

## 序文：構造地質学における実験技術

### Preface : Experimental techniques in structural geology

「構造地質」最終号となる本号では「構造地質学における実験技術」の特集を企画した。構造地質学では地殻変形やマントル流動によって生じた岩石を採取して変形構造の解析を行なっているが、それらが形成された物理条件やミクロな素過程を知るには、実験室において変形過程を再現することが不可欠である。そこで最近は日本でも様々なタイプの実験装置が開発され、レオロジーや岩石物性の研究が行なわれるようになってきた。実験的手法をもちいた岩石変形の研究では、目的にかなった装置開発そのものが研究の一部であるということができる。しかし、新しい装置を製作し立ち上げるまでにはかなりの時間と試行錯誤を要し、それは論文による成果報告では表にあらわれないのが通常である。本特集号ではむしろ、そうした蔭れた部分にも光をあてることを意図した。そのため、フィールド専門の読者にはややテクニカルで難しく感じられる面があるかもしれないが、信頼できるデータを得るまでは、各々の実験室において地道な積み重ねがあることを少しでも知っていただくことができれば幸いである。

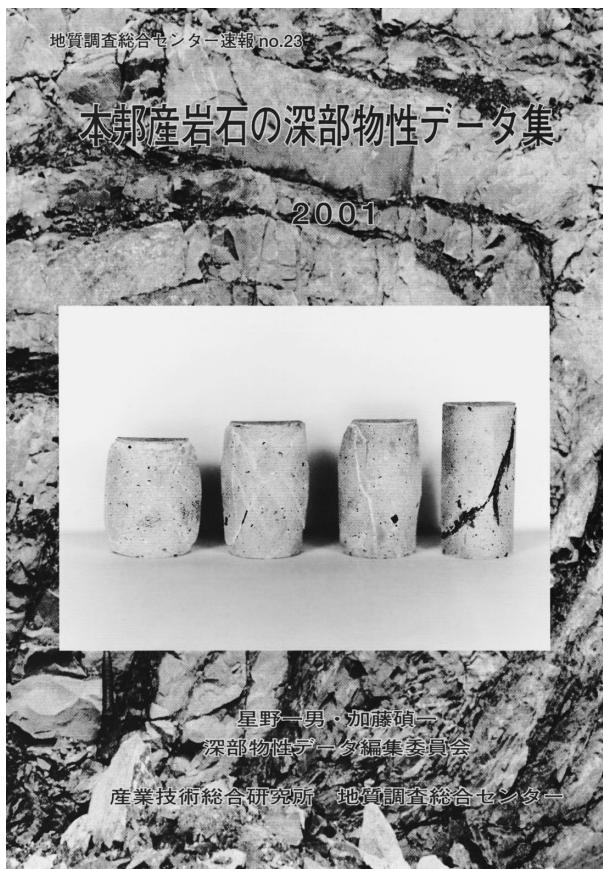
構造地質学研究会（構造研）の会誌「構造地質研究会誌」（28号から「構造地質」）が創刊された1960年代には、大理石などの三軸変形試験による脆性-延性転移の研究がアメリカでさかんに行なわれていた。特に1960年に刊行された“Rock Deformation”（Griggs and Handin, 1960）は、日本国内の岩石変形の研究者にとっても「まさに画期的な論文集であった」と植村（1997）は回想している。日本でも1966年に当時の地質調査所の星野一男によって、低速度変形が可能な油圧式三軸試験機が設計製作され、地殻中部に相当する封圧下（～250 MPa）での岩石強度試験が行なわれた。得られた膨大な実験データは最近、「本邦産岩石の深部物性データ集」（星野ほか, 2001）として出版されている（第1図）。また、新潟大学にも間隙圧制御と200°Cまでの岩石クリープ実験が可能な油圧式三軸試験機が導入された（植村, 1982, 1993）。岩石力学の知識は四万十帯など天然の岩石の圧密・変形作用にも応用され、粘性や延性（ダクティリティー）などの岩石物性の言葉による変形構造の理解が模索された（星野, 1982; 植村, 1982）。

一方、名古屋大学ではマントル流動による変形組織の解明をめざして1,000°C 1 GPa（深さ30 km相当）程度までの高温高圧条件が達成可能な固体圧式の3軸

変形試験機が開発されていた。その背景や製作の意図については本特集号の熊澤と清水の総説で、設計者の熊澤自身が詳しく述べている。この実験装置は静岡大学の増田俊明による石英再結晶の研究によって構造地質系の研究者にも広く認知されるところとなつたが、マントル物質に関する研究についてはあまり知られていない面もあるので、清水がまとめてレビューしている。装置の設計は清水・道林・渡辺・増田（俊）・熊澤による試験で明らかになったように、差応力の計測に優れる先駆的なものであった。

