

宇宙放射線科学の実験的研究

研究代表者 長谷部 信行

(理工学術院所 教授)

1. 研究課題

宇宙で繰り広げられている様々な高エネルギー現象は、宇宙の起源とその後の進化、宇宙の成り立ち等、それぞれの時空で生起している物理現象の解明の手掛かりになるだけでなく、新しい世界へと導く自然科学の魅力を有している。また、宇宙は、今後の人類が恒常的に進歩していく上で重要な活動領域といえる。本研究は、惑星科学、宇宙線・宇宙空間物理学に深く関連している宇宙放射線物理学の実験的研究を進めている。MeV領域の惑星・宇宙 γ 線及び高エネルギー原子核成分は、宇宙や身近な惑星表面からの貴重な物質情報を担っている。それらの情報から月・惑星・小惑星や天体の形成や進化、天体の表面や宇宙空間で生起している高エネルギー現象の謎の解明に取り組んでいる。また、それらの観測・実験分野で要求される新しい検出器の技術開発やその周辺技術の開発を進めている。

A) 月・惑星探査

† 月探査「かぐや」の観測データを利用した月科学と月の資源利用の展開

† 月面、月の地下、月の縦穴などの放射線量の評価

† 将来の月・惑星探査機（遠隔探査や表面移動車による探査）に搭載する高性能な小型元素分析装置及び光学機器の基礎開発

B) 放射線物理学及びその応用

† 放射線の検出媒体としての希ガスの基礎研究とその応用

† 超重核検出用の固体飛跡検出器の基礎開発とその応用

ここでは、A) 月惑星探査、に関する研究成果について報告する。

2. 主な研究成果

2.1 月・惑星探査

【1】 かぐやガンマ線観測と月科学

月表層における主要元素や微量元素（特に天然放射性元素）の元素濃度分布に関する情報は、月地殻の起源と進化を理解する上で必要不可欠な情報である。月探査衛星かぐやに搭載されたガンマ線分光計（KGRS）には、エネルギー分解能に優れたゲルマニウム結晶が用いられており、多くの元素由来のガンマ線を高精度で観測することができた。

月地殻の進化過程を考察する上で重要な情報である、カリウム（K）、トリウム（Th）、ウラン（U）の天然放射性元素の絶対濃度分布を決定した。また、月面上の主要元素組成（Al, Ca）のデータ解析も終了した。現在、FeとTiの濃度分布が、ほぼ終了段階に来ている。それらの結果について国内外の国際会議等で発表した。更に、KGRSの観測により月表面から放出される様々なエネルギーのガンマ線や中性子のデータが得られることで、いろいろな情報が得られることが明らかになってきた。

A) Tiの全球分布に関する研究

KGRSで得られたガンマ線エネルギースペクトルから、Ti濃度に関する月全球分布を示した。Ti濃度は海と呼ばれる地域で多様に組成変化を起こし、高地と呼ばれる長石質な地殻で大きく枯渇しており、海と呼ばれる玄武岩領域では多様に変化していることを明らかにした。今後は、現在のTiの相

対強度分布値を、絶対濃度に変換して、より詳細かつ精度の高い議論ができるようにして、学術誌に投稿予定である。さらに、海領域の Ti 濃度と K や Th 元素の濃度と比較することで、海の火成活動の熱源となりうる元素とその噴出年代との関係についてより定量的な議論をすすめ、月の火成活動の成因について迫る。

B) 月面の中性子分布

ガンマ線検出器を構成する Ge 結晶と月面から放射された中性子との核相互作用により、ガンマ線のエネルギースペクトル中に鋸歯状の Ge ガンマ線ピークが間作される。そのピーク解析により月面全域の中性子強度分布を高精度であることができた。この結果は、Lunar Prospector に搭載された中性子分光計よりも高感度でデータを取得でき、その濃度に関する空間分布は、従来のものと比べて大幅に向上することができた。また、KGRS 装置で反同時計数器として使用しているプラスチックシンチレータで測定した計数率の空間分布から、高速中性子の空間分布が求められることもわかってきた。

