

精度0.1~0.2mgalの網を構築するというものであった。1回目の測量は1960(昭和35)年に終了し、引き続き翌年から2回目の二等重力測量が開始された。なお、国土地理院の重力測量は、1965(昭和40)年以降は基準重力測定を除き、すべて、これまでの重力計よりドリフトが小さく定数が安定なラコスト重力計を用いて測定が行われるようになった(写真-24)。これらの結果はSuzuki(1974)により重力測量網にまとめられた。この網は基準重力点8点、一等重力点89点、二等重力点10,369点から構成され、全国の重力値が精度0.2mgalで決定された。



写真-24 ラコスト重力計による測定

一方、国土地理院は1955(昭和30)年にGSI重力振子装置により、初めての国際測定を千葉-ワシントン間で実施した。以来、国土地理院は国際測定を繰り返してきた。1962(昭和37)年には国際重力委員会の要請により、日本が中心となって西太平洋重力標準線設置が計画され、1971(昭和46)年までに7回の国際比較測定が行われた(鈴木, 1967; 瀬戸, 1968; 鈴木, 1975)。

(b) 国際重力基準網1971と日本重力基準網1975

一方、新しい国際的な重力基準網が、20年以上の歳月を経て1974(昭和49)年に完成し、国際重力基準網1971(IGSN71)と命名された。これは、基準となる8ヵ所の重力値を落体法(物体を自由落下させ、落下距離と経過時間から重力加速度を測定する方法)で求め、これに約1,200個の各種重力振子の相対測定データ、ラコスト重力計やその他の重力計による相対測定データ約12,000個を用いて構築されたもので、その精度は公称0.1mgalとされている。国土地理院の西太平洋重力標準線のデータも、IGSN71構築に用いられている(鈴木, 1975)

このIGSN71には、日本の11都市39点が含まれている。国土地理院は、IGSN71の完成を受けて国内の重力値をIGSN71に準拠させるために、Suzuki(1974)の重力網にその後の重力測量成果を加えて新たな重力網「日本重力基準網1975(JGSN75)」を0.1mgalの精度で構築した(国土地理院, 1976)。JGSN75は現在に至るまで実用成果として使用されている。

これらの重力測量の成果は、地下構造探査等に使用されている。たとえば、国土地理院では1985(昭和60)年に、得られたJGSN75準拠の二等重力測量の結果に基づき、地形補正を施したブーゲー異常図を刊行した(中堀, 1985)。

また、1989(平成元年)年から1991(平成3)年まで、地下構造を推定して地震予知に貢献することを目的に、房総半島の公共基準点等において、1kmメッシュに1点の高密度で重力測定を実施し、ブーゲー重力異常図を作成した(秋山他, 1992)。

(c) 可搬型絶対重力計と日本重力基準網1996

1980(昭和55)年に国土地理院は、重力網の精度維持、ラコスト重力計の検定、重力変化の検出等を目的に、可搬型の佐久間式絶対重力計(写真-25)を導入した(村上・太島, 1981)。これは、真空中で物体を投げ上げ、上昇・落下する過程を測定して重力値を求めるもので、当時としては画期的な0.01mgalの精度を持っていた。国土地理院では、つくばの国土地理院構内にて5年間の実験観測を実施した後(佐々木, 1986)、この佐久間式絶対重力計を用いて1985(昭和60)年から1993(平成5)年まで全国13ヵ所の基準重力点において16回の絶対重力測定を行った(測地部, 1997)。また、1993(平成5)年には佐久間式よりも小型で精度、安定性とも勝る自由落下式の可搬型絶対重力計であるFG5が導入され(写真-25)、佐久間式に変わり現在に至るまで国内の基準重力



写真-25 佐久間式絶対重力計(上)とFG5絶対重力計(下)

点において観測に使用されている。

これらの可搬型絶対重力計により、重力絶対測定値が比較的容易に得られるようになった。また、測定精度の向上により、重力の時間変化の検出が現実的になると、JGSN75の0.1mgalという精度では不十分であり、より高精度に重力値を与える重力網が求められるようになった。そこで国土地理院は、1995（平成7）年、1996年に実施されたFG5による9ヵ所の絶対重力測定を基準として1977（昭和52）年以降実施された一等重力測定データなどを解析し、新たな重力網「日本重力基準網1996（JGSN96）」を構築した（測地部、1997）（図-21）。これは基準、一等重力点あわせて117点からなり、JGSN75より一桁高い約0.01mgalの精度を持つものである。

Gravity Station in Japan

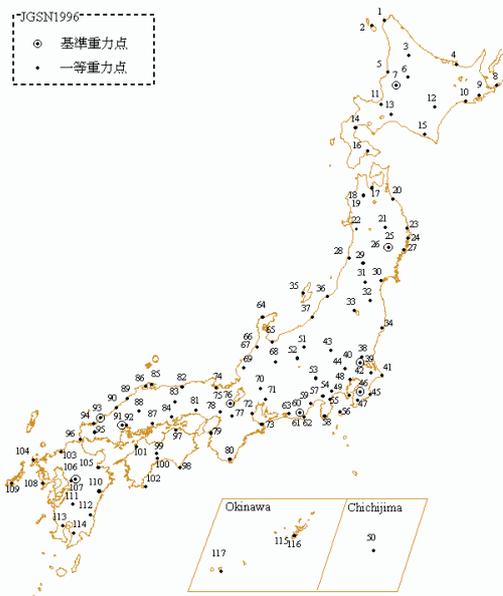


図-21 日本重力基準網 1996 (JGSN96) 配点図

(2) 重力変化の測定

重力の基準値を与えるための重力網構築のほか、国土地理院では重力変化の測定による各種現象の研究も行ってきた。細山(1958)は1957（昭和32）年より地理調査所内で実施されたアスカニアGs11重力計の連続観測データから、 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 の各成分の重力の潮汐変化算出を試みている。測地部(1967)では松代群発地震に伴う重力変化の検出を、また、藤井(1978)は1975（昭和50）年の大分県中部地震に伴う重力変化の検出を試みているが、これらの観測では、重力計の誤差を超えるような有意な変化は観測されなかった。

