

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

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

Visualization of the Global Geomagnetic Cut-off Rigidity on
Google Earth

P04087

たまる あつし

田丸 篤志

指導教員：久保田 あや 講師

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	宇宙線と地球磁場	3
2.1	宇宙線と人工衛星	3
2.1.1	宇宙線とは	3
2.1.2	衛星の運用、解析と宇宙線	4
2.2	地磁気とは	6
2.3	磁気双極子近似	6
2.4	磁気の変化	7
2.4.1	永年変化	7
2.4.2	日変化	8
第 3 章	Cut-off Rigidity	9
3.1	Cut-off Rigidity とは	9
3.2	地球磁場によるシールド原理	9
3.3	Cut-off Rigidity の算出	10
3.3.1	地場分布モデル	10
3.3.2	Cut-off Rigidity の計算	10
第 4 章	開発 — Cut-off Rigidity の計算	13
4.1	オリジナルプログラム	13
4.1.1	コンパイルと実行	14
4.1.2	プログラムの動作	14
4.2	変更後のプログラム	16
4.2.1	コンパイルと実行	16
4.2.2	プログラムの変更点	16
4.2.3	プログラムの動作	17
第 5 章	COR の可視化	21
5.1	視覚化ツールの選定	21
5.1.1	Google Earth の利用	21
5.1.2	オーバーレイ画像の仕様の要求	21
5.2	ROOT による COR コントアマップの作成	22
5.2.1	ROOT の利用	22
5.2.2	COR コントアマップの作成	22
5.2.3	さまざまな高度での COR の可視化	23
5.2.4	画像の仕様要求と結果	24
5.3	Google Earth へのオーバーレイ	33

5.4 考察	36
第 6 章 まとめ	39
6.1 まとめ	39
付 録 A COR 計算プログラムのソースコード	41
付 録 B ROOT に用いるマクロ	51

第1章 はじめに

宇宙に存在する天体からは X 線や赤外線などの電磁波が放射されており、これを観測することで光学観測では得られない様々な情報を得ることができる。しかし、こうした可視光以外の電磁波は地球大気中の水蒸気などに吸収されてしまうため、人工衛星を用いた地球大気圏外での観測が適している。実際近年は、人工衛星による観測が行われ大きな成果を挙げている。

こうした人工衛星は宇宙空間で宇宙線（2.1.1 章）や放射線帯などにさらされ、これらは人工衛星の運用面では搭載機器の損傷、観測面では雑音源となる。すなわち、衛星高度での宇宙環境を知ることは、衛星の運用面と得られたデータの解析面でも非常に大切であり、本研究ではこれを学習するための支援ツールの作成を行う。

本研究では、さまざまな宇宙環境の中でも検出器への雑音源となる宇宙線の入射を決定する Cut-off Rigidity（3.1 章）に着目し、これを様々な人工衛星の高度で地球規模で可視化することにより、人工衛星の学習補助ツールの開発を目指す。

第2章 宇宙線と地球磁場

2.1 宇宙線と人工衛星

2.1.1 宇宙線とは

宇宙では、超新星爆発や太陽表面の爆発などで発生した高エネルギーの荷電粒子がいつも飛び交っており、これを宇宙線（一次宇宙線）という。その構成要素は約 90 % が陽子、約 8 % がアルファ粒子（ヘリウムの原子核）、その他の粒子が 1 % となっている。

地球大気内に一次宇宙線が入射し大気圏に突入すると、高度数十 km で空気中の窒素や酸素の原子核と衝突し、核反応を起こして放射性同位元素を生成させたり、パイ中間子などの粒子を発生させる。この様子は空気シャワーと呼ばれている。一次宇宙線の衝突で発生した粒子は二次宇宙線と呼ばれ、寿命の短いものはすぐに崩壊してしまうが、安定な粒子は地上で観測される。地上高度での成分は μ 粒子が主である。人工衛星の運用に関係するのは一次宇宙線であるため、以後単に宇宙線と呼ぶ場合は一次宇宙線を指す。

図 2.1 は東京大学宇宙線研究所のホームページ¹から抜粋した宇宙線のイメージ図である。

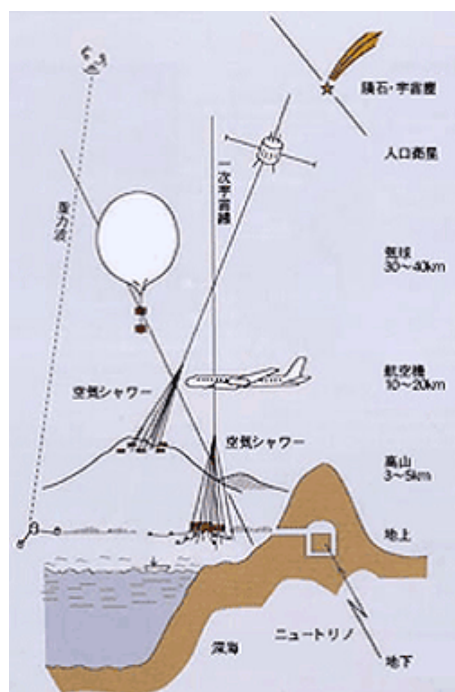


図 2.1: 宇宙線¹

¹<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/about/cosmicray.html>

2.1.2 衛星の運用、解析と宇宙線

観測においても宇宙線は影響を与える。観測機器に宇宙線が進入すると、機器はこれを観測目標の天体からの電磁波と区別することなく受けとってしまう。そのため、観測データには目標天体からのスペクトルとともに、宇宙線が雑音となってスペクトルに現れてしまう。つまり観測されたスペクトルは「観測目標+雑音」となってしまふのである。だが観測データを解析するには観測目標のスペクトルのみが必要なので、雑音を除去しなければならない。

通常は観測目標の天体付近の暗い宇宙(スペクトルが非常に低い部分)のスペクトルを観測目標の雑音と同じとし、それを目標の天体のスペクトルから差し引くことで本来の観測値を得る。つまり、「観測目標+雑音」-「雑音(周辺の暗い宇宙)」という作業を行うことにより「観測目標」のスペクトルを得るわけである。例として、天体 MCG -5-23-16 の雑音除去のイメージを図 2.2 に示す。

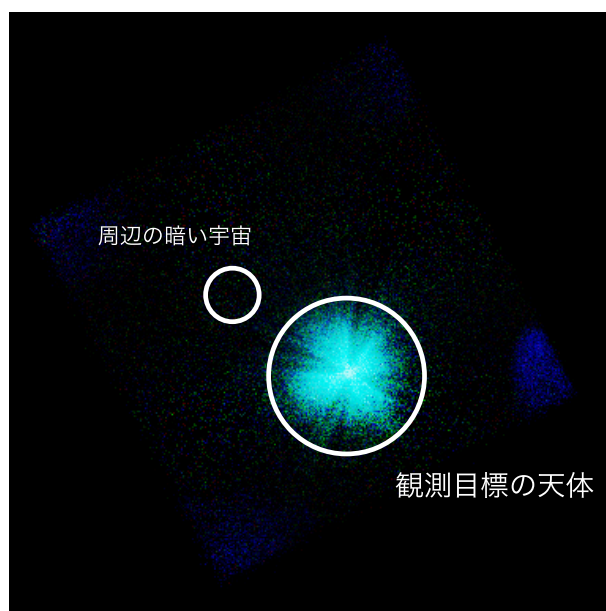


図 2.2: 通常の場合の雑音の除去—天体 MCG -5-23-16²

右下の白い円の中にあるのが観測目標の天体である。ここから、左上の白い丸の中のような周辺の暗い宇宙を観測して得たスペクトルを差し引くということである。

しかし、銀河団や超新星残骸などの広がった天体を観測する際はこの方法では雑音の除去はできない。これは機器の観測面積いっぱい目標の天体が入ってしまい、暗い宇宙が観測されず、付近の暗い宇宙を雑音として差し引くということができないためである。このような場合は Cut-off Rigidity(COR) を参照する。COR については 3.1 章で詳しく述べているが、地球磁場による宇宙線へのシールド効果を表す値で、地球磁場によって与えられる。異なる 2 地点で COR の値が等しいということは、その地点へ入射する宇宙線の量も等しいということを意味している。そこで、目標の天体と COR の値が等しく、暗い宇宙である別の観測データを用意し、それを目標の天体の雑音として扱う。後は先ほどと同じように「観測目標+雑音」-「雑音(COR が等しい別のデータ)」という作業を行うことで、「観測目標」のスペクトルを得ることができる。

²<http://darts.isas.jaxa.jp/cgi-bin/ion-p?page=suzaku%2FXISqlimg.ion&VER=2.1&OBS=700002010>

広がった天体の観測例として、天体 SN1006Ne-Rim を図 2.3 に示す。これと COR 等しく雑音として差し引く暗い宇宙を図 2.4 に示す。

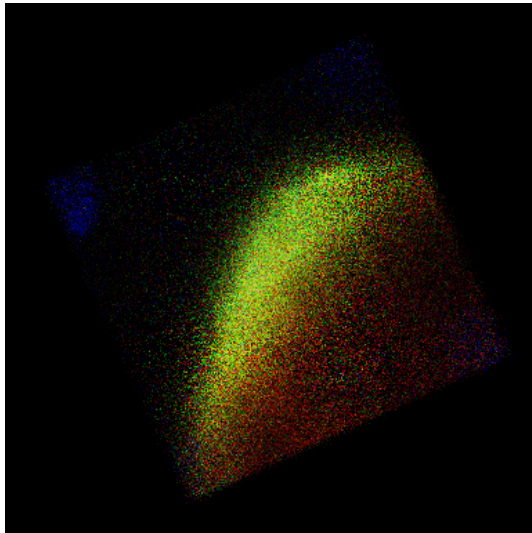


図 2.3: 広がった天体—SN1006NE-Rim³

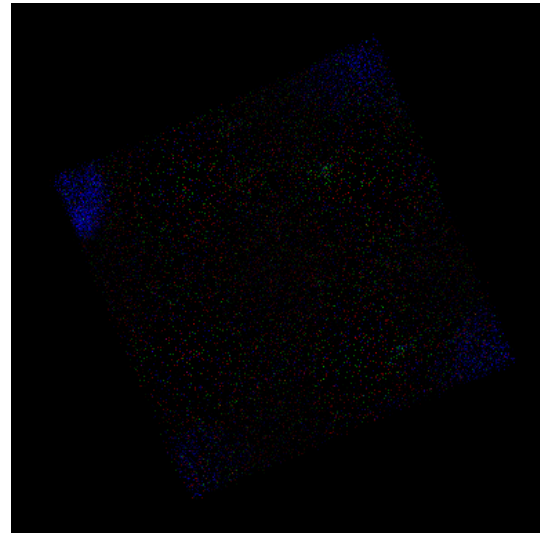


図 2.4: COR が等しい暗い宇宙⁴

図 2.3 では観測目標が黄色く広がっている部分全体で、図 2.2 と比べて観測目標が大きく広いことが分かる。これから雑音を除去するときには COR を参照し、COR が等しい暗い宇宙である図 2.4 のスペクトルを差し引くのである。

宇宙線の観測機器への入射が観測時の雑音になることはすでに述べたが、宇宙線の入射量が多くなると観測データの雑音も多くなる。観測データの雑音が多いということは、質の良いデータを得ることはできないということである。質の良い観測データを得るためには、宇宙線の入射量が少ないところでの観測をより多く行いたい。そこで DATA RATE の割り当てを行う。DATA RATE というのは観測に当てるデータ量のことである。COR を参照し、宇宙線の入射量が多い箇所では DATA RATE を下げる。反対に宇宙線の入射量が少ない箇所では DATA RATE を上げて観測を行うことで効率の良い観測を行っている。

³<http://darts.isas.jaxa.jp/cgi-bin/ion-p?page=suzaku%2FXISqlimg.ion&VER=2.1&OBS=100019020>

⁴<http://darts.isas.jaxa.jp/cgi-bin/ion-p?page=suzaku%2FXISqlimg.ion&VER=2.1&OBS=100019010>

2.2 地磁気とは

地磁気は地球が持つ磁気及び、それにより地球に生じる地場の総称である。これはベクトル量であり、大きさと方向を持つ。大きさの単位には通常「nT (ナノステラ)」が用いられる。

地磁気の要素は「伏角」「水平分力」「偏角」という3成分を用いて表現される。「伏角」とは地磁気が水平面に対して傾いている角度である。地磁気のベクトルは赤道付近を除いて地面に対して並行ではない。例えば京都付近では、重心で支えた磁石の針が50度ほど下を向くことが知られている。地面に突き刺さる方向の場合はプラス、反対に地面から出ていく向きはマイナスとなるように定義されている。「水平分力」とは地磁気の水平方向の強さで、ベクトルである。「偏角」とは水平成分が指し示す方向の地理的な北からのずれの角度である。地球磁場は現在北極付近にS極があり、これが地理的な北とは少しずれているためにずれが起こる。

また、上記のような角度を用いて表記法に対して、地磁気の「北向き成分」「東向き成分」「鉛直成分」と3つの方向それぞれの数値で表記する方法もある。図2.5は理科年表のホームページ⁵より抜粋した地磁気の成分を図にしたものである。この図は日本の状況に合わせて地磁気を西寄りに傾けたもので、偏角西方向を向き、東向き成分はマイナスの方向(西向き)となっていることに注意しなければならない。

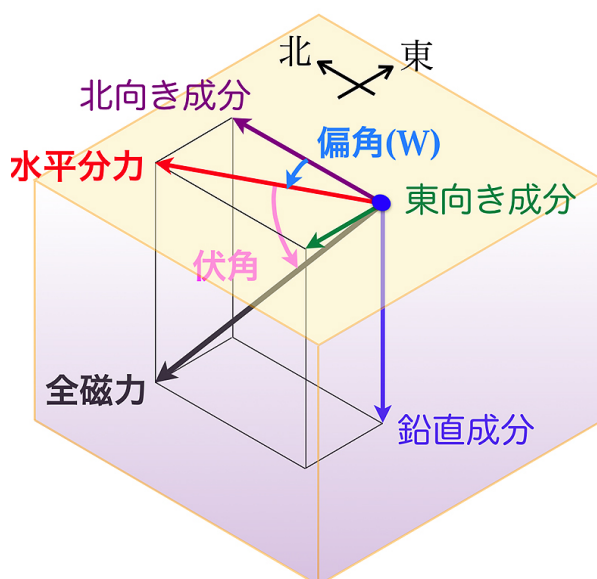


図 2.5: 地磁気の成分⁵[4]

2.3 磁気双極子近似

磁気双極子とはN極とS極が一つずつ、つまり極が二つある棒磁石のことであり、地球磁場は概ねこの磁気双極子で近似できる。これは地球を遠くから見れば、地球の内部に棒磁石が埋まっているのとはほぼ同じに見えるということである(実際には棒磁石の中心と地球の中心にはずれがある)。この磁石は、地球の中心にある核(コア)のダイナモ作用によって作り出されている。また、この双極子の考えで地球磁場の成因の80%が説明できるといわれている。

図2.6は理科年表のホームページ⁶より抜粋した磁気双極子近似のイメージ図である。

⁵http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/chigaku/chigaku_003.html

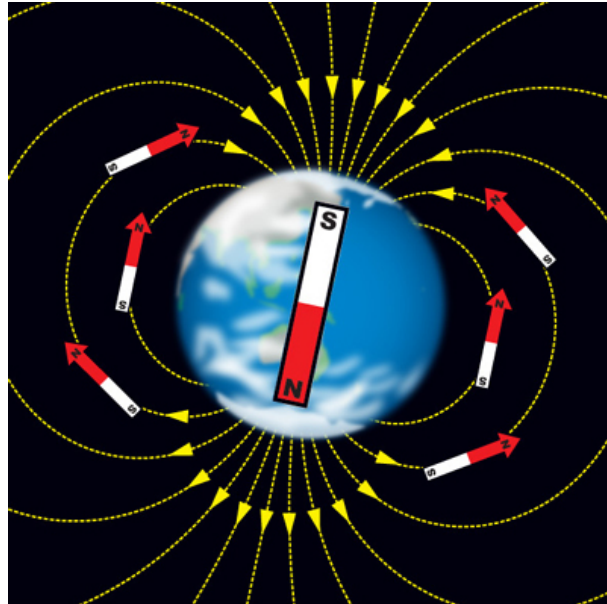


図 2.6: 磁気双極子近似⁶[4]

地球内部に埋まっている仮想的な双極子 (棒磁石) の延長と、地表との交点を地磁気極といい、そのうち北極付近にあるものを地磁気北極 (磁石の性質は S 極)、南極付近にあるものを地磁気南極 (磁石の性質は N 極) という。実際は地球の双極子地場は自転軸に対して約 10.2 度 (2006 年度) 傾いているため、地理上の極と磁極は異なった点となる。つまり、北極点 (南極点) = 地磁気北極 (地磁気南極) ではないということ、このズレが偏角を生む大きな要因となっている。この地磁気極は伏角が 90 度 (磁力線が地面に対して垂直) になる地点というわけではないことに注意しなければならない。伏角が ± 90 度になる地点は磁極といい、これも地磁気極と同様に磁石としてはそれぞれ S 極、N 極である。

