

奇妙な小地震

新潟県中魚沼郡津南町の被害

個 爲成

1992年の暮れも押し詰まって、新潟県南部の小さな町を強震が襲った。場所は長野県境に接した中魚沼郡津南町、12月27日11時17分のことである。津南はスキー場で有名な苗場山の北登山口に当たる。地震の規模はM4.5で、気象庁の観測網では震度0（無感）の小さい地震だったにもかかわらず建物などに6億5千万円を超える大きな被害を生じた。M3~5の地震を小地震と呼ぶが、これだけの被害を与えた小地震は日本では非常に珍しい。

実は、震源地から4 kmほど南の地点に、東大地震研究所信越地震観測所が高感度地震観測点を設置していた。そのため、この地震発生前後の地震データが得られ、非常に小さい前震や数ヵ月前の前駆活動の存在、きわめて少ない余震回数など、この地震の重要な性質が明らかになった。

だが、この地震の正確な震源推定には定常観測網のデータだけでは不十分であった。

地震後、新潟大学積雪災害研究センターは、震源地付近の4ヵ所に地震計を据えた。そのデータと定常観測網のデータを組み合わせることによって、被害集中域に極近く、深さも非常に浅いことが判った。地震は上部地殻の土台を構成している花崗岩質の層ではなく、その上に厚く堆積した第三紀層で発生した。これも珍しい。小地震以上の規模の地震活動の主要破壊領域が第三紀層であったことを確認した最初の例ではなかろうか。

本稿では、この地震の概論を述べ、そこから学んだ教訓についても触れてみたい。

津南の地震の被害と地変

津南の地震は小さい割に、局所的ながら学校などの建物に甚大な損害を与えた。そして震度0という気象庁発表に対し、世間の人々やマスコミ関係者は奇怪に感じた。

上越市にある高田測候所は、震源地から西北西へ32 kmほど離れた地点にあり、気象庁の観測網ではもっとも近い観測点であったが、M4.5の地震ではこれくらいの距離になると、震動の減衰のため無感になってしまう。次に近い長野地方気象台（51 km）でも無感であった。現地の震度は計測されていないので、発表は震度0となる。建物の被害の程度から推測すると震度は最大5に達していたようである。

被害地域は津南町の西部、長野県との県境に近

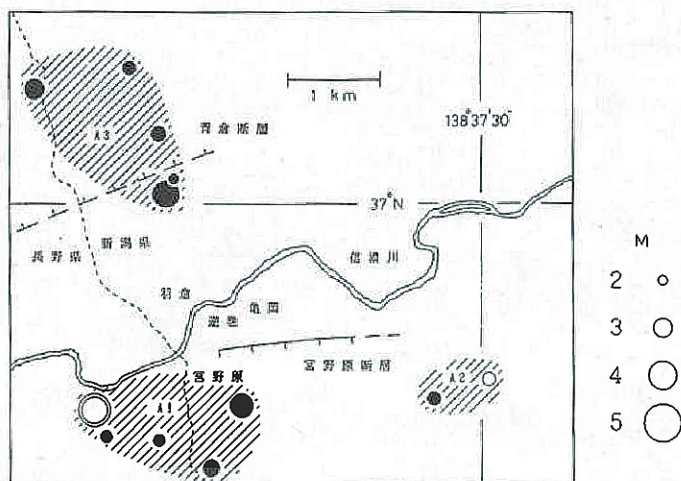


図1 震源地付近の地図

二重丸、黒丸、白丸はそれぞれ本震、余震、前駆地震。影をつけたA1、A2、A3は余震域。A1は狭義の余震を表し、A2とA3は広義の余震を表す。A2は9月の前駆活動の震源域でもある。

