

## 水路測量における解析空中三角測量について

(水路測量における写真測量の利用〔4〕)

杉浦 邦朗・東原 和雄・小沢 幸雄

### ON THE ANALYTICAL AERIAL TRIANGULATION FOR HYDROGRAPHIC SURVEY (APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRY TO HYDROGRAPHY〔4〕)

Kuniro Sugiura, Kazuo Tsukahara and Sachio Kozawa

*Received December 7, 1966*

#### Abstract

Aerial triangulation is a function of deciding the geodetic coordinate of photo points used for orientation by using aerial photographs and some control points. If these photo points can be used as the controls for hydrographic survey, the hitherto land triangulation will be replaced by the aerial triangulation. However, as we carried out the aerial photography only along the shoreline due to practical and economical point of view, the image of distribution of land and water is shown on the almost all photographs. Therefore, photo models and strip models used for triangulation are obliged to become imperfect, so that we must consider several problems on the accuracy of aerial triangulation.

Since 1964, we have utilized the analytical aerial triangulation in the harbour survey. However, in the present time we are obliged to analyze and discuss the accuracy of aerial triangulation carried out with the imperfect models from the above consideration, in order to find the working guide for the future surveys.

In this paper, firstly the practice of the analytical aerial triangulation in our Division is explained, and secondly, analysis of the results obtained during about 3 years is discussed. Finally, we will show the results of the check survey on the controls for hydrographic survey in the Simizu-Okitu district and the trial on the correction of the position error of these controls.

#### 1 まえがき

一般に、空中三角測量とは、地上測量によりすでに求めた標定基準点に基づいて、図化作業に必要な写真の標定点を増設し、その座標および標高を決定する作業であると定義される。これには一級図化機を用いて機械的に行なう方法と、コンパレーターと電子計算機との組み合わせによりこれを解析的に行なう方法とがあるが、その成果においては両者に大差はない。ただし、電子計算機を用いる解析法は、その能率の点で数段まさるので、近年は日本においても各機関においてその実用化の研究が鋭意推進されてきた。

写真上に増設するこれらの標定点を海上位置決定の基準となる測深基準点として使用するものとすれば、従来、水路測量を実施する際に行なってきた測深基準点を求めるための地上測量に代えて、空中三角測量をその作業の中に組み入れることによって、能率化と精度向上とを合わせて計ることができる。一般の空中三角測量を考える限りにおいては、この期待は問題なしに正しいと言えようが、海面と陸面との介在する区域が、水路測量における空中三角測量の対象であるので、各写真モデルや、コースモデルは不完全形とならざるを得ず、水路測量に解

析空中三角測量を応用する場合には、特にこのことが問題となる。

昭和37年ごろより解析空中三角測量の実用化の研究に着手し(1964)、同39年度においては、熊本県本渡港の水路測量の際にまずこれを適用してみたのが、その実用化の皮切りであった。以来、年とともに計算プログラムの改良を重ねて現在に至っているが、この間に、昭和40、41年度においても、若干の港湾測量に対して空中三角測量を適用した。したがって、ここに現行の方法について整理すると同時に、将来における改善策に対する指針を見出すためのよすがとしたい意図をもって、本論文において、水路測量に適用される解析空中三角測量についての概説ならびにその結果と二、三の問題点についてのべ、引きつづいて、この方法によって求めた測深基準点の位置誤差について、実際に現場で行なったチェック測量の結果について言及するつもりである。最後に、解析空中三角測量によって得られる測深基準点の位置誤差を小さくする目的で行なった位置補正法についても触れたい。

## 2 水路測量における空中写真測量の工程

水路測量において写真測量の関係する部分は大きく分けて次の作業である。

- (イ) 空中写真撮影 次の段階の作業に最も適した写真を航空機から撮影する
- (ロ) 測深基準点測量 地上測量に代え、解析空中三角測量による1級測深基準点(原点)を決定する
- (ハ) 図化作業 図化機による2級測深基準点(補助原点)の決定ならびに海岸線の描画、このほか必要の場合に実施する地形地物の描画を実施する

これらの作業をさらに細分し、その工程を順を追って示してみると Fig. 1. のようになる。

次に、同図にしたがって、水路測量における空中写真測量の工程についてのべることとする。

### 1) 測量計画

測量計画の基礎は、水深図の必要精度、すなわち、個々の測量に対して測深線間隔、水深および測深点位置の誤差を定めることにある。また、測深線間隔は、水深図の使用目的(実際には海図調整上の必要条件として判断されることが多いが)、たとえば

- (イ) 自然海底における地形表現
- (ロ) 掘り下げ区域ならびに航路における保証水深の確定
- (ハ) 探礁
- (ニ) 側傍水深の調査
- (ホ) 沿岸における海岸ならびに海底の侵食・堆積の調査

等によって決定されるべきものである。さらに、これに付随して

- (イ) 測深種別の配分決定
- (ロ) 既存三角点のデータの整理
- (ハ) 測深基準点の設定計画

等の作業が行なわれる。このほかに、測量区域、測量原図の図積、測量尺度等が決定される。

以上の基礎計画に基づいて、測量実施基準、測量班の編成、作業日程、所要経費等、測量全般についての細部計画が、技術的経済的に作成される。

なお、測深基準点および測深点の平面位置の許容誤差は TABLE 1. に示すものでなければならない。したがって、以後の作業の精度上の目標は、一応この表に示すところのものとなる。

