

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800277

研究課題名(和文)シリカ高圧相から読み解く月への小惑星衝突史

研究課題名(英文) Asteroid collision history on the Moon based on silica high-pressure polymorph

## 研究代表者

宮原 正明 (Miyahara, Masaaki)

広島大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90400241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：月表層の岩石試料(月起源隕石, アポロ・ルナ回収試料)に記録された天体衝突の記録を高圧科学, 鉱物学及び同位体年代学に基づいて解明した。月起源隕石, アポロ・ルナ回収試料には衝撃溶融組織に加えて様々な種類の高圧鉱物が発見された。高圧鉱物の安定圧力領域から, 月表層岩石に記録された衝撃圧力がおよそ3～23万気圧, 衝突速度が数km/秒と見積もられた。同位体放射年代を用いて衝突が起きた時代の推定も試みた。

研究成果の概要(英文)：Asteroid collision history on the Moon was investigated using lunar surface rock samples (lunar meteorite, Apollo and Runa return samples) based on high-pressure science, mineralogy and isotope chronology. Lunar meteorite, Apollo and Runa return samples include several kinds of a high-pressure mineral besides shock-induced melting texture. Considering the stable pressure field of high-pressure minerals, shock pressure and impact speed were estimated 3-23 GPa and several km/second, respectively. We also tried to determine the impact ages using radio-isotopes.

研究分野：隕石学

キーワード：月 隕石 高圧相 アポロ試料 シリカ 衝撃変成 放射年代 インパクト

### 1. 研究開始当初の背景

天体の衝突現象は天体の成長・進化の基本要素の1つである。小惑星「イトカワ」も母天体の小惑星が衝突により砕け、破片の一部が再集積し現在の形となった。実際に「イトカワ」回収試料にも衝突の痕跡が残されている。また、水や生命起源物質を原始地球にもたらした炭素質コンドライトの母天体と目されるC型小惑星の脱水過程は放射性元素の壊変熱だけでなく、衝突に伴う加熱も寄与していることが指摘されている。小惑星が衝突を繰り返しその質量が大きくなると、引力の作用する範囲が広がり、次第に落下してくる小惑星の大きさも大きくなる。原始地球形成末期になると、落下してくる小惑星の数は減少するものの、増大した地球の引力に引かれ、近隣の軌道上で成長過程にあった小惑星が、地球の軌道目がけて落下してくる。これは地球だけでなく、地球の衛星として成長過程にあった原始月にも災厄をもたらした。月には直径300 kmを超える「海」が10箇所以上、「嵐の大洋」や「南極エイトケン盆地」といった直径2,500 kmを超える超大型クレーターが存在し、これらは成長過程にあった原始月に小惑星衝突がもたらした災厄の痕跡である。

地球外天体の破片である隕石に記録された天体衝突現象の記録としては1)角礫化、2)鉱物粒子の扁平化、3)鉱物への歪み・欠陥の導入、4)長石のマスケリナイト化、5)衝撃熔融脈、6)高圧相などがある。衝撃変成度を表す指標としては古くからStöfflerらの衝撃実験回収試料と隕石試料をマクロ的に比較して得た一覧表が用いられている。しかし、高圧相の相転移メカニズムやそのカイネティクスが一切考慮されていない。また、衝撃実験の際問題となるのは、同一組成・同一岩石を用いて衝撃実験を繰り返しても、ターゲットの初期状態(密度や粒径等)が異なると、出現する衝撃変成の痕跡が異なることである。実際の天体衝突は衝撃実験に比べ桁違いに大規模であり、高圧力の持続時間がミリ秒から数秒のオーダーとなる。従って申請者は動的な衝撃実験よりむしろターゲットの初期状態に依存しない静的な高圧実験が天体衝突を再現できると予想し研究を行い、1)衝撃熔融脈で平衡状態が達成されている、2)先行研究の多くで衝撃変成度が過大見積もりされていることを明らかにした[1-4]。

多種多様な衝突条件下での衝撃変成を理解する基本的な方法は、隕石中の痕跡を調べ、衝撃変成度を求めて系統化することである。申請者は集束イオンビーム(FIB)加工装置、透過型電子顕微鏡(TEM)、放射光X線回折を隕石研究に世界に先駆けて導入し、月起源隕石からシリカ高圧相を次々と見出した[5, 6]。原始月は形成直後に激しい衝突現象を被ったことが放射年代学、クレーター年代学から推測されていたが、申請者の成果はそれを

