

衛星写真の電子計算機による Gridding と 低高度写真の判読

神子 敏朗* 能 登 正 之**

1. はしがき

衛星雲写真のみならず放射資料の解像力の向上とともに衛星資料を中規模じょう乱の調査研究に使用できる機会が増大している、特に人間衛星(GEMNI, APPOLO)が写した写真は鮮明度、解像力からみて小規模現象(たとえば lee wave cloud, 半径数 10km 程度のうず, 積乱雲, 前線, スコール)を取り扱っている航空気象への有用性が大きい。これら資料を中小規模じょう乱の調査研究に利用する場合、じょう乱の地理的位置の設定(Gridding)を正確に行う必要が生ずる。

Gridding に関しては藤田(1963)が図式で行う精密な方法を開発した。また Bonner(1965)はこの方法を若干修正し、プログラミングして電子計算機により Gridding することを提唱した。井沢(1964)はこれとほぼ時を同じくして計算処理に適合した計算方法を、また神子(1967)は APT 写真の Gridding のための計算方法、また土屋(1968)は ATS 写真の Gridding の計算方法を提出した。ただし写真に海岸線や目ぼしい地形があらわれている場合、前記の方法による計算結果と適合しないときには直下点、写真中心の緯経度、衛星の高さを変えて再計算を行ない、もっとも適合するものを選び出すことになる。いずれにしても、これらの計算においては写真中心を原点、ある基準線¹⁾を y 軸、それに直交する線を x 軸とし、ある緯度経度の値が与えられている点の写真上の x, y 座標を算出するとき、助変数としていくつかの要素を順々に求めて助変数を消去してゆく方法がとられる。その際これらの要素のうちの角度の正弦、余弦の一方の値から他方を求めようとしたり、あるいは、逆三角関数を求めようとする、その角がどの象

限にあるか検討し、角の大きさ、あるいはその属する象限や符号を判断することが必要になる。

しかし角の大きさの範囲があらかじめ限定されている場合を除けば、衛星と共に移動する座標系や、その座標内の任意に選ばれた点に関係している角については、その象限、あるいは三角関係数の符号を、逐一検討することはきわめて繁雑な手続きを必要とする。

このような困難を省くため、角の大きさの範囲が同一象限内に限定されている場合以外は、球面三角形に適用する正弦則、余弦則を用いて、正弦、余弦の値を求める方法を用い計算機処理にも便利なようにした。

また各写真の Gridding を行う場合、最小限必要な情報は直下点、写真中心の緯度、経度、衛星の高度、傾角²⁾などである。気象衛星についてはこれらの情報は与えられているが、人間衛星から写した写真や航空写真では得られていないことが多い。ただしこれらの写真でも海岸線や地形が識別できる場合には、写真測量の手法を利用して、写真中心、直下点、傾角、撮影高度、焦点距離を推定し、これらの推定値を用いて、今回提出する計算方法により緯経線を求めることができる。本報告では写真測量の手法も併せて説明する。

2. APT 写真の Gridding

気象衛星の写真はカメラの光軸に直交する平面に写っている。ここではカメラの光軸が、衛星を通る直下線に一致している場合、すなわち、カメラが地球を鉛直下方に向いて撮影した写真の緯経線格子の設定について考える。

写真上において直下点 TSP (ϕ_{SP}, θ_{SP}) を原点、heading line を y 軸、それに直交する線を x 軸とする

Computer Gridding of Satellite Picture and Rectification of Pictures taken by Vehicles flying at Low Altitude

