

測量技術の変遷とその動向

CHANGES AND TRENDS OF SURVEYING TECHNIQUES

馬 場 義 男*

By Yosio BABA

はじめに

今日、測量は様々な分野で基礎的、かつ、重要な役割を担っている。たとえば、各種工事の場合においても、工事の設計、施工管理および完成後の維持管理に欠かさないものとなっている。

測量の利用分野が多様化するに伴い、測量技術もまた、その利用分野に応じて多様化している。すべての測量において最も基本的で共通な長さや方向およびそれらの組合せによる位置の測定をとってみても、測量規模、精度、作業地域等によって用いられる技術は様々に異なっている。また、近年の科学技術の飛躍的な発達に伴って測量技術はかつてない程の急速な進歩をとげている。

この時期において、現在の測量技術をより有効に活用しながら将来の測量について考えるためには、測量技術の変遷とその動向について広い範囲に目を向けながら見直してみることが大切であろう。

すべての分野を網羅してまとめることは筆者の倒底及ぶところではなく、断片的で偏った観点からにすぎないかも知れないが、測量技術の変遷とその動向についていくつかの例を取り上げながら述べてみたい。

1. 測量技術と測量機器

測量技術という場合、測量の原理、使用する機器とその利用法、さらにデータの処理、解析、管理までを含めて考えることが必要である。したがって、測量技術は、

上述したように、測量しようとする量や規模、精度、作業場所等々によって異なったものとなる。

今日では、測量の対象となるデータには、距離や方向だけでなく重力、地磁気、水位、水深あるいは写真測量やリモートセンシングに関するものなどにまで及んでいるが、最も基本的なものは、距離すなわち長さや方向、およびこれを組み合わせて決められる位置である。もちろん、この中には基準となる尺度および座標系も含まれている。

ところで、測量距離の大きさを例にとりて考えてみると、メートル以下の大きさから1万キロメートルのオーダーの地球規模の大きさまでの拡がりがある。精度にしても、絶対値でマイクロメートルのオーダーからメートルのオーダーまで、相対値で 10^{-8} 程度から $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 程度までのひらきがみられる。このような広範囲の量を、必要に応じて効率よく測るために、それぞれの領域に適した機器あるいはシステムが開発され利用される。したがって、使用される機器を離れて測量技術を考えることはできない。目的に応じた測定原理、手法、精度を現実のものとするのは、機器だからである。このことから測量技術の変遷は測量機器の変遷に示されているといえる。いいかえれば、測量機器には、その時代の社会経済活動状況に応じた測量に対する需要範囲、および科学技術の水準などが反映されているのである。

たとえば、現在の測量機器の夥しいカタログを見れば数えきれないほどの種類があり、地上用、地下工事用、海上用など現在の社会経済活動のすべての範囲に及んでいて、それぞれの機能、性能が様々に異なっていることが知られる。また、電波、レーザー、マイクロプロセッサなど最新の技術が多く取り入れられており、構造も

* 建設省国土地理院 測地部 測地技術開発室長
(〒305/茨城県筑波郡谷田部町北郷1番)

小型・軽量で操作も容易となって、データが自動的に記録、処理されるものまであることがわかる。

このことはまた、当然のことながら測量技術の将来動向を考えるとときには、将来の社会経済活動のあり得べき状況と科学技術の進歩を合わせて考えなければならないということである。

2. 測量技術の変遷の一般的傾向

測量技術の変遷は測量機器の変遷として現れるといったが、その変遷もいろいろな角度から見るができると思われる。ここでは、基本的に重要と思われる自動化、高精度化および（測量範囲の）大規模化という点から見ることにしたい。

現在の測量機器のいくつかをみればすぐにわかることであるが、自動化がかなり進められている。ごく簡単な機器はともかく、マイクロプロセッサを容易に接続できるものから機器本体の中に組み込まれているものまで多数ある。マイクロプロセッサの性能向上に伴って、単なる測定手順の自動化だけでなく得られたデータの記録と演算処理まで可能になっている。カセットテープなどに記録してミニコンピュータあるいは大型コンピュータにそのまま入力して、大量で複雑な処理を迅速に行えるようになってきているものもある。自動化といってもマイクロプロセッサが働くものばかりではなく、水準儀の水準面自動補償機構も含まれるし、電磁波測距儀で電磁波の波を利用して距離を測るのも大きな自動化である。また、距離と方向の各測定機能を一体化して組み込むことも自動化の一つと考えることができる。