1986（昭和61）年の伊豆大島噴火の際には、噴火後に島内で水準重力測量を実施した。これは、水準測量と重力測量を同時期に実施し、地殻の上下変動と重力変化を調べることにより地殻内部の変化を推定するというもの

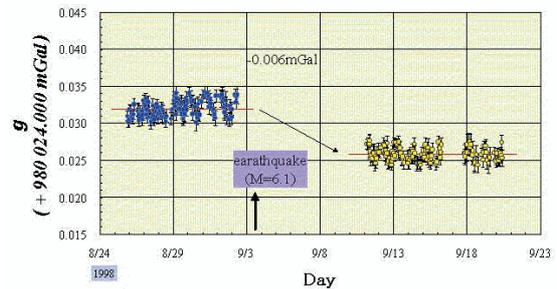


図-22 岩手山における重力値の時間変化

である。このうち重力測量は島内35ヵ所でラコスト重力計を用いて2回実施され、噴火前の重力値と比較した。その結果、噴火前後で島内の隆起域では重力値の減少が、沈下域では増加が見られた。これは定性的には重力変化が標高の変化に起因することと調和的である。しかし、上下変動量に対する重力変化の回帰直線を計算すると、その勾配はフリーエア勾配よりも有意に（絶対値で）小さいことが明らかになった。これは、高密度な岩帯の貫入を示唆している。（村上・吉田、1987）。

その後、小型で高精度な可搬型絶対重力計FG5の導入により、機動的な絶対測定が可能となり、地震や火山活動に伴う重力変化の検出に新たな時代をもたらすものと期待される。例えば、1998（平成10）年の岩手山の火山活動活発化の際には、1998～2000年に岩手山周辺においてFG5絶対重力計とラコスト重力計を用いた絶対、相対観測を、のべ6回実施した（町田他、2000）。この観測の結果、1998年9月3日の岩手山内陸北部地震の前後で基準重力点の重力値が0.006mgal減少したことが認められた（図-22）。また、2001（平成13）年に低周波地震の増加が見られた富士山でも、毎年絶対測定と相対測定の繰り返し観測を実施している。

(3) 南極での絶対重力測量について

国土地理院では、南極域における日本の重力測量の基準をあたえること、及び氷床後退による重力変化を捉えることなどを目的に、昭和基地の重力点で絶対測定を繰り返し実施してきている。これまでに第33次日本南極地域観測隊（1991（平成3）年）に佐久間式絶対重力計を、第36次（1994（平成6）年）と第42次（2000（平成12）年）ではFG5を用いて測定を実施した（藤原・渡部、1992；山本、1996；木村、2002）。なお、この昭和基地の重力点は、国際絶対重力基準点網のA点に登録されている。

1. 4. 3 地磁気測量

(1) 一等・二等磁気測量

日本の地磁気測量は、戦前は地質調査所、東京大学、海軍水路部により実施されてきた。国土地理院による地磁気測量は、1950（昭和25）年、偏角、伏角を測定するGSI型一等磁気儀（写真-26）が完成した後、直ちに北海



写真-26 GSI 型磁気儀

道、東北、関東地方などから開始された（国土地理院、1950）。また、2年後には二等磁気儀が完成し、二等磁気測量が開始された。

当初は、一等磁気測量は日本における全般的磁気図の作成に必要な地磁気要素の観測とその永年変化の地理的分布を求めるための一等磁気点約100点で実施され、二等磁気測量は局所的な磁気異常を詳細に調査するために400km²に1ヵ所の密度（およそ5万分の1地形図に1点）で実施する計画であった（測地第一課、1953b）。このうち、二等磁気測量は第1回目の測量が1957（昭和32）年（約800点）、引き続いて行われた第2回目の測量が1968（昭和43）年に終了した。しかし、二等磁気測量は1970（昭和45）年以降はほとんど実施されていない。一方、一等磁気測量については、全国105点での繰り返し観測を実施してきたが、地球電磁気連続観測装置（後述）の運

用に伴い、一等磁気点の中から約20点を選び10年周期で重点的に繰り返し測量する方針に切り替えられた。

地磁気測量には当初はGSI型磁気儀が用いられてきた。これに加えて、1957（昭和32）年に水素原子核の地球磁場内での歳差運動の周波数により磁場の強さを測定するプロトン磁力計が導入された。鹿野山測地観測所においてGSI型磁気儀との比較観測が行われた後（坪川他、1957）、地磁気測量の際にGSI型磁気儀の定数変化のチェックに使用されるようになった。これにより、測定信頼度が高まることとなった。1984（昭和59）年に一等磁気測量の一層の精度向上を図るためにフラックスゲート型三軸磁力計が導入された。これは、地磁気の偏角、水平分力、鉛直分力のある値（これを基線値と呼ぶ）からの変化量を検出する装置である（大滝、1989）。フラックスゲート型三軸磁力計は試験観測、機器の整備、改善の後1987（昭和62）年度の一等磁気測量より実用化された。

こうして得られた地磁気測量の結果は、10年ごとに、偏角、全磁力等を等値線図としてあらわした磁気図としてまとめられている（図-23）。また、藤原(1998)はロシア科学アカデミーと共同で、日本の一等磁気測量とロシアの日本海をはさんだ極東地域の地磁気観測データを用いて、自然成分直交法により地磁気変化モデルを作成した。

一方、地磁気は地殻に蓄積する応力や、マグマ移動に伴う温度変化などにより、変化すると考えられる。したがって、地磁気変化を観測することで、地震や火山噴火の際に地中で何が起こったかの情報を得ることができると考えられる。測地部(1967)では1965（昭和40）年に始

