

黒色月試料の炭素含有研究： 月面物質の急冷固化形成

Carbon Contribution of the dark moon samples: Quenched solids of the lunar materials

*三浦 保範¹*Yasunori Miura¹

1.客員（山口市、国内外大学）

1.Visiting (Yamaguchi, In & Out Universities)

大気をもたない天体は、月天体を含め全体が黒色になって見える。これまで、月面表面の白黒は、地形の光反射によるアルベドの差と、有色鉱物の違いにより説明されている。これは、天体を構成する物質やでき方を一般的に理解できるが、それ以外の発展的な解明が進まない要因である。最近、筆者らの対比的な研究により、地球の岩石中の炭素量と人工的な物質実験により、月面上の試料（米国アポロ報告値）と月隕石試料（本実験）には、有意な炭素量とその炭素含有組織が確認でき、黒色化した月面には炭素物質の寄与が大きいことが分かっている。

月面の岩石物質は、月面の海の玄武岩（火山岩）と高地のガブロ・斜長岩（深成岩）中の黒色鉱物（輝石、橄欖石と金属鉱物）の違いによって説明されている。しかし、地球のように多量の白色鉱物の石英や長石が多く広く生成していないため、月面鉱物は限定された組成範囲内で特異的に黒灰色化している。

本件の研究において、アポロ月面と月隕石(NWA4483とY-86032)等で得られる月面鉱物は、地球鉱物に比べて、結晶度が低く、流体が少ないため岩石種・鉱物種と含水鉱物が極端に少なく、シリカ・長石組成変動がないため、結果的に月面での内部活動が非常に少ないことを示している。月面の炭素含有量の差が、海と高地の岩石鉱物の違いよりも、表土ソイルや破碎岩に非常に多いことが、これまでの報告文献値から解明できます。対比研究として、地球の岩石では、バルク分析・電顕分析による炭素含有量が、有色鉱物が多くなるほど、そして深成岩より火山岩に多いことが分かりました。これは成因的に冷却過程で炭素量が異なることを直接的に示し、一般に考えられている未知の地球の内部の深さによる説明とは異なることを示します。本件の人工照射実験においても、急冷照射ほど炭素含有組織が広く形成されていることが確認されています。

本研究成果は、次のようにまとめられます。

- 1) 地球の岩石の色はシリカ（長石）量で分類されているが、月面岩石は鉱物種より（衝撃時の）冷却の違いによる炭素量で分類できる。
- 2) 月面の炭素量は急冷岩石（表土・破碎岩）に多いことが分かった。対比的に、地球の岩石では急冷した火山岩ほど多い。
- 3) レーザー照射実験で炭素含有組織が急冷固化する事が確認し再現でき、これは月面の炭素含有物質の生成が衝撃波反応でできていることが確認できる。
- 4) 月と地球の対比的な研究から、月表面に急冷角礫化に多い炭素含有固化物が含まれるため、その結果として、黒灰色化した月天体表面に炭素が寄与していることが分かった。まとめとして、大気をもたない天体は、月天体を含め全体が暗黒色になって見える。これまで、月面表面の白黒は、地形の光反射によるアルベドの差と有色鉱物の違いにより説明されている。これは、天体を構成する物質やでき方を一般的に理解できるが、それ以外の発展的な解明が進まない原因である。最近、筆者らの対比的な研究において、地球の岩石中の炭素量と人工的な物質実験により、月面上の試料（米国アポロ報告値）と月隕石試料（本実験）には、有意な炭素量とその炭素含有組織が確認でき、黒色化した月面には炭素物質の寄与が大きいことを示している。

キーワード： 黒色月試料、炭素含有影響、急冷固化形成

Keywords: Blackish dark color of lunar samples, Carbon content effect, Quenched solids formation

月のPKT中心領域における火成活動と表面地形の層序学的関係

Stratigraphy of mare basalts and topographic features in the central region of the Procellarum KREEP Terrane of the Moon

*加藤 伸祐¹、諸田 智克¹、山口 靖¹、渡邊 誠一郎¹、大嶽 久志²、大竹 真紀子²

*Shinsuke Kato¹, Tomokatsu Morota¹, Yasushi Yamaguchi¹, Sei-ichiro Watanabe¹, Hisashi Otake², Makiko Ohtake²

1.名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻、2.宇宙航空研究開発機構

1.Nagoya University Graduate School of Environmental Studies, 2.Japan Aerospace Exploration Agency

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の内部の大規模な構造変化の有無を理解する上で、月の火成活動史を復元することは有効である。月の海の玄武岩の組成と年代との関係からマンツルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性があり、それによって月マンツルの進化モデルを制約できると期待される。クレーターカウンティングによって決定された月の海の玄武岩の年代は海の火成活動にセカンドピークが存在することを示している。セカンドピークをつくるような活動は主に月の表側の熱源元素が多く濃集しているProcellarum KREEP Terrane (PKT)に集中している。このセカンドピークを引き起こした原因とそのマグマソースを解明することは、月の熱進化史に重要な制約を与えられると考えられる。

月の海を構成する溶岩流の噴出年代とチタン含有量の関係を調査したこれまでの我々の研究から、約23億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇していることが分かっている。このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えられるため、23億年前以前を「Phase-1火成活動」、23億年前以後を「Phase-2火成活動」と呼ぶこととする。そして、Phase-2火成活動はPKTの一部の領域で短期間に集中して起きていること、選択的に高いチタン含有量であること、セカンドピークの年代とよく一致することから、月深部に起源を持つホットブルームによるものであるという仮説を提唱している。

もしホットブルームが起こったとすると、それに伴う何らかの地形的な痕跡が残されている可能性がある。そこで地形とセレノイドとの差をとってみると、PKTの中心で直径約1000km、高さ500mの円形の台地状の地形が観測された。またこの台地はPhase-2の火成活動の中心地とよく一致している。また、この領域のリッジの走向と台地状地形の位置と照らしあわせてみると、台地状地形の上部にあたる領域では台地状地形に関係して分布していると解釈できる。このことから台地状地形の成因はPhase-2活動と強く関係していることが示唆される。

