

GMS-5VISSRキャリブレーションの現状

栗原 茂久*、徳野 正己*

The Status of Calibration of VISSR on board GMS-5

Shigehisa Kurihara, Masami Tokuno

Abstract

GMS-5 acquires calibration data in orbit and the calibration table is made from the data in the ground station. The calibration table is delivered Medium-scale Data Utilization Station (MDUS) users with Stretched-VISSR (S-VISSR) and is used in Data Processing Center (DPC) for producing several satellite products. Thus the calibration data is indispensable to users for utilizing the S-VISSR data of GMS-5.

This paper describes the status of calibration of VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) on board GMS-5 and a matter to pay attention for using the calibration data on the following subject.

- Techniques for calibrating visible and infrared channels' data
- Correction of the calibration tables of infrared channels' data observed before
- The necessary care to be taken and problems encountered on applying infrared channels' calibration tables (including observations for satellite wind estimation) and S-VISSR fixed calibration tables operationally
- A doubt about the response function of the water vapor channel
- Long term trend of visible channel's data

要 旨

GMS-5は軌道上でキャリブレーションデータを取得し、地上で処理を行いキャリブレーションテーブルを作成している。作成されたキャリブレーションテーブルはDPCで利用されるほかストレッチドVISSR (S-VISSR) データに付加してユーザに配信されている。GMS-5のS-VISSRデータを利用する上でキャリブレーションデータは必要不可欠なデータである。

ここでは、以下のようなGMS-5のキャリブレーション処理状況と利用上の留意点について報告する。

- 可視及び赤外チャンネルキャリブレーションの方法
- 過去データの赤外チャンネルキャリブレーションテーブルの修正
- 赤外チャンネルキャリブレーションテーブル (風観測時も含む) 及びS-VISSR固定キャリブレーション

*気象衛星センター システム管理課

(1999年12月28日受領、2000年1月12日受理)

ンテーブルの運用上の問題点

- 水蒸気チャンネルの応答関数に対する疑問点
- 可視チャンネルデータの経年変化

1. はじめに

静止気象衛星「ひまわり5号」(以下GMS-5という)が1995年3月18日に打ち上げられ、同年6月から運用に利用されている。GMS-5に搭載されている可視赤外スピコン型放射計(VISSR)は表1に示すようにGMSからGMS-4までに搭載されていたものと比較して改良されている。主な改良点は、赤外スプリットチャンネル(赤外1及び赤外2チャンネル)や水蒸気チャンネル(赤外3チャンネル)の搭載である。その利点を生かして、スプリットウィンドウ法(McMillin et al., 1984)による海面水温算出精度の向上、赤外スプリットチャンネルの輝度温度差による火山灰検出(Potts, 1993, Tokuno, 1997)、水蒸気チャンネルの画像データ

を利用した大気の水蒸気量の情報及び水蒸気風の算出等(気象衛星センター技術報告特別号,1996)が可能となってきた。また、可視チャンネルの検出器は光電子増倍管(Photo Multiplier Tube (PMT))からより感度が安定なシリコン光ダイオード(Tsuchiya,1982)に変更となり、可視チャンネルデータを用いて算出される日射量の精度向上が期待されている。このようなプロダクトの精度を維持するためには、検出器で取得されたデータの較正処理(以下キャリブレーション処理という)が必要不可欠である。

ここでは、現在までに気象衛星センターで行われてきているGMS-5のキャリブレーション処理状況と利用上の留意点についてまとめたので報告する。

表1 GMS 1-4とGMS 5の検出器の特徴

赤外1及び赤外2の観測波長域は大気の窓領域を2分しているため赤外スプリットチャンネル、赤外3は水蒸気の吸収帯にあるので水蒸気チャンネルと呼ばれている。

	チャンネル	波長帯(μm)	解像度(km)*1	センサ素子
GMS1-4	可視	0.5-0.7	1.25	光電子増倍管 水銀カドミウムテル ル化合物(HgCdTe)
	赤外	10.5-12.5	5	
GMS5	可視	0.5-0.9	1.25	シリコン光 ダイオード
	赤外 1 (窓領域)	10.5-11.5	5	HgCdTe
	赤外 2 (窓領域)	11.5-12.5	5	HgCdTe
	赤外 3 { 水蒸気 吸収帯 }	6.5-7.3	5	HgCdTe

注 *1:衛星直下点での解像度である

2. VISSRキャリブレーションの概要

スピン型衛星であるGMS-5に搭載されているVISSRは、衛星の回転に伴って、北から南へ観測を行う。観測の際にVISSRの検出器に入ってきたエネルギーは衛星に搭載されているVISSRデジタルモジュレータ (VDM) でデジタル化され、地上の指令収集局(CDAS)に送られる。CDASでは送られてきたデータにキャリブレーション情報やナビゲーション情報などの付加やデータのレベル値の変更などが行われ、その後、それらのデータはGMS-5を經由して中規模利用局 (MDUS) に配信される。衛星からCDASに送られてきたVISSRのデータは、CDASを介してデータ処理センター (DPC) にも送られ、キャリブレーション情報やナビゲーション情報の作成、WE-FAXの作成、各種プロダクトの作成などに利用される。

キャリブレーション情報の作成とは、衛星で観測されるカウント値と温度等エネルギーに関する物理量を関連づけるテーブルの作成をいう。それを行うためには、はじめにカウント値と物理量に対応づける関係式の係数が求められ、次に求められた係数からカウント値と物理量を関係づけるキャリブレーションテーブルの作成等が行われる。

可視及び赤外チャンネルについてDPC及びCDASで行われているキャリブレーション処理について以下に述べる。

2.1 可視チャンネルのキャリブレーション処理

VISSRの可視チャンネルは、南北方向 $35\mu\text{rad}$ 、東西方向 $35\mu\text{rad}$ の瞬時視野角 (IFOV) (直下点で約 1.25km の空間分解能) を持ち、観測されたデータは衛星上で6ビットのデジタルデータに変換され地上に送られる。可視チャンネルは4個の検出器で構成されているので、キャリブレーション処理をするための関係式も検出器毎に存在する。以下に可視チャンネルのキャリブレーション処理を示す。

まず、VISSRに入射した観測対象からのエネルギー (反射量) は検出器で電圧値に変換される。反射量と電圧が線型関係にあるので、反射量と電圧の関係は式

(1)で表すことができる。

$$V = a A + V_0 \quad (1)$$

ここで A は反射量、 V_0 は反射量がゼロと見なされる宇宙空間を測定した場合の電圧値であり、 a は係数である。

次に、式(2)に示すように、VDMにおいて電圧値はカウント値に変換される。

$$C = b_0 + b_1 \sqrt{V} \quad (2)$$

ここで、 V は電圧、 C はカウント値、 b_0 、 b_1 は係数である。係数 b_0 、 b_1 は衛星の打ち上げ前の地上試験で測定された値で定数である。

式(1)、(2)より、反射量とカウント値の関係は式(3)で表すことができる。

$$A = \frac{(C - b_0)^2}{b_1^2 a} - \frac{V_0}{a} \quad (3)$$

可視チャンネルについては、衛星に搭載されているプリズムを通して太陽光を50%に減衰させ、その輝度を測る「太陽校正機能」と呼ばれる機能が衛星に備わっている。宇宙空間の輝度を測定することで V_0 を求めることができるので、この機能を使用することにより、式(3)により係数 a を原理的に決めることが可能である。この処理を行うことが可視チャンネルのキャリブレーション処理であるが、実際には「太陽校正機能」を使用しても太陽光の輝度を高い精度 (絶対精度) で求めることが現在では困難なため、係数 a 及び V_0 は衛星打ち上げ前の地上試験で測定した値を使用している。

