

次世代型地震観測システムの開発と運用 — 満点(万点)を目指して —

飯尾能久

要 旨

次世代型地震観測システム(満点システム)は、京都大学防災研究所と株式会社近計システムが中心となって共同で開発したオフライン地震観測装置である。これまでの実績によると、単一電池32個で約8ヶ月間、250Hzサンプリングで連続記録を取ることが出来る。この例では記録媒体は一杯にはなっておらず、スペック上は約9ヶ月連続記録が可能である。単一電池32個を含めても6kg程度と小型・軽量化されており、設置時間も最短で5分程度となっている。本システムはこれまでの装置とは別次元のものであり、地震・火山関係の観測のみならず、地すべり・地盤・構造物における振動測定など、様々なフィールド研究における有力なツールとなるものと期待される。

キーワード: 満点システム, 稠密多点観測, 地震計, 省電力, 小型・軽量

1. はじめに

計測データに基づいてものごとの本質を明らかにしようとする、あらゆる学問分野において、計測データの量と質は、結果の成否を左右する最も重要な要因である。ところが、実験室外でデータを取る分野においては、計測システムの様々な制約により、これまで十分なデータを得ることが出来なかった。そのため、例えば、医学分野において、CT(Computerized Tomography)による「断層」写真はガンの早期発見などに大活躍しているけれども、地震学におけるSeismic Tomographyは、現在のところ、地震断層の本質を解明するほどの精度や分解能を持っていない。実験室外において、多点・高精度・容易にデータを計測できるシステムを開発することが、あらゆるフィールド科学の進展において本質的に重要であると考えられる。そして、近年のテクノロジーの進歩はそれを十分に可能にすると期待される。

現在の地震研究の進捗状況を概観すると、災害を契機にというのは非常に残念なことであるが、兵庫県南部地震後の進展には目を見張るものがある。しかしながら、今のところまだ、世の中の期待に答えるところまでは達していないと思われる。それは、上記の事情がその原因のひとつであると考えられる。

地震は、断層に加わる応力が断層の強度を越えたときに発生する。したがって、地下深くの応力状態

を知ることは、地震の発生予測にとって最も基本的なことである。しかしながら、現在のところ、地震が発生する地下数kmより深いところでの応力状態はほとんど分かっていない。定常的な観測網を用いた最新の解析結果においても、せいぜい数十km程度の領域内の平均的な応力状態が推定されているに過ぎない。

Fig.1に示すように、内陸地震の断層近傍には局所的な応力場の乱れが発生している可能性が高いことが、最近の研究により分かってきた(例えば、飯尾, 2009a ; 2009b ; 2010a ; 2010b ; 2010c)。既存の観測網では、このような局所的な応力場の乱れをとらえることは不可能である。これまでに無い高密度の稠密地震観測により、kmスケールの分解能で応力場を把握することにより、内陸地震の発生予測を進めることができると考えられる。

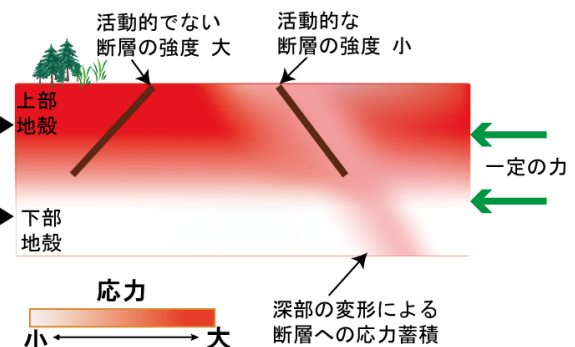


Fig.1 Generating process of intraplate earthquakes

そこで、京都大学防災研究所と株式会社近計システムが中心となって、多点・高精度・容易に地震データを計測できるシステムを開発した。このシステムは、1,000~10,000カ所の地震観測点を、数百m~1km程度の間隔で、10km~100km四方の領域に展開し、長期間にわたってデータを記録することを可能とするものである。これは、数十カ所でも稠密観測と称される現在のシステムとは別次元のものであり、地震・火山などの研究を飛躍的に進歩させる切り札となると期待される。現時点では世界最高のオフライン型地震観測装置であり、地震観測の理想像に近く、万点規模の地震観測も可能であることから、「満点システム」と呼ばれている。本小文では、その開発と運用に関するこれまでの歩みについて簡単に紹介する。なお、本システムを用いた観測例については、近畿地方中北部における稠密地震観測については、三浦ら(2010)により、詳細な報告が行われている。観測・データ処理システムについても簡単に紹介されているのでそちらを参照されたい。

