

強震動即時警報システムの可能性

北代 州平¹・堀 宗朗²

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

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)

コンピュータ内部に蓄積された情報は情報化社会においては極めて重要なものである。本研究は、巨大地震発生時に都市全域のコンピュータに対して即時警報を出すシステムの開発を目的としている。

その第一歩として、区間最大加速度変化率という判定指標を考案し、判定アルゴリズムを簡略化することで判定時間が今までよりも大幅に短縮させうることを示した。警報の伝送手段として地上デジタル放送、LAN と組み合わせることで、巨大地震に対してもその主要動到達前に都市全域のコンピュータに対して警報を出すことを提案する。

Key Words : *real-time alarming, huge earthquake, delta a, preserving important data in computers, digital broadcasting, LAN*

1. 研究の背景と目的

地震予知や災害低減に対する社会の関心は高く、さまざまな研究がすすめられている。その一つに即時警報がある。これは発生した地震を検知し、地震波が襲う前に警報を出す技術である。

今後将来の情報化社会においては、都市の多くの機能がコンピュータによって制御されていくことを考えると、即時警報の対象に都市全域のコンピュータが浮かび上がる。一方、コンピュータに蓄積された大量の情報の重要性はますます増加する。この点からも、コンピュータに即時警報を与え、地震が来る前に機能を安全に停止させたり情報を保護することが必要である。さらに、コンピュータを対象とすると、数秒前の即時警報でもデータ保存や機能停止に関して相当の効果が期待できる。本研究では、コンピュータに何らかの被害を起こしうる巨大地震を対象に、即時警報システムの開発の可能性を検討する。

地震検知から多数のコンピュータに対して警報を送信するまでのシステムの概要を図1に示す。大深度観測井の強震計と判定用サーバを用いて地震検知を行い、地上デジタル放送を用いて企業等の組織の受信用サーバに伝送、そして各コンピュータにサーバから警報を伝えることを想定している。

2. 判定基準

比較的大きい6つの地震に対して加速度波形データを入手し、検知に最適の判定指標を検討した。指標は単に「大地震が到達したか否か」をコンマ数秒でも早く判断しうるものを選ぶ。表1に示すように物理的指標として最大加速度と最大速度、工学的指標としてSI, DI, PIを用いてみたが、満足のいく結果が得られ

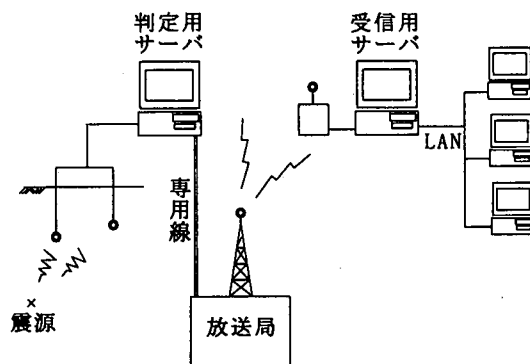


図-1 即時警報システムの概念図

なかった。そこで、下記に示す区間速度変化率と区間最大加速度変化率という新たな指標を考案し、妥当性を検討した。この指標は「地震が大きいほど加速度の立ち上がりが急になる」という観測事実を考慮したものである。

区間速度変化率 (Δv_i) とは、0.01 秒ごとのデータを $\Delta t(\text{sec})$ ごとの区間に分け、各区間の速度の最大値と最小値を計算し、対象とする区間 i 内の最大値と一つ前の区間 $i-1$ 内の最小値との差を取り Δt で割るものである。

$$\Delta v_i = \frac{1}{\Delta t} (\max_i v - \min_{i-1} v) \quad (1)$$

区間最大加速度変化率 (Δa_i) とは、上記と同じ Δt の区間で加速度の最大値を取り出し、対象とする区間 i 内の最大値と一つ前の区間 $i-1$ 内の最大値との差を取り Δt で割るものである。

