

平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

◆ 記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字	NAGAHARA HIROKO					
①研究代表者氏名	永原 裕子		②所属研究機関・部局・職	東京大学・大学院理学系研究科・教授		
③研究課題名	和文	星の進化とシリケートダスト進化の関係の実験的解明				
	英文	Experimental study on the relationship between evolution of stars and silicate dusts				
④研究経費 18年度以降は内約額 金額単位：千円	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	総合計
	45,700	18,400	10,800	3,600	2,800	81,300
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在						
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
永原 裕子	東京大学・大学院理学系研究科・教授	惑星科学	凝縮実験装置の設計・開発、凝縮実験の遂行、結果の解析、理論的考察、化学進化モデルの検討、まとめ 理論的考察、化学進化モデルの検討			
小澤 一仁	東京大学・大学院理学系研究科・教授	岩石学				
橋 省吾	東京大学・大学院理学系研究科・助手	惑星科学				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）						
<p>宇宙における主要な固体物質は Mg-Si シリケートと金属あるいは酸化物、あるいは硫化物状態の鉄化合物である。赤外線観測によると、末期の星の周辺部において結晶質および非晶質シリケートが見いだされる一方、星間空間では非晶質のみである。若い星の円盤では非晶質のものがほとんどであるが、惑星系が形成されつつある段階まで進化した円盤では結晶質シリケートの存在が示唆されている。シリケートの種類と温度、結晶質/非晶質の比は星ごとに異なるが、星の進化とシリケートダストの種類・結晶度・温度の間に関係があることが予想されている。このことは逆に、シリケートの種類・サイズ・温度の関係がガス組成・密度・ガスとダストの温度差の関数として求まっていれば、観測により決定される物質種は、それらが形成された物理化学条件、さらに星の進化段階あるいはその物理化学環境の推定が可能となることを表している。</p> <p>申請者は低圧条件におけるガスと固体の相変化に関する実験的研究を一貫しておこなってきた。特に Mg-Si-Fe-O 系の凝縮実験により、フォルステライト (Mg/Si=2)、エンスタタイト (Mg/Si=1)、非晶質シリケートを同一ガスから凝縮させることに世界で初めて成功した (Nagahara et al., 1989; Nature)。しかし、それらの形成条件に関する系統的研究は殆どなされてこなかった。</p> <p>本研究では、上記パラメータをコントロール可能な凝縮装置を開発し、結晶質/非晶質シリケートの凝縮条件を明らかにすることを目的とする。具体的には、ガス温度、フラックス、ガスの冷却速度をパラメータとし、フォルステライトとエンスタタイトの凝縮速度、粒子サイズ、結晶質粒子と非晶質粒子の形成条件の違いを明らかにすることをめざす。この研究により、観測によるシリケートの物質種、サイズ、温度情報から、星の周りにおけるガスの冷却速度（膨張速度）、フラックス、密度などの物理環境を推定することが可能となることが期待される。</p>						

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

平成16年度 多成分系のケイ酸塩の凝縮を可能とする分子線エピタキシー型実験装置の開発をおこなった（図1）。既存の真空チャンパーに、ガスソースとなるクヌッセンセル3本の取り付けを可能とし、酸素ガス導入システムの設置、基板加熱のための赤外線導入加熱システムの設置を主要な構造としてとりつけた。クヌッセンセルの仕様に関する検討もおこなった。一方、逆反応のおこりえない完全な真空蒸発実験を可能とする、簡易型実験装置の開発をおこなった。容器は石英管、赤外線集中加熱炉による加熱、大型のターボポンプによる排気システム、という構成である。本装置の導入により単純系における予察の実験が可能となった。また、実験生成物はFE-SEMによる観察、EDSによる分析が必須であることが下記の予備実験により明らかになったため、当初計画を変更し、EDS付きFE-SEMの導入をおこなった。

