

1. 測地測量と地殻変動研究

1. 1 高さの測量

1. 1. 1 日本水準原点

陸地測量部は、日本水準原点（以下「水準原点」という。）の起工を1890（明治23）年11月に開始し、翌年の5月に完成させた（写真－1）。



写真－1 日本水準原点

日本の高さの基準は、東京湾壺岸島の量水標を使用し、1873（明治6）年6月10日から1879年12月31日までの間、4ヵ月の欠測を除き、正味6年3ヵ月の験潮記録から平均潮位を求め、これを「東京湾平均海面」と称し、高さの基準面とした。

水準原点の標高は、東京湾壺岸島量水標附属水準点「交無号」から水準測量を行い、水準原点の水晶体の零目盛の真高が「24.5000m」となるよう決定した。

「東京湾平均海面」決定について、験潮記録の取得期間が短いこと等から、当時、一部で、その信頼性が疑問視されたこともあった。しかし、油壺験潮場の1900（明治33）年から1923（大正12）年8月までの23年間の験潮記録による平均潮位から求めた油壺験潮場附属水準点の高さと水準原点から水準測量により求めた油壺験潮場附属水準点の高さが、3mmで一致したと報告されている。このことは、「東京湾平均海面」から求めた水準原点の数値の確実性を裏付けるものと言える。

1923年9月1日の関東大地震は、関東地方に大きな地

殻変動をもたらした。陸地測量部では、1924年から復旧測量を開始し、水準測量は1926年に終了した。この水準測量のデータにより、地震の影響のないと考えられる地域の水準点を基準として、水準原点の高さを算出したところ「0.0854m」低くなった。

他方、これとは別に油壺の験潮データによる計算結果からは、水準原点が「0.0874m」低くなった。この二つの数値の平均値から「-0.0860m」を採用し、水準原点の高さを「24.4140m」とし、1928（昭和3）年3月31日に陸地測量部令を出し、高さを改定した。

水準原点の高さを監視するために、水準原点と油壺験潮場間の水準測量は、明治の第1回全国測量で実施した以降は、関東大地震直後から1981（昭和56）年頃までは10年で2～3回、最近では、ほぼ毎年実施されており、これまでに30回程度実施されている。これらのデータを用いて水準原点の変動を調査している。

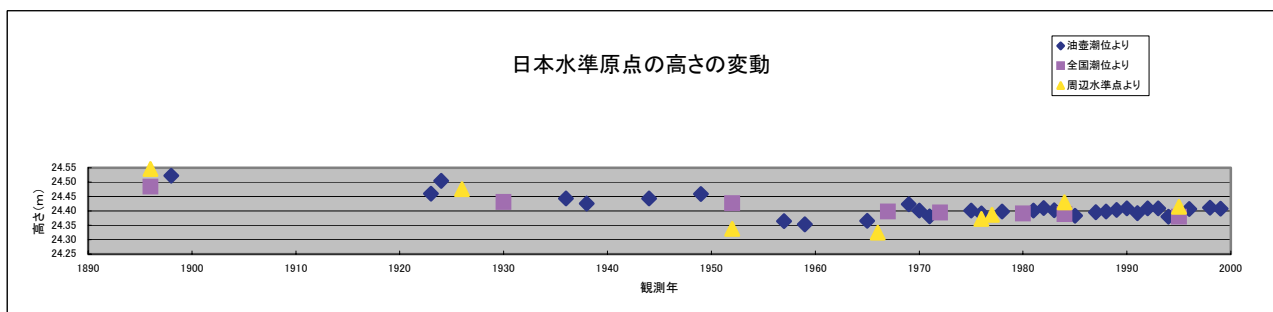
図－1は、油壺験潮場固定、全国の複数験潮場固定及び関東周辺の水準点固定の3通りの解析結果から得られた水準原点の高さの変動を示したものである。それぞれの方法で求めた水準原点の高さの変動傾向はよく一致しており、実用上特に変更を要する程の差はないものと判断され今日に至っている。

1. 1. 2 水準測量と水準点

水準測量は、2地点に標尺を立て、その中間にレベルを水平に置いて、2つの標尺の目盛を読み、その差から高低差を求め、この繰り返しで水準点の高さを求めている。

高さの測量を行うときに基準となるのが水準点である（写真－2）。国土地理院の水準点は、全国の主な国道又は県道に沿って約2km毎に一等から三等に区分され、およそ21,000点設置されており、各地点の高さを求めるための基準として利用されている。

我が国の一等水準測量は、1883（明治16）年参謀本部によって東京周辺より実施され、以後東京、大阪付近から逐次全国へと水準路線が広げられ、1913（大正2）年には本州、四国、九州及び北海道を完了し、第1回測量をほぼ完成した。



図－1 日本水準原点の高さの変動

1923（大正12）年，第2回の測量が関東大地震を契機として本格的に開始され，1945（昭和20）年までに北海道を除く本州，四国，九州の大半の測量が行われた。

第3回の測量は，東南海地震，南海地震区域を皮切りに全国において実施され，1961（昭和36）年に完了した。



写真-2 一等水準点

1962年から始まる第4回の測量以降は，日本全土を覆うように計画実施され，約7年周期で繰り返し測量（北海道は除く）されている。この間観測路線の見直し等もあり，路線長に増減はあったが，1999年度以降は，約20,000kmを10年間で実施できるよう計画し，現在第9回の測量を実施中である（表-1）。

戦後の水準測量で特筆すべきは，地図作成及び公共測

量等の利用に鑑み，全国の主要道路の地点標（キロポスト）に併設する一等水準点（以下「道路水準点」という。）を全国に設置し，その道路水準点を主体として観測を行ってきた。

この施策の背景には，高度成長期に入った国内において，公共事業が盛んに行われるようになり，これら公共事業に高さの基準を与える水準点が必要となったことが挙げられる。このため，敷地の入手，維持管理（地方建設局（当時の名称）等からの通報）及び利用の便等の利点から，地点標に併設することとし，道路局と覚書を取り交わし，1964（昭和39）年から1974年3月末にかけて約7,000点の道路水準点を全国に設置した。

しかし，1974年の第三次基本測量長期計画の策定で，水準点を繰り返し測量して，地震予知及び地盤沈下調査に利用する目的が付加された。

道路水準点は，測量結果を見る限り，表層沈下が大きく地震予知，地盤沈下等に関連する資料としては精度的に適さない点が多く，維持管理についても，その事故率は，当初の予想に反して，従来水準点の事故率より高率であることが明らかになった。さらに道路水準点を含めた一等水準路線は，長期計画のキロ数を大幅に超過しており，計画の遂行及び維持管理の面からも再検討が必要となった。この結果，1975（昭和50）年，繰り返し測量する路線は地盤堅固で人為的故障の少ない従来の一等水準点を主体とする水準路線に変更された。

表-1 全国繰り返し測量データ観測年及び総延長

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回
総路線長	18,542km	12,458km	15,684km	17,902km	14,088km	14,809km	18,081km	17,521km
北海道	1900～1913		1952～1961	1968～1973			1980～1990	1987～1999
東北	1892～1906	1933～1942	1953～1959	1965～1969	1973～1975	1978～1981	1984～1987	1986～1999
関東	1883～1899	1924～1943	1950～1957	1961～1969	1972～1976	1977～1981	1980～1985	1991～1997
北陸	1888～1903	1921～1943	1948～1956	1965～1967	1971～1974	1976～1981	1982～1985	1989～1995
中部	1883～1904	1926～1942	1947～1956	1965～1972	1971～1973	1979～1980	1983～1984	1990～1998
近畿	1885～1899	1927～1934	1947～1951	1961～1973	1970～1976	1975～1980	1982～1984	1988～1995
中国	1886～1892	1927～1943	1948～1956	1964～1968	1967～1971	1970～1978	1981～1983	1986～1997
四国	1886～1897	1929～1939	1947～1950	1955～1965	1968～1973	1970～1980	1981～1985	1990～1995
九州	1890～1899	1932～1941	1952～1960	1962～1965	1968～1971	1975～1977	1981～1983	1987～1997
全国	1883～1913 (M16～T2)	1921～1943 (T10～S18)	1947～1961 (S22～S36)	1955～1973 (S30～S48)	1967～1976 (S42～S51)	1970～1981 (S45～S56)	1980～1990 (S55～H2)	1986～1999 (S61～H11)

1. 1. 3 機器の開発と水準測量の精度

(1) レベル

水準測量の主要な器材であるレベルは，1924（大正13）年までは一等レベルCarl Bamberg製Y型レベルを使用していた。標尺は，木製標尺が使用されていた。1924年か

ら1952（昭和27）年までのレベルはCarl Zeiss製のⅢ型精密レベルが使用され，標尺はインバール製標尺となった。その後1979（昭和54）年までは，Wild N3が用いられ，1979年からはCarl Zeiss Jene製の自動レベルNi002が導入された。

さらに、1994（平成6）年からは電子レベル及びバーコード標尺（写真－3，4）が導入された。また、観測値は手簿に手書きしていたが、1985（昭和60）年には、タマヤ水準測量用データコレクターLC-7が開発され、現在では、電子レベルとバーコード標尺との組み合わせで、ほぼ自動的に観測値を読み取りデータコレクターへ格納するシステムとなっている。



写真－3 電子レベル（3器種）



写真－4 バーコード標尺等

一方、観測機器の変遷とともに視準順序、読定単位、視準距離などの観測法も変化してきている。観測法は使用するレベルによって決定されており、視準順序もCarl Bambergの時代では後視－前視、それ以外のレベルでは後視－前視－前視－後視の順序で行っている。読定単位では、Carl Bamberg、Carl Zeiss及び1960（昭和35）年以前のWild N3では、0.01mm単位、それ以外のレベルで0.1mm単位となっている。

また、最大視準距離は、Carl Bamberg及びCarl Zeissでは40m、Wild N3で50～60m、Zeiss Ni2及びZeiss Ni002で50m、その後の電子レベルであるLeica NA3003及び

Zeiss Dinil1では40mとなっている。

（2）水準測量の精度

水準測量における各種精度は、観測時の各種許容範囲と密接に関係する。往復観測の較差及び環の閉合差の許容範囲について、1965（昭和40）年までの往復観測の較差は $1.5\text{mm}\sqrt{2S}$ 以内、環の閉合差は $1.5\text{mm}\sqrt{S}$ 以内と定められていた。それ以降では、往復観測の較差が $2.5\text{mm}\sqrt{S}$ 以内、環の閉合差が $2.0\text{mm}\sqrt{S}$ 以内と定められている。

繰り返し測量における各回の網平均計算で得られた単位重量（1km）当たりの標準偏差を表－2に示した。第1回測量の標準偏差は3.5mmであったが、第2回以降順次数値が小さくなっており、第8回では1.3mmで、第1回の3倍程度精度が良くなっている。これは使用したレベルの性能が時代と共に向上してきたこと、レフラクション誤差の影響や標尺沈下防止対策など観測手法の改良を積極的に進めてきたことによると考えられる。

環の閉合差も水準測量の精度の指標である。第1回から第8回測量までに構成された環の総数は、544環あり、そのうち閉合差の制限を超過したものは150環であり、総数に対する割合は約28%である。この割合を環長100km毎の範囲について調べると、100km以下の環では制限を超過したものは約9%、100～200kmでは17%、200～300kmでは28%、300～400kmでは36%、400～500kmでは26%、500～600kmでは32%、600km以上では46%となっている。これらのことから、一般的に長い環ほど制限値を越える傾向になっている。表－3は、各測量回毎の環の閉合差から求めた観測値の標準偏差及び環の閉合差が制限値を超過した数を示したものである。環の閉合差から求める観測値の標準偏差は次式で求めた。

$$m = (1/n_p \cdot \sum (f_i^2/L_i))^{1/2}$$

ただし、 n_p ：環の総数

f_i ：第*i*環の閉合差

L_i ：第*i*環の環長

環の閉合差から求めた観測値の標準偏差は、網平均計算から得られた1km当たりの標準偏差とほぼ同じ数値であった。環の閉合差が最も多く超過したのは、第1回測量で34個であった。次いで多かったのは第3回測量で30個、その後は超過個数が減少し、最も少ないのは、第6回測量で11個であった。

表－2 単位重量当たりの標準偏差

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回
総路線長	18,542km	12,458km	15,684km	17,902km	14,088km	14,809km	18,081km	17,521km
標準偏差	3.5mm	2.5mm	2.8mm	2.0mm	1.7mm	1.5mm	1.5mm	1.3mm
観測年度	1883～1913	1921～1943	1947～1961	1955～1973	1967～1976	1970～1981	1980～1990	1986～1999

表－3 環の閉合差から求めた標準偏差と環の閉合差制限超過の割合

	環平均路線長	環閉合差による 標準偏差	環の総数	環の制限 超過の数	制限超過の 割合 (%)
第 1 回	346km	3.1mm (3.5 mm)	79	34	43.0
第 2 回	359km	2.3 mm (2.5 mm)	51	16	31.4
第 3 回	374km	2.6 mm (2.8 mm)	61	30	45.9
第 4 回	341km	1.8 mm (2.0 mm)	76	16	21.1
第 5 回	361km	1.7 mm (1.7 mm)	58	18	29.3
第 6 回	336km	1.4 mm (1.5 mm)	66	11	16.7
第 7 回	364km	1.5 mm (1.5 mm)	73	13	17.8
第 8 回	315km	1.2 mm (1.3 mm)	80	12	15.0

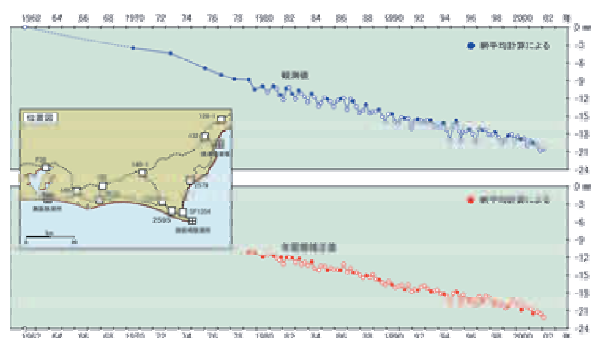
() 内の数値は網平均計算による 1 km 当たりの標準偏差

1. 1. 4 繰り返し測量による地盤沈下及び地殻変動の検出

(1) 地震と水準測量

繰り返しの測地測量により地殻の歪みを検出し、地震を予知しようとすることを「長期的地震予知」という。

水準測量は、繰り返し観測により、水準路線に沿った線状の上下方向の変動量が得られるため、地震調査研究では地殻変動を解析する基礎資料として極めて有効である。図－2は、東海の御前崎地方で実施されている水準測量から得られた掛川－浜岡間の高さの経年変化である。1979（昭和54）年度から年に2回、1981年度からは年4回測量されており、その結果を概観すると、プレートテクトニクス理論から予想されるような海側の地殻の沈み込み現象が続いている。今のところ沈降速度は一定であり、いわゆる東海大地震の前兆現象は見られないが、その速度等に変化が生じることがあれば注意を要する。



