

総 説

日本における固体圧変形実験装置の開発と研究の系譜

Development of the first solid-medium deformation apparatus in Japan : A historical review

熊澤峰夫*・清水以知子**

Mineo Kumazawa* and Ichiko Shimizu**

Abstract : The first solid-medium deformation apparatus (MK65S) in Japan was developed at the Nagoya University in 1965. The apparatus was designed by one of the author (M. Kumazawa) to study the crystallographic preferred orientation (CPO) of olivine, which was thought to the cause of the seismic anisotropy in the upper mantle. MK65S enabled us to deform a large volume cylindrical sample (10 mm in diameter) at high-temperature (over 1000°C) and high-pressure (up to 1 GPa in confining pressure and 2 GPa in axial stress), and very low strain rate (as low as 10^{-7} sec $^{-1}$). This apparatus has yielded a series of important contributions to the rheology and the CPO's of olivine and spinel-type minerals, and deformation and recrystallization microstructures in quartz as early as in 1970's-1980's.

Key words : deformation experiments, solid-medium apparatus, crystallographic preferred orientation (CPO), upper mantle, olivine, spinel

はじめに

地殻深部に起こるテクトニクスの解明に向けた実験的研究に最近日本でも注目が集まっている。深部の物理的過程を理解しようとするのに、地表で観測・観察される諸現象と理論的な研究だけでは片手落ちであることが広く認識され、その手段確保も容易になったからであろう。表題の固体圧変形実験装置（第1図、第2図）はそのような目的で1965年（昭和40年）に名古屋大学理学部において、著者のひとり、熊澤峰夫によって設計開発されたものである。その後、1988年に静岡大学に移設されて現在に至っている。本装置は「超低速度変形実験装置」の名称で株式会社大隈鐵工所（現・オーケマ株式会社）によって製作されたが、商品として開発されたものではなかったため製品番号や型式がなく、論文等に報告の際にも統一的な呼称が用いられてこなかった。そこで改めて、この装置 MK65S と呼ぶことにした。MK65S が製作されてから今年で40年が経過するが、今でも消耗部品を除き、装置本体は完成当時のまま健在である。しかも、ごく最近まで、地殻深部～モホ面直下の条件でこの種の実験が

できる国内唯一の装置であった。本稿では、一般には知られていない研究の背景や技術者・研究者の系譜、装置の設計思想を熊澤の回想の形で紹介する。さらに最後の節で、これまでに公表された論文成果を清水がレビューする。なお、MK65S の構造や機能については本特集号の別稿（清水ほか、2006）で詳しく述べる。

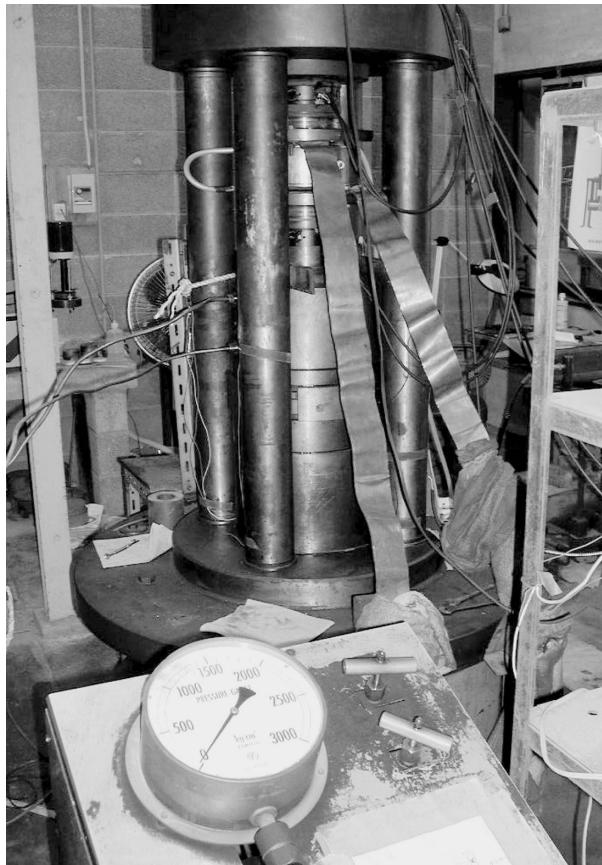
変形装置開発の背景

私（熊澤）が高圧力関係の仕事に関わったのは、名古屋大学で学位論文を上げた昭和36年（1961年）の4月、京都大学の川井直人先生〔当時講師、後に大阪大学教授〕の研究室に3日間逗留して、安川克巳さん〔当時京都大学ボスドク、後に神戸大学教授〕から対向アンビル型超高压発生装置（Bridgeman アンビルとも云う）の手ほどきを受け、練習にコーライトを合成したことから始まる。それ以来、多数の先達に教えをうけ、常用 500 MPa、圧力容器内径 30 mm の油圧装置の製作などを行い、三波川帯の結晶片岩と超塩基性岩の弾性波速度とその異方性測定などを行った (Iida et al., 1967; Iida and Kumazawa, 1970)。このころ三波川変成帯の地質構造と岩石構造は、広島大学の小島丈児とその門下の諸氏によって研究されていた。広島大学の研究を補完するとともに、その知見をマントルに応用するためには、両者を繋ぐ理論と実験を必要とする。研究上必要な手段は道具も思想も自前で調達す

2005年10月26日受付、2005年12月22日受理

* 静岡大学理学部生物地球科学教室
Institute of Geoscience, Shizuoka University, Shizuoka 422-8259, Japan

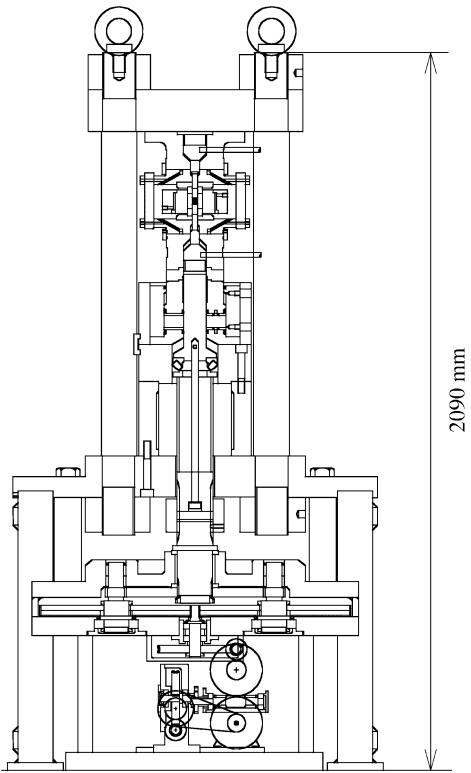
** 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan



第1図 高温高压変形実験装置 MK65S(静岡大学理学部における現在の姿)。手前はブルドン管による油圧表示とニードルバルブ。

るものである、信じていたので、先人の知恵を借りながら、愚直にあれこれ試行錯誤をするのが最も自然なアプローチだった。

この当時の私の目標は、マントルの流れ場を観測的にマッピングすることであった。1960年代にはプレートテクトニクスの観念も言葉もなかったが、地表での大陸漂移動をもたらす根本原因としてのマントル対流という言葉はあった。言葉はあっても、その実在性について具体的なイメージを描いていた研究者はきわめて限られていた。それでも、これが地球科学上の最大問題のひとつだから、どれだけの研究投資をしても構わないはずだと確信したのである。それに如何に対処するか？当然、地球内部における物質の動きを支配する温度分布や流動法則を知りたい。そうすれば、理論的に対流の存否確認はできるはずだが、それらは観測量ではない。しかし、マントル中の岩石にも野外で観察できる片麻岩などがもつ異方的構造があるだろう。だから、対流にともなう変形場・応力場を反映する鉱物結晶軸の配向を地震波の異方性として観測すれば、対流のパターンまで捉えることができるはずだ、と考えたのである。それには、地震学的な観測可能量と直結する岩石構造がどのようなものであるか、実験で把握



第2図 「超低速度変形実験装置」の青焼き設計図の写し。元の図面の縮尺は1:2.5であり、昭和40年6月の日付がある。最終的に製作された装置では、さらにいくつかの設計変更がされている。

しておけばよい。これらの目標に立ち向かえる手立ても保証もほとんどなかったが、できるところからはじめるべきだと考えた。当時、Boyd and England (1960) の固体圧媒体を使った高温高压の相転移実験、Griggs et al. (1960), Heard (1960), Handin et al. (1960) による Solnhofen limestone など各種岩石の変形実験、Carter et al. (1964) による石英の高温高压実験と変形構造などの論文に接していたので、1963年ごろには、このような実験的な研究に向けた検討を始めたと思う。当時、日本には岩石を高温高压条件下で実験的に変形させられる装置は存在していなかったので、技術と装置開発が当面の最重要課題だった。

装置製作と立ち上げ

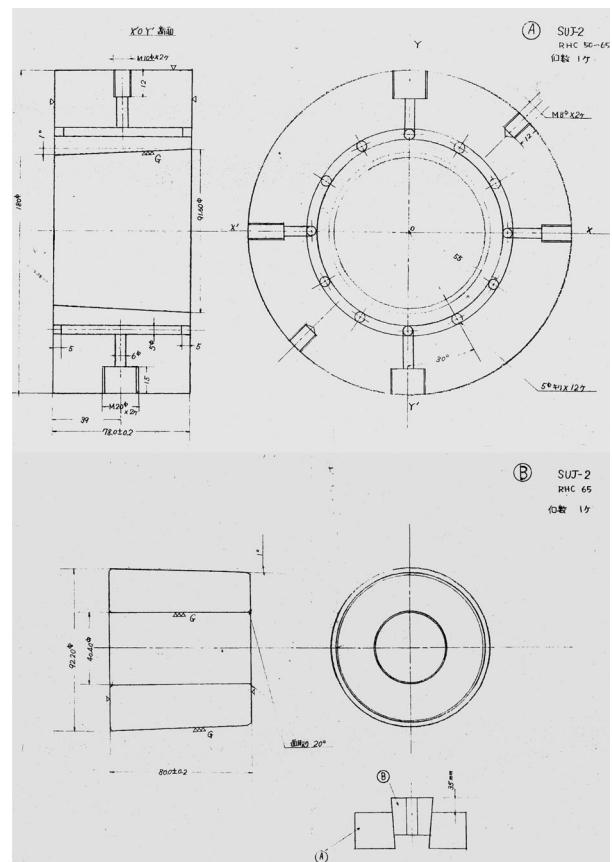
このような背景と、それまでの技術基盤に立って、飯田汲事教授の科学研究費によって装置が実際に製作されたのは1965年のことである。設計はおそらく1963年ごろから、名古屋大学理学部の金属機械工作室(現在の装置開発室)の高橋重敏さんにアドバイスを受けながら開始した。ここで、この高橋さんに言及しないわけにはいかない。高橋さんは技術職員として研究用装置の開発などに携わっていた。彼の師匠は実験

物理学の上田良二教授（故人）である。高橋さんは人格も見識も格段の人で、私は彼を人生と技術の師匠として様々なことを学んだ。その後、文部省傘下の組織で始めての技術課長となって分子科学研究所で働き、退官後、名城大学でカーボンナノチューブの発見者である飯島澄夫教授（当時）の実験を支えた。この道一筋で科学研究の最先端を卓抜した技術と技能で支えたとして、吉川英治賞を受賞した。文部大臣も出席した祝賀会のパーティー席上で、「高橋さんは自分の師匠である」と語ったら、「俺もだ」と有名な実験物理学の研究者が十何人も名乗りを上げたのには驚いたものだった。

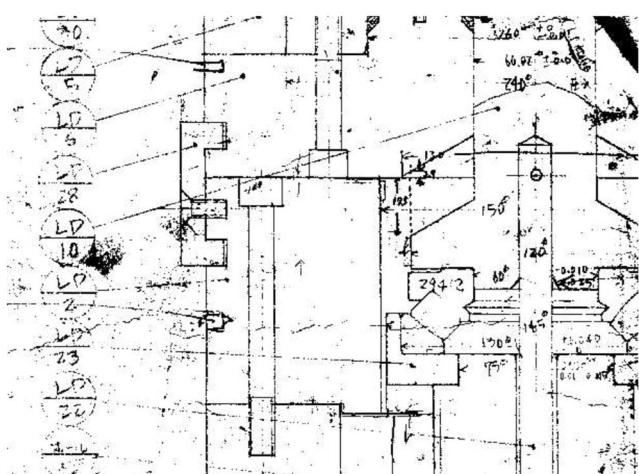
装置は最終的に株式会社大隈鐵工所に製作をお願いした（大隈鐵工所はその後、オークマ株式会社と改称し、現在、工作機械のトップメーカーのひとつである）。私の粗雑な設計図（図面は粗雑でも強度や剛性の計算は的確だったはずだ）をみた大隈鐵工所の営業担当者は、技術者を連れてきて「こんなとんでもない装置は技術的に不可能だ」と言わせたものだった。しかし、納得しない私が粘りに粘っている間に、長岡振吉さんという重役に声がとどいた。「そういえば親父から、地殻の岩石が流動する実験の話を聞いたことがある、やってみましょう」と言って、重役自ら若手技術者と一緒に議論しながら、私の強度計算のチェックから、さまざまな設計上のアドバイスまでして下さった。長岡重役の一言がなかったら、この装置は存在していなかつたであろう。この長岡重役の「親父」というのが、原子模型で有名な長岡半太郎である（長岡半太郎と岩石実験の関わりについては本特集号の熊澤（2006）を参照）。

