

高温高压岩石変形実験技術の開発

— 千年スケールで進行する地質現象の加速化と検証 —

増田 幸治

地震災害に正しく備えるためには、地震発生予測に関する正確な情報を社会へ発信する必要がある。そこで地震予測精度を向上させるために、物理プロセスを考慮した地震発生モデルを構築する。地質の調査を基に過去に地下深部でおきたプロセスのモデル化を行い、実験室で再現することでそれを検証する。その際、自然界と実験室の間の、環境の違いと時間の違いという二つの点を解決するために、既存の技術と独自開発した技術を統合した岩石実験手法を開発した。千年スケールで進行する地質現象を加速化して検証する技術と手法を報告する。

キーワード: 地震発生予測、地質調査、岩石実験、高温高压、減災

Development of rock deformation techniques under high-pressure and high-temperature conditions

– Evaluation of long-term geological processes by a compressed timescale process model –

Koji MASUDA

The reliability of earthquake forecast information is important for disaster mitigation in our society. A physical model of the earthquake generation process was constructed to improve the reliability of earthquake forecast information. We proposed a model based on the information extracted from geological surveys. Our model was evaluated using experimental techniques in the laboratory. During the experimental study, we considered two disparities between laboratory and natural conditions, which were differences in environmental conditions and timescale. A new experimental rock deformation technique was developed that unifies previous and newly developed techniques. Long-term geological processes were evaluated by a process model operating over a compressed timescale.

Keywords: Earthquake, geological survey, rock mechanics, high-temperature and high-pressure, disaster mitigation

1 はじめに

災害に強い社会の構築に貢献したい。地震に関する研究の最終目標は、その科学的成果をもって、地震による災害の軽減につなげることであると言える。災害は防ぐことはできないが、正しく備えることはできる。正確で、かつ地質学的にも、物理学的にも信頼性の高い情報や予測を速やかに発信することで、それが社会にとって、災害に備えるための有用な基礎情報となる。予測は単なる仮説ではなく検証された成果に基づいて科学の言葉で発信されなければならない。地震の発生予測には、データとモデルに起因するあいまいさが伴うが^[1]、我々は、より精度の高い地震発生予測モデルを構築することで、地震予測精度向上に貢献することを目指している。より精度の高い地震発生モデルを構築するためには、どのようなプロセスが起こっている

かということに関して地質学的にも物理学的にも信頼性のあるモデルを提案することが必要で、ここでは、そのモデルを検証するために開発した技術と手法を報告する。

地震研究を俯瞰したときには、地質の調査、地震波や地下水等の観測データによる研究、コンピューターを使用したシミュレーション研究、室内実験研究等さまざまな手法の研究がある。地質の調査・観測・室内実験・モデル化等、これら各種の地震研究は補完しあって地震の理解が進んできた^{[2][3]}。活断層の過去の活動状況（活動履歴）や津波堆積物の調査によって過去の巨大地震の発生時期と規模を解明することで、今後の巨大地震の発生時期や規模を予測する研究^{[4][5]}。最新の観測技術によって日本列島の地震発生状況や地殻変動（地面のわずかな動きや変化）を常時モニターし、いち早く異常を検出するための観測研

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7
Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: koji.masuda@aist.go.jp

Original manuscript received January 29, 2016, Revisions received March 11, 2016, Accepted March 12, 2016

究等が産総研でも実施されている^[6]。この研究の目標は、地震発生メカニズム、地下での岩石の挙動を明らかにすることであり、それを明らかにしないと地震発生の本質に迫ることができない。地震発生モデルやシナリオを明らかにすることで予測モデルを精緻化していこうというものである。図1に地震発生予測をするために必要な各段階の研究の流れをまとめ、高温高压岩石実験の役割と位置付けを示す^{[7][8]}。この論文では、地震発生予測モデルを検証するための手段として、室内で行う岩石実験手法を用い、千年スケールで進行する地質現象を加速化して検証する技術と手法について報告する。

地震は地下で断層が動く現象である。地下で岩石が急激に破壊する際、破壊はある面に沿ってずれる形で進行するので、断層が急激に動くことになる。自然界で起きている現象は複雑であるが、そのプロセスのメカニズムを支配している要因は何かを見極めて、物理モデルを構築し、そのモデルを検証するのが岩石実験の重要な役割である。決して、自然界の断層運動をそのままミニチュア実験として、実験室で行うのではない。室内での岩石実験をデザインする際には自然界と実験室での違いを見極めることが重要である（図2）。例えば、大きさの違い、時間スケールの違い、構造の違いなどがあげられる。大きさの違いというのは、現象の起こる空間スケールの違いのことである。自然界で起きる広範囲の断層運動や変形・破壊現象と実験室内の岩石試料内部で起こるそれらとは全く同じことが再現されているのであろうか。岩石の破壊強度は試料の大きさ（サイズ）によって変わるという実験結果も報告されている。

地震発生予測

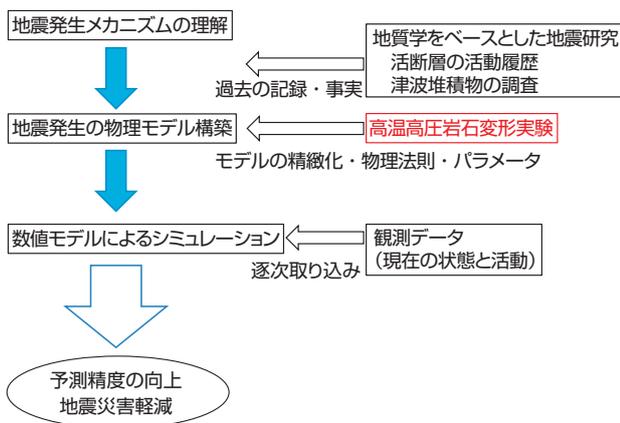


図1 地震発生予測研究と高温高压岩石変形実験の位置付け
地震発生予測のためには、地震発生メカニズムを正しく理解し、地震発生の物理モデルを構築し、地震発生や発生に至る一連の過程を数値モデル化して計算機によるシミュレーションで再現する。高温高压岩石変形実験は、その際、構成方程式やそのパラメータを見出したり、物理モデルを検証したりすることで地震発生モデルの精緻化に貢献する。

断層運動についても、断層の大きさに依存する性質と依存しない性質があることが知られている。空間的サイズに依存しない性質は実験室でそのまま再現して調べることができるかもしれないが、サイズに依存する性質は、どのように依存するかを調べて、それを基に実験室の結果を自然界に外挿したり、自然界の現象を解釈したりしなければならない。地震発生をコンピューターでシミュレーションするために現在使われている摩擦法則は主に実験室の岩石実験から得られた摩擦法則が使われているが、接触面の大きさによって岩石摩擦の性質が異なることが最近明らかにされてきた^[9]。

