

海表面温度推定のための熱赤外波長帯域における 大気補正の研究

浅沼 市男^{*1} 佐々木保徳^{*1}
宗山 敬^{*1} 斎藤 誠一^{*2}

海面から放射された放射エネルギーは、人工衛星レベルのセンサに到達するまでに、大気中の水蒸気などの吸収媒体によって減衰され、海表面温度として計算される値は実際の温度より低目に観測される。この大気効果を補正し海表面温度を求めるための経験式が提案されている。これは、熱赤外波長帯域に設けられた、わずかに波長の異なる2波長帯域のエネルギー量の差から海表面温度を求めるもので、日本近海の海表面温度の安定した海域かつその期間の衛星データについて検証を行った。また、二つの波長帯域を利用した2色温度計の原理を応用した大気補正方法についても同様の検証を行った。

この結果、MAULの提案する経験式が、海表面温度の実測値に近い結果を示し、十分に実用的であることが明らかになった。

Atmospheric Correction on Thermal Bands for Estimating Sea Surface Temperatures

Ichio Asanuma^{*3} Yasunori Sasaki^{*3} Kei Muneyama^{*3} Sei-ichi Saitoh^{*4}

Sea surface temperatures measured by remote sensors are lower than those acquired by surface measurement due to the transmittance effect of the atmosphere. Since it is often necessary to get the sea surface temperatures from satellite, equations to correct the effects of atmosphere are suggested. These involve the similar spectral channels on thermal bands. AVHRR carried on NOAA-7 have two similar channels at 10.5 to 11.3 and at 11.5 to 12.5 micrometers. Comparison were made between sea surface temperatures measured on the surface, and those computed by the equations, by examining an area where the large scale eddies are created and kept constant during summer and winter seasons. The correction method was also compared by applying the method of 2-color temperature measurement.

*1 海洋保全技術部

*2 北海道大学水産学部

*3 Marine Environment Department

*4 Research Institute of North Pacific Fisheries, Hokkaido University

As a result, the equation of Maul showed the best correspondence between the two sea-surface temperatures. It also showed that the correction is effective in the identification of the obscure edge of eddies or currents.

1. はじめに

気象衛星NOAAシリーズに搭載された改良型高解像度放射計 (Advanced Very High Resolution Radiometer, 以下AVHRRと略記) は, 熱赤外波長帯域に感度を持ち, 海表面温度を測定可能である。このため海表面温度分布情報から, 海洋ダイナミクスあるいは水産業などへの応用可能性が認識され, 各方面においてこの衛星データが利用されつつある。(Muneyama, 1980)

これまで熱赤外面像から暖流, 寒流あるいは渦などの位置, 規模またおよそその海表面温度を知り, 各研究に応用されていた。この段階で位置, 規模の情報は比較的正確に判読可能であったが, 海表面温度については実際の海表面温度より低目に観測され, またその誤差の程度の一定でないことから, 正確な海表面温度推定方法が必要とされていた。この誤差の原因は, 海水の持つ物理温度と見かけの輝度温度との間に差のあること, また大気を通過する間に大気中の水蒸気などの吸収媒体によって放射輝度エネルギーの減衰されるためである。

そこで, 大気効果を除去し正確な海表面温度分布を求めるためのMcclain (1983) およびMaul (1983) の提案する経験式について, また2色温度計の原理を応用した補正式について比較検討を行った。いずれの方式も, 熱赤外波長帯域に設けられたわずかに波長帯域の異なる二つのチャンネルのエネルギーの差を利用する方法である。現在のところ, この波長帯域を持つ衛星はNOAA-7号のみである。

海表面温度の実測値と衛星データとの比較検討は, NOAA-7号の観測データの中で大規模か

つ安定な渦などの海洋現象の観測されたものを選択し, 観測と同時期の海表面温度計測データを用いた。比較の時期は, 夏季および冬季を選択し, 各季節変化に伴う水蒸気量の影響についても考察を加えた。

2. 改良型高解像度放射計

これまでの気象衛星には高解像度放射計が搭載され, 気象観測に利用されてきた。改良型高解像度放射計は, TIROS-N衛星から搭載され, 表1に示す観測波長帯域を備えた放射計としてそれぞれの衛星に搭載される。また, 図1にNOAA-7号の波長帯域を示す。本報告で利用するところの熱赤外波長帯域に二つの観測波長帯域をもつ放射計を搭載した衛星は, NOAA-7号のみである。NOAA-7号は, 1981年に打ち上げられ, 1983年に打ち上げられたNOAA-8号と共に運用されており, 1984年8月にNOAA-Fと交替する予定である。また, NOAA-F以降の放射計は, 7号と同様の5チャンネルとなる予定である。(Susskind, 1984)

日本においては, 気象庁の気象衛星センターにおいてNOAAシリーズ衛星のHRPT (High Resolution Direct Readout, 高分解能直接伝送) 信号が受信されている。ただし, 1983年6月から8号の信号のみを受信している。また, 1984年6月から8号の不調なため, 再度7号の信号の受信を開始している。これらの日本上空で観測され, 受信されたHRPTデータは, 日本気象協会より, 磁気テープの形態で入手可能である。

2.1 較 正

HRPTデータ中に収録されたAVHRRデータについて, チャンネル1および2については反射率を,

表1 気象衛星ノア・シリーズ搭載AVHRRの波長帯域
Spectral Band of AVHRR on NOAA series.

Ch.	TIROS-N	NOAA-6,-8	NOAA-7
1	0.55 - 0.90	0.58 - 0.68	0.58 - 0.63
2	0.725 - 1.10	0.725 - 1.10	0.725 - 1.10
3	3.55 - 3.93	3.55 - 3.93	3.55 - 3.93
4	10.5 - 11.5	10.5 - 11.5	10.5 - 11.3
5	ch.4 repeated	ch.4 repeated	11.5 - 12.5

(Micrometers)

from NOAA polar orbiter data users guide
(Kidwell, 1981)

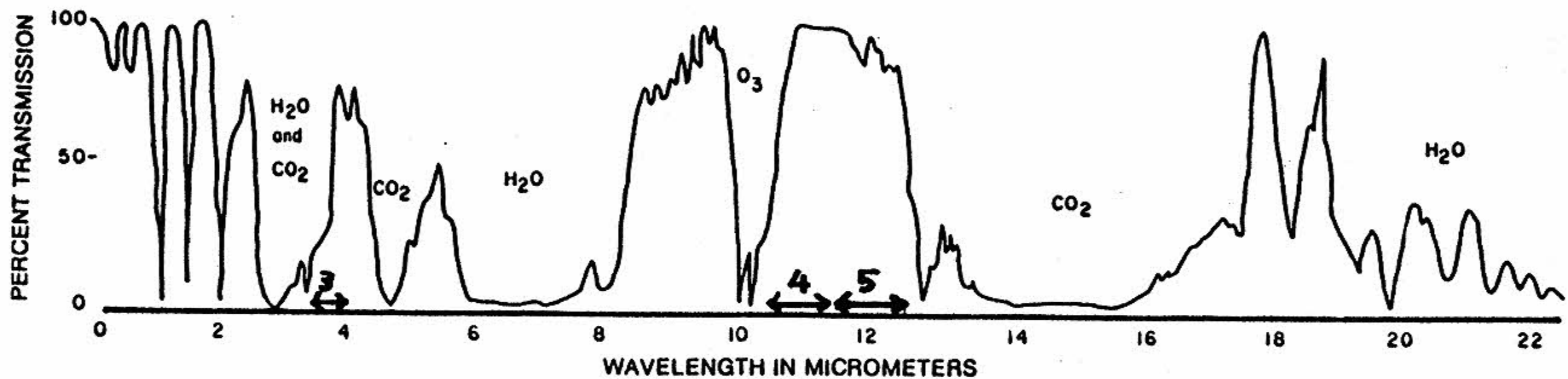


図1 大気の透過率とAVHRRの熱赤外波長帯域

Transmittance of atmosphere and spectral bands for longer wavelength of AVHRR

またチャネル3, 4および5については放射輝度温度を求めるための較正処理を施す。(Lauritson, 1979)

チャネル1の可視波長およびチャネル2の近赤外波長帯域については, センサ内部に較正用の光源を持たないため, デジタル・カウント値をパーセント・アルベードに変換するためのゲインとインターセプト値が初期値として与えられている。すなわち, パーセント・アルベード(A)は, 次式によって与えられる。

$$A = G \cdot X + I \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで, XはAVHRRより与えられる観測データのデジタル・カウント値, Gはゲイン(%・アルベード/カウント), Iはインターセプト(%・アルベード)である。

チャネル3, 4および5の熱赤外波長帯域については, 内部の較正用標準黒体(Internal Calibration Target)とその温度測定用の白金温度計の値をもとに輝度温度を計算する。

較正用標準黒体の絶対温度は, 4個の白金温度計の重みつき平均値として, 次式に与えられる。

$$T = \sum_{i=1}^4 b_i \left(\sum_{j=0}^4 a_{ij} X_i^j \right) \dots\dots\dots(2)$$

ここで, Tは較正用標準黒体温度(°K), Xは白金温度計のデジタル・カウント値, aは変換係数(°K/カウント), bは重み係数である。このとき, 白金温度計の示す値が宇宙環境の変化などによって変動するため, 通常区間平均を採った値を用いている。

この標準黒体温度から放射輝度エネルギー

(N_T ; $\text{mW}/\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$)は、次式によって与えられる。

$$N_T = \sum_{i=1}^n \beta(\nu_i, T) \cdot \hat{\phi}(\nu_i) \cdot \Delta \nu \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 β はプランクの関数、また $\hat{\phi}$ は正規化応答関数であり以下に与えられる。

$$\beta(\nu_i, T) = \frac{C_1 \cdot \nu_i^3}{\exp\left(\frac{C_2 \cdot \nu_i}{T}\right) - 1} \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 ν_i は波数、 C_1 および C_2 は定数である。
 $C_1 = 1.1910659 \times 10^{-5} (\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4})$,
 $C_2 = 1.438833 (\text{cm} \cdot \text{K})$ である。

$$\hat{\phi}(\nu_i) = \frac{\phi(\nu_i)}{\sum_{j=1}^n \phi(\nu_j) \cdot \Delta \nu} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 ϕ は波数区間 ν_1 から ν_n における応答関数を示す。

次に宇宙空間を測定したときの放射輝度エネルギーが定数として、各波長帯域ごとに与えられる。

これらの内部校正用標準黒体と宇宙空間の放射輝度エネルギー量とセンサのデジタル・カウント値から、次式によってゲインが与えられる。

$$G = \frac{N_{sp} - N_T}{X_{sp} - X_T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 N_{sp} 、 X_{sp} は宇宙空間の放射輝度エネルギー量とその観測時のデジタル・カウント値であり、 N_T 、 X_T は標準黒体の放射輝度エネルギー量とそのデジタル・カウント値である。また、宇宙空間の放射輝度エネルギー量とデジタル・カウント値および(6)式のゲインから、次式によってインターセプトが求められる。

$$I = N_{sp} - G \cdot X_{sp} \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって、観測デジタル・カウント値から放射輝度エネルギー量が次式によって求められる。

$$N = G \cdot X + I \quad \dots\dots\dots (8)$$

さらに海表面温度の測定を目的とすることから、プランクの逆関数によって放射輝度エネルギー(N)から放射輝度温度を次式によって求める。

$$T = \frac{C_2 \cdot \nu_i}{\ln\left(1 + \frac{C_1 \cdot \nu_i^3}{N}\right)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで求められた放射輝度温度は、大気効果など

