

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：宇宙放射線科学の実験的研究

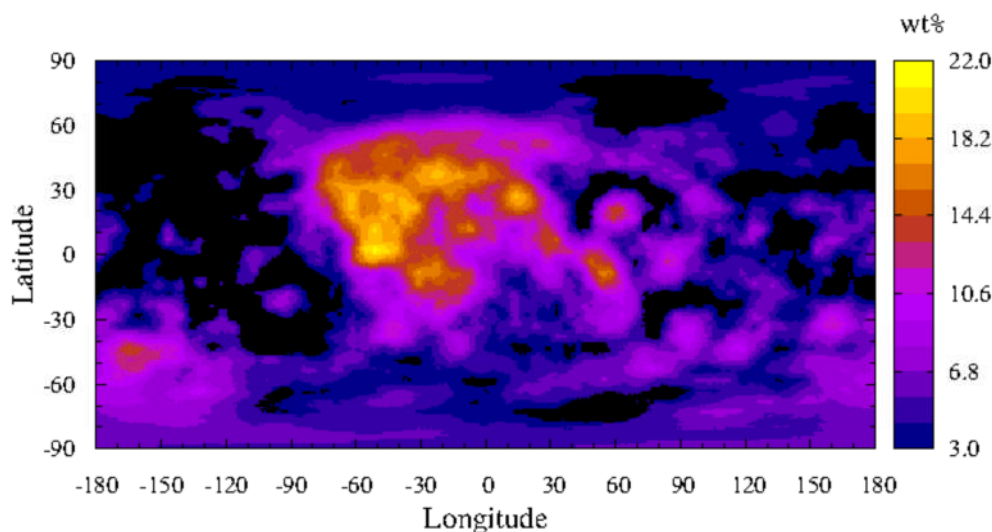
宇宙で繰り広げられている様々な高エネルギー現象を観測することは、宇宙の起源とその後の進化等、それぞれの時空で生起している物理現象の解明の手掛かりになるだけでなく、新しい世界へと導く自然科学の魅力を有しています。本研究では、地球科学を含め惑星科学、宇宙線・宇宙空間物理学に深く関連している宇宙放射線科学の実験的研究です。特に、MeV領域の γ 線、中性子線、粒子線、また keV領域のX線は、惑星・宇宙を構成している重要な物質情報(原子核や原子成分)を担っています。それらの情報を得て、月・惑星・小惑星や天体の形成や進化の謎の解明に取り組んでいます。また、それらの観測・実験分野で要求される新しい検出器技術やエレクトロニクス技術の開発、その周辺技術の開発を同時に進めています。

2. 主な研究とその成果

2.1 月・火星衛星・小惑星の科学と資源探査

月探査「かぐや」ガンマ線観測データ

最近の探査データ解析結果によって、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るようになりました。月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計(KGRS)のデータを駆使して、月表層の側北領域の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てみました。かぐやガンマ線分光計(KGRS)は月探査として始めて高純度ゲルマニウム半導体検出器を搭載したので、これまでに用いられたシンチレータと比較して高いエネルギー分解能をもっているのが特徴です。この特徴を生かして、複数のピークをフィッティングしてデータの解析した結果、鉄由来の846 keVと7.6 MeVのガンマ線強度を、従来得られたものよりも高い精度で求めることができました。月の鉄濃度分布図の結果を下図に示します。作成した元素分布図は、過去の探査の結果と比較して検出の下限値が小さく、高精度である。結果をCa、Thの分布や鉱物分布と比較した結果、複数の盆地地形の起源についてその形成過程が火成活動起源か隕石衝突起源かを決定することができました。



KGRSによって得られた月面の月濃度分布図

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、天体の表層物質を構成する元素組成やその分布を求めらるうえで有用な高性能ガンマ線・中性子分光計(GNS)の基礎開発をしている。天体に関する情報としては、天体の形状、サイズ、質量と並んで元素組成は基礎的かつ重要な情報である。核分光法は、天体の全体像を知るうえで重要な元素組成の情報が取得できることから、元素情報を取得する意義は高い。観測対象となる元素は、H, O, Mg, Al, Si, Ca, Feなどの主要元素や天然放射性元素 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。また、宇宙機から放出されるガンマ線・中性子束についても評価した。各々の天体の組成の特徴が、核分光法によって如実に反映され、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することができた。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。

