

# 地震物理学

東京理科大学 先進工学部 物理工学科 講師 あそう なおふみ 麻生 尚文

## ■地震を研究すること

地震は、日本に住んでいる誰もが知っている自然現象ですが、その中に潜む不思議には未だ解明されていないことが多く残されています。日々の生活において私たちを脅かす存在である地震に対する理解は、私たちの暮らしや社会に大きな影響を与えます。このように、誰でも知っている地震について、誰もが知らない謎を解き明かしていくことには、科学的な魅力だけでなく、自然に対する挑戦、そして社会に対する責任が伴います。

私の専門が地震だという自己紹介をすると、「○○地震は本当に起こりますか?」「次はいつ、どこで大きな地震が起こりますか?」という質問をかなり高い確率で受けます。地震の予測に関しては、多くの人々が興味を持っていることでしょう。地震学の世界にも、将来の地震活動を予測することを目指して研究に励む多くの研究者がいます。このように、地震の予測は地震学における一大課題ですが、その一方で、予測精度を大きく引き上げることは今のところ非常に難しい問題であり、地震の大きさと発生時期を正確に予測することは、少なくとも現時点ではほぼ不可能なのです。

しかしながら、数学における「存在しないことの証明」が難しいのと同じように、地震を予測することが不可能であると断定することもまた難しい問題です。また、予測が難しいという事実があるからといって、予測研究の意味がないというわけではありません。むしろ、必ずしも完全な予測という形でなくても、将来の地震を理解するためには、過去の地震を深く理解することが欠かせません。そして、過去の地震の挙動を完全に理解することは、将来の地震を予測することと、ほぼ同義だと言っても過言ではありません。過去の地震を詳細に分析することにより、将来の地震の予測精度が向上するか、あるいは、予測がどれほど難しいのかを明らかにすることができ、いずれにしても、それ自体が社会にとって有益な情報になります。したがって、地震研究において過去の事例を丹念に調べることは根本的に重要です。

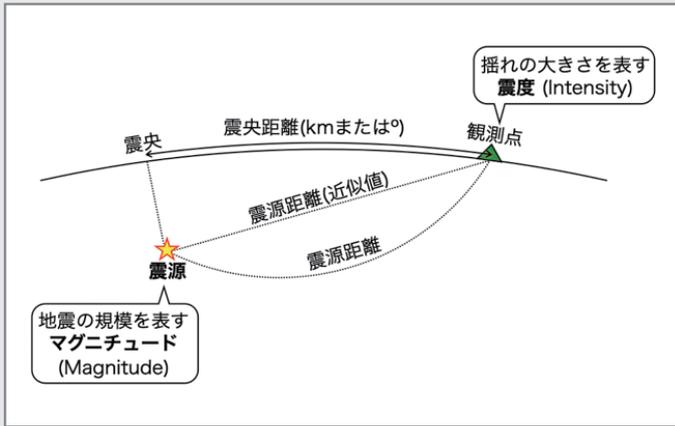
地震学の研究は、社会的意義だけでなく学術的にも非常に大きな意義を持っています。社会に役立つ研究はもちろん重要ですが、それだけがサイエンスではありません。私たちの知的好奇心を刺激し、人類の知を深めるには、まだ解明されていない多くの謎に挑むことが必要です。地震現象は、地球という大きな自然環境の一部として、単なる災害の一面だけでなく、自然の営みを理解するうえで欠かせない要素です。多くの未解明の謎を解明することは、自然科学の本質的な目的でもあります。私たち人類の生活の場に潜む謎を解くことで、私たち人類が持つ科学的知見を広げることが、私たち人類の使命ではないでしょうか。

以上のように、地震は私たちの生活に密接に関連し、その解明は人類全体に貢献する可能性を秘めています。特に、地震研究は社会的意義と学術的価値の双方において重要視されています。社会の安定性を向上させるとともに、自然現象への理解を深め、私たちの未来を切り開くために、地震学の重要性は計り知れません。