自然界と実験室での時間スケールの違いも重要である。自然界では通常時は非常にゆっくりとしたスピードで現象が進行している。大きな災害をもたらす大地震の発生間隔は数百年から千年程度であるが、これらの現象を全く同じ進行速度で再現することはできない。この論文ではプロセスの加速化を行った事例を報告する。また、自然界は様々な物質でできているわけではない、物質も構造も複雑になっている。断層運動において何が本質的な役割をはたしているか？ 例えば何種類かの物質（岩石）で成り立っている断層帯も、断層運動の際に全体の動きを支配しているのは何か？ どこか？ 体積の割合で一番多く含まれる物質の性質（物性）が全体を支配しているとは限らない。含まれる量としては少ないが、その部分が滑ったり動いたりすることによって全体の動きを支配しているような層があれば、断層運動の本質を調べるには、その層の物性を詳しく調べなければならない。室内における岩石実験は、単に自然界をそのままの形で模倣するのではなく、その本質的なメカニズムを抽出して検証することにその役割がある。

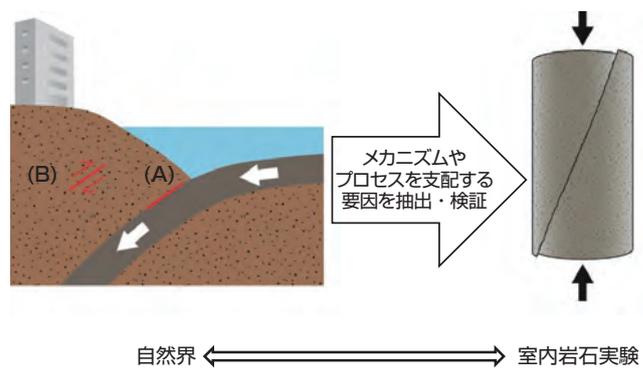


図2 自然界の断層帯と岩石実験
(左) プレートの沈み込みに伴う海溝型地震と内陸型地震の発生域、(A)海溝型地震、(B)内陸型地震、断層のずれの方向を矢印で示した。内陸型地震のずれは、この他に正断層、横ずれ断層等他のセンスもある。(右) 円柱形の岩石試料を用いた室内実験。岩石実験は自然界の断層運動をそのまま実験室に持ち込んで再現するものではなく、自然現象のプロセスやメカニズムを支配する要因を見極めて、物理モデルを構築し、それを検証するのが重要な役割である。

2 岩石実験技術に関する歴史

室内における岩石実験技術に関しては、1910年代に von Karman が静水圧下での変形試験装置を開発したが、Griggs が1930年代に初めて近代的な岩石変形実験のための実験機器の開発に成功した。それ以来、石油会社 (Shell) のヒューストン研究所の Handin, Heard といった研究者らによって米国で技術開発が進められてきた^[10]。現在でも、シェールガス開発に関連して、石油関連会社においてあるいは石油会社からの資金を使ってさかんに岩石実験研究が進められている。国内では1960年代には産総研 (当時地質調査所) において、星野らが、米国で使われている岩石用変形実験装置を参考にして、独自に設計した何種類もの岩石変形実験装置を製作し、精力的に実験データを生産していた^[11]。オーストラリア国立大の Paterson が1960年代から開発を進めたガス圧式の変形実験装置は、独自の会社を作ってそこから世界に向けて販売され、米国やヨーロッパ等で広く使われている^[12]。著者も、1990年代の終わり頃、その装置を購入できないかと思い、オーストラリアまで調査に行き、Paterson に工場も見せてもらったことがある。高压ガスを使用する装置をそのまま輸入するのは、検査や認証等のハードルが高かったこともあって、当時は購入をあきらめた。そして、既存技術と独自開発した技術を統合して、独自の実験システムを製作した。

最近では、深部掘削のプロジェクトによって、実際に地下深部に存在する岩石や断層帯を貫く岩石試料が入手できるようになった。それらの試料の物性を実験室で測定することによって、例えば東北地方太平洋沖地震の際に起こった浅い領域での大規模な滑りに対する理解が進んできた^[13]。現在の岩石実験分野の重要な課題は、多様性をもつ断層挙動についてより確からしい物理法則やその構成方程式のパラメータを見出して一般化し、シミュレーションによって地震を再現する研究と融合していくということにある。そのためには地震発生過程のより正しい理解がモデルの構築にとって不可欠である。この論文はそのような課題に対する取り組みとして開発した技術と手法を報告するものである。

3 地震現象再現のための課題

地震は地下で断層が動く現象である。そこで、地震発生モデル構築のためには、地震時に地下深部でどのような現象つまり断層運動が起きているかを明らかにする必要がある。我々は、地下深部で起きている断層運動を実験室内で再現して、断層が動き始める条件すなわち地震が発生する条件、断層に加わっている力と断層の動き等を検証するという手法で断層運動のプロセスを明らかにしようとしてい

る。その際、地下深部でのプロセスを実験室内で再現する場合の課題として、自然界と実験室の間の、環境の違いと時間の違いという二つの点を解決する技術が必要である。

地下深部は地表とは異なる温度・圧力条件にある。これを実験室内で再現するために、高压高温環境 (かつ水条件の制御の下) で実施できる岩石実験技術が必要である。これは、材料に力を加えて変形させる材料試験の手法において、被試験体となる材料部分を、密閉した高温高压圧力容器の内部に設置することで、すなわち材料科学分野の既存技術に試料部の環境を制御する圧力容器を追加することで実現できる。

自然界で進行する現象の時間スケールは長く、人間の時間スケールでは巨大地震発生等一つの事象の1サイクル分の観測事実が得られない。研究対象とする巨大地震の自然界でのプロセス進行はゆっくりで人の一生の長さより長い。例えば、海域で発生するマグニチュード8クラスの南海地震等の海溝型地震は、数百年間隔で発生し、東北地方太平洋沖地震のようなマグニチュード9クラスの巨大地震は約千年間隔で発生する。日本列島の内陸部で発生する活断層地震は千年以上の間隔である。つまり1回の現象のプロセスを観察しようとしたら数百年から千年かかるということの意味している。これについては、熱力学的考察を応用する^[14]。地下深部で非常にゆっくりと進行しているプロセスは、次章で考察するように、ミクロな視点では、そのメカニズムは化学反応がその進行速度を規定していると考えられる。そこで、実験室内で観察や検証が可能のように、そのプロセスの進行をスピードアップさせる。そのためには、断層運動が実際に起きている地下環境より高温にして化学反応速度を加速させる高温技術が必要である。この部分は、独自に開発した。

