

あらせ衛星搭載の電子計測機器 (HEP) への 高エネルギープロトン入射モデル計算

戸田 穂乃香^{*1} 三宅 亙^{*2} 三谷 烈史^{*3} 高島 健^{*3} 三好 由純^{*4} Park Inchun^{*4}
堀 智昭^{*4}

Calculation of High-energy Proton Injection to High-energy Electron Experiments (HEP) on board the Arase Satellite

by

Honoka TODA^{*1}, Wataru MIYAKE^{*2}, Takefumi MITANI^{*3}, Takeshi TAKASHIMA^{*3},
Yoshizumi MIYOSHI^{*4}, Inchun PARK^{*4} and Tomoaki HORI^{*4}

(Received on Sep. 30, 2019 and accepted on Nov. 07, 2019)

Abstract

The Arase satellite, launched on December 20, 2016, is equipped with high-energy electron experiments (HEP) to observe high-energy electrons in the earth's radiation belt. High-energy protons are abundant in the inner belt and are known to be an intense contamination source for electron measurement. In this study, we performed Geant4 model calculations of HEP for incidence of energetic protons to investigate such contamination in detail. The results show that protons of >60 MeV can reach the SSDs (particle detector) by penetrating through the HEP cover case and some inner components. They cause significant output signals for all the energy ranges of observation with HEP. It is also revealed that 1-2 MeV and >6 MeV protons can enter the SSDs of HEP through the entrance aperture for electron measurement and generate some amount of output signals. Our results will be used to analyze energetic particle data in the radiation belt.

Keywords: Arase satellite, Radiation belt protons, Geant4 calculation

1. はじめに

放射線帯と呼ばれる高エネルギー粒子が留まっているところが地球周辺に存在する。放射線帯とは地球を取り巻く様に存在する高エネルギー荷電粒子の帯状の構造で、発見者の名を冠してヴァンアレン帯 (Van Allen Belt)とも呼ばれる。地球磁場に捕捉された高エネルギー粒子が赤道上空にトーラス型に地球を取り囲む形で存在する領域であり、地球に近い内帯の部分とその外側に存在する外帯の二つの部分に分けられる。内帯は、高度 3,000 km を中心に分布し、主として数 MeV から数百 MeV の高いエネルギーをもったプロトンが地球磁場によって捕捉された領域である。内帯を通過する人工衛星の搭載機器は、高エネルギープロトンの被ばくにより劣化や故障が起こることが報告されており、太陽電池の劣化¹⁾はその顕著な例である。一方、外帯は高度 20,000 km を中心に分布し、高エネルギーの電子 (>1 MeV) が主成分である。外帯の高エネルギー電子は、太陽風の変動やそれに伴う地磁気嵐の発生により激しく変動し生成と消滅を繰り返している。この高エネルギー電子は人工衛星の電子機器に

対して深部帯電を引き起こし、機器の誤動作や故障などの衛星異常を引き起こす要因として知られている²⁾。

低軌道衛星や国際宇宙ステーションの高度は数百 km で内帯中心部よりも高度は低い。一方、静止軌道は高度 36,000 km であり外帯中心部よりも高度は高い。このため、重度の被ばくからは逃れられているものの、高エネルギー粒子による被ばくは人工衛星の寿命を決める重要な要因であり、人工衛星の設計には被ばく量の見積りは欠かせない。この目的で NASA の放射線帯粒子の経験モデル AP9 や AE9 が開発されており³⁾、その更新が今なお随時行われている。また、外帯の高エネルギー電子の生成・消滅の物理過程には未解明な点が多く残されている。上記の工学上の重要性に加え、宇宙における普遍的な高エネルギー粒子の加速機構の理解にも繋がると考えられており、宇宙物理学においても重要な領域である。

あらせ衛星は 2016 年 12 月 20 日 20:00 (JST) にイブシロンロケット 2 号機で打ち上げられたジオスペース探査衛星⁴⁾である。機体重量は約 350 kg 軌道傾斜角は 32°、近地点は 440 km 遠地点は 32,000 km 周期はおおよそ 570 分である。主なミッションは太陽風の擾乱に起因する磁気嵐にともなって生成と消失を繰り返している放射線帯の高エネルギー電子がどのようにして生まれてくるのか、そして磁気嵐はどのように発達するのかを明らかにする