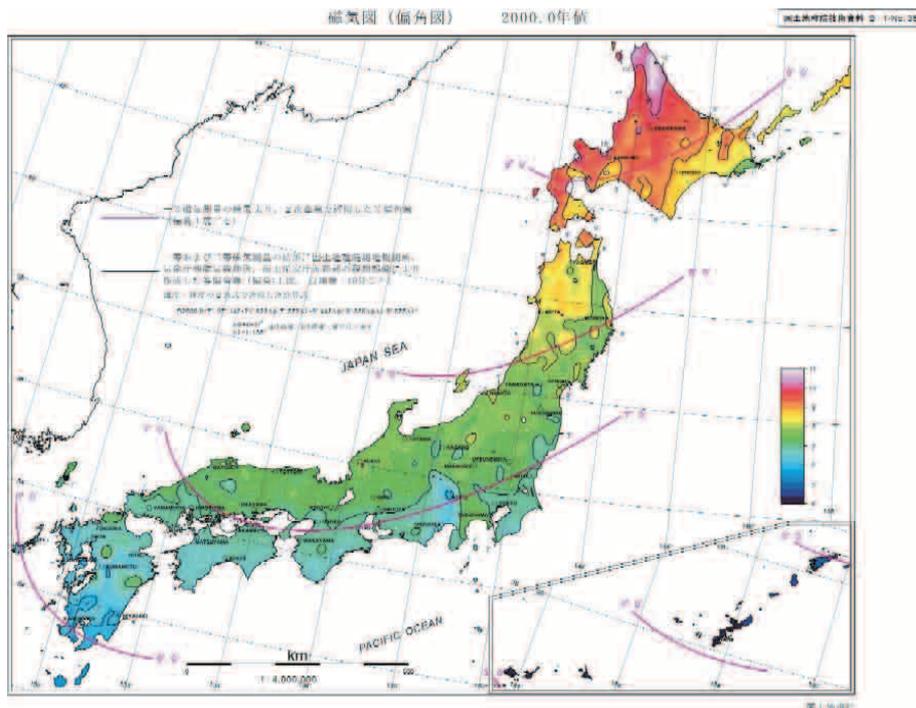


図-23 磁気図 2000.0 年値（偏角図）

まった松代群発地震の活動期間中に計4回地磁気測量を実施し、震源域に近い地域の磁気点で地磁気永年変化の異常を検出した。また、1993（平成5）年には同年の北海道南西沖地震前後の地磁気変化を検出する目的で一等磁気測量を実施し、地震に伴うと思われる地磁気各成分の変化を検出した（藤原他，1994）。さらに1998（平成10）年の岩手山の火山活動活発化の際には、国土地理院の機動観測の一環として岩手山麓に全磁力計を設置し毎5分ごとの連続観測を実施し、火山活動に伴うと思われる微少な地磁気変化を得ることに成功した（藤原他，2000）。

（2）航空磁気測量

国土地理院の磁気点は平均的には約20km間隔で配置されているが、山岳地域や海域ではまばらであり、様な密度とはなっていない。また、当然20kmよりも短波長の磁気異常は表現できない。その欠点を補うため、国土地理院では、世界磁気測量プロジェクトの一環として1967（昭和42）年に高度3,000mの航空磁気測量を開始した（田中他，1986）。これは、高度3,000mを南北方向に飛行しながら、プロトン磁力計により1分毎（約6km毎）に全磁力測定を実施するものである。その飛行コースの東西間隔はおよそ10kmで、日本本土とその周辺の海域をカバーしている。この測量は14年後の1981（昭和56）年に終了した。その結果は1975.0年値に化成され、航空磁気図にまとめられた。その結果、地磁気異常と重力異常帯は地理的に一致すること、また、日本の主要構造帯と地磁気異常も関連していることが判明した（田中他，1986）。

引き続き1982（昭和57）年より、短波長の地形高度の影響を軽減させ、より巨視的な磁気構造を示す異常帯を検出するため、飛行高度5,000mの航空磁気測量が開始され、1999（平成11）年に終了した（田中他，1986；錦・大滝，1992）。その成果は、観測された磁気データから標準的な地球磁場モデルであるIGRF1995モデルを取り除

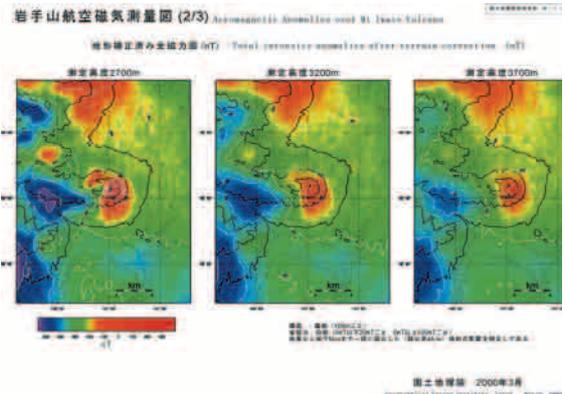


図-24 岩手山航空磁気測量図

き、1990.0年に化成した局地的な磁気異常を表した航空磁気図として2001（平成13）年に発表された。

一方、1999（平成11）年より新たに火山地域航空磁気測量が開始された。これは火山地域の磁気異常を詳細に捉えることにより、地下のマグマ活動の情報を得ることを目的としており、過去の3,000m、5,000mの航空磁気測量とは性格も目的も異なるものである。

1999（平成11）年には、活動が活発化している岩手山とその周辺で航空機による全磁力測量を行い、磁気異常を調査した。観測は岩手山を中心とする東西21km、南北27kmの範囲を対象に、2,700m、3,200m、3,700mの3高度において、東西、南北のコースを約800m間隔で実施し、これをもとに岩手山航空磁気測量図を作成した（図-24）。これを見ると、岩手山西部（大地獄谷から犬倉山）などで地表のごく近くまで地下の熱が達していることを示す強い負の磁気異常が見られる（熱消磁）。一方、東岩手山に表層の火山岩の磁化が極めて強いことを示す正の磁気異常が見られ、表層まで熱が達していないと考えられる（錦他，2000）。

また、2000（平成12）年の有珠山噴火の後には、有珠山とその周辺において緊急航空磁気測量を実施し、航空

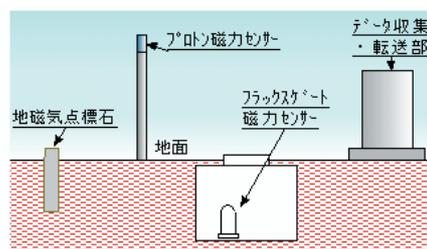
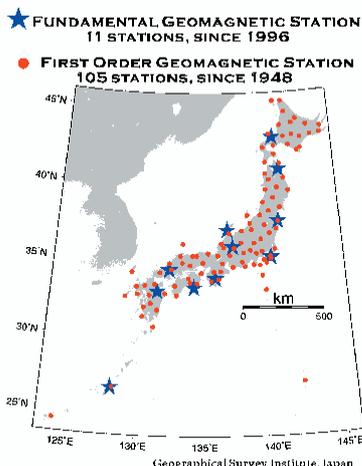


