

## 二層媒質写真測量の実験的検討

—水中にある物体の写真測量—

TESTS OF APPROXIMATE ORIENTATION IN TWO-MEDIUM PHOTOGRAMMETRY  
— TEST MEASUREMENTS OF UNDERWATER OBJECTS IN LABORATORY—

森 忠 次\*・岡 本 厚\*\*

By Chuji Mori and Atsushi Okamoto

## 1. 緒 言

写真測量により水中物体の位置・寸法・性状などを把握できれば、人間が直接物体に近づくことなく状況調査が可能となるから、写真測量は水中調査の有力な手段である。しかしながら、光の到達距離の短いこと、正しい色がとらえられないこと、水中専用の写真機を必要とすることなどの難点があり、これらのどれもが簡単な解決法のあるものではない。ただ、最後の点については、水中撮影専用の写真機さえあればよい。しかしながら、単に通常の写真機を耐水容器に入れて水中で操作できるようにしただけでは、写真光学上からも実体写真測量上からも多くの問題が生ずる。水中の観察、水理現象の解明その他の目的のために、通常の写真機を用いて空気中から水中の物体を写して観察する場合がよくあるが、この場合においても上記と全く同様である。

媒質の途中に光の屈折面が存在すれば、写真としてはひずみのない像が得られる場合でも、実体写真測量に際しては種々の問題を生じ、かなり以前から二層媒質写真測量として取扱われてきた。著者らは、二層媒質写真測量における位置決定法と標定法について、すでに解析的な面から検討を加えたが、ここでは、通常の写真機による図化作業の難易、測定条件と精度との関連などを事例によって調べることにした。

本文は、屈折面が完全に平面である場合のみを取扱う。したがって、写真機レンズ前面を平面ガラスとした耐水容器を用いて水中で撮影する場合、静水面あるいは容器の平面ガラス製側面を通して空気中から水中を撮影する場合などに適用できる。これらの

場合においては、水中と空気中との光線の経路の長さの割合が大きくなるほど実体写真測量上の難点が生じ、また近似的な手法を採用したときの誤差が増大する。したがって、事例では、水中と空気中との光線の経路長の比は、約0.4という比較的大きい値とした。

使用した写真機が精密測量用のものでなかったため、測定精度に関連する数字は、現今において求める最高精度のものではない。理想的な水中写真測量関係の様式一式が得られない現状において、少し面倒をかければ、一般の図化機を用いてどの程度の精度で近距離水中写真測量ができるかを事例によって調べたものである。

## 2. 水中写真測量と二層媒質写真測量

通常の写真機は、図-1 (a) に示すように、レンズの前後面ともに空気が存在するものとして設計されている。写真測量においては、第一節点  $N_1$  に入る光線の軸となす角  $\tau_1$  と第二節点  $N_2$  から発する光線の軸となす角  $\tau_2$  とが等しいことを原則とし、測量用写真機では、ひずみの小さいレンズを用いて、実用上この原則が成立するようにしている。しかしながら、通常の写真機のレンズ前面を直接水に触れさせると、前面媒質の光の屈折率が設計条件と異なるために、 $\tau_2$  に対応する水中光線の角度は  $\tau_1'$  となり、 $\tau_1' \neq \tau_2$  となる。一方、レンズを静水面から離して上に位置せしめたり、レンズ前面に平面ガラス窓を作って写真機を水中に入れたときには、図-1 (b) のように、レンズ直前では  $\tau_1 = \tau_2$  となるが、水

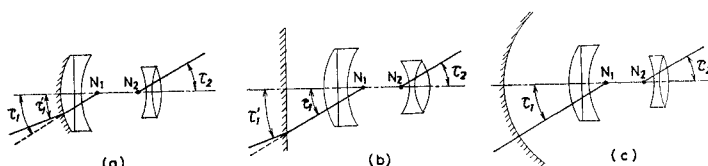


図-1 水中撮影に際する光の屈折

\* 正会員 工博 京都大学工学部交通  
土木学教室

\*\* 学生会員 京都大学大学院工学研究科

中光線の角度はやはり  $\tau_1' \cong \tau_2$  である。写真測量では、角度  $\tau_2$  の光線の像を得て、これを用いて水中光線の位置と方向を求めなければならないから、図-1 (b) の場合における補正法を考えなければならない。このような場合が、ここで取扱う二層媒質写真測量である。

たとえば、図-2 は、水を半分入れた水槽に測量用ポールと円柱を置き、水槽の鉛直ガラス側面の外側から写した写真である。写真に写っている2物体の上半は空中、下半は水中を通して写されており、このような撮影法では、像と水中物体との関係が空中の場合と大いに異なることが明らかであろう。

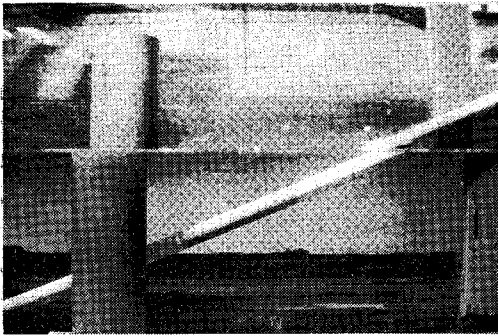


図-2 水の有無による物体の写り方の比較

水中の物体を通常の写真機で撮影しようとするとき、色取差をはじめとする各種の収差、写角の変化、焦点のずれなど多くの写真光学上の問題を生ずる<sup>1),2)</sup>。ここでは、これらの点については触れずに、つぎのことを付言しておく。レンズ前面に球形の窓をつけ、その球面の中心とレンズ第一節点を正確に一致させるようにした耐水容器によって水中写真を撮影することができれば(図-1 (c))、本節で示したような写真光学上および実体写真測量上の難点のほとんどが解決する。

### 3. 二層媒質写真測量における近似的位置測定と標定

実体写真測量では、任意の点の像を写した1対の写真を用い、もとの空間における2本の光線の位置と方向とを再現し、両光線の交会点としてもとの点の位置を求める。この様子を、水と空気2層よりなる媒質の場合について示したものが図-3である。水中の点Pより発し写真機レンズ  $O_1, O_2$  に到達する2本の光線の経路を細線で示してある。 $Q_1, Q_2$  は屈折面上の点である。これを通常の写真機で再現すれば、光線は  $O_1Q_1, O_2Q_2$  となって、一般には両光線の交会点が存在しない。したがって、純粋な意味での実体写真測量が不可能となる。そこで、近似的な位置決定法として、つぎのような方法を採用する<sup>3)</sup>。