## ■地震とは何か?

地震という言葉は二種類の異なる意味で用いられることがあります。一つは、揺れを引き起こす原因、すなわち「断層のすべり現象」を指します。もう一つは、文字通り「地面が揺れる現象」としての地震です。前者は地震の直接的な原因であり、後者はその結果として現れる揺れそのものです。英語では「Earthquake」という単語が使われますが、これも同様に、原因となる断層のすべり現象と、揺れの現象そのものと、両方の意味を指すことがあります。物理的には、摩擦や破壊力学に基づく断層のすべり運動を指すのか、連続体中の波動伝播現象を指すのかという違いがあり、この二つを区別することは重要です。

言葉の使い方は時代とともに変化します。地面がなぜ揺れるのか分からなかった時代には、地震という言葉は、単に「揺れる現象」を指すだけだったことでしょう。しかし、現在では、地下の岩石が断層と呼ばれる面で急激にすべることによって地震動が発生すると



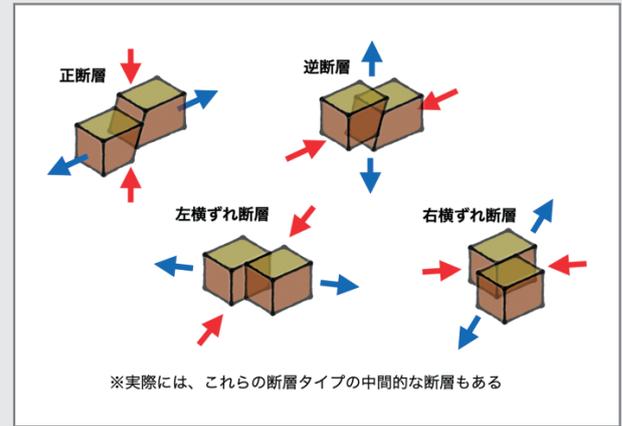
【図1】マグニチュードと震度

分かっています。このため、学術的な文脈では、地震という言葉は主に断層のすべり現象を指すことが一般的です。一方で、日常的な会話では、「あ、地震だ」というように、揺れそのものを指して地震という言葉が使われることが多いように思います。

このような言葉の使い分けは、地震を数える際の助数詞にも表れています。学術的には「〇個の地震」と数えるのに対し、日常的には「〇回の地震」と数えることが多いです。また、地震の「大きさ」を表す指標には、マグニチュードと震度の二種類があります【図1】。これも、先ほどと同様に、断層運動としての地震か、波動の伝播現象としての地震か、という違いに対応しています。

マグニチュードは、断層のすべり現象の規模を表す指標で、地震によって放出されるエネルギーの大きさに対応しています。マグニチュードにはいくつかの計算方法があり、大きな地震では断層の面積とすべり量を基に計算されますが、小さな地震では地震計の速度振幅を基に推定するのが一般的です。なお、マグニチュードは対数スケールで表されており、数値が1増えるごとにエネルギーは $\sqrt{1000}$ ＝約32倍になります。このため、マグニチュードが負となる地震も存在し、このような小さくても頻繁に発生する地震についても、私たちは精力的に研究を行っています。

一方、震度は、地面の揺れの大きさを表す指標です。日本では、震度計という装置を用いて「計測震度」というものを算出して、それに基づいて震度0・1・2・3・4・5弱・5強・6弱・6強・7の10段階で分類されます。かつては、「わずかに揺れるのが震度1」といったように、人の体感に基づいて震度が決められていましたが、個人差が生じるため、1996年に現在の計測震度を用いる客観的な方法が導入されました。特に震度7については、それ以前は現地調査を