「構造地質研究会誌」創刊号には熊澤（1966）が「現代化革命のすすめ」という一文を寄せて、「米国では、先人が今世紀の始めから高圧実験を手がけてきているので、その基盤がありますけれども、日本では、それが全くと言ってよいほどありませんでした。そのため、実験技術を含めて、あらゆる面で、非常な苦労をしています」と述べている。この文章が書かれたのが、ちょうど上記の変形実験装置の製作時期にあたることを考えると感慨深い。熊澤（1966）はこうした環境を悲観するのではなく、逆に「実験では instrumentation を自分自身でできることが非常に重要だと思われます」と述べて、出来あいの近代的な設備にのみ頼ることに警鐘を鳴らしている。なお、岩石クリープの研究では19世紀末～20世紀初頭のイギリスの Adams and Nicolson (1898, 1901; 本号表紙写真) の実験が最初期のものとして知られているが、明治時代の日本にも意外な研究の系譜があったことが、本特集号の熊澤の報告に紹介されている。

こうして構造研の創成期には、急速に発展しつつあった岩石変形実験の分野に日本も参入し、封圧下の実験的研究の第一歩が踏み出されたが、1980年代半ば以降は長らく停滞期を迎える。欧米ではその間にGriggs型試験機（第2図）やガス圧式変形試験機によって高温高圧下の岩石の塑性流動の研究が行なわれ、この分野で日本は大きく遅れをとった。Mervyn S. Patersonの開発したガス圧試験機は製品化され、ことに最新のねじり変形機構をそなえたものは一世を風靡したが、日本では高压ガス保安法の厳しい規制のために、これを輸入して使うことも容易ではない。こうした状況に風穴をあけたのが、京都大学の嶋本利彦による国産のガス圧試験機の開発である。その概要について嶋本・堤・廣瀬・相澤・曾根・上原・谷川・野田・溝口の報告と、同じ著者らによる口絵で紹介さ



第1図 星野ほか（2001）による岩石力学物性データ集の表紙。様々な岩石の三軸試験によって、常圧下の脆性挙動（右）から高封圧下の延性挙動（左）にいたる遷移が明らかにされた。試料の直径は約20 mm。バックおよび裏表紙に使われている写真は砂岩層（四万十帯牟婁層群）の褶曲構造で、天然岩石の変形様式との対比を通じて地質構造形成メカニズムを理解しようとした星野の姿勢が伺われる。

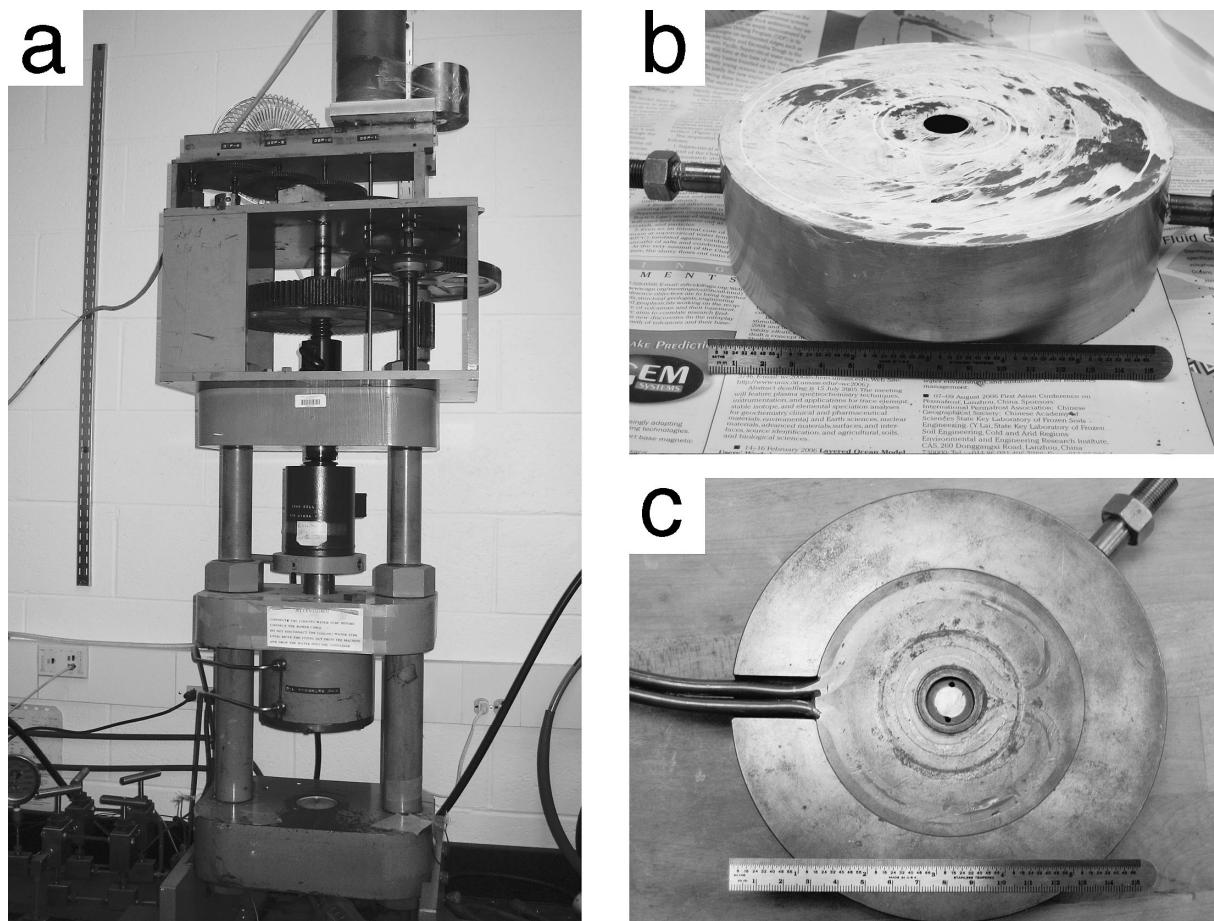
れている。これに続き産業総合研究所と東北大学でも、既存の油圧式3軸試験機を改良する形で2台目・3台目となるガス圧試験機があいついで設置された。増田（幸）・井料・小椋は産業総合研究所のガス圧試験機で、800°C以上の高温条件を実現できる内熱炉を開発している。「構造地質」前号（増田・新井、2004）にはガス圧試験機による高温高圧摩擦実験の例が報告されているのであわせて参考されたい。今後さらに内熱炉の開発が進めば、高温塑性流動の領域でもPatterson試験機と競合できるものとなるだろう。

