

[情報と防災～研究者が展望する災害情報システムの未来～]

1 地震観測のこれまでと未来

— 一次世代の情報研究者への期待 —



平田 直 | 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

地震観測とは

地震動の観測

地震観測の目的は、地表の揺れを測り、その原因を探ること、地球内部や地表付近の静的・動的性質を理解することである。動的な性質には、地震による揺れの大きさや継続時間も含まれる。地表の揺れを測ることは、古来いろいろな手法が開発されてきたが、振動する地表に固定された機器を用いて、振動自体を測ることは、必ずしも容易ではない。

もし、仮想的な「不動点」があれば、そこからの相対運動を計測することで地表の揺れは測れるが、実際には不動点は存在しないので、さまざまな工夫が必要である。古来、長大な腕を持つ振り子を用いた地震計や、それに等価な電気回路を作るなどして、ある周波数範囲の運動を精度よく測る機器が開発されてきた。近年では、慣性質量の加速度を測る手法が開発されて小型な地震計が実現している。

震源の推定

地表が振動する原因はさまざまあるが、1つは人間活動による振動であり、もう1つは地下深くに原因を持つ地震によるものである。産業・交通活動などの人間の活動は、その近くでは大きな揺れをもたらすが、放出されるエネルギーは小さいので、離れた地点では観測されない。その他にも、海岸に打ち寄せる波浪によって、内陸部の地表が振動すること

も知られている。それらの中で、圧倒的なエネルギーを持つ振動が地震による揺れ、つまり、地震動である。人間社会に影響を与えるのは、この強い地震動であるので、防災上の理由からも、地震と地震動の研究が進んだ。

地震の研究の第一歩は、地震がどこで発生したか、つまり震源（地震の3次元的位置）を特定することである。地震は、地下深く、たとえば数kmから場合によっては、数百kmの深部で発生し、震源から地震波を放出する。地震波は、水平距離も数10kmから、巨大地震では地球の裏側まで伝わる。地震波は岩石を伝わる弾性波であり、毎秒数kmの速さで伝わる。もし、地球内部を伝わる速さが既知であれば、観測された地震波の到着時刻から震源の位置と、地震の発生時刻を推定することができる。これが、震源決定問題である。未知数は位置 (x, y, z) と地震発生時刻 (t) の4つであるから、独立な観測が4つ以上あれば、容易に解くことができる。しかし、「地震波が伝わる速さ」（これを、地震学では速度構造という）は、本当はそれほどよく知られていないため、多くの観測点のデータを用いて誤差を減らしたり、速度構造自体を未知数にして解いたりする手法が開発されている。速度構造を求める問題になると、モデルにもよるが、未知数は数百から数万になることは普通であり、問題の正則化のためのさまざまな手法が開発されている。同時に、これらの研究のためには、複数多点の観測点のデータを用いることが

特集 Special Feature

重要であり、現在では、日本全体に 2,000 を超える常時観測点が、いろいろな機関によって運営されている。

1995 年阪神・淡路大震災を契機に発足した、国の地震調査研究推進本部によって、高感度地震観測網 (Hi-net) 等の建設が決められて、国立研究開発法人防災科学技術研究所 (以下、防災科研) によって設置・運営されている。防災科研は、同時に、全国強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net)、広帯域地震観測網 (F-net) の整備・運用を行ってきた。さらに、16 の火山で、基盤の火山観測網 (V-net) の整備を行い、火山活動を観測している。加えて、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災を受け、海域を震源とする地震や津波の早期検知・情報伝達などを目的として、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) を北海道沖から房総半島沖までの海底に整備し、2016 年 4 月からは、紀伊半島沖から室戸岬沖にかけて整備された地震・津波観測監視

システム (DONET) も運用している。これら全国の陸域から海域までを網羅する「陸海統合地震津波火山観測網」の本格的な統合運用が 2017 年 11 月より開始されたことを機に、その愛称を「MOWLAS」(Monitoring of Waves on Land and Seafloor: モウラス) とした。(図-1)。