2. システム開発

2.1 これまでの稠密地震観測

これまで、地震観測、特に内陸地震関連の観測においては、電源や通信、記憶容量等の制約により、十分な数の観測点において、数ヶ月以上の長期間にわたってデータを記録することが出来なかった。最も高密度の観測が行われた2004年新潟県中越地震の余震観測においても、全国の大学・研究機関等の観測点の総数は百数十点、観測点間隔は最も短いところで1.2kmであるが、観測期間は数ヶ月程度である(Kato et al., 2009)。

満点システムの開発後であるが、ひずみ集中帯機動的な地震観測網(防災科学技術研究所, 2010)では、新潟県を中心に200km×100km程度の領域に300点近い地震観測点が設置された。これは、これまで日本で行われた稠密地震観測では最大のものであり、しかもこれまでと違って5年程度の長期間にわたって連続観測が行われる予定である。満点システムとの良い比較となるため、この観測に用いられたシステムと対比させながら、既存の装置の問題点を述べることにする。

2.2 既存システムの問題点

これまで多点での地震観測の障害となっていたのは、機器の電源とデータ伝送である。商用電源を用いる限り、設置場所に大きな制約を受ける。しかも、商用電源のあるような場所は一般的にはノイズレベルが高くデータの質は良くない。地震観測装置は、

電池などDC電源で動作することが重要である。データ伝送は、伝送装置や伝送路および余分な電源が必要となり、システムの巨大化の原因となる。巨大なシステムを多点に設置することは困難である。データを伝送して集中記録するのではなく、個々の観測点における個別記録方式(オフライン)を取ることが必要である。個別記録方式の採用は、自然地震観測に限らず、石油資源等の大規模な探査においても近年始まりつつある。GPSによる高精度時計が安価に手にはいるようになったことが大きい。

2004年新潟県中越地震の余震観測等で主に用いられた装置は、DC電源で動作する個別記録方式のものだが、記憶容量および消費電力の制約により、3ヶ月程度の観測が精一杯であった。日本海沿いなどの豪雪地帯では、冬季の半年程度はメンテナンスに行くことが出来ない場合があり、既存のシステムでは、通年の連続観測することは極めて困難であった。

ひずみ集中帯機動的な地震観測網で用いられたデータロガー(計測技研製HKS-9550)は、消費電流が0.03Aという低消費型であり、105Ahの大容量バッテリーと併せて使用することにより、最長5ヶ月程度の連続観測が可能である(防災科学技術研究所, 2009; 2010)。この装置は従来のものに比べて記憶容量も大きく、16GBのCFカードを用いると、100Hzサンプリングの場合、記録時間は7ヶ月弱となる。105Ahの大容量バッテリーを用いると、計算上は4.7ヶ月間連続して観測可能であるが、容量の全てを使い切るとは難しいので、4ヶ月程度が現実的な交換サイクルであると思われる。したがって、この装置では、年に3回のバッテリー交換が必要であり、積雪期に1度行わざるを得ない。実際に、ひずみ集中帯機動的な地震観測網では、2~3月にもバッテリー交換を行っており、一部の観測点では除雪を行う必要があったということである(防災科学技術研究所, 2009)。豪雪地にもかかわらず、2~3月に一部しか除雪が必要なかったということは、奇異に感じられるが、山中の観測点が少ないことを反映しているのかもしれない。

ひずみ集中帯機動的な地震観測網で用いられた地震計は、2HzのChina Geo Equipment Cooperation製CDJ-S2C-2である。重量は約2kgである。Hinetとは違って2Hzを選定したのは、1Hzでは重量が大きくなり機動性に欠けるということであるが(防災科学技術研究所, 2009)、上記のようにデータロガーの電源に105Ahの大容量バッテリー(重量22.3kg)を用いており、システム全体の整合性が必ずしも取れていないように見える。この地震計はそのままでは防水に問題があり、浸水した機体があったようで、追加の防水対策を取っているということである(防災科学技術研究所, 2010)。

2.3 満点システムの開発

開発の第1のポイントは、機器の低消費電力化、大きな記憶容量と時刻の同期性の確保である。この点に関して装置に必要とされるスペックは、アクセスが極めて困難となる積雪期を乗り切るため、6ヶ月以上メンテナンス無しで動作可能と言うことである。通常は、低消費電力化すると、時刻精度が問題となる可能性があるが、その両立が大きな課題であった。