我々はかぐやマルチバンドイメージャ(MI)と地形カメラ(TC)の画像データ、標高データ(DTM)を用いて、PKTにおけるPhase-1、Phase-2の火成活動による溶岩流とリッジの層序学的な関係を調査した。その結果、台地状地形に沿ったリッジはPhase-2火成活動の前後で形成されていることが分かった。また、金星のコロナの形成において同心円状のリッジの形成はコロナ地形の緩和の段階で形成することが示唆されているが、本研究で提唱しているホットブルーム発生から緩和の時期と月のリッジの形成時期は近いこと、ホットブルーム仮説とリッジの形成の関係に矛盾はない。また、溶岩流ユニットの形状からマグマの流れの方向を推定したところ、Phase-2ユニットは台地状地形から噴出し、周囲に広がっているように見える。これは、Phase-2マグマ活動は嵐の大洋・雨の海の中心領域において集中的に噴出したことを示唆しており、これもホットブルーム仮説と矛盾しない結果である。

キーワード：月、火成活動、月の海、地形、海のリッジ、層序学

Keywords: Moon, Volcanism, Lunar mare, Topography, Mare ridge, Stratigraphy

太陽風中の月周辺でかぐや衛星によって観測された広帯域ノイズと電子加熱について

Broadband noise and associated electron heating observed by Kaguya around the Moon in the solar wind

*津川 靖基¹、加藤 雄人²、寺田 直樹²、町田 忍¹、綱川 秀夫³、高橋 太⁴、渋谷 秀敏⁵、清水 久芳⁶、松島 政貴³、斎藤 義文⁷、横田 勝一郎⁷、西野 真木¹

*Yasunori Tsugawa¹, Yuto Katoh², Naoki Terada², Shinobu Machida¹, Hideo Tsunakawa³, Futoshi Takahashi⁴, Hidetoshi Shibuya⁵, Hisayoshi Shimizu⁶, Masaki Matsushima³, Yoshifumi Saito⁷, Shoichiro Yokota⁷, Masaki N Nishino¹

1.名古屋大学宇宙地球環境研究所、2.東北大学大学院理学研究科、3.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、4.九州大学大学院理学研究院、5.熊本大学大学院自然科学研究科、6.東京大学地震研究所、7.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

1.Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 4.Faculty of Sciences, Kyushu University, 5.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 6.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 7.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Broadband electromagnetic noise in the frequency range up to ~ 10 Hz has been detected around the Moon at ~ 100 km altitude [Halekas et al., 2008; Nakagawa et al., 2011; Tsugawa et al., 2012]. Halekas et al. [2008] suggested that the waves are associated with electron energizations and are basically generated through the interaction between the solar wind plasma and crustal magnetic field. Nakagawa et al. [2011] studied the characteristics of the broadband waves by considering properties of whistler-mode waves propagating in the solar wind frame of reference. Tsugawa et al. [2012] showed that the statistical distributions of the intense noise are clearly located at the magnetic anomalies. While they discussed the possible generation process of the waves through resonant or non-resonant instability by ions reflected from the lunar surface, details of the generation process of the waves have not been clarified yet.

We analyzed the broadband noise observed by Kaguya statistically, and suggest that the absolute condition to observe the noise at altitudes ~ 100 km are 1) the spacecraft is connected to the Moon through the magnetic field, and 2) the solar wind ions are reflected considerably in the connected region on the Moon. The fluxes of reflected ions depend on the solar wind parameters and the magnetisms of the lunar crusts. In a usual solar wind condition (roughly the dynamic pressure < 2 nPa), the second condition is mostly satisfied above the magnetic anomalies. In the solar wind with larger density and faster speed than usual (roughly the dynamic pressure > 2 nPa), the second condition can be satisfied above not only magnetic anomalies but also unmagnetized surface. Electrons are often energized perpendicular to the ambient magnetic field or isotropically in association with the noise and reflected ions. The electron heating above the lunar magnetic anomalies are also associated with the broadband electrostatic noise in the frequency range up to ~ 10 kHz [Kasahara et al., 2011]. Their correlation is suggested in analogous to the transverse ion acceleration due to broadband extremely low frequency noise in the Earth's auroral region [e.g., Andre et al., 1998].

月の線状重力異常の形成仮説

Formation process of linear gravity anomalies of the Moon

澤田 なつ季¹、*諸田 智克¹、加藤 伸祐¹、石原 吉明²、平松 良浩³Natsuki Sawada¹, *Tomokatsu Morota¹, Shinsuke Kato¹, Yoshiaki Ishihara², Yoshihiro Hiramatsu³

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.宇宙航空研究開発機構、3.金沢大学理工研究域

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Japan Aerospace Exploration Agency, 3.Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

月はマグマオーシャンの状態から始まり、その後のマントル再溶融による火山活動があったと考えられている。しかしマグマオーシャンからマントル再溶融までの熱進化の経緯について明らかになっていない。その一つの原因は、初期に起こったであろうマグマ活動やテクトニクスの情報がその後の天体衝突によって破壊され、不明瞭になっているからである。一方、Andrews-Hanna et al. [Science, 339, 675-678, 2013] は月の重力分布図から線状重力異常 (Linear Gravity Anomaly: LGA) を発見し、その成因が初期の全球膨張によるマグマの貫入であると提案した。もしLGAの源が貫入岩であるとすると、その一部は表面に噴出した可能性、又は、貫入岩の一部がその後の天体衝突により掘削され、表面に露出した可能性がある。そこで本研究ではLGAの形成仮説を検証するため、反射スペクトルデータを用いた貫入岩露出の有無の調査を行った。

かぐやのマルチバンドイメージャー (MI) データから算出したFe含有量を用いて、LGA2の周辺地域においてFe量の高い点を抽出した。さらにMIデータから表面のスペクトルの吸収深さの特徴を用いて、これら高Fe物質の起源がマントル再溶融由来か、下部地殻由来かを区別することで、貫入岩の探索を行った。その結果、LGA2上の直径150 kmのRocheクレータと直径100 kmのEotvosクレータの間の領域で高Fe物質が多く分布しており、それらがマントル再溶融起源に近い組成であることが分かった。それらとRocheクレータの放出物の分布との空間的な対応関係は整合しないため、当初、想定したLGAソース物質がRoche形成によって掘り起こされたものであるという説明は成立しない。そのため、この物質がLGAソースであるとは結論づけることができなかった。一方、それらのマントル再溶融起源物質はRocheクレータやEotvosクレータの放出物に含まれていることから、RocheクレータとEotvosクレータによって掘り返されたものであり、それらのクレータ形成以前のマグマ活動でつくられたものであると言える。Rocheクレータの形成年代はクレータ年代学により39億年前と求められていることから [Hiesinger et al., 44th LPSC, 2827, 2013]、今回発見された物質は39億年前以前のマグマ活動の痕跡と考えられる。

