

阿武山における地震学研究：

阿武山における地震観測

梅田康弘（産業技術総合研究所）

1. 最初の地震計

阿武山で本格的な地震観測が始まったのは、観測所開所2年後の1932年（昭和7年）で、最初に稼働したのはウィーヘルト地震計だった。水平動は固有周期10秒、倍率170倍で、重さ1000kgの振子を下部の支点が支える倒立振子になっている。支点は自在継手のような構造で、ひとつの振子で東西方向と南北方向のふたつの地動を記録する。

上下動の固有周期は4.7秒、150倍である。鉄の箱に銑鉄を入れて重さ1300kgの振子を構成し、前4本、後ろ4本の計8本の太いつるまきバネで吊るしている。機械式地震計の周期を長くするためには振子の復元力を小さくする必要があるが、振子を吊り下げている8本のバネとは別に小さなつるまきバネがあり、前者の復元力を小さくするように両者のバネが梘子で連結されている。また温度変化による記録のずれを補償するため、振子を吊っているバネとは熱膨張の違った亜鉛棒を用い、温度変化に対して逆センスに作用するように、つるまきバネと梘子で連結している。ウィーヘルト地震計の構造については立花健二・他に詳しい。

上下・水平とも制振器（ダンパー）はピストン・シリンダーを利用した空気ダンパーだが、調節は非常に難しい。振子そのものの地面に対する倍率は1倍であるが、梘子による拡大機構によって前記の倍率を得ている。この倍率を得ようとすれば、拡大装置の摩擦に打ち勝つばかりか、それを無視できるほどの慣性がなくてはならない。そのため振り子の重量が1トンにもなっている。

記録は煤書き方式と呼ばれ、長さ180cm、幅20cmの白紙の両端を糊つけし、リング状にした後、石油ランプから出る煤を掛けたものを用いる。後には石油ランプからプロパンバスに変わった。記録紙を地震計の前面にある円筒状の駆動装置にセットすると、1分間に4cmの速さで記録紙が送られる。セットされた記録紙の上に描針（記録ペン）を降ろすと記録開始となる。描針を降ろした時刻を、年月日と共に手書きで記入する。1分間くらいゼロ線を描かせた後、振子を僅かに動かして、記録紙上の振幅が3cm～5cmになるようにダンピング記録を描かせる。これによって地震計の周期と周波数特性を知ることができる。

記録紙の駆動には地震計本体の横に設けられた錘の位置のエネルギーを利用している。すなわちこの錘を人力で1日1回巻き上げ、それがゆっくり下がっていくことによって記録紙が送られるという仕組みである。一定の送り速度を得るため機械式の時計機構がついている。電気は使われていない。

この地震計は倍率と周期において当時としては画期的な地震計だったようで、世界中に広まった。ただ有感地震の多い日本ではこの地震計を安定して可動させるには、なかなか難しく、人の手も相当かかった。阿武山でも震度1か2の有感地震があると、拡大装置のアームがピボットから外れていた。少しゆれが大きいと振子が傾いてストッパーに寄り掛ってしまう。その場合には1辺が1cmから4cmほどの、いろいろな重さの鉛の板が予め用意されていて、それを傾いた方向とは反対側に置いてバランスを取るようになっていた。あるいは傾いた側にすでに鉛板が置いてあれば、それを取り去るなどして振子を中心に持ってくるようになっていた。東西・南北ふたつの成分を同時に中心に持ってくるためには、鉛板を置く位置や重さを変えながら試行錯誤で作業をしていた。昼は技術職

員の北村俊吉さんや中川渥さんが手際良く調整をやっておられたが、宿直の時は大学院生も加わって、地震計の前と横から数人がかりでバランスを取っていた。

さらに大きな揺れがあると、拡大装置が壊れたり空気ダンパーのピストンとシリンダーが擦れるなどの故障が生じた。こんな時は地球物理教室の工場から森本喜一郎さんや多中勝美さん達に来てもらって修理していただいた。振子を支えているバネが損傷するなど、大きな修理の時のため、水平動の振子の下には木枠が組んである。通常はどうぜん振子と木枠は離れているが、作業の時はその間に木の楔を挿入して振子を木枠で支える。そして板ばねなどの交換を行うようになっている。いちど森本さん達が分解しておられたが、地震で板バネが折れたということは無かったと思う。組み立て図面は地震計室の壁に貼ってある。

