

(128) 地震(津波)警報のための地震早期検知を行う

1点検知システムの考え方とパソコンによる実施例

国鉄・鉄道技術研究所 中村 豊

1. はじめに

地震予知の研究はかなり進んでいるが、予知情報によって列車の運行を制御するほどの確度と精度は、当分期待できない。しかし、地震警報は早ければ早いほど安全確保の効果が大きくなると考えられるので、地震発生をできるだけ早く検知する警報システムの実現が望まれる。

現在一般に使用されている地震警報用の装置やシステムは、地震動が一定の大きさを超えた場合に警報を出すだけで、地震諸元を推定することはできない。地震動を検知すると同時に地震諸元が概略的にでも推定できれば、これを基に被害範囲が推定でき、的確な警報発令と合理的な地震後対応をとることができる。また、津波警報の迅速な発令も可能となる。

国鉄では、単一観測点のデータのみに基づいて、地震の初動の段階から概略的な地震諸元を迅速に自動推定することができる早期検知システム(1点検知システム)の開発を進めているので報告する。

2. 1点検知システムの背景と考え方

地震の諸元を自動推定するシステムは、地震予知研究の一環である微小地震観測を省力化するために、各大学理学部をはじめとする地震予知研究機関で研究・開発が鋭意進められている。これらのシステムは、数多くの観測点における地動波形データをリアルタイム伝送してセンターに集中し、センターでこれらの波形からP波到達時刻や振幅、PS時間(初期微動継続時間)などを自動計測して地震の位置、規模等を推定することを目指したものである。

このようなシステムでは、地震の位置を知るために通常3個以上の観測点が必要なので、3個以上の観測点に地震波が到達しないと震源推定処理が始められず、どこかの観測点で初めて地震を感じてから最初の結果が出てくるまでにはかなりの時間がかかる。また、リアルタイムで大量のデータをテレメータするため、莫大な回線使用料がかかるなど、保守上の問題点もある。

微小地震観測システムの場合、期間が限定された研究用であり迅速さよりも正確さが重要であることなどの理由で、上記の問題点はあまり顧みられない。しかし、地震警報システムの場合には、正確さをある程度犠牲にしても迅速であることに重点を置いて考える必要がある。また、地震警報システムは通常無人で運営され、期間が限定されないため、維持管理が容易であることや保守経費が低廉であることも重要である。

そこで、現在の微小地震観測用システムは地震警報システムには適さないと判断し、次のような新しい形の地震警報システムUrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System、ユレダス)の開発を進めている。すなわち、地動波形をセンターにリアルタイムでテレメータせず、各観測点において震源推定のための波形処理を常時行い、地震を検知すると同時にその中から地震情報を読みとって、必要ならば警報を発するとともに地震情報をセンターに自動的に伝送するローカルシステム(LS)と、各観測点から伝送された地震情報を集約してさらに精度の高いものにして地震後の対応に役立てるセンターシステム(CS)とから成るシステムの開発である。システムが複雑化することを避け、また、計算処理時間をできるだけ短縮するため、LSは単一の観測点で構成された1点検知システムとし、LS単独でも検知した地震の諸元が推定できるようにする。1点検知システムとは、単一観測点のデータのみに基づいて、1)地震発生位置(震央方位、震央距離、震源深さ)および2)地震規模、を地震検知直後から推定できるシステムのことである。このシステムでは、これらの推定を次の3つの基本的事実に基づいて行っている。

(1) P波部分の振動方向は震央方向 θ とはほぼ一致する。(押し引きを考えると震央の向きもわかる。)

(2) 地震波動の地表面への入射はほぼ鉛直に近い。

(3) 地震規模Mは、初動周期Tとはっきりした正の相関関係にある。

(2)により、P波部分の震動は上下が卓越し、S波部分の震動は水平が卓越することがわかる。すなわち、上下動と水平動の振幅比をモニターすることによって、P波とS波を識別することができる。これによって、

(1)に基づいて震央方位を推定する際の前提条件: 検知地震動がP波であること、が確認できるし、S波の到来とともにPS時間が算出され、震源距離Rを推定することができる。

(3)により、初動周期からMが推定できる。Mは初動振幅と当該観測点の震源距離からも推定できるので、逆に初動周期によるMと初動振幅から震源距離Rが推定できる。

1点検知システムの機能のいくつかについてはこれまでに報告している^{1)~3)}ので参照されたい。

ここでは、地動周期の連続計測法と震央距離および震源深さの推定法について述べる。

3. 地動卓越振動数の連続推定法

これは、地動の卓越周期T(または卓越振動数F: $F=1/T$)の変動を連続的に捉える方法で、地震波初動直後の時刻付近の卓越周期が初動周期となる。地動を単振動と仮定して、その振動数を次のようにして求め、卓越振動数Fと定義すれば、これは連続的に計算することができる。

$$F_i = (A_i / V_i)^{0.5} / (2\pi) \quad (1)$$

ここに、 $A_i = \alpha A_{i-1} + a_i^2$ 、 $V_i = \alpha V_{i-1} + v_i^2$ 、であり、 a_i と v_i はそれぞれ現時刻(1ステップ)の地動の加速度振幅と速度振幅である。また、 α は指数平滑の係数で、1未満の値をとる。

