

衛星画像を用いた雲位置の補正

Calculation of Sub-cloud Point

Abstract

When the line of sight is oblique, the location of the cloud on the VISSR image (apparent location) is different from sub-cloud point. The distance from the apparent location to sub-cloud point can be calculated geometrically.

Assuming the shape of the earth as ellipsoid, the distance over Japanese region turns out to be about 10km when the height of the cloud top is 15km.

The distance obtained is approximately the same when the earth is assumed to be spherical.

1. はじめに

VISSR が斜方向に観測している雲の画像上の位置は、雲の直下点と異なっている。特に高い雲の場合、その差は著しい。この差は、雲頂高度、および衛星の軌道・姿勢に依存する。衛星画像から台風の中心位置を求める場合、この差が影響して航空機による観測位置と異なることが暗示されている。

本報告では、この差を地球が回転楕円体であるとして幾何学的に計算した結果を述べる。また、地球を球近似した場合との比較にも言及する。

2. 計算方式

Fig. 1 に示すように、VISSR の視線方向 (line of sight) にある雲頂部 P は、地球表面上の点 Q に投影される。面 ABCD は、地球表面の一部を描いたものである。「ひまわり」の画像データは点 Q (厳密には瞬時視野) の集りとして構成されているので、画像から点 Q を雲の位置として求めると、真の雲の位置 P' との間に距離 d だけの位置ずれを生じていることになる。点 P' は、雲頂部 P の直下点にあり、この点を雲直下点 (sub-cloud point) と呼ぶ。

地球を回転楕円体とすると、この楕円体上の位置を表わすには緯度、経度を指定すればよいが、緯度の表現法として 2 種類がある。Fig. 2 は、地軸を含む平面 (すなわち任意の子午面) で回転楕円体を切断したところを示したものである。座標系は、カーテシアン座標であり、

地心を原点 O とする。X-Y 平面は赤道面に対応し、Z 軸は地軸方向に一致している。Fig. 2 に示すように、

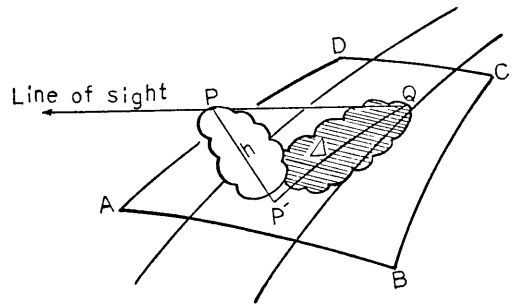


Fig. 1 The illustration of the cloud projected on the earth surface. Q; apparent position of cloud.

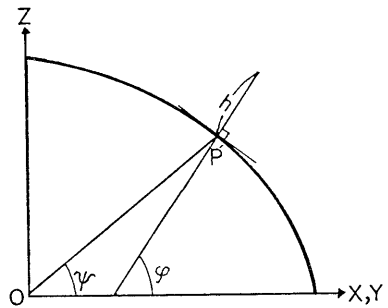


Fig. 2 The cross section and geocentric latitude.

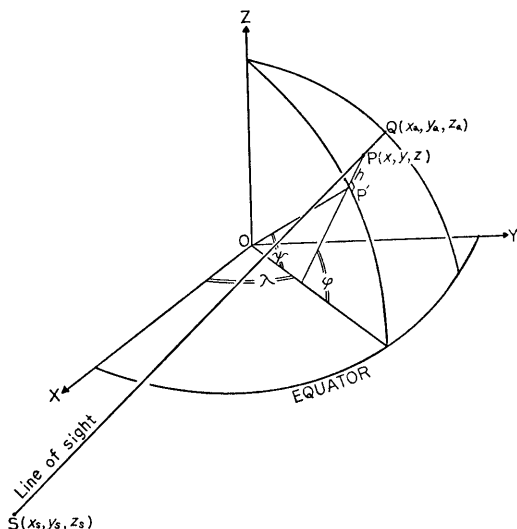


Fig. 3 The line of sight and the location of the cloud.

S; satellite, P; position of cloud top, Q; cloud position on image (apparent location).

楕円体面上の点 P' と原点 O とを結ぶ方向が赤道面となす角度を地心緯度 (geocentric latitude) と言い、また、点 P' での接平面に垂直な方向が赤道面となす角度を測地緯度 (geodetic latitude) と言う。地心緯度を ψ 、測地緯度を φ とすると、 ψ と φ との間には次の関係がある。

$$\tan \varphi = \frac{1}{(1-f)^2} \tan \psi \quad (1)$$

ここで、 f は楕円の扁平率を表わす。補正量 A の評価は地心緯度を用いて行いが、実際の計算では測地緯度を使用したほうが便利であるので、必要に応じて(1)の関係式から測地緯度と地心緯度の変換を行う。

