

## 12-10 地震動即時予測の研究：最近 10 年の進展から

### Research on earthquake early warning: development of last 10 years

干場 充之（気象庁気象研究所）

HOSHIBA Mitsuyuki (Meteorological Res. Inst., JMA)

#### 1. はじめに

緊急地震速報に代表される地震動即時予測（あるいは、地震動即時警報）は世界各地で研究が行われている。このうち、国あるいは地方行政の一環として、一般住民を対象に警報を出す運用は、2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）前に始めていたメキシコと日本に加えて、台湾（2014 年から、eBEAR と呼ばれる）<sup>1)</sup>、アメリカ西海岸（2018 年から、ShakeAlert）<sup>2)</sup>などで開始された。本稿では、特に、最近 10 年間の地震動即時予測の研究の進展のレビューを行う。

なお、「緊急地震速報」は気象庁から発表される情報の固有名詞であり、海外も含めた類似の技術には、一般名詞としての「地震動即時予測（あるいは、地震動即時警報）」が使われることが多い。本稿でもそのように使い分ける。

#### 2. 地震動即時予測の原理

地震動即時予測の原理として次の 3 つを上げることが出来る。

- (a) 地震波が伝播していく様子を推定し、地震動を予測する（伝播の予測）。
- (b) P 波を捉えることで後続の S 波による地震動を予測する（P 波から S 波の予測）。
- (c) 破壊過程の初期の段階の情報から破壊全体（地震規模（マグニチュード、M）など）を推定し、その情報に基づいて地震動の強さを予測する（破壊の予測）。

地震動即時予測は、この 3 つのいずれか、あるいは組合せにより行われる（図 1）。緊急地震速報では、(a)と(b)を組合せて行っている。

なお、地震動即時予測の説明として (b) が強調されることが多いためか、(a) について、ほとんど、あるいは、まったく触れていない解説書もある。しかし、(a) の原理で、S 波を観測し、その後の S 波の伝播を予測することは可能である（図 2）。地震動即時予測には、P 波部分の情報だけでなく、S 波の情報もとても有効である。実際、緊急地震速報では S 波の情報も用いている。

#### 3. 地震動即時予測の最近 10 年の進展

東北地震では、東北地方に対しては震度 5 弱が観測され始める 15 秒以上前に警報を出すことができたものの、関東地方では震度を過小予測した。これは、広い震源域への対応が十分でなかったためである。また、活発な余震活動のため、複数の余震が同時に発生した場合には、M を適切に決められず、過大な警報を出すことがあった<sup>3)</sup>。これらの解決のために、前節で示した 3 つの原理それぞれについて、どのように研究が進展したか、を東北地震以前（2000 年代）と最近 10 年間（2010 年代）を比較しながら述べる。

##### 3-1 (a) 伝播の予測

震源近傍の観測から震源と M を迅速に決定すれば、地震動予測式（GMPE）を用いるにより、やや離れた地点での地震動の強さを予測できる。迅速な震源決定として、2000 年代には、単発地震で点震源の仮定を用いるものが多かったが、2010 年代になると、複数同時多発に対応するものや広い

震源域へ対応を検討するものが増えてきた。複数同時多発への対応として、震源決定に振幅のデータを使う方法が提案されている（例えば、IPF 法<sup>4)</sup>。この方法は、2016 年に緊急地震速報の運用に取り入れられた）。これにより、振幅の小さな場所に震源を誤って決めてしまうことを回避できる。また、広い震源域の対応として、強震域の成長から震源域の広がり成長を逐次迅速に推定することが研究されている<sup>5,6)</sup>。

一方、2010 年代に入ると、震源と M などの震源パラメータを迅速に推定するのではなく、波動場を推定し、そこから波動伝播の物理に則り、未来の波動場を予測しよう（揺れから揺れの予測）という考え方が進められた<sup>7,8,9)</sup>。震源や M を必要としないため、広い震源域、複数同時多発、さらには、GMPE からの予測が大きく外れるような場合にも対応可能である。波動場の推定には、（気象の数値予報等で用いられている）データ同化手法を応用することが提案されている。この揺れから揺れの予測の考え方を簡易的に適用したものに PLUM 法がある<sup>10)</sup>。PLUM 法は、2018 年から緊急地震速報の運用に取り入れられている。