式(3)の係数が固定のため、カウント値と反射量を関係づける可視キャリブレーションテーブルは固定となる。また、可視チャンネルは4つの検出器を使用して観測しているため、それぞれの検出器毎に固定された可視キャリブレーションテーブルを使用することになる。そのため、4つの検出器の感度が異なる場合、そのままのカウント値を使用して画像データを作成・表

示すると、検出器間の感度差により縞模様が発生する。この縞模様の発生を最小限にするためにノーマライズと呼ばれる処理をDPCで行っている。この処理では、まず基準となる検出器を選択し、その検出器のキャリブレーションテーブルを基にして、他の3つの検出器のキャリブレーションテーブルを変更する処理が行われる。GMS-5では、運用前の調査結果に基づき、感度が他の検出器より安定であると判断された検出器2が基準検出器として選択されている。DPCの運用では、可視検出器間の感度差が現在に至るまで大きく変化することがなかったため、この処理は運用開始直後に1回行われただけである。

DPCでは上述したように検出器毎に4つのキャリブレーションテーブルが用意されているが、MDUSに配信されているS-VISSRでは、後述する固定テーブルの利用者に配慮するために、標準キャリブレーションテーブルが新たに1つ用意され、検出器毎の4つのキャリブレーションテーブルを標準キャリブレーションテーブルに置き換える処理が行われる。この処理では、各検出器で観測されたカウント値はDPCで使用されている各検出器毎のキャリブレーションテーブルに従って反射量に変換され、変換された反射量は標準キャリブレーションテーブルに従ってカウント値に変換される。また、この一連の処理でMDUSに配信されるS-VISSRの可視データの作成処理が行われる。

2.2 赤外チャンネルのキャリブレーション処理

GMS-5には赤外チャンネルとして、赤外1 (IR1, 10.5 - 11.5 μm)、赤外2 (IR2, 11.5 - 12.5 μm)、赤外3 (IR3 (WVとも呼ぶ), 6.5 - 7.3 μm)の3チャンネルが搭載されている。それぞれ、南北方向140 μrad 、東西方向140 μrad のIFOV (直下点で約5 kmの空間分解能) を持ち、観測されたデータは衛星上で8ビットのデジタルデータに変換され地上に送られる。以下に赤外チャンネルのキャリブレーション処理を示す。

まず、VISSRに入射した観測対象からのエネルギー (放射輝度) は検出器で電圧値に変換される。電圧と

検出器が観測する放射輝度とは線型関係であるので、電圧と放射輝度の関係は式(4)で表すことができる。

$$V = d E + V_0 \quad (4)$$

ここで、Eは検出器が観測する放射輝度、 V_0 は放射輝度がゼロと見なされる宇宙空間を観測したときの電圧、dは係数である。

次に、式(5)で示すように、VDMにおいて電圧値はカウント値に変換される。

$$C = C_0 + C_1 V \quad (5)$$

ここで、 C_0 、 C_1 は地上試験で求められた係数である。式(4)、(5)よりカウント値と放射輝度の関係は式(6)で表すことができる。

$$E = \frac{C - C_0}{C_1 d} - \frac{V_0}{d} \quad (6)$$

また、放射輝度と温度の関係は式(7)で表すことができる。

$$E(\lambda, T) = \varepsilon \frac{\int \Psi(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda}{\int \Psi(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

ここで、 ε 、 $\Psi(\lambda)$ 、 $B(\lambda, T)$ はそれぞれ観測対象の射出率 (地球観測時は1.0で固定)、検出器の応答関数、プランク関数である。 λ 、 T はそれぞれ波長及び温度を表す。式(6)、(7)を使用することによりカウント値と温度を関係づける変換テーブルが作成可能である。式(6)の係数 C_0 、 C_1 は固定であると考えられるが、係数 V_0 、 d は観測毎に変化する。そのため、赤外チャンネルのキャリブレーション処理では、観測毎に係数 V_0 と d を求める必要がある。

まず宇宙空間を観測した時に行う校正処理で係数 V_0 を求める。この処理では、宇宙空間を観測した時のカウント値を求め、放射輝度を0と仮定し、おのおのの値を式(6)に代入して得られる式(8)により V_0 を求めることができる。

$$V_0 = (C_{sp} - C_0) / C_1 \quad (8)$$

ここで、 C_{sp} は宇宙空間を観測したときのカウント値である。

次に衛星内部にある基準黒体を観測した時に行う校正処理で係数dを求める。この処理では基準黒体を観測したときのカウント値と温度を求める。求められる温度は検出器やスキャンミラー等の温度を考慮した基準黒体の温度（有効シャッタ温度、 T_e 、と呼ぶ）である。 T_e に対応する放射輝度は、 T_e を式(7)に代入し得られた式(9)により求めることができる。これらの値を式(6)に代入し得られる式(10)により係数dを求めることができる。

$$E_{b\ell}(\lambda, T_e) = \varepsilon \frac{\int \Psi(\lambda) B(\lambda, T_e) d\lambda}{\int \Psi(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

$$d = \frac{C_{b\ell} - C_0}{C_1 E_{b\ell}} - \frac{V_0}{E_{b\ell}} \quad (10)$$

ここで、 $C_{b\ell}$ は基準黒体を観測したときのカウント値、 $E_{b\ell}$ は基準黒体の放射輝度である。

上記の処理は風観測、臨時観測を除いた定常観測(1日24回)時に毎回DPCで行われ、カウント値と温度を関係づけるキャリブレーションテーブルが作成される。しかし、S-VISSRデータがCDASで作成されるため、上記の処理が画像作成までに間に合わないので、図1に示すように、前日の同じ時間帯に作成されたキャリブレーションテーブルが使用される。このテーブルでは低温側が低輝度レベルに、高温側が高輝度レベルに対応づけしている。DPCではこのキャリブレーションテーブルが使用されるが、S-VISSRの場合には上記のキャリブレーションテーブル作成の後に、利用者が使用し易いように反転とシフトという処理が行われ、その後、S-VISSR用にキャリブレーションテーブルが作成される。

図2は反転処理の概念図である。図に示されているように、反転処理とは例えば0レベルを255レベルに、1レベルは254レベルのように、観測した輝度レベル

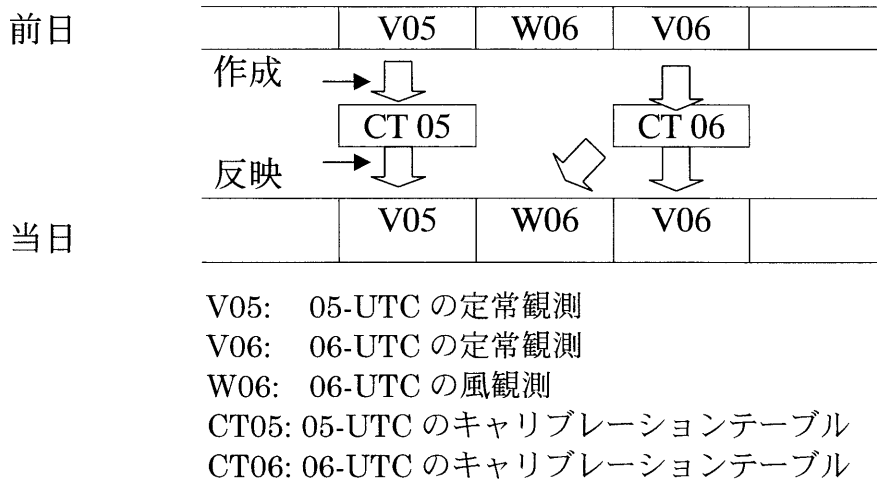


図1 キャリブレーションテーブルの作成とその反映のタイミング
風観測(W06)には前日の定常観測のキャリブレーションテーブル(CT06)が使用されている。

(以下観測レベルと呼ぶ)のnレベルを255-nレベルに反転させる処理のことである。この処理により、観測レベルを反転されたレベル(以下反転レベルと呼ぶ)に変換するテーブルが作成される。この結果、低温側が高輝度レベルに、高温側が低輝度レベルに対応することになる。

