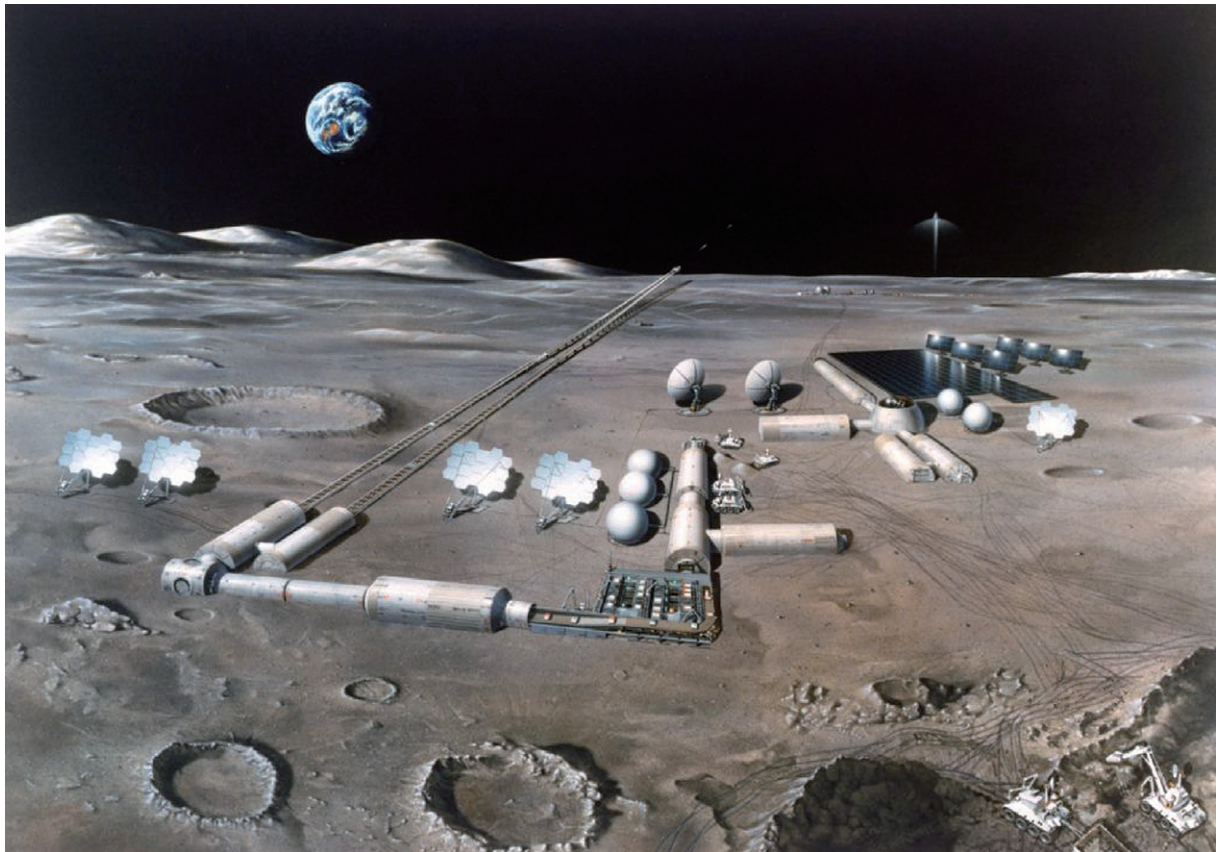


宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)

－宇宙に住む、宇宙から地球をみる－



宇宙航空研究開発機構
井口洋夫 監修

表紙の写真の説明

タイトル: 月面基地想像図

日付:

場所:

カテゴリー: 将来構想

ミッション:

内容:

Photo No.: P-019-05682

コメント:

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)
—宇宙に住む、宇宙から地球をみる—

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

本書を読んで下さる方へ

1957 年、人工衛星が地球を周回して 50 年、現在われわれ人類が宇宙開発にかけて来た努力が、その中間基地であり、また宇宙環境利用の拠点となる国際宇宙ステーション(ISS)として、結実完成する最終作業が進められている。その作業の中に、日本の実験棟(きぼう)の構築が含まれており、更に 2008~9 年にかけてその稼動が期待される。

そして、次の 10 年、この分野に携わる者は今迄蓄積した「宇宙環境利用の科学実験」の手法を遺憾なく発揮して、その成果を世に問うことが求められている。

ここに至るまでの段階で、宇宙環境利用研究の舞台づくりや推進役を荷った宇宙開発事業団(NASDA)は、1996 年以降宇宙環境利用研究システム並びにセンターを設置、そこに広い学術分野—理工系、生命系そして医学系といった—の人材が集い、更に目的を同じくする大学・研究機関の研究者・技術者との全面的協力を行い、日本全国で 200 余課題の宇宙実験を実施して来た。

そして、そこには様々の新しい発想の誕生が集約され、新規課題も累積されている。

これから、いよいよ本格的宇宙実験を実施しようとしている今、これらの実験を通して、「この奇跡と言うべき美しき星—地球—に生を受けた人類の将来を考える」ことは、「未知なるものへの挑戦」という立場からも意義深いものとする。

このような思いで、執筆者各人が自分の思索を率直に文章に込めて書き上げた作品で、教科書を目指すものでないことを理解いただきたい。

読者の方々も、是非執筆者と共に、宇宙環境の中に飛び込んで下さって、その独特な環境を楽しみながら空想を逞しくして戴ければ、本書の出版の意義を満たすことが出来ると考えている。

是非頁をめくって戴き、従来の本との相違点を読み取って戴きたい。

井口 洋夫

宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)
— 宇宙に住む、宇宙から地球をみる —

目 次

本書を読んで下さる方へ

1. 序論

1. 1 宇宙環境について(執筆:小林礼人)	1
1. 1. 1 現在利用している宇宙の環境—地球圏宇宙—	1
1. 2 国際宇宙ステーション(ISS)(執筆:山本昌孝)	3
1. 3 宇宙実験の現状	12
1. 3. 1 宇宙環境を利用した材料科学実験(執筆:石川毅彦)	12
1. 3. 2 宇宙環境を利用した基礎物理学実験(執筆:小林礼人)	16
1. 3. 3 宇宙環境を利用したライフサイエンス実験の 目的・方法・実験の難しさ(執筆:石岡憲昭)	19

2. 宇宙に住む

2. 1 はじめに(執筆:山本昌孝)	23
2. 2 スペースシャトル、ISS における生活	24
— 向井飛行士との対談— 聞き手:松本信二	
2. 2. 1 無重力の生活	24
2. 2. 2 食べたり飲んだり	25
2. 2. 3 宇宙での睡眠	26
2. 2. 4 バードレッグス アンド ムーンフェイス	28
2. 2. 5 仕事の効率	28
2. 2. 6 宇宙でのやすらぎと楽しみ	30
2. 2. 7 室内のデザイン	33
2. 3 宇宙ホテル、月面基地の建設(執筆:松本信二)	35
2. 3. 1 アポロ計画と月開発の現状	35
2. 3. 2 月の環境と資源	36

2. 3. 3	月に人が住む目的	37
2. 3. 4	月面基地の建設シナリオ	39
2. 3. 5	月面基地の建築構法	40
2. 4	宇宙天気予報(執筆:松本晴久)	45
2. 4. 1	宇宙環境	45
2. 4. 2	有人宇宙活動への影響	54
2. 4. 3	その他の影響	56
2. 4. 4	宇宙天気予報の現状と将来	57
2. 5	火星に住む(執筆:石川洋二)	59
2. 5. 1	火星とは?	59
2. 5. 2	火星の居住環境	60
2. 5. 3	生命探査	63
2. 5. 4	火星の有人探査	64
2. 5. 5	火星で見る空	64
2. 5. 6	火星居住	64
2. 5. 7	火星のテラフォーミング計画	66
3.	宇宙から地球をみる	
3. 1	大気・オゾン層の観測(執筆:中島英彰)	72
3. 1. 1	地球大気の変遷	72
3. 1. 2	雲や台風の観測	74
3. 1. 3	オゾン層の観測	76
3. 1. 4	温室効果気体の観測	81
3. 1. 5	大気汚染物質の観測	82
3. 2	オーロラの観測(執筆:高橋幸弘)	85
3. 2. 1	地上から見たオーロラ	85
3. 2. 2	地上観測から人工衛星観測へ	87
3. 2. 3	オーロラはどうしてできるか	89
3. 2. 4	人工衛星による直接観測	91
3. 2. 5	衛星観測の新展開	92
3. 2. 6	オーロラ科学から宇宙天気予報へ	94

3. 3 地球の水循環を測定するー熱帯降雨の観測(執筆:沖 理子)	95
3. 3. 1 地球表層環境を特徴付けているもの、生命を育む水	95
3. 3. 2 水の循環と大気の大循環	95
3. 3. 3 気候の変動と水資源	97
3. 3. 4 水の観測	99
3. 3. 5 熱帯降雨	99
3. 3. 6 降水観測の今後	104
3. 4 海洋の観測(執筆:江淵直人)	105
3. 4. 1 はじめに	105
3. 4. 2 海面温度	105
3. 4. 3 海面高度	107
3. 4. 4 海上風速・風向	109
3. 4. 5 海色と植物プランクトン	112
3. 5 陸域環境のリモートセンシング(執筆:亀山 哲)	114
3. 5. 1 水資源環境を観測する?	114
3. 5. 2 陸域リモートセンシングの原理	115
3. 5. 3 陸域における水環境	121
3. 5. 4 水のはたす役割と実際の観測技術	126
3. 5. 5 陸域リモートセンシングの将来	133
3. 6 国際宇宙ステーションからの観測(執筆:笠井康子)	136
3. 6. 1 私たちの地球に特有なオゾン層	136
3. 6. 2 国際宇宙ステーション搭載SMILES	136
3. 6. 3 SMILESの特徴	137
3. 6. 4 SMILESに期待されること	138
付録:人工衛星のプラットフォームと搭載センサ	142

参考 : 宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)

— いきものの星・地球 — 目 次 155

[宇宙環境利用と人類の将来 編集者紹介]

井口洋夫:宇宙航空研究開発機構 顧問

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

中島英彰:国立環境研究所 総括研究官

三原建弘:理化学研究所 研究員

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員(編集まとめ)

[宇宙環境利用と人類の将来(Ⅱ)―宇宙に住む、宇宙から地球をみる―

執筆者紹介]

小林礼人:中部大学(元宇宙航空研究開発機構 研究員)

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員

石川毅彦:宇宙航空研究開発機構 準教授

石岡憲昭:宇宙航空研究開発機構 教授

向井千秋:宇宙航空研究開発機構 宇宙飛行士

松本信二:CSPジャパン

松本晴久:宇宙航空研究開発機構 技術領域リーダー

石川洋二:大林組

中島英彰:国立環境研究所

高橋幸弘:東北大学

沖 理子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

江淵直人:北海道大学

亀山 哲:国立環境研究所

笠井康子:情報通信研究機構

1. 序 論

1. 1 宇宙環境について

1. 1. 1 現在利用している宇宙の環境ー地球圏宇宙ー

国際宇宙ステーションやスペースシャトルは、高度約 300～400km の高さのところを飛行する。ステーションのおかれる環境はどのようなものであろうか。この節では、人類がいままでに獲得した“地球に比較的近い”宇宙の特徴をまとめてみよう。

一口に宇宙の環境といっても、高度の差によってその様相は大きく異なっている。ここでは、国際宇宙ステーションが飛行する高度約 300～400km の環境を狭義の「宇宙環境」とし、特にことわらない限りこの“地球圏宇宙”における環境をさすものとする。

国際宇宙ステーションを取り巻く宇宙環境の特徴として、以下の性質があげられるであろう。人類が居住する地球上と、さまざまな点で異なっていることがわかる。

- ・微小重力($10^{-6}g \sim 10^{-4}g$)
- ・高真空(10^{-3}Pa)
- ・宇宙放射線(さまざまな宇宙放射線の複合環境)
- ・広大な視野(全天視野)
- ・特徴的な大気組成(85%が原子状酸素)
- ・豊富な太陽エネルギー(1.4kW/m^2)
- ・過酷な熱環境(真空中での熱放出)

これらの特徴について、それぞれ簡単に見ていくことにしよう。

(1) 微小重力

宇宙では無重力とよく言われるが、実際に宇宙空間で重力が全く働いていないわけではない。月は地球の重力を受けて運動し、地球もまた太陽からの重力を感じている。国際宇宙ステーションの中で物体が浮遊するような環境は、飛行の際の遠心力と地球の引力とのつりあいによって成り立っていることを理解する必要がある。そして、宇宙ステーションの重心(質量中心)からはずれた位置においては、相殺されない重力が残っているのである。また、希薄といえども存在する大気の抵抗によっても力を受けている。さらに、宇宙ステーションが振動することによって生じる周期的な加速度の変動(g ジッターとよばれる)も、わずかながら影響している。これらの複合的な効果のため、国際宇宙ステーションの中では地上に比べておよそ 1 万分の 1～100 万分の 1 の加速度レベルになっており、これは微小重力環境とよばれている。

国際宇宙ステーションがもたらす微小重力環境下では、密度の違いによる対流が

発生しない、静水圧の影響がないなど、材料創製や科学実験に新たな可能性が生み出されている。微小重力を用いた実験については、次の節を参照していただきたい。

(2) 真空と大気組成

高度が上がるにつれて、大気は薄くなる。そして、国際宇宙ステーションが飛行する高度では、およそ 10^{-3} Pa の真空になっている。さらに、成分においても地上と大きく異なり、約 85% が原子状酸素となっている。原子状酸素は活性が高いため、有機材料などの劣化の問題が生じている。一方で、この原子状酸素を実験室内に導き、他の元素を除いて精製することができれば、基礎的な化学実験のためのリソースとして用いることができるかもしれない。

(3) 宇宙放射線

地球圏宇宙では、地上で知られる α 線、 β 線、 γ 線の3種の放射線に加え、中性子線などが高いエネルギーをもって存在している。宇宙放射線は、銀河系内を飛び交う銀河宇宙線、太陽表面から発生する太陽放射線、粒子線が地磁気に捕捉されてできるバンアレン帯の捕捉粒子線からなっており、これらを一次宇宙線とよんでいる。さらに、一次宇宙線が大気や宇宙ステーションなどの機体に衝突して、二次宇宙線とよばれる放射線を生じさせている。

地上では、大気や地磁気のため宇宙放射線の影響はおさえられている。しかし、大気圏外を飛行する国際宇宙ステーションはこれらの宇宙線の複合的な環境にさらされるので、宇宙放射線が生物に与える影響を詳しく調べることは、人類が国際宇宙ステーション、さらには月や火星で活動していくために必須のものとなっている。

(4) 広大な視野

海辺にたった人の目から、どのくらい先まで見渡すことができるのであろうか。目の高さを 1.5m とし、ピタゴラスの定理を用いて少々計算すると、およそ 4.4km 先までしか見えないことがわかる。これに対して、高度 400km の宇宙ステーションからは、およそ 2,300km 先まで見えるのである。さらに、国際宇宙ステーションは地球を約 90 分で一周し、一日におよそ 16 周する。この軌道から地球の様相が間近に見て取れることであろう。また、視線を地球圏外へ向ければ、無限に広がる宇宙空間を大気にじゃまされることなく観測することができるであろう。

日本の実験棟 JEM には、宇宙環境に直接さらされる「船外実験プラットフォーム」が備えられる予定である。この施設を利用して、地球大気の観測や天体観測を行う実験計画が進められている。

(5) 豊富な太陽エネルギー

国際宇宙ステーションが飛行する地球圏宇宙では、太陽エネルギーの密度が非常に高く、 1.4kW/m^2 にも及んでいる。このエネルギーを利用して、宇宙ステーションで必要とされる電力を供給するのである。サッカーグラウンドくらいに広がった太陽電池を用いて、約 110kW の発電を行う計画である。

(6) 過酷な熱環境

(2)項にあるように、宇宙ステーションが飛行する環境は高度の真空中である。したがって、熱輸送が輻射のみによって行われるので、いかに放熱するかは大きな研究対象となる。国際宇宙ステーションの構成要素のうち、太陽電池の他に大きく広がる波形の板は、排熱のための巨大な放熱板である。

以上にまとめたように、国際宇宙ステーションが飛行する地球圏宇宙は地上と大きく異なった環境にある。人類がそこで活動し、さらに遠くへと進出していくためには、この宇宙環境の特徴を十分に理解し、それを利用できるまでになっていかなければならないだろう。

1.2 国際宇宙ステーション(ISS)

(1) 国際宇宙ステーション計画の起こりは今からおよそ25年前！

今からおよそ25年前のことですが、1982年にアメリカ航空宇宙局(NASA)において、国際宇宙ステーション(ISS)の計画が話し合われました。1984年に、当時のレーガン米国大統領が、「人が生活できる宇宙基地を10年以内に建設する」と発表しました。さらに、レーガン大統領は、日本、欧州、カナダに参加を呼びかけて、国際宇宙ステーション計画がスタートしました。9年後の1993年には、もう一つの宇宙大国であるロシアがISS計画に参加することになり、世界の16カ国が協力してISSを建設する体制が出来ました。

その後、計画の変更があり、2010までに全体が完成する予定になっています。ISSが完成したときの様子を図1.2-1に示します。この内、日本が作る部分(モジュール)は“きぼう”という名前がついています。“きぼう”はすでに出来上がっていて、2008年にスペースシャトルによってケネディ宇宙センターから打ち上げられます。



図1. 2－1 国際宇宙ステーションの完成図

(2) 国際宇宙ステーション(ISS)ってどんなもの？

国際宇宙ステーション(ISS)は宇宙に浮かぶ巨大な実験室です。それでは、今建設中のISSはどのようなものかということを説明します。ISSは、地球のまわりの高度約400kmのところを円を描いて、約90分で一周します。このとき、ISSには外向きに遠心力がかかります。ところが、ISSには内向きに重力がかかっています。このためにISSの中では、遠心力と重力が釣り合ってほとんど無重力の状態が起きるのです。

いままでにかかなりの部分が出来上がっていますが、ISSの組み立てが終わると図1. 2－1のような形のものが宇宙に浮かぶことになります。それでは、ISSの様子をもう少し詳しく理解するために、表1. 2－1を参考にしてください。

広さは国際試合に使われるサッカー場のフィールドにほぼ収まるサイズです。宇宙飛行士が生活をしたり、実験をするために必要な電気は、巨大な太陽電池パネルによって発電されます。与圧モジュールは、大気とほぼ同じ成分の空気と温度が保たされており、宇宙飛行士が宇宙服を着ないで生活ができる場所です。ISSには、多いときには7人の宇宙飛行士が乗り込んで研究をすることが出来ますが、しばらくの間は3人が乗り込むことになります。

ISS全体の重さは約415トンです。主なモジュール(部品)としては、与圧モジュール、太陽電池パネル、トラス(棒を組み合わせた骨組みの部分)、ロボットアーム、ラジエタ(放熱板)があります。これらのモジュールは、米国のスペースシャトルを中心に、ロシアのソユーズロケットやプロトンロケットで宇宙へ運ばれます。

表1. 2-1 国際宇宙ステーションの仕様

項目	諸元等	
寸法	約 108.5m × 約 72.8m(サッカーのフィールドと同じくらい)	
重量	約 420 トン	
電力	110kW(最大発生電力)	
全与圧部容積	935m ³	
与圧モジュール棟数	実験モジュール (5 棟)	<ul style="list-style-type: none"> ・デスティニー(米国実験棟) ・ロシア研究棟(研究モジュール(RM)、多目的実験モジュール(MLM)) ・コロンバス(欧州実験棟) ・「きぼう」日本実験棟
	居住モジュール (1 棟)	<ul style="list-style-type: none"> ・ズヴェズダ(ロシアのサービスモジュール)
曝露搭載物 取付場所	トラス上 4 箇所 「きぼう」船外実験プラットフォーム 10 カ所	
常時滞在搭乗員	6 名 (組立期間中は 2～3 名)	
軌道	円軌道(高度 330～480km) 軌道傾斜角 51.6°	
輸送手段	組立	<ul style="list-style-type: none"> ・スペースシャトル(米) ・ソユーズロケット、プロトンロケットなど(露)
	補給	<ul style="list-style-type: none"> ・スペースシャトル(米) ・ソユーズロケット、プロトンロケットなど(露) ・アリアン(欧) ・H-IIA(日)
通信能力	米国 追跡・データ中継衛星(TDRS)システム その他、日、欧のデータ中継衛星システム	

(3)日本はどのような仕事を分担しているの？日本が開発する実験モジュール“きぼう”については図1. 2-2を見てください。

“きぼう”の中で主なものは、無重力で材料実験をする船内実験室、宇宙空間に出して天体観測や地球観測をする船外実験プラットフォーム、さらに船外実験プラットフォームで人間の代わりに実験をするロボットアームがあります。

日本は、国際宇宙ステーション全体の約11%の仕事を分担して、各国と協力して計画を進めてきました。

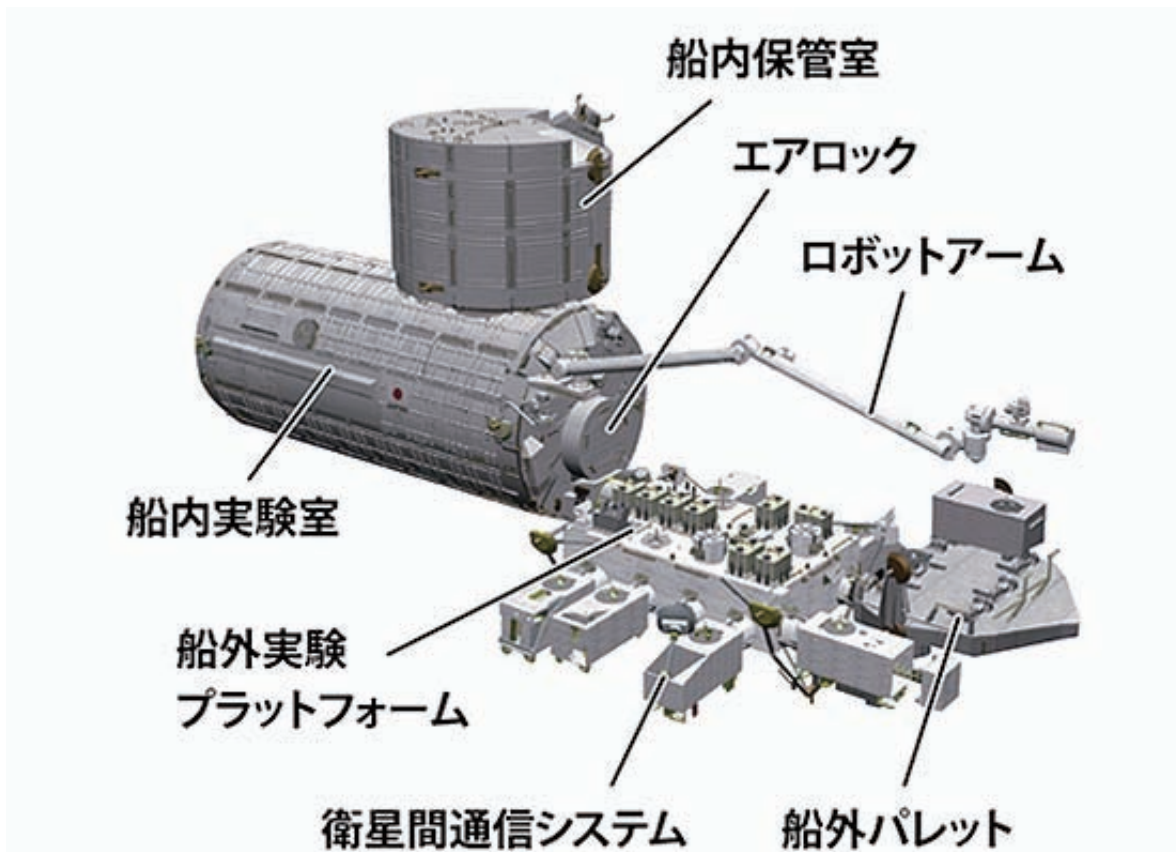


図1. 2-2 国際宇宙ステーションに建設される日本の実験棟「きぼう」

(4)国際宇宙ステーションではどんなことができるの？

国際宇宙ステーションでは多くの分野の研究を行うことができます。この中で将来有望と考えられる分野について説明をします。

* 新しい材料

無重力の環境を利用すると、地上では混ざり合うことが難しい物質の混合物ができます。このような実験によって新しい材料や医薬品の開発が可能になります。

* ライフサイエンス・宇宙医学

無重力の環境で生物はどのようにして成長していくのか。また、生物はどのよう

に重力を感じ取るのかななどの研究をします。さらに、人類が宇宙で長期間滞在するとき、無重力や宇宙放射線などの宇宙環境が人間や動植物にどのような影響を及ぼすかについて調べます。

*** 天体観測**

天候や大気に妨げられずに、360度の視界で天体を観測できます。これにより、宇宙の成り立ちや構造、星の誕生や消滅の様子を研究できます。

*** 地球観測**

国際宇宙ステーションからは、地球の表面の約85%を観測することが出来ます。このように広い視野でつねに地上を監視したり、調査したりすることは地球環境問題の解決に役立ちます。

(5) 日本の宇宙飛行士は8人！

日本の宇宙飛行士は、1985年に、毛利衛、向井千秋、土井隆雄の3名が選ばれました。その後、若田光一、野口聡一の2名に続き、古川聡、星出彰彦、山崎直子が宇宙飛行士となり、現在では8名の飛行士がいます。ISSの組み立てや完成後の宇宙実験を行うために宇宙飛行士の役割はますます重要になります。つぎに、8名の宇宙飛行士の横顔を紹介します。

*** 毛利 衛: 日本初のスペースシャトル搭乗員**

1992年9月に日本人としてはじめてスペースシャトル(STS-47)に搭乗。日米共同開発の装置で第一次材料実験(FMPT, ふわっと'92)を行いました。2000年2月に再びスペースシャトル(STS-99)に搭乗して、地球の立体地図を作成するために宇宙からデータを測定しました。



毛利飛行士の写真

*** 向井千秋: 医学者としての経験が強み**

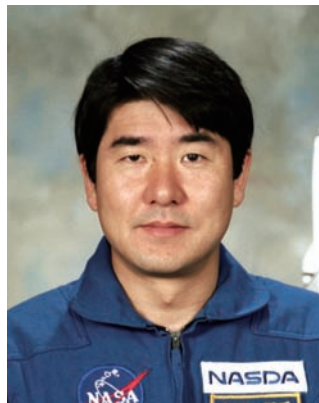
1994年7月に第2次国際微小重力実験室と呼ばれる計画(STS-65)で、金魚、メダカ、イモリの実験をしました。1998年10月には、アメリカの最高齢宇宙飛行士ジョン・グレンとともに2回目の飛行(STS-95)をしました。ここでは、医学者としての知識と経験を生かして、宇宙医学の実験やグレン飛行士の医学テストの手助けもしました。



向井飛行士の写真

*** 土井隆雄: 船外活動でも大活躍**

1997年11月に日本人宇宙飛行士として初めて船外活動(宇宙服を着て宇宙空間に出て作業をすること)をしました(STS-87)。船外活動では、ロボットアームの上に乗って人工衛星を回収したり、国際宇宙ステーションの組み立て作業の確認をしました。



土井飛行士の写真

*** 若田光一：日本人初のミッションスペシャリストとして搭乗**

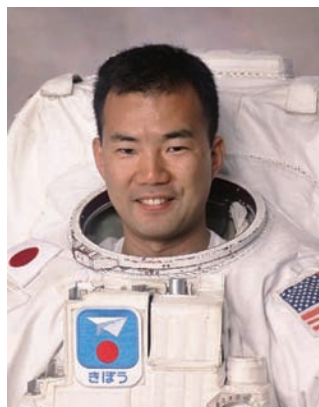
1996年1月にスペースシャトル(STS-72)に搭乗し、ロボットアームを操縦して日本の実験衛星を回収しました。2000年10月の飛行(STS-92)では、若田飛行士が操縦するロボットアームと4名の船外活動をする飛行士の協力により、米国製の部品が国際宇宙ステーションに取り付けられました。



若田飛行士の写真

*** 野口聡一：ロシアでも訓練を体験**

5人目の日本人宇宙飛行士として NASA で訓練を開始。1998年にはロシアのガガーリン宇宙飛行士訓練センターで訓練を受けた。2002年11月には、国際宇宙ステーションを組み立てるためのスペースシャトルとしては17回目の飛行に野口飛行士が搭乗しました。



野口飛行士の写真

*** 古川 聡: 医学者としての実績を生かす**

消化器外科医として医学の分野で活躍した後、宇宙開発事業団が実施した国際宇宙ステーション搭乗飛行士の基礎訓練に参加して2001年1月に宇宙飛行士として認定されました。



古川飛行士の写真

*** 星出彰彦: 支援業務の経験が光る**

1992年4月に宇宙開発事業団に入社。主に宇宙飛行士の訓練やスペースシャトルによる実験のサポートを担当。2001年1月に宇宙飛行士として認定されました。



星出飛行士の写真

*** 山崎直子:宇宙で琴を奏でたり、書をかいたり**

1996年4月に宇宙開発事業団に入社。主に生物実験装置の開発を担当。2001年9月に宇宙飛行士として認定されました。



山崎飛行士の写真

(5)国際宇宙ステーション計画の後にはどんなことが考えられるの？

国際宇宙ステーションは、2010 年に完成して、15年の間いろいろな宇宙実験のために使われる予定です。最初の5年間は科学や工学のための宇宙実験のために使われます。しかし、後半の10年間については、どのような実験をしたら良いかという検討をしています。その中には、宇宙で絵を描いたり、彫刻をしたりあるいはコンサートをひらくと言うような文化や芸術にかかわる研究もあります。

15年間の宇宙実験が終了した後、国際宇宙ステーションをどうするかということについては決まっていません。人間が宇宙へ進出するための足がかりとして、これを使うのが良いと思われます。更に、人間が地球から月や火星へ向かう中継基地、宇宙観光用のホテル、無重力で新しい物質を製造する宇宙工場などが考えられます。

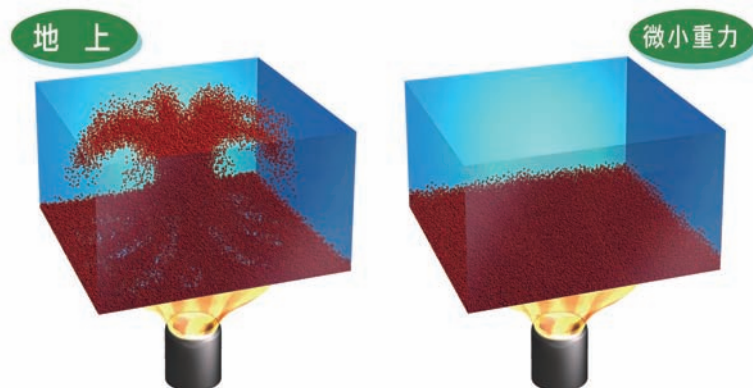
1. 3 宇宙実験の現状

1. 3. 1 宇宙環境を利用した材料科学実験

材料科学の実験が主に利用する宇宙の環境因子は、微小重力である。微小重力のもとでは、重力が地球上の100万分の1程度になり、以下のような効果が得られる。

(1) 無対流

図1. 3-1のように容器に入れた水を下から温めることを考えよう。容器の底付近の水は温度が上がると体積が増え、密度が減少する。こうして周りより軽くなった水は、浮力により上に移動していき、図のような流れが起こる。この流れを対流と呼ぶが、こうした現象は味噌汁の鍋の中や地球の大気の循環など、地上の多くの現象に見られる。しかし、微小重力下では密度差に起因する浮力がほとんど生じないので、このような対流は起こらなくなる。



微小重力では、「重い」「軽い」という概念がなくなる。
したがって、地上とは異なり密度差による対流が抑制される。

図-1 無対流

図1. 3-1 無対流の説明

(2) 無沈降・無浮力

地上では液体中に密度の異なる物質があると、その液体に比べて密度の大きな物質は沈降し、小さな物質は浮上する。サラダドレッシングを使う前に良く振って混ぜるのは、使用前にこの沈降・浮遊により分離しているからである。微小重力下では沈降・浮上もほとんど生じることがない。

(3) 無静水圧

豆腐をレンガのように積み上げていこう。いくつか積んでいくと一番下の豆腐は積み重ねられた豆腐自身の重さ(自重)によりつぶれてしまう。また、図1. 3-2のように液体中に沈めた物体には深さに比例した圧力が周囲からかかるのも、物体の上にある液体の重さが物体に作用するからである。素潜りをする時、深く潜るにつれて耳が痛くなるのは、鼓膜にかかる水圧が上昇するからである。この静水圧も微小重力下ではなくなる。

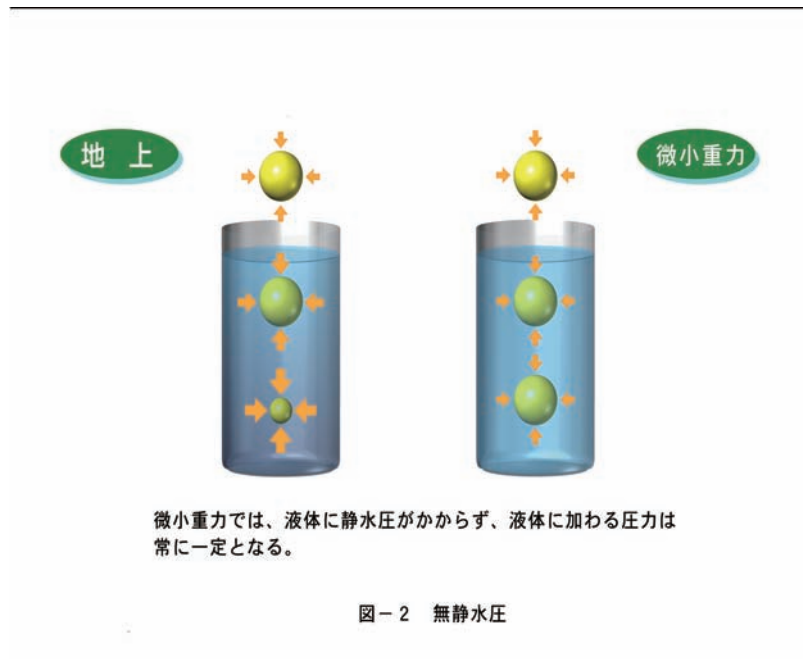


図1. 3-2 無静水圧の説明

(4) 無接触浮遊

図1. 3-3のように微小重力下では容器を用いることなく、液体を保持することが可能となる。

これらの特徴を活かして地上では得られない特性を持つ材料を作り出すのが材料科学の目的である。材料は原子で構成されているが同じ原子を用いてもその作り方によって性質は大きく異なってくる。例えば鋼は焼き入れれば硬くなり、焼きなませば柔らかくなる。これは原子の幾何学的な配列状態が材料の性質に影響しているからである。では、微小重力下で得ようとしている性質はどんなものであろうか。



図1. 3-3 無接触浮遊の説明

第一は、地上ではそれぞれの成分の密度が違うことにより均質な組成が得られない材料が、微小重力下では密度差による浮遊・沈降がないことを利用して材料の各成分が均質に混ざった材料となることである。特に、水と油のように液体状態で混じり合わない材料の組み合わせにおいても均質に分散した材料が得られる可能性がある。こうした材料は例えばアルミニウム中に硬い粒子を分散して強度を上げるなどへの応用が期待されている。

第二は、欠陥の少ない単結晶を得ることである。図1. 3-4のように原子が規則正しく並んだ結晶を単結晶という。コンピューターなどに使われるICは主にシリコンの単結晶で作られている。こうした単結晶は種となる単結晶を融液につけ種を成長させる方法で行われる。実際の単結晶をよく見ると中には1) 不純物の存在2) 原子の抜け3) 配列のゆがみなどの欠陥がある。この欠陥の多寡が最終的には半導体ICとしての性能を決める。欠陥が生じる原因としては、不純物があることその他、自重による変形や融液中の対流の影響する。微小重力下では自重による変形および対流が抑制されるため、地上に比べて欠陥の少ない単結晶を得られる可能性が高い。また、第一と組み合わせて、InGaAs など複数の元素を均質に分散させた材料(化合物半導)の単結晶を得る試みも行われている。

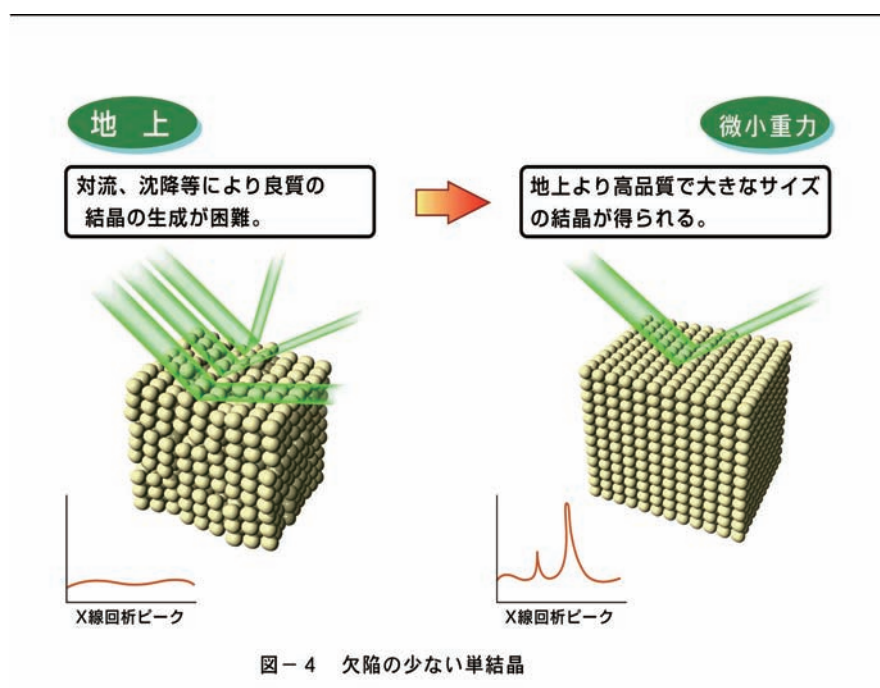


図1. 3-4 欠陥の少ない単結晶

高品質の単結晶は半導体だけでなく、蛋白質も対象となる。蛋白質の単結晶にX線や中性子を当て、その回折から蛋白質の3次元構造を調べることができる。蛋白質の構造解析は新しい薬を開発する手段として現在盛んに行われている。微小重力下で得られる蛋白質の欠陥の少ない単結晶はX線や中性子回折における分解能を向上させ、より細かい蛋白質結晶構造を知ることが可能となる。

第三は、無接触浮遊を利用して、新材料を作ることである。水は通常融点の0℃で固体(氷)となる。その時容器に接したところから最初の氷(核)が出来、これが成長していったって全て固体となる。では、容器に接したところがない場合はどうなるか。この場合、0℃より低い温度になっても、核が出来にくいめなかなか氷にならない。融点以下の液体を「過冷却状態」の液体と言う。実際は容器を用いた場合でも2～3℃程度は過冷却の水は作れる。しかし、無容器の場合はもっと大きな過冷却状態を作ることが出来る。大過冷却状態から急激に凝固して固体となった材料の組織は融点で凝固してゆっくり固体となった組織と異なる形態となる。場合によっては、結晶のような規則正しい配列を持たないガラスとかアモルファスと呼ばれる状態となる。こうした材料は硬さや磁性が大きくなる等、通常の凝固とは異なる性質を示すため、新材料としての応用が期待されている。

材料科学実験のこれまでの成果についての詳細は他の文書を参照していただくとして、宇宙での材料科学実験の現状をここでは説明する。微小重力を利用した材料科学実験は1970年代の米国のスカイラブ計画から本格的に実施され始めた。日本

では小型ロケットを利用した実験の他、スペースシャトルを利用した実験として1992年に毛利宇宙飛行士が搭乗した第1次材料実験、その後1994年のIML-2ミッション（向井宇宙飛行士搭乗）や1997年のMSL-1ミッションに参加してきたが、地上の実験と比べて実験機会が非常に少なく、地上に持ち帰れる実験サンプルの量も限られているのが現状である。このため、地上では実験を繰り返し行いその中で最適な結晶の成長条件を探索することが可能であるが、微小重力実験は一発で最適条件の実験をしなければならない。従って地上でコンピューターシミュレーション等を利用して微小重力環境での最適条件を探索するなど、実験前の周到的な準備が必要となる。更に、スペースシャトルや宇宙ステーションの空間は地上の実験室に比べて狭く、使用できる電力も限られている。このため実験装置は、小型・軽量・省電力にする必要がある。また、宇宙飛行士の生命の安全を確保するため多重の安全装置を設ける必要もある。実験のニーズを満たしつついかにしてコンパクトに装置を作り上げるかは一つの技術となっている。

このように、少ない実験機会・限られた空間や資源の中で材料科学実験は行われている。しかし、1000年以上に及ぶ鉄の製造技術の歴史に比べて30年余りの非常に短期間で成果を上げてきている。将来、人類が宇宙空間に活動範囲を広げた場合、物資を全て地球から持っていく訳にはいかないので、地球以外の宇宙空間で地球同様の生産活動が行われるであろう。月では地球の1/6の重力環境を活かした材料生産が行われるし、スペースコロニーでは微小重力環境を利用した宇宙工場で、高品質の半導体が大量生産されているかもしれない。材料科学実験はこうした遠い将来における人類の活動範囲拡大の為の基礎となる研究分野である。

1. 3. 2 宇宙環境を利用した基礎物理学実験

(1) はじめに

物体を自由に浮遊させることのできる宇宙環境は、基礎物理学研究にとってまたとない貴重な環境である。自重による圧力差がなく、密度が一様に保たれる理想的な環境において、液体ヘリウムを用いた高精度実験などが行われている。また、スペースシャトルの中での物体のふるまいのように、微小重力下でのさまざまな不思議な出来事が高等学校で習うごく初歩の物理実験に相当し、古典力学の正しい理解のためにも宇宙環境は利用価値が高いと思われる。この節では、微小重力環境を利用した基礎物理学実験について考えてみよう。

(2) 慣性質量と重力質量

宇宙環境の1つに微小重力がある。果たして、宇宙へ行ったとき、物体の質量の

違いを手で感じ取ることができるだろうか。この問いに対しては、原理的にはできるといふ答が正解であろう。なぜなら、宇宙が完全なる無重力空間であったとしても、物体の質量が 0 になるわけではないからである。つまり、1kg の物体を 1N(ニュートン)の力で押したときと、10kg の物体を同じ力で押したときとは、物体に生じる加速度が異なるのである。物体の加速されにくさが慣性であり、その大きさを表した物体の質量が、特に慣性質量と呼ばれるものである。質量の大きいもの、すなわち、「重い」ものほど加速されにくく、同じ力を与えたときの加速度の違いから質量の差を感じ取ることができるはずである。

加速されにくさを表した慣性質量は、普段われわれが感じる「重さ」の概念と、直感的に一致しているように思われる。しかし、実際には慣性質量を感じとっているのではなく、重力があってはじめて物体の重さを感じるものがほとんどである。つまり、鉛直下向きの重力に抗って持ち上げるときの持ち上げにくさを、「重さ」として感じている。万有引力の係数であるこの質量は、特に重力質量と呼ばれている。

重力質量と慣性質量は、同じものであろうか。この 2 つの質量が等しいという性質は等価原理と呼ばれ、物理学研究においても基本的な問題としてなお探求が進められている。厳密な証明は未だなされていないが、少なくとも非常に良い精度で成り立っていることは確かなようである。スペースシャトルや国際宇宙ステーションの中が微小重力環境であるということは、等価原理が成り立ち、遠心力という 1 つの慣性力によって重力が相殺されている、と考えることができる。あるいは、落下塔のように、自由落下し続けている系からみると重力がないかのようにみえる、といっても良い。

「重い」と「軽い」ものが同じ速さで落下する、という古くて新しいテーマは、等価原理の検証という形で将来の宇宙実験課題の 1 つとして検討されている。

(3) 力は加速度に比例する

現在建設中の国際宇宙ステーションの組み立てにおいては、大きな機材を動かすためにロボットアームが活躍している。無重力であるはずの宇宙空間で、なぜこのようなアームが必要となるのだろうか。物体は摩擦なく自由に動くのではないのだろうか。

毛利宇宙飛行士のフライト時の映像を見ると、ほんのわずかの力で物体を動かすことができるように見える。高品位テレビカメラでさえ、簡単に扱えるかのようなのである。しかし、物体の運動を詳細に見てみると、動いているものを静止させることは困難なようである。回転させる意図がないにもかかわらずくると回りはじめ、簡単に扱えるというにはほどとおいのだ。

加速度は力に比例する、ということをニュートンの法則は教える。質量を m 、加速度を a 、力を F とすれば $ma = F$ が成り立つ。しかし、地上では他の物体と接触していることが多く、この法則を実感できないことがほとんどである。たとえば、速さに比例し

た抵抗力が働く場合がそうである。力 F で加速するものの、速さ v に比例した抗力 cv が働くとすれば、最終的には速さ $c^{-1}F$ に収束する。つまり、力は速度に比例するのである。この近似が成り立つ物体の例が雨粒であり、力に加速度が比例していないものの代表である。

宇宙ステーションの部品のように、巨大なものが宇宙空間で自由に動き始めたら、どうなるだろうか。人の手できちんと静止させることができるのだろうか。回転してしまったらと考えると、かなり難しい制御になることが想像できる。

力は質量と加速度の積に比例する。つまり、質量の大きいものほど大きな力を加えなければ加速度が生じない。同じ速さで動いているのならば、質量が大きいものほど大きな運動量をもち、より大きな力を加え続けなければ静止させることができないのである。宇宙ステーションの部品のように巨大なものを考えれば、その大きな質量から動かすために大きな力が必要であり、静止させるためにもまた大きな力が必要となることがわかるであろう。もし、巨大な部品を瞬時に静止させようとすれば、ロボットアームが耐えられず、壊れてしまうに違いない。

(4) 基礎物理学分野での微小重力環境利用の視点

上の例でもわかるとおり、地上ではニュートンの法則の成立が実感できない場合が多い。また、逆に、法則どおりの現象が見られる宇宙での運動が、意外なものとして感じられることもある。地上でのふるまいが異なるために、本来成り立つべき法則を見失っていることはないだろうか。摩擦のない、単純な系によってはじめて見出される自然原理はないのだろうか。

基礎物理学分野での微小重力利用の本質的な意義は、新たな実験環境を利用することによって、自然現象の理解に新たな視点を加えることにある。重力によって破られた空間の対称性を回復した世界、他の物体との接触が断たれた孤立した空間、そして、密度や温度のゆらぎが保たれる環境で、新たな物理を論じることはできないだろうか。

これまでの基礎物理学分野での宇宙実験は、欧米(NASA 及び ESA など)を中心としてここ数十年の間に行われてきている。基礎物理学分野の宇宙実験成果の概要については、平成 13 年 10 月に制定された微小重力物理学分野研究シナリオを参照していただきたい。http://jem.tksc.nasda.go.jp/utiliz/jp_senario_pys.html にも掲載されている。

(5) 今後期待される実験課題

基礎物理学分野での宇宙実験は、二次相転移点付近でのふるまいを調べる臨界現象研究を中心として行われてきており、今後も重要な研究テーマとなり続けることと思われる。特に、臨界現象の動的ふるまいがこれから注目されていくことであろう。

NASA では、国際宇宙ステーションの初期利用段階における基礎物理学分野での実験テーマとして、液体ヘリウムを使った「微小重力環境での臨界ダイナミクスの実験 (DYNAMX)」が計画されている。日本でも、物理学研究の特徴と関心をふまえ、独自性を発揮できるテーマ立案へ向けたとりくみが進められている。

ボース・アインシュタイン凝縮実験や原子時計などのレーザー冷却・原子物理学の分野でも、NASA を中心とした検討が行われている。凝縮体を長時間保持することができる微小重力環境で中性原子のボース・アインシュタイン凝縮を実現し、量子力学の基本的な性質を検証する実験は有力なテーマ候補である。また、国際宇宙ステーション上に原子時計をおき、高精度の標準時計とする構想も検討されている。

日本における基礎物理学分野での微小重力環境利用は、宇宙実験へ向けてそのとりくみが始められたばかりである。若い人々が宇宙実験への関心を持ち、この分野の研究が大きく進展することを期待したい。

1. 3. 3 宇宙環境を利用したライフサイエンス実験の目的・方法・実験の難しさ

(1) 宇宙ライフサイエンスとは

宇宙がビックバンにより始まって、はや？150億年が過ぎ、太陽系ができてようやく46億年、その第三惑星地球に生命が誕生し進化を続けて40億年。未だ進化の途上にあるとはいえ、そのトップランナー？である私たち人類は、今、知的好奇心と思索の中で生命を科学という道具で解き明かそうとしています。脳が脳をどこまで解明できるのだろうかというパラドックス的問いに明確な解答を出し得ないまま、生命が生命をどこまで解明できるかに挑戦しているのです。

生命とは何か？生命の多様性とは？普遍性とは？これら大きな課題へのチャレンジは既に始まって久しいのですが、多くの知見が得られたと同時にまた多くの謎が新たに生まれ、未だ明確な答えを出すには至ってはいません。宇宙ライフサイエンスは重力をパラメーターとする新しい視点からこの課題に挑戦しようというものです。そして宇宙での生物実験の目的の一つがそこにあるのです。もちろん、生物が重力を感知する分子メカニズムやそれに対応する分子メカニズムを明らかにすることも重要な基礎生物学の研究課題ですし、宇宙飛行士が宇宙で起こす宇宙酔いや骨量の減少、筋肉の萎縮などもそれ自体が地上の医学に貢献できる重要な研究対象であることには間違いありません。が、やはりここでは、生命の本質に関わる新しい概念の創造を目指すことを宇宙ライフサイエンス研究の目的の第一として位置付けたいと思います。今まで地球上の生命の存在と進化に影響を与えてきた重力という環境から逃れるすべもなく、それ故に重力なしには地球上の生命とその進化を語ることができなかった私たち人類が、今、地球上で創り出せない唯一の環境であった長期間微小重力とい

う環境の場と重力をパラメーターとして生命現象を解析することのできる技術と方法をまさに手にしつつあるのですから。

(2) 微小重力環境でのライフサイエンス実験の難しさ

宇宙で実験をやろうとすると、まず頭に入れておかないといけない、地上と全く違う条件があります。それが微小重力です。地上では、うっかりグラスを床に落とせば割れてしまうという常識が通用しないのです。まず落ちるという感覚や地上で逆立ちしたときのあの上下感覚が無いのです。地上では液体中に発生した気泡は、ある大きさになると上方に浮かび上がってしまいますが、微小重力下ではそうした現象は起きません。ライフサイエンス実験では液体を使うことが多いのですが、この気泡の発生が宇宙実験では問題になることがあります。地上では殆ど問題にはなりませんが実験内容を十分に把握した上で実験装置や器具等の製作に反映されなければなりません。また、宇宙でお湯を沸かすかどうかはともかく、液体を加熱しても熱対流が起きませんので攪拌をしてやらなければなかなか沸きません。二種類以上の液体を混ぜたいときも同様です。攪拌するのは良いとしてその前にどうやって溶液を計量し、どういった容器に入れれば良いのでしょうか。地上では簡単にメスシリンダーやメスフラスコ、ピペット等を使って計量し、ビーカーに入れ攪拌して混ぜますが、すでにその時点で私たちは重力の恩恵を被っているのです。もし重力が無ければメスシリンダーやピペットに気泡が入ってしまうと正確に計量できないでしょうし、微小重力下では濡れ性により液体は、実は、容器にじっと入っておらず容器の壁面に広がろうとするでしょうし、表面張力により丸くなってメスシリンダーやビーカーの外に出てしまうでしょう。一方、重さの異なる液体や物を一度混ぜてしまうと二度と分離しなくなってしまう。地上で水と油を混ぜようと激しく攪拌すると懸濁液になりますが、時間がたつと油は水の上に浮いてきて水相と油相に分離します。けれども、微小重力下では懸濁液のままです。とにかく重力が在ることを前提にした地上の実験装置、器具類、操作使用方法は、微小重力下での実験にそのまま使えると言うわけにはいかないのです。実験器具や装置類の開発には工夫が必要になってきます。それが実験の制約や難しさにもつながっているのです。

(3) 動物を用いた実験の難しさ

動物の微小重力下における行動観察は地上における重力の影響を貝間見せてくれます。カエルは反り返ったり、また空中に飛び出したカエルは頭とお尻を結んだ体軸を中心にくるくると後ろ足を伸ばして交差させながら回転したりします。魚は種類によって後ろにあるいは前にくるくる回転し、鳥はばたばたと羽ばたきながらやはり後ろ回りをしました。トカゲやヤモリは何かにつかまろうともがきます。実際、しっかりつかまるとじっとして動きません。動物が微小重力に急性的に曝された結果は、それぞ