こうした自動化は、省力化、高速化および経費節減につながる強い需要に基づくものである。需要があれば、あるいは、需要の可能性があればそれを満たそうとする研究、開発が行われるのは必然的である。ただし、必要な科学技術が存在していることが前提となることはいまでもない。自動化はまた、測定動作の中で人の介入する部分が少なくなり、高度の熟練と勘を必要としなくなるが、それだけ個人差がなくなって測定結果の安定化と信頼度向上にも貢献している。

自動化が作業の効率化あるいは安定化という一般的な需要であるのに対して、高精度化には、測量ごとに要求精度が異なるため、その度合に応じて差異がある。高精度化によって新しい情報が得られるため、地殻の歪みの検出など学術研究的な分野における需要はとどまるところがないともいえる。また、大きな構築物で特に精度が要求される場合にも高精度化が強く要望される。高精度化には、単に機器本体の問題にとどまらず、気温など外的要因に関する物理学的な知識に基づく各種補正も強く

関係してくる。地上測量においては、大気の影響は避けることができないため、高精度化は大気による誤差の補正あるいは軽減が、むしろ大きな比重を占めているといえる。

次に、測量規模すなわち測量距離の拡大がある。通常の地上測量では、直接の視通可能範囲が限界であるため、それ以上の距離に対しては、同様な測量を繰り返して接続していかなければならない。これだけならば効率の問題であるが、海洋を遠く隔てた場合では測量の接続そのものが不可能である。したがって、地上における視通可能距離をはるかに越える長大な距離間を直接に測量し得る技術が求められるのである。今日では、すでに人工衛星あるいは銀河系外天体である準星を利用して地球規模の範囲にまで可能な技術が開発されている。

自動化、高精度化、長距離化は必ずしも独立しているわけではなく、相互に関連し合っているものである。また、機器の小型化、堅牢化、運搬や設置等の簡便化、目盛の見易さなど、機器の構造に関する要求も測量用機器として当然であり測量機器全般に共通していることは言うまでもない。

このように、需要の多様化と科学技術の進歩によって測量技術もまた多様化しながら、自動化、高精度化、長距離化が機器構造の改良とともに相互に関連して進展してきたといえる。この傾向は、新しく生ずるかも知れない分野も含めて、各分野によって程度の差こそあれ継続していくと思われる。

3. いくつかの例

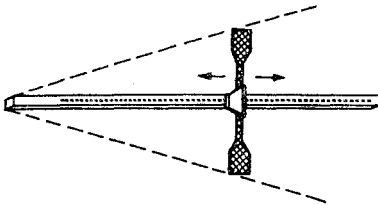
(1) 距離の測定と自動化

上記の変遷について、距離を測る技術の中のいくつかの例を見ていくことにする。まず、基準となるべきある長さが決められ、それを基に実際の測量に使われる尺が用意される。最初は、手や腕または歩幅など人体の一部であったのかもしれないが、やがて棒状の尺が使われるようになるとともに、持ち運びとより大きな長さの測定が便利のように縄や糸などを用いた巻尺も出現したのであろう。これらは、その後の科学技術の進歩により、高精度用にはより優れた材料として鋼、そして熱膨脹率の小さいインバールが用いられるようになったのである。このような尺を用いる直接的な測定方法では、尺の長さ以上の距離の場合には、同じ測定を同じ方向に接続しながら繰り返していかなければならない。その距離が大きければ大きいほど作業量は増えるし、接続できなくなれば測定そのものが不可能となる不便さがある。車が使われるようになった古代において、車輪円周を尺度とし、そ

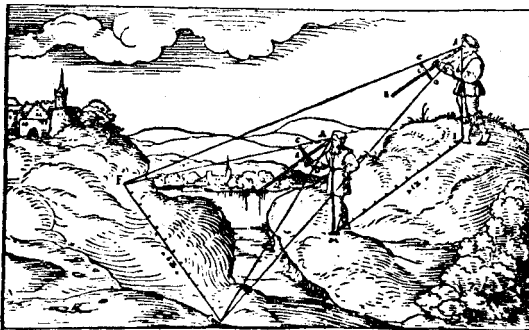
の回転を利用して移動距離を測るといった技術が現われているが、これは大きな自動化技術であった。しかし、基本的には、上述したような不便さは残るのである。

