

講 座
新 しい 測 量 2
新 しい 測 量 機 械
中 村 貢 治*

1. まえがき

前編に述べられているように、基本測量から局地測量までのあらゆる応用範囲をふくませ、そしてその手段も写真測量を加え、さらに“写真判読”など測量に関連した“調査”もふくませて、新しい機械の範囲を拡大すると、個々についてあまり述べるわけにいかなくなる。

そこで本編では、使用目的ごとに機械全体を総合的に眺め、新しい機械がそこでどんな地位にあるかを確かめて、その原理や基本的な注意を述べることにする。

また新しいということの時限をどこにおいてとりあげるべきかの基準はあまりむずかしく考えないで、わが国で実用化されている度合を主眼とした。

後編で述べられると思われる写真判読や近接写真測量などの機械についてはあまりくわしくふれないことにする。

2. 角度の測定、水準儀

角度の測定はいうまでもなく、測量の歴史を通じて変わることのない基本的測定で、その最も精密な方法は光学的方法である。水準儀は高さの差を測るものであるが、常に基準水平を視準する角度の測定機と見ることができるので、ともに述べることにする。

(1) 光学的角度測定機—経緯儀、水準儀

普通眼の角分解能は1分といわれているが、測量機の視準望遠鏡に見られるように、2本の線の間目標線をはさむと角分解能($\Delta\theta$)は10秒くらいまでも高められる。望遠鏡の倍率を m 倍とすると、角分解能は $10''/m$ となるはずである。

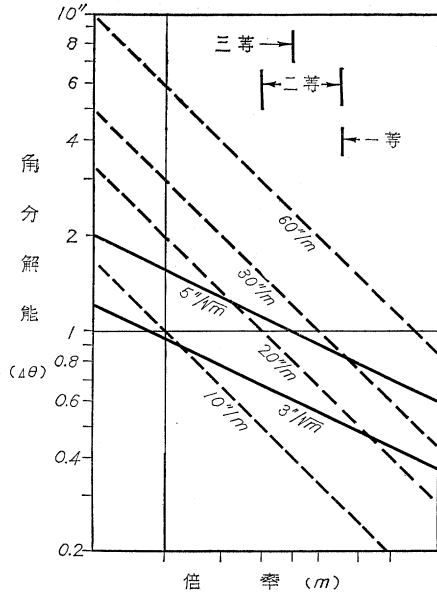
しかし測量機の場合は野外で用いられるのでカゲロウなどの影響によって低下し、実験的に式(1)が確かめられている。

$$\Delta\theta = \pm \frac{3''}{\sqrt{m}} \sim \pm \frac{5''}{\sqrt{m}} \dots\dots\dots(1)$$

この角分解能($\Delta\theta$)と倍率(m)との関係を図示する

* 正員 国際航業KK測量研究室長

図-1 視準望遠鏡の分解能



と図-1のとおりで、前の $10''/m$ と比較すると高倍になるほど低下することを知らる。この図にトランシットと水準儀との等級の大体を示した。さらに目盛と気泡管などを考えねばならない。

また二、三等以下の視準望遠鏡は、明るく小型であることが要求されているので、これより低下し、JISの規格によれば、分解能はトランシットの $30''$ 読で $<3.5''$ 、水準儀で気泡管感度 $30''$ で $<3.5''$ である。

新しい改良は主として二、三等以下のもにに限られている。測量機の構造は狂う要素を少なくするため単純であることが永年の原則とされていたが、最近精密機械工学の発達によってかなり大胆な構造のものも出ている。

a) トランシット、経緯儀 トランシットは部分的にはさしたる変化もないが、大きい変化としては英米型のトランシットから欧州型の経緯儀(Theodolite)の構造に移りつつあることである。

特に水平垂直目盛の読取りにはガラス製の精密な目盛板を親目盛として、その最小目盛を光学的マイクロメータによって簡単な操作で精密な読み取りをできるようにして、目盛板の 180° の2カ所での読みを自動的に平均して偏心誤差をとるような構造になっている。この方法は古くからウィルドのT2に採用され光学的マイクロメータが用いられている。