### 2) 空中写真撮影

測量計画によって決定された区域に基づいて、空中三角測量および写真図化を実行するに都合のよいコース

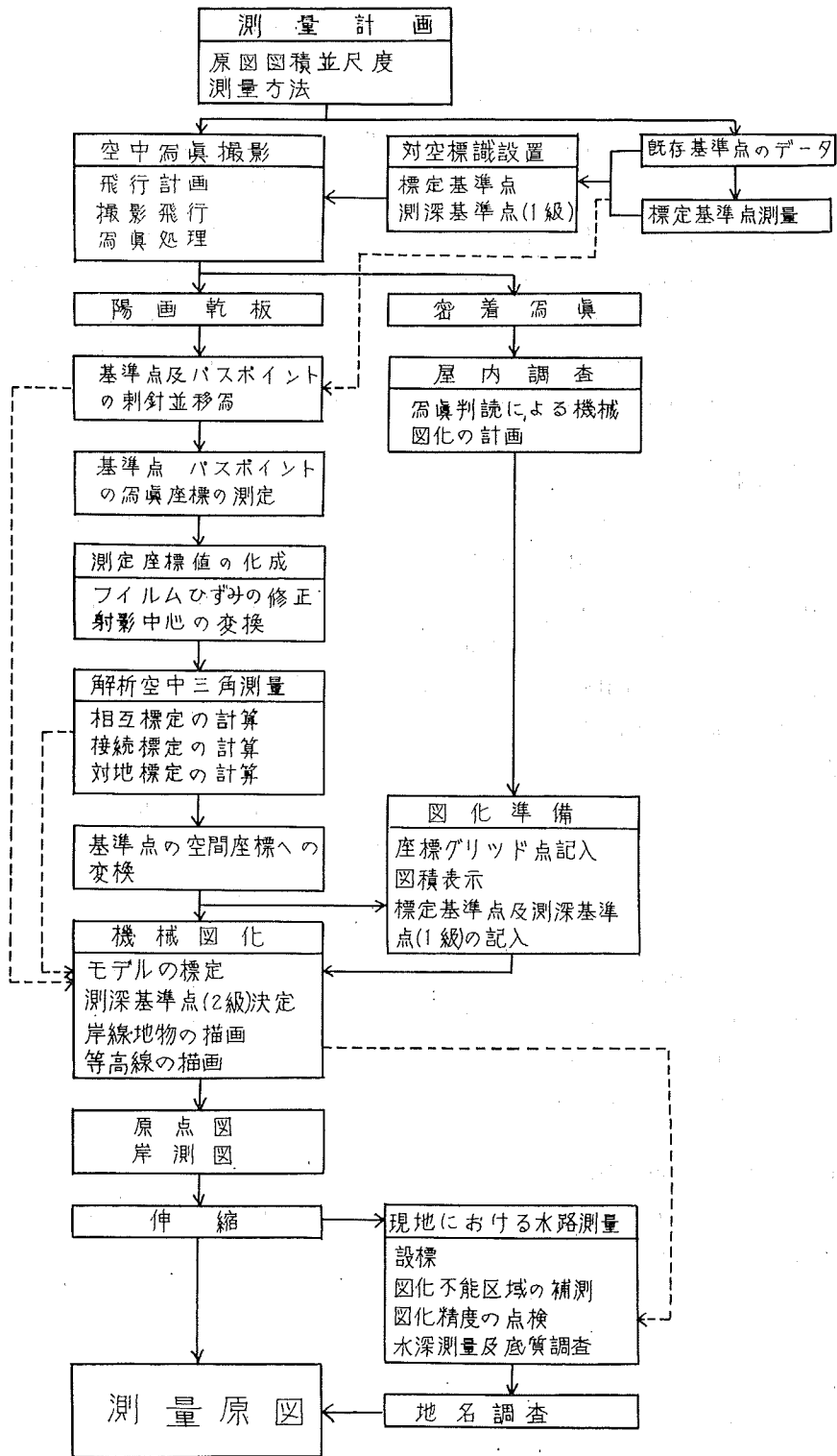


Fig. 1. Block Diagram of Aerial Photogrammetry in Hydrographic Survey

TABLE 1. MAXIMUM PLANIMETRIC ERROR OF CONTROL FOR HYDROGRAPHIC SURVEY AND SOUNDING POSITION

	測 深 基 準 点		測 深 点
	1 級 (原点)	2 級 (補助原点)	
記 入 誤 差	mm 0.2	mm 0.5	mm 0.5 (海洋測量の場合を除く)

を設定し、撮影高度（または写真縮尺）を決める。水路測量諸作業の対象はすべて海陸の境界となる区域であるので、原則として海岸に平行な撮影コースを選定することとなる。また、地上測量により標定基準点を増設することは作業能率上好ましくないため、原則として、標定基準点としては国土地理院三角点を主用することとし、撮影高度を 3,000m とすることを基準としている。したがって、撮影計画は、一般的に言って、単調でない海岸区域を最も経済的に、しかも、精度上難点を生じない範囲で最少の撮影帯でカバーすることを基礎として立てられる。

### 3) 解析空中三角測量

解析空中三角測量は、本論文の主題であるので、ここには工程の仕組みについてのみ触れることとする。

この作業は大別してつぎの三つに分けることができる。

- (イ) 表示作業 標定基準点（対空設標点）、測深基準点（一部は対空設標点）、パスポイントの選点、刺針および移写ならびに各点の座標の数値化
- (ロ) 標定作業 座標変換、各種の補正、標定計算、調整計算を含む
- (ハ) 逆変換 測深基準点等の測地座標への変換

### 4) 図化作業

解析空中三角測量の計算結果のうち、各種の点は、その X、Y 座標を用いて原点図にすべて記入され、これを根幹として図化機による描画、すなわち、2 級測深基準点の決定を含めて、モデルの標定、岸線・地形・地物の描画が行なわれる訳であるが、ここで、岸線図又は地形素図ができ上る。

### 5) 測量原図

測量区域は常に複雑な海岸線を含んでいるので、写真モデルが著しく不完全となる個所がある。したがって、こういう場合には特にその必要性が高いが、現地点検および補測を考慮しておく。

「水路測量業務規則」および「水路測量作業心得」にもとづく諸作業のうち、原点図、岸測図又は地形素図および水深測量、底質調査、地名調査等の資料から測量原図が作り上げられる。

## 3 解析空中三角測量の計算過程

前節で述べた如く、解析空中三角測量の作業は、大別して、表示作業と標定作業と逆変換計算とに分けられるが、その主なる部分が計算プログラムによる処理によって行われる。解析空中三角測量の実用化を計った当初は、別の論文（1964）に述べたように、Gruber-Jerie の標定法を計算に組み換えたものであるが、長いコースの接続の際、多少難点が考えられたので、現行のものはこれを改変し、以下に述べる方法のものとした。しかし、水路部の電子計算機は中型であって、ばくどいな計算を一つの流れに組み入れることができないので、計算自体を 3 群に分けてこれを on line となるように仕組んだ。すなわち、各群ごとに出力データは印字させると同時にさし入れさせ、それぞれの次の群の計算への入用データテープとして使用できるようにしてある。このように計算を途中で切断したことは、かえって、ある過程だけ条件を変えて再計算させるときなどに都合のよいものである。

Fig. 2. はこの計算過程の流れを示す。つぎに、この図において、三つの過程を簡単に補足説明する。

### 1) 写真座標の変換

各写真点はコンパレータ座標系で測定されているので、座標値を解析計算に繰り込むために、同図に示されるような1次変換によって写真座標への変換を行なう。したがって、この計算では、ダイアポジの異方伸縮や2次変形は修正されない。また、レンズの収差に対する補正は現在の要求精度からは必要がないので考慮していない。

### 2) 相互標定および接続標定

視差方程式

$$F = -x_1 k_1 - \frac{x_1 y_1}{f} \varphi_1 + x_2 k_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \varphi_2 + \left(1 + \frac{y_2^2}{f^2}\right) f \tau \omega_2$$

を用い、パスポイント8点によって最小自乗法によりこの式の係数を求める。この際の連立方程式の解法には共役傾斜法(1958)を用いた。コース全体について各対ごとに相互標定を行ない、それぞれの相互標定の要素と写真座標とから、パスポイント・測深基準点・標定基準点等の各モデルに含まれるすべての点のモデル座標を求める。

各モデルの形成が終了すると、これらを接続する計算手順が行なわれる。すなわち、まず両方のモデルの原点を一致させ、両方のモデルの縮尺の統一を計る。そのうえで、各左モデルを回転して各右モデルに接続させる。このためには、Fig. 2. に示すような回転マトリックスを用いて計算を行なう。逐次、相隣るモデルに対する接続を行ない、全モデルについての接続が完了すると、最終モデルの基線長を単位長とし、最終写真のカメラの中心を原点とするコース座標が形成されて、すべての点がこのコース座標で統一される。

