

宇宙放射線科学の実験的研究

研究代表者 長谷部 信行
(先進理工学部 物理学科 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を観測することは、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も有している。本研究は、地球科学を含め惑星科学、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である。特に、MeV領域の γ 線、中性子線、粒子線、また keV領域のX線は、惑星・宇宙を構成している重要な物質情報(原子核や原子成分)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技術やエレクトロニクスの技術開発、その周辺技術の開発を進めている。

A) 地球・月・惑星科学と探査

- A.1 月探査「かぐや」のガンマ線観測、月隕石と月科学
- A.2 火星衛星の起源の研究
- A.3 月・火星の溶岩チューブの研究 (UZUME計画)
- A.4 月・惑星探査機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
- A.5 放射線帯下層域の補足電子群の下降現象

B) 放射線物理学及びその応用

- B.1 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
- B.2 宇宙線中の重イオン計測のための固体飛跡検出器の高度化に関する研究開発

2. 主な研究とその成果

A. 地球・月・惑星科学と探査

A.1 月探査「かぐや」のガンマ線観測、月隕石と月科学

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ために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)の取得データを解析することで、月面の元素分布を作成することができる。今年度は月表側北領域に広がる Prcellarum KREEP Terrane (PKT) と呼ばれる K、Th といった天然放射性元素が非常に濃集している地域について、より詳細な濃度分布図を作成することができた。これらの高空間分可能元素分布図を用いることで、PKT 領域に複数分布する高 Th 領域について、その元素濃度と地形情報を合わせることでその形成過程と起源について明らかにした。

月隕石 Northwest Africa (NWA) 773 clan と呼ばれる隕石群がある。この隕石群は含まれる岩石の種類や組織、若い結晶化年代、液層濃集元素に富む化学的特徴から同じクレータを起源とする隕石群であると考えられる。この隕石群に含まれる隕石試料について、化学組成や鉱物組成、その岩石組織を調査した。その結果この岩石群は、液層濃集元素に非常に富んだ KREEP と呼ばれるアポロ試料と同じ希土類の元素パターンを示すことがわかり、最も Th 量に富む試料でその濃度は 5ppm

にも達する。さらにこの隕石群には多様な岩石片が含まれており、その起源地域では複雑な火成活動がかなり若い時代まで続いていたことがわかった。これらの特徴はリモセンで観測された PKT 領域の特徴と非常に合致しており、その起源地域を特定する手がかりとなる。

A.2 火星衛星の起源の研究

JAXA で火星衛星探査 (MMX) が検討されている。MMX の大きな科学目標は火星衛星の起源の解明にある。火星衛星の起源については衝突起源説と捕獲説の二つの可能性が示唆されており、いまだ解決には至っていない。我々は火星衛星表面の元素組成を全球的に測定する科学観測機器 (高性能ガンマ線・中性子分光計 GNS) を提案した。核分光法による in-situ 計測によって、火星衛星の全体像を把握する上で重要な組成データが取得可能となり、その搭載意義は高い。GNS のガンマ線分光計 GS では、H, O, Mg, Al, Si, Ca, Fe といった主要元素に加えて、天然放射性元素 K, Th, U を高精度で測定することができる。中性子分光計 NS は、水素の存在に敏感であり、深さ 1m 程度までの水の濃度分布の測定に適している。火星衛星の元素濃度分布に関して、サンプルリターンでは局所的な高精度の詳細なデータが取得できるが、核分光法による in-situ 計測では表面全体の観測が実施でき、衛星の全体像を把握することができる。

A.3 月・火星の溶岩チューブの研究 (UZUME 計画)

月や火星は、近い将来には長期的な有人探査地域となるであろう。しかし、月面や火星表面の放射線環境は、地球表面とは大きく異なっている。月・火星では大気が殆どないか薄い、そして磁場は非常に弱いため、高エネルギー荷電粒子はもちろんのこと低エネルギー粒子も直接月や火星の表面に到達する。月面や火星表面での居住者や作業者は、長期にわたって過酷な環境にさらされることになる。最近、月や火星に直径数 10 m 以上の縦穴がいくつも見つかった。有人基地として月や火星の溶岩チューブなどの空洞を考えた場合、放射線や微小隕石への曝露からの遮蔽、安定な温度環境など、長期滞在の居住環境として適した場所といえる。

月の表面、地下、ラバチューブでの放射線環境について述べ、一様で平滑な表面、巨大岩体周辺、縦穴、ラバチューブの特殊地域での放射線被曝および人的活動のための放射線防護に関する評価を行った。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らないがわかった。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。