4 目標実現に向けた研究シナリオと要素技術の連携・統合

図3にこの研究で用いた要素技術と研究全体の流れを示した。まず、観察事実を基に、作業仮説を構築する。既存の技術や独自開発した技術を統合した検証手法と技術で、作業仮説を検証する。本章において各要素技術を概説し、次章にその結果として得られた新たなコンセプトを例示する。

4.1 地表地質調査 (過去の事実の記録から作業仮説を構築する)

まず、検証すべきプロセスの推定と作業仮説の構築を行う。地下深部で起きている現象を推定するために、過去には地下深部にあったが、現在は地表に露出している地層を調査・観察する (図4)。地下の地層が長い年月をかけて上

昇する隆起という変動をする地域があり、そういう場所では過去の地下深部の状態を地表で観察することができる。地表に現れているのは過去に地下深部で起きた変形や破壊といったプロセスの結果である。岩石や鉱物等の物質やそれらの構造を詳細に観察・分析することで、過去に起きたプロセスを推定することができる。ただし、過去の記録は地質に残されているが、それは結果のスナップショットであるので、プロセスやその時間経過といった時間軸は地質の調査からは詳細に読み取ることはできない。そこで、このような結果となるにはどのようなプロセスが起きたのか、物理学的・地質学的根拠をもったモデルや作業仮説の構築が必要となる。そして地質記録から読み取ったプロセスやモデルを、再現して検証するという手順で研究を実施する。

大きな災害をもたらす大地震は千年単位で繰り返し起きているので、千年単位の長い時間での変化があって、それで千年後に大地震発生につながるような、非常に長い時間をかけて変化していくようなプロセスがあるに違いない。そのプロセスでは、断層の強度や、岩石の変形状態が、ゆっくり変化しているはずである。そこで、温度も圧力も高いところで、さらに地下深部であるので水も存在するという環境の下で、水と岩石の化学的な作用が関係しているのではないかと。断層運動というのは“滑り”というイメージであるが、摩擦の現象は、断層面の接触点でのミクロな破壊がその本質ではないか？ そのミクロな領域での破壊に、岩石と水との化学反応が影響しているのではないかと？ そういうプロセスが重要であるという作業仮説を考えた。摩擦現象は、断層面の接触部や固着部の突起先端部における岩石-水間の化学反応によるミクロな破壊が本質である、とい

うものである（図5）。岩石はその強度以上の力を加えると破壊が発生したり、岩石内部のクラック先端部の破壊が進行したりしていく。この理屈でいくと破壊強度に満たない力が加わった状態では破壊や状態の変化は起こらないし、クラックも進行しないことになる。しかし、実際には破壊強度以下の応力環境下でもクラックや破壊はゆっくり進行していくことが知られている。これは応力腐食といわれていて、物質や材料が、周りの環境に含まれる水等と反応して、その強度が低下していくというメカニズムで説明されている^{[15][16]}。

4.2 材料試験技術

地下深部では、岩石や断層に力（地殻応力）が加わって、ゆっくりとした変形や滑りが起きていると考えられる。したがって、地下深部でのプロセスを再現するためには、材料である岩石に力を加えて変形や滑りがどのように起きるかを測定する。これには材料試験で行われている手法と技術を用いる。図6に示したのはこの研究で使用した設備で、もともとは材料試験のためのものである。この試験機は1980年代に産総研（当時地質調査所）に導入されて、主に岩石の破壊靱性試験に使用されてきた。すでに役割を終えて休止状態にあったものを再利用した。基本的な機能は、材料（この場合は岩石試料）に上下方向から力を加えて変形・破壊させるというものである。図6の左に写っているのが試験機本体の制御装置で、試料に力を加えるピストンの上下方向の動きを制御する働きを担っている。ピストンの変位や材料に加わる荷重を測定しながら、それらの値が一定速度やあらかじめ設定した関数形（例えば正弦波）に沿って変化するように制御するサーボ制御を行う。これによって、ピストンの変位や材料に加わる荷重が、一様な



図3 要素技術の関係と研究全体の流れ

速度でゆっくり増加するように制御したり、正弦波のような繰り返し载荷したりすることが可能になっている。後にこの制御部はアナログ制御から、最新のデジタル制御方式に交換した。岩石試料に加わる力や岩石の変位・変形を測定するフレーム部分はこのように既存の材料試験機を利用した。

4.3 高压技術

単に岩石の材料試験を行うのではなく、地下深部と実験室の間の環境の違い、つまり地下では高温高压の環境であるので、高温かつ高压環境下での変形実験が可能のように、まず高压技術を導入して試験ができるようにした。

高温高压環境を実験室内に実現するにあたって、圧力容器（密封容器）の中で高压環境を実現するため、固体もしくは流体を圧力媒体として封入して使用する。ピストンを挿入して内部の体積を小さくしたり、外部からさらに圧力媒体を注入したりすることで容器内の圧力（封圧）を高くする。固体を圧力媒体に使用すると、流体を使った場合に比べて高压力を実現できる。Talc、NaCl、パイロフィライト等の固体を封入し、ピストンで荷重を加えることでこれらの物質を圧力媒体として用いる方法で、利点としては高い圧力と温度条件を作り出すことができる。しかし、圧力の値を正確に測定できないこと、圧力を加えた状態で試料の変形を精度よく測定することができないことから、岩石の変形実験にはあまり向いていない。そこで、岩石の変形

実験では圧力媒体としては流体（液体、気体）を使用する方法を採用することが多い。また、流体を使って高压でかつ高温状態を再現する際、圧力媒体に使っている流体のうち液体については、特殊なシリコンオイルという物質を使っても到達可能な最高温度は500℃くらいである。次節で説明するようにこの研究ではそれよりさらに高温が必要なので、不活性気体（アルゴンガス）を圧力媒体として使用した。気体（ガス）は、一様な圧力（静水圧）を加えることができる理想的な圧力媒体である。しかし、気体を扱う際はリーク（漏れ）については特に注意が必要である。また、気体は圧縮率大きい（圧力の変化に対して体積の変化率が大きい）ので、高い圧力を得るためには大容量の気体を送り込むことができるポンプシステムが必要になる。さらに、体積変化率が大いいため、その扱いには特別な注意が必要である。高压ガスの性質や扱いをよく理解し、