れの地上での生活様式や行動に依存した結果の反映と思われますが、この様な行動を起こす動物たちをどのようにして飼育すれば良いのでしょうか。給餌方法や糞尿、ゴミの処理など大変です。ラットなどは授乳も難しいでしょうから。もし動物たちが微小重力に適応できなければ悲惨です。餌も食べられず、水も飲めずに死んでしまうでしょう。単に行動観察をして、こうなりました、ああなりました。その結果、多分こう推察されますではなく、行動のメカニズムを感覚や骨、筋肉、臓器などの神経系、力学系を通した生理的情報として分析し解析して初めて地上の生物行動と重力の関係や生物の適応、多様性について明らかにしていくことができるのですが、これでは実験どころではありません。特に、宇宙ステーションでは、微小重力下での生殖行動、受精、そして2世誕生、さらに3世誕生と多世代に渡って慢性的に微小重力にさらされた生物の生理作用、代謝および生物相による相違などを解析することができるようになりますから、微小重力に適応するのかどうかは、大変重要なのです。適応できなければ、あるいは適応できたとしても生殖行動ができなければこれまた意味がありません。微小重力に反応しないメダカが見事に2世を宇宙で誕生させた様に、宇宙実験に適したモデル生物を探したり、創ったりしなければなりません。そういった意味では、既に経験のあるメダカやゼブラフィッシュなどの小型魚類を用いる実験が得策かもしれません。科学要求を十分満たす水棲生物用の実験装置の開発が待たれます。

(4) 宇宙では誰が実験をするのか

新しい研究テーマの実験をスタートするまでにかかる時間は、地上ではほんの数日或いは数ヶ月と言ったところでしょうか。それもこれも研究費に依存する場合がほとんどですが。じゃあ宇宙で実施するにはどのくらいの期間が必要なのでしょう。実験計画の開始から装置の開発と飛行機会の確保を考えると現在でも3～5年は覚悟しなければならいでしょう。さらに、地上のサイエンスの発展はめざましく、その間に宇宙実験の必要性が無くなってしまう場合も考えなくてはなりません。装置の開発を加えた広い意味での実験の搭載性にも考えなくてはならない課題があります。実験装置や器具等の消費電力や排熱、重量、容積などの制約です。ライフサイエンス実験では冷凍冷蔵庫は必需品ですし、細胞実験では細胞培養器に実験期間を通して継続的な電力供給が必要になるからです。でも実験を実施する上で一番重要な問題は、実は、誰が微小重力下で実験をするのかということです。実験の複雑さや内容にもよりますが、やはり人間の観察と判断に基づいた柔軟な実験操作が本来的には生物の実験には必要です。宇宙実験の提案者が直接宇宙で実験するのが一番ですが、それにはまだまだ時間が掛かりそうです。そこで宇宙飛行士にやってもらうことになる訳ですが、その為には訓練と時間が必要になってきます。つまり地上での訓練、練習や宇宙での実験操作にどれくらい宇宙飛行士の作業時間を割り当てられるのかということは実験実施上実に大きなファクターになるのです。結局、時間的にも技術的に

も実施に困難さが伴う場合は自動化した実験装置を用いた自動実験が必要になってきますが、開発が難しく時間が掛かり、装置が複雑化することになりますし、その反面、実験の効率や科学的要求の縮小にも当然つながってしまいます。

(5) 今後の宇宙ライフサイエンス実験

国際宇宙ステーションの建設が始まり、既に3人の宇宙飛行士が常駐し作業をおこなっています。今はまだ建設途中とはいえっても微小重力下での長時間実験やライフサイクルに関する実験が可能になりつつあります。いままで述べてきたことは宇宙ライフサイエンス実験の難しさのほんの一部にしかすぎません。さらに、研究者が計画する実験は多種多様ですので、共通実験装置や機器だけで宇宙実験に対応していくのはこれからもなかなか難しいと思われます。地上での先端の技術、ナノテクノロジー等を応用した実験系やミニチュア化された装置、器具類が要求されてくるでしょう。時代の要求に合わせながらいろいろな難しさは克服していかなければなりません、一番重要なことは、ただ宇宙に持っていけばなんとかなる的な、宇宙に持っていくこと自体が目的のような実験の時代は完全に終わったと認識することでしょう。ちょっと言い過ぎかもしれませんが、個人の興味や趣味的実験ではなく、科学にのっとった、地上実験の日々の積み重ねに裏付けられた、標的を絞った、綿密な実験計画の基に実施されることが、今後もますます求められるでしょう。

2. 宇宙に住む

2.1 はじめに

私たちが生活をしている地球は広い宇宙の中の一つの星です。それではその宇宙は、約138億年前にビッグバンによって誕生したと言われています。その後、太陽系は約45億年前、地球は約43億年前に誕生しました。やがて地球には植物が誕生し、動物へと進化していきました。動物は水中で活動をしていましたが、その後陸地へと生活範囲を広げていきました。動物の中で優れた能力を身につけた人類が誕生したのは約600万年といわれています。人類は火と道具を使うことにより、大きく進歩したのです。さらに、人間は文字や数式を発明し、短期間に飛躍的な発展をとげました。15世紀末にコペルニクスは地動説を発表して現代の宇宙観の基礎となる考えを示しました。

長年の夢である人間が空を飛ぶことが、1901年にライト兄弟によって実現したのです。1961年にはソ連において世界初の宇宙飛行士(ガガーリン)が誕生しました。また、1969年には米国がアポロ宇宙船によって、初めて人類を月面へ送り込んだのです。今では、スペースシャトルやソユーズ宇宙船によって、人間が地上と宇宙を往復したり、国際宇宙ステーションにおいて宇宙飛行士が常時生活をしています。2003年1月に発表された米国の宇宙政策大綱によると、米国は2020年代には月面に基地を建設し、その後火星へ人類を送り込むための計画を進めることを表明しています。

人類の長い歴史と近年の科学技術の目覚ましい発達を考えると、人間はいくつかの困難を克服して近い将来に月から火星へと進出していき、やがてはいくつかの星を生活の場として利用するようになると考えられます。

まず、向井宇宙飛行士に宇宙生活の体験を話してもらい、その後に月面で生活する基地の建設構想について説明をします。さらに人間が火星に永住するためには、火星を地球に近い環境(大気、気候、温度など)に変えなければならないのです(テラフォーミング)。どのようにしてテラフォーミングを行うかについても解説をします。

2. 2 スペースシャトル、ISS における生活 -向井飛行士との対談-

対談者 向井 千秋(宇宙飛行士)
松本 信二(CSP ジャパン社長)

2. 2. 1 無重力の生活

松本： 向井さんは、これまでに 2 回宇宙へ行かれたのですね。

向井： そうです。はじめの飛行は 14 日間で、2 回目は 9 日間でした。

松本： そのくらいの期間ですと、あっという間に過ぎてしまうという感じですか。

向井： 仕事が忙しくて、あっという間に過ぎてしまいましたね。最後の日になっても、仕事の積み残しがあり、もう 1 日あればよかったのにと思いました。

松本： ところで、宇宙における無重力の生活というのは、すぐに慣れるものなのですか。向井さんの場合には、十分にトレーニングしてから宇宙へ行かれたわけですが、本当の無重力状態で長時間生活するというのはやはり初めてはなわけですよね。なかなか思うようにいかないということもあるのではないですか。

向井： いわゆる「宇宙酔い」とか上下の感覚が無くなる空間識失調(スぺーシャル・ディスオリエンテーション)というのがあり、宇宙へ行って2~3 日は気持ちが悪くなってしまう。ひどいときは、吐き気がしたり食欲がなくなったりします。現在は「宇宙酔い」という言葉をあまり使わなくなり、宇宙環境適用症候群(スペース・アダプテーション・シンドローム)といいますが、強がりと言っている人でも何らかの形であるようです。海外に行ったときのジェットラグ(時差ボケ)と同じようなものです。

松本： ジェットラグと同じように考えればいいのですね。1 回目の飛行と 2 回目の飛行を比べると大分違いますか。

向井： 初めての飛行と 2 回目の飛行を比べてみると、体の動きが大分違います。初めての飛行のときは、体の動かし方がへたくそなんですね。スキューバダイビングなんかをやっても、初めてのときは、すぐそこにいる魚をさわろうと思っても、体のバランスの関係でなかなか思うようにいきません。いらないところに力が入ってしまいます。宇宙でも同じことで、壁を軽く押して移動するのですが、強く押しすぎたりして、なかなかうまくいきません。2 回目の飛行になると、頭の中にイメージーションができていますので、かなり楽です。

松本：私も初めてスキーをやったときは、無理な力を使うために、足腰がどうにもならないほど痛くなり困ったことがあります。2回目からはずいぶん楽になりました。

向井：私、はじめに宇宙へ行ったとき、1日目にもものすごく肩が凝って疲れたんですね。首筋や肩が凝って、目が疲れて、どうしてこんなに疲れるのだろうかと思っていたら、はっと気が付きました。物を書くときやパネルを見るとき姿勢に問題があったようなのです。地上で物を書いたり何かを見たりするとき、自然にできるだけ楽な姿勢でやっているわけですが、その場合、頭の重さが負担にならないように、背筋をのばして、視線を体の軸と直角にします。

ところが、無重力の状態では、一番楽な姿勢(ニュートラルポスチャー)というのは、水に潜ったときのように、背筋が若干屈折した状態になります。地上で楽な姿勢を宇宙で行うと、無理な力が入ってしまうということになります。2日目になると、宇宙での楽な姿勢が身に着いてきて、肩が凝らなくなりました。

松本：そうすると、コンピュータのデザインも地上のものとは異なったものになりそうですね。

向井：コンピュータには2種類あり、家具のような形にビルトインされているものとラップトップタイプのものがあります。ビルトインされているものの場合には、体の位置を変えて、一番楽な姿勢になるようにします。ラップトップの場合には、コンピュータの位置を好きなところに持っていきます。普通ですと、ワークベンチに置いて作業をしますが、壁にくっつけて操作したりします。

松本：自分の姿勢を変えたり装置の位置を変えたりすればいいということですね。

向井：ビルトインされた装置の場合には、やはり、どの位置に設置されているかということが重要です。床のすぐ近くに細かい操作を行うようなものがあると長時間の作業が難しいということになるので、位置を変えてもらったりすることもあります。

2. 2. 2 食べたり飲んだり

松本：宇宙で食べたり飲んだりするのは楽しいと思いますが、食欲というのはあまり変わらないものですか。

向井：はじめの3日間くらいは、宇宙酔い等のために、一般的に食欲がないんですが、その後はだんだんできてきます。ただ、面白いことに、地球上だと、おなかがいっぱいになったという感じは、下腹が張ってくるのですが、宇宙では、胃袋の中の食べた物の重さがないので、みぞおちのあたりが張ってくるようになります。だから、地上で食べるよりも少量でおなかがいっぱいになった気がします。

松本： そうすると、食べ過ぎるということがあまりなくて、ヘルシーですね。

向井： しかし、すぐにおなかがすいてしまうということになります。

松本： 飲み物の場合も同じですか。

向井： 飲み物も、少し飲んだだけでたくさん飲んだような気になります。ただし、飲み物の場合、きたない話ですが、ゲップに注意しなければなりません。げっぷというのは、飲み物を飲んだときに一緒に飲み込んだ空気が出てくるわけですが、地上の場合には、空気の方が液体よりも軽いので、空気だけが出てきますが、宇宙では、液体も一緒に出てくるので、気をつけなければなりません。赤ちゃんにミルクを飲ませる場合にも赤ちゃんを横にしたままですと、ゲップをしたときに、ミルクを吐き出してしまいます。そこで、赤ちゃんを縦にして、ゲップをさせますでしょう。

松本： じゃあ、ゲップの仕方が難しいですね。

向井： 難しいですよ。ゲップをするときは、もしかしたら液体も出てくるので、気を付けようということです。

松本： 宇宙では、いろいろと面白いことがありますね。ものを食べたり飲んだりするときの呑み込むということに関しては、別に重力の問題はないですね。

向井： 蠕動(ぜんどう)運動でぐにやぐにやと入っていきます。

松本： 地上でも、横になっても呑み込むことができるわけですからね。ところで、向井さんは宇宙で日本食を食べられたそうですが。

向井： 広報イベントのひとつで、「家庭料理を宇宙で」というイベントがありました。そのなかで日本料理もありました。たとえば、菜の花のピリ辛和えというのがあったのですが、小さい頃に遊んだ菜の花畑などの景色を思い浮かべておいしくいただくことができました。私たちの仕事場であるスペースラブは機械ばかり並んでいて本当に殺伐としています。機械の騒音も大きく60ホンくらいあります。そういう環境でも、このような料理を食べると心がなごみます。

2. 2. 3 宇宙での睡眠

松本： 次は、寝る話をお聞きしたいと思います。向井さんは、宇宙では何時間くらい寝るのですか。

向井： 一応、8 時間くらい寝るための時間は取ってあるのですが、仕事が遅れてくると少し短くなってしまいます。次の日の仕事をうまく進めるために、予習といいますか

翌日の準備をしておこうということで、平均睡眠時間は6時間くらいでしょうか。

松本： まあまあ普通の人と同じくらいですね。ところで、宇宙では夢なんかをみることもありますか。

向井： それが、私の場合、地上でもほとんど夢は見ません。横になるとすぐに寝てしまうタイプなのです。私の飛行は2回ともスペースラブという実験装置内で宇宙実験を行うという飛行であり、人工衛星を打ち上げるような飛行に比べると仕事のスケジュールが非常にきつかったのです。1日の仕事が終わるとぐったりくたびれて、寝られるところならどこでも寝てしまうという感じでした。一般的にいうと、宇宙では、あまり体を動かさないで、寝つきがよくないということもあるようです。

宇宙放射線が視神経に当たると、目をつぶっていても、目の中で光がチカッとひかります。私も、最初の飛行のときに2～3回、そのような光を感じました。

松本： それは寝ているときに感じるのですか。

向井： 寝入ってしまえば意識がなくなるので見えないのですが、目をつぶっていても光が見えるということです。最初の日には見えたのですが、2日目以降は、目をつぶるとすぐに寝てしまったようで、全然見えませんでした。

松本： 普通、横になると寝るという気持ちになりますが、宇宙だと、必ずしも横になるわけではなく、縦になったりして寝ていますね。

向井： 基本的には、水の上に浮かんでいる感じです。寝袋のなかに潜り込んで、寝ています。

松本： 寝ているとき、気持ちいいですか。

向井： 私は、ふかふかしていて気持ちがいいですが、そういうのがだめだという人もいます。地球上でも、重い布団をかけないと寝られないという人もいますからね。体をある程度圧迫するといいということもあり、赤ちゃんなんかでも抱きかかえてあげると安心感があるようです。そういうことで、寝袋のところに紐つけておいて、その紐を使って圧迫させるということもあります。枕も使います。地上では、枕は頭を乗せるものですが、頭にプレッシャーをかけるために枕を使います。私の場合には、地上でも朝になると枕がその辺に転がっているということが多いので、宇宙でも枕を使うということはありませんでした。

2. 2. 4 バードレッグス アンド ムーンフェース

松本：体調が悪いとき体が重くなると言い、実際そのような感じがします。無重力というのは、体が本当に軽くなっているわけですから、非常にいい気分になるような気がします。やはりそんなものですか。

向井：それほど単純ではありません。体の中は大部分水分であり、無重力になると、水分の分布が変わってきます。宇宙に行くと、下半身の水分が上半身の方に移動します。通常、気分がよくて体が軽いというのは、頭の中の脳みそが水浸しになっていないという感じだと思います。逆に、頭が重いというのは、頭が水っぽくてむくんでいるような感じだと思います。ということで、宇宙に行くと、頭水の分が増えるので、どうしても頭が重いという感じになります。

松本：頭は重くなるのですね。しかし、手足は軽くなるのでしょうか。

向井：宇宙医学の用語では、バードレッグス・アンド・ムーンフェースといいます。顔はむくんできますが、足はとりの足のようにすっきりします。おなかやヒップが垂れ下がるということがないので、スタイルがよくなったように見えます。地球上でもこのままのスタイルを維持できればいいのですが。とにかく、最初の2～3日は、頭が重くなり足は軽くなります。

松本：2～3日たてば、平常に戻りますか。

向井：宇宙に行くと、1リットルくらいの血液が下半身から上半身に移行します。しかし、上半身のセンサーが血液の多くなったことを感知して、2～3日たつと、体全体の水分は1リットルくらい少なくなりますが、心臓を中心にして地上と同じような循環をするようになります。無重力状態に体が適応するわけです。

2. 2. 5 仕事の効率

松本：向井さんには「宇宙を仕事場にする」という有名な言葉がありますが、仕事にもいろいろありますね。大きく分けると、肉体を使う仕事と頭を使う仕事があり、そのバランスが重要だと思いますが、宇宙でもやはりうまいバランスというのが必要なんだろうね。

向井：私が宇宙で行った仕事は宇宙実験であり、頭脳労働が中心です。しかし、人工衛星を捕まえて修理したり宇宙ステーションを建設したりする仕事は、まさに肉体労働です。そのときの飛行目的によって、仕事の性格が決まってしまう。

松本： 肉体労働であっても頭脳労働であっても、事前にトレーニングをやっていると思いますが、宇宙で作業効率が低下するということはないですか。思考能力も問題ないですか。

向井： 私の感じでは、特に問題はないと思います。宇宙での作業能率を調べる研究も行われており、反射能力、記憶力、計算能力等が調べられています。動いているものを確認しながら手で姿勢制御を行うというような作業では、初めの 3 日間くらいは能力が低下します。宇宙飛行士自身は自覚していない場合でも、データを見るとやはり落ちているということが多いといえます。そのようなことを考慮して、通常は、最初の 3 日間くらいは仕事量があまり多くならないように計画しています。船外活動も、宇宙に行ってすぐに行うということをせず、少しからだに慣れてから行うようにします。

松本： 私たちも作業研究というのを行いますが、作業の種類によって体への負担がどのようにかかるかということを調べる方法として、フリッカーテストというのがあります。光がある間隔で点滅するのを認識できるかどうかというテストです。このようなテストを宇宙で行うと、地上とは異なったデータになりそうですね。

向井： やはり悪いデータが出ると思います。地上でのデータに比べると 7 割くらいになるかもしれません。特に、宇宙酔いのような状態になっていると、もっと落ちるでしょう。

松本： しかし、最初にお話があったように、3 日間ぐらいたつと、ほぼ平常になるわけですね。ところで、宇宙での仕事はあらかじめ綿密に計画されていると思いますが、予定通りに仕事が進まないこともありますよね。また、あらかじめ決めたとおりにやらないほうがいいというようなこともあるのではないですか。そういう場合に、割と自由にスケジュールや作業の仕方を変えることができるのですか。

向井： 飛行前に、1 日目は何をやって 2 日間は何をやるというようにすべてのスケジュールが決まっています。しかし、1 日目は計画に従って作業を始めますが、2 日目以降はどんどん計画と変わってきます。積み残しの仕事ができたり、機材が壊れてしまったりということで、スケジュールを変更せざるを得なくなります。プライオリティー（優先順位）を決めてやっていくのですが、地上からの連絡でどうしてもこの作業を先にやってほしいというようなことを言ってきます。また、本来の予定に入っていない実験でも、時間があったらやりたいというものがあり、条件によっては、そのような実験を優先させることもあります。いずれにしても、地上のスタッフと相談しながら実施していきます。

松本： なるほど。計画は常に変更していくわけですね。

向井： 基本的には、リターン・トゥー・ザ・オリジナル・タイムライン（最初の計画に戻

る)というのが原則ですが、なかなか戻れないというのが実態です。

松本: それだけ密度の高い仕事を行うと、精神的なストレスも相当高くなりますね。ストレスの解消法というのは人によっていろいろあると思いますが、向井さんの場合は何かうまい方法がありますか。

向井: 地上での私のストレス解消法は、シャワーが一番です。私、外科医だったころから、大体、シャワーを浴びると、さっぱりと洗い流したという気がして、気分が爽快になります。宇宙ではシャワーを浴びることができませんが、2 週間くらいの飛行ですと、気合が入っているので、それほど疲れを感じることはありません。通常の出張なんかでも、必死で仕事をやっているのに疲れないということがありますね。それと同じことだと思います。私の飛行で、天候のために地球への帰還が1 日遅れてしまったことがあります。そのときは、実験室もすでに閉鎖されており、仕事に戻ることもできず、待ちの時間ができてしまいました。そのときには、どっと疲れがでてきました。天候待ちで地球を眺めながら、この2 週間、ずいぶん疲れていたのだなあ実感しました。

2. 2. 6 宇宙でのやすらぎと楽しみ

向井: ISS(国際宇宙ステーション)の場合には、3~6ヶ月宇宙に滞在することになるので、短期間の出張のように密度の高い仕事をやるわけにはいかないかも知れませんね。

松本: 長期間宇宙で生活するということになると、室内のデザインが重要になると思います。これまでの宇宙船では、室内を建築的にデザインするということはほとんどなかったと思いますが、長期滞在になると気分が和らぐようなデザインが求められると思います。

向井: 個室というのはやっぱりいいですね。通常のスペースシャトルの飛行では、寝るときも蚕棚のような3 段ベッドであり、個室はありません。たまたま私たちの飛行は24 時間実験室を稼働させなければならないので、2 シフトで仕事をしました。すなわち、何人かの人が仕事をやっているときに別の何人かが寝ているということになります。ということで、特別に個室が設けられました。狭くても、個室に入って、今日1 日の仕事も終わったなあという気持ちになり、音楽でも聴いて寝ようかということになります。何といっても一人になれる時間がいいですね。

松本: 個室があるというだけでも気分が和らぐわけですね。宇宙でも、音楽を聴くとリラックスできますか。

向井： ええ。自分の好きな音楽を持って行って聴きました。しかし、それほど自由な時間があるわけではないので、食事の時に音楽を聴いたり、音楽を聴きながら地球を眺めたりしました。音楽を聴きながら地球をぼかんと観ていると、本当に贅沢な気分になります。

松本： 私の場合はクラシック音楽が大変好きなのですが、向井さんはどんな音楽がお好きですか。

向井： 特別好きなジャンルがあるわけではないのですが、クラシックでしたらモーツァルトのような音楽がいいですね。聴いているとそのまま眠ってしまえるような音楽がいいと思います。うちの旦那のたつての願いで、演歌を持って行って宇宙でぜひ演歌を聴いてくれというもですから、演歌も聴いてみましたが、あまりいいとは思いませんでした。宇宙から眺めるあの壮大な景色には、ベートーベンの「皇帝」(ピアノ協奏曲第5番)のような音楽がすごく合っていたような気がします。何か気分が高揚するような感じがします。

松本： 私は、趣味でヴァイオリンを弾いたりするのですが、宇宙で楽器を弾くというのもおもしろいでしょうね。ヴァイオリンのような楽器を演奏する場合には重力が必要です。弓の重さを利用していますからね。

向井： そうすると、無重力の宇宙では、弓の重さ分の力を入れなければならなくなりますね。

松本： かなり演奏が難しくなるような気がします。楽器によっては、逆に、演奏が易しくなることもありそうですね。チェロなんかですと、弓の重さを支えるのに結構力が必要ですが、無重力になると弦の方だけに力を加えればいいということになります。

向井： 楽器を弾く姿勢も地上とは変わると思います。地上で楽器を演奏するときには、重力があるときに一番演奏しやすい姿勢になっているわけですが、無重力のときにそれと同じような姿勢で演奏するとうまく指が動かず、疲労も激しくなります。

松本： 宇宙では、いろいろと楽しいことがあると思いますが、多くの宇宙飛行士の方に聞くと、何とんでも地球を眺めるのが一番楽しいということのようですね。地球を眺める以外にも星もずいぶんきれいに見えるんでしょうね。先日話題になった流星群なんかも宇宙では格別なのでしょうね。

向井： とにかく、宇宙は星だらけという感じです。それに、大気がないので、星がまたたかないのです。

松本： 星がまたたかないということは、星が強い圧力を持って迫ってくるという感じがすね。

向井： こういうと、いつもうちの旦那に笑われますが、あっちにもこっちにも天の川があるという感じです。本当に星がたくさん見えます。もうひとつ私が感激したのは、サザンライト(南極のオーロラ)が見えたときです。私たちの飛行軌道は赤道に近い軌道(傾斜角が浅い)だったので、オーロラは見えないと思っていたのですが、南の方の地球に近い位置にサザンライトが見えて、本当に感激しました。しかも、そのサザンライトの左側にオリオン座が見え、右側に南十字星が見えたのです。地球上では、オリオン座と南十字星を同時に見ることはできませんからね。宇宙ならではの星座の楽しみ方だと思います。

松本： 宇宙には、見て楽しむものがいろいろとありますが、無重力の中で体を動かすというのが何ととっても面白そうですね。それと、無重力を利用したゲームも考えられるのではないのでしょうか。

向井： 重力がないと、何をやっても面白いですよ。私たちは、ゴミを丸めてガムテープなどを使ってボールを作り、ゴミを入れる袋を天井の近くにつけて、バスケットボールをやりました。床や壁を利用してドリブルもできますし、ジャンプシュートなんか簡単です。マイケル・ジョーダンがやっているようなことを、天井のところのバスケットでできるのですからね。

松本： 少し広いスペースがあれば、いろいろと面白いことができますね。

向井： 宇宙パン食い競争のようなものもできそうです。パンではなく、チョコレートみたいなものの方がいいかもしれませんが。浮かんでいるものをパクッと食べるのは、金魚のような気持ちになりますよ。それから、3次元ビリヤードなども面白そうです。たとえば、ボールを打って、壁に2回当ててから穴に入れるというようなルールを作ってゲームをすることができます。

松本： 現在の宇宙飛行士は、選ばれた非常に限られた人たちですが、本格的な宇宙旅行の時代になり、一般の人たちがもっと宇宙へ行くようになると、もっともっと面白い遊びのアイデアが出てきそうですね。先ほど宇宙で楽器を演奏するという話をしましたが、宇宙だから演奏ができるという新しい形の楽器を開発することになるかもしれませんね。宇宙でしか聴くことのできない音色というのも出現するかもしれません。そうすると、新しい音のイメージが現れて音楽の新しいジャンルができるかもしれませんね。

2. 2. 7 室内のデザイン

松本：最後に、室内デザインの話に戻りたいのですが、まず、部屋の広さについてお聞きします。宇宙における室内空間というのは構造的に考えても、狭い空間になってしまうかもしれませんが、先ほど話のあった宇宙スポーツなどをやろうということになると、少し広い空間の方がよさそうですね。精神的にゆったりしたデザインを行うためにもある程度広い方がいいと思います。室内の広さということで、どのようなことを感じておられますか。

向井：無重力空間では6面の壁を全部活用できるので、地上の空間よりも広く感じます。しかし、広ければ宇宙スポーツのような遊びもできるので、広い方がいいなと思います。私は、もともと広い部屋が好きなものですから。

松本：スペースラブの実験室の場合、照明も結構明るいのですか。

向井：明るさについては、問題ありません。植物の成長を実験するような場合には、明るさが重要なので、何ルックスほしいという要求を出しておきます。植物によっては、暗くしておかなければならないものもあります。

スペースシャトルの場合、電力として燃料電池を使っています。したがって、1回の飛行で使うことのできる総電力量が決まっています。ですから、できるだけ電力を使わないようにします。使っていない部分は暗くしたりして節約するわけです。そうやって節約すると、9日間の飛行でも、10日間とか11日間に延長することができます。ということで、室内は思っているよりも暗いといえます。

松本：電力の節約という意味で暗くするのはわかりますが、通常の室内照明でも、日本の家屋の室内よりも欧米における家屋の室内の方が暗いですね。欧米の人の目は、明るい光に対する抵抗力が小さいということもあると思いますが。

向井：欧米では、間接照明が多いですね。

松本：そのようなことを考えると、いろいろな国の人が一緒に生活している場合には、室内のデザインも難しいということになりますね。

向井：でも、スペースシャトルの場合、基本的に仕事の間ですから、問題はないと思います。居間とかリラックスして読書するような部屋はやはり間接照明がいいと思います。レストランのような食事の場は、キャンドルライトのような温かみのある照明がいいですね。

松本：現在建設中の国際宇宙ステーション(ISS)では、長期の宇宙滞在になるので、少しはそのようなリビング的な要素も必要になりますね。

向井： そうなってくればいいのですが。しかし、アメリカでは、経費を節約するために、居住モジュールを削減しようとしています。プライバシーを保つことのできる個室ができればいいほうかもしれません。まだまだ、インテリアを楽しんだり、宇宙での生活そのものを楽しんだりする時代にはなっていないのかもしれませんが。

松本： 私たちは宇宙ホテルなどを提案していますが、ホテルの部屋になると、リラックスできるようにするためには、結構デザインや照明が重要になると思います。

向井： 魚やその他の動物でも、照明や配色を考えておかなければなりません。鯉や金魚を持って行って実験をしましたが、魚のような動物も、通常、光は上からくるので、光がくる方向を上だと認識しているようです。重力ということからは上下はないのですが、光や配色で上下を明確にしておくとう動物が安定するようです。ネズミの飼育箱も同様の配慮をして一方向からライティングを行います。

部屋の配色でも、普通、床を濃い色にして、上に行くほど薄い色にすると落ち着きます。認識科学の上でも、そのようなことがわかっているのではないのでしょうか。

松本： 人間の指針的な安定もそういうところから得られるのでしょうか。ところで、ここにあるテーブルのようなものは宇宙では、物を置く必要がないので、あまりいらないということになりますね。

向井： 宇宙でもテーブルは必要です。実験装置には、手をつかむためのハンドレールというのがあります。そのハンドレールにカチッとはめることのできるテーブルを用いました。

松本： その上で物を書いたりするのですか。

向井： その上で、物を書いたり、顕微鏡やコンピュータを置いたりします。テーブルの角度はいくらでも変えることができるので、一番使いやすい角度にすればいいわけです。テーブルをひっくり返すと裏側にフットループ(足を固定する紐)が着いており、そこに足を引っ掛けて両手が必要な作業をすることもできます。

松本： 宇宙空間における家具は、機能の上では、地上の家具と全然違った形でもいいということもありますが、できれば、地上の家具に似ている方がいいということも言えますか。違和感がなくて気分が休まるということも言えそうですが。

向井： そうですね。地上で訓練を行う場合には、地上の家具しか使えないわけですから、地上で使えてそのまま宇宙で使えるというのが理想的です。

松本： まだまだお聞きしたいことがいろいろありますが、今日はこの辺でおわりにしたいと思います。どうもありがとうございました。

向井： ありがとうございました。

2. 3 宇宙ホテル、月面基地の建設

2. 3. 1 アポロ計画と月開発の現状

1961年5月25日、アメリカ大統領 J.F.ケネディーが、「1960年代のうちにアメリカ人を月へ送り込み、無事に地球へつれもどす」と宣言した。その宣言にもとづき、ジェミニ計画が始められ、アポロ計画に引き継がれていく。当時、アメリカとソ連は激烈な宇宙開発競争を展開しており、ソ連が大きくリードしていた。そのソ連のリードを一挙に覆すのがジェミニ計画・アポロ計画の最大の目的であった。

アポロ計画は、いくつかの失敗もあったが着々と進められ、1969年7月21日、アポロ11号により、人類初の月着陸に成功する。その後、アポロ17号まで合計7回の月着陸が実施され、合計384kgの岩石および土壌を地球に持ち帰った。

アメリカがジェミニ計画・アポロ計画で月を目指していた頃、ソ連も「ルナ」や「ゾンド」という探査機を用いて、積極的に月面探査を進めていた。月に探査機を軟着陸させたのはソ連の方が早く、1966年のことである。しかし、ソ連の月探査では、人間を月に送ることはできなかった。

いずれにしても、これらの月探査により、月面の環境や表土の成分が分析され、月の内部構造についても、多くの関連データを入手することができた。また、月には大気がなく水もないので、生物は存在しないということも確認することができた。

アポロ計画の成功により、米ソの月探査競争は終結し、その後、規模の大きな月探査計画は実施されていない。ふたたび、月への関心が高まるのは、1980年代後半になってからである。1989年7月のアポロ計画20周年記念式典のとき、ブッシュ大統領が、「2019年に火星に人間を送る。その前に、恒久的な月面基地を建設する。」という構想を発表した。

大統領によるこの宣言により、ふたたび、月に対する研究が活発になった。今回の研究は、信頼性の高い月面基地をどのように安価に建設するかということであり、純粋な科学研究ではなく工学的な研究であった。すわち、エネルギー・システムや建築構法等の検討が多面的に行われた。

しかし、1992年にクリントン政権が発足するとこの構想も取りやめとなり、アメリカにおける月面基地研究は急速に下火となってしまった。アメリカは、月面基地を作らずに直接火星に人間を送り込む計画に変更したのである。

一方、日本では、1996年に制定された宇宙開発政策大綱により、月面探査の推進が正式な日本の宇宙政策の一つとして位置づけられた。この大綱によると、2015年までは無人探査を行い、その後、国際協力により有人月面探査の可能性を検討することになっている。

2. 3. 2 月の環境と資源

月に居住施設を建設し、月探査を実施するためには、月の環境がどのようなものであり、月にどのような資源があるのか、十分に把握しておく必要がある。これまでの調査で分かっている範囲で、月の環境および資源について考察してみたい。

(1) 地盤

1) 地形

月面の地形は、海、高地(陸)、山脈に分類することができる。月面に居住施設を造る場合には、平坦な海の部分が適している。海の部分は月面の約 55%を占めており、地球に向いた側に海が多い。

2) 地層

月の地層は、表層、地殻、マントル、核で構成されている。表層はレゴリスという細砂で覆われており、その厚さは数m~数十mである。ごく表面を除くとよく締まっており、掘削作業は必ずしも容易ではない。

3) 地質

岩石の部分は、玄武岩、オリビン、輝石、斜長石、イルメナイト等が多い。地球上の同種の岩石と同様の強度をもっている。

4) 月震

月震は年に 300 回程度あり、14 日の周期がある。放出されるエネルギーは小さく、最大のものでマグニチュード 4 程度である。通常は2~3 程度であり、構造設計上は無視できる。

(2) 重力

月における重力は、地上の 1/6 である。構造物の自重や積載荷重は 1/6 となるので、鉛直荷重に対応する構造は断面を小さくすることができ、軽量化することができる。クレーンのような揚重機も地上で使用するときより重いものを持ち上げることができる。しかし、地盤を掘削したり土を押すような建設機械の場合には、機械の重さが重要な役割を果たしており、月では、必ずしも効率的ではない。

(3) 真空

月面には大気がなく、超真空($10^{-9} \sim 10^{-12}$ Torr)の状態である。人が住む部分は1気圧にすべきであり、室内側から外周構造物に内圧が加わることになる。また、真空状態なので、液体はすぐに蒸発してしまう。水分がまったくないので、金属類の錆の問題はほとんど心配する必要がない。

(4) 温度

昼が 14 日、夜が 14 日というサイクルであるが、大気がないので、昼夜の温度差が非常に大きい(−190℃〜+137℃)。しかし、地下 1m 以下では温度が安定(30℃)しており、地下に構造物を建設するか、構造物の上に土をかぶせることができれば、温度の問題は解決する。

(5)放射線

宇宙線、太陽風等の放射線が多量にあるので、それらを遮蔽するような構造にしなければならない。土を約 2m の厚さにかぶせると大部分の放射線を防御することができるが、太陽活動が活発化すると放射線量が非常に増加するので、そのような場合には避難できるように計画しておかなければならない。

(6) 隕石

月面には大気がないので、大小様々な隕石が燃え尽きることなく落下する。飛来速度は 20〜40m/s であり、非常に危険である。レゴリスを 2m 程度被覆させると小さな隕石は防御できるが、大きな隕石が落下すると構造物を破壊してしまうことになる。大きな隕石の落下頻度は小さく落下予測も可能なので、必要に応じて避難するようにしなければならない。構造物の計画も、部分的に破壊しても全体システムに影響しないような建築計画が重要である。

2. 3. 3 月に人が住む目的

月を探査する目的としては以下のようなことが考えられている。

(1) 月の科学(月の構造、地質、環境等)

アポロ計画とその後の各種の探査により、月に関する多くの事実が明らかになってきたが、月の起源と進化に関する基本的な疑問は依然として解明されていない。すなわち、月がどのようにしてできたかという問題であるが、この問題が月・惑星科学者の最大の関心事である。

その問題を解明するためには、月の内部構造を把握することが必要であり、そのためには、月の表面の地質や環境をより詳細に探査する必要がある。

(2) 月面天文台の建設

月は深宇宙の天文観測に最適の場所である。月には大気がないので、非常に精度の高い光学的な観測が可能である。特に月の裏側、すなわち、地球に面していない側は地球からの光が届かないので、観測条件が理想的である。

(3) 月の資源の利用

月には各種の鉱物資源があるが、大部分のものは地球上にもあるものなので、地球で活用するという観点ではそれほど価値があるわけではない。しかし、宇宙活動のために活用できるとすれば、おおいに価値がある。

その典型的な月資源の一つとして酸素がある。月の砂や岩石は大部分が酸化物であり、比較的簡単なプロセスで酸素を抽出することができる。酸素はロケットの燃料としても使うことができ、有人宇宙活動にも欠くことのできない有用な資源である。すべてを地球から供給するというのではなく月で生産して供給できるとすれば、宇宙活動のコスト削減に大きく貢献することができる。

地球にはほとんどないが月には豊富にある有用資源の例としてはヘリウム 3 がある。このヘリウム 3 を地球に持ち帰り、核融合の燃料に使おうという構想も研究されている。核融合の技術そのものがまだ確立していないが、もし、このヘリウム 3 核融合が実現すると、現在の原子力発電に比べて非常にクリーンな電力を入手することができるようになる。

(4) 有人宇宙活動を拡張するためのテストベッド

人類がその活動領域を拡張していくのは人間の基本的な欲求であり、どこまで拡張しても限界はない。月の次に目標としているのは火星であり、火星に人を送るとするのが大きな目標になっている。

しかし、火星にいくためには、片道でも数ヶ月かかり、いろいろな危険性がある。そのような危険性を克服するためには、月に長期間生活し、多くの経験が必要である。すなわち、月での長期滞在そのものが一つの実験となり、長期宇宙滞在の問題を明確にすることができるのである。月の場合、突発的な問題が発生しても数日で地球に帰る事ができ、人的なリスクがそれほど大きくない。

これら 4 つの目的のうち、(1)と(2)は、無人でも可能であり、必ずしも人間が月に行く必要はない。しかし、もし人間が実際に月に行って観測することができれば、現在考えられていない新しい発見の可能性がある。(3)も、ある程度までは無人で行うこともできるが、大きな成果をあげるためには、どうしても有人活動が必要となりそうである。

(4)の目的に対しては、長期間の有人活動が前提となり、どうしても月面基地が必要である。実際に月に人が住むことによって新しい問題が発見でき、新しい解決方法を発想することができる。しかし、月に長期間居住することだけを目的にする必要はなく、(1)～(3)の活動を同時に行うということになる。

2. 3. 4 月面基地の建設シナリオ

1990年代前半に、アメリカでは月探査について真剣に検討されたが、科学観測のみの目的では、大規模な資金を投入するための合意が得られそうもないということから、(3)と(4)の目的を中心にするという考え方が一般的であった。すなわち、資源利用を中心に考えながら、将来の宇宙活動に備えるという考え方である。そのようなシナリオの一例を表2. 3-1に示す。ただし、このシナリオで対象としている資源は、酸素、水素、ヘリウム3のみである。

このシナリオでは、6つの段階を設定し、順次拡張していくように計画されている。ここに記述されている年次はあくまで参考年次であるが、このような形で拡張させるのがもっとも現実的であろう。フェーズ1は無人であり、フェーズ1から6に進むにつれて、月に滞在するクルーの数が増加している。

フェーズ1の目的は、フェーズ2以降の有人月面活動を可能にするための基本施設を準備することであるが、特にエネルギー施設が重要である。フェーズ2では最小限の居住を可能にし、まず4人のクルーが45日間月面上に滞在する。そして、酸素やヘリウム3のパイロットプラントも建設する。

フェーズ3になると、居住クルーの人数も少し増やし、酸素やヘリウム3の実用プラントを建設する。更に、フェーズが進むと、クルーの人数や滞在期間も徐々に増え、各種の実験や観測も活発に行なわれるようになる。

活動が活発化するにしたがってエネルギーの消費量も増加するので、発電量も増やさなければならない。このシナリオでは、発電はすべて太陽電池となっているが、コストを考えると原子力発電の方が有利である。太陽電池の場合、昼間での発電のみとなり、蓄電施設が大きくなるという問題がある。

月面基地の建設や運営には莫大な費用がかかるので、国際共同で行なわれるであろう。したがって、クルーの構成も、宇宙ステーションと同様、関係各国の混成チームとなるであろう。

表2. 3-1 月面基地の建設シナリオ

第1表 月面基地の建設シナリオ						
	フェーズおよび第一次打ち上げ年					
	1 (2015)	2 (2020)	3 (2025)	4 (2030)	5 (2035)	6 (2040)
クルー数	0	4	5	8	10	15
滞在日数	—	45日	90日	180日	1年	恒久化
電力	< 1kW	10kW-量 5kW-夜	20kW-量 15kW-夜	60kW-量 45kW-夜	100kW-量 80kW-夜	140kW-量 90kW-夜
居住モジュール数	—	1	1	1	2	2
実験モジュール数	—	0	0	2	4	4
物資製造	小型無人実験	パイロット プラント (1kg/14日)	実用 プラント (10kg/14日)	1t/年	15t/年	155t/年
ペリウム3製造	—	パイロット プラント (2mg/14日)	実用 プラント (10mg/14日)	1g/年	10g/年	100g/年

清水建設、マクダネル・ダグラス

2. 3. 5 月面基地の建築構法

月面基地の目的に応じて各種の機能が要求される。それらの機能を抽出し、抽出された機能の相互関係を十分に検討しなければならない。機能ができるだけ重複しないようにして、無駄な部分をできるだけ排除しなければならないからである。

資源利用を目的とする月面基地に要求される機能の分類例を図 2.3-1 に示す。これらの機能の相互関係を検討し、ゾーニングを行う。すなわち、ある程度まとまって配置すべき施設をグルーピングし、それらの施設群同士の関係を検討する。

このようなゾーニング案をもとにした施設のレイアウトの例を図 2.3-2 に示す。そのようなレイアウト計画による月面基地のイメージを図 2.3-3 に示す。

図 2.3-2 および図 2.3-3 に示したように、月面基地には多くの施設が必要となるが、居住部分の建築構法としてどのようなものが考えられているかを紹介する。

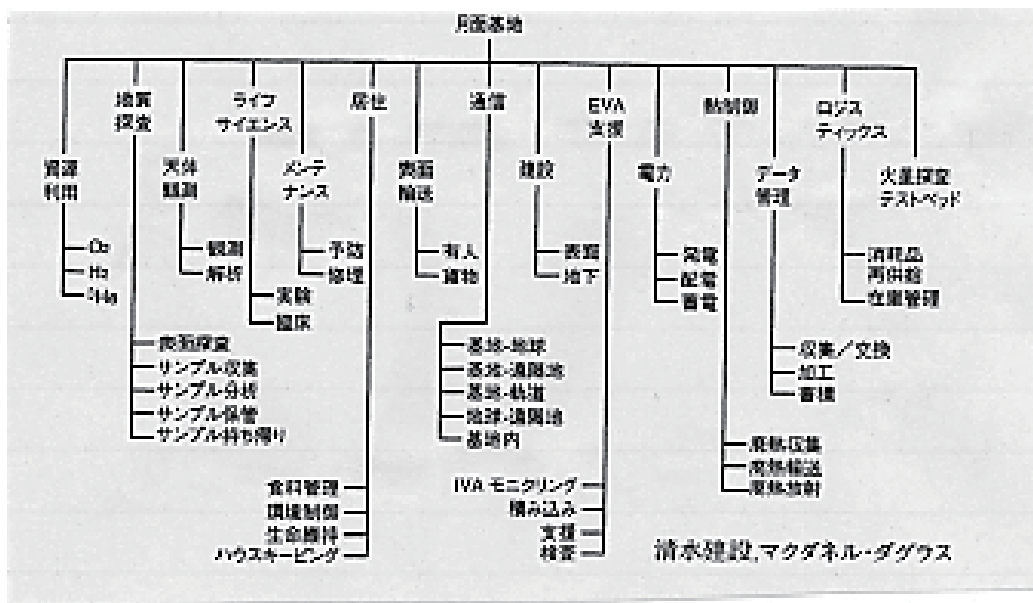


図2. 3-1 月面基地の建設シナリオ(清水建設、マクダネル・ダグラス)

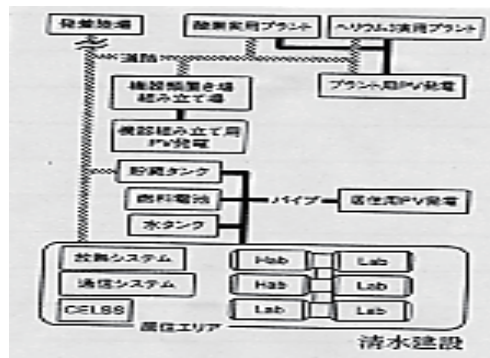


図2. 3-2 月面基地のレイアウト(フェーズ5)(清水建設)

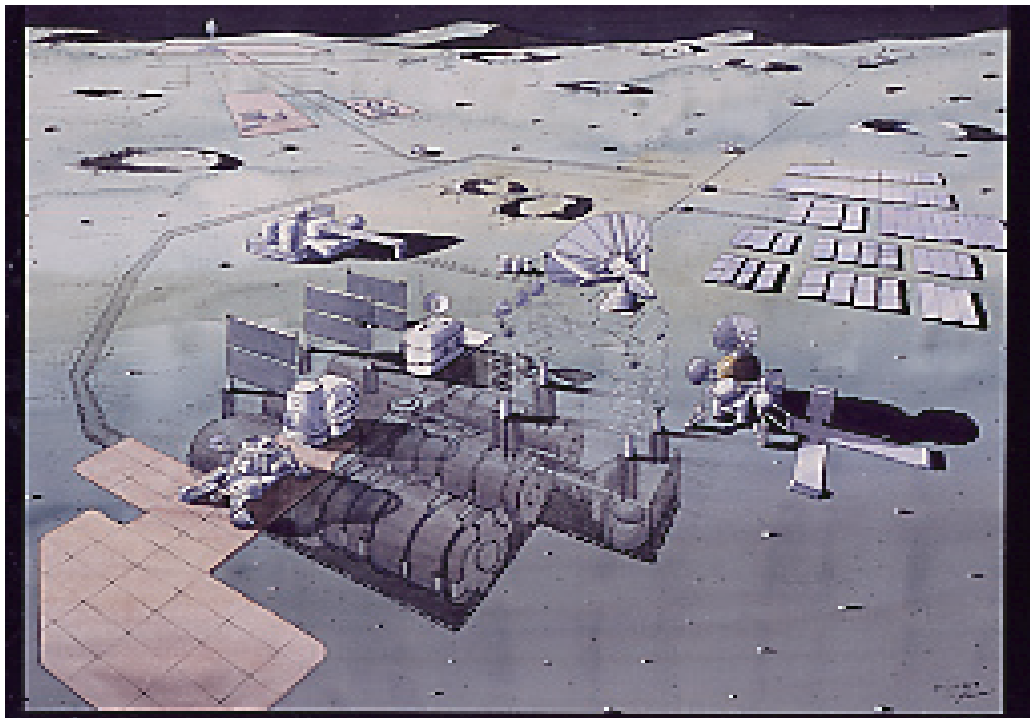


図2. 3-3 月面基地のイメージ(フェーズ5)(清水建設)

(1) アルミ合金製モジュール構法

技術的に最も簡単なのは、宇宙ステーションで使用するのと同様の円筒形モジュール(直径約4m、長さ8~12m)を地上から運び、月面上に設置し連結する方法であろう。しかし、基礎をどのようにするかという問題があり、連結作業も宇宙ステーションの場合よりも難しいかもしれない。隕石の衝突や放射線を防御するために、構造物の上にレゴリスを被覆させる必要があるが、その作業も意外に困難である。

(2) インフレータブル構法

NASA では、建設コストを下げる目的で、インフレータブル構法を提案している。柔軟性のある膜材料でできた袋状の構造物を月面上に持っていき、気体を封入して膨らませる。その後、その構造物を硬化させたり、内部から補強したりして、使用する。形状としては、球状または円筒形となる。

インフレータブル構法を採用した場合、膜材だけで内圧に対抗するのは困難であり、どのようにして補強するかが問題となる。単に補強するだけではなく、膜材を膨らませた後で室内に床・壁・家具等を設置しなければならず、単純には施工できない。

(3) コンクリート製モジュール構法

月面上でセメントや水を製造し、プレキャストコンクリート製のモジュールを作って、現地に運搬し、設置・接続をおこなう。月面上の岩石や砂には、セメントの主成分で

ある酸化アルミニウム(Al_2O_3)、二酸化珪素(SiO_2)、石灰(CaO)等が豊富に含まれているので、これらを抽出することによってセメントを作ることができる。コンクリートの骨材としては、月面上の岩石を若干加工すればよい。水は月にはないので、地球から水素を用いて、月で生産する。

コンクリートモジュール構法による平面計画の例を図 2.3-4 に示す。この案では、6角柱のモジュールを用いており、一辺の長さが約 3.6m、高さは 5.6m である。モジュール同士を連結させることによって各種の居住施設をつくることができる。この構法を用いた大型の月面基地のイメージを図 2.3-5 に示す。

月面基地の建築構法選択に当たっては、建設コストが特に重要であるが、建設コストは建設規模に大きく左右される。したがって、建設シナリオが大きな意味をもつということになる。

建設規模が小さいときには、アルミ合金製モジュール構法のように一式地上から持っていく、月面上での作業ができるだけ少ない工法がのぞましい。インフレータブル構法は更にコストを低減させることができるかもしれないが、技術的には格段に難しい。

コンクリート製のモジュール構法のように月面上の建設資材を最大限活用するという構法は非常に魅力的であるが、現地の資源を建材として使えるようにするためには、どうしても建材製造のための工場が必要となり、そのための建設費用がコスト・アップの要因となる。したがって、建設規模が大きくなるほど、コスト的に有利となる。

なお、月面基地の建設コストは、地球から月への輸送コストに大きく左右されるので、現時点で試算することは非常に難しい。アポロ計画では、現在の貨幣価値で約 10 兆円投入したといわれているが、現在の技術レベルでは、約 10 分の 1 の費用で同様のことができるであろう。そのような状況から判断すると、数兆円かけて宇宙ステーションと同規模の国際プロジェクトを実施するという可能性がある。どの建築構法が最も適しているか、研究の進捗状況に応じて判断することになる。

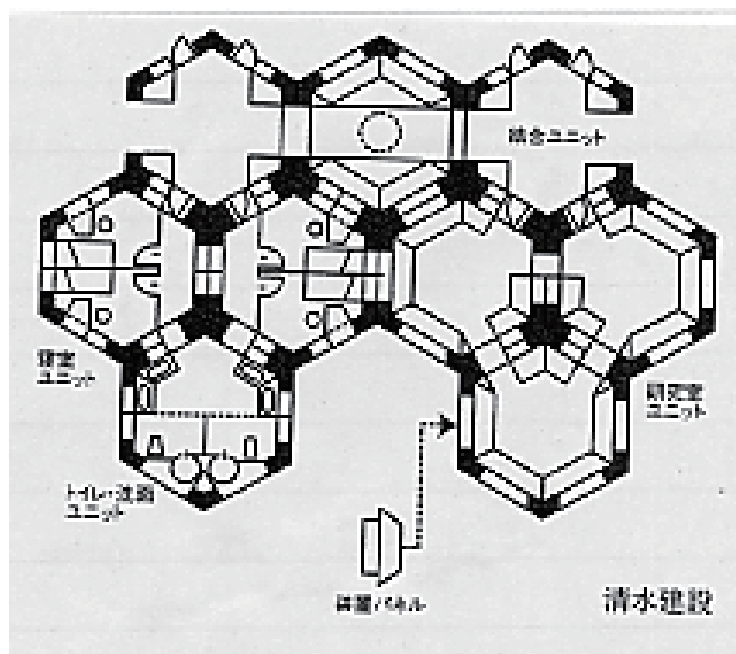


図2. 3-4 コンクリート製モジュールによる月面居住施設(清水建設)