低消費電力記録装置（近計システム社製EDR-X7000）は、消費電流が0.007A以下という驚異的な低消費電力を達成している(三浦ら, 2010)。これは、6ヶ月以上動作可能という点を最重要視してシステム全体を設計したことによる。

通常のデータロガーで用いられるデルタ-シグマ型のAD変換器は消費電力が大きく、また高サンプリングにすると、平均処理によるノイズ低減が効かないためダイナミックレンジが小さくなるという欠点がある。±5Vの入力レンジだと、24bitADの最小分解能に対応する電圧は $0.6\mu\text{V}$ である。地震計の感度は通常は $1\sim 2\text{V}/(\text{cm}/\text{s})$ 程度であるので、信号を増幅しない場合は、最小分解能は、地動に換算すると、 $0.3\sim 0.6\times 10^{-8}\text{m}/\text{s}$ という非常に小さな振幅に対応する。実際には、100Hzのサンプリングで用いると、20bit程度の実効分解能となるため、最小分解能は地動にして $4.8\sim 9.6\times 10^{-8}\text{m}/\text{s}$ という振幅に対応する。

このように、100Hz程度のサンプリングでは、デルタ-シグマ型のAD変換器は広いダイナミックレンジと高分解能を持つが、 $4.8\sim 9.6\times 10^{-8}\text{m}/\text{s}$ という振幅は、地表地震観測では比較的良い点のノイズレベルに相当する。つまり、デルタ-シグマ型のAD変換器は、100Hzで使う場合でも、±5Vの入力レンジで、

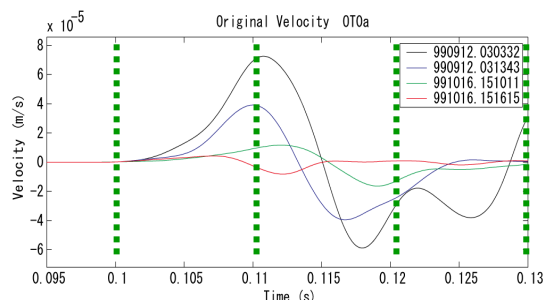


Fig.2 High sampling waveforms of microearthquake.

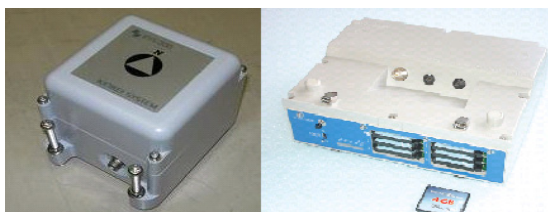


Photo.1 KVS-300 (left), and EDR-X7000

振り切れる寸前の大きな振幅を持つ地震動が入射した場合にのみ、比較的良好な観測点でようやくその能力を発揮出来るということである。ノイズレベルの大きな点やより小さな入力レンジ(信号を増幅する場合)では、その能力は十分に生かされないのである。そして、稠密地震観測の場合は観測点間隔が狭いために時間分解能を上げる必要があるため、サンプリング周波数を上げる必要があり、デルタ-シグマ型の特長を発揮するのはより難しくなる。

EDR-X7000は、最大で1kHzのサンプリングを設定可能である。250Hzサンプリングの場合は、4GBのCFカード6枚を装着すると、約9ヶ月の連続観測が可能である。

Fig.2に長野県西部地域で記録されたM0.5~2.0の地震波形を示した。これは別の装置(EDR6600)により10kHzのサンプリング周波数で記録されたものであるが、100Hzサンプリングの場合は、緑の点線部分のデータしか記録されず、M2.0でも波形の山や谷が分かる程度に過ぎない。従来は、伝送容量や記録容量の問題でサンプリング周波数をできるだけ低くせざるを得なかったのだが、技術が飛躍的に進歩した現在でも、そのスペックを引きずっているのは問題がある。つまり、データを正確に記録するという点において、ダイナミックレンジや分解能とサンプリング周波数のバランスがとれていないと考えられる。

EDR-X7000は、低消費電力で、かつ高サンプリング周波数でも実効分解能の落ちない18bitADを採用している(Photo 1)。高ダイナミックレンジを達成するため、振幅が小さい場合は64倍増幅した信号を記録するが、振幅が大きくなり振り切れそうになると、自動的に1倍増幅した信号に切り替える機能を持っている。実効的な分解能は100dB程度であるが、時刻分解能を上げるとともに、波形を正しく捉えること、および低消費電力を優先させた仕様である。稠密地震観測用には最適な選択であると考えられる。

