

PLUM 法への初期破壊の P 波の導入とその効果

小寺 祐貴 (気象庁気象研究所)

1. はじめに

緊急地震速報の更なる高度化のため、気象庁は平成 30 年 3 月より PLUM 法を緊急地震速報システムに導入した。PLUM 法は、震源推定を経由せず実際に観測された揺れから直接将来の揺れを予測する震度予測手法であり、2011 年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震が発生した際でも高い精度で予測震度を計算できるという特徴がある。しかしながら、現行の PLUM 法は半径 30km 以内で直接観測された震度（主に S 波による揺れ）のみを用いているため、迅速性の面では技術的課題がある。

Kodera (2018)は、PLUM 法の迅速化を図るひとつの方法として、P 波の導入を提案した。S 波の到達前に観測される P 波の震度から、それに対応する S 波の震度を予測し、その予測値を実測値の代わりに PLUM 法の計算に取り込むことで、S 波の到達を待たずに震度を予測できる。同研究では、パーティクルモーションによる P 波検出を S 波初動到達後も継続して実施することにより、巨大地震の強震動生成域の破壊による強震動の予測も前もって行えることを示した。一方で同研究の提案手法は、地中観測点のみを対象としている、複雑なサイト補正処理が前提とされている、という点で、そのままでは実装する上でのハードルが高い。本研究では、よりシンプルで容易に実装可能な計算手順で PLUM 法に P 波を導入する方法を検討し、その迅速化効果等を評価した。

2. 検討した方法

本研究で検証した方法を図 1 に示す。Kodera (2018)との違いは以下の通りである。

- (1) 入力データ：Kodera (2018)の方法ではサイト補正済みの地中観測点を前提としていたが、検証した手法ではサイト補正無しの地上観測点をターゲットとした。現在、緊急地震速報に用いられている観測点の多くは地上観測点であるため、これにより改善効果のある観測点数を大幅に増やすことができる。
- (2) P 波検知：Kodera (2018)の方法では常時 P 波検知を実施していたが、提案手法では P 波の誤検知を減らすためにトリガオン直後（最初に震度 3 に達した直後）のみの時間帯に対して P 波検知を試みる。また、P 波検出の指標として P-filter 値 (Ross and Ben-Zion, 2014) のほか、V/H 比で代用できないか検討する。
- (3) S 波予測：Kodera (2018) では上下動リアルタイム震度に定数 (1.0) を足すことで S 波震度を予測していたが、3 成分リアルタイム震度の場合も検討する。

3. 提案手法による改善効果の検証

気象庁震度計のイベント波形を用いて、提案手法による改善効果の検証を行った。対象としたイベントは、2000 年 1 月～2019 年 9 月に日本周辺で発生した、M6.0 以上かつ最大震度 5 弱以上の地震 (116 事例。うち、気象庁震度計で震度 5 弱以上であったものは 76 事例) である。

	入力データ	P波検知	S波予測
Kodera (2018) の方法	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト補正済みの地中観測点 <p>メリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・P波検知精度が最大限高められる ・強震観測時の表層地盤の非線形応答の影響を考慮しなくて良くなる <p>デメリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高度なサイト補正処理（周波数依存、鉛直・水平独立）が必要 ・地中点のみだと、使える観測点数が限られる 	<ul style="list-style-type: none"> ・常時P波検知を実施 ・P波指標値：P-filter値 <p>メリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・強震動生成域のP波なども活用できる ・連発地震にも対応可能 <p>デメリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コーダ部や表面波部分でのP波誤検知の可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・上下動リアルタイム震度に定数を加算
検討した方法	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト補正無しの地上観測点 <p>メリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サイト補正処理が不要 ・多くの観測点で使用可能 <p>デメリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・P波がうまく検知できない観測点の割合が増える ・（常時P波検知をした場合）コーダ部や表面波部分でのP波誤検知が増える、表層地盤の非線形応答の影響を受ける 	<ul style="list-style-type: none"> ・トリガオン直後のみ検知を実施 ・P波指標値：P-filter値 or V/H比 <p>メリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コーダ部や表面波部分でのP波誤検知の問題は無視できる ・非線形応答の影響も抑えられる模様 ・V/H比なら計算コストを削減できる <p>デメリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・強震動生成域のP波や連発地震には対応できなくなる 	<ul style="list-style-type: none"> ・上下動 or 3成分合成リアルタイム震度に定数を加算 <p>メリット</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「3成分」なら「上下動」を新たに計算する必要がなくなる

図1：Kodera (2018)と本研究で検討した方法の比較.

3.1. 警報第1報発表の迅速性効果

いずれかの観測点で震度5弱以上を観測した時刻が現行のPLUM法による警報第1報発表タイミングであると仮定し、その時刻と比べてどの程度早く提案手法が震度5弱を予測できるかを計測することで、警報第1報発表が迅速化される秒数を推定した。現行の緊急地震速報は警報発表基準として2点検知（震度3以上の観測点が2点以上）を必要としているため、秒数の算出にはその条件も考慮した。

Kodera (2018)と同じ条件設定（P波検出：P-filter値が0.4以上、上下動リアルタイム震度使用）でシミュレーションを行ったところ、18事例で警報発表が迅速化された。原理的に改善可能な猶予時間幅（震度5弱観測時刻と理論P波到達時刻の差）を基準とすると、そのうちおおむね3割程度が改善されることが分かった。P-filter値をV/H比に変えると、改善されるイベント数は同程度で、改善される猶予時間幅もほぼ同じであったものの、P-filter値に比べてP波検知が不安定になる場合があることが分かった。上下動リアルタイム震度を3成分リアルタイム震度に変えると、改善されるイベント数は増えるが、改善される猶予時間幅についてはほとんど変化がなかった。

3.2. P波検知閾値を変化させたときのパフォーマンス

P波検知の閾値を変化させたときの、予測精度、改善イベント数、改善される猶予時間幅に対する依存性を調査した。予測精度と改善イベント数にはトレードオフの関係が見られた。P波検知の指標がP-filter値の場合、閾値0.2から0.6までは予測精度と改善イベント数はほぼ一定であった。改善される猶予時間幅に関しては、どのような設定を採用したとしても、原理的に改善可能な猶予時間幅に対して統計的には3割程度の改善となることが分かった。

4. 結論

トリガオン直後のP波のみを用いたとしても、地震波を検知してから警報を発表するまでの時間が3割程度短縮できることが分かった。どのような物理量、検出閾値に基づいて予測計算を行うべきかは、どの程度の過大評価を許容できるかによって決定できるだろう。