

地殻変動と地震予知 ——下向きの研究から上向きの研究へ——

田中寅夫

要 旨

北丹後地震で大被害を受けた丹後地方には椋平虹による地震予知に期待を寄せた人々もあった。筆者が地震予知の研究に携わるようになったのもその影響を受けたのかも知れない。Sassa & Nishimura(1951)の有名な研究を受けて、傾斜計・ひずみ計による前兆的な地殻変動の検出をめざした。最近の宇宙技術による地殻変動の観測に加えて海底や深いボア・ホールでの観測により、地震予知の研究は着実に進められていくと期待できる。

キーワード：地殻変動，地震予知，傾斜計，ひずみ計，GPS，光波測量

1. はじめに

1960年4月に防災研究所「地かく変動研究部門」の助手として採用されて以来1999年3月に停年を迎えるまで39年にわたって地殻変動による地震予知、あるいはそれに関連する研究に従事してきました。地震予知のような時間的にゆっくりと進む現象に関する研究は本質的に息の長い研究が必要であることは当然ですが、そうは言っても長いだけでは何にもなりません。筆者もその長さに見合うだけの貢献をしてきたとはとても言えませんが、せつかくの機会をいただきましたので、ここで自分の辿ってきた道をふりかえりながら、地震予知研究の将来について少し考えてみたいと思います。

2. 椋平虹

私が地震予知の研究に足を踏み入れたのも、これは生まれが京都府の北部いわゆる丹後地方であるからなのです。皆様はあまりご存知ないかも知れませんが、「椋平さん」という虹で地震を予知する方が与謝郡の江尻、有名な天橋立が成相山の麓につながるところに

ある村に住んでおられまして、子供のころには「明日大地震があると椋平さんがいった」とかいう噂がよく流れてくるのです。この椋平さんの地震予知は、虹を見ていろいろ計算して場所とか地震の大きさを予知するとのことでした。第2次大戦のあと何もない時代に、地域の青年団などがみんなで勉強をしたり娯楽をして、戦後間もない混乱期の明日への希望を持つというわけで、講演会とか演芸会などが開かれていましたが、ある夕べ「椋平さんの講演会」が開かれ私も多分中学1年か2年だったと思いますが、勇んで聞きに行ったことを記憶しております。

椋平さんは自分が予知したたくさんの地震を表にして書いてある大きな紙を横に貼って講演されました。発震時とか場所などを全部記憶されていて、すらすら話しの中に出てくるのにはびっくりしてしまいました。「ひのこ」と呼ばれるそうですが、短冊のような虹がどのような形であるか、下のほうがどれくらい曲がっているかなどを計って地震の起こる方角とそこまでの距離を推定する、色の薄いものほど地震は大きいなど、

どうしてそのような計算手法を見つけたのか、の経験も含めて話されました。ただ、色が薄いほど大きな地震というのは、多少不思議な気がします。大きな地震ほど強い前兆があるのは理解しやすいのですが、薄い虹ほど出現する機会が多いような気がしますから、これは大きい地震は少ないことと矛盾するように思えます。気がします。ともかく、「尋常小学校のころ、不思議な虹が出て、そして地震が起こった。それから同じようなことに気がついたので、それらを記録して予知法をみだした」と言われておりました。なお、1927年3月7日の北丹後地震(M7.3)も予知したとも話されていました。それは北丹後地震の数日前に網野地方を訪れたところ、積もった雪の中で農家の人が裸足で大根か何かを掘っていたのを見て椋平さんが冷たくないかと思わず尋ねたところ、「地面が温かくて冷たくない」との返事であったので、「そのように地面が異常に暖かいことは地下に異常が起こっている、大地震が近いと思って大地震がくると住民に知らせたが、バカ呼ばわりされて受け入れられなかった。けれども自分は北丹後地震も予知できたのである」といわれたのを覚えております。昭和2年は丹後地方でも大雪で、3月になってもたくさん雪が積もっており、雪にもたれかかることができて家が倒れなかったとか、屋根の上に積もった雪は消火に役立つとか役立たないとか、そんな話題は私が子供のころにはよく聞かされました。