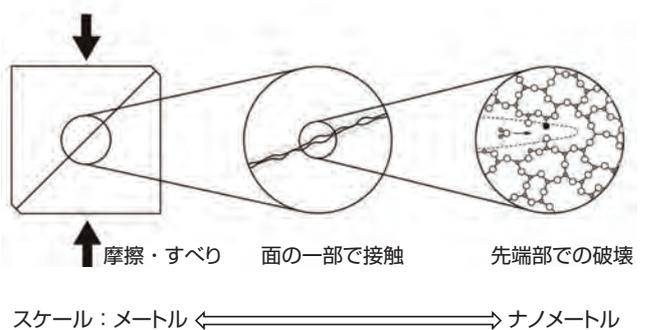


図5 摩擦と破壊の模式図

メートル～センチメートルの空間スケールで見ると、摩擦は面のずれで理解できる。しかし、ミリメートル以下の小さな空間スケールで見ると、摩擦面は完全な平面で接しているのではなく、その一部で接触している。接触している突起部ではマイクロな破壊が起こっている。この接触部での破壊現象こそが摩擦現象の本質であるといえる。ナノスケールで見ると、接触部先端でのマイクロな破壊は水が関係する化学反応によってゆっくり進展している。



図4 地表地質調査

過去に地下深部にあり現在地表に露出している地層（露頭）の調査。中央構造線（長野県）沿いの露頭。過去に地下深部で変形を受けた岩石を中央構造線より採取。過去に深部で起きた変形等のプロセスの結果を保存している岩石や地層を観察・分析することで過去に地下深部で起きていたプロセスを推定する。



図6 材料分野で用いられている材料試験機

被試験体に岩石を用いる。この研究ではこれを元に改造した。

法令に従った安全措置が求められる。

日本では高压ガスを圧力媒体として使用した実験装置の開発が外国に比べて遅れていたが、2000年頃、京都大学でガス圧式試験機が開発され、国内でもガス圧式試験機が製作できるようになった。我々は、京都大学で開発された技術を使用させてもらうことで、国内2号機を製作した^[17]。実現できる最高圧力（封圧）は200 MPa（メガパスカル）である。このシステムは、図7に示すように、圧力容器内部の岩石試料に圧力（封圧）を加えるだけでなく、外部から試料内部へ直接流体（液体もしくは気体）を送り込むことができ、またそれらを流通させたり、圧力（間隙圧）を制御したりすることも可能である。この間隙流体圧は最高200 MPaまで制御できる。このような環境下で、最大直径20 mm、長さ40 mm程度の円柱形岩石試料の変形実験や摩擦実験が可能になった。

また、圧力容器内部で試料に加えられている荷重を正確に計測するために、内部荷重計を開発した^{[10][2][17]}。試料に加わる荷重を測定するには、通常は圧力容器外部でピストンに加わる荷重を測定する方法で行われているが、ピストンと圧力容器の間のシール材であるOリングの摩擦が荷重測定に影響するので、試料に直接加わる荷重は圧力容器の内部で測定しなければならない。我々の装置は、外国のガス圧式試験機に比べ、軸荷重・封圧・間隙圧等の制御性能においてすぐれている。

高压ガスを圧力媒体に使用した高压容器の中に岩石試料を設置することで、地下10 kmくらいの環境が再現で

きるようになった（図8）。地下10 kmくらいでは、200～300 MPaという圧力で温度が300℃くらいである。しかし、地下と同じ圧力、環境を再現するだけでは、一つの事象の1サイクル分のプロセスを再現しようとすると千年くらい待たなければいけないことになってしまう。では、どのような技術開発をすればこの問題を解決できるか。

4.4 高温技術

我々の作業仮説では、地下深部での長期的変動を支配する本質的なプロセスでは化学反応が重要な役割をはたしている。もし化学反応が影響するのであれば、その反応速度は、一般に式(1)で表されるように温度に関係する。

$$\text{Rate} = A \exp \left(- \frac{H}{RT} \right) \quad (1)$$

ここで、Aは定数、Hは活性化エネルギー、Rは気体定数、Tは絶対温度。したがって、温度を上げて反応速度を速くすれば実験室で観察できる速さにスピードアップできるはずなので、地下深部でゆっくり進行する現象を室内実験で検証することができる^[14]。温度を上げることで試料が部分的にも溶けてしまったり、変形を支配するプロセスが変わってしまったりしては意味がないので、どの温度範囲までなら同じメカニズムを維持したまま温度を上げることが可能か、先に確認したうえで到達目標温度を設定した^[18]。そうすると、高温高压で、実際の自然環境下よりもさらに高温環境を実現する技術が必要ということになるが、この部分は独自に開発した。ここでは、200 MPaま

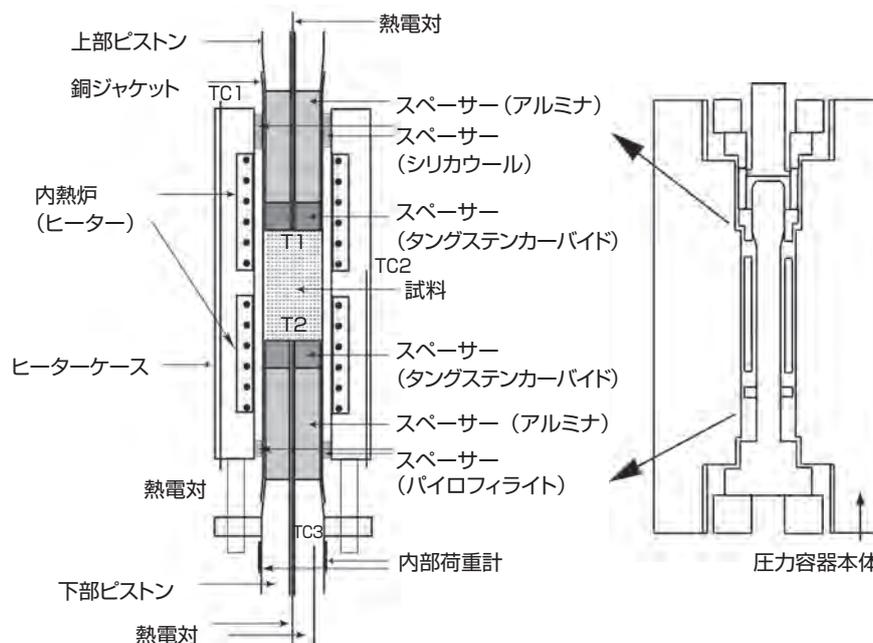


図7 压力容器の模式図^[19]

