

## 日本鉱物科学会賞

平成 24 年度日本鉱物科学会賞第 9 回受賞者

永原裕子 会員 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)



1952年2月生まれ(本籍東京都)。1974年3月早稲田大学理工学部資源工学科卒業。1976年3月早稲田大学理工学研究科資源工学専攻修士課程修了。1980年3月東京大学大学院理学系研究科地質学専攻修士課程修了。1983年3月東京大学大学院理学系研究科地質学専攻博士課程修了(理学博士)。1983年4月日本学術振興会奨励研究員。1984年5月東京大学大学院理学系研究科助手。1991年3月-1992年2月カーネギー地球物理研究所客員研究員。1992年12月東京大学大学院理学系研究科助教授。2001年7月東京大学大学院理学系研究科教授。

受賞題目:「原始惑星系円盤の物質進化に関する研究」

### 受賞理由

永原裕子会員は、一貫して原始惑星系円盤の物質進化について研究を進め、重要な成果を多くあげてきた。その研究は、(1) 隕石の研究、(2) 物理化学にもとづく初期太陽系星雲における化学分化過程の研究、(3) 太陽系原材料物質としての晩期星周における固体物質形成進化に関する研究、(4) 地球・惑星形成過程に関する研究の4つに分けることができる。(1)は、隕石の物質科学的情報からその形成・進化にかかわる物理・化学情報を抽出する研究、(2)と(3)は、真空実験による物質の蒸発、凝縮の反応カINETIクスとそれを用いた元素・同位体分別過程のモデル構築とより一般的な初期惑星系形成過程の物理と化学の結合にかかわる研究、(4)は、惑星形成初期過程に制約を課す研究である。永原会員は、これらを統合して原始惑星系円盤やそこにおける惑星の化学進化の理解を深める上で大きな貢献を果たした。

永原会員が世界に先駆けて行った普通隕石に含まれるコンドリュールや金属鉄の岩石学的研究は、それ以降現在までに多くの研究者によってなされた膨大な研究の礎となっている。また普通隕石のコンドリュールとマトリクスの成因的關係を世界に先駆けて発見してきた。これらの研究では、天然物質の観察と並行して非平衡蒸発実験を行い、実験結果と天然の観察を比較して成因を探るアプローチを取ることで、断片的な隕石の情報から多くの有意義な知見を抽出することに成功した。その成因解明が惑星科学の第一級の課題の一つであるコンドリュールに関する研究では、コンドリュールが太陽系における二次的生成物であることを初めて示した。また、コンドリュール形成が初期太陽系進化の~200万年に渡っていたことを初めて示し、一部のコンドリュールは前駆物質の蒸発により作られたガスからメルトが直接凝縮したことを明らかにした。さらに最近では、コンドリュールの前駆物質と形成環境で酸素同位体組成が変化し、酸素同位体進化の時間は円盤進化の200-300万年に相当することを明らかにした。始原的コンドリュートのマトリクスについて、初期太陽系星雲における低温の反応生成物が非平衡状態で集合したものがマトリクスであることを初めて示した。その他、始原的非コンドリュイト隕石であるロードナイトの岩石学的研究から、重量の小さい微惑星の部分融解においてはメルト分離が容易におこらず、地球マントルの部分融解とは異なる岩石が形成されることを明らかにした。

永原会員はその後、隕石から初期太陽系史を推定するという多くの実証的な研究と異なる研究スタイルを開拓した。それは、初期太陽系の物理進化と化学進化を統合させるために、鉱物やケイ酸塩メルトが経験する相変化速度を実験的に決定し、化学進化をモデルとして記述するという方法である。これのために、主要鉱物の凝縮・蒸発係数の決定とそのカINETIクスを実験的に明らかにした。ガスと凝縮物の相平衡関係や熱力学的性質に注目した初期の実験に引き続き、真空加熱実験が本質的に非平衡であることを利用し、主要鉱物やメルトの蒸発・凝縮の反応速度パラメータの推定や反応過程のカINETIクスの解明を行った。真空加熱実験装置を自作し、かんらん石、金属鉄、エンスタタイト、コ