* 東京航空地方気象台

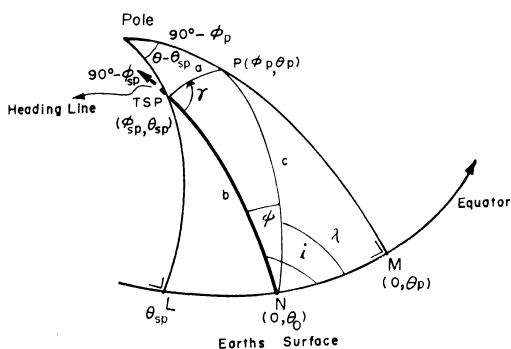
** 気象庁総務課

注 1) APT 写真の場合は heading line (衛星の軌道の地球表面における軌跡)、光軸が直下線と異なる場合には直下点と写真中心を結ぶ線

2) 衛星を通る直下線とカメラの光軸のなす角

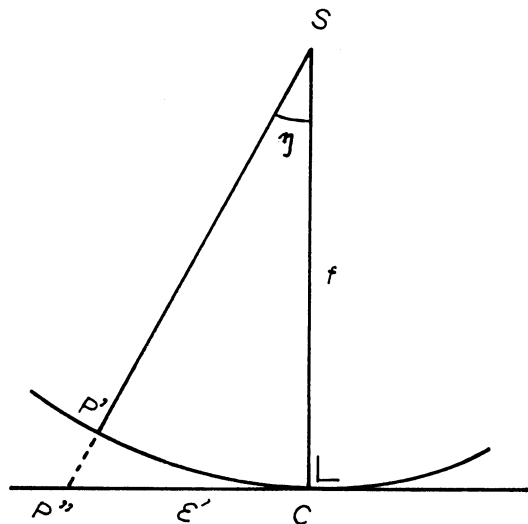
3) principal line (主線) 直下点と地上主点を結ぶ大円

4) カメラの中心を通り水平面に平行な面が写真面と交る線



第1図 APT 写真の Gridding 計算の基礎図

P : 測点 L : 直下点を通る子午線が赤道と交る点 M : Pを通る子午線と赤道の交点 ϕ : 昇交点Nにおいて N と P を結ぶ大円と heading line のなす角 γ : TSP において TSP と P を結ぶ大円が heading line となす角 λ : 昇交点Nにおいて, N と P を結ぶ大円が赤道となす角 i : 昇交点Nにおいて, heading line と赤道のなす角
 a : P と TSP を結ぶ大円



第2図 測点 P が光軸に直交する面 (レンズの中心から f の距離) に写っている状態を示す. C : 写真主点 P' : カメラの焦点距離 f を半径とする球面が P とレンズの中心を結ぶ直線と交る点 P'' : C において球に接する平面と P とカメラの中心を結ぶ直線が交る点

とき, この写真に写っている地球上の任意の点 P (ϕ_P, θ_P) の x, y 座標を求める. そのためにはまず P と TSP 間の大円距離を求める.

余弦則により Pole, TSP, P で構成される三角形において次の式が成立つ. (第1図)

$$\cos a = \sin \phi_P \sin \phi_{SP} + \cos \phi_P \cos \phi_{SP} \cos(\theta_P - \theta_{SP}) \quad (1)$$

$0 \leq a < \frac{\pi}{2}$ でなければならないから正号のみをとって,

$$\sin a = \sqrt{1 - \cos^2 a} \quad (2)$$

TSP と P を結ぶ大円 a を含む平面は, また衛星地球の中心 O および地表上の点 P も含む. (第6図で δ を a と読み換える) したがって衛星を通る直下線と, 衛星と P を結ぶ直線とのなす角 η は平面三角形に SOP に関する正弦側から求めることができる. すなわち,

$$\tan \eta = \sin a / \left(\frac{H + R}{R} - \cos a \right) \quad (3)$$

ここに H は衛星の高度, R は地球の半径である.

次に第1図の球面三角形 PMN において NP : 辺 c は余弦則から

$$\cos c = \cos \phi_P \cos(\theta_P - \theta_0) \quad (4)$$

また NP と NM のなす角 λ については余弦則および(4)式から次式が成り立つ.

$$\cos \lambda = \cos \phi_P \sin(\theta_P - \theta_0) / \sin c \quad (5)$$

また正弦則から

$$\sin \lambda = \sin \phi_P / \sin c \quad (6)$$

また TSP, L, N で構成される球面三角形において余弦則により,

$$\cos b = \cos \phi_{SP} \cos(\theta_0 - \theta_{SP}) \quad (7)$$

また正弦則により

$$\sin b = \sin \phi_{SP} / \sin i \quad (8)$$

が成り立つ. この場合は i 各衛星ごとに決まっている定数である. また TSP, P, N で構成される球面三角形において, γ については正弦則を適用し, 第1図から $\phi \equiv i - \lambda$ であることを考慮すると

$$\sin \gamma = (\sin i \cos \lambda - \cos i \sin \lambda) \sin c / \sin a \quad (9)$$