当時のやりかたは次のようなものであった。まず、図面（第3図、第4図など）と材質の仕様書を用意して特殊鋼メーカーに鍛造品の製造を依頼する。大型の

トラックが鉄の塊をキャンバスに配達してくれる。次に大隈鐵工所のトラックにそれを取りにきてもらう。しばらくして加工した部品や、部分的に組み立てた部分や個別加工部品が配達される。それを、それまでに



第3図 圧力容器の設計図。外側と内側の円筒容器にはそれぞれテーパーが切ってあり、一番下の図のように重ねてプレスで嵌め合わされた（本文参照）。



第4図 (株) 大隈鐵工所による最終段階の設計図。左：装置の組立図（部分）。各部品には通し番号がつけられている。右：部品番号 LD-28 の固定環。図面には昭和 40 年 11 月 30 日の日付がある。

用意しておいたチーンブロックを使って、実験室で全体を組み立てるのである。耐圧容器のテーパー押し嵌め(第3図)などは、研究室のプレスで私自身がやる。その時には、このような設計や製作経験のない大隈鐵工所の技術者が何人も見にきてくれたが、嵌め合いが計算通りの力でピタリとできて面白をほどこすことができた。油圧ラムを大型にしないで120トン以上の力を発生させるために、100 MPa以上の油圧回路を要する。そのために油圧バルブまで設計製作し(ニードルバルブは輸入品しかなく、かつ恐ろしく高価だった)、ブルドン管圧力計(第1図)を除いて、すべて理学部の工場で作った。圧力媒体の整形も、加工方法の基本を大学の工場で教えてもらって、材料に合わせた工夫でほとんど全部自分達の手で行うのである。直径10 mmの岩石試料の作成用のコアラーも、当時市販品はなかったので、ボール盤を改造して自分達で作成した。

こうしてできた装置が実質的に使えるまでには、試料と圧力媒体、ヒーター構成など、試料セル部分の試行錯誤に相当長い期間(3~4年ほどだったか)を要した。それにいっしょに働いたのは当時、非常勤技官だった松井照幸さん〔メイテクなど数社の研究開発部長および役員を経て、現在、ベンチャー企業の取締役・技術開発部長〕、名古屋大学の大学生だった笠原順三さん〔東京大学地震研究所を退官後、東濃地科学センター+静岡大学客員教授〕、小林洋二さん〔筑波大学退官〕、鈴木功さん〔現在、岡山大学教授〕、塙原弘昭さん〔現在、信州大学教授〕、藤村彰夫さん〔現在、宇宙研教授〕、東京大学の大学院学生だった増田俊明さん〔現在、静岡大学教授〕達であった。これによって、マントルや地殻流動についての先駆的研究がなされた。

この装置は1988年に藤村さんの知恵を借りて、増田忠志さん、鈴木和司さん、鳥居龍晴さん、石川秀藏さん〔現在、名古屋大学技術開発室〕らによってギヤの駆動系などの改造がされたのち、増田俊明さんが赴任していた静岡大学に移管された。名古屋大学の高圧研究は、20 GPa、2000°Cという更に超高圧・高温領域の技術開発(Kumazawa, 1971, 1973; Kumazawa et al., 1972; Masaki et al., 1975)と670 km深のマントル漸移層の相関係と物性解明(Kumazawa et al., 1974; Kato and Kumazawa, 1985 a, b; Sawamoto, 1977, 1986, 1987)に重点をシフトしていくからである。これと平行して始めた鉱物結晶の超音波スペクトロスコピー^(註)(Sumino et al., 1976; Ohno, 1976)や実験惑星学の研究(Hashimoto et al., 1979; Kawakami et al., 1983)も発展する中にあって、岩石構造と異方性の研究そのものは名古屋大学から消滅した。こののち、岩石変形の実験技術は静岡大学の増田さんと学生諸君に引き継がれていった。

(註)超音波スペクトロスコピーは、微小な鉱物試料で弾性波速度とその異方性を測定するもので、その実用化と組織的測定はほとんどこの研究室で行われた(その後、米国における高温超電導物質の測定で脚光を浴び、商品もできたとのことである)。人工合成鉱物も含め、当時入手可能なマントル鉱物を測定し尽くして名古屋大学での研究は終わったが、このあと大野一郎さん〔現在、愛媛大学教授〕、鈴木功さん、米田明さん〔現在、岡山大学地球内部研究センター助教授〕らによって、高圧の効果、高温における相転移効果など、より高度な研究に発展していった。カンラン石の高圧鉱物(β 相と γ 相)中の弾性波速度はニューヨーク州立大学(ストーニーブロック)と共同で、当時名古屋大学助教授だった澤本紘さん〔同教授を経てすでに退官〕が結晶の合成と測定の両方をやった(Sawamoto et al., 1984; Wiedner et al., 1984)。これによって上部マントルに関するかぎり、実験的基礎データをひと通り揃えたことになった。最近は分子動力学によって、異方性の圧力変化まで推測できる。これで上部マントルの地震波速度異方性に関する実際の観測データがあれば、岩石構造の異方性と関係づけられるはずである。そこで次の課題は、観測データの取得と解析ということになる。これに関しては、分極性の波を能動的に使う観測法(アクロス)を開発実用化しているので、別の機会に紹介しよう。

