

講 座
新しい測量 5
地上写真測量を主として
丸 安 隆 和* 大 島 太 市**

1. ま え が き

写真測量といえば、航空写真を用いて行なう地図作成だけを考える人が多い。航空写真測量は、それぐらいわれわれの仕事の上に密接な関連をもつようになっている。しかし、この原理は、地上で撮影した写真に対してもそのまま利用でき、これが非常に広い応用分野をもっている。しかも、普通の測定方法では不可能な三次元的なデメンションを広い範囲にわたって、またその時間的な変化をもとらえることができる点で、測定技術としてはきわめてユニークな方法といえるであろう。このために、後で説明するように、構造物の荷重による変形なども、多くの点で同時に測定できる。

写真を使って測定することの、いま一つの大きい利点は、測定しようとする物体に直接さわることなく、またはそれに近づけないような場合でも、写真が適正な方法で撮影できさえすればよいという点をあげることができる。このために、たとえばダム現場で掘削量を測定する場合であるとか、重要な文化財で、さわることのできないものなどの実測には非常に好都合である。

写真は撮影瞬間における状態を正しく記録にとどめるので、移り変わる現象のある瞬間の姿を正確に定量化するには、非常に好都合である。こんな利点を用いて、高速で走る自動車のタイヤの変形なども正確にとらえることができた。波の実験や、川の流れは実測に使えることは広くすでに知られている。

複雑な形をしたものの実測は、非常に時間がかかり、なかなか困難なことである。

写真測量を使うと、対象物がどんなにこみ入った形をしていても、少し誇張すれば、平たいものを測定するよりも、むしろ凸凹のあるもののほうが測定が容易である。仏像の実測を行ったり、人間の顔を図面にしたり、建築物の詳細を図面にすることなど、非常に容易である。

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 東京大学生産技術研究所

写真測量を使うと、現場で行なう作業が写真撮影とこれに付随するわずかな作業でよいから、時間的に短くてすむ、そのため時間に制約された、たとえば外地における測定作業とか、交通を妨げないようにするための交通事故現場の検証とかに好都合である。この点で東大が行なったインド遺蹟調査に、非常に大きい功績を残した。

自動車工業におけるモデルの線図化に、写真測量を応用して、新車のでき上がるまでの時日を非常に短縮できるようになったのも、最近の大きい利用開発であって、これが現在アメリカ自動車工業にも大きい話題となっている。

レントゲン写真、顕微鏡写真などに写真測量の技術を応用して、医学の面に貢献しているし、人体の測定を行なうことによって、人間工学や、衣服製造学にもお役に立っている。直接触れないもの、常に変化してやまないものの実態を知るためのただ一つの方法としての写真測量の威力を示したものとといえるであろう。

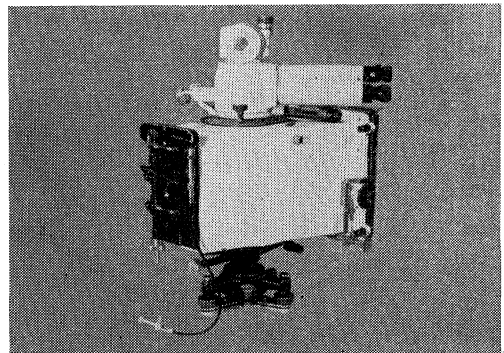
写真測量の技術は、上述のように、非常に広い応用面をもつようになってきたが、それがどんな方法で、どんな精度でなされるか、どんな点が写真測量の問題点となるかについて説明し、その實際例の二、三について紹介することにしよう。写真測量の原理は、どんな書物にも書かれていることであるから、ここでは省略することにする。

2. 使用機械

(1) カメラ

写真測量では、撮された写真が測定の基本であるから、その写真は正確に物体を縮図したものでなければならぬ。いいかえると、レンズのひずみによる像のずれがあってはならないし、フィルム面がたるんでいたり、光軸に垂直になっていなかったりしてはならない。普通われわれの使っているカメラでは、この条件を満足するものはないといってよいだろう。したがって、写真測量をしようとするれば、まずカメラの性能、機構について十

