



写真測量 (その1)

— 最近の動向とその基礎 —

中 川 徳 郎*

まえがき

最近、航空写真測量技術の急速な発達により、各方面での航空写真の利用は年々増大し、その技術は、各種の科学的調査に応用されている。

本講座は、農業土木技術者への写真測量の手引きとして、次の各項について講述するものである。

目 次

1. 最近の動向およびその基礎
2. 写真測量用図化機について
3. 航空写真測量による地図の作り方とその経費の見積り
4. 航空写真測量の農業土木への利用法（土壌調査、ホ場整備、開拓適地選定について）
5. 航空写真による災害調査の進め方とその判読の方法
6. 航空写真測量による道路および用排水路計画の進め方とその方法
7. 航空写真測量による海洋学的調査の進め方とその方法
8. 近接地上写真測量の土木構造物への利用

I. 最近の写真測量の動向

日本における写真測量は、大正初期に、現在の国土地理院の前身である旧陸軍の陸地測量部で、地上写真から地図を作る試みがなされたのが最初である。

戦後、精密実体図化機の開発により、航空写真測量が急速に発達し、現在では、世界でも写真測量の最も盛んな国の一つであり、縮尺 1/1,000 から 1/25,000 の地形図の作成には、航空写真測量の方法を除外しては考えられないほどに進んできており、中でも、国土の総合開発計画や調査の基礎資料として作られる国土基本図（縮尺 1/2,500 または 1/5,000）や経済企画庁国土調査課が担当する地籍測量には欠くことのできないものになっている。

* 東京教育大農学部

写真測量は、単に地図をつくることばかりでなく、土木構造物の変形量の測定、交通量、波、雲、流速、飛行機の航跡などの動体測定にも応用される。また、写真を用いてその内容の判読、分析などによる地質、土壌、水文関係などの質的調査にも応用されている。

その1例をあげると、次のとおりである。

(1) **森林調査** 樹木の種類と量を調べる。最近では写真画像の濃度を濃度計で測って樹種を調べたり、土地の乾湿を調べて、その内容を解析することなどである。

(2) **路線調査** 道路、鉄道、水路などの路線計画調査には、特別な測定装置を図化機にとりつけて、路線の土工量を写真から直接測定したり、あるいは線形要素を電子計算機に組み入れ、自動製図機で、自動的に図化する方法が開発されている。

(3) **災害調査** 洪水の被害実態、積雪、なだれ、地スベリの子知に利用される。たとえば、夏に写した航空写真と、雪の写真の地図をつくって、積雪の状況を調べたり、雪ヒ(庇)の方向から、局地風の傾向を推定したり雪の深さを測ったり、あるいはなだれの性質を調べて、これを予知したりする。

地スベリについては、地スベリ地点そのものをそれぞれの立場から調べるということでなく、航空写真によれば、過去に発生した地点の発見も、やさしいという特長もある。

(4) **地形・地質調査** 航空写真にメッシュをかけ、電子計算機を利用して、地形を3次的に表現して流域と流出量の関係を解明することも可能である。

また、写真地質学の発達もめざましく、アメリカなどでは、航空写真のモザイクの上に、岩石の種類や層界などを色刷りした新しい地質図や、土壌調査図、あるいは土地分類図などもつくっている。

わが国の水路部では、深海調査船にステレオ、カメラを装備して海底(600m)の地形、地質、生物の実体写真測量を計画している。

(5) **流速調査** 動いているものは、飛行機の方向によって、浮き上がったり、沈んだりして見える。この原理を応用して、川の流れを航空写真で写して、立体に見

ると、川の表面に流れの速さに応じて起伏があるように見える。航空写真を写した時間、飛行機の高さ、表面の起伏の量などから、計算によって川の流速を知ることができ、したがって流量も知ることができる。

ソ連では、流水の測定とともに、流水の測定にも、かなり研究が進んでいるようである。わが国でも、洪水時の川の流れの実態をつきとめるための研究が進められている。

このような動体測定は、交通量を調べたり、波浪、潮流の調査にも応用される。

(6) 構造物調査 航空写真測量の原理を、地上での測量に応用した地上写真測量は、たとえば、ダム設計に必要な、ごく精密な地図をつくる場合などに利用される。最近では、この方法は単に地図を作るだけでなく、ダムの模型の破壊試験の際、刻々の変化の状態を、3次元的に測るなど、地上写真測量の構造物への利用は、多種多様な応用方法が考えられている。

