

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340165

研究課題名(和文) 圧力制御システムを用いたコンドリュールの凝縮反応に関する実験的研究

研究課題名(英文) An experimental study on the condensation reaction during the chondrule formation using the pressure controlled system

研究代表者

今栄 直也 (Imae, Naoya)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：60271037

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：コンドリュール再現装置を開発した。装置に水素ガスを導入し、0.1から数千Paの任意の圧力で制御する。実験出発物質にはコンドライト組成の粉末焼結ペレットを用いた。還元雰囲気ではI型コンドリュールに一致する斑状の珪酸塩鉱物(フォルステライトとエンスタタイト)が晶出した。また、100Paより低い制御圧では鉄成分の蒸発により、メタル粒子は欠損したが、全圧が高い(千Pa以上)とこのメタル組織は認められた。一般に、丸い小さなメタル粒子はコンドリュールに不均一に含まれ、実験で生成した組織はI型コンドリュールをよく再現する。

研究成果の概要(英文)：A furnace for chondrule reproduction was newly developed. Introducing hydrogen gas, the pressure is controlled to be in the order of 0.1-1000Pa. As starting materials of the experiments, the sintered pellets of the powder with the chondritic compositions were prepared. Mg-silicate minerals (forsterite and enstatite) crystallized under the reduced condition. The porphyritic textured forsterite and enstatite crystallized. The metal depleted textures were observed at lower pressures (less than 100Pa) due to the iron evaporation during the melting, but the metal droplets were observed at higher total pressure of (>1000Pa). Small kamacite droplets less than 10 micron m in size are heterogeneously included in natural type I chondrules. The run products would nearly reproduce the textures and compositions of the type I chondrules.

研究分野：岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：コンドリュール 原始太陽系星雲 再現実験 I型コンドリュール 還元雰囲気 蒸発 凝縮

1. 研究開始当初の背景

(1)コンドリュールの形成環境として周囲のガス雰囲気(酸素、ケイ素、鉄、水蒸気などのガス種)を考慮した。このことはこれまで実験的に十分に検討されていなかった。

(2)この目的を達成するために、中真空(0.1-1000Pa 程度)圧力制御システムを導入した。

2. 研究の目的

コンドリュールは大きさが 1mm 程度の主として珪酸塩融液からの冷却生成物で、始源隕石のコンドライトを構成する。太陽系形成期に太陽系広域で形成したと考えられているが、コンドリュール前駆物質を溶融させた熱源は解明されておらず、その成因は明らかでない。熱源としては、天体同士の衝突、太陽活動の活発化、星雲への塵の降り積もり時の衝撃加熱、星雲内部の放電現象、など諸説混在する。これは、46 億年前の太陽系形成期に生じた固有の現象であり太陽系が形成後の現在では、この現象が観測できないためである。また、この現象は太陽系形成の力学進化理論からも系外惑星系の観測からの理解は進んでいない。一般に隕石からはコンドリュールの動的な形成現象に関して知見を引き出すことは難しい。

この現象を解釈するには制御した系での再現実験が有効である。コンドリュールは 2 価の鉄に乏しい I 型と 2 価の鉄に富む II 型に大別される。これまでは II 型コンドリュールの再現実験が行われ、II 型コンドリュールはこれまで多くの研究者がその再現に成功している。今回新たに開発した実験装置を用いて特に I 型の再現実験に焦点をあてた。

3. 研究の方法

(1) 出発物質として、太陽系組成を有する Allende 隕石(CV3.2)、NWA1465 隕石(炭素質コンドライト)、およびコンドライト組成の粉末調合試薬(金属鉄、サンカルロスオリビン、タンザニア産エンスタタイト、三宅島産ノーサイト、アフガニスタン産ディオプサイド)の3種の粉末焼結体を用いた。前2者の隕石試料は、金属鉄に乏しく、3つ目の粉末調合試薬は、金属鉄に富む。粉末焼結体は、最高温度は950 °Cで1分加熱、270°C/h の速度で昇温・冷却とし、水素雰囲気下で作成した。

