

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

サングリント観測における最適軌道の選定について —CoCoDAを用いた軌道解析—



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

サングリント観測における最適軌道の選定について
—CoCoDAを用いた軌道解析—

Orbit Optimization for Sun Glint Observation
— Orbital Analysis Using CoCoDA —

小川 亮^{*1}、野田 篤司^{*1}、中村 俊之^{*2}、浜崎 敬^{*2}、関 義広^{*2}
近藤 賀代子^{*2}、金子 豊^{*2}、久世 暁彦^{*2}

Akira OGAWA, Atsushi NODA, Toshiyuki NAKAMURA, Takashi HAMAZAKI, Yoshihiro SEKI
Kayoko KONDO, Yutaka KANEKO, Toshihiko KUZE

*1: 総合技術研究本部 情報技術開発共同センター 宇宙機システム設計チーム
Space Systems Engineering Team, Information Technology Center
Institute of Space Technology and Aeronautics

*2: 宇宙利用推進本部 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)プロジェクトチーム
Greenhouse gases Observing Satellite (GASAT) Project Team
Office of Space Applications

2004年3月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

MEMORANDUM FOR THE RECORD

DATE: 10/10/2000

TO: SAC, NEW YORK

FROM: SA [REDACTED]

SUBJECT: [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

目 次

はじめに	1
第 I 部 サングリント観測における最適軌道の選定	2
1. 解析条件	2
1.1. 軌道	2
1.2. サングリント観測可能な入射角範囲	3
1.3. サングリント点の緯度・経度計算方法	3
1.4. その他	3
2. 解析結果	3
2.1. 太陽非同期軌道での解析結果	3
2.2. 太陽同期軌道での解析結果	3
3. 考察	3
3.1. 太陽非同期軌道	3
3.2. 太陽同期軌道 (湖考慮なし)	3
3.3. 太陽同期軌道 (湖考慮)	4
4. まとめ	4
第 II 部 CoCoDA を用いたサングリント観測軌道解析	20
1. 要旨	20
2. 本プロジェクト協力の目的	20
3. 背景	20
4. コンカレント・コラボレイティブ設計手法 (CoCoDA) の概要	20
4.1 CoCoDA とは	20
5. 解析とセッション	20
5.1 解析実施項目	20
5.2 解析作業	21
5.3 セッション	23
6. 成果	24
6.1 CoCoDA の成果	24
6.2 サングリント解析の成果	24
7. 今後の課題	24
おわりに	26

サングリント観測における最適軌道の選定について*

—CoCoDAを用いた軌道解析—

小川亮*1、野田篤司*1、中村俊之*2、浜崎敬*2、
関義広*2、近藤賀代子*2、金子豊*2、久世暁彦*2

Orbit optimization for Sun glint observation —Orbital analysis using CoCoDA—*

Akira OGAWA*1, Atsushi NODA*1, Toshiyuki NAKAMURA*2, Takashi HAMAZAKI*2,
Yoshihiro SEKI*2, Kayoko KONDO*2, Yutaka KANEKO*2, Akihiko KUZE*2

はじめに

JAXA GOSATプロジェクトチームでは温暖化防止への国際的な取り組みに貢献することを目的とした温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)の開発研究を平成15年度より実施しているが、その観測センサ方式選定のためのトレードオフ検討*1に資する情報提供のため、NASDA技術研究本部宇宙機システム設計室(現JAXA総合技術研究本部情報技術開発共同センター宇宙機システム設計チーム)と共同で、太陽光の水面での鏡面反射光(サングリント)を観測する方式を取った場合の観測頻度について解析を行ない、最適な軌道を選定した。その内容は以下のとおりである。

- ▶ 太陽非同期軌道において、サングリントの入射角の許容範囲を35~71[deg]とし、春分を中心とした±60日間のシミュレーション
- ▶ 太陽同期軌道において、春分、夏至、冬至におけるローカルサuntime*2 6時、12時、18時のケースについての解析
- ▶ 上記の軌道における各ケースに対して、湖を考慮した場合の解析
- ▶ 最適軌道の選定

また、本解析を行うにあたっては、宇宙機システム設計室において研究されているコンカレント・コラボレイティブ設計手法(CoCoDA)を用いた。これは、情報技術を用いることで、専門家が集まって行う設計活動を強力にサポートするシステムおよび設計の手法である。

本資料は、サングリントの観測頻度解析、および初めて実プロジェクトへ適用したCoCoDAについて、その概要、実施結果、成果について纏めたものである。

※1 観測センサ方式選定のためのトレードオフ検討:

GOSATミッションにおける計測方法オプションや数値目標等を十分に検討・精査するために宇宙開発委員会が設置した「GOSAT研究推進委員会」の下に設けられた「技術検討会」において実施された。

※2 ローカルサuntime(LST)=降交点(衛星が赤道を北から南へ通過する点)通過時刻

* 平成16年3月11日 受付 (received 11 March, 2004)

*1 総合技術研究本部 情報技術開発共同センター 宇宙機システム設計チーム

(Space Systems Engineering Team, Information Technology Center, Institute of Space Technology and Aeronautics)

*2 宇宙利用推進本部 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)プロジェクトチーム

(Greenhouse gases Observing Satellite (GOSAT) Project Team, Office of Space Applications)

第I部 サングリント観測における最適軌道の選定

1. 解析条件

$\Delta \Omega \approx -3[\text{deg/日}]$ なので、春分を中心に±60日間の計算を実施した。

1.1. 軌道

太陽非同期軌道と、太陽同期軌道の2種類について解析を実施した。それぞれの軌道を以下に示す。

②太陽同期軌道

それぞれのエポックにおける軌道6要素を表2に示す。なお、回帰日数は14日で、1日の周回数を $14+9/14$ 周とし、14日間分の解析を実施した。

①太陽非同期軌道

軌道6要素を表1に示す。

この軌道では、慣性空間に対する軌道面の回転角速度

表1 太陽非同期軌道の軌道6要素

エポック	春分 08年3月20日
	LST 12時
軌道長半径 [km]	7028.14
離心率	0.00
軌道傾斜角 [deg]	65.00
昇交点赤径 [deg]	0.00
真近点離角 [deg]	0.00

表2 太陽同期軌道の軌道6要素

エポック	春分 2008年3月20日		
	LST 6時	LST 12時	LST 18時
軌道長半径 [km]	7051.75		
離心率	0.00		
軌道傾斜角 [deg]	98.09		
昇交点赤径 [deg]	88.04	178.28	268.52
真近点離角 [deg]	180.00		

エポック	夏至 2008年6月21日		
	LST 6時	LST 12時	LST 18時
軌道長半径 [km]	7051.75		
離心率	0.00		
軌道傾斜角 [deg]	98.09		
昇交点赤径 [deg]	179.70	269.95	0.19
真近点離角 [deg]	180.00		

エポック	冬至 2007年12月22日		
	LST 6時	LST 12時	LST 18時
軌道長半径 [km]	7051.75		
離心率	0.00		
軌道傾斜角 [deg]	98.09		
昇交点赤径 [deg]	0.31	90.56	180.81
真近点離角 [deg]	180.00		

1.2. サングリント観測可能な入射角範囲

文献(1) Fig4に基づいてサングリント点における偏光度が60%以上の場合観測が可能と仮定して、海面への太陽光入射角範囲を35~71度とする。

1.3. サングリント点の緯度・経度計算方法

地球の半径をそれぞれ以下のように定める。

赤道半径 $r_a=6378.140$ [km]
 極半径 $r_b=6356.824$ [km]

このとき、地表の任意の点の座標E (e_x, e_y, e_z) は、

$$\frac{e_x^2}{r_a^2} + \frac{e_y^2}{r_a^2} + \frac{e_z^2}{r_b^2} = 1$$

となる。座標E (e_x, e_y, e_z) における法線ベクトルは、

$$\left(\frac{e_x}{r_a^2}, \frac{e_y}{r_a^2}, \frac{e_z}{r_b^2} \right)$$

である。サングリント点は、入射角と反射角が同一という条件から、E (e_x, e_y, e_z) から見た衛星方向の単位ベクトル \vec{Sat} と、E (e_x, e_y, e_z) から見た太陽方向の単位ベクトル \vec{Sun} との合計 ($\vec{Sat} + \vec{Sun}$) が座標Eにおける法線ベクトルと方向が一致する点として、ニュートン法により求めた。

なお、座標E (e_x, e_y, e_z) における地理的緯度 (la) と経度 (lon) は、

$$la = \tan^{-1} \frac{\frac{e_z}{r_b^2}}{\sqrt{\frac{e_x^2}{r_a^2} + \frac{e_y^2}{r_a^2}}} \quad lon = \tan^{-1} \frac{e_y}{e_x}$$

となる。

1.4. その他

- ①海面のゆらぎによるサングリントの広がり は考慮していない。
- ②河川は考慮していない。
- ③湖の形状は円に置き換えて評価した。湖のデータは、気象研青木氏が、(財) 国際湖沼環境委員会によるデ

ータから面積が25km²以下の湖(約200個)を除外し、不足していた25km²以上の湖(約180個)を追加したものである。また、湖データベース約730個の内、追加した約180個は全て面積を25 km²として計算した。

2. 解析結果

2.1. 太陽非同期軌道での解析結果

太陽非同期軌道での解析結果を図1-1~1-5に示す。

2.2. 太陽同期軌道での解析結果

太陽同期軌道での解析結果を図2-1~5-3に示す。

- ① 図2-1~2-3 : 各季節における、衛星速度ベクトルから見た太陽入射角とサングリント方向
- ② 図3-1~3-3 : 各季節における、1日分のサングリント点と衛星直下点
- ③ 図4 : 1日あたりのサングリント観測時間
- ④ 図5-1~5-3 : 各季節における、14日分のサングリント点
- ⑤ 湖のデータを図6に、冬至の湖でのサングリントの解析結果を図7に示す。
- ⑥ 湖を考慮した場合としない場合の1日あたりのサングリント観測時間の違いを図8に示す。

3. 考察

3.1. 太陽非同期軌道

- ① サングリント観測時間は、1日当たり、7~15時間程度と大きく変動する。平均は約9.3時間である。
- ② 緯度-80度から+80度までのサングリントが観測が可能であるが、季節により中緯度地域の観測ができなくなる。
- ③ 衛星から見たサングリント点の方位角や仰角は、図1-4より、大きく変動する。ハードウェア実現上も運用上も制約が大きい。

3.2. 太陽同期軌道 (湖考慮なし)

- ① 図4より、1日の平均観測時間は、以下のとおりである。

1日の平均観測時間

	春分	夏至	冬至
LST 6時	15.4 時間	11.6時間	15.4時間
LST 12時	5.8時間	7.3時間	4.4時間
LST 18時	17.4時間	17.8時間	13.9時間

- ② ローカルサuntime6時と18時の場合は、軌道面が太陽と垂直となり、サングリント点への太陽入射角も常に50度付近にあるため、サングリント点が海上にある限りはほぼ常に観測が可能である。ローカルサuntime6時と18時では、1日の観測時間は11.6～17.8時間であり、両者の間に大きな差はない。
- ③ ローカルサuntime12時の場合は、太陽方向が軌道面内にあるため、軌道1周の内、約半分の時間、直下点が日陰であること、サングリント点への太陽入射角が大きく変動し、観測可能な35～71度の範囲を超える時間があることから、1日の観測可能時間は4.4～7.3時間と大きく減少する。
- ④ 図3-1、3-2、3-3より、ローカルサuntime12時では中緯度地域の観測ができないため(サングリント点への太陽入射角制限による)、不適である。
- ⑤ 図3-3より、太陽同期軌道のローカルサuntime18時では、冬至の北緯40度以北の観測が不可であり、北半球の主要先進国の観測ができないため不適である。
- ⑥ 図3-3、3-2より、太陽同期軌道のローカルサuntimeが6時でも12時でも、冬至の北緯60度以北の観測ができないが、大差はない。また、ローカルサuntime6時には、夏場は南米南端の観測ができないが影響は少ない。
- ⑦ 太陽同期軌道のローカルサuntime6時と18時は、太陽光入射角が約50度程度ではほぼ一定であり、ハードウェアの実現が容易である。また、太陽同期軌道のローカルサuntime12時には、衛星から見たサングリントの方位角と仰角の変化が大きい。

3.3. 太陽同期軌道 (湖考慮)

図7を図6と比較すると、大きな湖でのサングリントが、ある程度の比率で観測可能であるが、図8に示すように1日当たりの平均観測時間は、0.68%しか増加しない。今回は、サングリント点の入射角=反射角となるケースのみを計算しているが、実際にはサングリント点は広がりをもっており、複雑な追尾アルゴリズムを搭載すれば、さらに多くの湖の観測が可能である。しかしながら、湖の存在しない地域での観測は不可能である。

4. まとめ

太陽非同期軌道、太陽同期軌道(ローカルサuntime6時、12時、18時)を比較すると、ローカルサuntime6時の太陽同期軌道が先進国の多い北半球域での観測に適している。

湖のデータを考慮しても、サングリントの観測時間はあまり変化しない。

文献

- (1) Tadao Aoki, Teruo Aoki, and Masashi Fukabori
 "Path-radiance correction by polarization observation of Sun glint glitter for remote measurements of tropospheric greenhouse gases",
 APPLIED OPTICS, Vol.41, No. 24, pp.4945-4957 (2002)

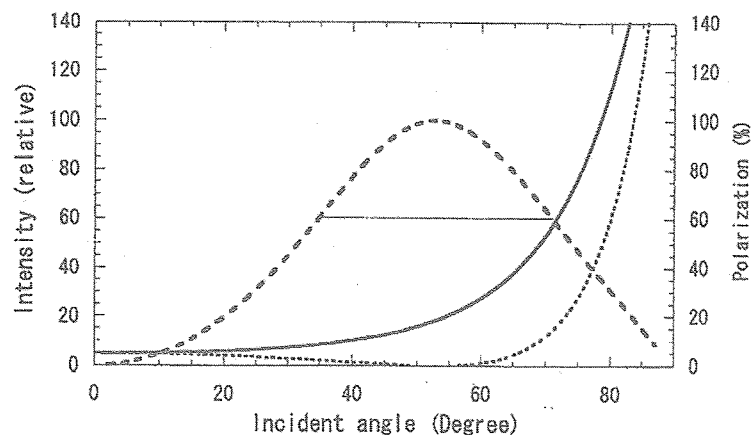


Fig. 4. Perpendicular (solid curve) and parallel (dotted curve) components of reflected radiation at the water surface with an index of refraction of 1.32. Linear polarization, thick dashed curve; polarization range of 60%, thin horizontal line.

