

単純に突進する —震源に向かって—

Simply Rush in Towards the Earthquake Source

飯尾 能久

Yoshihisa IIO

Synopsis

On the occasion of my retirement, I summarized the main seismic observations I have been involved in. I started with the observation of micro-fractures in mines and progressed to the observation of very small earthquakes. Advances in electronic technology, especially the practical use of GPS satellites, made it possible to carry out long-term observations in mountainous areas without a power source, which had previously been impossible. In the Western Nagano Prefecture region, high-frequency seismic observations with 10 kHz sampling and trigger method were started in 1995 and continued until my retirement. From around 2008, a device named the "Manten System" was developed in collaboration with a group of small and medium-sized enterprises in the Kansai region. The Manten system can continuously record 250 Hz sampling for more than half a year using about 32 single dry cell batteries. They were deployed in western Nagano Prefecture, the central and northern Kinki region, the San-in earthquake zone and the northern part of the South Island of New Zealand, in collaboration with related research institutions. Some unexpected and remarkable earthquakes, such as the 2017 Kaikoura, New Zealand earthquake (Mw7.8), occurred in all of the above observation networks, and these observations provided important data on the process by which intraplate earthquakes are generated.

キーワード: 地震観測, 稠密多点観測, 低消費電力, 内陸地震, 満点計画

Keywords: Earthquake observation, Dense multi-point observation, Low power consumption, Intraplate earthquake, Manten project

1. はじめに

筆者は、1980年4月、理学部4回生のときに、卒業研究のために、初めて阿武山地震観測所を訪れた。翌年には大学院に進学し、阿武山地震観測所に常駐するようになった。地震の研究においては、他の分野と同様に、理論・実験・観測など、色々な研究手法をとることが出来る。阿武山地震観測所は、その名前のとおり、観測に重きを置くところであった。最初に、そのような場所に居たことがその後の筆者

の研究者人生に大きく影響している。本小文では、地震の観測に関することを中心に、その後に行ったことをまとめてみたい。

退職に際して依頼いただいた特別寄稿であるので、本来は、私が主に関わった学問領域において成し遂げたことや成し遂げられなかったこと、特に地震予知研究における成果と問題点および今後の展望等をまとめるべきであるが、本小文ではその入り口を紹介するにとどまった。別の機会にまとめたいと思っている。

2. 鉱山における微小破壊の観測

2.1 きっかけ

阿武山に常駐し始めたころ、同室だった渡辺晃先生から言われたことをよく覚えている。「勉強はしない方がよい。教科書は読んではいけない」。学生からすると、まさかの発言であるが、その意味するところは、既存の地震観測データは極めて不十分なものであり、そういうものに基づいて得られた結果に惑わされず、自分の手でちゃんとしたデータを取って研究を進めなさいということであった。また、修士論文のテーマは自分で見つけるように言われた。数か月間、あれこれ悩んだが、これといって良いアイデアは浮かばなかった。まだ駆け出しで自前の観測データは持っておらず、勉強もあまりしていない

ので、地震のことはほとんど知らないのだから、これは当然のことであろう。これではいつまでたっても拉致はあかないと思われたようで、鉱山での微小破壊の観測を始めていた、行竹英雄助手のお手伝いをするようになった。

2.2 それまでの経緯と最初の観測

行竹英雄助手は、阿武山において、岩石破壊実験を担当していた。阿武山では、地震観測だけではなく、岩石の高圧実験も1950年頃から行われていたようだ。初代所長の志田順は、深発地震の発生過程を解明しようとして、松山基範とともに、高圧岩石実験を計画した(島田, 1993)。志田・松山によって開発された重錘式圧縮装置は、現在も阿武山観測所で動体保存されているが、初めて使用されたのは、松島

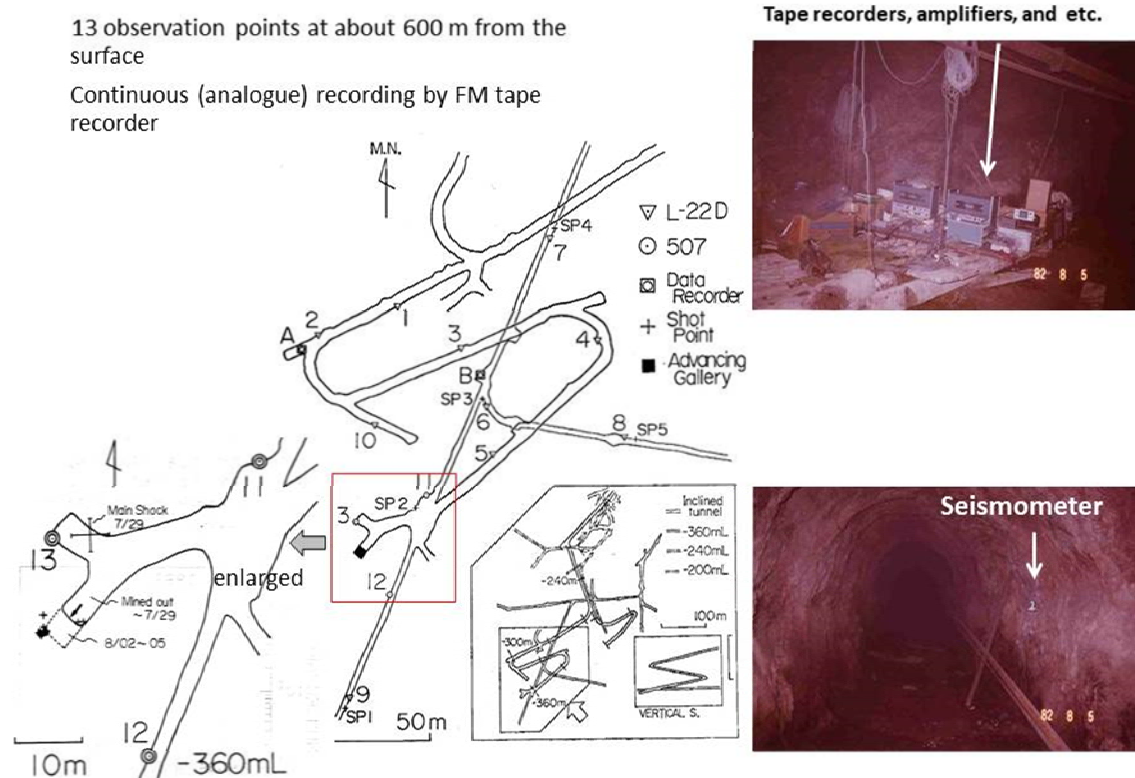


Fig. 1 Seismic observation network and photos at the Nakatatsu Mine. The lower middle shows an overall view of the mine and a sectional view of part of the mine enclosed by the line with an arrow. Seismometers were installed at 13 locations, based on the belief that microfractures would occur at the top of the face of the cuttings (advancing gallery) at the deepest part of the inclined shaft, where dump trucks would ride directly into the mine. The map of the area framed in red is enlarged at bottom left. The solid line shows the area already excavated by 29 July 1983 and the dotted line shows the area excavated between 2 and 5 August. Plus marks and error bars indicate locations of microfractures just after blasting and the microfracture with aftershocks. The Photo (top right) shows the data recorder and amplifiers installed at point A, and the photo (bottom right) shows the seismometer (L-22D) installed in the horizontal tunnel (-360 mL) (see Iio, 1984a).

(1956)による花崗岩の変形破壊実験においてである。この実験では、破壊前に岩石の体積が膨張する現象が捉えられている。この現象はその後、ダイラタンシーと呼ばれ、地震波速度の時間変化による地震予知に関係して、世間の注目を集めることになる(Scholz et al., 1973 ; Matsushima, 1960)。

その後、1970年代から、地震予知研究計画により高圧実験装置が次々と増設された。これらは、地震の予知に関係して岩石の破壊特性を解明するためのものであり、AE(アコースティック・エミッション)と呼ばれる、微小破壊(音)の計測も行われていた。AEは実験室において人工的に起こされた「地震」であり、実験室で得られた知見を活用するためには、自然地震との関係が問題となる。そこで、行竹助手は、自然と室内の中間的な状態と考えられる、鉦山で発生する微小破壊を調べようとしたわけである(行竹・他, 1982)。

私の修士論文は、その一環として、自然地震からAEまで、破壊の大きさと破壊の性質の関係を解明しようとするものであった(飯尾, 1982 ; 飯尾, 1983)。鉦山で発生する微小破壊の規模(地震モーメント)と波形の周期の関係を調べたが、阿武山地震観測所の

プロからは、観測データがもう一つだという評価をいただいた。

2.3 本格的な観測

そこで、博士論文においては、まず、大規模な観測網によりちゃんとしたデータを取ることにした。Fig.1に、福井県の中竜鉦山の最深部、地表から約600mの深さに設置された地震観測網を示した。

地震から放射される地震波の周期は、その断層を破壊する(断層すべりを起こす)のに要する時間にほぼ対応する。よって、小さな地震ほど周期が短く、周波数が高くなる。1970年代後半に設置された微小地震観測網は数十Hzの地震波を記録できるように設計されていた。鉦山の破壊はそれより断層が小さく、高周波であると考えられるので、微小地震観測で用いられている機材は使うことが出来ず、より高周波まで帯域の延びている観測システムを構築する必要があった。地震計は、10kHzまで帯域の延びている加速度計を購入した(Fig.1の11-13に設置)。この地震計を用いて、手持ちの各種地震計の周波数特性を検定して、1kHzまで帯域の延びている高感度の速度型地震計(L-22D)を併用することとした。また、稼働中の