観測 レベル	反転 レベル	温度
0	→ 255	T ₀
1	→ 254	T ₁
⋮	⋮	⋮
n	→ 255-n	T _n
⋮	⋮	⋮
254	→ 1	T ₂₅₄
255	→ 0	T ₂₅₅

図2 反転処理(赤外チャンネル)の概念図
(T_nは観測レベルnでの温度)

nレベルが255-nレベルに反転される。この処理により、観測レベルを反転されたレベルに変換するテーブルが作成される。

キャリブレーション テーブル(反転後)		固定テーブル	
224レベル	197.78K	225レベル	198.03K
223	199.52K	224	199.76K
⋮	⋮	⋮	⋮
222	201.18K	223	201.42K

処理1 この場合222レベルが223レベルになる
(レベル差は+1)

反転後レベル	S-VISSR レベル	温度
255	255	
254	レベル差 +1 → 255	T ₂₅₄
253	→ 254	T ₂₅₃
⋮	⋮	⋮
224レベル	225レベル	T ₂₂₄
⋮	⋮	⋮
1	2	T ₁
0	1	T ₀

処理2

図3 シフト処理(赤外チャンネル)の概念図
(T_nは反転レベルnでの温度)

処理1) 固定テーブルと反転テーブルとで200Kより大きく、200Kに最も近いレベル値を見つけ両者のレベルの差を計算する

処理2)計算されたレベル差の分だけレベル値を動かし、反転レベルとS-VISSRレベルの関係を示すテーブルを作成する。

シフト処理では反転レベル254, 255がS-VISSRレベル255になるように、異なる反転レベルが同じS-VISSRレベルになることがある。またS-VISSRレベル0が無いように、存在しないレベルが発生する。

図3はシフト処理の概念図である。シフト処理は、地上試験の結果を基に作成された固定キャリブレーションテーブル(以下固定テーブルという)の利用者のために、固定テーブルをなるべく上記のキャリブレーションテーブルにあわせるために行われる。方法としては、初めに200Kに対応する固定テーブルのレベル値と上記の反転レベルとの差(以降レベル差と呼ぶ)を求める(図3,処理1)。次に求めたレベル差の分だけ反転レベルを増減させてS-VISSRで使用されるレベル(以下S-VISSRレベルと呼ぶ)を作成する。この処理で反転レベルとS-VISSRレベルの関係を示すテーブルを作成する(図3,処理2)。

実際の画像作成では、反転処理とシフト処理は同時に行われる。図4に示すように、反転処理で作成された観測レベルと反転レベルの関係を示すテーブルと、シフト処理で作成された反転レベルとS-VISSRレベ

反転処理(図2の処理) シフト処理(図3の処理2)

観測 レベル	反転 レベル	温度	反転 レベル	S-VISSR レベル	温度
0	255	T ₀	255	255	
1	254	T ₁	254	255	T ₂₅₄
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
254	0	T ₂₅₄	1	2	T ₁
255	1	T ₂₅₅	0	1	T ₀

観測 レベル	S-VISSR レベル	S-VISSR レベル	温度
0	255	255	
1	255	255	T ₁
⋮	⋮	⋮	⋮
254	2	2	T ₂₅₄
255	1	1	T ₂₅₅

変換テーブル

S-VISSR
キャリブレーション
テーブル

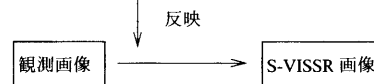


図4 実際の赤外キャリブレーション変更処理
反転処理とシフト処理が同時に行われる。

反転処理で作成された観測レベルと反転レベルの関係テーブルと、シフト処理で作成された反転レベルとS-VISSRレベルのテーブルから、観測レベルをS-VISSRレベルに変換する"変換テーブル"とS-VISSRのレベルと温度の関係を示す"S-VISSRキャリブレーションテーブル"が作成される。

ルのテーブルから、S-VISSRのレベルと温度の関係を示すS-VISSRキャリブレーションテーブルと観測レベルをS-VISSRレベルに変換する変換テーブルが作成される。CDASでは、この変換テーブルを元に観測された画像データをS-VISSR画像データに変更する処理が行われる。

3. 赤外チャンネルデータ利用上の留意点

3.1 赤外チャンネルキャリブレーションの修正

1996年6月13日V6のGMS-5運用開始から1996年11月29日V23の期間、2.2節の式(9)で使用する基準黒体の射出率(ε)が誤って計算されていたため、温度が本来の射出率で計算したものと比べて低く見積もられて

いた。例えばキャリブレーションテーブルの温度で300Kの場合に対応するレベル値の温度がIR1、IR2、IR3それぞれ約1.7K、約1.8K、約1.1K低く見積もられていた。このため、気象衛星センターでは上記期間のキャリブレーションテーブルの再作成処理を行った。この処理結果を使用して、利用者が保存している過去の赤外データの温度を容易に補正できるように、表2に示す通り簡易変換テーブルを用意した。この簡易変換テーブルとは別に、すべての観測毎に修正されたキャリブレーションテーブルも用意した。また、DPCで保存されているすべての画像データには修正されたキャリブレーションテーブルが格納されている。

表2 簡易修正テーブル

このテーブルは1995年6月13日06UTCから1996年11月29日23UTCまでの赤外キャリブレーションテーブルを修正するための補正量を示している。下式のように補正量を加えることにより温度の補正が可能である。

