

静止気象衛星データを用いた
海面水温算出方法の改良

安田 宏明*, 白川 嘉茂*

Improvement of the Derivation Method
of Sea Surface Temperature
from GMS-5 Data

Hiroaki Yasuda* , Yoshishige Shirakawa*

Abstract

In Meteorological Satellite Center, the sea surface temperature (SST) is derived for the area from 60 degrees North to 60 degrees South and from 80 degrees East to 160 degrees West with the spatial resolution of 0.25 degrees latitude by 0.25 degrees longitude for every 3 hours by using the observation data of GMS.

Since the start of the operation of GMS-5 in June 1995, SST has been derived by using the Multi-Channel Sea Surface Temperature (MCSST) retrieval algorithm which was originally developed by NOAA/NESDIS and adapted for GMS-5 sensors.

We made some modifications in the algorithm, and the new algorithm has been used for the SST derivation since August 1997. The points of modification are as follows.

- 1) The cloud screening in the new algorithm is carried out by using both the multi-channel method and the histogram method.
- 2) SST calculated from NLSST (Non-Linear SST) retrieval equation, which was developed by NOAA/NESDIS, is used in the quality check.
- 3) In addition to the climate SST data, the objective analysis data of the satellite derived SST and those of the daily SST [produced by Climate and Marine Department of JMA] are available for the quality check.

The accuracy of the SST derived from the new algorithm has improved about 0.3K in RMS (root mean square difference from the in situ ocean buoy data), compared with that from the former algorithm.

*気象衛星センター システム管理課
(1998年11月11日受領、1999年1月7日受理)

要 旨

気象衛星センターでは、GMSのデータを用いて、北緯60度から南緯60度、東経80度から西経160度の範囲の海面水温を、緯度経度0.25度×0.25度の格子点で3時間毎に算出している。

1995年6月のGMS-5の運用開始以来、海面水温の算出にはNOAA/NESDISで開発された、MCSST(Multi-Channel Sea Surface Temperature retrieval algorithm)法をGMS-5に適合するように改造したアルゴリズムを用いている。

1997年8月から、それまでのアルゴリズムにさらに改造を加えたアルゴリズムを作成し、海面水温を算出している。主な改造点は、晴天判別をマルチチャンネル法とヒストグラム法を融合させた方法にしたこと、NOAA/NESDISで開発されたNLSSTで算出した海面水温をデータの品質管理に用いていること、データの品質管理に気候値だけではなく、GMS海面水温場や日別海面水温解析値〔気象庁気候・海洋気象部作成〕といった、より海面水温の実況に近いと考えられる水温値も使用できるようにしたこと、などである。

この改造により、現場観測の海洋ブイデータと比較したRMSで、0.3K程度の改善が見られた。

1. はじめに

気象衛星による海面水温の観測は、船舶や海洋ブイ等による観測に比べ、より広範囲を短時間で行うことができる、という特徴がある。気象衛星センターでは、静止気象衛星(GMS)の観測データを用いて、北緯60度から南緯60度、東経80度から西経160度の範囲の海面水温を、緯度経度0.25度×0.25度の分解能で3時間毎に算出している(注)。算出した海面水温は、気象衛星センターで磁気媒体に保存するとともに、気象庁気候・海洋気象部へ配信している。海面水温を観測する場合、観測しようとする海表面と衛星の間にある大気の状態を何らかの方法で把握する必要がある。海面水温の観測に用いる赤外の波長帯は、大気の窓と呼ばれる、他の波長帯に比べ大気による減衰の少ない帯域を選んではあるが、それでも大気中の水蒸気等による減衰は避けられない。このため、そのまま海面水温を求めると、低目に算出してしまう。そこで、大気による減衰量を何らかの方法で見積もり、観測された温度を補正(大気補正)する必要がある。

GMS-1からGMS-4までは単一の波長帯の赤外センサーのみが搭載されていた。このため、大気の状態を把握する際、気候値や数値予報データ等の衛星以外で観測・作成されたデータを用いて大気補正を行う必要

があり、誤差原因の一つとなっていた。一方、1995年6月に運用が開始されたGMS-5には、スプリットウィンドウチャンネルと呼ばれる10.5~12.5 μ mの波長帯を分割し2つのセンサーで観測できる測器が搭載された。スプリットウィンドウチャンネルデータを用いると、2つに分割した波長帯それぞれで大気に対する応答に違いがあるため、両者の差から、大気による減衰量を推定することができる。この方法は、衛星の観測経路上の大気の状態を直接把握することができるという特長がある。

気象衛星センターでは、GMS-5の運用開始に合わせて、海面水温の算出方式をMCSST(Multi-Channel Sea Surface Temperature)に改めた。MCSSTは、NOAA/NESDISのMcCLAIN(1985,1990)らにより晴天判別アルゴリズムとともに開発された、スプリットウィンドウチャンネルデータを用いて、高い精度で海面水温を求めるアルゴリズムである。気象衛星センターでは、このアルゴリズムをGMSに適合するように改造し使用してきた[白川,1996]。MCSSTを用いた海面水温算出の精度は、海洋ブイと比較したRMS(Root Mean Square)誤差で1.5K程度の値が得られるようになった。

一方、1997年8月より、GMS-5の運用開始以来用いていた算出方法に改良を加えたアルゴリズムを開発し、海面水温を算出している。新しいアルゴリズムで算出

した海面水温の精度は、海洋ブイと比較した RMS誤差で1.2K程度であり、約0.3Kの改善が得られている。

ここでは、気象衛星センターでの静止気象衛星データを用いた海面水温算出方法の紹介を兼ねて、新旧の算出アルゴリズムについて報告する。

注) 気象衛星センターでは、極軌道衛星NOAAによる海面水温も算出している[白川,1994]

2. 海面水温算出方法

海面水温算出方法は、晴天判別・海面水温算出・品質チェック及び統計処理の3つのステップに分けることができる。

晴天判別は、観測対象の区域に雲が存在するかどうかを判別するために行われる。観測対象の区域に雲が存在すると、衛星では海面からの赤外放射と雲頂から

の赤外放射の両方を受けることになる。雲頂温度は一般に海面の温度に比べて低いため、雲頂からの赤外放射が混在すると実際より海面水温が低く推定されることになる。このため、雲の存在する区域は海面水温算出対象から除外している。晴天判別をいかに正確に行うかによって、海面水温算出の精度は大きく左右される。

海面水温算出は以下に示すMCSST算出式で行っている。

$$SST = a \times T_{11} + b \times (T_{11} - T_{12}) + c \times (T_{11} - T_{12}) \times (\sec \theta - 1) + d \quad (2-1)$$

ここで、SST:求められる海面水温、a,b,c,d:重回帰係数(表1)、 T_{11} : 11 μ m帯(10.5-11.5 μ m)の赤外輝度温度、 T_{12} : 12 μ m帯(11.5-12.5 μ m)の赤外輝度温度、 θ :衛星天頂角である。

		a (a')	b (b')	c (c')	d (d')
旧プログラム	MCSST	0.970271	3.5326	1.6217	12.3688
新プログラム	MCSST	1.07177	2.31327	2.59312	-16.8281
	NLSST	0.99595	0.09593	2.31884	5.2156

