

DAT による地震観測と震源の深さ分布の検定

京大防災研技術室 平野憲雄、和田博夫
京大防災研地震予知研究センター 伊藤 潔、竹内文朗
福井工業高等専門学校 岡本拓夫

始めに

福井地震(1948)の余震分布の並びは 1976 年からの北陸観測所における定常微小地震観測の結果から福井地震断層に沿うだけでなく、図 1 のように北への延長線で日本海沖合い約 20km にまで至っていることが分かった。深さ分布をみると陸側から日本海に向かって 5km ~ 20km へと連続して深くなる傾向がある。この傾向は全国的にみてもめずらしいことである。

一般に地震観測網の密度が高いほど震源の精度は良い。理想的には震源の回りに、即ち数十 km の深さで立体的に震源を取り囲む観測が最高の精度で結果を出せるが、現実的には陸側のそれも地表での設置が通常選ばれることになる。さらに言わせてもらうならば、人工ノイズを避けるために都市や町から離れた場所での観測に限られてしまい、結局観測点を理想の配置にすることが困難な場合が多い。観測網の外に決まる震源の位置は、P 波到着時刻で震源の方向を決め、S 波到着時刻で距離の決定をするのが効率的である。地震波は地中を伝わるのだがその媒質で遅れたり屈折したりして、また長い距離を

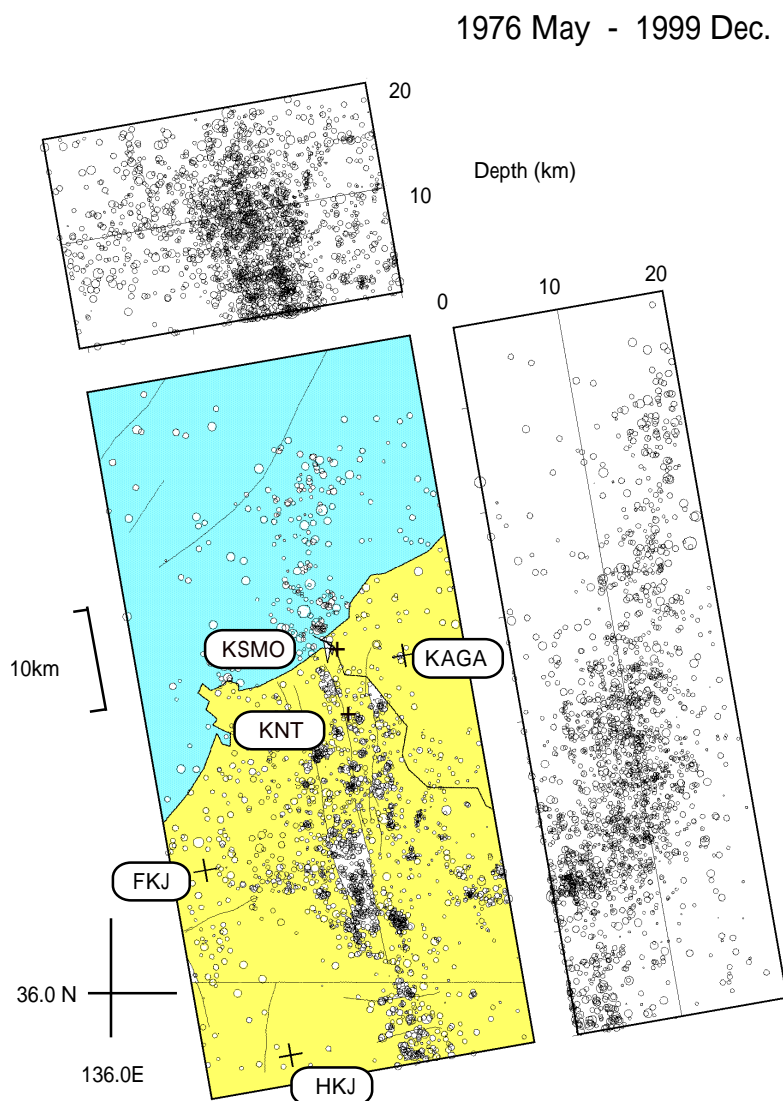


図 1 定常観測網による震源分布

伝わる程高周波成分が減衰し、地震波発生直後の本来の味を変えてしまって正確な伝達時間が分からなくなる。どちらにしても、観測網から離れば離れる程精度は極端に悪くなる。従って、震源位置の精度をあげるには近くでの観測が常套手段で、特に深さの精度を上げるには震源の真上での観測が理想である。今回の深さ分布を議論するには、P 波や S 波の速度構造を明確してからが本筋であるものの、定常の地震観測網は陸側にしかなく、日本海における観測点がないので詳細な議論ができず、余震分布の並びの真上での臨時観測が望まれていた（1998、平野）。

海側の地震活動を捕らえるには海底地震計での観測が必須であるが、この地域の地震活動は 4 ~ 5 個 / 年と少なく 1 回の観測機器の投入期間（バッテリーの容量で約 2 ヶ月間）では本命の地震を収録できない恐れがある。また、船のチャーターなど観測を維持する予算も大きく効率も非常に悪い。今回は海側での観測はあきらめ、海岸に近い陸上で手軽な臨時観測装置を利用した観測と解析までの報告をする。

