

2008 年度
芝浦工業大学 システム工学部
電子情報システム学科

総合研究論文

すざく衛星の軌道と軌道上バックグラウンド
の可視化による解析学習ツールの開発
Visualization of the Suzaku orbital background on
Google Earth

P05111

べっとうやしき けいた
別当屋敷 啓太

指導教員：久保田あや講師

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	X 線天文衛星すざく	3
2.1	すざく衛星	3
2.2	XIS 検出器	4
第 3 章	X 線観測におけるバックグラウンド	7
3.1	Cut-Off Rigidity	7
3.2	South Atlantic Anomaly	8
第 4 章	人工衛星の軌道計算	9
4.1	人工衛星の軌道決定について	9
4.2	軌道長半径 a の計算	11
4.3	離心近点角 E の計算	11
4.4	人工衛星の三次元座標計算	11
4.5	観測時刻におけるグリニッジ子午線の赤経計算	12
4.6	人工衛星の緯度・経度計算	12
第 5 章	XIS データの解析とライトカーブの作成	15
5.1	LOCKMANHOLE の観測データ取得	15
5.2	データの除去	16
5.2.1	GRADE と STATUS による選別	17
5.2.2	較正用放射線源の除去	18
5.2.3	マヌーバーの除去	19
5.2.4	テレメトリー飽和の除去	20
5.2.5	昼の地球が入ってくるデータの除去	21
5.2.6	ホットピクセル, フリッカリングピクセルの除去	22
5.3	ライトカーブの作成	23
第 6 章	Google Earth を用いた視覚化	25
6.1	すざく衛星の軌道の表示	25
6.2	軌道上バックグラウンドの表示	26
第 7 章	まとめ	27
付録 A	KML 言語	29
A.1	すざく衛星軌道の Google Earth への表示	29
A.1.1	衛星の位置情報	29
A.1.2	時間の指定	29

A.2	バックグラウンド量の Google Earth への表示	29
A.2.1	グラフの表示	29
A.2.2	タイムバーの表示	30
付録 B	KML 作成プログラム	31

第1章 はじめに

1960年代後半にはじまった X 線天文学により, 宇宙にはブラックホールや中性子星といったさまざまな高エネルギー天体が存在することが明らかになってきた. 天体から放射される X 線は地球の大気によって吸収されてしまうため, X 線観測はすざく衛星などの人工衛星を用いて行われている. しかし, 人工衛星による観測では, 宇宙線の影響などで目標天体以外からの雑音が検出器に生じてしまう. この雑音は衛星の軌道上の環境変化に左右される. 本研究では, この軌道上での雑音の変化を視覚化するために, X 線観測衛星すざくの XIS 検出器で得られたデータを用い, すざく衛星軌道上の雑音量 (バックグラウンド) を可視化するツールの開発を行った. これにより, 解析初心者の人工衛星による X 線観測の学習支援を目指す.

第2章 X線天文衛星すざく

2.1 すざく衛星

すざく衛星は2005年7月10日に打ち上げられた日本で5番目のX線観測用の衛星である。すざく衛星は地球を1日に15周、地球から高度550kmの軌道を保っており、北緯31°～南緯31°の範囲を飛行する。また、観測のために4種の装置(XRT,XRS,HXD および XIS)が搭載されている。

この衛星の最大の特徴は、XIS 検出器と硬 X 線検出器 (HXD) により、さまざまな X 線天体に対して、これまでになかった広いエネルギー領域 (0.3~600keV) をより高いエネルギー分解能かつ高感度での観測ができることである。

すざく衛星のイメージとすざくの内部構造をそれぞれ図 2.1, 図 2.2 に示す。



図 2.1: すざく衛星¹

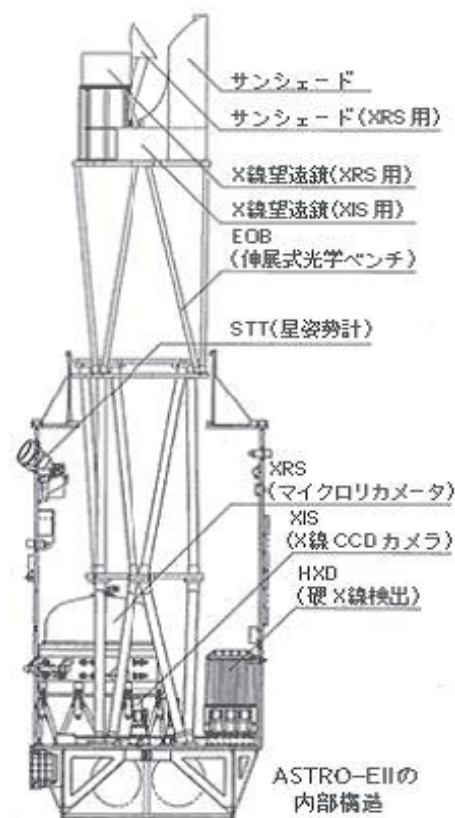


図 2.2: すざくの内部構造¹

¹すざくファーストステップガイドより

2.2 XIS 検出器

XIS 検出器 (X-ray Imaging Spectrometers) とは、X 線 CCD カメラで、撮像及び分光が可能な装置である。X 線光子の到来した位置及びエネルギーを高い精度で測定でき、あすか衛星 (日本の 4 番目の X 線天文衛星) で初めて搭載された。その後、Chandra、XMM-Newton に用いられ、X 線観測衛星の標準装備となっている。すざく衛星に搭載されている 4 台の XIS を図 2.3 に示す。



図 2.3: XIS 検出器²

また、XIS の 4 台のセンサーをそれぞれ X0, X1, X2, X3 と呼ぶ。CCD には表面照射型 (Frontside Illuminated; FI) と裏面照射型 (Backside Illuminated; BI) がある。表面照射型 CCD (FI-CCD) では X 線を電極側から入射するため、低エネルギーの X 線は電極や絶縁層で吸収されてしまうのに対し、裏面照射型 CCD (BI-CCD) では X 線を電極の逆側から入射するため低エネルギーの X 線に対して高い検出効率を得ることができる。X0, X2, X3 の 3 台が FI-CCD, X1 が BI-CCD である。

²すざくファーストステップガイドより

XISの観測モードは,ClockモードとEditモードという異なる2つのモードから定義される.Clockモードには,NormalとParallel-sum(P-sum)の2通りがある.

- NormalモードはCCDの全てのピクセルを通常8秒周期で読み出す.この場合,露光時間は8秒となる.NormalモードはEditモード(5×5,3×3,2×2のいずれか)と組み合わせることができる.
- P-sumモードは,撮像領域において縦方向に64/128/256列を加算し,一列分ずつデータを読み出す操作を行う.これにより,縦方向の位置情報は失うが,そのかわりに時間情報を得ることができる.時間分解能は加算列数によらず8/1024sec(~8ミリ秒)である.

以下の表 2.1 に XIS の概要を示す.

表 2.1: XIS の概要³

XIS	視野	17'.8 × 17'.8
	エネルギー帯域	0.2~12 keV
	有効画素数	1024×1024
	1画素のサイズ	24μm×24μm
	エネルギー分解能	~130eV@6keV
	有効面積	340cm ² (FI),390cm ² (BI)@1.5keV 350cm ² (FI),100cm ² (BI)@8keV
	時間分解能	8s(Nomal mode),7.8ms(P-Sum mode)

³すざくファーストステップガイドより

第3章 X線観測におけるバックグラウンド

バックグラウンドとは、観測を行う天体以外からの信号のことであり、宇宙からの広がった X 線源 (Cosmic X-ray Background; CXB) と非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background; NXB) に分類される。本研究で扱う NXB は、主に宇宙空間を飛び交う荷電粒子 (宇宙線) が起源となっている。

衛星高度の荷電粒子には、宇宙から飛来する荷電粒子 (宇宙線) が地球磁場によるシールドを抜けて人工衛星高度まで到達するものと、地球磁場によって捕獲された荷電粒子 (陽子, および電子) の 2 種類がある。これら荷電粒子の量は、前者は Cut-off Rigidity, 後者は South Atlantic Anomaly によって決定される。

3.1 Cut-Off Rigidity

宇宙線に対する地磁気のシールド能力を Cut-Off Rigidity (COR) と呼ぶ。COR が高い領域では、一定以下のエネルギーの宇宙線は軌道を曲げられてしまい、検出器のバックグラウンドが低くなる。逆に、COR が低い領域では、検出器のバックグラウンドが高くなる。

図 3.1 に同研究室田丸の「Cut-off Rigidity の可視化による人工衛星運用の学習支援ツールの開発」より作成したすざく高度における COR 強度を表したマップを示す。横軸が緯度、縦軸が経度、COR の強度は単位 GV で表されている。図 3.1 より COR の値は赤道付近が高く、磁極付近が低くなっていることが分かる。

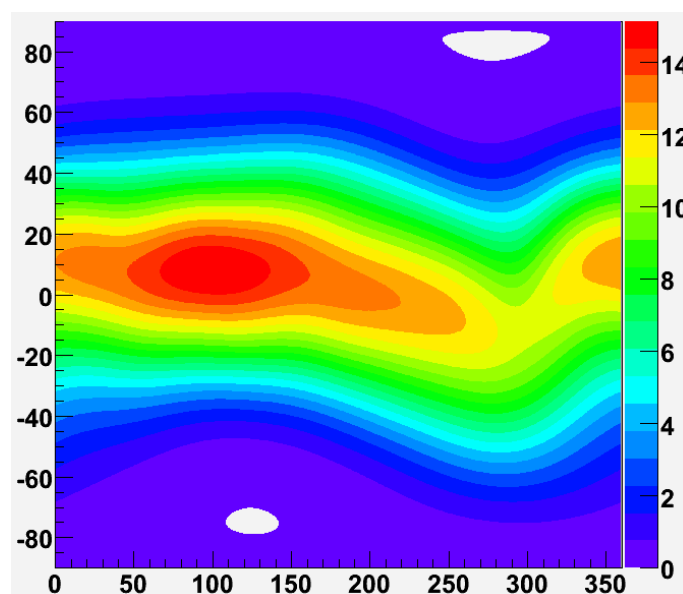


図 3.1: すざく高度での COR 強度

3.2 South Atlantic Anomaly

地球の周辺には太陽風の粒子が地球磁場に捉えられたとして出来たと考えられるバンアレン帯 (Van Allen belt) が存在する. 内帯は陽子の集まりで高度 300 km から 1200km, 外帯は 10000km 程度を下限とする電子の集まりである. 内帯の一部は地磁気を中心と地球の中心とのずれにより, 地球磁場が弱くなっているために, 南大西洋上空に垂れ下がっている. この領域を南太平洋磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly; SAA) と呼ぶ.