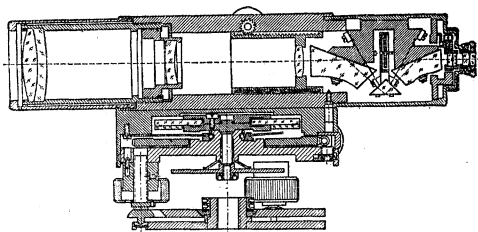
目盛板の角度目盛は欧州型で全周を400等分とした100分式の400グラードを用いたものがある。

b) 水準儀、オートレベル 最近オートレベルが一般化されてきた。これは原理的にいえば視準望遠鏡を水

に浮かせ、機械が傾いて設置されても常に水平方向を視準するようになっているものである。実際の構造は光学系の一部をつるし、重力で視線線が常に水平になるようになっている。これだけでは感度との関係で振動しやすく安定しないので、振動を減衰するためのダンパーが用いられている。感度が良ければ安定が悪く、安定を良くするためダンパーをよくきくようにすれば感度が悪くなるという矛盾した性質を有している。

オートレベルは原理上調整する要素が少なく十字線の調整だけで良いわけであるが、使用する場合はオートレベルの機構が安全に働いているかどうか、あるいは動くだけの範囲に機械が大体水平に設置されているかどうかを十分確認した上で使用せねばならない。倍率 25×前後で平均自乗誤差(中等誤差) 2mm/km くらいのもので二、三等級である。図-2 にツァイスの Ni 2 を一例として示した。

図-2 ツァイス オートレベル Ni 2



3. 距離の測定, 水深測量, 海底地質探査

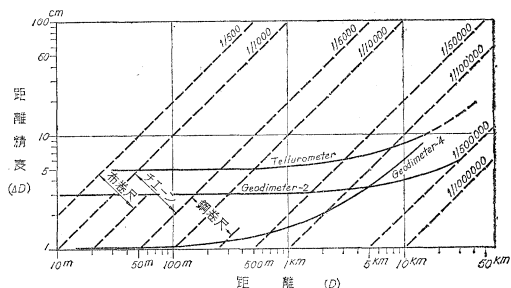
(1) 距離測定機

距離の測定も基本的な測量で、普通用いられているスケールを直接あてて測定する直接法によると、その誤差は距離の一次式として表わせる程度である。距離が遠くなれば直接法は行なえなく、基線をとって、光学的に三角測量を行なって測る間接法によらなければならない。この場合には基線の測定誤差のみならず、測角の測定誤差も入ってきて、ある場合にはその誤差は距離の二次式として表わせる程度にもなって、遠距離になるほど増大する。

最近電子工学の発達によって、スケールの代わりに電波あるいは光波の波長をスケールとして距離を測定する一種の直接法とも見られる方法によって遠距離までも驚くべき精度で、その誤差は距離の一次式として表わせる程度であるものが実用化されている。

以上のことを明示するため各種の方法についてその測定可能距離(D)と精度(4D)とを図示すると図-3のとおりであって、スケールなどによる方法と比較して、新しい電波あるいは光波による方法の精度の良いことを知ることができる。

図-3 距離測定機の精度



a) 光学的距離測定機—タキオメータ 光学的距離測定機には基線を測定点におくもの、目標点におくものなど種々の方法があるが、一般に斜距離を測るので、目標点までの垂直角を測って、計算によって水平距離を求めねばならない。水平距離を計算せずに読取れる種々のタキオメータがあるが、ウィルドの Reduction Tacheometer RDH は水平距離と垂直距離とは切り換えて直読できる。

これは距離の測定には光学的マイクロメータでスタッフをバーニヤとマイクロメータで読みとっている。そして2枚の頂角の等しいプリズムを反対方向に等しい角だけ回転し、フレの角を変え、その方向を斜距離の方向にして、その水平と垂直の分力は sin と cos とを乗じたものとなるので、これを斜距離の水平と垂直との分力に対応づけて自動的に計算を行なって、直読で水平と垂直の距離が読めるようになっている。これは 150m くらいまでの測定ができ、精度は 1~2 cm/100 m くらいである。

