

第4章 地震データ収集とデータベース

4.1 通信衛星を使った収録システム

(1) はじめに

1993年北海道南西沖地震、1995年兵庫県南部地震以降、地震観測点は飛躍的に増加してきた。しかしながら気象研究所では回線上の制約から気象庁本庁で収録されている地震波形記録をほぼリアルタイムで受信することは不可能であった。1996年から東京大学地震研究所を中心として衛星通信を用いた地震観測テレメタリングシステム(今後衛星テレメタリングシステムと略す)が導入された(衛星通信テレメタリンググループ, 1996)。このシステムにより全国の大学及び気象庁の地震観測点の波形を衛星通信に乗せてリアルタイムで集配信することが可能になった。衛星を使用する利点は衛星受信装置を設置すればどこでも波形記録を使用できるようになるということである。気象研究所では平成10年度に衛星通信による地震観測テレメタリングシステムを導入した。

(2) システムの概要

現在衛星テレメタリングシステムから取り込むことが可能な記録は、短周期地震計の波形を中心として各大学及び気象庁の観測点のデータである。Figure 4.1に現在衛星からデータを収録することのできる観測点を示す。この中には定常観測点だけでなく臨時観測点も含まれている。全国で約800観測点、約2,500チャンネルある。すべてデータはwinフォーマット(卜部・東田, 1992)で1秒ごとのパケットとして送られてくる。winフォーマットのデータは効率よく圧縮されているが、これら全チャンネルのデータを収録すると、1日に約20 Gbytesという膨大な量になるので、我々は必要最小限のデータのみ収録することにした。

Figure 4.1で●印で示したのは衛星から受信できる広帯域地震計の観測点である。全国で42観測点、126チャンネルある。気象庁の展開しているSTS2地震計20点と東京大学地震研究所が設置したCMG3が含まれている。両者とも周期100秒までは速度フラットな特性を持つ地震計である。広帯域地震計の記録は波形を用いた解析・研究を推進するためには必要不可欠であるので、全点を収録対象としている。また、関東地方南部については本特別研究の対象地域なので、短周期地震計記録も含め全チャンネルを収録対象とした。

本システムでは現在のところ波形記録は連続収録をしており、トリガーや自動震源決定システムを導入していない。以下に述べる地震波解析を行うためには連続記録から地震部分を切り出さなくてはならない。気象研では本庁及び管区気象台で決定された地震のリストを約2日後には本庁のftpサイトから入手することが可能である。そこで、このリストから自動的に地震の規模・観測点配置から規模の大きな地震だけを抜き出し、イベントファイルを作るプログラムを作成した。イベントファイルとして切り出すかどうか、あるいは切り出す時間長は気象庁の決定した震源リストのマグニチュードと震央から5番目に近い広帯域地震計観測点の震央距離の関数とした。マグニチュードの下限は3とし、切り出す時間長の下限を4分とした。関東地域で起きた地震については短周期地震計の記録も収録し、その他の地域の地震については広帯域地震計の記録のみを収録した。1998年1月から始め、現在までに約450の地震のイベントファイルができた。1998年8月以前は切り出すプログラムがなく手動で切り出しているため、切り出す基準は明確ではない。

また、収録した地震についてペーストアップを行い気象庁で使っている理論走時(浜田, 1984)を示すプログラムを作成した。1998年2月21日に新潟県中部で起きた地震($M_{JMA}5.0$)を一例として示す(Figure 4.2)。今後変換波や反射波を用いた不連続面の解析を支援するツールになるものと思われる。