また、地磁気中心と地球の中心にもズレがあり、地磁気中心は地球の中心から北緯 21.687 °、東経 144.280 ° の方向 534.259km の位置にある⁷。

2.4 磁気の変化

地磁気は一定ではなく常に変化している。その種類は大きく分けて二つあり、それぞれ永年変化、日変化と呼ばれる。

2.4.1 永年変化

ゆっくりとした長い時間での変化を永年変化という。永年変化しているものとしては、ある地点での偏角、伏角、磁力の大きさ。他にも、地磁気極、磁極などがあげられる。過去には S 極と N 極が入れ替わる現象なども起こっている。

⁶http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/chigaku/chigaku_003.html

⁷<http://hpamsmi2.mi.infn.it/wwwams/geo2.html>

例えば地磁気北極の移動を見ると、1900年では緯度78.6N、経度68.8Wであったのに対し、2005年では緯度79.7N、経度71.8Wとなっている⁸。図2.7は京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターのホームページ⁹より抜粋した地磁気北極と磁北極の移動を示したもので、2006～2010年は予測の位置となっている。

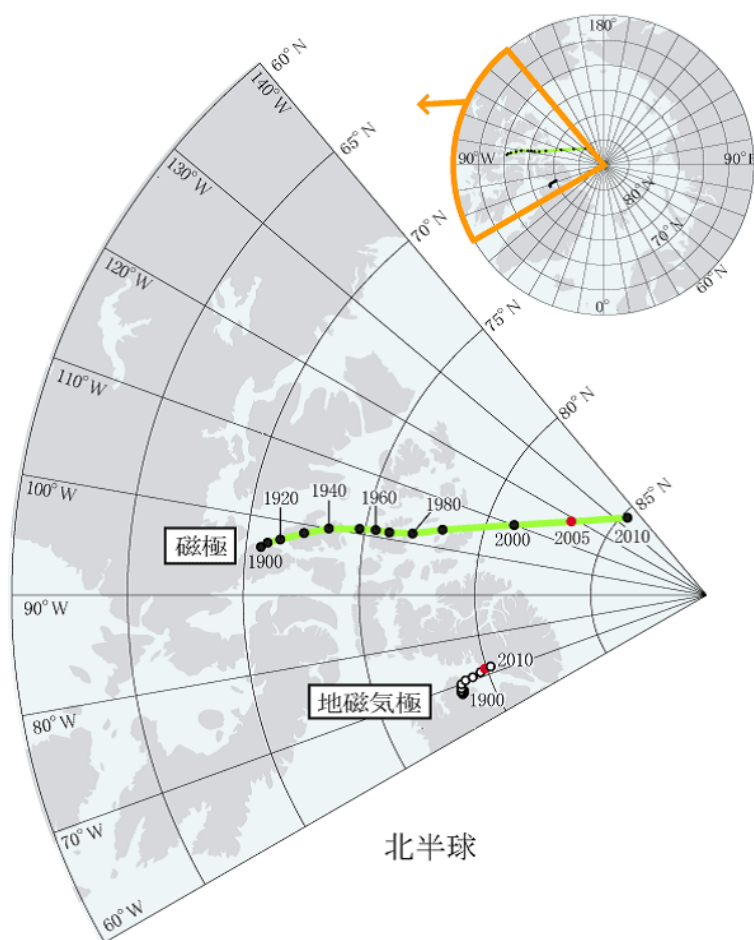


図 2.7: IGRF-10 に基づく地磁気極と磁極の 1900～2010 年までの 10 年毎の位置⁹

2.4.2 日変化

永年変化に対し、非常に短期間での地磁気の変化を日変化という。これは太陽の動きが活発になり、そこから飛び出してくる荷電粒子(陽子、ヘリウムの原子核、電子など電荷を持った粒子)が増え、地球の電離層を流れる電流が変化し、それによって生ずる磁場も変化するためである。この変化が激しいときは磁気嵐という。

⁸<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp-j.html> 表 1 より

⁹<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp-j.html> 図 2 より

第3章 Cut-off Rigidity

この章では Cut-off Rigidity とは何か、またそれを算出する計算式について述べる。

3.1 Cut-off Rigidity とは

Cut-off Rigidity(COR) とは宇宙空間からの荷電粒子(宇宙線)に対する地球磁場のシールド能力のことで、地球磁場によって決定される。単位は GeV/C または GV で表わされ、これは入射する宇宙線(2.1.1章)のエネルギーに対応する。

COR が低いとは、エネルギーの小さい粒子まで地球大気に侵入することができるということである。このときの検出器(観測機器)のおかれる環境としては、荷電粒子によるノイズが多くなる。反対に COR が高いとは、エネルギーの小さい粒子は侵入することができないということである。このときの検出器(観測機器)のおかれる環境としては、荷電粒子によるノイズが少なくなる。

ある地点での COR が分かれば宇宙線の入射量を一意に決定することができる。つまり、異なる2地点で COR の値が等しいとき、その2地点へ入射する宇宙線の量も等しいということである。

また、2.4章で地磁気は時間によって変化することを述べたが、地磁気が変化していくということは COR も時間によって変化していくということである。

3.2 地球磁場によるシールド原理

荷電粒子が地球へ入ってくると、地球磁場によって荷電粒子にローレンツ力が働く。これにより、荷電粒子は磁力線に沿って移動し、これがシールドのような役割を果たすこととなる。図3.1は地球磁場と地球へ入射する電子の様子を表したものである。

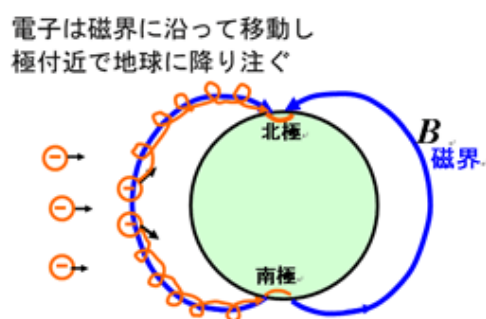


図 3.1: 地球磁場と地球へ入射する電子¹

¹<http://kumiko47.exblog.jp/1203274/>

南北両極地方では磁力線の方向が垂直に近い(伏角が90度に近い)ため、宇宙線が磁力線につかまって侵入しやすい。そのためCORは赤道付近では高く、極付近では低くなる傾向がある。また、地球地場の影響が強い低高度ではCORは強くなり、高度が上がるにつれ地球磁場の影響が少なくなるためCORは弱くなっていく。

3.3 Cut-off Rigidity の算出

CORは地球磁場によって決定されるため、地場の分布が分かれば一意に決定することが可能である。そのためここでは、よく使われている地場分布モデルとCORの計算式について述べる。

3.3.1 地場分布モデル

地磁気の分布は、測量した値を地図上に等高線で表示する磁気図と、数式で表現する地場モデルがある。後者のうち、全地球的スケールでの分布を表現するモデルとして最もよく使われているのが国際標準地球磁場(IGRF - International Geomagnetic Reference Field)である。

これは、国際地球電磁気超高層物理学協会(IAGA - International Association of Geomagnetism and Aeronomy)²の分科会に設置された作業委員会で決定され、5年ごとに発表されるもので、現在は2005年にリリースされたIGRF10モデルが最新である。

IGRFとは別に、よく使われるモデルとしてCGMモデルがある。CGMとは、修正地磁気座標(Corrected geomagnetic coordinate)³のことで、地磁気座標をより現実の地磁気に即するように改良した座標の一つ。求めたい点を通る磁力線が地磁気赤道面と交わる点を求め、そこから地磁気中心双極子場の磁力線に沿って求めたい点の高さまで戻り、戻った点の地磁気緯度、経度を緯度、経度とする。高緯度の地磁気に関連した現象の解析に用いられるが、低緯度地域ではそこを通る磁力線が地磁気赤道面を通らないために、定義できない場所もある。

3.3.2 Cut-off Rigidity の計算

CORを導く計算式はいくつかあるが、Lのパラメーター(文献[1]より)を用いると非常に簡潔な形にすることができる。(3.1)式(文献[2]より)はLのパラメーターを用いたCORの計算式である。

$$COR = \frac{14.5}{L^2} \quad (3.1)$$

Lのパラメーターとは地磁気の影響を表す指標で、地球からの距離、経度、地磁気の傾きで決まる値である。つまり、Lのパラメーターを導くことができれば、CORの算出が可能である。

CGMモデルによる計算式として、(3.2)式(文献[3]より)がある。

$$COR = 14.5 \cos^4 \frac{\lambda}{r^2} \quad (3.2)$$

²<http://www.iugg.org/IAGA/>

³<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/takeda/words/tiziki.html>

とはCGMによる磁気緯度で、 r は地磁気中心からの距離（地球半径単位）である。なお、地磁気中心については2.3章で述べている。

第4章 開発 — Cut-off Rigidity の計算

この章では、Cut-off Rigidity の実際の計算を行う。

3.3.2 章で、COR の計算法には L パラメータを用いる方法と、CGM による計算などがあることを紹介したが、3.3.1 章で紹介した IGRF のホームページでは、地球上のさまざまな位置において L パラメータを計算するプログラムが公開されており、本研究ではこのプログラムをダウンロードして利用することにした。オリジナルのプログラムでは出力に COR は含まれないため、本研究ではこのプログラムを改変して用いる。

4.1 オリジナルプログラム

「SPDF ModelWeb - Model: IGRF10 Model Coefficients for 1945-2010

<http://modelweb.gsfc.nasa.gov/magnetos/igrf.html>」

からプログラムをダウンロードする。ダウンロードしたものの中から必要なファイルを以下に示す。

```
bilcal.for
igrf_sub.for
dgrf45.dat  dgrf50.dat  dgrf55.dat  dgrf60.dat  dgrf65.dat
dgrf70.dat  dgrf75.dat  dgrf80.dat  dgrf85.dat  dgrf90.dat
dgrf95.dat  dgrf00.dat  igrf05.dat  igrf05s.dat
```

また、出力形式等は bilcal.for が処理し、その他のすべての計算は igrf_sub.for に含まれている。具体的には、igrf_sub.for のメインプログラムから呼び出される FINDB0、SHELLG、FELDG、という関数、およびこれらの関数から 2 次的に呼び出される STOER、FELDCOF、GETSHC、INTERSHC、EXTRASHC、INITIZE という一連のサブルーチンから成る。主要な関数である、FINDB0、SHELLG、FELDG はそれぞれ以下の計算を行う。

```
FINDB0    磁力線上で最も磁界が弱い箇所を見つける
SHELLG[5][6] 特定の測地学座標、高度、地磁気フィールド・モデルにおける
              L のパラメーターを算出する
FELDG[7]   球面調和関数から地球磁場を算出する
```

このプログラムは Fortran 言語にて書かれており、緯度、経度、高度などいくつかの必要項目の入力をおこなうと、さまざまな値を計算しそれをターミナルに表示したり、ファイルに書き込むことができる。

4.1.1 コンパイルと実行

コンパイル

```
f77 -c -o igrf_sub.o igrf_sub.for
f77 -o bilcal igrf_sub.o bilcal.for
```

このようにコンパイルすることで、メインプログラムである「bilcal.for」とサブルーチンである「igrf_sub.for」のオブジェクトファイルを融合させ、実行ファイルを作ることができる。

実行

```
./bilcal
```

4.1.2 プログラムの動作

このプログラムは、緯度や経度、高度などの必要な項目の入力を行うと、磁力やLのパラメーターなどを出力するものである。プログラムを起動すると以下の順番で入力を求められる。それぞれの入力について説明していく。

入力 1. 出力形式を選択する

[入力値：動作の説明]

- 0：画面 (terminal 上) に出力
- 1：ファイルへ出力 (拡張子は.IGR)
- 2：画面とファイルの両方へ出力

入力 2. 変化させるパラメーターを選択する

[入力値：動作の説明]

- 1：緯度
- 2：経度
- 3：高度
- 4：年

入力 3. 変化範囲を入力する

入力 2 で選択したものに対する変化の値を
変化の初期値, 変化の終わり値, 刻み幅
の順に「,」で区切って入力する。

入力 4. 緯度を入力する

求めたい地点の緯度の値を入力する。単位は「°」
入力可能範囲：-360.0 ~ 360.0

入力 5. 経度を入力する

求めたい地点の経度を入力する。単位は「°」
入力可能範囲：-90.0 ~ 90.0

入力 6. 高度を入力する

求めたい地点の高度を入力する。単位は「km」。

入力可能範囲：0.0～30000.0

入力 7. 年を入力する

求めたい年を西暦で入力する。単位は「年」。

入力可能範囲：1940.0～2010.0

IGRF10 は 2005 年発行なので、それ以降の年を入力した場合、結果は予測値となる。

入力 8. 磁力の出力オプションを選択する

[入力値：動作の説明]

0：単位を B で出力

1：単位を B/BO で出力

入力 4～入力 7 のうち、入力 2 で選択したパラメーターの入力は省かれることとなる。入力 2 で選択したパラメーター以外のパラメーターを固定し、選択したパラメーターを入力 3 で指定した範囲に従い、刻み幅に与えた値ごとに計算を行っていく。入力 8 まで終わるとプログラムが計算を行い、その結果が選択した出力形式（画面かファイル、もしくはその両方）に従って出力される。

図 4.1 にオリジナルプログラムでの計算結果の例を示す。

```
LONG  DIMO  B/Gauss  B-NORTH  B-EAST  B-DOWN    DIP    DEC  L-VALUE  C
0.00  0.3009  0.29872  0.19852  -.01014  0.22298  48.3  -2.9  1.467  1
15.00  0.3009  0.30517  0.20063  0.00092  0.22994  48.9   0.3  1.451  1
30.00  0.3009  0.31409  0.20152  0.00756  0.24079  50.1   2.1  1.457  2
45.00  0.3009  0.32480  0.20318  0.00956  0.25323  51.2   2.7  1.452  1
60.00  0.3009  0.33662  0.20794  0.00799  0.26460  51.8   2.2  1.425  1
75.00  0.3009  0.34831  0.21508  0.00516  0.27393  51.9   1.4  1.390  1
90.00  0.3009  0.35735  0.22102  0.00075  0.28080  51.8   0.2  1.364  1
105.00  0.3009  0.35917  0.22309  -.00714  0.28140  51.6  -1.8  1.353  1
120.00  0.3009  0.34974  0.22162  -.01595  0.27009  50.6  -4.1  1.349  1
135.00  0.3009  0.33051  0.21746  -.01766  0.24827  48.7  -4.6  1.349  1
150.00  0.3009  0.30923  0.21008  -.00828  0.22677  47.2  -2.3  1.363  1
165.00  0.3009  0.29432  0.19988  0.00768  0.21590  47.2   2.2  1.400  1
180.00  0.3009  0.28979  0.18936  0.02291  0.21817  48.8   6.9  1.461  1
195.00  0.3009  0.29500  0.18150  0.03376  0.23010  51.3  10.5  1.542  1
210.00  0.3009  0.30767  0.17678  0.04064  0.24851  53.9  12.9  1.642  1
225.00  0.3009  0.32511  0.17299  0.04288  0.27190  56.8  13.9  1.769  1
240.00  0.3009  0.34344  0.16821  0.03803  0.29700  59.9  12.7  1.934  1
255.00  0.3009  0.35781  0.16212  0.02398  0.31808  62.7   8.4  2.131  1
270.00  0.3009  0.36273  0.15676  0.00078  0.32711  64.4   0.3  2.301  1
285.00  0.3009  0.35456  0.15579  -.02539  0.31749  63.6  -9.3  2.325  1
300.00  0.3009  0.33621  0.16132  -.04393  0.29169  60.2 -15.2  2.157  1
315.00  0.3009  0.31638  0.17203  -.04845  0.26106  55.6 -15.7  1.895  2
330.00  0.3009  0.30249  0.18412  -.04038  0.23658  51.5 -12.4  1.667  2
345.00  0.3009  0.29693  0.19350  -.02531  0.22379  48.9  -7.5  1.529  2
360.00  0.3009  0.29872  0.19852  -.01014  0.22298  48.3  -2.9  1.467  1
----- International Geomagnetic Reference Field ----- Edition 2000 -----
LATI=  35.0  LONGI= 360.0  I  DIMO is Dipol  I  C=1  L and B0 correct
ALT=  750.0  YEAR=2002.0  I  Moment in Gauss  I  =2  wrong, =3  approx.
-----
**** DO YOU WANT TO CONTINUE?
-----
"0"  QUIT AND EXIT          "1"  NEW PARAMETERS
-----
```

図 4.1: 画面への出力 (オリジナルプログラム)

図 4.1 の場合、入力値は以下のようになっている。

出力形式：0 (画面に出力)

変化させるパラメーター：2 (経度)