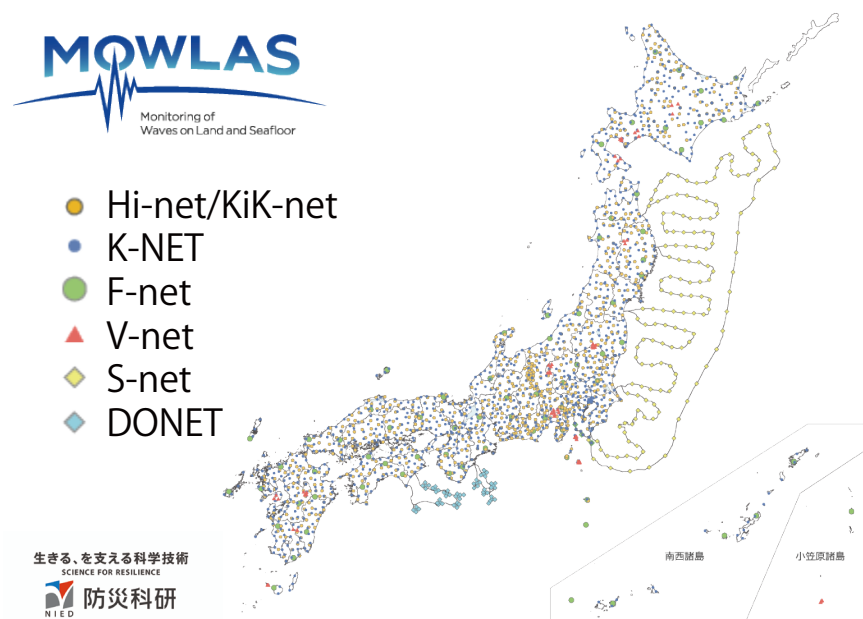
地下構造の推定

地下構造の推定は、震源決定問題を解くために必要であるが、同時に、地震がなぜ発生するかを理解するためにも必須である。また、地下天然資源の探査の観点からも重要である。たとえば、石油がどこにあるかを推定するためには、試験的に掘削する前に、綿密な地下構造の調査を行い、石油が貯留する層の深度を推定する必要がある。このためには、弾性波の伝播する速さの知見が必須であり、人工的に振動を発生させて観測することによって、地下構造を推定する技術が発展した。石油探査用に開発され

た地震観測システムでは数百から数千チャンネルの観測が行われている。

大規模観測ネットワーク

地震学的な研究でも、地下資源開発の調査でも、現在では、超多チャンネルの観測が行われている。これが実現できたのは、計測システムがデジタル化されることが大きい。地震観測では、観測点 (チャンネル) 間の時刻の同期が重要であるため、旧来のアナログ観測時代には、基準とする時間基準を作ることが難しく、多チャンネル化が難しかった。現在では、GPS 等の衛星測位システムや NTP (Network



■ 図-1 陸海統合地震津波火山観測網 (モウラス, MOWLAS: Monitoring of Waves on Land and Seafloor)。防災科研が全国の陸域から海域までを網羅して統合的に運用している地震観測網。高感度地震観測網 (Hi-net)、全国強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net)、広帯域地震観測網 (F-net)、基盤の火山観測網 (V-net)、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)、地震・津波観測監視システム (DONET) から構成される。Hi-net と KiK-net は、同一の観測坑の底部 (Hi-net) と、底部及地表部 (KiK-net) に設置されている

特集 Special Feature

Time Protocol) を用いた観測点間の時刻同期が実現している。観測網の規模にもよるが、地震波伝播の速さは数km/sなので、数十～百 ns の精度が確保されていれば十分である。しかし、これは、筆者が学生の頃やっていたような、ペンレコーダーでNHKの時報と地震動記録を同期する方法で実現することは難しい精度である。

データのデジタル化とタイムスタンプの付いたデータの packets 化により、大規模観測ネットワークが可能となった。今後は新しい技術によって、より高速で安価な通信手段が開発されることが期待される。

インターネット

これらの大量のデータの通信にはインターネット技術の進展が欠かせなかった。地震観測にインターネット技術を使うようになったのは、1995 年阪神淡路大震災の前後である。東京大学地震研究所では、それまで準備してきたインターネット技術を用いた地震観測技術を、この震災を起こした 1995 年兵庫県南部地震の余震観測に適応した (図-2)。当時はまだ、複数の観測点とそれらのセンターを結ぶ回線にはアナログの電話回線が使われていた。東京大学地震研和歌山観測所 (和歌山県和歌山市)、京都大学防災研究所阿武山観測所 (大阪府高槻市) と、兵

庫県南部地震の余震観測のための臨時観測網を、インターネットプロトコル (IP, Internet Protocol) 接続し、1つのネットワークとした。これらのデータはインターネット接続された東京大学地震研究所 (東京都文京区) や、京都大学防災研究所 (京都府宇治市) でも、リアルタイムで解析することができた。臨時観測網と定常観測網とのリアルタイム結合と、複数の遠隔地でのリアルタイム解析という点で、画期的なシステムとなり、その後の臨時地震観測方式の先駆けとなった。