これに対して、幾何学的思考の進歩に従って、尺で測れる短い距離を三角形の性質を利用して拡大することにより、大きな距離を測る間接的な方法が現われてくる。円周を刻んだ目盛で角度を測る技術と相まって、いわゆる三角測量の測量方式が確立される。いずれにしても、小さなものを大きく拡大するということであるから、もとの小さな誤差が大きく拡大されることになる。

また、距離＝速さ×時間という概念が比較的大きな距離を、概略的にはあるが測るのに用いられるようになった。人や乗物が1日に進む距離を基に、要した日数から距離を求めたのもこれにあたる。周知のように、すでに紀元前250年頃、エジプトのエラトステネスが地球の大きさを求めるときにアレキサンドリアからシエネ（いまのアスワン）との間の距離を隊商が1日に移動する距離と費した日数から推定したのはその例である。この方式は距離を測るのに時間という別の量を導入するが、上述の尺の接続の繰り返し回数を数えるということ、時間を測るということに置き換えたものであるから直接的な方法と言える。自動的に移動していくものを利用すれば自動化となり、高速のものを用いるほど効率的に測れる。もちろん、高速になればなるほど時間を測る時計の正確さが必要となる。科学の進歩によって、音と電磁波を移動体として利用できるようになり、音響測深儀やレーザ

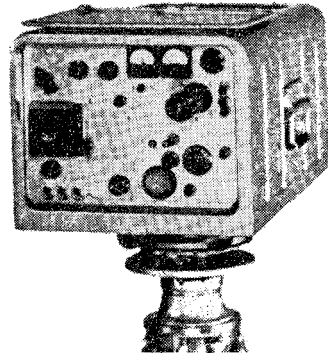


(a) 「ヤコブの杖」



(b) 「ヤコブの杖」を用いた測量
(参考資料 1) による

図一 幾何学的に拡大して距離の測る例



図一 2 ジオジメータ 8 型・最初の長距離用
レーザー測距儀 (AGA 社)

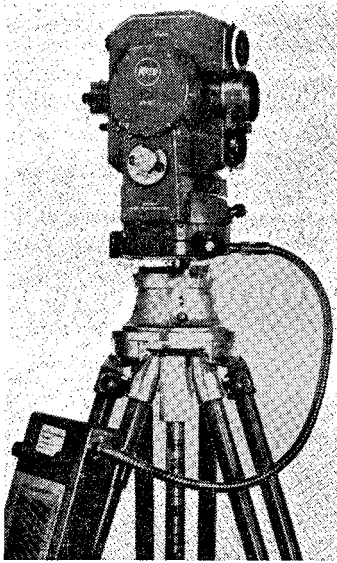
ーが出現するようになる。

さて、電磁波およびエレクトロニクス等に関する研究と技術の急速な発展により、電磁波の波としての性質を利用してその波長（ただし、変調波の波長）を尺に利用する技術と、電磁波の伝播時間の高精度測定によって距離を求める技術とが実用化されるに至ったのである。前者の技術は、電磁波測距儀の実用化により、尺で直接に測る方法における自動化を極限にまで推し進めることになった。何千回あるいは何万回も地表に沿って尺を継いで測定を繰り返さなければならなかった区間でも、何の労することもなく必要な数の尺を自動的かつ瞬時に、しかも、空間中に一直線に並べる技術が現実のものになったのである。まさに革期的な技術革新であった。

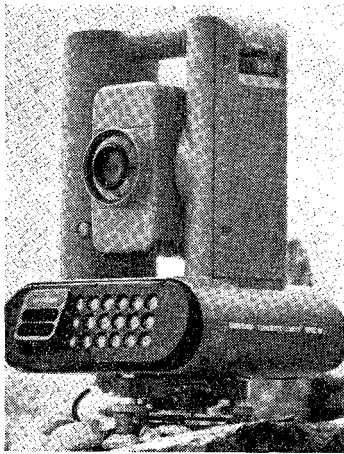
地上測量用としては、レーザー光を用いるレーザー測距儀が中心であり、数十キロメートルまで測れる機器がある。精度的にも、三角形で拡大する方法よりも優れた結果が得られる。これによって、角度視測を主体とするかつての三角測量方式は距離視測を主体とする方式に変わることになったのである。レーザーとマイクロプロセッサの進歩により、測距儀も開発当時と比べて小型化、操作の簡易化が進んでいる。