また余弦則により

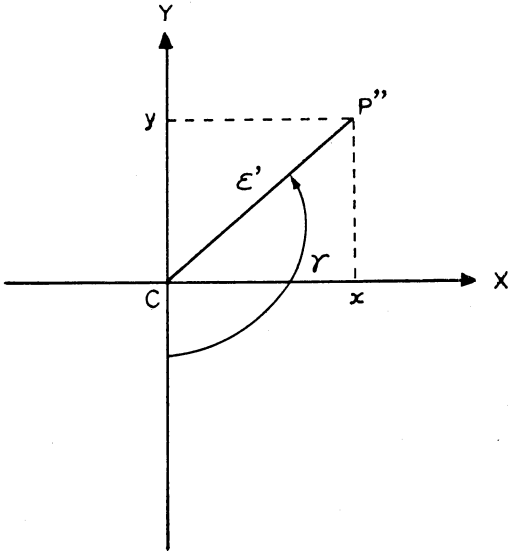
$$\cos \gamma = (\cos c - \cos a \cos b) / \sin a \sin b \quad (10)$$

を得る. 写真はレンズ中心から焦点距離 f にある平面上に像を結ぶ. 第2図において光軸と写真面が交る点を C, P 点の像を P' とするとき, P''C 間の距離 ϵ' は $\epsilon' = f \tan \eta$ (11) で与えられる.

次に第3図のように heading line の方向を軸の正の方向にとると点 P' の x, y 座標は次の式であらわされる.

$$x = \epsilon' \sin \gamma$$

$$y = \epsilon' \cos \gamma$$



第3図 写真平面上で測点Pの像 P'' の x, y 座標を求める図 C(写真中心)を原点, heading line または主線を y 軸とする直交座標 x, y 座標を設定する. 角 γ は第1図にしたがって y 軸の負の方向から測る. ただし衛星の進行方向または直下点(衛星を通る直下線が地表面と交る点)から地上主点(写真中心に対応)に向う方向を正にとる.

写真の拡大率 σ を考慮し, ε' に (11) 式を代入すると

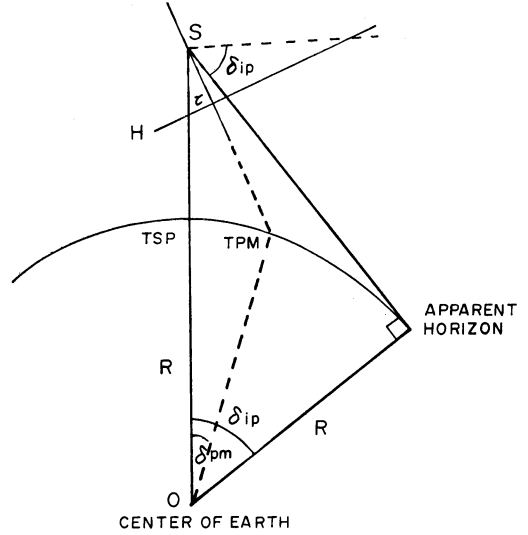
$$x = of \tan \eta \sin \gamma \quad (12)$$

$$y = -of \tan \eta \cos \gamma \quad (13)$$

緯度が既知の特定点について, たとえば $x' = \tan \eta \sin \gamma$ の値は計算で求まるから, この点の写真上の x 座標の値 x' を見れば $of = x/x'$ により of を知ることができる.

