

地物教室測地学分野の海外観測・国際貢献

竹本修三

1. 南米ペルー・チリにおける地殻変動連続観測

西村英一は、1960年のチリ大地震の直後に「地震に伴う地殻変動の国際共同観測（趣意書）」をまとめているが、そのなかで以下のように述べている（地かく変動部門, 1967）。“世界すべての地震国にとって、もっとも恐ろしい破壊的地震を事前に察知し、その惨害を可及的に防止・軽減する最善の方法を見出すことは、われわれ地震学者に課せられた最大の責務である。かかる見地にとって、単に日本においてのみならず、広く世界の地震国すべての協力によってこの問題の解決に進むべきであり、（中略）そしてこのような協力体制のもとにおいて始めて人類の共通の敵である大地震の本性を明らかにし、その惨害からわれわれの社会を守ることができるはず。”

当時の西村は、健康がすぐれなかったが、南米・北米・アリューシャン列島から日本列島・台湾・フィリピン・ニュージーランドを結ぶ環太平洋地殻変動観測網の構築の壮大な構想を抱いていた。西村は、この構想に基づき、1962年2月より3カ月間にわたり中南米に出張し、メキシコ、ペルー、チリ3カ国の関連機関の研究者と地殻変動共同観測の計画を話し合った。その内容は、(1)メキシコ4、ペルー7、チリ5の計16カ所で地殻変動の共同観測を実施する。(2)観測機器は京都大学が提供する。(3)観測用坑道と電力等の設備は現地3カ国がそれぞれの国の費用で準備する。(4)機器設置には京都大学から研究者を派遣し、現地の観測要員の指導を実施する。(5)観測記録は京都大学側と現地の担当機関の双方が利用する、というものであった。

西村は帰国後、上記3カ国の関連機関の担当者と共に共同観測の実施に向けての実質的交渉を行うとともに、国内の関係諸機関の支援と協力を得るために努力した。この間、田中豊や津島吉男を中心に観測機器の設計図が作られ、一部の機器の製作・性能試験が開始された。その計画途上の1964年3月に、西村英一は57歳の若さで急逝した。これにより一時は計画続行が危ぶまれたが、あとに残った田中豊は、一戸時雄、岸本兆方、中川一郎、田中寅夫などの協力を得て、粘り強く計画推進に向けての努力を続けた。

1964年8月にはカウンター・パートの1つであるメキシコ大学が観測用横坑掘削経費を工面できないということから、計画中止を申し入れてきた。しかし、ペルー及びチリの関係機関からは、西村の突然の不幸を悼むとともに、専門家派遣の時期が多少遅れても計画を遂行したいとの回答があり、現地で観測用の横坑掘削工事がすすめられた。ペルーにおいては、ペルー地球物理研究所がペルー国内の西北西に位置するイカ（Ica）地域に深さ34m～64mの横坑4カ所、国立サン・アグスチン大学地球物理研究所がイカ地域の南方のアレキパ（Arequipa）地域に21m～23mの横坑4カ所の工事を開始した。また、チリにおいても国立チリ大学地球物理学・測地学教室がサンチャゴ地域で3カ所の観測用横坑（37m～220m）の掘削工事に着手した。

一方、国内においては、中南米技術協力計画の一部として本計画が認められることになり、ペルー及びチリの2カ国に3名の専門家を派遣することが決定された。この際、京都大学が準備した派遣専門家の携行機材は、各観測所あたり、(1)Bow-string型伸縮計 2成分、(2)水平振子型傾斜計 2成分、(3)磁気偏角変化計 1台、(4)気温気圧変化計 1台、(5)光学記録器 2台、(6)光源ランプ 8台、(7)付属品 1式であった。合計30箱、総重量4トンに達するこれらの観測機器等は、1965年7月17日に京都大学から搬出され、神戸港から船便でペルー及びチリ両国に送り出された。

そして、1965年10月～1966年1月の3ヶ月間、田中豊、中川一郎と津島吉男の3名がペルー及びチリに出張し、計器設置ならび現地職員の技術指導を行った。まず、ペルーにおいては、イカ地域にペルー地球物理研究所が用意した横坑4カ所に観測計器の据付を行った。続いて、アレキパ地域に国立サン・アグスチン大学地球物理研究所が用意した横坑4カ所に計器設置を行った。ペルー滞在中の60日間で8カ所の観測室の計器設置を終了したことは、現地の協力があつたとしても驚異的な早さである。これにはペルー地球物理学研究所の太陽部長であった石塚睦博士の尽力によるところが大きかった。

