

ナウキャスト地震情報の活用を想定した 早期地震警報システムの開発 (その1) ー全体計画および早期地震諸元推定法ー

芦谷公稔¹・小高俊一²・東田進也³・佐藤新二⁴

横田 崇⁵・川津拓幸⁶・大竹和生⁷・野坂大輔⁸

¹正会員 理修 (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²理博 (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³理博 (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁵理博 気象庁 総務部 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

⁶気象庁 地震火山部 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

⁷理修 気象庁 地震火山部 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

⁸気象庁 地震火山部 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

気象庁が配信を計画している地震発生直後の緊急情報(ナウキャスト地震情報)や面的な地震動分布情報などの活用を想定した早期地震警報システムの研究開発を進めている。本発表では、研究開発の全体計画を紹介するとともに、地震波初動部の記録から地震諸元(震央距離やマグニチュード等)を推定する手法についての研究成果を報告する。これまでの検討結果によると、P波初動部の波形形状に着目し、その形状を関数 $Bt \cdot \exp(-At)$ でフィッティングし、得られた係数AやBと震央距離やマグニチュードとの相関を調べると、係数Bと震央距離との間にはよい相関があることが分かった。また、係数Bと初動部最大振幅(または係数A)を用いてマグニチュードを推定できる可能性のあることも分かった。

Key Words: *Early Earthquake Detection, Earthquake Warning System, Epicentral Distance, Magnitude*

1. はじめに

鉄道総研では、鉄道独自の地震保安システムとして、早期地震検知警報システム(ユレダス)を開発し実用化している。一方、近年では、気象庁をはじめとする公的機関の地震観測網の整備が進んでおり、かつ、気象庁ではこれらの観測網における地震直後の緊急即時情報(ナウキャスト地震情報)や地震後の面的な地震動分布情報等を配信する計画が進んでいる。さらに、コンピュータやネットワーク技術など情報技術もユレダス開発当時に比べて飛

躍的に進展している。このような状況を踏まえると、気象庁の緊急即時地震情報や面的地震動分布情報および最新の情報技術等を活用することにより、より経済的で汎用性の高いシステムの構築が可能と考えられる。こうしたシステムが開発されれば、現在新幹線を中心に導入されているユレダスと同様な地震保安システムを、今後在来線を含めて多くの線区に導入しやすくなると期待される。