キーワード：月、火山活動、線状重力異常、貫入岩

Keywords: Moon, volcanism, linear gravity anomaly, intrusion

月クレーター崩壊度地質ユニット年代測定法の適用評価

Evaluation of chronological measurement method of geological units by collapsed crater on the Moon

*坪内 彩音¹、春山 純一²、三宅 互¹

*Ayane Tsubouchi¹, Junichi Haruyama², Wataru Miyake¹

1.東海大学 工学研究科、2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1.Graduate school of engineering, Tokai University, 2.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

The age of the moon is an important clue in understanding the former state of igneous activity of the moon. To explore the time course of the scale and the eruption of the magma leads to pursue the internal evolution of the moon. Generally, exploring crater size frequency distribution is used to determine the model ages of lunar geological units. However, this age determination is susceptible to the influence of secondary craters, and an error is likely to occur in the measured age. Therefore, by using another age determination, it is necessary to confirm whether the measurement age by the age determination that is free from influence of the secondary crater should be investigated. The way based on the status of crater collapse is another expected method for age determination of lunar geological units. In order to establish this method, it is needed to investigate the correlation between the age of the geological units and a parameter value expressed by F which is corresponding to the total amount of impacted objects disrupting the craters. Since the F value is a numerical value determined by the most collapsed crater in a geological unit, it does not include the effects of secondary craters probably occurring after the formation of the oldest most collapsed craters. Here, we explore the correlation relationship between the F values and the model ages based on crater size frequency distribution for several lunar geological units, and discuss the possibility of the way based on crater collapse as an age determination of lunar geological units.

キーワード：年代学、月面クレーター、クレーター崩壊度

Keywords: chronology, lunar craters, status of crater collapse

月隕石に記録された水に富む月の上部マントル

Water-rich lunar upper mantle as recorded in lunar meteorites

*鹿山 雅裕¹、中嶋 悟²、富岡 尚敬³、瀬戸 雄介¹、大谷 栄治⁴、Fagan Timothy⁵、長岡 央⁶、小澤 信⁴、関根 利守⁷、宮原 正明⁷、三宅 亮⁸、福田 惇一⁹、留岡 和重¹、市村 隼¹、松本 恵¹、鈴木 康太¹、Götze Jens¹⁰

*Masahiro KAYAMA¹, Satoru Nakashima², Naotaka Tomioka³, Yusuke Seto¹, Eiji Ohtani⁴, Timothy Fagan⁵, Hiroshi Nagaoka⁶, Shin Ozawa⁴, Toshimori Sekine⁷, Masaaki Miyahara⁷, Akira Miyake⁸, Jun-ichi Fukuda⁹, Kazushige Tomeoka¹, Shun Ichimura¹, Megumi Matsumoto¹, Kouta Suzuki¹, Jens Götze¹⁰

1.神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻、3.海洋研究開発機構高知コア研究所、4.東北大学大学院理学研究科地球科学専攻、5.早稲田大学教育学部地球科学専修、6.早稲田大学先進理工学部、7.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻、8.京都大学大学院理学研究科地球惑星学専攻地質学鉱物学教室、9.Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University、10.TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University, 2.Department of Earth and Space Science, Osaka University, 3.Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4.Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 5.Department of Earth Sciences, Waseda University, 6.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 7.Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, 8.Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, 9.Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, 10.TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy

アポロ計画以来、月回収試料を対象とした全岩分析から月は表面から内部に至るまで水に枯渇 (<1 ppb) した天体と考えられてきた。しかし近年、月回収試料および月隕石に含まれる二次鉱物の質量分析から大量の水酸基が検出され、水に富む月のマントルモデルが提唱されている。マントルの熔融からマグマの噴出に至るまでのいくつかの仮定（鉱物とメルト間における水の分配係数、マントルの部分熔融の割合、二次鉱物の晶出時における主要構成鉱物の比率、脱ガス作用による水の損失率など）を踏まえた上で、アパタイトやメルト包有物の含水量からマントルには9-585 ppmにも及ぶ水の存在が示唆された。しかし、この水に富むマントルモデルについては未だ懐疑的な見方も多く、二次鉱物から得られた値はあくまでも不確かな仮定（地球の鉱物や火星のメルトの値を参照、月を模擬していない）をもとにした予想値に過ぎない。最近では、二次鉱物を対象とした塩素や酸素同位体分析から水に枯渇した (< 10 ppb) マントルモデルも提唱されているものの、水素を対象とした分析ではないことからあくまで間接的証拠に過ぎない。本研究では、マントル由来の水を含む角礫岩質月隕石に対して赤外吸収分光その場加熱実験を行い、主要構成鉱物であるカンラン石および単斜輝石の含水量を定量的に推定することで、プロセラルム盆地直下に位置する上部マントルの含水量を従来必要とされていた仮定を使わずに決定する。

角礫岩質月隕石はカンラン石や単斜輝石を主要構成鉱物とするはんれい岩質クラストと単斜輝石斑晶を含む玄武岩質クラスト、さらにそれらの礫質部から成る。本研究で用いた隕石試料には外縁部においてフュージョンクラストが存在し、さらに各クラストと礫質部を横断する衝突溶融脈が観察される。