Fig. 3 は、衛星の位置と雲の位置との関係を示したものである。座標系は、Fig. 2 と同じものである。衛星の位置を $S(X_s, Y_s, Z_s)$ 、雲頂部分を $P(X, Y, Z)$ 、画像から求められる雲の位置を $Q(X_q, Y_q, Z_q)$ とすると、 S, P, Q は一直線上 (視線方向) にあるから、この直線の方程式として次式が得られる。

$$\frac{X-X_s}{X_q-X_s} = \frac{Y-Y_s}{Y_q-Y_s} = \frac{Z-Z_s}{Z_q-Z_s} \quad (2)$$

次に、sub-cloud point P' の測地緯度を φ 、経度を λ とし、雲頂高度を h とすると、点 P の X, Y, Z は、

$$\begin{aligned} X &= (G_1+h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (G_1+h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= (G_2+h) \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられる。(3)式の G_1 、および G_2 は、地球の赤道半径を a 、楕円の離心率を e とすれば、

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} \\ G_2 &= \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$(e^2 = 2f - f^2)$$

で与えられる。なお、(1)、(3)、および(4)式については坪川等 (1969) に詳しい。

(2)式と(3)式から、 X, Y, Z および λ を消去し、 φ についての方程式を求めると、

$$\begin{aligned} &\left(\frac{C_1}{1-e^2 \sin^2 \varphi} + \frac{C_2}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} + C_3 \right) \sin^2 \varphi \\ &+ C_4 + \left(\frac{C_5}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} + C_6 \right) \sin \varphi \\ &+ \left(\frac{C_7}{1-e^2 \sin^2 \varphi} + \frac{C_8}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} + C_9 \right) \\ &\times (1 - \sin^2 \varphi) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

となる。 $C_1 \sim C_9$ は式の変形の途中で現われた定数項を整理したもので、 a, e, h, \dots など構成された値である。(5)式で $x = \sin \varphi$ とおき、分母を有理化して x について整理すると、次の8次方程式が得られる。

$$\begin{aligned} C_1' x^8 + C_2' x^7 + C_3' x^6 + C_4' x^5 + C_5' x^4 \\ + C_6' x^3 + C_7' x^2 + C_8' x + C_9' = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$C_1' \sim C_9'$ については、 $C_1 \sim C_9$ と同様の定数値を表わす。

(6)式の解法には、計算機による高次代数方程式の解法としてよく使用されるベアストウ法 (実係数の代数方程式の根を求めるために、ニュートン法を適用した逐次近似法) を用いた。ベアストウ法については、戸川(1976)等を参照されたい。収束の判定基準としては、 10^{-14} を採用した。

さて、8個の解 $x_i (i=1, 2, \dots, 8)$ の中から最適解を求めるわけであるが、虚根を除いた実根 x_i と、この根に対応する測地緯度 φ_i との間には定義から、

$$\sin \varphi_i = x_i$$

の関係があるので、これから φ_i は、

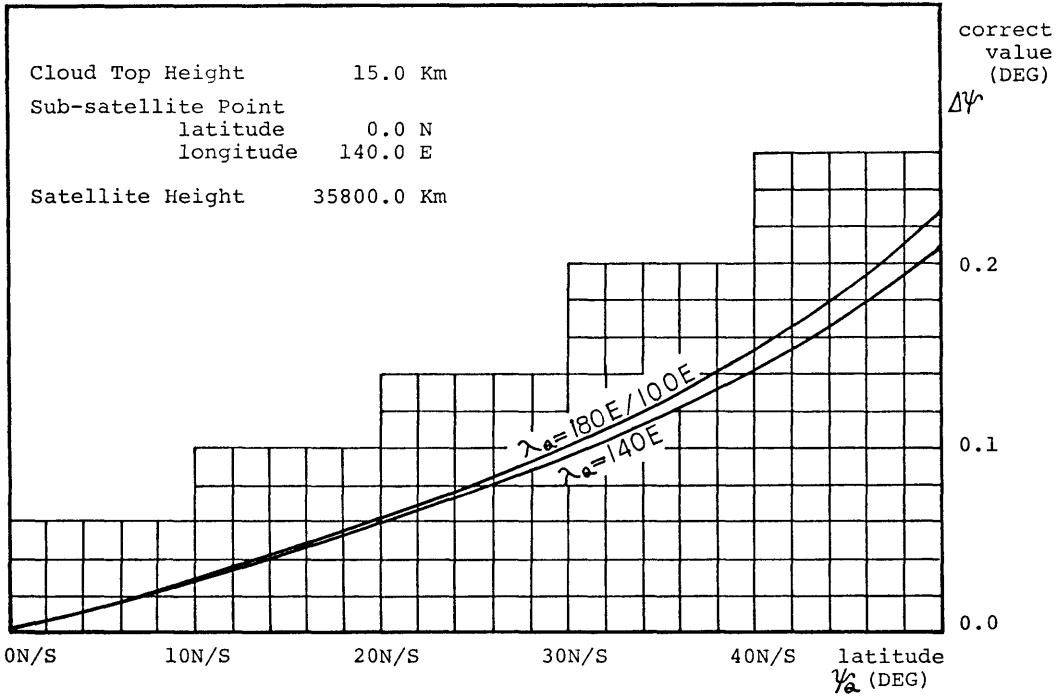


Fig. 5 Same as Fig. 4, except for latitudinal distance.