以下に実際に衛星テレメタリングシステムの波形を用いて解析をした一例として広帯域地震計によるメカニズム解析の結果を示す。

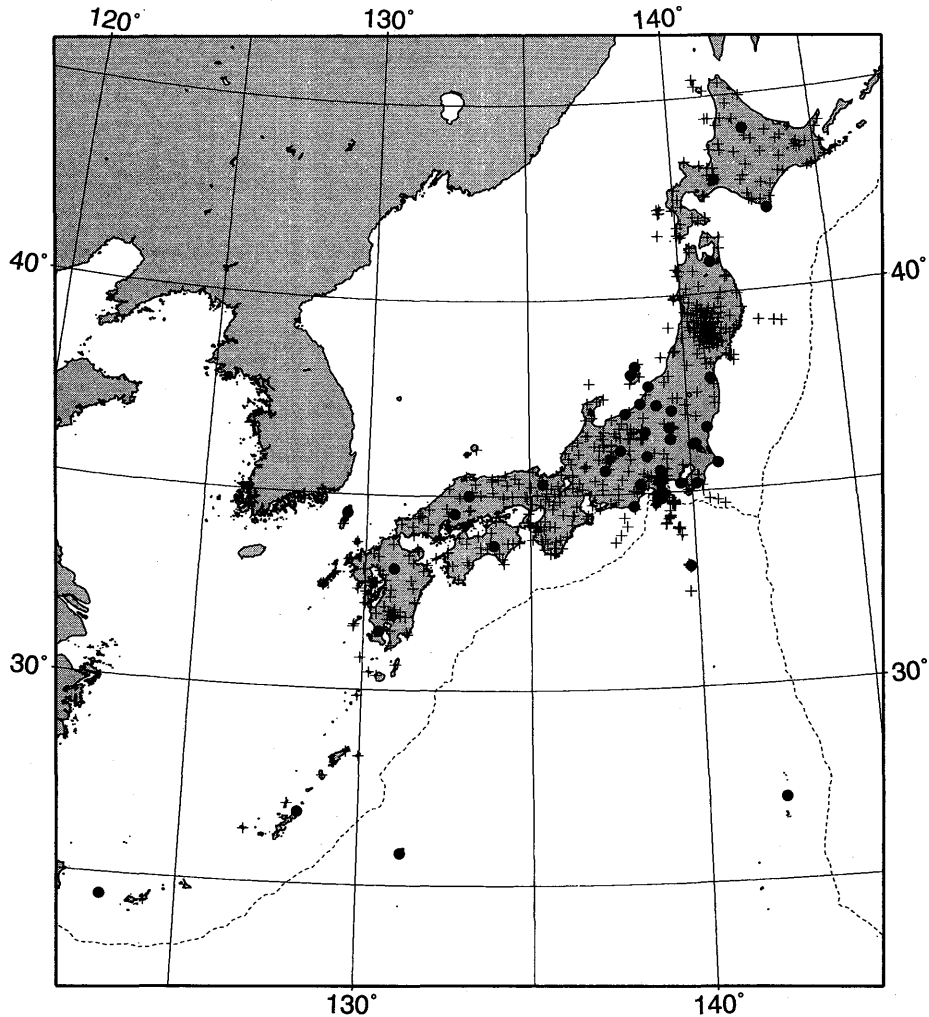


Figure 4.1 Map of stations which are available in satellite system. Crosses denote stations of short period seismometers; solid circles denote station of broad-band seismometers.

(3) 広帯域地震計によるメカニズム解析

地震発生からなるべく早い時間でメカニズム解を決定することは防災の面から非常に大切なことである。例えば海域で起きた地震であれば、大きな津波が発生するかどうかは地震の規模だけでなく、メカニズム解も効いてくる。横ずれ型の地震では縦ずれ型に比べて海底の上下変動量が小さいため津波は小さくなる。また、内陸地震についても断層面が決定されれば余震分布がどちらに伸びるかを予想することができるし、どのような応力場を反映して起きた地震かを推定できる。つまり今後の地震活動の推移を考える上でも有益な情報を与えてくれるのである。

現在気象庁ではP波初動の押し引きを用いて地震のメカニズムを決定している。また、 M が5以上の地震については周期50秒から100秒という長周期の波を用いてCMT解を決定している (Dziewonski *et al.*, 1981; Kawakatsu, 1989)。しかし、両者にはそれぞれ利点・欠点がある。まず、押し引き分布を用いる方法は1観測点の情報量が非常に少ないので(押し引きという情報のみ)メカニズム解を精度良く決定するためには多くの観測点の情報が必要となる。海域で起きた地震については観測点の方位角分布が悪いため解が一意的に求まらないことも多い。一方長周期実体波を用いるCMT解の方法は、3成分の波形全体を使うので、少ない観測点(観測点の方位角分布が良ければ2~3点で十分である)でメカニズム解を決めることができる。しかしながら用いる周期帯が非常に長いので、 M が5以下の地震についてはSN比が悪くなってしまい解を決定することができない。また、長周期のフィルターをかけるため、メカニズム計算に用いる波形記録の時間が長くなるので、それだけ計算を始める時間が遅れてしまう。