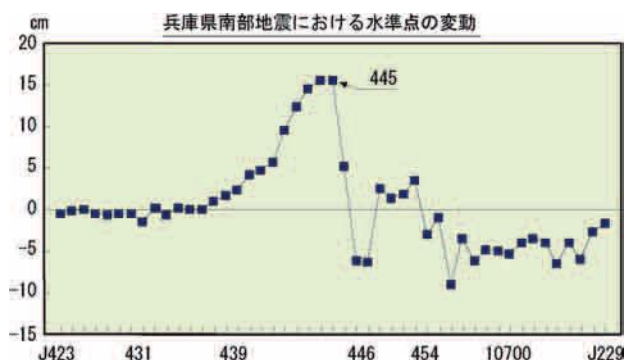
図－2 水準点2595（浜岡町）の高さの経年変化

水準測量により、地震前後の地殻の変動量を捉えることが出来る。図－3及び4は、1995（平成7）年1月17日発生した兵庫県南部地震による水準点の変動を表している。これを見ると姫路市から神戸市にかけて地殻が隆起し、断層を挟んで神戸市から大阪市にかけて沈降しており、地震活動によって生じた地殻変動が生々しく捉えられている。

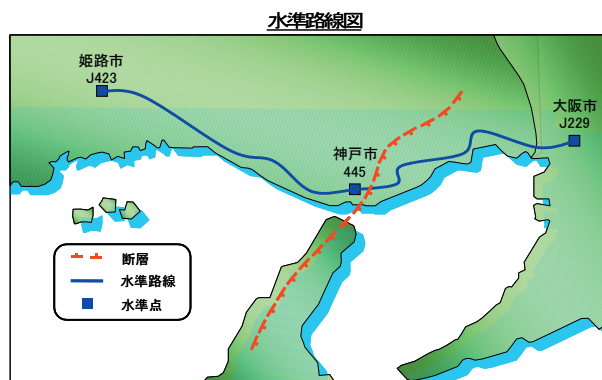
これら水準測量により、変動のない水準点を基準とし

て水準点成果を最新の値に改定し、復興工事等の基準を提供している。

このように、水準測量は、地殻の上下変動をミリメートル単位で把握することが可能な技術であり、地震調査研究では、必要不可欠な測量技術である。



図－3 水準点の変動



図－4 兵庫県南部地震における改測路線図

(2) 地盤沈下と水準測量

土地の沈下現象には、地殻変動など地球科学的な原因によるものもあるが、一般に地盤沈下として問題になるのは地下水の過剰汲み上げなど人為的な原因によるもので都市、工場地帯を中心として急激な沈下現象が生じる（写真－5）。これは地下の帯水層に関連する柔らかい

粘土層・砂層などが脱水して収縮するために起こると言われている。このような現象が地盤沈下として概念的に明確になったのはそれほど古いことではなく、昭和初期になってからである。



写真-5 抜け上がり

この地盤沈下の現象を把握し解明するためには、水準測量が最も有効不可欠な手段の一つとされ、現象発見の初期から今日に至るまで実施されている。

東京の江東地区では、1923（大正12）年の関東大地震後に行われた水準測量によって、一部の水準点が異常に沈下したことが判明した。当時、これは地震に伴う地殻変動と考えられていたが、その後頻繁に行われるようになった水準測量により、1930～1931（昭和5～6）年頃に年間沈下量15～17cmの地盤沈下が認められた。

また、大阪においては、1928年の水準測量の結果、一部の水準点の異常が認められたことを契機として、翌年から大阪市による水準点の増設と年1回の水準測量が行われるようになった。このように、東京、大阪及びこれらの周辺では、早い時期から地盤沈下が発生するようになった。

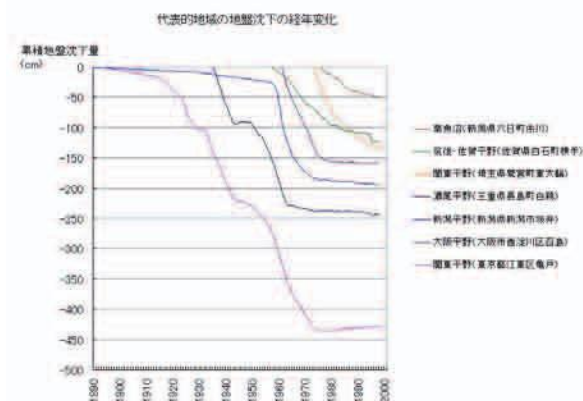


図-5 代表的地域の地盤沈下の経年変化

全般的には1930年代後半に産業の活発化と同時に地盤沈下が激化し、相当範囲の地域が年間数cm以上の沈下地域となった。その後、1950（昭和25）年頃から経済の復

興とともに地下水使用量が急増し、再び沈下は激しくなり範囲も拡大した。1955年頃以降には、地盤沈下地域は大都市のみならず、新潟（1955～1956年にかけて最大20cm以上沈下）、濃尾（1970年代前半が最盛期）、筑後、佐賀平野（1957年頃から始まり1960年代後半が最盛期）など全国各地において認められるようになり、多くの地域で年間最大20cm以上の沈下量が記録されている（図-5）。

（3）火山活動と水準測量

我が国は、多くの活火山が分布する世界有数の火山国である。有史以来、度重なる噴火で、しばしば地域社会は甚大な災害を被った。第6次火山噴火予知計画では、各機関連携のもと常時監視観測体制の整備及び機動・移動観測の充実を図ることとされている。

国土地理院は、活火山及びその周辺域でGPSにより地殻変動の連続監視を行うとともに、必要に応じ水準測量等の測地測量を行ってきた。

火山活動に伴って水準測量を実施した地域は、三宅島、伊豆大島、浅間山、草津白根山、有珠山、樽前山、駒ヶ岳、雲仙普賢岳、阿蘇山等日本各地に及ぶ。

近年では、2000年3月31日に噴火した有珠山の火山活動に伴う上下方向の地殻変動の状況を詳細に得るため、有珠山周辺の水準路線において水準測量の繰り返し観測を実施した（図-6）。これらの観測データは、現地災害対策本部で火山活動の状況を検討する際の重要なデータとして活用され、活動が沈静化してからは、災害復興工事の基礎データとして利用された。



図-6 噴火前と噴火後

1. 1. 5 離島の高さ

水準原点と結合できない離島では、国土地理院又は海上保安庁等の験潮場（所）の平均潮位から、験潮場（所）未設置の離島では、簡易験潮等による平均潮位から各島の原点数値を求めている。これらは、測量法第11条第1項第3号による院長承認を得て、標高の基準値として決定している。

これまでに原点数値を決定した離島等は、佐渡島、飛島、粟島、伊豆大島、三宅島、隠岐島前、隠岐島後、奄美大島、沖縄島、宮古島、石垣島、奥尻島、与論島、喜界島、伊平屋島、伊是名島、伊江島、津堅島、栗国島、渡名喜島、久米島、久高島、渡嘉敷島、座間味島、阿嘉島、南大東島、伊良部島、多良間島、西表島、鳩間島、小浜島、黒島、波照間島、与那国島、福江島、種子島、対馬である。

ちなみに国土地理院の験潮場には、看守がいる。看守は、各地の験潮場で、正しい潮位データ、気象・海象データを取得するために、雇用されているのであるが、その雇用形態も、業務内容も、一般の職種に比べて極めて特殊である。

1891（明治24）年に、我が国で初めて験潮場が設置された時、陸地測量部が作成した「験潮儀看守心得」の第一条には、「験潮儀ハ潮汐ノ高低ヲ測知シ中等海水面ヲ確定スルノ器械ニシテ本邦ノ水準測量ハ之ニ據テ起ルモノナレハ細心注意シテ看守ノ任ヲ竭スヘシ」とあり、かなり重い責任を課している。

1. 1. 6 水準測量の研究作業とその成果

水準測量に関する研究作業は、観測値の高精度化、機器開発、水準点の保全、新技術の導入、データベース化、プログラム開発、作業の効率化等種々の課題にわたり実施されてきた。

1883（明治16）年から実施されてきた水準測量は、繰り返し実施されてきた継続性の中に、研究成果を取り入れることで、その観測精度を3倍も向上させた。

特に、地道な研究作業による結果、特許取得ができたものに精密水準測量作業用標尺台の改良がある。この研究は、水準測量における観測の良否を判定するものの一つとして、往復観測値の差が使われているが、その往復差にプラス（+）の傾向を呈することに着目した。

往復差がプラスに偏る原因の一つとして器械及び標尺の沈下が考えられる。しかも夏季のような高温時に影響が顕著であることから、道路表面のアスファルトの軟化による沈下の可能性が考えられる。このため、アスファルト上における器械及び標尺の沈下について試験観測を実施した。

その結果、特に鉄製標尺台の沈下が大きな要因であることが明らかになった。そこで、その対策として標尺台の爪（接地部分）の形状及び材質の改良について研究を行い、実験を重ねながらセラミックスを用いた改良品を

完成させた（写真－6）。現在では、国土地理院で行う一等水準測量全般にこの標尺台が使われ、精度向上に貢献している。



写真－6 標尺台下面のセラミックス爪

1. 1. 7 2000年度平均成果

国土の高さに基準を与えるための水準測量は、1883年より開始されているが、これによる測量成果は、測量法制定以前に陸地測量部内の事業として行われた地図作成のほか、国レベルで行う事業等に利用されたものと思われる、一般公開される扱いではなかった。

測量法が1949（昭和24）年6月に制定され、公共測量に基準を与える役割を得た基本測量成果は、1953年から1963年にかけて各地域毎に手計算による水準網平均計算が行われ、完了次第順次公開されていった。その後、大型計算機の導入に伴い、第2回目の成果は北海道地方を除く地域について「昭和44年度平均成果」とし更新、北海道地方は、1972（昭和47）年に「昭和47年度平均成果」として更新し公表された。

今回の第3回目の「2000年度平均成果」は、各地域の地震・火山による地殻変動の影響、地盤沈下等に依る成果の不整合の解消や、新たに全国的に稠密な重力データが整い、これによる任意の地点の重力値を求めることが可能となったことから、これまで採用されていた正規正標高（Normal Orthometric Height）に換え正標高（Orthometric Height）を採用することになり、約30年ぶりに全国の水準点成果を更新した。なお、今回の更新成果の結果は、前述のとおり正標高採用のほか、本州、北海道及び九州地方を直接水準測量によって結合し、水準原点を固定とする全国同時網平均計算によって成果を得たことが主な特徴である。

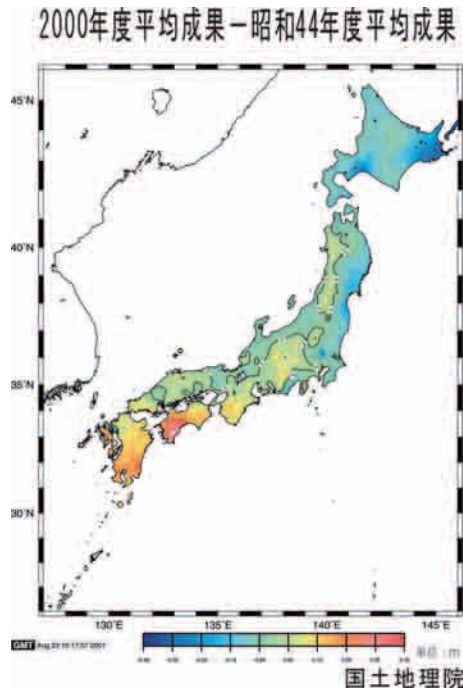
（1）新成果と旧成果の比較

新成果と旧成果の差を図－7に示す。この成果の標高差は、全国平均で+1.1mmであった。全国的な傾向としては、水準原点近くの東京周辺では、ほとんど差はなく、北海道側ではマイナス傾向（平均で－13cm）、九州側ではプラス傾向（平均で＋16cm）となっている。

北海道から東日本の太平洋側に沈下の傾向が見られる。これは太平洋プレートの沈み込みによる沈下であると考

えられる。北海道東部については、北海道東方沖地震による地殻変動量も含まれていると推察する。

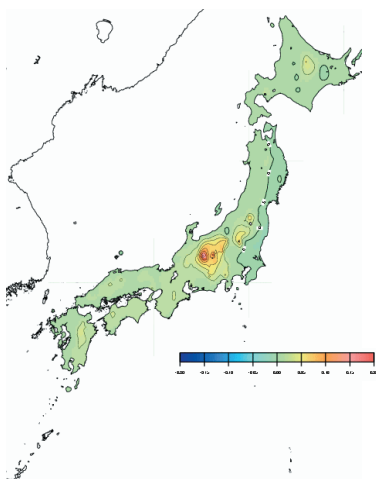
四国から九州にかけて隆起傾向が見られるが、地殻変動等の影響によるものなのか、あるいは新・旧成果算出の計算手法の違いに起因したものであるか、特定できない。また、中部山岳地域に隆起があるが、これは重力補正を正規正標高補正（楕円補正）から正標高補正に変更したための標高差が出ている。



図－7 新成果と旧成果の比較

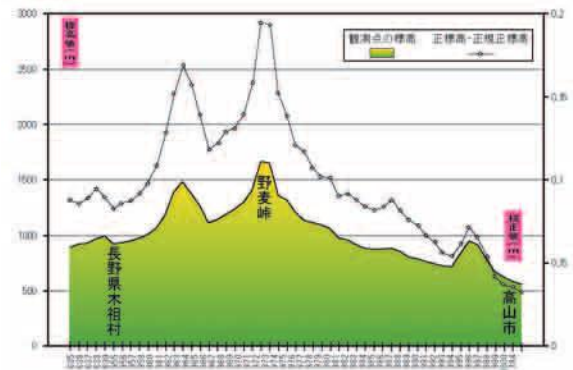
（2）正標高補正

今回採用した正標高と従来の正規正標高の差は、大部分の水準点（約93%）が2cm以内であった。15cm以上の水準点は8点あり、これらは標高1,300m以上の地域に設置されている水準点である。



図－8 重力補正の違いによる標高の差

図－8は、重力補正の違いによる標高差を表したものである。正標高から正規正標高を引いたもので、標高が高い所ほどその差が大きくなっている。



図－9 中部山岳地域の拡大図

図－9は、岐阜県高山市から長野県木祖村に至る水準路線について、各水準点の補正の違いによる標高差を拡大したものである。

左の縦軸が地形の標高値（単位：m）で、折れ線グラフが重力補正值の差（正標高と正規正標高の差）、右の縦軸がその数値（単位：m）を表している。標高が高い所ほど重力補正值の差が大きいことが解る。