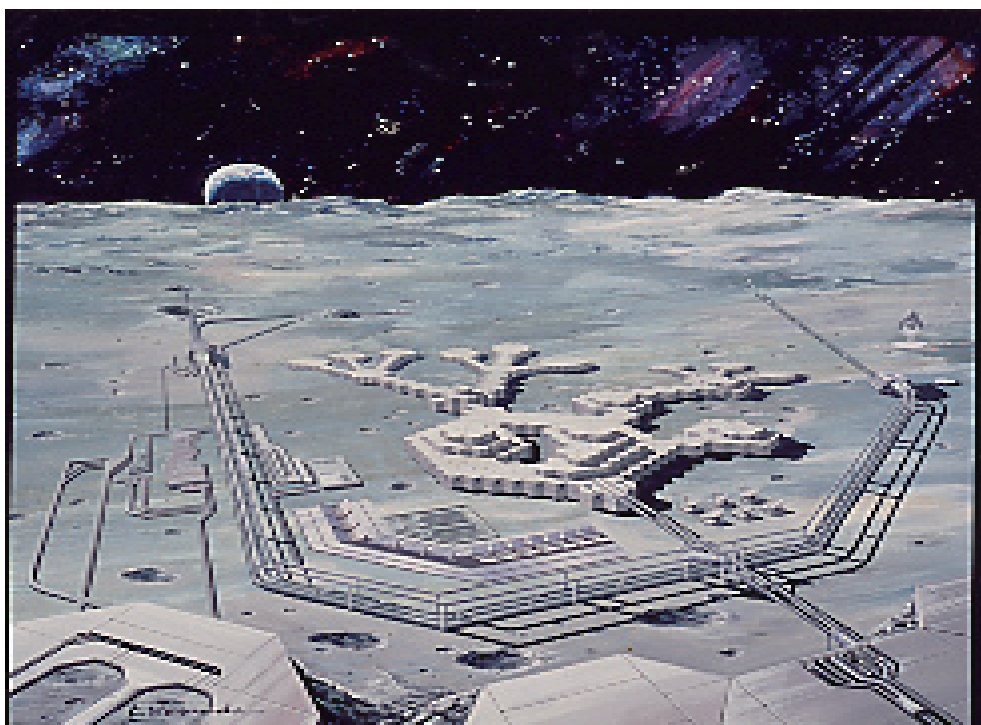


図2. 3-5 コンクリート製月面基地のイメージ(清水建設)

2. 4 宇宙天気予報

人類が宇宙で生活するためには、克服しなければならない幾つかの課題がある。第一には、長時間の生活で人間の肉体と心理に与える影響をどう取り除くかである。肉体的に大きな影響を与える原因には、無重力状態と放射線被ばくがある。無重力がどのような影響を与えるかは、宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)2. 6節生物は宇宙に適應できるかにおいて、述べたのでここでは割愛する。残る課題は、宇宙での放射線被ばくである。

2. 4. 1 宇宙環境

(1) はじめに

実は、地上で生活する私たちの周りにも、放射線を出すものがいろいろあって、私たちは知らず知らずに毎日放射線を受けている。また、食物を通してごく微量であるが放射線物質を体内に取り入れている。日本の場合 1 年間に約 1.5mSv 程度で、これをX線に換算すると胸部のX線撮影5回分程度に相当する。Sv(シーベルト)という単位の詳しい説明は、2. 4. 2節で取り上げる。これらの放射線のうち、宇宙から降り注ぐ放射線(主に銀河宇宙線が大気との衝突により生じた二次宇宙線)からの寄与は約 1/5(粒子フラックスは 1cm^2 あたり毎分1個程度)程度で、人類を含む地球上の生物は、大気圏が形成される以前の大昔を別にして宇宙の放射線環境を意識する必要がなかった。なぜならば、 1cm^2 あたり約 1kg に相当する厚い地球大気(コンクリートでは、約 4m50cm の厚さに相当する)と磁場によって守られてきたからである。但し、ひとたび宇宙空間に飛び出したならば、そこには、目に見えないプラズマ、磁場、さらには銀河と太陽に起源をもつ高エネルギー粒子が存在する。宇宙で生活するためには、これらの環境の状態を十分に把握すると共にその変動を予測する技術が必要になる。

第 1 の要素であるプラズマは、物質の三態と呼ばれる固体・液体・気体に次ぐ「第四の物質状態」で、原子から電子がはぎ取られて、自由に運動している電子とイオンが混じり合ったもので、それぞれの密度がほぼ同じで、ほぼ電気的中性を保って分布している粒子集団である。夜の街に美しく輝くネオン・ランプの内部とか真夏の稲妻などみなプラズマ状態にある。プラズマは、電気を通し、電場や磁場と強い相互作用を持つ。太陽などの自ら永遠に光り続ける恒星もプラズマ状態にあり、宇宙の物質の 99.9%以上がプラズマ状態にあるといわれている。

第 2 の要素である磁場は、太陽だけでなく水星、地球、木星、土星、天王星、海王

星、にも存在し、これらの磁場は放射線の侵入を阻止する役目を果たしている。

第3の要素である高エネルギー粒子については、この後詳細に述べる。

これらの要素の劇的な変化は、宇宙空間で生活する宇宙飛行士への悪影響や宇宙機搭載機器の劣化、誤動作を引き起こしたりする。これら放射線環境の概要を以下に示す。

(2) 放射線帯(バンアレン帯)

地球磁場は、外部からの放射線の侵入を阻止すると共に、侵入した荷電粒子を捕らえる。荷電粒子は、磁場中を運動する時には、常にその運動の向きと磁場とに直角に一定の力を受け円運動する。磁力線に沿ってらせん運動をしている粒子が、磁力線に沿って動いていく時、磁場が強くなると、ある強さの場所で跳ね返される。鏡のように反射することから、この点を鏡点(mirror point)という。地球磁場は、磁気赤道面あたりで最も弱く、南北両極で強くなっており、ひとたび磁場に侵入した粒子は、南北両極を往復運動して地球磁場に捕捉される状態になる。こうして地球の回りには放射線帯と呼ばれる強い放射線場が存在する。発見者の名前にちなんでバンアレン帯と呼ばれている。磁場に捕らえられた粒子は、緯度方向に往復運動すると共に往復運動中に磁力線の内側と外側の磁場の強さの違いから、経度方向にもドリフト運動をしている。

どの磁力線に粒子が捕らえられているか、磁力線を特定する値として L 値が用いられる。 L 値は、地球磁場を双極子磁場として近似し、各磁力線を赤道線上における地球中心からの距離で表したもので、無次元量で地球半径($R_e=6370\text{km}$)を1とした値である。放射線帯の構造、捕捉粒子の回転、往復、ドリフト運動の様子及び L 値の定義を図 2.4-1に示す。

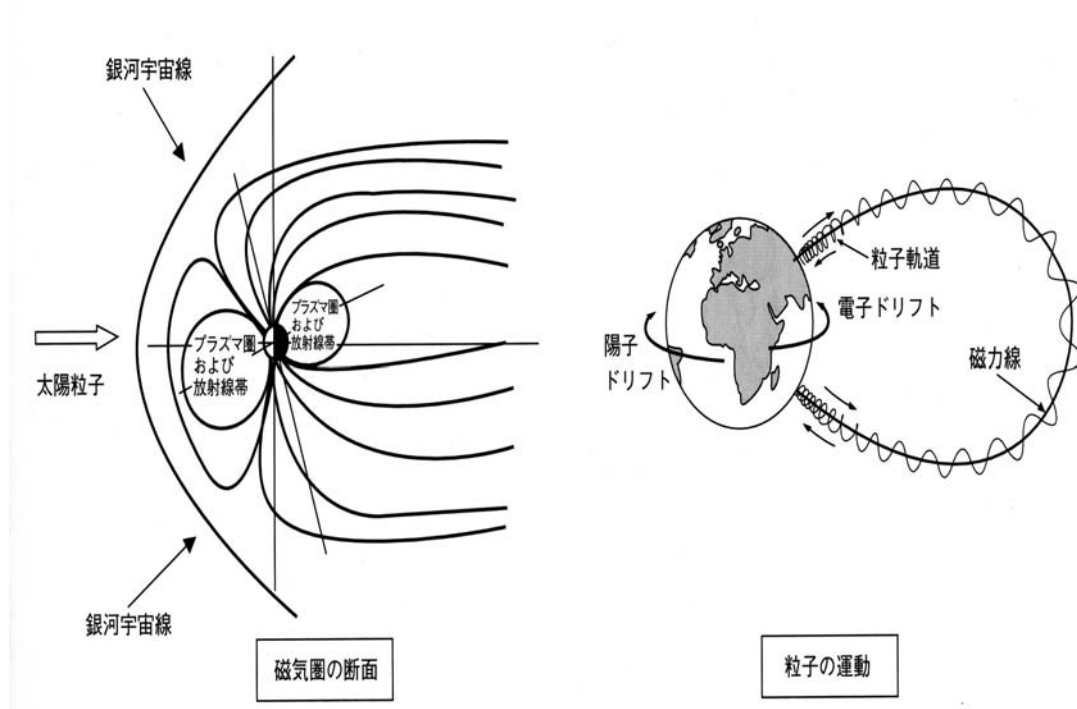


図2. 4-1 放射線帯の構造

(a) 空間分布

放射線帯の空間分布は、地球磁場の構造から、地球をとりまきドーナツ状になっている。1MeV以上の陽子についてその強度分布を描いたのが図2.4-2である。これは、東経300°に沿って南北で方向に割った図で、左の半円が地球を表し、磁気赤道から右に延びる線に地球半径を単位とした地球中心からの距離が記されている。静止軌道は、この線上で6.6にあたる。最も強度が高い場所は、距離が3(地上からの高度にして約13,000km)で磁気緯度が南北15度の領域であることがわかる。両極とも磁気緯度が60度以上の高緯度帯には捕捉された放射線は存在していない。

電子の空間分布は、陽子より複雑で内帯と外帯の2重構造となっている。内帯と外帯の間は比較的密度が少なく“スロット(slot)”と呼ばれる。1MeV以上の電子についてその強度分布を描いたのが図2.4-3である。

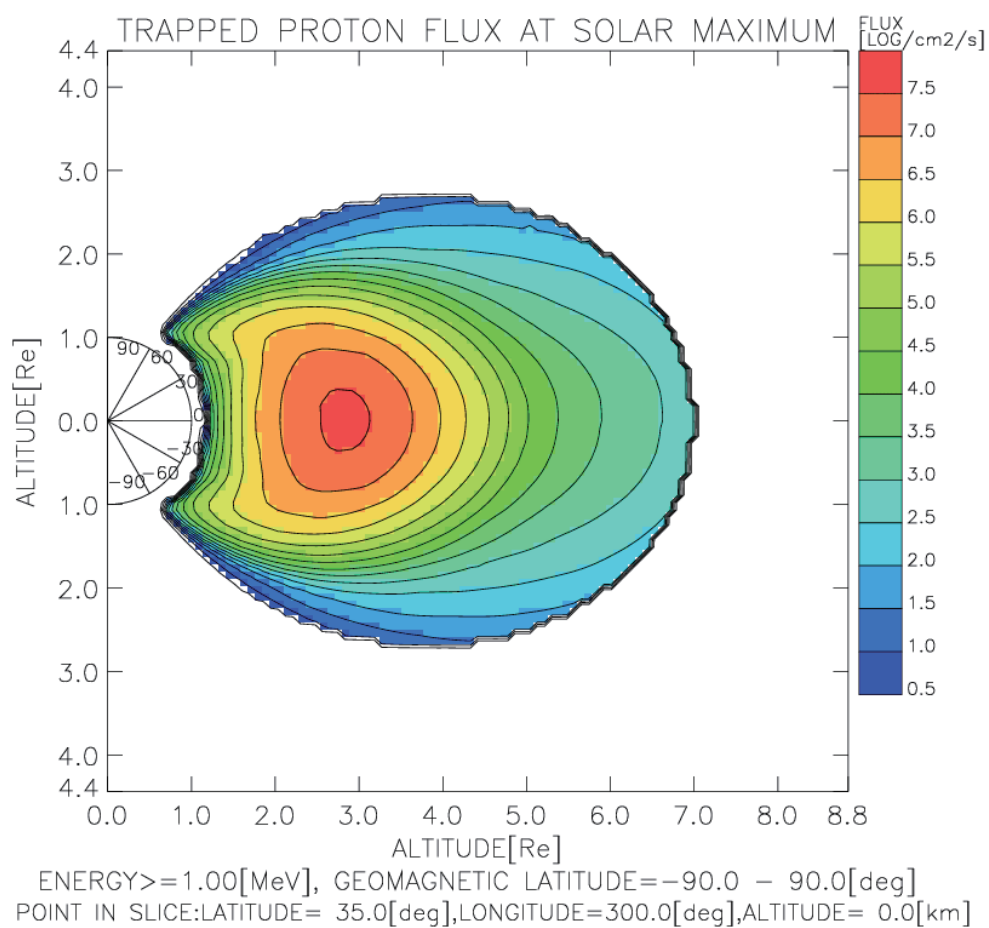


図2. 4-2 放射線帯における1MeV以上の陽子の強度分布。左の半球は地球を表し、横軸、縦軸の値はL値。

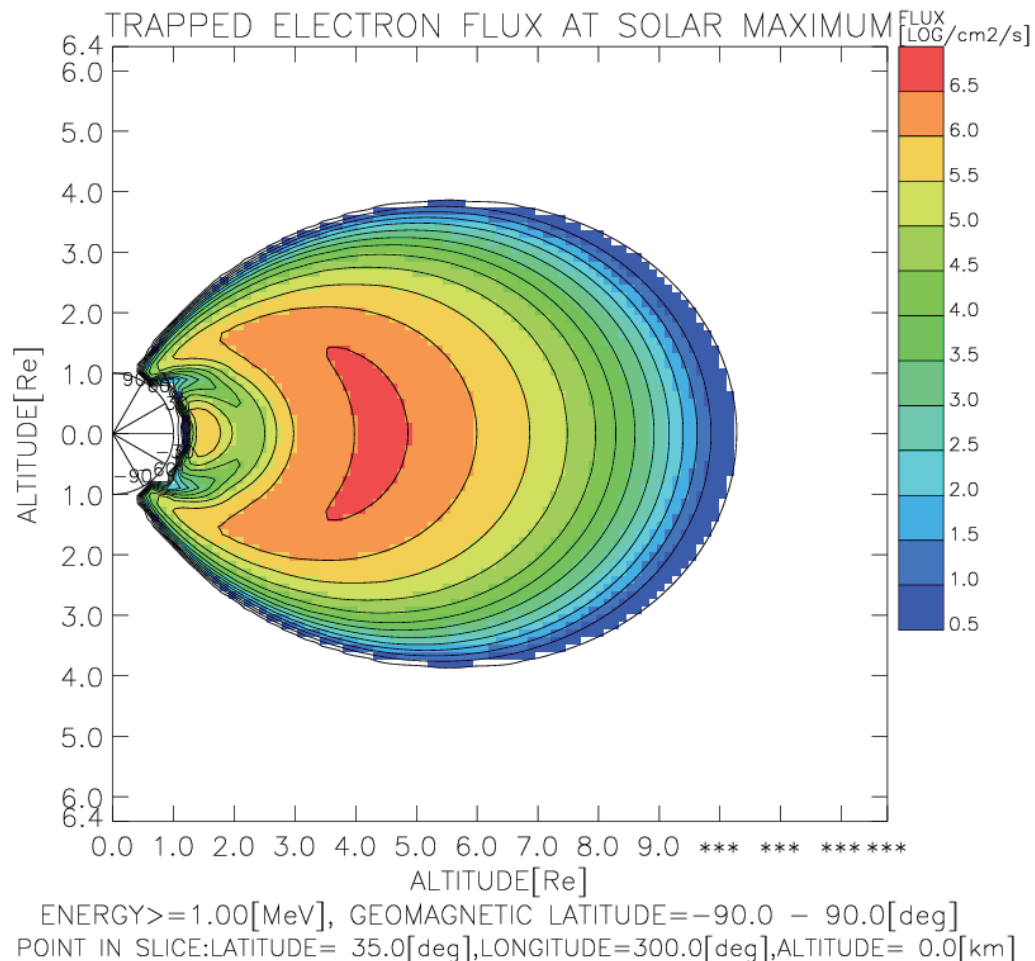


図2. 4-3 放射線帯における 1MeV 以上の電子の強度分布

(b) 南大西洋異常地域 (South Atlantic Anomaly: SAA)

高度が約 350km~1,500km の間の低高度では、南米のブラジル上空に、放射線帯が局所的に降りている領域があり、「南大西洋異常地域」または「ブラジル異常地域」と呼ばれる。人工衛星がその領域を通過する際に、高エネルギー陽子の被ばくや陽子によるシングルイベント(単発現象)が発生する。シングルイベントとは、メモリ IC やマイクロプロセッサのメモリ部において、高エネルギーの重イオンや陽子の入射によって書き込まれていた”1”や”0”のビット情報が反転する現象である。さらに、陽子が宇宙機の船壁に衝突して 2 次的に発生する中性子による影響等があるので注意が必要である。

その要因は、地球磁場の非対称にある。地球磁場は、地球回転軸に対して西経

69° の方向に11° 傾いており、磁場の緯度は北東アメリカでは地理緯度より11° 低い。また、ダイポール軸は、地球中心から約 430km オフセットしている。

南大西洋異常地域の様子を図2. 4-4に示す。国際宇宙ステーション(ISS)での船内中性子線量当量マップを図2. 4-5に示す。

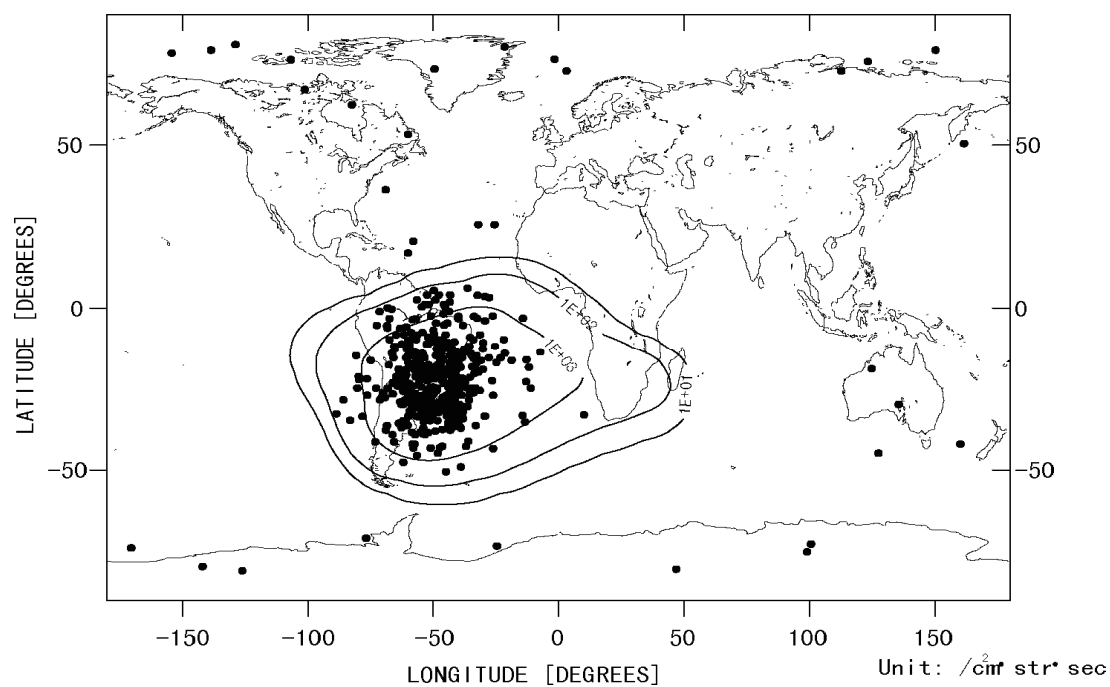


図2. 4-4 南大西洋異常地域

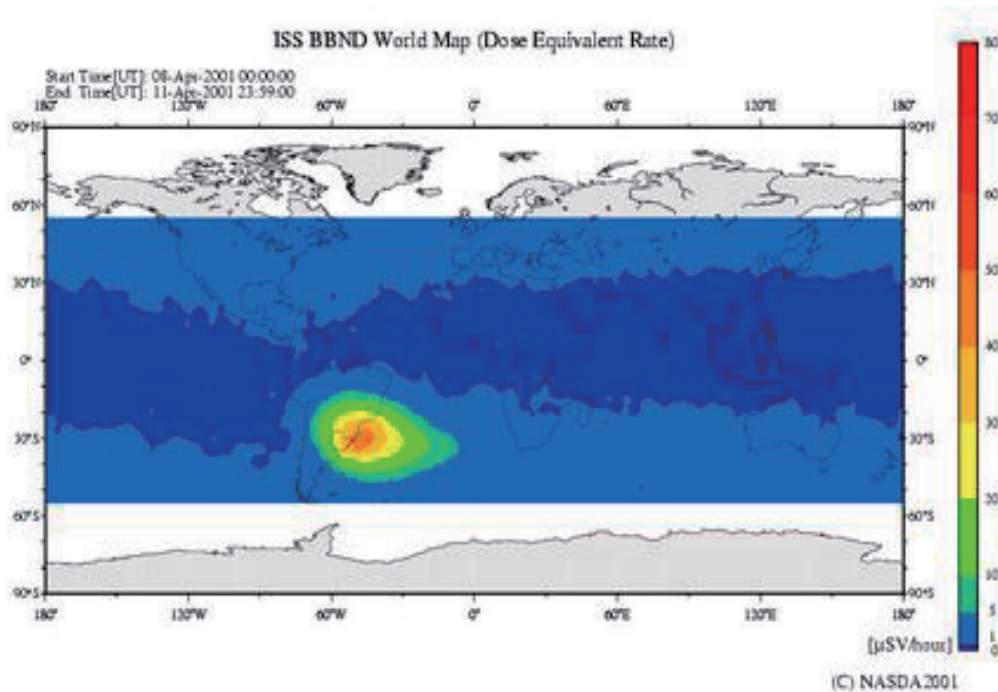


図2. 4-5 国際宇宙ステーション(ISS)での船内中性子線量当量マップ(静穏時)
SAA と両極地域において他の地域より高い値であることがわかる。

(c) 外帯電子の変動

磁気あらしが発生すると、外帯電子のフラックスは、ほとんどの場合変化する。静止軌道で MeV 程度の電子を計測していると、磁気あらしの開始(主相)に伴って、電子のフラックスは激減する。この状態が約 1 日程度継続した後、磁気あらしの回復相においてフラックスは増加し、磁気あらし以前のレベルを超えることもしばしばである。図2. 4-6は、MDS-1 衛星で観測された平成 14 年 2 月から 4 月の L 値に対する電子のフラックス変化を示したものである。横軸が時刻で、縦軸が L 値である。L の 1.5 付近が、内帯のピークであり、L の 4.5 付近が外帯のピークとなっている。内帯は、安定しているが、外帯は変動が激しいことが分かる。特に磁気嵐が起きた(2月23日、3月17日)直後は一時的にフラックスが減少し、約 1~2 日後、フラックスの増加が観測されている。

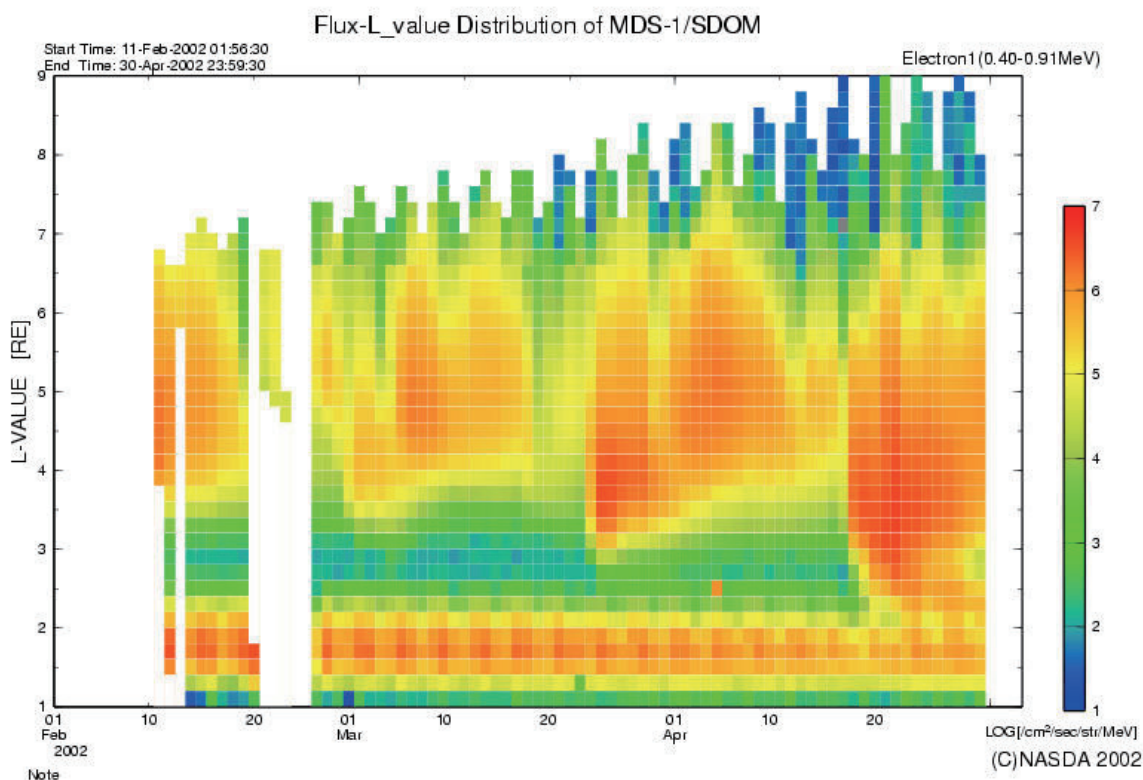


図2. 4－6 外帯電子の変動

(d) 第2の放射線帯

CRRES 衛星で、太陽風と地球磁場との強い衝撃作用により1991年3月24日に新たな放射線帯が形成されたことを観測した。この放射線帯は、これまで安全と考えられてきたスロットと呼ばれる領域に半年以上留まった。スロット領域も時には安全でなくなる。

(3) 太陽宇宙線

太陽の放出するエネルギーは、常に一定ではなく、変化し続けている。太陽活動の変化には、よく知られた11年周期の穏やかな変動と太陽フレア等の突発的な変動がある。

ドイツのアマチュア天文学者、ハインリッヒ・シュワーベは、黒点の観測から太陽が周期的に変化を繰り返していることを発見した。最も活動的な時期を「極大期」(約7年間)、最も静穏な時期を「極小期」(約4年間)と呼ぶ。太陽活動極大期には黒点の数、X線や紫外線等の輻射、コロナガス噴出(CME: coronal mass ejection)及び太陽フレアの規模や発生頻度が増大する。

太陽フレアは、太陽表面で発達した黒点群を中心として起こる局所的な爆発現象で、X線、紫外線、可視光、電波等の電磁波や高エネルギー粒子、プラズマ雲の放出を伴う。太陽宇宙線は、定常的な銀河宇宙線と違い突発的に起こる性質と、フレア毎にエネルギースペクトルと組成が異なるという性質をもち、フレアの発生予測が困難という性質をもつ。特に一太陽周期内に数回に満たないような、宇宙活動中の人命に係わる巨大太陽フレア(AL イベント: Anomalous Large Event)を予測することは、将来の宇宙活動にとって克服すべき重要な課題である。また、大型の太陽フレアの発生時期は、黒点数のピークの年ではなく、極大期の最初の年とか、最後の年になるような場合があるので注意が必要である。

フレアにともなって放出されたX線は、約8分後に地球へ到達し1時間から数時間高いレベルが継続する。太陽陽子は、フレアやCMEに伴う衝撃波が惑星間空間を伝播する過程で発生すると考えられており、フレア発生後早い場合は、30分程度で地球へ到達する。

(4) 銀河宇宙線(Galactic Cosmic Ray, GCR)

銀河宇宙線は、太陽系外のある場所で発生し加速を受けて、星間空間を飛び交っている高エネルギー原子核粒子である。その起源は宇宙線発見当時の大きな問題で、いまだに明確な答えは出ていないが、多くの場合極めて遠方の超新星(質量が太陽の3倍から30倍の星)の爆発だろうと考えられている。その解答の重要な手がかりとして元素分布が上げられる。銀河宇宙線中の元素はHから超U元素まで観測されており、その元素分布は一般に太陽から発生する宇宙線の元素分布と比較して、Hに対する重元素の割合が多い。このことから、銀河宇宙線は太陽より進化の進んだ超新星等から発生していると考えられている。また、銀河宇宙線のエネルギーは、1MeV/核子から 10^{14} MeV/核子までに及んでいる。

(5) 地球磁場の効果

惑星間空間の飛行や月、火星探査など、地球磁場のおよばない軌道については銀河宇宙線と太陽フレア粒子がそのまま探査機の放射線環境となる。しかし、ISSをはじめとする近地球軌道の宇宙機では地球磁場が大きな存在となる。銀河宇宙線や太陽フレア粒子などが地球に近づくと、その方向とエネルギーによって地球磁場とさまざまな相互作用をする。あるものは磁場ではね返されて低軌道まで達することができない。

(6) まとめ

宇宙機がさらされる放射線環境について放射線帯粒子、太陽宇宙線、銀河宇宙線に分けて述べた。それぞれが持つエネルギースペクトル、時間変化、空間分布など

諸特性はさまざまである。特に留意すべきことは、太陽フレア粒子は、その強度・組成・増加の時間スケールなどが実に千差万別であり、「平均像」描くことが困難なことから、宇宙機の軌道により放射線環境は全く異なったものになることの2点である。

2. 4. 2 有人宇宙活動への影響

宇宙放射線の被ばくが人体へ与える影響は、滞在期間が長期化するにつれ、一般の放射線管理と同様に慎重な対策が必要である。平成9年から宇宙開発事業団は、有人サポート委員会宇宙船被曝管理分科会を組織し、宇宙飛行士の放射線被ばくに関し検討を行っている。さらに、2002年からは、国際放射線防護委員会(ICRP)でも宇宙飛行士の被ばくに関する検討を開始した。

(1) 放射線に関する健康管理の考え方

(a) 確定的影響と確率的影響

人間が放射線に被ばくした場合、種々の影響が表れてくる。それらの影響は、その発生の出方によって、「確定的影響」と「確率的影響」の2つに分けられる。確定的影響は、ある線量以上の放射線を受けると影響が出てくる現象のことである。この確定的影響の例としては、毛が抜けたり、白内障などが挙げられる。一方、確率的影響というのは、必ず影響が出るというものでなく、受けた線量が多いほど影響の出る確率が高まるものである。例えばがんや遺伝的障害がこれに属する。

(b) 身体への影響

身体への影響は、放射線を受けた人の体にでる「身体的影響」とその人の子孫に現れる「遺伝的影響」の2つに分けることもできる。さらに、身体的影響は、症状が現れる時期から「急性障害」と「晩発障害」に分かれる。「急性障害」は、通常数週間以内に出る症状で、「晩発生涯」は、数ヶ月から数年後になって出てくる症状をいう。

(2) 宇宙放射線被ばくの評価に用いる量

放射線の生体影響を考える場合の基本的な量は、対象となる臓器・組織にどれだけのエネルギーが与えられたかを単位質量あたりで表す吸収線量(Gy)である。1Gyは、1kgあたり1Jのエネルギーを吸収したときの線量である。しかし、この吸収線量を生体影響に直接使用することはできない、なぜならば放射線の種類やエネルギーの違いにより、同じ吸収線量であっても生物学的な影響が異なるからである。例えば、同じ吸収線量でもγ線より中性子、陽子、重イオンのほうが影響は高い。このため、ICRPが1990年勧告で導入した量が、等価線量(Equivalent dose)である。単位は、Svである。

等価線量(H_T)は、放射線(R)による臓器・組織(T)の平均吸収線量に、放射線の種類とエネルギーによる生物学的影響の差を補正する放射線荷重係数(W_R)をかけたものである。すなわち、 $H_T = W_R \times D_{T,R}$ である。放射線の種類が複数ある場合、放射線の種類(R)について総和をとる必要がある。

また、等価線量の値が同じであっても照射された臓器、組織によって確率的影響が生じる確率が異なる。このため、全身が被ばくしたときの評価を行えるようにしたものが実効線量である。これも、ICRP が 1990 年勧告で導入した量である。実効線量(E) (単位は Sv)は、臓器・組織の等価線量 H_T におのの組織荷重係数 W_T を乗じ、それらの総和として求められ、 $E = \sum W_T \cdot H_T$ の式で表される。宇宙における放射線防護に関しても、地上と同様にこれらの等価線量、実効線量をもとに運用されていくことになる。

放射線障害を考える上で重要な因子の 1 つは、線量率効果である。同じ量の放射線でも、急激に受けた場合と少しずつ時間をかけて受けた場合は、生体効果が違ってくる。確定的影響に関しては線量率が高くなると生物効果が高くなる。確率的影響である発ガンに関しても、動物実験では、線量率が高いほど効果も大きいという結果が出ている。

放射線障害に関する問題の1つに低線量放射線の影響、特に放射線ホルミシスの問題がある。ホルミシスは、ギリシャ語からきた言葉で、刺激するとか促進するという意味である。最近、低線量(自然放射線の100倍くらい)では、放射線は生体にプラスの影響をもたらすという説が出されている。この現象を放射線ホルミシスと呼ぶ。例えば、低線量の放射線を浴びたマウスの寿命が延びたとか自然放射線の高い住民の発ガン率が低いと言った説である。この問題が解明されてくると、放射線防御の考え方も大きく変わる可能性がある。

(3) 各放射線源と危険性

(a) 放射線帯粒子

宇宙機の軌道により大きく環境が変わるので軌道毎に考慮する必要がある。低軌道では SAA における陽子の影響が大きい。

(b) 銀河宇宙線

銀河宇宙線の主成分は、高エネルギー陽子でそれ以外にヘリウムイオンや重イオンが存在する。重イオンの量は少ないが生物への影響(放射線荷重係数)はきわめて大きい。銀河宇宙線は、普遍的に存在し、そのエネルギーが高いためかなりの遮蔽でなければ効果がない。

(c) 太陽宇宙線

通常の太陽フレアにおいて、放射される核種中の He の相対依存度は 5～10%であり、また重粒子は非常に少なく、銀河宇宙線のバックグランドレベル以下である。しかし、大きなフレアの場合、いくつかの重粒子の依存度は、銀河宇宙線のバックグランドに対して、3～4 桁程度越えることがあり、その期間は数時間から1日程度である。このような重粒子の増加は、人体被ばくについて極めて深刻な状態を与える。

太陽フレアは、太陽活動極大期に頻発するため、数年にわたる火星飛行や月面滞在が太陽活動極大期に一致していると、その間 100 回以上この現象に遭遇することになる。但し、多くの現象は小さいので問題にならず、数回の巨大フレアにより総被ばく量が決定されるため、これらの予測が重要である。

(d) 二次粒子

宇宙での被ばくのかかなりの部分は、陽子、重イオンなどの高エネルギー荷電粒子によるものであるが、それらが宇宙船の船壁を通過する際、原子核との相互作用で2次中性子や制動 X 線という2次粒子を発生させる。荷電粒子は、ある程度の厚い遮蔽(数十g/cm²)を用いることで逓減させることが可能であるが、中性子は、この程度の遮蔽では不十分で非常に厚い遮蔽でなければ逆にフラックス強度は増加する。

(4) まとめ

放射線帯粒子、銀河宇宙線は、じわじわとその影響が蓄積されるものである。一方、太陽宇宙線は、太陽フレアのイベントによる影響を的確に防護すれば、イベント間の影響はほとんど無視しできる特徴がある。過去の観測結果から太陽活動極小期の3年間は安心していられる期間であることが分かっている。また、太陽フレアの種類により時間プロファイルの形が異なり、鋭い立ち上がりのものに注意が必要である。

2. 4. 3 その他の影響

(1) 人工衛星

宇宙放射線の急激な変化は、衛星の機能喪失や機能停止を引き起こす。衛星機能喪失という深刻な事故が、ここ10年間で米国、カナダの衛星で3件発生している。

太陽フレアによる高エネルギー粒子は、衛星搭載機器の半導体部品の深部に浸入して破壊またはビット反転を発生させる。また、地磁気嵐の時には静止軌道に熱プラズマが流入し宇宙機を帯電させ放電等で宇宙機の不具合を引き起こす。

(2) 地上

地磁気嵐によって地球の磁場は急激に増加または減少するが、地磁気の急激な変動は地上の送電線やパイプラインなどに誘導電流を発生させるため、予期しない障害が発生する。1989 年 3 月の大規模な変動に際してはカナダの送電系統に障害が発生し 10 時間にわたってカナダ東部から米国にかけての広範な地域で停電する深刻な事故が発生した。

また、電離層の電子密度の急な変化によりシンチレーションと呼ばれる電波の短期周期変動が発生して、衛星通信や GPS など宇宙地上間の電波伝搬に影響を及ぼす。

2. 4. 4 宇宙天気予報の現状と将来

今後ますます活発になる宇宙環境の利用や、有人火星探査など将来の人類の宇宙空間進出を可能にするためには、太陽から磁気圏内にいたる宇宙環境をモニタし、現状の把握と予測する技術が必要であることはわかり頂けたと思います。そのため「宇宙天気予報」の世界的ネットワークが作られており太陽フレアの発生を常時監視している。日本では、情報通信研究機構がその業務を行っている。

(1) 太陽高エネルギー粒子現象(SPE: solar particle event)の予測手法

現在、SPE の予測は、米国 NOAA/SEC と空軍の 55 気象中隊により行われている。SPE の予測は、1960年代の NASA のアポロ計画を支援するために誕生し、シャトル時代の今日まで続いている。先に述べたとおり SPE は、その強度・組成・増加の時間スケールなどが実に千差万別であり、その予測に多くの情報を必要とするが、現段階ではそれらの情報の全てをリアルタイムで入手できていない。

現時点で、フレア発生後多くの SPE を予測しているものの、予想しながらほとんど飛来しない場合も多く、宇宙飛行士の回避行動に使用できるまでの精度にはいたっていない。

そのようなことから、フレアが起こった後、太陽から地球までの宇宙環境監視が重要な役割を果たす。観測は、地球近傍での SPE の発生そのものやどのような粒子が飛来するのかを予測するのに役立つと共に SPE 予測精度をさらに向上させることにつながる。現在、国際太陽地球系物理学計画(ISTP)として、日本、米国、西欧諸国が共同で太陽や太陽風、地球磁気圏を複数個の宇宙機による統一のとれた同時観測を行っている。最近では、NASA が放射線帯の撮像に成功しており、新しい高度な観測とモデリング技術の進歩により、宇宙での生活がより安全なものとなる。

(2) 機上予報

今後火星探査などのように地球から遠く離れた場所で人間が活動するためには、地球近傍からの太陽監視は役に立たない。たまたま探査機に影響があるような現象を地球で予測できたとしても、知らせが届くのとフレア粒子が探査機に到達するのと同時にになってしまう。よって機上での自動・手動の監視システムが必要となり、かつ宇宙飛行士自らが予測を行うことになる。したがって、宇宙飛行士は、太陽物理からSPE予測に関する総合的知識が必要となるし、そのような教育を受けることとなる。

2. 5 火星に住む

2. 5. 1 火星とは？

火星は、太陽系の第4番目の惑星であり、地球のすぐ外側を回っています。温度、重力などの環境が比較的地球に近く、また、私たち人類の生存に必要な資源がすべてそろっています。したがって、宇宙に住むことの最終的な目標地は、火星であるといつてよいでしょう。

太古より、“赤い惑星”火星は、私たちの想像力をかきたててきた星でした。古くは、表面に運河が存在すると信じられ、高度な文明を持った“火星人”が生活していると考えられたこともありました。しかし、1976年に表面に降り立った“ヴァイキング”探査機などの無人探査により、火星は、表面に赤茶けた砂漠のような風景の広がる惑星であることがあきらかになりました。生命探査の結果、着陸した2地点の表面では少なくとも、生命体と考えられるものは存在しそうにありませんでした。科学探査の結果、大気、表面物質などについての知識が得られ、かつて、火星にも厚い大気と、海があった可能性が示唆されました。

火星への興味は、火星の過去、現在、未来に渡ります。30～40 億年前、火星は、かつての地球と同じように厚い大気を持ち、海を持っていたのでしょうか。なによりも、火星でも地球と同じように生命が発生したのでしょうか。もしそうなら、火星がその後大気を徐々に失い、乾燥した惑星になっていった現在でも、生命体やその痕跡が地下に存在しているかもしれません。現在の火星探査のひとつの大きな目標は、そのような生命探査にあります。また、近い将来、人類はみずからその表面上に足跡を残すでしょう。その後、少しずつ火星に住む人類が増えていくかもしれません。そして最後に火星にかける私たちの大きな夢は、火星を地球のように変えてしまうテラフォーミング計画です。それは、人類が呼吸できる大気や、水からなる海を表面上に作りだすことにほかなりません。火星に樂園を呼び戻すことでもあるのです。

火星は、地球と比べ、約半分の大きさで、地球より外側の 1.52AU(天文単位:太陽と地球との距離を1AU とする)の半径の軌道を同じ方向に回っています。このため、火星軌道上で受ける太陽光のエネルギーは、地球軌道上に比べ、43%ほどです。火星の一年は、約 687 地球日(1 地球日は 24 時間)であり、地軸の傾きが 25 度あるので四季があります。自転の速度から明らかなように、火星での一日の長さは、地球とほぼ同じように約 24 時間 40 分となります。将来火星に暮らす人には、火星独自の暦が必要になるでしょう。

表2. 5－1 火星と地球の天文学的特徴の比較

項目	火星	地球
軌道長半径	1.52 AU	1 AU
赤道傾斜角	25° 19	23° 44
恒星日	24時間37分	23時間56分
平均軌道期間	687地球日	365地球日
赤道半径	3397 km	6378 km
赤道での重力	地球の0.3795	
脱出速度	5.02 km/sec	
大気	CO ₂ 95% N ₂ 3%	N ₂ 78% O ₂ 21%
表面大気圧	約 0.6 kPa	約 0.1 MPa

* AU(Astronomical Unit)=太陽地球間の平均距離

2. 5. 2 火星の居住環境

火星で人類が生活していくための環境について、人類が進出する可能性のある空間と比較して見ましょう。火星表面上での重力は、約 0.38G(1G は地球表面上での重力加速度)であり、体を軽く感じたり、跳躍すると高く飛び上がったりします。しかし、約 0G の宇宙空間で人類が受けるであろう数々の生理学的な弊害は、火星上では緩和される可能性があります。表面での温度は、平均してマイナス 60℃ですが、場所と季節によっては、0℃を超えることもあります。このぐらゐの温度範囲であれば、人間にとって過酷な環境とはいえません。ただし、火星の大気は、地球に比べて百分の一ほどで、宇宙服をつけずに表面上を歩きまわることにはできません。ちなみに、大気の約 97%は二酸化炭素、約 3%は窒素です。そのほか、地球では厚い大気によって保護されている放射線や紫外線が、火星表面にはそれほど減衰されことなく降り注ぎます。火星で人が長期間にわたって生活するためには、これらの有害な放射線などから防護する対策が必要となります。

生活するためには、水や酸素などの資源が必要となります。火星では、それらはすべて手に入れることができます。つまり、自給自足の生活が営めるのです。

水は、火星に存在することがほぼ確実にわかっています。まず、大気中に水蒸気として含まれています。量は 0.03%と低いのですが、温度と圧力の関係から水蒸気は飽和状態になっています。次に、極地方に白く見られる極冠と呼ばれる部分のうち、

特に北極の極冠には、二酸化炭素の凍ったドライアイスとともに、水の氷も多く含まれています。また、地表の砂にも吸着されていますし、地中には氷や水の形で多量に含まれていると考えられています。

酸素は、人間が呼吸するために必要な気体です。これは、火星上では、水の電気分解や、大気の主成分である二酸化炭素からの変換によって得ることができます。

また、火星の表層物質は、火山岩や、その風化した物質である粘土鉱物などから構成されと考えられています。これらの物質を、放射線遮蔽のための材料や、建材作製の材料や、食糧用の植物栽培の培地として利用することができます。人間を含む動物や植物の生育には、リン、硫黄、鉄、マグネシウムなどの元素が必須ですが、表層物質には、これらの元素のほとんどが探査機によって検出されています。

表2. 5-2 地球近傍の居住環境比較

居住地候補	太陽からの距離 1) (AU)	重力 (G)	地表大気温度 2) (°C)	地表大気圧力 (MPa)	生命維持のための資源
水星	0.39	0.38	—	0	なし
金星	0.72	0.93	477	9	二酸化炭素、窒素、水蒸気
地球	1	1	13	0.1	水、酸素、窒素、二酸化炭素
地球周回軌道 (低軌道、 静止軌道)	1	0	—	0	なし
月	1	0.17	—	0	酸素
ラグランジュ点 (L4、L5)	1	0	—	0	なし
火星	1.52	0.38	-58	0.001	水、二酸化炭素、窒素
火星衛星 (フォボス、 ダイモス)	1.52	~0.001	—	0	(水素、酸素、炭素) 3)
小惑星	2.2 ~ 3.5	0 ~ 0.01	—	0	(水素、酸素、炭素) 3)

1) 軌道長半径 単位AU(Astronomical Unit)=地球太陽間の平均距離

2) 平均値

3) 存在が推測される元素資源

ラグランジュ点: 宇宙空間にある三つの天体(物体)の重力が、もっともバランスのとれた点(地域)をいい、宇宙ステーションやスペースコロニーなどの宇宙構造物の建設に適している。

2. 5. 3 生命探査

火星の科学探査でもっとも重要なものは、火星の生命探査です。1970年代のヴァイキング計画での微生物を想定した生命探査では肯定的な結果はでませんでした。1990年代には、火星起源の隕石 ALH84001 に微生物の存在の証拠が見られるとする論文も現れました。しかし、これらの問題にはいまだ結論はついていません。

探査の直接の対象は、過去に発現したかもしれない生命体や、その痕跡の地下での残存の可能性です。しかし、現在の火星の環境や、過去の火星の海の存在の証拠、過去の大気の温度などの調査を行うことも間接的な探査ということができます。

人間はなぜ火星に行くのか？

私たちが火星を目指す理由はいくつかあります。

(1) 科学探査の対象として

火星は地球と似た惑星であり、気候や地質を研究することにより、太陽系や地球の成り立ちを知ることにもつながります。また、生命がかつて発現し、かつ、現在もその痕跡や生き延びた生命体が地中に残されている可能性もあり、火星の生命探査は、太陽系における生命発生の仕組みについての貴重な知見をもたらします。

(2) 新しい資源開発の基地として

火星およびさらに遠くに人類が生活圏を広げていく場合に、火星での資源が役に立ちます。大気中の二酸化炭素、アルゴン、水などは、宇宙空間を航行する際のロケット燃料として利用されうでしょう。また、水や大気中の成分は、人間が火星で生活するうえで欠かせないものです。また、地球では希少な資源が火星には存在する可能性もあります。

(3) 宇宙開発の前進基地として

人類が火星を越えて宇宙空間に進出していく場合、火星はそのベースキャンプとしての役割をになうことでしょう。火星の外側の軌道を回る小惑星帯は鉄、ニッケル、プラチナなどの宝庫と考えられており、それらの開発、地球での利用にとっては、火星は重要な位置をしめています。さらに外惑星の探査を行う場合には、火星は中継基地、あるいは、オアシスとして機能するでしょう。

(4) 「第二の地球」として

かけがえのない地球に、不慮の事態が起こることも想定し、人類の居住の可能性のある場所を確保しておくことは人類にとって重要なことでしょう。地球や火星の成り立ちを知るためにも、火星を地球化するための実験を行うことは意味があります。

(5) 新しい価値観を形成する場所として

アメリカ大陸に移り住んだ人々が独自の文化、理想を掲げて独立したように、新しいフロンティアは、常に従来にない価値観を形成してきました。火星に長く住むように

なる人類は、あらたに火星で誕生した子供たち―「火星入」―と、地球にはない新たな文化、宗教、政治などのシステムを作り出すことでしょう。

2. 5. 4 火星の有人探査

火星に人間が住み始めることを考える場合、その第一ステップとなるのが、有人探査ミッションです。米国を中心に、その基本的な計画が検討されています。ミッションの第一の目的は、「人間を安全に火星に着陸させ、かつ安全に地球に帰還させる」ことです。エネルギーとコストを節約するために最適なホーマン軌道を採用すると、片道の移動だけで6ヶ月から1年弱、火星滞在期間も1年以上、地球までの帰還まで約3年もかかってしまいます。このため、推進システムや航法などの技術ばかりでなく、生命維持技術、集団の心理学などさまざまな分野の実験・試験・開発が必要です。また、火星についての知識を増やすために、調査のための無人探査が事前に数多く行われなければなりません。

2. 5. 5 火星で見る空

火星で見る風景は、地球とどう違うのでしょうか。まず、火星の大気には細かい塵が浮遊しているので、太陽光が散乱され、空の色は薄いオレンジ色になります。その太陽はといえば、地球から見る大きさに比べ、約三分の二の半径で見えます。また、火星にはフォボスとダイモスという二つの月（衛星）がありますが、その動きは対照的です。地球で見る月の半分くらいの大きさで見えるフォボスは、7時間39分で火星の廻りを回っており、西の空に昇ったと思ったら、わずか4時間半後には東の地平線に沈んでしまいます。逆に、ダイモスは、東の空に昇り、2日半をかけて西の地平線に沈みます。ダイモスは、火星から遠いので小さな星にしか見えません。一方、青い色をした星が明け方や夕方、地平線近くに見られることがあります。これは地球です。夜の空に見られる星座自体は、地球で見る形と同じです。しかし、地軸の向きが地球と火星とは異なるため、星座の回転の中心は北極星ではありません。

2. 5. 6 火星居住

火星は、地球から遠いことや、ホーマン軌道を想定すると地球に帰還するタイミングが約2年に1度しか訪れないことから、いずれ、有人探査を繰り返しているうちに火星に長期にわたり生活する人間が現れてくるでしょう。そうになると、火星での生活・居住環境について考える必要が出てきます。

物質的な補給については、前述したように、火星の資源を利用して、水・酸素が確

保できます。長期に渡る生活を考えると、物質がほぼ完全に循環するような、つまり、地球上で成立っているような生態系のミニバージョンが構築される必要があります。そこでは、植物栽培や動物飼育などの食料生産、廃棄物処理、水浄化再生、ガス循環などの諸要素を束ねたシステムが成立っていなければなりません。こうして、地球からの物質補給の不必要な自給自足システムが完成します。

火星でのエネルギーはどのように得られるのでしょうか？ 石炭・石油、天然ガス、水力、地熱などはいずれも火星では見つかりそうにありません。自然エネルギーとしては、太陽光と風力のエネルギーしか考えられません。火星表面上では、太陽光エネルギーは、地球上と比べ、半分ほどに減衰します。また、2年に一度、全火星規模の砂嵐があります。そこで、火星の静止軌道に太陽発電衛星を浮かべて火星基地に送電するというアイデアも出ています。また、火星の大気の圧力は低いのですが風速が平均毎秒 5mと強いので、補助的なエネルギー源としての風力発電も実用的と考えられます。

火星での科学探査を行うために、火星の表面の移動手段が必要です。近距離では火星ローバーが利用できますが、遠距離の移動には、火星の大気を利用したグライダー、大気主成分である二酸化炭素より軽い気体を詰めた飛行船が用いられるでしょう。



図2. 5-1 将来の火星居住地の想像図

2. 5. 7 火星のテラフォーミング計画

テラフォーミングとは、「地球(Terra)」を「作る(Form)」という意味の言葉で、火星や金星などを改造して、地球のように人間が宇宙服をつけなくても生活できるようにする計画のことです。考え方自体は古くからあったのですが、惑星探査で火星などの環境、構成物質が明らかになるにつれ、惑星科学者の興味の対象になってきました。

地球に比較的似ている火星は、とりわけ、テラフォーミングの第一候補です。ただし、改造するといっても、軌道をずらしたり、地軸を変えたりする方法は現実的ではありませんから、地表の物質を暖めて蒸気圧を上げたり、大気の温室効果を利用したり、移植する植物の光合成を利用したりという、時間はかかっても技術的に可能な方法を組合わせて、人間が呼吸できる空気を作り出すという方法が考えられています。

人間が宇宙服をつけなくても生活できる環境とは、地球にそっくりの環境でなくてもかまいません。環境条件が、最終的に人間が生存できる範囲内に収まればいいのです。人間の生存可能条件は、表2. 5-3に示したように、比較的許容範囲が広いのです。

表2. 5-3 人間が生存できる許容範囲

項目	条件
温度	0～30℃
全圧	0.014～0.37MPa
二酸化炭素(CO ₂)分圧	1kPa以下
酸素(O ₂)分圧	0.008～0.053MPa
窒素(N ₂)分圧	0.029～0.32MPa