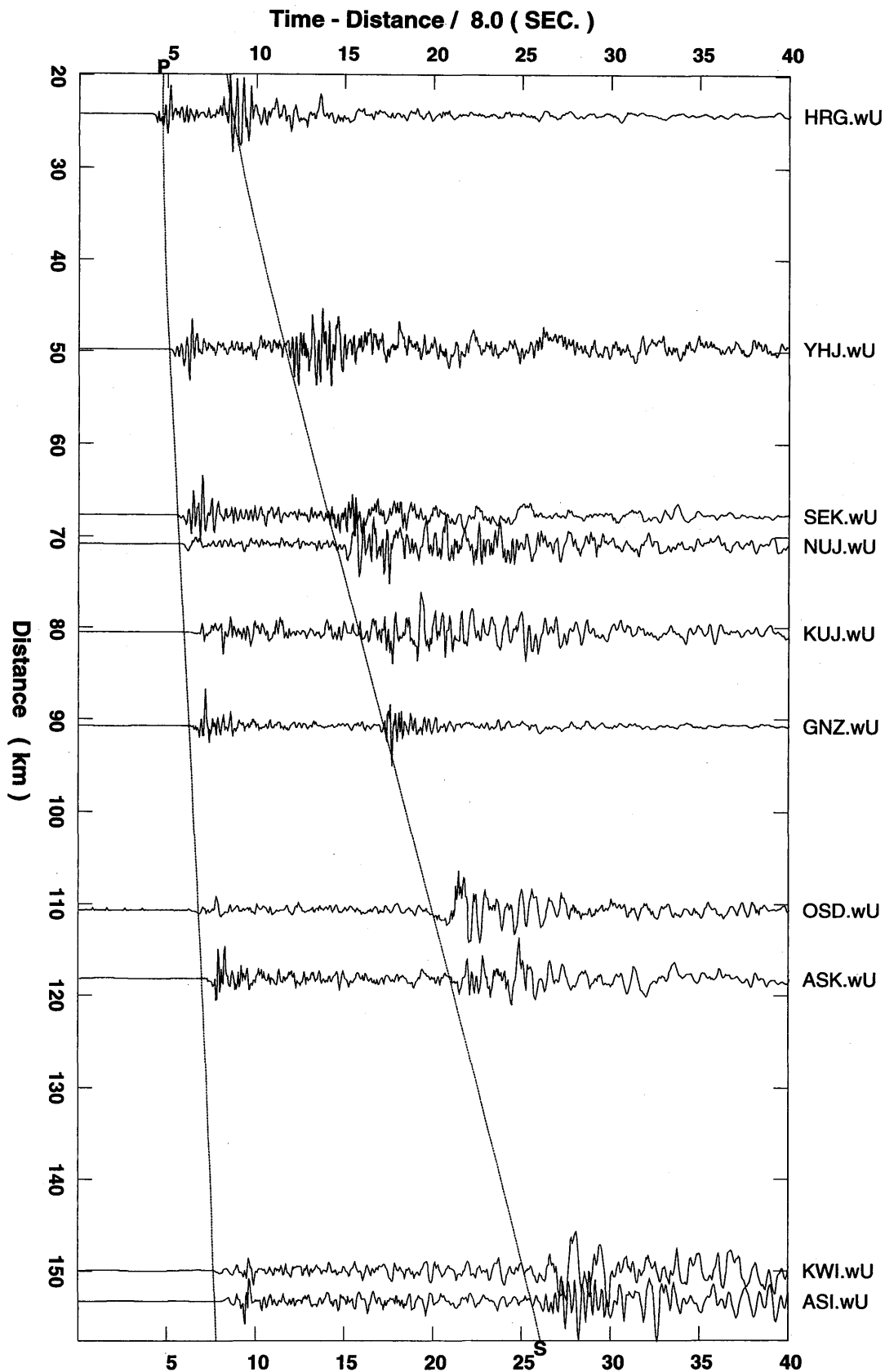


Figure 4.2 Paste-up of vertical components of broad-band seismograms for the event which occurred on February 21, 1998 in the middle of Niigata Pref. Dashed lines denote the calculated travel time curve of P and S waves using 83A structure.

一方今回開発を行った方法では周期帯にして10秒から50秒の地震波を用いるので前述のCMT解を求める時に比べて短周期の波を使う。このためM4クラスまでメカニズム解を決定することができ、また地震発生から短い時間の記録を用いて解析を始めることができる。一方3成分とも波形記録を使うため少ない観測点数(2~3点)でメカニズム解を決定することができる。しかしながら現在のところ波形計算に数十分時間がかかるという欠点がある。この欠点も色々な深さ、震央距離で予め波形計算をし、ハードディスクに保存しておけば解決できる問題である。次に解析手法について述べる。

グリーン関数の計算は武尾(1995)の方法を用いた。本方法では半無限水平成層構造に対する地盤応答を計算することができる。また、同時に非弾性減衰効果を考慮することができる。本研究では簡単のためTable 4.1で与えられた構造で理論波形を計算した。しかし、実際の地球は3次元的に不均質な構造を持っている。このため、より正確な波形を計算するためには観測点と地震の組ごとに構造を変えてグリーン関数を計算しなくてはならない。しかし用いる周期帯域が長くなれば構造の影響は小さくなっていく。周期20秒以上の波を用いると最終的な解に構造の影響がそれほど顕著に出てこない。そこで波形記録に基本的には周期20~50秒のバンドパスフィルターをかけて比較をした。しかしM<4の地震については20~50秒のフィルターをかけるとSN比が悪くなり、メカニズムが決定できなくなるので、これらの地震については周期10~50秒のバンドパスフィルターを用いることにした。この場合は地殻構造の影響が非常に大きいので解の吟味は十分に行う必要がある。波形比較に用いる記録の長さTは理論P波の到達時間10秒前から、最低80秒とし震央距離に比例して長くとることにした(伊藤, 1996)。

$$T = (\text{distance}) [\text{km}] / 12 [\text{km/sec}] + 80 \quad (4.1)$$

波形は主に表面波部分を合わせることになる。また、震央距離が遠くなると構造の影響を受けやすいので特別な場合を除いて500 km未満の観測点を用いた。

メカニズム解を求める方法としてKikuchi and Kanamori (1991)を用いた。基底として6つのモーメントテンソルを選び次式Δが最小になるようなパラメーター a_n , τ_j を計算から求める。

$$\Delta = \sum_{j=1}^{N_s} \int [x_j(t) - \sum_{n=1}^{N_b} a_n w_{jn}(t - \tau_j)]^2 dt \quad (4.2)$$