測定の目的によっては、距離と角度とを同じ位置で測る必要があるが、そのような場合に便利なように経緯儀にレーザー測距儀を接合できるようにしたもの、あるいは両者を一体として組み込んだ機器もある。さらに、測定データが逐次処理されながら記憶されるようになってきているものもある。これらは必要に応じてそのまま記録紙へ出力することも、他の外部コンピューターに入力することも可能になっている。それほどまでにエレクトロニクスの技術が進んでおり、また、その技術が活用されているということを示している。

電磁波を用いた距離の測定法で後者の時間測定を必要とする方法は、電磁波のパルスなどの信号が到達するに要する時間を測るのであるが、測量に利用できるだけの



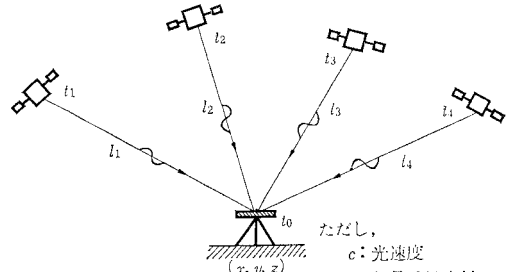
(a) 経緯儀 (KI-SE) にレーザー測距儀 (DM 502) を接続する例 (Kern 社)



(b) 一体化されている例・タキマット TC1 (Wild 社)

図-3 レーザー測距儀と経緯儀の両機能を併有する機器の例

十分な精度を得るには精密な時間測定技術が必要である。水晶発振器からさらに原子周波数発振器の実用化により、この方法も今日では実際の測量に応用されるようになってきている。この方法でレーザーを用いる場合は、パルス信号が用いられるが、レーザーでパルス信号を作る装置は大がかりとなるので、人工衛星までの距離を測るのに用いられるだけである。電波の場合は、人工衛星を利用する技術が進んでおり、人工衛星から発射される電波を地上で受信して効率的に地上位置を決めるシステムがある。現在、合衆国において NNSS (Navy Navigation Satellite System) の後継システムとして開発が進められている GPS (Global Positioning System)



ただし、
 c : 光速
 t_0 : 信号受信時刻
 $t_1 \sim t_4$: 信号発信時刻
 $l_1 \sim l_4$: 衛星までの距離
 (x, y, z) : 観測点位置座標
 なお、衛星位置はすべて既知。

図-4 GPS の測位原理

による測位では、衛星から発射された電波の信号が観測点まで到達するのに要する時間が測られる。ただし、精度的には数メートル以上である。後述する VLBI 方式では、地上の 2 点で銀河系外からの電波の到達時刻差を超高安定な水素メーザの発振周波数を用いて百分の 1 秒で測定し、したがって、地球の規模の距離を 3 センチメートル程度の高精度で測定可能となっている。

(2) 高精度化

次に精度についてみると、インバール尺では目視であるが絶対値で 0.1 ミリメートル、相対精度で 10^{-6} のオーダーが得られる。レーザー光を干渉させる方法で光の本来の波長の長さを目盛にするレーザー干渉計を用いるとミクロン単位で測れる。レーザー干渉計はインバール尺やレーザー測距儀の精密検定などに利用されているが、反射鏡をレーザーの遮断なしに移動させた距離しか測れないし、どこでも自由に使えるわけではない。トンネル内の歪みなどの小さな距離の微小な変化量を監視する場合には、一定の張力をかけて両端を固定したインバールワイヤーの伸縮を張力変化に換えて測定するディストメーターと呼ばれる測定器が開発されており、その方がほるかに使用し易く便利である。距離が大きくなると光波測距儀を用いなければならない。2 キロメートル程度の範囲までミリメートル単位の精度が必要な場合にはメコモーターのような特に高精度の短距離用光波測距儀がある。これ以上の距離でなおミリメートル単位の精度が必要な場合には、多色レーザー測距儀が必要となってくる。電磁波測距儀は、機器そのものに起因する誤差以外に大気屈折率による誤差を避けることができない。主要要素は、光の場合では気温、電波では湿度であ