2.2 探査機搭載の高性能小型元素分析装置及び探査機器の基礎開発

X線発生装置の開発

月・惑星(含む小惑星)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)の開発を進めています。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厳しい制限に適しています。AXS に搭載する励起源とした焦電型 X 線発生器(PXG)を利用した開発研究を実施しています。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更なる高強度 PXG のモデルの試作に取り組んでいます。試作モデルから得られる X 線は市販品と比較して 40 倍以上の強度を達成しています。また、本年度は、焦電結晶の X 線発生物理機構についても研究を進めています。焦電結晶は温度に依存して自発的に分極を生じる強誘電体の一種です。大気圧下では結晶の自発分極は空気中の自由電子によって中和され、見かけ上電氣的に中性となります。一方、1 Pa 程度の圧力下では電子の加速に利用され、X 線の発生器と使用することができます。焦電結晶による X 線発生器は小型軽量の線源として期待されていますが、その電子の発生の起源が不明な点も多いのが現状です。本研究では、真空チャンバー内の圧力を 10^{-5} - 10 Pa の範囲で変化させるとともに、封入ガスを He, CH₄, Dry air, O₂, Ar, Kr, Xe について、結晶を温度変化させて発生する X 線の強度を調べました。その結果、 10^{-4} -1 Pa の圧力範囲と気体の種類に対して X 線発生量に依存性は見られなかった一方、1 Pa 以上と 10^{-5} Pa 付近では X 線発生量が有意に減少する。このことから、電子の発生は結晶表面近くに形成される強電界領域の残留ガスが電子放出の起源であると結論付けることができました。

HPGeを用いた小型高性能ガンマ線分光計の開発

470g の軽量の冷凍機を用いて既存の検出器の 100K 以下への冷却を目標とし、設計・制作・試験を実施しました。先行研究において、200cc の Ge 結晶を想定した銅ダミーの-176°Cへの冷却が実現しました。実際のミッションを考える上では性能の評価が必須であることから、既存の Ge 検出器を用い、性能評価を行うモデルを設計しました。計算・強度シミュレーションにより検証を行い、全て部品から設計し、新しいモデルを作製しました。また、一連の研究結果について国際学会 ISTS、SELENE Symposium、韓国との二国間ワークショップに参加・講演を行いました。

中心窩を有する広視野センサの開発

本研究では、月や小惑星表面等の低重力環境下において、より短時間での効率の良い調査作業が行える不整地ならびに低重力環境下で安定した高速走行を可能とする車両型移動ロボット(ローバー)を開発することを目標としています。本研究は芝浦工業大学の研究代表者清水教授と研究者島田教授及び本研究室の共同で実施しています。機構部の基本設計を行い、ローバーの低重力下での

動作の挙動とローバーに搭載する各種センサの動作についての検討を加え、ローバーを試作しました。その性能評価は現在進行中です。その成果は、ISIE に投稿予定です。

地球外天体におけるジャイロ応用システムの開発

昨年度は独楽のモデルを用いた CMG という姿勢制御アクチュエータのモデリングから、複数の CMG による 3 軸の姿勢制御装置のモデリングを行いました。その 3 軸の姿勢制御装置に関する制御則を考え、数値シミュレーションにてその制御則の有効性に関して検証をしました。また、同じ運動モデルをドローンの姿勢安定モデルにも適用し、そちらについてはバックステッピングという制御法を用いることで、姿勢制御とドローンの並進運動の速度制御に関してシミュレーションにて検証を行い、制御則が有効であることを確認しました。それらの結果を 9 月に金沢大学で開催された計測自動制御学会で発表し、高い評価を得ることができました。