図-25 (左) 地球電磁気連続観測装置（星印）と一等磁気点（赤丸）の配点図 (右) 地球電磁気連続観測装置模式図

磁気図を作成し、有珠山の北西部に熱消磁によると思われる負の磁気異常を検出した（錦他，2001）。2001（平成13）年以後も、毎年1地域程度、火山地域とその周辺において航空磁気測量を実施している。

（3）地球電磁気連続観測

国土地理院では1995（平成7）年に、地磁気測量の高精度化と火山噴火など地球の変動に関連する地球電磁気的なシグナルを検出し、その発生メカニズムを明らかにすることを目的として地球電磁気連続観測装置を設置し（図-25）、翌1996年より運用を開始した（田辺，1997）。

地球電磁気連続観測装置は、全国11ヵ所の磁気変化観測部と、データ収集・監視を行う国土地理院本院の中央管理装置から構成される。磁気変化観測部では、プロトン磁力計で全磁力の、フラックスゲート三軸磁力計で水平分力、鉛直分力、偏角の常時連続観測を行う。観測結果は電話回線で一日ごとに中央管理装置に送信され、解析される。観測は自動であるが、フラックスゲート三軸磁力計の基線値決定のための一等磁気測量を各観測装置において1～2年に1回実施している。なお、地球電磁気連続観測装置の観測データは、2002（平成14）年に刊行された磁気図2000.0年値作成にも利用されている。

1. 5 地殻変動研究

1. 5. 1 地震に伴う地殻変動

地震に伴う地殻変動は、地震の準備過程、直前過程、地震時、地震後の余効変動という一連のプロセスのそれぞれにおいて、特徴的な様相を示す。震源において高速な破壊が進行している最中のことは、地震計で調べるのが適当であるが、それ以外の比較的ゆっくりした現象を観測すると、最終的に生じた食い違いの量であるとか、ゆっくり地震のように地震波を（あまり）出さない破壊過程を調べるなどという時には、測地測量の繰り返しないし地殻変動連続観測が有効である。国土地理院時報（以下「時報」という。）にも測量の結果見出された地殻変動に関する記事や、地震、特に地震予知の研究と地殻変動観測の関係に関する解説記事などが数多く掲載されている。1990年代半ばにGPS連続観測が導入されると、日々の変動が追跡できるようになり、ほぼ純粋に地震時の変動のみを取り出したり、地震後の余効変動の時間発展を観測したり、ゆっくり地震がいくつも観測されたりして、地震学、地殻変動論に大きな進歩をもたらしているのであるが、それ以前には、準備過程の一部を観測する時を除けば、いくつかの過程の重ねあわせを、しかも時間発展ではなく、積分量で観測するほかはなかった。しかし、大きな地震に伴う地殻変動は、時間あたりの変動量が、他の過程に比して桁違いに大きいので、地震後の復旧測量により、ほぼその様子が捉えられる。我が国は、近代の測量によって、基準点が高密度に維持されており、地震の計器観測も密に行われている地域で、頻繁に顕著な

地震が起こるといって、世界でも数少ない地域のひとつであったから、明治以来我々の先人たちが行ってきた観測の成果は、極めて貴重な学術的資料として、世界中で地震学、地殻変動論の研究に広く利用されてきている。GPS連続観測開始後も、世界に先駆けて1,000点規模の観測網を整備し、地殻変動の様相を精密に観測し、これを広く公開することで、内外の地震、地殻変動研究の推進に多大の貢献をしている。

時報の記事を振り返ってみると、特筆すべき分量を占めるのは、なんと言っても1944年東南海地震、1946年南海地震の復旧測量である。これらの地震は、歴史的にも常に同時ないし時間的に極めて近接して起こっており、昭和の地震は、いずれも歴史に残るそれ以前の同じ震源域で起こった地震よりやや小型であったとはいえ、マグニチュード8クラスの地震が隣り合って2年の間隔で起こったことであるから、地殻変動も中部、近畿中国、四国地方にわたる極めて広大な領域で生じた。しかも1948年には隣接して、マグニチュード7クラスながら、直下型地震として甚大な被害を及ぼした福井地震が起きたため、北陸地方を含む広大な地域を改測することになった。この作業は、三角測量については1947年から1952年、水準測量は1947年から1951年にかけて行われたが、その結果は、作業の進捗状況や、国際会議への報告などの時期に合わせて、数回に分けて時報に掲載されている。この地震は、何度も繰り返していることが歴史記録などから確認されており、いまだ1サイクルすべてについて近代の観測が行われているわけではないものの、準備段階、地震時、余効変動段階、来るべき地震の準備段階のそれぞれについて観測結果が存在することから、海洋プレートの沈み込みに伴うプレート境界の地震の研究に欠かせない資料となっている。大地形の発達と比較した吉川の研究（吉川，1968）、食い違いの弾性論を用いた精密な断層モデルを構築したFitchとSholtzの研究（Fitch and Sholtz，1971）、南海トラフからのプレートの沈み込みにより地震の繰り返しを統一的に論じた安藤の研究（Ando，1975）、粘弾性緩和の重要性を指摘したThatcherの研究（Thatcher，1984）など、この地域における測量の成果を用いた重要な研究は内外で枚挙に暇がない。それらの研究は、茂木による東海地域への歪蓄積の指摘、石橋による駿河トラフにおける地震説などをへて、東海地震説とこれに対応するための大規模地震対策特別措置法へとつながってゆく。また、東南海、南海地震についても、地震調査研究推進本部の長期評価、中央防災会議の議論などを経て、東南海、南海地震に係る防災対策特別措置法が制定されているが、それらの議論においても基礎資料として役立つのである。