目的と設計思想

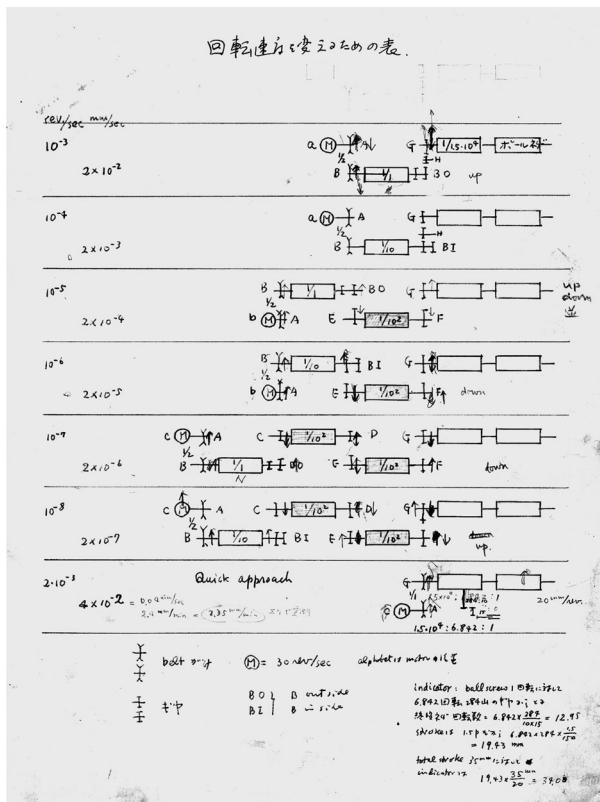
当時の知識でマントル物質の歪速度は $10^{-14} \text{ sec}^{-1}$ 以下の超低速度と認識していたが、実験室レベルでは 10^{-7} sec^{-1} ぐらいが制御可能な限度と判断した。(1000 mmの鉄の柱は1度の気温変化で、長さが $1000 \times 10^{-5} = 0.01 \text{ mm}$ だけ変わる。試料の寸法を10 mmとしたら、3時間に1度の温度変化で、歪速度は 10^{-7} sec^{-1} くらいになってしまう。こんなことも含めて、いろいろな計算をして対応を考えていたと記憶する)。また、目標はマントルであったけれども、とりあえずモホ面程度までの高温高圧まで到達できれば、すでに大満足という考えであった。実現できる物理条件の制約に若干の不足があっても実験結果に理論的あるいは経験的外挿が効く可能性もある。そこで、1 GPa 1,200°Cまでという当時としては現実的な条件(他の人たちからは、できそうもない非現実的な条件という論評を受けていた)を設定した。

温度圧力条件は固体圧媒体を使えば技術的に実現可能だと確信したが、固体圧を使うかぎり、駆動ピストンとの摩擦が著しく大きく、差応力を制御できない(当時でも対抗アンビル型装置で50 GPaの高圧が出了たが、これは固体ガスケットの摩擦が大きいことの

逆利用であった). 高精度で応力-歪曲線を実験的に決める「試験機」の製作は、夢の中にあったが、実行計画にはなかった。そこで装置は強制的超低速度変形の結果、発生する結晶軸の選択配向などを調べるのを目的として、「超低速度変形実験装置」と呼んだ。この目的のためには、試料寸法がセンチメートル程度あり、変形をもたらす応力主軸方向がわかれればよい。圧力媒体と称している部分は圧力「も」伝達するが、実効的にはむしろ熱絶縁体としての機能と、圧縮率の高いガスを扱わない簡便性が、技術的な優先事項であった。このような検討の末、設定した装置設計の方針を要約すると次のようであった。

- (1) 圧力媒体は高温高圧でも安定な固体とする。
- (2) 試料直径を 10 mm、長さを最大 25 mm とする。
- (3) 最高温度 1200°C、最大封圧 1.0 GPa、最大軸圧 2 GPa の範囲まで実験可能にする。
- (4) 変形速度を $4 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-8}$ mm/sec、歪速度にして 10^{-7} sec⁻¹ 程度までとする(第5図)。
- (5) 試料に加わる応力を測定できるかもしれない機構を組み込む。

上記仕様のうち、(2)は当時 Griggs (1967) が使っていた試料(直径約 3 mm)に比べ著しく大きい(UCLA で Griggs の実験装置をはじめて見たのは 1970 年の



第5図 ギア(歯車)による速度変換系列を表わす手書きの原図。

ことである)。(5)については必要な測定精度を達せられる保証はないが、その試行を通じた経験蓄積に意義と目標を設定し、ちょっとした機構をつけておいた。この機構が今になって生かされて(本特集号、清水ほか(2006))、応力-歪速度曲線が精度よく得られることができたのは感慨深い。

