

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。

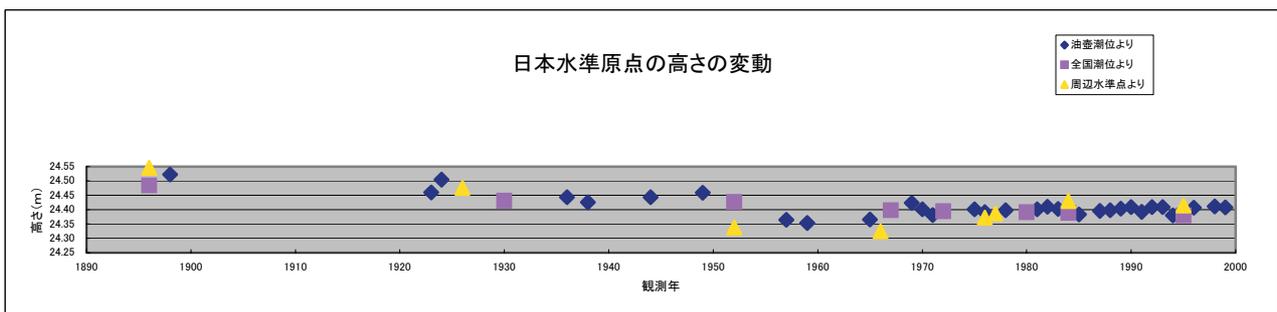
図－1は、油壺験潮場固定、全国の複数験潮場固定及び関東周辺の水準点固定の3通りの解析結果から得られた水準原点の高さの変動を示したものである。それぞれの方法で求めた水準原点の高さの変動傾向はよく一致しており、実用上特に変更を要する程の差はないものと判断され今日に至っている。

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、この繰り返して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 Dini11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。

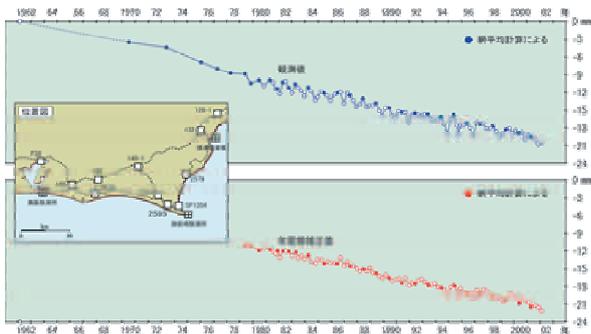


図-2 水準点2595 (浜岡町) の高さの経年変化

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。

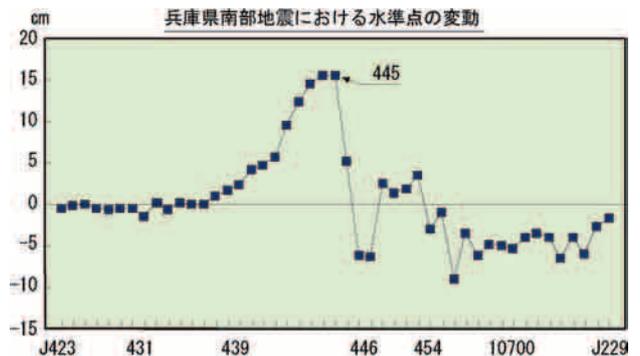


図-3 水準点の変動

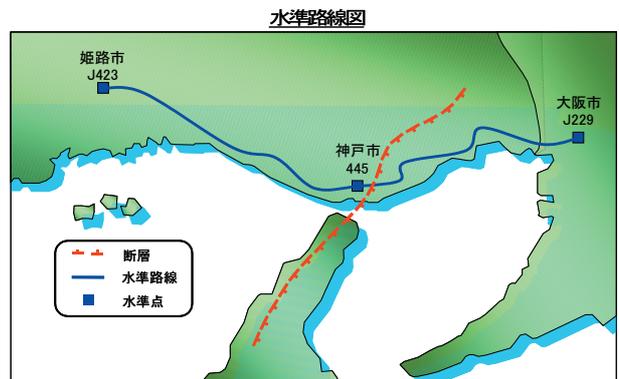


図-4 兵庫県南部地震における改測路線図

(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 揚げ上がり

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回的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。

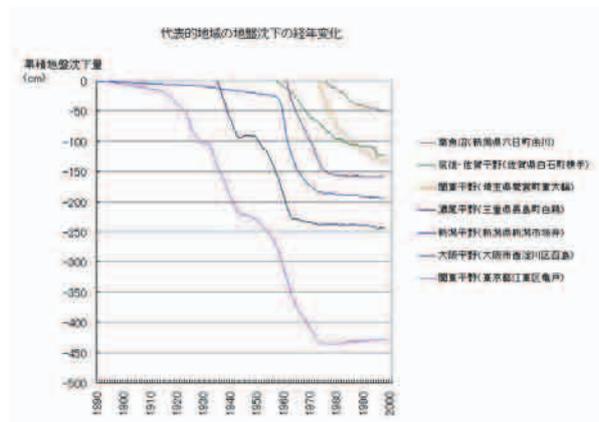


図-5 代表的地域の地盤沈下の経年変化

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。

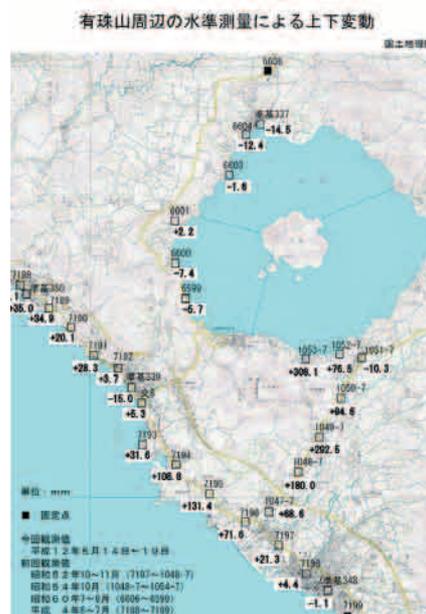


図-6 噴火前と噴火後