変化の幅：0.0,360.0,15 (経度を 0.0 ~ 360 °の範囲で 15 °ずつ変化させる)

緯度：35.0

高度：750.0

年：2002.0

磁力の出力オプション：0

図 4.1 の計算では画面への出力を行ったが、ファイルへ書き出したとしても内容としては同じものが書き込まれることになる。そのときの拡張子は「igr」となっている。

出力の中で重要な値として「L-VALUE」がある。これは、3.3.2 章で説明した L のパラメーターのことである。もう 1 つ重要な値が「C」で、これは L のパラメーターと磁力の計算結果の信頼性を表すものである。この値が「1」の場合は計算結果は正しい値、「2」の場合は間違った値、「3」の場合は正しい値の近似値となる。C の値が 2 になってしまうのは、磁力線が局所的に閉じ CGM が決まらない箇所 (文献 [3] より) である。

計算結果が出ると、同時に再び入力を求められる。これは、プログラムを終了するか、値を変えて再び計算するかを選ぶものである。再計算を選択した場合は続いて変化させる値の選択、値の再入力、変化させる値の選択...計算結果の表示...といったように動作が続くこととなる。

4.2 変更後のプログラム

今回変更を加えたプログラムは「bilcal.for」のみである。「bilcal.for」はその働きが数値の入力や、画面とファイルへの出力に関わるものだったためである。その他のファイルには変更を加えていない。そのため、ここでは「bilcal.for」に変更を加えたファイル、「bilcal.cor.for」にのみ触れていく。その他のサブルーチンの働き等はオリジナルプログラムと同じである。

このプログラムのソースコードを付録 A に掲載する。

4.2.1 コンパイルと実行

```
f77 -c -o igrf_sub.o igrf_sub.for
f77 -o bilcal_cor igrf_sub.o bilcal_cor.for
./bilcal_cor
```

上記のように、変更前と同様に行えばコンパイルと実行ができる。

4.2.2 プログラムの変更点

ここでは、プログラムの主な変更点について触れていく。

まず、機能の追加として COR の算出、COR の最大値の算出が出来るようにしている。L のパラメーターはすでに計算されていたため、COR の計算は 3.3.2 章の (3.1) 式に基づいて計算式を記述することで導いている。COR の最大値の算出は、後に COR コントアマップ (5.2 章参照) を作る際 COR の最大値の統一を行う作業があり、全高度中での COR の最大値を知る必要があった。

そのため、高度 0~1000km の範囲を 10km 毎に計算し、その中での COR の最大値を算出するようにしている。COR は 3.2 章でも述べたように、高度が低いほど値が小さく、高度が高いほど値が大きくなるという特徴があるのは分かっており、0km のときに最大値があることは予想していたが、それを計算で確認するために追加した機能である。

入力するパラメーターにも変更を加えており、以下の項目となっている。

- 画面への出力形式の選択
- COR の最大値を算出するかの選択
- 緯度の刻み幅
- 経度の刻み幅
- 高度
- 年

緯度や経度の値を入力していないのは、緯度は「-90 °~90 °-緯度の刻み幅」、「経度は-180 °~180 °-経度の刻み幅」で固定となっているためである。どちらとも範囲の最大値から刻み幅を引いているのは、1 点分多く計算してしまうのを避けるためである。高度と年を入力で与えると、刻み幅毎に全緯度、全経度で計算を行うようにした。

出力は画面へ出力する場合とファイルへ出力する場合で異なる。画面への出力はオリジナルプログラムと全く同じで、これは変更後のプログラムはファイルへの書き込みを行うことを目的としているため、画面への出力に変更を加えなかったためである。ファイルへの出力は項目に変更を加えており、以下のようにしている。

- 緯度
- 経度
- COR

出力が以上の 3 項目となっているのは、後に COR コントアマップ (5.2 章参照) を作る際に必要な項目がこの 3 項目であったためである。また、出力されるファイルの拡張子は「dat」としている。

4.2.3 プログラムの動作

変更後のプログラムも基本的な動作としてはオリジナルプログラムと同様で、必要な項目の入力を行うと、結果が出力されるというものである。プログラムを起動すると以下の順番で入力を求められる。それぞれの入力について説明していく。

入力 1. 出力形式を選択する

[入力値：動作の説明]
0：画面 (terminal 上) に出力
1：ファイルへ出力 (拡張子は.dat)
2：画面とファイルの両方へ出力

入力 2. COR の最大値を算出するかの選択

[入力値：動作の説明]
0：算出を行わない
1：算出を行う

算出を行う場合は通常の出力は行われず、画面に COR の最大値のみが出る。

入力 3. 経度の変化の刻み幅を入力する

経度の刻み幅を入力する。小数点入力可能。

ここに入力される値が小さいほど、経度について詳細なデータが得られる。

(経度の変化の範囲は-180 ° ~ 180 °-経度の刻み幅で固定なので入力はない)

入力 4. 緯度の変化のステップ幅を入力する

緯度の変化のステップ幅を入力する。小数点入力可能。

ここに入力される値が小さいほど、緯度について詳細なデータが得られる。

(緯度の変化の範囲は-90 ° ~ 90 °-緯度の刻み幅で固定なので入力はない)

入力 5. 高度を入力する

求めたい高度を入力する。単位は「km」。

入力可能範囲：0.0 ~ 30000.0

入力 6. 年を入力する

求めたい年を西暦で入力する。単位は「年」。

入力可能範囲：1940.0 ~ 2010.0

2005 年以降、出力結果が予測値となるのはオリジナルプログラムと同じである。

入力 6 まで終わると、計算結果が選択した出力形式 (画面かファイル、もしくはその両方) に従って出力される。

図 4.2 に変更後のプログラムでの計算結果の例を示す。

```
-60.0000 90.0000 0.129
-60.0000 120.0000 0.061
-60.0000 150.0000 0.128
-45.0000 -180.0000 2.115
-45.0000 -150.0000 3.367
-45.0000 -120.0000 4.766
-45.0000 -90.0000 5.857
-45.0000 -60.0000 5.600
-45.0000 -30.0000 3.957
-45.0000 0.0000 2.626
-45.0000 30.0000 2.063
-45.0000 60.0000 1.601
-45.0000 90.0000 1.097
-45.0000 120.0000 0.972
-45.0000 150.0000 1.287
-30.0000 -180.0000 5.768
-30.0000 -150.0000 7.236
-30.0000 -120.0000 8.529
```

図 4.2: ファイルへの出力 (プログラム変更後)

図 4.2 の場合、入力値は以下のようになっている。

出力形式：1 (ファイルに出力)

経度の変化のステップ幅：30

緯度の変化のステップ幅：15

高度：600

年：2004

出力値は左から緯度、経度、COR となっており、入力値の要求通りに出力が行われているのが分かる。図 4.2 の例では数値の変化が分かりやすいように刻み幅を大きく設定しているが、実際にはこれを 0.1 に設定する。後に COR コントアマップ (5.2 章参照) を作る際、刻み幅を 0.1 程度としておくと高画質の COR コントアマップが作成できるためである。

COR コントアマップを作るために、ここで様々な高度でデータファイルの出力を行ったが、どのような高度について作成しているかは、5.2.3 章で述べている。ここの表 5.1 にある高度すべてでデータファイルの作成を行った。

なお、計算の信頼性はオリジナルプログラムと同様の仕様となっている。後で COR コントアマップを作成する際、信頼性の低い箇所が分かるようにした画像を作るため、C=2 (間違った値) のとき COR に 50 を代入、C=3 (近似値) のとき COR に 100 を代入したデータファイルもすべての高度で作成した。これについても、5.2.3 章で詳しく述べる。

第5章 CORの可視化

この章では4.2章で作成したデータファイルを用いてCOR値の地球の位置に対する分布図を作成し、これを地球全体に対し視覚化を行う。5.1では視覚化のためのツールの選定、5.2で分布図の作成方法、5.3で実際に作成したCORをまとめ、評価する。

5.1 視覚化ツールの選定

5.1.1 Google Earthの利用

CORを視覚化するためには、最も単純には2次元の世界地図にCORの分布を示せば良い。しかし、これまで説明してきたように、CORは地球磁場と荷電粒子の相互作用で決まり、地球磁場は地球に対して立体的な構造、つまり地磁気の傾きや地球中心とのずれ、高度の依存性などを持つ。得られた結果を効果的かつ教育的に「見せる」ためには3次元的な扱いのできる地球儀が必須である。現在、Google社の提供するGoogle Earth¹は世界中の衛星写真をまるで地球儀を回しているかのように閲覧することができ、多くの山や主要都市の建物が3Dで表示されるが、地球全体を宇宙視点で見ることにもできる。また、地球に対して高度を表現することもできるため、立体的に地球周りのCORを表現する本研究に用いるツールとして最適である。

5.1.2 オーバーレイ画像の仕様の要求

2次元の平面画像を3次元の球へ貼り付けると、画像に歪みが生じてしまう。これはGoogle Earthへ地球規模でのオーバーレイ(画像の張り付け)を行った場合にも起こり得る現象であるため、これを考慮に入れなければならない。また、世界地図を表現する手段として、メルカトル図法、ランベルト正角図法、アルベルス正積円錐図法など色々あるが、Google Earthではイメージベースに単純円筒(Plate Carree)図法が用いられている。単純円筒図法とは、緯線と経線の間隔が等しく、直線で、直角に交差しているもので、Google Earthでは単純円筒図法で描かれた画像であれば地球規模でオーバーレイを行った際にも位置情報(緯度、経度)を正しく保つことができる。図5.1はGoogle Earthのホームページ²より抜粋した単純円筒図法のイメージ図である。

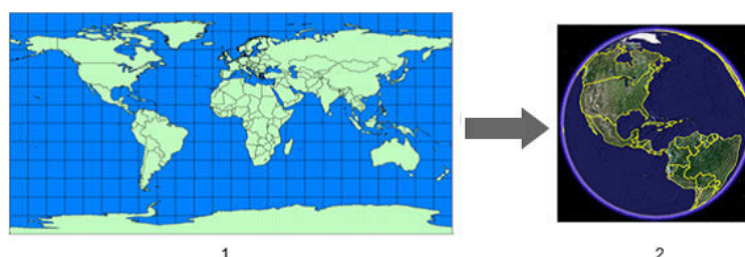


図 5.1: 単純円筒 (Plate Carree) 図法²

¹<http://earth.google.co.jp/>

²http://earth.google.co.jp/userguide/v4/ug_importdata.html

5.2 ROOTによるCORコントアマップの作成

COR コントアマップとは、横軸に経度、縦軸に緯度、重みにCORの大きさを用いた2次元ヒストグラムである。

5.2.1 ROOTの利用

本研究では2次元ヒストグラムの作成にROOT³というツールを用いる。ROOTとはCERN(欧州原子核研究機構高)⁴で開発されたデータ解析ツールで、C++言語をベースとしており、グラフプロット、ヒストグラム、フィッティング等の機能を備えている。操作はコマンドを1行ずつC++言語で入力していくか、もしくは予めコマンドを全てC++言語でファイルに記述してマクロで読み込ませて行う。

ROOTで同じ作業を連続して行う場合、マクロを作成するとコマンドの入力が短縮できて効率的である。本研究でもCORコントアマップを複数作成するのでマクロを使用した。このマクロでは2次元ヒストグラムの元データとなるファイルの読み込みを行い、横軸に経度、縦軸に緯度、これに対応してCORをカラーの2次元ヒストグラムで出力するようになっている。また、コメントアウト箇所を切り替えることで色を塗り分ける数の指定や軸へのメモリ、カラーパレットの出力の有無の指定も可能にしている。

5.2.2 CORコントアマップの作成

作成したマクロを使ってROOTでの作業を行っていく。

ターミナルで「root」とコマンド入力するとROOTが起動する。次に4章で作成したデータファイルをマクロと同じディレクトリに置き「.x マクロ名.cc」と入力するとマクロを読み込むことができる。すると、マクロに書かれているコマンドが実行され、2次元ヒストグラムが出力される。

例として付録Bに本研究でCORコントアマップを作成するために使用したマクロを示す。図5.2は実際にROOTでマクロを読み込み出力したコントアマップ(高度570km、2005年)である。

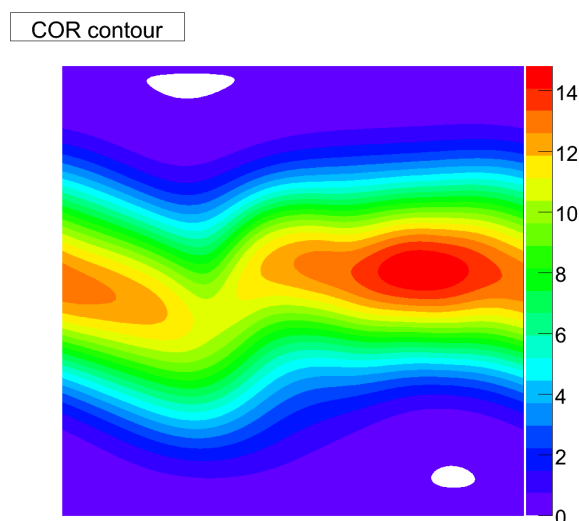


図 5.2: ROOT で出力した 2 次元ヒストグラム — 高度 570km、2005 年

³<http://root.cern.ch/>

⁴<http://public.web.cern.ch/public/>

Google Earth にオーバーレイする画像は、マップ本体のみであり、右のレベル表示は不要である。よって、実際に使用する画像は、画像編集ソフトの「Photo shop」を用いてマップ本体のみを切り出して使用する。

5.2.3 さまざまな高度での COR の可視化

本研究で作成した COR コントアマップの高度について、表 5.1 に示す。軌道高度に「近」「遠」と書かれている人工衛星は軌道が楕円を描いており、「近」は近地点高度 (地球に最も近づいたときの高度)、「遠」は遠地点高度 (地球から最も離れているときの高度) である。

人工衛星の軌道高度以外でも、参考としていくつか COR コントアマップを作成している。作成可能高度の最低値として高度 0km。一般的な航空機の高度として高度 10km、信頼度 2 が消えるくらいの境目付近として高度 1300km。他にも 15000km ~ 30000km (作成可能高度の最大値) を 5000km 毎に作成している。低高度に比べ高度の間隔を広くとっているのは、高度 10500km を以上では COR コントアマップの色がほぼ青や紫になってしまい変化が少ないためである。

また 4 章で計算の信頼度について述べたが、信頼度 2 (間違った値) と 3 (正しい値の近似値) のものについて色を変えたものを全ての高度で作成した。これは、データファイルを作成するとき $C=2$ のとき $COR=50$ 、 $C=3$ のとき $COR=100$ としている。こうすることで、正確な値 (最大でも 18.003) と数値として大きく差が付き、色としても大幅に差を付けることで作成を行っている。

年はすべて 2005 年で作成を行っている。これは、COR 計算プログラムで算出できる正確な年の範囲で、最も最新が 2005 年だったからである。

表 5.1 にある高度についてデータファイルの作成を行っているので、図 5.4 を作成したのと同じようにして COR コントマップを作成した。

人工衛星の名称	軌道高度
参考 (作成可能最低値)	0km
参考 (一般的な航空機)	10km
磁気圏観測衛星 あけぼの ⁴	近 275km, 遠 10500km
X 線天文衛星 すざく ⁵	570km
小型高機能科学衛星 れいめい ⁶	近 610km, 遠 654km
太陽観測衛星 ひので ⁷	680km
赤外線天文衛星 あかり ⁸	700km
参考 (信頼性 2 の境目付近)	1300km
参考	3000km
参考	5000km
参考	15000km
参考	20000km
参考	25000km
参考 (作成可能最大値)	30000km

表 5.1: COR コントアマップを作成した高度

5.2.4 画像の仕様要求と結果

出力された2次元ヒストグラム(図5.2)のCORの最大値を、最低高度のCOR最大値と統一する作業を行う。

出力されたキャンバスの画像の上で右クリックから「SetMaximum」を選択すると、数字を入力する項目がある。本研究で作成するCORコントアマップは高度0kmを最低高度としており、その高度でのCORの最大値は18.003[GeV/C]となっているので、そこに「18.003」と入力してOKを押す。すると、2次元ヒストグラムのCORの最大値が高度0kmのものと一緒になる。図5.3は、図5.2に対して重みの最大値の調整を行ったものである。図5.2に対してカラーパレットの最大値が変化し、それに伴ってヒストグラムの色が変化したのが分かる。