チリにおいては、サンチャゴ地域で5カ所に観測機器を設置する計画であったが、田中らがチリに着いたとき、1カ所、ケルテウエス(Qeltehues)の観測室が完成していただけて、他の2カ所は建設中、残り2

カ所はまったく工事が行われていなかった。ケルテウエスの観測室には計器設置ができたが、工事中の 2 カ所については滞在中に完成しなかったため、指導のみを行い、設置は現地スタッフに任せざるを得なかった。

1966 年 6 月 7 日にペルーのイカ地域の沖合 20km の太平洋底に $M=6.3$ の地震が発生し、震源から約 40km の距離にあるサマカ(Zamaca) 観測室では傾斜計 2 成分、伸縮計 2 成分に地震前の異常変化が観測された(田中 豊・他, 1969)。また、震源からの距離が約 100km のサラマルカ(Saramarca)および約 110km のガダルーペ(Guadalupe)観測室の傾斜計にも特異な変化が見出されたが、坑道掘削や計器設置後の日が浅いため、それらの影響も否定できず、地震活動との関連についての詳細な議論には至らなかった。

その後、1975 年 1 月～3 月に中川一郎、田中 豊、尾池和夫、加藤正明の 4 名がペルー及びチリを訪れ、イカ地域のコンドル (Condor) 観測室に伸縮計 1 成分を増設し、合計 3 成分の伸縮計にはアナログ信号を取り出すための差動トランスを取り付け、従来からの光学的印画紙記録方式に加えて、打点式記録計にも伸縮計データが記録できるようにした。また、アレキパ地域のアレキパ観測室に伸縮計 1 成分と光学記録計が増設されたほか、チリのケルテウエス観測室にも伸縮計 1 成分が増設された。このほか、ペルー及びチリ両国における重力測定や地震活動の調査も行なわれた(中川・他, 1976)。

田中豊(1994)は、1965～1983 年の 18 年間にわたる国際共同観測の結果のなかで、比較的良好のデータが長期間得られたペルー・イカ地域のコンドル観測室における傾斜計・伸縮計の記録を解析し、傾斜計データからは、ほぼ 10 年周期の変動が見いだされ、この地域で発生する $M>7.5$ の地震は傾斜変化の山・谷のところで発生しているように見えると報告している。また、伸縮変化については、長期のデータは東西及び南北方向の 2 成分しかないため、主歪の方向や振幅変化を論ずることはできないが、面積歪で見ると、1974 年 10 月 3 日にリマ付近で起きた $M=7.6$ の地震の後から急速な縮み変化を示し、その変化は 1979 年頃まで続いたことが明らかになった。田中豊は、得られた傾斜・伸縮変化をこの地域の低角逆断層型地震の発生過程と関連づけて論じている。

2. 国際重力結合

重力測定には絶対測定と相対測定の 2 つの方法があり、絶対測定は長さや時間の基準に基づいて、個々の観測点の重力加速度 (g) そのものを求める方法であるが、装置が大がかりで、1 点の観測に設置から撤収まで多くの日数を必要とする。これに対して、相対測定は重力値の差をスプリングの伸び縮みの差などに置き換える方法で、このための重力計は小型・軽量のものであり、短期間に多地点の重力値を求めることができる。第 2 次世界大戦後、油田開発などの重力探査を目的として開発された小型のスプリング式重力計が広く普及し、世界各地でさまざまな目的に広く用いられるようになった。しかし、得られた重力値は相対的なものであり、相対重力計を用いた測定には重力値が既知の測定点を少なくとも 1 点は含む必要がある。

1960 年代の初めにレーザーが開発されて以後、レーザー干渉法を用いた絶対重力計の開発が精力的にすすめられた。しかし、それが製品化され、一般ユーザーが広く絶対重力測定に使用できるようになったのは、1990 年の半ばである。それまでは、数少ない絶対重力測定点から相対重力計を用いて重力基準点を広げて行く必要があった。これを重力結合と呼ぶが、大陸を跨いで既知の重力点から相対重力計を用いて重力基準点を敷衍させて行くことを国際重力結合という。