この他に、その後の地震、地殻変動の研究において、エポックメイキングだった事件とその報告を時報の記事から拾ってゆくと、まず忘れてならないのが松代群発地震である。この群発地震は、1965年から1967年頃を最盛

期とする活発な活動で、有感地震が長期にわたって続いたことから、社会的にも大きな問題となった。この地震については、関係機関や大学による集中観測が行われた。時報33集にも、国土地理院が行った水準測量、菱形基線測量、地磁気測量、重力測量の結果が報告されている。この群発地震活動は後に中村(中村, 1971)により水噴火と呼ばれることになるのだが、地殻内流体の重要性を認識させた重要な事件であった。また、多くの機関が組織的に連携してことにあたったことも注目すべきことである。この経験は後の地震予知連絡会のいわば雛形とも言うべきものであった。

1969年になると、1968年十勝沖地震の後の、地震予知を求める世論等を背景に、地震予知連絡会が発足、時報にもこれに関する記事が登場する。さらに、この前後には、壇原による「地震予知と地殻変動」(29集, 1965)、佐藤による「地震と地殻変動」(42集, 1971)などの解説記事が見られる。壇原の解説では、関東地震を例にとり、地震サイクルを、地震時の過剰変動を地震間に重力的に調整するというモデルが述べられており、佐藤の解説では、地震は地殻内の剪断破壊であるとして地殻水平歪の観測の重要性を説いている。測量による地殻変動の検出と長期的地震予知という地震予知計画の戦略を踏まえた記事であると言えよう。佐藤の解説には、マントル対流と地震の関係ということで今ではおなじみの、プレート境界の地震の模式図が出てくるが、必ずしもそのようなモデルで説明できる地震ばかりではないと、内陸の地震を例にとって述べている。壇原の解説と比較すると、このころプレートテクトニクスの考えが次第に一般化してきていたことが窺われる。いわゆるプレートテクトニクスが成立してくるのが1960年代半ばであるから、我が国における同説受容の過程を反映しているのである。45集(1973)には、「東海地方の地殻活動と地震予知」という記事が掲載されている。南関東が地震予知連絡会によって観測強化地域に指定された後、東海については、これらの観測及び気象庁による空白域の発見により、1974年に観測強化地域に指定されるわけであるが、その間の国土地理院の取り組みを示す、貴重な記事である。

49集(1976)には、「多摩川下流域の地盤隆起と地震予知」という記事がある。ちょうどその頃、地震予知の新理論としてもはやされていたダイラタンシー・ウォーターディフージョンモデルによれば、地盤隆起は地震の前兆の可能性が考えられると言うことで、場所が首都圏と言うこともあり、社会的に大きな関心呼んだ。この記事が出る頃には、ほぼ地下水位の上昇の影響であろうと言うことで、地震の前兆ではあるまいという考え方が主流になっており、記事の結論もその可能性が高いことを述べているが、地震予知の問題に国土地理院が組織として真摯にかかわってきた様子がうかがえる。この報告にもあるが、我が国の大都市の多くが、河口の沖積平

野に位置していることから、地下水の挙動と観測される「地殻変動」の関係を理解しておくことが、地殻変動の解釈上、極めて重要であることを示した事件であった。

その後も、地震に伴う地殻変動に関して、その都度時報に記事が掲載されているが、71集(1990)に掲載された、吉村による「伊豆東方沖の群発地震活動及び海底噴火にかかわる地殻変動について」というレビューは、その後の国土地理院における地殻変動研究の主要な手段となってくる、GPS連続観測に触れている点で重要である。東伊豆の群発活動は、1970年代半ばから1990年代後半まで、断続的に継続し、マグマの貫入と関係していることが推定されていたが、1989年の海底噴火でこの考えが裏付けられることとなった。この活動は重力測量、水準測量、精密測距などで詳しく調査され、地殻変動に関する多くの知見をもたらした。初期には茂木モデルで議論されていた力源が、後半には、ダイク貫入モデルにより、より精密に議論されるようになった。また、観測機器のテストフィールドとしても大変役立ち、先に述べたGPS連続観測、自動光波測距装置(後に、APSとして広く用いられる)など、後の地殻変動観測の主力となる機器の原型が投入され、成果をあげた。

81集(1994)には橋本による「北海道南西地震に伴う地殻変動」が掲載されている。この報告になると、地殻変動の検出はGPS測量によったことが記されている。このときはまだ、電子基準点が無かったので、三角点をGPSで改測しているが、GPSが三次元の測量手段であることを十分に利用し、水平変動と上下変動をともに検出して断層モデルを論じている。その後1994年10月には北海道東方沖地震が発生し、ちょうどその数日前から稼動していたGPS連続観測点により、北海道全域にわたる地殻変動が見事にとらえられると言う、忘れられない出来事があるのであるが、なぜか時報にはこの地震をタイトルにした記事が見当たらない。このときの結果はGPS連続観測の威力を示す有効なデモンストレーションとなった。

83集(1995)は、兵庫県南部地震の特集であった。6,400人あまりの犠牲の出たこの地震は、日本の地震予知の体制を揺るがす大事件であった。しかし、この地震は、規模から言えばマグニチュード7クラスの地震で、この時点ではGPS連続観測点は、南関東、東海をのぞき、全国に100点程度がばらりと配点されているだけであったから、北海道東方沖地震のようにマグニチュード8クラスで、北海道全域と言うような大きな範囲に変動が及ぶケースと違い、GPSで検出された地殻変動はさほど大きなものではなかった。結局古典的に三角点の改測を行うことで地殻変動の詳細が知れたのである。しかし、この地震が契機となり、政府の地震調査研究推進本部が発足し、日本全国をくまなくカバーする、基盤的観測網が整備されることとなった。国土地理院のGPSも基盤観測として位置づけられ、1,200点の高密度なネットワークができることとなるのである。GPS連続観測が1,000点近くになると、マ