DAT 地震波形連続収録装置

写真 1 はグローバテック社製でバッテリー駆動方式の DAT(Digital Audio Tape)による臨時観測波形収録装置（1999 羽田、他）の一式である。

この装置は地震計 3 成分とアンテナと本体に別れており、GPS を利用した時計データと



地震計からの信号を増幅し AD 変換（16bits）したデータと、内部時計のデータを市販の DAT に収録する方式である。最大 3 成分 200Hz のサンプリングデータがテープに最長 1 ヶ月間記録され、テープ回収後再生器とワークステーションで解析するようになっている。また GPS 回路は 6 時間ごとに電源を投入する方法で電力消費量を抑えている。初期の製

品は単1のアルカリ乾電池 40 本で駆動するものであり、その後改良型の 12V バッテリーで駆動するものが出来た。アルカリ乾電池 40 本は約 8000 円もするから長期の観測では予算的に苦しい。我々は改良形のバッテリー駆動のタイプを利用し、充電したものと交換しながら長期連続観測を続けている。

観測場所の選定

地震計設置の場所探しを著者らだけでとりあえずした。理想的な設置環境条件は、転石や浮き石でなく地中深くまで根の生えていると思われる岩上であり、道路から 300m、鉄道から 1km 以上離れていることである。しかし、この地域は砂山ばかりの地形で車道からの探索では岩場を見つけることができず、やはり地元の古老に尋ねる方法を選んだ。今回は共著者の岡本の同僚である太田先生（地元の名士）に教えられた昔の石切場跡 = 福井県金津町（KNT）のトンネル入り口に地震計（L22D3 成分）と DAT 収録装置を設置した。1998 年の夏に観測を開始したが電源回路の初期故障が続き解析に使えるのは 1999 年からである。同じ時期に約 5 km 東の権世市野々（ここは適当な岩が民家の裏にすぐ見つかった）にパソコンを利用した観測装置も設置したがトリガーレベルの設定がうまく行かず 1999 年 12 月で観測を止めた。



写真 2 鹿島の森の民家裏庭

1 年半の観測からいくつかの観測点真下の地震を観測できたが、KNT の場所は海岸から陸側へ 7 km 離れているため、海側に発生する震源の深さの精度を上げるには不十分で

ある。設置する場所の条件が悪くても、つまり岩でなくても海岸にもっと近い新たな観測点が必要であると判断して、新たに追加する観測点の場所探しをした。が、どこを見ても砂地である。やはり前述の条件でなければの思いがつのり、地元の古老が知っているかもと一縷の望みで尋ねると、唯一の岩が露出している石川県加賀市鹿島の森を紹介していただいた。しかしここは文化財指定なので穴を掘るとか岩を削るとかは許されない場所であ



写真3 住宅の基礎に設置した地震計

る。結局近くの民家の裏で海拔ゼロメートルの所（写真2は DAT の入っている収納ボックスと栈橋に取り付けた GPS アンテナ向こうに見えるのは内海である。）センサーは写真3で家のコンクリート製の土台に石膏で固定し2000年8月26日から観測を KSMO の名前で開始した。

一般に海岸に近い地震観測は波の影響で地動ノイズが大きくなり倍率を上げられない。特に冬の日本海は荒れるので小さな地震を捕らえにくい欠点がある。従って、砂地に地震計を設置すればノイズが大きく邪魔をして使えないデータになるのは確実である。岩上であるから少しはノイズは軽減されるが、静かななぎの日もあることを期待してデータの増えるのを待っている。

再生ソフトのインストール

DAT 装置は地震計の信号と内部時計のデータと6時間ごとの GPS の時刻データが圧縮された状態で約1ヶ月間収録できるものである。

回収した DAT テープは次の4段階で作業をする。

- 1) 圧縮収録されたデータをワークステーションにダンプする。

- 2) 圧縮ファイルを解凍すると連続の波形データファイル(2GB くらい)になり、
- 3) このファイルからルーチン観測で求められた地震と対応する部分を切り出して
- 4) 定常観測で得られていた波形ファイルと合体させる。

