

# 海上の雲の航空写真による解析, I\*

(雲の高度の決定)

孫野長治\*\* 葛西俊之\*\*\*

**要旨:** 海上の雲の解析は基準になる地形, 地物が利用できないので一般に困難である. ここでは太陽光線に関する資料をできるだけ使った簡単な解析方法を紹介した.

## まえがき

一枚の雲の航空写真から得られるものは当然のことであるが, カメラの光軸に対する映像の方向だけである. したがって寸法に関する解析をすすめるためには何等かの寸法に関係した資料を写しこんでおかなければならない. このために地形を背景に写しこんだり, 撮影位置を変えて実体鏡方式を利用する方法がとられている. とにかく陸上の雲の場合は寸法に関する資料は得やすいが, 海上の場合はその機会が非常に少ない. またあとで述べるように航空機の位置条件がわかっているならば寸法の決定は原理上は可能であるが, 測定精度の問題も検討する必要がある. そこで地上の地物に一切頼らない方法, しかも斜め写真の場合について二, 三試みた結果を報告したい.

## 1. 写真以外の資料を利用した雲の高度の推定

寸法に関する量としての雲の高度は雲の解析に最も便利であり, 有用でもある.

海上の雲に限らず一般に, 雲形, 航空機の高度及びラジオゾンデの資料から, 雲の大体の高度の推定はよく行なわれているので, その問題点に簡単にふれてみたい.

**雲形:** 中緯度の場合は層状雲の高度は上層, 中層, 下層と三大別されて雲形からごく大体の高度が推定できるが, ここで問題とする程の精度は得られない. また高緯度地帯の上層雲は非常に低いし, 低緯度地帯では予想外に高いので, 実際問題として量的な解析の役にたたない.

**航空機自体の高度:** 航空機が実際に雲を貫く場合は勿論, 実際に貫かなくても航空機に近くてしかも似た高度にある雲の高度は相当正確に推定できる. しかし写真

解析としては限られた場合の狭い部分にしか適用できない.

**ラジオゾンデの資料:** 運よく近い時刻に近い場所のラジオゾンデの詳細な資料が入手できる場合には気温の逆転高度及び湿度の垂直分布から雲頂高度が比較的正確に推定できる場合がある. 雲底高度はゾンデ放球の際の目視観測の方がよいようである.

上にあげた三つの方法はそれだけでは推定根拠としては弱い傍証としてならば使える程度である.

## 2. 太陽による雲の海面上の影

地面に雲の影の写っている場合は, シカゴ大学の藤田教授がその場所の地図を利用して美事な雲の解析を多数行なった. 海面上の影の場合は地図は使えないが航空機の大体の位置と正確な高度, 及びカメラの光軸方向と撮影の時刻がわかっているならば, 雲の高度が相当の精度で測定される. その作図法を述べるのが本節の主目的であるが, その前に説明のための言葉の約束を第1図に示す.

図の左方が引伸をした雲の写真とし, 視野の対角線の交点Oがカメラの光軸の位置を示す. 又あとで光軸の位置が必要になるから引伸の際に視野の隅の部分まで写しこんでおくことと便利である. 今O点から写真面に垂直な直線(この場合は光軸)をたて, O点から有効焦点距離Fの点をAとすれば, A点が撮影位置に相当し, A点と写真上の物体とを結んだ直線が撮影位置からみた物体の方向を示すことになる. 有効焦点距離Fとはレンズの焦点距離に引伸倍率を乗じたものを意味し, 以後単に焦点距離と略称する.