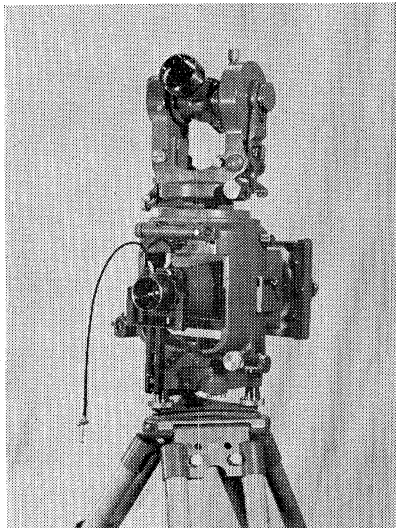
写真-1 Zess 製写真経緯儀 CIII B



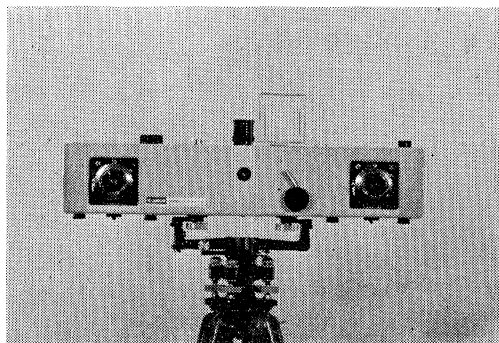
分検討することが必要である。焦点距離も正しく決定されなければならない。

われわれの研究室で現在使っているカメラは Zeiss 製写真経緯儀 CⅢB (写真—1) と, Wild 社 (スイス) 製 P 20 写真経緯儀 (写真—2) で, 乾板は前者が 13 cm × 18 cm, 後者は 15 cm × 10 cm, 焦点距離は 193.22 mm と 165.07 mm である。写真—3 は最近キャノンカメラ KK

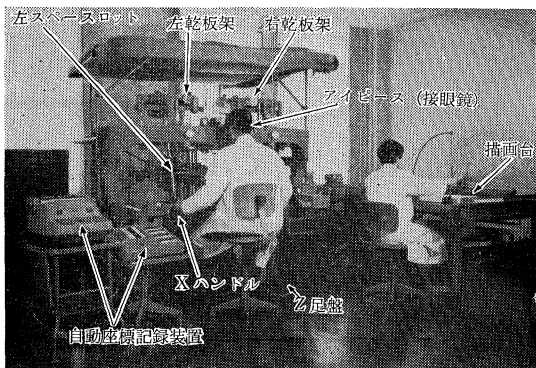
写真—2 Wild 社製 P 20 写真経緯儀



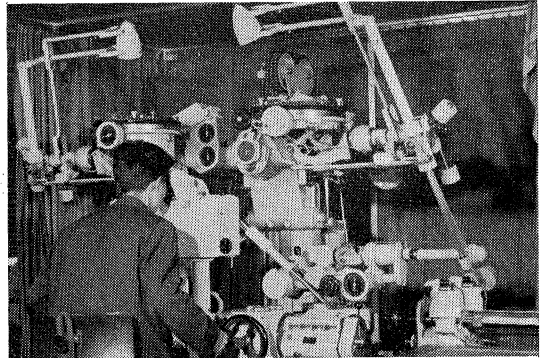
写真—3 固定基線をもつ実体写真カメラ



写真—4 A 7 Autograph



写真—5 Stereoplanigraph C 8



でつくった固定基線(40 cm) をとりつけた小型カメラである。

撮影された写真は図化機にかけて, 各種の測定が行なわれる, 地上写真を図化測定するには, いわゆる一級図化機が必要である。これは航空写真の場合には, カメラを真下に向けて撮影した写真であるが, 地上写真はカメラ軸が水平であるので, Z (高さ) 一定の等高線を描いて行くには, Y 軸 と Z 軸の切りかえができる構造になっていなければならないようである。この目的のために, わが国では Autograph A 7 (Wild 製, 写真—4) と Stereo planigraph C 8 (Zeiss 製, 写真—5) が使われている。なお, これらの機械には, 測定点の X, Y, Z の座標値をタイプできる印字機および, これらの値を直接テープに穿孔するパンチャーが付属されている。したがって, これらの値を使えば, 任意の断面図が描けるし, テープを電子計算機にかけて, 面積や体積, その他の計算が容易に行なうことができる。