以上のように、写真測量によって、早く、正確に地表面の測量ができるようになり、あらゆる面で、広く利用されるようになった。

1968年、スイスのローザンヌで開催された国際写真測量会議での主な話題は

- (1) 写真測量作業の自動化
- (2) 人工衛星を利用した写真測量の応用
- (3) 超広角カメラによる未開発地域の広域な測量
- (4) カラー写真の実用化
- (5) 4次元写真測量による動体測定

などがあげられる。

中でも、興味をひくものは、4次元写真測量の出現である。もちろん4次元とは、X、Y、Zの位置を決定する座標値のほかに、時間をとり入れようとするもので、運動する物体、変形する物体、振動の状況などをフィルムを通して正確に定量化しようとするものである。1対の写真の中に含まれる多くの点の動きを測定するのに、1点1点べつべつに測定し、記録しようとする方法の困難さに比べれば、いかに有効な方法であるかが理解できよう。これも写真測量と電子計算機とを併用することによって可能となるわけである。

このように、電子計算機を併用した近代写真測量の発達とともに、農業土木計画においても、地形、地質、土質、水系、植生、土地利用などの情報に関して、できるだけ質のよい、できるだけ多くのものを入手して、これをシステム化しようとする場合にも、航空写真測量は、きわめて重要な役割をもつことになるであろう。

従来、ただ単に、地図をつくる作業としか理解されて

いなかった写真測量は、近代化された土木計画や農業土木計画にも、その成果を大いに利用することを積極的に考えなければならぬ時期にきているように思われる。

II. 写真測量の基礎

写真測量 (Photogrammetry) の語源は、Photos(光)、gramma(描く) および metron(測定する) という三つのギリシヤ語を組合せてできた言葉で、1893年、ドイツのメイデンボーエルが、この新しい技術に関して、初めて Photogrammetry という用語を使った。

この言葉は、ヨルダン、ホーク、コッペなど多くの人々によって受けつがれ、今日におよんでいる。

現在、空中写真測量とか、航空写真測量という両方の用語が使われているが、最近、日本写真測量学会において用語の統一を図り、航空機、気球、人工衛星などから撮影した測量用の空中写真を用いる測量を、空中写真測量 (aerial photogrammetry) といい、そのうち、航空機から撮影した航空写真によるものを、航空写真測量と呼称することになった。

1. 航空写真と写真地図

測量用の航空写真は、これを実体模像に再現して測量する関係上、隣接する写真を、約 60% 重複 (オーバーラップ) させて撮影する。さらに、コース別に撮影する場合は、隣接コースを、約 30% 重複 (サイドラップ) させて撮影する。

撮影にあたっては、航空カメラの光軸を鉛直にして、直線コースを等高度に、水平飛行して撮影するが、風や気圧の影響で、多少横揺れしたり、縦揺れしたりして、完全な鉛直写真が得られない。しかし、その傾きが、約 3° 以内であれば、実用上、鉛直写真とみなしてきつつかえないので、これをとくに、垂直写真といって、一般に利用している。したがって、これ以上の傾きをもった斜め写真は、航空写真測量用としては使用できない。

(1) 広角写真と普通角写真 レンズの中心が画面の対角線に対して張る角を画角といい、その画角が約 60° のものを普通角、約 90° のものを広角、約 120° のものを超広角と呼んでいる。

また、レンズの中心から画面へ下した垂線の長さを画

表-1 広角写真と普通角写真

種類	画角	画面距離 (cm)	画面サイズ (cm)
普通角写真	約 60°	約 21	18×18
広角写真	約 90°	約 15	23×23
		約 11.5	18×18
超広角写真	約 120°	約 8.8	23×23

面距離といい、これは航空カメラが、固定焦点式であるので、レンズの焦点距離 f と一致する。

表-1 は、広角写真と普通角写真の画角、画面距離および画面のサイズの関係を表示したものである。

普通角写真は、写真像のヒズミが比較的小さいので、比高の著しい森林地帯の撮影に用いられる。また、画面距離が長いので、同じ縮尺の写真を書き出す場合、撮影高度が高くてもよいので、都市などの大縮尺の撮影に用いられる。しかし、普通角写真は、1枚の写真の中に含まれる撮影範囲が狭いので、撮影コース数が増し、写真の枚数も多くなって、一般に広角写真より経費がかさむ。

広角写真は、カメラの画角が大きいから、1枚の写真に入る面積は大きく、画面距離が小さいから、撮影高度も低くてよい。とくにヘリコプターによる低空撮影に有効であり、また、図化機による高さの測定精度が高く、撮影費も比較的安くすむので、一般に広角写真によるものが多い。

