

巨大地震即時検出のためのデータ解析

北代 州平¹・堀 宗朗²

¹正会員 工修 株式会社 NTT データ 公共システム事業本部 (〒 135-6033 東京都江東区豊洲 3-3-3)

²正会員 Ph. D. 東京大学地震研究所 助教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

地震予知のひとつの手段として早期警報という技術が存在する。しかし、そのための判定技術として地震波の初動のみを捕らえてその地震が大きいか否かという判断を下すことは決して簡単なことではない。しかも、誤報による損害が大きい場合など、詳細な情報を得たい場合には特に慎重にならざるを得なくなり、判定に要する時間は長くなってしまう。

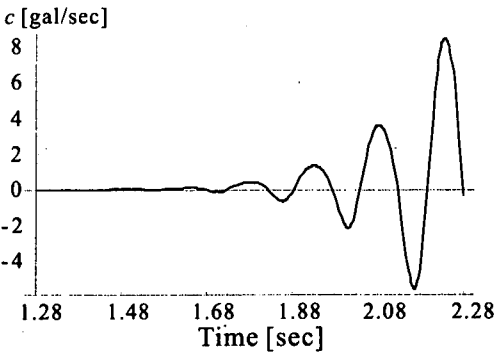
本研究ではできる限り早く確実に巨大地震を検出することのできる指標として加速度変化率という指標を提案した。実際にこの指標が巨大地震のみを検出することができるかどうかということについて、過去 5 年間に強震ネットから得られたすべてのデータをもとにデータ解析を行い、その妥当性を検証する。

Key Words : Disaster Prevention, Early Earthquake Warning System, Rate of Acceleraton, Data Analysis

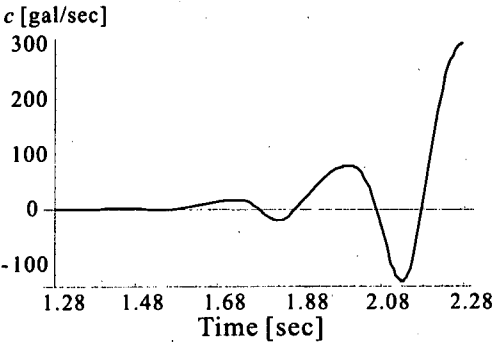
1. はじめに

近年、巨大地震が発生したときの社会基盤システムに対する早期警報技術が実用化されてきた。東海道新幹線に対する UrEDAS(ユレダス)¹⁾が代表的なものである。また、東京ガスの導管網に対する SIGNAL(シグナル)²⁾やカリフォルニア州でサービスが行われている CUBE(キューブ) や気象庁が考案中のナウキャスト等³⁾⁴⁾もこの警報システムに近い存在としてあげられる。

一方、巨大地震が発生したときに個人的に被害を受けることが予想されるものとして、資産、人命などがあげられる。特に今後の社会において、情報という資産の保護は極めて重要な問題になってくる。また、個人情報のは多くはデジタル化され、ファイルとしてハードディスク内に蓄積されるようになり、ネットワークを通じての情報保護を考えることが可能になってきた。したがって、巨大地震が襲ってくるということを数秒前にでもキャッチし、早期警報により重要な情報だけでもその瞬間に保護することができれば、情報という資産の被害は最小限に食い止めることができると考えられ、このための新たな早期警報システム (表 1) の開発が望まれる。



a) 震源核小，破壊過程不規則



b) 震源核大，破壊過程不規則

図-1 モデル解析の一例

表-1 社会基盤施設と個人情報機器を対象とした警報システムの比較

	社会基盤施設	個人情報機器
数	10 ^{0~2}	10 ⁶
警報	詳細地震情報	地震発生のみ
時間	10 ⁰ [sec]	10 ⁻¹ [sec]

この新たなシステムのための地震判定指標として提案された加速度変化率⁵⁾について、有効性を実証する他に、加速度変化率の持つ物理的意味を調べることも必要である。モデル解析⁶⁾においては有効性は検証されて