グニチュード7クラスの地震であっても、地殻変動がある程度密に観測され、すぐに断層モデルがつくられ、周辺の活断層への影響が見積もられるようになってきている。時報の発刊以来100集までの地殻変動検出技術の進歩はまさに目を見張らせるものがある。もうひとつ、83集について注目すべきは、このとき初めて干渉合成開口レーダによる地殻変動に関する記事が時報に載ったことである。村上、藤原、斎藤による「干渉合成開口レーダを使用した平成7年兵庫県南部地震に伴う地殻変動」がそれである。地殻変動の面的な分布を表す、今ではおなじみのあの虹色の図に、地殻変動研究の新たな時代の到来を感じた者も多かったであろう。このとき用いられたJERS-1(地球資源衛星「ふよう1号」)はもう運用を中止しているが、近いうちに打ち上げが予定されているALOSが我が国の地殻変動研究をさらにおし進める強力な武器になってくれることを期待している。JERS-1が運用を中止していても、地震の方は起きてしまうのだが、95集(2001)には、矢来、村上、飛田、中川、藤原による「RADARSATの干渉SARでとらえた平成12年(2000年)鳥取県西部地震に伴う地殻変動」が掲載されている。これは、条件が良かったこともあるが、我が国のように植生が密で、長い波長のレーダでなければ、干渉SARを行うのは困難と言われる中であって、JERS-1などより波長の短い電波を用いるRADARSATのデータから干渉を得ることに成功したという報告である。このことは、国土地理院のSAR関係者の技術力の高さを示したものである。この報告に掲載された図には、本震に誘発された地震に伴う小さな断層運動がはっきり捉えられて注目された。

ここですべてを紹介することはできないが、この100集の間には、他にも多くの地震と地殻変動を論じた報告が掲載されている。それらは、この間の観測技術の進歩、解釈のためのモデリングの理論的、技術的進歩を反映しており、先人たちが、常に学界の動向に注意を払い、技術の最先端を走ってきたことを語っている。座標系の維持という測地事業と、地殻変動の検出、モデリングは、車の両輪である。今後とも正確な座標の提供と、詳細な地殻変動情報の提供を通じて、社会に貢献していきたい。

1. 5. 2 国土地理院における火山観測のあゆみ

火山活動は地下の高熱のマグマの活動が引き起こす。その活動は多様であるが、多くの場合、地震や熱的現象とともに地殻変動が発生するため、地殻変動は火山現象を理解するための重要な情報である。火山学の発展の歴史の中で地殻変動が果たしてきた役割は大きい。我が国は100近い数の活火山を抱えており、火山活動は極めて活発で、歴史を通じて、多くの火山噴火を経験している。測地測量を実施して地殻変動を明らかにする使命を帯びる国土地理院は、古くから火山と関係した活動を行っているが、比較的最近の火山噴火については、地殻変動に関する報告が時報に掲載されている。これらの報告をた

どることによって、国土地理院における火山観測の進展を展望することができる。

(1) 火山活動と地殻変動

多くの火山では、地下数十kmの深さで生成されたマグマが徐々に上昇し、火山直下の5~10km程度の深さにあるマグマ溜りに一旦とどまった後、何らかのきっかけでさらに上昇して噴火などの様々な現象を地表付近で引き起こすと考えられている。マグマの移動により、地下ではマグマ溜りの圧力が変化したり、マグマの新たな通路となる割れ目が形成されたりするので、その影響により地表では山体の膨張・収縮など水平変動と上下変動の両方の地殻変動が発生する。火山性の地殻変動の特徴は、比較的狭い領域に、極めて大きな変動が発生することであるが、観測の精度が向上するに従い、火山から数十km離れた遠方でも微小な地殻変動が発生することがわかってきた。地殻変動の空間的な分布の様子を詳しく解析することにより、地殻変動を起こしたマグマなど力源の深さや形状を詳しく知ることができる。

GPSなど、新しい観測技術の登場により、火山監視における地殻変動観測の重要性は従来にも増して高まっている。以前は、測量により地殻変動を計測するのに数ヶ月も要していたのに対し、現在では、GPSにより、ほぼリアルタイムで水平・上下の地殻変動を観測でき、その時間推移を追跡できるまでに進歩している。また、衛星や航空機に搭載した合成開口レーダを用いて、地殻変動の面的分布を計測したり、GPS観測により多数の点との距離をリアルタイムで計測したりするなど、それぞれ大きな特徴を有する新しい手法が実用化されており、地殻変動がもたらす情報量は質・量ともに大幅に高まっている。

これらの最近の成果も、過去からの伝統の上に築かれたものであることは、言うまでもない。我々の先人達は、時間と労力を伴う観測手段しか利用できなかったが、精度を確保するため細心の注意を払った観測を行って的確に火山性地殻変動を検出・把握し、緻密な計算と大胆な想像力にもとづいて、火山の仕組みを明らかにしてきた。時報に掲載されている火山に係る各報告を振り返ってみると、初期には、技術的には制約のあるなかで苦労して取得されたデータから、的確に火山の姿を明らかにした重要な先駆的な業績が収録されている。また、時代の変遷と共に次々と登場した新しい技術を的確に取り入れて、火山観測や解析の効率や確度を高めてゆく努力の跡もうかがうことができる。最近では、GPSや干渉SARなど、革新的な観測手段も登場し、火山噴火予知の実用化がより現実的なものとなっている。次章では、時報の主だった記事を取り上げながら、国土地理院における火山観測や解析の歴史をたどる。

(2) 国土地理院における火山観測(測地学的手法)の歴史

創刊号(1947)の巻頭に掲載されている「鹿児島・高知及び紀伊地方一等水準検測実施報告」は、火山学の進展における国土地理院の役割を余すことなく表していることにおいて、極めて象徴的である。それには、鹿児島湾の北部の海岸線を周回する水準測量結果(1932年と1947年の比較)が報告されており、国分市周辺を中心とする隆起が指摘されている。桜島は、比較的最近においても、1914~1915年(大正噴火)、1946(昭和21)年(昭和噴火)に溶岩を出す噴火をした。その後も山頂火口で噴火を繰り返している極めて活発な火山である。