消費電流が0.007A以下という低消費電力により、単1電池24本で6ヶ月以上の連続観測が可能となった。重量にして3.3kg程度であり、105Ahのバッテリーの7分の1程度である。近年装置の小型軽量化が飛躍的に進んでいるが、観測システムはバッテリー等も含めた総合的な大きさや重量が重要であり、これにより機動性が飛躍的に高まった。

このような低消費電力下でも時刻精度を保つため、水晶発振子の発振周波数を制御し、さらに制御に用いるパラメータの値を自己学習させることで、1msの時刻精度を実現している(三浦ら, 2010)。自己学習の機能は装置の組み立てにおいても重要な役割を果たした。水晶の発振周波数やその制御パラメータは個体毎に異なっており、特性を揃えることは大変な

作業であるが、自己学習機能により、面倒な調整が不要となり、製作時間、コストの軽減に役立っている。

開発の第2のポイントは、機器の小型・軽量化である。地震観測システムは、センサー(地震計)と記録装置から成るが、上記のように記録装置関係の小型・軽量化は達成されたので、地震計の小型・軽量化が重要である。地震計の改善は大変遅れており、高性能で安定して動作するため今でもよく用いられているL-22D(Mark Products社製)は、30年以上前に開発されたものである。磁石や金属の切り出し加工で製作され、重くて大きい上に、加工の手間がかかるため価格も高かった。今回開発した小型軽量地震計(近計システム社製KVS-300, Photo 1)は3成分一体型の地震計で小型軽量化を実現しつつ(106(W)×104(H)×140(D) mm, 約1.5kg)、L-22Dと同等以上の性能を持っている(詳しくは、三浦ら, 2010)。

開発の第3のポイントは、取り扱いの容易さである。これは、システム全体としての合理的な構成・アセンブリと深く関係している。具体的なスペックとしては、1カ所の設置時間5分以内、背中に5セット背負って、徒歩でも田植えをするように、さくさくと設置可能という目標を掲げた。

背中に5セット背負うことは、上記のような小型・軽量化で既に実現されている。

設置時間の短縮のために下記のような設計とした。露岩上に直接設置できるように、水平レベル調整用ネジのストロークを長く、狭い場所でも設置可能のように水平調節ネジを上側から調整可能とした。地震計と記録装置は両方とも防水とし、防水コネクターをもったケーブルで直接に接続することとした。このため、雨天時でも取り扱いが楽になった。記録装置の各種パラメータはあらかじめCFカードの1枚目書き込んでおくこととした。電源ON時に、CFカード、地震計、GPSのセルフチェック機能を付けた。これにより、設置時間の短縮だけでなく安定的な観測も可能となった。初回設置時にGPSの受信時間を短縮したい場合は、あらかじめ大体の座標をCFカードに書き込んでおき、位置測定をせずに内部時計の調整のみ行えるようにした。設置時間5分という目標はかなり難しいが、GPSの受信確認をskipすれば十分可能である。この場合、システムはGPSを正しく受信した後に自動的にスタートする。

最後に、多点の観測網を作るためには、システムが可能な限り安価であることが望ましい。従来の地震計は、加工・工作のための人件費の占める割合が多かったが、粉末焼結技術を駆使した磁石の採用や上記の水晶の調整の手間の軽減等により、単価を大

幅に下げることが可能となった。

3. 次世代型稠密観測網の効果

それでは、これまでに無い高密度の稠密地震観測が、内陸地震の発生予測にどのように役立つのだろうか？ また、どのくらいの数の観測点が必要なのだろうか？ 本節では、仮想的な稠密観測網から得られるデータを用いてシミュレーションを行い、その効果や必要な観測点数を検証する。

3.1 観測点数と応力場の推定精度

最初に、観測点の密度の違いに起因する、応力場の推定能力の差を調べてみた。解析領域内で応力場は一樣であり、その中で20個の地震が発生した場合を想定した。応力場の推定において、断層面が色々な向きを向いていればいるほど、結果の推定精度が高くなる。逆に、一番極端な場合、全ての断層面が同じ向きを向いていたら、応力場は一意には決まらない。そこで、断層面の走向のばらつきを10度以内、傾斜のばらつきを30度以内と仮定した。これは、かなり厳しい条件設定であり、現実のデータは、これよりずっとばらつきが大きいと考えられる(例えば、Kawanishi et al., 2009)。