A.4 月・惑星探査機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

A.4.1. X線発生装置の開発

惑星表面に着陸して、その場で元素分析する装置として、小型軽量で高性能な能動型蛍光 X 線分光計の開発を進めている。着陸機と表面探査車に搭載する観測機器は、そのサイズや重量、消費電力という点で厳しい制限が課せられる。焦電型 X 線発生器の高輝度化・安定化を目標として、結晶とターゲットの径・結晶-ターゲット間距離・ターゲット形状を変化させたときに発生する X 線の強度変化を測定した。発生する X 線の強度は結晶-ターゲット間距離が 9-12mm で、大きな結晶と円柱状のターゲットを用いた時に最も強くなった。ターゲットの径を大きくすると結晶-ターゲット間距離が 9-12mm の時以外でも比較的強い X 線が測定されたが、X 線強度の最大値には変化が見られなかった。また、X 線発生時の焦電結晶表面の映像を撮影した。これにより、結晶表面で起こる放電の様子が撮影された。結晶表面で放電が起こるタイミングで発生する X 線が急激に弱まることが確認された。

A. 4. 2. HPGeを用いた小型高性能ガンマ線分光計の開発

小型冷凍機 (Ricor 社製 K508) を使用し、HPGe を用いたガンマ線分光計の検出部の基礎開発を行った。本研究の背景として、近年重要性が高まっている超小型探査機による惑星探査がある。超小型の惑星探査機に搭載可能な小型・軽量 GRS の開発が本研究の目的となる。HPGe は優れたエネルギー分解能を有する反面、熱雑音と放射線損傷を防ぐ為に液体窒素の温度まで冷却する必要がある。そこで、冷却能力を確かめるために 200cc の HPGe に相当するダミーを用いた熱実験モデルを作製し、冷却実験を行った。モデル重量は小型探査機に搭載可能な約 3.7kg となり、現在、様々な条件での基礎的な熱データを取得している。運用可能な温度は達成できたが、実機ではエレクトロニクス等による熱流入が増えるため、これまでの結果をもとに今後改良を加える予定である。また、地球近傍小惑星の探査搭載に向けた反同値計数用プラスチックシンチレータを含む GRS の設計を行う。

A. 4. 3. 中心窩を有する広視野センサ開発

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。

1. 広角中心窩望遠鏡対物レンズ部設計と試作を実施した。

従来の画角 80 度から、画角 30 度に目標仕様を変更し、視野中心部分で遠方を詳細に観察できるだけでなく動き回る観測対象に対して捉え逃しのない十分に広い視野をもつ特殊光学系の開発に成功した。

2. 液晶広角中心窩レンズの試作機の製作を実施した。

2 枚の液晶レンズセルを組み合わせ、約 110 度の広い視野の像の一部分だけを拡大するための試作機を構築した。

A. 5 放射線帯下層域の補足電子群の下降現象

地球磁気圏の放射線帯について、高度 666km で地球を周回する衛星 GOSAT が観測したデータを解析について、次の二つの項目について検討した。

はじめに、地震に関するものである。地震の際に発生する VLF 波は放射線帯の電子降下を引き起こすため地震と電子降下との関連性を調査し、地震予測の可能性について検討した。その結果、東日本大震災の前後でも震源地上空及び震源地の磁気共役点において電子降下が確認されたが、地震と電子降下の強い正の相関は得られず、他の原因による地磁気擾乱に伴う変動を排除することはできなかった。

第 2 に、太陽活動との関係についてである。CME とは磁化したプラズマが太陽から惑星間空間へと放出される現象であり、この CME は地球磁気圏で磁気嵐を起こして放射線帯の電子を増やすことが知られている。CME が到来したときの放射線帯電子のエネルギースペクトルの変化に着目しその傾向を調べたところ、 L 値が 3 未満の地球に近い領域ではほとんど変化が起きず、 L 値が 3~5 程度のところで最も変化が大きくなるということがわかった。

B) 放射線物理学及びその応用

B. 1 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

環境試料中の α 線放射物質など、微量放射能の検出には、試料の極薄化及び大面積検出器の開発が必要である。本研究では、コプラナー電極を有する希ガス電離箱の開発を行っている。この電離箱

の主な利点は、構造の単純さから大型化が容易なことであり、またグリッドを使用しないため機械的強度も保たれ、振動によるマイクロフォニック雑音を軽減することが出来ることである。