【2】月隕石と月科学

月隕石の研究と月探査「かぐや」の観測から得られた知見とから、月地殻の形成と進化の過程を研究している。

月隕石 Northwest Africa 2200 について、その元素組成・鉱物組成を求めた。これらの斜長岩片中にみられる鉱物組成は、アポロ計画で表側から回収された鉄に富む斜長岩によく似ており、隕石衝突の影響を強く受け多様に角礫化を経験していることだ分かった。一方、全岩組成は、Th や希土類元素が大きく枯渇していることから、その起源地域はアポロ回収地点とは異なる高地地域であることが分かった。

また、Dhofar 489 と Dhofar 911 という隕石試料の詳細な薄片観察から、ほぼ 100%斜長石で構成される岩石片（純粋斜長岩）を初めて見つけた。月隕石の分析結果と月探査衛星「かぐや」の反射スペクトル結果から、純粋斜長岩体は全球的に分布していることを明らかにし、従来の月地殻形成モデルの再考が必要であることを指摘した。

【3】月の特殊地域での放射線線量

月の地形は多様であり、月の特殊な地域の一つに、月の縦穴が挙げられる。これは溶岩チューブである可能性が高く、もしそうであれば将来の月の有人基地として大変有望である。これまで月面や地下における年間線量について評価してきた。月表面の線量は、地表の約 100 倍にも達する。また、太陽表面で、大規模な太陽フレアが起こると、大量の高エネルギー粒子が放出され、致死量を超えるほどの線量となる。人類の月面での活動と放射線の遮蔽効果や防護の立場から、月の縦穴での放射線環境と線量分布を詳細に求めることができた。縦穴または溶岩チューブでの活動は、殆んど地球の表面で受ける放射線の被ばく線量と殆んど変わりがないがわかった。月の縦穴、或はラバチューブ内での有人活動は、放射線だけでなく微小隕石、また過酷な温度環境などの点から、将来の人類の活動に適した環境であるといえる。

2.2 月・惑星探査機搭載用の機器開発

【1】元素分析装置の開発

月・惑星探査の目的の一つは、天体表層を構成する物質の元素組成とその空間分布の取得である。それらの情報は、固体惑星の初期形成・進化過程の科学的解明の重要な手掛かりとなる。惑星表面の元素組成を、その天体の周回軌道上または表面で決定するためには、元素に固有な蛍光 X 線、核ガンマ線、中性子を観測する手法がある。本研究室では、宇宙機搭載用の小型・軽量・省電力の高性能化学元素分析装置として、1) 能動型蛍光 X 線分光計、2) ガンマ線・中性子核分光計、の開発を進めている。宇宙機としては、将来の月面や小惑星の表面探査車（ローバー）搭載用の元素分析装置、月・惑星・小惑星の探査機に搭載する元素分析装置を開発することを目的としている。特に、多くの

元素に対して短時間で高精度な分析が可能で小型軽量・低消費電力である機器を開発目標としている。既存の焦電結晶型 X 線発生器では、発生 X 線強度が弱く短時間で高精度の分析を行うことが困難であるため、発生器の高輝度化が必要である。そこで、本研究では、焦電結晶型 X 線発生器の動作特性を実験的に調査し、設計・動作条件の最適化を進め、高輝度な発生器を開発し、惑星探査において重要な軽元素分析に特化した発生器を開発してきた。一連の実験により、既存の焦電結晶型 X 線発生器 (Amptek COOL-X) と比較して約 20 倍の強度を得ることができた(詳細は、草野広樹博士の年次報告を参照)。

【2】中心窩を有する広視野センサの開発

この研究は、宇宙機搭載に向けて重要な項目である重量・サイズ、消費エネルギー量の制限、情報通信速度のボトルネックの軽減・解消を目指した多機能的利用可能なセンサ開発を目的とするプロジェクトである。本研究は、特に可視光帯域にフォーカスを当てたセンシング技術確立に寄与する研究内容となっており、本年度の主な取り組みは、(1)広角中心窩センサ研究と(2)特殊広角レンズを用いたセンサの開発である(詳細は、清水創太准教授の年次報告を参照)。