太陽非同期軌道での解析結果

春分（2008年3月20日） ローカルサuntime12時のケース

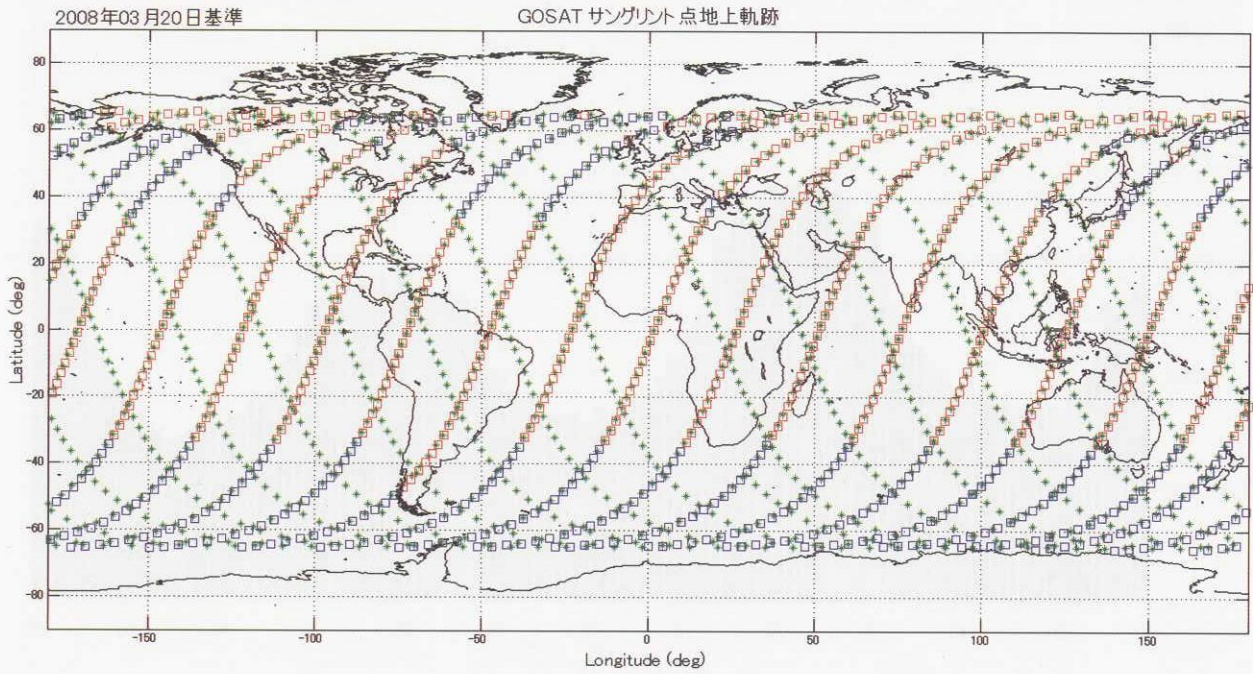


図1-1 サングリント点（海のみ、□）と衛星直下点（*）（1分刻み、1日分）

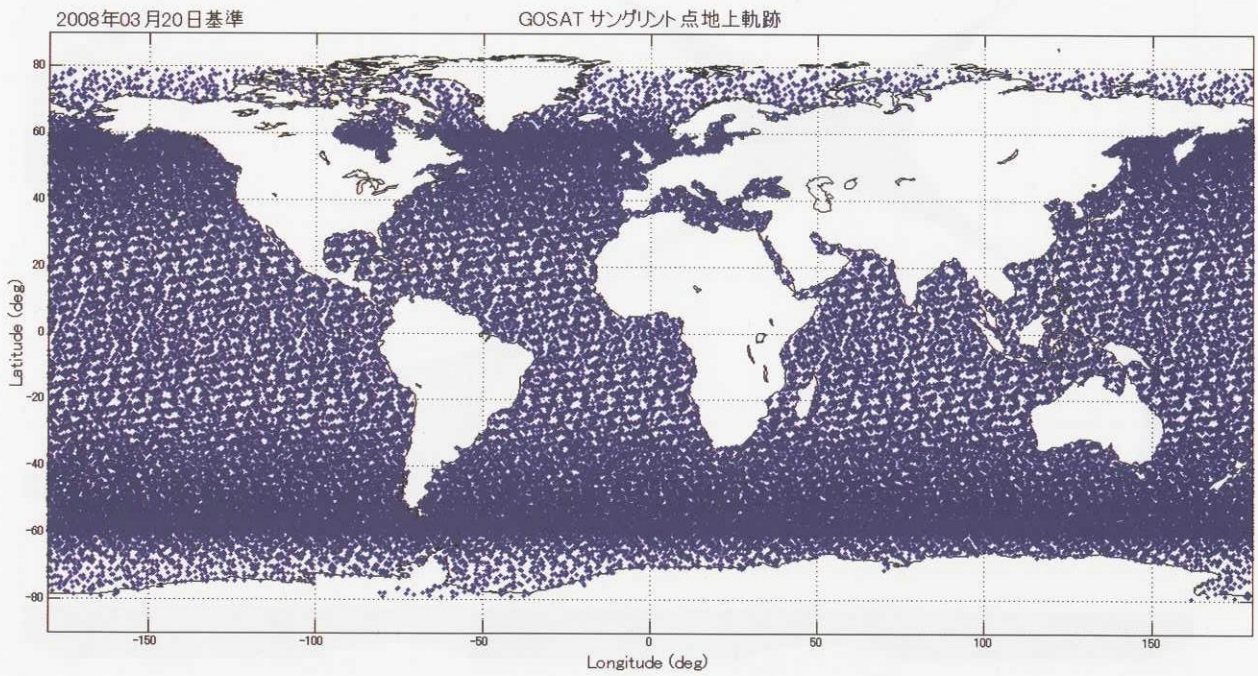


図1-2 サングリント点（海のみ、□）（1分刻み、120日分）

太陽非同期軌道

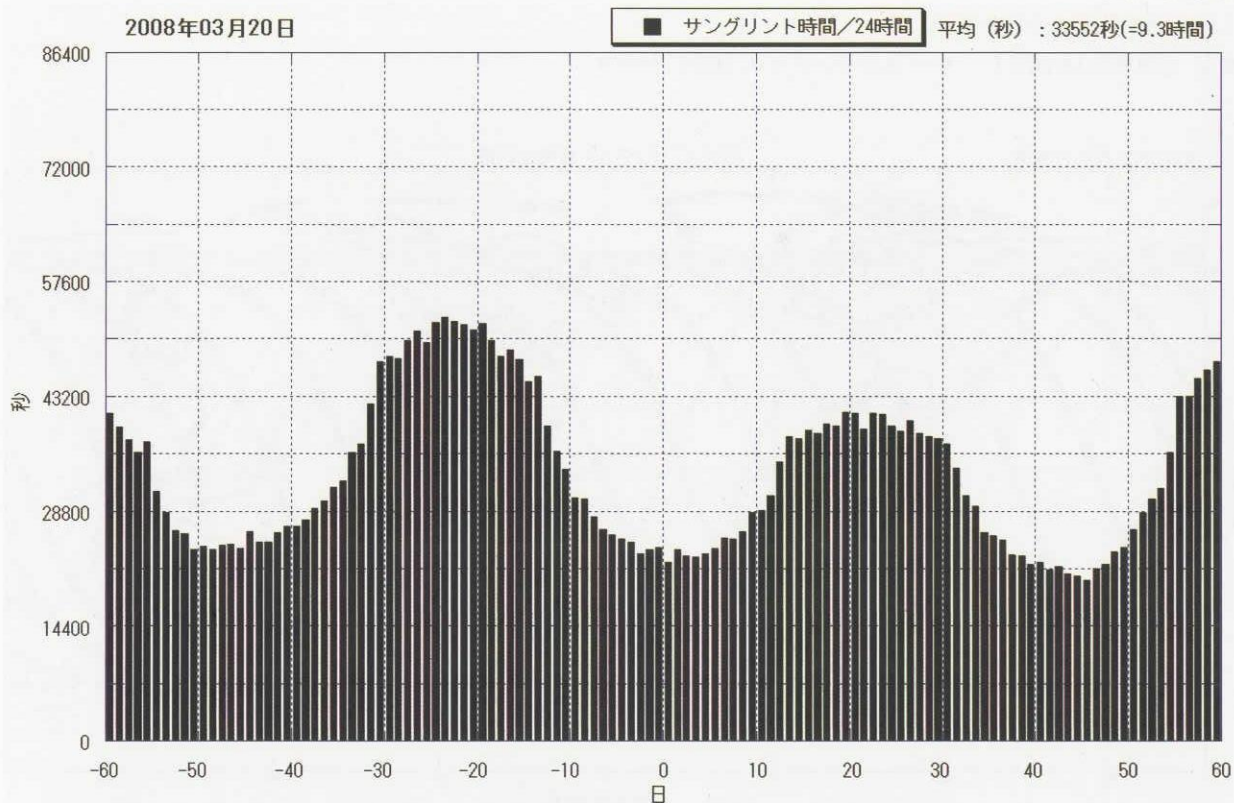


図1-3 1日あたりのサングリント観測時間 (1日ごと、120日分)

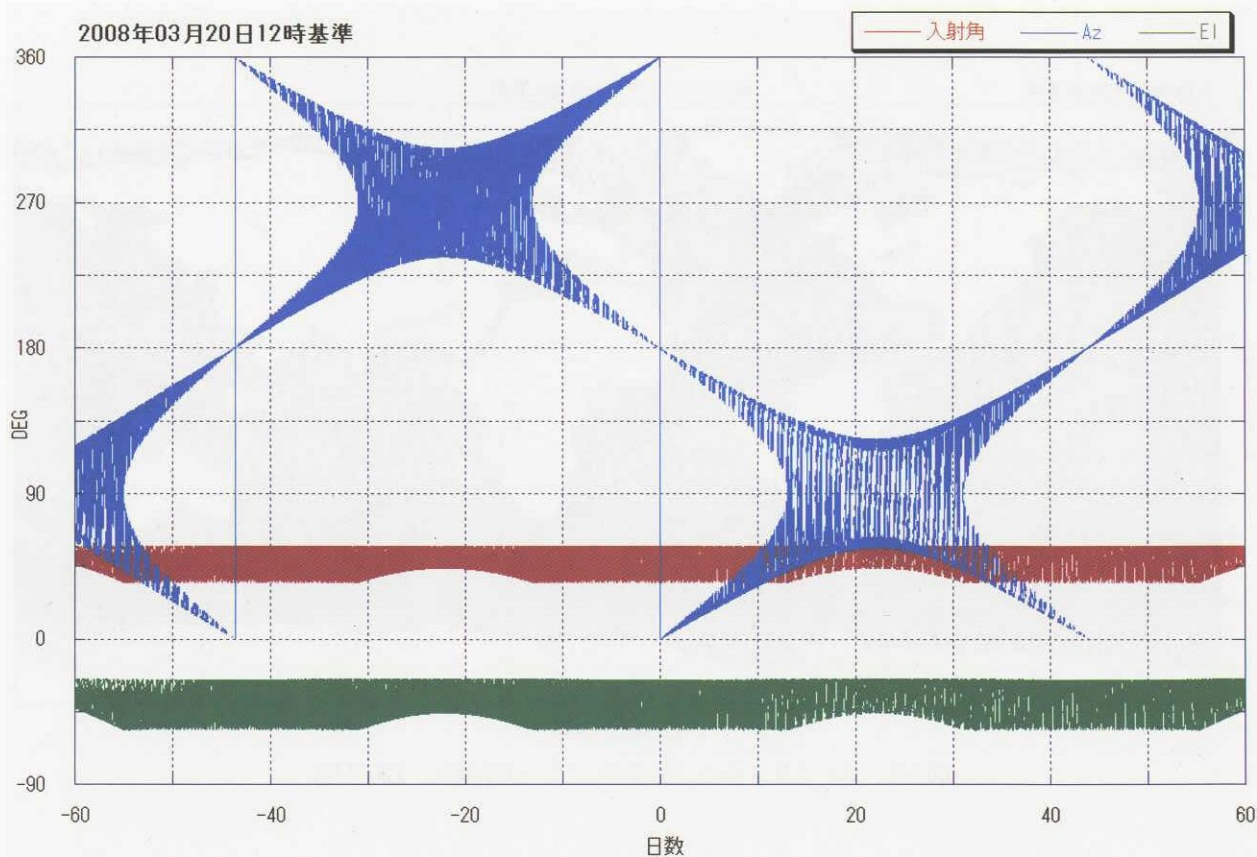


図1-4 衛星速度ベクトルから見た太陽入射角とサングリント方向 (1分刻み、120日分)