創刊号の水準測量の結果は、桜島火山のマグマ溜りが鹿児島湾のほぼ中央部の地下にあって、その間マグマが蓄積され周囲を隆起させたことを意味する火山学的にも貴重なデータである。終戦直後の困難の多い時期でありながら、このような重要なデータが取得されていたことに、当時の関係者の並々ならぬ熱意がうかがえる。なお、同じ報告に水準測量結果が収録されている紀伊及び高知地方は1944年、1946年に東南海及び南海地震が発生して大きな地殻変動が生じた地域であり、この水準測量はそれらの地殻活動をうけて緊急に実施されたものである。国土地理院では、その後も地殻変動が想起される大きな地震や火山活動が発生すると、その直後に緊急の測量を実施しているが、それらによって地殻活動を理解する上で貴重なデータが得られている。創刊号の巻頭を飾るこの報告は、その後も次々となされた国土地理院の地球科学への貢献のさきがけとなった記念すべきものである。

さて、当然のことながら国土地理院の使命の一つは国土の隅々に渡りその姿を正確に明らかにすることである。硫黄島は、本州中央から約1,200km南方に位置する太平洋戦争の激戦地として知られる火山島であり、他の小笠原諸島と共に1968(昭和43)年6月に正式に我が国に返還された。それに伴い国土地理院でも地図の修正を目的とした調査が行われ、それらは、「小笠原諸島調査報告」

(37集, 1969)及び「第2次硫黄島総合調査団に参加して」(53集, 1980)にまとめられている。これらの報告は、この島の異常ともいえるほど大規模な火山性の地殻変動について貴重なデータを提供している。この調査から30年以上を経た現在では、2基の電子基準点が設置され、連続観測が行われているが、地殻変動が活発である我が国においてさえも、異例ともいべき桁外れに大きい地殻変動が継続して発生しており、この島の火山活動の際立った活発さを示している。最新の手法による観測成果も参考にすると、この火山の地殻変動が空間的・時間的に極めて複雑に変化するらしいことが明らかになってきた。過去になされた調査・測量の成果はこの火山の全体像を理解する上での非常に重要な成果である。これらの報告を読むと、調査の第一義的な目的は地図作成であるが、実施された測量は、その制約の中で、貴重な機会を生かして、硫黄島火山の地殻変動を可能な限り明らかにすることを明確に意識したものとなっている。その

結果、後世の我々が参考にすることのできる貴重なデータが得られており、当時の関係者の見識の高さは、特筆に値する。国土地理院には、将来に渡る国民の知的財産として、国土に関する知見を何事にかかわらず正確に記録するというよき伝統があるが、これは現在の国土地理院の職員にも脈々と引き継がれている。

その後も2000年までに、三宅島(1983)、伊豆大島(1986)、十勝岳(1988)、雲仙岳(1990~1995)等、住民の避難を伴う噴火が相次いだ。記憶に新しいのは、最近の我が国の火山災害としては異例に多くの犠牲者を出した雲仙普賢岳の噴火である。この噴火における国土地理院の活動を報告した「雲仙岳周辺における測地測量」は、75集(1992)に掲載されている。この噴火において、国土地理院は、当時ようやく実用化の緒についたばかりのGPSをいち早く雲仙岳周辺に配置し連続観測を試みた。この経験から火山性地殻変動の監視におけるGPS連続観測の重要性が認識され、国土地理院の電子基準点の全国配備にあたって重要な火山の近傍にも点が配置された。その後の伊豆東方沖群発地震、2000年に相次いで噴火する有珠山や三宅島噴火において電子基準点データが提供したデータの重要性を振り返ると、巧みに配置された電子基準点網の設計は極めて適切なものであったことが再認識される。雲仙での観測は、国土地理院が後に行うGPS連続観測につながる重要な布石であった。

また、1998年には、岩手山において火山活動が発生した。これは噴火にはいたらなかったものの、活動中に周辺で震度6を記録する地震も発生し、社会に大きな影響を与えた。この活動では、JERS-1の合成開口レーダを用いた広域の面的地殻変動観測手法が火山活動を対象として始めて用いられた。これは、通常の方法では観測が困難な山林などにおいても、何ら装置を設置することなく広域に地殻変動検出を可能とするもので、岩手山での応用を通じて本手法が極めて有効なものであることが実証された。この観測により、岩手山西部の火山性膨張が見出され、この火山性活動が1998年9月3日岩手県内陸北部地震(M6.1)を誘発した可能性があることがわかった。これも測地観測が火山・地震活動の理解に大きく貢献することを示した重要な事例である。これらの経緯は、94集(2000)に掲載された「岩手山の火山活動及び岩手県内陸北部の地震(M6.1)の地殻変動と火山活動が地震を誘発した可能性について」に詳しく報告されている。また、岩手山の活動では、国土地理院が開発した太陽電池及び衛星携帯通信機能を備え、電源や通信設備の制約を受けない独立運用型のREGMOSや、APSも投入された(「岩手山における機動観測」(93集, 2000))。このような重要な機器の開発状況についても、詳細な報告が時報に掲載されている。

その後もGPS連続観測や合成開口レーダ等の最新技術を実用的手法として定着させる努力が続いた。それがほぼ終了していた2000年に、有珠山と三宅島が相次いで噴

火した。これらの噴火は、それまで国土地理院が周到に準備したGPS連続観測を始めとする地殻変動観測手段と、観測結果からマグマの移動等の火山学的情報を読み取る解析手法の真価が問われる機会でもあった。これらの火山は、最近20~30年に1回という高頻度で噴火を繰り返しており、近い将来の噴火の可能性が高いと考えられていたため、その周囲にはそれぞれ数点の電子基準点が周到に配置されていた。

有珠山の周囲では2000年3月末に地震数が急速に増加した。緊急に解析したGPSの結果からも、有珠山の周囲に配置してあった電子基準点間の距離もほぼ同時に変化が現れていたことが判明し、直ちに噴火予知連絡会に報告された。地下でマグマが移動していることがほぼ確実となったため、噴火の可能性の極めて高いことが認識された。活動開始当初は、有珠山周囲には山頂から約5kmの距離に3点の電子基準点しかなかったため、マグマ活動については確認されたものの、その位置や深さについては任意性が残った。しかし、関与マグマの量はそれほど大きいものではないことが示唆された。