の影響を考慮に入れたものではなく、実際の海表面温度よりも低目に観測される。

2.2 幾何補正

AVHRRは、約800Km上空から $\pm 55.4^\circ$ の走査角によって観測するために、撮影画像に球面歪みの影響を受ける。また、軌道ごとに赤道通過の経度が異なるために、軌道の異なる画像間の単純な重ね合わせ、あるいは海上調査点の対応を採ることが困難である。ここでは、斎藤(1981)および戸沢(1981)らによって開発された幾何補正処理を用いて、歪みを除去し、メルカトル図法に再配置する方法を採った。これは軌道情報から画像の歪みを知り、幾何補正を行う方法であるが、軌道情報の持つ誤差を除去するために地上標準点により軌道情報を補正する方法を採用している。

3. 大気補正方法

これまで、McClain(1980, 1983)が熱赤外波長帯域の2波長を用いた大気補正方法をいくつか提案している。また、Maul(1983)も同様の大気補正方法を提案している。ここでは、両者の大気補正効果について比較するとともに、2色温度計の原理を用いた大気補正方法を提案し同様の比較を行う。

3.1 McClainの補正式

McClainは、全地球的な海表面温度分布を求めることを目的とし、一週間から一月間の海表面温度計算のための複数波長帯域による補正式を提案している。これは、船舶、観測ブイなどによる計測データとAVHRRの輝度温度との関係から補正式を求めている。この補正式は、縦軸に海表面温度の計測データとチャンネル4の輝度温度との差をとり、横軸にチャンネル4の輝度温度とチャンネル5の輝度温度との差をとり、回帰直線を求めたものである。以下にNOAAのNESSにおいて、実際に利用されている補正式を示す。

(1) 昼間

$$T_{45} = 1.0209 \cdot T_4 + 2.5438(T_4 - T_5) - 279.23$$

(Split Window) $\dots\dots (10)$

ここで、 T_{45} は補正後の海表面温度($^\circ\text{C}$)、 T_4 および T_5 はチャンネル4および5の輝度温度($^\circ\text{K}$)を示す。昼間は、チャンネル3において太陽光の海

表面における反射光の影響のあるため、チャンネル4と5の補正式のみ有効である。

(2) 夜間

$$T_{45}=1.0529 \cdot T_4+2.6235(T_4-T_5)-288.28$$

(Split Window)(11)

$$T_{345}=1.0305 \cdot T_4+0.9823(T_3-T_5)-280.43$$

(Triple Window)(12)

$$T_{34}=1.0207 \cdot T_4+1.5195(T_3-T_4)-276.75$$

(Dual Window)(13)

ここで、 T_{45} 、 T_{345} 、 T_{34} はそれぞれの補正式による海表面温度(°C)を示す。

3.2 Maul の補正式

Maul は、放射伝達モデル・LOWTRAN-4 (Selby, 1978) によって、海表面温度のセンサ高度における輝度温度を求め、McClain と同様の方法によって補正式を求めた。Maul は、LOWTRAN-4 の持つ6組の大気モデルにおいて、また6.6°と53.8°の走査角において、海表面温度のチャンネル4と5によって観測される輝度温度を求め、回帰式を次のように求めた。

$$T_{45}=1.0 \cdot T_4+3.35(T_4-T_5)-272.83 \quad \text{.....(14)}$$

3.3 2色温度計の原理を応用した補正式

物理温度 T (°K) の物体の観測波数 ν (cm^{-1}) における放射輝度エネルギー E_ν ($\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$) は、プランクの関数によって式(4)と同様に求められる。

$$E_\nu = e \cdot \frac{C_1 \cdot \nu^3}{\exp\left(\frac{C_2 \cdot \nu}{T}\right) - 1} \quad \text{.....(15)}$$

ここで、 e は物体の放射率、 C_1 および C_2 は(4)式と同じ定数である。そこで、ふたつの観測波数 ν_4 、 ν_5 (cm^{-1}) について、それぞれの放射率 e_4 、 e_5 、また衛星レベルのセンサまでの大気の透過率を t_4 、 t_5 とすると、到達エネルギーは、

$$E_{\nu 4} = e_4 \cdot t_4 \cdot \frac{C_1 \cdot \nu_4^3}{\exp\left(\frac{C_2 \cdot \nu_4}{T}\right) - 1} \quad \text{...(16-1)}$$

$$E_{\nu 5} = e_5 \cdot t_5 \cdot \frac{C_1 \cdot \nu_5^3}{\exp\left(\frac{C_2 \cdot \nu_5}{T}\right) - 1} \quad \text{...(16-2)}$$

となる。2色温度計では放射率と透過率を等しいと考えて、観測エネルギーと波数の関係から物理温度を求める。ここでは、大気の透過率の2波長帯

域における差に注目し、物理温度を求めるため、放射率が等しい ($e_4 \simeq e_5$) と考えると、

$$\frac{E_{\nu 5} \cdot t_4 \cdot \nu_4^3 \exp\left(\frac{C_2 \cdot \nu_4}{T}\right) - 1}{E_{\nu 4} \cdot t_5 \cdot \nu_5^3 \exp\left(\frac{C_2 \cdot \nu_5}{T}\right) - 1} = \dots\dots\dots(17)$$

が成立する。0~30°Cの物理温度の範囲において、右辺の-1を消去し、対数をとると、求める海表面温度 T (°C) は次式に与えられる。

$$T = \frac{C_2(\nu_4 - \nu_5)}{\ln\left(\frac{E_{\nu 5}}{E_{\nu 4}} \cdot \frac{t_4}{t_5} \cdot \frac{\nu_4^3}{\nu_5^3}\right)} - 273.16 \quad \text{.....(18)}$$

ここで、未知数として大気の透過率 t_4 、 t_5 が残る。この大気の透過率の比は波数のべき乗で近似可能であり、式(18)は、

$$T = \frac{C_2(\nu_4 - \nu_5)}{\ln\left\{\frac{E_{\nu 5}}{E_{\nu 4}} \cdot \left(\frac{\nu_4}{\nu_5}\right)^{3+a}\right\}} - 273.16 \quad \text{.....(19)}$$

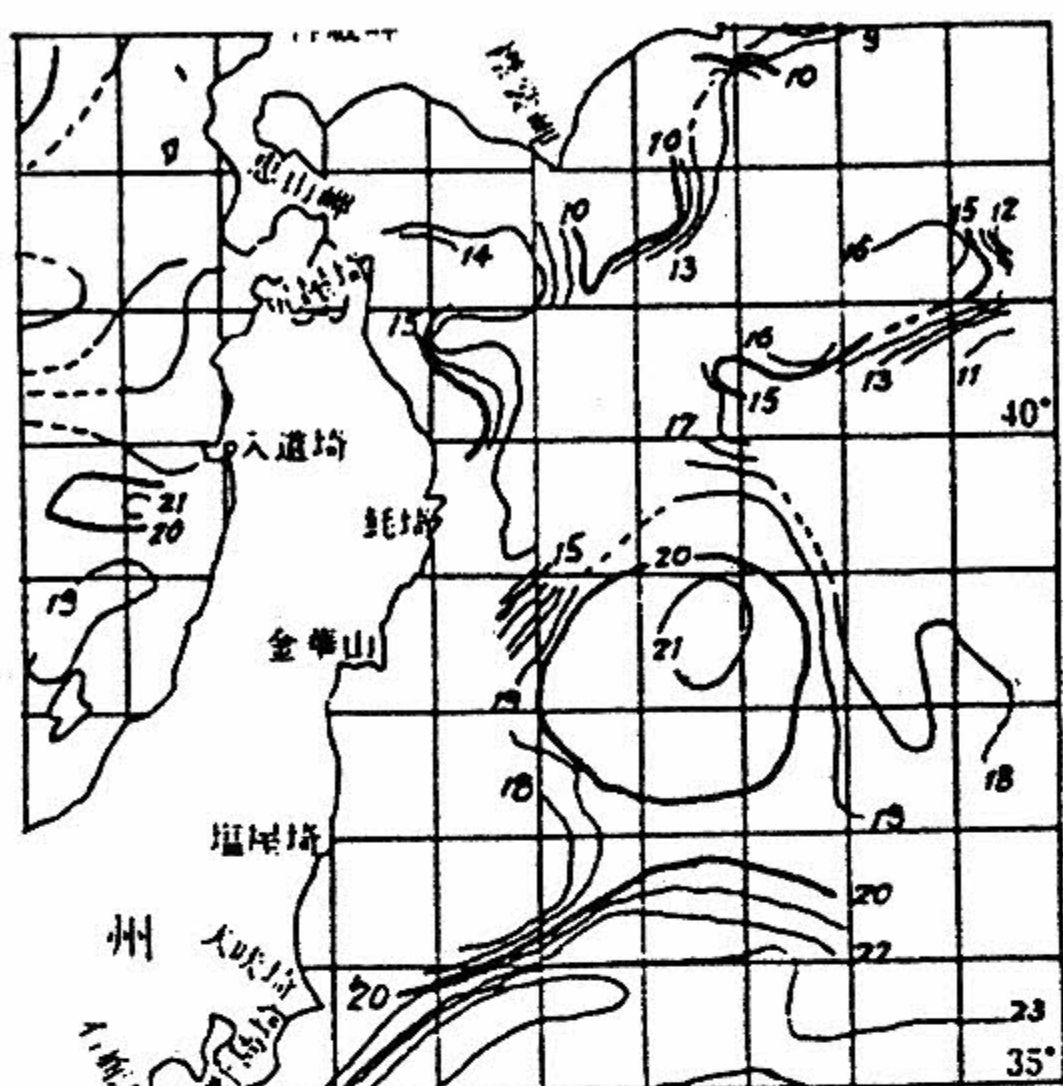
となる。ここで、 a は大気効果を示す係数であるが、本研究では次項の比較の段階で実際のデータから経験的に求めた。

4. 比較データ

1982年夏季および冬季のAVHRRデータについて各補正式にもとづく処理を施し、海上保安庁水路部発行の海洋速報の表面温度分布と比較し、その誤差について検討を加える。海洋速報の示す海表面温度値は、約2週間の、複数の観測船、定期船などによる測定データの平均値を採用している。この海洋速報を人工衛星観測データの検証データとして利用するときの問題点は、