### 3) 対地標定

対地標定は、これまでに得られた標定基準点のコース座標  $(x, y, z)$  を既知の測地座標  $(X, Y, Z)$  に変換するに必要な回転角、平行移動量、縮尺比を求めることであるが、この過程で行なわれる計算の大要は次のとおりである。

- (イ) まず、コース座標の  $z$  軸の方向を、測地座標系と同様に上方を正の方向に変換する。
- (ロ) 縮尺比を求める。
- (ハ) 回転角  $\Omega$  および  $\Phi$  を求める。
- (ニ) 回転角  $\kappa$  を求める。

この際、水平調整としては、2次の等角変換式を用いた。対地標定のすべての諸元が定まれば、回転マトリックス、縮尺比および原点の平行移動量により、すべての点の測地座標を算出する。付加的なことであるが、この結果、標定基準点での残差およびその標準偏差が求められ、さらに、残差の最大値が1.6mを超えない場合には、これらの点のすべての点の  $X, Y$  が測量縮尺すなわち記入の縮尺で求められて、すべての計算を終る。

## 4 解析空中三角測量の概要

昭和39年度水路測量作業計画のうち、本渡港(熊本県)および泉北港(大阪府)における水路測量実施に関連して、解析空中三角測量を試験的に導入することとなり、さらに次年度からは、主として港湾測量について、測深基準点を求めるための地上測量をいっさい排除して、これに代えて空中三角測量を実施することとし、現在に至っている。水路測量作業の性格上、現地作業の実施年度の1年前に、空中三角測量を中心とした写真測量を完了していることが望ましく、このために、現在では年度計画の作業の約80%がこの線に沿って、前年度内に実施

できる態勢ができ上った。

昭和39年度における本渡港の空中三角測量実施以来の成績を総括して示したものが、TABLE 2. である。

解析空中三角測量の実施に当たっては、次に掲げる作業規準に準拠している。

- (イ) パスポイントは、各点とも2個ずつ設定する。
- (ロ) 点の表示には、まず精密実体点刻機により、点刻と同時に移写を行ない、単眼コンパレーターによってその点の座標を読取るという方法をとる。
- (ハ) 座標の読取りは外注による。
- (ニ) 相互標定の際の縦視差は、一応、±15ミクロンを制限値とする。再測が容易でないので、パスポイントを二重点としたが、このうち、縦視差の大きい点を除外したパスポイントの系列を選定する。
- (ホ) 測深基準点の許容誤差を図上 ±0.2mm とする。したがって、標定基準点に対する許容誤差、言い換えれば、標定基準点の残差誤差としては、TABLE 3. を一応の基準とする。

TABLE 2. SUMMARY OF ANALYTICAL AERIAL TRIANGULATION IN OUR OFFICE

年次 (昭和)	区 域	空 中 写 真 撮 影					標定基準点			測深 基準 点	解 析 計 算			備 考
		実施年月	高度	コース	撮 影 者	機長	三角 点	以外 の点	新設		実施年月	モデル 数	形式	
39	本渡港	39 5	3,000	2	杉浦・東原	大塚	4	3	3	10	39 7	8	A	地方公共測量の 成果を一部利用  国土地理院作業 の資料を利用  設標点2点欠
"	泉北港	39 1	3,000 3,750	2	岩崎・東原	"	1	9	9	16	39 8	8	"	
40	阪南港	39 1	3,000	1	" "	"	3	3	0	10	40 4	5	"	
"	有田港	40 5	3,000	1	東原・中村	中村	4	0	0	6	40 6	4	"	
"	名古屋港	40 5	3,750	4	" "	"	14	0	5	52	40 6	18	B	
"	平戸瀬戸付近	40 6	3,000	3	国土地理院	—	13	0	0	24	40 8	12	"	
41	泉佐野港	41 1	3,000	1	東原・中村	中村	5	1	0	15	41 3	6	C	
"	清水興津港	41 1	3,000	1	" "	"	6	0	0	28	41 3	8	"	
"	和歌山港南部	41 1	3,000	2	" "	"	9	3	0	52	41 3	14	"	
"	菟田港	41 2	3,000	2	" "	"	6	4	0	33	41 3	11	"	
"	石巻工業港	41 2	3,000	1	高田・福島	大塚	6	0	0	17	41 6	8	"	

