

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

月岩石試料と月探査データに基づく月地殻  
の形成過程

Formation processes of lunar crust on the  
basis of lunar rock samples and remote  
sensing data

申請者

長岡	央
Hiroshi	NAGAOKA

物理学及応用物理学専攻 宇宙放射線物理学研究

2014年2月

大型の惑星は内部の熱的活動により形成初期の地殻物質の大半が失われ、惑星形成初期の情報を得ることが非常に困難である。一方、月は熱的活動が比較的早い段階で終了したため、形成初期の物質情報をよく保存している。したがって月の起源と進化を理解することは、太陽系の始原物質であるコンドライト隕石から、地球型惑星への物質進化の理解につながる。月の起源や進化を探る上で、その天体の元素組成に関する情報は不可欠であり、高精度でこれらの元素情報を取得することが、月の起源と進化を理解する上で重要な課題といえる。以前の月の起源と進化のモデルは、月の表側の赤道域で回収された局所性の強いアポロ試料に基づいて構築された。従って、地殻物質の化学的特徴をより詳細に把握し議論を進めるためには、月を全球的に俯瞰し得る高精度な情報源の取得と、その結果の適用が必須である。特に月形成初期の地殻情報を取得するためには、月面での隕石衝突による汚染や熱変成の影響が少ない初期地殻物質の高精度な分析データも必要である。

月の起源と進化の解明のために、日本初の大規模な月探査衛星「かぐや」の遠隔観測がこれまでにない精度で実施された。我々は、この探査により高精度の全球探査データが入手できる。一方、2000年代以降、砂漠から次々と月隕石が発見され、月隕石に関する研究が近年活発化してきた。この月隕石は月表層からランダムに飛来してきたものとされている。高精度な月隕石分析データと月全球にわたる探査データという相補的な関係にある両者を比較することで、局所性が強いアポロ回収試料に基づいて作られた月地殻形成モデル「マグマオーシャン説」の問題点が明らかとなり、このモデルのみでは月隕石や最新の探査データで示された結果を説明できないことがわかってきた。

本研究では、このような背景を踏まえ、グローバルサンプリングである月隕石を含めた月岩石試料研究に基づいた高精度な分析データと最新の月探査衛星データを統合的に取り扱い、アポロ回収試料の結果に大きく依存した月地殻モデルの問題点を指摘し、最新の月地殻形成に関する研究成果を提供することを目的とする。

本論文は、7つの章から構成されている。

第1章では、太陽系固体惑星の起源と進化を研究する上で、「なぜ月を研究するのか」というその研究動機について述べる。太陽系固体惑星は、始原物質であるコンドライト隕石を礎として進化が進み、大型の地球型惑星へと進化を遂げた。その進化の歴史の中で、月は地球型惑星の初期進化の歴史をよく保存している天体であり、その成り立ちを繋ぐ重要な進化過程を、我々に教えてくれる天体であることを強調する。また、本研究の背景として、固体惑星の起源と進化を研究する上で、その天体の元素組成を把握することの重要性について論じる。元素はその化学的性質により、その母天体が受けた変成や物質進化を大きく反映しながら鉱物として固結するため、その元素組成はその惑星が経験した物質進化の歴史を強く物語っている。我々が、太陽系の天体の元素組成を知る手がかりとして遠隔探査と並んで隕石研究が、重要な役割を果たしてきた。

第 2 章では、アポロ計画からこれまでの月科学研究について述べ、その問題点を指摘している。まず 1990 年代の遠隔探査では、初めて観測された月地殻の全貌を概観し、その元素組成に着目しながら月地殻組成の多様性について論じる。アポロ・ルナ探査の結果に基づいた月科学では、アポロ計画により回収された月斜長岩試料の研究から提唱された月地殻形成モデル「マグマオーシャン説」について示す。しかしこのモデルは局所性の強いアポロ回収試料の分析結果を基に提唱されたモデルであるため、全球探査や月隕石研究から新たに得られた結果を完全に説明するには、不十分なモデルであることが分かってきた。アポロ・ルナ時代以後の月科学は、月隕石研究と宇宙探査機を利用した全球遠隔探査に代表される。本研究ではこれらの最新データを統合的に取り扱い、それらの研究から得られた新たな地殻物質の情報を反映させた月地殻研究の必要性について強調する。また、難揮発性元素のトリウム Th を例にとり、過去の研究成果で見積もられてきた月全球の Th 含有量が、大きなばらつきを示すことにふれ、月のバルク組成を見積る上でも月地殻物質の元素組成の正確な理解が必要であることを述べる。