^{*1} 工学研究科機械工学専攻修士課程

^{*2} 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻教授

^{*3} JAXA/ISAS

^{*4} 名古屋大学/ISEE

ことである。この目的を達成するため、4 台の電子計測機器があらせ衛星には搭載され、19 eV から 20 MeV にわたる広いエネルギー範囲の電子を計測対象としている。

高エネルギープロトンはこれらの電子計測機器の内部にまで貫通して侵入し、その検出器に電子と同等の信号を発生させる。放射線帯内帯あたりの領域では高エネルギープロトンが多く存在し、機器への混入を防ぐことは困難である^{5), 6)}。それゆえ、放射線帯内帯は電子計測が最も困難な領域として知られている⁷⁾。一方で、あらせ衛星には高エネルギーのプロトンを計測する機器は搭載されておらず、高エネルギープロトンの計測値から混入信号を差し引くなどのデータ処理はできない。本研究の目的は、電子計測機器の構造モデルを作成し、これに高エネルギープロトンを入射させるモデル計算を行い、電子計測機器の出力データへの高エネルギープロトン混入を数値計算により検討することである。

2. 高エネルギー電子計測器 HEP

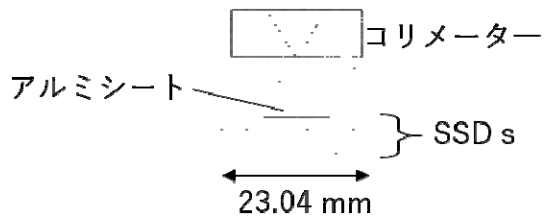


Fig. 1 Collimator and SSDs of HEP-L

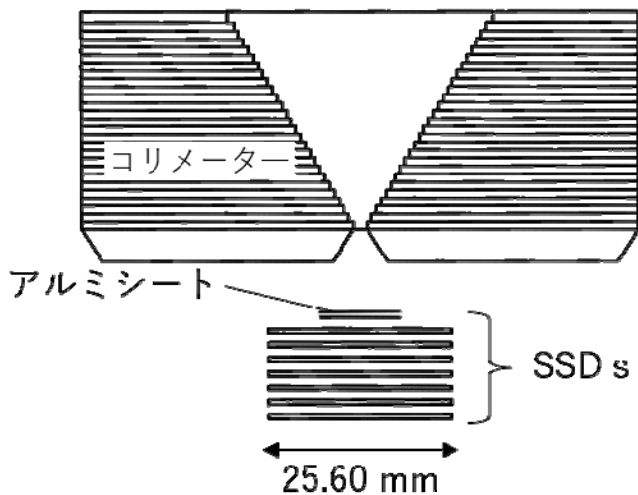


Fig. 2 Collimator and SSDs of HEP-H.

あらせ衛星には高エネルギー電子を計測するため高エネルギー電子観測機器の HEP (High-energy electron experiments) が搭載されている⁸⁾。HEP は HEP-L と HEP-H で構成されている。シリコンストリップ検出器である SSD (Silicon Strip Detector) は、入射電子のエネルギーを決定するとともに 1 次元で入射位置も計測する。SSD のストリップは Fig. 2 の左右の方向に並んでおり、コリメ

ーターは紙面に垂直方向には HEP-L で 0.63 mm, HEP-H では 2.4 mm の開口しかなく、1 次元のピンホールカメラを構成している。その焦点面に SSD スタックを配置して入射位置から粒子の入射角度が決定できる。HEP-L の SSD スタックは、1 枚の 50 μm 厚の Si シートと 3 枚の 600 μm 厚の Si シートからなり、Fig. 1 に示す。HEP-H は 1 枚の 50 μm 厚の Si シートと 7 枚の 600 μm 厚の Si シートからなり、Fig. 2 に示す。それぞれの SSD の前にはアルミシートを配置してある。これはプロトンと低エネルギーの電子の入射を排除するために使用される。HEP-L のアルミシートは 12.5 μm , HEP-H のアルミシートは 300 μm である³⁾。各物質に応じた粒子の飛程があり⁹⁾、この厚みが計測可能エネルギー範囲の下限を決定している。HEP-L および HEP-H の SSD の合計のシリコン厚さは、それぞれ 1.85 mm と 4.25 mm である。各 SSD で吸収されたエネルギーを合計することで入射電子エネルギーが機上で求められる。HEP-L の電子観測エネルギーは約 0.07 MeV $\sim$ 1.0 MeV, HEP-H は約 0.7 $\sim$ 2.0 MeV である。視野角は HEP-L および HEP-H ともに $60^\circ \times 10^\circ$ である。感度に相当する幾何学的因子 (G ファクター) は、コリメーターの開口面積と視野の立体角で決まり、HEP-L で $3.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ str}$, HEP-H で $3.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$ である。

