

## 水平線近傍の赤外線放射特性〔Ⅱ〕

松井 松長\*・玉重 繁良\*・高木 亨\*

### On Spatial Distribution of Radiation near the Sea Line in the Mid-Infrared Region

#### Part 2

Matsunaga MATSUI, Shigeyoshi TAMASHIGE  
and Tohru TAKAGI

#### ABSTRACT

In this paper, the discussion about details of the results of observation on distribution of the sea surface radiation near the sea line which the authors have mentioned in their previous paper, and image processing of the thermograms are described.

- (1) The high radiance area near the sea line widen in the summer, and the sharpness of its distribution curve becomes about five times in the winter.
- (2) The high radiance area near the sea line is the special phenomenon in mid-infrared region (8~13 $\mu$ m band).
- (3) A temperature inversive layer increases the width of high radiance area near the sea line and promotes the lowering of contrast.
- (4) The high radiance area may possibly be extinguished very much on the season that the atmospheric temperature of lower layer is as same as the sea surface temperature.
- (5) The thermograms with few contrast become easy to discriminate by the image processing of binarization.
- (6) The thermograms of the sea surface become easy to grasp the sea surface condition and to discriminate minute target with high radiance by the expressive method of radiance difference.

キーワード：赤外放射分布，海面放射，大気放射，遠隔探査

#### 1. まえがき

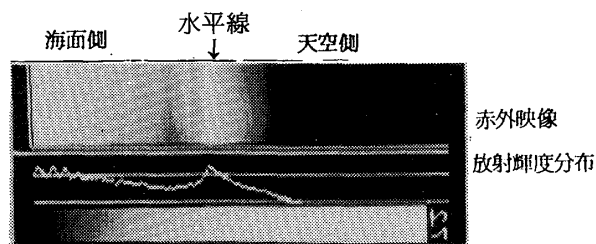
船舶または海岸から対海上方向の赤外線リモートセンシング，サーチ，およびホーミング・システムを考える場合，背景である水平線付近の赤外放射の分布状態が，目標検出の可能性を左右する。中間赤外の大気窓領域（8~13 $\mu$ m）においては，昼・夜間とも天空および海面からの背景放射が水平線付近で最大になり（明るい水平線），夏季にはこの高放射輝度帯が広がって，この種のシステムの動作に大きな障害になることは既に指摘した<sup>1,2)</sup>。

本報では，これまでの数次にわたる海洋の赤外線観測の結果をもとに，水平線付近の放射輝度の分布形の季節変化，高輝度帯が中間赤外域特有の現象であることの実

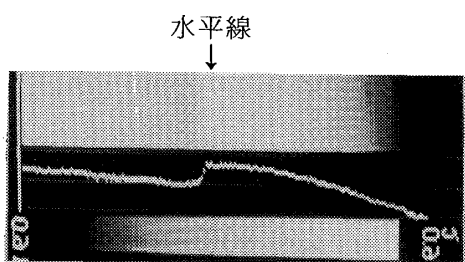
証，3海域の夏季の輝度分布の比較，気象モデルによるマスキング現象と気温鉛直分布の関連性の検証，水平線付近の海面反射率の推定，水平線付近の赤外映像の画像処理など放射輝度分布を種々の面から検討した結果を総括したものである。

#### 2. 放射輝度分布の季節変化

これまでの中間赤外域における低位置からの水平線観測で得られた結果から，水平線付近の高輝度帯の分布形が季節によって変化することは前報で述べた。本章では，その分布形の季節変化について考察する。（Photo. 1 参照）。



(a) 冬季



(b) 夏季

Photo. 1 水平線付近の赤外放射輝度分布

### 2.1 水平線付近の放射分布の尖鋭度

水平線付近の放射輝度分布は Photo. 1 に示すように、明らかな季節変化が認められる。ここではこれまでの観測記録から、その分布形の変化を調査した。分布形の表示法としては Fig. 1 のように、水平線付近の高輝度帯の幅（視角,  $v$ ）と放射輝度差（ $r$ ）の比を尖鋭度（ $R$ ）として表した。その結果を Fig. 2 に示す。