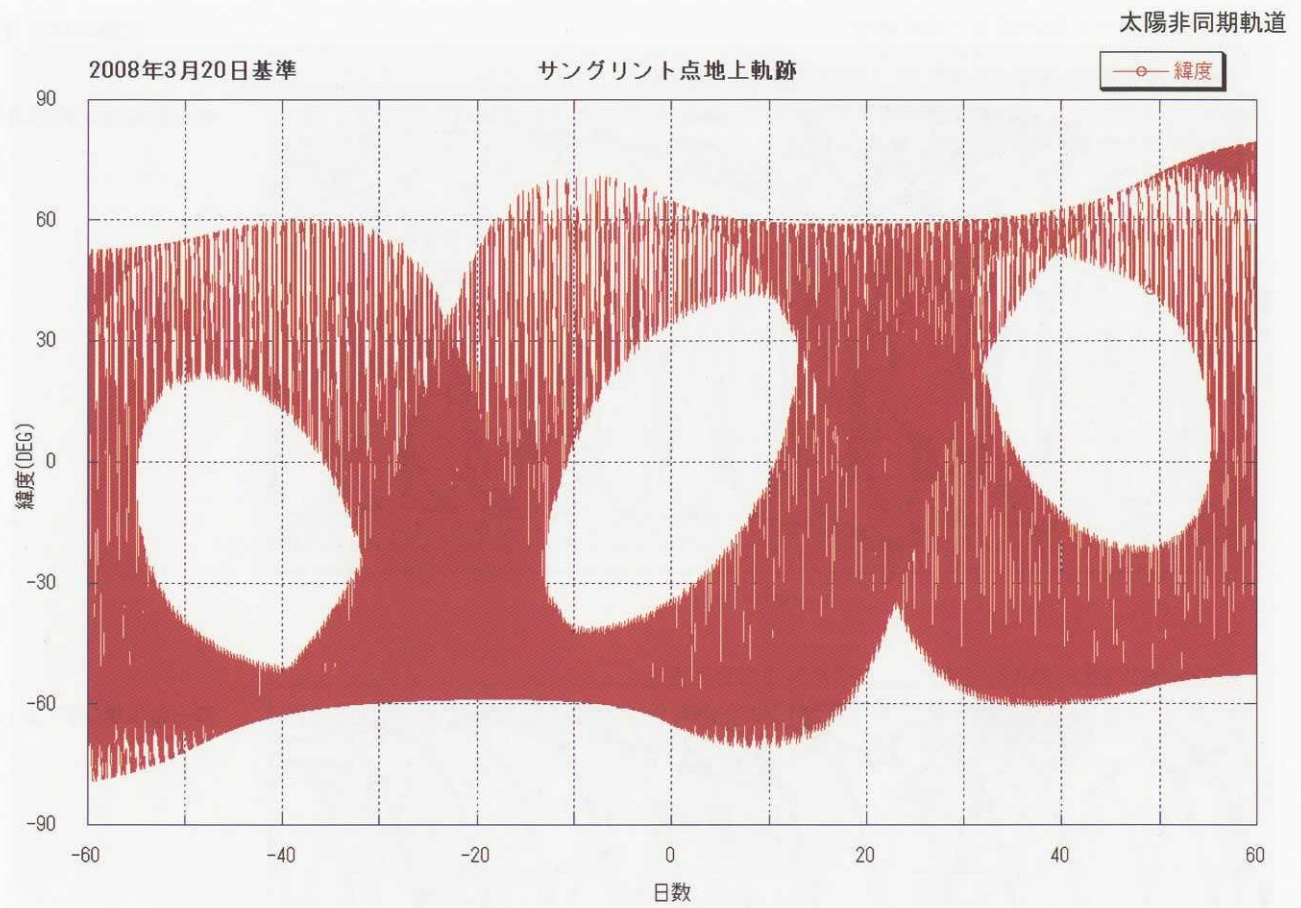
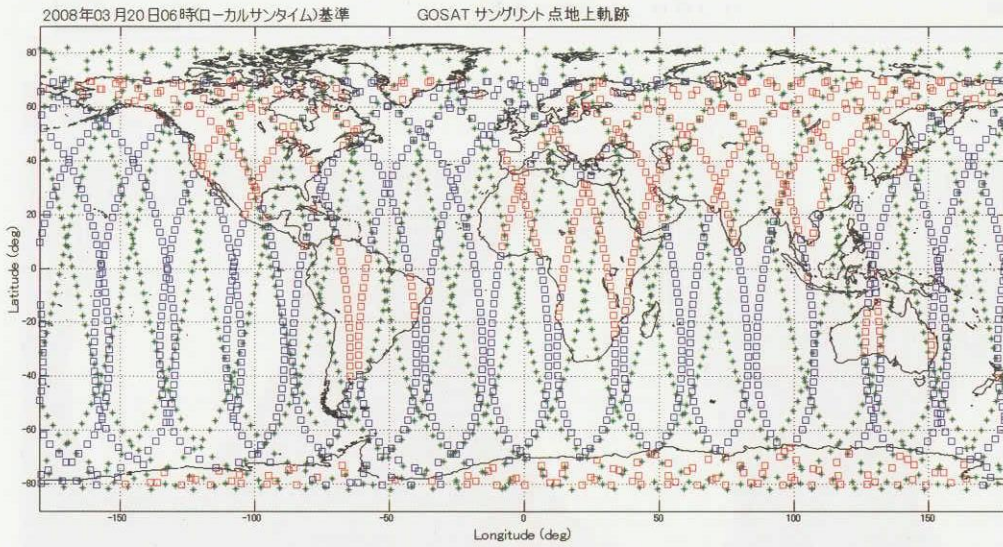


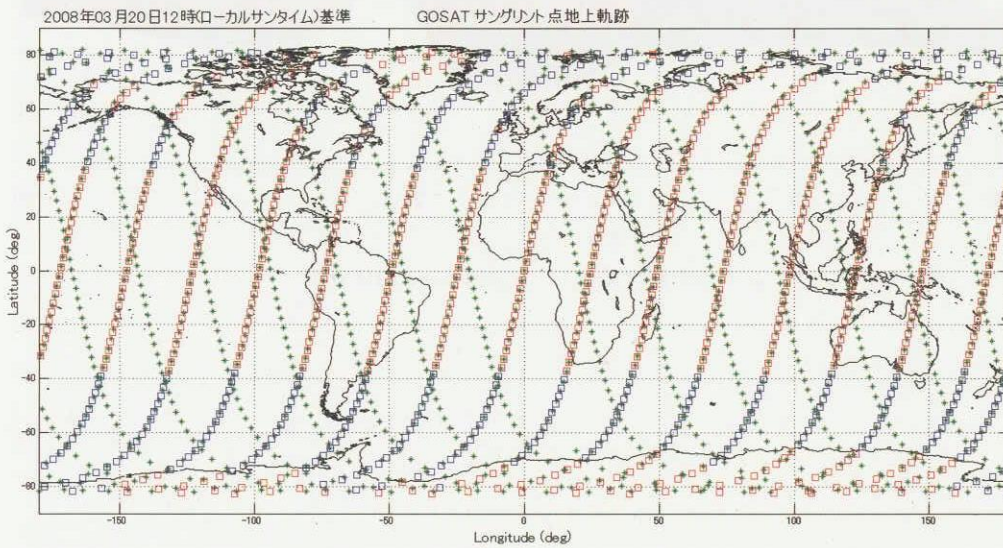
図1-5 サングリント点の緯度変化 (1分刻み、120日分)

太陽同期軌道での解析結果（湖考慮なし）

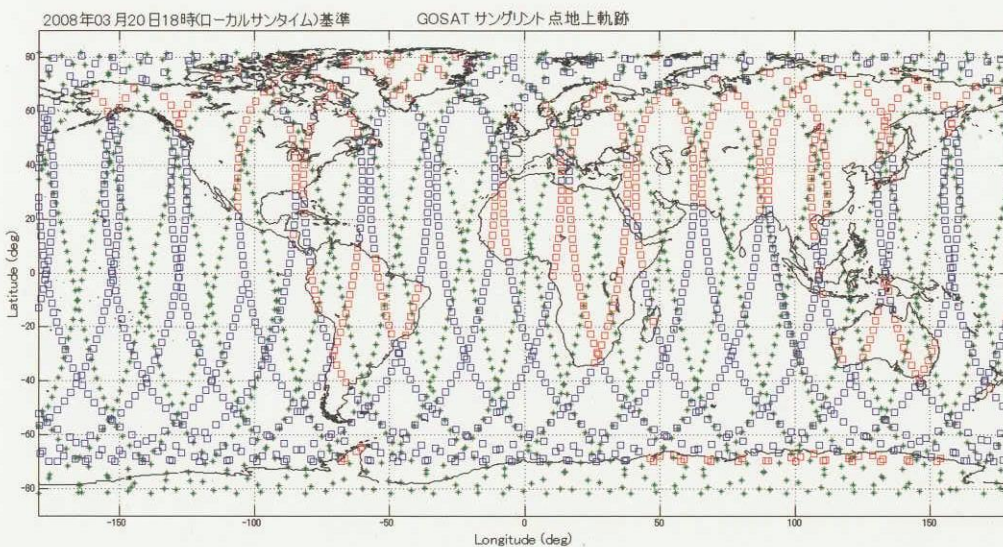
太陽同期軌道



ローカルサンタイム6時



ローカルサンタイム12時



ローカルサンタイム18時

図2-1 春分（2008/3/20）のサングリント点（海のみ、□）と衛星直下点（*）
（1分刻み、1日分）

太陽同期軌道

ローカルサuntime6時

ローカルサuntime12時

ローカルサuntime18時

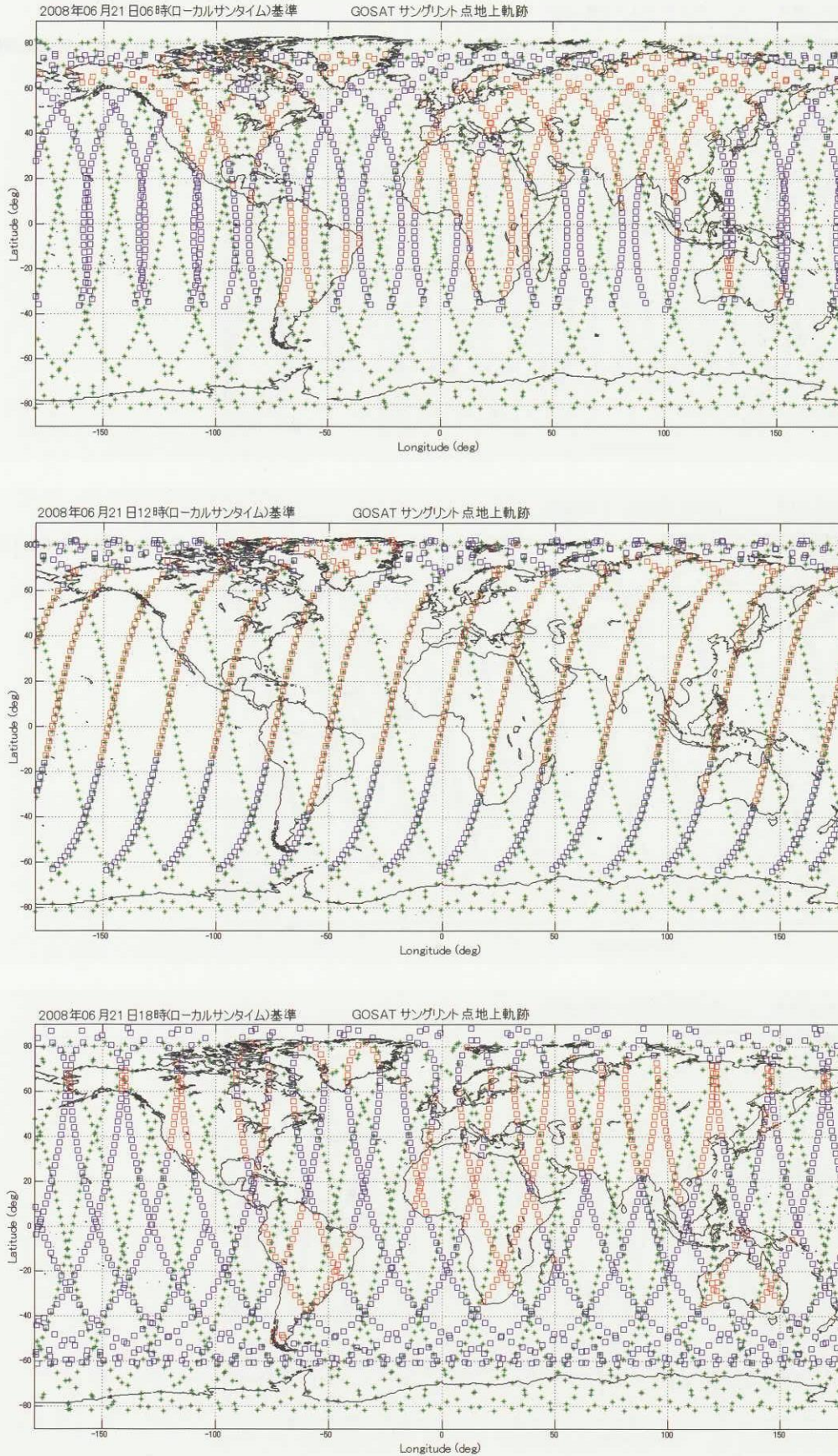
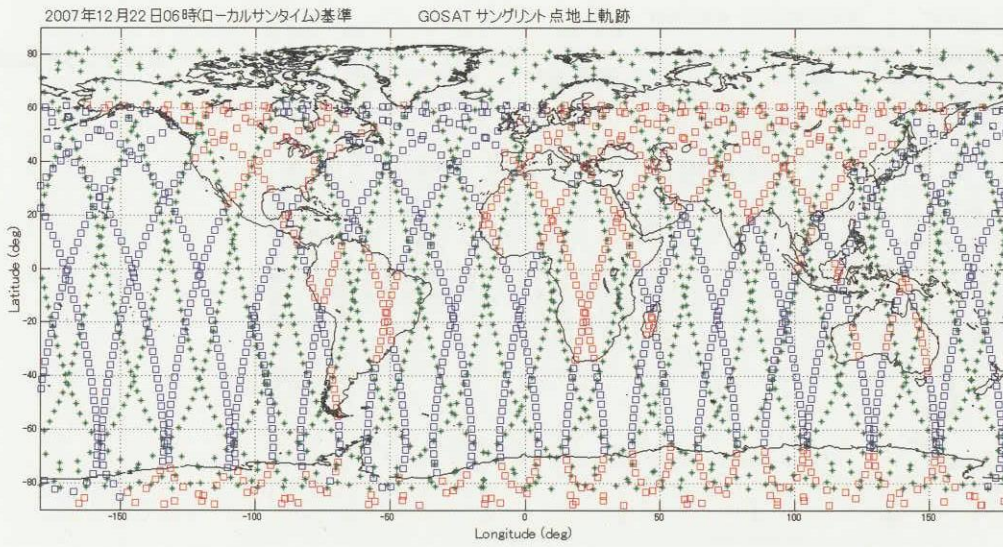
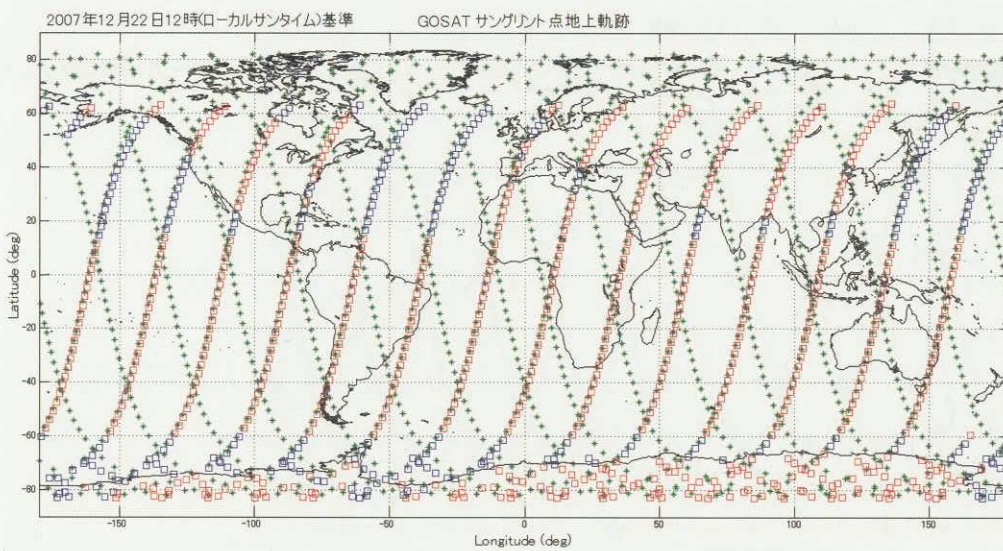


