

揺れから揺れを予測する：データ同化・リアルタイム Shake-map・波動伝播シミュレーション ～次世代の緊急地震速報を目指して～

ほしば
干場充之（1986年卒；現在、気象研究所勤務）

私が地球物理学教室を卒業したころ、「地震の研究をやっている」といえば、ほとんどの人は、地震予知をイメージしたものである（そして、現在でも、その状況はそれほど変わっていない）。当時の教授は、「天気予報の様なイメージで、いつの日か地震の予報も！」とよく言っていた。それから、およそ 30 年、いまだに地震の発生を 2～3 日前に予知することは容易ではないが、地震の揺れを数秒～数 10 秒前に予測出来るようにはなってきた。そして、現在、だれでもその予測情報を受け取ることができる。緊急地震速報である。

緊急地震速報は、2007 年 10 月から本格的な運用が始まった。私が、緊急地震速報の高度化の研究を担当する研究室長へ異動を命じられたのは、行政官として 5 年間過ごした後の 2008 年 4 月である。なので、実は、現在の手法の技術開発にはほとんど関わっていない。若い頃、高周波地震波の伝播をテーマとして博士論文をまとめたとはいえ、未経験の研究分野のリーダーを任されたことに、正直言ってかなり戸惑った。当時の私は、緊急地震速報の技術といえば、「いかに早く、いかに正確に、震源位置とマグニチュードを決めるか」、ということだと捉えていたので、自分の得意な研究分野では無いように思えたからである。

室長になってから 3 年が過ぎようとしていた頃、2011 年 3 月に東北地方太平洋沖地震が発生した。緊急地震速報は、東北地方に対して、強い揺れが襲う 15 秒以上前に、警報を発している。これは、緊急地震速報に期待されていた通りのパフォーマンスであり、想定通り動作したと言える。ただし、この地震では、「100 点満点」とはいかなかった。関東地方に対しては警報を出しておらず（関東は、多くの観測点で震度 6 強や弱を観測した）、過小な予測をしてしまった。これは、M9.0 の地震の震源域がおよそ 400 km にも及ぶ巨大なものであり、その南端は関東の沖まで及んだが、このような巨大な震源域への対応が不十分だったからである。さらに、本震後の数週間、多くの誤報を発する事態になってしまった。これは、上記の広い震源域にわたって、余震活動があまりにも活発だったため、複数の余震が同時に発生することもしばしばあり、そうすると、システムは、その複数の小さな余震を 1 つの大きな地震と誤って解釈してしまっただけである。

それ以来、この「広い震源域」と「複数同時多発」の問題を根本的に解決することが、我々の研究室の至上命題となった。実は、この 2 つは、2007 年に運用を開始する時点で既に認識されていた事柄であり、当時から「技術的な課題」として考えられていた。当時は、これらの問題の技術的な解決を待つよりも業務開始を行うべしという判断であり、完璧な技術の開発を待つよりも、早期に実用化することでの減災の効果を優先したと言える。「広い震源域」と「複数同時多発」への対応は将来の研究開発を待って導入すれば良いだろう、ということ

…のはずだった。我々の技術開発が間に合わなかった、という無力感にさいなまれ、被災した人に申し訳なく思う気持ちと同時に、でも、この困難な課題が、こんなに早く突きつけられることになろうとは、実用化開始当時、いったい何人の人が予想していただろうか、と恨めしくも思った。

もちろん、最初のころ、有識者からは「震源域を即座に推定する手法を！」とか「複数同時に発生しても、きちんと分離できる技術を！」とか、という意見を数多く頂いた。しかし、以下の基本的な、そして、重要な問いから始めることにした。つまり、“本当に、震源やマグニチュードを即座に推定することだけが唯一の方法なのだろうか？”、また、“震源域を推定することのみが精度向上に向けたただ一つの道なのだろうか？”という問いである。そして、我々の答えは、両方とも、否、である。まったく別のアプローチがあるように思えた。揺れが伝わってくる様子が分かれば、将来の揺れを予測できるだろう、と。