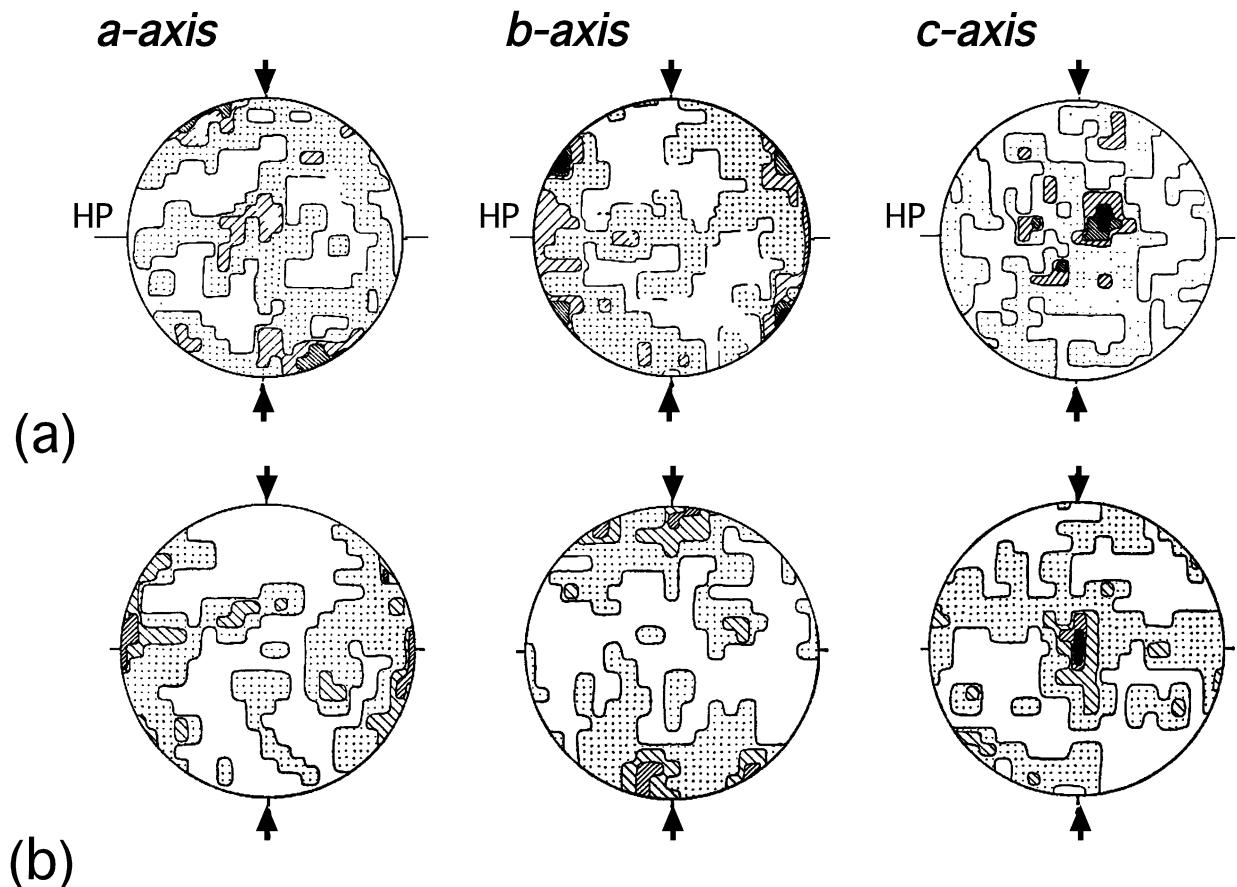
これまでの研究成果

高温高圧変形実験装置 MK65S 開発の動機は上部マントルの応力場・流れ場の中でつくられる岩石の異方的構造を解明することにあったので、装置が完成後、真っ先に手をつけられたのは北海道幌満カンラン岩(ダナイト)を用いた高温高圧変形実験であった。その結果は飯田ほか(1971)に報告されている。実験は封圧 800 MPa、軸圧 2 GPa まで、温度 900–1000°C、歪速度 $2.5 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-7}$ sec⁻¹ で行なわれ、歪量は最大で 15% におよぶ。いくつかの試料にはキンクバンドが生じており、その方位から {0kl} [100] の辺り面の活動が推定された。それらの変形条件は、Raleigh (1968) が示した封圧 500 MPa における {0kl} [100] 辺り系の温度-歪速度領域から少しそれぞれおり、圧力の違いに起因すると推論された。同時期に発表された Carter and Avé Lallmant (1970) の実験ほど体系的ではなかったが、辺り系の圧力依存性を独立に見いだしていたことは注目される。

幌満カンラン岩の変形実験では、応力-歪曲線や実験試料の観察から、高温塑性流動により定常クリープに達していたことが確かめられ、流動則も求められた(塚原, 1974; Tsukahara, 1974)。然しながら、期待していたような再結晶や結晶方位分布の改変は起こらなかった。このことは多少とも熊澤らの研究グループを気落ちさせることとなったが、すぐに新しい手立てが考えられた。まず、再結晶が限定的にしか起こらなかっただけの一つとして、天然のカンラン岩の結晶粒径が大きかった(数百ミクロン)ことがあげられる。そこで新たな実験(Tsukahara et al., 1976)では、天然および人工合成カンラン石粉末が出発物質に用いられた。細粒実験試料の結晶方位分布の決定には、X線極点固形ゴニオメーターが導入された。変形組織を発達させるためには、より高温で実験を行なえばよいが(温度は最高 1350°C まで達成できていた)、通常の安定な範囲(~1100°C)で実効的な温度をあげるために、合成の鉄カンラン石(ファイアライト)粉末を出発物質とする実験が行なわれた。鉄カンラン石は Mg に富む天然のカンラン石よりも融点が低い(~1200°C)ため、同じ温度でもレオロジーを支配する融点換算温度(homologous temperature)が大きくなる。いわば天然カンラン石のアナログ物質として用いられたのであった。

天然カンラン石をホットプレスした試料を出発物質とした圧縮試験では、軸対称に応力を加えているにも関わらず、第6図aのような非軸対称な極点図が得られた。結晶a軸とb軸はそれぞれ、圧縮軸から30°と60°の位置に集中している。塚原らは詳しい説明を与えていないが、(010) [100] の辺りが2方向で卓越したと考えれば説明できる。しかも、最大剪断応力方向の45°ではなく、断層と同じ30°の角度で辺りが起こっていることは興味深い。塑性不安定性により試料内部に共役な剪断帯が形成されていた可能性が示唆される。類似した配列パターンは6GPaおよび8GPaの超高圧実験（山崎ほか, 1996）でも報告されている。鉄カンラン石の実験では顕著な粒成長とともに結晶b軸が最大圧縮軸 (σ_1) 方向に向く選択的な結晶配向が見いだされた（第6図b）。この方位分布は弾性エネルギー最小化に基づく熱力学理論（Kamb, 1959; Kumazawa et al., 1971）では説明がつかず、卓越辺り面 (010) が圧縮軸に垂直になる「硬い」結晶粒子が「柔らかい」粒子を浸食するような再結晶が起ったと解釈された。

積された。そのメカニズムとして、辺りやすい方位の結晶にはより多くの転位が生じるため、転位エネルギーの差に駆動された粒界移動が起こる選択的粒成長モデルが提案された。実験条件はいずれの出発物質を用いた場合も封圧 650 MPa, 歪速度 $\sim 10^{-7}$ sec $^{-1}$ なので、結晶配向パターンの違いを生んだ原因としては温度効果が最も有力である。天然カンラン石の実験は 990–1060°C, 融点換算温度にして 0.6 付近であるのに對し、Fe-カンラン石の実験は 890–900°C, 融点換算温度で 0.8 付近となる。他の要因としては初期物質の結晶粒径や H₂O 含有量の違いなどがあげられる。結晶 b 軸が σ_1 方向に集中する配向パターンは Avé Lallement and Carter (1970) による報告があり、後の研究者によっても繰り返し見いだされている（Kunze and Avé Lallement, 1981; Karato et al., 1986; Karato, 1988; Bussod et al., 1993; Zhang and Karato, 1995）。Karato (1987) は、高温領域で結晶辺りによる幾何学的配向 (a 軸//剪断面), 低温では動的再結晶に支配された選択配向 (b 軸//圧縮軸) が卓越すると予想した



第6図 変形実験で得られたカンラン石の代表的な結晶方位パターン。Tsukahara et al. (1976) の Fig. 10a と Fig. 11a を改変 (©日本地質学会 1976)。矢印は変形実験における圧縮軸方向。(a) では一の目潟のレルゾライトノデュールから分離されたカンラン石粉末 (粒径 50 μm 以下) をホットプレスにより圧密し、出発物質を生成。HP: ホットプレス時の軸方向。温度 1060°C, 封圧 650 MPa, 歪速度 1.5×10^{-6} mm/sec で 10 時間変形 (軸方向の短縮歪 5.4%)。実験番号 HO-7。(b) は人工焼結鉄カンラン石粉末 (粒径数 μm 以下) を出発物質とした実験。温度 900°C, 封圧 610 MPa, 歪速度 1.8×10^{-6} mm/sec で 29 時間変形 (軸方向の短縮歪 19%)。実験番号 F-14。カンラン石の結晶軸は光学的手法により、それぞれ 100 粒子計測された。等高線間隔は 1, 3, 5, 7%。