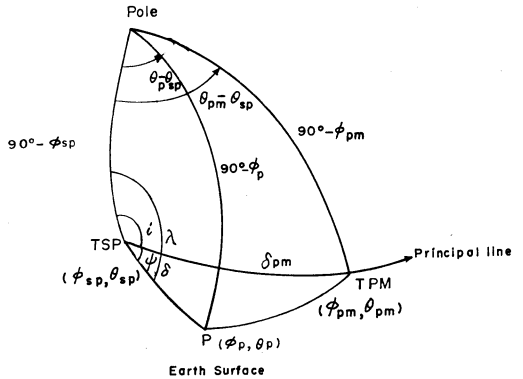
3. 斜写真の Gridding

2ではカメラの光軸が衛星の直下点に一致する場合には述べたが, ここではカメラの光軸が鉛直軸と一致しない場合について述べる. このとき, 衛星を通る直下線が写真面と交る点を写真下点とし, また光軸が地表面と交る点を地上主点, 写真面と交る点を写真主点と名づける. 直下点, 地上主点の経緯度, 飛行物体の高さが与えられているとき, 直下点と地上主点を結ぶ大円, および任意の点 P (ϕ_p, θ_p) が写真に写っている状態において, 写真主点を原点, その大円を y 軸, これに直交する x 軸をとり, 測点 P (ϕ_p, θ_p) の x および y 座標を求めることを考える. y 軸は直下点から地上主点に向う方向を正と定める. まず, 第4図において角 δ_{ip} とカ



第4図 斜写真の傾角を計算する基礎図

TSP: 直下点 TPM: 地上主点 O: 地球中心 δ_{ip} : TSP における地平面と S—APPARENT HORIZON のなす角 δ_{pm} : TSP と TPM 間の大円距離 H: 衛星の高度



第5図 斜写真の Gridding 計算の基礎図

δ : P と TSP 間の大円距離 δ_{pm} : TPM と TSP 間の大円距離 λ : P と TSP を結ぶ大円と TSP を通る子午線のなす角 i : 地上主線と TSP を通る子午線のなす角 ϕ : 地上主線と TSP, P を結ぶ大円のなす角

メラの高度 H, 地球の半径 R 間には次の関係がある.

$$\cos \delta_{ip} = \frac{R}{H + R} \quad (14)$$

また直下点と地上主点の作る地心角 δ_{PM} については, 第5図の Pole, TSP, TPM で構成される球面三角形に余弦則を適用し

$$\begin{aligned} \cos\delta_{PM} = & \sin\phi_{SP} \sin\phi_{PM} \\ & + \cos\phi_{SP} \cos\phi_{PM} \cos(\theta_{PM} - \theta_{SP}) \end{aligned} \quad (15)$$

を得る. ここに ϕ_{SP} , θ_{SP} はそれぞれ直下点の緯度, 経度, また ϕ_{PM} , θ_{PM} は地上主点の緯度, 経度である.

$0 \leq \delta_{PM} < \frac{\pi}{2}$ であることを考慮すれば

$$\sin\delta_{PM} = \sqrt{1 - \cos^2\delta_{PM}} \quad (16)$$

である.

写真面の傾斜角 τ は, S, O, TPM で構成される平面三角形 (第4図) に正弦則を適用し, (14) 式を代入すると,

$$\tau = \tan^{-1} \{ \cos\delta_{iP} \sin\delta_{PM} / (1 - \cos\delta_{iP} \cos\delta_{PM}) \} \quad (17)$$

ただし $0 < \tau < \frac{\pi}{2}$ を得る.

また第5図の Pole, P, TSP で構成される球面三角形に余弦則を適用すると, P と TSP 間の大円距離を求める式は次の通りになる.

$$\begin{aligned} \cos\delta = & \sin\phi_{SP} \sin\phi_P \\ & + \cos\phi_{SP} \cos\phi_P \cos(\theta_P - \theta_{SP}) \end{aligned} \quad (18)$$

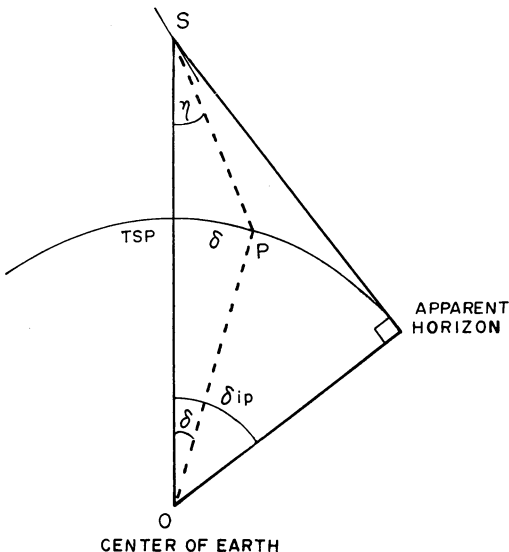
ただし点 P が衛星から見透せる位置にあるためには,

$0 \leq \delta < \frac{\pi}{2}$ でなければならない. したがって

$$\sin\delta = \sqrt{1 - \cos^2\delta} \quad (19)$$

($\cos\delta < 0$ となる点 P (ϕ_P , θ_P) については座標は与えられない.)