さて、火星のテラフォーミングはどのように行うのでしょうか？

一般には、二つの段階を経て、火星上に呼吸できる大気を作り出します。

第一段階では、二酸化炭素の厚い大気と、それに伴う温室効果による温暖な環境を作ります。

これに伴い、水からなる海を形成します。

第二段階では、火星表面に光合成可能な植物などを移植し、二酸化炭素の大気を最終的に酸素の大気に変えます。

第一段階の方法としては、従来の考えでは、何らかの方法をきっかけとして、正の

フィードバックのメカニズムを起こし、温室効果を加速して、厚く温暖な大気を作るというものでした。具体的には、極冠の上に煤を撒いて太陽光の吸収を増大させて二酸化炭素を溶解・気化させる方法、火星資源を利用して作製したフロンなどの温室効果ガスを大気に加えて大気温度を上昇させる方法などが考えられていました。これにより、温度の上昇→極冠の二酸化炭素の溶解・気化→温室効果の増大→温度の上昇・・・、という正のフィードバックを機能させ、二酸化炭素の厚い温暖な大気を作ろうというものでした。

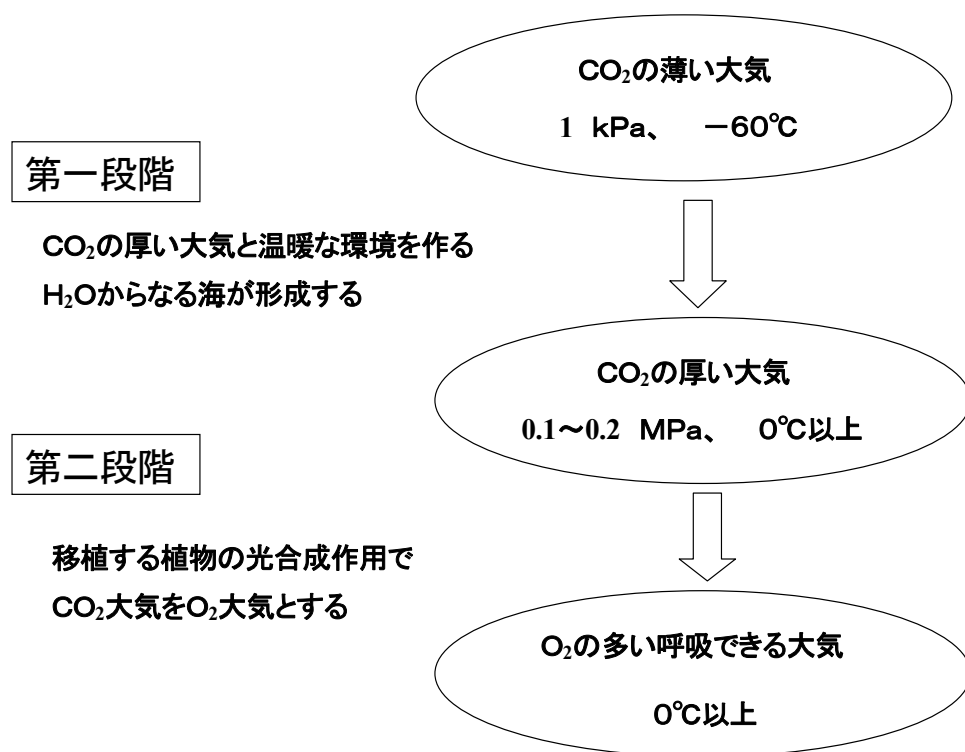


図2. 5-2 火星のテラフォーミング方法の概念

ところが、これらの方法では、必要な二酸化炭素の量の大気を得られないこと、および、短期間で海を形成することが難しいことが判ってきました。問題点は二つあります。

海を形成したり、第二段階で植物を移植するためには、大気の色度が 0°C 以上あることが必要となります。この温度を得るためには温室効果を利用するのですが、0.1～

0.2MPa の圧力を持つ二酸化炭素の大気が要求されるのです。ところで、表2. 5-3 に示したように、極冠からでは、これだけの量の二酸化炭素を得ることができません。炭酸塩鉱物から、しかも、600℃以上に加熱しなければこれだけの二酸化炭素は得られないのです。

表2. 5-4 火星における二酸化炭素の存在量

場所	資源の量
大気	0.7 kPa
極冠	数100 Pa以下
レゴリスへの吸着	30 kPa以下
炭酸塩鉱物として	数100 kPa

* 存在量は、火星大気に広がったときの圧力(Pa、kPa)で示す

参考： 火星大気を0℃以上にするCO₂の必要量＝100～200 kPa以上
炭酸塩鉱物からCO₂を気化させるのに600℃以上の熱が必要。

また、海を形作る水も、地下水や、地下の氷から得る必要がありますが、従来の考えの方法ですと、海が形成されるまでに百万年の歳月がかかることが判ってきました。

表2. 5-5 火星における水の存在量

場所	内容	資源の量(m)
極冠	永久凍氷、層内、地下氷	26m
表面	粘土鉱物中、レゴリスへの吸着	13m
地下	地下氷、地下水	数100m

* 存在量は、火星表面に広がったときの深度(m)で示す

これらの問題を解決するためには、第一段階で、より強烈な方法を採用する必要があります。考えられている方法は、(1)核爆発、(2)巨大な鏡を宇宙に浮かべる方法、(3)彗星・衛星・小惑星などの地表への激突、などです。これらの巨大なエネルギー

を、炭酸塩鉱物の堆積した厚い地層に集中することにより、厚い二酸化炭素の大気と、水からなる海が形成されると考えられています。

第二段階では、植物などの光合成を起こす生き物を火星に導入して、二酸化炭素の大気を、酸素を含んだ人間の呼吸できる大気に変換していきます。ここで留意すべき点がいくつかあります。

第一に、二酸化炭素が酸素に変換した場合、余剰となった炭素原子の処理が必要になります。対策として、光合成の過程で炭素を体内に吸収・蓄積した植物を刈り取って、これらのバイオマスを支中深く埋設する必要があります。また、テラフォーミングの過程で生態系が自然に豊かになるにつれ、増殖してくるであろう地中の微生物による活動を監視する必要があります。これらの埋設バイオマスを炭素源として、大気の酸素を二酸化炭素に戻してしまうことは避けなければなりません。

第二に、酸素のみからなる大気は危険です。地球のように、火星のテラフォーミング後の大気には窒素などの不活性な気体の存在が必要です。しかし、火星には必要なだけの窒素が不足しているのです。このために、たとえば、土星の衛星タイタンなどから、窒素を輸入する必要があるでしょう。

これまでに述べたテラフォーミングの考え方は、火星についての最新の知識に基づいているものです。同様に、私たちの地球の生態系について培ってきた知見や、考え方によってもおおいに影響を受けています。このように、テラフォーミング計画について考えることは、惑星科学、惑星大気科学、生態学、植物学、生理学などの幅広い分野の学問を駆使して、火星という題材を、ひいては、地球の生態系を、地球の将来の姿を考えることでもあるのです。実際の火星のテラフォーミング計画は、私たち人類が火星に居住し、火星についての更なる知見を得、新しい文化圏を創造した後に、彼ら「火星入」によって初めて企画され、実行されるべきものでしょう。その時には、長期に渡る、後戻りのできない計画として慎重に実行されなければなりません。

惑星という自然の創造物を人間の手によって改造することに、倫理的な面から警鐘を鳴らす研究者もいます。過去の火星生命が発見された場合に、人間は火星に住むべきか？ という考え方もあります。火星という題材を借りて、このような自然や生態系と人間との関係、他の生物との共生などについて議論を充分尽くしながら、地球というかけがえのない惑星に存在する、ともすれば奢りがちな人間について考えてみるのも重要なことと考えられます。

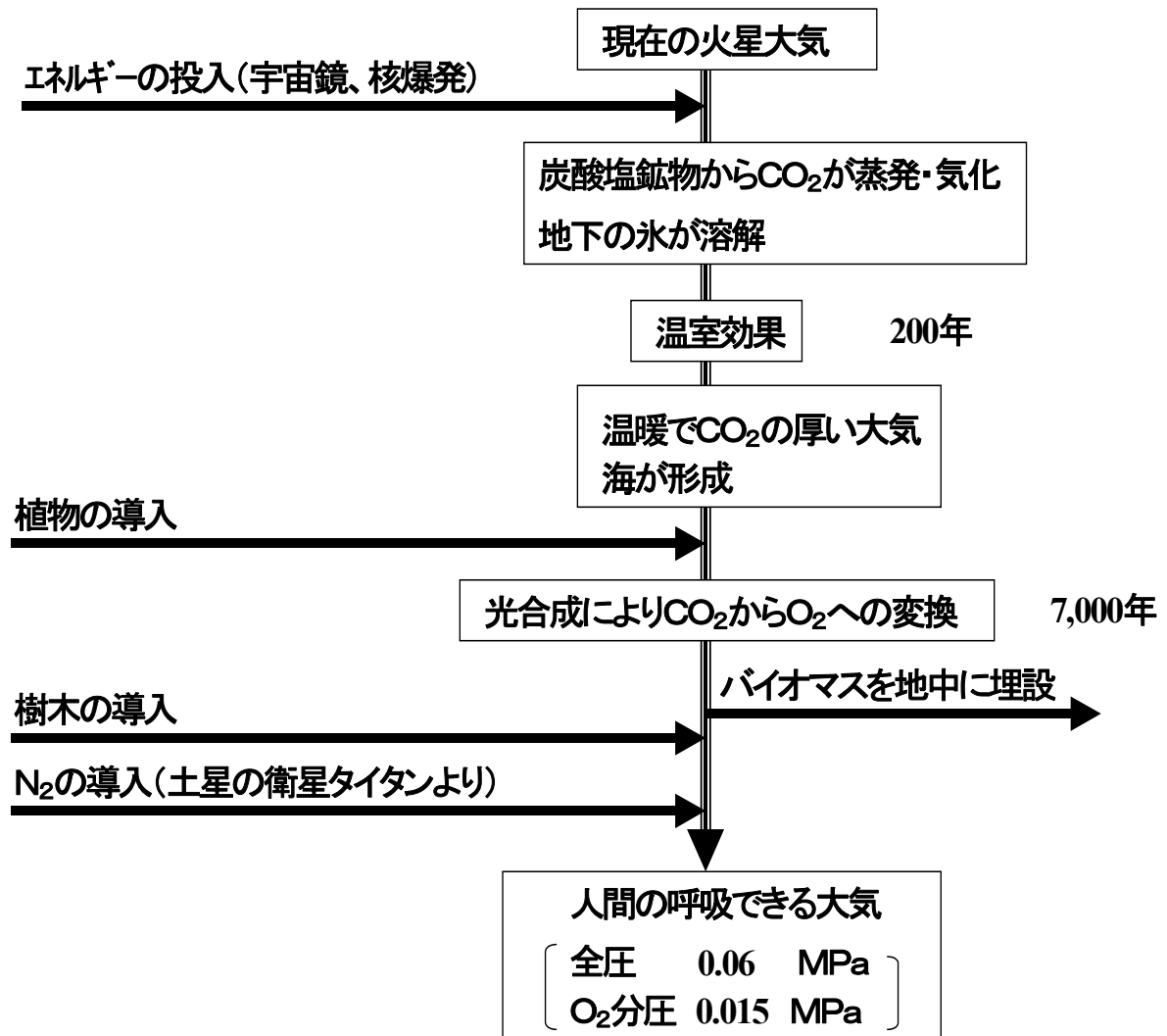


図2. 5－3 火星のテラフォーミングの方法

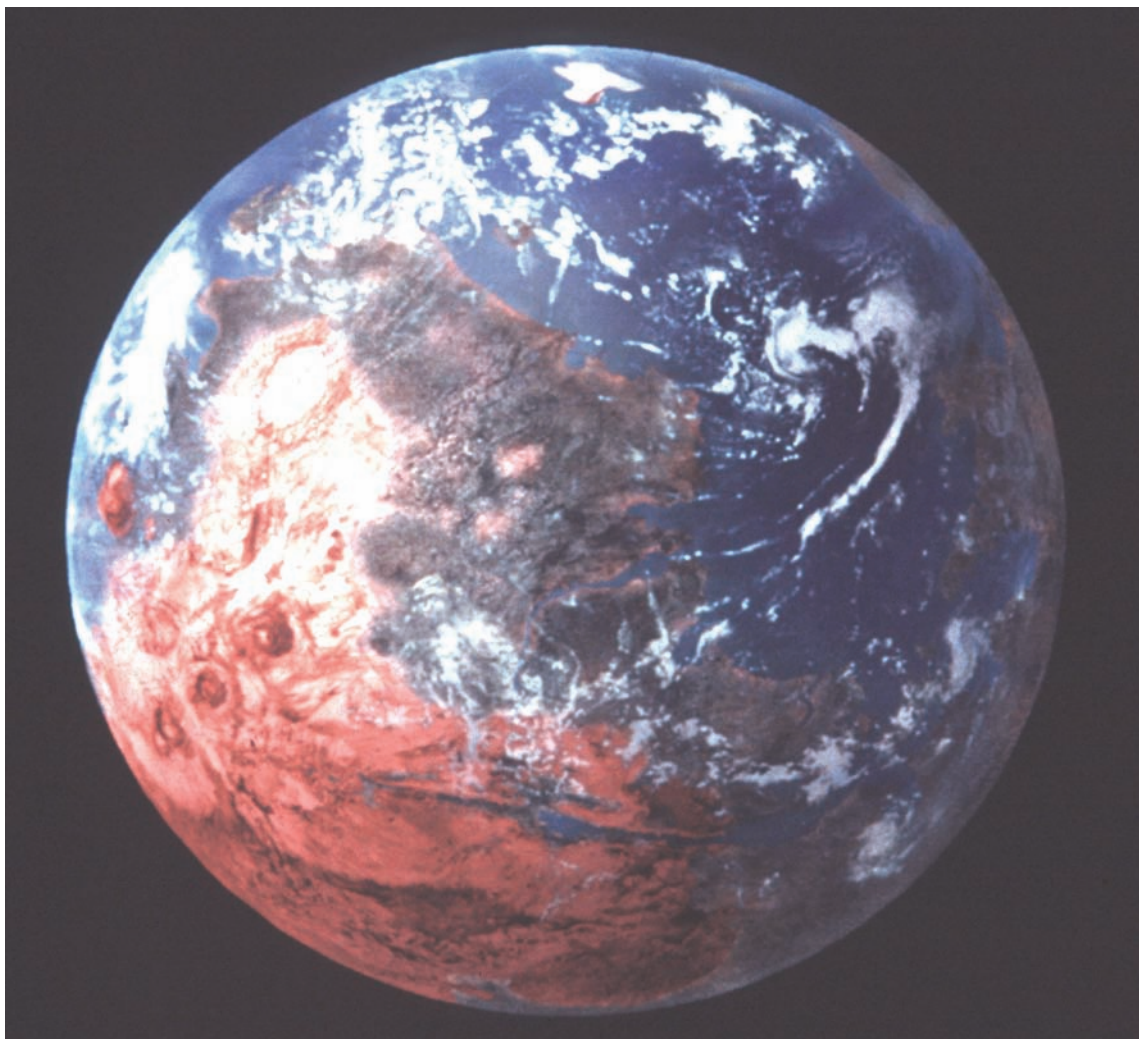


図2. 5-4 テラフォーミング後の火星の想像図

3. 宇宙から地球をみる

3. 1 大気・オゾン層の観測

3. 1. 1 地球大気の変遷

約46億年に太陽系第3惑星である地球が宇宙のチリの中から生れた後、その惑星を取り囲む気体の集合体、つまり地球の「大気」は、地球の歴史の中でさまざまな変遷を遂げてきました。地球大気が現在のような状態になったのは、地球の歴史の中ではごく最近のことです。その大気の変遷には、地球を構成する岩石圏・海洋圏・生物活動などが複雑に絡み合ってきました。まず最初に、地球大気の変遷過程について見ていくことにしましょう。

約46億年前に地球が誕生した後、約1億年ほどの間は流星などの星間物質の衝突のため、地球はかなり熱された状態であったと考えられています。そのため、解けた地球表面や地球内部から、揮発性の気体がいわゆる「脱ガス」過程によって放出され、地球の原始大気を形作っていったと考えられています。この地球原始大気の主成分は、二酸化炭素(CO_2)、水蒸気(H_2O)、窒素(N_2)、水素(H_2)、一酸化炭素(CO)、硫化水素(H_2S)等だったと言われています。これらの大気の成分は現在の火山から噴出しているガスの組成に近似しています。

その後、大気が冷えて水蒸気が凝結し、大量の雨となって降り注ぐことにより海が生れます。二酸化炭素、硫化水素等は水に溶けやすいため海に溶け込むこととなり、地球が誕生して約20億年後にはほぼ現在の海と同じpHやイオン組成になったものと考えられています。このころからの地球の歴史は、海底に沈殿した堆積岩の中に地層として刻み込まれているため、現在でもその変遷を調べることが可能となっています。このころの大気中には、現在の地球大気中で2番目に多い酸素(O_2)はまだほとんど存在していませんでした。大気中の微量の酸素は、鉄を多く含む火成岩の酸化作用によって消費され、岩石に取り込まれてしまっていたためです。現在、多くの生物の活動にとって不可欠な酸素は、その後の生物活動によって大気中に増えてきたのです。

地球上最初の生物の痕跡は、現在から約35億年前にさかのぼることができます(図3.1-1参照)。生物の発生の原因はいまだ明らかにはなっていませんが、雷活動などによって、偶然生物の元となるアミノ酸やDNAが原始海水中で生じたのではないかとされています。最初の生命の痕跡を残すストロマトライトと呼ばれるその石は、石灰質の薄い層がまるく堆積したもので、化石化したシアノバクテリアと呼ばれる生物(植物)や藍藻植物の死骸が積み重なったものと言われています。

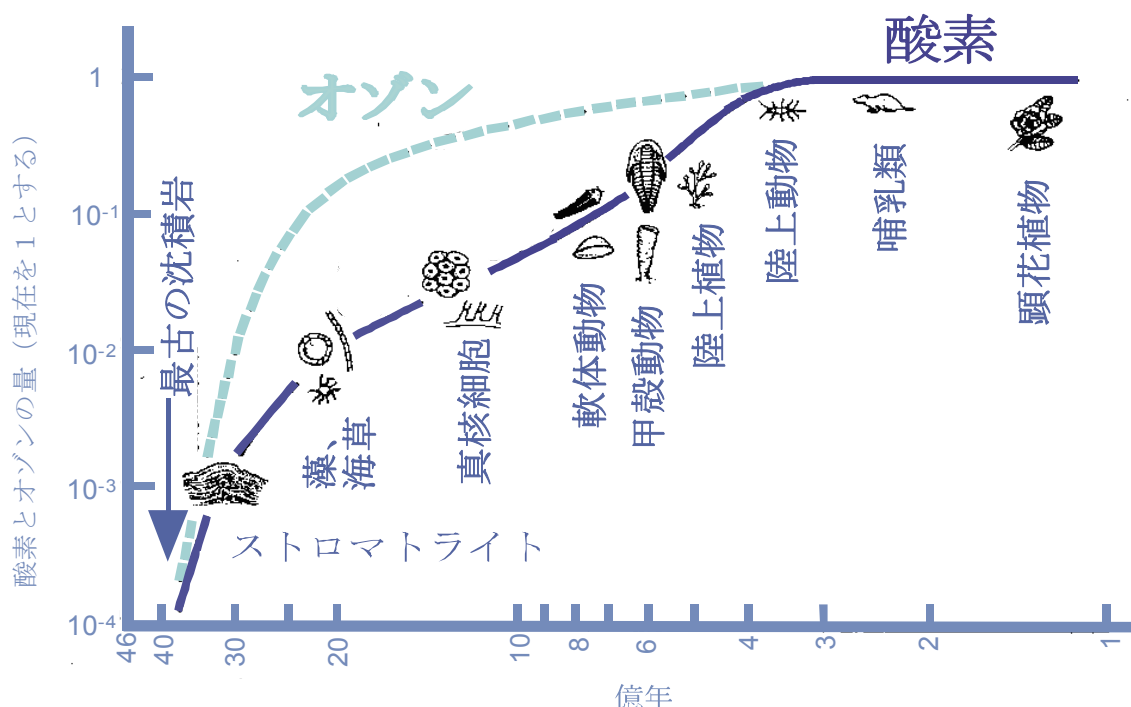


図 3.1-1 地球上の生物の進化、大気中の酸素量とオゾン量の変遷

25～26 億年前の原生代の堆積岩中には、フィラメント状の海草の微化石が確認できます。また、約 14 億年前には真核細胞の生物の大発生が確認されています。このころの生物活動は、太陽からの有害な紫外線の届かない海の中に限られていました。

これら、海中で大いに栄えたシアノバクテリアを始めとする植物は、光合成という炭酸同化作用によって有機物を産出することが可能でした。光合成は、光エネルギーによって地球大気中に豊富に存在していた二酸化炭素と水を栄養素として取り込み、結果的に排泄物として酸素を放出する反応です。その結果、地球大気の長い歴史の中で二酸化炭素濃度は減少し、逆に酸素濃度は高まってきました。また植物が作ってくれた有機物を栄養に、呼吸によって酸素を消費し二酸化炭素を放出する動物が発生し、地球上の生物は海の中で繁栄していきました。

やがて、植物による光合成活動によって地球大気中に増えていった O_2 からオゾン (O_3) 層が形成され、太陽からの有害な紫外線を遮ってくれることにより陸上での生物活動が可能となりました。今から約 4 億年前に陸上に進出した動物・植物は、その後のさまざまな進化と変遷を遂げ、結果的に現在の地球のような多様性を持った生物相が生れてきたと考えられています。特に動物は、植物の排出してくれた酸素と有機物を呼吸と言う新陳代謝機能で利用することにより、エネルギーを取り出すことによって、より高度な生物活動を可能としてきました。このように、現在の地球大気中では、

植物と動物が光合成と呼吸と言う相補的な活動を行うことによって、大気中の二酸化炭素と酸素の量を均衡させるような微妙な生態系バランスが保たれるようになっているわけです。

3. 1. 2 雲や台風の観測

地球全体の大気環境を広域で観測するためには、地球の外側から眺める衛星観測が適していることは明らかなです。衛星から地球を観測することによって、全球規模の均質なデータを、継続的に取得できるというメリットがあります。

地球観測で用いられる衛星を軌道の特徴で分類すると、大きく2つに分けることができます。一つは、赤道に 35800 km の高度で、地球の自転と同じ速度で回転する「静止軌道衛星」です。この衛星は、地上から見ると常に同じ地点に止まっているように見えるため、雲などの気象観測に適しています。現在静止軌道には、米国の GOES-E, GOES-W、ヨーロッパの METEOSAT、日本の GMS、インドの INSAT の 5 機の気象観測衛星が常駐し、定期的に雲画像を送信しています。

もう一つは、もっと低高度、500～1000 km の高度を周回する、「極軌道衛星」です。その中でも、太陽電池によって電力を得るための姿勢制御が容易な、太陽に対して同じ地方時の軌道面を周回する、太陽同期軌道がよく用いられます。

衛星からの地球観測の歴史を振り返ると、最初に実用化されたのは 1960 年代初頭における米国の TIROS/NOAA シリーズの気象観測衛星でした。この衛星の可視・赤外光センサーを用いることによって、1 日 2 回、ある地点上空における低気圧に伴う雲や前線、台風等気象現象の分布を得られるようになりました。また、1974 年からは静止衛星の運用が開始され、雲や台風などの連続的モニタリングが可能となり、特に台風やハリケーンの接近を知らせる天気予報の分野で大いに活用されています。

図 3.1-2 は、アメリカの静止気象衛星「GOES」が観測した、3 つのハリケーンの様子です。また、図 3.1-3 に、日本の静止気象衛星「ひまわり(GMS)」が観測した、日本列島からオーストラリア上空にかけての雲の分布を示します。このように、気象衛星は、現在では正確な天気予報にとって欠くべからざるものとなってきています。日本の気象衛星は、2006 年に機能を拡張したひまわり7号(MTSAT-2)が打ち上げられ、現在雲や台風の観測を行っています。また最近では、直接熱帯地域での降雨を測る人工衛星も打ち上げられています。これについては、3. 3節で後ほど詳しく述べます。

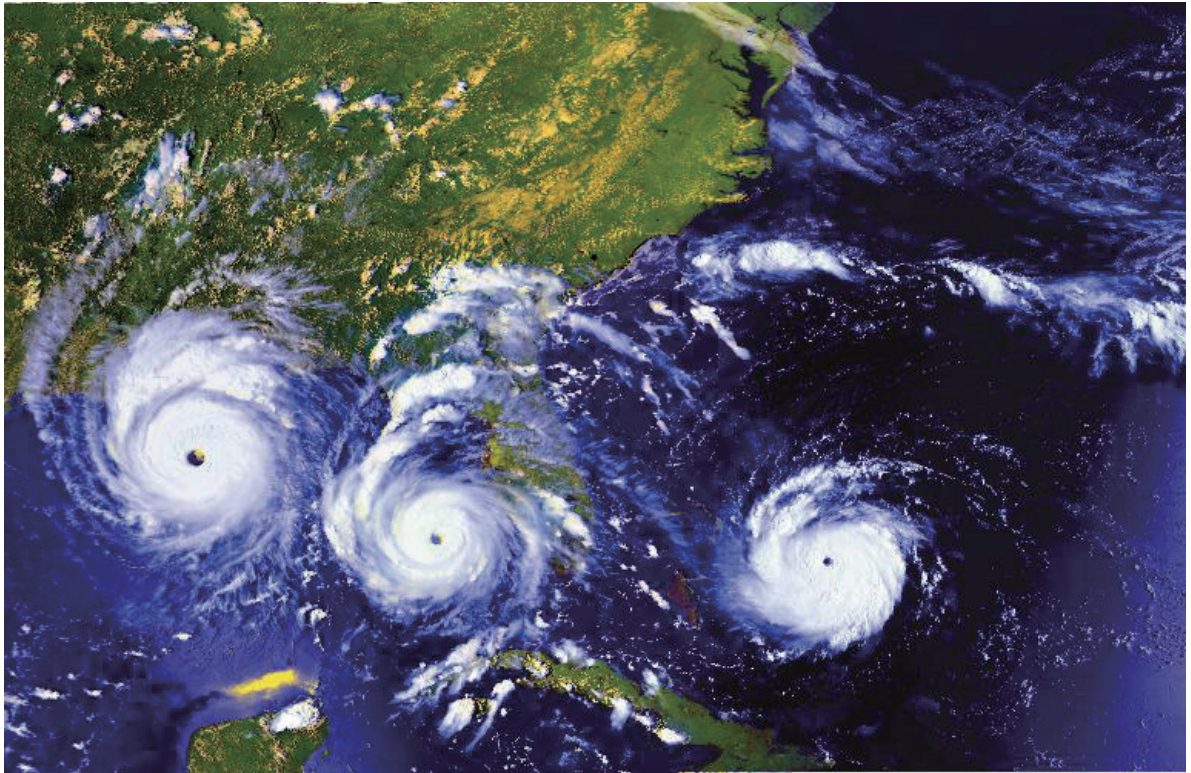


図 3.1-2 アメリカの気象衛星「GOES」が観測した、3つのハリケーン

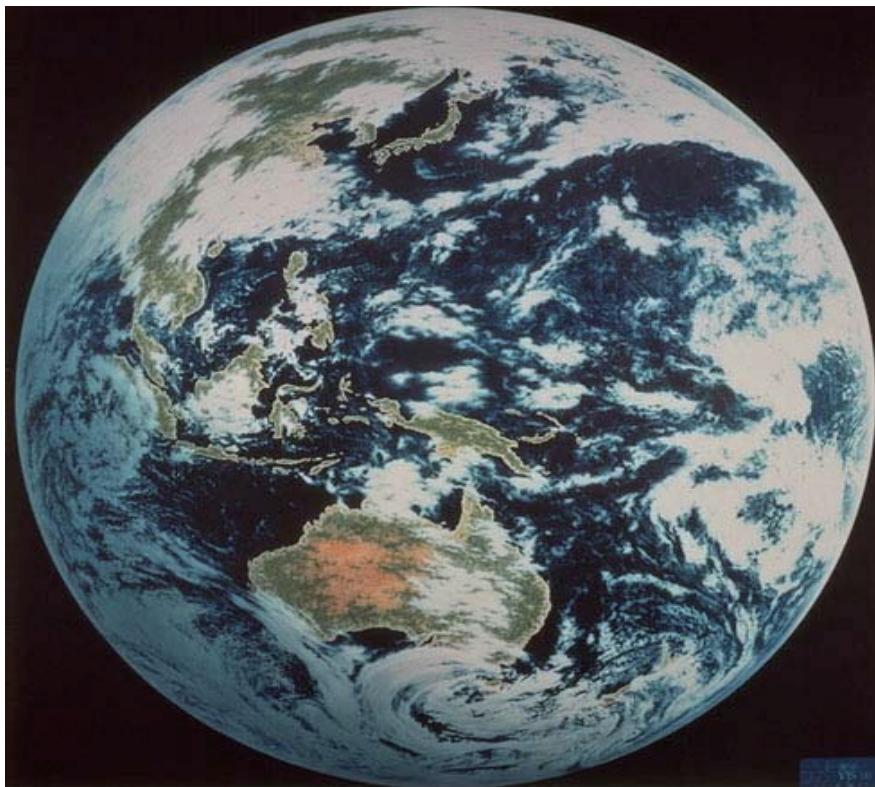


図 3.1-3 気象衛星「ひまわり」が観測した日本・オーストラリア上空での雲の様子

3. 1. 3 オゾン層の観測

地球大気の構成成分はその多くが無色透明です。逆にいうと、そのおかげで我々は空や星空を肉眼で見ることが出来るわけです。しかし、電磁波のうちでも特殊な波長を用いることで、宇宙から地球大気を構成する主成分である窒素、酸素以外の気体成分を観測することも可能となってきます。これらの気体成分のことを「大気微量成分」と呼びます。表 3.1-1 に現在の地球大気の構成割合を示します。この表でわかるとおり、主成分である窒素、酸素にアルゴン(Ar)を加えると、全体の 99.9%となってしまう、残りの大気微量成分はあわせても 0.1%に満たないことが判ります。しかし、これらの大気微量成分が、地球環境にとってなくてはならない働きをしています。その中心は、オゾン、及び二酸化炭素、メタン(CH_4)等の温室効果気体です。温室効果気体の働きについては、3. 1. 4 節で述べます。

地球大気はその温度構造によって、地上から約 12 km までの対流圏、その上約 50 km までの成層圏、その上約 85 km までの中間圏、その上の熱圏に大きく分けることができます図 3.1-4 に地球大気の温度構を示します。

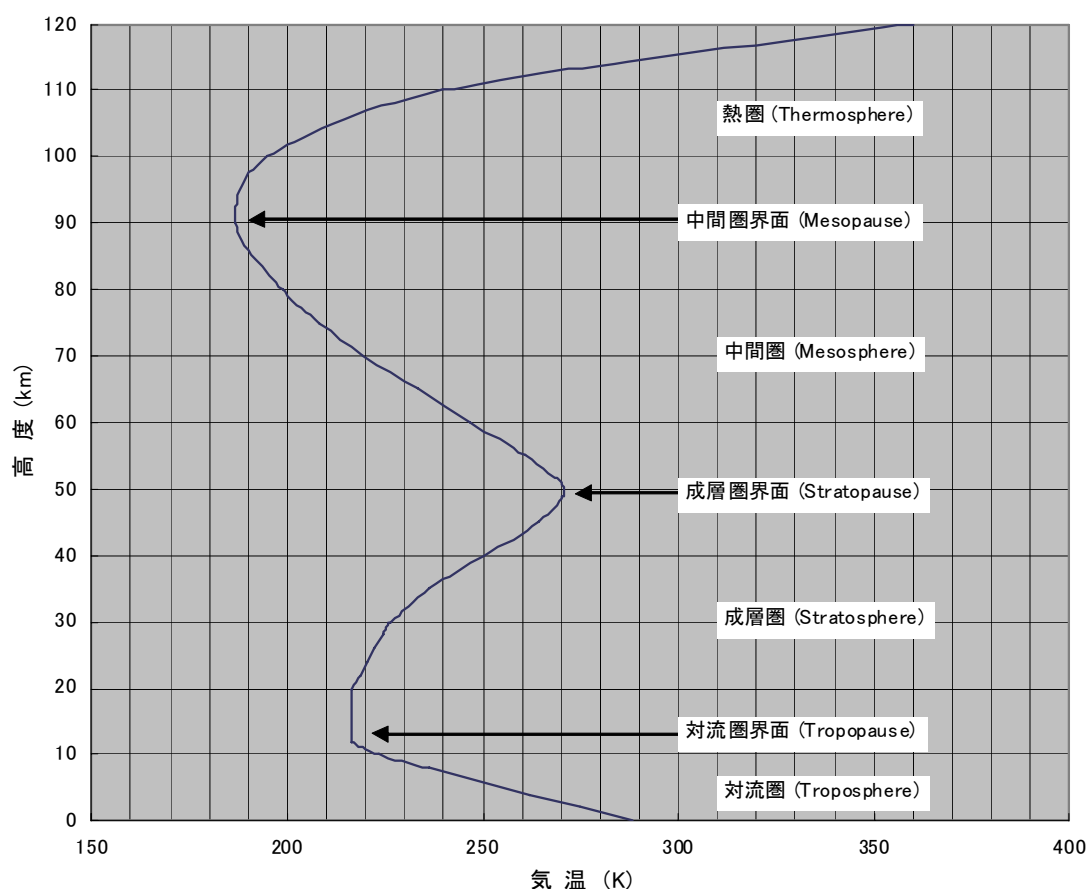


図 3.1-4 地球大気の温度構造

オゾン層は高度 12～50 km の成層圏に主に存在しますが、そのすべてを地上に集めたとしても、厚さわずか 3 mm ほどにしかならないほどの微量しか大気中には存在しません。しかし、このわずかなオゾンは太陽からの有害な紫外線(UV-B, UV-C)をほぼ完全に吸収してくれる働きを持っています。これらの紫外線がもし地上まで降り注いできていたとすると、生物は地上では生活することが出来ません。生命の存在に不可欠な DNA が紫外線によって破壊され、子孫を残すことが出来なくなってしまうからです。ところで、オゾンは酸素から生成される物質です。前に、原始地球大気には酸素は存在していなかったことを述べました。酸素は海中の植物の光合成の結果放出され、やがて大気中に増えてきた酸素から酸素が生成され、その結果植物を含めて生物は地上で生活することが可能になってきたわけです。

このように、長い間をかけて大気中に生成し存在しているオゾン層のおかげで地上での生物活動が保証されているわけですが、そのオゾン層の存在を揺るがす発見が 1980 年代前半になされました。それは、南極基地上空でのオゾン層が、通常の半分ぐらいの量まで減っているという発見でした。人工衛星からの観測の結果、南極大陸を覆うほどの面積で、オゾン層に穴があいたようになっている状況であることが判りました。

現在では「オゾンホール」と呼ばれるこの現象はその後の全世界をあげた研究のおかげで、人工起源のフロンガスがその元凶であることが突き止められました。図 3.1-5 に、アメリカの人工衛星センサー-TOMS が捕らえたオゾンホールの年々変動の様子を示します。このように、オゾンホールが南極で出現していることは、人間活動によって放出されたわずかなフロンガスが触媒の働きをすることによって、30 万倍ものオゾンを破壊していることによるものであったのです。

このような極域でのオゾン変動の様子は、1996 年 8 月に種子島宇宙センターから H-II ロケット 4 号機で打ち上げられた国産の人工衛星 ADEOS「みどり」に搭載された、環境省のセンサー「ILAS」によっても捕らえられました。図 3.1-6 に、ILAS が観測した南極上空におけるオゾンの変動の様子を示します。

各国の科学者たちはいち早くこの事実を国の政策決定者に知らせ、そのおかげでフロンガスの製造・流通を禁止させる国際条約である「ウィーン条約」「モントリオール議定書」などが締結され、オゾン層破壊物質放出禁止に関する国際的な取り決めがなされるようになりました。しかし、このような取り決めを行ってもなお、成層圏におけるフロンガス濃度はやっと昨今最大を迎えたばかりで、元の状況に戻るためにはまだ半世紀ほどの時間がかかるものと考えられています。人間活動によって地球環境が大きな痛手を負ったこの事件は、いかに自然環境がもろく微妙なバランスの上で成り立っているかということ知らしめる良いきっかけになったのであります。

オゾン破壊の原因はまだ完全に解明されたわけではなく、今後も引き続き監視を続けていく必要があります。わが国でも、2002 年 12 月に打ち上げられた人工衛星

ADEOS-II で、オゾン層とその化学変化に関連した大気微量成分のモニタリングを行ないました。その他、ヨーロッパやアメリカ、カナダの衛星による監視も計画されています。図 3.1-7 に、1996 年に ILAS が観測した、南極におけるオゾン(O_3)、硝酸(HNO_3)、二酸化窒素(NO_2)の変動の様子を示します。参考までに、ILAS プロジェクトのホームページを以下に示します。

(<http://www-ilas.nies.go.jp>)

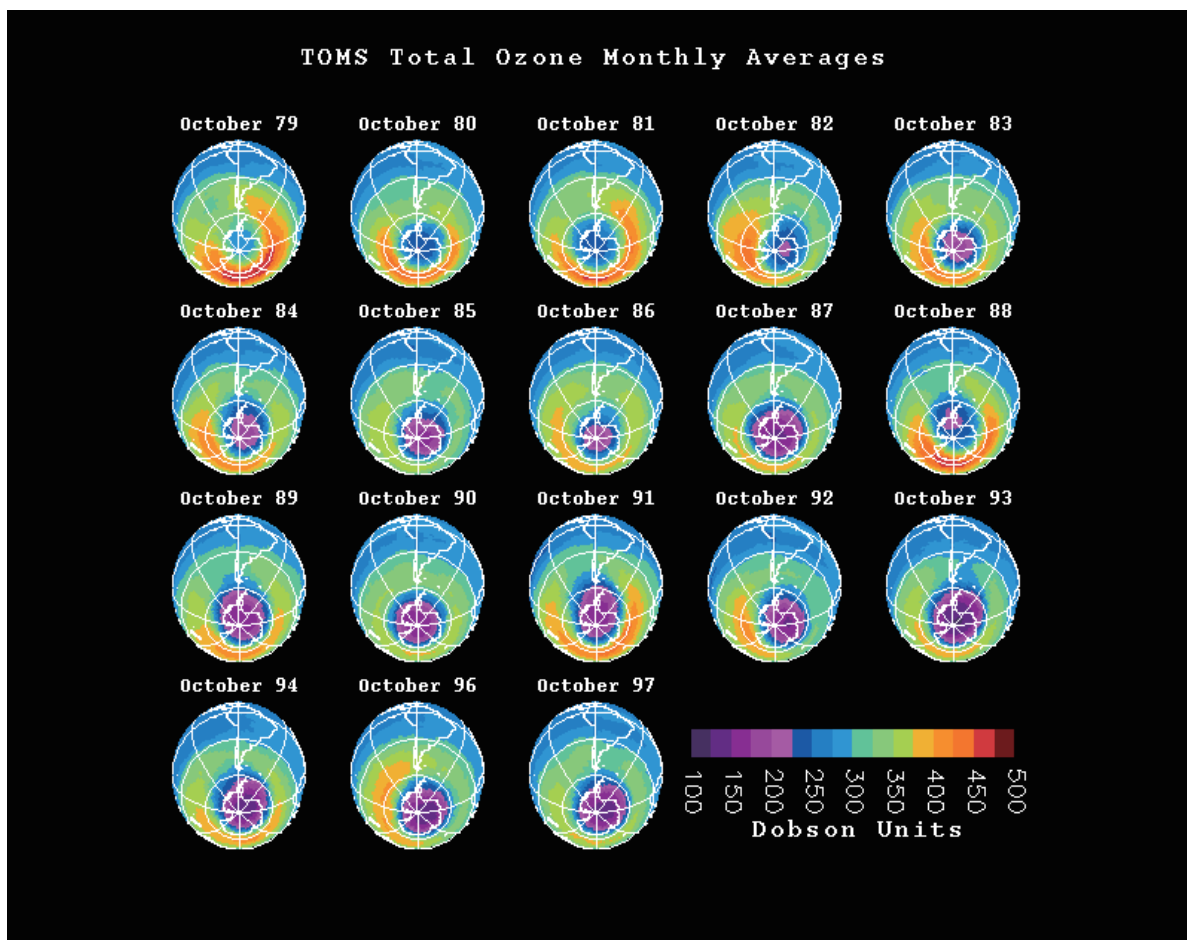


図 3.1-5 アメリカの人工衛星センサ TOMS が観測したオゾンホール
の年々変動の様子

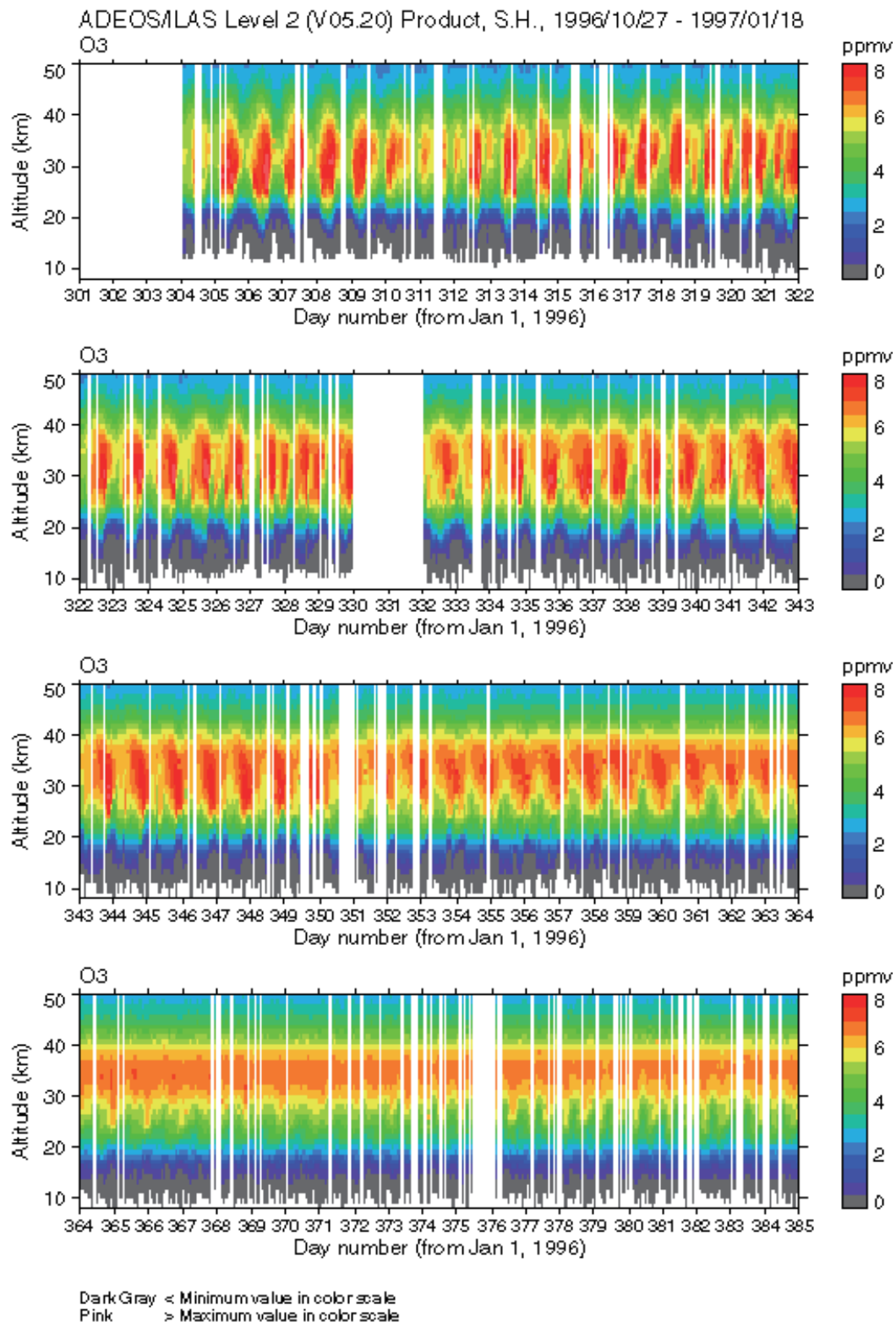
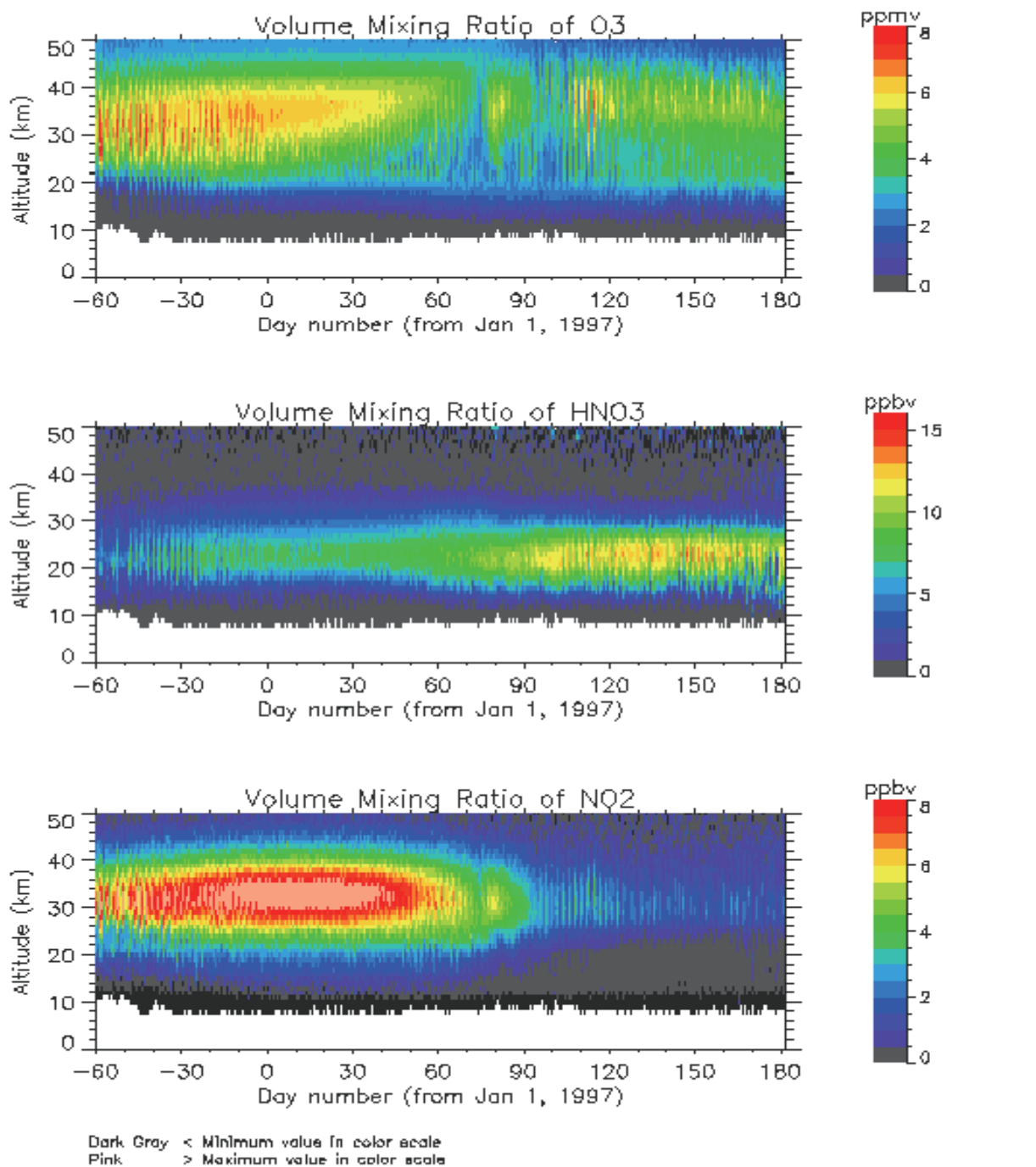


図 3.1-6 ILAS が観測した、南極上空におけるオゾン変動の様子。10 月末から 11 月はじめにかけて、オゾンの多い場所と少ない場所が交互に見受けられる(オホールの名残り)が、12 月にかけてオゾン量が回復していくことが見て取れる

ADEOS/ILAS Level 2 (V05.20) Product, S.H., 1996/11/01 — 1997/06/30



Copyright(c) 2001 National Institute for Environmental Studies

29/January/2002

図 3.1-7 ILAS が観測した、南極上空における約半年間(1996 年 11 月～1997 年 6 月)における、オゾン(O₃)、硝酸(HNO₃)、二酸化窒素(NO₂)の変動の様子

3. 1. 4 温室効果気体の観測

近年、地球温暖化問題がクローズアップされてきております。地球温暖化とは、産業革命以降人間が社会活動のエネルギーとして石油や石炭などの化石燃料を大量に使用することになったため、大気中の温室効果気体が増加することによって地球の平均気温が上昇することを意味します。産業革命前に約 280 ppmv だった大気中の二酸化炭素濃度が、2002 年現在では約 375 ppmv にまで増加しています(図 3.1-8 参照)。それに伴い、ここ 100 年間の地球の平均気温は 0.6 度上昇したことがわかっています。今後 100 年間には、さらに 1.5~6.0 度上昇すると言われています。それに伴い、海面水位の上昇、水不足、食料不足、異常気象の増加、地域紛争の増加などが懸念されています。

1997 年 12 月には京都において、気候変動枠組み条約第 3 回締結国会議(COP3)が行われ、地球温暖化問題に今後国際的にどう対処していけば良いかと言う議論がなされました。その結果、気候変動に対応するための国際的な取り決めがなされ、いわゆる「京都議定書」が採択されました。今後各国によって、この議定書の取り決めに基づいて、二酸化炭素等の温室効果気体の削減に対する取組みが進められていく予定です。日本も 1990 年レベルと比較して、温室効果気体の 6%の削減が義務付けられることになりました。

先に述べたように、人工衛星から地球大気の観測を行うことによって、全地球の大気環境を調べることが可能となります。今後は、温室効果気体も含めて人工衛星からモニタリングすることが求められています。温室効果が有効に働くのは、地球大気の中でも高度 10 km 以下の対流圏です。ところが、宇宙から対流圏の温室効果気体の分布を調べるためには、雲などの影響を排除する必要があります。また、年増加率 1.5 ppmv にしか過ぎない二酸化炭素のわずかな変化を、精度良く測定する必要があります。

このように困難は多くありますが、人工衛星からの温室効果気体の全球的モニタリングは、今後ますます要求される技術です。これまでには、日本の人工衛星 ADEOS 搭載のセンサー IMG が、先進的な技術で温室効果気体のモニタリングを試みました。また、2002 年 2 月末に打ち上げられたヨーロッパの大型人工衛星「Envisat」搭載のセンサー SCIAMACHY や MIPAS、また 2004 年 7 月に打ち上げられたアメリカの人工衛星「Aura」搭載のセンサー TES や HIRDLS など、温室効果気体の宇宙からのモニタリングを行っています。

