

日本列島をはかる——測地基津点測量をめぐって——

北 郷 俊 郎*

わが国が、近代的な測地測量を開始してから百年を経過した。日本列島をおおう三角点、水準点などの測地基津点は、その根元的な意味合いとして、その土地の座標点を具体的に表示しているということである。これらの点の持つ座標値は、地殻運動、自転速度変化、自転軸の移動、大陸移動、地球構成物質の状態変化や移動などの永年変化、または、脈動、地震、地球振動等の短周期変化の影響を受けて変化して止まない。こうした地球の動的状態を時々刻々把握するためには、一方では、天文学的観測による地球自転速度の究明や、人工衛星のドップラー観測による結果を加えた極運動の追求が必要であり、また一方では各種の測地学的方法による土地、および空間の測定の繰り返しと、できるだけ多数の地点における測地学的ならびに地球物理学的な同時連続観測が実施されなければならない。

国土地理院においても、明治以来の測地測量の地球科学への貢献を土台として、近年の光波測距技術の進歩、人工衛星の測地利用の発展等の計測技術の進歩により、新たな、昭和期の測地測量を、「地震予知の実用化」を目指すことを、一つの大きな柱とする、精密測地網計画に、衣更えする気運となって来たので、以下御紹介を試みたい。

わが国は、すでに活発な造山活動を停止した欧米諸国と異なり、生きている国土である。日本列島はアジア大陸北西部と西太平洋の2大構造の接線に位置し、現在も活発な造山活動、世界でも有数の地震、火山活動をくり返している環太平洋弧状列島の一部を成している。陸地の骨格は列島に平行して走る新しい褶曲山脈から成り海岸線は土地の隆起沈降により肢節に富み、多くの湾と岬を形成している。列島の海洋側には深さ10軒に達する日本海溝、伊豆マリアナ海溝、南海舟状海盆および琉球海溝が走り、次いで重力異常帯、地震帯および火山帯が並列して走っている。内陸部には活断層が、網の目のように走って居り、これらはいつ動いて地震を起すか、分らない状況にある。また国民の多数は、最新の地質年代にできた沖積平野に住み、地盤が軟弱なため、大地震の際は、家屋の倒壊などの被害にあって来た。この様に最盛期の生きた造山運動帯に位置する国は先進国中わが国を抜いて外にはない。このようにわが国が、高度福祉国家

を目指すための前提としても、変動する国土の、運動メカニズムの解明を目指す、動力学的な追跡調査が重要となってくる。

測地測量は土地に関するあらゆる事業の基礎となるもので、人類文明の発祥と同時に発せし、アレクサンドリア時代のエラトステネスは測地学の祖といわれている。(本誌昭和48年1月号 地球をはかる参照)

近代的測地事業は、他の諸科学と同様、近世西欧諸国に始まった。17世紀にフランスで地球の形状、大きさをきめるための三角測量が実施され、引続き、この測量にもとづく近代的地図作成法が確立した。

我が国では、明治維新による近代政府誕生と共に測地事業が始められた。明治4年工部省に測量司がおかれ、組織的な土地調査と地図作製の機関として、全国的な三角測量に着手した。その後測地事業は、陸軍に統合され、参謀本部陸地測量部が設立され、明治15年頃から始まった。全国の測地測量は大正5年に完了した。

明治の測地三角網は一、二、三等三角点からなり、一等三角本点(平均距離45km, 330点)、一等三角補点(25km, 619点)二等三角点(8km, 5048点)および三等三角点(4km, 32,675点)の順序で、それぞれの三角網を構成して設置された。一方土地の高さの決定には、全国主要国道に2km毎に一等水準点(現在1500点)がおかれ大正2年に第一回の全国測量が完了している。より低次の四等三角測量は、第二次大戦後、より密な基準点、土地利用の高度化と地籍の明確化のための国土調査を目的として始められ(平野部2km²、都市部1km²ごとに1点)だが、現在では5万分の1縮尺図作成の国土基本図事業のための基準としての両面から実施中であり既に全国に3万2千点をこえる四等三角点整備されたが、その座標は上位三角網から決められている。