日本国内で最も標高の高い所にある水準点は、野麦峠（標高1,670m）にある。この最高点では、約20cmの差が見られる。

1. 1. 8 日本列島100年間の地殻上下変動

我が国の水準測量は、1883（明治16）年から始まり、現在までに延べ約129,000kmの観測が実施されている。これらの観測値は、LAGSAS（水準・重力測量に係る総合解析システム）にデータベース化されている。

LAGSASに収録されている水準測量データには、明治以来実施されたすべての水準測量の観測データと、再設・移転等の履歴データ、水準点上の重力値、水準点の経緯度等が含まれる。

約100年前の一等水準測量（第1回）から、近年実施された一等水準測量（第8回）までの各測量回毎のデータを用いて全国同時網平均計算を行った。これにより過去100年間の日本列島における地殻上下変動の様子が明らかになった。

図－10は、過去100年間の日本列島の上下変動の様子を表している。日本列島の上下変動は、広域的な変動域と局所的な変動域とが顕著に表れている。広域的な変動の要因としてはプレート運動、造山運動に伴うものなどが挙げられる。また、局所的な変動の要因としては、地盤沈下、地震、火山に伴うものなどが挙げられる。

日本列島の上下変動で、沈下が大きい所は新潟県新潟市の－2.2668mで地盤沈下によるものと考えられる。逆

に隆起が最大であったのは千葉県館山市の+1.6560mで関東大地震により隆起したものと考えられる。

なお、日本の最大地盤沈下値(約-4.5m 環境庁「全国主要地域の地盤沈下」報告)である東京都江東区については、2001年度に行った網平均計算で-4.4406mの値を得た。この結果は、環境庁の報告書の値と比較しても大差はなく一致していた。

水準測量から求めた最近100年の日本列島の地殻上下変動

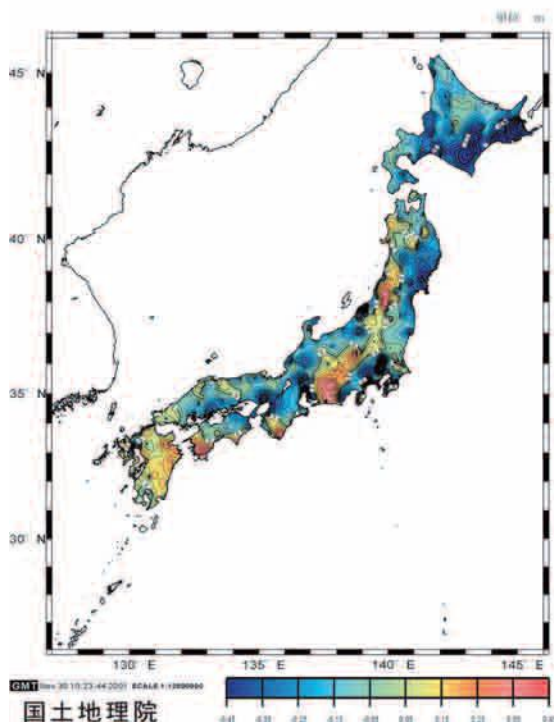


図-10 第8回-第1回変動図

1. 2 水平位置の測量

1. 2. 1 日本経緯度原点

1949(昭和24)年6月3日法律第188号により測量法及び同施行令が制定され、我が国の地理学的経緯度の基となる日本経緯度原点の位置と原点数値(経度、緯度、原点方位角)が明示された。この位置と原点数値は、国土地理院の前身である陸地測量部が使用していたものと同じである。

我が国の最初の経緯度原点は、1884(明治17)年に陸軍参謀本部(後の陸地測量部)が旧海軍観象台(後の旧東京天文台)構内に設置した一等三角点「東京」であり、参謀本部ではこの点を仮経緯度原点として、平面直角座標原点(旧東部原点)を定め、三角測量の原子を決定した。

1950年、陸地測量部は旧東京天文台の子午環の中心を新たに経緯度原点と定め、一等三角点「東京」の標石を撤去し、明治初年に経緯度原点周辺で実施された精密な天文測量及び新たに実施した方位角観測の結果を基に原

点数値を決定した。

1923(大正12)年の関東大地震により経緯度原点を示す子午環は崩壊した。その後実施された復旧測量では経緯度原点の東南東77mの場所に一等三角点「東京大正」が新設され、同点と子午環架台から推定した原点位置との取付測量の結果、経緯度原点の移動が確認された。その結果、原点方位角の値は変更されたが、経緯度の値は変更されなかった。これらの値が測量法施行令による原点数値である。

旧東京天文台の子午環架台は、関東大地震以降、1958年頃まで荒れたまま放置されていたが、測量法の制定後、1959年には旧子午環架台を利用して同位置に原点標識が設置された(写真-7の左)。この標識では、原点数値の位置に原点を示す金属標が設置され、これにより原点が目に見えるものになった。1962年には原点標識が改造され、現標識の基となる標識が完成した。この標識では旧子午環架台を撤去し、そのかわりに同位置に2枚の黒い石板が設置され、同石板の間(旧子午環架台の中央)に原点金属標が設置された。



写真-7 初期の経緯度原点標識(左)と現在の標識(右)

2001(平成13)年6月20日に測量法の一部が改正され、測量の基準が日本独自の日本測地系から世界共通の世界測地系に変わり、これに伴って原点数値も変更された。新たな原点数値は、国土地理院の鹿島VLBI観測局における長年の観測結果から得られた同観測局の国際地球基準座標系の座標値を基に、GPS測量で決定された。また、経緯度原点の位置は原点標識に設置された金属標の十字の交点に改正された。この改正を契機に老朽化した原点標識の改修工事が2002年に行われ、21世紀の新たな経緯度原点として整備された(写真-7の右)。

1. 2. 2 基線測量と基線尺

基線測量とは、三角網に大きさを与えるために、三角網の一边を基線尺を用いて測定する測量である。

我が国の三角網の骨格となる一等三角網の基線測量は、1882(明治15)年から1911年までに全国14カ所の基線において実施された。

明治の基線測量で使用された基線尺は、ヒルガード式4m測桿ないしエーデリン式25m基線尺であった。

ヒルガード式4m測桿は1874年頃アメリカ合衆国から輸入され、1882年以降1908年まで13カ所の基線で使用された。エーデリン式25m基線尺は線状の形状を有するインバール製(ニッケル36%、鉄64%の合金)の尺で、外界

温度の変動による形状の変化が極めて小さいのが特徴である。同基線尺は、1908年に北海道の声問基線で行われた作業の際に、ヒルガード式4m測桿との比較が行われ、測定精度及び作業効率の優秀性が認められた。その後、1911年の沖縄基線における作業から使用され、これ以降、国内及び国外で行われた基線測量はすべてエーデルン式25m基線尺が使用された（写真－8）。



写真－8 エーデルン式 25m 基線尺による基線測量



写真－9 ジョブメータII型による辺長測量

沖縄基線の基線測量から本格的に使用が開始されたエーデルン式25m基線尺は、その後地震に伴う震災復旧測量で使用されたが、1955（昭和30）年頃に一等三角辺長を直接測定可能な光波測距儀（写真－9）が実用化されたため、1954年に滋賀県の饗庭野基線において行われた再測量を最後に、基線尺を用いた基線測量は行われていない。

なお、エーデルン式25m基線尺はその後鋼巻尺や電磁波測距儀用の比較基線場の基線長決定や、1915年に測地学委員会が地殻変動と緯度変化の関係を調べるために三鷹の東京天文台構内に設置した菱形基線の精密距離測定に使用された。

1. 2. 3 東京都復興測量

地理調査所（国土地理院の前身）は戦争により荒廃した東京都の復興に寄与するため、都の委託費及び復旧費により都内の復興測量を行った。

作業地域は東京都区内450km²で、作業量は既設三角点68点、増設三角点198点であった。三角測量方式で実施されたが、既知点のほとんどが大偏心を必要とし、また、増設点は屋上点のために多角点を付設する等、困難な作業であった。また、終戦直後ということもあり測量資材の入手困難、輸送の不円滑のほか、食糧の補給にも多大な努力を要した。作業は1946（昭和21）年12月から開始し翌年の4月中旬に完了した。

当初この測量は関東大地震後に実施された復旧測量と同様に三等三角測量として実施されたが、小型標石を埋設したため四等三角測量として整理され、後に公共測量として扱われた。そのため増設点の基本図への表示は行われなかった。

なお、既設基準点の標石調査とその復旧測量は、連合軍総司令部（G. H. Q.）の指令作業として全国で実施された。

1. 2. 4 三角点の設置と繰り返し測量

（1）一等三角点の繰り返し測量

我が国の一等三角点は1883（明治16）年武遠三角網に着手以来、1915（大正4）年沖隅三角網に至る15ブロックを32年かけて設置したものである。その後、1945（昭和20）年までは地震等の原因による復旧測量で局所的に実施され、三角点成果の更新とともに、地球科学的に重要な地殻変動等のデータを提供してきたが、全国的な規模での繰り返し測量は行われなかった。

1946年12月21日に南海道沖でマグニチュード8.0の地震が発生し、その被害は四国・近畿・中国・九州及び中部の一部にわたり、死者1,330名、家屋の被害は39,000戸に及んだ。この地震に伴う一等三角点の復旧測量は、1947年から2年間の造標作業と1948年から3年間の観測作業（写真－10）で実施された。この結果、地震による地殻変動の範囲と様相を明らかにするとともに、二等三角点以下の復旧測量・再計算作業のための既知点の成果が得られた。

全国を対象とした一等三角点の繰り返し測量は前記作業を契機として、第一次基本測量長期計画に基づいて1953年から開始し、1967年に第1回目を完了した。その結果、約半世紀間における



写真－10 一等三角測量の観測（カルパソル一等経緯儀）

日本列島の地殻変動が明らかになった。第2回目の繰り返し測量作業は、翌年から開始され1973年に東海地域まで実施されたが、1974年から始まった第三次基本測量長期計画では、光波測距儀を主体とし、二等三角点以上を対象とした精密測地網一次基準点測量に移行した。

明治・大正時代の観測はほぼ一貫した角観測方式で行われたが、昭和の繰り返し測量では、作業方式や機器類に絶えず改革が加えられた。その主なものは、次のとおりである。

- 1）光波測距儀による辺長測定を追加することで、角観測を簡略化し、ラプラス観測（天文経緯度、天文方位角の観測）も一部の点で行う。
- 2）観測は夜間に行い、目標は自動点滅器を備えた電池式の無人回光灯を使用。
- 3）角観測にはウィルドT₃を使用し、地上で視通がとれる場合は三脚で観測する。
- 4）高測標は三脚式又は組み立て式の鉄製測標とする。

（2）精密測地網測量

測地基準点は時代の推移に伴い、国土開発など公共事業や地籍調査等に活用されるばかりでなく、地球科学の基礎資料としての重要性が認識されるなど、その活用分野は多様化し高精度の成果を要求されるようになった。しかし、既設の測地基準点は設置以降、局所的な再測量を除いて再測量が行われず、僅か一等三角測量の繰り返

し測量のみが南海道地震復旧測量を契機として全国的に実施されたにすぎない。二・三等三角点については地殻変動や地域開発等人為的障害を受け亡失、故障するなど、その機能を失いかけていた。このため、二・三等三角点の全国規模での繰り返し測量を行う「日本列島精密測地網の設定」が、1974（昭和49）年から開始される第三次基本測量長期計画の最重点測地事業として位置づけられ、精密測地網測量が事業化された。

精密測地網測量の当初の骨子は、

- 1) マグニチュード7クラスの内陸直下型地震の予知のための前兆変動が検出できるように、一次基準点（一・二等三角点、6,000点、平均辺長8km）網を5年周期で繰り返して測量する。
- 2) 二次基準点（三等三角点、32,700点、平均辺長4km）網を10年周期で繰り返して測量する。

というものであった。

精密測地網測量は、1973年に神奈川県足柄地方において試験作業が行われ、その結果に基づいて作業方式の検討、作業規程の制定、積算資料の作成等が行われ、翌年度から開始された。

（a）一次基準点測量

一次基準点測量の測量方式は、当初レーザを光源とした光波測距儀とセオドライトによる距離測定、角観測を組み合わせたアンブレラ方式が採用された。同方式は三辺測量方式に比べ精度的には多少劣るが、距離測定辺数が少なく経費的に有利と考えられた（図-11）。しかし、事業の進行とともに角観測で所要精度を確保するためには、かなりの経費を要することが判ったため、その後は原則として三辺測量方式に変更された。なお、比高差が大きい点間では傾斜補正の精度を上げるため鉛直角の観測も同時に行われた。

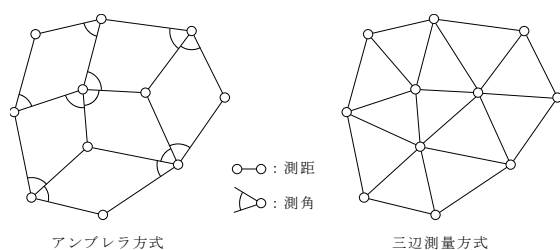


図-11 一次基準点測量の測量方式

一次基準点網は当初平均辺長8kmの標準網でスタートしたが、その後の進捗状況の遅れから事業の見直しが行われ、1979年からは、強化・特定観測地域等を除く地域では平均辺長20kmの中距離網で実施された。

一次基準点測量の使用機器は1989年まで光波測距儀が主体であったが、1990年からは一部の地区でGPS測量機が導入され、1993年にはすべての地区でGPS測量機が使用された。

一次基準点測量は1984年に瀬戸内の一部を除いて第1回目の測量が終了した。その成果は随時地震予知連絡会に報告され同会報に掲載された。1987年3月には、第1回目の全成果をまとめて「日本地殻水平歪1905年—1983年」として刊行した。

その後、1993（平成5）年に第2回目の測量が終了したが、翌年からの第五次基本測量長期計画からは高度基準点測量に移行した。

（b）高度基準点測量

高度基準点測量は、一・二等三角点の一部と全国に設置された電子基準点から構成された2,000点を対象とした測量である。観測は三角点上においてGPS測量機による12時間連続観測を行い、電子基準点を既知点として三角点の高精度な測地学的位置を求めるものである。同測量は、1994年から開始され、2002年までに第1回目の全国の繰り返し測量を終了した。

（c）二次基準点測量

二次基準点測量は、地殻変動及び地盤変動により再測量を必要とする地域、並びに都市部等再測量の急を要する地域から行われた。

測量方式はセオドライトや光波測距儀を用いた任意多角測量方式や三辺測量方式が採用された。1990年からはGPS測量機が導入され、1993年まで行われた。第五次基本測量長期計画では地域基準点測量に名称を変更して実施されている。