- (1) 衛星観測時刻と海上観測時刻とが必ずしも一致しないこと、
 - (2) 海上観測条件(観測時刻、天候、測器、測定方法など)が一定でないこと、
- などである。このため、本研究では三陸沖の暖水塊が直径200~300Kmの恒温状態を維持している時期を選択し、上記の問題点を無視できる規模において比較を行った。

図2に海洋速報の一例を示す。この海洋速報によると、1982年6月中旬から7月中旬まで、三

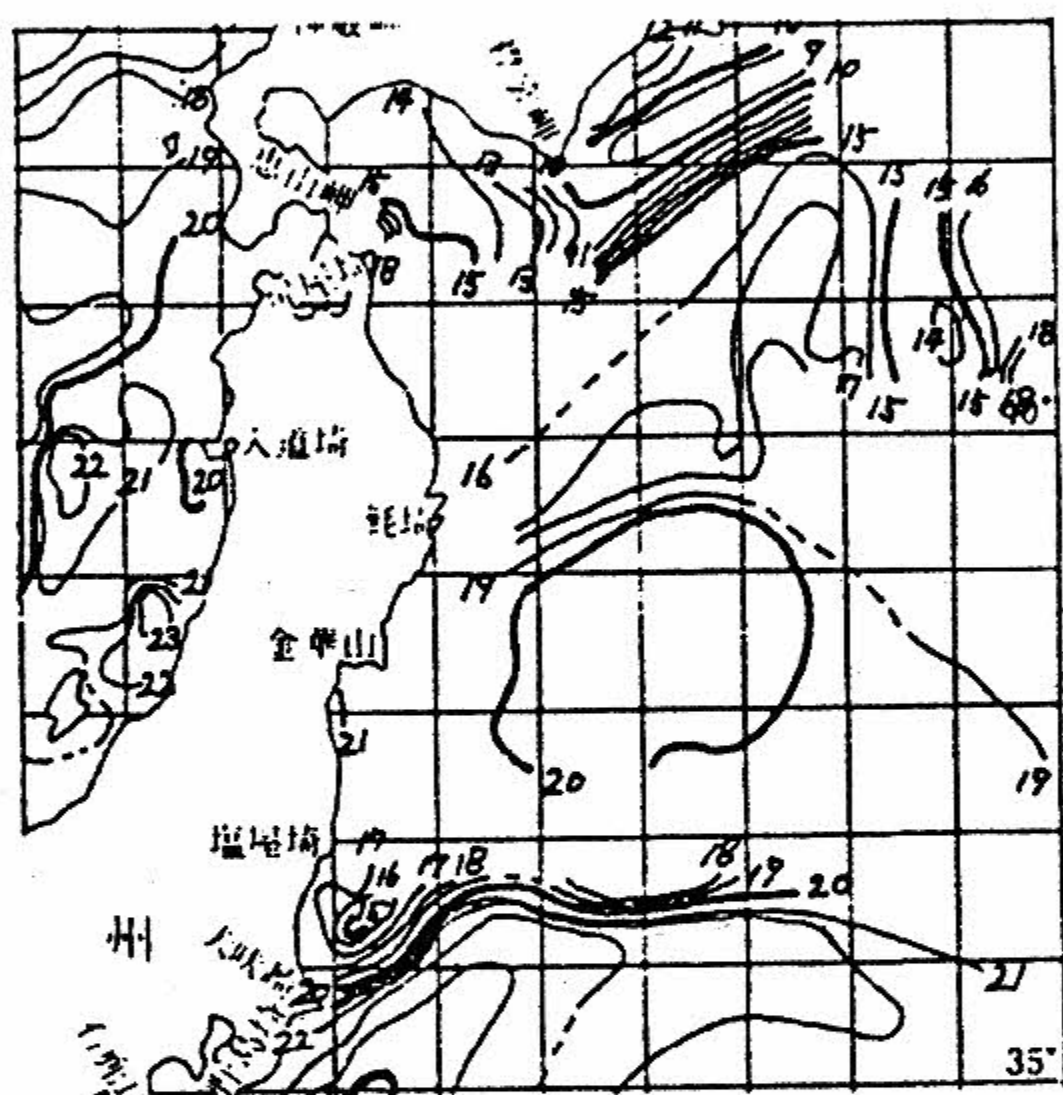


a.

観測期間：1982年6月16日～6月28日

16 June ~ 28 June, 1982

資料：海洋速報・昭和57年13号・抜粋
水路部・昭和57年7月2日

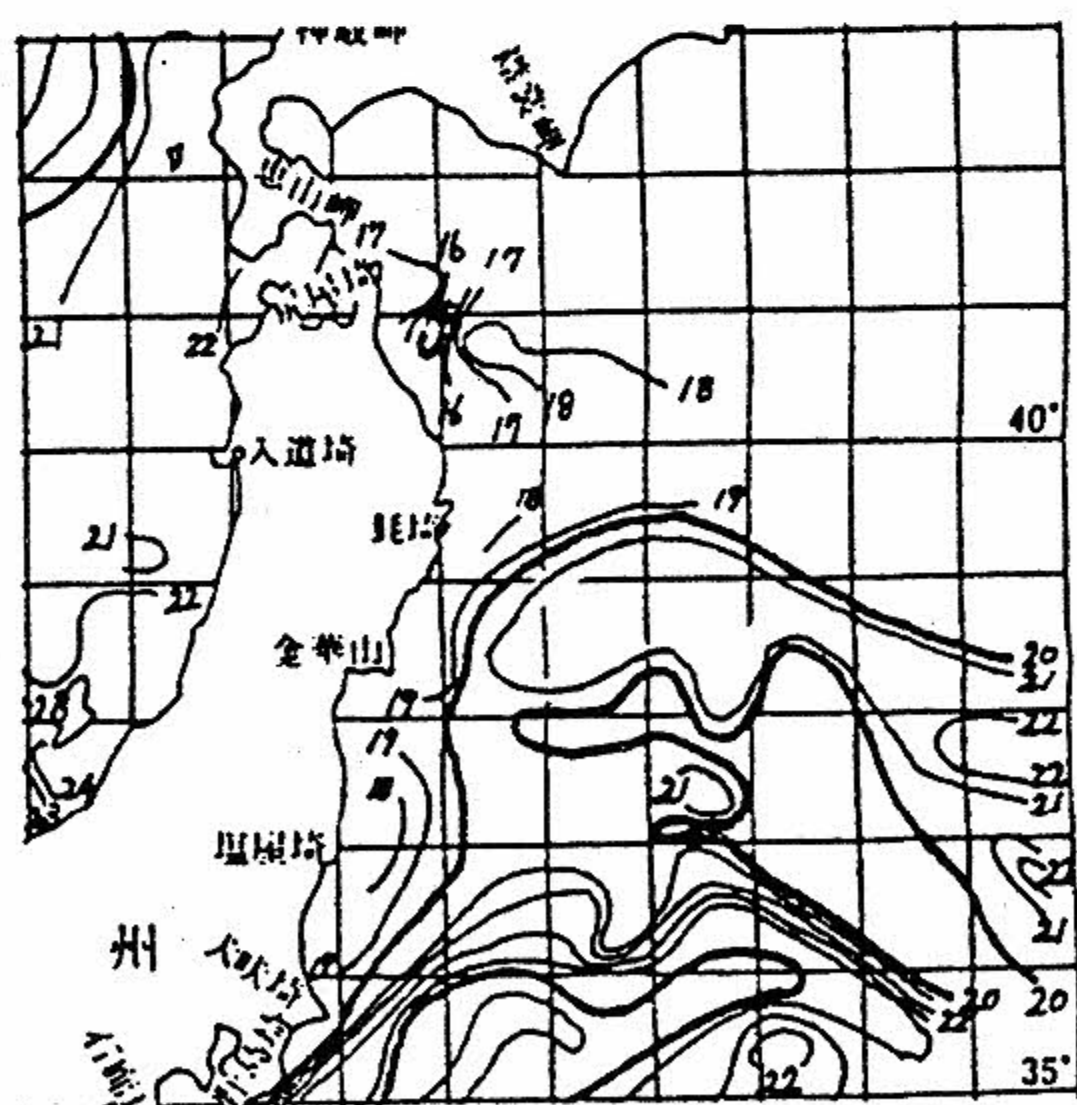


b.

観測期間：1982年7月1日～7月14日

1 July ~ 14 July, 1982

資料：海洋速報・昭和57年14号・抜粋
水路部・昭和57年7月16日



c.

観測期間：1982年7月15日～8月4日

15 July ~ 4 August, 1982

資料：海洋速報・昭和57年15号・抜粋
水路部・昭和57年8月6日

図2 海表面温度分布図

Distribution of sea surface temperatures

陸沖に20℃の大規模な暖水塊の存在するのが認められ、同年7月上旬の衛星データに対して有効な海上調査データを与えると考えられる。

また、他の期間の衛星データと海上調査データの対応についても、十分に安定した海域を選定し、比較の対象とした。

5. 結 果

5.1 海表面温度の精度向上

三陸沖の暖水塊のように長期にわたり恒温状態を保つ海域を選択し、その海域の平均値と海洋速報の与える海表面温度について比較を行った。その比較結果を表2に示す。海洋速報より読み取った海表面温度値をSSTの項に示す。1982年7月3日から9日までの海表面温度は、図2に示されるように北緯38°~39°、東経144°~145°に存在する三陸沖暖水塊の海表面温度を採用した。1982年12月21日については、北緯37°~38°、東経145°~146°に存在する三陸沖暖水塊と、北緯38°~39°、東経143°~144°の金華山近くに南入した親潮の海表面温度を採用した。1982年2月28日については、北緯35°、

東経142°~144°に存在する野島崎沖の黒潮北端と、北緯35°~36°、東経141°~142°の犬吠岬沖の冷水帯の海表面温度を採用した。

チャネル4、5より求められた海上調査域に対応する海域の平均輝度温度をCHANNEL 4、CHANNEL 5の項に示した。また、Maul, McClain および2色温度計の補正結果後の該当海域の平均海表面温度をそれぞれ示した。

表2の下段に誤差の程度を示した。すなわち、海上調査の海表面温度に対する誤差の割合として(E%)、次式に表わす。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|SST - Csst|}{SST} \times 100 \dots\dots(20)$$

ここで、nは海域の数、SSTは海上調査による海表面温度、Csstは計算による海表面温度を示す。また、RMS誤差も併せて示した。

この表2によると、チャネル4あるいは5の海表面温度値は、20%以上の誤差を持ち、3~4℃ほど低目に観測されるのが示されている。一方MaulとMcClainの計算結果は、3~5%の誤差と少なく、また0.5~0.8℃の温度差を示している。2色温度計による方法では、7.5%の誤差、

表2 海上調査データと計算による海表面温度との比較
Difference in sea surface temperatures between
sea-truth and computed value.(℃)