【図2】断層タイプ

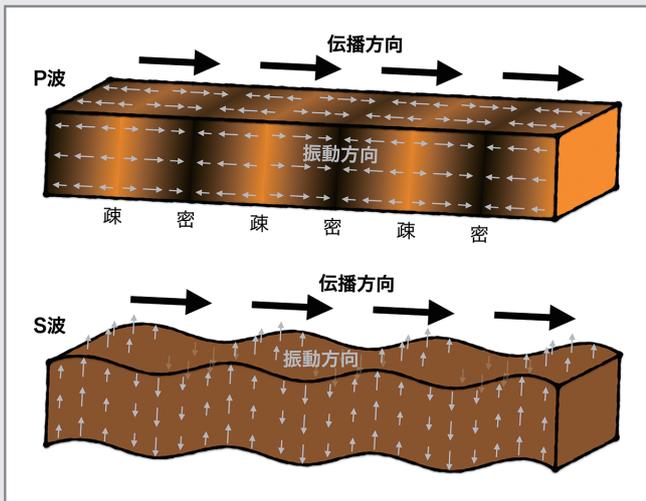
してから決めることになっており、1995年に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）において震度7の認定に時間がかかったことが、震度の定義を改める大きな契機となりました。

### ■地震の多様性

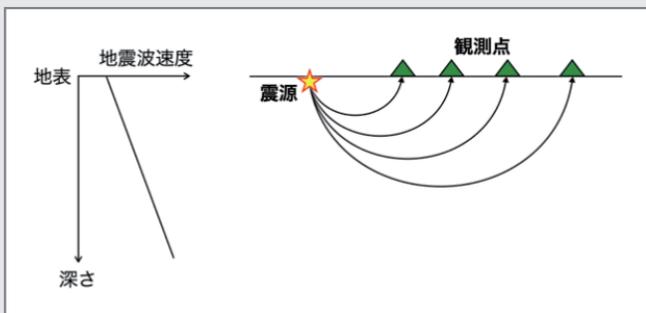
基本的に地震は地下の断層が急激にすべることによって発生しますが、実際にはその断層のすべり方には多様性があります。具体的には、断層がすべる向きや速度にバリエーションが見られます。この違いを明確に分類し、包括的に理解することは、地震発生メカニズムの解明において重要です。

断層のすべり方向に基づいて、地震は大きく三つのタイプに分類されます【図2】。正断層は、地下で水平に引き伸ばされる力（引張応力）によって、断層の上側の岩盤がずれ落ちる現象です。逆断層は、水平に押し縮められる力（圧縮応力）によって、断層の上側の岩盤が押し上げられる現象です。横ずれ断層は、岩盤が水平にずれる現象です。これらの断層タイプの違いは、断層にかかる力の違い、すなわち地震の駆動力の違いを反映しており、その違いをしっかりと理解することが重要です。

断層のすべる速度でも地震が分類できます。通常の地震が、急激な断層のすべり現象であるのに対し、スロースト地震は、断層がゆっくりとすべる現象です。頻度や速度は場所や時期によっても異なりますが、例えば、1ヶ月に1回、1週間ほどかけて断層がすべることがあります。また、通常の地震でもスロースト地震でもなく、常にほぼ一定の速度で断層がすべり続ける現象は、クリープと呼ばれます。例えば、アメリカのカリフォルニア州にあるサンアンドレアス断層では、地表でクリープが観察されていますし、その他の断層でも、地下