表1 海面水温算出式の係数

右辺第2項は、スプリットウィンドウチャンネルの輝度温度差と大気による赤外線減衰量との間に相関があることを利用して減衰量を補正(大気補正)する項である。右辺第3項は、大気光路長差を補正する項である。重回帰係数a,b,c,dは、輝度温度 T_{11} 及び T_{12} 、衛星天頂角 θ を独立変数とし、海洋ブイで観測した海面水温を従属変数として重回帰分析により決定している。

算出した海面水温は気候値などと比較され、品質チェックが行われる。品質チェックされた海面水温は、統計的に処理され、空間的・時間的に平均されたデータが算出される。次章以降で、各ステップ毎に新旧

のアルゴリズムを比較する。なお、この報告では、1995年6月から1997年7月まで用いたアルゴリズムを”旧プログラム”、1997年8月以降用いているアルゴリズムを”新プログラム”と呼ぶことにする。

3. 晴天判別

新旧プログラム共に、GMS-5に搭載されたスプリットウィンドウチャンネルデータを用いたマルチチャンネル法で晴天判別を行っている。マルチチャンネル法は、NOAA/NESDISのMcCLAIN(1985,1990)らによって開発されたアルゴリズムである。

新プログラムでは、マルチチャンネル法に加え、ヒ

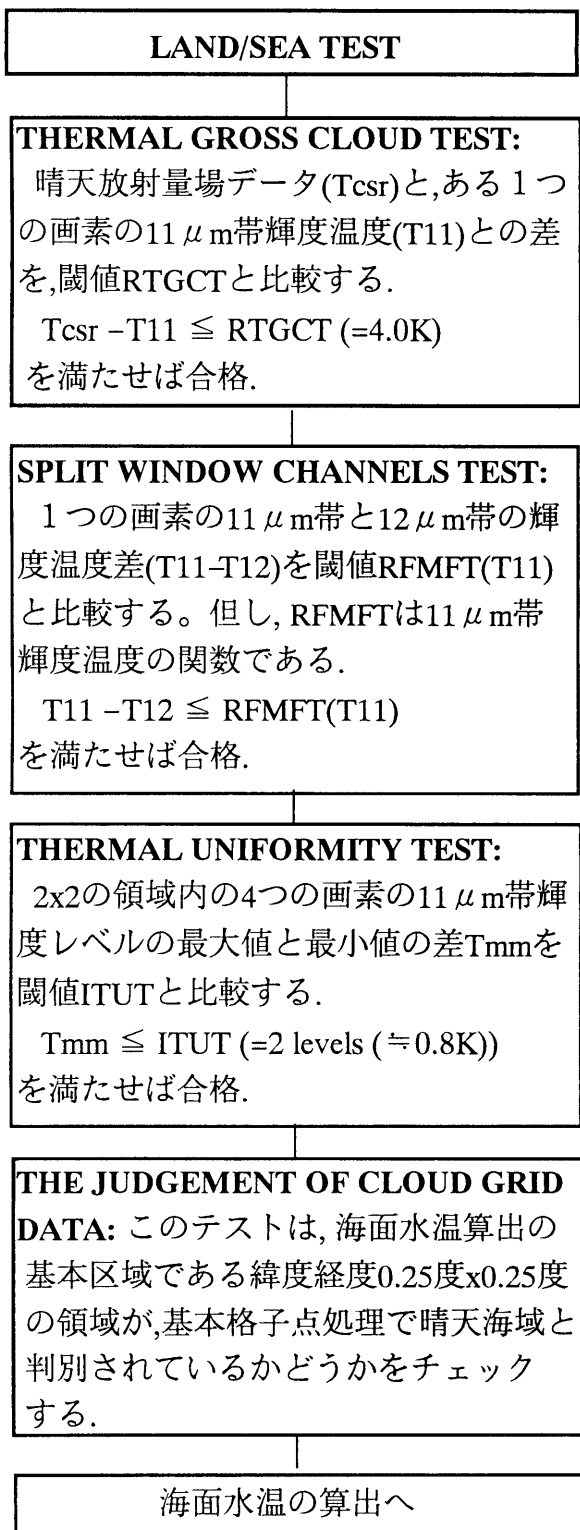


図1 旧プログラムの晴天判別
(マルチチャンネル法)

ストグラム法による晴天判別も行っている。ヒストグラム法は、GMS-4までの海面水温算出でも用いられていた方法で(阿部・山本,1979),新プログラムでは、2つの方法を融合したものとすることで、晴天判別精度の向上を計っている。

晴天判別の各判定で使用される閾値は、旧プログラムの場合、放射モデルLOWTRAN-7[Kneizys et al.,1988]で計算した値を用いている。一方、新プログラムでは、LOWTRAN-7で計算した値を基にしているが、実際の衛星データを用いて計算した結果と、海洋ブイによる現場観測データとの差が小さくなるように閾値の調節を行っている。

以下に、晴天判別法について、新旧のプログラムで使用されている方法を具体的に述べる。

(1)旧プログラムの晴天判別法

晴天判別は、衛星画像の1つの画素毎に行っている。図1に旧プログラムの晴天判別の流れ図を示し、以下に個々のステップについて説明する。

① LAND/SEA TESTは、衛星画像の対象とする画素の緯度経度を計算し、その画素内に陸地が存在するかどうかを地形データファイルと照合することにより行われる。このテストは、陸地の温度の日変化が、一般に海面のそれに比べて大きいことに起因する誤差を避けるために行っている。陸地の混在した画素では、その影響を受けて、輝度温度が昼間は高温側、夜間は低温側にずれる等の誤差を生じる可能性があり、海面水温の算出対象区域からは除外する必要がある。

② THERMAL GROSS CLOUD TESTは、晴天放射量場データの値と11μm帯の赤外輝度温度との差を、予め設定した閾値RTGCTと比較する。なお、晴天放射量場データは、基本格子点データ作成処理で作成されるデータである(付録参照)。海面水温は、通常、1日程度ではあまり大きな変化はしないことから、晴天放射量場データと赤外輝度温度とを比較して、その差が大きい場合は、雲が混在しているか、或いはノイズ

等による異常データであるとして、除外している。

③SPLIT WINDOW CHANNELS TESTは、 $11\mu\text{m}$ 帯($10.5\text{--}11.5\mu\text{m}$)と $12\mu\text{m}$ 帯($11.5\text{--}12.5\mu\text{m}$)の輝度温度差を閾値RFMFTと比較している。閾値RFMFTは、図2に示すように $11\mu\text{m}$ 帯の輝度温度に応じて変化する。このテストでは、薄い雲に覆われた区域では、 $11\mu\text{m}$ 帯と $12\mu\text{m}$ 帯の輝度温度差が大きくなることに着目し、それを検出することを目的としている。