ランダム等、主要鉱物についての実験をおこなった。さらに、フォルステライトとガスの反応によるエンスタタイト形成実験やコランダムとガスの反応によるスピネル形成実験も行い、ガス-凝縮相間の反応過程の理解を深めた。これらに加えて、蒸発に伴う同位体分別係数の決定とその物理化学機構の解明も行った。これらの実験結果を用い、初期太陽系星雲過程を理解するための、化学分別・同位体分別モデルを構築した。モデルは冷却しつつあるガス中で固体粒子成長とガスとの化学反応、ガスと固体の分離や混合過程を取り込んでおり、これにより系の開放性の程度による化学分別を予測することが可能となった。特に、揮発性元素について化学分別と同位体分別がデカップルする新たな分別レジームが存在する事を初めて明らかにした。このモデルをコンドリュールやCAIに適用し、多様なパラメータ空間を網羅して検討することで、それらの成因を明らかにした。さらに最近では、これらの研究はより普遍的な原始惑星系円盤物理モデルに化学を組みこむモデルの開発に発展し、系外惑星系までを射程距離にしている。

永原会員は、蒸発・凝縮における鉱物の異方性がその物理条件を反映することを明らかにしたことから、宇宙鉱物学における新しい分野の開拓にもつながった。指導学生により、フォルステライト蒸発の異方性が赤外線吸収スペクトルのちがいに交換され、天文観測から物理場の推定を可能にするという天文学に新しい領域を拓くにいった。

永原会員はこのほか、惑星形成初期過程における物理-化学進化について独創的な研究をおこなった。Hf-W系の消滅核種を用いて初期地球のマグマオーシャン進化における、付加成長速度、金属分離速度、酸化還元反応速に制約を与えた。さらに最近では、月の成因を明らかにするため、月の化学組成を従来にない方法で推定した。月に関してはアポロ時代の観測と、それをもとにして従来多くの研究がなされてきたが、マグマオーシャンの物理過程と化学反応のカップリングをきちんと解いていないため、コンセンサスがえられていなかった。永原会員は指導学生とともに、マグマオーシャンの直接情報を持つと考えられる月の高地に関する観測事実を制約として、マグマオーシャンのダイナミクスと結晶分別による地殻形成過程をモデル化し、月マグマオーシャンの化学組成は、地球の岩石成分より1.3倍程度鉄に富むと同時に難揮発性成分 (Al, Ca) に富むことを明らかにした。

以上のように永原会員は、原始惑星系円盤および原始惑星における物質進化の理解をめざした研究を行い、物質科学を基礎に太陽系惑星や隕石の物理化学情報と惑星系進化の理論物理モデルの橋渡しをする新しい分野を開拓しつつきており、鉱物科学会賞を授与されるに相応しく、ここに受賞候補者として推薦する。

### 主要論文

1. Evidence for the secondary origin of chondrules. H. Nagahara (1981) *Nature*, 292, 135-136.
2. Matrices of type 3 ordinary chondrites - primitive nebular records. H. Nagahara (1984) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 2581-2595.
3. Origin of iron-rich olivine in the matrices of type 3 ordinary chondrites: an experimental study. H. Nagahara and I. Kushiro (1987) *Earth Planet. Sci. Lett.* 85, 537-547.
4. Experimental vaporization and condensation of olivine solid solution. H. Nagahara, I. Kushiro, B.O. Mysen, and H. Mori (1988) *Nature* 331, 516-518.
5. Evaporation of forsterite in H<sub>2</sub> gas. H. Nagahara and K. Ozawa (1996) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1445-1459.
6. Isotopic fractionation as a probe of heating processes in the solar nebula. H. Nagahara, and K. Ozawa (2000) *Chem. Geol.*, 169, 45-68.
7. A short duration of chondrule formation in the solar nebula: evidence from <sup>26</sup>Al in Semarkona ferromagnesian chondrules. N. Kita, H. Nagahara, S. Togashi and Y. Morishita (2000) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 3913-3922.
8. Kinetic and equilibrium mass-dependent isotope fractionation laws in nature and their geochemical and cosmochemical significance. E.D. Young, A. Galy and H. Nagahara (2002) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 1095-1114.
9. Condensation of major element during chondrule formation. H. Nagahara, N. Kita, K. Ozawa and Y. Morishita (2008) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72, 1442-1465.
10. Kinetics of evaporation of forsterite in vacuum. K. Ozawa, H. Nagahara, M. Morioka, I. Hutcheon, T. Noguchi and H. Kagi (2012) *Am. Mineral.*, 97, 80-99.