図2-2 夏至 (2008/6/21) のサングリント点 (海のみ、□) と衛星直下点 (*) (1分刻み、1日分)

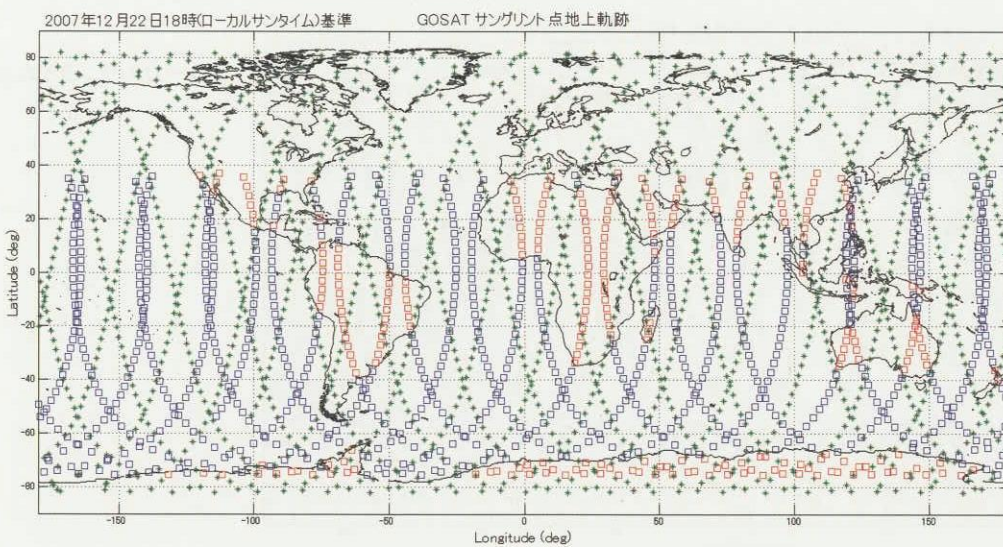
太陽同期軌道



ローカルタイム6時



ローカルタイム12時



ローカルタイム18時

図2-3 冬至 (2007/12/22) のサングリント点 (海のみ、□) と衛星直下点 (*) (1分刻み、1日分)

太陽同期軌道

ローカルサuntime6時

ローカルサuntime12時

ローカルサuntime18時

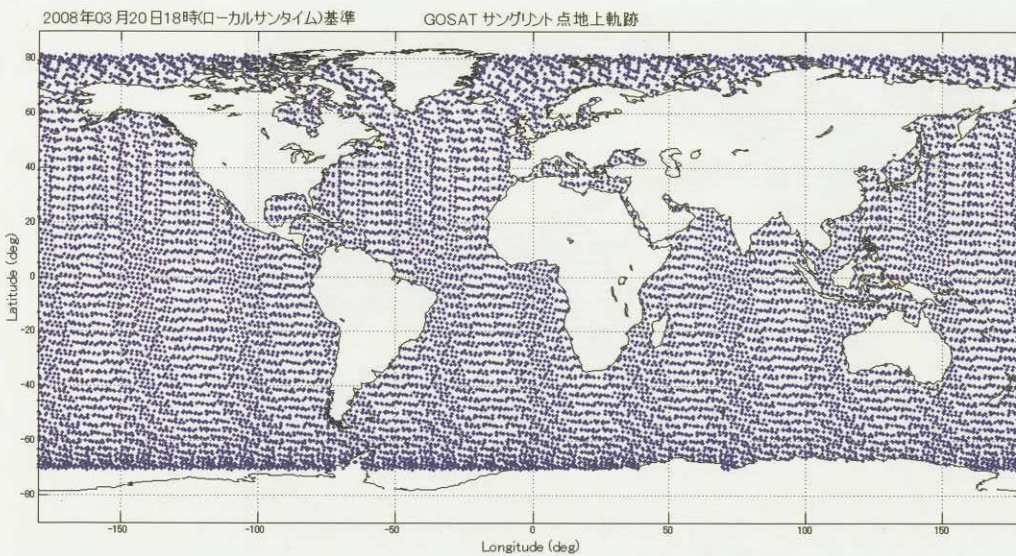
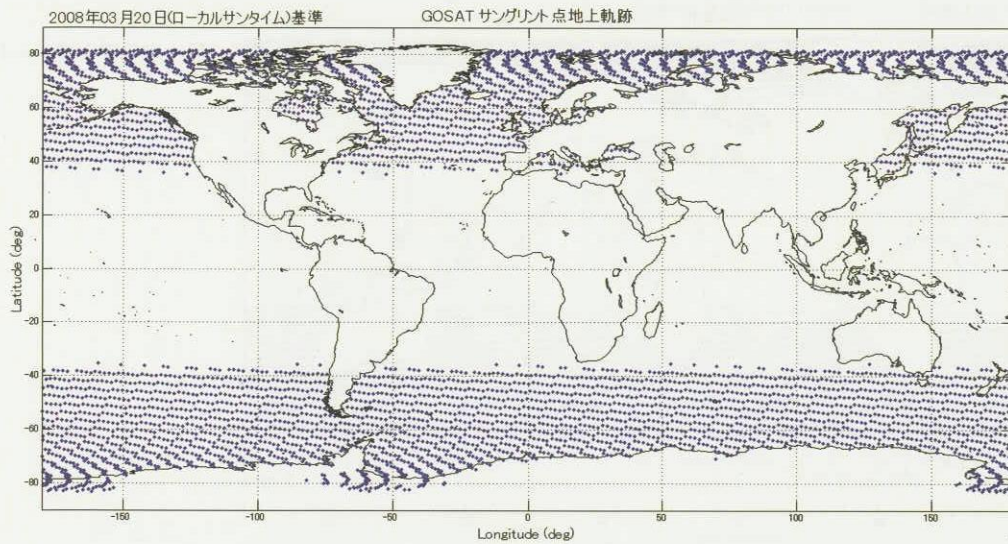
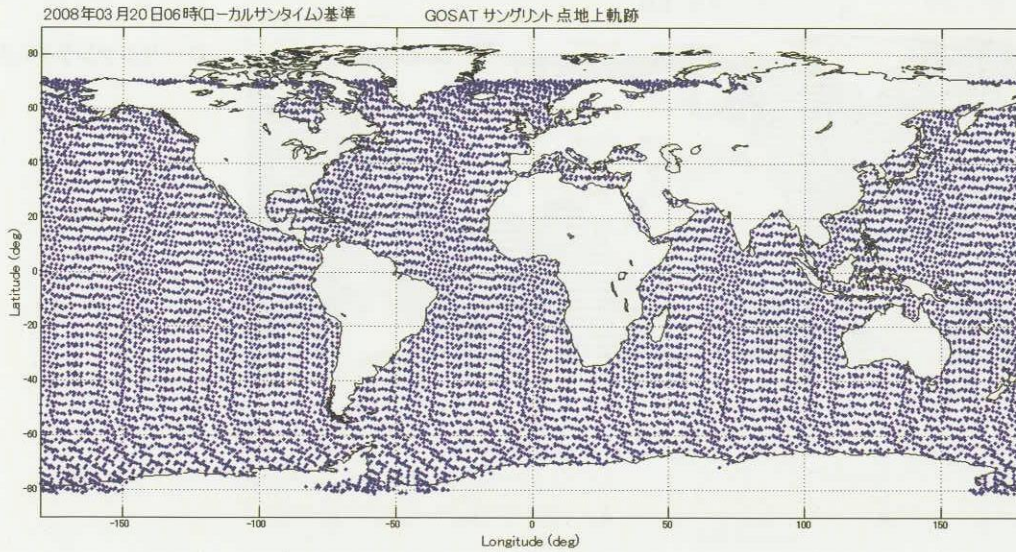
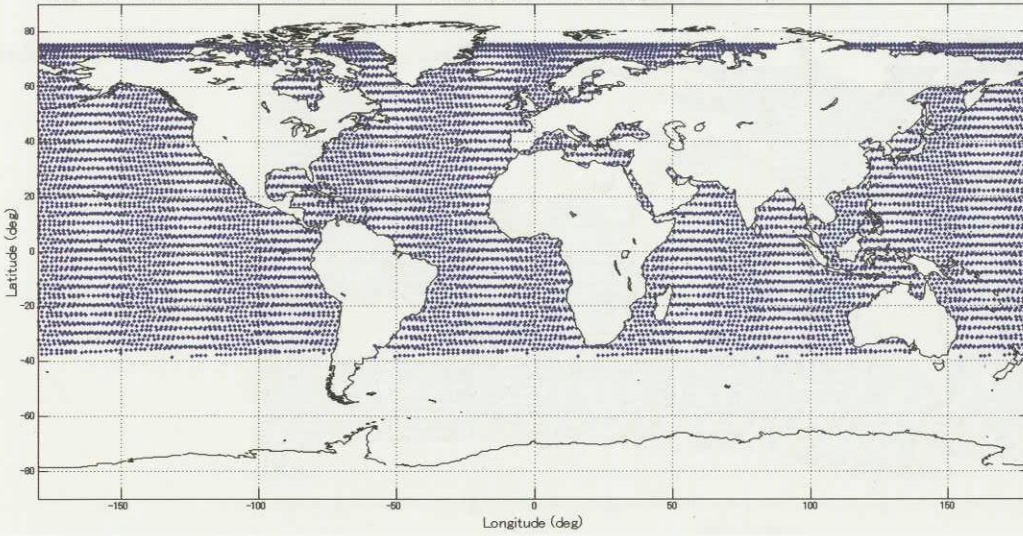


図3-1 春分(2008/3/20)前後のサングリント点(海のみ、□)
(1分刻み、14日分)

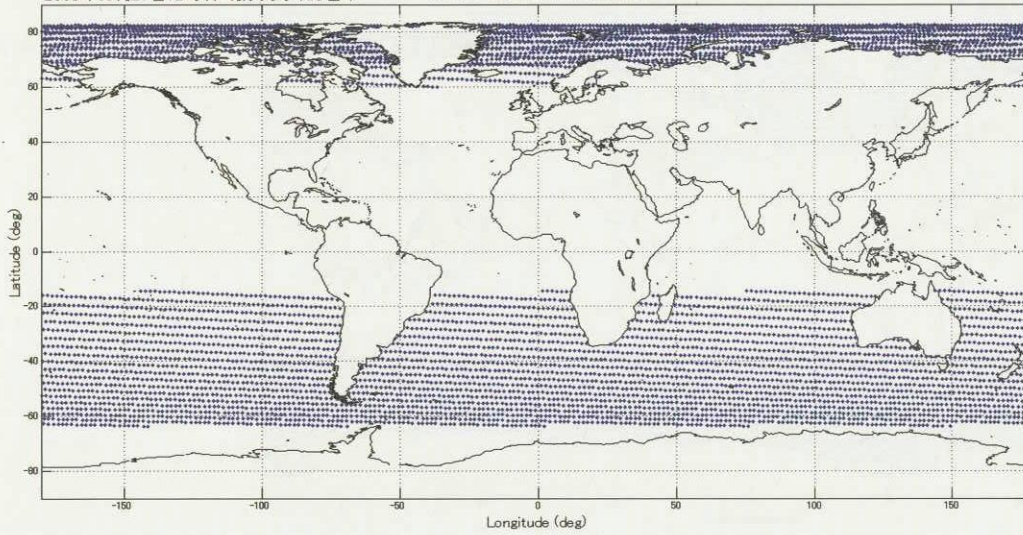
太陽同期軌道

2008年06月21日06時ローカルタイム基準 GOSAT サングリント点地上軌跡



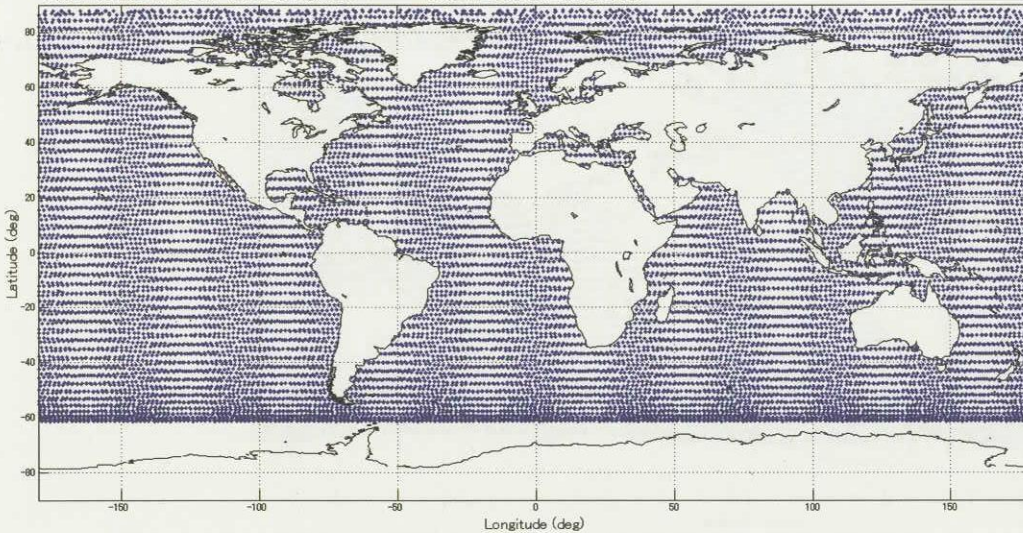
ローカルサンタイム6時

2008年06月21日12時ローカルタイム基準 GOSAT サングリント点地上軌跡



ローカルサンタイム12時

2008年06月21日18時ローカルタイム基準 GOSAT サングリント点地上軌跡



ローカルサンタイム18時

図3-2 夏至 (2008/6/21) 前後のサングリント点 (海のみ、□) (1分刻み、14日分)

