原始惑星系円盤における物質進化

Evolution of condensed phases in a protoplanetary disk

永原 裕子(Hiroko NAGAHARA)*

A protoplanetary disk is a dynamic system where physical and chemical processes interplay in complex manners, and it is the place where planetesimals were formed that further collided to form planets. The chemical difference among planets and planetesimals along with volatility-controlled composition of chondrites deviated from CI chondrite clearly indicate condensation and accompanying chemical differentiation are crucial. In order to gain fundamental understanding of the origin of planets, which requires integration of physics and chemistry, we have carried out evaporation and condensation experiments that enable us to describe principle behaviors of gas-solid reaction kinetics involving multiple condensed phases. Those parameters are dependent on cooling time scale and total pressure of the disk, which evolve with time and space. It is shown that phases that are not expected in equilibrium condensation appear in a dynamically cooling system, that the phases and their grain sizes are strongly dependent on the cooling time scale, and that the grains become as large as mm in size only with the chemical process, which is much larger than that usually assumed in standard models. The condensed grains with iron mantle make coagulation easier resulting in effective growth of dusts to form planetesimals.

Keywords: Protoplanetary disk, Condensation, Evaporation, Forsterite, Fe-metal, Kinetics

I. はじめに

原始惑星系円盤は惑星形成の場である。その進化は惑星科学の中心的課題であるとともに、地球科学の原点でもある。原始惑星系円盤進化は物理と化学が複雑に相互作用し、時間とともに顕著な温度変化がおこり、物質の状態・化学組成なども大きく変化する。固体物質は原始太陽に集積するとともに乱流により外側にも輸送され、多様な物理環境を経験する。数 100 万年にわたる動的過程の結果、今日みる太陽系の原型が作られた。それらはさらに、惑星系進化後期のきわめて動的な衝突や移動を経験する。系外惑星が多数発見され、惑星形成過程の見直しの進む今、惑星と隕石という物質情報の存在する太陽系においてその進化をつかさどる過程、初期の物質分布についての総合的な理解がとりわけ重要となっている。本論においては、われわれのグループが 20 年にわたり進めてきた実験とカイネティクスモデル、それから導かれる物質の姿を紹介し、このような研究を今後どのように進めるべきかを論ずる。

II. 原始惑星系円盤初期進化の概念と物質科学

1. 原始惑星系円盤初期進化の概念

原始惑星系円盤は、分子雲の重力収縮によりスタートし、原始星の形成とその周囲に円盤の形成、回転円盤中におけるダストの濃集による微惑星形成、微惑星の衝突合体によるエンブリオ形成、エンブリオの衝突合体による惑星形成と円盤ガス散逸、という進化を遂げたと考えられている。惑星系が衝突合体により内側から順に形成されていったのか、重力不安定により最初に木星が形成され他の惑星形成過程がその影響を大きく受けたかは現在大きな議論の焦点であり、明らかではない。形成順がいずれにせよ、原始惑星系円盤進化を担う本質は、周囲からのガスの降着と、円盤の作動回転とに起因する粘性、それによる物質(ガスおよびダスト)の中心星への落下と、その結果である角運動量の円盤外側への輸送による円盤の薄化と広がりである。若い星の回りの観測とよく合致すると広く受け入れられているアルファ粘性円盤モデル(Shakura and

doi: 10.2465/gkk.140113

(平成 26 年 1 月 13 日受付, 平成 26 年 1 月 20 日受理, 担当編集委員: 赤坂正秀)

* 東京大学大学院理学系研究科, 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

* Department of Earth and Planetary Sciences, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan
E-mail: hiroko@eps.s.u-tokyo.ac.jp

Sunyaev, 1973; Lynden-Bell and Pringle, 1974)では、希薄な円盤の分子粘性は小さく、乱流が円盤全体の粘性を担っていると考えられており(Kenyon *et al.*, 1988)、乱流の原因としては、磁気回転不安定がもっとも可能性があると言われている(Balbus and Hawley, 1991; Gammie, 1996)。

ガスは基本的には原始太陽に落下するため、円盤中に含まれる小さなダストもガスとともに運動し、すなわち大部分は太陽に落下し、一部は乱流拡散により円盤外側に輸送されることになる(Fig. 1)。ダストが太陽に落下してしまい、惑星の原材料が円盤から消滅してしまうという問題は、ダスト落下問題として、惑星科学における30年来の重大問題の一つとなっている。しかし、太陽系のみならず、最近の系外惑星観測によれば、太陽ないしそれより小さいM型星の周囲には半分程度の確率で惑星あるいは惑星系が存在していると考えられており、1/4程度の確率で地球サイズの惑星がハビタブルゾーン(惑星表層に液体の水が存在し、長期にわたり生命存在に適切な表層環境が維持されうる条件)に存在していると考えられている(Petigura *et al.*, 2013)。原始惑星系円盤惑星が形成されるためにはその初期段階として微惑星が形成される必要がある。すなわちダストが成長し、どこかの段階でガスの運動とデカップルする必要がある(Weidenschilling, 1977)。微小なダストを成長させるためには、衝突するだけでなく、衝突により増加する空隙を減少させ密度を高めるという困難な問題があり、現在も研究が進められている。日本においてはこの問題への関心が高く、多くの研究がなされている(たとえば, Wada *et al.*, 2011; Tanaka *et al.*, 2012; Kataoka *et al.*, 2013)。

物理と物質を結びつけるもっとも重要な要素は温度であるが、原始惑星系円盤の温度はきわめて難しい問題である。円盤上面は原始太陽からの紫外線やX線により加熱され、ガスは高温になるものの、希薄なため、ガス分子と固体ダストの衝突頻度が低く熱平衡が到達されず、ダストは低温と考えられる。ダストとガスの密度が高くなると熱平衡が到達されるが、ダスト温度は中心星からの輻射による加熱とそれ自身の赤外放射により決定されるため、密度の高い赤道面付近では低温となる。しかし、上面からの加熱・放射と、中心星からの輻射とダスト自身の放射以外

に、円盤の乱流粘性による加熱という不確定性の高い要素があるため、円盤中のダスト温度の推定はモデル依存性が大きい。乱流粘性は円盤の集積率に大きく依存するため、時間とともに変化する。ダスト温度の推定にはモデルにより大きな幅があり、たとえばLesniak and Desch (2011)は、地球軌道付近の赤道面では ~ 100 K、円盤上面では < 400 K、他方、Boss (1998)は1 AUの赤道面の温度を ~ 1500 Kと見積もっている。太陽系元素存在度の場合、ダストの完全蒸発温度は全圧 10^{-4} barで ~ 1700 K、きわめてrefractoryな鉱物を除けば、 ~ 1350 Kでフォーステライトおよび金属鉄という、もっとも主要な存在度の高い鉱物が蒸発/凝縮の相変化をおこす。従って、原始惑星系円盤においてどのような物質が存在し、時間・空間とともにどのような変化をしたかは、あまりに不確定要素が多く、議論が困難である。さらに深刻な問題として、ダストの種類、サイズ、形状など、場の温度を支配する物質情報も、物質科学からの制約がないため、物理モデルにおいては単純化して扱われている。

2. 物質科学の問題

物理モデルと、隕石や彗星塵などから得られる物質情報の間には、残念ながらほとんど情報の重なりが存在しないといってよいほどのギャップがある。その理由は主に4つあると考えられる。

第一に、原始惑星系円盤に関するほとんどの物理モデルにおいては化学情報が含まれていない。 H_2O のみは固相として存在しうる量の多さ、惑星へ取り込まれる水の量、雪線(H_2O の凝縮する円盤の最も内側の位置)の円盤内の位置、生命起源への可能性などの多様な関心から盛んに研究されているが、それ以外の物質は‘固体’という扱いである。ケイ酸塩鉱物と金属の区別すらなされないことがほとんどといって差し支えない。地球内部の研究においては、超高压実験がその先鞭をつけてきたように、化学情報を単純化することにより、物理と化学は一体化して理解される。しかし原始惑星系円盤は、質量の99%程度が水素および少量のHeガスであり、“固相”はわずか1-2%を占めるのみで、物質科学は系全体の運動や進化を記述することができない。しかし、惑星の組成の差があることから明らかなように、原始惑星系円盤内のダスト、微惑星、原

Fig. 1. Protoplanetary disk dynamics and chemical processes for solid materials.

始惑星の時空間的な分布は一樣ではなく、物質科学情報めきにはその進化を考えることはできない。

第二に、われわれが宇宙物質を手にすることができるということ自体が、ダストは集積して天体を作り、集積過程あるいは母天体におけるさまざまな程度の熱過程により、ミクロンの塵ではなく固い岩石に変化したことを意味している。すなわち、それらが原始惑星系円盤において保持していた物理的特徴や状態の情報を失っていることにはかならない。隕石や彗星塵試料から原始惑星系円盤の情報を抽出することは、本質的に大きな壁が存在しているのである。

第三に、物質科学の本質的な問題として、温度や圧力など場の条件変化をすべて記録しているわけではないという問題がある。この問題は宇宙科学に固有の問題ではなく、地球科学における普遍的な問題である。化学平衡が成立し、物質の情報が温度、圧力、化学組成のみをパラメータとして考えることで理解できる場合は限られていること、仮に温度・圧力が一定であっても系が開放系となり、組成を固定できなくなったとたんに解析はきわめて困難となること、非平衡となり反応速度すなわち時間がかかわるようになったとたんにあらゆる動的過程についての素過程に関する情報がないと系全体を解析できないこと、さらには、地球内部や原始惑星系円盤など物質が移動し場の変化がかかわるようになると、パラメータが多すぎ、物質から場や時間に関する情報を一意的に推定することはきわめて困難となることなど、多様な段階の困難が存在する。ほとんどの物質科学研究では、いくつもの仮定をおいてその推定をおこなっているが、積分された情報から微分情報を求めることの困難さは大きい。

第四に、原始惑星系においては、仮に物質からその物理条件・時間などを連続情報として読み解くことができたとしても、それは物質が置かれていた空間情報とは結びついていないという決定的な問題がある。地球科学においては、物質を手にするのでできない内部に関しては、物質情報を大胆に単純化し、地震情報という最大の制約を満たすことを境界条件に、実験と熱力学を駆使し、内部の温度と物質の状態を推定することがなされてきた。すなわち、深さという空間が圧力により規定されている。物質が手に入る浅所に関しては、地温勾配やトモグラフィから推定されている多様な空間情報を利用し、物質から推定された場に関する情報を空間と結びつけることがなされている。ところが、原始惑星系円盤においては温度と密度(面密度)の双方が大きく時間発展するため、仮に温度や圧力の条件がわかったからといって、太陽からの距離や円盤赤道面からの高さを特定することはできない。

3. 問題の克服のために

II-2 で述べた問題を克服し、原始惑星系円盤における物質進化を真に理解し、惑星原材料がいつ、どこに、どのような分布をしていたのかを明らかにすることは、地球を含む太陽系の惑星の組成を理解する上で大変重要である。

さらに、系外惑星における星と惑星(系)の多様な関係を理解するためのフォワードな研究という意味においてもきわめて重要なものである。

原始惑星系円盤の進化における物質進化を理解するためには、物理と物質を連結したフォワードな研究をおこなうことが必要となる。円盤のダイナミクスに物質科学を結合するためには、物質情報を物理情報の関数としてあらわさなくてはならない。筆者はそのための仕事を20年にわたりおこなってきた。その具体的内容は、(1) 基本的情報としての熱力学、(2) 反応速度論を導入するために必要なカイネティックなパラメータを得るための蒸発/凝縮実験、(3) その結果を用いた物質科学から場につなげるためのモデリング、(4) 最後に、円盤物理モデルに物質情報を結合したフォワードなモデル、である。本論においては、文字数の制約に鑑み、(1)から(3)について紹介する。

III. 原始惑星系円盤初期進化に関する最近の物質科学情報

最近10年程度の間、宇宙物質科学研究により、本論に係る3つの重要な成果が得られており、以下にそのエッセンスを紹介する。

第一に、隕石およびその構成要素の形成年代である。隕石の年代は古くより膨大な分析がなされてきたが、分析の技術的困難、試料の不均質性、消滅核種に関する円盤内分布の不均質性、仮定の妥当性、初期値に関する不確定性など、さまざまな問題のために、再三にわたり値が修正されてきた。しかし最近、それらの問題の多くが克服され、また、異なる核種による分析結果の比較が詳細になされ、整合性のある結果がえられるようになってきた。Kita *et al.* (2000)が消滅核種 ^{26}Al を用いて、コンドリュールはCAI (Ca-Al-rich inclusion: 難揮発性元素に富む包有物) より100~300万年後に形成されたということを示して以降、それを指示する結果が出されていたが、Connelly *et al.* (2012)は、絶対年代測定であるPb-Pb法を用い、CAIと同時にコンドリュール形成がスタートし、約300万年程度継続したことを示した。コンドリュール形成が本当に初期から300年以上も継続したのだとすると、原始惑星系円盤進化の観点からはその形成メカニズムがあらためて問題となる。さらに、一部の隕鉄はW-Hf年代がCAIの後わずか100万年の年代をもつ。このことは、原始惑星系円盤の集積期に、すでに融解・コア分離を起こした天体があったことを意味している。また、*angrite* はもっとも古いものはCAIからわずか200~300万年という年代を示す。*Angrite* は特異な玄武岩で、難揮発性元素に富み、揮発性元素に著しく乏しいという特徴をもつ。このことは、この天体が ^{26}Al を多く含んでいた可能性を示唆している。何らかの理由でAl量が多かった(可能性としては、原始惑星系円盤の内側で形成され、円盤内縁で作られるCAIが多く取り込まれたか、あるいは/および円盤進化の早期に

