



### 4. 惑星物質の動的圧縮状態

#### 4. Planetary Materials at Dynamic Dense States

奥地 拓生

OKUCHI Takuo

京都大学複合原子力科学研究所

(原稿受付：2022年10月27日)

原始の太陽の周囲で微粒子、小天体、小惑星が衝突と合体を繰り返すことで、現在みられるような惑星や衛星が誕生した。これらの天体は衝撃圧縮現象を頻りに経験していたと考えられる。このような衝撃圧縮現象の過程を、レーザー衝撃圧縮実験の手法によって研究する意義を簡単に述べる。特に酸化物（鉱物およびそのアナログ物質）については、ハイパワーレーザー照射によって衝撃圧縮を引き起こしつつ、フェムト秒 X 線パルスによって超高速の回折計測を行うことで微視的構造の時間変化の解析が可能になり、天然の隕石試料等と強くリンクする重要な結果が得られている。将来展開としては、さらに X 線吸収分光を組み合わせた解析等を考えることができる。

**Keywords:**

high-power laser, shock compression, planetary formation, x-ray diffraction, x-ray absorption

#### 4.1 はじめに

惑星探査機「はやぶさ」の1号機と2号機が続けて成功させた小惑星からの天然試料の回収（サンプルリターン）によって、46億年前の太陽系誕生のときに一時的につくられた惑星物質が、当時の状態を保持したまま地球の研究者にもたらされた[1-3]。原始の太陽の重力によって宇宙から惑星系の円盤に沈積した無数の微粒子が、互いに衝突による付着や合体を繰り返してこのような小惑星を構成した。それらがさらに長い時間をかけて衝突、破壊、合体を繰り返すことで、現在の太陽系にみられるような惑星や衛星が誕生した。このような惑星形成の過程の途中で経由する小天体の状況を間違いなく保存した物質を得たことで、実験室での惑星物質科学研究の比較対照の相手が非常に明瞭になり、課題が有意義になった。惑星物質科学の研究は、サンプルリターンの成功によって新しい段階を迎えることができたと考えられる。

惑星系の起源と進化という課題は、理論物理、計算機シミュレーション、天文観測、および隕石学の手法によって従来から深く研究されてきた。重力多体系相互作用が産み出す形態の理論物理と計算機シミュレーションによる理解、恒星の進化と太陽系内外の惑星系の実際の形態の望遠鏡観測による理解、および隕石試料解析やサンプルリターンを通じた宇宙惑星物質の微視的な形態の理解がそれぞれ相補的な役割を果たしてきたことで、上記の標準的な惑星形成モデルがつくられた。その一方で私たちは、広い意味での物質材料科学の立場において、標準的な手法の一つである衝撃圧縮計測実験を発展させることを通して、天体衝突時の物質変遷を再現する研究を進

めてきた。天体衝突は発生するエネルギーが巨大な現象であり、それが物質の状態変化に果たす役割は言うまでもなく大きい。太陽系の初期に起きたはずの小天体相互の衝突現象の想定像は実に多様である。そのなかでも特に、キロメートル毎秒を大きく超える相対速度の高速衝突においては、天体が巨視的に破壊されたり、その全体的な形状が大きく変わってしまうことに加えて、天体を構成する物質の微視的な性質も不可逆的に変化することが確実である。具体的には、衝撃圧縮が引き起こす一時的な圧縮と加熱に伴って、微視的な結晶構造の相転移、非晶質化、融解などが状況に応じて引き起こされる。このような微視的な変化が初期太陽系において頻発したであろうことは隕石学の研究においても強く示唆されてきた。私たちが衝撃圧縮状態の計測を通して進める惑星物質研究の目的は、天体衝突という物理現象が引き起こすべき結果と、天然の宇宙惑星物質に見られる微視的な形態の特徴の間に橋を渡すことである。物理学、天文学、隕石学の境界領域として発展してきた惑星の起源と進化の研究の場において、物質材料科学の視点からの新たな研究を進めることを通して、さらに相補的に問題を理解して、課題を効果的に解決することができると考えている。

#### 4.2 レーザー衝撃圧縮による惑星物質科学の今後

時間変化する動的な圧縮場がつくりだす高圧力条件下で惑星物質が経験する微視的な変化は、条件が変わらない静的な圧縮場を用いた実験の結果から類推されてはきたものの、わからないことが多かった。動的な場での惑星物質の変化という大きな課題に対して、ハイパワーレー

Kyoto University Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, OSAKA 590-0494, Japan

author's e-mail: okuchi@rri.kyoto-u.ac.jp

ザーを利用した衝撃圧縮実験法が特筆すべき有効性を示すことを、私たちは最近の研究で示した[4,5]. ハイパワーレーザーによる物質の圧縮操作に対しては各種のパルスのプローブビームを使った計測を容易に同期させることが可能であり、いわば時間分解計測との相性が特に良いために、物質が経験する構造変化の時間進展を正確に捉えることができる。一方でレーザーを使えば発生する圧力値を幅広く操作したり、各種のプローブビームを自ら励起することも可能であり、実験のデザインを工夫することで、圧縮状態の物質に対する多様な計測が進められている[6-11]. これらの手法を用いて今後解決すべき問題点を整理して述べることを、簡単な内容ではあるが本稿の主題とする。