Fig.3の上側は500点、下側は50点の観測網による解析結果の一例である。東西の最大圧縮応力(s1)、南北の最小圧縮応力(s3)、応力比 $R((s1-s2)/(s1-s3))=0.67$ を与え、20個の地震の初動押し引き分布を理論的に合成し、それを用いてHoriuchi et al.(1988)の方法で応力場を推定した。左側は、青○がs1、緑△が中間主応力(s2)、赤□はs3の方位の推定結果で、小さなシンボ

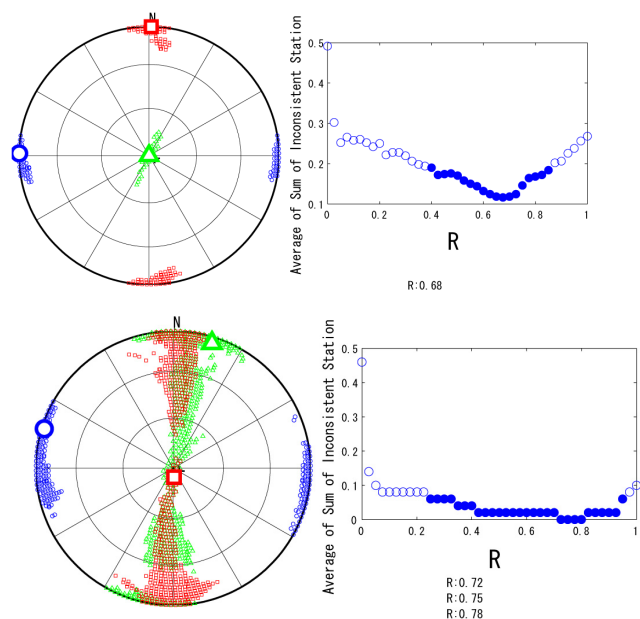


Fig.3 Results of stress inversions.

ルで95%の信頼限界を示す。右側は応力比Rの推定結果であり、塗りつぶした●が95%の信頼限界を示す。50点では、最大主応力の方位の誤差は30度以上あるが、500点では誤差は10度程度である。このように稠密多点になると、厳しい条件下でも応力場を精度良く推定可能であることがわかった。悪い例としてあげた50点というのは現時点ではかなり密度の高い観測網であり、通常の観測網では推定精度はさらに低いと思われる。

近畿地方に仮に500点規模の次世代型稠密多点観測網を設置すると、どのような結果が得られるだろうか？ 近畿地方中北部では気象庁により年間約4千個程度の地震の震源が決定されている。稠密多点観測ではより小さな地震まで検知可能なので、この10倍程度の地震データを記録できると期待される。よって、年間約4万個の地震データが得られることになる。上記のように近接する20個毎のデータセットについて応力インバージョン解析を行うことにより、近畿地方中北部の約2000カ所の「応力場」を毎年推定することが可能となる。天気予報では、各地の気圧の測定値が重要であるが、地震の発生予測においても、応力のデータは極めて重要である。地震データから推定されるのは応力テンソルの中の4成分ではあり、差応力の絶対値を直接推定することは出来ないが、毎年2000点において「応力場」を推定することにより、内陸地震の発生予測に役立つものと期待される。我々は、このような試みを「応力天気図」の作成と呼んでいる。

このような試みが内陸地震の発生予測に本当に役立つのだろうか？ 下記に、内陸大地震に関連する応力場の異常を示唆する例をあげる。Fig.4 は、阿武山微小地震観測網のデータから得られた、兵庫県南部地域における1979-1991年の12年間の微小地震のP軸の分布である(P軸の分布は最大圧縮方向の指標となる)(Iio, 1996)。明石海峡に周辺と異なった南北のP軸が見られる。約90度方位が異なっており、これは極めて特異なものであるが、1個の地震だけなのでこれ以上の解析は難しい。

野島断層においてゆっくりすべりが起こったと仮定したときの、周辺の主最大圧縮応力軸の分布をFig.5 に示す。図に示した10km×5kmの断層に3mのすべりを与えた。広域応力としては、偏差応力分として東西圧縮応力を80MPaと仮定している。断層の端付近で細かいスケールで応力場が乱れていることが分かる。観測されたP軸の特異な向きはこのようゆっくりすべりを捉えていた可能性がある。稠密多点観測網により応力場を年々モニターしておれば、このような数百mスケールの異常な変化を検知できるかもしれない。また、Fig.1に示したような深部延

