

改良型雲量格子点情報

徳野 正己*

Advanced Satellite Cloud Grid Information Data

Masami Tokuno

Abstract

Satellite Cloud Grid Information Data (SCGID) has been developed in Meteorological Satellite Center (MSC), Japan Meteorological Agency (JMA) since 1997 for supporting operational weather forecasting at JMA's meteorological offices. SCGID provides information on clouds, which consists of total cloud amounts, upper level cloud amounts, convective cloud amounts, cloud top heights and cloud types (cirrus, cumulonimbus (Cb), middle level cloud, cumulus, stratocumulus, fog/stratus (not available for GMS-5) and multilayered cloud) at 20-km grid intervals in the vicinity of Japan.

MSC began to produce prototype of SCGID operationally using multi-spectral data of GMS-5 in April 1999, and disseminated it to JMA meteorological observatories. Users had evaluated it for two years, and pointed out the following problems: 1) the amount of Cb and convective cloud is underestimated at dawn and dusk when solar height is low, 2) a discontinuous pattern is seen in distribution of cloud amount at dawn and dusk due to limitations of use of visible data, 3) the frequency of upper cloud amount with 100% accounts for the greater part of its distribution, 4) cloud top height is often estimated higher than the tropopause height.

To solve the above problems, we modified the algorithms for 1) discrimination of convective cloud, 2) discrimination of clear pixels from cloudy ones, and estimation of total cloud amount, 3) estimation of upper cloud amount, 4) estimation of cloud top height. The modified algorithms work generally well and the problems are greatly reduced.

In addition, comparison of SCGID total cloud amount estimated by the modified algorithms with surface total cloud amount obtained by Japan surface observatories shows a correlation coefficient of 0.93 to 0.94 in daytime (09JST, 12JST, 15JST, 18JST, respectively) in the term of July 1 to 10, 2001. It also shows that a bias of underestimated total cloud amount is improved from approximately 30% to 10%.

Thus, we confirmed the modified algorithms are effective for solving the problems and started to disseminate the advanced SCGID produced by the modified algorithms to JMA meteorological observatories at 12JST, August 31, 2001.

*気象衛星センター システム管理課
Meteorological Satellite Center, System Engineering Division
(2001年7月4日受領、2001年12月11日受理)
(Received July 4, 2001; Revised December 11, 2001)

要 旨

気象衛星センターでは、1997年から各地の気象官署等の天気予報を支援するために、雲量格子点情報の開発を行ってきた。雲量格子点情報は、日本付近について20km格子間隔で算出される、全雲量、上層雲量、対流雲量、雲頂高度、雲型（巻雲、積乱雲、中層雲、積雲、層積雲、霧/層雲（GMS-5では適用させない）、曇天域）から構成されている。

気象衛星センターは、1999年4月からGMS-5のデータを利用して雲量格子点情報をルーチ的に作成し、各地の気象官署等への試験配信を開始した。利用者は、雲量格子点情報を2年間にわたり評価し、次のような問題点を指摘した。

1) 太陽高度の低い朝夕に積乱雲や対流雲量が過小に計算されやすい、2) 可視画像が特定の領域にしか適用できない朝夕の時間帯に、雲量の分布に不連続なパターンが生じる、3) 上層雲量が100%の場合が多い、4) 雲頂高度が圏界面高度を超え、高すぎるものがたびたび生じる。

上記の問題を改善するために、1) 対流雲判別法、2) 晴天判別、全雲量算法、3) 上層雲量算法、4) 雲頂高度算法、についてアルゴリズムを変更した。このアルゴリズムの変更によって、問題点はほぼ解消した。

それに加えて、2001年7月1～10日の昼間（9時、12時、15時、18時）について、改良されたアルゴリズムで算出した全雲量と日本の地上観測の全雲量との比較結果では、相関係数は0.93～0.94で、また、過小に算出されていた全雲量のバイアス値も30%程度から10%程度に改善された。

このように、アルゴリズムの変更は問題点の解決に有効であることがわかり、このアルゴリズムを適用した改良型雲量格子点情報の試験配信を2001年8月31日の12時から開始した。

1. はじめに

気象庁は1996年3月からこれまでの予報に比べ、時間的、空間的にきめ細かな予報（地方天気分布予報や地域時系列予報、約20kmの格子に対して3時間毎）を開始した。こうした細かな予報を実施するためには、それに見合う観測資料が必要となる。雨に関してはレーダー・アメダス解析雨量がある。一方、雲量（晴れと曇りの判別）については、気象衛星センターがGMSのデータから気候用及び数値予報（全球）の初期値データとして0.5度格子の雲量データを作成してきているが（伊達、1996）、上記の目的に使用するためには水平解像度が不十分である。また、地上観測地点で観測される雲量についても水平解像度が不十分である。そのため、気象衛星センターでは時間的、空間的にきめ細かい雲量に関する情報（雲量格子点情報）の開発を行って来た。

開発当初は、現在運用で使用している雲解析情報図（徳野、隈部、1997）の原図作成プログラムの算出アルゴリズムをそのまま使い、算出領域及び1格子の算出範囲のみを変更したプロトタイプを作成し、その特

徴について検討した。雲解析情報図は、特に気象現象を解析する上で重要な雲域を抽出し見やすく表現する必要があり、原図データは雲量が60%以上の格子についてのみ雲量が算出され、雲量が60%未満の格子はunknownというカテゴリーに割り当てられ雲量は算出されない。このように原図データは雲量格子点情報としては不完全なものであったが、その他の情報は利用可能であったのでプロトタイプ版から試験データを作成し、その性質について検討を行なった。

はじめに、プロトタイプ版で算出された雲量格子点情報の全雲量の昼夜の特徴をみるために、1997年1月の9時（日中）と21時（夜間）について、稚内、札幌、根室、秋田の4地点で観測された全雲量と雲量格子点情報の全雲量とを比較した。昼夜について大きな違いはなく、雲量が60%未満のunknownの占める割合が全体の50%前後で、その内、地上観測の雲量が90%以上を占める割合は50%強であった。このように太陽高度が低い場合や夜間では、地上観測と比較し、かなり過小に雲量が算出される傾向にあった。また同年の夏季にあたる8月についても同様な調査を行った結果、冬

季に比べて太陽高度が高い9時についてはunknownの占める割合が全体の30%程度に減少し、その内、地上観測の雲量が90%以上を占める割合も20%に減少し、冬季の過小に算出されていた雲量の改善がみられたが、夜間については、unknownの占める割合が全体の45%で、その内、地上観測の雲量が90%以上を占める割合は57%であり、冬季同様にかなり過小に算出される傾向であった(Tokuno, 1997)。以上のように、太陽高度が低い場合や夜間では、地上観測と比較し、かなり過小に雲量が算出される傾向にあった。この原因の一つに、ここで使用された晴天判別閾値温度が雲解析情報図と同じで数値予報の温度プロファイルの900 hPaの気温(大気補正済み)を使用していたためであると考えられた。

そのため、より正確な地表面温度を推定しそれを閾値にできれば雲量算出の精度向上が図られる(村上他, 2001)という考えから、数値予報の予報値から回帰式で衛星が晴天の場合観測されるであろう赤外1輝度温度を算出する方法を開発し、その精度を検討した。

可視データを使用しないで、赤外データのみでこの方法の検証を行うため、1997年2月11~20日及び8月11~20日の10日間について、雲量格子点の全雲量と地上観測点、稚内、札幌、根室、秋田、仙台、輪島、大阪、潮岬、福岡、鹿児島、名瀬、那覇で観測された全雲量との比較を行った。その結果、特に冬季の夜間の雲量格子点は過大に雲量を算出し、逆に夏季の日中には過小に雲量を算出する傾向があったが概ね両者は一致していた(Tokuno, 1999)。日中については、可視データが使用できることを考慮し、また、夜間については運輸多目的衛星に搭載予定の $3.7\mu\text{m}$ 帯のデータ利用で改善が図られると考え、夜間の晴天判別は上記のアルゴリズムを採用し、1999年4月から試験配信を開始した。

試験配信期間の当初2年間について、各利用者によりこの雲量格子点情報(以下、旧バージョンと呼ぶ)の問題点について検討が行われた。特に大きな問題点は、日中の雲量格子点情報の全雲量が過小であること

であった(山田, 1999)。原因の一つは、可視データを使用して晴天判別をする際に用いる可視反射率の閾値が大きすぎることであった。

この原因を解決するために、格子点毎に過去10日分での最低アルベドを閾値として利用する方法を試験した結果、日中の全雲量の算出精度の改善が見られたが、太陽高度が低くなる18時で改善が見られず、更なる改善の必要が示唆された(山田, 2000)。

その他、以下の問題点が指摘された。1) 太陽高度の低い朝夕に積乱雲や対流雲量が過小に計算されやすい、2) 可視画像が特定の領域にしか適用できない時間帯(7時や18時など)に、可視データ適用領域と赤外データのみ適用領域との間で雲量等の分布に境界が生じる(雲量格子点情報の解説, 2001)、3) 上層の雲量が100%の場合が多い(山田, 1999)、4) 雲頂高度が圏界面高度を超え、雲頂高度が高すぎることがたびたび生じる(気象庁予報課、私信, 2001)。

今回上記の問題を改善するための技術開発を続け、一応の成果があったので、この改善したアルゴリズムを用いた雲量格子点情報(以下、新バージョンと呼ぶ)の配信を2001年8月31日の12時から開始した。

本稿では、アルゴリズムの変更点と結果について報告する。

2. 雲量格子点情報の概要

雲量格子点の算出される対象領域はRSM(領域モデル)ガイダンス配信領域($17.8^{\circ}\sim 51.2^{\circ}\text{N}$, $114.0^{\circ}\sim 149.75^{\circ}\text{E}$)で、緯度経度直交座標系を用い、1格子の大きさは緯度12分x経度15分とし、緯度経度(00分, 00分)を格子の中心とするものである。結果は、地方予報中核ごとに分割して配信される。配信形式は、国内2進形式のバイナリー電文を用い、毎時1回正時10分後までに配信される。1電文は、東西・南北ともに、24格子分(東西 $6.0^{\circ}\times$ 南北 4.8°)のデータから構成されている。

雲量格子点の1格子の情報は、全雲量(単位%)、上層雲量(単位%)、対流雲量(単位%)、雲型(積乱雲、巻雲、中層雲、積雲、層積雲、霧/層雲(但しGMS-5で

は算出されない)、曇天域、晴天域、を数値化)、雲頂高度(単位100m)の要素から構成されている。

その他、雲解析情報図との相違点や算出方法等については、「雲量格子点情報」の解説の第3章(気象衛星センター、2001)を参照されたい。以下の章では、1章で述べた4項目の問題点を改善するために行なったアルゴリズムの変更点と結果について示す。

3. アルゴリズムの変更点と結果

以下の節では、指摘されている問題点の影響を軽減するために変更したアルゴリズムの概要と結果について示す。

3.1 対流雲画素の判別アルゴリズムの変更

「太陽高度の低い朝夕に積乱雲や対流雲量が過小に計算されやすい」という問題点を軽減するために以下のようにアルゴリズムを変更した。対流雲量の定義は積乱雲画素数の全体に対する割合のことである。

Aso et al. (1988)によると、GMSの赤外、可視データを使用して雲型判別を行った結果、1) 積乱雲を判別できている太陽天頂角の範囲はほぼ75度以下、2) 太陽天頂角がほぼ0度の場合、積乱雲のアルベードは65%以上、3) 積乱雲のアルベードと太陽天頂角の余弦は直線関係にあると報告されている。これを基にして、各格子が可視データを利用して積乱雲画素を判別する条件を以下のように変更した。

可視データを利用できる太陽天頂角の範囲を80度以下から75度以下に変更

積乱雲画素を判別するための可視閾値を70%から $60\% \times \text{COS}$ (太陽天頂角)に変更

旧バージョンでは太陽天頂角補正済み可視反射率を使用した。新バージョンでは太陽天頂角未補正の可視反射率を使用した。その理由は、観測された可視反射率と閾値の関係がわかり易いためであり、本質的な精度向上をもたらすためではない。

3.1.1 アルゴリズムの変更結果

上記の条件で算出した結果と旧バージョンとの比較

例を「雲量格子点情報」の解説(2001年)の事例7(1999年7月3日)について、対流雲量(図1)及び雲型(図2)について示す。

赤外1輝度温度分布(6時)から、九州地方には雲頂温度が-60度程度の積乱雲域が見られ、7時ではその雲頂温度が更に低下し積乱雲の最盛期と判断できる。しかし、旧バージョンでは対流雲量及び積乱雲域とも7時には減少し、積乱雲が急に衰弱したように表現されている。新バージョンでは、太陽天頂角の変動にあまり影響されず、赤外1輝度温度分布で見られる低温域と対流雲量及び積乱雲域との対応が良く表現されていると考えられる。

