

リアルタイム地震学

Real-time Seismology

菊地正幸*

Masayuki Kikuchi

*非会員 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 文京区弥生 1-1-1)

Recently, seismic observation networks of various scales from local to global have been established. They contain the infra-network of seismic surveys and observations, and high concentration strong motion seismograph. Our concern is now how to make the best use of such a huge observation system for a science and disaster mitigation plan. In this project: real-time seismology, we attempt to extract the detailed information on seismic source and strong ground motions at an early stage by using seismic data provided by this huge system immediately after earthquakes or daily. In addition, we aim to develop effective methods to utilize such information for disaster mitigation, and to contribute to the further advancement of earthquake source physics and disaster science.

1. はじめに

1980 年代後半から 90 年代にかけて、高性能地震計・高速データ通信・電子計算機などの技術の進歩には目を見張るものがあった。これらを駆使して、震源や揺れの分布をいち早く把握し、その情報を発信することが可能になった。現在では大きな揺れが到達する前に警報や制御信号を出すシステムも検討され始めている。

ここに至って、震源や地震動の早期情報が災害救援に役立つ可能性が見えてきた。いうまでもなく、大都市の地震災害においては、的確な状況判断の下での素早い初動体制の立ち上げが重要である。救援活動に必要な道路と空間の確保が時間とともに急速に困難になるからである。

このような状況において、「リアルタイム地震学」と呼ばれる研究が進展しつつある。リアルタイムに提供される地震データを用いて、震源と強震動生成のメカニズムを解明するとともに、より早くより詳細な地震情報を利用者に提供して災害軽減に役立てようとする学際的研究である。

我々のめざす早期地震情報の提供は、観測データをそのまま転送することではない。震源と強震動の知見を加味し、利用者にわかる形に処理した

上での情報提供である。震源の物理や不均一構造中の波動伝播の理解が深まれば深まるほど、より根拠のある、確実度の高い情報提供が可能となる。逆に、早期地震情報は、地震がどのような場所でどのように発生したかの基礎データとして蓄積され、地震発生の基礎研究へフィードバックされる。我々が、リアルタイム地震学を「地震防災」だけに限定せず、「震源と強震動の物理」をもう一方の柱とする学際的研究と位置づけている理由もここにある。

2. リアルタイム地震情報システム

リアルタイム地震学の概念を図 1 に示す。システムの構成要素である各種地震計には、全国展開の高感度地震計・広帯域地震計・強震計の観測網のほか、大都市（横浜市など）の高密度強震計ネットや海底地震計（駿河湾や相模湾など）などが含まれる。