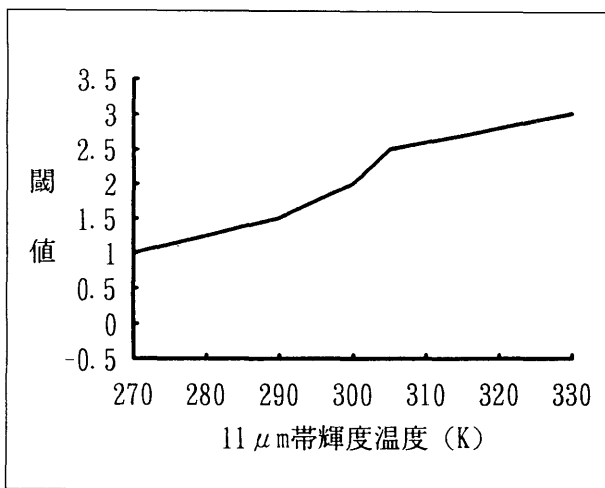


図2 旧プログラムのSPLIT WINDOW CHANNELS TESTの閾値

④THERMAL UNIFORMITY TESTは、 $11\mu\text{m}$ 帯赤外画像の 2×2 の4つの画素間の輝度温度差の最大値が、予め設定した閾値以下になることを条件としている。このテストは、雲が混在している海域では、隣接する画素間の一様性が小さくなり、晴天海域では、一様性が大きくなることに着目している。

⑤これらの晴天判別テストの全てに合格した画素のみを用いて、海面水温の算出単位である緯度経度 $0.25\text{度} \times 0.25\text{度}$ の区画毎に、 $11\mu\text{m}$ 帯と $12\mu\text{m}$ 帯の輝度レベルのヒストグラムを作成する。このヒストグラムは、 $0.25\text{度} \times 0.25\text{度}$ の区画が基本格子点データ作成処理で晴天海域（付録参照）と判定されている場合のみ、次の海面水温算出のためのデータとして使われる。

(2)新プログラムの晴天判別法

新プログラムの晴天判別法を図3に示し、各判別について説明する。

①LAND/SEA TESTは、旧プログラムと同一の処理を行っている。

②REFLECTIVE GROSS CLOUD TESTは、可視画像($0.55\text{--}0.90\mu\text{m}$)の 4×4 の16画素の中の最大の反射量と、予め設定した閾値を比較することにより行われる。このテストは、可視データの有効な日中についてのみ行われ、一般に雲からの可視反射量に比べ、海面からの可視反射量が小さいことに着目している。

このテスト及び、次のテストで用いている可視画像の 4×4 の画素区域は、ちょうど、赤外画像の1画素の大きさに対応し、これらのテストで不合格と判定された場合は、対応する赤外画像の1画素を海面水温の算出対象から除外している。

③REFLECTIVE UNIFORMITY TESTは、可視画像の 4×4 の16画素の中から、最大の反射量と最小の反射量を持つ画素を抽出し、その差と予め設定した閾値を比較することにより行われる。反射量の最大値と最小値の差は、その区域の反射量の一様性に対応している。このテストは、可視データの有効な日中についてのみ行われ、晴天の海域では反射量の空間的な一様性が大きくなり、雲の混在する海域では、一様性が小さくなることに着目している。

④THERMAL GROSS CLOUD TEST Iは、 $11\mu\text{m}$ 帯赤外画像の1つの画素の輝度温度が、予め設定した閾値の範囲内に入るかどうかを判定している。このテストは、海面水温は通常、 0℃ 以上であり、また高温側にもある限界がある（例えば 40℃ 以上にはならない等）ことに着目している。なお、閾値は大気による減衰量を考慮し、低目の値に設定している。

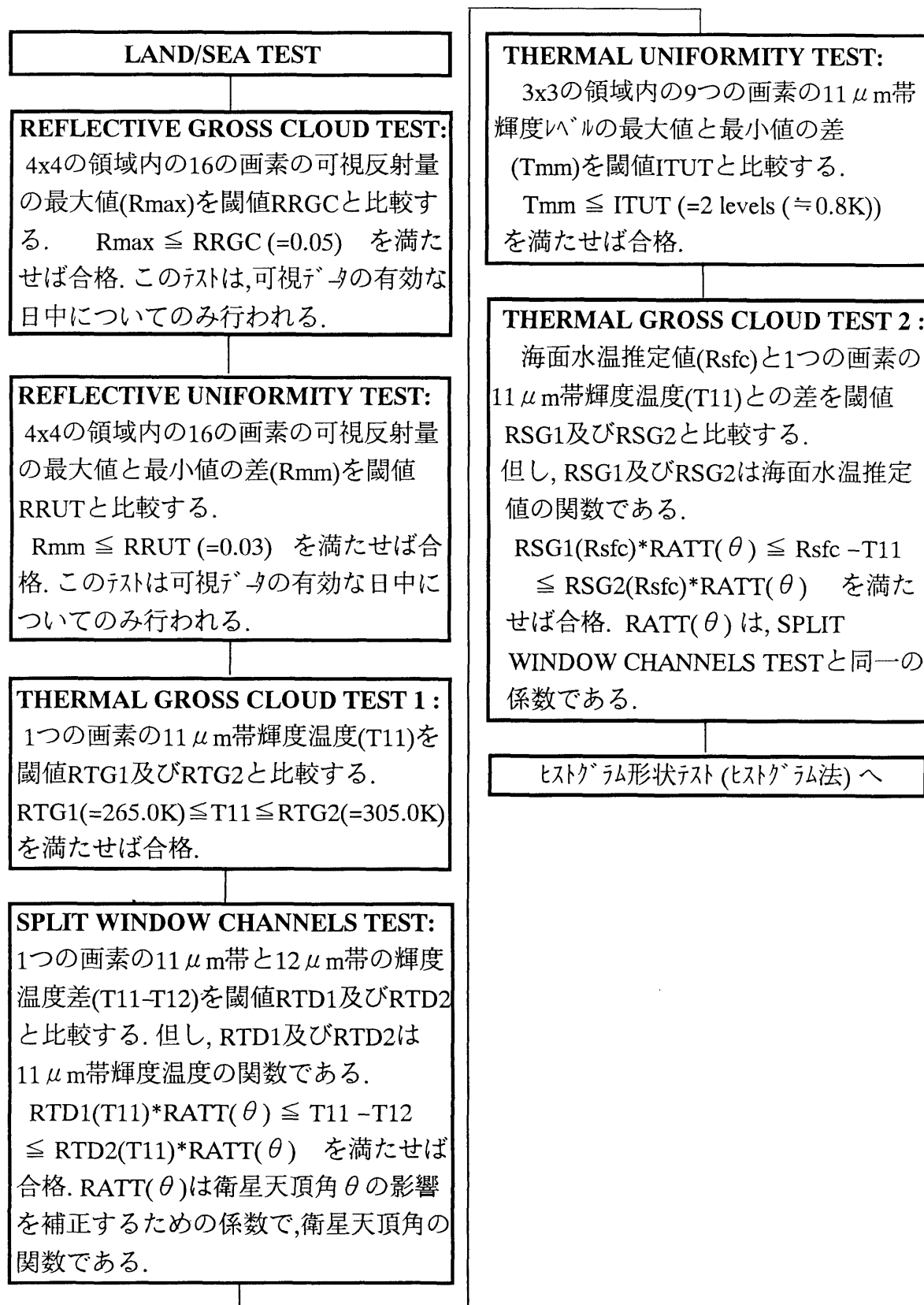


図3 新プログラムの晴天判別
(マルチチャンネル法)