ウィーヘルト (Emil Wiechert (1861-1928)) はこの地震計を製作するにあたって、設計図というか設計に至るまでの下書きを4冊ばかりのノートに記している。このノートはゲッチンゲン地球物理学研究所に保管されている。阿武山のウィーヘルト地震計は1928年(昭和3年)に、イリス商会を通じて購入されている。当時の物品管理票によれば水平動が¥4,000円、上下動は¥4,950円とある。日銀の企業物価指数によれば昭和のはじめと平成23年の貨幣価値の比は700倍だそうだから、現在の価格にすると水平動は280万円、上下動は347万円だろうか。

阿武山に残されている最初の記録は1929年1月2日の水平2成分である。3月には3成分の記録があるので上下動も組み立てられたようだ。しかしテスト観測だったのか、あるいは建物の建設が遅れたためか、翌年もその次の年もほとんど記録は無く、連続的に記録が残されるのは最初に述べたように1932年1月からである。

2. 強震計

ウィーヘルト地震計による観測が開始されてから3年ほど後の1934年12月に倍率5倍の地震計による観測が開始された。この地震計による観測は1954年7月まで20年近く続けられた。ウィーヘルト地震計のように当時としては高い倍率の地震計記録は毎日記録紙を保存したが、低倍率の強震計記録は地震の記録が無い場合は、記録紙の煤を刷毛で払って白紙に戻し、と言っても少しは黒ずんではいるが、紙を再利用していた。それでもこの地震計による記録は2000枚あまり残されており、その中には1943年鳥取地震(M7.2)や1948年福井地震(M7.1)の記録が含まれている。この地震計は現存しないのでどんな地震計だったのかは分からない。

5倍強震計の記録がなくなって約1年半後の1956年1月から、現存する15倍の強震計が稼働する。この地震計は上から吊された振子と、倒立振子のふたつの振子が薄い板バネで連結されている。連結部分を横から見ると、たすきを掛けたようになっているので「たすき掛け」あるいは「たすき掛け連成振子」と呼ばれている。ふたつの振子を連結することによって他成分の影響を打ち消すことができる。強震動のように他成分が無視できない場合には有効である。連成振子にしても周期を伸ばす効果は無いが、単一振子で周期を伸ばした場合より安定しているという利点がある。阿武山に設置されているのは「松沢式連成振子」で、国産と思われる。

3. 佐々式大震計

地下室の1室を占める大型の地震計で1936年6月から観測が始まった。支柱の高さ2.5m、振子を支えるアームの長さも1.7mある。水平2成分のみで上下動は無い。記録紙を1箇所にとめるため、東西成分をアームで南北成分のところに寄せている。振子の重心位置で倍率は1倍だが、描針を伸ばしているのが1.1倍となっている。安定した長周期地震計で、固有周期は24秒から27秒ある。

記録方式はウィーヘルトや強震計と同様、煤書きである。倍率が低く地震記録はめったに得られないが、長周期であるため 1960 年チリ地震など遠方の巨大地震を記録している。1943 年鳥取地震や 1948 年福井地震も振り切れることなく完全に記録した。残念ながら 1944 年東南海地震は欠測であった。1946 年南海地震の時は、記録紙はセットされていたが駆動装置が停止したままで、直線記録しか得られていない。

どの地震計の記録紙も当時は 1 日に 1 回交換していた。まず描針をあげ、回転ドラムを駆動部（モーターのギア）から外す。地震の記録が無いかどうか確認し、小さな波形記録でもあった場合は日時、観測所名を、煤の上からたいていマッチの軸で書いていた。ドラムに巻き付けられた煤書き記録紙をナイフで切る。クリップで両端を挟み、ゆっくり何にも触れないようニス付け室に運ぶ。煤書き記録は何かに触れたら消えてなくなるので細心の注意が必要である。定着用ニスはワニスを工業用アルコールで溶解したもので、これを予め大きな樋の形をしたニス皿に入れておき、そこに煤紙を通して記録を定着させる。

記録紙交換にはこのような作業があったので、大震計のように稀に地震記録があると、大地震の貴重な記録ゆえに、記録紙の交換は非常に緊張した。この地震計が地震を記録したのを初めて見たのは 1968 年 4 月 1 日 09 時 42 分に起こった日向灘地震（M7.5）だった。この地震計の記録交換を担当しておられた北村俊吉さんは前日の 3 月 31 日に定年退職され、その夜、阿武山に泊っていたのは黒磯章夫さんと高知大学から来られていた木村昌三さんと私の 3 人だった。誰かが記録紙を交換しなければならない。貴重な記録を傷つけたらと、木村さんと私は記録紙交換を躊躇していた。そこへ学年で 1 年上の黒磯さんが地下室へ降りてきて、さっさと記録紙を交換された。度胸のよさに感服した。