更に、上記の領域に対して新バージョンで対流雲量が算出されている格子についてのみ、太陽天頂角80度以下について、2種の対流雲量を識別する閾値($60\% \times \text{COS}$ (太陽天頂角))と($70\% \times \text{COS}$ (太陽天頂角))に分けて、対流雲、非対流雲画素数と閾値との関係について、時刻毎(6、7、8時)に調査した。6時については、すべての格子点が太陽天頂角80度以上であったので、ここでは7時と8時の結果について示す。

図3は7時について、閾値($60\% \times \text{COS}$ (太陽天頂角))の場合である。閾値15%がほぼ太陽天頂角75度、10%がほぼ80度に対応する。図1の北東から南西にかけて太陽天頂角は増加し、30N以南で130E以西の地域の太陽天頂角はほぼ75度以上なので、閾値10~12%に分布している対流雲量(カテゴリー1)はほぼ30N以南の対流雲量に対応していて、一方、閾値14~19%に分布している対流雲量(カテゴリー2)はほぼ30N以北の対流雲量に対応していると判断できる。

図4は8時について、閾値($60\% \times \text{COS}$ (太陽天頂角))の場合である。太陽天頂角の変動によりカテゴリー1は閾値21~23%に、カテゴリー2は閾値25~29%のところ分布するように変動した。この時の太陽天頂角は、閾値21%でほぼ69度、25%でほぼ65度である。図1の赤外1輝度温度分布をみると、7時のカテゴリー1の領域は8時と比較して対流雲が減少しているように見えないが、図3と図4とのカテゴリー1の対流雲量の比較では、明らかに、図3のほうが少ない。こ

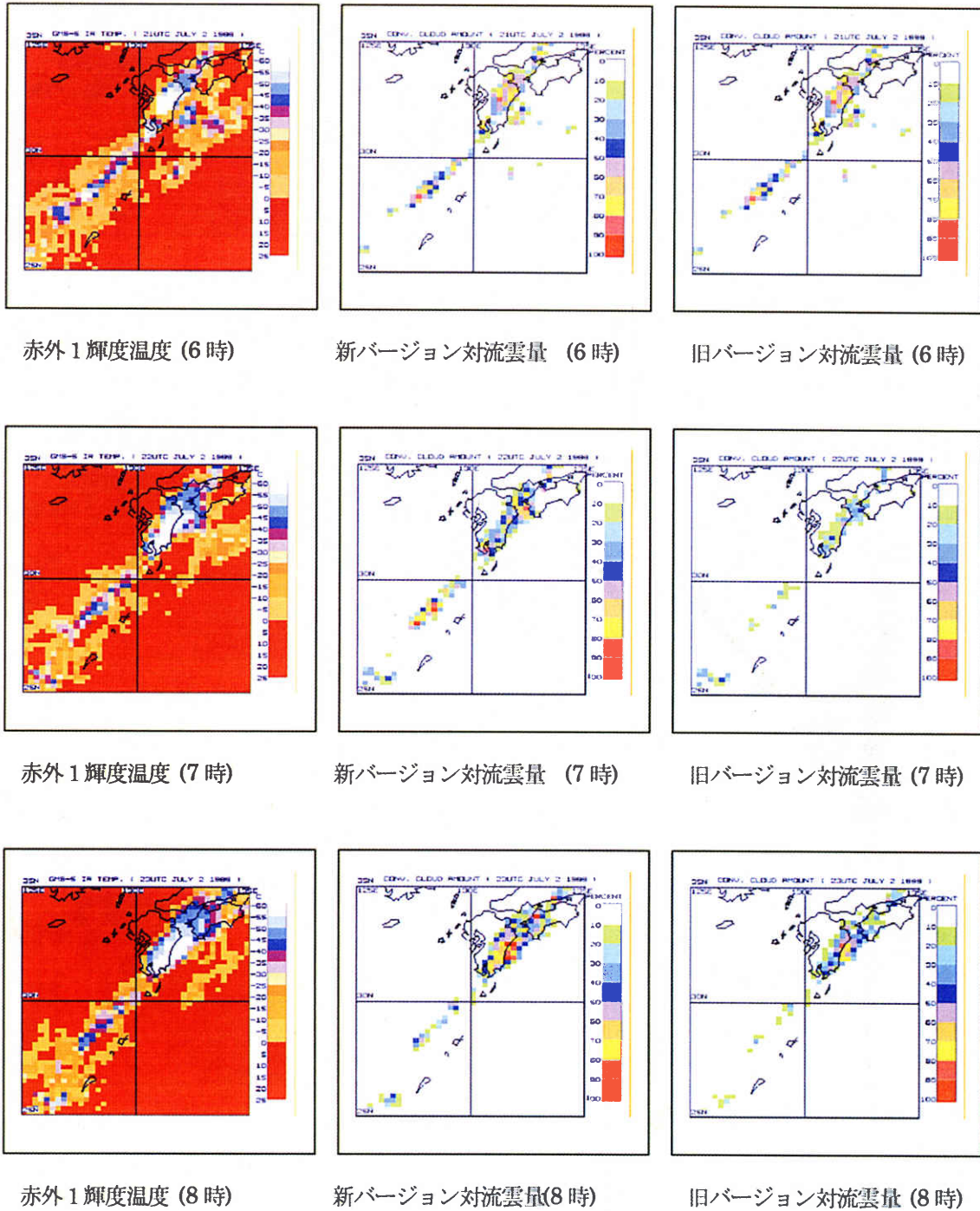


図1 雲量格子点情報、新バージョンと旧バージョンとの比較(対流雲量)
 左の図から、GMS-5赤外1輝度温度、新バージョンの結果、旧バージョンの結果
 1999年7月3日、上から6時、7時、8時(日本時間)の場合

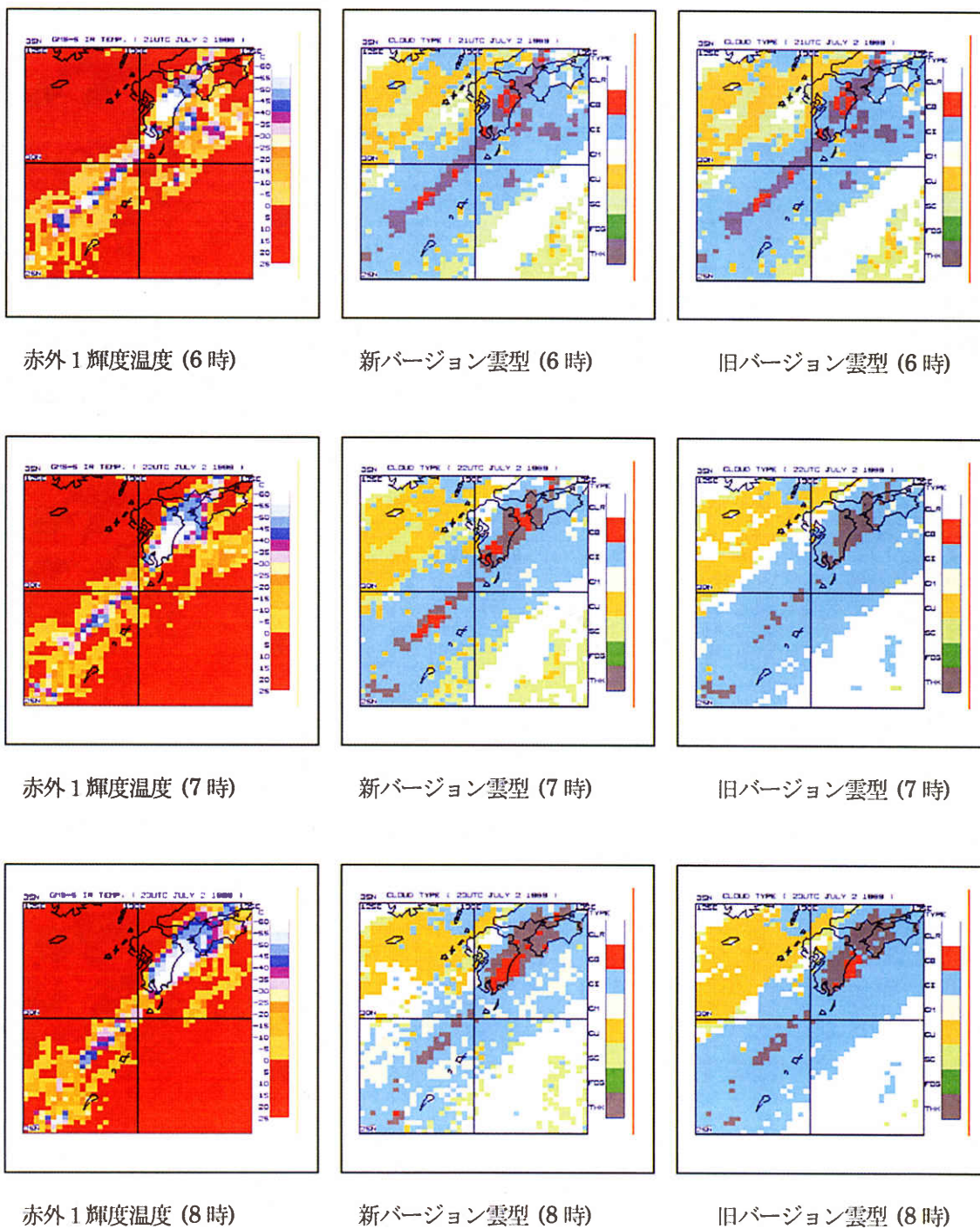


図2 雲量格子点情報、新バージョンと旧バージョンとの比較（雲型）
 左の図から、GMS-5赤外1輝度温度、新バージョンの結果、旧バージョンの結果
 1999年7月3日、上から6時、7時、8時（日本時間）の場合

対流雲、非対流雲画素数と閾値との関係 (7時)
 閾値(60%×COS(太陽天頂角))

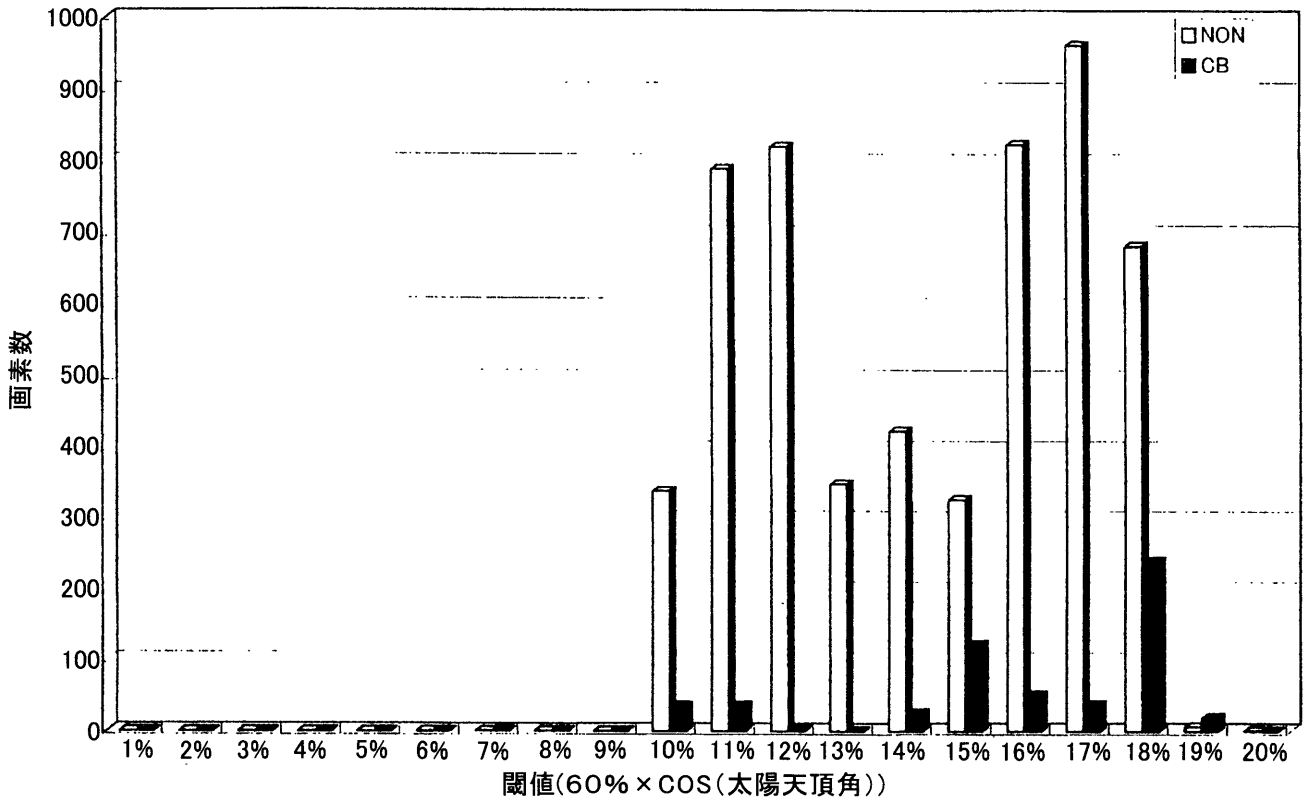


図3 閾値 (60%×COS (太陽天頂角)) と算出される対流雲量の画素数と非対流雲量の画素数の分布
 対応する格子は図1の新バージョンで対流雲量が0でない格子点を対象にしている。
 対象領域及び時刻は図1の7時の場合と同じ、NONは非対流雲を、CBは対流雲を示す。