$$\text{補正後温度(K)} = \text{補正前温度(K)} + \text{補正量}$$

温度(K)			補正量(K)			温度(K)			補正量(K)			温度(K)			補正量(K)				
IR1	IR2	WV	IR1	IR2	WV	IR1	IR2	WV	IR1	IR2	WV	IR1	IR2	WV	IR1	IR2	WV		
200	0.76	0.81	0.49	225	0.97	1.03	0.62	250	1.19	1.18	0.77	275	1.44	1.52	0.93	300	1.70	1.81	1.10
201	0.77	0.82	0.50	226	0.98	1.04	0.63	251	1.20	1.20	0.77	276	1.45	1.54	0.94	301	1.71	1.82	1.11
202	0.78	0.83	0.50	227	0.98	1.05	0.63	252	1.21	1.22	0.78	277	1.46	1.55	0.94	302	1.72	1.83	1.12
203	0.79	0.84	0.51	228	0.99	1.06	0.64	253	1.22	1.24	0.79	278	1.47	1.56	0.95	303	1.73	1.84	1.13
204	0.79	0.85	0.51	229	1.00	1.06	0.64	254	1.23	1.26	0.79	279	1.48	1.57	0.96	304	1.75	1.85	1.13
205	0.80	0.85	0.52	230	1.01	1.07	0.65	255	1.24	1.28	0.80	280	1.49	1.58	0.96	305	1.76	1.86	1.14
206	0.81	0.86	0.52	231	1.02	1.08	0.66	256	1.25	1.30	0.80	281	1.50	1.59	0.97	306	1.77	1.88	1.15
207	0.82	0.87	0.53	232	1.03	1.09	0.66	257	1.26	1.32	0.81	282	1.51	1.60	0.98	307	1.78	1.89	1.16
208	0.83	0.88	0.53	233	1.04	1.10	0.67	258	1.27	1.34	0.82	283	1.52	1.61	0.98	308	1.79	1.90	1.16
209	0.83	0.89	0.54	234	1.04	1.11	0.67	259	1.28	1.36	0.82	284	1.53	1.62	0.99	309	1.80	1.91	1.17
210	0.84	0.90	0.54	235	1.05	1.12	0.68	260	1.29	1.37	0.83	285	1.54	1.63	1.00	310	1.81	1.92	1.18
211	0.85	0.91	0.55	236	1.06	1.13	0.68	261	1.30	1.38	0.84	286	1.55	1.65	1.00	311	1.83	1.94	1.19
212	0.86	0.91	0.55	237	1.07	1.14	0.69	262	1.31	1.39	0.84	287	1.56	1.66	1.01	312	1.84	1.95	1.19
213	0.87	0.92	0.56	238	1.08	1.15	0.70	263	1.32	1.40	0.85	288	1.57	1.67	1.02	313	1.85	1.96	1.20
214	0.88	0.93	0.56	239	1.09	1.16	0.70	264	1.33	1.41	0.86	289	1.58	1.68	1.02	314	1.86	1.97	1.21
215	0.88	0.94	0.57	240	1.10	1.17	0.71	265	1.33	1.42	0.86	290	1.59	1.69	1.03	315	1.87	1.98	1.22
216	0.89	0.95	0.57	241	1.11	1.18	0.71	266	1.34	1.43	0.87	291	1.60	1.70	1.04	316	1.88	2.00	1.22
217	0.90	0.96	0.58	242	1.12	1.19	0.72	267	1.35	1.44	0.88	292	1.61	1.71	1.05	317	1.89	2.01	1.23
218	0.91	0.97	0.58	243	1.13	1.20	0.73	268	1.36	1.45	0.88	293	1.63	1.72	1.05	318	1.91	2.02	1.24
219	0.92	0.97	0.59	244	1.13	1.21	0.73	269	1.37	1.46	0.89	294	1.64	1.74	1.06	319	1.92	2.03	1.25
220	0.92	0.98	0.59	245	1.14	1.22	0.74	270	1.38	1.47	0.89	295	1.65	1.75	1.07	320	1.93	2.04	1.26
221	0.93	0.99	0.60	246	1.15	1.23	0.74	271	1.39	1.48	0.90	296	1.66	1.76	1.08				
222	0.94	1.00	0.61	247	1.16	1.24	0.75	272	1.41	1.49	0.91	297	1.67	1.77	1.08				
223	0.95	1.01	0.61	248	1.17	1.25	0.76	273	1.42	1.50	0.92	298	1.68	1.78	1.09				
224	0.96	1.02	0.62	249	1.18	1.26	0.76	274	1.43	1.51	0.92	299	1.69	1.79	1.10				

3.2 前日のキャリブレーションテーブル使用に依存する誤差

2.2節で述べたように、赤外キャリブレーション処理では前日の同じ時間帯に作成されたキャリブレーションテーブル(以後前日のテーブルと呼ぶ)が使用される。図5は当日観測されたデータを使用して計算され

たキャリブレーションテーブル(以後当日のテーブルと呼ぶ)と、前日のテーブルの比較の概念図である。この図より、あるレベルに対する両者のテーブルの温度差は、低温域から高温域になるに従って増大する傾向にある。そのため低温域と高温域についてその温度差がどの程度になるかを調査した。

図6は食の影響がない時間帯V0の高温域 (IR1のレベル値150 (約290K)) での両者の温度差 (ΔT_x) (以後誤差と呼ぶ) の経年変化である。1995年6月16日から1999年2月28日までの全部のデータ (データ数

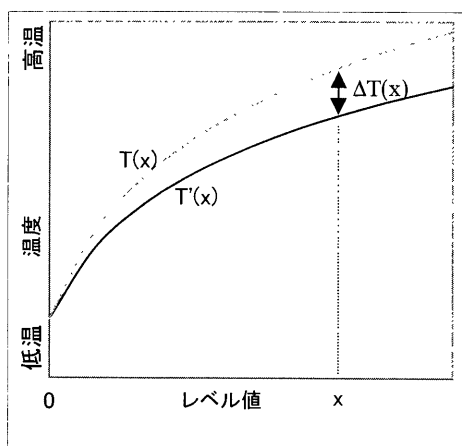


図5 前日と当日の同じ時間帯に作成された赤外キャリブレーションテーブルの比較
 $T'(x)$:前日テーブル
 $T(x)$:当日テーブル
 $\Delta(x)$: x レベルでの両者の温度差

1342個) を用いて統計処理した結果、誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.15K、最大誤差は0.48Kであった。同様にIR2の高温域である150レベル、低温域に相当するIR1,IR2のレベル60 (約235K) ,WVのレベル40 (約245K) について調査を行った。結果は表3に示すようにIR2の高温域について、誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.16K、最大誤差は0.56Kであった。IR1,IR2、WVの低温域については、いずれの場合でも誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.10Kであったが、最大誤差はIR1とIR2 (0.39K) が最も大きく、つづいてWV (0.31K) の順であった。

次に食期間について同様の調査を行った。GMS-5のようなスピン衛星では、春期 (2月の下旬から4月の中旬まで、年により正確な日時は変動する) と秋期 (8月の下旬から10月の中旬まで) それぞれ約50日間生じる食の影響により、食が明けた直後の観測であるV16 (16UTC観測) での有効シャッタ温度 (T_e) の変化が大きくなる。V16の T_e は図7に示すように約283Kから約295Kまで周期的に大きく変化している。これに