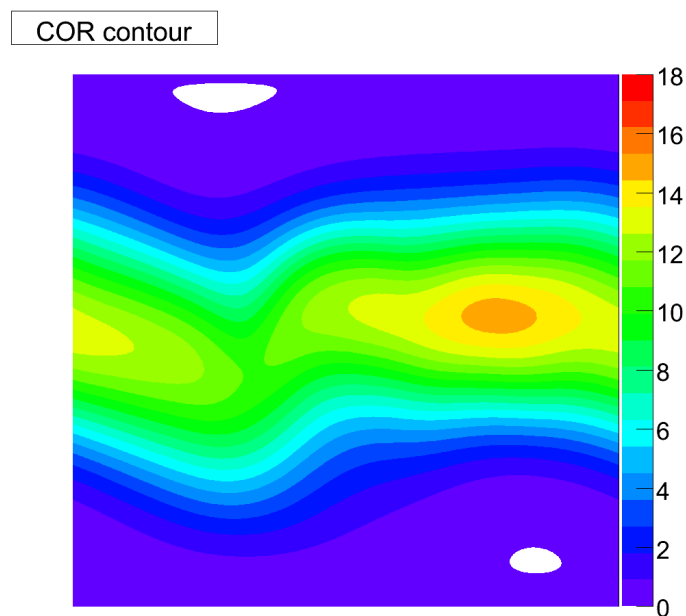


図 5.3: COR の最大値の調整を行ったヒストグラム

CORの最大値の調整を行った後、2次元ヒストグラムをgif形式の画像ファイルとして保存する。この画像から、「Photo shop」を用いてマップ本体のみを切り出す。図5.4は、図5.3から必要な部分の切り抜きを行ったものである。実際に使用するのはこのような画像で、様々な高度に対応させて複数作成した。

⁴<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/akebono/index.shtml>

⁵<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/suzaku/index.shtml>

⁶<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/reimei/index.shtml>

⁷<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hinode/index.shtml>

⁸<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/akari/index.shtml>

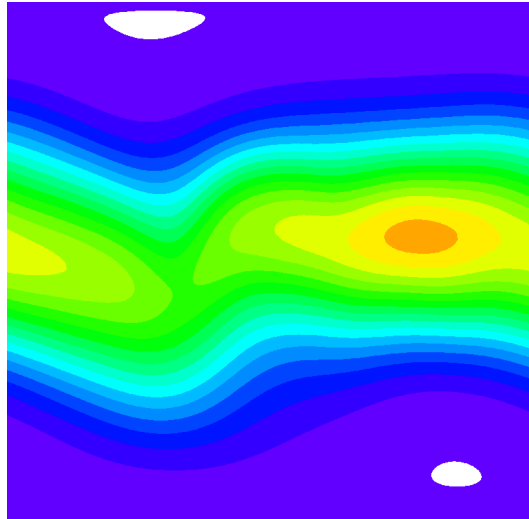


図 5.4: COR コントアマップ完成図 — 高度 570km、2005 年

また、高度によって色の塗り分けの段階を変えている。これは、違う高度でも同じ色具合で比較が行えるようにするためである。全ての高度で塗り分けの段階を同じに設定してしまうと、低高度では COR の差が大きく色の塗り分けがはっきりしているが、高度が上がると COR が小さくなり色の塗り分けが分かりにくくなってしまふ。これを考慮にいれ、本研究では塗り分けの段階を高度 0km ~ 700km は 20 段階、高度 5000km ~ 高度 30000km は 40 段階に設定することが最適であると結論した。

以下の図 5.5 ~ 図 5.20 に、作成した COR コントアマップを全て掲載する。なお、分かりやすくするために全て軸にメモリを付けてある。

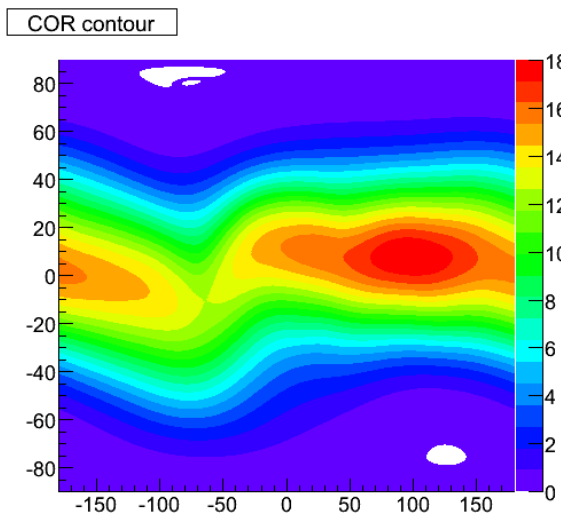


図 5.5: COR コントアマップ—高度 0km

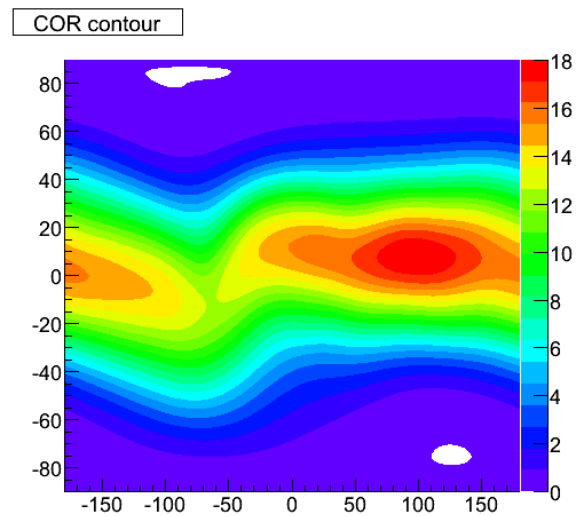


図 5.6: COR コントアマップ—高度 10km

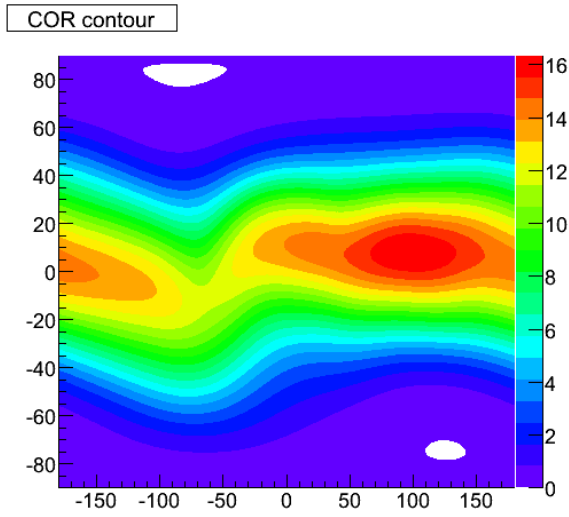


図 5.7: COR コントアマップ—高度 275km

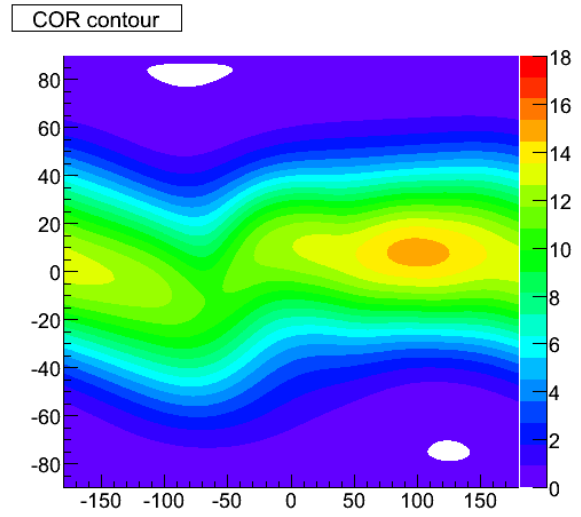


図 5.8: COR コントアマップ—高度 570km

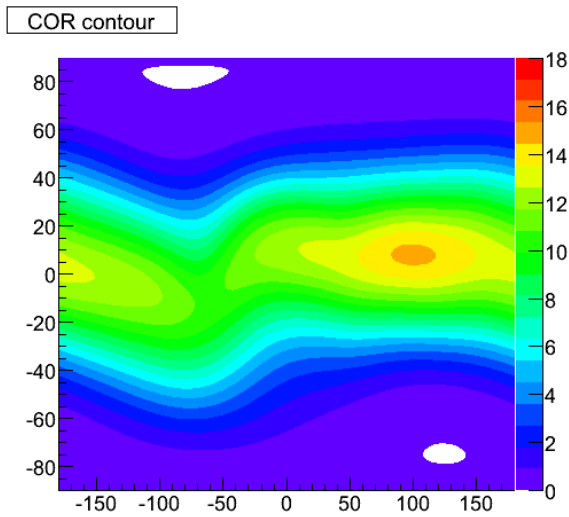


図 5.9: COR コントアマップ—高度 610km

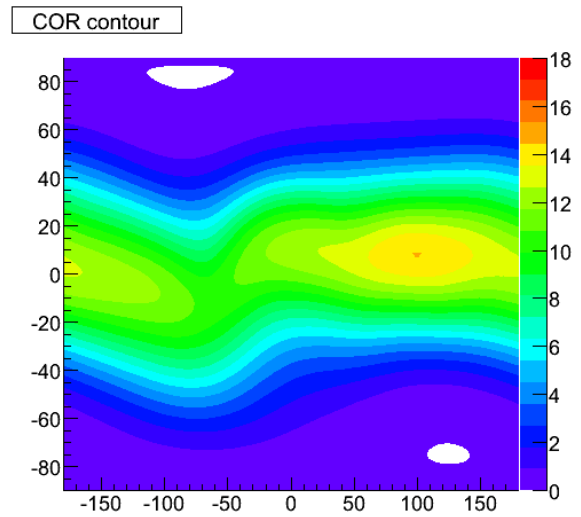


図 5.10: COR コントアマップ—高度 654km

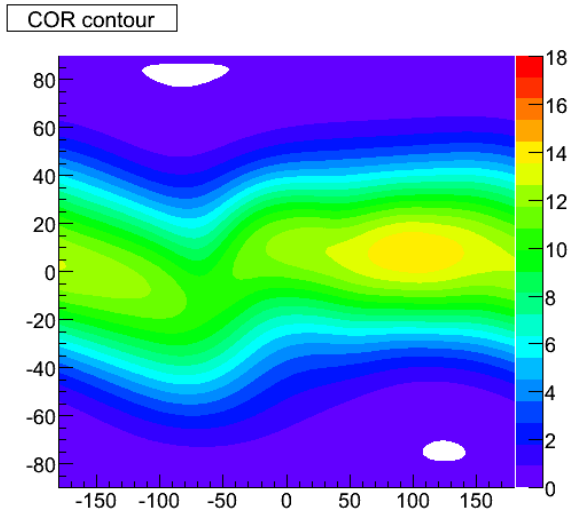


図 5.11: COR コントアマップ—高度 680km

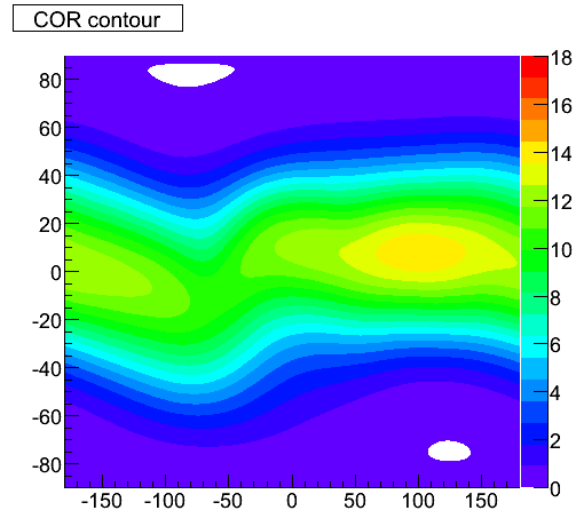


図 5.12: COR コントアマップ—高度 700km

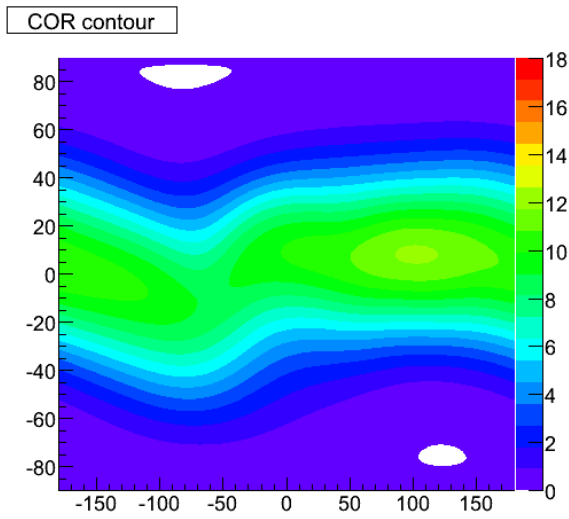


図 5.13: COR コントアマップ—高度 1300km

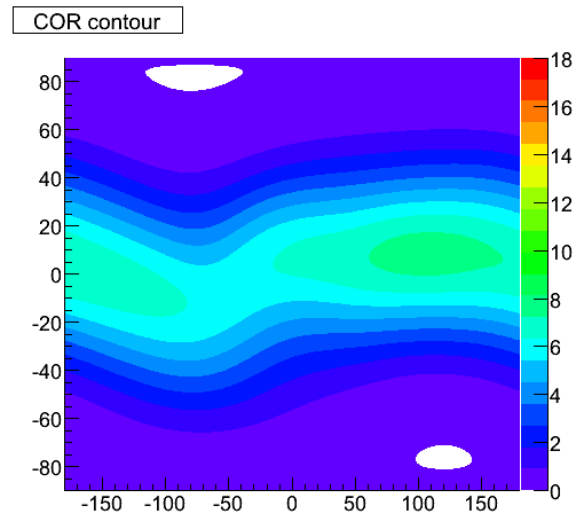


図 5.14: COR コントアマップ—高度 3000km

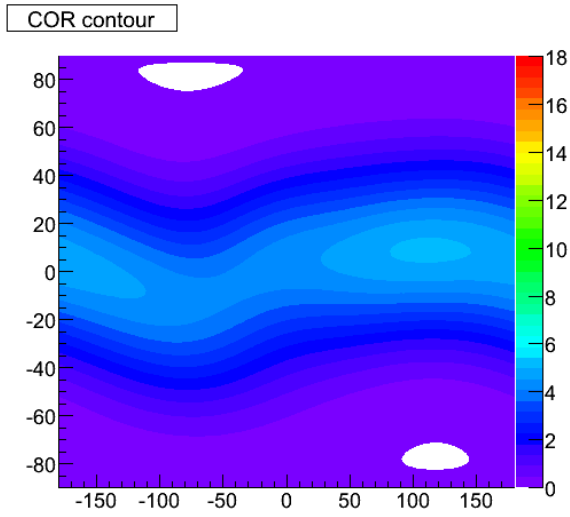


図 5.15: COR コントアマップ—高度 5000km

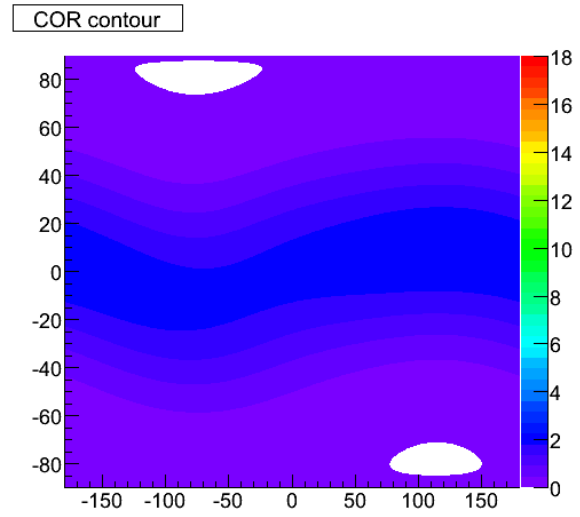


図 5.16: COR コントアマップ—高度 10500km

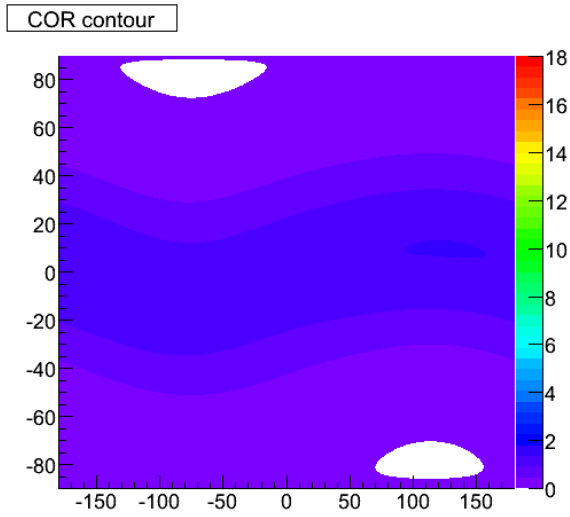


図 5.17: COR コントアマップ—高度 15000km

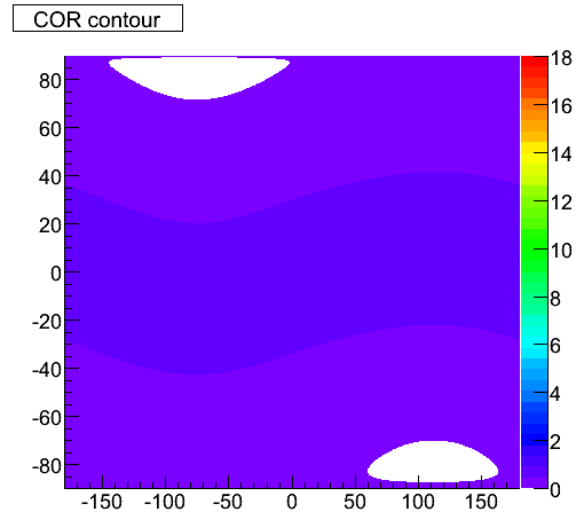
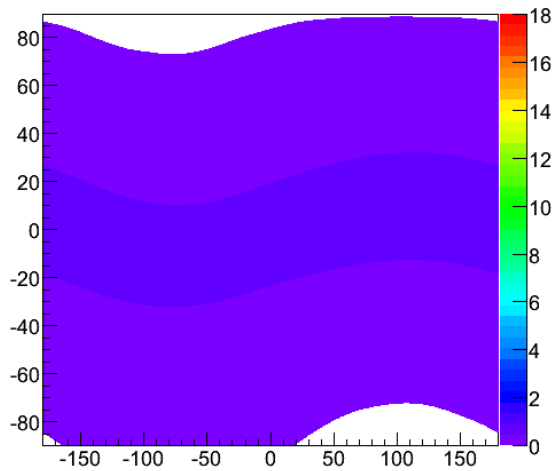


