

阿武山における地震学研究：

阿武山における短周期高感度地震観測（微小地震観測）

伊藤 潔 (元京都大学防災研究所)

1. はじめに

短周期高感度地震観測網（極微小、微小地震観測）による地震の観測・研究は、1963 年から全国の大学が合同で実施した極微小地震共同観測から本格的に開始され、現在の HI-NET による観測へと発展した。この合同観測は 1965 年まで福井、岐阜、和歌山と 3 つの地域でそれぞれ 8 月に約 2 週間臨時観測が実施された。この観測ではドラム記録による観測とともに、データレコーダーによる夜間の多点観測が初めて実施された。この極微小地震観測には三木晴男先生をはじめとして、阿武山観測所のスタッフが積極的に参加した。そのデータの処理にも精力的に活動し、験震表の作成などが行われ、基礎的観測の情報および地震活動と活断層の関連などについての論文が発表された（三木、1971、1973；渡辺・中村、1967、1968；渡辺・黒磯、1967 など）。この頃、やはり阿武山のスタッフが近畿北部一円のノイズ調査を実施し、これは後の観測網設立の準備となった。

1964 年度には東京大学和歌山微小地震観測所および京都大学鳥取微小地震観測所が設立されて、定常観測網による観測が開始されることになった。これらの観測網は 1965 年度から開始された地震予知（研究）計画に組み込まれ、各地に大学付属の観測所が設置される先駆けとなった。本報告では臨時観測から始まった阿武山観測所における高感度地震観測網の変遷とその成果について概略を記述する。

2. 鳥取観測所高槻支所

地震予知計画に先立って、1964 年度に設置された鳥取微小地震観測所は防災研によって鳥取地域に、理学部によって高槻支所として、近畿中北部と中国地方に 2 つの観測網が設置された。これは当時の複雑な事情によるものであり、後々まで京大における地震観測・研究に問題を残すものでもあった。しかし、当時の地震研究は個人的あるいは小規模な研究グループによる色彩が強く、観測計器の作成から、設置・データ解析・研究などは、個人あるいは小グループで実施された。

高槻支所における観測網は 6 点（阿武山、妙見山、八木、京北、上賀茂、岩尾山のちに志津川に移設）で、阿武山以外の観測点は、毎日の記録交換と記録紙の郵送を現地の人に委託するというものであった。地震計は固有周期約 0.7 秒でほとんどが 3 成分、電圧感度 1V/(cm/s)程度のもので、トランジスタアンプで増幅され、固有周期 0.36 秒のガルバノメーターを用いて、煤書きドラムに記録された。時計は水晶時計が用いられ、NHK の時報で構成された。地震記録には時分マークが重ねて記録され、別の煤書きドラムに時計記録としてラジオの時報と記録用時計の時マークが重ねて記録された。記録紙の送り速度は 2mm/s で、時刻精度は条件のよい場合に 0.1 秒程度である。記録紙は毎日交換され、地震の記録と時計記録の 2 枚がセットになって 1 枚は 60 x 30cm の大きさである。この観測は、実際には観測網の設立以前の 1963 年から順次開始され、その後、改良されながら、1975 年にテレメータ観測が実施されて順次廃止されるまで、長く続いた観測点では 20 年近く実施された。この観測網は岡野健之助先生、平野勇氏、黒磯章夫氏、梅田康弘氏および技官の斉田市三、伊藤勝祥、中川渥、浅田照行各氏等で維持管理された。

3. 丹波観測所

1967-68 年には丹波観測所として、阿武山を含めて 5 点の観測所（阿武山、但東、丹南、神戸、津名）が、丹後半島から淡路島にかけて建設され、観測が開始された。この観測網は官制のものではなく、関西電力の補助などで独自に建設したものであった。これらの観測点には固有周期 1 秒の地震計 3 成分と煤書きドラム式の記録計が設置された。機器は上述の計器と同様なものであるが、地震計は固有周期 1 秒、ガルバノメーター 30Hz で、ドラムが大型になって、紙送りが毎秒 4mm となっている。記録紙が大きくなり (60 x 65cm)、刻時精度が向上した。また、時計の秒マークと NHK の時報を記録に重ねるという方式になり、記録紙は 1 日 1 枚となった。観測点には記録室が建設されたが、記録交換や郵送等は現地委託方式で、上記の観測点と同じであった。この観測は主に渡辺晃氏、黒磯章夫氏によって維持運営され、阿武山には 2 つの観測網が存在するような状態であった。