さて、我が国の測量における精度は、他の精密物理実験や天文観測のそれに比肩できるもので、例えば一等三角測量における角度測定の精度は $\pm 0.6 \sim 0.8 (3 \times 10^{-6})$ 、一等水準測量においては数10軒離れた2点間の比高を $\pm 1\text{cm}$ の誤差($2 \sim 3 \times 10^{-7}$)で決定できるものであったので、戦前から多くの学術調査に利用され、とりわけ大地震後の復旧測量の結果を用いて、地震発生の機序の解明に大きな貢献があった。

その例として、大正12年の関東大地震による南関東地域の地殻の水平変動と上下変動とを図1-a, bに示した。

* 建設省国土地理院

T. Hokugo: Measuring the Japan Island

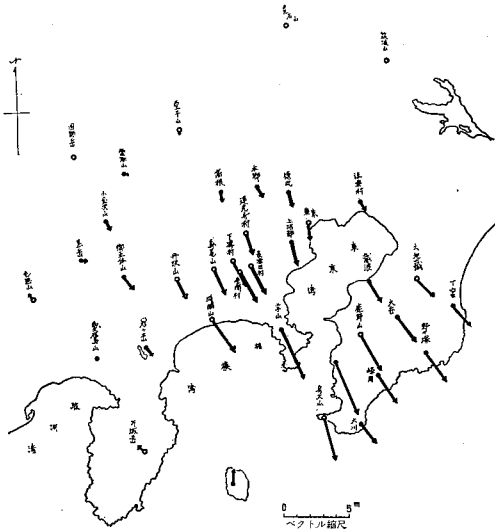


図1-a 関東大地震に伴う一等三角点変動図
(晃石山および国師岳を不動と仮定)

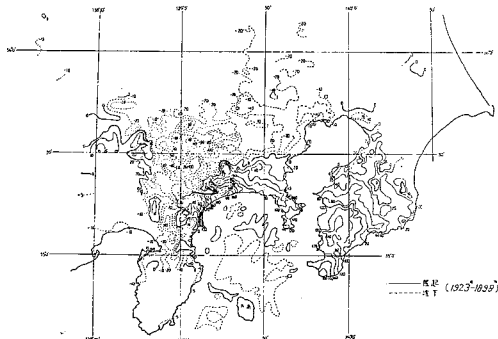


図1-b 関東大地震に伴う上下変動分布図

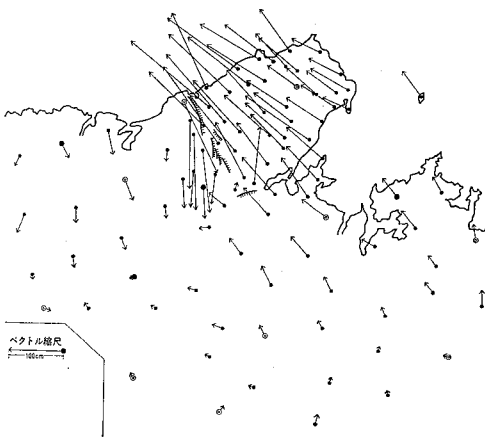


図2 丹後地震による三角点水平変動図

これは、震災直後の一、二、三等三角点 850 点の復旧測量（くり返し測量と同義と考えて下さい）と、水準点の改測結果を、明治年間に行なわれた値と比較して得たものであるが、これにより関東大地震の正体が、相模湾を東南から西北に走る相模トラフ（舟状海盆）を境とする長さ 100 km にわたる右ずれ逆断層であることが明白になった。これは地球科学に疑う余地のない観測事実を提供して、精密科学としての内容を与えると共に測地測量の実力を明らかにしたものであった。その後も、北丹後地震(1927)、北伊豆地震(1930)、南海道地震(1946)などで測地復旧測量はわが国の破壊的地震がもつ地球物理的特徴を明らかにし、最近の新潟地震(1964)では、約10年前から地震の前兆現象とも見られる異常な地殻変動を発見している。

精密測地網計画の背景

1) 第二次大戦後、前記した東南海、南海道などの大地震後の基準点復旧測量を経て、「地震予知を考慮した」測地事業として長期ビジョンを持った全体計画が、昭和37年に樹立され、昭和40年から一部が実施されて来た。しかし当時は、三角測量等の水平測量の精度は、地殻の変初を捉えるに充分ではなかったのも、より高精度であった水準測量に多くの期待がよせられ、一等水準は全国を5年周期でくりかえすが、水平測量は一等三角測