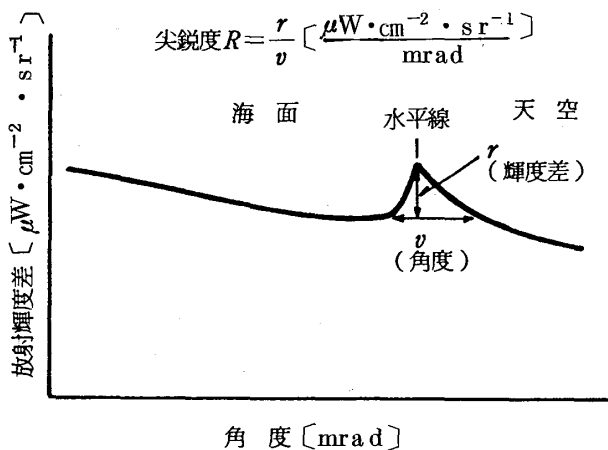


Fig. 1 放射輝度分布の尖鋭度

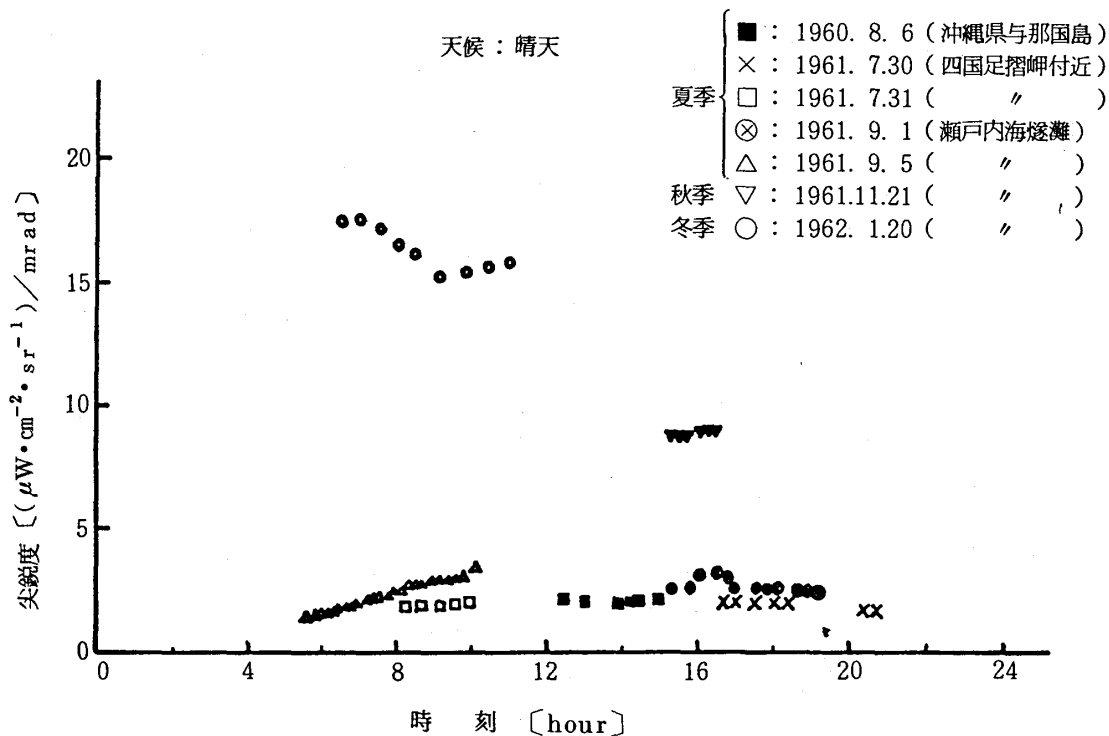


Fig. 2 放射輝度分布形（尖鋭度）の季節変化

同図より輝度分布の尖鋭度は夏季の1.5~3.5に対して冬季の15~18まで大きく変化していて、夏季と冬季の分布形の違いが明確に示されている。また、観測例は少ないが春季と秋季はほぼ中間の値になり、年間を通じてみた場合、冬形を上限、夏形を下限とする季節変化があるものと推定される。