角礫岩質月隕石に対する赤外吸収分光その場加熱実験 (120 °C) の結果、はんれい岩質クラストの単斜輝石は 3750、3600および3500 cm⁻¹付近に、カンラン石は3550、3500および3250 cm⁻¹付近に顕著な水の吸収帯を示す。フュージョンクラストおよび衝撃溶融脈内に分布する単斜輝石やカンラン石においても同様の水の吸収帯は認められるものの、はんれい岩質クラストと比べてそれらの吸光度は著しく低い。これは天体衝突時に発生した高温効果および大気圏突入時の摩擦熱による脱水現象が原因と考えられる。よって、はんれい岩質クラストに内在する水は月に由来するものであり、地球風化作用による副産物ではない。さらに、はんれい岩質クラストのカンラン石および単斜輝石に対しては、120から550 °Cの範囲における段階過熱実験を行った。300 °Cまでの段階過熱では各鉱物ともに吸光度に変化は見られないものの、300から500 °Cの範囲において温度増加に伴い吸光度の著しい減少を示す。これは300 °C以上で脱水するTightly bound molecular waterの特性である。一

部の吸収帯は550 °C以上の段階過熱実験後も残存し、さらに異方性を有することからも鉱物に配列を持って結合した構造水に帰属される。

Beer-Lambert法をもとに、積分吸光度、試料の厚さおよび吸収係数から各鉱物における含水量を定量的に評価した。その結果、はんれい岩質クラストの単斜輝石は>339-1363 ppm（うち構造水は>157-1051 ppm）、カンラン石は>199-1152 ppm（構造水は>199-906 ppm）もの含水量に達することが判明した。得られた値と主要構成鉱物のモード組成から月のマントルにおける含水量を仮定なしで直接的に推定することが可能であり、プロセラルム盆地直下の深さ>30から>400 kmにも及ぶ上部マントルにおいて、>631 ±498 ppmもの水が存在することが明らかとなった。驚くべきことに、この値は地球のマントルに匹敵する含水量である。推定された含水量は水に富むマントルモデルと非常に調和的である一方、水に乏しいとする先行研究とは一致しない。この原因として、月のマントルにおける水分分布は非常に不均一かつ部分的にしか水が存在しない可能性が示唆される。少なくともプロセラルム盆地直下の上部マントルの一部に大量の水を含む領域が存在することから、ジャイアントインパクト後の初期物質の集積や冷却過程、月におけるマグマオーシャンの分化作用、深部月震の原因さらには太陽系初期の地球と月における水の起源を紐解く上でこの月内部の水が重要な鍵となり得る。月内部における水は有人探査における水の利用や基地建設、さらには月の進化史を明らかにする重要なテーマであり、月探査の将来構想、特に着陸計画とサンプルリターンを実施する上で、月周回衛星かぐやから発見されたプロセラルム盆地やエイトケン盆地に分布する深部露出岩体は重要な探査地域と言える。

キーワード：月、月のマントル、月隕石、マントルの含水量、赤外吸収分光、プロセラルム盆地

Keywords: Moon, Lunar mantle, Lunar meteorite, Mantle water content, Infrared absorption spectroscopy, Procellarum basin

月の衝突盆地地下密度構造の時空間変化

A spatio-temporal change of the density structure beneath impact basins of the Moon

*内田 眞子¹、石原 吉明²、鎌田 俊一³、平松 良浩¹*Mako Uchida¹, Yoshiaki Ishihara², Shunichi Kamata³, Yoshihiro Hiramatsu¹

1.金沢大学、2.宇宙航空研究開発機構、3.北海道大学

1.Kanazawa Univ., 2.JAXA, 3.Hokkaido Univ.

月の大規模地形である衝突盆地は過去の巨大衝突の痕跡であり、そのような巨大衝突は月の表層や内部構造の進化に大きな影響を及ぼしている。すなわち衝突盆地の理解は、月の進化過程を理解するうえで必須である。現在、月探査機GRAILの全ミッションフェーズの観測データの解析により、月の重力場は球面調和関数900次まで展開されたモデルが公開されており [Lemoine et al., 2014 ; Konopliv et al., 2014]、月内部の情報を、従来よりも詳細に取得可能になった。本研究では、GRAILの高解像度重力モデルを用いて月の衝突盆地下のモホ面構造の起伏形状を算出し、議論する。地形データは球面調和関数1080次に展開されたモデル(モデル名:LRO_LTM01_PA_1080) [Neumann, 2013] を用いる。ブーゲー異常は球面調和関数900次に展開された重力ポテンシャル係数データ(モデル名:GRGM900C) [Lemoine et al., 2014] と地形データから計算する(補正密度2560 kg/m³、計算最大次数600次)。本研究ではマントル密度は3360kg/m³ [Ishihara et al., 2009]、地殻密度はHan et al. (2014)で求められた地殻密度の範囲で、Wieczorek and Phillips (1998)の重カインバージョンより全球的なモホ面の厚さ分布を求め、アポロ12・14号地点の地殻厚が同地点の月震の解析から算出された地殻厚 [Khan and Mosegaard, 2002; Lognonne et al., 2003] に最も調和的になる2750 kg/m³を採用した。下方接続フィルタが1/2になる次数は100次、計算最大次数は600次とした。この手法で算出した密度構造は、以降Global modelと称する。角柱モデリングを用いた重カインバージョン [Rama Rao et al., 1999] により、フィルタリングの制約条件を受けない局所的な密度構造を決定した。地殻・マントル密度はGlobal modelと同様で、角柱は水平方向に10kmx10kmの大きさを持つ四角柱とした。初期境界深さは各解析領域内における、Global modelによるモホ面深さの最深点とし、角柱が到達する最浅点は地形面における最深点とした。なお、密度境界面が地形面を突き破らないよう制約条件を課している。この手法で算出した密度構造を、以降Prism modelと称する。Prism modelの断面構造を定量的に評価するため、以下の手法をとった。まず各衝突盆地毎にPrism modelの10間隔、360平均の断面構造プロファイルを作成し、高ブーゲー異常域 [Neumann et al., 2015] の1.5倍の領域に切り取る。得られた断面構造プロファイルのうち、中心から高ブーゲー異常域の半径 [Neumann et al., 2015] までを「内側領域」とし、高ブーゲー異常域半径より外側の範囲を「外側領域」とする。中心から断面構造プロファイルの深度幅のうち上位15%に含まれる点までの距離をD_{upper}、中心から外側領域のデータ点より得られた1次近似直線と断面構造プロファイルの交点までの距離をD_{lower}とする。最後にD_{upper}/D_{lower}の比(=D_{upper}/D_{lower})を算出し、各衝突盆地で得られたPrism modelの形状の定量的な評価とする。D_{upper}/D_{lower}の値を全球的に比較すると、その値は盆地の空間スケールに正の相関を持ち、表側に値の大きい盆地、裏側に値の小さい盆地が偏在するといった分布の地域性を持つように見える。なお、後者は月面の元素分布による区分 [Jolliff et al., 2000] や長期粘弾性変形計算による地温勾配上限値 [Kamata et al., 2013] より推察される月の内部温度構造の地域性と調和的であることから、衝突盆地形成後の内部温度構造の違いを反映していると考えられる。講演では、本研究で得られた衝突盆地地下密度構造の形状の違いを支配する要因が、「盆地の空間スケール」と「内部温度構造」のどちらであるのか、長期粘弾性変形計算から得た結果を交え考察する。