この SAA 領域内では, シングルイベント (荷電粒子が半導体中の能動領域を通過する際に回路ノードに雑音電流を与える一時的な現象) と呼ばれる装置等の誤動作を引き起こすことがあるため, 検出器の動作を停止している. 図 3.2 に横軸が緯度, 縦軸が経度の陽子のカウント数のマップを示す.

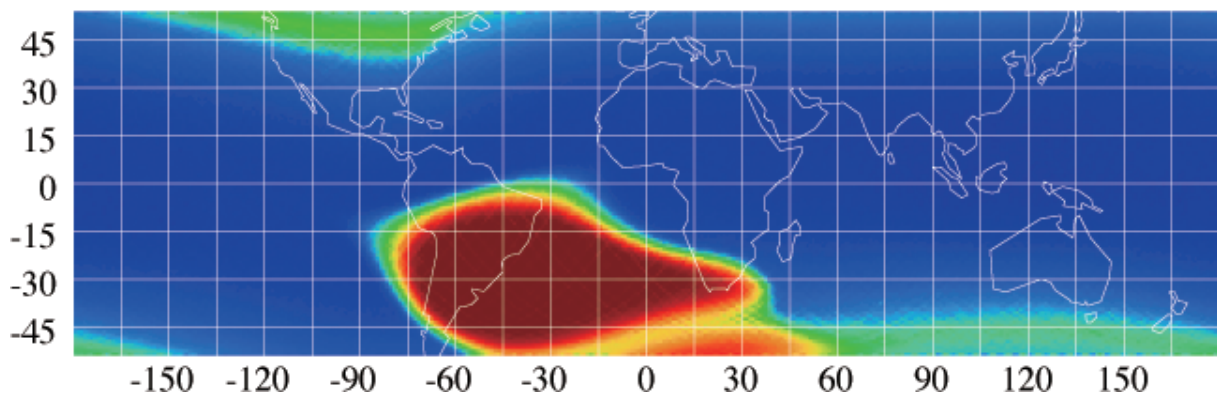


図 3.2: 陽子のカウント数¹(赤が多く, 青が少ない)

¹<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

第4章 人工衛星の軌道計算

4.1 人工衛星の軌道決定について

人工衛星の位置を決定する際には、以下の軌道六要素が必要となる。

- a : 軌道長半径. 楕円の長軸方向の半径
- e : 離心率. 楕円形がどの程度真円に近いかを表現するための数値.
- i : 軌道傾斜角. 地球の赤道面と人工衛星の軌道面がなす角度.
- Ω : 昇交点赤経. 軌道が赤道面を南側から北側に横切る位置 (昇交点) の赤経.
- ω : 近地点引数. 昇交点と軌道の近点が地球の重心から見たときになす角度を天体の運動方向に沿って昇交点からはかったもの.
- M : 平均近点角. 軌道上の衛星の位置を指定する要素で、衛星が近点を通過してからの経過時間を軌道周期に対する割合として表したもの.

軌道傾斜角 i と昇交点赤経 Ω 、近地点引数 ω の関係性を図 4.1 に示す。

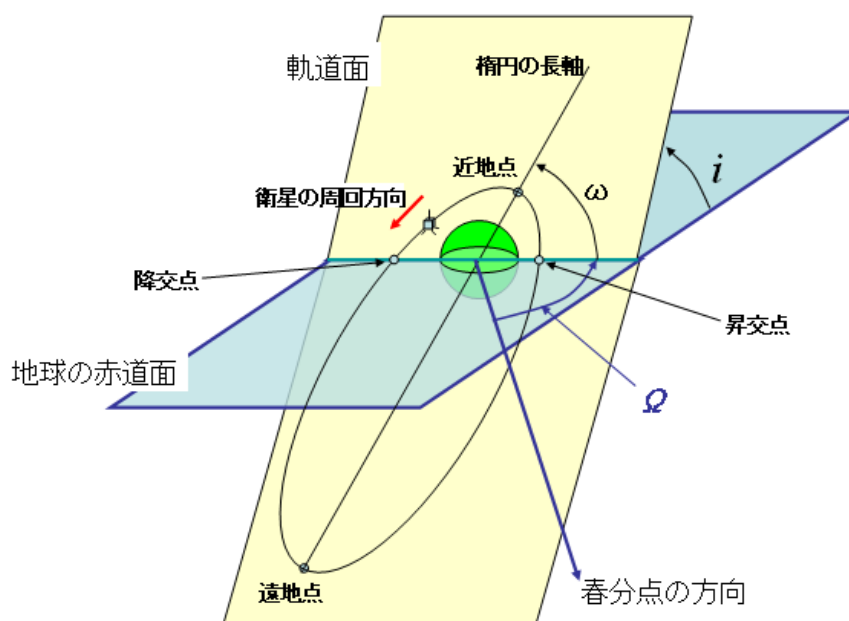


図 4.1: 軌道要素の関係¹

¹Wikipedia 人工衛星の軌道要素より

軌道六要素で衛星の軌道とある時刻における位置を表すことができるが、それと等価な情報を記述する、Two-Line Elements(TLE) という標準的なフォーマットがある。これを NORAD²より取得し、人工衛星の軌道を計算していく。NORAD から取得した本研究の対象であるすざくの軌道要素は以下の通りである。

- 元期 $ET = 2007$ 年 123.47797265 日 (世界時 5 月 3 日 11 時 28 分)
- 近地点引数 $\omega = 181.2841^\circ$
- 軌道傾斜角 $i = 31.4048^\circ$
- 昇交点赤経 $\Omega = 141.0988^\circ$
- 離心率 $e = 0.0006752$
- 平均近点角 $M_0 = 178.7788^\circ$
- 平均運動 $M_1 = 15.00368597(\text{rev/day})$
- 平均運動変化係数 $M_2 = 0.00000482(\text{rev/day}^2)$

図 4.2 に以下で計算していく流れをフローチャートで示す。

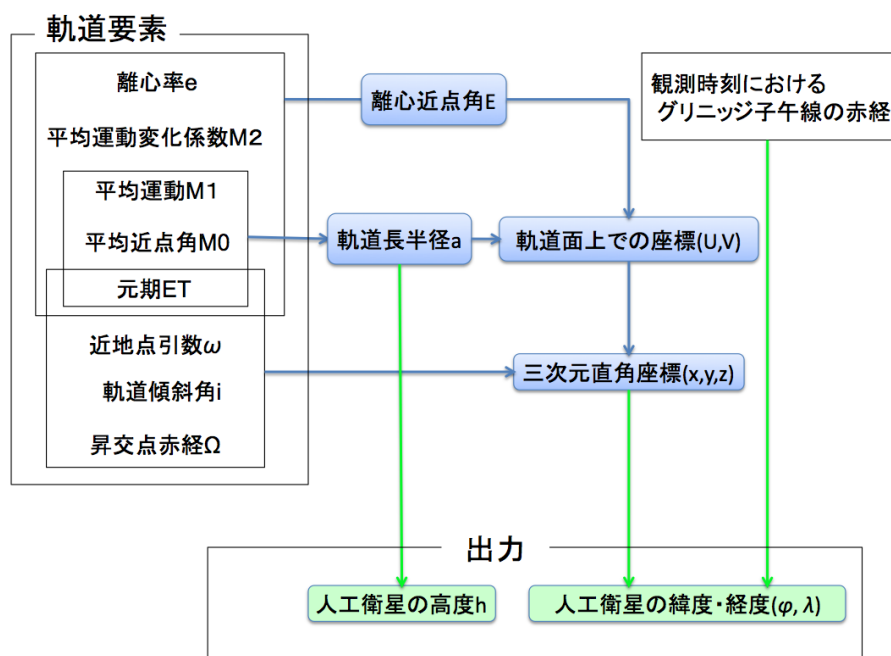


図 4.2: 計算フローチャート

図 4.2 での元期 ET は計算では元期からの経過日数を用いる。また、今回は例として、時刻をすざくが LOCKMANHOLE の観測を開始した時刻 5 月 3 日 23 時 12 分 8 秒 (123.9667592593 日) での緯度、経度、高度を計算していく。軌道長半径 a の計算を 4.2, 離心近点角 E の計算を 4.3, 軌道面上での座標 (U, V) と三次元直角座標 (x, y, z) の計算を 4.4, グリニッジ子午線の赤経の計算を 4.5, 最後に緯度、経度への変換を 4.6 に示す。

²NORAD(北アメリカ航空宇宙防衛司令部):<http://celestrak.com/NORAD/elements/>

4.2 軌道長半径 a の計算

ケプラーの第3法則より、軌道長半径 a を求める。公転周期 T が必要であるが、平均運動 M_1 より逆数を取ることで公転周期 T を求めることができ、

$$a = \left(\frac{GM}{4\pi^2 M_1^2} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (km)} \quad (4.1)$$