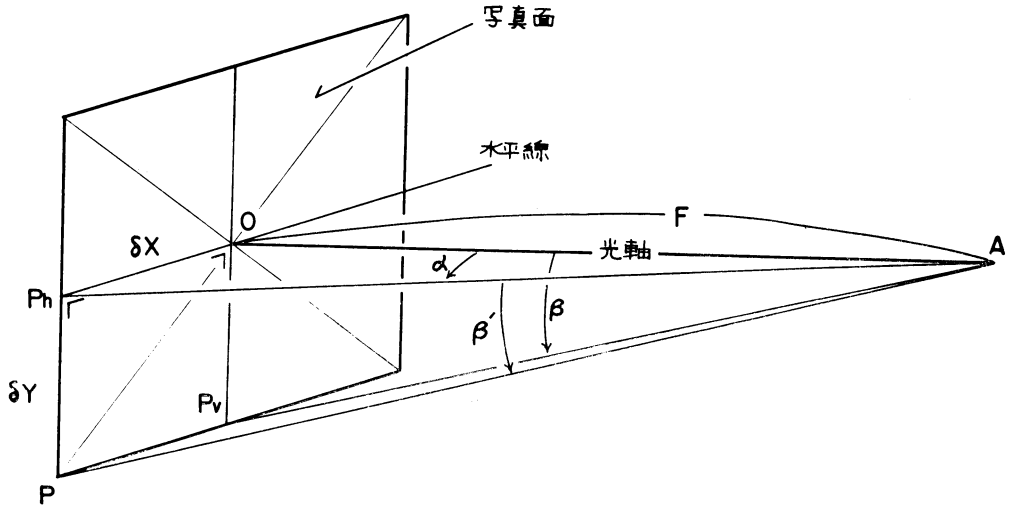
第1図で写真上の一点Pの光軸に対する(水平方位角)(以下方位角と略称) $\alpha$ を決めるには, P点の光軸からの水平方向のずれを $\delta X$ とすれば $\delta X/F = \tan \alpha$ の関係式から求めればよい. 実際に作図する場合には方位角 $\alpha$ の値を計算しないで $\delta X$ とFだけで方位を示す直線

\* Photogrammetry of clouds over the ocean, I (Determination of cloud height)

\*\* C. Magono, 北大理学部

\*\*\* T. Kasai //

—1966年6月3日受理—

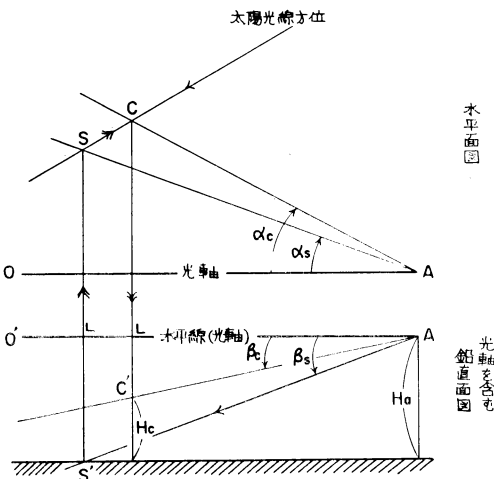


第1図 水平方位角 ( $\alpha$ ) と鉛直伏角 ( $\beta$ ) の約束

$\overline{AP}_h$  が作図できる。ここで水平方位角というのは、光軸に直角に真上からみた場合に、光軸と物体が撮影点Aを挟む水平投影角度である。

次に点Pの伏角  $\angle P_hAP$  即ち  $\beta'$  を決める代りに、P点の光軸に対する鉛直伏角  $\angle OAP_v$  即ち  $\beta$  を考えることにする。すると  $\beta$  は  $\delta Y/F = \tan \beta$  の関係式から求められる。実際の作図ではこの場合も  $\beta$  の値を使わずにP点の光軸からの鉛直方向のずれ  $\delta Y$  と  $F$  だけで鉛直伏角の方向を示す直線が簡単に作図できる。ここで鉛直伏角というのは光軸に直角に真横からみて光軸と物体が撮影点Aを挟む鉛直投影角度である。

