

GMS 赤外データを用いた雲の解析について

謝 平 平・光 田 寧

CLOUD ANALYSIS FROM GMS INFRARED IMAGERY DATA

BY *Pingping XIE* and *Yasushi MITSUTA*

Synopsis

A new method is developed to estimate the total cloud amount from GMS imagery data by the Two-Threshold-Method (TTM) taking account of the spectral peaks due to the ground surface and of the pixels totally covered by cloud. The approximate agreement is obtained between the estimated values and the ground-observed cloud amounts over an area of about 10^4 km². The possibility of classification of cloud types from GMS IR data into low, middle, high and convective clouds is studied and found that they can be distinguished from each other by T_{BB} spectral parameters except the middle and convective clouds.

1. はじめに

雲は周囲から集まってきた水蒸気を凝結し、降水をもたらすことによって、水循環過程に関与すると同時に、凝結による潜熱の放出や、太陽からの短波放射の反射、地上或いは下層空気からの長波放射の吸収などを通じて、エネルギー収支にも大きな影響を果している。従って、雲量雲高雲形などの雲に関する情報は局地及び全球規模の気象気候状況を把握する上で重要である。また雲に関する情報を利用して地上に降る雨量を推定する技術も進んでおり、その面への応用も重要である。

雲の観測は従来地上から目視で行われている。このような観測は代表範囲が窄く、中上層雲の観測が難しい上、海洋上では数少ない島及び船による観測しか得られないなどの問題があり、地上からの目視による雲の観測だけでは不十分である。

一方、気象衛星を用いた場合、観測はほぼ全球スケールで均一的にできるので、気象衛星の赤外・可視画像資料を用いて雲量を推測し雲形を判別する努力が多くの研究者によってなされてきた。

衛星の画像データから雲量を推測する際、推測対象地域内におけるピクセルでの輝度温度またはアルベドの頻度分布を使うことが多い。Koffler et al.¹⁾は TIROS の赤外画像データから上、中、下層雲の雲量の推測法を調べた。ある地域 (32 line×32 pixel) の赤外 T_{BB} 頻度分布を作成した場合、地 (海) 面温度 $T_{SFC}-5^{\circ}\text{C}$ 、700 mb 温度 T_{700} 、400 mb 温度 T_{400} をそれぞれ晴天、下層雲、中層雲および上層雲によるピクセル温度の閾値に使い、それぞれの閾値域に入るピクセル数と全地域ピクセル数の比率を晴天域、下、中、上層雲の雲量とした。また、気象衛星センターでも Koffler et al. と同様に海面温度 $T_{SFC}-5^{\circ}\text{C}$ と T_{400} を用いて、下層および上層雲量を算出している²⁾。謝・光田³⁾は T_{BB} を 10°C 毎アルベドを 0.1 毎に階級を分けて、 T_{BB} ・アルベド 2 次元頻度分布を作成した際、 $T_{BB}\geq 10^{\circ}\text{C}$ 、アルベド ≤ 0.1 の階級にあるピクセルが晴天域によるものとし、この階級における頻度値と目視雲量との関係を調べたが -0.868 と言う相関係数が得られた。

以上の方法では、 T_{BB} (アルベド) がある閾値以下 (以上) になると、ピクセルが全部雲で覆われ、そうでないと全部晴天であると仮定している。実際に衛星で雲を観測する場合、ピクセルの一部だけが雲で覆われる場合もあるので、一つの閾値だけを使う Single Threshold Method (以下、STM と略す) では雲量推測に誤差をもたらすことになる。

一方、衛星データから雲形を判別する方法も精力的に研究されてきた。なかでも衛星データから適当なパラメータを計算し、パラメータの値から衛星データが確率的にどの雲形によるものかを決める判別解析法 (Discriminant analysis) を用いたのが多い。

Parikh⁴⁾ は極軌道気象衛星 NOAA-1 号の可視・赤外データから雲形を判別する可能性について調べ、可視・赤外スペクトル特徴パラメータの組み合わせを用いて、Low, Mix, Cirrus および Cumulonimbus の4種類の判別ができることを示した。Parikh⁵⁾ は先きの NOAA 衛星データを用いた場合の判別法を静止気象衛星 SMS-1 (Synchronous Meteorological Satellite) のデータに適用し、NOAA の場合とほとんど変わらない結果を得た。さらに Parikh and Ball⁶⁾ は SMS の赤外データだけで、 T_{BB} の平均値と Roberts Gradient による5雲形の判別を試みた。また、謝・光田³⁾ も降水有無判断の一部分として、対流性雲と非対流性雲の判別を試みたが、赤外・可視2次元頻度分布におけるピークの位置より二者の統計的判別が可能であることを示した。

本論文は、地面によるスペクトル・ピークとピクセルの一部だけを雲が占める場合を考慮する Two-Threshold-Method (以下、TTM と略す) を用いて、GMS の赤外・可視データ (特に赤外データのみ) から雲量を推測する新しい方法を開発し、また、GMS 赤外データによる雲形判別法に関する研究の第一歩として、赤外データのみによる雲形判別の可能性について調べた。

2. 使用データと解析手法

GMS の赤外・可視画像データを用いた雲量推測法を調査し、雲形判別の可能性を確かめるため、日本の平野部に位置する面積約 10^4 km^2 の地域を調査対象地域とし、各地域に対応する GMS のデータを衛星データ、また、各地域に位置する気象官署の“地上気象観測日原簿” (以下、日原簿と略す) による雲情報を雲量・雲形の Ground Truth とした。