3. 撮影方法

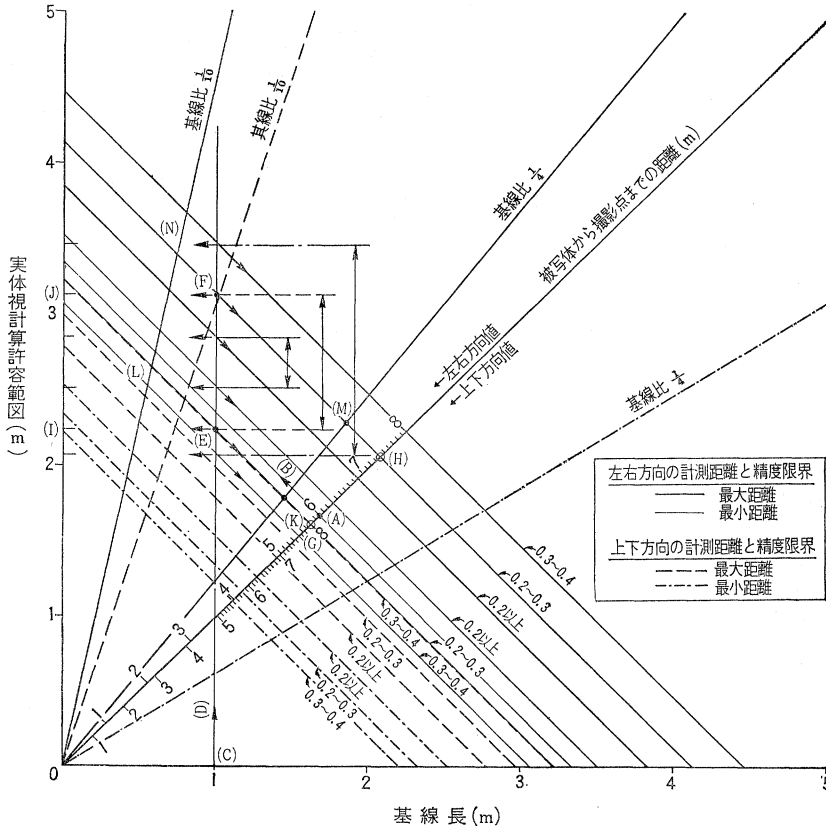
撮影は一定距離はなれた 2 点から平行撮影される。地上写真の場合には, この撮影基線は正確にはかれるし, またカメラも正しく水平に, また平行にすえつけられるので, 図化のとき大変手数がかぶけるが, それでも点検の目的に使うため, 撮影される部分に, 相対的に位置と高さの正確にきめられた点を同時に写しこむことができるよう, いくつかの標定点を配置しておく。

撮影面が平らで, 単調な色調であると, 図化機にかけて実体視したとき, 表面位置を確認することが困難となり, 測定精度があがらなくなる。そのために, 表面に適当な塗装を施す方法がとられる。

撮影基線をいくらにとるかは, 被写体までの距離と, 要求される測定精度とに関係する。およその関係は, 図—1 に示してある。

一級図化機を用いて測定する場合, 像は約 10 倍に拡大して観察されるので, 乾板乳剤は解像力がよく, 微粒

図-1 実体視計測許容範囲および許容計測誤差と基線長との関係



使用例：撮影点より被写体までの最小距離を 6m、基線長を 1m、計測誤差を 0.3mm 以上とすると、撮影点より何 m まで、また左右方向については何 m まで計測できるか。

解

手順	内 容	図示符号
1.	斜向軸（被写体から撮影点までの距離）上に 6m の位置をしるす。	A
2.	A より斜向軸に対し垂直線を引く。	B
3.	横軸（基線長）に 1m の位置をしるす。	C
4.	C より横軸に対し垂直線を引く。	D
5.	(4) が引かれた D 線と計測誤差値を示す線（実線の 0.2~0.3 と記してある線）との交点を、それぞれ E、F とする。	E, F
6.	E、F 点の値を斜向軸上にしるす。	G, H
7.	G=5.8m、H=7.4m となり、撮影点より 5.8m~7.4m の間は 0.3mm 以上の計測が可能である。	
8.	また、E、F 点を縦軸上にしるす。	I, J
9.	I=2.241m、J=3.135m、左右の実体視範囲 5.482m (2×2.241m+1m) と 7.270m (2×3.135m+1m)	