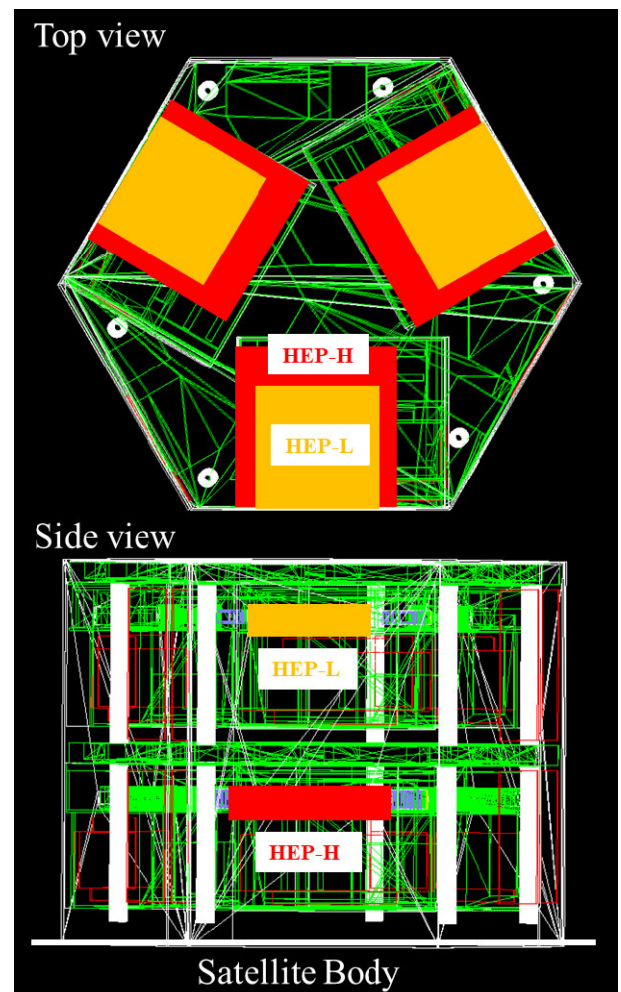


Fig. 3 Structure of HEP.

HEP の基本構造を Fig. 3 に示す。HEP は六角柱構造をしており、六角柱の高さが 150 mm、六角の頂点から対角の頂点までの幅が 204 mm 程である。HEP 全体カバーや大部分の内部構造はアルミでできている。上記の SSD センサーはアルミのケース（図中の橙が HEP-L、赤が HEP-H）の中に収納されており、これを載せるデッキ板や全体を支える 6 本の支柱が主な内部構造である。HEP の電子回路の基板は熱環境が安定している衛星構体（satellite body）の中にあるが、粒子を取り込む視野を十分に確保するために、この六角柱を突出させており HEP-L と HEP-H のセンサーを各々 3 台ずつ装着している。1 台のセンサーは 60° の視野を持つので、3 台の合計で視野は 180° となり、衛星のスピンの利用することで 4π str の全方向をカバーすることができる。衛星のスピン軸は上図で横に六角柱の頂点を結ぶ方向である。

3. プロトン入射計算

3.1 Geant4 でのシミュレーション

Fig. 3 に示した HEP の構造モデルを使用して、そのモデルに様々な角度から高エネルギープロトンを入射するモデル計算を実施した。本研究ではモデル計算のツールとして Geant4 10.04-patch02 を用いた。Geant4 とは放射線と物質の相互作用をシミュレートするためのソフトウェアであり、高エネルギー物理学から医療の放射線利用分野まで幅広く利用されている。ここで放射線とはプロトン・中性子・電子・ γ 線・ π 粒子・ μ 粒子などが挙げられる。物質との相互作用には γ 線などの 2 次放射線の発生や各物理過程の確率的な側面も取り込まれている。