二次基準点測量の成果は、単に二次基準点成果の維持のみでなく、一次基準点測量を補足してより詳細な地殻変動の把握にも寄与している。

（3）地籍測量と基準点測量

地籍測量は地籍調査において重要な一筆地の位置と地積とを測定するための測量である。

我が国の近代の地籍に関する調査は1873（明治6）年頃から開始され、1894年までに土地台帳及び町村地積図の調製が一応完了した。このときの地籍測量は当時平行して行われていた三角測量や水準測量と連携しておらず、測量器械、測量方法及び測量技術者の技術内容から測量精度が低く、地域によっては縄延び等の問題もあるため、得られた成果は不正確なものであった。

戦後、国土の開発及び保全並びにその利用の高度化に資するとともに、国土の実態を科学的かつ総合的に調査を行うことを目的として、1951（昭和26）年に国土調査法が制定され、地籍調査が新たに行われることとなった。この地籍調査に必要な基準点を設置する測量は地理調査所が担当し、地籍調査そのものは市町村が担当することとなった。

基準点測量で使用される座標系は事業の遂行に最も便利な座標系を選択する必要から、次の3つの座標系につ

いて検討が行われた。

- 1) 経緯度による楕円体座標
- 2) ゴルドネル等積投影による球面直角座標
- 3) ガウス等角投影による平面直角座標

最終的には3)の座標系が採用され、全国を13の系に分割した。その区分された系に基づいて、既設三角点の座標変換が1951年から約5年の歳月をかけて行われた。その後、系の数は、沖縄、小笠原諸島の返還及び沖ノ鳥島の日本国直轄管理に伴いさらに分割され、現在は19に及んでいる。

地籍調査に必要な基準点の設置は急速にしかも大量に計画されたため、地理調査所では新たに多くの技術者を採用し、3ヵ月程度の速成教育を行った後、作業に着手させた。しかし、実施にあたっての検討不足、低精度な使用機器、技術の未熟も相まって測量精度の低下をきたした。その後、使用機器の変更、作業規程の整備、技術の向上等により必要な測量精度が確保できるようになった。

基準点測量は当初、三角測量方式で四等三角点を設置したが、平野部、隠蔽地、一部の離島等では距離測定に鋼巻尺を使用した多角測量方式で二等多角点を設置した。1964年頃から電磁波測距儀が実用化され、距離測定の精度と能率が飛躍的に向上したことにより、四等三角測量も多角測量方式が主流となった。このため二等多角点の設置は1978年まで実施されたが、それ以降はすべて四等三角点に一本化された。一部の地区では、二次基準点測量との併設網も採用された。その後、GPS測量機が1991（平成3）年から試験的に導入され、1995年以降は特殊な地域を除くすべての地域でGPS測量方式により実施されている。

基準点測量は当初直営のみで実施されていたが、1967年からは一部外注で実施されるようになり、現在は一部を除きほとんどが外注で行われている。

なお、四等三角点は1960年から地籍測量のほか、国土基本図事業、湖沼調査、高速道路建設等でも設置された（図-12）。

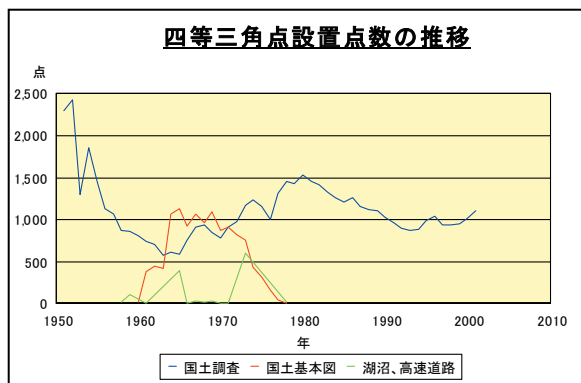


図-12 四等三角点の設置点数の推移
1951(昭和26)年～2001(平成13)年

1. 2. 5 繰り返し測量による地殻変動の検出

(1) 地震

1891(明治24)年10月28日午前6時ごろ、美濃・尾張地方を襲ったいわゆる濃尾大地震はマグニチュード8.4の最大級の地震であった。濃尾地震の翌年、文部省に災害予防調査会が発足し、その事業として、地震と地殻変動の関係を調査することなどが決められ、陸地測量部により災害地域の再測量が行われた。濃尾地震に伴う災害復旧測量は後年の測地測量による地殻変動研究の先駆をなすもので、その歴史的意義は大きい。

これ以降、大規模な地震発生後に復旧測量が行われ、群発地震では繰り返し測量により地震に伴う地殻変動の様相を明らかにした。

これらの測量は当初、三角測量により行われたが、1964（昭和39）年6月16日に発生したマグニチュード7.5の新潟地震後に実施した測量では、初めてテルロメーターⅡ型による辺長測量が実施された。1965年8月1日から1970年末まで続いた松代群発地震では、既設の三角点を利用して菱形基線を設け、繰り返し観測が実施されたほか、三角測量による数日間隔の短期観測が初めて試みられ、その結果は有意と思われる変動を示し、地殻変動調査に新しい課題を提起した。

1995（平成7）年に発生したマグニチュード7.2の兵庫県南部地震では、前年から運用を開始した電子基準点のデータを解析して変動量を算出するとともに、緊急的に近畿地方兵庫県南部を中心とする地域の20点の三角点において高度基準点測量を実施した。その結果、1984年から1985年にかけて実施した一次基準点測量結果と比較し、より詳細な地殻変動が明らかになった。また、阪神地区にGPS連続観測点を2点増設し周辺の電子基準点とともに、余震に伴う地殻変動の監視を行った。

これらの測量等により得られた成果は、地震による地殻変動及び地震の推移を把握するための資料として、地震予知連絡会に随時報告された。

(2) 火山噴火

1990年11月17日の雲仙岳の噴火後、ただちに雲仙岳周辺の火山活動に伴う地殻の水平変動の状況を把握し、今後の火山活動の予測に資するためのGPS測量を実施した。

GPS測量は、既設三角点等10点において繰り返し実施した。さらに雲仙主峰の普賢岳山頂にある三角点に対して、仁田峠観測点から、光波測距儀・セオドライトによる取付観測を実施した。また、同地域にGPS連続観測点を4点設置して1日1回2時間（火山活動が活発なときは1日2回）観測を実施した。この観測制御と観測データの収集はつくばの中央監視局のコンピュータにより行われた。

1998年2月から岩手山において火山性微動、火山性地震が増加し、火山活動が活発になり、9月3日には、マグニチュード6.1の地震が発生した。

ただちに、GPS連続観測装置、GPS火山変動リモート観

測装置 (REGMOS, 写真-11) 及び自動測距装置 (APS, 写真-12) を設置して緊急測量を実施した。

REGMOSは、商用電源・通信施設が確保できない場所でも連続観測ができる機器の開発を目指して、1997年から民間会社と共同研究開発をしてきた装置で、1周波GPS測量機、太陽光・風力発電装置、蓄電池、通信制御装置及び収納ケースで構成されており、観測データは衛星電話回線により中央監視局で収集された。

APSは、セオドライトと光波測距儀とを組み合わせ、パソコン制御によりあらかじめ設定した方向について、角と距離が自動的に観測できる既存の測量機である。APSによる観測は天候により左右されるが、目標として反射鏡を設置すればよく、GPS観測に比べて安い経費で多くの点の変位が検出できるのが特徴である。岩手山には10点の反射鏡を稜線上に設置して連続観測を実施した。

2000年3月下旬から活発化した有珠山の火山活動に伴う緊急測量では、測量班が現地に入った直後に噴火し、地殻変動データを取得したい場所が立ち入り禁止区域に指定され、GPS連続観測装置やREGMOSが設置できないため、従来測量方式の距離測定、角観測により地殻変動の監視を行った。

角観測は有珠山北西の安全な地域の1点において、火山活動が活発な地域内の自然目標を複数選び、基準方向と自然目標との水平角及び鉛直角観測 (写真-13) を実施した。距離測定は観測点を洞爺湖の東西を挟む2カ所を選び、反射鏡は洞爺湖の南部の湖岸に複数個設置して、光波測距儀による有人観測を実施した。これらの観測データは、点検後ただちに国土地理院内に設置された災害対策本部に送られ、解析後グラフ化されて火山噴火予知連絡会等へ提供された。

有人による測距測定、角観測は6月下旬まで実施



写真-11 姥倉山の可搬型 GPS 連続観測装置 (REGMOS)



写真-12 APS 連続観測装置



写真-13 角観測

され、その後、距離測定はAPSに切り替えて継続された。

GPS連続観測装置の設置は、4月2日に危険区域外の2カ所に設置し、その後立ち入り区域の拡張とともに、さらに2カ所に増設した。REGMOSの設置は、5月25、26日に各1基ずつ設置した。このREGMOSは岩手山に設置したものの改良型で、2周波GPSを採用したことにより周辺の電子基準点と一緒に解析が可能となった。

これらの観測により、火山活動に関連した地殻変動が捉えられ、地殻活動の活発な地域において、従来の測量と連続観測を組み合わせることで総合的に地殻活動の状況を把握することが有効な手法であることが確認された。

1. 2. 6 離島測量と青函海底トンネル測量

(1) 離島測量

戦後における我が国の離島における水平位置の測量は、主に基本図の作製を目的として実施された。

1968年6月25日、小笠原諸島が日本へ復帰し、ただちにこの地域における測量が測地部、測図部、地図部の混成部隊により行われた。

測量は、陸地測量部及び米軍が設置した既設の三角点を利用し、ウィルドT₂、ジオジメータIV型を使用した基線、三角、多角測量により、既設三角点の復旧、二・三等多角点の設置が行われた。硫黄島における測量は1911年以来何回も行われており (表-4)、今回の測量結果とそれまでの結果を比較することにより、島の北部で年間約30cm、南部で年間約7cm程度の隆起があることが明らかになった。

表-4 硫黄島の測量

回数	測量の年次	測量機関
第1回	1911(明治44)年	陸地測量部
第2回	1934(昭和9)年	海軍水路部
第3回	1945(昭和20)年	米国海軍
第4回	1952(昭和27)年	米国第71測量隊
第5回	1968(昭和43)年	国土地理院

なお、硫黄島については1996(平成8)年に2点の電子基準点が設置され、現在常時観測が行われている。

男女群島 (長崎県) の測量は、ウィルドT₃及びエレクトロレーブを使用して1973年に行われ、福江島内の既設三角点を与点として男島、女島に四等三角点を各2点ずつ設置した。また、男島、女島の北西約50kmに位置する鳥島の測量では、男島、女島の四等三角点から鳥島の南岩、北岩の直上でホバリングするヘリコプターを目標として三角測量を行い両岩の位置を決定した。

1977年以降に行われた離島測量においては、位置決定にNNSS (Navy Navigation Satellite System) が使用され、方位角は太陽観測により決定された。なお、主な島の実用成果の位置とNNSSの結果との差は表-5のとおりであった。

表－5 離島位置のずれ

島名	緯度の差 (秒) (NNSS－実用成果)	経度の差 (秒) (NNSS－実用成果)
北硫黄島	－26.9	＋4.7
鳥島	－7.6	－45.5
西之島	－2.6	＋7.7

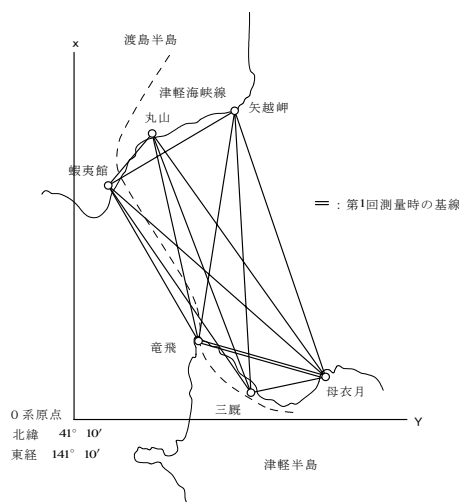
(2) 青函トンネル測量

青函トンネルの建設では、多くの掘削技術上の問題とともに、いかにルートどおりに掘削し正確に貫通させるかということが大きな課題であった。

青函トンネルは、トンネル延長53.9kmのうち海底部分が23.3kmのため、通常のトンネル工事で行う縦坑による掘削位置の点検ができず、かつ貫通誤差を数十cm以下(コンクリートの厚さで調整がきく程度)にするために、それぞれの坑口の相対位置を高精度に決定しなければならなかった。また、トンネルの全長が約50kmの規模になると測量そのものが地球の曲率を考慮する測地測量の範疇に入るなど、一般のトンネル測量では目的を達成できないことから、鉄道建設公団は国土地理院に技術的な援助を求めてきた。

国土地理院では技術的な調査検討を行い、その結果、既設の三角点成果では必要精度が得られないことから、新たな渡海三角網を設定することとした(図－13)。この測量は、1965(昭和40)年に国土地理院が受託測量として実施した。

この測量では、工事専用座標系(0系)を設置し、原点における縮尺係数を1.000とした。測量方式は三角測量方式とし、基線測量に当時最新鋭のジオジメータⅡ型、角観測にウイルドT₃を使用した。その後、この地域における地殻変動や成果の完全を期して1970年から新たに同渡海三角網の繰り返し測量を行うことになり、鉄道建設公団が測量会社に発注して毎年秋に実施した。



図－13 渡海三角測量網図

この測量は三辺三角方式で行われ、距離測定はレーザを利用したジオジメータⅧ型、角観測はウイルドT₃が使用された。この距離測定における気温測定は、当時行われていた地上1m付近の気温測定ではなく、地表付近の気温分布の調査結果から地上3mで実施された。

渡海三角測量に続く坑内測量(開放多角測量)は、測量会社により実施されたが、その際

- 1) 繰り返し測量の実施
- 2) 測定した角に横方向の温度勾配による光の横屈折補正を実施すること
- 3) 連絡坑等を利用し、多角路線をできるだけ連結・閉合すること
- 4) 高压注入による坑道の変位を考慮し、毎回の測量を坑口に近い点から出発すること

などが考慮された。

貫通まで約2kmに迫った1979年に最終掘削方向を決定するための試算が、それまでに実施された測量データを用いて国土地理院で行われた。その結果、水平方向の誤差は、±50cm程度と見積もられた。

1983年1月に先進導坑が貫通し、坑内の開放多角測量が貫通点で結合された。その結果は表－6のとおり良好であった。

なお、青函トンネルで実施された、補正方法等は他の長大トンネル測量にも採用されるようになり、長大トンネルの測量方式として総合的に体系化されたものとして評価されている。

表－6 貫通誤差

方 向	貫通誤差
トンネル横方向	644 mm
トンネル延長方向	19 mm
鉛直方向	196 mm

1. 2. 7 機器開発

(1) 高精度長距離光波測距儀

開発当初の光波測距儀は非常に大きな装置で、とても測量機器とは言い難いものであったが、順次改良が加えられ、さらに半導体やレーザ技術の進歩に伴い、小型で50km以上の測距ができるレーザ測距儀が開発された。それに伴い測量方式は三角測量から三辺測量へと変わった。