答

計測許容範囲は
 撮影点より 5.8m~7.4m の範囲
 基線 X の直角二等分線から両側 5.8m の位置で 2.74m
 7.4m の位置で 3.64m ずつの範囲

子でなければならない。照明のあて方も測定精度に大きい関係がある。

4. 応 用 例

現在写真測量を利用して測定している対象はその種類

が非常に多い。黒部川第四ダムの建設時には、数回にわたってダム岩盤の爆破前と爆破後に撮影、測定を行ない、1回爆破によって岩がどれほど掘削されるかを知り、次回爆破設計の基準としたし、大井川奥泉ダムでは、ダム越流によって、ダム下流側の洗掘の状況をしらべるため、数年にわたって写真測量を行ない、転石一つ一つの移動状況を明らかにするのに利用された。

若戸大橋が夏と冬とでその中央部のたわみが異なり、水面とのクリアランスが変わり、これによる船の通行に支障の有無を検討するため、いま海上保安庁で写真測量を行なっているし、気象庁では上空の煙の移動を測定して、風速の測定に利用し、ロケット追跡にも利用されだした。昨冬はスモッグの拡散現象の解明に地上写真測量が利用され、この冬にも引き続きその研究が続けられる。なだれの実態測定にも使われた。これらの研究結果は、それぞれ近い時期に発表されるであろう。考古学への利用として、鎌倉大仏や大谷

石仏、薬師寺の仏像などの測定を行ない、大いにその価値を認められたが、その成果の概要は東大生産技術研究所報告第 13 巻 7 号に紹介した。

自動車工業への利用は今後もますますその利用価値を高めることになると思われるが、その概要は土木学会論

文集第106号に、水車の羽根の精密測定の結果とともに紹介した。本編では、紙面の制限もあり、新しい応用例二、三について概説しよう。

(1) オリンピック国立屋内総合競技場

a) 概要 写真-6はその主体育館の模型によるできり図を示したもので、写真-7は建設中の現状を示している。この写真でわかるように、つり橋のケーブルに似た役をするメインケーブルが建物の軸方向に2本走り、これからスタンドの外周をまわる境界へ向かってつり材をかけ、これによって定まる曲面を押え網で緊張して安定させている。押え網としては44φの片よりロープが用いられている。メインケーブルは、公称径52φの片よりロープ31本、同じく34.5φのもの6本よりなっている。屋根面の形は造形上の要求から、つり材方向断面が自然なカタナリー曲線からかなりはずれている。このような曲面を作るためと、屋根面の二次以上の振動に対する剛性を高めるために、つり材としてI型钢

写真-6 主体育館模型

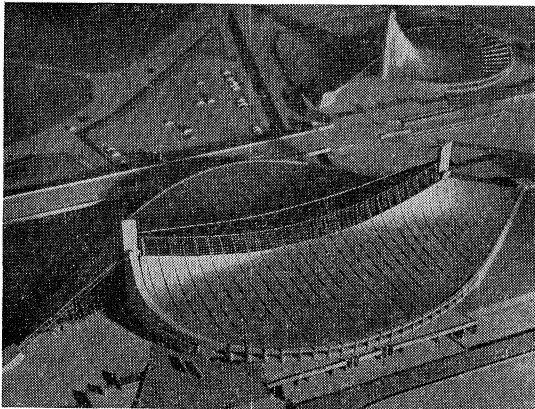
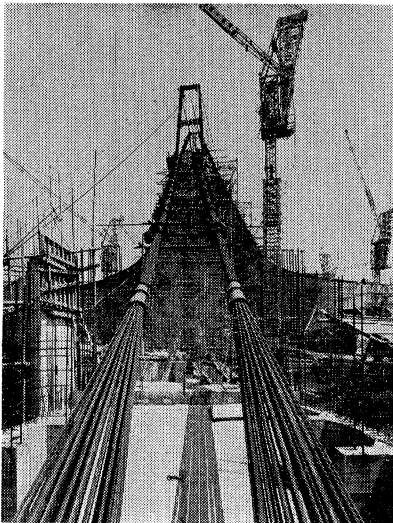