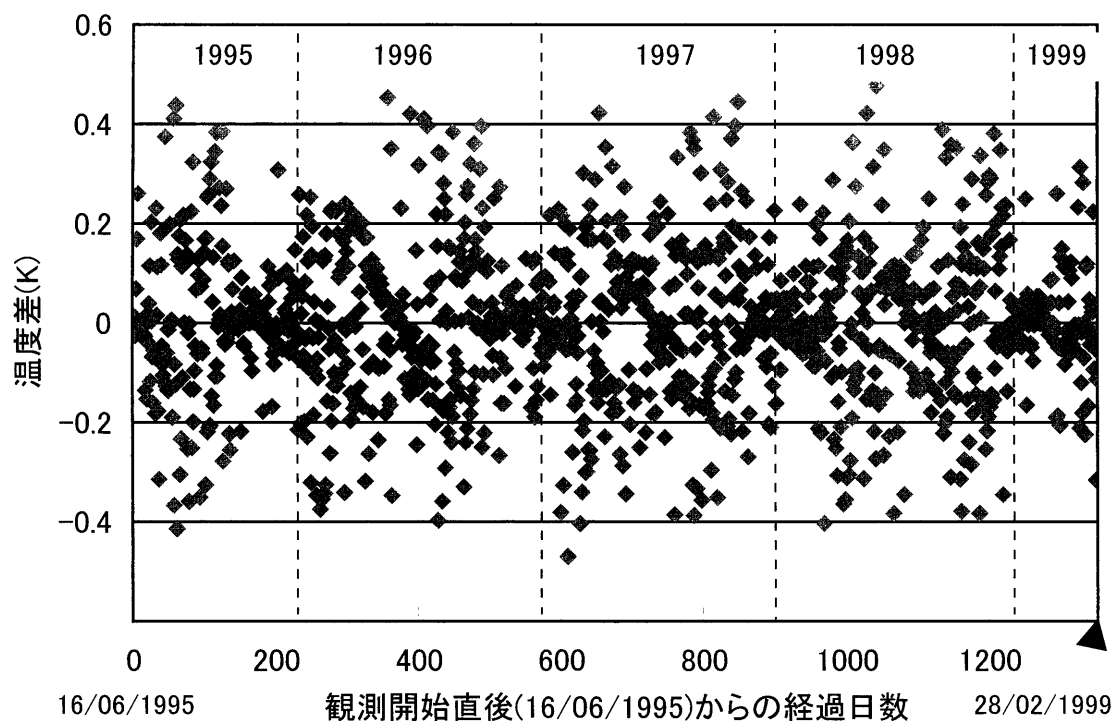


図6 V0の時刻での前日と当日に作成された赤外キャリブレーションテーブルの差 (IR1, 150 levelのデータを1995年6月16日から1999年2月28日までをプロットしたもの)

に伴い、カウント値と放射輝度の関係を示す式(6)の係数dも図8にあるように周期的に大きく変化している。1995年8月30日から1999年3月6日までの食期間のV16のデータ(340個)を使用して同様に前日のテーブルと当日のテーブルとの温度差について統計処理を行った。表3に示すようにIR1、レベル150に対応する誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.23K、最大誤差は0.81Kであった。同様にIR2の高温域について、誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.24K、最大誤差は1.02Kであった。このようにIR1、IR2の高温域につ

て、V16(食期間)の誤差はV0の場合と比較して標準偏差は1.5倍程度、最大誤差は1.8倍程度大きかった。IR1、IR2、WVの低温域については、いずれの場合でも誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.15K程度であったが、最大誤差はIR2(0.65K)が最も大きく、つづいてIR1(0.52K)、WV(0.40K)の順であった。このように低温域についてもV0の場合と比較して標準偏差は1.5倍程度、最大誤差は1.3~1.7倍程度大きかった。

以上のように誤差は、低温域から高温域になるにつ

表3 前日と当日の同じ時間帯に作成されたテーブルの温度差の統計処理結果
上段は通常時、下段は食期間を表している

チャンネル	レベル	温度 (K)	誤差平均 (K)	標準偏差 (K)	最大誤差 (K)	レベル	温度 (K)	誤差平均 (K)	標準偏差 (K)	最大誤差 (K)
IR1(V0)	150	290	0.00	0.15	0.48	60	235	0.00	0.10	0.39
IR2(V0)	150	290	0.00	0.16	0.56	60	235	0.00	0.10	0.39
WV(V0)	-	-	-	-	-	40	245	0.00	0.10	0.31
IR1(V16 食)	150	290	0.00	0.23	0.81	60	235	0.00	0.15	0.52
IR2(V16 食)	150	290	0.00	0.24	1.02	60	235	0.00	0.15	0.65
WV(V16 食)	-	-	-	-	-	40	245	0.00	0.14	0.40