本モデル計算においてはプロトンの入射方向を大きく 2 つに分けて行った。1 つ目はコリメーターの入り口 (Fig. 1 と Fig. 2 参照) から入射してアルミシートを通過して SSD に到達する場合であり、2 つ目はコリメーターを通過せずに HEP 全体カバーや内部構造を貫通して SSD に達する場合である。後者の入射方向の模式図を Fig. 4 に赤丸で示す。半球の中心に HEP-L あるいは HEP-H の SSD スタックが位置し、これに平行ビームでプロトンを照射する。HEP-L と HEP-H に対する計算は、各々個別に行った。プロトンビームの発射位置 (Fig. 4 の半球の半径) は SSD スタックの中心から 300 mm である。SSD 全体を覆うようにプロトンの発射場所を配置してある。HEP-L あるいは HEP-H の全 SSD に構造を貫通したプロトンが当たるように、約 11 cm² の十分なビームの断面積を取って計算をおこなった。1 つの入射方向と 1 つのエネルギーについて、2,000 発のプロトンビームを断面内でランダムに初期位置を変えて照射した。一方で前者のコリメーターを通過する場合、HEP-L あるいは HEP-H のセンサーの正面から仰角 0° としコリメーターが広がっている方位角 $\pm 30^\circ$ の範囲では 1° 刻みにプロトンを入射させた。ビームの断面積は上記と同じで、また 1 つの入射方向と 1 つのエネルギーについては上記と同様に 2,000 発のプロトンで計算した。プロトンのエネルギーは 0.8 MeV から 981 MeV までを対数的に等分割し、300 のステップで計算を行った。入射方向は合計で 77 であるため、計算した全

プロトン数は $2,000 \times 300 \times 77$ でおおよそ 5 千万弱になる。ただしこれらのプロトンが全て SSD に当たっているわけではないことには注意しておく必要がある。例えば、仰角 90° の Fig. 4 の中心の赤丸からの入射の場合、SSD は非常に薄い (50 μ m と 600 μ m) ため、大多数のプロトンは SSD に当たらずに通過していく。

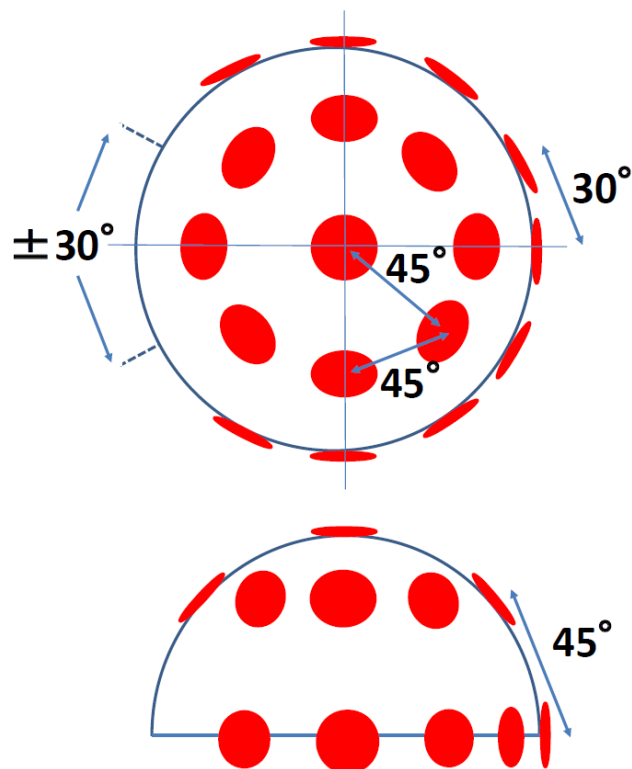


Fig. 4 Schematic view of incident directions of protons.

3.2 計算結果

Fig. 5 には HEP-L への正面方向のみのプロトン入射結果を 1, 2, 3 枚目の各 SSD に分けて示した。横軸が発射したプロトンのエネルギーで、縦軸がそれに対する各 SSD での吸収エネルギー、即ち観測されるエネルギーである。入射プロトンのエネルギーが 1 MeV より低い間は、SSD 前面に設置された 12.5 μ m のアルミシートを透過することができず、縦軸の観測エネルギーはゼロである。入射エネルギーが 1 MeV を超えてくるとアルミシートを貫通し、1 枚目の SSD でエネルギーが吸収され観測できるようになり観測プロトンエネルギーが立ち上がり、入射エネルギーとともに上昇してくる。しかし、さらに入射エネルギーが上がると、1 枚目の SSD を貫通して 2 枚目の SSD の観測エネルギーが立ち上がるのと引き換えに 1 枚目の SSD での観測エネルギーは頂点から低下に転ずる (橙破線)。この時、アルミシートでのわずかなエネルギー損失を除けば、1 枚目と 2 枚目の SSD の観測エネルギーの合計が入射プロトンのエネルギーにほぼ等しくなっている。さらに入射プロトンのエネルギーが上昇すると同様なことが 2 枚目と 3 枚目の SSD の間で生じる (橙実線)。また破線の青丸枠内はコリメータを貫通して