新型実験装置の開発と並行し、既存の蒸発装置に改良を加え、予察的な凝縮実験をおこなった。実験は宇宙においてMgケイ酸塩とともに最も普遍的に存在すると想定される金属鉄を用いた。金属鉄板をソースとし、加熱により発生したガスを装置低温部でMo基板上に凝縮させた。この実験では、特に星周環境に対応するような高過飽和度での凝縮が実現し、400-1020°Cの広い温度範囲で金属鉄結晶が凝縮することがわかった。凝縮および入射フラックスの比から凝縮係数が求まり、高温（1020°C）では1、それ以下で0.7-0.8、より低温で1、という興味深い結果を得た。これは温度により結晶表面のラフネスが変化したためと考えられ、高温では温度により表面がラフであり、低温では入射フラックスが過剰であるため、カイネティックラフニングがおこっており、中間温度ではスムーズ表面であるためと推定される。この結果、宇宙における凝縮では温度やガス密度の関数として凝縮係数を表す必要が示された。

平成17年度 珪酸塩の高温分子線エピタキシー成長に適した蒸発源の検討をおこない、小スペースで独立に蒸発を制御し、酸化蒸気を十分に発生させられる蒸発源として、小型の電子銃蒸発源を導入した。また、蒸発ガスの温度の制御を精密におこなうことを目的とした小型金属抵抗加熱炉の設計もおこなった。この小型炉は電子銃蒸発源と目的に応じて使い分けられるものである。四重極質量分析計、フラックスモニターも導入し、基盤へ到達するガスの組成やフラックスの定量測定が可能な実験システムを構築した。装置完成後は、電子銃による珪酸塩物質の凝縮実験を開始した。装置のキャリブレーションを兼ね、SiO₂を試料とする実験をおこない、tridymiteの凝縮物（図2）を得ることに成功し、Mg-Si-O系での実験への拡張が可能な段階まで到達した。

分子線エピタキシー法でのMg-Si-O系の実験の前段階として、既存の装置を用いてのフォルステライトの凝縮実験もおこない、広い条件においてフォルステライト（図3）が得られ、さらに低温では非晶質珪酸塩の凝縮物が得られることも明らかにした。また、既存装置を用いた金属鉄の凝縮実験の手法の改良をおこない、若い星の周囲の円盤条件に近いような低過飽和度での凝縮実験をおこなうことに成功し、FE-SEMによる結晶成長に伴うステップの観察に成功した（図4）。この結果、凝縮物が実験中の再結晶などによるのではなく、気相から直接凝縮したものであることが確実となった。これまでの結果から、低過飽和度では、沿面成長が支配的で凝縮係数が1より小さく、前年度に得られた高過飽和度での付着成長とは成長様式が異なることが示唆され、凝縮の物理の包括的な理解に向けて大きな前進をすることができた。また、速度論パラメータを組み込んだ星周環境での凝縮挙動の定式化をおこない、上記の予察の実験から得られた凝縮係数を用いると、凝縮係数の違いがフォルステライトと金属鉄の粒子サイズやその分布に影響を与えることが明らかになり（図5）、凝縮係数の決定の重要性が改めて示された。