DATE	HH:MM	SST	CHANNEL4	CHANNEL5	Maul	McClain	2-Color
03-JUL-82	13:42	20.000	15.912	14.710	20.123	18.793	21.028
04-JUL-82	13:30	20.000	16.637	15.481	20.697	19.443	21.213
05-JUL-82	13:18	20.000	17.319	16.482	20.294	19.333	18.591
09-JUL-82	14:11	20.000	16.486	15.230	20.862	19.546	22.108
21-DEC-82	13:05	17.000	13.638	12.500	17.640	16.309	18.301
21-DEC-82	13:05	9.000	6.060	5.160	9.244	7.980	3.942
28-FEB-83	14:14	13.000	15.849	15.136	18.402	17.505	16.015
28-FEB-83	14:14	9.000	6.829	6.093	9.441	8.327	7.947
RATE OF ERROR(%)			19.593	25.972	2.936	5.007	7.477
RMSD (℃)			3.099	4.110	0.519	0.761	1.401

HH:MM; 日本標準時(JST) SST; 海洋速報による海表面温度
CHANNEL 4, 5; AVHRRによる輝度温度

1.4℃の温度差を示している。これらの中で Maul と McClain による方法が最もよい結果を示したが、Maul は平均的に 0.5℃ほど海上調査温度より高めに、McClain は逆に 0.8℃ほど低めの海表面温度を与えている。

このように Maul の補正式が、最良の結果を与えた。これは、海表面からの放射輝度エネルギー伝達の計算において、亜熱帯、中緯度、高緯度の夏季、冬季の大気モデルを使用しており、補正式に一般性を与えているためと考えられる。一方、McClain の補正式の計算において、船舶の海上調査温度も用いられているが、観測ブイによる海表面温度を用いているため、海表面下 1 m の表面より低目の温度が補正式に大きく影響を与えているものと考えられる。

2 色温度計による方法は、元来、高温物体の温度測定に利用された方法であり、数式の変形の段階における近似の有効温度に限界がある。ここでは、大気効果を説明する波長比の累乗係数を、経験的に誤差を最小とする値とすることによって、大気補正を行った。この結果、累乗係数を与えないとき 22% の誤差を持つものが、係数を $a = 0.05$ としたとき表 2 に示すとおり 7.5% の誤差に押えることができた。しかし、数式の近似において限界のあるため、7.5% 以上の補正は困難であった。

5.2 海表面温度分布の判読向上

比較の対象となった 1982 年 7 月 3 日、日本標準時 13 時 42 分撮影のオリジナル画像を写真 1 a に示す。走査幅の約 3000 Km と広いことから球面歪みの影響を受け、日本が歪んで投影されている。日本海および三陸沖以外は雲に覆われている。日本海中央部に太陽光の強反射領域がある。写真 1 b に幾何歪みを除去した三陸沖を中心とする画像を示す。これらは、いずれもチャンネル 1, 2, 4 を重ねて表示した画像である。雲の反射率の高い部分が明るく表示され、また陸がそれに続き明るく表示されている。三陸沖の暖水塊の存在が認められる。写真 1 c, 写真 1 d にチャンネル 4 と 5 のレベル・スライス画像を示す。これは、0℃から 25℃まで 1℃おきに等温度のレベル・スライス画像である。チャンネル 4 が、チャンネル 5 よりも全体的に 1℃ほど高い温度を示す。ほぼ類似した

温度分布を示すが、微細部分また温度境界部分において異なる温度分布を示す。

写真 1 c と写真 1 d の各チャンネル画像から大気補正後の海表面温度分布を求めたものを写真 1 e に示す。これは、写真 1 c, 写真 1 d と同様の等温度のレベル・スライス画像である。全体として雑音の多い画像という印象を与える。しかし、海表面温度の連続変化部分の様子が明瞭になった。たとえば、北緯 38°から 39°、東経 146°から 147°海域に黒潮から分離した暖水塊の存在が認められるようになった。また、津軽海峡から襟裳岬の海域について、オリジナル画像からは津軽暖流の下北半島東側への東進と判断されるところ、大気補正によって津軽暖流の襟裳岬までの第一波、第二波の段階的東進であることがわかった。オリジナルのチャンネル 4 より求めた等温線図を写真 1 f, 補正後の等温線図を写真 1 g に示す。等温線図によっても、黒潮から分離した北緯 38°, 東経 144°を中心とする暖水塊の外郭が明らかに示された。また、北緯 38°, 東経 147°を中心とする暖水塊の存在が、大気補正によって明らかになった。

写真 2 a に 1982 年 7 月 5 日、日本標準時 13 時 18 分のオリジナル画像を示す。これによると三陸沖にサングリッタ領域が見られ、この強反射領域はチャンネル 3 においても観測され、チャンネル 3 を用いた大気補正の困難であることがわかる。写真 2 b に幾何歪みを除去した画像を示す。襟裳岬から三陸沖にかけ雲の存在するのがわかるが、尻屋崎沖の白色部はサングリッタによるものなのか雲によるものか判断の困難なところがある。写真 2 c にチャンネル 4 のオリジナル画像より求めた温度分布図を示す。これによると、可視・近赤波長帯域と異なり、サングリッタの影響を受けずに海表面温度分布の求められることがわかる。また襟裳岬から三陸沖の雲の領域は、写真 1 c に見られたような雲の部分における低温度とは異なることから、薄い雲から構成される領域と考えられる。写真 2 d に大気補正後の海表面温度分布図を示す。これによると、襟裳岬からの領域は、雲の影響を受けない領域と受ける領域が判別された。

つまり、薄雲の周辺部について大気補正が効果的に作用したことによるものと考えられる。これに

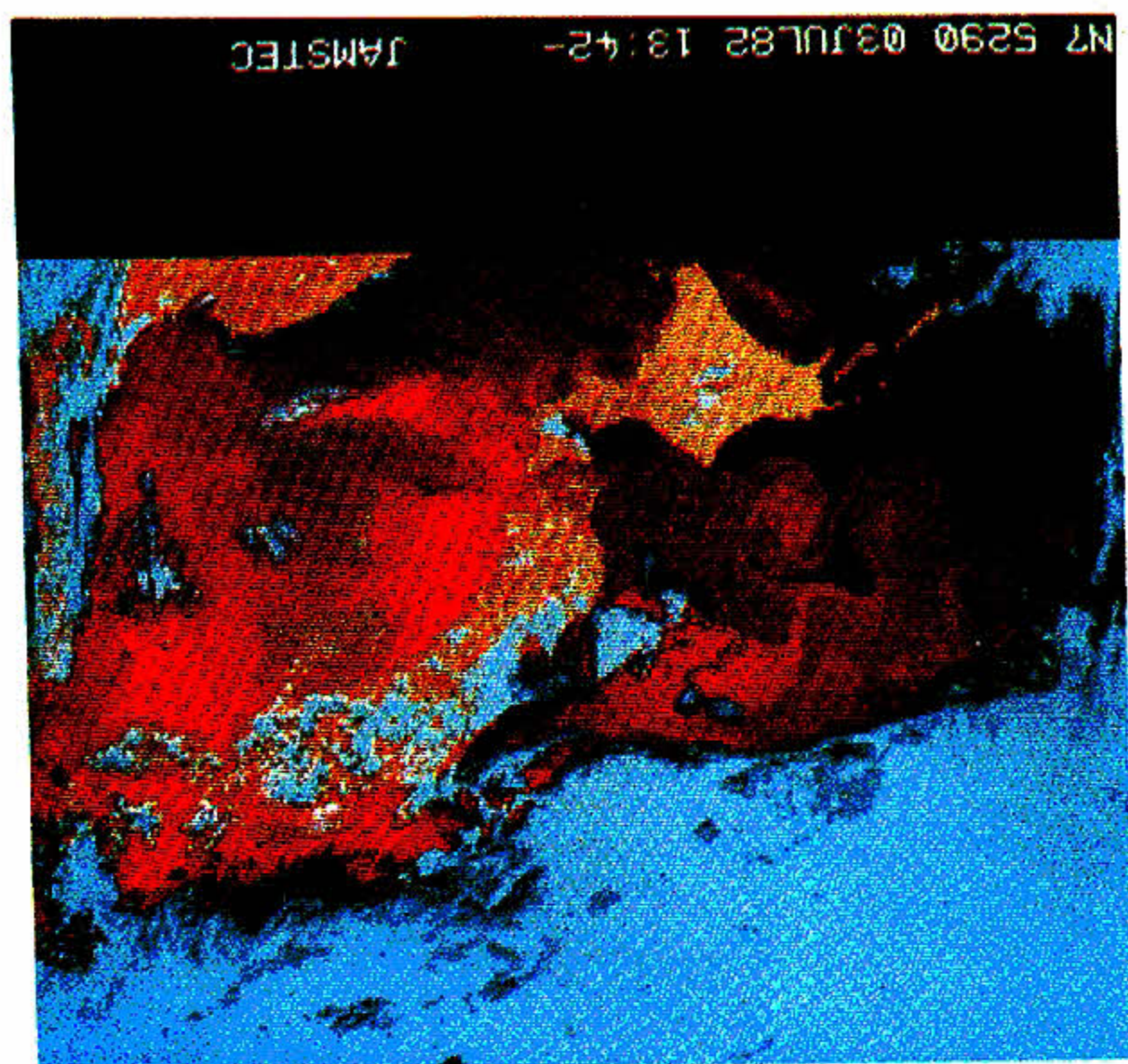


写真1 a AVHRR オリジナル画像
Original image of AVHRR
撮影日時：1982年7月3日13時42分
JST
軌道番号：5290
表示：チャンネル1, 2, 4を重ねて表示