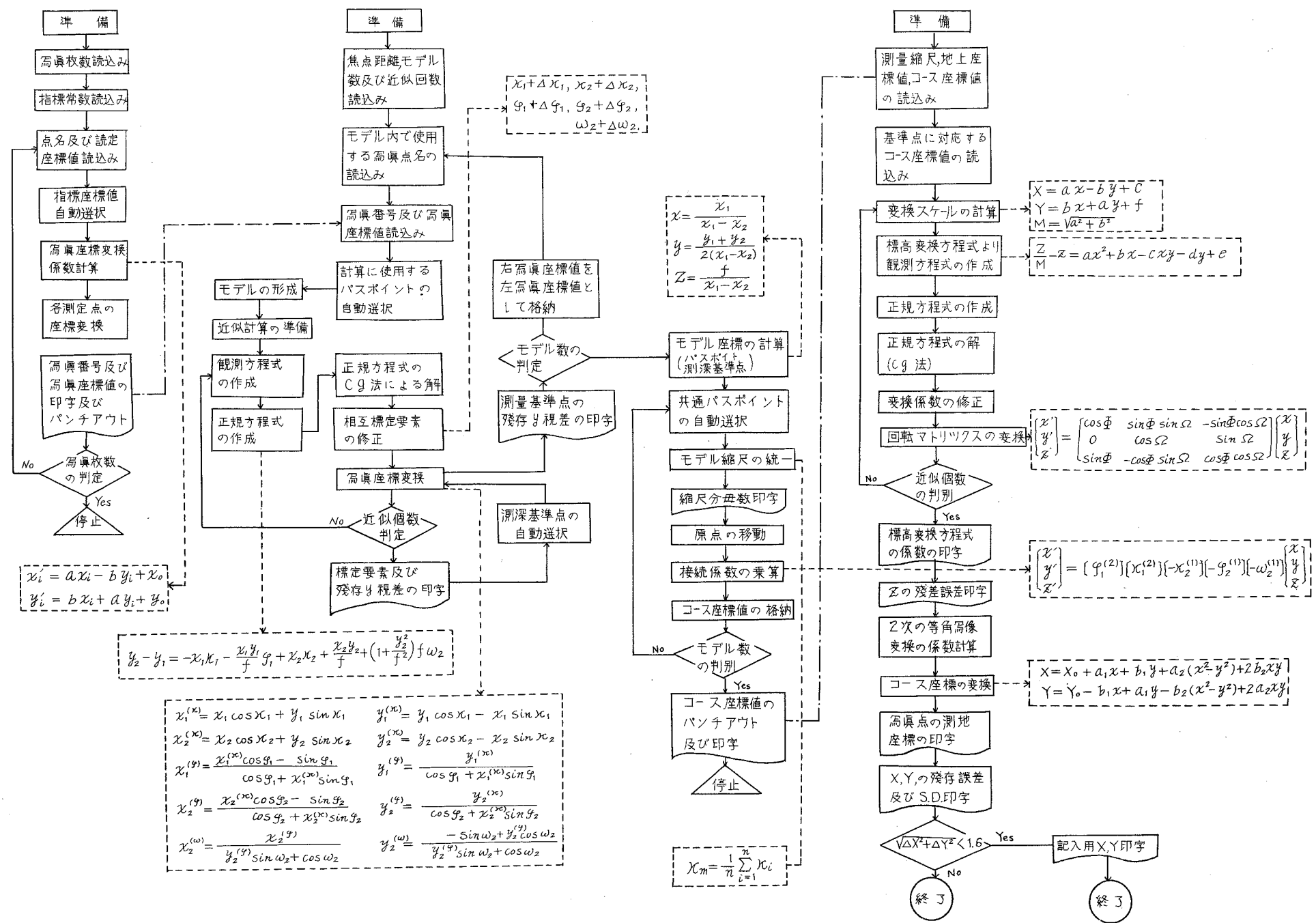
(注) (1) 計算形式の種別は次のとおりである。

- A : Gruber-Jerie の方式によった SHIP プログラムを用い、水平調整を1次の Helmert 変換で行なったもの
- B : ASIA 方式 (1960) によった SHIP プログラムを用い、水平調整を1次の Helmert 変換で行なったもの
- C : ASIA 方式によった HARP プログラムを用い、水平調整を2次の等角変換で行なったもの

(2) 標定基準点の数は全コースの延点数を示す。

TABLE 3. MAXIMUM PLANIMETRIC ERROR OF MAJOR CONTROL

種 目	写真縮尺	1/2 万の場合	1/1 万の場合
	平面位置 及び標高	中等誤差	± 1.0m
最大誤差		± 1.6	± 0.9



$$\begin{cases} x_i = ax_i - by_i + x_0 \\ y_i = bx_i + ay_i + y_0 \end{cases}$$

$$\frac{1}{2}x_2 - y_1 = -x_1x_1 - \frac{x_1y_1}{f}g_1 + x_2x_2 + \frac{x_2y_2}{f}g_2 + (1 + \frac{y_2^2}{f^2})f\omega_2$$

$$\begin{aligned} x_1^{(x)} &= x_1 \cos \alpha_1 + y_1 \sin \alpha_1 & y_1^{(x)} &= y_1 \cos \alpha_1 - x_1 \sin \alpha_1 \\ x_2^{(x)} &= x_2 \cos \alpha_2 + y_2 \sin \alpha_2 & y_2^{(x)} &= y_2 \cos \alpha_2 - x_2 \sin \alpha_2 \\ x_1^{(y)} &= \frac{x_1^{(x)} \cos \beta_1 - \sin \beta_1}{\cos \beta_1 + x_1^{(x)} \sin \beta_1} & y_1^{(y)} &= \frac{y_1^{(x)}}{\cos \beta_1 + x_1^{(x)} \sin \beta_1} \\ x_2^{(y)} &= \frac{x_2^{(x)} \cos \beta_2 - \sin \beta_2}{\cos \beta_2 + x_2^{(x)} \sin \beta_2} & y_2^{(y)} &= \frac{y_2^{(x)}}{\cos \beta_2 + x_2^{(x)} \sin \beta_2} \\ x_2^{(\omega)} &= \frac{x_2^{(y)}}{y_2^{(y)} \sin \omega_2 + \cos \omega_2} & y_2^{(\omega)} &= \frac{-\sin \omega_2 + y_2^{(y)} \cos \omega_2}{y_2^{(y)} \sin \omega_2 + \cos \omega_2} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} x = \frac{x_1}{x_1 - x_2} \\ y = \frac{y_1 + y_2}{2(x_1 - x_2)} \\ z = \frac{f}{x_1 - x_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = ax - by + c \\ Y = bx + ay + f \\ M = \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z - x = ax^2 + bx - cxy - dy + e \\ M \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \sin \Omega & -\sin \phi \cos \Omega \\ 0 & \cos \Omega & \sin \Omega \\ \sin \phi & -\cos \phi \sin \Omega & \cos \phi \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1^{(2)} \\ x_1^{(2)} \\ -g_2^{(1)} \\ -\omega_2^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} X = X_0 + a_1x + b_1y + a_2(x^2 - y^2) + 2b_2xy \\ Y = Y_0 - b_1x + a_1y - b_2(x^2 - y^2) + 2a_2xy \end{cases}$$

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Fig.2 Flow Chart in Analytical Aerial Triangulation

### 5 水路測量における解析空中三角測量の経済効果

前述したとおり、水路測量の実施区域において、空中三角測量を実行した場合、いわゆる原点測量作業を全面的に省略することができる。ただし、事前に対空標識を設けなかった測深基準点についての現地での確認とか、測深基準点に旗標を設置するとかの原点作業に多少関連する作業が残る場合がある。Fig. 3. は、水路測量における原点作業に要した人日数を、空中三角測量を実行した区域のもの（黒丸）と、これを行なわなかった区域のもの（白丸）とを比較して示した図である。その両者は、沿岸測量の分と港湾測量の分を含み、航路測量（×印）については別の群で示してある。すなわち、図の横軸は測量区域を、縦軸は、各作業種別による原点作業人日数を示す。

この図のもととなる資料は、各測量班長から提出された約50冊にわたる測量報告および、空中三角測量作業記録からとった。図から明らかのように、空中三角測量を実施することにより、従来の方法を実行する場合に比して約50人日の節減が可能である。年間の節減作業量は、港湾測量実施港が約7港であるとして、大略350人日ぐらいという勘定になる。

なお、航路測量の場合には、測量作業の性格から、ほとんど原点作業を必要としないことが多いので、この場合の所要作業人日数は、空中三角測量を実施した場合と傾向が類似しているのが特徴的でもある。

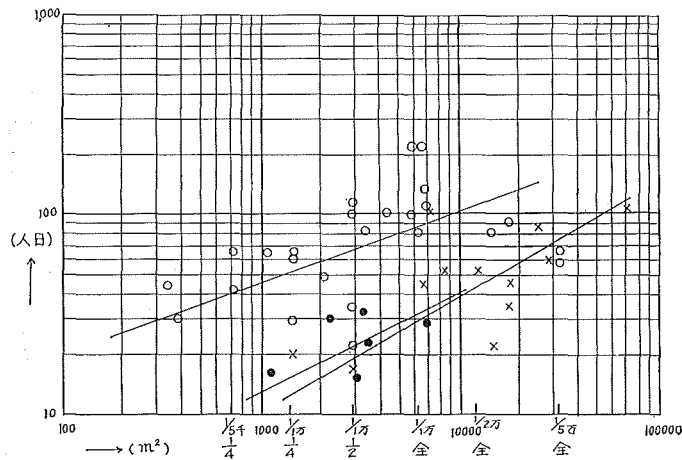


Fig. 3. Number of Man-day for Control Survey and the Broad of Surveying Area in Hydrographic Survey