形成された)ため、早期にマンツルの部分融解を起こし、玄武岩が形成されたと考えられる。これらのデータが得られる以前は、隕石の中でコンドライトがもっとも始原的な物質であり、その母天体は早期に形成され、後に融解しコア/マンツル分離をおこし、さらに玄武岩質地殻が形成された結果が隕鉄であり玄武岩質隕石である、すなわち隕鉄やエイコンドライトなどの分化隕石天体はコンドライトより後期に形成されたと漠然と考えられていた。しかし、最新の年代分析の結果は、むしろ分化隕石が先に形成され、未分化のコンドライトは後期に形成されたということを示唆している。実はこのことは原始惑星系円盤内の物質移動とその進化を考えるときわめて自然に理解できる。

第二に、同位体の均質性である。惑星においてもっとも多い元素は酸素であり、その酸素の同位体大きな不均質があることは良く知られている事実である(e.g., Clayton, 1993, 2003)。その原因は、原始惑星系円盤内側における光化学反応 (Clayton, 2002)、分子雲の光化学反応 (Yurimoto and Kuramoto, 2004)、原始惑星系円盤外縁における光化学反応 (Lyons and Young, 2005) など、時空は多様であっても光化学反応に由来するという説が広く受け容れられており、さらに、 ^{18}O に富む重い酸素のキャリアが氷であるというアイデアについても広くコンセンサスに至っている。氷は雪線以遠の原始惑星系円盤においてはもっとも多量に存在する固体物質であり、容易に状態変化をおこし、気相・液相状態では反応性に富み、隕石に見られる多様な酸素同位体組成を説明するにもっとも妥当な物質といえる。さらに、Genesis ミッションにより太陽風の酸素同位体についての研究がなされ、きわめて軽いという結果が得られた (McKeegan *et al.*, 2011)、太陽の同位体組成と地球型惑星の同位体組成が太陽系内側領域の大きく 2 つの特徴的な組成であるように見うけられる。ただし、そこで推定された太陽光球の酸素同位体組成 ($\delta^{17}\text{O} \sim \delta^{18}\text{O} \sim -60\%$) については、必ずしもコンセンサスに至っていないように見うけられる。他方、酸素以外の金属元素の同位体については、かなり均質であるということは認識されていたものの、系統的な研究はなされてこなかった。しかし、LA-ICPMS の普及に伴い、きわめて高い精度で、地球、コンドライト、分化隕石、月、火星隕石等が分析された。その結果、Mg, Si, 金属鉄という、固体惑星にとって最も主要な元素の同位体が高い均質性をもつことが明らかとなった (Chakrabarti and Jacobsen, 2010a, 2010b; Needham *et al.*, 2009)。なお、コンドライトの鉄同位体に関してはかなりの変動があるようである。地球、コンドライト、分化隕石、火星、月などの試料について、酸素以外の主要元素の同位体が高い均質性をもつことは、初期原始太陽系円盤の内側領域がいったん完全ガス化し、そこから凝縮した物質で構成されていたか、乱流によりよく攪拌されていたかのいずれかであるが、プレソーラー粒子がコンドライトマトリクスから発見されることを考えると、物理的攪拌

のみで均質化を行うことは困難で、円盤ガスの初期の高温化、鉱物の凝縮という仮定を考える方が妥当と思われる。そのことは、コンドライトのバルク組成が揮発性に支配された元素分布 (e.g., Wasson and Kallemeyn, 1988) を示すことから支持される。

第三に、固体物質の原始惑星系円盤内の大規模な移動である。2004 年、NASA の彗星探査機 Stardust は 81P/Wild2 彗星に接近し、彗星から放出された粒子の捕獲に成功し、2006 年、塵は地球で回収された。試料は世界中の研究者により分析された結果、CAI の破片、コンドリュールの破片、IDP、グリシンなどの有機物、プレソーラー粒子など、これまで知られていたほぼあらゆる惑星間固体物質の構成要素が発見された (Brownlee *et al.*, 2006; McKeegan *et al.*, 2006; Sandford *et al.*, 2006; Zolensky *et al.*, 2006)。彗星の主要構成元素である水素については、地球と同じ値から、D/H 比でその数倍程度重い値までのばらつきを示した。しかし分子雲の平均的な値に比べると特に高い値ではなかった。もう一つの主要元素である酸素に関しては、CAI と同様の組成と地球物質と同様の組成が得られた。しかしその後の研究により、Stardust 試料の酸素同位体は、地球物質の組成付近から CCAM (炭素質コンドライトの鉱物の作る、重い酸素と軽い酸素の混合線) と微妙に異なる混合線上に分散することが示された。さらに重要なことに、 ^{26}Al がほぼ完全に消滅した時期に作られたコンドリュールの破片が見いだされ、CAI 形成後 400 万年程度経過した後で作られたコンドリュールの破片がこの彗星に含まれていることが明らかとなった (Ogliore *et al.*, 2012)。これらの発見により、原始惑星系円盤内では、長期にわたり、大規模な物質輸送が起き、その中には円盤内縁で形成された CAI がカイパーベルト (海王星軌道である 30 AU 程度から 50 AU あるいは 100 AU あたり) までも運ばれたものがあることを意味している。大規模輸送を可能とする条件について研究がなされ、従来 1 次元で考えられた円盤内物質輸送を 2 次元で検討すると、赤道面に沿っては大規模な外向きの輸送が起こりうることを示された (Ciesla, 2008)。

IV. 原始惑星系円盤における物理と化学の統合へ

III 章で紹介したように、原始惑星系円盤が初期には大規模に加熱され、凝縮により作られた固体物質が、その後長時間にわたり円盤内の物質移動が継続していたことを表している。原始惑星系円盤が時間とともに温度も密度も変化することを考えるなら、物質移動は物質の相変化をひきおこし、最終的にわれわれが知っている惑星・小惑星の空間分布にいたるまでに多様な化学変化がおきていたということである。