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
主席研究員教授： 大内 茂人
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： 桜井邦朋、久野治義、柴村英道、月出章、大田周也、宮島光弘、
山下直之、小林正規、春山純一、森国城、藤井雅之、古内ちゆみ

国内の協力研究者

放射線総合医学研究所 小林進吾、小平聡
JAXA 春山純一、草野広樹

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),
ポルトガル： J.A. Matias-Lopes (UoC)

学生： 博士 D3： 内藤雅之
修士 M2： 石井隼也、田中直道、村上航平、石智成
修士 M1： 氣賀信太朗、山崎達也、敷島真奈
卒論生： 有松貴弘、橘高有哉、萩原成也、長谷部嵩道、平川翔一郎、松田一真、渡邊隆甫

4. 研究業績、

著書

N. Hasebe, K.J. Kim, E. Shibamura, K. Sakurai, "Nuclear Planetary Science", Advances in Planetary Science – Vol. 1, 2018, Series Ed. Wing-Huen Ip, World Scientific.

学術論文(査読有)

2018

H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, M. Mizone, K.J. Kim "Development of X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science" Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 16(2)(2018)137-142.

O. Adriani 他, "Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", *Physical Review Letters*, 119(2017) 181101, Issue 18-3, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.181101>.

2017

- M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, E. Shibamura, M. Ohtake, K. J. Kim, C. Wöhler, A. A. Berezhnoy, "Iron Distribution of the Moon Observed by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer: Geological Implications for the South Pole-Aitken Basin, the Orientale Basin, and the Tycho Crater", *ICARUS*, 2017 in press, /doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.005
- K.J. Kim, Y. Choi, J. Park, E.S. Yi, S. Lee, Y. Yeon, C.W. Sun, K.B. Lee, Y. Kim, K. Min, K. Kang, J.Y. Cho, J.H. Cha, **N. Hasebe**, R. Elphic, P. Englert, O. Gasnault, E. Shibamura, H. Nagaoka, L. Lim "Current Development Status of a Gamma-Ray Spectrometer for the Korea Pathfinder Lunar Orbiter" International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2017-k-28, 2017
- N. Hasebe**, H. Nagaoka, M. Naito, E. Shibamura, H. Kuno, S. Shimizu, K. J. Kim, V.V. Dmitrenko, T. Nakamura, H. Otake "Nuclear Spectroscopy for Unveiling the Origin of the Martian Moons" International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2017-k-54, 2017.
- M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, "Improved pyroelectric x-ray generator for planetary active x-ray spectroscopy," *Proc. SPIE 10392 (2017) 1039215*; doi: 10.1117/12.2273773
- M. Naito, **N. Hasebe**, H. Nagaoka, J. Ishii, D.Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, "A high performance neutron spectrometer for planetary hydrogen measurement," *Proc. SPIE 10392 (2017) 103920C*; doi: 10.1117/12.2273735.
- S. Shimizu and **N. Hasebe**, "Development of wide angle fovea telescope with wide-field-of-view immersive eyepiece", (2007)IECON2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
- S. Kiga, S. Ouchi, **N. Hasebe**, "Attitude control of drones by back-stepping controller", 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineering,
- T. Yamazaki, **N. Hasebe** and S. Shimizu, "Considerations about saliency map from Wide Angle Fovea image", IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (2017), IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Y. Asaoka 他, "Energy calibration of CALET onboard the International Space Station", *Astroparticle Physics*,91(2017)1-10.