### 6 解析空中三角測量の実績およびそれに対する解釈

昭和39年度以降において、筆者らは TABLE 2. に示すとおり解析空中三角測量を実施してきたが、それらの成果を整理し、これによって得られる二、三の結果についての解釈を試みることにする。このことは合わせて今後の空中三角測量に対する改善策を打ち立てる際の基礎資料とすることができるものとする。

#### 1) 相互標定におけるパスポイントの残存視差

写真点の座標測定は現在外注によっているので、測定結果の納入検査を行なう必要上、各対の写真を相互標定し、その時の残存縦視差を  $\pm 15$  ミクロン以下にするという規定によっているので、この検収というフィルターを通るため、パスポイントの相互標定による残存縦視差は非常に小さいものとなっている。TABLE 4. はそれぞれの場合のパスポイントの残存縦視差の平均値および標準偏差を示すものである。同表において、最初の2行は、われわれの解析空中三角測量作業の草分け期のものであるため、若干、他と比較して縦視差が大きい。



TABLE 4. RESIDUAL VERTICAL PARALLAXIS AT PASS POINTS BY THE RELATIVE ORIENTATION

測量地区名	絶対値の平均 ミクロン	標準偏差 ミクロン	コンパレーター
本渡港	7.8	±10.0	ASIA KPC-II (借用)
泉北港	5.9	± 8.5	同 上
阪南港	5.3	± 6.5	ZEISS PSK (借用)
〃	3.2	± 5.7	ASIA KPC-II (借用)
有田港	3.8	± 4.7	ASIA KPC-II (外注)
名古屋港 5	3.1	± 9.9	同 上
名古屋港 7	5.2	± 7.8	同 上
名古屋港 3	5.4	± 6.7	同 上
平戸瀬戸 1	3.6	± 5.3	同 上
平戸瀬戸 2	5.6	± 6.9	同 上
平戸瀬戸 3	6.2	± 8.0	同 上
泉佐野港	5.4	± 6.9	同 上
清水與津港	3.2	± 5.4	同 上
和歌山南部 1	6.5	± 9.1	同 上
和歌山南部 2	7.3	±10.0	同 上
苅田港 1	7.3	±10.0	同 上
苅田港 2	6.1	± 7.7	同 上
石巻工業港	3.8	± 5.7	同 上

TABLE 5. RESIDUAL VERTICAL PARALLAXIS AT PASS POINTS CLASSIFIED BY THE LAND FEATURE

点 の 名 称	絶対値の平均 ミクロン	標準偏差 ミクロン	資料数
燈台	3.7	± 4.7	3
畑の中の異物	4.0	± 5.1	16
岸壁の角点 (凸部)	5.0	± 7.6	22
畑の角点	5.1	± 7.6	34
岸壁の角点 (凹部)	5.3	± 6.5	16
あぜ道の交差点	5.5	± 7.3	47
道路の交差点	5.7	± 5.8	9
山中の樹木	5.8	± 7.4	7
建物の角点	5.8	± 7.6	4
防波堤・さん橋の尖端の角	6.0	± 7.5	22
岸壁上の異物	6.2	± 6.4	5
橋の角	6.2	± 8.3	4
埋立地の中の異物	6.3	± 8.5	13
固定サンドパイプの端・節点	7.4	± 7.5	9
岩石海岸の突起 (鼻)	10.0	±14.5	5
広場 (広い畑) の角点	13.0	±14.9	5
「対座標識点」	8.5	±10.8	34

また、パスポイントの残存縦視差は、パスポイントの点の種別によって明瞭な差異がある。TABLE 5. はその結果を示すもので、解析空中三角測量を実行する際に、パスポイントを選点する場合の基準として、これを使用することができる。ただし、同表は、本渡港、泉北港、阪南港地区の解析空中三角測量の結果に基づいて作成されたものである。したがって将来実行される解析空中三角測量の際には、同表の上から10行の間に記載した物点を主に選ぶことが望ましい。最後の行に、対空設標点に対する点刻の成果を掲げたが、パスポイントに比較してやや大きい値となっているので、点刻は特に慎重に行なう必要がある。その原因は、標識の寸法を、現行では 60cm×90cm のベニヤ板 3枚としているので、多少大きいためではないかと言えないこともない。将来 45cm×60cm に切り換えたいので、対空設標点に対する残存縦視差を再調査してみたい。

## 2) 標定基準点における Closing Error

空中三角測量の精度の目安として、一般に標定基準点における Closing Error が用いられる。勿論、標定基準点の Closing Error は写真測量と地上誤差との間の相対的誤差であると同時に、そのいずれにも属していない標定基準点の表示の誤差が含まれているのが普通であるが、計算過程に変更を与えることなく、標定基準点として国土地理院の4等以上の三角点を使用する限りにおいて、前者の誤差はある限定値以上になることはないとしても、ほぼ不変であると考えられる。したがって、標定基準点の Closing Error は解析空中三角測量においてただ一つの人為的操作であるところの諸点の表示作業そのものの適否を示すものと判断される。しかし、ある限定値以下にあるはずの前者の誤差といえども、水路測量の場合においては、空中写真の画面上に海部の存在するため、コースモデルが不完全とならざるを得ず、このため一般の場合の誤差よりその値は大きいことが予想される。この点については別の項で再び述べることにする。

TABLE 6. は現在までに実行した解析空中三角測量の結果得られた標定基準点における Closing Error を示す。解析計算に用いられるプログラムは再三にわたり改訂を行なってきたので、多少その影響はあるかとも考えられるが、これらの値は主として点の表示作業に関する誤差に関係するものと解せられる。しかし、これらの値が示すように水平位置については、飛行高度の 0.334%、標高については 0.178% であって、水路測量で要求する精度を一応満足していると考えられる。

一方、TABLE 6. に示す値は前述したように表示作業に関係すると思われるが、その裏付けとなるものが Fig. 4. である。図は、TABLE 4. と TABLE 6. の資料から、横軸にパスポイントの残存縦視差の標準偏差を、縦軸に標定基準点の Closing Error の標準偏差をプロットしたもので、この図から両者の間の大体の傾向を知ることができる。水路測量に応用される解析空中三角測量の精度は飛行高度の 0.3% 程度におさえればよいので、このためには各モデルについて相互標定を行なった場合のパスポイントの縦視差の標準偏差を大体 ±8 ミクロン程度におさえられるように、点の表示作業の誤差を小さくするよう慎重に行なう必要があるといえよう。解析空中三角測量の精度には点の表示における横視差の影響を多分に受ける訳であるが、この判断においては、横視差は縦視差と同程度のものであるという仮定に基づいている。

3) 水平調整

現在行なっている解析空中三角測量は 2 次の等角写像変換による水平調整を採用しているが、その効果は TABLE 7. の標定基準点における Closing Error に示すように、可成り顕著で、1 次の Helmert 変換による場合の約 40~50% 程度になる。しかも、平戸瀬戸第 1 コースの例にみられるように、非常に短いコースの場合でも次の等角写像変換が有効のようである。