椋平さんが一躍有名になったのは1930年11月26日の北伊豆地震(M7.3)を予知したことが、当時の気象台長藤原咲平氏によって世間に紹介されたことによります。「アスアサイズジシナル」という電報が藤原氏に届いたとのことで、このようなエピソードは「虹のおじさん」という本にもなって子供たちにも紹介されています。このことが当時から世界の有名学者であったアインシュタインの耳にも入って、アインシュタインから椋平さんへ研究を励ます手紙もよせられているとも聞きました。このような次第で大震災を経験した丹後地方では地震の恐ろしさと合わせて予知への期待とつながり、椋平さんは大変な有名人であったわけです。そうして私など子供はとくに、大地震がくるといった噂に戦々恐々となったものでした。もっとも母

親などに椋平さんの予知の噂を話しても、日々の生活に一所懸命で、そんなことにいつも関わってはおられない、といった様子ではありましたが。ただ、当時から「このような立派な研究を専門家が注目しないのはおかしい、学者は椋平虹を研究しなければいけない」といった話はよく耳にしました。

3. 地震予知の研究へ、そして兵庫県南部地震

上に述べた事柄は随分昔のことですのでいろいろ間違っているでしょうが、このような子供のころの環境が、たぶん私が地震予知の研究に足を踏み入れた動機になったことは確かだと思います。ただ、虹と地殻変動とは違いますし、「椋平虹」の研究はしませんでした。後年、京都大学理学部の三木晴夫教授が「椋平虹」の研究をされましたが(三木, 1971, 1973, 1976)、私は自分の出身地の近くであり子供の時からよく知っていた事柄でしたが、三木教授の研究には参加しませんでした。確かそのころ毎日新聞は椋平虹のサポータ的存在であった記憶がありますし、予知されたらあらかじめ新聞社の方へ連絡することになっているとか、そのころ椋平虹があまり当たらなくなった理由について椋平さんは「ソ連の水爆実験のため、大気の状態が乱されて予知ができなくなった」とコメントされている、といったラジオ番組も聞いた記憶があります。とにかく、私は地震予知については、1943年9月10日に起こった鳥取地震の(M7.2)の約6時間前から異常傾斜を見事に観測された Sassa & Nishimura(1951)の論文をみても、地下の応力状態を反映する地表面の変形の研究が前兆現象としても一番可能性が高い、と考えておりましたから、椋平虹は私の研究対象にはなり得ませんでした。

その後、長年地殻変動の研究を続けてきて、「決してそう簡単ではない、地殻変動といえども、それほど顕著な前兆としての変動があるとは限らない、地面は気象変化や地下水の変化などによっても変形するため、地震発生と確実に結びつけられる前兆的変動を観測するのは、伊豆半島で起こる群発地震のような特別な場合を除き、現在のところ、難しい」という考えをもつにいたっております。学会全体としても1970年代の楽

観的な頃と違い、現在は地震予知そのものが一筋縄で行かない難しい研究課題であるという考え方が支配的であります。

前にも述べましたが、丹後地方には1923年3月7日の夕方に北丹後地震が起こりまして、大変な被害を受けました。1995年の兵庫県南部地震よりひとまわり大きい地震で、断層が網野町から山田村まで現れ、地震学的にはいろいろなことが研究されて非常に有名な地震であったのですが、いわゆる直下型の地震で多くの人が倒壊家屋の下敷きになり、夕食準備の時間帯であったことから当然多くの場所から火が出てとくに峰山町はほとんどの家屋が焼失し、多くの人がそのために命を失いました。当時の記録をみますと、死者は合計で1,900人に達していますが、人口が4,600といった片田舎の峰山町一町でこのような1,100人も犠牲がでていることは驚くべきことです。実に4人に1人が犠牲になっています。同じ震源域にあっても、戸数1,035のうち全壊戸数は157と他の町村と比べて少ないのに849戸が全焼しています。10数カ所から火がでて、消防車も燃えてしまったそうです。火事がでるかでないかで犠牲が大きく違うことはよく知られていますが、火災を起こさないことは本当に大事なことです。昭和の始めの田舎では耐震設計はもちろん筋交いもない構造で、農家は2階を冬季用の物置としていたため重量が大きく、地震に弱かったと考えられています。ただし、2年前には但馬地震(M6.8)があり丹後地方でも震度5程度はあったはずですし、5年前の関東大震災のことも伝えられていますので、地震の恐ろしさ、どのような被害が出るかなどは分かっていたはずですが、ちなみに子供のころには、これも丹後地震のときの知恵でしょうが、地震のときは面積の割に柱が多くしかも周りは壁で作られている便所が一番安全、2階はつぶれないから安全、竹やぶに逃げれば地割れに落ちて死なないから安全などといわれていました。竹やぶの地割れは地下茎が張っているからとか、藪は火を防いでくれるとか説明がついていましたが、地割れにおちて死んだひとはいないそうですから、藪のことはよく分かりませんが、便所や2階の安全性はお分りの通りです。