そこで、鉄道総研では、気象庁と共同で、これら緊急即時情報等の活用を想定した早期地震警報システムの研究を進めている。

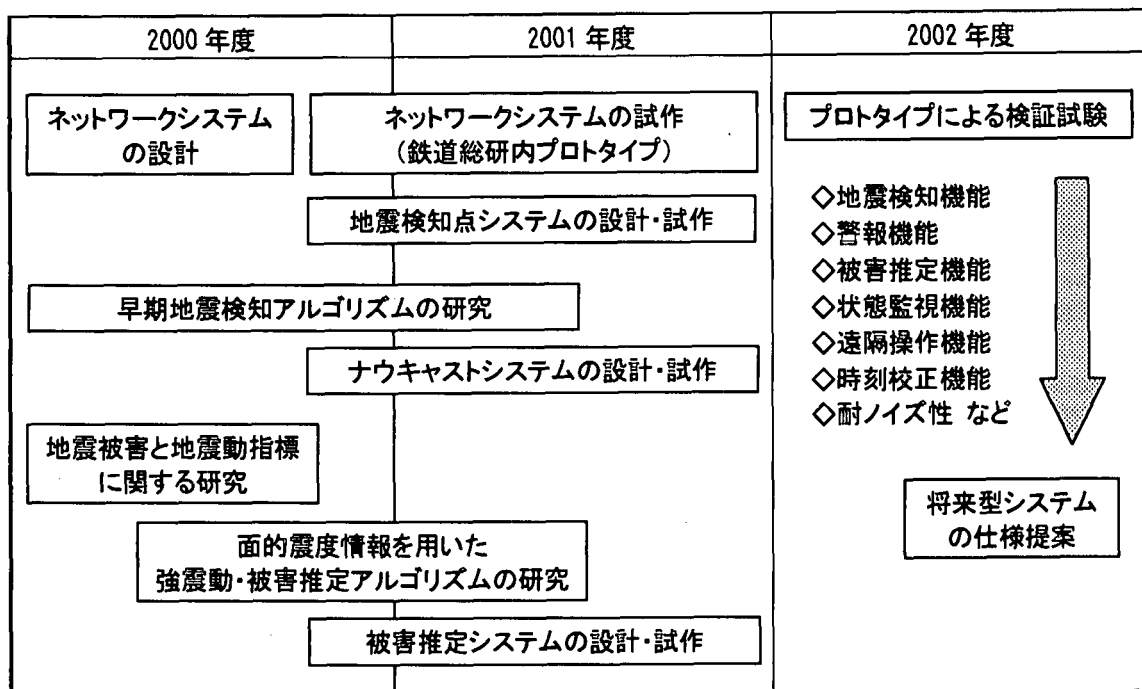


図-1 研究開発の全体計画

2. 研究開発の全体計画

研究開発の全体計画は図1に示すとおり、2000年度から3ヶ年計画である。研究内容は大きく3つに分けられる。

①ナウキャスト地震情報を用いた早期地震検知に関する研究

地震検知から数秒でその地震の規模や位置を推定し、鉄道構造物への加害性を判断して警報を発するシステムの研究開発を行う。

②鉄道構造物の被害推定に関する研究

地震諸元やナウキャスト地震情報の中の面的な地震動情報などから構造物の被害推定を行い、巡回指示等の情報を発するシステムの研究開発を行う。

③地震情報ネットワークシステムの開発

地震検知や被害推定等の各サブシステムを有機的に結合し、さらに、システム全体の状態監視機能や遠隔操作機能等を付加したネットワークシステムのプロトタイプを鉄道総研内に構築し、検証試験を実施する。

3. 早期地震検知アルゴリズムの検討

(1)既往の研究

1 観測点の地震波の初動数秒間のデータからそ

の地震の諸元を推定して警報を発するシステムはユレダスで実用化されているが、ユレダスではまず初動部分の周期から地震の規模（マグニチュード）を推定し、次に地震の規模と振幅の距離減衰から震央距離を推定している¹⁾。この手法は、現在のところ概ね満足できる結果を与えているが、初動数秒間で地震諸元を推定するという試みは、その後十分議論がなされてきたとは言い難いので、今回あらためて関係分野の成果等を踏まえて再検討することとした。

最近の地震学における関連分野の成果を概観すると、地表で観測される地震波は断層面上において様々なサイズの破壊が進行する際に発生する地震波の重ね合わせとして表現できると考えられている（たとえば参考文献2））。ただし、初期破壊が大きな破壊に成長するか否かは、P波初動の増加率を見れば分かるという説と、本質的に分からないという説があり、いまだ決着は見られていない（たとえば参考文献3）、4）、5）。このことは、早期地震検知において本質的な問題をはらんでいるが、結論を出すのは容易ではないと思われる。しかし、一方で、震度の大きい地点ほど初動数秒間の最大振幅が大きくなるという傾向が存在するのも事実である。よって、かりに初動数秒間で全ての地震についてその規模を把握することはできないとしても、数秒間でどの程度の地震規模までならば把握できるかを検討することは、早期地震検知の分野では重要な課

題であると考えた。そこで、本研究では、P波初動部の数秒間の波形形状に着目して、地震の規模や震央距離との関係を検討した。

(2)解析方法

まず、地震波のP波初動部から主要動までの波形全体の特徴を捉えやすくするために、地震波振幅の絶対値を取り、波形を対数表示することを試みた。図2はその一例である。これにより、波形のリニア表示では捉えづらかった微弱な初動部の特徴を、規模の小さな地震から大きな地震までを同一縮尺の図面で明確に表現できるようになった。こうした処理を規模や震央距離、深さの異なる様々な地震に対して行い比較検討した結果、初動数秒間の波形に対して次のような定性的な特徴が抽出できた。

- ①初動数秒間の振幅値は、大きければ地震規模が大きい、または、震央距離が近い。
- ②初動部エンベロープの振幅増加率は、震央距離が近いほど大きい。
- ③初動振幅が増加し続けるほど地震規模は大きく、すぐに減少する場合は規模が小さい。
- ④深発地震は地震規模のわりに初動振幅はすぐに減少する。