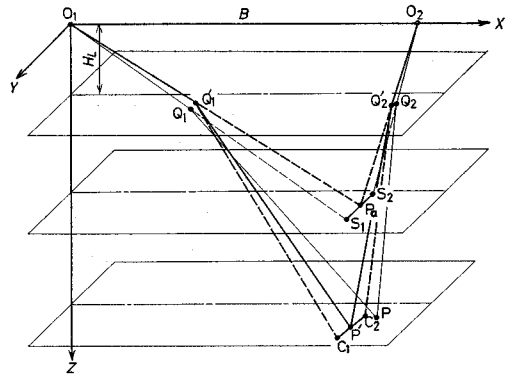


図-3 光の経路と水中測点の近似的位置測定

図-3 において、水面(屈折面)に平行に  $XY$  面をとり、 $Z$  軸は屈折面に直交するものとする。なお、 $O_1$  を原点として  $O_1O_2$  の方向に  $X$  軸を選ぶ。まず、 $XY$  面に平行なある面に2つの光線  $O_1Q_1, O_2Q_2$  を投影したとき、2本の光線が同一の  $X$  座標を占めるような点  $S_1, S_2$  を求め、これら2点の中点  $P_a$  を点  $P$  の見かけ位置と考える。つぎに、光線  $O_1Q_1', O_2Q_2'$  ( $Q_1', Q_2'$  は屈折面上の点) が光の屈折法則に従うものとして水中光線  $Q_1'C_1, Q_2'C_2$  の方向を計算し、ままと同様に、 $XY$  面に平行な面上において同一の  $X$  座標を占めるような2点  $C_1, C_2$  を求める。そして、 $C_1$  と  $C_2$  との中点  $P'$  を求める点  $P$  の位置と考える。

こうすれば、空中光線  $O_1Q_1', O_2Q_2'$  および水中光線  $Q_1'C_1, Q_2'C_2$  はともに正しい光線とは一致しないが、求めた点  $P'$  の位置誤差は小さい。ただし、水深  $H_w$  と被写体から写真機までの距離  $H$  との比  $H_w/H$  が大きくなるほど誤差が増大する<sup>3)</sup>。

通常の写真機を用いてこのような位置測定が可能であれば、同じ写真機を用いて1対の写真を標定することも不可能でないと考えられ、実用的な方法としてつぎのような近似標定法を提案した<sup>4)</sup>。

通常の写真機を使用して1対の写真を標定するときには、相互標定と絶対標定とに分けるのが通例であるから、この方式をそのまま適用することにする。通常の写真機では、図-3における光線の中で  $O_1Q_1, O_2Q_2$  しか再現できないから、まず見かけ位置  $P_a$  を測定対象とする。

写真機の標定要素、標定点位置などの近似値および水面位置などが全部既知であり、さらに媒質の屈折率もわかっているとすると、標定点の見かけ位置  $P_a$  を計算することができる。もちろん、点  $S_1, S_2$  の位置も計算できるから、距離  $S_1S_2$  が求められる。この距離は相互標定終了後も残存させる必要のある  $y$  視差(指定残存  $y$  視差と名付ける)であるから、あらかじめ距離  $S_1S_2$  を計算しておき、 $y$  視差が指定残存  $y$  視差となることを相互標定の条件とする。

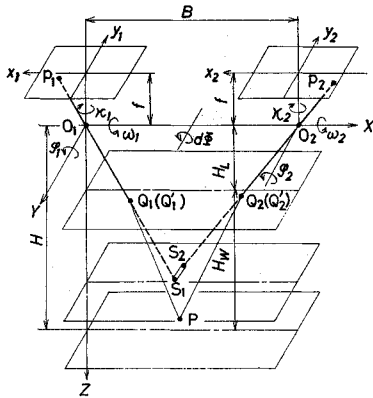


図-4 光の経路と標定要素

そうすると、基線  $O_1O_2$  がほとんど屈折面に平行であり、撮影方向が屈折面にほぼ直角である場合には、外部標定要素の近似値が与えられているとき、その補正量  $d\omega_1, d\varphi_1, d\varphi_2, d\kappa_1, d\kappa_2$  は、つぎの関係式を5つ以上の標定点に適用することにより決定することができる(図-4)。

$$p_y - p_{ry} = -x_1 d\kappa_1 + x_2 d\kappa_2 - \frac{x_1 y_1}{f} d\varphi_1 + \frac{x_2 y_2}{f} d\varphi_2 + f \left( 1 + \frac{y_1^2}{f^2} \right) d\omega_1 \dots (1)$$

ここに、

$$p_y = y_1 - y_2 \text{ (写真上の } y \text{ 視差)}$$

$$p_{ry} = \text{指定残存 } y \text{ 視差の写真上の値}$$

$$f = \text{画面距離}$$

後述の実験では、図-5 に示すように、撮影方向を  $Y$  軸のまわりに  $\varphi_{01}$  および  $\varphi_{02}$  だけ傾ける(実際には  $\varphi_{01} = \varphi_{02} = \varphi_0 = 26^\circ$  だけ傾ける)場合も実施したので、この場合の関係式を示すとつぎのとおりである。

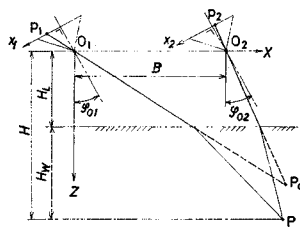


図-5 平行偏角撮影

$$\frac{y_1}{-x_1 \sin \varphi_{01} + f \cos \varphi_{01}} - \frac{y_2}{-x_2 \sin \varphi_{02} + f \cos \varphi_{02}} - \frac{p_{ry}}{f} = \frac{1}{(-x_1 \sin \varphi_{01} + f \cos \varphi_{01})^2} [ \{ (x_1^2 + y_1^2) \sin \varphi_{01} - f x_1 \cos \varphi_{01} \} d\kappa_1 - \{ f y_1 \sin \varphi_{01} + x_1 y_1 \cos \varphi_{01} \} d\varphi_1 + \{ x_1 y_1 \sin \varphi_{01} + (y_1^2 + f^2) \cos \varphi_{01} \} d\omega_1 ] - \frac{1}{(-x_2 \sin \varphi_{02} + f \cos \varphi_{02})^2} [ \{ (x_2^2 + y_2^2) \sin \varphi_{02} - f x_2 \cos \varphi_{02} \} d\kappa_2 - \{ f y_2 \sin \varphi_{02} + x_2 y_2 \cos \varphi_{02} \} \cdot d\varphi_2 ] \dots (2)$$

