

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

月環境における放射線量の評価

The Evaluation of Radiation Dose on the Moon

申 請 者

早津	佳那子
Kanako	HAYATSU

物理学及応用物理学専攻 宇宙放射線物理学研究

2011 年 12 月

本研究の目的は将来の月探査における宇宙飛行士の安全性を放射線量という観点から評価し、現状の線量評価の問題点や月探査に向けた課題を探っていくことである。

わが国の宇宙開発においては、国内初となる月探査衛星「かぐや」が成功を収め、今後はその後継機 **SELENE-II** による更なる月面の無人探査が計画されている。さらに 2009 年 3 月、政府の宇宙開発戦略本部専門調査会において 2025 年から 2030 年にかけてロボットと連動した有人月探査を実施する計画が示された。月は地球に最も近い天体ではあるが、その放射線環境は地球とは大きく異なる。月には地球のような厚い大気や磁場が存在しないため、銀河宇宙線や太陽高エネルギー粒子線が月面に直接降り注ぐ。それらの粒子群は月地殻の表層物質と相互作用することで中性子などの二次粒子を発生させる。これらの粒子群により人体が受ける線量は、地球で被爆する平均被曝量をはるかに上回る。このような過酷な放射線環境に晒されながら船外活動をする宇宙飛行士などの作業従事者の安全性の見積もりに関して国内では特に報告はされておらず、月の線量評価と月作業員に対する防護や遮蔽について日本は他国に先駆けて、そのガイドラインや方針を示していくことが重要である。

日本でも月の探査・開発を主目的とした宇宙計画が進行されつつあるにもかかわらず、放射線環境や線量の評価といった報告は国内からは殆ど皆無である。世界的に見ると、月における線量評価はアポロ探査の時代から行われてきたが、その多くが過去の宇宙線観測に基づく精度の低いものであった。近年、高精度な宇宙線観測結果が発表され、さらに放射線粒子の発生と輸送を取り扱うモンテカルロコードの発達もめまぐるしい。今、新たな月有人探査時代の幕開けを前に、より高精度な月の放射線環境の評価が急務となっている。そこで本研究では、高精度な宇宙線観測結果と高度に発達したモンテカルロコードを用いた線量計算を行うことで、月面の放射線環境の把握を行う。また線量計算を通して浮き彫りとなった問題点やさらなる改善点をまとめ、将来の月探査に向けた課題を示す。本研究は長期にわたり月に滞在する月面居住者（作業従事者）の線量管理に貢献できるため、今後の日本の宇宙開発の促進につながる大きな意義を持つ。

本論文第 1 章は序論である。先に述べた研究の背景と線量の定義について詳細を記すとともに、地球上の線量と宇宙空間における線量との違いに注目して、本研究の目標とするところを明確にした。宇宙空間における線量としては国際宇宙ステーションの線量計測の実態や将来の火星探査に向けた人体に対する線量シミュレーションについて過去の先行研究の報告をまとめ、月の放射線環境との違いを議論した。

第 2 章では、まず月の宇宙線環境のモデルについてまとめた。先に記したように、月は大気や磁場がほとんど観測されていない。そしてその放射線環境は地球とも国際宇宙ステーションなどの宇宙空間とも異なるものである。月での線量計算を行う場合に大切なことのひとつに、精度の良い月放射線環境モデルを選択することがあげられる。最新の宇宙線測定に基づくより高精度なモデルをもとに線量を計算する必要がある。1980 年代に **Simpson** らがまとめた気球による宇宙線観測の結果を用いて月の線量を見積もる先行研究もあるが、近年はより高精度な宇宙線観測が行われている。例えば、1997 年から 2002 年にかけて行われた **Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer (BESS)** による宇宙線観測では、太陽活動の変化に伴う宇宙線陽子やヘリウム核のエネルギースペクトルの変調が精度良く観測された。これにより、太陽活動の変調に伴う月表面の線量変化も計算することが可能になった。また 1997 年に打ち上げられた **Advanced Composition Explorer (ACE)** spacecraft 搭載の観測機器 **Cosmic Ray Isotope Spectrometer (CRIS)** は銀河宇宙線の相対強度を高精度に観測した。本研究ではこれら最新観測機器の宇宙線データをもとに線量計算を行った。