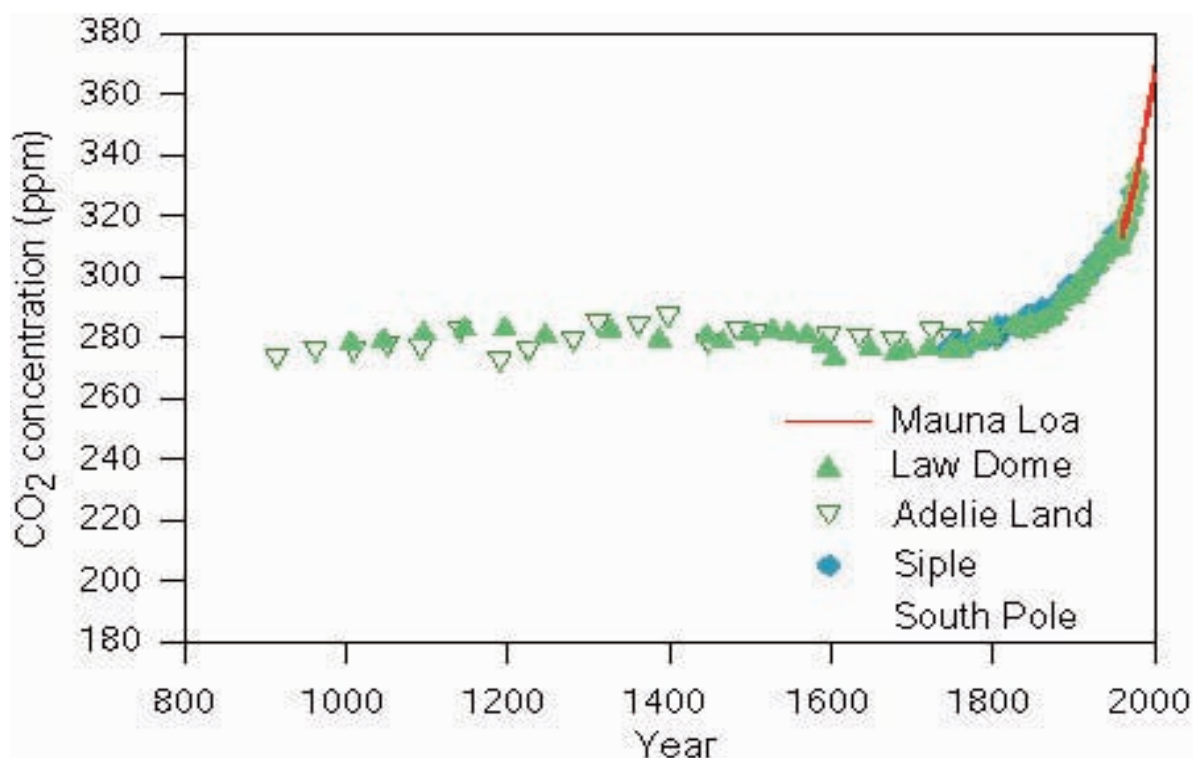


図 3.1-8 南極氷床コアの解析や、ハワイ・マウナケア山での観測に基づく、大気中二酸化炭素濃度の変化

3. 1. 5 大気汚染物質の観測

工場や自動車等からの排煙・排ガスや、山火事や焼き畑などのバイオマス燃焼、火山噴火等に伴って発生した大気汚染物質の広域輸送も、重要な環境問題の一つです。代表的な大気汚染物質としては、窒素酸化物(NO_x)、二酸化硫黄(SO_2)、一酸化炭素(CO)、ハイドロカーボン類(HCs)、エアロゾルなどが挙げられます。これらの物質は気体状で大陸間スケールで長距離輸送された後、酸性雨などになって地上に降り注ぎ、土壤に悪影響を及ぼすこともあることが判っています。

これまでに行われた一つの観測例として、ヨーロッパが 1995 年に打ち上げた「ERS-2」衛星のセンサー-GOME が観測した、インドネシア上空におけるバイオマス燃焼に伴う二酸化窒素(NO_2)の分布を図 3.1-9 示します。また、図 3.1-10 に同じく GOME が観測した、ルーマニア上空における二酸化硫黄の分布を示します。この図の中で、小さな丸印で示してあるのが、火力発電所の場所を示します。このように、ルーマニアでは、十分な脱硫装置のない火力発電所で、硫黄分を多く含んだ石炭を燃料に発電を行っているため、結果的に衛星から見て判るほどの大気汚染が起こっていることが判ります。

特に日本に関しては、今後中国の経済発展の影響で増加が見込まれる大気汚染物質の長距離輸送の影響が懸念されています。これら、大気汚染物質の衛星からのモニタリングも、将来的に見て必要不可欠となってくる分野です。

このように、衛星からのグローバルスケールでの大気環境モニタリングは、これからますます重要になってくる分野の一つです。

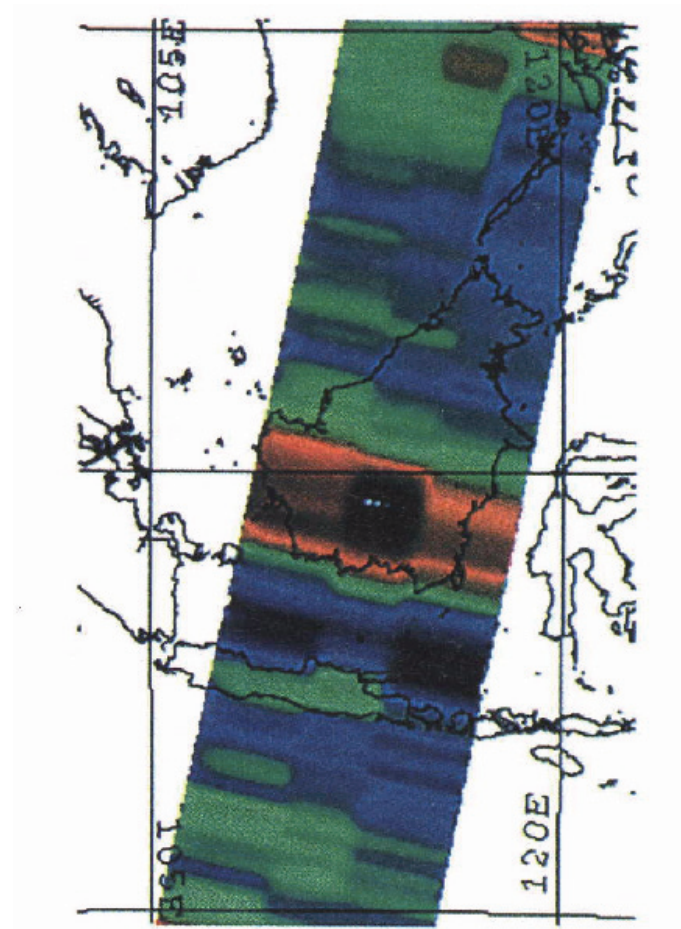


図 3.1-9 GOME が観測した、インドネシア・ボルネオ島上空でのバイオマス燃焼に伴って増加した二酸化窒素(NO_2)の分布

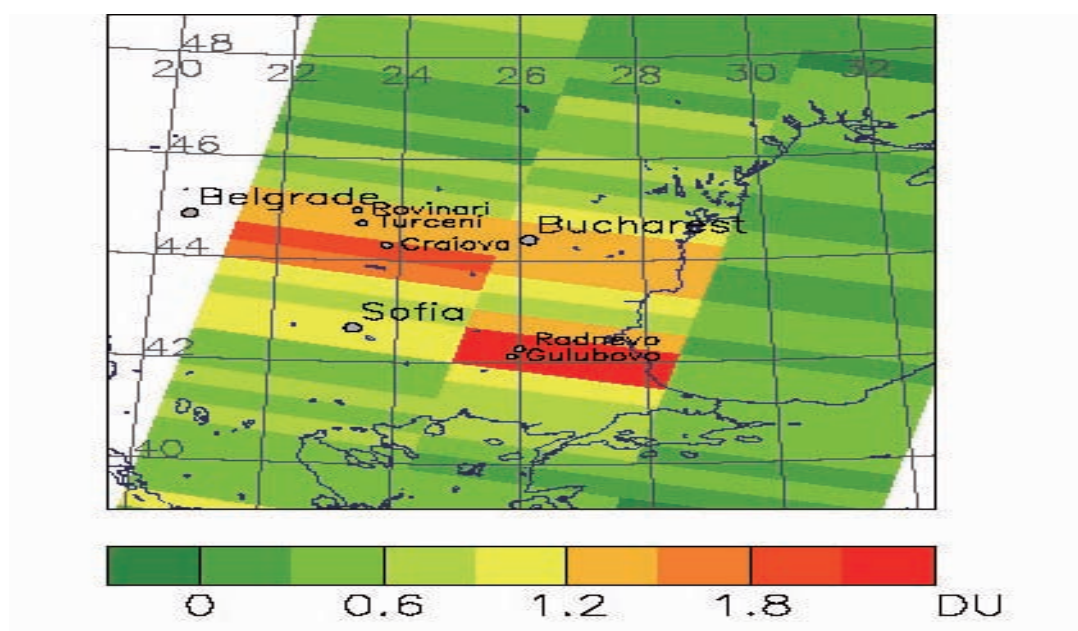


図 3.1-10 GOME が観測した、ルーマニア上空での二酸化硫黄(SO_2)の分布。図中の小さな丸印は、火力発電所の位置を示す

表 3.1-1 現在の地球大気の組成(体積混合比)

窒素(N_2)	78.088%
酸素(O_2)	20.949%
アルゴン(Ar)	0.93%
水蒸気(H_2O)	0.1-2.8%*
二酸化炭素(CO_2)	0.036%
ネオン(Ne)	0.0018%
ヘリウム(He)	0.00052%
メタン(CH_4)	0.00017%

*水蒸気濃度は変動が大きいため、体積混合比の値は水蒸気を除いて総和が 100%になるようにしてある。

3. 2 オーロラの観測

3. 2. 1 地上から見たオーロラ

あなたは今、例えばオーロラの良く見えることで有名な、米国アラスカ州のフェアバンクスにすることにしよう。季節は冬、天気は快晴、気温マイナス 30 度である。短い薄明が終わり、夜が始まろうとする頃、北の地平近くにオーロラのカーテンが静かに横たわっているのに気付く。特に動きもなく、明るさもようやく確認できるくらいしかない。2時間程してもう一度空を見上げると、いつの間にかオーロラは頭上を東西にまたいで延びていた。ぼんやりとした雲のよう。良く見ると全体がゆっくりと南へ平行移動しているようだ。しかし、その姿はぼやけていて、色も良く分からない。天の川と間違えそうだ。夕食をとり部屋に戻り再び外へ出てみると、オーロラはずっと南に位置を変えており、しかも何やら様子が違う。カーテンのような形がはっきりして、色は白味がかった緑色、時折ひらひらと風に揺らめくように動き、それが東西に伝わっていく。何かが起こりそうな不思議な気配が漂う。と思うと、カーテンの一部が強烈に明るくなり、突然の風に煽られたかのように北に向かって広がりはじめる。しかしそれはもはや1枚のカーテンではなく、何重にも折り重なった布が時に繋がり、時にちぎれながら、視界全体を覆い尽くすように流れ、渦巻いている(図 3.2-1)。視覚は遠近感を失い、美しいというよりは、吸い込まれそうな勢いに恐怖すら覚える。色は全体緑白色だが、場所によって微妙に色合いが異なる。特にカーテンの裾は鮮やかなピンク色に染まることもある。そんな光景が 20 分か 30 分も続いた頃だろうか、力強く輝いていた光の束は、いつしか煙草の煙のようにゆらゆらと漂う光の斑点に変わっていた。随分暗くなってしまったが、注意深く観察すると、その斑点は数秒間の間隔をおいて明滅を繰り返している。それらはゆっくりと西へ流れていたと思っていたが、気付くといつの間にか東へ向きを変えている。そのうち明滅も止まり、霧のようなぼんやりした帯が、東西に長く延びているだけになった。時計を見ると、すでに深夜を過ぎ、明け方に近い時間を指していた。ここまで読まれたところで、この晩のオーロラを、地球から少し離れた北の上空から眺めてみた時の様子を想像して欲しい。人工衛星によって、大量の宇宙から撮ったオーロラ画像を手にする前の、ほとんどの科学者たちもきっと同じ状況にあったはずである。



図 3.2-1 アラスカの空に舞うオーロラ
(名古屋市科学館、毛利勝廣氏提供)

3. 2. 2 地上観測から人工衛星観測へ

本格的なオーロラの近代科学としての研究が始まったのは 1930 年代であるが、それから 30 年もの長い間、科学者たちは次のように“思い込んで”いた。「オーロラは地球の磁石の極を囲むように、大きなリング状に分布しているが、夕方側のオーロラは常に静かでほとんど動かず、真夜中にはいつも明るく動きの激しいオーロラが存在し、朝方はカーテンがちぎれて斑点状になっている。これを地上の 1 点で見上げていると、地球の自転によってそれらのオーロラが次々と視界に入ってくる。」こうした伝統的な描像に異論を唱えたのが、1956-1957 年の国際地球観測年の間に撮られた 100 力所以上の全天カメラによるオーロラ画像を詳細に解析した、赤祖父俊一博士（現アラスカ大学国際北極圏研究センター所長）であった。真夜中に起きた爆発的なオーロラの活動は、オーロラのカーテンに沿って夕方側と朝方側に伝播していく。つまり、極域に出ているオーロラ“全体が”静かになったり活発になったりしているのだということを指摘した。赤祖父博士はこうした一連のオーロラの激しい活動を、オーロラサブストームと呼んだ。これはその後のオーロラ研究の軸となる考え方で、それなくしてオーロラの科学研究、ひいては今日のスペースサイエンスの華々しい発展そのものが無かったかもしれないと言われる程、重要な発見である。にもかかわらず、彼が 1960 年代に発表したこの「オーロラサブストーム」という概念を科学者達がちゃんと認めるには、何と 1980 年代まで待たなければならなかった。それは、人工衛星が、刻々と変動するオーロラの連続画像を地球に送り届けた時であった（図 3.2-2）。宇宙から地球を見下ろすことによって初めて、人類はオーロラサブストームという真実を受け入れることができたのである。これまでに、高感度カメラを積むいくつもの人工衛星が打ち上げられ、オーロラのダイナミックな映像を伝送してきた。宇宙からオーロラを観測することのメリットは大きく分けて 2 つある。まず広い範囲を天候に左右されずに観測できること。もう一つは、地上では大気によって吸収されて観測することのできない、紫外線などの光を捕らえることができる点である。オーロラは紫外線でも光っており、太陽光による妨害を受けにくい特徴がある。そのため、宇宙からは昼側に出ているオーロラも撮影することができる。これらの長所によって、衛星を用いたオーロラの撮像は、地上観測では不可能なオーロラ全体の動きを連続的に調べることを可能にし、オーロラ科学の新たな時代が幕を開けたのである。

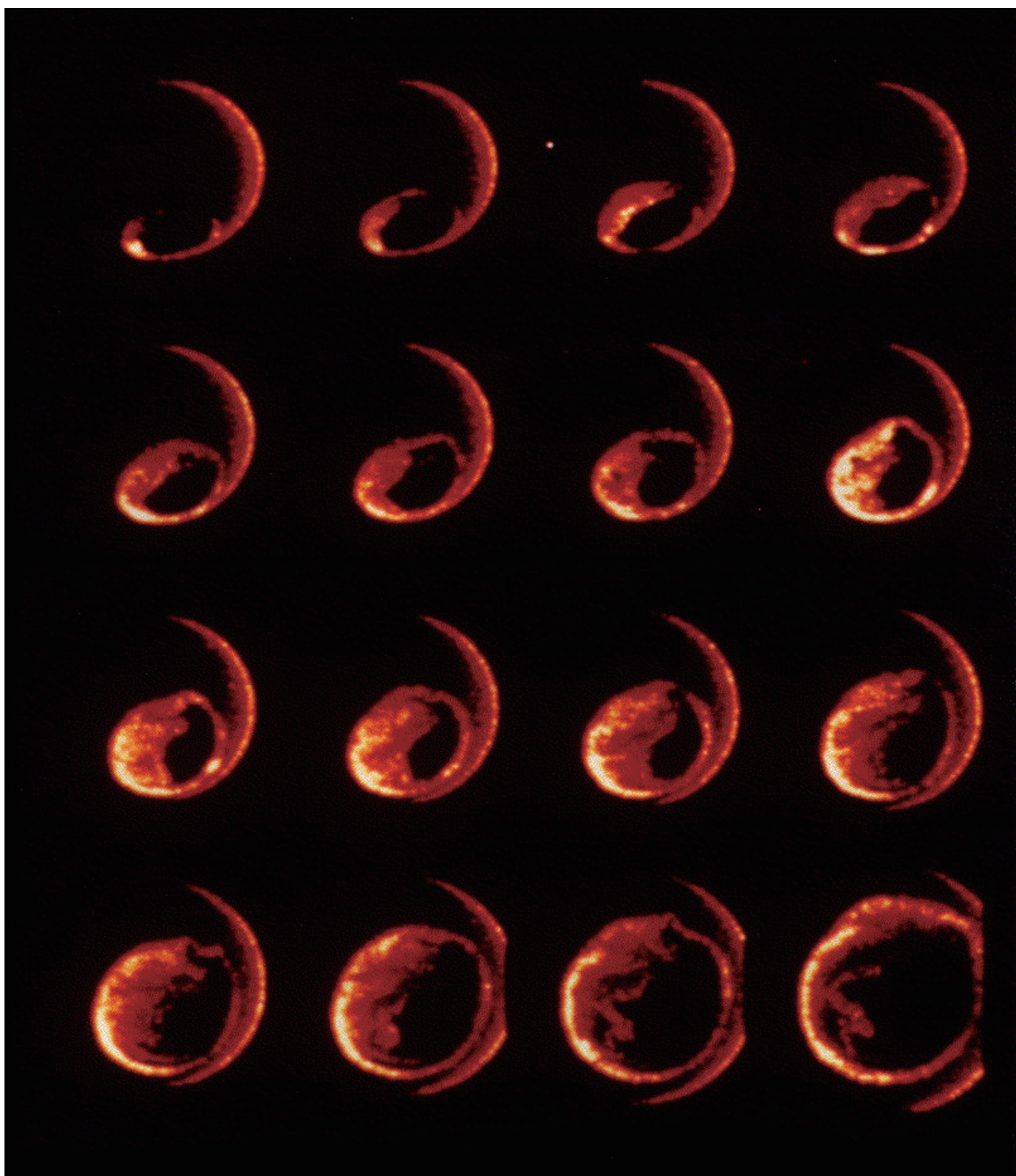


図 3.2-2 米国 DE-1 衛星に搭載されたイメージャーによって捕らえられたオーロラサブストームの発達の様子(左から右へ、上から下へ連続して撮られている)。リング状の発光がオーロラ。直径は数千キロメートルにもなる。右側の三日月状の明るい部分は地球に日のあたった部分。全体が大きくなるのは衛星が地球に接近しているため(NASA Homepage より)。

3. 2. 3 オーロラはどうしてできるか

ここでオーロラ発光の生成メカニズムについて触れておく。オーロラのエネルギーの源は、太陽から放出され、太陽系の中を秒速 300-400 km、時には 1500km を超える高速で外向きに流れている太陽風だと考えられている。太陽風は地球上の風と違い、主に陽子と電子という電気を帯びた粒子から成っており、電気を流すことができる。地球の磁場は、もともとは単純な形をしている(棒磁石の上に紙を置き砂鉄を撒いたときの模様を思い浮かべて欲しい)。それが、太陽風の力によって吹き流しのように、奇妙に変形させられている。太陽方向には地球半径の 10 倍程度、その直角方向には地球半径の 40 倍位までが、地球の磁場の届く範囲(図 3.2-3)で、その吹き流しの内側を磁気圏と呼ぶ。変形した磁気圏の磁場に太陽風が衝突し続けることによって、地球の周りではいくつもの場所で発電がおきる。いわば天然の風力発電装置ともいべきものであり、その発生電力は 100 万メガワットにも達すると推定されている。これは大型の原子力発電所(100 万キロワット)の 1000 倍という、とてつもない大きさである。普通の風力発電機なら効率は風速で決まるが、この太陽風力発電機はそれほど単純ではない。高速の太陽風が吹き続けても必ずしも大きな電力、すなわち明るいオーロラは生まれない。ここでは、磁場の再結合というメカニズムが重要な役割を果たしている(図 3.2-4)。太陽風の中にも、非常に弱いながらも磁場が存在し、その磁力線の向きが地球のそれと反対になった時にそれらが一旦切れてつなぎ替えが起こり、太陽風と地球の磁気圏は磁力線で繋がる(再結合:図 3.2-4)。このつなぎ替えが効率良く起きている時程、発電量も増加する。発電で生成された電流は、磁力線に沿って流れる性質があるため、一部は極域の地上 100km 付近まで届く。電流は陽子や電子といった電荷を帯びた粒子の運動なので、電流が流れるということは、粒子が降ってきたり、逆に出ていくことを意味する。高速で降ってきた粒子(オーロラ粒子)が、高度百 km~数百 km の地球超高層大気にぶつかり発光を引き起こすのがオーロラ現象である。

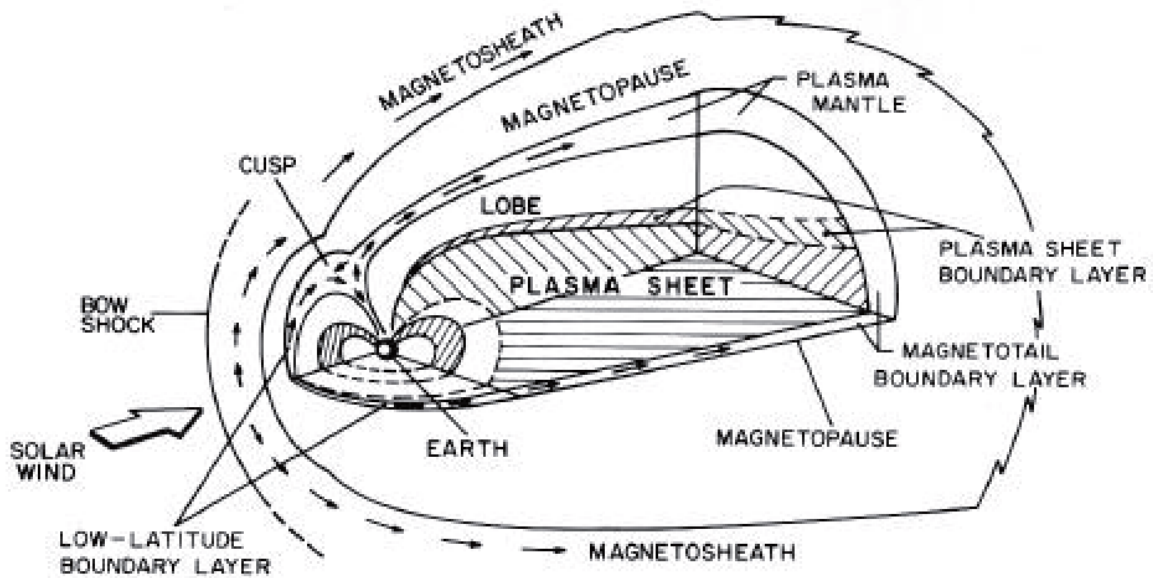


図 3.2-3 地球磁気圏の概念図 (Eastman and Frank, 1984)。左から当たる太陽風によって、吹き流しのような形に変形されている。磁気圏内部は温度や密度の異なるいくつかの領域に分けられている。

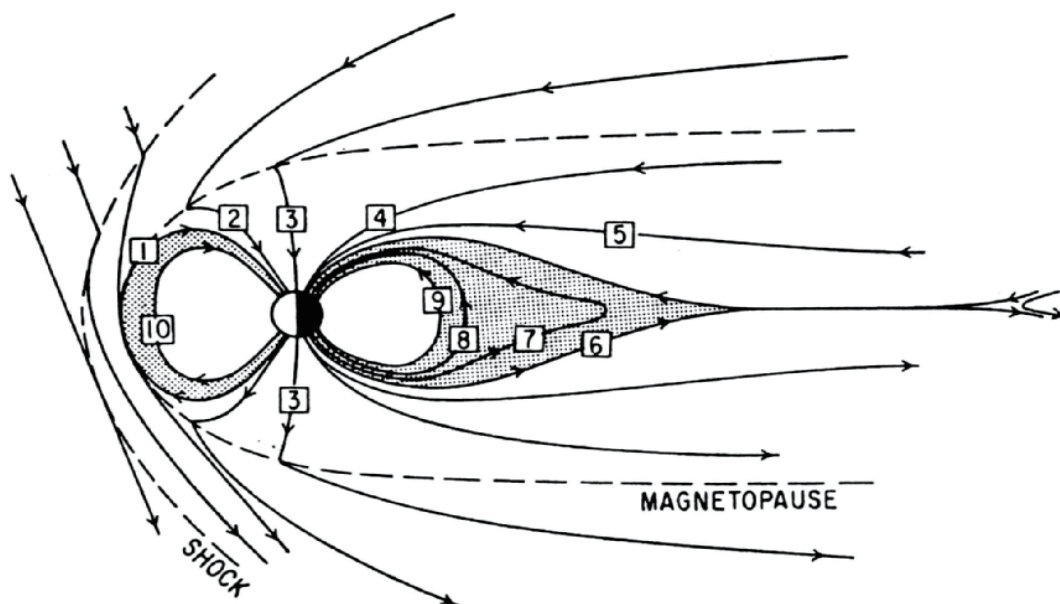


図 3.2-4 磁場再結合の概念図 (Axford, 1969)。左から来た太陽風の磁場が、地球の磁場とつなぎ替えを起こして右に流されていく様子を示している。

3. 2. 4 人工衛星による直接観測

このようなメカニズムを考えると、オーロラは、太陽風の吹き荒れる領域から地球外層大気に至る広大な宇宙空間領域における様々な現象を、超高層大気というスクリーンに凝縮して写し出すものだということが理解できる。私達は、宇宙空間に流れる電流を直接眺めることはできないが、代わりにオーロラの形態や明るさ、色を詳しく調べることで、宇宙空間のドラマを想像する。とは言うものの、やはり直接“触って”みなければ、本当のところはなかなか分からないのも事実である。研究者達は、オーロラを光らせている粒子の種類や温度、速度、また宇宙空間に流れる電流の作る磁場や、様々な波についても、人工衛星を使って精力的に観測を展開してきた。このように“その場”で何か観測量を計測することを、撮像等のリモートセンシングに対して直接観測と呼ぶ。1995年から5年間に亘り国際的な共同プロジェクト(STEP)が実施されたが、日本もこの期間に2つの人工衛星をもって大きな貢献を残している。一つは1989年に打ち上げられた「あけぼの」衛星である。大気に衝突する時のオーロラ粒子は、その直前に加速され、100倍ものエネルギーを得ていることが知られているが、それがどのようなメカニズムによるものかは詳しく分かっておらず、オーロラ研究最大のテーマの一つとされている。「あけぼの」衛星はこの加速過程が起きている領域を集中的に調査し、その仕組みを解明することを目指して作られた。観測は成功し、太陽活動の1サイクル(11年)を超えて、かつてない貴重な継続データをもたらした(図3.2-5)。現在解析が進み興味深い成果が報告されているが、加速の仕組みについては、むしろ謎は深まっており、更なる衛星観測が望まれている。もう一つは「GEOTAIL」衛星で、これは磁場の再結合過程を調べる目的で計画された。もくろみ通り、磁場再結合の証拠と思われる現象を捕らえることに見事成功し、世界的に高い評価を受けている。

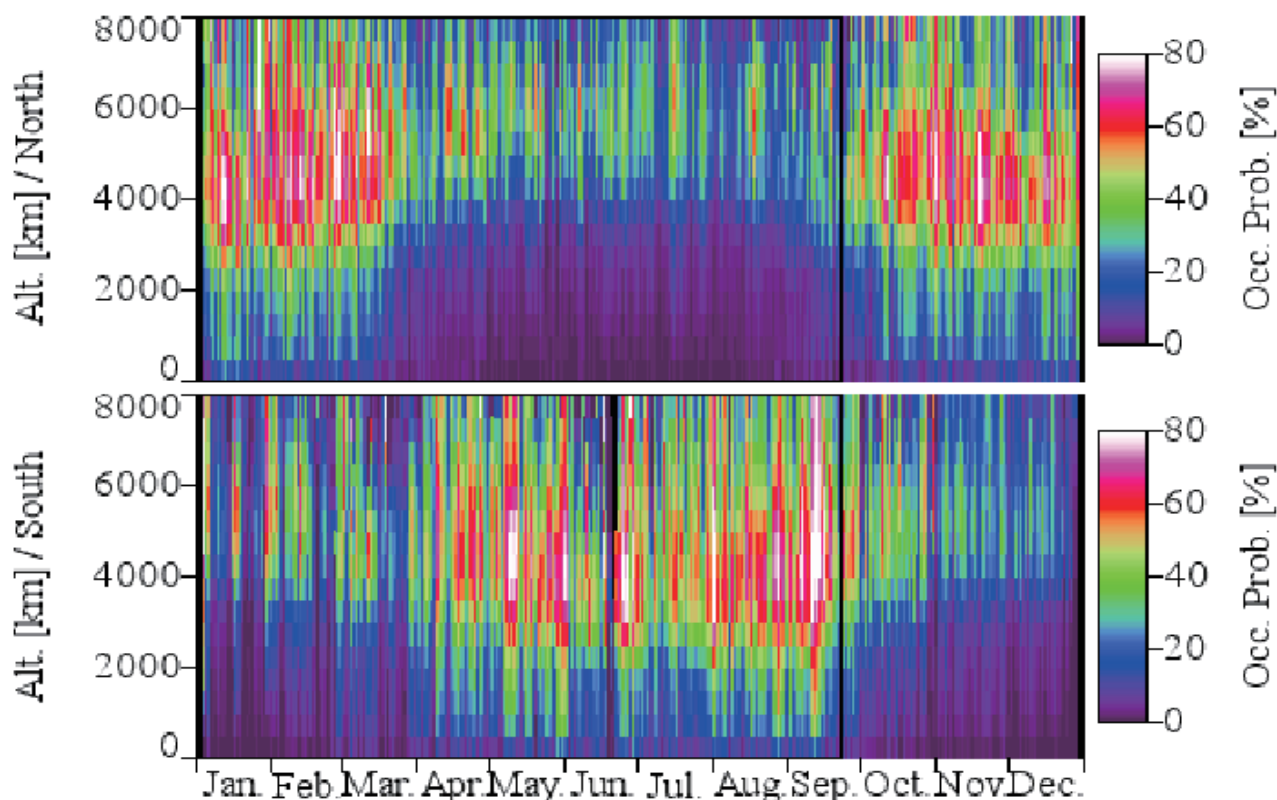


図 3.2-5 あけぼの衛星によって観測された、オーロラに伴うプラズマ波動現象の季節変動の様子(Kumamoto et al., 2001)。縦軸は衛星の高度、横軸は季節(月)を表す。上の図は北半球、下は南半球のデータ。冬の方が強い電波が観測されることが明らかになった。

3. 2. 5 衛星観測の新展開

数々の衛星がオーロラの謎を解明しようと臨んできたが、新事実が明らかになる一方で、むしろ謎は一層深いものになってきている。従来の衛星観測の成果を踏まえ更に一步進んだ最新の観測技術や、現在計画が進行中の、衛星観測のアイデアを紹介しよう。

「IMAGE」衛星は 2000 年に米国が打ち上げた全く新しいコンセプトの観測衛星である。その名の通り撮像を目標としているのだが、オーロラだけでなく、荷電粒子の分布そのものを特殊な装置を用いて撮像することを可能にしたのだ。今まで直接観測から想像をたくましくして描いてきた磁気圏の中の構造が、宇宙空間の闇の中から浮かび上がったのである(図 3.2-6)。現在はこの衛星 1 機のための観測なので、ある 1 方向から見た姿だけだが、将来同種の機器が複数周回するようになれば、時事刻々変化する、磁気圏粒子の立体的な分布が 3D 描画されるようになるかもしれない。

オーロラ粒子とオーロラ発光の対応も、実は解明されていない部分が多い。きちんと調査するにはオーロラの撮影と、オーロラ粒子の直接観測を対応する場所で完全に同時に計測しなければならない。これを地上のカメラと衛星でばらばらに行うと、非常に運が良くない限り、データは皆無に近くなる。もし一つの衛星で両方ができれば素晴らしい。こういった目的で、重さわずか 50kg の超小型衛星に2種類の観測器を搭載する試みも進行中である。

北極と南極のオーロラは、ほぼ同時に似た形状のものが出る場合がある。しかし、いつも全く同じという訳ではない。どんな時に一致し、どんな場合に異なるのかを調べることで、地球磁場の形状や電離層の状態が、オーロラに及ぼす効果を調べられる。月の付近から南北のオーロラをモニターするという挑戦も始められている。

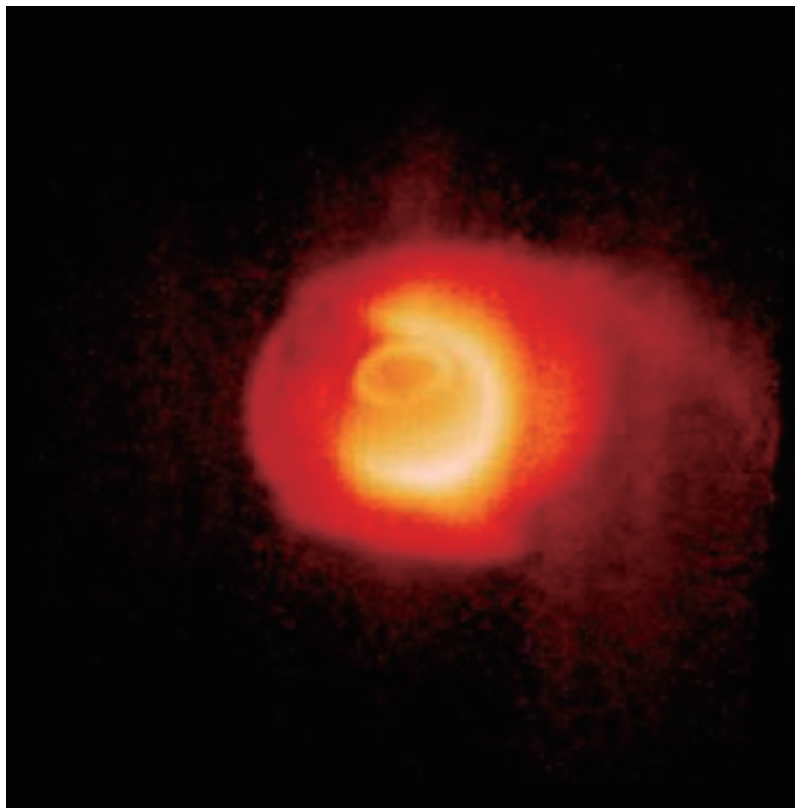


図 3.2-6 米国 IMAGE 衛星によって撮影された、磁気圏の中の特に粒子の密度の高い領域の画像。中心にあるのは地球で、極域にはオーロラのリングも写っている(アリゾナ大学 Homepage より)。

3. 2. 6 オーロラ科学から宇宙天気予報へ

オーロラの科学は、その神秘的な動きや形、色について研究するだけに留まらない。これから宇宙を人類が利用していく上で避けて通れない、重要な責任を担っている。それは、宇宙環境の深い理解に基づく、宇宙及び超高層大気での現象によって引き起こされる災害の予測である。既に情報通信研究機構ではその実用化に向けた基礎研究と、試験的な「宇宙天気予報」が毎日発令されている。一見何もない“真空”に思える宇宙空間だが、これまで紹介してきたように、太陽から超高層大気に至るまで、そこは荷電粒子で埋めつくされている。そして、それらは常に不安定で、突風が吹き、多種多様な波が存在し、時には嵐のように激しい様相を呈する。ここでは人類の活動に影響を与えているいくつかの現象について見てみよう。

オーロラに伴う電流が高度 100km 付近の電離層を流れる時(電離層電流と呼ぶ)、電気コンロの電熱線のように大きな熱を発生する。上部大気はこの熱によって膨張し、人工衛星の高度にまで達することがある。衛星はこの大気との摩擦によって、姿勢や軌道を変えられてしまう。また電離層電流は電離層の荷電粒子の密度を変動させる効果があるために、短波を利用した通信障害の原因にもなる。さらに、地上の施設にもダメージを与えることがある。高緯度地域の送電線やパイプラインに誘導電流を流し、これが送電線システムの破壊やパイプラインの腐食を招く。宇宙ステーションの飛行士にとっては、更に深刻な問題がある。オーロラ発生領域のすぐ低緯度側には、人体に有害な高エネルギー粒子が存在しており、もしそれらを大量に浴びれば被爆による健康障害になりかねないからだ。高エネルギーの粒子は、衛星機器にも影響を及ぼす。管制用の指令信号が過って作られたり、ひどい時には半導体部品が損傷を受けることすらある。衛星の電力源である太陽電池パネルも、粒子の衝突によって性能はどんどん劣化する。

こうしてみると、宇宙環境はそこで働く人間や衛星、更には地上の設備にまで多大な損害を発生させる可能性を持っていることがあらためて実感される。しかし、事前の予報や即時の対応などで、被害を大幅に軽減することができる。飛行士は宇宙船の奥の部屋に隠れたり、スペースシャトルなら高エネルギーの粒子を通さない厚い“底”を、粒子の飛来方向に向ければ良い。観測機器は一時電源をオフにすれば、破壊の危険はぐっと小さくなる。そのためには、予報の技術を向上させることが先決だが、広い意味でのオーロラ科学の発展がそれを支える基礎となる。今後は基礎科学としてのオーロラ観測衛星に加え、太陽風の中の高エネルギー粒子をモニターする衛星(今はたった2つしかない)を増やしたり、国際協力で計画的に宇宙天気予報衛星を磁気圏内に配置する等の手段が必要になるかもしれない。

3.3 地球の水循環を測定するー熱帯降雨の観測ー

3.3.1 地球表層環境を特徴付けているもの、生命を育む水

地球は水の惑星と言われています。スペースシャトルから見た地球の写真を見ても、地球の表面では海洋の青い色が目立ちますし、またそこには雲が意外と多く分布していることなどがわかります。地球の表層環境を最も特徴付けているのは水の存在と言われています。水は言うまでもなく地球上の生命を育むものです。地球上の水は地球を巡って循環しています。海洋環境および陸域の水については別章に譲るとして、ここでは大気と地球表面の間を巡る水の循環、その中でもとりわけ我々にとって身近な降水の観測について取り上げることにしたいと思います。

3.3.2 水の循環と大気の大循環

地球上の水の大部分は海洋にあります。しかし水はずっと海洋にだけ留まっているのではなくて、大気と地表の間を循環しています。水は地球の表面、つまり海洋や陸地表面から絶えず蒸発して、大気中の水蒸気となっています。大気中の水蒸気は風で運ばれて別の場所に移動しながら、一部はそのうちに降水となります。ちなみに降水というときは、雨も雪も、すなわち液相・固相全ての水が降ることをさしています。さて、降水の一部は雨、または雪などとなって地表まで到達します。地表まで到達したものは河川となって海に流出し、あるいは湖沼水や地下水、雪や万年雪、氷河などになって暫く陸域に滞留してから最終的には海に出て行きます。降水の中で地表にまで達しないうちに蒸発してしまう水もあります。また陸地に留まっていて海に流出する前に直接陸地から蒸発するものもあります。地下水や氷河などはその滞留時間はそれぞれ長いけれども、結果的には全ての水は地球上を循環しています。図 3.3-1 に、地球上の水循環の概念を示します。

海洋は地球上の水の 97.5%を占めており、地表で蓄えられている淡水は 2.5%、大気中の水蒸気として存在するのはわずかに 0.001%です。陸地に蓄えられている淡水のうち、氷河や万年雪、凍土あるいは土壌水分として蓄えられていてすぐには利用できないものを除くと、我々が利用できる湖や河川の水の量は全体の 0.3%とごくわずかです。しかもこのわずかな淡水資源の源となっている降水の分布は、世界中で一様ではないし、また時とともに変化します。

地球上の風の流れは非常に複雑ですが、地球全体をざっと見渡して単純化すると大気の大気の流れの特徴があり、これを大気の大循環と言います。ここではそれがどのようなものかを見てみたいと思います。地球全体で見れば、蒸発は気温、海水温度の高い熱帯域で活発に起こります。熱帯域で活発に起こる蒸発の結果、この地域

では大気の大気対流活動で積乱雲が発達し、雲・降水の生成が活発となります。この積乱雲の発達に伴う降水活動によって熱帯地域の大気は加熱されて上昇流となり、大気の流れは高緯度方向へ向かい、下降流となって地球の回転と相まって、地表付近では北半球で北東の、南半球で南東の風向きを持った貿易風となります。この概念的大気の大循環はハドレー循環と呼ばれています。

また地球を巡る大きな大気の循環として、熱帯域の東西方向の大気の流れであるウォーカー循環と呼ばれるものがあります。これは海面水温の東西差に起因する気圧差のために存在すると考えられる東西方向の大規模な循環です。図 3.3-2 に、これらハドレー循環とウォーカー循環の模式図を示します。

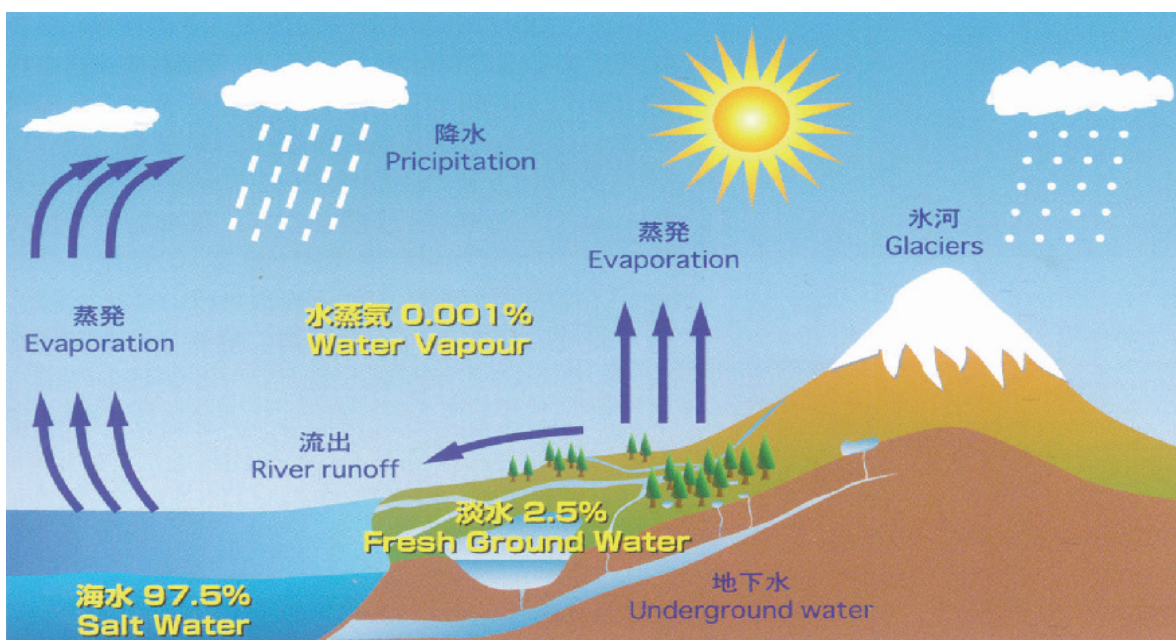


図 3.3-1 地球上の水循環の概念図(CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.45 より)

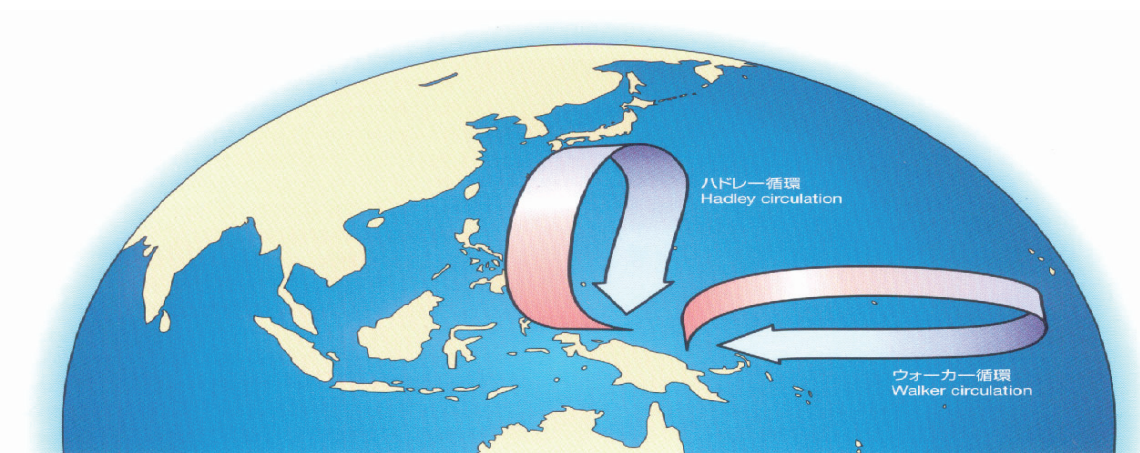


図 3.3-2 ハドレー循環とウォーカー循環の模式図
(CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.7 より)

太陽と地球の自転軸の位置関係から、地球は低緯度域で太陽の短波放射を多く受け取り高緯度で熱を失っていますが、一方的に低緯度で暑く同時に高緯度で寒くなり続けられないのは、地球上の大きな大気や海洋の循環により熱が低緯度地方から高緯度地方へ運ばれているからです。大気の循環による熱の輸送を語るとき、同時にこれによって水蒸気が輸送されていることの意味は大きいと言えます。水が液体の状態から蒸発して水蒸気に相変化するときには、熱(蒸発の潜熱)を必要とします。また水蒸気が凝結して降水になるということは、水蒸気が持っていたエネルギーが放出されてその場の大気を加熱することになります。つまりその水蒸気が輸送されて別の場所で降水となるということは同時に、熱の移動を意味しているのです。このように考えたとき、熱帯地域での雲・降水の生成は、地球全体の大気大循環の原動力となっており、それがいつ、どこで活発か不活発かを知ることは、熱帯地域だけでなく地球全体の気象や天候を知る上で非常に重要な意味を持っているのです。

3. 3. 3 気候の変動と水資源

前節では水の循環と大気の循環について概観しました。ところで水が人類をはじめとする生物にとって重要だという場合、我々は主として淡水を資源として用いていることからそれは淡水を指しています。淡水は前節で説明した水循環の過程で降水によってもたらされます。従って我々が利用する水を考えるときに、水循環の様子を知るということは非常に重要になってきます。というのも、いつも毎年決まったように決まった場所で雨が降れば、水の利用の仕方も安定するはずですが、実際に我々が経験するのは渇水や洪水です。つまり水資源は偏在していてかつその分布は刻々と変化しており、また我々が必要とするときにすぐその場所になければならないという特徴を持っているのです。

例えば今ではよく知られるようになったエル・ニーニョやラ・ニーニャが原因で年々の天候は変動します。図 3.3-3 に示すように、エル・ニーニョは熱帯太平洋で数年に一度起こる大規模な大気・海洋変動現象で、普段は温度の低い中・東部太平洋で海面水温が上昇するものです。普段は西太平洋で海水温度が高くまた降水活動も活発であるのに対し、エル・ニーニョが起こると暖かい海水は中部太平洋にまで広がり、積乱雲が発達して降水活動の活発な領域が中部太平洋に移動します。これは東西の地球規模の大規模な大気の流れであるウォーカー循環の様子が変化するという事に相当しますし、熱帯と中緯度をつなぐハドレー循環にも影響を及ぼすこととなります。結果としていつも雨が降る地域で降らなくなったりあるいはその逆があったり、また平年に比べて異常高温(低温)が観測されたりします。エル・ニーニョが起こると世界中で異常気象が発生すると言われているのはこのためです。また地球温暖化によっても地球上の水循環の様相は変化すると予想されています。

気候の変化を予測するための物理則に基づく気候モデルによる予測では、温暖化によって降水は集中化、即ち降水はよりその強度を増して狭い地域に集中して降るようになるという結果が得られています。しかし気候変化を予測するためのモデルもまだまだ完全ではないことから、現実の水循環の様子を知ってモデルを改良し、より良い予測を行っていくことが必要不可欠だと考えられています。そしておそらく何よりも、もし地球の温暖化が実際に今起こりつつあるならば、地球の水循環の様相も今後 30 年とか 50 年のうちに明らかに変化していくだろうと考えられます。その様子を捉えて現実に気候の変化が起こっているのか、起こっているのならばどのように起こっているのかを知ることは、我々の住む地球環境、とりわけ地球を地球たらしめている水を巡る環境を良く理解するという意味で必要なことではないでしょうか。

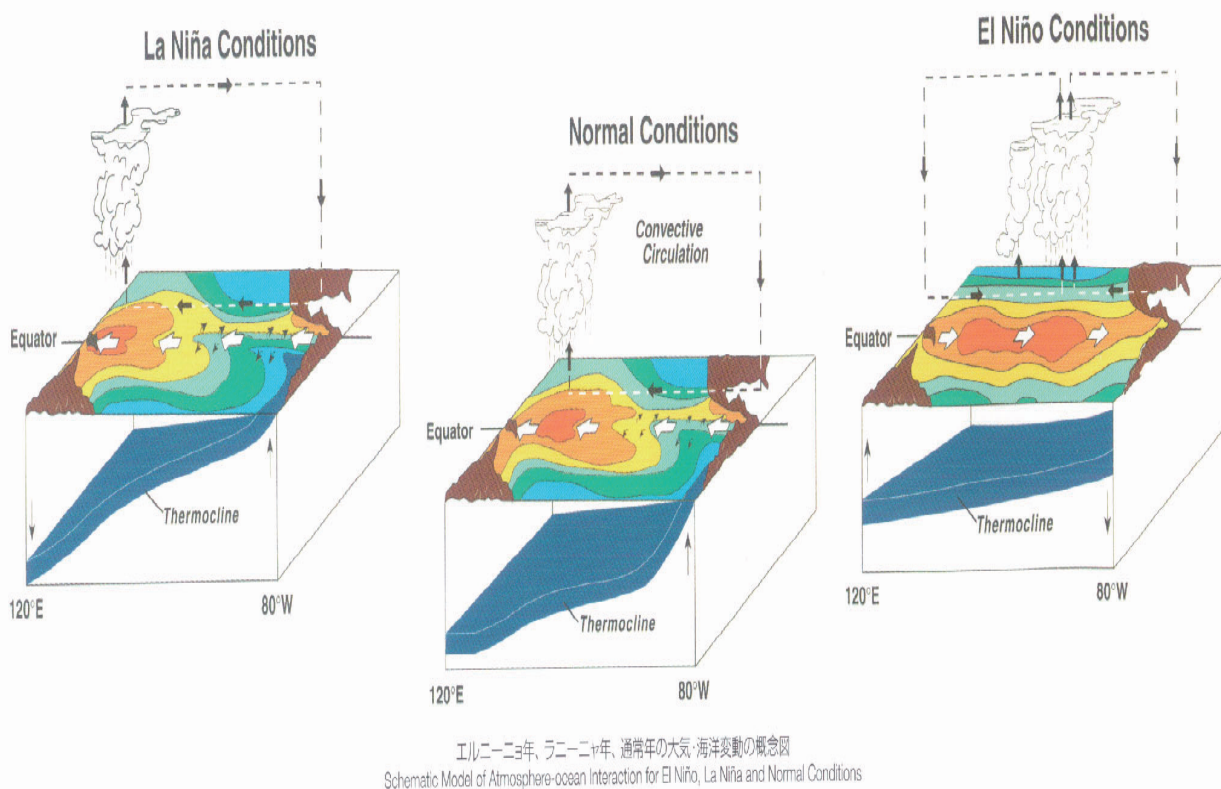


図 3.3-3 ラニーニャ年、通常年、エルニーニョ年の大気・海洋変動の概念図
(CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.11 より)

3. 3. 4 水の観測

地球上の水に係わる量としては、水循環の説明で述べたように水蒸気量や降水量などがあります。これらは普通地上からの気象観測で測定されています。水蒸気については観測機器をつけた気球を上空に飛ばして温度などとともに湿度の観測を行って上空の大気中での状態を観測します。降水量については地上に設置された雨量計で観測するのが普通です。ということは、雨量計を設置できない海上では降水量のデータは得ようにも得られませんし、また陸上でも雨量計を設置したり維持するのが困難な地域ではなかなか観測データを取得することはできません。地上に設置されたレーダによるとこれよりはるかに広い範囲を観測することができますが、それでも半径 200km 程度の範囲に限られます。

しかも、これら水に関わる量の特徴として、時間的、空間的な変化が激しい物理量であるということが挙げられます。別の言葉で言えば、データの時空間代表性が限られる、ということになります。地上からの観測では観測できる範囲が非常に狭く限られているので、広い範囲にわたる水蒸気や降水の様子を知るには全地球を観測することのできる衛星に搭載された観測機器(センサー)からの観測によるしか方法はないと言えます。

3. 3. 5 熱帯降雨

熱帯降雨観測衛星(Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM)は、以上のような背景から、地球大気大循環の駆動源と言われる熱帯域の降雨を観測することを目的として計画されました(図 3.3-4)。繰り返しますが、地球大気全体の大きな流れがどうなっているかを知るためには熱帯地方の水蒸気や降水を観測する必要があります。しかし熱帯地方はその大部分を海洋が占めているために降水量の正確な観測データを得ることは非常に困難でした。そこで考えられたのがこの衛星計画です。

熱帯の雨を測るために、観測機器としては日本が世界で初めて開発した衛星搭載用の降雨観測レーダである降雨レーダ(Precipitation Radar: PR)と、TRMM 以前に降水の間接推定に使われてきた受動型マイクロ波放射計および可視赤外センサの3つのセンサが同時に搭載されています。降雨レーダは自ら電波を出して雨粒から反射されて返って来る電波を観測することにより降水粒子が大気中のどの高さにどのくらい存在していることを直接的に観測することのできる装置です。この他に、雷を観測する LIS と地球の放射を測定する CERES というセンサの合計5つの観測機器が積まれています。衛星は 1997 年 11 月に日本の種子島から H-II ロケット 6 号機で打ち上げられ、もともとの衛星の設計寿命である3年の歳月を経てもなお順調に、2007 年現在も観測を継続しています。これから以下、いくつか TRMM の観測の成果を紹介しま