国際会議・“国内学会・研究会・講演会など

- N. Hasebe**, Nuclear Spectroscopy for Unveiling the Origin of the Martian Moons, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 9th, 2017
- V.V. Dmitrenko, S.E. Ulin, **N. Hasebe**, Experiment SIGNAL Onboard the Interhelioprobe Spacecraft, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 9th, 2017
- H. Nagaoka, Development of X-ray Generators for Active X-ray Fluorescence Spectroscopy of Future Lunar Landing Mission and Its Contribution to Lunar Science, Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 8th, 2017
- M. Naito, Numerical Estimation of Gamma-ray Spectroscopy for Deep Space Microsatellite, Department of Physics, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University,

Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 7th, 2017

- J. Ishii, Neutron Spectroscopy for Exploration of Near-Earth Asteroids, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 7th, 2017
- M. Shikishima, The Cooling System of HPGe Gamma-ray Spectrometer on a Deep Space Microsatellite, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 31st International Symposium on Space Technology and Science 2017, Ehime, Japan, June 7th, 2017
- N. Hasebe, Nuclear spectrometer for exploration of near-earth-asteroids on a microsatellite, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- M. Naito, Gamma-ray emission from near-Earth objects and its observation background, Department of Physics, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- J. Ishii, Water detection by neutron spectroscopy for exploration of small bodies, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- N. Tanaka, Development of a pyroelectric X-ray generator for future lunar and planetary explorations, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- T. Seki, Digital signal processing for nuclear spectroscopy, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- S. Kiga, Altitude control of drones by back-stepping controller, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- T. Yamazaki, Consideration about wide angle fovea lens on the planetary exploring Rover, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, The 5th International Workshop on Planetary Geology, The 7th Japan-Korea Bilateral Planetary Program, Tokyo, Japan, September 12th, 2017
- N. Hasebe, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- H. Nagaoka, Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan, 36th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- M. Naito, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- J. Ishii, Numerical and Experimental Investigation of Neutron Spectroscopy to explore Near-Earth Asteroids by micro-satellite, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- N. Tanaka, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017

- S. Kiga, Self-sustaining drive control of Gyrobike and its application to planetary exploration, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- M. Shikishima, High-purity Germanium Gamma Ray Detector Cooled by a Small Stirling Cooler, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan, 6th International Workshop on Planetary Geology, Daejeon, Korea, November 21st, 2017
- N. Hasebe, H. Nagaoka, M. Naito, J. Ishii, M. Shikishima, E. Shibamura, S. Torii, M. Miyashita, S. Shimizu, V.V. Dmitrenko, S. Ulin, V. Grachov, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, and K.J. Kim, "Nuclear spectrometer to explore near-earth asteroids onboard Microsatellite", European Planetary Science Congress (EPSC) 2017, Riga, Latvia, 17–22 September 2017.
- M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, J. Ishii, D. Aoki, E. Shibamura, K.J. Kim, J.A. Matias Lopes, J. Martínez-Frías, "High-performance neutron spectrometer for planetary hydrogen", SPIE 2017, San Diego, USA, 6-20 August, 2017.
- H. Nagaoka, N. Hasebe, S. Torii, 他 21 名 "Overview of Instrumental Package Combined with Nuclear- and Hyper- spectrometers for Geological Investigations of Near-earth Objects", The 3rd COSPAR symposium 2017, Cheju, Korea, 18-22 September, 2017.
- M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, Y. Oshima, M. Mizone, E. Shibamura, H. Kuno, K.J. Kim, J.A. Matias-Lopes, J. Martínez-Frías, "Improved pyroelectric X-ray generator for planetary active X-ray spectroscopy", SPIE 2017, San Diego, USA, 6-20 August, 2017.
- J. Ishii, H. Nagaoka, M. Naito, D. Aoki, N. Hasebe, "Water Detection by Neutron Spectrometer for the Exploration of Near-Earth Asteroids", 14th AOGS, Singapore, 6-11 August, 2017.
- N. Hasebe, S. Torii, T. Miyashita, T. Ota, T. J. Fagan, H. Nagaoka, M. Naito, J. Ishii, D. Aoki, T. Adachi, M. Shikishima, E. Shibamura, A. Hitachi, S. Shimizu, M. Ohtake, K.J. Kim, J. Martínez-Frías, J.A. Matias-Lopes, V.V. Dmitrenko, S. Ulin, "Investigation of Elemental Composition of Near-Earth Asteroids by Nuclear Spectrometer on the Miniature Deep Space Satellite", 14th AOGS, Singapore, 6-11 August, 2017.
- H. Nagaoka, N. Hasebe, M. Naito, M. Mizone, H. Kuno, "Pyroelectric X-ray Generator for Active X-ray Fluorescence Spectrometer on Future Lunar and Planetary Landing Missions", 14th AOGS, Singapore, 6-11 August, 2017.
- M. Naito, J. Ishii, N. Hasebe, E. Shibamura "Gamma-ray and Neutron Spectrometer for Microsatellites: Numerical Estimation of Elemental Compositions", The 3rd COSPAR symposium 2017, Cheju, Korea, 18-22 September, 2017.
- T. Miyashita, N. Hasebe, S. Torii, S. Shimamoto, T. Ohta, T. J. Fagan, H. Nagaoka, M. Naito, Y. Sato, "Waseda SAT-X: --- Miniaturized Deep Space Probe ---", The 3rd COSPAR symposium 2017, Cheju, Korea, 18-22 September, 2017.
- 内藤雅之, 田中直道, 氣賀信太郎, 長岡央, 長谷部信行, "焦電結晶による X 線発生時のガス種・ガス圧依存性", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 日本, 2017 年 3 月 18 日
- 長岡央, 長谷部信行, 内藤雅之, 石井隼也, "中性子分光による天体表層の水検出", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 日本, 2017 年 3 月 19 日
- 石井隼也, 長谷部信行, 長岡央, 内藤雅之, "地球近傍小惑星探査に向けた小型中性子分光計の性能評価", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 日本, 2017 年 3 月 19 日