と表すことができる、

しかし、平均運動 M_1 は、平均運動変化係数 M_2 が与えられている通り、経過時間により、変化している。したがって元期からの経過日数 Δt より観測時刻の平均運動 M_m は、以下の式で計算できる。

$$M_m = M_1 + M_2 \Delta t \text{ (rev/day)} \quad (4.2)$$

$$= 15.00368597 + 0.00000482 \times (123.9667592593 - 123.47797265) \quad (4.3)$$

$$= 15.003688 \text{ (rev/day)} \quad (4.4)$$

また、係数 GM は、地球周回軌道の人工衛星の場合は $GM = 2.975537 \times 10^{15} \text{ (km}^3/\text{day}^2)$ となっている。

以上を利用し、すざく衛星の軌道長半径 a を求めると、以下のようになる。

$$a = \left(\frac{2.975537 \times 10^{15}}{4\pi^2 \times 15.003688^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 6943.895613 \text{ (km)} \quad (4.5)$$

得られた値から地球の赤道半径 6378.137 (km) の値を引いて、すざく衛星の高度を求めると、 565.758 (km) 上空を周回しているということが分かる。

4.3 離心近点角 E の計算

次にケプラーの第2法則により、離心近点角 E を求める。まず、観測時刻の平均近点角 M を求めなければならない。平均運動 M_m を求めた式を積分し、積分定数として M_0 を与えれば、観測時刻の平均近点角が計算できる。なお、軌道要素における平均近点角 M_0 は、角度で与えられているのでこれを1回転を1とする単位 (rev) に変換しなければならない。

$$M = \frac{M_0}{360^\circ} + M_1 \Delta t + \frac{1}{2} M_2 \Delta t^2 = 298.875242 \text{ (rev)} \quad (4.6)$$

平均近点角 M と離心率 e から離心近点角 E が求まる。

$$E - e \sin E = M \quad (4.7)$$

ケプラーの方程式より、離心近点角 $E = 298.841355^\circ$ となる。

4.4 人工衛星の三次元座標計算

離心近点角 E が求まれば、軌道面上の座標 (U, V) は、以下の式で計算できる。

$$U = a \cos E - ae = 3344.949840 \text{ (km)} \quad (4.8)$$

$$V = a \sqrt{1 - e^2} \sin E = -6082.564614 \text{ (km)} \quad (4.9)$$

次に近地点引数 ω , 軌道傾斜角 i , 昇交点赤経 Ω より三次元直角座標を計算する . この座標系は , 地球重心を原点とし , 赤道面を x - y 平面 , x 軸を春分点の方向 , z 軸を北極の方向とする右手系である . 近地点引数 ω と昇交点赤経 Ω は , 平均運動と同様に日々変化している . その変化は , 軌道傾斜角 i と軌道長半径 a と地球の半径 r との比の関数で以下の式で与えられる .

$$\omega = \omega_0 + \frac{180 \times 0.174(2 - 2.5 \sin^2 i)}{\pi \left(\frac{a}{r}\right)^{3.5}} \Delta t = 186.065725^\circ \quad (4.10)$$

$$\Omega = \Omega_0 - \frac{180 \times 0.174 \cos i}{\pi \left(\frac{a}{r}\right)^{3.5}} \Delta t = 138.009848^\circ \quad (4.11)$$

観測時刻における値を求めた後 , 人工衛星の軌道面上の位置 (U, V) を地球中心の三次元直角座標 (x, y, z) へ変換する . この座標変換には , 三次元回転行列を用いる . まず (U, V) を z 軸回りに ω 回転させ , 続いて x 軸まわりに i , 最後に再度 z 軸回りに Ω 回転させる . これを式で表すと , 以下のようになる .

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -301.929222 \\ -6268.096251 \\ 2967.505660 \end{pmatrix} \text{ (km)} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$(4.13)$$

4.5 観測時刻におけるグリニッジ子午線の赤経計算

三次元座標における x 軸は春分点の方向を表している . したがって , 人工衛星の位置を緯度と経度で表すためには , 観測時刻にグリニッジ子午線がどこを向いているかを赤経で表す必要がある . この赤経の値は角度であるが , 360° を 24 時間とする時刻で表し , これをグリニッジ恒星時と呼んでいる . なおグリニッジ恒星時は , 理科年表や天文年鑑などで調べることができる . 地球の自転周期は 23 時間 56 分 4.09053 秒なので , 地球は一日あたり 1.002737909 回転 (rev/day) していることになる . ある時刻のグリニッジ恒星時が分かれば , それを回転数 θ_0 (rev) で表す . その時刻から観測時刻までの日数 ΔT を求めると , 観測時刻のグリニッジ恒星時が回転数の単位 θ_G (rev) で計算できる .

$$\theta_G = \theta_0 + 1.002737909 \Delta T \text{ (rev)} \quad (4.14)$$

2007 年 1 月 1 日 0 時 0 分 (UTC) のグリニッジ恒星時は 6 時 40 分 7 秒で , それを回転数で表すと , $\theta_0 = 0.277858796$ (rev) となる . 観測時刻を 2007 年 1 月 1 日 0 時 (UTC) からの日数に直すと $123.9667592593 - 1$ 日なので , 上式より , $\theta_G = 123.5812898$ (rev) となる . 角度で表すと 209.2643255° となる .

4.6 人工衛星の緯度・経度計算

観測時刻におけるグリニッジ子午線の赤経が計算できたので , 先に計算した人工衛星の三次元座標を赤道面におけるグリニッジ子午線の方向を x 軸とする座標に変換できる . この変換は , 単に z 軸回りの回転により表すことができる . なお , 注意すべきは回転の方向で , 座標軸を回転させるので負の向きに回転させなければならない .

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\theta_G) & -\sin(-\theta_G) & 0 \\ \sin(-\theta_G) & \cos(-\theta_G) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

緯度経度と三次元座標との関係は、地球を球形とし、人工衛星の地球重心からの距離を r とすると、以下の通りである。

$$X = r \cos \phi \cos \lambda \quad (4.16)$$

$$Y = r \cos \phi \sin \lambda \quad (4.17)$$

$$Z = r \sin \phi \quad (4.18)$$

したがって、緯度経度は以下の計算により求めることができる。

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{Y}{X} = 56.008472^\circ \quad (4.19)$$

$$\phi = \sin^{-1} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} = 26.797631^\circ \quad (4.20)$$

以上により、すざく衛星が LOCKMANHOLE の観測を開始した時刻 5 月 3 日 23 時 12 分 8 秒 (123.9667592593 日) での緯度 = 56.008472° 、経度 = 26.797631° 、高度 = $565.758(\text{km})$ が求められることができた。

また、元期 ET からの経過時間 Δt とグリニッジ恒星時からの経過時間 ΔT の値を変えていくことで、観測時間内のすざく衛星の軌道を計算していくことができる。図 4.3 に作成したすざく衛星の軌道計算プログラムの実行結果例を示す。

観測日時	緯度	経度	高度
2007-05-03 23:12:00	57.837491	25.308617	565795.612640
2007-05-03 23:13:00	61.469390	24.018696	565795.611607
2007-05-03 23:14:00	65.021553	22.632647	565795.610574
2007-05-03 23:15:00	68.495597	21.158487	565795.609541
2007-05-03 23:16:00	71.894406	19.604179	565795.608509
2007-05-03 23:17:00	75.221929	17.977565	565795.607476

図 4.3: プログラム実行結果例

このプログラムにより、観測開始時刻 5 月 3 日 23 時 12 分 8 秒 (123.9667592593 日) から観測終了時刻 5 月 6 日 2 時 0 分 19 秒 (126.08355324074 日) までの緯度、経度、高度を計算した。

第5章 XISデータの解析とライトカーブの作成

5.1 LOCKMANHOLEの観測データ取得

まずはじめに解析したい天体のデータを DARTS¹から取得を行う。
 本研究では衛星の軌道上のバックグラウンドについて解析していくため、目的天体からの X 線放射の少ない LOCKMANHOLE のデータを取得した。
 LOCKMANHOLE は 5 月 3 日 23 時 12 分 8 秒から 5 月 6 日 2 時 0 分 19 秒に観測された天体で、赤経 162.9366°, 赤緯 57.2557° に位置する天体である。

ダウンロードが終わると

```
auxil/   hxd/   xis/   log/
```

というディレクトリができ、xis の下に xis のデータが置かれている。
 xis/のディレクトリの中には

```
xis/event_uf/  ... スクリーニングされていないデータ
xis/event_cl/  ... スクリーニングされたデータ
xis/products/  ... イメージなど
xis/hk/        ... hk ファイルなど
```

が置かれている。event_cl 内のスクリーニングされているデータでは、SAA や夜の地球が入ってくる時間などのデータがあらかじめ抜いてあるため、軌道上の環境によるバックグラウンドを解析していくためには、event_uf 内のスクリーニングされていないデータから解析を行っていく。
 ダウンロードしたデータの /XIS/event_uf/ae102018010xiN_1_3x3n066z_uf.evt.gz(N=0,1,2,3 それぞれの XIS0~3 のデータ) などの中にイベントファイルとして観測データが入っている。

¹DARTS(Data Archives and Transmission System):宇宙科学情報解析センターが運用している、科学衛星データアーカイブス。

5.2 データの除去

取得したスクリーニングされていないデータから軌道上の環境とは関係がないデータを除去していく。以下のデータの除去をNASAのHEASARC²により提供されているソフトウェアパッケージ heasoft³のツール XSELECT, CLEAN SIS を用いて行う。

- GRADE と STATUS による選別 … X線か非X線かを選別する。
- 較正用放射線源 … xis 検出器の偏りを正すための線源。
- マヌーバー … 位置を修正している際のデータ。
- テレメトリー飽和 … 遠隔測定法によるノイズ。
- 昼の地球が入ってくるデータ … 地球に反射して他の天体からのX線を検出してしまう。
- ホットピクセル … X線が入射していても常に高い波高値を出してしまうピクセル。製造行程や放射線ダメージなどにより発生する。
- フリッカリングピクセル … 頻繁にでたらめなタイミングで信号を出すピクセル。