しょう。

当初からの TRMM の観測目的であったエル・ニーニョに関わる熱帯地域の広い範囲での降水現象の変動の様子は、TRMM によって詳細に観測されました。図 3.3-5 はエル・ニーニョとラ・ニーニャの年の、ともに 1 月の一ヶ月間の降水量の分布図である。また図 3.3-6 はそれぞれ同じ 1998 年と 1999 年 1 月それぞれの海面水温の分布図です。エル・ニーニョの時期に当たる 1998 年 1 月の場合と、ラ・ニーニャに当たる 1999 年 1 月を比べてみると、同じ月であるにも関わらず熱帯地域の降水の分布の様子は大きく異なっています。すなわち、ラ・ニーニャの年には西太平洋に降水が集中して赤道域は雨がほとんど降っていないことがわかります。それに対してエル・ニーニョの年には中部太平洋に多く雨が降っていて、このように地球上で雨の降る場所というのは年によって大きく異なることがわかります。ということはすなわち、雨の降る場所を知るといことはどこで大気が加熱されどこで大気の運動が起こっているかを知ることになりますから、それが次にどのような大気の流れに影響していくかを予測する上で重要なことなのです。

TRMM の降雨レーダによると、台風の中の降雨の分布の様子を知ることができます。地上に設置された気象レーダからも同じような情報は得られますが、衛星に搭載された降雨レーダによると、陸地から遥かに離れた通常は観測することのできない海洋上でも台風の観測を行うことができるという利点があります。

図 3.3-7 に示したのは 1997 年 12 月に TRMM が太平洋上で台風 28 号を観測したときの画像です。雲は静止気象衛星の雲画像で、これに TRMM の降雨レーダの観測した降雨強度(単位は mm/hr)のデータを重ね合わせています。台風が目がハッキリとわかりその部分では雨が見られないことがわかります。またほぼ同心円状に分布している雲に対して、台風の東側でだけ雨が降っていることがわかります。目の周縁部には壁雲と呼ばれるとりわけ背の高い降水が存在しています。また台風の東側には複数のレインバンドと呼ばれる非常に雨の強い領域がらせん状に分布しています。台風が通過するとき、強い雨が降ったと思ったらしばらくして雨が弱まったりまた強い雨が降ったりするのは、このようなレインバンドが何本も通過していくからなのです。このような台風の観測事例を、台風の発生期、最盛期、衰退期など異なる状態でそれぞれ数多く集めて調べることによって、これまで以上に台風の発生から衰退までの仕組みがわかるようになることが期待されています。

TRMM の観測によって明らかになった降水現象のひとつに、降雨の日変化が挙げられます。TRMM は太陽非同期軌道という特殊な軌道をとる衛星で、これは毎日観測する地方時が少しずつずれていき、約 40 日でもとに戻るといえるものです。それまでは降水の観測は極軌道衛星の観測機器のデータを用いて行っていました。極軌道衛星の場合は、同じ地域を観測する地方時が固定されるという特徴があります。すると例えば、熱帯地方で午後の決まった時刻にスコールが降りやすい地域などがあると

すると、極軌道衛星による観測ではいつもスコールで雨が降っているときに観測したり、その逆ということが考えられます。そうするとその地域で降っている降水量を正しく測定したことにはなりません。

図 3.3-8 は TRMM の降雨レーダの観測データを、地方時ごとに2年間という長期間集計して得られた降雨の日変化を示したものです。午前(6 時から 12 地方時)と午後(12 時から 18 地方時)の降雨量の比を色で表していて、赤が午後に雨の多い地域、青が午前に雨の多い地域を示しています。おおまかに言って、海洋上で午前の雨が多くなっており、陸上では午後の雨が多くなっていることがわかります。これまでは雨量計などで限られた地点の日変化の様子は調べられていましたが、TRMM 衛星の観測によってこのように熱帯地域全体の降水の日変化の特徴が初めてわかりました。

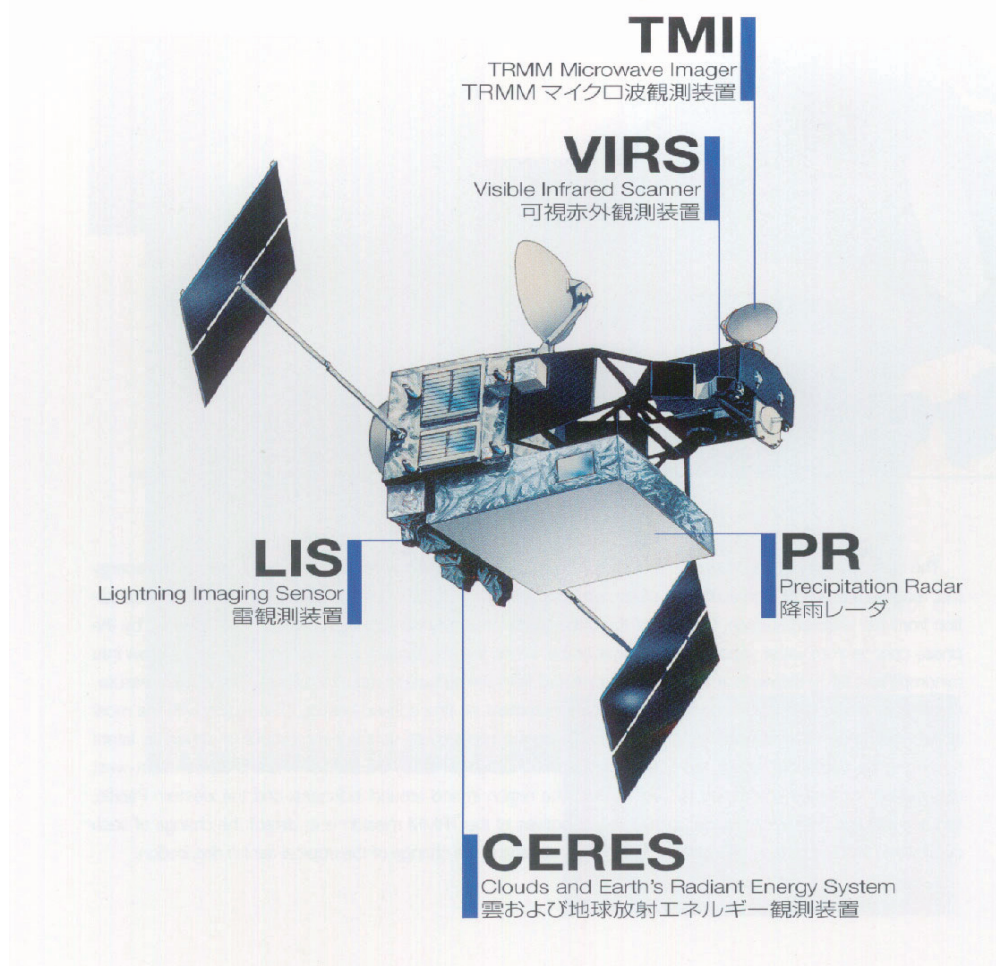


図 3.3-4 TRMM 衛星の各観測センサ

(CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.8 より)

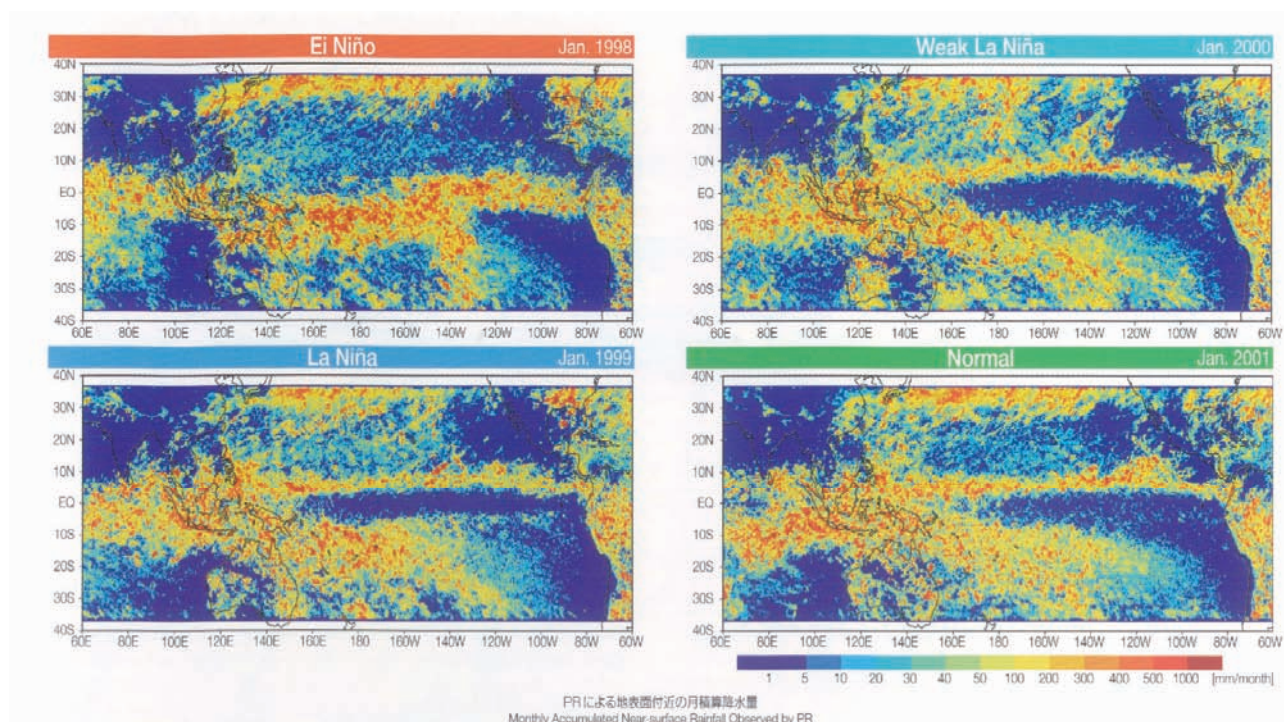


図 3.3-5 TRMM 衛星搭載 PR センサーによる、地表面付近の月積算降水量
(CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.12 より)

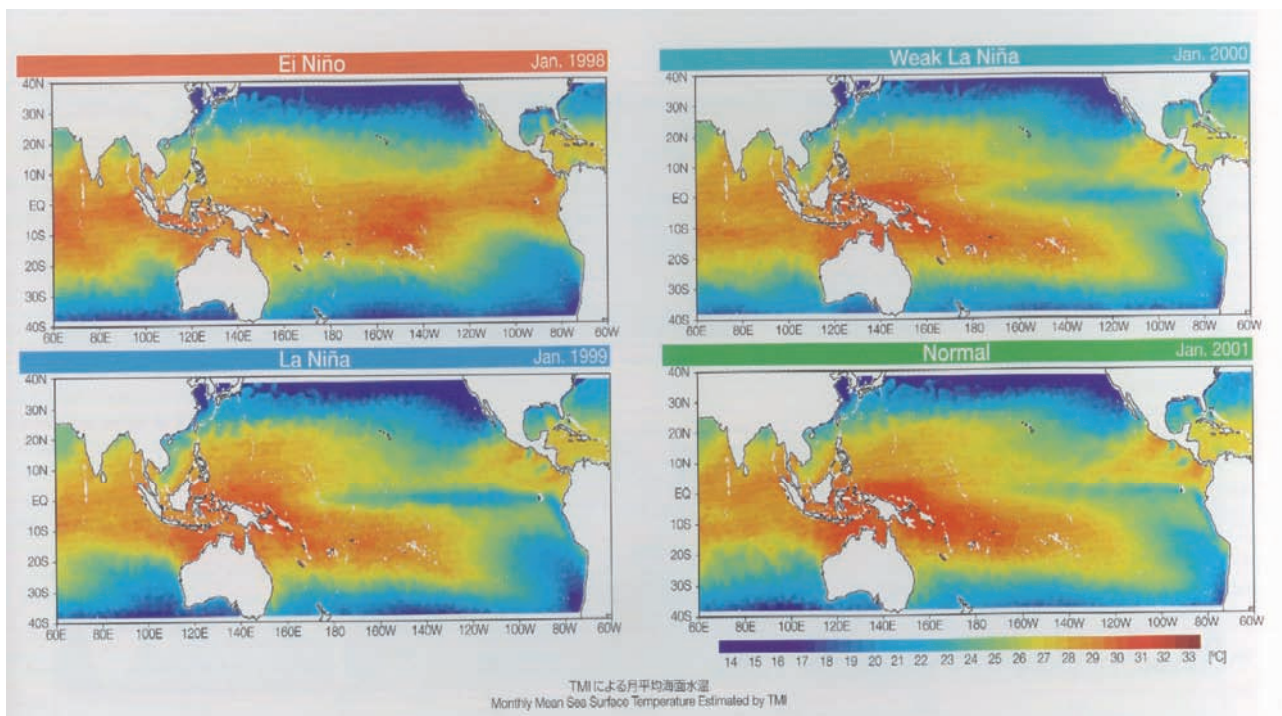


図 3.3-6 TRMM 衛星搭載 TMI センサーによる、月平均海面水温
(CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.13 より)

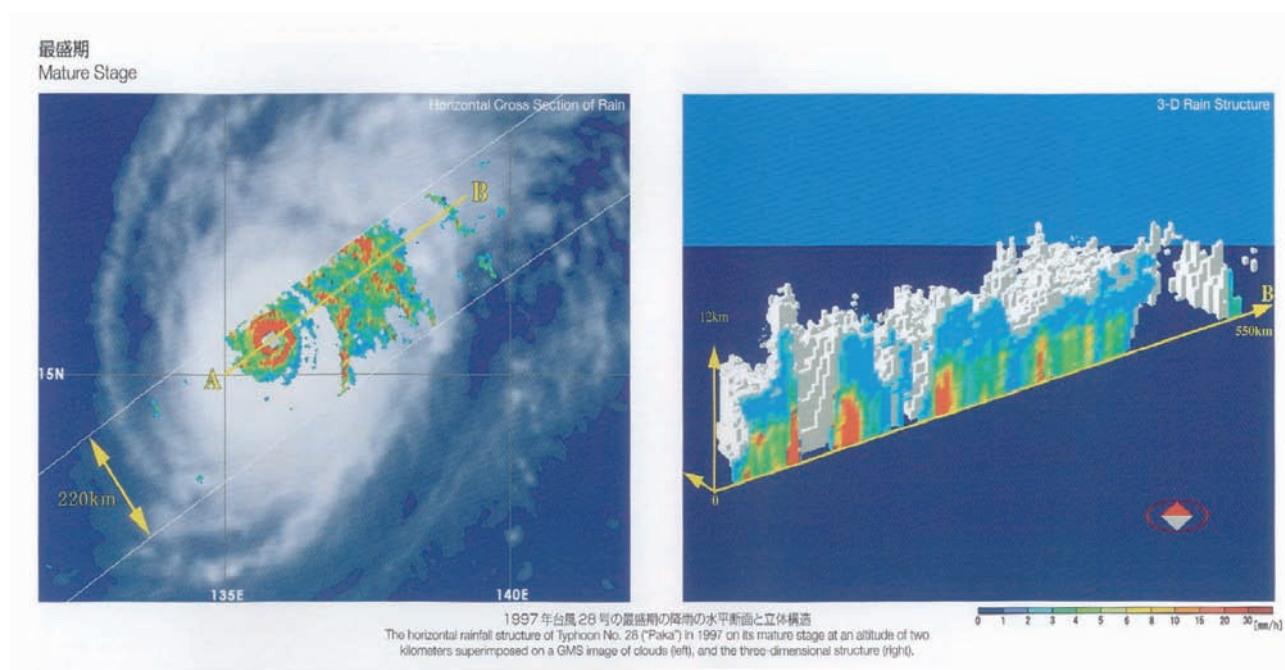


図 3.3-7 TRMM 衛星が捕らえた 1997 年台風 28 号の最盛期の降雨の水平断面と立体構造 (CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.20 より)

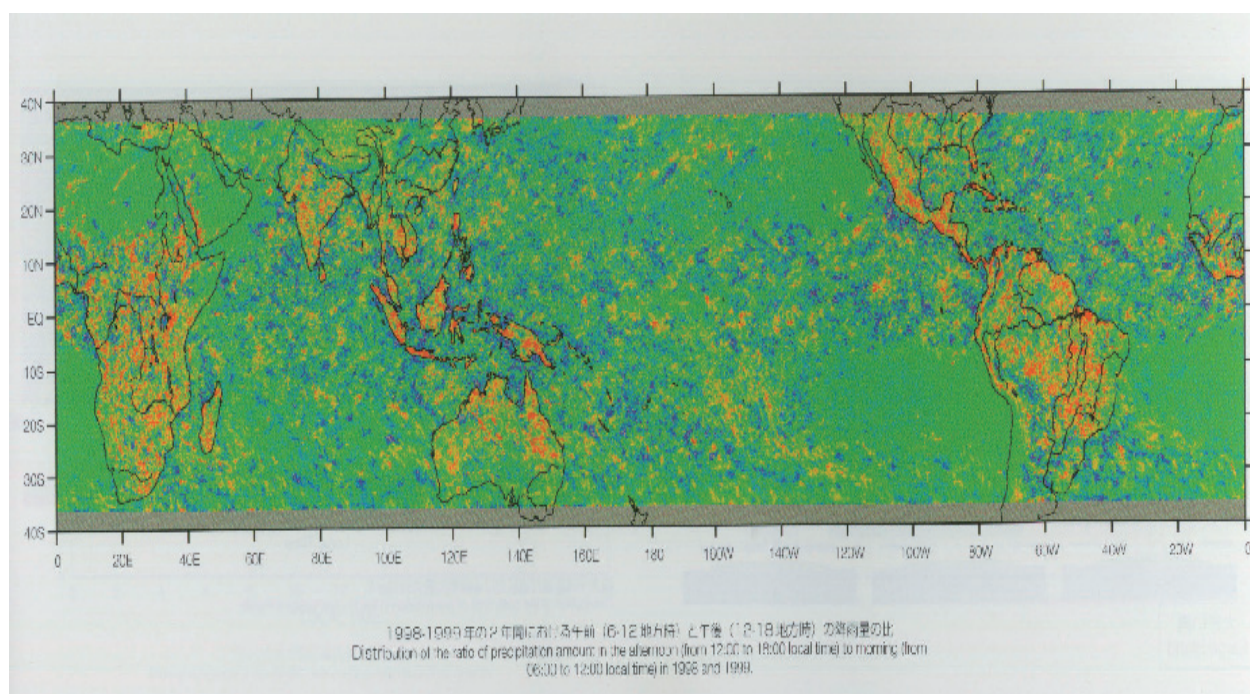


図 3.3-8 TRMM 衛星が捕らえた 1998-1999 二年間における午前と午後の降水量の比 (CRL, NASDA 編著「宇宙から見た雨」P.31 より)

3. 3. 6 降水観測の今後

紹介してきたような様々な科学的成果が得られ、TRMM では宇宙からの降水観測の技術的な基礎を築くことができたと考えられています。このような TRMM の観測をさらに拡張して高緯度地域にまで観測範囲を広げ、熱帯の降雨だけでなく地球全体の降水がどうなっているのかを調べようと考えられている GPM(全球降水観測)計画というものがあります。また、TRMM では衛星が1機だったので時空間変動の激しい降水現象を観測するには観測の頻度が不足していると考えられていたのですが、将来的にはいくつかの国々が受動型のマイクロ波放射計を搭載した衛星を打ち上げる予定があるので、これにTRMMのようなレーダを搭載した衛星を組み合わせ、複数の衛星でお互いに協力して観測頻度を格段に増やすことが考えられています。この計画が実現されると、TRMM の時代には月平均の地球上の降水量を正確に測定することを目的としていたものが、今度は3時間ごとに同じ地点が観測されることになります。そしてこのような高頻度な観測データは地球上の大気の流れと水循環を詳しく調べるのに役立つだけでなく、我々の暮らしにもより身近なものになるはずです。例えば日々の天気予報の基礎データとして用いられるほか、旱魃の警報や洪水予報などにも用いられることが期待されています。リモートセンシングのデータは皆さんにとってまだあまり身近ではないかもしれませんが、着実に我々の暮らしを支える社会基盤になっていくことでしょう。

3. 4 海洋の観測

3. 4. 1 はじめに

地球の表面の約7割は海洋で覆われている。海洋の持つ貯熱量は大気の約 1000 倍という極めて熱慣性の大きいシステムであり、地球の気候の形成およびその変動に対して海洋が非常に重要な役割を果たしていると考えられている。しかしながら、従来の船舶やブイを用いた海洋観測には観測領域・期間に限りがある。そこで広域の海洋を全球規模で繰り返し観測する手法として、人工衛星を用いたリモートセンシングが用いられている。本節では、宇宙からの海洋観測の例として、海面水温、海面高度、海上風速・風向、海色のリモートセンシングについて概説する。

3. 4. 2 海面水温

衛星からの海洋観測において最も早く実用化されたのが海面水温観測である。海面水温は、海流の流路や暖水塊・冷水塊の位置などの海況を直接反映するため、その情報は漁業や海上交通などに役立てられている。また、海洋の熱的な状態を反映し、沿岸の気候形成やより大きな大洋スケールの大気と海洋の相互作用を研究するための重要な情報として広く用いられている。

海洋に限らず地球の表面や雲からは、その温度に対応した赤外域にピークを持つ電磁波が宇宙空間へ放射されている。海面からの熱赤外域の放射を観測し、大気中の水蒸気による吸収やエアロゾルによる散乱の効果を補正することにより、海面水温が観測できる。赤外域の電磁波は水に吸収されやすいため、海面からの赤外放射は、海面のごく表層(数 μm 程度)の水温を反映するものである。

図 3.4-1 は、現在海面水温観測が行われている衛星の一つである NOAA 衛星のイラストである。NOAA 衛星に搭載されている可視・赤外放射計 AVHRR は、空間分解能約 1 km、観測精度 0.6 K 程度で海面水温の観測を行っている。図 3.4-2 に日本付近における観測例を示した。本州南岸に位置する高温の帯が黒潮を示しており、北海道南東岸から三陸沖に伸びている低温の帯が親潮である。また、暖水塊や冷水塊などの様々なスケールの渦や水温前線の波動などが捉えられている。

図 3.4-2 に示した例のように、赤外放射を観測することにより広域の海面水温の情報が得られる。ただし、赤外域の電磁波は雲に吸収されるため、雲のある海域の海面水温を観測することができない、という欠点を持っている。これに対して、精度や空間分解能は劣るが、雲の影響を受けないマイクロ波放射計のデータを利用する試みも行われている。

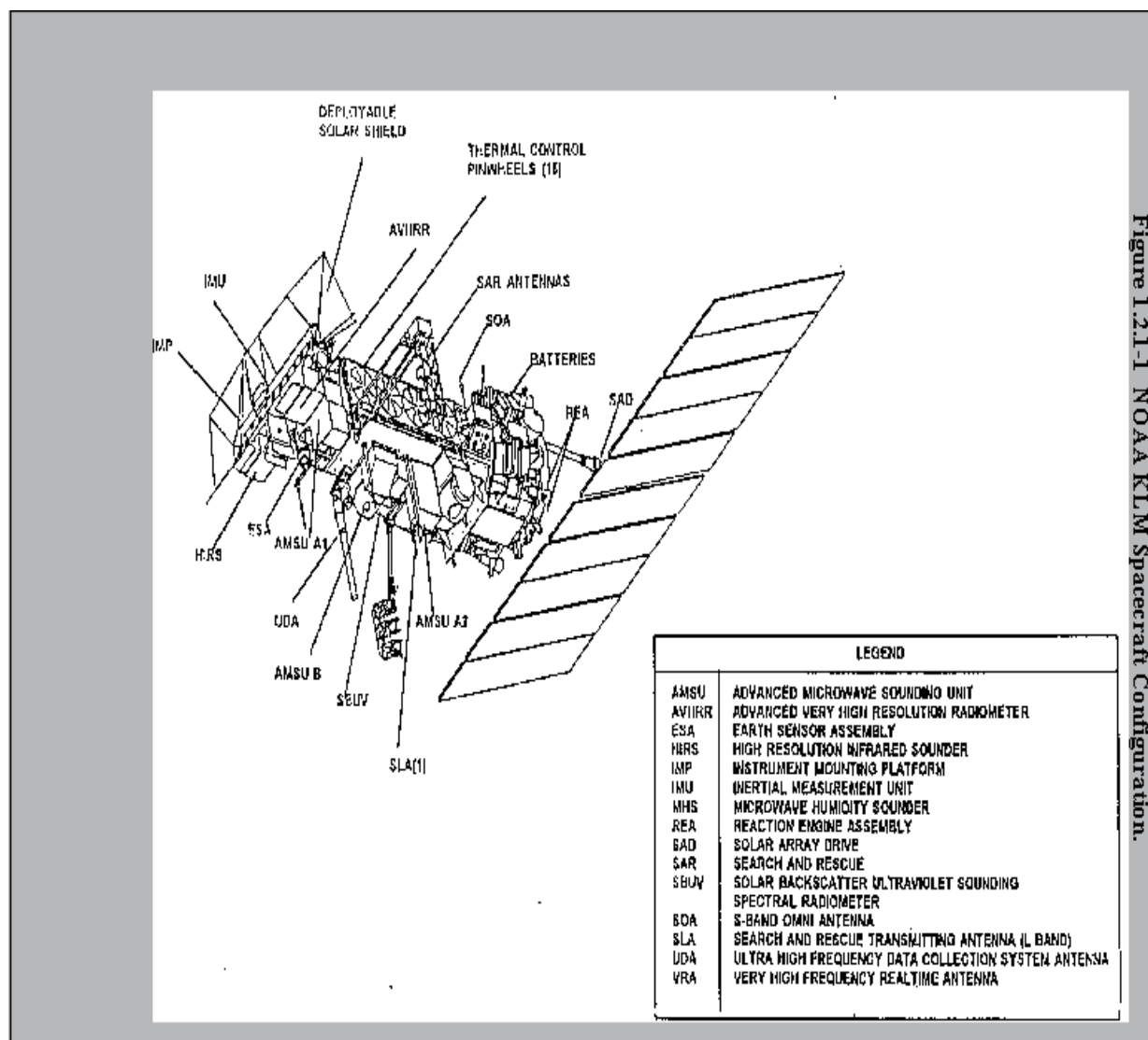


図 3.4-1 NOAA 衛星

出典 <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/html/c1/sec12-1.htm#f121-1>

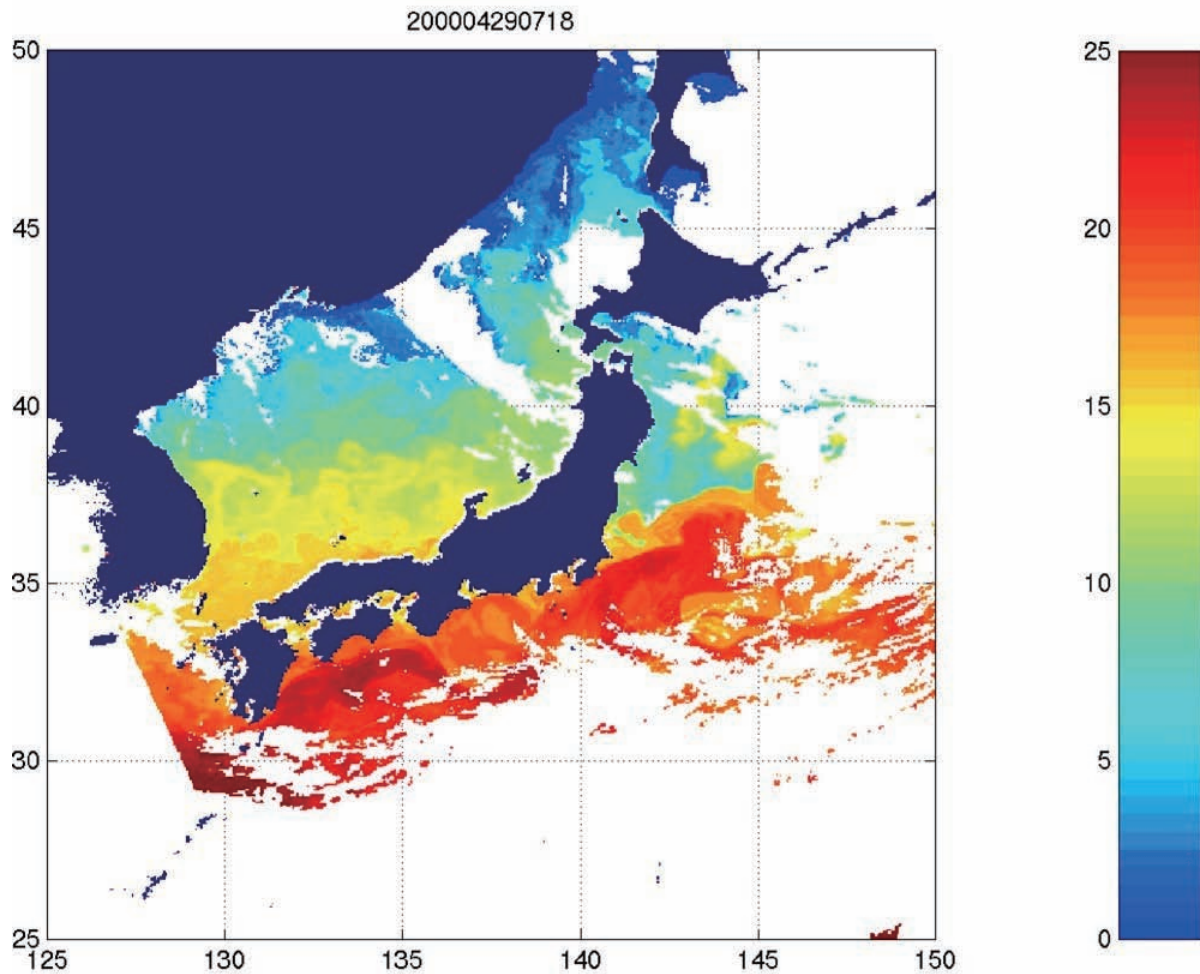


図 3.4-2 海面水温の観測例(****年**月**日**時**分 UT)

出典 東北大提供

3. 4. 3 海面高度

自転する地球上の大気や海洋は、自転による見かけの力であるコリオリ力(転向力)と圧力勾配が釣り合って運動している。すなわち、北半球の海洋では、海流は海面の高い方を右手に見て、海面の等高線に沿うように流れている。このような流れを「地衡流」と呼ぶ。衛星から海面の高度を直接観測すれば、この地衡流の関係から、海洋表層の流れの場の状況が把握できる。

図 3.4-3 は、海面高度を観測するセンサーであるマイクロ波高度計を搭載した衛星 TOPEX/POSEIDON のイラストである。マイクロ波高度計は、センサーから衛星直下

点に向けてマイクロ波のパルスを発射し、海面で反射されて戻ってくるまでの時間を計測することにより衛星と海面の距離を測定するものである。衛星軌道の高度を既知とすれば、これにより海面高度が得られる。TOPEX/POSEIDON 衛星の海面高度計の観測精度は数 cm 程度と言われている。

図 3.4-4 は TOPEX/POSEIDON 衛星海面高度計の観測データをもとに作成された北太平洋の海面高度場の一例である。海面表層の流れは、海面高度の等高線に沿って、高い方を右に見て流れており、等高線の勾配の大きいところほど流れが強い。日本南岸には黒潮に対応する大きな海面勾配が見られる。

黒潮や親潮などの海流の流路は複雑に変化しており、その変動を予測することは、水産業や沿岸の気候の予測のために重要である。海洋表層の流れの場の情報を直接反映する海面高度の観測データを数値モデルに取り込んで、気象予報と同じように海況の予報を行う「海の天気予報」の実用化に向けての試みが進められている。

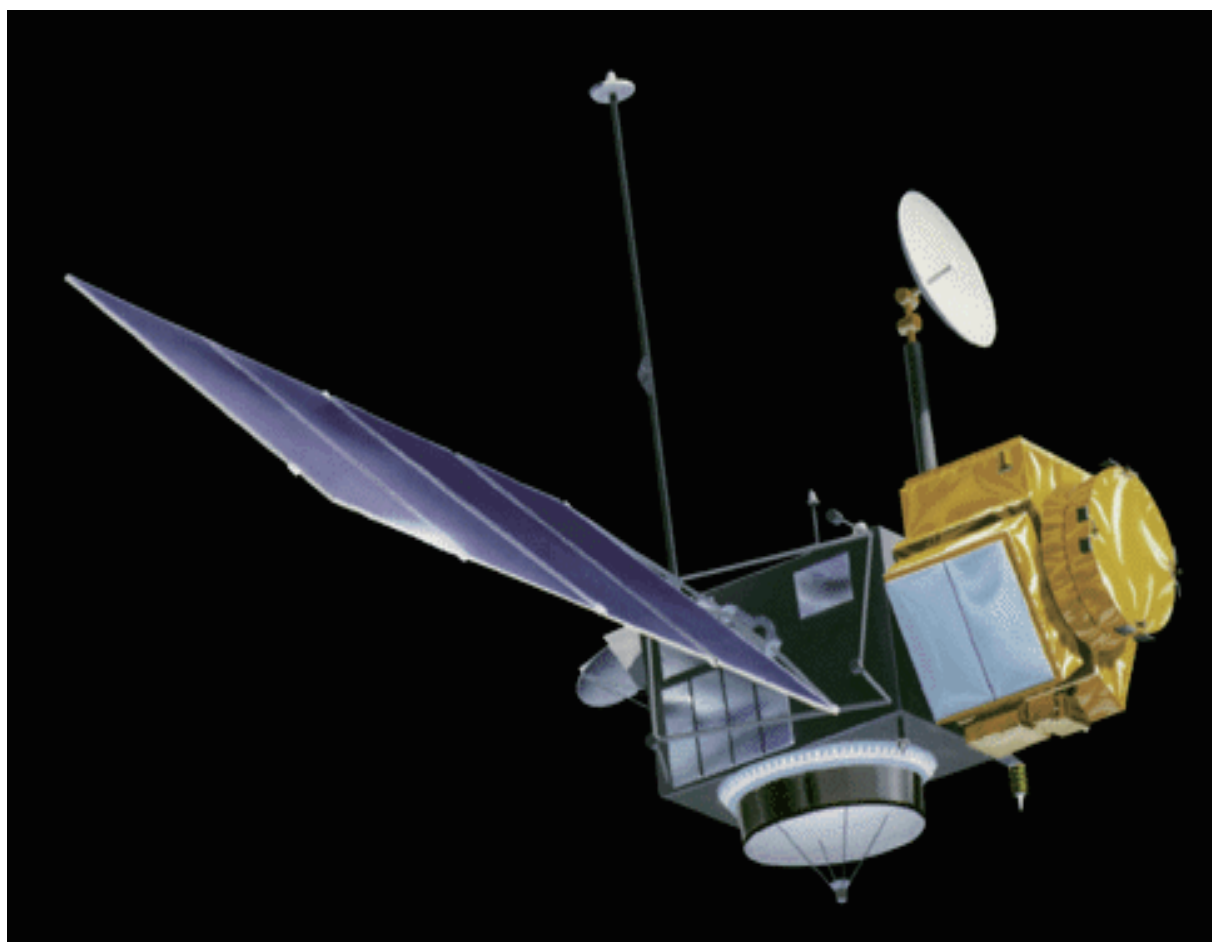


図 3.4-3 TOPEX/POSEIDON 衛星

出典 <http://sealevel.jpl.nasa.gov/gallery/spacecraft/gifs/topex.gif>

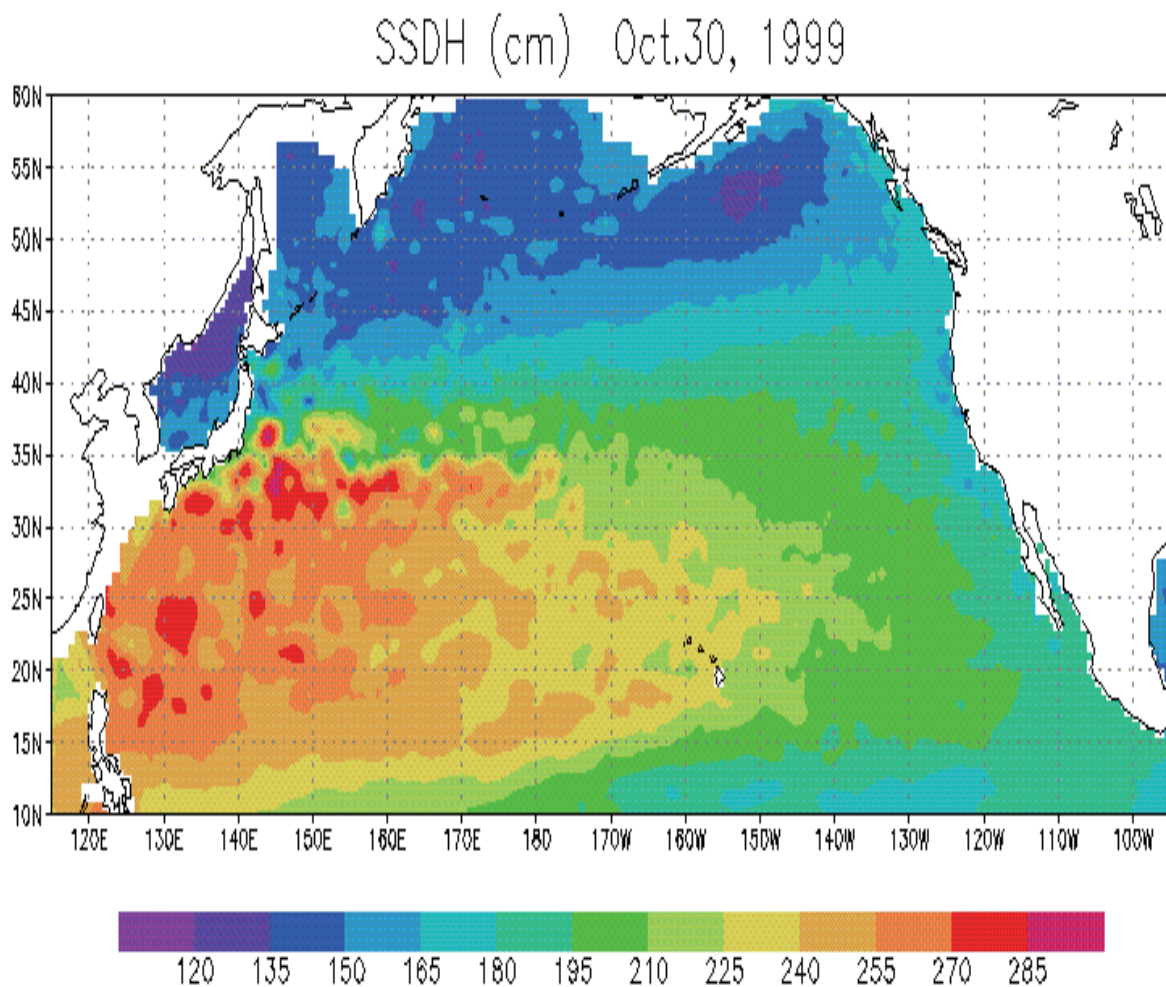


図 3.4-4 マイクロ波高度計の観測データから合成された海面高度場の例
(1999 年 10 月 30 日)

出典 科学技術振興調整費「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する
国際共同研究 SAGE」平成12年度成果CD-ROM、気象庁
気候・海洋気象部海洋気象課海洋気象情報室 発行

3. 4. 4 海上風速・風向

海上風を吹く風は海面との摩擦により、大気から海洋へ運動量を輸送する。この運動量が、海洋表層循環の駆動力となっており、大気－海洋系の気候システムの重要な要素となっている。また、海上風の観測データは、天気予報、海上交通、沿岸防災

などにとっても重要な情報である。衛星に搭載されたマイクロ波散乱計を用いて海上風の風速・風向を観測することができる。

図 3.4-5 はマイクロ波散乱計 NSCAT を搭載した日本の地球観測衛星 ADEOS のイラストである。マイクロ波散乱計は複数の方向から海面に向けて斜めにマイクロ波を発射し、海面で後方散乱されて戻ってくる信号を観測するセンサーである。海面でのマイクロ波の後方散乱はマイクロ波と同程度のスケール(数 cm 程度)を持つ海面の波によることが知られている。また、このような小さなスケールの海面の波はその場の風速・風向と非常によく対応するため、マイクロ波の後方散乱を観測することにより、風速・風向が観測できる。ADEOS 衛星に搭載されたマイクロ波散乱計 NSCAT の空間分解能は 25 km, 観測精度は風速が 2 ms^{-1} , 風向が 20 deg. 程度と言われている。

図 3.4-6 は NSCAT によって観測された全球の海上風場の一例である。日本付近には2つの大きな台風が見られる。また、中緯度の偏西風や赤道域の貿易風、熱帯収束帯などの風系が捉えられている。このような海上風の観測データは数値天気予報や防災などの現業利用のほか、様々なスケールの大気・海洋現象の研究に利用されている。マイクロ波散乱計以外にも、風向を計ることはできないが海上風速のみを観測できるセンサーとして、マイクロ波放射計やマイクロ波高度計も利用されている。

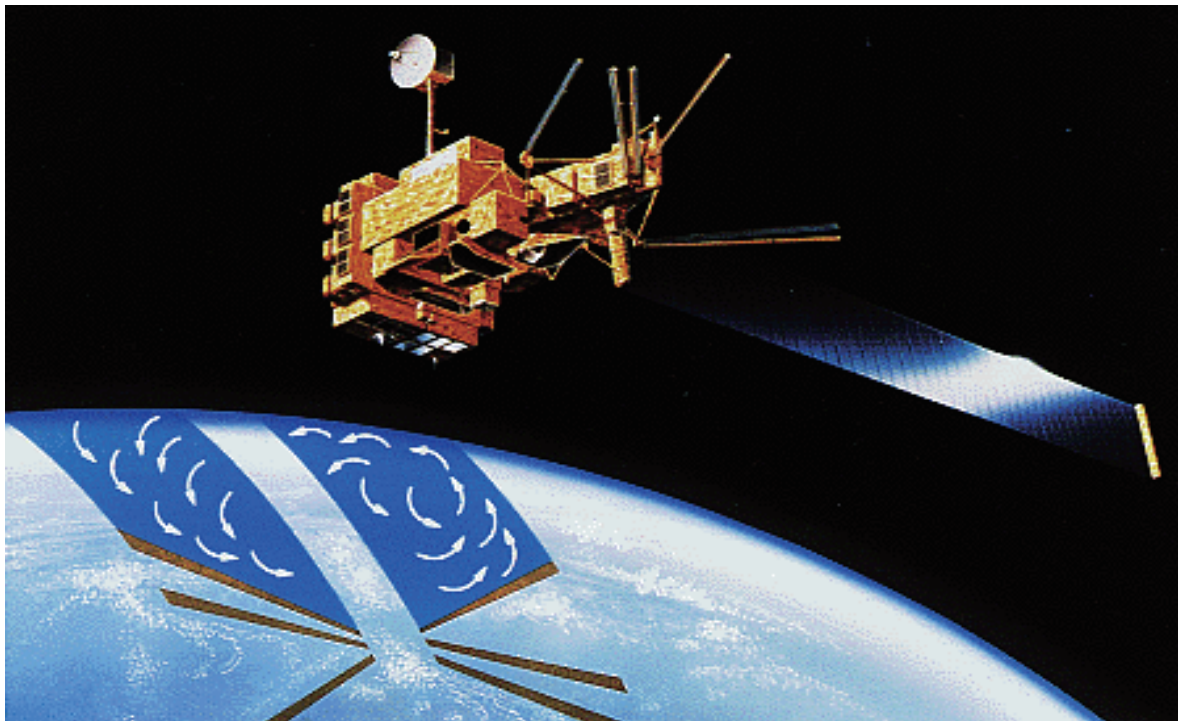


図 3.4-5 ADEOS 衛星

出典 <http://winds.jpl.nasa.gov/missions/nscat/nscating.html>

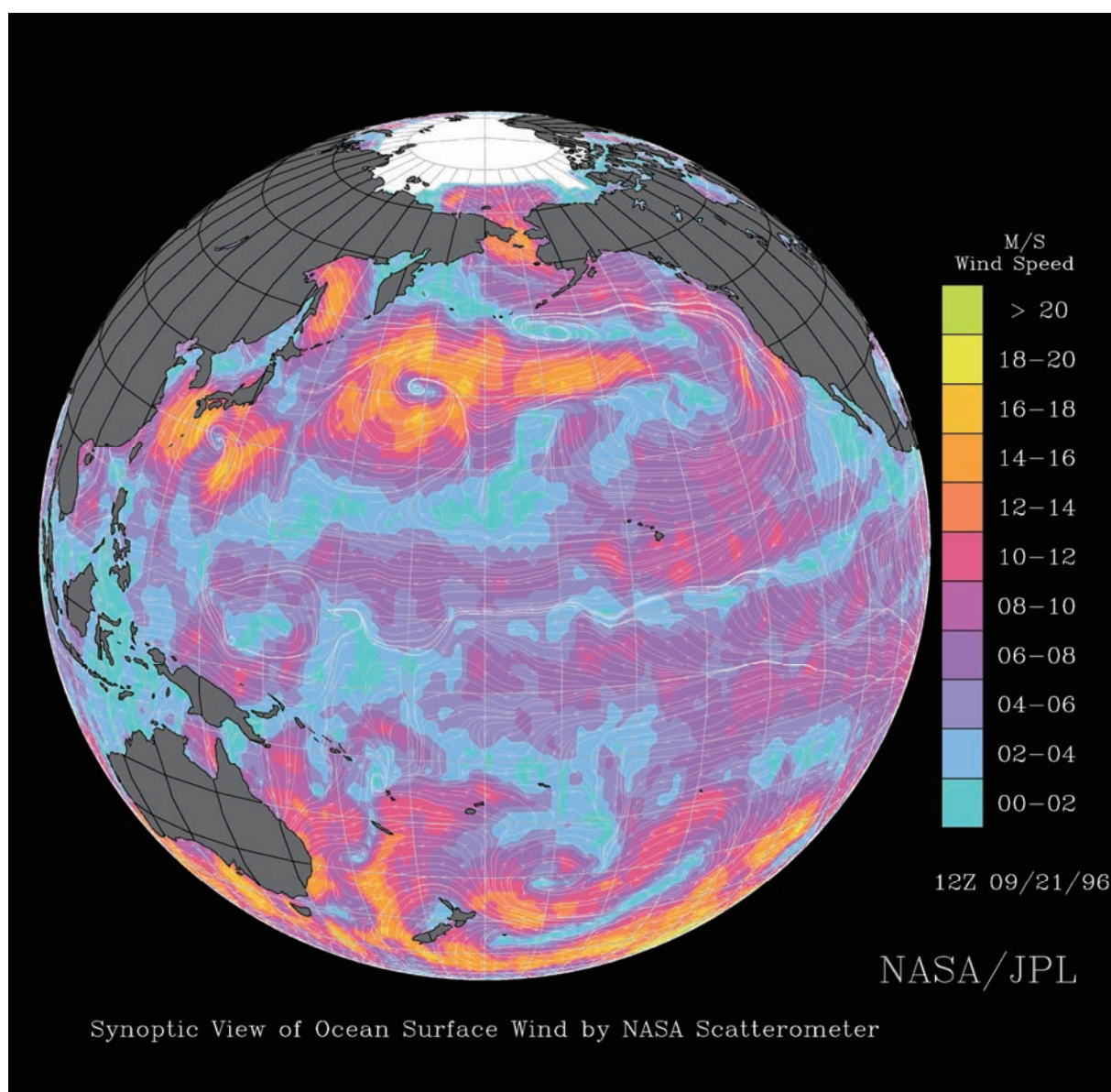


図 3.4-6 NSCAT 散乱計の観測データから合成された海上風場の例
(1996 年 9 月 21 日 12 時 UT)

出典 http://winds.jpl.nasa.gov/images/p47490_hires.gif

3. 4. 5 海色と植物プランクトン

地球温暖化の監視とそのメカニズムの解明に関連して、地球上での炭素循環の把握が重要な課題となっている。その中で特に、海洋による二酸化炭素吸収の見積もりが不確定な要素として注目されている。海洋に吸収された二酸化炭素の行き先として、植物プランクトンの現存量の変動を正確に観測することが求められている。しかしながら、植物プランクトンは、比較的短期間の間にその量が飛躍的に増える、いわゆる「ブルージング」と呼ばれる増殖期を持つなど、その時空間の変動が非常に大きく、その全容を現場観測によって全球規模で把握することは非常に難しい。そこで、衛星から可視域の複数の波長で海面を観測し、「海の色」を観測することにより、植物プランクトンの情報を得ることが試みられてきた。ただし、海面と衛星との間には大気が存在し、その中の様々な過程で可視光の吸収・散乱が行われるので、海色の観測のためには、高精度の大気補正が必要となる。

図 3.4-7 は、図 3.4-5 に示した日本の地球観測衛星 ADEOS に搭載された可視・赤外放射計 OCTS によって観測されたクロロフィルa濃度の分布の一例を同じセンサーで同時に観測された海面水温とともに示したものである。クロロフィルaの濃度は植物プランクトンの現存量の指標として用いられている。黒潮および親潮や様々なスケールの渦などの海況を反映して、クロロフィルaの濃度は非常に複雑な分布を示している。一般に黒潮系の海面水温の高い領域にはクロロフィルaは少なく、親潮系の低温域や日本海北部、オホーツク海などでクロロフィルaが多い、という分布をしている。このような海色の観測による植物プランクトンの情報は、水産業などへ直接利用されるほか、海洋の基礎生産量の見積もりなどの研究に用いられている。

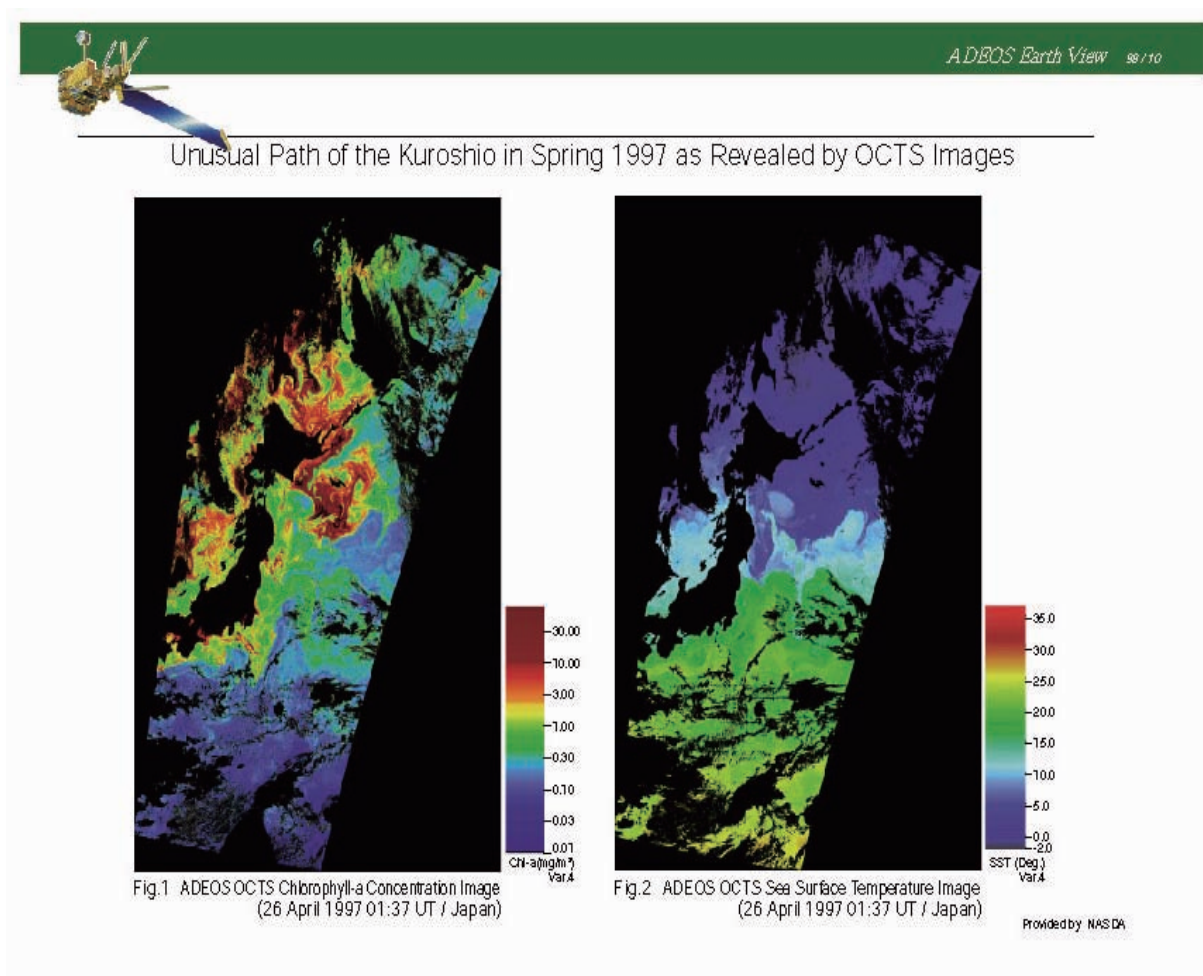


図 3.4-7 OCTS によるクロロフィルaおよび海面水温の同時観測の例
(1997 年 4 月 26 日 1 時 37 分 UT)