このような観測は、テレメータによる観測が実施されるまで約 15-20 年間にわたって実施され、現在 (2011 年) 原記録が全部、阿武山観測所に保管されている。鳥取支所と丹波観測所の記録は、それぞれ別に処理され、P、S 波の初動、最大振幅、P 波の初動などの読み取りが、非常勤の女子職員によって行われ、地震の験震表が作成された。験震表は全国の研究機関等に送付された。これらの記録を用いた研究は、いわゆる微小地震研究の先導的役割を果たした。その後、両観測網のデータはマニュアルで紙テープやデータカードに入力され、計算処理され、震源やマグニチュードが決定された。

また、1968 年には観測網に加えて、当時大学院生の中村正夫氏によって、阿武山周辺において、最大 18 点の煤書きドラム記録による稠密臨時観測が実施された。これは稠密観測による初動のメカニズム解の精密決定を目的にした先駆的なものであった (中村、1973)。

4. テレメータ観測

1974 年度に地震観測地域センターが設置され、ミニコンピュータが導入された。また、1975 年には観測点のテレメータ化が行われた。日本の観測網のテレメータ化は地震研を除けば、東北大とともにここから始まった。この際、高槻支所と丹波観測所の観測点が統合され、3 点の無線による観測点を含め新設移設等が行われた。その結果 11 観測点 (阿武山、妙見、丹南、八木、和知のちに追加、京北、上賀茂、坊村、近江八幡、宇治、交野、六甲) の観測網が稼働することになった。地震計は基本的に 1 秒計 3 成分である。送信は NTT の専用回線によるアナログ伝送、8 点、多重無線 3 点で、SN 比は 8 ビット相当であった。この観測網の建設は主に渡辺氏、黒磯氏および上記 4 人の技官によって実施されたが、1974 年に赴任した著者も手伝った。

波形は 8 ビットで AD 変換され、シフトレジスタが遅延に用いられた。当時としては多量のデータに遅延をかけることは難しく、この方式は画期的なものであった。記録は数観測点のトリガーによって、イベント記録が 14 チャンネルのアナログテープレコーダー 2 台 (後 4 台) に記録された。また、モニター記録として、14 チャンネルの大型ペンレコーダーが導入され、常時 1mm/s、トリガー時には 10mm/s の紙送り で上下動が記録された。各レコーダーの 1 チャンネルには、水晶時計の出力がスローコードで記録され、この時刻記録によって、自動処理が可能になった。また、伝送時に 20db の AGC がかけられ、振幅が振り切ると 1/10 に圧縮され、ダイナミックレンジも向上した。このシステムでは、地震の験震処理がディスプレイ上でマニュアル的に実施することが可能になった。同時に自動処理も全国に先駆けて開始された。この後、自動処理の方式や半自動処理などの方式が検討され、システムが改良されていった。

5. 自動処理と近隣観測網とのデータ交換

1976 年以降テレメータ化された観測網では、データがミニコンピュータのディスク上に保存されるようになった。最初ミニコンピュータはメモリーが 64kb で、11 点のデータが自動処理された。これを用いて、オンラインの自動検測の研究が行われ、P 波や S 波などの検測がされるようになり、結果をマニュアルで修正する半自動処理が実現した。

1980 年には組織の改組が行われ、阿武山の人員は助手 1、技官 1 を残して、全員地震予知観測地域センターに移った。さらに、1979 年からの第 4 次地震予知計画では、大学の観測網が近隣の観測網とデータ交換を行うことによって、広域の観測を可能にすることが行われた。1980 年には、名古屋大学、京大防災研、東大和歌山とのデータ交換が開始され観測網が拡大した。これによって、観測網の外側近傍で発生する地震のトリガーや震源精度の向上が計られた。各観測網と 9600bps、2 線式の専用線により PCM 方式で各 9 チャンネルずつの波形データが交換されるシステムが阿武山に設置された。同時に自動処理も実用化され、自動処理されたデータをマニュアルで再処理して、検震データを得ることがより効率よく行われることになった。