次に S, O, P で構成される平面三角形 (第6図) に正弦則を適用し, さらに (14) 式を代入すれば, 直下線



第6図 衛星の高度における測点Pの傾角ηを求める図

とカメラの光軸のなす角ηは次の式から求められる.

$$\eta = \tan^{-1} \{ \cos\delta_{iP} \sin\delta / (1 - \cos\delta_{iP} \cos\delta) \} \quad (20)$$

ここにηは $0 \leq \eta < \frac{\pi}{2}$ である.

また TSP を通る子午線が principal line (主線)³⁾ となす角については, Pole, TSP, TPM で構成される球面三角形 (第5図) に着目すると余弦則および正弦則によりそれぞれ次の式が求められる.

$$\cos i = (\sin\phi_{PM} - \sin\phi_{SP} \cos\delta_{PM}) / \cos\phi_{SP} \sin\delta_{PM} \quad (21)$$

$$\sin i = \cos\phi_{PM} \sin(\theta_{PM} - \theta_{SPM}) / \sin\delta_{PM} \quad (22)$$

同様に第5図で Pole, TSP, P で構成される球面三角形の Pole—TSP, P—TSP のなす角λをで表わせば, 余弦則および正弦則により

$$\cos\lambda = (\sin\phi_P - \sin\phi_{SP} \cos\delta) / \cos\phi_{SP} \sin\delta \quad (23)$$

および

$$\sin\lambda = \sin(\theta_P - \theta_{SP}) \cos\phi_P / \sin\delta \quad (24)$$

を得る. また第5図において TSP, TPM, P で構成される球面三角形の TPM—TSP, P—TSP のなす角をφで表わすと

$$\phi = \lambda - i \quad (25)$$

であることから

$$\cos\phi = \cos\lambda \cos i + \sin\lambda \sin i \quad (26)$$

$$\sin\phi = \sin\lambda \cos i - \cos\lambda \sin i \quad (27)$$

である.

次に衛星Sを中心として, 焦点距離fを半径とする球面を考え, 直線 S—TSP, S—P, S—TPM とこの球面が交叉する点をそれぞれ A, P', C とすると, A, P' 間および A, C 間の大円距離ならびに角 A はそれぞれ η, τ, φ である. (第7図) 球面三角形 AP'C についてその辺 P'C および 角Cをそれぞれ ε および γ で表わすと, 余弦則により,

$$\cos\epsilon = \cos\eta \cos\tau + \sin\eta \sin\tau \cos\phi \quad (28)$$

および

$$\cos\gamma = (\cos\eta - \cos\epsilon \cos\tau) / \sin\epsilon \sin\tau \quad (29)$$