1. 鉱物蒸発・凝縮実験

(1) 基本原理

原始惑星系円盤における物質移動と相変化による化学分

別を定量的に扱うため、われわれは原始太陽系において主要な成分であり、惑星原材料としてもっとも主要な **Mg** ケイ酸塩(フォルステライトとエンスタタイト)、金属鉄、さらに、最高温で蒸発/凝縮のおこるコランダムの実験をおこない、その速度の決定、反応素過程の理解をおこなってきた。

蒸発と凝縮の物理化学は古典物理学の気体分子運動論として定式化されており、Hertz-Knudsen 式として知られている。それを凝縮について示すと、

$$j = \alpha(p - p_{eq}) / \sqrt{2\pi mkT} \quad (1),$$

ここで、 j は凝縮速度、 α は凝縮係数、 p は分圧、 p_{eq} は平衡蒸気圧、 m は気体分子の質量、 k はボルツマン定数、 T は温度である。 j の単位は単位面積・単位時間当たりの凝縮する分子の個数、すなわちフラックスである。圧力と平衡蒸気圧との差が反応の熱力学的駆動力である。凝縮係数 α は、熱力学的駆動力により凝縮しようとする分子の個数に対し、実際に凝縮する個数を表す係数であり、0 から 1 の間の数となる。ゼロであれば、凝縮速度はゼロ、すなわちカイネティックバリアが無限大ということであり、1 であれば、熱力学的駆動力が 100% 反応に使われており、カイネティクスの効果は存在しないということである。原理はこのように単純であり、分圧 p と温度 T をコントロールした実験により、凝縮速度 j を決定し、係数 α を求めればよいことになる。蒸発については分子のカッコの中が逆になり、駆動力は $(p_{eq} - p)$ ということになる。真空蒸発であれば、 $p = 0$ なので、さらに単純な式となり、蒸発速度の熱力学的駆動力は平衡蒸気圧であることが明らかである。なおその場合は、 α は蒸発係数と呼ぶ。

(2) 凝縮・蒸発実験の困難さ

原理はきわめて単純であるが、実際の実験や解析はきわめて困難である。その理由は、まず、*eq. (1)* では凝縮係数を括弧の外にくくりだしているが、反応の素過程を考えるなら、ネットの凝縮フラックスは、凝縮と蒸発のフラックスの差で決定されるはずである。上述のように凝縮は過飽和度が駆動力であり、蒸発は平衡蒸気圧が駆動力であるため、蒸発係数と凝縮係数は独立に存在し、分子は $(\alpha_{cond} p - \alpha_{evap} p_{eq})$ と表されるべきである。しかし実験においてその素過程を分離することはできず、結果としてはある実験条件において一つの係数が求まることになる。しかし、温度や分圧が変化することを考えると、ある条件で決定された係数をどこまで外挿してよいのかは不明である。特に多成分系の場合はこの問題は深刻である。

次に、ごく一部の単原子分子をのぞき、化合物の場合は m を単純に定義できない。たとえばフォルステライト Mg_2SiO_4 の凝縮の場合、気相分子は、**Mg**、**SiO**、**O** あるいは **O₂** であるが、凝縮した量はフォルステライトそのものであって、**Mg** や **O** を測るわけではない。したがって、

フォルステライトの凝縮速度を **SiO** あるいは **Mg** の凝縮速度で読み替える。**SiO** と **Mg** のいずれで表わすかは、フラックスの小さいほうを選ぶことになる。なぜなら、**SiO** と **Mg** と **O** (あるいは **O₂**) の 3 体反応であるとするなら、反応速度を支配するのはもっともフラックスの小さい分子と考えることができるからである。しかし、たとえばフォルステライトの結晶構造を考えた場合に、どの分子が構造に組み込まれることが反応速度を支配しているのかは自明ではない。

第3の困難は、実験の技術的な問題である。技術的な問題と一言でいっても、実はさらに多くの問題が含まれている。フォルステライトや金属鉄がガス化するためには 1500 °C 以上の高温が必要である。ガスを発生させるために、その元素を含む固体物質を加熱することになるが、複数の分子(たとえば、**Mg** と **SiO**)を作るためには複数の加熱原が必要であり、物質や圧力条件によりそれぞれ異なる温度で加熱する必要がある。しかし、ガス分子ごとに温度が異なっている温度に依存する反応実験を行うことはできず、分子同士が衝突し、エネルギー交換をしてくれることが望ましい。ところが、分子同士が衝突する条件というのは、平均自由行程が小さいということに他ならず、原始惑星系円盤の環境とは異なっている。しかし実際の実験においては、高温で固体を加熱して発生させた複数の高温のガス複数を混合させ、均質なガスを作ることはほとんど不可能に近く、ガスの分圧を任意にコントロールした実験を行うということはきわめて難しい。さらに、高真空の条件で温度を測定すること自体がきわめて困難であったり、高温・高真空条件で実験に用いることのできる素材はきわめて限られているなど、困難を挙げると枚挙にいとまがない。

(3) 凝縮・蒸発実験結果

このような無数の困難があり、いまだに十分に納得できるものとはなっていないものの、これまでにわれわれが成功させてきた結果は、Nagahara and Ozawa (1996, 1999), Nagahara *et al.* (2009), Ozawa and Nagahara (2000), Ozawa *et al.* (2013), Tachibana *et al.* (2011), Takigawa *et al.* (2009), Yamada *et al.* (2006) などに報告してきた。詳細に関してはこれらの論文をお読みいただきたい。

われわれはフォルステライトおよび olivine 固溶体についてもっとも多くの実験を行ったが、Hashimoto (1990) はフォルステライトの真空中における蒸発実験という先駆的な仕事をおこない、融点下 300 度程度の広い範囲で蒸発係数が約 0.1 であることを示している。われわれの実験結果は、蒸発係数には雰囲気・温度依存性があり、水素ガスの共存する条件ではその値はより 1 に近く、しかしより一般的には、0.1 より小さく、ときに 0.01 まで小さくなる、さらに結晶軸方向により異方性が存在するというものであった。一桁の違いは、同じ量の蒸発がおこるのに必要な時間が一桁変わるということと、原始惑星系円盤内でのダストの移動にともなう蒸発過程では、粒子の経験する温度履歴