タキオメータについては尾崎・垣下両氏の報告(測量 63-4, 11 ページ)にくわしい。

b) 電波による距離測定機—テルロメータ 長さの測定の原則として短い間隔を精密に測ることは可能であるが、長い間隔を同一精度で測ることは困難である。例えばある方法で 1mm くらいの長さを何万分の1すなわち6桁の有効数字で測ることは可能であっても、1m くらいの長さを同一精度で測るには9桁の有効数字までも測らなければならないので不可能である。

そこでとられる方法は“比較法”である。すなわち 1m の精密な長さの基準尺といくらの差があるかを比較して測る方法である。波長をスケールとして測る方法は比較法によったものと考えられ、測定点から発信される電波と目標点に行って帰ってきて受信される電波との位相差を測る位相差測定機である。しかもこの位相差の測定精度はせいぜい、1/100の精度を有するに過ぎず、この限りではきわめて不精密な測定機である。そしてそれだけではその位相差が波長の幾整数倍で生じたのかが不明である。

Tellurometer を例にとって説明すると、スケールとなる波長の周波数を標準波長 (10 Mc) のほかに、それと 1/10, 1/100, 1/1 000 の差のある周波数の異なる 4 種の波長を用いて生じた位相差を 4 回測定する方法がとられている。標準波長で下 2 桁を測定し、それ以上の 3 桁は位相差を測った値を簡単な計算で求めて、有効数字 5 桁の測定を可能にしているのである。最大距離 15 km まで測れるが、さらにそれ以上の距離でも大体を地図などで推定できれば、その数倍まで測定できる。

以上の関係を表にするとつぎのようになる。

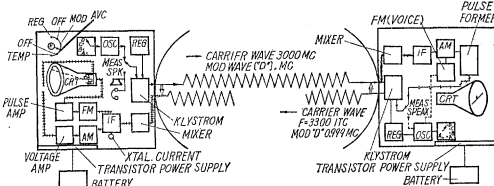
パターン	D	C	B	A
測定周波数	9 000	9 900	9 990	10 000 Mc
計算	A-D	A-C	A-B	A
測定桁	5 桁	4 桁	3 桁	下 2 桁

基準尺となる波長と波長との接続は電波であるので正確であるから位相差の測定誤差は全体の長さに対してわずかなものとなるわけである。その精度はつぎのようで図-3 に示したとおりである。

$$\Delta D = 5 \text{ m} \pm D/300\,000$$

テルロメータのブロック図は図-4 に示すとおりで標準となる波長 (10 Mc) の電波は恒温室に入った水晶発振器の発振によって行なわれ、変調されて、超短波の搬送波 (3 000 Mc) にのせて測定点 (主局) の機械から発振され目標点 (従局) の機械に至りエネルギーを補強されて主局に帰ってくる。

図-4 テルロメータ



波長の長さは電波の速度として測られているので、電波の速度が基準となつて、つぎの値が採用されている。実際は往復距離が測られているのでその 1/2 となる。

$$V = \frac{299\,792.5 \text{ km}}{n} / \text{sec}$$

電波速度 (V) は媒体の屈折率 (n) によって変化するので、空気湿度と蒸気圧とによって補正を行なう必要がある。

標準波長の位相差の測定は正逆方向にして測って平均

をとって精度をあげている。これはちょうどトランシットで水平目盛を 180° 2 カ所で測って平均をとり、目盛板の偏心誤差を消去しているのと同様に誤差を消去するためである。発振される電波は指向性があるが、幾分の拡がりをもつので、機械の設置は大体の方向に向けるだけで良い。また見とおしもさほど良くなくとも測定可能である。しかし前面に電波をさきぎったり、反射したりするものない測定点を選ぶ必要がある。また付近にレーダーなどがあると影響を受け、みだされる。この方法によると測定される距離は斜距離であるから、経緯儀で目標点までの垂直角を測定するか、精密な気圧測高計で 2 点間の高度差を求めて、計算で水平、垂直距離を求めねばならない。三脚は経緯儀と共用できて、また機械自身を使って両点間の無線通話ができる。