2010 年代になって、GNSS をリアルタイムで解析することで、震源域の広がりや、モーメント M ( $M_w$ ) の成長を逐次迅速に推定する研究が盛んになってきた<sup>11)</sup>。津波即時予測への応用が期待されているが、さらに地震動即時予測への応用も議論されている。ただし、一方で、（強い揺れをもたらす）高周波の地震波と ( $M_w$  を規定する) 低周波の地震波の発生場所が異なる場合があること<sup>12)</sup>、また、いわゆる“M の飽和”により、 $M_w$  に大きな差があっても揺れの大きさはそれほど変わらないこと<sup>13)</sup>、さらには、 $M_w$  を介して GMPE から揺れの大きさを予測するのでは迅速性にも精度的にも限界があること<sup>13,14,15)</sup>から、リアルタイム GNSS の地震動即時予測への効果は限定的だという考えもある。

### 3-2 (b) P 波から S 波の予測

P 波から S 波を予測するという考え方は古くからあり、S 波/P 波の振幅比として 5 倍程度を用いることが多い。しかし、断層の破壊継続時間が S-P 時間よりもはるかに長いときには、この考え方だけでは機能しない。早い段階の破壊からの S 波の後に、後続破壊の P 波が到達するためである。東北地震では、破壊継続時間が 200 秒程度と長かったため、初期破壊からの S 波の後に、後続の強震動生成域 (SMGA) からの P 波が到着している場所が多い。このため、2010 年代には、S 波群中から P 波成分の検出を試みる研究が行われるようになった<sup>16)</sup>。

### 3-3 (c) 破壊の予測

この考え方では、断層の破壊過程の初期の特徴から破壊の全体の予測を試みる。例えば、P 波の最初の 3 秒間の振幅や卓越周期の情報などから、地震の規模 (M) を推定するものである。地震の破壊継続時間は、M6, 7, 8 の地震で、それぞれ、3, 10, 30 秒程度なので、M7 や M8 だと推定することは、すなわち、初めの 3 秒の情報から、10 秒後や 30 秒後まで破壊が続いていると予測することに相当する。このように、P 波の最初の部分に、M6, 7, 8 でそれぞれ波形の特徴に違いがあり、最初の 3 秒で破壊全体の大きさを予測できる、と主張する論文がある一方、波形の特徴の違いを否定する研究も多い。地震発生のメカニズムや破壊の成長の物理の研究と相まって、破壊の未来を予測できる／できない、の議論が続いている<sup>17)</sup>。2000 年代には、“初めの 3 秒でわかる”という論調が多く、警報を更新するという考え方があまり多くなかったが、2010 年代には、“わからない”ので、警報を逐次更新していく必要性が認識されている。

緊急地震速報では、この「破壊の予測」の考え方は用いていない。また、「1. はじめに」で一般

住民向けに警報を出している（日本を含む）4 か国地域のシステムでも、この原理を採用しているものはない。

#### 4. 観測の進展

わが国では、2010 年代になると防災科研や JAMSTEC によるケーブル式海底地震計の敷設が進み、これらのデータも緊急地震速報に使われるようになった。ここでは、地震動即時予測に関してユニークな観測の研究を 2 つ紹介する。

一つ目は、スマホの利用である。スマホには加速度センサーが内蔵されており、これを強震計代わりに使おうという試みである。スマホを床や壁に固定する研究もあるが、一般の人がもっているスマホを利用することで仮想的に稠密な観測網を築くことが米国の研究者によって試みられている（30 分以上静止しているスマホは、昼間でも 20%程度あるとのこと）<sup>18)</sup>。警報受信の機能と強震計の機能をもっているアプリ（MyShake と呼ばれる）は、既に世界中の多くのユーザーにダウンロードされている。ただし、米国西海岸の ShakeAlert では、MyShake の警報受信器としての機能は活用するものの、強震計としての機能を活用することはペンディングとのこと。一方で、観測網が未発達の上国では、一気に広まる可能性があるかもしれない。

2 つ目は、（相対性理論の）重力波の利用である。東北地震の断層の変位に伴う質量の移動により生じた重力波を捉えたという報告がなされており<sup>19)</sup>、現在、モデル化やデータ解析手法の議論が続いている。重力波は P 波よりも格段に速い信号であり、現在よりもかなり早く地震の発生を検知できる可能性がある。

#### 5. おわりに

「1. はじめに」で触れた 4 か国地域以外でも、中国や韓国、イスラエル等で一般住民向けの警報の運用が視野に入っている。今後も、多くの国や地域で地震動即時予測の運用が始まるであろう。