により、サイズ変化が一桁くらい変わりうるということの意味すると言う点において重要である。

速度を求める実験の常として、蒸発速度という実験の最終的な結果の理解には、反応を支配する素過程の理解が必要である。その理解は、多様な条件における反応実験から法則性を見いだすことになる。蒸発に関しては、円盤ガス主成分である水素が存在する下での蒸発は、真空中より蒸発速度は加速され、その理由は熱力学的駆動力とカイネティクスの双方が水素の影響を受けることが明らかとなった。また、鉱物の場合、他の物性同様、異方性が存在し、場合によってはその差はファクターを超え、オーダーに及ぶこと、真空中であっても水素ガスが共存していてもそれは成立していること、固溶対鉱物の蒸発においては内部の元素拡散と蒸発速度の競合で決定される元素分別がおこること、蒸発過程においては同位体分別にもカイネティクスが重要な役割を果たすこと、コランダム、 SiO_2 などの単純酸化物とフォーステライトを除くと、ほとんどの鉱物は *incongruent* 蒸発をし、より揮発性の成分が選択的に蒸発し、残渣に非晶質物質であったり(たとえば斜長石)、*stoichiometric* であったりする(たとえばエンスタタイト蒸発残渣としてのフォーステライト)こと、よりミクロのスケールでは、蒸発は転位芯からおこり、蒸発ピットが形成されるなどの興味深い事実が明らかとなった。これらの素過程は、鉱物学や表面科学の知識により理解することができる(Ozawa *et al.*, 2013)。

金属鉄の蒸発実験は、Tachibana *et al.* (2011)によって系統的におこなわれた。金属鉄は単原子分子であるという意味において、他の物質に比べ高い精度の実験が可能であった。その結果、蒸発係数は温度だけでなく過飽和比に対しても依存性があり、低温ほどカイネティクスの効果が大きいことが明らかとなった。高温では係数はほぼ1であり、融点から400度程度下がると0.6程度まで下がる。また、過飽和比に対しては非線形な依存性を示した。

コランダムの蒸発実験はTakigawa (2011)によっておこなわれ、フォーステライト同様異方性があり、蒸発係数は0.1から0.05程度であること(異方性による大小を考慮するなら0.01近く)が明らかとなった。

他方、凝縮についてはいまだ圧倒的に限られた結果しかわれわれは持ちえていないが、金属鉄は広い条件のもとで実験が成功し、過飽和比10から30の範囲で凝縮係数はほぼ1であるという結果が得られた(Tachibana *et al.*, 2011)。コランダムの凝縮はTakigawa (2011)によって1575℃という特定の温度において実験がなされ、過飽和比に対する依存性、異方性があることが示され、凝縮係数も0.02–0.2程度と決定された。フォーステライトの凝縮実験は現在も継続中で、原始惑星系円盤環境(水素主体)での凝縮係数が求まりつつある(Tachibana *et al.*, 2014)が、温度、ガス組成、過飽和比などを系統的にコントロールした実験が完成するにはまだ時間が必要である。

2. 原始惑星系円盤における化学分別・同位体分別

凝縮・蒸発という相変化の動的過程においては元素および同位体の分別がおこりうる。原始惑星系円盤のように、希薄なガス中に微少なダストが浮遊している条件では一粒の粒子にも温度や圧力の変化の記録が残されている可能性があり、われわれがそのような粒子を手にし、最新の微少領域分析機器を用いて、元素や同位体の粒子中の分布を測定することにより、円盤中にける粒子のたどった物理条件の変化をたどれる可能性を秘めている。このことから、凝縮・蒸発にともなう元素・同位体分別を実験的に決定すること、さらにそれを定式化することをおこなった。また、天然試料の分析結果の解析もおこなった。それに関する結果の詳細は、Nagahara and Ozawa (2000), Nagahara *et al.* (2008), Ozawa and Nagahara (2001), Young *et al.* (1998, 2002), Davis *et al.* (2005), Kita *et al.* (2010)に示されている。

凝縮・蒸発にともなう元素・同位体分別の原理は、界面移動をとともなう気相-固相(あるいは液相)元素分配と固体および周囲のガス中の元素・同位体拡散により支配される。すなわち、移流と拡散からなる移流拡散方程式である。元素分配を伴わない場合(金属、単純酸化物、フォーステライトのように *stoichiometric* かつ *congruent* な相変化を起こす物質)は、定常状態となり(同位体に関しては拡散係数の濃度依存性がないとする)、その定常解はPeclet数(Pe)として与えられる。Peclet数はこの場合は蒸発にともなう界面移動と拡散の比である。検討の結果、 Pe が0.1より小さい場合は相対的に拡散が速く、粒子サイズ変化にともない、均質に同位体変化の起こる粒子(同位体的に重いあるいは軽い)が形成、 $Pe > 100$ の場合は相対的に界面移動が速く、同位体分別は固体内部には残らない、 $0.1 < Pe < 100$ の場合は粒子内部に同位体累対構造が作られるということがわかった。これを、想定される原始惑星系円盤におけるフォーステライト粒子加熱に当てはめると、MgとOには同位体分別の効果が残り得るが、Siではおこらないという結果となった(Nagahara and Ozawa, 2000)。

われわれはフォーステライト蒸発実験残渣のMg同位体分別を分析し、同位体分別係数は単純なMgではなく、Mg-Oの換算質量で理解でき、蒸発を支配する素過程がMgOの結合を切ることであることを明らかとした(Yamada *et al.*, 2006)。なお、これに先立ち、カイネティックな過程における同位体質量分別の本質が反応を支配する分子の換算質量であることをわれわれは指摘しており(Young *et al.*, 2002)、この理解は大気中の酸素が地表水より同位体的に重いという問題(ドール効果)への解釈も与え、その分野に大変大きなインパクトを与えた。

他方、固溶体鉱物、メルトなど多成分系の場合には、ここに元素の拡散・気相(液相)固相元素分配の効果が加わり、問題は複雑になる。詳細な検討の結果、元素分別と同位体分別が起こる条件と、元素分別は起こるが同位体分別のおこらない条件があることが判明した。その違いは、元素の

蒸発速度あるいは凝縮速度(揮発性と読み替えられる)と量(界面移動速度を支配する), 固相(液相)と気相中の元素拡散速度の競合により決定する。時間とともに進行する過程であるから, 当然のことながら, 反応進行の程度によりそれらのモードの違いが異なる。具体的には, olivine 固溶体の蒸発では Fa 成分が選択的に蒸発するが, サイズと時間の空間で, 元素分別がおこり残渣が Fo-rich になる条件と金属鉄の同位体が分別して重くなる(^{56}Fe の増加)条件をそれぞれ独自にコンターとして描くことができる。さらに, 月が全熔融したマグマオーションを経験したという広く受け容れられているモデルに対し, K の同位体分別が存在しないことから, 揮発性の K が著しく乏しいのはマグマオーションが存在しなかったからであるという議論(Humayun and Clayton, 1995)がなされたことに対し, このモデルを用いると, 極端に揮発性の元素が関係する拡散律速蒸発の場合には, 化学分別がおこる(K が蒸発で失われる)にもかかわらず, (K の)同位体分別はおこらないという, 化学・同位体分別デカップリングによっても説明可能であることがわかる。さらに, 元素と同位体が異なる分別をする条件がマグマオーションにおいても存在し, マグマオーションからアルカリ元素が失われ, かつ, 同位体分別が存在しなかった問題にも適用が可能である。なお, Richter (2004) は, この問題を現象のタイムスケールとい