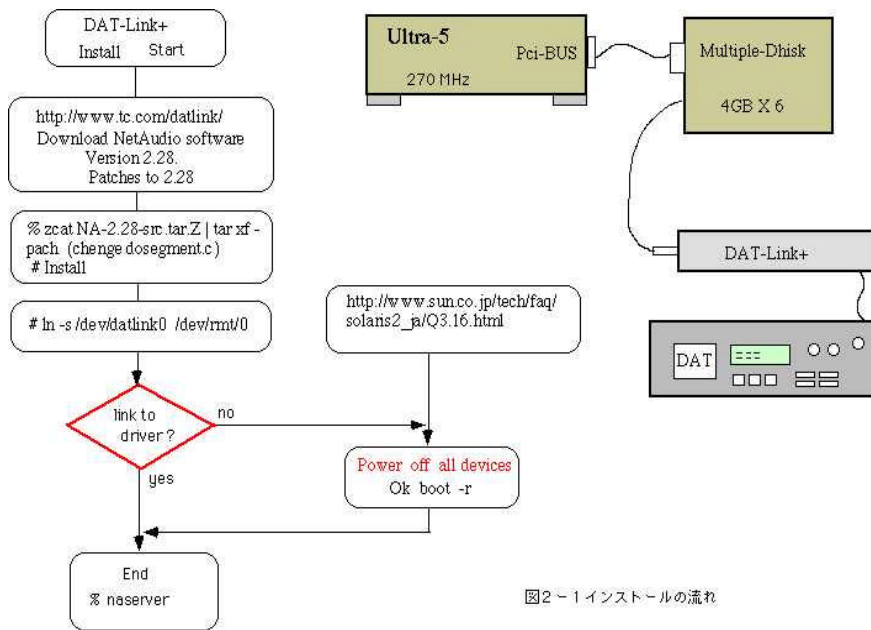
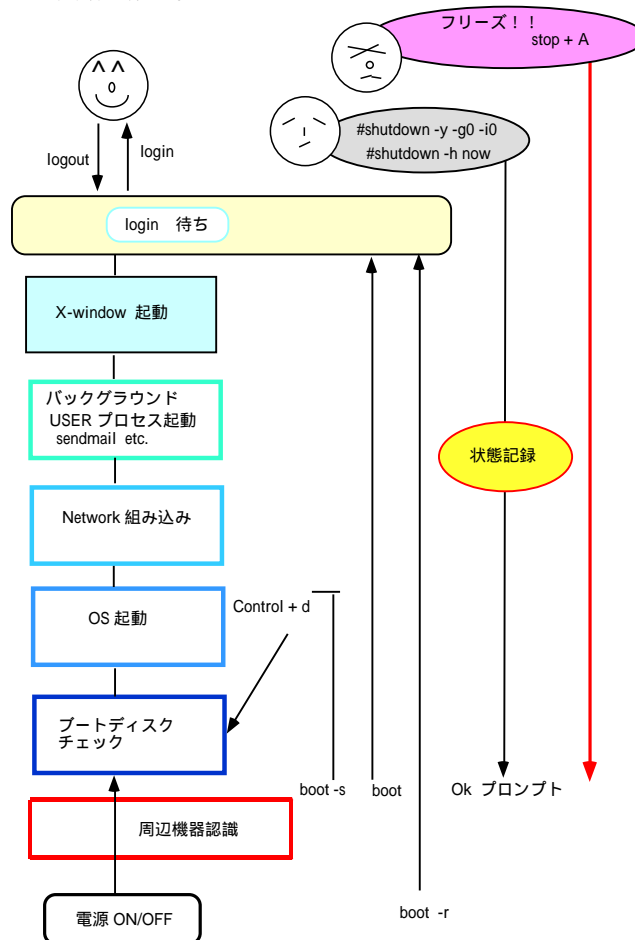


図2-1 インストールの流れ

最初は、古いマシン(Sun Spark Station-20) で市販のソフトをインストールしたのだが、

図2-2 システムブートのいろいろ



テープ 1 巻のハードディスクへのダンプに 3 時間、ファイル解凍にまた 3 時間もかかり、波形データ切り出しの時間も 2 時間と長い時間をかけていた。

そこで容量アップと処理速度アップのため高速マシン (Ultra-5, 270MHz OS:Solaris2.6) に 23GB のマルチハードディスクと DAT デッキ及びインターフェース (DAT Link) をつなぎ構築した。図 2-1 に機器構成とインストールの流れを示す。解析の装置一式を次ぎの写真に示す。黒いテープデッキの上に Dat Link のインターフェース (現在は製造されていない) がある。



Solaris2.6 は 1 つのパーティションに 23GB を確保できないので別売の DiskSuite ソフトを使って 20GB の作業領域にした。DAT Link はテープ装置と同じソフトドライバを使うようになっており、SCSI 番号を 5 にして OS を起動するが認識してくれず、SCSI ボードの交換やディスクの調査をしても原因は不明で困ってしまった。これは UNIX でいう target 番号 (8 以上の数がある) と SCSI 番号が部分的に対応しており、SCSI の番号がぶつかった状態になりハードディスクの認識に手間取っていたのであった。しかし、まだ認識しないのである。いつも電源を切らない習慣がついていたため図 2-2 のように OK プロンプトが出た状態でリブートしたためハードの初期化ができないのである。結局、電源を全て切ってから周辺装置のリセットを含むコマンド (boot -r) で正常に認識した。

テープデッキで再生したデータをハードディスクへダンプするソフトは Dat Link 付属のソフトをインストールしたがなぜか動かず、Web サイトからソースファイルを入手してコンパイルしたものを利用した。高速のマシンにしてもテープデッキでの再生時間は同

じだが、ハードディスクに入ったファイルの解凍の時間が 30 分、切り出しの時間も 30 分と大きく短縮できた。インストールの手順と機器の構成を図 2-1 に示す。

新しい器機を起動する場合に、同じような機種だからと説明書を読まない姿勢がつまり原因だと反省した。また、リセット操作も電源が入ったままの状態では完全なものではなく、一旦切ってからの操作が理想の再起動であることも学んだ。