【図3】P波とS波



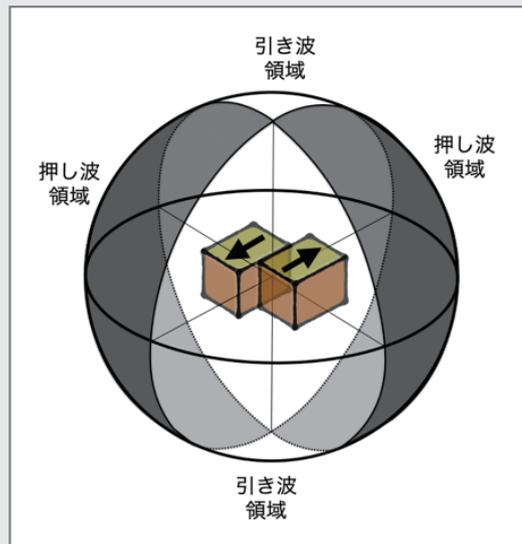
【図4】地震波の屈折

深部ではクリープが起きていると考えられています。

通常地震とクリープは古くから知られていましたが、これらの中間的な断層挙動であるスロー地震は、2000年ごろに発見された、比較的新しい現象です。スロー地震は、すべりの速度が遅く、放出される地震波が微弱であるため、検知するには高精度な観測が必要です。そのため、観測技術の発展とともに発見された現象です。通常地震・スロー地震・クリープは、それぞれが異なる速度で発生し、放出する地震波の特徴も大きく異なります。これらの現象が同じ断層上の異なる場所や異なる時期に発生するため、それらの棲み分けや相互作用を理解することは、巨大地震の発生メカニズムの解明に欠かせません。

## ■地震波と震源解析

地震が発生すると、その断層が急激にすべることによって地震波が放射されます。この地震波は、我々が地震について知るための主要な情報源です。地震波は主にP波とS波から構成されます【図3】。P波は、地震波の中で最も速く伝わる波です。いわゆる音波であり、圧縮と引張の動きを繰り返す疎密波で、物質中



【図5】P波の放射パターン

の粒子は伝播方向に沿って前後に振動します。S波は、物質中を横に振動しながら進行する波であり、P波よりも遅く伝わります。また、S波は液体中を伝わることができないため、S波を詳細に調べることで、地球内部に外核という液体部分が存在することが分かります。

これらの二種類の地震波は、伝播方向と振動方向の関係によって分類できます。P波は振動方向が伝播方向と平行であるため縦波、S波は振動方向が伝播方向と垂直であるため横波と呼ばれます。また、P波は地面を上下方向に揺らす縦揺れ、S波は地面を水平方向に揺らす横揺れとして観測されることが一般的です。縦波が縦揺れ、横波が横揺れとして観測されるのは、地震波の伝播方向が鉛直上向きであるからであり、このことは地球の内部構造に関連しています。地下深部ほど地震波の伝播速度が速いため地震波は屈折して進み、最終的に地表付近ではほぼ鉛直に伝播するのです【図4】。

P波は疎密波であるため、最初に押し波がくる場合と、引き波が来る場合があります。この違いは、断層のすべり方向と観測点との位置関係によって決まります。こうしたP波の放射パターンを分析することで、断層がどのように運動したかを特定することができます【図5】。

大きな地震では、断層の広範囲にわたる領域がすべります。すべる場所によって観測される地震波形が異なるため、その違いを逆手に取って、地震波データから、断層のどの部分がどれくらいのタイミングですべったのかを推定することができます。このような解析方法は、実際の物理現象を逆にたどる方法であるため、

一般に「逆解析（インバージョン）」と呼ばれています。地震波形を用いた震源過程のインバージョン解析は、「震源過程解析」として、地震の発生メカニズムを解明するために広く利用されています。

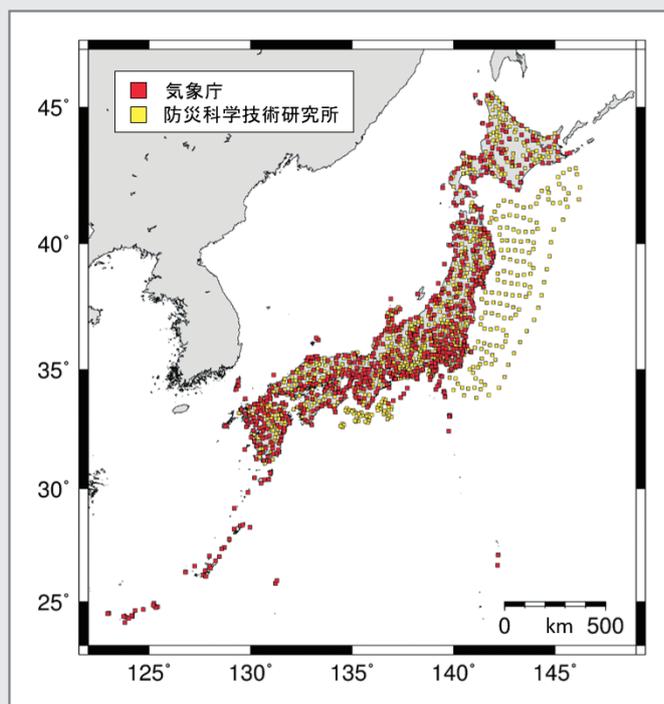
空間的なすべり分布を高精度に推定するには、多数の観測点から得られる地震波形を同時に解析する必要があります。そのため、大量のデータを処理する高度な計算手法が不可欠です。また、地球内部の詳細な構造も考慮する必要があります。そのため、並列計算やスーパーコンピュータを活用した解析が進められています。さらに、安定した解を求める新たな手法の開発も行われています。このように、地震波の伝播と震源解析の技術は、地震の発生メカニズムの理解を深めるために重要であり、地震学の最前線を牽引しています。