1974(昭和49)年から精密測地網測量が開始され、また、地震予知連絡会が指定した観測強化地域、特定観測地域では、精密変歪測量等距離測定を短期的に繰り返す測量が行われた。それらの測量は、国産の光波測距儀が短距離型のため、すべて外国製のレーザ測距儀が使用された。使用した測距儀のうち、長距離光波測距儀として永く使用し、実績のあるジオジメータⅧ型が生産中止となり、長距離測距儀の更新が不可能になった。外国製品については、故障の際部品等の関係から、修理に多くの時間を要する場合もあり、群発地震の発生や大地震発生直後の地殻変動の調査等緊急を要する測量に対応できないこと

が予想された。一方、地震予知の立場から巨大地震発生の原因となる駿河トラフ、相模トラフ周辺に蓄積する地殻水平歪を監視することは、極めて重要なため、駿河湾、相模湾を縦断する40～50数kmの距離測定は欠かせない。以上のことから、1980年から国産の長距離測距儀の開発が行われた。

開発にあたっては、長距離の測定ができることを主眼とし、標準的測定距離は40km以上とし、視通が良好な場合は50km以上まで測定できることを目標とした。

開発は、はじめに次の仕様により2年間で試作機を製作し、鹿野山(測定距離8km)、伊豆半島(測定距離27km)において試験観測を実施した。この27kmの測定は国産測距儀による初めての長距離測定であった。

仕様：

○光源	He-Ne レーザ 5mW
○変調周波数	60MHz 帯 5波
○変調器	タンタル酸リチウム (LiTaO ₃)
○送光レンズ	口径45mm 焦点距離340mm
○送光ビーム幅	0.03m ラジアン
○受光レンズ	口径120mm 焦点距離600mm
○光量調整	1～10 ⁻⁶
○位相測定	PLLによる波形整形後ゲート方式 ディジタル位相測定

2年間の研究結果をもとに改良を加え、国産の新しい長距離測距儀(日本光学製 NLD-2)が生まれた。

この測距儀は、試作機に比べて半分の大きさで、光変調器の小型化と温度補償機能の追加及び外部から調整できる機能を追加するなどの改良が行われた。

本測距儀の試験観測は、国土地理院構内の菱形基線において機械定数を決定後、伊豆半島及び伊豆諸島において、33～43kmの距離についてジオジメータⅧ型との比較観測を実施した。その結果、良好な結果が得られ、国産の長距離測距儀を開発するという目標が達成された。

なお、本測距儀はさらに改良されNLD-3として実作業でも使用された。

(2) 多波長レーザ測距儀

電磁波測距儀による距離測定で最も大きい誤差源は気象によるもので、特に長距離測定では問題である。これについてはヘリコプターを利用して光路上の気象測定を行い、観測の時間帯や気象測定方法について検討が行われ、その結果に基づいて距離測定が行われた。しかし、地震予知のための精密な地殻変動調査など長距離の測定では、従来からの電磁波測距儀の性能以上に高い精度の距離測定が要求されることから、多波長の光源を使用し、その周波数の違いを利用して気象補正を自動的に行う多波長レーザ測距儀の開発を行った。

設計にあたっては、

- 1) 高い変調周波数で高分解能を持つこと

- 2) 複数の波長のレーザを用いて気象補正を自動的に行うこと

- 3) トランスポンダ方式(対向型)により光を往復させずに測定距離を伸ばすこと

といった特徴を持つ測距装置を開発することとした。

開発は既に市販されていた2波長レーザ測距儀(テラメータ)を参考にし、1981(昭和56)年から1983年を第1期、1984年から1985年を第2期として行った。

第1期では、測距方式の検討、変調器の試作、2波長1ウェイ方式実験機の試作、2波長2ウェイ方式実験機の試作を行った。第2期では、第1期で開発した実験機の操作性、安定性等を考慮した改造を行い野外での実験観測を行った。

本開発で採用したトランスポンダ方式では、測定する辺の両側に器械を置き、それぞれ器械の制御、測定を行う局を主局、もう一方を従局と呼ぶ。主局側は赤色(He-Ne)レーザ、KDP結晶高周波変調器、光電増幅管、カセグレン式反射望遠鏡を搭載した光学架台と、レーザ・変調器の制御装置、信号位相測定器、データ取り込み・距離計算・結果記録用パソコンが組み込まれた電気架台、マイクロ波通信機で構成されている。従局側は光学系架台に青色(He-Cd)レーザが加わり、電気架台に位相差測定器がないところが異なるだけで基本的に同じ構成である。

仕様：

○光源	He-Ne レーザ(GLG-5350) 波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$ (赤) 出力5mW He-Cd レーザ(OMNICHROME 456-14) $\lambda = 441.6\text{nm}$ (青) 出力14mW
○変調器	KDP結晶変調器 変調周波数 $f_0 = 1.8\text{GHz}$
○信号検出器	ホトマル(浜松ホトニクス) 増幅率 R712(赤) 7.5×10^5 R268(青) 2.1×10^6
○カセグレン鏡	口径20cm ビーム広がり角 $\theta = 0.1\text{rad}$
○位相計	HP3575A 分解能 $d\phi = 0.1^\circ$

実験観測は0.4kmと1.1kmの基線で行われ一応の成果が得られたが、装置自体が大きく機動性に欠けることから、実作業では使用されなかった。

(3) 慣性測量機器

四等三角測量あるいはそれ以下の精度の測量における利用を目的とし、1983(昭和58)年から1987年までに慣性測量機器の開発が行われた。

慣性測量とは、力学的な原理に基づいて、加速度と時刻とを計測して任意の位置を求める測量手法で、航空機用慣性航法装置及び宇宙ロケットの慣性誘導装置などと

同じく慣性機器の技術を応用したものである。したがって、セオドライトや光波測距儀を用いる光学的な方式と異なり、視通や天候による影響が無く、利用上必要な基準点の位置を比較的自由に選ぶことができる。また、慣性自動測量装置(IASS ;Inertial Automatic Surveying System)を自動車に搭載した状態で運搬及び計測を行うことができるため、従来の方式に比べて効率が飛躍的に良く、夢の測量機と期待された。

開発は、既に日本航空電子工業(株)で試作されていたIASS(位置精度は1時間10kmの計測範囲で10m)の精度向上を目指して、慣性センサの精度向上、オフライン処理プログラムの開発を行い、走行実験を繰り返し実施し、実用化に必要な作業要領の検討などを行った。

慣性測量機器の方式としては、加速度計とジャイロがジンバル機構を有する安定台(プラットフォーム)に取り付けられ、加速度計の検知軸がジャイロによって常に基準方向(水平と北)に向くように制御されるプラットフォーム方式が採用された。

慣性測量は、IASSを車両に搭載し、はじめに15~30分間のウォーミング・アップ後、既知点において慣性センサの軸を東西、南北及び上下方向に正確に設定するため、60分間の初期設定を行う。その後、計測モードで測量計画路線に沿って測量を開始する。測量作業は極めて簡単で、搭載した状態のまま、あらかじめ選点された計測点付近に車両を停止させ計測点とIASSとの偏心(水平、高低のオフセット量)を測定した後、これを制御部から入力し、1測点の観測(Mark, 2~3分間)が終了する。また、観測実施中の車両運行時に加速度計バイアス誤差や重力異常、鉛直線偏差等、種々の系統的誤差を検出するため、4分間に1度車両を停止(Zupt, 10秒間)させ制御表示部からその都度Zupt信号を入力する。計測点におけるMarkとZuptを実施しながら、計画路線に沿って計測を行う(写真-14)。

国土地理院周辺の平地及び山岳地帯に設定した試験コースで行った走行試験の結果、当初の目標精度である20cm程度に達することができたが、基本測量及び公共測量における基準点測量への導入については、さらに検討を要すると判断された。一方、地図作成等のためのポジショニングとしては、有効に活用できることが示されたが、機器の小型化、低価格化及び高品質化が課題とされた。



写真-14 慣性測量作業
(計測点における偏心量測定)

1. 2. 8 測地成果2000

国土地理院では、明治以来維持管理してきた日本測地

系を、最新の高精度な測位技術への対応、長年の地殻変動等によるゆがみの解消を目的として、電子基準点を骨格とする基準点体系とし、ITRF(国際地球基準座標系)とGRS80楕円体に準拠した新たな測地系に基づく成果(測地成果2000)を構築した。この測地成果2000は2002年4月1日の改正測量法の施行により、我が国の新たな測地成果として公開された。

測地成果2000の計算は、ITRF94に準拠し、元期を1997年1月1日0時UTとした。VLBIあるいはGPSにより観測を行った点については、三次元網平均により座標値を決定した。VLBI観測点については、10年余りにわたって国際観測に参加しITRF系で座標が決定している鹿島VLBI観測局を基準点として、新十津川局、海南局の座標値を決定した。これらの3点のVLBI観測点を既知点として、元期において観測値のある595点の電子基準点及び事実上の経緯度原点とも言える一等三角点「東京大正」の座標値を決定した。さらに、これらの座標値をベッセル楕円体上の緯度、経度に化成し、これらの点を与点としてベッセル楕円体上で、高度基準点測量、一次基準点測量、二次基準点測量及び震災等復旧測量の観測値を用いて順次BL網平均計算を行い座標値を決定した。さらに最新の観測値がない点の座標値は、設置当時の観測値を使用してBL網平均計算で決定した。これらの座標値をGRS80楕円体上の緯度、経度に変換して一・二・三等三角点の測地成果2000を得た。

四等三角点等については、新たに開発した座標変換プログラムTKY2JGDにより座標変換が行われた。このプログラムは一・二・三等三角点の計算結果より得られた地域毎の座標変換パラメータ(日本測地系と世界測地系の緯度差と経度差)を利用して変換を行うものであり、変換を必要とする関係者の便宜を図るために、国土地理院のホームページ上で実行やプログラムのダウンロードを可能にした。

測地成果2000の検証は1999~2000年に全国で実施され、差が大きい地域については再測量が実施された。

1. 3 宇宙技術による測地測量

1. 3. 1 人工衛星レーザ測距観測

人工衛星レーザ測距観測は、位置が既知な点と未知な点両方から高エネルギーのレーザパルスを利用して、地上から反射鏡が搭載された人工衛星までの距離を観測することにより、任意時刻における衛星の位置を決定し、さらに未知点の位置を高精度に決定する観測である。国土地理院では、海上保安庁水路部(現 海洋情報部)及び宇宙開発事業団と協力し、人工衛星を利用した大規模で精度の高い測量により、国内測地網の規正、離島位置の決定、日本測地原点の確立等を目的として、日本独自の衛星測地システムの確立をめざして測地衛星、地上観測施設の開発を行った。

地上観測装置のうち、レーザ測距装置の開発は1973（昭和48）年度から水路部と協同で進められ、1976年にその試作機を完成して鹿野山測地観測所に設置し、調整及び地上ターゲットによる試験観測を行った（写真-15）。1982年にはビーコンC衛星の距離測定に成功した。一方、測地衛星は、H-Iロケットの試験機1号機の性能確認用のペイロードとして開発され、1986年8月13日午前5時45分に宇宙開発事業団種子島宇宙センター大崎射場からH-Iロケットで打ち上げられ、測地実験衛星「あじさい」と命名された。

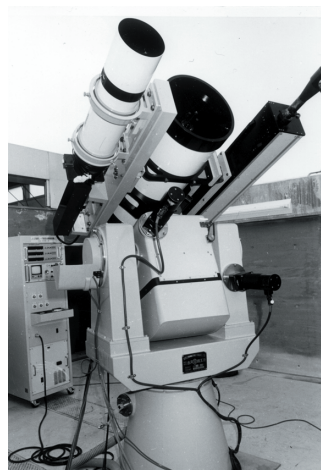


写真-15 人工衛星レーザ測距装置（鹿野山測地観測所）

あじさいは、直径2.15mの球の表面に太陽光を反射するためのアルミニウムの鏡318枚と地上から発射するレーザ光を反射するためのキューブコーナリフレクタ120組（1,436個）が装着されている。このように一つの衛星で二つの機能を持つ測地衛星は諸外国にはなく日本独自のものであった。

しかしながら、機器の老朽化や人工衛星レーザ測距観測装置とほぼ同時期に導入されたGPS及びVLBIの優位性を考慮し、人工衛星レーザ測距観測から撤退した。

なお、あじさいの観測に関する3機関（国土地理院、水路部、宇宙開発事業団）の協定に基づくスピンレート（衛星の回転数）の観測は、鹿野山測地観測所で継続している。

1. 3. 2 NNSSドップラー観測

NNSSは1961（昭和36）年、米海軍が軍事目的に運用を開始した人工衛星航法システムであり、1967年には一般船舶の航法用として民間にも公開され、その後、このシステムの持つ高精度性から、測地目的にも世界各国で広く使用された。このシステムは衛星の出す電波のドップラー効果を地上の受信装置で測定し、鉛直線偏差の影響を受けずに観測点の三次元位置を決定するもので、いかなる天候状態でも観測することができる。

国土地理院では、国内測地網の規正及び離島位置の決定のため、光学方式による人工衛星の測量を実施してきた。この方式では、恒星を背景に人工衛星を撮影する方向観測法により実施するが、天候に左右されやすく、観測装置が大がかりで測定能率が悪いことから、1976年にNNSSを導入した。

NNSSによる測量は、日本の測地系と世界測地系の結合、測地網の規正、離島の位置決定、ジオイド高の検出等を目的とし、観測は、国内はもとより南極や日韓測地技術



図-14 NNSS人工衛星観測点位置図（1976.3～1985.3）

協力（現在は、日韓測地・地図協力）に基づいて韓国においても実施した（図-14）。繰り返し観測点におけるすべての観測から求めたNNSSの1回あたりの観測の標準偏差は、広報暦で、緯度5.77m、経度4.07m、高さ4.77m、精密暦の場合は、緯度0.98m、経度0.86m、高さ0.91mであった。NNSSの観測により、①実用成果のゆがみの検出、②離島位置の決定、③測地系の原点偏位量の確定、④人工衛星ジオイドと天文ジオイドの比較、⑤測地網の規正データの取得などが実現した。

NNSSによる測量は1990（平成2）年まで行われたが、それ以降、より精度の高いGPSによる測量に移行した。

1. 3. 3 VLBI

VLBI (Very Long Baseline Interferometry : 超長基線電波干渉法) では、はるか数十億光年の彼方から地球に届く同じ電波星（準星：クエーサー）の電波を複数のアンテナで受信し、原子時計の信号とともに磁気テープに記録する。後日、記録した磁気テープを持ち寄り電波の到達時刻の差（遅延時間）を求め、その差から何千kmも離れたアンテナ間の位置関係を数mmの誤差で測ることができる。実際の観測は、24時間で数百個の電波星を対象に行う。この観測を繰り返すことにより大陸の移動や地球の自転の変化を精密に測ることができる。