TABLE 6. RESIDUAL ERRORS OF ABSOLUTE ORIENTATION AT MAJOR CONTROLS

地区名	飛行高度	モデル数	標準偏差			
			x, y	% of H	z	
本渡港	3,000	5	1.13	0.376	0.87	0.290
阪南港	"	5	0.43	0.142	0.39	0.130
有田港	"	4	0.90	0.301	0.62	0.207
名古屋港 3	3,750	5	1.48	0.395	0.11	0.029
名古屋港 5	"	4	0.90	0.240	0.24	0.064
名古屋港 1	"	5	0.50	0.133	0.17	0.045
平戸瀬戸 1	3,000	3	1.83	0.610	0.87	0.290
平戸瀬戸 2	"	5	1.10	0.333	0.10	0.033
平戸瀬戸 3	"	4	1.14	0.380	0.60	0.200
泉佐野港	"	6	0.86	0.287	0.51	0.170
清水興津港	"	8	0.63	0.210	0.96	0.320
和歌山南部 1	"	7	1.11	0.370	0.51	0.170
和歌山南部 2	"	6	0.88	0.293	0.44	0.147
刈田港 1	"	7	1.59	0.528	1.00	0.333
刈田港 2	"	4	1.18	0.393	0.14	0.047
石巻工業港	"	8	1.07	0.357	1.10	0.367
平均				0.334	0.54	0.178

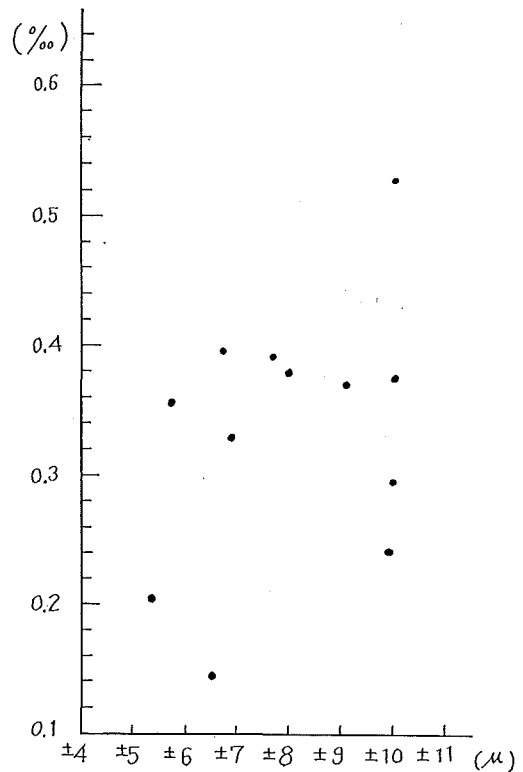


Fig. 4. Relation of Residual Errors of Absolute Orientation at Major Controls Residual Vertical Parallax at Pass Points

TABLE 7. COMPARISON OF RESIDUAL ERRORS AT MAJOR CONTROL OBTAINED BY THE ADJUSTMENT AFTER 1ST AND 2ND CONFORMAL TRANSFORMATION

(A) CASE OF THE STRIP OF HIRATO STRAIT (COURSE 1)

点番号	1次変換によつた場合		2次等角変換によつた場合	
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta X$	$\Delta Y$
1001	-1.83 <sup>m</sup>	+0.28 <sup>m</sup>	-0.14 <sup>m</sup>	+0.65 <sup>m</sup>
1002	+0.15	+0.07	-0.27	+0.05
1003	-0.06	-1.51	+0.32	+0.33
1004	+1.72	+0.17	+0.39	+0.64
標準偏差	$\pm 1.70^m$		$\pm 0.66^m$	

(B) CASE OF THE STRIP OF ARITA HARBOUR

点番号	1次変換によつた場合		2次等角変換によつた場合	
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta X$	$\Delta Y$
1001	-0.19 <sup>m</sup>	+0.24 <sup>m</sup>	+0.18 <sup>m</sup>	+0.10 <sup>m</sup>
1004	+0.22	-1.17	+0.47	-0.25
1003	-0.56	-0.12	-0.41	-0.23
1005	+0.53	+0.76	+0.09	+0.24
標準偏差	$\pm 0.95^m$		$\pm 0.45^m$	

## 7 測深基準点の精度の野外検査

前述のように、われわれが実行している解析空中三角測量の精度は一応水路測量の精度基準を満足するものとしたが、一方これにより展開して得た測深基準点に対する位置誤差については、厳密なところ、定量的には把握されていない現状である。解析空中三角測量により求める測深基準点の位置誤差については、格子写真によるデジタルな実験、すなわち、simulation によって大体の目安をつけることは可能であるが、実際の場合に対する位置誤差をつかんでおくことも重要なことであると考えられる。そのためには、標定基準点の密度の高いテストフィールドにおいて種々の実験ができれば非常に好ましいにもかかわらず、現在のところ、どこにも適当なものがないので、自らの手でテストフィールドを設営するか、実際に空中三角測量を手掛けた区域において、求め得た点について地上三角測量によりこれをチェックするかのいずれかの方法しかない。そこで、われわれとしては後者の方法をとることとし、場所を清水興津港地区に選んだわけである。

このためには、標定基準点の位置誤差と同程度のものでなければその目的を果し得ないので、少なくとも国土地理院の定める4等三角測量実行法の規程に準拠して地上測量を行なう必要がある。そこで、経緯儀としては、測機舎製10秒読み経緯儀 TM10型を用い、測角は方向角法により3対回以上行なった。測角精度の制限は、倍角差を36秒、観測差を24秒とした。Fig. 5. は、今回の測量における三角網図を示す。

地上測量により、 $B_n, L_6, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}$ 、望樓の各点の測地座標を網の平均計算および調整計算によって得たが、その結果を TABLE 8. に示す。ただし、同表に掲げる平面座標  $X_0, Y_0$  の値は  $\varphi=35^\circ 02' 13.000$ 、 $\lambda=138^\circ 30' 56.000$  を仮設原点とする地上測量により求めた各点の局所的測地座標であり、高さ  $H_0$  は平均海面上の値である。また、 $X, Y, H$  は同じ仮設原点を基準とした解析空中三角測量により求めた各点の測地座標を示す。同表の最後の欄は、両者の差、言い換えれば測深基準点の位置誤差を示す。 $\Delta R$  は水平距離に換算したもので、その標準偏差は  $\pm 1.30m$  であった。標定基準点の Closing Error の標準偏差は  $\pm 0.65m$  であるので、測深基準点の位置誤差は、標定基準点の配置や、測深基準点と標定基準点の相対的位置に関係するものと考えられるが、この場合には、標定基準点の Closing Error の約2倍であることがわかった。測深基準点の位置誤差について、もう一つ特徴的なことは同表から明らかのように、 $\Delta Y$  すなわち、撮影方向に直角な方向の誤差が負の方向に大きいということであって、これは simulation の結果からも結論できることであるが、水路測量における解析空中三角測量に関する simulation については、別の稿で論ずるつもりであるのでここには触れないこととした。