試作したコプラナー電極を有する希ガス電離箱の基礎特性を調べるとともに、フリッシュグリッド電離箱のエネルギー分解能を目標としてエネルギー分解能の向上を目指す。螺旋型のコプラナー電極を用いた電離箱の試作機（アノード電極の直径は140mm）に、PRガスを充填し、放射線源を用いた α 線計測を行い、検出器のエネルギー分解能を測定した。さらに、エネルギー分解能の決定的要因を電子収集電極（CA）と非収集電極（NCA）間の静電容量（ C_c ）やアノード-カソード間の静電容量（ C_d ）から生じる電子ノイズによると推定し、 C_c と C_d の値の変化と測定回路に生じる電子ノイズの関係性をテストパルスの半値幅を測定することで示した。コプラナー電極を用いた大型電離箱のエネルギー分解能は様々な要因で決定されるが、CA-NCA間の静電容量によって生じる雑音が最大要因であることが判明した。今後は、コプラナー電極の最適化によりCA-NCA間の静電容量の大きさを極力減少させ、より良い分解能を目指し、実験をしていく。

B.2 宇宙線中の重イオン計測のための固体飛跡検出器の高度化に関する研究開発

多種の荷電粒子が混在した宇宙線の観測は、高エネルギー物理学における起源の探索や加速・伝播機構の解明のために重要であるだけでなく、現在の国際宇宙ステーションや将来の月・惑星における有人活動に対する被ばくリスクの評価とコントロールにも不可欠となっている。国際宇宙ステーションにおける宇宙放射線線量計測手法としては、CR-39 固体飛跡検出器とルミネッセンス線量計を組み合わせた受動型線量評価法が一般的となっている。本研究では、これまでにない高性能CR-39/TechnoTrak（高純度モノマーによる品質改善と酸化防止剤添加による高感度化）の重イオンビームを用いた系統的な性能評価を行い、宇宙放射線計測の高精度化に成功した。この他、重イオンが星間物質や検出器等の標的物質と衝突して、軽い粒子へと破砕する核破砕断面積を高精度に決定可能な手法を確立した。CR-39 と原子核乾板を組み合わせたハイブリット検出器とトラッキングシステムの開発により、陽子以上の全荷電粒子の核反応断面積を系統的に求めることが可能となった。これにより得られる核反応断面積の実験値は、観測が可能な地球周辺に至るまでに、銀河空間を伝播してきた宇宙線の発生源における化学組成の推定や、検出器内での核破砕成分を補正するための重要なパラメータであるだけでなく、重粒子線がん治療における人体中の核破砕反応による二次粒子の線量影響を推定する上でも重要である。

3. 共同研究者

国内の共同研究者

名誉研究員(名誉教授) : 菊池 順

主席研究員准教授 : 清水創太

次席研究員助教 : 草野広樹

助手 : 長岡 央

招聘研究員 : 宮島光弘、桜井邦朋、久野治義、柴村英道、月出章、小平聡、小林進悟、大田周也、山下直之、小林正規、春山純一、森国城、藤井雅之、古内ちゆみ

海外の協力研究者

韓国 : K.J. Kim (KIGAM), G.Ju (KARI), K.B. Lee(KRISS)

ロシア : V. Dmitrenko, S. Ulin, V.M. Grachev, K. Vlasik (MEPhI)

フランス : C.d'Uston, O. Forni, O. Gasnault, S. Maurice (IRAP)

ドイツ : G. Klingelhoefer (JGU), J. Brueckner(MPIC)

米国 : B.W.Boynnton, D. Hamara (UoA), L. Lim, R. Starr (GSFC), R. Reedy(LPI),

ポルトガル : N. Yamashita(LPI)
 スペイン : J.A. Matius-Lopes (UoC)
 中国 : Jesús Martínez-Frías(CSIC-CUM)
 M. Zhu (MUST)