太陽同期軌道

ローカルサuntime6時

ローカルサuntime12時

ローカルサuntime18時

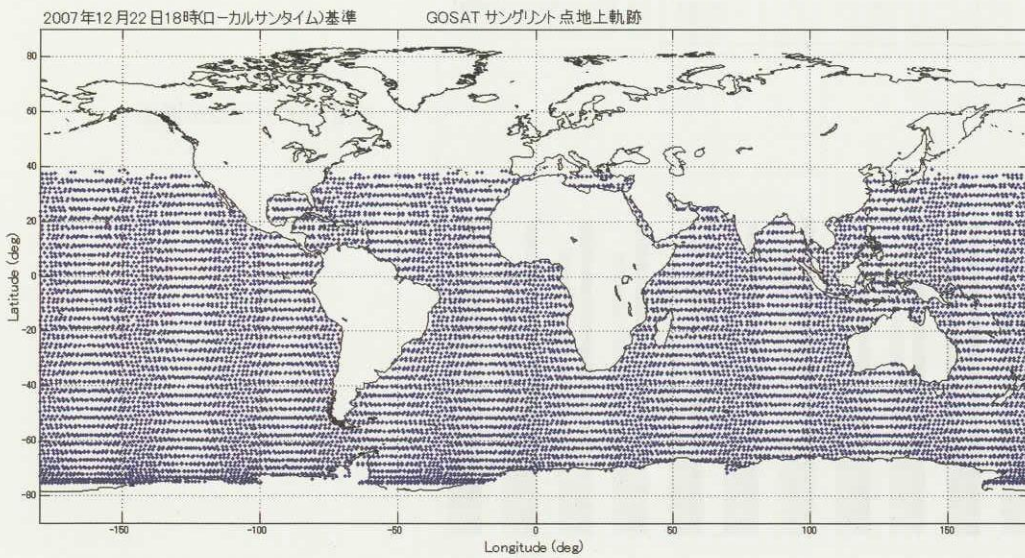
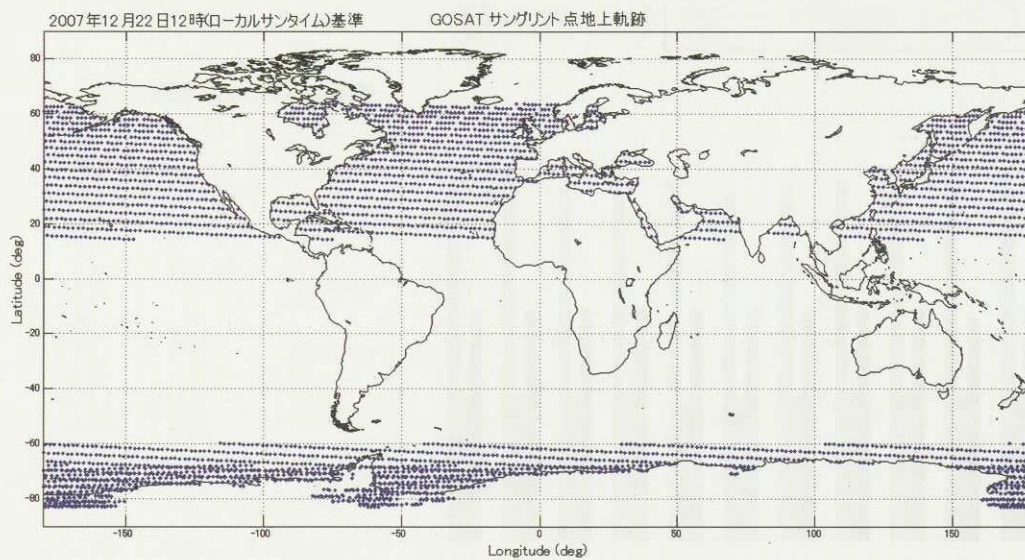
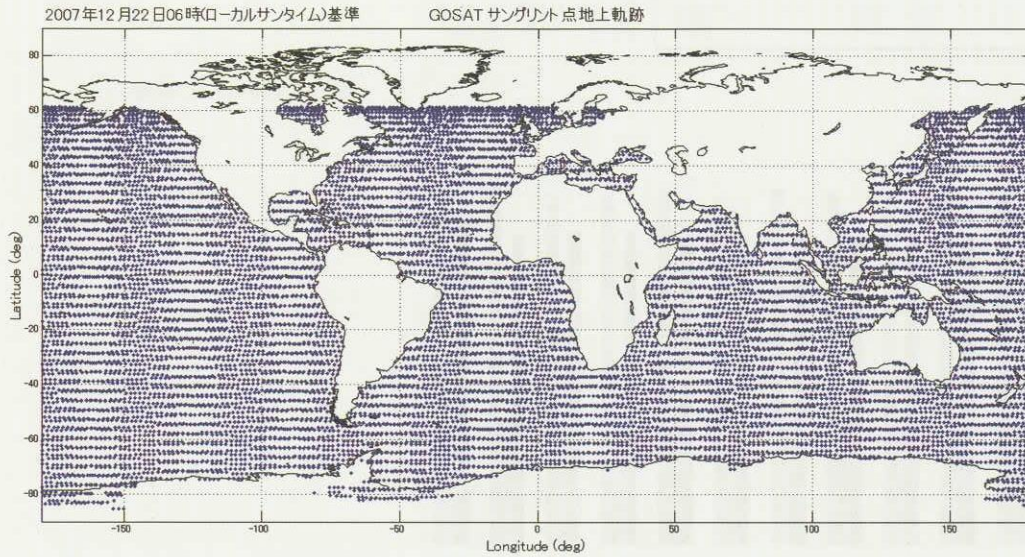
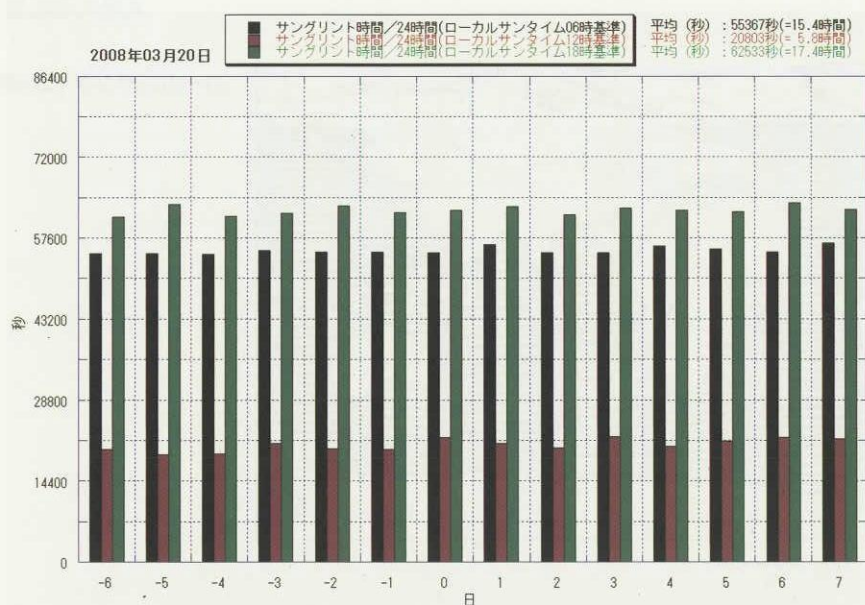
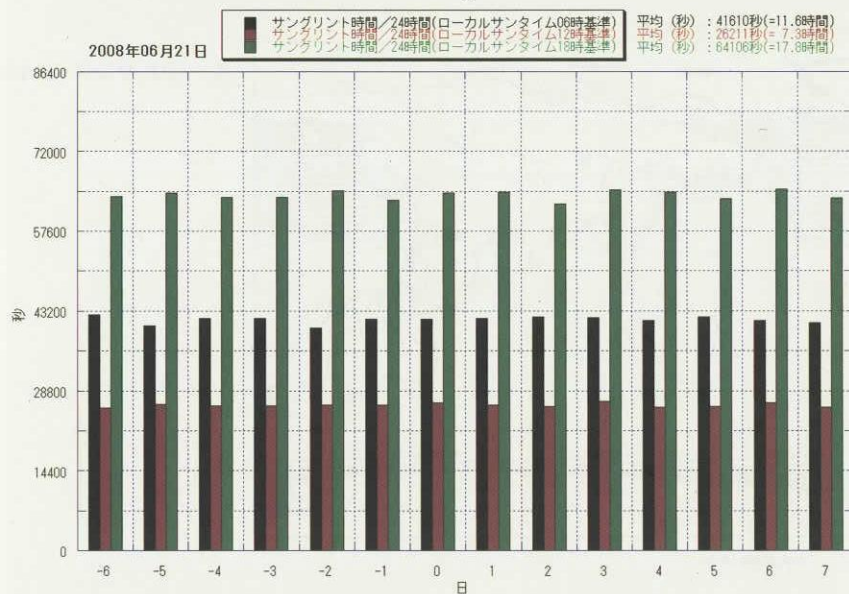


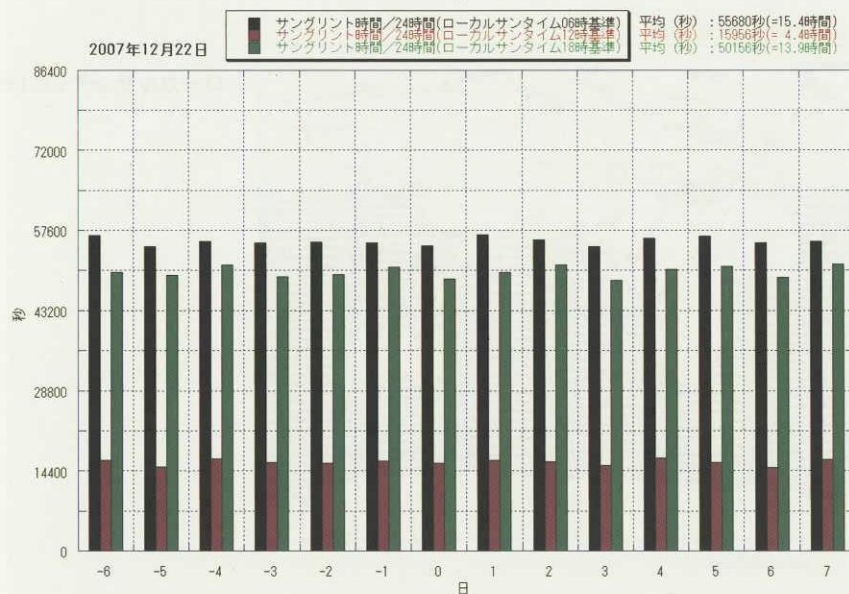
図3-3 冬至 (2007/12/22) 前後のサングリント点 (海のみ、□) (1分刻み、14日分)



春分(2008/3/21)前後



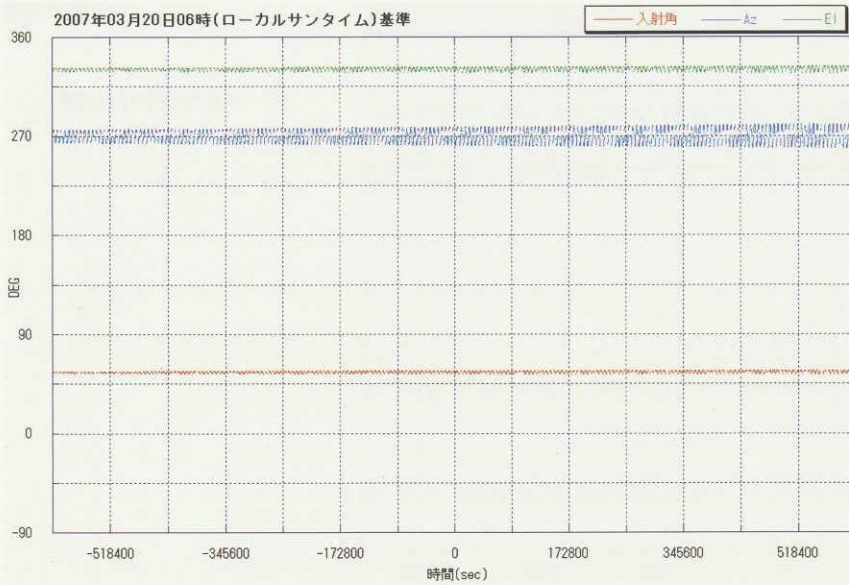
夏至(2008/6/20)前後



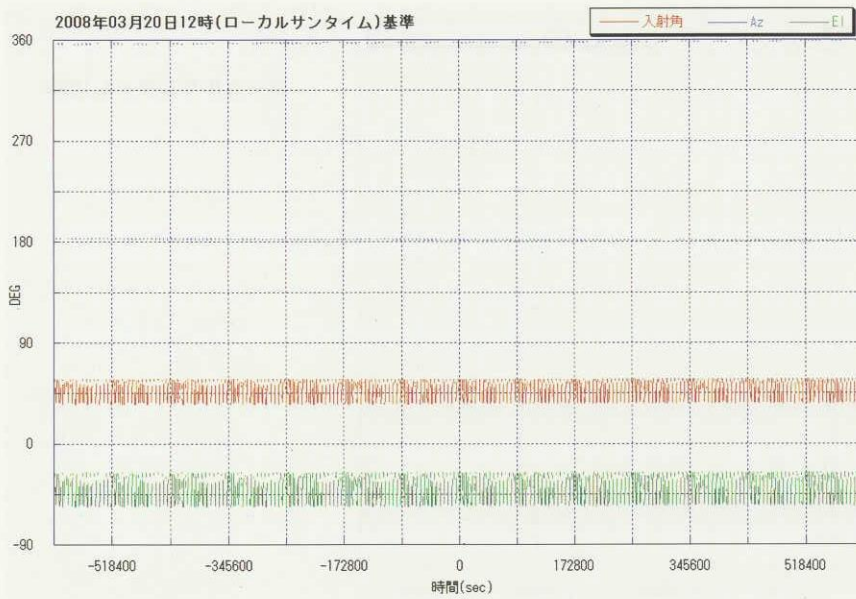
冬至(2007/12/22)前後

図4 1日あたりのサンダリント観測時間(1日ごと、14日分)