次小節より、それぞれのデータの除去を ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf.evt.gz のイベントファイルを例として説明していく。図 5.1 と図 5.2 にスクリーニングされていない元のデータのイメージと時間毎の X 線カウント数のグラフ (ライトカーブ) を示しておく。

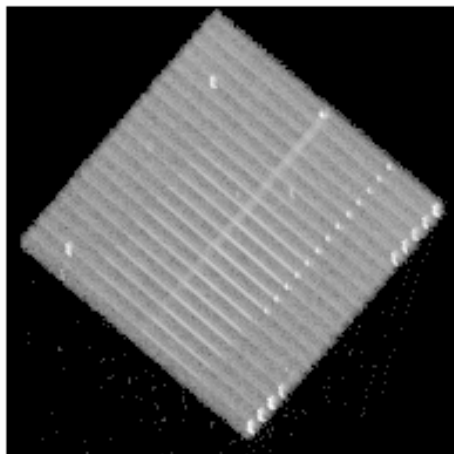


図 5.1: イメージ

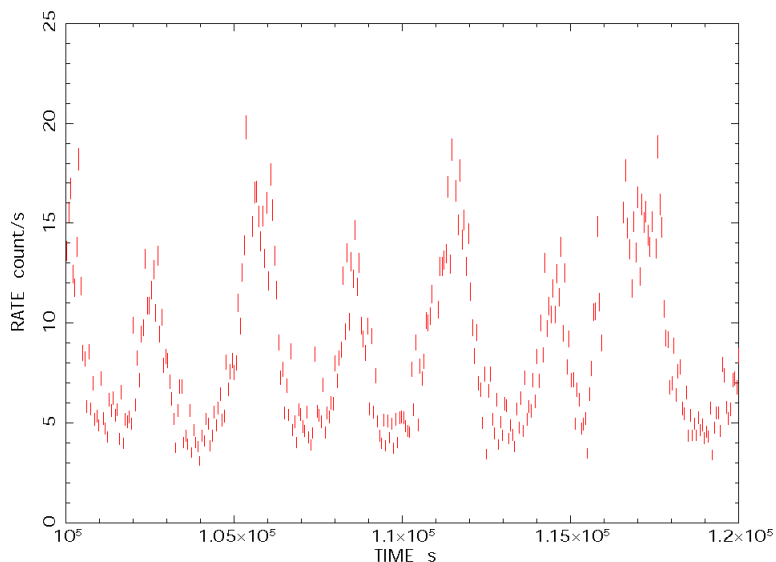


図 5.2: ライトカーブ

²<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

³<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/>

5.2.1 GRADE と STATUS による選別

まず, `xselect` を用いてイベントファイルを読み込み, GRADE と STATUS による選別を行う. 具体的には以下のコマンドにより, X 線イベントである GRADE が 0,2,3,4,6 で STATUS が 0~524287 のデータを選別する.

```
xsel:SUZAKU > set datadir .  
xsel:SUZAKU > read event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf.evt.gz  
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > filter column "GRADE=0:0 2:4 6:6 STATUS=0:524287"  
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > extract event  
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > save event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_GRADE_STATUS.evt  
> Use filtered events as input data file ? >[no] yes
```

図 5.3 と図 5.4 にコマンド実行後のイメージとライトカーブを示す.

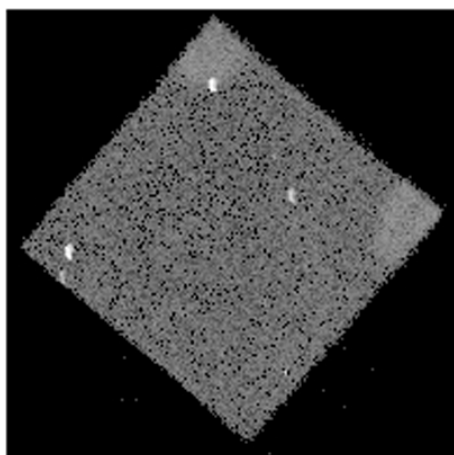


図 5.3: イメージ

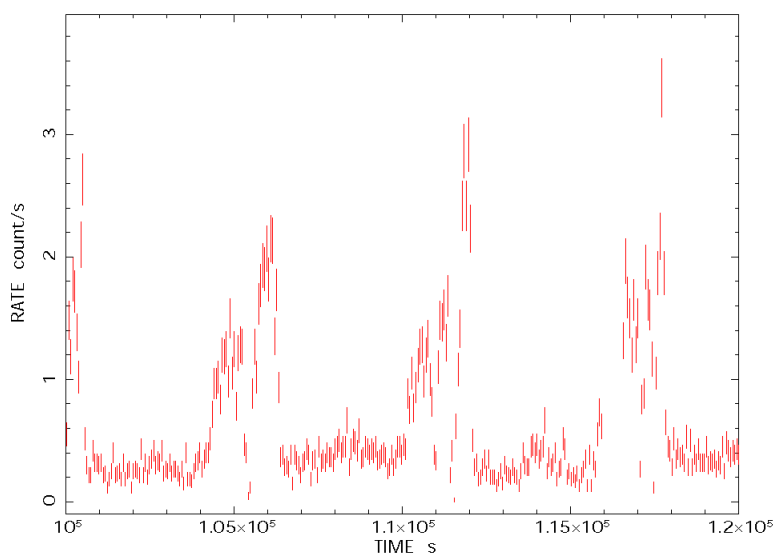


図 5.4: ライトカーブ

5.2.2 較正用放射線源の除去

次に, `xselect` を用いて先程作成した GRADE と STATUS を選別したイベントファイルを読み込み, 較正用放射線源の除去を行う.

以下のコマンドにより, 較正用放射線源ではない GRADE が 0,2,3,4,6 で STATUS が 0~65535,131072~196607,262144:327679 393216:458751 のデータを選別する.

```
xsel:SUZAKU > read event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_GRADE_STATUS.evt
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > filter column "GRADE=0:0 2:4 6:6 STATUS=0:65535 131072:196607
262144:327679 393216:458751"
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > extract event
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > save event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_calsourcecut.evt
> Use filtered events as input data file ? >[no] yes
```

図 5.5 と図 5.6 にコマンド実行後のイメージとライトカーブを示す. 前小節と比べるとイメージの右部と上部にあった色が濃い部分 (較正用放射線源) が取り除かれているのがよく分かる.

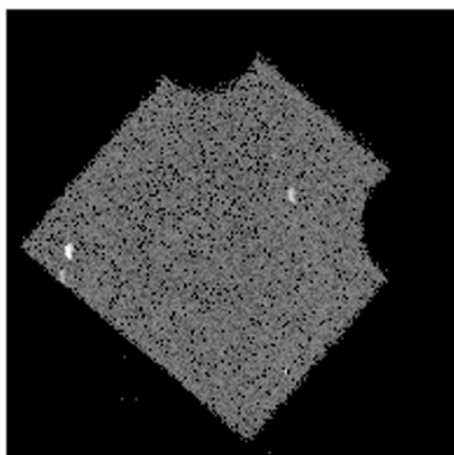


図 5.5: イメージ

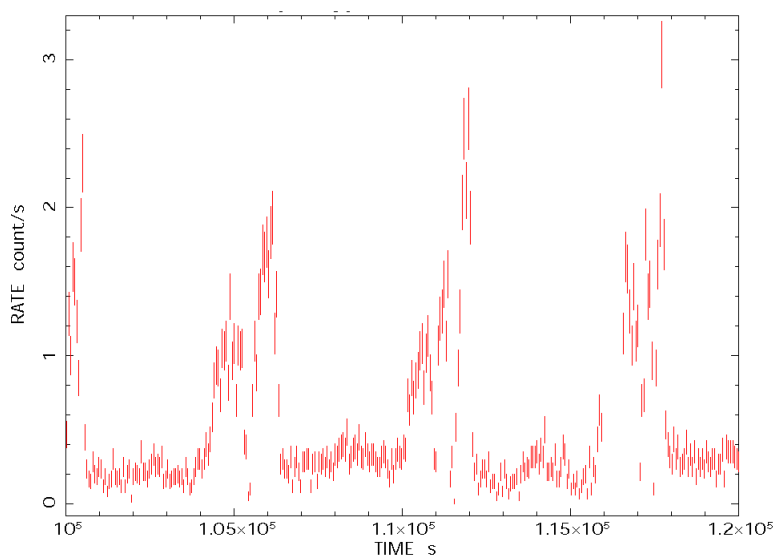


図 5.6: ライトカーブ

5.2.3 マヌーバーの除去

次に,xselect を用いて先程作成した較正用放射線源を除去したイベントファイルと auxil/内にある ae102018010.hk.gz を読み込み, マヌーバーの除去を行う.

```
xsel:SUZAKU > read event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_calsourcecut.evt
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > read hk hkfiles=ae102018010.hk.gz expand=yes
> HK file directory >[./]
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > select hk "AOCU_HK_CNT3_NML_P==1"
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > extract event
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > save event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_gsmnvcut.evt
> Use filtered events as input data file ? >[no] yes
```

図 5.7 と図 5.8 にマヌーバー除去を行った後のイメージとライトカーブを示す. 前小節と比べてみても変わらぬイベント数であり,ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf.evt.gz ではマヌーバーによる雑音は発見されなかった.