再生

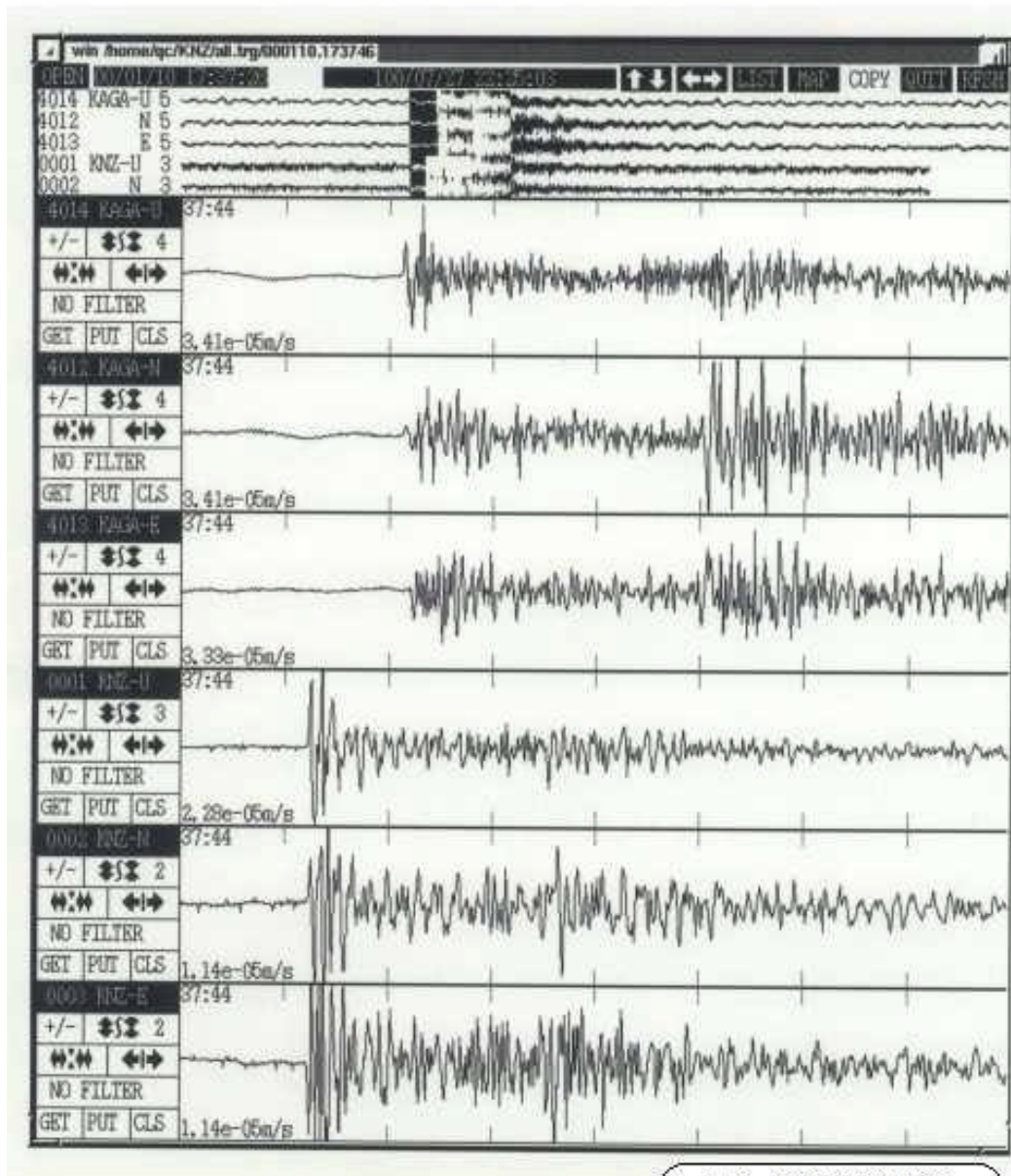


図3 観測地震波形例

再生手順は、1ヶ月ごとに回収したテープを再生デッキにかけ、新しい作業ディレクトリを作り、圧縮データをダンプする。そして、解答ソフトは地震研究所の松原誠氏の開発や北海道大学の勝俣啓氏の改良したものである rubbish で 2 GB サイズの連続波形データファイルを作る。この連続ファイルから地震発生の時刻に合して切り出すのだが、読み

取りから震源決定までの win システム（地震研ホームページ）に合すために、win フォーマットのファイルにする。切り出す際に GPS で得られた6時間ごとの時刻データと内蔵時計との差から正しい時刻に直して、最初の波形の時刻をファイル名としている。また、稀にはあるが、GPS のデータに異常値がある場合はそのデータを除去して補正をしなければならない。確認は GPS 時刻と内蔵時計データ (station.dif ファイル) のグラフを gnuplot ソフトを使って描きほぼ直線になれば合格とする。そして、定常観測で得られた地震の波形ファイルに win の持っている wadd コマンドで合体させて他の観測点に追加させた形にして、同じテーブルで読み取りを行う方法である。合体させた波形画面例を図3に示す。この画面はイベントファイルの最初の1分間の波形を表示した状態で起動し、任