いる。図1にモデル解析の一例を示す。なお、時間は破壊発生時を0とし、経過時間は地震波到達から示してある。これによれば、地震の規模が大きいほど加速度変化率の立ち上がりが大きいことが示されている。つまり、加速度変化率によって巨大地震の即時検出が可能であることが示されている。本研究においてはデータ解析においても加速度変化率の有効性を検証することである。具体的な本研究の目的は、強震ネットで観測されたデータを用いて、加速度変化率の閾値、判定時間を考慮しながら実際に判定を行っていく。加速度変化率はP波初動に対して計算し、その後、S波の主要動が何秒後に到達したかを見ることで、有効性が検討される。

本論文は以下のように構成される。まず、第2章において生データの処理について検討する。加速度変化率はノイズに敏感に反応するため、検出に際して誤動作を防ぐねらいがある。ついで第3章において指標の有効性の検討を行う。第4章では、強震ネットで観測されたすべての地震波を対象とし、加速度変化率を用いた大地震の検出が可能かどうかを検討する。

2. P波進行方向の推定

先に述べたように、加速度変化率の計算のためにデータ処理が必要である。本研究では、P波の進行方向の推定し、その方向成分のみを抽出することでノイズの影響を抑える。このため、時系列として得られる加速度3成分データにカルマンフィルタ¹²⁾を適用してP波の進行方向の推定を行った。カルマンフィルタの定式化に基づき、P波到達後 m 回目に計測される加速度 a_i^m の方向ベクトルを n_i^m 、その時の真のP波方向を N_i^m とし、発展方程式と観測方程式を次のように設定した。

$$\begin{cases} N_i^{m+1} = N_i^m + v_i^m \\ a_i^m = \|a^m\| N_i^m + w_i^m \end{cases} \quad (1)$$

ここで v_i^m と w_i^m はシステムノイズと計測ノイズである。フィルタを設定するために、1) v_i^m と w_i^m は定常であり分散が r と q 、2)誤差分散の初期値を $P_i^{0/-1} = 0.3$ 、3)P波の進行方向の初期値を $(N^{-1}) = (0, 0, 1)$ 、とした。この結果、 m 回までの計測データで推定される $(m+1)$ 回の推定値 $(N_i^{m+1/m})$ に関して次の漸化式が導かれる。

$$N_i^{m+1/m} = N_i^{m/m-1} + K_{ij}^m (n_j^m - N_j^{m/m-1}) \quad (2)$$

ここで K_{ij}^m はカルマンゲインであり、マトリクス表示すると、漸化式

$$[P^{m+1/m}] = ([I] - [K^m])[P^{m/m-1}] + [Q^m] \quad (3)$$

によって与えられる誤差分散マトリクスを使って

$$[K^m] = [P^{m/m-1}][P^{m/m-1} + [R^m]] \quad (4)$$

として計算される。ここで $[Q^m]$ と $[R^m]$ はノイズ v_i^m と w_i^m の共分散マトリクスである。なお、 N_i^m のノルムが1であるため独立な成分は二つであるが、この条件を用いてもカルマンフィルタによる判定は大きな差を生まなかった。

カルマンフィルタを適用するには、P波到来の判定が必要である。これは常時微動より大きなシグナルをとらえればよい。このため、「 K_1 個の加速度の平均のノルムが K_2 回続けて微動ノルムの標準偏差 σ_a を超える」ことと仮定した。すなわち以下のような条件である。

$$\bar{a}^{m-k} > \sigma_a \quad \text{for } k = K_2, K_2 - 1, \dots, 0 \quad (5)$$

ここで $\bar{a}^m$ は

$$\bar{a}^m = \frac{1}{K_1} \left\| \sum_{n=1}^{K_1} a_i^{m-n} \right\| \quad (6)$$

である。実測データを利用してこの判定を検討したところ、 $K_1 = K_2 = 10$ とすれば十分判定が可能であった。なお $K_1 > 8$ であれば平均が安定して計算され、この時には $K_2 = 5$ 程度でも判定可能である。確実かつ高速に判定するために、加速度変化率の有効性を検証する段階では $K_1 = K_2 = 10$ を設定した。この値に設定することで、加速度波形を目で見て地震波が到達したであろうと推測される時刻とほぼ同じ時刻に地震波到来の判定を行うことができる。