キーワード：衝突盆地、インバージョン、粘弾性変形

Keywords: impact basin, inversion, viscoelastic deformation

微小磁気異常の解析に基づく古月磁極の推定

Paleomagnetic poles of the early Moon estimated from small isolated magnetic anomalies

*池内 悠哉¹、綱川 秀夫¹、高橋 太²*Yuma Ikeuchi¹, Hideo Tsunakawa¹, Futoshi Takahashi²

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、2.九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

現在の月に、地磁気のような全球的磁場はないが、月地殻起源の磁気異常が観測されている。磁気異常ソースは残留磁化を持っており、熱残留磁化や衝撃残留磁化と考えられる。月岩石の岩石磁気学的研究によれば熱残留磁化を持つとされ、その場合は長期間安定するダイナモ磁場が周囲の磁場として妥当な候補である。磁気異常は形成時の月磁場を記録しているため、磁気異常の磁化方位を解析することで、過去の月ダイナモの磁極を推定することができ、さらに過去の月磁極、月自転軸の移動の可能性について重要な情報を得ることができよう。

KaguyaとLunar Prospectorが観測した月上空(高度20~40km)の観測磁場データを使用し、孤立した磁気異常に磁気双極子ソースモデルを仮定することで磁化方位を求め、仮想的な古月磁極を推定する先行研究が行われている[Takahashi et al., 2014]。しかし、月上空の観測磁場データは月地殻の磁場を比較的広範囲に平均化したものであり、微小構造を十分に表していない可能性もあることから磁気双極子ソースモデルの仮定が適切性が問題となりうる。そこで本研究では、月表面の磁場データであるSVMデータ[Tsunakawa et al., 2015]を使用して解析を行う。SVMデータは月上空の観測磁場データよりも空間分解能が高く、磁気異常の構造を詳細に表しており、磁気双極子ソースモデルの仮定が適切な磁気異常の選出に有効である。

SVMデータより磁気双極子ソースモデルの仮定が適切であると判断した磁気異常を抽出して仮想的な古月磁極の推定を行った。比較的精度良く求められた数十個の磁極を解析した結果、現在の月北極付近と東半球低緯度地域に古月磁極のまとまりが見られた。この結果より、過去の月磁極が現在の北極付近と東半球低緯度地域を移動した可能性が考えられる。

キーワード：月、磁気異常、磁極

Keywords: Moon, magnetic anomaly, paleomagnetic pole

地球起源酸素イオンの月面への降り込み：かぐやの観測

Kaguya observation of oxygen ion precipitation from the Earth to the Moon

*横田 勝一郎¹、斎藤 義文¹、北村 成寿¹、西野 真木²、綱川 秀夫³*Shoichiro Yokota¹, Yoshifumi Saito¹, Naritoshi Kitamura¹, Masaki N Nishino², Hideo Tsunakawa³

1.宇宙航空開発研究機構・宇宙科学研究所、2.名古屋大学、3.東工大

1.Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science, 2.Nagoya University, 3.Tokyo Institute of Technology

月はかつて、ティアと名付けられた巨大隕石が地球へ衝突したのを機に形成されたと広く考えられている。この隕石衝突による月形成モデルは数値計算等で理論的に研究されていて、また月から得た試料の同位体分析による実証の試みがなされている。数値計算モデルによる研究では月の物質の大部分はティアから供給されたということが提唱されている。しかしながら、同位体分析では月と地球の試料で非常に近似した結果が得られていて、これは地球が月に対して大きく物質供給したことを示唆することになる。数値計算と同位体計測は矛盾した結果を示していたが、最近の精度の良い同位体分析により、アポロによる月試料が170/160において地球の試料とは異なる結果も出るようになってきている。

同位体分析が月と地球の試料で近似した結果が出た理由として、地球での試料の汚染などがまず考えられている。一方で、GEOTAIL衛星を始めとした地球磁気圏観測衛星により、特に酸素イオンが地球起源粒子として地球から散逸し、地球磁気圏尾部へと流されていくことが観測されている。最も遠い場合だと200地球半径離れた地球磁気圏で、地球起源の酸素イオンが観測されている。酸素イオンの流出は太陽風の状態に大きく依存した間欠的なイベントではあるが、地球電離圏から脱出したイオンは磁気圏を漂流し、ある割合では地球に再帰する。月は一か月に5日ほど60地球半径離れたところで地球磁気圏を通過するため、地球起源の酸素イオンは月表面に輸送される機会があると考えることが可能である。

月探査衛星「かぐや」は太陽風が静穏な時期ではあるが2008年を100km高度で周回した。イオン分析器が「かぐや」には搭載されていて、地球磁気圏においてイオンを観測している。地球磁気圏イオンに酸素イオンが含まれていることが観測データから示されていて、地球から月面へ酸素イオンが流入が「かぐや」によって観測されている。我々はこの酸素イオンの流量と観測時間から、地球から月へと輸送される酸素イオンの量を見積もった。本発表では酸素イオンの輸送量を示し、月試料の同位体分析に対する影響を考察する。

キーワード：月の同位体、かぐや衛星、質量分析

Keywords: Isotope of the Moon, Kaguya spacecraft, Mass analyses

将来の月着陸探査機搭載能動型蛍光X線分光計の概要とその開発状況

Instrumental performance and present status of development of Active X-ray Spectrometer for future lunar landing mission

