

三陸上空の地球磁場による宇宙線切断運動量（その2）

近藤 一郎¹

Geomagnetic Cut Off Rigidities at Sanriku Balloon Center(2)

By

Ichiro KONDO

Abstract : For the analysis of cosmic ray charged particles observation near the top of the atmosphere, it is important to know the minimum rigidities for several directions. This minimum rigidities are due to the effect of the geomagnetic field, which can be approximated by the spherical harmonic coefficients (IGRF: International Geomagnetic Reference Field).

In this paper, geomagnetic cut off rigidities for 41 directions at an altitude of 35 km above Sanriku Balloon Center (SBC: geographic lat.:39.158° N, long: 141.825° E) . IGRF at 3 different epochs (1955, 1980, 1995) were used in the calculation of the trajectory trace of cosmic rays in the geomagnetic field. It is found that the secular changes of the cut off rigidity are relatively small at this location.

概 要

気球搭載機器によって、大気上層で宇宙線に関する観測を行なう時に、宇宙線の到来方向によって、地球磁場による切断運動量（geomagnetic cut-off rigidity）がどう変化するかを知っている必要がある。特に積分的な宇宙線強度や、一次宇宙線のrigidity分布を比較したり、東西効果を利用してrigidityを求めるといったような場合には、可成り正確な知識を必要とする。

この目的のために、1981年の「大気球特集号」に井上葵・和田雅美・近藤一郎の共著で、「三陸上空の地球磁場による宇宙線切断運動量」と題する報告 [1] を掲載した。この時は、宇宙線の地球磁場内での軌道の計算は、大型計算機で行っても可成りの時間を要するため、必要最小限の計算から結果を求めた。最近のCPUの性能向上により、Personal ComputerでもCPU Clockが1-3 GHzという高速な計算性能を持つ様になった。そこで、前回は若干の推定を行った地球磁場の経年変化の影響を含め、やや詳しい計算を行ったので、その結果を報告する。

¹ 東京大学 E-mail: ikrabbit@jcom.home.ne.jp

重要語：宇宙線，地磁気切断運動量，三陸観測所，宇宙線軌道計算

1. 軌道の計算方法

軌道の計算方法については，前回の報告に詳しく述べてあるが，今回も全く同じ方法に従った．つまり，三陸上空 35 km の高度から，負荷電の粒子を特定の天頂角・方位角に向けて打ち出し，その軌道（位置ベクトル，速度ベクトル）を運動方程式の数値積分で追跡する．数値積分には Runge Kutta Gill の方法を使用し，地球磁場の各成分については，国際的に承認されている International Geomagnetic Reference Field (IGRF) の係数 [2] を用いた他，参考のために前回使用した Finch Leaton による 1955 年の係数 [3] も使用した．Finch Leaton の係数は $n_{\max}=6$ であるが，IGRF は $n_{\max}=10$ とより高次の成分を含んでいる．

前回の報告の時の計算速度は 1 ステップ約 2 msec であったが，今回はパソコン (cpu clock 1.5 GHz) でも，1 ステップ 約 $150 \mu\text{sec}$ となり，約 13 倍の速度になった．しかも，自分の卓上で，データの書き込みから，プログラムの実行，結果の整理までを数分から数時間の作業で行える．膨大なプリント出力もなく，出力データをディスプレイ画面上でチェックし，編集・分析することで，目的の結果を迅速に得ることができる．

計算に使ったプログラムは前は FORTRAN 言語によって記述したが，今回はより汎用性を考えて C 言語 (ANSI-C 規格) を用いた．本質的には，前回用いたプログラムと変わらないが，以下に述べるいくつかの点を変更した．

a. 積分の step 長

前回の計算では，地心距離と，粒子の rigidity によって，表を使って段階的に step 長を変化させる方法を取った．今回はこれを数式による計算に変更した．実際には先ず地表での step 長を h_0 (地球半径 = 1) とし，次に地心距離によって実際の step 長 h を求めた．

i) Rigidity (Pc) に対する変化

$h_0 = 3.5 \cdot 10^{** - 5}$	$Pc < 1.0 \text{ Gv}$
$h_0 = 4.0 \cdot 10^{** - 5} \times Pc^{** 1.7}$	$1.0 \text{ Gv} \leq Pc \leq 3.0 \text{ Gv}$
$h_0 = 7.7 \cdot 10^{** - 5} \times (Pc / 3.0)^{** 0.5}$	$3.0 \text{ Gv} < Pc \leq 25.0 \text{ Gv}$
$h_0 = 2.29 \cdot 10^{** - 4}$	$25.0 \text{ Gv} < Pc$