（即ちコリメーターが機能せずに）SSD に到達する場合が生じていることを示している．各 SSD で吸収され観測されるエネルギーには，その厚みに対応した上限があることもわかる．ぎりぎりまで貫通せずにその SSD に入射したプロトンのエネルギーが全て吸収される場合が観測エネルギーの最大値を与える．

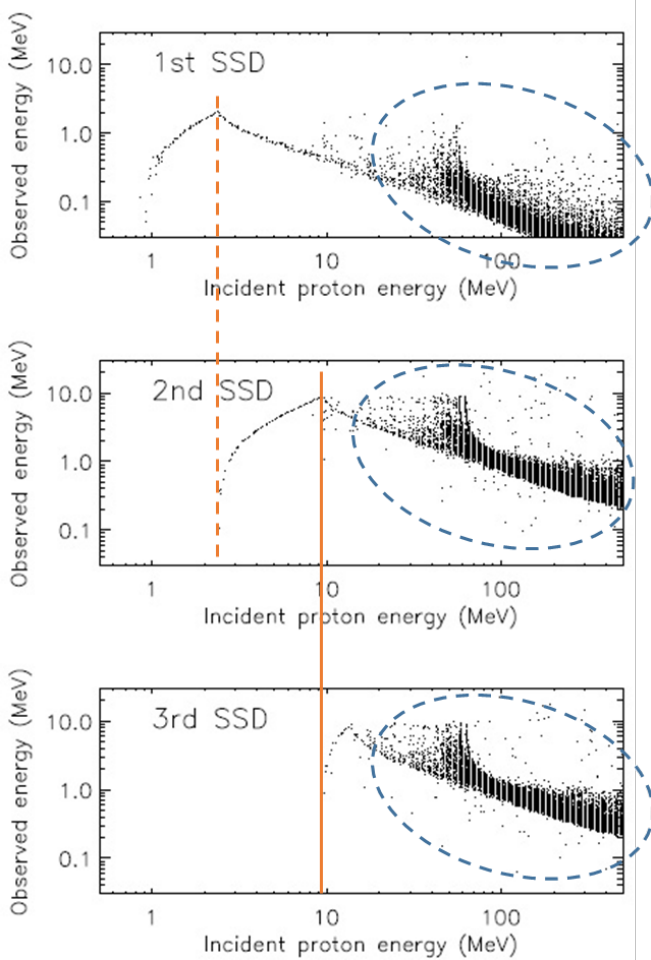


Fig. 5 An example of calculation results for each SSD of HEP-L.

実際の HEP の出力データは，全 SSD の観測エネルギーを合計し入射粒子のエネルギーを計測するものである．電子が SSD を貫通するエネルギー（観測上限値）を考慮するとともに計測回路部の簡素化・高速化のため，1 枚目の薄い SSD は 0.7 MeV を，2 枚目以降の SSD は 2 MeV を，出力エネルギー値の上限として飽和させている．さらにこの各 SSD からの出力の合計値を 2 MeV で飽和させて最終の観測エネルギー出力値としている．これらの過程をモデル計算上に組み込み，前述の 2 つの入射方向の大別を行い，入射プロトンエネルギーに対する観測エネルギーの値を HEP-L と HEP-H についてまとめたのが，Fig. 6 と Fig. 7 である．上のパネルは正面 $\pm 30^\circ$ からのプロトン入射の結果を，下のパネルは Fig. 4 の赤丸からのプロトン入射結果を．それぞれ示している．

HEP-L の結果を示した Fig. 6 の上のパネル（正面から $\pm 30^\circ$ 以内）では，入射したプロトンが 1～3 MeV のとき

に入射エネルギーの上昇とともに観測エネルギーが上昇していく．この領域は Fig. 5 で示した 1 枚目の SSD の吸収に対応している．1 枚目の SSD の飽和エネルギー 0.7 MeV で観測エネルギーがフラットになっていることが分かる．さらに入射エネルギーが上昇して 3 MeV を超えるあたりになると，観測エネルギーに 2 MeV の飽和が現れている．コリメーターを貫通する数十 MeV 以上の入射エネルギーになると，ほとんどの観測エネルギーに出力が出てくることになる．一方，Fig. 6 の下のパネルによると，HEP 全体ケースや内部構造を貫通して SSD にプロトンが到達するには，50～60 MeV 以上の入射エネルギーが必要であることが分かる．この高エネルギープロトンのカウントデータは全ての観測エネルギー領域で出てくることになる．