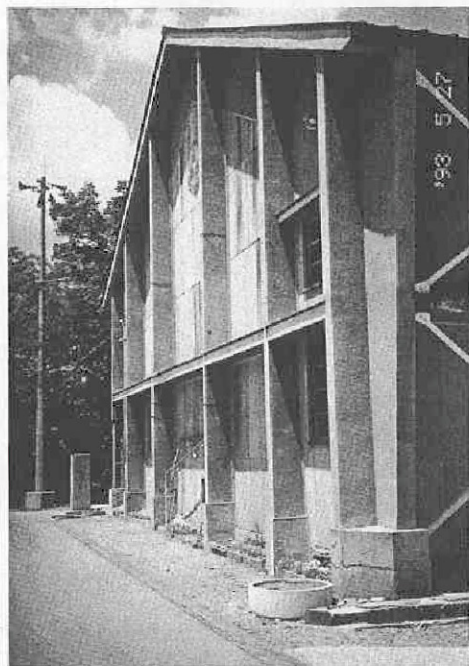


写真1 仮修復された上郷小学校体育館
(1993年5月撮影)

い信濃川南岸に開けた河岸段丘の面上にある逆巻地区を中心に1 km²の範囲に限られている(図1)。主な被害や地変を列举すると、次のようになる。

●上郷中学校 昭和55年に建設された鉄筋2階建ての校舎である。窓のアルミサッシごと外れたり、半分以上のガラスが割れる。とくに体育館の被害がひどく、天井壁の一部が落下した。新聞報道(毎日、読売)は、屋根の雪下ろしの最中に地震に遇った人の話を伝えているが、ドーンという大きな音がして下に沈み込むような感じがし、中学校の体育館の窓が風船のようにふくらんで破裂するように割れたのを目撃したということである。発生時刻は昼間であったが、当時は冬季休暇中であり日曜日でもあったので、生徒や教職員への被害がなかったのは幸いであった。

●上郷小学校 昭和40年に建設された木造モルタル塗り3階建ての校舎である。校舎の内壁がはがれ窓ガラスが割れた。また、体育館の外壁約3.3 m²がはがれ落ちた(写真1)。

●国道117号線 地変としては、地盤のわずかな

な隆起や多数の亀裂が生じた。逆巻地区において国道(アスファルト道)の約300 mにわたり多数の亀裂が生じた。そのうち、南側の150 mに多く、1~2 cmの隆起も生じた。山科⁷⁾によるいずれも開口性の亀裂で、中には1~2 cmの開口を示し、ほとんどは数mm以下であった。また、地盤の亀裂は中学校の校庭や小学校付近の道路にも現れた。

●その他 逆巻、宮野原、亀岡、羽倉などの集落において民家の家の造りが狂ったり、窓ガラス破損、壁のひび割れ、商品や家財道具の破損などの被害があった。そのほか宮野原地区では、消火栓に損傷、簡易水道水源パイプが破損した。羽倉地区のアスファルト町道にも亀裂が生じた。被害戸数は町全体で137に上った。東北電力の機器故障によって津南町と隣の長野県栄村では地震後約1時間停電した。

津南町役場によると被害総額は6億5156万円であった。そのうち、主なものは小学校、中学校などの公共文教施設の被害4億8660万円である。2年前に28 km北方の新潟県柏崎市と高柳町の境界付近で発生した地震(1990年12月7日、M5.4)⁵⁾では被害総額は約8億円であった。1986年11月13日北海道沼田町付近の地震(M5.3)¹⁾でも8億7千万円である。放出エネルギーでは約15~22倍大きいこれらの地震の被害額の4分の3に達する。今回はM4クラスの地震の被害規模としては格段で、日本ではM5クラスでも目立った被害がない場合がある。

高感度地震観測

逆巻地区から南に5 kmの出浦地区には、信越地震観測所の観測点がある(図2)。1982年6月10日から現地に委託観測を開始し、同年12月6日にはテレメータ化した。現地の観測計器は民家に置かせてもらっていた。その当時、テレメータ受信局である長野の観測所では多成分記録計に余裕がなく、他の観測点のデータと一緒に記録することができなかった。津南の読取り値は単独の連続記録から得て、あとで他の観測点のデータと