## ■地震観測の歴史と進化

地震という自然現象を理解するためには観測が必要不可欠であり、観測を通じて得られるデータこそが、現象を解明するための基盤となります。その地震計ネットワークは、社会情勢の影響を受けて発展してきました。特に、冷戦時代に核実験を探知する目的で世界各地に設置された地震観測網は、軍事的利用にとどまらず、地球内部の構造解明にも貢献することとなりました。その後、観測技術の進歩やデータ解析手法の発展とともに、地震計ネットワークは飛躍的に拡充され、今日に至っています。

有数の地震大国である日本では、過去の大地震のたびに、観測網が強化されてきました。兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の後には、内陸での地震活動を監視するため、高感度の地震計が日本全国に設置されました。このような地震観測ネットワークは、地震発生メカニズムの解明や、スロー地震などの新たな現象を調べる上で重要な役割を果たしてきました。また、東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）後には海域での定常的な地震観測の必要性が唱えられ、東北沖に海底ケーブルで連結された地震計ネットワークが整備されました【図6】。直近の動向としては、南海トラフ地震のモニタリングを目的として、九州・四国沖に同様の海底ケーブル型地震計ネットワークが設置されている最中です。

さらに、近年の新技术として、光ファイバーケーブル自体を地震計として活用する技術が注目されています。従来の地震計とは異なり、空間的にも連続的なデ



【図6】緊急地震速報に活用されている観測点  
(2024年4月1日現在・気象庁HPによる)  
<https://www.data.jma.go.jp/eew/data/nc/index.html>

ータ取得が可能となるため、地震学の研究における新たな可能性を切り開くことが期待されています。

このように、地震観測は社会情勢および技術革新と連動しながら進化し、地震学の研究を牽引してきました。特に日本は、地震活動が活発であるという地理的特性を活かして、観測に基づく新たな発見および現象理解の世界的フロンティアを担っており、国際的リーダーシップを発揮しています。

## ■地震研究の最前線と将来

地震学において、断層すべりや地震波に関する基本的理論は、およそ50年前に確立され、それ以降、観測データに基づく現象論的な理解が進んできました。初期の地震学では、地震の発生メカニズムを厳密に数式で記述しようとするアプローチが主流でした。この時期には、非常に単純な断層形状を仮定し、地震現象を理論的に説明することが目指されていました。しかし、観測データの解析を通じて、単純な理論的枠組では説明しきれない現象や特徴が次々と発見され、地震現象の複雑さや多様性が明らかになり、より現象に即したアプローチが重要視されるようになっていきました。

特に、近年の地震学の大きな転換点は、スロー地震の発見です。スロー地震は、それまでに知られていた

通常の地震とは全く異なり、地震波をほとんど放出せず、断層に蓄えられたエネルギーを解放します。このような全く新しい動力学現象の発見は、従来の地震学の枠組みを見直す契機となり、新しい研究の方向性を切り開くことになりました。