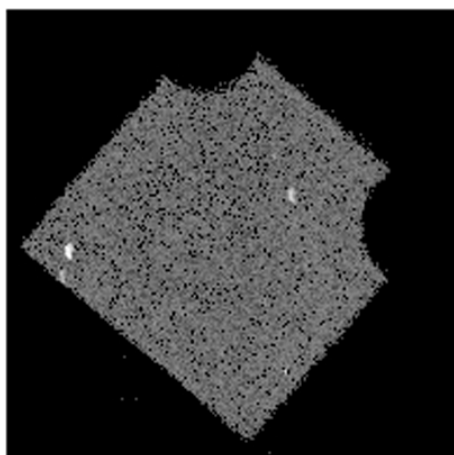


図 5.7: イメージ

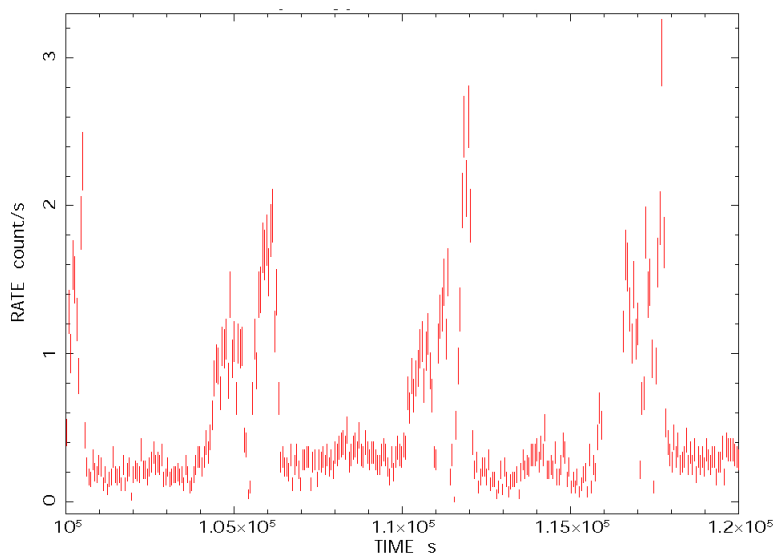


図 5.8: ライトカーブ

5.2.4 テレメトリー飽和の除去

次に,xselect を用いて先程作成したマヌーバーを除去したイベントファイルと xis/hk/内にある ae102018010xi0_0.hk.gz を読み込み,遠隔測定法によるノイズであるテレメトリー飽和の除去を行う.

```
xsel:SUZAKU > read event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_gsmnvcut.evt
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > read hk hkfiles=ae102018010xi0_0.hk.gz expand=yes
> HK file directory >[./]
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > select hk "S0_DTRATE>3"
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > extract event
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > save event ae102018010xi0_0_3x3n066z_uf_dtratecut.evt
> Use filtered events as input data file ? >[no] yes
```

図 5.9 と図 5.10 にテレメトリー飽和の除去を行った後のイメージとライトカーブを示す.これも前小節と変わらぬイベント数であり,ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf.evt.gz ではテレメトリー飽和による雑音は発見されなかった.

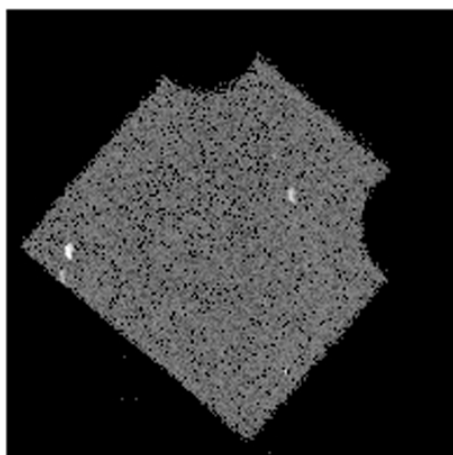


図 5.9: イメージ

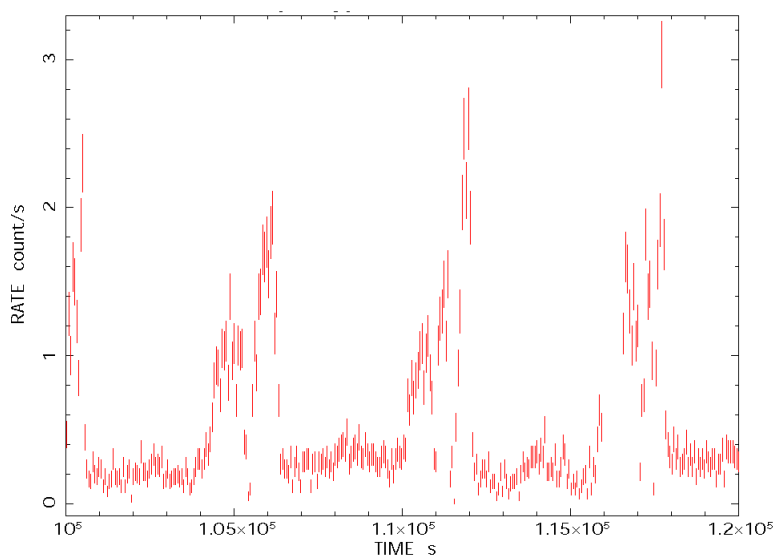


図 5.10: ライトカーブ

5.2.5 昼の地球が入ってくるデータの除去

次に, `xselect` を用いて, 先程作成したテレメトリ飽和の除去をしたイベントファイルと `auxil/` 内にある `ae102018010.ehk.gz` を読み込み, 昼の地球が入ってくるデータの除去を行う。

具体的には以下のコマンドにより, すざく衛星から目標天体への方向と昼の地球のはじめの角度 (ELEVATION ANGLE) が 20 度以上という条件を課す。

```
xsel:SUZAKU > read event ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf_dtratecut.evt
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > read hk hkfiles=ae102018010.ehk.gz expand=yes
> HK file directory >[./]
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > select hk "DYE_ELV>20"
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > extract event
xsel:SUZAKU-XIS0-STANDARD > save event ae102018010xi0_0_3x3n066z_uf_dye_elvcut.evt
> Use filtered events as input data file ? >[no] no
```

図 5.11 と図 5.12 に昼の地球が入ってくるデータの除去を行った後のイメージとライトカーブを示す。前小節と比べてみると, ライトカーブの X 線カウント数が多い時間帯のデータが除去されているのが分かる。また, このことから昼の地球が入ってくると目標天体以外からの X 線が多く検出されてしまうことも分かる。

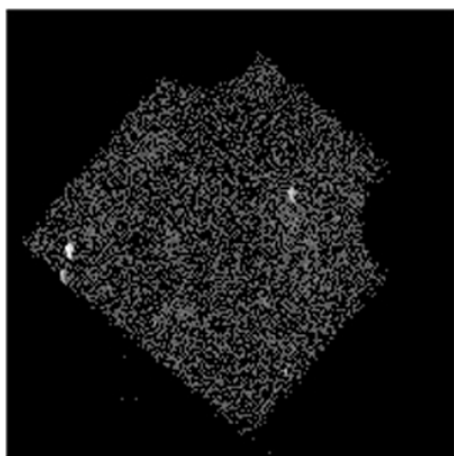


図 5.11: イメージ

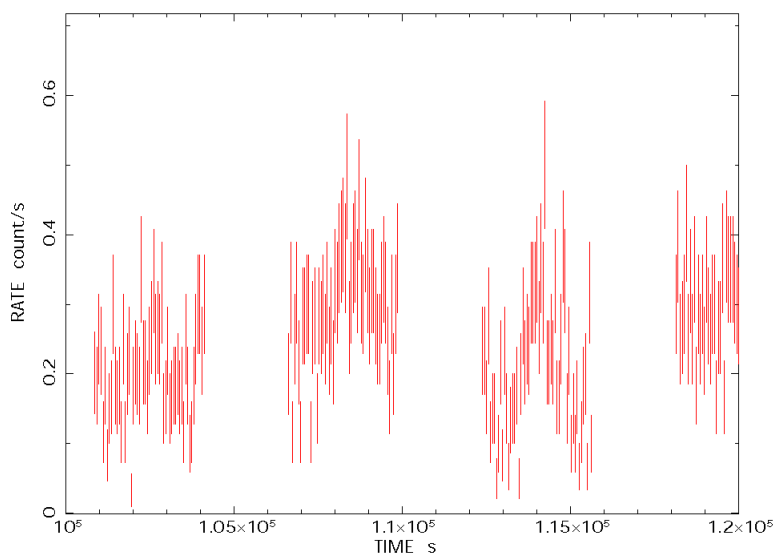


図 5.12: ライトカーブ

5.2.6 ホットピクセル,フリッカリングピクセルの除去

最後に,CLEANSIS を用いて,CCD カメラ特有のホットピクセル,フリッカリングピクセルの除去を行う.

```
unix% cleansis datafile=ae102018010xi0_0_3x3n066z_uf.dye_elvcut.evt
      outfile=ae102018010xi0_1_3x3n066z_cleansis.evt
      cellsize=5 logprob=-.53E+01 bthresh=3
      phamin=0 phamax=4095
      chipcol=SEGMENT
```

図 5.13 と図 5.14 にホットピクセル,フリッカリングピクセルの除去を行った後のイメージとライトカーブを示す.

