

平成21年6月26日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18204051
 研究課題名（和文） 衝撃変成に関する衝撃実験と衝撃スケールの精密化
 研究課題名（英文） Shock experiments on shock metamorphism and close examination of shock scale
 研究代表者：
 関根 利守（SEKINE TOSHIMORI）
 独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ物質ラボ・主席研究員
 研究者番号：70343829

研究成果の概要：衝撃変成をより深く理解し衝撃の度合いに対するスケールを構築する為に、回収された試料とその場計測法を通して実験的検討を行った。従来、データが不十分であったり皆無であった為に、衝撃変成の推定が困難であった硫酸塩及びその含水鉱物に対して得られた実験結果から火星表面での衝撃変成や水の循環に関する知見、隕石の海洋衝突による生物有機分子の生成、炭酸塩や含水鉱物の粉体に対する圧縮及び解放過程のその場計測、及び典型的な惑星物質である玄武岩の動的挙動や衝撃パラメータについて明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	24,300,000	7,290,000	31,590,000
2007年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	38,200,000	11,460,000	49,660,000

研究分野：衝撃の科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：衝撃変成、衝撃実験、衝撃圧縮状態、衝撃試料回収法、衝撃後解放過程

1. 研究開始当初の背景

隕石中の衝撃度合いを検討する為のスケールは、従来ドイツのグループが提案した隕石構成鉱物であるカンラン石や輝石などの主要鉱物だけの、しかも単結晶状態に関する衝撃実験データだけを基にしたスケールが使われていた。この従来スケールの問題は、実際の適用に限界があり、特に

(1) 主要鉱物以外の衝撃の程度が不明であり、ケイ酸塩以外にも広く衝撃度合いを示す鉱物での検討を要す。

(2) 種々の空隙率を有する隕石では、空隙率と衝撃の度合いは複雑な関係があり、空

隙を有する試料でのスケールの大幅な相違を明らかにする必要がある。

(3) 衝撃圧縮後の解放過程を含めた衝撃圧縮プロセス全体を加味した新しいスケールの構築が必要不可欠である。このような問題に対して衝撃実験での詳細な検討が必要であるが、実験が実施できる施設は限りがあり、十分なデータが揃っていなかったため、詳細な議論が健全に出来ず、推定の域をでなかった。

2. 研究の目的

衝撃変成は衝突現象に伴う宇宙惑星系での普遍的なプロセスであり、惑星の初期形成過程で

もまた衝突クレータ生成過程などでも広く知られている。未解明な多くの地球の進化過程でも衝突現象に伴う衝撃変成が重要な役割を果たし、さらに巨大衝突に伴う衝撃反応の結果として地球大気の進化、地球上の生命の誕生などにも大きな影響を与えたと考えられている。本研究は、これらの諸問題に対して基礎的な衝撃変成データを提供し、より定量的な議論を可能にすることを目的とする。衝撃スケールの精密化とそれに対する試料初期状態がどのように影響するか等の解明は、隕石の起源の理解にも役立つことが期待される。特に、ショックベイン等の衝撃変成作用に特有の特殊環境は隕石中あるいは隕石母体中の空間的に限られた領域でのみ起こり、そのメカニズムの解明には不均質系に対する衝撃変成の詳細な実験的研究が急務である。それらの環境下でのリングウッドイトやメジャーライトなど高压鉱物の生成条件の特定化への道を開く。熱変成や圧力変成と言うような静的プロセスでなく、動的な衝撃プロセスの重要性を明らかにできる。今後、このような衝突によってもたらされる動的なプロセスは、惑星物質の進化や生命の起源を議論する上で地球上での衝突現象に伴う地質学的変遷を理解するうえで、益々重要性が増大するので、その実験的研究は意義が大きい。

3. 研究の方法

本研究では、精密衝撃スケールを確立するために、衝撃試料回収法と衝撃圧縮状態からの開放過程のその場計測の2つの方法で行う。前者では衝撃波の破壊から護るため試料を金属容器に封入し衝撃波を与え、得られた試料を光学顕微鏡観察、SEMおよびTEM観察、X線回折法、ラマン分光法、EPMAなどの評価技術を利用して分析し、衝撃波の効果を実験的に検討する。衝撃波発生装置は物質・材料研究機構の装置を使用する。鉱物試料、隕石、あるいは試薬から調整した水酸化物や硫化物などを試料として使い、それらの衝撃変成を調べる。組織の変化、融解、分解、脱ガス、相転移などについて観察する。金属容器は試料と衝撃インピーダンスの差が少ないもので試料と反応しないものを選択する。衝撃圧は、衝突速度 (0.5 km/s-6.0 km/s) と飛翔板の材質を変えて必要な衝撃圧力 (5-100 GPa) の範囲で行う。衝撃銃は一段式や二段式銃を使用して、必要な圧力範囲をカバーする。