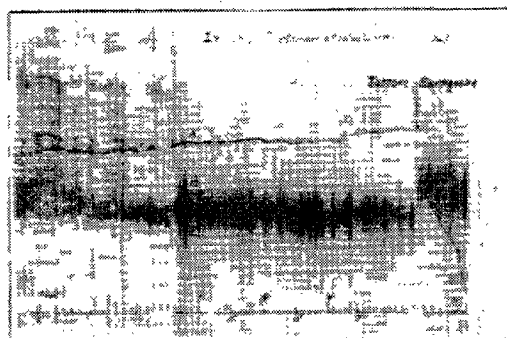


Fig. 1a--Tiltgram observed at Ikuno, September 4-11, 1943

Photo 1 Tilt record observed at Ikuno, September 4-11, 1943 (Sassa & Nishimura, 1951)

それにしても、阪神淡路大震災における長田区などの火災はまことに心の痛むことでした。兵庫県南部地震の直後のテレビで写し出されていた神戸の様子は普段とほとんど変わらないように見えたのですが、その後次第に明らかにされてくる大被害を目にし、70年も前の丹後地震のときとほとんど同じ形の震災が起こったことに大きなショックを受けました。丹後地震のような震災は耐震工法の進んだ現在の日本では起こらないだろうと楽観的な予想をしていたのですが、昔のままの災害が起こってしまったことに愕然としました。どのように学問が進んでも、規則が整備されても、それが生かされなければ役に立たないことを実感しました。これに対処するには、やはり政治の力しかないでしょう。要するに老朽化した建物は立て替え、修理をすること、それができない場合には可能になるよう適当な形で援助することしかありません。

兵庫県南部地震の確定的な予知ができなかったことはいわば現在の学問レベルからいえば当然ですが、おぼろげな予測もできませんでした。私の専門としていた地殻変動の研究分野では、六甲高尾の観測室で1996年10月ころから異常な地殻変動が起こっていたことがのちに明らかにされました(藤森ほか, 1995)が、Sassa & Nishimuraによって観測されたような数時間前から始まる明瞭な前兆的地殻変動は私たちの観測網では検出できませんでした。しかも研究所の目的としている地震災害の軽減ということに関しては、建物、

道路、土木構造物、港湾施設などに大きな被害が出たのを見て、そのとき所長という立場にあったものから、かねてより防災研究所の研究は「後追い研究である」との批判をうけておりましたので大きな責任を感じました。もちろん私たちは一所懸命研究に励んでいるのですが、目的としてきたことに対しこのような大災害の発生という厳しい回答をつきつけられて、その後の落ち込みから立ち直るのにはしばらく時間がかかりました。いろいろな対応に追われたり観測データを調べたりしていましたが実際に神戸の被災地は訪れることもできず、実際に神戸へ行ったのは3週間あまり経ったころでした。

4. 地殻変動の連続観測

私が専門に地球物理学を選んだのは、もともと旅行が好きだったので、観測や調査にいろんな所へ行けそうであるという単純な動機からでした。入学当時は人並みに湯川秀樹教授の理論物理学とか、当時新しいものを感じさせた生物学に興味をもっていたのですが、物理学を目指す友人は秀才ばかり、生物学の実習では観察写生がだめ、化学実験では分析が間違っただけという状態で、いずれも3回生への専攻分属の段階であきらめてしまいました。生家は丹後縮緬の製造業を営んでおり、卒業後はそのあとを継ぐべく夜には「関西経理専門学校」に通ったりなどしていましたが、指導教授であった西村英一先生から大学院は「体力があれば大丈夫」といわれて、なんとなく入学し、現在に至っている次第です。

さて、地殻変動と地震予知といえれば前に述べました佐々・西村両先生によって観測された有名な鳥取地震の約6時間前からの異常な傾斜変動でしょう。その結果は米国地球物理学連合(American Geophysical Union)の雑誌に発表されて世界的に有名ですが、水平振子型傾斜計と呼ばれる小型で簡単な、記録紙上で1mmが 10^{-9} ラジアンといった非常に高感度な器械で観測されたものです。しかし、この型の傾斜計による高感度での観測は結構熟練を要するものでした。ところで、Photo 1に示した記録は観測中に偶然得られたものではないのです。佐々教授は、山陰地方に起こる地震は、たとえ

