地球惑星科学におけるマルチアンビル型装置 2004

Multi-Anvil Apparatus in Earth and Planetary Science 2004

加藤 工

Takumi KATO

Current status and near-future development of the multi-anvil apparatus in Earth and planetary science are discussed, on the basis of the statistics of the recently published papers and personal views on the historical achievements. Close relationships between multi-anvil technology and material science are described, as an example of experimentation on the transport properties of the Earth's interiors and application of innovative alloy materials.
[large volume high pressure apparatus, phase transition, mantle and core materials]

1. はじめに

地球内部科学の探究がマルチアンビル型装置開発の大きな動機の一つであった事は間違いない。初期には静的圧縮装置の中で最高到達圧力を実現し、成熟期には大容量、高温発生、放射光 X 線、焼結ダイヤモンドアンビルとの組み合わせに特徴を示し、先端研究に貢献してきた。具体的成果について本学会誌の特集号「高压地球科学」[1]があり、若手研究者自身によるすぐれた研究紹介が存在する。伊藤英司氏による学会賞受賞記念の解説は自らが独断的と述べているが、20 世紀のマルチアンビル装置の成功面が本人の業績に基づいて網羅されている[4]。また、2000 年地学雑誌「地学における先端テクノロジー」では、焼結ダイヤモンド利用装置[2]と放射光実験[3]の総説がある。本稿は、具体的な研究紹介をこれらに譲り、2004 年英文誌特集号を用いた最新動向の分析（2 章）と次代の方向性に関する個人的見解（3 章）に焦点を絞る。

2. 国際誌に見る高压地球科学の実験装置の動向

Physics of the Earth and Planetary Interior (PEPI) は、30 年あまりに渡って、地震、測地数値シミュレーションを含めて、地球深部、内部の研究論文を

集めてきた国際誌である。143-144 巻は 2002 年夏に北イタリアで行われた欧米日セミナーのプロシーディング特集号 [New developments in high-pressure mineral physics and application to the Earth's interior][5] であった。さらに、145 巻ともう一つの特集号 146 巻を含めると総計 55 編の地球惑星の内部物性に関する実験的研究論文が掲載された。これをデータベースとして、研究に利用された装置の種類と放射光施設などを重複的に調査した。

マルチアンビル装置の利用率は 70% に上り高压地球科学に不可欠な手段であることが読み取れる。日本国内の大学研究室と共同利用施設からの論文は 18 編で国別としては優位ではある。しかし、EU 共同利用プログラムを持つバイロイト大学からの 11 編の報告は注目すべき躍進で、マルチアンビル実験室がわずか 10 年あまりの歴史であることを考慮すると戦略的成功と高い将来性が明らかである。

ダイヤモンドアンビル利用は 21 編 40% に上った。最近、ダイヤモンドアンビル装置で下部マントル最下部条件 120 GPa の MgSiO_3 ポストペロブスカイト相が報告された[6]。地球中心核とマントル境界付近での相転移は重要であり、これに関連した実験的研究が重点的に進められるとバランスはダイヤモンドアンビル装置に傾く。マルチアンビル装置の圧力は、参入に必要な条件の半分までしか到達していな

〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門

Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

Electronic address: tkato@geo.kyushu-u.ac.jp

いからである。しかし、ダイヤモンドアンビル実験は、地球科学においては周辺設備（高温発生、測温）、先端の実験のコストを考慮すると庶民的な研究手段とはなっていない。一方、日本国内でもマルチアンビル装置は、利用者の時間的制約を除けば、開放的な施設が多く利用者の拡大に努力している。装置利用率の推移は将来的長期的に興味深い。

放射光 X 線の利用は、26 編約 50% で、もはや標準的手段として高い需要が確立している。スプリング 8 と高工研の日本国内の施設が占める高い割合から、マルチアンビル装置との組み合わせが、大きく貢献していることが読み取れる。しかし、実験時間の制限と地域環境の制約で将来もこの程度の水準で推移すると予測される。特筆すべきことは、マルチアンビル装置、ダイヤモンドアンビル装置、放射光利用、さらに先端的分析手法の複合的応用によって実現している研究が地球惑星科学をリードしている事実である。

Table 1. High pressure apparatus and synchrotron facilities used in the published papers in Physics of the Earth and Planetary Interiors, 144–146.