写真-7



が用いられている。この屋根のI型钢の形状がつぎの9段階の荷重状態で、どのようなたわみを起こすかを模型と実構造物について測定し、設計上の仮定が、計算値と比較しどの程度に実際に一致するかを調べた。

9段階の荷重状態はつぎのとおりである。

- 1) ロープ自重のみ
- 2) 屋根荷重の1/2 載荷
- 3) 屋根荷重満載 (100 kg/m²)
- 4) 押え網によるプレストレス導入
- 5) 北側半面雪荷重載荷 (60 kg/m²)
- 6) 他の半面にも雪荷重載荷
- 7) 5) と 6) による追加荷重除去
- 8) 全面除荷 (風荷重による全面 Suction)
- 9) 押え網の張力除去

b) 測定結果の設計への応用 つり屋根構造は前述のように、世界的にも新しい建築構造形式で、その解析方法についても種々の提案がなされているが、まだ確定的なものを見るに至っていない。

つり屋根構造理論としては、曲面の立体性と、サスペンションの非線型性(つり橋のたわみ度理論に相当)をとともふくんでいるものが、正攻法であると考えられるが、これは容易に推察できる。そこで一つの近似法として、微小変形理論(つり橋の弾性理論に相当)が考えられるが、この方法を用いた場合の解の近似度は、つり屋根の構造形式、荷重のかかり方などによって、まちまちであろう。

今回の実験でも、荷重によるケーブルの変形量、変形の性質をつかみ、当面する構造に最も適した解析法を見出す手がかりにしたいという希望があったわけである。

写真測定によって、各ケーブルの全長にわたっての変形が得られたが、これにより、一般の荷重に対しては、微小変形理論が適用し得るという見とおしを得ることができ、目下この線に沿って解析が進められている。解析の結果が出た場合にも、これと実験結果を比較する際に、ケーブルの変形が全長にわたって三次元的に記録されていることは非常に好都合である。

つぎに、建築設計の立場からは、今回の写真測定はつぎのような意味で大いに利用された。

通常の建物の場合には、実験用のモデルにしても、実物建物にしても、形状は型わくや現寸図によって、設計図のとおりものを形

図-2

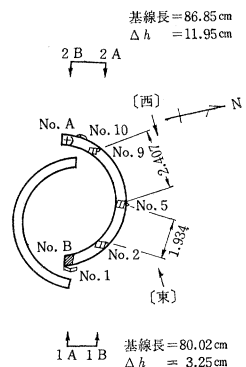


図-3

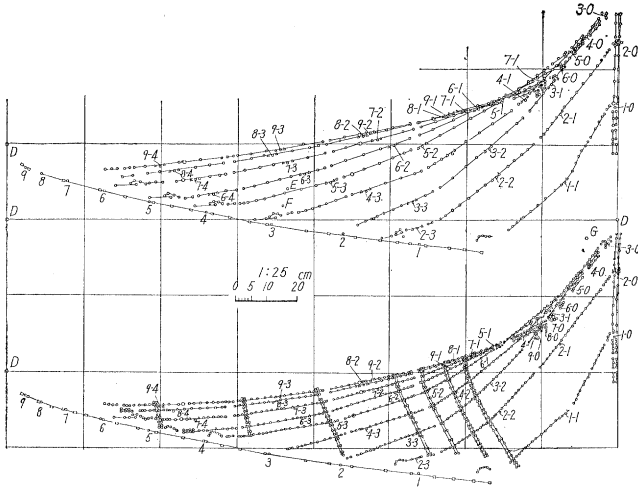


図-4

づることができる。しかし、サスペンション構造では、モデルや実物は、定められた形状の境界構造を製作した後、屋根面自体の形を定めるには、ケーブルの長さによつて異なる。こうしてできあがった立体が、はたして設計図どおりのものになっているかどうかの検討を、屋根面全体にわたって行なうことは、通常の方法ではまったく容易でない。今回の実験に用いた試験体は、写真測定結果の図化により、ほぼ正確に設計どおりの形状が再現されたことを確認することができた。