ば1924年の但馬地震と3年後の北丹後地震のように、1、2年おいて連発することが多いことから、その年の3月4、5日に鳥取県東部でM5.7~6.2の地震が起きたことから近いうちにその周辺に大地震がおけると予想されました。そこで、近くの「生野鉱山」の地下坑道に傾斜計を設置して観測を開始し、1年足らずのうちこのような貴重な記録を得られました。これは、現在でも良く言われる「目的を明確にした観測」の必要性を見事に示す研究として記憶されるべきでしょう。

その後京都大学では、このような前兆的記録を蓄積することが、地震予知の達成につながるとの観点から、近畿地方をはじめ、九州では槇峰鉱山、東北地方では細倉鉱山まで多くの鉱山などで地表面からのノイズを避けた深い静かな坑道内に傾斜計を設置して観測が続けられていました。4回生の終わりから大学院に入ったころの私は先輩の田中 豊氏のお供をしてこれらの鉱山の観測を手伝ったり、観測データの整理をしていました。もちろん鳥取地震のような記録が簡単に取れるわけではないので、西村先生は「地震予知の研究はなかなかデータがとれないから、普段は「地殻潮汐(現在は地球潮汐と呼ばれています)の研究をなさい」と言っておられました。

修士学位論文は簡易型の長期観測用傾斜計の開発と試作でありました。感度を稼ぐため水平振子のふれの角は光挺子で拡大していましたが、暗室とか光源用の電源を必要とします。また、多くの地点で観測することも必要です。そこで、多少ノイズは大きくても地表に穴を掘り、そのなかに設置しておけば、少なくとも1ヶ月間は連続して記録できる傾斜計の開発を目指したわけです。長く軽いペンを使うことにし、このために大型の振子を使い、ペン書きは摩擦を生じるため通常は記録紙の上で宙に浮いているペン先を、1時間に一度軽くたたいて穴をあけ、その穴の位置を読むというものでした。従来から使われている傾斜計との比較観測をしましたが、どうも両者が同じ傾斜を示さないで、慌てたり困ったりしておりました。よく調べた結果、このとき比較に使っていたのは先輩の伊藤芳朗氏が開発された軽量小型のいわば携帯型水平振子傾斜計であり、あまりに軽量で、また小さかったため、

やや不安定で必ずしも設置した床面の動きを忠実に記録せず、むしろ新作の大型傾斜計が忠実に床面の傾斜を記録していたことが明らかになり、修士の学位を頂戴することができました。このことは当時の新聞にも取り上げられ、今にもこの傾斜計で地震予知ができるように紹介され、恥ずかしかったと同時に、新聞記事の内容には読者として十分批判的でなければならないことも学びました。

この大型傾斜計は試験観測を行ったものの、本格的な製作と使用には到りませんでした。それは、湿度の高い地中で1ヶ月間もの長期にわたって動くぜんまい駆動式の記録装置の作成が容易でなかったこと、ペンをたたく装置には電源を使用せざるを得ず、したがって結局電源の無い屋外での観測にはなかなか使用しにくいということでありました。

5. 和歌山における地殻変動の連続観測

和歌山市周辺では明治以降群発地震が起こっていて、東京大学地震研究所の宮村三教授が研究を続けておられ、また先輩の三雲 健助教授はその走時および発震機構の研究で博士号を得ておられました。そこで、これらの群発地震は規模は小さいものの震源は浅く近い、しかも観測できる機会が多いということから、これらの小地震の前兆変動を捉えてこれを研究して博士論文にまとめること、という研究題目を西村先生から頂戴して研究を開始しました。これには岸本兆方および三雲 健助教授にすべてお膳立てをしてもらい、新米の筆者は大浦および秋葉山の横穴で傾斜計の感度を精一杯上昇させて観測を行い、データを調べました。この観測では巨大地震として有名なチリ地震(1960年5月22日)の震動、それにその後日本を襲って大被害を出したチリ地震津波による海水面の変動で生じた傾斜変化を記録することができました。

1960年11月14日にはこの地方ではトップクラスの大型の地震がかなり近い場所で発生したので、この発生時刻の前後を丹念に調べました。地震の時およびその後続く 10^{-9} ラジアン程度の傾斜変化は、地震時のいわゆるコサイスマックな傾斜変化かあるいは震動による傾斜計の器械的な余効変形かは厳密には区別でき