決定づけるものと成った。そこで申請者はこれまでの研究成果をさらに発展させ、月表面層物質に記録された衝撃変成の痕跡をシリカ高圧相スケールで系統化し、さらに衝突現象へ時間軸を導入することで月への小惑星衝突履歴を解明することを計画した。

### 2. 研究の目的

月には誕生以降45億年の天体衝突史が保存され、それは太陽系における小惑星・巨大惑星の軌道進化に密接に関係している。月の表面層物質は天体衝突により引き起こされた高温・高圧で高圧相に相転移していると予想される。本研究の目的は1)月の表面層物質に含まれる高圧相を用いて衝突天体時の衝撃圧力、速度、2)放射年代からそのインパクト・イベントが起きた時代を決定し、3)高圧科学、クレーター学、放射年代学、月科学を結びつけ月への天体衝突史を実証・検証することである。

### 3. 研究の方法

まず、月表面層物質の収集を行う。試料としては1)月から飛来した月表面層の岩石である月起源隕石、2)アポロ及びルナ計画で月から地球に持ち帰られた回収試料を使用する。研究の第一段階として、月表面層物質の衝撃熔融脈に含まれる高圧相の記載・分類を行い、衝撃圧力とその天体が衝突した時の速度を決定する。第二段階として高圧相の粒径をTEMで測定し、そのカイネティクスと衝撃熔融脈の温度履歴を利用し月に衝突した天体のサイズを明らかにする。第三段階として衝撃熔融脈内部とその周囲に含まれるリン酸塩鉱物のU-Pb放射年代を測定し、衝突の起きた年代を明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究で使用した月起源隕石試料はNWA 032, NWA 479, NWA 2977, NWA 2727, Yamato 793169である。また、月回収試料として米国のアポロ計画で採取されたApollo 15299試料及び旧ソ連のルナ計画で採取されたルナ24号レゴリス試料を使用した。以下に各試料の岩石・鉱物学的特徴、衝撃変成組織、高圧相の産状、見積もられた衝撃圧力、放射年代等について解説する。

NWA 032: 大部分は玄武岩から構成されるが、試料の一部が角礫岩となっていた。玄武岩の部分は主に斜長石とカルシウム輝石からなる急冷組織をマトリクスとして、斑晶として組成累帯構造を示すカンラン石、カルシウム輝石、低カルシウム輝石が生成している。玄武岩の部分には複数の衝撃熔融脈とメルトポケットが存在していた。一部のカンラン石が衝撃熔融脈に直接接しており、衝撃熔融脈に近い部分ではカンラン石の高圧相であるリングウツダイトに相転移していた。角礫岩の部分は主にカンラン石、輝石や斜長石の鉱物片、そしてガラスや玄武岩の破片を含む

でいた。角礫岩の部分には僅かではあるがシリカの破片も含まれていた。電子顕微鏡観察の結果、シリカにはスティショバイト或はザイファルタイトによく似た相転移組織が観察された。しかし、スティショバイト或はザイファルタイトに相当するラマンスペクトルを得ることはできなかった。高圧相（リングウッドイト）の存在から推定される衝撃圧力は約 13 ~ 23 GPa である。

NWA 479: 岩石組織及び構成鉱物種は NWA 032 とよく似ている。しかし、角礫岩状の部分は存在しない。NWA 032 同様に細い衝撃溶融脈が存在している。衝撃溶融脈に接するカンラン石にはリングウッドイトへの相転移組織或はブリッジマナイト + マグネシオブスタイトへの高圧分解組織らしきものが観察されたが、組織が微細であったため分析が難しく確証を得ることができなかった。従って、高圧相に基づく衝撃圧力等の見積もりができなかった。

NWA 2977: 斑糲岩に似た岩石組織を示す。主な構成鉱物はカンラン石、低カルシウム輝石、カルシウム輝石及び斜長石、イルメナイト、クロマイト、リン酸鉱物であった。斜長石に伴って僅かにカリ長石が生成していた。斜長石はほぼ完全にガラス化（マスケリナイト）しているのに対し、カリ長石は結晶性を保っていた。複数の衝撃溶融脈が存在し、衝撃溶融脈内部に取り込まれたカンラン石や溶融脈に接するカンラン石ではリングウッドイトへの相転移が起きていた。見積もられた衝撃圧力は約 16 ~ 23 GPa である。