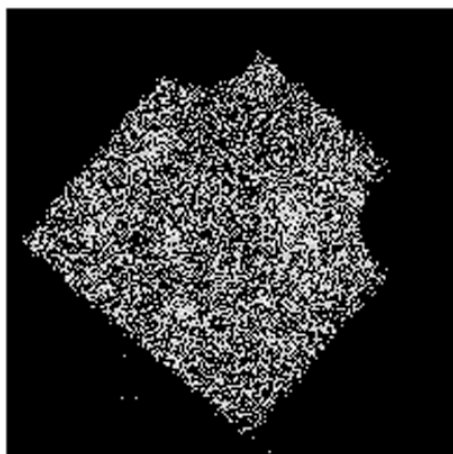


図 5.13: イメージ

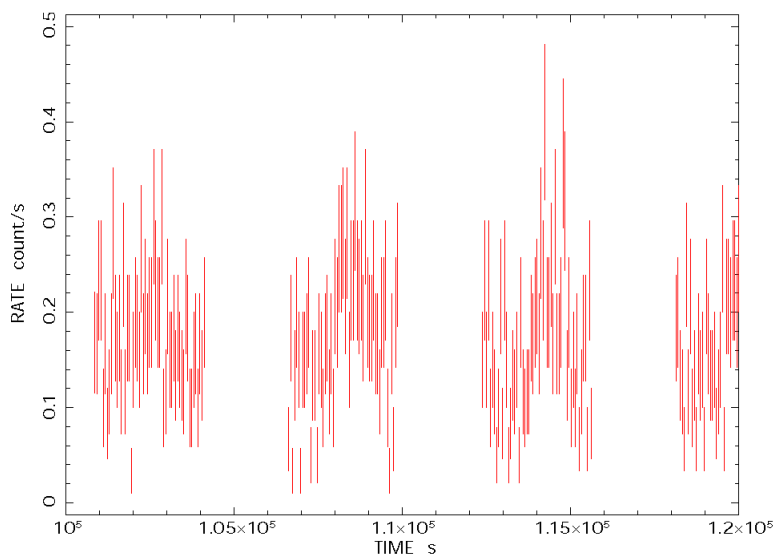


図 5.14: ライトカーブ

以上により衛星の軌道上の環境によるバックグラウンドを抽出することができる.

今回は ae102018010xi0_1_3x3n066z_uf.evt.gz のイベントファイルについてのデータの除去を行ったが,実際には XIS0,XIS1,XIS3 のそれぞれのデータをまとめて読み込み,3回の除去を行った.

5.3 ライトカーブの作成

第3章で記述したCORについては、すざくの高度について calibration database (caldb) についてデータが作成・保存されている。これを *Suzaku* ftools⁴の fdump というコマンドを用いて LOCKMANHOLE の観測時刻についてのCORを抽出し、図5.15に前節で作成したXIS 3台の解析結果を同時に表示させた。両者の変動を比較すると、バックグラウンドとCORの相関がよく分かる。

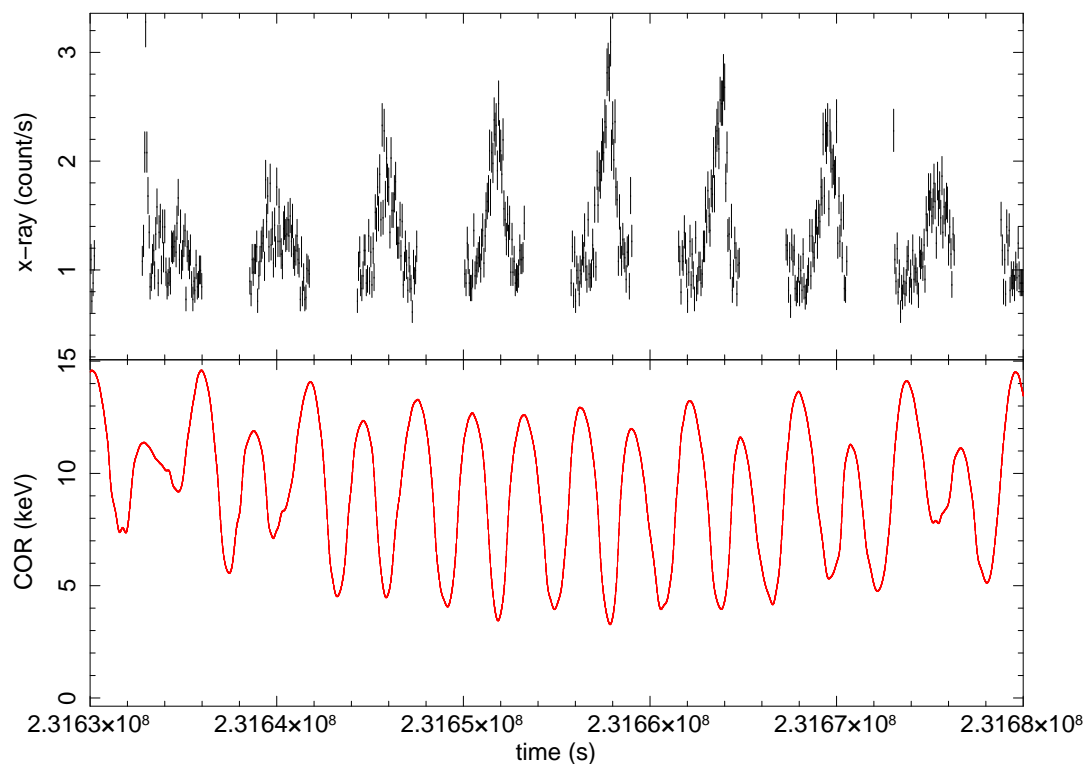


図 5.15: ライトカーブ

⁴<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/>

第6章 Google Earthを用いた視覚化

衛星軌道の表現には, 位置情報など様々な機能を付加させる KML 言語が利用できる Google Earth¹を用いて行った.

6.1 すざく衛星の軌道の表示

第4章で述べた計算を用い, 観測時刻毎の緯度, 経度, 高度を KML 言語で記述するプログラムの作成をおこなった. 実行結果を図 6.1 に示す. また, KML 言語での記述方法については付録 A.1 に示す.

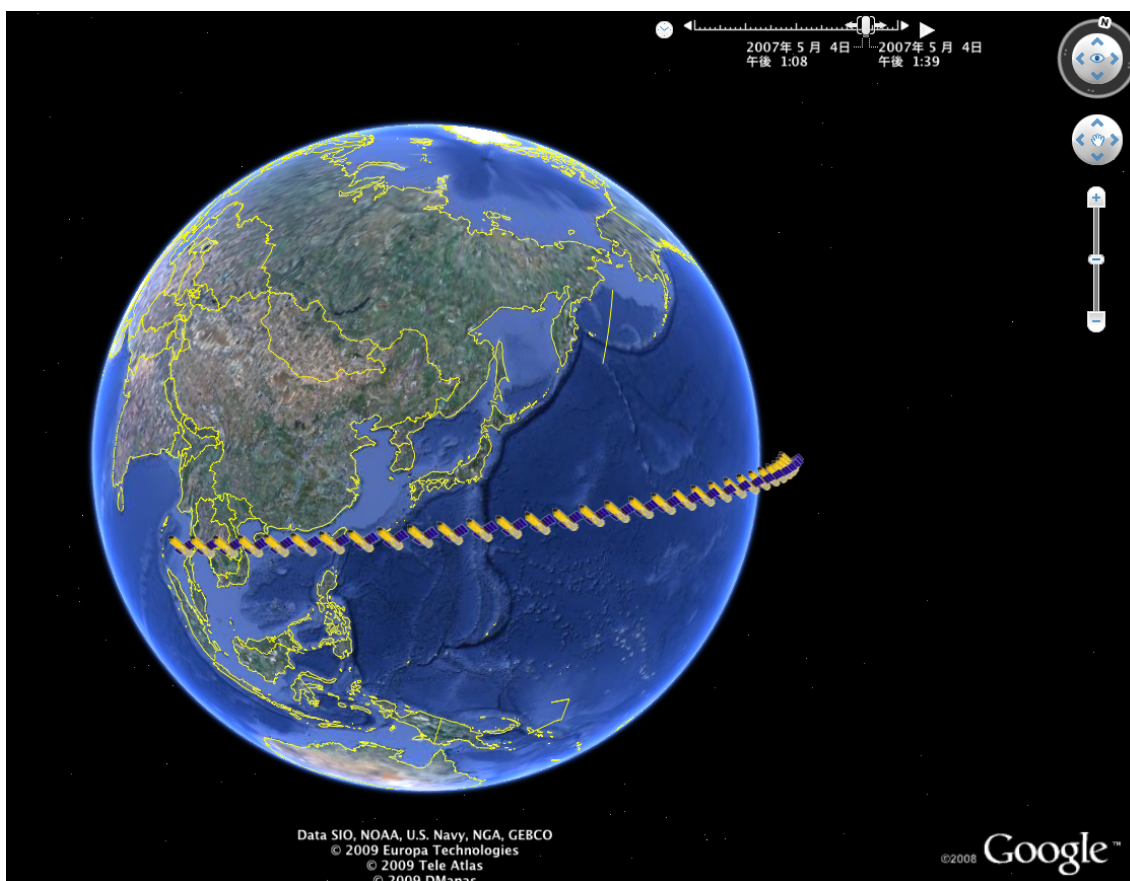


図 6.1: すざく衛星の軌道の可視化

これで, すざく衛星の軌道を表現することができたが, 一つの KML ファイルで実行すると, Google

¹Google 社が無料で配布しているバーチャル地球儀ソフト

Earth の機能上, 衛星の移動が早くなってしまふ. そのため, 実際には KML ファイルを一定時間ごとに区切り使用することにした.

6.2 軌道上バックグラウンドの表示

前節で作成したプログラムに, 第 5 章で得られた観測時刻毎のバックグラウンド量と Cut-off Rigidity の強度のグラフを KML 言語で追加し, 軌道上バックグラウンドを表現した. 図 6.2 に完成したツールを示す. このように左上のパネルに LOCKMAN HOLE のデータに基づいた XIS の軌道上バックグラウンドの変化を示した. このパネル上で Google Earth の時間情報をすざく衛星の地球上での位置と連動させたタイムバーが移動するように KML 言語で記述した. また, KML 言語での記述方法については付録 A.2, 作成したプログラムは付録 B に示す.