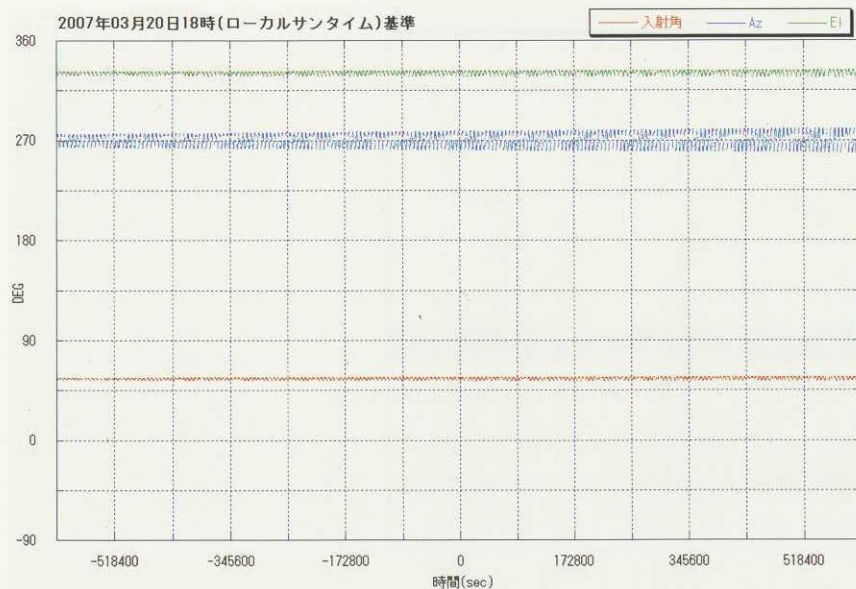
太陽同期軌道



ローカルサuntime6時



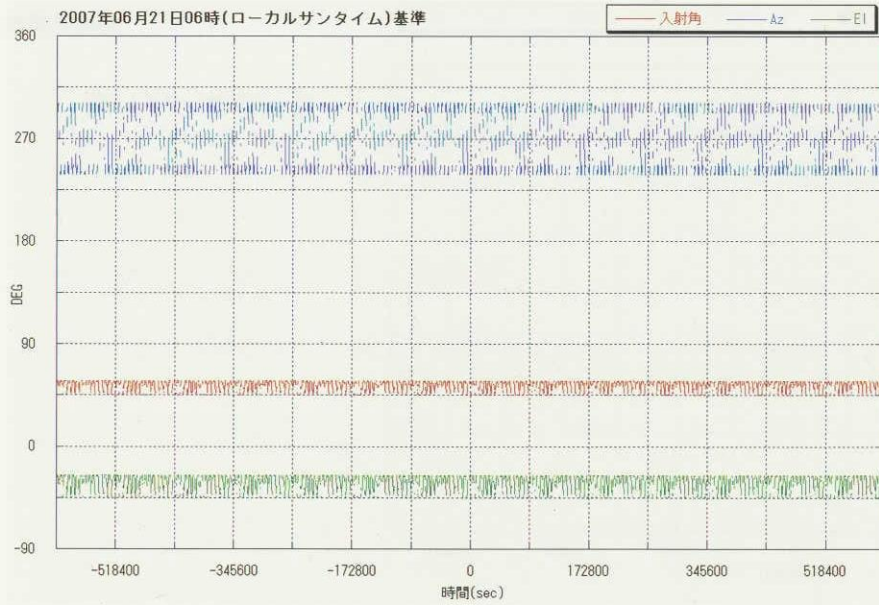
ローカルサuntime12時



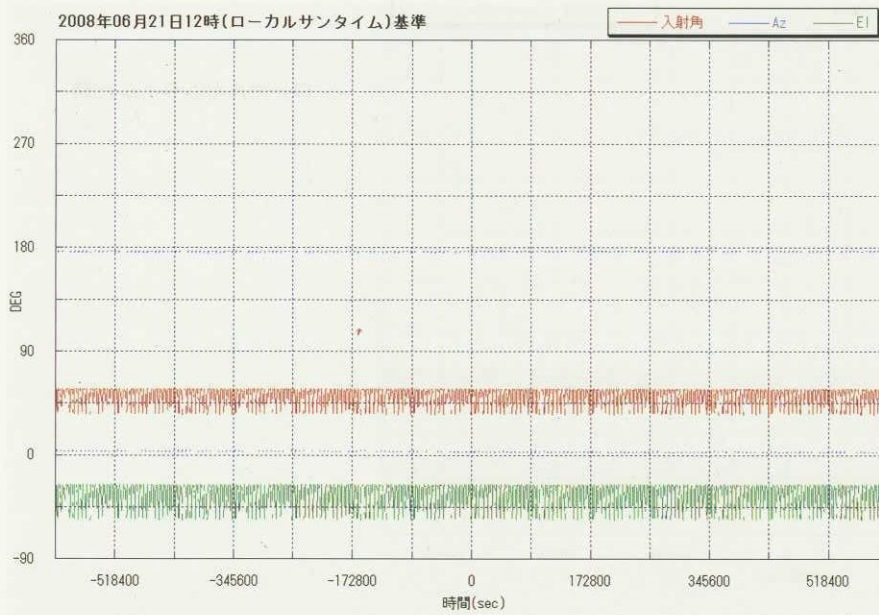
ローカルサuntime18時

図5-1 春分(2008/3/20)の衛星速度ベクトルから見た太陽入射角とサングリント方向
(1分刻み、14日分)

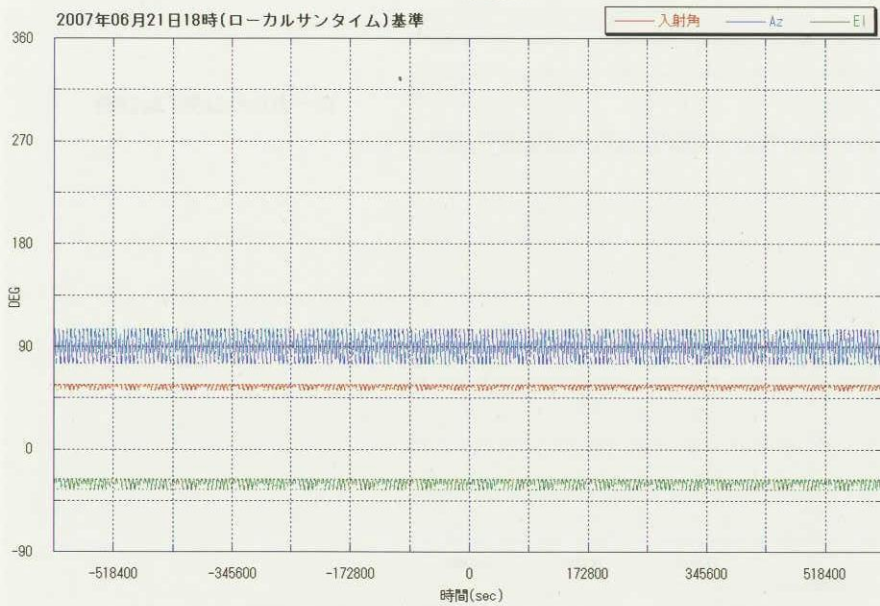
太陽同期軌道



ローカルサuntime6時



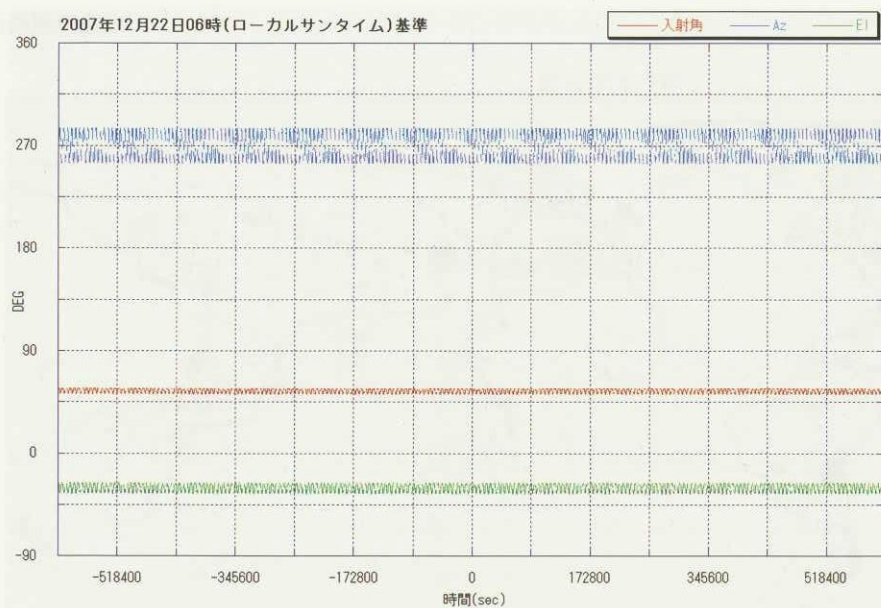
ローカルサuntime12時



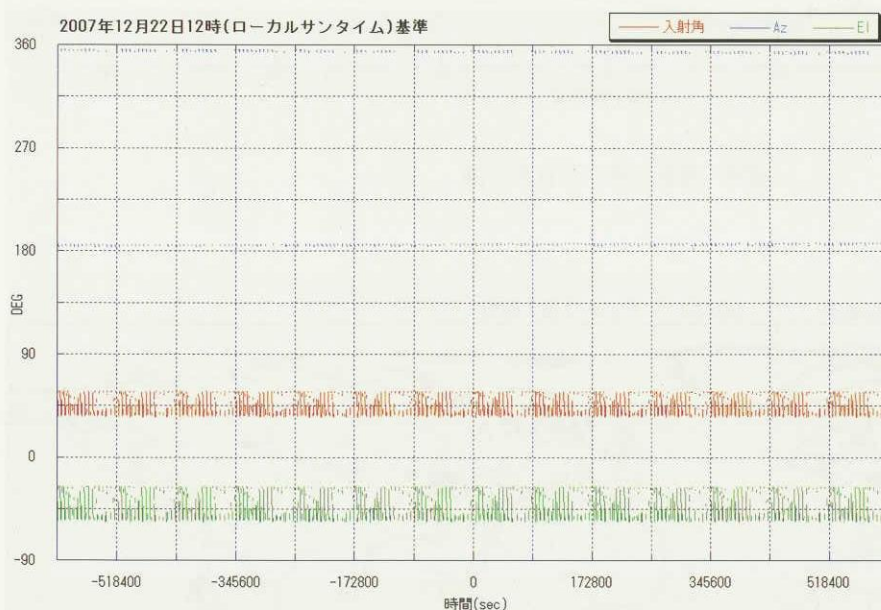
ローカルサuntime18時

図5-2 夏至 (2008/6/21) の衛星速度ベクトルから見た太陽入射角とサングリント方向 (1分刻み、14日分)

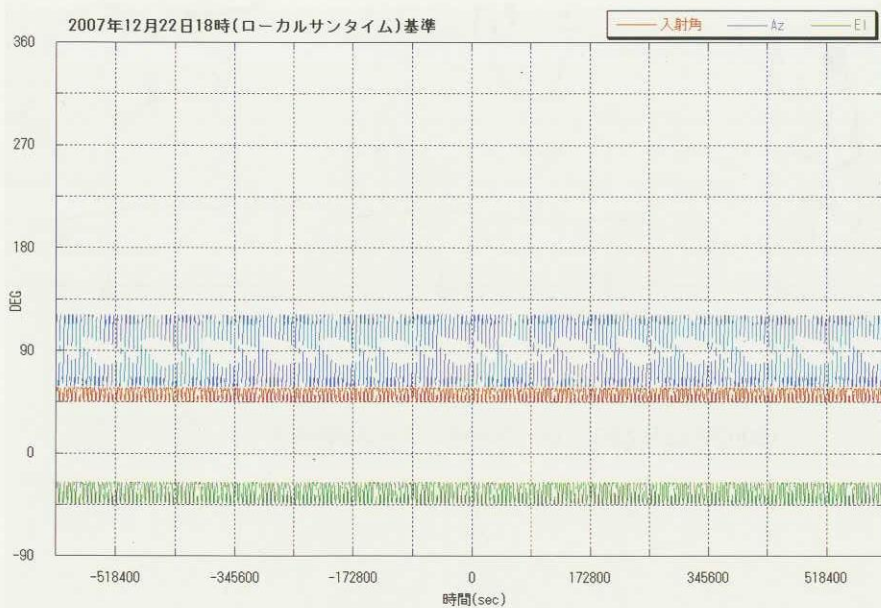
太陽同期軌道



ローカルサuntime6時



ローカルサuntime12時



ローカルサuntime18時

図5-3 冬至(2008/12/22)の衛星速度ベクトルから見た太陽入射角とサングリント方向(1分刻み、14日分)