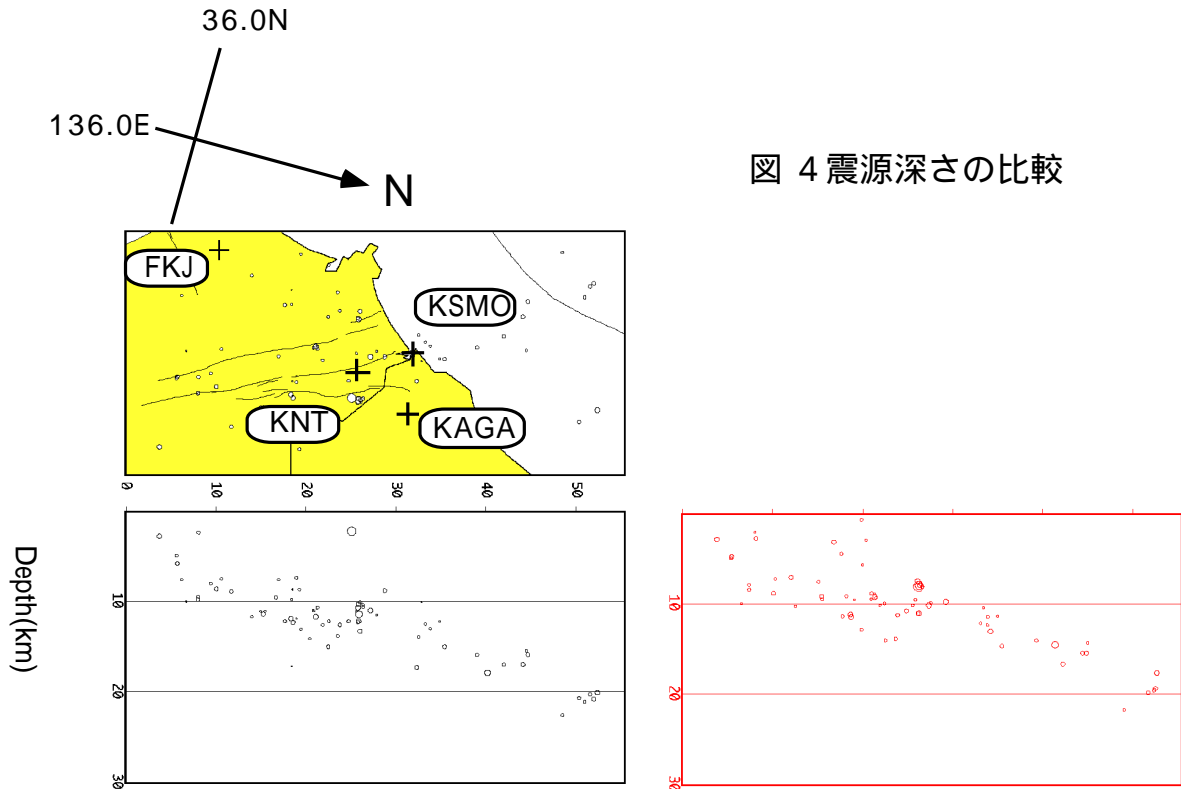


図 4 震源深さの比較

意の成分を選んで拡大表示させ波形の到着時刻などを読み取るようになっている。ここでは、加賀（KAGA）の上下動成分、南北動成分、東西動成分に続き、金津（KNT）の上下動成分、南北動成分、東西動成分の波形を拡大したもので S-P タイムが 2.5~3.0 秒の地震である。

考察

波形読み取りは P 波、S 波、などの到着時刻（カーソルで波形の位置をクリックするだけでよい）や最大振幅（該当する位置をクリックする）などを読み取る。3 点の P と 1 点の S 波時刻データがあれば震源計算ができ、結果は地図上に黒丸で印された画面になる。今回は、一つの地震について臨時観測点を入れた結果と入れない結果とをデータとして残す作業をした。

図4は1999年9月から2000年10月までの73個の震源分布である。震源を囲む定常観測網での震央分布と深さ分布(図下左)と気象庁のKAGA観測点及びKNTを入れた場合の深さ分布(図右)とを比較したものである。水平方向の誤差は一般に深さほど大きな誤差はなく、この場合も1km以内と小さい。KNTやKAGAを入れた深さは定常観測網の場合より平均で約2kmと浅く決まった。また海へ向かって深くなる傾斜分布の比較してみた結果を図5に示す。これは、臨時観測点を入れた場合(白丸)と入れない場合(黒丸)をそれぞれプロットしそれぞれの分布に最小2乗法で直線を引いてみたものである。

この結果から、臨時観測点を採用をしても日本海へ向かって深くなる傾向は15度から16度の平均傾斜と変わらないが、臨時観測点を採用すると全体に浅く求まっていることが分かる。この傾向はKSMOのデータをいれても変わらなかった。