なお、以上の定性的な特徴は、加速度波形、速度波形とも共通に見られた。

次に、上記の特徴を定量化するため、振幅の絶対値の形状 $V(t)$ を下記の関数形でフィッティングすることを試みた。

$$V(t) = Bt \cdot \exp(-At) \tag{1}$$

ここで、 t は時間 (秒) であり、地震検知時刻を原点 ($t=0$) としている。また、 A と B は未知係数 (形状係数と仮称する) である。この関数形は、 $t=0$ から時間とともに増加し、ある時刻で極大となり、その後は減少する。極大値となる時刻は $t=1/A$ で、その振幅値は B/Ae (e は自然対数の底) となる。よって、 A は振幅が極大となるまでの時間、もしくは、その時の最大振幅に関する係数であるといえる。また、係数 B は、初動振幅の平均的な増加率に関する係数といえる。

この関数形は、常用対数をとることによって、未知係数を線形化できるので、波形フィッティングによる未知係数の算出が通常の最小二乗法により簡単に行うことができる。

(3)解析結果

解析には、防災科学技術研究所 K-NET の地震波

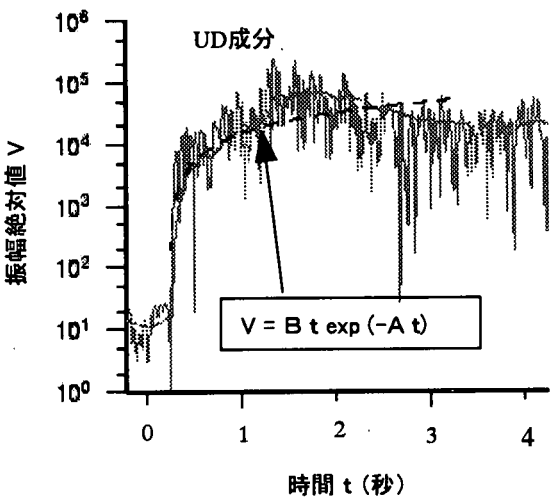


図-2 地震波形の対数表示例とフィッティング関数

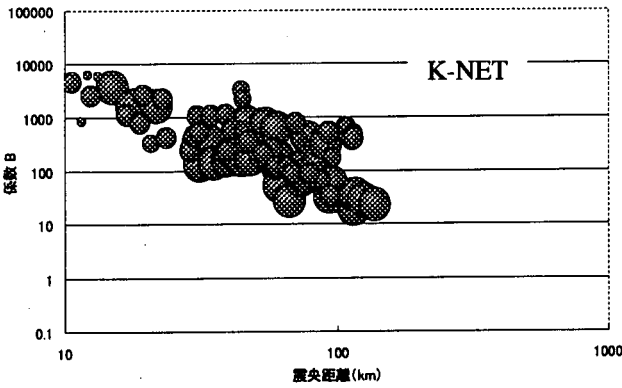


図-3 形状係数 B と震央距離 Δ の関係
印はマグニチュードが大きいものほど大きく描いている。最小は M4.7、最大は M7.3。

データ約 100 および気象庁 (JMA) 津波地震早期検知網のデータ約 230 を用いた。各データセットとも、地震データはその規模や深さ、発生地域がかたよらないように選定した。

各地震波データの初動 3 秒間に関数のフィッティングを行い係数 A および B を求め、地震のマグニチュードや震央距離との相関を調べた。その結果、係数 A は、近距離の小地震や深い地震において特徴的に大きな値を示すことが分かった。これは波形の立ち上がりが急峻でその後振幅がすぐに減少することを反映している。一方、係数 B は震央距離 Δ と比較的よい相関を示すことが分かった。図 3 は、K-NET (加速度波形) データについて、係数 B と Δ の相関を見たものである。印の大きさはマグニチュードが大きいほど大きく描いており、最小は M4.3、最大は M7.3 である。これによれば、係数 B と Δ には負の相関があり、また、この関係はデータのばらつきの範囲でマグニチュードにはよらない

ことが分かる。この傾向は JMA 検知網のデータにおいても同様に認められた。このように、「マグニチュードによらず係数 B と震央距離 Δ には一定の相関がある」ということは、係数 B のみで震央距離を推定できるということである。