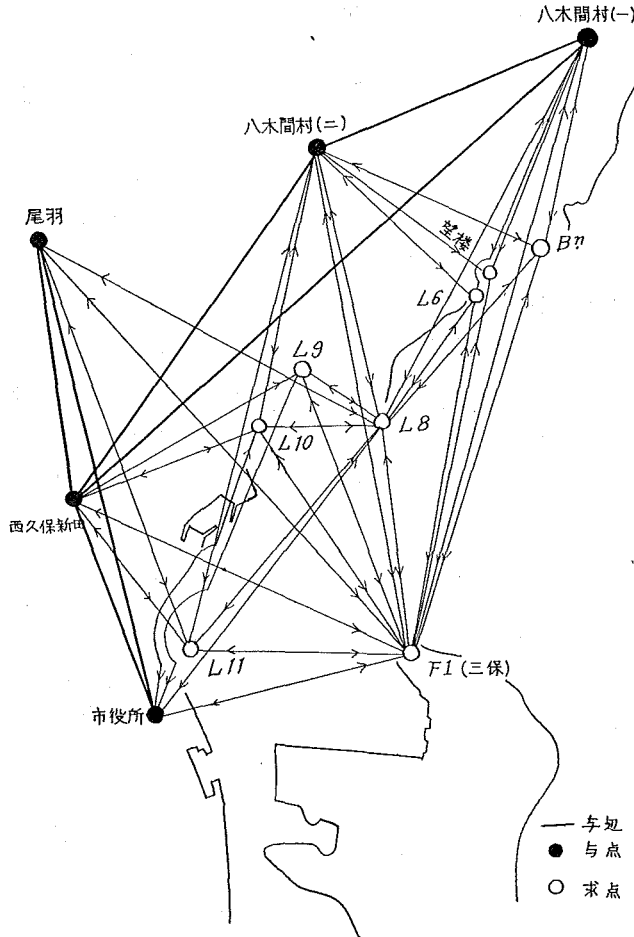


Fig. 5. Triangulation Net in Simizu-Okitu District

TABLE 8. ERRORS OF POSITION OF CONTROL FOR HYDROGRAPHIC SURVEY (CHECK POINT) DECIDED BY ANALYTICAL AERIAL TRIANGULATION

項目 点名	空中三角測量成果			検査測量成果							
	X	Y	H	X <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	ΔX	ΔY	ΔH	ΔR	
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
B <sub>n</sub>	+1752.67	+1930.78	+ 5.93	+1752.86	+1932.34	+5.08	-0.19	-1.56	+0.85	+1.57	
L <sub>6</sub>	+1194.51	+ 994.21	+ 6.93	+1193.94	+ 995.44	+6.39	+0.55	-1.23	+0.54	+1.35	
L <sub>8</sub>	- 242.87	+ 313.98	+ 4.88	- 243.50	+ 315.08	+4.62	+0.63	-1.10	+0.26	+1.27	
L <sub>9</sub>	+ 490.07	- 432.09	+ 4.92	+ 489.25	- 431.30	+6.00	+0.72	-1.79	-1.08	+1.07	
L <sub>10</sub>	+ 18.95	- 907.67	+ 5.68	+ 17.71	- 906.52	+6.15	+1.23	-1.15	-0.47	+1.68	
L <sub>11</sub>	-2239.95	-1750.63	+ 3.28	-2240.46	-1749.52	+4.10	+0.51	-1.11	-0.82	+1.21	
望樓	+1564.94	+1450.23	+33.34	+1564.49	+1450.68	—	+0.49	-0.45	—	+0.67	
											±1.30

8 測深基準点の位置補正

空中三角測量によって求めた測深基準点のもつ位置誤差の大きさは、空中三角測量の精度に関係することは当

然であるが、現在の方法によって求めた結果は、実用上差しつかえない程度のものであることを実験により結論することができた。しかし、地域によっては、十分な精度を保有していないという懸念のある場合も考えられるので、これをなんらかの方法で、すなわち、ある種の補正を加えることによって、測深基準点の位置誤差を小さくすることができれば非常にありがたい。

空中三角測量の計算において、相互標定および接続標定の際に、パスポイントの組み合わせを適当に変えるか（水路部においては、各パスポイントとも二重点としているので、組み合わせの変更は容易である）、対地標定の際の標定基準点の組み合わせを変えると、結果がわずかずつ異ったものが得られる。たとえば、Fig. 6. は清水與津港について行なった解析空中三角測量の場合において、標定基準点6個全部を用いた結果と、一つの三角点1006を除外した5点を用いて行なった結果との差量を、各パスポイント、各標定基準点、各測深基準点についてベクトル的に示したものである。この図から明らかなように、おのおの近傍の点相互の値は非常によく類似しており、かつ全体としてはある傾向をもって変化している。すなわち、Fig. 6. に示した各点の差量を、X および Y に分けてプロットしたものが Fig. 7. であって、図から明らかなように、近傍の点はそれぞれほぼ直線的に変

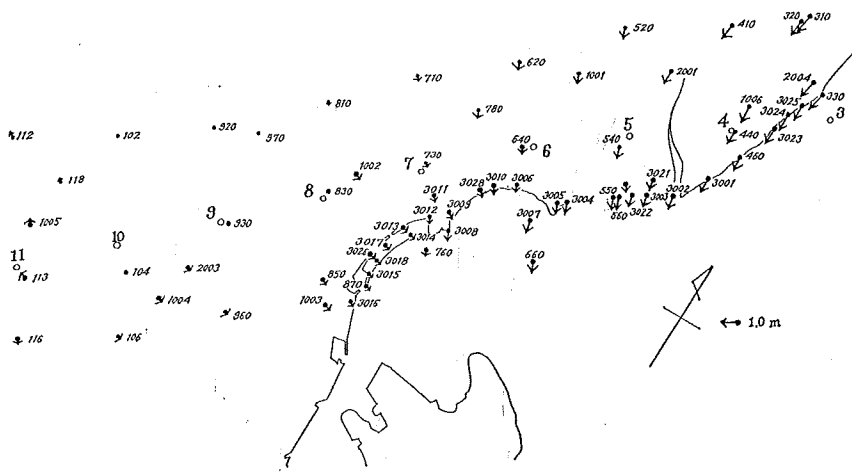


Fig. 6. Distribution of Discrepancies in X, Y Coordinates at all Points decided by the Absolute Orientation with the Different Series of Major Controls in same Strip