図1 作成した装置

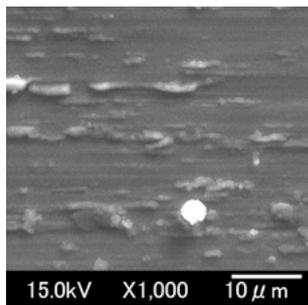


図2 凝縮したSiO₂

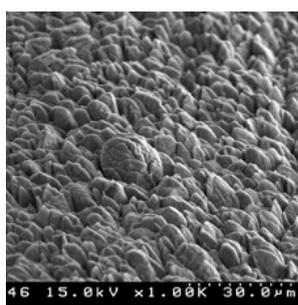


図3 凝縮したフォルステライト

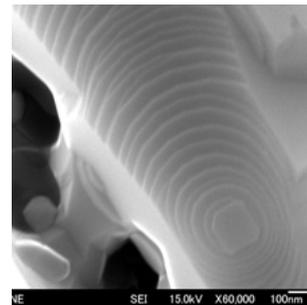


図4 凝縮した鉄表面の成長ステップ

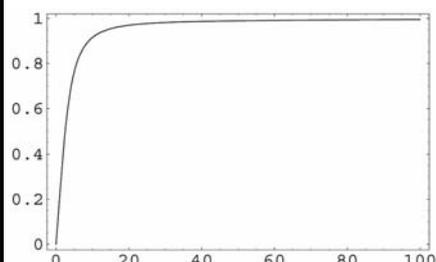


図5 温度一定の場合の過飽和度の関数としての凝縮係数

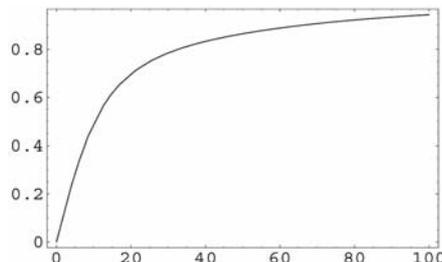


図6 同フォルステライト（蒸発係数から推定）
（鉄にくらべ、依存性の大きいことがわかる）

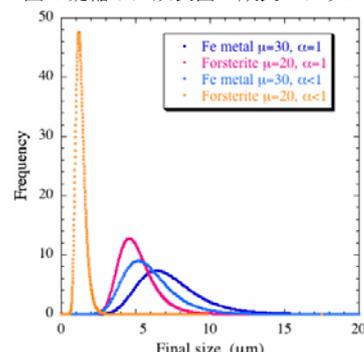


図5 凝縮係数のちがいによる粒子サイズ分布のちがい
（珪酸塩の場合、係数の違いが顕著となる）

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

本研究においては、ガスから珪酸塩物質の凝縮における凝縮係数（衝突する原子に対し、固体に取り込まれる原子の数の比）、結晶質 / 非晶質物質形成条件を実験的に求めることを第一の目標としている。この数字はゼロから1の間の何らかの値をとり、物質形成速度を決めるものである。粒子成長においては、この値が成長速度に対し直線的な関係にあり、すなわち粒子の成長がゼロから理論的に可能な最大までの間で何れも変わりうることを表している。したがって凝縮係数の決定は宇宙空間における物質形成において決定的に重要な役割を果たす。しかしながら、凝縮実験をおこなうことは、それ自体が技術的に大変困難であることと、かりにできたとしても条件のコントロールが困難で、係数を決定するという速度論的扱いに耐える試みは従来まったくなされていなかった。粒子成長を扱うモデルでは、係数を1とするのがほとんどの場合であり、きわめて例外的に、近年の蒸発実験における蒸発係数をそのまま凝縮実験に適用するということが行なわれている。ちなみにこの蒸発実験結果は筆者らのグループのほか、国内外の少数のグループのみが提供してきたものである。ところがわれわれの蒸発実験の結果は、この値は定数ではなく、温度および対象とする元素を含むガスの分圧の関数であることを示しており、分圧をコントロールした実験で決定するしかないものである。さらに、関数は分圧にたいし非線形な形をしており、蒸発条件における値を凝縮条件にまで拡張することはできない。したがって、凝縮条件において、分圧（ガスフラックス）をコントロールした実験が、宇宙における物質形成のモデル化に決定的な役割を果たす。この考え自体が、従来の当該分野の研究者には認識されていなかったことであり、きわめて重要な内容である。

他方、本研究の背景として、最近10年間における赤外線観測による様々な星周辺の珪酸塩ダスト存在の発見は、フォルステライト、エンスタタイトというMg珪酸塩および非晶質珪酸塩のいずれか、あるいは2相ないし3相の共存を示している。熱力学的平衡論からは理解のできないそれらの共存あるいは単独の存在は、非平衡状態における物質形成を示しており、どのような条件がそれを支配しているのかは、星の進化すなわち温度-圧力-時間変化と関係しているはずである。

本研究遂行のなかで、金属鉄の凝縮係数は温度と分圧（すなわち過飽和度）の関数であることが初めて実験的に示され、その結果を用いて、星周環境における鉄粒子成長をモデル化することに成功した。しかし珪酸塩は化合物であり、温度・分圧依存性は鉄よりはるかに高いことが予想され、珪酸塩について同様の関数を決定することの重要性がますます高まった。