ませんが検出できたものの、前兆的な傾斜異常は見せませんでした。その結果、私は前兆的な異常地殻変動は決してそれまで考えられているように大きなものではないかも知れない、ほとんど前兆的な地殻変動もなしに大地震は起こるかも知れない、と考えるようになりました。それ以後も長く観測を行ってきましたが、それらのデータの中には前兆的地殻変動であると確信をもてるものは一例もありません。ただ、1960年12月26日の大台ヶ原地震(M6.0)の前に、大浦の伸縮計が極めて異常な伸びの変化を示したため困惑した記憶があります。震源までの距離は遠く90km以上もあり、これと直交する成分の伸縮計、傾斜計などには対応する明瞭な変化が現れていないので、その伸縮計の器械的な誤差の可能性が高いのですが、それ以降この伸縮計にはそのような異常はみられなかったことから、あるいは関係があったかもしれない、実際にそのような異常変動が存在するかも知れない、といった考えも捨てていません。



Photo 2 Messrs. Bamba, Kitamura, Hosono and the author in front of the recording room of Kishu station

6. 光波測量による地殻変動観測

1960年度から開始された地震予知研究計画では、労力と費用と時間を要する三角測量、水準測量などは5年から10年の間隔で日本列島を繰り返して測量する、その結果、異常隆起などの地殻変動が見つければ地震発生に関連するものかどうかを詳しく調べる、そして前

兆現象を検出して短期的な予知を行なう、という手法が取られています。ところで 1950 年代の中頃には Tellurometer あるいは Geodimeter といった電波や光波を使った測距儀が発売され、測量に使用されるようになってきました。1965 年 8 月ころから松代群発地震が発生し始めましたが、東京大学地震研究所はこの Geodimeter による測距を繰り返して、群発地震活動に関係する地殻変動を見事に捉えました。これにより、それまでは三角測量という人力も時間も必要とする手段に代わって、光波測量によって 10km 規模の水平変動を比較的短時間にかつ簡単に測定できることが示され、防災研究所でも Geodimeter 6 型 1 台を導入し、これを地殻変動観測に利用することになりました。1968 年 2 月の「えびの地震」の震源に近い吉松町とか、桜島火山、高知市、和歌山市、奈良県屯鶴峯地殻変動観測所および岐阜県上宝地殻変動観測所の周辺、鳥取県の吉岡・鹿野断層、粉河町・阿波池田町・川之江市などにおける中央構造線、さらには天ヶ瀬観測室がおかれている長さ 1800m の導水トンネルの中など各地において、多くの皆さんと協力して光波測量用の基線を設置し、測定を繰り返して地殻変動の検出を試みました。光波測量の誤差の中には気温や気圧による光の速度変化がもたらす誤差があり、これが精度の向上を妨げていることから、その補正方法などについても考察を行いました。

もともと近畿地方などでは通常の地殻変動は年間 2×10^{-7} といった程度であるため、光波測量によって地殻変動を確かに観測できた記憶は持っていません。20 年、30 年といった歳月は大きな変革をもたらし、当時設置した測量基線のいくつかは壊されたり、視通が遮られたりして再測不可能になってしまいましたが、現在でも測定できるところでは地殻変動が検出されています。ただし、GPS によってさらに高精度の測定が可能になった現在では、光波測量は地表面に沿った計測のためもろに大気屈折誤差の影響をうけるので、むしろ短測線の精密距離測定に利用されるべきでしょう。けれども 30 年前といった古くからのデータにつながる光波測量基線の変動は地殻変動研究の立場から有意義なデータであることにも違いはないと思います。

7. GPS による地殻変動の研究

1970 年代に入ると VLBI (Very Long Baseline Interferometer : 超長基線電波干渉計) によって地球潮汐による地球規模の変形が観測できたという話が耳に入り、まもなく電波研究所 (現在の通信総合研究所) でも干渉実験が始められたり、海上保安庁水路部では人工衛星レーザ測距がはじめられて、10cm といった位置決定精度が得られる見込みがあるとか、プレート運動が実測できたといった情報ももたらされるようになると、やがて宇宙新技術によって地殻変動の観測が可能になる時代がくるだろうということは私などにも予想できました。