開放過程の計測では、従来は試料の背面に衝撃インピーダンスの小さい物質を置き、

その圧縮状態を計測することで試料の部分圧力開放状態を計測して来たが、この方法では少数の離散的な状態しか測定できず、連続的な時間変化を追うことができない。本研究ではそのために、最新技術のレーザー速度干渉計 (VISAR) を導入して連続的な計測技術で圧縮状態とその開放過程状態の計測を行う。この解析結果は衝撃試料回収実験結果と比較検討し、開放過程状態と回収物質との関連性を調べる。

これまでに、本研究グループから衝撃回収実験では、隕石 (Nakamura et al. (1995, 2000), Tomaoka et al. (1999, 2003))、隕石類似物質 (Yamaguchi et al. (2003), Sekine et al. (2002))、含水鉱物 (Akai and Sekine (1994))、鉱物 (Sekine et al. (1987), Uchizono et al. (1999), Shinno et al. (1999, 2000), Yamaguchi and Sekine (2000)) などの例があり、また圧縮状態計測実験では含水鉱物 (Sekine et al. (1991))、鉱物 (Takazawa et al. (1998))、岩石 (Sekine et al. (1995) Nakazawa et al. (1997)) などの例がある。これらの実験結果から試料の初期状態として

(1) 空隙率と空隙の分布状態、(2) 初期温度、(3) 揮発性成分の量と種類などが、また衝撃状態として (4) ピーク圧力、(5) ピーク圧力に達するまでの圧力履歴、(6) ピーク圧力の持続時間、(7) ピーク圧力からの圧力開放過程、及び (8) 残留温度が重要であることを示している。これらは衝撃変成の重要なパラメータである。

18年度には、本研究を遂行する為に重要なレーザー速度干渉計のシステムの導入及び設置を行った。本装置は、レーザー光を当て試料と窓材の境界面からの反射光干渉計に入れ、ドップラー効果を計測する事で衝撃圧縮プロセスに伴い変化する速度を時間分解で観察するものである。玄武岩を試料として計測を行なった。衝撃試料回収実験は硫酸塩及びその含水鉱物について検討した。

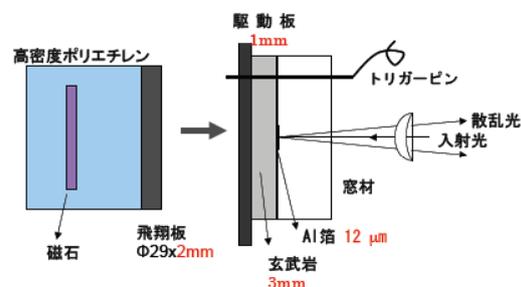


図1. レーザー速度干渉計での実験概念

19年度には、18年度に引き続き一段式火薬銃とVISARを用いた玄武岩の実験を継続し、回収試

料の熱分析のため熱分析・熱重量分析装置の導入と設置を行なった。衝撃試料回収法で得られた含水硫酸塩について分析を行なった。また、水を含む系での衝撃試料回収に必要な回収試料容器の開発及び試料量の適正化を検討した。

20年度には、VISARを用いたその場観察で、炭酸塩、含水鉱物、水を試料とした圧縮状態及びその後の圧力解放過程を検討する為の窓材の検討と同時に、粉体状態の空隙を有する炭酸塩や含水鉱物が解放過程で分解する事の確認実験を試みた。また、炭素、鉄、水及び窒素を金属容器に封入した試料からの有機物の生成実験を行なった。二段式軽ガス銃を用いて、蛇紋石に関する100 GPa程度での状態計測を行なった。