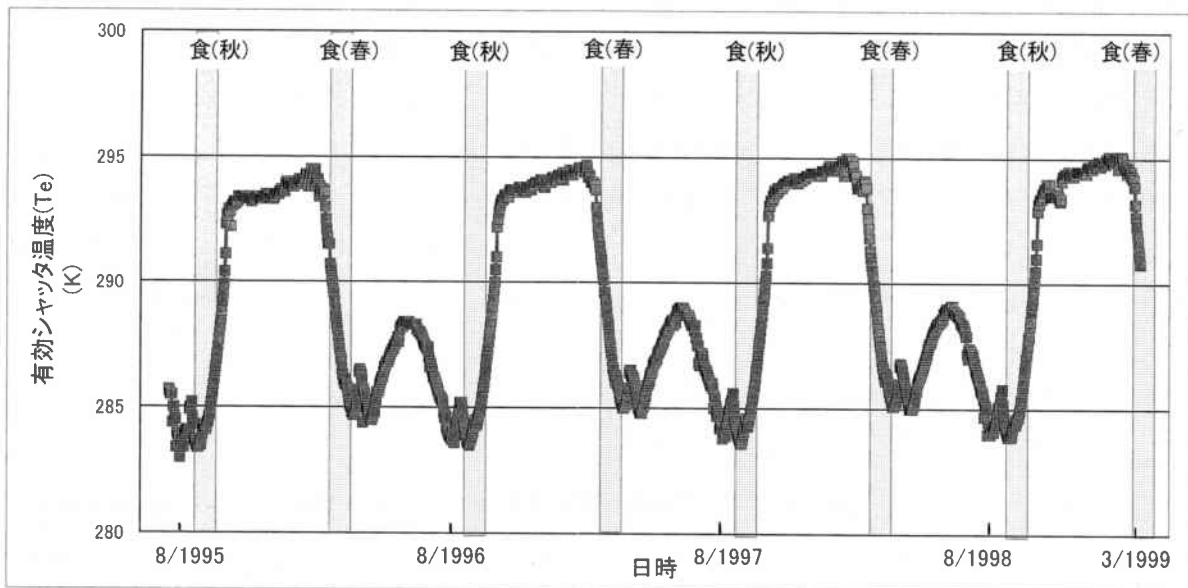


図7 V16での有効シャッタ温度(Te)の変化
斜線部分は食期間を示している

れて増大し、食の影響を受けるVI6では更に増加することがわかった。またIR2の誤差が他の赤外チャンネルと比較して最も大きかった。赤外輝度温度データを

時系列に解析する場合や赤外データから物理量を算出し評価する場合などにはこれらの誤差に留意する必要がある。

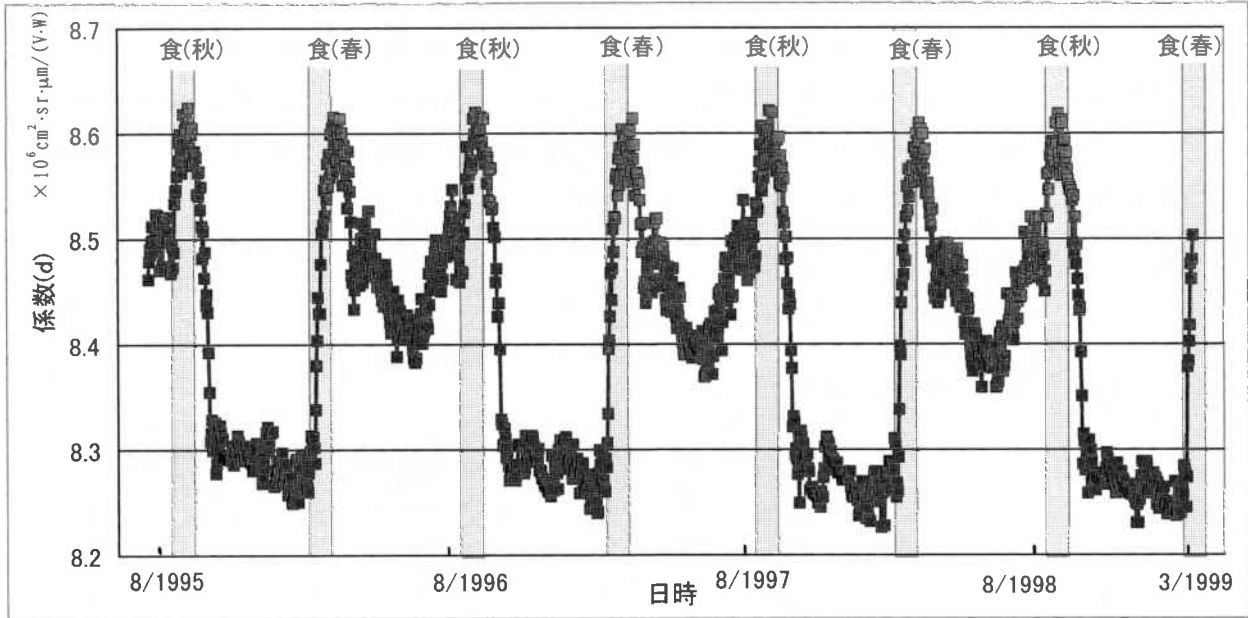


図8 カウント値と放射輝度とを関係づける係数dのVI6での変化
斜線部分は食期間を示している

3.3 風観測時のキャリブレーション

GMS-5では1日4回(00, 06, 12, 18UTC)の定常観測の30分前に衛星風算出のために必要な観測(風観測という)を実施している。図1に示されているように、風観測時に使用されるキャリブレーションテーブルはCDASの計算機処理能力の問題により、30分後の定常観測に使用されるキャリブレーションテーブルと同じテーブルが使用されている。

風観測時に定常観測のキャリブレーションテーブル

を使用することによる影響を調べるために、観測時間の差がどの程度キャリブレーションテーブルに影響を与えるのかを調査した。

表4は1時間前の観測時に取得されたデータを使用して計算されたキャリブレーションテーブルと、次の観測時に取得されたデータを使用して計算されたキャリブレーションテーブルを用いて、高温域及び低温域のレベル値に対する両者のテーブルの温度差(誤差)の統計量を示している。IR1で高温域に相当する150レ

表4 観測されたテーブルと1時間前のテーブルの温度差
(同一レベル値に対するV0とV1との差)

チャンネル	レベル	温度 (K)	誤差平均 (K)	標準偏差 (K)	最大誤差 (K)	レベル	温度 (K)	誤差平均 (K)	標準偏差 (K)	最大誤差 (K)
IR1	150	290	0.00	0.13	0.46	60	235	0.00	0.11	0.52
IR2	150	290	0.00	0.14	0.60	60	235	0.00	0.10	0.46
WV	-	-	-	-	-	40	245	0.00	0.11	0.39

ベルでの誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.13K、最大誤差は0.81Kであった。同様にIR2の高温域について、誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.14K、最大誤差は0.60Kであった。IR1、IR2、WVの低温域については、いずれの場合でも誤差の平均値は0.00K、標準偏差は0.10K程度であったが、最大誤差はIR1 (0.52K) が最も大きく、つづいてIR2 (0.46K)、WV (0.39K) の順であった。

しかし、風観測で使用される定常観測のキャリブレーションテーブルは3.2節で述べたように前日のテーブルであるため、風観測においては30分の観測時間差による温度差と前日のテーブルを使用することによる温度差の両方を考慮しなければならない。最も大きな影響は雲頂温度等から衛星風の高度を推定する際に生じると考えられる。両者の最大誤差の和が1K程度であるので、気温減率を0.6K/100mと仮定するとこ

の誤差による高度の推定誤差は最大200m程度となると推定される。

3.4 S-VISSR固定テーブルの誤差

2.2節で述べたようにS-VISSRで使用されるキャリブレーションテーブルは、200Kにおける固定テーブルとの温度差が最小になるように作成される。そのため、高温部ほど実際のキャリブレーションテーブルと固定テーブルの差は大きくなる傾向にある。

図9は運用開始直後の1995年7月2日から1999年10月2日までのS-VISSRのIR1キャリブレーションテーブルの240Kから300Kまで20K毎に対応するレベル値と同じレベル値に対応する固定テーブルの温度との温度差を示している。図からわかるように温度が高くなると両者の温度差も大きくなる傾向にある。1996年5月1日に軌道上の特性を反映するため固定テーブルに変更が加えられた。この影響により、変更前は両

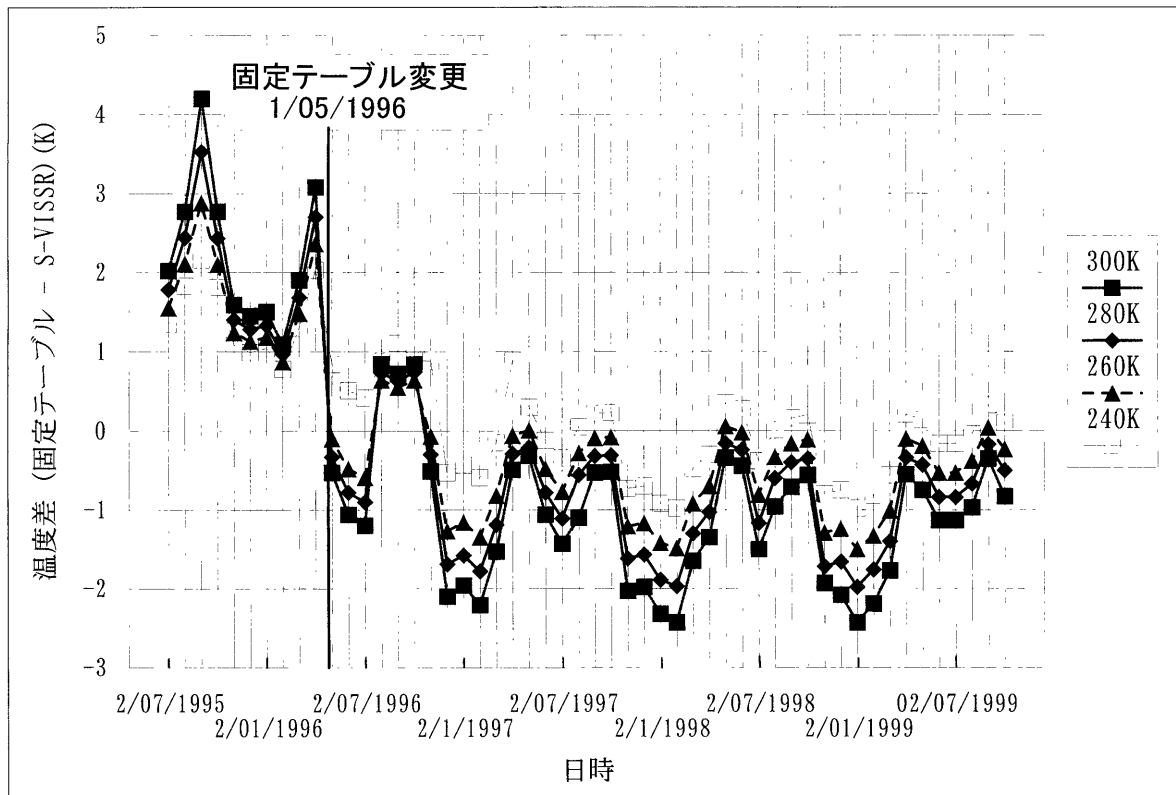


図9 S-VISSRのIR1キャリブレーションテーブルと固定テーブルの同じレベルでの温度差V0のデータを使用してキャリブレーションテーブル240K、260K、280K、300Kに対応するそれぞれの温度差を示している