震央距離が係数 B を用いて推定できれば、マグニチュードは地震学で一般に用いられている式に準じて、初動部の最大振幅 $V_{\max}$ と係数 B を用いて推定できる可能性がある。現時点では推定式の例として以下の形式を用いている。

$$M = a \log V_{\max} + b \log B + c \quad (2)$$

ここで、係数 a , b , c はデータセットごとに過去の地震データから統計処理により決定する。また、 $\log V_{\max}$ の代わりに係数 A を用いることも可能である。

最終的な震央距離やマグニチュードの推定式は、さらに解析データを蓄積して決定するつもりであるが、参考までに現時点での推定結果の例を紹介する。

図 4 は、JMA 検知網のデータによるマグニチュード推定式から求めた推定値と気象庁マグニチュードを比較したものである。印の大きさは震央距離に反比例している。ここで用いたデータは、 $\Delta < 200\text{km}$, $M < 7.5$ のものである。この図から、震央距離の大きい地震で一部推定精度が悪いものもあるが、大半はマグニチュードが ± 1 の範囲で推定されている。1 観測点の初動 3 秒間のデータのみからマグニチュードを推定していることを考えると、良好な結果であると思われる。

なお、推定式を求めるための地震データの選定については、どのような地震を警報対象とするか、また、得られた推定式で警報対象外の地震をうまく選別除外できるかなどを考慮しながら今後さらに検討するつもりである。

以上の解析結果によると、まだ細かい点では検討余地が残るものの、初動数秒間のデータから地震諸元を推定する手法として、「初動の波形形状に関数 $Bt \cdot \exp(-At)$ をフィッティングし、得られた係数 B から震央距離、さらに、係数 B と初動部最大振幅(もしくは係数 A) からマグニチュードを推定する方法」は有効であると考えられる。この方法によると、初動 3 秒程度の波形から、 Δ 数 100km 以内、 $M7$ 程度までの地震について、その震央距離とマグニチュードを推定することが可能と考える。

なお、 $M7$ 以上の地震についてマグニチュードを推定するには 3 秒以上のデータが必要であると思わ

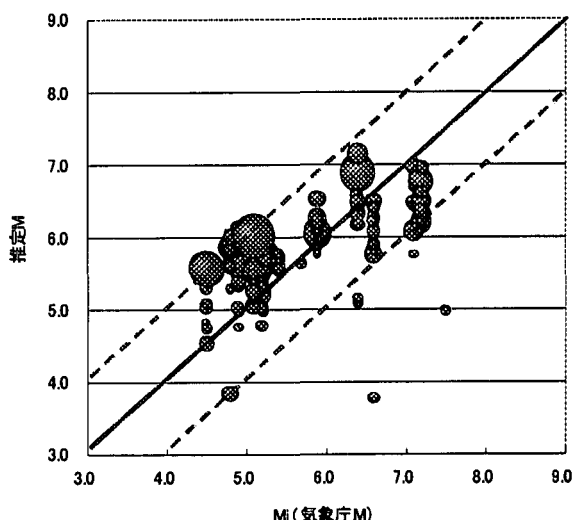


図-4 初動 3 秒による推定マグニチュードと気象庁マグニチュードの比較

震央距離 $\Delta < 200\text{km}$, $M < 7.5$ のデータ活用。

印の大きさは Δ に反比例。

れるが、この場合は、まず 3 秒で $M7$ 以上と判定して警報を発信し、初動振幅がさらに増加する場合は引き続きマグニチュードを推定しつつ逐次修正警報を発信する、などの方法をとることによって対応できると考えている。

4. おわりに

本論では、地震波初動数秒間の波形形状の特徴を抽出することにより、その地震の震央距離やマグニチュードがある程度推定可能であることを、観測波形の解析により経験的に導いた。このアルゴリズムを実際の警報システムに適用するにあたっては、さらにその理論的裏付けが重要と考えている。これについては今後引き続き検討していくつもりである。

本研究では、一部、防災科学技術研究所の K-NET のデータを使用した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村豊 (1996), 研究展望: 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No.531/I-34, 1-33.
- 2) 菊地正幸 (1995), 地震波でみた地震の一生, 科学, 65(4), 205-210.
- 3) 深尾良夫・柴崎文一郎 (1995), 地震の始まりは終わりを知っているか, 科学, 65(4), 211-218.
- 4) 松浦充宏 (1995), 地震のたねの大きさ, 科学, 65(4), 273-278.
- 5) 梅田康弘 (1985), 断層運動の加速と震源核の形成, 地震 2, 38, 203-215.