1979 年から 3 年次にわたり、中川一郎のリーダーシップで、日本の海外学術調査班が延べ 4 回に及ぶ環太平洋国際重力結合を実施した。これには、国内の大学・研究機関から 9 台のスプリング式ラコステ重力計 (G 型) が参加し、重力差にして 6Gal (cm/s^2) に及ぶ環太平洋の 15 カ国・地域にある合計 34 都市間の重力結合が実施された(中川・他, 1983a, 1983b, 1983c, 1983d, 1983e)。これらの成果は、中川一郎が組織委員会副委員長兼事務局長を務めた第 1 回 IAG 学術総会 (1982 年 5 月: 東京) で報告され、大きな反響を呼んだが、なかでも中国からは、環太平洋国際重力結合を中国まで延長するようという強い要請があった。そこで、再び中川一郎を代表者とする海外学術調査班が組織され、1985 年に日中国際重力結合が実施された(中川・他, 1987, 1989, 1995)。

3. 赤道域における超伝導重力計観測

1970 年代に米国で開発された超伝導重力計(Super-conducting Gravimeter : SG)は、従来からのスプリ

ング式重力計に比べて2~3桁の感度が高く、地球表面の重力値(9.8m/s²)の12桁目の変化(1×10⁻¹¹m/s²)を測定できる能力をもっている。京都大学では、中川一郎が1988年3月に2基のSG(TT-70型8及び9号機)を導入し、東敏博らの協力を得て、理学部4号館の地下観測室で高精度の重力測定を開始した。

超伝導重力計をグローバルに配置して地球深部に起因する微弱な重力変化を検出し、地球深部ダイナミクスなどを明らかにしようというGGP(Global Geodynamics Project)計画が1990年代に浮上した。この計画の推進者の一人であった竹本修三は、京都大学が保有する2基のSGのうちの1基(TT-70型8号機)をSG観測の実績のない赤道域に移設することを計画した。竹本は、当時UNESCOジャカルタ事務所に勤務していた橋爪道郎博士の協力を得て、インドネシアとマレーシアの数カ所について、SGの移転先を調査した結果、最終的にインドネシアのバンドンにあるインドネシア火山調査所(Volcanological Survey in Indonesia :VSI)の構内に移設することを決定し、1997年12月に福田洋一、東敏博らの協力を得て、SG(8号機)を京都からバンドンに移設した(Takemoto *et al.*, 1998)。

その間、GGPのデータ・センターは、わかたて王立天文台(ブリュッセル)の地球潮汐国際中央局(ICET)内に置かれることが決定され、1997年7月より、データ流通が開始された。これに、日本からは、京都及びバンドンのほか、江刺、松代、キャンベラ(オーストラリア)、南極・昭和基地、ニーオルセン(ノールウエイ)の7観測点に参加した。

バンドンはGGPに所属する約20の観測点のなかで、唯一赤道域にあるSG観測点として、1997年以来、貴重なデータをGGPに提供するとともに、バンドン観測点に固有の問題として、降雨・地下水・土壌水分の重力観測に及ぼす影響(Takemoto *et al.*, 2002)などを研究してきた。しかし、2004年3月27日に時間雨量140mmを超える局所的集中豪雨のために観測室が水没し、計器の修復が不可能となり、観測中止のやむなきに至った。

バンドンは赤道域にある唯一の観測点であったため、何とか再開して欲しいという国際的な要請があり、京都大学では再開に向けての努力を続けたが、講座担任の竹本は2006年3月に定年退職した。そのあとを継いだ福田洋一がジャカルタとバンドンの中間にあるチビノン(Cibinong)のインドネシア測量及び地図国家協力機構(The National Coordination Agency for Surveys and Mapping in Indonesia(BAKOSURTANAL))にSG(CT型022号機)を設置し、2008年11月に観測を開始した。これにより、京都大学は、赤道域の精密重力観測を再開することができた。

4. 東アジア・東南アジアにおける絶対重力測定

FG-5型絶対重力計の測定精度は環境ノイズの状況により異なるが、大体数 μ Gal(10⁻⁸cm/sec²)の精度で重力加速度の絶対値を決定することができる。そこで、cmオーダーの土地上下変化に伴う重力変化が絶対重力計を用いて測定できるようになった。