長のすべりによると考えられる応力場の異常が捉えられる可能性も考えられる(Kawanishi et al., 2009)。

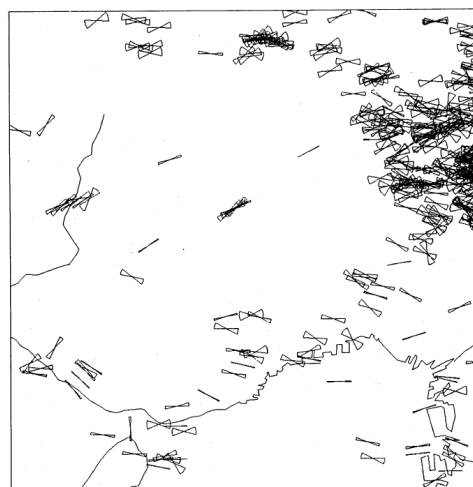


Fig.4 P-axis azimuths in the Southern part of the Hyogo Prefecture.

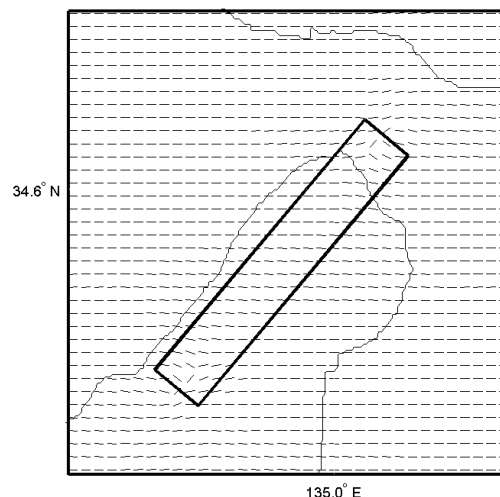


Fig.5 Maximum compressional stress direction around the Nojima fault due to the aseismic slip on the fault.

3.2 観測点数と3次元速度構造の推定精度

Fig.6 は地震波トモグラフィーの例であるが、左側は980点の仮想的な観測網、右側は長野県西部地域における実際の観測網(57点)(Iio et al., 1999)である。チェッカーボードテストによる、3次元速度構造の分解能を示した。碁盤の目状になっている領域が分解能のある部分であり、実際の観測網では、その中央部で1kmの分解能が得られている。計算時間の制約のため、仮想的な稠密観測網では用いる地震数を制限しデータ数を実際の観測網の場合の1/3程度に抑えているが、それでも、広い領域で500mの分解能が

得られている。

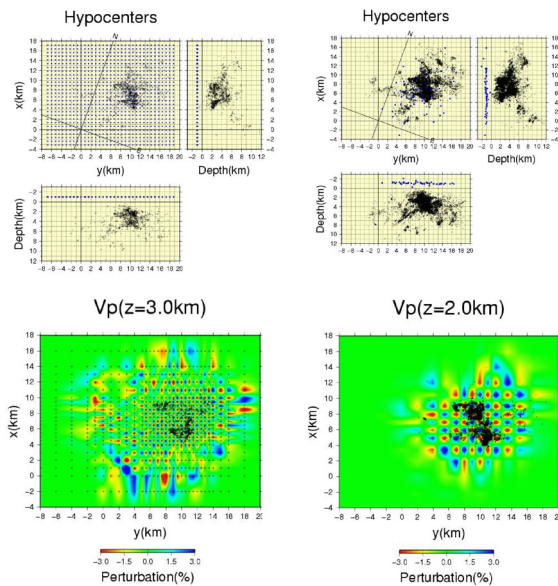


Fig.6 Checker board resolution test for a seismic tomography in the Western Nagano Prefecture region.

ところで、仮想的な観測網は10倍以上の観測点を持っているが、この例では分解能は倍になっすぎていない。これは、3次元トモグラフィーのため、大きさが半分のグリッドでも、モデルパラメータ数が8倍となっているためであると考えられる。つまり、3次元トモグラフィーの分解能を上げるためには、観測点数を飛躍的に上げる必要があると思われる。

4. 他分野における活用

満点システムは、京大防災研の地震・火山関係だけでなく、現時点において、国内外において256カ所に設置されている。海外は、インドネシア グントール火山に14カ所、ニュージーランド クライストチャーチ周辺に29カ所となっている。小型軽量のため、航空機に携行品として容易に持ち込むことが可能であり、海外における観測にも最適である。そのため、2月のクライストチャーチ地震の余震観測網を速やかに立ち上げることが出来た。