う観点から明快に整理し直した。

3. 原始惑星系円盤における凝縮と化学分別

蒸発・凝縮実験によりもっとも重要なフォルステライトと金属鉄についての反応の係数が, ラフではあるもののほぼ求まり, 元素・同位体分別の定式化ができたので, 原始惑星系円盤における凝縮・蒸発過程における固体の組成変化を論ずることが可能である。

実験的に決定した係数を用い, 円盤ガスの冷却による鉱物の凝縮と化学分別をモデルにより検討した。エッセンスは, ガスの冷却速度に応じ, 凝縮温度, 成長速度, 核の密度が変化し, その結果残るガスの化学組成も変化する様子を定量的に検討するというものである。冷却速度をパラメータとし, 均質核形成は古典的核形成モデル(Yamamoto and Hasegawa, 1977; Drain and Salpeter, 1977)にのっとり, 固体の表面張力とガスの過飽和比からその臨界条件を決定する。過飽和条件での核形成速度が臨界粒径の成長速度となり, 凝縮による粒子サイズの増加を Hertz-Knudsen 式で記述する。さらに, 固相の凝縮によるガス組成変化についての質量保存式を記述する。なお, われわれの実験から, フォルステライトはコランダムに, 金属鉄はフォルステライトにぬれ性が高いことが判明したので, それらの関係は不均質核形成するとした。上述の実験により決定した凝縮係数として, フォルステライトについては 0.1, 金属

Fig. 2. Kinetic condensation in the system H-He-C-O-Mg-Si-Fe at 10^{-5} bar total pressure at three cooling time scales. (a) and (d) cooling time of 10^{10} sec, (b) and (e) 10^6 sec, (c) and (f) 10^4 sec. The relative abundances of elements are those of the solar abundances. The model assumes homogeneous nucleation for silicate and heterogeneous nucleation for metallic iron. A traditional nucleation model is applied for homogeneous nucleation and condensation rates are based on experimental results of our group. The lower panels show size distribution of condensed grains, which includes individual mineral grains and composite grains with silicate core and Fe mantle.

鉄は 1, コランダムは 0.1 を用いた。単純化のため, 系は H-He-C-O-Mg-Si-Fe(-Al) とし, 元素の割合は太陽系存在度とした。

Figure 2 に結果の一例を示した。この結果は, 系に Al をいれず, Mg-ケイ酸塩と金属鉄のみが固相である系である。上段は凝縮過程, 下段は凝縮した粒子のサイズ分布を示している。また, 左から右に冷却時間が短く(冷却速度が大きくなる)。冷却時間が長い場合 (Fig. 2a), 初めに凝縮するのはフォスフェイトで, 1270 K から 1220 K あたりで一気に凝縮が収束し, 1220 K で金属鉄がその上に不均質凝縮している。同時に, SiO_2 が凝縮する。 SiO_2 は平衡の凝縮過程では出現しないが, ここで現れる理由は, 金属鉄がフォスフェイトに不均質凝縮したため, フォスフェイトとガスの反応が抑制されるからである。平衡であればフォスフェイトとガスが反応してエンスタタイトが形成されるが, ここではかわりに SiO_2 が凝縮するということである。冷却後に残る固相は, フォスフェイトをコアと金属鉄がマントルをなす複合粒子と SiO_2 の 2 種類だけである。冷却時間が短くなると, すなわち冷却速度が大きくなると (Fig. 2b), 凝縮温度が全体として低温側に移動する。これは, Clausius-Clapeyron 関係である。また, SiO_2 の凝縮が金属鉄の凝縮に対し顕著に遅れる。これは, 金属鉄は不均質核形成するためにカイネティクスの効果が小さいが, SiO_2 は均質核形成するために, 冷却速度の増大とともに, 過飽和が大きくなると凝縮しないためである。さらに冷却時間が短くなると (Fig. 2c), きわめて複雑な凝縮がおこる。急冷のため, フォスフェイトの核形成が抑制され, 著しく過飽和な状態でエンスタタイトが凝縮する。ただしそれはただちに金属鉄に覆われる。エンスタタイトの成長がほとんどおこらぬままに金属鉄に覆われるため, ガス中にはまだ多量の Mg や Si が存在していることになり, その結果, フォスフェイトや, 2 回目のエンスタタイト凝縮がおこる。さらにそのフォスフェイト上に鉄の不均質核形成がおこり, 最終的にはエンスタタイト上に金属鉄が凝縮した粒子とフォスフェイトの上に金属鉄が凝縮した粒子の 2 種の複合粒子が形成されることになる。

このように, 核形成と成長の 2 つの素過程にカイネティクスが影響を及ぼすと, 化学平衡とはまったく異なる種類, 存在形態の相が凝縮することになる。また, その種類や存在形態はガスの冷却を反映し, 冷却時間が短いほど複雑さの程度も大きく, 鉱物が非平衡な共存をすることもあることがわかる。冷却時間の効果は凝縮相のサイズにも顕著に反映される。下段の図は, それぞれ, 上段の図に対応する凝縮相のサイズ分布である。サイズ分布は非常にラフには, 冷却速度とべき乗則の関係にあり, 冷却速度が一桁小さくなると, 平均サイズもほぼ一桁小さくなる。金属鉄にマントルされたフォスフェイト粒子と SiO_2 は前者のほうがほぼ一桁程度大きい。なお, 質量保存を考えれば当

然であるが, サイズと粒子数は逆相関にあり, 冷却時間が短い場合は, 著しく小さな粒子が大量に凝縮することになる。

広い圧力, 冷却時間の条件のもとで凝縮過程を計算した結果を Figure 3 にまとめた。なおここでは, ケイ酸塩の相のみを表しており, フォスフェイトのコアに金属鉄マントルの複合粒子のことは示していない。複合粒子は図のあらゆる条件において存在している。凝縮相の変化する境界は図中で負の傾きをもち, 冷却時間が大きい場合は SiO_2 , 次にフォスフェイトとエンスタタイト, さらに, フォスフェイト, エンスタタイト, SiO_2 の 3 相, さらに低圧・小冷却時間の条件では Si 成分はすべて凝縮しないままにガス中に残ってしまう。すなわち, 低圧できわめて急速な冷却がおこると, 核形成そのものが抑制されてしまうということである。