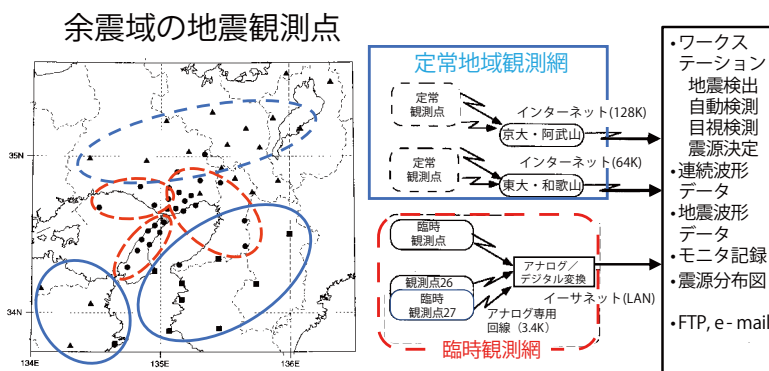
揺れの予測

防災情報として地震観測データを活用する重要な例として、緊急地震速報が挙げられる。これは、地震波のうち、速く伝わるP波と、それより遅く伝わるS波の到着時刻の差を利用する、即時的な情報伝達の技術である。

S波は、P波より一般に振幅が大きく、強い揺れはS波によってもたらされる。日本中に満遍なく観測点が配置されていれば、震源の近くのいくつかの観測点でP波を検知して、震源を推定し、後から来る大きな振幅のS波の到着時刻と大きさを推定し、まだS波の到着していない場所に揺れの予測 (到着時刻と大きさ) を伝えることができる。この情報が、気

象庁が 2007 年 10 月から発表している緊急地震速報である。この情報では、揺れまでせいぜい数秒から 10 数秒程度の猶予時間しかないが、高速で走っている列車の速度を落として脱線の確率を下げるなど、情報を自動的に利用できるユーザには有益である。

震源に近い観測的で震源を決めれば、遠方での揺れまでの猶予時間が増える。このために、2011 年東日本大震災の後、東北地方の太平洋沖には海底地震津波観測網が設置されて、海域で発生する地震



■図-2 1995 年兵庫県南部地震余震観測の観測システム。余震域を取り囲む 2 つの定常観測網 (京大・阿武山観測網と東大・和歌山観測網) と、現地の臨時観測網をインターネットで繋いで、リアルタイムデータ解析やデータ保管を東京や京都などの全国の大学で実施した。当時は、臨時観測点から現地収録基地局間へは、アナログ回線でデータを収集して、基地局でアナログ/デジタル変換を行った。

の緊急地震速報の情報発信の迅速化が図られた。理論上は最大 20 秒くらい早くなる。

防災情報として

地震観測データは、地震動の観測であるから、揺れの現状把握、さらに緊急地震速報のような少し先の揺れの予測情報を出すことで防災情報として活用することができる。しかし、本当に効果的な防災情報とは、災害への対応に地震観測データが活かされる情報である。少し広い観点から議論する。

災害科学では、社会に災害をもたらす可能性のある力、社会の外力を災害誘因という。英語では hazard (ハザード) である。災害は、社会に内在する脆弱性によって発生するので、それを災害素因という。災害素因は、ハザードに曝される量 (曝露量)、ハザードに対する脆弱性 (地震災害では、建物の耐震性の欠如)、社会の災害への対応力 (レジリエンス) から構成される。

地震観測データの直接的な貢献は、地震ハザードの予測である。社会への外力が適切に予測されることが、社会の災害素因の提言につながるからである。たとえば、この地域ではどのくらいの強さの揺れが、何年に 1 度の割合で発生するかという、地震動の長期評価によって、都市への過度の集中化が災害のリスクを高めることを定量的に評価して、対応策を検討することができる。合理的な投資によって、建物や都市の耐震化が可能になる。また、緊急地震速報のようなハザードの直前予測により、高速で走る列車を減速させることが可能になる。つまり、ハザードの地震学的な予測が、曝露量、建物の非耐震性の低減に貢献できる。

エッジコンピューティング

しかし、適切な都市計画や建物の耐震化が進んでも、そこに住む人々の災害への対応力 (レジリエ

ス) が低ければ、災害を全体として低減することはできない。第 1 に、理想的な建築物、都市が実現する前に、不幸にして大きな地震が起きてしまう可能性が高いからである。第 2 に、仮に、都市全体を免振機構の上に作るという理想的な世界が実現しても、自然現象はしばしば予想を超えるほどに大きくなったり、対応装置が故障したりすることがある。これらに備えるには、最終的には住民や地域組織、企業が自ら災害への対応力を強化する必要がある。