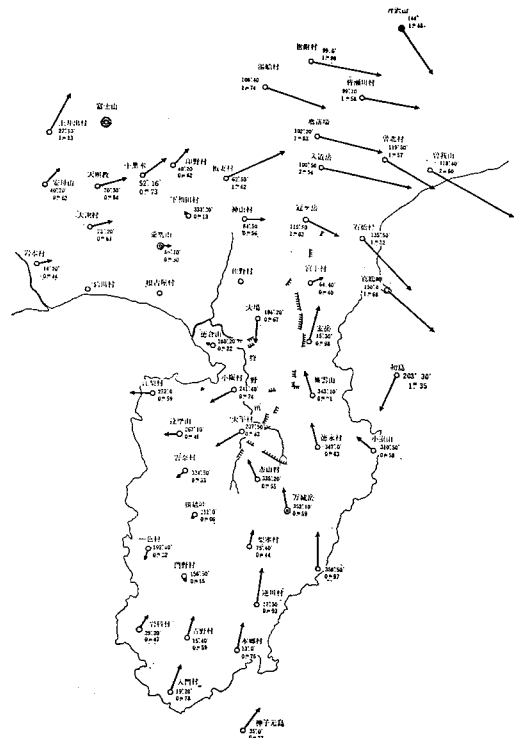


図3 北伊豆地震一・二等三角点変動図

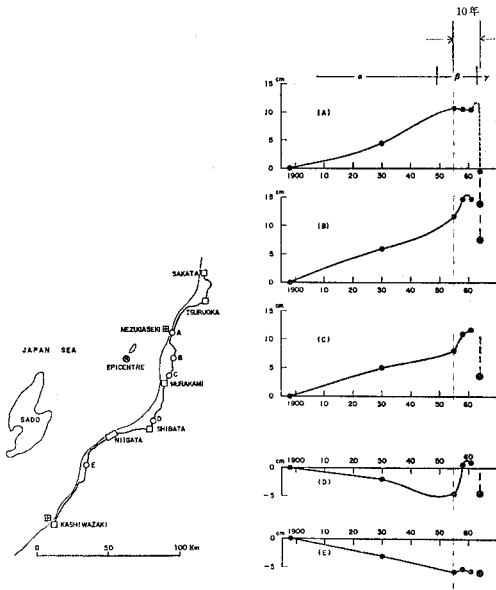


図4 新潟地震前後の粟島対岸各地の垂直変動 (M7.5)

量が10年周期で反覆されるにとどまり、一等補点以下の3万8千点は組織的改測の計画がなく、大正初期の設置完了以来、半世紀にわたって放置されて来たのが現況である。そのため、一等三角測量のくり返しから明らかになっている様に過去60年間に一等三角点は最大4m、1~2mは各地に見られる程の変動をしており、これから値をきめた二、三等三角点の成果は、局地的にはさらに大きな変動をうけたものが、そのままにされており精度が著しく低下していると考えなくてはならない。また、地震に

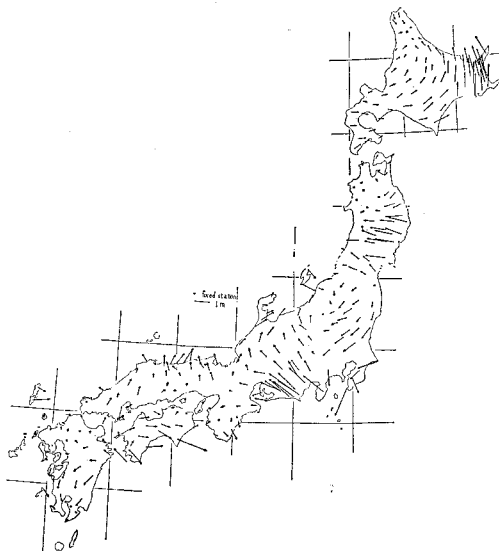


図5 過去半世紀における地殻の水平変動

よる地殻変動地域、欽害地域、地沈り、地盤沈下地域は全国におよび復旧測量による、座標値の部分的、局地的更新方法はかえって周辺部分に系統的誤差を波及させ、全国を統一した測量と計算方法をもってするほか收拾の道がなくなっている現状にある。