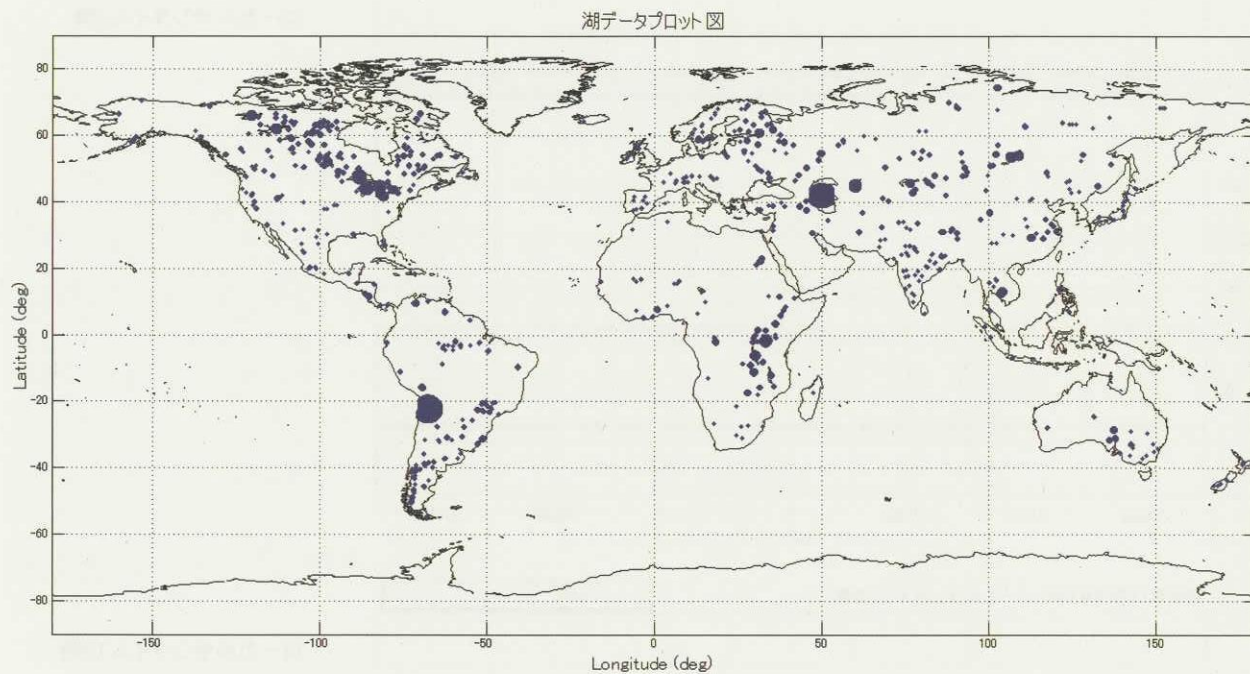


図6 解析に用いた世界の湖

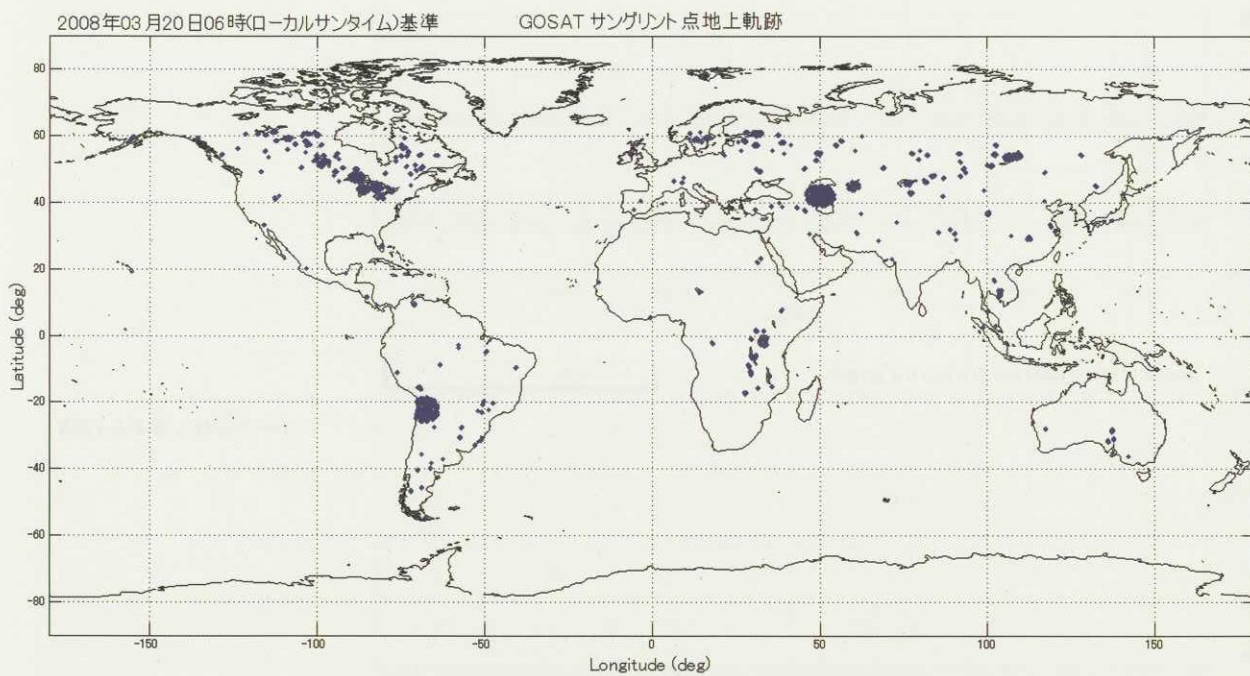


図7 太陽同期軌道の湖でのサングリント
(2007年12月22日 ローカルサuntime6時のケース)

太陽同期軌道

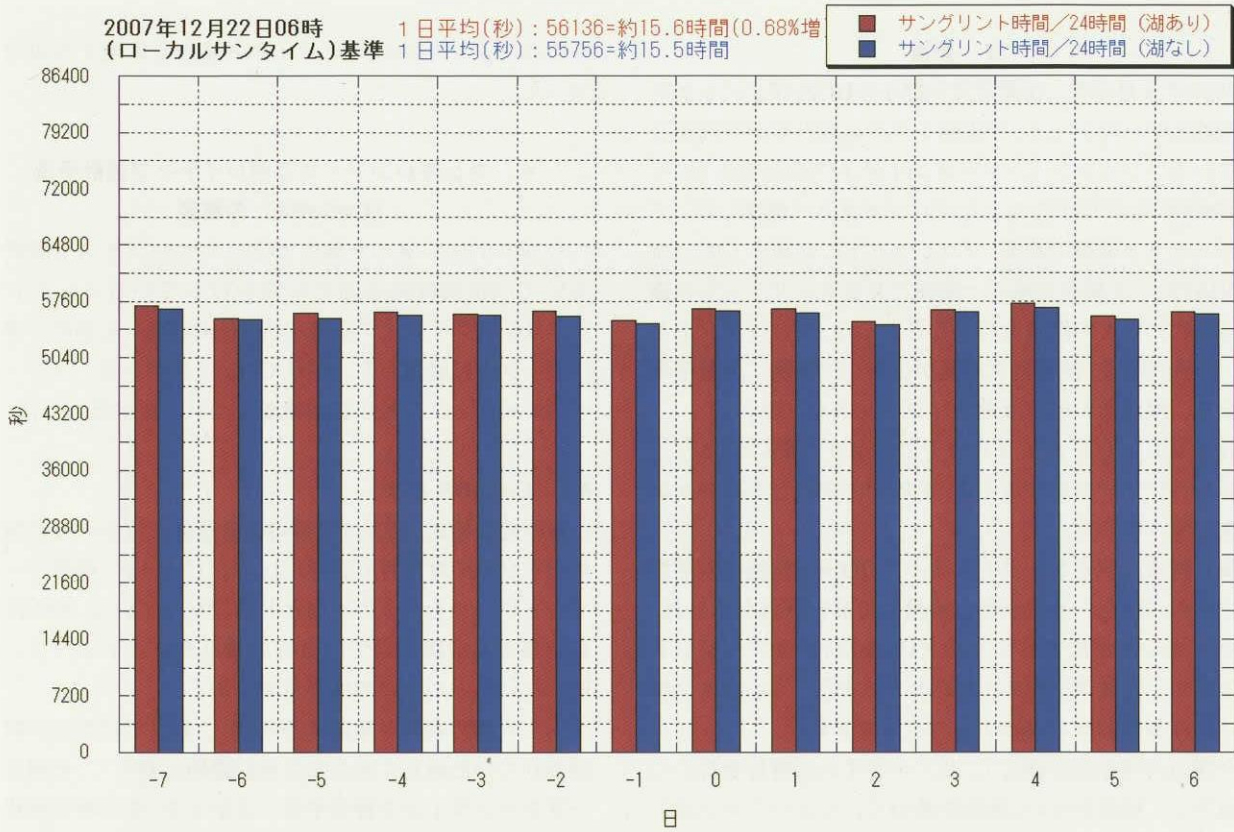


図8 太陽同期軌道で湖を考慮した場合としない場合の1日あたりのサングリント観測時間の違い (冬至 (2007/12/22) 前後、ローカルサuntime6時、1秒刻みで解析、1日平均、14日分)

第Ⅱ部 CoCoDAを用いたサングリント観測軌道解析

1. 要旨

2003年4月中旬、技術研究本部からGOSATプロジェクト情報化の一助として、宇宙機システム設計室が研究を行っているコンカレント・コラボレイティブ設計手法（以下CoCoDA）を利用することをプロジェクトへ提案した。プロジェクトと協議の結果、プロジェクトで必要としていた、GOSATセンサ観測方式の一候補であるサングリントの観測方式についての解析を行うこととした。サングリントとは、地球の海面、湖面に太陽光が反射して衛星に入る現象であり、地球上の反射点をサングリント点と呼ぶ。

5月9日から7月18日までの約2ヶ月間にわたって解析を行いデータを作成した。その間に会議とセッションを3回ずつ行った。

解析結果はプロジェクトによってGOSAT技術検討委員会で報告された。その結果、委員会で高い評価が得られ、観測方式の選定に寄与するなどCoCoDAを実プロジェクトに適用した成果が初めて得られた。また、ミッション解析における有効性を実証することができた。

今回の共同作業を通じて、リアルタイムに解析を行いつつ協力して検討を行い、議論を進めていくというコンカレント・コラボレイティブ設計手法の有効性が示せたことは特筆すべき成果である。ただ、今後検討すべき課題も新たに見つかっており、改善に向けて取り組んでいく。

2. 本プロジェクト協力の目的

今回行ったプロジェクト協力の目的は次の二つである。

- CoCoDAの有効性、すなわち限られた期間でプロジェクトに実際に役立つ成果を生み出せるかを検証すること（CoCoDA適用の主要なターゲットは衛星システム全体の検討だが、今回はミッション解析の一つとしてサングリント観測ミッションに適用した。）
- GOSATの候補ミッションであるサングリント観測の有効性（観測頻度、地域等）を確認するために必要なデータを作成すること

3. 背景

今回のプロジェクト協力の背景としては次の二つがあげられる。

- GOSAT開発の情報化の一助として技術研究本部からCoCoDAを活用することの提案が行われたこと
- GOSATプロジェクトでセンサの観測方式について検討を実施しており、特にサングリント方式についての解析を必要としていたこと

これにより今回のプロジェクト協力を実施する運びとなった。

4. コンカレント・コラボレイティブ設計手法（CoCoDA）の概要

今回のプロジェクト協力で行ったサングリント解析においては技術研究本部で研究を行っているコンカレント・コラボレイティブ設計手法（CoCoDA）を初めて実プロジェクトに適用した。本章では、そのコンカレント・コラボレイティブ設計手法の概要について述べる。

4.1 CoCoDAとは

技術的な検討、例えば衛星の概念設計を行うのに必要な解析を自分の席で行うときにはコンピュータ、解析ツール、ネットワークを使うのが当たり前になっている。なのに全員が集まる会議の場では自分の頭とホワイトボードしか使わないことが多いのは不思議である。

もしも専門家達が議論する場で、これまでは次回に持ち越されていた新しく発生した検討課題に対して、必要なデータをオンラインで獲得することができ、その場で解析して結果を出すことができれば、止まるはずだった議論が続けられることになる。またその結果をプロジェクト等を用いてみんなで確認しつつ議論できれば、意思疎通も簡単に、より深いものになる。

つまり、関係者が集まって（コンカレント）共同で（コラボレーション）技術検討ができれば、検討に必要な時間が短縮され、アウトプットの質も上がると考えられる。

このような考え方に則って、必要なツールと環境を有効に利用して専門家が集まって設計を行う手法をConcurrent and Collaborative Design Approachと呼ぶ。

5. 解析とセッション

次に、具体的にを行った解析内容とそのアプローチについて述べる。

5.1 解析実施項

解析のケースには、表1に示す2種類の軌道について、それぞれ表2に示した10ケースを選定した。全ケースに対して次の3項目について解析を行い、結果を85種類の図にプロットした。

- ①海／湖によるサングリント点および衛星の地上軌跡（2周回、1日間、14日間、120日間）
- ②衛星に対するサングリント入射方向（14日間、120日

間の入射角、Az、El)

③サングリント観測可能時間（1日間、14日間、120日間）

表1. 解析を実施した軌道

	高度(km)	離心率	軌道傾斜角(deg)	真近点離角(deg)
太陽同期軌道	700	0.0	98.08	180.0
太陽非同期軌道	650	0.0	65.00	180.0

表2. 解析ケース

		2007年冬至	2008年春分	2008年夏至
太陽同期軌道	ローカルサuntime6時	湖なし	湖なし	湖なし
		湖有り		
	ローカルサuntime12時	湖なし	湖なし	湖なし
	ローカルサuntime18時	湖なし	湖なし	湖なし
太陽非同期軌道	---	---	湖なし	---

5.2 解析作業

解析アルゴリズムの設計、ソフトウェアのコーディング、

解析、データ処理は全て社内で行った。内容と手順を以下に、全体像を図1に示す。

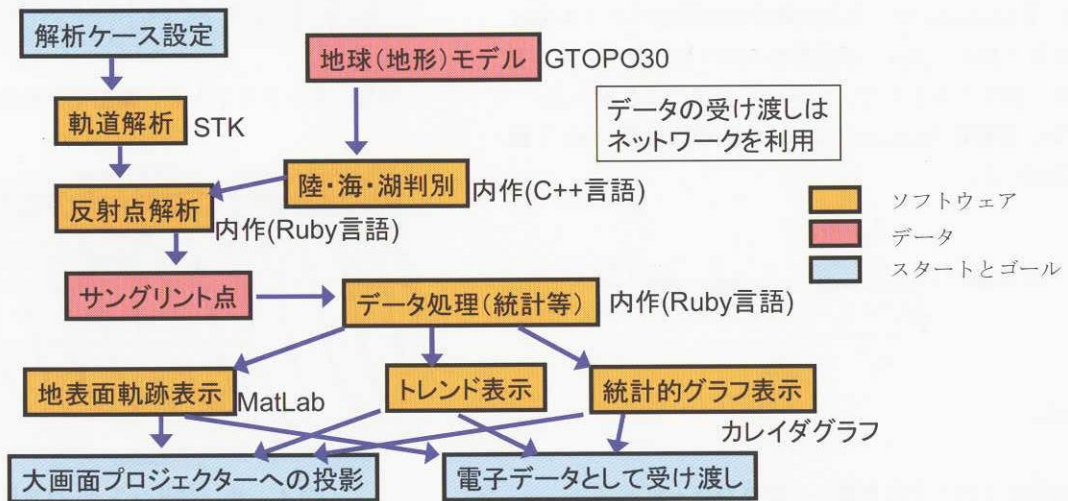


図1 サングリント解析の全体像

1) 陸域海洋データの取得

STK等のソフトウェアに整備されていない陸域海洋データを調査し、USGS（米国地質調査所）よりGTOPO30のデータを取得

(<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>)