4. 研究成果

(1) 平成18年度

衝撃圧縮状態及び圧力解放過程のその場観察に必要なレーザー干渉速度計の導入を行い、システムのテスト実験を実施した。トリガー、光源、測定ターゲット及び光学系の調整を行った。その結果は、所定の仕様を満足し次年度での活用が出来るようになった。十分な干渉強度を得るために衝撃波を受けている時の反射面の能力保持に、更に工夫が必要であることも判明したので、今後衝撃圧を上げたときに十分な反射面を確保すると同時に、圧力解放過程を計測するには、必要な窓材の検討が必要であることが明らかになった。炭酸マグネシウムに関するユゴニオ計測を従来よりも高圧までデータを取得し、解析した結果相転移の検出に成功し、また圧縮状態からの解放過程で炭酸ガスとマグネシアに分解が起きるのに圧力値にしきい値が存在することも明らかになった。このことを確認するためレーザー衝撃試料回収実験で得られた試料の詳細な電顕観察や電子線回折での同定を行った。その結果、約100GPaを超えるような衝撃圧縮を受けると炭酸マグネシウムは圧力開放過程で分解が起ることが確認された。

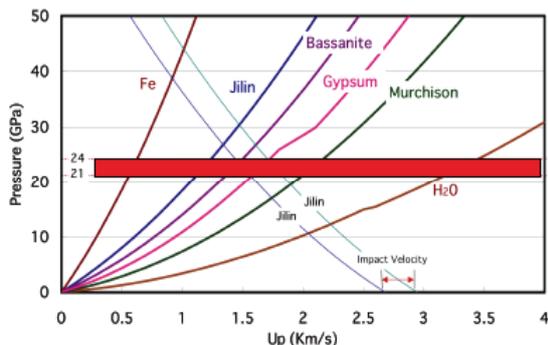


図2. 粒子速度と圧力の関係. 種々の隕石や彗星の衝突速度が決まる.

これは衝撃圧縮に伴う残留温度の効果として考えられる。その他蛇紋石、含水硫酸マグネシウム（水の量の違う3種類）、および含水硫酸カルシウムでそれぞれ衝撃回収実験を行い、蛇紋石では、圧力の増加に伴い非晶質化が始まりさらに圧力が大きくなると脱水が起ることが確認されたが、含水硫酸塩も場合、脱水は比較的容易に起きるが硫酸塩自体の分解は確認できなかった。

(2) 平成19年度

衝撃圧縮状態及び圧力解放過程のその場観察に必要なレーザー干渉速度計を使用して、玄武岩の圧縮過程と解放過程の計測を行った。計測には玄武岩背後に窓材を置き、また十分な反射強度を得るために、窓材と玄武岩との間にアルミニウム箔を挟んだ。この結果、従来は測定困難であった、弾性波と塑性波とを分離して計測することに成功した。また、窓材の衝撃インピーダンスを変化させて、衝撃圧縮状態からの解放過程の計測も行った。特に、低密度のエアゲルを使い、解放過程の最終段階での状態計測が出来る事を実験的に確認した。高衝撃インピーダンスの窓材を使うと、再圧縮過程の計測が出来る事もフッ化リチウム単結晶窓材で確認した。このレーザー干渉速度計を用いて、急激衝突脱ガス反応の計測に利用が出来るかの検討をはじめた。

衝撃試料回収実験では、水を含む系での検討および衝撃脱ガスで生じるガスの回収容器開発を行った。水とカンラン石との混合物からの反応でサーペンチンが生じる事を明らかにした。これは惑星形成過程での揮発し易い水が鉱物として安定化するとより広範囲な宇宙空間まで水を運ぶキャリアーとなり、初期惑星形成論に重要な情報となる。ガス回収容器の開発は、従来衝撃脱ガスを回収した固体からの推定で検討していたのを直接分析可能となり、より正確な把握が出来るようになる。このように、衝撃変成について実験的な検討をその場計測

(レーザー干渉速度計)と試料の回収法を通して行って、着実に進展が見られた。

(3) 平成20年度

衝撃変成を理解する為の衝撃圧縮状態のその場観察と衝撃試料回収法での検討を引き続き行なった。その場観察法では、平成18年度に導入し平成19年度に玄武岩の動的挙動を計測した技術を更に、高度化する為にレーザー干渉速度計の窓材の開発として、単結晶ホタル石の特性を調べた。その結果、従来の窓材以上の衝撃圧力に対して使用できる事が解った。これらの窓材を使用して、粉体状バサナイトの衝撃脱水過程に関してレーザー干渉速度計を利用した計測実験を行い、衝撃圧と波形の変化の関連について

て明らかにした。蛇紋石の衝撃脱ガス挙動を理解する為の計測を約130GPaまで行なった。また衝突溶融を理解する為にフォルステライトのユゴニオを従来の衝撃銃では実現できない1,000 GPaを越える領域まで、レーザー衝撃波を利用して計測した。また、従来の低圧下のデータと合わせて解析中である。衝撃回収実験で水を含む系で圧力解放時の様子を理解する為に、水に関して圧縮過程とその後の解放過程をその場観察すべく、レーザー干渉速度計で実験を行ない、計測が出来る事を確認した。