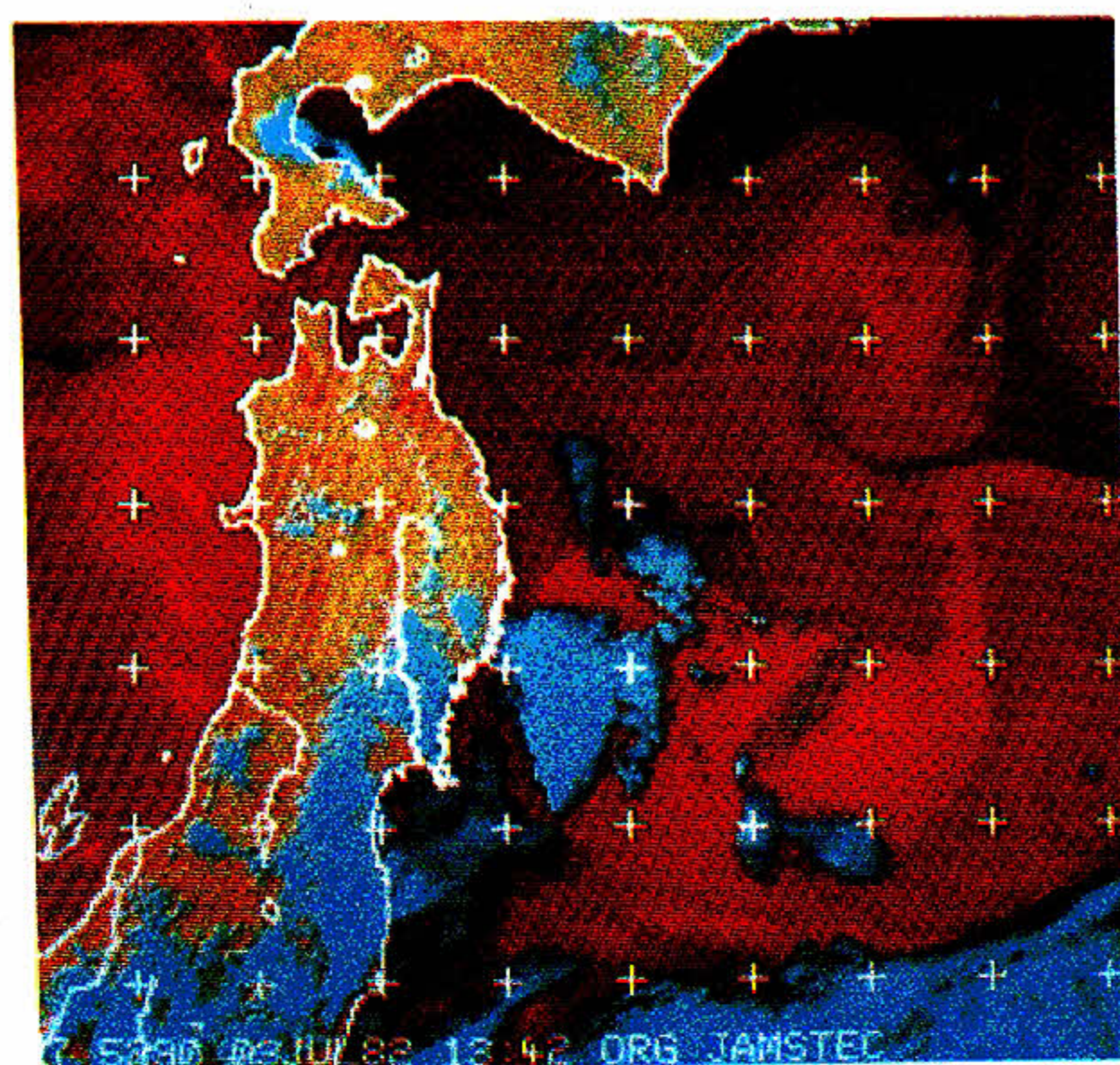


写真1 b AVHRR 幾何補正済画像
Image of AVHRR with
geometric correction
撮影日時および軌道番号は写真1 a に同じ
表示：チャンネル1, 2, 4を重ね、また海岸
線を重ねて表示

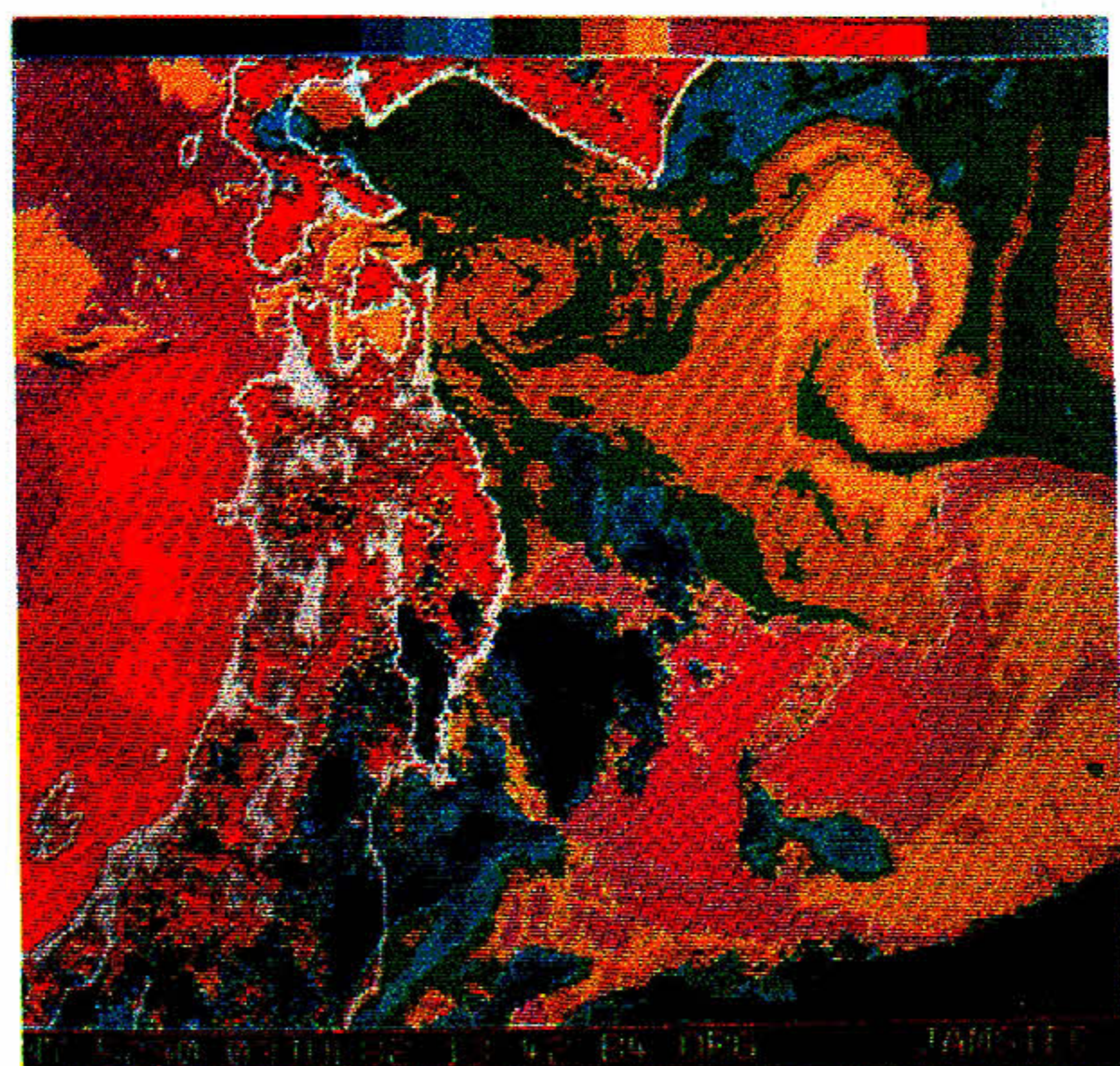


写真1 c チャンネル4より求めた海表面温度分
布図
Distribution of sea surface
temperatures computed from
Channel 4.
撮影日時および軌道番号は写真1 a に同じ
表示：0℃から25℃まで1℃おきにレベル・
スライス表示



写真1 d チャンネル5より求めた海表面温度分
布図
Distribution of sea surface
temperatures computed from
Channel 5.
撮影日時および軌道番号は写真1 a に同じ
表示：写真1 c と同じレベル・スライス表示

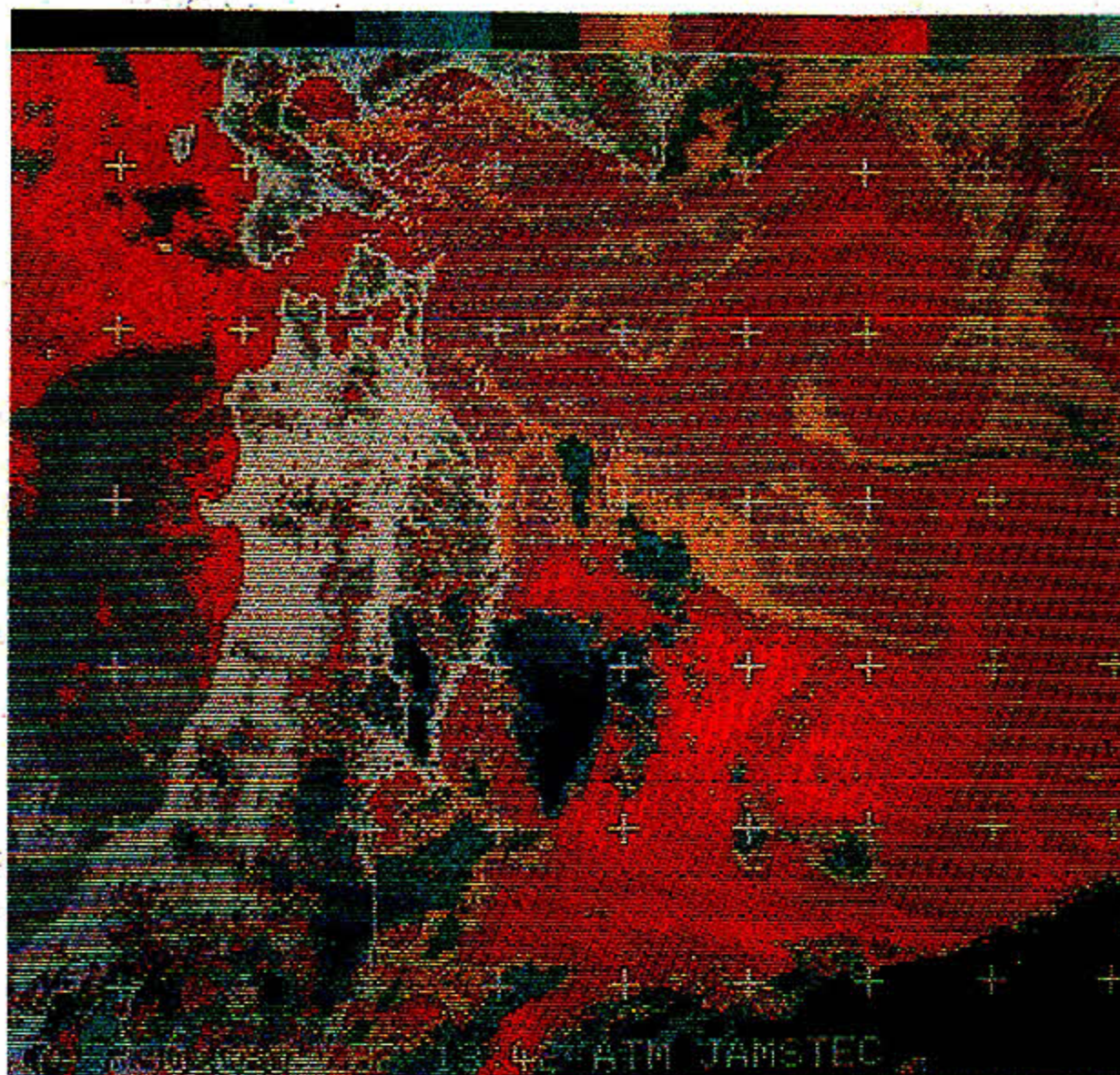


写真1 e 大気補正後の海表面温度分布図
Distribution of sea surface
temperatures with atmospheric
correction
撮影日時および軌道番号は写真1 aに同じ
表示：写真1 c と同じレベル・スライス表示