者の温度差がIR1の300Kで最大4 K程度と大きく、また固定テーブルのほうがS-VISSRのテーブルに比べて温度が高かったが、変更後は両者の温度差がIR1の300Kで最大-2.5K程度と全体に小さくなったが、逆に固定テーブルの方がS-VISSRのテーブルと比較して温度が低くなる傾向になった。さらに、1月や7月に固定テーブルの温度がより低くなるような季節変動もあることがわかった。

また、同様にIR2及びWVについて調査した結果、固定テーブル変換後は、IR2の300Kで最大-2.4K程度、WVの250Kで最大-2.5K程度、両者の温度差が生じている。固定テーブルを利用する際これらの点に留意する必要がある。

3.5 水蒸気チャンネルの応答関数

アメリカ海洋大気庁 (NOAA) からGMS-5の水蒸気チャンネルの応答関数が水蒸気の透過率の曲線に非常に似ているとの指摘があった (Breon,1999:私信)。

応答関数は、真空中で検出器がある波長のエネルギーをどれぐらいの割合でとらえることができるかを示したものである。この応答関数は衛星製作メーカーが打ち上げ前、地上において検出器から4~6 m離れたターゲットから射出されるエネルギーを計測する事により求められた。本来は、このような計測は、大気中の水蒸気などによる吸収、散乱の影響を避けるため真空中で行われるべきであるが、計測が大気中で行われたため、ターゲットから射出されたエネルギーは、検出器にすべて到達しなかったことが判明した。この結果、計測された応答関数は水蒸気等の影響を受けたものになってしまった。赤外1, 赤外2チャンネルの観測波長域は大気の窓領域であるため、計測中の水蒸気の影響は非常に小さいと考えられるが、水蒸気チャンネルの観測波長域は水蒸気吸収帯であるため計測中の水蒸気の影響は大きいと考えられる。

気象衛星センターでも放射モデル (MODTRAN (Berk,1989, Kneizys,1988)) と1976年US標準大気

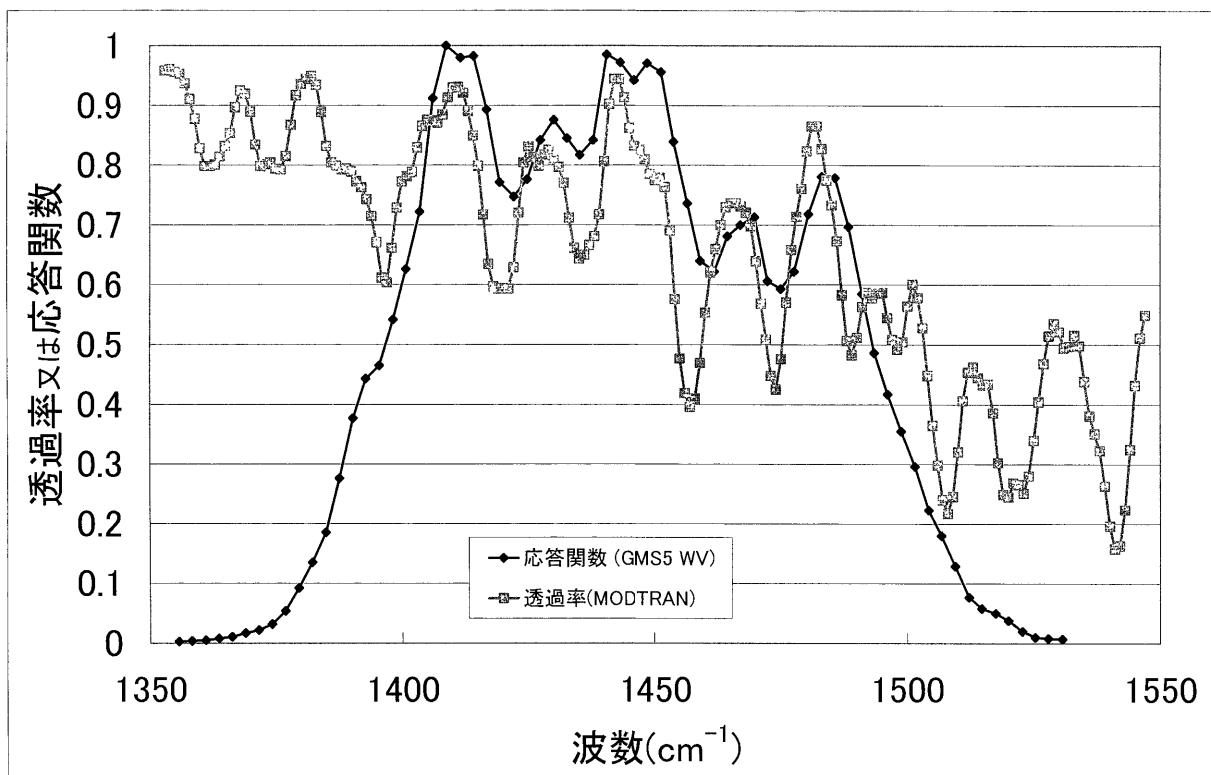


図10 放射モデルMODTRANを使用して計算した透過率とGMS-5のWVの応答関数 (透過率は1976年US標準モデルを使用。4 m先のターゲットを水平方向に観測したときのもの)

モデル (Kneizys,1988) を使用して、地表面 (1013hPa) で水平方向に路程4m地点での大気の透過率を算出し水蒸気チャンネルの応答関数と比較した。図10は算出された透過率と水蒸気チャンネルの応答関数を重ね合わせたものである。Breonが指摘したように両者は類似していることが確認できた。

現在、気象衛星センターでは大気中で測定した応答関数のキャリブレーションへの影響及び補正の方法等を検討している。

4. 可視チャンネルデータ利用上の留意点

4.1 可視チャンネルデータの経年変化

GMS-3及びGMS-4で観測された長期間の可視データの解析により、PMTが使用されている可視検出器の感度に顕著な経年変化が見られたと報告されている (Tsuchiya 1996)。一方、1章で述べたようにGMS-5の可視検出器はPMTからより感度が安定なシリコン光ダイオードに変更になった。長期間の可視データの利用には可視データにどのような経年変化が生じてい

るかを把握する事は重要である。

そのため、ここではGMS-5の可視チャンネルデータのレベル値がどのように経年変化しているのかをGMS-4と比較してみた。使用したデータはGMS-4 (1989年12月9日から1995年5月15日まで) 及びGMS-5 (1995年6月13日から1999年3月31日まで) のV6の全球画像データを用いて作成されたデジタルカウント値のヒストグラムデータである。個々のヒストグラムについて、ゼロカウント値から累積度数40%、70%、90%、98%、99.9%に対応するカウント値を求めそのカウント値を反射量に変換し、その反射量の時系列を比較する事でその経年変化を調査した。図11、12はそれぞれGMS-4、GMS-5の運用開始からの上記の反射量の変化を示している。図11のGMS-4の結果から、反射量が低い領域に対応する累積度数が40%のところ、運用開始時に2.75%だった反射率は運用開始から5年半後には1.67%の反射率に低下した。同様に反射率が高い領域に対応する累積度数99.9%のところでは、運用開始時に68.72%だった反射率は運用開始