図 5.18: COR コントアマップ—高度 20000km

COR contour



COR contour

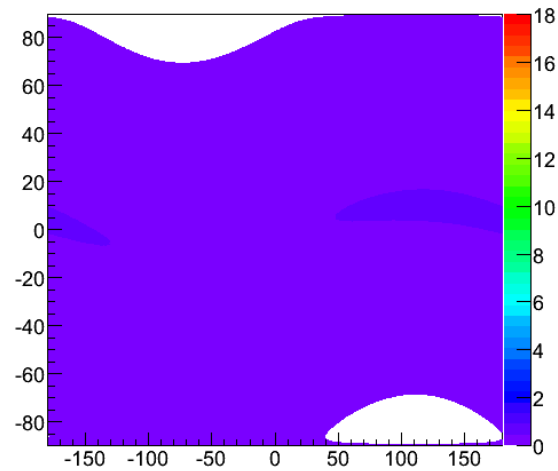
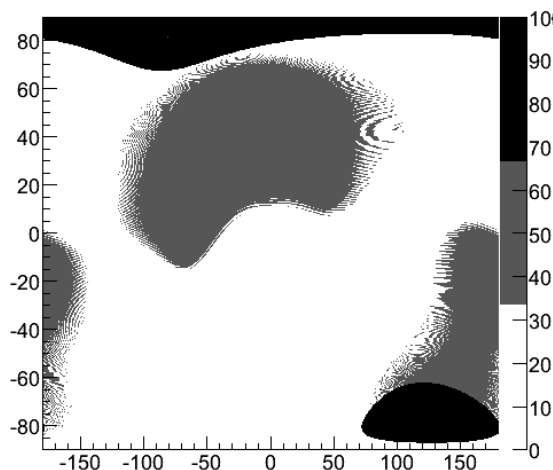


図 5.19: COR コントアマップ—高度 25000km 図 5.20: COR コントアマップ—高度 30000km

このように、高度の低い環境から、高い環境まで COR を同一のレベルで比較することが可能で、かつ、高度が高く、COR の変化のレンジが狭い場所においても、緯度、経度の違いでの COR の差がはっきりと分かるマップが完成した。なお、高度 20000km 以上では塗り分けの色が白を除き 2 色になってしまっているが、塗り分けの段階を 40 より増やしても大きな変化は見られず、逆に近い色で細かく塗り分けてしまい見にくくなるため、やはり 40 程度が適切といえる。

続いて、信頼度の低い地域についての COR コントアマップを図 5.21 ~ 図 5.36 として掲載する。こちらでも分かりやすくするために軸にメモリを付け、白が信頼度 1(正しい値) グレーが信頼度 2(間違った値)、黒が信頼度 3(近似値) となるようにしている。

COR contour



COR contour

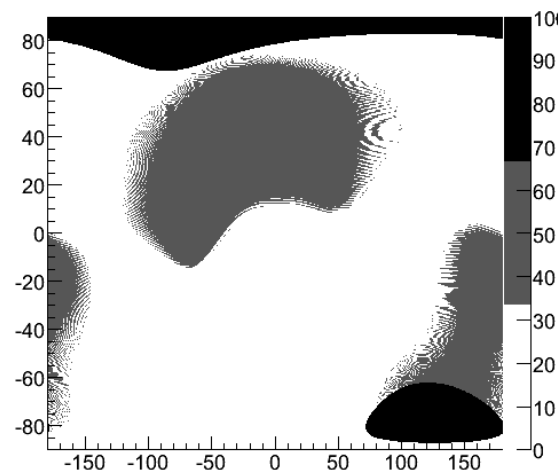


図 5.21: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 0km 図 5.22: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 10km