(1) 国内観測

国土地理院では、測地網の規正、プレート運動及び地殻変動の検出等を目的として、VLBI技術を用いた超長基線測量を行うため、1981年より、口径5mのアンテナをもつ可搬型VLBI観測装置（写真-16）の開発を開始した。開発は、日本で初めてVLBI技術を開発した通信総合研究所（当時、電波研究所）の協力を得て行われ、1984年に完成した。同年より鹿島宇宙通信研究センター（当時、鹿島支所）の鹿島局（口径：26m、写真-17）を主局として機能確認のための実験観測を繰り返し実施した。その結果、地

上測量との比較の結果は9cmで一致し、VLBIとしての性能が確認された。なお、VLBI観測の再現性は、標準偏差で1.5cmであった。

可搬型VLBI観測装置による移動観測は、1986年から開始し、1995年まで行われた(表-7)。この間、3.8m、2.4mアンテナ

による小型システムも開発された。なお、1992年には鹿島局が通信総合研究所から国土地理院に所管替えされた。

移動観測は一定の成果があったが、GPSの発展により日本におけるVLBI観測の状況は一変し、固定局観測へと移行した。すなわち、1992年から電子基準点の全国配備が進んだことにより、日本全国の高密度、高頻度な観測は電子基準点網が担当し、VLBI観測はプレート運動の検出、ITRFの維持・高精度化、電子基準点網の点検を担当することになったのである。



写真-16 可搬型 VLBI 観測装置 (アンテナ径 5m)



写真-17 鹿島 VLBI 観測局 (アンテナ径 : 26m)

表-7 移動観測の概要

観測点	観測年	アンテナ径	主局
国土地理院(つくば市)	1984 - 1991	5 m	鹿島 26m
宮崎県新富町	1986, 1988, 1993	5 m	〃
東京都小笠原村父島	1987, 1989	5 m	〃
北海道新十津川町	1990	5 m	〃
岩手県水沢市	1991	5 m	〃
静岡県相良町	1992	5 m	〃
国土地理院鹿野山測地観測所(千葉県君津市)	1993, 1994	2.4m	鹿島 34m
和歌山県海南市	1993	5 m	鹿島 26m
富山県砺波市	1994	2.4m	鹿島 34m
大韓民国水原市	1995	3.8m	鹿島 26m

固定観測局の整備は1994年から開始され、1995年には口径3.8mのアンテナを有する新十津川局が設置された。その後、1997年には口径10mのアンテナを有する小笠原諸島の父島局と鹿児島県の始良局、1998年には世界でも高性能な口径32mのアンテナを有するつくば局(写真-18)が国土地理院構内に設置された。

現在4局4基線を有して年6回の国内観測を実施しており、この観測には、大学、国立天文台等国内の他の機

関の観測局も随時参加している。

(2) 国際観測

国土地理院における国際観測は鹿島局の移管を受けてからである。

鹿島局は通信総合研究所によって1968(昭和43)年に設置され、1984年から通信総合研究所の下で、NASA(米国航空宇宙局)が主導のCDP(地殻力学観測計画)に参加した。国土地理院に移管されてからもDOSE(個体地球力学観測計画)やCORE(地球回転連続観測事業)などの国際共同観測に参加してきたが、現在ではつくば局が国際共同観測の任を担っている。

1999年にIVS(国際VLBI事業)が発足し、国土地理院を含めた全世界のVLBI関連機関が加盟し、IVSの下で国際VLBI観測等を実施することになった。現在、IVS主導による複数のプロジェクトに参加し、世界の各観測局と共に年30回の24時間観測のほか、2002年から地球回転パラメータUT1を求めるための1~2時間の観測をドイツヴェッツェル局との間で実施している。

なお、鹿島局は老朽化のため2002年度中に解体される。



写真-18 つくば VLBI 観測局 (アンテナ径 : 32m)

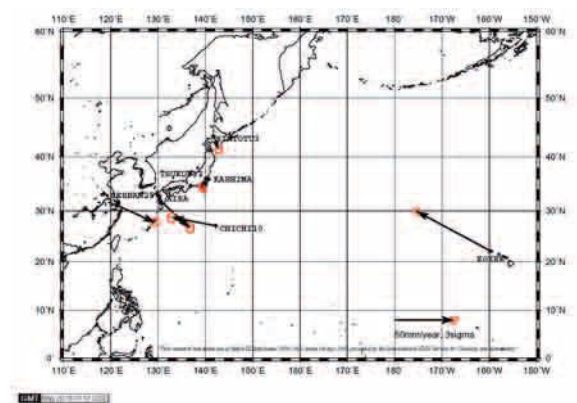


図-15 グローバル解析により得られた日本周辺の移動速度場

(3) VLBI観測の成果と課題

VLBI観測による成果は、プレート運動の検出(図-15)、位置基準の維持(ITRFの維持・高精度化、電子基準点網の点検)、GPSの運用支援(地球回転パラメータの決定)など、測量行政や地球科学及び地球変動研究に貢献している。特に、1987年と1989年に父島で実施した観測により、フィリピン海プレート上に位置する父島が鹿島局に対して年間約3.7cmの割合で移動していることが確認された。これは、東海地震を発生させるフィリピン海プレートの動きを初めて実測により検証した観測であった。また、2002年4月1日から公開された測地成果2000の計算では、鹿島VLBI観測局における長年の観測により得られたITRFの

位置座標が基準となっており、移動観測で得られた新十津川局、海南局の観測データも利用された。

これまでVLBI観測を進めていくなかで、高精度化や効率化を図るため、低雑音増幅器や信号伝送系等の改善・統合化・プログラム開発、温度変化によるアンテナの熱変形監視システムの構築、各作業のマニュアル化、遠隔観測システムの構築等に取り組んできた。

今後の課題としては、

- 1) リアルタイムVLBIを目指した光結合による次世代VLBIシステムの導入
- 2) 観測成果を迅速かつ高精度に求めるためのグローバル解析の研究
- 3) 高精度化のための相関処理システムの実用化
- 4) 機動観測に耐えうる超小型VLBI観測システムの開発(アンテナ口径1m程度)
- 5) 今後のVLBI観測を維持するための観測時にノイズとなる次世代携帯電話対策

などが挙げられる。

1. 3. 4 GPS

GPSの登場は、1960年代に実用化された光波測距儀以上に、国土地理院の測量の歴史の上で画期的なものである。従来、測量作業の効率を大きく左右してきた天候と視通の問題から開放されたことも重要であるが、電子基準点というアイデアによって観測の連続化・自動化が図れるようになったこと及び全く新たな位置情報インフラとしての性格を有することの意義は非常に大きい。

(1) 最初のGPS受信機

国土地理院がGPS受信機を最初に導入したのは、1987年3月のエアロサービス社製マクロメータⅡである(写真-19)。このGPS受信機は、現在、測量に用いられている小型軽量の機器からは想像できないような大掛かりなもの(アンテナが17kg、ラックに収められた受信機部分の重量が60kg)であった。井上(1989)は、

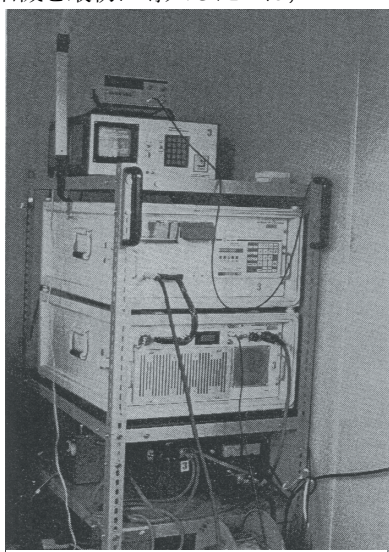


写真-19 マクロメータⅡ

L1, L2の2波の電波信号を、直交ダイ

ポールアンテナで受信し、コード情報を使用しないで搬送波を再生する。測定データは、ディジタルカセットテープに記録する。コード情報を使用しないため、観測の前にカセットテープに観測計画に従ってテープを作成しなければならない。テープには、受信点の概算座標及び衛星の軌道情報を与え、各衛星のドップラシフト量を計算し、予報値の近くに周波数の窓を開いて受信を行う。なお、受信機本体でGPS時刻を受信することができないため、別のGPS受信機(オズボーンTTR-5)を使用し、観測前に受信機間の時刻同期を行う。観測終了後周波数カウンターを用いて、周波数標準の変化量を測定する。また、必要に応じて衛星からの軌道情報(広報暦)をパソコンに記録する。1回の観測で取得できるデータ数は、最大60個で、取得間隔は任意に設定できる。

と当時のGPS受信機による観測の煩雑さを記している。

(2) GPSによる実験観測

そういった煩雑な観測でも精度が得られれば良いのであるが、国土地理院がGPSに取り組みを開始した当時は日本で観測可能なGPS数が十分ではなかったため、十分な精度が得られていたわけではなかった。増田(1989)は、

現在は、わずか7個の実験衛星しか利用できず、また、これらは北米大陸上で最も有利な配置となるように軌道が調整されている。従って、測位精度に大きく影響する衛星の空間配置が、わが国上空では必ずしも良好といえず、観測可能な時間も1日に2時間程度と極端に短く、観測時間帯も1年のうち半分は夜間となっている。このような理由で実験観測の結果も、欧米の1ppmをコンスタントに超える高精度測位や、従来の測量方法を上回る効率等と比較して、精度、効率の二面において、若干劣っているのが現状である。

と苦しい観測状況を記している。

制約のある観測条件の下で精度向上のためにできることのひとつが人工衛星軌道の精密決定であった。このため、新十津川、つくば、鹿屋、父島の4ヵ所に軌道追跡局を整備し(写真-20)、国土地理院独自の軌道決定を開始している(辻, 1991)。

また、精密測地網一次基準点測量、二次基準点測量、地殻変動観測といった光波測距儀で実施されていた従来の測量にGPSを使用する試みが1990年代の前半に精力的に行われた(根本, 1990; 鈴木他, 1991; 阿部他, 1993)。こういった試みを経て、1992年のGPS衛星の完全配備以降、GPSを利用した測量が実用化するに至ったのである。

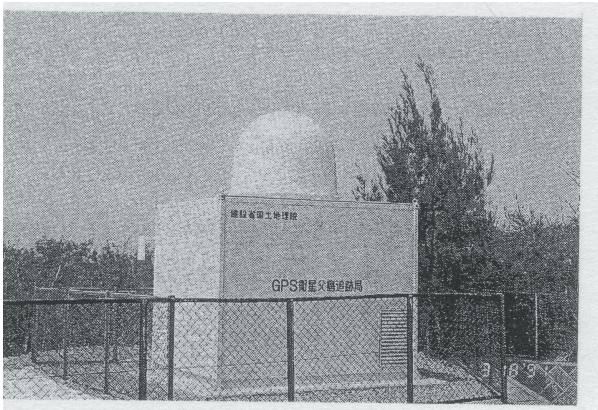


写真-20 軌道追跡局

縦 2.2m, 横 3.0m, 高さ 2.3m の局舎の内に受信機や原子時計が収納されている。“おぼけのQ太郎”のように見えるのは、アンテナレドーム。この中に GPS アンテナが設置されている。

(3) 電子基準点登場

GPSを利用して、現地での測量作業なしに地殻変動を自動的に取得するという現在の電子基準点につながるアイデアは、GPSが実用化される以前から構想されていた。例えば、細野 (1989) は、

GPSの個々の観測点のデータをテレメータ化し、1局において集中監視することは、十分可能な技術である。

と現在の電子基準点の姿を予想している。

また、電子基準点の用語が初めて使用されたのは国土地理院技術協議会の下に設立された基準点体系分科会による最終報告「新しい基準点体系を求めて」(1993年3

月)の中である。この報告書では、電子基準点を中核とした新しい基準点体系が構想されている。

しかしながら、実際に電子基準点の本格的整備が開始されたのは、1993年度に南関東・東海地域で合計110ヵ所に設置されたことを嚆矢とする。1994年4月から運用が開始されたこのシステムはContinuous Strain Monitoring System with GPS by GSIを略して、COSMOS-G2という名称で呼ばれていた(図-16)。岩田 (1994) は、

プログラムは、毎日自動運転をすることを基本に作成されている。ただし、地殻変動の少ないと思われるGPS観測局に対しては、データのダウンロードを1日から10日までの期間で任意に設定することも可能である。

と記しているように、当時は現在と異なり、24時間連続観測の運用がされていたわけではなかった。

翌1994年度には、全国100ヵ所に電子基準点が整備された。こちらのシステムはGPS Regional Array for Precise Surveyingを略して、GRAPESと呼ばれていた(図-17)。1994年10月1日に運用を開始したGRAPESの登場は、本格運用から数日を経たずに発生した1994年北海道東方沖地震による地殻変動を検出したことにより劇的なものとなった。従来、多くの年月を要する基準点上の現地測量によらなければならなかった地殻変動の検出が電子基準点により数日のうちに検出されたことは多くの関係者に衝撃を与えたものである。

1996年度には、COSMOS-G2とGRAPESが統合されたシステムになった。システムの名称はGPS Earth Observation Network Systemを略したGEONETである。飯村他 (1997) は、

