

はじめに

いつ襲ってくるかわからない大地震は怖いものです。いつ揺れるのか、教えてくれる人はいないでしょうか。そんな不安な気持ちをあおって「来月地震が起こる！」とか「次の地震はここだ！」という言葉が巷にあふれています。たくさん出版されている地震についての書籍も、将来予測を強調しがちです。その反動か、地震についての最新の科学的知見をまとめた本はほとんどありません。最新の知見はとっつきにくく、文章中心の手軽な読み物には向かないという理由もあるでしょう。でも、太陽や月によって地下の断層が静かに動かされていることや、石油掘削によって地震リスクが急増することなど、確かな知識がないとオカルトになりかねない奇妙な事実も見つかっています。そういうことを伝えられたらなあ、と考えていたら、今回、「絵」をたくさん使って地震の科学の最先端について説明する、という企画にめぐりあいました。そこで自分の文章力も顧みず、挑戦した結果が本書です。

本書を読んでも「いつどこでどれくらいの地震が起こるか」わかるようにはなりません。でも、なぜわからないのかは伝わるように、心がけたつもりです。この四半世紀に多くの震災が起こりましたが、事前に「予知」されたものはありません。一見停滞しているように見える地震の研究は、じつは岩石実験や統計数理など、さまざまな研究者の応援も受けて、しっかりと進んでいるのです。研究が進んだことによって、わからないことがわかったというのは何とも皮肉なのですが、「ゆっくり地震」など新たな展開を期待させる発見もあります。本書には中高生レベルの基礎知識から、大学院で教えるような高度な内容、さらに定着していない新説まで、地震の科学のさまざまな話題を盛り込みました。将来予測に限らない地震の真実が、少しでも伝われば幸いです。

最後に、本書執筆のきっかけをつくってくれたイェール大学の是永淳教授と、不慣れな執筆作業を見守ってくれた講談社サイエンティフィクの渡邊拓さんに感謝します。カモシタハヤトさんのイラストもじつに効果的でありがたいものです。そして妻保恵への感謝は、第一読者として草稿を読み的確な意見をくれたことだけにはとどまりません。

2016年1月
井出 哲

地震はどこまで わかっているのか？

1.1

地震を理解するところみ

怖いから知りたい地震

日本は、世界中で起こる地震の1割以上が集中する地震国です。1995年の阪神淡路大震災や2011年の東日本大震災の記憶はまだ新しく、地震による強い揺れや津波が引き起こす被害、震災の恐ろしさは、直接体験した人はもちろんのこと、多くの人々の心に残っていることでしょう。巨大地震のもたらす震災によって社会が動揺し、時には世の中の雰囲気から仕組みまで変わっていくこともあります。

古くから地震は日本人の怖いものの筆頭にあげられてきました。人は、怖いものの存在を知ると、それを理解しようと試みます。理解してしまえば、怖さも薄れるからです。実際に昔は恐れられたもののいくつかは、その正体が科学的に解明されるにつれ、怖いものではなくなりました。幽霊やお化けはもちろん、多くの病気も怖くはなくなりました。雷も火事もある程度は防げるようになりました。それらにくらべると地震はまだまだ怖い存在ですが、これまでに得られている科学的知識とそれを生かした技術によって、多少は地震の怖さを減じることができています。

多くの日本人は、たいいていの地震の揺れはすぐ収まることを知っているので騒ぎません。テレビやラジオでは地震の場所と大きさが伝えられ、大きな地震でないとなれば、あったことも忘れて、みな日々の生活に戻っていきます。とはいえ、時にはやや大きな地震が起き、交通機関が麻痺して日常生活がかき乱されることもあります。そんな地震の場合にも、現在の

科学技術ではそれがどのような地震だったのか、かなり短時間で分析可能です。その結果を気象庁が記者会見で説明し、「余震に注意してください」程度のコメントを出した後は、あまり話題にもなりません。

これは日本人にとっては日常の光景ですが、地震がめったに起きない国から来た人には驚かれます。日本でも、明治時代以前は大きめの地震が起きると、巨大地震の前兆かもしれないと騒ぎになったようです。実際に少し大きめの地震の後、地割れを恐れて竹やぶに逃げたり家の外で寝たりする人がいたそうです。当時にくらべると、現在の地震の知識は飛躍的に向上しました。