1992. 12. 27-1993. 4. 30 $M \geq 2$

N= 11

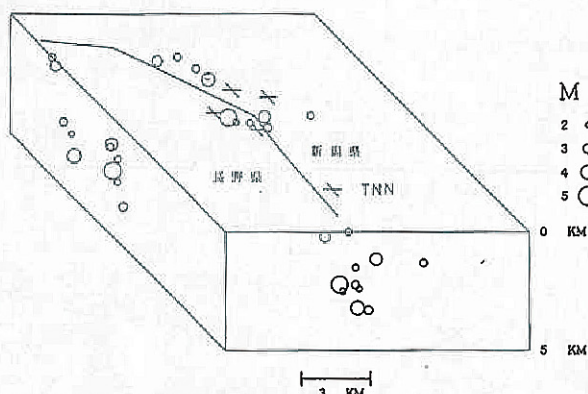


図2 余震分布と付近の観測点

最大の地震は本震。TNNは東大の常設観測点。他の+は新潟大の臨時観測点。

統合するという面倒なことをやっていた。多成分同時観測は1984年10月1日からである。その後、1 kmほど位置を変え、新たに観測局を建設し、1987年10月12日から現在まで観測を継続している(写真2)。

地域の地震活動を均質に捉えるための観測網を構成するために津南の地を選んだのであって、とくに今回のような地震をねらったものではなかった。たまたま、今回の地震の震源域に近い所に置かれていた。津南観測点のデータは、この地震には非常に小さな前震が伴われており、余震についてはこれだけの近距離における高感度観測にもかかわらず、その回数が著しく少ないことを示した。定常観測点があったればこそ得られたこのような小地震に関する貴重なデータであった。ただ、高感度観測のため振幅が振り切れてしまい、本震の波形や震度の値については情報は得られていない。現在の観測体制や予算では、低感度の観測を行なう余裕はないのである。

震源推定

信越地域には上記の津南(TNN)観測点を含む高感度観測点の常設ネットワークが張られているが、それぞれの観測点間の距離は40~50 kmとかなり離れているので、深さが10 km以下の浅い震源の場合、精密な震源決定、とくに深さの

決定には困難がある。この地域の地下の構造が、複雑で不均質の程度が著しいことがさらに問題を難しくしている。多くの観測点のP波とS波の到着時刻を矛盾なく説明する解を得ることが容易でないのである。

そこで、顕著な地震が発生した場合は、たいてい震源域に近い所に臨時的ネットワークをこしらえ、余震の震源をまず精密に決定することを行なう。そして、同じ地震について広いネットワークの結果と比較し、広域ネットによる結果のずれを測るのである。本震の震源は、そのずれの量で補正する。あるいは、広域ネットの震源計算の際、各観測点の読取り値に補正を施してもよい。その補正量を余震のデータによって決定する。図1と図2に示した震源は、後者の方法によって求めたものである⁹⁾。

新潟大学が震源域付近に設置した4ヵ所の臨時観測点のデータを用いた解析を終えるまでは、震源域はもっと南の地点だと思っていた。しかも深さは10 kmぐらいだと推定していた。

信越観測所の震源決定によると本震の震央は津



写真2 東大地震研究所の津南観測点

南観測点から1~2 km 東に位置する。これが数 km の誤差を含んでいるだろうことは予想していた。深さは2 km と浅く決まっていたが、余震には10 km ぐらいに決まるものもあり、精度が悪いのであろうと思ったので、大森係数の方法で推定を試みた。S波とP波の到着時刻の差、S-P時間（初期微動継続時間ともいう）に大森係数をかけると震源距離が推定できる。この係数の値は普通8 km/秒ぐらいである。津南観測点において本震の波形は振り切れていて不明だが、余震のS-Pが多くは1.5秒前後であるから、大森係数8をかけると震源距離は12 kmとなる。震央距離が2 km とすると、深さはピタゴラスの定理によって11 kmのはずである。震央がもっとずれて、例えば震央距離5 km のときでも深さは9 km に達する。実はこの地域の大森係数としては、1990年12月7日新潟県南部の地震の余震の研究から9という結果がでている。ますます震源は深くなってしま