第 3 章では、アポロ探査以後で最大規模の月探査衛星「かぐや」の概要とその成果について述べる。本研究では、「かぐや」に搭載された観測機器の中で、月の元素組成と鉱物組成を計測する目的をもつ「ガンマ線分光計 (KGRS)」、「分光カメラ (特に MI, SP)」の成果について注目した。ガンマ線分光法は、軌道上から惑星表層の元素組成を全球的に観測するのに優れた方法であり、過去の月探査においても米国のアポロ探査機やルナ・プロスペクターに搭載され、多くの成果をあげてきた。KGRS は、月探査において初めて Ge 半導体検出器を採用することで、従来のガンマ線分光計の約 10 倍以上優れたエネルギー分解能を達成し、更に BGO シンチレータとプラスチックシンチレータを副検出器として反同時計数を行うことで、バックグラウンド計数を大幅に低減することに成功した。その結果、KGRS は、月表層から漏れだしてくる核ガンマ線 (200keV~12MeV) を過去最高の精度で測定した。

KGRS と反射分光計の観測により、マグマオーシャンから最初期に固化したと考えられる斜長岩地殻が、月裏側の高地に残されていることが初めて明らかにされた。また反射分光の観測により、苦鉄質鉱物を殆ど含まない純粋斜長岩 (Purest Anorthosite, PAN) が、大規模クレータの中央丘に普遍的に分布していることが世界で初めて報告され、全球的な PAN 層の存在が提唱された。PAN は、これまで知られていた斜長岩と比較して斜長石に富むことから、アポロデータに基づいた月斜長岩形成モデルに大幅な修正を加える必要があることが明らかとなった。ここでは、これらかぐやの観測結果と関連させ、本研究における隕石研究の意義について述べている。

第 4 章では、月岩石試料の分析方法についてまとめた。月の岩石試料は希少であるので、少量の試料に対して複数の分析手法を併用して、多くの惑星化学的情報を高精度で獲得できるようにした。本研究で用いた分析手法は、中性子放射化分析、電子顕微鏡による X 線分析、可視近赤外反射分光である。全岩化学組成は中性子放射化分析により求め、鉱物組成分析には X 線分析、可視近赤外反射分光を用いた。

中性子放射化分析では、出来る限り同一試料から多くの元素情報を得るために、中性子誘起即発ガンマ線分析 PGA と機器中性子放射化分析 INAA を併用した。中性子照射実験は、東海村の実験用中性子原子炉を用いた。電子線照射は、照射により発生した特性 X 線のエネルギーから元素を同定し元素の存在量を決める。電子線の照射位置をマイクロスケールまで絞ることができるので、岩石中の鉱物組成を分析するのに適している。X 線分析については、早稲田大学の走査型電子顕微鏡 (SEM) と、東京大学大気海洋研究所の電子線マイクロアナライザ (EPMA) を用いて、月岩石の鉱物組成を決定した。鉱物はその種類、組成により、可視・近赤外領域の波長で特徴的な吸収を示すことが知られており、その特性から岩石試料の鉱物組成を調査した。岩石表面の可視近赤外反射スペクトルの取得には、宇宙航空研究開発機構相模原実験室の拡散反射測定装置を用いた。

第 5 章では、月岩石試料の分析データに基づいて、それらの化学的岩石学的特徴を明らかにし、それぞれの結果と考察をまとめた。斜長岩地殻由来の月隕石は、表層での隕石衝突により角礫化し周辺物質との混合を受け、苦鉄質鉱物を多く含むのが特徴である。一方で苦鉄質鉱物を殆ど含まない PAN 層については、月隕石研究の立場からこれまで言及されたことはない。