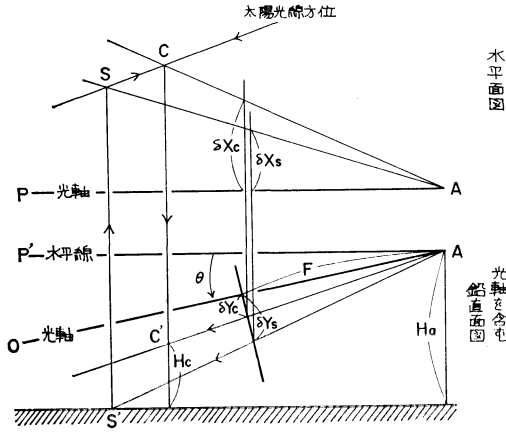
今簡単のためにカメラの光軸が水平な場合について海面上の雲の影の位置から雲の高度を簡単に求める方法を説明しよう。第2図の上方は真上からみた水平面図であり、下方は真横からみた光軸を含む鉛直面図である。点A, A' がそれぞれの撮影観測点で、観測点の海面からの高さを  $H_a$  とする。着目する雲の一点を C, C' とし、これに対応する海面上の影の点を S, S' とする。以後作図によりこの点を求める方法を述べるが写真からC点及びS点の光軸からのずれの成分  $\delta X_c, \delta Y_c$  及び  $\delta X_s, \delta Y_s$  から、それぞれの方位角  $\alpha_c, \alpha_s$  及び鉛直伏角  $\beta_c, \beta_s$  が第2図のように作図される。鉛直面図で影の点の鉛直伏角を表わす直線が海面と交わる点 S' が海面上の影の点の位置を示し、この点から垂直に水平面図にのびた直線が、影の点の方位角を示す直線と交わる点Sが影の点の水平位置を表わす。撮影の精確な時刻と大体の位置がわかっているならば、この時の太陽光線の方位が計算できるから、その方位に平行な直線をS点から引き、雲の方位角を示す直線との交点Cが雲の水平位置である。更にC点から鉛直面図に垂線を下ろして雲の鉛直位置を示す直線との交点が雲の鉛直位置で、これと海面との差  $H_c$  が雲の高度に相当する。



第2図 海面上の雲の影から雲の高度を求める作図法 (カメラ光軸が水平の場合)

太陽光線の方位角は一般に天測計算表から求められるが、特にこの目的で作成された梶川 (1965) の便利な計算図もある。

光軸が水平ではなく第3図のように角度  $\theta$  だけ下に傾いた場合の作図法を次に説明しよう。写真の上で水平線の光軸からの鉛直方向のずれを測れば、第3図のよう



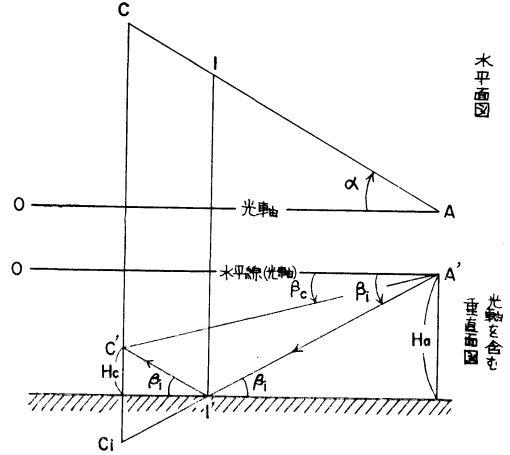
第3図 海面上の雲の影から雲の高度を求める作図法 (カメラ光軸が傾いた場合)

に光軸を含む鉛直面図内で水平線に対して光軸方向を示す直線  $\overline{A'O}$  を引くことができる。光軸上にAから有効焦点距離  $F$  の点で垂線をたて、写真上の雲と影の点の鉛直方向のずれ  $\delta Y_c$ ,  $\delta Y_s$  を用いて雲及び影の点の鉛直伏角の方向を示す直線  $\overline{A'C'}$ ,  $\overline{A'S'}$  の方向が決定される。 $\overline{A'S'}$  直線が海面と交わる点  $S'$  が影の点の位置である。一方、前記の  $\delta Y_c$ ,  $\delta Y_s$  の端から水平線に垂線をたてて、それぞれの  $\delta X_c$ ,  $\delta X_s$  を使って第3図の水平面図の如く雲の点及び影の点の方位角が決定される。また海面上の影の点  $S'$  から水平面図に垂線をたてて、既に決定された影の点の方位角を示す直線との交点  $S$  が影の点の水平位置である。このあとの作図は第2図の場合と同様な手続で雲の高度  $H_c$  が決定される。図版の写真1に東太平洋の列状雲の影から計算した例を示す。この時の航空機の高度は  $9450\text{m}$  で雲底高度は  $1300\text{m}$  と計算されたが気温逆転の高度と一致した。