つぎに、正確な座標既知の基準点に対して見かけ位置を計算しておき、この点と図化機で求められる点が一致するように絶対標定を行なう。このような標定法は、原

理的に正しい方法ではないので、標定精度が悪いときには、あらためて相互標定から繰返しを行なう必要がある。

必要精度内で標定が完了すれば、図-3 に示すように見かけ位置  $P_a$  を求めることができるから、点  $P_a$  に達する光線の屈折後の経路を追跡し、仮定の真の点  $P'$  の位置を求め、これを真の点  $P$  の位置と考えればよい。このような方法による精度を解析的に検討したところ、ほぼ満足すべき結果が得られている<sup>4)</sup>。

相互標定は、空間モデルを正しく形成することによって、そのためには、図-3 における正しい光線を追跡し、水中の真の点  $P$  において2本の光線を交差させるようにしなければならない。このような条件が成立するためには、前記5つの標定要素以外に、さらに撮影位置や方向と屈折面との相互関係を規定する3つの標定要素  $d\omega_2, \omega_0 = H_L/B, d\theta$  をも決定しなければならない(図-4)。これが二層媒質写真測量における正しい相互標定法であって、すでに Rinner<sup>5)</sup>, Shmutter および Bonfiglioli<sup>6)</sup> などの研究があり、解析的な方法を実行するには本質的な困難はない。絶対標定は、残りの標定要素を用いて基準点の真位置と写真による測定値とを一致させるわけである。

そもそも、ここで示した近似標定法は、図化機を用いて通例と同様に標定できることに特徴があるが、正しい標定法と比較すれば明らかのように、この標定法の欠点は、相互標定において完全な空間モデルが形成されないで誤差の発生が避けられず、標定要素の仮定値に誤差があれば、指定残存  $y$  視差の計算値自身にも誤差を含むことである。このような近似標定法自身に由来する誤差の比較的小さいことは、すでに行なった計算例<sup>4)</sup> によって明らかにされたが、図化機による実地測定に際して  $y$  視差の存在するという難点が大きな支障とならないかどうかは、あらためて調べなければならない。以下には実例によって検討を加えた結果を示す。

#### 4. 実験の方針と概要

二層媒質写真測量においても、被写体の水深  $H_w$  が被写体から写真機レンズ  $O_1, O_2$  までの距離  $H$  に比べて小さいときには、1媒質中の写真測量と大差のない考え方で処理することが可能である<sup>7), 8)</sup>。しかしながら、 $H_w/H$  の値が大ききときには、図化機の使用上多くの難点を生ずるので、 $H_w/H = 0.3$  という比較的大きい値となるようにした。また、基線が屈折面に平行で撮影方向は屈折面に直角という基本的な場合(図-4)以下に、基線が屈折面に平行で撮影方向と屈折面とは直交しない場合(図-5)も考慮することにした。

使用した写真機は、市販の高精度写真測量用のものではなく、特別に製作した写真経緯儀<sup>9)</sup>用のレンズ可動の写真機であり、精度は幾分劣っている。使用時における写真機の

表-1 写真機の性能

レンズ	Angulon, F 6.8/165 mm
乾板寸法	キャビネ版, 119×164 mm
合焦距離	4 m
画面距離	172.88 mm

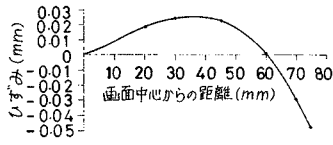


図-6 レンズのひずみ

主要性能は表-1および図-6に示す。

野外水槽（平面寸法 2.7×3.8 m、深さ 1.2 m）の底に基準点を設け、この基準点は相互標定にも使用することにし、モデルの端近くに配置した。測定物体としては、10~20 cm 間隔で格子状に測点を設けたガラス板（145×85 cm、厚さ 0.8 cm、全部で 3 枚）、直線、円、半円などの図形を描いた四角錐および円錐に絵を描いたものなどを随時沈めた。その概要を図-7に示す。ただし、四角錐上の図形は、表面に直接描いたのではなく、厚さ 0.5 cm のガラス板に所定の図形を描き、これを各面に固定して、それぞれの図形がなるべく平面内にあるように心掛けた。

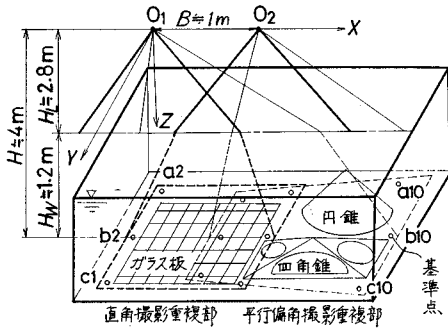


図-7 実験の概要

写真機の取付け装置は図-8に示すとおりである。水面上約 3 m のところに 1 本のレールを固定し、これに 1 台の写真機をほぼ鉛直下向きまたは 26° 傾けて固定した。写真機がレール上を移動可能として適当な位置で撮影できるようにし、移動量はレール上の目盛りで読取れるようにした。

基準点、それ以外の測点、写真機の投影中心などの相対的位置を決定するためには、主として Wild 社製万能経緯儀 T2 を用い、前方交会法によることにした。地上に適当な基準点を設けて座標系を設定し、最終的には、図-7 における左写真機投影中心 O<sub>1</sub> を原点とする直交座標系で点の位置を示すことにした。

撮影方向は、すでに述べたように、鉛直撮影と 26° 偏角させた平行撮影の 2 種であり、約 60% の重複となる

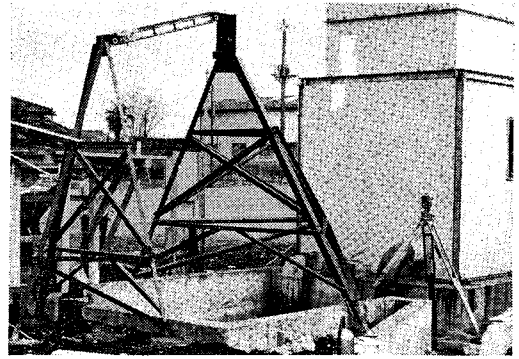


図-8 実験場と写真機据付台

ようにした。表-2に示す 4 種類の撮影を行ない、これらは撮影方向の区別を V と A、被写体の区別を G と F で示すことにする。水の屈折率は 1.3329 であった。