図 1 に実際の値の例が示してある．

ii) 地心距離 r (地球半径 = 1) に対する変化

$h = h_0$	$r < 1.0$
$h = h_0 \times r^{** 1.7}$	$1.0 \leq r \leq 7.0$
$h = h_0 \times r^{** 1.7} \times (r / 7)^{** 0.5}$	$7.0 < r \leq 25.0$
$h = 490.2 \times h_0$	$25.0 < r$

図 2 に実際の値の例が示してある．

b. 出発点での天頂角・方位角

前回の計算では，三陸上空での軌道計算は，地理緯度 39.158 度，地理経度 141.825 度の地点の高度 35 km を観測点とし，そこで，鉛直方向と，天頂角 16, 32, 48, 64, 80 度で，方位角 0, 22.5, 45, ..., 337.5 度の方向についての軌道について，計算を行った．今回は，経年変化などを見る目的なので，方位角については，45 度間隔の 8 方向について計算を行った．

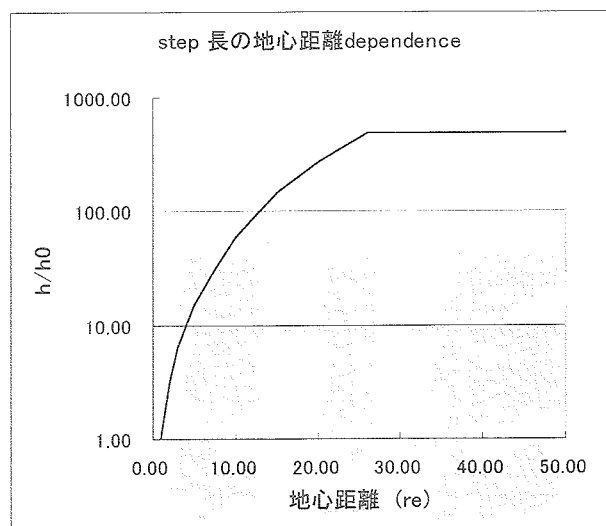


図1 step長の地心距離に対する変化

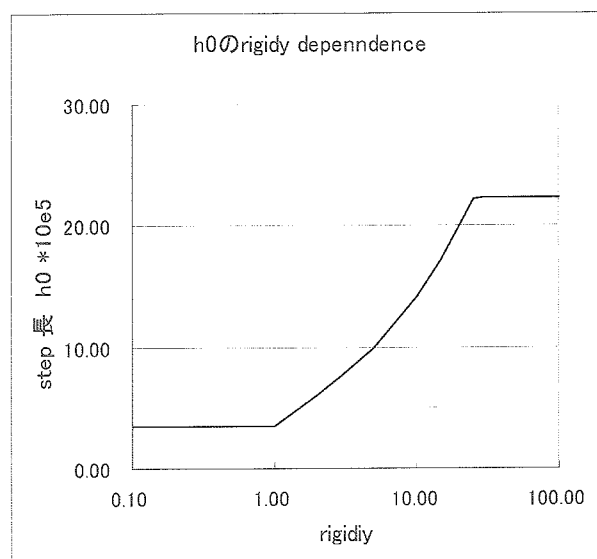


図2 step長のrigidyに対する変化

c. 地球磁場に関する係数

前回の計算では、Finch and Leatonによる1955年の係数を用いたが、その後、国際的に認められた磁場の係数IGRFが1900年から5年置きに発表されているので、これの中から1955, 1980, 1995の係数 ($n_{\max}=10$) を使用し、また比較のために、前回と同様にFinch and Leatonによる係数 ($n_{\max}=6$) による計算を行った。

d. 軌道計算をしたRigidy

今回は、3段階の方法で、cut off rigidityを求める方式をとった。第一段階では、後で平均の粒子のsource direction等が求められる様に、次の区分けで、ほぼ対数的なrigidityの間隔で、計算を行う。Rigidity (Pc Gv.) の範囲によって、rigidityのステップ (dPc (Gv)) を表1の様に設定した。