図-5 ディストメーター・ISETH (Kern 社)

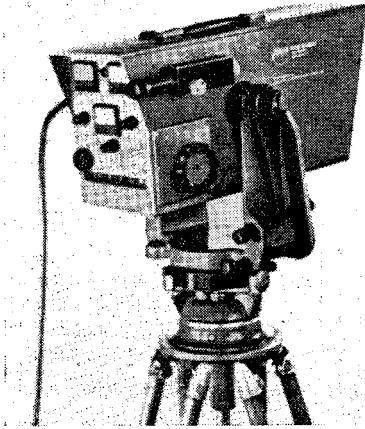
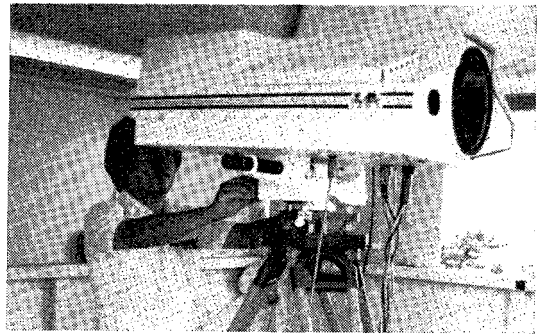


図-6 メコメーター・ME 3000 (Kern 社)

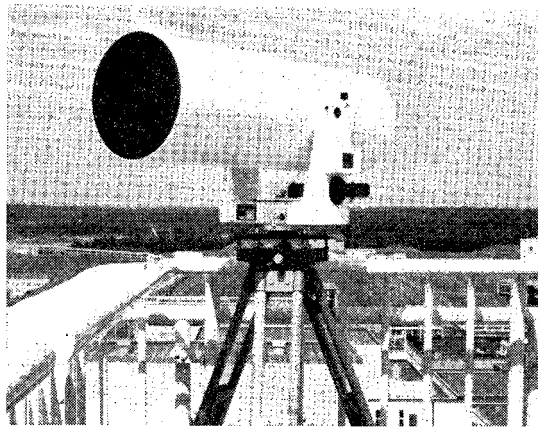
る。光路上の気象測定は実際上ほとんど不可能であるから、距離の両端点の測定値を平均して光路全体を代表すると仮定している。しかし、レーザー測距儀では、光路上の平均気温の推定に 1°C の誤差があると、測定距離の 10^{-6} の誤差が生ずる。たとえば、10 km の距離で 1 cm となる。この誤差は気温推定誤差に比例して距離とともに大きくなる。この問題を解決する方法として、光の大気屈折率が光の波長によって異なり、それに応じて測定距離にわずかな差が生ずるという性質を利用することが考えられた。2つの波長の異なるレーザー光で同一距離を同時に測り、その差を用いて光路上の気温測定を行うことなく正確な距離を求める多色レーザー測距儀が開発されたのである。すでに商品化されているものは、赤と青の2色のレーザー光で 10 km 近くまで 1 mm 近い精度で測れる。このような高精度測距儀は、地震予知のための地殻変動観測のためだけでなく、ヨーロッパでは高エネルギー研究施設のような高精度が要求される大規模な建設工事に関連して導入されている例もある。地殻変動観測用として国土地理院では、さらに高精度で長距離化も可能な多色レーザー測距儀の開発が進められている。多色レーザー測距儀は、光路上の気象測定の自動化を実現することによって同時に高精度化を可能にしたものといえる。

(3) 長距離化

以上のような測距儀では、精度はともかく、一度に測れる距離は視通可能範囲に限られる。それ以上の距離を直接に求めるためには、人工衛星あるいは準星のような天体を活用しながら、時間を測る手法で距離を測って幾度か何学的に決定する方法が採られる。たとえば、最大規模つ最高相対精度の測定技術として実用化されつつある VLBI (Very Long Baseline Interferometry) では次のように行われる。地球上の2点で数億光年以上もの宇宙のから



(a) 本 体



(b) 反射鏡
(Terratechnology 社)