3. 指標の有効性の評価

強震ネット(K-net)で最大震度5以上が観測されたデータを用いて、加速度変化率の有効性を検証した。地震の諸元は表2に示す。データは発生した時期と震源の場所がよく似ているものを抽出した。なお、データ解析の手順は以下の通りである。

1. 式(5)を用いてP波到来を判定
2. 式(2)を用いてP波方向を推定
3. P波方向の加速度変化率を差分によって計算
4. 加速度変化率が閾値 c_c を越えると大規模地震の強震動襲来を判定

表-2 データ解析に用いた地震の諸元

発生日時	M	震源位置	深さ [km]
1997.03.26.17.31	6.2	32.0N, 130.3E	20.0
1997.04.03.04.33	5.5	32.0N, 130.3E	10.0
1997.04.09.23.20	4.9	32.0N, 130.4E	10.0
1997.05.13.14.38	6.1	31.9N, 130.3E	20.0

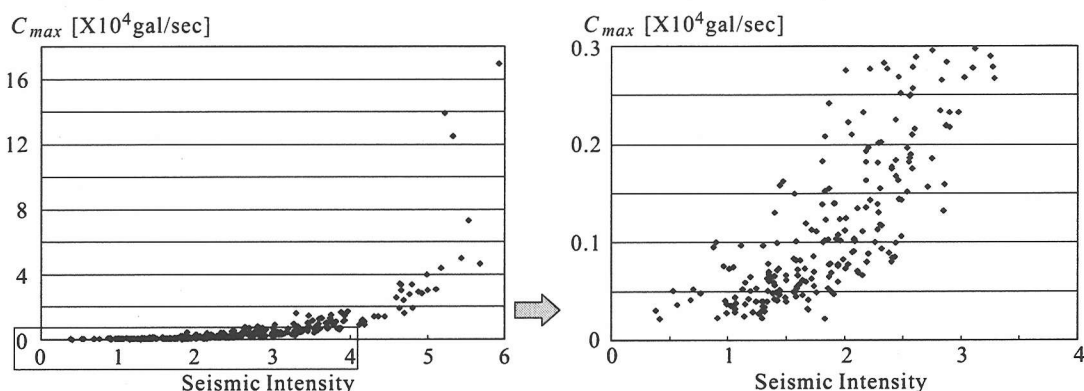


図-2 計測震度と加速度変化率最大値の関係

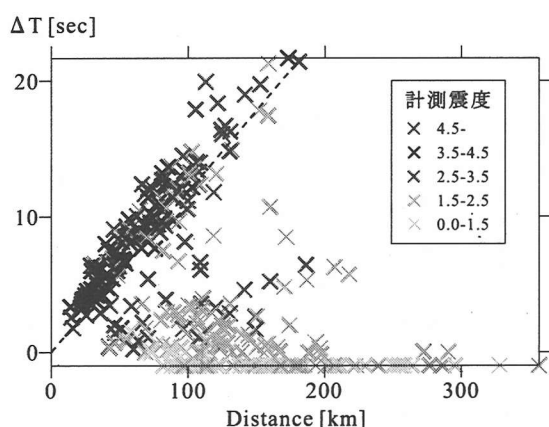


図-3 推定された警報時間と震源距離、計測震度の関係

閾値は判定する地震波の大きさを決める。図2に、計測されたグループごとの強震動の震度とP波部分の加速度変化率の最大値をプロットする。今回の解析でポイントとなる小さい震度の加速度変化率を詳しく見るために、すべてのグラフにおいて該当する領域(図中の枠で囲んだ領域)を拡大している。閾値を $c_c = 800[\text{gal/sec}]$ とすると計測震度1以下の地震波の場合、 $c < c_c$ となる。なお、この値は $0.01[\text{sec}]$ の間に $8[\text{gal}]$ の変化があることに対応し、本節の解析ではこれを閾値として用いた。また、有効性を次の指標で検討する。