自動処理の研究・改良は 1975 年の設置以来継続して実施されてきたが、これらの過程を経て実用化され、検測処理の際に自動処理の比重が増した。システムは改良され、マニュアル処理に頼っていた検測も自動処理結果を修正する方法に変わっていった。このようにして処理された 1976 年以降 2000 年までの、データが阿武山観測網の検測ファイルとして残されている。この長期間にわたる検測の大半は竹内晴子氏によって行われた。これらのシステム改良、自動処理方式の高度化の研究は、渡辺氏、黒磯氏とともに大学院生であった前田直樹氏によって行われた（前田、1985）。

また、1975-1976 年には三木先生などの科研費で阿武山観測網と北陸観測網を含んで琵琶湖西岸地域の調査を目的とする臨時観測が実施され、両観測網の境界領域を含む、広域の地震活動の調査が実施された。2 つのテレメータ観測網のデータと臨時観測のデータを統合処理するのは、隣接観測網の設置の先駆けでもあった。この調査には防災研の見野和夫、竹内文朗、渡辺邦彦氏および梅田康弘氏と著者などが参加した（三木他、1976）。

6. 観測網のインテリジェント化と総合解析装置

観測網は各大学の研究機関によるある特定の地域を対象として構築された。その後、各地でそのような観測網が建設されると、観測網間の空白が問題になり、観測網間での部分的なデータ交換網が設置された。これらの間に通信やデータの収録・処理がそれぞれの時代の通信・計測機器の発展に伴って、改良されていった。改善点はダイナミックレンジと周波数帯域、刻時精度および通信・収録データの量などである。

隣接観測網が完成したのち、観測計器の老朽化に伴い、さらに観測網を高度化することが計画され、1989 年度から観測網のインテリジェント化が順次実施された。3.4KHz 帯の回線を利用するが、常時伝送の回線の感激に低サンプリングのデータや、トリガーによって蓄積した低感度でのデータを送信できるようにするものであった。年に 2-3 観測点ずつこれらの回線装置が設置され、1990 年に阿武山にスーパーミニコンをによる波形収録装置が導入され、記録は光ディスクに収録されるようになった。このシステムによって、自動処理も強化された。当時の通信方式や計算機の能力を考慮して、地震観測の広帯域化高精度化をはかるもので、観測網の周波数範囲を広げ、高ダイナミックレンジにすることで、より確実に大きな地震から微小地震までの地震波形をより確実に記録するものであった。これによって、100-150Hz、8 ビットサンプリングから 200Hz、12 ビットサンプリングの記録が得られるようになった。さらに固有周期 10 秒の地震計を併設することによって、微小地震から中地震まで、完全な波形を記録する計画であったが、予算不足で部分的な実施にとどま

った。インテリジェント化の計画は地殻変動データも含めて、データの解析を行う総合解析装置の設置を新設することによって、完成するものであったが、観測坑の設置や処理系の方は十分には設置することができなかった。これらの推進には飯尾氏および片尾浩氏が活躍した(飯尾・他、1992)。

1990年には、京大では理学部と防災研究所の地震予知関連施設が統合され、地震予知研究センターが設立され、観測網は一体化して運営する方針で上記の整備がなされた。各観測所のこれらのシステムをまとめて、宇治に京大全体の地震観測網を構築する努力がなされ、既存のシステムを利用することでSATARNシステムと呼ばれる京大の観測網が整備されていった。このシステムの構築には大見士朗氏が力を発揮し、多くのスタッフがかかわった。各観測網はそれぞれの設立趣旨があり、観測の思想の違いや、設立時の技術水準の違いによる仕様の相違もあり、また統合には場所も予算も必要であって難航した。北陸および鳥取観測所に同様な機器が設置されたのは、1996年になってからで、十分に稼働することなく、衛星通信利用の観測網に引き継がれることになった。この総合観測装置によるデータ交換には64kbの回線が導入され、地震データの交換とともにTCP/IPプロトコルによるインターネットの利用が可能になり、電子メールなどを含む通信網の能力が格段に向上した(大見他、1999)。