この機械は電波法の適用を受けるので、所有者は無線局としての許可を受ける必要があり、操作者は特殊無線士のレーダーと無線電話の資格者でなければならない。

電源は 20 AH くらいの蓄電池が必要である。

現在類似のものがあるので表-1 に示した。

e) 光波による距離測定機—ジオジメータ 前節の電波によるものと全く同一原理で光波をスケールとするものに Geodimeter がある。

これは図-5 に示すとおりで光を高周波電圧をかけたケルセルを通して変調したのち平行光線として出し、目標点に設置したミラーから帰ってきた光を光電管で受けてもとの光との位相差を測るのである。目標点に設置するミラーはトリプルミラーが用いられ、設置の方向を正確に向けなくとも常に発せられた方向に反射するようになっている。遠距離のためにはミラーの数の多いものを用い反射光のエネルギーを大きくする。電波によるものと異なって、昼間は外光に妨げられるので、夜間に比して測定距離が短くなる。

図-5 ジオジメータ

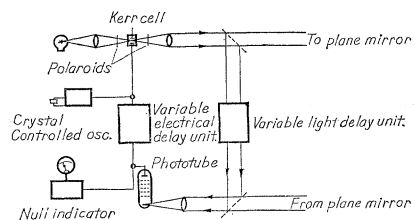


表-1 電波距離測定機

製作所 名称	Tellurometer Ltd. Micro-Distancer		Cubic Corp. Electrotape	Wild Distomat	安立電波 距離測定装置
型	MRA-1,2	MRA-3	DM-20	DI-50	ADM-3
測定範囲 (近 遠)	150 m 45 km	30 m 100 km	30 m 50 km	100 m 50 km	100 m 40 km
測定精度	5 cm ± D/300 000	5 cm ± D/300 000	1 cm ± D/300 000	2 cm ± D/10 000 ~ 100 000	3 cm ± D/200 000
変調周波数	10 Mc	10 Mc	10 Mc	10 000 Mc	7.5 Mc
搬送周波数	3 000 Mc	3 000 Mc	10 000 Mc	10 000 Mc	3 000 Mc

NASM-2 型は遠距離用で、10 m~30 km の範囲で、精度は $3 \text{ cm} \pm D/1\,000\,000$ で、ポータブルでない。これについては多谷虎男氏の報告（土木学会誌 44 巻 11 号 17 ページ）にくわしい。測定精度は 図-3 に示してある。

NASH-4 型は三脚にのせられるもので 15 m~15 km の測定範囲で、精度は $1 \text{ cm} \pm D/200\,000$ である。

NASH-4D は特殊の光源を用いていて、昼間は 16 m~18 km、夜間はその数倍の距離の測定ができる。

(2) 音波による水深測量—音響探査機

水深測量はレッドポールなどの直接法によるほか、深海で用いられる音響測深機は音波を発信し海底より反射してくる時間を記録し、音速を基準として深さを測るので海底の断面が縮尺化されて連続的に描画されるので、次節に述べる線の測量とすることができる。

発信する音波の周波数によって性能が違うので、つぎの音響探査機と比較するためその一例を示すとつぎのとおりである。

周波数	深度	精度
50 kc	0~175 m	$3 \text{ m} \pm D/166$
200 kc	0~200 m	$3 \text{ m} \pm D/1\,000$

これと同様の原理でその性能の音波のエネルギーと周波数とを適当に変えて、非常な衝撃の音波で比較的low周波の音波を発すると、海底よりの反射のみならず、海底下地層の境界面からの反射も記録され、またその媒体すなわち海底地質の性質によって記録される像の状態も異なるので、地質学的知識経験とサンプリングとによって海底地質の定性的ないし定量的判読探査ができるので音響探査機として沿岸などの開発に最近利用されている。

音響探査機は発信音波のエネルギーと周波数とによって性能が異なるので、目的によって適当のものを選ぶかあるいは各種の機械を併用して使用できれば理想的である。わが国においては Sparker, Sonoprome などチャーターされて使用されていたが、最近各種のものが整備されたので、その性能を示すと表-2 のごとくである。