対流雲、非対流雲画素数と閾値との関係 (8時)
 閾値(60%×COS(太陽天頂角))

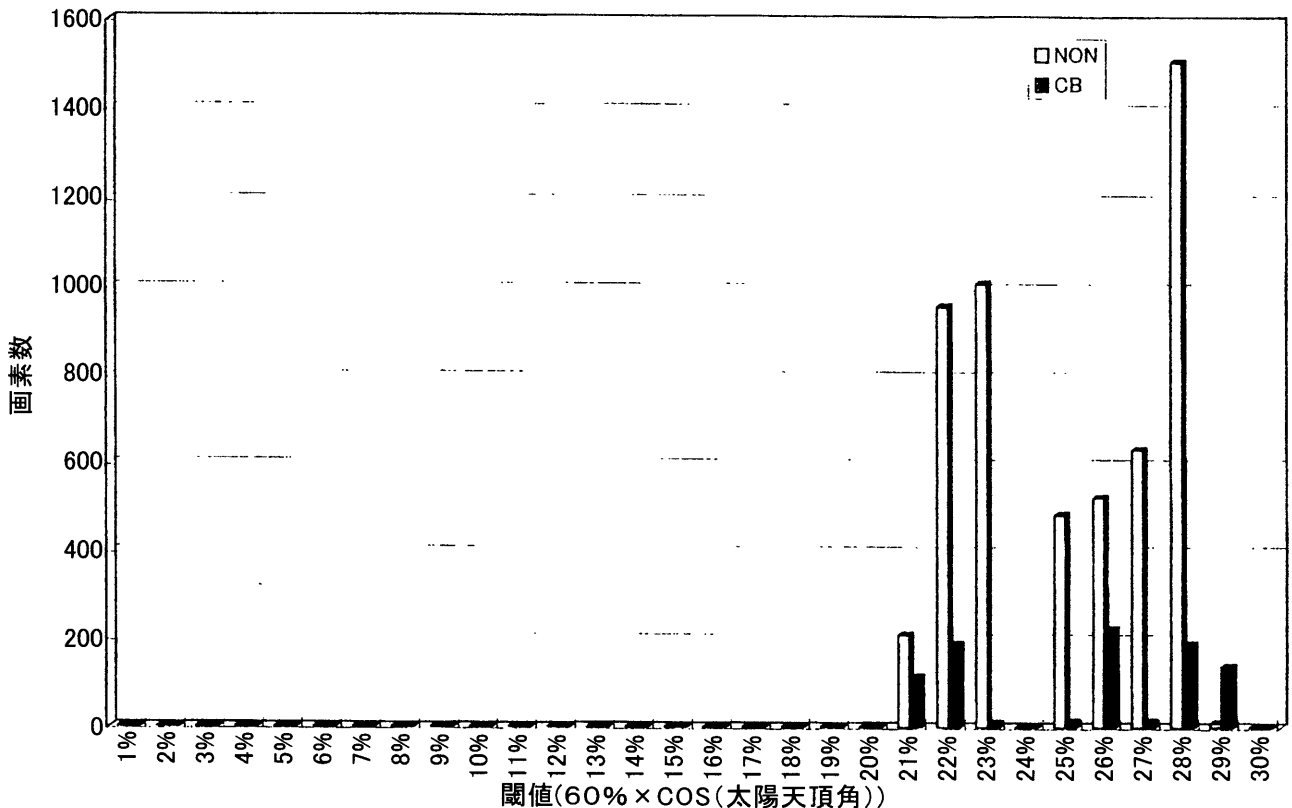


図4 図3と同じ、但し、8時の場合

対流雲、非対流雲画素数と閾値との関係 (7時)
 閾値(70% × COS(太陽天頂角))

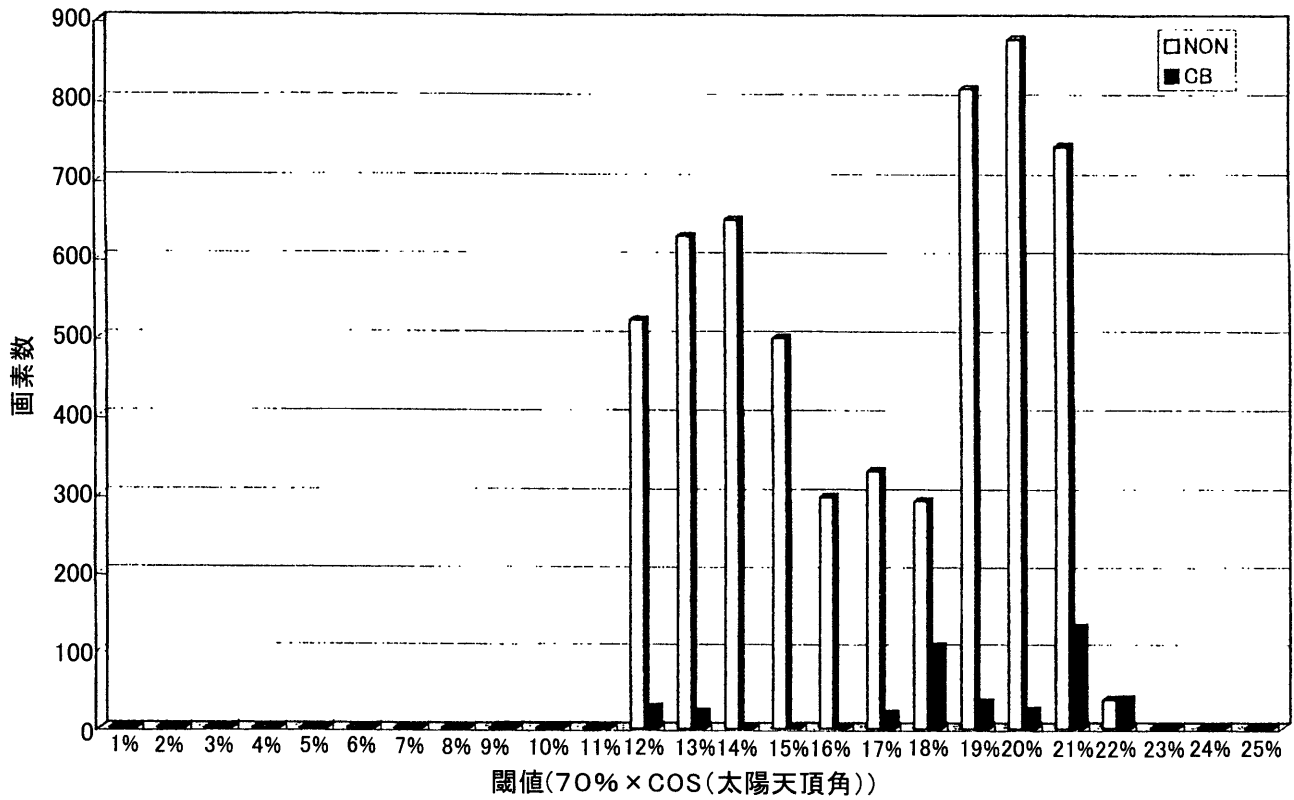


図5 図3と同じ、但し、閾値 (70% × COS (太陽天頂角)) の場合

対流雲、非対流雲画素数と閾値との関係 (8時)
 閾値(70% × COS(太陽天頂角))

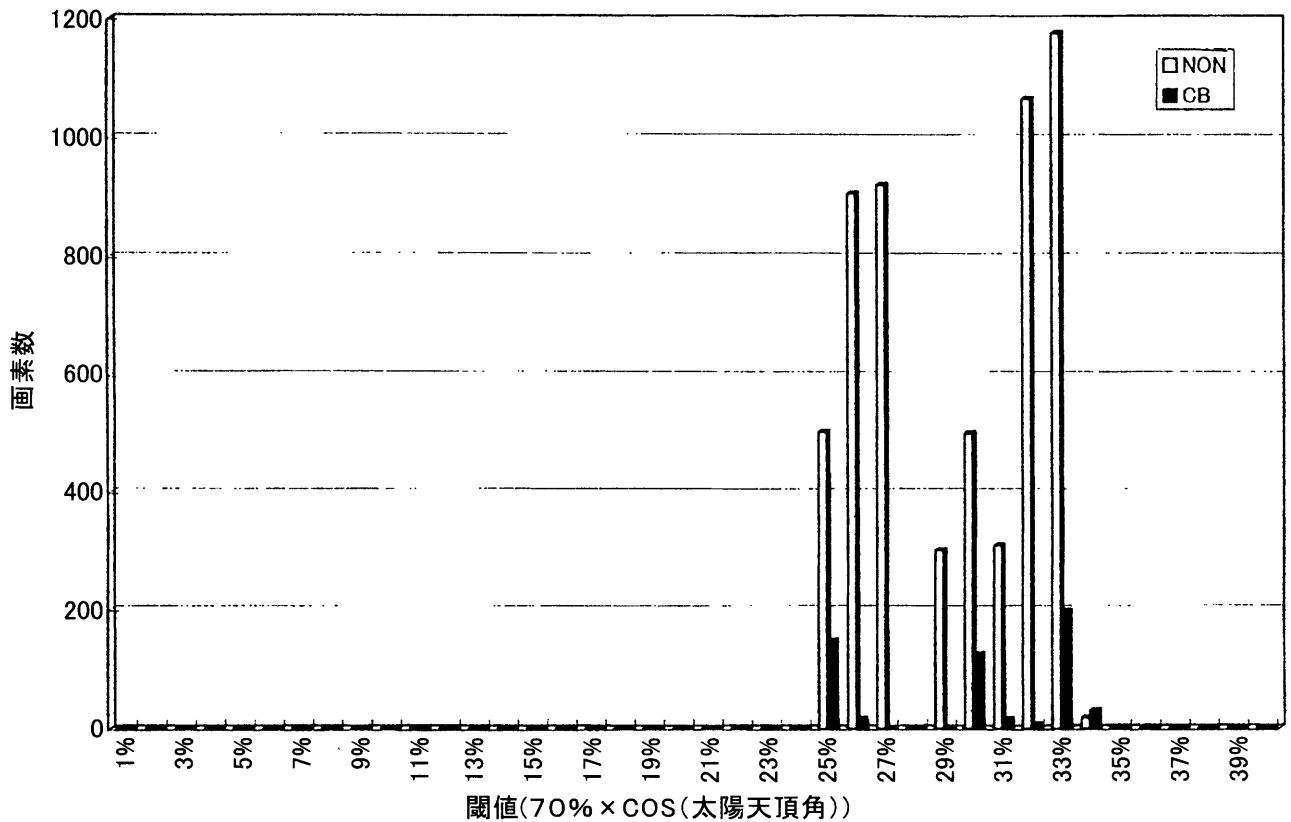


図6 図4と同じ、但し、閾値 (70% × COS (太陽天頂角)) の場合

これは、太陽天頂角がほぼ75度以上で可視データを併用して対流雲量を算出することが適切でないことを示している。

図5、6はそれぞれ図3、4の最大閾値だけを60%から70%に変更した場合である。図5と3、図6と4はそれぞれ同様な分布を示している。カテゴリ-2について対流雲画素数は、最大閾値が60%のほうが70%に比べ、約1.5倍多くなり、太陽天頂角が大きい場合、最大閾値の変動が対流雲量の算出に大きく影響を与えることが確かめられた。

3.2 晴天画素判定閾値反射率及び雲量算出アルゴリズムの変更

可視画像が特定の領域にしか適用できない時間帯（7時や18時など）に、可視画像が適用される領域と赤外画像のみ適用される領域が雲量格子点情報の作成領域上に存在する場合、全雲量の分布等に旧バージョンでは明らかに境界が生じる。

図7は、2000年7月10日の場合の雲量格子点情報の雲頂高度についての、新、旧バージョンの比較を示している。図7の各図は、観測時刻が5時から9時までのものを時系列に並べたものである。

旧バージョンでは、6時と7時の図に明らかに雲頂高度が薄いブルーで示されているところで境界が生じている。この境界から西側が赤外データのみアルゴリズムで、東側が可視データを加えたアルゴリズムで作成されたものである。雲頂高度の低い雲の判別に対して、西側では過大に、東側では過小に判別されているため、境界がより鮮明に生じている。旧バージョンの晴天判別のままで、3.1節のように、太陽天頂角を80度以下から75度以下の場合に可視データを利用するとしても、7時の図で薄いブルーの境界が7度程度東側にずれて、境界が鮮明に生じることになると考えられる。このことは、6時の場合を参照すると明らかであり、単に可視データの利用を太陽天頂角の制限のみで変更しても、境界が急激に減少しないことを意味している。

この境界を減少させるためには、夜間の下層雲量の

減少、日中の下層雲量の増加、をさせるようなアルゴリズムの変更が必要である。また、可視反射率がある程度低い場合、閾値で雲画素を判定する際に不確かさがあり、晴天判別に用いる温度閾値と観測される雲画素の輝度温度との温度差が小さい時に同様に閾値で判定する際に不確かさが生じる。それらの部分を補正するために、下記のように雲画素数の算出方法を変更した。