(2) 写真地図 航空写真をそのままつなぎ合わせたものを、略集成写真という。これに対して、写真の傾きを直し、縮尺を一定にした修正写真をつなぎ合わせたものを、厳密集成写真という。しかし、これら集成(モザイク)写真は、台紙の上に展開した基準点の位置に合わせてつなぎ合わせるが、比高によるずれは、とりのぞかれていないので精度は期待できない。したがって、現地の様子を概観する場合に用いられる。

なお、モザイク写真の上に、地名や記号を入れたり、着色したものを、写真図といい、地図の代用として利用することもある。

最近、写真地図(オーソホトマップ)といって、地図と同様に、平行投影した写真がつけられている。

これは、等高線を写真に重ねて焼きつけたもので、地図と同様にして読みとることができる。

写真地図のつくり方には、いろいろの方法があるが、その一つの方法としては、たとえば、

高さ 0~10m の等高線帯(白の部分)を、縮尺 1/m で焼きつけ、次に、高さ 10~20m の等高線帯(斜線の部分)を同じ縮尺で焼きつけると、高さ 0~20m までの比高によるずれがとり除かれる。このようにして、順次、高さごとに区切って焼きつけていくと、写真全体が同じ縮尺になって、地図と同じ性質をもつことになる。

このようにしてつくった写真地図は、縮尺も一定で、比高によるずれもないから、隣りの写真とつなぎ合わせてもずれることがないので、各種の調査や計画用として広く利用されるであろう。

2. 写真の縮尺とその用途

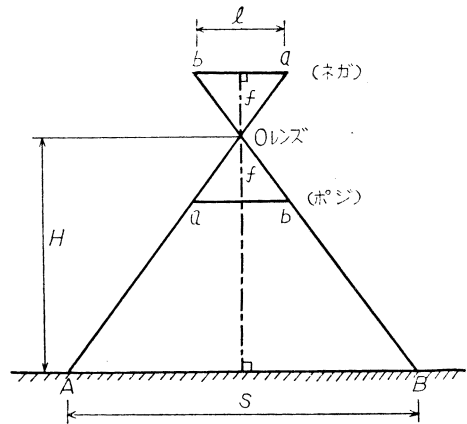


図-1 撮影高度と縮尺

図-1 において、鉛直に撮影した航空写真では、地上の S が、フィルム面で l に写るから、その縮尺 M_b ($= \frac{1}{m_b}$) は

$$M_b = \frac{1}{m_b} = \frac{l}{S} = \frac{f}{H} \frac{\text{(画面距離)}}{\text{(撮影高度)}}$$

で示される。

しかし、航空写真は、中心投影であるため、土地の比高により高いところは大きく、低いところは小さく写ってしまうので、写真の縮尺は、全面が同一であるとはいえない。したがって、ここで使われる撮影縮尺、あるいは写真縮尺とは、写真のだいたいの縮尺であると解さなければならない。

撮影の計画および撮影を指示する場合、正確を期するためには、使用カメラと海面上の撮影飛行高度(絶対高度)を示すか、撮影基準面の標高とその基準面に対する撮影縮尺を示すとよい。

写真の縮尺は、その使用目的に応じ最も適当なものしなければならない。

(1) 写真図化のための撮影縮尺 写真を図化する場合の撮影縮尺は、図化縮尺、要求精度、および使用する図化機に応じて決定する。すなわち図化縮尺が 1/5,000 程度の中縮尺では、撮影縮尺の 5 倍に拡大して図化し、1/1,000 以上の大縮尺では、6~8 倍に拡大して図化できるものとし、また、高さの精度は、だいたい撮影高度の 1/5,000 が得られるものとして、撮影縮尺や撮影高度を考えれば実用的である。

図化機には、いろいろの種類があつて画一的にはいえないが、ツァイスでは、写真縮尺 ($1/m_b$) と地図縮尺 ($1/m_k$) との関係を次式で示している。

$$m_b = k\sqrt{m_k}$$

ただし、 $k=200\sim300$

また、アメリカでは撮影高度 (H) と測定精度に応じて描画しうる等高線 (間隔= Δh) の関係を各図化機に対する C ファクターとして発表している。

$$C = \frac{H}{\Delta h}$$

- C : 1級図化機 : 1,500
- 2級図化機 : 1,200~800
- 3級図化機 : 600

したがって、図化にあたっては撮影縮尺に応じ、必要な精度と図化縮尺を得るに最も適当とする図化機を選定し、逆に、図化機と図の縮尺ならびに精度が先に決まっている場合には、これに適應する撮影縮尺、撮影法を定めなければならない。

航空写真測量のコストは、精度のよい図化機を使用しその精度の許す限り高い高度から小さな縮尺で撮影し、撮影コース数、使用写真枚数を少なく、かつ、航空三角測量のための地上基準点の数を少なくするほど低下するのがふつうである。