表-2 音響探査機

製 作 所	海上電機	日本電気	Edgerton Inc.
名 称	Sonostrater	Geo Sonar	Sonar Boomer
エネルギー源	磁歪振動子	放 電	振 動 板
発信周波数	1 000~5 000 cps	300~500 cps	120~250 cps
指 向 性	有	無	無
水 深	30 m	100 m	100 m
探査可能深度	10~20 m	50~100 m	300 m
主 用 途	沿岸開発土木工事等	資源開発海底トンネル等	資源開発海底トンネル等
類似性能機	Sonoprome	Sparker	Sparker

4. 点の測量、点位置の決定

ある地点の位置を求めることは測量の主体で、前節の角度の測定と距離の測定とによって、三角測量またはト

ラバース測量を行なう方法がとられるが、距離測定が簡単に精密に行なわれるようになったので電波距離測定機のみによる三辺測量 (Trilateration) の方法もとられている。

水深測量の場合の測定点の位置の決定には六分儀等によって陸地の二つ以上のステーションとの関係を測角して求める方法が行なわれていたが、船上と2カ所のステーション間に2組の電波距離測定機を用いて同時観測して三辺測量的に位置を決定する方法が用いられている。この目的のために2組の電波距離測定機の同時観測を容易な構造にした Hydrodist がある。ハイドロディストを地質調査所によって陸で試験したつぎの結果が報告されている。

距離	4 600 m	9 400 m	35 000 m
誤 差	1/4 000	1/5 700	1/19 000

また電波を利用したものでは陸上の二つのステーションから発信されている電波の双曲線の交点によって位置を知るデッカ、ローランなどがある。

大陸間の関係位置を定める新しい天測法として、掩蔽観測法 (Occultation) が用いられている。これは星の月による星蝕を天体望遠鏡のホトマルチプライヤーで受けて観測し、タイマーとによって、天体の運行を基礎として位置を求めるのである。

5. 線と面との測量—写真測量

近時写真測量特に空中写真測量が測量において重要な位置を占めるに至ったのは、精度がいちじるしく向上し、経済的にも有利となったためである。空中写真測量の特長は現地踏査困難な所でも、ある地域内の相互関係がほぼ同一精度でとらえられ、室内での立体観測によって立体的地形を連続せる線としておって行けることである。すなわちこれは線の測量と見ることができる。

最近には前編に述べられているように空中写真測量によって写真地図 (Photomap) という面の測量も行なわれている。

(1) 空中写真測量写真機と図化機

立体視に必要な重なりを持った撮影帯 (ストリップ) は原理的には写真像自身のデータによって“相関標定”して接続して行けるが、測地座標系に対する“絶対標定”は地上測量による図根点を基準として定めねばならない。現在のところ地上測量による図根点を全くなくするわけにはいかないが、その数をいかに少なくして写真上で図根網を広地域 (ブロック) に拡大接続して行くかが“空中三角測量”の課題となっているほどである。

測量写真機は必要十分な精度でその画面距離 (焦点距離 F) と画面主点 (写真座標原点) との内部標定がわかっていなければならない。このことは地上写真測量の写

真儀でも同様である。

空中写真測量写真機は世界的にはほぼ規格統一されていて、最新のおもなるものは表-3のとおりである。写真像の精度を支配するものは地形の細部をいかに細かくとらえているかを示す対物レンズの線分解能(線数 1mm)と、地形の相互関係をいかに精密にとらえているかを示す対物レンズのディストーションとによる。ディストーションは画面主点を原点とした極座標の位置の誤差として表わせる。これらの性能は第二次大戦前と後とははいちじるしい進歩の差を示している。測角機と比較するため角分解能にすれば一級図化機で 10 秒程度である。

表-3 空中写真測量写真機

種類 画角	画面の 大きさ	ディスト ーション 最大 μ	分解能 線数/mm	基線比 B/H	主用途	例
普通角 60°	18×18	5	45-20	1/3	比高大 きい所	Zeiss RMK 21/18, Wild RC 8
広角 90°	23×23	5	40-20	2/3	一般	Zeiss RMK 15/23, Wild RC 8
超広角120°	23×23	5	35-15	1/1	小縮尺	Wild RC 9