これまで、主に自然地震観測に関係した例を紹介したが、はじめに述べたように、満点システムは、様々なフィールド科学において有用であると考えられる。例としては、地すべり地での高密度アレイ観測、河川堤防等での地盤調査のための振動観測、高密度アレイ観測による不整形表層地盤の地震動増幅特性の評価、構造物の振動特性解明のための振動観測、地盤と構造物の動的相互作用評価のための高密

度アレイ観測、高密度アレイ観測による不均質地盤の地震前後の応答特性評価、既往の（離散的なボーリングによる）表層地盤情報の高精度補間などが挙げられる。これらの研究はいずれも、電源を引いたり、太陽電池や大容量バッテリーを装備するのが難しいところでの観測である。既存の装置ではデータを取得することが困難であり、これまでは限定的な研究しか行われていなかった。平成21年度防災研究推進特別事業経費「次世代型地震観測システムの共同利用」によって、西井川地すべりにおける地震動観測(担当：斜面災害研究センター 末峯 章)、谷埋め盛土における地震動の観測(担当：斜面災害研究センター 釜井俊孝)、港湾空港技術研究所内における比較観測(担当：野津 厚)等が行われた。

5. おわりに

これまでの実績によると、満点システムは、単一電池32個で、約8ヶ月間、250Hzサンプリングで連続記録を取ることが出来た。この例では記録媒体は一杯にはなっておらず、スペック上は約9ヶ月連続記録が可能である。単一電池32個を含めても6kg程度と小型・軽量化されており、設置時間も最短で5分程度となっている。

このように、本システムはこれまでの装置とは別次元のものであり、地震・火山関係の観測のみならず、地すべり・地盤・構造物における振動測定など、様々フィールド研究における有力なツールとなるものと期待される。

本システムは、個別の記録装置からなるため、1万点規模でまとめて運用する他に、例えば、百点規模で個人的に使うことも可能である。現在、何でもインターネットで拾ってくるのが日常化しつつあり、学生の研究テーマも、ややもすれば、ネット上でダウンロードできるデータを用いたものになりがちである。安価ではあるが十分な能力を持つシステムを個人で使えるようになれば、学生でも、個人の自由な発想に基づき、フィールドへ出てデータを取得することを中心とする研究テーマを選択可能となると期待される。本システムは、次の世代を育てるためにも有用であると考えられる。

謝 辞

満点システムの開発において、平成18年度京都大学総長裁量経費「超多点フィールド計測システムの開発」、平成19年度防災研究所特別事業費「次世代型地震観測システムの開発」等のサポートをいただいた。各地での観測は、平成19~21年度科学研究費

補助金基盤研究A「地震はなぜ起こるのか?-地殻流体の実体の解明-」, 文部科学省委託業務「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」, 地震・火山噴火予知のための観測研究計画, 平成21年度防災研究推進特別事業経費「次世代型地震観測システムの共同利用」, 平成22年度防災研究所拠点研究「日本-ニュージーランド内陸地震研究ネットワークの構築—代表的な沈み込み帯における比較研究—」, 平成23~26年度科学研究費補助金(基盤研究(A))「内陸地震の断層直下はやわらかいのか?—ニュージーランド南島北部における稠密観測—」等のサポートを受けている。地震波トモグラフィテストはJR総研 野田俊太氏が京都大学在学中に行ったものである。

満点システムは, 京都大学防災研究所と株式会社近計システムが中心となって共同開発された。尾池和夫元京大総長には終始励ましていただき, 打ち合わせにも数回参加頂いた。株式会社近計システムの高島一徳氏, 大橋善和氏, 内田淳氏, 本橋恵三氏, サイモテック株式会社の古屋和男氏, 日本科学冶金株式会社の佃多喜男氏, 上本育夫氏, 宮崎真二氏, 石川和男氏, 株式会社エス・ジー・ケイの矢口裕隆氏, 京都電測株式会社の宮村清氏, 高田稔幸氏に大変お世話になった。真砂慶一郎氏, 鹿熊英明氏にも大変お世話になった。開発メンバーである九州大学理学部の松本聡氏, 京都大学防災研究所 三浦勉氏, 片尾浩氏, 澤田麻沙代氏, 米田格氏, 中尾節郎氏, 近藤和男氏, 平野憲雄氏, 藤田安良氏, 井口正人氏, 松波孝治氏, 西村和浩氏, 多田光弘氏, 坂 靖範氏, 宮澤理稔氏, 澁谷拓郎氏, 大見士朗氏, 加納靖之氏, 西上欽也氏, 吉村令慧氏, 石川裕彦氏, 理学研究科の大倉敬宏氏, 平原和朗氏, 人間・環境学研究科の酒井敏氏, 満点計画教育プログラムの主要メンバーである, 防災研究所 矢守克也氏, 関西大学 城下英行氏, 共同利用研究のメンバーである防災研究所 釜井俊孝氏, 末峯 章氏, 田村修次氏, 飛田哲男氏, 京都大学人間・環境学研究科 加藤 護 氏, 建築研究所 新井 洋氏, 港湾空港技術研究所 野津厚氏, 鹿児島大学 後藤和彦氏, 高知大学 久保篤紀氏, 名古屋大学 田所敬一氏, 金沢大学 平松良浩氏, 終始支援いただいた防災研究所 岡田憲夫氏を始め関係の皆様へ深く感謝いたします。