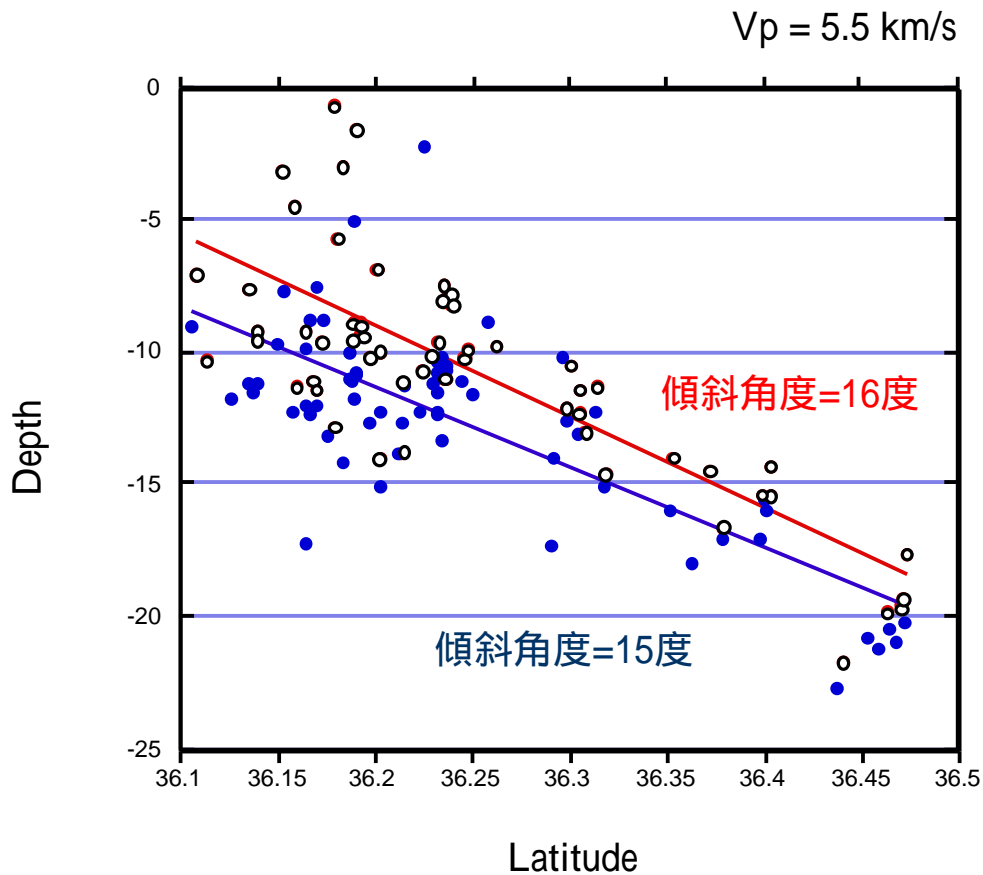


図5 深さ分布の直線近似

震源決定に使ったP波の速度構造は図6 Case1で水平成層構造を仮定している。地表に近い構造が遅いと見かけの位置が深く見える。この地表下4kmまでの構造を2.0、3.0、5.9kmのそれぞれの場合で計算したが、2.0、3.0の場合は地表下4kmのところ収束してしまい全体に遅い速度構造をしているようではなさそうである。3.0kmの結果例を図7に示し、また、 $V_p=5.9\text{km}$ の結果を図8に示す。