ここで N_s : 観測点数, N_b : 基底数, $x_j(t)$: j 観測点の観測波形, $w_{ij}(t)$: j 観測点 i 基底の理論波形である。

震源時間関数は三角形で近似できるものとし、その継続時間はマグニチュードの関数として表すものとする。

1998年9月8日に銚子付近($M_{JMA}4.2$)で起きた地震について解析方法を示す。Figure 4.3に震央の位置、及びメカニズム解析に使用した観測点の分布図を示す。観測点は震央距離の近いものから約10点を選択する。

計算に用いた構造と実際の構造が異なるため、あるいは震源決定の誤差のため観測波形と理論波形の位相が合わない場合がある。そこで各観測点ごとに観測波形と理論波形のcorrelationをとり、一番合いが良くなるように時間をずらした。また、観測点ごとに1点の波形だけを用いてメカニズム解も同時に求めた。Figure 4.4にその結果を示す。

Table 4.1 Velocity structure used for calculating synthetic waveforms.

Depth (top) (km)	V _P (km/sec)	V _S (km/sec)	Density (g/cm ³)	Q _P	Q _S
0	5.50	3.18	2.8	300	150
5	6.10	3.52	2.5	400	200
24	6.65	3.84	2.5	500	230
40	7.79	4.50	2.6	500	230

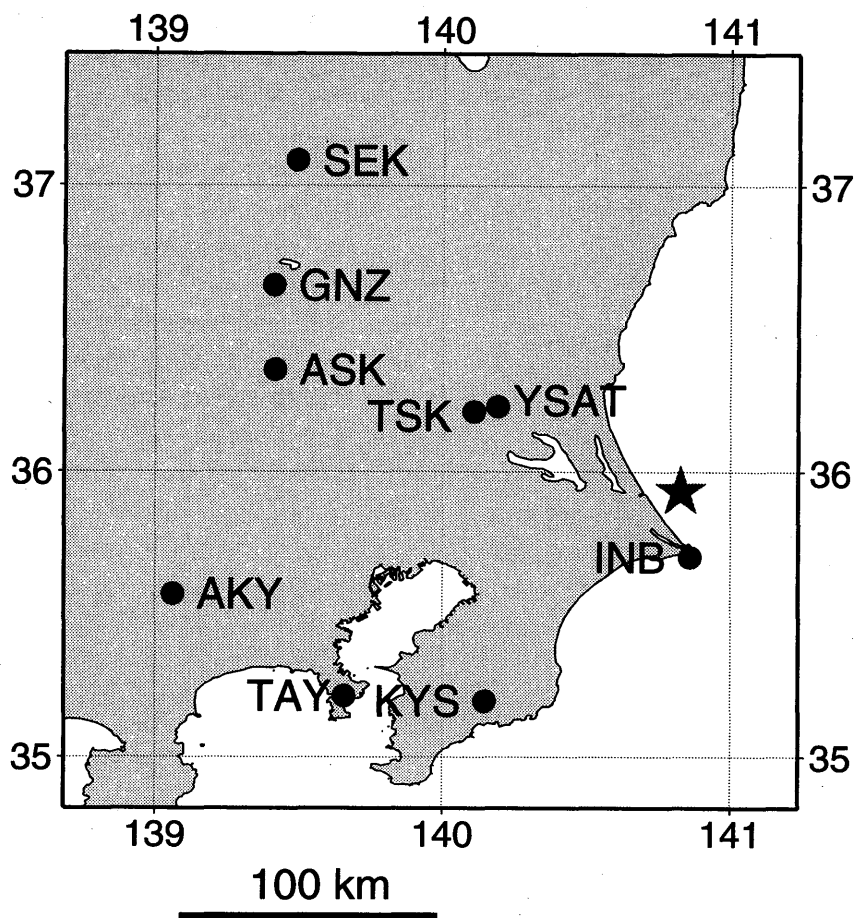


Figure 4.3 Epicenter and stations used in the analysis. Circles denote the broad-band stations whose waveforms are used. A star denotes the epicenter of the analyzed event which occurred on September 8, 1998 near Choshi-city. The depth of this event is 37 km.

