

理論計算による衛星到達放射量を用いた VISSR の 赤外キャリブレーション方法について

VISSR Infrared Calibration by Means of Calculated Radiances

内山明博*・一木明紀**・高橋大知*

Akihiro Uchiyama, Akinori Ichiki and Taichi Takahashi

Abstract

The current routine Infrared calibration procedure is performed once a day. Because of the thermal gradient within the sensor scanner unit, infrared data are not well calibrated.

We statistically determined the equations to compute a effective shutter temperature (Te) on the basis of the data set of theoretically calculated radiances and telemetry data. The differences between the current routine Te^O and the new Te^N are greater than 1K from the late of April to the middle of August. However, the new Te has not been used operationally, because of difficulties to evaluate the error of theoretical calculation.

1. はじめに

ひまわりで観測される赤外放射から得られる海面温度の精度に関する調査中に、赤外放射データの較正処理の一部に誤りがあることが見つけられた。その誤りは、黒体シャッターの有効シャッター温度を算出する際に使用する温度がまちがっていたことである。この修正を行ったあとも、海面水温の誤差調査によると衛星による海面水温と実測値との差の RMS に 0~2 度の年変化があった。このことより、現在の較正処理そのものに欠点がある可能性がある。この原因として、可視赤外回転走査放射計 (VISSR) 内部の温度勾配が大きいことによる現行の有効シャッター温度算出式の不適当性が考えられる。

ここでは、新しい有効シャッター温度の算出式を決定することを試みた。その結果、現行の有効シャッター温度 (Te) の算出式による Te^O と新しく決定した算出式による Te^N には、4 月下旬から 8 月中旬にかけて 1 度以上 (最大約 2 度) 差があることがわかった。新しい有効シャッター温度算出式の有効性を確かめる適当な方法はないが、海面水温算出の際に使われる大気補正式の係数の年変化を抑える傾向にあるので、新しい算出式は妥当だと思われる。

2. 有効シャッター温度

赤外放射の較正は、宇宙空間からの放射と衛星内部のシャッターからの放射を基準に行なっている。このうちシャッターからの放射は、Fig. 1 に示したように走査鏡、反射鏡の影響をうけることなく赤外センサーへ入射する。このため、シャッターからの放射エネルギーが VISSR の外部にシャッターをおいて測定したとき、

* 気象衛星センターシステム管理課, Meteorological Satellite Center

** 気象衛星センター解析課, Meteorological Satellite Center

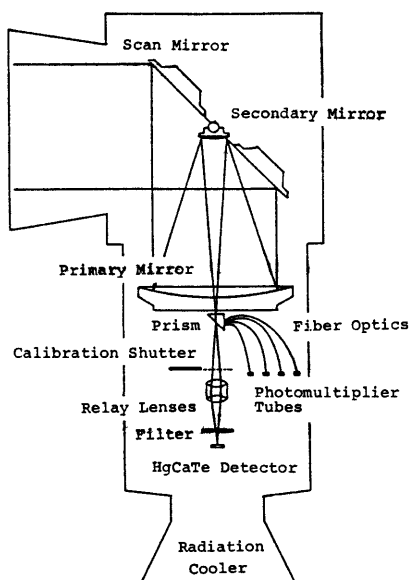


Fig. 1 Schematic of VISSR. The calibration shutter is inserted into the infrared optical train to expose the detector to the internal black body.

何度のシャッターからの放射エネルギーに相当するか引き直す必要がある。この引き直された温度を有効シャッター温度と呼んでいる。

§3 で示す方法によって、理論計算値とセンサーの出力を対応させることによって衛星で観測される放射エネルギーを校正できる。すなわち、ゾンデ・データ（鉛直温度・水蒸気分布）と放射伝達方程式より衛星で観測される放射エネルギーを計算し、この計算値とセンサーの出力を関係付けることができる。このようにすれば、有効シャッター温度 Te は必要ない。しかし、ルーチン観測での校正は、画像データ取得時に行なう必要がある。ゾンデ・データや地表面（海面）温度のデータが、いつでも画像取得時刻に近いわけでないで、シャッターや走査鏡の温度から有効シャッター温度を決定し利用することは有用である。