今回調査の対象地域は、謝・光田³⁾ と同じで、北海道札幌周辺、関東地方、近畿地方、瀬戸内海、山陰地方および北九州の6地域 (謝・光田³⁾ Fig. 1 参照) である。各地域には気象官署4~5ヶ所ずつある。

GMS は1986年までは1日8回観測を行っていて、今回は1980年9月3日から同11日、1982年7月23日、1982年8月1日から3日および1983年8月7日から9日計105回分のデータを入手しているが、衛星のデータを00Z, 06Z および12Z に行われる地上目視による雲観測と比較するため、雲量推測に際しては00Z と06Z のデータ計26回分、また赤外データによる雲形判別可能性の調査に際しては00Z, 06Z と12Z のデータ計40回分を使用した。これらの衛星データは、赤外の場合0~255の256レベル、可視の場合0~63の64レベルに量子化されているが、各地域に依る分を磁気テープから割り出して、赤外データを T_{BB} に、可視データをアルベドに変換して利用した。

赤外データの T_{BB} への変換は磁気テープの先頭に格納されている Calibration Table を用いて直接できるが、可視データのアルベドへの変換は、太陽と衛星が共に反射体の真上にある場合を仮定して作った Calibration Table を用いて、アルベド, a に変換したあと、さらに太陽高度角と衛星相対位置による変化を補正し、標準化アルベド A を計算する必要がある。

調査範囲があまり広くない場合、反射体と衛星との相対位置による補正量の変化はあまり大きくないので、Lovejoy and Austin⁷⁾ や Tsonis and Isaac⁸⁾ および謝・光田³⁾ のように、太陽高度角の補正だけを考慮すればよいが、調査範囲が広い場合には両方考える必要がある。今回の調査は雲量推測法と雲形判別法を将来的により広い地域に適用したいところから、加藤・石川⁹⁾ と同様に太陽高度角と衛星相対位置の両方を考慮して補正を行った。すなわち、

$$A = \frac{a}{\cos z \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (2)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{(1 + \tan^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$\tan \theta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta - \frac{R}{R+H}} \quad (4)$$

$$\cos \delta = \cos \varphi \cdot \cos (\lambda_s - \lambda) \quad (5)$$

ここで、 z は太陽高度角、 θ は衛星高度角、 φ は反射体の緯度、 λ は反射体の経度、 δ は太陽の赤緯、 t は太陽の時角、 λ_s は衛星の経度、 R は地球半径また H は衛星高度である。

雲量推定法を研究し雲形判別可能性を調べるために、割り出した各地域の赤外及び可視データについて、先きに述べたような方法でそれぞれ T_{BB} と標準化アルベド A に変換し、 $T_{BB} \cdot A$ の2次元頻度分布、 T_{BB} 、 A の1次元頻度分布を作成した。

$T_{BB} \cdot A$ の頻度分布は雲量計算や雨量見積りなどによく使われている。謝・光田³⁾ は $T_{BB} \cdot A$ 2次元頻度分布から降水の有無を判定し雨量を見積るという目的から、 T_{BB} を10°C毎 A を0.1毎の階級で分けて、頻度分布を作って調べたが、雲量の計算と雲形の判別という今度の目的からみて、より細く分けられた頻度分布が必要である。従って、今回 T_{BB} については衛星観測オリジナル・データと同様に256階級に、またアルベド A については0.02毎の階級に分けて頻度分布を作った。

雲量・雲形の Ground Truth には各地域に位置する気象官署の日原簿の記録を用いた。地域の全雲量・各雲種の雲量は地域内各官署で観測した値をその代表面積に比例した重みを付して平均し、地域での雲形はこうして計算した全雲量・各雲種雲量より分類する。なお、地域での雲形分類方法は4章に詳しく述べる。

地上から目視で雲を観測する場合、1) 視野内に障害物がある場合、観測範囲が限られる、2) 障害物がない場合でも周囲20キロぐらいの状況しか観測できない、3) 視野角によって近い雲が大きく見える、4) 下層に雲がある場合より上層の雲が観測できないなどの問題がある。しかし、今回の場合平野部に位置するおよそ100 km×100 kmの範囲内に気象官署が4～5ヶ所あり、それらの官署での観測から平均した量を採用したので、1)、2)、3)の問題が緩和でき、Ground Truthとして、このような平均量が理想とは言えないが衛星データと比較可能なものになっていると言える。

利用したデータの中で、1980年9月3日～11日は台風T8013によるもので、1982年7月23日は長崎豪雨によるもので、また1982年8月1～3日、1983年8月7日～9日も台風によるものである。雲量の推測に用いる6地域156回データの中で、晴天は6回で、全地域が雲で覆われる(雲量10)場合は74回ある。

3. 衛星データによる雲量推測法

衛星の画像データから雲量を推測する場合、一つの閾値でピクセルが晴天か雲を判定し、地域の雲量を計算するSTM方法では、ピクセルの中で雲が一部しか占めない場合、雲量の推測値に誤差が生ずる。特に静止気象衛星のデータを用いる場合、ピクセルが大きい(GMSの場合、衛星直下点で5 km×5 km)ので誤差がより大きくなる。

Shenk and Salomonson¹⁰⁾ は衛星データで雲量を算出する際、衛星センサーの空間分解能即ちピクセルの大きさがどのように算出精度に影響するかについてシミュレーションした。その結果、STMを用いてピクセルの一部に雲があるにもかかわらず、ピクセルが全部雲で満たされているとした場合、衛星データによる推測量は雲量を過大推測し、推測精度を10%以内におさめるためには、雲の大きさとピクセルの大きさの比 R が100以上でなければならない。しかし、TTMを採用し、ピクセルを晴天域、部分雲、全部雲によるものに分類して、雲量を推測する場合、 R が25より大きければ推測精度がかなりよいものになることを示した。本