また、この振動数 F_i に対応する速度振幅 V_{a_i} は次のようになる。

$$V_{a_i} = (V_i (1 - \alpha))^{0.5} \quad (2)$$

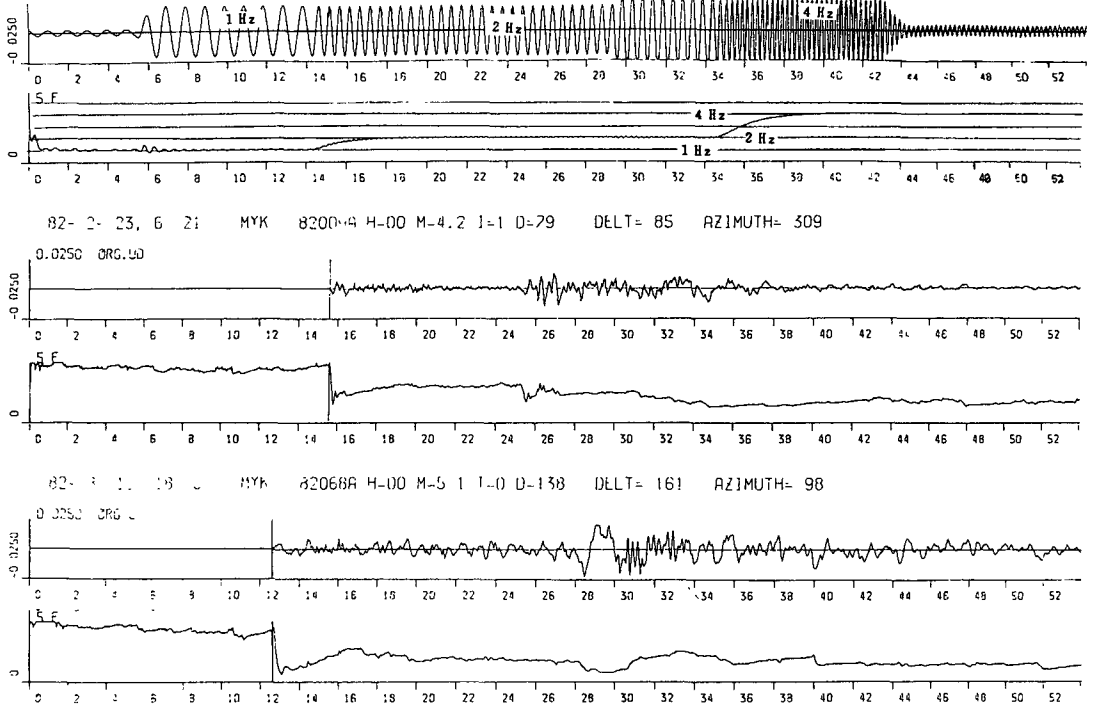


図1 振動数の連続計測法による振動数の読み取り例

図1は、周波数が急変する場合と徐々に変化する場合、および実地震波形について(1)式によって計算される卓越振動数の変動をみたものである。この図から、(1)式による卓越振動数の読み取りがうまくいくことがわかる。人工的な振動ノイズの比較的高い卓越振動数に相当する地震の規模はかなり小さいので、この連続的な卓越振動数の計測によって、大きな地震と人工的な振動ノイズを弁別することができ、危険地震の検知がより確実になると期待される。

図2はこの方法によって検出した初動周期TとMの関係を示したものである。この関係のばらつき程度はゼロクロス法によるものより若干小さくなっている。また、この方法はゼロクロス法より短い時間で長い周期を検出することができる特徴を有する。

なお、 $F_1 = (A_1/V_1) / (2\pi)$ 、
 $A_1 = \alpha A_{1-1} + |a_1|$ 、 $V_1 = \alpha V_{1-1} + |v_1|$ 、
 と定義してもよいがその時は、 $V_{s1} = V_1(1-\alpha)$ 、
 となる。

4. 震央距離 Δ と震源深さ h の推定方法

地震被害予測の観点からは、震源距離よりも震央距離や震源深さの方が重要である。震源距離に関しては、初動周期による M と初動振幅を基に推定する方法や PS 時間を推定するための S 波の検知法などを既に報告している^{1)・3)} ので、ここでは、震源距離 R から震央距離 Δ や震源深さ h を推定する方法について述べる。