左：試料部。外部から試料内部に直接流体を送り込んでその圧力（間隙圧）を制御したり、流体を流通させたりすることができる。右：压力容器の構造。

での高圧環境下でさらに 800 °C くらいの高温にできる技術、具体的には圧力容器の内部に設置するヒーターを作製した^[19]。

圧力容器内部にセットした試料に対しての加熱機構としては、外熱式と内熱式がある。外熱式は圧力容器全体を熱する方式で温度の上昇と下降に時間がかかることと、圧力容器の材料そのものが十分な強度を保持できる以上の温度にはできないなどの制約がある。一方、内熱式は加熱機構（ヒーター）そのものを圧力容器の内部にセットする方式で、外熱式の制約を上回る高温状態を圧力容器内の試料部に実現できる。この原理自体は単純で、コイル状の構



図 8 材料試験機の試験片を取り付ける部分に設置する圧力容器
岩石試料は圧力容器の中で圧力（封圧）を加えて地下にあるのと同じ環境下で試験を行う。



図 9 独自開発したヒーター（電気炉）
高圧下で実際の地下環境よりも高い温度を実現する。（左）ヒーター本体。セラミックスのチューブに電熱線をコイル状に巻き付けた。二つの部分からなる。（右）ヒーターの外観。

造をもったヒーターを作成すればよいのだが、技術的制約が多く開発に 2 年を要した。図 9 左の写真に示すように、ヒーター本体は二つの部分が独立した 2 ゾーン方式とし、上下のヒーターコイルに対して、それぞれ外部から電力を供給する。試料の温度分布を一様にするために、試料の加熱中は、試料の上端面と下端面の温度を測定する熱電対の出力をそれぞれ制御信号としたフィードバック機構によって上下それぞれのヒーターに供給する電力を制御した。外国の同様な装置では 3 ゾーン方式のものもあるが、このような 2 ゾーン式でも試料部の一様な温度分布が得られた^[19]。

図 7 右は圧力容器内部の模式図である。非常に狭い空間に試料やヒーターが内蔵・セットされている。圧力容器内部の中心部にある岩石試料は非常に高温にしなければいけないが、圧力容器自体は金属でできているので、これを 800 °C にしたら塑性変形してしまうし、圧力容器内部は圧力が高いので非常に危険な状態になる。限られた狭い空間内で中心部分だけは高温にし、容器内壁は高温になってはいけないという、さまざまな技術的制約があった。これは図 9 のヒーター本体とヒーターケースの間に詰める断熱材とその詰め方を工夫することで解決した。これらの開発は、担当していただいた民間企業と試行錯誤を繰り返して実現することができた。図 10 に今回独自製作したヒーターの性能試験の結果を示す。試料部の温度は高温（800 °C）かつ一様な温度分布を実現し、圧力容器内壁部や内部荷重計等の測定機構部分は安全な温度範囲（300 °C 以下）に保たれていることが確認できた。

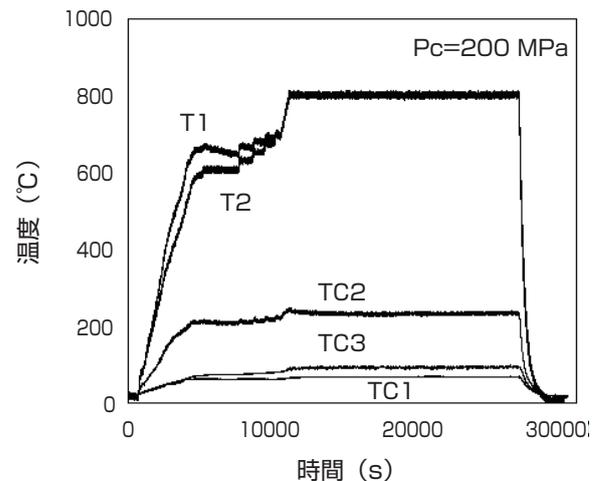


図 10 開発したヒーターの性能テスト^[19]
内部の試料の温度は上下端とも一定に保たれている（T1、T2）。圧力容器内壁（TC1、TC2）や内部荷重計のある部分（TC3）は 300 °C 以下に保たれている。

4.5 高温高压岩石変形実験における技術の統合とプロセスの再現

このような既存および独自開発した技術を統合して、高温高压環境下で岩石の変形実験ができるようになった。これによって、地質の調査で考察したメカニズムや作業仮説を、高温高压岩石実験という手段を用いて検証することができるようになった（図3）。地下深部に存在する岩石を対象とする場合、一般的に多様な方向から多様な圧力がかかる非静水圧系を考える必要がある。しかし、その変形や破壊を考える際は、圧力下（静水圧下）で地殻応力はプレートの運動に伴う差応力のみを考えればよく、静水圧下での圧縮で代表される。本装置ではその状況を再現した。また、高温高压下で岩石の変形を精密に測定するためには、圧力媒体を気体（高压ガス）とする必要があった。実現できる最高圧力は200 MPaである。これは世界的にみても最高性能グループに該当するが、地下10 km程度までの再現にとどまっている。

5 新たなコンセプトの提示

今回開発した技術と手法を用いた学術的成果についての例を示す^[18]。地震分野では、自然界における断層の摩擦強度は、実験室内で測定されている岩石の摩擦強度に比べて弱いことが地質学的・地球物理学的観測より知られている。また、岩石の強度は、その変形の数値によって変化し、クリープ現象にみられるように、時間によっても変化する。これらは岩石の物性、特に破壊強度や摩擦強度が時間に依存することを示している。このような岩石物性の時間依存性を理解することは、地震発生メカニズムの解明にとって重要な課題となっている。

大地震の発生サイクルは数百年から千年という長期間であるので、断層強度の長期的変化の全容は地球物理学的手法によるモニタリングでは直接観測することはできないが、岩石の摩擦強度も長期的に変化していると考えられる。そこで、断層摩擦強度の長期的弱化メカニズムの本質は、断層面が真に接触している突起部先端での、ゆっくりとしたクラック進展によって引き起こされるマイクロな破壊であるというモデルで、摩擦強度の時間依存性も説明できると考え、それを実証する実験を行った。このモデルでは、断層強度の長期的弱化は水の存在下で進行する化学反応が支配していることを仮定している。したがって、このメカニズムが有効に働いているのなら、断層強度の長期的弱化に対する水の影響が実験室で観測されるはずである。そこで、断層運動が起きていると想定される実際の地下深部の環境より高温状態で断層の摩擦強度に対する水の影響を調べた。図11に示すように、円柱状に整形した岩石試