2) 三角測量における角度測定は、器械周辺での光の異常屈折により、補正困難な誤差を生じ、経緯儀の改良も限界に達し現状以上の進歩は望み難いが、近年開発された光波測距儀は、変調した光を測定する点間を往復させて距離を高精度 ($\sim 1 \times 10^{-6}$) でしかも短時間で測定できるようになった。距離測定については既に角測定の精度を凌駕しており、今後さらに精度を向上させる可能性も充分にある。たとえば、複数個の搬送波長を用いて光路での屈折率の変化を検出補正するなどの手段が、考えられるからで、遠からず 10^{-7} 台の精度に達するのではないかと期待されている。

3) 次に、地震予知の推進の観点から測地測量のくりかえし周期とあるべき規模をみてみよう。

日本列島は、活発な、地震帯に属しているが、通常地殻水平ひずみの蓄積量は年間 $2\sim 3 \times 10^{-7}$ 程度である。従って、観測精度が、(ひずみの年変化量) \times (測量の繰返し周期) を上回っていなければ、検出することができない。

従来は前出のように、測量の中で最も精度の高いものは水準測量であったため、本命の測量は水準であると考えられ、全国約2万杆の一等水準網を5年周期で繰返し測量が行なわれて来た。しかし上下変動のみでは、もともと、三次元的物理量である地殻の変形とその進行状況

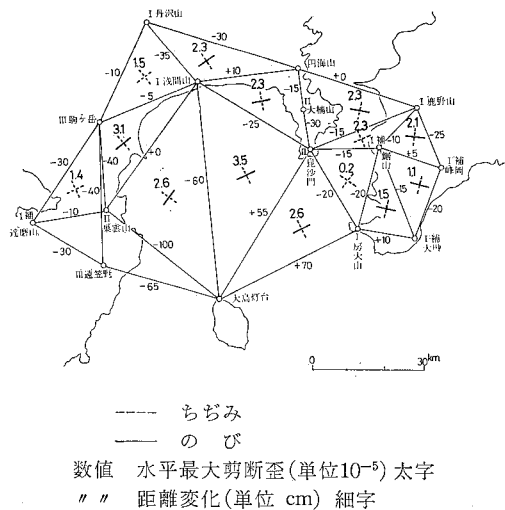


図6 関東南部精密測量による距離変化 レーザ・ジオジメーター(光波測距儀)を用いた。(1924-26~1970-72)と水平最大剪断歪
 数値 水平最大剪断歪(単位 10^{-5}) 太字
 " " 距離変化(単位 cm) 細字

作業種類	旧名称	作業内容	備考
一次基準点測量	一等三角測量 二等三角測量	平均点間距離 8~10 km (二等三角測量相当) の網を標準の基準点網とし、さらに全国的標準網の強化のため、20~50 km (一等三角および一等補点担当) の長距離測量を行なう。	<ul style="list-style-type: none"> 主として外注、一部直営 5年周期 くり返し測量 計画点数…………… 6,000点 長距離測量 10年周期 330点
二次基準点測量	三等三角測量	平均点間距離 4~6 km とし、(三等三角測量相当)、一次基準点を与点として、精密トラバース測量を行なう。	<ul style="list-style-type: none"> 原則として外注 当面10ケ年で全国を測量し、以後成果維持のため復旧改測を行なう。 計画点数……………32,700点

を捉えることはできないし、また、水準網も環が大きくて面的に稠密な情報が得られない。さらに沖積平野部では人為的地盤沈下が、自然の地殻変動よりも1~2桁大きくっており、情報がノイズにマスクされて検出不可能な地域が広がっている。また最近の理論である海洋底拡大説によれば、大規模な造山運動をおこす主体は水平応力とみられ地殻の水平運動を調査することが、この面からも重要性をまして来た。在来一等三角測量の再測周期10年としたのは、測量精度が 3×10^{-6} の程度であるためであったが、光波測距儀の進歩は測距精度をほぼ 1×10^{-6} まで高め、且つ He-Ne レーザー光を光源とする装置は測距距離を日中でも一等点を結ぶスパンに達する程度増大させた。従って観測装置の能力だけからみても、三角測量を三辺測距の測量方式に変更して、そのくりかえし周期は3~5年と考える根拠が得られる。一方基準点網の面的な広がりを考えてみると、檀原によれば、地殻