この本では最先端の地震の科学について解説していきますが、本題に入る前に、まずは地震についての知識がどのように獲得されてきたのか、おおよっぱに歴史を振り返ってみましょう。

ナマズの仕業か天罰か？

東京の大通りをドライブしていると、ときどきナマズのイラストが描かれた標識を目にします（**図 1.1**）。これは、大地震が起きたときに交通規制をおこなうための標識です。地震とナマズを結びつけるのは日本オリジナルの考え方です。標識には英語も書かれていますが、外国人がこれを見たら、なぜ地震に関係した標識にナマズが登場するのか理解に苦しむことで

しょう。日本では昔からナマズと地震が関係づけられてきましたが、ナマズと地震を結びつけた最古の記述は豊臣秀吉の書いた手紙だとされています（寒川，2007）。その関係がとくに強調されたのは、1855年の安政江戸地震の後です。この地震後にたくさん印刷されたなます鯰え絵が今も残されています。そのひとつは、鹿島神宮の神様が地震を起こす鯰を押さえつけているものです（**図 1.2(a)**）。今も神宮の境内にあるかなめいし要石がその役を果たし

図 1.1 ナマズが描かれた道路標識



図 1.2 要石

(a) 要石の描かれた鯨絵



(所蔵：凸版印刷株式会社印刷博物館)

(b) 鹿島神宮の実際の要石



ているということですが、地表に見える石はほんの小さなもので、そのような強力なパワーは想像できません(図 1.2(b))。

国が変われば地震についての解釈もいろいろです。ギリシャ神話に出てくるポセイドンは地震の神でもありました。キリスト教でもイスラム教でも、地震は人間の悪いおこないに対する天罰と考えられていました。歴史を振り返れば、巨大地震後に急速に衰退した国家や政治体制の例は多く、その衰退はいかにも天罰に見えたでしょう。仏教の書物にも、仏が地震を起こすと書かれています。「地震=天罰」という考えは、昔の日本や中国の施政者も意識していたようです。平安時代の天皇は震災が発生するたびに、その責任は天皇にあると宣言をしていたそうです(保立, 2012)。

あらゆる事象も説明しようとした古代ギリシャの哲学者たちも、地震を考察しました。アリストテレスは、地下に存在する空間を風が通り抜けるときに生じる振動が地震である、と説明しました。この説は一見科学的でもっともらしく、ヨーロッパでは長い間信じられていました。その証拠に、シェイクスピアが戯曲「ヘンリー四世」で常識のように用いています。

これ以外にもインド、メキシコ、ニュージーランドなど、世界の地震国ではそれぞれに、地震の原因についての言い伝えが残されています。近代

的な地震学が誕生する前から、人々は地震になんらかの説明を求めたのです。今の科学的な知識と比較すると正しくない説明でも、人々の地震に対する恐怖心を和らげたに違いありません。

1.2 近代地震学の誕生

弾性波としての地震

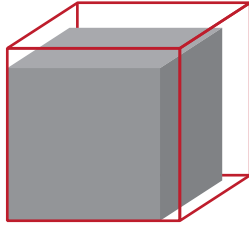
地震の揺れは、地震波によって地下を伝わります。地震波は、物理学の一般的な用語で弾性波と呼ばれる波の一種です。**弾性**というのは、物質に力をかけて変形させても力を取り除くともとの形に戻る性質で、これを有する物質を**弾性体**といいます。ばねやゴムは典型的な弾性体です。地中の岩石はばねやゴムとくらべると変形しにくいもの、弾性体とみなせます。弾性体の中を伝わる波が**弾性波**です。高校の物理学では、ばねの伸びと力の関係をフックの法則として学習します。これは、イギリス人ロバート・フックが17世紀に発見した法則です。弾性体理論の父フックは、弾性体の変形が引き起こす地震についても考察しました。彼の講義録には、海洋生物の化石が高地で見つかるのは、地震によって土地の上昇が起きるためだという指摘が残っています。ある程度正しい解釈といえます。