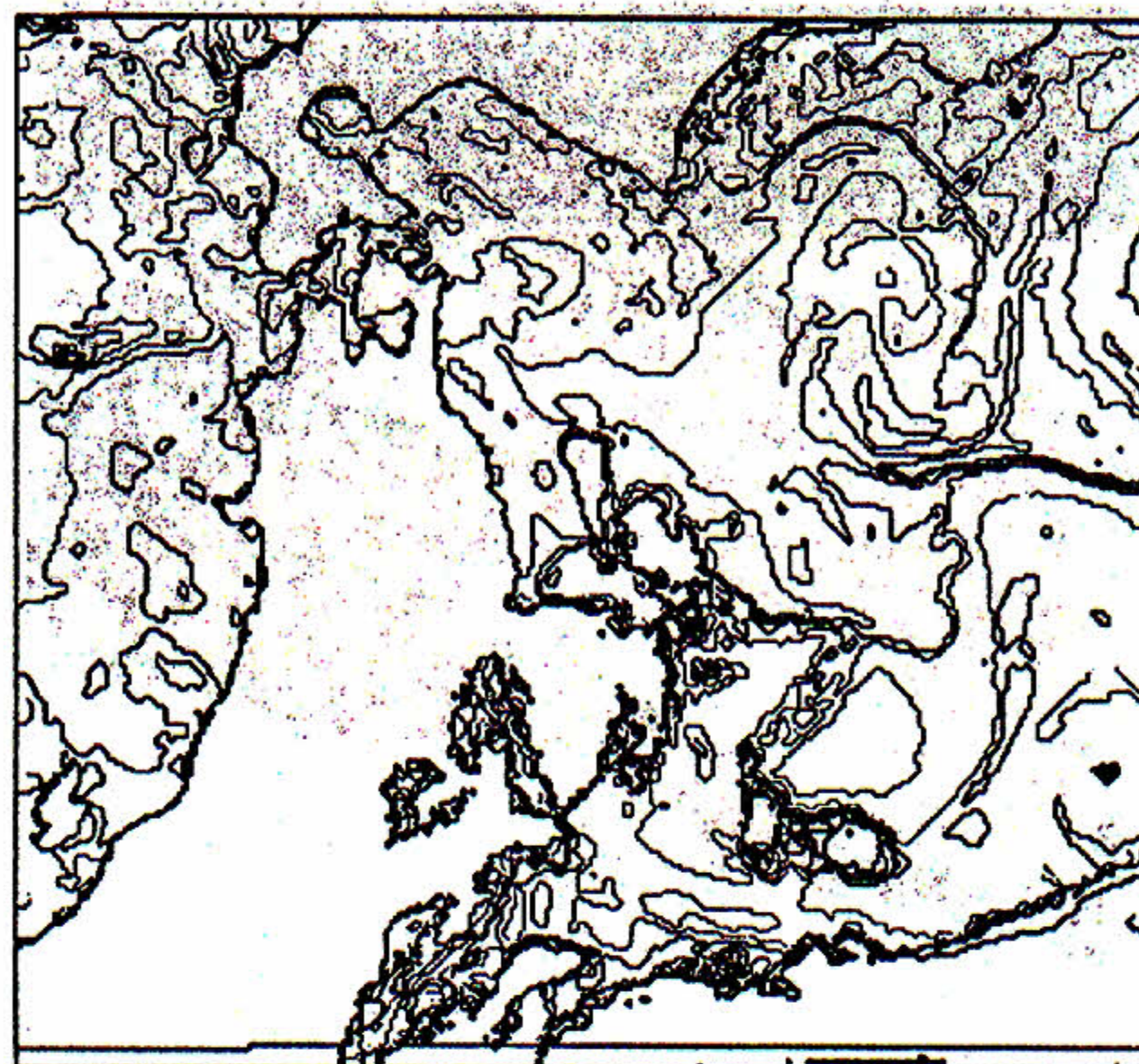


写真1 f 写真1 c より求めた海表面温度の等温
線図（オリジナル画像）
Contour map of sea surface
temperatures drawn from
photo 1c (original)



写真1 g 写真1 e より求めた海表面温度の等温線図（大気補正画像）
Contour map of sea surface temperatures drawn from
photo 1e (with atmospheric effect correction)

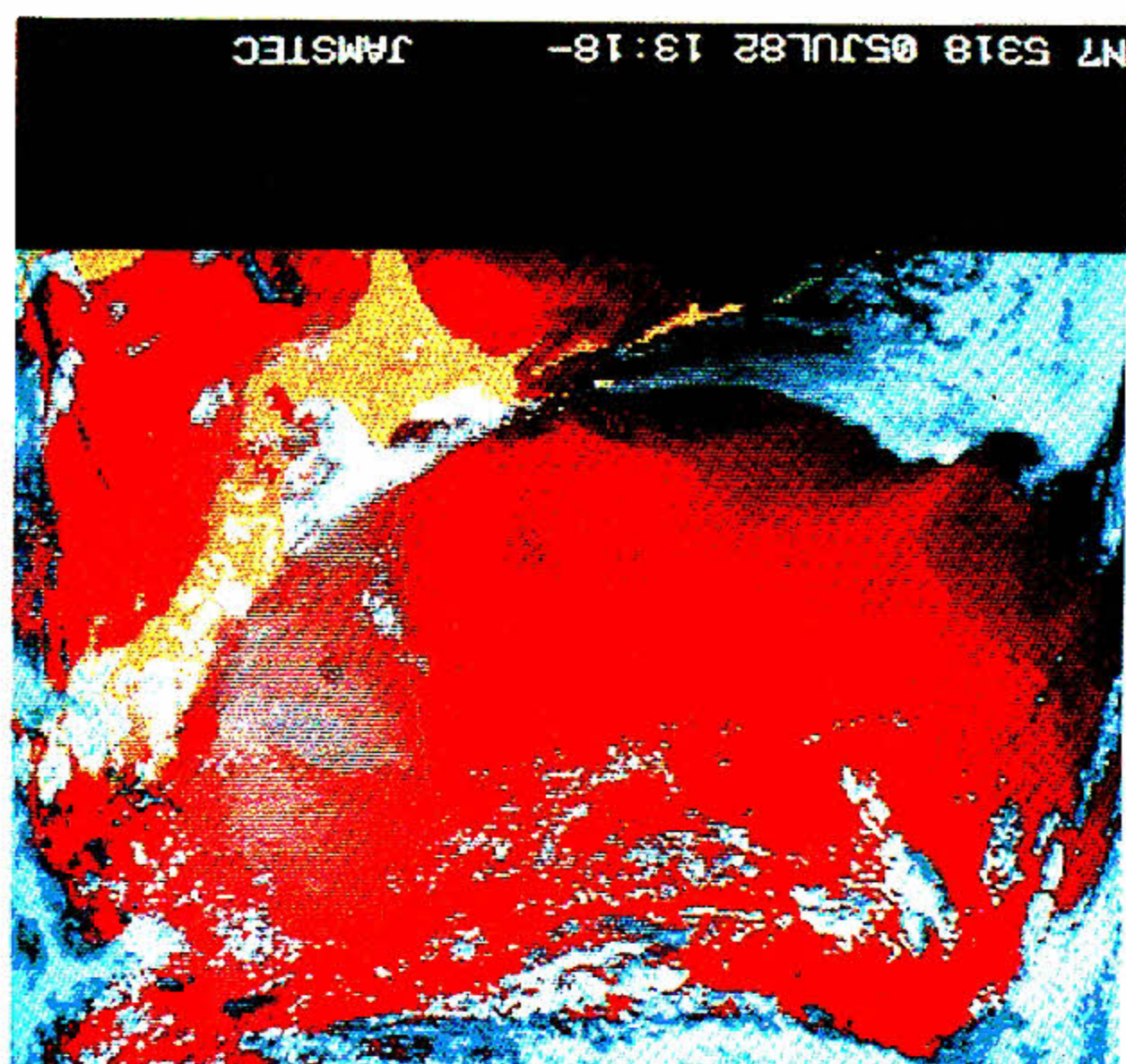


写真 2 a AVHRR オリジナル画像
Original image of AVHRR
撮影日時：1982年7月5日13時18分
JST
軌道番号：5318
表示：チャンネル 1, 2, 4 を重ねて出力

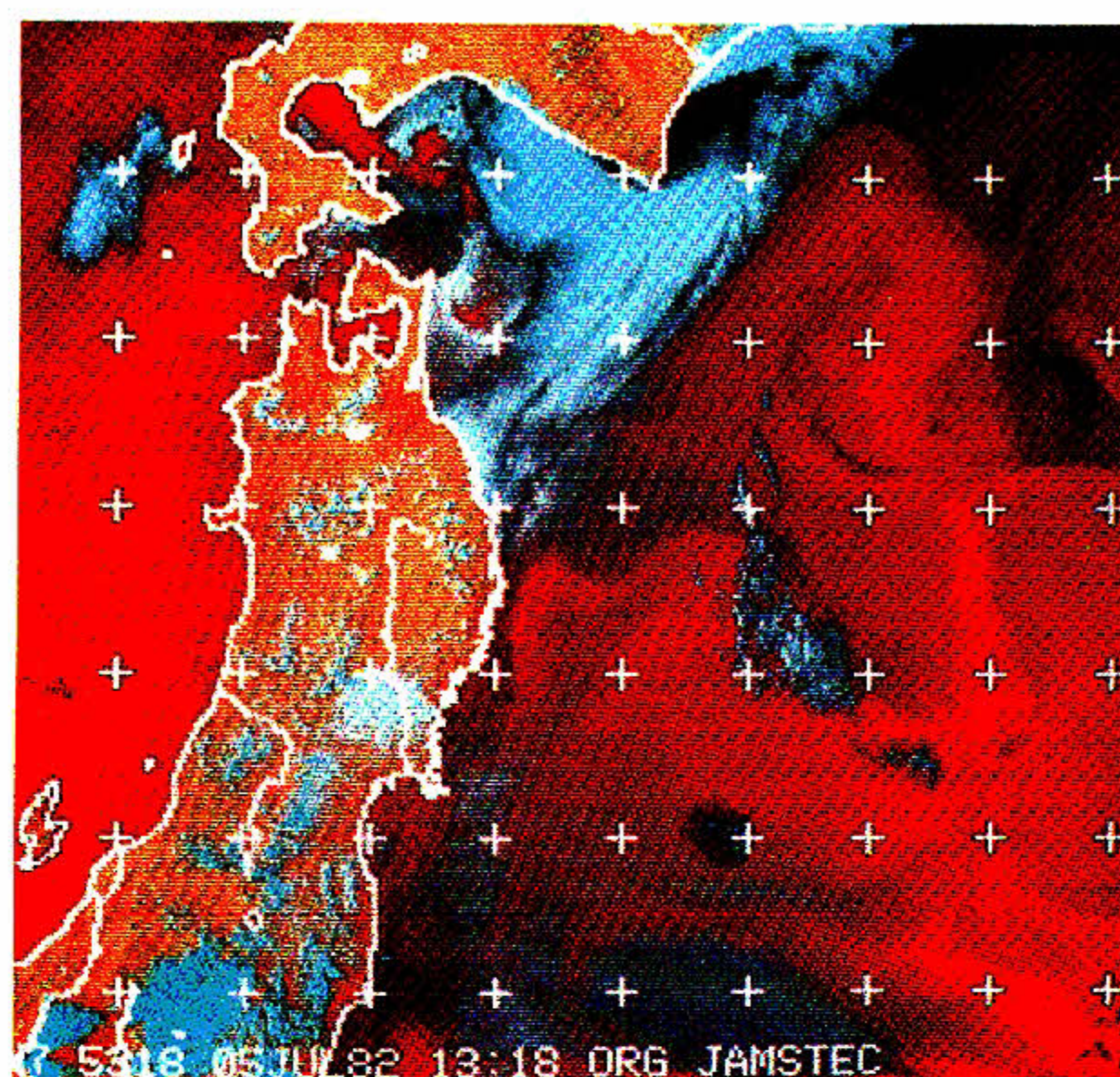


写真 2 b AVHRR 幾何補正済画像
Image of AVHRR with
geometric correction
撮影日時および軌道番号は写真 2 a に同じ
表示：チャンネル 1, 2, 4 を重ね、また海
岸線を重ねて出力