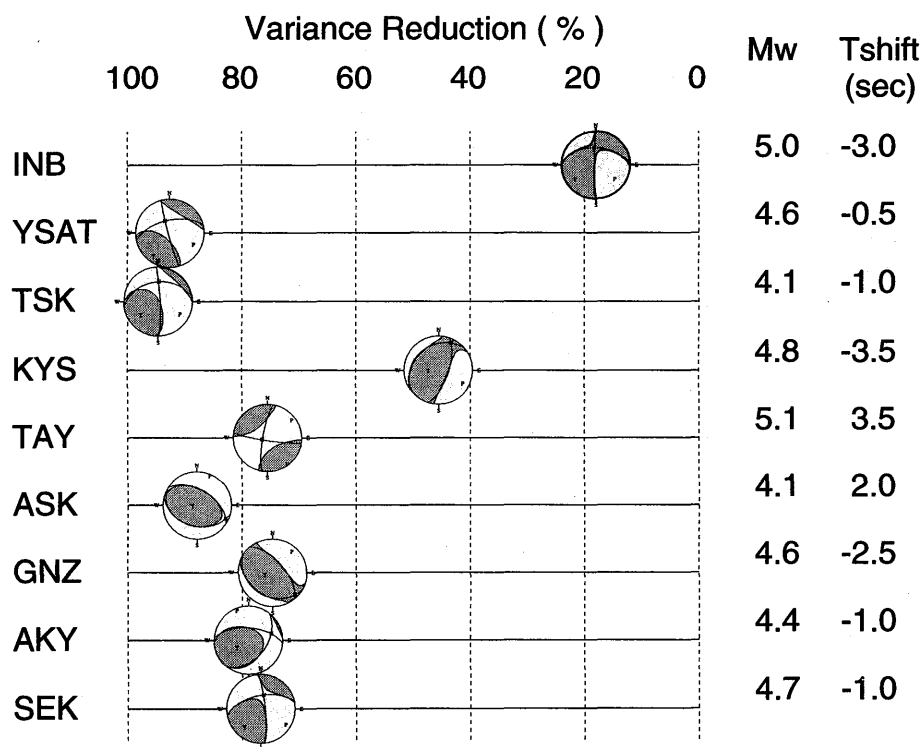


Figure 4.4 Diagram of derived mechanism for each station and variance reduction. Horizontal axis denotes the variance reduction. The two numbers on the right side of this figure denote magnitude and time shift.

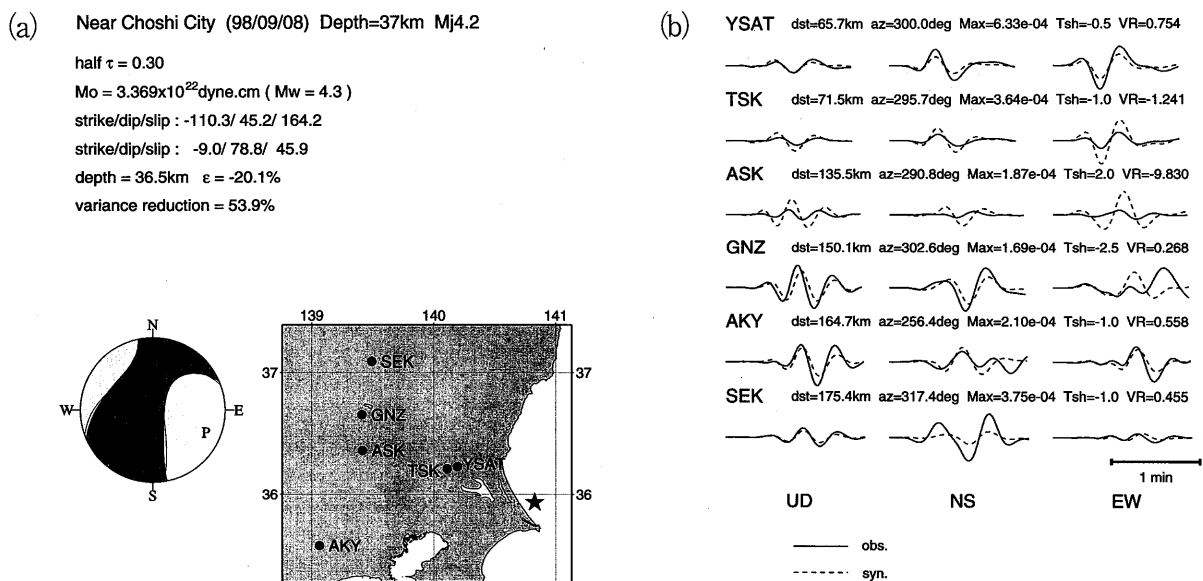


Figure 4.5 Best solution of this analysis. (a) focal mechanism of the solution. (b) the comparison between observed and calculated waveforms. The solid and dashed lines mean observed and calculated waveforms.

図を見てわかるのは1点ごとにメカニズム解を決定したにもかかわらず残差がそれほど減っていない観測点があるということである。つまりその観測点の波形はどのようなモーメントテンソル解を考えても説明がつかない異常な記録ということになる。福山・他(1998)によるとモーメントテンソル解を求めるためには3観測点のデータがあれば十分であると言っている。しかしながら今回用いた広帯域地震計の記録は上にあげたような異常な(モーメントテンソル解では説明がつかない)波形が多々見られる。これは今回波形を使用した観測点のほとんどが短周期地震計用に作られた場所に設置しており、広帯域地震計用に特別に作られたものではないので観測条件があまり良くないということがある。このような異常なデータを除く方法として色々と考えられるが、本解析では1点のインバージョンで残差の減少が少ない観測点を落とすという手法を採用した。しかしながら、これだけではすべての異常なデータを取り除くことは不可能である。そこで5点くらいのデータを用いることにより相対的に異常なデータのウェイトを下げることにした。最終的に求められたメカニズム解及び観測波形と理論波形の比較をFigure 4.5に示す。残差の減少もすべてのデータを使った時は17%であるが、時間をずらして良いと思われるデータだけを使うと54%まで上げることができる。以上のような方法により日本付近で起きた地震の波形解析を行った。最終的にメカニズム解を求めることができたのは45地震である。前述のような基準で切り出しを行った地震の数に比べてメカニズムを決定できた地震の数が少ないのは、設定した切り出し基準が甘かったため、小さい地震についてはSN比が悪く、メカニズムを決められなかったことによる。