現在、スロー地震の研究は、観測データに基づく現象論的なアプローチと、理論的な枠組みに基づいたシミュレーションによるアプローチの双方から進められています。観測データの解析に基づきスロー地震の詳細を可視化することは非常に興味深いですが、科学としてはそれだけでは不十分であり、最終的には背後の物理的過程を解明することが重要です。そのため、現象論的なアプローチに加え、理論的なシミュレーションを用いてスロー地震を再現し、そのメカニズムを包括的に理解するための取り組みが行われています。

このように、観測研究および理論研究の両面から進められているスロー地震の研究ですが、依然として重要な謎が多く残されています。特に注目されているのは、スロー地震がどのように通常の地震と棲み分けているのかという問題です。スロー地震は主にプレート境界に沿って発生することが確認されていますが、その発生条件や発生場所については未だに全貌が明らかにされていません。すべりが空間的に広がっていく様子についても、多くの謎が残されており、その理解には新たな観測技術や解析技術が必要です。

現象論的な不明点に加え、スロー地震の物理的なメカニズムに関する理解はさらに不十分です。現在の地震学では、通常の地震とスロー地震の発生メカニズムの違いに関して、まだ根本的な物理的要因を特定することができていません。このため、スロー地震が通常の地震に変身する可能性についても明確な答えを出すことができていません。また、スロー地震が他の地震現象とどのように相互作用するのかも分かっていません。地震現象を理解するためには、スロー地震と通常の地震との物理的な違いを理解することが必要不可欠であり、地震予測の精度向上や災害軽減に向けて重要な課題です。

## ■麻生研究室での取り組み

これまで述べてきたように、地震の物理的理解には依然として多くの解決すべき課題が残されています。これらの課題に取り組むため、当研究室では物理的理解を深めることを目指し、データ解析を中心に研究を行い、必要に応じて独自の観測も実施しています。物

理的理解を追求する姿勢から、研究室の大テーマとしては「地震学」ではなく「地震物理学」をキーワードに掲げています。

研究の一つの柱は、地震の統計的特徴の理解にあります。数千から数百万個にもおよぶ地震の発生時刻や発生場所に関するデータを基に、それぞれの地域ごとの特徴や時間的な変化を明らかにすることで、そこに潜む物理現象の手がかりを得ることができます。このような統計的解析は他の研究機関でも広く行われていますが、しばしば物理的背景には立ち入らずに純粋な統計解析に終始する場合があります。なぜなら、統計的特徴が完全に理解さえできれば、地震活動の予測が可能になると考えられるからです。しかしながら、当研究室は、統計的特徴に対する理解の不完全性を補完するためには物理的理解が欠かせないと考え、あくまで物理的理解を深めるための統計解析ということを意識しています。物理的背景を包括的に理解できれば、地震活動の予測可能性に関する新たな議論が可能になると考えています。

研究の二つ目の柱は、地震波を解析することで地震の物理過程を直接的に解明することです。先に触れたように、地震波の解析を通じて、地震時に断層がどのようにすべったかを調べることができますが、この解析は運動学的な特徴に焦点を当てており、力学的特徴には迫っていません。例えば、断層が急に全体で同時にすべり出し、突然全体で止まるような運動が現れることがあります。これは力学的には不自然な動きです。実際には、すべりが特定の場所から始まり、それが時間経過とともに空間的に広がり、最終的にどこかで自然に終了します。地震の終了過程については、それまでに放出された地震波が覆い隠してしまうため、特に未解明な部分が多いです。しかし、この終了過程の理解は非常に重要です。なぜなら、全ての断層すべりは小規模なものから始まり、徐々に拡大していくため、終了過程が最終的な地震の規模を決定づける要因となっているからです。このように、地震の力学的特徴を理解することは、地震現象の本質的な解明に欠かせません。そのためには、力学的仮定に基づくシミュレーションを行い、実際に観測される地震の特徴を再現することが求められます。

当研究室では、地震統計学と震源物理学という二つの柱を基盤にして、地震物理学の研究に取り組んでいますが、最終的にはこれらの融合が不可欠だと考えています。既存の枠組みにとらわれず、幅広い研究を進めており、実際に火山の地震や氷河の地震についても