出典 http://www.eorc.nasda.go.jp/ADEOS/Earth_View/jap/adeos10j.pdf

3. 5 陸域環境のリモートセンシング

3. 5. 1 水資源環境を観測する？



<http://www.enlighten.co.jp/kankyo/kankyoku.htm>

この章では、宇宙空間から地球の表面を観測する技術「リモートセンシング」の中でも、特に陸域のモニタリングを「水資源環境」という言葉をキーワードにして紹介します。

地球上の生物が様々な相互作用を営んでいる生態系。それにとって「水」が必要な理由やその働きを考えてみたことはあるでしょうか？最初から大きなスケールで考えると実感が湧かないかも知れません。例えば暑い夏、皆さんの家の庭にホースで水をまく場合を考えてみてください。何故、暑い日や雨がずっと降らなかった時、庭に水を撒くのでしょうか？難しく考えることはありません。もちろん、庭に植えている植物を成長させるためや、熱くなった庭を涼しくするために水を撒くわけです。早い話が雨や露の代わりですね。

地球上のいろんな地域の生物環境(生態系)と水の関係もまったく同じです。雨として降った水は植物を成長させ、地表面の熱をコントロールし、動物の生存のための飲み水として利用されます。また、人間の社会では工業や農業のため、また他にエネルギーを作り出すためにも水が利用されます。このように降雨から海までの水の果たす役割は、非常に多種多様で、場所と時間によってまったく違った働きをしています。また、一度雨として降った水は暖められた地表面や海からはどんどん蒸発していき、また雲となって再び海から陸地へと再び運ばれます。このような地球上の水のサイクルのことを水循環といいます。

水というものは非常に大切だけれども「循環している資源」であるということをまず忘れないで下さい。それでは、ここからは水循環のうち、陸域の水の役割とその観測方法(モニタリングとも言います)について説明していきます。

さて、水を撒いて少し涼しくなった庭や家の周囲の状態を「観測」するにはどのような方法があるでしょうか？

「写真を撮る。それも出来るなら2階とか高いところから……。それもいまどきはデジタルカメラを使って……。」という発想が浮かぶのではないのでしょうか。これがリモートセンシングのスタート地点です。では、2階の窓のような高いところからデジタルカメラを庭に向けた時に、どのような写真を撮ることが出来るでしょう？俯瞰的に高いところから地上を見ると、庭に居た時、背丈くらいだった庭の針葉樹は丸く写っていることでしょう。芝生は緑色のカーペットみたいで、良く育っているところは色が濃くなっているかもしれません。空き地で土が見えているところは、水の湿り具合で少し濃淡が見えるのではないのでしょうか？この様に、視点をかえて高いところから写真(画像)を写すことによって、地面から観察出来ることとは少し違った、広い範囲の現象が一度に記録出来るという事に気が付くと思います。

これと全く同じ原理を使って観測を行うこと(離れた所から直接触れずに、対象物を同定あるいは計測し、またその性質を分析する技術)をリモートセンシング(Remote Sensing)と呼んでいます。

あなたはデジタルカメラを使って家の2階から自分の家の庭を観察しました。では？飛行機に乗ってデジタル画像を取ったとしたら、どのような映像が得られるのでしょうか？きつともっと広い地域、あなたが住んでいる町や県内のことが一度に分かるはずです。ではさらに、もっともっと高い所。例えば人工衛星の飛行軌道にカメラを積んだとしたら……。どうでしょう？日本全国やアジア全域の事までも一瞬にして観測することが出来そうですね。

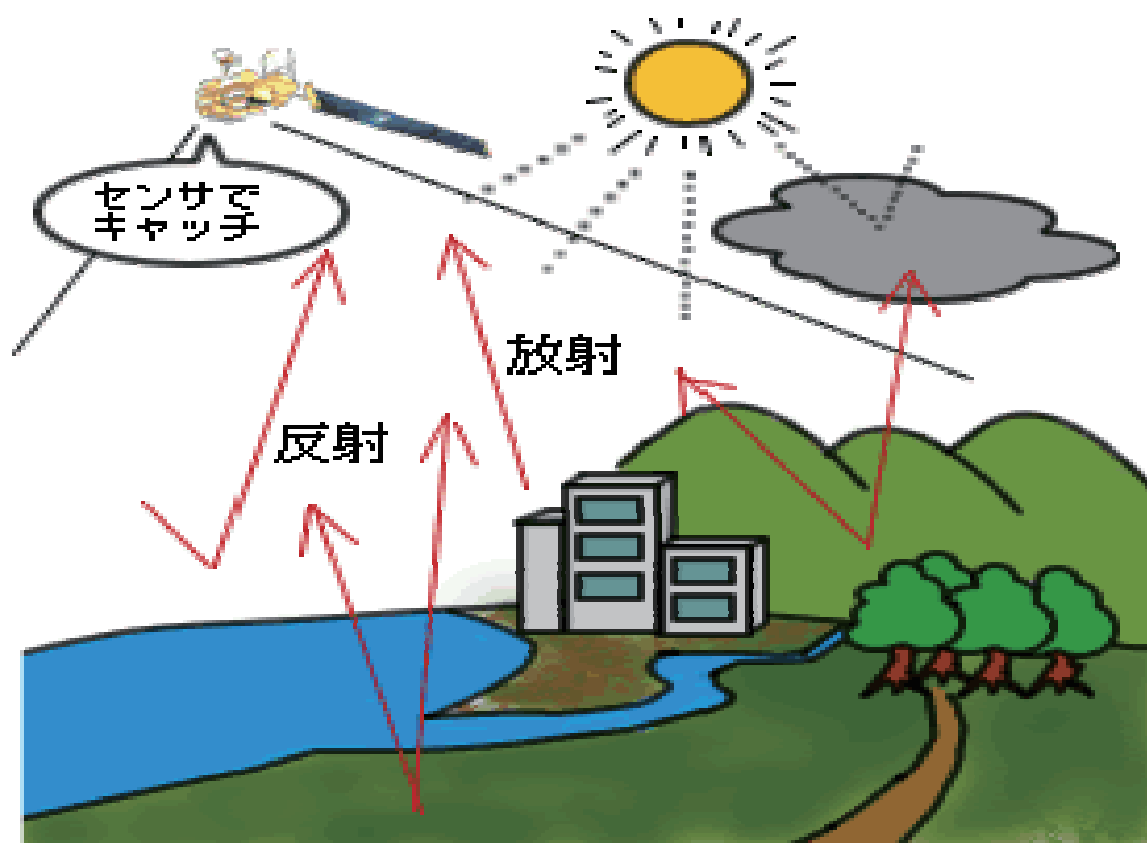
こんな発想からスタートしたリモートセンシングは、現在様々なところで活用されています。この章ではその中でも特に「陸域の水資源環境モニタリングのためのリモートセンシング」の分野についてもう少し詳しく解説していきます。

3. 5. 2 陸域リモートセンシングの原理

先ず最初に、実際にどのような原理で陸域のモニタリングが行われるのかを紹介します。

リモートセンシングとは、「離れたところから直接触れずに対象物を同定あるいは計測し、またその性質を分析する技術」と定義することが出来ます。リモートセンシングによって地表面からの光(専門的には電磁波と言います)を観測すると、地上の対

象物を判読できたり、特定の現象を解析できるのは、「全ての物体は種類および環境条件が異なれば、異なる電磁波の反射または放射の特性を有する」、という電磁波の特性に基づいています。つまり、リモートセンシングとは、物体から反射または放射される電磁波の固有性に着目して電磁波を観測し、物体の識別やそれが置かれている環境条件を把握する技術であるといえます。少し難しい表現ですね。最初は実感が湧かなくても大丈夫。「地表面にはいろんな物が、いろんな状態で存在している(例えば山があったり海があったり砂漠があったり...)。そしてそれらは光があたった時それぞれ特有の光を反射する(山の木は「緑」だし、海は遠くから見ると「青」に近い色に見える)。だからそこから来る光の特徴と量を画像として記録すればそこに写った対象とその状態を観測できる、くらいに覚えておいて下さい。デジタルカメラのような物で画像として地表面を観測すれば、この反射率・放射率の違いをもとにしてそこにある物体の判別や分析を行うことが出来るわけです。



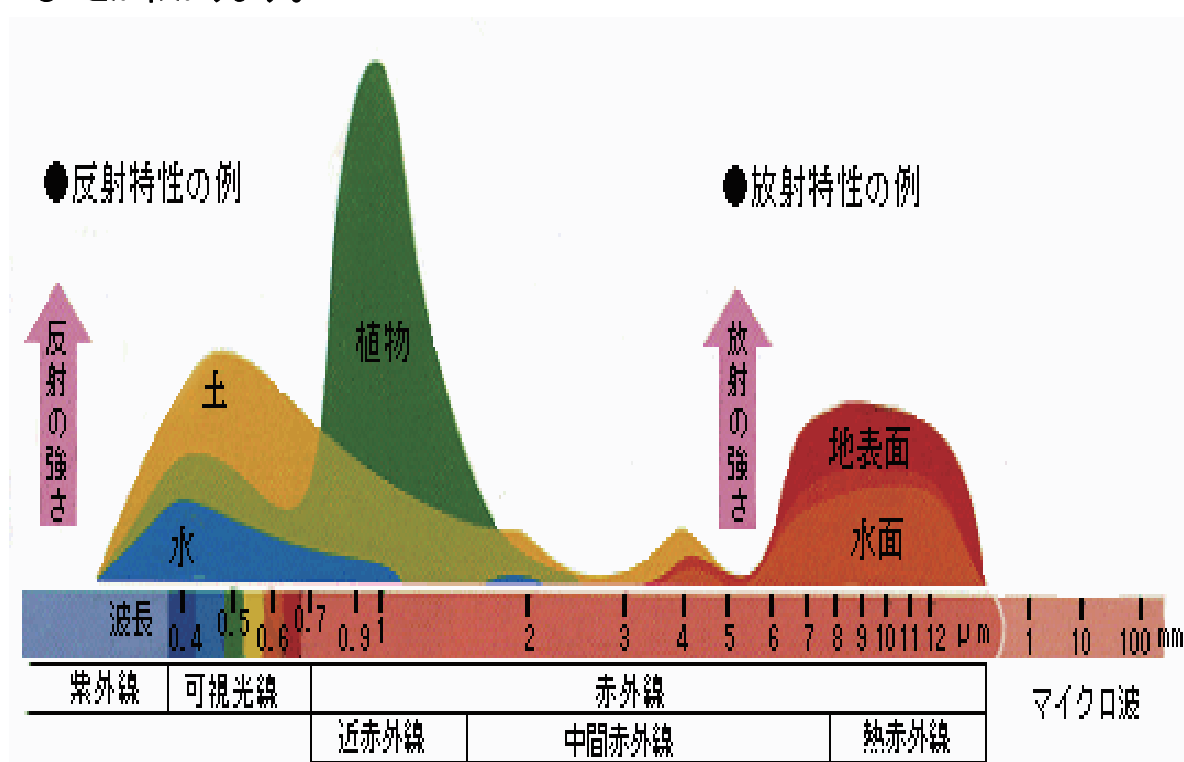
このように宇宙から地上の様子を観測する場合は、地上から反射したり放射されている光(電磁波)が利用されています。ここからは、これらの電磁波を使い、どのようにして地上の物質の大きさ、形、性質等を特定しているのか少し詳しく説明します。

地上のあらゆる物質は、電磁波(人間の目で見ることができる光(可視光線)や人

間の目には見えない波長帯の赤外線、紫外線、電波など)を受けると、物質の性質に応じて波長帯毎に固有の強さの電磁波を反射します。また、物質が熱を帯びると、その物質の性質に応じて波長帯毎に固有の放射の強さを示します。これを専門用語ではスペクトル特性といいます。

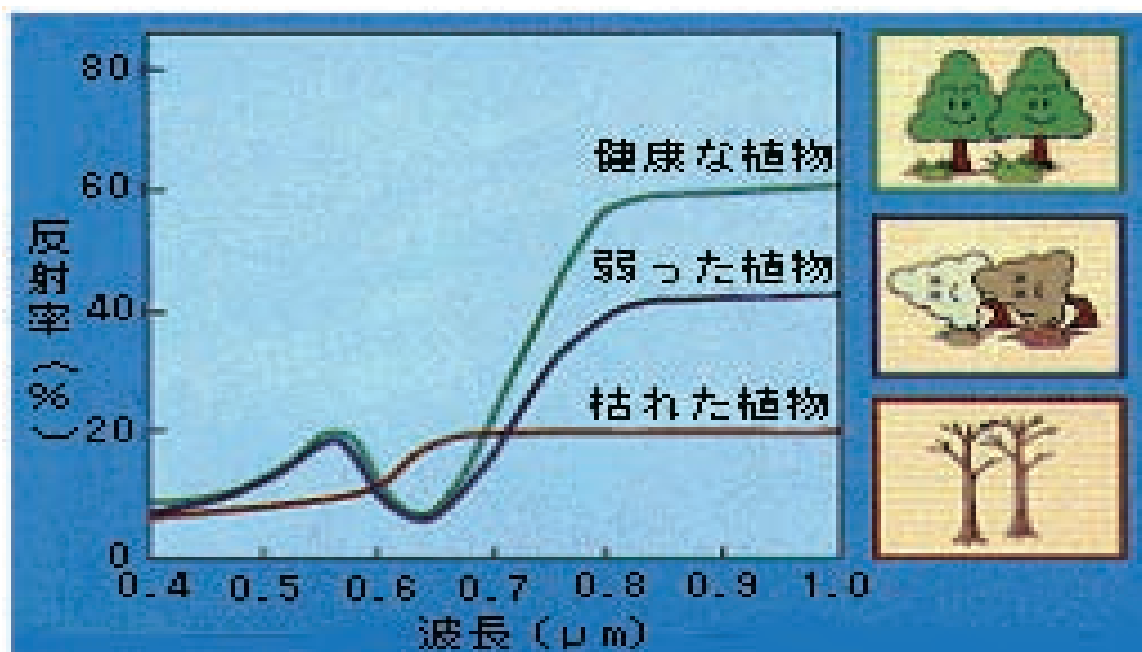
下の図は、植物・土・水のスペクトル特性です。つまり波長帯毎に、それぞれの反射・放射の強さを表したものです。横軸は波長を表し、左側に行くほど波長は短く、右側に行くほど波長は長くなります。波長の長さに応じて、それぞれの呼び名(紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波等)が付けられています。

各波長帯における反射・放射の強さが、物質の種類(植物、土、水等)によって異なることがわかります。



さらに、植物の種類や植物の生育状態(枯れている、弱っている等)や、水の濁り具合、また土壌の湿り具合といった物質の状態によっても、スペクトル特性(反射・放射の強さ)は異なります。

例えば、植物の健康状態による反射率の違いを次ページの図に示します。葉が生い茂っている健康な植物、葉の水分がほとんどなく枯れて弱っている植物、葉が落ちて完全に枯れている植物では、電磁波の反射の強さが異なることがわかります。



地球観測衛星に載せているセンサは、各波長帯毎に、反射の強さや放射の強さをとらえる能力を持っています。地上から反射したり、放射したりしている電磁波をセンサを使ってデジタル値として記録することで、森林の生育状態、海の汚れの状況、砂漠化の状況等を知ることができるのです。

受動式センシングと能動式センシング

リモートセンシングの種類は、その観測方法から大きく2種類「受動型リモートセンシング」と「能動型リモートセンシング」に分けられます。

“受動型リモートセンシング”とは、太陽光が表面で反射されたそのエネルギーをセンサが受信する観測方法です。これは、比較的分解能(地表を細かいところまで観測できる能力)が高く、また、多くのバンド(波長の種類)を扱えるセンサが開発されています。バンドの組み合わせによっては、人間の眼で見たのと同じようなカラー画像を作成することができます。可視光線や赤外線などの波長を使うものがほとんどで、太陽光が当たらない夜間や雲に覆われた場合には地表を見ることはできません。

もう1つの「能動型リモートセンシング」は、センサ自体が電磁波(主にマイクロ波)を地表に向けて発射し、それが地表で反射・散乱されてセンサの方向に戻ってきたものを受信する方式です。この方式では太陽光線に依存しないので、曇っていても夜間でも地表のようすを観測することができます。

具体的な例をあげますと、1992年～1998年まで地球観測を行った。日本製の地球

観測衛星 JERS-1 衛星には受動式の光学センサ(OPS)と能動式の合成開口レーダ(SAR)が搭載されていました。OPS は可視光線の緑と赤、そして近赤外線をキャッチするもので、それぞれの波長は次のようになっています。

バンド 波長 [μm]

バンド1 0.52~0.60 バンド2 0.63~0.69 バンド3 0.76~0.86
 バンド4 0.76~0.86 バンド5 1.60~1.71 バンド6 2.01~2.12
 バンド7 2.13~2.25 バンド8 2.27~2.40

このうち、バンド1(可視-緑)・バンド2(可視-赤)・バンド3(近赤外)の各バンドの画像は、それぞれ一枚一枚別々のモノクロ画像のデータとして記録されます。これらの3種類の画像を、それぞれ光の3原色の赤・緑・青に対応させて合成するとカラー画像を作ることが出来ます。3つの画像の組み合わせ方によって、いくつかの組み合わせが可能です。こうやって作成された代表的な画像には、“フォールスカラー画像(バンド1→青, バンド2→緑, バンド3→赤)”と“ナチュラルカラー画像(バンド1→青, バンド2→赤, バンド3→緑)”があります。それぞれの画像の特徴は、フォールスカラーでは植生域が赤で強調され、ナチュラルカラーでは植生域が緑で強調されます。可視の青のデータを用いると、人間の眼で見るのと同じ“トゥルーカラー画像”を構成することもできます。

フォールスカラー



森林や草地といった植物が多く生えているところを赤色で強調しています。植物が多く生えているところほど赤みを帯びて表示され、植物の生えている部分の識別がしやすくなります。

植物の少ないところは灰色がかって見えています。

衛星名/センサ: ADEOS/AVNIR
 観測場所: 淡路島・大阪南部
 観測日: 1996年12月30日

ナチュラルカラー



森林や草地といった植物が多く生えているところを緑色で強調しています。普段、私たちがイメージする植物の色に近い色合いが得られます。

植物の少ないところや住宅地等は赤紫色で表示されます。

衛星名/センサ: ADEOS/AVNIR
 観測場所: 淡路島・大阪南部
 観測日: 1996年12月30日

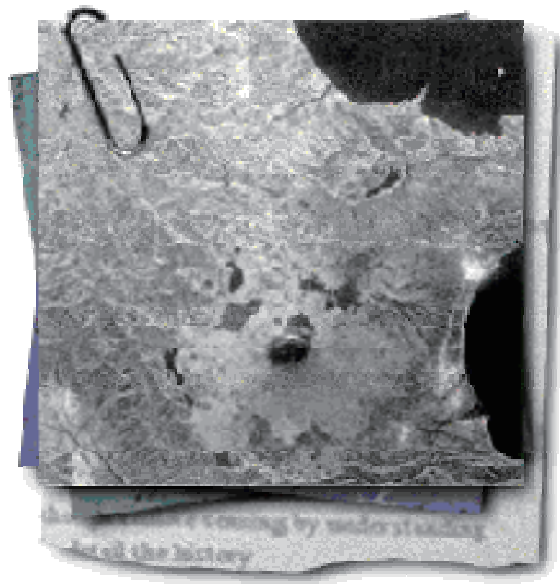
トゥルーカラー



私たちが普段目にする時とほぼ同じ色合いで表示されます。

衛星名/センサ: ADEOS/AVNIR
 観測場所: 淡路島・大阪南部
 観測日: 1996年12月30日

次に、能動式の合成開口レーダ(SAR)の画像を示します。SARは衛星から地表に向かって斜めにマイクロ波を照射して、反射・散乱されて衛星の方に戻ってくるマイクロ波のエネルギーをデータとして記録し画像化します。このエネルギーは地上が水面や波のエネルギーをデータとして記録し画像化します。このエネルギーは地上が水面や砂漠のように平坦であるか、また森林や都市域のように複雑な構造物が多くあるかで極端に異なります。例えば、水面ではマイクロ波が衛星とは反対方向に反射してしまう(鏡面反射する)ので、衛星に戻るマイクロ波のエネルギーは小さくなり、結果的に画像で池の部分は黒っぽく映ります。逆に、都市部の建物では地面でマイクロ波が強く反射されるので、衛星の方向に戻ってくるエネルギーが強く、画像では白っぽく映ります。森林などの植生域では複雑な反射の過程を経て、衛星の方向に散乱されてくる成分が発生するので、エネルギーはほぼ中間的となり画像ではグレーに映ることが多いです。



人工衛星観測が持つ地上観測の長所

地球観測衛星によるリモートセンシングには、以下のような共通した特徴があります。そしてこの能力が地球のモニタリングにとって非常に重要な鍵となっています。

(1) 広い範囲を一度にとらえることができる

見渡せる範囲は、地球観測衛星に載せているセンサの種類により異なります。しかし、地球観測衛星による観測は、広い範囲を一度に見渡すことができるので、各地域における土地利用の状況、緑の分布の違い及び遺跡、造形物の形や大きさ等を

知る上で大変役に立ちます。

(2)同じ地域を長期にわたって観測することができる

地球観測衛星は、地球の回りを繰り返し飛んでいるので、同じ地域を定期的に観測することができます。すなわち、時間の経過に伴う環境の変化を知ることができます。

(3)直接現地に行かなくても、状態を知ることができる

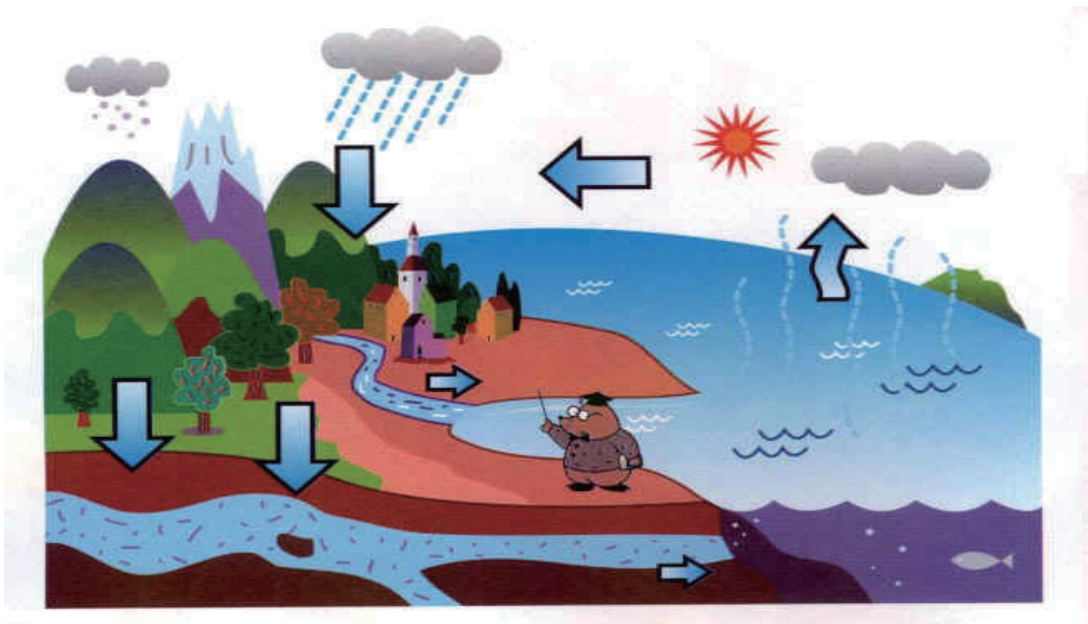
地球観測衛星は、地球のさまざまな地域を観測しているので、普段私たちが行くことのできない地域や自然災害がおきた地域等の環境変化や被害状況等を知るのに役立ちます。

(4)人間の目で見ることができない情報(温度など)を知ることができる

地球観測衛星は、人間の目で確認することができない温度などの情報も観測することができるので、地球環境の解明等に新たな発見をもたらしています。

3. 5. 3 陸域における水環境

陸域における水の世界を考える時には、「地球上のどこにどれだけの水が存在するか?」という水の空間分布を知ることと、「どのように水は移動するか」という水循環プロセスを知ることがとても重要です。これを扱う学問分野は「水文学」と呼ばれています。水の惑星と言われる地球で生活する全ての生物にとって(もちろん人間もその中の一員です。), 水の持つ役割を理解し、水自身を貴重な資源として認識することは生存の根本に関わるほど大切なことなのです。



<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/kaizen/kisei/mizu/chikasui/siori/part1.htm>

では、皆さんの家の中で「水」はどのように使われているのでしょうか？当然、飲むためや料理を作るための飲料水、またトイレやお風呂で使う水として利用されていますよね。また、庭の植物を育てるために散布する水、水槽で魚などを買っているとその水としても消費されていることでしょう。

この水の消費をもっと広く、陸域全体に広げてみるとそこには大きな問題が浮かび上がって来るのです。現在では社会構造(広い意味で人間の暮らし方)やマクロスケールの気候が変化した結果、「陸上の水の空間分布」と「水循環プロセス」が世界各地で急激に変わってしまったことが報告されています。このような水資源環境の問題を考える際には、山の上に降った水が海に流れ込むまで、その水の流れと使われ方を把握する必要があります。そしてこの場合、対象がとても広い範囲に拡大されるのです。この様に広い場所を、同時に、同じ精度で、繰り返し観測する技術はリモートセンシングをおいて他にありません。

まず、ここでは地球規模の環境問題を、身近な例としてあなたの家の近くに置き換えます。そして、特に「水環境」に注目して次の順序で話を進めていきます。決して堅苦しく考えることはありません。雨が地表面の森や草原に降るのと、あなたが如雨露を使って庭に水を撒くことは、「水のはたす役割」としてはスケールが違うだけで同じようなことなのです。

水資源環境に関わるキーワード

水は大切な資源ですが、この資源を考えるときに忘れてはならないキーワードは3つあります。それは、「利水」・「防災」・「環境」です。

まず「利水」ですがこれは皆さんが毎日水を飲んでいることから実感しやすいと思います。しかし、水は飲み水(飲料水)の他に、工業・農業の分野でも大量に消費されています。工業はテクノロジーと経済活動を活性化させ、農業は社会に安定した食料を提供します。

しかし、地球上の陸地を見渡せば、砂漠化や森林減少という言葉に代表されるように、水資源の豊かな地域は急激に減少しています。歴史で習ったように古代の4大文明はすべて大きな川の近くにありました。そこでは、一年のうちの定期的な河川の氾濫を高度に予測する技術が発展しました。そして、その水資源を人類が利用しやすい環境を巧みに形成し、さらに維持しながら古代国家を発展させていきました。しかし、現在のそれらの地域はどのような状況でしょうか？そのほとんどの場所は、21世紀までオリジナルの文明が反映を続けてはいません。これは、水の持続的な利用が行えなかったことに原因があります。それらの場所では、森林の過剰伐採や過放牧、また灌漑用水の管理を中断してしまったために、地下水が枯渇し農業用灌漑水が利用できにくくなりました。また一部の地域では、季節的な降雨前線が長期スケール

ルで移動したために、降雨の分布パターンが変化し、降水量自体が減少して砂漠化してしまった地域もあります。この結果、現在までに文明発祥地のほとんどが、次第に人が住みづらい地域に変わってしまいました。



<http://www.shonan-inet.or.jp/~gef20/desert/index.html>

次に「防災」です。日本は季節風や台風の影響で洪水の頻発する場所であるといわれています。しかし世界を見渡せばもっと大規模な洪水が中国の長江やアフリカで発生しており、被害の大きいときにはひと夏のうちに 1000 人以上が洪水によって亡くなっています。これも早急に対応策が求められている水環境の問題の一つです。こ

の洪水の理由にはいくつかの説があります。上流の森林や草地が荒廃したために水の保水能力が低下した、雨の降る範囲と降り方に偏りが出始め両方が集中化した、もともと氾濫しやすい場所まで開発が進み、危険な場所に人が住み始めた、といった要因が考えられています。ここで重要なのは、大きな川になればなるほど問題の原因が決して一つではなく、いくつかの洪水を起こす要因は複合的に影響しあっているということです。



<http://www.mlit.go.jp/river/saigai/kiroku/index.html>

<http://www.mlit.go.jp/river/saigai/kiroku/index.html>

では次に「環境」です。この問題はとても多くの側面があり、また地域ごとに違った問題を抱えています。これを次に説明します。

地球規模での環境変化とその影響

少し乱暴かもしれませんが簡単にいうと、ここには人口問題を出発点とする土地利用と水需要との間にジレンマがあります。まず世界の人口は今後増え続けることがほぼ間違いはありません。そして、増加した人類は、その人数に比例して食料とそれを生産するための水(農業用水)と飲料水を必要とします。また同時に、膨れ上がった人口が生活レベルを安定させて暮らしていくためには、都市や社会的インフラを地球のどこかに拡大していく必要があります。

しかし、これはいつまでも続くものなのでしょうか？大きさを決まっている地球の陸地の中で、砂漠やツンドラ地帯を除くと人が暮らしていける場所は陸地のうちごく僅かです。この残った利用可能な土地を、生態系を守るための森林・食糧生産のための農地・人間の社会的生産基盤のための都市、この三つで分け合わなければならないのです。

皆さんも想像してみてください。森林は拡大する砂漠化と過剰な伐採のために、現在急激に減少し続けています。残った平野部分をどちらもこれから必要となる農地と都市域で分割しなければならないのです。当然どちらかを重視して拡大していくともう一つは犠牲になり減少していきます。では問題解決のために、もっと土地利用の効率を高めればいいのでは？と皆さんは考えるかもしれません。しかし、都市の人口の高密度化、化学肥料と品種改良に頼る農業生産量の増加は現在ではもう限界のところに来ているのです。

さて、このような土地利用に関係するジレンマは、見方を変えればそのまま水需要の問題と捉えなおすことが出来ます。増加する人類が全員豊かに暮らすために、農業・工業・飲料水のために必要とされる水の量は今後急増するでしょう。しかし土地と同じで、必要量が増えたからといって、降ってくる雨の量が増えるわけでも、砂漠に雨が降り始めるわけでもありません。

現在の地球上で、この重要な地上の利用状況と水資源の現状はどうなっているのでしょうか？無駄に使われたり、急速に環境が劣化している場所はないのでしょうか？これらに対し真剣に取り組む事は、我々が未来から課せられた使命なのです。これらの観測対象を見守ることを、環境モニタリングと呼んでいます。我々は現在、優れたモニタリング技術の条件そして、「ずっと繰り返し続けられて(周期的・継続的で)、広い範囲をモニターできて(広範囲観測)、どこも同じ精度で計測できて(均一精度)、出来れば対象を傷つけずに(非接触)」といった、かなり欲張りなことを考えています。そしてこの要求を満たすもの、地球の将来を託すものとして、開発され期待されているのがリモートセンシングというわけです。

3. 5. 4 水のはたす役割と実際の観測技術

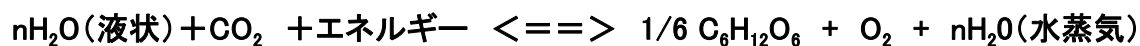
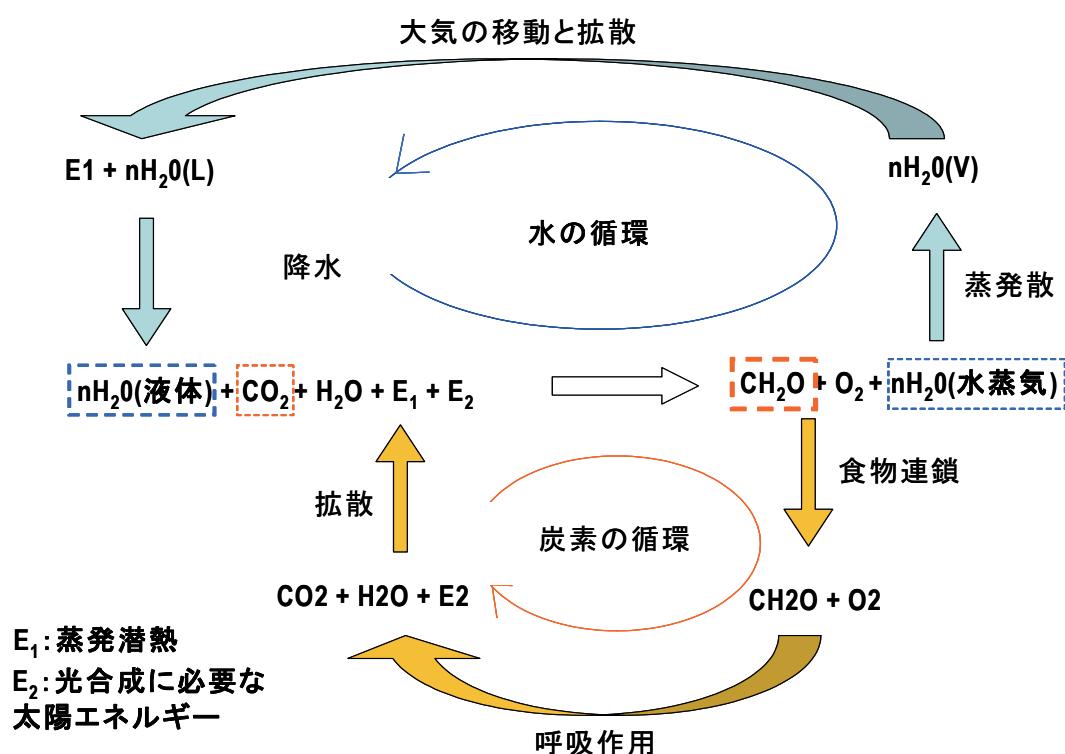
陸域における水の役目

ここでは陸上と大気との間に、水を介したどのような関わり合いがあるのか、つまり「地面と空気との間の水循環とその中での植物の役割」を少し詳しく紹介します。

まず大気中から地面への水インプットを考えましょう。これは皆さんも良く知っている降雨、つまり雨です。地上のある一地点に注目すれば、そこに降る雨と、流域の上流から流れて来たり浸透してきた水が足しあわされて、生物が利用できる水になっています。

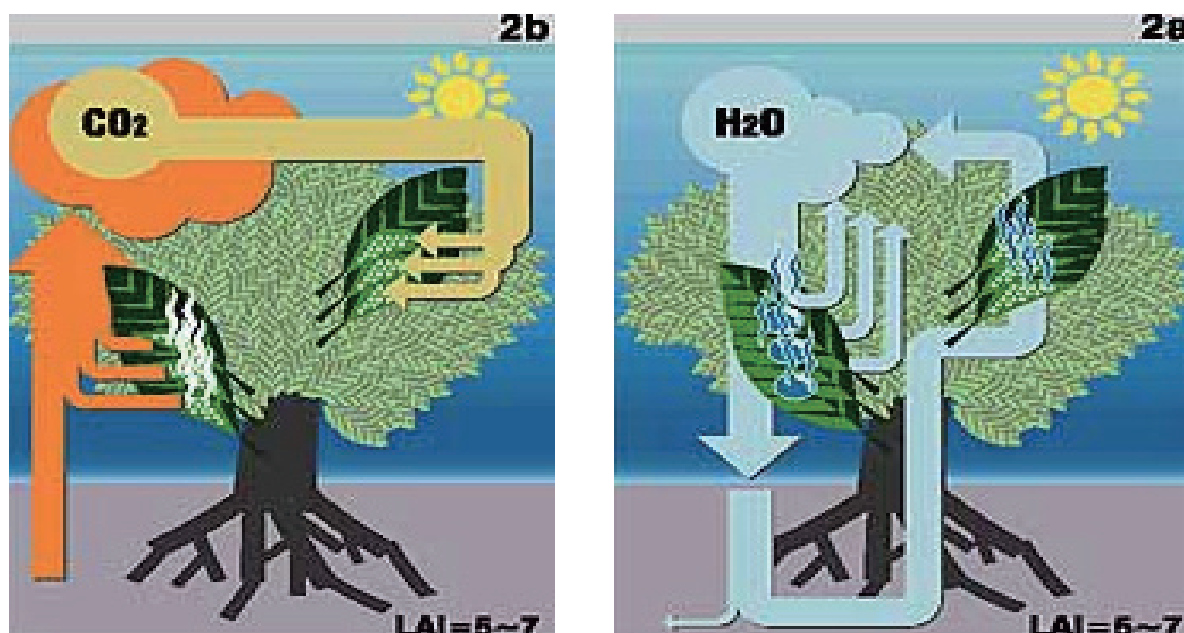
では次に、陸地の植物の上に降った雨が生物に対しどのような役割を果たしているのかを考えて見ましょう。ここで皆さんに覚えてほしいキーワードは大気—陸面過程(やさしく言えば土壌と植物と大気の関わり合い)と「水循環」です。

皆さんは光合成という言葉聞いたことがあると思います。植物に太陽が当たった時に植物内部に起こる反応のことで、図や式で書くとつぎの様になります。



この式が左から右へ進むことが光合成です。つまり、根から吸った水分と CO_2 二酸化炭素を基にして植物(緑色光合成生物)が太陽エネルギーを使い、ブドウ糖と酸素を作り出す反応のことです。ではこの逆の反応は何でしょう？これが動物(もちろん我々もこの中に入ります)も植物も行っている呼吸で、人言えば食べ物(ブドウ糖)と酸素を消費して水と二酸化炭素を作り出しているわけです。

皆さんは左辺に「エネルギー」とありますがこれはなんだろう？と考えるのではないのでしょうか？これは、水が葉の表面から蒸発する時に移動する蒸発潜熱 E_1 と植物が太陽から吸収した熱量 E_2 、になります。水の蒸発については、左辺の液状の水が右辺では水蒸気になっていることに注目してみてください。光合成という右向きの反応のなかで植物が果たしている役割とは「太陽から熱量を吸収しつつ、水を液状のものから水蒸気へ変化させることによって蒸発潜熱を大気中に放出していること」と考えることが出来ます。また言葉を変えて熱量を絶対温度で割った値であるエントロピーを考えれば、これを増大させる作用とも言い換えられます(普通自然界ではエントロピーは増大する方向に反応が進みます)。一言で言えば、植物は自分で水を吸って太陽エネルギーの熱量によって乾かされながら、そのときに水を大気中に拡散させているわけです。この時、植物体から奪われていく熱量との収支によってエントロピーを大きくする方向(つまり右向きの)に反応を進めているともいえます。つまり、地球上で植生に覆われている部分は、植物の光合成によって冷やされつつ、酸素と食物の素が生産されているわけです。この反応が生態系の中で起こる結果、われわれを含む動物は酸素を呼吸の際にすることが出来、食物連鎖の中でブドウ糖は食物として消費されていきます。



<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/jp/news/no11/page04.html>

難しいことは今すぐに分からなくても、「植物を含む生態系では、太陽光が当たって光合成が進む(反応が右に進む)ことによって、熱エネルギーが移動し、 H_2O 水と炭素(左辺の CO_2 と右辺の $C_6H_{12}O_6$ の中にありますよね)が循環する。」ということを覚えておいてください。

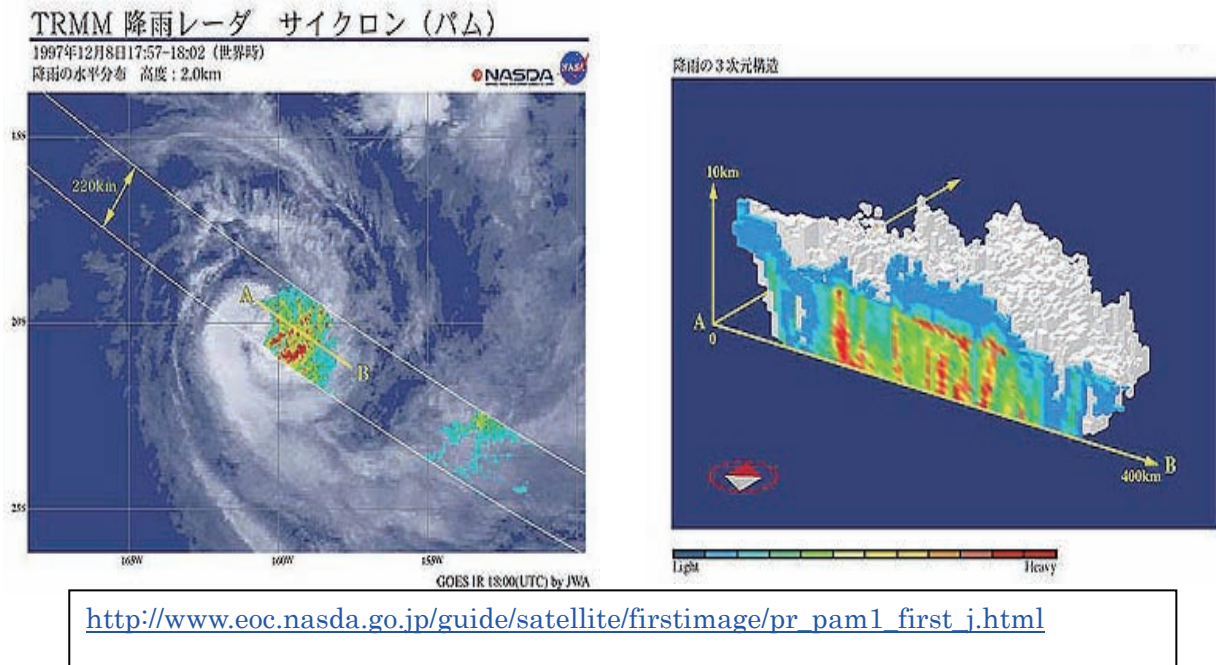
リモートセンシングによる実際の計測

では実際の大気－陸面過程の特に水の循環を観測するにはどうすればいいのでしょうか？皆さんの身近にある庭でも公園でもいいですから、土壌と植生と大気の関係を考えてみてください。

(降雨量)

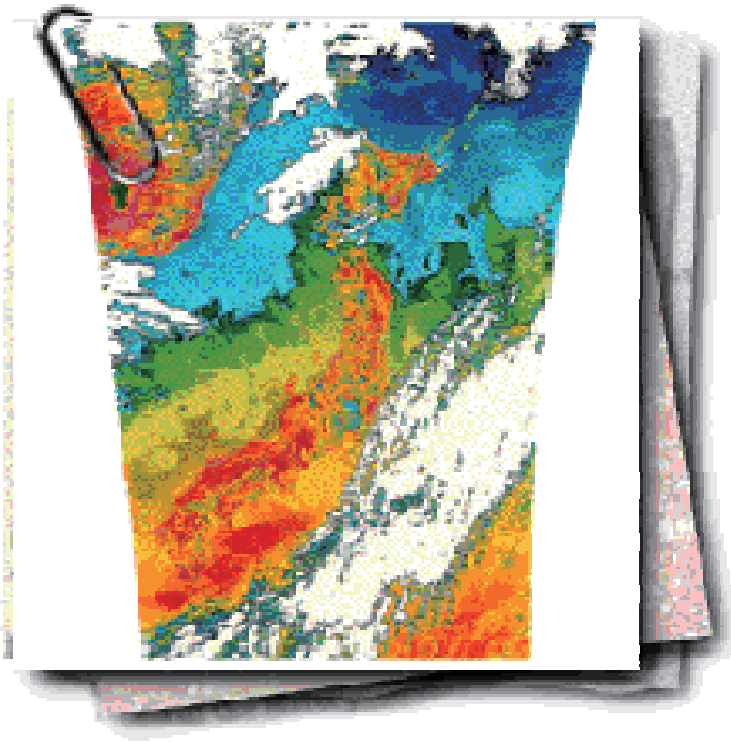
まず雨の量、降雨量が最初のインプットデータでした。現在日本では AMEDAS という地上にある観測サイトのネットワークが整備されておりここから降雨データを得ることが一般的です。しかし、海の上も含めた日本全体とか地球全体と考えると、観測地点を増やすことでは対応できません。このために、雲の分布を観測する先に述べたひまわりなどの静止気象衛星と TRMM に代表されるような降雨分布を観測するため

の衛星があります。今後このプロジェクトは GPM(全球降水観測計画)に引き継がれていく予定です。



(地表温度)

光合成に関しては、地上の温度を知ることにも非常に重要です。それは光合成反応が起こっている場所(生態系の中の植物)がどれくらいの熱量を得ているか知るためです。このためには 1981 年から NOAA という衛星が使われました。最近では日本が開発した ASTER というセンサが注目されています。

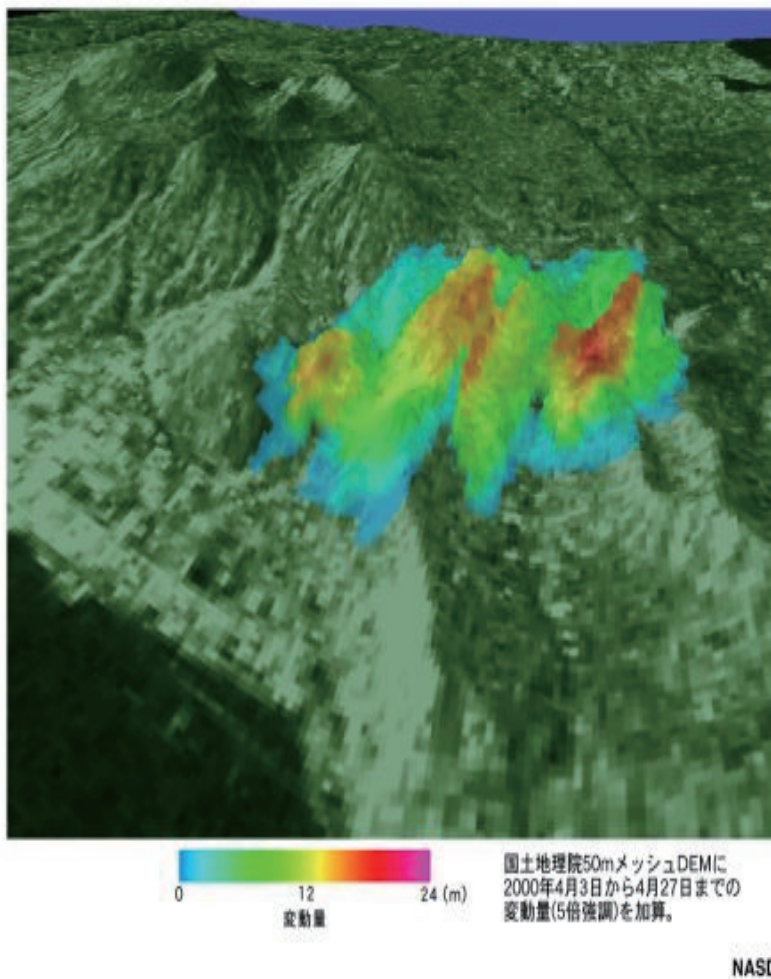
**VTIR の画像例**

(シュードカラー画像：
日本周辺、1990 年 5 月 6 日観
測)

[http://www.restec.or.jp/jpn/d
ata/data.html](http://www.restec.or.jp/jpn/data/data.html)

(地形)

さて、地球の陸域にはヒマラヤなどの高山帯もあればチベットなどの高原、また中国東部のようなデルタ地帯もあります。このような地形は気象に大きな影響を与え、降雨分布に非常に大きな影響を持ちます。また氷河として水を蓄えている地域から、大穀物地域として農業生産に利用されているところなど、標高によって水の循環はそれぞれに異なっています。このような地球の陸地面の起伏、地形を把握するための衛星があります。それは主に SAR(合成開口レーダー-Synthetic Aperture Rader)というタイプのセンサが使用されています。このセンサが搭載されている衛星には、JERS-1、ERS1、RADARSAT などがあります。



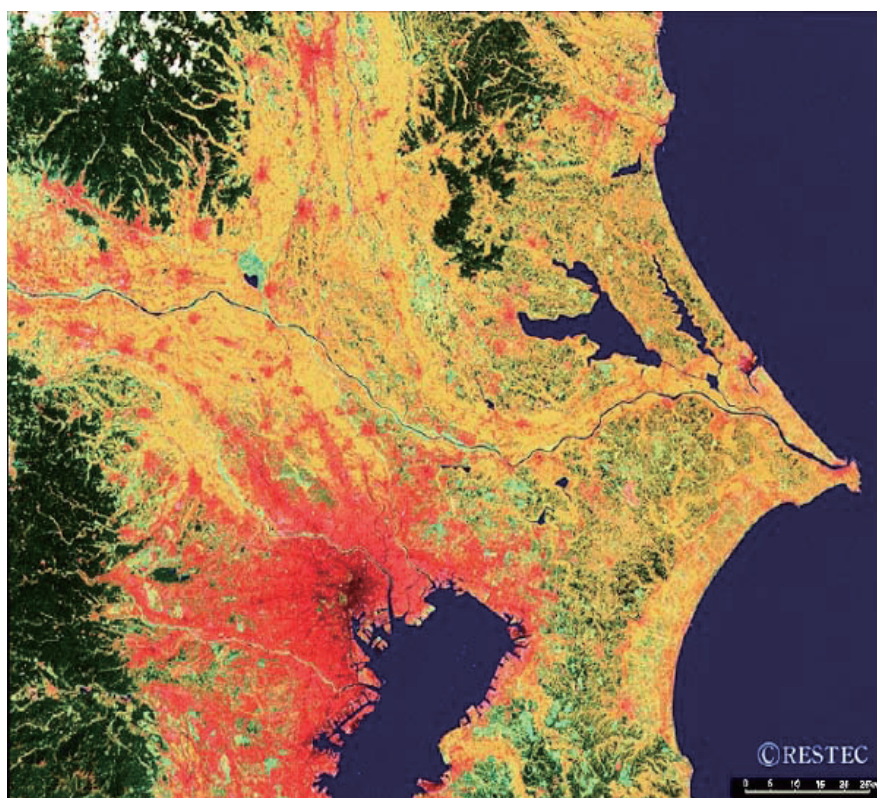
RADARSAT/C-band
SAR データによる北海道・有珠山およびその周辺地域の火山噴火等に伴う 4 月 3 日～4 月 27 日の地形変化量の三次元画像。

<http://www.restec.or.jp/jpn/data/data.html>

(植生)

陸地が、砂漠なのか凍りに覆われているのか森林なのか都市なのか？このような土地被覆を知るための衛星があります。これは時代的にも長く、1972 年からアメリカの landsat が観測を続けています。

特に陸域にある森林や草原や農地にどれくらいの植物が生えているのか？これは光合成量を左右する中心的な量ですからリモートセンシングを用いて長年研究が続けられてきました。これに対する独自のセンサはないのですが、逆に言えばほとんどの光学センサはこの植物の量を測定する機能を備えています。先に紹介した、landsat、フランスの SPOT、日本の JERS-1 搭載の OPS 等がこれに当たります。また、もっと広範囲を同時に観測するために、NOAA の AVHRR、新しい TERRA や AQUA に積まれている MODIS が用意されています。



Landsat/TM データによる 1988 年 10 月 14 日の関東地方の土地被覆分類画像。

赤色、桃色が市街地、住宅地で、黄色や朱色が農地、黄緑色が草地、荒地、緑色が森林、青色が水域を示す。

<http://www.restec.or.jp/jpn/data/data.html>

(土壌水分)

また、植物の根が水を吸って光合成を行うのですから、土壌に含まれている水分も非常に重要です。『そうは言ったって、土の上には草が生えていたり、森の中に木がたくさん生えていたら土壌が乾いているか湿っているかなんてわからない。』こう考える人も居るのではないのでしょうか？この回答は非常に的を射たもので、我々陸域を監視している研究者の抱えている非常に大きな課題なのです。

これに対応する技術として、土壌中や陸地にある水から放射される微弱な電磁放射を観測するセンサも開発されたのですが、陸地の状態は、森林・農地・都市・水面など不均一性が高いために、それらを含む代表的な水分量はその定義自体難しいのが現状です。この土壌水分に関してはリモートセンシングのみで解析するのではなく、地上観測やほかの植物の情報や気象条件などをインプットとしてシミュレーションモデルを使って解析が行われています。この研究分野では 1999 年に打ち上げられた TERRA、2002 年の AQUA などが注目されています。