3. 海面上の雲の反射映像

海面が静かな時に海面に雲の反射映像が写っていることがある。一例を図版写真2に示す。この場合に雲の高度を求める作図は第4図に例示されているように至って簡単である。

雲及び雲の反射映像の鉛直伏角  $\beta_c$ ,  $\beta_i$  を光軸を含む鉛直面図に第3図のように作成し、反射映像の鉛直伏角を示す直線が海面と交わる点  $I'$  から反射の原理で  $\overline{I'C'}$  の方向が決まり、これと雲の鉛直伏角を示す直線との交点  $C'$  が雲の高度  $H_c$  を与える。また  $C'$  から水平面図に垂線をたてて、雲の方位角 (反射映像の方位角と一致) を示す直線との交点  $C$  が雲の水平位置を与える。こ



第4図 海面上の雲の反射映像から雲の高度を求める作図法

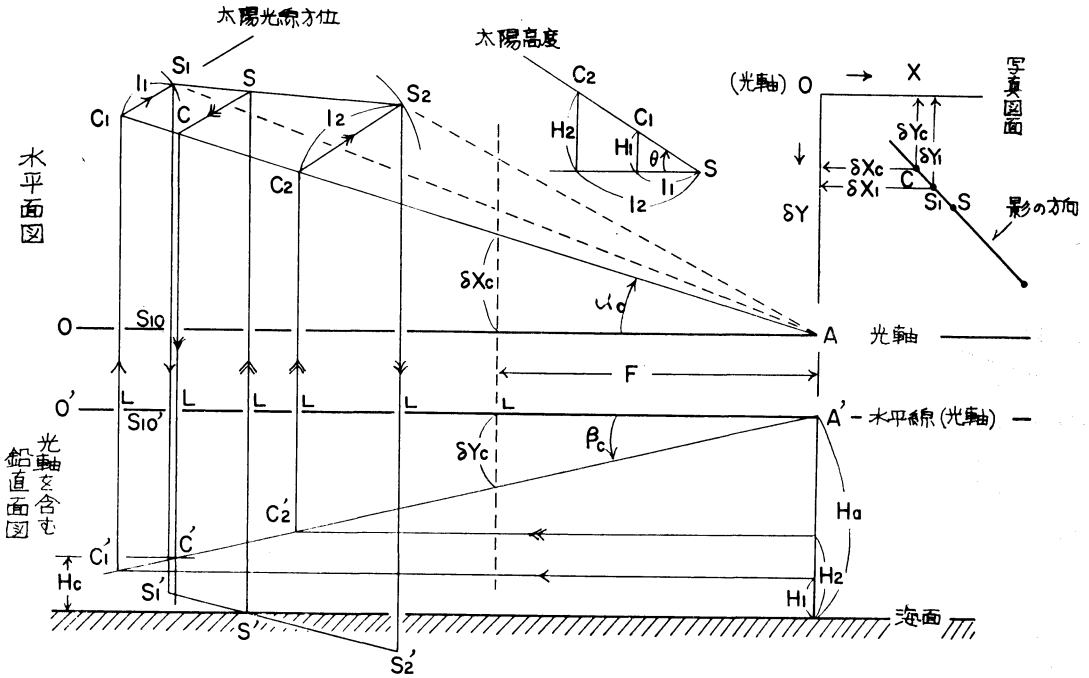
の方法は天測結果を使わないので至って簡便である。写真2の場合は東支那海の下層雲で雲底高度は  $400\text{m}$  であった。

4. 雲の影の方向

太陽光線が雲に当たって影の伸びている方向が写真から判定できるけれども、海面に到達する点が見えないことがある。しかしカメラの光軸の方向と航空機の高度が正確にわかっていれば、影の海面への到達点が計算され、したがって雲の高度も推定できる。一例を第5図で説明しよう。