料の圧縮破壊実験を行った。岩石試料には福島県畑川破砕帯より採取したマイロナイト^[19]という岩石を使用した。この岩石は地下深部で変形と破壊を受けたもので、円柱形試料の高さ軸方向が、岩石の面構造^[20]と30度になるように整形した。これによって試料の軸方向に圧縮応力を加えることで、面構造に沿った方向に断層面が形成され、形成された断層面を滑らせ、摩擦強度を測定した。実験では、圧力一定の下で、水のないDRYな状態と、水のあるWETな状態の2種類の実験を行った。それぞれのシリーズについて、温度を室温、200℃、400℃、600℃とした。

その結果、水のない環境では摩擦強度は温度が高い状態でもほとんど変わらないのに対して、水の存在下では摩擦強度は温度の上昇によって低下することがわかった（図12）。圧力状態が同じなので、間隙水圧の上昇で強度低下を説明する有効圧の法則で知られているような、物理的メカニズムとは別の化学的效果によると考えられる強度低下を示すデータを得た。自然界でゆっくり進行する現象のプロセスが化学反応に依存していると仮定できる場合、温度を上げて化学反応を促進させることで、現象が進行するスピードを速めるということをサポートする結果となった。図13では、温度が高いほど長期的な現象を観察しているということに相当する。

今回明らかにした現象は、長期的時間スケールでみると

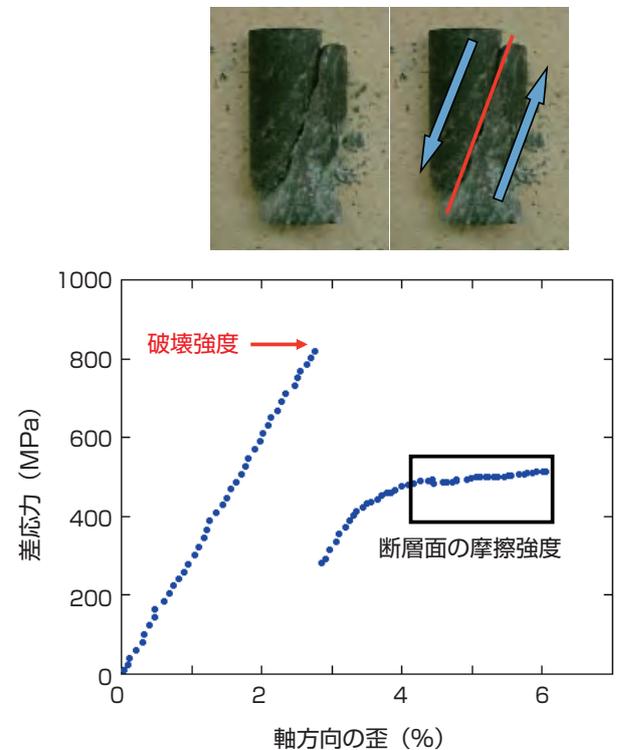


図11 実験の試料と応力-歪曲線^[18]
岩石の破壊強度と断層の摩擦強度を測定した。差応力が破壊強度に達すると岩石試料は破断面を形成する。破断面が滑る際に必要な差応力が摩擦強度に相当する。

断層強度が低下していくというメカニズムを示したことになる。断層強度が低下すれば、ある時にその場の応力以下になり、破壊（地震）発生のトリガとなることが予想される。このプロセスをモデル化することで地震発生のシミュレーションの精密化に貢献することができる。地震発生子測研究においては、地震発生メカニズムを正しく理解したうえで、地震発生の物理モデルを構築し、数値モデルによるシミュレーションにつなげる必要がある。今回の結果は通常の時間スケールでは直接観測できない現象で、かつ地震発生過程において重要なメカニズムが存在することを示した。それらを定量的に評価しモデルに組み込むことができれば、より精密化した地震発生モデルに近づくことができる。今後は、さらにこれらの現象を数値モデルに取り込むことができるような構成方程式を見出して、数式化し、必要なパラメータの値とそれらの温度・圧力等の環境依存性を明らかにしていくことが必要である。地震発生の予測精度が向上することで、より正確な情報を社会に発信することが可能になることが期待される。

6 今後の課題と展開

地震発生子測モデルを検証するための手段として、室内で行う岩石実験手法を用い、千年スケールで進行する地質現象を加速化して検証する技術と手法を開発した。そこでは、既存の個々の手法や技術を組み合わせ、さらに独自開発した技術を組み込んで、目的の技術開発や方法論を完成させた（図3）。このコア技術は、一部の大学へも提供した。

現時点では、データ取得段階であるが、すでに新しいコンセプトを検証し公表することができた。したがって、学問的にも一つのことが達成できたという段階である。

次の展開として、最終的な目標に向けて、得られたデータやモデルを、シミュレーションや計算科学に投入できるような形で提出することで、物理学的・地質学的な根拠をもった将来予測ができるようにしたい。より正確な将来予測ができるようなモデルを構築するという方向に展開していきたい。

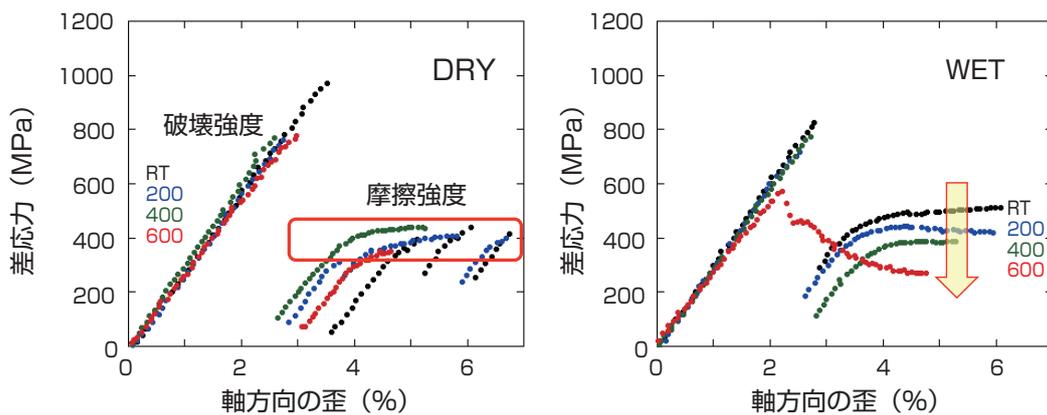


図12 測定結果^[18]
摩擦強度は、DRYでは温度によらずほぼ一定のレベルであるが（赤枠の部分）、WETでは温度が上がるに従ってそのレベルが下がっている（矢印で示した部分）。左：水のない環境下（DRY）での測定結果。右：水の存在する環境下（WET）での測定結果。