が、Tsukahara et al. (1976) の結果はむしろ逆のセンスを示していることに注意したい。

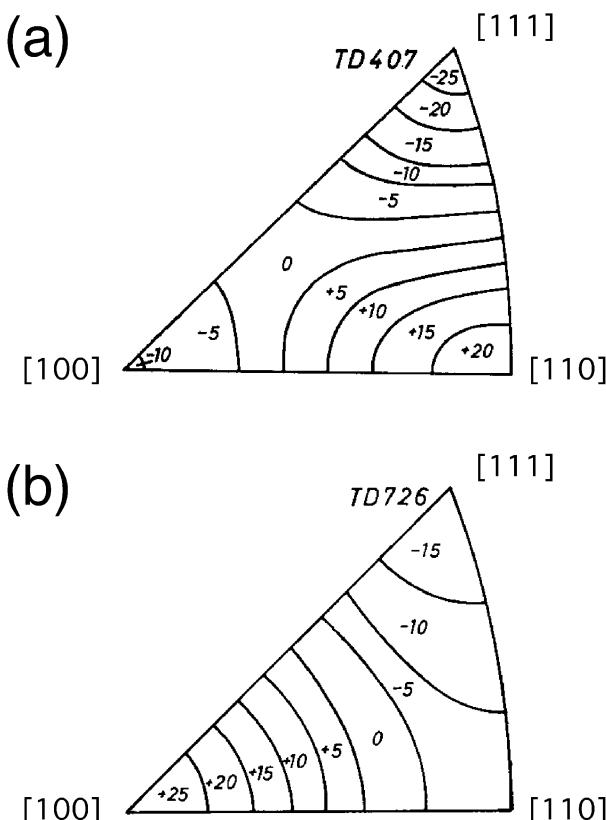
上部マントルの弾性波異方性を考えるためにカラン石 (α 相) のみならず、これが高圧相転移してできる β 相 (変形スピネル) や γ 相 (スピネル) のつくる結晶軸配向も明らかにしなければならない。しかし、MK65S の温度圧力範囲ではこれらの高圧相が安定な領域で変形実験を行なうことはできない。そこで、ここでもまたアナログ物質が利用された。珪酸塩スピネルのアナログとして選ばれたのはトレボライト NiFe_2O_4 であり、 γ 相と同じ結晶構造を有する (Fujimura et al., 1979; Fujimura, 1984, 1989; 藤村, 1986)。スピネルは等軸晶系のため、結晶方位の決定はすべて X 線極点図形ゴニオメーターによって行なわれた。解析の結果、低温-高歪速度では [110] 軸が圧縮軸に平行になり (タイプ I)，高温-低歪速度では [100] 軸が圧縮軸方向に並ぶ (タイプ II) という、対照的なパターンが得られた (第 7 図)。タイプ I は結晶辺りによる幾何学的回転モデル (Taylor-Bishop-Hill

モデル) でよく説明できるのに対し、タイプ II はこれでは説明できない。変形によって蓄積する転位エネルギーと弾性エネルギーのいずれもが、[100] 軸が圧縮軸方向に向くときに最小化されるので、歪エネルギーに駆動される粒界移動がそのメカニズムであると推論された。結晶軸の定向配列が動的再結晶の影響で変化することを、これほど明瞭に示した例は稀である。現実のマントル中の γ -スピネルでは、再結晶に支配されるタイプ II の配向になると推定されている。

なお、藤村らは名古屋大学で新たに開発された MA 8 型高圧発生装置によって、 β 相のアナログ物質 $\beta\text{-MnGe}_2\text{O}_4$ の変形実験も行なっている (藤村ほか, 1981; 藤村, 1986; Fujimura, 1989)。等方的に圧力を発生するマルチアンビル装置でも、試料を硬いピストンで挟むことにより、圧媒体との圧縮特性の差で変形が起こる。この場合、軸圧や歪速度をコントロールすることはできないが、5 GPa を超える高圧条件で変形特性を調べることができる。今でこそマルチアンビル装置による変形実験も特殊なことではなくなっているが (Green et al., 1990; Bussod et al., 1993; 山崎ほか, 1996; Karato and Rubie, 1997)，この方法を最初に考案し実用したのが藤村らの実験であった。

地殻流動による変形組織については、瑪瑙を出発物質とした一連の実験が行なわれた (Masuda and Fujimura, 1981; 増田・藤村, 1981; 増田, 1983, 1984, 1986)。瑪瑙は高温で H_2O を放出するため、石英の塑性変形が容易になるとともに、再結晶が促進される利点がある。パイロフィライト圧媒体も、脱水反応により wet な環境を維持するのに役立てられた。石英の動的再結晶による組織は、結晶の外形により低温-高歪速度領域の S タイプと高温-低歪速度領域の P タイプに分類され、天然の変形条件への外挿により、変成帶の石英組織との対応づけが行なわれた (Masuda, 1982)。石英の変形組織については、のちに Hirth and Tullis (1992) もまた温度-歪速度をパラメータとする分類を提案している。両者は一見、類似した分類にも見えるが、Masuda and Fujimura (1981) は定常組織の概念から分類を行なっているのに対し、Hirth and Tullis (1992) は核生成と粒界移動という再結晶メカニズムを基準に分類しているので、両者を直接結びつけるのは正しくない。Hirth and Tullis (1992) の論文は透過電子顕微鏡 (TEM) 観察を駆使しており被引用件数も多いが、そのことによって増田・藤村論文の価値が減じるということでもない。このことはすでに清水 (1998) で論じた。P タイプと S タイプの成因については、いくつか異なる解釈が出されており (Karato and Masuda, 1989; Takahashi et al., 1998)，今後、より詳しい検討が必要である。

以上のように、名古屋大学で行なわれていた研究は国際的にみても最前線のものであり、実験手法も材料



第 7 図 マントルの γ -スピネルのアナログ物質 (NiFe_2O_4) の変形実験による結晶方位選択配向の代表的な例。Fujimura (1984) の Fig. 2 より抜粋。逆極点図において、圧縮軸方向の分布を示す。等高線の数字はランダム配向からのずれ (%) を表す。(a) 低温-高歪速度のタイプ I の例。温度 800°C, 歪速度 $1.64 \times 10^{-5} \text{ mm/sec}$, dry 条件。(b) 高温-低歪速度のタイプ II の例。温度 1000°C, 歪速度 $1.53 \times 10^{-6} \text{ mm/sec}$ 。英数字は実験番号。