(1) 広角中心窩センサを多機能的利用可能な可視域視覚センサとして月面探査ローバーへの搭載する、という計画のもとに韓国・KIGAM との国際共同研究に基づいて遂行している。また、広角中心窩センサのさらなる小型化・省エネルギー化については高機能化を目的としたノンメカニカル化の取り組みを実施した。月面探査ローバーへの応用研究は、視線入力デバイスとの組み合わせにより利便性を図ったシステムの構築と考察を目的として、研究を実施してきた。2014 年 3 月には、学生の国内学会発表の機会を提供し、大きな教育的な効果が得られた。研究成果はその後さらに進捗され、2014 年度 4 月及び 10 月の国際学会発表及び国内学術雑誌に投稿する予定である。

(2) 特殊広角レンズを用いたセンサの開発は、JKA 財団から 3 年連続して採択されている研究テーマ(代表：清水創太)の一環であり、2013 年度はドライブレコーダ用の視覚センサとして交通事故の起こり易い夕暮れ時に撮影された動画像の品質を向上させることを目的として実施された。特殊な広角光学系を設計・試作し、その成果を 2014 年 3 月の国内学会で発表を行っている。

3. 共同研究者

菊池 順 (名誉研究員(名誉教授))、清水創太 (主席研究員准教授)、草野広樹 (次席研究員助教)、長岡 央 (助手)、宮島光弘 (招聘研究員)、桜井邦朋 (招聘研究員)、久野治義 (招聘研究員)、柴村英道 (招聘研究員)、小平聡 (招聘研究員)、小林進悟 (招聘研究員)、大田周也 (招聘研究員)、山下直之 (招聘研究員)、小林正規 (招聘研究員)、春山純一 (招聘研究員)、森国城 (招聘研究員)、藤井雅之 (招聘研究員)

海外の協力研究者

K.J. Kim (KIGAM), G.Ju (KARI), K.B. Lee(KRISS) : 韓国、C.d'Uston, O. Forni, O. Gasnault, S. Maurice (IRAP) : フランス、G. Klingelhoefer (JGU) : ドイツ、B.W.Boynton, D. Hamara (UoA), L. Lim, R. Starr (GSFC), R. Reedy(LPI) : 米国、J.A. Matius-Lopes (UoC) : ポルトガル、M. Zhu (MUST) : 中国

学生 学部生 : 8名、 修士学生 : 8名

4. 研究業績

著書・国内講演会等 :

長谷部信行、桜井邦朋編「人類の夢を育む天体“月”」恒星社厚生閣、2013 年
長谷部信行、「月の特殊地域の放射線環境」、第 57 回宇宙科学技術連合講演会「月惑星の縦孔・地下空洞探査」、米子市コンベンションセンター、米子市、2013. 10. 9—11.

長谷部信行、太田亮、“M型小惑星探査機搭載の γ 線・中性子分光計”、日本惑星科学会将来計画専門委員会「イプシロンロケットによる小型惑星探査」に関するシンポジウム、2014年1月22-23日、神戸大学惑星科学センター、神戸。

長谷部信行、“核惑星科学のための $n \cdot \gamma$ 分光計”、電気学会産業計測技術(センサー)、(招待講演)、早稲田大学、西早稲田キャンパス、2013年10月25日

長谷部信行、“太陽系の天体 夢を育む月”、第1回宇宙シンポジウム「私達を取り巻く宇宙への挑戦ー未来を探り、未来を拓くー」2013年3月5日、早稲田大学西早稲田キャンパス

国内学会講演：

中村和貴、清水創太、長谷部信行、草野広樹、長岡央、“惑星探査ローバー遠隔操縦のための広視野視覚システムの開発”，電気学会研究会資料、産業計測制御研究会、IIC-014-038、(2014.3).

清水創太、長谷部信行、“ドライブレコーダ用広視野センサの開発”、電気学会研究会資料、産業計測制御研究会、IIC-014-037、(2014.3).