さらに、フォルステライトから発生するガスから、きわめて広い温度、過飽和度条件において結晶質フォルステライトが高い成長速度で凝縮しうることが明らかになったが、このことは、温度変化の他無スケールの長い若い星の周りだけでなく、温度・圧力変化のタイムスケールが小さい晩期星周においてさえ、結晶質フォルステライトが凝縮する可能性を示している。観測において結晶質粒子の割合が低いことは、結晶質粒子の存在を否定するものではなく、むしろ合体等により、より大きな粒子に成長していることを示していると考えられる。今後の観測と理論を結びつける上で、重要な知見を得るに至っており、星の進化と珪酸塩粒子の進化の関係を考察する手がかりが得られつつある。

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

[公表論文]

- Ozawa, K. (2004) Thermal history of the Horoman peridotite complex: a record of thermal perturbation in the lithospheric mantle *J. Petrol.*, **45**, 253-273.
- Nagahara, H., Ozawa, K. and Tomomura, S. (2005) Kinetic condensation of silicate melt and its role in the chemical diversity of chondrules. in *Chondrites and the Protplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, ASP Conf. Ser., **341**, 456-468.
- Hua X., Huss G. R., Tachibana S. and Sharp T. G. (2005) Oxygen, Si, and Mn-Cr isotopes of fayalite in the oxidized Kaba CV3 chondrite: Constraints for its formation history. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 1333-1348.
- Nakamoto T., Kita N. T. and Tachibana S. (2005) Chondrule age distribution and rate of heating events for chondrule formation. *Antarc. Met. Res.* **18**, 253-272.
- Tachibana S. and Huss G. R. (2005) Sulfur isotope composition of putative primary troilite in chondrules from Bishunpur and Semarkona. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 3074-3097.
- Nakamoto T., Hayashi M. R., Kita N. T. and Tachibana S. (2005) Chondrule-forming shock waves in the solar nebula by X-ray flares. in *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 883-892.
- Davis, A., Alexander, C. M. O'D., Nagahara, H., and Richter, F. (2005): Evaporation and condensation during CAI and chondrule formation. In *Chondrites and the Protoplanetary Disk*. ASP Conf. Ser., 341, 432-455.
- Kita N. T., Huss G. R., Tachibana S., Amelin Y., Nyquist L. E. and Hutcheon I. D. (2005) Constraints on the origin of chondrules and CAIs from short-lived and long-lived radionuclides. in *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 558-587.
- Lauretta, D. S., Nagahara, H. and Alexander, C. M. O'D. (2006): Petrology of ferromagnesian silicate chondrules. In *Meteorites and the Early Solar System II*. Univ. Arizona Press (in press).
- Tachibana S. (2006) Chondrule formation and the evolution of the early solar system. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, in press.
- Shimura, R. and Ozawa, K. (2006) Mechanism of crystal redistribution in a sheet-like magma body: constraints from the Nosappumisaki and other shoshonite intrusions in the Nemuro Peninsula, Northern Japan. *J. Petrol.* in press.
- Sogawa H., Koike C., Chihara H., Suto H., Tachibana S., Tsuchiyama A. and Kozasa T. (2006) Infrared reflection spectra of forsterite crystal. *Astron. Astrophys.* in press.
- Tachibana S., Huss G. R., Kita N. T., Shimoda G. and Morishita Y. (2006) ⁶⁰Fe in chondrites: Debris from a nearby supernova in the early solar system? *Astrophys. J. Letters* **639**, L87-L90.
- Yamada, M., Tachibana, S., Nagahara, H. and Ozawa, K. (2006) Anisotropy of Mg isotopic fractionation during evaporation and Mg self-diffusion of forsterite in vacuum. *Planetary and Space Science* (in press)

[国際学会における発表]