2) 陸域海洋データの加工（C++言語でコーディング）

構造を分析、27に分割されている全世界データを統合、メモリ上に展開できるようにフォーマットを工夫して圧

縮した。データは数値の羅列であるが、区画の北西端から南東端へ経度方向に並んでいる。各数値は30秒角（約1km）四方の標高を表しており、海は-9999で表されている。今回は陸海の判別のみが必要なので、海域を0、陸域を1としてそれぞれ1ビットで表し、バイナリ形式で保存した。これにより、約2GBのデータが約100MBまで圧縮された。

さらに、気象研究所の青木先生より頂いた全世界の湖のデータから有効なデータを抽出して、720個を追加した。

3) 衛星／太陽の軌道データ生成 (STKを利用)

各ケースにおける衛星と太陽の慣性空間 (Mean of J2000) における位置、速度、さらに、エポック時刻基準の触にかかると時間帯を算出した。

4) サングリント点解析 (Ruby言語でコーディング)

アルゴリズムは以下のとおり。

地球の半径をそれぞれ以下のように定める。

$$\text{赤道半径 } r_a = 6378.140 \text{ [km]}$$

$$\text{極半径 } r_b = 6356.824 \text{ [km]}$$

このとき、地表の任意の点の座標E (e_x,e_y,e_z) は、

$$\frac{e_x^2}{r_a^2} + \frac{e_y^2}{r_a^2} + \frac{e_z^2}{r_b^2} = 1$$

となる。座標E (e_x,e_y,e_z) における法線ベクトルは、

$$\left(\frac{e_x}{r_a^2}, \frac{e_y}{r_a^2}, \frac{e_z}{r_b^2} \right)$$

である。サングリント点は、入射角と反射角が同一という条件から、E (e_x,e_y,e_z) から見た衛星方向の単位ベクトル \vec{Sat} と、E (e_x,e_y,e_z) から見た太陽方向の単位ベクトル \vec{Sun} との合計 ($\vec{Sat} + \vec{Sun}$) が座標Eにおける法線ベクトルと方向が一致する点として、ニュートン法により求めた。

なお、座標E (e_x,e_y,e_z) における地理的緯度 (la) と経度 (lon) は、

$$la = \tan^{-1} \frac{\frac{e_z}{r_b^2}}{\sqrt{\frac{e_x^2}{r_a^2} + \frac{e_y^2}{r_a^2}}} \quad lon = \tan^{-1} \frac{e_y}{e_x}$$

となる。

その他以下のことを考慮して計算を行った。

- ①海面のゆらぎによるサングリントの広がりや考慮していない。
- ②河川は考慮していない。
- ③湖の形状は円に置き換えて評価した。湖のデータは、気象研青木氏が、(財) 国際湖沼環境委員会によるデータから面積が25km²以下の湖 (約200個) を除外し、足していた25km²以上の湖 (約180個) を追加したものである。また、湖データベース約720個の内、追加した約180個は全て面積を25km²として計算した。

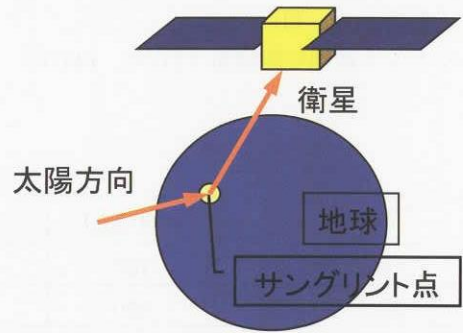


図2 サングリントの仕組み

5) サングリント点、衛星軌跡を世界地図上に全53種類プロット (MATLABでコーディング)

例を図3～図5に示す。

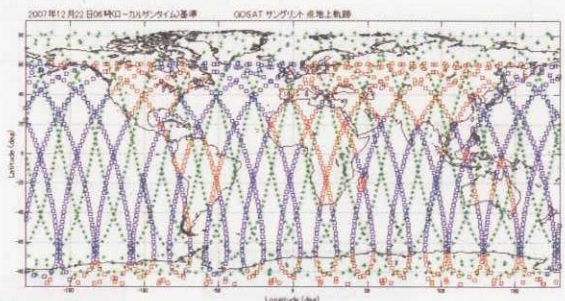


図3 サングリント点と衛星地上軌跡 (1日間)

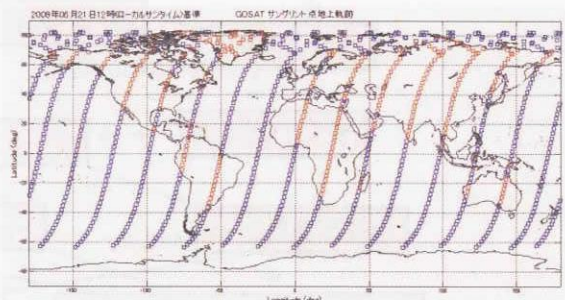


図4 サングリント点 (1日間)

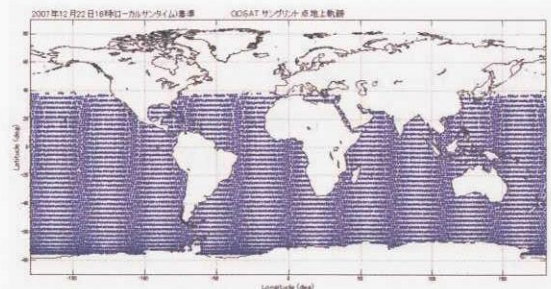


図5 サングリント点 (14日間)

- 6) サングリント観測可能時間、入射方向を全32種類グラフ化 (カレイダグラフを利用)
例を図6、図7に示す。

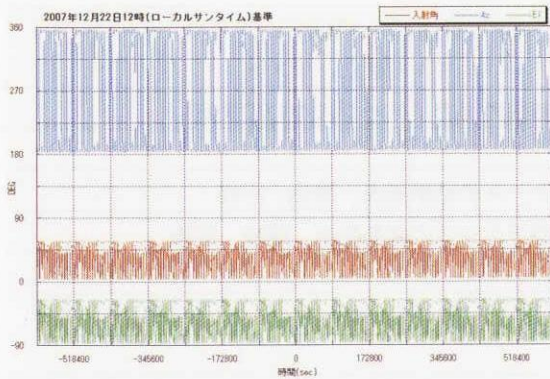


図6 サングリント入射方向 (入射角,Az,El) (14日間)

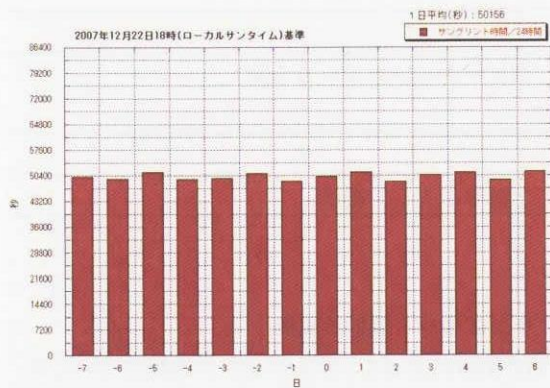


図7 サングリント観測時間 (14日間)

5.3 解析作業

「セッション」は、事前に行った検討結果を持ち寄って議論を行う「会議」とは異なり、その場で解析ツールを動かせることにより、議論の結果を反映した解析をその場で行い、さらに議論を発展させることができる方法を指す。これにより、議論と解析のターンアラウンドにかかる期間を短くすることが可能である。

設計セッションは5月15日、6月2日、6月13日に、宇宙機システム設計室およびGOSATプロジェクトチームのメンバー6～8人がコラボレーションルームに集まり、各2～3時間行った。スケジュールと実施内容の詳細については表3を参照のこと。

初回のセッションでは、サングリント解析を行うにあたって、STKを用いてどのような軌道データが生成できるかツールを動かしたり、GTOPO30のデータがどのようなものであるかをインターネットを介してダウンロードし、利用可能かどうかの検討をプロジェクトスクリーンに画面を映すことで情報を共有しながら行った。

2回目には、解析を行った1ケースについての結果を表示して議論した後、解析条件を変更して(同じ軌道で時期を変える、軌道を変える、結果の可視化方法を変える等)どのような条件下でサングリント解析が有効であるかが繰り返し議論できたことは非常に有効であった。また、結果の出力方法や図示の仕方についてもユーザと細かい調整ができた。

3回目には、解析を行った9ケースを一つのスクリーン上に配置し、全体を比較するとともに、図の大きさを変更して細部を比較、データの一部分のみをプロットし直して検討するなどダイナミックに表示方法を変更しながら議論が行えた。

表3 サングリント解析スケジュール

4月中旬	情報化ミーティング (GOSATプロジェクト、ITG、高情部、技研) において CoCoDAの利用を提案した
5月9日	キックオフミーティング: サングリント解析の実施を決定
～	GTOPO30より得た海域データの分析、利用可能な形にデータ加工 サングリント解析プログラム作成、全解析アルゴリズムの確立、テスト
5月15日	第1回セッション: 解析ケースおよび解析結果の出力イメージについて決定
～	全ケースの解析を実施
6月2日	第2回セッション: 事前に実施した解析1ケースの結果発表、議論、評価
6月13日	第3回セッション: 湖考慮ケースを含む全解析ケースの結果発表、議論、評価
～	表示方法の変更や1秒ごとの解析実施
6月19日	解析結果の提供
6月23日	解析訂正版提供
6月24日	解析ケース、軌道要素一覧提供
～	衛星とサングリント点の軌跡プロット図を再作成 (両者が12時間のずれ)
6月25日	衛星軌跡とサングリント点を全ケース2週回分抽出した図を追加作成し提供
7月8日	追加解析実施打ち合わせ
～	追加解析実施: 入射角制限を考慮した解析、湖データベースプロット図 太陽非同期長期解析の検証
7月17日	追加解析結果を提供
7月18日	湖を考慮した場合、考慮しない場合の1秒ごと計算出力し、提供

6. 成果

6.1 CoCoDAの成果

今回初めて実プロジェクトのミッションにCoCoDAを適用してセッションを実施した。大画面に解析結果を表示し、多人数で結果を確認しながら議論ができた。さらに、ある程度はリアルタイムにパラメータを振って検討でき、ミッション解析には有効であることが示せた。また、両グループ間の相互理解と良好なチームワークを築くことができた。

以上のような成果が得られた要因として、今回の課題については以下の条件がそろったため従来の解析に比べて効率的な検討ができたと考えている。

- ①解析の入力条件を早期に明確にすることができた
- ②解析が比較的シンプルでツールの習熟度も高かった
- ③既製のツールを補完するプログラムの開発がスムーズにできた
- ④膨大なアウトプットデータを処理するソフトウェアが整備されており、その習熟度が高かった
- ⑤解析結果をその場で評価してフィードバックできる、環境と人的能力があった

6.2 サングリント解析の成果

今回の解析によって、サングリント観測については、ローカルサuntime 6時の太陽同期軌道が観測地域、頻度の点から最適であることを明らかにした。これらの解析結果はプロジェクトによってGOSAT技術検討委員会で報告された。その結果、委員会で高い評価が得られ、観測方式の選定に寄与できた。

今回の成果は今後のサングリント観測ミッション創出にも貢献すると期待される。

7. 今後の課題

今回初めて実際のプロジェクトに即した検討を、CoCoDAを実行する環境を備えているコラボレーションルームを用いて実施した。セッションの運営、検討項目、環境、ソフトウェア等多くの面で課題が明らかになったため、改善を進めていく予定である。後日行った反省会で両者(プロジェクトおよび設計室メンバー)から挙げた主な反省点は以下のとおりであった。

- セッションの運営能力の向上と習熟が必要
- 結果のグラフ整理や可視化などについてセッションを設けるなどアウトプット段階におけるインタラクションを充実させる必要がある

- 最終のプログラムについては見栄えも含めて改善が必要
- セッション中のネットワーク環境を世間一般レベルにしたい
 - ①全てのPCを無線接続し、スクリーン表示できるようにする
 - ②ユーザが自己のサーバにアクセスし必要な情報入手できるようにする
- 人的リソースを部署横断的に安定して確保できるか不明
- セッションで多くの解析結果を並べて見られると、より効率的な検討ができるので、スクリーンの複数化、グラフの並べ方の検討が必要
- 端末操作者との距離が遠いため大きい声を出す必要がある
 - PCの消音化、小型マイクروفोनとスピーカの導入を検討する
- ユーザが加工せずに使えるデータを提供する
- 組織的な取り組みにより解析における繰り返し作業の自動化による時間短縮、ミスの削減
- 長時間のセッションでも参加者がモチベーションを持続できるような運営を検討する

以上の中でも、セッションの運営方法をどう改善するかは大きな課題である。セッションで解析を行って議論を進められるのはメリットであるが、話題になっている項目をその場で解析するため、必然的に議論が止まることが多くなる。解析を極力自動化して処理にかかる時間を最小化する、他のトピックに一時的に移るなど、セッションをスムーズに進める方法を見いだす必要がある。

また、解析内容についての議論は多くなされたが、最終的なアウトプットについてはあまり議論がなされなかったため、担当者間で後日調整した。解析結果はもとより、それを可視化した見栄えも重要であることから、それを議論するセッションを開催することも、検討内容によっては考慮する必要がある。

文献

- (1) Oxnevad, K.I., *NPDT The Future of Design is Now, The 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and, Informatics, Creating the Image for New Systems Session, Orlando, Florida, July 23-25, 2001*

おわりに

今回の解析により、ローカルサンタイム6時の太陽同期軌道が北半球でのサングリント観測に適していることを明らかにしたが、他にもローカルサンタイムによる違いや太陽同期軌道と太陽非同期軌道での違いなど、衛星からのサングリント観測に係る多くの定性的・定量的知見が得られた。結果的にGOSATでは定常的なサングリント観測は行わないことになったが、衛星によるサングリント観測についてここまで詳細に解析した例は世界的にも少ないと考えられ、本解析結果は今後サングリントを利用した観測ミッションを計画する上で非常に貴重な基礎データとなると自負している。

またコンカレント・コラボレイティブ設計手法であるCoCoDAは、衛星システム全体の検討を想定して編み出された手法であるが、今回はGOSATプロジェクトが緊急に必要としていたミッション解析に適用した。適用対象の規模は大きくないが、プロジェクトチームと共同で作業を行った2ヶ月間でプロジェクトに実際に役立つ成果を生み出した。これによって、リアルタイムに解析を行いつつ協力して検討を行い、議論を進めていくというコンカレント・コラボレイティブ設計手法の有効性が示せたことは大きな成果であった。今後とも得られた成果や反省点を元に、より良い概念設計手法、設計支援環境の整備を進めていく予定である。

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-025

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



Japan Aerospace Exploration Agency

