

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	野田俊太
論文題目	Relation of Earthquake Growth and Final Size with Applications to Magnitude Determination for Early Warning (地震の成長と最終サイズの関係および早期警報におけるマグニチュード決定への応用)		

(論文内容の要旨)

早期地震警報 (EEW) システムは、強い揺れが来る前に人々に警報を出すことを目的として構築されている。多くのシステムにおいては、地震計で観測された地面の揺れからマグニチュード (M) を出来る限り迅速に決定し、地震動予測式から、各地点の揺れの大きさを計算する。しかしながら、Mの決定においては2つの技術的問題が存在する。第一の問題は、 $M \geq 8.3$ 程度の非常に大きな地震の場合に、観測システムの低周波側の周波数特性が不足するために、従来のEEWアルゴリズムから決定されたMが過小評価されている可能性があることである。第二の問題は、最大振幅が到着するまで最終的なMが不明であり、地震の最終的なサイズを決定するためには破壊の終了を待つ必要があることである。第一の問題を、広帯域地震計による長周期の地震波を用いて解決する手法や地震波の揺れの継続時間を用いる手法等があるが、これはMの決定が遅くなる欠点を持っている。第二の問題に対して、最大振幅が到着する前の地震波の振幅や周期を使う方法がいくつか提案されているが、地震波の周期を使う方法では特にその正確さに問題があるし、そもそも揺れ始めの一部の波形データが最大振幅や地震の最終的なサイズを反映するのかどうか疑問を呈する研究も存在する。

本研究は、防災科学技術研究所が展開している強震観測網K-NETの地震波形データを解析して、地震の成長の特性を調べることにより、2つの異なった手法により、この2つの問題の解決を試みた。第一の問題を解決するために、加速度波形のS波の到着から最大振幅までの時間 (Top) を利用するアプローチを提案した。 $\log(\text{Top})$ と M_w (モーメントマグニチュード) が正の相関を持つこと、および震源距離にはあまり依存しないことから、Topと M_w の簡単な関係式を導いた。Topが破壊継続時間に比例するのであれば、 $\log(\text{Top})$ と M_w との線形の関係式の係数が0.5であることが期待されたが、得られた関係式の傾きはそれより小さなものであり、その関係式の物理的な意味は必ずしも明確にはならなかったが、8-16Hzのような通常地震観測で使用されている帯域を用いても、この関係式からMを推定することが可能であることが分かった。さらに、この関係式を東北地方太平洋沖地震 ($M_w 9.0$) のデータに適用して、 $M_w 9.3$ と飽和することなく非常に大きなイベントを評価できることを示した。

第二の問題を解決するために、P波の最初の立ち上がりの形状の特性を調べた。その結果、地動変位の絶対値波形は地震の大きさに関係なく同じような立ち上がりを示す傾向にあるが、小さな地震ほどその標準的な立ち上がり曲線から早めに外れること、P波初動から標準的な曲線からの外れまでの時間 (Tdp) は、平均的な破壊継続時間の20-30%程度であり、 M_w と相関があることが分かった。また、このTdpと M_w の関係から、P波初動後の適当な時間までの最大振幅が M_w と相関することが期待され、 $M7$ 程度以下の地震について観測データからそのことを確認した。

この変位波形の立ち上がりの大きさと地震の規模の間のスケールリング関係を用いると、最大振幅の到着前に M_w を推定することが可能であり、P波初動からある時刻までの最大振幅と M_w の間の線形の関係式の切片をP波初動からの経過時間に依存して変更することにより、時間依存しない切片を用いた場合よりも推定精度が向上することが分かった。一方、 $M_w 7$ クラスの大きな地震に関しては、個々の地震毎のばらつきが大

きいことが分かったが、その原因は今後の課題となった。

本研究で提案した2つの手法は、EEWシステムにおける2つの技術的問題を別々に扱うものであるが、これら手法はEEWアルゴリズムのパフォーマンスを向上させることが可能であり、また、地震の震源過程の解明においても重要な寄与をするものである。

(論文審査の結果の要旨)

早期地震警報 (EEW) システムは、新幹線や気象庁において実用化されており、地震による被害の軽減に貢献している。しかしながら、東北地方太平洋沖地震の際に緊急地震速報は揺れを過小評価した。これは、現在用いられているシステムが長さや幅といった断層の形状を考慮していないために断層への距離を過大評価する場合があるためである。マグニチュード (M_w) を正しく推定できていれば、 M_w から計算した断層からの距離を用いるため、実際の距離との乖離を小さくすることが可能である。本研究は、この問題意識に立ち、 M_w をより正しくより迅速に推定することを目指して、K-NETで観測された地震波形の解析を行ったものである。

EEWシステムにおける M_w の決定においては、観測システムの低周波側への周波数特性が不足しているために、非常に大きな地震の場合に M_w が過小評価される可能性があること、および、最大振幅が到着するまで地震の最終的なサイズを決定できないことという2つの問題があった。申請者は、通常地震計で観測されたS波の到着から加速度波形の最大振幅までの時間の対数と M_w が正の相関を持つことを見出し、これらの関係式を初めて導いた。この関係の物理的な意味は必ずしも明確にはならなかったが、最初の問題点の解決のために、簡便な M_w の予測式を見出したことは評価できる。これまで広帯域の地震計による方法などが提案されていたが、いずれも M_w の決定までに時間を要することから、申請者の提案した方法は、EEWシステムの改善のための新たな切り口を示したものと評価できる。

二つ目の問題に関しては、P波の最初の立ち上がりの形状の統計的特性を調べて、地動変位の絶対値波形は地震の大きさに関係なく同じような立ち上がりを示す傾向にあるが、小さな地震ほどその標準的な立ち上がり曲線から早めに外れることを見出した。P波の初動直後のわずかな時間の波形から地震の最終サイズを推定できるかどうか、地震はその発生直後、さらには始まる前から最終サイズを知っているのかどうかという問題はこれまで大きな論争となっていたが、申請者は、日本において使用可能な観測データを網羅的かつ丁寧に解析することにより、地震は、その破壊過程の途中から減速を始め、減速を始める時期が遅いほど最終サイズが大きくなることを示した。また、この関係を活用した M_w の推定式を提案して、破壊の成長の途中でもより正しく M_w を推定できる可能性を示した。地震がその破壊過程の途中から減速を始めるという知見は、P波到着後の比較的短い経過時間後の適切なタイミングで最終サイズを推定可能であることを示しており、一部では疑問視されていたこれまでの手法に物理的な根拠を与えるものである。 M_w が7クラスの地震についてはこの手法で推定された M_w のばらつきが大きいことや、東北地方太平洋沖地震については M_w をかなり過小評価することなど、実用に供するためにはいくつかの問題点は残されているものの、EEWシステムの改善に向けて、既存の手法を整理し合理的な新手法を提案したことは価値があるものと評価できる。また、地震の破壊過程や発生過程の解明における貢献も大きいと評価できる。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年10月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降