その後、NASS (Navy Navigation Satellite System : アメリカ海軍航行衛星方式) よりさらに精度が良く近代的な軍用航法として米軍が開発を進めていた GPS (Global positioning System : 汎 (全) 世界測位システム) がいくつかの衛星が打ち上げられいよいよ試験段階に入り、実験が行われて、その結果は 1cm もに達する位置決定精度を有しているとか、米国ではこれをプレート運動の観測やサン・アンドレアス断層周辺の地殻変動観測に使われる、などの話が伝わってくるに及んで、わが国の関係者の間でも GPS を何とかして導入し、実験や観測に使用してみたい、との機運が急速に盛り上がってきました。余談ですが、その頃鳥取微小地震観測所の総合移動観測班に所属していた平原和朗氏は「地殻変動については GPS が実用化されれば、積極的に GPS を使って観測と研究をしたい」と、そのような時代は技術的にも予算的にもかなり先のことであろうとたぶん予測されていたのでしょうか、私に言われたことを覚えています。

GPS の精度は非常に高くその利用は大いに関係者の興味をひくところであり、平原氏や加藤照之氏 (東京大学地震研究所) にはその導入と利用を考えるようになりましたが、何しろ高額でもあるため、やはり多くの人を集めてみんなで力を合わせて導入を働きかけようとの考えのもとに、まず GPS についての勉強からはじめることになりました。そこで、当時定期的に開催され、地殻変動の観測や研究などについて相談や意見交換が行われていた「地殻変動懇話会」が 1985 年 4 月の

地震学会の際に開催されることになったので、この機会を利用して「GPSに関する勉強会」が開かれました。そこには60人を超える人たちが集まり、その関心の高さを窺わされました。この勉強会を契機に、当然のことですが実際にGPSを入手して実験を始めたいとの機運が高まり、同年5月の日本測地学会では「GPS購入を考える会」が開かれました。1台が2,000万円といった高額なGPS受信機は、地震予知計画でも導入は難しい状況であり、せめて3台でも導入が許されればそれを共同で利用していこうといった相談もなされつつありました。やがて、このような状況が反映されたのでしょうか、国土地理院がわが国で始めてデモンストレーションに使われたのと同じMacrometerIIをテスト用に2台導入されるという情報が入り、さらに東京大学地震研究所では文部省科学研究費によるGPS購入の申請が認められ、SONYの受信機1セットが購入されました。それより前、SONYでは米国からGPS関連資料を入手して独自に開発がすすめられていてそれが導入されたわけで、ハード、ソフト共に単にブラック・ボックスとしての製品ではない、内部を覗けるGPSがまず地震研究所に入ったことは以後のGPS関連の進歩にとって大変よかったと私は考えております。このように、わが国での測地学的なGPS利用のための研究は、まず地震研究所の村田一郎教授を中心とするグループによって開始されました。

この頃、GPSの利用に関する問題点として、「GPSは米軍の軍事システムであり、精度劣化措置が示すように、いつもわれわれが学問的に利用できる保証が無いではないか」、「大気中の水蒸気が誤差の原因となり、その補正をしないと高い精度が得られないのではないか」という2点がしばしば指摘され、これに対する説明ができなければ導入は一層困難であると思われました。そこで、気象庁のラジオゾンデのデータを使って、水蒸気の影響を調べてみたりしておりました。

このようなときに突如、日米間の貿易摩擦を解消するための補正予算が生まれ、GPS導入の意義は大きく、またその要求も強かったためでしょうか、100台近い受信機が大学に導入されることが決まりました。それまではまさに高嶺の花であった多数のGPSが、一挙に

地殻変動の研究に利用できることになったのでした。防災研究所でもMacrometerII型の小型化改良版であるMinimac2816を3セット固定用として、それに、当初は1周波受信しかできませんでしたがほどなく2周波用にグレードアップされたWM102(当初はWM101)を9セット移動観測用として導入しました。平原和朗氏を中心としてGPSによる地殻変動の研究がスタートし、私もそれに参加してきました。以後、これらの受信機を利用して、宇治-潮岬-池田-鳥取を結ぶ固定観測や全国の研究者との協力のもとでの地殻変動合同観測キャンペーンなどが実施されてきました。そして、フィリピン海プレートの沈み込みによる紀伊半島の北西-南東方向の圧縮、南西諸島におけるフィリピン海プレートとユーラシアプレートの相対運動の検出、兵庫県南部地震後の余効変動の観測など、数々の成果が挙げられてきました。GPS利用に関する初期の研究の状況については、たとえば月刊地球(1992)を参照していただきたいと思います。地殻変動の研究に取り組んでいては論文が書けない、10年も待たなければ地殻変動について何も言えない、といわれてきた私などにとっては、手回しのタイガー計算機と算盤でデータ処理と計算を行っていたところへの電子計算機や電卓の登場と同じように、このGPSの出現はただただ目を見張るのみでありました。