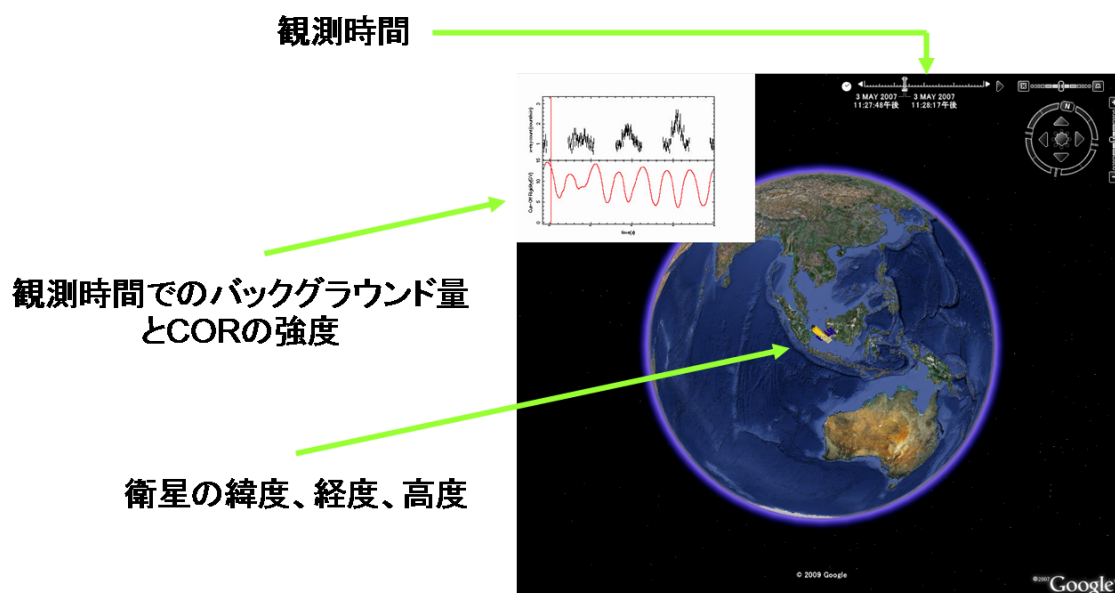


図 6.2: すざく衛星軌道と軌道上バックグラウンドの可視化

第7章 まとめ

本研究では, すぐく衛星軌道上でのバックグラウンド量を可視化を行った. このツールにより, X線観測における環境での影響についての学習を支援することができる.

また, 同研究室田丸の研究「Cut-off Rigidity の可視化による人工衛星運用の学習支援ツールの開発」と合わせると, より視覚的に衛星の軌道上の環境を表現することができるようになる.

図 7.1 に Cut-off Rigidity の可視化による人工衛星運用の学習支援ツールの開発」との組み合わせ結果を示す.

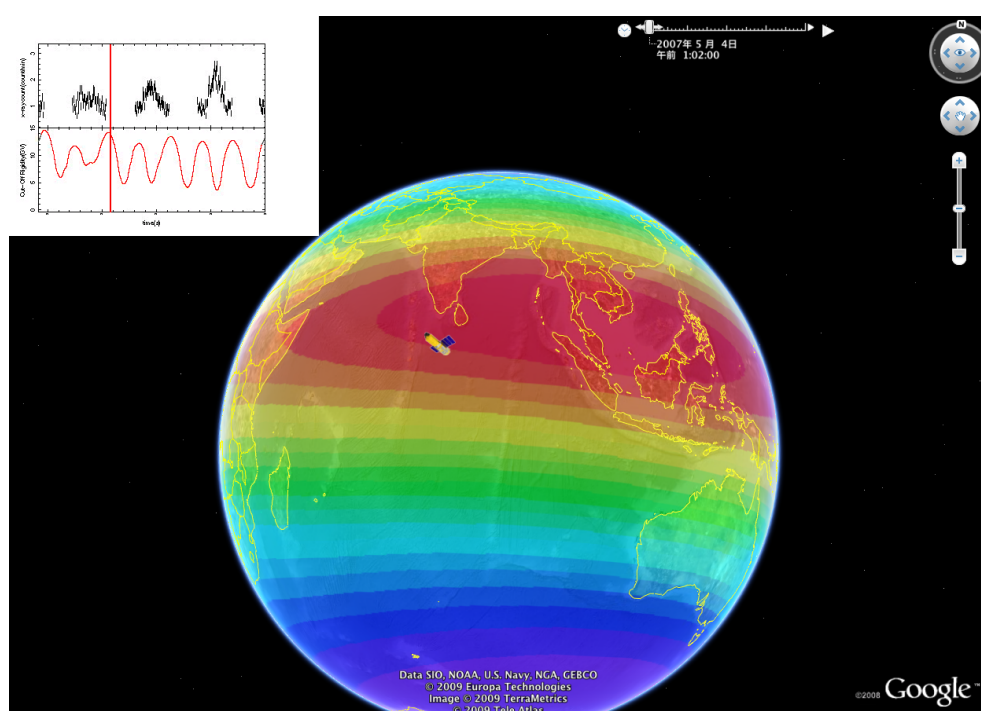


図 7.1: COR の可視化との組み合わせ画像

付 録 A KML 言語

Google Earth への搭載には, 位置情報など様々な機能を付加させることができる KML 言語を利用した.

A.1 すざく衛星軌道の Google Earth への表示

A.1.1 衛星の位置情報

衛星の位置情報はプレスマークという機能を用い, Google Earth に搭載させた。以下に KML 言語に直した位置情報の例を示す.

```
<Placemark>
  <styleUrl>#msn_suzaku</styleUrl>← アイコンの決定
  <Point>
    <altitudeMode>relativeToGround</altitudeMode>
    <coordinates>57.837491,25.308617,565795.612640</coordinates>← 緯度, 経度, 高度の情報
  </Point>
</Placemark>
```

A.1.2 時間の指定

衛星の位置を時間の推移によって表示させたり, 非表示にさせたりするためにはタイムスケールという機能を追加しなければならない.

以下に示す例のようにタイムスケールを Placemark の環境内に付加させる.

```
<TimeStamp>
  <when>2007-05-03 T23:12:00Z</when>← 時間の決定
</TimeStamp>
```

A.2 バックグラウンド量の Google Earth への表示

A.2.1 グラフの表示

グラフを画面に固定した状態で表示させるにはスクリーンオーバーレイを使う。また, グラフを表示させる際にも時間推移によってグラフの変更が必要なため, タイムスケールを利用してグラフ

の表示を行う。以下にグラフの表示例を示す。

```
<ScreenOverlay>
  <name>graph</name>
  <Time Span>
    <begin>2007-05-02 T23:12:00</begin>← 表示開始時刻
    <end>2007-05-03 T04:59:00</end>← 表示終了時刻
  </Time Span>
  <Icon>
    <href>files/X-ray1.jpg</href>← ファイル指定
  </Icon>
  <overlayXY x="0" y="1" xunits="fraction" yunits="fraction"/>← 画像の位置指定
  <screenXY x="0" y="1" xunits="fraction" yunits="fraction"/>← スクリーンの位置の指定
</ScreenOverlay>
```

A.2.2 タイムバーの表示

衛星がグラフ内のどの時点と連動するかを示すためのタイムバーの表示が必要となる。タイムバーの表示にもグラフ表示の際に利用したスクリーンオーバーレイとタイムスケールを用いる。以下にタイムバーの表示例を示す。

```
<ScreenOverlay>
  <name>time bar</name>
  <drawOrder>1</drawOrder>← グラフとの重ね合わせの優先度
  <TimeStamp>
    <when>2007-05-03 T23:12:00Z</when>← 時間の決定
  </TimeStamp>
  <Icon>
    <href>files/red.gif</href>← ファイル指定
  </Icon>
  <overlayXY x="0.5" y="0.5" xunits="fraction" yunits="fraction"/>
  <screenXY x="45.000000" y="767" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
  <size x="0.001" y="0.235" xunits="fraction" yunits="fraction"/>← サイズ指定
</ScreenOverlay>
```

付 録 B KML 作成プログラム

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
double kml(double ,int *,int *,int *,FILE *,int ,double *);
int main(void){
double del_t,bar;
int min,day,hour,Num,loop;
FILE *fp;
del_t = 0;
bar = 45;
min=12;
hour=23;
day =3;

loop = 48;
fp =fopen("suzaku_1.kml","w");
del_t = kml(del_t,&min,&hour,&day,fp,loop,&bar);

loop = 60;
fp =fopen("suzaku_2.kml","w");
del_t = kml(del_t,&min,&hour,&day,fp,loop,&bar);
fp =fopen("suzaku_3.kml","w");
del_t = kml(del_t,&min,&hour,&day,fp,loop,&bar);
fp =fopen("suzaku_4.kml","w");
del_t = kml(del_t,&min,&hour,&day,fp,loop,&bar);
fp =fopen("suzaku_5.kml","w");
del_t = kml(del_t,&min,&hour,&day,fp,loop,&bar);
fp =fopen("suzaku_6.kml","w");
del_t = kml(del_t,&min,&hour,&day,fp,loop,&bar);

return 0;
}
double kml(double del_t,int *min,int *hour,int *day,FILE *fp,int loop,double *bar){
double M_0,M_1,M_2,i,omega_0,OMEGA_0,E,r;
double t,M_M,GM,M,a,Ec,Ek,Mk,U,V,i_r,omega,OMEGA,omega_r,OMEGA_r,x,y,z;
double T,th_0,th_G,th_Gr,X,Y,Z,xyz,h,phi,lambda;

```