現在使用されている有効シャッター温度 (Te) の算出式は次の式である。

$$Te = T_S + K_1 \cdot (T_S - T_A) + K_2 \cdot (T_S - T_1) \quad (1)$$

ここで、

$$T_S = (T_{sh1} + T_{sh2}) / 2$$

$$T_A = (T_1 + T_2 + T_3) / 3$$

T_{sh1} , T_{sh2} : シャッター温度

T_1 , T_2 , T_3 : 走査鏡温度

$$K_1 = 0.325$$

$$K_2 = 0.175$$

である。

上式の右辺の第一項と第二項は、内部の温度差が小さいときに簡単な考察から導かれる（Appendix 参照）。 K_1 は、走査鏡の射出率と遮蔽率で定まる定数である。 K_2 は、経験的に決められている定数である。

ここでは、以下の四通りの場合について係数を決めてみる。(1)式と同様に、有効シャッター温度とシャッター温度、走査鏡温度は線形な関係にあるとする。

$$Te = C_0 + C_1 \cdot T_{sh1} + C_2 \cdot T_{sh2} + C_3 \cdot T_1 + C_4 \cdot T_2 + C_5 \cdot T_3 \quad (2)$$

$$Te = C_0 + C_1 \cdot T_S + C_2 \cdot (T_1 + T_2) + C_3 \cdot T_2 \quad (3)$$

$$Te = T_S + C_0 + C_1 \cdot (T_S - T_A) + C_2 \cdot (T_S - T_1) \quad (4)$$

$$Te = T_S + K_1 \cdot (T_S - T_A) + C_0 + C_1 \cdot (T_S - T_1) \quad (5)$$

(2)式は、定数項と係数5個の合計6個の場合である。(3)式は $T_{sh1} \approx T_{sh2}$, $T_1 \approx T_3$ であるので、 T_{sh1} と T_{sh2} , T_1 と T_3 を独立に扱わない場合である。(4)式は現行のルーチン業務で使用している算出式と同じ形のものである。ただし定数項を含めてある。(5)式は、現行の算出式で経験的に決めている K_2 だけを定めるものである。ただし、この場合も定数項は含める。

3. 方法

有効シャッター温度の算出式をどのように決めるかを簡単に述べると以下の通りである。晴天域の海面に対して、ゾンデ・データ（鉛直温度・水蒸気分布）、海面水温と放射伝達方程式より衛星に到達する放射エネルギーを計算する。その放射エネルギーと衛星のセンサー出力（レベル値）の関係を求める。この関係を利用して、衛星のシャッターのレベル値に対応するエネルギー、相当温度を順次求める。この温度を有効シャッター温度とし、衛星内部の温度との関係を統計的に決定する。

Table 1 Location of radio-sonde station.

station number	name	lat. (N)	long. (E)
32186	Urup	46	151
47401	Wakkanai	45	141
47420	Nemuro	43	146
31960	Vladivostok	42	132
47580	Misawa	41	142
47582	Akita	40	139
47590	Sendai	38	142
47600	Wajima	37	136
47744	Yonago	36	133
47807	Fukuoka	34	129
47778	Shionomisaki	33	136
47678	Hachijojima	33	140
47971	Chichijima	27	142
47936	Naha	26	127
47945	Minamidaitojima	26	131
47918	Ishigakijima	24	124
47991	Minamitorishima	24	154
91217	Guam	14	145

3-1 使用データ

① 海面水温

船とブイの観測値にもとづいて、気象庁海洋気象部海洋課が旬ごとに作成しているデータを使用する。このデータは、東経 110°~180°、北緯 0°~53° の範囲について 1°×1° の格子点の値として作られている。

② ソンデ・データ

指定気圧面 (1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 mb) の気温と露点温度 (400 mb 以下) のデータを使用する。利用する高層観測点は、Table 1 のとおりである。

③ 衛星データ

衛星に関係したデータとしては、シャッターのレベル値、宇宙空間のレベル値、高層観測地点の近くに指定した海域のレベル値、及びテレメトリー・データ (シャッター温度、走査鏡温度) を用いる。1983年1月から12月までの1ヶ月あたり6日、1年で72日分 (72画像) の各データを使用する。画像データは、ほぼ03Zに取得したものを使用する。

3-2 処理手順

上述のデータを使用して、以下の手順で有効シャッター温度 T_e の算出式を決定する。

① 衛星で観測される放射エネルギーの計算

高層観測点の近くに海域を指定し、海面温度を抽出する。気温・水蒸気量の鉛直分布、海面水温を用いて放射伝達方程式を解くことにより衛星で観測される放射エネルギーを計算する。