物質科学の知識を生かしながら進化していった。上記のほかにも、部分熔融系におけるカンラン石の結晶軸配向 (Tsukahara and Yamazaki, 1976; 藤村, 1986; Fujimura, 1989) や、アルミニシリケイトの相転移に及ぼす差応力の影響 (笠原順三, 私信) など、今日的にも興味をそそられる研究テーマが扱われている。また、通常の軸対称の圧縮試験に加え、1軸展張試験 (Tsukahara et al., 1976; Fujimura, 1984) も行なわれるなど、多彩な試みがされていた。MK65S の開発とこれをもちいた経験の積み重ねは、その後のマルチアンビル装置をもちいた超高压実験の基盤となったともいえる。名古屋大学の高圧実験グループは、他の研究機関と競合しつつ、日本の超高压研究を世界のトップレベルに引き上げるのに貢献していった。一方、マントル流動の実験研究そのものは 1980 年代でとだえることになる。海外の研究拠点では引き続きカンラン石などの変形実験が行なわれ、今世紀にはいってからも、結晶軸配向に対する H_2O やメルトの効果 (Jung and Karato, 2001; Holtzman et al., 2003) など新たな議論が展開されていることを考えると、日本でこの分野の研究の継承がなかったのは残念なことである。しかしながら、選択配向をきめる要因やメカニズム、とりわけ再結晶の役割については、まだまだ未解決な問題が多い。最近は走査型電子顕微鏡の後方電子散乱像 (EBSD あるいは EBSP) による解析法が発達し、再結晶微細組織と結晶方位の対応づけが可能となった。塙原や藤村らが提起した問題をつきつめていくための環境が、今ようやく整ったといえよう。

その後、実験装置 MK65S は静岡大学の増田研究室に引き取られ、教育研究に使用された。それらの結果の一部は国際誌にも発表されている (Masuda et al., 1997)。しかし、最近は実験の継承者がなく、装置自体も錆びついた状態が続いた。今回、実験装置 MK65S を研究の第一線に戻すべく全面的な点検整備を行ない、装置復活後の最初の仕事として、前節の目標(5)にある応力測定の精度の検証を行なった。これについては続く論文 (清水ほか, 2006) で詳しく報告する。

謝 辞

静岡大学の道林克禎・増田俊明の両氏には、図版作成と文献資料の収集、粗稿の校閲で終始お世話になった。本原稿に使われた青焼設計図からの図面起こしはすべて道林氏の手によるものである。本装置復活の契機は、嶋本利彦教授による「第1回試験機設計セミナー」(2001年8月23-25日、京都大学)における議論にあったことを付記しておく。著者の一人、熊澤はここで述べた実験的研究を支援していただいた多数の先人と後輩諸氏（お名前を出さなかつたが、大変お世話になった方が大勢いる）に、この場を借りて深くお礼

を申し上げる。

文 献

- Avé Lallement, H.G. and Carter, N.L., 1970, Syntectonic recrystallization of olivine and modes of flow in the upper mantle. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 2203-2220.
- Boyd, F.R. and England, J.L., 1960, Apparatus for phase equilibrium measurements at pressures up to 50 kilobars and temperatures up-to 1750°C. *Jour. Geophys. Res.*, **65**, 741-748.
- Bussod, G.Y., Katsura, T., and Rubie, D.C., 1993, A large volume multi-anvil press as a high $P-T$ deformation apparatus. *Pure. Appl. Geophys.*, **141**, 579-599.
- Carter, N.L. and Avé Lallement, H.G., 1970, High-temperature flow of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 2181-2202.
- Carter, N.L., Christie, J.M., and Griggs, D.T., 1964, Experimental deformation and recrystallization of quartz. *Jour. Geol.*, **72**, 687-733.
- Green, H.W., II., Young, T.E., Walker D., and Scholz, C.H., 1990, Anticraack-associated faulting at very high pressure in natural olivine. *Nature*, **348**, 720-722.
- Griggs, D.T., 1967, Hydrolytic weakening of quartz and other silicates. *Gephys. Jour. Roy. Astron. Soc.*, **14**, 19-31.
- Griggs, D.T., Turner, F.J., and Heard, H.C., 1960, Deformation of rocks at 500°C to 800°C. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **79**, 39-104.
- Fujimura, A., 1984, Preferred orientation of silicate spinel inferred from experimentally deformed aggregates of trevorite. *Jour. Phys. Earth*, **32**, 273-297.
- 藤村彰夫, 1986, マントル鉱物の選択配向, 唐戸・鳥海編, 固体と地球のレオロジー, 東海大学出版会, 202-218.
- Fujimura, A., 1989, Preferred orientation of mantle minerals. In Karato, S. and Toriumi, M., eds., *Rheology of solids and of the Earth*, Oxford University Press, New York, 263-283.
- 藤村彰夫・遠藤節子・加藤 学・熊沢峰夫, 1981, 变形スピネル β - Mn_2GeO_4 の選択配向. 地震学会昭和 56 年春季大会予稿集, 185.
- Fujimura, A., Ohno, I., and Kumazawa, M., 1979, Determination of preferred orientation of cubic crystals in the experimentally produced tectonites with a special reference to spinel