本研究では、裏側高地が起源とされる月隕石 Dhofar 489 グループから発見した斜長岩片に着目した。これらの岩石片は従来の月斜長岩よりも斜長石に富んだ純粋な斜長岩であることを本研究により初めて示した。さらに Dhofar 489 グループから見つかった純粋斜長岩片に含まれる苦鉄質鉱物の組成は、岩石片毎に変化があることも明らかにした。さらに、月隕石研究と並行して、アポロ 16 号で回収された最も斜長石に富む回収斜長岩 (サンプルナンバー 60015) の測定を通して、斜長岩 60015 について再解釈を行い、この試料が表側から回収された純粋斜長岩の一部であるとした。

第 6 章では、月試料分析結果及びかぐやデータの解析結果について議論し、月斜長岩地殻の化学的特徴について統合的な考察を行った。月斜長岩地殻を、表層の隕石衝突の影響を強く受けた角礫岩混合層と純粋斜長岩 (PAN) 層にわけて議論した。苦鉄質鉱物を多く含む混合層については、月隕石の全岩組成データとかぐやが取得した元素・鉱物情報を比較し、その化学的特徴について議論した。PAN 層に関しては、月隕石の研究結果、アポロ試料分析結果とかぐやの観測結果を統合的に解釈することで PAN 層が月全球的に存在する地殻物質であることを明らかにした。さらに純粋斜長岩中の苦鉄質鉱物の組成不均質性の形成メカニズムには、アポロ試料に基づくマグマオーシャンモデルでは不十分であり、より複雑な形成プロセスが必要であることを述べた。

第 7 章においては、本研究論文について総括を行い、将来の月探査特に着陸探査・試料回収探査に向けた展望について述べた。

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 長岡 央 印

(2014 年 12 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）	“Implications for the origins of pure anorthosites found in the feldspathic lunar meteorites, Dhofar 489”, Earth, Planets and Space, 66, 115, 2014, doi:10.1186/1880-5981-66-115. <b>H. Nagaoka</b> , H. Takeda, Y. Karouji, M. Ohtake, A. Yamaguchi, S. Yoneda, N. Hasebe.
○ 論文 （学術誌）	“Geochemistry and mineralogy of a feldspathic lunar meteorite (regolith breccia), Northwest Africa 2200”, Polar Science, 7, pp. 241-259, 2013, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, T. Arai, M. Ebihara, N. Hasebe.
○ 論文 （学術誌）	“The global distribution of calcium on the Moon: Implications for high-Ca pyroxene in the eastern mare region”, Earth Planetary Science Letters, 353-354, 93-98, 2012, N. Yamashita, O. Gasnault, O. Forni, C. d'Uston, R.C. Reedy, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, <b>H. Nagaoka</b> , N. Hasebe, K.J. Kim.
論文 （国際会議、 査読有り）	“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, 2013, H. Kusano, N. Hasebe, <b>H. Nagaoka</b> , T. Kodama, Y. Oyama, R. Tanaka, Y. Amano, K.J. Kim, and J.A.M. Lopes.
○論文 （国際会議、 査読有り）	“Geochemistry and Mineralogy of Ferroan Feldspathic Lunar Meteorite Northwest Africa 2200”, New Advances in Lunar Exploration (Proc. of International Symposium on Lunar Science ISLS2010), 140-148, 2010, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, N. Hasebe, T. Arai and M. Ebihara.
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 ISLS2010), 42-49, 2010, N. Hasebe, Y. Karouji, O. Okudaira, K. Hayatsu, Y. Takeda, <b>H. Nagaoka</b> , K. Tsukada, J. Machida, S. Sakurai, S. Komatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, T. Okada, E. Shibamura, M.-N. Kobayashi, N. Yamashita, C. d'Uston, O. Gasnault, O. Forni, S. Maurice, K. Kim, R.C. Reedy, J.M. Dohm.
論文 （国際会議、 査読有り）	“Distributions of K, Th, U and Rare Earth Metal in Procellarum KREEP Terrane”, New Advances in Lunar Exploration (Proc. of International Symposium on Lunar Science ISLS2010), 84-89, 2010, N. Hasebe, Y. Karouji, O. Okudaira, <b>H. Nagaoka</b> , K. Tsukada, S. Kobayashi, K. Kim, J. M. Dohm.
論文 （国際会議、 査読有り）	“Lunar Gamma-Ray Observavation by KAGUYA GRS”, Advances in Geosciences, 19, 57-67, 2008, N. Hasebe, N. Yamashita, Y. Kaouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, S. Komatsu, K. Hayatsu, K. Nemoto, K. Iwabuchi, Y. Takeda, <b>H. Nagaoka</b> , K. Tsukada, J. Machida, O. Okudaira, S. Sakurai, 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, K.J. Kim.
論文 （国際会議、 査読有り）	“Distributions of K and Th on the Moon: The initial results from observations by SELENE GRS”, Advances in Geosciences, 19, 43-55, 2008, Y. Karouji, N. Hasebe, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, M. Hareyama, T. Miyachi, S. Kodaira, K. Iwabuchi, K. Hayatsu, S. Nemoto, Y. Takeda, K. Tsukada, <b>H. Nagaoka</b> , M.-N. Kobayashi, E. Shibamura, M. Ebihara, T. Hihara, T. Arai, T. Sugihara, H. Takeda, C. d'Uston, S. Maurice, O. Gasnault, O. Forni, B. Diez, R.C. Reedy, K.J. Kim, T. Takashima, Y. Iijima and H. Otake.