3. 5. 5 陸域リモートセンシングの将来

最後に陸域観測リモートセンシングの将来についていくつか話をします。リモートセンシングの分野で進化しているものに、高解像度、ハイパースペクトル、複合センサの搭載があります。

衛星画像の高解像度化とは、皆さんが使っているデジタルカメラの記録画素数が毎年毎年多くなっていき、記録される画像がより鮮明になっているのによく似ています。リモートセンシングの分野での最初の高解像度化は、この技術がある意味軍事技術から発展したことと関係があります。東西の冷戦時代、アメリカとソビエトは両国とも相手の軍事的情報を人工衛星画像解析から得ようとしていました。そのために相手基地の出来るだけ鮮明な画像を得たいと考え、宇宙から撮影したにもかかわらず、あたかも航空機から写真を撮ったような画像を得られる高分解能センサを開発しました。これの空間分解能(地上分解能とも言います)は、約1m程です。この軍事技術が冷戦体制崩壊後にオープンになってきたのと、現在ではより高性能なセンサが開発されたことを受けて、一世代前の解像度の高いセンサが、民間企業や研究者の利用目的のために公開されています。日本国内の地域的な問題や都市域内部の解析等にこの高分解能センサの画像は非常に役に立っています。

次にハイパースペクトルです。これはセンサに記録されるバンド数(チャンネル数)が増加してきたことを意味しています。リモートセンシングが始まったころのLANDSATのMSSというセンサはたった4つの観測波長帯しかセンサに記録されませんでした。それから後のTMになっても、近赤外域、赤外域、熱バンドを含めて7つの波長帯しか観測できません。しかし、1999年に打ち上げられたTERRAのMODISでは36のバンドで画像を記録しています。観測できるバンド数が多いということは地上から反射してくるスペクトルのより細かな違いまで区別できるということです。地上から反射してくるスペクトルが本来は非常に滑らかで連続的であるのに対し、センサの観測波長帯は離散的で、スペクトルの飛び飛びの値しか観測していないことに気づくでしょう。このように連続的なスペクトルの情報のうちそれをより正確に記録することは、画像を分類して特定の土地被覆のところだけを抽出するときなどに非常に重要となります。

最後に説明するのは複合センサの搭載です。人工衛星が地上を観測するセンサとそれを運ぶプラットフォームから成り立っていることは前に説明しました。最近の傾向として一つのプラットフォームに複数のセンサを同時に搭載して、同じ人工衛星から何種類もの画像を得ることが可能となり始めました。これは、リモートセンシングで観測しなければいけない項目が多様になり、世界の多くの国でセンサ開発が加速してきたこと、またロケット技術の進歩から、打ち上げ可能重量が大きくなったことが原因です。これは画像を解析する研究者にとっては、地球上の観測地点に対して、同じ

日の同時刻に何種類もの衛星画像が得られるわけですから、それらの長所を関連させられれば非常に有効な研究が行えます。このような複合型衛星で新しいものとして NASA が地球観測のために打ち上げている AQUA があります。この衛星の上では、改良型マイクロ波放射計(AMSR-E)、大気赤外サウンダ(AIRS)、高性能マイクロ波サウンダ(AMSU)、雲、地球放射エネルギー観測装置(CERES)、マイクロ波水蒸気サウンダ(HSB)、中分解能撮像分光放射計(MODISという6つのセンサが稼動しており、それぞれが独自の情報を記録し、地上にデータを送信しています。この結果陸域の観測者は、地上分解能の高いASTERを使って地上のテストサイトの細部や熱環境を監視し、それと観測域の広い MODIS を組み合わせて対象のスケールアップを図っています。



EOS-PM1(Aqua)は、地球環境システムのメカニズムの解明を目的とし、NASA によって開発された地球観測衛星。Aqua には、NASA だけでなく、日本(JAXA)、ブラジル(INPE)といった他国のセンサも搭載しており、その開発、運用は国際的なプロジェクトとして行われている。

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/eos-pm1_j.html

(最後に:これからこの分野に進まれる皆さんへ)

リモートセンシングは我々人類が持ちえた非常に高い一つのテクノロジーです。そして、人類の未来を左右するモニタリングを続ける上でなくてはならないものです。特に、これから環境分野に進んでいこうという皆さんには、積極的にこの分野の門をくぐって来てもらいたいと考えています。

そこで、一つ皆さんにワンポイントアドバイスのようなものを最後に残しておこうと思います。それは常に自分自身が「何を目的としてこの技術を使うのか」明確にして

おいてもらいたいということです。リモートセンシングはあくまでも手段であって目的ではありません。目的があいまいなまま利用するのであればこのテクノロジーはとてつもなく高価なおもちゃでしかありません。

例えば、最初にカメラの話題を取り上げましたが、カメラを買ってマニュアルを熟読してそれを暗記できたところで、すぐに上手い写真が取れるとは限りません。では経験を積みばいい写真が撮れるのでしょうか？確かにある程度までは技術が向上するかもしれませんが、いい写真家になるためにはもう一つ何か必要なものがあるように思えます。

写真を撮るのなら、風景写真であれ、ポートレートであれ、鉄道の写真であれ、まず被写体の何に感動したのか？そしてそれを印画紙の上に表現し鑑賞者に伝えるためにはどんな技術を使うべきなのか？それが撮影者の中ではっきり意識出来ない限り名作は生まれません。

リモートセンシングを使う人は「地球を対象とした写真家」なのです。この写真家は、技術を磨くのと同時に対象と誠実に向き合い、地上の表面に現れている問題だけでなく、それ以上にそれが発生したプロセス、また他の原因との因果関係を正確に把握し、時にはそれを推理しなければなりません。その意欲と知識があって始めて、問題を視覚化し人に伝えられるベストな画像処理方法が見つけれられるのです。

これからリモートセンシングの分野に足を踏み入れ、特に地球の環境を守ろうという皆さんへメッセージを残して、この章を終えたいと思います。

「地球という我々の観測対象のことを慈しみ、より深く知る努力をし続けてください。勉強の合間には自分の足で地球のあちこちに出かけ、自分の目で確かめた地球の素顔を忘れないで下さい。」

3. 6 国際宇宙ステーションからの観測

3. 6. 1 私たちの地球に特有なオゾン層

オゾン層はどの様にして産まれたのだろうか。3. 1節でも見てきたとおり、私たちの地球では、28 億年ほど前に海の中で原始的な植物の光合成によって酸素が増え始めた。その後、酸素の濃度は順調に増加し、約 6 億年前にオゾン層が誕生した。オゾン層は太陽光に含まれる危険な紫外線を吸収するので、生物を守る地球の宇宙服の役割を果たす。その結果、地上の生物の爆発的な繁栄がもたらされ、その中で人間の様な知的生物も生まれた。

一方、地球の成層圏に存在するオゾンは 250nm 付近を中心として主に 200-310nm の範囲の紫外波長域に強い吸収帯を持ち、太陽からの光を吸収している。この波長の光は生物のDNAにダメージを与える事が知られているが、オゾン層の存在により地上には届かない。このため「オゾン層は地球の宇宙服」と言われている。

現在、人類が放出したフロンなどのハロゲン物質が成層圏に入り込み、光によって分解された塩素や臭素原子などが成層圏のオゾンを破壊し続けていることは良く知られている。破壊され続けるオゾン層が“いつ回復するのか”を言うのは非常に困難である。シミュレーション計算による予測には計算によって数 10 年から 100 年の開きがある。これは、ハロゲン物質は窒素系、水素系などの物質とも複雑に相互作用しあった化学反応系を組んでおり、“成層圏に存在している間にオゾンをどの様に、どの程度、破壊しているのか”は正確に理解されていないからである。なぜ、理解できないのか？原因の一つに臭素系の物質の観測例がこれまでなく、正確な量やグローバルな振る舞いが把握されていないことが挙げられる。

しかし、現実には臭素系物質の観測は非常に困難である。ppt 以下しか成層圏に存在しないため、従来の測定器では感度不足により検出が不可能である。先に述べた様に、地球はその温度による電磁波を放射している。地球大気中の物質も大気の温度による、それぞれの分子に固有の波長の短い電波(サブミリ波)を放射している。もし、このサブミリ波を宇宙から感度よく観測することができれば、臭素系ハロゲンを始めとした一連の大気中の微量な物質の状況を把握し、目に見えない変化をグローバルに知ることが可能となる。今、従来では不可能と言われていたそれに挑戦しようとしているミッションが日本にある。

3. 6. 2 国際宇宙ステーション搭載 SMILES

国際宇宙ステーションは、地上から約 400km 上空に建設される巨大な有人施設である。宇宙ステーションの主な目的は、宇宙だけの特殊な環境を利用したさまざまな実験や研究を長期間行える場所を確保し、そこで得られた成果を活かして科学・技術

をより一層進歩させること、そして、地上の生活や産業に役立てていくことにある。国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟 (JEM) 曝露部に取り付けられる第一次ミッションの中に SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder) がある。SMILES (図 3.6-1) は、2009 年頃に打ち上げられ、サブミリ波帯で地球大気の高精度観測を行う予定である。検出感度の向上のために 4 K 級の機械式冷凍機と サブミリ波 SIS (Superconductor - Insulator - Superconductor) 受信機を世界で始めて宇宙で実用化する。これは世界で初めての試みであり、技術的には「非常にチャレンジング」である。それだけに世界各国から成り行きが注目されている。

3. 6. 3 SMILES の特徴

全地球規模で短時間に成層圏分子の3次元分布を知るためには、リム放射サウンディングと呼ばれる方法が有効になる。宇宙から地球大気の縁に沿った観測をすることで分子輝線の受信強度を大きくし、高度分解能をよくすることができる。宇宙ステーションの軌道運動で水平方向の情報を、アンテナの高速スキャンで垂直方向の情報を得る。図 3.6-2 の青線は宇宙ステーションの軌道上から1日で観測する軌跡である。SMILES では宇宙ステーションの軌道に対して、アンテナを 45° 傾けており、北緯 65° から南緯 38° までの範囲を観測する。

図 3.6-3 に SMILES 観測システムの概略図を示す。成層圏大気中に存在する分子からのサブミリ波はアンテナで収集され、637.32 GHz のローカル周波数と合わせて SIS ミクサによりヘテロダイン検波する。SMILES では機械式冷凍機によって絶対温度 4K 及び 20K まで冷却された超伝導 SIS ミクサ (受信器) と低雑音 HEMT アンプ (増幅器) で構成された受信機を用いている。周波数はダウンコンバートされ、広帯域の音響光学型電波分光計でスペクトルになる。こうして得られたスペクトルは、宇宙航空研究開発機構が開発を行ったデータ中継技術衛星 (DRTS) を介して筑波宇宙センターに設置される地上局に送られる。得られたスペクトルは地上局で逆変換法を用いたアルゴリズムで処理し、大気中の分子存在量を求める。そして最終的には分子存在量の高度分布をグローバルに得ることができる。

SMILES の最大の特徴は超高感度 SIS 受信機とこれを 4K に冷却する機械式の冷凍機である。サブミリ波 SIS ミクサの写真を図 3.6-4 に示す。マイクロ波では数 mm の大きさのミクサが、サブミリ波では数 μm ほどになる。サブミリ波を用いた大気観測衛星の計画は世界でも他にいくつかあるが、これらは受信機部にショットキーダイオードという技術を用いている。これは確実に安全ですが高感度ではない。それに比べ SIS ミクサを用いた観測ではショットキーダイオードを用いるよりも約 10 倍感度が良くなる。従来より 10 倍良い「眼力」で見ると地球はどの様に見通せるのだろうか。一つの例として、従来のショットキーダイオードで観測したスペクトルと SMILES で得られる

スペクトル(シミュレーション)の比較を示す(図 3.6-5)。従来ではシングルショットではノイズに埋もれてどこにいるか分かりませんが、SMILES の観測では ClO の美しいスペクトルが姿を現している。

3. 6. 4 SMILES に期待されること

SMILES では従来の装置では検出不可能な分子を観測し、地球規模でその分布と変化を明らかにする事が可能になる。また、オゾンに関しても従来よりも精度の良い観測が可能となり、オゾン層のわずかな変動を細やかに観測することができる。これらによりオゾン破壊、地球温暖化などの大気微量成分による複雑な現象の解明に新しい世界を拓く事が期待されている。我々が SMILES で蓄積している技術は将来の惑星間通信、惑星大気の観測などにも新しい可能性を開くことでしょう。

参考: SMILES ホームページ <http://smiles.tksc.nasda.go.jp/indexj.shtml>

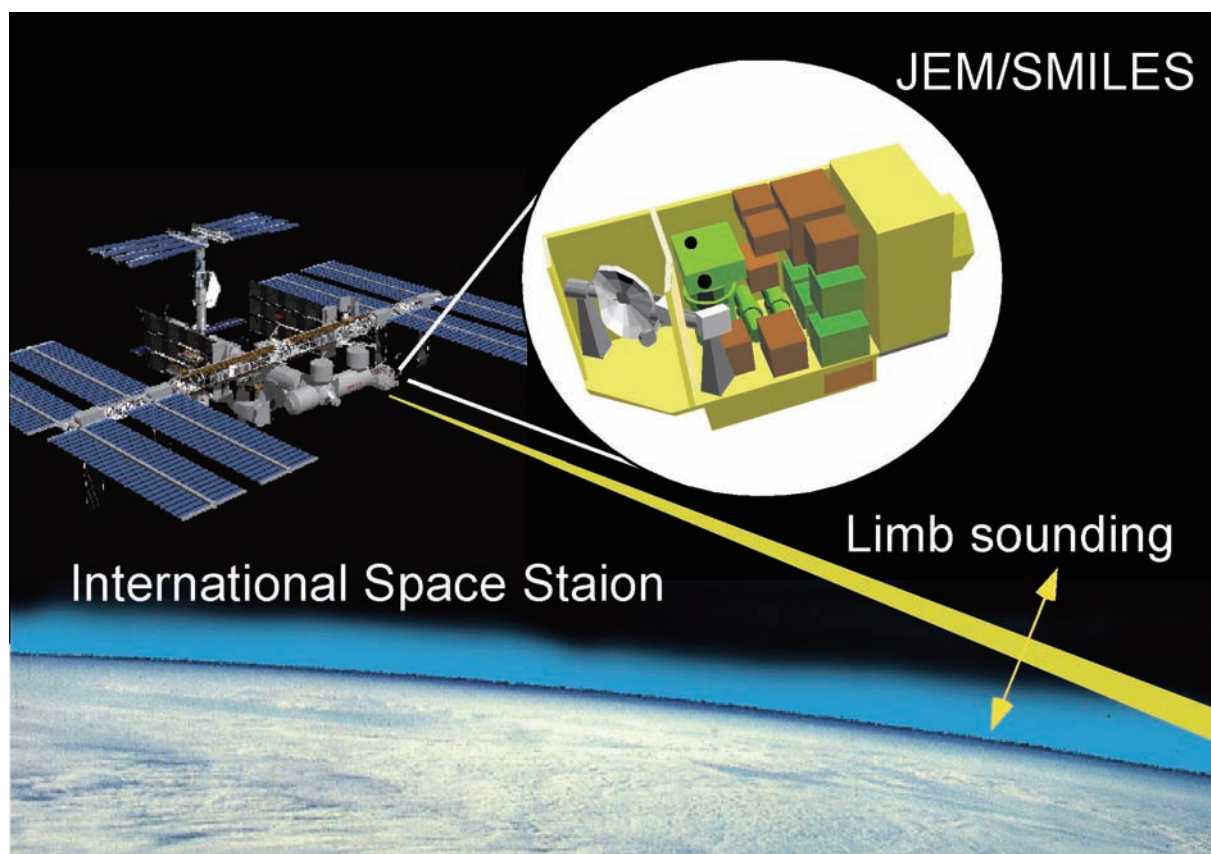


図 3.6-1 国際宇宙ステーション搭載 SMILES とリムスキャンニング

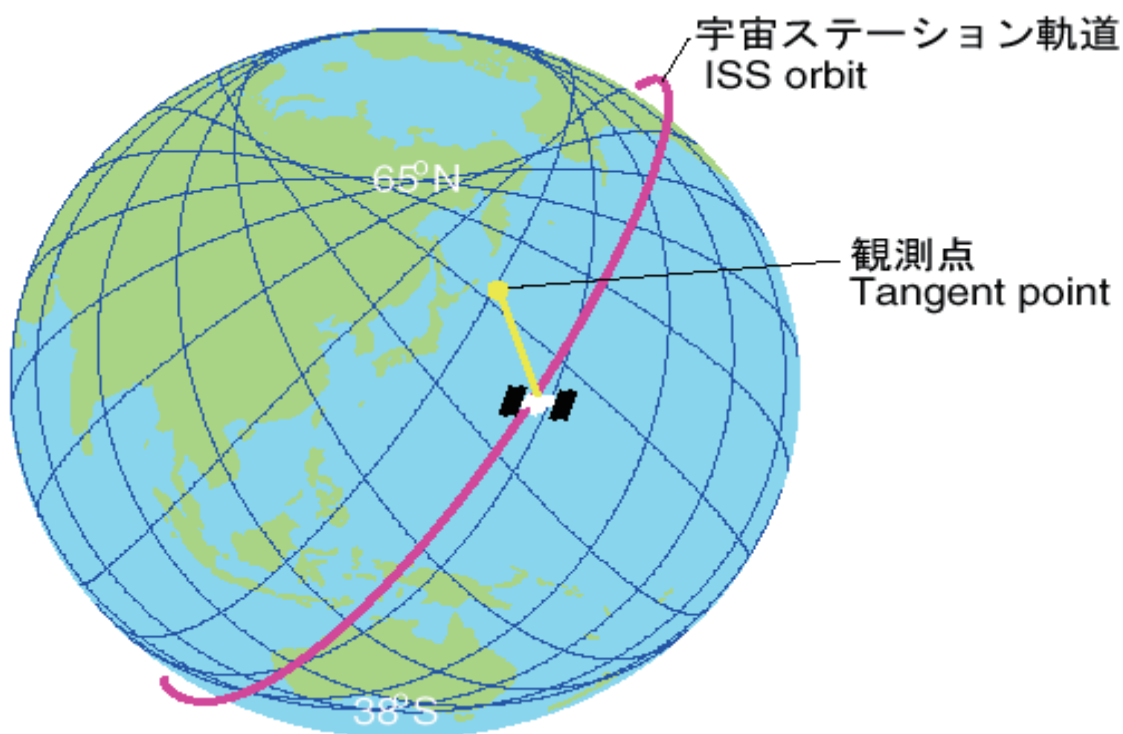


図 3.6-2 国際宇宙ステーションの軌道と、SMILES の観測点

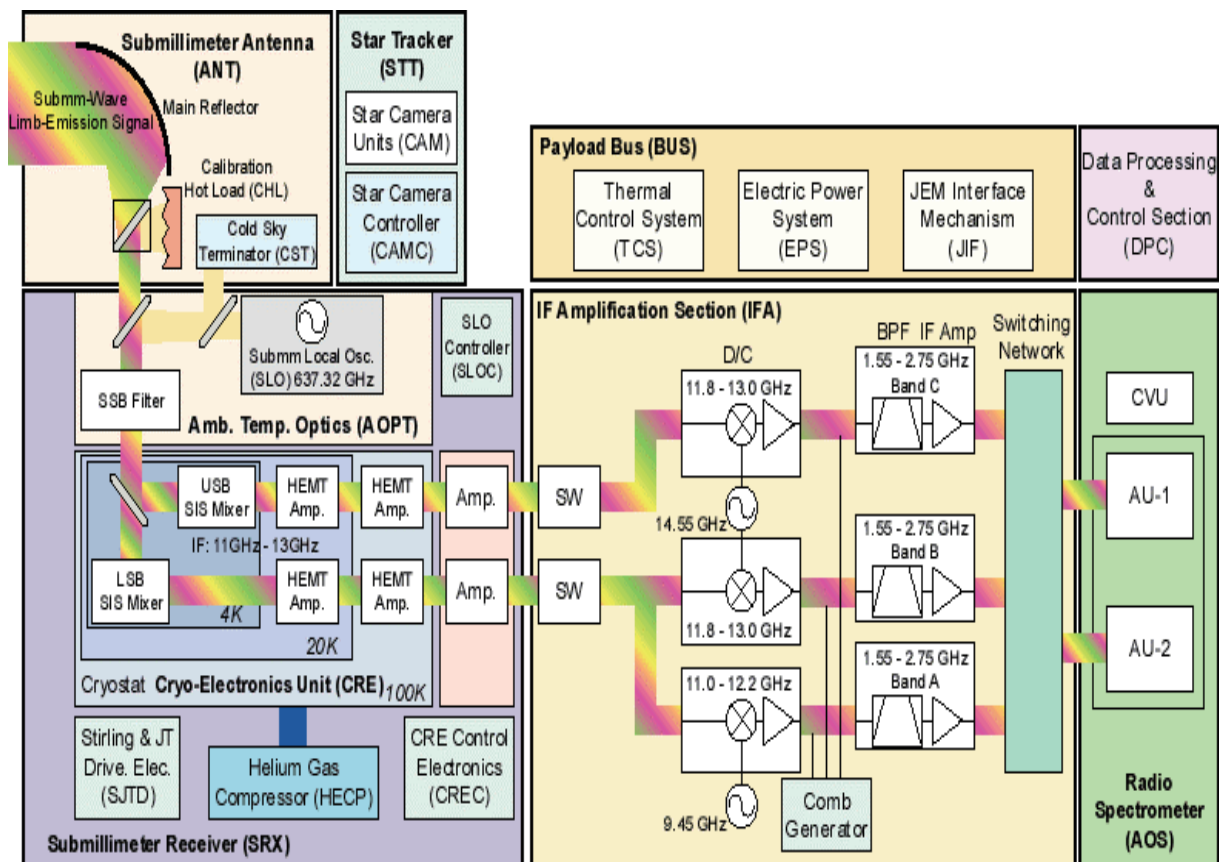


図 3.6-3 SMILES システム概略図

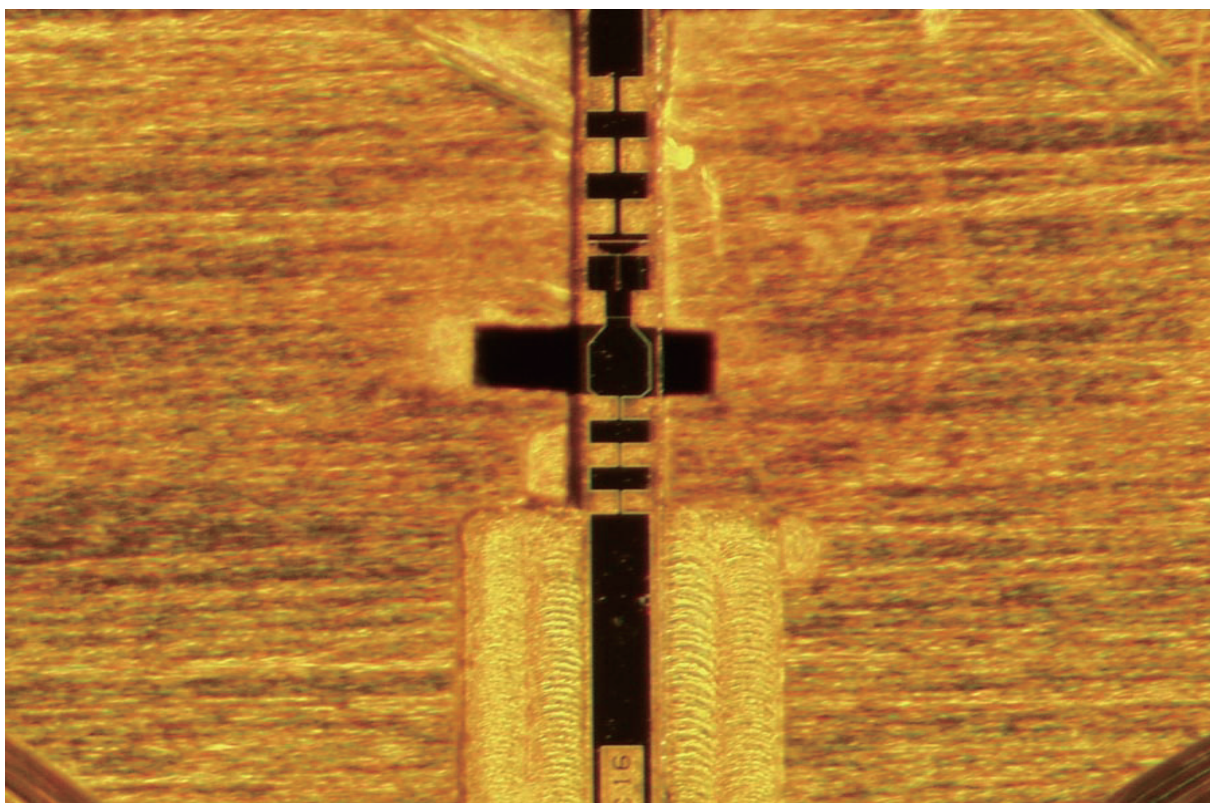
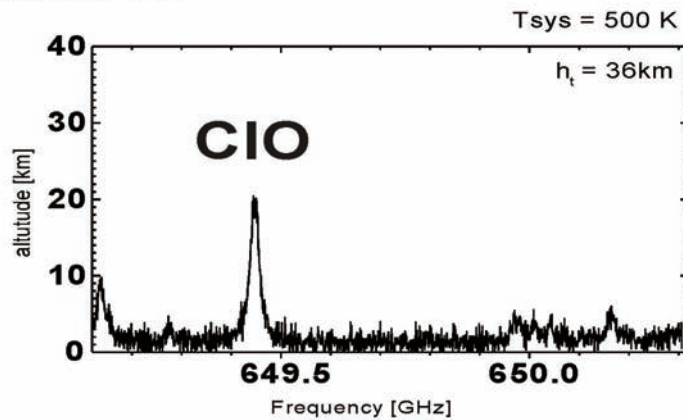


図 3.6-4 サブミリ波 SIS ミクサの内部構造(導波管サイズ 0.40 x 0.14 mm)

a) SISミクサ+シングルサイドバンドのスペクトル
例：JEM/SMILES



b) ショットキーダイオード+ダブルサイドバンドのスペクトル
例：MLS/AURA

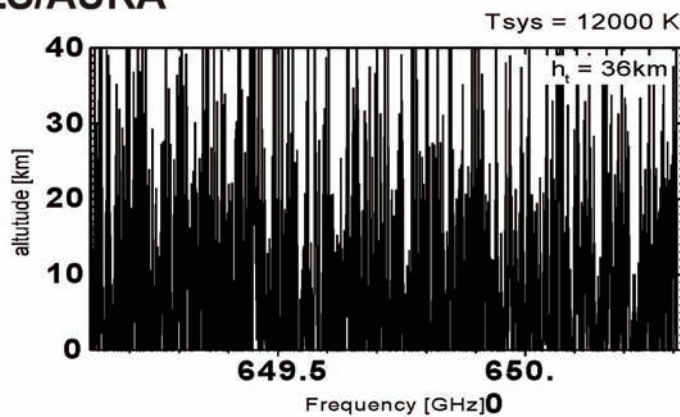


図 3.6-5 SIS ミクサで観測したスペクトル(JEM/SMILES, a)とショットキーダイオードで観測したスペクトル(MLS/AURA, b)との比較(シミュレーション)

付録：人工衛星のプラットフォームと搭載センサ



陸域観測技術衛星(ALOS)

- [パナクロマチック立体視センサ\(PRISM\)](#)
- [高性能可視近赤外放射計2型\(AVNIR-2\)](#)
- [フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ\(PALSAR\)](#)



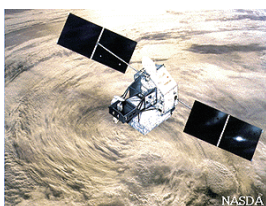
環境観測技術衛星(ADEOS-2)

- [高性能マイクロ波放射計\(AMSR\)](#)
- [グローバルイメージャ\(GLI\)](#)
- [海上風観測装置\(SeaWinds\)](#)
- [地表反射光観測装置\(POLDER\)](#)
- [改良型大気周縁赤外分光計-II\(ILAS-II\)](#)



EOS-PM1 衛星

- [改良型マイクロ波放射計\(AMSR-E\)](#)
- [大気赤外サウンダ\(AIRS\)](#)
- [高性能マイクロ波サウンダ\(AMSU\)](#)
- [雲、地球放射エネルギー観測装置\(CERES\)](#)
- [マイクロ波水蒸気サウンダ\(HSB\)](#)
- [中分解能撮像分光放射計\(MODIS\)](#)



熱帯降雨観測衛星(TRMM)

- [TRMM 搭載降雨レーダ\(PR\)](#)
- [可視赤外観測装置\(VIRS\)](#)
- [TRMM マイクロ波観測装置\(TMI\)](#)
- [雲及び地球放射エネルギー観測装置\(CERES\)](#)(運用停止)
- [雷観測装置\(LIS\)](#)



地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS)

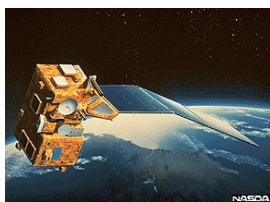
- [高性能可視近赤外放射計\(AVNIR\)](#)
- [海色海温走査放射計\(OCTS\)](#)
- [NASA 散乱計\(NSCAT\)](#)
- [オゾン全量分光計\(TOMS\)](#)
- [地表反射光観測装置\(POLDER\)](#)

- [温室効果気体センサ\(IMG\)](#)
- [改良型大気周縁赤外分光計\(ILAS\)](#)
- [地上・衛星間レーザー長光路吸収測定用リトロリフレクター\(RIS\)](#)



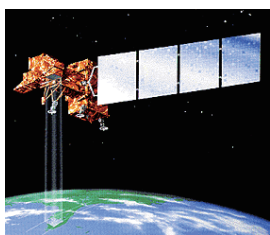
地球資源衛星1号「ふよう1号」(JERS-1)

- [合成開口レーダ\(SAR\)](#)
- [光学センサ\(OPS\)](#)



海洋観測衛星1号/1号-b「もも1号/1号-b」(MOS-1/1b)

- [可視近赤外放射計\(MESSR\)](#)
- [可視熱赤外放射計\(VTIR\)](#)
- [マイクロ波放射計\(MSR\)](#)



ランドサット衛星(LANDSAT)

- [Enhanced Thematic Mapper Plus \(ETM+\)](#)
- [マルチスペクトル・スキャナ\(MSS\)](#)
- [セマティック・マップ\(TM\)](#)



スポット衛星(SPOT)

- [High Resolution Visible Infrared\(HRVIR\)](#)
- [High Resolution Visible Imaging System\(HRV\)](#)



ヨーロッパリモートセンシング衛星(ERS)

- [合成開口レーダ\(AMI\)](#)
- [測風散乱計\(SCAT\)](#)
- [レーダ高度計\(RA\)](#)
- [走査放射計/マイクロ波サウンダ\(ATSR/M\)](#)
- [レーザー反射鏡\(LRR\)](#)
- [精密測距装置\(PRARE\)](#)

〔陸域観測技術衛星(ALOS) 〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/alos_j.html



陸域観測技術衛星(ALOS)は世界最大級の地球観測衛星で、地球資源衛星 1 号 (JERS-1)および地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)による陸域観測技術をさらに高度化し、地図作成、地域観測、災害状況把握、資源探査等への貢献を図ることを目的としています。

高精度で標高抽出を行うためのパンクロマチック立体視センサ(PRISM)、および土地被覆の観測を高精度に行うための高性能可視近赤外放射計 2 型(AVNIR-2)、昼夜の別なく、また天候によらず陸域の観測が可能なフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ(PALSAR)の 3 つの地球観測センサを搭載し、高分解の陸域観測に威力を発揮することが期待されています。

同衛星は、H-IIA ロケットで 2006 年(平成 18 年)1 月に打ち上げられました。

ALOS は、世界最大級の地球観測衛星で、高分解能の陸域観測データを全地球的規模で収集することを目的としています。そのため観測データも大容量となります。そこで、観測したデータを EOC で直接受信(ダウンリンク)する以外に、データ中継衛星(DRTS)を用いることで、ALOS が EOC の受信可能範囲外の軌道を飛行していても、DRTS 経由で日本周辺以外で観測されたデータの受信を速やかに行うことが可能となります。

〔環境観測技術衛星(ADEOS-II)〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/adeos2_j.html



環境観測技術衛星(ADEOS-II)は、地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)の観測ミッションを継承するとともに、地球温暖化等のグローバルな環境変動のメカニズムの把握など世界的な気候変動研究、および気象や漁業等の実利用の面への貢献が期待されています。

ADEOS-II は、水・エネルギー循環過程、炭素循環の解明を主目的に、これらの重要な指標となるクロロフィルの分布や、水蒸気、海氷分布、海面温度等の観測を行う衛星として位置付けられています。そしてこれらのデータは、国際気候共同研究計画(WCRP)の全球エネルギー・水循環実験計画(GEWEX)や気候変動研究計画(CLIVER)並びに地球圏・生物圏国際共同研究計画(IGBP)などに利用され、世界的な気候変動研究計画に貢献することが期待されています。

ADEOS-II には、コアセンサとして宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発する、グローバル・イメージャ及び高性能マイクロ波放射計の他、改良型大気周縁赤外分光計-II、海上風観測装置、地表反射光観測装置が国内外の機関から提供され、搭載されます。当初は 98 年夏打上げが予定されていましたが、太陽電池パネルの設計変更にともなって延期され、2002 年 12 月に鹿児島県種子島宇宙センターから打ち上げられました。

〔EOS-PM1(Aqua)〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/eos-pm1_j.html

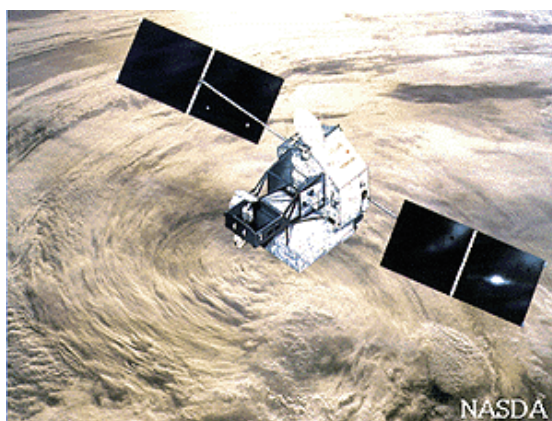


EOS-PM1(Aqua)は、地球環境システム(大気、雲、雪氷、水、植生等)のメカニズムの解明を目的として、アメリカ(NASA)によって開発された地球観測衛星です。Aquaには、NASAだけでなく、日本(JAXA)、ブラジル(INPE)といった他国のセンサも搭載しており、その開発、運用は国際的なプロジェクトとして行われます。

Aquaには、JAXAが開発した改良型マイクロ波放射計(AMSR-E)の他に、大気赤外サウンダ(AIRS)、高性能マイクロ波サウンダ(AMSU)、雲、地球放射エネルギー観測装置(CERES)、マイクロ波水蒸気サウンダ(HSB)、中分解能撮像分光放射計(MODIS)の5種類のセンサが搭載されています。

〔熱帯降雨観測衛星(TRMM)〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/trmm_j.html



近年、地球規模の環境変化を把握する必要性について、世界的な関心が高まりつつあります。このような問題に対し、宇宙からの観測技術を利用し、地球を診断しようとする新たなチャレンジとして、熱帯降雨観測衛星計画が進められています。この熱帯降雨観測衛星(TRMM)は、地球規模の気候変動の解明や環境変化のモニターに

重要な熱帯地域の降雨強度やその分布に関わるデータを取得することを目指したものです。

この衛星計画は、1986 年(昭和 61 年)に日米共同プロジェクトとして、宇宙開発事業団(NASDA、現在宇宙航空研究開発機構 JAXA)が H-II ロケットによる打ち上げ及び主要観測機器である降雨レーダの開発等を担当し、米国(NASA)が衛星の本体の開発、降雨レーダ以外の観測機器の開発及びデータ中継衛星を用いた衛星の運用を担当しています。この計画を進めるに当って、宇宙開発事業団では、通信総合研究所(現在情報通信研究機構)と協力し、降雨レーダの開発を実施しました。また、H-II ロケットにより種子島宇宙センターから打ち上げられた後の TRMM 衛星の運用は、NASA のゴダード宇宙飛行センターにより、追跡・データ中継衛星(TDRS)を経由して行なわれています。

〔地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS) 〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/adeos_j.html



地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS)は、地球温暖化、オゾン層の破壊、熱帯雨林の減少、異常気象の発生等の環境変化に対応した全地球規模の観測データを取得し、国際協力による地球監視に役立てるとともに、次世代地球観測システムに必要なプラットフォーム・バス技術、軌道間データ中継技術等の開発を行うことを目的とした衛星です。

同衛星は、陸域、海域及び大気を総合的かつ継続的に観測するために、宇宙開発事業団(NASDA)が開発を担当する高性能可視近赤外放射計(AVNIR)および海上海温走査放射計(OCTS)および NASA 散乱計(NSCAT)およびオゾン全量分光計(TOMS)、フランス国立宇宙開発センター(CNES)の地表反射光観測装置(POLDER)、通産省の温室効果気体センサ(IMG)、環境庁の改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)および地上・衛星間レーザ長光路吸収測定用リトロフレクタ(RIS)の 6 種類の公募セ

ンサを搭載しています。

ADEOS は、重量約 3,560kg、発生電力 4,500W 以上の大型衛星ですが、熱的、電気的、かつ機械的に独立した通信データ処理系、電源系および姿勢軌道制御系等のユニットから構成され、組立および試験を容易としています。また、多数の観測機器を運用するための自動化・自律化機能、観測データをデータ中継衛星経由で地上に伝送するための軌道間データ通信機能など優れた特徴を有しています。

衛星は 1996 年(平成 8 年)8 月 17 日午前 10 時 53 分(日本標準時)に H-II4 号ロケットにより種子島宇宙センターから高度約 830km の太陽同期準回帰軌道に打ち上げられました。

〔地球資源衛星 1 号「ふよう 1 号」(JERS-1) 〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/jers_j.html

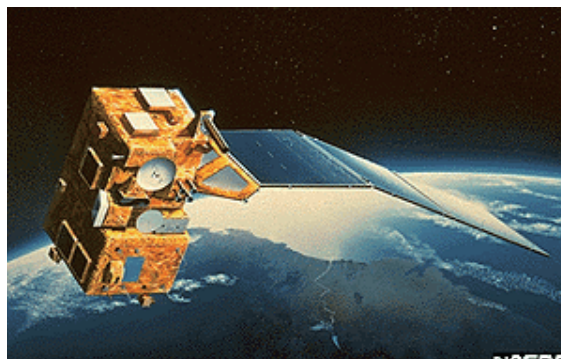


地球資源衛星 1 号「ふよう 1 号」(JERS-1)は、地球の全陸域を観測し、資源探査を主目的に国土調査、農林漁業、環境保全、防災、沿岸監視等の観測を行う地球観測衛星です。1992 年(平成 4 年)2 月 11 日に種子島宇宙センターから H-I ロケットで高度約 568km、回帰日数 44 日の太陽同期準回帰軌道に打ち上げられ、高性能の合成開口レーダ(SAR)と光学センサ(OPS)で全地球のデータを観測しミッションデータレコーダによる収集が続けられていました。

SAR は、マイクロ波を照射し地上からの反射波をとらえて、昼夜天候に左右されずに地表面の特性や起伏、傾斜などを観測する能動型センサです。SAR は合成開口とパルス圧縮技術により通常のレーダに比べて格段に高い分解能が得られるという優れた特徴を持っています。OPS は可視域から短波長赤外までを 7 つのバンドに分け、可視域では 15.3° の前方視による立体観測が可能であり、短波長赤外では岩石や鉱物の識別に威力を発揮する特徴を持っています。

〔海洋観測衛星 1 号／1 号-b「もも 1 号／1 号-b」〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/mos_j.html



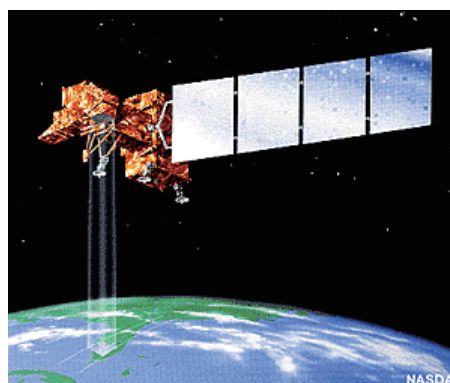
海洋観測衛星 1 号「もも 1 号」(MOS-1)は、地球資源の有効利用、環境の保全等に資する人工衛星による地球観測システム開発の一環として、日本の自主技術により開発された我が国初の地球観測衛星です。海洋観測衛星 1 号-b「もも 1 号-b」(MOS-1b)は、MOS-1 の後継機として打ち上げられたもので同等の性能を有しています。

MOS-1 は 1987 年(昭和 62 年)2 月 19 日に N-II ロケットで、MOS-1b は 1990 年(平成 2 年)2 月 7 日に H-I ロケットで、それぞれ種子島宇宙センターから打ち上げられましたが、MOS-1 は 1995 年(平成 7 年)3 月 31 日を以て運用中止となり、MOS-1b はバッテリー機能劣化が確認され、今後の運用の継続ができなくなると予想されたために、1996 年(平成 8 年)4 月 25 日に運用を終了しました。

MOS シリーズは、高度約 909km の宇宙から観測機器を常に地球に向けながら、約 103 分かけて地球を一周します。可視近赤外放射計(MESSR)、可視熱赤外放射計(VTIR)、マイクロ波放射計(MSR)の 3 つのセンサを搭載し、日本はもとより、海外の受信局でも受信され、観測データが広く一般に利用されています。

〔ランドサット衛星(LANDSAT) 〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/landsat_j.html



アメリカの地球観測衛星ランドサット1号(LANDSAT-1)は、1972年(昭和47年)にアメリカが打ち上げた世界最初の地球観測衛星です。はるか宇宙から地球を観測することの有用性が認識されるようになった記念すべき衛星で、その優れた観測能力から、一躍リモートセンシングという技術が重要視されるようになりました。その後、2号と3号、更に発展した4号、5号と引き続き打ち上げられ、現在は7号が主力として運用されています。

LANDSAT-5号の観測機器は、多重スペクトル走査計(MSS)とセマティックマップパー(TM)の2つのセンサを搭載しています。MSSは、光学系と検出器を組み合わせ、地表面からの太陽反射光を4つの波長帯に分けて観測する光学センサです。TMは、MSSをより高度化した観測装置で、地表面を可視光域から熱赤外域まで7つの波長帯で観測します。

LANDSAT-7号の観測機器は、TMの後継機器となるETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus)を搭載しています。ETM+では、TMと同じバンド1からバンド7に加えて、地表分解能15mの高解像度を持つバンド8が新たに付加されました。

〔スポット衛星(SPOT) 〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/spot_j.html



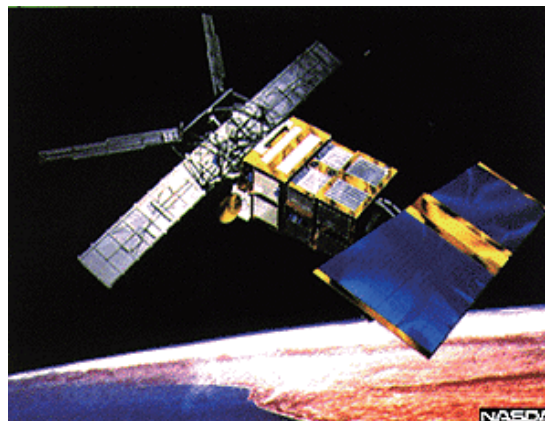
スポットは、フランスの地球観測衛星で、1986年(昭和61年)に1号機、1990年(平成2年)に2号機、1993年(平成5年)に3号機、そして1998年(平成10年)に4号機が高度約822kmの太陽同期準回帰軌道に打ち上げられました。スポットは、衛星の直下を観測するだけでなく、センサの向きを変えることにより、斜め観測をすることができます。これにより、これまでの衛星ではできなかった特定地域の繰り返し観測の周期を短縮することができます。

1 号機から 3 号機までの観測機器は、HRV(High Resolution Visible Imaging System)と呼ばれる CCD センサを搭載していますが、4 号機では HRV の後継機器となる HRVIR(High-Resolution Visible and Infrared)と、VGT(Vegetation)*1 と呼ばれる CCD センサを 2 台搭載しています。

HRVIR の観測する波長帯は基本的に HRV と同じとなりますが、HRVIR では短波長赤外帯(SWIR:1.58 ～ 1.75 mm)のバンドがバンド 4 として新たに追加されました。また、VGT は観測幅 2,250km の広域観測センサです。

〔ヨーロッパリモートセンシング衛星(ERS) 〕

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/ers_j.html



ヨーロッパリモートセンシング衛星は 1991 年(平成 3 年)に 1 号機、1995 年(平成 7 年)に 2 号機が高度約 780km の太陽同期準回帰軌道に打ち上げられました。海洋、海水分布、海上風、海洋循環等の観測を主に、陸域情報も高分解能レーダで観測する地球観測衛星です。

観測機器は合成開口レーダ(AMI)、測風散乱計(SCAT)、レーダ高度計(RA)、走査放射計及びマイクロ波サウンダ(ATSR-M)、レーザ反射鏡(LRR)、精密測距装置(PRARE)が搭載されており、SAR 以外はデータレコーダに記録することができます。衛星の回帰日数は 35 日を標準として、3 日、176 日の 3 種類の運用モードがあります。

RADARSAT

レーダーサット衛星

搭載センサの諸元

センサ種類	波長	種類	モード	分解能
C バンド SAR	5.3GHz (C バンド)	マイクロ波	Fine Beam Mode ファインビームモード	10m
			Standard Beam Mode スタンダードビームモード	30m
			Wide Beam Mode ワイドビームモード	30m
			ScanSAR Narrow Beam Mode スキャンサーナロービームモード	50m
			ScanSAR Wide Beam Mode スキャンサーワイドビームモード	100m
			Extended High Mode エクステンディットハイモード	25m
			Extended Low Mode エクステンディットロウモード	35m

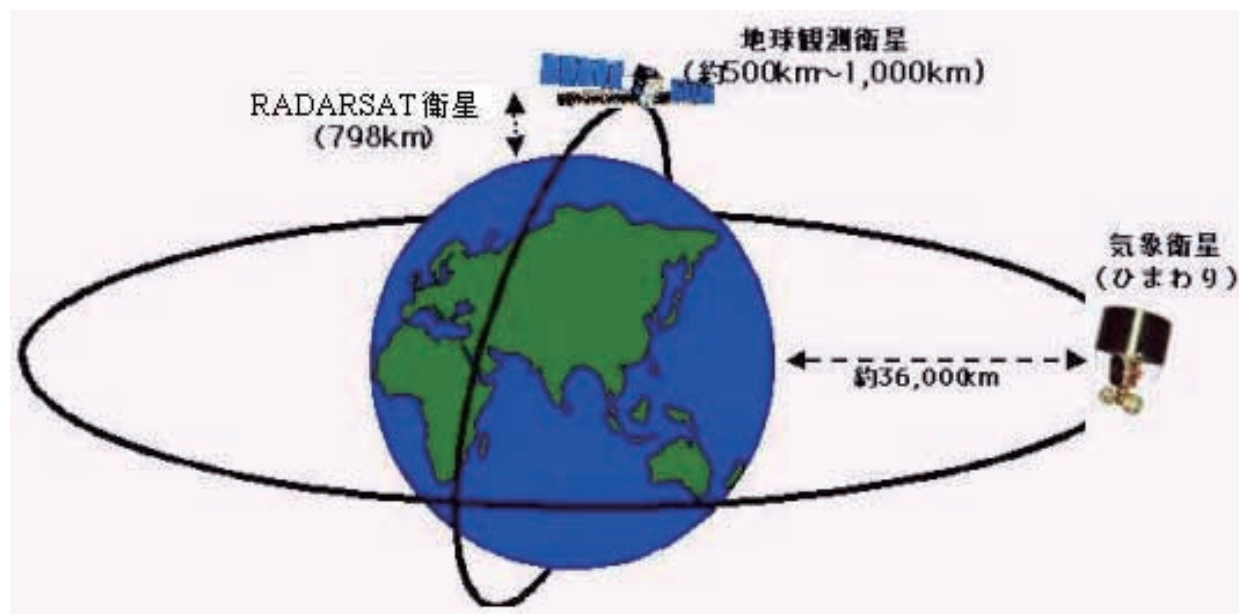
IKONOS

イコノス衛星

搭載センサの諸元

センサ名	バンド	波長	種類	分解能	
Panchromatic: パンクロマチック	Band1	0.45 ~0.90 μ m	パンクロマチック	オフナディア 26 度 1.0m	直下 0.82m
Multispectral: マルチスペクトル	Band1	0.45 ~0.52 μ m	青	オフナディア 26 度 4.0m	直下 3.3m
	Band2	0.52 ~0.60 μ m	緑	4.0m	3.3m
	Band3	0.63 ~0.69 μ m	赤	4.0m	3.3m
	Band4	0.76 ~0.90 μ m	近赤外	4.0m	3.3m

地球観測衛星の軌道



地球観測衛星の多くは、両極付近の上空(地上高度 500km から 1,000km)を通過する軌道を回っています。この軌道と地球の自転が少しずつずれていくので、地表が見える位置も少しずつ変わり、多くの地域の情報を集めることができます。

また、それぞれの衛星の高度や軌道については、地球観測衛星とセンサのところから各衛星毎に参照することができます。一方、天気予報などに使われる気象衛星ひまわりは、赤道上空約 36,000km の軌道に日本が常時見えるように地球の自転にあわせた速さで回っています。

参考：宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)
— いきものの星・地球 —

目次

本書を読んで下さる方へ

1. 序論

1. 1 地球の創生と生物の発生、進化(執筆:石岡憲昭)

1. 1. 1 地球の創生と生命誕生

1. 1. 2 火星は生命誕生の母なる星か

1. 1. 3 宇宙環境を利用した実験の目的・方法・実験の難しさ

2. 宇宙・地球と生物

2. 1 はじめに(執筆:佐藤温重)

2. 2 生命の起源と進化(執筆:東端 晃)

2. 2. 1 太陽系の誕生

2. 2. 2 生命の起源と定義

2. 2. 3 原始生命の誕生

2. 2. 4 原核生物の誕生

2. 2. 5 酸素の発生

2. 2. 6 原核生物から真核生物へ

2. 2. 7 単細胞生物から多細胞生物へ

2. 2. 8 生物の急発展—先カンブリア期からカンブリア期へ(顕生代)

2. 2. 9 水中から陸上へ—オゾン層の形成(オルドビス紀～シルル紀)

2. 2. 10 植物の進化(シダ植物から裸子植物へ)

2. 2. 11 動物の上陸と骨格の形成

2. 2. 12 生物の進化と重力環境

2. 2. 13 地球から宇宙へ

2. 3 地球外生物、地球外文明は存在するか(執筆:谷垣文章)

2. 3. 1 宇宙人という概念

2. 3. 2 火星からの隕石

2. 3. 3 地球外知的生物の存在する確率

2. 3. 4 宇宙人探しという挑戦の始まり

2. 3. 5 本格的に始まったSETI計画

2. 4 生物の重力感受の仕組み(執筆:永松愛子)

2. 4. 1 生物の重力感受機構

2. 4. 2 植物の重力屈性機構

2. 4. 3 宇宙実験での重力感受機構の解明

参考文献、論文

2. 5 宇宙環境での生物の生殖と発生(執筆:矢野幸子)

2. 5. 1 アフリカツメガエルの受精と発生

2. 5. 2 イモリの産卵・発生実験

2. 5. 3 卵がヒヨコになるには重力が必要

2. 5. 4 宇宙でのメダカ

2. 5. 5 微小重力下における生物の生活環境に関する研究

2. 5. 6 宇宙滞在のための継世代培養を実現するための装置や技術について

2. 5節の付録:用語の説明

参考文献

2. 6 生物は宇宙に適応できるか(執筆:泉龍太郎)

2. 6. 1 生物の適応とは何ぞや

2. 6. 2 ヒトは宇宙でどうなるか

2. 6. 3 宇宙への適応に向けて

[宇宙環境利用と人類の将来 編集者紹介]

井口洋夫:宇宙航空研究開発機構 顧問

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

中島英彰:国立環境研究所 総括研究官

三原建弘:理化学研究所 研究員

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員(編集まとめ)

[宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)ーいきものの星・地球ー 執筆者紹介]

石岡憲昭:宇宙航空研究開発機構 教授

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

東端 晃:宇宙航空研究開発機構 助教

谷垣文章:宇宙航空研究開発機構 主任開発員

永松愛子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

矢野幸子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

泉龍太郎:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-05-027

発 行 平成18年3月31日
編集・発行 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL : <http://www.jaxa.jp/>
印刷・製本 (株)ビー・シー・シー・

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター
〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1
TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体に加工することを禁じます。