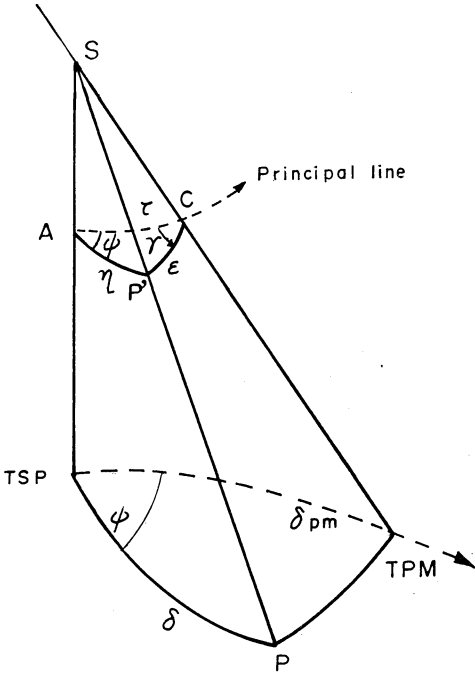
また

$$\sin\gamma = \sin\phi \sin\eta / \sin\epsilon \quad (30)$$

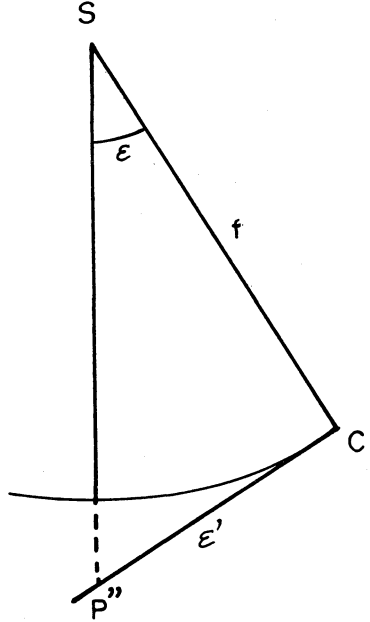
地上の物体の写像はレンズから焦点距離 f の距離において直交する平面に写る. 地球上の点 P の写像を P'' とすると, CP'' の長さ ε' (第8図) は

$$\epsilon' = f \tan\epsilon \quad (31)$$

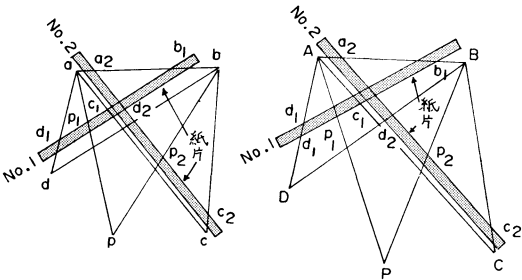
である. 第3図は写真面上において写真主点Cを座標原点, 主線の方向を y 軸とする xy 座標を表わすので, $x = \epsilon' \sin\gamma$, $y = -\epsilon' \cos\gamma$ となる. 写真の拡大率 σ を考慮した整理すると



第7図 Sを中心とし焦点距離を半径とする球面A P'Cにおいて写真中心CとP'間の大円距離ε, および大円εと主線のなす角γを求める
 図A: その球面とSを通る直下線の交る点
 P': Sと測点Pを結ぶ線がその球面と交る点



第8図 カメラからf(焦点距離)の直距離にある平面上で地上測点PがP''に写っている状態を示す P'': 写真測点



9図 四点図解法(紙片法)

d_1, p_1, c_1, b_1 は紙片 No. 1 の片側が ad, ap, ac, ab と交る点, また a_2, d_2, p_2, c_2 は紙片 No. 2 の片側が ba, bd, bp, bc と交る点

$$x' = f\sigma \sin\phi \sin\eta / \cos\epsilon \quad (32)$$

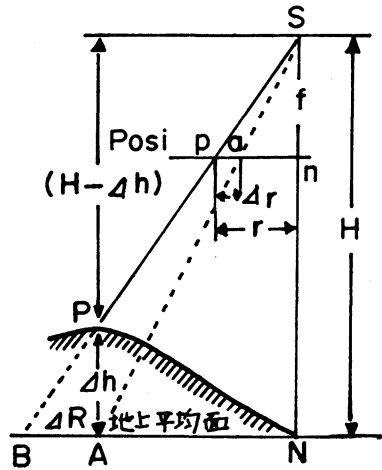
$$y' = -f\sigma (\cos\eta - \cos\epsilon \cos\tau) / \cos\epsilon \sin\tau \quad (33)$$

ただし $\phi_P = \phi_{SP}, \theta_P = \theta_{SP}$ のときは極限を考え、

$$x' = 0 \quad (34)$$

$$y' = -f\sigma \tan\tau \quad (35)$$

となる。



第10図 地表が水平面でないことや山の存在のためにおこる平面測量の誤差 Δh: 山の高さ
 H: 飛行物体の高さ Δr: 誤差

4. 低高度写真真の判読

直下点, 写真中心の経緯度飛行物体の高度が殆んど分っていない人間衛星, 航空機による写真の場合, もし海岸線, 山などが判別できれば, 写真測量の手法により前述の三要素を求めることができる。そのためには四点図