*長岡 央¹、長谷部 信行¹、草野 広樹²、天野 嘉春²、柴村 英道²、太田 亨³、Fagan Timothy³、内藤 雅之¹

*Hiroshi Nagaoka¹, Nobuyuki Hasebe¹, Hiroki Kusano², Yoshiharu Amano², Eido Shibamura², Tohru Ohta³, Timothy Fagan³, Masayuki Naito¹

1.早稲田大学先進理工学部、2.早稲田大学理工学研究所、3.早稲田大学教育学部地球科学専修

1.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 2.Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3.Department of Earth Sciences, School of Education, Waseda University

Recent Chinese lunar landing mission (Chang'E 3) was successful in landing on the surface of the Moon after their twice successful remote observations. The landing mission investigated the elemental compositions of landing sites in more detail, and obtained new "ground truth" by using alpha particle X-ray spectrometer, which could have not been provided by any returned samples. The compositions of major elements as Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe of landing site help us to understand its petrogenesis and evolution. In Japan, the global investigation of Kaguya promoted our knowledge and understanding of the origin and evolution of the Moon. The landing and/or sample-returned missions in the future will be followed in order to investigate the geology in more details, in the next.

We have been developing the active X-ray spectrometer (AXS) as elemental analyzer on site, in order to prepare for future lunar landing mission. Present AXS consists of active X-ray generators with pyroelectric crystal (LiTaO₃), and a silicon drift detector (SDD). Here, the present status of development is reported, and the instrumental performance of AXS and the observation targets of AXS will be discussed.

キーワード：能動型蛍光X線分光計、着陸探査

Keywords: Active X-ray spectrometer, landing mission

月の断層活動終了年代の推定：一次元クレーター年代学の提案

One-dimensional crater chronology: A method of estimating the termination age of faulting

*嵩 由美子¹、山路 敦¹、佐藤 活志¹*Yuko Daket¹, Atsushi Yamaji¹, Katsushi Sato¹

1.京都大学理学研究科

1.Graduate School of Science, Kyoto University

月のリッジやグラーベンを形成した断層の活動終了年代を制約するために、月面の断層上に分布するクレーターを使った推定方法「一次元クレーター年代学」を提案する。断層でずらされ変形したクレーターは断層活動終了よりも前に形成されたことを、断層上に分布するにも関わらず変形していないクレーターは断層活動が終了した後に形成されたことを意味する。一次元クレーター年代学とは、リッジを形成した断層上に分布するクレーターのうち、変形していないクレーターの線密度を観測することで断層活動終了年代を見積もる方法である。単位面積あたりのクレーター生成頻度とそのサイズ分布はよく研究されている（例えば Ivanov et al., 2001）。そこで、単位時間・単位断層長あたりに形成されるクレーターのサイズと頻度の関係式と、クレーター線密度と経過年数の関係式を数値実験により明らかにした。これらの関係式を用いることで、断層上の変形していないクレーターの線密度から、断層活動終了年代を推定することができる。

月のテクトニックな地質構造の代表であるリッジやグラーベンは、主に海の内部や周縁部に弧状あるいは放射状に分布しているため、海の玄武岩溶岩の荷重によって形成されたと考えられてきた（例えば Solomon and Head, 1979）。この変形は溶岩の堆積と同時に起こったと考えられるため、主要な火山活動の終了（30億年前）と共に構造形成も終了した（例えば Solomon and Head, 1980）というのが一般的な見解であった。しかし近年、溶岩堆積時の荷重による変形では説明できない若い構造が報告されている（例えば Ono et al., 2009; Watters et al., 2011）。これらの構造は、全球冷却に伴う収縮や、月-地球系軌道進化に伴う変形の結果できた可能性があり、これらの成因で形成される構造の形成年代や形成位置、歪量には偏りがあると推測されている（例えば Solomon and Chaiken, 1976; Melosh, 1980）。従って各地質構造の位置や形成年代、歪量を見積もることで、月科学において大きな課題である熱史や軌道進化史の解明に寄与できると考えられる。しかし、構造形成がいつまで続いていたのかの定量的な見積もりはこれまでされてこなかった。今回提案する方法を月に適用することで、いつまで構造形成が続いていたかを定量的に見積もることができるだろう。

キーワード：月、構造発達史、クレーター年代学、リッジ

Keywords: Moon, Tectonic history, Crater chronology, Mare ridge

統計的投票アルゴリズムを用いた月地形データの強調手法について

Enhancement of lunar topographic data with statistical voting algorithm

宇津宮 昂平¹、*本田 親寿¹Kohei Utsumiya¹, *Chikatoshi Honda¹

1.会津大学

1.The University of Aizu

In addition to terrestrial planets, grabens and ridges that are typical topographic features on the moon indicate stress activity of the lunar surface. The grabens, which show negative channel-like reliefs result from tensile stress in lunar subsurface. On the other hand, the ridges, which show positive reliefs, result from compressive stress in the lunar subsurface. Especially, grabens and ridges have been supposed to be indicators of thermal evolution of the moon, because these feature result from expansion and constriction of the moon.

In order to find grabens and ridges by visual inspection, images taken by exploration camera are usable. However, some of ridge have gentle slope and some of graben have shallow channel-like relief, so it is difficult to identify these degraded features by visual inspection. In addition to degraded features, visibility of these topographic features is affected by spatial resolution and sun-lighting condition. Therefore, we use the Digital Terrain Model (DTM) of the moon for production of enhanced topographic data. The DTM provides elevation data of the lunar surface and is not generally affected by sun-lighting condition. However, it is difficult to identify small grabens and ridges with DTM data. In previous research with a similar purpose, roughness parameter (Root Mean Square Slope, here after RMS) with DTM data was utilized to identify several topographic features such as craters, ridges, and lava flows. The RMS with DTM data depends on a parameter set of calculation window size and data sampling step size. Appropriate parameter combination of these two parameters was needed to adjust to every scale of topographic features. In this study, on the basis of topographic data, we developed new calculation algorithm based on statistics named as "statistical voting algorithm". In this algorithm, we calculated an average and standard deviation in calculation window and it vote to each pixel which has a significant difference comparing with the average value. Continuously, we do same procedure along with moving calculation window. We expect that this algorithm is good at identifying small degraded or small-scale topographic feature.