⑤SPLIT WINDOW CHANNELS TESTは、 $11\mu\text{m}$ 帯と $12\mu\text{m}$ 帯の輝度温度差が、予め設定した閾値の範囲内に入るかどうかを判定している。閾値は図4に示すように、 $11\mu\text{m}$ 帯の輝度温度に対応して変化する。

なお、スプリットウィンドウチャンネル輝度温度差は、衛星天頂角によって定まる大気光路長に依存して変化する。この影響を考慮し、図5に示す係数で閾値を補正している。

新旧プログラムのSPLIT WINDOW CHANNELS TESTの閾値を比較すると、 $300\text{K}\sim 305\text{K}$ 付近で、新プログラムの閾値（図4）のほうが旧プログラムの閾

値（図2）に比べて、約 0.5K 大きな値に設定されている。これは、新プログラムの閾値決定の際、旧プログラムの場合よりも多くのデータを解析した結果、旧プログラムで雲の混在域と判定していた部分も晴天域であることがわかったのと、新プログラムでは、ヒストグラム法（後述）も晴天判別に加えているため、SPLIT WINDOW CHANNELS TESTの閾値を緩めても精度は低下しないことがわかったためである。

また、旧プログラムの閾値は上限のみであったが、新プログラムでは上限と下限を設定している。

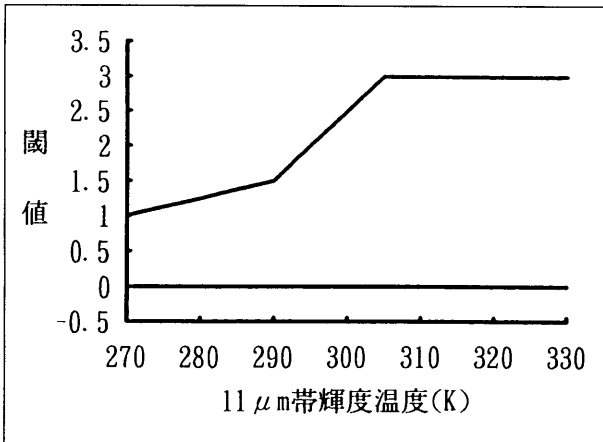


図4 新プログラムのSPLIT WINDOW CHANNELS TESTの閾値

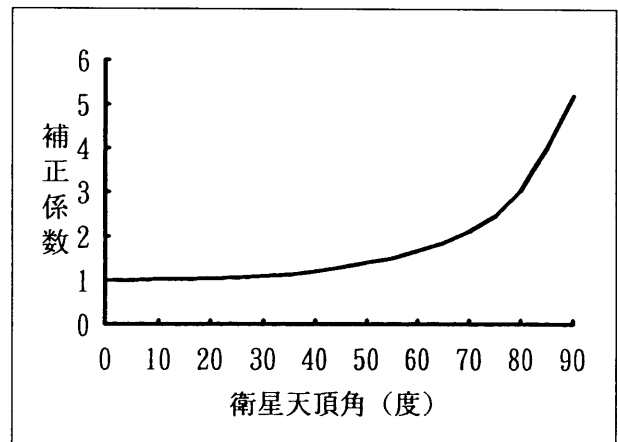


図5 衛星天頂角の影響の補正係数

⑥THERMAL UNIFORMITY TESTは、着目する $11\mu\text{m}$ 帯赤外画像の1つの画素と、それを取り囲む8つの画素との間の輝度温度差を求め、その最大値と最小値の差を予め設定した閾値と比較することにより行っている。このテストで、値が閾値を越えた場合、除外されるのは着目していた中央の1つの画素のみである。

⑦THERMAL GROSS CLOUD TEST 2は、海面水温の推定値（後述）と $11\mu\text{m}$ 帯赤外画像の1つの画素の輝度温度との差が、予め設定した閾値の範囲内に入るかどうかを判定している。ここで用いる閾値は、図6に示すように、海面水温の推定値に応じて変化する。

なお、海面水温の推定値と輝度温度との差は、衛星天頂角によって定まる大気光路長に依存して変化する。

このため、⑤のSPLIT-WINDOW CHANNELS TESTでも用いた、衛星天頂角に応じて変化する係数（図5）で閾値を補正している。

海面水温の推定値は、

- 1)GMS海面水温場
- 2)日別海面水温解析値（気象庁気候・海洋気象部海洋課作成）[吉田,1996]
- 3)気候値

の3つのデータの内、予め設定した優先順位で選択したデータである（現在は、1:日別海面水温解析値、2:気候値の優先順位で、GMS海面水温場は使用していない）。

なお、GMS海面水温場は、3時間毎に算出したGMS海面水温を晴天放射量場と同じ手法で客観解析した

データ（付録参照）である。

気候値はReynolds(1982)のデータを用いている。

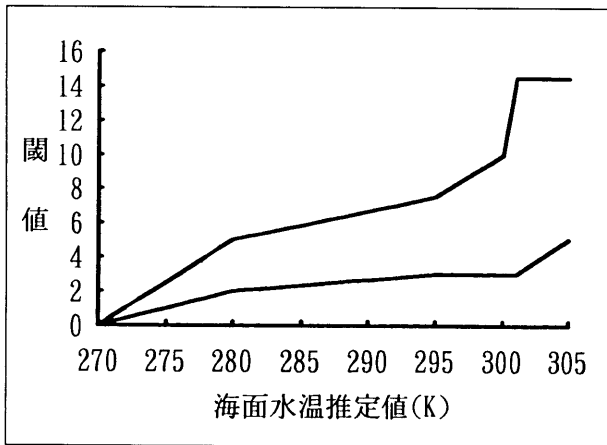


図6 新プログラムのTHERMAL GROSS CLOUD TEST 2の閾値

⑧ヒストグラム統計値によるテスト(ヒストグラム法)

これまでの晴天判別の全てに合格した画素のみを使って、海面水温算出の単位区画である緯度経度0.25度×0.25度の領域毎に赤外輝度レベルのヒストグラムを作成し、図7に示す判別を行っている。なお、これらのテストでは、11μm帯の赤外データから作成したヒストグラムを使用する。

赤外ヒストグラムによる判別は、次に示す特性を利用して行っている。

ある海域の赤外データのヒストグラムを作成した場合、その海域が完全に晴れているか、雲が混在しているかによってその形状が異なる。一般に、晴れている海域では、ある輝度温度にピークを持つ非常にシャープな、正規分布に近い形状となる。このため、そのヒストグラムは、ピークの度数が大きく、分散が小さな、ほぼ対称な形状になるという特徴がある(図8)。一方、雲が混在した海域では、晴天海面からの放射に対応する高温側の正規分布に近い部分に、雲頂からの放射に対応するなだらかな低温の部分が付加した形状となる。このため、(高温側の晴天域に対応する)ピークの度数は小さく、分散の大きな、低温側に広がった非対称な形状になるという特徴がある(図9)。