② 海域のレベル値の抽出

画像データから指定した海域の 0.5°×0.5° 格子のヒストグラムを作成し、ヒストグラムから海面水温に相当するレベル値を抽出する。

③ 有効シャッター温度の計算

①で計算された放射エネルギー (E) とそれに対応する海面のレベル (L) 値とする。 E と L の間に

$$E = \alpha \cdot L + \beta \quad (6)$$

の関係を仮定し、 α , β を最小自乗法により決める。

(6)式に、シャッターのレベル値を代入して放射エネルギー E_{sh} を求める。 E_{sh} を相当温度 (有効シャッター) 温度に変換する。放射エネルギーを温度に変換するには、

$$E_{sh} = \frac{\epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) B(\lambda, T_e) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda}$$

を、0.25 度きざみで 170~330 K の T_e に対してテーブルを作成し利用する。 ϵ は、シャッターの射出率、 $\phi(\lambda)$ は、センサーの応答関数である。 λ_1, λ_2 は、それぞれ応答関数の下限と上限である。 $B(\lambda, T_e)$ は、波長 λ 、温度 T_e でのプランク関数である。

以上の処理を画像ごとに行なう。

④ 有効シャッター温度算出式の決定

①~③の処理で得られた有効シャッター温度と衛星内部の温度を統計的に結びつけ算出式を決める。

処理①で使用した高層観測点と指定した海域の中心緯度をTable1に示す。ゾンデ・データと海面のデータは、空間的にも時間的にもずれている。ここでは、高層データを海面の位置、観測時間内に外挿することなくそのまま使用した。放射伝達方程式を解いて衛星に到達する放射エネルギーの計算は、Weinreb & Hill (1980)に従って行なった。水蒸気の連続吸収係数 $k_v(T)$ は、Roberts et al. (1976) によって与えられている次式を使用した。

$$k_v(T) = C_v(T) \cdot [P_{H_2O} + \gamma(P - P_{H_2O})]$$

$$C_v(T) = C_v^0(T=296) \cdot \exp \left[T_0 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{296} \right) \right]$$

$$T_0 = 1800(K)$$

$$a = 1.25 \times 10^{-22} \text{ mole}^{-1} \text{cm}^2 \text{atm}^{-1}$$

$$b = 2.34 \times 10^{-18} \text{ mole}^{-1} \text{cm}^2 \text{atm}^{-1}$$

$$\beta = 8.30 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

ここで ν は、波数である。 γ としては、 $\gamma = 0.003$ という

値を使用した。

ヒストグラム の作製は、指定海域のまわりの $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の4つの格子について行なう。この4つの格子の2個以上から海面のレベル値が抽出された場合にも、すべて独立のデータとして扱う。雲の影響が少ないとき、パラッキの少ない海面のレベル値が得られるので、そのような海域のデータには重みがかかるようにするためである。海面のレベル値としては、レベル値が高いほうからのヒストグラムの第1ピークのモード値を使用した。ただし、観測した最大のレベル値から3レベル以内にモード値があり、そのモード値の度数が全ヒストグラムの度数に占める割合が10%以上のものを海面のレベル値とした。

処理③においてはレベル値と輝度温度を直接むすびつけないで、エネルギーとレベル値の関係をまず決める。というのは、エネルギーとレベル値は、線形な関係になるように設計されているためである。

処理①、②で得られたデータには、誤差の大きいデータが含まれる可能性がある。特に処理②においては一様な雲域を選ぶ可能性があるので、エネルギーとレベル値の関係は二つのステップで決める。まず一番目のステップで $E = \alpha \cdot L + \beta$ の推定値を求めその推定値に基づいて悪いデータを除き、もう一度 α 、 β を決める。

$E = \alpha \cdot L + \beta$ の推定は、次のようにして行なう。レベル値が低いデータには、雲のデータが含まれる場合が多い

ので、レベル値が105(約270 K)以下のデータは除く。そして、宇宙空間のデータ(エネルギーは零とする。)を加えて係数 α 、 β を決める。宇宙空間のデータを加えると $E = \alpha \cdot L + \beta$ の傾きを実際に近い範囲に制限することができる。宇宙空間のデータとして加えるデータの個数は、処理①、②で得られるデータの数の1割とする。ただし1割の個数が4個を超えるときには、加える個数は4個とした。