3.2.1 可視データを使用する場合

可視データを利用できる太陽天頂角の範囲を80度以下から75度以下に変更

更に晴天画素閾値反射率については次のように変更した。

旧バージョンでは事前に過去10日間の最低反射率から最も低い反射率を時刻毎に格子点毎に作成されている最小反射率（太陽天頂角の補正なし）（ALBCLR (I, J)、I, Jは格子点番号）と、カテゴリ毎に設定している最小反射率（ALBCTG (K)、Kは海、日本、大陸に対応（海：5%、日本：15%、大陸：20%））と比較して、大きい場合と小さい場合に分けて、それぞれ下記のように補正して晴天画素閾値反射率を設定している。旧バージョンでは、可視データは太陽高度角補正済みを使用しているため、補正値を加えている。

（旧バージョン）

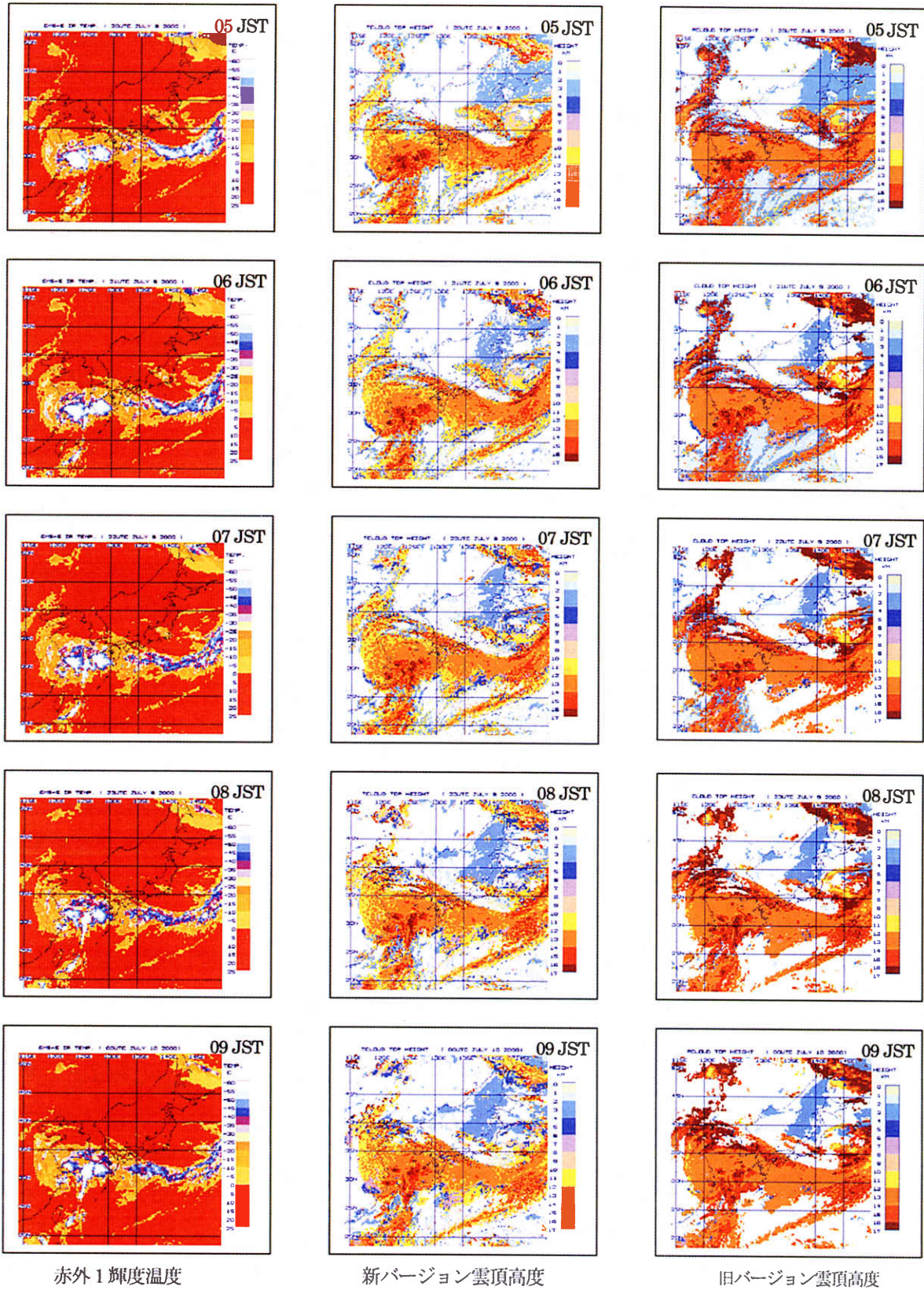
ALBCLR(I, J) ≥ ALBCTG(K) の場合

晴天画素閾値反射率(I, J) = ALBCLR(I, J) + 10(%)

ALBCLR(I, J) < ALBCTG(K) の場合

晴天画素閾値反射率(I, J) = ALBCLR(I, J) + 5(%)

新バージョンでは、ALBCLR (I, J) と整合性をとるために、可視データは太陽天頂角未補正のデータを使用するように変更した。更に可視データから雲画素を判別するための閾値を2つ設定し、確実に雲画素と判定される領域と、雲画素の50%は太陽天頂角に依存する領域とに分けるような晴天画素閾値を設定した。前者の閾値を晴天画素閾値反射率1 (ALBSHK)、後者の閾値を晴天画素閾値反射率2 (ALBSHV) とし、下記のように設定した。



赤外1輝度温度

新バージョン雲頂高度

旧バージョン雲頂高度

図7 雲量格子点情報、新バージョンと旧バージョンとの比較（雲頂高度）
 左の図からGMS-5赤外1輝度温度、新バージョンの結果、旧バージョンの結果
 2000年7月10日、上から5時、6時、7時、8時、9時（日本時間）の場合

(新バージョン)

晴天画素閾値反射率1 (ALBSHK(I, J))=ALBCLR(I, J)+21×COS(太陽天頂角)(%)

晴天画素閾値反射率2 (ALBSHV(I, J))=ALBCLR(I, J)+13×COS(太陽天頂角)(%)

上記の式で用いられている係数(21、13)は、太陽天頂角が75度の場合で観測される可視データの反射率(ALBCH(I, J))がALBCLR(I, J)より5%以上の場合は全て雲画素になり、ALBCLR(I, J)より3~5%大きい場合は雲画素の50%は太陽天頂角に依存するように設定した。これらの係数は、経験的にきめたものである。

この閾値により、1格子内に含まれる雲画素数は以下のように計算される。

雲画素数=IVISCL+IVISCV/2+(IVISCV/2)×COS(太陽天頂角)

IVISCLはALBCH(I, J)≥ALBSHK(I, J)の条件を満たす画素数

IVISCVはALBCH(I, J)≥ALBSHV(I, J)の条件を満たす画素数

3.2.2 赤外データのみの場合

赤外データのみを使用して雲画素を判別する場合、観測される赤外1輝度温度が準高温画素の場合(600hPaの気温(大気補正済み)<赤外1輝度温度=<晴天画素閾値温度の条件を満たすことをいう)、その画素群(個数NC)のヒストグラム処理により、新バージョンの条件を下記のように変更した。

(旧バージョン)

準高温画素に含まれる赤外1及び2の輝度温度のヒストグラムのモード値の温度差が巻雲閾値以上の場合、準高温画素は全て巻雲画素とし、それ以外は、全て下層雲画素とする。

(新バージョン)

巻雲画素の判定には以下の処理を加えた。また、雲量の算出は次節の「巻雲の雲量算出アルゴリズムの変更」を参照のこと。

1格子に含まれる画素25個の赤外1と3のデータを

放射輝度に変換した後に相関をとり、相関係数と一次回帰式の傾きが閾値以上の場合に、準高温画素に含まれる画素を全て巻雲画素とする。

この処理を加えることにより、図8の5時と6時の新・旧の上層雲の分布を見ると、赤外面像で見られる20N, 133Eから30N, 150Eにのびる巻雲域が、新バージョンではより明瞭に算出されていて、その北側のちぎれて流れる巻雲も表現されている。

準高温画素が巻雲画素でない場合、晴天画素になる条件は次の2つである。

準高温画素に含まれる赤外1及び2の輝度温度のヒストグラムのモード値の温度差が0.5K以上

準高温画素に含まれる赤外1の輝度温度のヒストグラムの温度幅が1.0K以下

巻雲画素及び晴天画素の判定条件を満たさない場合は、全て下層雲画素とする。

下層雲画素数は下記のように、晴天判別に用いる温度閾値(FBBIKI(I, J))と、準高温画素に含まれる赤外1の輝度温度のヒストグラムのモード値(IRCH(I, J))との温度差が3K以下の場合、雲画素数がある割合で減少させる処理を加えた。

DELTA=FBBIKI(I, J)-IRCH(I, J)

DELTA≥3の場合

下層雲画素数=NC

DELTA<3の場合

下層雲画素数=NC×3/SQRT(9-DELTA×DELTA)

但し、NCは準高温画素数である。

上記の考え方は、標準大気において、晴天判別閾値温度が地表面温度と仮定したときに、雲頂高度が500m以上はすべて雲画素とし、それ以下は、DELTAを半径3の円周に沿う割合で雲画素数を減少させるというものである。