学生

博士 D1 1 名
 修士 M2 3 名
 修士 M1 5 名
 卒論生 9 名

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) K. Yamamoto, J. Haruyama, S. Kobayashi, N. Ohtake, T. Iwata, Y. Ishihara, N. Hasebe, “Two-stage development of the lunar farside highlands crustal foemation”, *Planetary and Space Science*, 120(2016)43-47.
- 2) Hiroshi Nagaoka, Yuzuru Karouji, Hiroshi Takeda, Timothy J. Fagan, Mitsuru Ebihara and Nobuyuki Hasebe, “Mineralogy and Petrology of lunar meteorite Nowthwest Africa 2977 consisting of olivine cumulate gabbro including inverted gionite”, *Eath, Planets and Space*, (2015)67:200, DOI10.1186/s40623-015-0368-y.
- 3) N.Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, “X-ray fluorecence spectrometer for planetary exploration”, *Adv. X-ray. Chem. Anal., Japan*, 47(2016)59–77.
- 4) H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, Y. Oyama, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno “The Development of X-Ray Generator with a Pyroelectric Crystal for Future Planetary Exploration” *Adv. X-ray. Chem. Anal., Japan*, **46(2015)**347-354.
- 5) M. Naito, N. Hasebe et al., “Future lunar misson active X-ray Spactrometer development: Surface roughness and geometry sttudies”, *Nucl. Instr. Methods, Phys. Res. A*. 7888(2015)182-187.
- 6) Sota Shimizu, Yukihiro Nishiyama, Nobuyuki Hasebe, “A Solution of Time-delay Problem in Remote Operation of Active Vision Sensing Device -Visual Tracking in Time-series of Images from Past to Future –”, *Proc. of IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control*, pp. 000-000 (2015.3)
- 7) S. Shimizu, T. Kadogawa, M. Naito, T. Hashizume, H. Kusano, H. Nagaoka, N. Hasebe, Y. Tanzawa “A study on color information corrected in human brain – Measurement and evaluation of color propagation” *Proc., IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Article number 7049297(2015)5230-5235.
- 8) S. Shimizu, N. Hasebe, K. Nakamura, H. Kusano, H. Nagaoka, K.J. Kim, Y.R. Choi, E.S. Yi “Multi-purpose wide-angle vision system for remote control of planetary exploring rover” *Proc., IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Article number 7049302(2015)5260-5265.
- 9) J. Haruyama et al., “Mission Concepts of Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME) Project”, *ISTS Paper No: 2015-k-29[900356]*.
- 10) 清水創太, 中村和貴, 長谷部信行, 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—視線入力装置を用いたカメラ方向制御の精度評価手法—, *電気学会論文誌, Sec.D*, 135(12)(2012)1138-1143.

4.2 総説・著書

長谷部信行、草野広樹、長岡央、“惑星探査における蛍光 X 線分光” X 線分析の進歩 47(2016)59-77.

4.3 招待講演

- 1) N. Hasebe, “Nuclear Spectroscopic Approach to Study Planetary Bodies”, Seminar for Physics Departments, Sep. 8, 2015.
- 2) N. Hasebe, “Gamma-Ray and Neutron Spectrometer for Martian Satellites Mission”, Seminar for Lab. for Experimental Nuclear Physics and Cosmophysics of MEPhI, Place: Build. : 70, Dec. 11, 2015.
- 3) N. Hasebe, “Gamma-Ray and Neutron Spectrometer for the MMX”, The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, Nishi-Waseda Campus, Waseda Univ., March 1, 2016.
- 4) N. Hasebe, “Investigation of the Origin of Martian Moons by Nuclear Spectrometer “, The 4th International Workshop on Planetary Geology, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.

4.4 国際会議など

1. H. Nagaoka, M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, E. Shibamura, H. Kuno, K. J. Kim, J. A. M. Lopes, J. Martínez-Frías, and JP team of AXS, “X-ray generator for active X-ray fluorescence spectrometer on-board landing rover for future planetary missions”, 46th Lunar and Planetary Conference, Woodlands, United States, 16-20 Mar., 2015.
2. M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, H. Kuno, E. Shibamura, J. A. M. Lopes, “X-ray Emission using the Pyroelectric Crystal for the Active X-ray Spectrometer”, 30th International Symposium on Technology and Science, Kobe, Japan, 4-10 Jul., 2015.
3. M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, E. Shibamura, H. Kuno, J. A. M. Lopes, J. Martínez-Frías, “Stable and Increased X-ray Luminosity of Pyroelectric X-ray Generator for Planetary X-ray Spectrometer”, 12th Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, Suntec, Singapore, 2-7 Aug., 2015.
4. T. Adachi et al.,” The basic research of Gamma-ray Spectrometer cooling system”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
5. H. Sekine et al., “Improved distributions of Th and K in the Procellaum KREEP terraine derived from Kaguya Gamma-Ray Spectrometer”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
6. N. Hasebe et al., “Gamma-Ray and Neutron Spectrometer for the MMX”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
7. K.J. Kim et al., “Overview of the KLPO and GRS”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
8. H. Nagaoka et al., “Overview of Active X-ray Spectrometer for future lunar landing mission” : Hiroshi Nagaoka”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
9. Naito et al., “Gamma-Ray Flux from Martian Moons as a Function of Elemental Composition”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.