4.6 2017年度卒論及び修論

修士論文

- 石井隼也 地球近傍小惑星探査に向けた超小型衛星搭載用中性子分光計の開発、
- 石智成 月面及び溶岩チューブ内の放射線量の評価
- 田中直道 月面探査ローバー搭載に向けた X 線発生装置の研究 (焦電結晶型と CNT 型の比較)、

村上航平	Xe+CH ₄ を用いた Luke 型平行平板電離箱のエネルギー分解能
卒業論文	
有松貴弘	デジタル信号処理による放射線計測システムの高性能化
橘高有哉	小天体探査用の核分光計と SiPM を使用した反同時計数用プラスチックシンチレータの性能評価
萩原成也	小天体探査に向けた超型冷凍機を用いた小型軽量 HPGe ガンマ線分光計
長谷部嵩道	ピラミッド型リアクションホイールを用いた小型衛星の姿勢制御及び冗長性
平川翔一郎	顕著性マップと Haar-Like 特徴量を用いた単眼カメラによる惑星表面での障害物検出
松田一真	巨大衝突 盆地 (SPA) (SPA) における K 及び Th 濃縮地域の起源
渡邊隆甫	コプラナー電極を有する円筒型希ガス電離箱のエネルギー分解能

5. 研究活動の課題と展望

月は、我々の住んでいる地球の天然衛星であって、最も身近な地球外天体です。エレクトロニクス、材料科学、IT 技術、天体観測の技術、宇宙工学などの飛躍的な進歩に伴って、近い将来には月への旅行も実現するだろう。月は、アポロにより持ち帰られた岩石試料や周回衛星による大量のリモートセンシングデータが揃った研究対象であり、惑星科学と地球科学の両分野に跨っています。従って、地球科学の幅広い分野の手法、技術や知見を総合的に利用することによって、月の全体像の構築とその起源と進化の理解ができるものと考えています。更に、知的好奇心のもと文明発展と活動領域の拡大を続けてきた我々人類が、地球を飛び出して太陽系の大海へと漕ぎ出す日(宇宙大航海時代)はそう遠くないはずで、地球外天体への第一歩は、間違いなく月であり、さらなる宇宙へ活動領域を拡大していく上で月は、必要となる知識や技術を獲得するための重要な足固めの場となることでしょう。そして、地球の第 8 番目の大陸としての月を研究する月科学は、これからも探究し続け発展する人類の必然的な対象であるのかもしれない。