3.2.3 アルゴリズムの変更結果

上記のアルゴリズムの変更結果を見るために、図7の雲頂高度の図と同期間の全雲量と雲型の時系列分布をそれぞれ図9、10に示す。

雲型の分布を見ると、旧バージョンでは6時、7時、

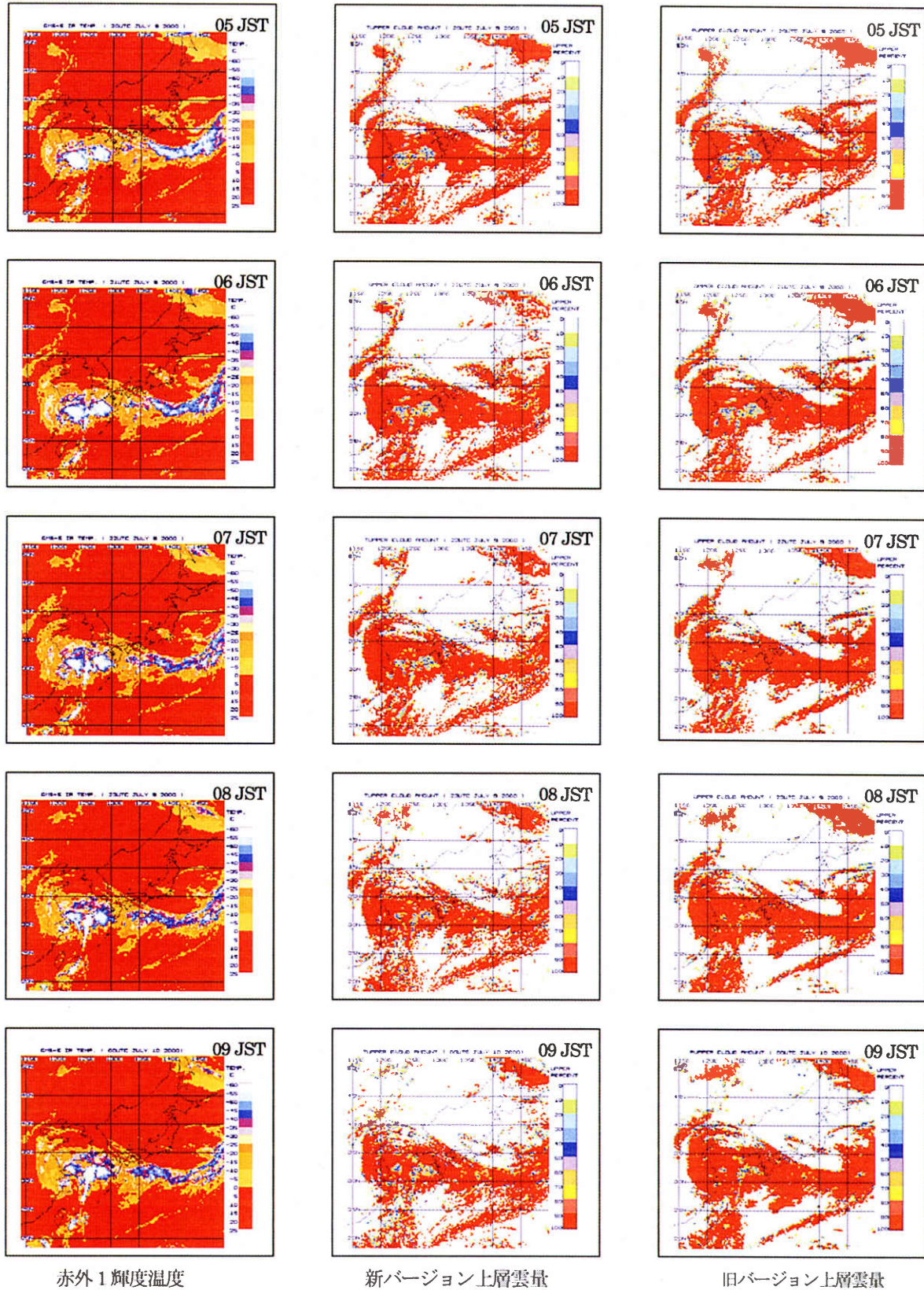
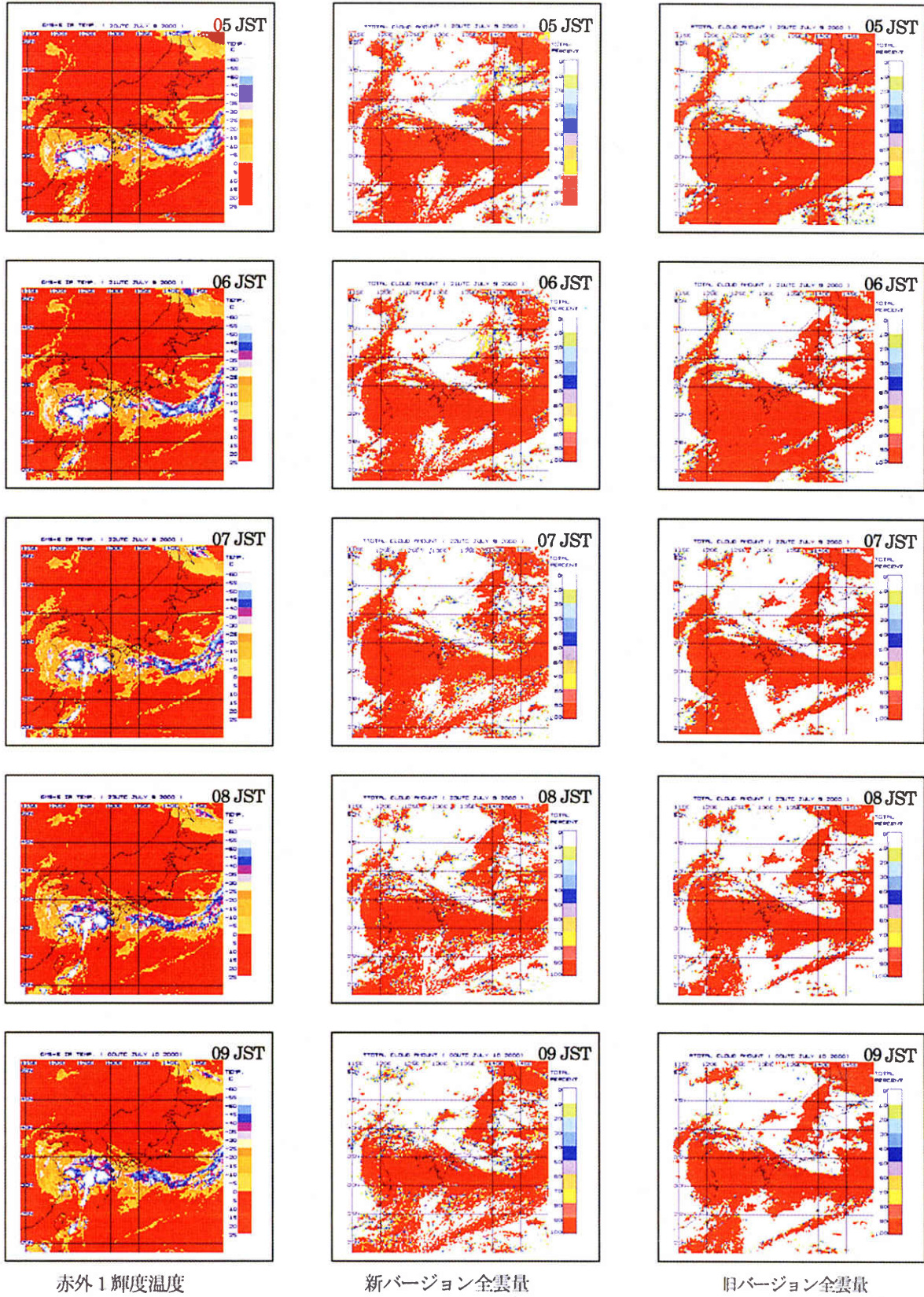


図8 図7と同じ、但し、上層雲量の場合



赤外1輝度温度

新バージョン全雲量

旧バージョン全雲量

図9 図7と同じ、但し、全雲量の場合

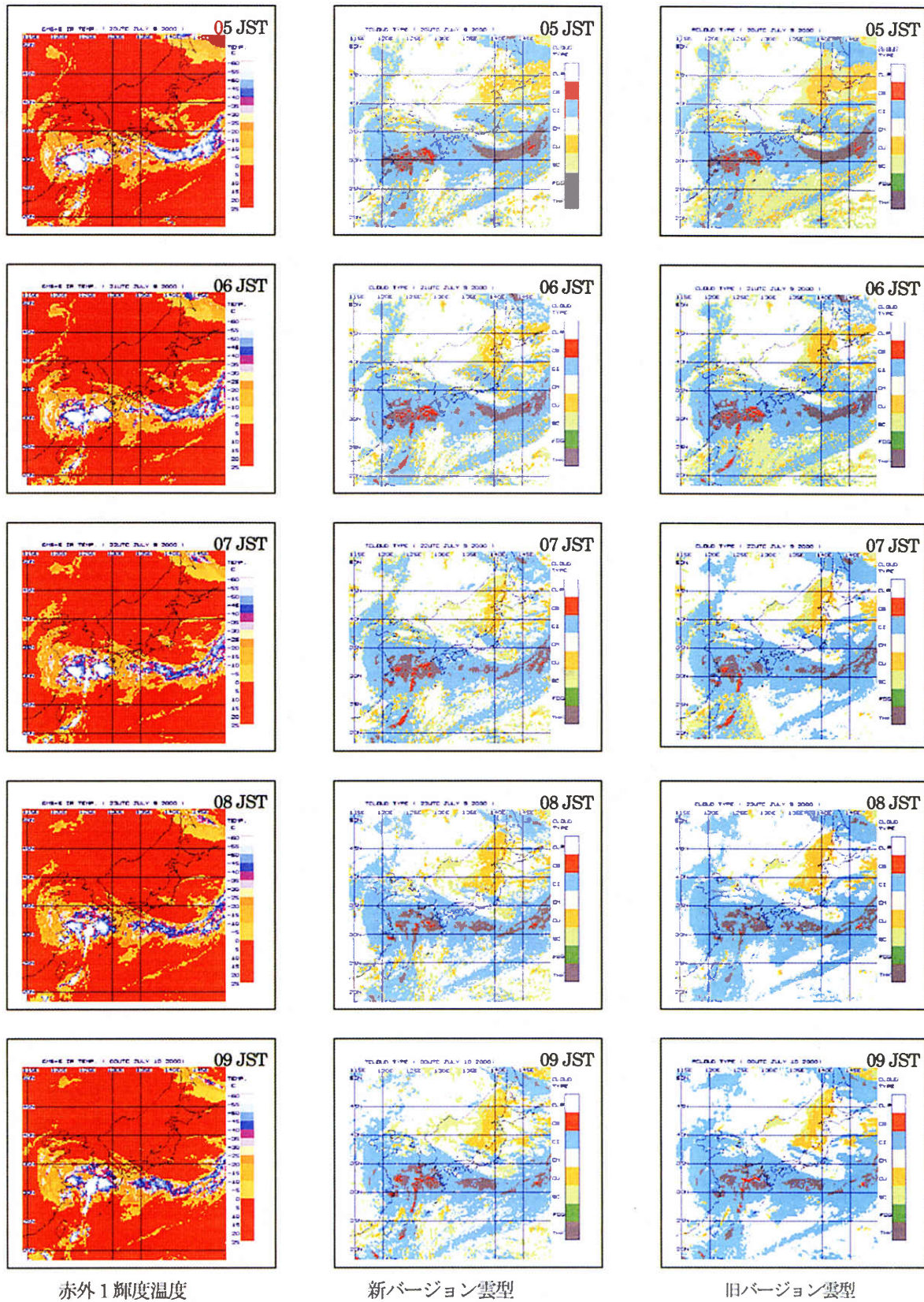


図10 図7と同じ、但し、雲型の場合

8時と太陽天頂角が小さくなるにつれて、20～30Nの領域では、層積雲の領域が明らかに15度程度西にずれていくのが見られるが、新バージョンでは、このような傾向がかなり改善されている。これを、全雲量の分布で見ると、雲型の分布と同様に、旧バージョンでは6時、7時、8時と太陽天頂角が小さくなるにつれて、20～30Nの領域では、全雲量が90%以上の領域が明らかに15度程度西にずれていくのが見られるが、新バージョンでは、このような傾向がかなり改善されている。

また、北海道の西部から日本海にかけて広がっている下層域の全雲量の分布を見ると、旧バージョンでは5時から7時にかけて90%以上であるが、新バージョンでは0から100%まで分布していて、雲頂高度の違いにより雲量が変動している。可視データが利用できない時間帯では、雲頂高度が低い場合、アルゴリズムの制限により地上で観測される雲量が100%に近い場合は過小に、逆に雲量が0%に近い場合には過大になる傾向にある。

可視データが利用できない時間帯では、雲頂高度が高い下層雲で雲量が少ないのか、雲頂高度が低いために雲量が過小に算出されているのか、雲頂高度と比較することにより判断できるので、下層雲量の時系列の変動を見る上で注意する必要がある。

3.3 巻雲の雲量算出アルゴリズムの変更

3.2節で示したように、準高温画素の場合でも条件により巻雲画素と判定される場合があるが、旧バージョンでは、雲量算出については画素数がそのまま計算される。このような巻雲画素は半透明であり、太陽光や地表面温度をある程度透過する。この特性を雲量に反映させるために、新バージョンでは、有効射出率の概念をとりいれて巻雲画素数の算出方法を変更した。また、新バージョンでは、高温画素の場合でも、条件により巻雲画素と判定される場合があるが、準高温画素と同様な算出方法を適用している。

準高温画素に含まれる画素数をNCとすると、新バージョンでは、

$$\text{巻雲の画素数} = \text{NC} \times \text{有効射出率}$$

$$\text{晴天画素数} = \text{NC} \times (1 - \text{有効射出率})$$

である。

有効射出率は、準高温画素、高温画素とも同じ方法で算出されていて、各画素群に含まれる水蒸気チャンネルの画素の輝度温度から作成されるヒストグラムのモード値(それぞれ、TB3CLH、TB3CRHとする)と、400hPa、及び700hPaに黒体があった場合に水蒸気チャンネルで観測されるであろう輝度温度(それぞれ、WBB400、WBB700とする)から以下のように有効射出率を計算する。

$$\text{有効射出率} = (\text{WBB700} - \text{TB3CLH} (\text{またはTB3CRH})) / (\text{WBB700} - \text{WBB400})$$

上記では、晴天の場合に衛星で観測される輝度温度は700hPaの気温から射出される温度で巻雲は高度400hPaに存在しているという仮定で求めている。

この変更により、図8の上層雲量の変動をみると、5時から9時にかけて、能登半島から房総半島沖にかけて日本を横断している巻雲域について、赤外1輝度温度分布から判断すると次第に輝度温度が上昇し、薄くなっていくのに対応して、新バージョンでは、上層雲量が徐々に減少している。三陸沖から北東にのびる巻雲域についても同様なことがいえる。

3.4 雲頂高度算出アルゴリズムの変更

「雲頂高度が圏界面を超え、雲頂高度が高すぎるものが度々生じている」と指摘されていた大きな原因は、衛星データから算出される雲頂温度が、高度を推定するのに使用する鉛直プロファイルの圏界面温度より低い場合に、プロファイルの最大高度である100hPaに割り当てられるためである。旧バージョンでは、上層雲域が特にこの傾向が強かった。これは、巻雲の温度を算出するために使用した巻雲の半透明性を補正する温度が大き過ぎたことも要因の一つとして考えられる。

そのため、新バージョンでは、巻雲温度の算出方法の変更と、雲頂温度が圏界面を超えた場合の補正方法を追加した。積乱雲、中層雲、下層雲の場合は変更し

ていない。

3.4.1 巻雲温度算出方法の変更

巻雲、曇天域、及び中温画素の巻雲の場合

(旧バージョン)

$$\text{巻雲温度} = \text{赤外3最低輝度温度} - (\text{赤外1最低輝度温度} - \text{赤外3最低輝度温度})$$

(新バージョン)

2点、(赤外1最低輝度温度、赤外3最低輝度温度)、及び(赤外1最高輝度温度、赤外3最高輝度温度)を通る直線を求めた後に、赤外3輝度温度＝赤外1輝度温度となる輝度温度を求める。この求めた温度を巻雲温度とする。