Fig. 7 の HEP-H の結果も HEP-L の場合とほぼ同様である．ただし，SSD 前面に設置してあるアルミシートの厚みが 300 μm であるため，6 MeV 以上の入射エネルギーで観測エネルギーが立ち上がってくる．HEP-L では観測エネルギーの出力の上限が 1.8 MeV であるため 2 MeV で飽和されたデータは出力されないが，HEP-H では出力の上限が 2 MeV であるため，2 MeV で飽和した入射エネルギー 6～7 MeV 以上のプロトンのカウントデータが出力されることが分かる．また，およそ 60 MeV 以上の入射エネルギーのプロトンのカウントデータが全ての観測エネルギー領域で出てくることも HEP-L と同様である．

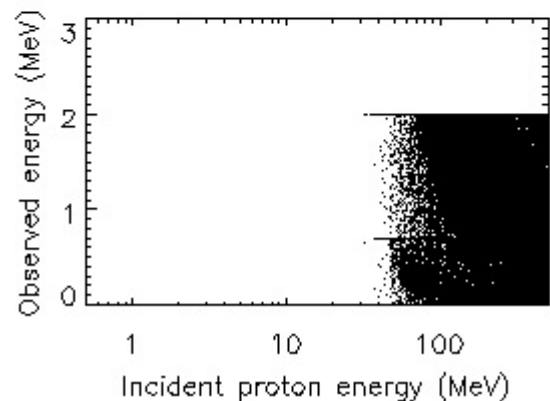
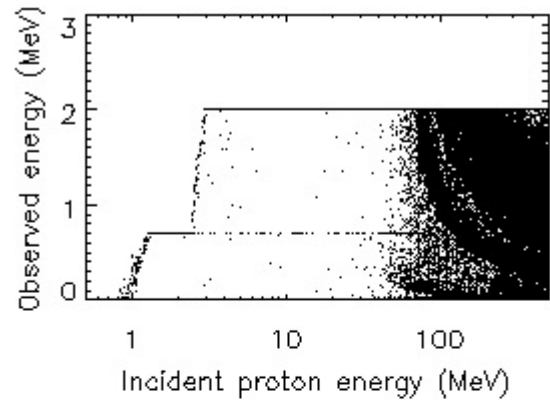


Fig. 6 Calculation results for total SSDs of HEP-L.

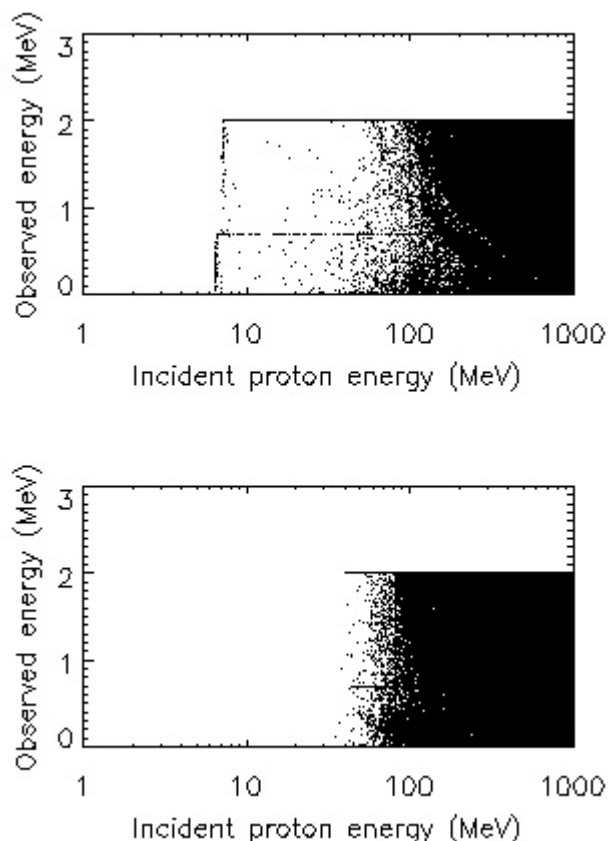


Fig. 7 Calculation results for total SSDs of HEP-H.