## 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 （国内会議、 査読有り）	“Application of neutron activation for elemental analysis in lunar meteorite NWA2200”, Radiation Detectors and Their Uses, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 22, 114-125, 2008, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, K. Hayatsu, M. Hareyama, N. Hasebe, T. Hihara, M. Ebihara.
論文 （国際会議、 査読無し）	"Elemental Composition of the Lunar Surface --- KAGUYA Gamma-Ray Spectrometer Observation --- ", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2013-k-16, 2013, N. Hasebe, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Hirai, Y. Fujibayashi, E. Shibamura, H. Kusano, M. Hareyama, Y. Karouji, T. Okada, S. Kobayashi, M. Kobayashi, N. Yamashita, R. Reedy, K. J. Kim, C. d'USTON, O. Forni, O. Gasnault, J. Dohm.
論文 （国際会議、 査読無し）	“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 (29th ISTS), 2013-k-18, 2013, H. Kusano, Y. Amano, N. Hasebe, K.J. Kim, T. Kodama, H. Kuno, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Oyama, E. Shibamura, and R. Tanaka.
論文 （国際会議、 査読無し）	“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, 2009, N. Hasebe, N. Yamashita, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, K. Hayatsu, S. Nemoto, K. Iwabuchi, Y. Takeda, <b>H. Nagaoka</b> , 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.
Short report （学術誌）	“Comparisons of mineralogy of pure anorthosite in lunar meteorites, Dhofar 489 group and pure anorthosite observed by Kaguya”, 75 <sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society, published in Meteoritics and Planetary Science, Supplement, #5197, 2012, <b>H. Nagaoka</b> , H. Takeda, Y. Karouji, M. Ohtake, A. Yamaguchi, S. Yoneda, N. Hasebe.
Short report （学術誌）	“Global distribution of silicon by KAGUYA gamma-ray spectrometer”, 74 <sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society, published in Meteoritics and Planetary Science, Supplement, #5239, 2011, <b>H. Nagaoka</b> , N. Hasebe, K.J. Kim, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Yamashita, O. Gasnault, O. Forni, C. d'Uston, R.C. Reedy, E. Shibamura, M.-N. Kobayashi, H. Takeda, and the Kaguya Gamma Ray Spectrometer team.
Short report （学術誌）	“Chemical signatures in bulk element composition for Northwest Africa 2977”, 73 <sup>rd</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society, published in Meteoritics and Planetary Science, Supplement, #5183, 2010, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, H. Takeda, M. Ebihara, N. Hasebe.
Short report （学術誌）	“A most ferroan feldspathic lunar meteorite NWA 2200”, 71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, published in Meteoritics and Planetary Science, Supplement, #5246, 2008, <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, T. Arai, K. Shinotsuka, M. Ebihara, and N. Hasebe.
○書籍	“人類の夢を育む天体「月」月探査機かぐやの成果に立ちて”、恒星社、2013、長谷部信行、桜井邦朋、晴山慎、唐牛譲、山下直之、 <b>長岡央</b>