第5図には水平面図、光軸を含む鉛直面図の他に、右上方に光軸を原点とした写真上の影の方向を示す斜めの直線、及び中央上方に太陽光線の高度角を示す図が附いている。まず写真上の雲の一点  $C$  をえらび、ここからこの点の影の方向が右上方の附図の斜めの直線のように写真に写っているとす。  $C$  点の光軸(原点)からのずれ  $\delta X_c$  及び  $\delta Y_c$  を使って、  $C$  点の方位角及び鉛直伏角を示す直線を第5図の水平面図及び鉛直面図のように引くことができる。図の  $F$  は有効焦点距離を示す。次に雲の一点  $C$  の高度を  $H_1$  と仮定して、高度  $H_1$  の水平線と  $C$  点の鉛直伏角を示す直線との交点を  $C_1'$  とすれば、この点が雲の鉛直位置となる。  $C_1'$  から垂線を水平面図にたてて、それと雲の方位角を表わす直線との交点  $C_1$  が雲の水平位置を表わすことになる。

次に  $C_1$  から太陽光線の方位に平行な直線を引く。一方、雲の高度を  $H_1$  と仮定してあるから、雲から海面上の影の点までの水平距離は、太陽高度角を利用して第5図中央上の附図の如く  $l_1$  と計算される。この水平距離



第5図 雲の影の方向から雲の高度を求める作図法

$l_1$  を前記の水平面図の  $C_1$  から太陽方位に平行に引いた直線上にとれば、これが海面上の影の点  $S_1$  の水平位置になる。そして  $S_1$  の鉛直面図の位置が海面に一致すればよい訳である。そこで  $S_1$  から光軸（水平線）に垂線を下ろして光軸との交点を  $S_{10}$  とする。また  $S_1$  の写真面における光軸からのずれを  $\delta X_1, \delta Y_1$  とすれば、

$\delta X_1/\delta Y_1 = S_1 S_{10}/S_1' S_{10}'$  になるように  $S_1' S_{10}'$  の長さを垂線上にとれば、影の点  $S_1'$  の鉛直面図上の位置が決定される。しかし今の場合には図にみられるように  $S_1'$  の位置が海面より少し高くなって、海面上の影の点という条件を満足しない。

そこで雲の高度を今度は  $H_2$  と仮定して前と同様の作図をくり返すと、鉛直面図にみられるように  $S_2'$  が海面下に来てしまった。そこで  $S_1'$  と  $S_2'$  を結ぶ直線を作ると、海面との交点  $S'$  が求める海面上の影の点である。

$S'$  が決定されれば、この点から水平面図に垂線をたてて、 $S_1$  と  $S_2$  を結ぶ直線との交点  $S$  が影の点の水平位置である。また  $S$  点から太陽光線方位に平行線を引き、雲の方位角を示す直線との交点  $C$  が雲の水平位置を示す。更に  $C$  点から垂線を鉛直面図に下ろして、雲の鉛直方位角を示す直線との交点  $C'$  が雲の鉛直位置にあたり、海面との差  $H_c$  が求める雲の高度である。

光軸が水平でない場合にも第3図と同様な要領で作図できる。実例を図版写真3に示す。中央下の斜めの直線が雲の一点  $C$  の影の方向で、算出した地表の到達点が  $S$  で示してある。この時の雲の高さは 2100m であった。

5. 真水平線と光軸方向の決定

本論文の解析法では水平線と光軸方向がわかっていることを前提として来たが、漫然と航空機の窓から雲を撮影した場合には、水平線と光軸方向の決定が非常に難しいので、あらかじめ注意する必要がある。