このようにして決められたエネルギーとレベル値の関係からずれの大きいデータを除く。データの除去は、残差の標準偏差 (σ) を基準にして行なう; 残差は、 α 、 β を決めるために使用した値から推定値を引いたものとする。残差が正のときには 1.5σ より離れているデータを、残差が負のときには 2.0σ より離れているデータを除く。海面のレベル値抽出の際雲の影響を受けると、理論計算で得られるエネルギーに比べて衛星で観測された海面のレベル値が低くなる。このため残差が正のデータには悪いデータが含まれ易いので残差が正のとき条件を厳しくした。さらに、宇宙空間のデータも除く。宇宙空間のレベル値の変化はほとんど見られず、宇宙空間のレベル値は、雑音のレベルを示していると思われる。衛星内部の温度変化がセンサーの出力に影響を与えるとすれば、宇宙空間のレベル値にも変化が現われるはずである。宇宙空間に対するセンサー出力の変化が検出できないのは、この変化が雑音レベルより小さいためである。

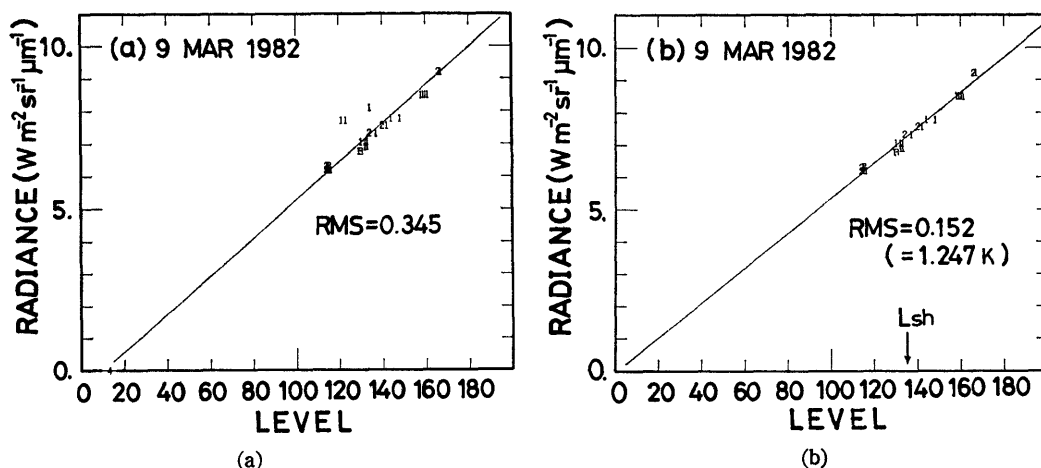


Fig. 2 Linear regression lines on March 9, 1982. (a) First step regression line (including some bad pieces). The regression line was determined by the deep space and the other data. The numeral in the figure indicates the number of data. The upper left data are contaminated by cloud. Root mean square (RMS) of residuals is $0.345 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. (b) Second step regression line (after eliminating bad pieces). Lsh shows the shutter level. RMS is $0.152 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ (1.247 K).

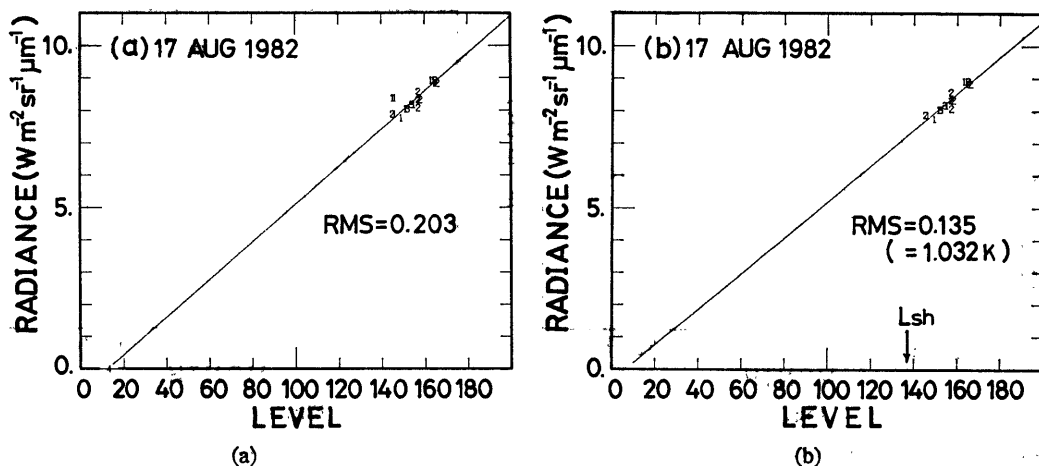


Fig. 3 As in Fig. 2, except for August 17, 1982.