もうひとつGPSの利用で頭に浮かぶことは、国立防災科学技術センター(現在の防災科学技術研究所)で始められ大きな成果が得られたGPS固定連続観測、それに新しく国土地理院が展開を始めた全国観測網による日本列島の変動モニタリングとこれに対する大学におけるGPS利用のあり方に関する課題であります。当初から、大学は「大学連合」を組んで観測計画の立案、共同集中観測、データ解析、GPS研究会の開催などを進めてきていました。当時、東京大学地震予知研究協議会の議長であった青木治三名古屋大学教授から、国土地理院の全国観測網完成後の大学における研究の方向などについていつも質問を受けていました。「大学連合」では常にこのような問題については議論がなされ、国の研究機関が取り組みにくい近隣諸国との広域合同観測によるプレート運動およびプレート境界の変

形に関する共同研究、活断層の運動や構造に関連する変動など 20km 規模の観測網ではカバーできない領域の研究とそのためのも密観測、それに GPS 観測精度の向上などが大学としての研究の方向であろうとの合意のもとに研究が進められてきておりました。国際共同観測については WING(Western-Pacific Integrated Network of GPS)、稠密観測としては伊東合同観測、花折断層観測、そして精度の向上に関しては「GPS 気象学」など、GPS を利用する研究は活発に取り組まれています。これらの研究成果はやがて地震予知、まずは長期予知に大きく貢献するものと考えられます。

なお、GPS 利用に関して、国際貢献という観点からその頃感じたことを一つ書いておきたいと思います。GPS の測地利用のため IGS(International GPS Geodynamics Service:国際 GPS 地球力学事業)という任意組織を作り、GPS の軌道を正確に測定してこれを関係者に配布して利用し、測地学の研究に役立てよう、このための観測あるいはデータ解析に参加する団体を募集する、との案内状が、GPS 受信機を多数購入した防災研究所に所属する私の手元にも届けられました。一応、データ解析に参加したいと応募しましたが、結局それ以後力不足のために何の貢献もできませんでした。わが国からは国土地理院、東京大学地震研究所が積極的に参加され、辻 宏道氏、加藤照之氏が活躍してこられました。けれども、わが国からこのような事業への参加状況は、所有する GPS 受信機の台数からいっても決して満足すべき状況ではなかったと思います。国際化・国際協力が学問の世界でも叫ばれていますし、これは地球科学の分野でも非常に大切なことであります。自分が IGS に貢献しなかったことは力不足でしかないのですが、基本的には国際シンポジウムの開催とか交流以外のことになる、なかなか国際的な協力が出来にくい体制、そのようなことに力を注ぎにくい体制にあることが問題なのではなかろうか、とっております。

8. GPS 気象学との関わり

—水蒸気ラジオメータと GPS—

GPS を利用した地殻変動の観測と同時に、大気中の

水蒸気による GPS 衛星からの電波の伝播遅延とその誤差を調べていた関係から、当時気象研究所で 2 台だけ導入されていた「水蒸気ラジオメータ」を防災研究所でも 2 台購入できることになり、これを利用して水蒸気分布の観測を行いました。その研究は大場雅彦君の修士論文や、エジプトから留学していたアシュラフ・ムーサ君の博士論文にまとめられました。GPS による地殻変動の研究は国際共同研究を通してインドネシアでも取り組むことができ、これを契機に留学生を受け入れ、インドネシアでの GPS による測位と地殻変動に関する研究と教育の立ち上げに役立つこともできました。

国土地理院の GEONET 観測網を構成している 1,000 点にのぼる GPS 観測データからは、これまでは全国でわずか 20 点ばかりのラジオゾンデ観測点で 1 日 2 回しか観測できなかった大気中の水蒸気に関する情報がほぼ連続的に入手できます。そこでこれを気象数値データに組み入れて天気予報に役立てよう、その気象数値データを再度 GPS 測位精度の向上に役立てよう、観測された水蒸気に関するデータベースを構築して、これを河川情報、水利用、蒸発散・水循環などの研究に役立てようとする「GPS 気象学」への取り組みがはじまられています。いわば、「GPS を地震予知の研究に、そして天気予報の精度向上に」という展開であります。この分野の研究はまだ始められたばかりであります。その進展は目を見張るばかりであり、自分をとりまいている地球科学のほんの狭い範囲でもその移り変わりの速さと広がり大きな驚きと深い感慨をおぼえます。