また基線比 (B/H) は立体視のために必要な重なりを 60% とした場合の撮影基線 (B) に対する撮影高度 (H) との比で、これは高さの測定図化精度に影響する。この関係は写真測量の基礎を微分した式 (2) の誤差式によって知ることができ。4p は視差々の誤差を示す。

$$\Delta H = \pm \frac{H}{B} H \Delta p \dots \dots \dots (2)$$

この基線比を大きくして精度を高めるためと、できるだけ広地域を撮影して経済的にするために、写真機の画角はより広角のものが用いられている。超広角写真機は焦点距離が短くなるので小縮尺用となるので、わが国では用いられていないが、主に未開発地域で用いられ、地球上をカバーする撮影面積は超広角写真が主となりつつあるほどである。フィルムは安定の良いポリエステル系が用いられつつあり、また変形を補正できるレゾーカメラが用いられる。

写真機を選定すれば、基線比が定まり、あとは式 (2) でわかるように、撮影高度 (H)、したがって撮影縮尺 (F/H) が関係し、さらにそれから図化する場合の撮影縮尺と図化縮尺との関係といかなる図化機を用いるかに関係する。

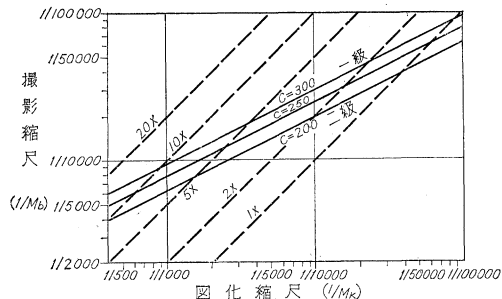
撮影縮尺 (1/M_b) と図化縮尺 (1/M_k) との関係は実験的に式 (3) が確かめられている。

$$M_b = C \sqrt{M_k} \dots \dots \dots (3)$$

そこで C は定数で 200~300 の値がとられていて、図化機などに関係する。図-6 はこの関係を示す。

図化機は一对の立体写真から撮影状態を再現して、縮尺化された立体像の光学的模型を形成し、これを立体観測して図化するもので大体三つの等級に区分されてい

図-6 撮影縮尺と図化縮尺との関係



る。一級図化機は撮影帯の連続接続ができる厳密解法の万能の機械、二級図化機は連続接続ができないが厳密解法の単能機械、三級図化機は近似的解法の簡単な機械である。図化機の精度の表現には (a) 撮影高度に対する割合で示すもの、(b) 図化可能の等高線のわかる C-factor で表わすもの、(c) 式 (3) の C で表わすものなどがあって、これらの大体を各等級の図化機について示すと表-4 のとおりである。

表-4 空中写真測量図化機

種類	図化縮尺/ 撮影縮尺 最大	(a) 高さの 精度	(b) C-factor	(c) 式(3)の C	例
一級	10×	H/10 000 ~20 000	1500	250~300	Zeiss C 8, Wild A 7
二級A	8×	H/5 000 ~7 500	1500	200~250	Wild A 8
二級B	5×	H/5 000	1000	200	Kersh
三級	2.5×	H/1 000	—	—	Zeiss-Stereotop

図化機は構造上からいえば光学的投影、機械的投影、光学的機械的投影などがある。

空中写真を判読して地形または植生物などの調査を行なうには三級以下の機械でよく判読技術の心得がありさえすればステレオスコープで十分である。

空中写真の場合は被写体全体としてコントラストが小さいので陰影部のある場合には濃度の全域にわたって細部を出して焼付けることが困難であるので、写真の部分部分の焼付濃度を自動的に調節しながら焼付ける電子プリンターが有効である。

a) 写真測量図化機の数値化 電子計算機の発達によって、図化機で直接図化しないで、その撮影座標系に A-D 変換機をとりつけ、アナログの動きを、数値化(デジタル化)し、テープまたはカードにさん孔し、電子計算機にかけて、標定計算、座標変換、平均計算などを行なう方法がとられている。

