

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 探査機搭載の高性能小型元素分析装置及び光学機器の基礎開発

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

最近の探査データ解析により、月表層の火成活動は従来考えられてきたよりも、長い期間継続しかつ複雑なプロセスで引き起こされていたことが指摘されている。月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計(KGRS)、とLISM(地形カメラ、マルチバンドイメージャ、スペクトルプロファイラ)のデータを駆使し、月表側北領域のPKTと呼ばれる領域にみられる火山性の地形の組成を調べた。これら火山性地形を含むピクセルは、周囲の玄武岩質マグマと比較して、K, Thといった液相濃集元素に富み、長石質である。このような特長は、周囲の玄武岩質マグマとは異なり、よりシリカに富む火成活動により形成されたことを示唆している。玄武岩質月隕石 NWA 773 clan と呼ばれる隕石群の薄片観察から、非常にシリカに富む火山性の岩石片を発見した。この岩石片は非常にシリカに富んだマグマから結晶化したことがわかり、リモセンから指摘されている火山性地形の起源と関係性が見られる。これらの結果は月表層で起きた火成活動の多様性を示しており、探査データと試料分析結果を統合的に駆使することで、月火成活動を体系的に理解する手がかりとなる。

A.2 火星衛星及び地球近傍小惑星の研究

将来の火星衛星及び地球近傍小惑星探査における科学観測機器として、高性能ガンマ線・中性子分光計(GNS)を提案している。GNSによる核分光法は、天体の全体像を知るうえで重要な元素組成情報の取得が可能であり、その搭載意義は高い。観測対象となる元素はH, O, Mg, Al, Si, Ca, Feな

どの主要元素と天然放射性元素の K, Th, U である。観測対象となる複数種類の天体の元素組成を仮定して数値シミュレーションを行い、それらから放出されるガンマ線・中性子束を得た。ガンマ線・中性子束にはそれぞれの天体の組成の特徴が如実に反映され、これらの観測によって天体の組成を決定することが可能であることが確認された。また、観測器についても複数のタイプの検出器を仮定して観測シミュレーションを行い、それぞれの検出器の利点の特徴が確認された。衛星鋼体から放出されるバックグラウンドについても計算を行い、それらが天体の観測に及ぼす影響について見積もった。

A.3 探査機搭載の高性能小型元素分析装置及び光学機器の基礎開発

A.3.1. X線発生装置の開発

惑星の着陸探査において元素分析を行う能動型蛍光 X 線分光計 (AXS) の開発を進めている。AXS の特徴は小型・軽量・省電力な点であり、これらの特徴は着陸探査で搭載機器に課せられる制限に適している。AXS に搭載する励起源として、焦電型 X 線発生器 (PXG) とカーボンナノチューブ (CNT) を利用した X 線発生器 (CNXG) の 2 種の開発研究を行った。PXG の開発では、前年度までに決定した高強度の X 線が得られる PXG 内部の環境設定を反映させた小型の試作モデルを作成した。試作モデルから得られる X 線は市販品と比較して 30 倍以上の強度を達成した。CNXG の開発では、CNT 陰極に電圧を印加したときに陰極から放出される電子の電圧特性を調査した。CNT に交流電圧を印加することで、陰極の長寿命化を示唆する結果が得られた一方で、短時間で高強度の X 線を得るためには直流電圧を印加する方が有利であることが分かった。

A.3.2 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 K508N) を使用して高純度半導体 HPGe を用いたガンマ線分光計 GRS 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搭載可能な小型・軽量・高性能の GRS の開発が本研究の目的となる。そこで、冷却能力を実証するために 200cc の HPGe に相当するダミーを用いた装置を作製し、冷却実験を行った。装置の重量は小型探査機に搭載可能な約 3.5 kg。チェンバー内部に配置するスーパーインシュレータの効果、外気温度のと冷却能力、冷却時間、分光計内部の温度分布などの基礎データの取得に成功した。地球近傍小惑星の探査搭載に向けた反同時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.3.3 中心窩を有する広視野センサの開発

「中心窩を有する広視野センサの開発」プロジェクトは、積載重要、スペース、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。衛星や小惑星探査用の探査機は仕様上の制限から上述の問題の解決が至上命題である。研究室では、放射線、赤外線、可視光等の複数の帯域におけるリモートセンシングを可能とする多機能センサの開発を目指している。本プロジェクトは中でも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いる。また、人間や鳥の視覚機能に知見を得ているため、平行してこれら生物の視覚機能のメカニズムの解明や検証実験を並行して実施している。