表-2 撮影の種類

記号	撮影方向	被写体
VG	鉛直	ガラス板上の格子点
VF		四角錐面上の図形
AG	平行偏角 26°	ガラス板上の格子点
AF		円錐面上の絵、その他

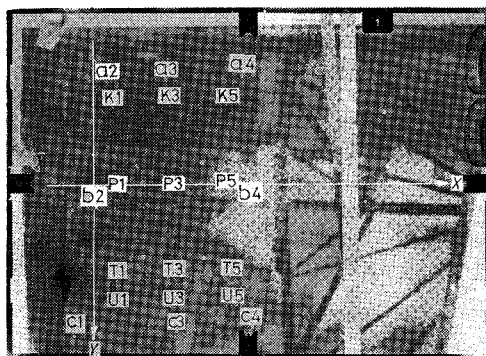
5. 写真の標定

写した写真には、写真機支持用の台が障害となって、配置した測点の全部の像は得られなかったの、基準点とするために正確に位置測定をした点の中でのなるべく写真重複部の周辺に写っているもの 6 個を標定点として用いた。図-9 は右側撮影点 O<sub>2</sub> から写したものであり、標定点（基準点としても使用）の座標は表-3に示してある。

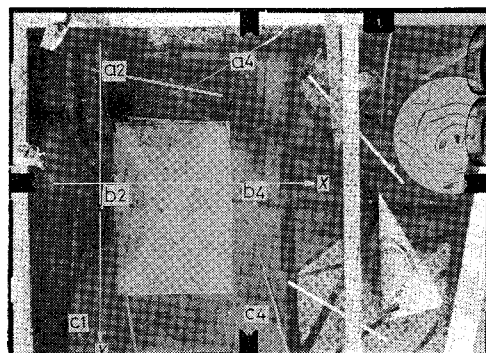
これらの標定点の指定残存 $\gamma$ 視差を計算すれば、表-4 のようになり大きい値となる。まず、それぞれの写真における標定点の座標を単眼コンパレータで測定し、式(1)および(2)を適用して解析的に相互標定を 1 回実行した結果、 $\gamma$ 視差に生じた誤差をも表-4 に示し

表-3 標定点（基準点と共通）の座標

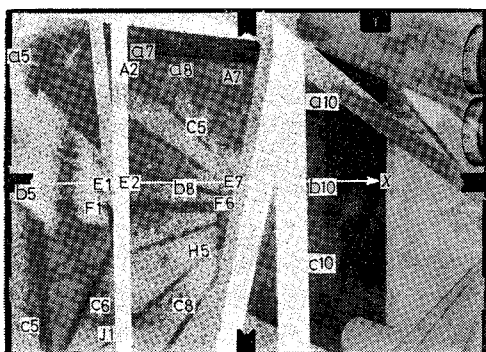
		(単位: mm)		
実験	点	X	Y	Z
VG および VF	a 2	-13.7	-703.7	4 023.5
	a 4	1 052.4	-746.4	4 027.6
	b 2	29.9	176.4	4 023.2
	b 4	1 111.8	145.1	4 028.6
	c 1	-110.0	1 062.3	4 008.5
	c 4	1 132.4	1 009.3	4 030.3
AG および AF	a 5	1 152.6	-750.5	4 037.6
	a 10	3 513.0	-577.1	4 015.8
	b 5	1 216.9	139.6	4 040.7
	b 10	3 517.9	127.9	4 017.1
	c 5	1 232.1	1 009.2	4 043.0
	c 10	3 505.9	776.0	4 023.6



(a) 実験 VG



(b) 実験 VF



(c) 実験 AG

図-9 撮影した写真(右側)

である。ここに、誤差とは、相互標定後に残存している  $y$  視差から指定残存  $y$  視差を差引いたものである。

図化機としては Wild 社製 Autograph A7 を用い、機械縮尺は 1:12、図化縮尺は 1:4 として標定ならびに図化作業をすることにした。図化機による座標測定値は数値記録(最小桁 0.01 mm)として求めることができる。

表-4 に示すようにならかなり大きい指定残存  $y$  視差があるので、図化機において写真を実体視することがいくぶん困難であった。できるだけ正しく位置を求めようとすると、まず投影機を  $y$  方向にずらせて  $y$  視差をなくして実体視し、その後投影機をもとに戻し、 $y$  方向に離れた

表-4 指定残存  $y$  視差および  $y$  視差の誤差 (単位: mm)

実験	点	指定残存 $y$ 視差		$y$ 視差の誤差	
		実物	写真	写真	
		正しい値		解析第1回	図化機使用
VG	a 2	2.70	0.125	0.006	0.007
	a 4	-2.63	-0.122	-0.002	-0.021
	b 2	-0.73	-0.034	-0.011	0.010
	b 4	0.43	0.020	0.012	-0.007
	c 1	-4.45	-0.207	0.006	-0.029
	c 4	4.10	0.190	-0.005	0.031
VF	a 2	2.71	0.126	0	0.025
	a 4	-2.72	-0.126	0	-0.026
	b 2	-0.76	-0.035	0	0.004
	b 4	0.56	0.026	0	-0.013
	c 1	-4.61	-0.215	0	-0.024
	c 4	4.17	0.193	0.01	0.013
AG	a 5	-3.11	-0.139	-0.035	-0.074
	a 10	-7.93	-0.297	0.006	0.009
	b 5	0.64	0.028	0.004	0.002
	b 10	1.78	0.067	-0.020	-0.001
	c 5	4.58	0.203	0.016	-0.004
	c 10	10.59	0.397	0.016	0.019

測標の中心を推定する必要があった。なお、相互標定は通例に準じて実施したが、このとき原則として  $\omega$  は撮影時の測定値を変更しないことにした。表-4 には、図化機で相互標定を終わったときの  $y$  視差の誤差も示してある。

平行偏角撮影の写真は、いくぶん  $y$  視差の誤差が大きくて正しい標定に達するのに少し困難があった。この原因は、標定法の近似度がよくないこと、標定要素の仮定値および標定点の座標測定値などの誤差がいくぶん大きかったことなどが重なっているものと思われる。

絶対標定においては、標定点 6 個を全部基準点として使用し、最小二乗法によって残りの標定要素を求めた。解析的方法では、鉛直撮影の場合について、第 1 回の標定完了後もさらに第 2 回、第 3 回の標定を実施し、標定要素と基準点位置誤差の変動状況を調べた。表-5 は標定要素の値を示したものである。第 2 回目の標定では標定要素にわずかな変動を生じ、第 3 回目の標定ではほとんど変化しない。このことはすでに報告した計算例<sup>9)</sup>と同様であり、本例では各種の誤差が含まれてはいるが、1 回または 2 回の標定で十分であることを示している。図化機による標定結果も表-5 に示してあるが、このときには、原則として基線長を変えないことにした。