衝撃回収試料の検討は、炭酸塩、長石、及び隕石の海洋衝突を模擬する系で行なった。炭酸カルシウムや長石に関しては今後引き続き種々の分析・解析を行ない、検討を進める予定である。初期地球に相当する海洋衝突時には、隕石中の炭素や金属鉄が大気成分の窒素や海洋の水と反応して単純なアミノ酸を含む有機物が生成される事が明らかになった。

これらのデータは、隕石中や惑星表面衝突起源物質に見られる衝撃変成を詳細に検討する為の重要な基礎となる。



図3. Nature Geoscience 2009年1月号に載ったBackstoryで研究チームと研究が紹介される。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12件)

- ① N. Hirata, K. Kurita and T. Sekine (2009) Simulation experiments for shocked primitive materials in the solar system. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 174, 227-241. 査読有
- ② Y. Furukawa, T. Sekine, M. Oba, T. Kakegawa, and H. Nakazawa (2009) Biomolecule formation by oceanic impacts on early Earth. *Nature Geoscience* 2, 62-66. 査読有
- ③ T. Niihara, H. Kaiden, K. Misawa, and T. Sekine (2009) U-Pb isotopic systematics of experimentally shocked baddeleyite. *Proc. Luna. Planet. Sci.* 40th, 1562.pdf. 査読無
- ④ T. Sekine, T. Kobayashi, M. Nishio, and E. Takahashi (2008) Shock equation of state of basalt. *Earth Planet. Space* 60, 999-1003. 査読有
- ⑤ T. Kurihara, T. Mikouchi, A. Yamaguchi, and T. Sekine (2008) Transmission electron microscopy of experimentally shocked San Carlos olivine. *Proc. Luna. Planet. Sci.* XXXIX, 2505.pdf. 査読無
- ⑥ I. Nishioka, M. Funaki, and T. Sekine (2007) Shock-induced anisotropy of magnetic susceptibility in basaltic andesite. *Earth, Planet and Space*, 59, e45-e48. 査読有
- ⑦ T. Kobayashi, T. Sekine, K. Takemura, and T. Dykhne (2007) Emission spectroscopy of Eu doped CaF₂ under static and dynamic high pressure. *Jap. J. Appl. Phys.*, 46, 6696-6701. 査読有
- ⑧ F. Zhang and T. Sekine (2007) Impact-shock behavior of Mg- and Ca-sulfates and their hydrates. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 4125-4133. 査読有
- ⑨ 関根利守 (2007) 宇宙惑星科学への衝撃実験。 *高圧力の科学と技術* 13[1], 334-340. 査読有
- ⑩ Y. Furukawa, H. Nakazawa, T. Sekine, and T. Kakegawa (2007) Formation of ultrafine particles from impact-generated supercritical water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 238, 543-549. 査読有
- ⑪ N. Tomioka, K. Tomeoka, K. Nakamura, and T. Sekine (2007) Heating effects of the matrix of experimentally shocked Murchison CM chondrite: Comparison to micrometeorites. *Meteoritics Planet. Sci.*, 42, 19-30. 査読有
- ⑫ T. Sekine, H.L. He, T. Kobayashi, and A. Yamaguchi (2006) Hugoniot and impact-induced phase transition of

magnesite. *Am. Mineral.*, **91**,
1802-1806. 査読有

[学会発表] (計 20件)