Figure 4.6に関東地方で起きた地震について求められたメカニズム解を示す。図をみてわかるように押し引き分布からではメカニズム解を求めるのが困難な海域の地震についても解が求まっている。

現在はまだ解析を始めた段階であり、解の信頼性などの評価は行っていない。今後は順次データを収集していき、解析結果の評価を行いたい。

(4) まとめ

以上述べたように衛星テレメタリングシステムを導入することにより、気象研究所でも準リアルタイムで地震波形解析を行うことが可能になった。今回開発した波形を使ったメカニズム解析手法は今後広帯域基盤観測網が整備された時、業務として導入する際に活用できるであろうし、従来の押し引きでは決定できなかった海域のメカニズム解を求めることが可能となり、広域応力場の推定にも大きな威力を発揮するものと思われる。

(吉田康宏)

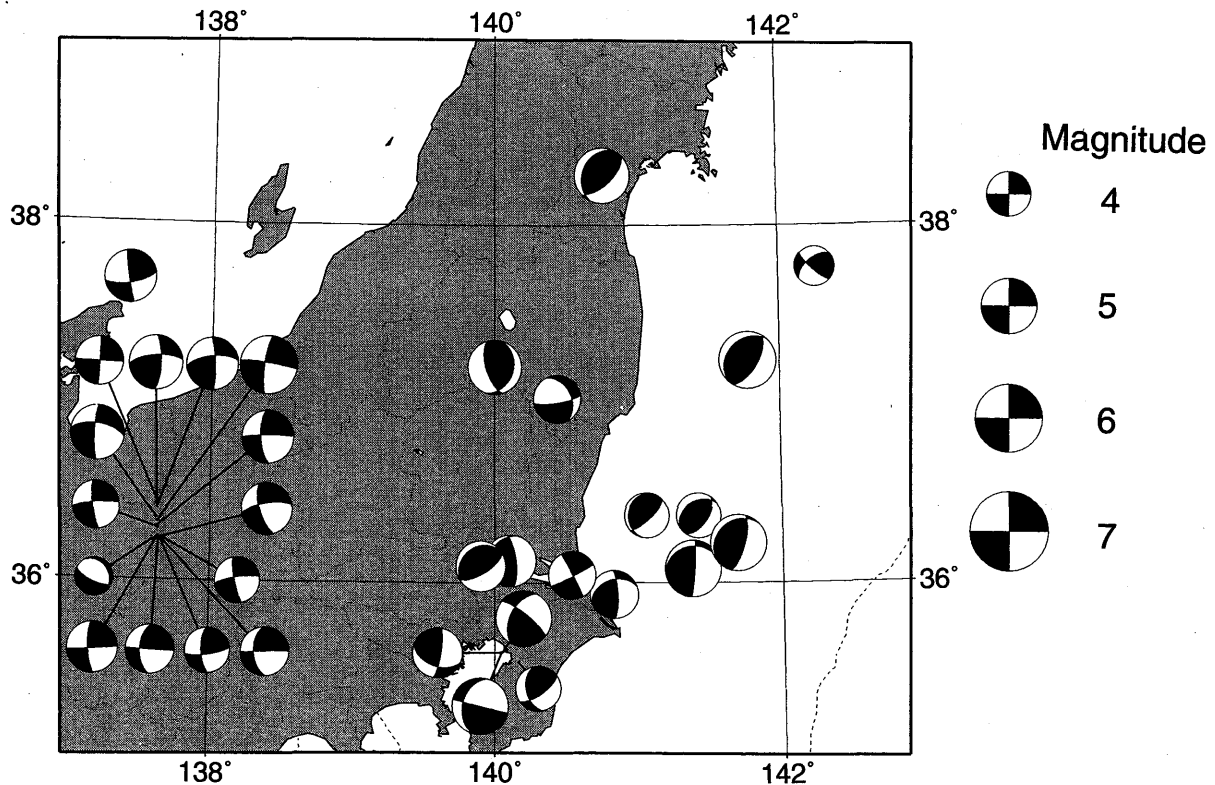


Figure 4.6 Focal mechanisms derived in this study in Kanto district.