固体圧試験機の方でも、2000年に広島大学に新たなピストンシリンダー型変形試験機が設計開発されるという進展があった。上述の名古屋大学での装置開発から数えて35年ぶりということになるが、その背景には、この間の日本における高圧科学技術の進歩がある。広島大学の装置はこの種の三軸変形試験機としては世界最高となる4 GPa（深さ120 km相当）以上の圧力発生能力を有し、これまでの予備実験で既に3 GPaを超える圧力を実現している。安東・竹下・松

原・早坂の口絵と論説には、装置仕様とともに立ち上げと力学データの取得にいたる過程が詳しく述べられている。この装置が本格稼働はじめしたことにより、マントル領域のレオロジー研究が活発化することが期待される。なお、5 GPa以上の超高圧下の変形実験にはマルチアンビルやダイヤモンドアンビルなどの超高圧発生装置が用いられる。これらは本来、試料変形を目的とした装置ではないため、実験中に歪速度や差応力を制御/計測できないのが難点であったが、最近、対向アンビル装置の一環であるドリッカマーランビルを用いた変形実験装置がエール大学の唐戸俊一郎によって開発された（西原・徐・唐戸の口絵を参照）。この装置では回転式の剪断変形機構と大型放射光施設の利用により、上述の問題を克服している。この他、六面体アンビルによる変形実験装置（Wang et al., 2003）を用いているグループもある。今後、マントル遷移層や下部マントルの変形と異方性についての研究が高圧地球科学の新たな領域として開拓されていくであろう。

断層力学の研究では汎用的な三軸試験機の他に、岩石や断層ガウジの摩擦特性を明らかにするという目的に特化したユニークな試験機が開発してきた。これについては「構造地質」39号（シュードタキライト特集）の嶋本・堤（1994）らの一連の論文と、本特集号の嶋本ほかの報告およびSone et al. の口絵に詳しく述べられている。嶋本が地震研究所在任中に製作した高温二軸試験機は3つのブロック間の滑りという最も単純な構成によって、摩擦挙動を高感度で調べることのできる試験機であり、回転式高速摩擦試験機はシュードラキライトを生じるような高速の地震性滑りを再現している。摩擦熔融が滑りを潤滑するか抑制するかという基本的な問題も、この高速摩擦試験機によって調べられた。