解法を介して写真中心の経・緯度、やその他数点の位置を求めなければならない。四点図解法を採用するという事は判読の対象が平面写真であるという仮定があり当然誤差が生ずる。写真測量 (1968) には色々の手法や前述の誤差が紹介されている。ここではアポロ写真の判読に至るまでに利用した手法と誤差について簡単に述べる。

1. 四点図解法 (第9図)

地図上の4点を A, B, C, D とし写真上でそれらに対応する点 a, b, c, d も分っているとす。いま写真上のある点 (たとえば写真中心) を地図上に求める。写真上で No. 1 の紙片が ad, ap, ac, ab を切る点 d_1, p_1, c_1, b_1 を紙片上に記入する。その紙片を地図にのせ AD, AC, AB を d_1, c_1, b_1 で切るように移動させる。AP₁ を結ぶ線を地図上に描画する。

次に No. 2 の紙片が写真上で ba, bd, bp, bc を切る点 a_2, d_2, p_2, c_2 を紙片に記入する。その紙片を地図にのせ No. 1 の紙片と同様な操作をし、BP₂ を結ぶ線を地図上に描画する。AP₁, BP₂ の交点により写真上の目標物の経緯度が知れる。この操作を逆に行なって地図上の各点を次々に写真上に求めれば経緯線を描画できる。ただしこの作業は手数がかかるので、写真中心の経・緯度、消失線⁴⁾ (true horizon) の設定、次の2, 3を行うに必要な点、消失線と主線の交点のみに留めた。

2. 写真の傾角の推定

いま θ を地上測点と地上主点 (写真中心の地上位置) を結ぶ線が地上主線となす角、 θ' を写真測点と写真主点を結ぶ線が写真主線となす角、傾角を τ とすると次式がなり立つ。

$$\theta - \theta' = -\frac{\tau^2}{4} \sin 2\theta' \quad (30)$$

これから傾角が求められる。

3. 飛行物体の高度の推定

Δx を写真主線上の二点間の距離、 ΔM はこれら二点近傍の縮尺差、 H を高度とすると次の式がなり立つ。

$$H = \frac{\Delta x \sin \tau}{\Delta M} \quad (31)$$

これから飛行物体の高さが求まる。

4. 直下点の推定

第4図の TPM, S, O からなる三角形において

$$\delta_{PM} = \sin^{-1} \left(\frac{H + \bar{R}}{\bar{R}} - \sin \tau \right) - \tau \quad (32)$$

地上主線上において消失線と反対方向に大円距離 δ_{PM} 離れた点が直下点となる。

5. 地面に起伏のあることによる誤差

次節で取り上げる写真は地球表面を対象としておりまた山を標点としているので、四点図解法では当然誤差が生ずる。ここでは山の場合について考察する。

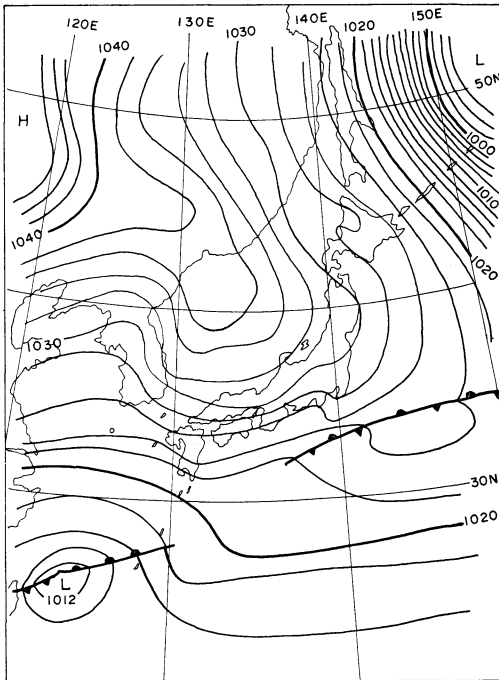
第10図では写真がSからfの距離に写っているとしている。またP (山頂) はPに、山頂の直下点Aはaに、また地上主点Nはnに写っている。平面として緯経線を求める場合Pの緯経度の値はB点のそれになっており写真上で Δr の誤差を生じている。簡単な計算により