研究を行っています。また、地震波を活用して地下構造を調べる研究や、地震波が建物に与える影響、災害時の避難行動など、関連する工学分野にも幅広く取り組んでいます。当研究室ではこのような横断的な取り組みにより、理学として地震現象の本質に迫りつつ、工学として社会への貢献にもつながることを目指しています。

## ■ 社会への貢献

地震物理学の研究は、単なる学問的探求にとどまらず、社会への直接的な貢献が期待される重要な分野です。特に、地震発生メカニズムや地震活動の予測に関する研究は、災害リスクの軽減に直結します。本研究室では、統計地震学と震源物理学を二本柱とした分野横断的研究を通じて、地震現象の本質に迫ることを目指しており、こうした取り組みが以下に挙げる社会貢献につながると考えています。

地震波を解析し、断層すべりや地震の終了過程を詳細に理解することは、地震発生のメカニズムを解明し、その規模をより正確に予測するための鍵となります。特に、断層の動的な挙動やエネルギー解放のメカニズムを明らかにすることで、地震発生のタイミングや地震の大きさに関する予測精度を高めることが期待されます。たとえば、地震発生直前や発生直後の断層の動きや、地震が大きく成長する過程をリアルタイムで把握することができれば、早期警戒システムの精度向上に大きく寄与します。

さらに、地震波が建物やインフラに与える影響を深く理解することは、災害時の被害を軽減するために非常に重要です。地震波の伝播特性を高精度にシミュレーションすることにより、建物の揺れやインフラへの影響を予測し、その大きさに応じた避難経路や避難行動、さらには復興計画の策定が可能になります。事前に十分な準備を行うことで、災害発生時の迅速な対応が可能となり、一次被害だけでなく、二次的な被害も軽減することができます。

地震や地震動に関する研究は、即時の避難指示発令にとどまらず、都市の耐震設計やインフラ強化といった、長期的な都市計画に関わる政策決定にも重要な影響を与えます。例えば、地震動が大きくなる地域や建物の弱点を事前に特定し、適切なタイミングで耐震強化を施すことで、将来の災害リスクを効果的に軽減することができます。地域ごとのリスク分析に基づく政策立案が進めば、社会全体の防災力が向上し、より安

全な未来を築くことにつながります。

地震物理学の発展は、持続可能な社会の構築において、今後ますます重要な役割を果たすと考えています。地震のメカニズムや統計的特徴を理解することは、地震の予測精度を高めるためだけでなく、広範な防災や減災に貢献することを意味します。こうした研究が進むことで、地震による被害を軽減し、社会の安全を確保するための基盤が強化されることが期待されます。

ただし、社会とのつながりが強い分野であるからこそ、過度な期待や誤った情報を与えないよう、私たちは十分に気をつけたいといけません。したがって、サイエンスとして地震物理学に取り組むにあたり、社会への実装に前のめりになるのではなく、物理現象の理解という立場を常に忘れてはいけません。

## 参考文献

- Aso, N., K. Ohta, and S. Ide (2013), Tectonic volcanic and semi-volcanic deep low-frequency earthquakes in western Japan, *Tectonophys.*, 600, 27–40.
- Aso, N., V.C. Tsai, C. Schoof, G.E. Flowers, A. Whiteford, and C. Rada (2017), Seismologically observed spatio-temporal drainage activity at moulins, *J. Geophys. Res.*, 122 (11), 9095–9108.
- Aso, N., R. Ando, and S. Ide (2019), Ordinary and slow earthquakes reproduced in a simple continuum system with stochastic temporal stress fluctuations, *Geophys. Res. Lett.*, 46 (24), 14347–14357.
- Aso, N. and N. Terai (2023), Modifications of epidemic-type-aftershock-sequence models for characterising diffusive shear slips of deep long-period earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 234 (2), 1254–1267.
- 井出 哲 (2017), 絵でわかる地震の科学, 講談社.
- 井出 哲 (2023), 地震学, 講談社.