第一段階の計算で、その方向のCut off Rigidityの概算の値が見つかるので、第二段階では、その値の上下 ± 3 Gvの範囲は0.025 Gv間隔、その上下4 Gvの範囲は0.1 Gvの間隔で軌道の計算を行った。これで多くの場合は十分な精度で、Effective Cut off Rigidityが計算できるが、時には第三段階として、補充の計算を行った。41方向について計算に要する時間は、一つの地球磁場係数に対し、第一段階が約3分、第二段階が約20分で、第三段階を含めて、約30分以内で、軌道計算は完了する

表1 rigidity範囲と計算したrigidityの間隔 (第一段階)

Pc	dPc	Pc	dPc	Pc	dPc	Pc	dPc
800 ~ 440	40	400 ~ 220	20	200 ~ 110	10	100 ~ 55	5
50 ~ 27.5	2.5	25 ~ 16	1.0	15 ~ 0.5	0.5		

e. 軌道終端の判定

軌道計算プログラムによる計算では、最終的にその軌道が地球磁場の圏外へつながっている (allowed orbit) か、または地球大気内に戻ってしまうか (re-entrant orbit) であるかを判定する基準が必要である。今回の計算では、粒子の地心距離が地球半径の25倍 (25 Re) 以上になり、且つ粒子の速度ベクトルのradial成分が正である場合に計算を終了し、allowed orbitと判定する。又地心距離が出发点より小さくなり、且つ粒子の速度ベクトルのradial成分が負の場合にその軌道はre-entrant orbitと判定する。このどちらの条件も満足しない軌道については、出发点から経度方向に地球を4周以上回った時には、やはりre-entrant orbitと判定し、計算を終了する。これらの3ヶの

条件をも満足しない軌道については、30,000 stepを経過したら計算を終了し、trapped orbitとする処置が組み込まれているが、今回の計算では、これに該当するorbitはなかった。

2. 計算結果と評価

前章で述べた方法で、それぞれの地球磁場係数にたいして、三陸上空での宇宙線粒子の軌道の計算が行われた。これから、各方向についてのEffective Cut Off Rigidityを求める訳であるが、三陸の様に緯度が低い場所では、軌道が地球を横切ることによって生じるいわゆるpenumbra(半影)と呼ばれるrigidity範囲があるので、これを特定することが必要である。今回はこの範囲でもrigidityを0.1 Gvおきに計算を行ったので、結果的には、狭いshadow areaをミスしていた可能性があった。今回はこれを0.025 Gvおきの計算としたので、より精度の高い結果が得られた。

Effective Cut Off Rigidityの計算は次の様に行う。

まず、そのrigidity以上では、すべての粒子が計算地点に到達できる、いわゆるMain cone rigidity (Pm)

が定まる。次にこのrigidityからより低rigidityの領域で、それ以下のrigidityの粒子はその地点に到達出来ないといういわゆるStormer cone rigidity (Ps) を定め、且つMain cone rigidityとStormer cone rigidityの間にあるallowed orbitsの数 (N Exit) を数える。今回はこの範囲での計算はrigidity 0.025 Gv間隔で行ったので、次の式でEffective Cut Off Rigidity (Pce) を求めた。

$$Pce = Pm - 0.025 * N_{Exit}$$

1995年のIGRF係数を使用した計算結果について、各方向別に、Main cone rigidity, penumbra中のallowed regionの幅 (Window), Effective cut off rigidity, penumbraの幅, allowed orbitの最下限のrigidityが表2に示してある。今回の計算に用いた4種の磁場係数について、求めたEffective Cut Off Rigidityを表2に示した。

表2の結果の内1955 F.Lの磁場係数による結果は前回の計算結果と一致すべきであるが、実際には、最大で0.2 Gv程度の差異が見られる。この原因は前回は、rigidityについて0.1 Gv間隔での計算であるのに、今回は0.025 Gv間隔であるので、penumbraの細かい構造を見る事が出来たためと思われる。