まず、明確にしたのは、「重要なのは揺れを予測すること」ということである。つまり、「震源とマグニチュードは、揺れを予測するための手段であり、震源とマグニチュードは必ずしも必要ではない」と位置付けた。そうすると、震源とマグニチュードの早期決定による現在の方法は、野球のプレーで例えるならば、図の左側のようなことをやっている、と思えるようになってきた。「バッターが打った瞬間の方向と速度が分かれば落下地点が予測できる」という考えである。でも、実際の外野手は、右側の図のように「今現在のボールの位置と速度を把握してそこから落下地点を予測している」だろう（こういう例え話をすると、高校時代に野球部だったという方からお叱りを受けることがある。上手い外野手とはバッターが打った瞬間から動き出すものだ。これに対する私の反論は…、ある冗談を持ち出すのだが、それは当日、講演を聞いてもらった人だけの特典ということにしたい）。

要するに、「現在の状況を正確に把握」し、その後「物理の法則に従って未来を予測」しようというものである。微分方程式の解法の観点から見ると、初期値を正確に把握し、方程式に代入する、という考えである。この手の予測を行っているのは、身近なところに存在した。天気予報である。数値予報の考え方に極めて近いと思う。気象の数値予報のやり方を横目で見ながら、“揺れの数値予報”の研究を進めた。

白状すると、私は、気象庁に入ってからというもの気象学を勉強したことがなかった。でも、そこは、気象庁であり、気象研究所である。フロアを1つ移動するとその道の専門家が大勢そろっており、初心者向けのセミナーも開かれている。“地震の人がなぜここに？”と言われながらセミナーに参加した。それらで、データ同化手法を学習し、その手法を用いて、地震の揺れの分布の現状把握（リアルタイム Shake Map）に応用することを考えた。数値実験を重ねながら、データ同化が極めて強力であることが分かってきた。そして、現状が正確に把握できたならば、次のステップは、揺れの予測、つまり、地震波動の伝播の計算の出番である。地震波動伝播の物理を使って、10秒後や20秒後の揺れの分布を計算する。これならば、私の得意分野である。博士論文にまとめた、高周波地震波の伝播のシミュレーションを、20年ぶりに、もう一度、登場してもらおうことにした（ちょうど、小泉今日子が20年ぶ

りに復活していた頃である！)。再び、役に立つ日が来るとは、2008年に緊急地震速報の担当になった時には思いもしていなかったことであり、少々感慨深い思いがしたものである。

この方法では、震源とマグニチュードを求めるわけではないため、「広い震源域」であっても「複数同時多発」であっても、動作が変わるわけではない。東北地方太平洋沖地震や、余震が極めて活発だった2004年新潟県中越地震（M6.8）などのデータに適用しながら、「広い震源域」と「複数同時多発」に対しても有効に機能することを確認している。今後、いつの日か実際に緊急地震速報の業務に応用されることを目指して、研究を進めていきたい。

さて、地球物理学教室を卒業しておよそ30年、「天気予報の様に地震の発生を予知する」ことは未だに夢のままであるが、このように、「天気予報の様に地震の揺れを予測する」ことへは道が開けてきた。

手法の詳しい内容は以下を参照頂きたい。

Hoshiya, M., 2013: Real-time prediction of ground motion by Kirchhoff-Fresnel boundary integral equation method: extended front detection method for Earthquake Early Warning, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 1038–1050, doi:10.1002/jgrb.50119.

Hoshiya, M. and S. Aoki, 2015: Numerical shake prediction for Earthquake Early Warning: Data assimilation, real-time shake-mapping, and simulation of wave propagation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **105** (in press).

干場充之, 2014: 波動場の把握に基づく地震動の予測 —地震動即時予測の次世代への考察—, 地震予知連絡会会報, 92, 406-411, http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou92/12_03.pdf

未来を予測するには, ...