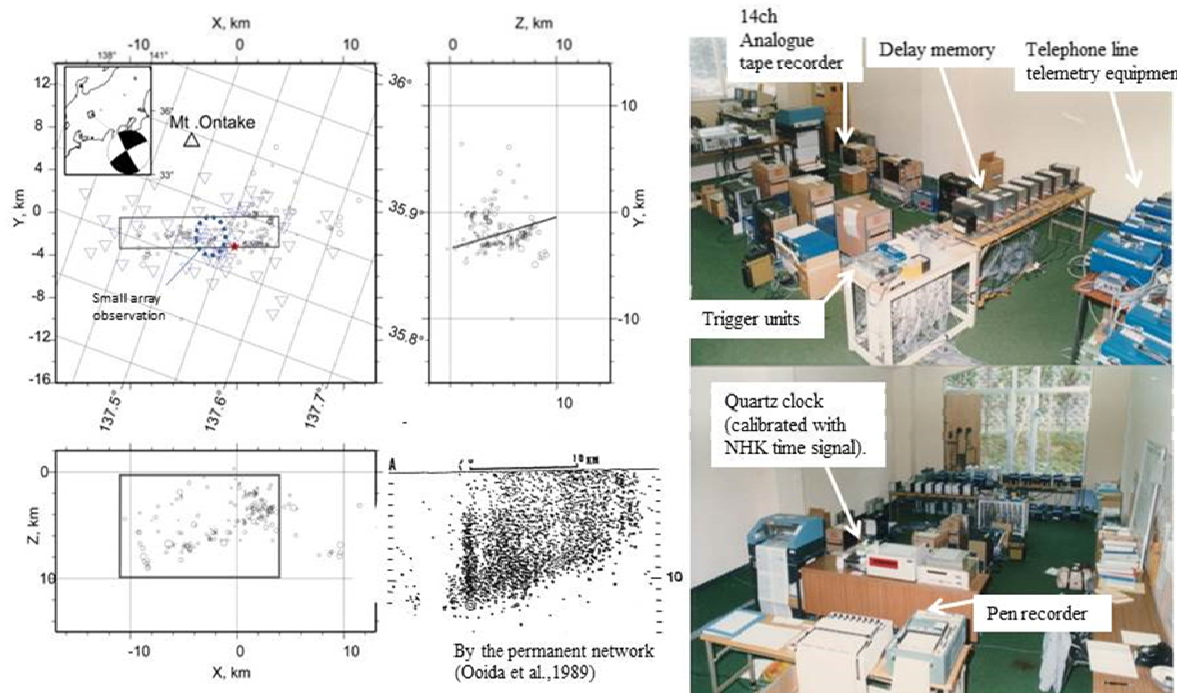


Fig. 2 Seismic observation of the Joint Seismological Research in Western Nagano Prefecture. The left panel shows the locations of dense seismic observation points and hypocenters (Horiuchi et al., 1992), modified from Yukutake et al.(2010). The location of the array seismic observation is also shown by the dashed line. The lower middle panel shows a depth distribution of hypocenters estimated by a permanent seismic network (Ooida et al., 1989). The right photos shows observation instruments installed at the Otaki village.

鉦山での観測であるため、さまざまな電気ノイズを拾う可能性があった。商用電力の周波数である60Hzのノイズが一番懸念された。そこで、小さな信号を捉えるために、電気ノイズを拾いにくく、増幅率の大きな増幅器を自作した。60Hzを除去するフィルターを備えたものも、必要なチャンネル数を制作した。

このシステムにより、目論見通り、掘削している斜坑の先端付近で、発破直後に発生した微小破壊を至近距離で記録することが出来た(飯尾, 1984a)。また、そこからやや離れたところで、発破直後でないときに、余震を伴った、マグニチュードマイナス1程度の「大きな」微小破壊も記録することが出来た。この微小破壊は、余震分布により断層サイズを推定することが出来た(飯尾, 1984b, Iio, 1986)。

中龍鉦山において、まだよく知られていない観測対象を捉えようとする経験をしたことは、その後の自然地震観測にも大いに役立った。また、阿武山地震観測所は、基本的には、仕事は担当の研究者が一人で行うというところであり、上記の観測も、鉦山の全面的なサポートをいただきつつ、一人で実行し

たことも、貴重な経験となった。

3. 長野県西部地域での極微小地震の観測

3.1 観測の動機

博士論文においては、自然地震から鉦山の微小破壊まで、破壊の規模と破壊の性質の関係を解明しようとした。修士論文で扱っていたAEは、あまりにも大きさが異なるので、外すこととした。鉦山の微小破壊については中龍鉦山で良いデータを得ることが出来たので、残された課題は、自然地震について、鉦山の微小破壊に近い、できるだけ小さな地震を捉えることだった。阿武山地震観測所の観測坑道に、中龍鉦山で用いたような高周波まで帯域の延びた観測システムを設置して、小さな地震を捉えようとした。しかしながら、その付近の微小地震の震源の深さは5km~15km程度であり、震源に近づき、小さな地震を捉えることには限界があった。そのようなときに、1984年長野県西部地震(Mj6.8)が発生した。大地震が起こると多数の余震が伴うので、小さな地震を観測

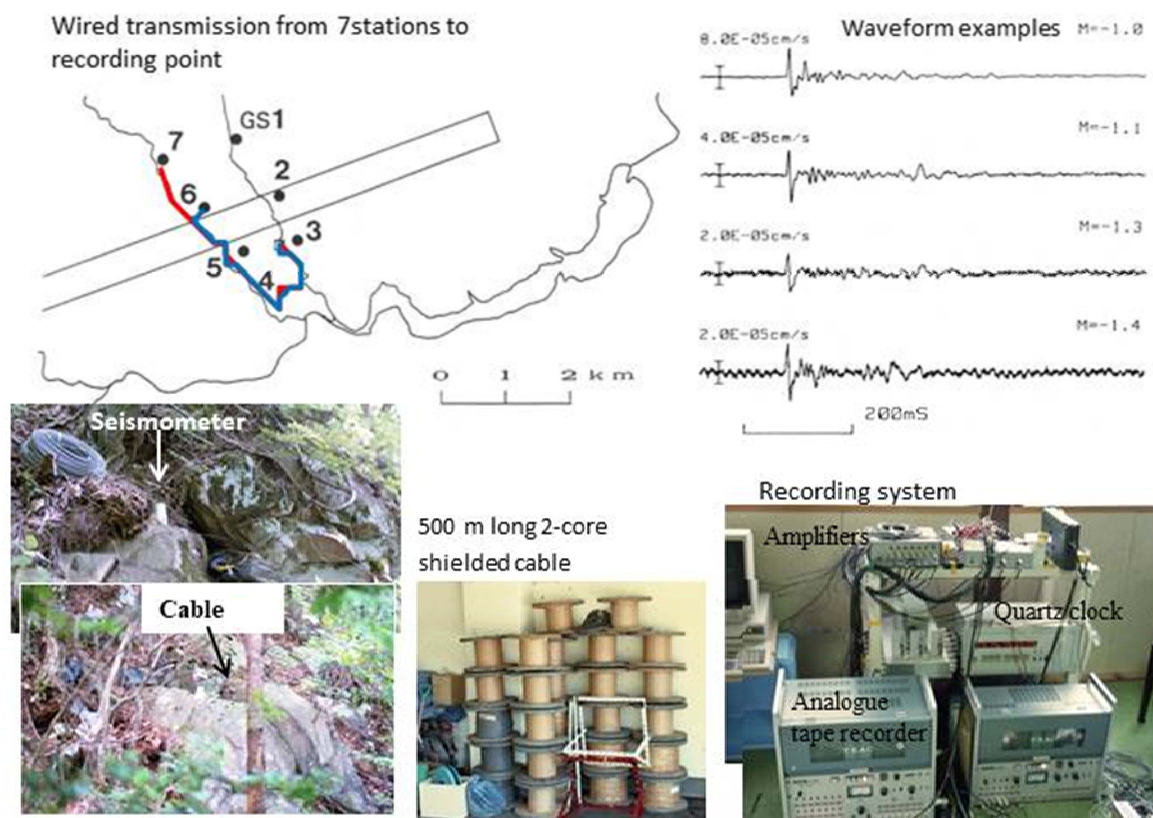


Fig. 3 Small seismic array (Kyodai-godo) of the Joint Seismological Research in Western Nagano Prefecture. The upper left panel shows the locations of 7 seismic stations and the recording site (Iio, 1991). The rectangle is the estimated fault plane of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake. The upper right shows examples of observed waveforms with magnitudes from -1.4 to -1.0 at No.4 station. The lower photos show the seismometer, cables, cable bobbins and the recording system.