情報の伝達面ではこれまで文字と音声情報が主であった。一方、スマホ等の移動体の通信技術の発達は目覚ましいものがあり、現在、5G の普及が進んでいる。5G では、動画の情報伝達も容易になるという。強い揺れが向かってくる様子をスマホ（や、スマートウォッチ）で、リアルタイムで見られるようになる日が来るかもしれない。

（干場 充之）

HOSHIBA Mitsuyuki

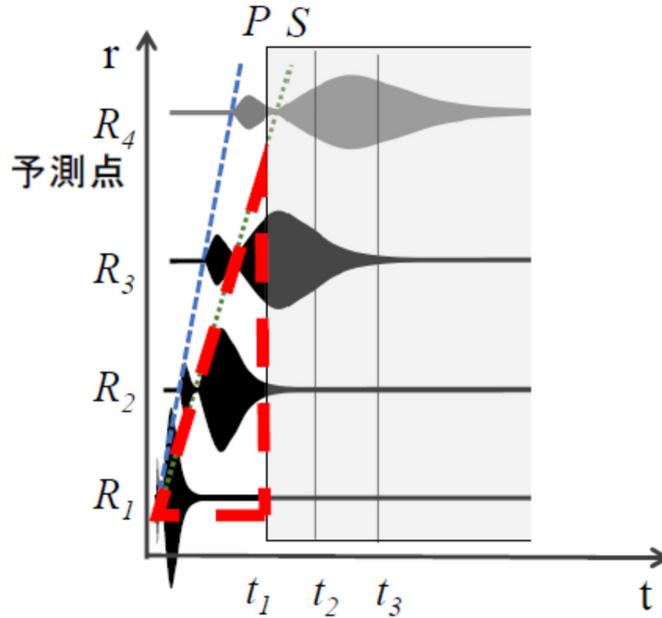
#### 参考文献

- 1) Chen et al. (2015), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 568–579.
- 2) Cochran et al. (2019), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **109**, 1524–1541.
- 3) 干場充之・尾崎友亮 (2012), *地震 2*, **64**, 155-168.
- 4) 溜淵功史・他 (2014), *地震*, **67**, 45-55.
- 5) Yamada (2014), *Early Warning for Geological Disasters - Scientific Methods and Current Practice*, 29-47. doi:10.1007/978-3-642-12233-0\_2.
- 6) Böse et al. (2018), *Geophys. J. Int.*, **212**, 725–742.
- 7) Hoshiba and Aoki (2015), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 1324–1338.

- 8) Ogiso et al. (2018), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**, 3457–3468. <https://doi.org/10.1785/0120180063>.
- 9) Furumura et al. (2019), *Geophys. Res. Letters*, **46**, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.
- 10) Kodera et al. (2018), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**, 983-1003.
- 11) Kawamoto et al. (2017), *J. Geophys. Res., solid earth*, **122**, 1324-1349.
- 12) Lay et al. (2012), *J. Geophys. Res., solid earth*, **117**, B04311, doi:10.1029/2011JB009133.
- 13) Hoshihara (2020), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **110**, 1276–1288.
- 14) Minson et al. (2018), *Science Advances*, **4**, eaaq0504, doi: 10.1126/sciadv.aaq0504.
- 15) Minson et al. (2019), *Scientific Reports*, **9**, 2478. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39384-y>.
- 16) Kodera (2017), *Geophys. Res. Letters*, **45**, 156-165, <https://doi.org/10.1029/2017GL076118>.
- 17) Meier et al. (2016), *Geophys. Res. Letters*, **43**, 7991–7996. <https://doi.org/10.1002/2016GL070081>.
- 18) Kong et al. (2020), *Seismol. Res. Letters*, **91**, 2206–2217. <https://doi.org/10.1785/0220190177>.
- 19) Kame (2021), *Phil. Trans. R. Soc. A* **379**: 20200136. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0136>.



第 1 図 2000 年代から 2010 年代の地震動即時予測の研究の進展.  
 Fig. 1 Development from the 2000s to the 2010s on researches of earthquake early warnings.



第 2 図 地震動即時予測の概念図.  $R_4$  が予測点.  $R_4$  での P 波よりも  $R_1$  や  $R_2$  の S 波の方が早い.  
 $R_4$  の地震動を予測するためには S 波の情報も重要.  
 Fig. 2 Schematic illustration of real-time prediction of ground motion for earthquake early warning.  $R_4$  is target point. S waves at  $R_1$  and  $R_2$  are earlier than P wave at  $R_4$ . Information of S waves is important for predicting ground motion.