の異常変動地域の広さ(半径 r km)と地震のマグニチュード M との間には $\log r = 0.51M - 2.27$ の実験式が成立するという。これは例えば $M8$ の地震なら半径 65 km の円と同等の面積、 $M7$ なら 20 km、 $M6$ なら 6 km の異常変動域が付随することを意味し、 $M7$ クラスまでの地震に伴う地殻異常変動を捉える網の目としては平均辺長 8~10 km、即ち二等三角網までを、全国くまなく改測しておくのが望ましいことになる。また繰返し測定周期についても、異常変動の継続期間として、過去の例からは、大地震発生約10年前頃から、永年の地殻変動が傾向を転じ加速的な変化に移ることが知られて居り、坪川、藤井陽一郎の研究では、この地震の前兆現象の継続期間として、 $\log T = 0.52M - 2.8$ 即ち $M7$ では $T = 7$ 年となることが明らかにされている。これから前兆的異常変動期間中に最少2回の観測を行なうためには、最低5年がくり返し周期として必要となってくる。

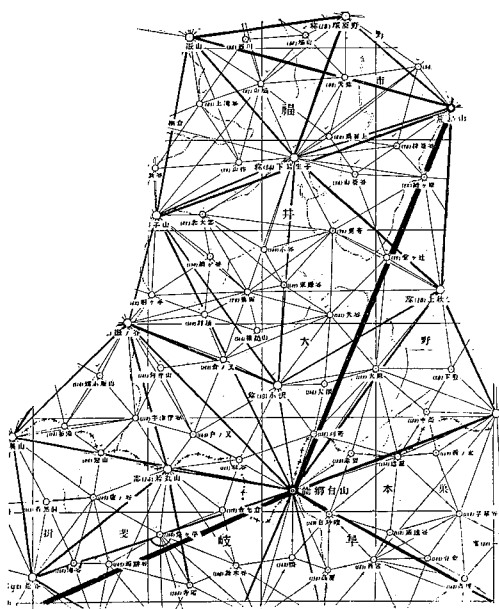


図 7-a 従来の方式による二、三等三角網

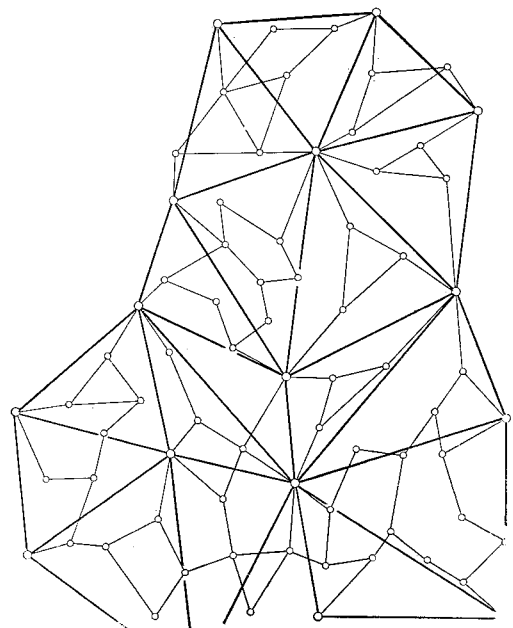


図 7-b 新しい方式による精密測地網

精密測地網の設定

このようにして、国土地理院では昭和49年度から、過去100年の伝統ある測地測量方式を改正して、新しい測量体系による「精密測地基準点測量」を開始することになった。内容は表1および図7に示す通りであるが、従来の一等三角点一等補点、二等三角点、三等三角点の4段階を、2段階に整理し、一次基準点群と二次基準点群に大別する。一次基準点は従来の一等三角点、一等補点、二等三角点の合計6千点により構成され、これらは測地座標を与える基準としては明治の体系と異なり、全て同格な最高の精度をもった国家基準点となる。二次基準点は従来の三等三角点3万2千7百の新しい名称であり、一次基準点群を与点として座標を決定するためこのように呼ぶのであり、且つ後続の四等三角点、図根三角点等の細部測量の与点となるのである。このうち一次基準点測量はレーザ測距儀による平均8kmの中距離測量を主体とし、20~50kmの大距離測量を加えて野外で到達できる限りの高精度で位置を定める、最も基本的な国家基準点群とする。これ等の点は常に正しい座標をもって維持されなければならない。また、くり返し測量の周期を全国一等水準測量と国じく5年とする。また、二次基準点の測量は早急に新しい昭和測地成果を確立するため全国を10年間で完成させる計画である。