また普通に図化して地形を等高線で表わした平面図としないで、ある縦断または横断をとる断面測定機を図化機にとりつけ道路設計などに利用している。これについては後編で述べられるはずである。図根点の展開にも座標値を入力として自動的に展開する自動展開機も用いられている。最近では写真そのものからコンパレータで写真

座標を測定しテープまたはカードにさん孔し、電子計算機にかけ、相関標定、絶対標定、そして図根点を基準とする平均計算などを数値処理によって行なう空中三角測量の解析法も行なわれている。この方法は地籍測量にも有効である。

以上の方法は空中写真からの点の測量と見ることができ。

(2) 面の測量—オルソ ホトスコープ

空中写真像は中心撮影像であるので高さの差によるずれがあるので、これを平行投影に変換して焼付けるのが Orthophotoscope である。これは半自動的であるが光学的投影の図化機にとりつけられ、全地域をスリットに分け走査して、その区間を立体視して高さを修正しながら狭い幅で焼付けて、全地域におよぼすものである。

6. 製 図

測量した成果にもとづく原図を清絵、墨入し、複写して印刷原板を作る代りに、コーティングしたマイラー上に針のついた Scriber で図をたどり削りとり、ただちにネガの印刷原板とするスクライビング法が用いられている。

また青図原図もマイラーが用いられているが、適当な処理をほどこしたものでないと、焼付のとき変形を生ずるので注意を要する。

7. あとがき

測量機械は新しい原理のものであっても、野外で用いられるものであるため、小型、軽量であることが重要な要素となっている。したがってその精度はその目的に応じて、構造上ぎりぎりのできているので、使用に当たっては必要にしてかつ十分な点検規正（調整）を行なった上で使用しなければならぬことはいままでもないことである。調整の原則は機械誤差を消去することにあるが、その調整順序は一度調整した要素がつぎに行なう調整によってくずされないようであれば迅速に行なうことができなく、また不可能な場合も生ずる。

それぞれに規定された方法、順序にしたがって調整した上で、残存機械誤差はできるだけ消去できるような測量方法を行なって、そして得られた測量値の処理には合理的誤差平均法を行なえば良い。

百年一日のようであった測量機械も、ようやく新しい原理のものが出現してきたが、その機械がどの範囲でどの程度に用いられるべきものであるかを知るのが、先決の重要問題であるので、この点に重点をおいたため概念的なものとなってしまった。個々の機械を実際に使用する場合はそれぞれの参考文献を参照されたい。

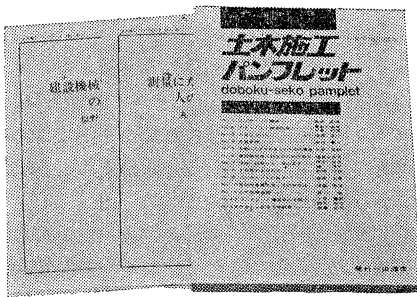
また機械を選定するには当然その経済性からも考慮しなければならないが、ふれることができなかった。

月刊「土木施工」の読者賞を得た連載講座・教室の1冊本

1期13冊ケース入 (分売可)

土木施工パンフレット

●学生・現場技術者の好テキスト●



- No. 1 コンクリート舗装.....磯崎 正晴
- No. 2 アスファルト舗装の施工.....亀井川 振興
中島 彬博
- No. 3 土質について.....福岡 正巳
- No. 4 品質管理.....中村 慶一
- No. 5 測量にたずさわる人のための講座.....丸安 隆和
- No. 6 建設機械施工技士のための教室.....塩野入 宗吉
- No. 7 溶接・段取りから施工まで.....梅主 俊次
堤 清平
- No. 8 土留壁および石工.....磯崎 伝作
- No. 9 コンクリートの施工.....磯崎 正晴
- No. 10 発破用産業火薬とその取扱法.....須藤 秀治
- No. 11 土木用接着剤.....瀬川 敏
- No. 12 コンクリート構造物の支保工.....小寺 重郎
鈴木 和也
- No. 13 やさしい応用力学教室.....後藤 正司

山海堂 東京都新宿区細工町15
振替東京 194982

B5・各100~130円