5.1 真水平線の決定

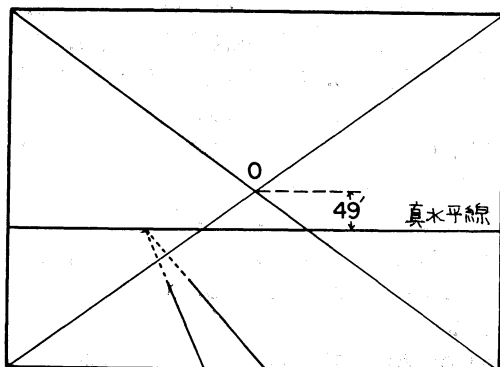
航空写真に海の水平線が写っていても、これは真の水平線ではない。このみかけの水平線と真水平線の間には次の関係式が成立する。

$$\cos \theta = R/(R+H)$$

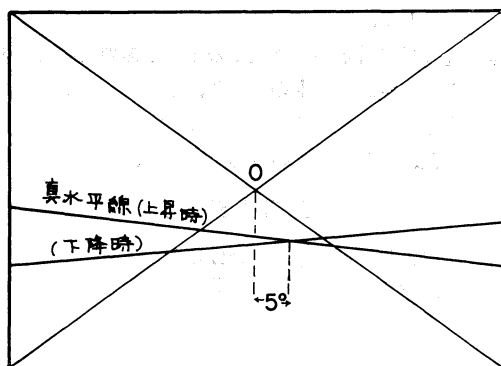
ここで  $R$  は地球の半径、 $H$  は航空機の高度で真水平線はみかけの水平線よりも角度  $\theta$  だけ上にある。 $H$  が 1 km を越える頃からこの角度が問題になる。

海のみかけの水平線が写っている場合には上の方法で真水平線が見つかるが、航空機の高度の大きな場合例えば下層雲を見下ろすような場合には、みかけの水平線も決定できないことがむしろ多い。そこでカメラの光軸の方位角をその都度、測定しておけばよい訳であるが実行困

難である。カメラが航空機に固定してあれば、地上で真水平線と光軸の関係を決めておく方法がある。これは藤田教授から伝授された方法であるが、第6a図のように離陸前に平行な滑走路の両側の二線の収斂する点と光軸の関係を決める方法もある。離陸後でも航空機の高度の同時測定がしてあれば同様に可能である。



第6a図 地表の平行線を使って真水平線を決定する方法 (1例 49°)



第6b図 交差する真水平線、または交差する同高度でのみかけの水平線を使ってカメラの航空機に対する光軸方向を決定する方法 (1例 5°)

上述の方法で決めた水平線は、航空機が翼を水平に保ちながら飛んだ時の写真解析に利用できるのである。

## 5.2 光軸方向の決定

写真に太陽または太陽の海面からの反射映像が写っている場合には、その時刻その位置における太陽方位角及び高度角を基準にしてカメラの光軸方向を決定できることがある。また太陽光束の収斂する点(視野外でも)が作図されても同様である。しかし上に述べたような機会にはむしろ例外的にしか得られない。

カメラの光軸の方位をその都度、自分で測定すること

は、磁石が航空機内では正常に作動しないので不可能である。そこでカメラを航空機に固定しておいて、航空機の方角計を基準にする方法が考えられる。そのためには両者の方位角の関係をカメラの固定後に測っておく必要がある。この操作の一案として藤田教授の方法を第6b図で説明しよう。カメラを航空機の左側の窓に向けて設置したとすれば、上昇時には地平線(真水平線に平行)が視野内で左上りとなり下降時には右上りとなるので、図に示すように両真水平線の交点が航空機の機首に対して直角方向を示すので、これと光軸の関係を決めておけばよいわけである。みかけの水平線の場合は同高度のものを使用すればよい。

## 6. その他解析精度等に関する問題

### 6.1 航空機の高度

今迄に述べた雲の解析法では撮影時の航空機の高度が不可欠であった。ところが海上の航空写真の場合は既知の地形が同時に撮りこまれることが稀なので、航空機の高度を精確に補正することが困難である。海上写真の唯一の利点は影の高度が海面に決まっていること位なものである。

航空機の高度計は気圧の減少方式に頼っている場合は、それから下の気温と湿度の垂直分布がわかっていなければ精確な補正はできない。また電波の反射方式の高度計でも精度は1/100くらいで、高度10kmの場合に100m程度の誤差は免れない。