この地震計を作成したのは、阿武山 2 代目の所長佐々憲三先生で、その名が冠されているが、元々の設計は初代所長の志田順先生だったようだ。志田先生は 1925 年頃、地球の自由振動を観測するための地震計の机上設計の論文を書いている。三木晴男先生によれば、1883 年クラカトア火山の大爆発の際、噴火が 1 時間間隔で続いたことに、地球の自由振動の観測を思い立ったようだ（三木晴男、1981）。志田の論文には図面は無く文章のみだったが、地震計の寸法は支柱、アームの長さ共に 2m と、現存する佐々式大震計とほぼ同じである。これを電磁式にして検流計に接続する計画で、検流計の高さも 2m ほどだった。志田の論文は私の手元にはないが、Ben-Menahem (1995) の地震学レビューによると地震計の周期が 180 秒、検流計のそれは 1、200 秒 (!) とある。しかしこの長周期高感度地震観測システムを稼働させるためには、温度の安定した地下観測壕が必要不可欠と、志田の論文の最後に記述してあった。

おそらくこの地下観測壕が観測所建物の西端（ガレージの北側）から掘削された横坑と思われる。横坑は観測所の裏の小高い部分の直下をめぐって掘り進められたそうで、林一（はやしはじめ、2002）さんによると、掘削工事は出来高払いで、林さんは掘りだした土の重さを測っていたそうだ。横坑がある程度掘り進められたところで、到達予定の建物裏の小高い所からも縦穴を掘削し始めたそうだ。そこで石瓦に当たったという。その下には漆塗りの木棺があり、中に金糸があったことから貴人の墓と呼ばれているが、藤原鎌足の墓という説もある。志田は埋葬物を写真だけでなくレントゲン写真も撮っている。当時としては先進的である。レントゲン撮影装置は島津製作所製だったそうで、ガラスの乾板だった。木棺は宮内庁の指示によって元に埋め戻されたそうだ。現在はその周辺一帯（古墳）が環境庁の所管となり整備されている。

4. 電磁式地震計

佐々式大震計が観測開始した同じ年にガリツイン地震計による観測が始まっている。ガリツイン（Boris Galitzin、1862-1916）はウィーヘルトの 1 年後に生まれているのでほとんど同じ時期に地震

計の開発をめざしていたことになる。ガリツイン地震計はウィーヘルト地震計の6年後の1910年に世にでていますが、おそらく最初の電磁式地震計だと思われる。

阿武山にある物品管理票によれば、納入業者はCambridgeで、1式(3成分) 価格 ¥8,376円となっている。ウィーヘルト地震計(3成分価格¥8,950円)とほぼ同じ値段である。地震計には「The Cambridge and Paul Institute England Co. Ltd」という名盤が貼ってあるので、そこから直接購入したらしい。ただ、購入日は大正12年7月15日となっていて、上賀茂の番号が付いている。後に阿武山に移したようだ。地震計を封入する銅板製ケースは地球物理学教室の工作室で造られており、材料費(銅板)の金額は3成分合計で¥490円、大正13年教室生産となっている。

阿武山では1967年まで使われていたが同年7月には次世代の電磁式地震計、プレス・ユーイング型地震計に変わった。ちょうど私が阿武山に大学院生として行った翌年で、岡野健之助先生の指導のもとで1年上の三波俊夫さんが組み立てと設置をしておられた。そういうわけで私はガリツイン地震計を扱ったことはない。上下動は阿武山地下室の西端(台所の下)に設置されていた。水平動は裏山に掘られた深さ3mほどの縦穴に設置されていたようだ。その後、ガリツイン地震計は伊藤勝祥さんや浅田照行さんによって、展示のため透明プラスチックケースに入れられ、現在は地下室に置いてある。