$$\Delta a_i = \frac{1}{\Delta t} (\max_i a - \max_{i-1} a) \quad (2)$$

後述するように Δt は 0.1[sec] 前後を用いた。

表-1 判定基準の比較

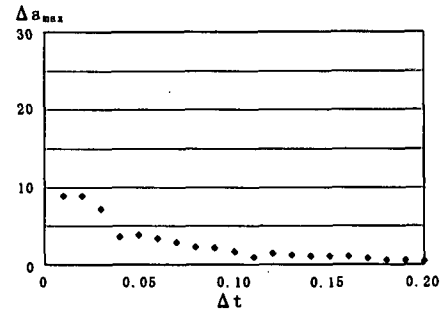
判定指標	判定区間	判定時間
最大加速度	最大値発生まで	大
最大速度	最大値発生まで	大
SI	全区間	大
DI	最大値発生まで	大
PI	発生から 1 秒	1.0sec
Δv	発生から 1 秒	0.8sec
Δa	発生から 1 秒	0.4sec

表 1 に示すように、最大加速度、最大速度、SI、DI の指標については、判定時間が 1 秒以上かかり即時警報には適さないと判断した。また、PI については判定時間が 1 秒と比較的短い値となったが、コンピュータへの警報という点と、後述の警報の伝送時間と比べると決して十分に短くはない。新たな指標である区間速度変化率と区間最大加速度変化率は、判定時間が 0.8 秒と 0.4 秒であった。本研究では、区間最大加速度変化率を判定指標として用いることにした。なお判定には上下水平 3 方向のノルムをとっている。

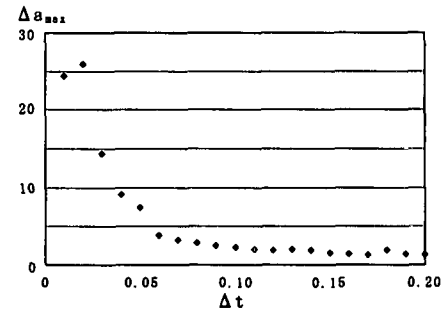
区間最大加速度変化率の計算に用いる時間区間や閾値を設定するため、地上のさまざまな地点で得られた 158 個の強震データ¹を用いることにした。それぞれのデータに対して、 Δt の値を 0.01 秒から 0.20 秒まで 0.01 秒ごとに変化させ最大の区間最大加速度変化率 (Δa_{max}) を計算した。その結果のうち代表的なものの 2 例を図 2 に示す。a) は観測点が震央から十分に遠く、ほとんど Δa_{max} の値が大きくなっていない場合である。b) は観測点が震央からそれほど遠くない場合のデータである。どちら場合も Δt の値が大きくなるにつれて Δa_{max} の値はほぼ一定となり、 Δt に依存しないことがわかる。したがって地震波の特徴をとらえていることが示唆された。また Δt の違いが判定時間に及ぼす影響について図 3 に示すような結果が得られた。これは閾値 (Δa_c) を 80gal/sec に設定した場合のもので、閾値に達しなかった場合は判定時間を 1 秒とした。ばらつきはあるものの 0.06 から 0.12 秒の時間区間では判定を 0.4 秒前後で出せることがわかる。なお、0.13 秒以上の区間ではほぼ線形に判定時間が増加しているが、これは閾値に達する加速度の変化が起こった後、区間の長さに応じて判定時間が増加していることを意味している。したがって 0.1 秒程度の時間区間が合理的と考えられる。今回はその中間の値である 0.10 秒を用いることにした。

3. 巨大地震の判定方法

先に述べた区間最大加速度変化率を用いて巨大地震の検知をする。その際に地震発生の判定と巨大か否



a) NGN021(震央距離:187.5km)



b) CHB001(震央距離:41.1km)