$$\Delta r = \frac{4h}{H} r$$

従って真下を向いて撮った写真でもこれだけの補正が必要になる。

5. 適用例

アポロ9号が昭和44年3月11日8時30分(日本時)に写した写真(第11図・口絵)は海岸線があらわれていない。目ぼしい標点は富士山のみである。しかし幸いにも中部山岳、関東山脈、三国山脈の山々には雪が残っており、それらを標点として前述の主要点を四点図解法により推定した。その結果写真主点は遠州灘の南34.3N, 137.9Eであることが判った。また4節2の方法により傾角を求めその値は75°19' となった。アポロの高度は新聞の情報通り110kmとし4節4の方法により直下点を求めた所、それは室戸岬の南310.2kmと判明した。これらの情報を3節の方法により計算機で各緯経度の点のxy座標を求めた。しかし4節5に述べたような誤差や手作業による誤差、また平面と仮定しているための誤差が加わり、標点にとった山の緯経度が実際とかなり喰違った。そこで一応写真中心を固定し直下点を色々変えて数例計算し、標点の緯経度の合致するものを取り出した。(直下点は33.8N, 137.3E, 傾角35.4度)それにより描画した経緯線が第12図に示された海岸線を設定した。第12図の地上天気図によれば東日本はいわゆる北高型または北東気流の型であり顕著な停滞前線が関東南東海上から八丈島付近に達している。写真によれば関東南部、伊豆半島、山梨、駿河湾、静岡県は層積雲または高積雲系に蔽われており、波状雲が所々に存在する。また関東中北部、長野県中部、赤石山脈、木曾山脈、愛知県南東部は晴れている。また日本海沿岸の黒部川口から新潟までの日本海側は雲に蔽われている。一方伊豆半島の南も雲が切れ、遠州灘の南に積雲からなるうずがあり、雲バンドが南東に伸びている。また関東南東の雲の切れ間は第12図の前線付近に存在する。地上実況による雲の分布(図省略)は写真にあらわれている雲分布に適合するが写真



第12図 地上天気図 昭和44年3月11日9時(日本時)

のような詳細は分らない。なおここに述べた状況の力学的、熱力学的解明については他日稿を改めて報告する。

6. むすび

1. 衛星写真の Gridding は米合衆国では解決済みであり今更問題にならないと思われる。しかし我国で電子計算機で処理する場合、従来の計算式では逆三角函数の特性(プログラム)のため未解決な面があった。本報告では三角函数の値をそのまま使うことにより測点を各象限に属せしめることを解決した。

2. 直下点、地上主点地、上主線、衛星高度の判明していないアポロ衛星の写真に写真測量の方法を適用し、Griddingに必要な要素を推定し、それから斜写真のGridding法(計算機による)を適用して経緯線を設定した。当然この手法では誤差を伴うがGriddingに必要な諸要素の判らない写真の判読の近似的方法となる。航空写真ならばほぼこの手法で差支えないと思われる。

本報告で取扱った写真は台風研の渡辺室長から提供されGriddingについては台風研の井沢主任研究官、気象庁予報課の土屋技官の助言をいただいた。この報告作成については気研との共同研究「静止衛星観測の航空気象への利用」の費用の一部を使用した。

また常々便宜を計っていただいている柿崎東航台長、安斎次長、股野予報課長に感謝するものである。なお小野けい子技官に製図を、大平泰二氏に写真をお願いした。

参考文献

- Fujita, T. (1963) A technique for precise analysis for satellite data: Vol. 1 Photogrammetry. MSL Rep., 14, 1~104.
- Bonner, W. D. (1965) A program for computer gridding of satellite photographs for mesoscale research. SMRP., 43, 1-31.
- 井沢竜夫(1964) スキャンポイント(輻射)とフォトグリッド(写真)について, 昭和39年秋季大会発表(未印刷)
- 神子敏朗(1967) 衛星の雲写真および DRIR Gridding 測候時報, 34, 191~207.
- 土屋 清(1968) ATS 写真の緯経度記入法と解像度 天気, 15, 39~41.
- 種田 守(1968) 写真測量—基礎と演習—オーム社 1~234.