図7に示したテストにおいて、MODE PERCENT TESTは、雲の混在した区画のヒストグラムでは、晴

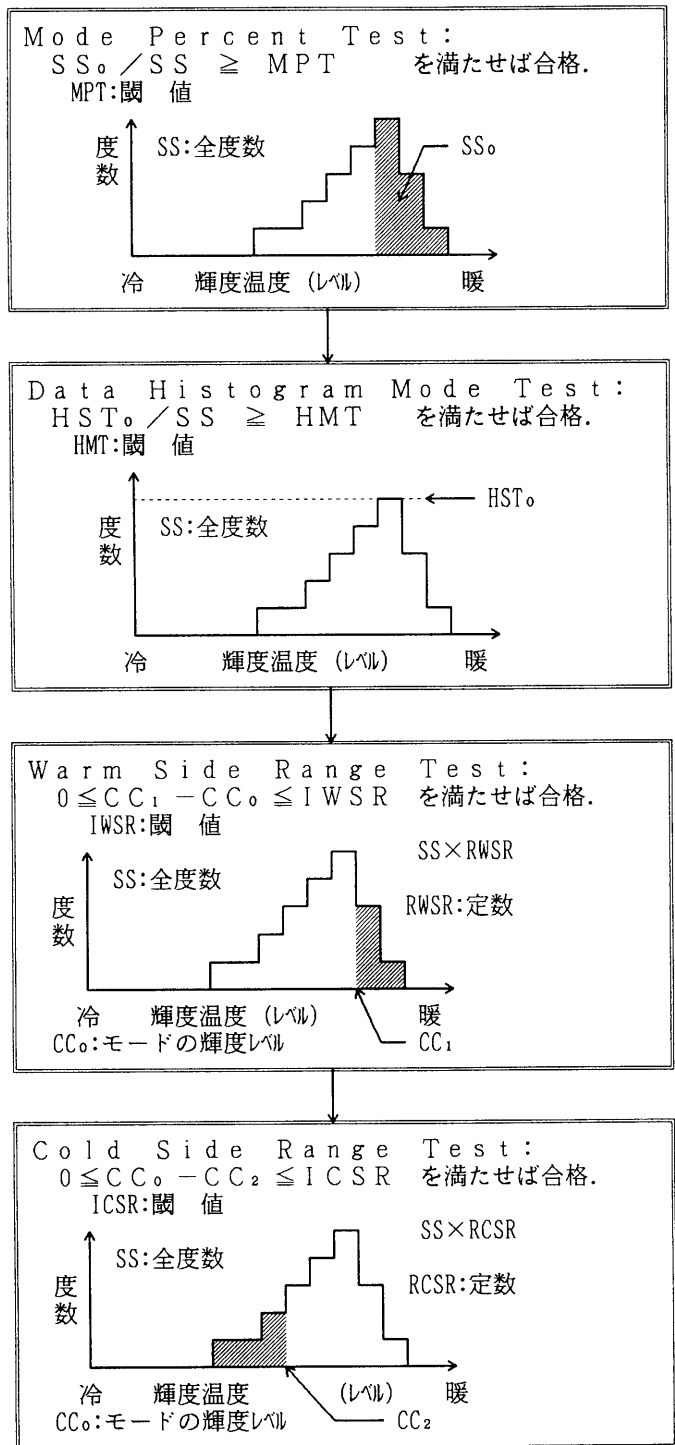


図7 新プログラムの晴天判別 (ヒストグラム法)

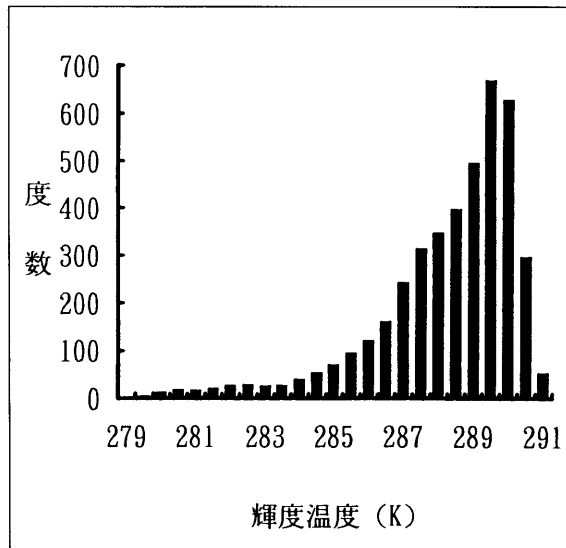


図8 晴天域のヒストグラムの形状例

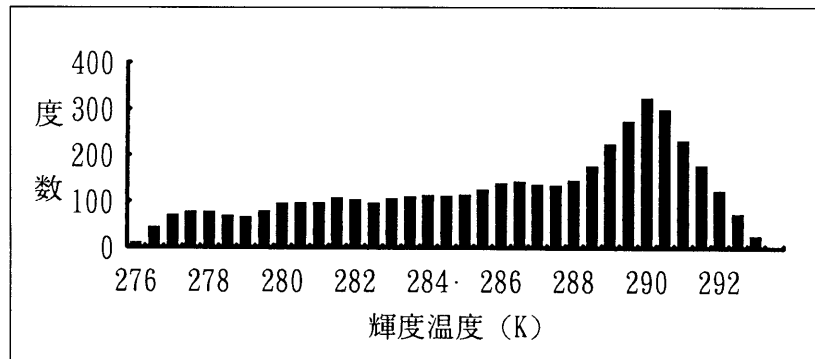


図9 雲の混在した区域のヒストグラムの形状例

天域の区画に比べ低温側の度数が相対的に多くなることに着目しており、モードより高温側の輝度レベルの度数の全体に占める割合が、予め設定した閾値より大きいかどうかを調べている。

DATA HISTOGRAM MODE TESTは、晴天区画のヒストグラムでは、雲の混在した区画に比べ、ピークに度数の集中した非常にシャープな形状になることに着目しており、モードの度数の、全体に占める割合が予め設定した閾値より大きくなるかどうかを調べている。

WARM SIDE RANGE TEST及びCOLD SIDE RANGE TESTは、晴天区画のヒストグラムが分散の小さな、ほぼ対称な形状を持つことに着目している。WARM

SIDE RANGE TESTでは、それより高温側にある度数の和と全度数の比が、予め設定した閾値に達するような輝度レベルを求める。一方、COLD SIDE RANGE TESTでは、それより低温側にある度数の和と全度数の比が、予め設定した閾値に達するような輝度レベルを求める。そして、これらの輝度レベルとモードの輝度レベルの差が、予め設定した閾値以内に入るかどうかを調べることで、分散の小ささを判定している。また、高温側及び低温側で、同じ閾値とすることで対称な形状を持つかどうか調べている。