この考え方は、巻雲の温度を求める際、薄い巻雲の温度を補正するのに用いているIR-WVインターセプト補正方法(例えば、徳野、土屋、1990)を簡略化したものである。この際、直線の傾きが0.5以上の場合は、補正量が極端に大きくなることを避け、旧バージョンと同様に、

$$\text{巻雲温度} = \text{赤外3最低輝度温度} - (\text{赤外1最低輝度温度} - \text{赤外3最低輝度温度})$$

である。

準高温画素の巻雲の場合

(旧バージョン)

$$\text{巻雲温度} = \text{赤外3最低輝度温度} - (\text{赤外1最低輝度温度} - \text{赤外3最低輝度温度}) \times 2/3$$

(新バージョン)

$$\text{巻雲温度} = \text{赤外3最低輝度温度} - 3 \times (\text{赤外3最高輝度温度} - \text{赤外3最低輝度温度})$$

であり、第2項が補正項である。

高温画素の巻雲の場合

旧バージョンでは高温画素での巻雲の識別を行って、新バージョンではじめて導入した。

$$\text{巻雲温度} = \text{赤外3最低輝度温度} - 3 \times (\text{WBB700} - \text{WBB400})$$

であり、第2項が補正項である。補正項の部分は実際の観測値から求めることが困難であったので、放射モデルで計算したものをを用いた。

3.4.2 巻雲温度算出アルゴリズム変更の評価

アルゴリズムの変更について、どの程度巻雲の推定温度が変化するかを簡単に比較してみた。大気状態は中緯度帯夏のモデル(Kneizys et al., 1988)に類似しているとして、巻雲の温度は240K、赤外1の晴天輝度温度は290K、赤外3の晴天輝度温度(TCLR(赤外3))は、260K、265K、270Kの3通り、巻雲の射出率(ϵ)は、赤外1と赤外3で等しいと仮定すると、赤外1、赤外3で観測される輝度温度はそれぞれ

$$T(\text{赤外1}) = (1 - \epsilon) \times 290.0 + \epsilon \times 240.0 (\text{K})$$

$$T(\text{赤外3}) = (1 - \epsilon) \times \text{TCLR}(\text{赤外3}) + \epsilon \times 240.0 (\text{K})$$

で表すことができる。

ϵ を0～1.0まで0.1毎に変化させた場合、T(赤外1)とT(赤外3)は、表1ようになる。

表1 巻雲の射出率を0～1.0まで0.1毎にした場合の、赤外1及び赤外3で観測される輝度温度T(赤外3)a、T(赤外3)b、T(赤外3)cはそれぞれ、赤外3の晴天輝度温度(TCLR(赤外3))を260K、265K、270Kにした場合である。

ϵ	T(赤外1)	T(赤外3)a	T(赤外3)b	T(赤外3)c
0.0	290.0 K	260.0 K	265.0 K	270.0 K
0.1	285.0	258.0	262.5	267.0
0.2	280.0	256.0	260.0	264.0
0.3	275.0	254.0	257.5	261.0
0.4	270.0	252.0	255.0	258.0
0.5	265.0	250.0	252.5	255.0
0.6	260.0	248.0	250.0	252.0
0.7	255.0	246.0	247.5	249.0
0.8	250.0	244.0	245.0	246.0
0.9	245.0	242.0	242.5	243.0
1.0	240.0	240.0	240.0	240.0

表1の値を基に、準高温画素、中温画素、低温画素について、旧バージョンと新バージョンのアルゴリズムで巻雲の温度を推定する。

準高温画素は射出率が0.1~0.3の領域とし、最高輝度温度は射出率が0.1の場合、最低輝度温度は射出率が0.3の場合と仮定する。同様に、中温画素は射出率が0.4~0.7の領域とし、最高輝度温度は射出率が0.4の場合、最低輝度温度は射出率が0.7の場合と仮定する。低温画素は射出率が0.8~0.9の領域とし、最高輝度温度は射出率が0.8の場合、最低輝度温度は射出率が0.9の場合と仮定する。結果は表2の通りである。

表2 表1の算出された値を基に、準高温画素、中温画素、低温画素毎に旧バージョンと新バージョンで算出される巻雲の温度の比較結果。AKは、2点(赤外1最低輝度温度、赤外3最低輝度温度)と(赤外1最高輝度温度、赤外3最高輝度温度)を通る直線の傾きの係数である。

	旧バージョン	AK	新バージョン
準高温画素：T(赤外3)a	240.0 K	—	242.0 K
準高温画素：T(赤外3)b	245.8 K	—	242.5 K
準高温画素：T(赤外3)c	251.7 K	—	243.0 K
中温画素：T(赤外3)a	237.0 K	0.4	240.0 K
中温画素：T(赤外3)b	240.0 K	0.5	240.0 K
中温画素：T(赤外3)c	243.0 K	0.6	243.0 K
低温画素：T(赤外3)a	239.0 K	0.4	240.0 K
低温画素：T(赤外3)b	240.0 K	0.5	240.0 K
低温画素：T(赤外3)c	241.0 K	0.6	241.0 K

表2に示すように、準高温画素は、新バージョンの方が旧バージョンと比較して、精度がほぼ一定で改善されているのがわかるが、やや高温に推定する傾向にある。中温画素では、IR-WVインターセプト法が理想的な場合、推定精度がよいことを示しているが、2点(赤外1最低輝度温度、赤外3最低輝度温度)と(赤外1最高輝度温度、赤外3最高輝度温度)を通る直線の傾きの係数(AK)が0.5以上の時に、旧バージョンと同様な方法を用いたのは、大きな推定誤差を防ぐためであるが、やや高温に推定する傾向にある。このことは、例えば、高気圧の場にジェット気流に対応する巻雲域が横断するような場で、巻雲の高度をやや低めに

推定することを意味している。AKが0.5以下になるにつれて旧バージョンでは巻雲の温度を低めに(巻雲の高度を高めに)推定しているが、新バージョンではこの点が改良されたと考えられる。低温画素の場合、巻雲は黒体に近い温度を示しているため、新、旧で顕著な差は生じていないが、それでも、AKが0.5以下になるにつれて旧バージョンでは巻雲の温度を低めに推定していると考えられる。

このように、新バージョンでは、旧バージョンでAKが小さくなるにつれて高めに推定されていた巻雲の高度が改善されたと考えられる。

3.4.3 推定雲頂高度が圏界面を超えた場合の補正

次に新バージョンでは、予報値の誤差や推定温度の誤差等により衛星データから推定した雲頂高度が圏界面を超えた場合の補正を追加した。

旧バージョンでは、衛星データから算出された雲頂温度が、高度を推定するのに使用する鉛直プロファイルの圏界面温度より低い場合に、プロファイルの最大高度である100hPaに割り当てられる。このため、図8に見られる旧バージョンでの雲頂高度の分布では16km以上の上層雲領域がかなりの割合を占めている。この影響を軽減するために、雲頂温度が圏界面温度より低温の場合、適用した鉛直プロファイルの圏界面高度以上の温度減率を標準大気温度減率(0.6K/100m)を仮定し、下式のように、雲頂温度と同じ気温になる高度を算出するように変更した。

$$\text{雲頂高度} = \text{圏界面高度} + 100(\text{m}) \times (\text{圏界面温度} - \text{雲頂温度}) / 0.6 (\text{m})$$

この補正を行うことにより、衛星から算出された雲頂温度が圏界面温度より低い場合でも、その温度情報を削除することなく雲頂高度に反映できるようになった。

図7は、2000年7月10日の5時から9時までの1時間毎の雲頂高度の変動を、新・旧とで比較したものである。特に、両者の大きな違いがサハラや中国大陸にかかっている上層雲の高度に現れている。旧バージョンではこれらの大部分の上層雲の高度は16km以上

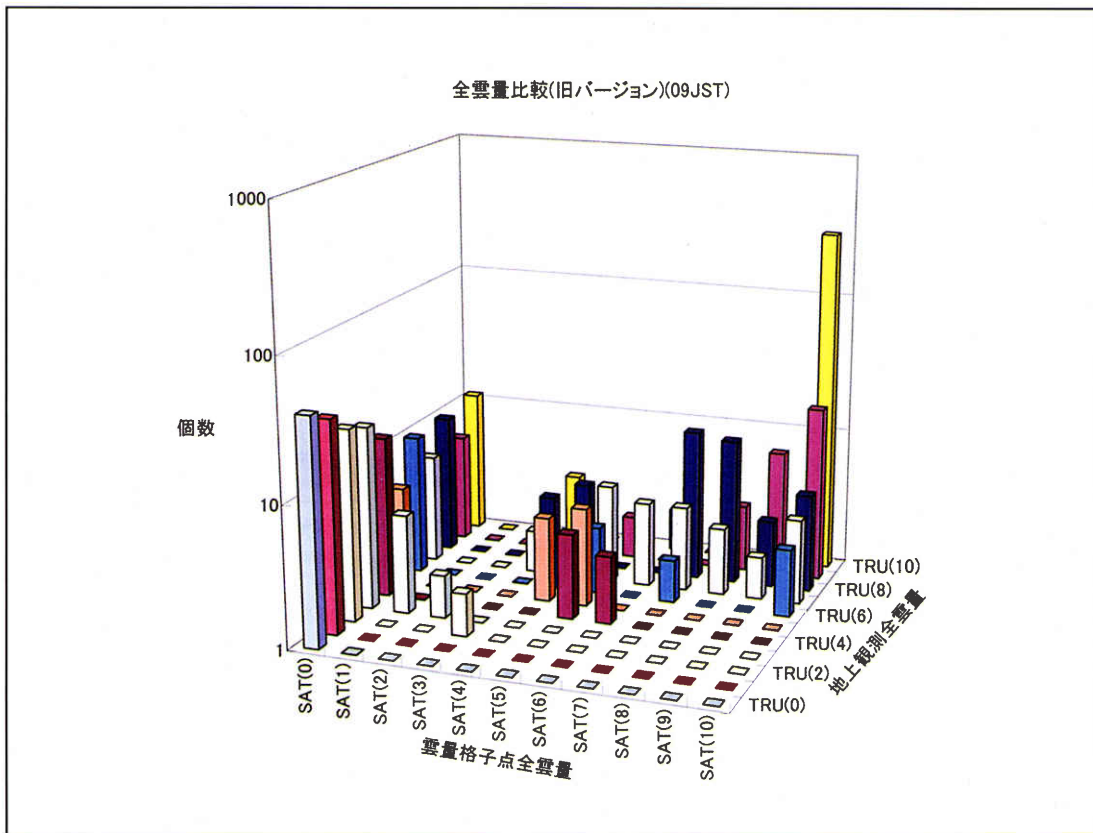
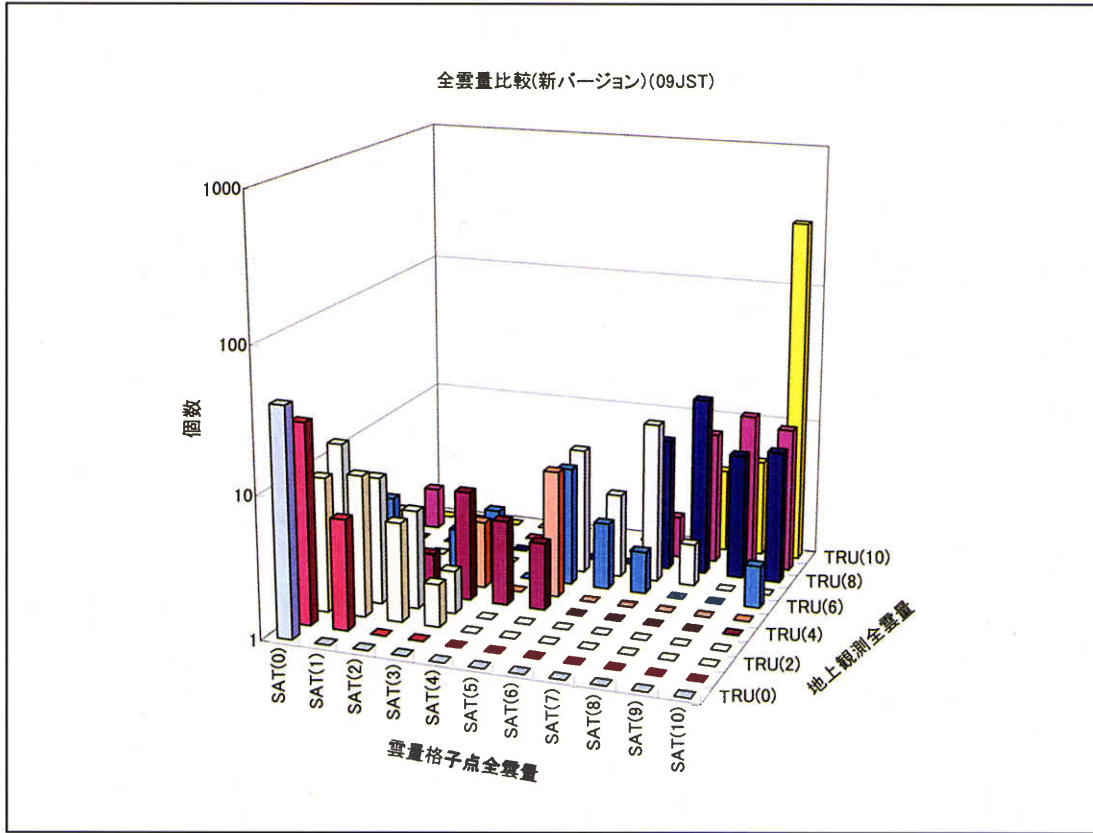