地球磁場の経年変化によるcut off rigidityの変化は、方向にもよるが、ただか0.2 Gv程度であると思われる。従って、2000年代に入った時期の実験でも、ここに報告した値を参考として、データの解析を進めても大きな間違いがない。

地上の宇宙線観測についても、同じ様にgeomagnetic cut off rigidityの計算や、より高いrigidityの粒子の地球磁場外からの到来方向の計算などは、ここで用いた軌道計算プログラムを使って、比較的短時間に計算が行える様になった。従って、多方向中間子テレスコープや中性子モニターなどを使った観測から、宇宙線の異方性を求めるためのCoupling Coefficients等の計算も従来より、短時間で行える様になり、いくつかの研究機関で研究に用いられている。

なお、この論文は西村 純元宇宙科学研究所長のすすめで、発表する事とした。

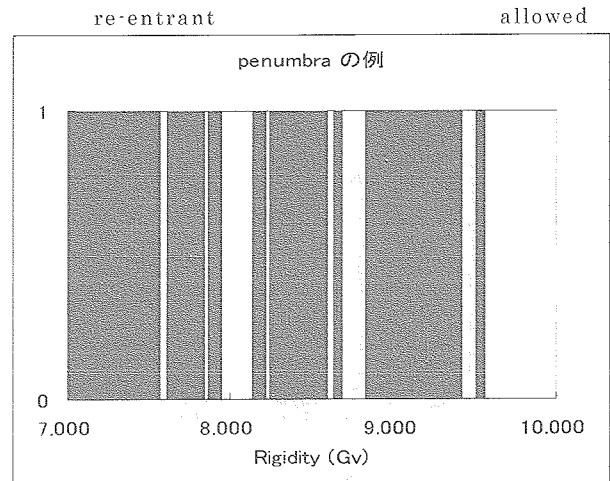


図3 penumbra (半影) の例

表2 三陸上空におけるcut off rigidity計算表の例
 Geomagnetic Cut Off rigidities at SBC, IGRF 1995
 Lat.= 39.158, Lon.= 141.825, Alt.= 35 km

Zenith	Vert	16							
Azim.	0	0	45	90	135	180	225	270	315
Main C	10.512	11.048	11.913	11.938	11.063	10.063	9.563	9.613	10.113
Window	0.275	0.725	0.400	0.200	0.225	0.325	0.600	0.275	0.700
Eff.Cut	10.237	10.323	11.513	11.738	10.838	9.738	8.963	9.338	9.413
Penum	1.324	2.310	2.050	1.625	1.375	1.750	2.000	1.275	2.325
Stormer	9.188	8.738	9.863	10.313	9.688	8.313	7.563	8.338	7.788
N Exit	11	29	16	8	9	13	24	11	28
Zenith		32							
Azim.		0	45	90	135	180	225	270	315
Main C		10.888	13.813	14.113	11.838	9.663	8.963	8.988	9.263
Window		0.275	0.200	0.025	0.025	0.225	0.625	0.675	0.550
Eff.Cut		10.613	13.613	14.088	11.813	9.438	8.338	8.313	8.713
Penum		0.650	0.275	0.200	0.175	0.978	1.425	1.950	0.749
Stormer		10.238	13.538	13.913	11.663	8.685	7.538	7.038	8.513
N Exit		11	8	1	1	9	25	27	22
Zenith		48							
Azim.		0	45	90	135	180	225	270	315
Main C		8.988	15.763	17.513	12.913	9.388	8.613	8.313	7.688
Window		0.100	0.000	0.025	0.000	0.200	0.675	0.400	0.150
Eff.Cut		8.888	15.763	17.488	12.913	9.188	7.938	7.913	7.538
Penum		0.500	0.000	0.200	0.000	1.450	2.275	0.475	0.426
Stormer		8.488	15.763	17.313	12.913	7.938	6.338	7.838	7.263
N Exit		4	0	1	0	8	27	16	6
Zenith		64							
Azim.		0	45	90	135	180	225	270	315
Main-C		11.988	16.463	22.888	14.213	9.213	8.513	7.113	7.938
Window		0.000	0.000	0.075	0.050	0.150	0.825	0.150	0.400
Eff.Cut		11.988	16.463	22.813	14.163	9.063	7.688	6.963	7.538
Penum		0.000	0.000	0.150	0.075	0.750	1.625	0.975	1.250
Stormer		11.988	16.463	22.738	14.138	8.463	6.888	6.138	6.688
N Exit		0	0	3	2	6	33	6	16
Zenith		80							
Azim.		0	45	90	135	180	225	270	315
Main-C		20.838	30.663	31.588	14.463	9.188	8.663	6.988	9.338
Window		0.000	0.000	0.000	0.075	0.275	0.425	0.225	0.000
Eff.Cut		20.838	30.663	31.588	14.388	8.913	8.238	6.763	9.338
Penum		0.000	0.000	0.000	0.125	1.051	0.874	0.875	0.000
Stormer		20.838	30.663	31.588	14.338	8.138	7.788	6.113	9.338
N Exit		0	0	0	3	11	17	9	0