変形試験機は力学データの取得や回収された変形試料の観察が第一の目的であるが、それ以外にも様々な物性計測のための試験機として活用できる。ガス圧試験機をもちいた弾性波速度測定（北村・増田、2005）や透水試験（嶋本ほかの報告を参照）がそのよい例である。嶋本はまたプレスや圧力容器などを一体化した普及型の透水変形試験機を新しく開発している。近年、地震波速度や比抵抗などの地球物理学的な観測の精度が上がり、地下の構造がトモグラフィーとして詳しくイメージングされるようになってきたので、これら観測にかかる物性と透水性などの間隙物性、そして岩石変形の関わりを実験室で明らかにすることが、今後の震源過程の研究のひとつの方向性になるだろう。岩石物性に対する化学的な作用も重要であり、地震発生帶の形成に水の関与する化学反応が関わっているという考え方もある。しかし、超臨界状態にある地殻流体の熱力学的性質は未だによく定量化されていない。そこで東北大学の内田と大槻はガス圧試験機に熱水化学



第2図 1960年代後半にD.T. Griggsが設計製作した固体圧式変形実験装置。エール大学の唐戸研究室に引き取られ、現在もレオロジー研究の最前線で用いられている。「構造地質」45号(唐戸, 2001)に解説されているカンラン石の実験もこの装置による。(a) 装置本体。上方にモーターとギア系列、中央にロードセル(荷重変換器)、その下に油圧シリンダーがある。下方の空間に圧力容器(b)と台(c)が設置される。(b) 圧力容器。中心部に圧媒体と直径3.2mmの円柱型試料がセットされる。封圧は最大2.5GPa。(c) 圧力容器の下受け台。写真は片山郁夫博士の御好意による。

実験用の部品を開発・装着し、深部地殻流体の状態方程式の精密決定に挑戦している。岩石破壊に伴う電磁気の発生も地震の短期・直前予測と関係して重要な課題であり、阪神淡路大震災の際にも電磁気的学的な異常現象が大きく注目された。堤と白井は岩石破壊による電磁気信号の計測方法について解説し、封圧下の摩擦実験において計測された電界・磁界変動のメカニズムを考察している。

以上のように、本特集号では構造地質学における最新の実験技術についての論文を集めているが、成果よりも基礎技術に焦点をあてているため、一見、地味な内容に映るかもしれない。しかし、注意深く読んでいただければ、いずれも近い将来の飛躍を予感させるものであることがわかるであろう。最後になるが、本特集号の編集にあたっては構造研の会員以外の専門家の方々にも論文執筆や査読をお引き受けいただいた。また新潟大学元教授の植村武博士にはAdams and Nicolson (1898, 1901) の資料をご提供いただいた。この場を借りて、お礼申し上げたい。

## 文 献

- Adams, F.D. and Nicolson, J.T., 1898, Preliminary notice of some experiments on the flow of rocks. *Rept. 67th Meet. British Assoc. for Advancement of Sci.*, 642–643.
- Adams, F.D. and Nicolson, J.T., 1901, An experimental investigation into the flow of marble. *Philosoph. Trans. Royal Soc. London, Ser. A*, **195**, 363–405.
- Griggs, D.T. and Handin, J., 1960 eds., Rock deformation. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **79**, 282 p.
- 星野一男, 1982, 構造解析のための岩石変形実験—脆性-延性転移を中心として—. 月刊地球, **36**, 68–77.
- 星野一男・加藤碩一・深部物性データ編集委員会, 2001, 本邦産岩石の深部物性データ集. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 479 p.
- 唐戸俊一郎, 2001, 実験構造地質学の最近の進歩. 構

- 造地質, no. 45, 1-7.
- 北村圭吾・増田幸治, 2005, 高温高压条件下での岩石の弾性波速度測定とその地質学的意義. 地学雑誌, **114**, 963-974.
- 熊澤峰夫, 1966, 現代化革命のすすめ. 構造地質研究会誌, no. 1, 9-12.
- 増田幸治・新井崇史, 2004, ガス圧式高温高压変形実験装置を用いた破壊—摩擦実験. 構造地質, no. 48, 25-30.
- 嶋本利彦・堤 昭人, 1994, 新しい高速変形摩擦試験機: その基本設計と研究目的. 構造地質, no. 39, 65-78.
- 植村 武, 1982, 岩石の高压3軸試験と天然の変形速度. 月刊地球, **36**, 31-38.
- 植村 武, 1993, 変形相の研究にまつわる回想と展望. 地質雑誌, **99**, 1001-1009.
- 植村 武, 1997, 構造地質学夜話. 構造地質, no. 42, 87-94.
- Wang, Y., Durham, W. B., Getting, I. C. and Weidner, D.J., 2003, The deformation-DIA : A new apparatus for high temperature triaxial deformation to pressure up to 15 GPa. *Rev. Sci. Soc. Instr.*, **74**, 3002-3011.

清水以知子

Ichiko Shimizu

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻  
Department of Earth and Planetary Science,  
University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan