

超低高度衛星の利用 に向けたワークショップ 報告書 (2015年度)



2016年8月

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門 SLATS プロジェクトチーム

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ報告書（2015年度）
FY2015 Report of the Workshop for
Super Low Altitude Satellite Applications

第一宇宙技術部門 SLATSプロジェクトチーム
SLATS (Super Low Altitude Test Satellite) Project Team,
Space Technology Directorate I

2016年8月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 背景とねらい | 1 |
| 3. 開催概要・プログラム | 1 |
| 4. コミュニティ | 6 |
| 5. 議論の成果 | 7 |
| 6. まとめ・今後の展開と課題 | 17 |
| 7. 補足 | 19 |
| 添付資料 | 38 |
| 第1回 | 39 |
| 第1回ワークショッププログラム | 41 |
| 開催趣旨 | 43 |
| JAXAにおける超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の開発と将来の展望について 佐々木 雅範 (JAXA) | 45 |
| 超低高度衛星の利用に向けた意見交換 | 59 |
| アンケートでの質問事項に対する回答 | 63 |
| 第2回 | 67 |
| 第2回ワークショッププログラム・開催趣旨 | 69 |
| 要旨および経緯 | 71 |
| アンケート結果および分析 | 75 |
| 社会的課題、科学的課題、技術的課題に対する進め方 | 79 |
| 低高度衛星観測から期待される超高層大気研究の進展 藤原 均 (成蹊大) | 91 |

| | |
|---------------------------------|---------------------|
| 第3回 | 105 |
| 第3回ワークショップ プログラム | 107 |
| 超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の概要と開発状況 | 佐々木 雅範 (JAXA) …111 |
| AOFS/MDM 開発状況について | 木本 雄吾 (JAXA) …119 |
| 将来超低高度衛星構想・衛星設計標準検討 | 星野 宏和 (JAXA) …125 |
| 軌道力学・大気密度計測 | 今村 俊介 (JAXA) …141 |
| SLATS 希薄空力特性評価に向けた希薄風洞計測と数値解析 | 小澤 宇志 (JAXA) …145 |
| 宇宙環境工学の観点から見た SLATS への期待 | 田川 雅人 (神戸大) …153 |
| 熱圏大気密度研究の現状と SLATS への期待 | 三好 勉信 (九大) …163 |
| SLATS の共同研究公募 (案) について | 川崎 春夫 (JAXA) …171 |
| 飛翔体による超高層大気観測と超低高度衛星 | 阿部 琢美 (JAXA) …177 |
| 衛星および地上からの電離圏観測計画について | 山本 衛 (京大) …183 |
| 衛星航法に対する電離圏の影響とその軽減策 - 衛星観測への期待 | 齋藤 亨 (電子航法研) …193 |
| 中性大気密度計測装置の開発状況について | 東尾 奈々 (JAXA) …199 |
| 超低高度衛星による地球磁場精密観測について | 能勢 正仁 (京大) …207 |
| 超低高度衛星のビジネス展開に向けた期待 | 平松 敏史 (パスコ) …215 |
| 航空気象における風観測の現況と衛星観測への期待 | 古川 武彦 (気象コンパス) …223 |
| ドップラー風ライダーによる大気風観測 | 石井 昌憲 (NICT) …237 |
| 衛星搭載ライダー観測のデータ同化 | 関山 剛 (気象研) …247 |

1. はじめに

本資料は、超低高度衛星の利用拡大に向けて、SLATS プロジェクトチームが 2015(平成 27)年度に 3 回開催したワークショップの成果を整理し、取りまとめた報告書・資料集である。

ワークショップの成果は、超低高度衛星技術試験機(SLATS)の成果の最大化に向けた共同研究公募に役立てるとともに、将来超低高度衛星を含めたミッション検討に活用する。

2. 背景とねらい

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では人工衛星による新たな価値の創生に向けた取り組みを行っており、その一環として、人工衛星がこれまでほとんど利用してこなかった超低高度 180-300km 程度における観測を計画している。2016(平成 28)年度の打上げに向けて SLATS (Super Low Altitude Test Satellite)を開発しており、SLATS による軌道上実証により新たな価値を創生し、成果を将来機に継承する取り組みを進めている。

高度約 100-300km の領域は地球大気最後のフロンティアとする考えもあり、研究者から期待が寄せられている。超低高度衛星の利用による新たな価値の創生には、超高層大気、防災、気象などの研究者や企業などのユーザから構成されるコミュニティと JAXA との関係構築が必要不可欠であると考え、超低高度衛星の利用に向けたワークショップを開催するに至った。

2015 年度は、SLATS および将来機の成果の最大化に向けて、ワークショップを 3 回開催した。SLATS のデータ利用機会を活用して成果を最大化する研究テーマを議論すること、および、将来超低高度衛星ミッションに向けて、超高層大気および磁場・重力場などの物理探査、防災など公共活動のための地表観測、気象観測に関して情報交換を行うことを主な目的とした。

ワークショップの成果は、SLATS の成果の最大化に向けた共同研究公募に役立てるとともに、将来超低高度衛星を含めたミッション検討に活用する。

3. 開催概要・プログラム

SLATS プロジェクトチームが主催したワークショップの会議名称を示す。

- ・第 1 回：超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ
- ・第 2 回：超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ
- ・第 3 回：超低高度衛星の利用に向けたワークショップ

第 1 回はサイエンス全般を対象とし、第 2 回はサイエンスのうち超高層大気に焦点を当てた。第 3 回は対象として磁場・重力場などの物理探査、防災など公共活動のための地表観測、気象観測などに分野を広げた。ワークショップ実施概要を表 3-1 に示す。

表 3-1. ワークショップ実施概要

| | 日時 | 場所 | 参加者 | 備考 |
|-------|-------------------------------|------------------------------|------|---|
| 第 1 回 | 2015 年 5 月 26 日(火) 18-20 時 | 幕張メッセ国際会議場 101A | 30 名 | 日本地球惑星科学連合 JpGU 連合大会期間 |
| 第 2 回 | 2015 年 9 月 2 日(水) 13-15 時 | 情報通信研究機構 NICT 本館 4 階国際会議場 | 27 名 | 中間圏・熱圏・電離圏 MTI 研究会, ISS-IMAP 研究集会期間 |
| 第 3 回 | 2016 年 2 月 29 日(月) 10-18 時 | JAXA 東京事務所 B101-103 | 36 名 | |

プログラムおよびアブストラクトを以下に示す。

(1) 第 1 回

| | | 登壇者(所属)※敬称略 |
|---|--|-----------------|
| 1 | ワークショップ趣旨説明 | 事務局(JAXA) |
| 2 | JAXA における超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発計画と将来の展望について | 佐々木雅範(JAXA) |
| 3 | 観測ロケットの利用研究と超低高度衛星について | 阿部琢美(JAXA/ISAS) |

| | | | |
|---|-------------------|-------------|-----------|
| 4 | 超低高度衛星の利用に向けた意見交換 | 19:00-19:50 | 事務局(JAXA) |
| 5 | 今後の進め方 | 19:50-20:00 | 事務局(JAXA) |

(2) 第2回

| | | | 登壇者(所属)※敬称略 |
|---|-----------------------------------|-------------|-------------|
| 1 | ワークショップ趣旨および経緯 | 13:00-13:10 | 事務局(JAXA) |
| 2 | 基調講演：低高度衛星観測から期待される 超高層大気研究の進展 | 13:10-13:35 | 藤原均(成蹊大) |
| 3 | アンケート結果報告 | 13:35-13:45 | 事務局(JAXA) |
| 4 | 社会的課題、科学的課題、技術的課題に 対する進め方 | 13:45-14:45 | 事務局(JAXA) |
| 5 | まとめ | 14:45-15:00 | 事務局(JAXA) |

(3) 第3回

| | | 登壇者(所属)※敬称略 | SLATS | 将来 |
|--------------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|-----|
| ■ オープニングセッション | | | | |
| | 開会挨拶 | 10:00-10:05 | 山本 静夫(JAXA) | |
| | 世話人説明 | 10:05-10:10 | 世話人(JAXA) | |
| ■ SLATS 開発状況 | | | | |
| 1 | 超低高度衛星技術試験機(SLATS)の概要と開発状況 | 10:10-10:30 | 佐々木 雅範(JAXA) | ○ |
| 2 | AOFS/MDM 開発状況 | 10:30-10:45 | 木本 雄吾(JAXA) | ○ |
| 3 | 将来超低高度衛星構想・衛星設計標準検討 | 10:45-11:00 | 星野 宏和(JAXA) | ○ ○ |
| ■ SLATS 成果利用拡大 | | | | |
| 4 | 軌道力学・大気密度計測 | 11:00-11:15 | 今村 俊介(JAXA) | ○ |
| 5 | SLATS 希薄空力特性評価に向けた 希薄風洞計測と数値解析 | 11:15-11:30 | 小澤 宇志(JAXA) | ○ |
| 6 | 宇宙環境工学の観点から見た SLATS への期待 | 11:30-11:45 | 田川 雅人(神戸大) | ○ ○ |
| 7 | 熱圏大気密度研究の現状と SLATS への期待 (昼休み) | 11:45-12:00 | 三好 勉信(九大) | ○ ○ |
| 8 | 共同研究公募要領説明 | 13:30-13:45 | 川崎 春夫(JAXA) | ○ |
| | 共同研究公募要領意見交換 | 13:45-14:00 | — | ○ |
| ■ 超高層大気・電離圏/磁気圏分野 | | | | |
| 9 | 超高層大気観測 | 14:00-14:15 | 阿部 琢美(JAXA/ISAS) | ○ ○ |
| 10 | 衛星および地上からの電離圏観測計画について | 14:15-14:30 | 山本 衛(京大) | ○ ○ |
| 11 | 衛星航法に対する電離圏の影響とその軽減策 -衛星観測への期待 | 14:30-14:45 | 斎藤 享(電子航法研) | ○ |
| ■ 物理探査分野 | | | | |
| 12 | 中性大気密度計測装置の開発状況について | 14:45-15:00 | 東尾 奈々(JAXA) | ○ |
| 13 | 超低高度衛星による地球磁場精密観測について (休憩) | 15:00-15:15 | 能勢 正仁(京大) | ○ |
| ■ 地表観測分野 | | | | |
| 14 | 地理空間情報取得・災害状況把握の視点からみた 超低高度衛星への期待 | 15:30-15:45 | 小荒井 衛(茨城大) | ○ |
| 15 | 超低高度衛星のビジネス展開に向けた期待 | 15:45-16:00 | 平松 敏史(パスコ) | ○ |
| ■ 気象観測分野 | | | | |
| 16 | 航空気象における風観測の現況と衛星観測への期待 | 16:00-16:15 | 古川 武彦(気象コンパス) | ○ |
| 17 | ドップラー風ライダーによる大気風観測 | 16:15-16:30 | 石井 昌憲(NICT) | ○ |
| 18 | 衛星搭載ライダー観測のデータ同化 (休憩) | 16:30-16:45 | 関山 剛(気象研) | ○ |
| ■ クロージングセッション | | | | |
| | 課題解決に向けて・まとめ | 17:00-17:25 | 世話人(JAXA) | ○ ○ |
| | 閉会挨拶 | 17:25-17:30 | 石田 中(JAXA) | |
| | (移動) | | | |
| | 懇親会@御茶ノ水 ビアホール | 18:15- | | |

| | | 登壇者(所属)※敬称略 |
|--|-------------------------------|------------------|
| ■ SLATS 開発状況 | | |
| 1 | 超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の概要と開発状況 | 佐々木 雅範(JAXA) |
| <p>JAXA では、従来実現できなかった、高度 200~300km 程度を継続的に飛行する超低高度衛星の研究開発を進めている。超低高度衛星は従来の地球観測衛星と比較して、地表面との距離が半分以下となるため、光学センサ分解能を 2 倍以上に向上でき、SAR の送信電力を 8 分の 1 以下に低減できる等の利点があり、実利用への応用が期待されている。</p> <p>本講演では、現在開発中の超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の概要と開発状況について報告する。</p> | | |
| 2 | AOFS/MDM 開発状況 | 木本 雄吾(JAXA) |
| <p>超低高度域で運用される宇宙機の課題の一つとして原子状酸素(Atomic Oxygen: AO)がある。AO は高層大気中の酸素分子が太陽からの紫外線により分解され酸素原子となったものであり、高度が低いほど高濃度である。AO は衛星の熱制御材やケーブル被覆などに多用されている有機材料に衝突すると、これらを浸食することが知られている。</p> <p>SLATS には、AO 環境とその影響を観測するミッションとして、AO モニタ(AOFS/MDM)が搭載される。AOFS は SLATS で運用される軌道の AO 環境の計測、MDM は AO による材料劣化の確認を目的としている。本発表では AOFS/MDM の開発状況の概要を紹介する。</p> | | |
| 3 | 将来超低高度衛星構想・衛星設計標準検討 | 星野 宏和(JAXA) |
| <p>超低高度衛星は光学、SAR、ライダーなどリモートセンシングミッションでメリットを際立たせるポテンシャルを有している。SLATS の成果を受けた将来機の構想および開発に活用するための衛星設計標準検討に向けた取り組みについて紹介する。</p> | | |
| ■ SLATS 成果利用拡大 | | |
| 4 | 軌道力学・大気密度計測 | 今村 俊介(JAXA) |
| <p>本発表では、イオンエンジンを使用した SLATS の軌道姿勢制御計画を紹介し、大気抵抗・大気密度の推定方法・期間について述べる。</p> | | |
| 5 | SLATS 希薄空力特性評価に向けた希薄風洞計測と数値解析 | 小澤 宇志(JAXA) |
| <p>SLATS の空力特性は流れ場が希薄になるほど表面熱適応係数依存性が高くなる。そのため、空力特性評価精度を向上させるためには、表面熱適応係数の決定が重要である。</p> <p>JAXA では希薄風洞において表面熱適応係数計測手法の確立を目指しており、その結果について報告する。</p> | | |
| 6 | 宇宙環境工学の観点から見た SLATS への期待 | 田川 雅人(神戸大) |
| <p>宇宙環境は宇宙機の信頼性に直結する問題であるため、これまでも地上実験装置での環境試験が行われてきた。しかしながら、実宇宙環境は極めて複雑なため、地上実験装置内で正確に軌道上環境を再現することは不可能である。そのため実宇宙環境をどのように簡略化すれば、地上試験結果と軌道上劣化現象の整合性を確保できるかという点が、これからの高精度宇宙環境地上試験のポイントとなる。</p> <p>本講演では、LEO 環境とは異なる超低高度環境での初の軌道上データとなる SLATS 搭載材料試験への期待と、その宇宙環境地上試験へのインパクトについて述べる。</p> | | |
| 7 | 熱圏大気密度研究の現状と SLATS への期待 | 三好 勉信(九大) |
| <p>熱圏大気密度・組成分布としては、MSIS 経験モデルが広く利用されているが、問題点も多く報告されている。</p> <p>そこで、MSIS の長所・短所を検証するとともに、現在、我々が開発している物理モデル(GAIA)との比較や今後 SLATS での観測への期待を紹介する。</p> | | |
| 8 | 共同研究公募要領説明 | 川崎 春夫(JAXA) |
| <p>JAXA では、開発を進めている SLATS を対象とした共同研究を公募し、選考の上、研究成果が期待できる研究者に SLATS データ利用の機会を提供する計画である。本発表では共同研究の公募要領を説明する。</p> | | |
| ■ 超高層大気・電離圏/磁気圏分野 | | |
| 9 | 超高層大気観測 | 阿部 琢美(JAXA/ISAS) |
| <p>飛翔体を用いた中間圏・熱圏・電離圏 MTI 研究について、地上観測などとの連携を含めた現状と将来への期待を述べる。また、ISAS におけるプロジェクト立上げの方法について紹介する。</p> | | |
| 10 | 衛星および地上からの電離圏観測計画について | 山本 衛(京大) |
| <p>超高層大気に対しては、下層大気から伝搬してくる大気波動の影響が大きく、注目を集めており、衛星や地上からの観測が提案・実施されている。それらを紹介するとともに、超低軌道衛星 CARINA の概要について話題提供する。</p> | | |

| | |
|--|-------------|
| 11 衛星航法に対する電離圏の影響とその軽減策 -衛星観測への期待 | 齋藤 享(電子航法研) |
| <p>航空航法においては衛星航法の利用が近年進んでいる。 本発表では、現在の航空航法における衛星航法を利用したシステムの現状を紹介し、航空航法における衛星航法のより高度な利用のために、衛星観測に期待することを述べる。</p> | |

| | 登壇者(所属)※敬称略 |
|---|---------------|
| ■ 物理探査分野 | |
| 12 中性大気密度計測装置の開発状況について | 東尾 奈々(JAXA) |
| <p>近年、衛星等の超低高度における運用により、中性大気密度による影響を無視できなくなってきた。しかし一方で、国内において低高度の大気密度の実データが非常に乏しく大気密度モデルにおける妥当性の評価を行えないでいる。その問題を解決する為、高度100km~400kmの実観測データ取得をターゲットとした小型で高精度な6自由度加速度計の開発を行っている。今年度のBBMの製作を行い、地上における校正試験でデータ取得を行ったことについて報告する。</p> | |
| 13 超低高度衛星による地球磁場精密観測について | 能勢 正仁(京大) |
| <p>高度200-300kmの低高度領域での地球磁場観測が実現できれば、地表面(地殻、海洋)起源の磁場現象や地球内部ダイナモの変動、コア表面流れ場をこれまでにない精度で検出できる。また、地球磁場標準モデルの作成には、低高度衛星による磁場データが必須であるため、磁場モデル改訂への応用が期待される。</p> | |
| ■ 地表観測分野 | |
| 14 地理空間情報取得・災害状況把握の視点からみた 超低高度衛星への期待 | 小荒井 衛(茨城大) |
| <p>演者はこれまで、国土地理院の職員として、高分解能の光学衛星画像、SAR衛星画像を含めて、リモートセンシング技術を活用した地図作成や災害状況把握の業務に携わってきた。また、JAXAの次世代地球観測衛星に関連して、地図作成や災害状況把握の立場から必要なセンサスペックについて、JAXAに提案してきた。今回、JAXAの超低高度衛星の開発にあたって、地理空間情報取得・災害状況把握の視点から超低高度衛星に期待することを、これまでの演者の取り組みで分かってきたことを中心に述べる。</p> | |
| 15 超低高度衛星のビジネス展開に向けた期待 | 平松 敏史(パスコ) |
| <p>超低高度衛星は、超低高度であるため光学センサの分解能向上が期待できる。さらに、小型化や軽量化が可能のため、製造・打上費用を低減することができる。よって、従来の衛星と同程度の分解能の衛星画像がより容易に入手できるようになる可能性がある。また、平成28年度に超低高度衛星であるSLATSの打上げが予定されており、新たな宇宙利用の可能性が検討される。本発表では、この超低高度衛星におけるビジネス展開の可能性とその課題について述べる。</p> | |
| ■ 気象観測分野 | |
| 16 航空気象における風観測の現況と衛星観測への期待 | 古川 武彦(気象コンパス) |
| <p>国際および国内の航空気象サービスに関する枠組み、空港周辺および航空路における風の場の重要性、観測システム・予測プロダクト・情報伝達の現況などについて概観し、SLATSへの期待に触れる。</p> | |
| 17 ドップラー風ライダーによる大気風観測 | 石井 昌憲(NICT) |
| <p>全球規模で気象データを取得できる衛星観測の重要性はさらに増しているが、現在の衛星観測は気温や水蒸気に関連した観測が多い。風は、気圧、気温、湿度など共に基本的な気象要素であるにも関わらず、全球の風観測は、海上風や大気追跡風のように、ある特定その観測に限られている。本発表は、気象観測分野からの将来構想の一つとしてドップラー風ライダーによる全球風観測の概要と現在の検討について報告する。</p> | |
| 18 衛星搭載ライダー観測のデータ同化 | 関山 剛(気象研) |
| <p>風速・気温・気圧・大気成分濃度などの観測値と気象シミュレーションモデルの計算結果を組み合わせて数学的に「最も尤もらしい」大気の状態を推定する技術はデータ同化と呼ばれる。データ同化は気象予測計算の初期値を作成する方法として現代の天気予報の要となっている。しかし、遙か上空の風速データや大気成分濃度データを測定する手段は極めて限られており、天気予報や大気汚染予測の信頼性向上のネックとなっている。</p> <p>そこで期待されるのが衛星搭載ライダーによる風速観測とエアロゾル濃度観測であり、その観測データがシミュレーション計算に与えるインパクトについて報告したい。</p> | |

4. コミュニティ

今年度のワークショップに準備を含めてご参加、ご助言いただいた超低高度衛星利用研究コミュニティの所属・分野を表 4-1 に示す。今後、分担を調整し、SLATS の成果最大化に貢献するテーマは公募を行い共同研究等により協力体制として構築する計画である。

表 4-1. 超低高度衛星利用研究コミュニティ 所属・分野(順不同)

| | 所属(順不同) | 分野 |
|------------|------------------------------|---------------------|
| 北海道大学 | 大学院理学研究院 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| | 地震火山研究観測センター | 火山 |
| 北海道情報大学 | 経営情報学部 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| 東北大学 | 大学院理学研究科地球物理学専攻 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| | 惑星プラズマ・大気研究センター | 超高層大気・プラズマ物理 |
| 茨城大学 | 理学部地球環境科学コース | 地理空間情報、防災、地質 |
| 成蹊大学 | 理工学部 | 大気モデル |
| 名古屋大学 | 太陽地球環境研究所 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| 富山県立大学 | 工学部情報システム工学科 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| 京都大学 | 大学院理学研究科 | 超高層大気・プラズマ物理 磁場 |
| | 生存圏研究所 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| | 防災研究所地震予知研究センター | 防災、重力場 |
| 神戸大学 | 大学院システム情報学研究科 | 計算宇宙科学 |
| | 大学院工学研究科機械工学専攻 | 原子状酸素、宇宙材料 |
| 九州大学 | 大学院理学府地球惑星科学専攻 | 大気モデル |
| | 国際宇宙天気科学・教育センター | プラズマ物理・磁気圏 |
| 情報通信研究機構 | 電磁波計測研究所宇宙環境 インフォマティクス研究室 | 超高層大気・プラズマ物理 |
| | 電磁波計測研究所センシング 基盤研究室 | ライダ |
| 国立極地研究所 | 宙空圏研究グループ | 超高層大気・プラズマ物理 |
| 電子航法研究所 | 航法システム領域 | 電離圏 |
| | 航空交通管理領域 | 航空交通管理、航空気象 |
| 航空気象研究会 | — | 航空気象 |
| 気象庁 | 気象研究所、他 | 気象(風, エアロゾル) |
| 日本気象協会 | — | 気象 |
| 産業技術総合研究所 | 地質調査総合センター | 地質、資源探査 |
| 宇宙航空研究開発機構 | 研究開発部門第一研究ユニット | 原子状酸素、宇宙材料 超高層大気 |
| | 宇宙科学研究所太陽系科学研究系 | 超高層大気・プラズマ物理 磁気圏 |

5. 議論の成果

発表内容を踏まえた議論を、①SLATS の成果利用、②将来超低高度ミッション、③コミュニティの活動の観点で整理し、得られた成果をまとめる。なお、必要な情報の補足として、超低高度衛星環境について、超高層大気・プラズマおよび磁場の観点で特徴を補足の章(7章)に示す。また、発表資料を巻末に添付する。

(1) 第1回

【まとめ】

- 超低高度衛星の利用に向けた超高層大気コミュニティとして、SLATS で取得される超高層大気密度データだけではなく、宇宙材料劣化評価に使われる原子状酸素のデータの利用も含めた体制とする方向で調整する。
- 超高層大気の詳細観測はデータが少ないため、将来ミッションでのセンサ搭載に対する期待が寄せられた。また、広範囲のコミュニティ*に対して募集してほしいとの意見も出された。ミッションの選定、優先順位の決め方などに高い関心が伺えた。

* (a)中間圏・熱圏・電離圏(MTI)、(b)磁場、(c)工学、など。

SLATS の軌道高度を研究分野としている超高層大気研究者を主な対象として、ワークショップの趣旨、SLATS の開発状況、将来超低高度衛星への展望として社会的課題、科学的課題の解決に向けた体制のイメージを説明し、様々な研究機関、大学等の研究者、技術者の方々に参画をお願いした。

ワークショップ開催に当たり、SLATS および将来超低高度衛星に関するアンケート調査を実施し、11 機関、40 名から事前および当日に回答をいただいた。アンケートの結果、将来超低高度衛星によるミッション提案が数多く出され、分野として電離圏、磁気圏、中性大気を複合的に観測するミッションへの希望が最も多かった。観測期間として 1 年以上 5 年以下、高度 180-220km の要望が多く、180km 以下でも短くても観測してほしいとの希望も出された。また、ミッションの選定、優先順位の決め方などに高い関心があることが伺えた。

①SLATS の成果利用

| 質問・コメント | 回答 |
|---|---|
| 【コメント】低緯度における東西風の影響や、計画されている高度 180km 以下のデータは興味深く、研究への活用が期待できる。 | 高度 180km 以下での SLATS の運用はエクストラとなっている。運用期間は長くないものの可能な限りデータを取得したい。 |
| 【コメント】SLATS の成果は意義があるため、AO(Announcement of Opportunity)などで学術コミュニティに広く周知するとよい。 | SLATS 取得データから将来機に貢献できる研究テーマを共同研究公募として周知する予定です。 |
| 【コメント】SLATS で取得される超高層大気密度データだけではなく、宇宙材料劣化評価に使われる原子状酸素のデータの利用も含めて研究体制を考えてほしい。 | 取得データはもともと超高層大気そのものの評価用途ではないことを研究者にご理解いただいた上で、データが提供可能か JAXA 内で調整します。 |

②将来超低高度ミッション

| 質問・コメント | 回答 |
|---|---|
| 【コメント】超高層大気の詳細観測はデータが少ないため、将来ミッションでのセンサ搭載に期待している。 | 社会的課題の解決に貢献できるミッションであればメインの可能性も考えられ、科学的課題の解決に貢献するミッションについてもリソースの範囲内で相乗りの可能性が考えられます。 |

③コミュニティの活動

分かりやすくするため、SLATS と将来超低高度衛星は分けて議論することとした。超低高度利用に関しては対流圏を観測するドップラライダなどがあるが、ここでは別途議論することとした。

| 質問・コメント | 回答 |
|---|---|
| 【コメント】(a)中間圏・熱圏・電離圏(MTI)、(b)磁場、(c)工学など、広範囲のコミュニティに対して募集してほしい。 | 共同研究公募として周知する予定です。 |
| 【コメント】複数のワーキンググループを作るやり方は研究者を疲弊させるので避けてほしい。 | アンケートの結果からもサイエンステーマに関しては複数の提案要望が出ており、分野複合的な提案もあることから、進め方についてISASと調整します。 |
| 【コメント】社会的課題および科学的課題の解決につながるテーマについて検討するため、搭載ミッション機器のリソースとして参考情報がほしい。 | SLATS に搭載されているミッション機器のリソースを第2回ワークショップでご説明します。 |

(2) 第2回

【まとめ】

- 第1回ワークショップのアンケート分析結果を報告し、超高層大気の研究分野では、科学的課題の解決をターゲットとした提案が多く、社会的課題の解決につながるテーマはアンケート時点ではなかったものの、超低高度衛星の設計、運用に必要な研究があることが確認できた。
- 将来機向けの社会的課題は JAXA 第一宇宙技術部門としてあれば理想であるが、サイエンス(科学的課題)の場合は ISAS が主体となる。

基調講演「低高度衛星観測から期待される超高層大気研究の進展」では、MSIS などの経験モデルについて、超高層大気で局所の密度構造、時系列変化についてのあまり議論されていないことなどが報告された。また、磁気擾乱による予測が、CHAMP、GRACE 等の観測を反映して可能になりつつある状況も報告された。中間圏、熱圏の寒冷化から対流圏の温暖化現象の把握に役立てられるなど、高層大気研究が持つ社会的意義についても紹介された。

第1回ワークショップのアンケート分析結果を報告し、社会的課題および科学的課題の解決につながるテーマについて意見交換を行った。超高層大気の研究分野では、科学的課題の解決をターゲットとした提案が多く、社会的課題の解決につながるテーマはアンケート時点ではなかったものの、超低高度衛星の設計、運用に必要な研究があることが確認できた。

JAXA 側からは社会的課題の解決につながる説明が必要なことから、コミュニティと認識を合わせるため、社会的課題、科学的課題、技術的課題の進め方について考え方を説明した。

将来機についても科学的課題に関する提案が多く、その中で中性大気、電離圏、磁気圏の結合に関するテーマが最も多かった。科学的課題の提案については ISAS と意見交換することとした。

①SLATS の成果利用

| 質問・コメント | 回答 |
|---|--|
| 【質問】 SLATS のデータポリシーについて、科学衛星のようにデータが公開されるか？ | SLATS は科学衛星でないため取得データを Web 公開する予定はなく、共同研究契約などを締結した場合にデータを提供する想定です。 |
| 【質問】 共同研究の場合、論文公開は可能か？ | データはそのままでは出せないため、結果の表現は何らかの工夫が必要になります。 |
| 【質問】 データ公開に対する要望として、5-10 年後のデータ公開の可能性はあるか？ | 研究者からの働きかけが必要であることと、超高層大気データに関する海外での公開／非公開状況について研究者側でも海外研究者との意見交換を行い情報を集めていただきたいと考えています。 |
| 【コメント】 SLATS との共同研究提案に際し、SLATS で取得されるデータがどの程度の時間、計測分解能かが分からないと提案しにくい。 | SLATS 搭載ミッション機器(AOFS, MDM)の開発元と調整し、第3回ワークショップに必要な情報を提示します。 |
| 【コメント】 将来のミッション機器提案のベースとするため、SLATS のミッション機器へのリソース配分等に関しても知りたい。 | (同上) |

②将来超低高度ミッション

超低高度衛星の貢献が期待できると想定する社会的課題、科学的課題、技術的課題の3つの課題に対して、防災分野・気象環境分野、超高層大気サイエンス分野における具体例を示した。

理学委員会の承認を得るなどの手続きに関する参加者の理解は深いようであったが、現在提案されている科学的課題を社会的課題と関連付けるなど、社会的課題に関するコミュニティでの議論や関連機関との調整が必要であることについて、コミュニティとの共通理解が促進できたと認識している。

| 質問・意見 | 回答 |
|------------------------|--|
| 【質問】社会的課題はミッションとして必須か? | SLATS プロジェクトチームが所属する第一宇宙技術部門としてはあれば理想で、サイエンスで超低高度衛星が使われることもメリットですが、その場合 ISAS が主体となる想定です。 |

③コミュニティの活動

第1回ワークショップで実施したアンケートでは、課題は科学的課題が多く、社会的課題に関しては前段階の活動が必要と判断したが、科学的課題に対して、複数のワーキンググループを作るやり方は研究者を疲弊させるので避けてほしいとの意見を踏まえ、ISAS で検討しているリサーチグループの中でミッションを検討し、議論を進めていく方向とした。

| 質問・コメント | 回答 |
|-----------------------------|--|
| 【質問】ミッション提案まではどのような進め方になるか? | 一般論として、衛星開発は社会的課題または科学的課題等の解決に貢献することが認められ、費用対効果や機能・性能・スケジュール等の実現性が認められた後に研究開発がスタートします。 サブミッションとしての機器搭載は、メインミッションの研究開発着手以降にスタートになります。メインミッションに影響を与えない範囲でサブミッションが搭載可能な場合、重要度等に応じて優先順位付けされますが、搭載機器選定プロセスについては検討が必要になります。 |

(3) 第3回

【まとめ】

- SLATS の軌道上実証データを活用して得られる成果を最大化するため、外部協力体制を構築することをワークショップの目的として、SLATS で得られる成果の見込みについてコミュニティの研究者からご紹介いただいた。また、共同研究の公募要領について研究者からご意見をいただいた。
- 将来超低高度衛星ミッションに向けて課題解決のための議論、情報交換を行うことをワークショップの目的として、将来のミッション要求につながる各分野のニーズおよび可能性としてのシーズについて有識者からご意見をいただいた。
 - ✓ 社会的課題(実利用研究)
 - ✓ 科学的課題(サイエンス)
 - ✓ 技術的課題(将来超低高度衛星の技術研究)

SLATS で取得されるデータを用いて新たな価値を創生し、成果を拡大するための以下の研究テーマについて議論を行い、研究公募について説明を行った。

- ・大気環境モデルの向上
- ・超高層大気もたらす影響を反映した衛星設計基準の策定

また、将来超低高度衛星ミッションに向けて、分野を磁場・重力場などの物理探査、防災など公共活動のための地表観測、気象観測などに広げて情報交換を行い、コミュニティと JAXA との関係構築を進めることができた。

①SLATS の成果利用

(a) 大気密度観測

★第1回(佐々木)、第3回-1(佐々木)、第3回-4(今村)、第3回-12(東尾)参照

| 質問・コメント | 回答 |
|---|--|
| 【コメント】 SLATS による中性大気密度観測に関して、高度約 400→268km で噴射制御しないシーケンスは興味深い。 | 高度 268km 以上での中性大気密度の評価についても、興味を惹くデータが得られるよう運用を行う計画です。 |
| 【コメント】 太陽活動度(波長 10.7cm (2.8GHz)の強度である太陽電波フラックス f10.7)、磁気(地磁気活動指数 ap, Kp)などから大気密度に対する影響を考慮した観測結果の評価が必要ではないか。 | 太陽活動、地磁気変化が大気に影響していることは把握しており、影響を踏まえて評価できる研究体制を構築したいと考えています。 |

(b) 希薄空力解析

★第3回-5(小澤)参照

希薄大気中を航行する衛星の空力現象把握のため、JAXA 研究開発部門(調布)では評価ツールおよび極超音速希薄風洞 HRWT(Hypersonic Rarefied Wind Tunnel)を開発している。希薄大気の希薄度を表すクヌーゼン数 Kn は、おおよそ $Kn < 0.01$ で連続体、 $0.01 < Kn < 10$ で希薄流、 $Kn > 10$ で自由分子=非連続体の特性を示す。

高度が下がるにつれて空力特性は自由分子流→希薄流→連続流と変化し、 $Kn \sim 10$ @高度 150km、 $Kn \sim 1$ @高度 120km、 $Kn \sim 0.05$ @高度 100km となる。希薄度が高い(Kn が大きい)ほど熱適応係数(accommodation factor) γ への依存性が高くなる。 γ は希薄大気と衛星物質との熱の授受における効率を表し、希薄大気組成および衛星物質に依存する。 $\gamma = 1$ は拡散反射(diffuse)、 $\gamma = 0$ は鏡面反射(specular)であり、 γ が小さいほど衛星物質に与える影響が大きく、大気抵抗が増す傾向にある。

低高度(低 Kn)域における連続体領域においては数値流体力学 CFD(computational fluid dynamics)による空力解析が行われるが、SLATS が航行する高度 150km 以上では、自由分子

流解析と DSMC(モンテカルロ直接法; Direct Simulation Monte Carlo)解析の結果がよい一致を示した。抗力係数 C_D 値は表面熱適応係数 γ に最大で 20%依存する。

γ について風洞 HRWT で直接計測を行った結果、 γ が大きいほど気流による変位が大きく、抗力係数 C_D 値が大きくなり、Kn が大きいほど γ 依存性が顕著になる。金属やカーボン系は拡散反射に近く $\gamma \sim 0.9-0.95$ であり、Al は $\gamma=0.8$ 、ガラス BSG(borosilicate glass)は $\gamma=0.6$ と鏡面反射の割合が高くなり、大気抵抗が増す傾向にあることが示された。

今後、SLATS 向けに、ポリイミドや表面コーティングの影響評価、SLATS 模型を用いた Kn 依存性評価、高 Kn 域のオリフィスプローブによる気流計測手法確立が計画されている。

| 質問・コメント | 回答 |
|--------------------------|---|
| 【質問】 風洞 HRWT の AO への対応は? | N ₂ ガスを使用し、火星大気向けに CO ₂ 化を行うが、AO は未対応である。 |
| 【質問】 速度依存性の評価は? | 流速 8km/s は再現できておらず 1km/s 程度のため、難しい。 |

(c) 材料と超低高度衛星周辺環境(原子状酸素)との相互作用評価

★第 3 回-2(木本)、第 3 回-6(田川)参照

宇宙環境模擬実験装置として、原子状酸素 AO 照射試験装置がある。JAXA 筑波宇宙センターの他、神戸大学田川研究室にレーザ脱ネーション型装置がある。

また、周辺環境を利用して、大気吸込式イオンエンジン ABIE(Air Breathing Ion Engine)の構想がある。NASA、ESA の支援を受けた海外企業を含む研究が幅広く進められ、火星探査など大気天体向けのテストベッドとして実験が進められているものもあるが、多くは研究段階である。

| 質問・コメント | 回答 |
|---|--|
| 【質問】 デュアルビームとして、AO および (N ₂ 代替として)Ar を混合したことによりエッジングレートが上がるとのことだが、AO のみならず N ₂ (大気組成)や反応率に影響する他のメカニズムがあるのではないか? | 超高層大気による材料劣化は AO だけでないという研究があることは認識しており、研究動向にも着目しています。 |

(d) 超高層中性大気

■大気モデル構築、中性大気の風速場

★第 2 回(藤原)、第 3 回-7(三好)参照

統計モデルである米海軍研究所 NRL(Naval Research Laboratory)による熱圏中性大気モデル MSIS(Mass Spectrometer Incoherent Scatter)と、大気圏モデルと電離圏モデルを結合した全地球大気の数値シミュレーションモデル GAIA(Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)から得られる大気密度を比較すると、潮汐波に伴う緯度構造や、波数 4 の経度構造(wave-4)で両モデルに違いが見られた。

また、中性大気の風速場に関する観測データは少ないものの、SETA(Satellite Electrostatic Triaxial Accelerometer)(1983)では 200m/s 近い東西風がデータとして示された。

| 質問・コメント | 回答 |
|--|--|
| 【質問】 GAIA モデルの 1 日分の計算時間は? | 期間 1 か月分を 1 日間で計算する。数十分・数時間・数日の大気変動が再現可能である。 |
| 【コメント】 中性大気の風速場による SLATS の軌道変化の影響は研究対象になるのではないか。 | 現状では SLATS の運用に大きな影響はないものと考えていますが、評価結果は将来機に反映する計画です。 |

②将来超低高度ミッション

(a) 超高層電離大気(プラズマ)

■電子密度・電子温度、イオン密度・イオン温度、中性大気と電離圏プラズマの相互作用

★第 1 回・第 3 回-9(阿部)、第 3 回-10(山本)参照

宇宙科学研究所で打上げを行っている観測ロケットは、ロケット自身が宇宙空間を飛行しながら落下までの間に観測を行う。気球が到達可能な高度は約 50km 程度までで、多くの人工衛星は高度 250km 以上を航行しているため、気球と人工衛星の間の飛行空間を直接観測できるのは観測ロケットのみであり、天体物理学の観測、上層大気の研究、宇宙プラズマ物理学等に貢献している。

SLATS での観測に対して、相互研究が考えられる観測ロケットおよび地上観測、海外衛星の観測について紹介があった。

| 質問・コメント | 回答 |
|---------------------------------|---|
| 【質問】地上観測からの高層大気観測の方向性はどのような状況か？ | 地上からは、低緯度からの電離層観測が行われている。日本はインドネシアと共同研究をしており、中国では昆明、南海島で観測を行っている。米国では、電離層の上の太陽フレアの影響などを観測する動きがある。地上から中性大気の観測は厳しいので、低高度衛星での観測は興味がある。 |

■電離圏、大気光

★第 3 回-11(斎藤)参照

実利用の観点で、電離圏観測は航空航法への応用が一例として考えられる。国際民間航空機関 ICAO(International Civil Aviation Organization)において、衛星測位システム GNSS を利用した衛星航法は次世代航空航法の中心と位置付けられている。但し、GPS 単独では要求を満足できず補強システムが必要であり、衛星(広域)による SBAS(Satellite-Based Augmentation System)、地上(狭域)による GBAS(Ground-Based Augmentation System)、航空機による ABAS(Aircraft-Based Augmentation System)がある。欧州、米国、豪州では 2014 年頃から広域航法 RNAV(aRea NAVigation)に置換しており、GPS 置換が 2020 年頃までに予定されている。

衛星航法を利用するに当たり、精度だけでなく所要の完全性(Integrity)：情報の確実さを満足する必要がある。誤りが無いことを保証し、使用すべきではない場合に迅速に警報を発する Integrity の要求レベルは 10^{-7} - 10^{-9} である。航法精度を満足できない見込みの時間帯が発生する場合、前後ば一定の余裕時間を含め、広域航法 RNAV は使用できない。

電離圏プラズマにより電波の伝搬速度が変化(電離圏遅延)し測距誤差が生じるが、電離圏による誤差が最も大きい。

$$\text{電離圏誤差} \propto \frac{\text{TEC(伝搬路上の単位面積当たりの全電子数)}}{f^2}$$

電離圏には空間勾配があるが、常に存在すると仮定している。電離圏擾乱の広域監視として、地上から VHF レーダや VHF/UHF ビーコンにより観測を行っている。①in-situ 観測に加えて、②リモートセンシング(光学観測)として電離圏で原子状酸素 AO から発生する大気光(波長 630.0nm: 赤)などの面的観測、③リモートセンシング(電波観測)が、衛星航法の Integrity を高める候補になる。

| 質問・コメント | 回答 |
|---|--|
| 【質問】電離圏の擾乱が航空機の運用に影響を与えるケースは年に何回程度あるか？ | 年間 99%は航空機の運用上支障がないが、航空管制には電離圏の擾乱は稀な現象でも把握が必要であり、特にプラズマバブルに注意を払っている。 |
| 【質問】航空機で搭載している GPS 受信機により電離圏擾乱を観測できないか？ | 現状の航空機搭載機材では実現できないが、ジャイロからは分析可能と考えられる。 |

(b) 重力場観測、大気密度観測

★第 3 回-12(東尾)参照

地球内部構造を知るには、加速度計による重力分布の観測が 1 つの手段である。欧 ESA/

GOCE は地球重力場を観測するため軌道高度を保持する必要があり、大気抵抗や太陽輻射圧(太陽光圧)などの外乱の影響をキャンセルするドラッグフリー機能を有し、補償分だけ推力を調整するイオンエンジンを使用している。GOCEでは重力場(Gravity Field)観測に加え、Gulf Stream(メキシコ湾流)のような海流(Ocean Circulation)の観測が含まれる。ESAが開催する International GOCE User Workshop¹では中性大気密度を除き議論内容が参照できる。加速度計による地球内部構造の計測は、資源探査などへの応用も期待される。

加速度計は位置精度が求められる光学観測などでも必要となるほか、その場(in-situ)の大気密度の計測手段としても有効である。JAXAでは共同研究により中性大気密度計測用の小型高精度加速度計の開発を進めている。分解能はある程度粗い(10^{-8} m/s^2)ものの、最大加速度範囲が大きい(10^{-2} m/s^2)ことから、超高度および再突入領域を観測ターゲットとして、磁力による強い制御を行っている。一方、CHAMP、GRACE、GOCEなど、これまでの衛星搭載の加速度計(精度 10^{-12} - 10^{-8} m/s^2 、最大 10^{-7} - 10^{-4} m/s^2)は、静電加速度計(Electrostatic accelerometers)である²。検出したい変動対象の検出に必要な分解能をもとに、加速度計の仕様を設定する必要がある。

| 質問・コメント | 回答 |
|----------------------------------|---|
| 【質問】観測ロケットなどで加速度計の試験を行う予定はあるか? | 観測ロケットなどでの試験が望ましいが、パラボリックフライト試験も検討しており、振動環境が懸念され、配線などいくつか課題をクリアする必要がある。 |
| 【質問】加速度計の宇宙機コンポーネントとしての完成時期の目標は? | 研究テーマの見直しが行われており、現時点では決められない。 |

(c) 磁場観測

★第3回-13(能勢)参照

磁場変化は、図 7-12 に示すように、地球外部および地球内部の影響を受ける。

【地球外部の影響】数日より短い時間スケール

- ✓ 電離圏を流れる電流
- ✓ 磁気圏からの影響
 - 磁気嵐、磁気圏と電離圏を結ぶ磁力線に沿って流れる沿磁力線電流など

【地球内部の影響】数年-数千年スケール

- ✓ 地球深部ダイナミクス(地球中心流体コア表面の流れ場)
- ✓ 大気重力波(下層大気の擾乱)による電離圏ダイナモ電流
- ✓ 磁場変化に誘導されて地中を流れる誘導電流
- ✓ 海流によるダイナモ電流
- ✓ 地殻起源の磁場変化(磁気異常)
- ✓ 火山起源の磁場変化 $\sim 0.01 \text{ nT}$

地表で観測される磁場は絶えず変動しており、変動周期は短い 1 s 程度から長い数十年以上程度までである。数日スケールの短い磁場変動は外部起因と考えられ、地球外部の電離圏や磁気圏など一時的に引き起こされる現象に対応する。内部起因の磁場変動は数年-数千年スケールで変動するため、両者は時間スケールの違いで分離できる。但し、それぞれの要因を個々に分離するためには、空間分解能および 0.1 nT オーダの精度が必要となる。

地表で 10 nT オーダの火山起源の磁場変化を高度 200 km から検出すると 0.01 nT ほどにしかならず、空間分解能および時間変化として微小変化を捉えることを考慮すると難しい可能性があり、より大きな磁気異常ではない限り、資源探査などへの応用にはハードルが高い。また、磁場が双極子で近似できない場合、距離の 3 乗ではなく距離の 2 乗に反比例するため、磁場感度を大きめに見積もっている可能性がある。

¹ earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/goce/5th-goce-user-workshop-proceedings

² icpc-2016.com/sites/default/files/files/Proceedings-example.pdf

| 質問・コメント | 回答 |
|--|--|
| 【質問】磁場観測で衛星に対する姿勢要求や安定度要求はあるか？ | 衛星本体からの磁場の影響が大きいいため、ブームを伸ばして磁力計を離す要求がある。SWARM、CHAMP ではブームを 5m程度伸ばしているが、ブームの振動の影響を避けるため、恒星センサ STT を搭載して振動をキャンセルする手法が採られている。 |
| 【質問】磁気異常の要因は何か？ | 火山溶岩が冷却化するときその時点の地球磁場方向に固定される。また、鉱物の影響により局所的な磁気異常が見られる。 |
| 【質問】磁気観測で外部要因と内部要因のそれぞれの要因同士は、他との観測などとの関係を含めてどのように分離や識別が可能か？ | 外部要因では時定数が短い、内部要因では時定数が長い傾向にあり、球関数展開により各成分を分離できる。 |

(d) 地表観測

★第3回-14(小荒井)、第3回-15(平松)参照

高分解能光学衛星は災害状況把握に限らず、平時は土地家屋調査など多くの自治体が航空写真(縮尺 1/1000)を用いる用途に活用できる。例えば、だいち ALOS(分解能 2.5 m)画像は 1/25,000 地形図作成・修正に活用されているが、1/5,000 地形図では分解能 1 m が、1/2,500 地形図では分解能 0.5 m が目安となり、経年変化の識別が期待できる。

また、2方向センサでは高さ情報が得られる。ALOSの立体視は 5 m分解能(ベース高度比 $B/H^3=0.8$)でDTM(Digital Terrain Model)、DEM(Digital Elevation Model)として活用されている。一方、倒壊状況の把握や公共活動向けに、高分解能双眼視観測やレーザ高度計(プロファイラ)などを併用して家屋等の立体視を含むDSM(Digital Surface Model)が可能となれば、自治体・消防に限らず様々な用途での活用が考えられる。

火山・地滑り・地盤沈下の観測には干渉 SAR が有効な手段であるが、波長が長い L 帯ではメリットが出しやすいものの、アンテナが大型になる傾向にあり、干渉には軌道保持技術が求められるため、超低高度衛星では形状の工夫が必要である。小型形状とする場合には、帯域幅が確保しやすくアンテナ利得が高い X 帯・Ku 帯などの高周波 SAR による観測が候補になる。

| 質問・コメント | 回答 |
|---|---|
| 【質問】災害観測に関して、高頻度重視か(空中発射システムとの併用など)、中・高分解能重視か？ | 衛星は回帰に時間を要し、高価であるが、小型化により機数を増やして高頻度観測できれば、災害面でメリットは大きい。 |
| 【コメント】災害予測に関して、津波予測の初期条件に使用するため、海面高度の変位(凹凸パターン)が計測できないか？現状は津波予報データベースで予め何十万ケースをシミュレーションしており、地震の位置と規模から津波警報を出している。 | 可能性について専門家に伝えておく。 (補足: 津波到達までの時間内に対象海域を含む刈り幅で観測できる必要があることと、海面高度の変位を計測するために対比のための変位前の情報が事前に必要になる) |
| 【コメント】高度 268km は 1 日 16 週の回帰軌道であり、SLATS では将来の 1 日 1 回の観測を見据えて高度保持実験を 1 か月間行う。 | — |
| 【質問】低高度からの観測では刈り幅が狭くなる傾向にあるが、刈り幅が狭くても商用ベースでニーズがあるか？ | ニーズの高い場所があり、その地点が観測できれば、刈り幅が狭くてもニーズはある。 |

³ B/H 比が大きいほど高さの計測精度は向上する。

(e) 気象観測

★第3回-16(古川)、第3回-17(石井)、第3回-18(関山)参照

気象観測として、上空の風観測により気象予報や航空気象などにどのように役立てるかについて議論の対象とした。ドップラレーダEarthCARE/CPRは雲域を対象としてW帯 94GHz(波長約 3 mm)レーダにより雲粒(mmオーダー)の鉛直風速を観測する一方、ドップラライダは航空機や気象台・空港等の地上で使用され、晴天域のエアロゾル(PM2.5、黄砂、ブラックカーボンなど)のミー散乱から風速を観測する。水平風速を観測するため斜め複数方向を指向し、特定地点の観測値を予報モデル格子点の解析値と整合(同化)させる際の「空間代表性誤差」が解消して気象予報精度の向上に貢献するとともに、航空気象への応用や、火山噴火時の立体的な拡散状況把握などへの活用、エアロゾル濃度および偏光解消度 δ の計測によるエアロゾルの形状の観測、乱気流⁴・ダウンバースト・竜巻・突風前線(ガストフロント)⁵などの観測への利用が考えられる。

| 質問・コメント | 回答 |
|--|---|
| 【質問】気象衛星ひまわりによる大気追跡風AMV(Atmospheric Motion Vector)では5kmオーダーで風観測を行っているが、ドップラライダの利点と課題は何か? | AMV は風を 2 次元でかつ特定の高度でしか観測できないが、ドップラライダは 3 次元観測できるメリットがある。AMV と比較して分解能は劣るものの、分解能 100km 以下の実現には S/N が関係するため、エアロゾル濃度に応じた積分間隔の設定が必要になる。 |

③コミュニティの活動

SLATS で取得されるデータを用いて新たな価値を創生し、成果を拡大するための共同研究を公募することとした。募集方法について説明し、特に異論はなかった。

⁴上空で密度が異なる気塊が上下に存在し、相互の風速が異なると、大気の安定度を示すリチャードソン Ri 数が臨界値(0.25程度)以下では波の振幅が増大し、ケルビン-ヘルムホルツ(Kelvin-Helmholtz)不安定により乱気流が発生する。

⁵ 積乱雲から冷たい下降気流が水平に吹き出し周囲の暖かい空気と衝突した際に生じる上昇気流を伴う小規模な前線

6. まとめ・今後の展開と課題

ワークショップでの議論を踏まえ、超低高度衛星の利用に向けた成果の最大化について考察を行い、今後の展開を表 6-1 にまとめる。

SLATS の成果拡大に向けた共同研究契約については 2016 年度に締結し、SLATS 打上げ後、初期機能確認結果を中心としたワークショップ(第 4 回)を 2017 年度に開催する予定である。

表 6-1. 超低高度衛星の利用に向けた成果最大化のまとめ

| 分野 | 成果最大化のまとめ |
|------------------------|--|
| 超低高度衛星技術 超高層大気・プラズマ | <ul style="list-style-type: none"> • SLATS で観測を行う中性大気密度、AO フラックスのデータを活用して、<u>大気モデルとの比較および材料劣化(寿命評価, 高耐性材料)に関する共同研究を行う。</u> • 将来衛星での超低高度利用拡大に向けて、SLATS での観測結果を受けて、大気密度評価、材料劣化、空力に関する<u>設計標準を作成する。</u> • 電離圏観測として、in-situ の AO フラックスと地上大気レーダによるイオン・電子観測および面的な他衛星からの大気光観測との<u>比較検証などが有効と考えられる。</u>SLATS と同期して光学観測(大気光イメージャ)、レーダ、GPS-TEC 等により総合的に観測するキャンペーンなどについても候補として考えられる。 |
| 重力場・磁場観測 | <ul style="list-style-type: none"> • 重力場・磁場の高分解能および高精度観測に超低高度衛星は有効なことから、<u>検出したい変動対象の検出に必要な分解能を元に加速度計・磁力計等の仕様を設定する。</u> |
| 気象観測 | <ul style="list-style-type: none"> • 上空の風速観測は、気象予報精度の向上や航空気象への有効活用、エアロゾル(PM2.5、黄砂、ブラックカーボンなど)・火山灰などの拡散状況に関する立体的な情報提供などを可能とし、手段としてライダは超低高度衛星により実現性が高まることから、有望な候補として<u>ドップラライダを搭載した場合のシステム検討を進める。</u> |
| 地表観測 (光学・SAR) | <ul style="list-style-type: none"> • 回帰日数が短い軌道からある定点を頻度高く観測するミッションは、全球・広域を観測する衛星と相補的な役割として有効である。土地家屋調査や災害状況把握等への活用として建造物などを立体視し、DSM(Digital Surface Model)・3D モデル化することは、自治体・消防などの公共活動での活用が考えられ、<u>高分解能双眼視観測やレーザ高度計(プロファイラ)を実現手段とした要求分析やシステム検討が有効と考えられる。</u> |

成果最大化に向けたまとめを踏まえ、今後の参考として、将来超低高度衛星ミッションに向けて今後必要となる研究開発要素を表 6-2 に整理する。複数の分野やミッションで共通のコンポーネントもあり、研究開発部門が制定する JAXA 研究戦略書などに反映され、プロジェクト立上げに向けて課題が解決することが期待される。

表 6-2. 将来超低高度衛星ミッションに向けた研究開発要素

| 分野・ミッション | 研究開発要素 | |
|-------------------|---------------------------------------|---------|
| 超低高度衛星技術 | ・ドラッグフリー | システム |
| | ・加速度計 | コンポーネント |
| | ・電気推進系推力調整,長寿命化 | コンポーネント |
| | ・ローターレス ⁶ 姿勢決定・制御 | コンポーネント |
| | ・複数衛星同時打上げ構造・保持分離機構 | コンポーネント |
| 超高層中性大気観測 | ・加速度計 | コンポーネント |
| プラズマ観測 | ・電位計(Langmuir プローブ他) | コンポーネント |
| | ・質量分析計 | コンポーネント |
| 重力場観測 | ・加速度計($10^{-8}m/s^2$ 分解能) | コンポーネント |
| 磁場観測 | ・磁力計(pT 分解能) | コンポーネント |
| 組成観測(分光, in-situ) | ・分光計 | コンポーネント |
| | ・質量分析計 | コンポーネント |
| 気象観測(ライダー) | ・ドップラ計測(原理, 軌道姿勢擾乱対応) | システム |
| | ・ライダーシステム(出力, 排熱, アライメント) | コンポーネント |
| 地表観測(光学) | ・アジリティ向上(WorldView-3 ⁷ 以上) | コンポーネント |
| | ・検出器(高速・高感度サンプリング) | コンポーネント |
| | ・立体視(B/H 向上, 精度評価) | コンポーネント |
| 地表観測(SAR) | ・軽量化 SSPA(進行波管 TWTA→固体アンプ SSPA@高周波) | コンポーネント |

⁶ 擾乱源となる姿勢検出用の機械式ジャイロスコープ(角速度センサ)、姿勢制御用アクチュエータのリアクションホイール RW、コントロール・モーメント・ジャイロ CMG を使用しない

⁷ 3.5deg/s

7. 補足

考察(6章)に当たり、超低高度衛星環境について、巻末の発表資料で触れられていない超高層大気・プラズマおよび磁場の観点で特徴を示す。また、超低高度衛星ミッションに有効な分野の衛星観測・地上観測について表形式で整理する。

(1) 超高層大気・プラズマ

■密度分布

超高層大気には原子状酸素 AO、窒素分子 N₂、酸素分子 O₂ などの中性大気のほか、太陽からの極端紫外線によって中性大気が部分的に電離し、電子やイオンなどの電離気体(プラズマ)が存在する。電離圏(Ionosphere)は高度によって区分される。

- ・高度 150-800km の F 領域
→昼間は高度 170 km 付近に F1 領域(夜間は消滅)、高度 300km 付近に F2 領域
- ・高度 100-150km の E 領域
→高度 100km 付近(狭範囲)に電子密度が非常に高いスポラディック(sporadic)E 領域 Es
- ・高度 70-100km の D 領域

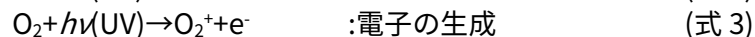
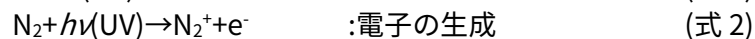
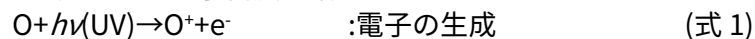
超低高度衛星が航行する高度 180-300 km 程度は、電離圏 F 領域の下部に相当する。超高層中性大気(分子・原子)、プラズマ(イオン・電子)の密度高度分布を図 7-1 に示す。密度分布は太陽放射に依存し、昼間・夜間および太陽活動度により変化するのに加えて、地磁気活動度に依存し、電子密度は地磁気活動度とともに増加する。地方時 LST12 時の昼側日照域では太陽からの紫外線によってプラズマが生成され電子密度は高くなるが、地方時 0 時の夜側ではプラズマが生成されずに電子密度は低くなる。

超高層大気的主要中性大気は原子状酸素 AO、窒素分子 N₂ であり、主要イオンは E 領域で NO⁺、O₂⁺ などの分子イオン、F 領域で原子状酸素 AO イオン O⁺ の原子イオンである。プラズマ密度(電子密度)は F 領域の高度 300 km 付近で最も高く、おおよそ

$$\text{イオン密度} \approx \text{電子密度} = 10^{11} - 10^{12} [\text{m}^{-3}] \approx 10^{-3} \times \text{中性大気密度}$$

である。電離圏の電子やイオンは中性大気と同じように拡散し、また、電子とイオンは電気的中性を保つように一緒に両極性拡散する。電離圏は 0.1%程度が電離しているに過ぎないが、電離圏の高度領域は熱圏の超高層中性大気の高度領域と重なり、電離圏プラズマは中性大気と運動量、熱量を交換し、中性大気の影響を受ける。また、太陽からの紫外線は太陽活動の 11 年周期で変化し、電離圏は太陽活動の影響を受けて変動する。特に極域の電離圏プラズマは上部の磁気圏の影響を受け、磁気圏からの磁力線に沿って降下する磁気圏プラズマ(沿磁力線電流)の影響を受け、衝突電離によりオーロラが発生する。

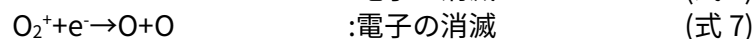
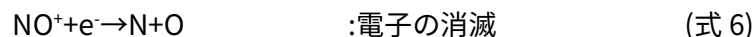
F 領域の電子密度は最も多い AO 原子密度および次いで多い N₂ 分子密度に依存する。(式 1) より、AO が多いほど電子が生成され、電子密度が増加する。



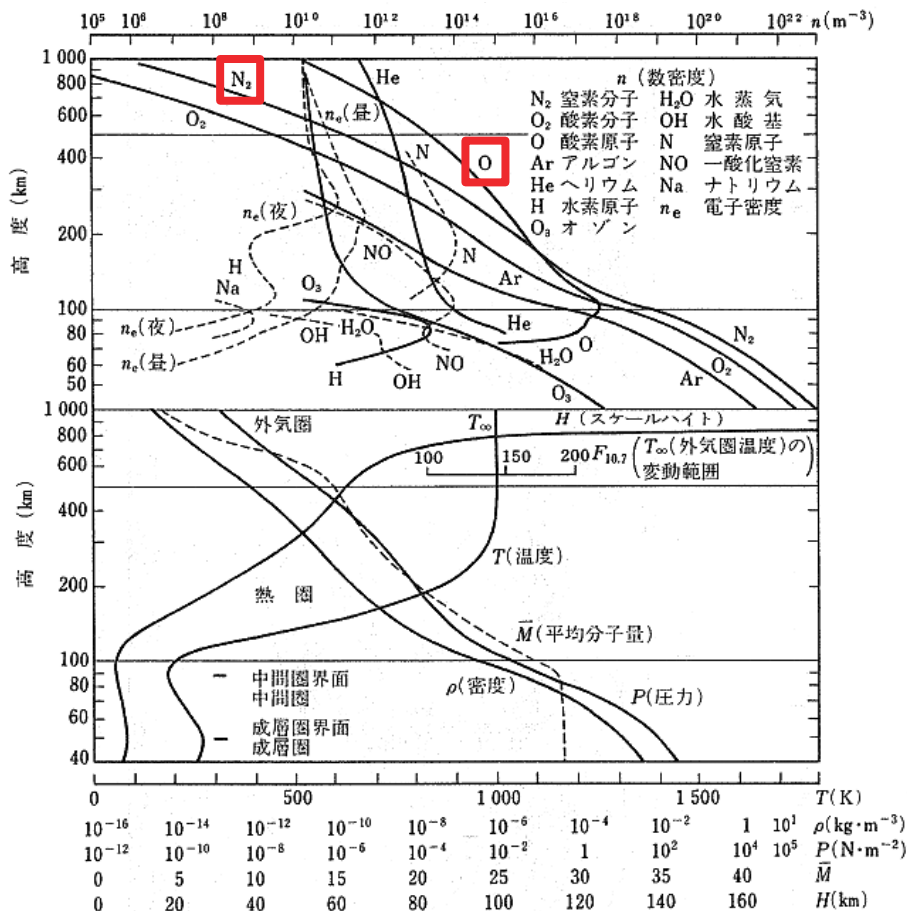
F 領域の主要イオンは原子状酸素 AO イオン O⁺ の原子イオンであり、電子 e⁻ とほぼ同密度となる。O⁺ は窒素分子 N₂、酸素分子 O₂ との組換え衝突を経て分子イオン NO⁺、O₂⁺ となる。



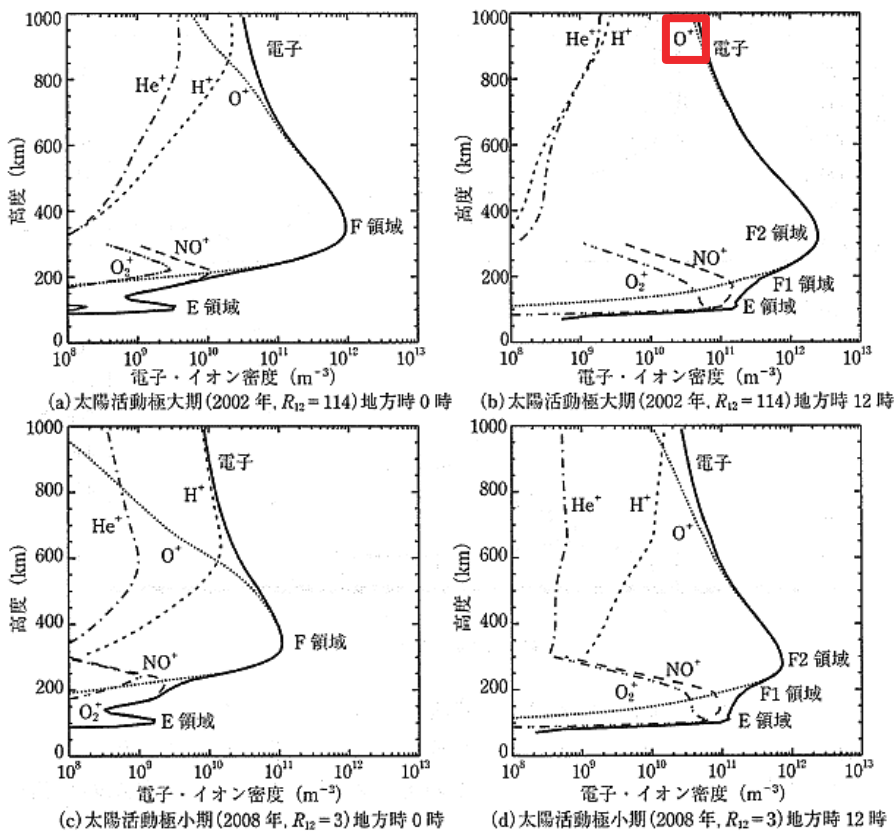
窒素分子 N₂ が多いほど(式 4)により生成される NO⁺ は、解離再結合により電子と再結合しやすく、電子が消滅し、電子密度が減少する。



E 領域の主要イオンは(式 4)、(式 5)で生成される NO⁺、O₂⁺ などの分子イオンであり、(式 6)、(式 7)の電子との解離再結合により電子が消滅し、原子に解離する。



地第55図 地球高層大気物性の高さ分布



地第56図 東京(3月)上空電離圏の電子・イオン密度の高さ分布(IRI-2012)

図 7-1. 地球超高層大気のも分子・原子・イオン・電子密度分布 出典: 理科年表(丸善, 2016)

電子密度の増加(電子の生成)は、太陽表面での爆発現象に起因する地球の極域へのエネルギー注入による電磁気学的な力($E \times B$ ドリフト)により、主に昼に電離圏が高い高度に持ち上げられることで生じる。高い高度では電子の生成(紫外線による電離)は活発に行われるものの、電離圏プラズマの消滅原因となる窒素 N_2 との化学反応が少なくなるために電子の消滅が減り、結果的に電子密度が増加する。

電子密度の減少も、太陽表面での爆発現象に起因する。極域の超高層大気にエネルギーが注入され、加熱膨張により大気が擾乱を起こし、原子状酸素 AO と窒素分子 N_2 が攪拌されると、消滅の化学反応が進んで電子密度が減少する。

大気組成には緯度依存性があり、 N_2/AO 比は高緯度ほど大きくなる。そのため、電子密度は高緯度ほど低く、磁気赤道の南北両側で極大となる。超高層中性大気と電離圏プラズマは相互作用して、低中緯度における中性大気密度と電子密度は似た分布となる。中性大気密度と電子密度は昼間は磁気赤道の南北両側の磁気緯度 20° 付近で極大となり、高緯度ほど低くなる。中性大気がプラズマに作用して電離圏の構造を変化させるだけでなく、中性大気がプラズマに作用して、中性大気密度が昼間は磁気赤道を中心に対称に分布し、電子密度分布と相関があることが CHAMP 衛星の搭載加速度計による中性大気および電子密度の全球観測により示唆されている(Liu *et al.*, 2005)。また、中性大気密度は昼間(14 時頃)に極大、夜間に極小となる。

電離圏 F 領域では、大規模なプラズマ循環によって電子密度分布が大きく変化する。図 7-2 に惑星間空間磁場 IMF(Interplanetary Magnetic Field) B_{IMF} が南向きの場合のプラズマ循環を示す。磁気圏から印加された電場により $E \times B$ ドリフトが生じ、極冠域を横断して昼→夜(反太陽)方向に数 100m/s から数 km/s 程度のプラズマの流線が卓越する。夜側の磁気圏尾部に向かう磁力線と昼側に向かう磁力線の境界である極域の細かいカスプ領域や両半球でオーロラが発生する地域では、沿磁力線電流、オーロラ粒子によるジュール加熱により上昇流が発生し、電子密度が上昇する。上昇流が大きなスケールの波動として高緯度域から低緯度域に伝搬することによって、電子密度は赤道方向にも増加する。

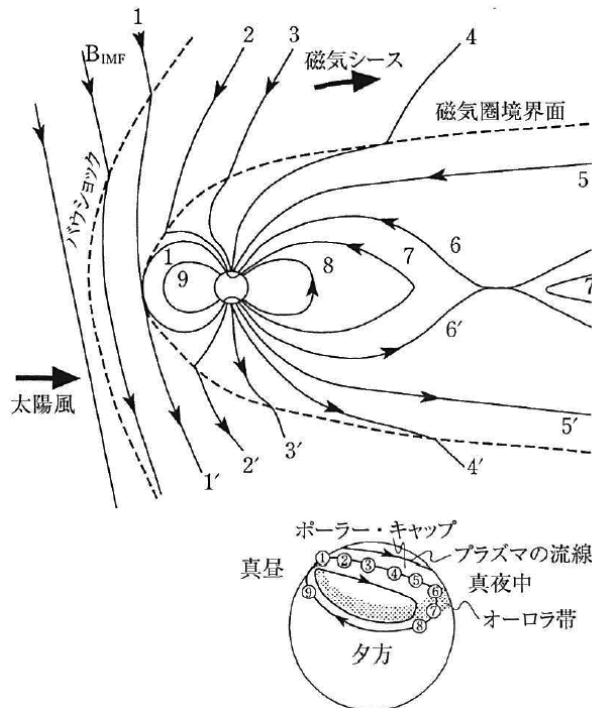


図 7-2. 極域電離圏におけるプラズマ循環 出典: 太陽地球系科学(SGEPSS, 2010)

電離圏の in-situ(その場)観測として、電圧-電流特性から電子温度・電子密度分布を計測する Langmuir(静電)プローブ(電場観測装置)による観測がある。観測ロケットによる電子温度・電子密度を図 7-3 に示す。また、Langmuir プローブの主な仕様を表 7-1 に示す。

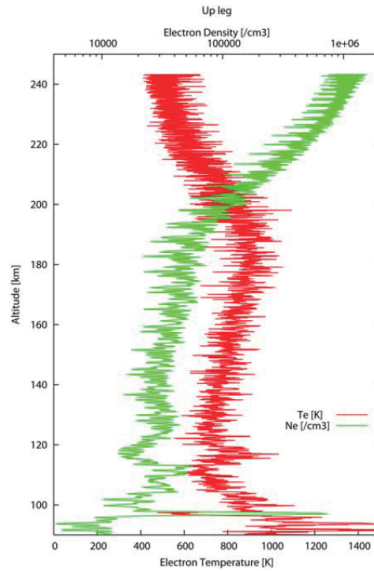


図 7-3. 観測ロケット S-520-29 号機による電子温度・電子密度 出典: 阿部(2015)

表 7-1. Langmuir プロブ仕様

| | |
|--|---|
| れいめい(2005/8/24-) /CRM(Plasma Current Monitor) →プラズマ温度・プラズマ密度 | <ul style="list-style-type: none"> ・シングルプローブ(筐体と同電位) ・ダブルプローブ(筐体と独立電位) |
| 観測ロケット S-520-29 号機(2014/8/17) /FLP(Fast Langmuir Probe) →電子温度・電子密度 | <ul style="list-style-type: none"> ・直径 3mm ステンレス製円筒プローブに 3V_{p-p}, 周期 125ms 三角波電圧掃引で 16Hz 高速サンプリング |

また、電離圏は電子密度に応じた周波数の電波を反射する性質がある。地上から短波 HF 帯の周波数を掃引したパルス電波を上空に放射し、各周波数に対応する電子密度の高度から得られるエコーの遅延時間から反射高度を計測するイオノゾンデを用いて、電子密度が最大となる高度より下側について、図 7-4 のようなイオノグラムと呼ばれる電離圏電子密度の高度分布が得られる。巨大地震により地震波、津波だけではなく数 10km の鉛直波長を持つ大気波動(音波、大気重力波)を励起し、電離圏内を高度 250km 付近まで伝搬しエコーが乱れたことが観測されている。なお、エコーが得られる最大周波数(F2 領域臨界周波数 f_0F_2)は最大電子密度に対応する。

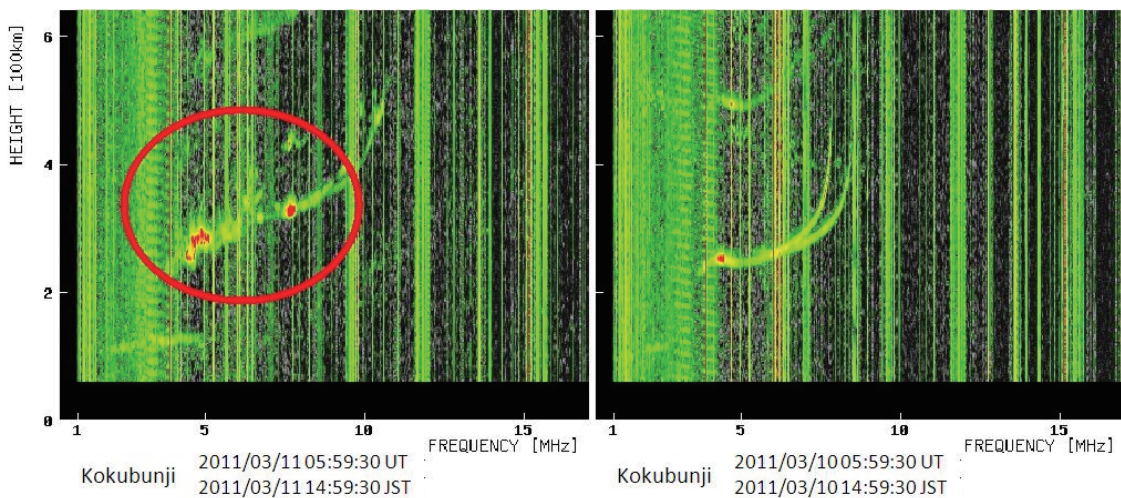


図 7-4. 東日本大震災前後のイオノグラム(国分寺) 横軸:周波数(1-15MHz),縦軸:高度(-600km) 出典: NICT

NICT では国内 4 地点(稚内、国分寺、山川(鹿児島)、沖縄)で電離圏観測を行っている。

また、国土地理院の GPS 受信機網 GEONET を利用した電離圏全電子数(TEC: Total Electron Content)観測を行っている。電離圏を通過する電波は、伝搬経路上の電子の総数と電波の周波数に依存して速度が遅くなる。GPS 衛星から送信される周波数の異なる 2 つの信号から、地上の GPS 受信機と GPS 衛星を結ぶ伝搬経路に沿って電子数密度を積分した TEC が観測できる。TEC には、電子密度が極大となる高度約 300 km の電離圏の変化が強く反映される。TEC は仮想的な単位面積鉛直柱状内の電子の総数であり、単位は TEC Unit(TECU)= 10^{16} 個/m² で表される。太陽活動極大期には、日本上空の TEC は 10^{17} - 10^{18} 個/m²(=10-100 TECU)になる。

高度 1,000km 程度までの電子密度(~AO イオン O⁺密度)、電子温度、イオン温度、視線方向のイオン速度は、地上大気レーダにより観測されている。電離圏のイオン温度は長期的に寒冷化している研究結果がある。中性超高層大気は下層大気と相互作用するが、超高層大気は大気密度が小さく、下層大気に比べて変動が顕著に表れる。温室効果ガスの 1 つである CO₂ 濃度が 2 倍に増加すると、地表面は温暖化するのに対して、超高層大気では高度 120 km 付近での 15 μ m による CO₂, 高度 150 km 付近での 5.3 μ m による NO, 高度 200 km 付近での 63 μ m による O の赤外放射冷却増加により 50 K 程度寒冷化し、中性大気密度が 40-50 %減少すると見積もられている。

地上観測との連携により、大気光の可視-赤外放射がもたらす放射冷却による超高層大気寒冷化の研究や、中性大気密度分布異常の解明が期待される。

■流れ

電離圏 F 領域では、低緯度で昼間は西向き、夜間は東向きの数 100 m/s オーダの中性風が吹く。高度 200-600km の範囲では磁気赤道付近で西向き、東向きいずれも極大となる傾向にあり、磁気赤道を中心にほぼ対称な東西風の速度分布をしている。また、高度が高いほど西向き、東向きの風速ともに増加する。夜間は東向きの風速の増加が顕著となり、高緯度側でも風速が増加する。

また、プラズマの流れにより、昼間は東向き、夜間は西向きの電場が発生する。一種の発電機構であり、電離圏ダイナモと呼ばれる。昼間の東向きの電場は、低緯度域での水平で北向きの磁場に対して、鉛直上向きの $E \times B$ ドリフトを引き起こす。上昇したプラズマは磁力線に沿って高緯度側に向かい、重力により磁気緯度 20°付近の E 領域で下降したプラズマにより磁気赤道の両側に電子密度が極大の赤道異常 EIA(Equatorial Ionization Anomaly)が生じる。赤道異常を引き起こすプラズマの流れを図 7-5 に示す。

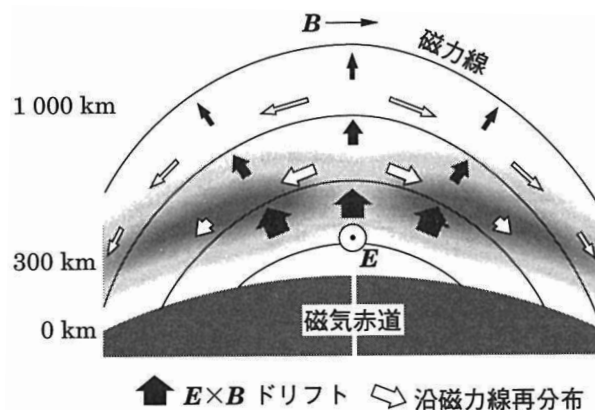


図 7-5. 赤道異常を引き起こすプラズマの流れ($E \times B$ ドリフト)

出典: 宇宙環境科学(恩藤・丸橋, 2000)

超高層大気では、中性大気の圧力勾配が中性風を生み、電離圏プラズマに影響を与える。一般に熱圏・電離圏のエネルギー源は太陽放射であり、昼間と夜間で圧力勾配が生じ、中性風は昼間から夜間の方向に吹く。

中性風は主に Fabry-Perot 干渉計などの可視光観測、非干渉散乱レーダおよび衛星のドラッグにより観測される。

Fabry-Perot 干渉計は、E 領域・F 領域において大気光のドップラー効果やオーロラ放射から中性風を観測する。

非干渉散乱レーダは、電離圏でのプラズマの運動を観測することにより中性風の東西ドリフトを推測しており、昼間は西向き、16LT 頃に反転し夜間は東向きになる(Fejer *et al.*, 1981)。

衛星のドラッグは、衛星の軌道の変化や中性風による衛星の加速度の変化により観測する。Dynamics Explorer 2(DE-2)衛星 WATS(Wind and Temperature Spectrometer)により、超高層大気の東西風が観測されている。高度 200-600km にかけて東西風の速度分布は時間帯に依存せず磁気赤道を中心にほぼ対称であり、東向き・西向きともに高度が高くなるにつれて風速が増加する。15MLT-06MLT 付近の東向きの風の増加が特徴的で、15MLT-00MLT 付近の速度は磁気緯度方向にも増加し、高度 400-500km において磁気緯度 $\pm 60^\circ$ まで拡張されている。

■ 超高層大気・電離圏の影響

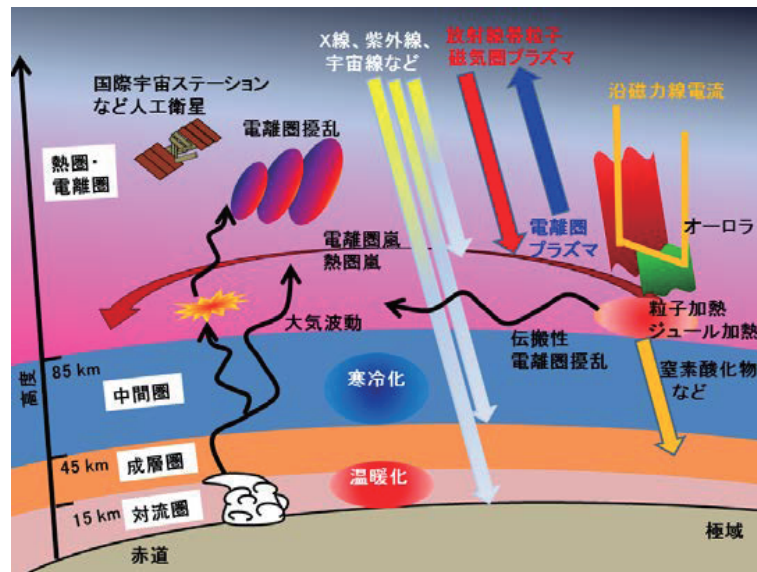


図 7-6. 様々な要因により変動する超高層大気・電離圏環境 出典: SGEPSS(2013)

超高層大気・電離圏は太陽活動や磁気圏など上方からの影響に加え、対流圏など下層大気の変動も関わり、周辺環境の影響を受けて常に変動している。超高層大気・電離圏環境の様々な変動要因を図 7-6 に示す。

電離圏に大きな変動が生じると、衛星通信の電波が乱れ様々な影響が生じる。電離圏を流れる電流により発生するジュール加熱は、擾乱として電子密度が急激に増加・減少する電離圏嵐を引き起こす。

電離圏は電波に対して伝搬遅延や位相の変化あるいは屈折率の揺らぎ(電離圏シンチレーション)などを引き起こす。衛星測位は複数衛星からの電波を受信して到来時間差から位置を測定するため、衛星-地上間の電離圏擾乱は測位誤差を生じる原因になる。電子密度が急激に増加すると、電離圏を通過する衛星からの電波伝搬路に沿った全電子数効果により伝搬遅延が増大し、GPS ナビゲーションに誤差が生じる。

電離圏 F 領域による電波の鏡面反射を利用した短波 HF 通信(周波数 3-30MHz, 波長 10-100m)は船舶無線や航空機管制などに利用されているが、電子密度が急激に減少すると短波 HF 帯の電波が反射されずに通信障害を来す。なお、電離圏 D 領域は短波 HF 帯の電波を吸収する効果があるが、太陽フレアで放射された X 線によって急激に D 領域の電離が進むと短波 HF 通信が途絶えるデリンジャー現象(Dellinger effect)、突発性電離圏擾乱 SID(sudden ionospheric disturbances)が発生する。

電離圏構造は常に滑らかに変化するとは限らず、数 m-数十 km のスケールで不規則な電子密度分布を示すことがあり、電波は回折や散乱を受け、強度や位相が変化するなど、通常とは異なる伝搬をする。電離圏で見られる空間スケールが小さい電子密度の擾乱として、伝搬性電

離圏擾乱 TID(Traveling Ionospheric Disturbance)、赤道スプレッド F(ESF; Equatorial spread-F)、プラズマバブル(plasma bubble)などがある。衛星測位の精度低下や衛星通信に障害を引き起こすとともに、中性大気が加熱され、中性風や中性温度に波動的な伝搬性大気擾乱 TAD(Travelling Atmospheric Disturbance)が生じる。

TID は日本上空などの主として中緯度域において夏頃の夜半前に頻繁に発生し、電離圏 F 領域を極域から低緯度南西方向に数 100km スケールの電子密度の波状構造が数 100m/s で伝搬する中規模(Medium-scale)の伝搬性電離圏擾乱(MSTID)がある。また、大規模(Large-scale)の LSTID もある。MSTID は超高層中性大気の風が電子密度の微小擾乱によって引き起こす分極電場により電離圏を鉛直方向に変動させる Perkins 不安定によって生じると考えられている。

赤道スプレッド F は、低緯度域の電離圏 F 領域で夜間に発生する電子密度の不規則構造である。スプレッド F の発生は時間と場所によって大きく変化し、45-50°より高緯度では時間によらず発生し、2つの領域に挟まれた中緯度ではスプレッド F はあまり発生しない。

プラズマバブルは、電離圏 F 領域下部で発生した電子密度が局所的に低い「泡」領域が電離圏の上層まで上昇する現象であり、低緯度域で観測される。夜間の赤道スプレッド F はプラズマバブルによる。高度 250km 付近で発光する原子状酸素の大気光(波長 630.0nm)の全天画像(大気光イメージャ)で観測されたプラズマバブルを図 7-7 に示す。枝のような形をした大気光の暗い領域がプラズマバブルである。プラズマバブルは磁気赤道における Rayleigh-Taylor 不安定によって生成されると考えられている。赤道域では下向きの重力加速度によりイオンは東向きにドリフトし、結果として東向きの電流が生じる。電離圏 F 領域の下部で等密度面に上下方向の揺らぎが生じると、電流の一様性を保つために分極が生じ、分極による電場に伴う E×B ドリフトにより、等密度面の上昇部分で上向き、下降部分で下向きの力を受け、初期擾乱が成長する。よりスケールの細かいプラズマの粗密構造は、電離圏を通過する衛星電波に揺らぎ(電離圏シンチレーション)を引き起こすため、プラズマバブルの発生場所・時刻を評価、予測することが実用面から求められている。

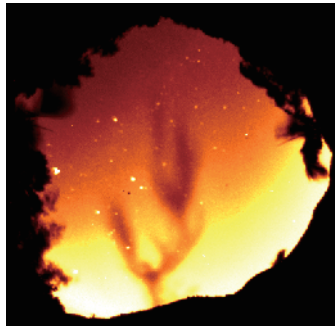


図 7-7. 高度 250km 付近で発光する原子状酸素の大気光(波長 630.0nm)の全天画像で観測されたプラズマバブル(鹿児島県佐多町) 出典: 名古屋大学宇宙地球環境研究所⁸

■磁気圏の影響

太陽活動の影響として、太陽表面で太陽フレアや、太陽コロナから突発的に放出されるコロナ質量放出 CME(Coronal Mass Ejection)、磁場が外向きに伸びプラズマが高速に吹き出すコロナホールなどの爆発現象が発生すると、太陽風が強まり、磁気圏に蓄積された磁場エネルギーがプラズマの運動エネルギーに変換されて磁気圏から電離圏に至る電流が流れ、電離圏に影響を与える。

太陽風のエネルギーが磁気圏内に注入され、中低緯度で地磁気が数十-数百 nT 減少する磁気嵐や極域での数百-千数百 nT のサブストームによって磁気圏から極域にエネルギーが流入すると、超高層大気が加熱され、低緯度まで超高層大気の膨張・擾乱が発生し、大気抵抗を受けて衛星の姿勢や軌道に影響を及ぼす。

X 線天文衛星あすか(ASTRO-D)は、2000 年 7 月の太陽フレアで、磁気嵐の加熱による急激な大気膨張(密度増加)により外乱トルクが増大し、リアクションホイールの飽和値および臨界ニューテーション角を超え、コーニング運動に陥る姿勢不具合が発生した。

⁸ cicr.isee.nagoya-u.ac.jp/site1/obs/kagoshima.html

磁気圏の影響として、超低高度衛星が航行する高度 180-300km はオーロラが出現する領域であることが挙げられ、地上および宇宙から光学観測(イメージャ)により、超高層大気のみならず分子・原子が発光する大気光(airglow)が観測されている。大気光は超高層大気の構成成分が化学反応によって励起され、低いエネルギー状態に遷移するときに放出される。大気成分の高度プロファイルにより、大気光の発光層はほぼ決まった高度に存在する。図 7-8 に国際宇宙ステーションから撮影されたオーロラ、図 7-9 に代表的な大気光の波長および発光高度、表 7-2 に電離圏の観測に使用される大気光の観測波長、図 7-10 に原子状酸素の発光のエネルギー遷移を示す。



図 7-8. 国際宇宙ステーションから撮影されたオーロラ(ISS029-E-06020) 出典: NASA/JSC⁹

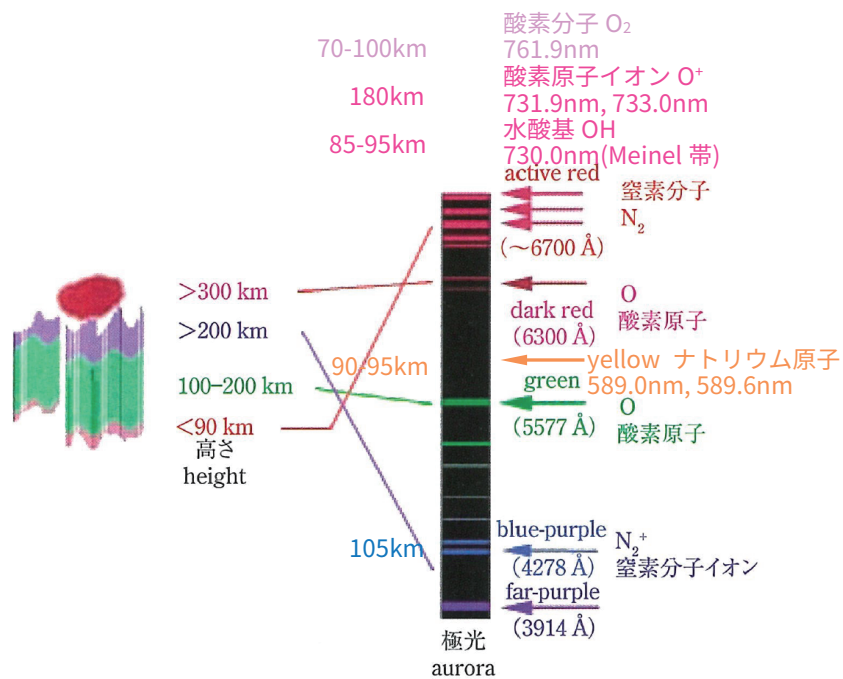


図 7-9. 大気光波長・発光高度 出典: 太陽地球系科学(SGEPSS, 2010)に加筆

⁹ eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos

表 7-2. 大気光観測波長

| 波長[nm] | 発光対象 | 観測例 |
|--------|-----------------------------|---|
| 761.9 | O ₂ | ISS-IMAP/VISI |
| 730.0 | OH ⁻ | ISS-IMAP/VISI かぐや/UPI-TVIS |
| 670.0 | N ₂ | れいめい/MAC |
| 630.0 | O | ISS-IMAP/VISI かぐや/UPI-TVIS れいめい/MAC |
| 589.3 | Na | かぐや/UPI-TVIS |
| 557.7 | O | かぐや/UPI-TVIS |
| 427.8 | N ₂ ⁺ | れいめい/MAC かぐや/UPI-TVIS |
| 83.4 | O ⁺ | ISS-IMAP/EUV かぐや/UPI-TEX |
| 30.4 | He ⁺ | ISS-IMAP/EUV かぐや/UPI-TEX |

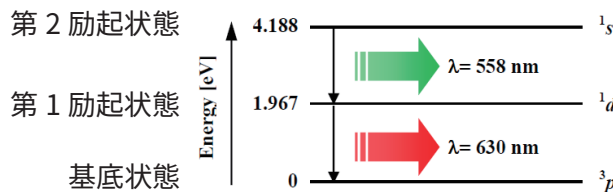


図 7-10. 原子状酸素の発光のエネルギー遷移

極域の電離圏プラズマは上部の磁気圏の影響を受け、図 7-11 に示すように、磁気圏からの磁力線に沿って形成される大規模な電位差により磁気圏プラズマが加速され(沿磁力線電流)、衝突電離によりオーロラが発生する。磁場中の荷電粒子にとって、磁場に直角な方向の移動は困難であるが、磁力線に沿う方向の移動は比較的容易であり、極域からは H⁺, He⁺, AO イオン O⁺ が逃散する極風(polar wind)が発生する。降下する電子は大気中の原子を発光させオーロラを出現させると同時に、原子を電離する作用があり、電離圏の電子密度が上昇することで電流が流れる。オーロラは keV 程度の高エネルギー電子が大気中の原子状酸素 AO や窒素原子 N を励起して発光する。

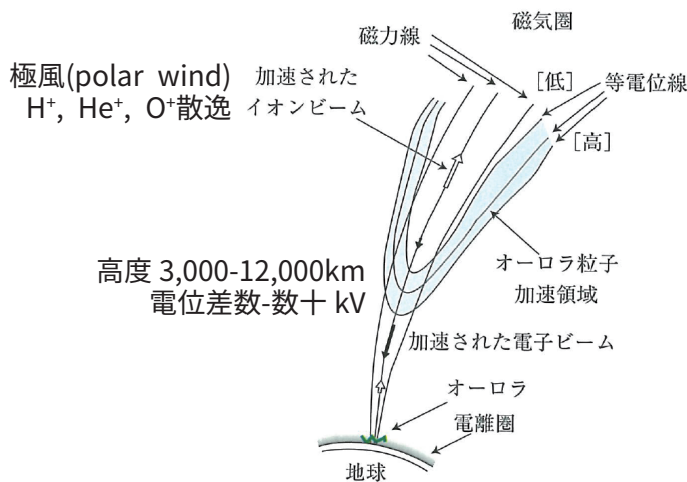


図 7-11. オーロラ粒子加速領域 出典: 太陽地球系科学(SGEPSS, 2010)に加筆

(2) 磁場

地磁気変動スペクトルとして周期に対する振幅を図 7-12 に示す。地磁気変動には地球の固有磁場に起因する成分も存在するが、太陽風-磁気圏相互作用による変動成分に比べると極めて長周期であるため、分離して扱うことができる。

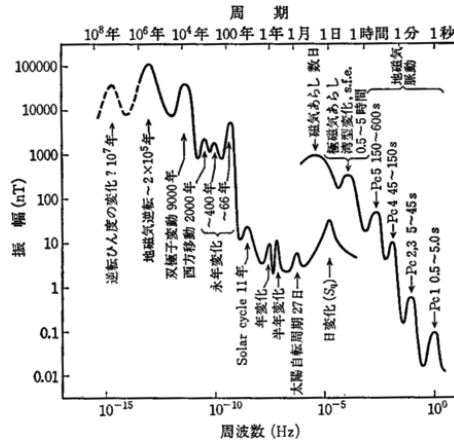


図 7-12. 地磁気変動スペクトル(短周期: 擾乱時のみの変動) 出典: 地球(上田・水谷, 1992)

地磁気は電離圏に流れる電流により変化する。地磁気の静穏時には、比較的規則的な地磁気変動を示す。太陽からの熱エネルギーにより駆動され、熱圏中性大気の潮汐運動に伴うダイナモ作用に起因する。短周期の地磁気擾乱には磁気嵐やサブストームがある。約 60,000 nT の地表の地磁気に対して、電離圏に流れる電流が地表に誘起する磁場は高々 1,000 nT 程度と 2% 程度であるが、磁場変動幅が急激で継続時間が長いと、電磁誘導の法則に従い地表に大きな誘導起電力が生じる。磁場の変化に誘導されて地中を流れる誘導電流により磁場はさらに変化する。

電離圏を流れる電流は、磁気圏と電離圏を結ぶ磁力線に沿って流れる沿磁力線電流や、オーロラに伴い夜側の電離圏の高度 100-200 km を西向きに流れるオーロラ・ジェット電流、プラズマバブルを引き起こすと考えられる赤道環電流(赤道ジェット電流)などがある。

磁気嵐によっても磁場は変動し、人工衛星の帯電により不具合の原因になり得る。

衛星に磁力計を搭載する際はブーム等により構体から極力離すが、振動を arcsec オーダのキャンセルする必要がある。衛星搭載磁力計としては、表 7-3 に示すように、JAXA で開発実績がある ETS-VIII 搭載技術データ取得装置 TEDA や準天頂衛星 QZS-1 搭載 TEDA のほか、科学衛星 ERG や Bepi-Columbo/MMO の pT(10^{-3} nT) オーダの磁力計がベースになると考えられる。

なお、衛星による火山観測への応用では、合成開口レーダ(SAR)による観測に加えて、磁場観測、噴煙火山灰やエアロゾルの光学・ライダ観測および H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S などを定量的に捉える分光観測のほか、ヘリウムガス観測($^3He/^4He$)が火山を評価する指標の 1 つとして有用であることなどから、質量分析計などによる大気計測などが可能性として考えられる。

表 7-3. 国内衛星磁力計仕様(3成分ベクトル観測リングコアフラックスゲート磁力計)



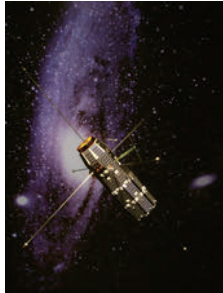
| 衛星/搭載磁力計 | 周波数 | 分解能 | ダイナミックレンジ | 量子化 bit | サンプリング |
|--|----------|-------------------------------------|---|---------|---------|
| MDS-1/SEDA(MAM)(2002-03) 【地球】500×36,000km | - | 0.002nT 0.008nT 0.03nT 2nT | ±64nT ±256nT ±1,024nT ±65,536nT | 16bit | 8, 32Hz |
| ERG/MGF(2016-) 【地球】300×30,000km | DC-数十 Hz | 0.031nT 0.250nT | ±8,000nT ±60,000nT | 19bit | 256Hz |
| ETS-VIII/TEDA(MAM)(2006-) 【地球】静止 | DC-1Hz | 0.1nT | ±256nT ±1,024nT ±4,096nT ±65,536nT | 16bit | 2Hz |
| QZS-1/TEDA(MAM)(2010-) 【地球】準天頂軌道 | - | - | ±4,096nT ±65,536nT | - | - |
| SELENE/LMAG(2007-09) 【月】100→50km | DC-10Hz | 0.008nT 0.03nT 0.125nT 8nT | ±64nT ±256nT ±1,024nT ±65,536nT | 14bit | 32Hz |
| MMO/MGF(2016-) 【水星】590×11,600km | DC-64Hz | 0.0038nT | ±2,000nT | 20bit | 128Hz |

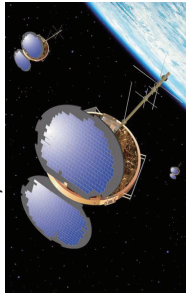
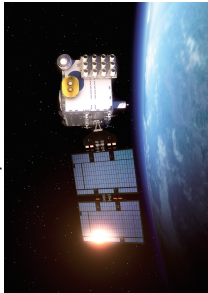
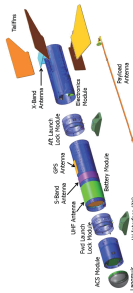
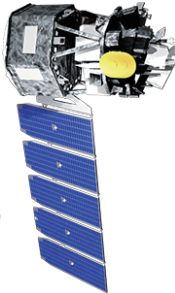
(3) 参考文献

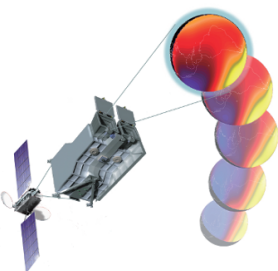

- ・国立天文台 編『平成 28 年 理科年表』丸善出版, 2016
- ・恩藤忠典・丸橋克英 編著『宇宙環境科学』オーム社, 2000
- ・地球電磁気・地球惑星圏学会 編『太陽地球系科学』京都大学学術出版会, 2010
- ・柴田一成・上出洋介 編著『総説 宇宙天気』京都大学学術出版会, 2011
- ・H. Liu, H. Lühr, V. Henize and W. Köhler, Global distribution of the total mass density derived from CHAMP, J. Geophys. Res., 110, A04301, doi:10.1029/2004JA010741, 2005
- ・阿部琢美, 観測ロケット S-520-29 号機搭載ラングミュアプローブによる電離圏プラズマ観測, 2015
- ・情報通信研究機構「2011 年 3 月 11 日東日本太平洋沖地震に伴う電離圏擾乱」, 2011¹⁰
- ・国立極地研究所「超高層大気が寒冷化する様子を、33 年間の大型レーダー観測から解明」, 2014¹¹
- ・細川敬祐, 地球電離圏, J. Plasma Fusion Res., Vol.90, No.12, 764-768, 2014
- ・地球電磁気・地球惑星圏学会『地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来』, 2013
- ・小川忠彦, 赤道域における対流圏活動と熱圏・電離圏擾乱との関係, MTI 上下結合の物理, MTI-HandBook, 2007
- ・上田誠也・水谷仁 編『地球』岩波書店, 1992




¹⁰ www.seg.nict.go.jp/2011TohokuEarthquake/index_j.html¹¹ www.nipr.ac.jp/info/notice/20140926.html




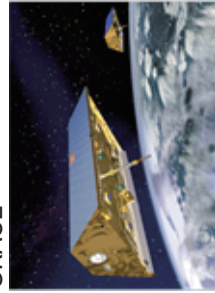
表 7-4. 超低高度衛星ミッションに有効な分野の衛星観測

| 衛星 | 軌道 | 期間 | 機関 | ミッション・センサ | 備考 |
|---|------------------------------------|----------------|------------|--|--|
| <p>■ 超高層大気・電離圏・磁気圏</p> <p>小型高機能科学衛星 INDEX(れいめい)</p>  | 610×654km | 2005/8- | JAXA/ISAS | <ul style="list-style-type: none"> 多波長オーロラ観測カメラ MAC(Multi-spectral Auroral Camera) 静電式トッパット型電子・イオンエネルギー分析器 ESA/ISA(Electron/Ion Energy Spectral Analyzer) Ambient Plasma Current Monitor (CRM): 3 対 Langmuir プローブ(電場観測装置) Geomagnetic Aspect Sensor(GAS): 3 軸フラックスゲート磁力計 | - |
| <p>地球超高層大気撮像観測ミッション ISS-IMAP</p>  | ISS 搭載 @ $\phi=51^\circ$ | 2012/10- | JAXA 他 | <ul style="list-style-type: none"> 可視・近赤外分光撮像装置 VISI : OH(730nm@85km), O₂(762nm@95km), O(630nm@250km) 極端紫外光撮像装置 EUVI : O⁺(83.4nm), He⁺(30.4nm) | Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping |
| <p>C/NOFS</p>  <p>(出典: NASA/米空軍)</p> | 400×850km @ $\phi=13^\circ$ →100km | 2008/4-2015/11 | 米 NASA/米空軍 | <ul style="list-style-type: none"> Planar Langmuir Probe Ion Velocity Meter Neutral Wind Meter Electric Field Instrument GPS Receiver RF Beacon | Communications/Navigation Outage Forecasting System |

| 衛星 | 軌道 | 期間 | 機関 | ミッション・センサ | 備考 |
|---|--|-----------------------|------------------------------------|--|--|
| COSMIC/FormoSat-3  (出典: アメリカ大気研究センター-NCAR) | 515→800km @ $\varphi=72^\circ$ | 2006/4-(6機) | 米台 | <ul style="list-style-type: none"> GPS 掩蔽 (Radio Occultation; RO): 電離圏の影響による電波の遅延量を計測して状態を観測する | Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate |
| COSMIC-2/FormoSat-7  (出典: アメリカ大気研究センター-NCAR) | 720→550km @ $\varphi=24^\circ$, 500→750km @ $\varphi=72^\circ$ | 2016(6機), 2018(6機) | 米台 | | |
| CARINA  (出典: NRL) | 170×270km @ $\varphi=51.6^\circ$ →150km | 2016/6- | 米海軍研究所 NRL (PI: Paul Bernhardt) | <ul style="list-style-type: none"> RLP(Ram Langmuir Probe): イオン密度計測(10^2-10^6/cm³) EFI(Electric Field Receiver): 電波伝搬を利用した海上波動計測(3-13MHz) OGR(Orbiting GPS Receiver) | <ul style="list-style-type: none"> E層とF層の間を航行し、両層からの反射を、地上レーダによる電離圏加熱時に観測 |
| ICON@  (出典: カリフォルニア大学バークレー校) | 550km@ $\varphi=24^\circ$ | 2017/2-(2年) | 米カリフォルニア大学バークレー校 | <ul style="list-style-type: none"> Michelson Interferometer for Global High-Resolution Thermospheric Imaging Extreme Ultraviolet imager Far Ultraviolet imager Ion Velocity Meter | Ionospheric Connection Explorer <ul style="list-style-type: none"> レーダによる電離圏加熱時に観測 |

| 衛星 | 軌道 | 期間 | 機関 | ミッション・センサ | 備考 |
|--|--------------------------|----------------------|---------------|---|---|
| <p>GOLD</p>  <p>(出典: gold-mission.org)</p> | <p>静止</p> | <p>2017/9-</p> | <p>米</p> | <p>• scanning imaging spectrographs</p> | <p>Global-scale Observations of the Limb and Disk</p> |
| <p>Dynamics Explorer 2(DE-2)</p>  <p>(出典: NASA)</p> | <p>309 X 1,012km</p> | <p>1981/8-1983/2</p> | <p>米 NASA</p> | <ul style="list-style-type: none"> • FPI(Fabry-Perot Interferometer) • IDM(Ion Drift Meter) • LANG(Langmuir Probe) • LAPI(Low Altitude Plasma Instrument) • MAG-B(Magnetic Field Observations Triaxial Fluxgate Magnetometer) • NACS(Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) • RPA(Retarding Potential Analyzer) • VEFI(Vector Electric Field Instrument) • WATS(Wind and Temperature Spectrometer) | <p>—</p> |

| 衛星 | 軌道 | 期間 | 機関 | ミッション・センサ | 備考 |
|--|-----------------------------|---------------|----------------------------------|---|---|
| ACE  (出典: NASA) | ラグランジュ 点 L1 リサ ジューー軌道 | 1997/8- | 米 NASA | ミッション・センサ ・ CRIS(Cosmic Ray Isotope Spectrometer) ・ RTSW(ACE Real Time Solar Wind) ・ SWIMS(Solar Wind Ion Mass Spectrometer) ・ SWICS(Solar Wind Ion Composition Spectrometer) ・ ULEIS(Ultra-Low Energy Isotope Spectrometer) ・ SEPICA(Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer) ・ SIS(Solar Isotope Spectrometer) ・ SWEPM(Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor) ・ EPAM(Electron, Proton, and Alpha-particle Monitor) ・ MAG(Magnetometer) | Advanced Composition Explorer |
| Lemur-2  (出典: Spire) | 650km | 2015/9-(4機) | 米 Spire(spire.com) cubesat 企業 | ・ GPS 掩蔽: 気温、水蒸気観測 | - |
| CSES  (出典: ASI) | 507km | 2017-(5年, 2機) | 中伊 | ・ Search Coil magnetometer ・ Fluxgate Magnetometer ・ Electric field detector ・ GNSS Occultation Receiver ・ Tri-Frequency Transmitter ・ Plasma analyzer ・ Langmuir プローブ(電場観測装置) ・ Energetic particle detector | China Seismo-Electromagnetic Satellite |

| 衛星 | 軌道 | 期間 | 機関 | ミッション・センサ | 備考 |
|--|------------------------------|----------------|---------------------|---|---|
|  UARS/WINDII (出典: NASA) | 575km@ $\neq 57^\circ$ | 1991/9-2005/12 | 米 | - | Upper Atmosphere Research Satellite/Wind Imaging Interferometer ・ 高度 80-300km での風速の変化に応じた O, OH, O ₂ 輝線のドップラシフト計測 |
|  CHAMP (出典: DLR) | 460km @ $\neq 87.3^\circ$ | 2000/7-2010/9 | 独地球研究センター GFZ | <ul style="list-style-type: none"> ベクトル磁力計 (fluxgate) スカラー磁力計 (Overhauser) Langmuir プローブ (電場観測装置) 静電容量型加速度計 | Challenging Minisatellite Payload |
|  SWARM (出典: DLR) | A,C : 460km B : 510km | 2013/11-(3機) | 欧(独)ESA | <ul style="list-style-type: none"> ベクトル磁力計 (fluxgate) スカラー磁力計 (光ポンピング) Langmuir プローブ (電場観測装置) 静電容量型加速度計 | - |
|  GRACE (出典: NASA) | 450km | 2002/3- | 米 NASA/JPL 独 GFZ | <ul style="list-style-type: none"> 静電容量型加速度計 | Gravity Recovery and Climate Experiment |


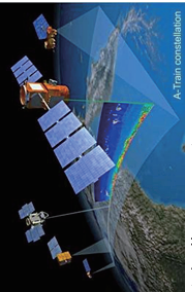




| 衛星 | 軌道 | 期間 | 機関 | ミッション・センサ | 備考 |
|--|------------|----------------|---------------|--|--|
|  <p>GOCE (出典: ESA)</p> | 260→230km | 2009/3-2013/11 | 欧 ESA | ミッション・センサ ・ 静電容量型加速度計 | Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer |
|  <p> CALIPSO/CALIOP (出典: NASA)A-Train EarthCARE/ATLID (出典: ESA) </p> | 700km@±98° | 2006/4- | 米 NASA/仏 CNES | ・ 雲・エアロゾルライダー (532nm, 1,064nm, ミー散乱: 雲・エアロゾル) | Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization ・ 後方散乱係数β ・ 偏光解消度δ⇒エアロゾル形状 |
|  <p>ADM-Aeolus/ALADIN (出典: ESA)</p> | 400km@±97° | 2017- | 欧 ESA | ・ 偏光高スペクトル分解ライダー (355nm, レイリー散乱: 大気) | Atmospheric Lidar ・ 後方散乱係数β ・ 偏光解消度δ⇒エアロゾル形状 ・ エアロゾル消散係数α ・ ライダー比 S1=α/β |
|  <p>ADM-Aeolus/ALADIN (出典: ESA)</p> | 400km@±97° | 2016- | 欧 ESA | ・ ドップラライダー (355nm, ミー散乱: 雲・エアロゾル & レイリー散乱: 大気) | Atmospheric Laser Doppler Instrument |

表 7-5. 超低高度衛星ミッションに有効な分野の地上観測(電離圏観測用地上大気レーダ)

| 機関 | 場所 | 周波数帯 | 機関 | 備考 |
|---|---|------|--|---|
| <p>■ 超高層大気・電離圏 赤道大気レーダ EAR</p>  <p>(出典: 京大生存研)</p> | インドネシア | VHF | 京大生存研 | Equatorial Atmosphere Radar |
| <p>MU レーダ</p>  <p>(出典: 京大生存研)</p> | 滋賀信楽 | VHF | 京大生存研 | Middle and Upper Atmosphere Radar |
| <p>大型大気 PANSY レーダ</p>  <p>(出典: 国立極地研究所)</p> | 南極昭和基地 | VHF | 極地研 | Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar |
| <p>欧州非干渉散乱 EISCAT レーダ</p>  <p>(出典: 国立極地研究所)</p> | トロンソ・ノルウェー キルナ・スウェーデン ソダンキラ・フィンランド (北極域) | UHF | 日本と欧州 6 カ国 (英、仏、独、ノル ウェー、スウェーデ ン、フィンランド)の 国際協同運営 | European Incoherent Scatter Scientific Association ・ トロムソ、キルナ、ソダンキラ はオーロラ帯の真下に位置し、 オーロラ観測に適する。 |
| | | VHF | | |

| 機関 | 場所 | 周波数帯 | 機関 | 備考 |
|---|-----------------------------------|------|-----------------------|---|
| EISCAT ESR レーダ  (出典: 国立極地研究所) | ロングイヤビン・ノルウェー (スバルバル/スバルバード) | UHF | | EISCAT Svalbard radar ・ロングイヤビンは太陽風プラズマ粒子が直接磁気圏に流入するカスプ域に対応する。 |
| SuperDARN  (出典: 英 Leicester 大) | 北半球 22 基、南半球 11 基 (北海道陸別に 2 基) | HF | 世界 11 ケ国による国際共同プロジェクト | Super Dual Auroral Radar Network ・1-2 分間隔で電離圏プラズマ対流をレーダ観測。熱圏や中間圏の研究にも利用。 |

添付資料
第1回
第2回
第3回

以上

第1回

2015(平成 27)年 5 月 26 日(火) 18-20 時

於: 幕張メッセ国際会議場 101A

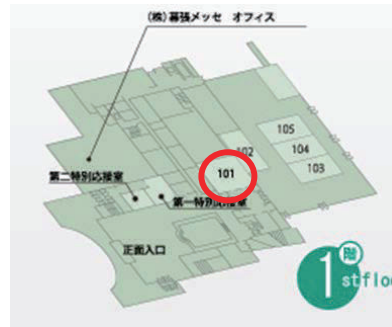
超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

JAXA サイエンスワークショップ事務局

開催日時：平成 27 年 5 月 26 日(火) 18 : 15 ~20 : 00

開催場所：幕張メッセ国際会議場 101A 会議室 (JR 京葉線 海浜幕張駅 徒歩 5 分)

(日本地球惑星科学連合大会 JpGU2015 会場内)



議事次第

- | | |
|--|--|
| (1) ワークショップ趣旨説明 | 18 : 15-18 : 20 |
| (2) JAXA における超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の開発計画と将来の展望について | 18 : 20-18 : 40 (質疑 5 分含む) JAXA/SLATS 佐々木プロマネ |
| (3) 観測ロケットの利用研究と超低高度衛星について | 18 : 40-19 : 00 (質疑 5 分含む) JAXA/ISAS 阿部 准教授 |
| (4) 超低高度衛星の利用に向けた意見交換 | 19 : 00-19 : 50 |
| (5) 今後の進め方 | 19 : 50-20 : 00 |

以上



超低高度衛星の利用に向けた サイエンスワークショップ

日時:平成27年5月26日 18:15-20:00

場所:幕張メッセ国際会議場101A会議室



議事次第

- (1) ワークショップ趣旨説明 18:15-18:20
- (2) JAXAにおける超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発計画
と将来の展望について 18:20-18:40
JAXA/SLATS 佐々木プロマネ
- (3) 観測ロケットの利用研究と超低高度衛星について 18:40-19:00
JAXA/ISAS 阿部 准教授
- (4) 超低高度衛星の利用に向けた意見交換 19:00-19:50
- (5) 今後の進め方 19:50-20:00



ワークショップ趣旨説明

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では人工衛星による新たな価値創生に向けた取り組みを行っており、その一環として、これまで人工衛星がほとんど利用してこなかった超低高度軌道(180km~300km程度)における観測を計画しています。超低高度を利用する初号機として超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発を平成28年度の打上げに向けて進めています。SLATSにて軌道上実証を行い、その成果を後継機に継承するとともに新たな価値の創生に取り組んでいきます。

高度約100km~300kmの領域を地球大気最後のフロンティアとする考えもあり、研究者の方々から期待が寄せられています。超低高度衛星の利用による新たな価値の創生には、高層大気、熱圏、電離圏などの研究者により構成されるサイエンスコミュニティとJAXAとの関係構築が必要不可欠であると考えます。

これらを踏まえ、「超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ」を開催することといたしました。JAXAにおけるSLATSの開発計画と将来の展望やこれまでの高層大気の観測等についてご理解を深めていただき、SLATSの観測成果の最大化や将来の超低高度ミッションの提案を行うコミュニティ体制の構築を行っていきたいと考えております。



JAXAにおける超低高度衛星技術試験機 (SLATS)の開発と将来の展望について

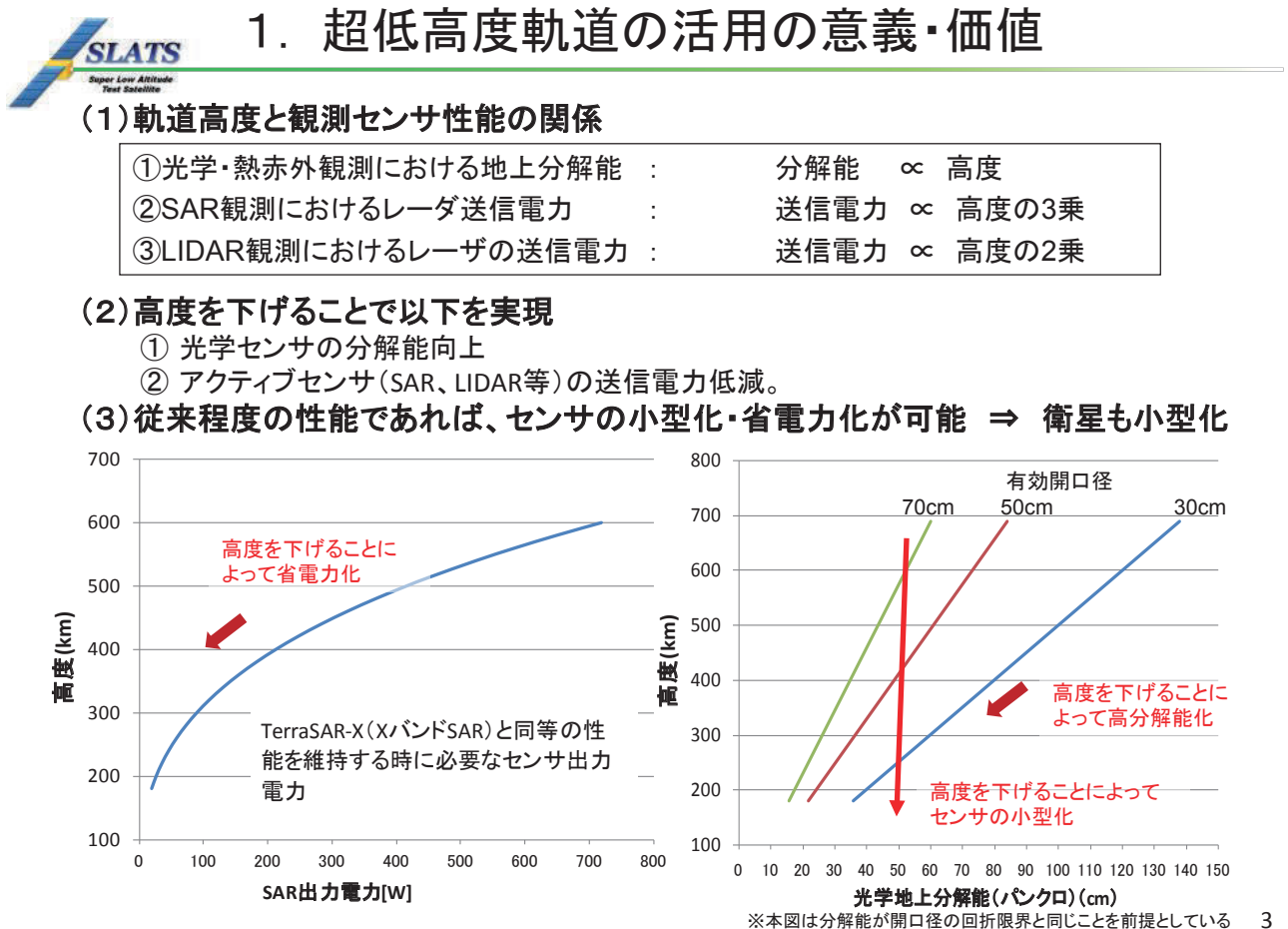
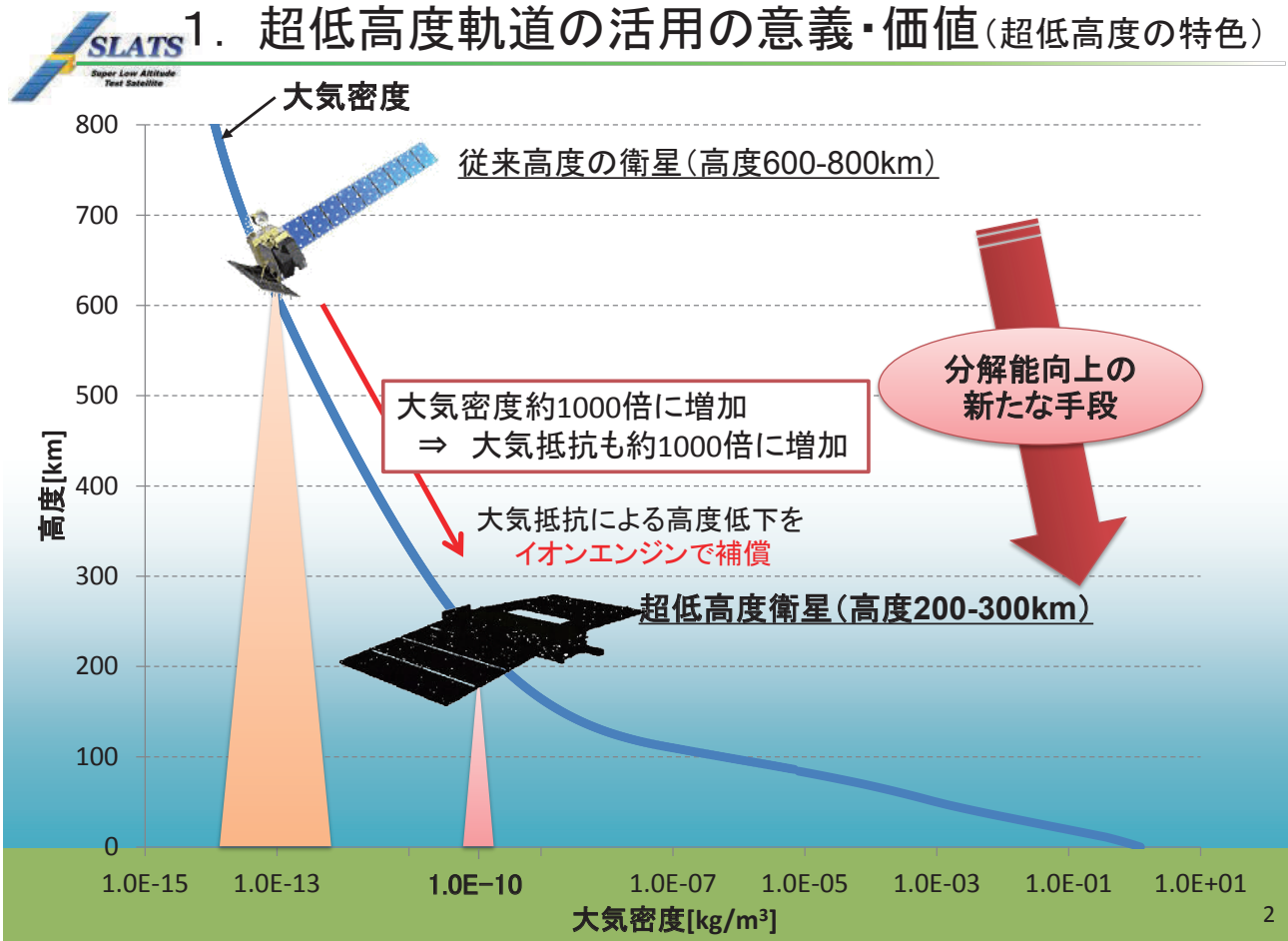
平成27年5月26日

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクトマネージャ
佐々木 雅範



講演内容

1. 超低高度軌道の活用の意義/価値
2. SLATS概要(目的、諸元、ミッション等)
3. SLATS成功基準
4. SLATS開発スケジュール
5. 将来の超低高度衛星への展望
6. まとめ





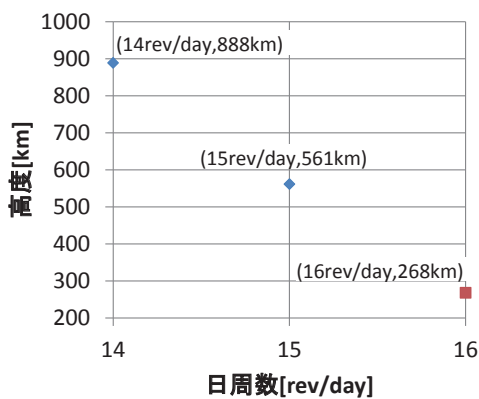
1. 超低高度軌道の活用の意義・価値

今までにない自由度をもつ衛星を実現 ⇒ 新たな衛星の使い道を拓く

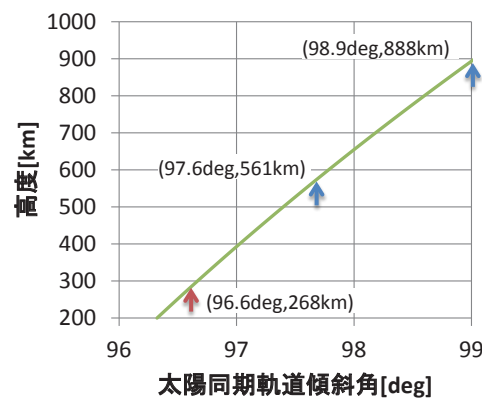
- これまでは、ミッション期間中は一つの固定された軌道で運用
- 超低高度衛星は、① 燃料効率(比推力)の高いイオンエンジンを搭載するため、
従来の衛星にはないフレキシブルな軌道変換を繰り返すことが可能。
- ② このため、低高度で太陽同期準回帰軌道と**完全回帰軌道**の併用運用を実現
例: 通常: 準回帰軌道(高度324km) ⇔ 緊急時: 完全回帰軌道(高度268km)



同一場所の高頻度/高解像度観測を実現



完全回帰軌道となる高度と日周数の関係



高度と太陽同期軌道傾斜角の関係

4

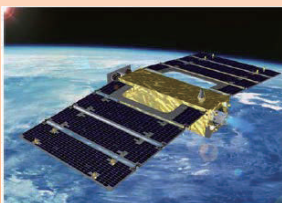


1. 超低高度軌道の活用の意義・価値

イオンエンジン技術

活用

超低高度衛星技術試験機
Super Low Altitude Test Satellite
(SLATS)



新たな軌道
開拓により、
衛星利用
の新たな可
能性を拓く

超低高度の
・飛行技術獲得
・環境データ取得
・リモセン衛星の
事前試験

科学的な意義

- ① 超低高度域の大気密度に関するデータ取得
- ② 原子状酸素の材料への影響に関するデータの取得

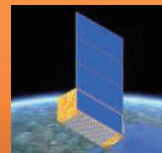
超低高度衛星の例

高分解能
光学



小型・低コストで
大幅な分解能向上
を実現

新しい周波数
によるSAR



Ku帯を利用して
高分解能
SARを実現

2次元風向・風速
LIDAR



世界初の2次元風
向・風速観測を実現

5



1. 超低高度軌道の活用の意義・価値

将来の超低高度衛星の実用化に向けた課題一覧

| No | 課題内容 | 対処案 |
|----|--|---|
| 1 | [軌道上大気密度の予測精度の課題] 大気密度の予測精度が十分ではなく、衛星の軌道制御や姿勢制御への影響が懸念される。(大気密度は軌道高度600km→250kmで約1000倍) | 飛行実証データにより、環境予測モデルの精度向上を図る。 ⇒ SLATSにより対応 |
| 2 | [実用ミッションへ適用する際の課題] ○ 実用ミッションでの長期運用を設定すると、下記の状況が発生し得る。 1) ミッション機器の大型化、消費電力の増加 2) 軌道保持用推薬が増大 ⇒ 衛星が大型化 3) より大推力のイオンエンジンや、それを駆動する大電力パネルが必要 ⇒ 再び2)へ ○ 軌道高度の低下により、地上局との通信時間が減少するため、データ伝送容量が減少する。(600km 10分程度 → 250km 4分程度) | ○ 超低高度に対応したシステム設計等の工夫。 高効率な太陽電池パネルやバス機器の小型・省電力化が必要。 ○ 搭載通信系の高速化や観測運用の制限等。 |
| 3 | [電気推進系の課題] 衛星の長期間運用や大型化に向け、イオンエンジンの長寿命化や大推力化が課題 | イオンエンジンのグリッド等の耐久性向上、大口径化、クラスタ化。 |
| 4 | [各観測ミッションに対応した技術課題] ○ 光学センサ: 画素サイズ縮小と視点速度の上昇による入射光量の減少。大気抵抗の増大や指向精度の悪化等。 ○ レーダセンサ: 大気抵抗の増大や指向精度の悪化。干渉SAR観測を行うために必要な軌道保持精度等。 | ○ S/N向上対策、指向精度及びMTFの向上対策、小型化、等 ○ アンテナ等の高密度実装。高効率太陽電池パネル、軌道保持精度の向上、等 |

6



2. SLATS概要(目的/主要諸元)

SLATSは超低高度軌道からの地球観測を実証することで、地球観測における新たな利用の可能性を拓くことを目的とし、下記のミッションを実施する。

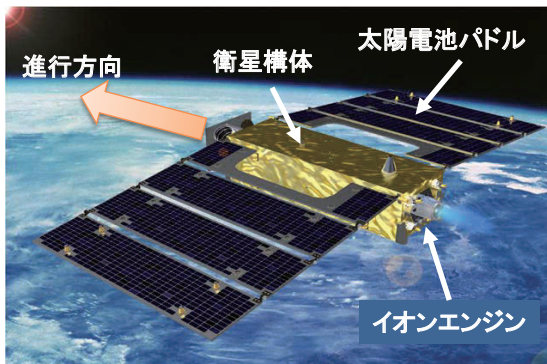
SLATSのミッション

- ① 超低高度衛星技術の実証**
超低高度域でのイオンエンジンによる軌道保持などの衛星運用を軌道上実証する。
- ② 大気密度・原子状酸素に関するデータの取得**
超低高度域での衛星の軌道や姿勢の変動データや原子状酸素(AO)のデータを取得し、大気密度モデルの精度向上や超低高度衛星に係る設計基準への反映を行う。
- ③ 小型高分解能光学センサによる撮像実験**
超低高度域にて衛星の軌道や姿勢と協調して撮像する実験を行う。

<SLATS主要諸元>

| 項目 | 仕様 |
|------------|---|
| 主要ミッションセンサ | (1) 小型高分解能光学センサ (SHIROP) (2) 原子状酸素モニタシステム (AMO) (a) AO計測センサ (AOFS) (b) 材料劣化モニタ (MDM) |
| サイズ | 2.5 (X) × 5.2 (Y) × 0.9 m (Z) (軌道上展開状態) |
| 質量 | 400 kg以下(暫定) |
| 発生電力 | 1140W以上(暫定) |
| 設計寿命 | 2年以上 |
| 運用軌道 | 軌道高度 268km~180km |
| 打上年度 | 平成28年度 |
| 打上ロケット | H-IIAロケットによる相乗り打上げ (主衛星: GCOM-C) |

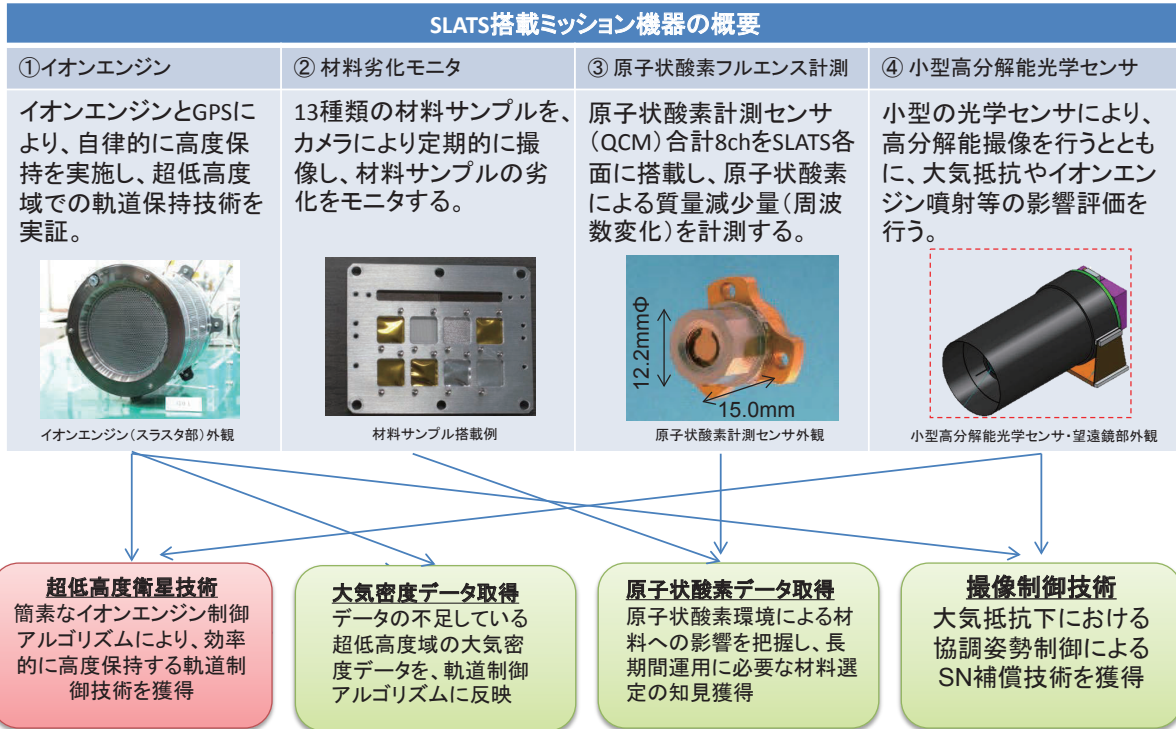
<SLATS外観図>



7



2. SLATS概要(搭載ミッション機器)



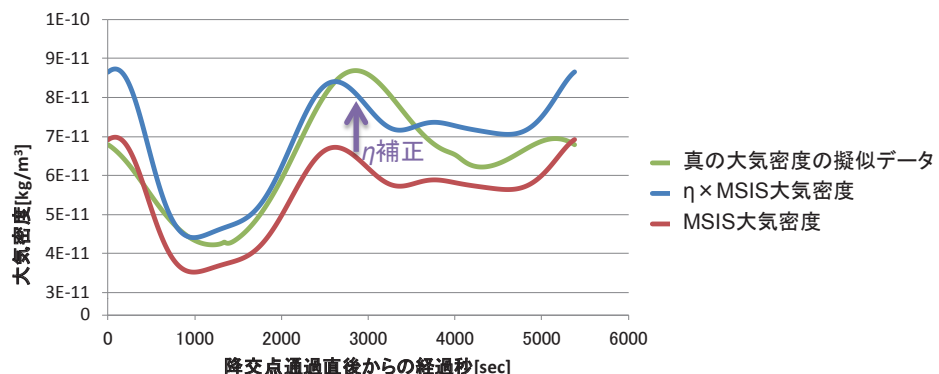
2. SLATS概要(参考:大気密度に関するデータ)

- SLATSは衛星リソース、開発コストの観点から高精度加速度計を搭載していない。
- SLATSの大気密度データは、高度履歴(GPS出力)および蓄積角運動量履歴(リアクションホイール出力)から算出する。
- 高度履歴(GPS出力、約10秒周期)から得るデータから次式で定義する「大気抗力補正係数 η 」を算出する。

$$D = \eta \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \rho v^2 C_D S}_{\text{モデル値}}$$

D : 大気抵抗[N]、 ρ : 大気モデル出力大気密度[kg/m³]、 η : 大気抗力補正係数[-]、 v : 軌道速度[m/s]、 C_D : 抗力係数[-]、 S : 参照面積[m²]

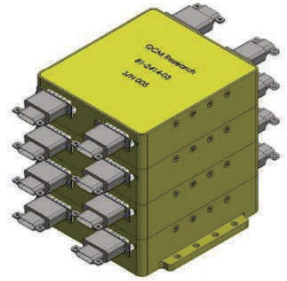
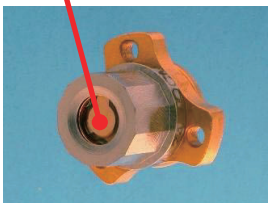
ここで、 η はSLATSで用いられている大気モデルNRLMSISE-00による大気抗力と実際の大気抗力のずれを表す値となる。





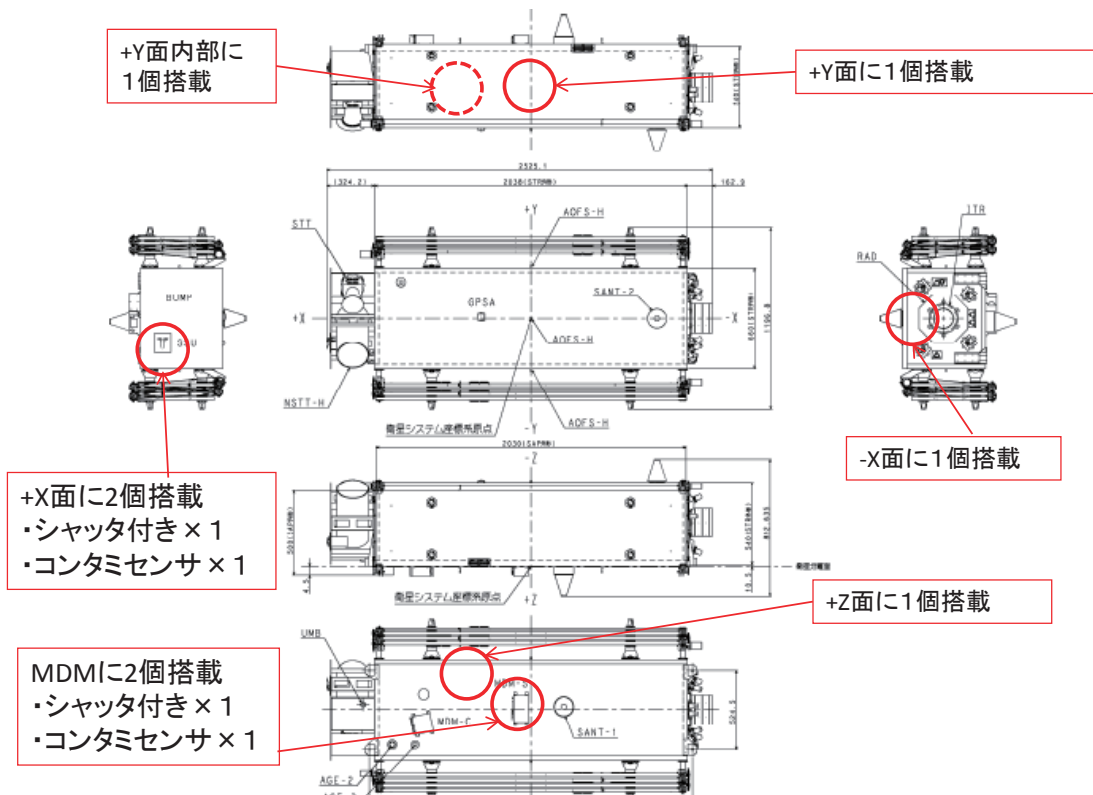
2. SLATS概要(原子状酸素フルエンス計測)

① AOFS(原子状酸素フルエンスセンサ)仕様

| コンポーネント | 諸元 | 外観 |
|------------------------|--|---|
| AOFSコントローラ (AOFS-CTRL) | 主要機能: (1)SLATS- SCUとのテレメトリ/コマンド送受信処理 (2)8個のMK24TQCMセンサのコントロール 外形: 143mm × 133mm × 138mm |  (コネクタソケットを含んだ図) |
| AOFSセンサヘッド (AOFS-H) | 構成: QCM Research社製MK24TQCM × 8個。 TQCM: 温度制御機能付き水晶微小天秤 主要機能: (1) ポリイミド膜により原子状酸素衝突フルエンスを計測(6個) (2) コンタミネーション計測(2個) (3) センサ面保温機能(75°Cに保温。最高80°Cまで可能) 外形: 12.2mmφ × 15.0mm ^H (コネクタピン除く) | AO計測用センサ面にポリイミド膜を付着させ、ポリイミドがAOIによってガス化することによる質量減少(周波数変化)を計測する  |



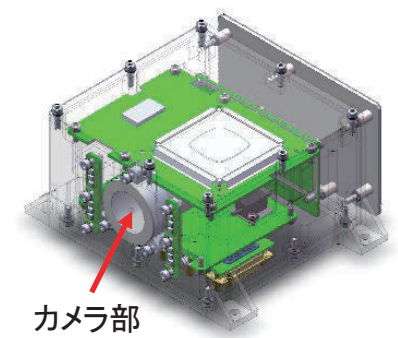
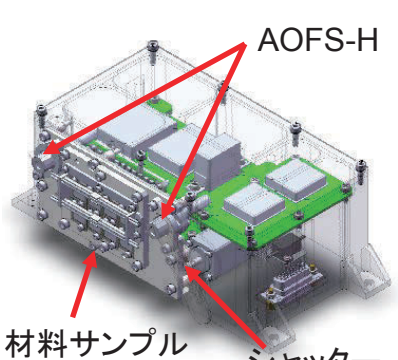
2. SLATS概要(原子状酸素フルエンス計測位置)





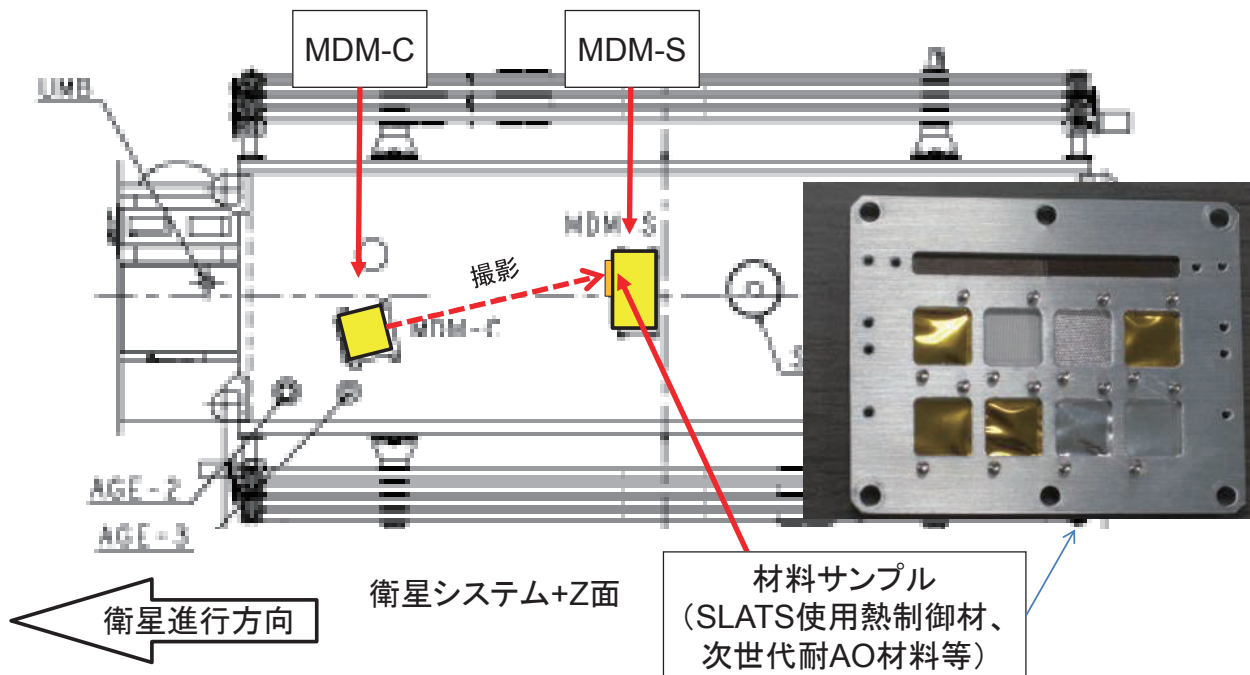
2. SLATS概要(材料劣化モニタ)

① MDM(材料劣化モニタ)仕様

| コンポーネント | 諸元 | 外観 |
|-----------------------------|--|---|
| 材料劣化モニタ カメラ部 (MDM-C) | 主要機能: (1)SLATS- SCUとのテレメトリ/コマンド送受信処理 (2) 材料サンプルの撮影、保存 (3) 材料サンプルへの前面光照明 画素数:30万画素 外形:154mm×118mm×73mm(突起含む) |  <p>カメラ部</p> |
| 材料劣化モニタ サンプル部 (MDM-S) | 主要機能: (1)材料サンプルの保持 (2)材料サンプルへの背面光照明 (3)AOFS-H搭載およびシャッター機能 (4)MDM各機器への電力分配 外形:209mm×120mm×73mm(突起含む) |  <p>AOFS-H 材料サンプル シャッター</p> |



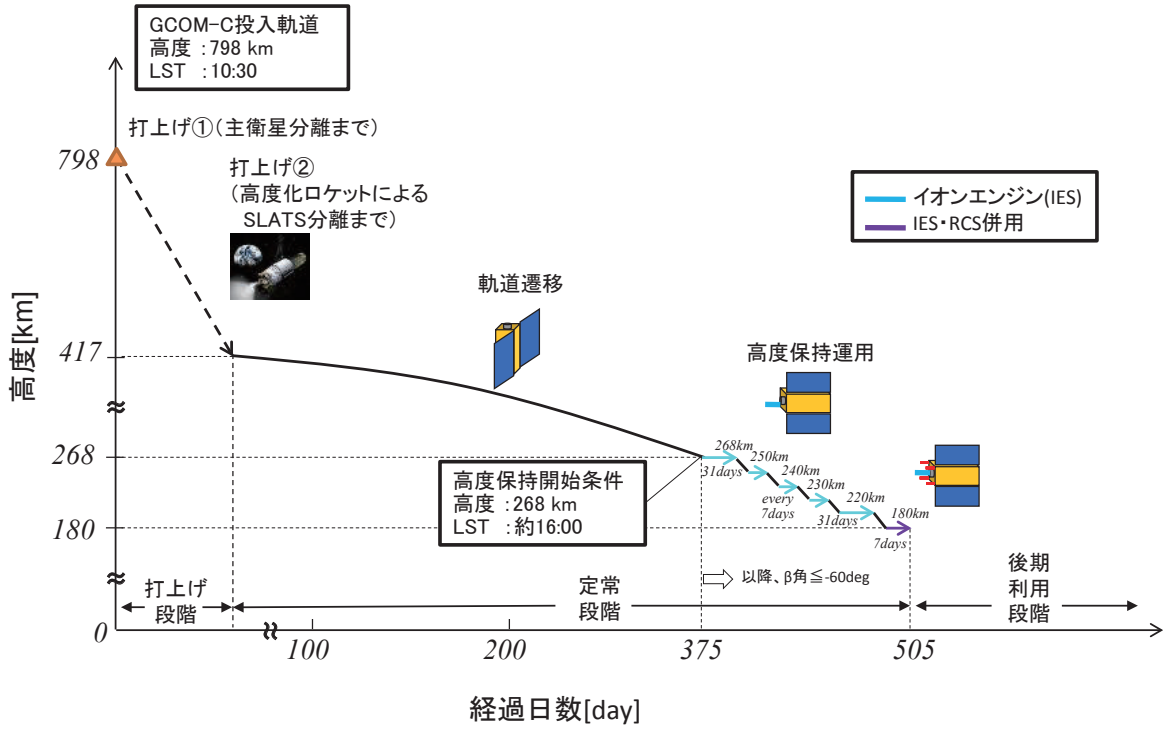
2. SLATS概要(材料劣化モニタ搭載位置)



- (1) MDMによりAOによる材料サンプルの劣化を分解能100 μ m以下の光学画像で把握することが可能。
- (2) MDMによるサンプル撮像は基本的には1週間に一度の頻度で行う予定である。



2. SLATS概要(運用軌道プロファイル暫定)



3. SLATS成功基準

| 目的 | 達成目標 | | |
|----------------------|--|---|---|
| | ミニマムサクセス*2 | フルサクセス*1 | エクストラサクセス*2 |
| 超低高度衛星技術の実証 | 超低高度軌道への投入が成功すること 【判断時期: 高度268km到達時点】 | ①高度*3220km(ノミナル)において、27日間以上、自律的に高度保持を実施し、高度保持精度 ± 1 km(1 σ)を満足すること ②異なる高度から光学センサにより撮影できること | 緊急高度上昇運用の有用性を示せること |
| 大気密度データの取得*4 | 高度268kmより高い高度において、大気密度に関するデータを取得できること 【判断時期: 高度268km到達時点】 | 高度268kmから180kmにおいて、90日間の大気密度に関するデータを取得できること | ①高度268kmから180kmにおいて、90日間を超えて大気密度に関するデータを取得できること ②高度180kmより低い高度において、大気密度に関するデータを取得できること |
| 原子状酸素データの取得*4 | 原子状酸素衝突フルエンスセンサが正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】 | 高度268kmから180kmにおいて、90日間の原子状酸素衝突フルエンス(F_{AO})を計測できること | ①高度268kmから180kmにおいて、90日間を超えて F_{AO} を計測できること ②高度180kmより低い高度において、 F_{AO} を計測できること |
| | 材料劣化モニタ機器の全機能が正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】 | 高度180km以上において、材料劣化状況を原子状酸素衝突フルエンスと共に取得できること | 原子状酸素による材料劣化について新たな知見が得られること |
| 小型高分解能光学センサによる高分解能撮像 | 小型高分解能光学センサが正常に動作し、撮像ができること 【判断時期: 高度268km到達時点】 | 衛星姿勢と協調制御による画質向上の効果や大気抵抗及びイオンエンジン噴射による画質への影響が評価できること | 超低高度軌道(高度268km以下)において、衛星姿勢との協調制御による画質向上の効果や大気抵抗及びイオンエンジン噴射による画質への影響を評価できること。 |

*1 : フルサクセスの達成判断時期は全て定常段階終了時とする。 *2 : ミニマム/エクストラサクセスは、項目ごとに達成判断をする。

*3 : 高度は「平均軌道長半径-赤道半径」の値とする。 *4 : ミッション期間中に取得できるデータを用い、環境モデルの評価解析を行う。



4. SLATS開発スケジュール

| | FY24 / FY25 | FY26 | FY27 | FY28 | FY29 | FY30 |
|---------------------|-------------|---------------------------|--------------------|---------|----------|------|
| マイルストーン | 研究 | 詳細設計 | △設計審査 (システムCDR) | △開発完了審査 | △定常移行確認会 | |
| 衛星システム開発 ミッション機器 | | バス機器製作・試験 ミッション機器製作・試験 | システム製作・試験 | 射場 | | |
| ロケット関連 | | 打上げ準備 | | | | |
| 地上システム・運用 | | 追跡管制設備の整備・運用準備 | | | 初期・定常運用 | 後期運用 |

16



5. 将来の超低高度衛星への展望

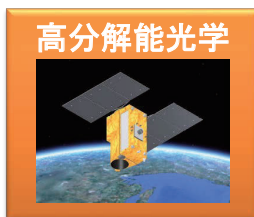
SLATSのミッション: 将来の超低高度衛星の実現に向けた試験機

- ① 超低高度衛星技術の実証**
超低高度域でのイオンエンジンによる軌道保持などの衛星運用を軌道上実証する。
- ② 大気密度・原子状酸素に関するデータの取得**
超低高度域での衛星の軌道や姿勢の変動データや原子状酸素(AO)のデータを取得し、大気密度モデルの精度向上や超低高度衛星に係る設計基準への反映を行う。
- ③ 小型高分解能光学センサによる撮像実験**
超低高度域にて衛星の軌道や姿勢と協調して撮像する実験を行う。

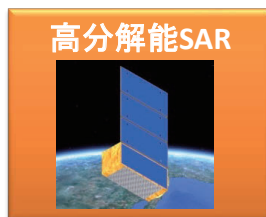


超低高度域のサイエンスや高分解能観測の成果を後継機に反映し、社会的課題の解決に貢献

将来の超低高度衛星の候補案



光学センサやSARを用いた高分解能観測により、特定地点を1日1回以上の高頻度かつ詳細な画像情報として、防災関連事業に提供。




LIDAR観測にて、風向・風速データを取得し、気象予測モデルの精度向上。

17

5. 将来の超低高度衛星への展望 光学衛星の例

- ① コンセプトの一例を以下に示す。既存光学系を採用し衛星開発費の圧縮を図り、更にイプシロンロケットに搭載可能な小型軽量システムに抑え、打上げ費の圧縮も図る(衛星開発費、打上げ費含め100億円以下目標)
- ② 更に、小型軽量システム及びイオンエンジンによる軌道自在性を活かして、H-IIAロケットによる複数機同時打上げにも対応する(打上げトータルコストの圧縮及び観測頻度向上)
- ③ 最下例は、一度に4機を打上げる計画であり、1機あたりの打上げコストはイプシロンロケット単独打上げを下回り、更にコンステレーションによる観測頻度向上により1日でほぼ全球任意地点の観測を可能とする。

● 超低高度光学観測衛星コンセプト例



| 項目 | 値 |
|---------|--------|
| 衛星質量 | 640kg |
| 高度(SSO) | 268km |
| 光学センサ | 口径62cm |
| 地表分解能 | 0.28cm |
| 観測幅 | 6.0km |
| 運用期間 | 5年 |
| 平均推力 | 10mN |

シングル
ローンチ
→
マルチ
ローンチ
↓

● 打上げ手段例①：イプシロンロケット

イプシロンロケット2号機型*
による単独打上げ

*小型科学衛星2号機ERG用、
打上げ能力：高度300km、
SSO、640kg




イプシロンロケット
包絡域収納図

Φ1.9m

● 打上げ手段例②：H-2Aロケット

H-2Aロケット
による4機同時打上げ*


*投入高度からの降下タイミングにより軌道面内位相を制御し、コンステレーションで全球観測



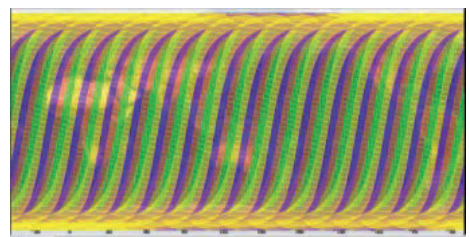
H-2Aロケット
4機包絡域収納図

Φ3.7m

●：衛星位置



高度268km
太陽同期完全帰帰軌道
位相90deg毎配置



1日分の光学可視範囲
(±45degポインティング、4機分)

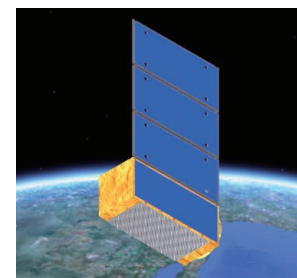
5. 将来の超低高度衛星への展望 SAR衛星の例

L/C/Xバンドに次ぐ新たな周波数帯として、広帯域が使用可能なKuバンドを利用した高分解能SAR観測を実現。
(地球観測を目的とした衛星搭載KuバンドSARは世界初)

超低高度SAR観測衛星とTerraSAR-Xの比較

| | 超低高度SAR観測衛星 | | TerraSAR-X |
|--------|---|---------|---|
| 軌道高度 | 300 km | 軌道高度の低下 | 515 km |
| 周波数 | 13 GHz(Ku-band) | 新たな周波数 | 9.65 GHz(X-band) |
| 帯域幅 | 500 MHz(最大) | 広帯域幅 | 300 MHz(最大) |
| アンテナ寸法 | 3.0 m(Az) × 1.5 m(EI) | | 4.8 m(Az) × 0.8 m(EI) |
| 地上分解能 | 0.6 m以内(Az) × 0.6 m以内(Rz) (Spotlight) 1.5 m以内(Az) × 1.0 m以内(Rg) (Stripmap) | 分解能の向上 | 2 m以内(Az) × 1 m以内(Rz) (Spotlight) 3 m以内(Az) × 3 m以内(Rg) (Stripmap) |
| 観測幅 | 6 km(Spotlight) 10 km以上(Stripmap) | | 10 km(Spotlight) 30 km以上(Stripmap) |
| NESZ | -23 dB以下 (Spotlight/Stripmap) | 同等の信号品質 | -23 dB(Spotlight) -22 dB以下(Stripmap) |
| 送信電力 | ピーク：2 kW 平均：300 W (送信Duty:15%) | | ピーク：2.26 kW 平均：407 W (送信Duty:18%) |

超低高度SAR観測衛星システム例



軌道上外観図

| 項目 | 諸元 |
|---------|---|
| 高度(SSO) | 300km |
| LST | 18時 |
| 地上分解能 | 1.5m(Az) × 1.0m(Rg) (Stripmap) 0.6m(Az) × 0.6m(Rg) (Spotlight) |
| 観測幅 | 10.0km(Rg) (Stripmap) 6.0km(Az) × 6.0km(Rg) (Spotlight) |
| SARセンサ | KuバンドSAR |
| イオンエンジン | 20mN級イオンエンジン × 2基 |
| 運用期間 | 5年 |
| 衛星質量 | 1000kg以下 |



5. 将来の超低高度衛星への展望 LIDAR衛星の例

ドップラライダーによる風向・風速観測については、従来の軌道高度からの観測とすると、大規模なレーザ送信電力が必要であり、実現が困難であったが、超低高度衛星にドップラライダーを搭載することで、**世界初の2次元高精度風向・風速観測ミッション**が実現可能となる。

■ 衛星による風向・風速観測の意義

A) 気象予報精度の向上

a. 台風予報精度向上

(台風はライフサイクルの大半において海洋上に存在しており、現在観測データが不足している)

b. メソ数値予報システムの精度向上

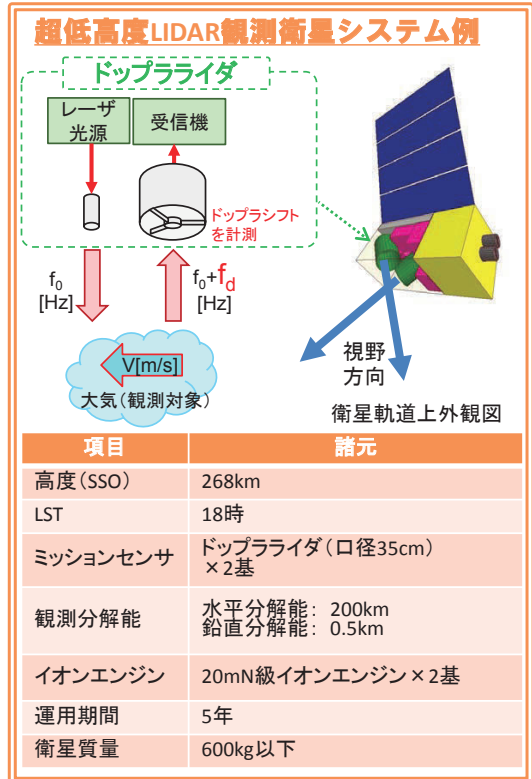
B) 気候変動予測分野への貢献

a. 熱帯気象モニタリング

温帯の中期予報にも大きなインパクトを及ぼす

b. 大気中の物質輸送の解明

越境汚染や炭素循環の推定精度を向上できる



20

5. 将来の超低高度衛星への展望

社会的・科学的課題の解決に向けた体制の全体像(案)



想定する社会的課題、科学的課題、技術的課題

超低高度衛星の貢献が期待できると考える課題と対応の例

1. 社会的課題

① 防災分野: 画像情報の把握、等

➢ 例: 超低高度から光学センサやSARを用いた高分解能観測をすることで、対象地点を高頻度(1日1回)かつ詳細な画像情報をユーザに提供することで貢献、等。

② 気象環境分野: 気象予報精度の向上、等

➢ 例: 超低高度からのLIDAR観測にて、風向・風速データを取得し、気象予測モデルに同化させることで、気象予測モデルの精度向上に貢献、等。

2. 科学的課題

① 高層大気サイエンス分野: 超低高度域の実測データを一定期間取得、等

➢ 例: 超低高度域の大気密度、プラズマ、磁気等の実測データが極めて少ないことが課題であり、大気密度等を一定期間にわたり実測することで高層大気サイエンス分野の科学的課題の解決に貢献、等。

3. 技術的課題

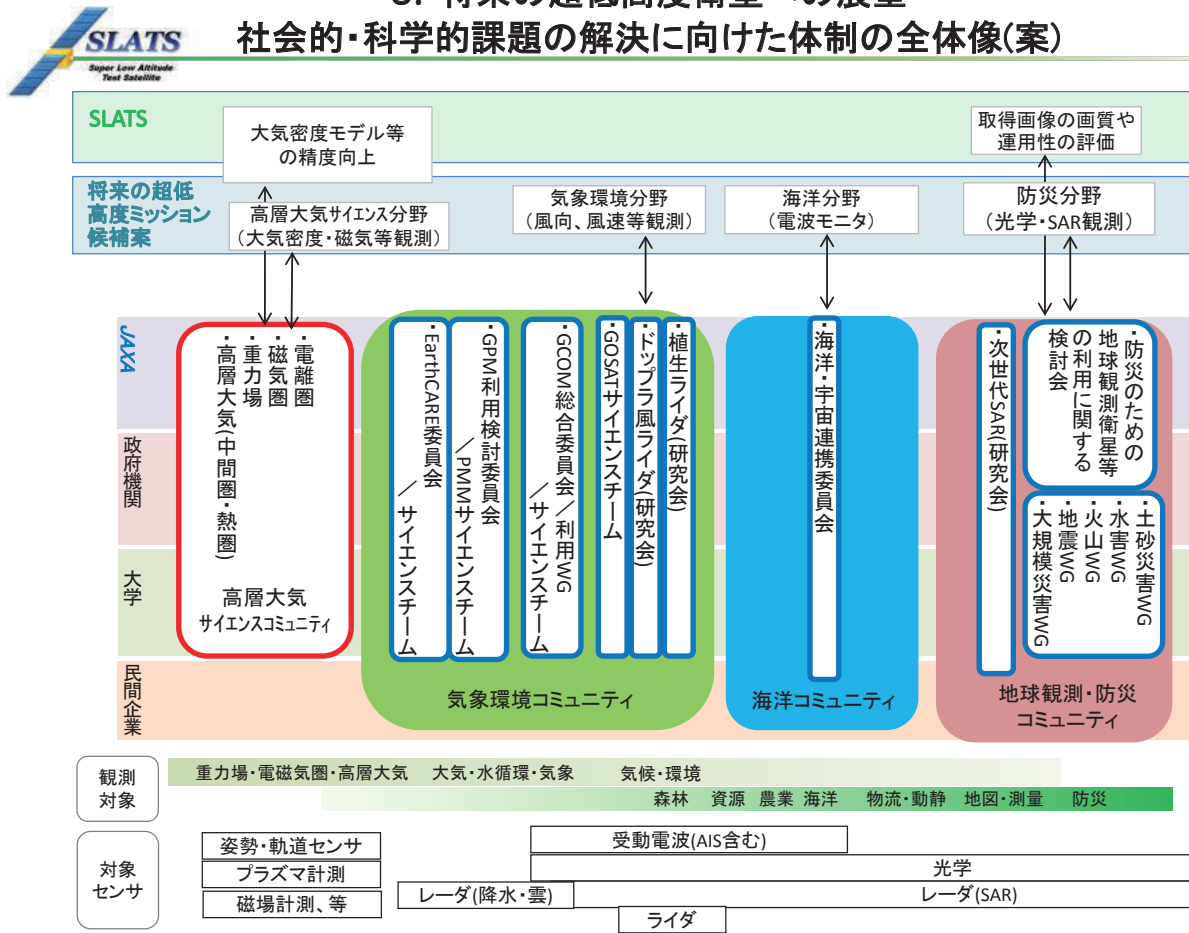
① 超低高度域における大気密度に関する日変化、時間変化の予測精度の向上

➢ 例: SLATS及びSLATS後継機の運用にて得られるデータに基づき精度向上を図り、衛星の姿勢・軌道制御精度の向上、長寿命化、低コスト化を実現し、超低高度衛星の利用拡大を図る。

21

5. 将来の超低高度衛星への展望

社会的・科学的課題の解決に向けた体制の全体像(案)



5. 将来の超低高度衛星への展望

コミュニティ活動のスケジュール案

| | FY27 | FY28 | FY29以降 |
|---------------------|--|-------|--|
| SLATS | ← 詳細設計 システム製造 | 試験 打上 | 運用、取得データ評価 |
| 高層大気サイエンス分野に関する体制構築 | △ 第1回 ワークショップ △ 第2回 大気密度モデルの精度向上研究 | | 成果反映 モデル精度向上に向けた研究継続 モデル精度向上に向けた研究継続、等 |

| | | | |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| 将来の超低高度衛星ミッション(想定) | | △ MDR(想定) | ← 概念設計 SDR(想定) 打上(想定) |
| 防災、気象環境、海洋の各分野に関する体制構築 | 既存コミュニティへの参加(随時) | 将来ミッション検討/ミッション要求検討(想定) | 開発仕様書△への助言等(想定) 解析等、開発への参画(参画形態は調整による) |
| 高層大気サイエンス分野に関する体制構築 | △ 第1回 ワークショップ △ 第2回 | 将来ミッション検討/ミッション要求検討(想定) | 開発仕様書△への助言等(想定) 解析アルゴリズム設計等(参画形態は調整による) |



6. まとめ

現在開発中の超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発計画と将来の超低高度衛星への展望についてご紹介をしました。

これまであまり人工衛星で利用されてこなかった超低高度域(200km～300km程度)を活用することにより、新しい人工衛星の利用が生まれ、防災・気象・環境等の数多くの分野において社会的課題の解決に貢献するものと考えております。

社会的課題の解決に橋渡ししていくには、科学的課題や技術的課題を抽出し、解決するための体制づくりが不可欠と捉えています。

JAXAとしても本体制づくりに参画・支援をしたいと考えており、また、さまざまな研究機関、大学等の研究者・技術者の方々の参画を大いに期待しております。

ご理解ご協力を賜りますようよろしくお願い申し上げます。



超低高度衛星の利用に向けた 意見交換

平成27年5月26日

超低高度衛星の利用に向けた
サイエンスワークショップ 事務局



事前アンケート

本ワークショップ開催に先立ち、以下の事前アンケートを実施した。

・アンケート項目

| No. | 質問事項 |
|-----|--|
| 質問1 | SLATSをご存知ですか？ |
| 質問2 | 将来の超低高度衛星ミッションの提案がありますか？ |
| 質問3 | 提案したい分野(複数可) ①高層大気 ②中層・下層大気 ③電離圏 ④磁気圏 ⑤重力場観測 ⑥その他 |
| 質問4 | 解決したい課題 |
| 質問5 | 質問4の課題の解決にはどのような観測が必要ですか？ |
| 質問6 | 希望する軌道上観測期間 |
| 質問7 | 希望する観測軌道高度(複数可) ※観測範囲がありましたらお書きください() |

・送付先

国内の大学および政府研究機関(計11機関、40名)の方々にご協力いただいた。

有効回答数:20



アンケート 集計状況(5/25時点)(1/3)

質問1: SLATSをご存知ですか？

| 超低高度軌道で運用されることを知っていた | 名前は知っていた | 今回初めて知った |
|----------------------|----------|----------|
| 17名 | 2名 | 1名 |

質問2: 将来の超低高度衛星ミッションの提案がありますか？

| 提案したい | 検討中 | 提案なし |
|-------|-----|------|
| 13名 | 5名 | 2名 |

質問3: 提案したい分野(複数回答可)

A. 中性大気 B. 電離圏 C. 磁気圏 D. 重力場 E. 工学

| A | A+B+C | C | D | E |
|----|-------|----|----|----|
| 3件 | 6件 | 2件 | 0件 | 3件 |

2



アンケート 集計状況(5/25時点)(2/3)

質問4: 解決したい課題

【順不同】

| 分野 | 解決したい課題 |
|-------------------------------|--|
| A. 中性大気 | <ul style="list-style-type: none"> 原子状酸素を中心とした中性大気のグローバル規模の変動解明 中間圏・熱圏下部大気の力学過程の解明 観測例のほとんどない高度100-250km領域での中性大気密度、組成、温度分布 Dissipation and breaking of atmospheric waves and their effect on the upper atmosphere |
| A. 中性大気 +B. 電離圏 +C. 磁気圏 | <ul style="list-style-type: none"> 大気・プラズマの相互作用の解明 熱圏の中性大気・電離大気のダイナミクス 極域電離圏におけるプラズマと中性大気の相互作用(電磁および力学エネルギーの消散過程等) 低緯度域の電離圏と中性大気の相互作用の解明 磁気圏・電離圏・熱圏結合系における大気・プラズマ・電磁場の相互作用過程・ジオスペースダイナミクス 磁気圏-電離圏相互作用(オーロラ等の粒子降込みに伴う電場配位と電流分布。特に電離圏電流) |
| C. 磁気圏 | <ul style="list-style-type: none"> 低高度(高度数百km)における磁場観測を用いた超高層現象および地球内部現象の解明 地球磁場の精密観測、沿磁力線電流分布の精密観測 |
| E. 工学、等 | <ul style="list-style-type: none"> 衛星そのものまたは電離圏プラズマとの相互作用により、観測や測器がどの程度影響を受けるのかに関する定量的知見の取得 原子状酸素以外の中性分子の宇宙機材料・システムへの影響評価 大気吸入型電気推進の実証 |

3



アンケート 集計状況(5/25時点)(3/3)

質問5: 質問4に関わる課題の解決に必要な観測手段

→第2回ワークショップで集計結果を説明

質問6: 希望する軌道上観測期間

| 1年未満 | 5年未満 | 5年以上 |
|------|------|------|
| 2名 | 8名 | 3名 |

質問7: 希望する観測軌道高度(複数回答可)

| 150km以下 | 150 - 180km | 180 - 220km | 200 - 268km | 268km以上 |
|---------|-------------|-------------|-------------|---------|
| 2 | 2 | 7 | 5 | 4 |

4



ご意見をいただきたい事項(1/2)

- (1) コミュニティの名称(案)について
 - ・「高層大気サイエンスコミュニティ」
- (2) コミュニティで行う活動の定義(案)について
 - ・SLATSの観測成果の最大化に向けた研究
 - ・将来の超低高度ミッションの提案
 - ・将来ミッションのミッション要求書の作成・維持
- (3) コミュニティのワーキンググループの分け方と各ワーキンググループの名称(案)について
 - ・中性大気、電離圏、磁気圏、重力場、工学、等
- (4) 各ワーキンググループのまとめ役について

5



ご意見をいただきたい事項 (2/2)

(5) 第2回ワークショップの進め方(案)

①「SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究」

- ・大気密度モデルの精度向上に向けた研究(案)
- ・原子状酸素モニタ成果に関わる研究(案)
- ・原子状酸素による材料劣化に関わる研究(案)

②「将来超低高度ミッションに関わる提案」

- ・高層大気における直接観測に関わる研究(案)
- ・直接観測技術に関わる研究(案)
- ・超低高度衛星が解決に貢献できる研究的課題についての研究(案)
- ・超低高度衛星が解決に貢献できる社会的課題の解決に向けた研究(案)、等
 例: 大気密度・大気組成等の計測
 ⇒地球規模の気候変動予測精度の向上

(6) その他、ご提案

- ・海外ミッションとの協力の可能性等

6



今後の予定

(1) 第2回ワークショップ開催予定について

開催時期: 2015年秋頃

※MTI研究会(9/14-15頃)のテーマとして開催することも検討中

講演依頼・研究提案募集: 2015年7月頃ご案内を予定

事務局連絡先: JAXA第一宇宙技術部門

SLATSプロジェクトチーム 川崎・星野

(2) 国内の関連学会への参加予定について

JAXAとしては、関連すると思われる国内の学会に出席し、SLATSの開発計画や将来の展望について講演を行うことを予定しております。講演等を希望される場合にはJAXA事務局までご相談ください。

(3) JAXAにおけるSLATSの技術審査の予定について

JAXAにおきましては、SLATS 総括詳細設計審査(CDR)を2015年11月頃に予定しております。コミュニティの研究者の方に外部審査員として審査を依頼することも検討しております。その際には、改めてご案内いたしますので、ご協力の程、よろしく願いいたします。

7



アンケートでの質問事項に対する回答(案)

- ① SLATSのJAXA計画上の位置付けは?
- ② 超低高度衛星のデータポリシーは?
- ③ 衛星やミッション機器の開発着手には何が必要か?



① SLATSのJAXAの計画上の位置付けは?

JAXAの中期計画※(平成27年3月31日変更認可)で以下のように追記されました。

※独立行政法人宇宙航空研究開発機構の中期目標を達成するための計画(中期計画)
平成25年4月1日～平成30年3月31日

I. 国民に対して提供するサービスその他の業務の質の向上に関する目標を達成するためにとるべき措置

1. 宇宙安全保障の確保

(2) 衛星リモートセンシング

我が国の安全保障体制の強化のため、衛星リモートセンシングの利活用に係る政府の検討を支援するとともに、その検討結果を踏まえ、リモートセンシング衛星の開発等を行う。

具体的には、データ中継技術衛星(DRTS)、陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)、**超低高度衛星技術試験機(SLATS)**、先進光学衛星に係る研究開発・運用を行うとともに、先進レーダ衛星、先進光学衛星の後継機をはじめとする今後必要となる衛星のための要素技術の研究開発等を行い、(中略)。

上記の衛星及びこれまでに運用した衛星により得られたデータについては、国内外の防災機関等のユーザへ提供する等その有効活用を図る。また、衛星データの利用拡大について、官民連携への取組みと衛星運用とを統合的に行うことにより効率化を図るとともに、衛星データ利用技術の研究開発や実証を行う。



②超低高度衛星のデータポリシーは？

• SLATSのデータポリシー

SLATSで取得したデータ(軌道運用データ、大気密度データ、材料劣化データ、撮像データ等)については、検証・評価のために、JAXAとの間で共同研究などの契約や協定を締結した場合には、必要に応じてデータを提供します(データそのものを外部公開することはできません)。

• 将来機のデータポリシー

データポリシーは、ALOS-2等のJAXA衛星と同様になります。

サイエンスチームが提案・研究開発したミッション機器のデータは、当該サイエンスチームで優先的に使えることになると考えます。



③衛星やミッション機器の開発着手には何が必要か？

一般論として、衛星開発は社会的課題等の解決に貢献することが認められ、費用対効果や機能・性能・スケジュール等の実現性が認められた後に研究・開発がスタートします。

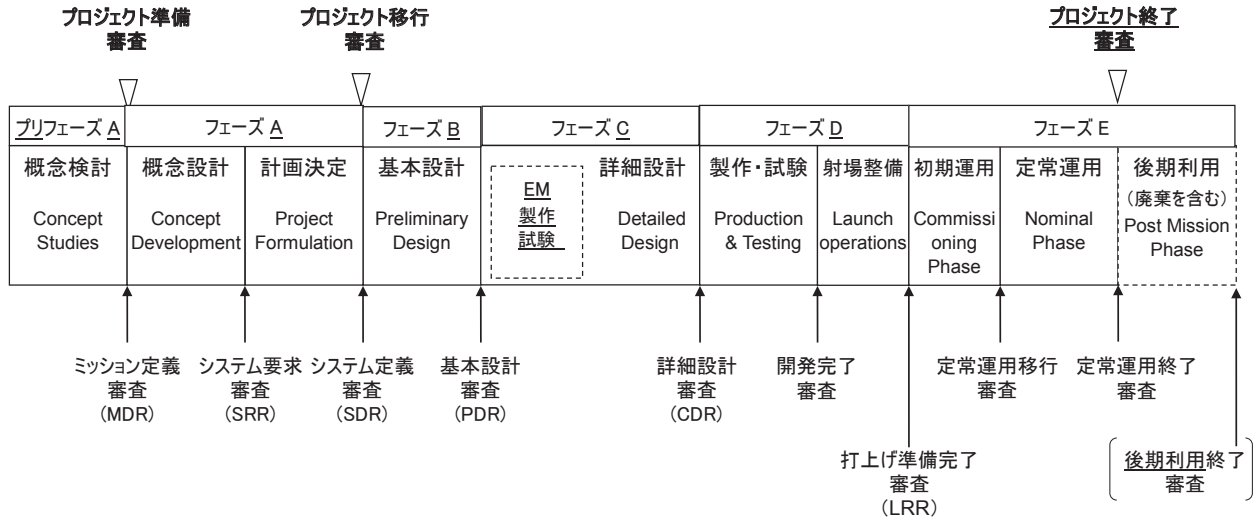
搭載ミッション機器については、当該衛星のミッションとして選定された場合は、衛星の研究開発着手と同時にスタートします。

また、開発が認められた衛星において、当該衛星のリソースの範囲で搭載でき、低コストの小型ミッション機器については、コミュニティの中での研究等を踏まえて、重要度・貢献度等に応じて優先順位付けされ、搭載機器として選定される運びになると考えます。



(参考)フェーズと審査の関係

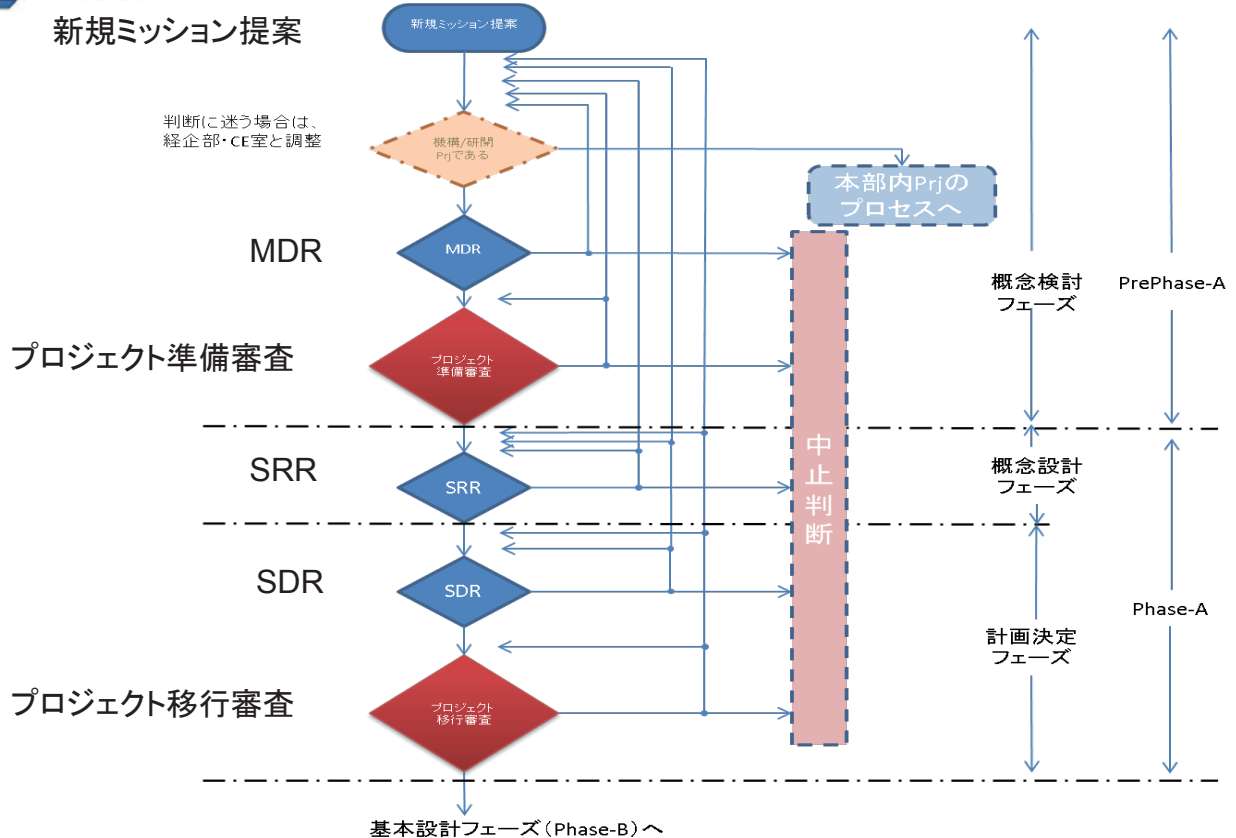
【フェーズと審査の関係(衛星プロジェクトの例)】



(注)計画変更については、必要に応じてプロジェクト計画変更審査を実施する。



(参考)プロジェクト初期段階の意思決定プロセス



第2回

2015(平成 27)年 9 月 2 日(水) 13-15 時

於: 情報通信研究機構 NICT 本館 4 階国際会議場

超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ

JAXA 超低高度衛星利用ワークショップ事務局

開催日時：平成 27 年 9 月 2 日(水) 13 : 00 ~15 : 00

開催場所：情報通信研究機構 小金井本部 本館 4 階 国際会議室

(MTI 研究集会場内)

議事次第

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| (1) 趣旨および経緯 | 13 : 00-13 : 10 |
| | 事務局 |
| (2) 基調講演：低高度衛星観測から期待される超高層大気研究の進展 | 13 : 10-13 : 35 |
| | 成蹊大学 藤原均 教授 |
| (3) アンケート結果および分析 | 13 : 30-13 : 45 |
| | 事務局 |
| (4) 社会的課題、科学的課題、技術的課題に対する進め方 | 13:45-14:45 |
| | 事務局 |
| (5) まとめ | 14:45-15:00 |
| | 事務局 |
| | 以上 |

超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ

開催の趣旨

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では人工衛星による新たな価値創生に向けた取り組みを行っており、その一環として、これまで人工衛星がほとんど利用してこなかった超低高度軌道（180km～300km程度）における観測を計画しています。

超低高度を利用する初号機として超低高度衛星技術試験機（SLATS）の開発を平成28年度の打上げに向けて進めています。SLATSにて軌道上実証を行い、その成果を後継機に継承するとともに新たな価値の創生に取り組んでいきます。

高度約100km～300kmの領域を地球大気最後のフロンティアとする考えもあり、研究者の方々から期待が寄せられています。超低高度衛星の利用による新たな価値の創生には、高層大気、熱圏、電離圏などの研究者により構成されるサイエンスコミュニティとJAXAとの関係構築が必要不可欠であると考えます。

これらを踏まえ、「第1回 超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ」を開催することといたしました。今回は前回のご意見を反映して「第2回 超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ」を開催いたします。

アンケートの結果に基づき、SLATSの成果の最大化や将来の超低高度ミッションの提案を行うコミュニティ体制の構築について説明および意見交換を行います。



SLA-M-150042



第2回 超低高度衛星の利用に向けた 超高層大気ワークショップ

01__要旨および経緯

平成27年9月2日

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクトチーム



ワークショップ開催の趣旨(1)

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では人工衛星による新たな価値創生に向けた取り組みを行っており、その一環として、これまで人工衛星がほとんど利用してこなかった超低高度軌道(180km~300km程度)における観測を計画しています。

超低高度を利用する初号機として超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発を平成28年度の打上げに向けて進めています。SLATSにて軌道上実証を行い、その成果を後継機に継承するとともに新たな価値の創生に取り組んでいきます。



ワークショップ開催の趣旨(2)

高度約100km～300kmの領域を地球大気最後のフロンティアとする考えもあり、研究者の方々から期待が寄せられています。超低高度衛星の利用による新たな価値の創生には、高層大気、熱圏、電離圏などの研究者により構成されるサイエンスコミュニティとJAXAとの関係構築が必要不可欠であると考えます。

これらを踏まえ、「第1回 超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ」を開催することといたしました。今回は前回のご意見を反映して「第2回 超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ」を開催いたします。

アンケートの結果に基づき、SLATSの成果の最大化や将来の超低高度ミッションの提案を行うコミュニティ体制の構築について説明および意見交換を行います。



これまでの活動(FY27)

| 月日 | 内容 |
|-------|---|
| 5月26日 | 「第1回 超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ」@幕張、SLATSの現状、観測ロケットの利用、将来ミッションへの提案にむけてのアンケートと意見交換を行った。 |
| 6月17日 | 災害対策技術講演会2015で「超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発と将来への展望」@小金井を講演した。 |
| 8月11日 | H27年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「低高度衛星磁場観測研究会」@京都にて磁場観測ミッションを利用した社会的課題に対する下記の貢献案について議論した。 |
| 9月2日 | 「第2回 超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ」 前回のアンケート結果、および進め方を議論 |
| 10月9日 | 「第59回宇宙科学連合講演会」@鹿児島 セッション26: SLATSの開発と超低高度衛星の将来利用 |





将来の超低高度衛星への展望 社会的・科学的課題の解決に向けた体制の全体像(案)

想定する社会的課題、科学的課題、技術的課題

超低高度衛星の貢献が期待できると考える課題と対応の例

1. 社会的課題

①防災分野: 画像情報の把握、等

- 例: 超低高度から光学センサやSARを用いた高分解能観測をすることで、対象地点を高頻度(1日1回)かつ詳細な画像情報をユーザに提供することで貢献、等。

②気象環境分野: 気象予報精度の向上、等

- 例: 超低高度からのLIDAR観測にて、風向・風速データを取得し、気象予測モデルに同化させることで、気象予測モデルの精度向上に貢献、等。

2. 科学的課題

①高層大気サイエンス分野: 超低高度域の実測データを一定期間取得、等

- 例: 超低高度域の大気密度、プラズマ、磁気等の実測データが極めて少ないことが課題であり、大気密度等を一定期間にわたり実測することで高層大気サイエンス分野の科学的課題の解決に貢献、等。

3. 技術的課題

①超低高度域における大気密度に関する日変化、時間変化の予測精度の向上

- 例: SLATS及びSLATS後継機の運用にて得られるデータに基づき精度向上を図り、衛星の姿勢・軌道制御精度の向上、長寿命化、低コスト化を実現し、超低高度衛星の利用拡大を図る。

4



第1回 超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ 実施報告

日時: 平成27年5月26日(火) 18:15-20:00 (JpGU連合大会期間)

場所: 幕張メッセ国際会議場101A会議室

参加者: 約30名

(1) ワークショップ趣旨説明

(2) JAXAにおける超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発計画と将来の展望について

JAXA/SLATS 佐々木プロマネ

(3) 観測ロケットの利用研究と超低高度衛星について

JAXA/ISAS 阿部 准教授

(4) 超低高度衛星の利用に向けた意見交換

(5) 今後の進め方



5

第1回のワークショップの サマリ



(1) コミュニティ名

超低高度衛星の利用に向けた超高層大気コミュニティ

* 対流圏を含めるため「高層大気サイエンスコミュニティ」とのご意見も頂いたが、対流圏についてはすでに社会的課題に対応したコミュニティ「ドップラーライダーによる宇宙からの風観測を考える検討会」があるため、「超高層大気」とさせていただいた。

(2) SLATSの成果利用に関わるご意見等

SLATSで取得される高層大気データだけでなく、材料劣化評価に使われる原子状酸素のデータの利用も含めたワーキンググループ(名称 SLATS WG)を作る方向で準備をする。

(3) 将来超低高度ミッションに関わるご意見等

- ① 超高層大気の直接観測はデータが少なく、センサを搭載することが可能になればとの期待が寄せられた。またミッションの選定、優先順位の決め方、自己資金の有効性などに高い関心があることが確認できた。
- ② その一方、WGは、多数にならないようにしてほしいとの要望も寄せられた。また、募集には広い範囲のコミュニティから意見を聞いてほしいとの意見も出された。WGとして、(a) 中間圏・熱圏・電離圏(MTI)WG、(b) 磁場WG、(c) 工学WG が考えられる。
- ③ 活動資金の母体をISAS(相模原)にするか、第一宇宙技術部門(筑波)にするかなどの課題が出された。



将来の超低高度衛星への展望 コミュニティ活動のスケジュール案

| | FY27 | FY28 | FY29以降 |
|--------------|--|------------|---|
| SLATS | ← 詳細設計 → | ← システム製造 → | ← 試験 → △ 打上 |
| 超高層大気サイエンス分野 | △ 第1回 △ 第2回 △ 第3回 ワークショップ ← 大気密度モデルの精度向上研究 → | | ← 運用、取得データ評価 → 成果反映 ↓ ← モデル精度向上に向けた研究継続 → ← モデル精度向上に向けた研究継続、等 → |

| | | | |
|--------------------|--|-----------------------------|--|
| 将来の超低高度衛星ミッション(想定) | | △ MDR(想定) | ← 概念設計 → △ SDR(想定) → △ 打上(想定) |
| 防災、気象環境、海洋の各分野 | ← 既存コミュニティへの参加(随時) → | ← 将来ミッション検討/ミッション要求検討(想定) → | ← 開発仕様書△への助言等(想定) → ← 解析等、開発への参画(参画形態は調整による) → |
| 超高層大気サイエンス分野 | △ 第1回(想定) △ 第2回 △ 第3回 ワークショップ | ← 将来ミッション検討/ミッション要求検討 → | ← 開発仕様書△への助言等(想定) → ← 解析アルゴリズム設計等(参画形態は調整による) → |

実線矢印: 計画済み

点線矢印: 想定



SLA-M-150043



第2回 超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ

02__アンケート結果および分析

平成27年9月2日

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクトチーム

アンケートについて



平成27年4月21日から5月26日までアンケートを行いました。26名の方から回答をいただきました。

| 質問 | 選択 | 結果 |
|----------------------------------|---|--------------------------------------|
| 質問1: SLATSをご存知ですか？ | ① 超低高度軌道で運用されることを知ってた ② 名前は知っていた ③ 今回初めて知った | ①2名 |
| 質問2: 将来の超低高度衛星ミッションの提案がありますか？ | ① 提案したい ②検討中 ③その他 | ①14名 ②5名 |
| 質問3: 提案したい分野(複数可) | ①高層大気 ②中層・下層大気 ③電離圏 ④磁気圏 ⑤重力場観測 ⑥その他 ※分野の詳細がありましたらお書きください | ①:3件 ①+②+③: 6件 ③:2件 |
| 質問4:解決したい課題 | — | 次ページ |
| 質問5:上記課題の解決にはどのような観測が必要ですか？ | — | 個別提案があるため提示しません |
| 質問6:希望する軌道上観測期間 | ①1ヶ月未満 ②6ヶ月未満 ③1年未満 ④5年未満 ⑤5年以上 | ③:2名 ④:8名、 ⑤:3名 |
| 質問7: 希望する観測軌道高度(複数可) | ①268km以上 ②268 km – 220 km ③220km – 180 km ④180 km – 150 km ⑤150km以下 | ①:5名 ②:6名 ③:8名 ④:3名 ⑤:4名 |



アンケート結果(1)

「解決したい課題」については16名の方から回答がありましたので分類整理を行いました。

| 回答者 | 解決したい課題 | 社会的課題 | 科学的課題 (SLATS) | 科学的課題 (将来) | 技術的課題 (SLATS) | 技術的課題 (SLATS + 将来機) |
|-----|---|-------|---------------|------------|---------------|---------------------|
| 1 | 低高度(高度数百km)における磁場観測を用いた超高層現象および地球内部現象の解明 | | | ○ | | |
| 2 | 大気重力波の消散過程と高層大気への影響 | | | ○ | | |
| 3 | 地球磁場の精密観測、沿磁力線電流分布の精密観測 | | | ○ | | |
| 4 | 原子状酸素を中心とした中性大気の地球規模の変動解明 | | ○ | ○ | ○ | |
| 5 | 大気・プラズマの相互作用の解明 中間圏・熱圏下部大気の力学過程の解明 | | | ○ | | |
| 6 | 衛星そのものまたは電離圏プラズマとの相互作用により、観測や測器がどの程度影響を受けるのかに関する定量的知見の取得 | | ○ | ○ | ○ | |
| 7 | 熱圏の中性大気・電離圏大気のダイナミクス | | ○ | ○ | | |
| 8 | 低緯度域の電離圏と中性大気の相互作用の解明(軌道傾斜角10-20度を希望、他の衛星課題との連携を考慮する) | | | ○ | | |
| 9 | ・原子状酸素以外の中性分子の宇宙機材料・システムへの影響評価 ・大気吸入型電気推進の実証 | | | ○ | ○ | ○ |
| 10 | 極域電離圏におけるプラズマと中性大気の相互作用(電磁および力学エネルギーの消散過程等)と磁気圏-電離圏相互作用(オーロラ等の粒子降込みに伴う電場配位と電流分布(特に電離圏電流)) | | | ○ | | |
| 11 | 観測例のほとんどない高度100-250km領域での中性大気密度、組成、温度分布 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 12 | 磁気圏・電離圏・熱圏結合系における大気・プラズマ・電磁場の相互作用過程・ジオスペースダイナミクス | | | ○ | | |
| 13 | 200km高度の電子密度直接計測、測位への影響 | | | ○ | | |
| 14 | 電離圏～磁気圏間のエネルギー物質の輸送 | | | ○ | | |
| 15 | 強磁場環境における衝突プラズマの振る舞い | | | ○ | | |
| 16 | 電離圏F領域下部における中性大気・プラズマ結合とその影響 | | | ○ | | |

2



アンケート結果(2)

アンケート結果を以下のように分類・分析しました。

| 分類 | アンケート回答件数 | 分析 |
|-------------------|-----------|--|
| 社会的課題(将来機) | 0 件 | 提案がなかった。社会的課題に関してはJAXA側から説明が必要と分析した。(今回、説明) |
| 科学的課題 (SLATS) | 4 件 | AO、中性大気に関するものだが、現状の評価に含まれているか確認が必要 |
| 科学的課題 (将来機) | 16 件 | 中性大気+電離圏+磁気圏の結合に関するミッションが最も多い |
| 技術的課題 (SLATS+将来機) | 4 件 | 180km以下のデータ取得の要望有。中性大気に関するもので評価が、将来の設計基準書につながるものがあるか分析が必要。 |
| 技術的課題 (将来機) | 2 件 | SLATSより低い高度180km以下での計測要望があり。工学提案が1件あり |



アンケートでの質問事項に対するJAXA回答

- ①JAXAの計画におけるSLATSの位置付けは?
- ②超低高度衛星に係るデータポリシーは?
- ③衛星やミッション機器の開発着手には何が必要か?
- ④サブミッション機器のリソースは?

4



③衛星やミッション機器の開発着手には何が必要か?

一般論として、衛星開発は社会的ないし、科学的課題等の解決に貢献することが認められ、費用対効果や機能・性能・スケジュール等の実現性が認められた後に研究・開発がスタートします。

搭載ミッション機器については、当該衛星の搭載ミッションとして選定されたとすると、衛星の研究開発着手以降にスタートします。

衛星のメインミッションに影響を与えない範囲で搭載可能なリソースの小さなミッション機器をサブミッションとして搭載することが可能な場合は、コミュニティの中での研究等を踏まえて、重要度・貢献度等に応じて優先順位付けされ、搭載機器として選定される運びになると考えます。(選定プロセスについては要検討)

5



④サブミッション機器のリソースは？

参考にサブミッションの例として、SLATSミッション機器のリソースを下記に示す。

| SLATS搭載ミッション機器の概要 | | | |
|-------------------|--|--|--|
| 名称 | 材料劣化モニタ | 原子状酸素フルエンス計測 | |
| 概要および外観 | 13種類の材料サンプルを、カメラにより定期的に撮像し、材料サンプルの劣化をモニタする。  <small>材料サンプル搭載例</small> | 原子状酸素計測センサ(QCM)合計8chをSLATS各面に搭載し、原子状酸素による質量減少量(周波数変化)を計測する。  <small>原子状酸素計測センサ外観</small> | |
| 重量 [kg] | 2.8 kg | 3.4 kg | |
| 最大消費電力 | 35 W | 44.8 W | |

6



アンケートのまとめ

- ・社会的課題に関する提案はなかった。
JAXA側から社会的課題に対する説明が必要で、次の03_「社会的課題、科学的課題、技術的課題の進め方」で、SLATSプロジェクトでの考え方を整理してみました。
- ・SLATSで取得されるデータを利用した研究提案があり、SLATS WGの中でどのような成果が出されるか、議論が必要
- ・将来機については、科学的課題の提案が多く、その中で中性大気+電離圏+磁気圏の結合に関するミッションが最も多かった。

これらのアンケート結果に基づいて、次の03_「社会的課題、科学的課題、技術的課題の進め方」について整理しました。

7



SLA-M-150044



第2回 超低高度衛星の利用に向けた超高層大気ワークショップ

03__社会的課題、科学的課題、技術的課題に対する進め方

平成27年9月2日

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクトチーム



目 次

1. 想定する社会的課題、科学的課題、技術的課題
2. SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究
(高層大気に関する課題)
3. 将来超低高度ミッションに関わる提案
4. 進め方



1.想定する社会的課題、科学的課題、技術的課題

超低高度衛星の貢献が期待できると考える課題と対応の例

1. 社会的課題

- ①防災分野： 画像情報の把握、等
 - 例：超低高度から光学センサやSARを用いた高分解能観測をすることで、対象地点を高頻度(1日1回)かつ詳細な画像情報をユーザに提供することで貢献、等。
- ②気象環境分野： 気象予報精度の向上、等
 - 例：超低高度からのLIDAR観測にて、風向・風速データを取得し、気象予測モデルに同化させることで、気象予測モデルの精度向上に貢献、等。

2. 科学的課題

- ①高層大気サイエンス分野： 超低高度域の実測データを一定期間取得、等
 - 例：超低高度域の大気密度、プラズマ、磁気等の実測データが極めて少ないことが課題であり、大気密度等を一定期間にわたり実測することで高層大気サイエンス分野の科学的課題の解決に貢献、等。

3. 技術的課題

- ①超低高度域における大気密度に関する日変化、時間変化の予測精度の向上
 - 例：SLATS及びSLATS後継機の運用にて得られるデータに基づき精度向上を図り、衛星の姿勢・軌道制御精度の向上、長寿命化、低コスト化を実現し、超低高度衛星の利用拡大を図る。

2



1.想定する社会的課題、科学的課題、技術的課題

SLATSおよび将来超低高度衛星からみた研究の分類 (高層大気に関する課題分類)

①「SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究」

衛星バス、ミッション機器が確定しており、SLATSが取得するデータを利用した研究を行う。このために共同研究の募集を行います。

⇒今回、該当する高層大気に関連するミッションについて説明します。

②「将来超低高度ミッションに関わる提案」

超低高度衛星の利用を最大化することを目標に、コミュニティからメインミッション、またはサブミッションの提案を募集したい。

* 8/31の阿部先生の講演で説明のありました理学委員会が定めるRG(リサーチグループ)で議論し提案していただくことも想定している。提案が社会的課題なのか、科学的課題なのかは、その中の議論の中で確認していきたい。

3



2. SLATS観測計画検討や 成果活用に向けた研究

4



2.SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究

参考に現状のSLATSの関連するサクセスクライテリアを下記に示します。

| 目的 | 達成目標 | | |
|-------------|--|--|---|
| | ミニマムサクセス | フルサクセス | エクストラサクセス |
| 大気密度データの取得 | 高度250kmより高い高度において、大気密度に関するデータを取得できること 【判断時期: 高度250km到達時点】 | 高度250kmから180kmにおいて、90日間の大気密度に関するデータを取得できること | ① 高度250kmから180kmにおいて、90日間を超えて大気密度に関するデータを取得できること ② 高度180kmより低い高度において、大気密度に関するデータを取得できること |
| 原子状酸素データの取得 | 原子状酸素衝突フルエンスセンサが正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】 | 高度250kmから180kmにおいて、90日間の原子状酸素衝突フルエンス(F_{AO})を計測できること | ① 高度250kmから180kmにおいて、90日間を超えて F_{AO} を計測できること ② 高度180kmより低い高度において、 F_{AO} を計測できること |
| | 材料劣化モニタ機器の全機能が正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】 | 高度180km以上において、材料劣化状況を原子状酸素衝突フルエンスと共に取得できること | 原子状酸素による材料劣化について新たな知見が得られること |

5



2.SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究

SLATSのミッションで高層大気に関わる「原子状酸素に関するデータの取得」について説明します。

目的: 原子状酸素(Atomic Oxygen : AO) は高層大気中の酸素分子が太陽からの紫外線により分解され、酸素原子となったもので、衛星高度が低いほど高濃度になる傾向がある。衛星に使用する材料(最外層の熱制御材料)は、原子状酸素(Atomic Oxygen : AO)による影響を強く受けることで損傷し、衛星熱設計に影響する。超低高度軌道で運用する衛星を開発するためには、この軌道のAO環境や、材料が受ける影響を把握し、将来の超低高度衛星の設計に反映する。

ミッションセンサの構成は下記のとおりです。

①原子状酸素フルエンスセンサ(Atomic Oxygen Fluence Sensor : AOFS)

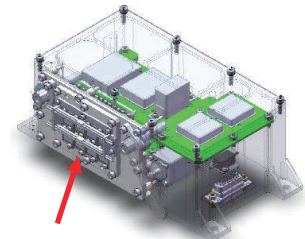
→SLATSが運用される軌道のAO環境の計測



AOFSセンサ-外観

②材料劣化モニタ(Material Degradation Monitor : MDM)

→AOによる材料劣化を軌道上で確認



材料サンプル

研究体制

研究開発部門 第一研究ユニット*の取りまとめとした
衛星システムメカ、大学などから構成される委員会

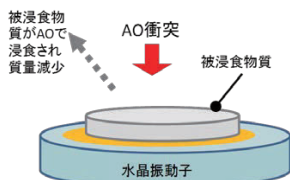
* 担当: 木本雄吾、宮崎英治、土屋佑太



2.SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究

原子状酸素フルエンスセンサAOFSの動作原理

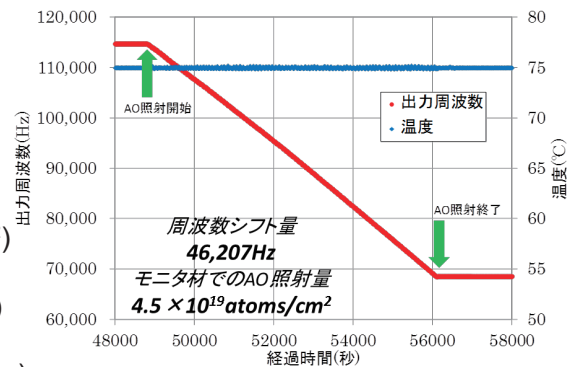
- QCM電極面にポリイミド膜を形成させ、これにAOを照射すると、表面のポリイミド膜はAOとの反応によりガス化し質量が減少する。このことを応用してAO衝突量の計測が可能となる。ポリイミドに対して酸素原子1個が衝突した際の浸食量は「反応効率($3 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$)」としてデータが有るため、QCMで計測された質量変化から、次式によりポリイミド膜が被曝したAOフルエンスを計算する。



$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot E_y}$$



- F : AOフルエンス(atoms/cm²)
- Δm : 質量減少量(g)
- A : 曝露される膜の面積(cm²)
- ρ : 材料の密度(g/cm³)
- E_y : 材料の反応効率(cm³/atom)



結果: AO照射により、想定通りの直線的な周波数変化を確認した。このケースでは、感度係数が $9.74 \times 10^{14} [\text{atoms}/\text{cm}^2/\text{Hz}]$ であり期待通りのセンサ性能を有していることを確認。

* 高度220kmでAO濃度(平均値) $3.06 \times 10^{15} [\text{atoms}/\text{m}^3]$ だが、センサ単体では有効数字2ケタ以上の性能を有する。ただしAO抑制用のシャッタ運用(軌道上で1/100以下にAO暴露を抑える)などの誤差などを考慮する必要がある。計画では1日の平均値AOフルエンスを求める。

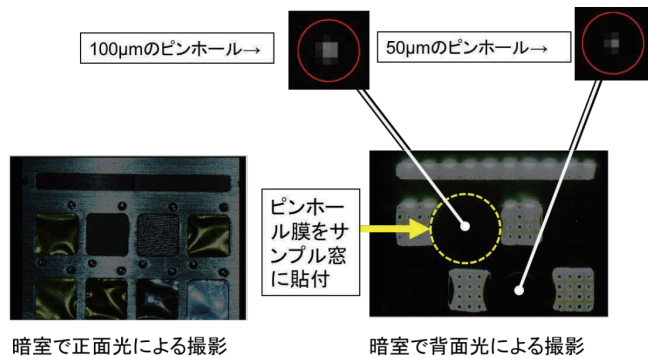
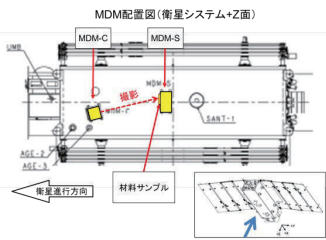


2.SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究

(1) 材料劣化モニタ(MDM)の概要

- 衛星に使用する材料がAOIによってどのように劣化していくのか、画像観測によって定性的にモニタリングするシステムである
- 十種類程度の材料試料片を衛星の進行方向を向いた面に並べ、これをCCDカメラで定期的に撮影する。
- 搭載照明を用いることで、安定した照明条件により行う。

- 評価材料は10種類+モニタ材
 熱制御フィルム(断熱)5種類
 熱制御フィルム(放熱)3種類
 配線材 2種類



16

8



2.SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究

大気密度モデルの精度向上に向けた研究 現在の取り組みの紹介

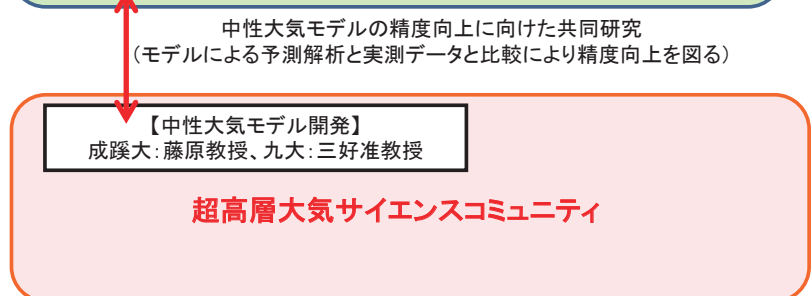
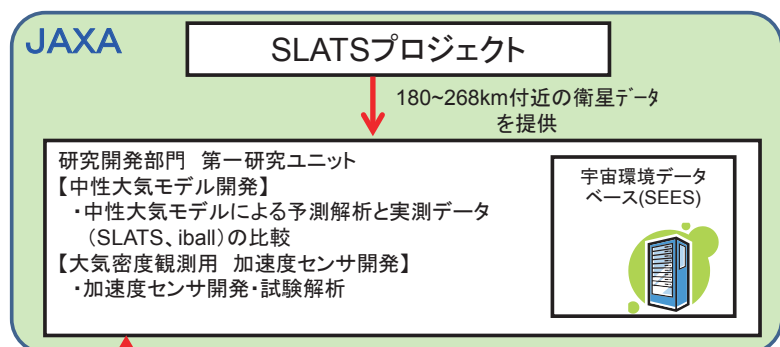
SLATSのGPSの高度変化情報から、大気密度を算出します。

MSISなどとの比較のほか、JAXA 研究開発部門で行っている中性大気モデルとの比較を予定しており、宇宙環境データベース(SEED)を構築しており、SLATSの大気データの登録を検討中(原則非公開)。

今後は、将来超低高度衛星の設計基準文書を制定する活動に携ってきたい。



独DLR CHAMP衛星データ(450km付近)を用いた精度向上



現状: 技術的課題のためのデータ取得 → 社会的課題に対応できないか検討をしたい。

9



2.SLATS観測計画検討や成果活用に向けた研究

・社会的課題に貢献例 大気密度モデルの精度向上に向けた研究(案)

地球規模の気候変動予測精度の向上

アウトカム

・人間活動の影響を受けにくい高層大気の観測および数値シミュレーションにより、地球温暖化の動向を正確に把握する。 →環境問題解決への貢献

手段:

- ① 超低高度衛星による中性大気密度・大気組成等の計測
電離圏温度の直接計測
- ② 高層大気モデルの高精度化

【確認したいこと】

- ・SLATSのデータで本課題の解決に貢献できるでしょうか？
- ・本研究に参画されたい研究者はおりますでしょうか？
- ・環境省や環境研究所は本課題で、あまり見ませんがなぜでしょうか？今後、参画する可能性はありますでしょうか？

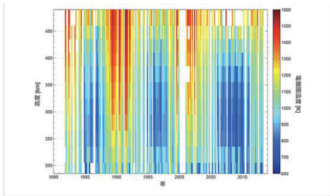


図2: SLATSデータから得られた電離圏温度(1985-2010年)の高度100km-300kmの電離圏温度変動の長期的な変動。電離圏温度(高度100-300km)の変動は、電離圏温度変動の長期的な変動を示している。電離圏温度変動の長期的な変動を示している。電離圏温度変動の長期的な変動を示している。

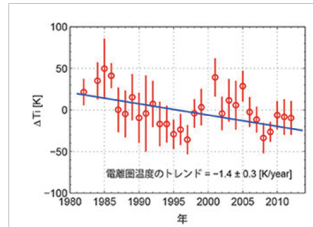


図3: 高度320kmの電離圏温度の長期トレンド。ΔTは、電離圏温度から太陽活動の影響を除いたもの。1年間あたり1.4度の割合で温度の低下が起きている。

* 中層・超高層大気では、二酸化炭素の増大に伴う赤外放射冷却の増加のため、地表とは逆に寒冷化が起きると考えられている。また、中層・超高層大気は大気密度が小さいため、下層大気に比べて気候変動の影響が顕著に表れる。(極地研ホームページより)

極地研HPより

191



3. 将来超低高度ミッションに関わる提案



3.将来超低高度ミッションに関わる提案

将来ミッションの提案については、宇宙理学委員会のRG(Research Group)で提案するミッションについて議論を行い深掘り下げていく。

将来超低高度衛星に搭載を望む場合

- ・ 将来超低高度衛星の成果最大化に貢献できること。
- ・ 科学的価値があること
(社会的課題または科学的課題が設定されていること)
- ・ 海外における研究に対する優位性があること。
- ・ 実験の位置付け・内容・必要性が明確であること。
- ・ 実施体制が妥当であり、十分な研究業績を有すること。
- ・ 成功基準、コストの検討を行うこと。
- ・ 搭載にあたっての技術課題やプログラム対し、今後の検討で解決が見込まれること

を提案者側でも整理する必要があります。

以下に、ISAS のRWの流れおよび社会的課題解決型の体制例を示します。



3.将来超低高度ミッションに関わる提案

科学的課題の体制構築にむけての流れ

宇宙理学委員会認可のRG(Research Group)を立ち上げ、ミッションの創出を目指す。次にWG(Working Group)の設立提案を理学委員会に申請し審査を受ける。

皆さんに期待すること

- ・ まずはサイエンスの議論をしっかり行ってほしい
- ・ 特に若い研究者の参加を歓迎
- ・ 宇宙科学研究所にリサーチグループ(RG)を作ってはどうか

WGは、明確な科学目的の達成を掲げて、飛翔体を用いた宇宙ミッションを提案・検討し、その実現を目指す研究者グループとその活動を指す。

WGの手前の組織として、RGが設けられている。RGは宇宙理学ミッションの創出を目指し、WGの前段階に当たる作業を行うことを目的としている。

August 31, 2015

MTI研究集会

21

MTI研究集会 2015.8.31

ISAS 阿部先生講演より

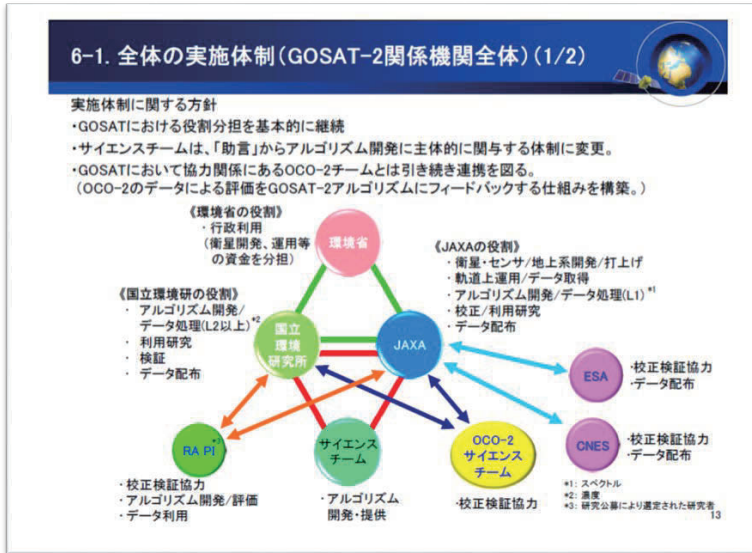
アンケートより、複数の研究グループなど多数作らないでほしいというコメントを踏まえ、リサーチグループの中で、ミッションを検討し、科学的課題なのか社会的課題なのか、議論を進めていくのが良いのかと考えます。

* 前回のアンケートでは、課題は、科学的課題がほとんどでした。現時点では、社会的課題に関してWGを作るのは厳しいとみており、その前段階の活動が必要と考えております。



3. 将来超低高度ミッションに関わる提案

社会的課題に対する体制の例



* サイエンスチームのほか、JAXA、JAXA外部機関で構成されている。アウトプットとして行政利用も盛り込まれている。さらにJAXA外での資金分担が行われている。

文部科学省HP:「GOSAT-2 プロジェクト移行審査の結果について」より抜粋



将来の超低高度衛星への展望 コミュニティ活動のスケジュール案

| | FY27 | FY28 | FY29以降 |
|--------------|--|-------------|--|
| SLATS | ←→ 詳細設計 システム製造 | →△ 試験 打上 | ← 運用、取得データ評価 |
| 超高層大気サイエンス分野 | △ 第1回 △ 第2回 △ 第3回 ワークショップ 大気密度モデルの精度向上研究 | | 成果反映 モデル精度向上に向けた研究継続 モデル精度向上に向けた研究継続、等 |

| | | | |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| 将来の超低高度衛星ミッション(想定) | | △ MDR(想定) | ←△ 概念設計 SDR(想定) 打上(想定) |
| 防災、気象環境、海洋の各分野 | ←既存コミュニティへの参加(随時) | ←将来ミッション検討/ミッション要求検討(想定) | ←開発仕様書△への助言等(想定) 解析等、開発への参画(参画形態は調整による) |
| 超高層大気サイエンス分野 | △ 第1回(想定) △ 第2回 ワークショップ | ←△ 将来ミッション検討/ミッション要求検討 | ←開発仕様書△への助言等(想定) 解析アルゴリズム設計等(参画形態は調整による) |

実線矢印: 計画済み
点線矢印: 想定

↑ 第3回のワークショップで各課題の状況を報告していただきたい。将来超低高度衛星のミッションの検討は、議論を深めてからミッション提案をまとめていきたい。



3.将来超低高度ミッションに関わる提案 今後の予定

スケジュールについて

平成28年1月末から3月の間に第3回ワークショップを開催の予定です。RWでの超低高度衛星に関する活動内容や、ミッションのご提案について、ご発表いただくことを考えておりますが。いかがでしょうか。

第3回ワークショップでは、別途検討をすすめている社会的課題についての検討結果についても報告する予定です。ご参加ほどよろしくご願ひいたします。

場所および開催時期の詳細については、年内に連絡をする予定です。

RWでの検討結果を踏まえ、中間圏、熱圏、電離圏(MTI)分野、磁気圏分野、工学分野の各1件以上のご提案お願いできたらと考えます。

16



ご質疑お願いいたします。

17



参考資料



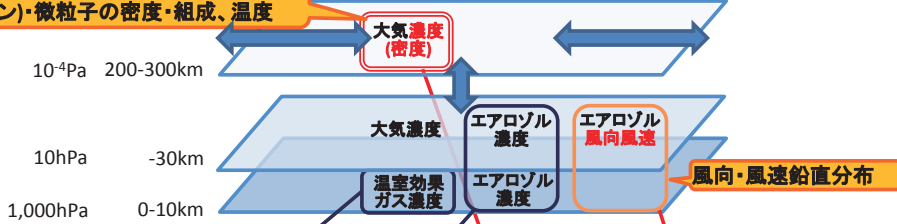
3. 将来超低高度ミッションに関わる提案 超高層大気観測による社会貢献(アウトカム)案

【例】地球規模の気候変動予測精度の向上 ⇒ 大気環境の改善・局所変化予報

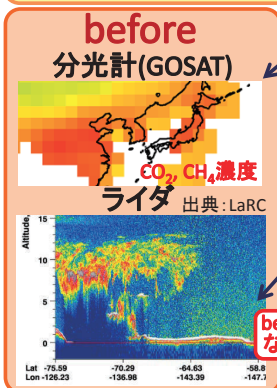
アメダスで計測している基本的な気象要素

温度 気圧 風向風速

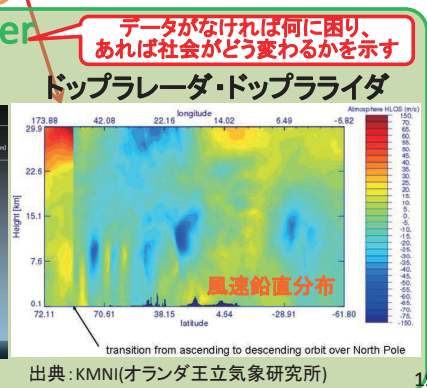
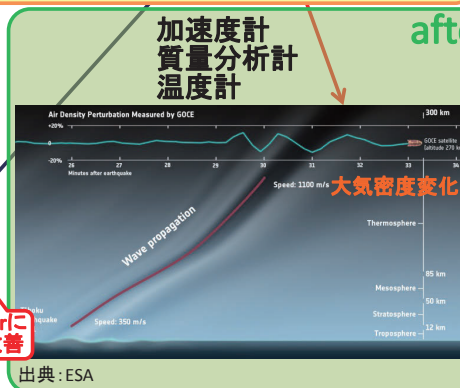
大気密度が小さく、対流圏からの変動を顕著に検出 ⇒ 大気(分子・イオン)・微粒子の密度・組成、温度
大気分子(nm) エアロゾル(μm) 大気中微粒子(エアロゾル・PM2.5など)・雲



- 地上観測・高層観測では行えない海上を含む、地上観測を補間する衛星観測
- ① 大気濃度(密度、気圧)、温度変化を顕著に観測
 - ② 曇天域に加え晴天域でも(全天候型)風向風速高度分布(上昇下降流)を観測
- 大気環境継続モニタ⇒改善措置へ局所変化予報の質の改善



before⇒afterになるよう要改善





3.将来超低高度ミッションに関わる提案 将来ミッションでの社会的課題と科学的課題との関係

社会的貢献、科学的課題のJAXA内の分担イメージを下記に示します。

↓ 現状、明確な区切りはない。

| 社会的課題 | 科学的課題 |
|-------------------------------|-----------|
| JAXA 第一宇宙技術部門 (衛星利用運用センター) | JAXA ISAS |
| 技術的課題解決 (共通) | |

JAXA 第一宇宙技術部門で
将来機の開発を行うケース

JAXA ISASで
将来機の開発を行うケース



社会的課題に最適化されたバス開発となる。
科学的課題ミッションについての搭載については
JAXA内での調整も必要(今までに例がないため)

科学的課題に最適化されたバス開発ができる。

* イメージですので状況により変わる可能性があります。



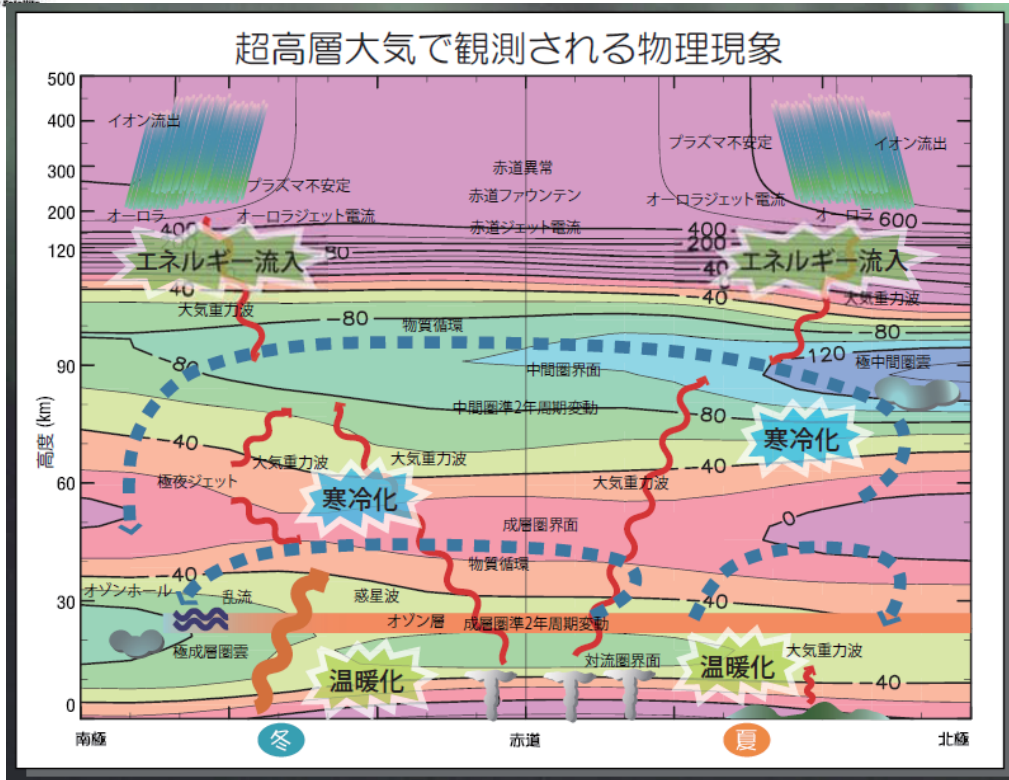
Research GroupとWorking Group

- WGの手前の組織として、RGを設ける。RGは宇宙理学ミッションの創出を目指し、WGの前段階に当たる作業を行うことを目的とする。具体的には、以下の項目のすべてもしくは一部を行う。
 - 現状での技術レベルや国際的な研究の動向を踏まえた上で、宇宙理学ミッションの科学目的を精査し、絞り込むこと。
 - ミッションの鍵となる要素技術の開発研究を組織化し加速すること。TRL1(基本原理の実証)およびTRL2(実用に向けた概念検討)を達成することを目安とする。
 - 宇宙理学ミッションの規模、形態、打ち上げ手段、システム要件、時期などを検討し、絞り込むこと。
 - その他、WGの設立提案に先立ち、必要とされる検討を行うこと。
- 各RGは、1名の代表者と複数名の共同研究者から構成され、いずれも宇宙理学班員であることを必要とする。
- 設立を希望するRG代表者は、宇宙理学委員会に申請し、別に定める手続きで宇宙理学委員会の審査を受け、認可されることを必要とする。
- RGは3年の時限とするが、延長を申請し審査に合格すれば再度、3年の活動ができる。延長申請およびRG終了の手続きは別に定める。
- RGは、年度ごとに旅費を申請できるが、戦略開発研究費に応募する資格は有しない。またRGはプロジェクト提案を行う資格をもたない(小規模プロジェクトCカテゴリーを除く)。
- RGは年度ごとに、活動報告を行う義務を有する。報告が無いRGや活動内容が不適切なRGは、宇宙理学委員会の議を経て、終了となる場合がある。これらの詳細は別に定める。
- RGが自動的にWGに昇格することは無い。また準備段階としてRGを経ることは、WG設立の条件とはしない。
- RGからWGに進むには、いったんRGを終了した上で、WGの設立提案を行い、宇宙理学委員会にて審査を受けることを必要とする。

(理学委員会 WG・RGの定義文書から)



参考: 高層大気



IUGONET HPより
http://www.iugonet.org/doc/iugonet2011_A4.pdf



「将来の超低高度ミッションの提案」

【確認したいこと】

GOCE やCHAMPでは、大気密度データが公開されていますが、十分でないところは何か？

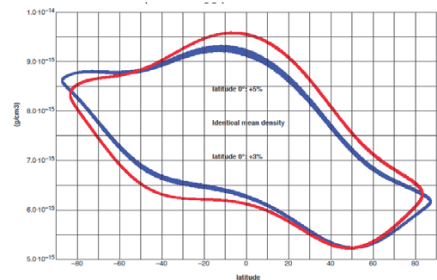
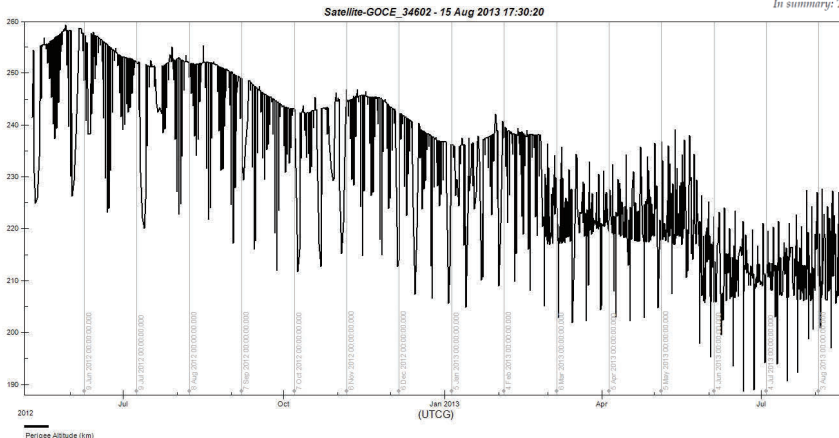


Fig.10. The CHAMP and GOCE densities for the dawn and dusk profiles of the first revolution on 24 January 2010.

In summary: The preliminary GOCE-Angem and CHAMP densities are fully consistent.



GOCE 高度
 2013 9.16 221km
 2013 11.8 約170km
 -8km/day
 2013 11.11 再突入
 (予想80kmで分解)

MTI/ISS-IMAP/SLATS研究集会@情報通信研究機構 2015年9月2日

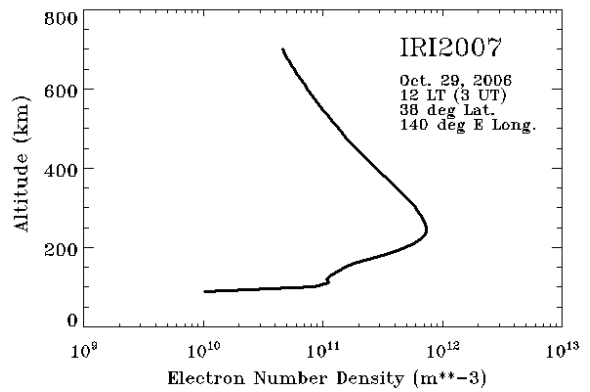
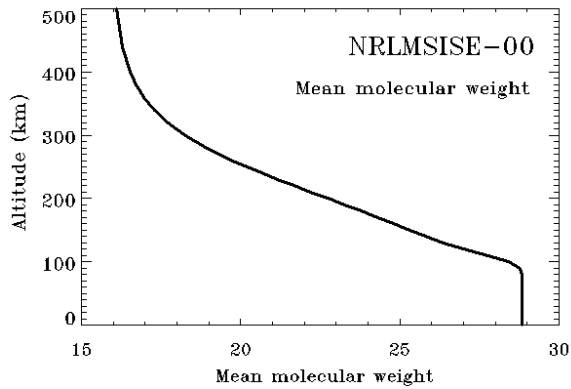
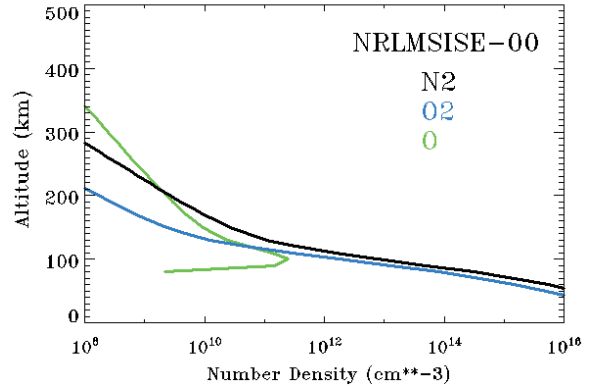
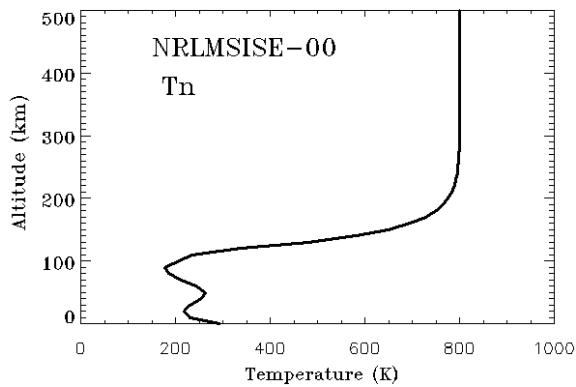
低高度衛星観測から期待される 超高層大気研究の進展

藤原 均
成蹊大学 理工学部

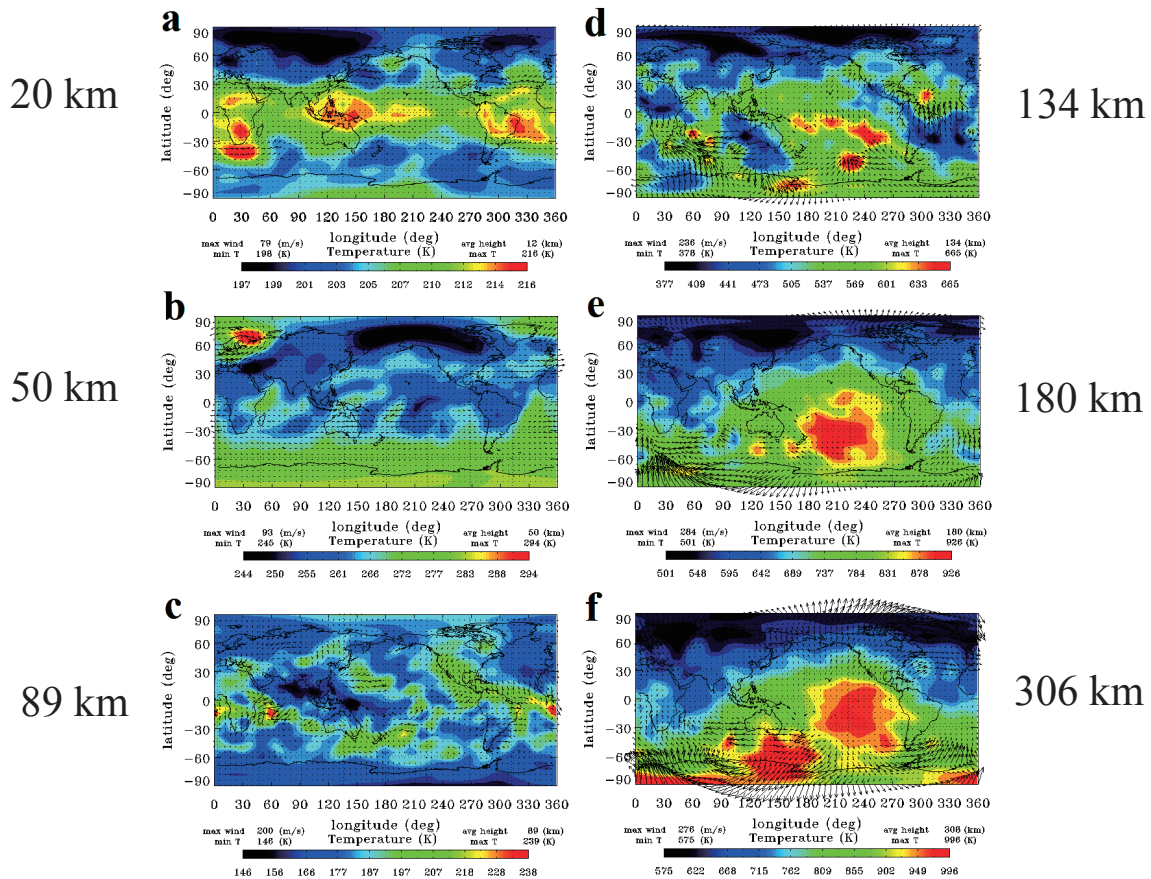
概要

- ・超高層大気の研究課題のいくつか
特に、高度100-300 kmでの科学的(社会的)研究意義
- ・これまでの低高度衛星(< 300 km)による観測例
- ・将来の衛星観測へ期待すること
- ・まとめ

熱圏の大気



Examples of GCM simulation (Fujiwara et al., 2011)



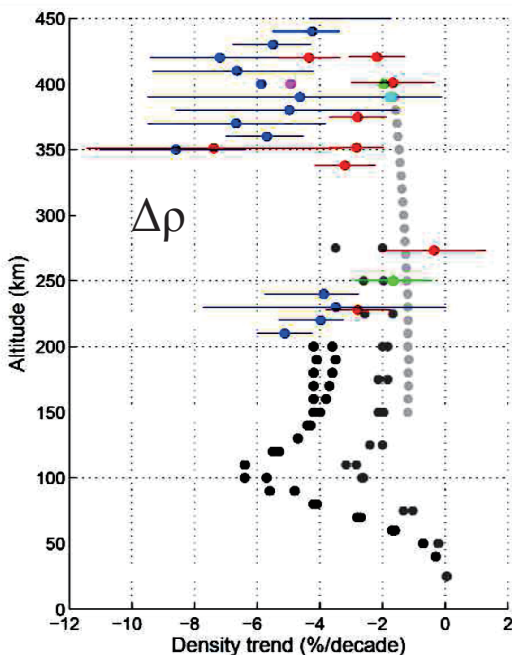
高度**100~200** km付近では、温度、組成(平均分子量)、電子密度が高度とともに急激に変化する。

この高度範囲での、温度、質量密度、組成、風速...の高度分布の**観測例は極めて少ない**。

- * 温度分布→エネルギー収支とコンシステントか？
寒冷化との関係は？
- * 組成(特に赤外放射に関わる微量成分と酸素原子)は？
- * 風速分布
→波の伝搬との関係は？
この領域での風の加速機構は十分にわかっているか？

熱圏大気質量密度減少の長期トレンド

Mass density trend due to greenhouse cooling



- Akmaev et al. (2006)
- Cnossen (2009)
- Qian and Solomon (2011)
- Saunders et al. (2011)
- Emmert et al. (2004)
- Emmert and Picone (2011)
- Marcos et al. (2005)
- Keating et al. (2000)

(Ingrid Cnossen, 2012: Climate change in the upper atmosphere in “Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management”, www.intechopen.com)

Few observations and many uncertainties for mass density variations.

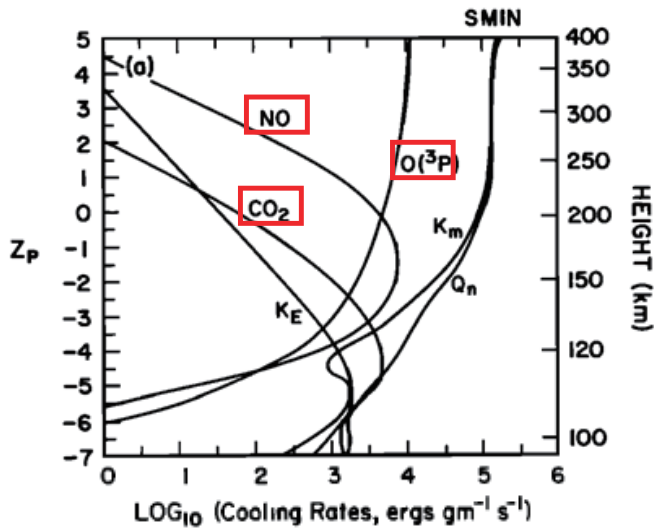
Observations seem to show larger cooling than theoretical ones.

高度
~ 250-350 km
< 200 km
では、トレンドを議論できる
データがない！

熱圏での赤外放射冷却

- CO₂ cooling at 15 μm (peaks ~ 120 km)
- NO cooling at 5.3 μm (peaks ~ 150 km)
- O(³P) fine structure cooling at 63 μm (maximizes > 200 km)

(Burns et al. [2011, Chapman conference ppt]より)



Global mean cooling rates in the thermosphere by NCAR 1D model

(Roble et al., JGR, 1987)

CO₂、NOからの全赤外放射量

Infrared radiation from the thermosphere to space

Mlynczak, M. G., L. A. Hunt, C. J. Mertens, B. Thomas Marshall, J. M. Russell III, T. Woods, R. Earl Thompson, and L. L. Gordley (2014), Influence of solar variability on the infrared radiative cooling of the thermosphere from 2002 to 2014, Geophys. Res. Lett., 41, 2508-2513, doi:10.1002/2014GL059556.

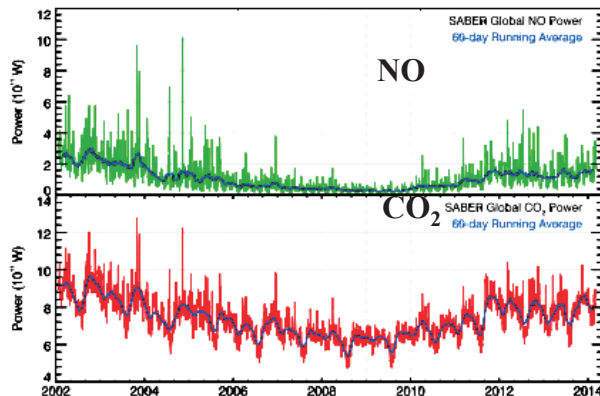


Figure 1. Time series of SABER daily global infrared power for (top) NO and (bottom) CO₂, from 22 January 2002 to 11 March 2014. The 60 day running mean is shown by the blue curve in both cases. Data from more than 4400 days of SABER observations are in each series.

Total Global CO₂ Cooling Power

O+CO₂ reaction coefficient

| | Baseline Model $k_O=1.5 \times 10^{-12}$ | Mod #1 $k_O=6 \times 10^{-12}$ | Mod #2 EUV _{min} × 1.18 $k_{zz}/2$ $k_O=6 \times 10^{-12}$ | Typical SABER annual average |
|-----------|---|-----------------------------------|--|------------------------------|
| Solar Min | 330 | 420 | 510 | 700 |
| Solar Max | 510 | 590 | 650 | 900 |

Integrated global cooling rate in GW

Solomon et al. *TREND 2012 Workshop*, 2012

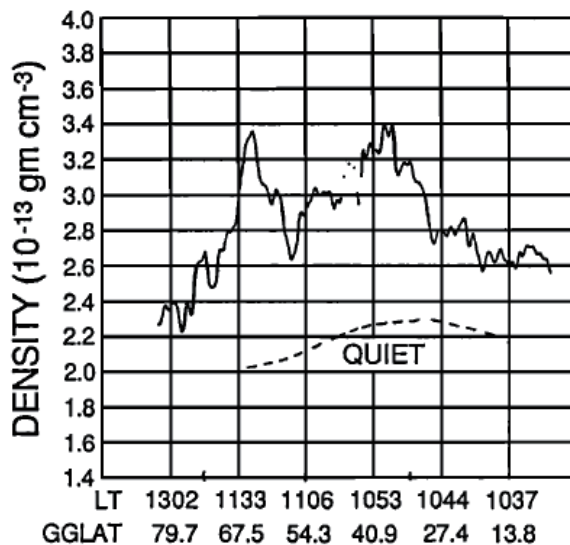


モデルでは赤外放射が過小評価のようである
寒冷化の進み具合 (K/decade) は、モデルが過小評価
といった先行研究と整合的

原因は？ → 100~150 kmの高度範囲で、CO₂と
Oの両方がわからなければ決着はつかない

高度200 km付近での熱圏大気質量密度変動

レーダーによるプラズマ計測以外には、ロケット観測などが
まれにあるだけでほとんど観測が行われていない。

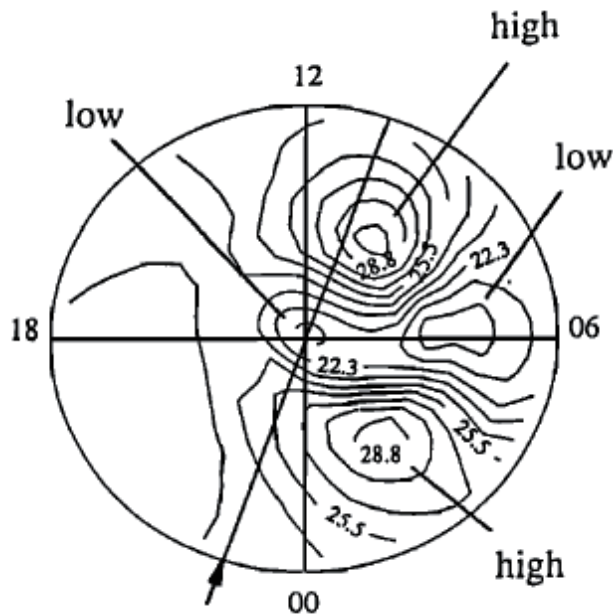


Crowley et al. [JGR, 1996]
高度200kmでの中性
大気密度変化。
地磁気静穏時と
擾乱時(Kp~5)の比較。

San Marco satellite

Figure 1. Comparison of measured density variations for active (solid curve) and quiet (dashed curve) conditions at 200 km as a function of geographic latitude for a polar orbiting satellite in the 1040-2240 LT plane.

Crowleyらは、観測された密度分布をcellular structure (又は density cell)と呼び、極域に現れる2~4の高(低)密度領域を衛星が通過したことによると考えた。



NCAR-TIGCMによる
シミュレーション.
高度200 km、
Cross polar cap potential
drop = 90 kV

これまでの主な超高層大気観測ミッションの例

AEROS, Alouette, Atmospheric Explorer (AE)
Dynamics Explorer (DE)
Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)
Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics
(TIMED)
Cosmic/FORMOSAT, C/NOFS
Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM)
Odin satellite, SCISAT-1(ACE-FTS)
NOAA satellites
Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)
GPS → Total electron content
CHAMP, GRACE, SWARM, GOCE

ISS-IMAP

たいよう(SRATS)、ひのとり、おおぞら、あけぼの、れいめい、(Geotail) ...

| Year | Experiment | Data | Lifetime | Agency |
|------|--------------|-------------|----------|--------------------|
| 1981 | DE-2 | Composition | 18 Mos. | NASA |
| 1982 | SETA-2 | Density | 8 Mos. | AFRL |
| 1983 | SETA-3 | Density | 8 Mos. | AFRL |
| 1985 | S85-1 | Density | 3 Mos. | AFRL |
| 1988 | San Marco | Density | 8 Mos. | NASA |
| 1999 | LORAAS | Composition | 3 Yrs. | NRL |
| 2000 | CHAMP | Density | 5+ Yrs. | GFZ Potsdam |
| 2001 | TIMED GUVI | Composition | 4+ Yrs. | NASA/APL/Aerospace |
| 2002 | GRACE | Density | 3+ Yrs. | CSR, Texas |
| 2003 | SSULI/SSUSI | Composition | 3+ Yrs. | DMSP/APL/NRL |
| 2003 | ORBITAL DRAG | Density | 30+ Yrs. | AFRL/AFSPC/NRL |

Figure 2 Satellite density measurements before and after the year 2000

(Marcos, AIAA 2006)

Cross-track wind from the accelerometer onboard the **SETA satellite**

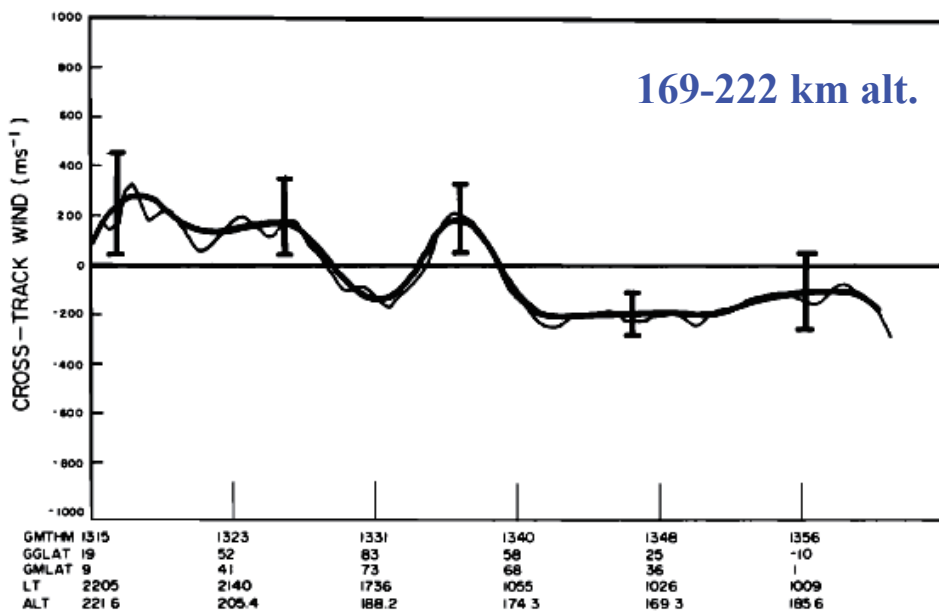


Fig. 5. Cross-axis winds corresponding to the data in Figure 4 plotted versus universal time, geographical latitude, geomagnetic latitude, local time, and altitude. Unsmoothed (light line) and smoothed (heavy line) data are shown. Error bars on the smoothed data primarily reflect uncertainties due to vehicle vibration noise (see section 2).

(Marcos and Forbes, JGR1985)

200 km alt.
July 20-23, 1983

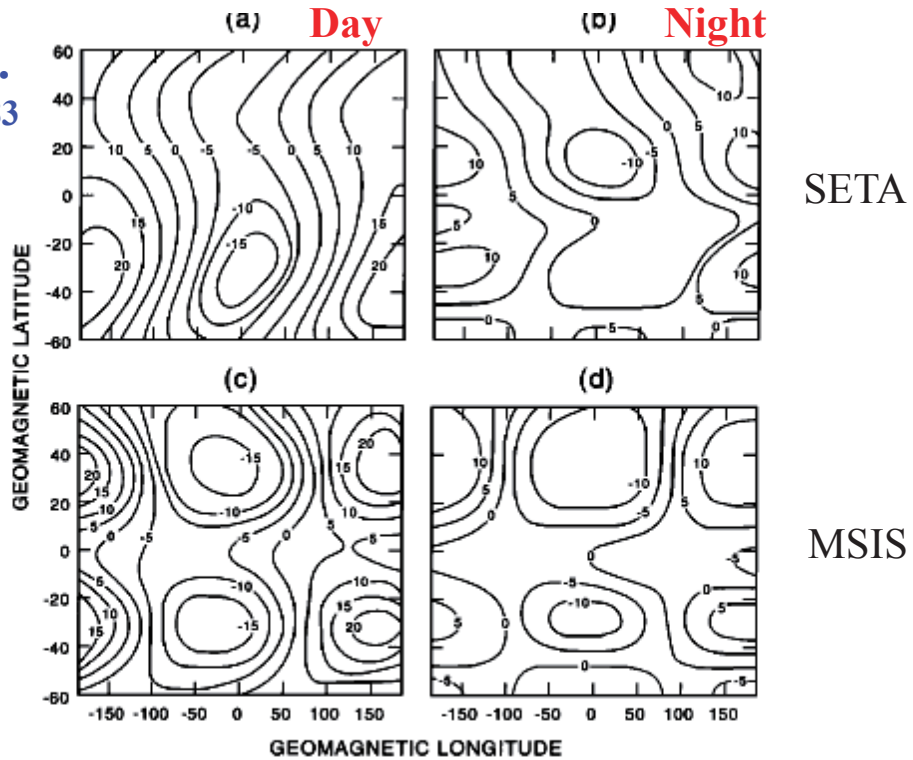
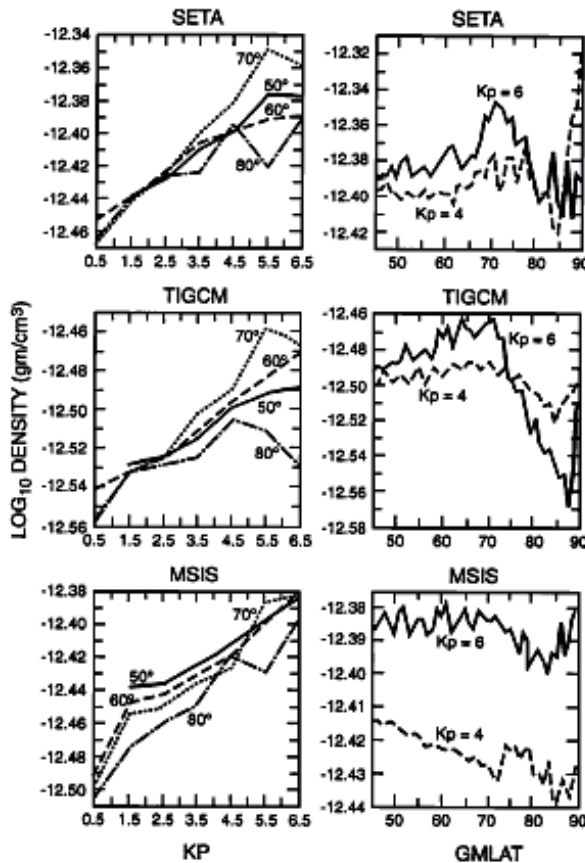


Figure 4. Longitude/UT effect as revealed in (a) and (b) SETA and (c) and (d) MSISE-90 total mass densities (percent variation about quiet-time densities, as in Figure 3) at 200 km during July 20-23, 1983. (left) Daytime is ~1030 LT. (right) Nighttime is ~2230 LT. The scales correspond to -15% to +20% (daytime) and -10% to +10% (nighttime).

(Forbes et al., JGR1999)



高度約200 kmで
のρの緯度変化

(Forbes et al., JGR1993)

Fig. 6. Daytime density at 300 km as a result of one-unit K_p binning and 10° latitude binning over the 30-day observational period. (Top) SETA densities (normalised to 300 km) (left) versus K_p , at various geomagnetic latitudes and (right) versus geomagnetic latitude for $K_p = 4.0$ and 6.0 . (Middle) Same as top figures, except for the TIGCM at 300 km. (Bottom) Same as above, except for the MSISE90 model at 300 km.

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 27, NO. 9, PAGES 1387-1390, MAY 1, 2000

1994, 1997にスペース
シャトルから放出

**A global measurement of lower thermosphere
atomic oxygen densities**

K. U. Grossmann, M. Kaufmann, and E. Gerstner
Department of Physics, University of Wuppertal, Wuppertal, Germany

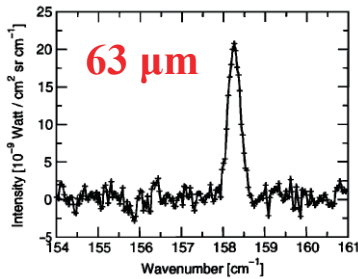


Figure 1. Single spectrum of the O(3P) emission line at 63 μm recorded by CRISTA-2 at an altitude of 151 km.

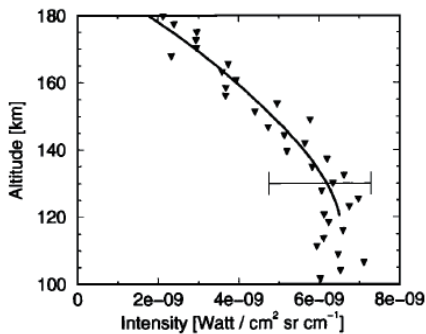


Figure 2. Line integrated limb radiance profile (CRISTA-2, one altitude scan). For details see text.

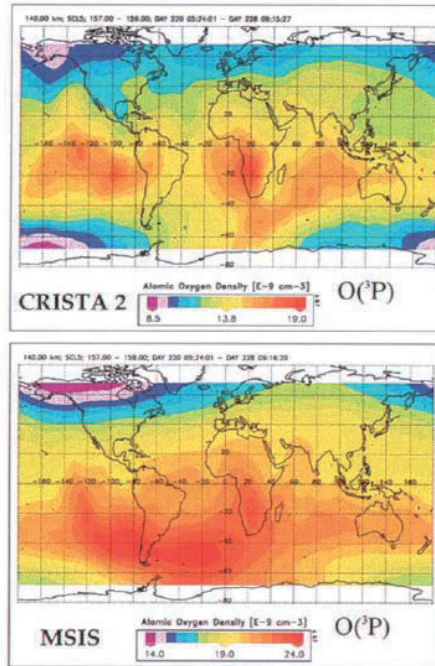


Plate 1. Atomic oxygen concentrations at 140 km measured by CRISTA-2 August 13 – 15, 1997 (upper panel). The color scale is $8.5 - 19.0 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ in increments of $0.7 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$. MSIS model atomic oxygen concentrations (lower panel) calculated for the conditions of the experimental data. The color scale here is $14.0 - 24.0 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ in increments of $0.7 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

140 km

**下部熱圏での酸素原子密度推定例
- 63μm放射、balloon platform at 37 km**

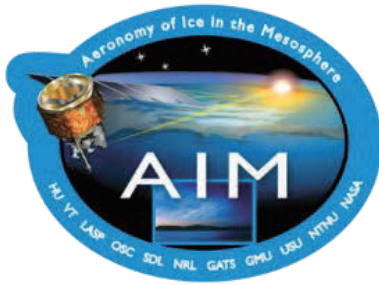
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 92, NO. D4, PAGES 4325-4336, APRIL 20, 1987

Atomic Oxygen in the Lower Thermosphere

FLORENCE J. LIN, KELLY V. CHANCE, AND WESLEY A. TRAUB

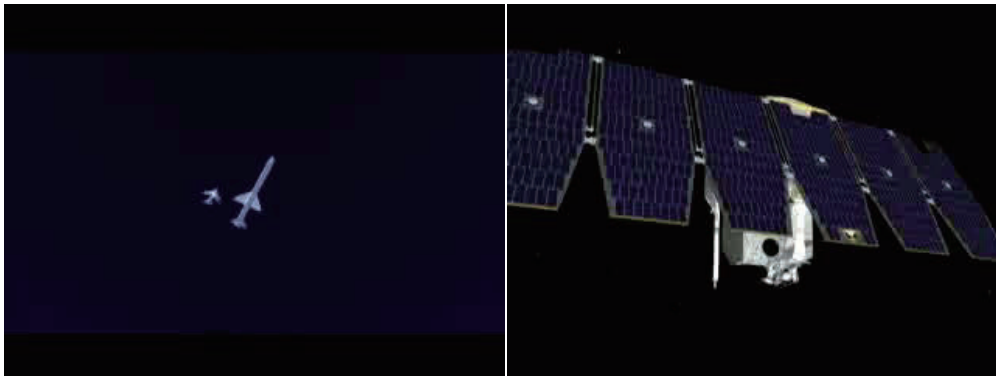
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts

We measured in thermal emission the 63-μm line due to thermospheric atomic oxygen O(3P), using a far-infrared spectrometer on a balloon platform at 37 km altitude over Palestine, Texas (32°N), on June 20, 1983. From measurements of the equivalent width of this line at two elevation angles, we find a weak angular dependence: the equivalent width increases by a factor of 1.5 ± 0.3 as the angle decreases from +30° to +1°. Since the optical depth of the O(3P) line is large, we cannot directly convert the measured line intensity to a column abundance. Instead, we interpret the measurements in terms of radiative transfer through a 16-layer atmosphere extending to 200 km. We use a model atmosphere for summer at 30°N, with an exospheric temperature of 1300 K, including (1) an assumed daytime atomic oxygen abundance profile constructed from recent chemical and dynamical models and (2) a water vapor abundance profile constructed from recent experimental and model results. For this assumed O(3P) vertical profile shape we determine from our spectra at two elevation angles a multiplicative scaling factor of 0.8, with an altitude-dependent uncertainty. In the best-determined layer the uncertainty in the multiplier is ± 0.2 at 119 km. The model-dependent peak atomic oxygen density is $3.6 (\pm 1.9) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ at an altitude of about 101 km.



http://www.nasa.gov/mission_pages/aim/overview/index.html

A NASA spacecraft scheduled for launch in 2006 should provide some answers. The *Aeronomy of Ice in the Mesosphere* satellite, or AIM for short, will orbit Earth at an altitude of 550 km. Although it's a small satellite, says Thomas, there are many sensors on board. AIM will take wide angle photos of NLCs, measure their temperatures and chemical abundances, monitor dusty aerosols, and count meteoroids raining down on Earth. "For the first time we'll be able to monitor all the crucial factors at once."



高度100~200 km付近での研究課題例のまとめ

- * CO₂、Oの分布
- * 質量密度の変動(density cell)
- * 熱圏高速風?
- * NLC、大気光の微細構造→大気重力波の微細構造

超低高度衛星から(間近から)のリモートセンシング

社会的な意義

中間圏・熱圏の寒冷化→対流圏の温暖化 のモニタリング
宇宙への玄関口の環境を知る→将来の高度な宇宙機の運用
のための基礎情報

超低高度からのリモートセンシング技術・データ利用の可能性

Summary

低高度 (< 200 km)での密度計測の例はそれなりにはある。また、経験モデル(MSIS)との比較もされている。密度の局所構造(赤道非対称性)などは十分に説明はされていない? 時系列での変動についての議論はない?(少ない?)

高高度では、CHAMP、GRACE以降、様々な例が示された。特に、地磁気擾乱時の密度構造のClimatologyがそれら以前とは比べ物にならない。地磁気擾乱時の予測への準備が進みつつある?(Guo et al., 2010)。

ただし、静穏時が完全に理解されているかは疑問。例えば、Oberheide et al. (2011)では外気圏での半日・一日潮汐の振幅とその場加熱によるものとの議論。太陽活動依存性(Bruinsma et al., 2010) や、CO₂増加の影響の議論(Akmaev, 2012) は続いている。

超高層大気の寒冷化との関係で、高度100-200 kmに赤外放射のピークをもつCO₂と、CO₂との反応が重要であるOの時空間変動の理解が不可欠(赤外放射量、温度・密度の減少トレンドのモデルと観測との不一致の原因究明のため)。

また、超低高度からのリモートセンシングにより、大気光や夜光雲の微細構造の可視化→重力波砕波の可視化が有効かもしれない。

高度100-200 kmは、衛星運用・利用の面だけでなく、大気科学のフロンティア領域でもある。

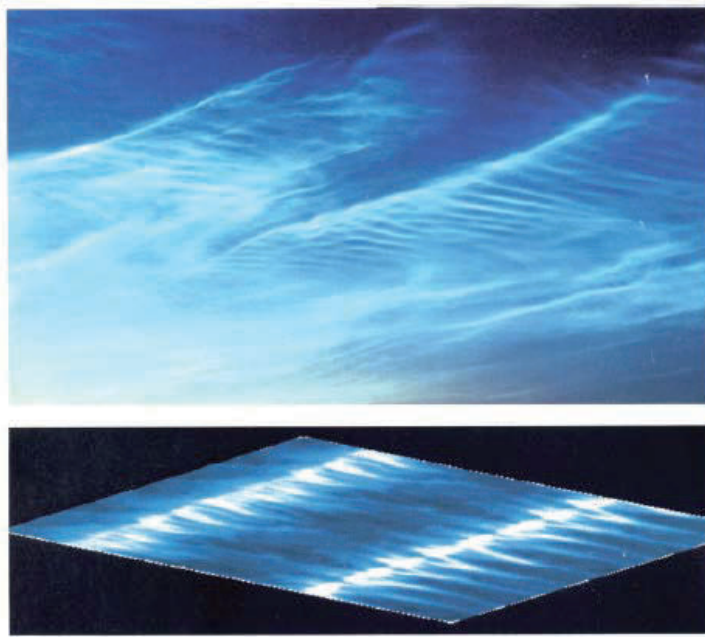
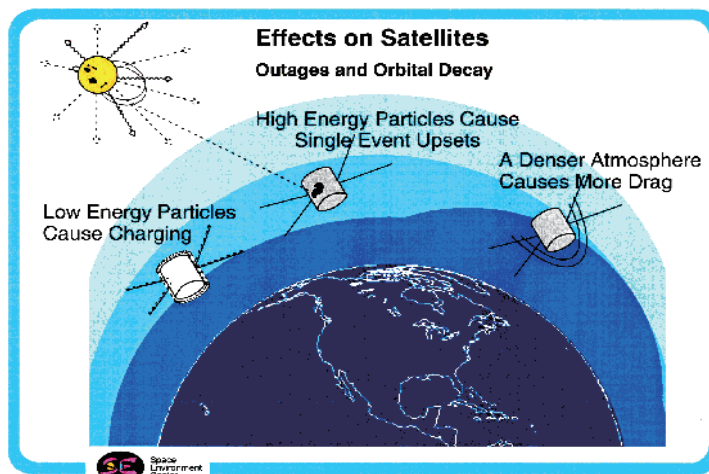


Figure 16. (top) Observed and (bottom) simulated gravity wave and instability structures in NLC. Photo was taken at Turku, Finland, on 21–22 July 1989, courtesy of Pekka Parviainen. Streamwise-aligned instability structures are believed to have accounted for the smaller-scale bright bands oriented approximately normal to the gravity wave phase fronts in the upper image. After *Fritts et al.* [1993b].



Fritts and Alexander
(Rev. Geophys., 2003)



$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\rho V C_D A_r r}{m} \iff \rho = -\frac{m}{V C_D A_r r} \frac{dr}{dt}$$

キーパラメータ: A/m

Relative effects of CO₂ cooling

Venus : very effective

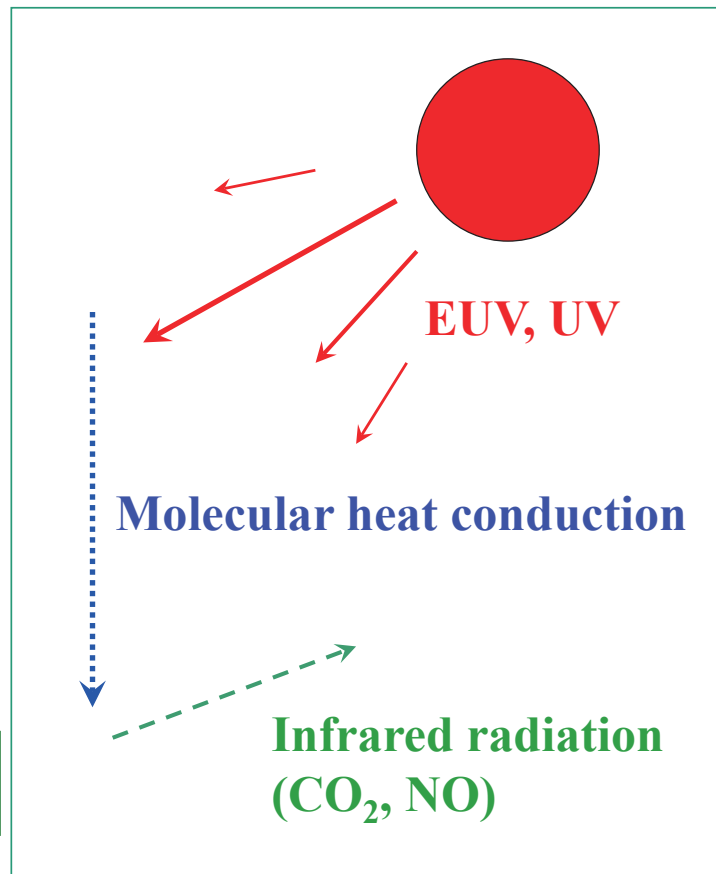
Mars : effective

Earth : not so effective

e.g., Bougher and Roble
(JGR, 1991)

O/CO₂ is one of key
parameters for
energetics in the
terrestrial planets,
Venus and Mars.

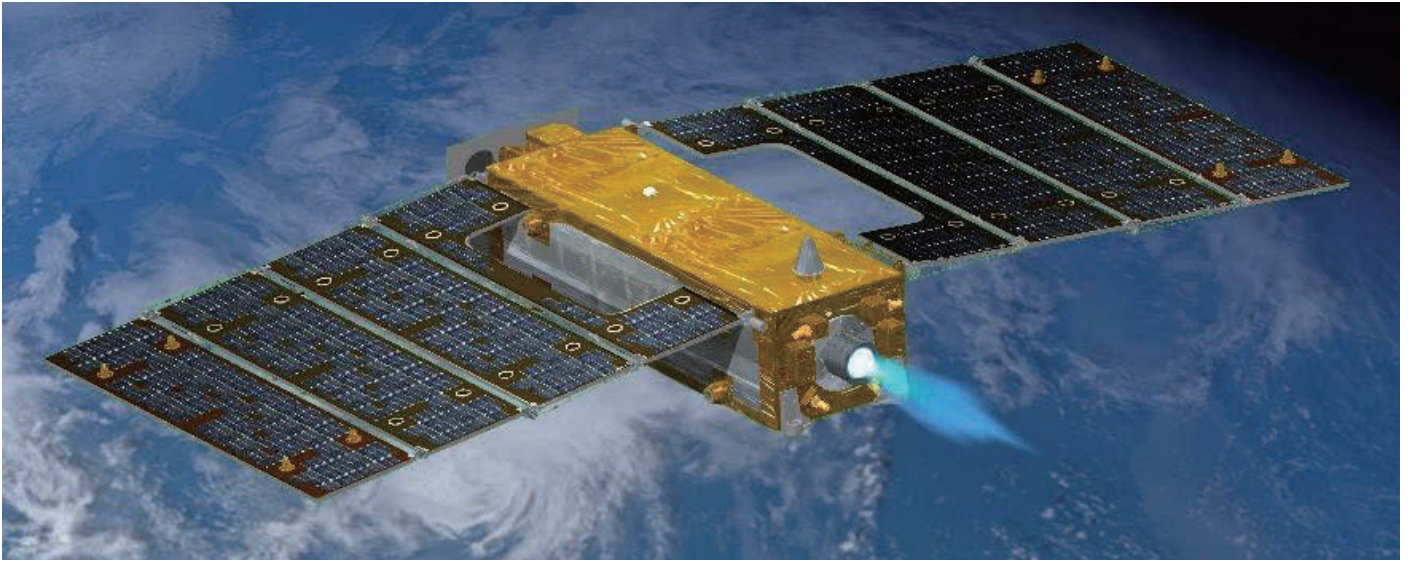
In case of the Earth, O/N₂
is important.



第3回

2016(平成 28)年 2 月 29 日(月) 10-18 時

於: JAXA 東京事務所 B101-103 会議室



超低高度衛星の利用 に向けたワークショップ

第3回

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では人工衛星による新たな価値の創生に向けた取り組みを行っており、その一環として、これまで人工衛星がほとんど利用してこなかった超低高度軌道(180km~300km程度)における観測を計画しています。

本ワークショップでは、平成28年度の打上げに向けて開発を進めている**超低高度衛星技術試験機(SLATS)**のデータ利用機会を提供し、成果を最大化するための以下の研究テーマについて議論を行います。

- ・大気環境モデルの向上
- ・高層大気をもたらす影響を反映した衛星設計基準の策定

また、**将来の超低高度衛星ミッション**に向けて、分野を磁場・重力場などの物理探査、防災など公共活動のための地表観測、気象観測などに広げ、情報交換を行います。

皆様のご参加をお待ちしています。

平成28年
2/29 月
10:00 - 17:30

- SLATS 開発状況
 - SLATS 成果利用拡大
 - 高層大気・電離圏/磁気圏分野
 - 物理探査分野
 - 地表観測分野
 - 気象観測分野
- 終了後、懇親会

場所 宇宙航空研究開発機構(JAXA)東京事務所 B101-103
東京都千代田区神田駿河台4-6 御茶ノ水ソラシティ 地下1階

**参加
申込** JAXA 第一宇宙技術部門 SLATS プロジェクトチーム (世話人: 川崎、星野)
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/>

定員60名



演題 15分(発表 12分、質疑 3分)

| | | 登壇者(所属)※敬称略 | SLATS | 将来 |
|---|-------------|----------------------------|-------|----|
| ①オープニングセッション | | | | |
| 開会挨拶 | 10:00-10:05 | 山本 静夫(JAXA) | | |
| 世話人説明 | 10:05-10:10 | 世話人(JAXA) | | |
| ②SLATS 開発状況 | | | | |
| 1 超低高度衛星技術試験機(SLATS)の概要と開発状況 | 10:10-10:30 | 佐々木 雅範(JAXA) | ○ | |
| 2 AOFS/MDM 開発状況 | 10:30-10:45 | 宮崎 英治(JAXA) 木本 雄吾(JAXA) | ○ | |
| 3 将来超低高度衛星構想・衛星設計標準検討 | 10:45-11:00 | 星野 宏和(JAXA) | ○ | ○ |
| ③SLATS 成果利用拡大 | | | | |
| 4 軌道力学・大気密度計測 | 11:00-11:15 | 今村 俊介(JAXA) | ○ | |
| 5 SLATS 希薄空力特性評価に向けた希薄風洞計測と数値解析 | 11:15-11:30 | 小澤 宇志(JAXA) | ○ | |
| 6 宇宙環境工学の観点から見た SLATS への期待 | 11:30-11:45 | 田川 雅人(神戸大) | ○ | ○ |
| 7 熱圏大気密度研究の現状と SLATS への期待 | 11:45-12:00 | 三好 勉信(九大) | ○ | ○ |
| (昼休み) | | | | |
| 8 共同研究公募要領説明 | 13:30-13:45 | 川崎 春夫(JAXA) | ○ | |
| 共同研究公募要領意見交換 | 13:45-14:00 | — | ○ | |
| ④高層大気・電離圏/磁気圏分野 | | | | |
| 9 超高層大気観測 | 14:00-14:15 | 阿部 琢美(ISAS/JAXA) | ○ | ○ |
| 10 衛星および地上からの電離圏観測計画について | 14:15-14:30 | 山本 衛(京大) | ○ | ○ |
| 11 衛星航法に対する電離圏の影響とその軽減策 -衛星観測への期待 | 14:30-14:45 | 斎藤 享(電子航法研) | | ○ |
| ⑤物理探査分野 | | | | |
| 12 中性大気密度計測装置の開発状況について | 14:45-15:00 | 東尾 奈々(JAXA) | | ○ |
| 13 超低高度衛星による地球磁場精密観測について | 15:00-15:15 | 能勢 正仁(京大) | | ○ |
| (休憩) | | | | |
| ⑥地表観測分野 | | | | |
| 14 地理空間情報取得・災害状況把握の視点から見た 超低高度衛星への期待 | 15:30-15:45 | 小荒井 衛(茨城大) | | ○ |
| 15 超低高度衛星のビジネス展開に向けた期待 | 15:45-16:00 | 平松 敏史(パスコ) | | ○ |
| ⑦気象観測分野 | | | | |
| 16 航空気象における風観測の現況と衛星観測への期待 | 16:00-16:15 | 古川 武彦(気象コンパス) | | ○ |
| 17 ドップラー風ライダーによる大気風観測 | 16:15-16:30 | 石井 昌憲(NICT) | | ○ |
| 18 衛星搭載ライダー観測のデータ同化 | 16:30-16:45 | 関山 剛(気象研) | | ○ |
| (休憩) | | | | |
| ⑧クロージングセッション | | | | |
| 課題解決に向けて・まとめ | 17:00-17:25 | 世話人(JAXA) | ○ | ○ |
| 閉会挨拶 | 17:25-17:30 | 石田 中(JAXA) | | |

(移動)

懇親会@御茶ノ水 ビアホール

18:00-

| | 登壇者(所属)※敬称略 |
|--|-----------------------------|
| <p>1 超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の概要と開発状況</p> <p>JAXAでは、従来実現できなかった、高度 200~300km 程度を継続的に飛行する超低高度衛星の研究開発を進めている。超低高度衛星は従来の地球観測衛星と比較して、地表面との距離が半分以下となるため、光学センサ分解能を 2 倍以上に向上でき、SAR の送信電力を 8 分の 1 以下に低減できる等の利点があり、実用への応用が期待されている。</p> <p>本講演では、現在開発中の超低高度衛星技術試験機 (SLATS) の概要と開発状況について報告する。</p> | 佐々木 雅範(JAXA) |
| <p>2 AOFS/MDM 開発状況</p> <p>超低高度域で運用される宇宙機の課題の一つとして原子状酸素(Atomic Oxygen: AO)がある。AO は高層大気中の酸素分子が太陽からの紫外線により分解され酸素原子となったものであり、高度が低いほど高濃度である。AO は衛星の熱制御材やケーブル被覆などに多用されている有機材料に衝突すると、これらを浸食することが知られている。</p> <p>SLATS には、AO 環境とその影響を観測するミッションとして、AO モニタ(AOFS/MDM)が搭載される。AOFS は SLATS で運用される軌道の AO 環境の計測、MDM は AO による材料劣化の確認を目的としている。本発表では AOFS/MDM の開発状況の概要を紹介する。</p> | 宮崎 英治(JAXA) 木本 雄吾(JAXA)○ |
| <p>3 将来超低高度衛星構想・衛星設計標準検討</p> <p>超低高度衛星は光学、SAR、ライダーなどリモートセンシングミッションでメリットを際立たせるポテンシャルを有している。SLATS の成果を受けた将来機の構想および開発に活用するための衛星設計標準検討に向けた取り組みについて紹介する。</p> | 星野 宏和(JAXA) |
| <p>4 軌道力学・大気密度計測</p> <p>本発表では、イオンエンジンを使用した SLATS の軌道姿勢制御計画を紹介し、大気抵抗・大気密度の推定方法・期間について述べる。</p> | 今村 俊介(JAXA) |
| <p>5 SLATS 希薄空力特性評価に向けた希薄風洞計測と数値解析</p> <p>SLATS の空力特性は流れ場が希薄になるほど表面熱適応係数依存性が高くなる。そのため、空力特性評価精度を向上させるためには、表面熱適応係数の決定が重要である。</p> <p>JAXA では希薄風洞において表面熱適応係数計測手法の確立を目指しており、その結果について報告する。</p> | 小澤 宇志(JAXA) |
| <p>6 宇宙環境工学の観点から見た SLATS への期待</p> <p>宇宙環境は宇宙機の信頼性に直結する問題であるため、これまで地上実験装置での環境試験が行われてきた。しかしながら、実宇宙環境は極めて複雑なため、地上実験装置内で正確に軌道上環境を再現することは不可能である。そのため実宇宙環境をどのように簡略化すれば、地上試験結果と軌道上劣化現象の整合性を確保できるかという点が、これからの高精度宇宙環境地上試験のポイントとなる。</p> <p>本講演では、LEO 環境とは異なる超低高度環境での初の軌道上データとなる SLATS 搭載材料試験への期待と、その宇宙環境地上試験へのインパクトについて述べる。</p> | 田川 雅人(神戸大) |
| <p>7 熱圏大気密度研究の現状と SLATS への期待</p> <p>熱圏大気密度・組成分布としては、MSIS 経験モデルが広く利用されているが、問題点も多く報告されている。</p> <p>そこで、MSIS の長所・短所を検証するとともに、現在、我々が開発している物理モデル (GAIA) との比較や今後 SLATS での観測への期待を紹介する。</p> | 三好 勉信(九大) |
| <p>8 共同研究公募要領説明</p> <p>JAXA では、開発を進めている SLATS を対象とした共同研究を公募し、選考の上、研究成果が期待できる研究者に SLATS データ利用の機会を提供する計画である。本発表では共同研究の公募要領を説明する。</p> | 川崎 春夫(JAXA) |
| <p>9 超高層大気観測</p> <p>飛行体を用いた中間圏・熱圏・電離圏 MTI 研究について、地上観測などとの連携を含めた現状と将来への期待を述べる。また、ISAS におけるプロジェクト立上げの方法について紹介する。</p> | 阿部 琢美(ISAS/JAXA) |
| <p>10 衛星および地上からの電離圏観測計画について</p> <p>超高層大気に対しては、下層大気から伝搬してくる大気波動の影響が大きく、注目を集めており、衛星や地上からの観測が提案・実施されている。それらを紹介するとともに、超低軌道衛星 CARINA の概要について話題提供する。</p> | 山本 衛(京大) |

| | 登壇者(所属)※敬称略 |
|---|---------------|
| 11 衛星航法に対する電離圏の影響とその軽減策 -衛星観測への期待 | 齋藤 享(電子航法研) |
| <p>航空航法においては衛星航法の利用が近年利用が進んでいる。 本発表では、現在の航空航法における衛星航法を利用したシステムの現状を紹介し、航空航法における衛星航法のより高度な利用のために、衛星観測に期待することを述べる。</p> | |
| 12 中性大気密度計測装置の開発状況について | 東尾 奈々(JAXA) |
| <p>近年、衛星等の超低高度における運用により、中性大気密度による影響を無視できなくなってきた。しかし一方で、国内において低高度の大気密度の実データが非常に乏しく大気密度モデルにおける妥当性の評価を行えない。その問題を解決する為、高度 100km~400km の実観測データ取得をターゲットとした小型で高精度な 6 自由度加速度計の開発を行っている。今年度の BBM の製作を行い、地上における校正試験でデータ取得を行ったことについて報告する。</p> | |
| 13 超低高度衛星による地球磁場精密観測について | 能勢 正仁(京大) |
| <p>高度 200-300 km の低高度領域での地球磁場観測が実現できれば、地表面(地殻、海洋)起源の磁場現象や地球内部ダイナモの変動、コア表面流れ場をこれまででない精度で検出できる。また、地球磁場標準モデルの作成には、低高度衛星による磁場データが必須であるため、磁場モデル改訂への応用が期待される。</p> | |
| 14 地理空間情報取得・災害状況把握の視点からみた 超低高度衛星への期待 | 小荒井 衛(茨城大) |
| <p>演者はこれまで、国土地理院の職員として、高分解能の光学衛星画像、SAR 衛星画像を含めて、リモートセンシング技術を活用した地図作成や災害状況把握の業務に携わってきた。また、JAXA の次世代地球観測衛星に関連して、地図作成や災害状況把握の立場から必要なセンサスペックについて、JAXA に提案してきた。今回、JAXA の超低高度衛星の開発にあたって、地理空間情報取得・災害状況把握の視点から超低高度衛星に期待することを、これまでの演者の取り組みで分かってきたことを中心に述べる。</p> | |
| 15 超低高度衛星のビジネス展開に向けた期待 | 平松 敏史(パスコ) |
| <p>超低高度衛星は、超低高度であるため光学センサの分解能向上が期待できる。さらに、小型化や軽量化が可能のため、製造・打上費用を低減することができる。よって、従来の衛星と同程度の分解能の衛星画像がより容易に入手できるようになる可能性がある。また、平成 28 年度に超低高度衛星である SLATS の上げが予定されており、新たな宇宙利用の可能性が検討される。本発表では、この超低高度衛星におけるビジネス展開の可能性とその課題について述べる。</p> | |
| 16 航空気象における風観測の現況と衛星観測への期待 | 古川 武彦(気象コンパス) |
| <p>国際および国内の航空気象サービスに関する枠組み、空港周辺および航空路における風の場の重要性、観測システム・予測プロダクト・情報伝達の現況などについて概観し、SLATS への期待に触れる。</p> | |
| 17 ドップラー風ライダーによる大気風観測 | 石井 昌憲(NICT) |
| <p>全球規模で気象データを取得できる衛星観測の重要性はさらに増しているが、現在の衛星観測は気温や水蒸気に関連した観測が多い。風は、気圧、気温、湿度など共に基本的な気象要素であるにも関わらず、全球の風観測は、海上風や大気追跡風のように、ある特定その観測に限られている。本発表は、気象観測分野からの将来構想の一つとしてドップラー風ライダーによる全球風観測の概要と現在の検討について報告する。</p> | |
| 18 衛星搭載ライダー観測のデータ同化 | 関山 剛(気象研) |
| <p>風速・気温・気圧・大気成分濃度などの観測値と気象シミュレーションモデルの計算結果を組み合わせることで、数学的に「最も尤もらしい」大気の状態を推定する技術はデータ同化と呼ばれる。データ同化は気象予測計算の初期値を作成する方法として現代の天気予報の要となっている。 しかし、遙か上空の風速データや大気成分濃度データを測定する手段は極めて限られており、天気予報や大気汚染予測の信頼性向上のネックとなっている。 そこで期待されるのが衛星搭載ライダーによる風速観測とエアロゾル濃度観測であり、その観測データがシミュレーション計算に与えるインパクトについて報告したい。</p> | |



超低高度衛星技術試験機（SLATS） の概要と開発状況

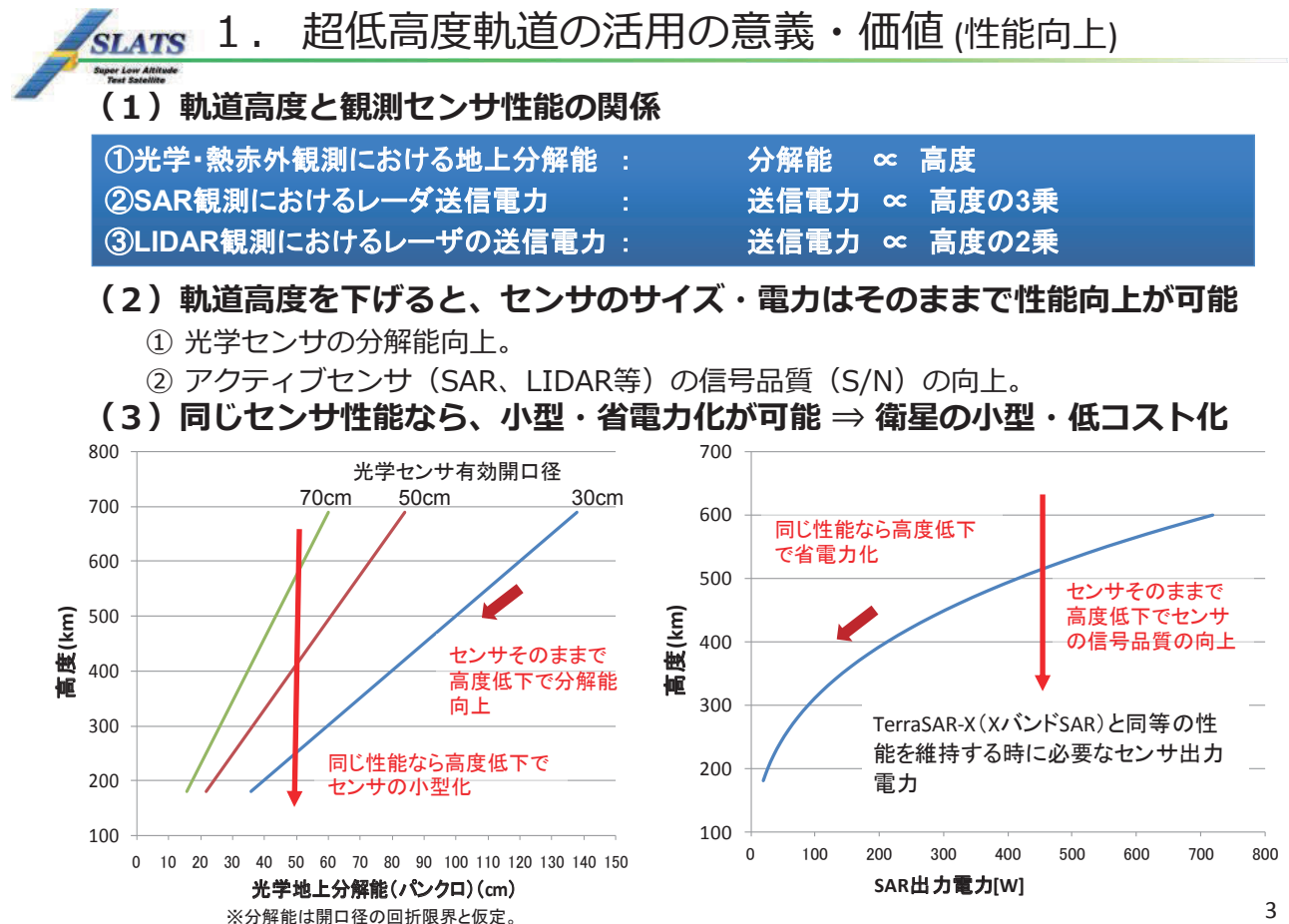
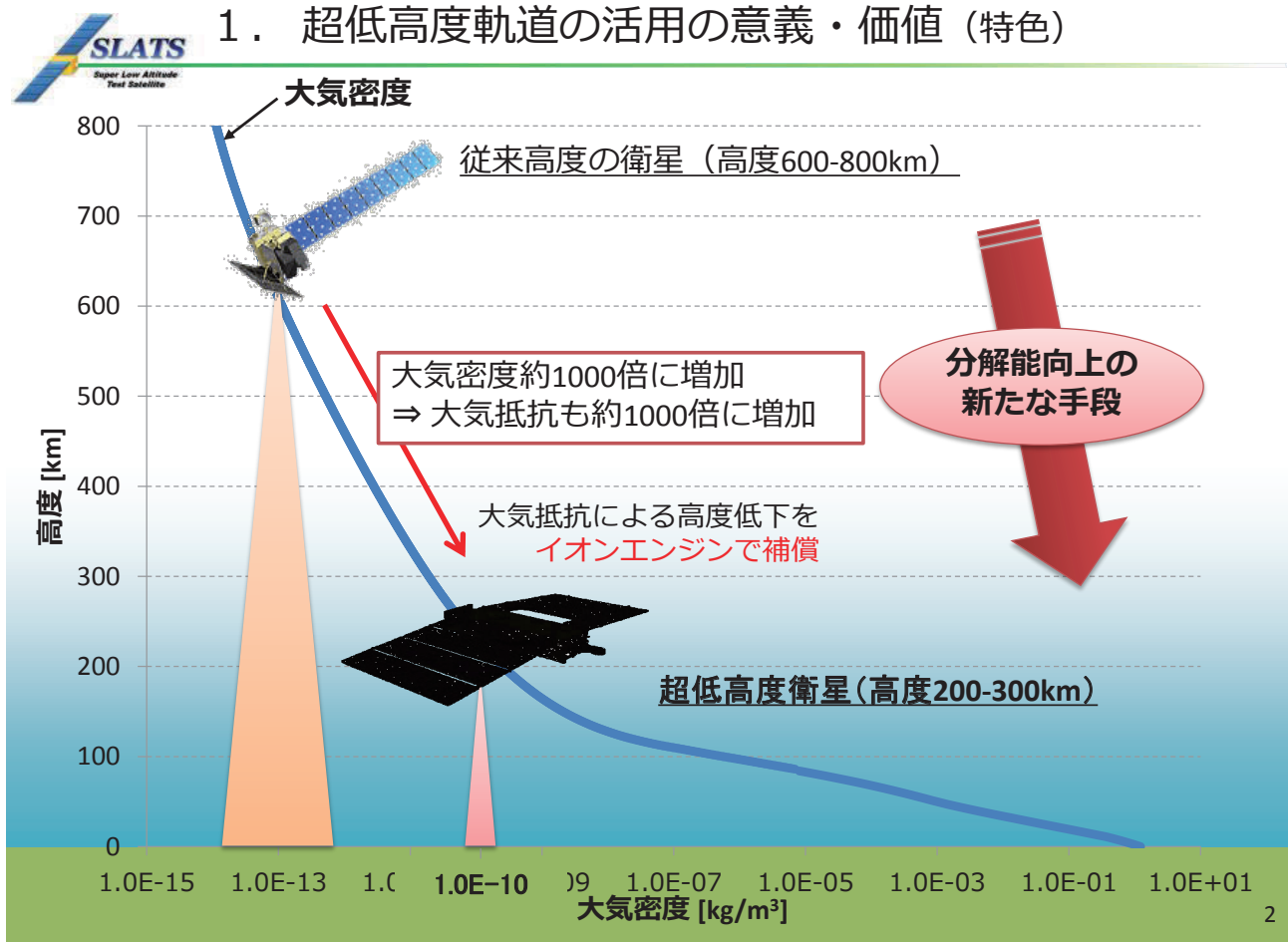
平成 28 年 2 月 29 日

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
SLATS プロジェクトマネージャ
佐々木 雅範



目次

1. 超低高度軌道の活用の意義/価値
2. SLATS 概要
3. SLATS 成功基準
4. SLATS 開発スケジュール
5. まとめ





1. 超低高度軌道の活用の意義・価値(自由度)

今までにない自由度をもつ衛星を実現 ⇒ 新たな衛星の使い道を拓く

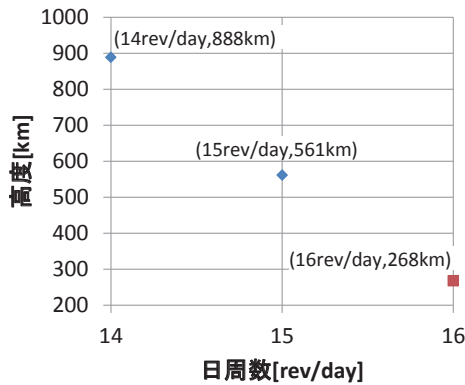
- 従来の周回衛星は、ミッション期間中は一つの固定された軌道で運用。
- 超低高度衛星は、燃料効率(比推力)がガスジェットの10倍以上を有するイオンエンジンを搭載するため、軌道変換の幅や回数が飛躍的に増加。

応用例として、太陽同期準回帰軌道と完全回帰軌道の併用運用を実現。

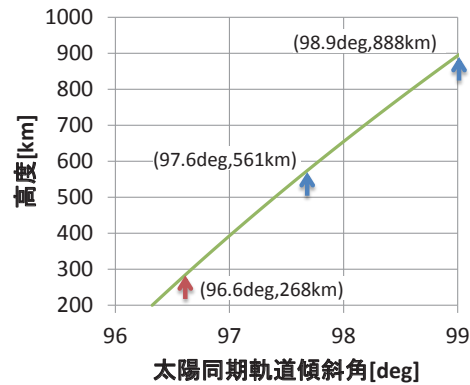
例 通常：5日回帰軌道 高度324km ⇔ 緊急時：完全回帰軌道(1日回帰) 高度268km



『全球観測』と『高頻度/高分解能観測』をフレキシブルに選択



完全回帰軌道となる軌道高度と日周数の関係

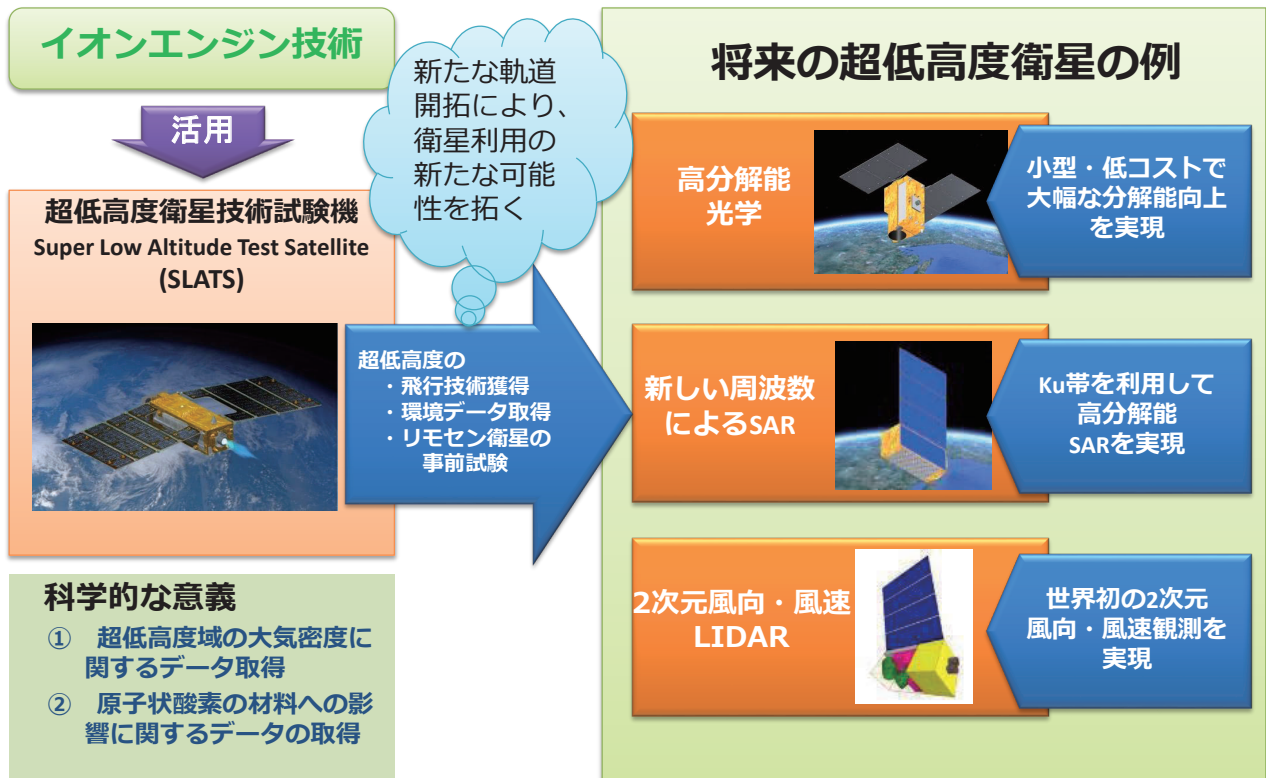


軌道高度と太陽同期軌道傾斜角の関係

4



1. 超低高度軌道の活用の意義・価値(発展性)



5



1. 超低高度軌道の活用の意義・価値（技術課題）

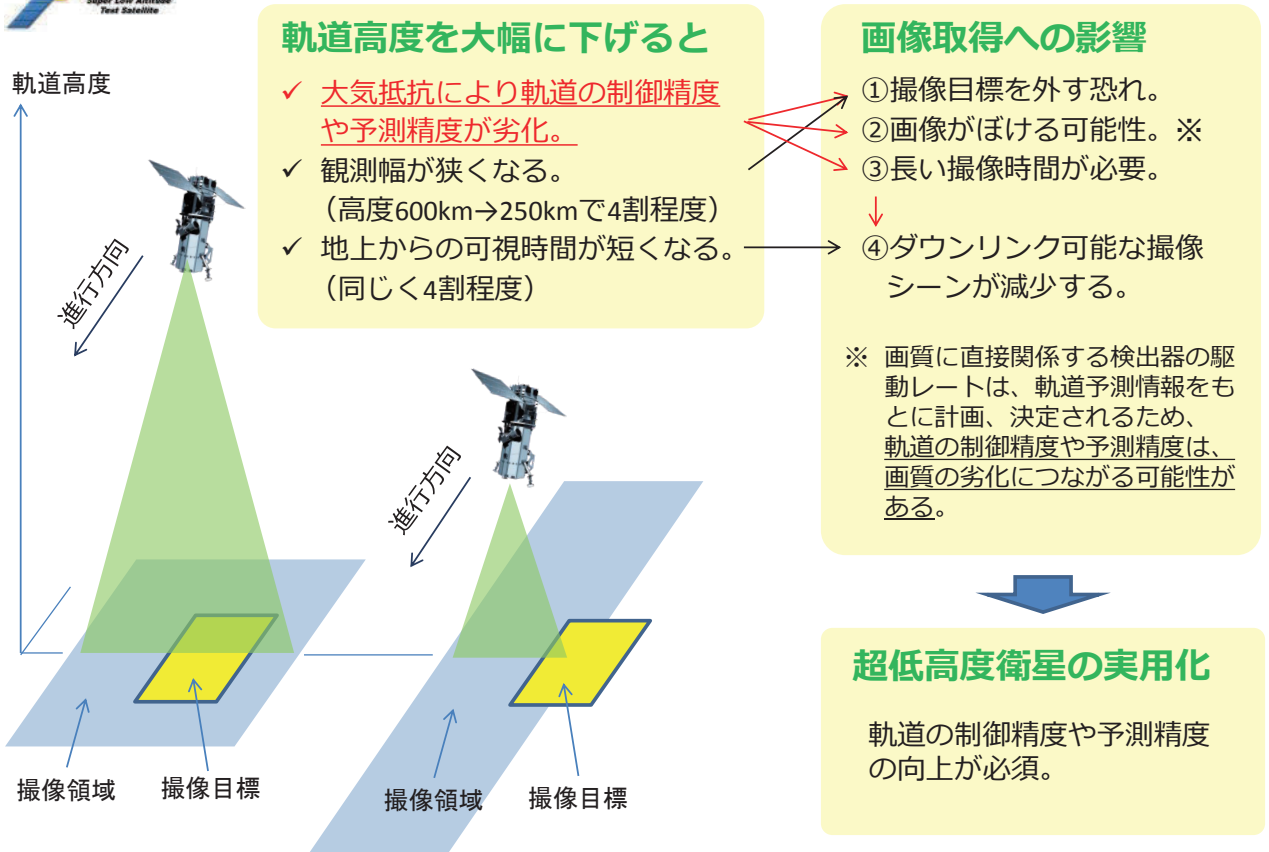
将来の超低高度衛星の実用化に向けた技術課題一覧

| No | 課題内容 | 対処案 |
|----|--|--|
| 1 | [軌道上大気密度の予測精度、原子状酸素の課題] 大気密度や原子状酸素の予測精度が十分ではなく、衛星の軌道制御、姿勢制御材料への影響や材料劣化が懸念される。 (大気密度は軌道高度600km→250kmで約1000倍) | 実証データにより、環境予測モデルの精度向上を図る。原子状酸素に耐性のある材料を評価・採用。 ⇒ SLATSにて対応 |
| 2 | [実用ミッションへ適用する際の課題] ○ 実利用での長期運用を設定すると、下記の状況が発生し得る。 1) ミッション機器の大型化、消費電力の増加 2) 軌道保持用推薬が増大 ⇒ 衛星が大型化 3) より大推力のイオンエンジンや、それを駆動する大電力パネルが必要 ⇒ 再び2)へ ○ 軌道高度の低下により、地上局との通信時間が減少するため、データ伝送容量が減少する。 (600km 10分程度 → 250km 4分程度) | ○ 超低高度に対応したシステム設計等の工夫。 大気抵抗軽減のための高効率な太陽電池パネルやバス機器の小型化・省電力化。 ○ 搭載通信系の高速度化や観測運用の制限等。 |
| 3 | [電気推進系の課題] 衛星の長期間運用や大型化に向けては、イオンエンジンの長寿命化や大推力化が課題 | イオンエンジンの耐久性向上、大口径化、クラスタ化。 |
| 4 | [各観測ミッションに対応した技術課題] ○ 光学センサ：画素サイズ縮小と視点速度の上昇による入射光量の減少。大気抵抗の増大や指向精度の悪化等。 ○ レーダセンサ：大気抵抗の増大や指向精度の悪化。干渉SAR観測を行うために必要な軌道保持精度等。 | ○ S/N向上対策、指向精度及びMTFの向上対策、小型化、等 ○ アンテナ等の高密度実装。軌道保持精度の向上、等 |

6



1. 超低高度軌道の活用の意義・価値（地球観測に係る技術課題）



7



2. SLATS 概要 (目的/主要諸元)

SLATS は超低高度軌道からの地球観測を実証することで、地球観測における新たな利用の可能性を拓くことを目的とし、下記のミッションを実施する。

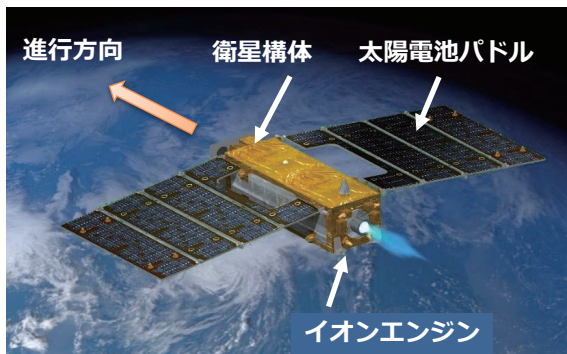
SLATS のミッション

- ① **超低高度衛星技術の実証**
超低高度域でのイオンエンジンによる軌道保持などの衛星運用を軌道上実証。
- ② **大気密度・原子状酸素に関するデータの取得**
超低高度域での衛星の軌道や姿勢の変動データや原子状酸素 (AO) のデータを取得し、大気密度モデルの精度向上や超低高度衛星に係る設計基準への反映。
- ③ **小型高分解能光学センサによる撮像実験**
超低高度域にて衛星の軌道や姿勢と協調して撮像する実験。

<SLATS主要諸元>

| 項目 | 仕様 |
|------------|--|
| 主要ミッションセンサ | (1) 小型高分解能光学センサ (SHIROP) (2) 原子状酸素センサ (AMO) (a) AO計測センサ (AOFIS) (b) 材料劣化モニタ (MDM) |
| サイズ | 2.5 (X)×5.2 (Y)×0.9 m (Z) (軌道上展開状態) |
| 質量 | 400 kg以下 |
| 発生電力 | 1140W以上 |
| 設計寿命 | 2年以上 |
| 運用軌道 | 軌道高度 268km~180km |
| 打上年度 | 平成28年度 |
| 打上ロケット | H-IIAロケットによる相乗り打上げ (主衛星: GCOM-C) |

<SLATS外観図>

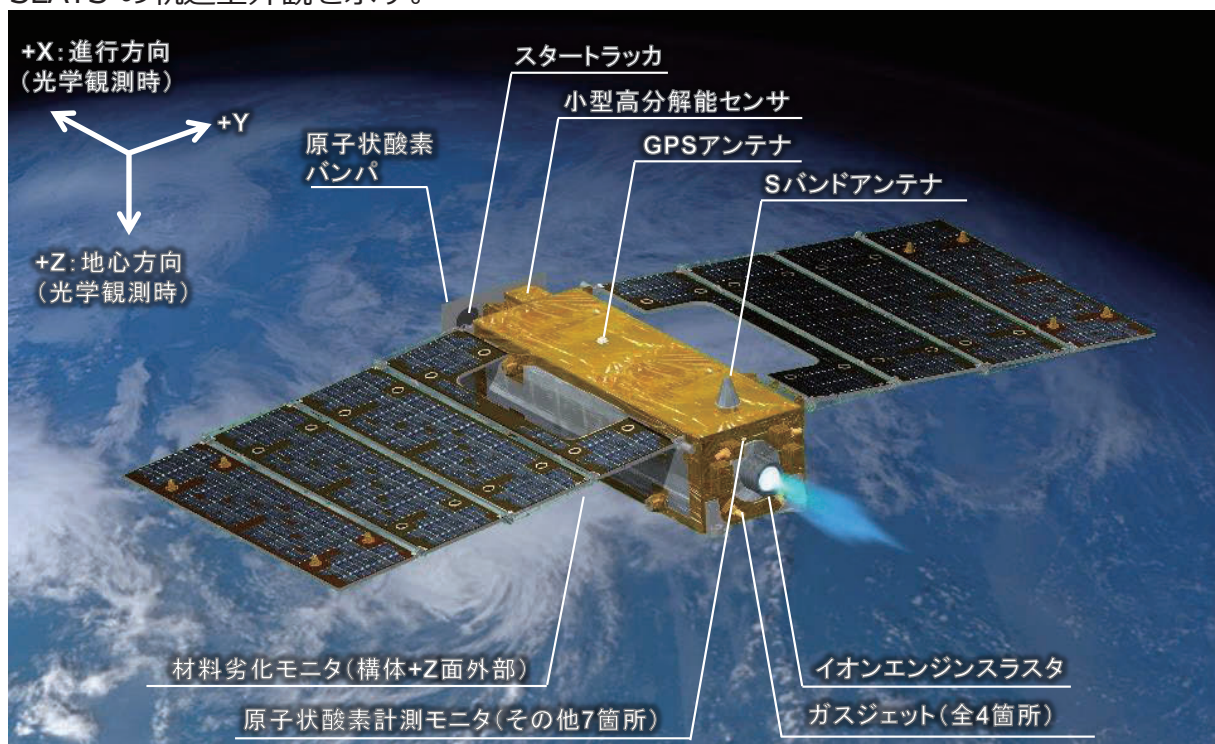


8



2. SLATS 概要 (軌道上外観)


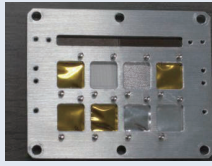
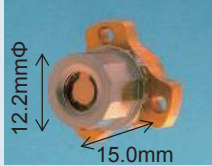

SLATS の軌道上外観を示す。

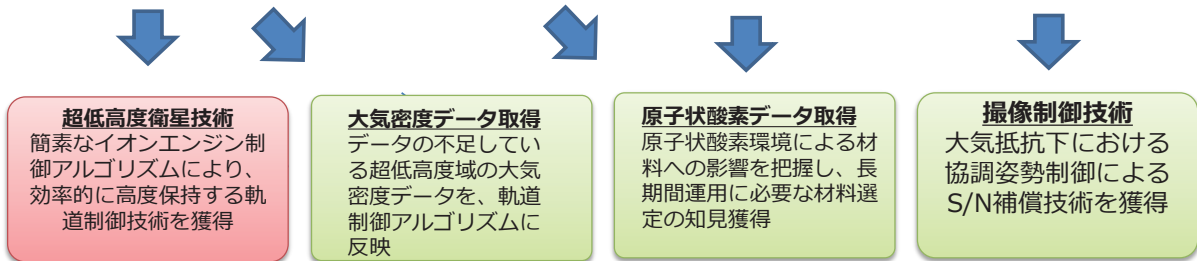


9



2. SLATS 概要 (搭載ミッション機器)

| SLATS 搭載ミッション機器 | | | |
|---|--|--|---|
| <p>1. イオンエンジン</p> <p>イオンエンジンと GPSR により、自律的に高度保持を実施し、超低高度域での軌道保持技術を実証。</p>  <p>イオンエンジン(スラスト部)外観</p> | <p>2. 材料劣化モニタ</p> <p>13 種類の材料サンプルを、カメラにより定期的に撮像し、材料サンプルの劣化をモニタする。</p>  <p>材料サンプル搭載例</p> | <p>3. 原子状酸素フルエンス計測</p> <p>原子状酸素計測センサ (QCM) 合計 8ch を SLATS 各面に搭載し、原子状酸素による質量減少量 (周波数変化) を計測する。</p>  <p>12.2mmΦ 15.0mm</p> <p>原子状酸素計測センサ外観</p> | <p>4. 小型高分解能光学センサ</p> <p>小型の光学センサにより、高分解能撮像を行うとともに、大気抵抗やイオンエンジン噴射等の影響評価を行う。</p>  <p>小型高分解能光学センサ・望遠鏡部外観</p> |



3. SLATS 成功基準

| 目的 | 達成目標 | | |
|----------------------|--|---|---|
| | ミニマムサクセス*2 | フルサクセス*1 | エクストラサクセス*2 |
| 超低高度衛星技術の実証 | 超低高度軌道への投入が成功すること 【判断時期: 高度268km到達時点】 | ①高度*3220km(ノミナル)において、27日間以上、自律的に高度保持を実施し、高度保持精度±1km(1σ)を満足すること ②異なる高度から光学センサにより撮影できること | 緊急高度上昇運用の有用性を示せること |
| 大気密度データの取得*4 | 高度268kmより高い高度において、大気密度に関するデータを取得できること 【判断時期: 高度268km到達時点】 | 高度268kmから180kmにおいて、90日間の大気密度に関するデータを取得できること | ①高度268kmから180kmにおいて、90日間を超えて大気密度に関するデータを取得できること ②高度180kmより低い高度において、大気密度に関するデータを取得できること |
| 原子状酸素データの取得*4 | 原子状酸素衝突フルエンスセンサが正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】 | 高度268kmから180kmにおいて、90日間の原子状酸素衝突フルエンス(F _{A0})を計測できること | ①高度268kmから180kmにおいて、90日間を超えてF _{A0} を計測できること ②高度180kmより低い高度において、F _{A0} を計測できること |
| | 材料劣化モニタ機器の全機能が正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】 | 高度180km以上において、材料劣化状況を原子状酸素衝突フルエンスと共に取得できること | 原子状酸素による材料劣化について新たな知見が得られること |
| 小型高分解能光学センサによる高分解能撮像 | 小型高分解能光学センサが正常に動作し、撮像ができること 【判断時期: 高度268km到達時点】 | 衛星姿勢と協調制御による画質向上の効果や大気抵抗及びイオンエンジン噴射による画質への影響が評価できること | 超低高度軌道(高度268km以下)において、衛星姿勢との協調制御による画質向上の効果や大気抵抗及びイオンエンジン噴射による画質への影響を評価できること。 |

*1 : フルサクセスの達成判断時期は全て定常段階終了時とする。 *2 : ミニマム/エクストラサクセスは、項目ごとに達成判断をする。
*3 : 高度は「平均軌道長半径-赤道半径」の値とする。 *4 : ミッション期間中に取得できるデータを用い、環境モデルの評価解析を行う。



4. SLATS 開発スケジュール

| | FY24 / FY25 | FY26 | FY27 | FY28 | FY29 | FY30 |
|---------------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|----------------|------|
| マイルストーン | | | △ 詳細設計審査 | △ 開発完了審査 | △ 定常運用移行確認会 | |
| | 研究 | 詳細設計 | | 維持設計 | 射場 | |
| | | | | | 初期運用 | |
| | | | | | 定常運用 | |
| | | | | | | 後期運用 |
| 衛星システム バス機器 ミッション機器 | | バス機器製作・試験 | | システム製作・試験 | | |
| | | ミッション機器製作・試験 | | | | |
| ロケット関連 | | 衛星分離部等ロケット製作、打上げ作業 | | | | |
| 地上システム 運用準備 | | 地上システムの整備 | | | | |
| | | | 運用準備 | | | |

- SLATSを構成するバス機器、ミッション機器の製造をFY28初期に完了し、システムプロトフライト試験に移行する計画。
- ロケット関連作業や地上システムの整備について計画に従い、作業を実施中。

12



6. まとめ

超低高度衛星の意義・価値と現在開発中の超低高度衛星技術試験機（SLATS）の開発状況についてご紹介しました。

これまで人工衛星で利用されてこなかった、200km～300kmの超低高度域を活用を目指します。

将来の新しい人工衛星の利用を生み出すことで、防災・気象・環境等の数多くの分野において社会的課題の解決に貢献していきたいと考えております。



AOFS/MDM開発状況 について

第3回超低高度衛星の利用
に向けたワークショップ
2016年2月29日 JAXA東京事務所

宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第一研究ユニット
木本雄吾、宮崎英治



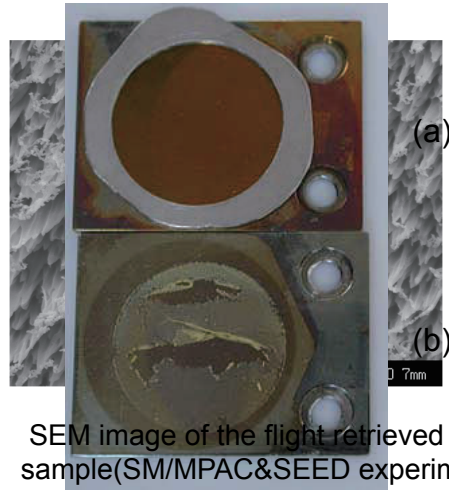
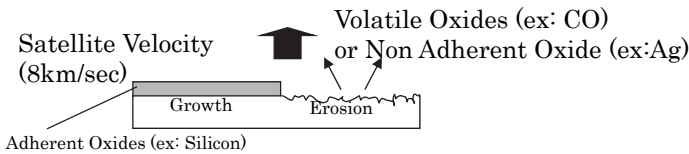
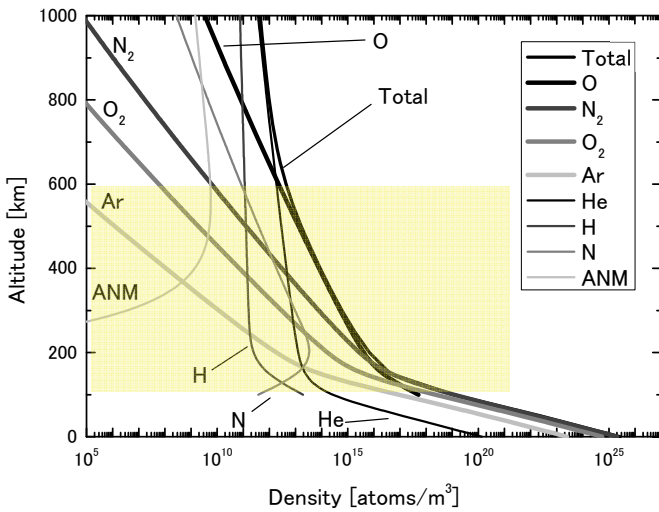
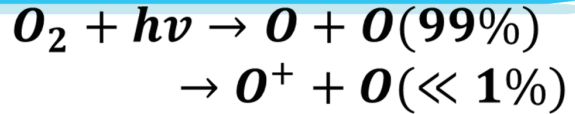
Contents



1. AMO (Atomic oxygen MOnitor) の目的
2. 原子状酸素についての知見の現状、課題、
SLATS/AMOで得られる知見の展望
3. 開発結果
4. まとめ



1. AMOの目的



SEM image of the flight retrieved sample(SM/MPAC&SEED experiments)

Surface of Kapton H (thickness: 25μm) ((a) pristine sample, (b) sample irradiated by AO of 9×10^{20} [atoms/cm²])



1. AMOの目的

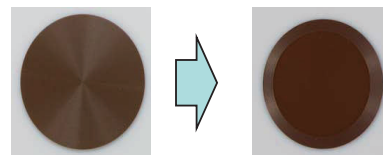


ISS photovoltaic array blanket box cover after one year¹⁾

(1) Bruce Banks, et al., "Durability Issues for the Protection of Materials From Atomic Oxygen Attack in Low Earth Orbit", IAC-02-1.5.02, 2002



SEDA-AP搭載
微小粒子捕獲実験装置及び材料曝露実験装置 (MPAC&SEED)



宇宙曝露前 宇宙曝露後

宇宙曝露前後の原子状酸素モニタ材表面状態²⁾

(2) Yugo Kimoto, "Passive Space Environment Effect Measurement on JEM/MPAC&SEED", Astrophysics and Space Science Proceedings 32 Protection of Materials and Structures from the space environment(2012), pp73-82



1. AMOの目的



SLATSに搭載されるAMOは、AO環境とその影響を観測するミッションであり、次の2種の機器で構成

- 原子状酸素フルエンスセンサ
(Atomic Oxygen Fluence Sensor : AOFS)
→SLATSが運用される軌道のAO環境の計測
 - 材料劣化モニタ
(Material Degradation Monitor : MDM)
→AOによる材料劣化を軌道上CCDカメラで確認
- ミッション期間 約2年(うち250km以下:約3ヶ月)

5



2.原子状酸素についての知見の現状、課題(1/2)



200km～300kmの大気環境はAOが支配的である。このため、超低高度衛星の実現にあたっては、AOの密度、挙動^(*)や材料劣化特性を評価することが重要である。

(*)挙動とは、衛星の進行方向から入射するAOが衛星各部に到達し、実際に影響を及ぼしうるAO影響の様子。

AOにかかる技術課題と現状

衝突量(フルエンス)と挙動

- 超低高度域である高度300 km 以下におけるAOの詳細な軌道上計測データは無い。また、AOの挙動についてのデータも不足している。AOのフルエンス量およびその挙動を把握するための実データの取得が必要である。

材料サンプルの劣化状況把握

- 高度300 km 以下において、AOによる材料の劣化状況を記録したデータはない。材料サンプル(熱制御材、耐酸化膜等)の劣化状況を把握するための実データの取得が必要である。

6



2.原子状酸素についての知見の現状、課題(2/2)



・ 現状の超低高度大気モデルの問題点

超低高度大気の軌道上での直接計測(*in-situ*)の報告例はなく、また現状の超低高度大気モデルは 総大気密度で $\pm 40\%$ (2σ) 程度の誤差があるとの報告がある。



超低高度大気、特に材料劣化に大きく関わるAO を直接計測するため、H/W設計目標として誤差精度 $\pm 20\%$ (2σ) を設定し、AO の実測を実現する。

なお、直接計測することで ①地上試験における計測原理と同じ測定方法となり、データの同一性を確保できる。②AO量を計測するのみならず、挙動を把握し、将来機への設計指針を与えることが可能となる。

7



2.SLATS/AMOで得られる知見の展望



SLATS/AMOで得られる知見

- ・ AOが非常に多い環境で、衛星全体(たとえば衛星内部状態)のAOの状況(挙動)を知ることができる。
- ・ よって超低高度におけるAOの環境、即ち入射面(RAM面)の定量評価のみならず、衛星設計指針へと反映可能なデータを取得する計画となっている。
- ・ MDMにてRAM面の材料劣化指標を、AOの実測データと相関を取りつつ、取得することができる。
- ・ 実測が報告されていないAOの軌道上データをTQCMとシャッターを組み合わせることで得ることができる(世界初)。さらに現状大気モデルと比較し、良い精度のデータを取得することができる。



SLATSで開拓される超低高度軌道を利用する将来宇宙機に向けて、従来の衛星設計手法では対応できないAO対策分野において世界の優位に立ち、国際競争力を確保する。

8



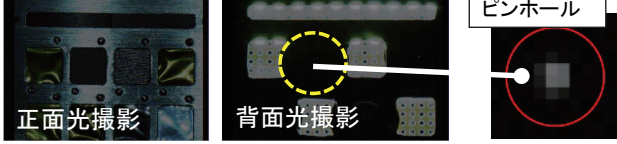
3. ミッション要求に対する開発結果



○ AOFS (原子状酸素フルエンスモニタ)

| 項目 | ミッション要求 | 確認状況 | 判定 |
|--------|---|--|-------|
| ①計測期間 | 初期機能確認運用フェーズから定常段階終了まで | 【完了】シャッターの開閉によって、AO衝突量を1/1000に低減することで、要求の期間を満足。 | 要求を満足 |
| ②計測分解能 | シャッター開による計測毎に出力データに変化があること | 【完了】代表的なセンサの校正試験の結果、感度は 6.68×10^{14} [atoms/cm ² /Hz]であり、高度268 kmでは0.53 [Hz/s] (最少値)となる。1回のシャッター開時間は4秒を想定しており、2.12 Hzの変化が観測できる。テレメトリ出力の最小単位は0.5 Hzである。 | 要求を満足 |
| ③推定精度 | ±20% [atoms/cm ² /Hz] 以下 | 【完了】代表的なセンサの試験の結果、精度見積りは±17.5% (2σ)であることを確認。 | 要求を満足 |

○ MDM (材料劣化モニタ)

| 項目 | ミッション要求 | 確認状況 | 判定 |
|-------------|------------|---|-------|
| ④損失部エッジ検出精度 | ±100[μm]以下 | 試作装置を使用して背面光により100μmのピンホールの識別が可能なることを確認。  | 要求を満足 |

9



4. まとめ



- ミッション要求を満足
- AOFS/MDMは開発を終了
- 今後SLATSシステム側へ引渡



将来超低高度衛星構想・ 衛星設計標準検討

星野 宏和
宇宙航空研究開発機構(JAXA) 第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクトチーム

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ(第3回)@JAXA東京事務所 平成28年2月29日

講演趣旨



超低高度衛星は光学、SAR、ライダーなどリモートセンシング
ミッションでメリットを際立たせるポテンシャルを有している。

SLATSの成果を受けた将来機の構想および開発に活用するための
衛星設計標準検討に向けた取り組みを紹介する。

目次



1. 検討の背景・超低高度利用実績
2. 超低高度衛星のメリット
3. 超低高度衛星システム特有事項
4. 将来超低高度衛星ミッション候補案
 - (1) 光学
 - (2) SAR
 - (3) 電波モニタ
 - (4) ライダ
 - (5) 磁場・重力場・超高層大気サイエンス
5. 衛星設計標準検討への取組み
6. まとめ・今後に向けて

将来超低高度衛星検討の背景



SLATSミッション：将来の超低高度衛星の実現に向けた試験機

- ① 超低高度衛星技術の実証
- ② 大気密度・原子状酸素に関するデータの取得
- ③ 小型高分解能光学センサ(SHIROP)による撮像実験

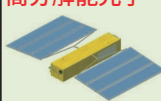
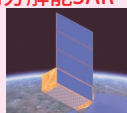
高度200~300km台

SLATSの成果を反映し
課題解決に貢献

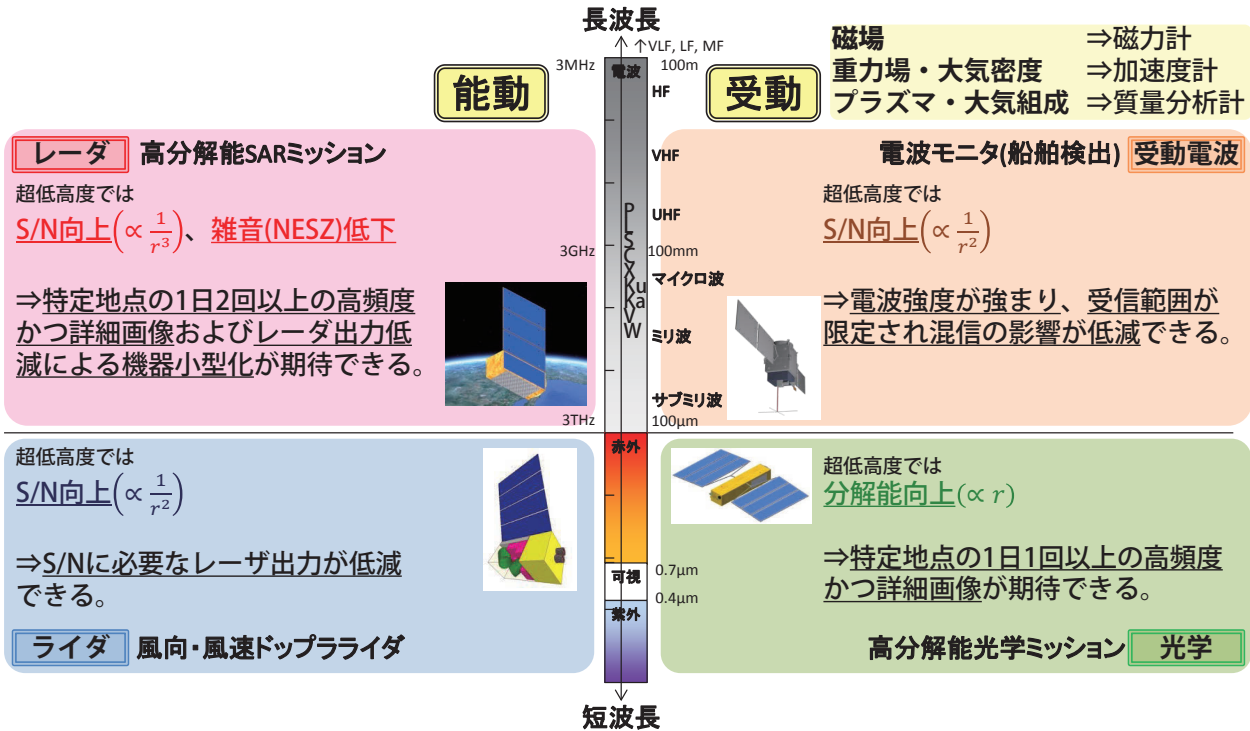


SLATS(平成28年度打上げ)

将来超低高度衛星ミッション：新たな利用分野の開拓

| | 行政分野・防災分野 | | 気象・地球環境分野 海洋分野 | | 超高層大気 サイエンス分野 |
|--|---|--|--|---|------------------------------|
| ①超低高度でなければ 実現できないミッション | 超高分解能光学 | — | — | — | 超高層大気直接 観測(中性大気 ・プラズマ) |
| ②超低高度を利用することで 技術的な実現性が高まる ミッション | — | — | — | 風向・風速ドップラ ライダ  | 磁場観測 重力場観測 |
| ③超低高度を利用することで 大幅な低コスト化が 期待できるミッション | 高分解能光学  | 高分解能SAR  | 降水レーダ マイクロ波放射計 電波モニタ (船舶検出)  | — | 試料回収が必要 な微小重力実験 |

衛星ミッション分類



超低高度では、S/N向上および高分解能・高精度の観測および機器小型化が期待できる。

超低高度利用実績



表. 地球周回衛星のミッション分類と超低高度(近地点高度350km以下)利用実績(2005年以降打上げ)

| ミッション分類 | 機数 (50kg以上) | うち近地点 350km以下 | 超低高度を採用する推定理由 | 超低高度利用代表例 @近地点×遠地点高度 | 運用期間 | | |
|------------------------|----------------|------------------|---------------|-------------------------|--|---|-----------------------------------|
| 高分解能光学 | 103 | 29% | 15 | 60% | 高分解能画像を取得するため (露中は短い運用期間を許容) | 米/KeyHole@260×1,000km 露/Kosmos@180×280km 中/快舟@300km | 楕円軌道：5-10年 回収式：3か月 円軌道：2年以内 |
| 微小重力実験 | 6 | 2% | 6 | 24% | 試料を実験後 短期間で回収するため | 露欧/Foton-M@260×570km 中/返回式@180×220km | 半月-1か月 |
| 宇宙環境観測 | 20 | 6% | 3 | 12% | 大気、プラズマ、放射線等 個々の高度に対応して 直接観測するため | 加/CASSIOPE@330×1,380km | 1年-2年 |
| 重力場観測 | 1 | 0.3% | 1 | 4% | 高度低下により 重力場の観測精度が向上 するため | 欧/GOCE@260-230km (イオンエンジン搭載) | 5年弱 |
| 気象・地球環境光学観測 | 24 | 7% | — | — | | | |
| 高分解能SAR | 34 | 9% | — | — | | | |
| レーダ (高度計、風散乱計、降水、雲) | 4 | 1% | — | — | | | |
| ライダー | 1 | 0.3% | — | — | | | |
| 受動電波(放射計) | 5 | 1% | — | — | | | |
| 受動電波(船舶AIS、ELINT) | 32 | 9% | — | — | | | |
| 通信 | 73 | 21% | — | — | | | |
| 天文・デブリ監視 | 11 | 3% | — | — | | | |
| バス技術開発、等 | 44 | 12% | — | — | | | |
| 合計 | 358 | | 25 | (全体の7%) | | | |

微小重力実験



Foton-M(出典:DLR) 返回式衛星(出典:中国政府)

注：複数用途の衛星はミッションの主目的で分類し、用途が不明な衛星は「バス技術開発、等」に分類した。

ミッション・プロジェクト企画



平成27年4月のJAXA組織改編を受けたミッション・プロジェクト企画

①国立研究開発法人：政策的な枠組みに対応する

- ・開かれたJAXAとすることで、色々な研究開発法人との連携、企業との対話をより幅広く進める。
- ・他の分野で開発された日本独自の強みを宇宙機に導入する。

②機能集約：政策的な枠組みの中で決められた役割をより効果的、効率的に進める

- ・「研究開発部門」 研究開発という大きな柱を1本立て、研究開発機能を集約
- ↓
- ・「ミッション企画部」 本社にミッション企画機能を集約
⇨従来：各本部で新たなプロジェクトを検討
- ↓
- ・「第一宇宙技術部門」 プロジェクトを立上げ、開発・運用(成果創出)する機能として、衛星・輸送系2つの研究開発を行うJAXAの強みの1つを集約

6

超低高度衛星のメリット



| メリット | 備考 |
|--|--------------------------------|
| 【センサ】 | |
| ・同じセンサであれば、性能向上(光学：分解能、SAR：S/N) | — |
| ・同じ性能(光学：分解能、SAR：S/N)であれば、センサ小型化・低コスト化 | — |
| 【システム】 | |
| ・衛星小型化や消費電力の大幅削減 | — |
| ・センサ・衛星の小型化による、製造・試験期間の短縮 | — |
| ・上記に起因して、開発コストの低減 | →個々のミッションに対応したシステム設計に基づいた評価が必要 |

7

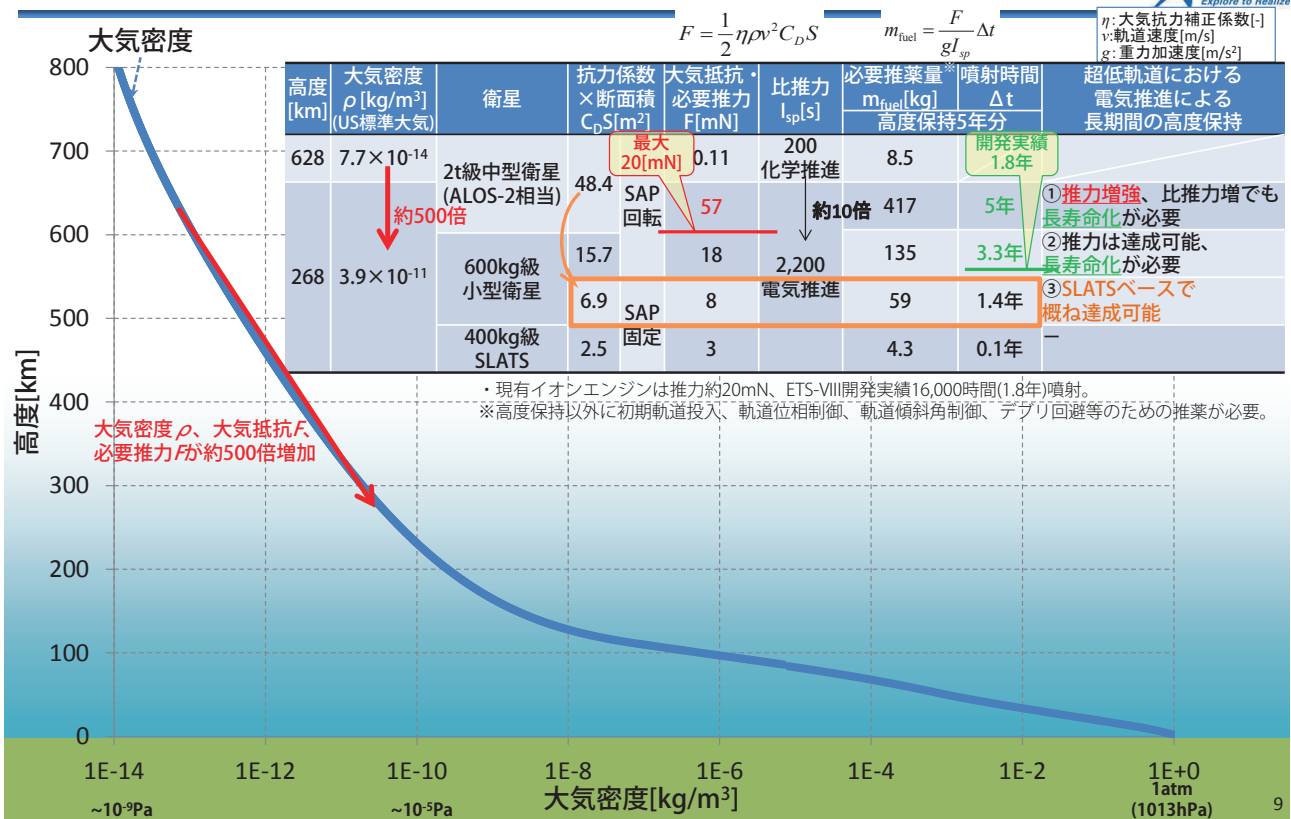
超低高度衛星のデメリット



| デメリット | 対応策(下線はコスト増) |
|--|---|
| 【センサ】 | |
| <ul style="list-style-type: none"> 画素サイズ縮小と視点速度上昇による入射光量減少に伴うS/N低下(光学の場合) 軌道制御の精度劣化の恐れがあり、撮像計画と運用結果のずれが、撮像地点のずれやMTF劣化(光学の場合)を招く可能性がある。 軌道高度に比例して観測幅、観測可能エリアが縮小する。 | <ul style="list-style-type: none"> 積分時間増(20段@695km→60段@250km) リアルタイム軌道決定による撮像計画と結果のずれ縮小 対応不可 |
| 【システム】 | |
| <ul style="list-style-type: none"> 大気抵抗を補償する推葉が増大する。 大気抵抗を電気推進で補償する場合、推力の制限(20mN程度)やスラスト動作寿命の制限(16,000時間)があり、衛星サイズや軌道高度に制約が発生する。 大気抵抗の予測精度に課題がある。 可視時間が短い(10分@600km→4分@250km)。 原子状酸素が影響してMLIは損傷し、熱制御異常の恐れがある。 | <ul style="list-style-type: none"> ミッションに適した軌道高度選択 電気推進(高比推力) 既存の範囲内での運用 電気推進の大推力化&電力確保のための太陽電池パドル大型化 SLATS運用成果を反映 Ka帯等高速データ通信 データ量削減 耐原子状酸素MLIコーティング |

8

衛星高度低下による大気抵抗の影響



9

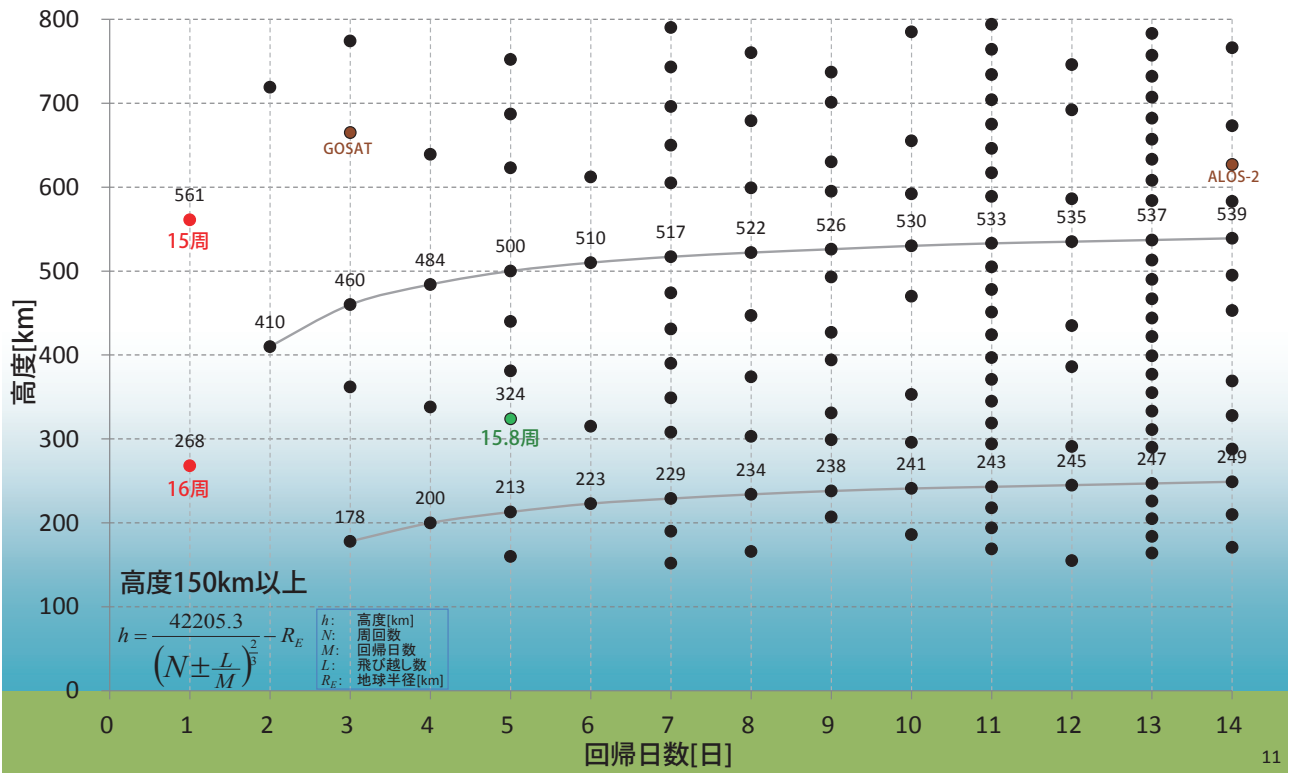
(Backup)LST選択と太陽電池パドル駆動の関係



| 軌道ケース | LST18:00 (Dawn-Dusk) | LST10:30 | |
|-------------|---|----------|----------|
| | | | |
| 太陽電池パドル駆動方式 | 固定 | | 回転 |
| 発生電力プロファイル | <p>大 (全日照・太陽方向正対)</p> | <p>小</p> | <p>中</p> |
| 大気抵抗 | 小 | | 大 |
| 評価 | <p>固定式の太陽電池パドルでも電力確保が容易で、パドルが進行方向に平行なため、空力断面積が小さくなり、大気抵抗を小さくできることから、超低高度衛星に有利。但し、地表面が暗いため、光学ミッションには向かない。</p> <p>パドルが進行方向に平行なため、空力断面積が小さくなるが、発生電力が回転式に比べて半分程度になるため、電力制約が大きくなる。</p> <p>日照中は一定の発生電力が確保できるが、パドルの回転により空力断面積が変化して大きくなるため、極付近で大気抵抗が大きい傾向にある。</p> <p>光学観測にはLST10:30付近などの軌道が用いられるが、発生電力の観点からは回転式の太陽電池パドルが望ましいため、大気抵抗と発生電力をトレードオフして、太陽電池パドルの固定/回転を選択する。</p> | | |

10

(Backup)軌道高度と太陽同期準回帰日数の関係



11

(Backup)超低軌道へのロケット打上げ



- イプシロンロケット搭載1機打上げに加えて、
 - 強化型イプシロン(日本) ⇒590kg@太陽同期軌道SSO500km
- H-IIA/H3ロケットによる複数機打上げにより、コスト低減を図る。

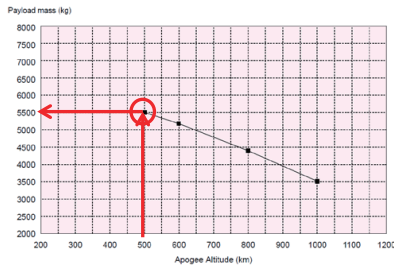


Figure 2.4.1 Payload capability for SSO mission (H2A202 with Model 5S fairing except summer)

出典: H-IIA User's Manual

- H-IIA(日本) ⇒5.5t@SSO500km
- Dnepr(露) ⇒2.3t@SSO600km
- Falcon9(米) ⇒8.1t@SSO300km、など



磁気圏観測衛星SWARM同時分離(出典:ESA)
→Rokotロケット(露)、衛星質量1機約500kg

•より低高度での分離に対するロケット飛行安全上の課題
•複数機同時搭載方式の検討

複数機同時打上げコンフィギュレーションにより、コスト低減の実現性を検討する。

高分解能光学(高精細映像)

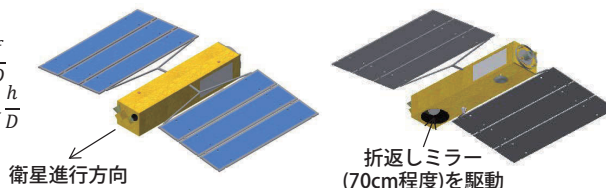


- 衛星を姿勢変更せず、折返し2軸ポインティングミラー駆動により高精度で指向することで、俊敏な高アジリティ観測を行う。大気抵抗の影響を小さくするため、衛星進行方向に長い光学系とする。
- 口径 $D \sim 0.3\text{m}$ 級反射望遠鏡($F10, f \sim 3\text{m}$)により高度 $h \sim 268\text{km}$ から 0.5m 級観測を行うのが一例。

回折限界(δ :画素ピッチ)


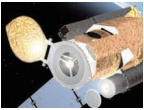
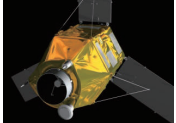
$$\delta = 1.22\lambda F = 1.22\lambda \frac{f}{D}$$

$$\text{GSD} = \frac{\delta}{f} h = 1.22\lambda \frac{Fh}{f} = 1.22\lambda \frac{h}{D}$$



SLATS/SHIROP開発成果反映

製作しやすい小型光学系

| 望遠鏡口径 | 0.2m級 | 0.3m級 | 0.4m級 | 0.5m級 | 0.6m級 |
|---|------------------------------|------------|---|---|---|
| 搭載例 | SLATS/SHIROP SPRINT-A(UV) | ALOS/PRISM | 米Skysat  出典:SkyBox | SOLAR-B  | 仏Pleiades  出典:CNES |
| 回折限界 @ $h \sim 268\text{km}, \lambda = 0.45 \mu\text{m}$ | 0.7m | 0.5m | 0.34m | 0.27m | 0.23m |

高分解能光学(高精細映像)



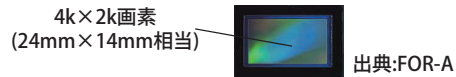
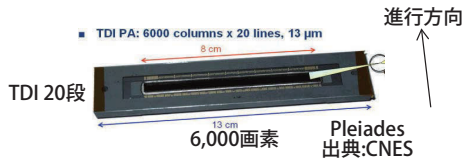
- ・撮影対象を一定時間指向し、高感度エリアセンサでの積分によりS/N向上、低コスト化を図る。

従来方式: 1次元ラインセンサ(TDI CCD)

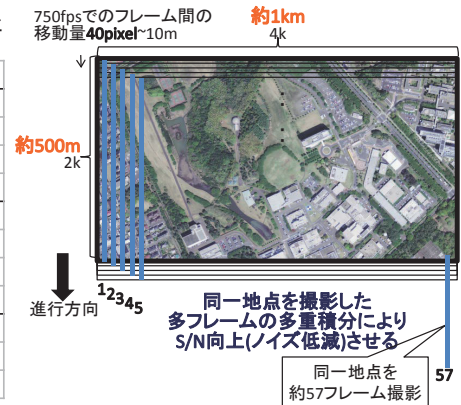
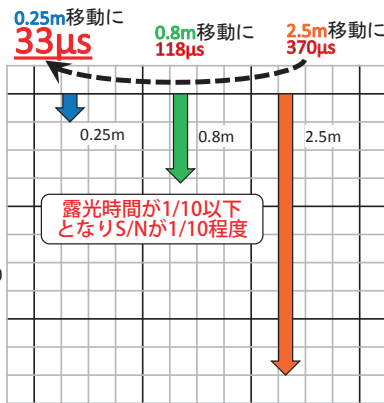
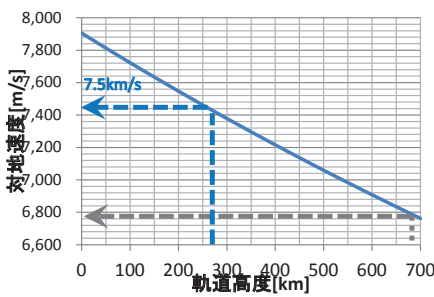
- ・ S/N向上のため、進行方向の隣接画素に電荷を転送・積分
 - 撮像周期に同期した隣接画素への電荷転送が必要
 - CCDの製造プロセスは一般の半導体でのプロセスとは異なるなど特殊性があり、製造ラインが限られることから、製造コストが高くなる傾向にある
 - 静止画撮影

新方式: 2次元エリアセンサ(エリアCMOS)

- ・ 各画素で独立に電荷を蓄積(通常のデジカメと同じ)
 - シャッターON/OFFで撮像し、素子の駆動が単純。グローバルシャッターでは全素子同時露光
 - CMOSは標準的な半導体製造プロセスで生産可能で成長が著しく、民間技術活用でコスト低減が見込める
 - 動画撮影が可能



高分解能光学(高精細映像)



| 問題点 | 課題 | 解決策 |
|---------------------------|------------|---|
| ① 速いシャッター スピード(短い露光時間) | 高速撮影 | 分解能を高くすると露光時間(撮像周期)が短くなるため、1/30,000s程度の高速度撮影が可能。高速カメラを使用する ※高度h=268km(対地速度v=7.5km/s)からの撮影で分解能0.25mを実現するための露光時間は、0.25m/7.5km/s=33 μs(1/30,000s) |
| ② S/N低下 | 信号増幅・ノイズ低減 | 露光時間が短くなるとセンサへの入射光量が低下するため、S/Nが低下する。S/N向上に必要な信号増幅・ノイズ低減の課題に対して、高感度・高速カメラで撮影した高速フレーム多重積分により、TDIで50段程度のS/N向上効果を上げる |

高分解能光学(高精細映像)

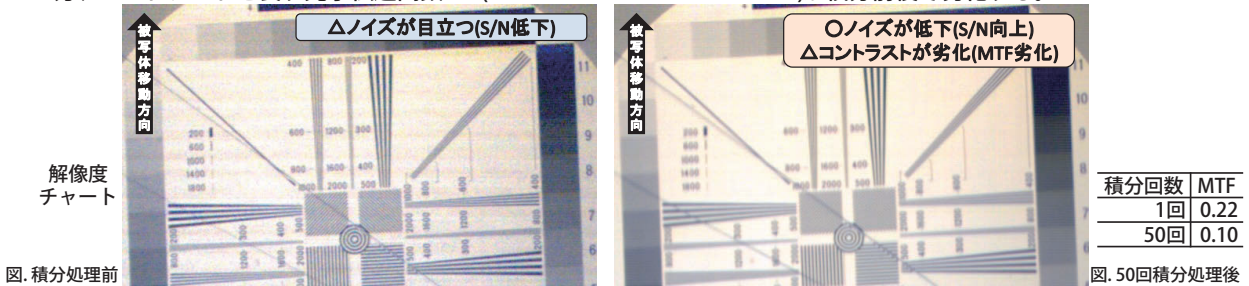


※フレームレートコンバータやビデオスタビライザで使用している動き補正処理技術を使用

- 4Kハイスピードカメラによる高速撮像フレームから動きベクトル量を検出※後、同期およびフレーム積分処理
 ⇒TDI50段程度の積分前後でS/N向上
 ⇒S/N増幅率が√積分回数に達していない⇒ノイズを重畳させない積分方法は検討課題

| ケース | 照度 | フレームレート | 露光時間 | F値 | ゲイン設定 | S/N (1回) | S/N 積分回数 | S/N 増幅率 |
|------|----------|---------|-----------|------|--------|----------|--------------|---------|
| 照度減少 | 5,000lx | 750fps | 1/30,000s | F=10 | 64.3dB | 3.8 | 12.9 50回 | 3.4倍 |
| ノミナル | 60,000lx | 750fps | 1/30,000s | F=10 | 37.9dB | 89.1 | 131.8 50回 | 1.5倍 |

- 一方、コントラストを表す光学伝達関数MTF(Modulation Transfer Function)が積分前後で劣化する。



- 被写体の明るさに応じてフレーム積分回数を最適化することにより、積分が不要な場合には滑らかな動画とし、S/Nを必要とする場合には静止画に近い(コマ送り)画像とする。

- 衛星搭載方式としてエリアイメージャでのハイスピードフレーム積分処理はS/N向上に有効である。
- ノイズを重畳させない積分方法は検討課題である。

高分解能SAR

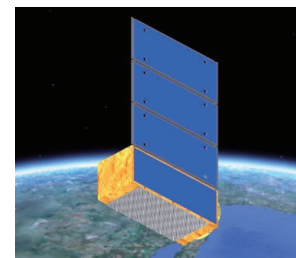


L/C/X帯に次ぐ新たな周波数帯として、広帯域が使用可能なKu帯を利用した高分解能SAR観測を行う。
 (地球観測を目的とした衛星搭載KuバンドSARIは世界初)

超低高度SAR観測衛星とTerraSAR-Xの比較

| | 超低高度SAR観測衛星 | | TerraSAR-X |
|--------|---------------------------------------|---------|---|
| 軌道高度 | 300 km | 軌道高度の低下 | 515 km |
| 周波数 | 13.5 GHz(Ku-band) | 新たな周波数 | 9.65 GHz(X-band) |
| 帯域幅 | 500 MHz(最大) | 広帯域幅 | 150 MHz |
| アンテナ寸法 | 3.0 m(Az) × 1.5 m(EI) | | 4.8 m(Az) × 0.8 m(EI) |
| 地上分解能 | 1.5 m以内(Az) × 1.0 m以内(Rg) (Stripmap) | 分解能の向上 | 2 m以内(Az) × 1 m以内(Rg) (Spotlight) 3 m以内(Az) × 3 m以内(Rg) (Stripmap) |
| 観測幅 | 10 km以上 (Stripmap) | | 30 km以上 (Stripmap) |
| NESZ | -23 dB以下 (Stripmap) | 同等の信号品質 | -22 dB以下 (Stripmap) |
| 送信電力 | ピーク: 1.4 kW 平均: 140 W (送信Duty:10%) | 送信電力低減 | ピーク: 2.26 kW 平均: 407 W (送信Duty:18%) |