10. H. Kusano et al., “Neutron Spectrometer for the MMX”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
11. M. Mizone et al., “Development of the pyroelectric X-ray generator for lunar landing”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
12. Y. Hayashida et al., “KGRS DATA Analysis”, Mini-Workshop of Lunar and Planetary Explorations, 55-S Build., Nishi-Waseda, Campus Waseda Univ., 1-2, March, 2016.
13. ***N. Hasebe*** et al., “Gamma-ray and Neutron Spectrometer for Martian Moon Exploration”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
14. H. Nagaoka, ***N. Hasebe***, H. Kusano, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, Y. Amano, T. Ohta, T. J Fagan, K.J. Kim, “Active X-ray Spectrometer for Lunar and Planetary Landing Missions --- scientific overviews and instrumental specification ---”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
15. H. Sekine, H. Nagaoka, ***N. Hasebe***, “Detailed Distribution of K and Th in the Procellarum KREEP Terrane Based on the Low-Altitude Observation Data by Kaguya Gamma-ray Spectrometer”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
16. M. Naito, K. Yoshida, J. Ishii, D. Aoki, H. Nagaoka, H. Kusano, S. Shimizu, ***N. Hasebe***, “Leakage Flux of Gamma-rays Emitted from Martian Moons Depending on Elemental Compositions”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
16. T. Adachi, ***N. Hasebe***, E. Shibamura, H. Kuno, M. Naito, H. Kusano, H. Nagaoka, “Sensor Head of the HPGe Gamma-ray Spectrometer by the Use of Small Cooler”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
18. M. Mizone, M. Naito, H. Kusano, H. Nagaoka, H. Kuno, ***N. Hasebe***, “Development of the PyroElectric X-ray Generator for Lunar Landing Mission”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
19. J. Ishii, ***N. Hasebe***, H. Kusano, H. Nagaoka, M. Naito, K. Yoshida, D. Aoki, S. Shimizu, “Dependence of Neutron Flux on Hydrogen-Concentration in Mars Moon Exploration”,
20. S. Shimizu, H. Nishiyama, ***N. Hasebe***, “Undistorted Image Reconstruction from Advanced Wide Angle Foveated Image”, International Symposium on Remote Sensing 2016 (ISRS2016), International Convention Center, Jeju, Korea, April 20 – 22, 2016.
21. H. Nagaoka, ***N. Hasebe***, H. Kusano, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, Y. Amano, T. Ohta, T.J. Fagan, K.J. Kim, “Overviews of Active X-ray Spectrometer for Lunar and Planetary Landing Missions”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.
22. H. Sekine, H. Nagaoka, ***N. Hasebe***, “Abundances of K and Th in the Lunar Surface Observed by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer at the Lower Altitude Orbit”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.

23. M. Naito, K. Yoshida, J. Ishii, D. Aoki, H. Nagaoka, H. Kusano, S. Shimizu, **N. Hasebe**, “Dependence of Gamma-rays on Elemental Compositions of Martian Moons”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.
24. T. Adachi, **N. Hasebe**, E. Shibamura, H. Kuno, M. Naito, H. Kusano, H. Nagaoka, “Thermal Property of HPG γ Gamma-ray Spectrometer Cooled by Small Mechanical Cooler”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.
25. M. Mizone, M. Naito, H. Kusano, H. Nagaoka, H. Kuno, **N. Hasebe**, “X-Ray Flux produced by Pyroelectric X-ray Generator”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.
26. J. Ishii, **N. Hasebe**, H. Kusano, H. Nagaoka, M. Naito, K. Yoshida, D. Aoki, S. Shimizu, “Investigation of Hydrogen-Concentration of Martian Moons by Neutron Measurement”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.
27. S. Shimizu, H. Nishiyama, **N. Hasebe**, “Reconstruction of Undistorted Image from Advanced Wide Angle Foveated Image”, The 4th International Workshop on Planetary Geology : The 6th Korean-Japan Bilateral Planetary Program, KIGAM, Daejong, Korea, : April 19(Tue) 2016.
28. **N. Hasebe**, H. Kusano, H. Nagaoka, Masayuki Naito, M. Mizone, E. Shibamura, K.J. Kim, H. Kuno, J. A. Matias Lopes, J. Martínez-Frías, “Pyroelectric X-ray generation of active X-ray spectrometer for future planetary missions”, Colloquium Spectroscopicum Internationale XXXIX (CSI 2015), Figueira da Foz, (Coimbra), Portugal, 30 August - 3 September 2015.
29. N. Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, T. Adachi, K. Yoshida, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, Y. Amano, J. A. Matias Lopes, J. Martínez-Frías, “Gamma-ray and neutron spectrometers: An investigation of elemental composition of near-Earth asteroids onboard the miniature deep space probe”, Colloquium Spectroscopicum Internationale XXXIX (CSI 2015), Figueira da Foz, (Coimbra), Portugal, 30 August - 3 September 2015.
30. M. Naito, **N. Hasebe**, H. Kusano, H. Nagaoka, E. Shibamura, H. Kuno, J.A. Matias Lopes, J. Martínez-Frías, “Stable and Increased X-ray Luminosity of Pyroelectric X-ray Generator for Planetary X-ray Spectrometer”, 12th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2015), Suntech Convension Center, Singapore, Aug. 2-7, 2015.
31. **N. Hasebe**, H. Kusano, H. Nagaoka, S. Shimizu, M. Miyajima, E. Shibamura, H. Kuno, M. Naito, J.A. Matias-Lopes and J. Martínez-Frías, “Nuclear Spectroscopic Study of Near-Earth-Asteroids Using the Miniature Deep Space Satellite”, 12th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2015), Suntech Convension Center, Singapore, Aug. 2-7, 2015.
32. R. Hayashida, H. Nagaoka, H. Kusano, E. Shibamura, M. Naito, **N. Hasebe**, “The Spatial Distribution of Gamma Rays Observed by Kaguya (SELENE) Gamma-Ray Spectrometer”, 30th International Symposium Ton Space Technology and Science(ISTS2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 4 -10, 2015.
33. **N. Hasebe**, H. Kusano, H. Nagaoka, S. Shimizu, M. Miyajima, E. Shibamura, H. Kuno, M. Naito, K. Yoshida, T. Adachi, José A. Matias-Lopes, “Nuclear Spectroscopic Approach to Study M-type Near-Earth -Asteroids on the Miniature Deep Space Satellite”, 30th