現行のルーチンの較正処理では、宇宙空間のレベル値を零としているが、そのようにする根拠はないと思われるので宇宙空間のデータは最終的に α , β を決めるときには含めない。

以上のようにして、宇宙空間のデータ、精度の悪いと思われるデータを除いて、もう一度 α , β を最小自乗法で決定する。

処理④では、処理①～③で得られたデータをすべて使用するのではなく $E = \alpha \cdot L + \beta$ の係数 α の平均値・標準偏差を計算し、 α が平均値から標準偏差の2倍以上離れているデータは除いて係数を決めた。

1982年3月9日の例について Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) は、宇宙空間のデータを含めた場合、Fig. 2(b) は、精度の悪いと思われるデータと宇宙空間のデータを除いて求めた直線である。図の中の数字は、データの個数を示す。Fig. 3 は、1982年8月17日の例である。この例のように夏の場合、中緯度の地点からの放射量が増加するため衛星で観測される放射エネルギーの幅は狭くなる。

4. 結果

有効シャッター温度の算出式の係数は、Table 2 に示した。得られた結果は、次のとおりである。

現行のルーチンの較正処理で使用している形の(4)式でも、得られた係数の値はルーチンの処理で使っている値とかなり違う。すなわち、現在使用している値は、 $C_0=0$, $C_1=0.325$, $C_2=0.175$ であるのに対して、 $C_0=1.3603$, $C_1=0.9417$, $C_2=0.1052$ である。また、どの場

Table 2 Equations for effective shutter temperature. Values in the parenthesis are 95% confidence limits.

Effective Shutter Temperature (T_e)	
(1)	$T_e = C_0 + C_1 \cdot T_{sh1} + C_2 \cdot T_{sh2} + C_3 \cdot T_1 + C_4 \cdot T_2 + C_5 \cdot T_3$ $C_0 = 3.0643 (\pm 2.5365)$ $C_1 = 0.2865 (\pm 2.7996)$ $C_2 = -1.2735 (\pm 2.6104)$ $C_3 = -0.7035 (\pm 0.5781)$ $C_4 = 2.0827 (\pm 2.5199)$ $C_5 = 0.3870 (\pm 0.6372)$
(2)	$T_e = C_0 + C_1 \cdot (T_{sh1} + T_{sh2})/2 + C_2 \cdot (T_1 + T_3)/2 + C_3 \cdot T_2$ $C_0 = 1.0683 (\pm 1.3094)$ $C_1 = -0.7749 (\pm 2.6990)$ $C_2 = -0.3664 (\pm 0.1604)$ $C_3 = 2.1020 (\pm 2.5528)$
(3)	$T_e = T_{sh} + C_0 + C_1 \cdot (T_{sh} - T_a) + C_2 \cdot (T_{sh} - T_1)$ $T_{sh} = (T_{sh1} + T_{sh2})/2$ $T_a = (T_1 + T_2 + T_3)/3$ $C_0 = 1.3603 (\pm 0.3151)$ $C_1 = 0.9417 (\pm 0.6761)$ $C_2 = -0.1052 (\pm 0.4259)$
(4)	$T_e = T_{sh} + K_1 \cdot (T_{sh} - T_a) + C_0 + C_1 \cdot (T_{sh} - T_1)$ $K_1 = 0.325$ $C_0 = 1.2102 (\pm 0.2734)$ $C_1 = 0.2816 (\pm 0.0399)$

合も定数項が1～3と大きく無視できない。

Fig. 4(a)～Fig. 7(a) に示したように、現在ルーチンで使用している算出式による T_e^0 とここで決めた算出式による T_e^N の間には差がある。1～3月、10～12月では0.5度以内で一致しているが、5～8月では、1.0度以上の差があり、6、7月には約2度の差がある。 T_e^N の95%の信頼区間は、標準偏差(σ)の約2倍である($\sigma = 0.828 \sim 0.913$) ので、 T_e の差約2度は、信頼区間より大きく有意な差である(今の場合 RMS と標準偏差は一致する。)

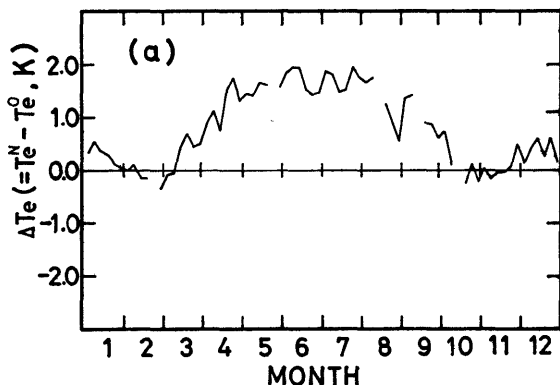


Fig. 4(a)