Layered structures of P-wave velocity

Hokuriku

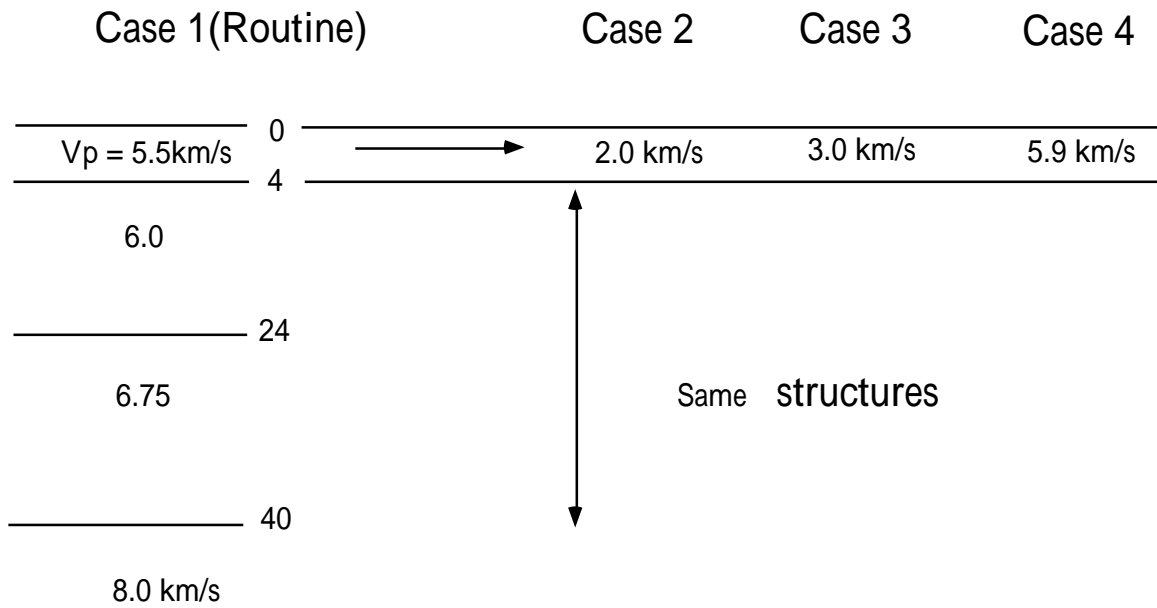
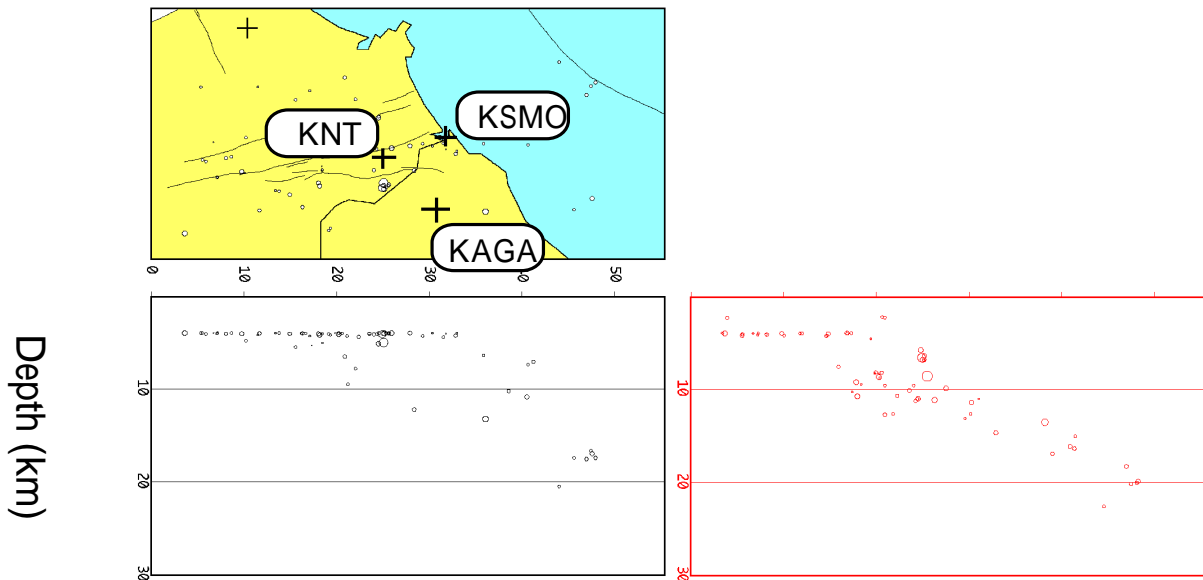