う。しかし、図3に示したように余震の波形を見ると短周期成分が弱く採石発破の震動波形のように表面波らしい波が卓越していて、非常に浅い地震を想像させ、釈然としないものが長い間残っていた。

新潟大学のデータによって、謎が一挙に解けた。主な震源域は宮野原に近く、深さは2~3 km となった。本震はその西端に位置する。その震央は当初の推定から4.5 km ずれていた。図1と2に

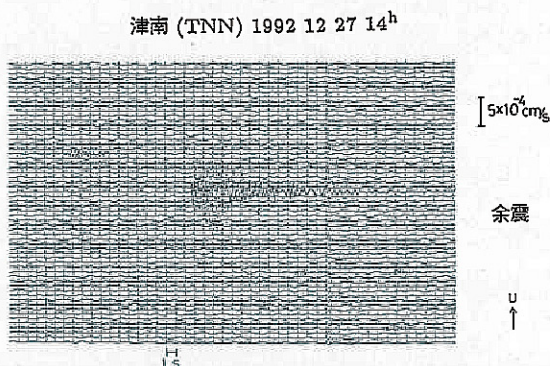


図3 余震の波形

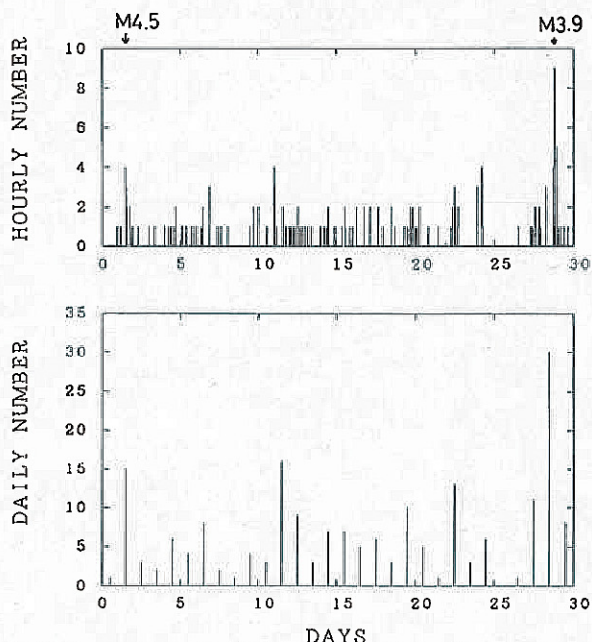


図4 前震と余震の時間別回数（上）と日別回数（下）

示した震源はP波だけのデータから決定したものである。深さについては、いくぶん不確定さがある。震央はほぼ確定したとして、S-P時間でクロスチェックをする。その際、以下のような大森係数を採用すれば、先に述べたような矛盾は生じない。

この地域の地下構造は人工地震の実験によってある程度わかっている²⁾。深さ2 km まではP波速度が3.1 km/秒、その下に4.7 km/秒の層が5~6 km まで存在する。これは、おそらく第三紀層であろう。この層がかなり厚い。6 km/秒のいわゆる花崗岩層はその下になる。大森係数 k はP波、S波の速度をそれぞれ V_p 、 V_s とすると、 $k = V_p / (V_p/V_s - 1)$ となる。震源が浅いとなると V_p は3.1~4.7 km/秒で、余震について津南付近の観測点のデータから $V_p/V_s = 2.0$ と推定されるので、震源が非常に浅い場合の大森係数は3.1~4.7 km/秒となる。

余 震

今度の津南の地震では極微小地震を数えても余震がきわめて少ない（図4）。また震源決定でき

方角に青白い稲妻状の光を見た。

神戸市北区と三田市・西宮市が接するところで、東の方角にぼんやりした青白い光が目撃されている。

川西市北部でも、細く白っぽい稲光が何本も光ったり消えたりして2～3秒続き、次に地鳴り、その1～2秒後に、ドーンと下から突き上げる揺れとともに激震（横揺れが大きい）が始まった。猪名川町南部（広根付近）でも、青白い稲光が数本見られ、同じ光かどうかわからないが、道路を通過中の車からは昼間のような強烈な光が目撃された。