また高度に発展したモンテカルロコードを使用することで、月表層中における宇宙線と月物質の相互作用を再現し、二次粒子の発生と輸送を計算することが必要となる。そのために本研究では粒子と物質の相互作用や輸送を取り扱うモンテカルロ・シミュレーションのためのライブラリー群である **Geant4** を用いて、月表層中の二次粒子のふるまいを計算した。月物質の組成によって二次粒子の発生量は異なり、月の海と呼ばれる地域に多い玄武岩が組成の大半を占める場合、二次中性子の発生は増加する傾向がある。これは鉄やチタンといった質量数の大きく、かつ反応断面積の大きい元素が玄武岩に多く含まれていることに起因する。本研究では **Apollo** の月探査で持ち帰られた月の海と高地の試料組成を用いて、月の二次粒子の生成量の違いも見積もった。

これらを総合して得られる月の放射線環境モデルから、月の線量を計算した。線量の定義は様々でありそれぞれ計算手法も異なるが、本研究では実用量のひとつである周辺線量等量と防護量の定義にしたがって定められた実効線量当量、及び実効線量を算出した。これらの計算手法については第 2 章でその詳細を記した。

第 3 章では 2 章で選択されたモデルと計算条件をもとに実際に線量計算を行った結果を記した。銀河宇宙線による線量計算により、太陽活動極大期と極小期の年間被曝線量が見積もられた。月の放射線量は線量定義によりその値は異なるが、本研究の結果として月表面は地球の放射線環境下での値とは比べものにならないほどの大きな線量を示した。月の年間線量のワーストケースは月近傍の銀河宇宙線強度が最も高まる太陽活動極小期における線量であり、十分な防護を行わない場合、過去に示された宇宙飛行士の生涯線量制限（25 歳女性の生涯線量制限 400 mSv）を月探査ではたった 1 年で越えてしまうことが示された。

さらにこの計算により月年間線量の太陽活動に伴う変動が示された。線量定義ごとに差はあるが、現在最も一般的な実効線量で比較した場合、その線量差は 2.7 倍にもなる。これほどの大きな線量変化が数年の周期でおこるとするのは地球にはない月の放射線環境の大きな特徴の一つである。

また二次粒子のフラックスをモンテカルロ計算で求めることにより月の海と高地の線量差が示された。地球上では外部被曝の線量は場所により若干異なることが分かっている。これはウランやトリウムといった放射性同位元素を含む鉱物の存在によるところが大きい。月でもこのような元素が濃集している地域が見つかっている。表側の PKT と呼ばれる領域である。そのため月のガンマ線の年間線量には場所による違いが生じる。しかし、年間の総線量に対するガンマ線線量の寄与は小さく、むしろ中性子線量の場所による違いが大きいことが本研究から分かった。この線量差は太陽活動の周期変動に起因する線量差に比べて小さいものの、鉄やチタンといった重い元素が濃集している月の海では高エネルギー中性子の生成量が多く、その線量も高地に比べ高くなった。

また太陽フレアなど、突発的な太陽の爆発現象で高フルエンスの荷電粒子が放出される現象がある。これらの場合、宇宙空間における線量はその爆発現象の継続時間や放出粒子、爆発規模等によって異なる。したがって平均的な高エネルギー太陽粒子線の月面線量を求めることはたいへん困難である。本計算では近年観測された大規模 GLE イベントのモデル式をもとに、線量を計算した結果を第 3 章に示した。本計算の結果から、太陽粒子線に起因する月面線量は時として年間の銀河宇宙線月面線量を大きく上回る可能性が示唆された。特に大きなイベントを想定した場合、その実効線量は太陽粒子線陽子成分だけでも 1 Sv を超える結果となった。そのように大きな線量をもたらす太陽イベントはたいへん稀ではあるが、時として太陽の爆発現象が、月にいる宇宙飛行士に急性被曝症状を引き起こさせる危険性を持ち、さらに大規模な場合は命の危険すら与える可能性があることが分かった。

このように過酷な放射線環境下で宇宙飛行士が活動を行う場合、十分な防護と遮蔽が必要不可欠である。本章では一般的な宇宙服を模擬した素材としてアルミニウムを選択し、太陽粒子線の遮蔽効果を計算する。その結果、 10 g/cm^2 程度のアルミニウムが十分に遮蔽体として働き、大規模太陽フレアから人命を守ることが示された。これは、低エネルギー領域に非常に高いフルエンスを持つ太陽粒子線ならではの結果である。高エネルギー領域まで高いフルエンスを持つ銀河宇宙線の場合、遮蔽はそう簡単ではない。本計算では月の地下に基地を作ることを想定し、月物質を用いた銀河宇宙線陽子の遮蔽効果と、深さごとの二次中性子、ガンマ線の線量を計算した。本計算から、月表面で支配的だった宇宙線荷電粒子の寄与は月地下では小さく、逆に二次中性子の線量が大きく増加する傾向が示された。これにより、二次中性子被曝を防ぐためにはある程度の深さを有する月基地の建設が望ましいことが分かった。本章の結果から、現在、月のリモートセンシングでその存在が示唆されている月の溶岩チューブなどは、月基地建設の候補地としては大変有効であると考えられる。

第4章は第3章での計算結果を踏まえた考察と今後の有人月探査に際しての問題提起である。高度に発達したモンテカルロコードを用いた二次中性子線量の計算結果から、これまであまり注目されてこなかった月探査の際の二次中性子線量の重要性をまとめた。今までの宇宙探査では存在度の高い宇宙線陽子の線量ばかりに注目が集まり、二次粒子の生成と輸送に対しては見落とされがちであった。しかし実際は、二次中性子線量が月面年間線量の10%近くを占め、有人月探査に際して、無視することができない重要な成分であることが分かった。また、存在度の低い銀河宇宙線重粒子核成分も線量定義によっては存在度の高い銀河宇宙線陽子成分を上回るほどの大きな線量を与える結果となった。本研究の結果を踏まえ、今後はさらなる銀河宇宙線重粒子成分の高精度観測がのぞまれる。

さらに、過去に定められている宇宙飛行士の生涯線量制限と月探査における線量被曝の見積もりから、今後の有人月探査の開始時期に関する提言を行った。本計算の結果、銀河宇宙線強度が最も大きくなる太陽活動極小期は大規模フレアの数が少なく、致死量に達するような線量を受けにくいことが分かった。長期にわたる月滞在のために、まずは月基地の建設を行う必要があるが、月の溶岩チューブなど自然にある地形を活用することで銀河宇宙線の防護も可能である。したがって、有人月探査の開始時期としては太陽活動の極小期をその第一の候補とするべきである。

また各線量定義に従って計算された線量を比較することで、それぞれの値にばらつきが生じることを示した。これをもとに現在の各線量定義の問題点についても考察するとともに、今後の宇宙探査における統一的な線量定義の必要性を示唆した。実用量である周辺線量当量を用いた線量評価の問題点としては、高い透過率を持つような粒子に対して定められている定義上、荷電粒子のような透過率の低い粒子では特に重粒子成分の線量が過大評価される傾向がみられた。防護量のひとつである実効線量による線量計算の課題点としては、放射線荷重係数の高精度化の必要性があげられる。現在、放射線荷重係数は陽子に対しては5、その他の重粒子成分に対しては全て20という大雑把な値が設けられているが、実際はエネルギーごと、荷電粒子ごとに細かい改良が必要である。特に銀河宇宙線は様々な荷電粒子成分を含み、それらのエネルギー領域も広いため、地球での線量管理の枠を超えて荷電粒子の放射線荷重係数の見直しが迫られる。中性子に関しては近年、放射線荷重係数の大きな見直しがなされ、エネルギースペクトルとして再定義されたが、同様の試みが荷電粒子に対しても必要である。

第5章には総括と今後の展望に関する記述をまとめた。本計算により示された月線量を実証するような実際のリモートセンシング探査の重要性や地上加速器実験の必要性を訴え、有人月探査を実施するための課題を示した。

本研究は国内ではほとんど行われていない月の線量評価に焦点を当て、今後の有人月探査、有人宇宙探査へと進んでいくための、第一歩である。近い将来行われるであろう日本独自の有人月探査を安全に成功させるために、たいへん重要な結果と提言を示すことができた。