地震波が弾性波だと説明されたのは18世紀後半、やはりイギリス人のジョン・ミッチェルによってでした。彼は地震よりむしろ、ブラックホールについて最初に考察したことで有名です。この地震の正しい説明が生まれるきっかけとなったのは、1755年にポルトガルの首都リスボンを襲ったリスボン地震でした。強い揺れや火災、津波などによって6万人が亡くなったと推定されるこの地震の大きさは、マグニチュード9に近いと考えられています。被害はリスボン周辺に集中したものの、その揺れは広くヨーロッパで感じられたために、ある地点から伝わるなんらかの波動現象だという考え方が受け入れられたのでしょう。ただしそれがどのような波なのか、その説明がなされるまで、もう数十年待たなければなりません。

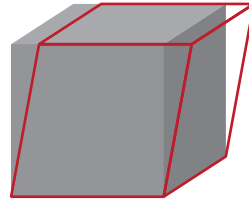
弾性体の中の変形や運動を数式で表現する弾性体力学は、19世紀に大きく進展しました。弾性体の変形は大きく2つに分けられます。周囲から

図 1.3 弾性体の 2 種類の変形

(a) 体積変形



(b) せん断変形



の圧力が変化することによって膨張したり圧縮したり密度が変化する変形（体積変形、図 1.3(a)）と、密度は変わらないままにずれる変形（せん断変形、図 1.3(b)）です。このうち圧縮・膨張による密度変化が伝わる波を略して圧密波、あるいは **P 波** と呼びます。圧密波には空気や水の中を伝わるものもあって、これを音波と呼んでいます。せん断変形を伝えるのは **S 波** です。空気や水は弾性体でないので、S 波は伝わりません。P 波と S 波という 2 種の波の存在が理論的に説明されたのは 1830 年のことです。弾性体の一点に力をかけたときに、その影響が弾性体の中をどのように伝わるかという問題の解は、19 世紀半ばにストークスによって数学的に厳密に求められています。ここに、地震を弾性波として理解するための物理学的な基礎が完成しました（川崎，2010）。

明治維新と日本地震学の黎明

世界には「我が国こそは地震研究発祥の地だ」と主張する国がいくつかあります。フックやミッチェルが地震の考察をした当時の科学の中心地イギリスや、ヨーロッパの中では比較的地震が多く、世界で初めて地震計で地震を観測したイタリアなどです。機械による地震の検知に限れば、初めて成功したのは 2 世紀、中国の科学者張衡が作成した地震計だともいわれます。日本も地震研究の元祖を名乗る国のひとつです。それまで比較的ゆっくり進んできた科学的地震研究の急速な発展が始まったのは 19 世紀の終盤から、その舞台が日本でした。

1868 年の明治維新後、政府は欧米の科学技術の最先端知識を短時間で吸

収するために、数多くの外国人科学者を雇いました。その多くは優秀で好奇心旺盛な若者です。彼らは地震など知らずに来日しましたが、日本にいれば頻繁に地震に遭遇します。とくに1880年に横浜付近で起きた地震は、被害はさほど大きくなかったものの、多くの在日外国人の注目を集めました。そして、その中から地震を科学的に理解するための調査研究を始める人たちが現れました。世界初の地震学会は、この横浜の地震の直後につくられています。地震の研究をする人たちの集まり、地震学会が初めてつくられたことこそ、日本が地震研究の元祖を名乗る理由のひとつです。

地震学会設立の中心人物は工部大学校（現在の東大工学部）教授だったジョン・ミルン（図1.4(a)）というイギリス人です。当時は、世界中を探しても正確な観測ができる地震計がない時代でしたから、ミルンと同僚の外国人科学者たちは、まず地震計の開発からとりかかりました（図1.4(b)）。多くの外国人が滞在数年で帰国する中で、ミルンは日本人女性と結婚し19年間も日本に滞在しました。その間、地震に関するさまざまな考察を論文として発表するとともに、後に続く日本人研究者を育てました。この点で「日本地震学の父」と呼ぶべき人です。

地震計の開発は世界中の科学者によって進められ、19世紀中に世界各地で地震の観測が始まっています。これらの地震計の記録が科学的な地震研究の基礎となりました。イギリス帰国後にミルンは私設の地震研究所を設立し、世界中から地震計の記録を収集し始めました。当時の大英帝国が支