冷却時間と平均粒子サイズの関係 Figure 4 に示してある。原始惑星系円盤冷却の時間スケールは, 10^{10} sec ($\sim 10^3$ 年) 以上であり, その冷却条件では全圧にかかわらず, SiO_2 (およびフォスフェイトと金属鉄の複合粒子) が主要な凝縮相である。これらの粒子を凝縮させた高温条件は, 原始太陽系においては内側領域であり, それらの粒子は合体成長をくり返し, 短時間のうちに微惑星, 原始惑星を経て, 地球型惑星に成長した。したがって, それらの粒子は小惑星帯あるいはそれ以遠において形成されたコンドライトには残されないと考えられる。

また, その粒子サイズはミリのオーダーであることがわ

Fig. 3. Condensed phases in kinetic condensation of cooling gas with the system H-He-C-O-Mg-Si-Fe. The figure shows silicate phases, all of which are coexisting with composite grains with forsterite core and Fe mantle. The calculation conditions are the same as those for Figure 2.

Fig. 4. Average grain size of condensed grains, which are composite grains with core of forsterite and mantle of metallic iron. Solid lines are average grain sizes at 10^{-3} and 10^{-5} bar total pressure, and the dotted lines are one sigma variations. The composite grain with forsterite core and Fe mantle was formed by homogeneous condensation with subsequent heterogeneous condensation of Fe. The calculation conditions are the same as those for Figures. 2 and 3.

かる。全圧が高い場合はさらに大きい。これは大変重要な結果といえる。原始惑星系円盤形成の物理モデルでは、ダストサイズは最初は分子雲に由来するミクロンサイズ以下であり、円盤内を赤道面に沈着する過程で物理的合体成長をすると考えられてきたが、ダスト同士が衝突しても、ファンデアワールス力のみでは一定以上成長しないことが問題となっている。他方、われわれの凝縮実験の結果は、高温からの凝縮により、ミリサイズ以上の粒子が成長可能であることが示された。金属に取り囲まれた衝突断面積の大きい粒子は効果的に成長が可能であり、微惑星形成の困難という惑星科学の重大な問題に一つの解を与えるものである。

V. 結 論

原始惑星系円盤の初期進化、とりわけダストから微惑星形成過程を理解するため、われわれは蒸発/凝縮実験とカイネティックモデルの開発を進めてきた。本論では、字数の制限から、モデルに関しては閉鎖系における単純な結果を示した。この閉鎖系モデルでは、CI コンドライト以外のコンドライトの組成を説明することは不可能である。コンドライトの化学組成は元素の揮発性の関数であり、凝縮過程に支配されていることは明らかである。コンドライト組成、すなわち微惑星の組成の多様性は、本論で示したカイネティックな凝縮という化学過程に、原始惑星系円盤におけるダストの輸送という物理過程を組み合わせる必要がある。冒頭で述べたように、物質・化学は時空の進化をとまなう惑星系形成における場というものは表さない。地球や惑星は唯一無二の進化の過程があったのであ

て、それを理解するためには、物理と化学の結合が必要なのである。われわれは現在、物理モデルに化学を統合するという研究を進めている。

謝 辞 鉱物科学会賞という荣誉ある賞をいただくことになり、学会に感謝いたします。受賞に関連し、小暮敏博氏(東大)にお世話になりました。

本研究は、長年にわたる小澤一仁氏(東大)との共同研究の結果の一部です。地球惑星の進化における物理と化学の相互作用という問題を正面からとらえる視点、ミクロとマクロを結合する研究は、小澤氏との議論無くしては到達しえなかったものであり、深く感謝いたします。また、本論に紹介した実験は、10年にわたる橋省吾氏(北大)との共同研究であり、多忙な私を全面的に支えてもらいました。院生であった瀧川 晶さん(京大)の驚異的な頑張りも、この困難な実験、その解析の理解を大いに進展させてくれました。さらに、大学院時代の恩師久城育夫氏と真空実験のスタートを指導いただいたカーネギー地球物理研究所 Bjorn Mysen 氏にはきわめて長い時間にわたる様々な支援をいただきました。達見圭介君、小川理絵さん、池田陽平君、野村龍一君、千葉久義君、玉田真之介君、中田 守君は研究室の院生として、困難な実験と格闘してくれました。これらの方々に感謝いたします。