出来るのではないかと考えた。また、長野県西部地域は山岳地帯であり、地動ノイズも小さいことが期待された。

3.2 発生直後の余震観測

1984年長野県西部地震は、御岳山の南東麓で、9月14日に発生した。御岳崩れ等の土石流や地すべりにより、29名の方が死者・行方不明者となった。発生直後、余震域には車では近づけないという情報を名古屋大学青木治三教授からいただき、岐阜県の付知から県境の山を徒歩で越えて余震域に行くことを計画した。徒歩のために、観測システムは可能な限り小型軽量であることが必須で、これまで用いていたものは使えない。阿武山の伊藤潔助手が自作した、カセットテープに流し撮りする爆破観測用のシステムが存在した。爆破観測とは、地殻構造の解明のために、ダイナマイトの発破を行い、側線上に並んでその信号を記録するものである。多点で観測する必要があるが、AC電源はあてにできないので、小型軽量、電池で駆動できるものが主流であった。周波数特性をチャックしてみると、200Hzくらいまでは特性が伸びていることがわかり、それを使用させていただくこととした。

9月17日に、付知の国有林道を車で行けるところまで行って一泊、翌18日にテントを担いで山越えて、余震域を目指した。しかし、軽量ではあるが予備システムも含めて2セットの観測システム、小型のオシロスコープ、設置用の工具、テントと食料その他と、荷物はかなりの重量となっており、余震域の手前で力尽きて、そこで観測をすることになった。荷物を少なくしたいにも関わらず、小型のオシロスコープまで持っていったところに若さが出ているが、驚くべきことに、モニター画面はほとんど常時ゆれっぱなしだった。5分に1回くらい有感地震もあった。

データの処理解析には、行竹助手が岩石実験で使っていた、AE測定用のトランジェントメモリーを使用した。高速でAD変換できるので、100Hzを超えるような高周波の地震波でも、全く問題なくとらえることが出来る。その結果、S-P timeが55ms、震源距離約400mをはじめとして、至近距離で多数の余震を記録することが出来た(飯尾, 1986)。このデータは、地震モーメントと周期の関係だけではなく、地震の始まり方の議論にも大きな貢献を果たした(Iio, 1992)。

後からわかったのだが、実は、力尽きたところは、開削後それほど時間のたっていない林道であり、路肩の岩盤がほとんど風化していなかった可能性がある。そのため、地表の観測点にも関わらず、卓越周

波数が200Hz近いような高周波の地震波を捉えることが出来たと考えられる。

3.3 長野県西部合同地震観測

2年後の1986年9-11月に、長野県西部地域において、合同地震観測が行われた(青木, 1988)。この観測は、現在も大地震発生時などに行われている合同観測の走りであり、全国の大学の地震予知研究計画に参画していた組織の総力を結集し、2年間の準備を経て、59点から成る観測網が設置された。阿武山からも、黒磯・梅田・伊藤・飯尾の4助手が参加した。Fig.2に、観測点分布と得られた震源分布、および集中記録が行なわれた王滝村国民体育館の一室に設けられたセンターでの観測風景を示した。私は、観測準備班に所属して、無線テレメーターの試験や機材の準備等を行った。この年には長野県西部に100泊以上している。

GPSはなく各観測点で高精度の時刻信号が得られないので、有線・無線テレメーターによりセンター

Seismic observations in a 1200m deep borehole (OT-03) with a hydrophone

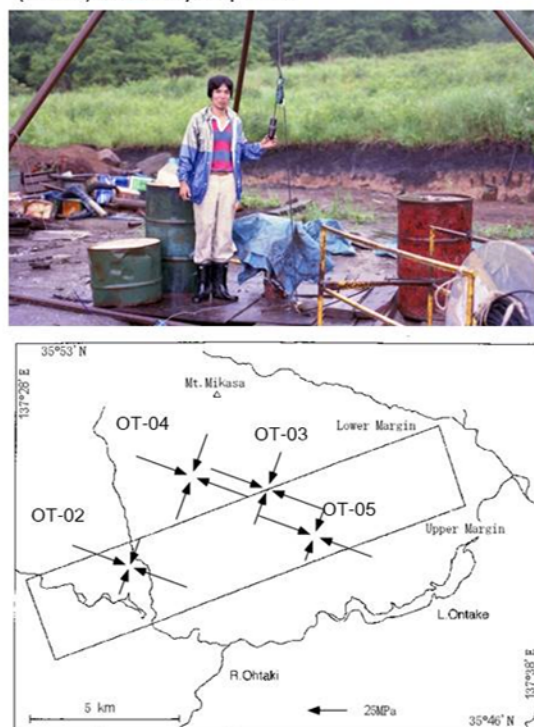


Fig. 4 Seismic observations with a hydrophone at a borehole (OT-03) drilled by NEDO (Nedo, 1988). The lower figure shows the location of 1000m-class boreholes; stress measurements using core samples by Yamamoto et al. (1990) are also shown (directions of principal stresses are assumed).

に集められたデータを、アナログデータレコーダー7台にトリガー方式で集中記録することが基本となった。マンパワーや費用の問題のため、52日間しか観測を継続できなかった。パソコンによる収録と自動処理も試験的に行われた(堀内・他, 1985)。

Fig.2の左下には、稠密観測により得られた震源分布(Horiuchi et al., 1992)と、名古屋大学の定常観測網によって得られた分布(Ooida et al., 1989)を比較した。地震分布の下限が東上がりの傾向はどちらも同じだが、合同観測によるものが、コンパクトにまとまっており、震源断層を非常に明瞭に描き出している。これ以降、稠密な余震観測により、内陸地震の発生過程の解明が進むこととなる。

合同観測の基本方針は、出来るだけ多くの観測点を設置することであり、テレメーター装置の数は限られているので、単独点の設置が推奨された。京都大学では、阿武山と防災研究所の地震関係の組織の若手が共同して、7点からなる小アレイ観測を実施した(西上・他, 1988)。Fig.3に観測点の分布と波形例および観測写真を示す。センターとはつながっていない単独点であるが、点数を稼ぐために、2芯シールドマイクケーブルでデータを伝送して、7点の集中記録を実現した。やり方は、まさに愚直の極みであるが、各点から記録場所までで別々の2芯線でつなぐと

いうものだった。ケーブルを16km購入し、約14kmを使用した。普通、このような長いケーブルでアナログデータを伝送することは行われないが、中竜鉱山の経験等から、電気ノイズを拾うのは必ずしもケーブル長の問題ではないことを知っていた。用心のため、地震計のすぐ横にプリアンプを置いていたが、Fig.3のように、SN比の良い記録を得ることが出来た。テレメーターを使っていないので、周波数特性も十分に高周波まで伸びており、小さな地震も問題なく観測可能であった。

成果の一つとして、マグニチュード-1.4未満の地震が、検知能力があるのとれなかったという結果が得られ、破壊がゆっくりになると、地震でなくなってしまうという論文を発表した(Iio, 1991)。

ところで、Fig.3には、Fig.2と同じ高精度時計が写っている。単独点なので独自の高精度の時計が必要だからである。この時計は理想的には、センターの時計とぴったり時刻が一致している必要がある。稠密な観測網であり観測点間隔が1km程度と非常に短いため、少なくとも、10ms以内に合わせる必要があった。この時計は、阿武山の微小地震定常観測網で用いられていたものと同じ近計システム社製の時計であり、私は、微小地震担当の黒磯助手から調整手法を学んでいた。そのため、単独点でも刻時精度を

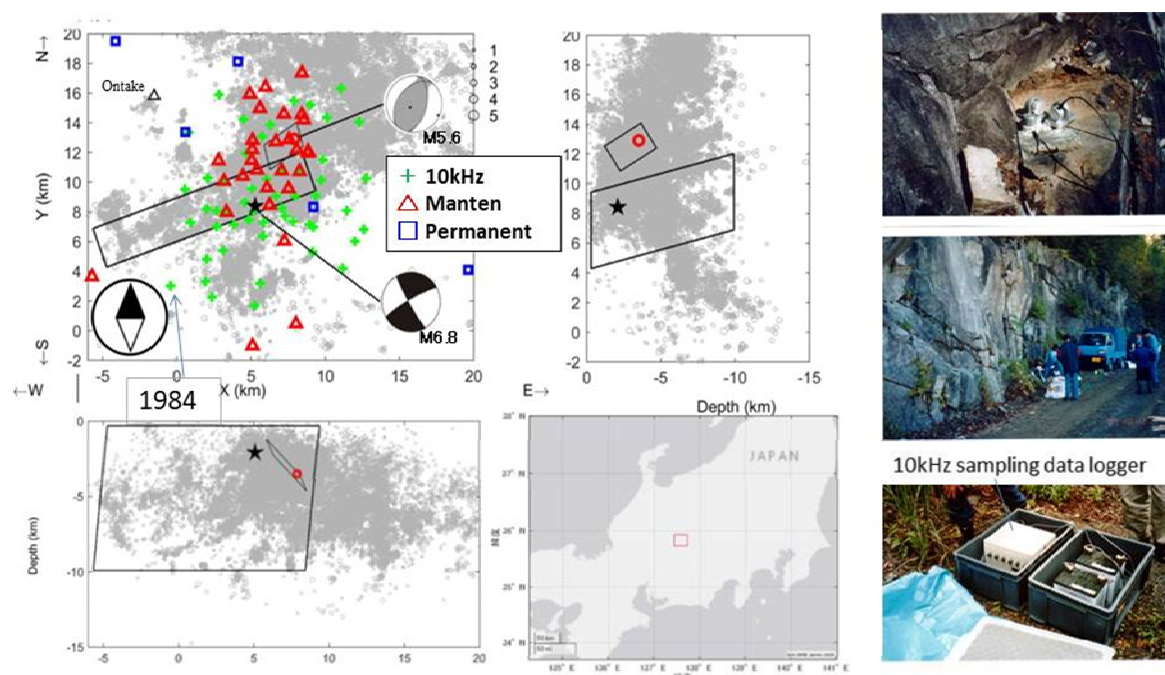


Fig. 5 Locations of seismic observation stations and earthquake hypocenters in the Western Nagano Prefecture region, Japan (modified from Nogi et al., 2021), and photographs showing observation scenes. 10 kHz: 10 kHz sampling stations; Manten: Manten stations; Permanent: permanent stations (Nagoya University, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention). The source fault and hypocenter of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (M5.6) is projected on each section. The point marked 1984 is the same location as the station installed immediately after the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake. Upper right: seismometers (L-22D); middle right: situation near the observation point; lower right: data logger and batteries.