International Symposium Ton Space Technology and Science(ISTS2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 4 -10, 2015.

34. M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka¹, H. Kuno, E. Shibamura, J.A. Matias-Lopes, “X-ray Emission using the Pyroelectric Crystal for the Active X-ray Spectrometer”, 30th International Symposium Ton Space Technology and Science(ISTS2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 4 -10, 2015.
35. J. Haruyama, I. Kawano, T. Kubota, M. Otsuki, H. Kato, T. Nishibori, T. Iwata, Y. Yamamoto, Y. Ishihara, A. Nagamatsu, K. Shimada, T. Hasenaka, T. Morota, M. N. Nishino, K. Hashizume, K. Saiki, M. Shirao, G. Komatsu, **N. Hasebe**, H. Shimizu, H. Miyamoto, K. Kobayashi, S. Yokobori, T. Michikami, S. Yamamoto, Y. Yokota, H. Arisumi, G. Ishigami, K. Furutani, Y. Michikawa, “Mission Concepts of Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME) Project”, 30th International Symposium Ton Space Technology and Science(ISTS2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 4 -10, 2015.
36. **N. Hasebe**, T. Saito¹, H. Kusano, H. Nagaoka, S. Shimizu, R. Hayashida, A. Nagamatu, J. Haruyama, “Radiation Environment on the Moon ---On the Lunar Surface and inside the Vertical Hole of the Moon ---“, 30th International Symposium Ton Space Technology and Science(ISTS2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 4 -10, 2015.
37. K. Ohno, R. Mitsuhashi, **N. Hasebe**, K. Oyama, T. Kodama, H. Matsumoto, O.Okudaira, “The Precipitation of Energetic Electrons Observed at the Altitude of 666km Association with the Phenomenon before the Great 3.11 Earthquake”, 30th International Symposium Ton Space Technology and Science(ISTS2015), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 4 -10, 2015.
38. M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, K. Yoshida, J. Ishii, D. Aoki, H. Kusano, “Numerical investigation of the leakage gamma – ray and neutron fluxes from Marian Moons”, LPSC2016, March Houston, USA
39. H. Nagaoka, M. Naito, **N. Hasebe**, H. Kusano, E. Shibamura, H. Kuno, Kyeong J. Kim, José A. Matias Lope, Jesús Martínez-Frías, and JP team of AXS, “X-ray generator for active X-ray fluorescence spectrometer on board landing rover for future planetary missions”, LPSC2016, March Houston, USA
40. K. J. Kim, C. Wöhler, **N. Hasebe**, S. van Gasselt, A. A. Berezhnoy, J. A. P. Rodriguez, A. Grumpe, S. Kobayashi, N. Yamashita, R. C. Reedy, Y. Karouji, M. Kobayashi, “Lunar Silicon Distribution as Observed by the Kaguya Gamma-Ray Spectrometer and Chandrayaan-1 Moon Mineralogy Mapper (M3) Calibration”, LPSC2016, March Houston, USA
41. K. Iwasaki, N. Tanaka, K. Murakami, H. Kusano, E. Shibamura, **N. Hasebe**, and M. Miyajima, “Development of gas ionization chambers with coplanar electrodes for alpha-ray spectrometry”, International Symposium Radiation Detectors and Their Uses : ISRD2016, KEK Tsukuba, Kobayashi-Hall, Tsukuba, January 18 – 21, 2016.
42. K. Yoshida, **N. Hasebe**, H. Kusano, H. Nagaoka, M. Naito, J. Ishii, D. Aoki, “Gamma-ray Emission from the Surface of Martian Satellites as a Function of Elemental Composition”, International Symposium Radiation Detectors and Their Uses : ISRD2016, KEK Tsukuba, Kobayashi-Hall, Tsukuba, January 18 – 21, 2016.
43. **N. Hasebe**, T. Ohta, Y. Aman, M. Naito, H. Kusano, H. Nagaoka, K. Yoshida, T. Adachi, T.J. Fagan, H. Kuno, E. Shibamura, A. Hitachi¹, J.A. Matias Lopes, J. Martínez-Frías⁶, T. Nakamura⁷, S. Kameda, Y. Cho, N. Shirai, H. Miyamoto, T. Niihara, T. Mikouchi, T. Okada, Y. Karouji, “An Investigation of Elemental Composition of Martian Satellites by