As a result, and an availability of the statistical voting algorithm with DTM data to enhance the contrast of DTM data at the topographic features was confirmed. The appropriate parameter of this algorithm is window size 640 pixels in both case of grabens and ridges. This algorithm is useful to identify not only normal topographic features but also small and indistinct ones. However, small target superposed on large topographic feature could not be identified by visual inspection with our statistical voting algorithm data.

キーワード：地形、数値地形モデル、統計的投票アルゴリズム

Keywords: Topographic feature, Digital Terrain Model, Statistical voting algorithm

小型月着陸実験機SLIMによる科学観測

Scientific observation plan for Smart Lander for Investigating Moon mission

*大竹 真紀子¹、大嶽 久志¹、坂井 真一郎¹、櫛機 賢一¹、澤井 秀次郎¹、福田 盛介¹

*Makiko Ohtake¹, Hisashi Otake¹, Shinichiro Sakai¹, Kenichi Kushiki¹, Shujiro Sawai¹, Seisuke Fukuda¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Main objective of Smart Lander for Investigating Moon (SLIM) mission is to develop and demonstrate technology of high-precision landing on the Moon, which enables us to explore not only the Moon but the other planetary body with gravity. This mission is planned to land on the lunar surface within a hundred meters from the pre-fixed destination, and it is extremely attractive for landing site dependent study themes. Therefore, although weight and other resource budgets are very limited for this mission because the mission aims to develop a challenging light weight and small lander, possibility of a payload have been discussed recently within that strict resource budgets for adding extra result to the mission. Around 20 instruments were proposed for the mission as the results of efforts of instrument team members and candidate instruments and candidate objectives were identified. In this presentation, the candidate instruments and their objectives will be discussed with the information of current status the mission.

キーワード：月、SLIM、高精度着陸

Keywords: Moon, SLIM, high-precision landing

嵐の大洋の3つの火山性地形群を貫く線形質量異常構造についての考察

Linear mass anomalies going through three volcano complex areas in the Oceanus Procellarum

*山本 圭香¹、春山 純一¹、大竹 真紀子¹、岩田 隆浩¹、石原 吉明¹

*Keiko Yamamoto¹, Junichi Haruyama¹, Makiko Ohtake¹, Takahiro Iwata¹, Yoshiaki Ishihara¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

In western part of the Oceanus Procellarum of the lunar nearside, there are several large-scale volcanic complexes, in which volcanic geographical features are highly concentrated. In this study, Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)-derived lunar gravity field data is used to investigate the geophysical relevance of the major volcanic complexes in the region. One of our concerns is whether the volcanisms of these complexes are caused by common factors or not. We estimated Bouguer gravity anomaly in the region and investigated the directions of the linear structure of the anomalies. The result shows that there are linear mass anomalies, which connect the mass anomalies at the volcano complexes of Aristarchus Plateau, Marius Hills and Flamstead Basin. The observed linear structures lie inward of the large quasi-rectangular pattern revealed by Andrews-Hanna et al., and much shallower than the pattern. Considering that, the observed linear structures should have been created later than the quasi-rectangular outer structure. After the quasi-rectangular pattern was created, magma rose to the surface through the cracks. The observed linear structure is supposed to be created through cooling of the overflowed magma. The geological units, which the linear structures go through, are younger than that of the outer quasi-rectangular pattern. The linear cracks created by cooling are weaker than other locations. Therefore, magma probably rose easier than in other area. That may be why the three currently observed volcano complexes lie on the same linear structure.

キーワード：月重力場、GRAIL、火成活動

Keywords: lunar gravity field, GRAIL, volcanic activity

最古の月玄武岩隕石がどこからきたか？

Where did the oldest lunar mare sample come from?

*杉山 賢一¹、中村 良介²、小澤 信¹、寺田 健太郎³、中村 智樹¹、中嶋 大輔¹、大谷 栄治¹

*Kenichi Sugiyama¹, Ryosuke Nakamura², Shin Ozawa¹, Kentaro Terada³, Tomoki Nakamura¹, Daisuke Nakashima¹, Eiji Ohtani¹

1.国立大学法人 東北大学大学院 理学研究科 地学専攻、2.産業技術総合研究所、3.大阪大学大学院理学研究科
1.Department of Earth and Planetary Material Sciences, Faculty of Science, Tohoku University,
2.AIST, 3.Graduate School of Science, Osaka University

Introduction: Kalahari 009 is a lunar meteorite classified as a very-low-titanium (VLT) mare basalt breccia and known as one of the oldest mare basalts with the U-Pb age of 4.35 ± 0.15 Gyr (Terada et al., 2007). This meteorite provides the information of the lunar oldest mare magmatism prior to the Late Heavy Bombardment around 3.8-4.1 Gyr ago and potentially facilitates understanding of the origin of lunar mare magma activity. Here we report search for the source crater of the Kalahari 009 meteorite and shock products in the meteorite.

Analytical Methods: The source crater of Kalahari 009 was searched in a region from northern latitude of 60 degree to southern latitude of 60 degree using data of the Multiband Imager (MI) and Gamma Ray Spectrometer (GRS) obtained by the lunar explorer SELENE (KAGUYA). We selected candidates of the source crater, of which FeO, TiO₂ and Th concentrations are comparable to those in Kalahari 009 (16 wt% of FeO, 0.45 wt% of TiO₂ and 0.09 ppm of Th) (Sokol et al., 2008). To estimate the compositions of FeO and TiO₂ we used the algorithms for deriving the abundances of FeO and TiO₂ based on MI image data (Otake et al., 2012). At the same time, optical maturity parameter (OMAT), which is an index of relative surface age of craters, was also calculated to search for the source crater of Kalahari 009 using the method in Lucey et al. (2000).

To reveal the impact history of Kalahari 009, we observed the thin section of the meteorite using the field emission scanning electron microscope (JEOL 7001F) and Raman spectrometer (JASCO NRS-2000).