確保することが出来、合同観測に貢献することが出来た。

3.4 長野県西部ボアホール地震観測

合同観測と同時期に、長野県西部地域において、新エネルギー総合開発機構により、地熱開発促進調査が行われていた(NEDO調査報告書, 1988)。Fig.4に1000m級のボアホールの位置を示す。長野県西部の推定断層の付近に多数のボアホールが掘削されていた。

Fig.3に示された地震や、発生直後に観測された震源距離約400mの余震のように、長野県西部地域では、地表近くまで余震が発生している。そのため、1km程度のボアホールでも、地震発生域に届いている可能性があった。そこで、NEDOの調査終了後にボアホールを使用する許可をいただき、地震観測を試みた。私は、ボアホールでの観測は未経験だったので、当時防災科学技術研究所におられた佐藤春夫博士に指導および機材を提供いただき、OT-03の深度約600mにおいて、ハイドロホンによる地震観測を行った。残念ながら、機材のトラブルにより数日間の記録が得られたただけだったが、震源に近づくことを試みた貴重な観測であった。

その後、地質調査所(現産業技術総合研究所)の伊藤久男博士らのグループと共同で、200mボアホールでの地震観測を1991年に開始した。また、防災科学技術研究所では傾斜観測のための王滝観測井(深さ150m)(防災科学技術研究所, 2001)、産業技術総合研究所では王滝観測施設(深さ800m)(伊藤, 1992)を掘削し、各種の調査研究を行っている。これらのボアホールに設置された地震計のデータは非常に高品質であり、大いに活用させていただいた(Iio et al., 1999)。

4. 2つの万点(満点)計画

1990年頃になると、記録方式がアナログからデジタル方式に変わってきた。また、GPS衛星が運用を始めており、各点で高精度の時刻信号を得ることが可能となりつつあった。これらにより、それ以前よりもずっと安価で高精度の記録装置を開発できる条件が整い、稠密多点観測を行うために、2つの観測装置を開発した。1つめは、1秒間に1万ポイントのデータを記録するもの、2つめは1万点の観測も可能とするもので、万点をもじって満点計画と命名した。

4.1 長野県西部10kHzサンプリング地震観測

1986年の合同観測以降、長野県西部地域では多点の地震観測は行われていなかった。震源が浅く、地震活動が活発で、アクセスに使用できる林道等が縦

横に走っており、山中でノイズレベルが低く、硬い岩盤が露出しているという地震観測には理想的な場所なので、それに見合うだけのしっかりした地震観測を行いたいと思っていた。

1993年に防災科学技術研究所に移籍し、特別研究という主力のプロジェクトのサブテーマとして概算要求が認められ、1995年に10kHzサンプリングの地震観測を開始した。サブテーマは、直下型地震のダイナミクスというもので、実は、地震発生域を掘りぬくというものの壮大なプロジェクトだった。ボーリングには進めなかったが、掘削のための事前調査として地震観測を行った。

上記のように、GPS衛星の運用等のために現地収録方式をとることが可能となっていた。そこで、近計システム株式会社と共同で、低消費電力型の高サンプリングデータロガーEDR-6600を開発し、Fig.5に緑色の+で示した57か所に観測点を設置した。ほとんどが電源のない山の中のためバッテリーで駆動した



Fig. 6 Photograph of a forest road leading to observation stations near the immediate vicinity of the low velocity anomaly area. Above: point where bear grass covers the road but it is still passable by car. Bottom: forest road impassable by car due to overgrowth of bushes.

が、低消費電力型と言っても、2週間おきにバッテリー2個を交換する必要がある、冬季には積雪のためアクセスできないので毎年撤収していた。高周波まで精度よく地震波形を記録するために、1秒間に1万ポイントと言う、通常の100倍のサンプリングでデータを取得した(Iio et al., 1999)。

2000年代になると太陽電池が普及し、バッテリー駆動の観測点には全てソーラーパネルを設置することにより、ようやく通年の観測が可能となった。また、データを記録する媒体は、当初はリムーバブルハードディスク(512MB)であり、トラブルが多かったが、CFカードに変更することにより欠側も少なくなった。その結果、1995年から2022年まで約27年間という長期間にわたって、データを記録し続けることが出来た。得られたデータから、地震のP波初動の徐々に加速する立ち上がりが震源特性であること(Iio, 2009)、1984年長野県西部地震を起こした応力場は深部すべりによると考えられること(Yukutake et al., 2010)、地震波速度異常と地震発生の関係(Doi et al., 2013)など、多くの成果を上げることが出来た。

ところで、この装置、EDR-6600は、海外でも活躍した。1999年8月17日のトルコ・イズミット地震(M7.6)の余震観測においてである。海外で起こった大地震の余震観測としては、1990年のフィリピン地震の際に、防災研の総力を挙げて実施したものである(Shibutani et al., 1991)。これは海外では初めての本格的な余震観測であるが、観測方法は、フロッピーディスクに連続でデータを収録するというものだった。PHIVOLCS(フィリピン地震火山研究所)から防災研に依頼があり、適当な観測機器を持っていなかったにも関わらず、意に感じて出動した地震観測だった。

イズミット地震に関しては、私はどうしても余震観測に出なければならなかった。北アナトリア断層では1939年頃から西方への大地震のマイグレーションがあり、1967年Mudrunu地震はその最後の地震だった。1987年に、東工大とボアジチ大の共同研究(本蔵・伊東・大志万, 2000)の一環として、その西端付近で地震観測を行っていた(Iio et al., 1991)。イズミット地震はまさにその観測地域で起こった地震だった。EDR-6600を空輸し、10か所に設置した。観測中に隣接領域でM7.2のデュズジェ地震が発生し、その発生前に、余震域東部で地震発生域の下限付近に線状の余震分布が見いだされ、深部のゆっくりすべりを示すものであると考えられた(Iio et al., 2002)。

4.2 満点計画

(1) 満点地震観測装置の開発

GPS衛星により、単独点での地震観測が現実のも

のとなったが、しばらくの間は、記録媒体の容量や記録装置の低消費電力化が十分ではなく、電源のない山中での観測を長期間行うことは難しかった。例えば、2000年鳥取県西部地震の合同余震観測では、DAT方式のレコーダーによる59点の観測が行われたが(Shibutani et al., 2005)、観測期間は1か月半程度だった。そのため、数か月以上の長期間の観測は、電源のある地点において、オンラインで行うことがほとんどだった。合同余震観測のような稠密多点の地震観測を長期間にわたって行うことはできなかったわけである。前節の10kHz観測は、トリガー方式であり、労力のことを考えない例外的な観測である。

そこで、電源のない山中でも長期間にわたって観測可能な装置の開発を2006年ごろから開始した。必要とされる記録装置の仕様は、小型バッテリー1個で半年以上連続観測可能というものだった。京大防災研を中心とする研究者と、近計システム株式会社を中心とする関西の中小企業が共同して、EDR-X7000を開発した(三浦・他, 2010; 飯尾, 2011; 飯尾, 2012; 飯尾, 2017)。

装置の開発の経緯や装置の詳細等は、既に上記の文献等に詳しいので、ここでは概要のみを紹介する。GPS衛星からの信号を受信しないときには、CPUを完全に停止するなどの徹底した省電力化により、単一乾電池24本で半年以上、250Hzサンプリングで連続観測可能な装置の開発に成功した。刻時精度については、内臓時計のドリフトを、水晶振動子への印加電圧を自動で制御することにより小さくした。最適な印加電圧は温度に依存し、装置ごとに異なるが、各装置がその補正テーブルを持ち、かつ自動的に補正テーブルをupdateすることで、高精度かつ自動調整が可能なものとなった(近計システム株式会社と共同で特許取得)。

このように記録装置は画期的なものを開発できた。地震計は既存のものを使う予定だったが、想定通りの良い記録装置が出来ると、トータルの観測システムとして、理想的なものが欲しくなった。近計システム株式会社がセンサーの開発に関心があったこともあり、地震計も開発することとなった。サイスモテック古屋和男氏ほかの協力を得て、2Hz速度型地震計KVS-300を開発することが出来た。Fig.7の左には、長野県西部の観測点(OT56)における設置の様子を示した。設置に要する時間は、GPS衛星の信号の受かり具合に依存するが、通常は30分～1時間程度である。

(2) 満点地震観測の開始

開発した装置を用いて、1万点規模の地震観測を行うおうとする満点計画を開始した。EDR-X7000とKVS300から成る満点システムが最初に現場に投入されたの

は、2008年6月14日に発生した岩手宮城内陸地震(M7.2)である。その頃、EDR-X7000のソフトウェアはまだ最終調整中だったが、岩手宮城内陸地震は東北地方の脊梁山脈下で発生し、余震の多くは山中で発生していた(Okada et al., 2010)。その当時、満点システム以外に、山中で長期間使用可能な装置は存在しなかったため、観測点は余震域の直上を避けるかのように展開されていた。これはまずいということで、急遽、4セットを脊梁山脈に投入した。