(2) コンドリュール再現実験のピーク温度は1200-1550°C、冷却速度は80-10000°C/h の範囲で、容器内には試料と直接接しないように固体バッファー(シリカあるいは金属鉄の粉末)を用いる場合と、用いない場合とで行った。用いた炉は、還元雰囲気用の大気圧以下に圧力制御可能な低圧炉で、全圧は1, 10, 100, 1200Paで行い、主に100Pa に設定した。実験容器は、上部に1mm 径の穴を開けたアルミナ容器内に、0.2mm 径のモリブデン(あるいは白金、イリジウム)ワイヤーで粉末焼結体を

吊るす。固体バッファーとしてシリカ粉末(あるいは金属鉄粉末)を用いる場合は、それを容器の底に置いた。容器内物質の蒸気圧は、最高温度の1450°C 付近で1Pa 程度である。アルミナ容器の外は水素ガスで全圧を約100Pa に制御すると、アルミナ容器内に水素ガスは流入し、容器内部も全圧は外部と同じになる。この時、熱化学計算によりピーク温度(1450°C)でシリカバッファー時の酸素分圧はIW-3.5で、鉄バッファーではIW-2、固体バッファーがない時は、IW-4と計算により求まる。

(3) 金属鉄に乏しい組成を出発物質とする実験で、これまでに計56回(シリカバッファー23回、メルトバッファー30回、鉄バッファー2回)、金属鉄を多く含む組成で、計23回(シリカバッファー11回、メルトバッファー10回、鉄バッファー2回)行った。実験生成物は、研磨片にして、エレクトロン・プローブ・マイクロ・アナライザー(JXA-8200)で組織観察と、主要構成鉱物、ガラス、およびバルクの分析を行った。

4. 研究成果

(1) Allende 隕石およびNWA1465 隕石の粉末焼結体を用いた実験において、ピーク温度が1450°C、冷却速度が100°C/h で、丸みのあるかんらん石(フォルステライト)をエンスタタイト斑晶が取り囲むポイキリティック組織を呈する I 型コンドリュールに類似する組成と組織を有する生成物を得た。このかんらん石は、”溶け残り鉱物”で、鉄に富むかんらん石が還元した組織を呈する”dusty olivine”およびフォルステライトの2種の溶け残りかんらん石が確認できた。これはコンドリュール組織にも共通している。この組織・組成は、シリカガス源がある実験で顕著で、I 型コンドリュールによく類似する。しかし、炭素質コンドライトの I 型コンドリュールには通常、多数の丸い数ミクロン径の金属鉄粒子をポイキリティックに含むが、実験生成物には多くない。全岩組成変化を求めたところ、鉄成分は大きく減少していた。試料保持に用いたモリブデンワイヤーへの鉄成分の吸収は、ワイヤー断面の分析から評価したところ、全岩組成変化に比べて、1桁小さい。したがって、鉄成分は金属鉄に還元することなく、蒸発していると考えられる。

(2) 調合試薬を用いた実験では、ピーク温度が1500°C 以上で、金属鉄が溶融し一塊になる傾向が認められた。1500°C未達の温度では、低溶融のため金属鉄は試料内部で均一に分布したが、試料表面では金属鉄は欠損が見られた。これは試料表面付近の金属鉄が蒸発したと考えられる。これらの組織は、いずれも天然のコンドリュール組織とは一致しない。

(3) 以上の実験結果を考慮すると、金属鉄を含む前駆物質よりも金属鉄に乏しい前駆物質が I 型コンドリュールを作った可能性がある。

(4) また、全圧を高く制御すると(1200Pa)、金属鉄(カマサイト)が析出する傾向が認められた。炭素質コンドライト中のI型コンドリュールに丸い金属粒子(主として10ミクロン以下の微小なカマサイト粒子)が不均一に産出する。一方、非平衡普通コンドライトには比較的少ない。この原因として、全圧の効果が考えられる。

これらの一連の実験結果に天然のコンドリュールの酸素同位体の特徴などを考慮してコンドリュールの成因を整合的に説明できるモデルを検討している。

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5件)

N. Imae, V. Debaille, Y. Akada, W. Debouge, S. Goderis, G. Hublet, T. Mikouchi, N. Van Roosbroek, A. Yamaguchi, H. Zekollari, P. Claeys, and H. Kojima, Report of the JARE-54 and BELARE 2012–2013 joint expedition to collect meteorites on the Nansen Ice field, Antarctica. *Antarctic Record* **59**, 38-72 (2015). 査読有り。