ここで、精密測地網計画で考えている「座標」について言及しておこう。測地座標は当然のことながら3次元空間の座標であるが、19世紀には3次元測地座標を厳密に求める理論はまだ存在せず、また、実用上の要請も大きくなかった。従って、わが国の明治成果は、今日的観点からみると、早急に修正厳密化すべき点が出てくる。すなわち現在日本が採用している測地座標系（ベッセル準拠楕円体）は日本周辺のジオイドと概略南北に12"、東西に10"ずれている。この主な理由は、東京測地原点の採用経緯に主として南関東地域の地形、地殻構造に由来する鉛直線のかたよがりがあるためであるが、このため東京原点でジオイド面と一致させた準拠楕円体が北海道や九州地方では、数10mもジオイド面の上空にずれしており、地上での観測量を楕円体上に引き直す際無視できぬ誤差を生じている。しかし、第2次大戦後測地学の理論は大きい進歩をし、在来の楕円体測地等に重力論的測地学を結合して、ほとんど厳密な3次元座標を求める理論が完成している。更にまた人工衛星時代の到来によって、ジオイド面の全地球的な形状が分り、且つ人工衛星測地技術によって、従来、地域別国家別であった測地座標系を、汎世界的な座標系に、統一結合することが可能となった。このため、新しい精密測地網においては、現代測地学の成果をとり入れ、新しい汎世界的座標系に

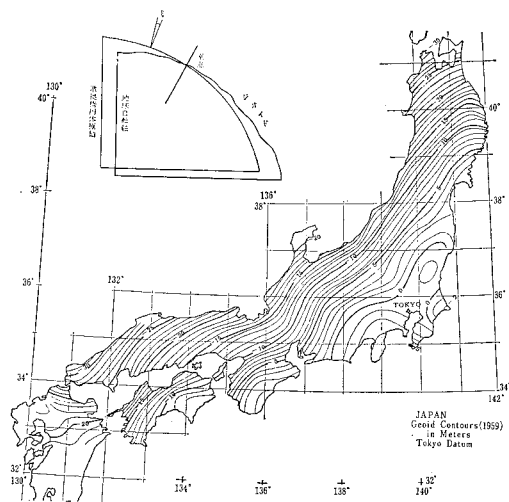


図8 準拠楕円体に対するジオイドの高さ(単位m)、東京原点から離れるに従いジオイドはベッセル楕円体の下方に数10mずれる。

よる我国の位置を決定し、平均のジオイド面に一致する準拠楕円体を設定し、正しい3次元測地座標系の確立することを目標としている。

精密測地網の効果

明治の測地測量は、中縮尺地形図作製の基準点作りを主な目的として行なわれた。今や昭和の測地測量は、新しい地球科学の基礎としてのデータ作りへと変身しようとしている。これによっていろいろの実際の効果があらわれることが期待されるが、とりわけ地震予知(地震発生の規模、場所、時期)の実用化を促進し、対策の樹立に大きな効果があるであろう。精密測地網のくり返し測定は、水準測量による上下変動の調査とあわせて、大地震の前兆現象を必ずや検知することと期待される。

今回は、列島内測地について主として述べたが、最後に、人工衛星測地について一言しておきたい。汎地球的な立場から、日本列島の位置を確立するには、殆んど唯一の効率的な手段が、人工衛星を利用する測地技術である。現状では最終精度として、写真を用いるいわゆる角度測定の方法では、 10^{-5} 程度の精度であるが、最近レーザ・パルスによる人工衛星測距では 10^{-6} を切る結果を東京天文台グループは得て居り、計測技術面では 1×10^{-7} に達するのに難点はほとんどないとみられている。これは各国測地系の結合には勿論のこと、大陸移動ないし海洋底拡大説を直接検証する手段となり得ることを示唆しているもので、測地学的に極めて興味深い。われわれとしても、精密測地網を補完、発展させるこれら大規模測地技術に大きな努力を払ってゆきたい。