他多数の講演発表

学術論文・国際学会論文(2013～)

- H. Nagaoka et al., “Geochemistry and Mineralogy of Feldspathic Lunar Meteorite, Regolith Breccia, Northwest Africa 2200”, *Polar Science* 7(2013)241-259.
- M. Kobayashi, N. Hasebe et al., “The Kaguya gamma-ray spectrometer: instrumentation and in-flight performances”, *J. Instrument.* 8 (2013) P04010.
- H. Kusano, N. Hasebe et al., “Basic studies on x-ray fluorescence analysis for active x-ray spectrometer on SELENE-2”, *Proc. SPIE 8852, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XV, 88520B* (September 26, 2013), doi:10.1117/12.2024004.
- M. Naito et al., “**Experimental and Numerical Studies on X-Ray Fluorescence Analysis for Active X-ray Spectrometer on Selene-2**”, *Proc. of ISRS2014: International Symposium on Remote Sensing, April 16-18, 2014, The Pukyong National University Daeyeong Campus, Busan, Korea.*
- N. Hasebe et al., “**Global Distribution of Counting Rates Observed By a Thin Plastic Scintillator of KAGUYA Gamma Ray Spectrometer**”, *Proc. of ISRS2014: International Symposium on Remote Sensing, April 16-18, 2014, The Pukyong National University Daeyeong Campus, Busan, Korea.*
- H. Kusano et al., “**Development of a Pyroelectric X-Ray Generator for X-Ray Fluorescence Analysis on Future Lunar and Planetary Landing Missions**”, *Proc. of ISRS2014: International Symposium on Remote Sensing, April 16-18, 2014, The Pukyong National University Daeyeong Campus, Busan, Korea.*
- S. Shimizu et al., “**Multi-Purpose Use of Wide-Angle Fovia Vision System for Planetary Exploration Rover**”, *Proc. of ISRS2014: International Symposium on Remote Sensing, April 16-18, 2014, The Pukyong National University Daeyeong Campus, Busan, Korea.*
- N. Hasebe et al., “**Radiation Dose in the Vertical Hole of the Moon**”, *Proc. of ISRS2014, International Symposium on Remote Sensing, April 16-18, 2014, The Pukyong National University Daeyeong Campus, Busan, Korea.*
- H. Nagaoka et al., “**Titanium Distributions on the Moon by KAGUYA Gamma-Ray Spectrometer (KGRS)**”, *Proc. of ISRS2014: International Symposium on Remote Sensing, April 16-18, 2014, The Pukyong National University Daeyeong Campus, Busan, Korea.*
- S. Shimizu et al., “**A study on Color Information Corrected in Human Brain-Measurement and Evaluation of Color Propagation**”, *Proc. of IECON (2014.10)* (submitted)
- S. Shimizu et al., “**Multi-purpose Wide-Angle Vision System for Remote Control of Planetary Exploring Rover**”, *Proc. of IECON (2014.10)* (submitted)
- S. Shimizu et al., “Mona Lisa might be displeased? -Emotion Propagation from Central Field of View to Periphery in the Brain”, *Proc. of the 10th anniversary of France-Japan and 8th Europe-Asia Congress on Mechatronics (2014.11)* (submitted)
- N. Hasebe et al., “**Elemental Composition of the Lunar Surface --Kaguya Gamma-Ray Observation--**”, *Proc. of the 29th International Symposium of Space Technology and Science, 2013, 2013-k-16.*
- H. Kusano et al., “**Development of a pyroelectric X-ray generator for active X-ray spectrometer of SELENE-2**”, *Proc. of 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013, 2013-k-18.*
- K.J. Kim et al., “**An Active X-Ray Spectrometer for the SELENE-2 Rover**”, *Proc. of 29th ISTS: International Symposium on Space Technology and Science, 2013, 2013-k-20.*
- H. Kusano, N. Hasebe et al., “**Pyroelectric X-Ray Generator for Active X-Ray Fluorescence Spectrometer on the Rover of SELENE-2**”, *Proc. ISRS2013: International Symposium on Remote Sensing, May 15~17, 2013, MakuHari Seminar*

House, Chiba, Japan.