Apparatus and facilities	Number over 55 papers (%)
Multi-Anvil	38 (69)
Japan domestic MA	18 (33)
Bayreuth Univ. MA	11 (20)
Diamond anvil	21 (38)
Synchrotron X-ray	26 (47)
SP-8 (Japan)	8 (15)
KEK (Japan)	4 (7)
ESRF (EU)	3 (5)
APS and NSLS (USA)	11 (20)

3. 近未来のマルチアンビル型装置

地球惑星深部の高温高圧条件を数 mm のサイズに実現し試料合成、物性測定を行う研究手段として、日本国内で川井式（6–8 もしくは MA 8）マルチアンビル型装置がほぼ確立したのは、1980 年前後であった。欧米への輸出実績と上述の現状分析によって、現在に至るまでの大成功は明らかである。その過程で激しい競争を通して、多くの高圧地球科学実験室が日本国内に誕生し、輸出先国外での改良も積極的に行われた。マルチアンビル型装置のユニーク

さは今後消滅し、すべてダイヤモンドアンビル装置に代わられると予測する見解もある。しかし、筆者は、過去に埋もれる開発試行の再評価と周辺産業界からの刺激によって、マルチアンビル装置による未踏条件実現の可能性がある、将来も高圧物性科学に貢献できると信じている。良質の焼結ダイヤモンド体がアンビル材として導入され、長らく 30 GPa 以下で停滞していたマルチアンビル型装置の限界圧力がほぼ倍増したことは、最近の好例である[7 など]。

3.1 新世代超大型マルチアンビル型装置

地球惑星科学で利用されている二段式マルチアンビル型装置のほとんどは、500–1500 トンクラスの一軸圧縮プレスによって駆動されている。その理由は、二つの実践的制約からと考えられる。(1) 二段目立方体超硬もしくは焼結ダイヤモンドアンビルを 30 mm 以下として経費を抑える。(2) 放射光 X 線実験の予備実験装置として使用するため、SP-8 の 1500 トン装置程度で十分である。

ここ数年内に二ヶ所の研究機関に超大型プレスが導入された。パイロイト大学の 5000 トンプレス[8]と愛媛大学の 3000 トン装置[9]である。両者ともマルチアンビル装置の利点である大容量、長時間加熱により大型試料合成と精密物性測定を目的としている。この提案は目新しいものではなく、マルチアンビル創世記 1970 年代には複数の 1 万トンクラス装置が稼働していた。筆者は大学院時代、名古屋大学で 17000 トンプレス駆動のマルチアンビル装置を保有する研究室で育った。その数年前にさかのぼる導入時の計画は、地球中心核の極超高压力発生であったらしいが、1980 年時点では大容量を活かした静水圧下の物性測定が主要プロジェクトになっていた[10]。これらの旧世代大型プレスは、大型超硬アンビルの品質の問題もあり、十分な威力を発揮する事無く低出力に限って使用された時代が続いた。

今日の新世代超大型マルチアンビル計画の実現性は、周辺産業環境の進歩に依存している。大型装置設計が、カンに頼った改良から有限要素法解析などによる実証的装置理論の応用が可能になった。また、高速計算機普及による油圧制御、駆動制御と NC 工作機普及による部品作成によって、研究者は奴隷労働から解放されている。焼結技術によって大型超硬アンビルも高性能化している。新世代大型装置の成功はこれらの事情により約束されていると考えられる。大容量物性測定に関する国際的優位性を保つ戦

略として、国内の放射光施設への導入検討を提案したい。

3.2 機能材料の応用

前節では、計算機環境の進歩によるマルチアンビル装置の利用条件拡大について述べた。ここでは、国家政策として重点推進されている材料物質科学の成果を高温高压実験に活用する可能性を提案する。機能材料は、必要な機能を発現する物質の工学的産業的需要から生まれた。結晶構造、多元系混合物、界面特性など、特殊環境下の機能発現機構の理論と合成実用化が両面的に進められている。地球惑星科学との接点を考えると、目的は全く異なっているが、上述の基礎となる理論は完全にオーバーラップしている。地球惑星内部物質、岩石鉱物は 100 以上の元素から結晶を単位として様々な界面環境、極限環境の履歴結果として形成された。これらの複雑な取り扱いには地球科学者が最も得意とする問題で、現在、材料科学が数種類程度の元素、結晶混合物の特性評価と物性理解を検討している状況を見ると、今後地球科学の分析化学手法がより応用され貢献するだろう。数 GPa から数十 GPa の圧力条件での材料物性、合成分野でも、単結晶ダイヤモンド合成に続く産業利用の観点においても魅力的な課題の提起によって、マルチアンビル装置の利用拡大を期待する[11, 12]。

Fig. 1. An illustration of the components of the multi-anvil sliding system.