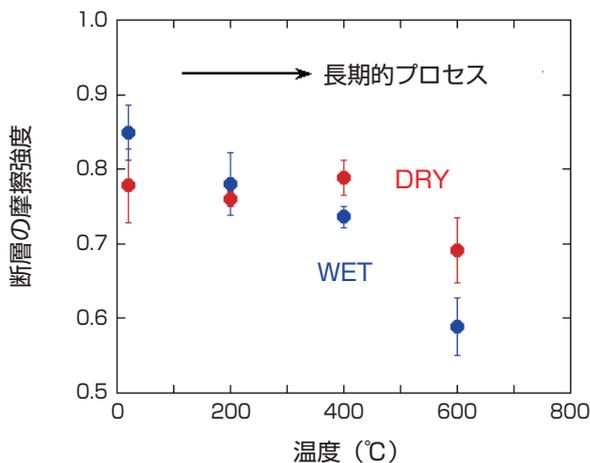


図13 岩石試料中の断層面の摩擦の温度依存性を測定した結果^[18]
実際の地下環境より高温状態で測定することにより、岩石中の断層面の接触部で起こっているプロセスを加速する。温度が高いほど、長時間で起こっているプロセスを観察していることに相当する。水の存在（WET）下では、摩擦強度の低下が起こっていることが示されている。

謝辞

この研究は多くの同僚の皆さんと実施したものである。藤本光一郎、新井崇史、高橋美紀、北村圭吾、溝口一生、重松紀生の各氏に感謝する。また、内熱炉の開発は井料兼一、小椋 昭（現：株式会社プレテック）の各氏と行った。

用語の説明

用語1: マイロナイト: 断層深部の高温領域（延性せん断帯）で形成された強く変形した岩石。

用語2: 面構造: 岩石中に発達する面状要素。変形に起因したプロセスによって生じる構造などがある。

参考文献

- [1] 山岡耕春: 南海トラフ地震, 岩波新書 (2016).
- [2] 日本の地震学: 現状と21世紀への萌芽, 地震, 2 (61), 特集号 (2009).
- [3] C. Scholz: *The Mechanics of Earthquakes and Faulting (second edition)*, Cambridge Univ. Press (2002).
- [4] 吉岡敏和: 活断層からの地震発生予測, *Synthesiology*, 2 (3), 194-200 (2009).
- [5] 岡村行信: 西暦869年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓, *Synthesiology*, 5 (4), 234-242 (2012).
- [6] 小泉高嗣: 地下水観測による地震予知研究, *Synthesiology*, 6 (1), 24-33 (2013).
- [7] 長谷川昭, 佐藤春夫, 西村太志: 地震学, 共立出版(2015).
- [8] 平田直: 首都直下地震, 岩波新書(2016).
- [9] F. Yamashita, E. Fukuyama, K. Mizoguchi, S. Takizawa, S. Xu and H. Kawakata: Scale dependence of rock friction at high work rate, *Nature*, 528, 254-257 (2015).
- [10] T. E. Tullis and J. Tullis: Experimental rock deformation techniques, Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies, The Paterson Volume, B. E. Hobbs and H. C. Heard eds, *Geophysical Monograph*, 36, American Geophysical Union, 297-324 (1986).
- [11] 星野一男: 高圧岩石変形実験機器について, *石油技術協会誌*, 44 (3), 161-165 (1979).
- [12] M. S. Paterson: A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, 517-526 (1970).
- [13] K. Ujiie, H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J. Mori, J. Kameda, E. Brodsky, F. Chester, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists: Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments, *Science*, 342, 1211-1214 (2013).
- [14] M. S. Paterson: Rock deformation experimentation, The Brittle-Ductile Transition in Rocks, The Heard Volume, A. G. Duba, W. B. Durham, J. W. Handin and H. F. Wang, eds, *Geophysical Monograph*, 56, American Geophysical Union, 187-194 (1990).
- [15] S. W. Freiman: Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics, *J. Geophys. Res.*, 89, 4072-4076 (1984).
- [16] K. Masuda: Effects of water on rock strength in a brittle regime, *J. Struct. Geol.*, 23, 1635-1657 (2001).
- [17] K. Masuda, K. Fujimoto and T. Arai: A new gas-medium, high-pressure and high-temperature deformation apparatus at AIST, Japan, *Earth Planets Space*, 54, 1091-1094 (2002).
- [18] K. Masuda, T. Arai, K. Fujimoto, M. Takahashi and N. Shigematsu: Effect of water on weakening preceding

rupture of laboratory-scale faults: Implications for long-term weakening of crustal faults, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01307, doi:10.1029/2011GL050493 (2012).

- [19] 増田幸治, 井料兼一, 小椋昭: ガス圧式高温高压実験装置用内熱炉の開発, *構造地質*, 49, 73-76 (2006).

執筆者略歴

増田 幸治 (ますだ こうじ)

1987年名古屋大学大学院理学研究科博士課程（後期課程）地球科学専攻満了、1987年理学博士。1990年通商産業省工業技術院地質調査所入所。専門は地球内部物理学、地震学、岩石力学。地震発生機構における流体と物理化学過程の役割について、岩石力学実験を手法として研究してきた。2014年から活断層・火山研究部門副研究部門長。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント (栗本 史雄: 産業技術総合研究所)

世界有数の変動帯に位置し地質災害が頻発する日本において、特に地震災害に強い社会の構築が求められており、そのための地震発生予測に関する研究は必須です。この論文は、過去に地下深部で起こった地質現象を実験室において再現し、地震発生予測モデルを岩石実験により検証するという挑戦的な課題に取り組んでいます。実験室と自然界の間に存在する環境や時間の相違を解決するために地質現象の検証と技術開発に取り組んだ過程は、明確なシナリオのもと高度な知見を統合したものであり、シンセシオロジーにふさわしいと判断します。

コメント (清水 敏美: 産業技術総合研究所)

この研究は、一般の材料試験で使われる圧縮試験機に独自に高圧・高温技術を巧みに導入、統合することにより開発した、千年スケールで進行する岩石の変形・破壊現象を加速化して検証できる実験技術と手法について述べています。断層摩擦強度が長期的に弱化する現象に対して水の影響があるという仮説の妥当性を室内の実験で明らかにし、当該手法の有効性を示したことは大変興味深いものです。これにより、より精度の高い地震発生予測モデルの構築という社会的価値に貢献する事例が示されており、シンセシオロジーにふさわしい内容を含んでいると思います。