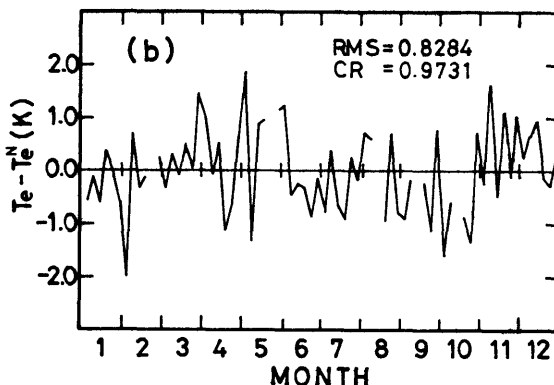
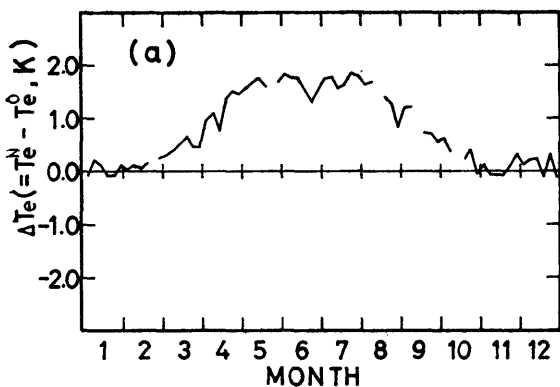


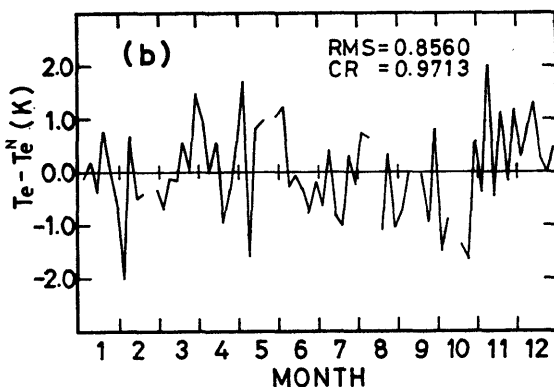
Fig. 4(b)

Fig. 4(a) Differences between the new effective shutter temperatures Te^N and the current routine ones Te^O . Te^N is calculated by eq. (2) in the text. Differences are about 2 K during June and July.

Fig. 4(b) Time series of residuals. CR is correlation coefficient. Slightly seasonal variation is noticed.

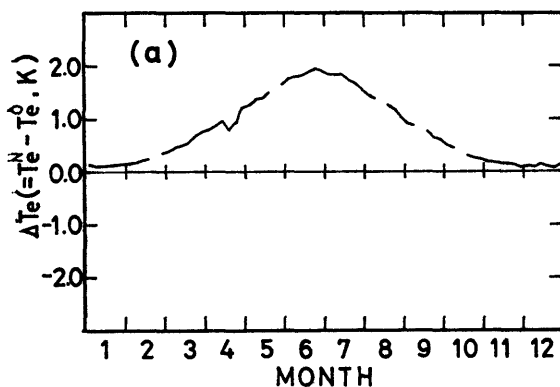


(a)

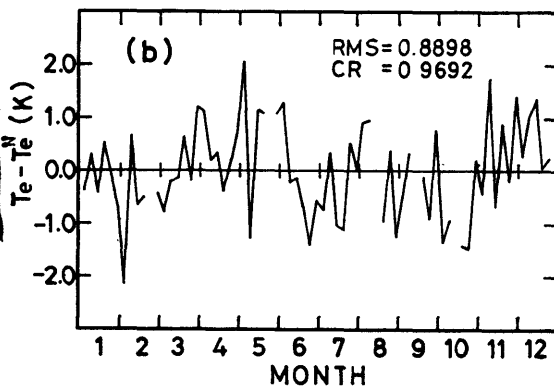


(b)

Fig. 5 (a), (b) as in Fig. 4, except but Te^N are calculated by eq. (3).



(a)



(b)

Fig. 6 (a), (b) as in Fig. 4, except but Te^N are calculated by eq. (4).