そのほか、オレンジ～赤っぽい色の光が、兵庫県の三田市や猪名川町でも目撃された。

(3) 発光出現時間 多くの人は地震動に先立ち、地鳴りを聞いている。最初のP波が振幅が小さいために、体感では震動を感じないが、高周波成分（数十Hz以上）が空中に伝わり音波として耳に達するのであろう。小さい地震の場合は、P波は音だけ、S波が体感となることは多いが、M7の地震では、P波といえども大きな振幅がある。したがって、地鳴りのもとの震動はP波のうちの先行した高周波である。つまり、地震波の先頭部は振幅は小さいが高周波であった。

この高周波がどうして発生するのかは、震源過程や地震波の伝播に関する興味深い問題であるが（佃ほか、1995）、ここでは大きな震動に先立つ地鳴りの発生時刻を発光時刻の一つの基準に用いる。発光の発生時刻は、①地鳴り以前、②地鳴りとほぼ同時、③大きな揺れとほぼ同時、④大きな揺れの後、に分けられる。

①つまり、地震前の発光ではないかという情報がいくつかある。

神戸市東灘区鴨子ヶ原、六甲山系の麓の高台から、地震の1時間ぐらい前の明るい西の空の写真がいくつかの新聞に紹介された。この光がどのくらい継続していたのかなどを今後調査したいが、西に沈みかけていた満月の光の影響はどうだったのか。

猪名川町中部において、地震の数時間前に赤っ

ぱい明りが山なみの鞍部に目撃された。発生時刻は17日午前1時から3時の間で、継続時間については不明である。

神戸市須磨区の山中では、前日の夕刻、オレンジ色の光が観察された。

そのほかにも情報が寄せられつつある。

発光の継続時間は、①一瞬（2秒以内）、②3～5秒間、③5秒程度以上、に分ける。点滅するような光では、全体の継続時間を表す。

時間の報告がある19件について、①と②がそれぞれ40%前後、③は16%にすぎない。

(4) 発光源の大きさ 光源の範囲を押さえるには、多くの地点や方向からの目撃証言が必要である。そのようなデータが得られるケースは限られる。それは早朝のため、もともと目撃者が多くないことと、地形や都市構造の制約があるので仕方がない。以下に3つのケースを紹介する。

(4)－1 神戸市都心付近——中央区や兵庫区の市街地を覆うように水平に広がった青い光が目撃されている（図2の12番の地点、図3）。

東の方角からは、阪神高速神戸線の神戸市東灘区深江本町付近を走行していた人の証言がある。揺れを感じる前に、前方右側（神戸三宮方面）に地面を走るような筋状の緑色に近い光が3回くらい点滅した。

先行した緑の（青い）光は、南側からも目撃された。人工島ポートアイランドの北公園付近で、六甲山方面へ西から東へ青白い光が走ったように見えた。光は六甲山頂の高さより高い角度で、チリチリと2～3秒間は光っていた。そのとき地鳴りも聞こえた。次に下からドーンとくる揺れ、次に横ゆれがきた。

西側からの目撃は、長田区高取山に登山中、高度150～200mのところ、地鳴りとともに目の高さに、中央区・兵庫区あたりで横に広がった青い光を見たというものである。長田区南部にいた新聞配達の人、この光を見ていないので、長田区全体までは広がっていない。

青い光の幕は中央区から兵庫にかけて広がり、高度は150～200mである。ポートアイランド

較すると M2.5~3 と推定される。同じく本震の初動の時刻を精密に読めないが、いくつかの観測点において、本震とその前震の初動の到着時刻の差は 0.1~0.2 秒の範囲で同一であるから、この 2 つの震源の位置はほぼ同じと見なすことにする。