収集されたデータから主に 2 つの情報を発信する。1 つは震源の情報、もう 1 つは地震動（強震動）の情報である。前者については次のような内容を含む。

REALTIME SEISMOLOGY

リアルタイム地震学

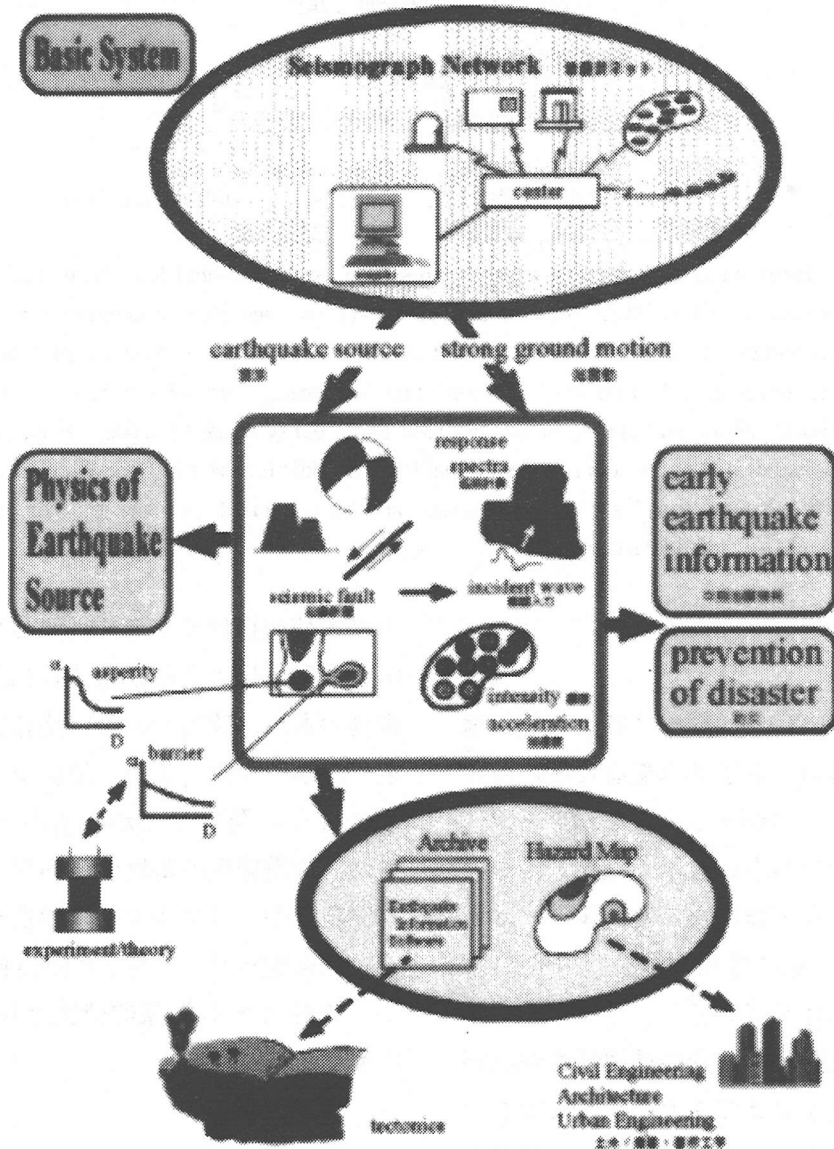


図1 リアルタイム地震学の概念図。

- (1) 発生時刻（震源時）・場所・大きさ
- (2) 断層のメカニズム
- (3) 破壊の伝播方向・継続時間
- (4) 不均一断層すべり分布

このうち、(1)についてはほぼ自動的・ルーチンの得られている。実際、有感地震があると、気象庁の震源情報が数分以内に報道される。(2)の

情報も、今のところ内輪の研究者間だけであるが、地震発生後5分ぐらいで配信される¹⁾。(3)、(4)の情報は、地震の被害範囲を推定したり、余震の推移を見る上で重要であるが、現状ではまだ即時解析だけでは信頼性に乏しい。

一方、地震動の情報としては、高密度強震計ネットのデータを中心に、震度、最大加速度、卓越周期、応答スペクトル（周期別振幅）などの空間

分布を発信する。詳細な震源情報から基盤入力地震動を算出し、地盤データと結びつけて強震計のない場所についての地盤応答計算を行う。このためには、強震動生成のメカニズムの解明が重要である。

3. 地震観測網

70年代後半から80年代にかけて、米国や仏国などにより高性能デジタル地震計のグローバルネットワークが整備された。米国の地震学研究連合(通称 IRIS)の広帯域地震計ネットワークは最も代表的なグローバル地震計ネットワークである。我々はインターネットを介してFTPで波形データを得ることができる。Webからのダウンロードサービスもある。

国内では、平成7年1月17日兵庫県南部地震(気象庁マグニチュード7.2)の2年後、地震調査研究推進本部が、『地震に関する基盤的調査観測計画』と題する報告書をまとめ、その中で高品質の地震計記録を全国偏り無く恒常的に収集する、という地震観測計画の基本方針を打ち出した。また、配備すべき観測装置として、(1)高感度地震計・広帯域地震計(2)強震計(3)GPSをあげ、これを「基盤観測」として推進することとした。このうち高感度地震計観測網については今年度までに約500点余の新設観測点(通称Hi-net)が整備され、既存観測点と合わせて、全国およそ1,100の観測点(15-20kmの三角網)から成る観測網となる。