4. 海面水温の算出

(1)旧プログラムの海面水温算出

晴天判別で晴れと判定された画素のみを使って作成されたヒストグラムデータから海面水温を算出する。赤外11 μm 帯と赤外12 μm 帯各々について作成したヒストグラムから、以下の式により平均輝度温度を算出する。

$$T_{\text{MEAN}} = \sum T_i h_i / \sum h_i \quad (4-1)$$

但し、 i は輝度レベル、 h_i は輝度レベル i の画素の度数、 T_i は輝度レベル i に対応する輝度温度である。

次に、求めた11 μm 帯及び12 μm 帯の平均輝度温度を(2-1)式へ代入し、海面水温を算出する。

(2)新プログラムの海面水温算出

新プログラムでは、晴天判別で晴天と判定された画素のみの赤外輝度温度を海面水温算出式へ代入して水温を算出している。新プログラムでは、海面水温算出式として(2-1)式の他に、以下の2つの式も用いている。

$$\begin{aligned} S S T_2 = & a' \times T_{11} + b' \times (T_{11} - T_{12}) \times RSFC \\ & + c' \times (T_{11} - T_{12})(\sec \theta - 1) + d' \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} S S T_3 = & a' \times T_{11} + b' \times (T_{11} - T_{12}) \times S S T_1 \\ & + c' \times (T_{11} - T_{12})(\sec \theta - 1) + d' \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここで、 T_{11} は赤外11 μm 帯の輝度温度、 T_{12} は赤外12 μm 帯の輝度温度、 θ は衛星天頂角である。 a', b', c', d' は重回帰係数で(4-2)式、(4-3)式とも同じ値を用いている(表1)。また、RSFCは海面水温の推定値(3章2-⑦参照)である。 $S S T_1$ は、(2-1)式で算出された海面水温である。

(4-2)式及び(4-3)式はNLSST(Non-Linear Sea Surface Temperature)算出式と呼ばれ、NOAA/NESDISで開発された。NLSSTは、MCSSTの大気補正項(右辺第2項)に海面水温の推定値を掛けることで、大気補正量に弱い温度依存性を持たせた式となっている。大気補正量は、主に大気中の水蒸気量に依存して変動する。大気中の水蒸気量の多い高水温域では大きな補

正量となり、水蒸気量の少ない低水温域では小さな補正量となるなど、一般に温度依存性がある。NLSSTではこの効果を取り入れて、精度を向上させることを目的としている。

5. データの品質チェック及び統計処理

新旧プログラムとも、得られた海面水温に対し、気候値や推定値との比較による品質チェックを行っている。気候値等との温度差が、ある閾値を超えた場合は、品質不良データとして、棄却している。

(1)旧プログラムの品質チェック

旧プログラムでは、1段階の品質チェックを行っている。得られた海面水温と気候値との差の絶対値が予め設定した閾値を超える場合は、その海面水温を品質不良として棄却する。気候値には、Reynolds(1982)のデータを用いている。

気候値データは、緯度経度1度 \times 1度格子毎の月平均値である。海面水温は、0.25度 \times 0.25度毎に算出されるので、1度 \times 1度の気候値は中に含まれる16個の海面水温と比較される。また、気候値が月毎に求められているので、海面水温が月の中旬のデータの場合は、その月の気候値を使用するが、上旬及び下旬の場合は、各々前月及び後月の値との平均値を求め比較に用いている。

(2)新プログラムの品質チェック

新プログラムでは、2段階の品質チェックを行っている。第1段階では、4章の(2)で述べた3種類の海面水温算出式を用いて晴天と判別された画素毎に求めた、3つの海面水温の中の最大値と最小値の差が、予め設定した閾値以内に入るかどうかをチェックしている。このテストは、もし晴天判別が完全に行われているならば、3種の方法で算出した海面水温は、互いにきわめて近い値をとるであろうとの考えに基づいて行っている。この品質チェックに合格した晴天の画素毎の海面水温(現在は、(2-1)式のMCSSTにより算出した海面水温値を採用している)を、緯度経度0.25度 \times 0.25

度の単位区画毎に平均し、平均値をその区画の海面水温としている。

第2段階では、単位区画毎に平均した海面水温と、海面水温推定値（3章2-⑦参照）との差が、予め設定した閾値以内に入るかどうかをチェックしている。新プログラムでは、海面水温推定値として気候値以外に日別海面水温解析値やGMS海面水温場も品質チェックに使用できる。後者2つのデータは、気候値に比べ、より現実の海面水温に近いと考えられることから、品質チェックの精度向上には有効であると思われる。

なお、現在は使用していないが、新プログラムは、緯度経度0.25度×0.25度の単位区画で、晴天判別を通過した画素数と、区画内の全画素数の比を、予め設定した閾値と比較する品質チェック機能も持っている。

(3)統計処理

品質チェックの終了したデータは、GMS海面水温の元データとして磁気媒体に保存するとともに、時間的・空間的な統計処理が施される。この統計処理については、新旧プログラムで変更はない。[白川,1996]

6. 新旧プログラムで算出した海面水温の精度

衛星で算出した海面水温の精度を把握するため、現場観測データとの比較を毎月行っている。現場観測データとしては、比較的データの信頼性の高い、海洋ブイの観測データを用いている。

新旧プログラムで算出した海面水温と、海洋ブイの現場観測値の1ヶ月分のデータを比較した散布図を図10及び図11に示す。旧プログラムに比べて新プログラムでは、分布がより狭い範囲に集中しており精度が向上していることがわかる。

また、図12に、衛星で観測した海面水温と海洋ブイの現場観測値との差から1ヶ月毎に求めたBIASとRMSの1年間の変化を示す。ここでBIASは、衛星海面水温と海洋ブイの観測値との差の平均値であり、RMSは、衛星海面水温と海洋ブイの観測値との差の2乗平均の平方根である。また、比較に用いた海洋ブイ

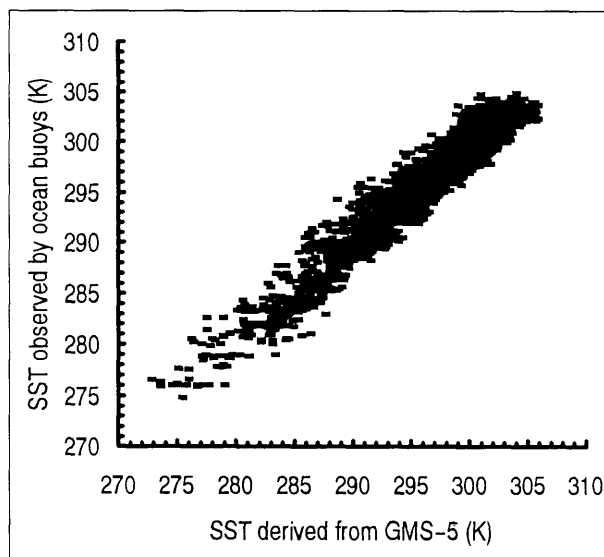


図10 旧プログラムで算出した海面水温と海洋ブイの観測データを比較した散布図 (1997年3月,データ数:4405)

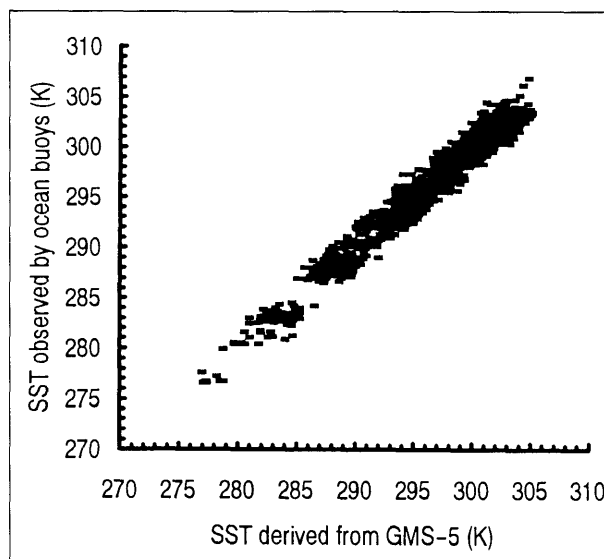


図11 新プログラムで算出した海面水温と海洋ブイの観測データを比較した散布図 (1998年3月,データ数:3077)