図 1.4 日本地震学の父、ジョン・ミルンとミルンの地震計

(a) ジョン・ミルン



(b) ミルン水平振り子地震計（重要文化財）



(写真提供：国立科学博物館)

地震とは何か？

日常生活の中で、突然ガタガタという揺れを感じると、「地震だ！」と思います。地面の揺れが建物を揺らすことを知っているからです。ふだん地震について研究している私も、東日本大震災の強い揺れを机の下で感じていたときには、この地震（＝揺れ）はいつ収まるのだろうと、不安に思っていました。しかし、じつは地震という言葉が指すのは地面の揺れだけではありません。揺れは重要なプロセスなのですが、地震にはほかにも多くのプロセスが含まれていて、そのためにしばしば誤解が生じます。これから地震のさまざまな面について説明していく前に、まず地震とはどのような現象で、とくにその大きさはどのように表現されるか見ていきましょう。

2.1

地震のプロセスと規模

「地震」の揺れをさかのぼる

私たちが「地震だ！」と感じる揺れ、とくに地表近くの地震の揺れのことを、専門用語では**地震動**と呼びます。ただし地震のときに揺れるのは、地表近くだけではなくありません。

地表での揺れは地下深くから伝わって来ます。揺れのもとを少しさかのぼると、地下を伝播していく**地震波**としての地震をイメージすることができます。地下の岩盤中を伝わる弾性波動です。都市の多くは土（堆積層）の上につくられているので、足元に岩盤があるというイメージがわかりかたかもしれません。しかし、関東周辺の厚い堆積層に覆われた場所でも、数キロメートル掘れば硬い岩盤にぶつかります。山に行けば地表に露出した岩

図 2.1 「地震」が含むもの



盤を見ることができます。その岩盤は地下深部までつながっているのです。

岩盤は様な弾性体ではなく、さまざまな岩石や鉱物からなる複雑な物質です。地震波は均一な弾性体の中では光と同様に直進しますが、複雑な岩盤の中を伝わるときには反射や屈折を何度も繰り返します。ガタガタという地震動のかなりの部分は、この波動伝播における反射や屈折によって生みだされます。とくに堆積層を含む地表近くの複雑な地下構造を伝わる際には、もともと単純な地震波でさえ、きわめて複雑な揺れとなります。

伝わる地震波をさらにさかのぼると、その源にたどり着きます。地震波のエネルギーの放出源、**震源**です。震源は空間の一点として示されるようなものではなく、岩盤中に広がっている断層面という面です。震源でのエネルギー放出プロセスが地震波を生みだし、その波が地下の岩盤中を伝わり、最終的に地面や建物を揺らします。この一連の現象はすべて、広い意味での地震です (図 2.1)。ただ、地震という言葉を狭く使うと、エネルギー源としての震源を指すことも、足元の地震動を指すこともあり、しばしば混乱を招きます。

大きな地震とは？

私たちはとくに疑問もたずに「大きな地震」「小さな地震」という言葉

を使います。しかし今見てきたように、地震がいくつかのプロセスに分かれているなら、地震の大きさとは何を指すのでしょうか？ じつは、地表での地震動、地下を伝播する地震波、エネルギー源としての震源というそれぞれのプロセスについて、大きさを測ることができます。「大きな地震」といったときに何の大きさを指しているのか曖昧だと、混乱が生じがちです。とくに「震度」と「マグニチュード」がわかりにくいといわれます。どちらもだいたい4～7という値が目される指標なので、混乱するものもとてもなのですが。

地表での地震動の大きさの尺度として**震度**が有名です。震度はある場所がどのくらい揺れたかという尺度なので、1回の地震でも場所ごとに違う値をとります。一方、エネルギー源としての震源の大きさは**マグニチュード**を用いて説明することが多いです。これは1回の地震について1つに決まるべき尺度です。一般的には、震度は震源に近いほど大きく、震源から遠ざかるにつれて小さくなります。また、震源からの距離が同じくらいの場所どうしを比較すると、マグニチュードが大きいと震度も大きい傾向があります。しかし、史上最大級のマグニチュード9を超える地震がチリで起きたとしても、地球の裏側の日本では人が感じるレベルの揺れはありませんから、震度は最低の0となります。