- ① T. Sekine (2009) Fast transportation of volatiles simulated by shock experiments; implication for fast magma transportation. *19th V.M. Goldschmidt Conf.* 2009.6.25. Davos.
- ② 新原隆史ら (2009) U-Pb isotopic systematics on experimentally shocked baddeleyite up to 57 GPa. *日本惑星科学会連合2009年大会*. 2009.5.21. 幕張メッセ.
- ③ 関根利守 (2009) 粉体の衝撃挙動のその場観察. *2009年春季応用物理学関連講演会*. 2009.3.31. 筑波大学.
- ④ T. Sekine et al. (2009) Forsterite Hugoniot on warm dense matter. *Intern. Workshop Warm Dense Matter*. 2009.3.19. Hakone.
- ⑤ 高橋栄一ら (2008) 惑星形成初期過程でのFeメルトの集積. *49回高压討論会*. 2008.11.12. 姫路
- ⑥ 関根利守ら (2008) スピノダルと衝撃プロセス. *49回高压討論会*. 2008.11.12. 姫路
- ⑦ 古川善博ら (2008) 隕石構成鉱物、水及び窒素の衝突反応による有機分子の生成. *日本惑星科学会*. 2008.11.2. 九州大学.
- ⑧ 栗原大地ら (2008) 茶色カンラン石を含む火星隕石の透過型電子顕微鏡観察. *日本鉱物科学会2008年年会*. 2008.9.22. 秋田大学.
- ⑨ 中沢弘基ら (2008) 初期地球における粘土鉱物と生物有機分子の起源: 実証実験. *粘土科学討論会*. 2008.9.4. 沖縄.
- ⑩ T. Sekine (2008) Hugoniot elastic limit of basalt measured by VISAR. *Workshop Cond. Mat. Dynamics at Microscopic level*. Argonne Nat. Lab., 2008.6.24. Chicago.
- ⑪ 関根利守 (2008) レーザー干渉計での衝撃圧縮過程とその解放過程の計測. *第55回応用物理学関連講演会*, 2008.3.29. 日大理工船橋キャンパス.
- ⑫ 関根利守ら (2007) 火星表面物質の衝撃脱水と火星の水. *48回高压討論会*. 2007.11.21 倉吉.
- ⑬ 関根利守ら (2007) 玄武岩のVISAR測定. *48回高压討論会*. 2007.11.21 倉吉.
- ⑭ 西岡文雄ら (2007) 安山岩を用いた衝撃実験: 残留磁化・ヒステリシス・異方性の変化. *地球電磁気・地球惑星圏学会第*

122回講演会. 2007.9.29. 名古屋大学.

- ⑮ T. Sekine (2007) Shock dehydration of hydrous sulfates and its implications for water recycle on Mars surface. *40th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 2007.7.25. Sagamihara.
- ⑯ T. Sekine et al. (2007) Shock compression of magnesium silicon nitride. *APS Topical Conf. Shock Comp. Cond. Mat.* 2007.6.26. Hawaii.
- ⑰ T. Sekine et al. (2006) Shocked magnesite and decomposition on decompression. *2006 Fall AGU Meeting*, 2006.12.13. San Francisco.
- ⑱ 関根利守ら (2006) サイオナイト (酸化ケイ素) が示す隕石中の衝撃変成. *47回高压討論会*. 2006.11.10. 熊本
- ⑲ 西尾峰之ら (2006) 衝撃超高压下における金属鉄の粒成長と軽元素の移動. *47回高压討論会*. 2006.11.9. 熊本.
- ⑳ T. Sekine (2006) Effects of projectile shape on the formation of impact crater. *39th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 2006.8.7. Sagamihara.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 1件)
名称: 衝撃波誘起蛍光体とそれを用いた衝撃波センサー並びに衝撃波計測装置
発明者: 小林敬道、関根利守
権利者: (独)物質・材料研究機構
種類: 特願
番号: 2009-059148
出願年月日: 2009年3月12日
国内外の別: 国内
- 取得状況 (計 1件)
名称: アミノ酸合成方法
発明者: 中沢弘基、関根利守、中沢 暁、掛川 武、古川善博、大原祥平
権利者: (独)物質・材料研究機構
種類: 特許
番号: 第4288332号
取得年月日: 2009年4月10日
国内外の別: 国内

[その他]

- 「かがくナビ」の科学ニュース2009年2月16日に取り上げられた。
- NPG Nature Asia-Pacific Web contents 2009年2月特集記事で関根利守が紹介された。
<http://www.natureasia.com/japan/tokushu/detail.php?id=157>
- Scientific American 2008年12月7日 Newsなどの記事に取り上げられた。

○ NHK 総合TV “NHK スペシャル” 番組
2008年10月13日放送分にNIMSでの衝撃実験
が放送された。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関根 利守 (SEKINE TOSHIMORI)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ
物質ラボ・主席研究員
研究者番号：70343829

(2) 研究分担者

留岡 和重 (TOMEOKA KAZUSHIGE)
神戸大学・大学院自然科学研究科・教
授)

研究者番号：00201658

中村 智樹 (NAKAMURA TOMOKI)
九州大学・大学院理学府・准教授

研究者番号：20260721

山口 亮 (YAMAGUCHI AKIRA)

国立極地研究所・助教

研究者番号：70321560

小林 敬道 (KOBAYASHI TAKAMICHI)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ
物質ラボ・主幹研究員

研究者番号：50343835

(3) 連携研究者

なし