図-7 2色レーザー測距儀・テラメーター

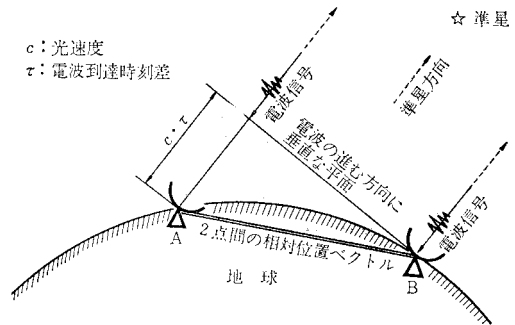


図-8 VLBI の原理

たにある準星(クェーサー、見かけ上は恒星のように小さいが銀河系外のはるかにあって強力なエネルギーを放出している天体)からやってくる電波の到達時刻差つまり受信時刻差を測定する。準星は無限遠としてよいからその電波は平面波として伝わってくる。地球自転の影響が正しく補正されるとして、いずれか一方の点を基準にしたとき、他方の点は準星方向に垂直で、基準点からの距離が光速と受信時刻差の積に等しい平面上にあることがわかる。同様な観測を方向の異なる3個の準星について行えば、この点は3平面

の交点として基準点に対する位置が決定される。つまり、2点間の距離と方向が同時に決まるのである。準星からの電波は地球上のどこでも共通した方向で受信される。したがって、地球直径規模の測量が可能になるのである。地球上の測量規模はこの方法によって極限に達したといえる。この技術は、プレート運動の検出など広域的な地殻変動観測に大きな貢献をするものと期待されている。ただし、現在の VLBI の電波受信アンテナは、国土地理院が開発している可搬型でも直径が5メートルあって移動が容易ではない。また、VLBI ではデータ量が膨大である。このため、小型化、データ処理の効率化が今後の課題である。

GPS の人工衛星を VLBI の場合と同様な電波源に利用して地上の観測点間の距離と方向を求める技術も開発が進んでいる。これによれば、300 km 程度以下の距離であれば、VLBI と同程度の約 3 cm の精度で決定可能と期待されている。受信アンテナも三脚に載せられるぐらいに小型である。これらの方法は世界中のどこでも常に利用可能 (GPS 衛星はそうのように配置されるということであ

る) で、電波を利用するので天候に関係なく、観測ができるため効率も高い。

(4) 力学的な測定による効率化

これまでの例では、直線的に距離を測ることが中心であったが、通常そのような方法では比較的短い距離ごとに視通障害が多くあったり、多数の位置決めが必要な地域では多数回の機器運搬、設置と観測を繰り返さなければならない。また、光学観測では雨天になると作業もできない。上空視野が狭いと人工衛星も利用できない。このような場合の測量の効率化は、天候と環境に依存する通常の距離観測や角度観測の概念では到底不可能と思われる。周囲に信号を送ることなく、また、周囲から何の信号も得ないで測量する方法が必要である。これに適するのは、ある移動体が移動しながらそれ自体の内部に移動量を測定する機能を有している場合である。すなわち、移動に伴う加速度を連続的に検出しながら時間的に積分する方法である。この方法を実現しようとする機器が慣性測量装置である。慣性測量装置の原理は、航空機の慣性航法やロケットの慣性誘導に用いられている装置と同じで、東西、南北、垂直の3方向にジャイロと加速度計を組み合わせて加速度を時々刻々に検出して積分しながら三次元的に移動距離を測定する。一般的な距離や方向の測定概念とは全く別な力学的な方法で測量するのである。装置は自動車に搭載して移動する。慣性測量装置においては、加速度の検出と積分の自動化に加えて自動車運搬による移動の自動化と晴雨にかかわらない全天候化によって測量効率が高められるのである。現在、10 km を約1時間で移動して数十センチメートルの精度まで可能な段階になっているが、精度をさらに向上させる研究が進められている。精度の向上に伴って、より広い領域まで利用範囲が拡大する。規模は大きいですが特に高精度を必要としない土木工事測量の分野にも利用できるようになるのではないと思われる。今後の発展が期待される技術の一つである。