三波さんが福岡教育大学へ赴任された後は、私がプレス・ユーイング地震計の保守をすることになった。この地震計の上下動1台はアメリカから輸入されたものだったが、水平動は伊勢屋機械製作所で作られたものだった。水平動はガリツイン地震計と同様に裏山の縦穴に、上下動は地下室の西端に設置し、東隣の暗室で記録していた。上下・水平共地震計の周期は15秒、検流計(ガルバノメータ)の固有周期は120秒と決められていた。電磁式地震計から出力される起電力によって検流計のコイルが回転する仕組みだが、復元力を小さくして周期120秒を得るために、コイルを吊っている銅線は非常に細いものだった。検流計は理化学研究所で作られていたが、最も細い銅線を、さらに指に粉をつけて削って細くし、周期120秒にしたという話を聞いた。この細い銅線に直径6mm程の薄い鏡が付いており、これに光源ランプからの光をあて、反射光をブロマイド紙に記録していた。日常の観測は技術職員の伊藤勝祥さんがされていた。検流計は不安定で反射光(イメージと呼んでいた)を半円筒状のレンズ(シリンドリカルレンズ)を通して適切な明るさをブロマイドに持ってくるのに手間がかかった。吊り線もしばしば切れた。そのつど理研に送り返して吊り直してもらった。

長周期地震計記録には特有のノイズがあり、特に冬に大きくなった。上下動では地震計の中で空気の対流が発生し、振子を揺らせていることに気付いた(Umeda, 1977)。さっそく地球物理学教室の工場で耐圧カプセルを作ってもらって封入し、空気を抜いたら、数十秒の大きなノイズは消えた。水平動は土地の傾斜を書いていることが分かった。

1972年に地下観測室(横坑)が完成し、プレス・ユーイング地震計は3成分とも耐圧カプセルに入れ地下観測室に設置した。1978年には検流計が変わって電子回路による増幅装置が梅田によって開発され、記録方式もブロマイドからペン書き記録紙になった。佐々式大震計には振子部に電気変換機を取り付け、増幅器を通してペン書きに変更した。ウィーヘルト地震計や15倍強震計も順次、等価な地震計が開発され、ペン書きになった(梅田康弘・他、1992)。これらに伴いウィーヘルト地震計の煤書き方式は1991年に停止した。これで阿武山地下室の地震計はすべて電気変換され、ペン書きになったと同時にデジタル記録用の出力も持つようになった。しかし、デジタル記録はテスト的にしか行わなかった。

1990年に阿武山地震観測所が京都大学防災研究所地震予知研究センター附属になったことから職員は順次宇治地区へ転勤した。また高感度地震計や広帯域地震計が地下観測室(横坑)に設置されたこともあって、地下室で観測していた地震観測は1996年末で終了した。現在では高感度地震計と防災科学技術研究所のSTS地震計が稼働している。

5. 刻時、煤掛けなど

煤書き記録の刻時は、磁石で描針を持ち上げる方式で、記録上では線が途切れるようになっている。時と分の区別がつくように、描針があげられる時間が前者は長く、後者は短くしてある。光学式印画紙（プロマイド）の場合も同様で、光源を遮ることによって刻時するようになっている。ウィーヘルト地震計は刻時装置を持っているが、他の地震計記録には振り子時計からの信号を使っていた。1950年以前の刻時の精度は、P波の着震時で震源決定できるほどはない。年ははっきりしないが、少なくとも1950年代は、観測所の振り子時計（親時計と呼んでいた時計）の出力と、JYJかNHKの時報を整流した信号とを同時に煤書き記録し、両者の差を ΔT として、地震記録の読み取り時刻を補正していた。1960年代には親時計には水晶時計が採用された。水晶時計は格段に正確ではあったが、P波の着震時で震源決定できるほどの正確さを得るには、やはり ΔT の記録は必要だった。1970年代に親時計がデジタル時計になり、毎時自動校正されるようになって、ようやく ΔT の記録は廃止された。

煤書きの記録紙はドラムに巻かれた白紙に石油ランプから出る煤を掛けて作っていた。ランプの炎を調節し、ドラムを回転させながら、煤が均一にかかるようランプを動かす。慣れないと、掛けた煤に濃淡ができたり、ひどいときは紙を焦がす事もある。これを一挙に解決したのが、プロパンガスの使用だった。記録紙の幅（約25cmと50cm）の長さで、直径3cm程の鉄のパイプに、直径1mm以下の細かい穴を縦方向1列にたくさん開ける。火口の細かいガスコンロをまっすぐにしたようなものである。これにプロパンガスを通して点火すると細かい穴から炎が出るが、穴が細かいと不完全燃焼を起こし効率よく煤を出すことができた。石油ランプのように動かさなくても、ドラムを回すだけで簡単に煤が掛けられるようになった。これは黒磯章夫さんの発明で、製作は地球物理学教室工場の森本喜一郎さんだった。