上下振幅と水平振幅の比 (V/H) によって、 P 波と S 波の識別ができることは既に報告した²⁾ が、この比の大きさは地震波動の地表面への入射角度に関係する。地震波動の入射角度は h/Δ と関係しているので、 V/H の大きさと R から Δ と h を推定することができる。

図3および図4はそれぞれ Δ/R と V/H の関係および h/R と V/H の関係をプロットしたもので、 V/H と R がわかれば、これらの関係図からおおよその Δ や h が推定できることがわかる。

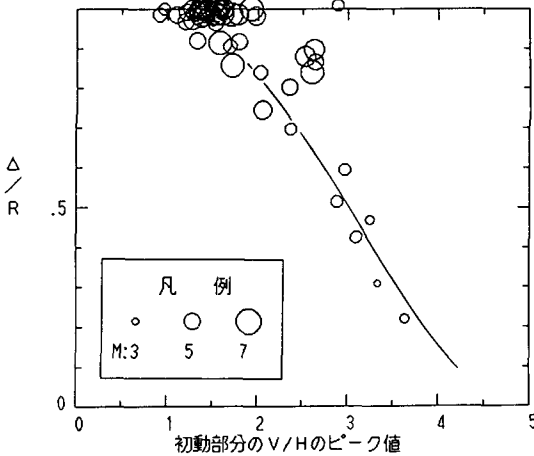


図3 Δ/R と V/H の関係

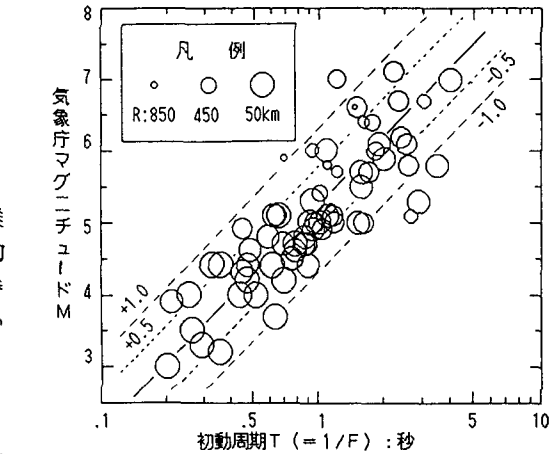


図2 連続計測法による初動周期と地震規模の関係

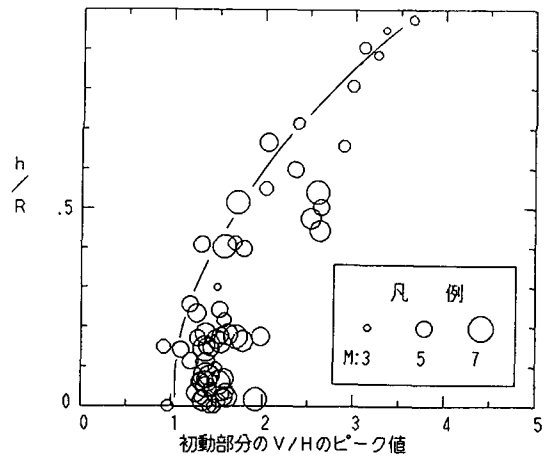


図4 h/R と V/H の関係

5. パソコンによる実施例

パソコンを用いてリアルタイムで震源推定する1点検知システムを試作した。試作システムに保有させた機能は、1) 地動ノイズレベルおよび地震トリガーレベルの計算、2) 地震の検知と PS 識別、3) 地震の規模の推定、4) 震央方位の推定、5) S 波の検知と震源距離の推定、6) 初動振幅と最大動振幅の読み取り、などである。なお、地震を検知した場合、検知4秒前からの3成分の地震動波形、震央方位の変動波形や V/H の変動波形などを地震検知情報などと併せてフロッピーディスクに記録する。また、停電した場合には停電復旧後自動的に再スタートするようにしている。

図5は、宮古地震観測点での記録地震波形をこのシステムに入力して地震処理させた結果の例である。このシステムにはまだ付加すべき機能や改善する余地があるが、この図に例示するように、震央方位や地震規模などを推定する基本機能は完成しており、実地震のリアルタイム処理経験を蓄積することが今後の課題である。

東海道新幹線沿線の警報地震計を交換する際、沿線地盤のマイクロゾーニング結果を検証するなどのために地中地震計を設置したが、この地中地震計の出力を利用して、現地においてリアルタイムで地震の1点検知処理を行わせ、データを蓄積することとした。また、新しい警報システムは、警報地震計の最大加速度や故障通報を総