1995年兵庫県南部地震の際には阿武山の処理装置はその年度末には新しく導入された総合解析装置に置き換えられることになっていたが、本震の際に停止して処理機能が稼働しなくなった。急遽テスト中の新システムによって処理が継続された。この年の3月にはデータ交換装置が宇治に移設され、隣接交換の拠点としての阿武山の役割が終わった。また、阿武山におけるテレメータ装置も宇治に移設し、阿武山観測網は宇治で稼働することになった。したがって、この時点で阿武山は観測網の一観測点になった。

7. 観測網の拡大と人工衛星通信利用による全国データ交換

各地域でのデータが交換されることによって、観測網の空白が減少し、広域の観測網が構築され、処理も効率化していった。観測網もインテリジェント化、総合解析装置などによって順次宇治に統合されたが、統合までには時間がかかったので、その間も観測網として稼働していた。

一方、全国の大学の観測網を全部統合して全国ネットを構築する構想が議論されていた。この構想は1995年兵庫県南部地震以降に実現し、1996年から衛星通信とインターネット通信技術を利用する全国の観測網が設立された。各観測点あるいは各観測所に有線で集められたデータを衛星通信で東大地震研に送り、そこで全国のデータを集めて、各大学等に配布するというシステムである。この場合も既設の観測網を基本として実施したので、京大も各観測所ごとに有線で集めた記録を観測所からまとめて衛星通信で送ることになった。阿武山観測網の送受信装置は宇治に置かれることになり、宇治における送受信局の一部になった。各観測点からデータを送信せず、観測網を残して衛星テレメータを利用するシステムにしたのは、インテリジェント化装置が稼働して間もないこともあったが、データをすべて公開してしまうことには、大学の観測網としてはやはり抵抗があったといわざるを得ない。阿武山観測網としてのデータの処理は1997年12月まで実施された。それ以降は京大の観測網として継続されている。京大の観測網については技術的なことを含めて大見他(1999)のまとめがある。

衛星通信以前の通信網はデータ量の制限から通信の成分を限定するとか、トリガー後のイベントデータのみにするなどの制限があったが、衛星観測網によって、各観測点に6チャンネルのデータ変換装置が設置され、1回線で100-200Hzの連続データを送信できるようになった。また、GPSによる刻時装置を使うことで、刻時の同時性が革命的に改善され、全観測点のデータをミリ秒の精度で同期させることができるようになった。それ以前は各観測網で水晶時計による刻時が行われ、NHKの時報やJYJなどの時刻電波報時によって、自動校正されていたため、観測網内では高精度の

相対刻時が可能であったが、観測網間では数ミリ秒から百ミリ秒程度の差は避けられなかった。また、24 ビットの AD 変換が可能になりダイナミックレンジも向上した。ただし、IP パケット通信によるデータ伝送を用いたので、実時間伝送という点では数秒の遅れが生じるようになった。これらのデータ処理・処理には現在用いられている WIN システムが導入された。WIN システムは UNIX (LINUX) が稼働可能な PC があれば構築できるので、全国のデータを受信できる場所では容易に処理が可能になった。

さらに、1995 年兵庫県南部地震以降、地震防災特別措置法によって、大学等の観測網による地震波形を実時間で気象庁に伝送することが義務づけられ、1997 年 10 月からデータの一元化処理が開始された。京大では宇治と大阪管区気象台との間で、波形データ交換が開始された。この時点ではデータは衛星通信を通じて宇治に集められており、このシステムを利用してデータの交換が行われるようになった。また、全国的に高感度観測網 (Hi-net) が建設されたが、大学の観測点は、これらの観測点と補完的に全国を覆っており、観測網の一部としても現在稼働している。

8. 研究成果

短周期高感度観測は当初はどのくらいまで小さな地震がどこで発生するかを課題に観測が実施された。その後、地震予知研究に組み込まれ、微小地震をとらえることで、大地震の前震が観測されるであろうということで観測が拡充された。