煤紙を定着するニスは溶剤（工業用アルコール）で溶かされているので、蒸発させないため、使用後は漏斗で一升瓶に移していた。このめんどうさを解決してくれたのが、ニス皿の底と5リットルくらいのポリタンクをゴムホースで繋ぐという簡単な仕掛けだった。定着用ニスはポリタンクに保存しておき、ニス付けする時はポリタンクをニス皿の高さに置くと自動的にニスが皿に出る、使用後はポリタンクをニス皿より低い位置に置けば自然にニスはポリタンクにおさまる。極めて簡単。これも黒磯さんの発案だった。

記録がインクペン書きの時代になっても、いかにペンを細くし記録がかすれないようにするか、など様々な工夫がなされた。

6. 記録と観測報告

阿武山の地下室で記録された記録用紙はすべて建物東端の記録室に保管されている。ウィーヘルト地震記録の読み取り結果（phase data）は1934年1月からひとつの地震につき1枚のカードに記録されていた。1985年頃に伊藤潔さんが、桐の箱に納められていたカードを整理され、リストにして印刷出版された（MIKI H.、1987）。この読み取りカードは1957年3月までであるが、1943年～1946年は欠測が多い。

1952年からは「SEISMOLOGICAL BULLETIN ABUYAMA」が半年毎に印刷され、世界の地震関係機関180カ所あまりに送られた。私も助手に採用された最初の年にBULLETIN作成に携わったが、なかなか根気のいる作業のため1回（半年分）で音をあげた。ずっと続けて来られた伊藤勝祥さんには頭が下がる。ブレティン作成手順は伊藤勝祥（1995）に詳しい。伊藤さんはブレティン出版の前に、速報値をイギリスの国際地震センターに送っておられた。このブレティン出版も地震観測が終了した1996年に終了した。

1984年から3年掛かりで、ウィーヘルト地震計及び5倍と15倍強震計、佐々式大震計記録、33、000枚余りを整理し、マイクロフィルムに収録した。ウィーヘルトは観測開始から1963年まで、他の地震計記録はすべて収録した(MIKI H、1987)。私が退職した後の2008年頃に、(財)地震予知総合研究振興会によって阿武山に現存するすべての地震記録がデジタル化されたと聞いている。

参考文献

- Ben-Menahem, A.(1995):Review, a concise history of mainstream seismology: origin, Legacy, and perspectives, Bull.Seismol.Soc.Am., 85, 1202-1225.
- 萩原尊禮(1982): 地震学百年, 東京大学出版会.
- 林 一 (2002): 京大阿蘇火山研究所阿武山地震観測所草創期物語.
- 伊藤勝祥(1993): 阿武山観測所の大震計について, 京大防災研技術部通信, No.8, 2-5.
- 伊藤勝祥(1994): 阿武山観測所の長周期地震計(ガリチン)記録について, 京大防災研技術部通信, No.22, 2-3.
- 伊藤勝祥(1995): 地震観測報告について「SEISMOLOGICAL BULLETIN ABUYAMA」の作成, 京大防災研技術部通信, No.22, 2-5,
- 伊藤勝祥(1996): 阿武山地震観測所の歴史, 京大防災研技術室通信, No.50, 2-3.
- 三木晴夫(1981): 日本の地震学百年の歩み, 京都大学理学部, 地震II, 34-特 157-160.
- MIKI H.(1987): Microfilm of Historical Seismograms at Abuyama Seismological Observatory.
- 杉政和光(2001): 阿武山地震観測所について, 京大防災研技術室報告, No.3, 73-78.
- 立花健二, 鈴木和司, 増田忠志, 石川秀蔵, 鳥居龍晴, 松下幸司, ウィーヘルト地震計の修復について, <http://www.Tech.nagoya-u.ac.jp/event/h19/web/Dk202web.pdf>
- Umeda Y.(1977): The Predominant Noises of Long Period Seismographs and their Generating Mechanism, J.Phys.Earth, 25, 103-116.
- 梅田康弘, 伊藤勝祥, 斎田市三(1992): ウィーヘルト地震計と等価な地震観測装置, 防災研究所年報, 35号 B-1, 291-298.