超低高度SAR衛星システム例



軌道上外観図

| 項目 | 諸元 |
|---------|---|
| 高度(SSO) | 300km |
| LST | 18時 |
| 分解能 | Stripmap: 1.5m(Az) × 1.0m(Rg) Spotlight: 0.6m(Az) × 0.6m(Rg) |
| 観測幅 | Stripmap: 10.0km(Rg) Spotlight: 6.0km(Az) × 6.0km(Rg) |
| センサ | KuバンドSAR |
| イオンエンジン | 20mN級イオンエンジン×2基 |
| 運用期間 | 5年 |
| 衛星質量 | 1,000kg以下 |

高分解能SAR



Ku帯SAR衛星検討例とX帯(TerraSAR-X)、L帯SAR(ALOS-2)の比較

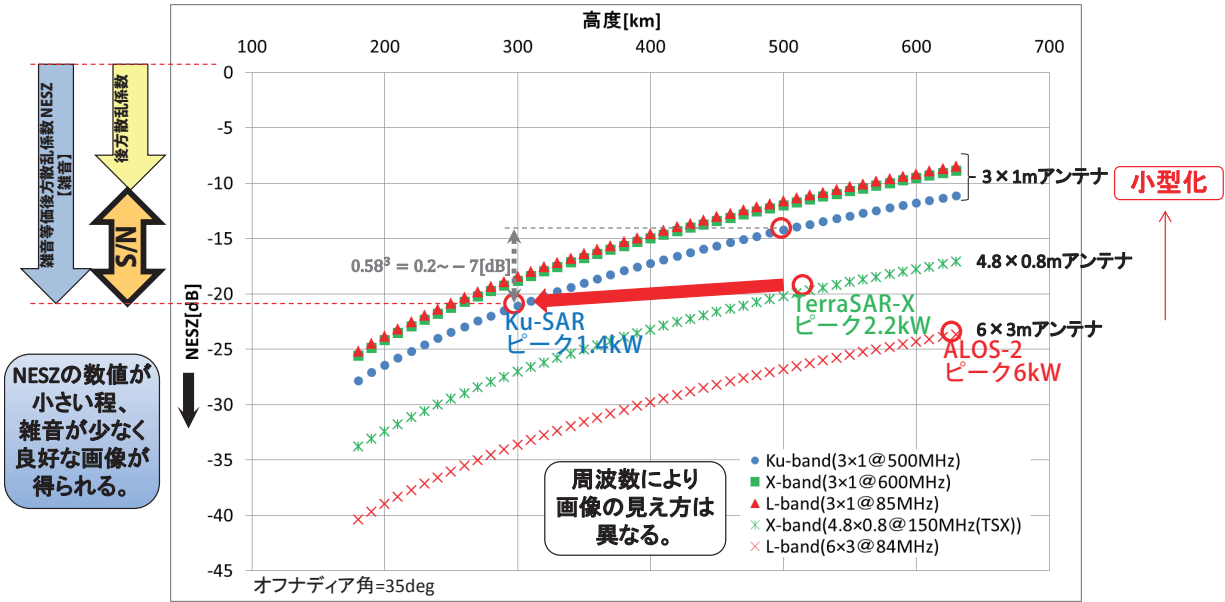


図. 衛星SARの高度とNESZの関係(周波数・帯域幅・アンテナサイズ別)

・周波数・帯域幅以外を同一条件とすると、**高周波数**のほうがアンテナ利得が大きくなるため、帯域幅が広くても、**信号品質(NESZ)**が向上する。

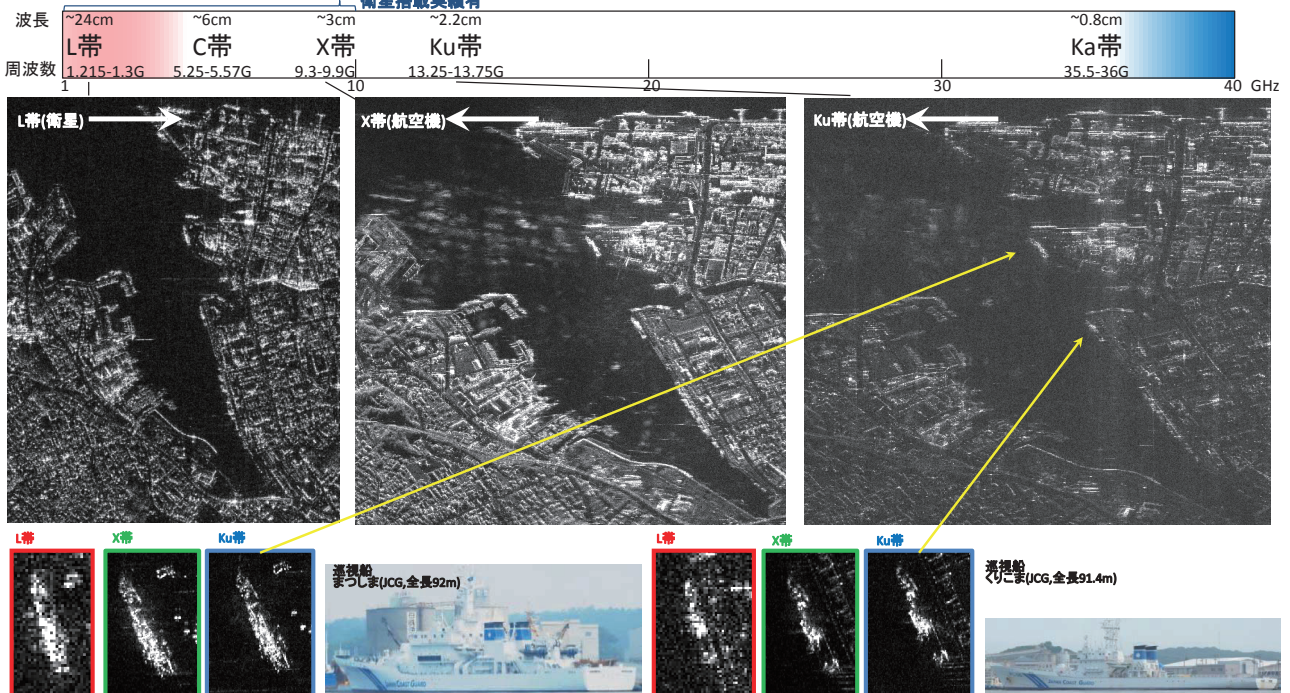
X帯, Ku帯(航空機): 2015/7/28 12:57(JST) HH, L, 40deg
 L帯(ALOS-2): 2015/7/28 12:37(JST) HH, L, 47.7deg

高分解能SAR

航空機SAR観測実験
 港湾・船舶@仙台塩釜港



・ SAR画像の周波数(波長)の違いによる比較



周波数が高いほど、反射特性の違いにより、SAR画像の視認性向上、判読性向上が期待される。

電波モニタ(電波源マッピング)



■排他的経済水域(EEZ)等の関心海域を航行する船舶動向を超低高度からの電波観測により把握。

- 従来**
- SARによる船舶検知(ALOS-2では観測幅50km)
 - 船舶自動識別装置AISによる船舶位置把握(幅5,000km程度)
 - 船舶過密域で混信により受信率が低い。
 - 一部の船舶はAIS(VHF帯)を発信していない。

新規 • 船舶レーダ(X帯)などの相補的な電波観測による位置推定

⇒超低高度衛星では低仰角・近距離の電波受信が可能で、範囲(幅500km程度)が限定されることで混信の影響が抑えられることから、AISでは検出できない船舶の検出率および位置推定精度の向上を見込む。

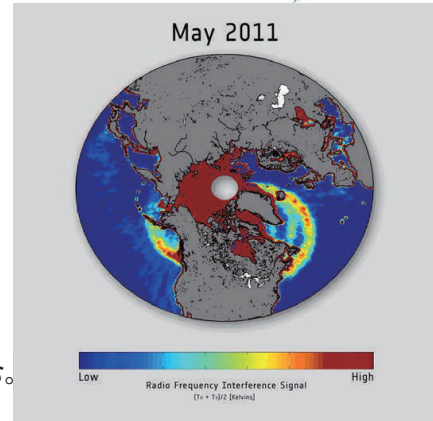
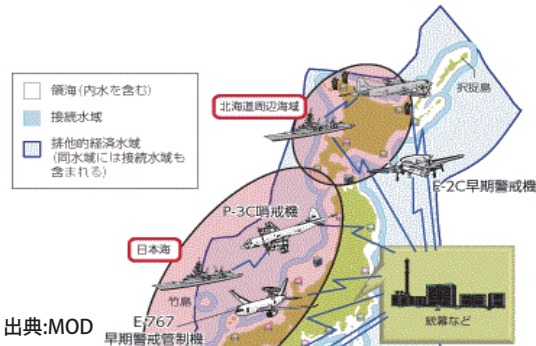


図. 電波干渉の改善 (SMOS/L帯干渉計) 出典:ESA

図表Ⅲ-1-1-1 わが国周辺海空域の警戒監視のイメージ



風観測と高層天気

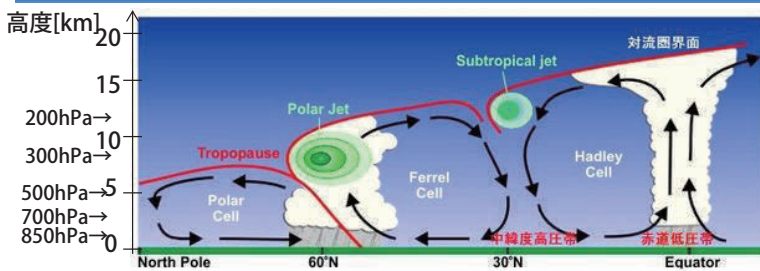


図. 対流圏界面高度の緯度分布とジェット気流 出典:NOAA

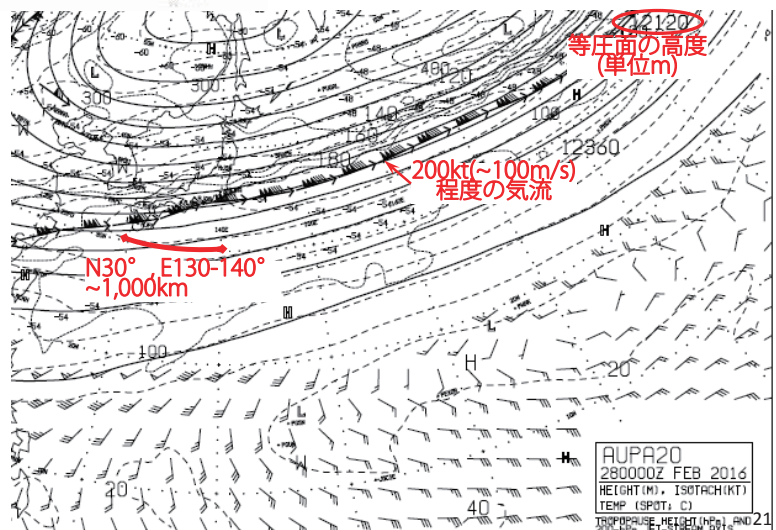


図. 200hPa高層天気図 出典:気象庁

ドップラ観測・観測対象

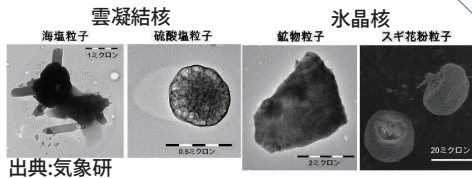
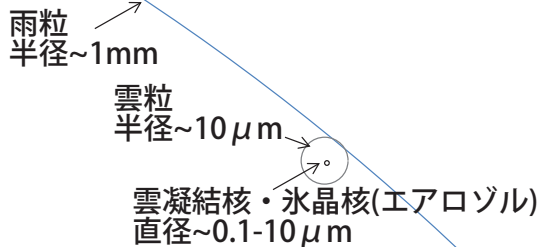


雲エアロゾル放射ミッションEarthCARE/雲プロファイリングレーダCPR

⇒雲粒により散乱される94GHz帯電波観測

- ・電波散乱強度・位相 ⇒雲粒やエアロゾルの鉛直構造
- ・ドップラ速度 ⇒雲粒の上昇・下降速度

| CPR主要諸元 | |
|------------|--------------------|
| 中心周波数 | 94.050 GHz |
| アンテナ開口径 | 2.5mΦ |
| ビーム幅 | 0.095度 |
| 送信電力 | 1.5 kW以上 |
| 送信パルス周波数 | 6100 Hz~7500Hz(可変) |
| 送信パルス幅 | 3.3 μs |
| 最小検出感度 | -35 dBZ以下 |
| ドップラ速度計測範囲 | ±10m/s |
| ドップラ速度計測精度 | 1.3 m/s以下 |
| 鉛直分解能 | 500 m |
| 質量 | 約270kg |

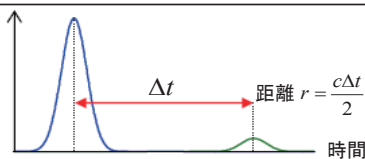
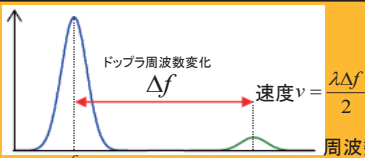
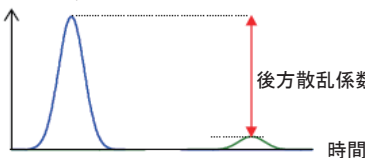
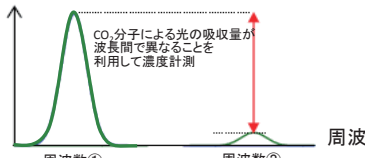



- ・雨粒 : 1mm ⇒Ku:13GHz帯(2.3cm), Ka:35GHz帯(8.5mm)マイクロ波レーダ
- ・雲粒 : 10μm ⇒W:94GHz帯(3.2mm)ミリ波レーダ
- ・エアロゾル : 0.1-10μm ⇒1.5μm, 2μmライダー

ライダー



代表的なライダー計測原理

| ライダー計測原理 | 送信 — 受信 | 用途 | 衛星ミッション例(実績・計画) | 超低高度衛星適用への課題 |
|---|---------|--|---|---|
|  | | 高度計 | 米/ICESat(2003)@590km 日/植生ライダーMOLI@ISS(計画) | ・大気抵抗による衛星軌道位置決定精度が劣化する場合、高度計測精度への影響について検討が必要。 |
|  | | ドップラライダー (風向風速計測) | 欧/ADM-Aeolus@400km(計画) | ・大気抵抗による姿勢変動の影響が大きくなるため、ドップラ成分計測における風速・風向精度への影響について検討が必要。 |
|  | | 散乱ライダー (雲・エアロゾル計測) ・雲・エアロゾルによるミー散乱 ・大気分子によるレイリー散乱 ⇒分子密度、温度計測 ※地上観測ライダーネットワークはミー散乱ライダー | 米仏/Calipso(2006)@700km 日欧/EarthCARE@400km(計画) 日/MDS-2@550km(計画中止) | — |
|  | | 差分吸収ライダーDIAL (微量ガス(CO ₂ 等)濃度計測) | 米/ASCENDS(計画) | — |

ライダー



大気中エアロゾルで反射したレーザドップラ周波数から風向・風速を計測し、気象予測モデル精度向上に貢献する。
超低高度衛星搭載により斜め2方向に照射し、水平風速成分により**世界初の2次元風向・風速観測**を可能とする。

■ 衛星による風向・風速観測の意義

A) 気象予測(メソ数値)モデル精度向上

ライフサイクルの大半において海洋上に存在している台風などの観測データ不足解消に貢献する。

B) 地球環境(気候変動予測)分野への貢献

中期予測にインパクトを及ぼす大気中の物質輸送、越境汚染、炭素循環の解明に貢献する。

性能目標

| 高度 | 地表 | 2km | 5km | 10km | |
|-------|-------|-------|------|------|--------|
| 水平分解能 | 100km | | | | 約13秒平均 |
| 鉛直分解能 | 0.5km | 0.5km | 1km | 1km | |
| 風速分解能 | 1m/s | 1m/s | 2m/s | 4m/s | |

各高度のエアロゾル濃度に応じた後方散乱係数 β と所要パルスエネルギー E の関係から、目標分解能を達成可能な E および積分回数 N を見積もる。

例) 衛星搭載1.5 μ mライダー

→ $E=10$ mJ, PRF=2.5kHz($N\sim 32,000$)で達成可能か、減衰、揺らぎ(屈折)の影響評価を行う。

超低高度ライダー衛星システム例

ドップラライダー

$f_d = \frac{2v}{\lambda}$
ドップラシフトを計測

| 項目 | 諸元 |
|---------|------------------------------|
| 高度(SSO) | 268km |
| LST | 18時 |
| センサ | ドップラライダー(口径35cm)×2基 |
| 観測分解能 | 水平分解能: 100km 鉛直分解能: 0.5km |
| イオンエンジン | 20mN級イオンエンジン×2基 |
| 運用期間 | 5年 |
| 衛星質量 | 600kg以下 |

24

磁場・重力場・超高層大気サイエンス



超低高度からのサイエンスとして、中性大気・電離圏プラズマなどのその場直接観測および磁場観測、重力場観測を行うためのセンサ搭載が考えられる。

| | | |
|-----------------|--|---|
| ① 磁力計 | 地球内部磁場を計測し、地球内部の活動および電離圏プラズマとの相互作用などについて解明する。 | ERG: 分解能31pT/レンジ±8,000nT 分解能250pT/レンジ±60,000nT |
| ② 加速度計 | 大気ドラッグにより中性大気密度を計測する。また、地球内部の重力ポテンシャル・重力異常を計測する。 | GOCE:分解能 10^{-12} m/s ² (10^{-13} g)加速度計 cf. 大気ドラッグ, 太陽輻射圧: 10^{-6} - 10^{-7} m/s ² 地球輻射圧: 10^{-8} m/s ² 程度 |
| ③ 静電プローブ | プラズマ内の電子密度、電子温度、イオン密度、イオン電位などを計測する。 | れいめい:電子密度 $10^8\sim 10^{10}/m^3$ |
| ④ 質量分析計 | 電離圏プラズマおよびイオン化した中性大気(O ⁺ など)の組成(分子量・割合)を計測する。 | MMO:質量分解能1/40/質量レンジ1-60 /エネルギーレンジ5eV-4keV(TOF-MS) |

25

衛星設計標準



SLATSでは他衛星同様、様々な項目で標準類を適用し、独自の基準を定めている。
 将来機はSLATSの成果を反映した標準、基準に基づき設計することで検討を進めている。

• JAXA共通技術文書(JMR/JERG) <http://sma.jaxa.jp/TechDoc/>

- JMR：プログラム管理要求文書(JAXA Management Requirement)
- JERG：技術要求・ガイドライン文書(JAXA Engineering Requirement Guideline)
- 0：共通
- 1：ロケット
- 2：宇宙機(人工衛星・探査機)
 - 100：システム設計標準
 - 200：電気設計標準
 - 300：機械系設計標準
 - 400：通信設計標準
 - 500：制御系設計標準
 - 600：ソフトウェア開発標準
 - 700：運用設計標準
- 3：地上設備

【考え方】

- 従来の設計標準では規定されていない項目については新規に設定する。⇒空力、材料劣化
- 既存の設計標準・基準の一部を新たなデータで置き換える(更新する)。

衛星設計標準



| 項目 | 標準類 | SLATS適用・参考 | 対応 | 反映データ類 | 分担 | |
|---------|---------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| ①システム | システム | JERG-2-000 JERG-2-100-HB001 | 宇宙機(人工衛星・探査機)設計標準 システム設計標準/ハンドブック | N/A N/A | | |
| | 安全 | JMR-001B JMR-002B JERG-1-007 | システム安全標準 ロケットペイロード安全標準 射場・飛行運用安全技術基準 | ○ ○ ○ | SLATSシステム安全プログラム計画書 | |
| | スペースデブリ | JMR-003 JERG-2-144-HB001 | スペースデブリ発生防止標準 スペースデブリ防御設計マニュアル | ○ ○ | | |
| | 信頼性・品質保証 | JMR-004B JERG-0-016 JMR-005 | 信頼性プログラム標準 宇宙開発信頼性技術ハンドブック 品質保証プログラム標準 | ○ ○ ○ | SLATS信頼性設計基準書 | |
| | コンフィギュレーション | JMR-006 | コンフィギュレーション管理標準 | ○ | | |
| | 設計過誤防止 | JERG-2-007 JERG-2-008 | 人工衛星設計過誤防止基準 人工衛星設計過誤防止検査/試験基準 | ○ ○ | | |
| | 部品・材料、 コンタミネーション | JMR-010 JERG-0-034 JERG-0-039 JERG-0-040 JERG-0-041 JERG-0-042 JERG-0-043 JMR-012 | コンタミネーション管理標準 宇宙用有機材料アウトガスデータ集 宇宙用はんだ付工程標準 宇宙用電子機器接着工程標準 宇宙用電気配線工程標準 プリント配線板と組立品の設計標準 宇宙用表面塗装はんだ付工程標準 電気・電子・電気機器部品プログラム標準 | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | SLATS材料・工程基準書 SLATS EEE部品プログラム基準書 | |
| | 試験 | JERG-2-002 JERG-2-130 | 衛星一般試験標準(廃止予定) 宇宙機一般試験標準 | ○ ○ | | |
| | 宇宙環境 | JERG-2-141 JERG-2-142 | 宇宙環境標準 一般環境標準(宇宙機) | N/A N/A | SLATS耐環境性設計基準書 | 更新 大気密度データ、大気環境モデル |
| | 放射線 | JERG-2-143 | 耐放射線設計標準 | ○ | | |
| | 軌道 | JERG-2-151-HB001 | ミッション・軌道設計ハンドブック | N/A | | 更新 軌道データ、C _s 評価 |
| | 設計(軌道・姿勢、加熱) | — | — | — | SLATS軌道子軌道設計基準書 | 新規 シミュレーション、風洞実験 |
| | 設計(軌道・姿勢、加熱) | — | — | — | — | 新規 AOFsデータ、MDMデータ |
| | 設計(軌道・姿勢、加熱) | — | — | — | — | 一部、研究機関 |
| ②電気 | 電気 | JERG-2-200 | 電気設計標準 | ○ | SLATS電気設計基準書 | |
| | 帯電・放電・絶縁 | JERG-2-211 JERG-2-212 JERG-2-213 | 帯電・放電設計標準 ワイヤレディング設計標準 絶縁設計標準 | ○ ○ ○ | | 更新 一(運用時の知見) |
| | 電源系、太陽電池/パドル系 | JERG-2-214 JERG-2-215 JERG-2-216-HB001 | 電源系設計標準 太陽電池/パドル系設計標準 太陽電池/パネル品質保証ハンドブック | ○ ○ ○ | | |
| | 電磁適合性EMC | JERG-2-241 JERG-0-028 | EMC設計標準 EMC設計標準 | N/A N/A | SLATS電磁適合性設計基準書 | 更新 一(運用時の知見) |
| ③機械系 | 機械・機構・構造 | JERG-0-037 JERG-2-320 JERG-2-330 JERG-2-005 | 宇宙用機構及び機構部品設計ガイドライン 構造設計標準 機構設計標準 人工衛星機械設計標準 | ○ ○ ○ ○ | SLATS機械設計基準書 | |
| | 熱 | JERG-2-310 JERG-2-009 JERG-2-311 | 熱制御系設計標準 人工衛星熱制御系設計標準 MLI剥離防止設計標準 | ○ ○ ○ | SLATS熱設計基準書 | 更新 軌道上熱データ |
| | 推進系 | JERG-2-340 JERG-0-001 | 宇宙機用推進系設計標準 宇宙用高圧ガス機器技術基準 | ○ ○ | | |
| ④通信 | 通信 | JERG-2-400 JERG-2-410 JERG-2-420 JERG-0-033 JERG-0-024 | 通信設計標準(利用ガイドライン含む) RF通信系設計標準 RF回線設計標準 T&Eデータ管理基準 宇宙データシステム(CCSDS動弁)ハンドブック | ○ ○ ○ ○ ○ | SLATSテレメトリコマンド設計基準書 | |
| ⑤制御系 | 姿勢系 | JERG-2-500 JERG-2-510 | 制御系設計標準 姿勢制御系設計標準 | ○ ○ | | |
| | 擾乱 | JERG-2-152 | 擾乱管理標準 | ○ | | 更新 軌道データ、姿勢データ、撮像データ |
| | 指向管理 | JERG-2-153 | 指向管理標準 | ○ | | 更新 軌道データ、姿勢データ、撮像データ |
| ⑥ソフトウェア | ソフトウェア | JERG-2-600 | 宇宙機ソフトウェア開発標準 ソフトウェア開発標準(宇宙機用) | ○ ○ | | |
| | 地上ソフトウェア | JERG-3-003 | 地上ソフトウェア開発標準 | ○ | | |
| ⑦運用 | 運用 | JERG-2-700 | 運用設計標準 | N/A | | 更新 超低軌道運用 |

※この他にMIL, JIS, ISOなどの標準を適用している。

※N/Aには設計者手後で制定された標準類を含む。

まとめ・今後に向けて



本講演では超低高度衛星の将来構想を報告した。

超低高度衛星がもたらす波及効果やインパクトを評価し、社会的課題の解決に貢献する有望なミッションを創出していく考えである。

技術的にハードルが高いチャレンジングなミッションに挑戦して、ユーザにメリットがあるイノベーションを生み出すことが目標である。

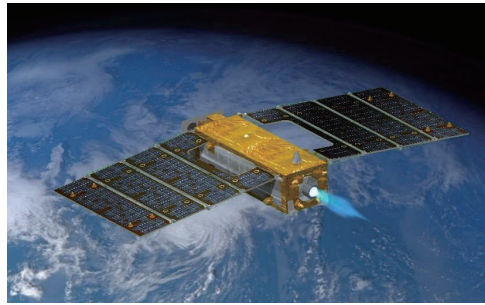
来年度以降ミッション検討を行い、SLATS打上げ後に開発着手可能とするため、衛星搭載センサの要素技術研究(フロントローディング)を行う計画である。設計検討にはSLATSの軌道上成果を反映する。

・最短ケースでのスケジュール例

| 年度 | FY27 | FY28 | FY29 | FY30 | FY31 | FY32 | FY33 | FY34 |
|--------------------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| SLATS | | ▲打上げ | | | | | | |
| | | 開発 | 運用 | | | | | |
| (参考)想定 将来超低高度衛星 | | センサ研究 | | 将来機開発 | | | | |
| | | 予備設計 | 基本設計 | 詳細設計 | 維持設計 | ▲打上げ | 定常運用 | |



超低高度衛星の利用に向けた ワークショップ(第3回) 軌道力学・大気密度計測



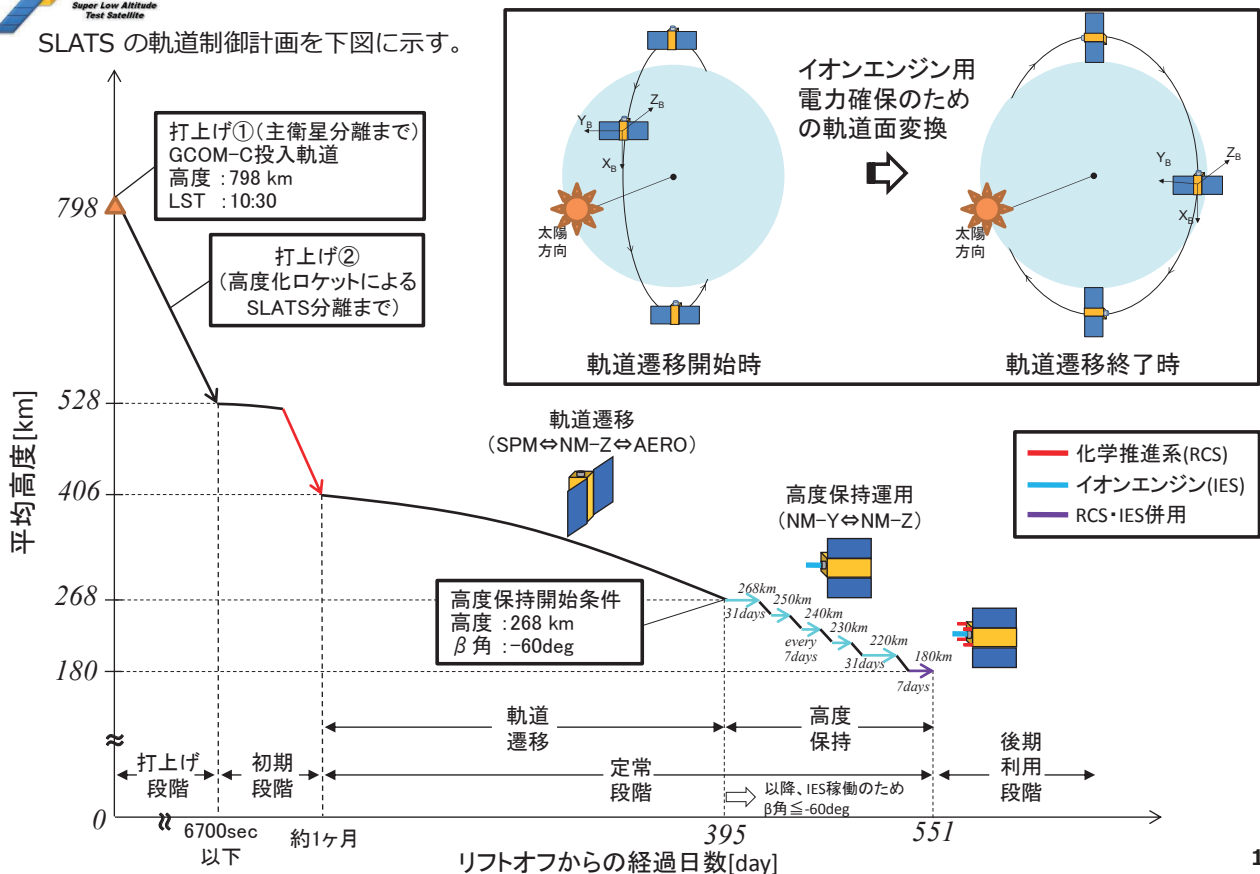
2016年2月29日

JAXA/第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクトチーム
今村 俊介



軌道姿勢制御計画

SLATS の軌道制御計画を下图に示す。





大気密度に関するデータ

- (1) コスト、衛星容積の観点からSLATSは高精度加速度計を搭載していない。
- (2) SLATSの大気密度データは主にGPS出力（軌道位置・速度履歴）からモデルを介して得られる値であり「大気抵抗補正係数 = 真の大気抵抗と大気モデル・空力モデルから得られる大気抵抗との差（割合）」と定義されている。
- (3) 大気抵抗補正係数は次式にて定義している。

$$\eta = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 C_D S}$$

←軌道履歴（GPS）からの推定値
←モデル値

| | |
|--|-----------------------------|
| η : 大気抵抗補正係数[-] | D : 大気抵抗[N] |
| ρ : 大気モデル出力大気密度[kg/m ³] | v : 軌道速度[m/s] |
| C_D : 抗力係数[-] | S : 参照面積[m ²] |

- (4) 大気抵抗補正係数 η は衛星軌道決定と同時に行われる（目標推定精度10%以下）
- (5) η を精度良く推定することが出来れば、大気抵抗も精度良く推定出来るようになり、必要なイオンエンジン推力の精度も向上する。イオンエンジン推力を適切に設定できると、消費電力低下に繋がり、太陽電池パドル・バッテリーの小型化など将来の超低高度衛星の小型化・低コスト化に繋がる。

2



大気抵抗補正係数の決定

- (1) η を精度良く推定するためには、大気抗力の影響が衛星軌道にある程度表れている必要があり、目標推定精度10%以下とするためには大気抗力による高度低下量として約100mが必要となる（時間が短すぎると大気の影響がGPS誤差に埋もれる）。
- (2) 以下に各高度における降下量100mに要する時間を示す。
- (3) 太陽活動度にも依存するが、SLATSが軌道遷移を開始する高度400km付近では1日毎、高度250km付近では1周回以下毎（ただしイオンエンジンOFF時）に η を決定する予定である。

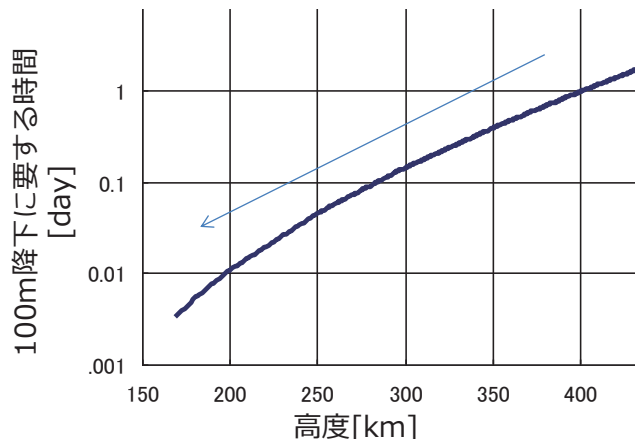


図 SLATS 高度と100m降下に要する時間の関係

3



大気抵抗補正係数データまとめ

以下のようなリストで大気抵抗補正係数をまとめていく予定である。

| 日付 | | 期間平均 | | | | | 大気抗力補正係数 (η) [-] | η 推定誤差 [%] |
|-----------|-----------|------|-------|--------------|------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| 期初 | 期末 | 期間 | 高度 | 太陽活動指数 F10.7 | 地磁気活動指数 Ap | 平均大気密度 (MSIS出力) [kg/m ³] | | |
| 2015/10/1 | 2015/10/2 | 1day | 400km | 150 | 20 | 2.0E-12 | 0.9 | 10 |
| ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ |
| ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ |
| ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ |
| 2016/6/1 | 2016/6/1 | 1rev | 250km | 160 | 30 | 6.0E-11 | 1.2 | 8 |
| ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ |
| ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ | ・ |



SLATS希薄空力特性評価に向けた 希薄風洞計測と数値解析

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央
 研究開発部門, 宇宙航空研究開発機構
 T. Ozawa, T. Suzuki, and K. Fujita
 Research and Development Directorate, JAXA

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ
 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 東京事務所
 2016年2月29日 10:00-17:30

極超音速希薄風洞開発の背景

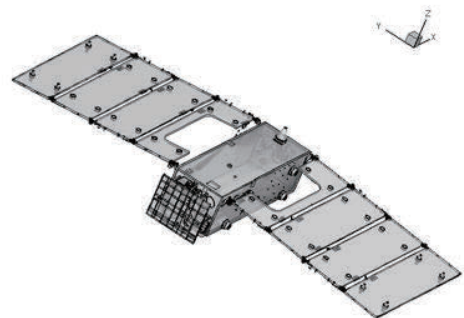


- 超低高度衛星(SLATS), 大気再突入, 惑星大気突入等, JAXAのミッションにおいて, 飛行体が希薄大気中を極超音速飛行する技術への需要が増えている.
- その際に遭遇する希薄空力現象はいまだ解明されておらず, 評価ツールを開発することは必要不可欠である.
- 特に, 希薄領域の流れを再現する中型風洞は世界に例がない.
- JAXAでは, 極超音速希薄風洞(Hypersonic Rarefied Wind Tunnel)を開発中である.
- 極超音速希薄空力評価のパラメータ
 - クヌーゼン数(Kn): 希薄度のパラメータ

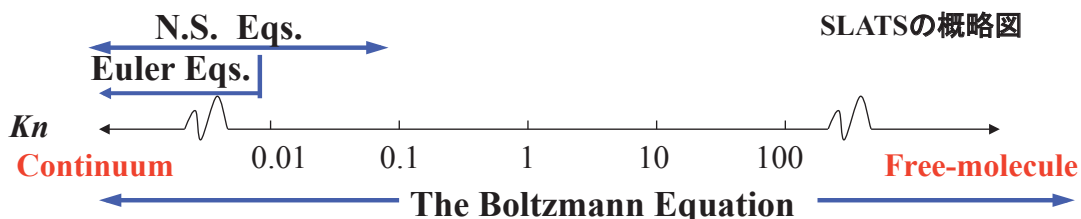
$$Kn = \frac{\lambda(\text{mean free path})}{L(\text{characteristic length})}$$

- マッハ数(M): 速さのパラメータ

$$M = \frac{U(\text{velocity relative to the medium})}{a(\text{speed of sound})}$$



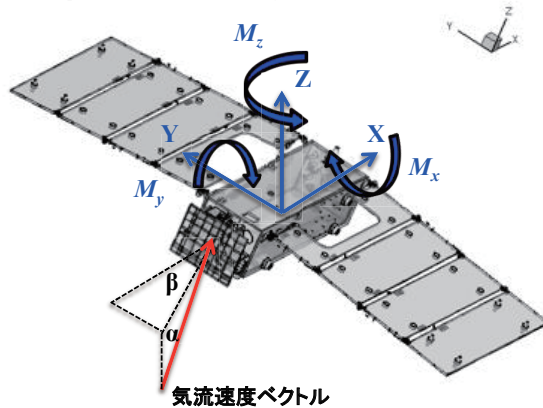
SLATSの概略図



SLATSの希薄空力解析環境



DSMC座標と気流速度ベクトル



- 原点は底面のXY中心位置でZ方向の下面³
- 重心位置
(x, y, z)=(-62.1, -10.5, 260.2)mm
- モーメント係数は重心周りで評価
- $T_w=300$ K
- 参照面積: $S_{ref}=10.093$ m²
- 参照長: $R_{ref}=0.54$ m

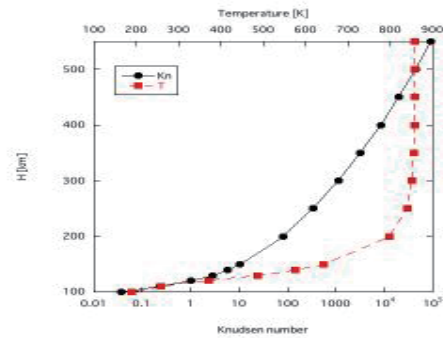
$$C_D = F_D / (1/2 \rho_\infty U_\infty^2 S_{ref})$$

$$C_{DS} = C_D S_{ref}$$

$$C_{M,i} = F_{M,i} / (\rho_\infty U_\infty^2 S_{ref} R_{ref})$$

Table 1: SLATSテスト形状

| 項目 | 記号 | 単位 | サイズ |
|----------|-------|----|-------|
| 高さ | H | m | 0.54 |
| 横幅 | W | m | 0.66 |
| 奥行き | D | m | 2.038 |
| ソーラーパネル幅 | W_p | m | 5.17 |
| ソーラーパネル厚 | T_p | m | 0.02 |

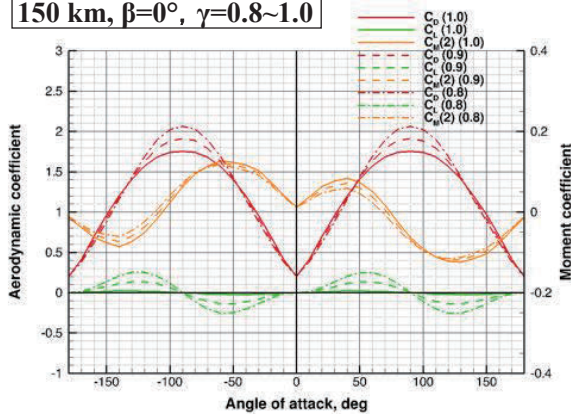


高度とクヌーゼン数

SLATSの空力・モーメント数値解析

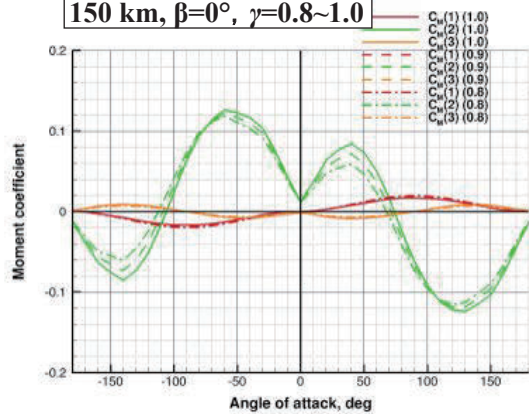


150 km, $\beta=0^\circ$, $\gamma=0.8\sim 1.0$



高度150 kmにおける自由分子流モーメント係数($\beta=0$)の迎角依存性及び表面熱適応係数依存性

150 km, $\beta=0^\circ$, $\gamma=0.8\sim 1.0$



高度150 kmにおける自由分子流モーメント係数($\beta=0$)の迎角依存性及び表面熱適応係数依存性

壁面反射モデル: Maxwell model

- $\gamma=0.8\sim 1.0$

高度150 kmの迎角依存性の評価

- $\alpha=-180\sim 180^\circ$, $\beta=0^\circ$
- C_D , C_L , C_{My} を評価
- C_D の γ 依存性は最大で20%
- 自由分子流解析とDSMC(direct simulation Monte Carlo)の結果は良い一致

高度150kmのモーメント係数表面熱適応係数依存性の評価

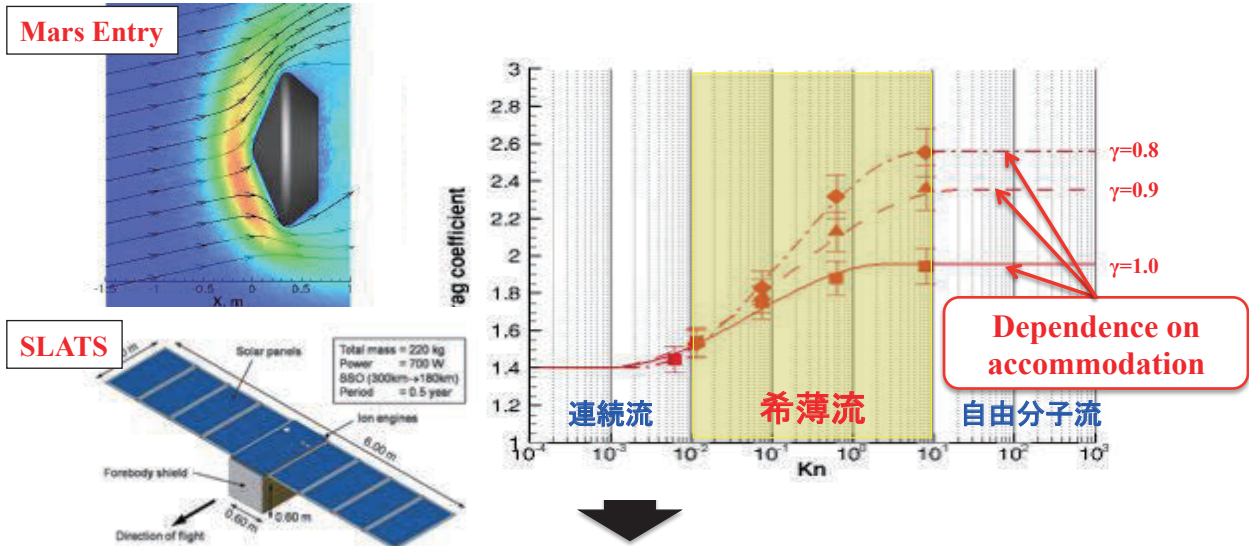
- $\beta=0$ の場合, $C_M(2)$ に関して最大で $\pm 18\%$ 表面熱適応係数に依存する。
- モーメント係数を自由分子流解析とDSMC Cで比較した結果, 良い一致が得られた。

極超音速希薄風洞開発の目的



5

- 極超音速希薄空力の評価
 - 超低高度衛星 (Super low altitude test satellite: SLATS), 惑星大気突入等
- 希薄領域における自由分子流から連続流領域への空力特性の変化
- 希薄空力の表面熱適応係数依存性の評価
- 表面熱適応係数の気流組成・物質依存性評価

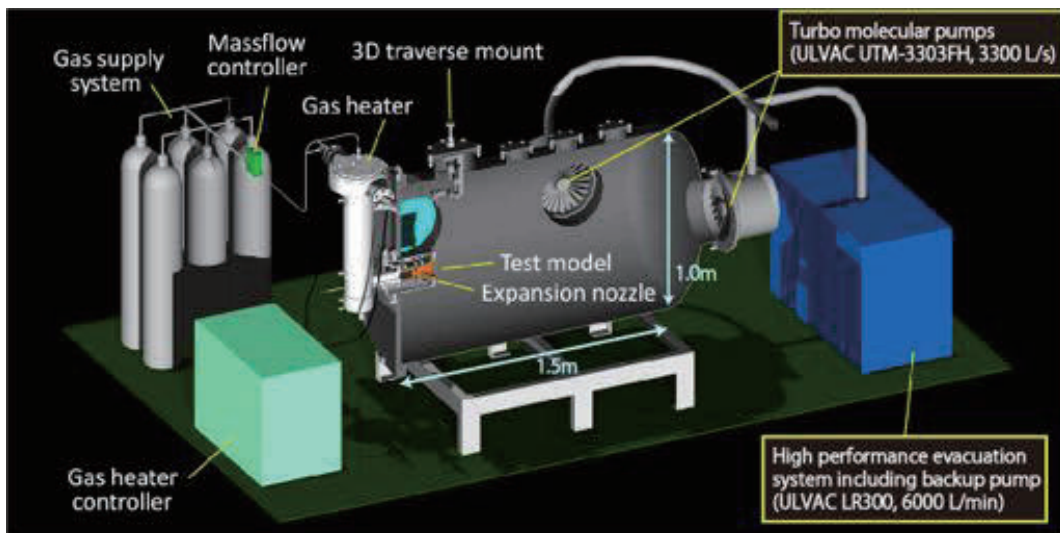


希薄空力の直接計測・表面熱適応係数評価によって空力特性評価精度が向上する。

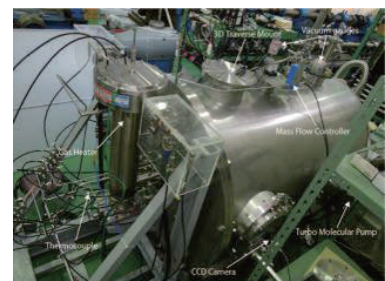
Hypersonic Rarefied Wind Tunnel (HRWT)



6



- 真空チャンバー, ノズル, 排気システムで構成される
- 真空チャンバー: $D=1.0\text{ m}$, $L=1.5\text{ m}$
- 3台のターボ分子ポンプとドライポンプ
- タングステンメッシュヒーター: $T_0 \sim 750\text{ K}(\text{N}_2)$
- 45°コニカルノズル: $D_e=100\text{ mm}$, 開口比(A_e/A_{th}) $\approx 3,755$
- 3軸移動装置: 真空チャンバー上部, ステッピングモーター使用

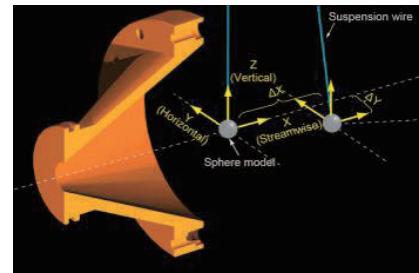


HRWT計測手法 (吊り下げ変位計測)



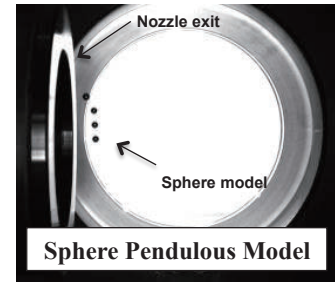
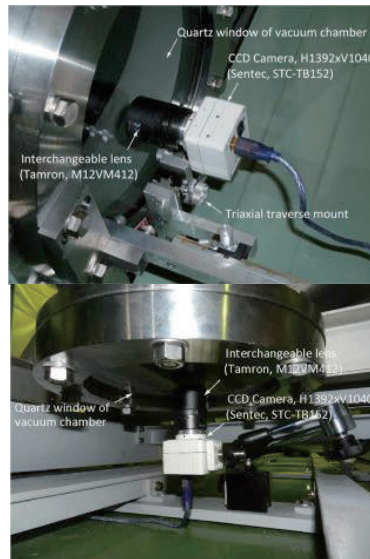
吊り下げ変位計測

- 希薄空力は微小であるため、吊り下げ球モデルによる変位計測を行い、動圧を推定する。
- 2台(side and bottom)のCCDカメラを使用し、画像処理手法を用いて変位計測を行う。
- 球モデル (Stainless-Steel[SUS], Aluminum, Graphite, SiC, C/C, Borosilicate glass, Polyimide等)変位計測より表面熱適応係数の物質依存性を評価する。



Camera 01

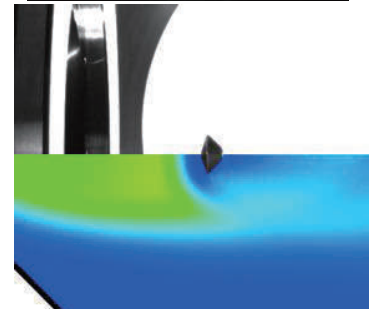
- 横方向
- 流れ方向(Δx)と鉛直方向(Δz)の変位



Sphere Pendulous Model

Camera 02

- 鉛直方向
- 流れ方向(Δx)と横方向(Δy)の変位, 回転(Φ)



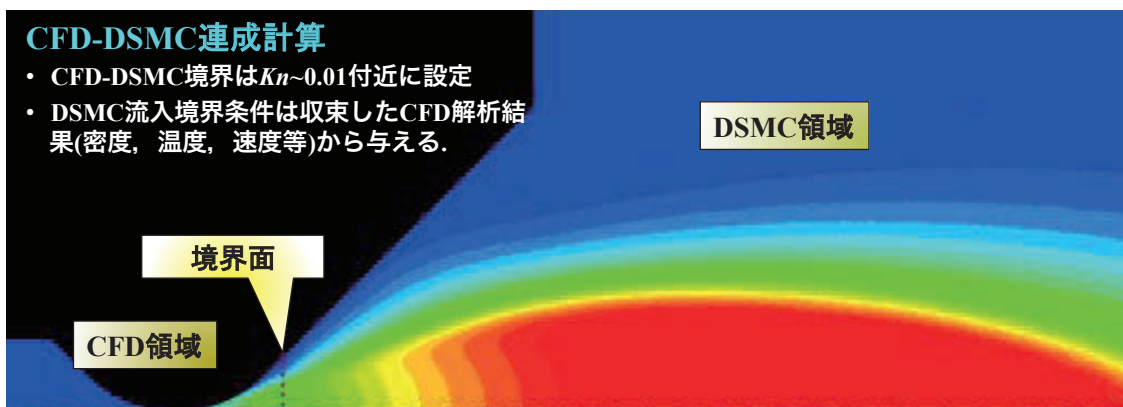
数値解析手法(ノズル流)



- **CFD解析:連続流領域**
 - JAXA Optimized Nonequilibrium AeroThermodynamic ANalysis (JONATHAN) code
 - 3D Navier-Stokes equation solver
 - スリップ境界条件
- **DSMC解析:非連続流領域**
 - Modeling Of Transitional-Ionized Flows (MOTIF) code
 - 3D Boltzmann equation solver
 - NTC(No time counter) 衝突周波数モデル
 - VHS(Variable hard sphere)衝突断面積モデル
 - Maxwell表面反射モデル($\gamma_{th} = \gamma_{norm} = \gamma_{tan}$ を仮定)
 - ノズル壁面は完全拡散反射条件を使用

CFD-DSMC連成計算

- CFD-DSMC境界は $Kn \sim 0.01$ 付近に設定
- DSMC流入境界条件は収束したCFD解析結果(密度, 温度, 速度等)から与える。



CFD-DSMC連成計算流れ場: マッハ数等高線図

数値解析手法



9

• CFD解析:連続流領域

- 三次元**JONATHAN**(JAXA **O**ptimized **N**onequilibrium **A**ero**T**hermodynamic **A**nalysis) Navier-Stokes ソルバー

• DSMC解析:非連続流領域

- 三次元**MOTIF**(**M**odeling **O**f **T**ransitional-**I**onized **F**lows)ボルツマン方程式ソルバー
- NTC(no time counter)衝突周波数モデル
- VHS(variable hard sphere)衝突断面積モデル
- CLL(Cercignani-Lampis-Lord)表面反射モデル

• CFD-DSMC連成計算

- CFD-DSMC境界は Kn が0.01付近に設定
- DSMC流入境界条件は収束したCFD解析結果を与える

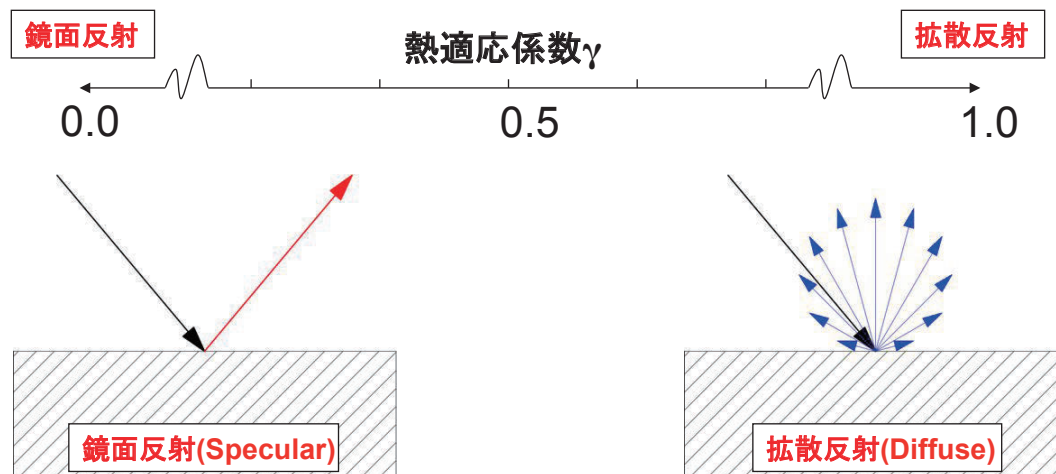
• DSMCにおける模型の融合 (吊り下げ式変位計測手法の融合)

- 模型が受ける空力: $F = \sum_p [(mv_p^{pre} - mv_p^{post})F_{num,p}] / \Delta t$
- 模型表面熱流束: $q = \sum_p [(E_{col,p}^{pre} - E_{col,p}^{post})F_{num,p}] / \Delta t$
- 模型変位置: 模型が受ける空力と吊り下げ糸の張力の釣り合いによって計算される

表面熱適応係数とは



10



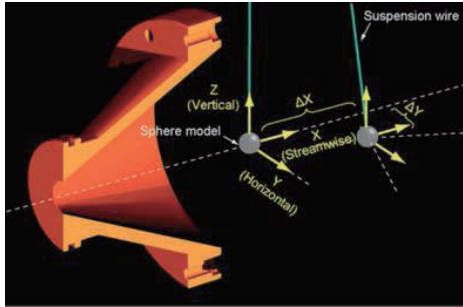
- 表面熱適応係数 γ によって、鏡面・拡散反射比が決定される。
- 空力係数は希薄度が高いほど表面熱適応係数 γ 依存性が高くなる。
- 希薄領域において空力特性を把握するためには、表面熱適応係数 γ の決定精度を高める必要がある。

風洞試験による表面熱適応係数直接計測が必要不可欠!

計測と数値解析による球模型の変位予測



11



HRWT計測概要

- 5mm球模型
- 2自由度の変位($\Delta x, \Delta y$)計測
- 20 μ m SUS細糸で1点支持, 1本吊り
- 支点($x_e+17, y_0, 220$) mm (ひもの長さ $L_{st}=220$ mm)
- $y_0=0\sim 10$ mm

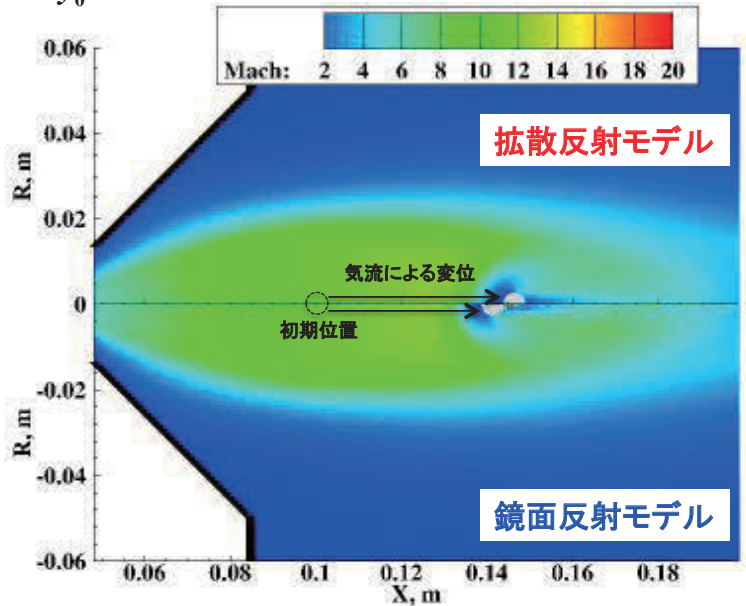
拡散反射モデル

- 球模型の変位が大きい
- 熱適応係数: $\gamma=1.0$

熱適応係数(γ)が大きくなるほど、模型の変位も大きくなる。

鏡面反射モデル

- 球模型の変位が小さい
- 熱適応係数: $\gamma=0.0$



Aluminum球模型変位の熱適応係数依存性検討

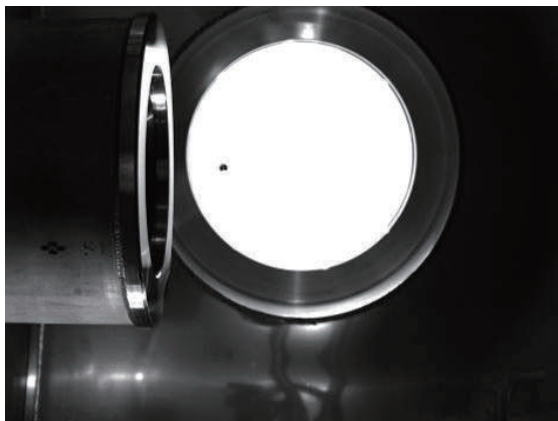


12

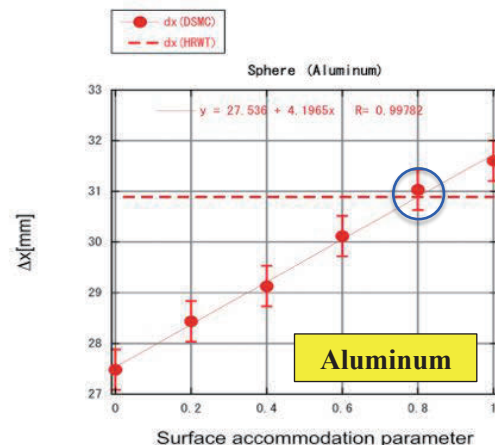
- Al球模型の変位と熱適応係数の相関性
 - $Y_0=0$ mm, Δx (HRWT)=30.9 mm
 - 鏡面と拡散反射では, x 方向には約4.2 mm程度の変位変化がある
 - Al球模型熱適応係数計測結果 $\gamma=0.80\pm 0.06$

Al球模型変位の熱適応係数依存性

| γ | Δx [mm] |
|----------|-----------------|
| 1.00 | 31.6 |
| 0.80 | 31.0 |
| 0.60 | 30.1 |
| 0.40 | 29.1 |
| 0.20 | 28.4 |
| 0.00 | 27.5 |



Al球模型の希薄風洞計測写真



Al球模型の Δx 比較($y_0=0$ mm)

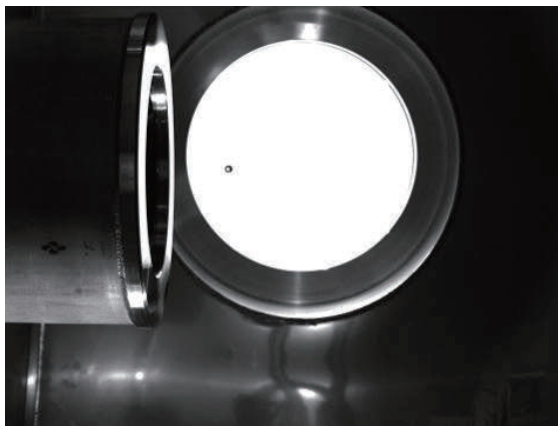
BSG球模型変位の熱適応係数依存性検討



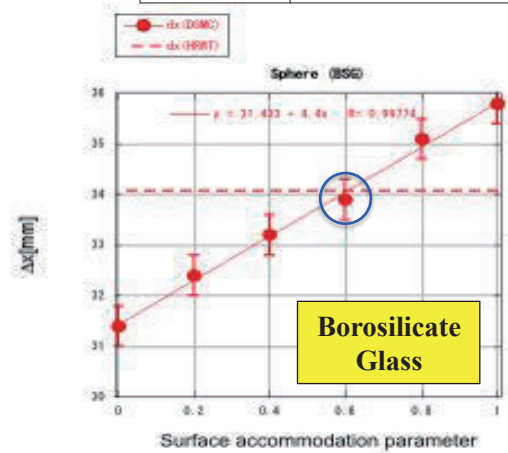
- ホウケイ酸ガラス(Borosilicate glass; BSG)球模型の変位と熱適応係数の相関性
 - Δx (HRWT)=34.1 mm
 - 鏡面と拡散反射では, x 方向には約4.4 mm程度の変位変化がある
 - BSG球模型熱適応係数計測結果:
 $\gamma=0.60\pm0.06$

BSG球模型変位の熱適応係数依存性¹³

| γ | Δx [mm] |
|----------|-----------------|
| 1.00 | 35.8 |
| 0.80 | 35.1 |
| 0.60 | 33.9 |
| 0.40 | 33.2 |
| 0.20 | 32.4 |
| 0.00 | 31.4 |



BSG球模型の希薄風洞計測写真



BSG球模型の Δx 比較($y_0=0$ mm)

熱適応係数計測結果のサマリー



- 極超音速希薄風洞において1~2自由度球模型変位計測を実施し, 熱適応係数計測システム検討を行った.
 - $\Delta x, \Delta y/\Delta y_0=0, 5, 10$ mmにおいて良い一致が得られた.
 - C_D (拡散) > C_D (鏡面), その差はクヌーセン数が高いほど大きくなる.
 - 金属系やカーボン系はアルミニウム以外は拡散反射に近いが, ボロシリケートガラスは鏡面反射の割合が高い.

| Material | Δx [mm] | $\gamma(N_2, HRWT)$ | $\gamma(N_2, Disc Spin)^1$ |
|--------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| Stainless | 13.9 | 0.90±0.1 | - |
| Aluminum | 30.9 | 0.80±0.06 | 0.77 |
| Graphite | 39.9 | 0.95±0.05 | - |
| SiC | 27.7 | 0.88±0.07 | - |
| C/C | 44.2 | 0.89±0.05 | - |
| BSG ^{2,3} | 34.1 | 0.60±0.06 | - |

¹Acharya, T., Falgout, J., and Martin, M., AIAA Paper 2014-2115, June 2014.

²Morrison, J. A. and Tuzi, Y., *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 2, No. 3, pp. 109-112 (1965).

³Yamaguchi, H., et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 32, No. 2, 061602 (2014).

結論



15

- SLATSの空力係数を自由分子流解析とDSMC解析により評価した。
 - 高度150 km以上では自由分子流とDSMC解析の結果は良い一致を示した。
 - 空力係数は最大で20%表面熱適応係数に依存することがわかった。
- 極超音速希薄風洞において、表面熱適応係数計測手法を構築し、表面係数の物質依存性を評価した。
 - アルミニウムとボロシリケートガラスに関しては、他の金属・カーボン系素材と比べて鏡面反射の寄与が高いことが判明した。
 - これらの素材を用いた平板形状の表面においては、抗力係数が拡散反射モデルの予測よりも高くなる。

将来計画と謝辞



16

- 将来計画
 - ポリイミド模型を用いて、ポリイミドの表面熱適応係数を評価する。
 - 表面コーティングによる影響を評価する。
 - SLATS模型を用いて希薄空力直接計測を行い、クヌーセン数依存性を評価する。
 - 高クヌーセン数領域の計測に向けてオリフィスプローブによる気流計測手法を構築する。
 - HRWTのCO₂化に向けてヒーターシステムを改良し、希薄空力特性の気流組成依存性を評価する。
- 謝辞
 - 本研究にご助言いただいた藤田先生、鈴木博士、イリノイ大学のレビン先生に感謝の意を表します。
 - SLATS解析にご助言いただいた今村様、佐々木様に感謝の意を表します。
 - The research performed at JAXA was partly supported by the Grant-in-Aid for Scientific Research (C), No. 15K06611 from Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) whose support is gratefully acknowledged.

宇宙環境工学の観点から見た SLATSへの期待

第3回 超低高度衛星利用に向けてのワークショップ
2016年2月29日 JAXA東京事務所

神戸大学大学院工学研究科

田川雅人

井出健太、山崎勇希、北 一貴、横田久美子

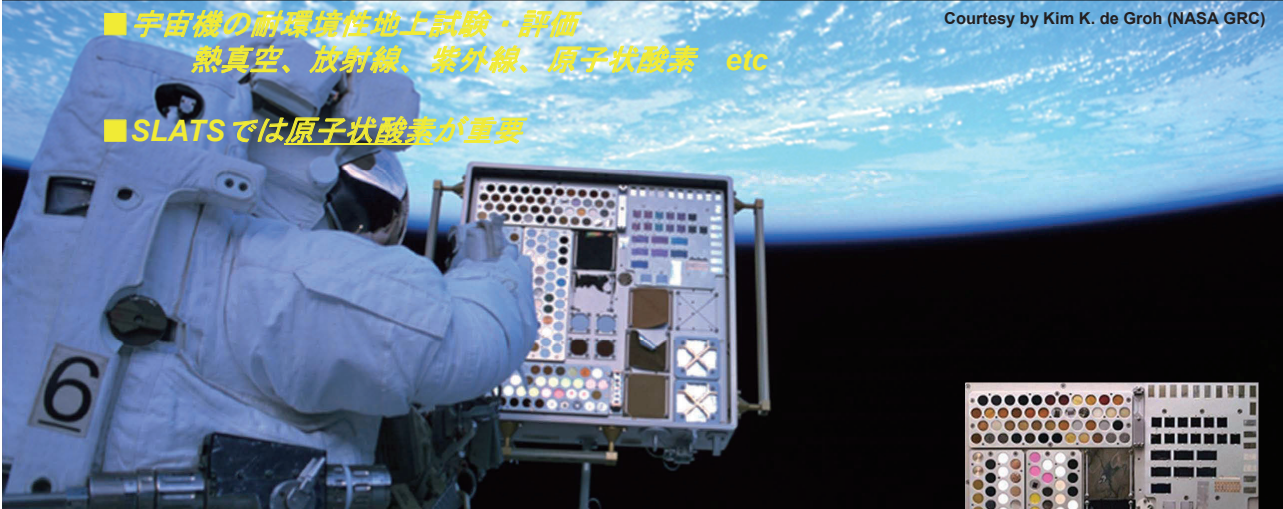
宇宙環境工学 (Space Environmental Effects)

■ 宇宙機設計・開発における重要項目の1つ

■ 宇宙機の耐環境性地上試験・評価
熱真空、放射線、紫外線、原子状酸素 etc

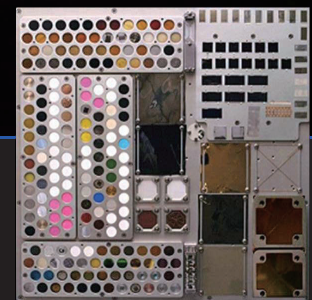
Courtesy by Kim K. de Groh (NASA GRC)

■ SLATSでは原子状酸素が重要

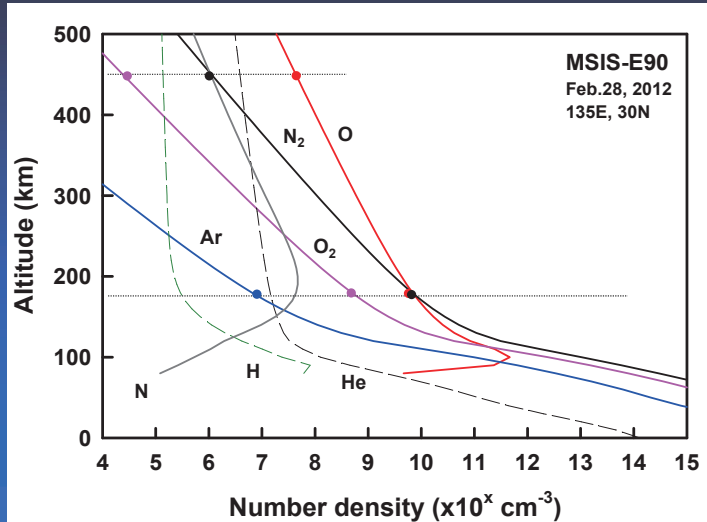


MISSE-1 PEC1 pallet after 1 year of exposure on ISS (450 km)

MISSE-1 PEC1 pallet before launch



超低軌道における分子密度・組成



ISS軌道 (450km)

↓
SLATS軌道 (180km)

★分子密度

O: 100倍

N_2, O_2 : 1,000倍

Ar: 10,000倍

★分子組成

O : N_2 = 99 : 1 (450km)

O : N_2 = 50 : 50 (180km)

★原子状酸素誘起材料劣化
が急速に進行する

宇宙環境科学・工学

■ SLATSでは原子状酸素が重要

★プロジェクト側から見ると

→ 低軌道上試験データあり

→ 地上試験設備あり

→ 地上試験結果を信頼！



★試験実施側から見ると

→ 軌道上試験は限定された軌道のみ

→ 高層大気による材料劣化の知見不足

→ 地上試験の複雑さ・不完全さ(同一環境は再現できない)

→ 地上試験結果を鵜呑みにされても・・・(内心)

原子状酸素地上試験とは・・・

原子状酸素地上試験

- ASTM-E2089-00による規定
- プラズマアッシャーとレーザーデトネーション
→ JAXAでは後者による試験
- 原子状酸素試験における前提条件
 - (1) 照射量はKapton-Hの質量減少で測定
 反応率 $Re : 3.00E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$
 → STS初期フライトによる計測値 (詳細不詳)
 - (2) 原子状酸素のみが劣化要因
 - (3) 衝突エネルギー効果なし
- SLATSにおける特殊性
 - (1) 原子状酸素密度が桁違い
 - (2) 大気組成が異なる



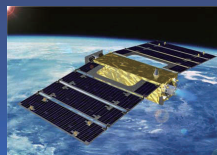
複合宇宙環境試験装置 (D設備)

超低軌道でも
 $Re=3.00E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$
 を用いて良いのか?

原子状酸素反応率 Re

- SLATSによる原子状酸素密度測定ミッション
AOFs: atomic oxygen fluence sensor, **MDM**: material degradation monitor
 → 材料劣化量から原子状酸素フルーエンスを計測

★ SLATS



質量変化・膜厚変化の計測

← 反応効率 $Re=3.00E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$

原子状酸素フルーエンス

→ Re の不確実性は原子状酸素密度計測精度に直結

★ 実用機



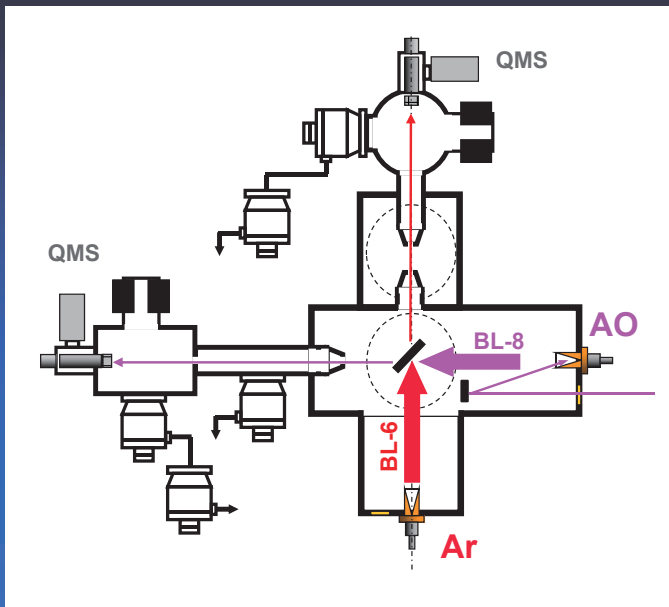
原子状酸素フルーエンス予測 (大気モデル)

← 反応効率 $Re=3.00E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$

膜厚・材料選定

→ Re の過小評価は材料劣化予測値の過小評価に

デュアルビームレーザーデトネーション装置



Specifications

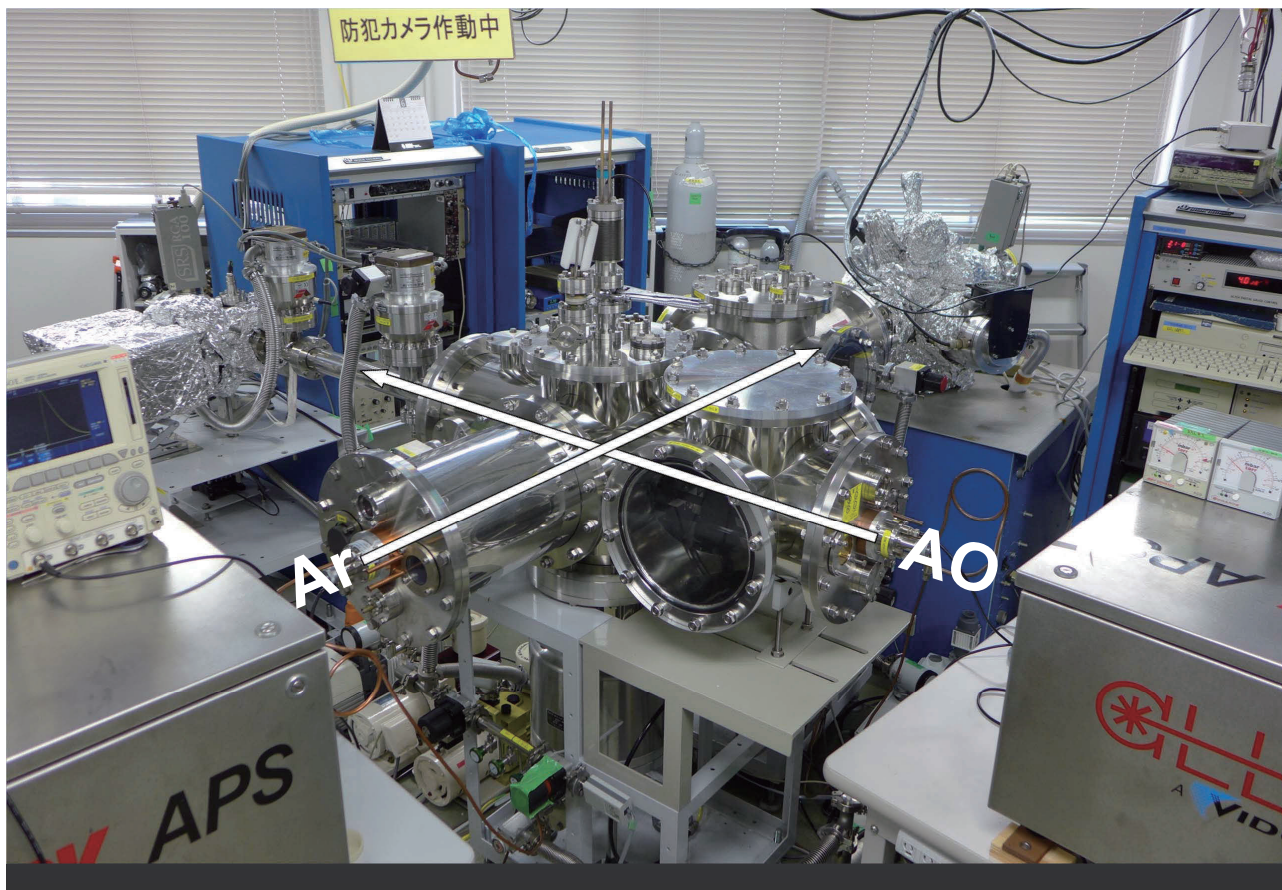
- Beam line: BL-6
- Flight length: 258.5 cm
- Differential stage: 3
- Laser: AL-871APS
- Pressure: $2E-7$ Pa
- Vacuum pumps
TMP: 4, IP: 1

Beam line: BL-8

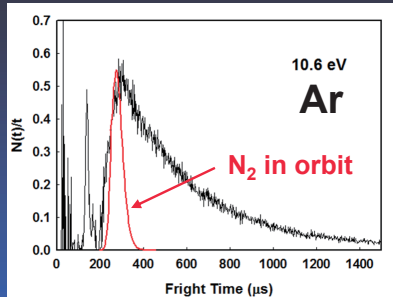
- Differential stage: 5
- Flight length: 207.5 cm
- Laser: AL-871APS
- Pressure: $5E-7$ Pa
- Vacuum pumps
TMP: 4, IP: 1

Sample

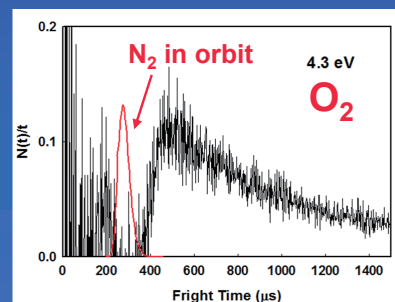
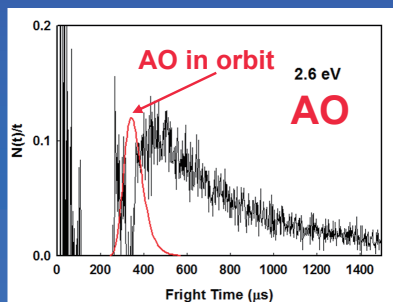
- Polyimide-coated QCM
- Room Temperature
- Incident angle 45°



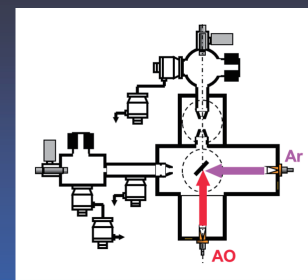
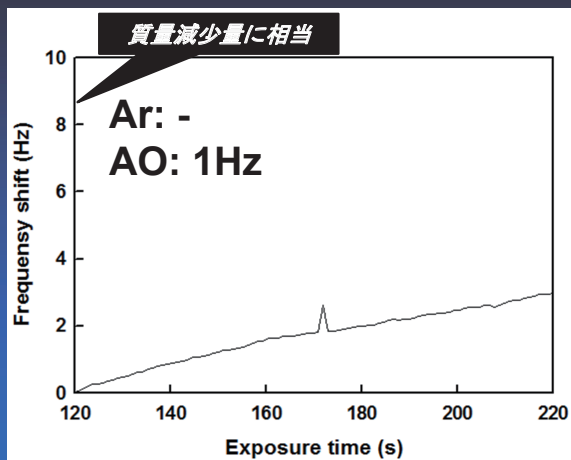
飛行時間(TOF)スペクトル



■ Fluxes @ sample point (62.5 cm)
 AO: $5.6E+14$ atoms/cm²/s (2.6 eV)
 Ar : $1.3E+14$ atoms/cm²/s (10.6 eV)
 @normal incidence, 1 Hz



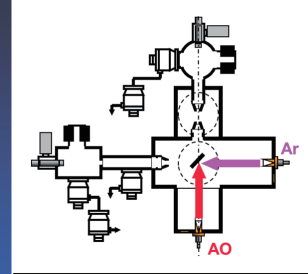
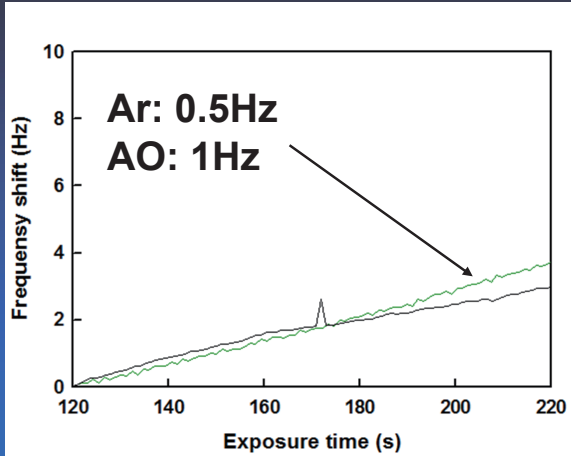
PI-QCMの周波数変化



| | |
|--------------------|--------------------|
| AO | Ar |
| Energy: 2.6 eV | Energy: 10.6 eV |
| Flux: $3.9E+14$ | Flux: $9.1E+13$ |
| @ 1 Hz | @ 1 Hz |
| Incident angle: 45 | Incident angle: 45 |
| Rep. Rate: 1 Hz | Rep. Rate: 0-4 Hz |

Frequency shift of PI-coated QCM under various repetition rate of Ar pulses. Note that the repetition rate of AO pulse is fixed at 1 Hz.

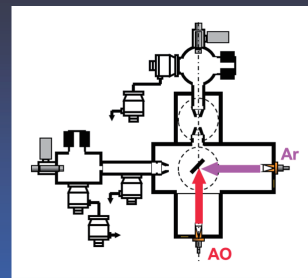
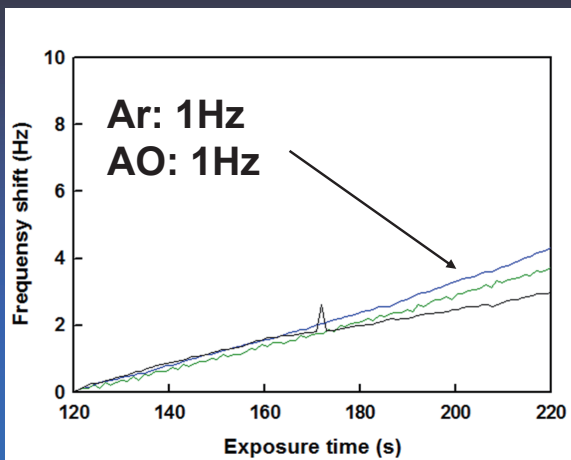
PI-QCMの周波数変化



| | |
|--|---|
| <p>AO Energy: 2.6 eV Flux: 3.9E+14 @ 1 Hz Incident angle: 45 Rep. Rate: 1 Hz</p> | <p>Ar Energy: 10.6 eV Flux: 9.1E+13 @ 1 Hz Incident angle: 45 Rep. Rate: 0-4 Hz</p> |
|--|---|

Frequency shift of PI-coated QCM under various repetition rate of Ar pulses. Note that the repetition rate of AO pulse is fixed at 1 Hz.

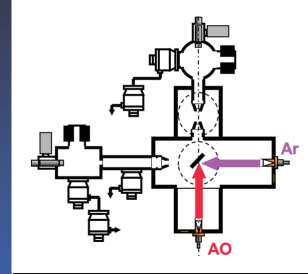
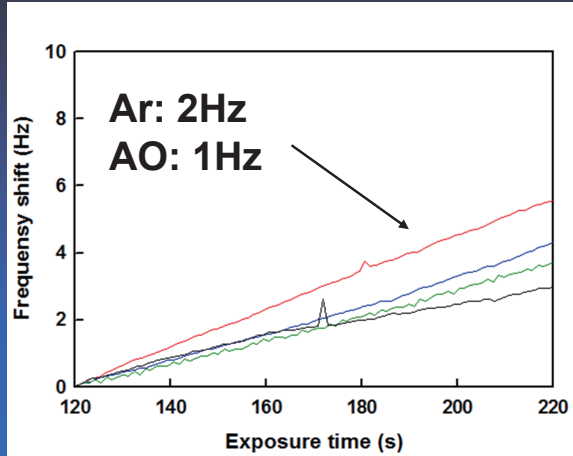
PI-QCMの周波数変化



| | |
|--|---|
| <p>AO Energy: 2.6 eV Flux: 3.9E+14 @ 1 Hz Incident angle: 45 Rep. Rate: 1 Hz</p> | <p>Ar Energy: 10.6 eV Flux: 9.1E+13 @ 1 Hz Incident angle: 45 Rep. Rate: 0-4 Hz</p> |
|--|---|

Frequency shift of PI-coated QCM under various repetition rate of Ar pulses. Note that the repetition rate of AO pulse is fixed at 1 Hz.

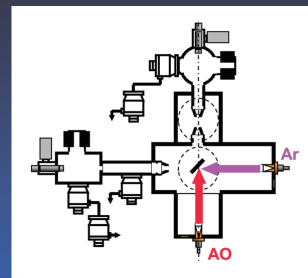
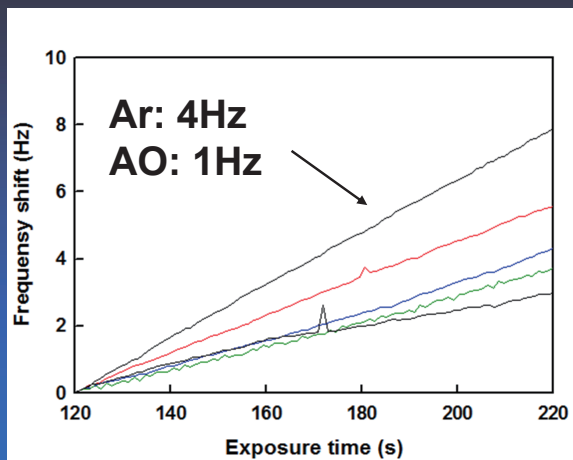
PI-QCMの周波数変化



| | |
|--------------------|--------------------|
| AO | Ar |
| Energy: 2.6 eV | Energy: 10.6 eV |
| Flux: 3.9E+14 | Flux: 9.1E+13 |
| @ 1 Hz | @ 1 Hz |
| Incident angle: 45 | Incident angle: 45 |
| Rep. Rate: 1 Hz | Rep. Rate: 0-4 Hz |

Frequency shift of PI-coated QCM under various repetition rate of Ar pulses. Note that the repetition rate of AO pulse is fixed at 1 Hz.