その後、当初の予定通り、2008年8月に長野県西部地域に設置した。その秋はまだ試験観測の段階であり、KVS300も間に合っていなかったため、地震計としてはL-22Dを用いた。Fig. 5に示されているように、満点観測網は、10kHzの観測網の北部に集中的に配置

されている。これは、Doi et al. (2013)で見いだされた深さ2km程度の顕著な低速度異常域を詳しく調べようとしたからである。長野県西部地域は木曽ヒノキの産地であり、深い山中にも林道が多数整備されているため、低速度異常域の直上付近にも観測点を設けることが可能であった。しかし、Fig. 6に示すように、それらの観測点に通ずる林道は次第に通行が困難となった。最初は1km程度の距離を徒歩でメンテナンスしていたが、3点は途中で観測を断念した。これらの観測点は、2018年のM5.6の断層上端付近に位置しており、M5.6の発生時点では稼働してはいなかったが、それ以前の貴重なデータを取得することができた。満点観測網は、結果的には、2017年に発生した長野県南部の地震(M5.6)の震源域をマークす

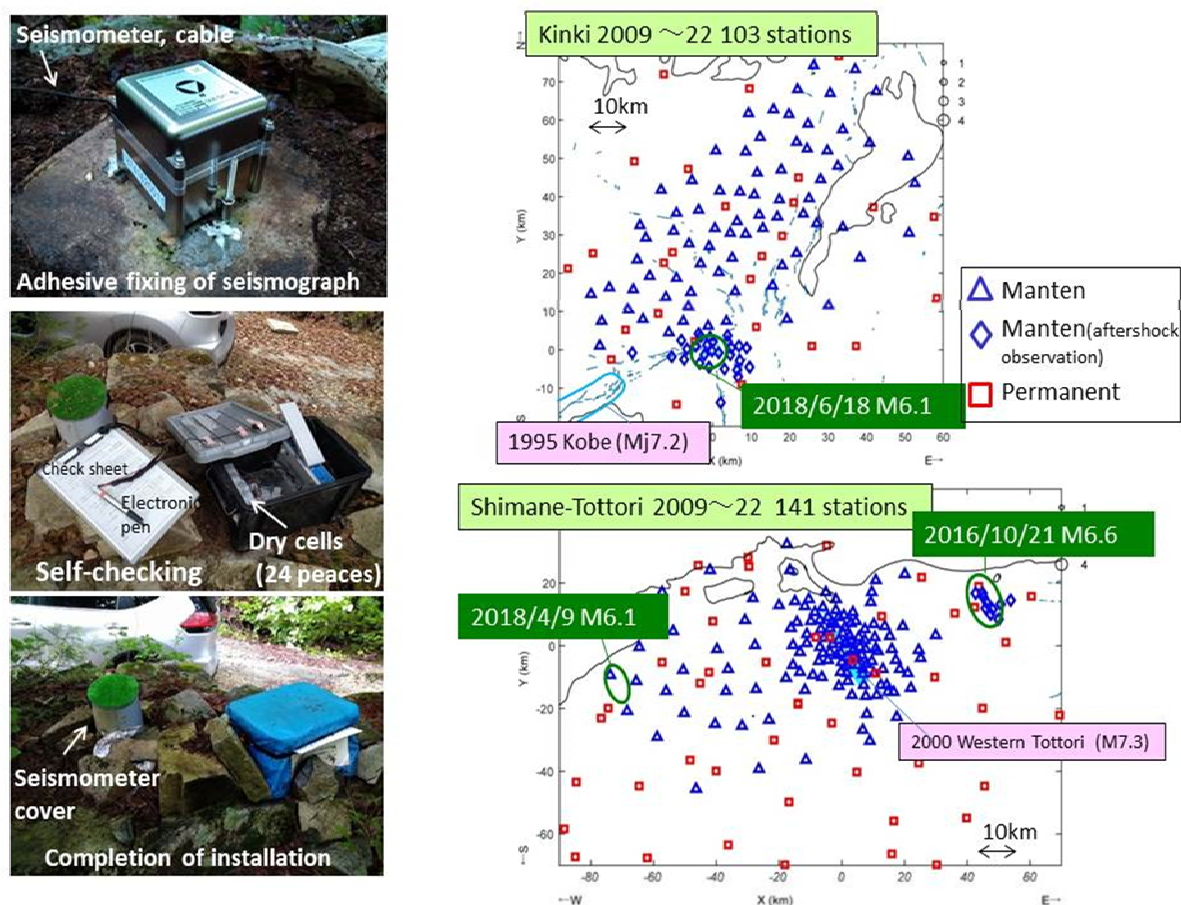


Fig. 7 Installation view of Manten seismic stations and distribution of seismic observation stations. Top left: installation of Manten seismic stations. Middle left: recording equipment being adjusted. Bottom left: installation completed; The seismometer and recording equipment are covered. Top right: distribution of Manten stations installed in the Kinki region, with the epicenter areas of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake and the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake circled by blue lines. Bottom right: distribution of Manten stations in the Shimane and Tottori regions, with the epicenter areas of the 2006 Central Tottori Prefecture earthquake and the 2018 Western Shimane Prefecture earthquake surrounded by blue lines; stations are densely located near the aftershock zone of the 2000 Western Tottori Prefecture earthquake.

るような配置となっていた。地元の人も滅多に行かないようなアクセスの悪いところで、大変な労力をかけて密な観測点配置を取っていたところ、数km以内という至近距離でM5.6の地震を捉えることが出来たわけである。付近では、2003年ごろに、水準測量により、局所的な隆起が観測されていた(Kimata et al., 2004)。

この付近は地震発生域の下限が5-6kmと浅く、M5.6といっても、地震発生域をほとんど断ち切るような地震だった。つまり、M5.6はこの地域の最大級の地震と言えるものである。この地震がどのような地震で、なぜ起こったのか、地震前に何らかの異常があったかなどについて鋭意検討中である(例えば、野木・他, 2021)。

(3) 満点地震観測網の展開

2009年からは、近畿地方中北部および山陰地方の地震帯の島根・鳥取地域にも観測網を展開した。これらの地域における観測点分布をFig.7に示した。近畿地方中北部は1995年兵庫県南部地震の震源域に隣接しており、定常的な地震活動が活発な地域である。島根・鳥取地域は、2000年鳥取県西部地震が発生し、余震がまだ続いている。山陰地方の地震帯は、日本の内陸においては、この約100年では、大地震の活動が最も活発であり、微小地震も海岸線に沿って線状に分布している(例えば、Kawanishi et al., 2009)。

このように、観測網内かその近傍で既に大地震が発生しており、地震活動が活発な地域を観測フィールドとして選定したわけである。ところが、それぞれのフィールドとその周辺では、観測期間中にも、2018年大阪府北部の地震(Mj6.1)、2016年鳥取県中部地震(Mj6.6)、2018年島根県西部の地震(Mj6.1)が発生した。予期していなかったのだが、大地震の発生前からある程度の密度の地震観測網が設置されていることは、上記の2017年長野県南部の地震(Mj5.6)や2008年の岩手宮城内陸地震(Mj7.2)を除けばそれほど例はなく、貴重なデータを取得することが出来た。例によって、地震発生後には、関係する機関と共同して稠密な余震観測を実施して、これらの地震の発生過程等を調べている(Iio et al., 2020 ; Iio et al., 2021 ; Iio et al., 2022)。

これらの中で、2016年鳥取県中部地震は、2000年鳥取県西部地震と同様に、山陰地方の地震帯に沿う方向ではなく、それに直交する断層で発生した地震だった。2000年の合同余震観測のデータを使わせていただき、Yukutake et al.(2007)は、地震前に断層の南端で差応力が小さかった可能性を指摘していた。これは、地震の発生過程を考える上で重要な指摘であり、島根・鳥取の満点観測網は、2000年鳥取県西

部地震の発生過程の解明が大きな目的の一つであった。そのため、Fig.7に示されているように、その余震域に観測点を重点的に配置している。2016年鳥取県中部地震も地震帯に直交する断層を持つ地震だった。そのため、鳥取県西部地震に関して上がっていた断層端の課題を解決すべく、余震観測点も南端付近を特にマークするように配置していた(Iio et al., 2021)。発生直後から多点を密に配置した結果、断層端の特徴を明らかにすることが出来た(Iio et al., 2022)。

満点観測網は、これら以外に、2009年頃から、ニュージーランド南島北部にも設置された。ニュージーランド南島北部には、アルパイン断層の東西に多数の内陸の活断層が存在する。東側のマールボロ地方には長大な横ずれ断層が多数走っており、各断層の深部に低比抵抗異常が見つかった(Wanamaker et al., 2009)。定常地震観測網は密には配置されていないので、満点観測網を設置した(三浦・他, 2014 ; Okada et al., 2019)。海外での長期間の観測は国内以上に大変であるが、ニュージーランド南島北部は、内陸地震の発生域の直下に、沈み込むプレート内の地震活動が広く分布しており、活断層の深部の構造を調べるには非常に適した場所であった。この観測網内においては、2016年にカイクウラ地震(Mw7.8)が発生し、関連する速度構造や応力場を推定した(Okada et al., 2019)。国内の満点観測網は2022年に全て撤収されたが、ニュージーランド南島北部については、東北大・九大とビクトリア大など現地の研究機関の共同研究により、現在も観測継続中である。