観測網が稼働すると、最初は震源決定をどうするかということで、数が少ないうちは、均質速度構造を利用して図式解法で震源が求められた。数の増加と計算機の普及とともに、水平多層構造を用いて、P、S 波の走時を用いる最小自乗法による震源決定のプログラムが開発された。阿武山の高槻支所の観測網のデータでは、設置が早かったこともあり、1963 年頃から、全国に先立って 3 層水平成層構造によるプログラムが開発され、多数の震源が求められるようになった (Okano and Hirano, 1968)。阿武山の観測網は観測点間隔が比較的小さく 10-15km であり、近畿中北部の地震多発地帯に設置されたので、短期間に多くの地震が観測され、種々の先行的研究が実施された (たとえば、岡野・平野、1965、1966、1967 など)。まず、地震発生の不均性が明らかにされ、発生が地表の活断層と対応する場所が多いことがわかった。次には小地震の大きさ決めるために気象庁マグニチュードを小さい地震まで拡張するマグニチュードの式が求められた。これにはそれまでに蓄積された広帯域の地震観測結果も利用することができ、その後、渡辺の式として広範囲の観測網で利用された (渡辺: 1971, 1973)。また、初動の発震機構の解析によって、地震発生の応力場が中小地震に対しても求められるようになった。さらに、多数の地震の走時を利用して、表層部分の速度構造の不均質がもとめられた。波形の利用も可能になり、同じ規模の地震でも卓越周波数が異なる場合があり、それらの地域性が議論された。多数のデータを利用して、数とマグニチュード (M) など統計的な研究もなされ、石本飯田の式や Gutenberg-Richter の式が小地震まで広範囲で利用できることもわかった。

さらに、テレメータ観測網が完成すると時刻精度が向上したので、相対的な震源の精度を向上させることができ、M4 程度までの中小地震の余震分布を求めることもできて、これらの起震応力とともに発生場の詳細な議論が可能になってきた。このような震源精度の向上は震央分布だけでなく、地震の深さの議論も可能にした。これによって、中規模地震の発生前に同じ地域で、先行的な地震活動が発生する場合が多いことも見いだされた。ただし、定常状態でこれらを前震と認定することは難しい。

地震観測は地表 (付近) で実施されているので、震央に比べて深さの精度は悪い。大学の微小地震観測網は一般に 20-30km の間隔で設置されたものが多く、阿武山の 10-15km というのは、密な観

測網であった。このため地震の高精度の深さ決定には、阿武山の観測網は有効であった。多数のデータが集積されると、その中から深さの精度のよい地震のみを選ぶことによって、地殻内の地震が深さ 20km 以浅のみで発生することが明らかにされた。さらに、これらの原因について、地殻の熱構造や岩石の破壊の性質などとの関連も議論された (Ito, 1990)。

地震の初動の立ち上がりは、一般に地震が大きくなると長くなるが、必ずしもそうでない地震がある。初動の立ち上がりの変化と応力効果の関連や、初期破壊が本震のみに存在するかなど、地震の始まりに関する議論が行われた (Umeda, 1981; Iio, 1992 など)。

阿武山では 1930 年代からの広帯域のデータが蓄積されており、一部を前節で述べた研究には短周期記録だけでなく、広帯域のデータを併用して、成果を上げたものも多い。大地震の発生頻度は低いので、観測データの蓄積は新しい研究の基礎になると思われる。また、本稿では定常観測網に関する記述を中心にしたため触れなかったが、大地震の余震観測や全国の大学による合同地震観測、構造調査などへの積極的な参加によって、観測網と臨時観測のデータを結合した研究も行われるようになった。

9. おわりに

短周期高感度地震観測は、1960 年代に観測網を展開する形で、以前の観測が強化され、地震予知 (研究) 計画の基で改良されて、現在は気象庁一元化地震観測網の一部として稼働している。その間、それぞれの時代の通信・電子機器の発展とともに、新しい機器が導入され、それぞれの記録に応じて、地震の研究も発展してきた。その間、定常観測を大学で実施することに伴い、観測網の建設や維持等に研究者が多く時間を費やす必要が生じるなど研究と業務の問題も発生した。この問題は完全には解決していないものの、機器の発展によって省力化を果たして現在にいたっている。また、大学の観測網の建設、維持管理には技術職員の力が大きかったことも重要である。阿武山では上記 4 人の技官によって観測網の保守がなされ、非常勤職員によるデータの整理、観測処理がなされた。技術職員の定員削減は、大学における長期間の観測、データ収集などを困難にしている。