一方、すでに実用化段階にある機能性材料を特殊環境の高压実験に活用する余地は高い。形状記憶合金の温度特性を活かした駆動ピストンへの応用が報告されている[13]。筆者はこれをマルチアンビルの大容量セル内に組み込み、地球内部物質の高温高压その場条件での変形流動実験を計画しているが、そもそも形状記憶機構が相転移を利用しているため、その圧力効果、異方性形成など検討すべき課題が多い。固体圧超高压実験だけでなく、形状記憶合金特性の圧力効果は、産業利用、惑星探査機器開発での需要が想定され、大きな新研究領域として成立すると感じられるほどである。

さらに、過去の試行が今の機能材料の応用によって実用化されうる可能性がある。1970 年代前半から名古屋大学でマルチアンビル・スライディングシステム (MASS) による実験が行われた[14]が、筆者が研究室配属した 1980 年には実践的に大きな困難に直面し開発継続の気力が失われていた。Fig. 1 に MASS 型の 1 例の概念図を示す。30 年来の繰り返しであるが、無限小体積への圧縮が可能でマルチアンビル装置の中で原理的に最も優れている。実用化プロセスの極限条件利用での問題は、(1) 剛体アンビルの弾性変形、(2) 圧縮性パッドの塑性変形、(3) 摩擦 (部品間)、(4) 応力モニターの欠如、と分析できる。現在、マルチアンビル型の超高压発生に使われている焼結ダイヤモンドの弾性変形は非常に小さい、圧縮性パッドには以前の加圧過程片道のみの変形を期待した穴あきステンレスより非常に弾性限界の高い超弾性合金が利用できる、結晶粒成長や表面加工技術は高応力下で摩擦係数を制御できる、放射光 X 線利用で高圧力セル内部の応力 3 次元解析とイメージングができる。これらの組み合わせによる小型実験機での検討を速やかに開始したい。

これらに加えて言及しておきたい試行として、岡山大学におけるキュービックとグリッグス型変形試験器を組み合わせた大型マルチアンビル型装置[15]とアメリカの上下独立な油圧駆動を可能とした変形 DIA 装置がある[16]。能動的な変形実験の圧力領域拡大の画期的な計画と評価しているが、機能材料の導入が実験上のブレークとなる余地があると考えられる。

4. おわりに

地球惑星科学におけるマルチアンビル型装置に関

して、2004 年時点の利用実績を示し、近い将来の動向について個人的見解を述べた。発生圧力において地球中心核条件にまで到達したダイヤモンドアンビル装置に対して、マルチアンビル型装置は大容量精密環境制御下の物性測定実験に今まで以上に特徴を発揮する必要がある。固体地球惑星の物質輸送物性は、最も根本的で未解決の問題であり、実験手法と機構解析において、機能材料科学との共通点が多い。また、導き出される地球史物質循環の問題解決は、地震、海洋、大気、地球化学の広い地球環境科学へのインパクトが期待される。

謝 辞

本論を執筆するに際し、機会を下さった編集委員岡山大学浦川啓博士と有益なコメントを下さった匿名査読者に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 大谷栄治: 高圧力の科学と技術, **9**, 2 (1999).
- [2] 伊藤英司: 地学雑誌, **109**, 859 (2000).
- [3] 加藤工, 寺崎英紀, 久保友明: 地学雑誌, **109**, 868

- (2000).
- [4] 伊藤英司: 高圧力の科学と技術, **14**, 158 (1999).
- [5] D.C. Rubie, T.S. Duffy, E. Ohtani: Phys. Earth Planet. Inter., **143-144**, 1 (2004).
- [6] M. Murakami, K. Hirose, K. Kawamura, N. Sata, Y. Ohishi: Science, **304**, 855 (2004).
- [7] T. Katsura, K. Funakoshi, A. Kubo, N. Nishiyama, Y. Tange, Y. Sueda, T. Kubo, W. Utsumi: Phys. Earth Planet. Inter., **143-144**, 497 (2004).
- [8] D.J. Frost, B.T. Poe, R.G. Tronnes, C. Liebske, A. Duba, D.C. Rubie: Phys. Earth Planet. Inter., **143-144**, 507 (2004).
- [9] <http://www.chime-u.ac.jp/~grc/>
- [10] Y. Kozuki, A. Yoneda, A. Fujimura, H. Sawamoto, M. Kumazawa: Jpn. J. Appl. Phys., **25**, 1427 (1986).
- [11] T. Irifune, A. Kurio, S. Sakamoto, T. Inoue, H. Sumiya: Nature, **421**, 599 (2003).
- [12] W. Utsumi, H. Saitoh, H. Kaneko, T. Watanuki, K. Aoki, O. Shimomura: Nature Materials, **2**, 735 (2003).
- [13] G. Oomi, S. Aduma, Kosaka, T. Kagayama, M. Nishida: SHAPE MEMORY MATERIALS, **327-328**, 39 (2000).
- [14] 熊澤峰夫: 海洋, シンポジウム地球内部のダイナミックス **8**, **4**, 328 (1973).
- [15] <http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/>
- [16] Y. Wang, W. Durham, I. Getting, D. Weidner: Rev. Sci. Inst., **74**, 3002 (2003).

[2004 年 8 月 13 日受理]