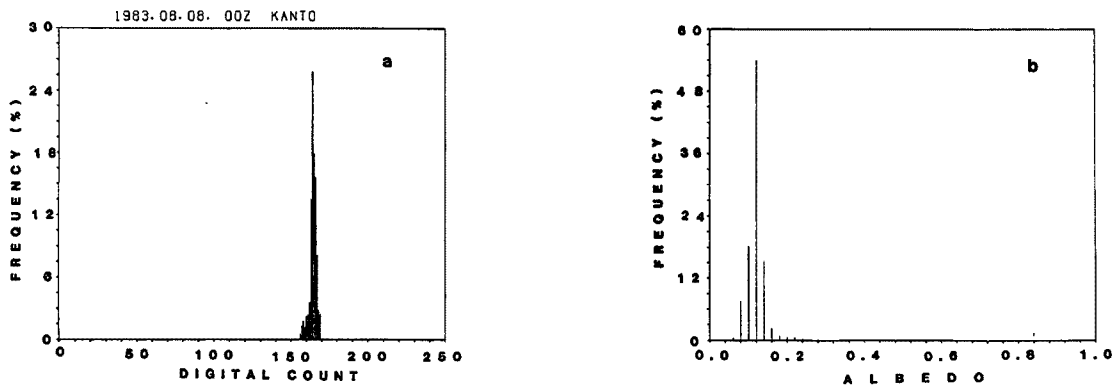


Fig. 1. The example of frequency distributions of a) T_{BB} and b) albedo, for the case of clear sky. T_{BB} of 220K, 240K, 260K, 280K and 300K correspond to digital counts of 46, 68, 96, 132 and 176, respectively in a).

章では、まず地域が晴天、一部雲および全部雲の場合の赤外・可視2次元、1次元頻度分布を分析し、TTMを用いた場合閾値の取り方を検討し、雲量推測法を開発する。

3.1 頻度分布例

00Z および 06Z 全部156例の中で、地上観測による雲量が0、つまり地域が全部晴天であるケースが6例ある。Fig. 1 にその一例関東地方1983年8月8日00Z時の T_{BB} およびアルベド頻度分布を示している。 T_{BB} の場合 (Fig. 1a) 頻度が暖かい側、アルベドの場合 (Fig. 1b) 頻度がアルベドの低い側に集中的にシャープな単峰性分布を示していることが分かる。また、Table 1 に晴天6ケースについて求めた T_{BB} 、アルベド場合の最頻値、標準偏差および全部ケースについて求めたそれらの平均値を示しているが、当然ながらケースによって地面温度が違うので、 T_{BB} の最頻値が違うが、アルベドの最頻値の変化はあまり大きくない。各地域内 T_{BB} の標準偏差は1.0°Cから3.2°C、平均して2.0°Cで、アルベドの標準偏差は0.02から0.08、平均して0.04である。

Fig. 2 に地域平均雲量が5である場合の T_{BB} とアルベド分布例を示す。この場合、地上目視雲観測によると地域内に中層雲があるが、 T_{BB} 頻度分布 (Fig. 2a) でみると T_{BB} の暖かい側に地面を代表するピークがあり、分布が冷たい側にも広がっている。また、アルベド頻度分布でみる場合も同様に、暗い側に地面によるピークがあり、分布が明るい側に向いて広がっていることが分かる。

また、地域が全部雲で覆われている場合、衛星から地面が見えなくなり、 T_{BB} の低い側に、アルベドの明るい側に広がり、そして、その分布の様子は雲の種類によって違う。Fig. 3 は全地域が対流性雲 (Cu, Cb) である場合の T_{BB} とアルベド頻度分布例である。

3.2 TTM による雲量推測

上節の結果にもとづいて、 T_{BB} 頻度分布、アルベド頻度分布および T_{BB} ・アルベド2次元頻度分布から、雲が一部しか占めないピクセルをも考慮した雲量推定法を試みた。Fig. 4a と Fig. 4b はそれぞれ T_{BB} 、アルベド1次元頻度分布を用いた場合の推定法概念図で、Fig. 5 は T_{BB} ・アルベド2次元頻度分布を用いた場合の推定法概念図である。

(a) T_{BB} 1次元頻度分布による推測法

T_{BB} 1次元頻度分布を作成した場合、頻度分布の暖かいところ ($T_{BB} \geq 285$ k) にピークがあれば、それは地面によ

Table 1. Modes and standard Deviations (STD) of T_{BB} and albedo (ALB) frequency distributions for the cases of clear sky

CASE	1	2	3	4	5	6	MEAN
$M_{ODE} T_{BB}$	289.0	291.2	288.6	295.0	291.0	288.6	290.6
$S_{TD} T_{BB}$	1.3	1.4	3.2	1.0	2.1	3.2	2.0
$M_{ODE} ALB$	0.12	0.12	0.14	0.12	0.12	0.10	0.12
$S_{TD} ALB$	0.08	0.03	0.03	0.02	0.05	0.03	0.04