Result and Discussion: 254 craters with concentrations of FeO (14-17 wt%), TiO₂ (≤ 1 wt%) and Th (≤ 1 ppm) were identified. It was suggested that Kalahari 009 was ejected together with the Kalahari 008 highland breccia (Sokol et al., 2008), and therefore the source crater may be located in a region of cryptomare. 92 out of 254 craters are located in cryptomare. The cosmic exposure age of Kalahari 009 is from 220 ± 40 yr to ~ 0.3 Myr (Nishiizumi et al., 2005), which means that the craters with relatively high OMAT are candidates of the source crater. Thus, the source crater of Kalahari 009 is probably one of 92 craters in cryptomare having relatively high OMAT.

In the thin section of Kalahari 009, shock products such as coesite, ringwoodite, partly mosaicism and planar fracturing in plagioclase and olivine were observed. According to the shock classification in Stöffler et al. (1991), the shock pressure is estimated as 30-35 GPa. The presence of ringwoodite suggests the shock pressure of ~ 7 -14 GPa based on the Fe₂SiO₄ phase diagram (Ohtani, 1979). Thus, it is inferred that Kalahari 009 experienced the shock pressure of ~ 7 -35 GPa. The Ar-Ar dating of Kalahari 009 showed that the meteorite experienced significant loss of radiogenic Ar at 1.7 Gyr (Fernandes et al., 2007). Thus, Kalahari 009 has experienced at least one impact which caused loss of radiogenic Ar and/or produced shock-induced minerals.

In summary, we describe a possible ejection scenario of Kalahari 009 based on the results of the present and previous studies. An impact event occurred at 1.7 Gyr, but the ancient basalt clast remained in the impact crater as a breccia. Then, the 2nd impact produced a small crater inside the large crater between ~ 0.3 Myr and 220 ± 40 yr and ejected the meteorite from the small crater.

In the presentation, we will discuss the source crater of Kalahari 009 in conjunction with the impact history of the meteorite.

キーワード：月、かぐや、クリプトマーレ

Keywords: Moon, Kaguya/SELENE, Cryptomare

月のレオロジー構造と深発月震の発生メカニズム

The rheological structure of moon interior and the mechanism of deep moonquake.

*東 真太郎¹、片山 郁夫²*Shintaro Azuma¹, Ikuo Katayama²

1.東京工業大学地球生命研究所、2.広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

アポロ計画によって8年以上月震波の観測が行われ、月の内部構造に関する我々の理解は大きく前進した。この月震波のデータを解析することで、月にも月震（地殻変動）が起きていることや、内部は分化しており、地殻は斜長石、マントルは地球と同様苦鉄質鉱物（カンラン石や輝石）で構成されていることが支持されている（reviewed by Wieczorek et al., 2006）。月震のデータから我々は様々な月の内部の知見を得てきたが、月震のメカニズム自体については幾つかの仮説はあるものの(e.g., Weber et al., 2008; Frohlich and Nakamura 2009), 未だに議論がある。月震は発生領域や発生メカニズムによって、浅発月震、深発月震、熱月震、インパクトによる月震に分類されており、我々はこの月震の中でも深さ約800-1200 km付近で起きる深発月震の発生メカニズムについて、月内部のレオロジー構造とともに考察を行った。この深発月震の特徴として、決まった場所で繰り返し起きていることや、非常に小さな応力降下(~0.1 MPa)があげられる(e.g., Lammlein, 1977; Nakamura 1981)。この深発月震の発生メカニズムを考察することは、月内部の不均一性や、月内部の進化を解明する大きな手がかりとなる可能性がある。

月内部のレオロジー構造を検証する際、月内部の温度構造を見積もる必要がある。これについては先行研究において観測された熱流量などから推察されている温度構造を用いた(Kuskov et al., 2002)。圧力については、地殻の密度を(3000 kg/m³), マントルの密度3300 (kg/m³), モホ面の深さを60 (km)に設定し(Hood and Zuber, 2000), 上載岩圧を計算した。上記の温度・圧力構造を基に、脆性破壊領域はByerleeの法則を用いて強度の計算を行い(Byerlee, 1978), 塑性変形領域においては流動則を用いて計算を行った。特に地殻については斜長石の流動則(Rybacki and Dresen, 2000; Rybacki et al., 2006)を適用し、マントル部分についてはかんらん石の流動則(Karato and Jung, 2003)を適用した。歪速度については不確定なので10⁻¹⁴ (s⁻¹)と10⁻¹⁹(s⁻¹)の二通りの歪速度を仮定し計算を行い、月内部のレオロジー構造を決定した。本研究ではこのレオロジー構造の決定と地球で起きている深発地震のメカニズムのモデルを参考にすることで深発月震のメカニズムについて考察を行った。

まず計算された月内部のレオロジー構造から、深発月震は明らかに塑性変形領域で発生していることがわかった。通常、塑性変形領域では破壊や滑りは起こらない。そこで地球で起きている深発地震の発生メカニズムのモデルとして提案されている断熱不安定が、月内部でも引き起こされる可能性について考察を行った。この断熱不安定を引き起こすためには、(1)変形による温度上昇が熱拡散を上回ることと(大きい歪速度), (2)その温度上昇に伴う強度の減少が変形による加工硬化を上回る必要(比較的低温条件)がある(Karato et al., 2001)。計算の結果、まずドライの条件下では、月内部で断熱不安定を引き起こすことは非常に難しいことがわかった。なぜなら、潮汐力によって生み出される月内部の応力は非常に小さく(0.1 MPa), 熱的不安定を引き起こすために必要な歪速度(>10⁻¹⁴ s⁻¹)に対し、ドライ条件では実現できる歪速度に限界(<10⁻¹⁵ s⁻¹)があるからである。しかし、ウェット条件(500-1000 ppm H/Si)では歪速度も飛躍的に大きくなり(>10⁻¹⁴ s⁻¹), 断熱不安定を引き起こす可能性が示された。さらにその断熱不安定が引き起こされる温度圧力条件は深発月震が観測されている深さの温度圧力条件(1000-1500 °C, 3.5-4.5 GPa)に近いことも示された。このことから月内部には不均一に水が存在しており、その水の不均一性が原因で深発月震は繰り返し同じ場所で起きているのかもしれない。

キーワード：月、深発月震、レオロジー構造

Keywords: Moon, Deep moonquake, Rheological structure