1999年につくば市で開催されたIAGアジア太平洋スペース・ジオダイナミクス計画(APSG)全体会議において、環太平洋絶対重力測定の重要性が指摘されたほか、国連アジア太平洋地域地図会議・アジア太平洋GIS基盤常置委員会(PCGIAP)においてもアジア太平洋地域における絶対重力測定の必要性が議論され、とりわけこの取り組みに対する日本の貢献が要請された。このような国際的要請に応えるために、2002年から2005年の4年間に竹本修三が中心となり、国土地理院及び中国科学院測量・地球物理研究所などの国内外の関連機関の協力を得て、中国10カ所(10点)、台湾1カ所(2点)、インドネシア4カ所(4点)、マレーシア2カ所(2点)、フィリピン1カ所(1点)、タイ2カ所(2点)及び日本8カ所(9点)、計28カ所(30点)における絶対重力測定を実施し、1000km~3000kmの距離で東アジア・東南アジアを結ぶ絶対重力基準網を構築した(竹本・他, 2006)。

このキャンペーンのなかで、インドネシア、マレーシア及びフィリピンにおいては、それらの国における最初の絶対重力測定であった。その結果、これらの国の重力基準網に基準重力値を与えることができた。

東アジア・東南アジア地域で実施した絶対重力測定の測定点が図1に示されている。今後10年程度の間隔において、各重力点の繰り返し測定を行えば、大陸と島弧の相対的な上下変動をcmオーダーで明らかにすることができると思われる。

このほか、絶対重力計の重要な役割の1つは超伝導重力計(SG)のCalibration Factorを決定することにある。このキャンペーン期間中にSGが設置されている武漢、バンドン、江刺、松代、京都及び神岡において絶対重力測定を実施し、それぞれの観測点においてSGのCalibration Factorを求めた。