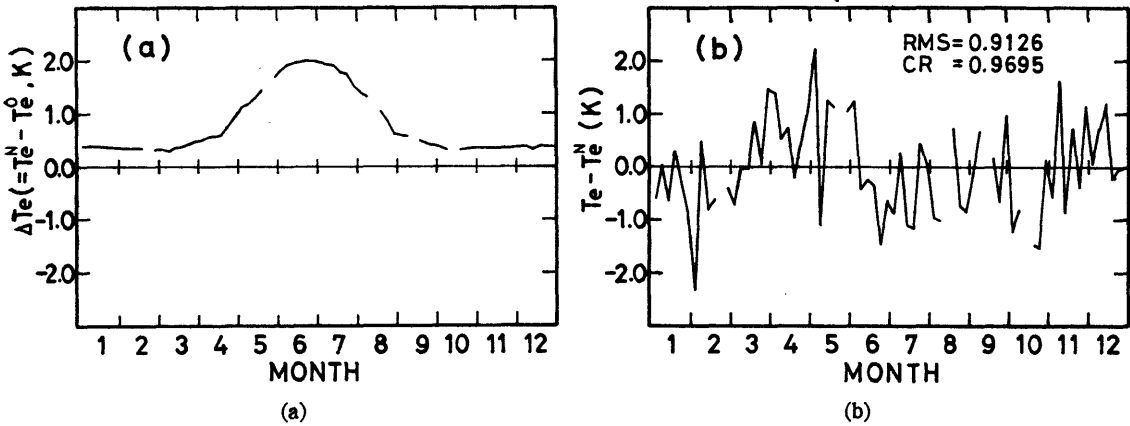


Fig. 7 (a), (b) as in Fig. 4, except but Te^N are calculated by eq. (5).

5. 考察

1982年の海面水温、観測された等価黒体温度 T_{BB} 、可降水量 W を使用して大気補正式の係数を決めると、本来変化しないはずの係数が変化する。すなわち、大気補正式は同じ大気状態に対して、夏に大気補正を大きくする傾向の式となる；低緯度で、冬期間に比べて、夏期間に約 3.5 K ほど大気補正が大きくなる。ここで決めた有効シャッター温度 Te^N を使用すれば夏の期間の Te^N は現行のルーチンの Te より高いので T_{BB} は高いほうに修正される： $Te=290$ K、有効シャッター温度の差 ΔTe を $\Delta Te=2.0$ K とすると $T_{BB}=280$ K のとき約 1.86 K、 $T_{BB}=290$ K のとき 2 K、 $T_{BB}=300$ K のとき約 2.13 K 修正される。従って、ここで決めた有効シャッター温度を使用すれば大気補正が夏に大きくなる傾向が抑えられる。この意味で、ここで示した有効シャッター温度は、妥当な傾向を示している。

統計的には、有効シャッター温度の算出式を決めることができた。しかし、より物理的に意味のある算出式が必要と思われる。Fig. 8 に示したようにシャッターの温度は冬にもっとも高いのにシャッターのレベル値は夏にもっとも高い。このような状態は、シャッター温度とシャッターのレベル値が比例するというような単純な考え方では説明できない。放射計の熱構造を十分考慮した有効シャッター温度の算出式が必要である。

最小自乗法で決めた式の残差 (Fig. 4 (b)~Fig. 7 (b)) には、少しではあるが季節変化がある。これは、理論計算に含めなかった大気中の成分 (aerosol など) の影響や、使用した吸収係数の不確かさによるものであろう。理論計算値に基づいて、有効シャッター温度を決めたの

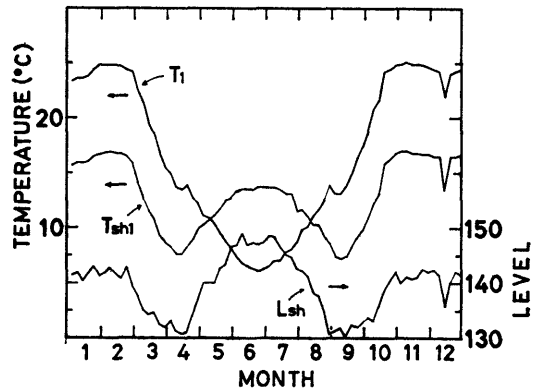


Fig. 8 Annual variation of shutter temperature (T_{shl}), temperature of scan mirror T_1 and shutter level.