震度もマグニチュードも、長さや速さあるいはエネルギーのような物理量ではありません。また歴史を引きずったさまざまな定義があります。単位もついていませんが、それぞれさまざまな物理量と関係はあります。以下ではもう少ししていねいに、地震動と震源の大きさの尺度について、物理学的な意味を見ていきましょう。

2.2 地震動の尺度「震度」

震度4の地震？

地震が起きると、NHKで地震速報が流れます。その内容が数年前に一部変わりました。かつての速報では、たとえば「ただ今、関東地方で震度4の地震がありました」といった決まり文句が使われていたのですが、現

在は「ただ今、関東地方で震度4の揺れを観測する地震がありました」というようになりました。何が違うかおわかりでしょうか？ 後者の説明は多少回りくどいですが、震度が地震全体というより、局所的な揺れ=地震動の尺度であることが明確になっています。もっとも報道機関によっては、このような工夫をしているところと、していないところに分かれているようです。注意して比較するとおもしろいかもしれません。

ある地点の地震動は、後で詳しく説明しますが、物理学的に厳密に計測できます。それならば、その計測値を使って揺れの大きさを説明すればよい、と思うでしょう。しかしそれでは直感的にわかりにくいのと、なにより歴史的経緯から、震度がよく使われています。震度は地震がどのようなものか理解される以前から、経験的に用いられてきた尺度です。

揺れを震度に結びつける

震度はある地点での地震動（揺れ）をいくつかの階級に分けたもので、もともとは、体感した揺れや構造物の破損状況と結びつけて定義されました（図2.2）。日本で用いられていた気象庁の震度階では、たとえば、震度1は「静かにしている場合に揺れをわずかに感じる。立っただけでは感じない場合が多い」、震度3だと「ちょっと驚くほどに感じ、眠っている人も目をさます」、震度5では「立っただけではかなり難しい。一般家屋では軽微な被害が出始める」などと決まっていました。また、震度は7までしかなく、震度7だと「30%以上の家屋が倒れる」と定められていました。尋常な揺れではありません。

地震国日本は、地震についてのさまざまな独自基準をもっていますが、震度もそのひとつです。国際的には、12段階あるメルカリ震度階のほうがよく使われます。メルカリ震度階の値は、おおむね日本の震度の1.5倍くらいの数字になります。ですから、アメリカで震度（seismic intensity）が7の地震があったといわれても、大騒ぎする必要はありません。メルカリ震度階の7は日本の震度ならば4か5弱くらいで、30%以上の家が倒れるような大災害になったとは考えられません。

計測震度

揺れの体感や構造物の破損状況による尺度は、客観的でないことに加え

図 2.2 気象庁の震度階（かつての定義）

震度 1



静かにしている場合に揺れをわずかに感じる。立っていても感じない場合が多い。

震度 3



ちょっと驚くほどに感じ、眠っている人も目を覚ます。

震度 5



立っていることはかなり難しい。
一般家屋では軽微な被害が出はじめる。

震度 7



30% 以上の家屋が倒れる。

て、地震後すぐに算出できないという欠点もあります。現在では全国各地に地震計が設置されており、とても強い地震動でも完全に記録し、デジタルデータとして伝送できるようになっています。ですから、地震計の記録から直接震度を計算したほうが、客観性・即時性の面で有利です。

そこで日本では 1996 年以来、気象庁が、観測される地震動から直接震度を計算するようになりました。この震度をとくに**計測震度**と呼びます。地震が起きると、全国各地に展開した震度計（震度計算のために最適化された地震計）で直ちに計測震度が計算され、その結果がニュースで報道されています。階級としては 0 から 7 までありますが、計測震度の計算上、震度 5 と 6 の範囲が大きすぎたので、それぞれ強・弱の 2 階級に分けることにしています。そのため、震度は 0 から 7 までの 10 階級と、ちょっとおかしなことになってしまいました。計測震度の計算法は昔の経験的な震度階とおおむね一致するように設計されていますが、必ずしも対応がよくないという批判もあります。

計測震度の登場で、体感や被害にもとづく震度階は、日常的には用いら