観測網を大学が維持するには、常に新しい研究目的が必要である。初期の小規模な観測網のうちには、観測と研究は一体化していたが、大規模な観測網になるにしたがい、業務的な色彩が強くなり、問題が生じた。データを共有し、さらには防災科技研が Hi-net 観測網を構築し、気象庁が一元化データ処理を行い、これらのデータが公開されて、自由に使えることで一応の解決を見ている。データは研究に使われると同時に、気象庁の業務にも利用されている。このように常時公開されている地震観測のデータは、研究の一定レベルの基礎になるもので、長期間における大学の観測が結実したものであると思われる。2011 年の東北の大地震については、直後からデータのアーカイブ計画が米国の研究機関によって実施されている。研究者が集めるデータはどうしても主観的になるので、世界の共有財産としてのデータの集積と公開は研究にとって重要である。その上に個々の研究者のデータのデータが積み上げられて発展した研究が行われるようになっていく。その意味でも今後も新たな長期間の地震データの蓄積・公開は必要であろう。

著者は 1974 年に阿武山観測所に採用され、その後 40 年以上直接間接に地震観測に携わってきたが、その間過去を振り返ることは殆どなく、手元の資料は散逸しており、詳細な経緯は殆ど忘れてしまっている。採用前、1974 年以前の記述については、不正確な部分がある可能性がある。また、その後の経過についても、十分な資料をそろえることができなかったため、間違いがあるかもしれないと気になっている。この 50 年ほどの間に地震観測網は大きく変貌を遂げ発展してきた。この小文をまとめるに当たり、改めてその感を深くしている。

参考文献

- Iio, Y., 1992, Slow initial phases of the P-wave velocity pulse generated by microearthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 477-480.
- 飯尾能久・片尾浩・浅田照行・他, 1992 光ディスクを用いた地震波形データ収録処理システムについて, 京大防災研年報, 35B-1, 371-378.
- Ito, K., 1990, Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, *J. Phys. Earth*, 38, 189-212.
- 黒磯章夫・渡辺晃, 1977, 阿武山地震観測所の微小地震テレメータシステムについて, 地震 2, 30, 91-106.
- 前田直樹, 1985, 地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価, 地震 2, 38, 365-379.
- 三木晴男, 1971, 極微小地震合同観測の成果, その一, 探知能力, 地震 2, 24, 129-138.
- 三木晴男, 1973, 極微小地震合同観測の成果, その二, 地震活動, 地震 2, 26, 118-129.
- 三木晴男・他, 1976, 琵琶湖周辺の地震活動について, 京大防災研年報, 19 号, 13-20.
- 中村正夫, 1973, 近畿地方中部の浅発地震の発震機構, 東大地震研研究速報, 10 号, 10-22.
- 中村正夫, 1973, 京都近傍における稠密多点観測 (1968), 東大地震研研究速報, 10 号, 23-48.
- 大見士朗・渡辺邦彦・平野憲雄・他, 1999, 微小地震観測網 SATARN システムの現状と概要, 京大防災研年報, 42B-1, 45-60.
- Okano K. and Hirano I., 1968, Earthquake occurring in the vicinity of Kyoto, *J. Physics Earth*, 16, 141-152.
- 岡野健之助・平野勇, 1965, 京都周辺に発生する微小地震(1), 京大防災研年報, 8 号, 117-125.
- 岡野健之助・平野勇, 1966, 京都周辺に発生する微小地震(2), 京大防災研年報, 9 号, 21-26.
- 岡野健之助・平野勇, 1967, 京都周辺に発生する微小地震(3), 1965, 京大防災研年報, 10 号, 29-34.
- 渡辺晃・中村正夫, 1967, 根尾谷近傍に発生する微小地震の 2, 3 の性質, 地震 2, 106-115.
- 渡辺晃・中村正夫, 1968, 近畿地方南西部の地殻上層部の構造について, 地震 2, 32-53.
- 渡辺晃・黒磯章夫, 1967, 紀伊半島西部の局地地震の二, 三の性質について, 地震 2, 180-191.
- 渡辺晃, 1971, 近地地震のマグニチュード, 地震 2, 24, 189-200.
- 渡辺晃, 1973, 近地地震のマグニチュード (続報), 地震 2, 26, 160-170.
- 渡辺晃・黒磯章夫, 1977, 阿武山地震観測所の微小地震テレメータ システムについて, 地震 2, 30, 115-118.
- Umeda, Y., 1981, An earthquake source model with a ripple generating core, *J. Physics. Earth*, 29, 341-370.