```

int Num;
fprintf(fp,"<?xml version=\"1.0\" encoding=\"UTF-8\"?>\n");
fprintf(fp,"<Document>\n<name>SUZAKU 2007年5月%d日 %d:0%d ~ </name>\n",*day,*hour,*min);
fprintf(fp,"<StyleMap id =\"msn_suzaku\">\n");
fprintf(fp,"<Pair>\n<t<key>normal</key>\n<t<styleUrl>#sn_suzaku</styleUrl>\n</Pair>\n\n");
fprintf(fp,"<Pair>\n<t<key>highlight</key>\n<t<styleUrl>#sh_suzaku</styleUrl>\n</Pair>\n</StyleMap>\n\n");

fprintf(fp,"<Style id=\"sh_suzaku\">\n");
fprintf(fp,"<IconStyle>\n<t<scale>4</scale>\n<t<Icon><href>files/suzaku.png</href></Icon>\n</IconStyle>\n</Style>\n\n");
fprintf(fp,"<Style id=\"sn_suzaku\">\n<t<IconStyle>\n<t<scale>4</scale><Icon><href>files/suzaku.png</href></Icon>\n");
fprintf(fp,"</IconStyle>\n</Style>\n\n");

fprintf(fp,"<ScreenOverlay>\n");
fprintf(fp,"<name>graph</name>\n");
fprintf(fp,"<Icon><href>files/X-ray1.jpg</href></Icon>\n");
fprintf(fp,"<overlayXY x=\"0\" y=\"1\" xunits=\"fraction\" yunits=\"fraction\"/>\n");
fprintf(fp,"<screenXY x=\"0\" y=\"1\" xunits=\"fraction\" yunits=\"fraction\"/>\n");
fprintf(fp,"</ScreenOverlay>\n\n");

for(Num=0;Num<= loop;Num++){
if(*min>=60){
*hour = *hour +1;
*min= *min-60;
}
if(*hour >= 24){
*hour = *hour-24;
*day = *day+1;
}

M_0 = 178.7788; //平均近点角
M_1 = 15.00368597; //平均運動
M_2 = 0.00000482; //平均運動变化率
i = 31.4048; //軌道傾斜角
omega_0 = 181.2841; //近地点引数
OMEGA_0 = 141.0988; //昇交点赤経
E= 0.0006752; //離心率
t = 0.4887866 + del_t; //経過時間
T = 123.9667592593 - 1 + del_t; //観測時刻を2007年の1月1日0時(UT)からの経過

```

日数に直す

```
th_0 = 0.2782488; //グリニッジ恒星時 6.6779712 時  
r=6378.1; //地球の半径
```

```
/* 軌道長半径の計算 */
```

```
M_M = M_1 + M_2*t;  
GM = 2.975537 * pow(10,15);  
a = cbrt(GM / (4 * pow(M_PI,2) * pow(M_M,2))); //軌道長半径
```

```
/* 離心近点角の計算 */
```

```
M = M_0/360 + M_1 * t + M_2/2 * pow(t,2);  
M = M - floor(M);
```

```
M = M*360;
```

```
Mk = M * M_PI/180; //平均近点角 (rad)
```

```
/* ケプラーの方程式 */
```

```
Ec = Mk + E * sin(Mk);
```

```
while(1){
```

```
Ek = Mk + E * sin(Ec);
```

```
if(fabs(Ek - Ec )< 0.00000000001){
```

```
break;
```

```
}
```

```
Ec = Ek;
```

```
}
```

```
/*地球を中心とする人工衛星の三次元座標計算*/
```

```
U = a *cos(Ec) - a * E;
```

```
V =a* sqrt(1-pow(E,2))*sin(Ec);
```

```
i_r = i * 3.1415 / 180; //軌道傾斜角の rad
```

```
omega = omega_0 + (180*0.174*(2-2.5*pow(sin(i_r),2)))/(M_PI* pow(a/r,3.5))* t;
```

```
OMEGA = OMEGA_0 - (180 * 0.174*cos(i_r))/(M_PI* pow(a/r,3.5))*t;
```

```
omega_r = omega * M_PI / 180;
```

```
OMEGA_r = OMEGA * M_PI / 180;
```

```
x = ((cos(OMEGA_r)*cos(omega_r)) - (sin(OMEGA_r)*sin(omega_r)*cos(i_r)))*U-
```

```
((cos(OMEGA_r)*sin(omega_r))+sin(OMEGA_r)*cos(i_r)*cos(omega_r))*V;
```

```
y = (sin(OMEGA_r)*cos(omega_r) + cos(OMEGA_r)*cos(i_r)*sin(omega_r))*U+
```

```
(cos(omega_r)*cos(OMEGA_r)*cos(i_r)-sin(omega_r)*sin(OMEGA_r))*V;
```

```
z = sin(i_r)*sin(omega_r)*U+sin(i_r)*cos(omega_r)*V;
```

```

/* 赤経計算 */
th_G = th_0 + 1.002737909 *T;
th_G = (th_G - floor(th_G))*360;
th_Gr = th_G * M_PI / 180;

/* 緯度、経度計算 */
X = cos(-1 * th_Gr)* x - sin(-1*th_Gr)*y;
Y = sin(-1 * th_Gr)* x + cos(-1*th_Gr)*y;
Z = z;

xyz= sqrt(pow(X,2)+pow(Y,2)+pow(Z,2));
h = (a - r) *1000;

phi = asin(Z/xyz);
phi = phi * 180 / M_PI;
lambda = atan2(Y,X);
lambda = lambda * 180 / M_PI;

/*タイムバー*/
fprintf(fp,"<ScreenOverlay>\n");
fprintf(fp,"<name>time bar</name>\n");
fprintf(fp,"<drawOrder>1</drawOrder>\n");

if(*hour < 10 && *min < 10){
fprintf(fp,"\t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T0%d:0%d:00Z
</when>\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}
else if(*min < 10 && *hour >= 10){
fprintf(fp,"\t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T%d:0%d:00Z
</when>\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}
else if(*min>=10 && *hour<10){
fprintf(fp,"\t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T0%d:%d:00Z
</when>\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}
else{
fprintf(fp,"\t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T%d:%d:00Z
</when>\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}

fprintf(fp,"<Icon><href>files/red.gif</href></Icon>\n");
fprintf(fp,"<overlayXY x=\"0.5\" y=\"0.5\" xunits=\"fraction\" yunits=\"fraction\"/>\n");

```

```
fprintf(fp,"<screenXY x=\"%f\" y=\"767\" xunits=\"pixels\" yunits=\"pixels\"/>\n",*bar);
fprintf(fp,"<rotationXY x=\"0.5\" y=\"0.5\" xunits=\"fraction\" yunits=\"fraction\"/>\n");
fprintf(fp,"<size x=\"0.001\" y=\"0.235\" xunits=\"fraction\" yunits=\"fraction\"/>\n");
fprintf(fp,"</ScreenOverlay>\n\n");
```

```
/*衛星の位置*/
```

```
fprintf(fp,"<Placemark>\n\t<drawOrder>1</drawOrder>\n\t<styleUrl>
#msn_suzaku</styleUrl>\n");
if(*hour < 10 && *min < 10){
fprintf(fp,"<t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T0%d:0%d:00Z</when>
\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}
else if(*min < 10 && *hour >= 10){
fprintf(fp,"<t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T%d:0%d:00Z</when>
\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}
else if(*min>=10 && *hour<10){
fprintf(fp,"<t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T0%d:%d:00Z</when>
\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}
else{
fprintf(fp,"<t<TimeStamp>\n\t\t<when>2007-05-0%d T%d:%d:00Z</when>
\n\t</TimeStamp>\n\n",*day,*hour,*min);
}

fprintf(fp,"<t<Point>\n\t\t<altitudeMode>relativeToGround</altitudeMode>
\n\t\t<coordinates>%f,%f,%f</coordinates>\n\t</Point>\n
</Placemark>\n",lambda,phi,h);
printf("%f\t%f\t%f\t%f\n",del_t,lambda,phi,h);
del_t = del_t + 0.0006944444444444; /*1min*/
*min = *min + 1;
*bar = *bar + 0.827;

}

fprintf(fp,"</Document>");
fclose(fp);
return del_t;
}
```


関連図書

- [1] Mitsuda, K., et al.2007, PASJ, 59, 1
- [2] Koyama, K., et al.2007, PASJ, 59, 23
- [3] すざくヘルプ編「すざく解析マニュアル」
http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep/suzaku_fstep081117.pdf
- [4] 海老沢 研 講義ノート (東京大学)2008
<http://plain.isas.jaxa.jp/~ebisawa/TEACHING/2008Komaba/2008Komaba.pdf>
- [5] 中本 創 卒業論文 (広島大学) 2006
<http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/thesis/hajime2005.pdf>
- [6] 高木 方隆 人工衛星位置推算の実際 (高知工科大学)
<http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/takagi/RSGIS/5Estimation2.pdf>
- [7] Screening criteria for the XIS data in the version 2.0 processing
http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/process/v2changes/criteria_xis.html
- [8] 内部 高志, 森田アンナ, 茜丸著「Google Earth コンテンツ&アプリ作成ガイドブック」技術評論社
- [9] 田丸 篤志 卒業論文 (芝浦工業大学) 作成中

表 目 次

2.1 XIS の概要 ³	5
--------------------------------	---

目 次

2.1	すざく衛星 ¹	3
2.2	すざくの内部構造 ¹	3
2.3	XIS 検出器 ²	4
3.1	すざく高度での COR 強度	7
3.2	陽子のカウント数 ¹ (赤が多く, 青が少ない)	8
4.1	軌道要素の関係 ¹	9
4.2	計算フローチャート	10
4.3	プログラム実行結果例	13
5.1	イメージ	16
5.2	ライトカーブ	16
5.3	イメージ	17
5.4	ライトカーブ	17
5.5	イメージ	18
5.6	ライトカーブ	18
5.7	イメージ	19
5.8	ライトカーブ	19
5.9	イメージ	20
5.10	ライトカーブ	20
5.11	イメージ	21
5.12	ライトカーブ	21
5.13	イメージ	22
5.14	ライトカーブ	22
5.15	ライトカーブ	23
6.1	すざく衛星の軌道の可視化	25
6.2	すざく衛星軌道と軌道上バックグラウンドの可視化	26
7.1	COR の可視化との組み合わせ画像	27