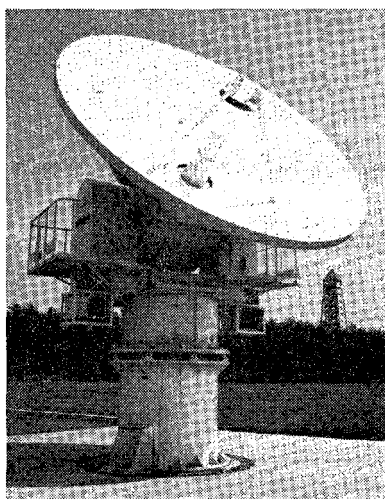


図-9 国土地理院で開発されているアンテナ直径5 m の可搬型 VLBI 装置

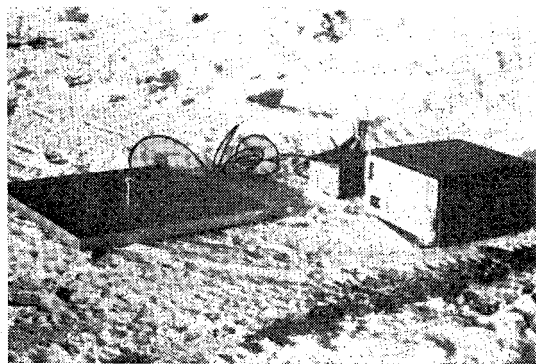


図-10 GPS 用受信機の例・マクロメーター (Marometrics 社)

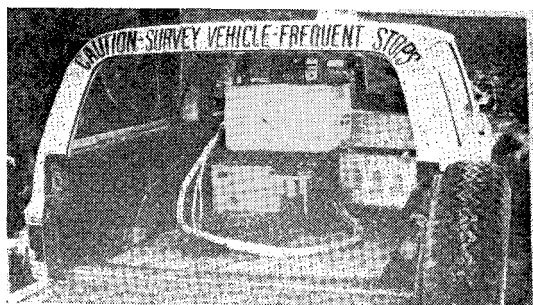


図-11 慣性測量装置の例 (SPAN 社)

おわりに

測量全般についていえば、多様化しながらも常に正確さあるいは信頼性の維持と向上および効率化が要求されている。個々の具体的な技術については、需要と科学技術とが相互に関連している。これらは、たとえば、自動化、高精度化および長距離化を中心にして全天候化や機器の小型化などとして現われてくる。需要があってもそれを実現するだけの他分野の技術がなければならぬが、近い将来においても、レーザー、電波、光ファイバー、セラミックスなどをはじめ、マイクロプロセッサーやミニコンピューターもさらに活用されるようになると思われる。宇宙空間の無重力下における新材料開発技術も、将来、測定機器の素材に貢献するかもしれない。測量領域も海底の高圧下から大型宇宙基地やスペースコロ

ニーの構築、あるいは月の資源開発のような宇宙空間における無重力と真空下での測量までますます範囲が広がっていくと思われる。

説明の足りない箇所や筆者の誤解に基づく点など多々あると思うが、測量技術について考えるうえで些かなりとも参考になれば幸甚である。

参考文献

- 1) Raymond E. Davis, et al. : Surveying Theory and Practice, 6-th ed., McGraw-Hill, 1981.
- 2) Fritz Deumlich : Surveying Instruments, Walter de Gruyter, 1982.
- 3) 第13回国土地理院技術研究発表会資料.
- 4) Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik 6/84.
- 5) Heribert Kahmen : Elektronische Messverfahren in der Geodäsie, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe, 1978.

(1984.8.6・受付)

計 測土木構造物の埋設計器による測定
試 験模型試験・室内試験・現場試験
計 算プログラムの作製・計算の実施
計画・調査・設計・施工管理各種

- 計測は計器納入、据付、測定、解析を一環して行ないます。
- 水理模型試験、構造模型試験、土質試験、コンクリート試験
岩盤試験、地耐力試験その他多年の経験を持っています。
- (株)開発計算センターと特約、I.B.M.4341(VM)を使用いたします。
- その他一般土木技術に関する御相談をお待ちしています。

株式会社 八重洲土木技術センター 代表取締役 中村龍雄
 取締役 榎本嘉信
 東京都中央区日本橋茅場町1-6-12 共同ビル内 電話 東京(03)666局5503(代表)