津南の地震が発生した付近は、もともと地震活動が低い地域の一部である(図 6)。地震の半年前までの連続記録を限なく捜してみたところ、S-P 時間が 1~2 秒の極微小地震が月に数回は発生していることがわかった。そのなかで 9 月には 8 回も検出され、さらに、S-P 時間が 1.6 秒のものが多い。これは、12 月 27 日の地震の震源に近い可能性が高い。実際、震源が決まる地震が 1 回(9 月 19 日 18 時 59 分、M2.5)あったが、12 月 27 日の本震のほぼ 4 km 東で発生した。

これらは広い意味の前震、あるいは前駆的地震と言える。このように津南の地震の発生には少なくとも 3 カ月前から準備を始めていたのではないかと思う。この前駆的地震活動の震源付近にも余震があった。12 月 30 日 10 時 11 分、M2.6 の地震がそれである。

背景となるテクトニクス

震源地は、信濃川沿いのいわゆる信濃川地震帯に位置する。この地震活動帯は北西-南東方向の地殻圧縮場にあり、活褶曲地域、活断層密集域としてよく知られている。今度の地震はその活動域のはずれで発生した(図 6)。また、震源は浅く、4.7 km/秒層という比較的柔らかい層で発生した。信越の活褶曲地域の北西-南東方向の短縮は、この浅い層にも横からの圧力としてかかっているらしい。実際、主な地震の発震機構はだいたい横ずれ型である。本震の発震機構は、南北圧縮を示しており、地域の広域的な応力場に一致しない。北部の巣(図 1 の A 3)の最大地震はこの地域の一般的傾向である北西-南東圧縮を示す。

この地域は重力異常の急変帯の屈曲ないし不連続(銚子-直江津線)とこれに平行した、佐渡の小木から柏崎に至る微小地震の活動線の延長(こも重力異常の急変帯の屈曲)とに挟まれた地域

である。同じ地帯では、今度の地震から北へ 28 km ほどの地点で 1990 年 12 月 7 日新潟県南部の地震(M5.4)が発生している。

この地震の頃から能登半島から信越地域を含むいわゆる日本海東縁変動帯地域で地震活動が活発化したように見える。1992 年 12 月の津南の地震、1993 年 2 月 7 日の能登半島沖(M6.6)と続き、同年 7 月 12 日の北海道南西沖地震(M7.8)が発生した。1983 年の日本海中部地震の際は、その後、日本東縁地域ばかりでなく、西南日本でも地震活動が活発化したが、今回はその前から日本海東縁地域の地震活動活発化の傾向が現れていたのかもしれない。

小地震の数

津南の地震のような小地震がどれくらいの頻度で発生しているのだろうか。1976 年から 1985 年の 10 年間に気象庁が観測した M4.0~5.0 の地震は全部で 3932 回ある。1 日 1 回はこの程度の地震が日本周辺で発生していることになる。今回の地震とほぼ同じ規模の M4.4~4.6 の地震は 817 回となる。これでも 5 日に 1 回ぐらいは日本のどこかで発生している。多くは太平洋側の海の地震であろう。では、信越地域を中心にした地域(北緯 36° から 39° まで、東経 137.5° から 140° まで、深さ 30 km 以下)に限ると M4.0~5.0 の地震は 37 回、M4.4~4.6 では 9 回となる。つまり、信越地域では 1 年に 1 回弱の割合で津南の地震と同程度の規模の浅い地震が発生していることになる。しかし、今回のように強い被害を伴った地震は他には 1 度もなかった。非常に浅い地震の頻度が低いことを意味するのだろうか。

一方、首都圏を例にとると、東京を中心とする地域(北緯 35.5° から 36.5° まで、東経 139.5° から 140.5° まで、深さ 30 km 以下)では上と同じ 10 年間に M4 以上の浅い地震は全く発生していない。

直下地震への対策

今回の地震は浅い直下地震であるが、同じような浅い顕著地震として、1961年2月2日の長岡の地震(M5.2)がある。震源の深さの正確な値は不明だが、水準測量の結果、大きな地表変動が認められているので、非常に浅かった(数km)と思われる。新潟から津南にかけての信濃川流域一帯にはこのような浅い地震があると思わなければならない。