このためには、ハザード、つまり自然現象のうち災害をもたらす可能性のある現象の推移を事前、即時的、地震後に一人ひとりに伝達して、自らで状況を判断し、対応方法を判断できる情報を提供する必要がある。たとえば以下のような情報である。まず、(1) どこで地震が発生したかという情報。マグニチュード、震源など。次に、(2) 緊急地震速報として、あと 10 秒後に震度 6 弱の揺れが予想される、という情報。さらに、(3) 自分のいるところが実際にどのくらい揺れたか。その結果として (4) 自分はこうしたらよいか、という情報を地震後ただちに受け取る。これらの情報のうち (1) と (2) は現状でもほぼできている。(3) と (4) を実現するためには、自分のいる建物の階ごと、できれば部屋ごとに揺れを測るセンサが設置されていて、それが通信機機能を持っていることが必要である。自分がどこにいるかによって、対応の仕方が異なるので、(4) の情報はユーザの位置情報に紐づけられている必要もある。

現在では多くの人がスマートフォン (スマホ) という無線通信手段を携帯しているので、もしすべての建物管理者や住民に位置情報を持った揺れのデータを送信する仕組みができれば、個々人の状況認識を向上させ、適切な防災行動を促す仕組みが実現する。

スマホには、小型の加速度計が装備されているので、アプリを開発することで、自分のいる場所の揺れを測定することもできる (スマホ地震計)。スマホは、通信機能とセンサを持つコンピュータなので、

特集 Special Feature

自らデータを処理してクラウドに解析結果を送ったり、クラウド上のデータを参照したりすること（エッジコンピューティング）が可能となる。筆者の研究グループを含め世界のさまざまなグループがスマホ地震計を開発して、機能の改善、データの利用方法の研究を行っている。ただし、スマホは基本的には持ちあるので、地面や建物の揺れを測るには、特別な工夫が必要である。たとえば、建物の揺れが正しく測れるような、充電用の卓上スタンド（クレードル）が開発されている。スマホを持ち歩いているときと、静かに机の上に置いているときを自動的に判別する人工知能（AI）の開発が有効かもしれない。実用化されれば、世界中の数十億のスマホがすべてネットワークにつながった地震観測網になるという画期的なアイデアである。

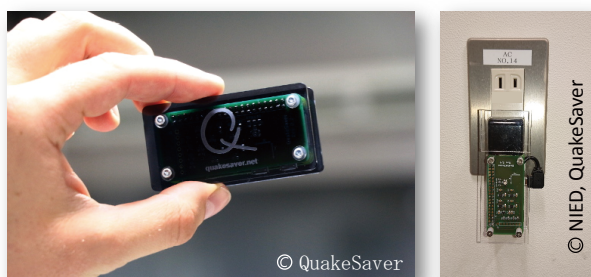
スマホ地震計のほかに、筆者たちは、スマホの中に入っている加速度センサ（MEMS加速度計）を回路基板搭載超小型コンピュータ（たとえば、ラズベリーパイ）に組み合わせ、それを住居の壁のコンセントに差し込むコンセント型地震計を開発している（図-3）。震度という地表の揺れだけではなく、

建物の部屋の揺れを測定することが可能となる。測定された信号は、WiFi 経由でクラウドサーバに送信され、他の地震計や気象庁などの地域の観測データと統合されてユーザに情報が提供される。

未来の地震防災情報

こうしたシステムが防災に役立つためには、大きく2つの課題が解決される必要がある。まず、すべての建物に揺れのセンサを設置することへの、居住者・建物オーナーの理解と同意が必要である。その上で、こうしたシステムが安価に安定して供給される必要がある。情報・通信技術的にはエッジコンピューティングと、高速通信技術の進展が不可欠である。さらに、社会科学的な知見を活用して、人間の行動を促したり、抑制したりすることが必要となる。つまり、率先して避難したり、お互いに救助しあったりすることをこうしたシステムが促すことが期待される。単に、警報が流れるだけでは、人々の防災行動には結びつかない。次世代の理系と文系の研究者が学際的に取り組んで、人々が自分自身にとってより良い選択を自発的に取れるように手助けする技術が進展することを期待する。

(2020年9月29日受付)



■図-3 エッジコンピューティング技術を用いた超小型地震計。コンセントに差し込むだけで観測ができる。WiFi を用いて、クラウドにデータを上げ、世界中どこからでも利用できる。防災科研と QuakeSaver 社とが共同開発している。

■平田 直 nhirata@bosai.go.jp

東京大学理学部卒業。東京大学大学院理学博士。東京大学地震研究所教授、所長を経て、国立研究開発法人防災科学研究所首都圏レジリエンス研究推進センター長。東京大学名誉教授。地震調査研究推進本部地震調査委員長。