表-1 は、撮影縮尺、図化縮尺および使用図化機の関係を、また 表-2 は、全国測量業協会では、撮影縮尺と図

表-1 図化縮尺に応ずる撮影縮尺、図化機および精度の関係

完成図の縮尺	使用図化機	撮影縮尺	測定精度	等高線の間隔
1/ 500	1級・2級A	1/ 3,000~1/ 4,000	7~15cm	50cm
1/ 1,000	1級・2級A	1/ 6,000~1/ 8,000	20~30cm	1m
1/ 2,500	2級A	1/12,500~1/15,000	40cm	2m
1/ 3,000	2級A	1/15,000~1/18,000	50cm	2m
1/ 5,000	2級A・B	1/25,000	A 70cm B 150cm	A 2m B 5m
1/10,000	2級A・B	1/30,000~1/40,000	A 120cm B 240cm	5~10m

表-2 撮影縮尺と図化縮尺に対応する測量費の関係

図化縮尺	1 : 8		1 : 6		
	写真縮尺	コスト係数	写真縮尺	コスト係数	
1/ 500	1/ 4,000	0.90	1/ 3,000	1.00	
1/ 1,000	1/ 8,000	0.90	1/ 6,000	1.00	
1/ 2,500					
1/ 3,000					
1/ 5,000					
1/10,000					
1 : 5		1 : 4		1 : 2	
写真縮尺	コスト係数	写真縮尺	コスト係数	写真縮尺	コスト係数
1/ 2,500	1.10	—	—	—	—
1/ 5,000	1.10	—	—	—	—
1/12,500	1.00	1/10,000	1.15	1/ 5,000	1.90
1/15,000	1.00	1/12,000	1.15	1/ 6,000	1.90
1/25,000	1.00	1/20,000	1.15	1/10,000	1.90
—	—	1/40,000	0.90	1/20,000	1.30

化縮尺の倍率と、その間の作業コストの関係を発表したものである。

表-2 において、コスト係数 1.00 とある個所が、一般に考えられる適当な撮影縮尺で、他はこれに対するコスト増減の係数である。

航空写真測量の精度と図化しうる図の縮尺の限界は、撮影縮尺と、その撮影高度におおむね比例して考えられるので、撮影高度を下げて縮尺の大きい写真ができるならば、相当大きな縮尺の図化も可能である。最近では、ヘリコプターを使用して、撮影高度 450m、撮影縮尺 1/3,000 はもちろん、撮影高度 30m で 1/200 に撮影し、1/20 に図化して、1~2cm の等高線の描画が行なわれている。

(2) 判読調査のための写真縮尺 判読調査のための写真の縮尺は、何を判読するかによって使いやすい縮尺を定めることができるので、図化の場合ほど厳密に考える必要はない。

一般に、写真上で判読できるものの大きさは、コントラストや形、実体視したときの高さなどにもよるが、最小 0.02mm といわれている。写真上で 0.02mm とは写真縮尺が 1/5,000 なら現物で 10cm となるから、たとえば、田や畑の区別は 1/30,000 で判るが、果樹園では 1/10,000 でないと区別は困難となる。また、一筆の調査が必要であれば 1/1,000~1/500 の写真が必要となる。また、地質学的な判読は 1/20,000 程度が適当であるが、崩壊地などの調査には 1/3,000 程度のものが望ましい。

なお、判読のための写真は、撮影時期をその目的に応じて選定する必要がある。たとえば、日中撮影した写真と朝、または夕方撮影したものとを比較しながら判読するとか、あるいは降雨 2~3 日後に、赤外線写真を撮れば土地の乾湿による土壌や、地質の差がはっきりするしさらに、その地方の農作業の慣習上、特別の時期を選べば、特殊作物の作付けや収穫の状況を調査できるし、潮の干満、交通量のピークなど例をあげれば切りのないほど利用方法がある。したがって積雪、なだれの危険度やその発生、洪水の状況やその被害調査など、計画的に撮影することによって、より大きな写真判読の効果が得られる。

最近では、先に述べた正射投影写真 (オーソホトマップ) を用いれば、写真の鮮明度もふつうの引伸し写真とも変わらないので、今後、写真調査の面で広く利用されることになる。