- Nagahara, H., and Ozawa, K. : Variation of the Condensation Path of Supercooled Silicate Melt. *The 35th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2004.3)
- Tatsumi, K., Nagahara, H., Ozawa, K. and Tachibana, S. : Condensation kinetics of metallic iron: an experimental study. *The 35th Lunar and Planetary Science Conference*, (Houston, 2004.3)
- Tomomura, S., Nagahara, H., Tachibana, S., and Kita, N. T. : Relationship between bulk chemical composition and formation age of chondrules in Bishunpur and Krymka. *The 35th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2004.3)
- Yamada, M., Tachibana, S., Nagahara, H. and Ozawa, K. : Magnesium isotopic fractionation of forsterite during evaporatio from different crystallographic surfaces. *The 35th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2004.3)
- Kurahashi, E., Kita, N. T., Nagahara, H. and Morishita, Y. : Contemporaneous Formation of Chondrules in the ²⁶Al-²⁶Mg System for Ordinary and CO Chondrites. *The 35th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2004.3)
- Nagahara, H. and Ozawa, K. : Surface reaction kinetics of forsterite in vacuum. *The Tenth International Symposium on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (Frankfurt, 2004.4)
- Yamada, M., Tachibana, S., Nagahara, H. and Ozawa, K. : Anisotropy of Mg isotopic fractionation for evaporation of forsterite in vacuum. *The Tenth International Symposium on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (Frankfurt, 2004.4)
- Nakamoto, T., Hayashi, M. R., Kita, N. T. and Tachibana, S. : X-ray flare induced shock waves and chondrule formation in upper solar nebula --- A new model for chondrule formation --- *Modeling the Structure, Chemistry and Appearance of Protoplanetary Disks* (Bayern, 2004.4)
- Nagahara, H. and Ozawa, K. : Kinetic condensation of gas for the diversity of ferromagnesian chondrules. *Goldschmidt Geochemistry Conference* (Copenhagen, 2004.6)
- Kurahashi, E., Kita, N. T., Nagahara, H. and Morishita, Y. : ²⁶Al ages of ferromagnesian chondrules of CO3.0 Yamato-81020. *Goldschmidt Geochemistry Conference* (Copenhagen, 2004.6)

⑨研究成果の発表状況(続き) (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

Tachibana, S., Hirai, T., Goto, K., Yamamoto, S., Kirschvink, J. L., Kopp, R. E., Ohkouchi, N., Isozaki, Y., Tada, R., Tajika, E., Kita, N. T. and Morishita, Y.: Mass-independent isotopic fractionation of sulfur from sulfides in the Huronian Supergroup, Canada, Oxygen. *Oxygen in the Terrestrial Planets* (Santa Fe, 2004.7)

Nagahara, H. and Ozawa, K.: Kinetics of evaporation-condensation in a melt-solid system and its role on the chemical composition and evolution of chondrules. *Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk* (Hawaii, 2004.11)

Kurahashi, E., Kita, N. T., Nagahara, H. and Morishita, Y.: Contemporaneous chondrule formation between ordinary and carbonaceous chondrites *Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk* (Hawaii, 2004.11)

Tatsumi, K., Nagahara, H., Ozawa, K. and Tachibana, S.: Experimental study of iron metal condensation. *Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk* (Hawaii, 2004.11)

Tachibana, S.: Incongruent evaporation of minerals: Formation of porous or compact layer. *Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk* (Hawaii, 2004.11)

Kita, N. T., Huss, G. R., Tachibana, S., Amelin, Y., Zinner, E., Nyquist, L. E. and Hutcheon, I. D.: Constraints on the origin of chondrules and CAIs from short-lived and long-lived radionuclides. *Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk* (Hawaii, 2004.11)

Odashima, N. and Ozawa, K.: Spatial variation of morphology and distribution of spinel in the Horoman complex and its implication in mantle processes, *International Seminar on Mantle Processes* (Sapporo, 2004.11)

Hirai, T., Goto, K., Tada, R., Tajika, E., Isozaki, Y., Yamamoto, S., Tachibana, S. and Kirschvink, J. L.: High manganese concentration in the sedimentary record of the Gowganda formation, the Huronian supergroup. *Geological Society of America Annual Meeting 2004* (Denver, 2004.10)

Tachibana, S., Hirai, T., Goto, K., Yamamoto, S., Isozaki, Y., Tada, R., Tajika, E., Shimoda, H., Kita, N. T. and Morishita, Y.: Sulfur isotopic compositions of sulfides from the lower Huronian Supergroup, Ontario, Canada. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, (San Francisco, 2004. 12)

Yamada, M., Tachibana, S., Nagahara, H. and Ozawa, K.: Anisotropy of Mg isotopic fractionation and Mg lattice diffusion during evaporation of forsterite *European Geosciences Union General Assembly*, (Vienna, 2005.4)