$$\Delta T = (\text{最大ノルム発生時刻}) - (c > c_c \text{ の時刻}) \quad (7)$$

この ΔT は、判定後、S波の主要動が到達するまでの警報時間間隔に対応する。

図3に震源距離と警報時間間隔 ΔT 、計測震度の関係を示す。なお、横軸には震源からの距離、縦軸には警報時間間隔をプロットし、計測震度は色の違いによって表している。なお、加速度変化率が計測時間内において閾値を超えなかったものに関しては、 $\Delta T = -100[\text{sec}]$ という値を便宜的に当てはめている。震源からの距離

と加速度の関係については、P波とS波の波速 (α , β) の違いから $\Delta T \approx d(1/\beta - 1/\alpha)$ が成立することが予想される。 $\alpha = 6.0[\text{km}]$, $\beta = 3.5[\text{km}]$ とし、これを図中に破線で示した。警報時間間隔の値にばらつきは大きいものの、この破線に近いグループと破線からは遠く ΔT の値が小さくなっているグループに分けられる。破線に近いグループはP波の到達時点で加速度変化率が閾値を超え、確実に判定が行えたものであると考えられる。一方、破線からは遠く ΔT の値が小さくなっているグループは観測点が震源から遠くなるにつれて強震動が減衰しているためにP波部分では加速度変化率が閾値を越えなかったにも関わらず、S波が到達した時点の波を観測したため、求める ΔT の値は非常に小さなものになったと考えられる。なお、震源が深い場合など、他のデータを解析した結果も同様であった。計測震度については、加速度変化率の閾値を計測震度1.0に対応するように設定しているため、計測震度1.0以下では ΔT が $-100[\text{sec}]$ となっている。一方、計測震度2.5以下のところで特に2秒以下の ΔT があることが示されているが、これは先に述べたように初動ではないS波の部分を捕らえたためである。なお、震度の大きい部分においても警報時間間隔が2秒程度あり、コンピュータに対する即時警報としては十分であると考えられる。初動のP波が小さい場合にS波による加速度変化率を捉えてしまう問題点を解決する必要がある残されているものの、計算結果は加速度変化率という指標はその後続く大きなゆれをいち早く検知できる可能性を示すと考えられる。

4. 大規模地震の判定

加速度変化率が本当に大規模地震を検出することができるかどうかを確かめるため、1996年5月から2000年1月の間に日本で発生したすべての地震を対象とし

表-3 すべてのデータによる判定

計測震度 5.0 以上			計測震度 5.0 未満		
観測地点数	判定個数	判定確率 [%]	観測地点数	判定個数	判定確率 [%]
21	18	85.7	23946	270	98.9

て判定を行った。なお、震度 5 強程度以上の地震を判定できるように、震度 5 強程度以上を観測した地震のすべてのデータを用いてパラメーターと閾値を変更した。パラメータは、式 (5) において $K_1 = 10, K_2 = 20$ とし、閾値は $2\sigma_a$ とした。また、加速度変化率の閾値は $6250[\text{gal/sec}]$ とした。さらに、できる限り S 波を捕らえないようにするために判定時間を地震波到達から 3 秒間に限定した。

以上の結果をもって、上記の期間内に日本で発生したすべての地震について判定指標を適用し、判定すべきではないデータに対する信頼性を調べた。判定した地震の延べ総数は 23,967 個である。

判定の結果、計測震度が 5.0 以上であったにもかかわらず判定できていない地点が 4 地震で 6 個所あった。これらの原因を実測波形を詳細に検討することで追求したところ、大きなイベントが発生する数秒前に極めて小さなイベントが発生しており、判定指標は誤ってそちらに反応したため、大きなイベントを捕らえることができなかったものが 3 地点あることが判明した。この影響を取り除いた結果、これらの地震についてはすべて判定を行うことが可能となった。その他の判定を行うことができなかった 3 地点については、同じイベントに対して震源に近い観測点のデータを用いた解析では判定を行うことができているので、減衰の影響かもしくは方位の影響が判定を阻害したと思われる。一方、計測震度 5 未満の地震で閾値を超えたもののうち、震度 5 弱のものが 8 個、震度 4 のものが 14 個、震度 3 のものが 1 個であった。また、震源から非常に近かったため、3 秒以内に S 波を捕らえてしまい、本来判定すべきではない S 波のゆれを判定したものが 3 個あった。