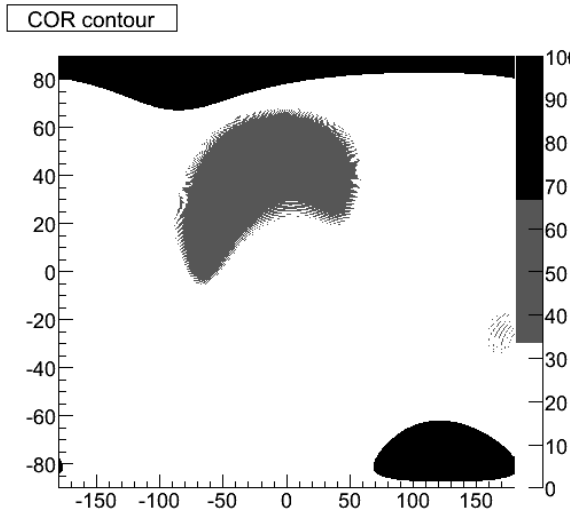


図 5.23: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 275km

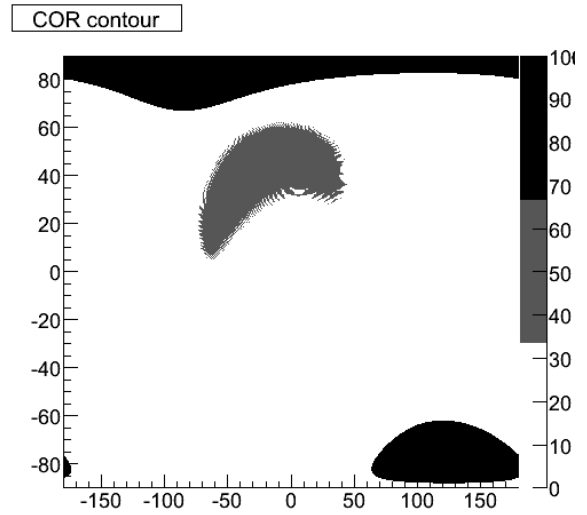


図 5.24: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 570km

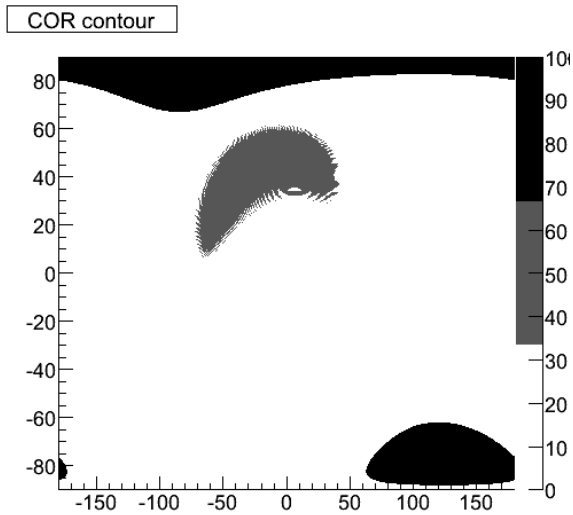


図 5.25: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 610km

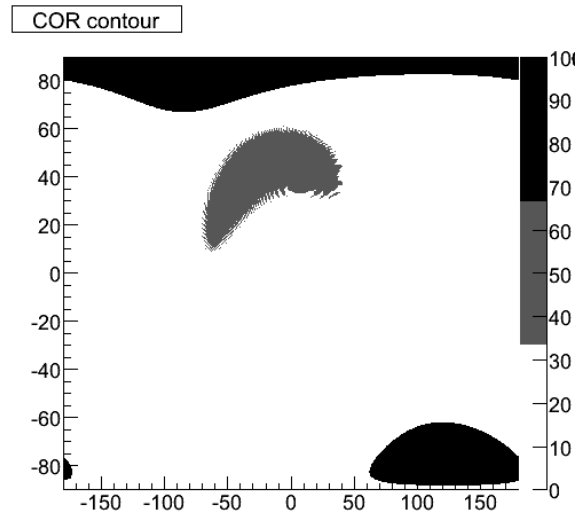


図 5.26: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 654km

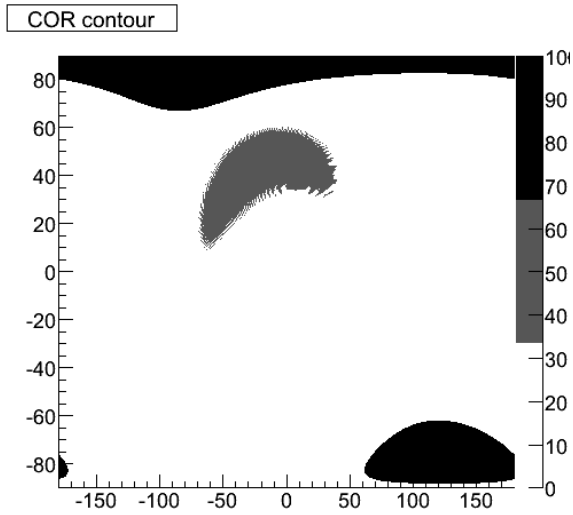


図 5.27: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 680km

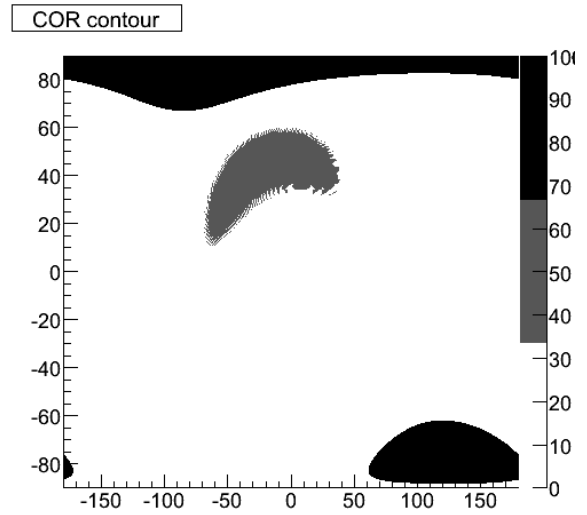


図 5.28: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 700km

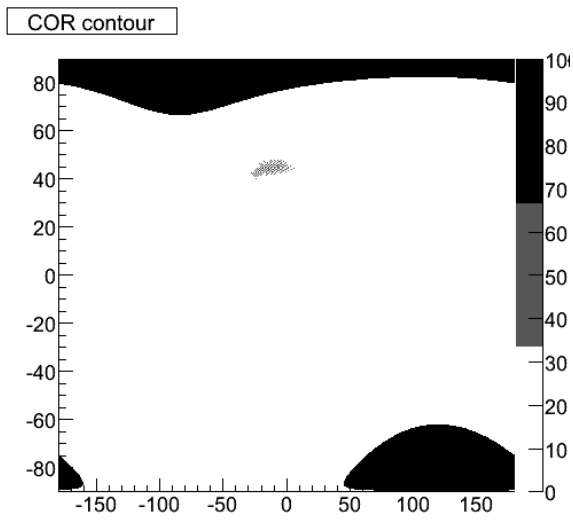


図 5.29: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 1300km

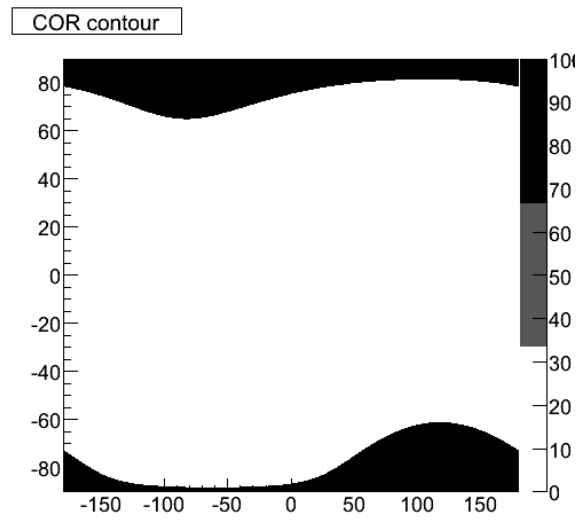


図 5.30: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 3000km

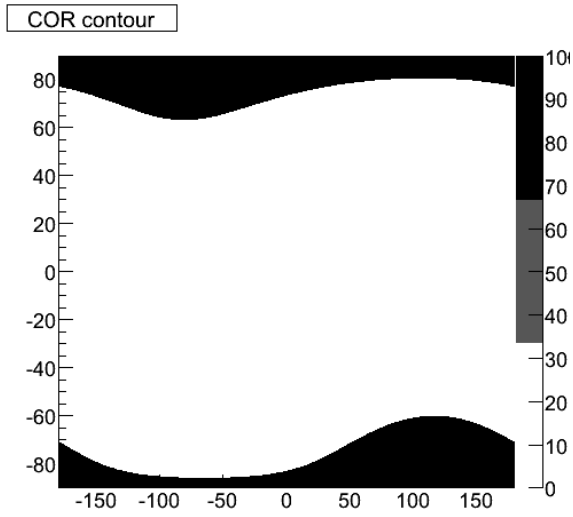


図 5.31: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 5000km

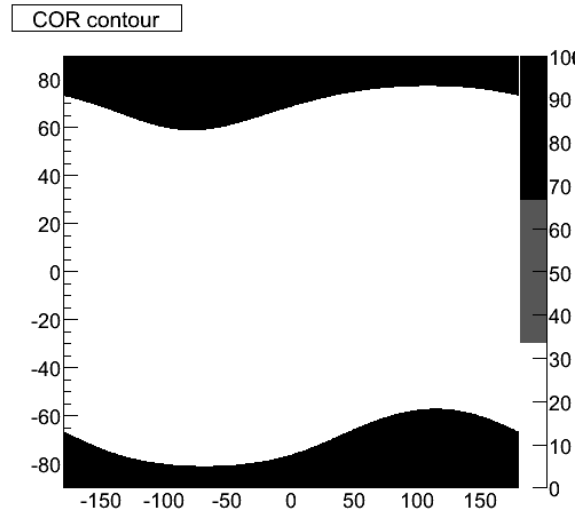


図 5.32: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 10500km

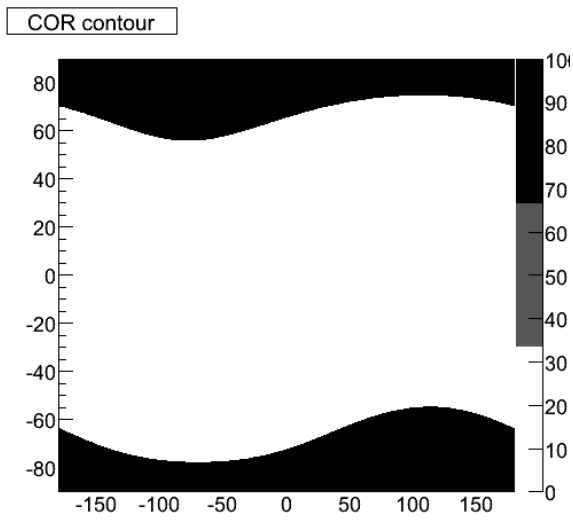


図 5.33: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 15000km

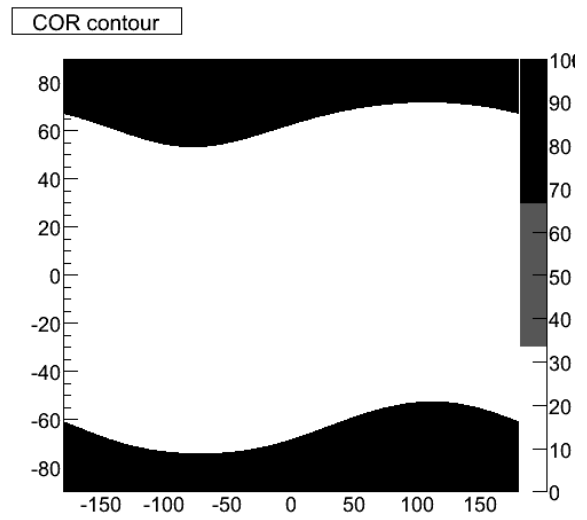


図 5.34: COR コントアマップ (信頼値表示)—高
度 120000km

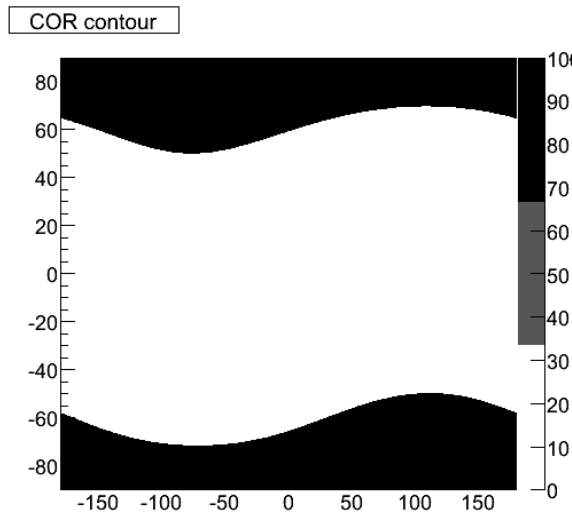


図 5.35: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 25000km

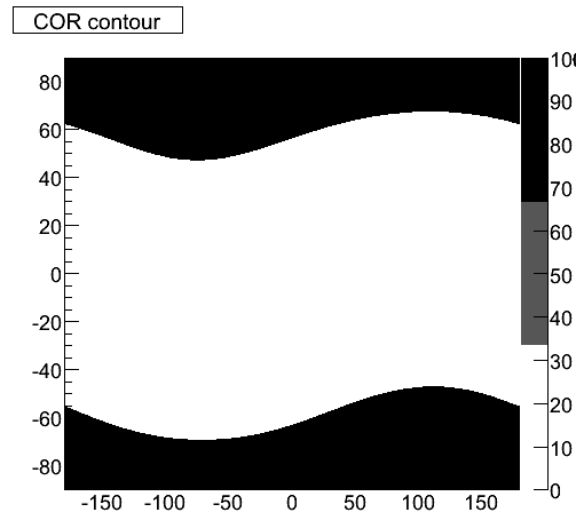


図 5.36: COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 30000km

信頼度 2 は高度 1300km 程度でほぼなくなり、信頼度 3 は高度が上がるにつれて範囲が広がっているのが分かる。

5.3 Google Earth へのオーバーレイ

Google Earth 上に画像を貼り付けることをオーバーレイという。本研究では作成した COR コントアマップを地球を覆うようにしてオーバーレイする。

Google Earth へ画像のオーバーレイを行う際、画像を張り付ける位置を指定することができる。位置の指定は緯度、経度で 4 辺を指定するが、「90E,90W,180N,180S」とすることで地球全体を覆うようにオーバーレイすることが可能である。このように単純に画像を貼付けるオーバーレイをグラウンドオーバーレイといい、これは Google Earth 上から可能である。

高度の設定をすることで画像を地面から浮いた状態にすることも可能となっている。高度の設定は基準となる地面を「地球表面」もしくは「海拔」から選ぶことができる。地球表面を選んだ場合は山や谷など地球表面の地形がオーバーレイした画像にも適用され、画像に凹凸が出てしまうため、本研究では全て「海拔」に設定している。

必要に応じて透過度の設定も可能である。透過度を 0 に設定すると、画像ははっきりと見えるが、内側にある地球は見づらくなったり、低い高度にある画像は全く見えなくなってしまう。こういった低高度にあるものを見たいときは透過度を上げることによって、内側の地球や画像と照らし合わせながら見ることができる。

これら位置、高度、透過度の設定を行って、5.2.2 章の図 5.4 を実際に Google Earth へオーバーレイしたものが図 5.37 である。高度の設定は作成した COR コントアマップと同様に 570000m(570km) として、透過度を少し設定してある。図 5.38 はそのときの高度、透過度を設定している画面である。

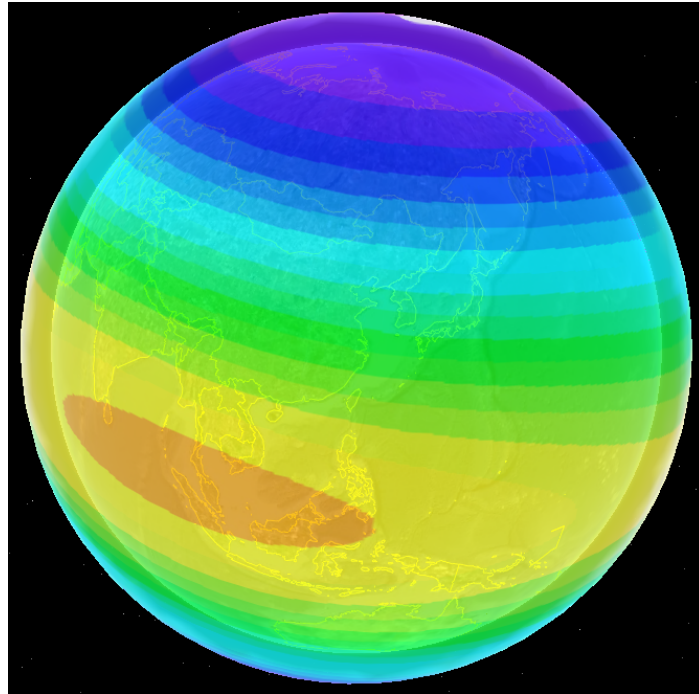


図 5.37: Google Earth へのオーバーレイ—高度 570km



図 5.38: Google Earth での高度と透過度の設定

このようにして、表 5.1 にある高度に従い COR コントアマップを高度を指定してオーバーレイし、各人工衛星毎にフォルダ分けを行っていく。

続いて、COR の大きさが分かりやすくなるよう Google Earth のスクリーン右端にカラーパレットをオーバーレイする。このカラーパレットは最低高度である高度 0km の COR コントアマップの画像から切り抜いたものである。この画像が常にスクリーン右端にあるようにしたいわけだが、これはグラウンドオーバーレイと異なりスクリーンオーバーレイと呼ばれるもので Google Earth 上からこれを行うことは出来ない。

これを行うためには、KML(Keyhole Markup Language) ファイルへの記述が必要となる。KML とは Google Earth に表示するポイント、線、イメージ、ポリゴンなどをモデリングして保存するための XML 文法および XML 形式のタグ構造を持つファイル形式で、ウェブブラウザで HTML や XML ファイルが処理される方法と同様にして、Google Earth で処理される。通常 Google Earth 上で行う作業は KML ファイルが自動で作成されており、この KML ファイルにグラウンドオーバーレイを行うために追記を行う。

KML ファイルに以下のように記述することで、画面の右端にスクリーンオーバーレイを行うことができる。

```
<ScreenOverlay>
  <name>mem</name>
  <visibility>0</visibility>
  <Icon>
    <href>mem.gif</href>
  </Icon>
  <overlayXY x="1" y="0" xunits="fraction" yunits="fraction"/>
  <screenXY x="1" y="0" xunits="fraction" yunits="fraction"/>
  <rotationXY x="0.5" y="0.5" xunits="fraction" yunits="fraction"/>
  <size x="47.5" y="407" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
</ScreenOverlay>
```

画像の位置を決めているのが<overlayXY>と<screenXY>で、画像配置の基準となる場所を overlayXY が指定し、その画像をスクリーン全体のどこに配置するのかを screenXY で行っている。指定はスクリーンに対する x と y 座標で行われ、スクリーンの左下が座標 (0, 0)、右上が座標 (1, 1) となっている。上記の KML 記述では、(x, y)=(1, 0) としているので、スクリーンの右下に配置される。

図 5.39 は、実際にカラーパレットをオーバーレイしたものである。これがあることで COR の値がおおまかに分かるようになった。

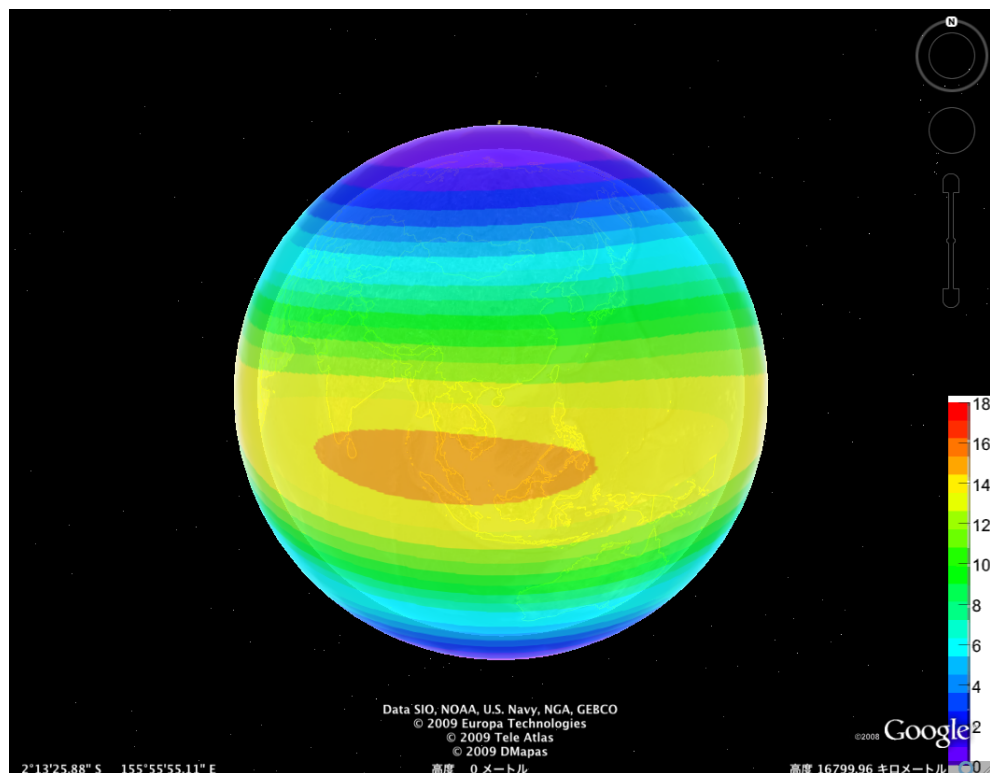


図 5.39: Google Earth にカラーパレットをオーバーレイ

以上で本ツールは完成となる。

5.4 考察

Google Earth で表現することで、COR コントアマップのような平面の地図と比較して COR 分布が非常にわかりやすく表現できていることが分かる。

図 5.40 に高度 570km の COR コントアマップに分かりやすくするため軸のメモリを付けたもの、図 5.41 に高度 570km の経度 70 °付近を示す。図 5.40 では経度-70 °辺りで緑色の帯のようなものが下方方向に凹んでおり、一見歪んでいるように見えるが、図 5.41 では見られない。これは地球磁場の軸が回転軸とずれているためであり、COR の分布は地球軸に対して歪みなく分布していることが説明できる。

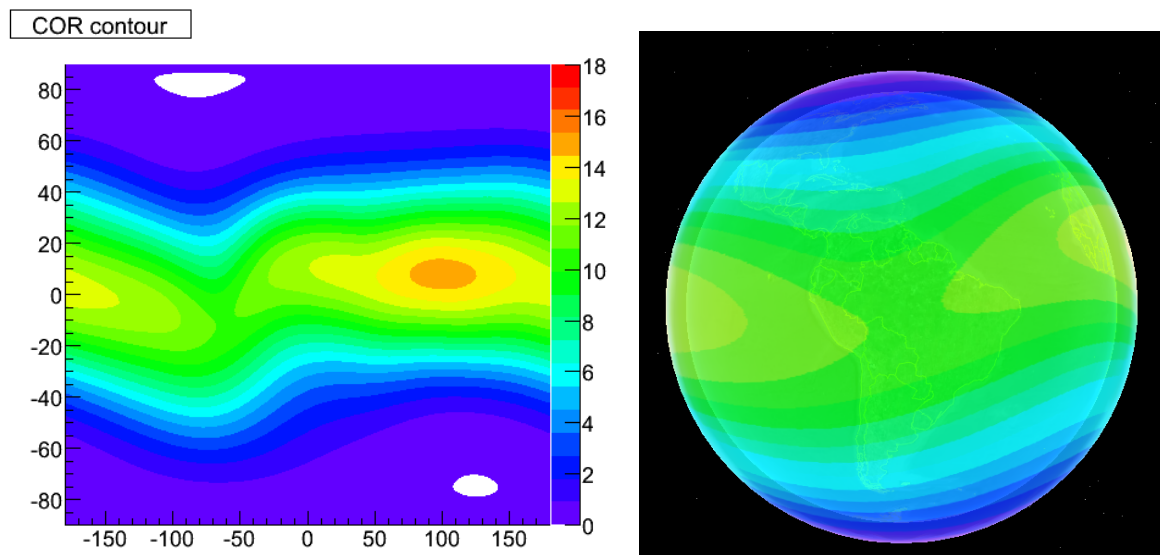


図 5.40: COR コントアマップ—高度 570km(メモリ付き)

図 5.41: Google Earth—高度 570km、経度-70 °付近

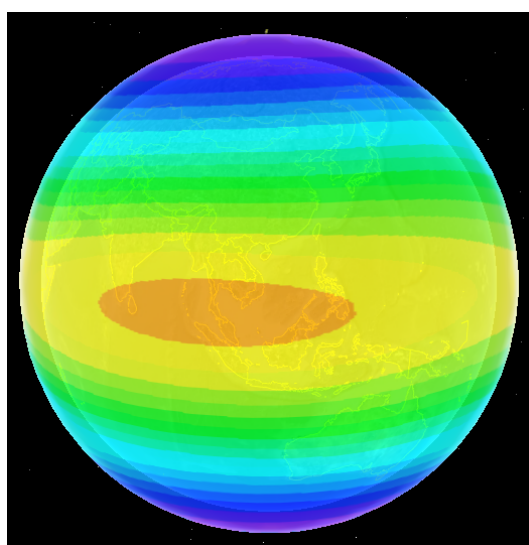


図 5.42: Google Earth へのオーバーレイ—高度 570km、経度 110 °付近

図 5.42 は高度 570km の経度 100 °付近の画像を示す。赤道に近づくと COR が強く、極地方へ近づくと COR が弱くなることは確認できるが、同じ赤道付近でありながら経度 110 °付近では、180 °反対の経度-70 °付近（図 5.41）と COR の強さに大きく差があることが分かる。これは、2.3 章で述べたように地球の中心と地磁気中心がずれているためである。

図 5.43 に高度 10km での北極点付近を拡大した画像を示す。2.3 章で地球の自転軸と、双極子地場にずれがあることを述べたが、画像の白い部分は磁気の最も弱い部分、つまり地磁気中心周辺であり、北極点とのずれがあることが確認できる。

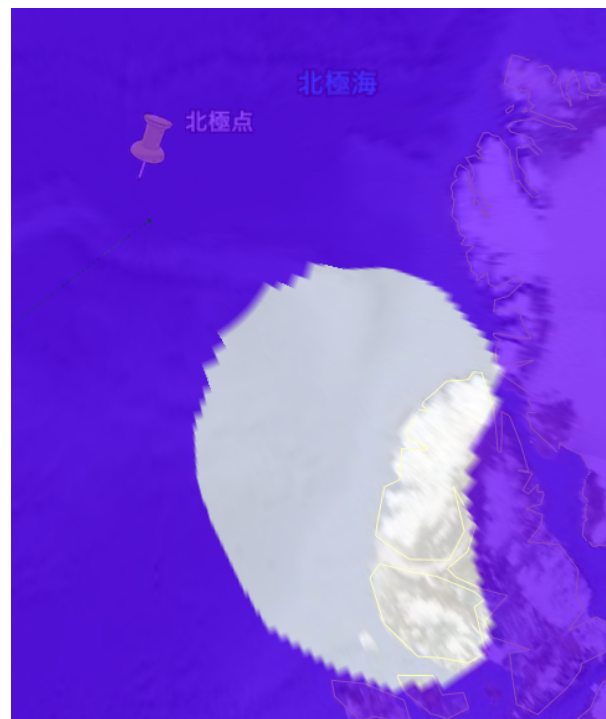


図 5.43: Google Earth へのオーバーレイ—高度 10km、北極点付近

Google Earth を用いることによってこういったことを視覚的に分かりやすく説明することが出来る。

第6章 まとめ

6.1 まとめ

本総合研究により、CORを視覚的に非常に分かりやすく表現するツールを作成することができた。利用者が自分で地球儀を回し、表示高度を変えていくことにより、緯度と経度によるCORの分布傾向や磁気極と地球の極のズレなどを実際に見ることができ、解析初心者などの利用者に対して学習支援としての貢献が期待できる。

また、同研究室の別当屋敷の総合研究「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」では、すざく衛星の軌道と観測時の雑音をGoogle Earth上に取り込んでいる。今後、本研究と組み合わせる予定である。