Kita, N. T., Tomomura, S., Tachibana, S., Nagahara, H., Mostefaoui, S., Morishita, Y. and Valley, J. W.: Correlation between aluminum-26 ages and bulk Si/Mg ratios for chondrules from LL3.0-3.1 chondrites. *The 36th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2005.3)

Tachibana, S., Huss, G. R., Kita, N. T., Shimoda, H. and Morishita, Y.: The abundances of iron-60 in pyroxene chondrules from unequilibrated ordinary chondrites. *The 36th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2005.3)

Nakamoto, T., Hayashi, M. R., Kita, N. T. and Tachibana, S.: Generation of chondrule forming shock waves in solar nebula by X-ray flares. *The 36th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2005.3)

Suzuki, A., Yaduda, A., and Ozawa, K.: Cr-Al Diffusion in Chromite Spinel at High Pressure, *American Geophysical Union, Fall Meeting*, (San Francisco, 2005.11)

Nagahara, H., Ozawa, K., Ikeda, Y. and Tachibana, S.: Condensation of forsterite and metallic iron around evolved and young stars. *The 37th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2006.3)

Ogawa, R., Nagahara, H., Ozawa, K. and Tachibana, S.: Experimental Condensation of Crystalline Magnesium-rich Silicates. *The 37th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2006.3)

Tachibana, S., Nagahara, H. and Mizuno K.: Constraints on cooling rates of chondrules from metal-troilite assemblages. *The 37th Lunar and Planetary Science Conference* (Houston, 2006.3)

[国内学会における発表]

永原 裕子: Kinetic condensation of supersaturated solar nebula gas and its relevance to the variation of chondrule compositions. *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

友村 晋, 永原 裕子, 橘 省吾, 木多 紀子: The diversity of bulk chemical compositions of chondrules from least equilibrated ordinary chondrites. *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

小川 理絵, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橘 省吾: Experimental condensation of forsterite. *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会*, (幕張, 2004.5)

達見 圭介, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橘 省吾: Condensation kinetics of metallic iron: an experimental study. *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

中川 要, 永原 裕子, 小澤一仁, 橘 省吾, 安田 敦: Experimental determination of AlAl-MgSi interdiffusion in orthopyroxene *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

倉橋 映里香, 木多 紀子, 永原 裕子, 森下 祐一: Yamato-81020 CO3.0 コンドライト中のFeMgコンドリュールの²⁶Al年代測定 *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会*, (幕張, 2004.5)

中本 泰史, 林 満, 木多 紀子, 橘 省吾: X線フレアによる衝撃波生成とコンドリュール形成 *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

⑨研究成果の発表状況(続き) (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

田近 英一, 多田 隆治, 磯崎 行雄, Kirschvink, J. L., 浜野 洋三, 永原 裕子, 大河内 直彦, 橋 省吾, 山本 信治, 後藤 和久, 平井 建丸: 原生代初期の地球システム変動 *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

後藤 和久, 橋 省吾, 大河内 直彦, 田近 英一, 多田 隆治, 山本 信治, 平井 建丸, 小川 奈々子, 磯崎 行雄, Kirschvink, J. L.: Carbon isotope study of the Espanola Formation, Huronian Supergroup, Canada. *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

大河内 直彦, 後藤 和久, 平井 建丸, 橋 省吾, 山本 信治, Kirschvink, J. L., 磯崎 行雄, 小川 奈々子, 多田 隆治, 田近 英一: 原生代初期における炭酸塩および有機炭素の炭素同位体比: 炭素同化経路と酸化還元境界層の変動 *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会* (幕張, 2004.5)

Nakamoto, T., Kita, N. T. and Tachibana, S.: Chondrule age distribution and degree of heating for chondrule formation. *第28回南極隕石シンポジウム* (国立極地研究所, 2004.6)

Tachibana, S., Huss, G. R., Miura, H. and Nakamoto, T.: Heating conditions of chondrule precursors during shock-wave heating: Constraints from sulfur isotopic compositions of chondrule troilites. *第28回南極隕石シンポジウム* (国立極地研究所, 2004.6)

永原 裕子 原始太陽系星雲における珪酸塩物質の進化: *日本惑星科学会 秋季講演会* (札幌, 2004.10)