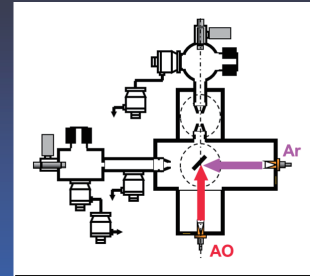
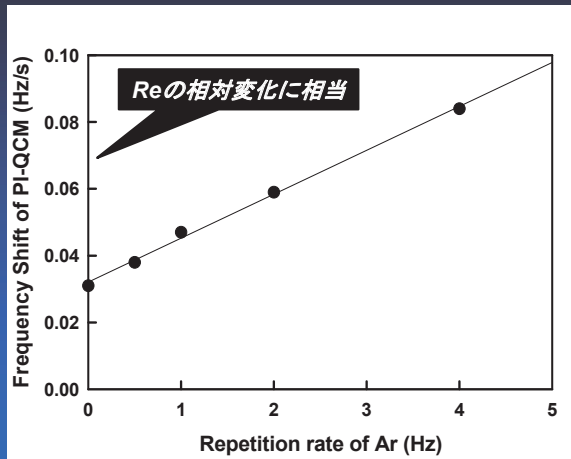
PI-QCMの周波数変化



| | |
|--------------------|--------------------|
| AO | Ar |
| Energy: 2.6 eV | Energy: 10.6 eV |
| Flux: 3.9E+14 | Flux: 9.1E+13 |
| @ 1 Hz | @ 1 Hz |
| Incident angle: 45 | Incident angle: 45 |
| Rep. Rate: 1 Hz | Rep. Rate: 0-4 Hz |

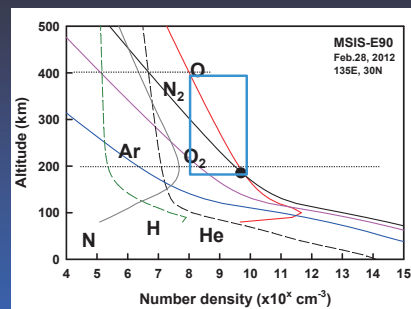
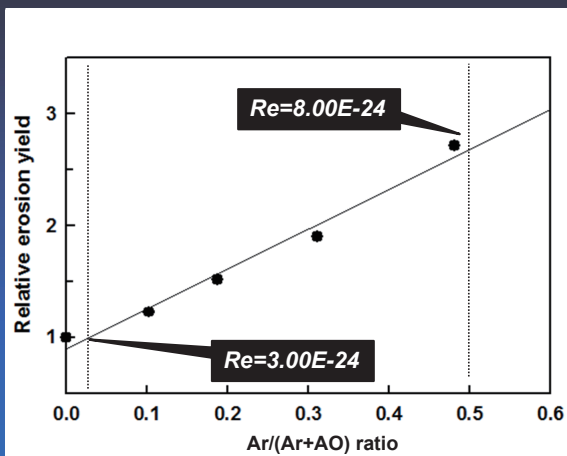
Frequency shift of PI-coated QCM under various repetition rate of Ar pulses. Note that the repetition rate of AO pulse is fixed at 1 Hz. The mass loss of PI increased with increasing Ar repetition rate.

PI-QCMの周波数変化



The mass loss of PI linearly increased with increasing Ar flux (AO flux was constant). Rate-limiting process is desorption process.

実験環境と宇宙環境との比較



By comparing the computational result by MSIS-E90 model, Ar fractions studied in this experiment correspond to those in the altitude of 200-300 km. Reaction efficiency Re of polyimide in sub-LEO may be increased by the factor of 3!

Conclusions

デュアルビームレーザーデトネーション装置を用いた超低軌道中性ガス環境試験の結果、以下の結論が得られた。

1. N_2 (or Ar)の同時衝突はポリイミドの材料劣化を加速する。高度180kmでは高度450kmの3倍程度になる。
2. ポリイミドの標準エロージョンイールド ($3.00E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$)は超低軌道環境では適用できない。→密度計測、他の材料も連鎖的に影響を受ける。
3. 通常の原子状酸素地上照射試験のフラックスはビーム中に存在する未解離の O_2 の存在により過大評価されている。

上記の地上実験結果はSLATS搭載材料試験で世界で初めて軌道上検証でき、SLATSに続く超低軌道実用衛星開発への基礎データを提供できる。

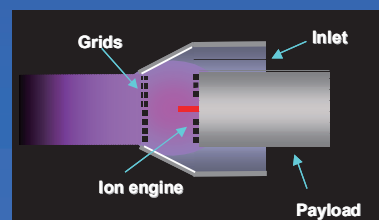
A part of this study was supported by the Grant-in-Aids for Scientific Research #25289307, #26289322, 15K14252 and 15K14253; and also by the Coordination Funds for Promoting Aerospace Utilization from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.

SLATSに対する期待

SLATSはこれまでにない中性ガス環境を飛行するため、超低軌道の利用に必要な技術について重要な知見を与えることができる。特に地上実験とリンクすることにより工学的なメリットは大きい。

1. 原子状酸素誘起材料劣化のメカニズム → LEO衛星の耐環境性
新材料開発の地上検証
地上試験の定量化・高精度化
2. 混合ガス高速衝突時の化学反応 → 惑星探査機開発への基礎データ
3. 超低軌道専用システム検証のテストベッド → 大気吸入イオンエンジン

CORONA project (1960s, >165 km)
を通して米国のみが有する知識と技術+アルファを日本の科学界に還元できる



End of presentation

熱圏大気密度研究の現状とSLATSへの期待

三好勉信(九州大学)

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ

目次

- 背景/目的
- 大気密度を表現するモデル
経験モデル(MSIS)と数値モデル(GAIA)について
- 経験モデルと衛星観測との比較
- 経験モデルと数値モデルとの比較
- まとめとSLATSへの期待

背景・目的

【サイエンス目的】

中性大気密度の変動に関して現在も科学的に解明されていない部分があり、それを物理的に表現し、観測との突き合わせを行うことは非常に興味深い様々に変動するオーロラ・太陽活動のもとでの熱圏 (100 km ~ 700 km 高度) における中性大気質量密度変動を理解する。

【実利用目的】

宇宙機の運用という観点から現在オープンソースとなっている中性大気密度モデル(統計・経験モデル)を使用している。大気抗力として考慮しなくてはならない、大気密度の日々変動を表現できない。

その観点から、現在サイエンスコミュニティが研究している大気の日々の変動を表現できる物理モデル(GAIAモデル)を宇宙機の運用に利用できるよう検討している。

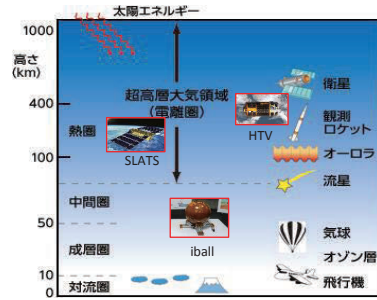


図2.大気密度構造 引用:<http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2012/abe/index.shtml>

Atmosphere-Ionosphere Coupled model : GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)

Jin et al. (2011)
J.G.R., A01316

Ionosphere
Shinagawa et al. (2007)

EIA, PRE
Plasma Bubble

Electrodynamics
Jin et al. (2008)
E, J

E-region dynamo

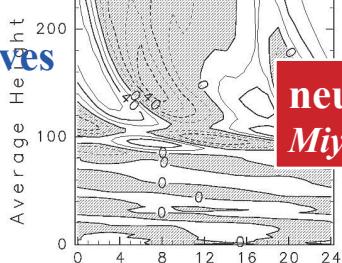
Atmospheric Waves
from the lower
atmosphere

Negative/positive storm
penetration E-field

disturbance
dynamo disturbed
wind

composition
change

neutral atmosphere (GCM)
Miyoshi and Fujiwara (2003)

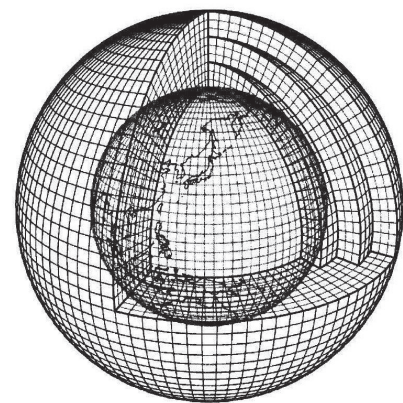


GAIAは、三好(九大)、藤原(成蹊大)、陣・品川(NICT)の共同研究

数値モデル(GAIA)の概要

①中性大気を記述する大気大循環モデル

- ・気象の数値予報モデルを鉛直上方(熱圏上端まで)に拡張
- ・**全球**をいくつかの格子点に分割し、各格子点上で、物理法則(運動方程式、連続の式、熱力学の式、放射伝達の方程式など)を解き、**大気全層における風速、密度、温度、大気組成**などの3次元分布を計算・予測
- ・下層大気の観測値(海面水温、氷床、対流圏循環の状態)および太陽活動度や磁気圏からのエネルギー降り込み量を基に、全大気の状態を物理的に計算



②電離大気を記述する電離圏モデル

③電気力学過程を記述するダイナモモデル

大気密度モデルの特徴

| | 数値モデル(GAIA model) | 統計モデル(e.g. MSIS model) |
|----|--|--|
| 長所 | <ul style="list-style-type: none"> ・数10分～数時間・数日の大気変動を再現可能 ・局所的な大気構造を表現可能 ・現象の物理機構を調査可能 ・全球を均等にカバーするデータが得られる | <ul style="list-style-type: none"> ・取り扱いが比較的簡単(PCで動作可能。様々なプログラムへの組み込みが可能) ・平均的な大気構造を容易に表現・理解できる |
| 短所 | <ul style="list-style-type: none"> ・高時間・空間分解能にするほど高度な計算機資源(スーパーコンピュータ)が必要 ・物理・化学過程のモデル化に際し、仮定が必要 ・非線形方程式を数値的に解いていることから、何らかの観測との比較が必要(適用限界の把握が難しい) | <ul style="list-style-type: none"> ・その時々の大気の状態をうまく表現できない ・局所的な大気構造を表現できない ・変動の時間変化をうまく表現できない |

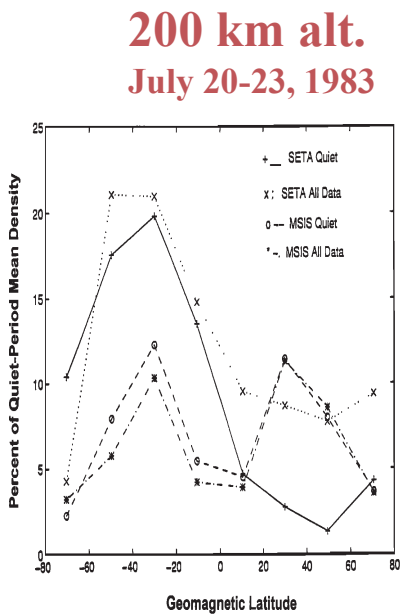


Figure 3. Comparison of amplitudes of SETA and MSISE-90 Longitude/UT variations as a function of latitude for daytime data during the July 20-23, 1983 (quiet), and July 21-26, 1983 (all data) periods. Units are percent of the mean density over July 20-23.

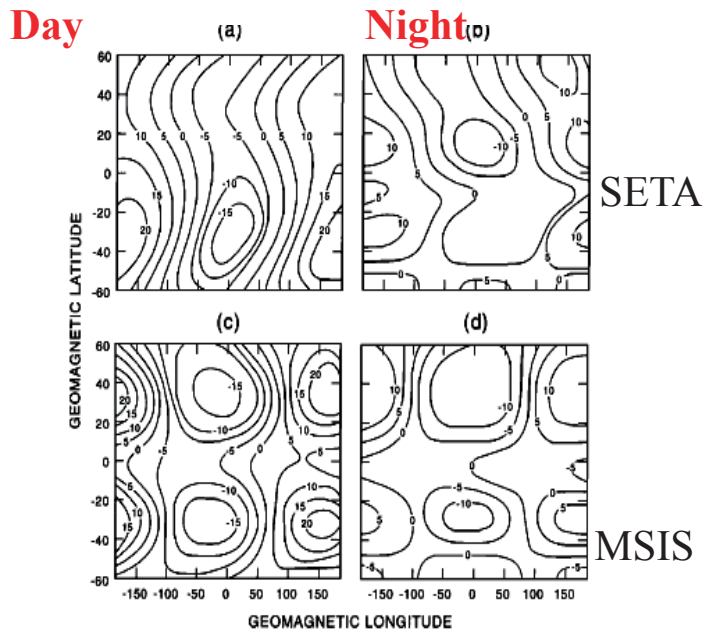
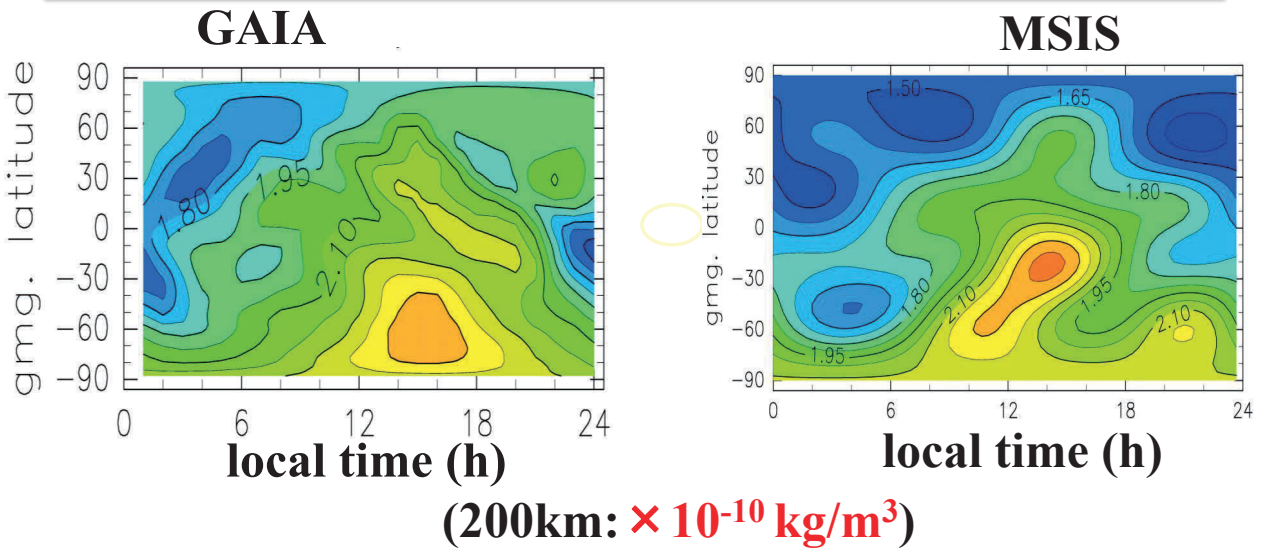


Figure 4. Longitude/UT effect as revealed in (a) and (b) SETA and (c) and (d) MSISE-90 total mass densities (percent variation about quiet-time densities, as in Figure 3) at 200 km during July 20-23, 1983. (left) Daytime is ~1030 LT. (right) Nighttime is ~2230 LT. The scales correspond to -15% to +20% (daytime) and -10% to +10% (nighttime).

(Forbes et al., JGR1999)

高度200kmで、SETAで得られた大気密度とMSIS(90)との比較している。おおよその分布は似ているが、緯度構造(おそらく潮汐波に由来する)には大きな差がある。

GAIAとMSISでの中性大気密度分布例 (January)

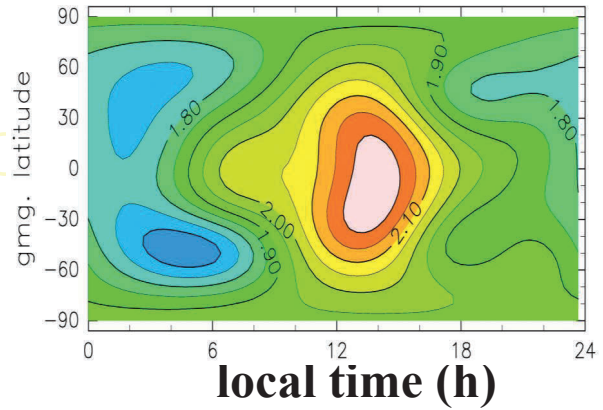
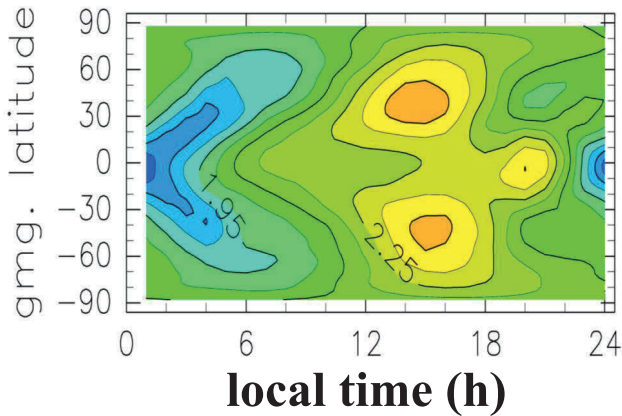


大まかな緯度構造や日変化の様子は、それなりに一致している。しかし、密度が最大・最小となる時刻が違うなど、違いも目立つ。

GAIAとMSISでの中性大気密度分布例 (March)

GAIA

MSIS



(200km: $\times 10^{-10} \text{ kg/m}^3$)

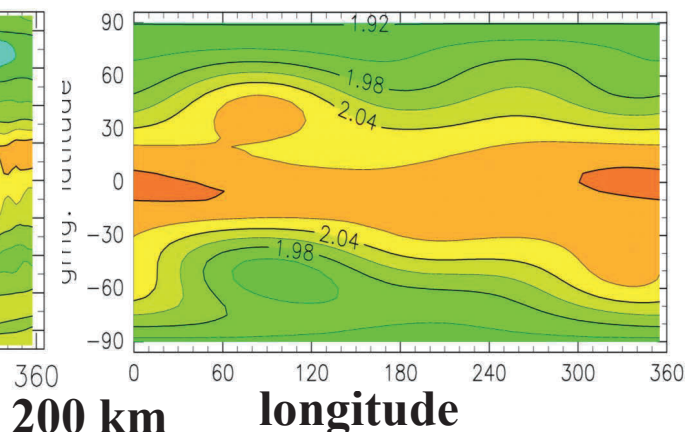
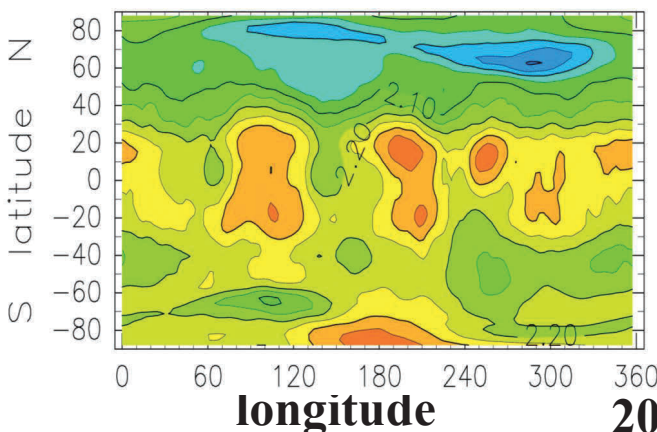
大まかな日変化の様子は、それなりに一致している。しかし、MSISが赤道付近で密度最大となっているのに対して、GAIAでは中緯度域で密度最大となっている。半日潮汐波の表現の違いに起因していると思われるが、原因については今後の課題である。

GAIAとMSISの大気密度の経度構造 (September)

GAIA

10LT(地方時)における密度分布

MSIS



MSISでは、大気密度の東西非一様性はほとんどないのに対して、GAIAでは、明瞭な経度構造がみられる。(密度のピークが経度方向に4か所; wave-4 構造)この東西非一様性は、対流圏の雲分布(積雲対流活動)の東西非一様性に由来する一日潮汐波が原因である。MSISでは、最近発見されたwave-4構造は再現されていない。

Cross-track wind from the accelerometer onboard the **SETA satellite**

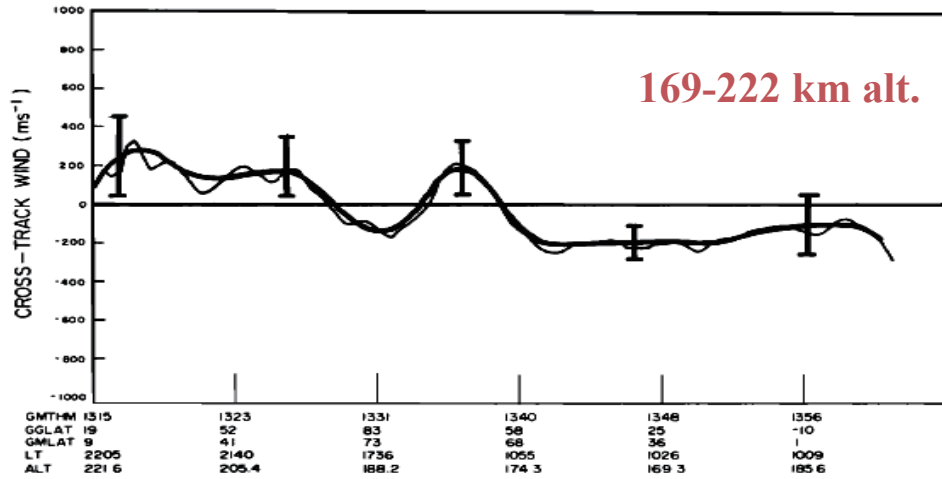


Fig. 5. Cross-axis winds corresponding to the data in Figure 4 plotted versus universal time, geographical latitude, geomagnetic latitude, local time, and altitude. Unsmoothed (light line) and smoothed (heavy line) data are shown. Error bars on the smoothed data primarily reflect uncertainties due to vehicle vibration noise (see section 2).

(Marcos and Forbes, JGR1985)

高度169 - 222kmの領域でも、200 m/sを超えるような強い水平風の観測例がある。ただし、観測例が少なく、詳細については不明な点が多い。

海外での観測衛星計画

☆現在観測:

・CHAMPの後継機: SWARM (研究成果が出始めている)

☆観測例の少ない高度100-250km領域について科学衛星を計画

ICON (Ionospheric CONnection explorer) : 550km

GOLD (Global-scale Observations of the Limb and Disk): 静止衛星

(NASA; 2017年打ち上げ予定)

特徴: 一つは静止軌道でもう一つは極軌道

観測例の少ない中性大気温度・中性大気組成比・電場などを測定



中性大気の構造を理解する

中性大気と電離大気間の相互作用過程

(E層ダイナモ過程の理解)

下部熱圏と上部熱圏間の大気結合過程の理解)

低高度衛星における今後期待する観測

- ・ 中性大気密度の高精度な直接観測
 - ・ 熱圏下部領域における高速風 (?) の観測
 - ・ 計測されたことのないCO₂, NOの直接観測
- CO₂の計測による温暖化現状把握
→熱圏のエネルギー収支(大気密度へ影響)

高度100-200 kmは、衛星運用・利用の面だけでなく、大気科学のフロンティア領域でもある。

まとめ

・GAIAモデルの改良を行い、より現実に近い大気質量密度が得られるようになった。高度200kmにおける潮汐波に伴う大気密度変動の解析を行った。潮汐波の緯度構造や経度構造に関して、経験モデル(MSIS)を行った。その結果、一致しない部分もかなりあることがわかり、今後の観測やモデル研究に期待したい。

・高度100~200kmまでの領域は、低高度 (< 200 km)での密度計測の例は少しにはある。また、経験モデル(MSIS)との比較もされている。しかし、密度の局所構造は十分に説明はされていないし、時間変動や経度非一様性などについての議論はほとんどない。

ご静聴ありがとうございました。



8.SLATSの共同研究公募(案)について

平成28年2月29日

宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門
SLATSプロジェクト
川崎 春夫



8.1 SLATSの共同研究公募に至るまでの経緯(1/2)

SLATSプロジェクトでは、以下の通り、サイエンスコミュニティの構築・連携に係る活動を行ってきました。

JAXA内での意見交換

平成27年4月にかけて、ISAS阿部准教授、研究開発部門(旧宇宙環境G)と協議し、サイエンスワークショップの開催や提案される研究テーマの扱い、JAXA内の業務分担などについて意見交換。

ワークショップの開催

平成27年度に3回のワークショップを開催し、コミュニティとの意見交換、アンケートを実施。

第1回:平成27年5月26日 幕張メッセ 約30名参加

第2回:平成27年9月 2日 NICT小金井 約30名参加

第3回:平成28年2月29日 JAXA御茶ノ水(今回)





【参考】アンケート結果(1/3)

平成27年4月21日から5月26日までアンケートを行いました。26名の方から回答をいただきました。

| 質問 | 選択 | 結果 |
|----------------------------------|---|---|
| 質問1: SLATSをご存知ですか？ | ① 超低高度軌道で運用されることを知ってた ② 名前は知っていた ③ 今回初めて知った | ①2名 |
| 質問2: 将来の超低高度衛星ミッションの提案がありますか？ | ① 提案したい ②検討中 ③その他 | ①14名 ②5名 |
| 質問3: 提案したい分野(複数可) | ①高層大気 ②中層・下層大気 ③電離圏 ④磁気圏 ⑤重力場観測 ⑥その他 ※分野の詳細がありましたらお書きください | ①: 3件 ①+②+③: 6件 ③: 2件 |
| 質問4: 解決したい課題 | — | 次ページ |
| 質問5: 上記課題の解決にはどのような観測が必要ですか？ | — | 個別提案があるため提示しません |
| 質問6: 希望する軌道上観測期間 | ①1ヶ月未満 ②6ヶ月未満 ③1年未満 ④5年未満 ⑤5年以上 | ③: 2名 ④: 8名、 ⑤: 3名 |
| 質問7: 希望する観測軌道高度(複数可) | ①268km以上 ②268 km – 220 km ③220km – 180 km ④180 km – 150 km ⑤150km以下 | ①: 5名 ②: 6名 ③: 8名 ④: 3名 ⑤: 4名 |



【参考】アンケート結果(2/3)

「解決したい課題」については16名の方から回答がありましたので分類整理を行いました。

| 回答者 | 解決したい課題 | 社会的課題 | 科学的課題 (SLATS) | 科学的課題 (将来) | 技術的課題 (SLATS) | 技術的課題 (SLATS + 将来機) |
|-----|---|-------|---------------|------------|---------------|---------------------|
| 1 | 低高度(高度数百km)における磁場観測を用いた超高層現象および地球内部現象の解明 | | | ○ | | |
| 2 | 大気重力波の消散過程と高層大気への影響 | | | ○ | | |
| 3 | 地球磁場の精密観測、沿磁力線電流分布の精密観測 | | | ○ | | |
| 4 | 原子状酸素を中心とした中性大気のグローバル規模の変動解明 | | ○ | ○ | ○ | |
| 5 | 大気・プラズマの相互作用の解明 中間圏・熱圏下部大気の力学過程の解明 | | | ○ | | |
| 6 | 衛星そのものまたは電離圏プラズマとの相互作用により、観測や測器がどの程度影響を受けるのかに関する定量的知見の取得 | | ○ | ○ | ○ | |
| 7 | 熱圏の中性大気・電離大気のダイナミクス | | ○ | ○ | | |
| 8 | 低緯度域の電離圏と中性大気の相互作用の解明(軌道傾斜角10-20度を希望、他の衛星課題との連携を考慮する) | | | ○ | | |
| 9 | ・原子状酸素以外の中性分子の宇宙機材料・システムへの影響評価 ・大気吸入型電気推進の実証 | | | ○ | ○ | ○ |
| 10 | 極域電離圏におけるプラズマと中性大気の相互作用(電磁および力学エネルギーの消散過程等)と磁気圏-電離圏相互作用(オーロラ等の粒子降込みに伴う電場配位と電流分布(特に電離圏電流)) | | | ○ | | |
| 11 | 観測例のほとんどない高度100-250km領域での中性大気密度、組成、温度分布 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 12 | 磁気圏・電離圏・熱圏結合系における大気・プラズマ・電磁場の相互作用過程・ジオスペースダイナミクス | | | ○ | | |
| 13 | 200km高度の電子密度直接計測、測位への影響 | | | ○ | | |
| 14 | 電離圏～磁気圏間のエネルギー物質の輸送 | | | ○ | | |
| 15 | 強磁場環境における衝突プラズマの振る舞い | | | ○ | | |
| 16 | 電離圏F領域下部における中性大気・プラズマ結合とその影響 | | | ○ | | |



【参考】アンケート結果(3/3)

アンケート結果を以下のように分類・分析しました。

| 分類 | アンケート回答件数 | 分析 |
|----------------------|-----------|--|
| 社会的課題(将来機) | 0 件 | 提案がなかった。社会的課題に関してはJAXA側から説明が必要と分析した。(今回、説明) |
| 科学的課題(SLATS) | 4 件 | AO、中性大気に関するものだが、現状の評価に含まれているか確認が必要 |
| 科学的課題(将来機) | 16 件 | 中性大気+電離圏+磁気圏の結合に関するミッションが最も多い |
| 技術的課題 (SLATS+将来機) | 4 件 | 180km以下のデータ取得の要望有。 中性大気に関するもので評価が、将来の設計基準書につながるものがあるか分析が必要。 |
| 技術的課題(将来機) | 2 件 | SLATSより低い高度180km以下での計測要望があり。 工学提案が1件あり |



8.1 SLATSの共同研究に至るまでの経緯(2/2)

コミュニティの意見・要望の集約

- ・超高層大気の直接観測データが少ないので、JAXA等機関から提供していただきたい。
- ・SLATSで取得される高層大気データを入手して研究したい。
- ・SLATSに取得される原子状酸素(AO)の直接観測データを入手して研究したい。
- ・将来ミッションに研究者が提案するセンサを搭載してもらいたい。

要望に対するJAXA内の分担整理

- ・ 超高層大気サイエンステーマに関しては、ISASの理学委員会等を通じてミッション提案をする。(リサーチグループでの検討等)
- ・ SLATS将来機の設計、機能向上に関わる研究テーマは、SLATSプロジェクトで共同研究として進める



8.2 共同研究募集(案) (1/2)

1. 研究公募の目的:

SLATSプロジェクトの成果の最大化のため、SLATSの取得データを用いて、将来超低高度衛星の設計基準の構築に貢献に資する共同研究を、国内の専門家から公募します。

2. 共同研究公募の範囲:

対象分野は、下記の項目です。

- ①超低高度衛星の設計運用に必要な高層大気の数値予測と運用データとの評価
- ②超低高度での衛星姿勢の安定性検討
- ③高層大気による宇宙材料への影響評価

また、上記項目に合わせて設計基準構築に向けて必要な高層大気の計測に関する検討も含めます。



8.2 共同研究募集(案) (2/2)

4. 選定方法:

有識者により構成された「JAXA/SLATS研究公募委員会」を通じて研究提案を審査し、成果が期待できる研究を選定します。委員の構成は、第一宇宙技術部門、宇宙科学研究所、研究開発部門の委員のほか外部委員から構成されます。なお、研究提案は選定のためにのみ使用されます。

5. 共同研究:

提案が選定された代表研究者PI(Principal Investigator)の所属機関とJAXAが共同研究契約を締結します。契約条件はJAXAが指定する約款により、JAXAが選定した研究提案について、JAXAが発行する承諾書をもってPIの所属機関とJAXAとの契約が成立します。PIは研究活動および共同研究者Co-I(Co-Investigator)の監督責任を有します。

6. 今後の予定:

公募発出: 平成28年4月を予定
選定委員の設定: 平成28年4月を予定
応募期限: 平成28年6月を予定
選定結果発表: 平成28年8月を予定
共同研究開始: SLATS打上の半年前を予定



【参考】SLATS)共同研究提案書 応募フォームイメージ①

| | |
|--------|--|
| 研究テーマ名 | |
| 研究分野 | |
| キーワード | |

| | |
|--------------|---|
| 代表研究者 | |
| 氏名 | |
| 所属機関 所属部署 | |
| 役職 | |
| 所属地 | 〒 |
| Tel | |
| E-mail | |

共同研究者についても記載をお願いします。



【参考】SLATS)共同研究提案書 応募フォームイメージ②

| | | |
|----------------|------|--|
| 代表研究者名 主な経歴 | (期間) | |
| 主な業績 | | |

| | |
|---------------|---------------|
| 研究提案要約 | (背景、課題、意義を含む) |
| 研究目的 | |
| 期待される 研究成果 | |



【参考】SLATS)共同研究提案書 応募フォームイメージ③

| | |
|------------------|------------------------------------|
| 希望する SLATSデータ | (観測時期、場所、頻度、条件等の観測 要求があれば明記) |
| 研究方法 | |
| 研究計画 | (JAXA・共同研究者との分担、研究スケ ジュール、条件など) |
| その他 | |



公募が決まりましたら
HP上にご連絡いたします。

申し込みよろしく願いいたします。

飛翔体による超高層大気観測と超低高度衛星

阿部 琢美

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

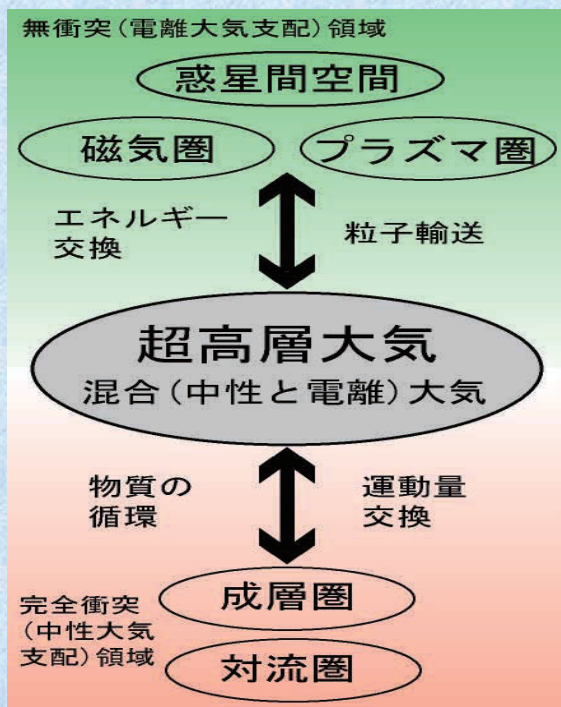
2016/2/29

超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

1

超高層大気領域の特徴

地球と宇宙の境界にあって、中性大気と電離大気が共存する領域



中性・電離大気間の運動量・エネルギー輸送はこの領域で行われるが、現象の複雑さと観測データ不足のため、統一的理解が困難。超高層大気での運動量・エネルギーの変換過程と物質の輸送・循環過程を解明し、上・下層との結合過程を含め磁気圏までの地球大気の総合的に理解する必要がある。

2016/2/29

超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

2

海外の^{飛行体を用いた}超高層大気観測の潮流

- 地磁気嵐の地球大気圏への影響(米国GOLD)
- 下層・中層大気の波動や潮汐の熱圏への影響(米国GOLD)
- 電離圏変動(米国ICON)
- エネルギー・質量輸送を通じた大気圏から宇宙までの総合的理解(米国ICON)
- 高度250km以下のボトムサイド電離圏の長期モニター(米国CARINA)

領域外からのエネルギーや運動量の流入に伴う超高層大気の変動、地球大気を総合的に研究しようとする研究が主流

2016/2/29

超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

3

日本での飛行体による超高層大気観測

- 2000年以前は熱圏・電離圏の研究者が頻繁に飛行体観測を行っていた
- 現在は一部のグループのみが利用している状況(機器開発には経験が必要という免れない面もある)
- 「れいめい」以降はISS-IMAPはあるものの衛星プロジェクトはない
- 日本は地上観測グループの活動が協力で、飛行体ミッションとの連携を考えやすいというメリットがある

2016/2/29

超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

4

これまでの議論から

- 中性大気の風速場を観測することの重要性については合意が得られそう
- しかし、どのようなサイエンスをかかげて中性風を観測するのか、例えば
 - 1) 中性大気とプラズマの結合
 - 2) 下層大気からの波動の影響

のどちらを知りたいか、また求める空間スケールや分解能によって、観測機器構成は変わる。

様々な方向性

独自の衛星を製作し打上げる計画だけでも

- 小型衛星シリーズで打上げる
- 大学衛星として打上げる
- 海外との協力のもとで日本の観測器を搭載した衛星を打上げてもらう

等の様々な可能性が考えられる。

他にも、他国との国際協力により衛星計画を実現する可能性が考えられる。

超低高度衛星は、これまで衛星が到達できなかった高度を飛翔できるという点で、大変魅力的である。

超低高度衛星への期待

- 高度250km以下の大気・プラズマ直接観測
 - 中性大気とプラズマの相互作用
 - 熱圏下部大気密度(組成)・温度・風の全球分布
 - ボトムサイド電離圏のプラズマ密度・温度・組成・電場
 - 熱圏－電離圏－磁気圏結合
- 大気・プラズマのリモートセンシング観測
 - 中間圏・熱圏下部の中性大気温度・風速
 - 電波による下部電離圏プラズマ密度観測
- 精密磁場観測
 - 磁気異常、電流分布
- 重力場観測

超低高度衛星の実現に対する個人的意見

- SLATS初号機はシステムが確定し、新たな観測提案は出来ないことから、大気密度等取得されるデータを用いて大気モデルの向上に関する貢献が考えられる
- 2号機以降の機会に向け、超低高度の軌道上で可能になるサイエンスを議論し、ミッション検討に積極的に参加していくべきではないか
- 特に新たなサイエンスを行うために必要な測定器開発は時間を要するため、必要な予算的・人的体制に向けた準備を始めるべきではないか

立ち上がるために Research/Working Group設立の提案

- Working Group(またはResearch Group)を設立し、SLATS後継機を含む計画検討をしてはどうか
 - # 宇宙科学研究所内のWGとは、明確な科学目的の達成を掲げて、飛翔体を用いた宇宙ミッションを提案・検討し、その実現を目指す研究者グループ
- WGの手前の組織として、Research Groupがある。
(作業としてはミッションの科学的精査、要素技術の開発研究加速、ミッションの規模・形態・システム要件等検討)

宇宙科学研究所 宇宙理学委員会下のWorking Group

Working Groupについての規定

- 2013年度に設定された宇宙科学のロードマップに基づき、WGのカテゴリーとしては、(i)戦略的に実施する中型計画の提案を行うWG、(ii)公募型小型計画の提案を行うWG、(iii)小規模プロジェクトの提案を行うWG、(iv)打ち上げ手段や親ミッションを特定せず宇宙機に搭載する装置開発を目的とするWG、という4カテゴリーを設ける。
- 打ち上げ機会・方法としては、おもにカテゴリー分けに準じ、単独衛星だけでなく、ISSへの搭載、外国ミッションへの参加、大気球や観測ロケットの利用などを含む。
- 新たなWGを設立する際は、宇宙理学委員会に申請し、委員会もしくはその下の小委員会で審査を受け承認されることを必要とする。
- カテゴリー(i)(ii)(iii)のWGは、プロジェクトもしくはプリプロジェクトとして採択された時点で、また(iv)ではBBMを完成させた時点で、目的を達成したものとして終了する。
- WGは、戦略的開発経費に応募する資格を有する。

Research Group (理学委員会の定義文書から)

- **WGの手前の組織として、RGを設ける。RGは宇宙理学ミッションの創出を目指し、WGの前段階に当たる作業を行うことを目的とする。**以下の項目の全てもしくは一部を行う。
 - A) 現状の技術レベルや国際的な研究動向を踏まえ、**ミッションの科学目的を精査し、絞り込むこと。**
 - B) **ミッションの鍵となる要素技術の開発研究を組織化し加速すること。**TRL1(基本原理の実証)およびTRL2(実用に向けての概念検討)を達成することを目安とする。
 - C) **ミッションの規模、形態、打ち上げ手段、システム要件、時期などを検討し、絞り込むこと**
 - D) その他、**WGの設立提案に先立ち、必要とされる検討**を行うこと。
- 設立を希望するRG代表者は、**宇宙理学委員会に申請し、別に定める手続きで宇宙理学委員会の審査を受け、認可されることを必要とする。**
- **RGは3年の時限とするが、延長を申請し審査に合格すれば再度、3年の活動ができる。**延長申請およびRG終了の手続きは別に定める。
- **RGは年度ごとに旅費を申請できる**が戦略開発研究費に応募する資格は有しない。RGはプロジェクト提案を行う資格をもたない(小規模プロジェクトCを除く)。
- **RGからWGに進むには、いったんRGを終了した上で、WGの設立提案を行い、宇宙理学委員会にて審査を受けることを必要とする。**

2016/2/29

超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

11

観測ロケット実験と超低高度衛星観測の連携について

- 超低高度領域を水平に飛行する衛星とほぼ垂直に飛行する観測ロケットの連携で、150～250kmの高度領域で3次元的なデータ取得が可能になる
- 観測ロケット実験の機動性(提案から実現まで最短で約2年)を活用し、コーディネートも考えやすい
- 超低高度衛星に搭載予定の新たな測定器を、観測ロケットを用いて事前実証することも価値ある活用法

2016/2/29

超低高度衛星の利用に向けたサイエンスワークショップ

12

JAXA低軌道衛星研究会
JAXA東京本部
2016年2月29日

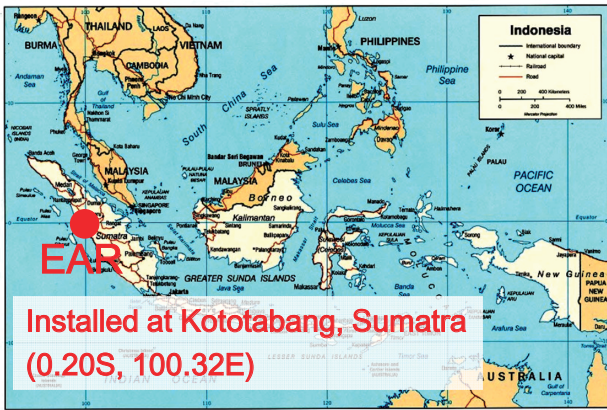
衛星および地上からの 電離圏観測計画について

山本 衛
京都大学生存圏研究所

Contents

- Projects related of myself
 - EAR and EMU (Equatorial MU Radar)
 - Satellite-ground beacon experiment
- Ground-based observations
 - Radars (from China, USA, etc)
 - Interesting trials
- Satellites: good-by and hello
 - SWARM, COSMIC-1/2, ICON/GOLD, CSES
 - CARINA project by P. Bernhardt at NRL

The Equatorial Atmosphere Radar (EAR)



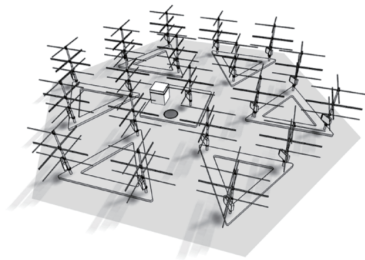
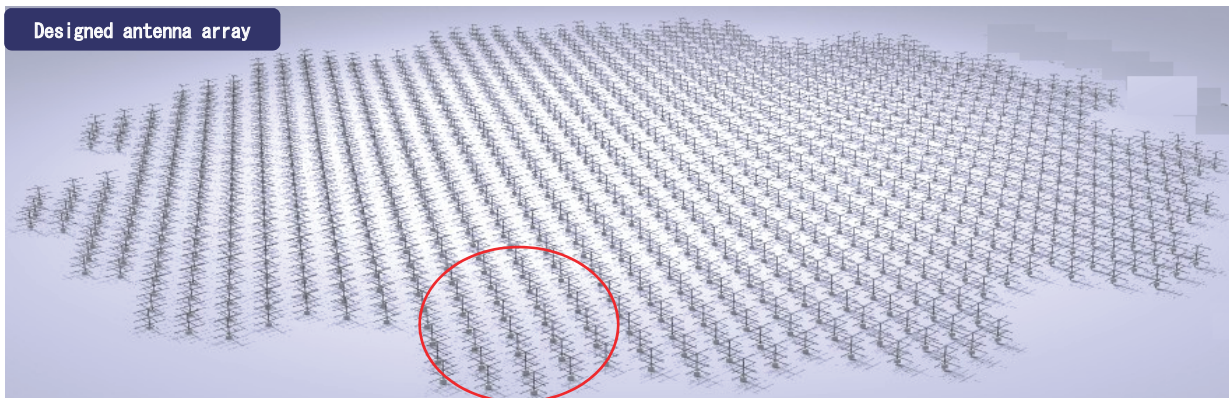
TR: transmitter and receiver

PROPOSAL FOR MASTER PLAN 2014

- Title: “Study of Coupling Processes in the Solar-Terrestrial System”
- Leader: Prof. T. Tsuda
- Institutions: RISH, NIPR, STEL, Kyushu Univ.

1. **Equator:** Develop Equatorial MU Radar (EMU) at the EAR site
2. **Polar region:** Develop EISCAT_3D radar in Europe
3. **Global:** Deploy global network of airglow imager and magnetometer.

Equatorial MU Radar (Expansion of EAR)



1-group = 19 Yagis
 Array consists of 55 groups
 (19 Yagis x 55 = 1045)

◆ EMU System

Frequency: 47MHz

Antenna: Active-phased array
 (163m diameter, Total 1045 Yagis)

Output power: 500kW PEP)

Subsystems:

TR module at each Yagi-antenna

Multi-channel receivers

Radar controller / Data processor

MUR x 2

MUR x 1/2

Other projects -- Radars --

Radars in China

– Qujing (Kunming) IS Radar

- 25.6N, 103.8E
- 500MHz, 2MW (PEP), 29m dish
- Start operation since 2014 April
- China Research Institute of Radiowave Propagation (CRIRP) in Qindao, China

– Hainan IS & coherent Radars

- 18.4N, 109.6E
- Coherent VHF radar is in operation.
- IS radar like AMISR is funded, and now under design.
- Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences in Beijing.

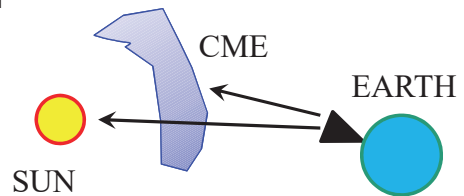


Other projects -- Radars --

Interesting future plan

– Heliospheric Radar

- Under consideration by USA (Hysell, Meriweather)
 - A facility for studying all geospace
- Expected target
 - Coherent echoes from the middle and upper atmosphere
 - IS echoes from the ionosphere and plasmasphere
 - Coherent echoes from magnetosphere and solar wind
 - Reflection from the Sun
- VHF system is thought
 - Large active-phased array like Jicamarca
 - Several mega-watts peak power
 - Near 100% duty cycle
 - Expected at USA southwest

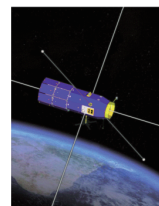


Other projects -- Satellites --

Low-latitude satellites

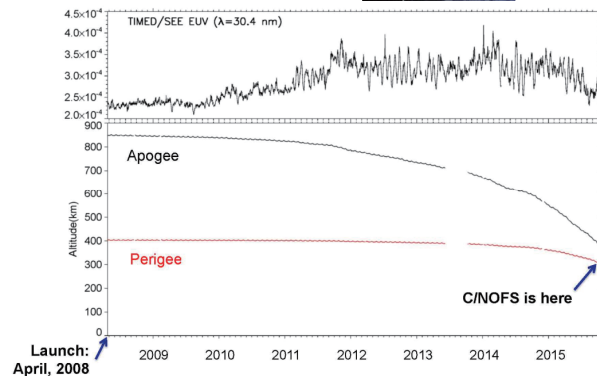
– Good-byes

- C/NOFS will re-entry in Nov. 2015.
- COSMIC constellation is gradually stopping by age.



– New comers

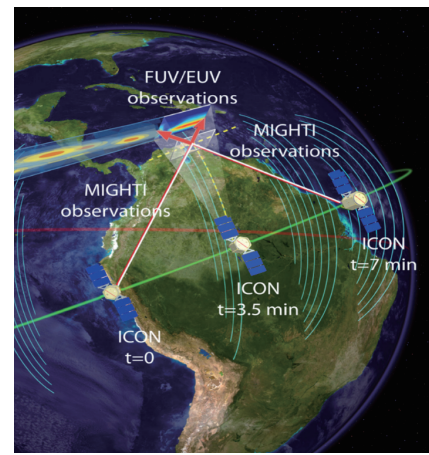
- ICON/GOLD
- COSMIC-2
- SWARM
- CSES



ICON (USA)

Outline

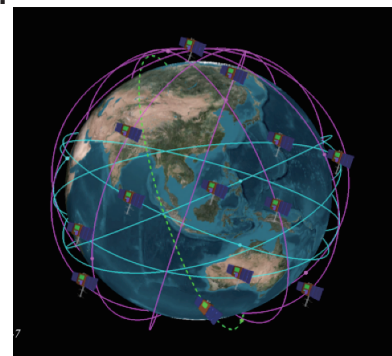
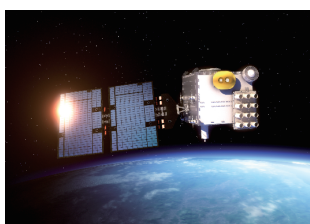
- Explore the boundary between Earth and space to understand the physical connection between our world and the immediate space. (from web)
- Expected launch in June 2017.
- Inclination = 27 deg
- 575 km height
- Collaborate with GOLD (imager from stationary satellite)
- <http://icon.ssl.berkeley.edu/>



COSMIC-2 (USA+Taiwan)

Outline

- GPS occultation of ionospheric density and air temperature (humidity).
- Launch six satellites into low-inclination orbits in 2016, and another six satellites into high-inclination orbits in 2018.
 - Inclination = 24 deg, Height = 520-550 km (1st launch)
 - Several sub-payloads are planned.



- <http://www.cosmic.ucar.edu/cosmic2/>

Other projects -- Satellites --

Other new satellites

– SWARM (Germany)

- 3-unit constellation, polar orbit, 450-550 km height
- Ultra-sensitive magnetometer and accelerometer + basic plasma instruments
- Launched in November 2013, data are now open.

– CSES (China)

- China Seism-Electromagnetic Satellite ... DEMETER type satellite(s)
- Expected launch in 2017, 2 satellites?
- Polar sun-synchronous orbit at 2AM/2PM, 500 km HT
- Plasma in-situ measurements + beacon transmitter
- Standard data will be open to public.
- More satellites may follow in 2020.



CARINA Ionosphere Probe Program



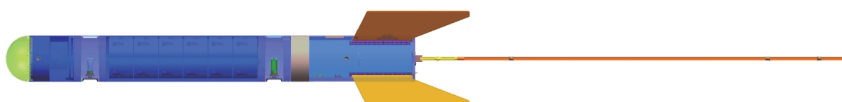
Paul A. Bernhardt, Plasma Physics Division
 Paul Oppenheimer, Naval Center for Space Technology
 Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375

2015 CEDAR Workshop
 University of Washington, Seattle, WA
 22 June 2015

Agenda and Introduction

CARINA

Complex Action of Radio-Waves in the Ionosphere for Nonlinear Analysis

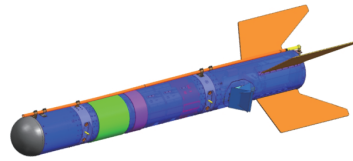




CARINA Program Overview

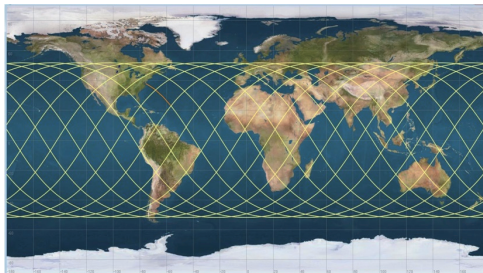


- Space Plasma Physics Mission:
 - High Power HF Waves in the Ionosphere
 - Sporadic-E Layers Characterization
 - Global Imaging of F-Layer Ionosphere
- Orbit Details:
 - Launch Orbit: 225 ± 50 km
 - Orbit Inclination: >50 Degrees
 - 45-60 day mission
- Low Cost: $< \$11M$
- Fast Pace: 1 year from concept to ready for launch

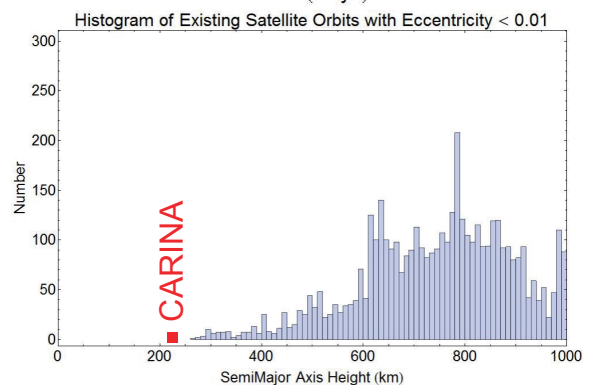
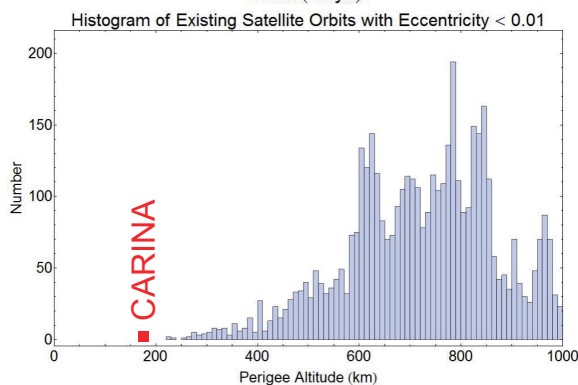
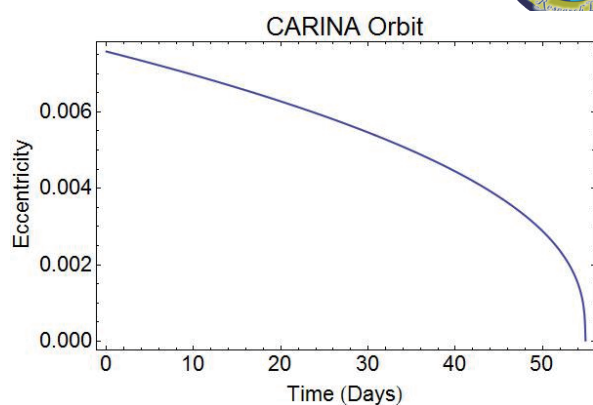
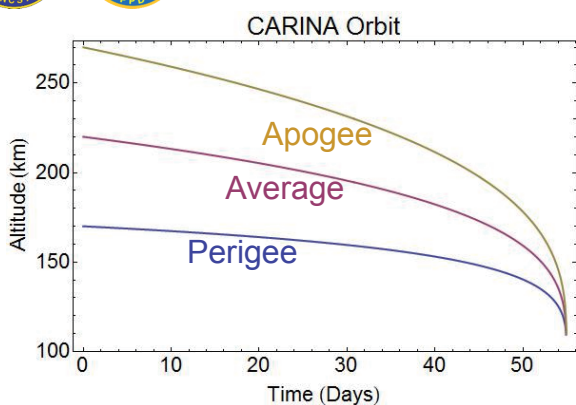


Space Vehicle

- Space Segment
 - Pair of Identical Satellites (Redundant)
 - Mass: 150-200 kg
 - Orbital Average Power: $< 9W$ (Battery Only)
 - Size: 10.25" Diameter X 90" Long
- Ground Segment
 - TT&C - UHF Uplink, S-Band Downlink
 - Blossom Point (NRL)
 - Science Data D/L - X-Band Down
 - Pomonkey (NRL)
- US DoD Relevance
 - Ionospheric Impacts
 - Communication (ex. UHF SATCOM),
 - Navigation (ex. GPS),
 - Radar Performance (ex. OTHR)
 - Ocean Turbulence Effects
 - Ship Motion (ex. Wave Height Spectrum)
 - Radar Clutter (ex. OTHR)

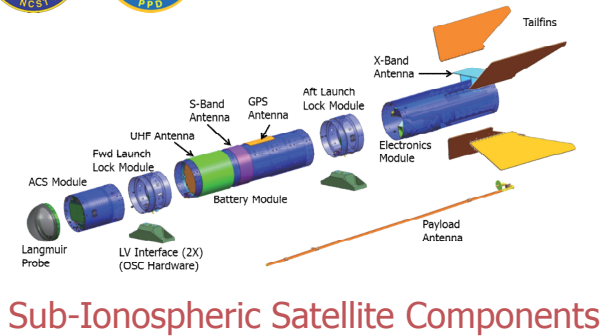


CARINA Sustained Low Altitude Orbit

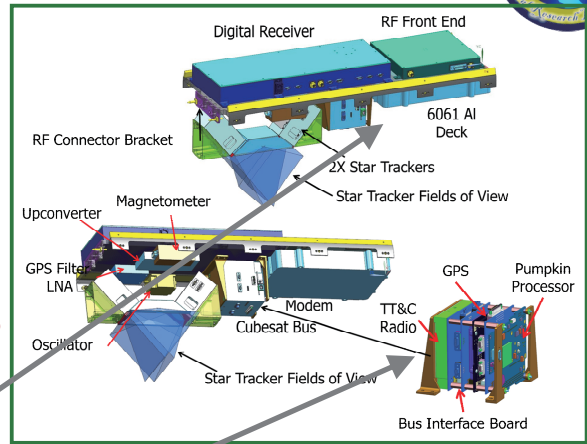




CARINA Science Instruments



Sub-Ionospheric Satellite Components



CARINA Science Instruments

Electric Field Receiver (EFI)

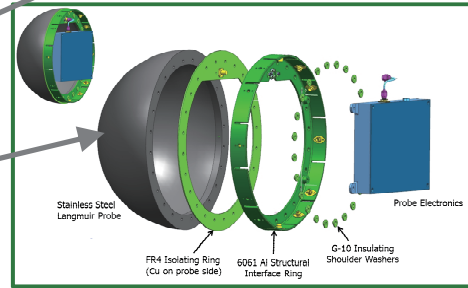
MF/HF Band: 3 to 13 MHz
20 Watts Peak Power

Orbiting GPS Receiver (OGR)

Global TEC Measurements
2 Watts Power

Ram Langmuir Probe (RLP)

10^2 to 10^6 cm⁻³ Electron Concentration
2 Watts Power



CARINA Science Topics



Costal Ocean Wave Remote Sensing

Wave Height Spectrum Derived from HF Surface Wave Scatter

Assimilation Models

GPS Total Electron Count (TEC) and In Situ Plasma Density
Updating Data Driven Ionospheric Models (GAIM, IDA3D)

Radio Wave Propagation and Interactions

Impact of Bottomside Ionosphere on HF Ray Trajectories
Ionospheric Irregularities and UHF/L-Band Scintillation
Ionospheric Modification by High Power HF Waves

Ionospheric Structures

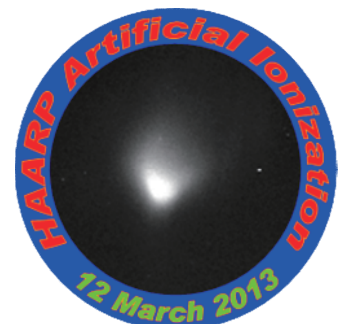
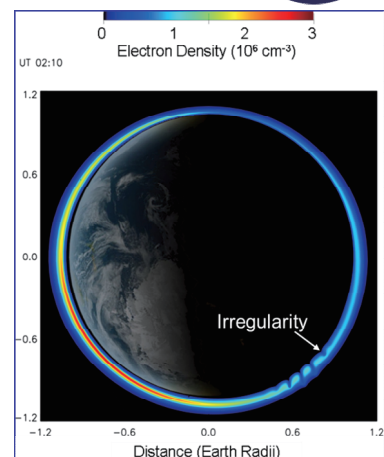
Sporadic-E/Intermediate Layers and TIDs
Large Scale Bottomside Fluctuations in the F-Layer

Neutral Drag

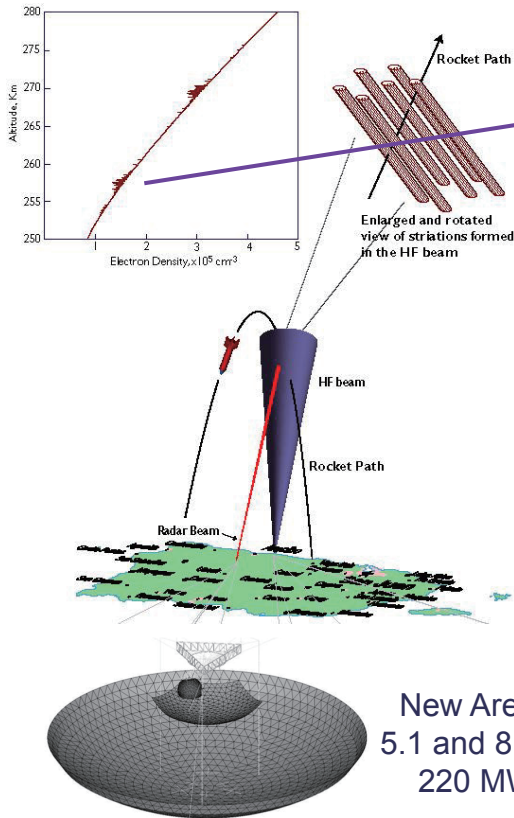
Orbit through Reentry Modeling of Drag Coefficients
Neutral Density Model Updates

Atmospherics and Lightning

Lightning EM Pulses and Impact on Ionosphere



Space Plasma Experiments Using the Arecibo HF Facility and 430 MHz Radar



New Arecibo HF
5.1 and 8.175 MHz
220 MW ERP

CARINA Probing of the Arecibo HF Beam

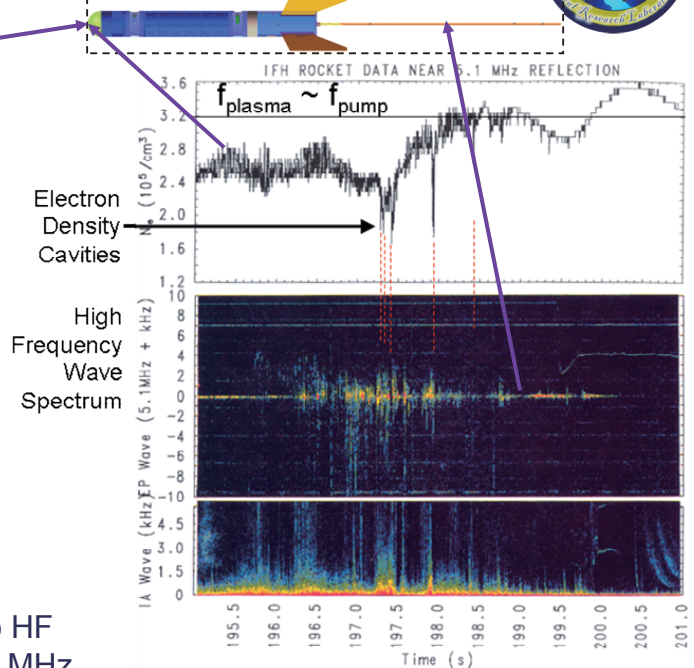
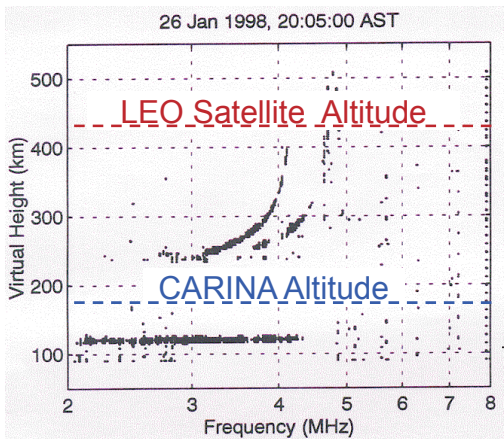


Plate 2. Detail of the electron density, Langmuir waves around 5.1 MHz and low-frequency ion acoustic waves near the HF reflection level. The Langmuir waves and ion acoustic waves seem to be trapped or guided by the density cavities. Spectra of low-frequency electric fields are measured between sensors EF1 and EF4 of Figure 2.

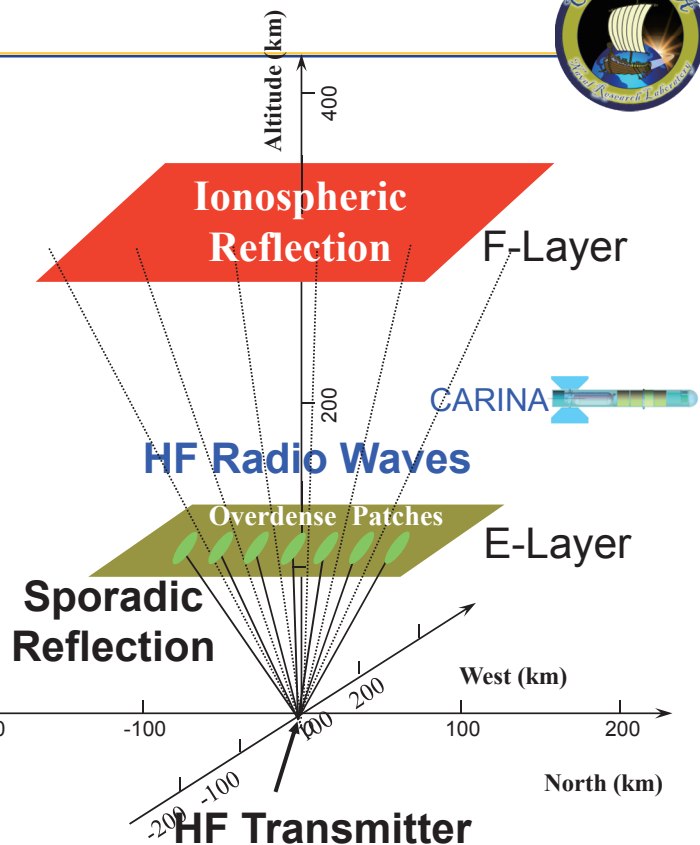
M.C. Kelley, et al., *J. Geophys. Res.*, 100(A9), 17,367-17,376, 1995.
L. K. Breakall, *The New Arecibo HF Facility* ..., 2014

Rodriguez, et al., *Geophys. Res. Lett.*, 24, 635-638, 1997

Penetration of HF Diagnostic Waves Through a Patchy Sporadic-E Layer



Ionogram





衛星航法に対する電離圏の影響とその 軽減策 -衛星観測への期待

齋藤 享

電子航法研究所

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

1



電子航法研究所について

- * 電子航法について、航法技術の開発、機器の試作、評価試験などを行うことにより、交通の安全の確保とその円滑化を図る
 - 特に航空分野に重点
- * 重点研究分野
 - 飛行中の運航高度化に関する研究開発
 - 空港付近の運航高度化に関する研究開発
 - 空地を結ぶ技術及び安全に関する研究開発

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

2



衛星航法と航空

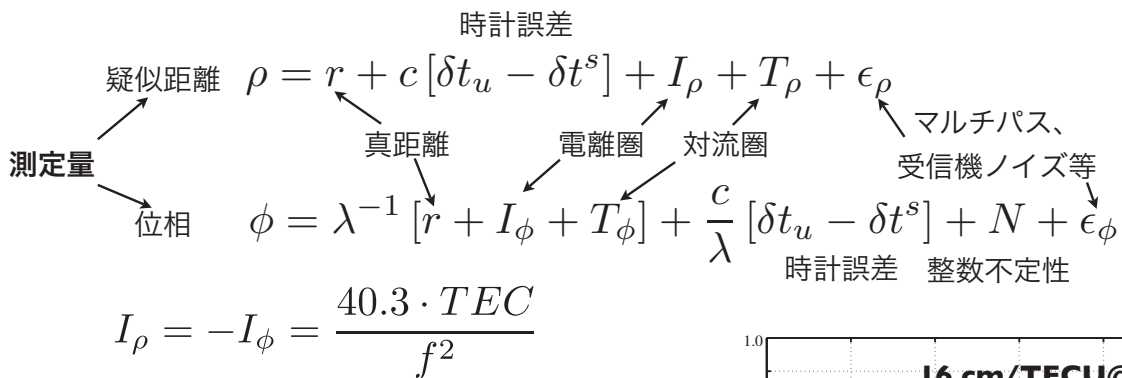
- * 国際民間航空機関（ICAO）において、衛星航法(GPSなど)を次世代航空航法の中心と位置づけ
- * 精度だけでなく完全性（インテグリティ）を重視
 - インテグリティ：誤りがないことを保証し、使用すべきではない場合に迅速に警報を発すること
 - インテグリティ要求レベル： $1-10^{-7} \sim 10^{-9}$
- * GPS単独では所要のインテグリティを満足できないため、補強システムが必要
 - SBAS (Satellite-based Augmentation System)：衛星、広域
 - GBAS (Ground-based Augmentation System)：狭域、地上
 - ABAS (Aircraft-based Augmentation System)：航空機単独

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

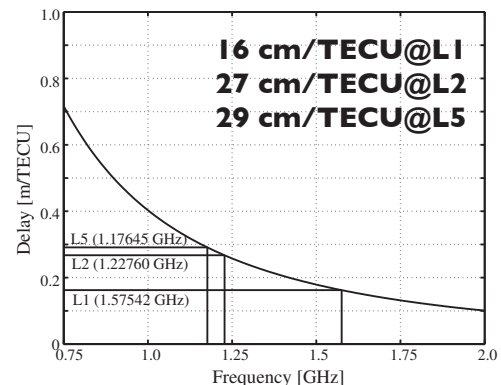
3



衛星航法と誤差要因



- * 誤差のうち、電離圏によるものが最も大きい
 - * 電離圏プラズマにより電波の伝搬速度が変化し、測距誤差を生じる→電離圏遅延
 - * 全電子数（伝搬路上の単位面積あたりの総電子数）に比例し、周波数の2乗に反比例
- ➡ 電離圏遅延⇔全電子数

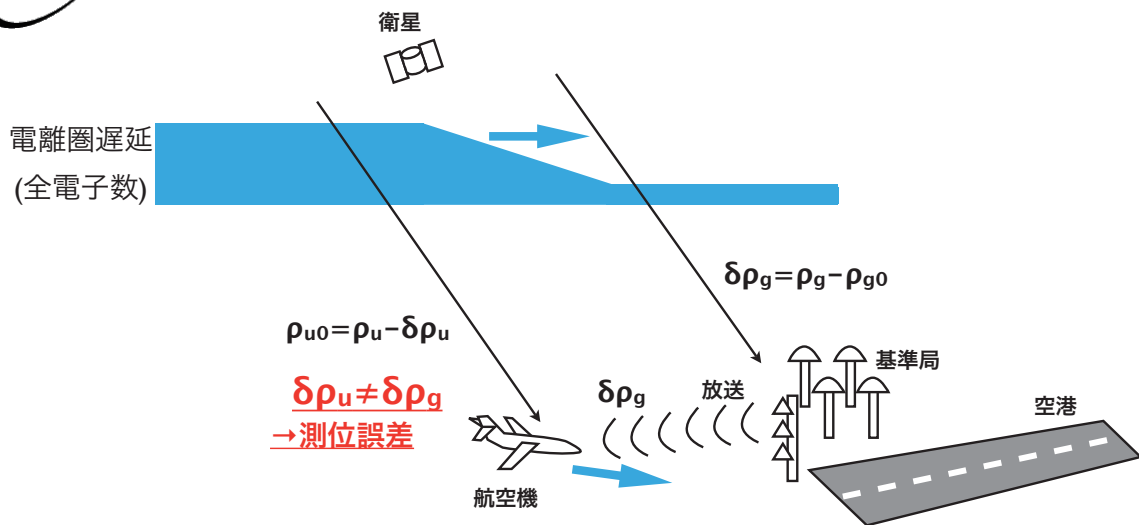


第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

4



航空用衛星航法例(GBAS)と電離圏の影響



- * 空港に設けた基準局の測定結果を用いて、各衛星ごとの遅延量補強情報を各空港から放送
- * 航空機は補強情報を用いて測位
- * 電離圏遅延（全電子数）空間勾配が誤差要因

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

5



GBASにおける電離圏対策と問題点

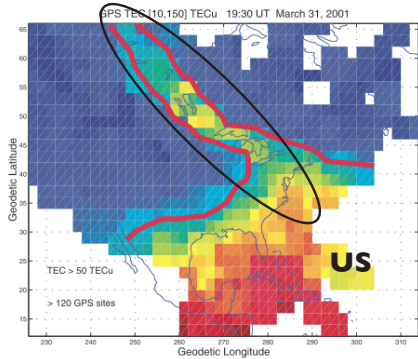
- * 対策上のキーポイント
 - 極めて高いインテグリティ要求($1-10^{-7} \sim 10^{-9}$)を満たす
 - 可用性(要求レベル99~99.9%)を損ねない
- * GPS衛星信号を用いた対策
 - コード擬似距離と搬送波位相の変動の乖離の検出
 - 空間勾配の直接検出
 - ◆ 基準局の測定にかからないものは検出できない
- ➔ 電離圏勾配は常に存在するものと仮定し、それでも安全性が保たれるように補正パラメータを保守的に操作する
- ➔ 可用性を高くしにくい

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

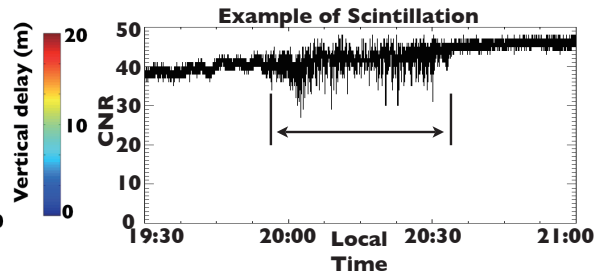
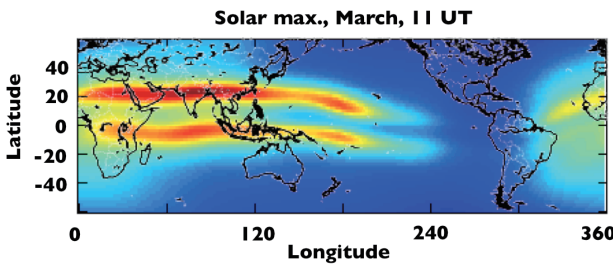
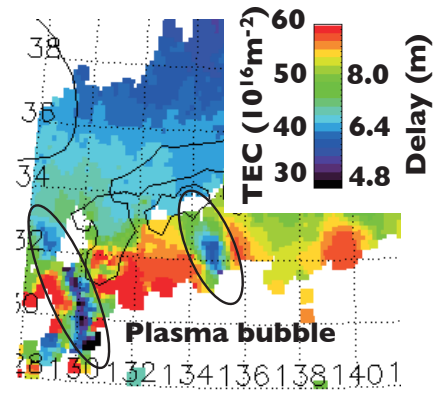
6



衛星航法の障害となる電離圏擾乱



[Foster et al., 2002]



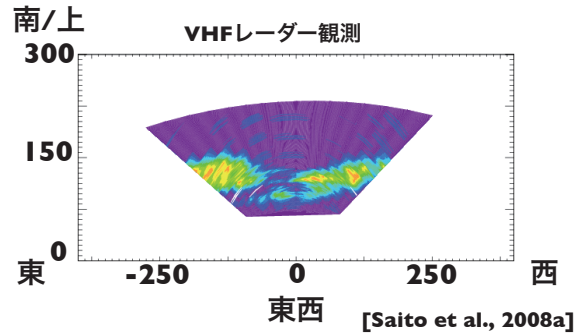
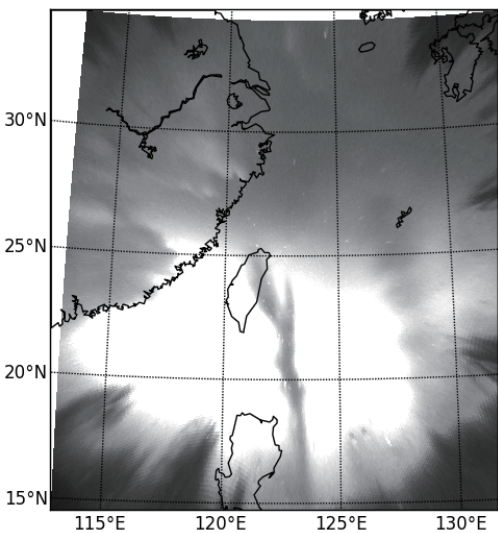
* 電離圏の空間・時間変動が問題

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

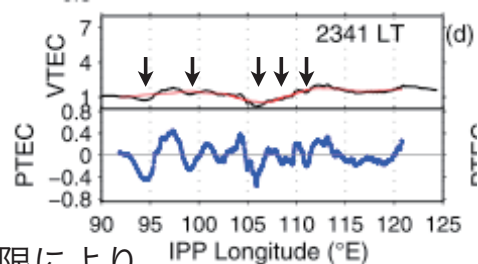


衛星航法のための電離圏擾乱の広域監視(地上)

大気光(630.0nm, 777.4nmなど)観測



VHF/UHFビーコンによる前駆現象検出



[Thampi et al., 2009]

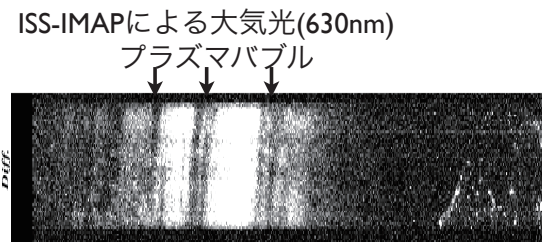
* 地理的条件、気象条件による制限により
監視範囲に限界

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日



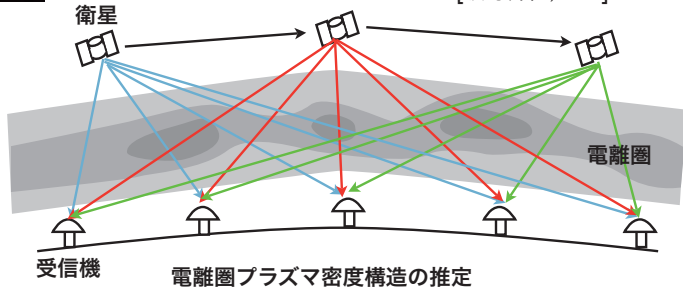
衛星による電離圏擾乱監視の可能性

- * in-situ観測 (電子密度、電場、中性風速度、GNSS掩蔽)
- * 光学観測
 - 大気光によるプラズマバブルの撮像(表面、リム)



[坂野井他, 2013]

- * 電波観測 (衛星-地上連携)
 - VHF/UHFビーコン電波を送信、地上の観測ネットワークで受信
 - 例: C/NOFS, COSMIC



電離圏プラズマ密度構造の推定 (トモグラフィ)

- * 高度: F領域中～上側(300km～)

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

9



まとめ

- * 航空航法における衛星航法の利用において電離圏擾乱が大きな問題。
 - 電離圏擾乱の効率的な監視・検出は、性能向上のために必要
- * 地上観測の限界 (地理的条件、気象条件など) を越えるために衛星の利用が有効
 - 光学観測
 - ビーコン電波による地上観測網との連携
- * 将来の運用への利用に向けた技術実証として期待

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ, 2016年2月29日

10

中性大気密度計測装置の 開発状況について

東尾奈々(JAXA)、新谷昌人(東大)
大里優一郎(都市大)、渡邊力夫(都市大)

1

1.開発の背景・目的

近年、飛翔体(超低高度衛星、再突入)の運用が低高度化してきていることに伴い、中性大気の影響が無視できなくなっている。

しかし、現在衛星等の運用で使用されている大気密度モデルは基本的に統計モデル(国外)、大気密度の細かい変化を再現できるモデルではない。

一方で、国内で開発しているGAIAモデルのような数値モデルは大気の細かい変化を再現することができる。GAIAモデルのような数値モデルを今後使用していくことは超低高度衛星や再突入物体の運用、デブリ監視を改善して上でも重要である。

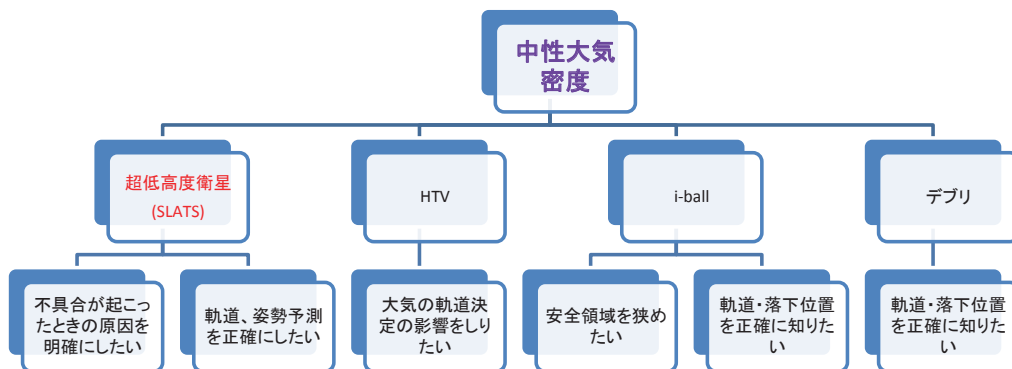


図1-1 中性大気密度モデルと運用との関係

2

数値モデル(GAIAモデル等)を運用に適用する際の問題点

☑実測値データとの比較が少ないので信頼性が低い

↓

☑モデルの精度確認のための実測データが非常に乏しい
(特に高度200km以下)

↓

☑低高度の中性大気密度(全体)を高精度に計測する装置がない



中性大気密度による大気ドラッグによる影響を解決するため
第一歩として400km～120kmまでの中性大気密度全体を把握したい



小型で高精度な加速度計が必要

3

2. 加速度計と大気密度との関係性

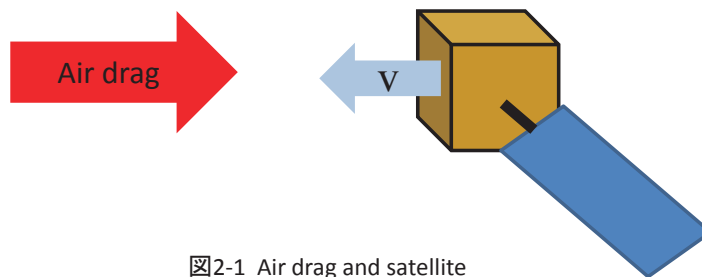


図2-1 Air drag and satellite

$$m\mathbf{a} = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

m[kg]: 質量,
a[m/s²]: 加速度,
ρ[kg/m³]: 大気密度
v[m/s]: 速度,
A[m²]: 面積,
C_D[-]: 抗力係数

大気抵抗
計測によって求まる
衛星軌道や設計によって定まる

加速度の計測により大気密度を求めることができる

4

3.大気密度と加速度の関係

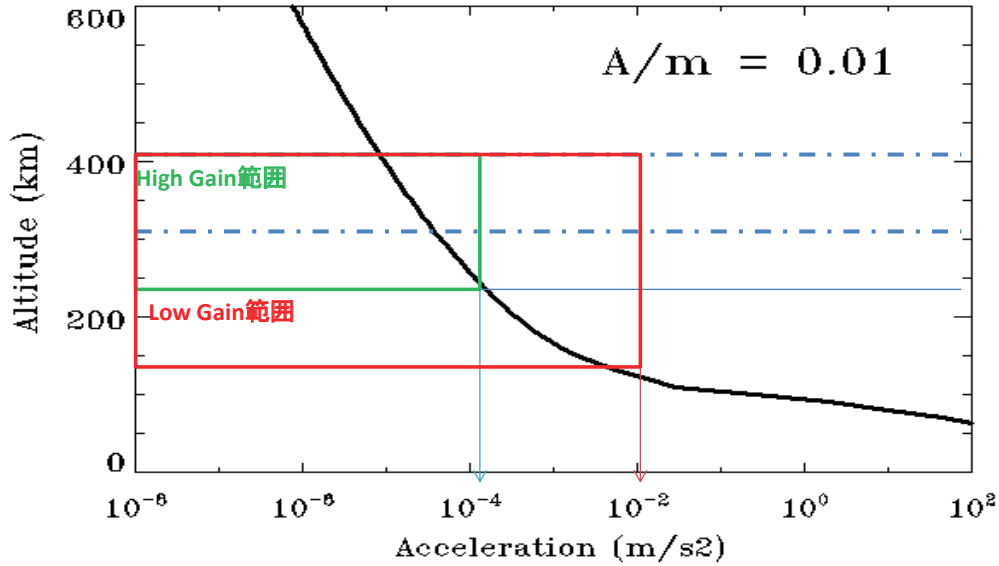
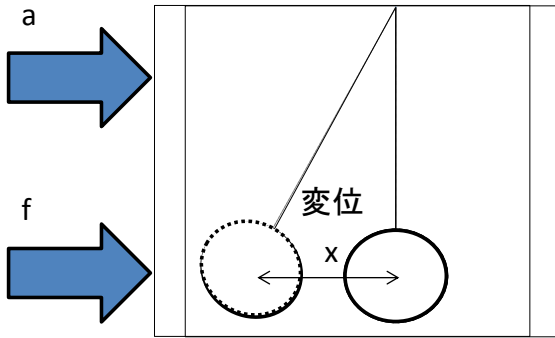


図3-1 高度と加速度の関係

※太陽活動極大期(大気密度使用)
 ※衛星断面積/衛星質量 (=A/m)
 ※CHAMPの場合、A/m=1.43 × 10⁻³

| 世界との比較 | | | | | | | |
|-----------------|--|--|--|------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| | CHAMP 【STAR】 | GRACE(2機) 【SuperSTAR】 | GOCE 【ASH】 | Swarm(3機) | HTV 【SIGI】 | DPF | new |
| 国 | DLR(独) | NASA(米) DLR(独) | ESA(欧州) | ESA(欧州) | JAXA(日本) | JAXA/ISAS | JAXA |
| 製造先 | ONERA | ONERA | ONERA | ONERA | Honeywell | 東大地震研 | 東大地震研/JAXA |
| 対象 | 重力場 大気密度(付属) | 重力場 | 重力場 | 重力場 | 誘導・制御 | 重力場 | 大気密度 |
| 高度 | 約470km | 約500km ※2機衛(220km) | 270km | 450km(2機) 530km(1機) | 350km-100km | 500km | 350km- 100km |
| 軌道傾斜角 | 83度 準極・円軌道 | 89度 太陽同期軌道 | 96.7度 | | | | 未定 |
| 打ち上げ日 | 2000.07.15 | 2002.03.17 | 2009.03.17 | 2011.06 | 2009.09.11 | | |
| 分解能 | 1 × 10 ⁻⁹ m/s ² (Y軸, Z軸) 1 × 10 ⁻⁸ m/s ² (X軸) | 1 × 10 ⁻¹⁰ m/s ² | 1 × 10 ⁻¹² m/s ² (センシティブ2軸) 1 × 10 ⁻¹⁰ m/s ² (1軸) | おそらく GRACEと同じ | 1 × 10 ⁻⁵ m/s ² | 1 × 10 ⁻¹¹ m/s ² | 1 × 10 ⁻⁸ m/s ² |
| 最大加速度 | 1 × 10 ⁻⁴ m/s ² | 1 × 10 ⁻⁵ m/s ² | 1 × 10 ⁻⁷ m/s ² | おそらく GRACEと同じ | 3 × 10 ⁻¹ m/s ² | 1 × 10 ⁻⁵ m/s ² | 1 × 10 ⁻² m/s ² |
| 重量 | 522kg(全体) | 432kg(全体) | 1,100kg | | | 5kg程度 | 5kg程度 |
| 寸法 (長さ×高さ×幅) | 4.2m × 0.75m × 1.62m(全体) | 台形断面 3.122m × 0.72m × 1.64m(底) × 0.69m(頂) | | | | 10cm × 10cm × 20cm | 10cm × 10cm × 20cm |
| 備考 | ・GPS ・LRR(レーザー反射器) ・OVM(FRD(磁力計)) ・DIDM(イオン測定器) | ・GPS ・ACC ・KBR(Kバンド測距装置) ・LRR(レーザー反射器) ・CSA(衛星方向感知観測カメラ) | | | | | ・GPSは必要 |