まったく同様のことが実物に対してもいえるので、建築現場での作業の進行につれて、実物の写真測定を行ない、施工管理の面にも利用する予定になっている。

なお、今回の実験においては、たわみの測定には1/100 mm ダイヤルゲージを併用し、また模型各部の応力測定には、電気抵抗線ひずみ計を用いた。これらの結果は、写真による変形の測定結果とよい一致を示している。図-2 は撮影点と被写体との関係を示した略図である。写真-8 はその測定モデルの全景を示している。

写真-8

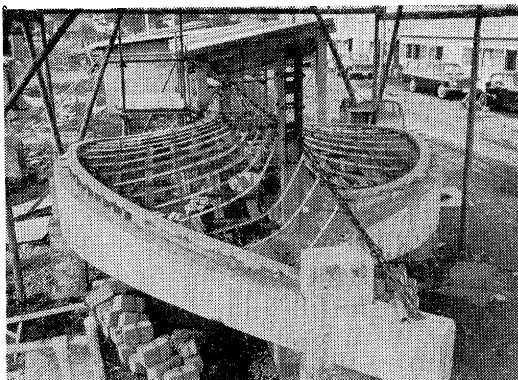
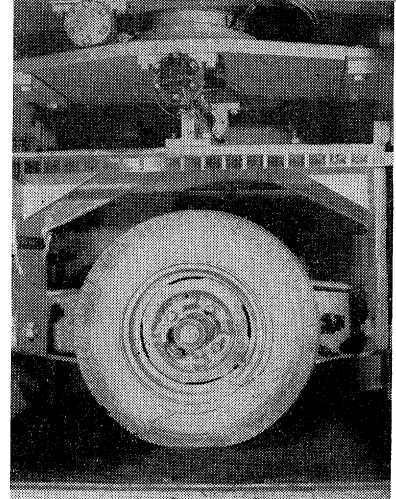


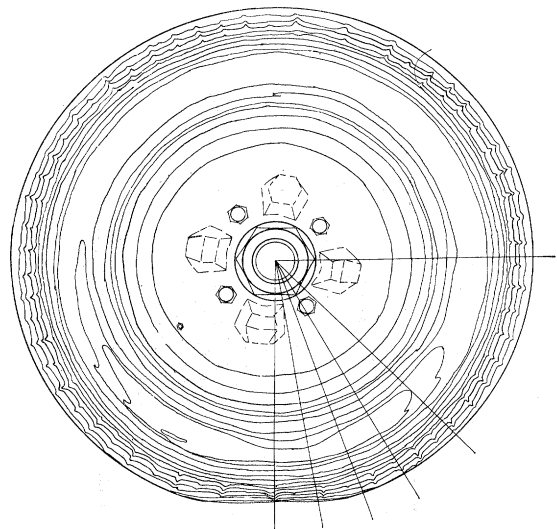
写真-9 荷重を乗せて回転しているところ



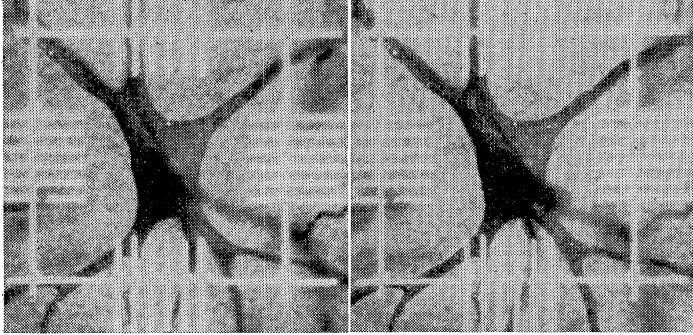
c) 図化測定作業とその成果について 図化測定作業は Autograph A7 を使って、機械縮尺 1/15, 図化縮尺 1/2.5 で実施した。その際の Y 方向（奥行方向）の描画の範囲は 2.10 m から 7.27 m である。