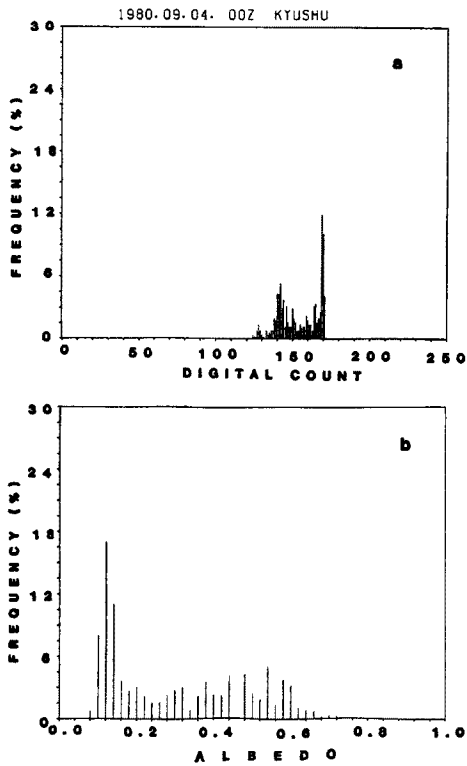


Fig. 2. As in Fig. 1. except for the case of total cloud amount 5. T_{BB} of 220K, 240K, 260K, 280K, and 300K correspond to digital counts of 51, 74, 105, 143 and 189, respectively in a).

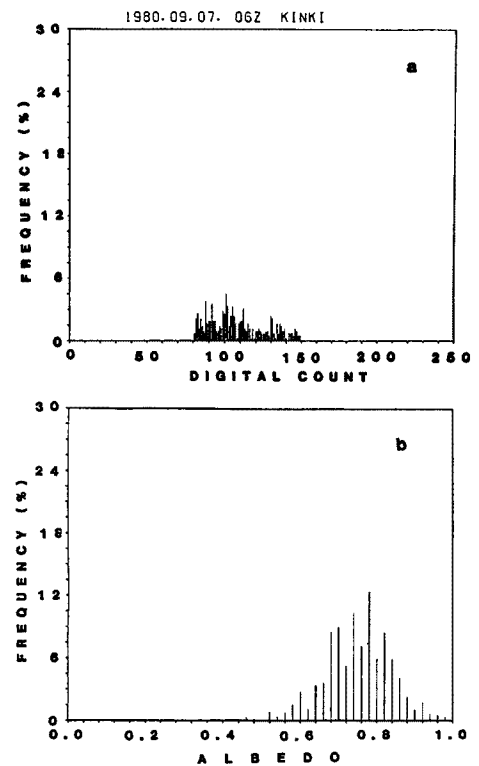


Fig. 3. As in Fig. 1. except for the case of total cloud amount 10 (convective cloud). T_{BB} of 220K, 240K, 260K, 280K and 300K correspond to digital counts of 51, 74, 105, 143 and 189, respectively in a).

るものと考えられる。このピークに対応する T_{BB} 値を T_G とする。このピークがはっきりしない時は同じ地域の同じ時間帯におけるピークがはっきりしているケースでの T_G の平均値を使用する。

地上から目視で雲なしの6例について地域内 T_{BB} の標準偏差を計算し、 2.0°C という値を得たが、地上から目視で地域内に雲が部分的にある場合にも、晴天域(地面)による T_{BB} が T_G のまわりにこれと同じ広がりを示すと考え、 $T_1 = T_G - 2.0^\circ\text{C}$ より暖かいピクセルを地面によるものとする。

雲だけが占めるピクセルの一番暖かな T_{BB} の値を T_2 として、この T_1 と T_2 の間はピクセルを部分的に雲が占め、その割合は $\Delta T = T_1 - T_2$ に対して線型的であると考え。つまり、衛星による地域内の雲量 FC は (6) 式のように計算する。

$$FC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \quad (6)$$

$$f_i = \begin{cases} 1 & T_i \leq T_2 \\ \frac{T_1 - T_i}{T_1 - T_2} & T_2 < T_i \leq T_1 \\ 0 & T_1 < T_i \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 T_i ピクセルでの T_{BB} で、 N は地域内のピクセル数である。

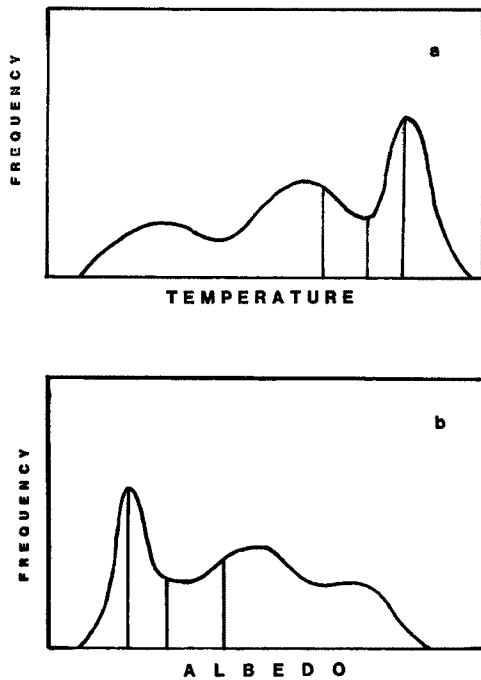


Fig. 4. Schematic figures of frequency distributions of a) T_{BB} and b) albedo.