(4) 大阪府北部の地震の余震観測

2018年大阪府北部の地震(M6.1)は、阿武山観測所の直下で発生した。その余震観測は、これまで行ってきた地震観測とはやや異なっていた。というのは、震源は人口密集地である大阪府の高槻市役所付近に決定されており(気象庁, 2018)、余震域のかかなりの部分は人口密集地の下にあったからである。この付近の満点観測網は、全て、有馬高槻断層帯の北側、北摂・丹波山地の山中のノイズの小さな場所に設置されていた。それでも、Fig.8に示すように、余震域直上に数点の観測網が稼働しており、発生直後の余震活動の把握には大いに役立った。しかし、余震域を囲むようには設置されていないため、発生当日から、京大九大東大地震研関大の合同余震観測により、余震観測を開始した(飯尾, 2020)。

通常は高感度地震観測を行わないような場所での観測となったが、何とかあるという見込みがあった。というのは、2017-2018年にかけて、鳥取県西部地震の余震域において、0.1満点観測という1000点の地震

観測点を約1km間隔で設置するという観測を行っていたからである(松本・他, 2018 ; 松本・他, 2020 ; Hayashida et al., 2020). 用いられた装置は, この観測のために, 九州大学の松本さんを中心とする研究者と近計システム株式会社が, 満点の記録装置をベースに新たに開発したものである(松本・他, 2018). 鳥取県西部地震の余震域は米子市街にも伸びており, 1kmおきに観測点を配置するために, 通常は設置しない街中にも観測点を設置したが, 問題なくデータを取得することが出来ていた. 大阪府北部では条件はさらに厳しいが, 大地震直後の余震活動が活発化したときにおこる大きめの余震を観測することによ

りなんとかなると考えた.

鳥取県西部での経験も大きかったが, さらに, 地元であることが大きかった. 阿武山観測所はまさに余震域の直上にあり, 2011年に始まったサイエンスミュージアム構想において, 主要な役割を果たしている多数の阿武山サポーターが存在した(矢守・他, 2021). 阿武山サイエンスミュージアム構想とは, 阿武山地震観測所の歴史的な地震計を活用して, 地震の博物館として, アウトリーチ活動を行おうとする計画である. そして, その際のキーワードに市民参加ということがあった. 防災に関する様々な取り組みにおいて, 与える側の専門家と受け手としての市

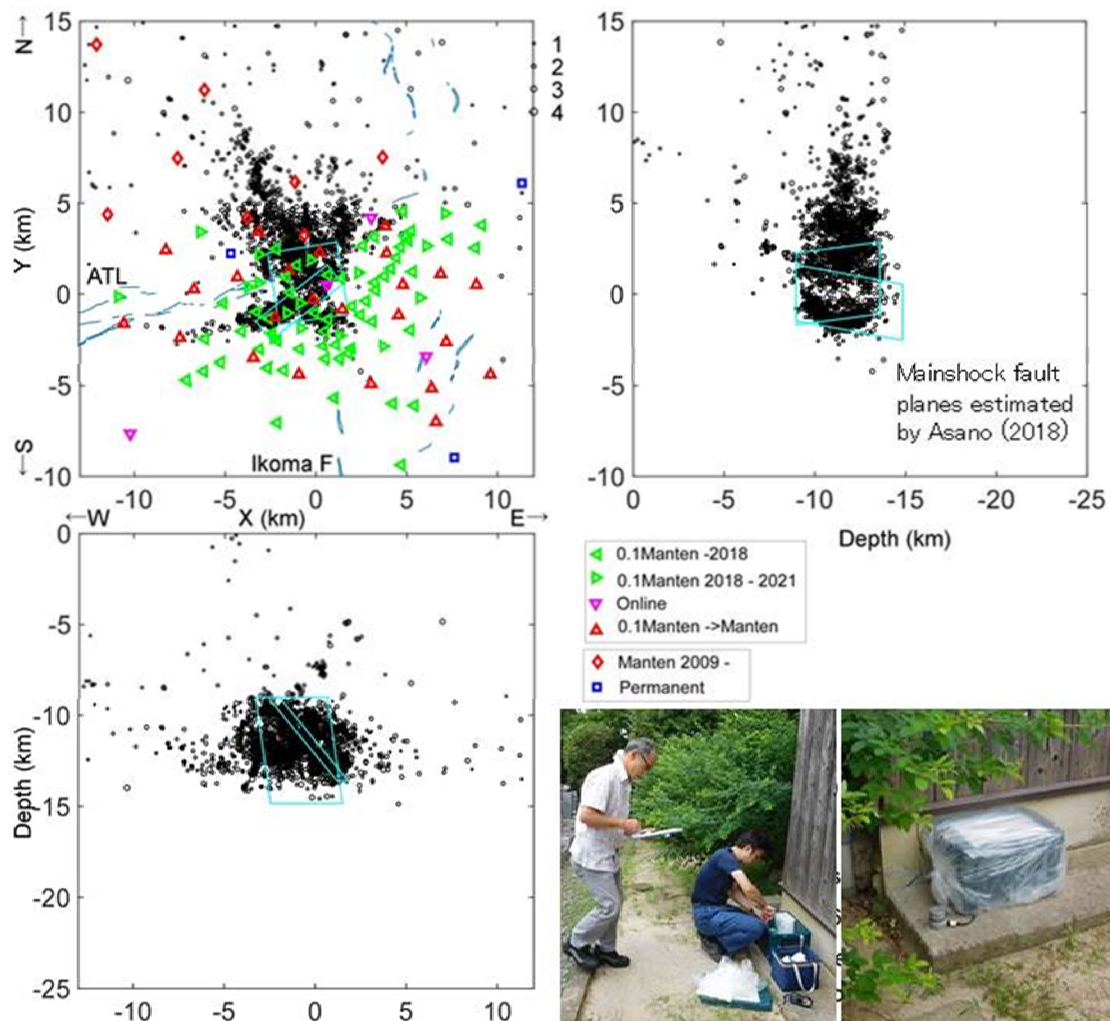


Fig. 8 Distribution of aftershocks, observation stations and observation views of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake (Iio, 2017). Observation points are indicated by different markings, depending on the instrument used: 0.1 Manten instruments (until 2018), 0.1 Manten instruments (until 2021), online observation points, 0.1 Manten systems replaced by Manten systems, and Manten stations in operation since 2009. The blue rectangles are the mainshock fault planes estimated by Earthquake Research Committee (2018). ATL: Arima-Takatsuki fault zone. Ikoma F.: Ikoma fault zone. Photographs show the installation of 0.1 Manten system and after installation at the Sonjyu-ji temple (OT72) in Takatsuki.

民という関係となることが多いが、指示待ちの姿勢に結び付く可能性があるなど、問題が指摘されていた(矢守・他, 2021 ; 岩堀・他, 2016). そこで、阿武山観測所において、市民参加型の取り組みを行い、これまでの防災研究に新しい風を吹き込もうと計画された。この構想に沿って、見学会のツアーガイドを務める一般市民のサポーターが育っていた。

阿武山サイエンスミュージアム構想のもう一つの特徴は、歴史的な地震計の展示だけではなく、最先端の地震研究が行われていることである。上記の満点計画の基地を阿武山に置くことで、一般市民の方々が最先端の研究に直接触れることが重視された。このことは、絵にかいた餅ではなく、鳥取県西部地域での満点地震観測等に阿武山サポーターが積極的に参加することなどにより、実行に移されていた(飯尾・他, 2017). 鳥取県西部地震の0.1満点観測では、現地の一般市民のボランティアにも観測点調査等で大変お世話になったが、阿武山のサポーターは、研究者と一般市民の間を取り持つ重要な役割も果たしていた。

鳥取県西部地域で経験を積んだ阿武山サポーターは、地震観測に関して、既に十分なノウハウを身に着けるまでに成長していた。発生の翌日から、土地勘、地縁血縁を駆使して、場所探し、土地交渉から設置まで、阿武山サポーターの大車輪の奮闘により余震観測を実施することが出来た。用いた機材は、鳥取県西部や島根県西部の観測から戻ってきていた0.1満点システムである。電池がまだ入っているものが多数あった。0.1満点システムは、上下動のみの1成分観測であることもあり、設置に要する時間は15分程度である。地震発生後の1週間で60か所ほどの観測点が設置された。その後、2020年冬に開始した第2期の余震観測(Fig.8には未記載)を含めて、大阪府北部において、総計約160か所の余震観測点を設置した。

これまで行ってきた他の観測も同様であるが、我々の観測は、地震の発生機構の解明等の基礎的な課題を明らかにすることが主な目的であり、地震計の設置でお世話になる地主さんに直接的なメリットがあることはほとんどない。それにも関わらず、これまで大変な便宜を図っていただけたことは大変ありがたいことである。大阪府北部に関しては、平野や台地における観測が主であり、余震は真下で起こるので、各観測点の直下の堆積層の厚さを見積ることが可能であった。堆積層の厚さその地点でのゆれ方に大きく影響しているため、このような観測でも、地震の災害軽減に役立つ可能性が示された。