合指令所に伝えるために、鉄道電話回線を利用したデータ通信機能を持っている。この機能を使って、検知した地震情報と地上に設置してある警報地震計による最大加速度などを鉄道電話回線を用いて鉄道技術研究所にも伝送し、動作状況を追跡している。検知データを気象庁その他の情報と比較してその精度が確認できれば、早期検知情報を迅速な運転再開に役立てることを計画している。さらに、地震波初動での警報精度が十分なものになれば、警報発令そのものに早期検知システムを用いることができ、精度の高い地震早期警報システムが実現できる。もし警報が適当でなかった場合でも、そのことは直ちに判断できるので、迅速に運転再開できる。

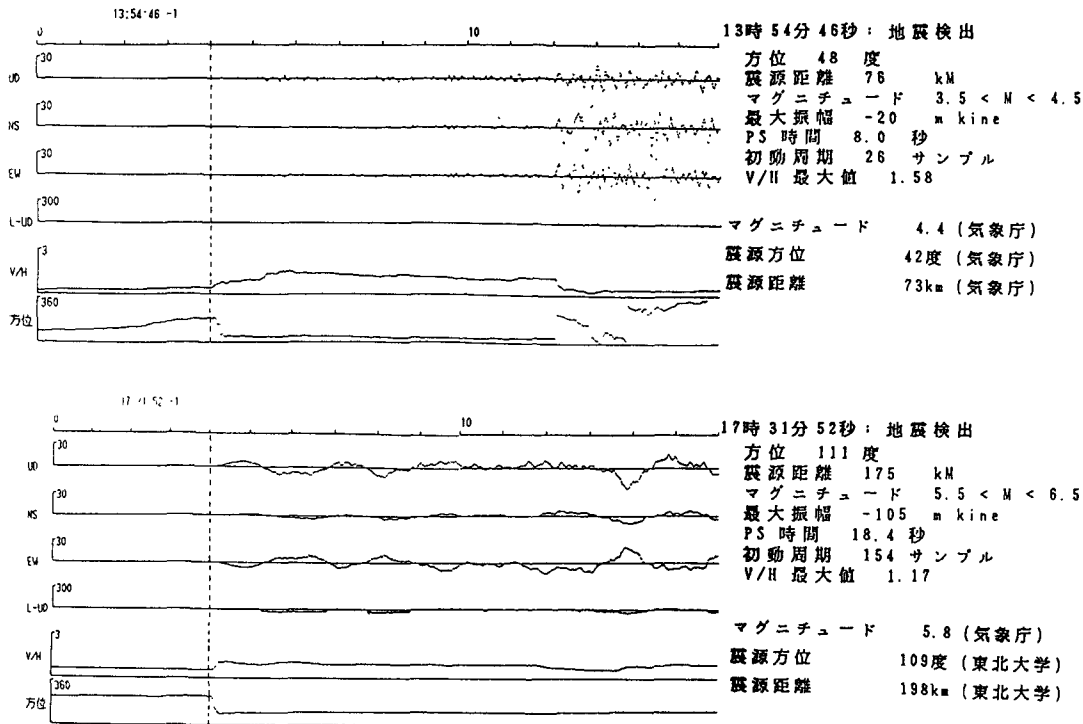


図5 パソコンによる1点検知システムの地震処理例(宮古地震観測点のデータ使用)

6. おわりに

以上、国鉄が開発中の地震警報システム UrEDAS の一部である1点検知システムの概要を述べた。このシステムは的確な地震警報をできるだけ早く出すことと、地震後の対応を合理的かつ迅速に行うことを目指している。このシステムの警報は精度が高いと考えられ、鉄道のみならず原子力発電所や化学プラントなど精度の高い警報を必要とする分野での地震警報として活用できる。さらに、機器構成が簡易なので廉価なシステムとなり、広く一般の地震警報としても利用可能である。また、早い段階で検知した地震の諸元が推定できるので、津波警報にも利用できるものとする。

今後、実際に地震をリアルタイム処理しながら、問題点の発見と改良・機能向上に努めて、UrEDASを発展させていきたい。UrEDASの動作状況やセンターシステムの機能などについては機会を改めて報告したい。

謝辞 : 震源データを提供して頂いた東北大学地震予知観測センターに謝意を表します。また、研究をサポートして頂いている構造物研究室 富田健司研究員ならびに沖電気工業(株)の橋本民雄氏に感謝致します。

参考文献 : 1) 中村・斉藤: 「地震の早期検知・警報システムの開発」、第6回日本地震工学シンポジウム(1982)講演集, PP. 2009-2016, 1982年12月。2) 中村・斉藤: 「地震波動種別の識別と単一観測点に基づく震央方位の推定」、第17回地震工学研究発表会講演概要, PP. 95-98, 1983年7月。3) 中村・富田・橋本: 「波形を蓄えないS波のリアルタイム検出法」、地震学会講演予稿集1984:No. 2, P. 104, 1984年10月。