図6 P波速度構造

以上のことから、海での深さの精度はまだ不十分であるものの、陸側での深さの精度

図7 $V_p = 3.0\text{km/s}$ の場合の深さ分布



ルーチン

ルーチン + KAGA + KNT

は高く、海岸に向かっての深さ分布の傾斜は正しいであろう。そして、この深くなる傾向は海側でも続くものとみなしてもよいだろう。まだ海の震源データが不足であるので、も

うしばらく観測を続け、海側での傾斜傾向をさらに調査するつもりである。

図8 $V_p = 5.9\text{km/s}$ の場合の深さ分布

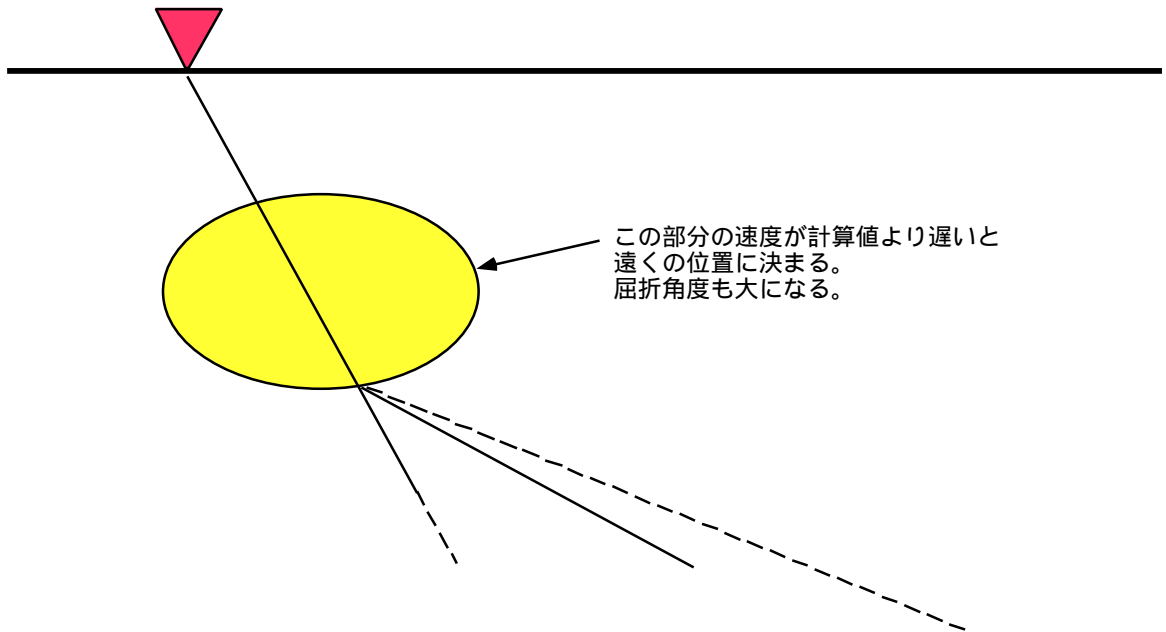
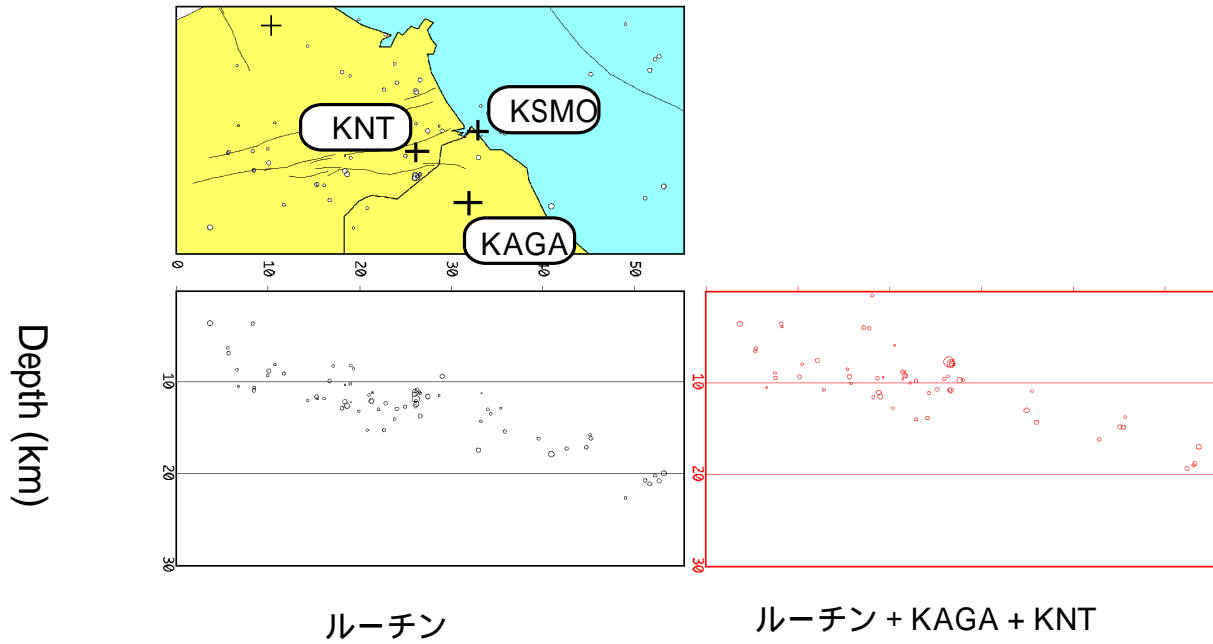


図9 みかけの震源位置

一方、手取ダム工事の発破を利用した地下構造探査ではこの近くは低速度であり 0.2 秒の下駄を履かせたデータにすると水平になるとの指摘もある (1980, K. WATANABE, etc)。図9のように地震波の通過途中にクラックなどの多い構造やマグマなど液体に近

い構造があると伝播速度が遅れたり、大きく屈折してみかけより深くまた遠くの位置に決まるものである。このように特定の場所のみに速度の違う構造がある場合はステーションコレクションを与えて計算し、震源精度を上げる方法がある。

ステーションコレクションを KNY, KSMO, KAGA などに与えてみて分布の違いを検討することを今後の課題としていくつもりである。

謝辞

微小地震観測の最適の場所探しの情報を提供していただいた福井高専の太田泰雄博士と、DAT 地震観測装置の設置場所提供に心良く承諾していただいた KNT (金津) の地主である近藤義勝氏及び KSMO (鹿島の森) の地主である南 正三氏に深く感謝します。

参考文献

平野憲雄、地震データの高度有効利用のための地震観測・解析システムの構築，1998，博士論文，33-36．

羽田敏夫，酒井要，小林勝，橋本信一，井上義弘，三浦禮子，田上貴代子，松原誠，1999，デジタルオーディオ記録器 (DAT レコーダー) を用いた地震観測，1999 東京大学地震研究所技術報告 39-64．

地震研ホームページ：<http://eoc.eri.u-tokyo.ac.jp/WIN/index.html>

K. Watanabe, H. Fukui, Upper Crustal Structure in the Northwestern Chubu District, Japan as Derived from the Tedoru-River Quarry Blasts, 1980, Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Vol.30, Part 2, No. 270., 31-52.

使用ソフト

震源検測定：win, wadd

震源分布：HyperDPRImap3.9

再生：naserver, narecord

解凍・切り出し：rubbish, cutout

作図：Canvas 3.5

グラフ：KaleidaGraph 3.0、Gnuplot、

写真：IX Scan ver.2.6, PowerShot 600

文章：Microsoft Word98