表3 上空 35 k mの各方向に到達出来る宇宙線の下限硬さ (rigidity)
 Geomagnetic Cut Off rigidities at SBC(Lat.= 39.158, Lon.= 141.825, Alt.= 35 km),
 Summary: Effective Cut off Rigidity (in Gv)

SBC									
	Vert	ZEN. = 16							
Model	AZIM =	0	45	90	135	180	225	270	315
1955 FL	10.413	10.413	11.813	12.063	11.113	9.788	9.188	9.388	9.563
1955 IG	10.288	10.313	11.613	11.863	11.018	9.938	9.088	9.363	9.463
1980 IG	10.313	10.488	11.788	12.013	10.988	9.813	9.113	9.338	9.563
1995 IG	10.237	10.323	11.513	11.738	10.838	9.738	8.963	9.338	9.413
		ZEN. = 32							
Model	AZIM =	0	45	90	135	180	225	270	315
1955 FL		10.013	13.913	14.438	12.063	9.683	8.463	8.463	9.138
1955 IG		10.913	13.738	14.263	11.888	9.413	8.963	8.313	8.713
1980 IG		10.963	12.838	14.363	12.038	9.638	8.438	8.438	9.138
1995 IG		10.613	13.613	14.088	11.813	9.438	8.338	8.313	8.713
		ZEN. = 48							
Model	AZIM =	0	45	90	135	180	225	270	315
1955 FL		9.063	16.308	17.838	13.338	9.463	8.138	8.313	7.738
1955 IG		8.813	16.113	17.588	13.088	9.088	8.063	8.088	7.613
1980 IG		9.038	16.313	17.863	13.313	9.363	8.038	8.188	7.713
1995 IG		8.888	15.763	17.488	12.913	9.188	7.938	7.913	7.538
		ZEN = 64							
Model	AZIM =	0	45	90	135	180	225	270	315
1955 FL		12.238	16.963	23.363	14.763	9.263	7.988	7.263	7.838
1955 IG		12.063	16.638	23.113	14.338	9.138	7.788	7.063	7.713
1980 IG		12.213	17.838	23.313	14.738	9.238	7.788	7.138	7.763
1995 IG		11.988	16.463	22.813	14.163	9.063	7.688	6.963	7.538
		ZEN. = 80							
Model	AZIM =	0	45	90	135	180	225	270	315
1955 FL		21.138	31.238	32.463	15.238	9.263	7.738	7.013	9.313
1955 IG		20.963	30.888	32.188	14.413	9.138	8.038	6.963	9.313
1980 IG		21.038	30.663	32.438	15.488	9.238	7.813	6.888	9.363
1995 IG		20.838	30.663	31.588	14.388	8.913	8.238	6.763	9.338

参 考 文 献

- [1] 上 葵, 和田 張美, 近藤 一郎: 宇宙科学研究所報告 特集一号 (大気球特集号), 79-75 (1981)
- [2] IUGG/IAGA によって国際的に承認された地球磁場の係数: 理科年表 (岩波書店)「地学部」に掲載されている, また京都大学・地磁気国際データセンターのホームページ (<http://swdcwww.kuji.kyoto-u.ac.jp/igrf/index-ihtml/>) からダウンロードできる.