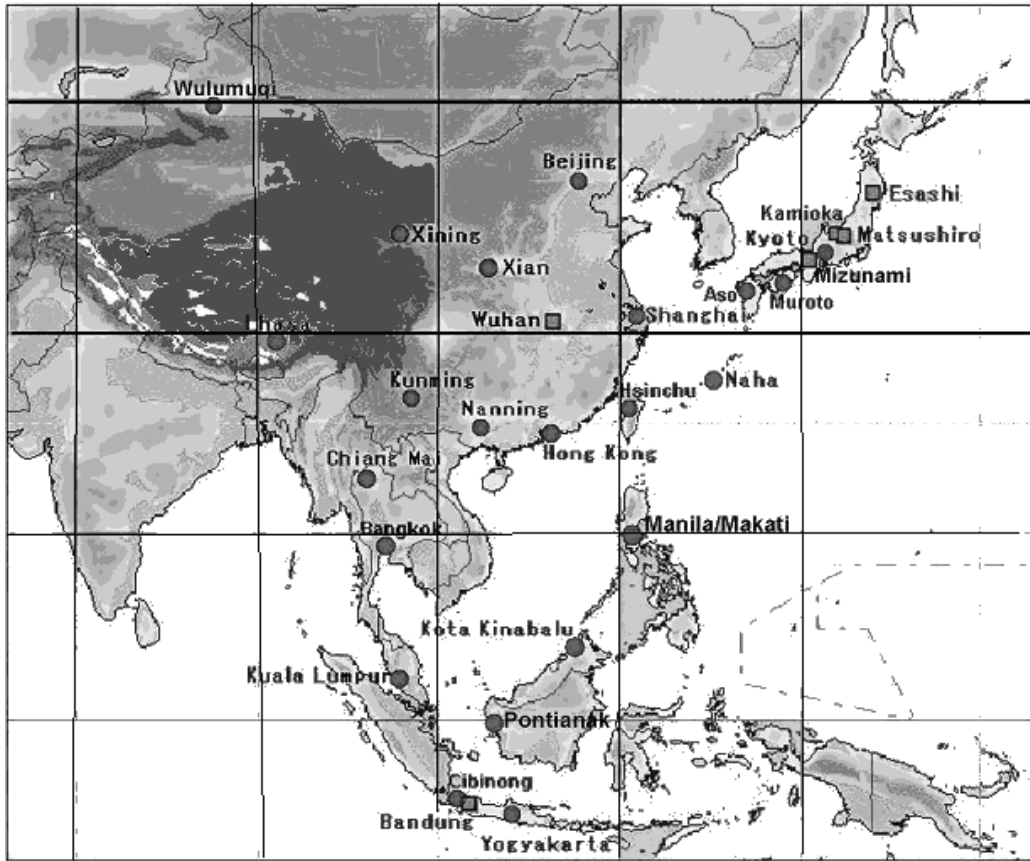


図1 東アジア・東南アジアにおける絶対重力測定(2002~2005年度)。

ところで、現在急速な発展を遂げつつある東南アジア諸国では、かつてわが国が経験したと同様の地盤沈下が大きな社会問題となっている。福田洋一らは、FG-5型絶対重力計のほか、より小型・軽量のA10型絶対重力計を用いて2008年度からインドネシアやタイにおいて多点の絶対重力測定を行い、GPS(Global Positioning System)やInSAR(Interferometric synthetic aperture radar)に代表される宇宙測地技術で得られるデータとも合わせて検討することにより、過剰な地下水揚水に伴う地盤沈下のモニタリングを実施している。

5. 京大測地学分野の国際測地学協会 (IAG) への貢献

最後に京都大学の測地学研究者の国際測地学協会 (IAG) への貢献を記しておく。

中川一郎

1983~1987 IAG Section III (Determination of the Gravity Field): Secretary

1987~1991 IAG Section III (Determination of the Gravity Field): President

// IAG Executive Committee: Member

田中寅夫

1984~1987 IAG Commission VII(Recent Crustal Movements)

Western Pacific Sub-commission Secretary

1987~1991 IAG Commission VII(Recent Crustal Movements) Vice President

1991~1999 IAG Commission VII(Recent Crustal Movements) President

竹本修三

1991~1995 IAG Special Study Group:3.137 [Combined Use of Gravimetry and Stress-Strain Measurement Techniques]: Chairman

1995~1999 IAG Commission V(Earth Tides) Vice President

1999~2003 IAG Commission V(Earth Tides) President
福田洋一
2007~2011 IAG Commission 2 (Gravity Field) President
" IAG Executive Committee: Member

(文献)

- Takemoto, S., Y. Fukuda, T. Higashi, *et al.*: Precise Gravity Observation in Bandung Using a Superconducting Gravimeter, Proc. of the Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project, Sept 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, (1998), 223-230.
- Takemoto, S., Y. Fukuda, T. Higashi, *et al.*: Effect of groundwater changes on SG observations in Kyoto and Bandung. Bulletin d'Information des Marees Terrestres (BIM), Vol. 136, (2002), 10,839-10,848.
- 竹本修三・福田洋一・東 敏博・他 (2006) :東アジア・東南アジアにおける絶対重力基準網の確立, 測地学会誌, 第52巻, 第1号, 51-95.
- 田中 豊・一戸時雄・他 (1969) : 1966年イカ地震(ペルー)前後の土地の異常変動, 京都大学防災研究所年報, 第12号A, 19-31.
- 田中 豊 (1994) : 地殻変動の様式から推定される低角逆断層型地震の発生過程と前駆的地殻変動観測, 月刊地球, 第16巻, 8月号, 333-337.
- 地かく変動部門 (田中 豊) (1967) : (地震に伴う地殻変動の国際共同観測 (序報), 京都大学防災研究所年報, 第10号A, 77-111
- 中川一郎・田中 豊・尾池和夫・加藤正明 (1976) : ペルー及びチリにおける地殻変動と地震活動の学術調査—調査の目的と概要—, 学術月報, 第29巻, 第3号, 207-212.
- 中川一郎・東 敏博・他 (1983a) : 環太平洋地域における国際重力結合(I), 測地学会誌, 第29巻, 第1号, 48-63.
- 中川一郎・他 (1983b) : 同 (II), 測地学会誌, 第29巻, 第1号, 64-75.
- 中川一郎・他 (1983c) : 同 (III), 測地学会誌, 第29巻, 第2号, 113-123.
- 中川一郎・他 (1983d) : 同 (IV), 測地学会誌, 第29巻, 第3号, 141-148.
- 中川一郎・他 (1983e) : 同 (V), 測地学会誌, 第29巻, 第3号, 150-156.
- 中川一郎・中村佳重郎・東 敏博・他 (1987) : 日中国際重力結合(I), 測地学会誌, 第33巻, 第3号, 185-204.
- 中川一郎・他 (1989) : 同 (II), 測地学会誌, 第35巻, 第1号, 37-47.
- 中川一郎・他 (1995) : 同 (III), 測地学会誌, 第41巻, 第2号, 171-195.