- 1) 東半分（北側）のケーブルのみのたわみ曲線図縮尺 1/2.5 (図-3)
- 2) 東半分のケーブルの載荷緊張後の曲線図, 縮尺 1/2.5 (図-4)
- 3) 東半分のケーブルのたわみ曲線図 縮尺 1/2.5
各ケーブルにつき上から無荷重, 風による吸上げ, 自重緊張, 雪荷重の各状態を示す。
- 4) 西半分（北側）のケーブルのたわみ曲線図, 縮尺 1/2.5

図-5 写真-9 を図化したもの（タイヤ特性形状図）



写真—10



各ケーブルにつき最上線は無荷重，最下線は設計状態，中央は風による吸上げ状態を示す。

3),4)の場合にはケーブルごとに高さ方向1~5cm(図面上)ずらして，そのたわみ図を描いた。

図面中◎印はダイヤルゲージ測定点を示し，△—○—△は写真測定用のマーク点の位置を示している。

現在これらの成果品を用いて坪井研究室で種々の検討が行なわれている。

(2) タイヤ変形の測定

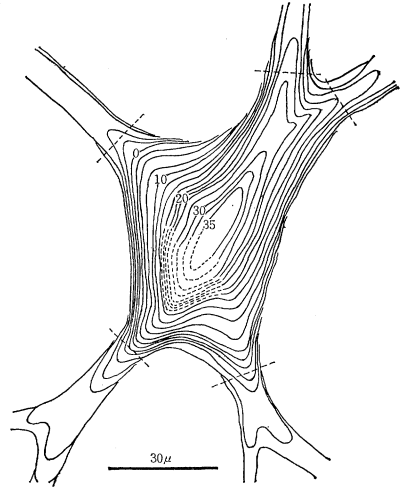
高速自動車道が完成し，自動車の速度も非常に高くなってきたが，これにともなって空気タイヤの限界が問題になってきた。時速120km以上になるとタイヤの寿命がきわめて短くなることにすでに知られているが，その原因究明に，タイヤの変形の実状を知ることがその先決の問題である。従来から高速カメラで諸現象の解析が行なわれているが，それは定性的な域を出なかったが，立体写真法によって，はじめてその実際を知ることができた。写真—9は荷重をのせて回転しているとき，これを1/1で図化したのが図—5である。これからわかるように，接地部分が平らにつぶされているが，横へのふくらみは，接地部分より，むしろその後方において大きくなっている。回転が早くなると，このひずみが完全にもとに戻らないうちに再び圧縮され，ひずみが次第に蓄積されて，タイヤの寿命を極度に短くするのであろう。

(3) 顕微鏡写真

写真—10は脳細胞の顕微鏡写真である。手の光や足の先に与えられた刺戟は，神経を通して，樹枝状突起からこの脳細胞に伝えられ，ここで刺戟に対する反応を軸索を通して命令する。この脳細胞の大きさや表面積は，いままできわめて幼稚な方法で推定されていたが，今度新しい撮影方法を工夫して立体測定が可能になり，脳細胞の測定を開始した。共同研究の医学者は世界でも全く最初の試みだといっている。

図—6は図化した一例である。表面積は，測定データを直接電子計算機にかけて求めるプログラミングもできている。表面積が多いのは“しわ”のためで，脳のしわ

図—6



が多い人は頭がよいといわれているが，どのような結果になるかはこれからの研究が教えてくれるだろう。

(4) 交通事故測定への応用

日ごとに増大する近代交通の密度は，警察事故班にとってもまた大きい問題となっている。特に東京のような大都会で，交通事故現場での現場検証と測定の遅延は，交通流のいっそうの混雑をまねき，大きな社会問題にまで発展する可能性をもっている。このような状態での大きな要望は，交通事故現場の測定と現場検証が正確，完全，しかも急速に行なわれるということである。この要望に最も適切な解答を与えるものとして写真測量の方法がある。筆者は前よりこのことについて，ドイツのベルリン市における交通事故の処理方法に自動車の上にカメラを積みこんで，事故現場に急派する方法が用いられ，非常に効果をおさめている。日本の道路でも，この方法が目ざされて，警察庁でも非常にのり気である。図—7は事故現場を図化した例である。

図—7