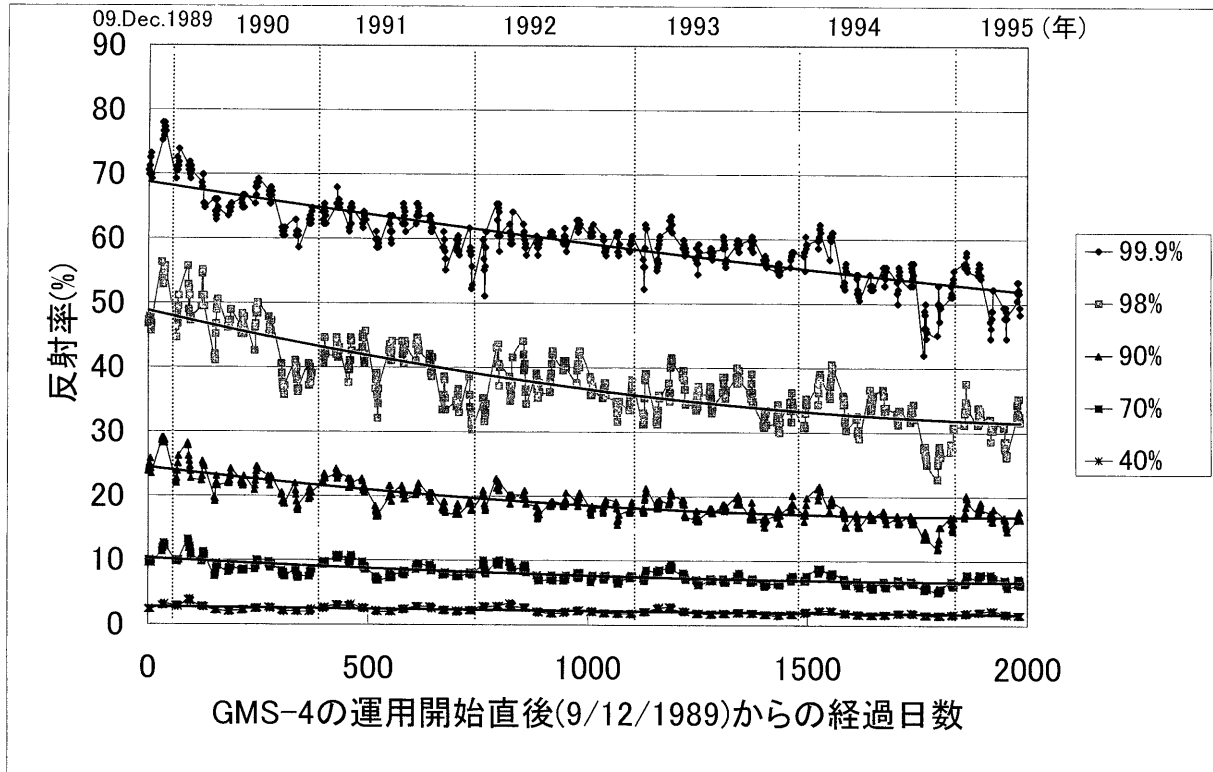


図11 GMS-4の反射量の経年変化

全球ヒストグラムを作成し、反射率が低い側から累積度数40%、70%、90%、98%、99.9%に対応するそれぞれの反射量(運用開始直後(1989年12月9日)から運用終了直前(1995年5月14日)までの06UTC帯のデータ)

が保存している過去の赤外データの温度を容易に補正できるように、簡易変換テーブルも用意された。

- (4)赤外キャリブレーション処理では、前日の同じ時間帯に作成されたキャリブレーションテーブルが使用されるが、これによる誤差は、低温域から高温域になるにつれて増大し、食の影響を受ける時間帯では更に大きくなる。また、IR2の誤差が他の赤外チャンネルと比較して最も大きく最大誤差は1 K程度である。このため、赤外輝度温度データを時系列に解析する場合や赤外データから物理量を算出し評価する場合などにはこれらの誤差に留意する必要がある。
- (5)風観測時には30分後の定常観測に使用されるキャリブレーションと同じテーブルが使用される。これによる誤差と前日のテーブルを使用する誤差による大きな影響は雲頂温度等から衛星風の高度を推定する際に生じると考えられる。両者の最大誤差の和が1 K程度であるので、気温減率を0.6K/100mと仮定するとこの誤差による高度の推定誤差は最大200m程度になる。
- (6)S-VISSR固定テーブルは1996年5月1日に変更されたが、変更前はIR1 (300K) で最大4 K程度S-VISSRテーブルに比べて温度が高かったが、変更後は逆に最大で2.5K程度低くなる傾向になっている。また、1月や7月に固定テーブルの温度がより低くなる季節変動が生じている。この傾向は、IR2及びWVについても同様であり、IR2 (300K) で最大2.4K程度、WV ((250K) で最大2.5K程度、固定テーブルの方が低くなる傾向になっている。
- (7)GMS-5の水蒸気チャンネルの応答関数は水蒸気の透過率と類似している。応答関数の計測を真空中で行わなかったことが、主な原因と推測される。
- (8)GMS-5の可視検出器はPMTからより感度が安定なシリコン光ダイオードに変更になった。このため、GMS-4までの可視チャンネルデータに見られたレベルの経年変化がかなり小さくなり、運用開始から4年後でその低下の割合は1レベル程度と推測される。

更に、次世代の気象衛星である運輸多目的衛星では、赤外検出器のデータが8ビットから10ビットになり、測定できる温度分解能が小さくなるため、キャリブレーション処理に対する要求が今まで以上に高くなってくると考えられる。また、気候変動等の調査のためには全球的に精度の高い衛星データが求められるが、そのためには全球的により精度の高いキャリブレーションデータが必要である。そのため、全球的な均質なキャリブレーションデータの作成とキャリブレーションデータの品質向上のため、1997年の気象衛星運用国会議では静止気象衛星と極軌道衛星NOAAなどの相互キャリブレーションが提唱されている。日本を含む各衛星運用国はこの提案に従って調査を実施している。

今後気象衛星センターは、これらの要望に対応するため、より精度の良いキャリブレーションデータを提供して行く考えである。

謝辞

水蒸気チャンネルの応答関数について貴重な指摘をいただいたNOAA/ERL Francois-Marie Breon氏に感謝します。

参考文献

- Berk, A., L.S. Bernstein and D.C. Roberson, 1989: MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122.
- 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.
- Tschiya, K., M.Tokuno, H. Itaya and H. Sasaki, 1996, Calibration of GMS-VISSR, Features of MOS-VTIR and LANDSAT MSS, Adv. Space Res. Vol.17, No.1.1-10
- McMillin, M.L. and D. S. Crosby, 1984: Theory and Validation of the Multiple Window Sea Surface Temperature Technique, J. of Geo-

- phys. Res., 89, 3655-3661.
- Meteorological Satellite Center, 1997, The GMS User's Guide Third Edition
- Tokuno, M., H. Itaya, K. Tsuchiya and S. Kurihara, 1997: Calibration of VISSR On-board GMS-5, Adv. Space Res., 19, 9, 1297-1306.
- Potts, R.J., 1993: Satellite Observations of Mt. Pinatubo Ash clouds, Australian Met. Mag., 42, 59-68.
- Tokuno, M., 1997: Satellite observation of volcanic ash clouds, Meteorological Satellite Center Technical Note, 33, 29-48.
- Tsuchiya, K., R. Ito and C. Ishida, 1982: Characteristics of the Detector of Multi Spectral Scanner (MSS) of Landsat in Space Environment. J. Meteorological Soc. Japan, SerII, 60, 1165-1174.
- 気象衛星センター技術報告特別号, 1996: 1-179.