このようにして、 T_2 をいろいろと変化させて、FCを計算し、それを地上から目視による雲量GC (Ground Truth) と相関を取り、相関係数の一番よい T_2 を選ぶ。Table 2 は $\Delta T = T_1 - T_2$ を 1.0°C 毎に変化させた場合得た FC と GC との回帰係数を示すものである。 ΔT を 0.0°C から 9.0°C まで変化させた時、両者の相関係数が 0.773 から 0.812 の間に变化するがその変動幅があまり大きくない。これは156ケースの中で、雲量10のケースが多いためであると思われる。相関係数が一番高いのは $\Delta T = 1.0^\circ\text{C}$ の時で、大体 0.812 である。

Parikh and Ball⁹⁾ は SMS の赤外 T_{BB} 頻度分布から雲量を求める方法として、 T_1 を暖かいピークでの T_{BB} 、 T_2 をその次のピークでの値としたが、 T_1 と T_2 の差が平均してやはり 2.5°C ぐらいである。

(b) アルベド1次元頻度分布による推測法

T_{BB} の場合と同様に、アルベド1次元頻度分布を用いて、雲量を推測する場合でも、まず頻度分布の暗い側 ($A \leq 0.16$) より、地面を代表するピークでのアルベド値 A_G を決め、 $A_1 = A_G + 0.04$ より小さいピクセルは地面によるもので、また雲だけが占めるピクセルの一番低いアルベド値を A_2 とすると、(6)式で FC を計算する場合、 fi は (8) 式のように定義される。

$$fi = \begin{cases} 1 & A_1 \geq A_2 \\ \frac{A_1 - A_1}{A_2 - A_1} & A_2 > A_1 \geq A_1 \\ 0 & A_1 > A_1 \end{cases} \quad (8)$$

但し、ここで A_1 はピクセルでのアルベド値である。

T_{BB} の場合と同様に、 $\Delta A = A_2 - A_1$ を 0.02 毎に変化させて、FC と GC との相関を求めたが、Table 3 はその結果である。 ΔA が 0.0 から 0.18 に変化させた場合、両者の相関係数が 0.792 から 0.825 の間に変動し、一番高いのは $\Delta A = 0.08$ の時で、 0.825 である。

Table 2. Regression coefficients between GC and FC for various $\Delta T = T_1 - T_2$

1) γ is the correlation coefficient between FC and GC.

$$2) \text{RMS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (GC_i - \bar{GC})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ΔT	$\gamma^{1)}$	RMS ²⁾	RMS/GC
0.0°C	0.809	0.180	0.228
1.0	0.812	0.179	0.227
2.0	0.805	0.182	0.230
3.0	0.800	0.184	0.233
4.0	0.794	0.186	0.236
5.0	0.789	0.188	0.238
6.0	0.785	0.190	0.240
7.0	0.781	0.191	0.242
8.0	0.777	0.193	0.244
9.0	0.773	0.194	0.246

Table 3. Regression coefficients between GC and FC for various $\Delta A = A_2 - A_1$

ΔA	ν	RMS	RMS/GC
0.00	0.792	0.187	0.237
0.02	0.803	0.182	0.231
0.04	0.813	0.178	0.226
0.06	0.821	0.175	0.222
0.08	0.825	0.173	0.219
0.10	0.824	0.174	0.221
0.12	0.823	0.174	0.221
0.14	0.819	0.176	0.223
0.16	0.815	0.177	0.224
0.18	0.810	0.179	0.227

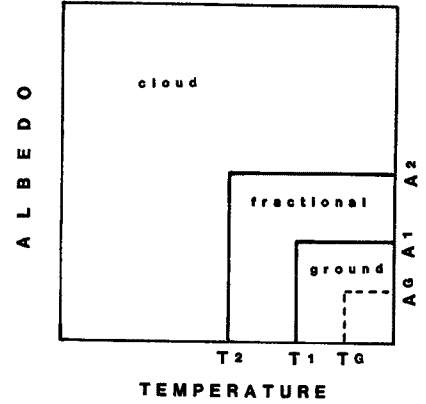


Fig. 5. Schematic figure of T_{BB} · Albedo 2-dimensional frequency distribution.

(c) T_{BB} · アルベド 2次元頻度分布による推測法

以上、 T_{BB} およびアルベド 1次元頻度分布から雲量を求める方法について述べたが、 T_{BB} だけを使う場合、雲頂が低くて雲頂温度と地表温度の差が小さくて、雲として検知できない場合があり、またアルベドだけを使う場合でも、特に薄い cirrus についてはアルベドが低いので、検知できないこともあり、雲量推測に誤差を生ずる。

武田・服部¹¹⁾ は NOAA 衛星空間分解能 1 km の赤外データを用いて雲量を計算する場合、雲頂温度に加えてそのばらつき程度を反映するパラメータを使うと、海上下層雲の検知が可能であると提唱しているが、この方法を空間分解能 5 km の GMS データに適用したところ、 T_{BB} だけを使う場合と比べて、あまり改善できないことが分かった。しかし、謝・光田⁹⁾ にも示したように、赤外・可視データを同時に使い、 T_{BB} · アルベド 2次元頻度分布を使う場合、地面と下層雲或いは薄い cirrus の区別ができるので、 T_{BB} · アルベド 2次元頻度分布から、先の 1次元頻度分布の場合と同じ考え方にもとづいて、雲量をよりよい精度で推測できると考えられる。Fig. 5 に 2次元頻度分布による雲量推定法の概念図を示す。