## 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）
○招待講演（国際会議、口頭）	“SELENE DATA FOR MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY (MI, SP, GRS DATA)”, SELENE Symposium 2013, January 23-25, 2013, <b>H. Nagaoka</b> , N. Hasebe, M. Ohtake, T. Matsunaga.
講演（国際会議、口頭）	“Lunar olivine gabbro, Northwest Africa 2977 and 6950: Implication for lunar young volcanism”, International Symposium on Remote Sensing 2013 (ISRS2013), Chiba, Japan, May 15-17, 2013. <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, H. Takeda, T.J. Fagan, N. Hasebe.
講演（国際会議、口頭）	“Purely anorthosite clasts in feldspathic lunar meteorites, Dhofar 489 group”, International Symposium on Remote Sensing 2012 (ISRS2012), Incheon, S. Korea, Oct. 10-12, 2012, <b>H. Nagaoka</b> , H. Takeda, Y. Karouji, M. Ohtake, N. Hasebe.
講演（国際会議、口頭）	“Comparisons of mineralogy of pure anorthosite in lunar meteorites, Dhofar 489 group and pure anorthosite observed by Kaguya”, 75 <sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society, Cairns, August 12-17, 2012, <b>H. Nagaoka</b> , H. Takeda, Y. Karouji, M. Ohtake, A. Yamaguchi, S. Yoneda, N. Hasebe.
講演（国際会議、口頭）	“Mineral Chemistry and Reflectance Spectra for the Anorthosite Clast in Lunar Meteorite Dhofar 489 with Reference to Lunar Farside Crust”, Papers presented to the 34th Symposium on Antarctic Meteorites, Tokyo, Novem. 17-18, 2011, <b>H. Nagaoka</b> , H. Takeda, Y. Karouji, M. Ohtake, A. Yamaguchi, S. Yoneda, N. Hasebe.
講演（国際会議、口頭）	“Silicon Abundance of The Lunar Surface Material by Kaguya Gamma-Ray Spectrometer”, 2011 Conference of International Symposium on Remote Sensing, Yeosu, November 2-4, 2011, <b>H. Nagaoka</b> , N. Hasebe, K. J. Kim, K. Hayatsu, Y. Fujibayashi and the KGRS team.
講演（国際会議、口頭）	“Global distribution of silicon by KAGUYA Gamma-ray spectrometer”, 74 <sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society, London, August 8-12, 2011, <b>H. Nagaoka</b> , N. Hasebe, K. J. Kim, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Yamashita, O. Gasnault, O. Forni, C. d’Uston, R. C. Reedy, E. Shibamura, M.–N. Kobayashi, H. Takeda, and the Kaguya Gamma Ray Spectrometer team.
講演（国際会議、ポスター）	“Co-existing pyroxenes in the Northwest Africa 2977 with reference to the source region”, 42 <sup>nd</sup> Lunar and Planetary Science Conference, 2011, #1864. <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, H. Takeda, T.J. Fagan, M. Ebihara, N. Hasebe.
講演（国際学会、ポスター）	“A most ferroan feldspathic lunar meteorite NWA 2200”, 71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, July 30 2008, #5246. <b>H. Nagaoka</b> , Y. Karouji, T. Arai, K. Shinotsuka, M. Ebihara, and N. Hasebe.