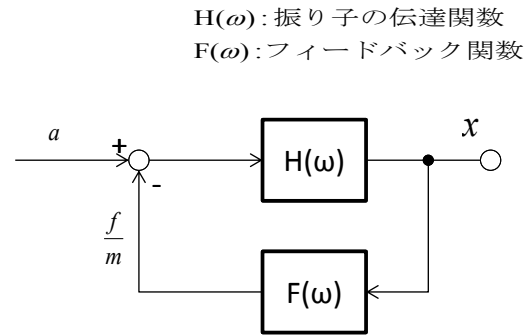
4. 加速度計の基本原理



変位量に応じた力を掛ける

$$a = \frac{f}{m}$$

図4-1 Principle of accelerometer



$H(\omega)$: 振り子の伝達関数
 $F(\omega)$: フィードバック関数

図4-2 block diagram

おもりの変位が常に0になるよう力をかけ、その時の力計測することで加速度を計測

http://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/80b975458609c09036129beb83269f98.pdf

5. 加速度計への要求スペック

CHAMPやGRACEの加速度計は静電容量の変化から変位を検出静電アクチュエータで復元力かける方式。この方式では低高度の大気密度の計測は困難。

本加速度計の特徴

◆磁力による制御

強い制御をかけることが可能

◆光による変位検出^[5]

非接触のため測定対象を乱すことなく精密かつ高い精度の測定可能

表5-1 要求スペックと加速度計(BBM)の対比表

| | 要求スペック | 加速度計BBM | 適正 |
|-------|----------------------------------|--|----|
| 自由度 | 6自由度 | 6自由度 | ○ |
| 最大加速度 | $1 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ | $2.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ | ○ |
| 分解能 | $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ | $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 構成部品・回路のノイズ測定結果に基づく | △ |
| サイズ | 10cm × 10cm × 20cm ※バッテリー除く | 116mm × 116mm × 116mm(センサ部)+12mm × 150mm × 100mm(デジタル基板) ※バッテリー除く | ○ |
| 重量 | 5kg程度 ※バッテリー除く | 約2.5kg ※バッテリー除く | ○ |
| 消費電力 | 20W以内(TBD) | 約7W | ○ |

6. 本加速度計(BBM)の概要

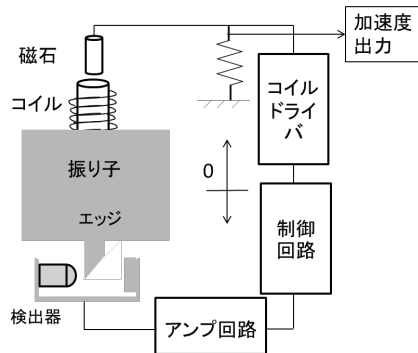


図6-1 加速度計の概略図

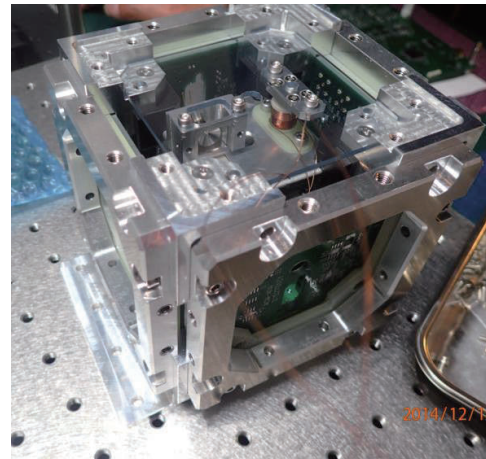


図6-2 加速度計(BBM)の外観写真

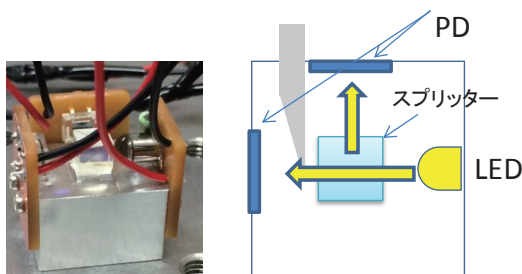


図6-3 変位検出部(地震計)

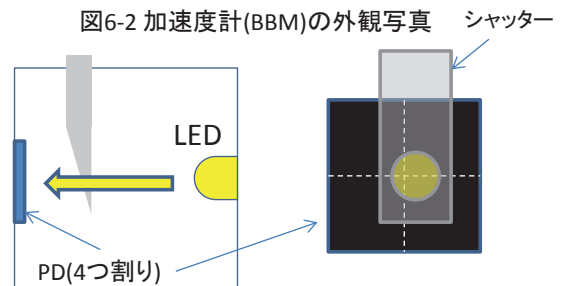


図6-4 変位検出部(加速度計BBM)

変位検出部においてはこの装置の基本としている地震計ではスプリッターにより分光して変位を検出していたが、フライトを見据えて4面割PDを使用し変位を検出するように改良を行った。

7. 加速度の評価

6軸加速度計の擬似加速度応答の測定結果(鋸山観測所)

6軸加速度計のマスを手で吊した状態で、支持点をX,Y,Z方向にd動かすとそれぞれ

$$X,Y(\text{水平方向}): a = \frac{g}{L} d \dots (1)$$

$$Z(\text{垂直方向}): a = \frac{k}{m} d \dots (2)$$

の擬似的な加速度が6軸加速度計に加えられる。
(g: 重力加速度、L: 振り子長、k: ばね定数、m: マスの質量)

一方、加速度計の出力 V_{out} は、コイル電流を i 、アクチュエーター係数を β 、電流読み取り抵抗を R 、アンプゲインを A とすると、 $V_{out} = \frac{m a}{\beta} R A$ と表される。従って、

$$X,Y(\text{水平方向}): V_{out} = \frac{m g}{\beta L} R A d \dots (3)$$

$$Z(\text{垂直方向}): V_{out} = \frac{k}{\beta} R A d \dots (4)$$

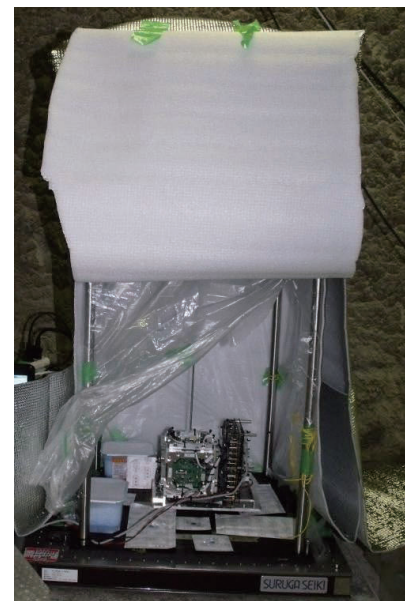


図7-1 実験風景

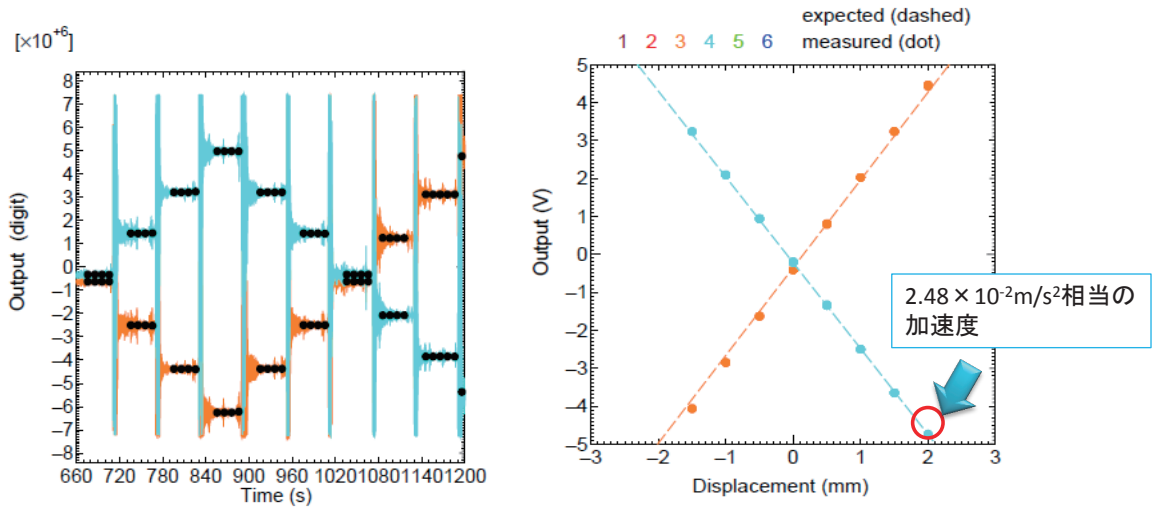


図7-2 6軸制御試験の結果(Y軸:2016年1月19日実施)
 左: マイクロメータを動かしたときの出力vs時間 右: 出力電圧vsマイクロメータの移動量

マイクロメータでdを1分毎に変化させたときの加速度出力(Low gain output)の10秒平均(黒丸)を取り、横軸d、縦軸をVoutとしてプロット(各点)した。
 破線: 移動量から擬似的加速度を計算した値。
 6軸すべてにおいて計測した結果設計通りの動作をしており、最大加速度 $1 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ が検出できることを確認した。

8. 加速度計の分解能の評価

最小加速度の想定を高度400km飛行してるCHAMP衛星のデータを基準に本加速度の部品・回路の個別ノイズと比較を実施した。

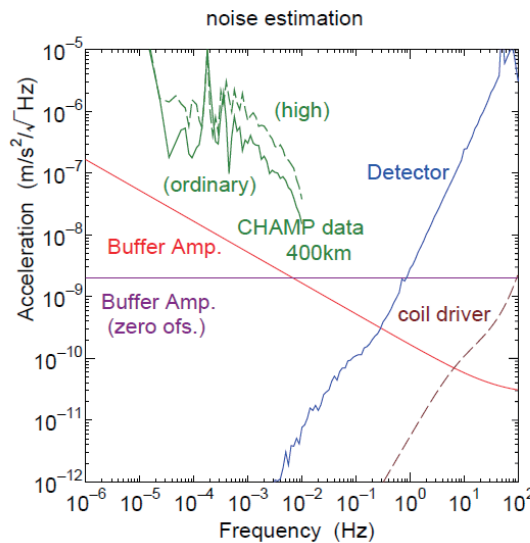


図8-1 部品・回路の個別ノイズとCHAMP衛星との比較結果

分解能の評価については微小加速度 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ の試験環境を地上で構築することが困難であるため部品・回路の個別ノイズの評価(実測値)から要求スペックの分解能で計測できる事を確認した。

まとめ

- 6自由度加速度計BBMの製作を行った
- 6自由度で安定して制御がかかることを確認した
- 最大加速度 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}^2$ が出ることは確認できた
- 加速度分解能 $1 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ は部品レベルでのノイズ確認を実施し検出範囲内であることを確認できた

超低高度衛星による 地球磁場精密観測について

能勢正仁¹、篠原育²、清水久芳³、
松本晴久⁴、家森俊彦¹

¹ 京都大学理学研究科・地磁気世界資料解析センター

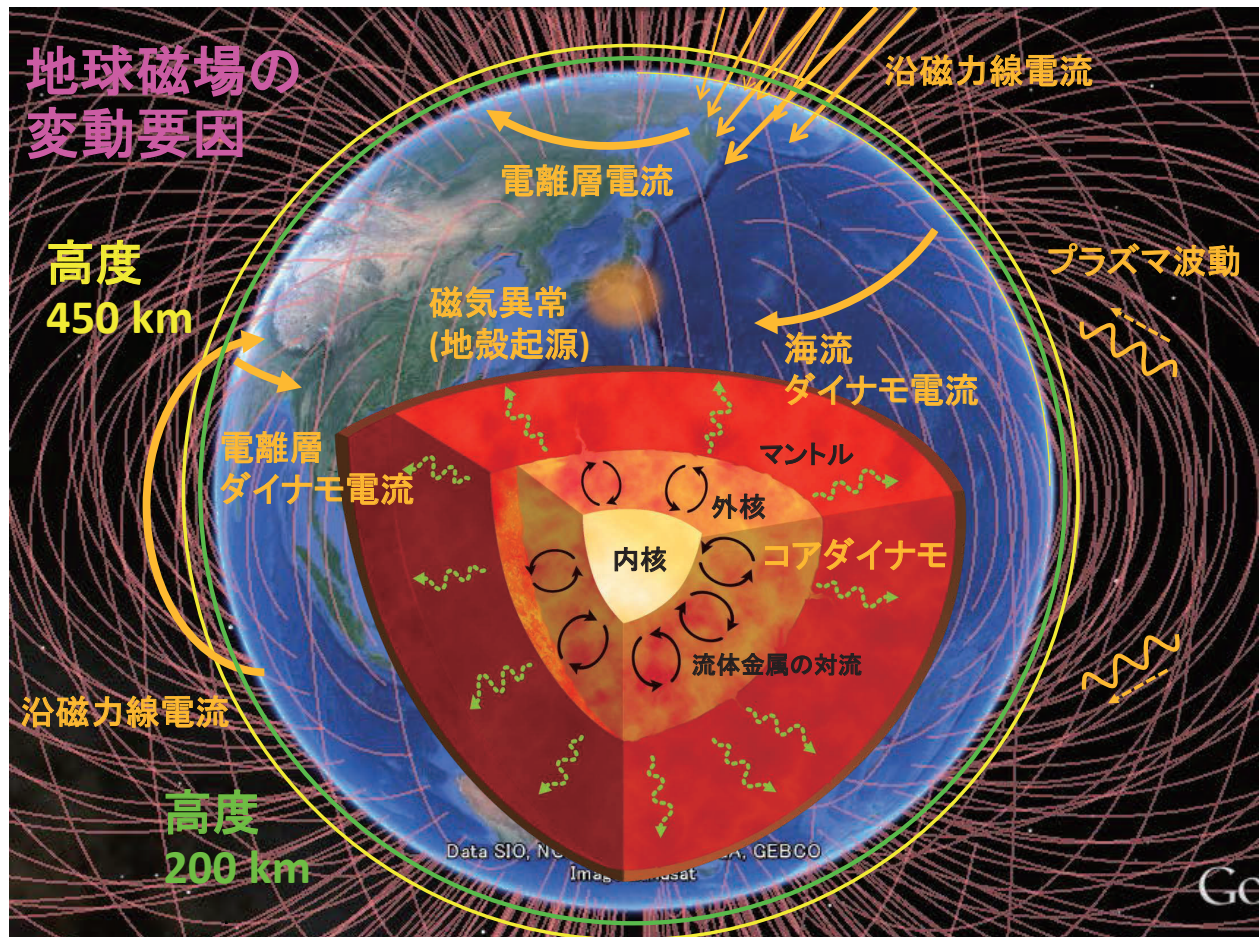
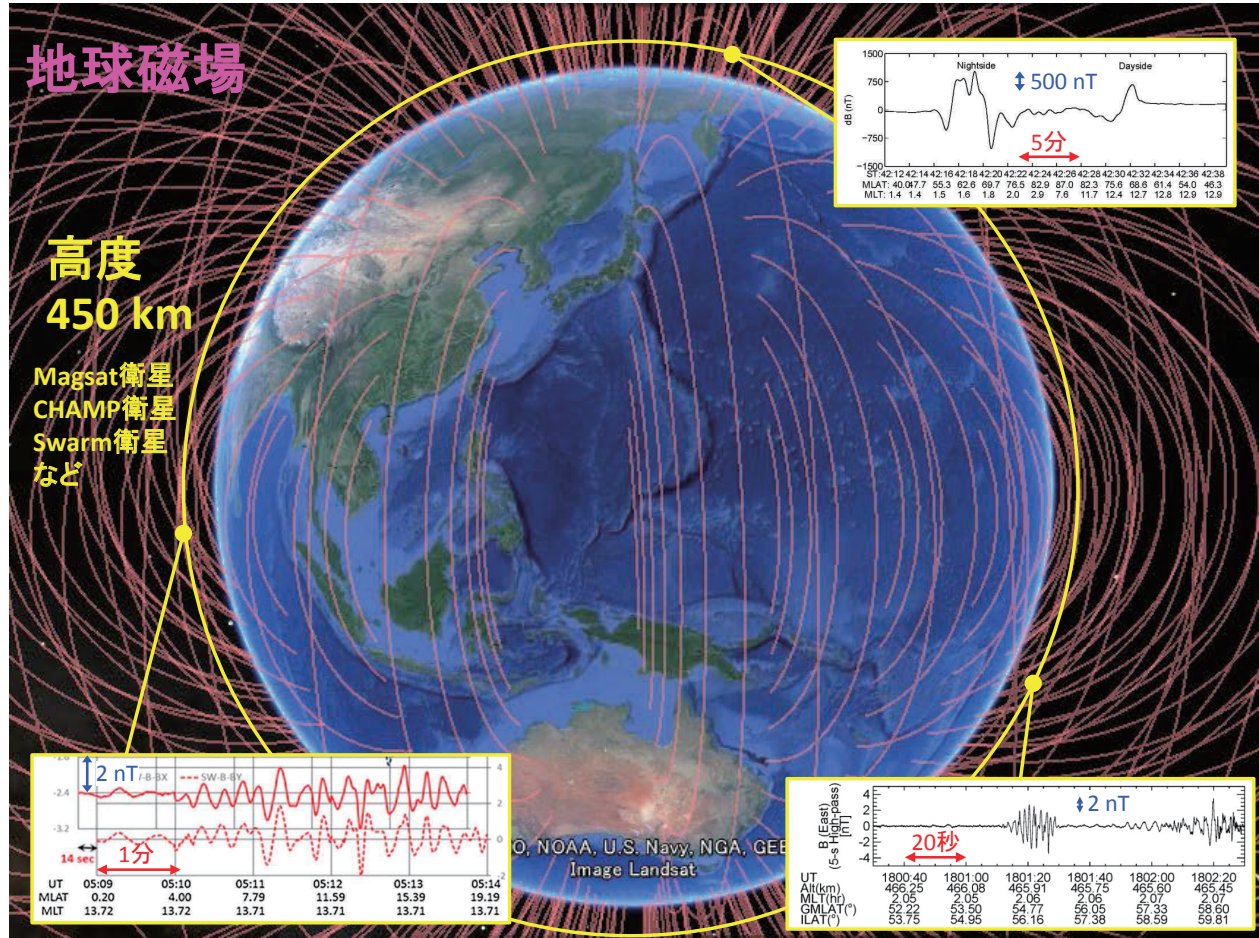
² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

³ 東京大学地震研究所

⁴ 宇宙航空研究開発機構・筑波宇宙センター

1





超低高度衛星による磁場精密観測から分かること

科学的課題

外部要因の変動・・・数日より短い時間スケール

- 磁気嵐、サブストーム、沿磁力線電流など
(太陽風をエネルギー源にして励起される宇宙空間プラズマ現象・超高層大気現象)
- 磁気圏から伝わってくるプラズマ波動
- 短周期大気重力波による電離層ダイナモ電流
- 海流によるダイナモ電流

内部要因の変動・・・数年～数千年スケール

- 磁気異常分布の高解像度計測
- 地球中心流体コア表面の流れ場
- マントル電気伝導度分布

社会的課題

- 地磁気モデルの作成
- 火山周辺の磁場変動

5

超低高度衛星による磁場精密観測から分かること

科学的課題

外部要因の変動・・・数日より短い時間スケール

- 磁気嵐、サブストーム、沿磁力線電流など
(太陽風をエネルギー源にして励起される宇宙空間プラズマ現象・超高層大気現象)
- 磁気圏から伝わってくるプラズマ波動
- 短周期大気重力波による電離層ダイナモ電流
- 海流によるダイナモ電流

内部要因の変動・・・数年～数千年スケール

- 磁気異常分布の高解像度計測
- 地球中心流体コア表面の流れ場
- マントル電気伝導度分布

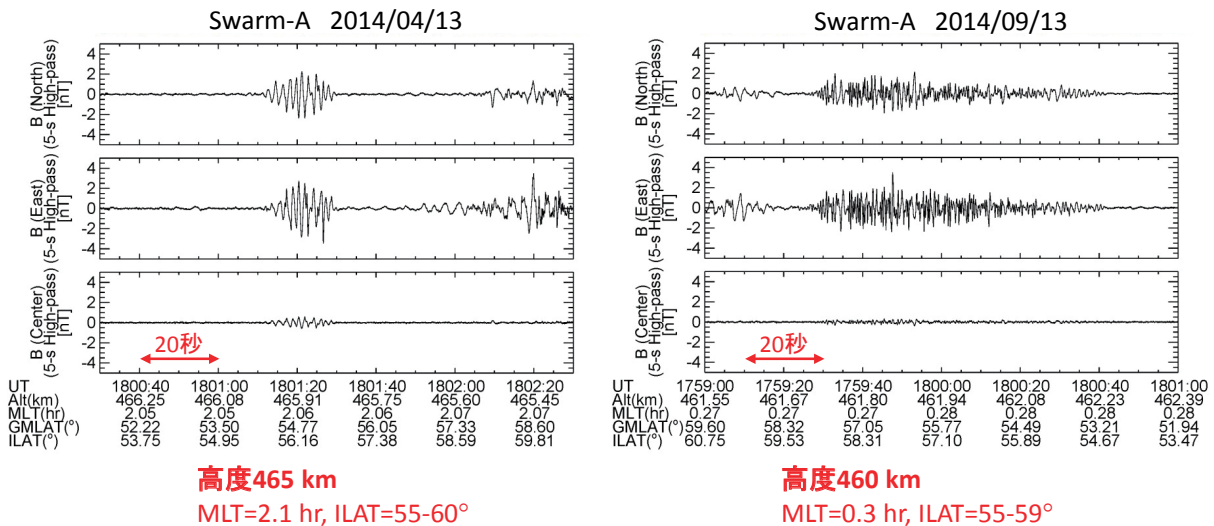
社会的課題

- 地磁気モデルの作成
- 火山周辺の磁場変動

6

磁気圏から伝わってくるプラズマ波動

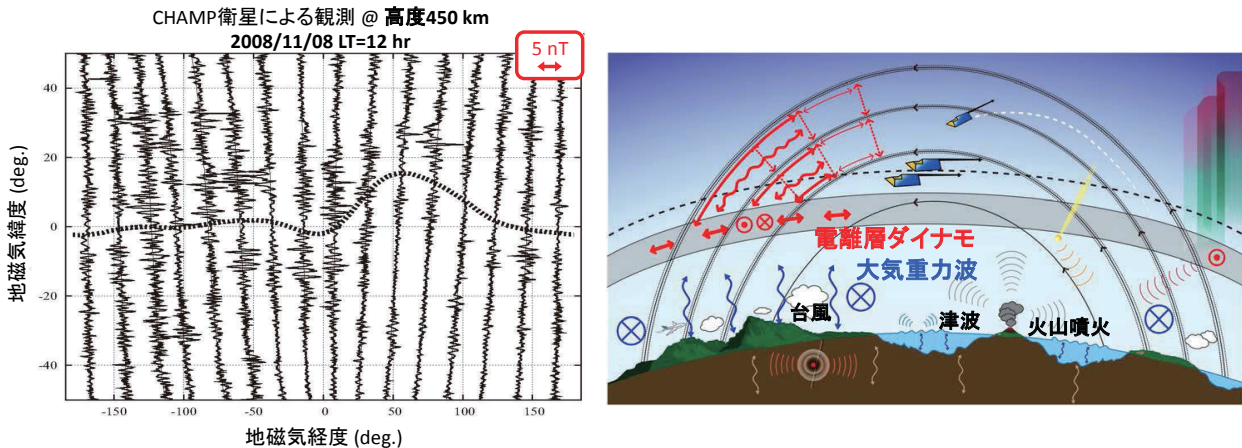
- Swarm衛星で夜側・中緯度において観測された周期0.2-5秒の磁場擾乱。
- 高度450 km辺りの低高度でも、磁場を高い分解能(0.1 nT)で計測すれば、こうした正弦波的な磁場変動が数多く存在することが分かってきた。
- 超低高度(~200 km)まで伝搬しているか? 低高度衛星・地上との同時観測。



7

大気重力波による電離層ダイナモ電流

- 高度450 kmで、短い周期の磁場変動が1 nT~数nTの振幅で常時観測される。
 - 磁場変動は、磁気静穏時でも磁気擾乱時でも存在している。
 - 振幅は磁気赤道(dip equator)で最も小さくなる。
 - 擾乱の周期は低緯度ほど長くなる傾向にある。
- 下層大気起源の電離層ダイナモによって、微細な沿磁力線電流が常に流れていると推測される。
- 大気重力波の全球的分布を推定できる可能性がある。

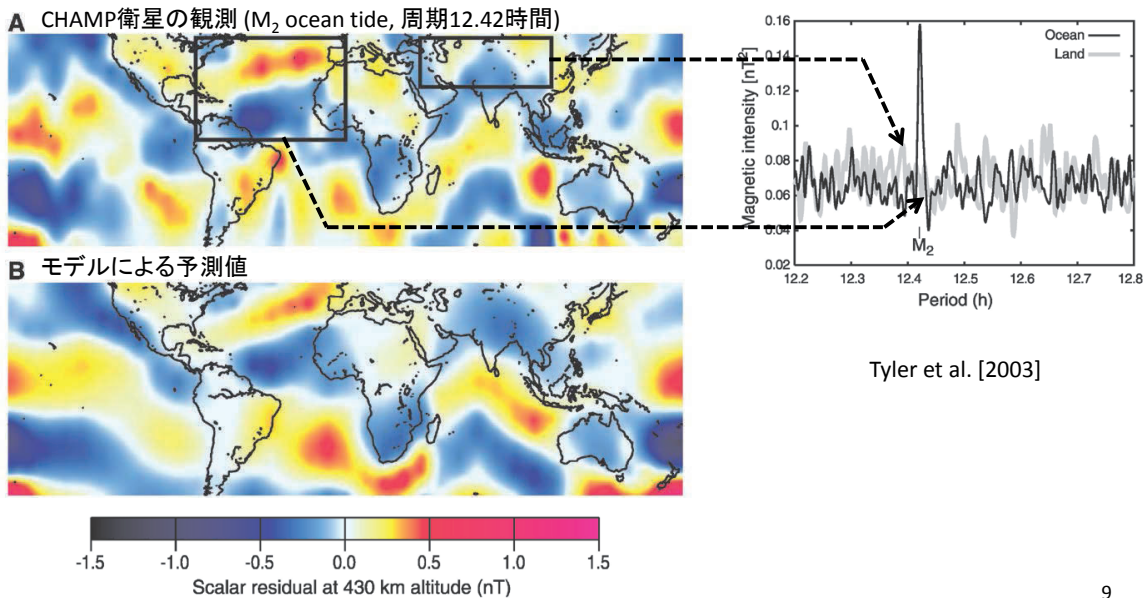


Nakanishi et al. [2014]

8

海流によるダイナモ電流

- 430 km高度で、海洋潮汐(M2分潮)周期の磁場変動を全球的に調べると、海上と陸上で振幅に差がある。
- 潮汐による海洋ダイナモ起源の磁場変動が存在する。0.1-0.2 nT程度。
- 超低高度で計測すれば、この変動をもっと明確に検出できると考えられる。



9

超低高度衛星による磁場精密観測から分かること

科学的課題

外部要因の変動・・・数日より短い時間スケール

- 磁気嵐、サブストーム、沿磁力線電流など
(太陽風をエネルギー源にして励起される宇宙空間プラズマ現象・超高層大気現象)
- 磁気圏から伝わってくるプラズマ波動
- 短周期大気重力波による電離層ダイナモ電流
- 海流によるダイナモ電流

内部要因の変動・・・数年～数千年スケール

- 磁気異常分布の高解像度計測
- 地球中心流体コア表面の流れ場
- マントル電気伝導度分布

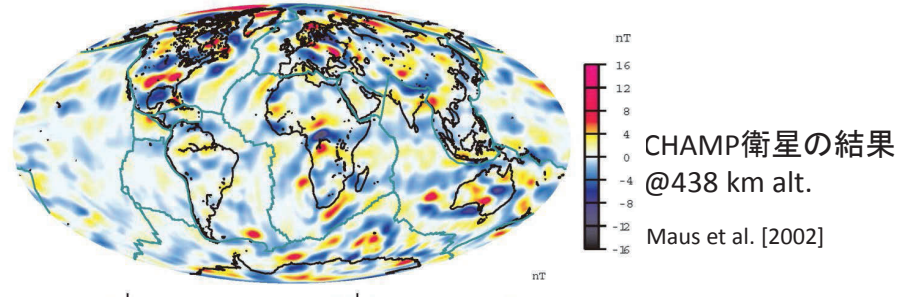
社会的課題

- 地磁気モデルの作成
- 火山周辺の磁場変動

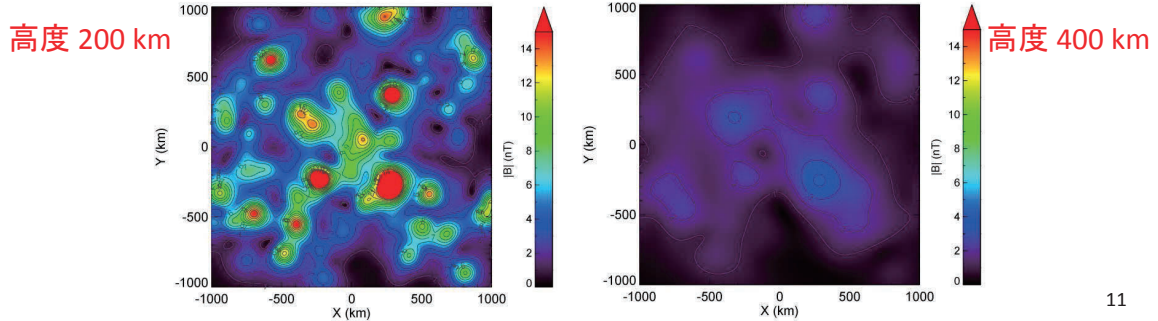
10

磁気異常分布の高解像度計測

- 低高度(~200 km)で磁場を計測すれば、地殻起源の磁気異常のグローバルな分布を高解像度で観測できる。



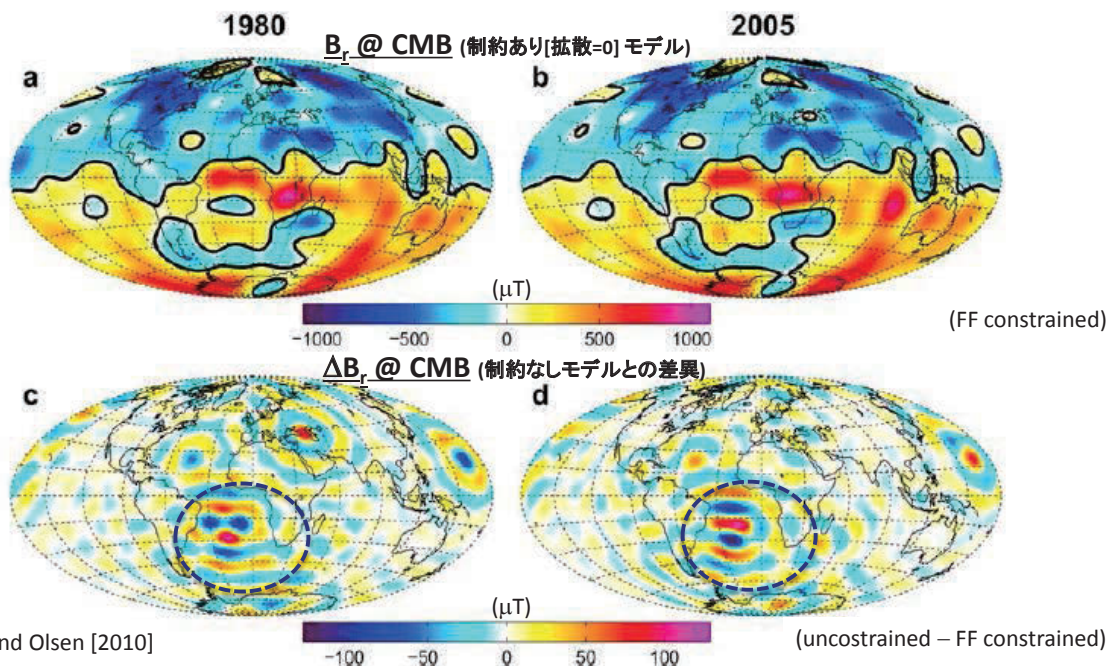
ランダムに双極子磁場を配置した地表上での観測
(地球の双極子の 10^{-6} - 10^{-7} の大きさ)



地球深部のダイナミクス

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

- 地球内部における磁気拡散が数年の時間スケールで無視できないことを示唆。
- 磁場観測を継続することにより、拡散過程を解明する。(原因は核?マントル最下部?)
- 磁気拡散過程の評価→コア表面の流れの推定につながる。



超低高度衛星による磁場精密観測から分かること

科学的課題

外部要因の変動・・・数日より短い時間スケール

- 磁気嵐、サブストーム、沿磁力線電流など
(太陽風をエネルギー源にして励起される宇宙空間プラズマ現象・超高層大気現象)
- 磁気圏から伝わってくるプラズマ波動
- 短周期大気重力波による電離層ダイナモ電流
- 海流によるダイナモ電流

内部要因の変動・・・数年～数千年スケール

- 磁気異常分布の高解像度計測
- 地球中心流体コア表面の流れ場
- マントル電気伝導度分布

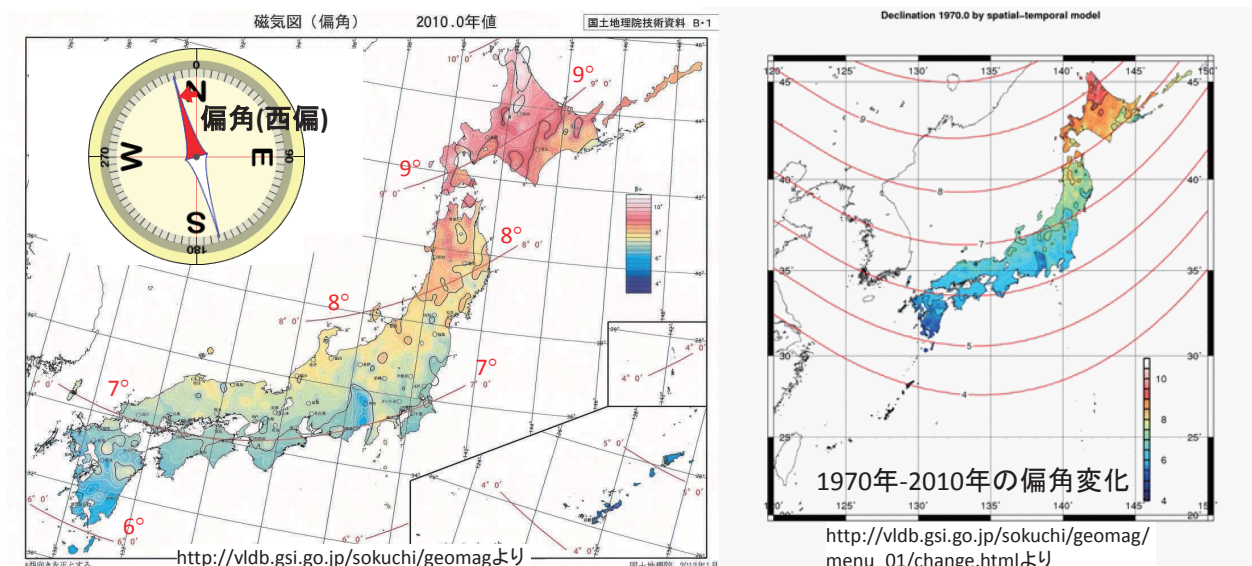
社会的課題

- 地磁気モデルの作成
- 火山周辺の磁場変動

13

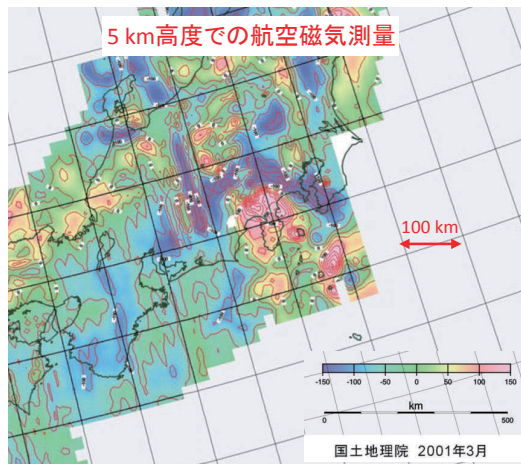
日本の磁気図

- 国土地理院が磁気図を5年毎に公開している。(2000年→2010年は10年)
- 2次式で近似式が与えられている。偏角は40年間にかなり(1°程度)変わっている。
- 「偏角は、地理空間情報と方位磁針を結びつける情報で、地磁気センサー技術の進歩により様々な分野での活用が期待されます。」(国土地理院のホームページより)
http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/magnetic_charts_2010.html
- 磁気図の更新頻度・空間分解能を改良できる可能性がある。

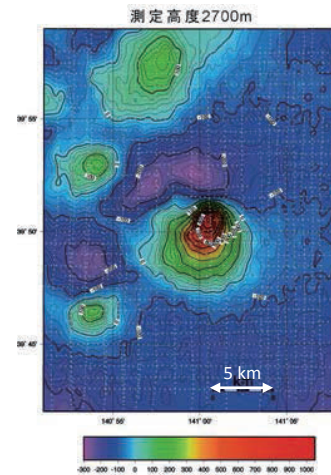


火山周辺の磁場変動

- **富士山近傍**: 5 km高度で150 nT程度の磁気異常がある。
この消磁が起こった場合、150 kmの高度では~0.01 nT程度の変化が期待される。
- **岩手山**: 2.7 km高度で1000 nT程度の磁気異常がある。
この消磁が起こった場合、150 kmの高度では~0.01 nT程度の変化が期待される。
- 高度150 kmでは期待される変化は非常に小さいが、超低高度での観測データがあれば、実際に解析してみることが望ましい。
(磁気異常のスケールが数100 km(~衛星の高度)なら、 r^{-3} よりは緩やかに減少する。)



http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/php/aeromag.php?id=jap1_1:1より



http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/php/aeromag.php?id=iwt1_3:1より

15

まとめ

- 超低高度衛星による磁場精密観測は、科学的・社会的課題への新たな回答を与える。

科学的課題

- 磁気圏から伝わってくるプラズマ波動
- 短周期大気重力波による電離層ダイナモ電流
- 海流によるダイナモ電流
- 磁気異常分布の高解像度計測
- 地球中心流体コア表面の流れ場

社会的課題

- 地磁気モデルの作成
- 火山周辺の磁場変動

- 低高度衛星による精密磁場観測(*)は、Swarm衛星以降の計画がないので、継続観測が望まれている。

| | | |
|---------------------------|--------------|--------------------------|
| - MAGSAT* (米国) | 1979-1980 | 350×570 km |
| - Ørsted* (デンマーク) | 2000-2005 | 650×850 km |
| - CHAMP* (ドイツ) | 2001-2010 | 470 km |
| - SAC-C (アルゼンチン) | 2001-2004 | 700 km |
| - Space Technology-5 (米国) | 2006 | 300×4500 km (×3) |
| - DMSP (米国) | -present | 840 km |
| - Swarm* (ESA) | 2013-present | 450 km (×2), 530 km (×1) |

16

超低高度衛星のビジネス展開に向けた期待

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ（第3回）
2016年2月29日

衛星事業部 平松 敏史

株式会社パスコ

© PASCO CORPORATION 2014

PASCO
World's Leading Geospatial Group

発表内容

1. はじめに
2. 衛星画像利用者の要求
3. 超低高度衛星の概要
4. 超低高度衛星の提供サービス
5. 超低高度衛星の地上システム
6. まとめ

© PASCO CORPORATION 2014

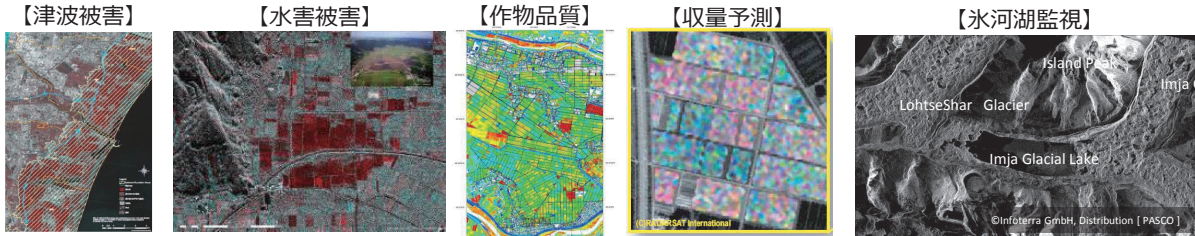
2

PASCO
World's Leading Geospatial Group

1. はじめに

■ 衛星画像について

➤ 防災、災害対応、農業における収量予測や資源探査、環境監視など広範囲な分野において利用されており、必要不可欠なツールとなっている。



■ 超低高度衛星

➤ これまであまり利用されていなかった低高度に衛星を投入することが検討されている。

- 【GOCE】
- ESA
- 2009年打上



- 【SLATS】
- JAXA
- 2016年打上 (予定)



本発表では、超低高度衛星における衛星画像利用に関わるビジネス展開と課題を整理する。

2. 衛星画像利用者の要求 (1/2)

■ 超低高度衛星のビジネスを検討するにあたり、衛星画像利用者の要求を整理する。

【衛星画像に対する利用者の一般的な要求】

| 利用者の要求 | 要求によりトレードオフとなる事項 |
|---------------------|--------------------|
| 高解像度であること | 衛星画像価格：高 |
| 希望の日時に撮像できること | 衛星画像価格：高 |
| 安価で入手できること | 解像度：低 撮像日時：指定不可 |
| 要求後、すぐに衛星画像が入手できること | 衛星画像価格：高 |

現在の一般的な衛星画像サービスは、すべての要求は満たせていない。

2. 衛星画像利用者の要求 (2/2)

- 一部の要求を満たすことが重要と考える以下のような利用者がある。
 - ▶高解像度の衛星画像が希望の日時、または要求後直ちに撮像可能であり、利用者が撮像後に迅速に衛星画像を入手することができれば、それに見合った費用を支払う利用者である。
 - ▶衛星画像を安価で入手可能であれば、撮像日時については問わない利用者である。研究などの目的で、特定の地域の衛星画像を必要としているが、指定する数か月の期間内に撮像できれば、撮像日時を指定する必要がないケースが多くある。

現在、多くの衛星が運用されているが、複数の利用者が同一地域に関心がある等の理由から、利用者からの撮像要求に対して十分なリソースは提供されていない。上記のニーズを満たす衛星が打上げられる場合はビジネス展開できる可能性がある。

3. 超低高度衛星の概要

■ 超低高度衛星におけるメリット・デメリット

| メリット | デメリット |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 光学センサの高解像度化 | 撮像幅が狭い |
| センサの小型化・省電力化 (従来衛星と同等性能とした場合) | 空気抵抗が大きい (一般的な地球観測衛星の軌道と比較) |
| | 衛星ライフが短い (一般的な軌道の地球観測衛星と比較) |

⇒広い範囲の利用者のニーズを満足することは困難である。衛星の特徴を最大限に生かすことが可能な特定の領域に絞ったサービスを提供することで、ビジネス展開の可能性があると考えられる。

■ 超低高度衛星の提供サービスを検討する上で、推進系の有無を考慮して整理する。

| 推進系 | 衛星 | 概要 |
|-------|---------------------------|--|
| 推進系あり | SLATS等 | <ul style="list-style-type: none"> • 推進系を持つため軌道制御が可能で、軌道の変更や維持が可能 |
| 推進系なし | 即応型衛星 (推進系なしの構成の場合の一例) | <ul style="list-style-type: none"> • 推進系がないため徐々に高度を落とす |

4. 超低高度衛星の提供サービス（1/4）

超低高度衛星の提供サービス（例）を示す。

■ 推進系がある場合

- 1) 緊急撮像サービス
- 2) 短期間の定点監視撮像サービス

■ 推進系がない場合

- 1) 即応型撮像サービス



4. 超低高度衛星の提供サービス（2/4）

■ 推進系がある場合

- 1) 緊急撮像サービス

利用者からの突然の撮像要求に対して、軌道を変更して可能な限り早期に撮像し、衛星画像を提供するサービスである。

- 一般的な地球観測衛星は平均で2～3日に1回撮像可能となる。

- 有事発生タイミングによって、衛星画像入手までの時間が大きくことなる。

- ✓ 有事発生：6日（火）の場合
⇒3日後の9日（金）に撮像
- ✓ 有事発生：21日（水）の場合
⇒1日後の22日（木）に撮像

⇒超低高度衛星により撮像要求受付後直ちに撮像する。

【一般的な地球観測衛星の撮像可能日の例】

| SUN | MON | TUE | WED | THU | FRI | SAT |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |

注：上記の表において、6日（火）と21日（水）に「有事発生」の赤い星型マークがあり、それぞれ9日（金）と22日（木）に撮像可能となることを示す矢印が伸びています。

4. 超低高度衛星の提供サービス (3/4)

2) 短期間の定点監視撮像サービス

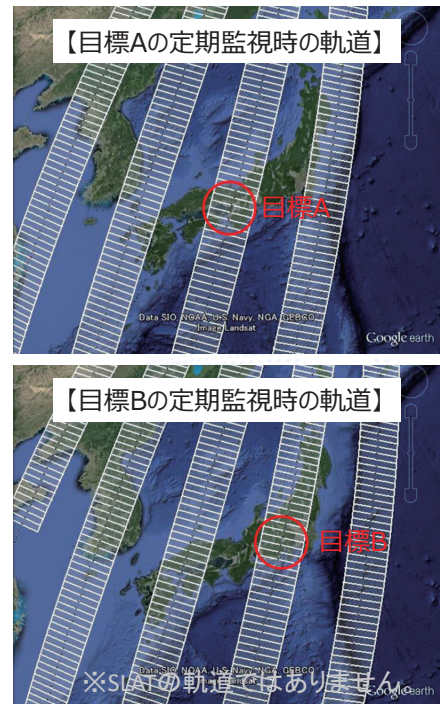
完全回帰軌道に変更し、同一箇所を定点観測するサービスである。毎日の定点監視撮像が可能となる。

- 有事等が発生した場合等に、特定の目標に対して数週間から数か月という短期間の定期的な衛星画像の取得というニーズが発生する。

一般的な地球観測衛星では

- ✓ 衛星のリソースを占有するため、事業者が即座に必要なリソースを提供することが難しい。
- ✓ 数日に1回しか撮像ができない。

- このような要求は短期間であるが、推進系を搭載しているため、軌道変更により別の利用者からの要求に対応可能となる。

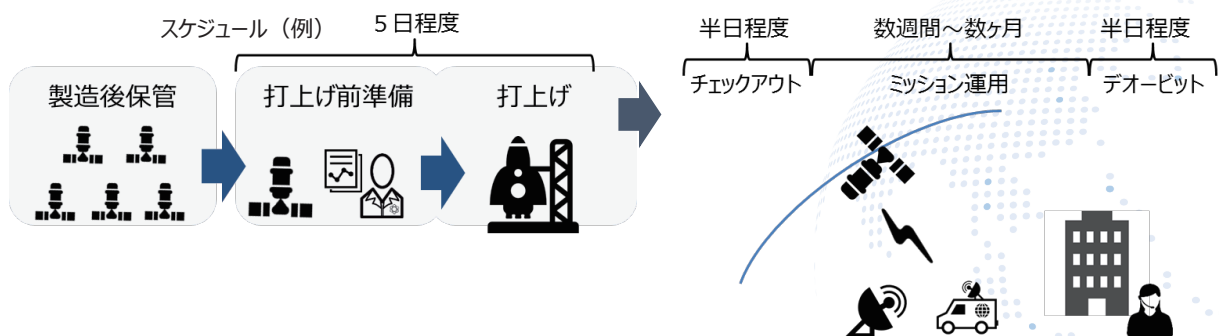


4. 超低高度衛星の提供サービス (4/4)

■ 推進系がない場合

1) 即応型撮像サービス

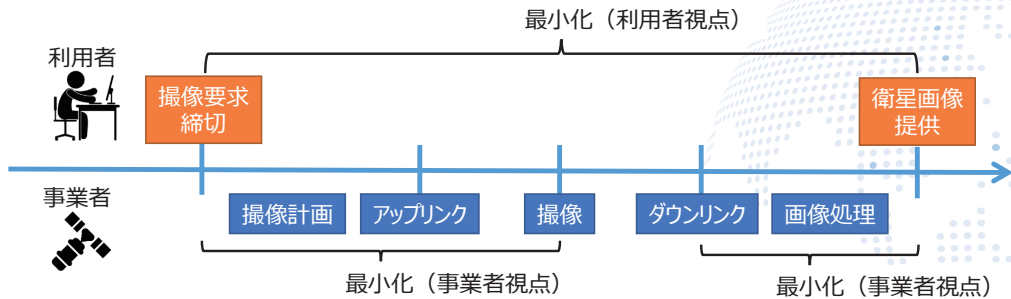
- 有事等を契機に、利用者から要求を受けて、製造後保管していた衛星をミッションに応じて打上前準備を行い、その後直ちに打ち上げを行うサービスである。
- 利用者の要求に応じた衛星が打ち上げられ、衛星を占有することができるのが最大の特徴である。



5. 超低高度衛星の地上システム（1/2）

超低軌道衛星の提供サービスを実現するために、地上システムに求められることを以下に示す。

- 既存の地上システムを可能な限り流用可能とすることで、固有の地上システムを都度構築することによるコストを低減する。
- 要求から衛星画像提供までの時間を最小化することが提供サービスの重要な要素であり、以下を実現することが必要である。
 - ▶ 撮像時間の直前まで緊急の撮像要求が可能となる。
 - ▶ ダウンリンク後には画像提供までが全自動で迅速に処理可能となる。



5. 超低高度衛星の地上システム（2/2）

- より早く画像を入手するために、直接受信の要望を持つ利用者が出てくる可能性があり、受信以降の処理を利用者の地上局で可能となるように設計時から考慮する必要がある。
- 地上局と衛星との通信（アップリンク、ダウンリンク）を全体で最適化することが必要である。
 - ▶ 超低高度衛星は軌道が低いため、可視時間が通常の衛星（600～800km）の半分程度となる。そのため、以下のような検討する必要がある。
 - ・ 衛星でのオンボード処理やデータ圧縮処理の向上
 - ・ 電波から光通信へシフトする等の衛星の通信能力の向上
 - ・ 地上局の数や配置の最適化、または中継衛星の利用等
 - ▶ 将来的には衛星によるアドホックネットワークを形成し、大容量のデータを迅速に地上へ伝送することが可能なシステムを構築することが望ましい。

6. まとめ

- 超低高度衛星は、これまで利用されてこなかった超低高度という軌道を採用することで、衛星利用の新たな可能性を開拓することが期待される。
- 超低高度という軌道にはメリットとデメリットがあり、超低高度衛星による提供サービスは特定の領域に絞ったサービスを提供することで、ビジネス展開の可能性があると考えられる。
- ビジネス展開を進めるためには、衛星や地上システムにおいて必要な機能・性能を具備する必要がある。
- SLATSの構築・運用により、超低高度でのナレッジが得られ、今後の宇宙利用において新たな可能性を拓いていけることを期待する。

ご清聴ありがとうございました。

超低高度衛星(SLATS)の利用に向けたワークショップ

2016.2.29

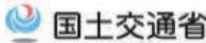
1. 近年の航空需要と国際的な動向
2. 航空管制・気象サービス
3. 航空気象情報サービスに関する国際的枠組み
4. 航空気象情報サービスの概要(観測・予測・情報提供)
5. 運航に及ぼすハザード現象とSLATSへの期待

古川武彦「気象コンパス」

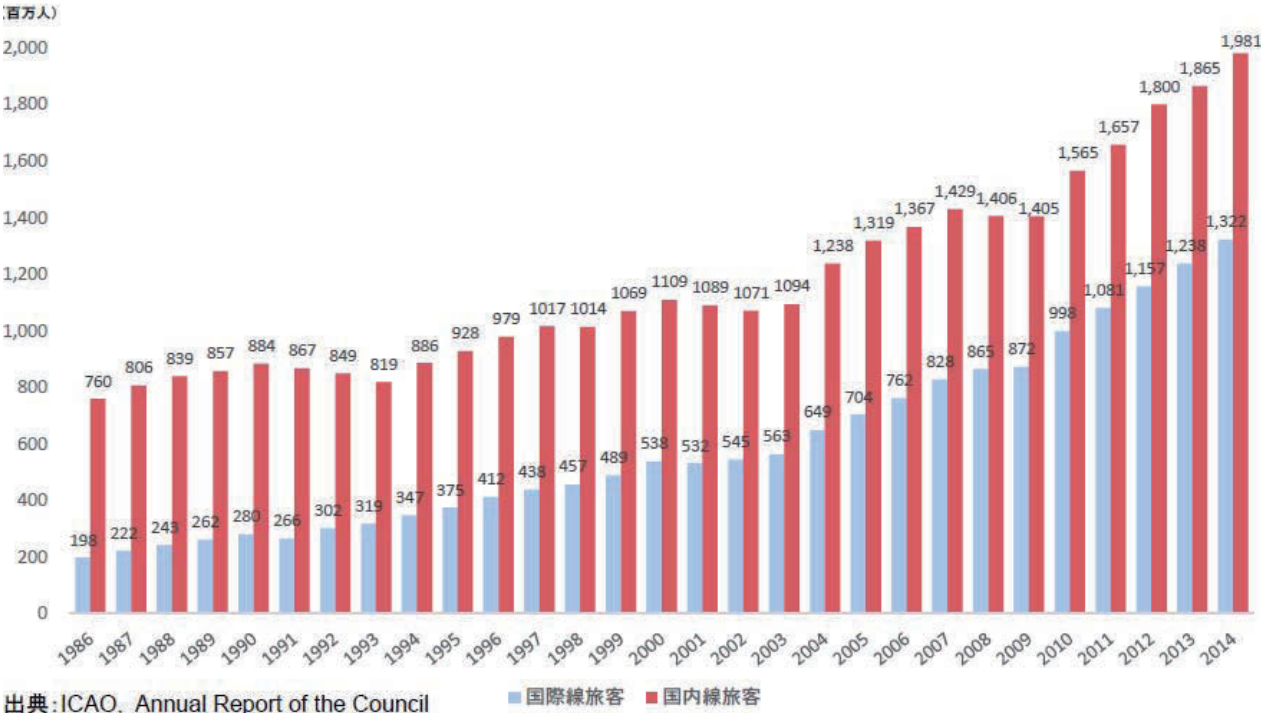
takefuru@eos.ocn.ne.jp

<http://www.met-compsss.com>

世界の航空旅客数の推移



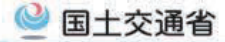
世界の航空旅客数は、近年ほぼ一貫して増加傾向。



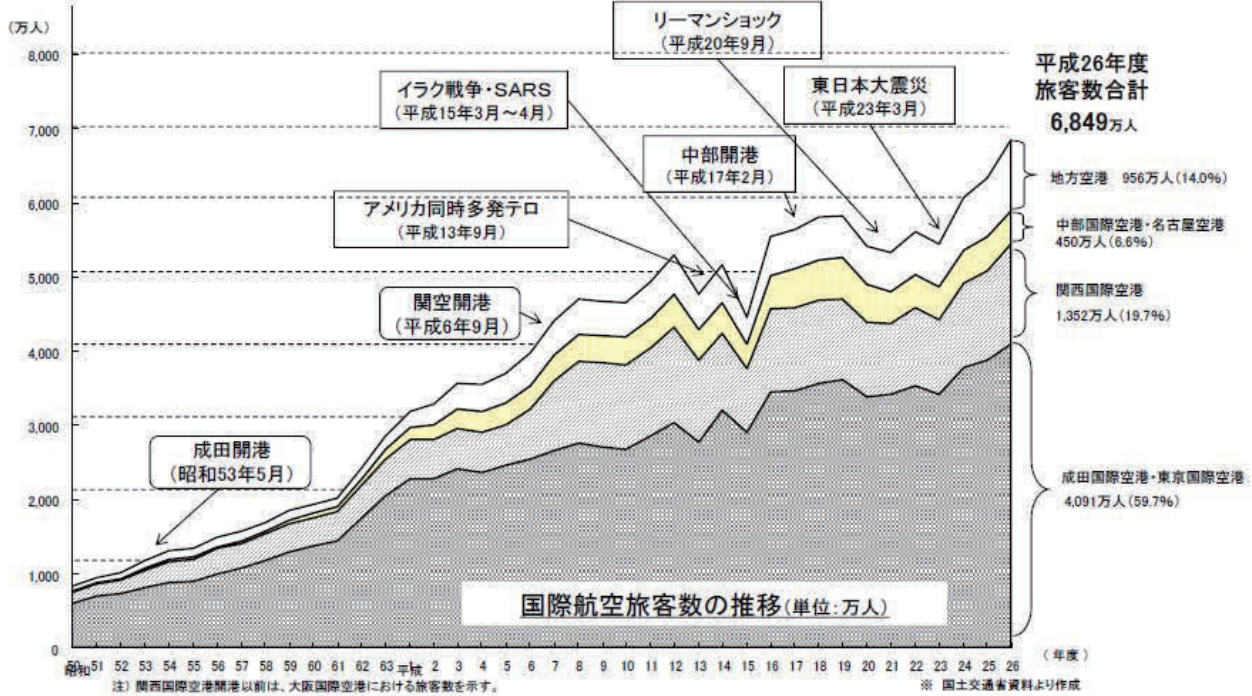
出典: ICAO, Annual Report of the Council

■ 国際線旅客 ■ 国内線旅客

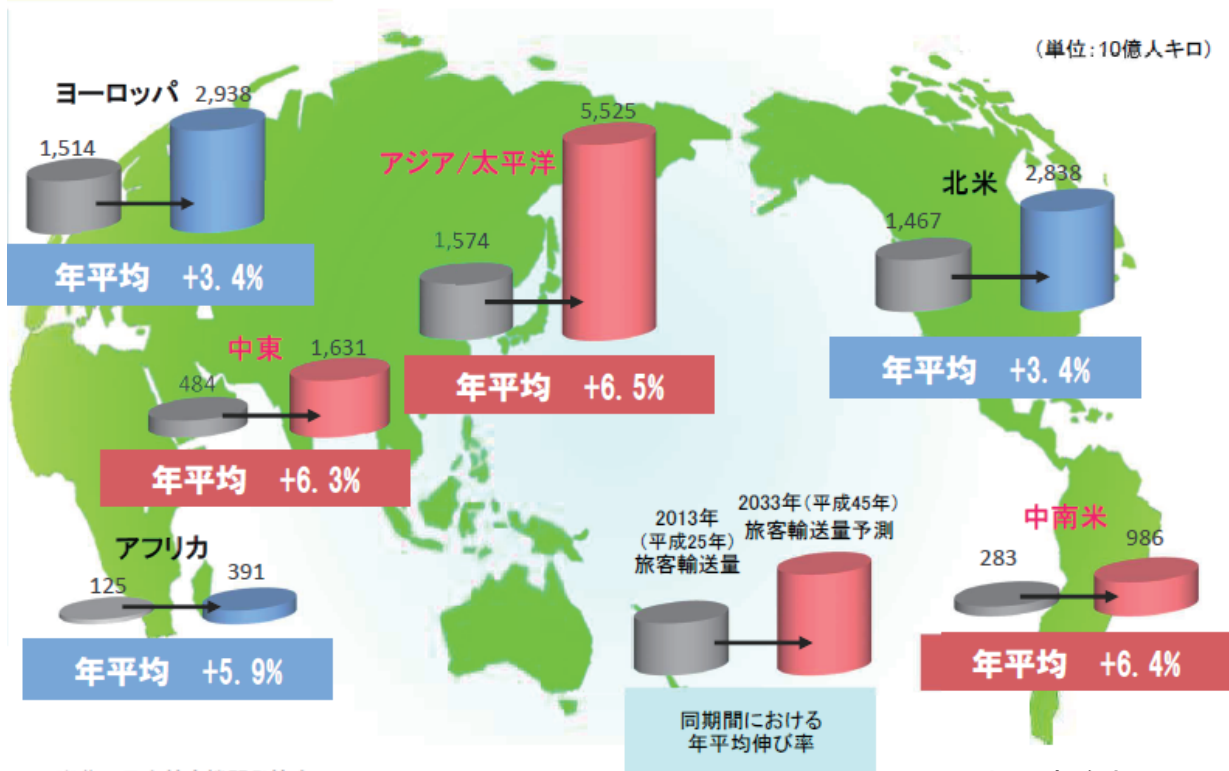
我が国の国際航空旅客輸送の動向



我が国の国際航空旅客需要は右肩上がりで増加傾向にあり、平成26年度では、過去最大の旅客数となっている。なお、平成13年以降のテロ、紛争、景気後退、東日本大震災の発生毎に一時的な落ち込みが見られる。



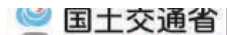
アジア太平洋地域、中東、中南米地域においては、航空需要の伸びが特に顕著



出典：日本航空機開発協会

国土交通省資料

ASEANとの地域的な航空協定について



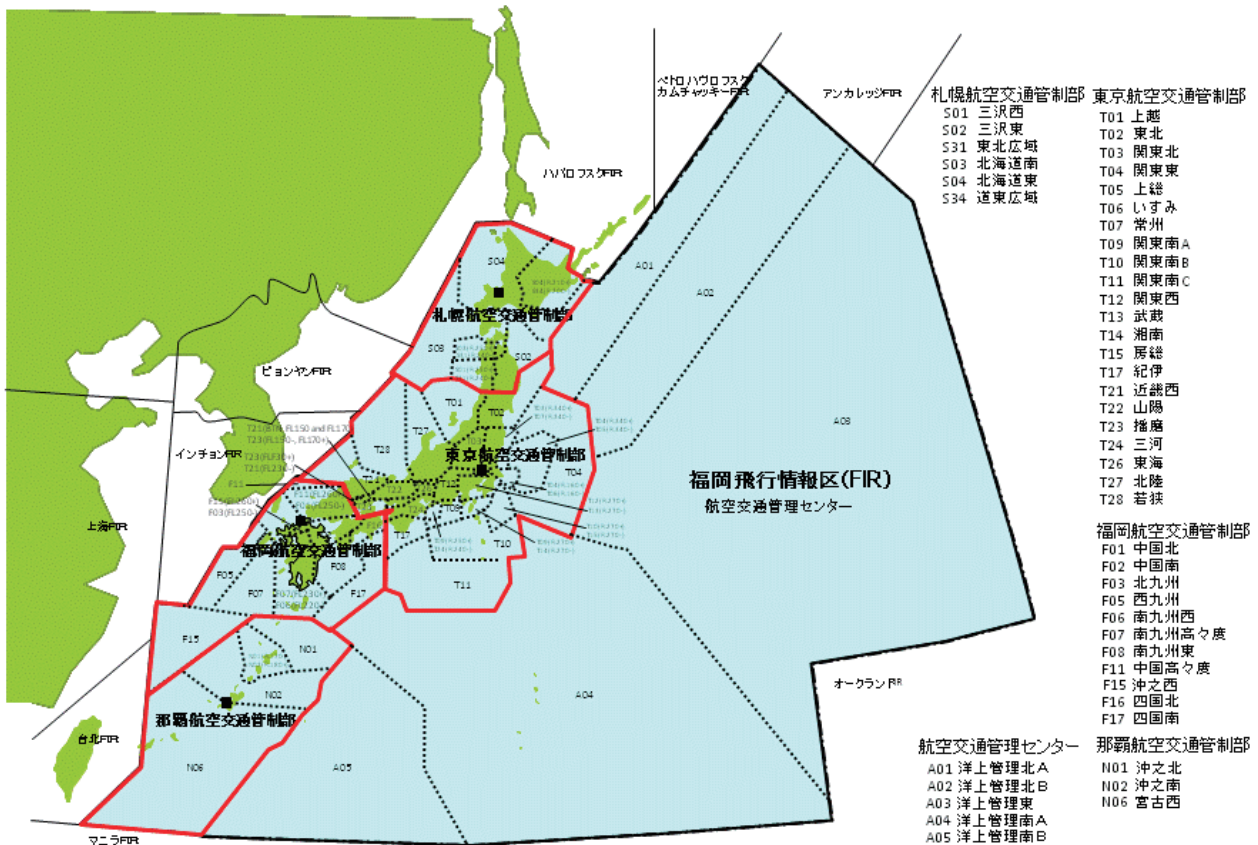
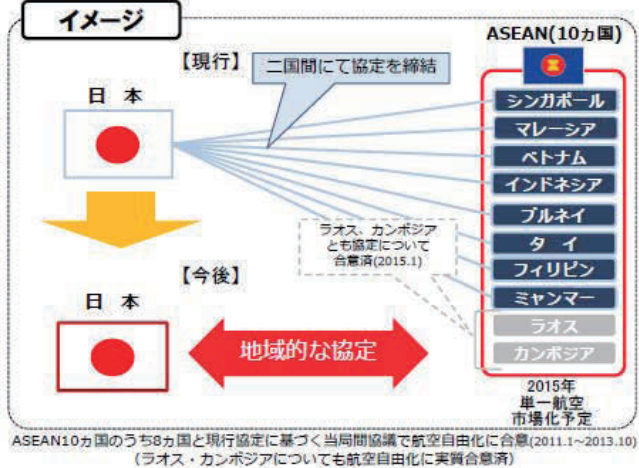
経緯

- **日・ASEAN特別首脳会議(2013年12月14日)**
「日・ASEAN交通大臣会合の枠組みを通じて、とりわけ日・ASEAN間の単一の地域的な航空協定の締結に向けた検討により、航空輸送における協力を強化する。」(日・ASEAN友好協力に関するビジョン・ステートメント 実施計画)
- **第11回 日・ASEAN交通大臣会合(2013年12月19日)**
「交通大臣は日・ASEAN特別首脳会議で表明されたASEANと日本の航空交渉に向けての日本のイニシアティブを歓迎し、イニシアティブを推進するための交通次官級会合傘下の作業グループ会合の設置を支持した。」(共同大臣声明)
- **第12回 日・ASEAN次官級交通政策会合(2014年6月25日)**
作業グループ会合の実施要領(TOR)を採択。
- **日・ASEAN航空協定検討作業グループ会合(AJWG-RASA)(第1回会合2014年10月16日～17日、第2回会合2015年4月22日～23日)**
上記会議の決定及びTORに基づき、航空協定締結に向けて日・ASEAN間での意見交換を開始。

ASEANとの地域的な航空協定締結のメリット

- ASEAN域内で同一水準の自由化を達成できる。
 - 日・ASEAN間で航空協定の枠組みを用意することで、**航空企業の国籍要件が緩和され、域内の航空市場の統合により、ASEAN内に設立される会社の運航が容易となる。**
 - 航空自由化のみならず、安全・保安を含めた様々な課題への対応に際し、**ASEAN単位で対応が可能となることから、ASEAN各国ごとの対応に比べ、迅速な対応が可能となる。**
- ※ASEAN諸国との航空自由化について二国間で協議してきたところ、最初のシンガポールから実質合意済みのラオス・カンボジアまで約3年半を要した。
- **我が国として初の地域的な航空協定の締結により、ASEAN市場を重視していることを内外に強く訴えることができる。**

イメージ

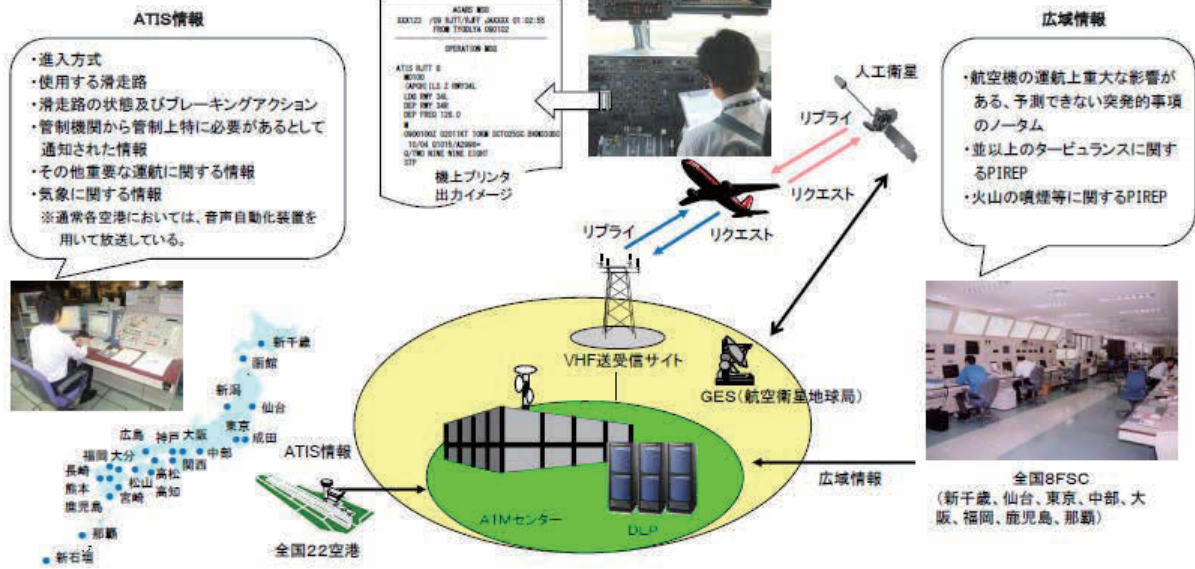


データリンクによるATIS/広域情報の提供

データリンク情報提供業務とは、データリンク処理システム(DLP:Data Link Processing System)を使用してATIS(Automatic Terminal Information Service)情報、広域情報をリクエスト/リプライ方式により、航空機に提供する業務である。

1. ATIS情報...飛行場に発着する航空機を対象に提供される。当該飛行場の進入方式、使用滑走路、飛行場の状態、気象情報等に関する情報
2. 広域情報...航空機の運航上重要な影響のある予測できない突発的事項のノータム、PIREPのうち並以上のタービュランスに関する情報及び火山の噴煙等に関する情報

パイロットは機上操作端末(ACARS)へ空港の地点略号又は空域識別を入力することによりATIS情報/広域情報を要求し、地上からの応答は機上プリンターに出力される。国内を飛行中や主要な国内空港においてデータリンクにより情報を入手できる他、衛星データリンクを利用することにより国外からも情報を入手することができる。データリンク情報提供業務を利用することによりパイロットは確実かつ効率的な情報入手が可能であり、航空機の安全運航に寄与している。



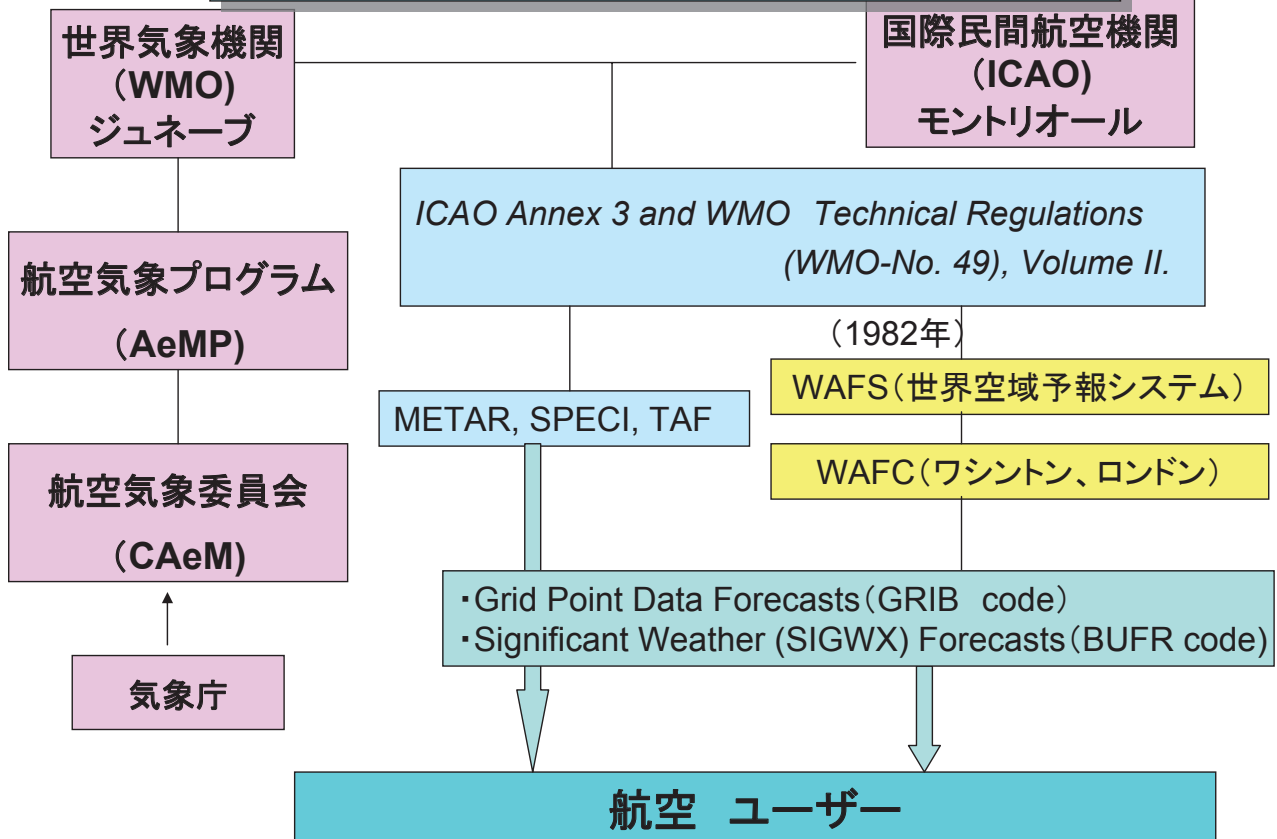
国土交通省資料
国土交通省資料

ATMセンター(航空交通管理センター)、福岡



国土交通省資料

航空気象サービスの国際的枠組み



航空気象情報サービス

- METAR(定時飛行場実況気象通報):各空港
 - SPECI(特別飛行場実況気象通報):各空港
 - TAF(運航用飛行場予報):37空港
 - TREND(着陸用飛行場予報):東京、成田、中部、関西空港
 - TAKE-OFF Forecast(離陸用飛行場予報):東京、成田、中部、関西空港
 - 飛行場時系列予報:37空港
- =====
- SIGMET(国際向け、福岡飛行情報区):本庁で作成
 - 国内悪天予想図(FJP:本庁で作成)
- =====
- Sig Wx (グローバル空域の悪天図情報) WAFC (ワシントン、ロンドン)で作成
 - WINTEM(グローバル空域の風・気温格子点値、作成はWAFC)

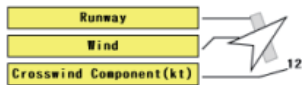
飛行場予報(羽田)

気象庁資料

RJTT AERODROME SEQUENTIAL FORECAST Part1

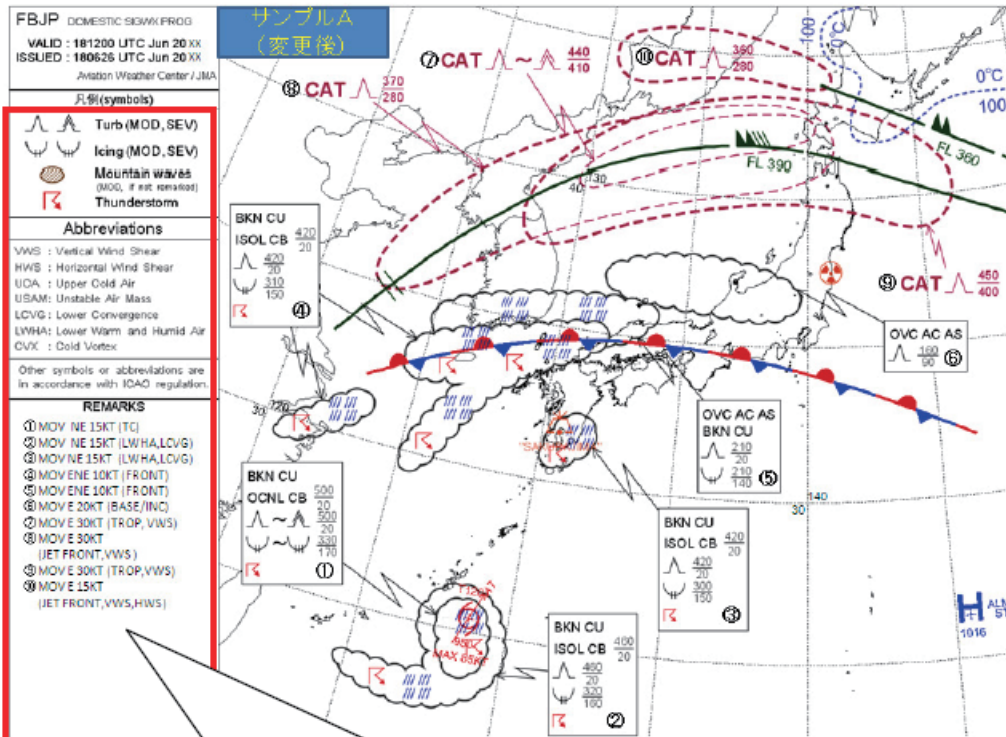
ISSUED TIME 0506UTC 25 NOV 2013
TOKYO AVIATION WEATHER SERVICE CENTER

| UTC | ~07 | ~08 | ~09 | ~10 | ~11 | ~12 | ~13 | ~14 | ~15 | ~16 | ~17 | ~18 |
|-----------------|---------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Wind | Cross DIR/Speed(kt) | 12 | 12 | 16 | 19 | 19 | 19 | 19 | 17 | 16 | 18 | 14 |
| | Gust(kt) | | | | | | | | | | | |
| | Tempo | | | | | | | | | | | |
| Visibility(m) | | 9999 | 9999 | 9999 | 8000 | 8000 | 8000 | 6000 | 6000 | 6000 | 8000 | 9999 |
| | Tempo | | | | | | | 3000 | 3000 | 3000 | | |
| | Ceiling(ft) | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 2000 | 1200 | 1200 | 1200 | 2000 | |
| Weather | | | | | | | | -SHRA | -SHRA | -SHRA | | |
| | Tempo | | | -SHRA | -SHRA | -SHRA | -SHRA | SHRA | SHRA | SHRA | -SHRA | |
| | Tempo | | | | | | | | | | | |
| Temperature(°C) | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 16 |
| Pressure(hPa) | 1010 | 1009 | 1007 | 1006 | 1005 | 1004 | 1003 | 1003 | 1003 | 1003 | 1003 | 1003 |
| TS probability | | D | | | D | | | C | | | D | |

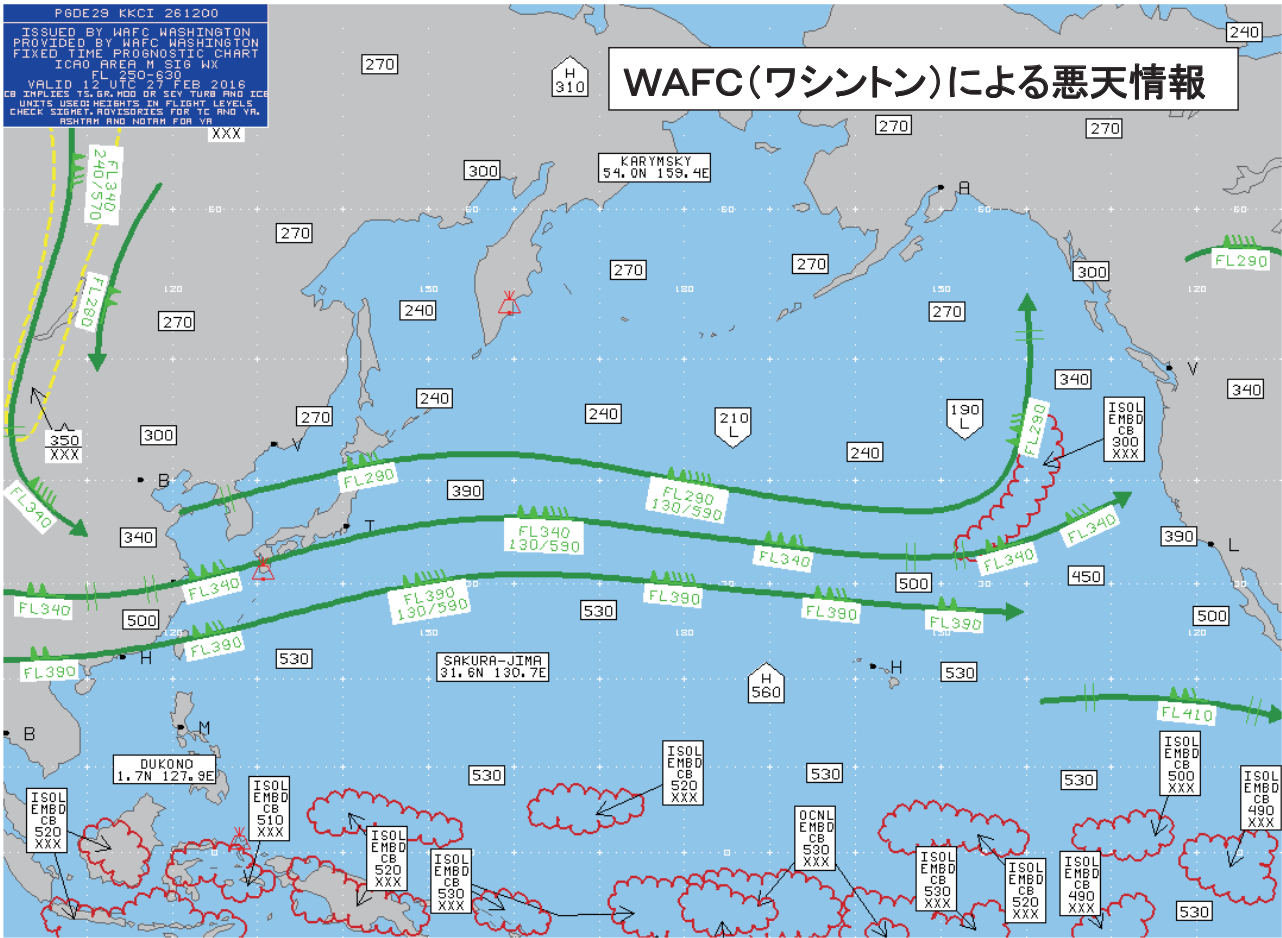


| TILE | Wind(kt) | Vis. (m) | Ceil. (ft) | WX | TS Prob. |
|------|----------|-----------|------------|----|----------|
| | 34~ | ~900 | ~100 | TS | A |
| | 25~33 | 1000~3100 | 200~900 | | B |
| | ~24 | 3200~ | 1000~ | | C, D |

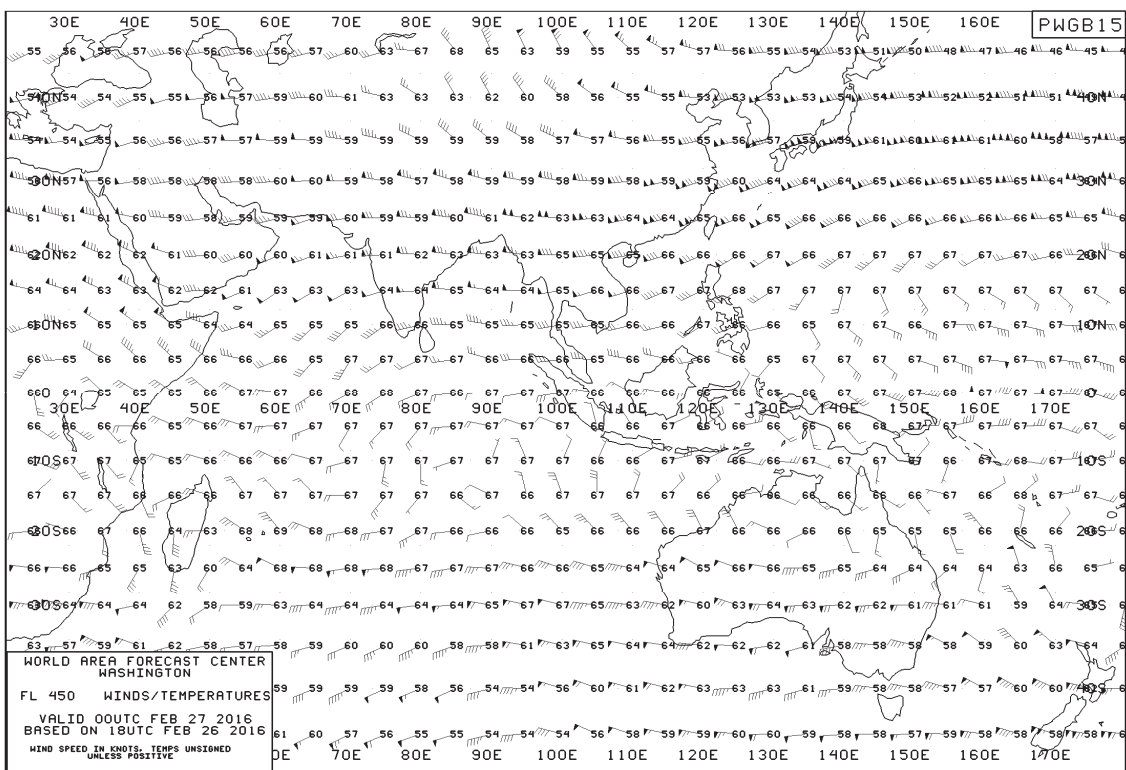
国内空域悪天予想図(気象庁予報部)