となる。

3. 計算結果

前述の計算方法により雲頂高度が15kmの場合を例にとり補正量の大きさ 4ψ , 4λ を表わしたものが Fig. 4 と Fig. 5 である。使用した定数は次のとおりである。

地球の赤道半径 (a)	6378.16km
地球の扁平率 (f)	3.35292×10^{-3}
衛星高度	35,800km
衛星直下点の緯度	0° N (赤道上)
衛星直下点の経度	140° E

(地球定数は1967測地基準系)

Fig. 4 は、経度の補正量を示したもので、横軸は λ_q 、縦軸は各 ϕ_q に対する $\Delta\lambda$ を示してある。例えば、画像から $\phi_q = 30^\circ$ N, $\lambda_q = 120^\circ$ E と求められた雲の位置は、同図より 0.08° の経度補正が必要であることがわかる。Fig. 5 は、緯度の補正量を示したもので、横軸は、 ϕ_q 、縦軸は各 λ_q に対する $\Delta\psi$ を示してある。なお、 $\lambda_q = 100^\circ$ E ~ 140° E, 140° E ~ 180° E の間の λ_q の値に対する

曲線は、Fig. 5 の2つの曲線の間位置している。Fig. 4 の場合と同様に、画像から $\phi_q = 30^\circ$ N, $\lambda_q = 120^\circ$ E と求められた雲の位置は、 0.1° の緯度補正が必要であることを示している。以上の緯・経度の補正は、距離にすれば東西方向に約 8km, 南北方向に約 11km の大きさとなる。従って、雲の高さが 15km ~ 17km にもなる積乱雲や台風などの場合、中緯度帯では 10km 前後の位置ずれを生じていることになる。位置ずれの方向は、原理的に経度は、 140° E より東では sub-cloud point よりも東に、 140° E より西では西にずれていることになる。また、緯度は北半球では sub-cloud point よりも北にずれることになる。

Table 1 は、地球を楕円体とした場合の補正量と、地球を球体とした場合の補正量との差を示したものである。球体とした場合の補正量の計算方法は、楕円体の場合に比べれば非常に簡単であるので、ここでは省略するが、使用した定数は次のとおりである。

地球の平均半径	6371.0315km
---------	-------------

(地球定数は1967測地基準系)

衛星高度、衛星直下点の緯・経度、および雲頂高度 h

Table 1 The difference of the distance from the apparent location to sub-cloud point, between the values which are calculated under the assumption that the earth is assumed to be spheroid and ellipsoid. The values in the table; ellipsoid minus spheroid (unit 10^{-3} degree)

ϕ_q \ λ_q		90 E	95 E	100 E	105 E	110 E	115 E	120 E	125 E	130 E	135 E
50N	LAT	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
	LON	4.0	3.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45N	LAT	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
	LON	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40N	LAT	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5N	LAT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LON	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

の値は、楕円体の場合の計算時に与えたものと全く同じである。Table 1 の縦欄の緯度(5°N~50°N)は ϕ_q を、横欄の経度(90°E~135°E)は λ_q を表わしている。表中の数字は、任意の ϕ_q と λ_q に対する緯度方向および経度方向の補正量の差を示したもので、値は楕円近似の補正量から球近似の補正量を差し引いたものである。

表からわかるように、高緯度で少し差が出てくるが非常に小さく、その他の地域では全く差は無い(10^{-4} 度以下の差は0度としてある)。例えば、50°N, 90°E 付近では、緯度の補正量の差が -2.0×10^{-3} 度、経度の補正量の差が 4.0×10^{-3} 度であり、いずれも 10^{-3} 度のオーダーで無視できる大きさである。この結果からわかるように、雲の位置を補正する場合、地球を球体で近似しても十分である。また、計算機の処理時間とか負荷という点からみても、楕円体近似の場合に比較してはるかに有利である。

4. おわりに

衛星画像から sub-cloud point を求める場合、雲の地球表面上への投影による幾何学的な位置ずれの補正の他にグリiddingの補正も考慮しなければならない。グリiddingの精度は、衛星の軌道および姿勢の予測精度に依存するが、1979年9月~11月のランドマークデー

タ抽出結果を調査してみると、ライン方向については時刻によって変動がみられるが、ピクセル方向についてはバイアス的に3~4画素の東方向へのずれがあるようである。これは日本付近で6~7 km の東方向への距離のずれとして現われる。その他の補正として、雲頂高度誤差の補正、気象データの観測時刻と撮像時刻の違いによる補正などが考えられるが、これらを含めて、総合的な評価を実際のデータを使用して行ってみたい。

最後に、本報告を作成するにあたり、いろいろと助言をしていただいた島田主任技術専門官(気象衛星センター管制課)に感謝致します。

文 献

- 坪川家恒, 大森又吉(1969): 測地学序説, 山海堂, 16—27.
- 戸川隼人(1976): 数値計算技法, オーム社, 168—185.