3. 航空写真の性質

航空写真は、これをそのまま引き写しさえすれば地図

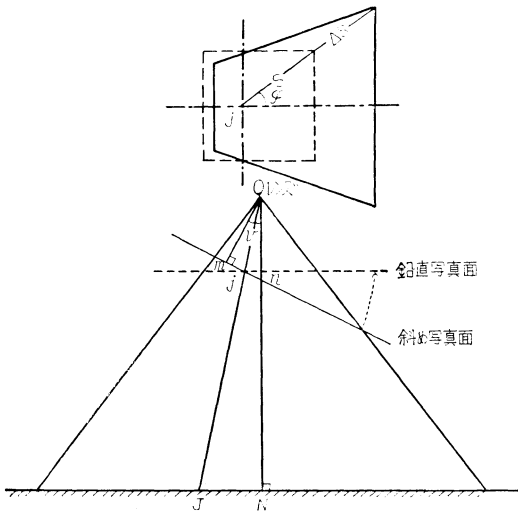


図-2 カメラの傾きによる写真像のヒズミ

を行なうためには、伸縮のないAK印画紙、またはプラスチックベースのAKポリグラフィーなどを使用するとよい。

(1) カメラの傾きによる像のヒズミ 土地が平坦な場合でも、撮影の際、カメラの光軸が真下に向いていないと、写真は 図-2 のようにひずんでくる。

図において、 m 点は、写真の光軸で、これを写真主点といい、印画紙上で、写真の中心を示す指標を結ぶ線の交点として求められる。

n 点は写真鉛直点で、撮影点から鉛直に下した垂線の足である。

j 点は、写真の傾斜角 mon の二等分線の点で、これを等角点といい、カメラの傾きによる写真像のずれは、図-2 に示すように、この等角点を中心とする放射線方向に生じ、その偏位量 (Δ_s) は次式で求められる。

$$\Delta_s = \frac{S^2 \cdot \sin V \cos \varphi}{f}$$

ただし、 S : 等角点から求める点までの距離

f : カメラの焦点距離

V : カメラの傾斜角

φ : 等角点における傾斜方向線から求める点までの角

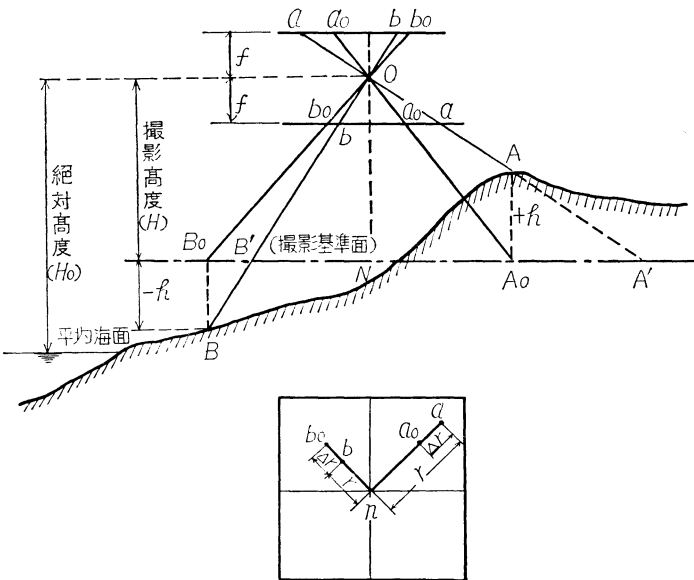


図-3 土地の比高による写真像のヒズミ

このようにカメラの傾きによる像のずれは j 点からの放射線方向になっているので、写真上の j 点で測角した写真上の測角値は、これに対応する地上の J 点での現地の測角値に等しい。このことから j 点を等角点というのである。

(2) 土地の比高による像のヒズミ 地図上では、同一鉛直線上のすべての点は、同じ位置に表わされるが、写真上では同一鉛直線上の点でも比高によって 図-3 に示すように、その位置がずれる。その比高によるずれの量 (Δr) は次式で求められる。

$$\Delta r = \pm \frac{h}{H} \cdot r$$

$$\therefore h = \frac{\Delta r}{r} \cdot H$$

ただし、 H : 撮影高度

h : 比 高

r : 鉛直点から地点までの写真上の長さ

上式でわかるように、比高によるずれを利用して、地物の高さを求めることができるという特徴がある。

[1970. 5. 29. 受稿]

になるように思われるが、写真には、撮影用カメラのレンズのディストーションによる像のヒズミのほか、撮影時のカメラの傾き、土地の比高によって写真像のヒズミを生じたり、フィルムや印画紙の伸縮によるヒズミもあって、写真を利用するには、これらのヒズミの性質を理解しておかねばならない。

レンズの像のヒズミ、すなわちディストーションは、新型のカメラでは0.005mm程度で、実用的にはヒズミがないものとみなしてよい。印画紙は、その現像過程で水を通すし、また紙自体の伸縮があるから、正確な測量