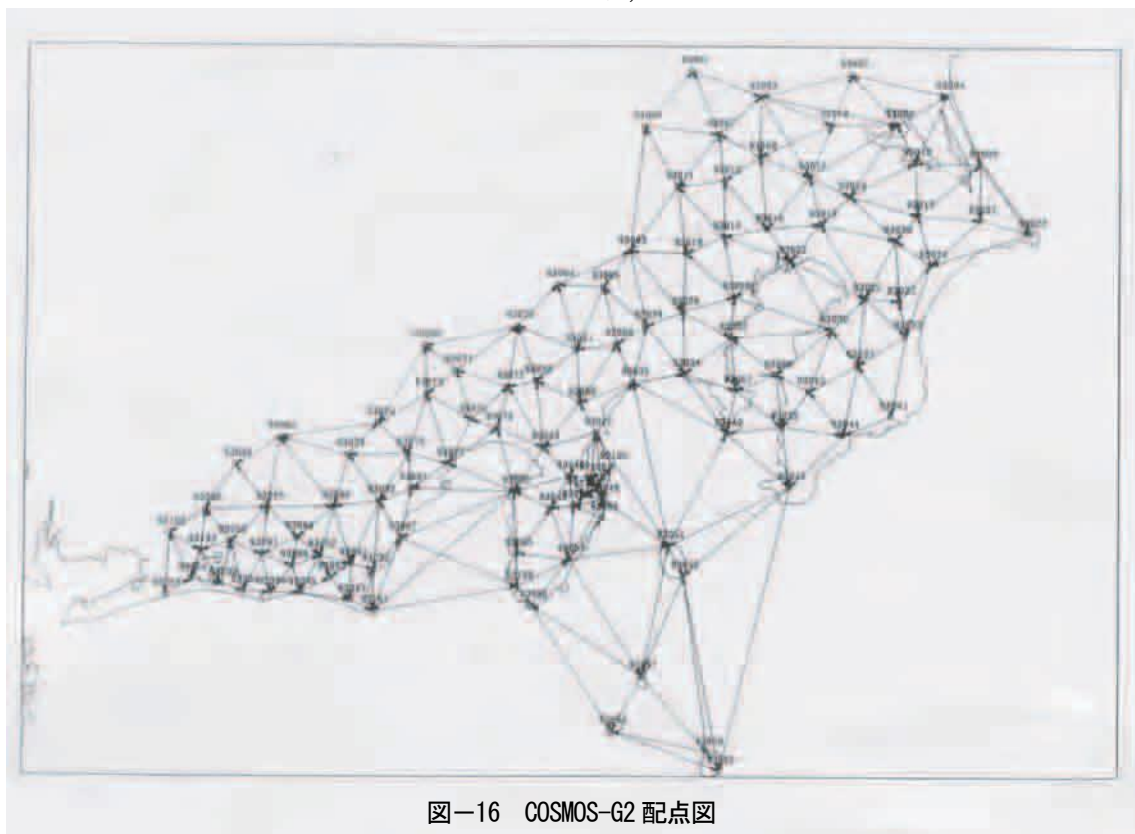


図-16 COSMOS-G2 配点図



図-17 GRAPES 配点図

国土地理院が本格的なGPS連続観測を開始してから3年が過ぎようとしている。国土地理院のGPS連続観測は、当初、地域別に運用していたが、1996年度からGPS観測点を高密度に配置するとともにシステムの自動化・高精度化等の機能を向上させて全国を統一するGPS連続観測システムとして運営を開始している。1997年4月からは、さらにシステムを向上させた約900点の世界最大級のシステムとして運用することとなる。

と記している。

なお、期を同じくして国土地理院に測地観測センターの組織が認められ、電子基準点中央局等の施設を収めた宇宙測地館が建設されて、電子基準点による観測体制の整備が図られている。

電子基準点(写真-21)は、1996年度に測量法施行規則に測量標として追加され、2001年4月には世界測地系を測量の基準とする改正測量法が施行されたため、名実



写真-21 電子基準点写真

写真-22 富士山に設置された電子基準点
(記者発表資料)

ともに基準点として公共測量等にも利用されるようになっている。

この間、太陽電池パネルと風力発電装置、データ転送用の衛星携帯電話を備えた機動観測用のREGMOSが開発され、岩手山、有珠山等において活躍している。

また、2002年度には富士山山頂や日本の最東端の領土である南鳥島への設置も含めて、電子基準点を合計1,200点まで増設する予定である(図-18、写真-22)。

(4) 阪神・淡路大震災での活躍

1995年兵庫県南部地震によって引き起こされた阪神・淡路大震災の際の測量分野におけるGPSの活躍は強く印象に残るものである。当時、東海・南関東以外の地域では電子基準点は約120kmの点間距離でしかなかったが、それでも地震に伴う数cmの地殻変動を検出している。

電子基準点のある場所では数cmの地殻変動しかなかったが、震源断層に近いところでは1mを超える地殻変動が発生している。地震の直後に一・二等三角点上で国土地理院が実施したGPSを用いた高度基準点測量は密度の高い地殻変動を捉えている。こういった測量の効率的な実施も視通障害の影響を受けないGPSなしでは考えられない。石原他(1995)は、

現在では、GPS連続観測が導入されたおかげで概略の変動量はほとんど即日に分かるようになった。もちろん、本稿で述べた測量はGPS連続観測のみではないが、これに触発されて他の測量体制も昔とは比べものにならないほど速く組織されるようになったことは否めない。このことは単に地殻変動研究上の意味あいばかりではなく、震災の復興事業に必要な基準点の復旧を速やかなものとした点においても大きな意味を持つ。本稿執筆中の今も精力的に復旧測量が進められている。この測量結果が社会のいろいろな場面で有効利用されることを望んで止まない。

と記している。

また、1995年度には被災地域の復興に資するために1級基準点に相当する復興基準点を国土地理院が整備している。大量の復興基準点を比較的短時日に設置できたのもGPSによる測量の効率化の恩恵をこうむっている。国土地理院と社団法人日本測量協会等により設立された震災復興測量協議会はGPSの固定観測局を被災地に設置して、パソコン通信で受信データを提供するサービスを実施している。この方法により最低1台のGPS受信機を有していれば測量が可能となった。現在の電子基準点の測量利用の先駆けともいうべき同システムには、394日間に5,411件の利用があったことが報告されている(飯村他, 1996)。

- (5) 電子基準点を利用したリアルタイム測位
GPSを利用してリアルタイムに正確な位置を求めるS測

量方法の確立にも国土地理院は取り組んできている(飯村, 1994)。これらの取り組みは、リアルタイムキネマティック法による標準的な作業方法・機器等を規定した「RTK-GPSを利用する公共測量作業マニュアル」(国土地理院技術資料, 2000) となって実を結んでいる。

電子基準点をRTK測量の基地局として利用できれば、測量の効率化に大きく寄与すると考えられる。後藤他(1998)は、

国土地理院は、郵政省と共同で電子基準点を利用したRTK-GPSに関する公開実験を1997年から実施している。この実験内容は、関東及び関西のそれぞれ6点ずつの電子基準点にDMCA無線と呼ばれるデジタル移動無線装置を設置し、実験に参加している利用者へデータ提供を行っている。

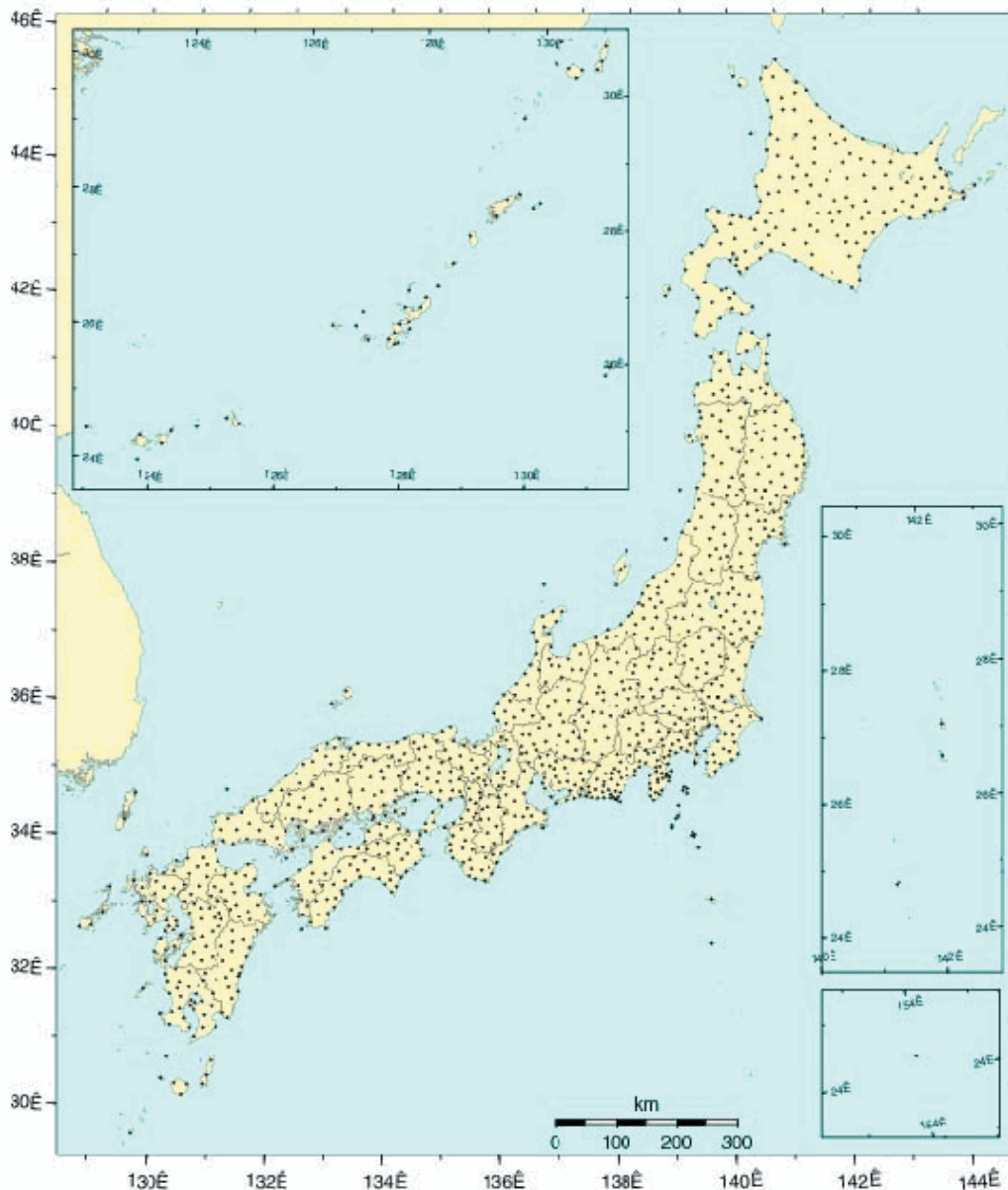


図-18 2002年度電子基準点配点図(予定)

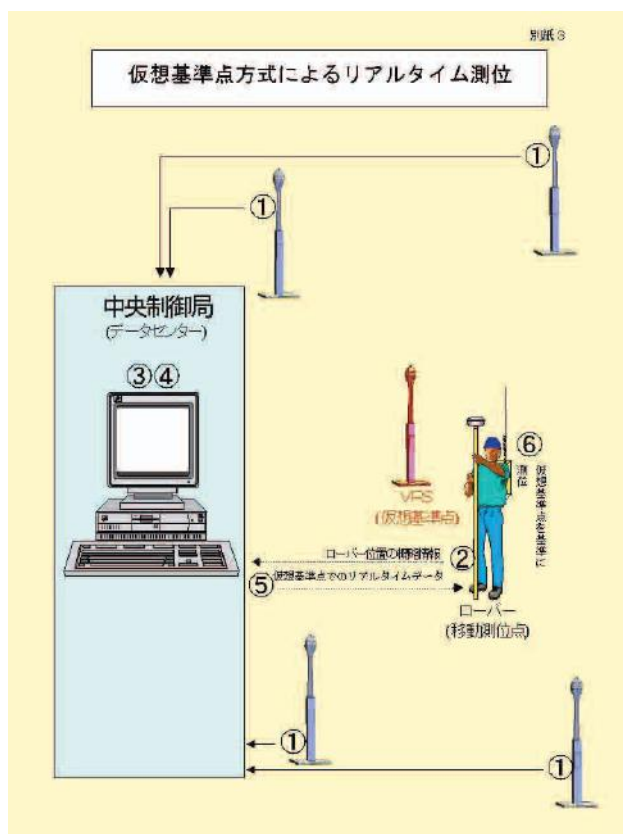
実験に先立ち同年7月に「RTK-GPS実験推進協議会」が設立され、参加の申し込み受付、機器の無償貸し出し、技術指導、実験結果報告書のとりまとめなどを行っている。現在約220社（名）の会員が実験に参加し、精力的に取り組んでいる。

と国土地理院の取り組みを紹介している。

しかしながら、従来のRTK方式では基準局から10km以上離れると高精度で測位できなくなることがわかっている。平均的な点間距離が20～25kmである電子基準点を基準局として使用することを想定すると、測位不能な地域が発生してしまうことになる。この欠点を補う方法が、近年開発された複数の基準局を使用して測位を行う仮想基準点方式である（図-19）。

国土地理院では仮想基準点方式によるリアルタイム測位の実用性を実証するために、2000年度と2001年度に実験参加者を公募して電子基準点によるリアルタイム測位の公開実験を実施している（都筑他、2001）。

こうした背景の下、電子基準点を利用したリアルタイム測位に関する民間からの期待も大きく、2000年8月に社団法人経済団体連合会から提言された「一つの電子政府実現に向けた提言」の中で「リアルタイムの高精度位置情報は、災害対策、ITS、カーナビ、デジタル地図など、国民生活や企業活動の基本的なインフラとして期待できることから、電子基準点の拡充、高機能化や適切な保守等を図る必要がある」と触れられている。



仮想基準点方式によるリアルタイム測位の原理

- ①電子基準点のリアルタイムデータは中央制御局（データセンター）において、リアルタイムに配信されている。
- ②ローバー（移動測位点）から携帯電話等で、中央制御局にアクセスし、ローバーの概略の位置を伝送する。
- ③中央制御局は、ローバーの測位に利用可能な3点以上の電子基準点を決定する。
- ④中央制御局で決定した電子基準点の位置と位相データから、ローバーの近くに仮想の基準点を設置し、仮想基準点で観測されるであろう位相データを生成する。
- ⑤中央制御局からローバーに仮想基準点の位置、生成された位相データを携帯電話等で伝送する。
- ⑥ローバーは、中央制御局から伝送された仮想基準点の位置、位相データ及びGPS衛星から受信した位相データを用いて位置を決定する。

図-19 仮想基準点方式によるリアルタイム測位

また、2001年には民間企業等約100社により構成された「電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会」が設立され、国土地理院他関係機関に電子基準点リアルタイムデータの利用を求める要望書が提出されている。

国土地理院では、従来、電子基準点に対してはダイヤルアップにより接続し、1日1回観測データをダウンロードしていたところであるが、常時接続を推進しリアルタイムデータ提供可能な基盤の構築を進めている。2002年5月には、関東・中京・京阪神地域等の大都市を中心として200点の電子基準点についてリアルタイムデータの提供を開始している。また、2002年度中には全国をカバーする電子基準点のリアルタイムデータを提供可能な基盤が整備される予定である。

1. 4 ジオイド・重力・地磁気測量

1. 4. 1 ジオイド測量

ジオイドとは、地球の等重力ポテンシャル面のうち、平均海面（海流、潮汐、気象等の影響を除いた仮想的な海水面）に一致するものと定義され、それを表現するには、準拠楕円体からジオイドまでの距離（ジオイド高）を用いる。ジオイドは、地球物理学的に見た地球の形といえ、その決定は測地学の基本的な課題である。また、実用的には、陸上の標高の基準面を与えるものである。