図11-1 雲量格子点情報の全雲量と地上観測の全雲量の新バージョン（上図）とルーチン（下図）との比較
 期間：2000年7月1～10日までの10日間（9時（日本時間））

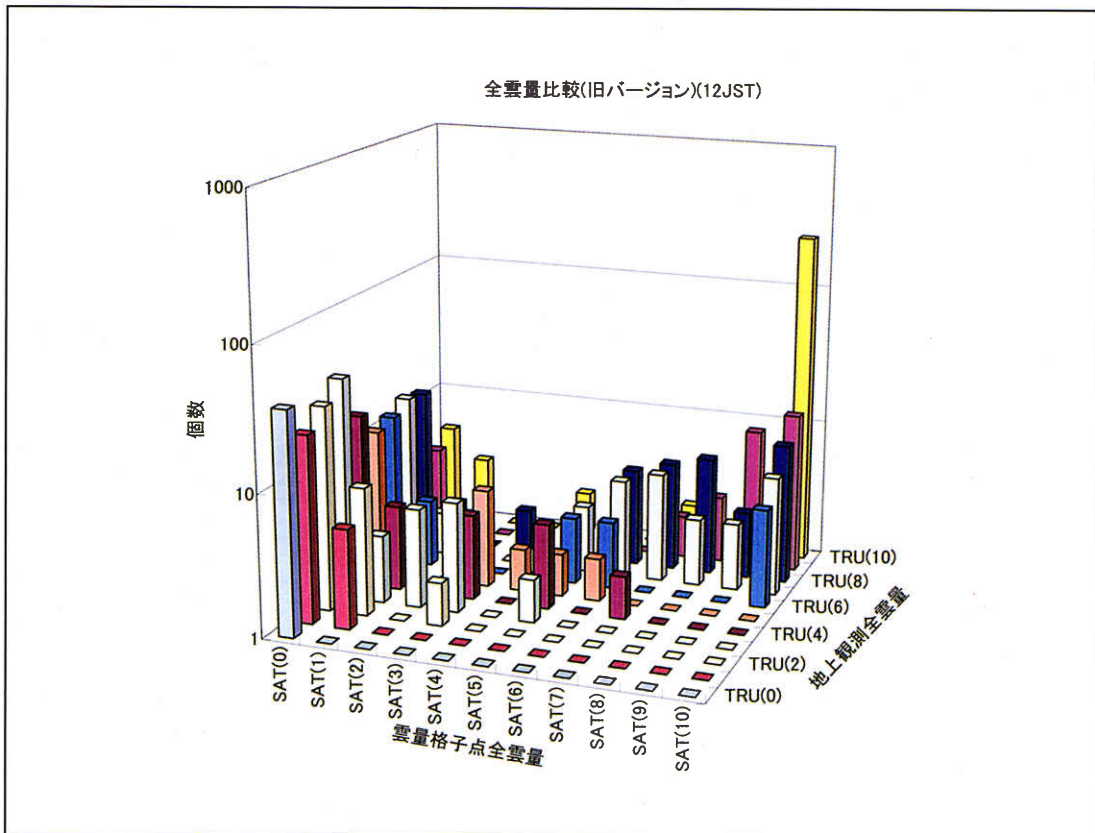
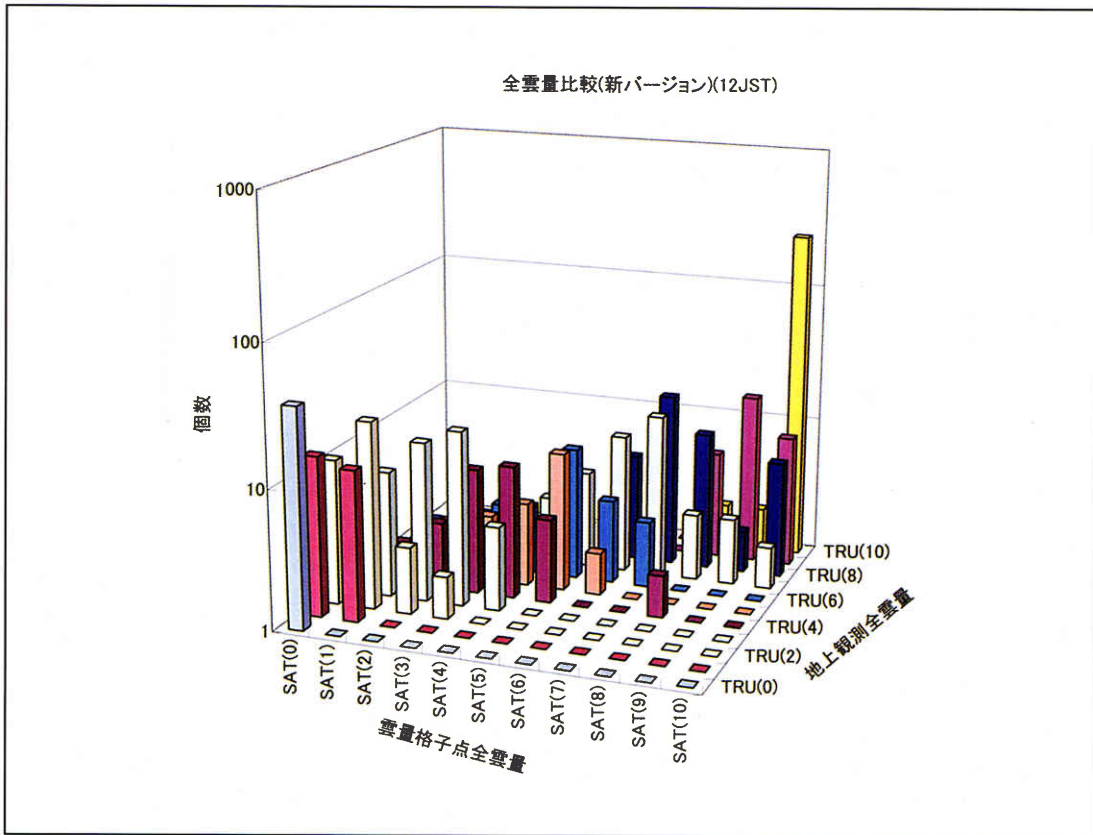


図11-2 図11-1と同じ。但し、12時（日本時間）の場合

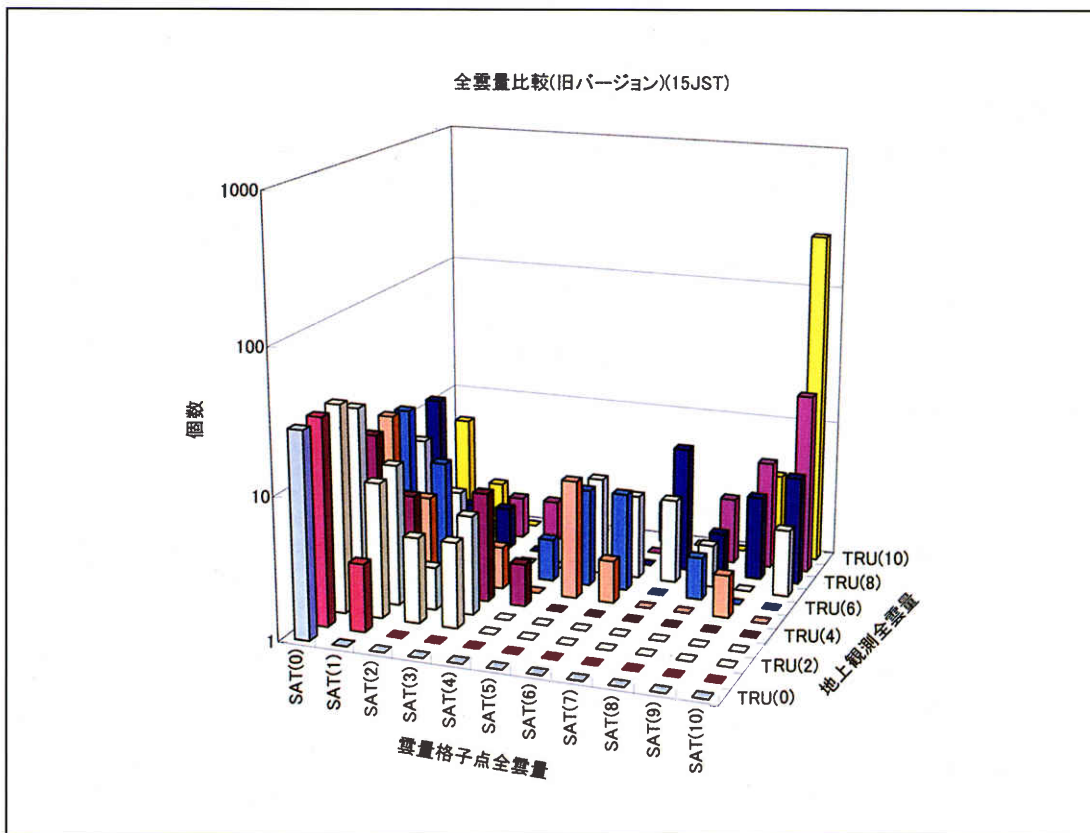
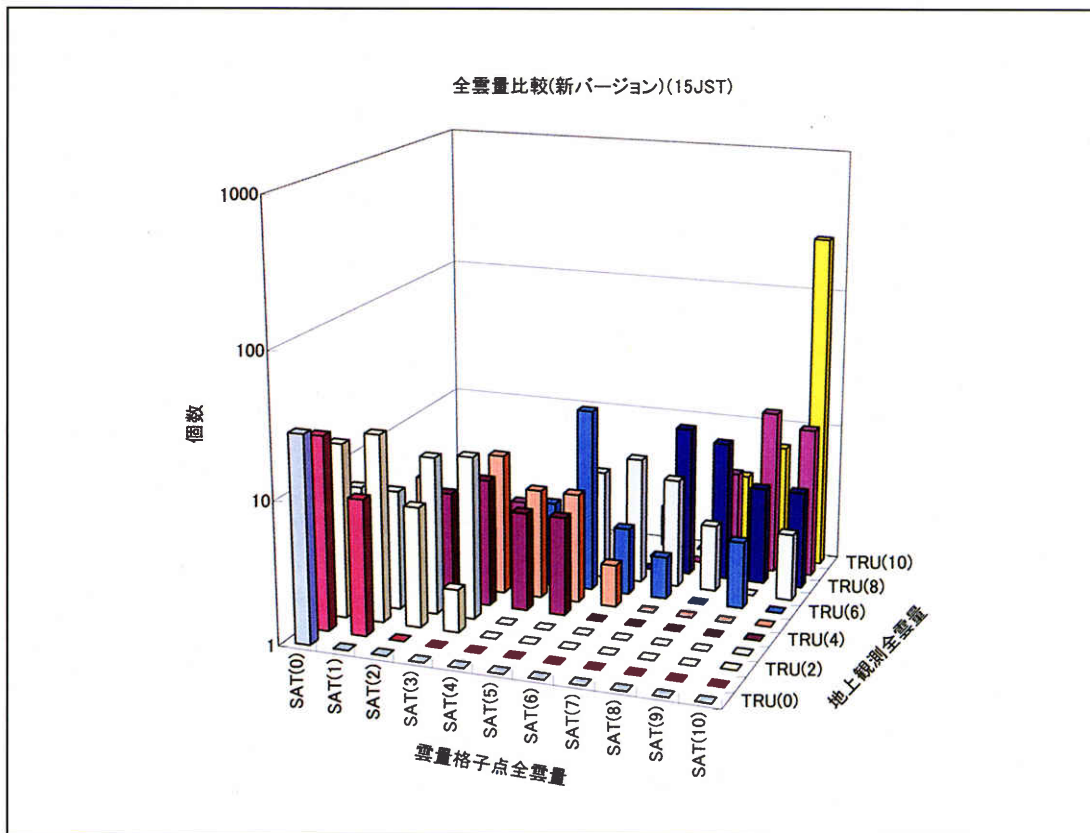