参考文献

- Dziewonski, A. M., T.-A. Chou, and J. H. Woodhouse, 1981 : Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, **86**, 2825-2852.
- 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉, 1998 : オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, *地震*, **51**, 149-156.
- 浜田信生, 1984 : 近地地震用走時表の再検討, *気象研究所研究報告*, **35**, 109-167.
- 伊藤 渉, 1997 : 近地地震のCMT解自動決定, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻修士論文.
- Kawakatsu, H., 1989 : Centroid single force inversion of seismic waves generated by landslides, *J. Geophys. Res.*, **94**, 12363-12374.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori, 1991 : Inversion of complex body waves - III, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 2335-2350.
- 衛星通信テレメタリンググループ, 1996 : 衛星通信による地震観測テレメタリングシステムの基本設計, *日本地震学会講演予稿集*, No.2, 22.
- 武尾 実, 1995 : 非弾性減衰を考慮した震源近傍での地震波合成, *気象研究所研究報告*, **36**, 245-257.
- ト部 卓・東田進也, 1992 : win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版), *地震学会講演予稿集*, No.2, 70.

4.2 データベース開発装置

(1) はじめに

本研究を進めるにあたり、地震や地殻変動等の観測データの収集、蓄積、検索および解析を効率良くおこなうために、データベース開発装置が導入された。本装置の基本構成は3台のワークステーション、CD-ROM記録装置および固定ディスク装置からなる (Figure 4.7)。本装置には各種地震波形データ、験測データ、震源情報および数値計算結果等が集積されて解析が行われている。また同時に導入されたデータベース・ソフトウェアSYBASEが各種データのデータベース構築・検索に利用されている。

本装置の導入により、保存期間や収納場所に問題を抱えていた大量の地震波形記録や体積歪計原データを収録していた磁気テープ記録をCD-ROMに整理したため、データ検索の効率化と省スペースが実現された。

(2) データ通信処理装置

本装置は、気象庁本庁および管区気象台に設置されたEPOSおよびETOSのデータを通信により取得し、データを処理するため、また開発した解析・処理プログラム等を還元するために、上記機種と互換性のある NEC EWS4800/320PXが選定された。本装置には、気象庁が決定した震源情報やメカニズム解のみならず、東大地震研究所, Harvard大学, 防災科学技術研究所, ISC (International Seismic-data Center), USGS (United State Geological Survey) 等の情報も収録され、新情報の収拾とともに更新されている。上記データの検索・表示にはHYPDSP (横山, 1997) がインストールされ、利用されている。

(3) データ蓄積・検索処理・固定ディスク装置

本装置は、ワークステーションSUN Ultra Enterprise 2とSCSI接続された25.2GB固定ディスクおよびPIONEER CD-ROM CHANGER / CD-Writerから構成される。本報告2.3節にあるように、地震波形からモーメントを推定する場合にあらかじめ与えられた成層構造の各震央距離と震源の深さごとのグリッド点について数値計算で関数を求めて

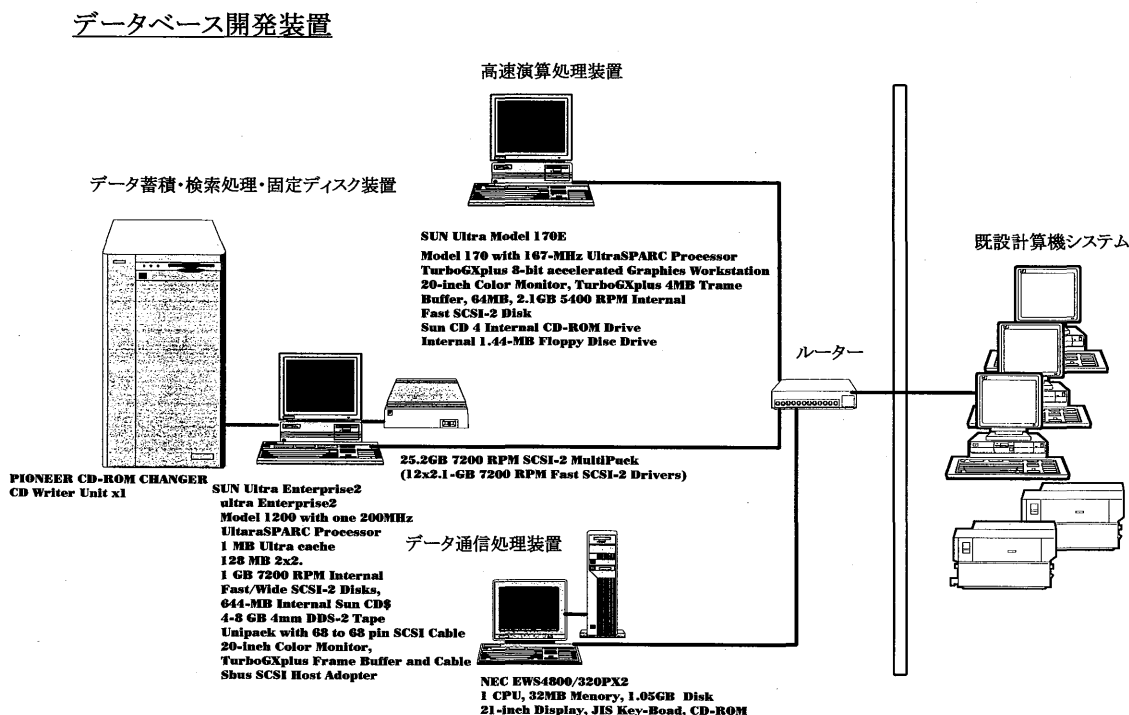


Figure 4.7 Configuration of data-base development system. The system consists of three workstations for data communication, high-speed data processing and high-speed data retrieval, and has a CD-ROM changer/writer and a 25GB external hard disk.