で、結果は理論計算の精度に依存する。理論計算の精度は使用した吸収係数、海面水温、大気鉛直分布などに依存するため正確には見積れない。従って、ここで決めた有効シャッター温度の算出式がどれくらい正しいか評価できない。船で測定された海面水温のデータは、よく知られているように、かなり大きい標準偏差を持っている。理論に使用した吸収係数が良いものであっても海面水温の誤差のため理論値に誤差が含まれる可能性がある。また、一般に衛星で観測される海面温度は、表皮温度 (skin temperature) であるので、理論に使用した海面水温とは差があるかもしれない。

統計的に有効シャッター温度と衛星内部の温度を決めるためには、いろいろな衛星の温度状態のデータが必要である。衛星内部の温度は年変化しているので、いろいろな状態のデータを集めるには約1年かかる。即ち約1

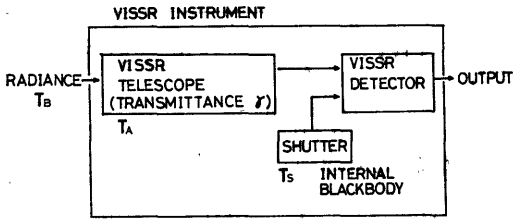


Fig. A-1 Simplified schematic of VISSR. The Shutter is inserted into the infrared optical train to expose the detector to the internal blackbody.

年たない有効シャッター温度の算出式を決定できない。

衛星データを定量的に使用しようとした場合、データがよく校正されている必要がある。衛星打ち上げ後は、処置の仕様がなないので、衛星の打ち上げ前に、衛星が何を測定し、テレメトリー・データとどう関係にあるか、どのようにすれば物理量に変換されるかを明確にしておく必要がある。

Appendix 有効シャッター温度

有効シャッター温度と衛星内部の温度との関係については、木村 (1981) に述べられている。それに基づいて簡単にまとめると以下ようになる。

有効シャッター温度 Te は、次のように書ける。

$$Te = T_S + (T_S - T_A) \cdot \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \quad (A-1)$$

ここで

- T_S : シャッター温度
- T_A : 走査鏡, 一次鏡, 二次鏡の平均温度
- γ : 望遠鏡の透過率である。

γ は,

$$\gamma = (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)(1 - \epsilon_3)(1 - K) \quad (A-2)$$

である。 ϵ_i は3つの鏡の射出率, K は望遠鏡の遮蔽率である。

VISSRでの測定を模式的に示すと Fig. A-1 のようになる。シャッターからの放射は、望遠鏡の影響を受け

ずにセンサーへ入射する。VISSRの外部から温度 T_B に相当する放射が入射したとき、センサーで受ける放射は、

$$\gamma \epsilon B(\lambda, T_B) + (1 - \gamma) B(\lambda, T_A) \quad (A-3)$$

である。 ϵ はシャッターの射出率, $B(\lambda, T)$ は、波長 λ 温度 T でのプランク関数である。第2項は、望遠鏡の部分からの放射である。シャッターからの放射を $\epsilon B(\lambda, T_S)$ とする。 $\epsilon B(\lambda, T_S)$ と (A-3) 式が等しいときの T_B が Te である。

$$\epsilon B(\lambda, T_S) = \gamma \epsilon B(\lambda, Te) + (1 - \gamma) B(\lambda, T_A) \quad (A-4)$$

$\epsilon \approx 1$ であるので、以下では、 $\epsilon = 1$ とする。 Te, T_A, T_S には、あまり差がないとして、 T_S のまわりで一次までテーラー展開する。

$$B(\lambda, T_S) = \gamma B(\lambda, T_S) + \gamma \frac{\partial B(\lambda, T_S)}{\partial T} (Te - T_S) + (1 - \gamma) \left\{ B(\lambda, T_S) + \frac{\partial B(\lambda, T_S)}{\partial T} (T_A - T_S) \right\} \quad (A-5)$$

(A-5) 式を整理すると

$$Te - T_S = (T_S - T_A) \cdot \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right)$$

となり (A-1) 式が得られる。

(A-1) 式に経験的な補正項 $K_2 \cdot (T_S - T_1)$ を加えたのが現行のルーチンで使われている式である。

参考文献

木村光一, 1981: VAS システムについて, 気象衛星センター技術報告, 第4号, 133-140.
 Weinreb, M. P. and M. L. Hill, 1980: Calculation of Atmospheric Radiances and Brightness Temperatures in Infrared Window Channels of Satellite Radiometers, *NOAA Tech. Rept. NESS 80*, National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 40 pp.
 Roberts, R. E., J. E. A. Selby and L. M. Biberman, 1976; Infrared continuum absorption by atmospheric water vapour in the 8~12 μ m window, *Appl. Opt.*, 15, 2085-2090.