Gamma-ray and Neutron Spectrometers”, International Symposium Radiation Detectors and Their Uses : ISRD2016, KEK Tsukuba, Kobayashi-Hall, Tsukuba, January 18 – 21, 2016.

44. M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, E. Shibamura, K. Yoshida, J. Ishii, D. Aoki, “Neutron Fluxes from Martian Satellites as a function of Chemical Composition and Hydrogen Content”, International Symposium Radiation Detectors and Their Uses : ISRD2016, KEK Tsukuba, Kobayashi-Hall, Tsukuba, January 18 – 21, 2016.
45. H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, Y. Amano, E. Shibamura, T. Ohta, T.J. Fagan, M. Naito, H. Kuno and J.A. Matias-Lopes, “Instrumental Overview of Active X-ray Spectrometer for Future Lunar Landing Missions”, International Symposium Radiation Detectors and Their Uses : ISRD2016, KEK Tsukuba, Kobayashi-Hall, Tsukuba, January 18 – 21, 2016.
46. H. Kusano, N. Hasebe, H. Nagaoka, M. Naito, M. Mizone, Y. Amano, E. Shibamura, H. Kuno, “Current Development Status of an X-ray Generator for X-Ray Fluorescence Analysis on Space Mission”, International Symposium Radiation Detectors and Their Uses : ISRD2016, KEK Tsukuba, Kobayashi-Hall, Tsukuba, January 18 – 21, 2016.
47. S. Shimizu, Y. Nishiyama, N. Hasebe, A Solution of Time-delay Problem in Remote Operation of Active Vision Sensing Device ---Visual Tracking in Time-series of Images from Past to Future ---, Proc. Of IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, IS3-1-1(2015.3)1-6.

4.5 国内学会・研究会・講演会など

1. 長谷部信行、“月・火星表面及び縦穴内での放射線線量の評価”、第5回月と火星の縦孔・地下空洞探査研究会、JAXA/ISAS、March 2-3、2015.
2. 林田陵佑、長岡央、長谷部信行、草野広樹、小平聡 “月周回衛星による月ガンマ線および中性子の線量空間分布”、第62回応用物理学会春季学術講演会、2015年3月11日、東海大学
3. 内藤雅之、長谷部信行、草野広樹、長岡央、久野治義、柴村英道、J. A. M. Lopes、“焦電結晶を用いたX線発生器の動作特性(II)”、第62回応用物理学会春季学術講演会、平塚市、3/11-14、2015.
4. 長岡央、長谷部信行、草野広樹、内藤雅之、“月着陸探査に向けた能動型蛍光X線分光計の開発状況”、日本地球惑星科学連合2015年大会、千葉市、5/24-28、2015.
5. 内藤雅之、長谷部信行、長岡央、草野広樹、桑古昌輝、大山裕輝、柴村英道、天野嘉春、太田亨、J. A. M. Lopes、“次期惑星探査計画に向けた蛍光X線分析法の検討—試料表面の粗さと特性X線強度比の関係—”、日本地球惑星科学連合2015年大会、千葉市、5/24-28、2015.
6. 草野広樹、長谷部信行、長岡央、柴村英道、天野嘉春、太田亨、Fagan Timothy J.、久野治義 “月着陸探査に向けた能動型 X 線分光計” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016
7. 内藤雅之、溝根美穂、草野広樹、柴村英道、長岡央、久野治義、長谷部信行 “月着陸探査に向けた焦電結晶 X 線源の開発” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016
8. 西山裕之、清水創太、内藤雅之、草野広樹、長岡央、長谷部信行 “アクティブ X 線検出器の動作モニタリングのための探査ローバー用多機能遠隔広視野視覚センサシステムの開発” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016
9. 草野広樹、長谷部信行、長岡央、柴村英道、天野嘉春、太田亨、Fagan Timothy J.、久野治義 “火星衛星探査に向けたガンマ線・中性子分光計” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016