において、観測波形を最小二乗法によって合わせこんで地震モーメントや震源パラメータを求める手法は、膨大な量の計算値を収録するための大容量ディスク装置を備え、それらを高速検索できる本装置の整備があつて成し得るものである。また、5.1節の報告にあるように、保存可能期間に限界がある磁気テープに収録された東海・南関東の体積歪計原データをCD-ROMに媒体変換し、対応表を作成したことはデータ保存の半無限化と保存場所の省スペースを実現させた。これは、500枚のCDを高速検索・処理可能なCD-ROM CHANGER / CD-Writerの整備によって成し得たものである。

大量の磁気テープデータのCD-ROMへの媒体変換(150 MBの磁気テープ4本が640 MBのCD1枚に収録できる)には体積歪計データのみならず、L/ADESSにより伝送・収録された地震波形データ、EPOSで収録された同データについても行われた。さらには、ETOSによりMOに収録された地震波形データについても作業が進められている。

(4) 高速演算処理装置

本装置は、ワークステーションSUN Ultra Model 170Eで、SAC (Seismic Analysis Code Manual, 1996), PITSA (Scherbaum and Johnson, 1993) 等、地震波形データ解析用アプリケーション・プログラムがインストールされ、各種観測データの高速処理に供されている。

(5) SYBASE

計算機内部のデータはファイルとして生成され、各種のデータファイルはテーブルの形で表される。これら複数のテーブルに対応関係を付けることによって、それぞれのデータ間に関連がつけられる。こうした構造をもつデータベースは関係データベース (Relational Database) とよばれる。

SYBASEは関係データベースの1つで、その検索速度、ネットワーク環境での利便性、セキュリティ管理等で高度な機能を持っているため、本装置に採用した。

本装置の地震関連のデータベースは、

基本テーブル

- 1 jma : 気象庁震源データ
- 2 utsu : 宇津震源カタログ (宇津, 1990)
- 3 usami : 日本被害地震総覧 (宇佐美, 1978) の震源リスト
- 4 zencho : 地震前兆現象 (気象研究所, 1990)
- 5 watanabe : 被害津波 (渡辺, 1985)
- 6 kazan : 第4紀火山 (一色・他, 1968 ; 大谷・他, 1993 ; 小野・他, 1981 ; 近堂・他, 1989 ; 清野 (私信))
- 7 rel : 地震間の関連度を記述したデータ (干場・他, 1993)
- 8 doc : 日本被害地震総覧, 日本被害津波総覧の中の記事,
- 9 fig : 日本被害地震総覧, 日本被害津波総覧の中の図表

関係テーブル (基本テーブル間の対応付けを行うテーブル)

- id_cd : 地震id と記事・図表の対応をいれたもの

で構成され、主として地震活動の統計的解析に活用されている。

(6) おわりに

本装置およびそれによって生成されたデータベースが本研究の推進のツールとして活用されたことを報告するものである。

(神定健二)

参考文献

- 千場充之・清野政明・岡田正実・伊藤秀美, 1993: 相互関連度付き震源リストの制作とその応用, 気象研究所研究報告, **44**, 83-90.
- 一色直記・松井和典・小野晃司, 1968: 火山文献集, 地質調査所, 78 pp.
- 気象研究所, 1990: 地震前兆現象のデータベース, 気象研究所技術報告, **26**, 329 pp.
- 近堂祐弘・小柳敏郎・河内晋平・中川光弘・鈴木貞臣・長谷川栄・山之内統・川辺百樹・岸功志・岡久保幸, 1989: 東大雪山系丸山火山の最新の活動, 火山学会予稿集 No.2, 160.
- 小野晃司・曾屋龍典・三村弘二, 1981: 日本の火山(地質編集図 第2版), 地質調査所.
- 大谷知生・関口辰夫・原口和政, 1993: 火山地形データベース作成について, 火山学会予稿集 No.2, 30.
- Seismic Analysis Code Manual, 1996: <http://www-ep.es.llnl.gov/tvp/sac.htm>
- Scherbaum, F. and J. Johnson, 1993: PITSA, Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis, IASPEI Software Library, Vol.5, 269 pp.
- 宇佐美龍夫, 1978: 日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 435 pp.
- 宇津徳治, 1990: 世界の被害地震の表, 243 pp.
- 渡辺偉夫, 1985: 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 238 pp.
- 横山博文, 1997: Xウィンドウシステムを用いた地震活動解析プログラム, 験震時報, **60**, 37-51.