この章では、国土地理院におけるこれまでのジオイド研究の流れを紹介する。

（1）鉛直線偏差と天文ジオイド

天文経緯度と測地経緯度の差を鉛直線偏差という。鉛直線偏差はある点におけるジオイド面と準拠楕円体面の間の傾きをあらわしている。

国土地理院では、測地網の方位規正を目的として1947（昭和22）年以来350点ほどの三角点で天文経緯度観測を実施し、天文経緯度と鉛直線偏差を算出してきた。西（1982）はこれらの鉛直線偏差のデータを用いて、精密測地測量の網平均の際に必要な測点の楕円体高算出を目的として、surface fitting法により天文ジオイドモデルを作成した。この方法は、ジオイド面が緯度、経度の多項式で近似できるとし、鉛直線偏差とジオイド高の関係式と鉛直線偏差のデータから最小二乗法で多項式の係数を決定するというものである。西（1982）では次数10次と20次について東京の測地原点のジオイド高を0としたジオイドモデルを作成した。その推定精度は原点から1,000km離れたところで約2mとしている。

（2）重力ジオイド

ジオイドを決定するもう一つの方法が、重力異常データを用いて、ストークス積分によりジオイド高を計算する方法である。こうして決定されたジオイドを重力ジオイドと呼ぶ。天文ジオイドでは原理的に、天文測量を実施できる陸域のジオイドモデルしか作成できない。一方、

重力ジオイドは海域のジオイドも決定できるが、全球の重力異常データが必要である。

重力ジオイドの研究は、重力計の発達により日本やその周辺の重力データが増加するにつれて、活発に行われるようになった。国土地理院では、Kuroishi (1995) が、国土地理院の一等、二等重力測量データと名古屋大学の陸上重力データ及び日本海洋データセンターで編集された海上重力データを用いて日本とその周辺の3分×3分分解能の重力ジオイドモデルJGE0ID93を構築した。計算には全球重力モデルOSU91Aを参照し、ストークス積分は二次元FFT法によっている。

その後、国土地理院は重力ジオイドモデルの高精度化に取り組み、高精度な全球モデルEGM96と、国際重力局の広範囲にわたる海上重力データを使用し、ストークス積分を厳密な一次元FFT法により計算した、より高精度な重力ジオイドモデルJGE0ID98を発表した（Kuroishi, 2001a；黒石, 2000）。さらに、2001（平成13）年にはより稠密な陸上重力データを使用した1分×1.5分分解能の高精度な重力ジオイドモデルJGE0ID2000を発表した（Kuroishi, 2001b）。

（3）ジオイド測量と混合ジオイドモデル

1990年代に入って一般化したGPS測量はジオイドを取り巻く状況に大きな影響を及ぼした。従来の測量技術では、ジオイド高は直接測定できない量であった。それが、GPS測量を用いれば楕円体高が直接測定できるため、その点の標高を別途水準測量で決定すれば、その差としてジオイド高が直接測定できるようになった（ジオイド測量）。

その一方で、GPS測量の普及に伴い、GPSで求まる楕円体高と日常使用される標高の間の変換パラメータとして高精度なジオイドモデルが、実用的な面から切望されるようになった。そのためには、日本の標高体系に適合し、日本の標高基準面の三次元的な位置を与える意味でのジオイドモデルが必要となってきた。

そこで国土地理院は、重力ジオイドモデルをジオイド測量結果に適合させることにより、日本の標高基準面の三次元位置を与える混合ジオイドモデル「日本のジオイド96」を作成した（黒田他, 1997）。構築は、以下の手順で行われた。まず、1995（平成7）年に全国840点以上の水準点上でGPS測量を実施し（GPS/水準測量）、その結果得られた楕円体高と水準点の標高からジオイド高を算出した。次に、各GPS/水準測量点においてGPS/水準測量によるジオイド高と重力ジオイドJGE0ID93の較差を計算した。それを最小二乗コロケーション法により内挿し、重力ジオイドモデルへの補正グリッドを作成した。これをJGE0ID93に加えて、日本の水準体系に適合させた5kmメッシュの混合ジオイドモデル「日本のジオイド96」を作成した。

その後、2002（平成14）年に、測地系の世界測地系への移行、標高システムの正標高体系への移行が行われた。

それに伴い、新しい測地系に準拠し、かつ、それに強く拘束された新しいジオイドモデルが必要となった。そこで安藤他(2002)は、新たに2kmメッシュの高精度混合ジオイドモデル「日本のジオイド2000 (GSIGE02000)」を構築した。構築には最新の重力ジオイドモデル JGE0ID2000を、1995 (平成7) 年以降に実施されたGPS/水準測量のデータを再解析して計算したジオイド高に適合させる手法を取った。GPS/水準測量のうちGPSデータは観測当時に稼働していた電子基準点の成果に強く拘束させた形で全国同時網平均を行い、楕円体高を算出した。標高についてはGPS観測時点に一番近い水準測量データを用いて、水準原点一点固定・正標高補正により算出した。こうして日本の新しい測地体系に準拠したジオイド高を再計算した。このジオイド高を用いて、「日本のジオイド96」構築と同様な手順でJGE0ID2000を最小二乗コロケーション法で補正し、「日本のジオイド2000」を作成した(図-20)。なお、離島域については別途ジオイド測量を実施して独立にジオイドモデルを作成し、「日本のジオイド2000」に追加していくこととした。「日本のジオイド2000」は2002 (平成14) 年4月に刊行され、現在、公共測量等で使用されている。

「日本のジオイド2000」の精度としては、最小二乗コロケーションによる内部誤差はおおよそ4cmと見積もられている。また、2000 (平成12) 年に北海道地域で電子基準点において標高取り付け観測を実施したが、その結果より算出した電子基準点でのジオイド高とモデルを比較すると、その較差の標準偏差はおおよそ6cmであった(安藤他, 2002)。

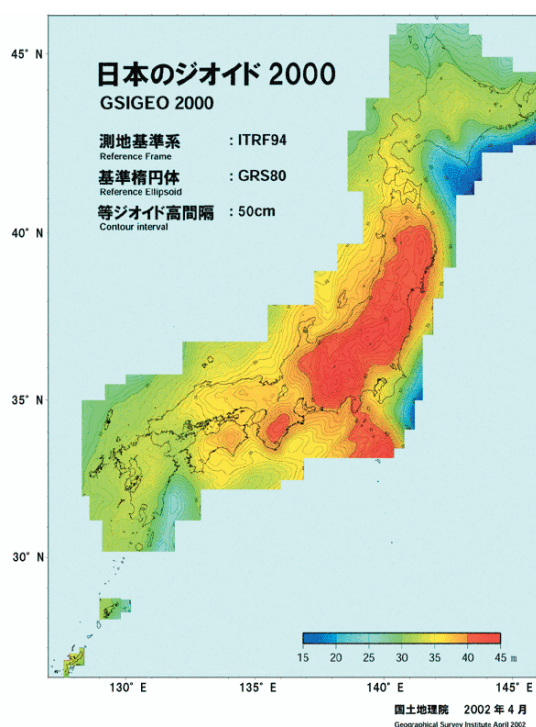


図-20 「日本のジオイド2000」

1. 4. 2 重力測量

重力の測定には、ある点の重力値そのものを測定する絶対測定と、2点間の重力差を測定する相対測定がある。相対測定は絶対測定に比べて容易に行えるため、通常、ある地域の重力を測定する場合には、重力値が既知の基準重力点の周りに相対測定による重力網を構築する。この章では、国土地理院が実施してきた重力測量について紹介する。

(1) 重力網の構築

(a) 国土地理院による重力測量の開始

戦前においては、我が国の重力網は測地学委員会によって重力振子を用いて実施されてきた。それはドイツのポツダムでの絶対測定値を基準とする比較測定結果(ポツダム系)に準拠したものである。このポツダム系は数mgalの精度を持つとされた。

しかし、戦後、迅速に精度の高い相対測定のできるスプリング式の重力計が開発され実用化されると、ポツダム系に変わる高精度な重力系を作ることが必要となってきた。そこで、1951 (昭和26) 年の国際測地学地球物理学連合(IUGG)及びその一部門である国際測地学協会

(IAG) 総会において、高精度な重力系構築を目的とした国際重力比較測定推進のため、各国は半永久的な重力基準点を設置することが決議された。それを受け、文部省の測地学審議会は、日本の重力基準点を京都におくことを決定した。

このような背景の元、国土地理院の前身である地理調査所は、地理調査所が1951 (昭和26) 年に開発したGSI型重力振子装置(測地第一課, 1953c) (写真-23) と同年に購入したノースアメリカン重力計を用いて、1952 (昭和27) 年より日本国内における重力測量を開始した。(測地第一課, 1953a)。当初の目標は、各国の重力測量を関連させるための5点(京都, 札幌, 水沢, 柿岡, 熊本)の国際基準点を重力振子装置で測定、国内の重力網を規正するための数十点の一等重力点、全国の水準点、三角点等に約1万点の二等重力点を設置、重力計で観測し、

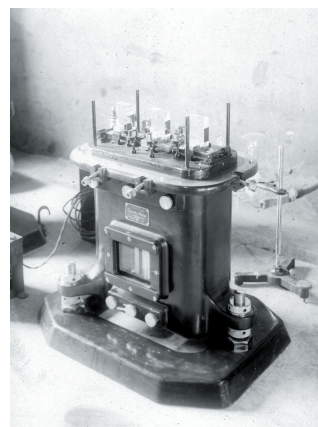


写真-23 GSI 型重力振子装置

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ー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ってくると、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量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

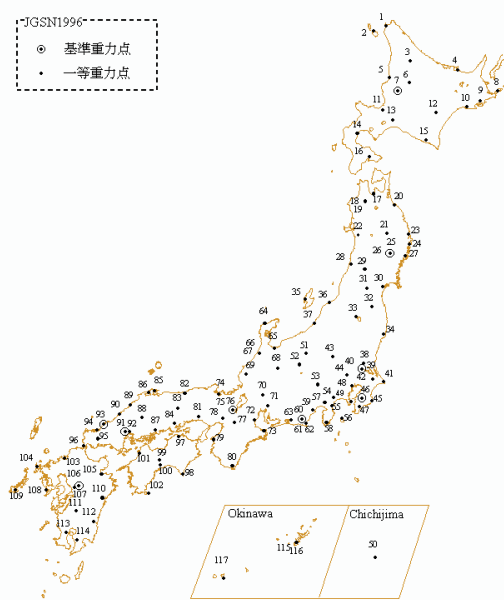


図-21 日本重力基準網 1996（JGSN96）配点図

（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で地殻内部の変化を推定するというもの

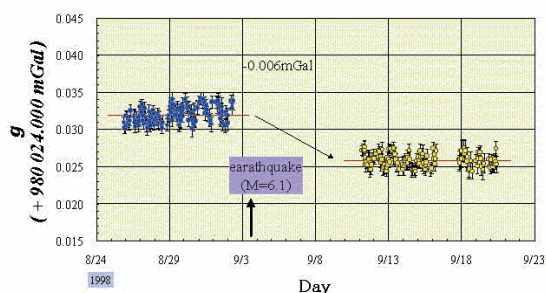


図-22 岩手山における重力値の時間変化

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

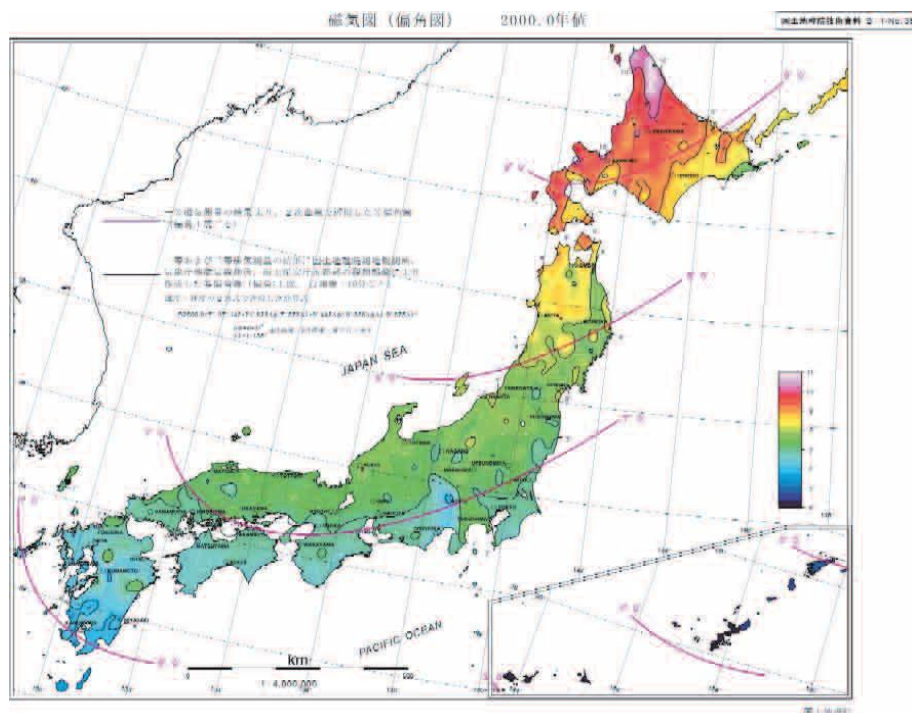


図-23 磁気図 2000.0年値 （偏角図）

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、一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

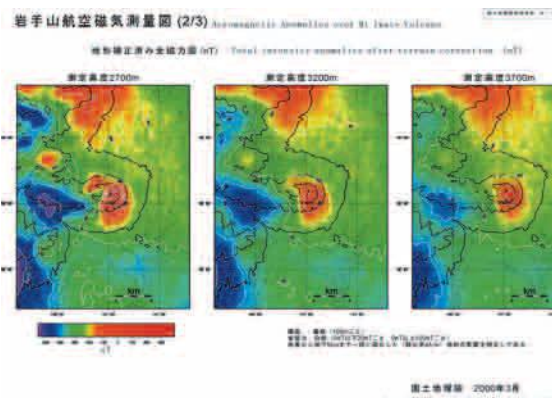


図-24 岩手山航空磁気測量図

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

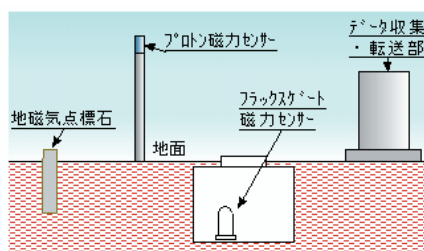
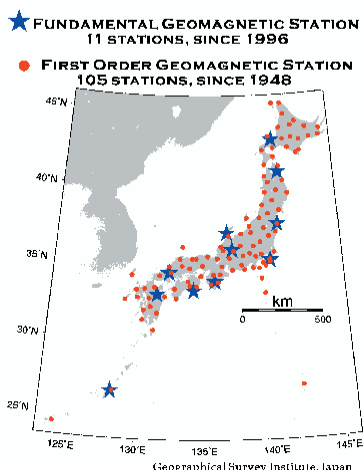


図-25 （左）地球電磁気連続観測装置（星印）と一等磁気点（赤丸）の配点図
（右）地球電磁気連続観測装置模式図

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、近代的測量によって、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

地震が起こるという、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的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っているのである。

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、マンテ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ろう。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ヵ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係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。