NWA 2727: 試料の大部分は角礫岩状で、3分の1程度が斑糲岩に似た岩石組織を示す岩片であった。斑糲岩の部分は主にカンラン石、低カルシウム輝石、カルシウム輝石、斜長石及びイルメナイトから構成されていた。角礫岩状部分には、これらの鉱物に加えてシリカが含まれていた。斑糲岩と角礫岩状部分の両方に衝撃溶融脈やメルトポケットが発達しており、その内部と近くのシリカではコーサイトへの相転移が起きていた。衝撃圧力は約 2.5 ~ 13 GPa と見積もられた。

Yamato 793169: 玄武岩であり、構成鉱物種は NWA 032 や 479 に似ているが、急冷組織からなるマトリクスを持たず、等粒に近い岩石組織を示す。斜長石はマスケリナイト化しており、強い衝撃変成を経験したことを示唆するものの、衝撃溶融組織は観察されなかった。他の試料に比べて最も多くシリカを含んでいたが、高圧相を見出すことはできず、衝撃圧力等の推定は断念した。

Apollo 15299 試料: アポロ 15 号計画で採取された月表層土壌試料である。主に玄武岩の岩片や鉱物片を含んでいた。鉱物種はカンラン石、輝石、斜長石、シリカ、イルメナイトを含んでいた。僅かな衝撃溶融組織も観察された。シリカとしては石英、トリディマイト、クリストバライトを含んでいた。SPRING-8 での放射光を使った X 線回折実験の

結果、シリカ高圧相であるスティショバイトが検出された。衝撃圧力は少なくとも 8 GPa と見積もられた。同位体放射年代等を考慮すると、インプリウム期（32 ~ 38 億年前）に月の表側で起きたインパクト・イベントに関連して生成した可能性が高いことが明らかになった。この研究成果はアメリカ鉱物学雑誌にレターとして掲載され、ハイライト論文に選出された。

ルナ 24 号レゴリス試料: 月の危難の海から回収された月表層土壌試料である。粒径が数十から数百マイクロメートルの鉱物片と岩片からなる粉体試料である。鉱物種としてはカンラン石、輝石、斜長石、シリカを含んでいた。岩片の一部には溶融組織も見られ、シリカを含んでいた。しかし、高圧相を見いだすことはできず、衝撃圧力等の見積もりは断念した。

一連の研究を通して、月表層物質からシリカ高圧相であるコーサイト、スティショバイトだけでなく、カンラン石の高圧相であるリングウッドイトを複数試料から見出すことができた。高圧相の安定圧力領域を考慮し衝撃圧力を見積もると、おおよそ 3 ~ 23 GPa であった。この圧力は火星起源隕石に記録されたものよりやや低く、普通コンドライト隕石で見積もられた衝撃圧力とほぼ同じであった。従って、衝撃圧力から衝突速度を計算すると普通コンドライトのものと同様約 10 km / 秒となった。

今回研究に用いた試料ではシリカが角礫岩内に含まれていた。角礫岩は不均質構造でありシリカのカイネティクスに基づくインパクト・イベント定量化に用いるモデルの構築が困難であった。そこで、代わりに衝撃溶融脈に生成したリングウッドイトのカイネティクスに基づくモデル計算を試みた。隕石中のリングウッドイトを TEM で観察すると、リングウッドイトは数百ナノメートルの粒子の集合体となっていた。この結果もやはり普通コンドライトで得られた観察結果と調和的である。リングウッドイトのカイネティクスに基づき得られた衝撃誘起高圧力持続時間はシリカのカイネティクスに基づく結果より 1 桁程度長くなり、差異が生じている原因を今現在検討している。NWA 2977 ではリン酸鉱物の U-Pb 放射年代測定も行った。しかし、予想に反して衝撃溶融内部と母岩で放射年代に差異が認められなかった（共に約 31 億年）。一方、母岩中の一部のリン酸鉱物は相対的に若い放射年代を示したが（約 3000 万年）、その理由については現在も検討中で明確な答えは得られていない。

今回の研究計画では月起源隕石 5 個と月回収試料 2 個を調査した。月表層試料は希少試料であり利用できる試料数や量はごく僅かであるが、先行研究成果に格段の知見を付け加えることが出来た。

<引用文献>

[1] Ohtani E. et al. (2004) EPSL, 227,

505-515.

[2] Miyahara M. et al. (2008) PNAS, 105, 8542-8547.

[3] Miyahara M. et al. (2010) EPSL, 295, 321-327.