2016 年度の取り組みは、大きく以下の 2 つがあげられる。(1) 科研費を用いて継続して実施された広角中心窩センサ研究と (2) 公益財団法人 JKA からの研究補助金を得て実施された広角中心窩望遠鏡用アイピースの開発である。

前者は広角中心窩センサから得られた人間の視覚情報を模倣した画像情報からやはり人間の脳の視覚情報処理をモデルとした顕著性地図を作成し、注目点を自動的に決定するという取り組みが

行われた。これは月面探査ローバーへの搭載する視覚センサにおける注目点移動に自律機能が必要であるという背景のもとに慶應義塾大学との共同研究に基づいて遂行された。上記、広角中心窩センサから得られた画像から得られる顕著性地図に関する考察が行われ、研究室学部生の卒業研究テーマとして実施され、学生本人による2016年11月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、2017年度6月の国際学会発表及び国内Journalに投稿予定である。

後者のアイピースの開発は、当該財団から6年連続して採択されている研究テーマの一環であり、2014~2015年度は広角中心窩双眼鏡及び望遠鏡の対物レンズ部の設計・試作が実施された。当該のアイピースは従来のアイピースに比べ網膜のより広範囲に像を結像させる特殊な仕様をもち、上述の対物レンズとの整合性を高めるために設計、試作された。その成果を2017年10月の国際学会で発表を行う予定である。

A3.4 地球外天体におけるジャイロ応用システムの開発

独楽のように1つの軸に対して高速で回転させ、その回転軸の方向を自由に変えられる装置をジャイロスコープという。高速で回転する物体は、ジャイロ効果と呼ばれる、主に2つの特徴的な性質を有する。

- ① “外部からの力がないとき、回転軸は一定方向を指す” (慣性の法則)
 - ② “外部から回転軸に力が加えられると回転軸はその力と90°方向に回転する” (プリセッション)
- このようなジャイロ効果を利用した動力源は、しばしば人工衛星の姿勢制御などに利用される。しかし、ジャイロ効果に関しては複数の軸回転を扱うために運動の解析がやや複雑になってしまう。

これらの状況を踏まえて以下の研究を行った。(1)オイラー角に基づいた座標変換を用いて、ジャイロ効果を有した回転体である独楽のモデリングを行った。(2)その応用として、姿勢角が運動に大きな影響を及ぼす飛行体の一例であるドローンの運動に関するモデリングを行った。シミュレーションによって両者のモデリングが正しいことを確認した。

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 : 大内
 主席研究員准教授 : 清水創太
 次席研究員助教 : 長岡 央
 助手 : 内藤雅之
 招聘研究員 : 宮島光弘、桜井邦朋、久野治義、柴村英道、月出章、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), A. Brezunhoi(UoM)
 ドイツ : G. Klingelfoefer (JGU), J. Brueckner(MPIC)
 米国 : B.W.Boynton, D. Hamara (UoA), L. Lim, R. Starr (GSFC), R. Reedy(LPI), N. Yamashita(LPI)
 ポルトガル : J.A. Matius-Lopes (UoC)

学生

博士 D3	1 名
修士 M2	5 名
修士 M1	3 名
卒論生	8 名

4. 研究業績

学術論文(査読有)

- 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.
- N.Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, “X-ray fluorescence spectrometer for planetary exploration”, *Adv. X-ray. Chem. Anal., Japan*, 47(2016)59–77.
- Nubyuki Hasebe, Tohru Ohta, Yoshiharu Amano, Masayuki Naito, Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, Kohei Yoshida, Takuto Adachi, Timothy J. Fagan, “An Investigation of Elemental Composition of Martian Satellites by Gamma-ray and Neutron Spectrometer”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- E. SHIBAMURA, S. SASAKI and N. T. TRAN, “Systematic Study of Inorganic and Organic Scintillator Light Yields”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- H. Nagaoka, N. Hasebe, H. Kusano, Y. Amano, E. Shibamura, T. Ohta, T.J. Fagan, M. Naito, H. Kuno, J.A. Matias Lopes, “Instrumental Overview of an Active X-ray Spectrometer for Future Lunar Landing Mission”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- Hiroki Kusano, Nobuyuki Hasebe, Hiroshi Nagaoka, Masayuki Naito, Miho Mizone, Yoshiharu Amano, Eido Shibamura, and Haruyoshi Kuno, “Current Development Status of an X-ray Generator for X-ray Fluorescence Analysis on Space Mission”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- Kenta Iwasaki, Naomichi Tanaka, Kohei Murakami, Kusano Hiroki, Eido Shibamura, Nobuyuki Hasebe, and Mitsuhiro Miyajima, “Development of Gas Ionization Chambers with Coplanar Electrode for Alpha-ray Spectrometry”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- Kouhei Yoshida, Masayuki Naito, Nobuyuki Hasebe, Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, Junya Ishii, and Daisuke Aoki, “Gamma-ray Emission from the Surface of Martian Satellites as a Function of Elemental Composition”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- Masayuki Naito, Nobuyuki Hasebe, Kouhei Yoshida, Junya Ishii, Daisuke Aoki, Hiroshi Nagaoka, Hiroki Kusano, and Eido Shibamura, “Neutron Fluxes from Martian Satellites as a Function of Chirical Composition and Hydrogen Content”, 2016, JPS Conf. Proc. 11
- 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.