図11-3 図11-1と同じ。但し、15時（日本時間）の場合

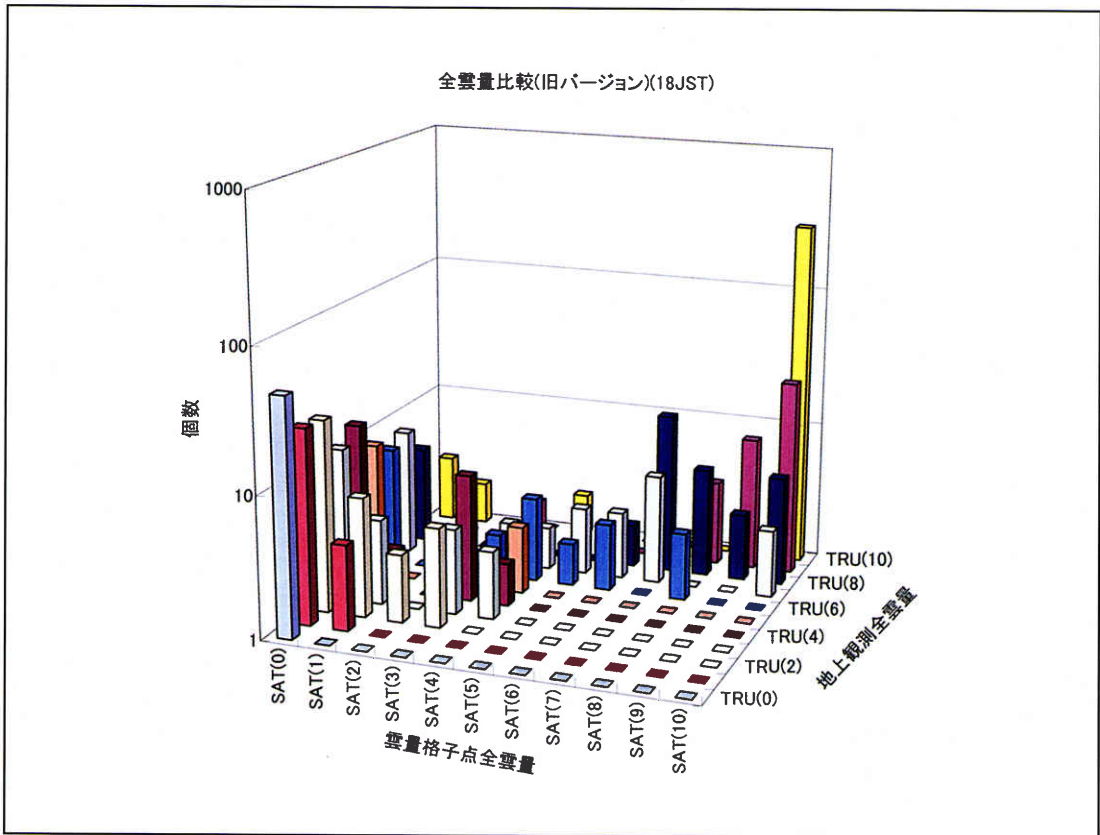
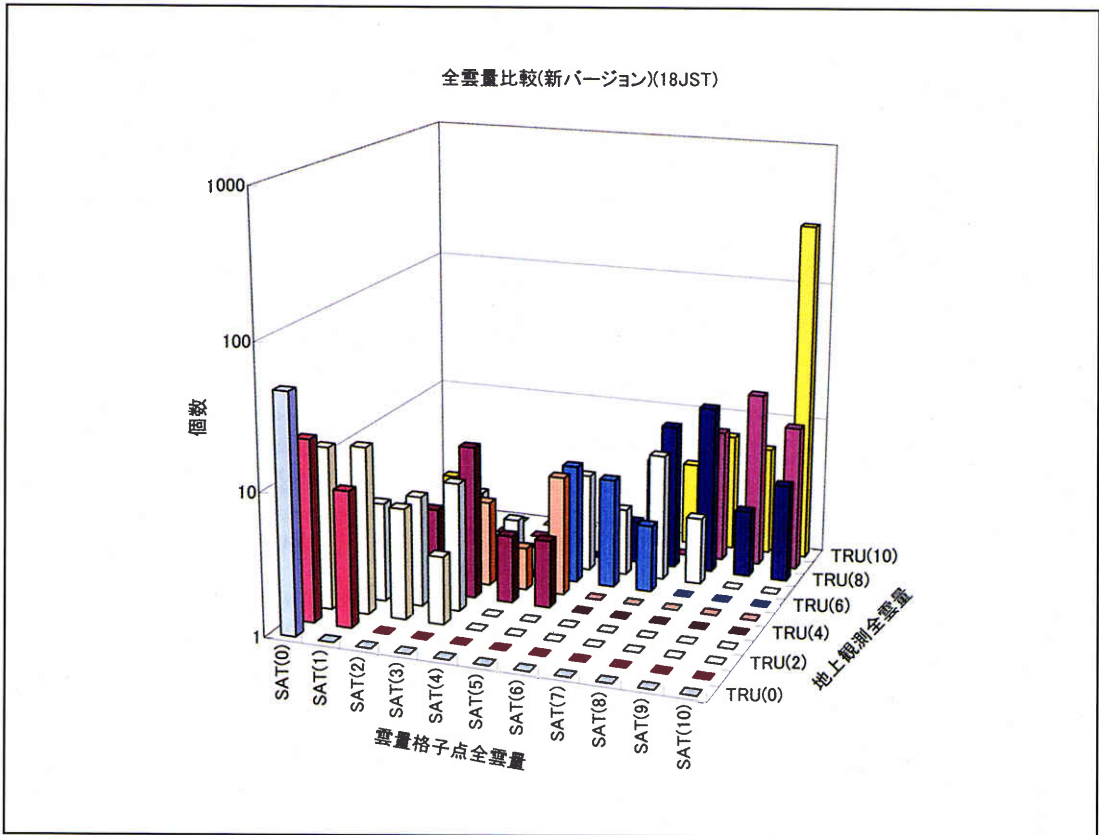


図11-4 図11-1と同じ。但し、18時（日本時間）の場合

表3 地上観測の全雲量と新バージョンで算出された全雲量との比較 (2000年7月1～10日) Yは地上観測の全雲量、Xは新バージョンで算出された全雲量

時刻	旧バージョン			新バージョン		
	個数	相関係数	一次回帰式	個数	相関係数	一次回帰式
09 JST	620	0.83	$Y = 0.66X + 3.14$	620	0.94	$Y = 0.83X + 1.52$
12 JST	620	0.83	$Y = 0.64X + 3.19$	620	0.93	$Y = 0.86X + 1.19$
15 JST	620	0.84	$Y = 0.65X + 3.11$	620	0.94	$Y = 0.84X + 1.35$
18 JST	620	0.89	$Y = 0.74X + 2.32$	620	0.93	$Y = 0.85X + 1.34$

であるのに対し、新バージョンでは10～13km程度に補正されていて、定性的にはアルゴリズムの改良は有効であると考えられる。

4. 雲量格子点情報と地上観測との全雲量の比較

3章で示したアルゴリズムを導入して作成された新バージョンの雲量格子点情報と、旧バージョンの雲量格子点情報の全雲量の評価を地上観測地点で観測された全雲量で行った。

使用した地上観測の全雲量は、日本の62観測地点(雲量を1日7回観測する地点)で観測されたものである。

地上観測の雲量と雲量格子点情報の雲量の比較については、地上観測地点が含まれる格子点及びその格子点を囲む格子点(8格子点)の全雲量と地上観測の全雲量とを比較し、その差が最も小さい格子点との全雲量との比較結果から精度を評価した。これは、衛星データから推定された全雲量が正時より20分程度早く観測されたデータを使用しているため、雲の変動等を考慮し、この方法を使用した。そのため、地上観測地点に対応する雲量格子点情報の格子点为新・旧でかならず同じ格子点になるとは限らない。しかし、この精度評価は、新・旧の精度の差を見るのが主な目的なため、上記の方法でも特に問題はないと判断した。

ここでは、特に今回アルゴリズムを大きく変更した日中について精度評価した。使用したデータは、2000年7月1～10日までの10日間について、日中(9時、

12時、15時、18時)の4回の時刻について評価を行った。

表3は、地上観測の全雲量と衛星からの全雲量の相関結果を示したものである。また一次回帰式、のYは地上観測の雲量を、Xは衛星から算出した雲量を示す。また、図11は各時刻別の分布を示したものである。

新バージョンは旧バージョンと比較して、相関係数が0.93～0.94であり精度の向上が見られた。また、地上観測全雲量と雲量格子点の全雲量とを関係づける一次関係式の係数が9～18時にかけてほぼ同じであることより、太陽天頂角の変動等に伴う可視データの利用方法の改善が反映された結果と言えよう。旧バージョンでは、一次回帰式が示すように、30%程度全雲量が過小に算出されているが、新バージョンでは、かなり改善され10%程度になった。しかしながら、新バージョンでも、衛星データから算出される全雲量は地上観測の全雲量と比較してやや過小に算出される傾向にある。

また、図11の各分布図は上記の場合の分布を図に示したものであるが、これらを見ても、明らかに旧バージョンの全雲量が過小に算出されていたのが、新バージョンでは改良されたのがわかる。

5. まとめ

気象衛星センターでは、1997年から時間的、空間的にきめ細かい雲量に関する情報(雲量格子点情報)の開発を行ってきた。1999年から2年間にわたる試験配

信を実施し、その結果、各利用者から以下のような問題点が指摘された。1) 太陽高度の低い朝夕に積乱雲や対流雲量が過小に計算されやすい、2) 可視画像が特定の領域にしか適用できない時間帯(7時や18時など)に、可視データ適用領域と赤外データのみ適用領域との間で雲量等の分布に境界が生じる、3) 上層雲量が100%の場合が多い、4) 雲頂高度が圏界面高度を超え、雲頂高度が高すぎるものがたびたび生じる。

上記の問題を改善するために、1) 対流雲判別法、2) 晴天判別、全雲量算出法、3) 上層雲量算出法、4) 雲頂高度算出法、についてアルゴリズムを変更した。主な変更点は、以下の通りである。

- ・可視データの利用できる太陽天頂角の範囲を80度以下から75度以下に変更
- ・積乱雲画素を判別するための可視閾値を70%から60%に変更
- ・晴天画素閾値反射率を2通り設定し、確実に雲画素と判定される領域と、雲画素の50%は太陽天頂角に依存する領域にわけて算出するように変更
- ・巻雲画素の判定には赤外1と3との放射輝度の相関関係から識別する処理を追加
- ・赤外データのみによる下層雲量算出について、晴天判別閾値温度と赤外1の輝度温度ヒストグラムのモード値との温度差が3K以下の場合、雲画素数を温度差に対応するように減少させる処理を追加
- ・巻雲の雲量算出には、有効射出率の概念をとりいれて算出する処理を追加
- ・巻雲の雲頂高度算出にはIR-WVインターセプト補正方法を簡略した方法を追加
- ・雲頂高度が圏界面高度を超えた場合、雲頂温度と圏界面温度との温度差を高度に補正して圏界面高度に上乘せする形で補正する方法を追加

以上の処理の変更により、指摘されていた問題点の影響を軽減することが可能となった。

また、2001年7月1～10日の10日間の可視データ利用時間帯(9時、12時、15時、18時)について、日本の62地上観測地点の全雲量と改良型雲量格子点情報の全雲量とを比較した結果、相関係数が0.93～0.94であ

り精度の向上が見られた。また、過小に算出されていた全雲量のバイアス値も30%程度から10%程度に改善された。

今後、雲頂高度は特に航空気象の分野で重要になるので、雲頂高度の精度評価が必要である。雲量については、赤外データのみの場合、雲頂高度が高い下層雲で雲量が少ないのか、雲頂高度が低いために雲量が過小に算出されているのか、雲頂高度と比較することにより判断できるので、利用する際注意する必要がある。運輸多目的衛星の場合には、 $3.7\mu\text{m}$ 帯のデータが利用できるため、夜間の下層雲量の算出精度は向上すると考えている。

参考文献

- Aso, T., K. Oosawa and Y. Takeuchi, 1988 : Latitudinal and seasonal variation of the cloud characteristic parameters and their effects on the cloud classification, Meteorological Satellite Center Technical Note, No. 16, 9-20.
- Kneizys, F. X., E. P. Shettle, L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Galley, J. E. A. Selby and S. A. Clough, 1988 : Users Guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177.
- Tokuno, M., 1997 : Development of new products for MTSAT, 1997 Meteorological Satellite Data Users' Conference, 423-430.
- Tokuno, M., 1999 : Satellite Cloud Grid Information Data, The 1999 EUMETSAT Meteorological Data User's Conference, 449-456.
- 伊達哲弘、1996 : 雲量・対流雲量、気象衛星センター技術報告特別号、77-81.
- 徳野正己、土屋清、1990 : MOS-1/VTIR水蒸気チャンネルと赤外チャンネルによる半透明の巻雲の高度推定、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 10、No. 2、25-39.
- 徳野正己、隈部良司、1996 : 雲解析情報図、気象衛星センター技術報告特別号、119-138.
- 村上正隆、星本みずほ、折笠成宏、山田芳則、水野量、徳野正己、添田耕一、梶川正弘、池田明弘、五井稔、

2001：冬期越後山脈にかかるシーダビリティの高い雪雲の出現頻度—衛星赤外チャンネルデータとマイクロ波放射計データを用いた統計評価、天気、Vol. 48、No. 8、547—559.

山田真吾、1999：天気ガイダンスへの利用に向けての雲量格子点データの特性調査、平成11年度量的予報研

修テキスト、73—79.

山田真吾、2000：雲量格子点データの天気ガイダンスへの利用に向けて、平成12年度量的予報研修テキスト、79—82.

気象衛星センター、2001「雲量格子点情報」の解説、1—37.