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 早津 佳那子 印

(2011年10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○ 論文 (学術誌)	"Radiation Doses for Human Exposed to Galactic Cosmic Rays and Their Secondary Products on the Lunar Surface", Biol. Sci. Space, Vol.22, No.2, pp.59-66, 2008, K. Hayatsu , M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe.
○ 論文 (学術誌)	"The lunar radiation dose based on the definition of protection quantity and operational quantity", Rad. Meas. (submitted), K. Hayatsu , K. Sakurai, L. Sihver, N. Hasebe.
論文 (学術誌)	"Determining the Absolute Abundances of Natural Radioactive Elements on the Lunar Surface by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer", Space Sci. Rev., Vol.154, pp.193-218, 2010, S. Kobayashi, N. Hasebe, E. Shibamura, O. Okudaira, M. Kobayashi, N. Yamashita, Y. Karouji, M. Hareyama, K. Hayatsu , C. d'Uston, S. Maurice, O. Gasnault, O. Forni, B. Diez, R. C. Reedy, and K. J. Kim.
○論文(国際会議・査読有り)	"HZE Particle and Neutron Dosages from Cosmic Rays on the Lunar Surface", J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, Vol.78, pp.149-152, 2009, K. Hayatsu , M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe.
論文(国際会議・査読有り)	"First Results of High Performance Ge Gamma-Ray Spectrometer Onboard Lunar Orbiter SELENE (KAGUYA)", Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, Vol.78, pp.18-25, 2009, N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M.-N. Kobayashi, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, Y. Karouji, M. Hareyama, S. Kodaira, S. Komatsu, K. Hayatsu , et. al.
論文(国際会議・査読有り)	"Germanium Gamma-Ray Spectrometer on SELENE (KAGUYA)", J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, Vol.78, pp.153-156 2009, N. Yamashita, N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M. Kobayashi, O. Okudaira, S. Kobayashi, M. Hareyama, Y. Karouji, S. Kodaira, K. Sakurai, K. Iwabuchi, K. Hayatsu , et al.
論文(国際会議・査読有り)	"The ambient dose equivalent from lunar gamma-ray observed by Kaguya gamma-ray spectrometer", Advance in Geosciences, Vol.19, pp.69-88, 2008, Y. Takeda, K. Hayatsu , S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Hasebe.
論文(国際会議・査読有り)	"Distribution of K, Th and U Concentration on the Moon: The Initial Observation by SELENE GRS", Advance in Geosciences, Vol.19, pp.43-55, 2008, Y. Karouji, N. Hasebe, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, M. Hareyama, T. Miyachi, K. Satoh, K. Iwabuchi, K. Hayatsu , S. Nemoto, Y. Takeda, K. Tsukada, H. Nagaoka.
論文(国際会議・査読有り)	"Lunar Gamma-ray Observation by Kaguya GRS", Advance in Geosciences, Vol.19, pp.57-67, 2008, N. Hasebe, N. Yamashita, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, S. Komatsu, K. Hayatsu , S. Nemoto, K. Iwabuchi, Y. Takeda, H. Nagaoka, K. Tsukada, J. Machida, O. Okudaira, K. Sakurai.

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文(国際 会議・査読 有り)	"Global Distributions of K, Th and U on the Moon Observed by Kaguya GRS", New Advances in Lunar Exploration (Proc. of International Symposium on Lunar Science), pp. 42-49, 2010, N. Hasebe, Y. Karouji, O. Okudaira, K. Hayatsu , Y. Takeda, H. Nagaoka, K. Tsukada, J. Machida, S. Sakurai, S. Komatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, et al.
論文(国際 会議・査読 有り)	"Overview of Elemental Distributions on the Moon Observed by SELENE GRS", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2009-o-3-10v, N. Hasebe, N. Yamashita, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, K. Hayatsu , S. Nemoto, K. Iwabuchi, Y. Takeda, H. Nagaoka, K. Tsukada, O. Okudaira, S. Sakurai, S. Komatsu, E. Shibamura, M.-N. Kobayashi, M. Ebihara, T. Hihara, T. Arai, T. Sugihara, H. Takeda, C. d'Uston, O. Gasnault, B. Diez, O. Forni, S. Maurice, R. C. Reedy and K. Kim.
論文(国際 会議・査読 有り)	"Radiation Dose Estimated in the Lunar Environment", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2008-p-08, K. HAYATSU , S. KOBAYASHI, M. HAREYAMA, N. YAMASHITA, K. SAKURAI, N. HASEBE.
論文(国際 会議・査読 有り)	"High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer On Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA)", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2008-k-41, N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M.-N. Kobayashi, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, Y. Karouji, M. Hareyama, S. Kodaira, S. Komatsu, K. Hayatsu , K. Iwabuchi, S. Nemoto, et al.
論文(国際 会議・査読 有り)	"Radiation Environment on the Moon", Radiological Science, Vol.53, No.8・9, pp. 28-33, 2010, N. Hasebe, K. Hayatsu .
論文(国際 会議・査読 無し)	"ENVIRONMENTAL RADIATION DOSE ON THE MOON", Proc. of 10th Int. Conf. on Adv. Tech. and Particle Phys., Index of /ICATPP10th_2007/Software Applications, 05-Nov-2007, K. HAYATSU , S. KOBAYASHI, N. YAMASHITA, M. HAREYAMA, K. SAKURAI, N. HASEBE.
寄稿	"月表面の放射線量(Dose Equivalent on the Lunar Surface)", Space Radiation, Vol. 5, No. 2, pp. 177-187, 2006, K. Hayatsu , S. Kobayashi, N. Yamashita, O. Okudaira, K. Ishizaki, T. Miyachi, M. Miyajima, K. Sakurai, N. Hasebe.
寄稿	"宇宙の放射線環境", 科学 Science Journal KAGAKU, Vol.81, No.2, p. 159, 2011, 長谷部信行, 早津佳那子 .
報告書	"銀河宇宙線による月面の線量", 宇宙環境利用科学委員会「月面における人類の活動に向けた線量計測」第一回会合報告書, pp. 82-88, 2008, 早津佳那子 , 小林進悟, 晴山慎, 山下直之, 長谷部信行.
報告書	"銀河宇宙線を中心とした月の線量", 平成 20 年度 STE 研究集会「太陽圏シンポジウム」報告書, pp. 23-25, 2009, 早津佳那子