また、大学関係では、93年3月に全国の大学地震観測施設が高速専用回線で結ばれ、オンライン地震データ流通システムが実現した。その後、この流通システムは大学共同の衛星テレメタリング・システムへと引き継がれた(図2)。衛星テレメタリング・システムは、従来の地上回線では実現の難しかった、全国地震観測点の地震波形データを全国どこでもリアルタイムで利用できる

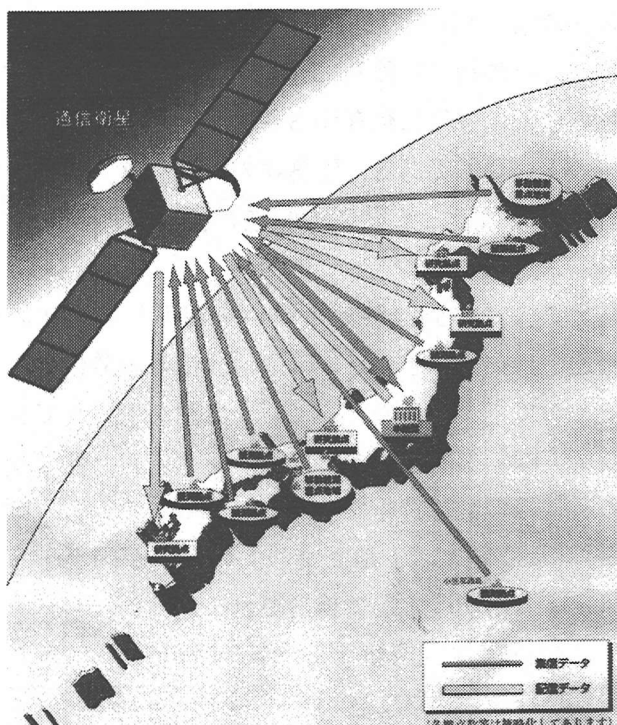


図2 衛星テレメータを利用した全国大学地震データ流通ネットワーク。

という画期的な状況をもたらした。各送信局(観測点)からいったん中継局に送り、中継局で全点を集約して配信するという「2ホップ方式」を用いているため、簡単な設備で送受信が可能である。

4. 早期地震情報の発信

早期地震情報は提供されるタイミングによって大きく2つに分けられる。1つは、主要動到達前の警報システムに代表されるような、文字通りのリアルタイム地震情報、もう1つは、一通り揺れが収まった後の被害全容情報である。

4.1 主要動到達前情報

地震波にはP波とS波の2種類がある。地殻を通るP波の速さはおおよそ6km/s、S波の速さはおおよそ3.5km/sである。したがって、例えば震源か

ら 100km の場所では、地震発生から約 16 秒で P 波が、その約 13 秒後に S 波が到達する。それぞれの振幅は方位に依存するが、平均して S 波が P 波の 5~10 倍である。建築物の倒壊や落下物の被害の多くはほとんどこの S 波の揺れが原因である。

そこでこの到達時刻の違いを利用して S 波の到達前に揺れを予想し、緊急地震情報を発信することができないものか、という発想が生まれてきた。実際、国内ではすでに「ユレダス」と呼ばれる新幹線の緊急警報システムが稼働している²⁾ほか、「ナウキャスト地震情報」の活用が国土庁・気象庁・消防庁の間で検討されている。

この直前地震情報システムを実現するにあたって解決すべき大きく 3 つの課題がある。(1)どんな情報が提供できるか (2)どのように伝達するか (3)どのような緊急対応に利用可能か、を明確にすることである。このうち(2)については、デジタル CS の利用が有望である。(3)については、危険物からの緊急避難、列車の緊急停止、医療現場での緊急対応、コンピュータシステムのバックアップ等、アイデアとしてはいろいろあげられる。これについては今後、直前地震情報の具体的な内容を防災担当者に提示した上で活用調査をする必要があろう。

以下ここでは、主に(1)に関連して、現在「ナウキャスト地震情報」計画で試作されているものに筆者の考えを少し加えた内容を示す。

<規模のしきい値情報>

地震の発生時刻(震源時という)と位置と大きさは震源情報の 3 要素である。この早期地震情報は、いろいろな意味で、その後の緊急対応にきっかけを与える役割を果たすので、情報の速報性とともにある程度の信頼性が要求される。一般に解の信頼性はデータ数に依存する。地震発生直後の観測データは皆無であり、その後地震波が広がっていくにつれて信号をキャッチする観測点の数が増えていく。したがって、ある程度時間がたて