国際会議など

- Sekine Hokuto, Hiroshi Nagaoka, Nobuyuki Hasebe, “The detail distributions of Th and K in the Procellarum KREEP terrane from the low-altitude data of Kaguya Gamma-ray Spectrometer”, *International Symposium on Remote Sensing 2016*, April 20-22 Jeju, Korea
- Hiroshi Nagaoka, Nobuyuki Hasebe, Hiroki Kusano, Masayuki Naito, Eido Shibamura, Haruyoshi Kuno, Yoshiharu Amano, Tohru Ohta, Timothy 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*, April 20-22, Jeju, Korea
- Masayuki Naito, Junya Ishii, Kouhei Yoshida, Hiroshi Nagaoka, Hiroki Kusano, Souta Shimizu and Nobuyuki Hasebe, “Leakage Flux of Gamma-rays emitted from Martian Moons Depending on Elemental Compositions”, *International Symposium on Remote Sensing 2016*, April 20-22, Jeju, Korea
- Junya Ishii, Daisuke Aoki, Kouhei Yoshida, Masayuki Naito, Hiroshi Nagaoka, Hiroki Kusano, Nobuyuki Hasebe, “Determination of the amount of hydrogen using Neutron Spectrometer for Mars Moon Exploration”, *International Symposium on Remote Sensing 2016*, April 20-22, Jeju, Korea

- Miho Mizone, Nobuyuki Hasebe, Haruyoshi Kuno, Eido Shibamura, Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, Masayuki Naito, "DEVELOPMENT OF THE PYROELECTRIC X-RAY GENERATOR FOR LUNAR LANDING MISSION", International Symposium on Remote Sensing 2016, April 20-22, Jeju, Korea
- Takuto Adachi, Nobuyuki Hasebe, Eido Shibamura, Haruyoshi Kuno, Masayuki Naito, Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, "SENSOR HEAD OF THE HPGE GAMMA-RAY SPECTROMETER BY THE USE OF SMALL COOLER", International Symposium on Remote Sensing 2016, April 20-22, Jeju, Korea
- Akira Hitachi, "Fundamentals of Fresnel diffraction demonstrated using ultrasound", the 2nd International conference on ultrasonic-based applications: from analysis to synthesis (ULTRASONICS 2016), June 6-8, Costa de Caparica, Lisbon
- Nobuyuki Hasebe, Hiroki Kusano, Yoshiharu Amano, Eido Shibamura, Tohru Ohta, Timothy J. Fagan, Masayuki Naito, Haruyoshi Kuno, "Instrumental overview and scientific expectation of Active X-ray Spectrometer for future lunar landing mission", 13th Annual Meeting Asia Oceania Geoscience Society 2016, July 31- Aug 5, 2016, China
- Junya Ishii, Kouhei Yoshida, Daisuke, Aoki, Hiroshi Nagaoka, Hiroki Kusano, and Nobuyuki Hasebe, "Gamma-Ray Fluxes of Martian Moons as a Function of Their Chemical Composition", 13th Annual Meeting Asia Oceania Geoscience Society 2016, July 31- Aug 5, 2016, China
- Daisuke Aoki, Kouhei Yoshida, Masayuki Naito, Hiroshi Nagaoka, Hiroki Kusano, Nobuyuki Hasebe, "Fluxes of thermal, epithermal and fast neutrons emitted from the Martian moons", 13th Annual Meeting Asia Oceania Geoscience Society 2016, July 31- Aug 5, 2016, China