火山噴火予知の観点から振り返ると、活動の開始時点において地震数の顕著な増加とともに地殻変動の発生を準リアルタイムで捉え、地下におけるマグマの移動が始まったことを強く示唆する情報が得られたことが重要な成果である。しかし、この時点では、マグマがどこに移動しているか、山頂に出るのか、もしくは他の場所に出る可能性があるのかを判断するほどの詳細な情報は得られなかった。しかし、有珠山の近傍だけではなく周囲に均等に分布した観測点によって、かなり遠地(50km程度)にも有珠山活動に伴う地殻変動が観測され、マグマの上昇に伴うマグマ溜り(約10km)の収縮が捉えられた。この収縮は4月には停滞し、地表での活発な水蒸気爆発や隆起現象とは裏腹に、マグマ溜りからの新しいマグマの上昇はないことが、かなり早い時点で確認できた。このような情報は防災上の判断を速やかに行う上で重要な情報となったと考える。特に、マグマ溜りからの新たなマグマの供給がないと確認できたことは、終息への見通しの重要な基礎資料となり、早期の避難解除の判断に結びついたと思われる。このように地殻変動観測は、防災上有効な予測情報を提供することができた。通常、火山活動予測は、活動開始よりもその終息時期の判断が難しいとされるが、GPSは、将来の火山活動においても重要な貢献をなす可能性が示された。このような国土地理院の貢献は、95集(2001)に掲載されている多くの有珠山噴火関連の報告に詳しく述べられている。

また、2000年有珠山噴火では、北西山麓に潜在溶岩円頂丘の形成に伴い60m程度の極めて大きな隆起現象が観測された。95集の「SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動、変動速度、体積変化」は、衛星合成開口レーダの画像を巧妙に用いることにより、これらの地殻変動の三次元成分の分布を広域に面的に計

測する新しい手法を世界に先駆けて開発したものである。このように国土地理院は、必要に応じ自らも手法を開発しながら地殻変動観測を続けているが、これも過去から脈々と保たれている伝統である。有珠山噴火では、このほか、トランシットを用いた目視による傾斜観測、APSによる連続自動測距、水準測量、REGMOS設置など、有効と考えられる様々な技術が投入され、それぞれに、重要なデータを提供している。

有珠山噴火の余韻がまだ残っている2000年6月末、今度は三宅島で、突然地震数が急増し、防災科学技術研究所の傾斜計にも変化が現れた。緊急に計算したGPSでも、同時期に大きな地殻変動が現れていた。過去の噴火の経験から、地震活動が現れてから噴火にいたる時間は数時間程度と予測されていた。直ちに地殻変動結果を解析してみると、地震の位置の北西海域への移動を伴いながら、マグマの岩脈が海底の地殻内を北西方向に走ったことが推定された。岩脈の上部にあたる三宅島付近の海域で小規模な海底噴火があったことを示唆する海水の変色も報告されたが、それ以外は、溶岩の流出は見られなかった。しかしながら関与したマグマの量は三宅島火山の過去の噴火に比べて異例に多く、大量のマグマが地下の岩脈を通じて三宅島のマグマ溜りから北西の神津島方向に流出したと考えられている。その結果、マグマ溜り内の圧力が減少し、上部を支えられなくなったためマグマ溜りの天井部が崩壊し、山頂部が陥没して、直径が1km、深さが500mを超えるカルデラが形成された。このカルデラ形成の過程で、何回かの噴火が起きている。その後、世界の他の火山でも観測されたことのない多量な火山ガスの放出が始まり、現在に至っている。カルデラ形成に伴うマグマ溜り内の熱のやり取りが大規模な脱ガスの引き金を引いたとする考え方も提出されている。

一方、神津島から三宅島にかけての海域で続いた活発な群発地震活動もマグマの活動によるものと考えられたが、地震活動が三宅島から神津島近海へ移動したのとはほぼ同時に神津島と新島の距離が伸び始めたことがGPSによっていち早く検出され、火山噴火予知連絡会に報告された。新島、式根島、神津島もそれぞれ活火山であり、噴火すれば爆発的なものとなりやすい危険な火山として知られている。それらの近傍でマグマ活動に関連すると考えられる地殻活動が発生していることがGPSによって検出され、これらの火山の活動の可能性も視野に入れながら検討がなされた。今回の地殻活動に関連した国土地理院の対応は、95集及び96集(共に2001)の三宅島関連の各報告に詳しく紹介されている。なお、三宅島のカルデラの形成については、写真測量及び航空機SARを利用して、時間経過と共に詳しい地形解析がなされ、詳細な地形データが得られている(「三宅島山頂の陥没地形の計測」(95集, 2001))。目前で進行するカルデラ形成という稀有な現象について、近代的観測手段で繰り返し観測ができたことは、火山学的にも極めて意義深いことで

あり、各方面から高い関心を呼んでいる貴重なデータとなっている。

(3) 今後の展望

時報に掲載されている火山関係の資料をたどると、地殻変動データが火山学において極めて重要な意義をもつことを深く理解したうえで、その時代その時代の最新の技術を適切に取り入れながら、正確な測定、測量をタイムリーに実施し、汲み取れる限りの火山学的な情報を明らかにするという姿勢が貫かれていることが読み取れる。また、雲仙岳(1990-1995)、有珠山(2000)、三宅島(2000)等、最近になるほど火山に関する記事が時報に現れる頻度が増えている。これは、国土地理院の防災の分野における活動の広がりを反映していると思われる。現在は、電子基準点やREGMOSを用いたGPS連続観測網の整備が進

み、多くの火山をカバーしている。また、GPSに加え、衛星及び航空機合成開口レーダ、APS等、最新の技術による観測のリアルタイム性が高まっており、次の火山噴火を迎える体制は、従来に比べて格段に向上している。最近の火山噴火予知連絡会等における検討においても、地殻変動解析結果は、最も重要なデータの一つと位置付けられており、多くの時間を割いて検討がなされている。データ取得手段については、一定の整備が終了したため、今後は、リアルタイムに得られた変動データを速やかに解析して、火山活動の推移を予測する手法の開発が急務となっている。このような技術の開発もこれから加速度的に進展すると思われるが、我が国の立地条件上、将来も発生することが避けられない火山活動や火山災害において、国土地理院の地殻変動観測は、これまでと同様に重要な役割を果たすであろう。