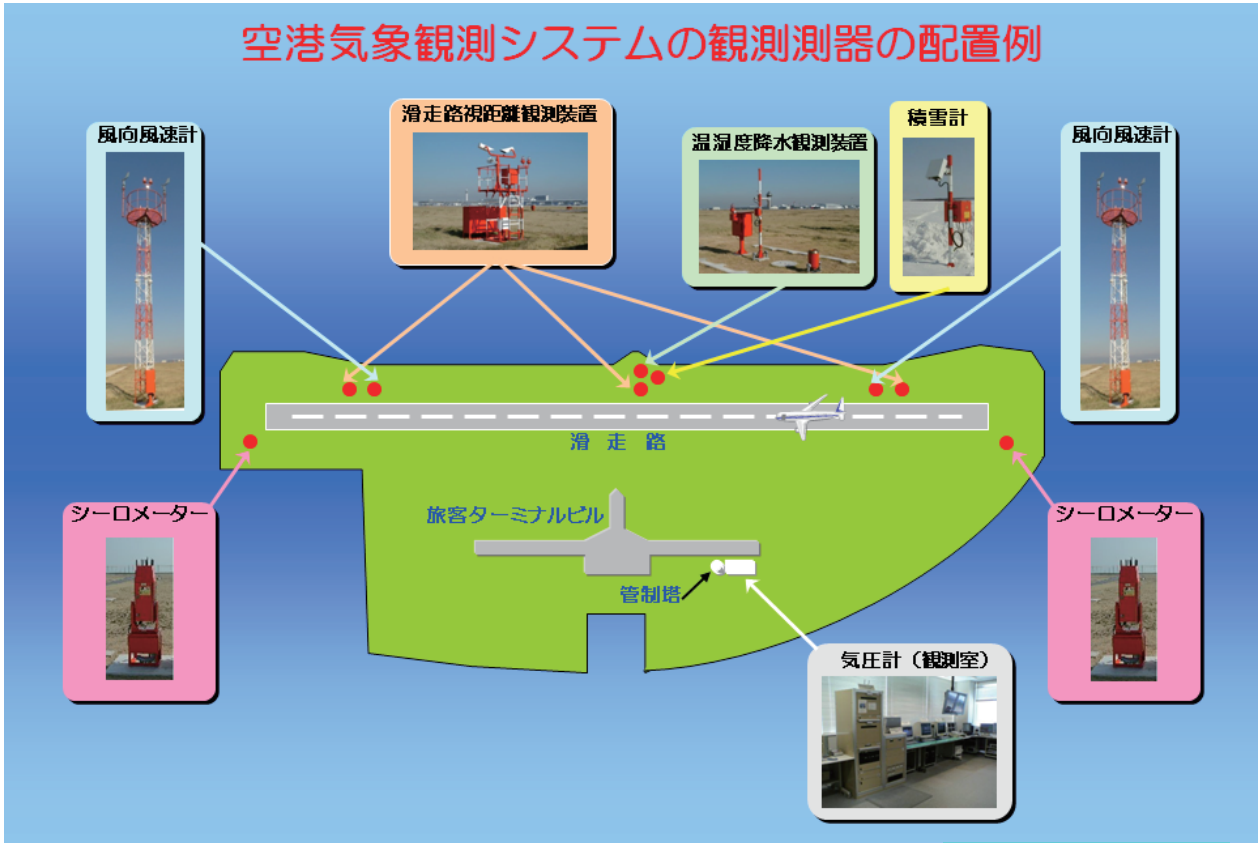
凡例とREMARKSを英語・英略語化し、原則として全ての悪天域にコメントします。



WAFC (ワシントン)によるWITEM (風と気温の予測図)

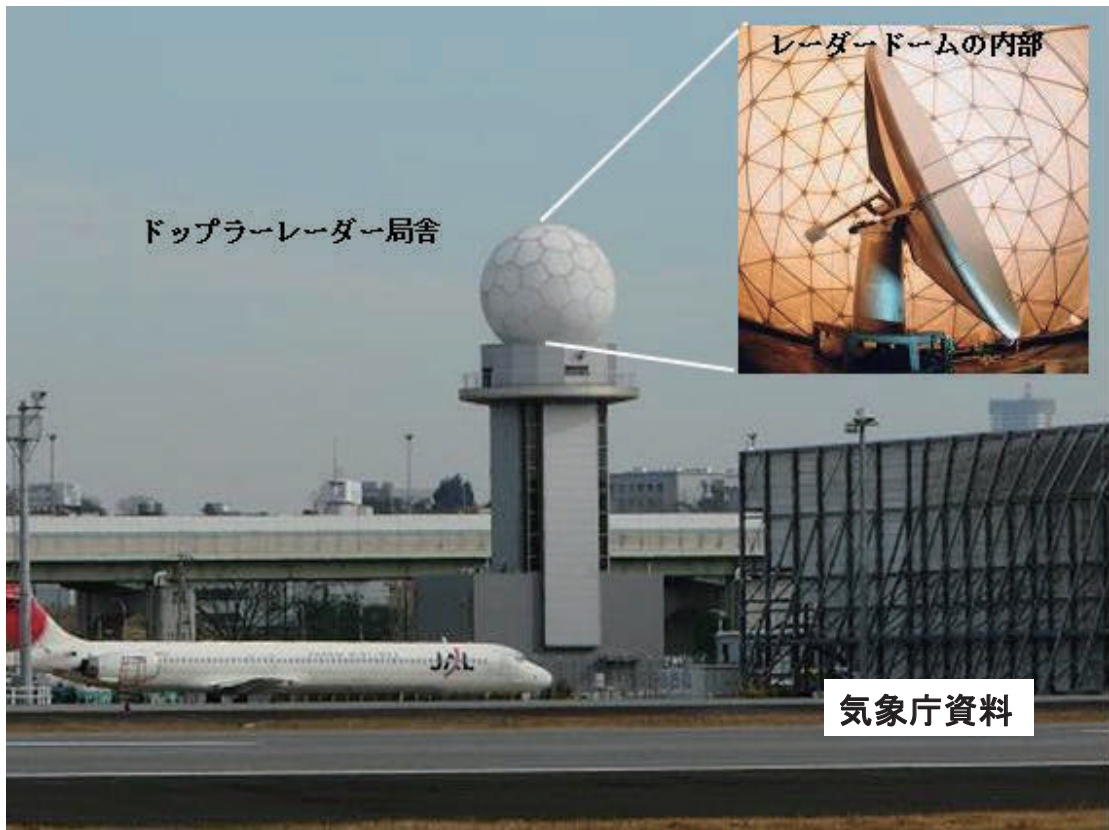


空港気象観測システムの観測測器の配置例



(気象庁資料)

空港気象ドップラーレーダー



気象庁資料

空港気象ドップラーライダー



気象庁資料(成田空港)

ウインドプロファイラ(与那国島)



気象庁提供

ハザード現象とSLATSへの期待

1. 乱気流(CATを含む)
 - 目視、気象レーダー(陸上、機上)、気象衛星、
2. 火山噴火
 - 気象衛星、目視、カメラ、地震計、マイクロフォン、
3. ダウンバースト(下降噴流)
 - 気象ドップラーレーダー、ライダー
4. 竜巻、ガストフロント
 - 気象衛星、目視、風向・風速計、ドップラー気象レーダー、ライダー
5. 低層ウインドシア
 - ドップラー気象レーダー、風向・風速計など
6. 上層の風
 - ラジオゾンデ、ウインドプロファイラ
7. 局所的なウインドシア(水平・鉛直方向)
 - 現状では困難
8. 局所的な温度変化(特に鉛直方向)
 - 現状では困難
9. 雷
 - GPSを利用した電気雑音の解析

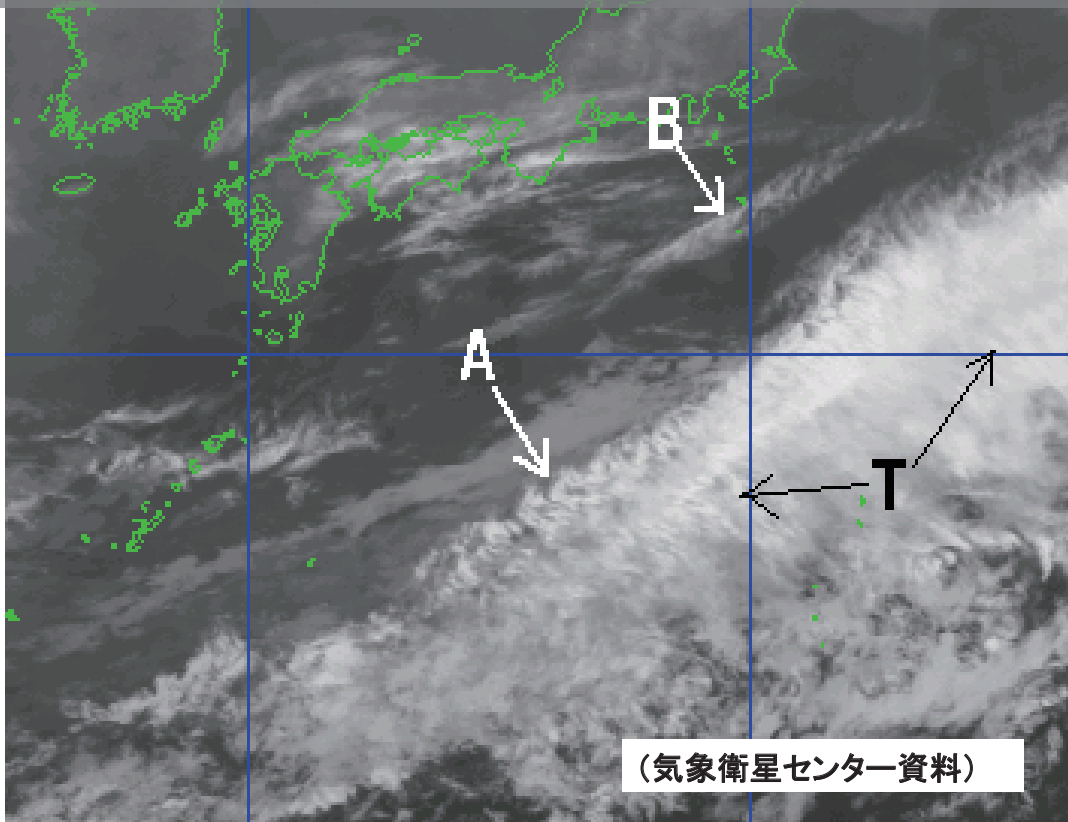
(参考文献):

「ウインドシア」古川武彦、2013年8月、
気象学会機関紙「天気」

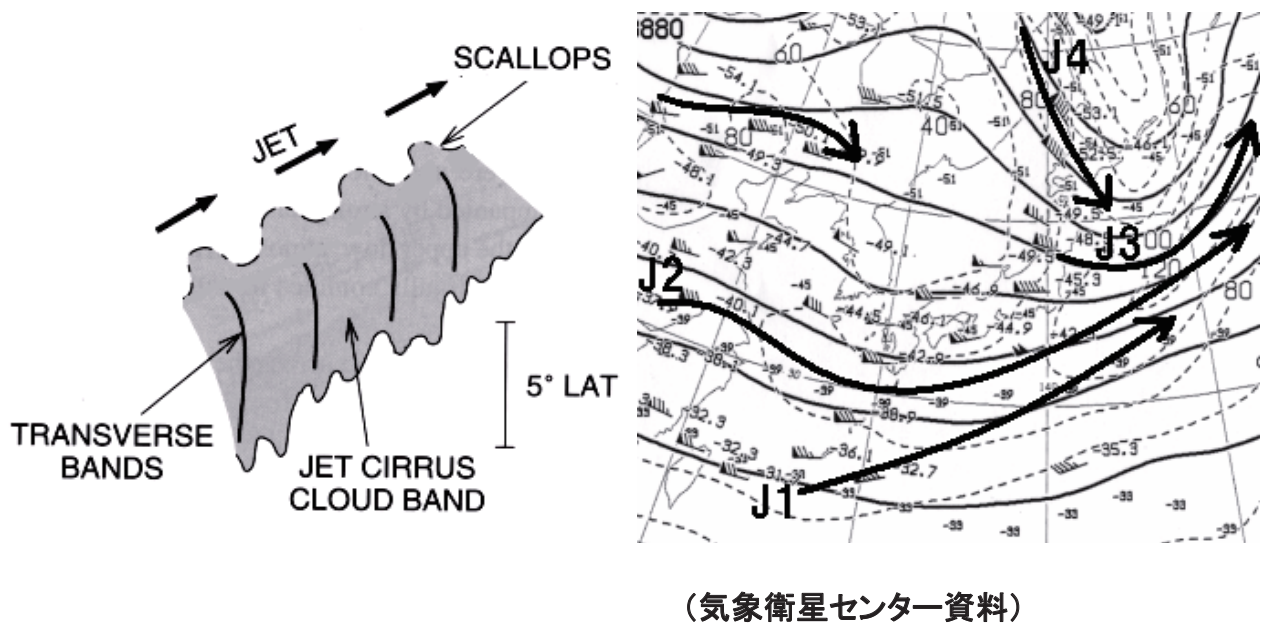
乱気流(ケルビン-ヘルムホルツ波)(NCAR)



ジェット気流の縁辺に見られるトランバースバンド



トランスバース バンドバンド(クラウド)

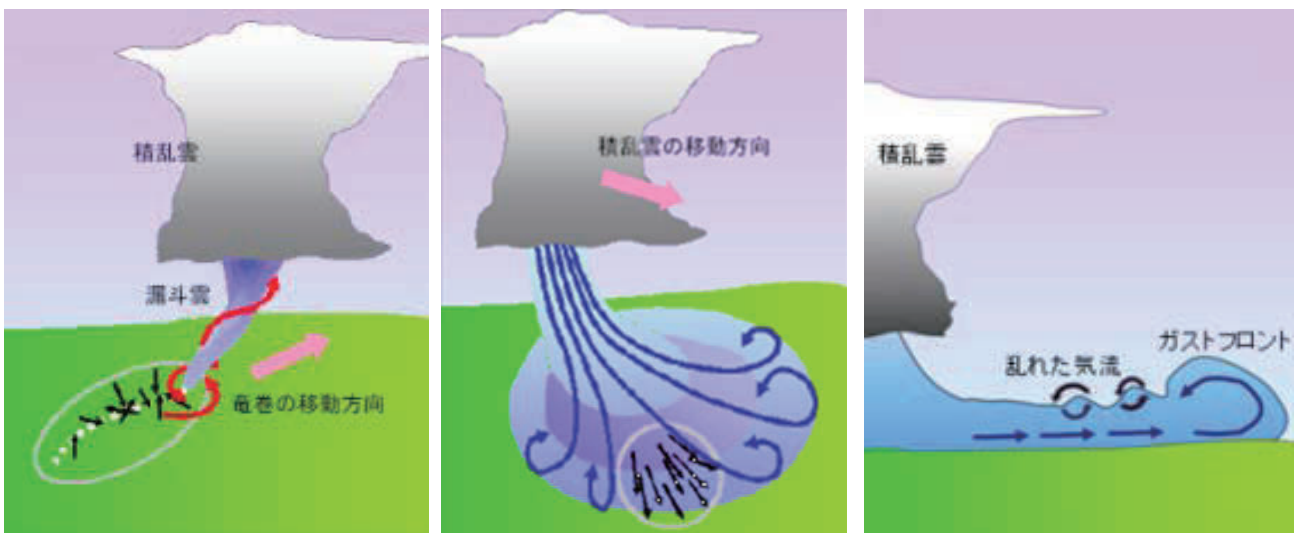


Richardson Number (大気の安定度の指数の一つ)

ラメータとなる。Riは次式で与えられる。

$$Ri = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} / \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \right)^2 = -\frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial \theta}{\partial p} / \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \right)^2$$

g : 重力加速度 θ : 温位 z : 高度 **V** : 水平風ベクトル
 p : 気圧 ρ : 密度 Riは静力学的な安定度が減少すれば小さくなり、また風の鉛直シヤー（以下VSという）が増加すれば小さくなる。理論的研究や室内実験の結果では、K-H波の不安定が発生するには、Riが0.25以下であることが必要とされている。 (気象衛星センター資料)



竜巻

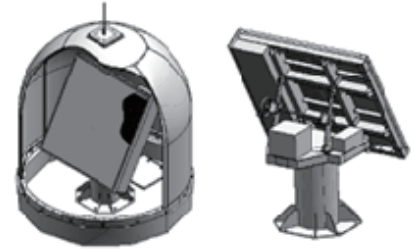
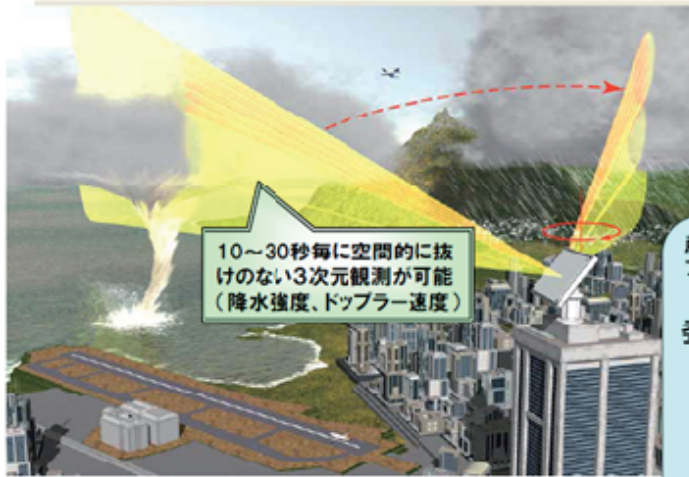
ダウンバースト

ガスとフロント

(気象庁資料)

NICT委託研究「次世代ドップラーレーダ技術の研究開発」

突発的、局所的気象災害の予測や災害対策のため、その原因となる集中豪雨、竜巻突風等を10秒以内に100 m以下の分解能で立体的に観測可能な次世代ドップラーレーダの研究開発を行う。



フェーズドアレイレーダのアンテナ部外観

産学官連携プロジェクト
NICT
委託研究
↓
東芝・大阪大
が受託

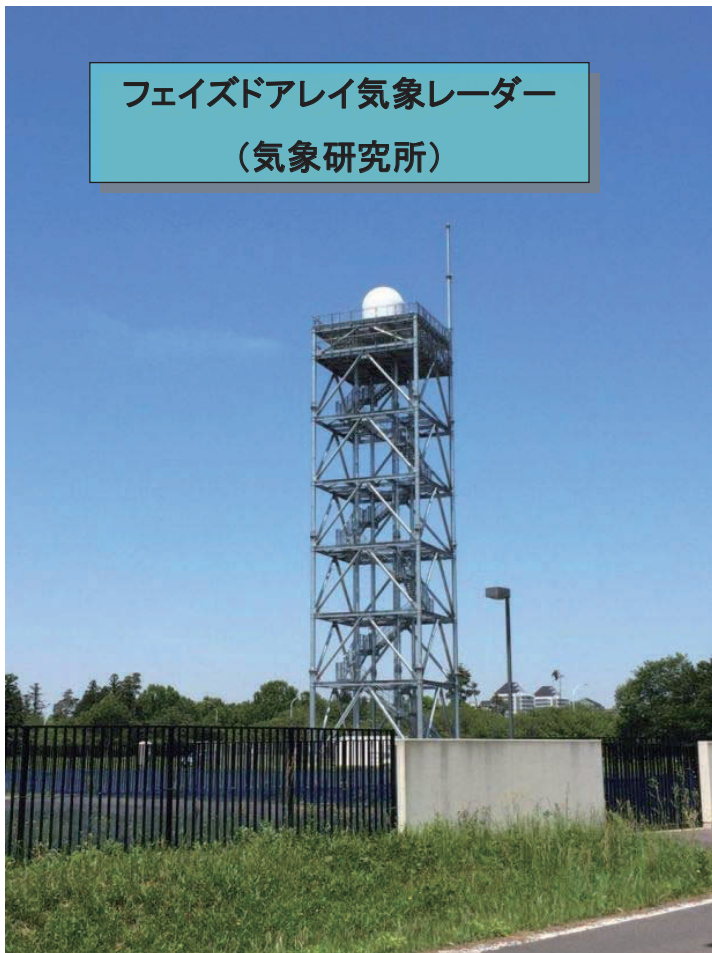


大阪大(吹田キャンパス)に設置

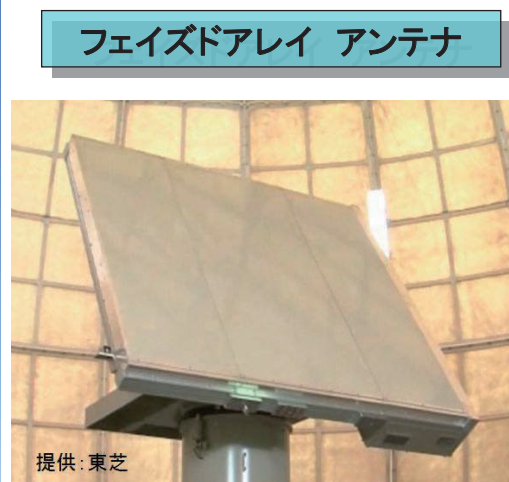
開発スケジュール

| 2008(H20) | 2009(H21) | 2010(H22) | 2011(H23) | 2012(H24) |
|--|--|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 概念設計(システム検討) 素子部分試作 | <ul style="list-style-type: none"> 予備設計(主に空中線部) 送受信モジュール試作 性能評価シミュレーション | <ul style="list-style-type: none"> 基本設計(主に信号処理部) 空中線部の製作 クラッタ除去技術の開発 | <ul style="list-style-type: none"> 詳細設計(解析処理部) 信号処理部の製作 観測運用技術の開発 | <ul style="list-style-type: none"> 実証実験・評価 データ解析処理部の開発 |

完成



フェイズドアレイ気象レーダー
(気象研究所)



フェイズドアレイ アンテナ

提供: 東芝



National Institute of Information and Communications Technology

第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ
(29/2/2016, 宇宙航空研究開発機構東京事務所, 東京都千代田区)

(気象観測分野) ドップラー風ライダーによる大気風観測

石井昌憲⁽¹⁾, 岡本幸三^(2,1), 久保田拓志⁽³⁾, 佐藤洋平⁽³⁾, 境澤大亮⁽³⁾,
石橋俊之⁽²⁾, 田中泰宙⁽²⁾, 関山剛⁽²⁾, 眞木貴史⁽²⁾, 山下浩史⁽⁴⁾, 西澤智明⁽⁵⁾,
佐藤篤^(6,1), Philippe Baron⁽¹⁾, 水谷耕平⁽¹⁾, 落合啓⁽¹⁾, 安井元昭⁽¹⁾
沖理子⁽³⁾, 佐藤正樹⁽⁷⁾, 岩崎俊樹⁽⁸⁾

1 情報通信研究機構, 2 気象研究所, 3 宇宙航空研究開発機構,
4 気象庁, 5 国立環境研究所, 6 東北工業大学, 7 東京大学, 8 東北大学



1/17

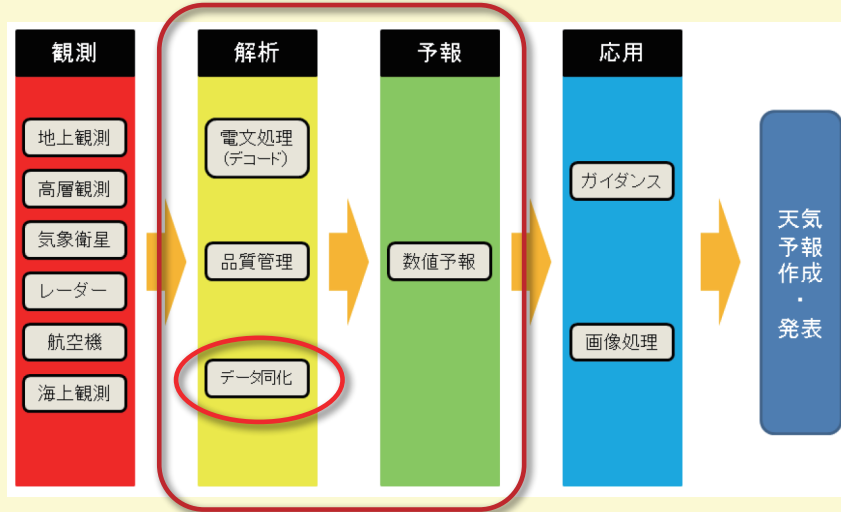
目次

- 数値天気予報
- 現在の衛星観測と風観測について
 - 衛星風観測(大気追跡風)の課題
- ドップラー風ライダーによる風観測
 - ドップラー風ライダーについて
 - ライダーシミュレーターによるドップラー風ライダーの性能評価
 - 観測システムシミュレーション実験(OSSE)による気象予報へのインパクト評価
- まとめ

ライダー(LIDAR) : Light Detection And Ranging

数値天気予報

- 物理的・統計的な法則に基づき、計算機を用いて**将来の状態を計算・予測**すること
- 計算結果(解析値)は、天気予報や防災情報のために**重要な基礎資料**として使われる
- 観測データ、予報モデル、データ同化(解析)システムを用いて実行される



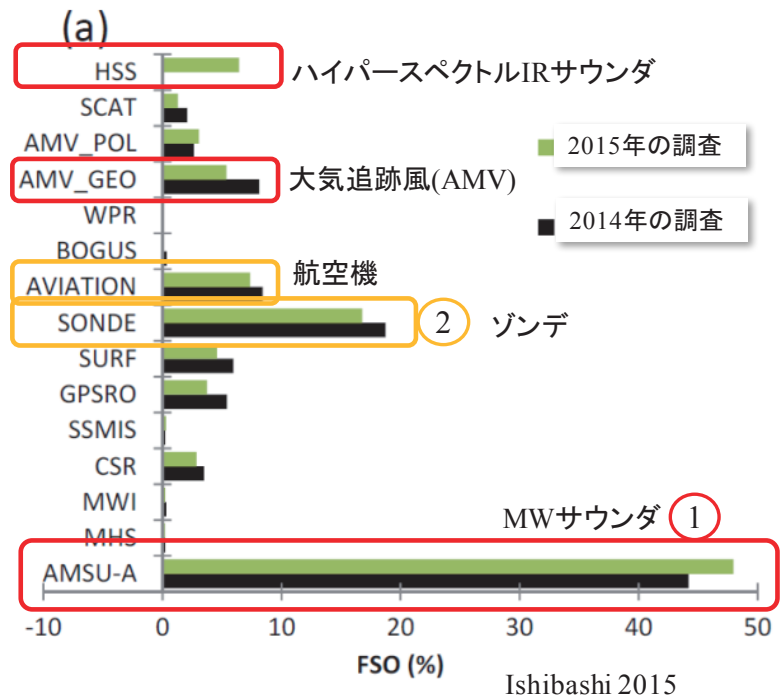
データ同化: 観測値と第一推定値(予報値)を用いて、整合した値(大気状態)を、物理・統計的な関係式に基づいて計算すること。

『数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム(気象庁, 2012)』より


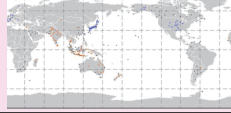

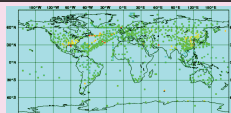

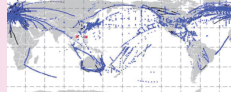
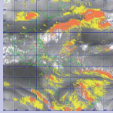
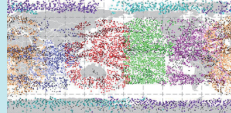
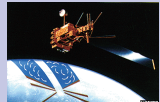
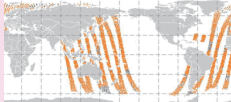


全球予報改善に対する各観測の寄与率

- 寄与率が高いもの
 - 1. マイクロ波サウンダ
 - 2. ラジオゾンデ
 - 3~5. 航空機、赤外サウンダ、衛星風
- 寄与率を決めるもの
 - 観測の精度や数
 - データ同化システムの性能
- 衛星データの効果は、年々増大
 - 衛星観測の高精度・多様化、データ同化システムの高度化
 - 衛星観測は、気温や水蒸気観測に偏重
- 注意! この評価方法(FSO)では、現在存在しない、もしくは十分に利用されていないデータの潜在的な寄与は考慮されない



現在の風観測の状況

| 観測システム | 観測範囲 | 観測高度 | 観測頻度 (hour/days) | 観測精度 (m/s) |
|--|---|--|--|----------------------|
| ウインド プロファイラー  |  | Δ 0~10km | Δ 24/7 (limited area) | \bigcirc 1~3m/s |
| ゾンデ  |  | \bigcirc 0~30km | Δ 12 or 24/7 (limited area) | \odot ~0.2m/s |
| 航空機  |  | Δ Flight level | Δ 24/7 (limited area) | \bigcirc 1~3m/s |
| 大気追跡風  |  | Δ Low vertical resolution | \bigcirc ~3/7 (limited area) | Δ 3~5m/sM |
| マイクロ 波散乱計  |  | Δ Sea-surface | Δ 24/7 (limited area) | \bigcirc 2m/s |

Kubota (JAXA), private notice



第3回超低高度衛星の利用に向けたワークショップ

5/17

大気追跡風を求める上で、雲と水蒸気は理想なトレーサーか？

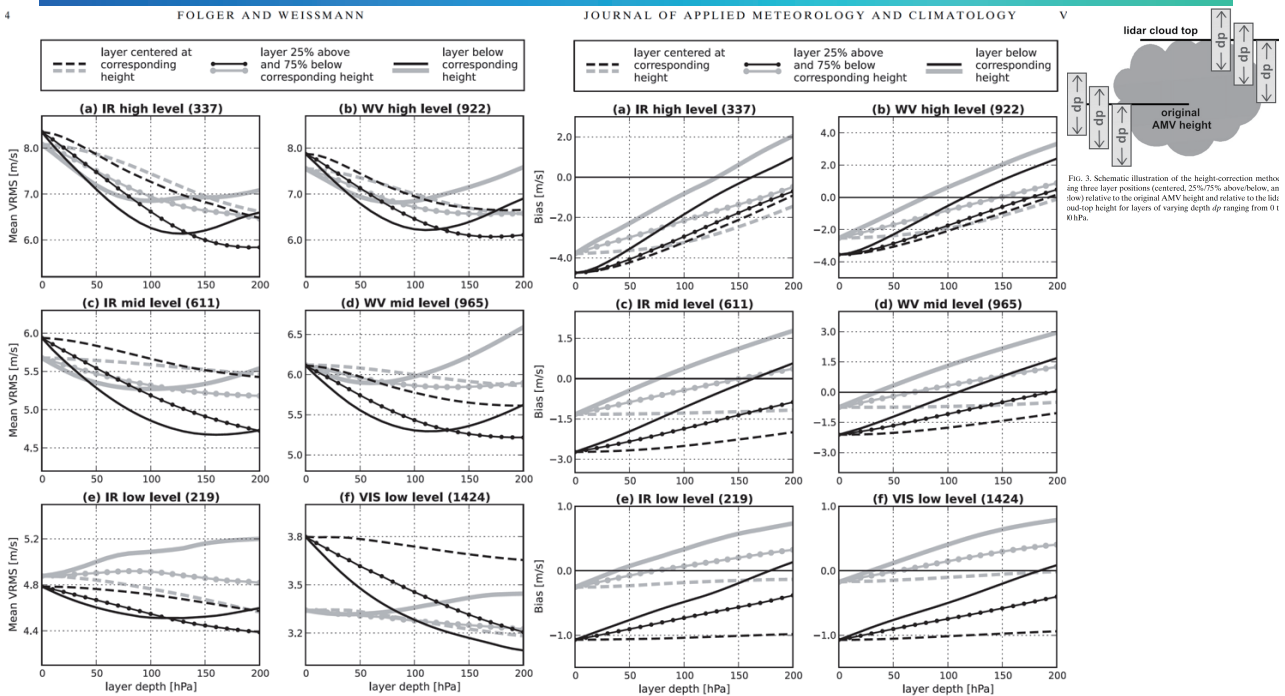


FIG. 4. Mean VRMS differences between AMV winds and layer-averaged radiosonde and (b) WV, midlevel (c) IR and (d) WV, and low-level (e) IR and (f) VIS AMVs. Num counts for the respective graph. Gray lines represent layers relative to the original AM lines represent layers relative to the lidar cloud-top height. As shown in the legend, the are indicated by different line styles.

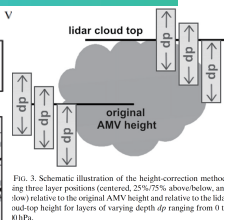


FIG. 3. Schematic illustration of the height-correction method using three layer positions (centered, 25% above/below, an low) relative to the original AMV height and relative to the lidar cloud-top height for layers of varying depth Δp ranging from 0 to 10 hPa.

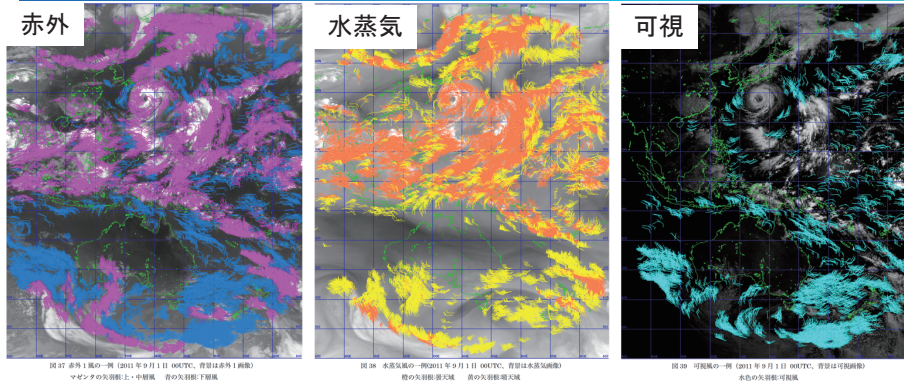
衛星搭載ライダーの雲データを用いて校正

- VRMSは5-8 m/s、バイアスは、層が厚くなるにつれて改善
- 高度推定精度が悪い

(Folger and Weissmann, 2014)

6/17

大気追跡風を求める上で、雲と水蒸気は理想なトレーサーか？ 大気追跡風の導出が難しいケース



大気追跡風で高度分布を得るための条件:

- ・上層雲が薄い雲
- ・下層雲の形状(凸凹)が上層雲の凸凹が大きいこと

雲の凹凸があるかどうか
キーポイント

気象衛星センター技術報告 第58号

気象観測衛星・大気追跡風が苦手なケース:

1. 雲の動きが風の動きと一致しないケース (AMVでは絶対算出不可)
 - 地形性の雲
 - 短時間で消散したり発生したりする雲(春先の日本海上の霧など)
 2. 地形と雲が判別しにくいケース (かなり難しく、そう簡単には解決できない)
 - 凸凹が多い積雪がある高山地帯、海岸線付近
 3. 大気放射計算が難しいケース (今は問題があるが、数年後には解決できる可能性あり)
 - 陸地全般(特に砂漠のような乾燥域、雪氷域、海氷域)、季節によって植生が大きく変わる地域
 - 積雲や積乱雲(上昇流が卓越しているような部分)地域
 4. 雲の動きが遅いとき、内陸地の地表面付近等
- 以上のような場合算出数が大幅に減少。



ドップラー風ライダーによる全球風高度分布観測

- 風は、全球的な3次元観測は行われていない
 - ✓ マイクロ波散乱計による海上風観測、AMVによる特定層の観測に限定
 - ✓ 風の高度分布観測はゾンデ観測に頼る状況、しかし、高層気象観測点は減少している
- 世界気象機関WMOは、風の高度分布も観測出来る全球的なシステムを要請
 - ✓ Development of satellite-based wind profiling systems remains a priority for the future global observing system. (WMO technical report 2012-1)
 - ✓ 水平距離分解能: 100km, 高度分解能: 1km, 風速誤差: <3m/sec
- 『全球規模で風の高度分布を観測できる定常的な観測システムは、現存しない...』、この重要な課題を解決するために、ESAは2016年に衛星搭載ドップラー風ライダーADM-Aeolus/ALADINの打上げを予定。日本でも衛星搭載ドップラー風ライダーの実現を目指して活動中!
 - サイエンス検討チーム(代表:岩崎・東北大教授、気象研、気象庁、東大、理研など)で検討中
 - ライダー技術検討チーム(NICT,JAXA,東北工大など)で開発中

【衛星搭載ドップラー風ライダーの目的】

全球規模で風ベクトルの高度分布を観測し、

- 数値予報精度向上に貢献する
- 台風の進路や強度等の予測向上に貢献する
- 気候モデル、大気輸送モデルの向上に貢献する
- 大気追跡風の風観測検証、観測精度、高度推定の向上に貢献する



$$\text{観測距離} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t$$

$$\text{ドップラー速度} = \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta f$$

(c: 光速, t: 往復時間, λ: 波長)

ドップラー風ライダーについて

| | 直接検波式 (Direct detection) | コヒーレント式 (Coherent detection) |
|-------------|---|---|
| 機器構成 | | |
| 周波数シフトの測定方法 | | |
| 特徴 | <p>[メ] どの波長でも使用可能 ⇒ 紫外波長を使用可能(=大気分子によるレイリー散乱を利用できる)</p> <p>[デ] 背景光に弱い(日照域ではSN劣化)、大電力が必要、大型化</p> | <p>[メ] 背景光耐性が高い、小型に出来る</p> <p>[デ] 受信光に対する位相精度要求が厳しい(綺麗な正弦波を受信でなければ光ヘテロダインを実施できない) ⇒ 近赤外より長波長でのみ使用可能(=エアゾルの様な後方散乱体が必要) ⇒ アライメントや鏡面精度への要求が厳しい</p> |



Sakaizawa et al. 2014

WMO観測要求に対する衛星搭載ドップラー風ライダーの比較

| 機関 | Wind profile | Application | Horizontal resolution (km) | | | Vertical resolution (km) | | | Observing Cycle (h) | | | Accuracy (m/s) | | |
|---------|---------------|-------------|----------------------------|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|--|-----|-----|-------------------|-----|-----|
| | | | Goal | B/T | T/H | Goal | B/T | T/H | Goal | B/T | T/H | Goal | B/T | T/H |
| WMO 要求 | U,V (LT) | Global NWP | 15 | 100 | 500 | 0.5 | 1 | 3 | 1 | 6 | 12 | 1 | 3 | 5 |
| | U,V (HT) | Global NWP | 15 | 100 | 500 | 0.5 | 1 | 3 | 1 | 6 | 12 | 1 | 3 | 8 |
| | U,V (LS) | Global NWP | 15 | 100 | 500 | 0.5 | 1 | 3 | 1 | 6 | 12 | 1 | 3 | 5 |
| Japan | Surface | Global NWP | 100 | | | 0.5 | | | | | | 1 | | |
| | 2km | Global NWP | 100 | | | 0.5 | | | | | | 1 | | |
| | 5km | Global NWP | 100 | | | Coherent 2 LOS wind spd | | | 1 | | | 2 | | |
| | 10km | Global NWP | 100 | | | 1 | | | | | | 4 | | |
| ESA ADM | 0-2 km | Global NWP | 100 | | | 0.5 | | | Depends on orbit and number of satellite | | | ≤1-2 (Bias: ≤0.5) | | |
| | 2-16 km | Global NWP | 100 | | | Direct 1 LOS wind spd ¹ | | | | | | ≤2 (Bias: ≤0.5) | | |
| | 16-20 (30) km | Global NWP | 100 | | | 2 | | | | | | ≤3 (Bias: ≤0.5) | | |
| NASA | 0-2 km | Global NWP | 80-350 | | | 1 | | | | | | ≤2 (Bias: ≤0.5) | | |
| | 2-12 km | Global NWP | 80-350 | | | Direct 2 LOS wind spd ² | | | | | | ≤2 (Bias: ≤0.5) | | |
| | 16-25 km | Global NWP | 80-350 | | | 4 | | | | | | ≤3 (Bias: ≤0.5) | | |

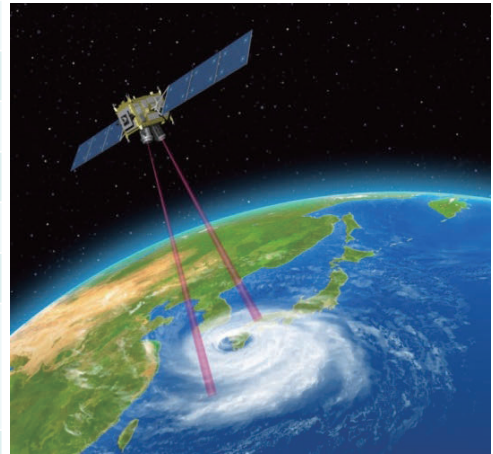
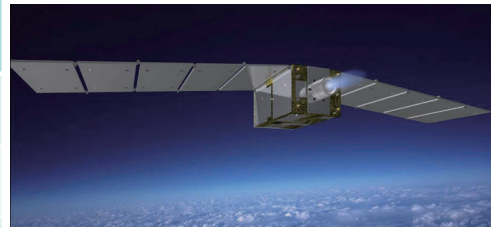
B/T: Breakthrough, T/H: Threshold
www.wmo-sat.info/oscar/variables/view/179

WMO requirement: horizontal wind vector
ESA ADM-Aeolus: 1 LOS wind measurement, no wind vector.
Japan and NASA: 2 LOS wind measurement, wind vector.

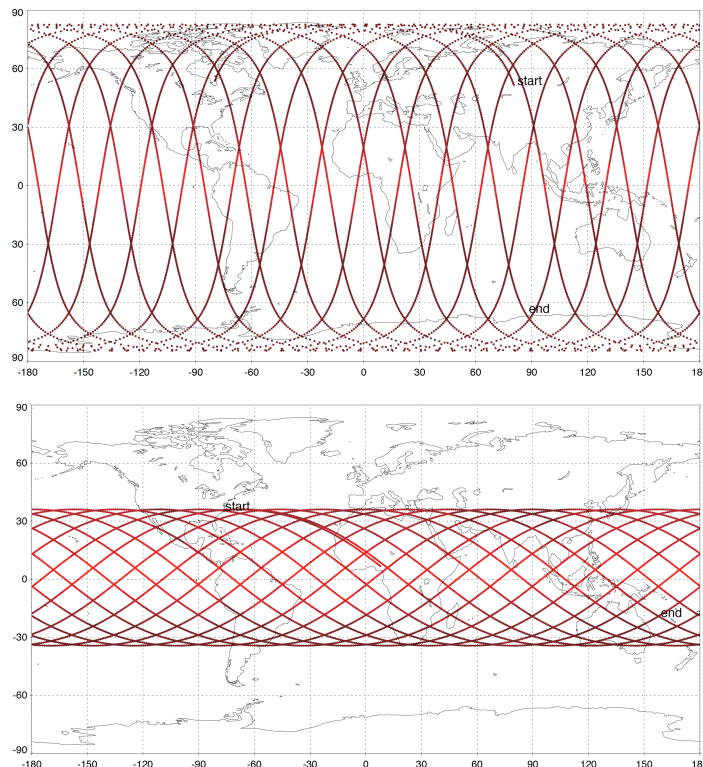


超低高度衛星ドップラー風ライダーの想定諸元

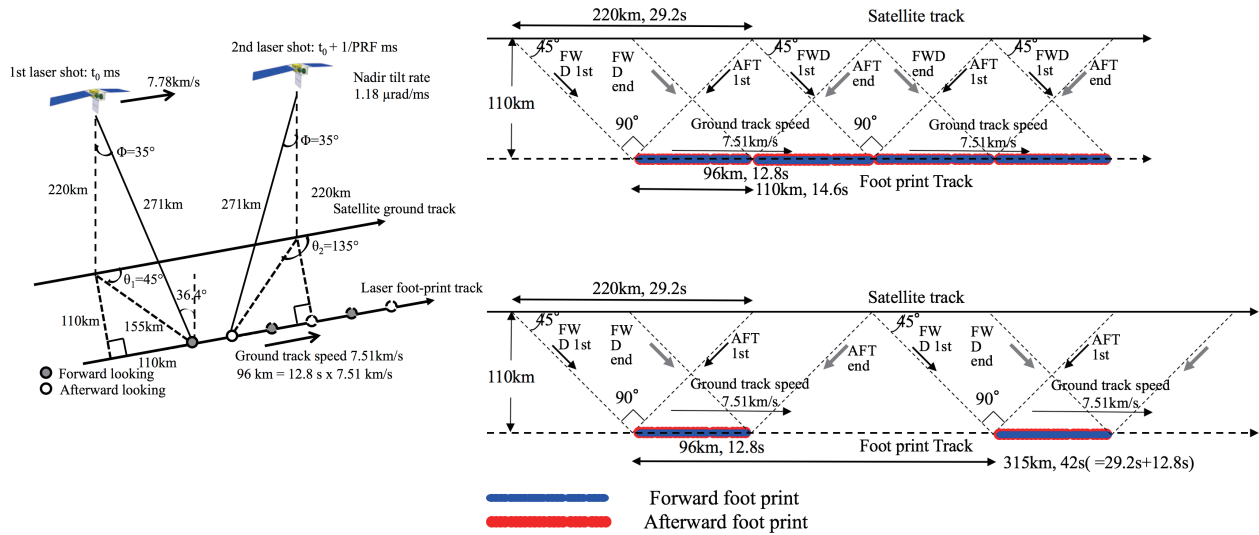
| | Attribute |
|------------|--|
| バス | 超低高度衛星 |
| 軌道 | 220km 極軌道, 低傾斜角 |
| 大きさ(ミッション) | $1.5 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ |
| 質量 | 600 kg (bus + Instrument) |
| 電力 | 1600 W(bus + Instrument) |
| レーザ | 3.75 W (125 mJ/pulse \times 30 Hz) @2 μm |
| | 3.75 W (10 mJ/pulse \times 2500 Hz) @1.6 μm |
| 望遠鏡 | 0.4 m (有効口径) \times 2 |
| 水平距離分解能 | <100 km |
| 高度分解能 | Altitude <3 km: <0.5 km Altitude 3-8 km: <1 km Altitude 8-20 km: <2 km |
| ナディア角 | ~35 度 |
| 方位角 | 45, 135度(進行方向に対し) |



超低高度衛星ドップラー風ライダーの想定軌道



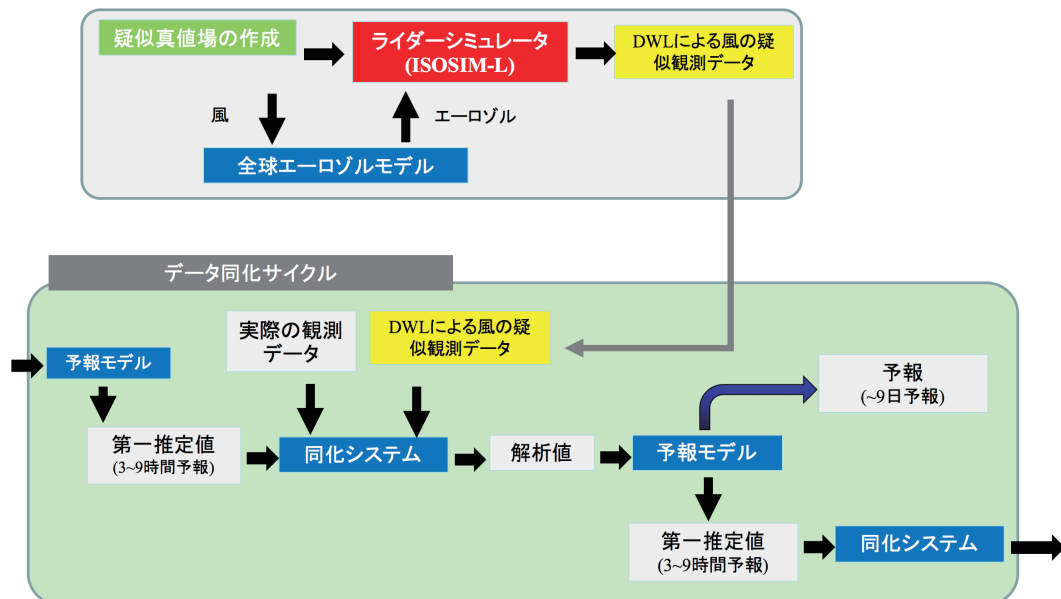
超低高度衛星ドップラー風ライダーによる大気風観測



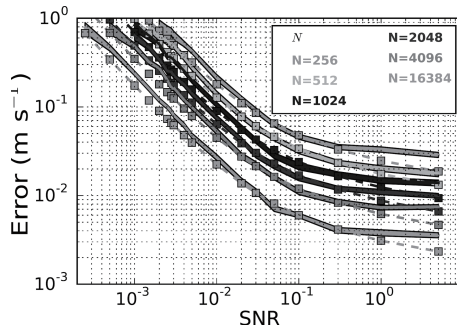
観測システムシミュレーション実験

観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment, OSSE) とは、仮想的なデータを疑似的に作成 (シミュレート) して、データ同化サイクル (実験) を実施

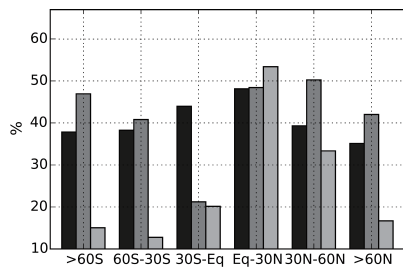
➤ 通常のデータ同化サイクル (実験) は、実際の観測データだけで実施



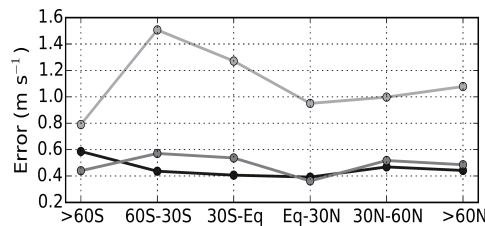
ライダーシミュレータによるランダム誤差の評価と疑似衛星風観測評価



Relationship between SNR and wind speed error for various total number of the range gate. The bad retrieval ratio r_b is lower than 50%. Dashed lines are the Cramer-Rao lower bounds.



Distribution of power spectra with $\text{SNR} \cdot \sqrt{N} > 0.1$ for different latitude ranges: (black bar) 0-3 km, (dark grey bar) 3-8 km, and (light grey bar) 8-20 km.



Wind speed error with $\text{SNR} \cdot \sqrt{N} > 0.1$ for various altitude ranges over the different latitude ranges: (black bar) 0-3 km, (dark grey bar) 3-8 km, and (light grey bar) 8-20 km.



まとめ

本発表では、気象分野の観点から超低高度衛星の利用をご提案させて頂くために、現在の衛星観測とその課題について紹介し、アイデアとしてドップラー風ライダーによる大気風観測をご紹介致しました。

- 現在の衛星観測は、気温や水蒸気に関連した観測に重点 (Baker et al. 2014)。
 - 衛星搭載サウンダにより、鉛直方向を含む全球的な3次元観測はある程度実現
 - 海上風、大気追跡風による全球風観測
 - ✓ 広範囲、高頻度の観測を実現 (不特定範囲の多数観測)
 - ✓ 海上、2、3層のある特定層のみの観測
 - ✓ 高度推定の向上、相対的に低い鉛直高度分解能 (1-2 km)
 - ✓ 他の観測測器に対する相対誤差 (>4 m/s) ・バイアス (<2 m/s)
- **WMO**は、風の高度分布も観測出来る全球的なシステムを要請
 - Development of satellite-based wind profiling systems remains a priority for the future global observing system. (WMO technical report 2012-1)
 - ESAは2017年に**視線方向のみ**風観測可能なドップラー風ライダーを打上げ予定
 - 日本は**ベクトル風観測**が可能なドップラー風ライダーについてフィジビリティ研究
 - ✓ コヒーレント方式
 - ✓ 2000年代まではISS搭載を検討
 - ✓ 2011年にWGを立ち上げ、超低高度衛星搭載を検討



まとめ

- コヒーレントドップラー風ライダーによる大気風観測
 - 高い鉛直高度分解能(<1km)で直線的な観測によるベクトル風観測を実現
 - 相対的に高い距離分解能で距離を測定が可能
 - システムに起因するランダム誤差・バイアスは、**小さい**(高度<8kmに対し<0.5 m/s)
 - ✓ 大気の変動が観測誤差に影響
 - OSSEを実施し、数値予報精度への効果を客観的に調査中
 - ✓ 予備実験では、**風の予報や台風進路予報が改善**することを確認
 - ✓ 複数事例(極軌道、低軌道)の気象予報へのインパクト評価を実施
 - **光能動型センサーから見た超低高度衛星搭載のメリット**
 - ✓ ライダーの受信パワーは距離の2乗に反比例するため、システムパラメータを1/4に軽減可能
 - ✓ システムパラメータ(例えば、レーザ)の消費電力は、衛星設計の上で極めて重要
- 最後に超低高度衛星に期待していること...
 - 超低高度衛星の想定高度は、全ての分野にとってフロンティアです。技術的な困難さ(例えば、熱、エアードラッグ)を克服し、超低高度衛星が新しい観測領域を切り拓く事を期待しています
 - 技術実証ミッションと観測ミッションの両方で活用されることを期待しています
 - 観測ミッションの場合、5-10年の衛星観測が求められています。さらなる長寿命化を目指して研究開発を進めて欲しいです

謝辞 本研究はJSPS科研費15K05293, 15K06129の助成を受けています。



ご清聴ありがとうございました。



衛星搭載ライダー観測のデータ同化

気象庁気象研究所
関山剛・岡本幸三

第3回 超低高度衛星の利用に向けたワークショップ
2016年2月29日@JAXA東京事務所

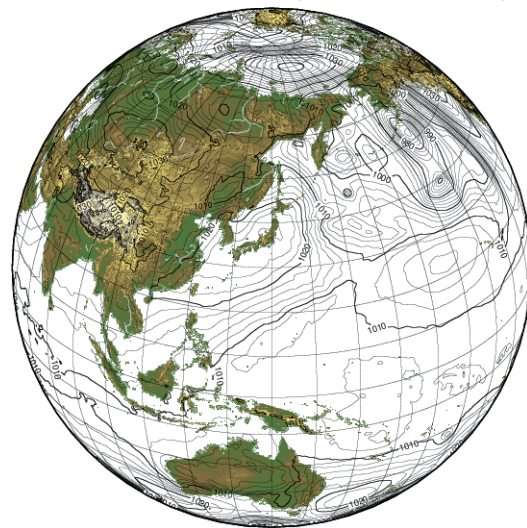
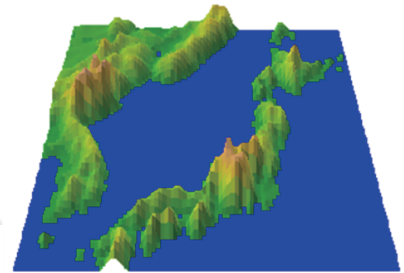
内容

- 1. 天気予報/大気汚染予測の技術
 - 気象学を支える数値シミュレーション
 - 数値予報とは何か
 - 衛星データの重要性
- 2. 宇宙から風とエアロゾルを測る
 - ドップラーシフトで風を計る
 - 大気汚染も観測（そして予報）できる
- 3. まとめ

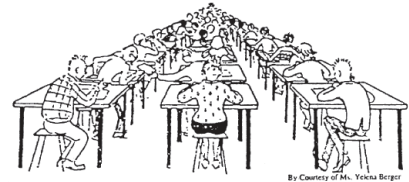
数値シミュレーション



GSM-TL959L60 2014.01.23.12UTC FT=000
(Valid Time: 01.23.12UTC)



$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_z} \left(\frac{\partial \rho_z u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_z u w}{\partial z} \right) - C_p \theta \frac{\partial \Pi'}{\partial x} + f(v - v_g) - \frac{\partial u' u'}{\partial x} - \frac{\partial u' w'}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_z} \left(\frac{\partial \rho_z v u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_z v w}{\partial z} \right) - f(u - u_g) - \frac{\partial v' u'}{\partial x} - \frac{\partial v' w'}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_z} \left(\frac{\partial \rho_z w u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_z w w}{\partial z} \right) - C_p \theta \frac{\partial \Pi'}{\partial z} + g \frac{\theta'}{\theta} - \frac{\partial w' u'}{\partial x} - \frac{\partial w' w'}{\partial z} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_z} \left(\frac{\partial \rho_z \theta' u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_z \theta' w}{\partial z} \right) - w \Gamma - \frac{\partial \theta' u'}{\partial x} - \frac{\partial \theta' w'}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho_z u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_z w}{\partial z} &= n \end{aligned}$$



3

数値予報とは？

- 数値シミュレーションを使って少し未来の気象状態を計算する
 - 数秒～数分先の計算を繰り返すことで数日先の天気も知ることができる
 - 数値シミュレーションには初期値（ $t = 0$ の時の状態）が必要
- 初期値の推定が重要
 - 観測データと数値予報の計算結果から作成
 - 数学的に最も尤もらしい状態を推定する技術「データ同化」

4

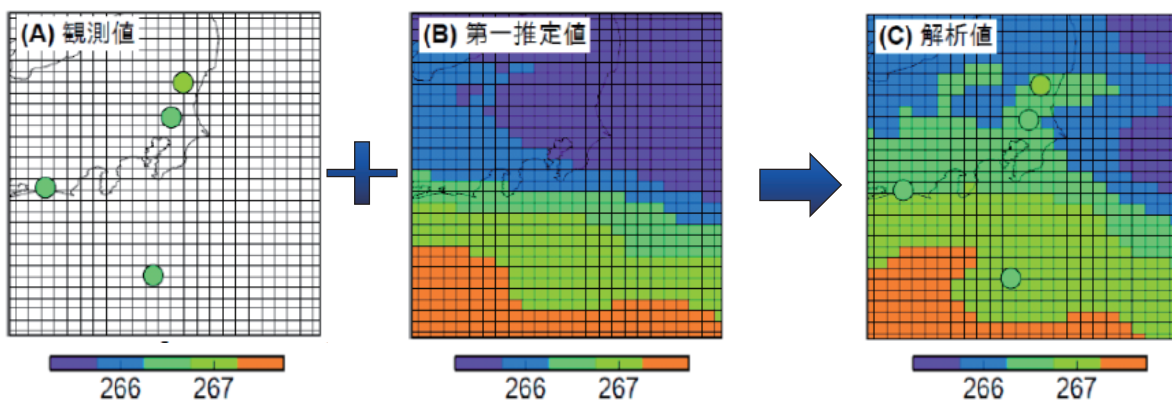
データ同化とは？

観測値と第一推定値を用いて、**整合した値**（大気状態）を物理学や統計学から得られる関係式に基づいて求めること

→作成された値を**解析値**と呼ぶ

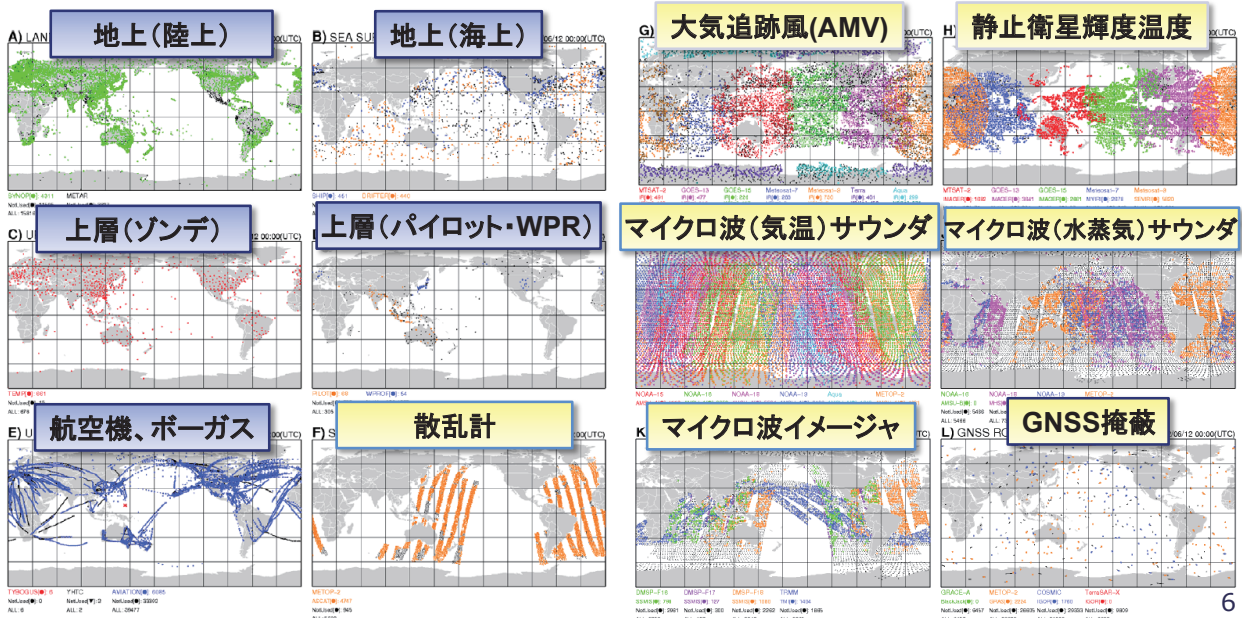
第一推定値としては予報値（数値シミュレーションの計算結果）を用いることが多い

→観測と比較して時間的・空間的に均質



気象庁全球データ同化システムで使われている観測データ

2012年6月11日21UTCから12日03UTCまでの6時間の場合



全球予報の改善に対する寄与率

寄与率が高いもの

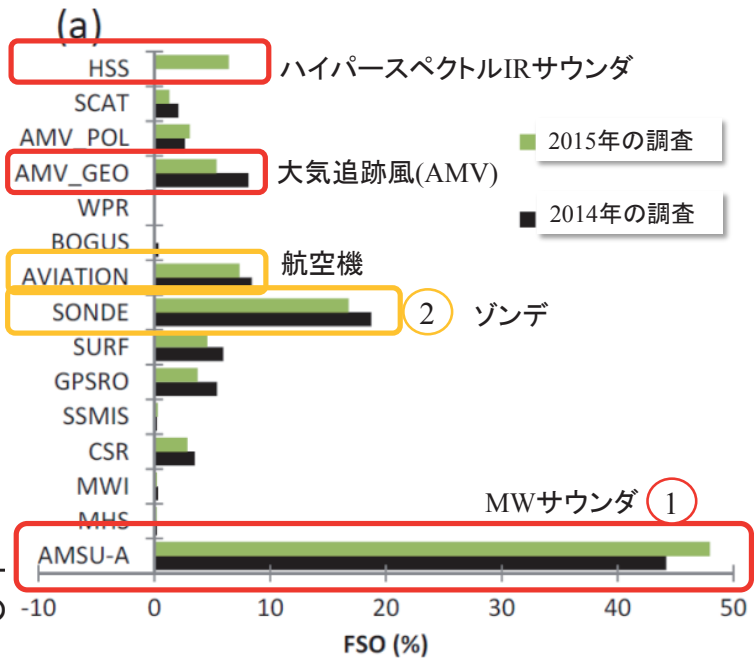
- 1. マイクロ波サウンダ
- 2. ラジオゾンデ
- 3~5. 航空機、赤外サウンダ、衛星風

寄与率を決めるもの

- 観測の精度や数
- データ同化システムの性能

衛星データの効果は年々増大

- 注意！この評価方法(FSO)では、現在存在しない、もしくは十分に利用されていないデータの潜在的な寄与は考慮されない



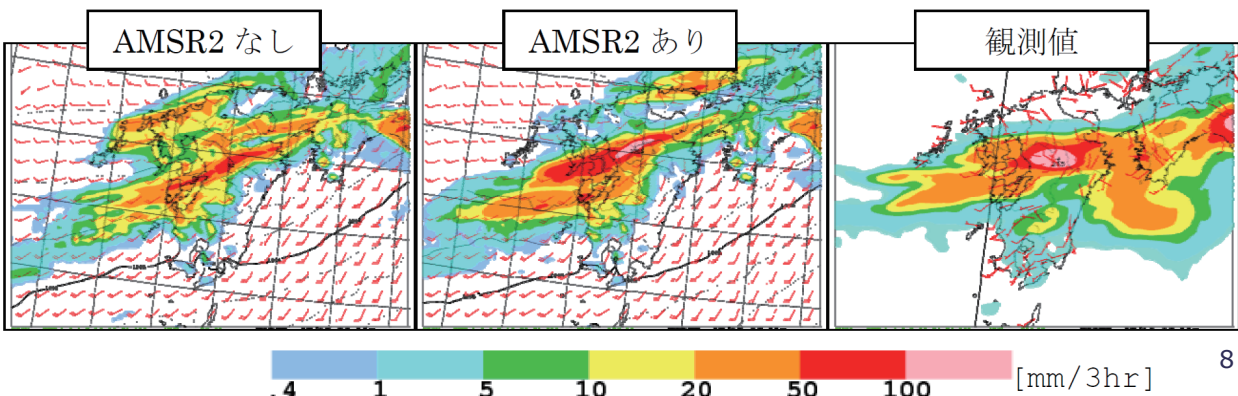
衛星観測データの特徴とインパクト

● 衛星観測の特徴

- 広域・均質 → 海洋上や大気上層など遠隔地も観測
- 定常(常時観測) → 現業的な利用では特に重要

● GCOM-W/AMSR2の例

- AMSR2データの同化で、海上の水蒸気の解析精度が向上し、九州の豪雨予測が改善

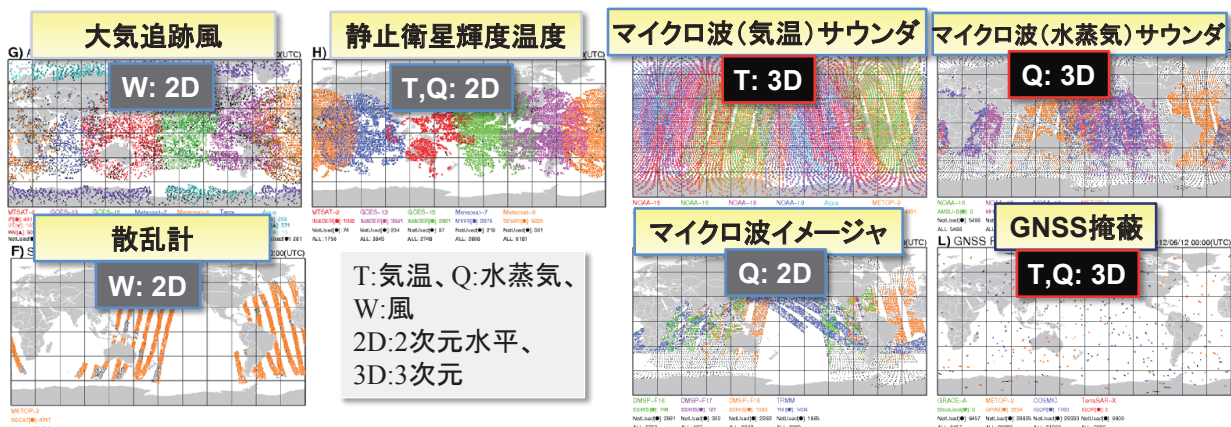


宇宙から風とエアロゾルを測る

9

気象庁で同化している衛星観測要素

- 「**気温**」と「**水蒸気**」は衛星サウンダ（鉛直探査計）によって（鉛直方向を含む）全球的な3次元観測が実現されている
- 「**風**」は全球的な鉛直分布の観測が極めて少ない
- 数値予報精度向上のためには広域・高頻度・高精度な風観測が必要 → **衛星で観測できないのか？**



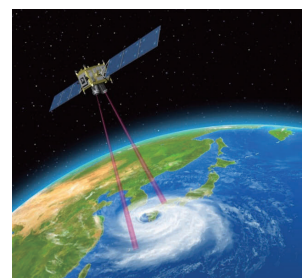
数値予報で同化されている風データ

- ゾンデ（気球）
 - 高精度・全天候観測可能。しかし観測地点・頻度が極めて限定的
- ウインドプロファイラー(WP)、ドップラーレーダ
 - **広域（全球規模）で風の鉛直プロファイルを観測する定常的システムは、現在のところ存在しない**
- 航空機
 - 高精度・高頻度。しかし全球規模で観測域に限定。
- 衛星イメージャによる大気追跡風(AMV)
 - 高頻度・広域観測（ほぼ全球）。しかしほぼ単層で、高度推定精度が悪い
- 衛星マイクロ波散乱計
 - 海上風。高精度・高頻度。観測域は比較的広い

11

衛星搭載ドップラー風ライダーDWL

- 全球的な3次元風観測を実現する有力な候補
- エーロゾルや大気分子で散乱されるレーザー光のドップラーシフトを測定 → 視線方向の風速を得る
 - 地上ドップラー風ライダーは既に空港で現業運用
- 世界各国で重要性が認識
 - ESA（欧州宇宙機関）では2016年にADM-Aeolusを打ち上げ予定
 - NASAでも技術的検討及び航空機観測を実施
 - 日本ではサイエンス検討チーム（東北大、気象研、気象庁、東大、理研など）で検討中
- NICTなどで航空機搭載機を開発中



12

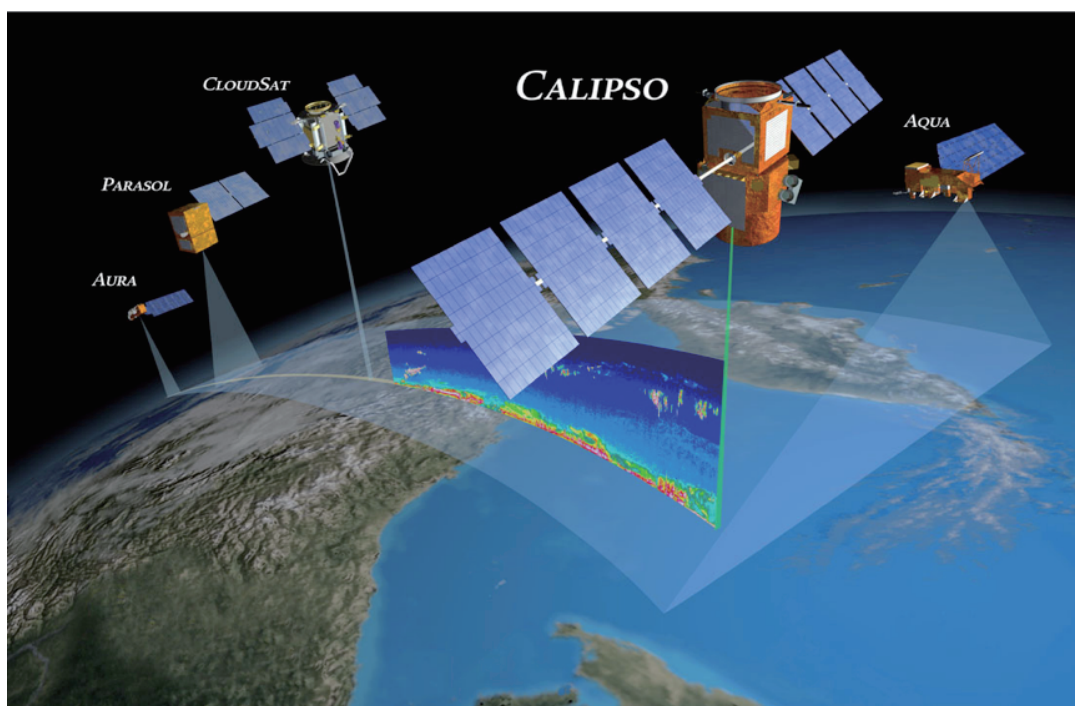
衛星搭載ライダー-CALIOP

- 雲粒とエアロゾルの分布を測定するためのライダー
- NASAが2006年に打ち上げ
 - A-train衛星の一つCALIPSOに搭載
- 2波長、偏光解消度を測定（ドップラー観測は無し）
- なので風の観測はできないけれど、エアロゾル分布の観測に威力を発揮



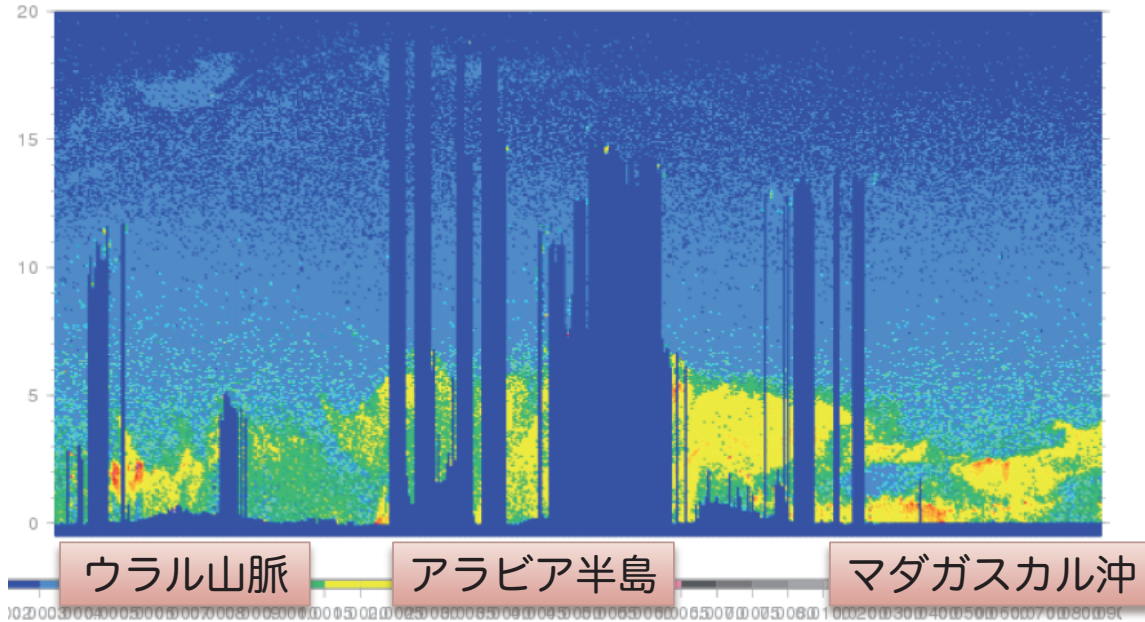
13

衛星搭載ライダー-CALIOP



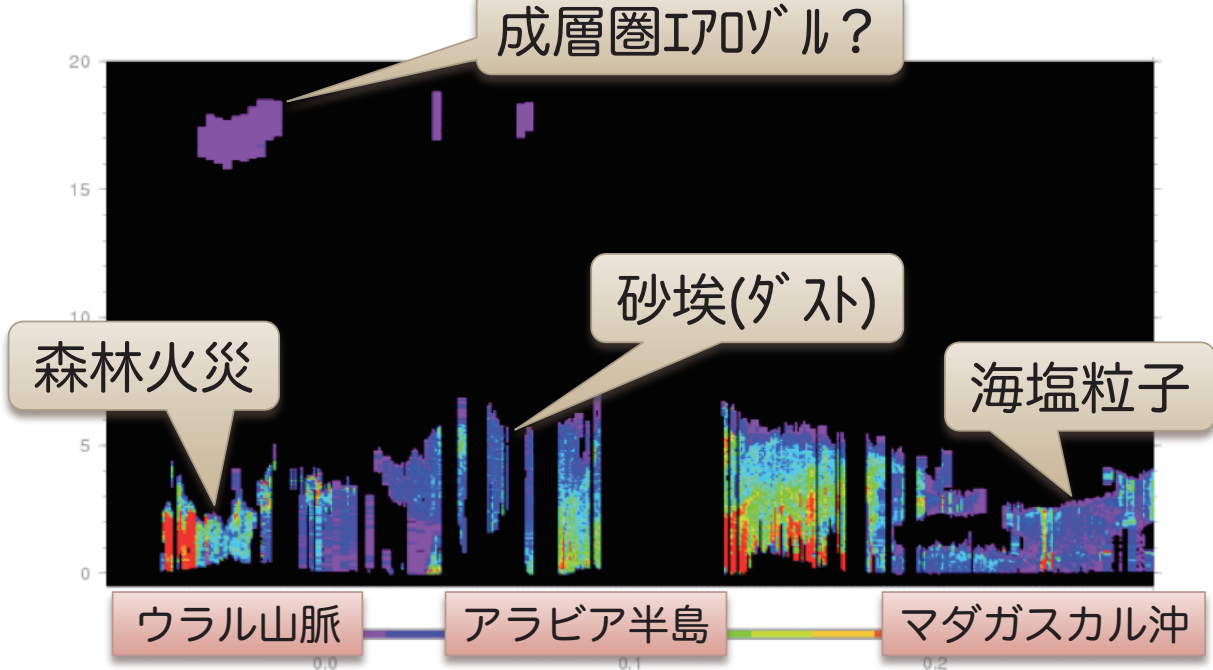
14

衛星搭載ライダー-CALIOP



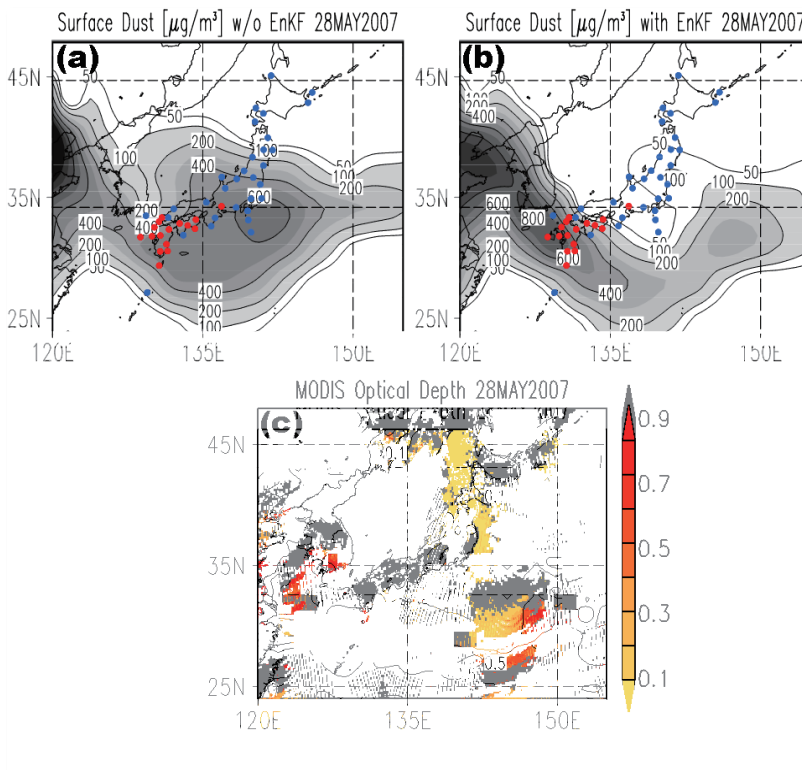
減衰後方散乱(=ライダーが受信する信号)の大きさ。雲のシグナルは除去済み。縦軸は地表面から高度20kmまで。

衛星搭載ライダー-CALIOP



逆解析で得られたエアロゾルの**消散係数**(=値が大きいほどエアロゾル粒子の量が多い)。高度は0~20km。

CALIOP観測のデータ同化(黄砂)



地上の黄砂濃度

- (a) データ同化**無し**.
- (b) データ同化**有り**.

灰色の領域は環境省基準を超える濃度。

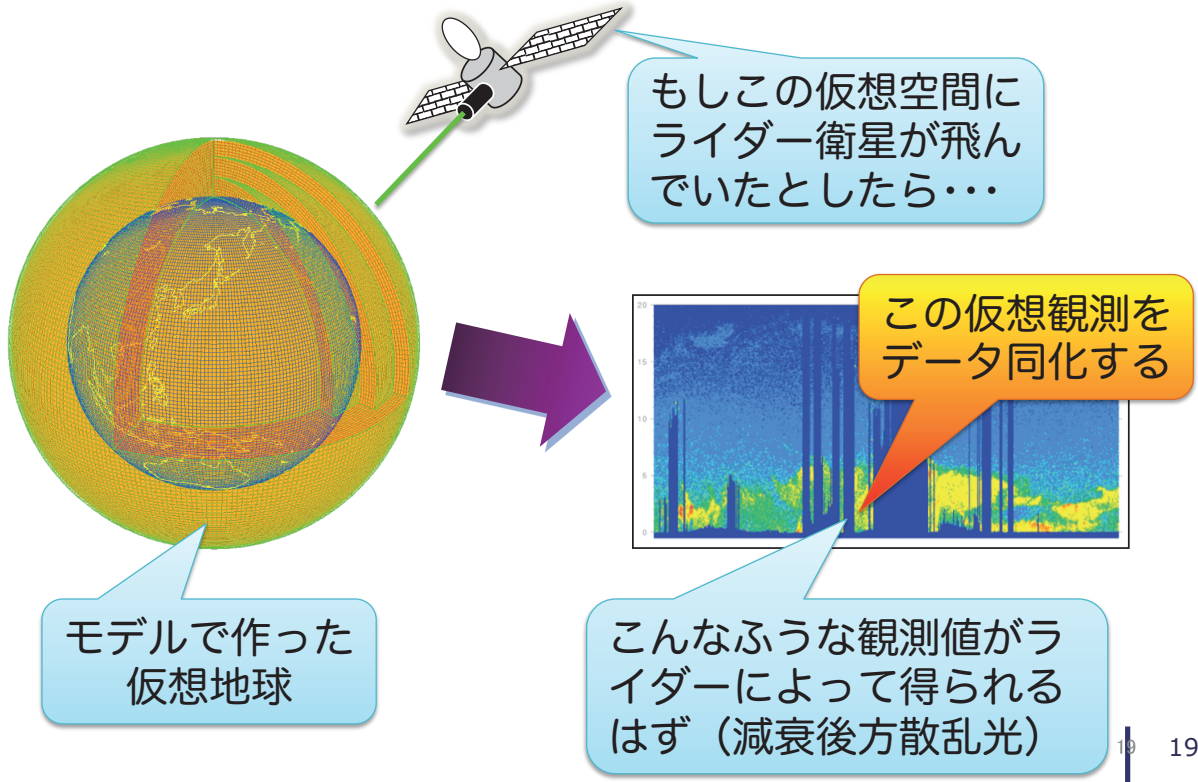
赤●：黄砂を**目視観測**した気象官署

青●：黄砂の**観測がなかった**気象官署

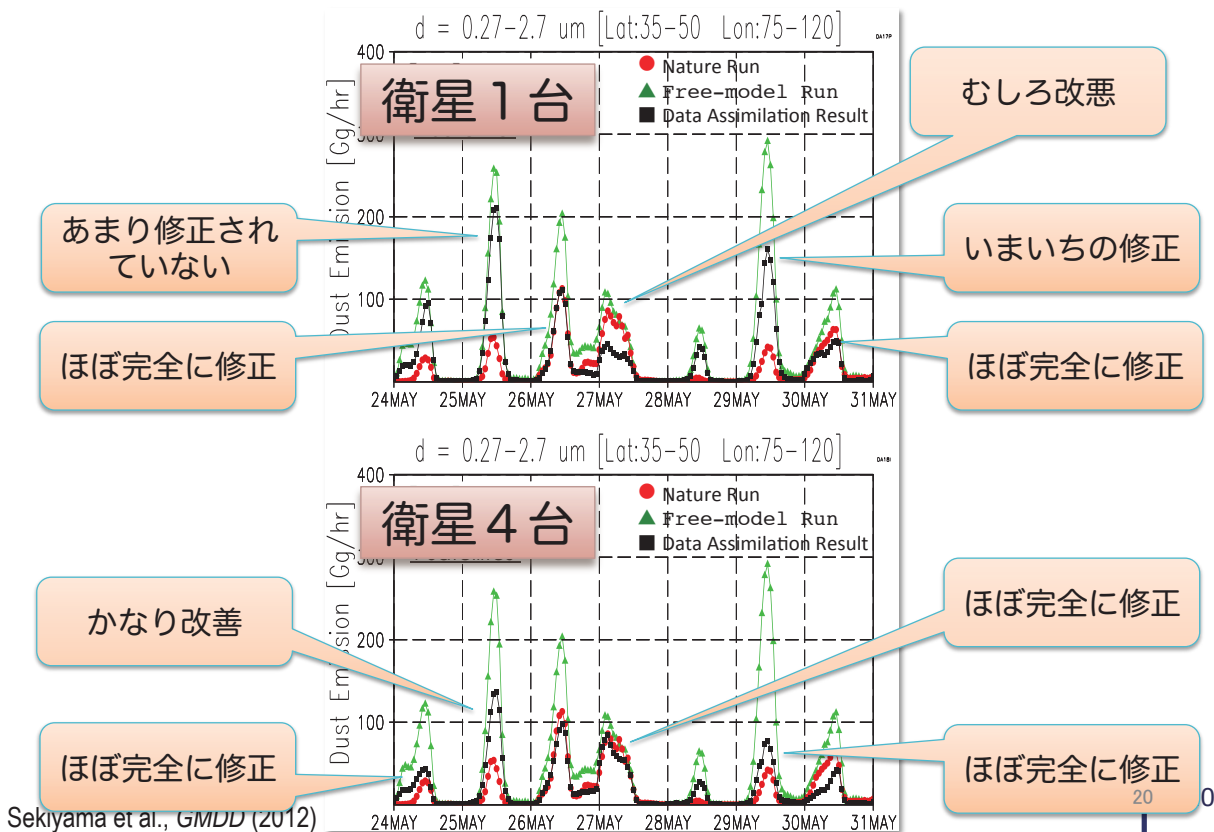
(c) 同じ日にMODISが観測したエアロゾルの光学的厚さ

データ同化の技術を利用して 仮想世界を実験する

仮想実験 (OSSE) とは？



仮想世界のCALIOPデータ同化実験(黄砂発生量推定)



工事中

衛星搭載ドップラー風ライダーDWLの 仮想実験 (OSSE) もNICTと気象研 が共同で実施中



どのくらい天気予報に役立つ？

21

まとめ

- 衛星データは均質・広域・定常的 → 極めて重要な観測
- 気象の予測・防災情報は、衛星データの利用によって大幅に精度が向上する
- 数値予報に利用される風の観測は多数あるが、**全球的な鉛直分布観測**は不十分
- 衛星搭載の**ドップラー風ライダー**(DWL)は数値予報からの観測ニーズを満たす有望な候補
- 衛星搭載ライダーは気象観測だけでなくエアロゾル (**黄砂・PM2.5・大規模森林火災**) 観測もできる
- 衛星搭載ライダーがあれば火山噴煙の高頻度観測も可能になる (**噴煙の高さと濃さが分かる!**)
- 衛星搭載ライダー観測は**複数**の衛星で行った場合に大気状態の推定精度が大きく向上する可能性あり

22

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-16-001
JAXA Special Publication

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ報告書(2015年度)
FY2015 Report of the Workshop for Super Low Altitude Satellite Applications

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成28年8月31日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2016 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