5. おわりに

ここでは主な観測事例を紹介したが、最後に非常にユニークな2つの事例を紹介したい。1つめは、2004年新潟県中越地震の京大九大合同余震観測である(Shibutani et al., 2005 ; Matsumoto et al., 2005 ; 飯尾・他, 2006). 停電の中での衛星テレメーターによるオンライン観測という力任せの余震観測であったが、速度不均質の大きな地域において、精度良い余震分布を即時的に決定するのに大いに役立った。このデータは、気象庁にもオンラインで分岐され、監視業務にも使われた。海外では、南アフリカの金鉱山においても観測を行った(小笠原・他, 2003). 私が働いたのは最初の立ち上げの頃だけだが、その後、立命館大の小笠原宏さんを中心とする国際共同研究として大きな成果を上げている。長野県西部では震源が非常に浅く、南アフリカの金鉱山と同程度である。南アフリカの金鉱山では、震源に肉薄できるが、それは厳密に言えば自然地震ではない。両者を比較研究することが重要であるが、今後の課題となっている。

駆け出しの頃は、既存の装置を組み合わせで観測を行っていた。その後、電子技術等の進歩もあって、独自に観測装置を開発することが可能となった。満点計画では、1万カ所で地震観測するために、当初は、1セット10万円以下の価格を目指していた。それでも、1万台となると10億円近い総額となる。このように、地震観測には膨大な費用がかかり、コストパフォーマンスが悪いとよく言われた。予算獲得にプラスとなるように、目立つネーミングをしたのが、満点計画である。目覚ましい成果を上げてアピールすることはあまり出来ず、実際に設置できたのは、1万カ所には程遠かった。それでも、例えば、九州大の松本さんや東大地震研の酒井さんたちとの共同研究により、鳥取県西部地域では、満点計画の理想に近い約1kmスパンで1000点の観測を実現することが出来た。

本稿では、大学院生として阿武山に常駐して以来関わってきた地震観測について紹介した。阿武山地震観測所で課題研究を行ったことがきっかけであるが、内陸地震についての現在の研究のレベルを見ると、データを取得することを重視した研究生活を送ったことは正しい選択であったと個人的には思っている。残念ながら、データを取得することを重視しすぎて、処理・解析には、観測ほど力を割いてこなかった感は否めない。しかしながら、もしそうしていなかったら、ここで述べたようなデータに関して、少なくとも一部は得られなかったはずである。これらのデータは、今後も長い間、地震の研究に貢献できるものと信じている。

謝 辞

1983年日本海中部地震の余震観測を行っていた最中の7月1日に、京都大学理学部に助手として採用されて以来、約40年間にわたって、地震に関する研究・教育に従事させていただいた。この間にお目にかかった全ての方から様々なことを教わり、色々なことを学ばせていただいた。退職に際して、いただいた名刺を全てスキャンしたので、名刺をいただいた方についてはお名前を挙げることは可能であるが、お名前を存じ上げない方も多数おられる。個別にお礼を申し上げることが出来ない非礼をお詫びしつつ、大変お世話になった全ての皆様に深く感謝申し上げます。

本稿では地震観測に焦点を絞って、これまで行ってきたことを紹介したが、地震観測の出来不出来は、観測装置の良し悪しに最も大きく依存する。何とかやってこられたのは、観測装置に関してお世話になった全ての方々のおかげである。本稿では触れることは出来なかったが、私は、就職後最初は、阿武山微小地震観測網を担当していた。テレメーターと基幹の処理システムでは沖電気工業、データレコーダー等ではティアック、地震計では勝島製作所さんなどに大変お世話になった。近計システム株式会社さんには、いくつもの重要な観測装置を作っていただいた。本稿で何度も「共同で開発」と記述したが、基本的にはこちらは仕様を提案しているだけで、実際の仕事はメーカーさんに全てやっていただいた。高島一徳氏、内田 淳氏、本橋恵三氏、大橋善和氏を始めとする近計システム株式会社の方々には本当にお世話になった。

地震観測でもう一つ欠くことが出来ないのは、観測のための費用である。「金食い虫」と揶揄されていたが、多数の予算を付けていただき、紹介したような観測を実行することが出来た。特にお金のかかった満点システムに関して、主なものを列举させていただくと、装置開発においては、京都大学総長裁量経費(2006年度) 超多点フィールド計測システムの開発、防災研究所特別事業費(2007年度) 次世代型地震観測システムの開発、科研費基盤A (2007-2009年度) 地震はなぜ起こるのか？-地殻流体の実体の解明、観測の実行においては、文部科学省 (2007-2011年度) ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究、防災研究所特別事業費(2009年度) 次世代型地震観測システムの共同利用、文部科学省 (2009-2013 年度) 地震・火山噴火予知のための観測研究計画、文部科学省 (2014-2018 年度) 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画、文部科学省 (2019-2023 年度) 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究

計画(第2次)、防災研究所拠点研究 (2010年度) 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—、科研費基盤A (2011-2014年度) 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—、科研費基盤B (2015-2017年度) 内陸地震の発生過程の解明-ニュージーランド南島北部における稠密地震観測による-、科研費新学術領域研究 (2014-2018 年度) 地殻ダイナミクス—東北沖地震後の内陸変動の統一的理解—、京都大学全学経費(2018 年度) 大阪北部地震後の大地震発生可能性の評価、防災研究所拠点研究 (2020年度) 大阪盆地北部における地盤構造のマッピングと未知の活断層の発見—オープンサイエンス的な手法による余震観測から—、および、様々な方面から暖かいご支援をいただいた。

満点の観測点は2022年中に全て撤収された。観測点、観測機材、データ処理用機材やソフトウェア等の「後始末」は膨大な仕事量となった。データについては、各種の波形データ、読み取りデータや観測に関する全ての情報とともに、アーカイブされている。これらの大変な仕事の多くを担っていただいた、田中美恵さん、澤田麻沙代さん、ホクト電気制御・水沼さん、富阪和秀さん、片尾浩さん、水島理恵さんには大変お世話になった。特に、これらの仕事は、田中美恵さんの完璧な仕事抜きには決して完了しなかったと思われる。

最後になったが、地震観測において必須なのが、地元の皆様の協力である。様々な立場の方々から、温かいご支援・ご協力をいただき、長期間にわたって観測を行うことが出来た。お世話になった皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 青木治三 (1988) : 1986年長野県西部合同地震観測-基本観測ノート-, 月間地球, 1986年長野県西部合同地震観測--御嶽山を探る-(1), 第10巻, 11号, pp. 657-659.
- 飯尾能久 (1982) : 破壊のスケーリング—自然地震からA Eまで—, 地震2, 第35巻, pp. 183-193.
- 飯尾能久, (1983) : 破壊のスケーリングその2, —一群発活動の時, 空間分布および規模別頻度分布について—, 地震2, 第36巻, pp. 13-21.
- 飯尾能久, (1984a) : 発破によって誘発される微小破壊, 地震2, 第37巻, pp. 109-118.
- 飯尾能久, (1984b) : 余震を伴う微小破壊, 地震2, 第37巻, pp. 599-606.
- 飯尾能久, (1986) : 地表近くで発生した極微小地震

- M=-3, —1984年長野県西部地震の余震—, 地震2, 第39巻, pp. 645-652.
- 飯尾能久 (2011) : 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, 京都大学防災研究所年報, 54(A), pp. 17-24.
- 飯尾能久 (2012) : 満点計画一次世代型稠密地震観測システムの開発—, 物理探査学会ニューズレター, 14, pp. 2-3.
- 飯尾能久 (2017) : 地震観測システムの小型化・軽量化・低コスト化, 日本地震工学会誌, 32, pp. 8-12.
- 飯尾能久 (2020) : 大阪府北部の地震 (2018年6月18日, M6.1), 地震予知連絡会50年のあゆみ 第2部 この10年の主な地震及び地殻活動.
- 飯尾能久・松本聡・松島健・植平賢司・片尾浩・大見士朗・澁谷拓郎・竹内文朗・西上欽也・Bogdan Enescu・廣瀬一聖・加納靖之・儘田豊・宮澤理稔・辰己賢一・和田博夫・河野裕希・是永将宏・上野友岳・行竹洋平 (2006) : 2004年新潟県中越地震の発生過程—オンライン合同余震観測結果から—, 地震2, 58, pp. 463-475.
- 飯尾能久・米田格・澤田麻沙代・伊藤喜宏・片尾浩・富阪和秀・長岡愛理・松本聡・宮崎真大・酒井慎一・加藤愛太郎・林能成・山品匡史・大久保慎人・野口竜也・香川敬生 (2017) : 鳥取県西部地域における満点地震観測. 京都大学防災研究所年報. B, 60(B), pp. 382-388.
- 伊藤久男 (1998) : 長野県王滝地域における地殻応力測定結果, 地震予知連絡会会報, vol. 60, pp. 485-489.
- 岩堀卓弥・矢守克也・城下英行・飯尾能久・米田格・米山望 (2016) : 防災教育における「伝達型」・「参加型」モデルの関係性—満点計画学習プログラムをめぐって—, 災害情報, 14, pp. 140-153.
- 小笠原宏・飯尾能久・中谷正生・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ (2003) : 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験 (2002-2006), 月刊地球, vol.25, No.10, pp. 815-817.
- 気象庁 (2018) : 平成30年6月18日07時58分頃の大阪府北部の地震について, <https://www.jma.go.jp/jma/press/1806/18a/201806181000.html>.
- 島田充彦 (1993) : 高圧実験による深発地震発生機構の解明, 高圧力の科学と技術, 2(2), pp. 151-160.
- 地震調査委員会 (2018) : 2018年6月18日大阪府北部の地震の評価. http://www.kaiho.mlit.go.jp/syukai/soshiki/soumu/seika/h19/h19_05.pdf.
- 西上欽也・飯尾能久・澁谷拓郎・平原和朗・平野憲雄, 岡本拓夫震源域直上における極浅発地震の観測— (1) 震源分布—, 月間地球, 1986年長野県西部合同地震観測—御嶽山を探索—(1), 第10巻, 11号, pp. 711-715.
- NEDO調査報告書 (1988) : 地熱開発促進調査報告書 No. 17 王滝地域, <https://geothermal.jogmec.go.jp/report/nedo/file/48.pdf>
- 野木ひかり・飯尾能久・澤田麻沙代・富阪和秀 (2021) : 2017年長野県南部の地震(Mj5.6)の断層近傍における応力場推定, 2021年度日本地震学会秋季大会予稿集, S08-10.
- 防災科学技術研究所 (2001) : 地震の基礎知識とその観測 10.2 地殻変動連続観測, https://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/secA.2.html.
- 本蔵義守・伊東明彦・大志万直人 (2000) : 観測網のなかでおこった地震, 科学, 70, pp. 109-112.
- 堀内茂木・山本明・松沢暢・河野俊夫・長谷川昭・高木章雄・伊神輝・山田守・青木治三 (1985) : 1984年長野県西部地震余震観測データの現地自動処理について, 地震 第2輯, 38(4), pp. 529-539.
- 松島昭吾 (1956) : 花崗岩の変形と破壊について, 地震2, 8, pp. 173-183.
- 松本聡・飯尾能久・酒井慎一・加藤愛太郎 (2018) : 0.1満点地震観測による, 地殻構造の可視可に向けて, 可視可情報, 38, 149, pp. 7-10.
- 松本聡・飯尾能久・酒井慎一・加藤愛太郎 (2020) : 超多点稠密地震観測による断層帯発達過程の解明に向けて—2000年鳥取県西部地震域への適用—, 地学雑誌, 129(4), pp. 511-527.
- 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, pp. 203-212.
- 三浦勉・飯尾能久・Sibson, R. H.・岡田知己・松本聡・Pettinga, J.・Bannister, S.・平原聡・中山貴史・中元真美・山田真澄・大見士朗・米田格・濱田勇輝・高田陽一郎・深畑幸俊・小菅正裕・Townend, J.・Reyners, M.・Ghisetti, F. (2014) : ニュージーランド南島北部における地震観測. 京都大学防災研究所年報, (57), pp. 94-101.
- 山本英和・山本清彦・加藤尚之・飯尾能久 (1990) : 1984年長野県西部地震震源近傍の地殻応力 (2), 地震学会講演予稿集, No.1, 24.
- 矢守克也・飯尾能久・城下英行 (2021) : 地震学のオープンサイエンス—地震観測所のサイエンスミュージアム・プロジェクトをめぐって—. 実験社会心理学研究, 60(2), 82-99.
- 行竹英雄・飯尾能久・西田良平・谷口慶祐・寺島敦・