表-6 は、絶対標定終了後における基準点の見かけ位置の誤差(写真測量値-地上実測値)を示したものである。鉛直撮影の場合には誤差が小さく、見かけ位置誤差は  $\pm 1$  mm 程度に収まっている。写真機から基準点までの距離は約 4 m であるから、位置誤差と距離との比は、第 1 回の標定において約 1/4 000 程度となっている。

表-5 標定要素の変動

実験	標定		撮影方向変化(単位:分)					投影点移動(単位:mm)						
			$d\kappa_1$	$d\varphi_1$	$d\omega_1$	$d\kappa_2$	$d\varphi_2$	$d\omega_2$	$dX_1$	$dY_1$	$dZ_1$	$dX_2$	$dY_2$	$dZ_2$
VG	解析法	相互標定, 第1回	4.1	67.3	7.9	1.8	43.5	0						
		絶対標定	第1回	-4.6	58.6	5.9	-6.9	34.8	-2.0	-5.4	3.1	-9.1	16.6	0.5
		第2回	-4.9	58.7	3.4	-7.2	34.9	-4.5	-6.1	-2.6	-5.5	15.9	-5.4	-2.9
		第3回	-4.8	58.7	3.9	-7.1	34.9	-4.0	-6.1	-1.9	-6.6	15.9	-4.7	-4.0
	図化機使用, 絶対標定		-6	58	0	-3	52	0	-2.5	1.0	-1.2	-2.5	-6.6	-1.2
VF	解析法	相互標定, 第1回	-15.8	7.5	-5.5	-31.4	-8.9	0						
		絶対標定	第1回	0.6	16.9	-5.4	-15.0	0.5	0	-11.4	-6.7	-6.1	2.6	-1.5
		第2回	0.4	17.2	-6.2	-15.2	0.7	-0.7	-10.9	-10.4	-2.5	3.1	-5.4	-5.5
		第3回	0.4	17.2	-6.2	-15.2	0.7	-0.7	-10.9	-10.4	-3.8	3.1	-5.2	-6.8
	図化機使用, 絶対標定		1	7	-2	-18	3	-2	-4.5	-4.3	0.3	-4.5	-0.5	-0.3
AG	解析法	相互標定, 第1回	-34.9	10.5	-7.5	-29.6	15.2	0						
		絶対標定, 第1回	-16.6	18.9	59.4	-11.3	23.6	66.9	-14.2	54.3	-45.4	4.5	59.5	-47.8
	図化機使用, 絶対標定		-6	1	10	-6	1	10	-0.2	1.3	-3.7	22.7	1.1	-4.5

注: 基線長実測値はつぎのとおりである。実験 VG: 1047.9mm, 実験 VF: 1067.9mm, 実験 AG: 948.8mm

表-6 基準点見かけ位置の誤差 (単位: mm)

実験	点	解析的標定, 第1回			図化機による標定		
		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
VG	a 2	-0.1	0.2	0.9	0.6	0.8	0.1
	a 4	-0.1	0.6	-1.1	-0.3	2.2	0.4
	b 2	-0.2	0	-1.5	0.5	0	0.4
	b 4	0.7	-0.1	2.1	-1.6	-0.4	-1.1
	c 1	-0.1	0.5	0.6	1.9	0	-0.3
	c 4	-0.1	-1.1	-0.9	-0.9	-2.6	0.7
	MSE	$\pm 0.3$	$\pm 0.6$	$\pm 1.3$	$\pm 1.1$	$\pm 1.4$	$\pm 0.6$
VF	a 2	0	0.1	0.5	0.5	-0.2	0.1
	a 4	0	0.1	-0.1	-0.3	0.1	-0.2
	b 2	-0.3	0.2	-1.0	0	-0.3	-0.5
	b 4	0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.6
	c 1	-0.1	0	0.4	-0.1	0.8	0.9
	c 4	0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.1	0
	MSE	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 0.3$	$\pm 0.4$	$\pm 0.5$
AG	a 5	-3.8	-2.8	-4.8	-0.3	0.1	0.2
	a 10	5.5	-4.2	7.6	0	-3.6	1.0
	b 5	-4.5	2.8	-0.9	1.7	3.5	-0.8
	b 10	3.4	0.3	-1.7	-1.5	-2.2	-1.5
	c 5	-2.3	4.2	6.2	-1.4	6.7	0.6
	c 10	1.5	-0.4	-6.4	1.5	-4.4	0.6
	MSE	$\pm 3.7$	$\pm 2.9$	$\pm 5.2$	$\pm 1.3$	$\pm 4.0$	$\pm 0.9$

注:  $MSE = \pm \sqrt{\sum(\text{誤差})^2 / \text{個数}}$

本実験における程度の条件のもとで、測点がターゲットで示されていれば、図化機を用いても解析的な方法とほぼ類似した結果が得られた。ただし、 $H_w/H$  がさらに大きくなり、かつ広角写真機で撮影すれば、指定残存  $\gamma$  視差が非常に大きくなり、実体視に大きな困難が伴うものと考えなければならない。

標定要素の変化が角度約  $1^\circ$ 、あるいは基線長 20mm 以上というものがある。標定要素の仮定値は地上実測値であって、この値の誤差はやや大きいけれども(4. 参照)、かかる大きな誤差を含んでいるものとは考えられ

ず、標定要素を詳細に調べると疑点が存在する。その原因の解明は困難であるが、いくぶん無理な標定となっていて、モデルに変形を生じていると考えなければならない。

### 6. 位置および寸法の誤差

標定が終れば、測点の真位置を求めるために、見かけ位置を求めた光線の屈折後の位置を追跡し、3. で述べた方針にしたがって真位置を計算した。表-7 にその結果を示す。見かけ位置から真位置を求めると、標定誤差と測点の位置によって、ある量の位置のずれを生ずるので、真位置の方が誤差が大きくなる。このずれは、 $X$ 、 $Y$  座標よりも  $Z$  座標の方が大きく、モデル周辺部において大きい値となる<sup>3), 4)</sup>。したがって、表-7 には基準点の座標誤差の平均値と単純な平均二乗誤差とを併記した。誤差の大きさは、解析法によっても図化機を用いても同程度であると考えてよかろう。もともと、既述のように、本実験に使用した写真機ならびに基準点位置測定精度から考えると、0.1mm 程度の誤差を議論することは不可能であって、本実験で目的としている程度の精度であれば、実体測定に不便が伴うけれども通常の図化機を用いて測定ならびに標定の実行できることがわかる。平行偏角撮影のときには、表-5 に示したように標定要素にいくぶんの疑問があったわけであり、位置誤差も大きい。平行偏角撮影では、ただ1回の標定では良好な結果を得ることはむずかしい。