4.5 国内学会・研究会・講演会など

- 長岡宏、長谷部信行、草野広樹、柴村英道、天野嘉春、太田亨、Timothy J Fagan 内藤雅之、安達拓人、"月・惑星周回機搭載用の元素分析装置「ガンマ線中性子分光計」", 第 49 回月・惑星シンポジウム, July 20-21, 2016, Kanagawa
- 内藤雅之、石井隼也、吉田康平、青木大輔、長岡央、柴村英道、長谷部信行, "火星からのガンマ線放出と火星及び探査機からのバックグラウンド評価", 第 49 回月・惑星シンポジウム, July 20-21, 2016, Kanagawa
- 青木 大輔、吉田 康平、内藤 雅之、長岡 央、長谷部 信行, "中性子分光法による火星衛星の起源の研究", 第 49 回月・惑星シンポジウム, July 20-21, 2016, Kanagawa
- 長谷部 信行、長岡 央、内藤 雅之, "超小型衛星搭載に向けたガンマ線分光計の小型冷凍機による冷却", 第 49 回月・惑星シンポジウム, July 20-21, 2016, Kanagawa
- 長谷部信行、柴村英道、内藤雅之、天野嘉春、太田亨、Fagan Timothy
- 重力天体着陸探査に向けた元素分析装置「能動型蛍光 X 線分光計」の開発、日本惑星科学会 2016 年秋季講演会、2016 年 9 月 12 日-14 日、ノートルダム女子大
- 溝根美穂、草野広樹、長岡央、柴村英道、久野治義、長谷部信行、惑星探査搭載に向けた焦電結晶 X 線源の基礎開発、"第 77 回応用物理学会秋季学術講演会"2016 年 9 月 13 日-16 日、新潟
- 長谷部 信行、長岡央、内藤 雅之, "小型冷凍機を用いた HPGe ガンマ線分光計の軽量化", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会"2016 年 9 月 13 日-16 日、新潟
- 清水創太 長谷部信行, "広角中心窩画像から得られる顕著性マップについての考察 Discussions on Saliency Map from Wide Angle Fovea Image", 一般社団法人電気学会、2016 年 11 月 26 日、東京
- 青木大輔、木村優里、内藤雅之、長岡央、草野広樹、長谷部信行, "地球近傍小惑星探査に向けた中性子分光計の開発", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 14-17 日、神奈川
- 月出章、都留忍, "広視野望遠鏡の自作と星空の活用 III", 日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日-20 日、大阪パシフィコ
- 月出章, "暗黒物質探索と低速重粒子の放射線物性 11" 日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日-20 日、大阪パシフィコ

4.6 2016年度卒論及び修論

修士論文

- 岩崎健太、“Coplanar 電極を有する希ガス電離箱における分解能の向上”
- 林田陵佑、“かぐや観測データに基づく月の元素組成変化とその火成活動時期に関する研究”
- 木村優里、“小天体の探査に向けた中性子分光計の基礎研究”
- 溝根美穂、“焦電結晶を用いた小型 X 線発生装置の開発”
- 安達拓人、“超小型冷凍機を用いた宇宙探査用 HPGe ガンマ線分光計の冷却実験”
- 青木大輔、“小惑星探査に向けた核分光計の評価”
- 鍋倉由樹、“惑星探査用 CNT 型 X 線発生装置の研究開発”
- 敷島真奈、“小惑星探査に向けたガンマ線分光計の軽量化に関する研究”

卒業論文

- 今里真由子、“かぐや観測データに基づく PKT 領域内火山性地形の成因に関する研究”
- 大島佑介、“焦電結晶を用いた X 線発生装置の高輝度化”、
- 山崎達也、“広角中心窩画像から得られる顕著性マップについての考察”
- 氣賀信太郎、“飛行体の姿勢制御装置としてのジャイロスコープ(CMG)に関する研究 ”
- 石塚典義、“地震に伴うラドン放出量測定に関するガンマ線検出器のデジタル波形処理”
- 藤田可奈美、“小惑星表面のガンマ線放出率の推定”

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。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。

ジャイロスコープはセンサとしての利用が良く知られているが、動力源としての利用はあまり知られていない。しかし、モータなどの動力源に比べてジャイロスコープの回転数に比例した大きな力を発生することが可能である。一方、モータは回転方向と力の発生方向が同一なのに比べて、回転方向と 90 度の方向に力が発生するという性質のため、その扱いは容易ではない。しかし、この課題を解決することにより、人工衛星の姿勢制御用ジャイロ、操縦しやすいドローンの開発、輸送システム(2 輪車・自動車・航空機・ロケット)、ロボット、建築物(揺れ止め・振じれ止め)、産業機械(クレーン)など多くの分野での活用が期待できる。今後、超小型衛星などにジャイロを利用し姿勢制御に取り組む予定である。