- T. Saito et al., “**Radiation dose in the lunar subsurface produced by galactic cosmic rays**”, Proc. of ISRS2013: International Symposium on Remote Sensing, May 15~17, 2013, Makuhari Seminar House, Chiba, Japan.
- N. Hasebe et al., “**Distribution of Lunar Fast Neutrons Observed by Kaguya Gamma-Ray Spectrometer**”, Proc. of ISRS2013: International Symposium on Remote Sensing, May 15~17, 2013, Makuhari Seminar House, Chiba, Japan.
- N. Hasebe et al., “**Global distribution of natural radioactive elements observed by Kaguya Gamma-Ray Spectrometer**”, Proc. of ISRS2013: International Symposium on Remote Sensing, May 15~17, 2013, Makuhari Seminar House, Chiba, Japan.
- H. Nagaoka et al., “**Lunar olivine gabbro, Northwest Africa 2977 and 6950: Implication for lunar young volcanism**”, Proc. of ISRS2013: International Symposium on Remote Sensing, May 15~17, 2013, Makuhari Seminar House, Chiba, Japan.

国際会議講演(2013~) :

- N. Hasebe et al., “**Lunar Surface Abundances of Natural Radioactive Elements: Implication of Lunar Crustal Origin**”, 10th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2013), 24-28 June 2013, Brisbane, Australia. (Invited)
- H. Nagaoka, Y. Karouji, T. Arai, M. Ebihara, N. Hasebe, “**Geochemistry and mineralogy of a feldspathic lunar meteorite (regolith breccia)**”, Northwest Africa 2200”, Polar Science, (2013).
- H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Ohtake, T. Matsunaga, “**Selene Data for Mineralogy and Geochemistry (MI, SP, GRS DATA)**”, SELENE Symposium 2013, January 23-25, 2013. 【Invited】
- H. Kusano, N. Hasebe et al., “**Development of X-ray Generator for Active X-ray Spectrometer on SELENE-2/Rove**”, AOGS 10th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), June 24- 28, 2013, Brisbane, Australia.
- N. Hasebe et al., “**Lunar Surface Abundances of Natural Radioactive Elements: Implication of Lunar Crustal Origin**”, AOGS 10th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), June 24- 28, 2013, Brisbane, Australia.
- N. Hasebe et al., “**Radiation Dose on the Lunar Surface Based on the Definition of Protection Quantity and Operational Quantity**”, AOGS 10th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), June 24- 28, 2013, Brisbane, Australia.
- T. Saito, N. Hasebe, et al., “**Depth Dependency of Radiation Dose Produced by Galactic Cosmic Rays in the Lunar Surface and Subsurface**”, Heavy Ion in Therapy and Space Radiation Symposium 2013 (HITSRS2013), May 15-18, 2013, The Keiyo Bank Culture Plaza, Chiba, Japan
- M. Hareyama, Y. Karouji, Y. Yamashita, Y. Fujibayashi, H. Nagaoka, N. Hasebe, S. Kobayashi, R.C. Reedy, C. d'Uston, O. Gasnault, O. Forni, K.J. Kim, “**Lunar Iron and Uranium Distribution Obtained by SELENE(Kaguya) Gamma-Ray Spectrometer**”, 44th Lunar and Planetary Science Conference, 2013.

5. 研究活動の課題と展望

月惑星科学については、「かぐや」KGRS データだけでなく LISM の観測データも同時に利用して月の火山活動に伴う月の進化について研究を進める。多元素、多鉱物成分を対象として特徴ある地域について考察する。また同時に総合的な観点で月の進化を考察する。月惑星の研究は、地球のことをよく知ることでもあり、逆に地球について理解した事を、ほかの天体に応用することでもある。地球のマントルにおけるスーパープレームに関連した大規模なプレーム・テクトニクス研究を対比させて、月を研究すると同時に地球のコアに似た M 型小惑星に核惑星分光光学を適用する。そこで M 型天体観測用の小型・軽量の高性能核分光計の開発を進める。

能動型蛍光 X 線分析装置の X 線発生装置については、軽元素分析のために Mo、Zrなどをターゲットとして動作試験を行い、これをもとにして低エネルギー X 線発生器の開発へ取り掛かる。開発している焦電結晶は低消費電力でポータブルな X 線発生器として広範囲に応用が可能であり、本研究ではその開発の基礎として有用な知見を取得しその成果を広く公表していく。

一方、中心窩を有する広視野センサについても、小型化、省エネルギー化を進める。そのため、メカニカルな可動部を要さない注目点移動システムの開発が課題であり、これを実現する展望として光学機能性材料に着目している。