鉛直撮影の場合に、標定の繰返しによる真位置の誤差の減ずる状況が表-7 よりわかる。この場合の基準点座標の平均二乗誤差は、第1回の解析的標定において  $\pm 3$  mm、標定回数を増すと  $\pm 1 \sim 1.5$  mm 程度になり、距

表-7 基準点真位置の誤差

(単位: mm)

実験	点	解 析 的 標 定									図化機による標定		
		第 1 回			第 2 回			第 3 回			ΔX	ΔY	ΔZ
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ			
VG	a 2	0.6	0	-1.8	-0.4	-0.1	2.8	-0.3	-0.1	1.2	0.6	0.9	0.2
	a 4	0.6	0.5	-3.9	0	0.3	0.7	0	0.3	-0.9	-0.3	2.0	-0.1
	b 2	0.4	-0.2	-4.2	-0.4	0.1	-0.3	-0.4	0	-1.8	0.6	0.5	-0.7
	b 4	1.4	-0.3	-0.8	0.9	-0.2	3.2	0.9	-0.2	1.6	-1.6	0.2	-1.5
	c 1	0.6	0.4	-2.6	-0.2	0.9	0.9	-0.2	0.9	-0.8	1.9	0	-0.3
	c 4	0.6	-1.4	-4.0	0.2	-1.0	-0.6	0.2	-1.0	2.3	-0.9	-2.6	0.3
	平均 MSE	0.7 ±0.8	-0.2 ±0.7	-2.9 ±3.2	0 ±0.5	0 ±0.6	1.1 ±1.8	0 ±0.4	0 ±0.6	0.3 ±1.5	0.1 ±1.1	0.1 ±1.4	-0.4 ±0.7
VF	a 2	-0.7	0.2	-2.3	-0.2	-0.1	2.1	-0.2	-0.1	0.4	0.4	-0.1	-0.4
	a 4	-0.7	0	-2.8	0.2	-0.4	1.6	0.1	-0.3	-0.2	-0.4	0.2	-0.7
	b 2	-1.0	0.1	-4.0	-0.4	0.1	0.5	-0.5	0.1	-1.3	0.1	0.3	-1.2
	b 4	-0.6	-0.2	-2.6	0.4	-0.3	1.5	0.3	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-1.0
	c 1	-0.8	0	-2.6	-0.2	0.3	1.6	-0.3	0.3	-0.3	-0.1	0.9	0.8
	c 4	-0.6	-0.2	-2.8	0.4	0	1.2	0.3	0.1	-0.7	0.1	0.2	-0.2
	平均 MSE	-0.7 ±0.8	0 ±0.2	-2.9 ±2.9	0 ±0.3	-0.1 ±0.2	1.4 ±1.5	-0.1 ±0.3	0 ±0.2	-0.4 ±0.7	0 ±0.2	0.2 ±0.4	-0.5 ±0.8
AG	a 5	-3.9	-2.9	-3.8							-0.4	0.1	0.1
	a 10	1.2	-4.2	2.9							-1.7	-3.5	-1.1
	b 5	-4.6	4.7	-2.4							1.5	3.5	-1.7
	b 10	-3.1	1.4	-7.8							-3.8	-2.3	-6.0
	c 5	0.3	5.2	1.2							5.4	6.7	0.3
	c 10	-3.9	1.5	-11.3							0	-4.6	-1.5
	平均 MSE	-2.3 ±3.2	1.0 ±3.6	-3.5 ±6.6							0.2 ±2.9	0 ±4.0	-1.7 ±2.7

注: MSE = ±√Σ(誤差)<sup>2</sup>/個数

離に対する精度は、それぞれ 1/1 300, 1/4 000~1/2 700 程度になる。

本実験結果を用いて、各種の誤差要因の中から水中写真測量特有の要因のみによって生じた誤差を分離することは困難であるから、標定精度やモデル変形について既報の結果<sup>4)</sup>と比較して詳しい議論をすることはできない。したがって、その他の測点の位置誤差や測点間の距離誤差など、実用上興味ある数字を示すことにする。

ガラス板上の格子点(大文字の記号を含むもの、図-9)その他の位置誤差を示したものが表-8である。平均値をみればわかるように、どの実験においてもかなりある方向へのずれがみられる。このずれの方向が、実験 VG では解析によるものと図化機によるものとが類似していて、表-7 における基準点のずれの方向とは必ずしも同一でないので、表-8 の誤差には、モデル変形の影響よりも、各測点と基準点との間に相対的な実測誤差があって、これがかなり影響をおよぼしているものと考えられる。

これらの例によれば、鉛直撮影に際する諸測点の X, Y 座標の誤差は約 1 mm, Z 座標の誤差は 3 mm 程度で測定できるものと考えられる。平行偏角撮影の場合にはいくぶん誤差が大きくなる。

表-9 は、基準点を結ぶ線分の長さの誤差を示したも

のである。実験 VG の図化機による測定値は、点 a 4, c 4 の測定誤差が大きな影響を与えているようであるので、これを除外すると、鉛直撮影の場合に、長さ約 1.7 m のものの誤差が ±1 mm 以内に収まっている。す

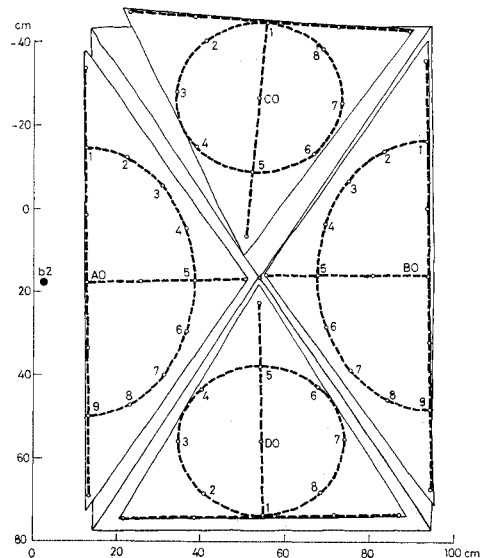


図-10 実験 VF の図化機により描いた平面図 (見かけ位置, 原縮尺 1:4)

表一〇 基準点以外の測点真位置の誤差

(単位：mm)