- type mineral. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **85**, 27–45.
- Handin, J., Higgs, D.V., and O'Brien, J.K., 1960, Torsion of Yule marble under confining pressure. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **79**, 245–274.
- Hashimoto, A., Kumazawa, M., and Onuma, N., 1979, Evaporation metamorphism of primitive dust material in the early solar nebula. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **43**, 13–21.
- Heard, H.C., 1960, Transition from brittle to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **79**, 193–226.
- Hirth, G. and Tullis, J., 1992, Dislocation creep regimes in quartz aggregates, *Jour. Struct. Geol.*, **14**, 145–159.
- Holtzman, B.K., Kohlstedt, D.L., Zimmerman, M.E., Heidelbach, F., Hiraga, T., and Hustoft, J., 2003, Melt segregation and strain partitioning : Implications for seismic anisotropy and mantle flow. *Science*, **301**, 1227–1230.
- Iida, K. and Kumazawa, M., 1970, Elastic anisotropy of crystalline schists and dunite. *Rock Mech. Japan*, **1**, 26–28.
- Iida, K., Sugino, T., Furuhashi, H., and Kumazawa, M., 1967, Elastic dilatational wave velocity in crystalline schists from Sanbagawa metamorphic terrain, Shikoku, Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **15**, 112–147.
- 飯田汲事・塙原弘昭・熊沢峰夫・小林洋二・鈴木功・笠原順三, 1971, 高温高压下における岩石の超低速度变形. 材料, **20**, 179–184.
- Jung, H. and Karato, S., 2001, Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, **293**, 1460–1463.
- Kamb, W.B., 1959, Theory of preferred crystal orientation developed by crystallization under stress, *Jour. Geology*, **67**, 153–170.
- Karato, S., 1987, Seismic anisotropy due to lattice preferred orientation of minerals : Kinematic or dynamic? In Manghnani, M.H. and Syono, Y., eds., *High pressure research in mineral physics*, Amer. Geophys. Union, Washington D.C., Geophysical Monograph, **39**, 455–471.
- Karato, S., 1988, The role of recrystallization in the preferred orientation of olivine. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **51**, 107–122.
- Karato, S. and Masuda, T., 1989, Anisotropic grain growth in quartz aggregates under stress and its implication for foliation development. *Geology*, **17**, 695–698.
- Karato, S. and Rubie, D.C., 1997, Toward an experimental study of deep mantle rheology : A new multianvil sample assembly for deformation studies under high pressure and temperatures. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 20111–20122.
- Kato, T. and Kumazawa, M., 1985a, Stability of phase B, a hydrous magnesium silicate, to 2300°C at 20 GPa. *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 534–535.
- Kato, T. and Kumazawa, M., 1985b, Garnet phase of $MgSiO_3$ filling the pyroxene-ilmenite gap at very high temperature. *Nature*, **316**, 803–805.
- Kawakami, S., Mizutani, H., Takagi, Y., Kato, M. and Kumazawa, M., 1983, Impact Experiment on ice. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 5806–5814.
- Kumazawa, M., 1971, Multiple-anvil sliding system —a new mechanism of producing very high pressure in a large volume. *High Temperatures—High Pressures*, **3**, 243–260.
- Kumazawa, M., 1973, Theory of generation of very high static pressures by an external force. *High Temperatures—High Pressures*, **5**, 599–619.
- 熊澤峰夫, 2006, 岩石物性の先駆的研究者としての長岡半太郎, 構造地質, no. 49, 83–86.
- Kumazawa, M., Helmstead, H., and Masaki, K., 1971, Elastic properties of eclogite xenoliths from diatremes of the east Colorado Plateau and their implication to the upper mantle structure. *Jour. Geophys. Res.*, **76**, 1231–1247.
- Kumazawa, M., Masaki, K., Sawamoto, H., and Kato, M., 1972, Guide blocks and compressible pads for the practical operation of multiple-anvil sliding system for the production of high pressure. *High Temperatures—High Pressures*, **4**, 293–310.
- Kumazawa, M., Sawamoto, H., Ohtani, E. and Masaki, K., 1974, Postspinel phase of forsterite and evolution of the Earth's mantle. *Nature*, **247**, 356–358.
- Kunze, F.R. and Avé Lallement, H.G., 1981, Non-coaxial experimental deformation of olivine. *Tectonophysics*, **74**, T1–T13.
- Masaki, K., Sawamoto, H., Ohtani, E., Kumazawa, M., Machida, M., Mizukusa, S., and Nakayama, N., 1975, High pressure generation by MASS 3I 8–90 type apparatus. *Rev. Sci. Instrum.*, **46**, 84–88.
- Masuda, T., 1982, A microstructural sequence of schists in central Shikoku, Southwest Japan. *Tectonophysics*, **83**, 329–345.

- 増田俊明, 1983, 高温高压下の岩石変形実験. 地学雑誌, **92**, 495-499.
- 増田俊明, 1984, 流動と破壊. 木村敏雄編, 地質構造の科学, 朝倉書店, 40-66.
- 増田俊明, 1986, 石英の変形組織—形成過程についての一考察—. 唐戸俊一郎・鳥海光弘編, 固体と地球のレオロジー, 東海大学出版会, 194-201.
- Masuda, T. and Fujimura, A., 1981, Microstructural development of fine-grained quartz aggregates by syntectonic recrystallization. *Tectonophysics*, **72**, 105-128.
- 増田俊明・藤村彰夫, 1981, 地下深部における岩石の変形様式. 月刊地球, **3**, 24-30.
- Masuda, T., Morikawa, T., Nakayama, Y., and Suzuki, S., 1997, Grain-boundary migration of quartz during annealing experiments at high temperature and pressure. *Jour. Metamorph. Geol.*, **15**, 311-322.
- Ohno, I., 1976, Free vibration of a rectangular parallelepiped crystal and its application to determination of elastic constants of orthorhombic crystals. *Jour. Phys. Earth*, **24**, 355-279.
- Raleigh, C. B., 1968, Mechanisms of plastic deformation of olivine. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 5391-5406.
- Sawamoto, H., 1977, Orthorhombic perovskite (Mg, Fe) SiO_3 and constitution of the lower mantle. In Manghnani, M. H. and Akimoto, S., eds., *High pressure research : Application in geophysics*, Academic Press, New York, 219-244.
- Sawamoto, H., 1986, Single crystal growth of the modified spinel (β) and spinel (γ) phases of (Mg, Fe) SiO_4 and some geological implications. *Phys. Chem. Minerals*, **13**, 1-10.
- Sawamoto, H., 1987, Phase diagram of $MgSiO_3$ at pressures up to 24 GPa and temperatures up to 2200°C-phase stability and properties of tetragonal garnet. In Manghnani, M. H. and Syono, Y., eds., *High pressure research in mineral physics*, Amer. Geophys. Union, Washington D.C., Geophysical Monograph, **39**, 209-219.
- Sawamoto, H., Weidner, D. J., Sasaki, S. and Kumazawa, M., 1984, Single crystal elastic properties of the modified spinel phase of Mg_2SiO_4 . *Science*, **224**, 749-751.
- 清水以知子, 1998, 岩石における動的再結晶. 地質学論集, no. 50, 1-12.
- 清水以知子・道林克禎・渡辺悠太・増田俊明・熊澤峰夫, 2006, 固体圧変形実験装置 MK65S の設計と性能: 内部摩擦の評価. 構造地質, no. 49, 15-26.
- Sumino, Y., Ohno, I., Goto, T., and Kumazawa, M., 1976, Measurement of elastic constants and internal frictions on single-crystal MgO by rectangular parallelepiped resonance. *Jour. Phys. Earth*, **24**, 263-273.
- Takahashi, M., Nagahama, H., Masuda, T., and Fujimura, A., 1998, Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rate meter. *Jour. Struct. Geol.*, **20**, 269-275.
- 塙原弘昭, 1974, 岩石および珪酸塩鉱物の流動特性, 上田誠也編, 固体の流動, 東海大学出版会, 109-133.
- Tsukahara, H., 1974, Evaluation of effects of partial pressure of H_2O on power law creep for ultrabasic rocks. *Jour. Phys. Earth*, **22**, 343-358.
- Tsukahara, H. and Yamazaki, T., 1976, Preferred lattice orientation in partially melted fayalite aggregate at high temperature. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **82**, 751-756.
- Tsukahara, H., Yamazaki, T., and Ohno, I., 1976, Preferred lattice orientation produced by deformation in natural olivine aggregate and synthetic fayalite under stress. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **82**, 713-727.
- Weidner, D. H., Sawamoto, H., Sasaki, S., Kumazawa, M., 1984, Single crystal elastic properties of the spinel phase of Mg_2SiO_4 . *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 7852-7860.
- 山崎大輔・加藤 工・大谷栄治, 1996, 超高压下における応力場によるオリビンの選択配向. 地震, **49**, 39-53.