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (学会)	"Environmental Radiation Dose on the Moon" (口頭発表), 10th Int. Conf. on Adv. Tech. and Particle Phys., Como, Italy, 10/8-12, 2007, K. Hayatsu , S. Kobayashi, N. Hareyama, N. Yamashita, M. Miyajima, N. Hasebe.
講演 (学会)	"Radiation dose Estimated in the Lunar Environment" (口頭発表), The 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, Japan, 6/1-8, 2008, K. Hayatsu , S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe.
講演 (学会)	"Dose equivalent on the Moon contributed from cosmic rays and their secondary particles" (口頭発表), The 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada, 7/13-20, 2008, Hayatsu K. , Hareyama M., Hasebe N., Kobayashi S., Yamashita N.
講演 (学会)	"Radiation Dose Equivalent on the Moon" (口頭発表), Asia Oceania Geosciences Society 2008, Busan, Korea, 6/16-20, 2008, K. HAYATSU , M. HAREYAMA, S. KOBAYASHI, N. YAMASHITA, K. SAKURAI, N. HASEBE.
講演 (ワークショップ)	"HZE Particle and Neutron Dosages from Galactic Cosmic Rays on the Lunar Surface" (ポスター発表), International Workshop on Advances in Cosmic Ray Science, 3/17-19, 2008, K. Hayatsu , M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe.
講演 (学会)	"Radiation Environment Concerned with Human Activity on the Moon" (口頭発表), Asia Oceania Geosciences Society 2009, Singapore, 8/11-15, 2009, Kanako Hayatsu , Makoto Hareyama, Shingo Kobayashi, Naoyuki Yamashita, Kunitomo Sakurai, Kyeong J. Kim and Nobuyuki Hasebe.
講演 (学会)	"Effective Dose Equivalent due to Cosmic Ray Particles and Their Secondary Particles on the Moon" (ポスター発表), The 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 7/18-25, 2010, Kanako Hayatsu , Makoto Hareyama, Shingo Kobayashi, Yuzuru Karouji, Kunitomo Sakurai, Lembit Sihver, Nobuyuki Hasebe.
講演 (学会)	"Global Map of Lunar Effective Dose Equivalents Observed by Kaguya Gamma-Ray Spectrometer" (口頭発表), The 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 7/18-25, 2010, Kanako Hayatsu , Yuko Takeda, Yuzuru Karouji, Makoto Hareyama, Shingo Kobayashi, Nobuyuki Hasebe.
講演 (学会)	"Lunar Radiation Dose due to Cosmic Rays and Their Secondary Particles" (口頭発表), 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, 9/27-10/1, 2010, Kanako Hayatsu , Yuzuru Karouji, Lembit Sihver, Nobuyuki Hasebe.