これらの事情を考慮すると、表 3 に示すように、震度 5 強程度以上の地震に対しての判定確率は 85.7% となり、観測点をリンクさせて考えると、震度 5 強以上を観測したイベントについてはすべて警報を出せることになり、確実に判定できているとみなしてもよいと判断した。また、誤報の出ない確率は 98.9% と非常に高い数字を得た。震度 4 程度のグレイゾーンをどのように評価するかが問題となってくるが、発生確率は高々 1% 程度であり、仮に警報が流れたとしても、誤報による損害は社会基盤施設の場合に対してそれほど大きく

はないと考えられるので、安全側を見て警報を出すということでもよいと考えている。

5. 終わりに

本研究の目的は、実際のデータを用いて加速度変化率によって地震判定を行うことができることを実証することであった。データ解析では、強震ネットでのデータを用いて、加速度変化率の有効性を検討した。適当な閾値を設けることで一定以上の大きさの地震の判定が可能であることが検証された。

一方、大規模地震の十分なデータを収集することは不可能であるため、大規模地震に対応する加速度変化率の閾値を経験的に設定することは難しい。しかし、破壊過程によらず、加速度変化率が一定値を越えなければ強震動が伝播しないというモデル解析の結果を考慮すると、何らかの外挿によって閾値を設定することは可能であろう。なお、社会基盤施設と違い個人情報機器では、安全側の誤警報が発信されても、大きな社会的損害は被らない。実用段階において当初信頼性はある程度犠牲にし、中規模地震を対象とした低めの閾値を設定していくことがもっともよい選択であろう。

謝辞: 本研究には科学技術庁防災科学技術研究所の方々より、強震ネットのデータの借用をはじめさまざまな示唆をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高山昭, 江本佑橋, 阿部英彦, 中村豊, 地震動早期検知システムの研究, 土木学会誌, 1981 年 5 月号, 51-56, 1981.
- 2) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田茂, 吉川洋一, 大谷泰昭, 大規模都市ガス導管網の地震時警報システムの開発, 土木学会論文集, 525/I-33, 331-340, 1995.
- 3) 菊地正幸, リアルタイム地震学 (地震発生メカニズムと予測), 地震工学会誌第 46 巻, 第 7 号, 45-50, 1998.
- 4) 山崎文雄, リアルタイム地震防災システム, 地震と調査, 第 3 号, 37-42, 1997.
- 5) 北代 州平, 堀 宗朗, 強震動即時警報システムの可能性, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, 第 2 分冊, 1113-1116, 1999.
- 6) 北代 州平, 堀 宗朗, 大地震早期検知のための強震動初期波形の理論・データ解析, 応用力学論文集, Vol. 3, 687-694, 2000.
- 7) 大中 康寿, 山下 輝夫, 地震はどう始まりどう終わるか, 阪神・淡路大震災と地震の予測, 128-138, 1996.
- 8) 金森 博雄, 地震の物理, 岩波地球科学選書, 岩波書店, 1994.
- 9) 笠原 慶一, 地震の力学 (近代地震学入門), 鹿島出版会, 1983.
- 10) 北代 州平, 堀 宗朗, 強震動即時警報システムの可能性, 日本災害情報学会 1999 年研究発表大会, 37-44, 1999.
- 11) 深尾 良夫, 芝崎 文一郎, 地震の始まりは終わりを知っているか, 阪神・淡路大震災と地震の予測, 120-127, 1996.
- 12) 片山 徹, 応用力学フィルタ, 朝倉書店, 1985.
- 13) <http://www.sdr.co.jp/cue/shindo.html> 参照.