図-2 Δt と判定値の関係

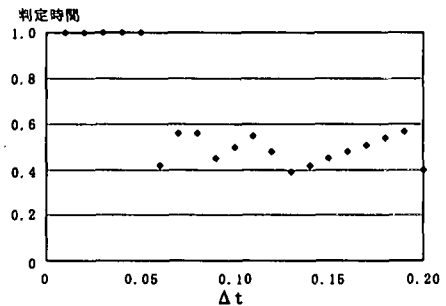


図-3 Δt の変化と判定時間の関係

かの判定の 2 段階で検知を行うことにした。地震発生の判定は Δa_i が常時微動の誤差範囲を超えたときとする。常時微動の誤差範囲には発生確率が 1 年の値を用いる。この値は 0.5gal/sec となった。そして地震発生から 1 秒間の Δa_i を監視し、 Δa_c を超えたときに巨大地震であるとした。 Δa_c は、どの地点で判定するか、どの程度の精度で判定をするか、また、判定時間にどの程度の早さを要求するかによって大きく値が変化する。

大深度地下のデータを用いた結果を図 4 に示す。これは横軸に地震発生後の時間、縦軸にその時間までの最大の区間加速度変化率を用いており、地震発生から 0.4 秒の時点でこの最大値がほぼ安定している。したがってこの場合には Δa_c を例えば 6.0gal/sec とすることができる。

なお海洋地震にはうまく反応していないが、直下地震のうち比較的大きいものに対しては敏感に反応していることがわかる。この結果では、大深度地下で検知

¹ 1998 年 8 月 29 日午前 8 時 46 分、北緯 35.6 度、東経 140.1 度、深さ 67km、M5.1

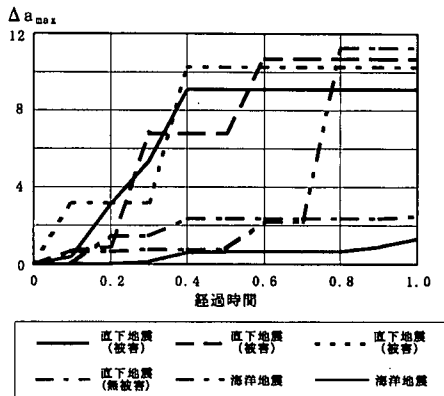


図-4 地震発生から1秒間の区間最大加速度変化率

を行うとP波の検知から0.4秒前後で直下の巨大地震の判定が可能であることがわかる。

4. 地上の観測点への適用

検知の指標やその設定の妥当性を検討するため、地上にある観測点のデータを用いてさらなる解析を行った。なお、地上観測点を用いると、大深度地下と地上の上下の距離で時間を稼ぐのではなく、観測点と該当地域との水平距離で時間を稼ぐものである。地上での判定は先ほどの Δt を決定するとき用いたのと同じ地震を用いた。

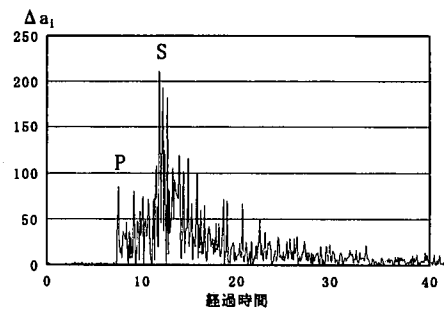
地上の観測点では、常時微動の振幅が異なるためP波到達の検知がうまく行えない。そこでP波到達の検知は行わないことにした。また判定時間を Δa が Δa_c を越えた時点から最大値をとるまでの時間とした。これは地震動の主要動が到達するまでの時間となっている。

地上での Δa の変化を見てみると、図5に示すように、 Δa の値は地震発生時点で突然変化する。したがって、検知ミスの可能性は増すものの、 Δa_i が最初に立ち上がった部分で巨大地震か否かの判定ができるものと考えられる。なお、震度によっても立ち上がりの大きさは異なっており、これを用いてより信頼性のある検知が期待できる。