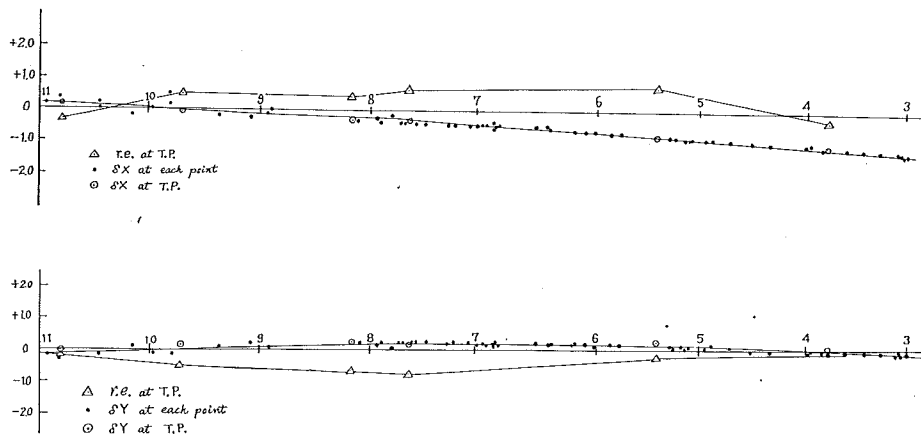


Fig. 7. Distribution in Course Direction of Discrepancies shown in Fig. 6

化している。

したがって、もし、算定された測深基準点が位置誤差をもつものならば、それは、その付近にある標定基準点のもつ Closing Error に非常に近いものであるものと推定される。そこで、標定基準点の Closing Error に対するコースに関する函数を  $x, y$  について、それぞれ求めて（図解的にも求めることが可能である）、これによって各測深基準点についての位置の修正を行なうことができる。

清水興津港の場合について、この位置補正法の結果各点における補正量の分布を示したものが Fig. 8. である。すなわち、各点についてこれらの補正量を  $X, Y$  に分けて加えれば、真値に近いものが得られることになる。このような処理をチェック点について実際に試みた結果を数値で示せば TABLE 9. のとおりとなる。この表の最後の3行が、各チェック点についての補正後の位置誤差を示すが、その標準偏差は  $\pm 0.63$  m となって、TABLE 8. の結果と比較して約  $\frac{1}{2}$ 、言いかえれば、この場合にあっては標定基準点の Closing Error と同程度にまで位置誤差を小さくすることが可能であるといえそうである。

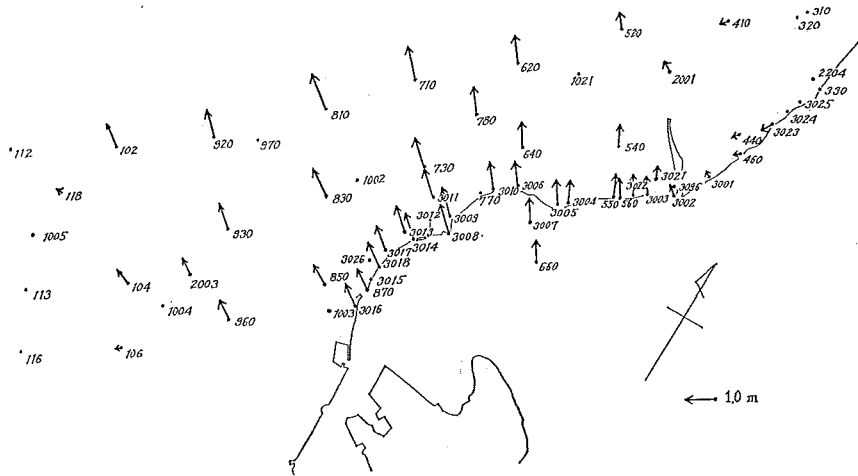


Fig. 8. Distribution of Correction Values for Position Error at all Control Points

TABLE 9. RESULT OF PLANIMETRIC CORRECTION FOR CONTROL FOR HYDROGRAPHIC SURVEY

項目 点名	空中三角測量による結果		補正量		補正後の測地座標		補正後の点の位置誤差		
	X	Y	$\Delta X$	$\Delta Y$	$X_c$	$Y_c$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta R$
$B_n$	+1752.67	+1930.78	-0.3	+0.2	+1752.4	+1931.0	-0.5	-1.3	1.4
$L_0$	+1194.51	+ 994.21	-0.6	+0.3	+1193.9	+ 994.5	+0.0	+0.1	0.1
$L_8$	- 242.87	+ 313.98	-0.7	+0.4	- 243.6	+ 314.4	-0.1	-0.7	0.7
$L_9$	+ 249.07	- 432.09	-0.7	+0.5	+ 489.4	- 431.6	+0.2	-0.3	0.4
$L_{10}$	+ 18.95	- 907.67	-0.7	+0.6	+ 18.3	- 907.1	+0.6	-0.6	0.9
$L_{11}$	-2239.95	-1750.63	-0.6	+0.7	-2240.6	-1749.9	-0.1	-0.4	0.4
望 楼	+1564.94	+1450.23	-0.6	+0.3	+1564.3	+1450.5	-0.2	-0.2	0.3
標準偏差									$\pm 0.63$

この補正法は、清水興津港の場合には成功したが、これがいずれの場合にも有効であるかは、なお若干の例について調査したうえでないと確信することはできないかもしれない。なお、この問題については、格子写真によってもチェックしてみたいと考えている。

## 9 結 語

われわれが実行している解析空中三角測量そのものの精度は、必ずしも良好なものでなく、水平位置に関しては平均的には約  $1/3,000$  の精度しかないわけであるが、これを約3倍だけ精度を上げる、言いかえれば、 $1/10,000$  の精度で求められないものだろうかということが一つの課題である。もちろん、上谷良吉 (1965)(1966)によれば、それは、それなりに困難なことではないということであるが、しからば、両者の差異は何に原因するものであろうか。

はじめにも述べたように、その最大要因は海陸の分布によりわれわれの使用する空中写真についての重大な欠陥であるところのモデルおよびコースモデルが不完全であるということにある。したがって、解析空中三角測量の精度を  $1/10,000$  の線まで level up するためには、若干の海中固定点の設置といった処置を取るようになるしなければならないということになる。このほかに考えられる要因としては、解析空中三角測量の実用化を行なってきたのが浅いということと、解析空中三角測量の工程にどうしても必要な設備投資が完全でないこととからくる作業上の無理ということではなからうか。

もう一つ、これは当然のことであるが、標定基準点を新設した場合のその点の位置誤差が大きいために対地標定の結果数値上に直ちに表われてくるということである。新点の位置決定のための地上測量は少なくとも4等三角測量実行法に準じて行なう必要性のあることを感ずる。

これらのことはすべて、ある程度までは simulation により追求することが可能であり、また、現在これを実行しつつある。次の機会に、この論題についての simulation の結果を総合して報告したい考えである。

(測 量 課)

## 参 考 文 献

- 上谷良吉 1960, “解析空中三角測量の一方法” 測地学会誌 6, 89.
- 上谷良吉 1965, “解析写真測量の本質とその展望 (点刻器と単眼コンパラターを用いて)” 測地学会誌 11, 41.
- 上谷良吉, 那須 充, 鍛冶晃三 1966, “空中三角測量のシュミレーション” 日本測地学会第26回講演会論文
- 森口繁一, 高田 勝 1958, “数値計算法 I” 岩波講座「現代応用数学」p. 18.
- 杉浦邦朗, 岩崎 博, 東原和雄 1964, “解析空中三角測量により測深基準点の展開 (水路測量における写真測量の利用 (1))” 水路要報 78号, 1.
- 杉浦邦朗, 東原和雄 1965, “水路測量における解析空中三角測量” 日本測地学会第24回講演会論文
- 杉浦邦朗, 東原和雄, 小沢幸雄 1966, “解析空中三角測量により求めた測深基準点の精度について” 日本測地学会第26回講演会論文