10. 内藤雅之、吉田康平、石井隼也、青木大輔、長岡央、草野広樹、長谷部信行 “火星衛星から発生するガンマ線数値シミュレーション” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016
11. 石井隼也、**長谷部信行**、草野広樹、長岡央、内藤雅之、吉田康平、青木大輔 “火星衛星表面から放出される中性子強度の水素濃度依存性” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016
12. 草野広樹、内藤雅之、溝根美穂、長岡央、久野治義、柴村英道、**長谷部信行** “焦電結晶 X 線源による発生 X 線強度の測定” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015
13. 長岡央、**長谷部信行**、草野広樹、内藤雅之、柴村英道、天野嘉春、太田亨 “月着陸探査に向けた能動型 X 線分光計の開発状況” 日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015
14. 内藤雅之、**長谷部信行**、長岡央、草野広樹、桑古昌輝、大山裕輝、柴村英道、天野嘉春、太田亨、Matias Lopes José A. “次期月惑星着陸探査に向けた蛍光 X 線分析法の検討 —試料の表面粗さと特性 X 線強度比の関係” 日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015
15. 西山裕之、清水創太、長岡央、**長谷部信行** “遠隔操作時の時間遅れ問題を解決する SIFT を用いた過去から未来へのビジュアルトラッキング” 日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015. 5. 22-26 幕張メッセ
16. 西山裕之、清水創太、内藤雅之、草野広樹、長岡央、長谷部信行、 “アクティブ X 線検出器の動作モニタリングのための探査ローバー用多機能遠隔広視野視覚センサシステムの開発”、第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (2016. 3) 19-22, 東京工業大学
17. 四之宮創、小平聡、森島邦博、**長谷部信行**、蔵野美恵子、久下謙一、「CR-39 と原子核乾板を用いた重イオンの核破砕反応の計測」、第 30 回固体飛跡検出器研究会、福井大学附属国際原子力工学研究所、2016 年 3 月 14 日・15 日
18. 森重敬太、小平聡、川嶋元、蔵野美恵子、**長谷部信行**、小口靖弘、篠崎和佳子、「宇宙放射線計測のための重粒子線に対するテクノトラックの性能評価」、第 30 回固体飛跡検出器研究会、福井大学附属国際原子力工学研究所、2016 年 3 月 14 日・15 日
19. **長谷部信行**、 “惑星探査用核分光計による火星衛星フォボスの起源に迫る”、宇宙科学観測研究所 公開セミナー、「最先端観測機器開発による宇宙科学観測」、早稲田大学総合学術情報センター、国際会議場 井深大記念センター、2016年3月15日

4.6 2015年度卒論及び修論

修士論文

1. 吉田康平 : Gamma-ray emission from the surface of planets as a function of elemental composition
2. 三橋怜 : ジオスペース探査機搭載用高エネルギー電子検出器の性能評価
3. 四之宮創 : CR39と原子核乾板を組み合わせた飛程検出器を用いた重イオンの核破砕断面積の測定

卒業論文

1. 安松勇貴 : サーキュラーモデルに基づく広角中心窩画像テッセレーション手法の構築
2. 石智成 : コロナ質量放出発生に伴う放射線帯電子のスペクトルの変化
3. 森重敬太 : 改良型CR-39固体飛程検出器を用いた宇宙放射線の計測
4. 関根北斗 : 月のPKT領域における K, Th 元素濃度分布及びその形成過程の解明
5. 舘慶弥 : 月の南極エイトケン盆地における元素分布の解析
6. 相京知良 : 月レゴリス試料に対する蛍光X線分析法の検討と決定精度向上に関する研究

7. 石井隼也: 火星衛星探査に向けた中性子強度の水濃度依存性
8. 田中直道: LUKE型電離箱における電極の幾何学的構造及び線源の位置依存性
9. 村上航平: α 線をを用いた円筒型電離箱のエネルギー分解能の評価

5. 研究活動の課題と展望

月探査では従来の観測を凌駕する観測を、またこれまで皆無であった火星衛星探査に高性能な元素分析装置の搭載に向けて、核分光計の高性能化及び小型軽量化に取り組み、世界に先駆けて宇宙科学における未知領域での新たな研究を展開する。また、これまで得られた多波長の観測データを統合化して、月・惑星・小惑星の起源と進化の理解をさらに進める。

これまで実施してきた海外との研究機関との共同研究をこれまで以上に密にして、学生や若手研究者との交流をさらに深め、密度の高い協力関係を展開していく予定である。また、超小型衛星(50-100kg級)を積極的に利用した深宇宙探査を切り拓いていく。特に、小惑星(M型、D型天体)を含めた宇宙資源探査に注目し、それらの搭載に向けた核分光計の高精度化、省電力・小型・軽量化に取り組む予定である。