小川 理絵, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橋 省吾: 結晶質フォーステライトの凝縮及び気相成長についての考察 *日本惑星科学会 秋季講演会* (札幌, 2004.10)

達見 圭介, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橋 省吾: 金属鉄の凝縮現象 *日本惑星科学会 秋季講演会* (札幌, 2004.10)

倉橋 映里香, 木多 紀子, 永原 裕子, 森下 祐一 (2004)コンドリュール同時形成: 炭素質コンドライト中コンドリュールの²⁶Al年代測定 *日本惑星科学会 秋季講演会* (札幌, 2004.10)

田近 英一, 多田 隆治, 磯崎 行雄, 橋 省吾, 後藤 和久, 平井 建丸, 山本 信治, 大河内 直彦, Kirschvink, J. L.: Evolution of atmosphere and global glaciations on Earth. *日本惑星科学会 秋季講演会* (札幌, 2004.10)

橋 省吾: 固相-気相反応の速度論的解析と系外原始惑星系円盤化学進化 *研究会「太陽系外惑星の新展開」* (国立天文台, 2005.1)

永原 裕子, 小澤 一仁, 友村 晋: 珪酸塩メルト凝縮カインेटィクスとコンドリュール組成変化への適用 *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

橋 省吾, Gary R. Huss, 木多 紀子, 下田 玄, 森下 祐一: 初期太陽系における消滅核種 60-鉄の存在度: 太陽系誕生過程への制約 *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

橋 省吾, 平井 建丸, 後藤 和久, 山本 信治, 磯崎 行雄, 多田 隆治, 田近 英一, Kirschvink, J. L., 下田 玄, 木多 紀子, 森下 祐一: Sulfur isotopic compositions of sulfides from the Huronian Supergroup, Canada. *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

達見 圭介, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橋 省吾, 松本 尚子: Condensation coefficients of metallic iron determined through condensation experiments *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

山田 真保, 橋 省吾, 永原 裕子, 小澤 一仁: フォーステライトの真空蒸発におけるMg同位体分別係数およびMg拡散係数の異方性 *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

水野 恵子, 橋 省吾, 永原 裕子: Experimental study on behavior of Fe-S system during chondrule formation *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

鈴木 彩子・安田 敦・小澤一仁: クロマイトスピネル中の Cr-Al の拡散 *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

小田島 庸浩・小澤 一仁: 上部マントル変形指標としての Cr-Al スピネル *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会* (幕張, 2005.5)

小田島 庸浩・小澤 一仁: 上部マントル変形指標としての Cr-Al スピネル: 幌満岩体における温度圧力履歴と変形のタイミング *日本地質学会 2005 年会* (京都, 2005.9)

Tatsumi, K., Tachibana, S., Nagahara, H., Ozawa K. and Matsumoto N.: Experimental study on growth kinetics of metallic iron in vacuum. *第29回南極隕石シンポジウム* (国立極地研究所, 2005.6)

松本 尚子, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橋 省吾, 山田 真保: フォーステライト蒸発速度の異方性 *日本鉱物学会 2005 年度年会* (松山, 2005.9)

池田 陽平, 橋 省吾, 永原 裕子: 真空中での金属鉄の凝縮実験 *日本鉱物学会 2005 年度年会* (松山, 2005.9)

鈴木 彩子・安田 敦・小澤一仁: クロマイトスピネル中の Cr と Al の拡散係数の温度・圧力依存性 *日本岩石鉱物鉱床学会 2005 年学術講演会* (松山, 2005.9)

小川 理絵, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橋 省吾: 実験による気相からのフォーステライト凝縮 *日本惑星科学会 秋季講演会* (会津若松, 2005.9)

倉橋 映里香, 木多 紀子, 永原 裕子, 森下 祐一: コンドリュール形成: 普通コンドライトおよび炭素質コンドライトにおける形成環境の相違 *日本惑星科学会 秋季講演会* (会津若松, 2005.9)

Tachibana, S., Huss, G. R., Kita, N. T., Shimoda, H. and Morishita, Y.: The abundance of live ⁶⁰Fe in the early solar system. *OMEG05* (東京, 2005.11)