議論2 地震発生予測モデルの精緻化に関して

コメント (清水 敏美)

この研究の目標として、より精度の高い地震発生予測モデルの構築をあげています。確かに、高温高压下での加速試験を活用して岩石の挙動、物性変化を解析することが地震発生メカニズムモデルを検証するのに役立つことは理解できます。しかし、その研究成果によって一般の人々が地震災害に正しく備えるためにどうすればよいかの間接的、直接的アウトカムが少く思われます。一方では、活断層の活動履歴や津波堆積物の調査に基づいて今後の巨大地震の発生時期や規模を予測する研究、あるいは地殻変動等の常時モニタリングによっていち早く異常を検出する研究等はメディアが多く取り上げていることもあり、一般の方々にも理解しやすくなっています。そこで、「1 はじめに」の第二段落ですでに記述はありますが、地震研究、特に地震予測技術において現在、どのような研究（技術）要素があり、今回の高温高压岩石変形実験による予測モデルの精緻化が全体においてどの位置にあり、どのように貢献するかの役割分担的な構成図があれば読者の理解が進む気がします。

回答（増田 幸治）

図1を新たに作成し、地震発生予測に関する現状の認識について、既存の教科書等も参考にして流れをまとめ、さらにそれぞれの研究、特に岩石実験の位置付けに関して、私なりの考えをまとめました。

議論3 研究シナリオ

コメント（栗本 史雄）

作業仮説から要素技術の開発と統合、さらに新たなコンセプトの提示に至る研究シナリオが適切に整理された図があれば読者の理解が深まると思います。

回答（増田 幸治）

実際の岩石試料や実験装置の写真を組み合わせて、研究シナリオを図3としてまとめました。図1と併せて見ると、地震発生予測に関する研究全体が理解できるように工夫しました。

議論4 研究史と外国の技術動向

質問（清水 敏美）

岩石用の変形実験装置に関する歴史的経緯に関して記述がありますが、現在の各国の状況はいかがでしょう。同じ岩石試料を用いた場合、各国が開発した装置を用いた解析において各国の優位性等があれば教えてください。特に、最近話題になっている非在来型天然ガスとして知られるシェールガスは頁岩層から採取されるそうですが、石油系会社等の企業の岩石実験に関する取り組み、興味はどうでしょうか。関連して、岩石変形実験に関する国際的な連携や枠組み、さらには国際標準化への動きがあれば教えてください。

回答（増田 幸治）

各国が開発した装置について、基本的な性能や能力としては、個々の優位性を記述するようなそれぞれの特徴（違い）はあまりありません。国際的な連携に関しても、特段の連携組織があるというような状況ではありません。地震や津波観測が全世界レベルで連携ができているというとは少し対照的です。

シェールガスに関連しては、この論文の歴史的経緯に書き加えましたが、黎明期にアメリカで岩石実験装置を開発・研究を發展させた人たちはShellの人たちです。現在でも石油会社関連で岩石実験がさかんに行われています。ただし、シェールガス開発やその興味の対象とする深度は、地震の研究として今回紹介した深度より浅く、技術的には地震研究として開発したものの方が、より高温高压領域を実現しています。

議論5 地震の発生メカニズムと岩石変形に関して

コメント（清水 敏美）

地震とは、地下の岩盤に力が加わり、それが岩石の破壊強度を上回った際に生じる破断現象であると聞いています。一方では地球の表面を覆っている厚さ数十 km の岩盤（プレート）間の歪み解消といったより大きなマクロスケールでも言われています。一般読者からすれば、岩石の破壊といったナノメータ～マイクロメータスケールから、プレート間の歪み解消といったマクロスケールまで地震原因が議論さ

れ、それらのスケールギャップに少し戸惑いを感じます。この研究では、地下深部で起こっている断層運動の再現やプロセス解明が目的ですので、空間スケールの理解では、例えば、図2と図5は1枚の図に組み入れ、キロメートル、メートル、マイクロメートル、ナノメートル等のスケールを各図に挿入し、摩擦、すべり、破壊等の技術用語、水分子、鉱物結晶等の説明句の挿入等によって理解できるような図面の工夫をお願いしたいと思います。

回答（増田 幸治）

図2は、そもそもなぜ岩石実験をやるのかという本質的な理由を示すのが目的でした。ここでは、単にスケール（ダウン）するのではなく、むしろ、空間スケールが問題ではなく、自然現象の本質を見極めてその要因を取り出して検証する、というのが岩石実験であるということを主張したかった図です。それがわかるように図やキャプションを工夫しました。一方、図5は、空間スケールを変化させて見ていくと、ミクロなメカニズムを検証することに行きつくということを説明した図です。空間スケールの議論を理解できるように図や説明を工夫しました。

議論6 新たなコンセプトの提示

コメント（栗本 史雄）

地震発生のシミュレーションの精密化への貢献や正確な情報の社会への発信について記述していますが、最新の研究動向と最先端の課題との関連に注目して、この研究の位置付けと貢献、今後の展開についてももう少し言及していただきたいと思います。

回答（増田 幸治）

今回、通常の時間スケールでは直接観測できない現象で、かつ地震発生過程において重要なメカニズムが存在することを示しました。今後はさらにこれらの現象を数値モデルに取り込み、必要なパラメータの値と温度・圧力等の環境依存性を明らかにしていくことが必要であることを、第5章に明記しました。

議論7 材料試験機に関して

質問（清水 敏美）

プラスチック、セラミック、金属、木材、コンクリート等の材料を対象とする材料試験では圧縮以外に引っ張り、曲げ、ねじり等の多様な力を負荷し、破壊現象が起こるまでの強さや弾性、硬さ等の機械的性質を測定します。これに対して、地下深部に存在する岩石を対象とする場合は、多様な方向から多様な圧力がかかる非静水圧系を考える必要があり、圧力のかけ方も多様な制御が必要と思います。そこで、高温高压環境下（水分調節も制御）以外で、一般の材料試験機との性能上の大きな相違点、測定の限界値等を教えてください。

回答（増田 幸治）

ご指摘に対するコメントを4.5節に追加しました。地下の応力状態は、基本的なものとして、圧力下（静水圧下）での圧縮で代表されます。また、今回の試験機の限界は高压ガスを使うこと（使わなければ、高压かつ高温を実現できず、さらに精密な変形の測定ができない）による、最高到達圧力値（200 MPa）であることを記述しました。