T_{BB} · アルベド 2次元頻度分布を作成した場合、 T_{BB} 暖かくかつアルベド低い所 (T_g, A_g) にピークがあり (ない場合の対応は 1次元の場合と同じ)、雲が全ピクセルを占める場合の最大 T_{BB} を T_2 、最小アルベドを A_2 とし、(6) 式で FC を計算する場合、 f_i は (9) 式のように求める。

$$f_i = \begin{cases} 1 & T_i \leq T_2 \text{ or } A_i \geq A_2 \\ \frac{T_1 - T_i}{T_1 - T_2} & T_2 < T_i \leq T_1, A_i > A_i \\ \frac{A_i - A_1}{A_2 - A_1} & T_1 < T_i, A_2 A_i \geq A_1 \\ \text{Max} \left[\frac{T_1 - T_i}{T_1 - T_2}, \frac{A_i - A_1}{A_2 - A_1} \right] & T_2 < T_i \leq T_1, A_2 > A_i \geq A_1 \\ 0 & T_1 < T_i, A_1 > A_i \end{cases} \quad (9)$$

但し、ここで T_i, A_i はそれぞれピクセルでの T_{BB} とアルベドで、 $T_1 = T_g - 2.0^\circ\text{C}$ 、 $A_1 = A_g + 0.04$ はそれぞれ晴天域ピクセルと部分雲ピクセルを区別する T_{BB} とアルベドの閾値である。

$\Delta T = T_1 - T_2$ を 1°C 毎に、 $\Delta A = A_2 - A_1$ を 0.02 毎に変化させて、FC を計算し、FC と GC との相関係数を

Table 4. Corelation coefficients between GC and FC for various ΔT and ΔA

ΔT ΔA	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
0.00	0.855	0.874	0.873	0.872	0.870	0.867	0.864	0.862	0.859	0.857
0.02	0.849	0.879	0.881	0.881	0.881	0.880	0.879	0.879	0.878	0.878
0.04	0.850	0.885	0.886	0.887	0.887	0.886	0.885	0.884	0.884	0.883
0.06	0.847	0.887	0.889	0.888	0.888	0.887	0.886	0.886	0.885	0.884
0.08	0.842	0.887	0.889	0.888	0.888	0.887	0.886	0.886	0.885	0.884
0.10	0.837	0.887	0.888	0.888	0.887	0.887	0.886	0.885	0.884	0.883
0.12	0.832	0.886	0.887	0.887	0.887	0.886	0.885	0.884	0.883	0.881
0.14	0.827	0.886	0.887	0.887	0.886	0.885	0.884	0.883	0.881	0.880
0.16	0.823	0.885	0.886	0.886	0.885	0.884	0.883	0.881	0.880	0.878
0.18	0.819	0.884	0.885	0.885	0.884	0.883	0.88	0.880	0.878	0.877

計算したがその結果は **Table 4** に示している。相関係数が一番高いのは $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$, $\Delta A=0.08$ の時で、相関係数は0.889である。

3.3 衛星データによる雲量推定値と目視雲量との比較

先きに GMS の T_{BB} とアルベド頻度分布から地面によるピークの確定によって、晴天ピクセルと部分雲ピクセルを区別する閾値 T_1 (A_1) を決め、さらに目視による地域平均雲量との相関計算によって、部分雲ピクセルと全部雲ピクセルを区別する閾値 T_2 (A_2) を決めたが、ここではこうして決めた閾値で計算した衛星雲量 FC と目視雲量 GC との比較を行う。

2章にも述べたように、衛星による雲量と地上観測による雲量とは、観測方法等に相違があるが、地上雲量を地域内で平均化することによって、両者の間に可比較性があるものと考えられる。

Fig. 6 に T_{BB} 頻度分布による FC と GC との散布図を示している。地上雲量が4~6 (GC 0.4~0.6) の時、点がかかなり広がっているが、両者の相関係数は0.825であり、RMS 誤差は0.179である。

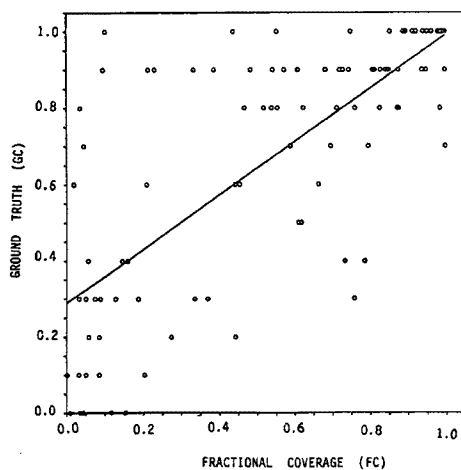


Fig. 6. The comparison between ground observed total cloud amounts and TTM derived values when only T_{BB} are used.

久保田・遠藤¹²⁾ は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の領域内の T_{BB} 頻度分布を作成した場合、GMSSA 気候値による地表面温度よりも 5°C 以上冷たい部分を雲として雲量を計算し、地上観測雲量と比較したが、陸上では両者の相関係数がわずか0.438で、RMS は0.331である。**Table 2** から分かるように、本論文に述べた方法では T_{BB} 頻度分布だけを使い、 $\Delta T=T_1-T_2=0.0^{\circ}\text{C}$ 、即ちピクセル内を晴天か全部雲かで考える場合でも相関係数が0.809で、RMS が0.180となり、久保田・遠藤陸上の場合よりよい。これは地面と雲を区別する閾値として、地表面温度の気候値のかわりに、暖かい側のピークでの T_{BB} を使うことによって、 T_{BB} 頻度分布による雲量の推定がより正確にできたことによると考えられる。

また、**Fig. 7**, **Fig. 8** はそれぞれアルベド1次元頻度分布および T_{BB} ・アルベド2次元頻度分布を用いた場合、TTM による FC と GC の散布図である。アルベドデータだけを用い

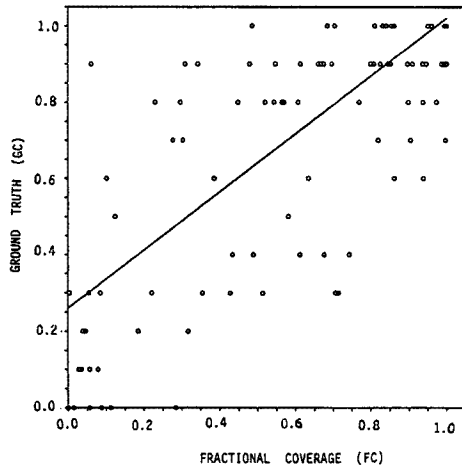


Fig. 7. As in Fig. 6. except when only albedo data are used.