観測を行うにあたって, 観測システムを設置させていただき, また, ご協力いただいた日本並びに国外の地主の皆様方, ならびに観測点付近の住民の皆様へ深く感謝いたします。

参考文献

飯尾能久 (2009a): 内陸地震の発生過程, 地震II, 第

61巻特集号, S365-S378.

飯尾能久 (2009b): 内陸地震はなぜ起こるのか?, 近未来社, 名古屋.

飯尾能久 (2010a): 内陸地震の発生過程の解明, 自然災害科学, 28-4, 284-298.

飯尾能久 (2010b): 飛躍的に進んだ内陸地震研究 阪神・淡路大震災からの15年, ないふる, 77,2-3.

飯尾能久 (2010c): 内陸地震はどうしておこるのか?, 地震ジャーナル, 49, 1-8.

防災科学技術研究所 (2009): ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト 平成19年度成果報告書, <http://www.hizumi.bosai.go.jp/report-index.html>.

防災科学技術研究所 (2010): ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト 平成20年度成果報告書, <http://www.hizumi.bosai.go.jp/report-index.html>.

三浦 勉・飯尾能久・片尾 浩・中尾節郎・米田格・藤田安良・近藤和男・西村和浩・澤田麻沙代・多田光弘・平野憲雄・山崎友也・富阪和秀・辰己賢一・加茂正人・澁谷拓郎・大見士朗・加納靖之 (2010): 近畿地方中北部における臨時地震観測, 京都大学防災研究所年報, 53B, 203-212.

Horiuchi, S., Rocco, G. and Hasegawa, A. (1988): Discrimination of fault planes from auxiliary planes based on simultaneous determination of stress tensor and a large number of fault plane solutions, *J. Geophys. Res.*, 100, 8327– 8338.

Iio, Y. (1996): Depth-dependent change in the focal mechanism of shallow earthquakes: Implications for brittle-plastic transition in a seismogenic region, *J. Geophys. Res.*, 101, 11209-11216.

Iio, Y., Ohmi, S., Ikeda, R., Yamamoto, E., Ito, H., Sato, H., Kuwahara, Y., Ohminato, T., Shibasaki, B. and Ando, M. (1999): Slow initial phase generated by microearthquakes occurred in the western Nagano prefecture, Japan -the source effect-, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 13, 1969-1972.

Kato, A., E. Kurashimo, T. Igarashi, S. Sakai, T. Iidaka, M. Shinohara, T. Kanazawa, T. Yamada, N. Hirata, and T. Iwasaki (2009): "Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes", *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05301, doi:10.1029/2008GL036450.

Kawanishi, R., Iio, Y., Yukutake, Y., Shibutani, T. and Katao, H. (2009): Local stress concentration in the seismic belt along the Japan sea coast inferred from precise focal mechanisms: implications for the stress accumulation process on intraplate earthquake faults, *J. Geophys. Res.*, 114, B01309, doi:10.1029/2008JB005765.

**Development of a Seismic Observation System in the Next Generation
- to Install Ten Thousands Stations -**

Yoshihisa IIO

Synopsis

We developed a new seismic observation system in the next generation, with the initiative of DPRI Kyoto Univ. and Kinkei System Co.. We were able to record about 8 months continuous seismic data with 250 Hz sampling frequency and 32 dry cells. The system is small and light. The total weight is only about 6 kg, including those 32 dry cells. It takes only several minutes to install one station. This system is extremely useful and it is expected that this system will be a main tool for all the field works.

Keywords: manten system, dense array observation, seismometer, power saving, small and light