実験	点	解析的標定						図化機による標定		
		第1回			第3回			ΔX	ΔY	ΔZ
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ			
VG	a 3	0.9	-0.2	-5.2	0.2	-0.3	-2.1	-0.3	1.1	-2.4
	c 3	0.4	-0.1	-0.6	-0.2	0.3	1.1	-0.1	-2.5	-3.0
	K 1	-0.4	-1.6	-3.4	-1.2	-1.6	-0.5	-0.7	-0.6	-1.5
	K 3	0.9	-1.0	-3.7	0.2	-1.1	-0.8	-0.6	0.6	-5.8
	K 5	0.6	-1.1	-4.8	0	-1.2	-1.9	-1.2	1.2	-4.9
	P 1	-0.1	-0.6	-6.1	-0.9	-0.5	-3.1	-0.3	0	-2.7
	P 3	1.3	-0.7	-5.7	0.6	-0.6	-3.2	-0.2	-0.2	-3.8
	P 5	0.9	-0.9	-6.4	0.4	-0.9	-4.0	-1.0	0.3	-4.1
	T 1	-0.1	-0.9	-5.8	-0.8	-0.6	-3.8	-0.2	-0.9	-1.8
	T 3	0.4	-1.1	-4.0	-0.2	-0.8	-2.1	-0.7	-1.7	-4.0
	T 5	0.8	-1.0	-5.1	0.3	-0.9	-3.1	-1.4	-1.7	-4.5
	U 1	0.5	-1.1	-4.4	-0.2	-0.7	-2.5	0.9	-1.5	-0.3
	U 3	0.5	-0.6	-2.3	-0.1	-0.3	-0.5	-0.5	-2.4	-1.3
	U 5	0.5	-1.4	-4.0	0.1	-1.1	-2.2	-1.5	-2.9	-0.3
	平均	0.5	-0.9	-4.4	-0.1	-0.7	-2.1	-0.6	-0.8	-2.9
MSE	±0.7	±1.0	±4.6	±0.5	±0.9	±2.5	±0.8	±1.5	±3.3	
AG	a 7	-6.5	-1.2	-10.6				0.6	-2.7	4.7
	a 8	-4.0	-2.7	-11.2				1.1	-1.4	3.0
	b 8	-1.9	2.3	-0.4				0.9	-0.1	-1.0
	c 6	1.2	9.6	6.3				3.1	4.3	0
	c 8	-2.9	5.2	5.7				4.7	1.4	0.2
	A 2	-5.9	-1.6	-8.3				0.8	-4.2	4.0
	A 7	-3.1	-4.4	-10.9				-0.4	-4.1	-3.0
	C 5	-1.4	-0.4	-10.2				5.5	0.5	0.5
	E 1	-3.6	5.9	-2.4				1.3	-0.9	-2.3
	E 2	-2.7	4.7	1.2				2.5	0.4	5.9
	E 7	-1.8	-0.1	-7.3				2.4	-2.2	4.2
	F 1	-3.7	6.1	-2.5				1.9	1.3	4.0
	F 6	-2.9	-0.6	-9.3				3.2	-2.8	-1.6
	H 5	-0.6	2.9	0.8				3.3	-0.1	0.8
	J 1	1.2	5.8	6.5				3.8	3.4	-2.0
平均	-2.6	2.1	-3.5				2.3	-0.5	1.2	
MSE	±3.3	±4.4	±7.3				±2.8	±2.5	±3.0	

注：MSE = ±√2(誤差)<sup>2</sup>/個数

に述べたように、平行偏角撮影の場合には誤差が大きく、4隅の基準点を結ぶ四角形がかなりひずんだ形となっている。

図一〇は実験 VF (図一 (b)) において写した四角錐 (底面寸法 80×120 cm, 高さ 40 cm) を平面図として図化したものである。既述のように、図化機で求められる位置は見かけ位置であるから、この図を描くときに測点の座標を数値記録させておき、その真位置は計算によって求めた。こうして、四角錐の傾斜面に描かれた円および半円の半径の測定誤差を計算し、別に解析的方法によっても誤差を求めた。表一〇はそれらの結果である。

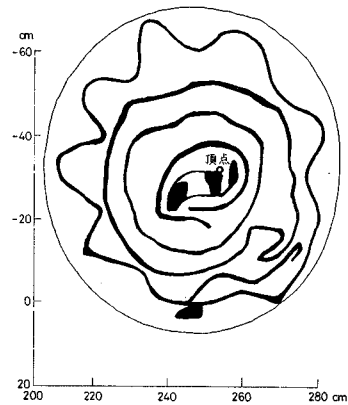
解析的な計算結果と図化機によって求めた結果とはほとんど同様な傾向を示し、表一五に示した標定要素も類似しているから、この場合の標定は、本方法を用いるかぎりにおいてはまず妥当なものと考えてよい。この場合の線分の長さは、一般に水平方向に拡大し、最大傾斜方

表一〇 基準点間の長さとその誤差

(単位：mm)

実験	区間	長さ	誤差	
			解析第2回	図化機
VG	a 2-a 4	1067.0	0.3	-1.0
	c 1-c 4	1245.5	0.5	-2.7
	a 2-c 1	1768.7	1.0	-1.0
	a 4-c 4	1757.6	-1.3	-4.6
	a 2-c 4	2062.1	-0.5	-3.8
	a 4-c 1	2150.1	0.6	-2.9
平均			0.1	-2.7
MSE			±0.8	±3.0
VF	a 2-a 4	1067.0	0.4	-0.8
	c 1-c 4	1245.5	0.6	0.2
	a 2-c 1	1768.7	0.4	1.0
	a 4-c 4	1757.6	0.4	0
	a 2-c 4	2062.1	0.4	0
	a 4-c 1	2150.1	0.8	0.4
平均			0.5	0.1
MSE			±0.5	±0.6
AG	a 5-a 10	2366.9	4.9	-1.6
	c 5-c 10	2285.8	-3.6	-4.2
	a 5-c 5	1761.5	8.3	6.9
	a 10-c 10	1353.1	5.8	-1.1
	a 5-c 10	2805.1	2.4	-2.2
	a 10-c 5	2778.4	6.1	0.1
平均			4.0	-0.4
MSE			±5.5	±3.5

注：MSE = ±√2(誤差)<sup>2</sup>/個数



図一〇 実験 VF における円錐の図化 (見かけ位置, 原縮尺 1:4)

向には縮小している。このような傾向は、測定誤差というよりもモデル変形と解すべきであろう。なお、このように Z 座標の異なる測点があるときには、Z 座標の値によっても位置誤差の大きさがかなり異なることに注意する必要がある。

以上によって、本実験における長さ測定誤差は、正しく標定されたときに ±1 mm 程度、標定その他に誤差の大きいときに ±3 mm 程度、平行偏角撮影のときに



表—10 実験 VF における半径の誤差

(単位: mm)