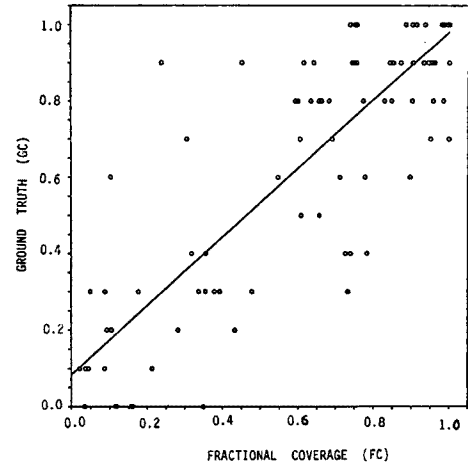


Fig. 8. As in Fig. 6. except when both T_{BB} and albedo data are used.

た場合、相関係数が0.825で、RMSは0.173であり、 T_{BB} ・アルベド2次元頻度分布を用いた場合、相関係数が0.889、RMSが0.140である。

以上、本章には衛星データによる雲量推定法について述べた。雲量FCは晴天ピクセルと部分雲ピクセルを区別する閾値($T_{BB}: T_1$, Albedo: A_1)および部分雲ピクセルと全部雲ピクセルを区別する閾値($T_{BB}: T_2$, Albedo: A_2)を用いて、部分雲ピクセルにおける雲の割合が $(T_1 - T_2)$, $(A_1 - A_2)$ に対して線型的であるとして計算する。ここで、 T_1 (A_1)は頻度分布の暖かい(暗い)側にある地面によるピークの位置 T_G (A_G)から地面による T_{BB} (Albedo)の標準偏差を引いた(加えた)ものを用い、 T_2 (A_2)は $\Delta T = T_1 - T_2$ ($\Delta A = A_2 - A_1$)を変化させて、FCとGCとの相関係数の一番よい ΔT (ΔA)を選ぶ。

こうして求めたFCとGCとを比較したが、 T_{BB} ・アルベド2次元頻度分布を使う場合、両者の対応が一番よいが T_{BB} だけを使う場合でも両方使う時と比べて、あまり差のないことが分かった。

4. 赤外データによる雲形判別の試み

衛星データで雲形を判別しようとする場合、その目的によって分類したい雲形が違ふ。Harris and Barrett¹³⁾は雲解析図の客観化を目的として、雲形をstratiform, stratocumuliform/Mixおよびcumuliformの3つに分類し、DMSPの可視と赤外データによる雲形判別を試みた。また、Parikh and Ball⁶⁾は雲形をLow cloud only, Middle cloud with no significant high clouds, High clouds with no significant lower clouds, High clouds with significant lower cloudsおよびCbの5種類に分類した。本調査はGMSの赤外パラメータから雲形を判別する可能性を調べたいところから、Table 5に示すように雲形を晴天 (CLSK), 部分雲 (FRAC), 下層雲 (LC), 中層雲 (MC), 上層雲 (HC) 対流雲 (CON) および混合雲 (MIX) の7種類に分類した。なお、地上観測 (Ground Truth) にもとずいて雲形を分類する際に用いる各雲種の雲量は、2章に述べたように計算された地域平均雲量である。

衛星のデータで雲形を判別する可能性を調べるために、雲形によってその値が違ふパラメータ (特徴パラメータ) をさがす必要がある。Harris and Barrett¹³⁾は特徴パラメータに雲表面の平滑状況を反映するベクトル分散を用いたが、Parikh and Ball⁶⁾は隣接ピクセル間の T_{BB} 差を表すロバーツ勾配 (Roberts Gradient) と T_{BB} の平均値を用いた。本調査では、赤外データのみを使うこととしたので、Table 6に示すような T_{BB} 頻度分布における特徴パラメータを計算して、それを上述したようにGround Truthにもとずいて分類した雲形について平均値と標準偏差を求めた。

全体的に、下層雲、中層雲、上層雲および対流雲の場合、各パラメータ間の差は、最大値、最小値などに

Table 5. Criteria for classification of cloud types

Cloud	Type	Number of Data	CRITERIA
Sign	Name		
CLSK	Clear sky	7	NT=0
FRAC	Fraction	51	$1 \leq NT < 7$
LC	Low Cloud	5	NT ≥ 7 LC ≥ 7 , MC+HC < 3 CON < 3
MC	Middle Cloud	11	NT ≥ 7 MC ≥ 7 , HC < 3 CON < 3
HC	High Cloud	16	NT ≥ 7 CON < 3
CON	Convective cloud	85	NT=10 CON ≥ 3
MIX	Mixture	65	NT ≥ 7 No classified to LC, MC, HC or CON