の個数は、約170個であり、太平洋北部とオーストラリア北部海域を除いた太平洋及びインド洋のほぼ全域に分布している。

RMS及びBIASを計算する際に用いた月毎のサンプル数は、旧プログラムのデータでは約4970、新プログラムのデータでは約3750である。

RMSでは、年間を通じて新プログラムの方が旧プログラムに比べて、0.2Kから0.4K程度小さくなっており、

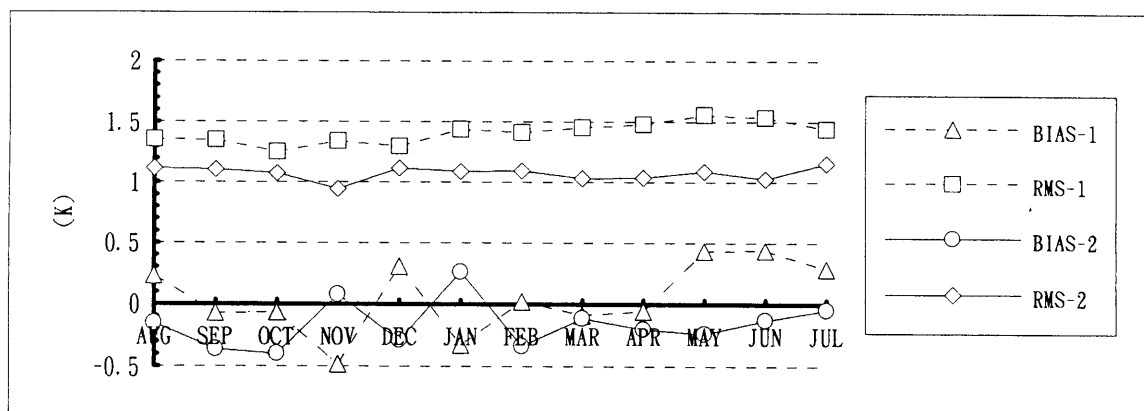


図12 BIASとRMSの年変化

BIAS-1とRMS-1は旧プログラムによる1996年8月から1997年7月までのデータ

BIAS-2とRMS-2は新プログラムによる1997年8月から1998年7月までのデータ

精度が改善されていることが分かる。

一方、BIASについては、冬季では両者ともに±0.4K程度の間を変動しており、冬季以外の季節では、旧プログラムが正のBIASになる傾向があり、新プログラムが負のBIASになる傾向がある。

7. おわりに

これまで、GMS海面水温格子点値算出プログラムの新旧の方法について述べてきた。

新プログラムで精度が向上した理由として、

- ①晴天判別の段階数を増やすとともに、マルチチャンネル法とヒストグラム法を組み合わせたものにする事で、2つの方法の特徴をいかせるようにしたこと。
- ②晴天判別の閾値として、旧プログラムでは放射モデルLOWTRAN-7で算出した値をそのまま用いていたが、新プログラムでは、LOWTRAN-7で算出した値を基にして、実データで計算した結果を海洋ブイによる現場観測データと比較しながら、閾値を調整したこと。
- ③旧プログラムでは、MCSST算出式のみを用いて海面水温を算出していたが、新プログラムでは、MCSST算出式を用いて算出した値に対して、NLSST算出式を用いて算出した値による品質チェックをかけることで精度の向上を計ったこと。
- ④算出データの品質チェックにおいて、旧プログラム

では気候値との比較のみを行っていたが、新プログラムでは、気候値より実況に近いと考えられる日別海面水温解析値を比較に用いていること。

などの点が挙げられる。

以上、新プログラムで精度が向上した理由と考えられる、新旧プログラムでの変更点を列挙した。今後、これらの変更点について、さらに定量的な評価を行うことにより、晴天判別等のアルゴリズムの効率化や精度の向上につなげて行きたい。

1999年には次期衛星であるMTSAT(運輸多目的衛星)が打ち上げられる予定である。

MTSATでは、赤外系データの10ビット化・3.7μm帯赤外チャンネルの搭載等、海面水温算出精度の向上にとっても有効と思われる改善がはかられる。

この内、赤外系データの10ビット化では、GMS-5の8ビットデータの温度分解能が約0.4Kであったのに対し、MTSATでは約0.1Kと4倍の分解能が得られる。海面水温の誤差の原因の1つとして、輝度温度の誤差が海面水温算出式の係数の大きさに応じて増幅されて算出した温度に反映する、ということが挙げられる[Barton,1995]。このため、輝度温度の分解能が向上すれば、算出される海面水温の精度向上が期待できる。

また、 $3.7\mu\text{m}$ 帯赤外チャンネルは、大気中の水蒸気から受ける影響が $11\mu\text{m}$ 帯チャンネルに比べて小さく、海面水温算出精度の向上が期待できる。さらに、 $3.7\mu\text{m}$ 帯チャンネルは、夜間の下層層状雲の検出に有効であることから、夜間の晴天判別の精度向上が期待できる。

付録 基本格子点データについて

基本格子点データは、GMSによって観測された画像を処理して得られた解析結果を集約したデータベースである。

旧プログラムでは、2ヶ所で基本格子点データ処理で作成されたデータを使用している。1ヶ所目は、晴天判別のGross Cloud Testの閾値を決定するために基本格子点データの晴天放射量場データを使用している部分である。2ヶ所目は、緯度経度 $0.25\text{度}\times 0.25\text{度}$ の単位区画で海面水温を算出する際に、基本格子点データで該当区画が「晴天海域」と判定されているかどうかを確認している部分である（基本格子点データは、海面水温と同一範囲・同一分解能で作成されており、単位区画は一致する）。ここでは、基本格子点データ作成処理の内、晴天海域を抽出する方法及び晴天放射量場データの算出方法について簡単に説明する。なお、基本格子点データ作成処理の詳細については、佐々木(1989)を参照されたい。

1. 晴天海域の抽出方法

晴天海域の抽出は、緯度経度 $0.25\text{度}\times 0.25\text{度}$ の単位区画毎に可視と赤外 $11\mu\text{m}$ 帯のヒストグラムを作成し行っている。

(1) データの有効性のチェック

晴天海域を抽出する前段階として、以下に示すようなデータの有効性のチェックを行う。

①海／陸／海岸線のチェック

予め用意してある地表面状態の区分データを用いて、緯度経度 $0.25\text{度}\times 0.25\text{度}$ の区画が、海・陸・海岸線の

いずれに該当するかを判別し、その場所の地表面の特性を表す定数を入力する。

②ヒストグラムの有効性チェック

データの有効性をチェックし、有効な画素数と全てのデータが有効な場合に得られる全画素数との比が、予め設定した閾値より大きいかどうかを判定する。

③データのノイズチェック

可視反射量データでは最低レベルの、赤外輝度温度データでは最高レベルの画素数と全画素数の比が、各々予め設定した閾値よりも小さく、最低（高）レベルと最低（高）レベルの次に低い（高い）レベルとの差が、予め設定した閾値よりも大きい場合は、その最低（高）レベルのデータは、伝送時のノイズ等によるエラーデータとして除外する。