#### 4.2.1 物質種と解析法の今後

原始太陽の周囲を取り巻く円盤において最も多く存在していたはずの固体の微粒子は、水素を含んでいて極性を持つ分子の集合体である“氷”と、二酸化ケイ素を主成分として含む酸化物の集合体である“鉱物”である[12]. 元素の宇宙存在度の1位が水素、3位が酸素、4位が炭素、6位が窒素であることから[13], これらの元素がつくる $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ などの分子が凝縮して混合すれば、一つの主成分の氷ができる。いずれの分子も温度が上がると昇華して気体になるために、氷は太陽系の外側の低温の領域においてのみ固体として沈積、合体、および集積を引き起こし、最終的にはそれが巨大化した惑星(氷惑星)や衛星(氷衛星)を構成した[12]. この氷惑星の内部の静的だが極限的な高温高压の状態を理解するために、ハイパワーレーザー衝撃圧縮による構造相転移、融解や金属化現象の解析が重要な役割を果たしてきた[6-11]. 今後はハイパワーレーザーによらない完全に静的な実験で得られている超高压の氷の相転移計測の結果と[14, 15], 上記の動的な計測の結果の比較をしつつ、本質的に動的な過程である各種の構造変化や物性変化の経路や時間進展を明確にするために、さらに高い時間分解能の計測をデザインしていくことが必要であろう。

太陽周囲に多く存在していた二種類目の固体微粒子は、宇宙存在度が3位の酸素と、7位のケイ素、8位のマグネシウムなどがつくる“鉱物”である。高温でも昇華しないことから、それらが太陽系の内側の高温の領域において集積を起こして惑星を構成した[1, 12]. ただし境界的な温度の領域では鉱物と氷が混合したものが天体の材料となった[2, 3]. 先に述べたように、動的な圧縮場での鉱物の構造相転移の経路や時間進展は、ハイパワーレーザー衝撃圧縮によって明瞭に捉えることが可能になり[4, 5], 得られた結果が衝突を経験した隕石に残された高密度鉱物の産状とも強くリンクすることがわかった[16, 17]. このような研究の将来像としては、これまでに実現したX線パルスによる超高速時間分解回折計測に加えて、同様のパルスを使ったエネルギー分散X線吸収分光が重要な方向性の一つと考えられる。これは基礎的なところからの技術開発がいる課題である。ケイ素やマグネシウムの吸収端エネルギーは軟X線領域にあって光学系の構

築が難しいために、それらと化学的性質が類似する元素で硬X線の吸収端を持つものを最初の計測対象とすることが現実的である。ハイパワーフェムト秒パルスレーザー励起によるプラズマ化と同期させた銅の吸収端のX線吸収分光が直近に実現されているので[18], それと吸収端エネルギーが近く、ケイ素と性質が非常に近いゲルマニウムが一つの候補になる。この手法が実用化できれば、圧縮時の陽イオンの配位数などの局所構造の時間進展現象を捉えることで、状態変化の理解をさらに進めることができる。

#### 4.2.2 圧縮時間スケールの今後

ナノ秒を典型的なパルス長とするハイパワーレーザーで駆動される高圧力状態の圧縮時間スケールは、初期太陽系における衝突現象の時間スケールとは大きく異なるという意見があり得る。できあがった惑星や小惑星だけを考えて、確かにそうなるのかもしれない。一方で単純に考えると、惑星や小惑星よりも小さな天体が引き起こす短時間の衝突現象の頻度は、むしろ惑星同士の衝突よりもはるかに多くなることから、短い圧縮時間スケールの現象にも重要な意義はあるといえる。例えばmmサイズの多数の粒子が天体表面に高速衝突する現象は想定が可能であるが、その際にはナノ秒時間幅の圧縮現象が繰り返して起きるであろう。また、圧力の急速な上昇または減衰の際にのみ引き起こされる変化があるとすれば、その進み方はレーザーと天然の衝突の間での本質的な差がない。我々はそのような超高速の相転移現象の一つを実際に発見して報告した[4, 5]. 圧縮の継続時間が本質的な変化はもちろん存在するはずだが、そのような現象は長い圧縮時間スケールが可能で実験技術を用いた相補的な計測を進めることで、時間スケールを互いに近づけていけばよいと考えられる。

#### 参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, *Science* **333**, 1113 (2011).
- [2] T. Yokoyama *et al.* *Science* 10.1126/science.abn7850 (2022).
- [3] M. Ito *et al.*, *Nat. Astron.* **6**, 1163 (2022).
- [4] T. Okuchi *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 4305 (2021).
- [5] 奥地拓生:SPRING8/SACLA 利用者情報 **26**, 341 (2021).
- [6] T. Kimura *et al.*, *J. Chem. Phys.* **142**, 164504 (2015).
- [7] M. Millot *et al.*, *Nat. Phys.* **14**, 297 (2018).
- [8] M. Millot *et al.* *Nature* **569**, 251 (2019).
- [9] M. Guarguaglini *et al.*, *Sci. Rep.* **9**, 10155 (2019).
- [10] A. Ravasio *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 025003 (2021).
- [11] A.E. Gleason *et al.*, *Sci. Rep.* **12**, 715 (2022).
- [12] B.W. Jones, *Discovering the Solar System*, 2nd Edition (John Wiley & Sons, Chichester, 2007).
- [13] E. Anders and N. Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 197 (1989).
- [14] V.B. Prakapenka *et al.* *Nat. Phys.* **17**, 1233 (2021).
- [15] G. Weck *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 165701 (2022).
- [16] N. Tomioka and T. Okuchi, *Sci. Rep.* **7**, 17351 (2017).
- [17] N. Tomioka *et al.*, *Commun. Earth Environ.* **2**, 16 (2021).
- [18] Y. Inubushi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 053534 (2021).