- 田中豊 (1982) : 鉾山における高周波帯域での微小地震の観測, 地震, 第35巻, pp. 77-90.
- Doi, I., Noda, S. Iio, Y. Horiuchi, S. Sekiguchi, S. (2013): Relationship between hypocentral distributions and V_p/V_s ratio structures inferred from dense seismic array data: a case study of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake, central Japan, *Geophys. J. Int.* 195: pp. 1323-1336.
- Hayashida, Y., Matsumoto, S. Iio, Y. Sakai, S. I. and Kato, A. (2020): Non - double - couple microearthquakes in the focal area of the 2000 Western Tottori Earthquake (M 7.3) via hyperdense seismic observations. *Geophysical Research Letters*, 47(4), e2019GL084841.
- Horiuchi, K. and the members of the Joint Seismological Research in Western Nagano Prefecture (1992): Hypocenter locations by a dense network, *J.Phys.Earth.*, 40, pp. 343-360.
- Iio, Y. (1986): Scaling relation between earthquake size and duration of faulting for shallow earthquakes in seismic moment between 10^{10} and 10^{25} dyne cm., *J.Phys.Earth*, vol 34, pp. 127-169.
- Iio, Y.(1991): Minimum Size of earthquakes and minimum value of dynamic rupture velocity, *Tectonophysics*, 197, pp. 19-25.
- Iio, Y.(1992): Slow initial phase of the P-wave velocity pulse generated by microearthquakes, *Geophys.Res.Let.*, 19, pp. 477-480.
- Iio, Y. (2009): Earthquake nucleation process - Does the initiation of earthquake rupture know about its termination?, *Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes in Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, edited by R. A. Meyers, Springer, New York., pp. 2538-2555.
- Iio, Y., Gurbuz, C. Nishigami, K. Pinar, A. Aybey, N. Ucer, S. B. Honkura, Y. and Isikara, A. M. (1991): Microseismic activity around the western extension of the 1968 mudurnu earthquake fault, *Tectonophysics*, 193, pp. 327-334.
- Iio, Y., Horiuchi, S. Bariş, S. Celik, C. Kyomen, J. Uçer, B., ... and Işikara, A. M. (2002): Aftershock distribution in the eastern part of the aftershock region of the 1999 Izmit, Turkey, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), pp. 411-417.
- Iio, Y., Matsumoto, S., Yamashita, Y. et al. (2020): Stationarity of aftershock activities of the 2016 Central Tottori Prefecture earthquake revealed by dense seismic observation. *Earth Planets Space* 72, 42. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01161-x>
- Iio, Y., Matsumoto, S., Yamashita, Y. et al. (2021): Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake. *Commun Earth Environ* 2, 156.
- Iio, Y., Matsumoto, S. Yamashita, Y. Sakai, S. Tomisaka, K. Sawada, M. Iidaka, T. Iwasaki, T. Kamizono, M. Katao, H. Kato, A. Kurashimo, E. Teguri, Y. Tsuda, H. Ueno, T. (2022): Spatial change in differential stress magnitudes around the source fault before intraplate earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 233, pp. 1279-1295, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac521>.
- 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, pp. 1969-1972.
- 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.
- Kimata, F., Miyajima, R., Murase, M., Darwaman, D., Ito, T., Ohata, Y., ... and Anderson, H. (2004): Ground uplift detected by precise leveling in the Ontake earthquake swarm area, central Japan in 2002-2004. *Earth, planets and space*, 56(12), e45-e48.
- Matsumoto, M., Iio, Y. Matsushima, T. Uehira, K. Shibutani, T. (2005): Imaging of S-wave reflectors in and around the hypocentral area of the 2004 mid Niigata Prefecture Earthquake (M6.8), *Earth Planets Space*, 57, pp. 557-561.
- Matsushima, S. (1960): On the flow and fracture of igneous rocks, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst.*, Kyoto Univ., No.36, pp. 2-9.
- Okada, T., Iio, Y. Matsumoto, S. Bannister, S. Ohmi, S. Horiuchi, S. Sato, T. Miura, T. Pettinga, J. Ghisetti, F. Sibson, RH (2019): Comparative tomography of reverse-slip and strike-slip seismotectonic provinces in the northern South Island, New Zealand. *Tectonophysics* 765, pp. 172-186.
- Okada, T., Umino, N. and Hasegawa, A. (2010): Deep structure of the Ou mountain range strain concentration zone and the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, NE Japan—seismogenesis related with magma and crustal fluid. *Earth, planets and space*, 62(3), pp. 347-352.

- Ooida, T., Yamazaki, F. Fujii, I. and Aoki, H. (1989): Aftershock activity of the 1984 Western Nagano Prefecture Earthquake, central Japan, and its relation to earthquake swarms. *Journal of Physics of the Earth*, 37(6), pp. 401-416.
- Scholz, C. H. Sykes, L. R. and Aggarwal, Y. P. (1973): Earthquake Prediction: A Physical Basis: Rock dilatancy and water diffusion may explain a large class of phenomena precursory to earthquakes. *Science*, 181(4102), pp. 803-810.
- Shibutani, T., et al. (1991): Search for the Buried Subfaults, of the 16 July 1990 Luzon Earthquake, the Philippines Using Aftershock Observations, *Jour. Natural Disaster Science*, vol.13, pp. 29-38.
- Shibutani, T., Iio, Y. Matsumoto, S. Katao, H. Matsushima, T. Ohmi, S. Takeuchi, F. Uehira, K. Nishigami, K. Enescu, B. Hirose, I. Kano, Y. Kohno, Y. Korenaga, M. Mamada, Y. Miyazawa, M. Tatsumi, K. Ueno, T. Wada, H. Yukutake, Y. (2005): Aftershock distribution of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake derived from a combined analysis of temporary online observations and permanent observations, *Earth Planets and Space*, 57, pp. 545-549.
- Shibutani, T., Katao, H. and Group for the Dense Aftershock Observations of the 2000 Western Tottori Earthquake (2005): High resolution 3-D velocity structure in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake in southwestern Honshu, Japan using very dense aftershock observations. *Earth, planets and space*, 57, pp. 825-838.
- Wannamaker, P. E., Caldwell, T. G., Jiracek, G. R., Maris, V. Hill, G. J. Ogawa, Y. Bibby HM, Bennie SL. and Heise, W. (2009). Fluid and deformation regime of an advancing subduction system at Marlborough, New Zealand. *Nature*, 460 (7256), pp. 733-736.
- Yukutake, Y., Iio, Y. and Horiuchi, S. (2010): Detailed spatial changes in the stress field of the 1984 Western Nagano earthquake region, *J. Geophys. Res.*, 115, B06305, doi:10.1029/2008JB006111.

(論文受理日 : 2023年8月31日)