4. 考察

本研究の Geant4 によるプロトン入射計算は、Fig. 3 に示した構造モデルを用いて行われたわけだが、そこでは計装線や IC チップ、ネジが入っていない。これらのパーツが内部構造に含まれると、そこを貫通するプロトンに若干のエネルギー損失が生じるため Fig. 6 と Fig. 7 の下のパネルで入射エネルギーが高い方向にその分のずれが生じる。しかし、Fig. 3 で無視した上記のパーツはごくわずかの部分にしか存在せず、入射プロトンのエネルギーがおよそ 60 MeV 以上で全観測エネルギー領域に出力カウントが出てくるとい結果にはほとんど影響はないと考えられる。

高エネルギープロトンの入射方向については Fig. 4 に示したように衛星構体側からの入射は考慮していない。プロトンのエネルギーが数百 MeV になると衛星本体を貫通して SSD に到達することが予想され、Fig. 6 と Fig. 7 の下のパネルで入射エネルギーが数百 MeV の部分の粒子カウントは増大するであろう。しかし、すでに 2π str 以上の立体角を Fig. 4 に示すようにカバーしており、その増加分は数十%に留まると想定される。また影響を受けているのは数百 MeV の入射エネルギーの領域であり、入射プロトンのエネルギーがおよそ 60 MeV 以上で全観測エネルギー領域に出力カウントが出てくるとい結果には影響はないはずである。

最後にここでの結果を踏まえて、実際の地球周回軌道上でどのような計測データが出てくるかを検討してみる。放射線帯内帯の中心部の高度 3,000 km においては、特にエネルギーの高いプロトンが多く存在し、そこでのプロトンのエネルギースペクトルはかなりハードである。NASA の経験モデル AP9²⁾ では 1 MeV 以上と 60 MeV 以上のプロトンフラックスは数倍の違いしかない。一方で、HEP-L と HEP-H とともに数 MeV と 60 MeV 以上の 2 つの異なるエネルギーのプロトンが混入するのであるが、60 MeV 以上の方が圧倒的にそのカウント数は大きい。以上から内帯中心部では 60 MeV 以上の高エネルギープロトンの混入が支配的であることが想定される。また、近年の米国の探査衛星 Van Allen Probes の観測^{7), 10)} によると、内帯には 1 MeV を超えるエネルギーの電子はほとんど存在しない。このため特に 1 MeV 以上の観測エネルギー領域では、電子も観測されず 60 MeV 以上の高エネルギープロトンのみが観測されると予想される。

NASA の経験モデル AP9 によると、内帯の中心部から高度を上げていくと 60 MeV 以上の高エネルギープロトンのフラックスは急激に減少するのに対し、1 MeV 以上のプロトンフラックスはむしろ上昇しエネルギースペクトルはソフトになる。例えば高度 6,000 km では両者のフラックス比は数千倍に達する。このような領域では HEP-L と HEP-H とともに数 MeV 領域のプロトンの混入が 60 MeV 以上のものに近づいてくる。特に観測エネルギーが 0.7 MeV (HEP-L と HEP-H) と 2 MeV (HEP-H のみ) の飽和しているところでは、数 MeV 領域のプロトンが卓越して観測される可能性を指摘できる。

具体的にこのカウント値を見積もってみる。HEP-L の飽和が出るのは 1-2 MeV の入射プロトンに対応し、AP9 では最大の場合で $10^7/\text{cm}^2 \text{ s}$ の全方位 (4π str で積分した) フラックスが見込まれる。一方 HEP-L の G-factor は $3.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ str}$ であり、想定カウントは約 200 /s となる。同様に HEP-H の飽和は >6 MeV の入射プロトンに対応しており AP9 での最大全方位角フラックスは $3 \times 10^5/\text{cm}^2 \text{ s}$ であり、これに HEP-H の G-factor $3.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$ を使うと、想定カウントは約 100 /s となる。これはどちらも有意なカウント値でありプロトンフラックスが大きい場所ではプロトンのカウントが混入することが想定される。

電子の信号とプロトンの信号を 1 つ 1 つ区別することは、現在の計測スキームではできない。しかし、上述の飽和はプロトンに対してだけであり、電子はこの飽和に達するよりも低いエネルギーで貫通して次の SSD に進行する。つまり、電子の場合は滑らかなエネルギースペクトルが得られるのに対し、飽和に対応するエネルギーでのみ特にカウントが高ければプロトンの混入が有意であることは判断できる。

実際の軌道上の計測データの解析も進められつつあり、高エネルギー電子とは考えられない観測結果が放射線帯内帯で報告されている¹¹⁾。NASA の経験モデル AP9 によ