引用文献

- Balbus, S.A. and Hawley, J.F. (1991): A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I. Linear analysis. *Astrophys. J.*, **376**, 214–222.
- Boss, A. (1998): Temperatures in protoplanetary disks. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **26**, 53–80.
- Brownlee, D. et al. (2006): Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science*, **314**, 1711–1714.
- Chakrabarti, R. and Jacobsen, S.B. (2010a): Silicon isotopes in the inner Solar System: Implications for core formation, solar nebula processes and partial melting. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 6921–6933.
- Chakrabarti, R. and Jacobsen, S.B. (2010b): The isotopic composition of magnesium in the inner Solar System. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **293**, 349–358.
- Ciesla, F.J. (2007): Outward transport of high-temperature materials around the midplane of the solar nebula. *Science*, **318**, 613–615.
- Clayton, R.N. (1993): Oxygen isotopes in meteorites. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **21**, 115–149.
- Clayton, R.N. (2002): Self-shielding in the solar nebula. *Nature*, **415**, 860–861.
- Clayton, R.N. (2003): Oxygen isotopes in the Solar system. *Space Sci. Rev.*, **106**, 19–32.
- Connelly, J.N., Bizzarro, M., Krot, A.N., Nordlund, A., Wielandt, D. and Ivanova, M.A. (2012): The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, **338**, 651–655.
- 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.
- Drain, B.T. and Salpeter, E.E. (1977): Time-dependent nucleation theory. *J. Chem. Phys.*, **67**, 2230.
- Gammie, C.F. (1996): Layered accretion in T-Tauri disk. *Astrophys. J.*, **457**, 355–362.
- Hashimoto, A. (1990): Evaporation kinetics of forsterite and implications for the early solar nebula. *Nature*, **347**, 53–55.
- Humayun, M. and Clayton, R.N. (1995): Potassium isotope cosmochemistry: Genetic implications of volatile element depletion. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 2131–2148.
- Kenyon, S.J., Hartmann, L. and Hewett, R. (1988): Accretion disk models for FU Orionis and V1057 Cygni—Detailed comparisons between observations and theory. *Astrophys. J.*, **325**, 231–251.
- Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S. and Adachi, K. (2013): Fluffy dust forms icy planetesimals by static compression. *Astron. Astrophys.*, **557**, L4.
- Kita, N.T., Nagahara, H., Togashi, S. and Morishita, Y. (2000): A short duration of chondrules formation in the solar nebula: Evidence from Al-26 in Semarkona ferromagnesian chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 3913–3922.
- Lesniak, M.V. and Desch, S.J. (2011): Temperature structure of protoplanetary disks undergoing layered accretion. *Astrophys. J.*, **740**, 118.
- Lynden-Bell, D. and Pringle, J.E. (1974): The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables. *Month. Not. Royal Astron. Soc.*, **168**, 603–637.
- Lyons, J.R. and Young, E.D. (2005): CO self-shielding as the origin of oxygen isotope anomalies in the early solar nebula. *Nature*, **435**, 317–320.
- McKeegan, K.D. *et al.* (2006): Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science*, **314**, 1724–1728.
- McKeegan, K.D., Kallio, A.P.A., Herber, V.S., Jarzebinski, G., Mao, P.H., Coath, C.D., Kunihiro, T., Wiens, R.S., Nordholt, J. E., Moses, R.W., Reisenfeld, D.B., Jurewicz, A.J.G. and Burnett, D.S. (2011): The oxygen isotopic composition of the Sun inferred from captured solar wind. *Science*, **332**, 1528–1532.
- Nagahara, H., Kita, N., Ozawa, K. and Morishita, Y. (2008): Condensation of major element during chondrule formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 1442–1465.
- Nagahara, H., Ogawa, R., Ozawa, K., Tamada, S., Tachibana, S. and Chiba H. (2009): Laboratory condensation and reaction of silicate dust. *APS Conf. Ser.*, **414**, 403–410.
- Nagahara, H. and Ozawa, K. (1996): Evaporation of forsterite in H₂ gas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 1445–1459.
- Nagahara, H. and Ozawa, K. (1999): Mechanism of forsterite evaporation as inferred from surface microstructures. *Proc. Jap. Acad.*, **75** Ser. B29–34.
- Nagahara, H. and Ozawa, K. (2000): Isotopic fractionation as a probe of heating processes in the solar nebula. *Chem. Geol.*, **169**, 45–68.
- Nagahara, H. and Ozawa, K. (2012): The role of exchange reactions in oxygen isotope fractionation during CAI and chondrule formation. *Meteorit. Planet. Sci.*, **47**, 1209–1228.
- Needham, A.W., Porcelli, D. and Russell, S.S. (2009): An Fe isotope study of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 7399–7413.
- Ogliore, R.C., Huss, G.R., Nagashima, K., Butterworth, A.L., Gainforth, Z., Stodolna, J., Westphal, A.J., Joswiak, D. and Tylliszczak, T. (2012): Incorporation of a late-forming chondrules into comet Wild 2. *Astrophys. J.*, **745**, L19.
- Ozawa, K. and Nagahara, H. (2000): Kinetics of diffusion-controlled evaporation of Fe–Mg olivine: experimental study and implication for the cosmochemical fractionation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 173–189.
- Ozawa, K. and Nagahara, H. (2001): Chemical and isotopic fractionations by evaporation and their cosmochemical implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2171–2199.
- Ozawa, K., Nagahara, H., Morioka, M., Hutcheon, I., Noguchi, T.K. and Kagi, H. (2012): Kinetics of evaporation of forsterite in vacuum. *Amer. Mineral.*, **97**, 80–99.
- Petigura, E.A., Howard, A.W. and Marcy, G.W. (2013): Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proc. Natl. Acad. Sci.* www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1319909110.
- Richter, F. (2004): Timescales determining the degree of kinetic isotope fractionation by evaporation and condensation. *Cosmochim. Acta*, **68**, 4971–4992.
- Sandford, S.A. *et al.* (2006): Organics captured from comet 81P/Wild 2 by the Stardust spacecraft. *Science*, **314**, 1720–1724.
- Shakura, N.I. and Sunyaev, R.A. (1973): Black holes in binary systems. *Astron. Astrophys.*, **24**, 337–355.
- Tachibana, S., Nagahara, H., Ozawa, K., Ikeda, Y., Nomura, R., Tatsumi, K. and Joh, Y. (2011): Kinetic condensation and evaporation of metallic iron and implications to metallic iron dust formation. *ApJL* 736, DOI: 10.1088/0004-637X/736/1/16.
- Tachibana, S., Takigawa, A., Miyake, A., Nagahara, H. and Ozawa, K. (2014) Condensation of forsterite under controlled protoplanetary disk conditions. *LPSC* (abst.)
- Takigawa, A. (2011): Formation and evolution of circumstellar alumina: from evolved stars to the early solar system. pp. 179, *PhD. Thesis, Univ. Tokyo*.
- Takigawa, A., Tachibana, S., Nagahara, H., Ozawa, K. and Yokoyama, M. (2009): Anisotropic evaporation of forsterite and its implication for dust formation conditions in circumstellar environments. *Astrophys. J.*, **707**, L97–101.
- Tanaka, H., Wada, K., Suyama, T. and Okuzumi, S. (2012): Growth of cosmic dust aggregates and reexamination of particle interaction models. *Prog. Theor. Phys. Supp.*, **195**, 101–113.
- Wada, K. *et al.* (2011): Collisional growth conditions for dust aggregates. *Astrophys. J.*, **702**, 1490–1501.
- Wasson, J.T. and Kallemeyn, G.W. (1988): Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A 1988 **325**, 535–544.
- Weidenschilling, S.J. (1977): Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula. *Month. Not. Royal Astron. Soc.*, **180**, 533–544.
- 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. *Planet. Space Sci.*, **54**, 1096–1106.
- Yamamoto, T. and Hasegawa, H. (1977): Grain formation through nucleation processes in astrophysical environment. *Prog. Theor. Phys.*, **58**, 816–828.
- Young, E., Nagahara, H., Mysen, B.O. and Audet, D.M. (1998): Non-Rayleigh oxygen isotope fractionation by mineral evaporation: theory and experiments in the system SiO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**, 3109–3116.
- Young, E.D., Galy, A. and Nagahara, H. (2002): Kinetic and equilibrium mass-dependent isotope fractionation laws in nature and their geochemical and cosmochemical significance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 1095–1114.
- Yurimoto, H. and Kuramoto, K. (2004): Molecular cloud origin for the oxygen isotope heterogeneity in the solar system. *Science*, **305**, 1763–1766.