[4] Miyahara M. et al. (2011) PNAS, 108, 5999-6003.

[5] Ohtani E. et al. (2011) PNAS, 108, 463-466.

[6] Miyahara M. et al. (2013) NatureCommunications, DOI: 10.1038/ncomms2733.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

金子詳平, 宮原正明, 大谷栄治, 荒井朋子, 平尾直久, 佐藤和久. アポロ 15299 試料からのステショバイトの発見. アメリカ鉱物学雑誌 100号, 1308-1311頁, 2015年, 査読有. doi: 10.2138/am-2015-5290.

〔学会発表〕(計 11件)

宮原正明, 大谷栄治, 山口亮, 小澤信. 衝撃を受けた隕石からのコーザイト, ステショバイト及びザイファタイトの発見. 隕石学会, ベルリン, ドイツ, 2016年8月6日(招待講演).

鹿山雅裕, 中嶋悟, 富岡尚敬, 大谷栄治, 瀬戸雄介, 長岡央, 三宅亮, 小澤信, 関根利守, 宮原正明, 留岡和重. 赤外吸収分光法により検出される月隕石の水. 日本惑星科学会2016年秋季講演会, 岡山, 2016年09月12-14日.

宮原正明, 大谷栄治. 衝撃を受けた天然のシリカ高圧相, インターナショナルワークショップ: 地球深部での揮発性成分の循環に関する新たな挑戦, 東北大学知のフォーラム, 東北大学, 2016年7月3日(招待講演).

寺田健太郎, 橋口友実, 河井洋輔, 宮原正明. 危難の海から回収されたルナ24号レゴリス試料のキャラクタリゼーション. 2016年日本地球科学連合大会. 幕張メッセ, 2016年05月22-26日.

鹿山雅裕, 富岡尚敬, 大谷栄治, 中嶋悟, 瀬戸雄介, 長岡央, Fagan Timothy, Götze Jens, 三宅亮, 小澤信, 関根利守, 宮原正明, 松本恵, 庄田直起, 留岡和重. 月面における水の起源と水源地: 物質科学的見地からの検討. 2016年日本地球科学連合大会. 幕張メッセ, 2016年05月22-26日.

鹿山雅裕, 中嶋悟, 富岡尚敬, 瀬戸雄介, 大谷栄治, Fagan Timothy, 長岡央, 小澤信, 関根利守, 宮原正明, 三宅亮, 福田 惇一, 留岡和重, 市村隼, 松本恵, 鈴木 康太, Götze Jens. 月隕石に記録された水に富む月の上部マントル. 2016年日本地球科学連合大会. 幕張メッセ, 2016年05月22-26日.

宮原正明, 大谷栄治, 金子詳平. 高圧相

から探る月起源隕石に記録された衝突史の解明. 第56回高圧討論会, 広島市アステールプラザ, 2015年11月10日~12日.

鹿山雅裕, 富岡尚敬, 大谷栄治, 瀬戸雄介, 中嶋悟, 関根利守, 宮原正明, 小澤信, 三宅亮, 福田惇一, 留岡和重, 西戸裕嗣, Gotze Jens, Fagan Timothy. 月隕石に存在する水の痕跡と水に富む月のマントル. 日本鉱物科学会2015年年会, 東京大学, 2015年9月25日~27日.

宮原正明, 大谷栄治. 超高圧地球惑星科学へのFIBシステムの応用. 2015年極限環境下の化学研究の新領域: FIB技術の応用ワークショップ, 上海, 中国, 2015年5月21日~22日(招待講演).

鹿山雅裕, 富岡尚敬, 大谷栄治, 瀬戸雄介, 福田惇一, 関根利守, 宮原正明, 小澤信, 三宅亮, 留岡和重, Fagan Timothy, 西戸裕嗣. 月隕石に存在する水の痕跡. 2015年日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2015年5月24日~28日.

宮原正明. 衝撃を経験した隕石中のシリカ高圧相とそのインプリケーション. 2015年日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2015年5月24日~28日.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

2015年7月1日朝日新聞(夕刊)に研究成果が掲載(月の岩石, 天体衝突の証拠)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮原 正明 (Masaaki Miyahara)  
広島大学, 理学研究科, 准教授  
研究者番号: 90400241

(2)研究分担者  
該当なし ( )

研究者番号：

(3)連携研究者  
該当なし ( )

研究者番号：

(4)研究協力者  
該当なし ( )