9. これからの地殻変動研究の進展への期待

GPS がいかに高精度の測位を可能にするといっても 1mm 以下の変動を検出することは簡単にできそうにありません。ここでひずみ計そして傾斜計による連続観測、そして高精度の電磁波測距と GPS を組み合わせることによって空間的にも時間的にも広いスペクトル領域での地殻変動の研究が可能になると期待されます。ひずみ計や傾斜計で観測される、これまでは意味不明であった局所的な歪とか傾斜変化が広い領域の地殻変動と関連づけられる日が近いと予感されます。

海底における地殻変動の研究は非常に重要であります。GPS とトランスポンダーを組み合わせた海底精密測位によるプレート運動の検出、海底での地殻変動連続観測などは今後どうしても推進してほしい課題であります。また、地震予知の面からいっても、一層地下深い場所での地殻変動観測も進められていく必要があります。

実際に地下における運動を捉えることも地殻変動に本質的にせまる研究であると思われます。地下の何かを「マーカー」としてつかまえ、これが動いていく状況を追跡することが可能になればよいと思います。地下の地震波反射面の変動をつかまえる試みがなされていますが、温度変化による物性変化の検出だけではなく、その場所における地殻変動のインディケータとしてのこの種の観測の実用化が計られるようになっていくことが望まれます。面的に地殻変動を捉える SAR(合成開口レーダ)による干渉技術の利用も今後地殻変動の観測に大いに利用されていくでしょう。これらいわば周辺分野への広がり新しい技術の応用などを「横向きの研究」と言うことにすれば、これからの地殻変動が「上向きの、そして横向きの研究へ」、そして八方にらみの、八方から眺められる学問として、ますます興味深いものとなっていき、その結果、地震予知の「いつ?」という問いにも答えられるようになっていくものと期待しています。

謝 辞

防災研究所では 3 9 年間にわたって地殻変動と地震予知の研究をさせていただきましたが、この間、先生方、諸先輩をはじめ大変多くの方々にご指導、ご鞭



Photo 3 GPS positioning for gravity survey in Bandung, Indonesia (Mr. Asada, Dr.Ito, Messrs.Irwan, Kuntjiri and Setyadji from left to right)

撻、ご援助を賜りました。この場をお借りして心よりお礼を申し述べさせていただきます。

参考文献

- 永濱宇平(1929): 丹後地震誌, 丹後地震誌刊行会。
三木晴男(1971): むくひらにじ (その 1)。
三木晴男(1973): むくひらにじ (その 2)。
三木晴男(1976): むくひらにじ。
藤森邦夫・山本剛靖・石井 紘(1995): 1995 年兵庫県南部地震に関連した地殻変動と湧水量変化—六甲高雄観測室における観測—, 月刊地球, 号外 No.13, 148-153。
月刊地球「GPS(汎地球測位システム) -現状と将来-」, 通巻 157 号, 1992 年 7 月, 海洋出版株式会社。
Sassa,K. and Nishimura,E.(1951):On phenomena forerunning earthquakes, Transactions of the American Geophysical Union, v.32, 1-6.

Research on Crustal Movement and Earthquake Prediction

— From the Ground Surface to Space —

Torao TANAKA

Synopsis

Mukuhira Niji(rainbow) was very famous as a special forerunner of big earthquakes found by an amateur,

Mr. Mukuhira in the Tango area, attacked by the Kita-tango earthquake(M7.3) in 1927 and suffered by a great damage. The anomalous tilt observed by Sassa and Nishimura at Ikuno Mine before the Tottori earthquake in 1943 encouraged scientific research of earthquake prediction by observing crustal movements. Recent researches suggest that it seems difficult to catch such anomalous crustal movement forerunning big earthquakes. Combination of observations with space techniques such as GPS and SAR and conventional techniques such as strainmeters, tiltmeters and precise distance meters at more deeper part underground and ocean bottom will open a way to long-term prediction of earthquakes.

Keywords: crustal movement; earthquake prediction; tiltmeter; strainmeter; GPS; electro-optical distance measurement