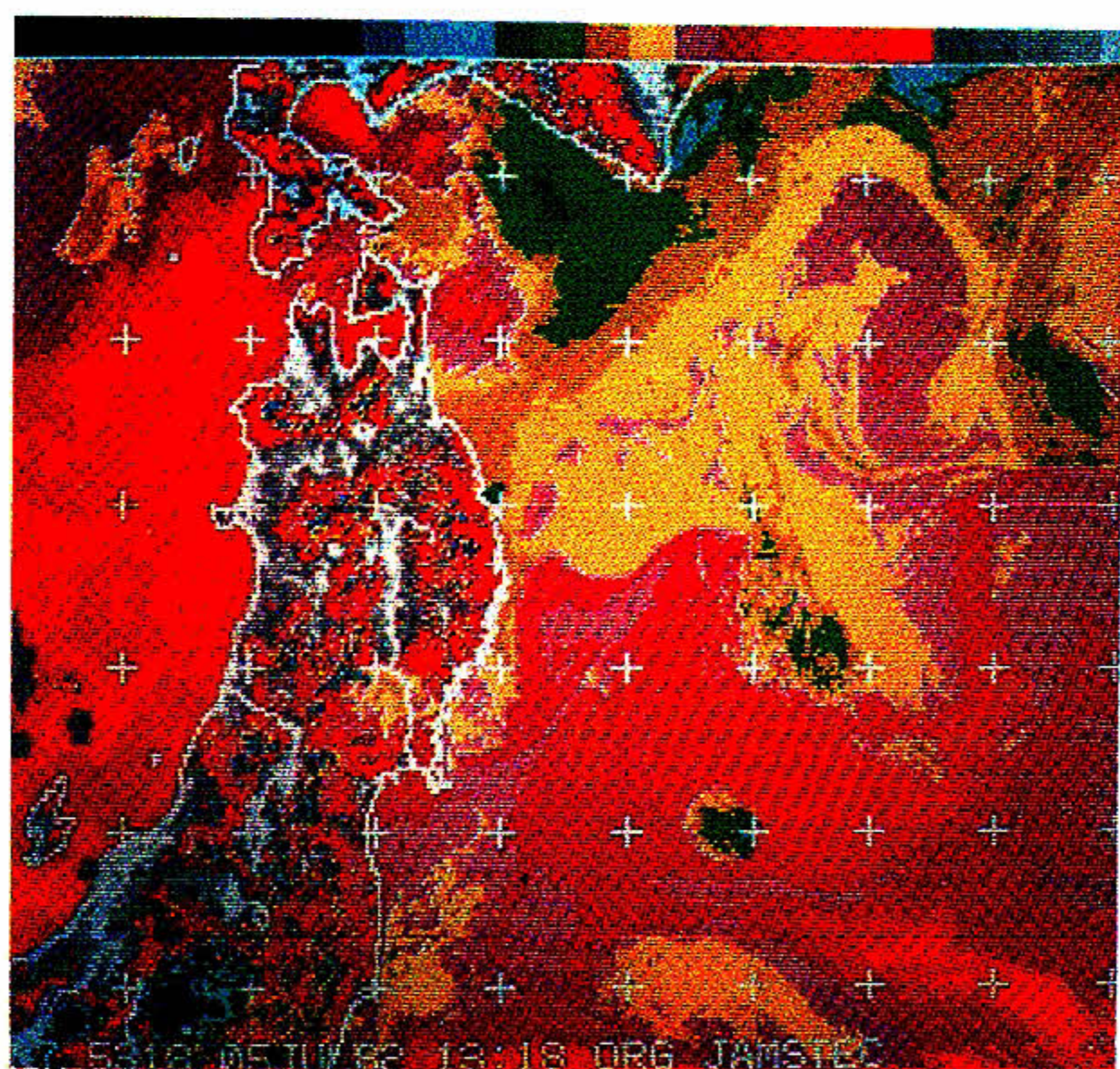


写真 2 c チャンネル 4 より求めた海表面温度分
布図
Distribution of sea surface
temperatures computed from
Channel 4.
撮影日時および軌道番号は写真 2 a に同じ
表示：0℃から 25℃まで 1℃おきにレベル
・スライス表示

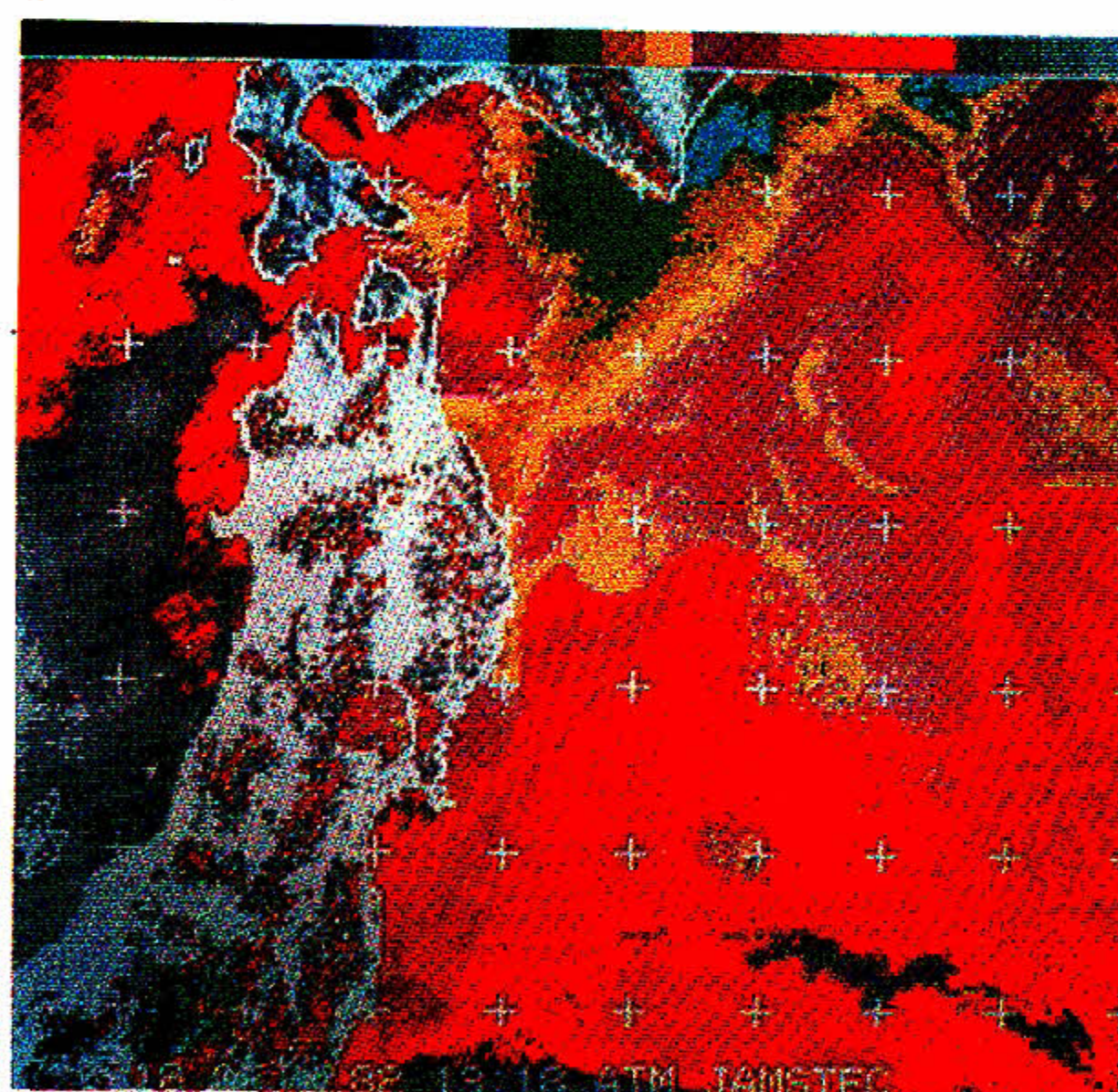


写真 2 d 大気補正後の海表面温度分布図
Distribution of sea surface
temperatures with atmosphe-
ric correction
撮影日時および軌道番号は図 4 a に同じ
表示：写真 2 c と同じレベル・スライス表示

よって北緯 41° 、東経 145° を中心とする黒潮分離の暖水塊とその周辺に存在する親潮系冷水帯との三陸沿岸近くにおける挙動が判読可能となった。一方、北緯 40° から 39° 、東経 144° から 145° に存在する暖水塊の北東端が鮮明に識別可能となった。この部分は、オリジナル画像においては識別困難であったものである。

以上のように2例をもって大気補正効果による海表面温度分布の判読向上を示した。この判読向上によって、これまでひとつの画像内において判読困難であるとき、その前後の撮影画像から推定していた部分について、ひとつの画像内においてかなりの部分の判読が可能となった。

6. まとめ

気象衛星NOAAに搭載されたAVHRRの熱赤外波長帯域から海表面温度を求めるための大気補正方法について検討を加えた。この結果、Maulの提案が海表面温度に近い値を与えた。McClainおよび2色温度計の方法による大気補正は、5%から7%の誤差を持つ結果を与えた。また、大気