る様々なエネルギーのプロトンの空間分布との比較から、全く異なる2つのエネルギー領域でプロトンの混入があるとうまく説明がつくことが分かっている。本研究の結果はこの軌道上の計測データの解釈と一致するものである。

5. まとめ

あらせ衛星に搭載された高エネルギー電子計測器 HEP の構造モデルを作成し、Geant4 を使って高エネルギープロトンの混入に関するモデル計算を行った。その結果 2 つの HEP のセンサーである HEP-L と HEP-H のほぼすべての観測エネルギー領域で 60 MeV 以上の入射エネルギーを持つプロトンの混入が示唆された。これらの高エネルギープロトンは、HEP のカバーケースや内部構造を貫通して検出器の SSD に到達する。また、各々のセンサー入り口から入射してくるプロトンに関しては、HEP-L ではおよそ 1~2 MeV、HEP-H では 6 MeV 以上のエネルギーのプロトンの混入が確認された。特に処理回路上で飽和させている観測エネルギーが 0.7 MeV と 2 MeV ではこの数 MeV のプロトンの混入が増大することもわかった。

参考文献

- 1) 戸田穂乃香, 三宅互, 三好由純, 豊田裕之, 宮澤優, 篠原育, 松岡彩子: 「あらせ」の太陽電池劣化とプロトン放射線帯モデルとの比較, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 日本航空宇宙学会, 3G04, JSASS-2018-4756, 久留米シティプラザ (2018).
- 2) 三好由純, 加藤雄人, 小嶋浩嗣, 疋島充: 波動粒子相互作用による放射線帯相対論的エネルギー電子の生成機構とその人工衛星観測による実証に向けて, J. Plasma Fusion Res. Vol.89, No.8, pp.536-543 (2013).
- 3) G. P. Ginet, T. P. O'Brien, S. L. Huston, W. R. Johnston, T. B. Guild, R. Friedel, C. D. Lindstrom, C. J. Roth, P. Whelan, R. A. Quinn, D. Madden, S. Morley and Yi-Jiun Su: AE9, AP9 and SPM: New Models for Specifying the Trapped Energetic Particle and Space Plasma Environment, Space Science Reviews, pp.579-615 (2013).
- 4) Y. Miyoshi, I. Shinohara, T. Mitani, K. Asamura, N. Higashio, T. Mitani, S. Kasahara, S. Yokota, Y. Kazama, S.-Y. Wang, S. W. Y. Tam, P. T. P. Ho, Y. Kasahara, Y. Kasaba, S. Yagitani, A. Matsuoka, H. Kojima, Yuto Katoh, K. Shiokawa and K. Seki: Geospace Exploration Project ERG. Earth Planets Space, Vol.70 (2018).
- 5) R. S. Selesnick, D. N. Baker, S. G. Kanekal, V. C. Hoxie and X. Li: Modeling the proton radiation belt with Van Allen Probes Relativistic Electron-Proton Telescope data, Journal of Geophysical Research: Space Physics, pp.685-697 (2018).
- 6) J. F. Fennell, J. B. Blake, S. Claudepierre, J. Mazur, S. Kanekal, P. O'Brien, D. Baker, W. Crain, D. Mabry and J. Clemmons: Current energetic particle sensors, Journal of Geophysical Research: Space Physics, pp.8840-8858 (2016).
- 7) S. G. Claudepierre, T. P. O'Brien, M. D. Looper, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder, J. H. Clemmons, J. E. Mazur, D. L. Turner, G. D. Reeves and H. E. Spence: A Revised Look at Relativistic Electrons in the Earth's Inner Radiation Zone and Slot Region, Journal of Geophysical Research Space Physics, pp.934-951 (2019).
- 8) T. Mitani, T. Takashima, S. Kasahara, W. Miyake and M. Hirahara: High-energy electron experiments (HEP) aboard the ERG (Arase) satellite, Earth Planets and Space, Vol. 70 (2018).
- 9) 木村逸朗, 阪井英次: 放射線計測ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1991).
- 10) F. Fennell, S. G. Claudepierre, J. B. Blake, T. P. O'Brien, J. H. Clemmons, D. N. Baker, H. E. Spence and G. D. Reeves: Van Allen Probes show that the inner radiation zone contains no MeV electrons: ECT/MagEIS data, Geophys Research Letters, pp.1283-1289 (2015).
- 11) H. Toda, W. Miyake, T. Mitani, T. Takashima, Y. Miyoshi, I. Park and T. Hori: Observation of high-energy particles in the inner radiation belt by the HEP instrument of the Arase satellite, submitted to Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan (2019).