組み合わせることにより、衛星が地球を回り、CORの変化とともに検出器雑音が変化していく様子を可視化し、衛星運用および解析の学習支援ツールを完成させる。その完成予想図を図6.1に示す。これにより、利用者がより一層理解を深めることのできるツールになることが期待できる。

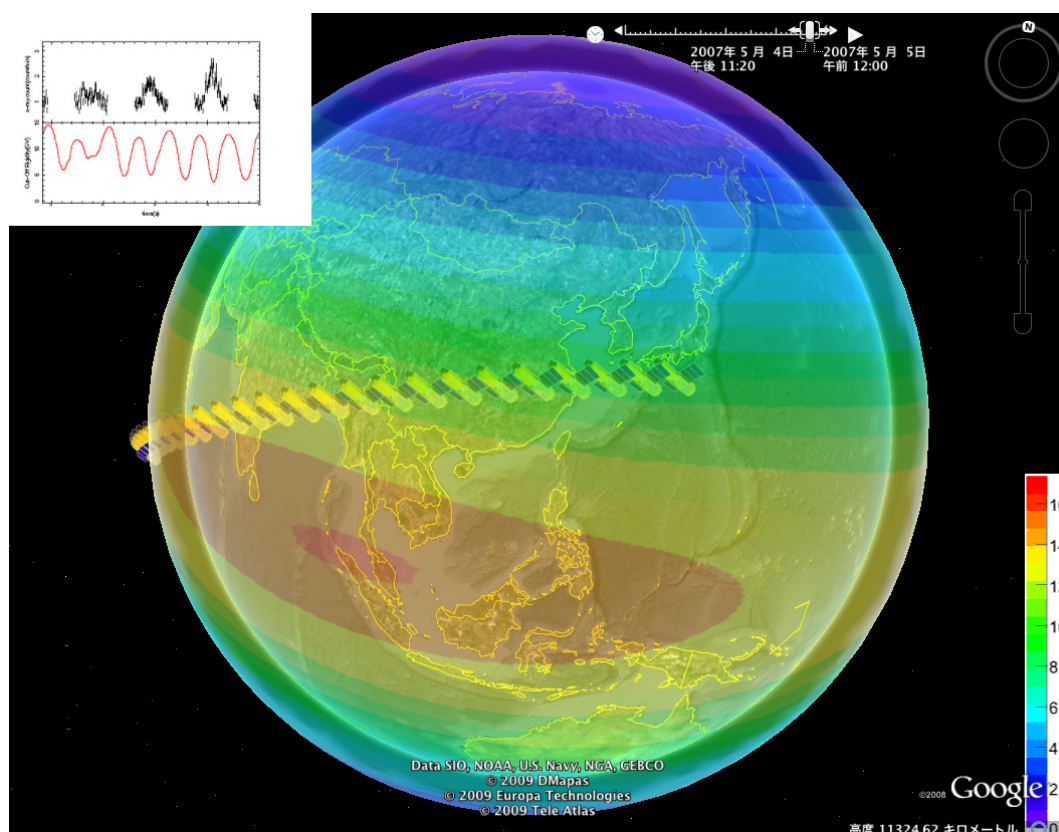


図 6.1: すざくの衛星軌道と COR の組み合わせ

謝辞

本研究を行うにあたって、Cut-off Rigidity の計算方法のご指導、算出した Cut-off Rigidity 算出結果の確認などにご協力頂きました広島大学の水野恒史さんに深く感謝いたします。また、衛星軌道とバックグラウンドの組み合わせを行った別当屋敷君をはじめ、宇宙情報解析研究室の皆さんと久保田あや先生に感謝いたします。ありがとうございました。

付 録 A COR 計算プログラムのソースコード

本研究、4.2 章で用いた変更を加えたプログラム「bilcal_cor.for」を以下に掲載する。

```

C BILCAL, VERSION 3.0, AUGUST 1995
C
Cmm/dd/yy
C 1/25/92-DKB-Modified for use with the IGRF-91 coefficients, which
C     were provided by R. Langel, GSFC.
C 2/ 5/92-DKB-Reduce variable-name: INITI(ALI)ZE
C 3/25/96-DKB-Modified for use with the IGRF-95 coefficients, which
C     were provided by R. Langel, GSFC.
C 6/ 6/00-DKB-Modified for use with IGRF-2000 coefficients.
C11/14/01-DKB-Add IMIN=0 above 4927 READ(...) [Rui Pereira]
C04/25/05-DKB-IBBB instead of IBB in data statem. [Alexey Petrov]
C
C*****
C***** IGRF MAGNETIC FIELD MODEL *****
C***** SHELLG L-VALUE CALCULATION *****
C*****
C*****
C*** THIS PROGRAM PRODUCES PROFILES OF: ***
C***     GEOMAGNETIC FIELD STRENGTH (GAUSS)     ***
C***     L-VALUE           ***
C*****
C*** FOR SPECIFIED: ***
C***     YEAR (DECIMAL YEAR, E.G., 1995.5 FOR MID 1995) ***
C***     GEODATIC LATITUDE AND LONGITUDE (DEGREE) ***
C***     ALTITUDE (KM) ***
C*****
C*****
C*  -----ADDRESS----- *
C*  I  DR. DIETER BILITZA (301)513-1664          I  *
C*  I  GSFC, NSSDC, CODE 933, GREENBELT, MD 20771, USA I  *
C*  I  SPAN:      NSSDCA::BILITZA, NSSDC::BILITZA      I  *
C*  I  BITNET:    BILITZA%NSSDCA.SPAN@DFTNIC.BITNET    I  *
C*  ----- *
C*****
C*****
C*****

```

C

C -----変数に COUNTER, LATCHECK, COR, LATSTEP を追加-----

```
INTEGER  EGNR,AGNR,OGNR,LONGn,LATIn,LATCHECK,COUNT
REAL    LATI,MLAT,MLONG,COR,LATSTEP,CORT,LONGI
REAL*8          SVAR,XCOR,LONGC
CHARACTER*4  ITEXT(4),LTEX
CHARACTER*7   ITB
CHARACTER*11  NAME
LOGICAL  NOTBEG,VAL
DIMENSION  DEN(8),TEMP(2),XVAR(4),VARE(4),VARB(4)
COMMON/GENER/ UMR,ERA,AQUAD,BQUAD
```

C

C 変数への代入

C

```
DATA ITEXT /'LATI','LONG','H/km','YEAR'/
DATA LATI,LONGI,HEIGHT,YEAR,IVAR,BVAR,EVAR,SVAR,IBBB,JAGNR,LATSTEP
&    /45.1,293.1d0,100,1985.5,3,100,1000,100,0,2,10/
c### year limit modified
DATA VARB /-90.0,-360.0,0.00000,1940.0/
DATA VARE /+90.0,+360.0,30000.0,2010.0/
```

C

```
CALL INITIZE
ALOG2=ALOG(2.)
ISTART=1
```

C

```
C FIRST SPECIFY YOUR COMPUTERS CHANNEL NUMBERS .....
C EGNR=INPUT, MONITO=MONITOR, KONSOL=MESSAGES.....
C AGNR=DISPLAY, OGNR=FILE OUTPUT.....
```

C

```
EGNR=5
MONITO=6
AGNR=6
OGNR=16
LONGn=0
LATIn=0
LATI=-90
LATCHECK=0
CORT=0
COUNT=0
WRITE(MONITO,5100)
5100  FORMAT(1X/////4X,54('*')/4X,
& '***** IGRF GEOMAGNETIC FIELD MODEL 1945 - 2005 *****'/4X,
& '***** SHELLG L-VALUE CALCULATION *****'/1X,
```

```

& 60('*')/' This program allows you to produce COR ',
& 'profiles in '/' latitude, longitude, year or altitude.'/
& ' In each of the following windows you will be ',
& 'asked to enter'/' one or more values, defining the conditions',
& ' for your tables.'/' In each window the current value(s) is',
& ' (are) shown in the right'/' upper corner (#...#). You can ',
& 'choose the current values by'/' entering / at the prompt.'/
& ' If you enter a wrong character or a value outside the ',
& 'allowed'/' parameter range, the program will ask you for a',
& ' new entry.'/' You can leave the program at any point ',
& 'by entering Ctrl Z.'/1X,25('*'),' GOOD LUCK ',25('*'))
NOTBEG=.FALSE.
GOTO 5508

```

```

C-----START ENTERING PARAMETERS-----

```

```

3293 CONTINUE

```

```

      ISTART=ISTART+1

```

```

C-----WINDOW 1: WHICH PARAMETER CHANGE ?-----

```

```

C      WRITE(MONITO,5602) LATI,LONGI,ITEXT(IVAR),HEIGHT,YEAR,BVAR,
C      & EVAR,SVAR

```

```

C5602 FORMAT(1X/' **** WHICH PARAMETER DO YOU WANT TO CHANGE?'/

```

```

C      & 1X,60('-')/' 0 NO FURTHER CHANGES, CALCULATE PROFILE'/

```

```

C      & ' 1 LATITUDE #',F6.1,'#',7X,'5 DISPLAY OR STORE'/

```

```

C      & ' 2 LONGITUDE #',F6.1,'#',7X,'6 SELECTION OF VARIABLE #',

```

```

C      & A4,'#'/' 3 ALTITUDE #',F8.1,'#',5X,'7 VARIABLE RANGE'/

```

```

C      & ' 4 YEAR #',F6.1,'#',11X,'#',F8.1,',',F8.1,',',

```

```

C      & F8.1,'#'/29X,'8 B OR B/B0'/1X,60('-')/' ENTER NUMBER')

```

```

C IMIN=0

```

```

C IMAX=8

```

```

C4925 READ(EGNR,*,ERR=8600,END=6666) ISWIT

```

```

C IF((ISWIT.GE.IMIN).AND.(ISWIT.LE.IMAX)) LATI=-90

```

```

C      IF((ISWIT.GE.IMIN).AND.(ISWIT.LE.IMAX)) GOTO 8601

```

```

C8600 WRITE(MONITO,4924) IMIN,IMAX

```

```

4924 FORMAT(' Your input is outside the value range:',

```

```

      & I2,' to',I2/' try again')

```

```

C GOTO 4925

```

```

C8601 GOTO (5505,3329,3339,5502,6780,5508,5503,5504,9138) ISWIT+1

```

```

C-----WINDOW 2: DISPLAY OPTIONS-----

```

```

C 画面への出力形式を選択する

```

```

C

```

```

C 5508 & 5123 入力説明のプリント JAGNRの初期値は2

```

```

C 4927 出力形式の読み込み

```

```

C 1:ディスプレイ 2:ファイル 3:両方

```

```

C 数字はJAGNR(初期値2)に格納される

```

```

C IF文は入力値が正しい範囲にあるかを判定している

```

```

C   正しければ GOTO で 8602 へ
C
C 8602 ファイルの準備 次へのジャンプ
C   出力形式が 1,2 であれば書き込み用のファイルを用意する
C   3 つ目の IF 文 NOTBEG は WINDOW 3 で選ばれた値の入力を飛ばすための判定
C
5508 WRITE(MONITO,5123) JAGNR
5123 FORMAT(/' DO YOU WANT YOUR PROFILES',32X,'#',I1,'#'/5X,
& 'DISPLAYED ON YOUR MONITOR: ENTER 0 AT PROMPT'/5X,
& 'STORED IN FILE OUTPUT.dat: ENTER 1 AT PROMPT'/5X,
& 'DISPLAYED AND STORED: ENTER 2 AT PROMPT')
WRITE(MONITO,8630)
IMAX=2
IMIN=0
4927 READ(EGNR,*,ERR=8603,END=6666) JAGNR
IF((JAGNR.GE.IMIN).AND.(JAGNR.LE.IMAX)) GOTO 8602
8603 WRITE(MONITO,4924) IMIN,IMAX
GOTO 4927
8602 IVARNR=0
IF(JAGNR.GT.0)
& OPEN(UNIT=OGNR,FILE='COR.dat',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')
IF(JAGNR.EQ.1) AGNR=OGNR
IF(NOTBEG) GOTO 3293
C-----WINDOW 2.5: SELECT TEST-----
2501 WRITE(MONITO,2502)
2502 FORMAT(/'COR MAX TEST?',72X,
& 'NOT TEST: ENTER 0 AT PROMPT'/5x,
& 'COR MAX TEST: ENTER 1 AT PROMPT')
WRITE(MONITO,8630)
IMAX=1
IMIN=0
2503 READ(EGNR,*,ERR=8603,END=6666) TEST
IF((TEST.GE.IMIN).AND.(TEST.LE.IMAX)) GOTO 3000
2504 WRITE(MONITO,4924) IMIN,IMAX
GOTO 2503
C-----WINDOW 3: SELECT VARIABLE-----
C 変更前のプログラムでは VARIABLE の選択を行っていた。
C このプログラムでは IVAR に直接値を代入することで
C VARIABLE を LONGITUDE で固定している。
C
C ITEXT(IVAR):選択した VARIABLE
C
3000 IVAR=2
8630 FORMAT(1X,60('-'))/' Enter / to use previous value(s) ',

```

```

& '(see # .. #); Ctrl Z to exit')
WRITE(MONITO,0001) ITEXT(IVAR)
0001 FORMAT(/'SELECTED VARIABLE is ',A4)
GOTO 5504
C-----WINDOW 4: SELECT VARIABLE RANGE-----
C 変更前のプログラムでは VARIABLE の変化範囲、ステップ数を入力していた。
C ここでは VARIABLE、つまり LONGITUDE の変化範囲を固定し、ステップ数のみ
C 入力させる。
C
C 入力されたステップ数 (SVAR) が正であれば次に進む
C 0 または負であった場合は再入力を促す
C
5504 WRITE(MONITO,5044) ITEXT(IVAR)
5044 FORMAT(1X//' CHOOSE : ',A4,' STEPWIDTH')
WRITE(MONITO,8630)
BVAR=-180
EVAR=180
4931 READ(EGNR,*,ERR=8606,END=6666) SVAR
C SVAR=0.2d0
WRITE(MONITO,0002) BVAR,EVAR,SVAR
0002 FORMAT('RANGE : ',F6.1,'-',F6.1,' STEPWIDTH=',F6.1)
IF(SVAR.GT.0) GOTO 8607
8606 WRITE(MONITO,4930)
4930 FORMAT(' Your input is the wrong value.
& Please input it positive number. try again')
4830 FORMAT(' Your input is outside the value range:',
& F8.1,' to',F8.1/' try again')
GOTO 4931
8607 LANZ=INT((EVAR-BVAR)/SVAR)+1
IF(NOTBEG) GOTO 3293
IVARNR=IVARNR+1
IF(IVARNR.EQ.IVAR) GOTO 7339
C-----WINDOW 5: LATITUDE-----
C このプログラムでは LATITUDE のステップ数を入力させるようになっている。
C
C 入力されたステップ数 (LATSTEP) が正であれば次に進む
C 0 または負であった場合は再入力を促す
C
3329 WRITE(MONITO,5000)
5000 FORMAT(1X//' CHOOSE YOUR LATITUDE : STEPWIDTH')
WRITE(MONITO,8630)
XMAX=VARE(1)
XMIN=VARB(1)

```



```

4933 READ(EGNR,*,ERR=8608,END=6666) LATSTEP
      WRITE(MONITO,0003) LATSTEP
0003 FORMAT('STEPWIDTH=',F6.1)
      IF(LATSTEP.GT.0) GOTO 8609
8608 WRITE(MONITO,4930)
GOTO 4933
8609 IF(NOTBEG) GOTO 3293
7339 IVARNR=IVARNR+1
      IF(IVARNR.EQ.IVAR) GOTO 7500
C-----WINDOW 6: LONGITUDE-----
C LONGITUDE は常に VARIABLE として扱われるのでここは不要である。
C
C3339 WRITE(MONITO,6001) LONGI
C6001 FORMAT(1X//1X,'GEOD LONGITUDE ?   !EAST!   [DEGREE,DECIMAL] ',
C      & 7X,'#',F6.1,'#')
C WRITE(MONITO,8630)
C XMAX=VARE(2)
C XMIN=VARB(2)
C4934 READ(EGNR,*,ERR=8610,END=6666) LONGI
C IF((LONGI.GE.XMIN).AND.(LONGI.LE.XMAX)) GOTO 8611
C8610 WRITE(MONITO,4830) XMIN,XMAX
C GOTO 4934
C8611 IF(NOTBEG) GOTO 3293
7500 IVARNR=IVARNR+1
      IF(IVARNR.EQ.IVAR) GOTO 5551
C-----WINDOW 7: ALTITUDE-----
C ALTITUDE を入力する。
C ここには一切変更を加えていない。
C
5501 IF(TEST.EQ.1) GOTO 7501
5502 WRITE(MONITO,6002) HEIGHT
6002 FORMAT(1X//1X,'ALTITUDE ?   [KM] ',33X,'#',F7.1,'#')
WRITE(MONITO,8630)
XMAX=VARE(3)
XMIN=VARB(3)
4936 READ(EGNR,*,ERR=8615,END=6666) HEIGHT
IF((HEIGHT.GE.XMIN).AND.(HEIGHT.LE.XMAX)) GOTO 8616
8615 WRITE(MONITO,4830) XMIN,XMAX
GOTO 4936
8616 IF(NOTBEG) GOTO 3293
5551 IVARNR=IVARNR+1
      IF(IVARNR.EQ.IVAR) GOTO 9138
      IF(TEST.EQ.0) GOTO 6780
C-----WINDOW 7.5: ALTITUDE TEST-----]