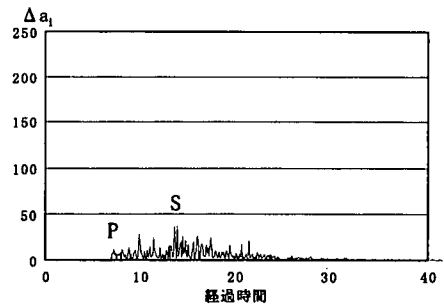
計測震度と Δa_{max} の関係を図6に示す。計測震度が大きくなれば、 Δa_{max} も大きくなっているため、適当な値の Δa_c を用いれば、ある震度以上の地震の検知が可能であると考えられる。なお、図5から分かるように、 Δa_i はP波到達時点で鋭敏な立ち上がりを示しており、この特徴を利用することも期待できる。

図7に Δa_c を決めたときの計測震度と判定時間の関係を示す。判定時間が15秒程度以上のものは主要動到達後のノイズを検知したため、判定時間が延びている。これによると、観測点が震央に近いほど計測震度が大きくなるが、判定時間は短くなってしまふ。しかし、計測震度が大きいほうが立ち上がりが大きいため、十分大きな Δa_c を用いればより確実に大地震の判定が可能である。

同一の地震に対して、数箇所の観測点での判定時刻



a) CHB001(計測震度 3.46)



b) TKY001(計測震度 1.64)

図-5 地上での Δa_i の変化

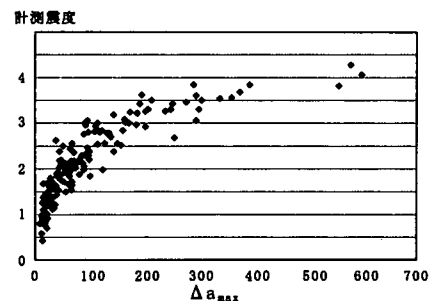


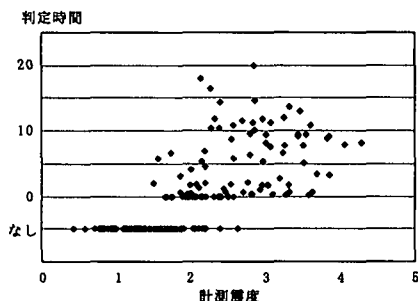
図-6 Δa_{max} と計測震度の関係

と Δa_{max} の値を調べてみた。10箇所のデータを表2と図8に示す。多少時間的前後はあるものの、震央距離が遠くなるにつれて判定時刻が遅くなっている様子がわかる。したがって、都市域から見て震央の方向に観測点があれば地震動の到達前に警報が出せると考えられる。

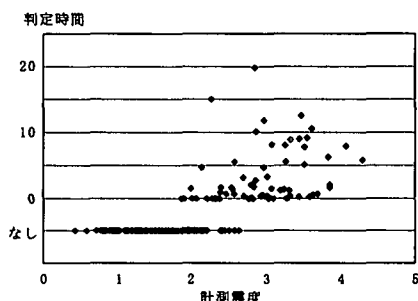
5. LANの伝送速度の実験

イントラネットが整備された環境では、LANのサーバーのみに地上デジタル放送の受信機を取りつけ、他のコンピュータにはLANを通して警報を送信することが考えられる。これにより、セキュリティや速報性・同報性をそれほど犠牲にせずに送信に必要なコストを大幅に下げることができる。

LAN内で簡単なツリー構造のネットワークを組むことで、100台のコンピュータに対しての送信時間は表3



a) $\Delta a_c = 50 \text{ gal/sec}$



b) $\Delta a_c = 80 \text{ gal/sec}$

図-7 Δa_c の違いによる計測震度と判定時間の関係

表-2 観測点ごとの震央距離と判定時刻・計測震度

観測点	震央距離	判定時刻	計測震度
CHB012	31.9	8:47:08.9	2.79
CHB017	34.6	8:47:09.3	3.24
IBR015	52.4	8:47:10.0	2.83
IBR011	58.6	8:47:10.1	2.27
KNG006	44.8	8:47:10.2	2.85
IBR010	64.6	8:47:11.0	2.31
TKY004	53.9	8:47:11.2	3.54
IBR009	69.8	8:47:11.8	2.07
IBR013	76.1	8:47:12.2	3.07
TCG013	92.6	8:47:13.8	2.06