ば精度のよい震源決定は可能である。しかし、リアルタイム地震防災ではまさに地震波が観測点を通過していく数秒間が大きな意味をもつので、最初の 1 点でキャッチした段階でも何らかの情報を出す意味がある。たとえば以下のような手順が考えられる。

1) 最初に 1 点で P 波を感知した段階:

この観測点を震央、深さを 10~15km と仮定して、地震の規模を判定し、あるしきい値を越える場合に地震が発生したことを知らせる。

2) 複数の観測点で P 波を検出した段階:

震源時・位置・規模を決定し、震源情報を更新する。各点の主要動の大きさ(しきい値)、到達時刻の予測情報を発信する。

3) 複数の観測点で S 波を検出した段階:

予測震度・計測震度に基づき被害予測情報を発信する。

日本全国にはおよそ 20~30km 間隔で地震のテレメータ観測が行われている。これを使えば、日本国内の地震について、地震発生からおよそ 5~7 秒で震源の特定が可能である。しかし地震動の初めの部分だけでは、主要動の到達時刻は予測できても、大地震かどうかの判定が難しい。地震の規模は最終的なすべり破壊領域の広がりであり、M8 の地震では破壊領域の広さはおよそ 100km、破壊に要する時間は 30~60 秒である。この場合、主要動の到達前に地震の規模を判定することは原理的に不可能である。

しかしそのような場合でも、M6 を越えるかどうかといった「規模のしきい値予測」は P 波初動の数秒間の段階で可能である。原理は以下のとおりである。

震源時間関数のパルス幅(継続時間) $T[s]$ と地震モーメント $M_0[Nm]$ との間には次のような良い相関関係がある³⁾。

$$M_0 / T^3 = \begin{matrix} 10^{16} \text{ [Nm/s}^3\text{]} & \text{浅い地震} \\ 10^{17} \text{ [Nm/s}^3\text{]} & \text{深めの地震} \\ & (h>50\text{km}) \end{matrix}$$

この式から継続時間Tとモーメントマグニチュード M_w の間の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} M_w &= (\log M_0 - 9.1)/1.5 \\ &= 2 \log T + 5 \pm 0.3 \end{aligned}$$

震源時間関数は無限媒質中で観測されるであろう変位波形に対応している。そこで、上のTを「P波到達のあと変位が零線をクロスするまでの時間」と置き換えれば、上の式は各時刻におけるマグニチュードの下限値を示しているとみなすことができる。たとえば1秒、3秒の段階で零クロスがなければ、“M5以上”、“M6以上”の判定を各段階で出すことができる（図3）。

4. 2 被害全容の早期情報 – 横浜市の例

横浜市は、強震計を市域に張り巡らし地震時の揺れを数分以内に収集して、被害程度を迅速に把握するシステムを構築した。このシステムは平成8年に仮運用を始め、平成9年5月より本稼働に入った⁴⁾。地震計は消防所を中心に全市に150基配置されている。およそ1.5キロ四方に1基の割合である。

Magnitude Threshold (M_{thr}) vs Lapse Time (T)

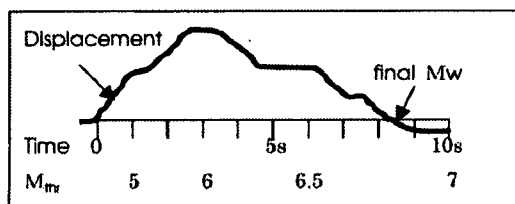


図3 地動変位波形を使ったマグニチュードのしきい値判定。

各地点の揺れが一定のレベル（2gal）を超えると、早期情報（最大加速度、卓越周波数、計測震度、SI値、応答スペクトル）が観測点のマイクロプロセッサで計算され、ISDN回線を通して、3カ所のセンター（市庁舎、消防署、市立大学）に送信される。