比較的浅い最近の付近の地震としては、1986年8月24日の長野県東部の地震(M4.9)³⁾の深さ6.1kmや、1986年12月30日の長野県北西部の地震(M5.9)⁴⁾の深さ5.5kmという例がある。これらの地震は津南の地震より規模は大きい。花崗岩層内の深さのためか、被害は津南の地震をはるかに下回った。ちなみに、1990年12月7日の新潟県南部(柏崎市と高柳町の境界付近)の地震の深さは12.6kmであった⁵⁾。

津南の地震は、小さい地震でも非常に浅い場合は大きな震度を発生する恐れがあることを実際に示してくれた。軟弱地盤が多い首都圏などで、このような直下地震が発生すれば、大きな被害が発生するという警告である。信越地域のように浅い地震が比較的多いところでも、今回のような被害地震は希な現象である。しかし、今後このような地震が市街地直下で発生する可能性は十分ある。将来へ向けて着々と備えをし、警戒を怠らないようにしなければならない。

すでに述べたように、首都圏直下の浅い地震は現在ほとんど発生していない。潜在的な活断層の存在や、浅発直下地震と思われる安政の江戸地震のような歴史地震の存在が暗示するように、そのような地震が今後も全く発生しないとは思えないので、いずれ大中小の規模の浅い地震があると覚悟しておいたほうがよい。小地震であっても、地形的に震動を増幅するような地点や地盤が柔らかい地点では、強い震動が発生しかねない。

今度の地震は、観測点のすぐそばであったから観測情報を地元を提供することができたし、小地震の貴重な研究資料が得られたが、現在の地震観測網はまだまだ手薄である。現在、日本全体に200~230の高感度観測点が大学で運営されてい

る。地殻構造の不均質性に対応して地殻上部の浅い地震の震源を1km程度の精度で震源決定し、M0~1の微小地震の検知能力をアップして前震や異常地殻活動の指標としての極微小地震活動を監視し、地震発生場の精密な研究をするためには、少なくとも20km間隔の観測網が必要である。これを全国に網羅すると1000点になる。各種の自動化によって地震活動監視の効率を上げるためにも、高密度の観測網が必須である。科学思想の問題にも関わるが、基本的な量のわずかな変化を自然現象から見いだしていく観測事業は大切である。低感度あるいは強震観測網も広げたい。その将来について、どういう体制で行なうかも含めて今後議論を深めるべきだと思う。

本稿をまとめるにあたって、新潟大学の大木靖衛氏をはじめ、東大地震研究所の山科健一郎氏、橋本信一氏、津南町役場の方々に情報を提供していただいた。最後にお礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) 北海道地区自然災害科学資料センター, 1987, 北海道地区自然災害科学資料センター報告, Vol. 1.
- 2) Ikami, A. et al., 1986, A seismic-refraction profile in and around Nagano Prefecture, central Japan, J. Phys. earth, 34, 457-474.
- 3) 佃 為成ほか, 1988, 長野県東部の地震(1986年, M4.9)及びそれに伴った地震群の活動特性とそのテクトニクス的意味, 地震研究所集報, 63, 237-272.
- 4) 佃 為成ほか, 1989, 広義の前震・余震活動を伴った1986年長野県北西部大町付近の地震(M4.9)の震源過程と地震テクトニクス, 地震研究所集報, 64, 433-456.
- 5) 佃 為成ほか, 1992, 1990年新潟県南部の地震(M5.4)の構造化された前兆的空白域と余震域, 地震研究所集報, 67, 361-388.
- 6) Tsukuda, T. and Y. Oki, 1993, A destructive shallow small earthquake The 1992 Tsunan earthquake of M4.5 in southern Niigata Prefecture (準備中).
- 7) 山科健一郎, 1993, 新潟県津南町付近の地震について.

[つくだ ためしげ 東京大学地震研究所助教授]