

氏 名	高 木 俊 治
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	太陽活動による放射線帯粒子の分布変動と 半導体素子の損傷に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 中村 尚司
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 武部 雅汎 東北大学教授 渡辺 博茂

論 文 内 容 要 旨

宇宙空間には、銀河宇宙線をはじめとして、太陽フレア粒子や放射線帯粒子などの高エネルギーの荷電粒子が多く存在することはすでに様々な観測の結果から知られている。これらの宇宙環境放射線は、宇宙機器や宇宙飛行士の被曝に多大な影響を及ぼす。とりわけ、近年、スペースシャトル等による有人宇宙飛行の増加、宇宙ステーション計画の進展に伴い、宇宙飛行士の宇宙環境放射線による被曝評価がますます重要になってきている。一方、人工衛星やスペースシャトル等の宇宙飛行体は高度な制御を必要とし、数多くの電子機器が装備されており、宇宙空間での半導体素子の利用はなくてはならないものになっている。

宇宙環境放射線の中でも放射線帯は、粒子フラックスが高く、またその存在している位置が衛星やロケットの軌道にあるため非常に重要で、様々な人工衛星やロケットなどにより測定されてきた。それらの結果を、米国航空宇宙局 (NASA) において、電子と陽子の強度分布について放射線帯モデルとしてまとめ、現在、宇宙環境における線量評価のための線源強度を計算するのに広く利用されている。しかし、この NASA の放射線帯モデルは 1960 年代から 1970 年代にかけての測定で得られた古いデータに基づいたもので、現状とは食い違いがあることが報告されており、新しい観測値が望まれている状況にある。

搭載電子機器の放射線に対する影響には、シングルイベント効果とトータルドーズ効果とがあるが、これらの効果の評価は地上での加速器による測定が主で、人工衛星等の飛行体の打ち上げが少ないこともあり、実際の宇宙空間での測定は少ない。

宇宙科学研究所の第12号科学衛星「あけぼの」(EXOS-D)は、オーロラならびにオーロラに關係する諸現象の観測を目的として打ち上げられ、高度約250kmから11000km、傾斜角75°と、磁気圏を横切るような準極軌道を通り、放射線帯の粒子強度の高いところを通過する。この様に放射線帯を横切るような軌道を通る衛星は少なく、その放射線環境は興味深いものがある。そのため、この衛星に搭載された荷電粒子の検出器により放射線帯粒子の測定がされている。この検出器のエネルギー応答特性から、検出粒子は電子 ($>0.3\text{MeV}$), 陽子 (6.3–38MeV), α 粒子 (15–52MeV)である。また、メモリ用半導体素子で宇宙環境放射線による半導体素子の誤動作の発生率ならびに劣化の測定がされている。

本論文は、「あけぼの」衛星に搭載された検出器の測定データから、放射線帯の構造ならびに宇宙環境放射線による半導体素子の劣化、誤動作についての研究をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論で本研究の背景ならびに目的を述べた。

第2章では放射線帯について詳しく述べた。放射線帯を構成している荷電粒子の生成・消滅の機構、荷電粒子の地球磁場内での運動について、これまでに明らかされていることを述べ、放射線帯の概要を把握した。また、現在公表されているNASAの放射線帯モデルについても紹介した。

第3章では「あけぼの」衛星の概要ならびに、この衛星に搭載された高エネルギー荷電粒子の検出器と放射線による効果の測定に用いた半導体素子について述べた。高エネルギー荷電粒子の検出器についてはエネルギー応答特性の検証ならびにデータ処理法について述べた。また半導体素子については、衛星打ち上げ前に地上実験により得られている耐線量データを示した。

第4章に観測結果を示した。1989年2月22日の「あけぼの」衛星の打ち上げから約3年の長期にわたり、放射線帯中の電子、陽子、 α 粒子が測定された。この期間で、比較的放射線帯が安定しているときに比べて、1989年10月19日と1991年3月23日に発生した大きな太陽フレアのとくに、放射線帯粒子の分布が大きく変化したのが観測された。

また、これらの荷電粒子の測定結果に基づいて、1989年4月から1991年3月までの放射線帯が比較的安定しているときの荷電粒子の空間分布を得た。各測定粒子は、磁気赤道上にフラックス分布のピークがあり、緯度が高くなるに従い、フラックスは減少しているのが観測された。また電子は、外帯の放射線帯により緯度45°付近でフラックスが高くなるのが観測された。

電子と陽子については、衛星の一ヶ月の軌道上での平均エネルギースペクトルを求めた。これらの粒子は空間分布があるため、軌道が変化するとスペクトルも変化し、陽子は一桁近く変動し、さらに太陽フレアにより一桁以上フラックスが増加するのが観測された。

異なる磁力線上での放射線帯粒子のフラックス変動を求めた。地球磁場の擾乱時に放射線帯粒子のフラックスは急激に増加し、ゆっくりと減少していくが、内側の磁力線ほど増加したフラックス

が減衰する時間が長くなっているのが観測された。

半導体素子で発生したソフトエラーの発生頻度ならびに発生位置の空間分布を示した。この結果、発生したソフトエラーのほとんどは放射線帯粒子、とりわけ陽子によるものであることが検証できた。

半導体素子の放射線による劣化については、MOSFETのしきい電圧値の変化を測定した。しきい電圧値の変化の様子は、アニールの効果により値のばらつきが大きいがおおよその傾向としては、600日でp-channel MOSFETは0.11V、n-channel MOSFETは0.07V変化した。これらの値から、 ^{60}Co で較正した吸収線量値を用いてSiでの吸収線量を求めると、 $40\text{ Gy}(\text{Si}) \cdot \text{day}^{-1}$ となった。

第5章では第4章で得られた結果について考察した。電子、陽子について、エネルギースペクトルと空間粒子強度分布に関して、「あけぼの」衛星で得られたものとNASAの放射線帯モデルから得られるデータを比較した。一ヶ月の衛星の軌道上での平均エネルギースペクトルでみると、モデルに比べて「あけぼの」衛星による観測値は高エネルギー成分が多い。磁気赤道上でモデルと比較すると、電子は低いエネルギー範囲では測定されたフラックス値は低く、高いエネルギー範囲では逆に高くなっているが、分布の傾向は似たものになった。陽子では、フラックスのピークの位置が測定値はより内側（地球側）にあり、フラックスの絶対値も大きく異なる結果が得られた。また、磁力線に沿った空間方向に対するフラックス分布は電子、陽子とも絶対値で一桁から二桁の違いはあるものの、おおまかな傾向は測定値とモデル値で一致した結果を得た。しかし、電子のエネルギーの高い領域では放射線帯の内帯と外帯の境界域でのモデルの精度が悪いことも示された。

荷電粒子フラックスの測定結果から、エネルギー範囲が限定されているものの新しい放射線帯モデルを作成、評価した。このモデルは、1990年前後の新しいデータを用いているため、今後宇宙環境放射線の評価に有用なものになると考えられる。

α 粒子は、粒子強度が陽子と比較して二桁ほど低いとその影響は無視できない。しかし、 α 粒子の広範囲の空間粒子強度分布は今までなく、「あけぼの」衛星による測定値はエネルギー範囲が狭いが重要なデータである。

太陽フレア等による地球磁場の擾乱後の放射線帯粒子の減衰から、磁力線毎に放射線帯粒子の生存時間 (life time) を求め、放射線帯の構造について考察した。

ソフトエラーは放射線帯の陽子と半導体素子中のSiとの核反応により発生したものがほとんどであるが、その発生断面積は、「あけぼの」衛星により実際の宇宙空間で測定された発生率から求めた。しかし、陽子がSiとの核反応を起こすのに必要なエネルギーは高く、「あけぼの」衛星に搭載されている高エネルギー荷電粒子の検出器では直接測定ができないため、NASAの放射線帯モデルを用いて陽子のフラックスを推定して、ソフトエラーの発生断面積を評価した。その結果が $2.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ proton}^{-1} \text{ bit}^{-1}$ となり、加速器を用いた地上実験の結果から得られたソフトエラーの発生断面積 ($3.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ proton}^{-1} \text{ bit}^{-1}$) に比べて約1/50になった。この差異は、陽子のフラックスを求めるのにNASAのモデルを用いて陽子のフラックスを推定したことによると考えられるが、現状では正確に陽子フラックスを評価するのが難しい。

衛星中の大まかな線量分布を求めるために、衛星を半径70cmの密度が $0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ のAlの均質球と仮定して、吸収線量を三次元モンテカルロ計算コードを用いて計算した。しきい電圧測定用MOSFETは衛星表面から1cm内部にあることから、その点での吸収線量は電子に関しては $5.2\times 10^{-1}\text{Gy(Al)}\cdot\text{day}^{-1}$ 、陽子に関しては $2.5\times 10^3\text{Gy(Al)}\cdot\text{day}^{-1}$ となり、吸収線量に関しては陽子が支配的であることが計算から示された。MOSFETによるしきい電圧値の変化の測定結果から求めた吸収線量と比較すると、計算値は約10倍であるが、これは複雑な構造の衛星を密度 $0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の均質Al球と近似したことによる差異と考えられる。また、宇宙環境放射線の強度が空間的に一定でなく、分布をもっているため、半導体素子のアニールによりしきい電圧値が元に戻る減少効果によるものであることも大きく影響している。しかし、簡単な体系に近似することによる吸収線量評価が、測定値と比較的によく一致したことが示された。

第6章は結論で、本研究の成果をまとめた。

審査結果の要旨

近年の宇宙空間利用の進捗に伴い、宇宙線による衛星搭載素子の損傷や宇宙飛行士の被曝が重要な問題になっている。宇宙環境放射線の測定は米国航空宇宙局（NASA）によって長年行われてきて、モデルも作られているが、20年程前の測定データに基づいていて最近の宇宙環境を反映していないことが指摘されている。著者は、宇宙科学研究所が1989年に打ち上げたオーロラ観測衛星「あけぼの」に搭載された高エネルギー荷電粒子モニタ（HPM）を用いて、放射線帯粒子のエネルギースペクトルや空間分布を観測するとともに、半導体素子の放射線効果モニタ（RIC）により、素子の損傷を観測して、新しい放射線帯粒子モデルを提唱するとともに、高エネルギー粒子強度と素子の損傷との関連を明らかにしている。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、地球近傍において、地球磁場に捕捉された荷電粒子が作る粒子強度の高い放射線帯について、その生成・消滅の機構を述べるとともに、NASAの放射線帯モデルについて解説している。

第3章では、「あけぼの」衛星の概要と軌道について説明し、本研究に用いたHPMとRICの両モニタについてその構造と測定回路系およびデータ収集システムについて述べるとともに、その放射線応答特性について述べている。

第4章では、HPMによる観測結果として1989年3月から1991年12月に至る高エネルギー電子、陽子、 α 粒子の強度の経時変化を衛星の軌道変化、つまり高度・緯度変化と対比させて示し、さらに1989年3月、10月及び1991年3月の大きな太陽フレアが発生した時のこれらの粒子の強度変化を追っかけて、フレア粒子の放射線帯への捕捉の様子を明らかにしている。これらの観測結果に基づいて、電子、陽子、 α 粒子の地球近傍における空間強度分布とエネルギースペクトルを求めている。一方、半導体素子のソフトエラーの発生数を高エネルギー陽子強度分布と対比した観測結果から極めてよい相関があることを導き、トータルドーズ効果に関してはしきい電圧値の経時変化を求め、それから吸収線量を推定している。これらの結果は三年近くに及ぶしかも最新のデータとして、現在要望されている世界的に見て貴重な情報を提供している。

第5章では、著書が得た結果をNASAのモデルと比較し、NASAのモデルが高エネルギー電子成分は約半分、高エネルギー陽子成分は約一桁もの過小評価となっていることを明らかにした。これは素子の損傷、人体の放射線被曝を考える上で極めて重要な結果である。さらに観測結果に基づいて放射線帯における電子、陽子、 α 粒子の新しいモデルを導出している。 α 粒子のモデルは今まで存在しないものであり、実用上極めて重要な成果である。第6章は結論である。

以上要するに本論文は、地球近傍を取り巻く放射線帯の高エネルギー荷電粒子の強度分布と半導体素子の損傷に関する研究を行い、新しい放射線帯粒子モデルを得、半導体素子の損傷との関係を明らかにしたもので、原子核工学、放射線工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。