図 形	半 径	解析第 2 回	図 化 機	方 向
半 円 A R=320 mm	1	0.4	0.4	水 平
	2	-0.1	-0.2	最大傾斜
	3	-1.4	-1.4	
	4	-2.7	-2.9	
	5	-3.0	-3.2	
	6	-2.6	-2.8	
	7	-2.4	-2.6	
	8	-0.9	-1.1	
	9	0.3	0.2	水 平
半 円 B R=320 mm	1	-0.1	-0.2	水 平
	2	-0.6	-0.8	最大傾斜
	3	-0.9	-1.0	
	4	-1.0	-1.2	
	5	-0.5	-0.7	
	6	-0.1	-0.3	
	7	-0.2	-0.3	
	8	0.2	0.1	
	9	0.8	0.8	水 平
円 C R=200 mm	1	-1.0	-1.2	最大傾斜
	2	0.5	-0.6	水 平
	3	0.3	0.2	
	4	0.3	0.4	最大傾斜
	5	0.5	0.4	
	6	-0.1	-0.2	水 平
	7	0.1	0	
	8	-0.3	-0.6	
円 D R=200 mm	1			水 平
	2	-0.8	-0.8	
	3	0.4	0.3	最大傾斜
	4	0.2	0.1	
	5	0.1	0	水 平
	6	0.8	0.8	
	7	0	-0.1	
	8	-0.2	-0.3	

はそれよりも誤差が大きくなると考えればよいであろう。

Zaar<sup>10)</sup> が、精密な写真機を用いて本実験の 1/3 くらいの規模で測定を行なっている。それによれば、実測値そのままの標定要素を用い、水深の測定誤差約 ±0.8 mm という値を得ており、だいたい本実験と同程度の精度であると考えてよい。

実験 AF において写した円錐の 1 つ (図—9 (b)) において右上にあるもの、底面半径 80 cm、高さ 20 cm) を図化したものが 図—11 である。この図を描くときには図化機の座標系が 26° 傾いており、したがって、同図は見かけ位置を水平より 26° 傾いた面に投影したものとなっている。このように、平行偏角撮影のときでも複雑な被写体を図化することができた。

## 7. 結 言

本文で示した測定例によって、二層媒質写真測量においても、通常の図化機を用い、かつ 5 つの標定要素を用

いた相互標定とそれに続く絶対標定を繰り返すという近似標定法により実体写真測量のできることがわかった。ただし、正しい標定が行なわれたとしても、 $\gamma$  視差が残っているために実体測定に困難の伴うこと、および図化機では見かけ位置が求められるだけであって、これから真位置を計算しなければならないという面倒は避けられない。この近似法の長所は、標定点および基準点が空気中および水中に混在しているときでも実施できることである。

二層媒質写真測量が通常の一媒質中における写真測量と異なる点は、被写体の水深と写真機から被写体までの距離の比  $H_w/H$  および測点の位置が、標定精度、測定精度および指定残存  $\gamma$  視差などに大きい影響を及ぼすことである。測定誤差や指定残存  $\gamma$  視差は、点の位置が主点より離れるほど増加するので、広角写真機を用いれば測定誤差が減ずるとは限らない点に注意を要する。

本実験はきわめて高精度の測定とはいえないが、測定結果をまとめて概括的な表現をすれば、つぎのようになる。すなわち、位置誤差は距離の数千分の 1、長さ数 m のものの測長誤差は数 mm に収めることができ、一媒質写真測量よりも誤差が大きいかれども、工学上の測定法として十分役立つものである。

そもそも、この程度以上の高精度の測定では、測定システム全体の微妙な諸条件が精度に影響するので、実験値に含まれる誤差が理論的欠陥に基づくものか、個別の実験条件に由来するものかの判断はきわめて困難である。すでに明らかにした標定法または位置測定法のみ起因する誤差の大きさ<sup>3),4)</sup> と本実験の誤差とを比較すると、だいたい同程度の大きさであることから、これ以上高精度の測定を実施しても著しい誤差の減少は望めないだろうし、また本実験の結果は妥当なものと考えてよいであろう。

空気中から水中の物体を写真測定する場合であれば、 $H_w/H$  の値は本実験条件の 0.3 という値を越えることは比較的少ないが、写真機を耐水容器に入れて水中撮影を行なうときには、 $H_w/H=1$  に達することがある。このような条件のときには、測定法をあらためて考察しなければならない。

本研究経費の一部は文部省科学研究費補助金によった。数値計算には京都大学に設置されている電子計算機 HITAC 5020 を利用した。図化機による標定ならびに測定作業は国際航業 (株) 宝塚測量所において実施していただいたものであり、関係各位に厚く御礼申上げる。なお、実験を手伝っていただいた当時の星 仰助手 (和歌山工専) をはじめ、学生であった、端 栄三郎 (大阪ガス (株))、高尾善昭 (兵庫県)、斉野 進 (関西電力 (株)) などの諸氏に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Wakimoto, Z. : On Designing Underwater Camera Lenses, Photogrammetric Engineering, Vol. 33, 1967, pp. 925-936
- 2) McNeil, G.T. : Underwater Photography, Photogrammetric Engineering, Vol. 35, 1969, pp. 1135-1152
- 3) Mori, C. and Okamoto, A. : Näherungsverfahren für die Ermittlung der Lage des Unterwasserpunktes in der Zweimedienphotogrammetrie, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto Univ., Vol. 32, 1970, pp. 47-65
- 4) 森 忠次・岡本 厚：二層媒質の写真測量における逐次近似標定，写真測量，9巻，4号，1970，pp. 1-11
- 5) Rinner, K. : Abbildungsgesetz und Orientierungsaufgaben in der Zweimedienphotogrammetrie, Sonderheft 5 der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen, 1948
- 6) Shmutter, B. and Bonfiglioli, L. : Orientation Problems in Two-Medium Photogrammetry, Photogrammetric Engineering, Vol. 33, 1967, pp. 1421-1428
- 7) Tewinkel, G.C. : Water Depths from Aerial Photographs, Photogrammetric Engineering, Vol. 29, 1963, pp. 1037-1042
- 8) Meijer, W.O.J.G. : Formula for Conversion of Stereoscopically Observed Apparent Depth of Water to True Depth, Numerical Examples and Discussion, Photogrammetric Engineering, Vol. 30, 1964, pp. 1037-1045
- 9) 森 忠次・赤羽嘉紀・端 栄三郎：試作した写真経緯儀による近接写真測量，昭和42年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，1967，pp. 301-302
- 10) Zaar, K. : Zweimedienphotogrammetrie, Sonderheft 4 der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen, 1948

(1970.10.5・受付)