のように10回の平均で0.037秒となった。これにより、対象とするコンピュータが1000台であっても0.1秒もあれば警報を送ることが可能であると予想される。

表-3 LAN 内の100 台のサーバーに対する伝送速度

平均時間	最短時間	最長時間
0.037sec	0.020sec	0.050sec

6. 結論

区間最大加速度変化率による検知、100 台のコンピュータの LAN を利用すると、P 波到達から検知に要

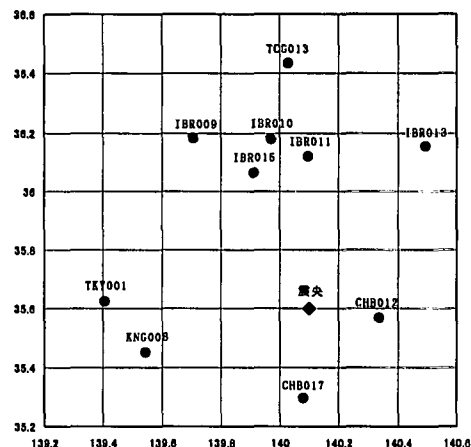


図-8 震央と観測点の位置

する時間が0.4秒、伝送に要する時間が0.037秒であった。したがって、検知からLANまで十分速い伝送手段を用いれば、都市全域の 10^6 のオーダーのコンピュータに対しても地震発生から0.5秒程度で警報を送ることが可能となると期待できる。特に大深度地下で検知を行うと、地上での地震波の襲来までに最短でも1.0秒程度の差があるため、直下地震であっても主要動到達前の警報発令が実現しうると考えられる。一方、水平距離で時間を稼ぐ場合では、都市外部から襲ってくる地震に対して都市周辺の全ての観測点で確実に判定できれば、警報システムが有効に機能することも期待できる。技術的な問題の他さまざまな課題が考えられるが、本研究の結果は提案されたシステムが有効となる可能性を示唆していると判断している。コンピュータを対象とすると短時間の警報でも十分効果があること、情報ネットワークの利用により多数のコンピュータに安価に警報が出せること、という特徴を活かせるよう、課題の解決を考えている。

本研究には科学技術庁防災科学研究所の方々より、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) 深尾良夫, 石橋克彦: 阪神・淡路大震災と地震の予測, 1996.
- 2) 鹿島都市防災研究会: 地震防災と安全都市, 鹿島出版会, 1996.
- 3) 木下繁夫: 深層井観測により推定された厚い地層の地震応答特性, 国立防災科学センター研究報告第38号, 1986.
- 4) Kinoshita, S.: Anatomy of local event seismograms for earthquake engineers, 1997.
- 5) TOKYO GAS: Countermeasures for Earthquake, 1997.
- 6) 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.
- 7) 菊地正幸: リアルタイム地震学(地震発生のメカニズムと予測), 地震工学学会誌第46巻, 第7号, 45-50, 1998.
- 8) 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.
- 9) Comer, D.: 第2版 TCP/IP によるネットワーク構築 Vol. I, 1991.
- 10) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 1994.
- 11) 菅野政孝, 松田栄之, 木幡康弘, 白井力: ネットワークセキュリティと暗号化, 1997.
- 12) 北岡正敏: 確率・統計と待ち行列理論, 産業図書, 1994.
- 13) 地上デジタル放送懇談会, 地上デジタル放送懇談会 中間報告, 1998.
- 14) 日本地震学会: 強震動地震学・地震工学の現状と展望, 1994.
- 15) 太田裕: 強震動情報と地震防災, 地震2, 113-136, 1994.
- 16) 北代州平: 巨大地震即時警報システムの開発, 1999.