しかし乱気流内に入りさえしなければ航空機の高度の一定性は非常によいものである。

### 6.2 写真上の読とり誤差

これは用いたレンズの焦点距離にもよるが、雲の場合は特に輪郭がぼやけていることが多いので雲の着目点とそれに対応する海面の影の点を決める際に大きな誤差を伴う。焦点距離35mmの広角レンズを使って撮影したものを、長さで10倍に引伸したとしても、写真の上で良くても1mmの誤差を伴うから角度にしては1/3°の精度である。

### 6.3 水平線と光軸決定に基づく誤差

みかけの海面の水平線が明確でないために、それ以外の5節で述べるような補正に頼る場合は角度にして1°程度の誤差をおかすことがあり、水平線の決定のしかたは意外と注意を要する。

これに比べて光軸の方位角は水平位置に影響を与えても雲の高度の精度にはそれほど影響しない。

### 6.4 作図上の誤差

図版：太陽光線を利用した雲の解析例

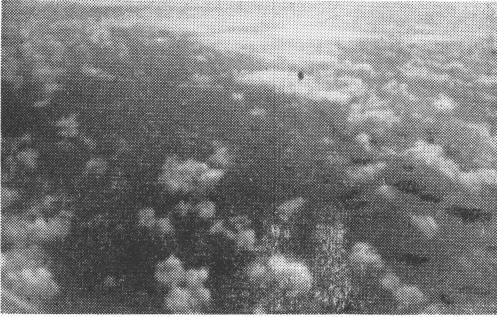


写真1：海面の雲の影，雲底高度 1300m

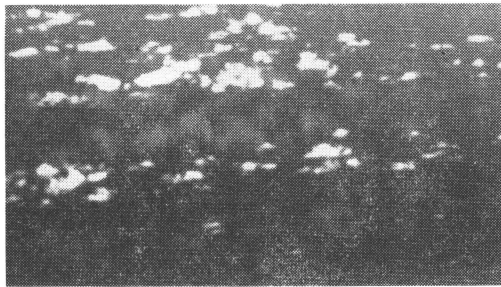


写真2：海面の雲の反射映像，雲底高度 400m

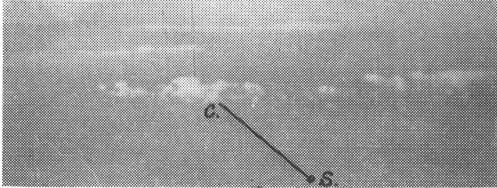


写真3：雲の影の方向，雲底高度 2100m

写真の像関係の収差がないと仮定しても、作図上の誤差も無視できない。角度を測る通常の分度器では  $0.5^\circ$  くらいの精度しか望めないので、この論文では分度器は一切使用しないためえをとり、角度は  $\tan$  で決めることに統一した。

作図の都合上、大きな方眼紙を使用することになるが、方眼紙自体の誤差も  $1/300$  くらいが普通である。また作図が大きくなれば定規の曲りも効いてくる。鉛筆の線の太さも影響する。したがって作図上の誤差は角度にして  $1/200$  と見込む必要がある。

以上、いろいろの誤差の原因と程度を考えて、海上の雲の高度や大きさを解析する場合に、角度にして  $1/50$  の誤差を覚悟しなければならないので、例えば高度  $2000\text{m}$  の雲の場合は  $100\text{m}$  きざみの決定が精一杯であり、またこの程度の精度までは信頼性がある。

#### 結論

海上の斜めの航空写真から雲の寸法に関する解析についての簡単な方法を報告し、またその際に水平線と光軸の決定の重要なこと及び太陽光線に関する資料の有用なことを強調した。

本研究は日米科学協力事業下の「太平洋の雲の研究」の一部として行われたものであり、米国側パートナーのシカゴ大学の藤田哲也教授から多くの指導や有益な示唆を賜わった。記して深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

梶川正弘，1965：北半球における太陽高度および方位角の計算図の作成。地球物理学研究報告，北海道大学，13号，71—98頁。