センター側では地震発生後2分ぐらいで市域の揺れ分布が画面に表示され、約20分後には建物の倒壊や液状化などきめ細かな被害予測が行われる。この被害予測システムはREADY (REal-time Assessment of earthquake Disaster in Yokohama)と名付けられ、平成11年4月から稼働している。

この強震計ネットワークは大地震時以外にもいろいろな用途がある。まず規模の小さい地震の記録を使って地盤の振動特性を調べることができる。また、きめ細かな震度分布を市民に公表することにより地震に対する注意や関心を喚起することができる。さらに、活断層のような段差が地下に存在するかどうかを調べることも可能である。

図4は98年5月3日に起こった伊東沖の地震時の揺れ（地動の軌跡）を示す。主に長周期のラブ波の振動である。地下構造の不均一性に起因する複数の伝播経路を反映した変位のループが見える。このようなデータがいろいろな地震について蓄えられれば、どの地震ではどこが揺れやすいといったきめ細かな地震動のデータベースができあがる。それにより、家屋の耐震診断を優先的に行ってもらうとか、将来的には都市造りにも役立てることが期待される。

5. 首都圏強震計ネットワークシステム

地震防災の基本は日常的な事前の備えと地震発生時の臨機応変策である。阪神淡路大震災以降、国・自治体・公共企業体を中心に、かなり多くの強震計・計測震度計が設置された。首都圏につい



図4 平成10年5月3日の伊東沖の地震(M5.7)による横浜市の揺れ(地動の軌跡)。

てみると、オンライン、オフラインを含め、約500点の強震計・計測震度計がある。これらのシステムの主目的は、地震発生後数分以内に震度情報を提供することであるが、技術的には地震波形データを取り出すことも可能である。そこで我々は自治体等との協力の下に、既存のネットワークから波形データを収集し、研究者や自治体関係者に提供するシステムを構築しようとしている(図5)。震度情報だけでは地面の揺れ方の特徴はわからないが、波形データを分析することによって、広い周波数範囲の地盤応答を得ることができる。このことは、日常的に起こる小さい地震の観測データを用いて大地震が起こった場合の揺れ分布を推定する際に重要である。

このような地震計ネットワークの構築やデータの活用にあたっては、自治体と大学研究者の間

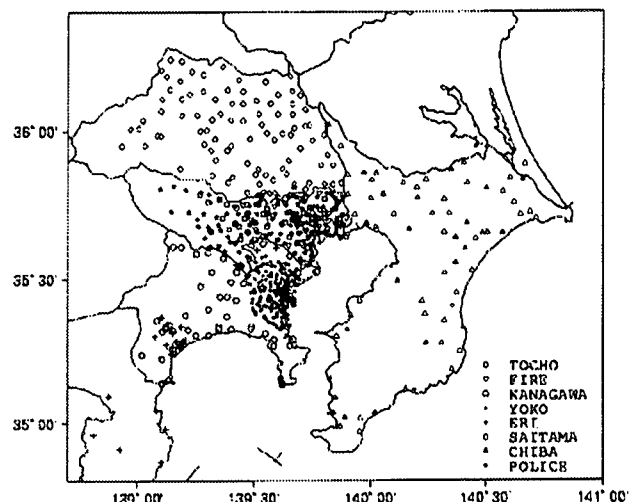


図5 強震計・計測震度計による首都圏の強震動観測ネットワーク。

の日常的な情報交換がとくに重要であり、また、その日常的なパイプこそが” いざ大地震” というときにネットワークが効果的にはたらく保証であることを強調したい。

参考文献

- [1] 福山英一・石田瑞穂・堀貞喜・関口渉次・綿田辰吾：Freesia Project による広帯域地震観測，防災科学技術研究所研究報告，No. 57，pp.23-31，1996.
- [2] 中村豊：ユレダスとヘラス：地震災害軽減のためのリアルタイム防災情報システム，鉄道総研報告，Vol.10，pp.1-12，1996.
- [3] Kikuchi, M. and Ishida, M.: Source retrieval for deep local earthquakes with broadband records, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol.83, pp.1855-1870, 1993.
- [4] 菊地正幸：大都市における高密度強震計ネットワーク，科学，Vol.66，pp.841-844，1996.