Table 6. The used IR parameters

Number	Sign	Definition
1	MODE	The mode of TBB histogram
2	MEDI	The median of TBB histogram
3	MEAN	The mean TBB for the area
4	MAXI	The maximum TBB for the area
5	MINI	The minimum TBB for the area
6	1%V	TBB value at 1% cumulative frequency
7	5%V	TBB value at 5% cumulative frequency
8	10%V	TBB value at 10% cumulative frequency
9	90%V	TBB value at 90% cumulative frequency
10	95%V	TBB value at 95% cumulative frequency
11	99%V	TBB value at 99% cumulative frequency
12	STDE	Standard Deviation of TBB for the area

比べて、モード、平均値の方が大きい。これはモード、平均値を用いた雲形の判別がよりよくできる可能性があることを示している。

これらの特徴パラメータでどの程度で2種類の雲形を判別できるかを調べるために、先きに各雲形について計算した各特徴パラメータの平均値と標準偏差を使って、Fisher's Distance J_k を(10)式のように求めた。

$$J_k = \frac{|\mu_{ik} - \mu_{jk}|}{\sigma_{ik} + \sigma_{jk}} \quad (10)$$

ここで、 μ_{ik} , μ_{jk} はそれぞれ雲形 i, j についての特徴パラメータ K の平均値で、 σ_{ik} , σ_{jk} はそれぞれ雲形 i, j についての特徴パラメータ K の標準偏差である。

Table 7 にモードの場合各雲形間の Fisher's Distance を示しているが、値が小さいのは下層雲—高層雲および対流雲—中層雲であることが分かる。平均値を用いた場合も同じような結果になった。これはモード、平均値といった特徴パラメータで雲形を判別する際、下層雲—高層雲、対流雲—中層雲間の区別が他の組み合わせ（例えば対流雲—下層雲）と比べてより難しいことを意味する。

Table 7. Fisher's Distances between every 2 cloud types for T_{BB} mode

Cloud Type	CLSK	FRAC	LC	MC	HC	CON
FRAC	0.270					
LC	1.111	0.534				
MC	3.328	2.023	1.475			
HC	0.899	0.568	0.207	0.824		
CON	2.098	1.427	1.020	0.113	0.596	
MIX	1.104	0.748	0.406	0.569	0.164	0.393

5. まとめ

GMS の赤外 and/or 可視画像データから 10^4 km² 地域における雲量の推測法について検討し、また赤外データのみによる雲形判別の可能性について調査を行った。

雲量の推測については、雲が一部しか占めないピクセルを考慮して、 T_{BB} 、アルベド頻度分布から地面によるピークを確定し、晴天ピクセルと部分雲ピクセルを区別する閾値を決定し、同時の Ground Truth との比較によって部分雲ピクセルと全部雲ピクセルを区別する閾値を決定して、この2つの閾値を用いて、いわゆる TTM 方法による雲量推測法を開発した。この方法による推測量と地上目視雲量とを比較したが、赤外 T_{BB} 頻度分布だけを用いた場合でも相対的によい結果を得た。

雲形の判別については、 T_{BB} 頻度分布からモード、平均値などを用いた場合の雲形判別の可能性について調べたが、今の方法では中層雲—対流雲との区別などがまだ困難であることが分かった。

今後の方針としては、雲形の分け方をもっと検討すると同時に、可視パラメータをも含む外の特徴パラメータを各ケースについて計算し、特に降水の推定に有利な雲形の分類と特徴パラメータの組合わせを見付け、雲形判別法を確定したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Koffler, R., A. G. Decotiis, and Krishna Rao : A procedure for estimating cloud amount and height from satellite infrared radiation data, Mon. Wea. Rev., Vol. 101, 1973, pp. 240-243.
- 2) 加藤一靖：静止気象衛星の画像データによる気象要素の抽出，気象研究ノート第148号，1983，pp. 685-786.
- 3) 謝平平・光田寧：GMS 赤外・可視資料による降雨の推定について，京都大学防災研究所年報，第31号 B-1，1988，pp. 201-217.
- 4) Parikh, J. : A comparative study of cloud classification techniques, Remote sensing of Environment Vol. 6, 1977, pp. 67-81.
- 5) Parikh, J. : Cloud classification from visible and infrared SMS-1 data, Remote Sensing of Environment, Vol. 7, 1978, pp. 85-92.
- 6) Parikh, J., and J. T. Ball : Analysis of cloud type and cloud amount during GATE from SMS infrared data, Remote Sensing of Environment, Vol. 9, 1980, pp. 225-245.
- 7) Lovejoy, S. and G. L. Austine : The delineation of rain area from visible and IR satellite data for GATE and midlatitudes, Atmos-Ocean, Vol. 17, 1979, pp. 77-92.
- 8) Tsonis, A. A., and G. A. Isaac : On a new approach for instantaneous rain area delineation in midlatitudes using GOES data, J. Appl. Met., Vol. 24, 1985, pp. 1208-1218.
- 9) 加藤一靖・石川正勝：GMS 画像データによる客観的雲高算出処理について，気象衛星センター技術報告，No. 5, 1985, pp. 1-24.
- 10) Shenk, W. E., and V. V. Salomonson : A simulation study exploring the effects of sensors spatial resolution, J. Appl. Met., Vol. 11, 1972, pp. 214-220.
- 11) 武田喬男・服部文彦：NOAA 衛星データを用いた海上の下層雲の雲量の解析，日本気象学会1988年春季大会予稿集，1988，pp. 30.
- 12) 久保田効・遠藤有礼：雲分布のデジタル化データ，気象衛星資料と数値予報，電子計算機室報告第26号，気象庁予報部，1980，pp. 30-33.
- 13) Harris, R., and E. C. Barrett : Toward an objective nephanalysis, J. Appl. Met., Vol. 17, 1978, pp. 1258-1266.