```

```

7501 WRITE(MONITO,7502)
7502 FORMAT(/'!!COR MAX TEST!!')
      IMAX=1000
      IMIN=0
      HEIGHT=IMIN
      WRITE(MONITO,7503) IMIN,IMAX
7503 FORMAT('HEIGHT: MIN=',I2, ' MAX=',I4)
7504 IVARNR=IVARNR+1
      IF(IVARNR.EQ.IVAR) GOTO 9138
C-----WINDOW 8: YEAR-----
C YEARを入力する。
C ここには一切変更を加えていない。
C
6780 WRITE(MONITO,6004) YEAR
6004 FORMAT(1X//' YEAR(EPOCH) ?',9X,'*decimal*',9X,'#',F6.1,'#')
WRITE(MONITO,8630)
XMAX=VARE(4)
XMIN=VARB(4)
4938 READ(EGNR,*,ERR=8617,END=6666) YEAR
IF((YEAR.GE.XMIN).AND.(YEAR.LE.XMAX)) GOTO 8618
8617 WRITE(MONITO,4830) XMIN,XMAX
GOTO 4938
8618 IF(NOTBEG) GOTO 3293
C-----WINDOW 9: ABSOLUTE OR NORMALIZED B-----
C ここは関係ないので、プログラムを先に進めるために
C 4738のREADを止め、IBBBに直接0(でなくても構わないが)を代入しておく。
C IBBBは地場の形式
C
9138 IBBB=0
IF(IBBB.NE.0) THEN
ITB=' B/BO '
ELSE
ITB='B/Gauss'
ENDIF
8718 IF(NOTBEG) GOTO 3293
C-----CALCULATE PROFILES-----
C 入力された値の計算、出力を行う。
C
C JAGNRは出力形式
C AGNRの場合ディスプレイ、OGNRの場合ファイル
C 0101:ループが2周目以降であればLATSTEPの分だけLATIにプラスする
C
C 5505:単位の画面への表示
C ITBは上で決められたもの。B/BO または B/Gauss

```

```

C0101  IF(LATCHECK.GT.0) LATI=-90+LATSTEP*LATIn
      0101  LATI=-90+LATSTEP*LATIn
           LATIn=LATIn+1
           IF(TEST.EQ.1) GOTO 3911
5505  IF((JAGNR.EQ.0).OR.(JAGNR.EQ.2)) WRITE(MONITO,3910)
      &    ITEXT(IVAR),ITB
3910  FORMAT(
      &    5X,A4,'  DIMO  ',A7,' B-NORTH  B-EAST  B-DOWN ',
      &    '  DIP    DEC  L-VALUE C')
3911  XVAR(1)=LATI
XVAR(2)=LONGI
      XVAR(3)=HEIGHT
      XVAR(4)=YEAR
      LFD=0
C      XVAR(IVAR)=BVAR-SVAR
C2123  LONGC=XVAR(IVAR)
      2123  XVAR(IVAR)=BVAR+SVAR*LONGn
           LONGn=LONGn+1
           COUNT=COUNT+1
C      IF((XVAR(IVAR)-LONGC).EQ.(0.1001)) XVAR(IVAR)
C      &    =XVAR(IVAR)-0.0001
C      IF((XVAR(IVAR)-LONGC).LT.(0.0999)) XVAR(IVAR)
C      &    =XVAR(IVAR)+0.0001
           LFD=LFD+1
           LATI=XVAR(1)
           LONGI=XVAR(2)
           HEIGHT=XVAR(3)
           YEAR=XVAR(4)
IF((IVAR.LT.4).AND.(LFD.GT.1)) GOTO 2910
CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
2910  CALL FELDG(LATI,LONGI,HEIGHT,BNORTH,BEAST,BDOWN,BABS)
CALL SHELLG(LATI,LONGI,HEIGHT,DIMO,XL,ICODE,BAB1)
IF(IABS(ICODE).GT.9) THEN
WRITE(MONITO,7227) ICODE
7227  FORMAT(' ICODE=',I10,' is set to 2')
ICODE=2
ENDIF
IF(IBBB.EQ.0) GOTO 2299
BEQU=DIMO/(XL*XL*XL)
IF(ICODE.EQ.1) THEN
BDEL=1.E-3
CALL FINDBO(0.05,BDEL,VAL,BEQ,RR0)

```

```

IF(VAL) BEQU=BEQ
ENDIF
2299 DIP=ASIN(BDOWN/BABS)/UMR
DEC=ASIN(BEAST/SQRT(BEAST*BEAST+BNORTH*BNORTH))/UMR
XCOR=XVAR(IVAR)
C
C Cut-off Rigidity を計算
      COR=14.5/(XL*XL)
C XCODE の判定時使用
C XCODE=3 の場合、COR に 100 を代入
C IF(ICODE.EQ.3) COR=100
C XCODE=2' の場合、COR に 50 を代入
C IF(ICODE.EQ.2) COR=50
C
C 画面への出力 1、ファイルへの出力
      IF((TEST.EQ.0).OR.(COR.LT.CORT)) GOTO 8888
      CORT=COR
      HEIGHT_T=HEIGHT
C      WRITE(MONITO,8787) CORT
C8787  FORMAT('CORT=', F8.3)
8888  IF(TEST.EQ.1) GOTO 9999
      IF(JAGNR.EQ.0) THEN
          WRITE(AGNR,7117) XCOR,DIMO,BABS,BNORTH,BEAST,BDOWN,
&          DIP,DEC,XL,ICODE
      ELSE IF(JAGNR.EQ.1) THEN
C          WRITE(OGNR,7118) LATI, XCOR, COR, ICODE
          WRITE(OGNR,7119) LATI, XCOR, COR
      ELSE IF(JAGNR.EQ.2) THEN
          WRITE(AGNR,7117) XCOR,DIMO,BABS,BNORTH,BEAST,BDOWN,
&          DIP,DEC,XL,ICODE
C          WRITE(OGNR,7118) LATI, XCOR, COR, ICODE
          WRITE(OGNR,7118) LATI, XCOR, COR
7117  FORMAT(1X,F8.2,F8.4,4(1X,F7.5),2F7.1,F8.3,I3)
7118  FORMAT(F7.1,F8.2,F8.3,I3)
C7118  FORMAT(F8.2,F7.1,F8.3,F8.3)
7119  FORMAT(F8.4,F10.4,F8.3)
ENDIF
C 画面への出力 2、ファイルへの出力はなし
IF(XCOR.LT.EVAR) GOTO 2123
      IF((JAGNR.EQ.0).OR.(JAGNR.EQ.2)) WRITE(MONITO,2193)
&      LATI, LONGI, HEIGHT, YEAR
C ### edition date corrected
2193 FORMAT(1X,'----- International Geomagnetic Reference Field',
&      ' --- Edition 2000 -----'/ ' LATI=',F7.1,' LONGI=',F6.1,

```

```

& ' I DIMO is Dipol I C=1 L and B0 correct'/
& ' ALT=',F7.1,' YEAR=',F6.1,' I Moment in Gauss',
& ' I =2 wrong, =3 approx.'/1X,74('-'))
C ### year limits corrected
IF((YEAR.LT.1945.0).OR.(YEAR.GT.2005.0)) THEN
WRITE(AGNR,5612)
ENDIF
C ### timeperiod corrected
5612 FORMAT(' !! REMINDER: Recommended time period is 1945',
& ' to 2005 !!')
C-----LAST WINDOW: CONTINUE ?-----
C LATCHECK が 0 でなければ 2 週目以降と判断、CALCULATE PROFILES の頭へ飛ぶ
C ループが終了する (LATI が 90 を超える) とプログラムが終了する。
C
C 9992 WRITE(MONITO,9991) LATI,LATCHECK
C 9991 FORMAT('LATI=',F8.4,' LATCHECK=',I4.3)
9999 LONGn=0
IF(LATI.LT.90.0) GOTO 0101
WRITE (MONITO,9991) COUNT
9991 FORMAT('COUNT=', I10)
IF((TEST.EQ.0).OR.(HEIGHT.GE.1000)) GOTO 9995
9993 WRITE (MONITO,9994) LATI,XCOR,LATIn
9994 FORMAT('/LATI=',F8.4,' XCOR=',F10.4,' LATIn=',I8.3)
HEIGHT=HEIGHT+10
LATI=VARB(1)
LATIn=0
WRITE(MONITO,9996) HEIGHT
9996 FORMAT('HEIGHT=', F8.3)
GOTO 0101

9995 IF(TEST.EQ.0) GOTO 8653
9998 WRITE (MONITO,9997) CORT,HEIGHT_T
9997 FORMAT('/MAX COR=',F8.3,' HEIGHT_T=',F8.3)
8653 NOTBEG=.TRUE.
IF(IALL.EQ.1) GOTO 3293
6666 CONTINUE
STOP
END

```

付 録 B ROOT で用いたマクロ

本研究、5.2.2 章で用いたマクロのうち通常の COR コントアマップの作成に用いたものを以下に掲載する。

```
{
  gStyle->SetPalette(1);
  gStyle->SetOptTitle(1);
  gStyle->SetOptStat(0);

  TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","COR_contour",1000,1000);
  // TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","COR_contour",500,500);
  // STEP=0.1
  TH2F *hm = new TH2F("hm","COR contour", 3600, -180, 179.9, 1800, -90, 89.9);
  // STEP=0.2
  // TH2F *hm = new TH2F("hm","COR contour", 1803, -180, 180, 3901, -90, 90);
  // STEP=0.5
  // TH2F *hm = new TH2F("hm","COR contour", 720, -180, 180, 360, -90, 90);
  TH2F *hn = new TH2F("hn","Mercator", 100, -180, 180, 100, -90, 90);
  Double_t lat, lon, cor;

  // ファイルオープン、読み込み
  ifstream in;
  in.open("COR.dat");

  while (1) {
    in >> lat >> lon >> cor;
    if (!in.good()) break;
    hm->Fill(lon,lat, cor);
    hn->Fill(lon,lat, 1);
  }
  in.close();

  // コントア数
  // Int_t NumberContours = 40;
  Int_t NumberContours = 20;
  // Int_t NumberContours = 3;
  gStyle->SetNumberContours(NumberContours);
}
```

```
    hm->Draw("colAHz");  
    // hm->Draw("colz");  
    // hm->Draw("z");  
    // hm->Draw("CONT4Z");  
  
    TFile *f = new TFile("test.root","RECREATE");  
    hm->Write();  
    f->Close();  
  
    return c1;  
}
```

続いて、信頼度の低い地域について表示したCOR コントアマップの作成に用いてマクロを掲載する。

```
{
  gStyle->SetPalette(1);
  gStyle->SetOptTitle(1);
  gStyle->SetOptStat(0);

  TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","COR_contour",1000,1000);
  // TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","COR_contour",500,500);
  // STEP=0.1
  TH2F *hm = new TH2F("hm","COR contour", 3600, -180, 179.9, 1800, -90, 89.9);
  // STEP=0.2
  // TH2F *hm = new TH2F("hm","COR contour", 1803, -180, 180, 3901, -90, 90);
  // STEP=0.5
  // TH2F *hm = new TH2F("hm","COR contour", 720, -180, 180, 360, -90, 90);
  TH2F *hn = new TH2F("hn","Mercator", 100, -180, 180, 100, -90, 90);
  Double_t lat, lon, cor;

  ifstream in;
  in.open("CoR111.dat");

  while (1) {
    in >> lat >> lon >> cor;
    if (!in.good()) break;
    hm->Fill(lon,lat, cor);
    hn->Fill(lon,lat, 1);

  }
  in.close();

  // コントア数
  // Int_t NumberContours = 40;
  // Int_t NumberContours = 20;
  Int_t NumberContours = 3;
  gStyle->SetNumberContours(NumberContours);

  Bool_t yesorno;
  yesorno="true";
  const Int_t colNum = 2000;
  Int_t palette[colNum];
  for(Int_t i=0; i<colNum; i++)
  {
    Float_t red;
```



```

Float_t green;
Float_t blue;

blue = (Float_t)i/colNum;
green = (Float_t)i/colNum;
red = (Float_t)i/colNum;

if(! gROOT->GetColor(230+i))
{
TColor* color = new TColor(230+i, red, green, blue, "");
}
else
{
TColor* color = gROOT->GetColor(230+i);
color->SetRGB(red, green, blue);
}

if(yesorno)
{
palette[i] = 230 + colNum - i;
}
else
{
palette[i] = 230 + i;
}
}

gStyle->SetPalette(colNum, palette);

hm->Draw("colAHz");
// hm->Draw("colz");

// hm->Draw("mercator");
// hm->Divide(hn);
// hm->Draw("z");
// hm->Draw("CONT4Z");

TFile *f = new TFile("test.root","RECREATE");
hm->Write();
f->Close();

return c1;
}

```

関連図書

- [1] McIlwain, C.E. Coordinates for mapping the distribution of trapped particles. J. Geophys. Res. 66, 3681-3691, 1961.
- [2] D.F.Smart, M.A.Shea 2005, SCIENCE DIRECT, 36, 2
- [3] 水野恒史 2006「すざく」バックグラウンド再現性向上を目指したCORマップのアップデート」
- [4] 理科年表 国立天文台編 丸善
- [5] G. KLUGE, EUROPEAN SPACE OPERATIONS CENTER, INTERNAL NOTE
- [6] G. KLUGE, COMPUTER PHYSICS COMMUNICATIONS 3, 31-35, 1972
- [7] G. KLUGE, EUROPEAN SPACE OPERATIONS CENTRE, INTERNAL NOTE 61,1970.

表 目 次

5.1 COR コントアマップを作成した高度	23
----------------------------------	----

目 次

2.1	宇宙線 ¹	3
2.2	通常の場合の雑音の除去—天体 MCG -5-23-16 ²	4
2.3	広がった天体—SN1006NE-Rim ³	5
2.4	COR が等しい暗い宇宙 ⁴	5
2.5	地磁気の成分 ⁵ [4]	6
2.6	磁気双極子近似 ⁶ [4]	7
2.7	IGRF-10 に基づく地磁気極と磁極の 1900 ~ 2010 年までの 10 年毎の位置 ⁹	8
3.1	地球磁場と地球へ入射する電子 ¹	9
4.1	画面への出力 (オリジナルプログラム)	15
4.2	ファイルへの出力 (プログラム変更後)	18
5.1	単純円筒 (Plate Carree) 図法 ²	21
5.2	ROOT で出力した 2 次元ヒストグラム — 高度 570km、2005 年	22
5.3	COR の最大値の調整を行ったヒストグラム	24
5.4	COR コントアマップ完成図 — 高度 570km、2005 年	25
5.5	COR コントアマップ—高度 0km	25
5.6	COR コントアマップ—高度 10km	25
5.7	COR コントアマップ—高度 275km	26
5.8	COR コントアマップ—高度 570km	26
5.9	COR コントアマップ—高度 610km	26
5.10	COR コントアマップ—高度 654km	26
5.11	COR コントアマップ—高度 680km	27
5.12	COR コントアマップ—高度 700km	27
5.13	COR コントアマップ—高度 1300km	27
5.14	COR コントアマップ—高度 3000km	27
5.15	COR コントアマップ—高度 5000km	28
5.16	COR コントアマップ—高度 10500km	28
5.17	COR コントアマップ—高度 15000km	28
5.18	COR コントアマップ—高度 20000km	28
5.19	COR コントアマップ—高度 25000km	29
5.20	COR コントアマップ—高度 30000km	29
5.21	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 0km	29
5.22	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 10km	29
5.23	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 275km	30
5.24	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 570km	30
5.25	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 610km	30

5.26	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 654km	30
5.27	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 680km	31
5.28	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 700km	31
5.29	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 1300km	31
5.30	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 3000km	31
5.31	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 5000km	32
5.32	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 10500km	32
5.33	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 15000km	32
5.34	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 120000km	32
5.35	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 25000km	33
5.36	COR コントアマップ (信頼値表示)—高度 30000km	33
5.37	Google Earth へのオーバーレイ—高度 570km	34
5.38	Google Earth での高度と透過度の設定	34
5.39	Google Earth にカラーパレットをオーバーレイ	35
5.40	COR コントアマップ—高度 570km(メモリ付き)	36
5.41	Google Earth—高度 570km、経度-70 °付近	36
5.42	Google Earth へのオーバーレイ—高度 570km、経度 110 °付近	36
5.43	Google Earth へのオーバーレイ—高度 10km、北極点付近	37
6.1	すざくの衛星軌道と COR の組み合わせ	39