補正によって暖水塊の輪郭がはっきりと表われ、海表面温度分布の判読に非常に有効であることが示された。

このふたつの波長帯域による大気補正方法は、現在のところNOAA-7号のAVHRRについてのみ有効である。今後、NOAA-9号以降は、7号と同様の波長帯域を持つAVHRRの搭載が予定されており、海表面温度の観測の高精度化が期待される。一方、チャンネル3の $3.55\sim 3.93$ マイクロメートルの波長帯域を用いた大気補正方法も、McClainによって提案されているが、昼間に太陽反射光を観測してしまうことは別にしても、雑音の問題がある。写真3aおよび写真3bにNOAA7号AVHRRのチャンネル3の変化を示した。1982年7月3日撮影の画像に雑音は見られないが、同年12月21日撮影の画像に走査縞に類似した雑音が見られる。このため、チャンネル3を用いた複数波長帯域による大気補正を施すと、全体に雑音の程度が増し詳細な海表面温度の判読は困難となる。この現象は、NOAA6号、8号にも見られ、センサ受光部の問題と考えられる。

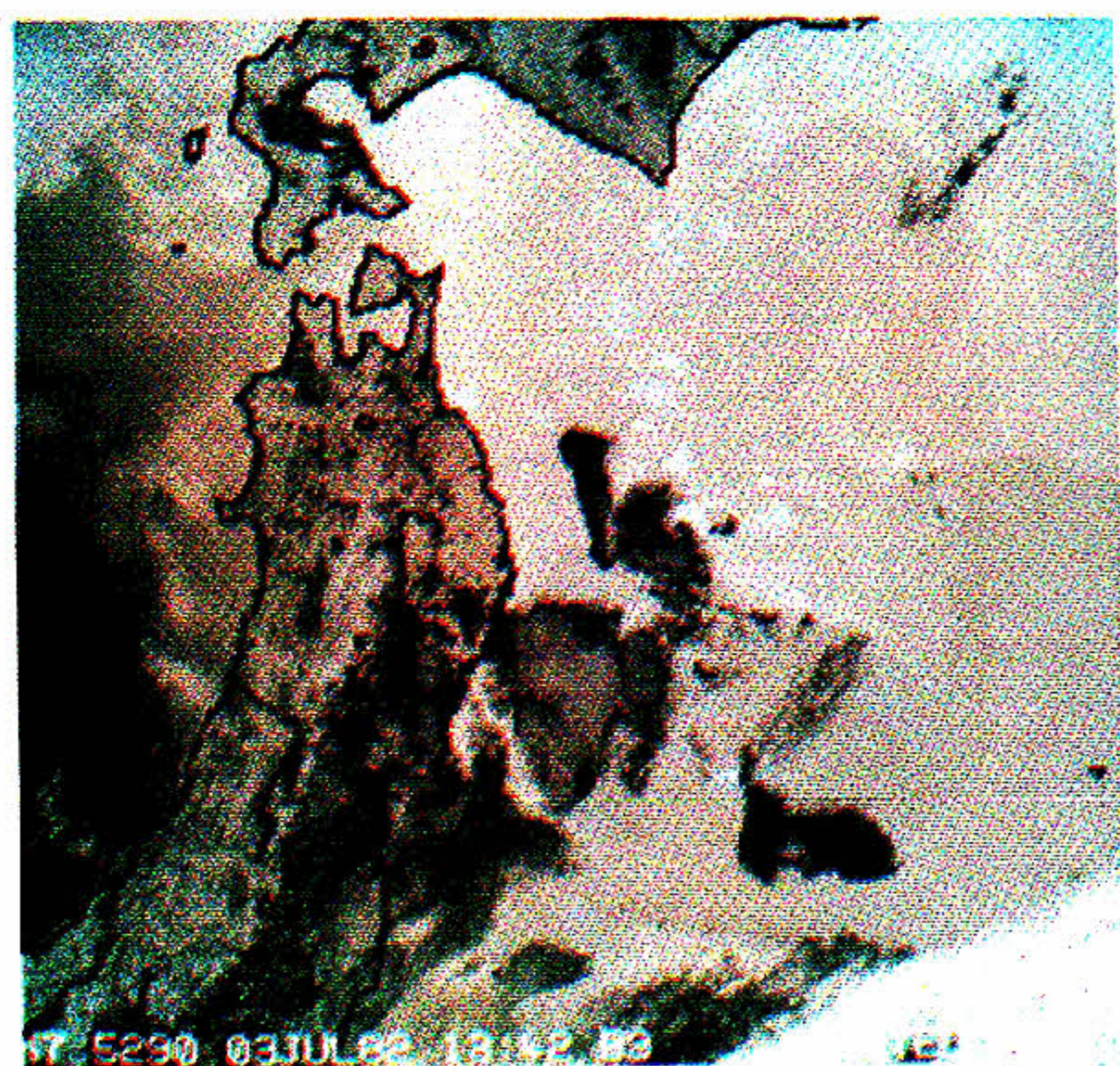


写真3a 正常なAVHRRチャンネル3画像
Image of Channel 3 of
AVHRR for normal operation
撮影日時：1982年7月3日13時42分
JST
軌道番号：5290

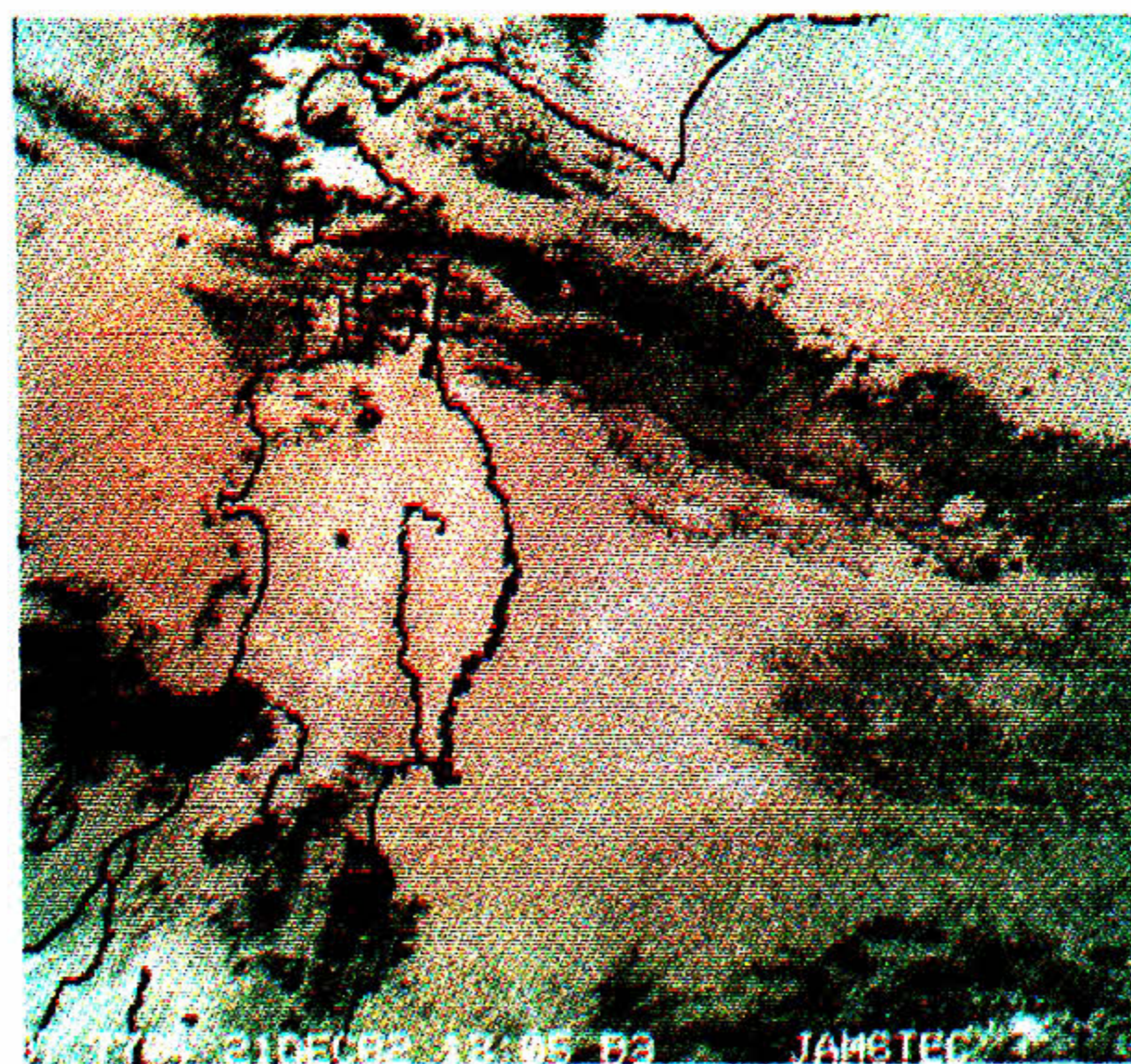


写真3b 雑音を持つAVHRRチャンネル3画像
Image of Channel 3 of
AVHRR with scanning noise
撮影日時：1982年12月21日13時05分
JST
軌道番号：7704

今後、わが国においても「ひまわり」などの静止衛星以外に、極軌道衛星による海表面温度観測も計画されており、波長帯域の選択には慎重な検討が必要である。この研究において実証されたように近似した2波長帯域の設計を期待したい。

文 献

- 1) Kidwell, K.B., "NOAA Polar Orbiter Data (TIROS-N, NOAA-6 and NOAA-7) Users Guide", NOAA, EDIS, NDD, SDSD, WS.DC. (1981)
- 2) Lauritson, L. et al., "Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers", NOAA Tech. Memo. NESS 107, (1979)
- 3) Maul, G.A., 1983, "Zenith Angle Effects in Multichannel Infrared Sea Surface Remote Sensing", Remote Sens. Environ., 13, 439-451
- 4) McClain, E.P., "NOAA Satellite-derived Operational Sea Surface Temperature Products, in Satellite-derived Sea Surface Temperature", Workshop-I, NASA, JPL, JPL Publication 83-84, (1983), C1-C16
- 5) Muneyama, K. et al., "An Application of NOAA AVHRR for Oceanography in the East China Sea, Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas", Ichiye, T. ed., Elsevier Science Publishers, (1984), 375-386
- 6) Saitoh, S. et al., "User's Guide on Operational Pre-processing of TIROS-N/NOAA series AVHRR Data", Tokyo Sci. Ctr., IBM Japan, Rept. N:GE18-1960, (1981)
- 7) Selby, J.E.A., "Atmospheric transmittance/radiance: Computer code LOWTRAN 4.", AFGL-TR-78-0053, Hanscom AFB, MA 01731 (1978)
- 8) Susskind, J., "TIROS-N/NOAA Series, NASA Oceanic Processes Program Ann. Rept. FY1983", NASA Tech. Memo. 86248, Nelson, R.M., Pieri, DC. ed. II-4 - II-5, (1984)
- 9) Tozawa, Y. et al., "SST Estimation by NOAA AVHRR and its Application to Oceanic Front Extraction", Tokyo Sci. Ctr., IBM Japan, Rept. G 318-1556, (1981)

(原稿受理：1984年9月14日)