T. Noguchi, N. Ohashi, S. Tsujimoto, T. Mitsunari, J. P. Bradley, T. Nakamura, S. Toh, T. Stephan, and N. Iwata, N. Imae, Cometary dust in Antarctic ice and snow: Past and present chondritic porous micrometeorites preserved on the Earth's surface. *Earth and Planetary Science Letters* **410**, 1-11 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.11.012> 査読有り。

M. Kimura, J. A. Barrat, M. K. Weisberg, N. Imae, A. Yamaguchi, and H. Kojima, An ungrouped carbonaceous chondrite, Yamato-82094: Classification and characteristic features. *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 346-357 (2014). DOI: 10.1111/maps.12254 査読有り。

N. Imae, S. Taylor, and N. Iwata, Micrometeorite precursors: Clues from the mineralogy and petrology of their relict minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **100**, 116-157 (2013). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.09.052> 査読有り。

N. Imae, Cometary dust in Antarctic micrometeorites. *Proceedings the International Astronomical Union, Astrophysics from Antarctica (IAU Symposium, 288)* 123-129. Edited by T. Montmerie and P. Benvenuti. (2012) Cambridge University Press (Cambridge, U. K.; New York, USA; Melbourne, Australia). DOI: 10.

1017/S1743921312016766 査読無し。

[学会発表](計10件)

今栄直也、磯部博志、I型コンドリュールの再現実験、日本地球惑星科学連合大会、2015年5月24日~28日、幕張メッセ、千葉。

N. Imae and H. Isobe, An experimental study of chondrule formation interacting with the surrounding gas under the nebular conditions of reducing and 10-3 bars, The Fifth Symposium on Polar Science (Thirty-seventh Symposium on Antarctic Meteorites), 2-5 December, 2014, NINJAL, Tokyo.

今栄直也、磯部博志、原始太陽系雰囲気におけるコンドリュールの再現実験、日本鉱物科学学会年会、2014年9月17日~19日、熊本大学、熊本。

今栄直也、磯部博志、新たに開発した手法によるコンドリュールメルトへのシリカに富むガスの凝縮実験：急速な低Ca輝石の析出 Condensation experiments of Si-rich gas into the chondrule melt for rapid low-Ca pyroxene formation using a new furnace 日本地球惑星科学連合大会、2014年4月28日~5月2日、パシフィコ横浜、神奈川。

N. Imae and H. Isobe, An experimental study by the condensation of Si-rich gas into the chondrule melt under the nebular pressures controlling gas conditions, 4th Symposium on Polar Science (36th Symposium on Antarctic Meteorites), 12-15 November, 2013, NINJAL, Tokyo.

今栄直也、磯部博志、準閉鎖系下での標準的原始太陽系星雲圧におけるコンドリュールの再現実験、日本鉱物科学学会年会、2013年9月11日~13日、筑波大学、茨城。

M. Kimura, A. Yamaguchi, N. Imae, T. Mikouchi, and M. K. Weisberg, Abundant anomalous chondrules in an ungrouped carbonaceous chondrite, Y-82094, 76th Annual Meteoritical Society Meeting, 29 July – 2 August, 2013, Edmonton, Canada.

T. Noguchi, N. Ohashi, S. Tsujimoto, J. P. Bradley, T. Nakamura, S. Toh, T. Stephan, N. Iwata, and N. Imae, Delivery of Typical Cometary Dust to the Surface of the Earth, 44th Lunar and Planetary Science Conference, 18-22 March 2013, Houston, USA.

三宅亮, 大井修吾, 今栄直也、微隕石中に見出した二種類の空間群 Pbca 斜方輝石、日本鉱物科学学会年会、2012年9月19日~21日、京都大学、京都。

今栄直也、南極微隕石中の彗星塵、日本鉱物科学学会年会、2012年9月19日~21日、京都大学、京都。

〔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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

今栄 直也 (IMAE, Naoya)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号：60271037

(2)研究分担者

磯部 博志 (ISOBE, Hiroshi)
熊本大学・自然科学研究科・教授
研究者番号：80311869

山口 亮 (YAMAGUCHI, Akira)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号：70321560

(3)連携研究者

()

研究者番号：