④可視データの使用チェック

緯度経度 $0.25\text{度}\times 0.25\text{度}$ の単位区画毎に、昼夜の判別及びサンプリング領域であるかどうかを判定し、以後のテストで可視データを使うか、赤外データのみで行うかを判断している。

(2) 可視・赤外データのテスト

前項で有効と判断され、作成された可視及び赤外ヒストグラムに対し、以下に示すテストを行う。

①可視閾値テスト

可視ヒストグラムの低反射量側から、予め設定した割合の度数を抽出し、その平均反射量と前日の晴天放射量場（晴天反射量）の差の絶対値が予め設定した閾値より小さくなるかどうかを調べる。（合格： $J_1=1$ 、不合格： $J_1=9$ とする）

②赤外ヒストグラム形状テスト

赤外ヒストグラムの最高輝度温度に対応する輝度レベルから、低温側に予め設定したレベル幅内にある度数の合計と全度数の比が、予め設定した閾値より大きいかどうかを調べる。（合格： $J_2=1$ 、不合格： $J_2=9$ とする）

③赤外閾値テスト I

赤外ヒストグラムの高温側から、予め設定した割合の度数を抽出し、その平均輝度温度と、前日の晴天放

射量場（晴天輝度温度）との差が予め設定した閾値の範囲内に入るかどうかを調べる。（合格： $J_3=1$ ，不合格： $J_3=9$ とする）

④赤外閾値テスト2

③と同一のテストであるが、閾値に予め設定した定数を掛けて範囲を変えて行う。

（合格： $J_4=2$ ，不合格： $J_4=8$ とする）

(3) 総合判定

前項のテストで得られた結果をもとに、天候の判定を行う。

①可視画像データが使用できる場合（昼間など）

(2)の判定結果で、 $J_1=J_2=J_3=1$ の場合及び、 $J_1=1$ かつ $J_2=9$ でも $J_3=1$ と判定されていれば、晴天海域とする。

また、 $J_1=J_2=1$ でも、 $J_3=9$ であった場合は、④の赤外閾値テスト2を行い、 $J_4=2$ と判定されれば晴天海域とする。

②可視画像データが使用できない場合（夜間など）

(2)の判定結果で、 $J_2=J_3=1$ であれば晴天海域とする。

2. 晴天放射量場（晴天輝度温度及び晴天反射量）

前述した晴天域判定処理で晴と判定された、緯度経度 0.25 度 \times 0.25 度毎の単位区画について、その区画内の赤外輝度温度の平均値及び可視反射量の平均値が算出され、客観解析用観測値ファイルへ観測時刻・緯度経度などとともに出力される。次に、客観解析用観測値の赤外輝度温度と可視反射量の各々について客観解析処理を行い、晴天放射量場データ（晴天輝度温度及び晴天反射量）を作成する。晴天放射量場は、3時間毎の8ファイルがあり、各々該当する時刻の客観解析用観測値から1日1回作成される。なお、晴天放射量場データは、客観解析用観測値と同一範囲・同一分解能で作成されており、それぞれの格子点は一致する。

客観解析処理は、当日得られた観測データと、前日作成された晴天放射量場データを基にして、当日の晴天放射量場データを算出することを目的としている。なお、客観解析は、赤外輝度温度、可視反射量ともに

同一の方法で行っている。

以下、客観解析処理について、簡単に説明する。以下の説明では、緯度経度 0.25 度 \times 0.25 度毎の単位区画をその中心の緯度経度で代表させ、格子点と呼ぶことにする。なお、客観解析処理についての詳細は、青木、中島[1983]を参照していただきたい。

①客観解析用観測値ファイルから、観測値の得られた格子点を抽出し、それに該当する晴天放射量場の格子点での推定値を算出する。推定値は、晴天放射量場の該当する格子点及びそれを取り囲む格子点（ 3×3 の格子点）の9つの値から、観測値の得られた格子点との間の距離の重みを考慮した荷重平均をとることにによって算出される。格子点値の空間的な平均を推定値とすることで、場の整合性を保てるようにしている。

②客観解析用観測値ファイルの観測値と、晴天放射量場データから①の方法で算出した推定値との差を補正量Aとする。次に、全ての観測値の得られた格子点に対して補正量Aを算出する。

③算出した全補正量Aを用いて、晴天放射量場ファイルの各格子点（観測値の得られなかった格子点に該当する格子点も含む）での補正量Bを、荷重平均をとることにより算出する。荷重平均の重み関数は、観測値の得られた格子点と補正量Bを求めようとする格子点との間の距離及び、観測時刻と各格子点の放射量場データの解析時刻との差の関数である。

ここで、放射量場データの解析時刻は、通常は1日前の同時刻である。しかし、補正量Bを求めようとする格子点及びその周辺で天候等の影響により、1日以上観測値が得られなかった場合、その格子点の解析時刻は、2日以上前の同時刻となる。時間差の重み関数は、観測時刻と解析時刻との差が大きいために、観測値の影響を小さくするために導入している。

④晴天放射量場の各格子点に対して求めた補正量Bと前日の晴天放射量場の値を加えることにより、当日の

晴天放射量場を算出する。

参考文献

Barton, I.J., 1995: Satellite-derived sea surface temperatures: Current status, *Journal of Geophysical Research*, Vol.100, No. C5, 8777-8790.

Kneizys, F.X., E.P. Shettle, L.W. Abreu, G.P. Anderson, J.H. Chetwynd, W.O. Gallery, J.E.A. Selby and S.A. Clough, 1988: Users guide to LOWTRAN 7. Technical Report AFGL-TR-88-0177, Optical/Infrared Technology Division (Hanscom: Air Force Geophysics Laboratory).

McClain, E.P., W.G. Pichel and C.C. Walton, 1985: Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures, *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, No. C6, 11587-11602.

McClain, E.P., C.C. Walton and L.L. Stowe, 1990: CLAVR cloud/clear algorithms and nonlinear atmospheric corrections for multi-channel sea surface temperatures, Preprint volume of the fifth conference on satellite meteorology and oceanography, September 3-7, 1990.

Reynolds, R.W., 1982: A monthly averaged climatology of sea surface temperature. NOAA Technical Report, NWS-31.

青木忠生, 中島 忍, 1983: 表面温度場の客観解析, 気象衛星センター技術報告特別号, TOVSデータ処理システムの解説, 105-110.

阿部勝宏, 山本孝二, 1979: 海面水温, 気象衛星センター技術報告特別号 (特別号 II-2), GMSシステム総合報告 II データ処理解説編 その2, 59-82.

佐々木秀行, 1989: 基本格子点データの作成, 気象衛星センター技術報告特別号(1989) II, GMSシステム更新総合報告(1989年版) II データ処理編, 123-139.

白川嘉茂, 1994: NOAA/AVHRRデータによる海面水温格子点値の作成, 気象衛星センター技術報告, 28, 43-49.

白川嘉茂, 1996: 海面水温, 気象衛星センター技術報告特別号(1996), GMS-5システムの更新, 95-101.

吉田 隆, 1996: 日本周辺海域の高分解能海面水温解析, 測候時報, 63, 287-302.