なお、放射輝度の分布形の日変化、天候との関係などの検討は長期間にわたる連続観測の資料を必要とするために、ここでは割愛した。

2.2 高放射輝度帯の消滅

前節で述べた水平線付近の高輝度帯が生じる原因は、水平線直上部すなわち下層大気からの放射が主因であり、それは下層部の気温、湿度、混濁度などに依存するが、なかでも気温による影響が大きい。一方、水平線付近の放射の分布形はこのような大気放射レベルと海面からの自己放射レベル（主として海面温度に依存する）によって形成されると考えられるから、下層大気の気温と海面温度がほぼ等しくなるような気象条件下では高放射輝度帯が生じないものと考えられる。

瀬戸内海中部のような中緯度の海域においては、晩春と初秋にこのような気象条件になるものと推定される。Photo. 2は瀬戸内海中部の燧灘を対象とした観測例であって、1961年9月5日早朝（5時~7時）の観測記録では高放射輝度帯がほとんど消滅している。

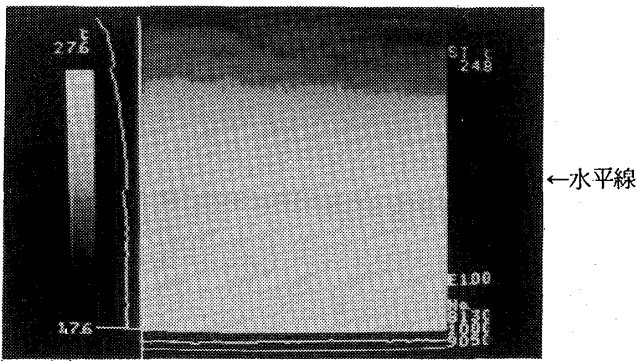


Photo. 2 水平線付近の放射輝度差の小さい観測例  
 波長域 8~13 μm 帯, 広島県向島,  
 (1986.9.15 06:00, 天候: 雲点在)  
 気温: 25℃, 湿度: 81%.

Fig. 3は上記の観測時の気象条件に近いモデルから計算した結果であって、水平線付近の放射輝度の変化が小さくなっている。

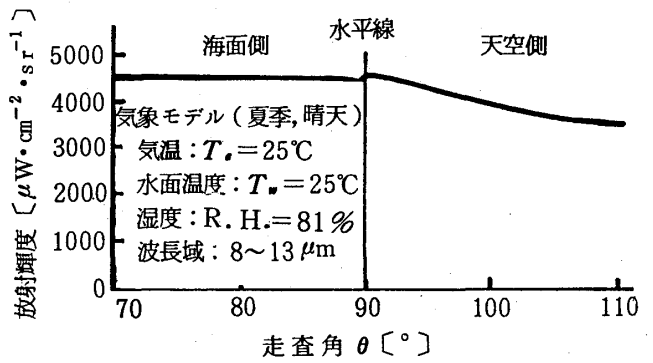
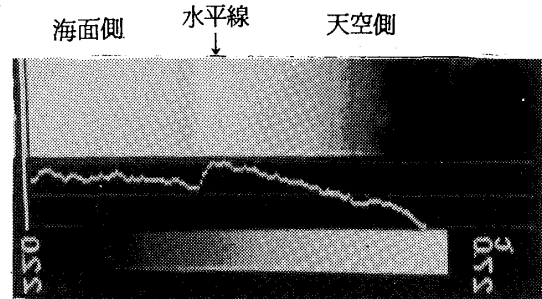


Fig. 3 気温と水面温度の等しいときの輝度分布

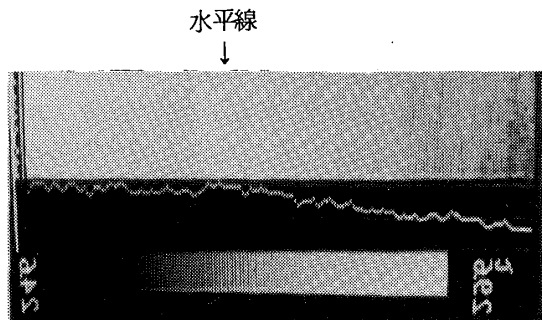
3. 波長域間および海域間の放射輝度分布の比較

3.1 中間赤外域特有の高放射輝度帯

赤外線リモート・センシングにおいて多く用いられる波長域は3~5 μmおよび8~13 μmである。Photo. 3は同一海面をこれらの2波長域で同時観測した例であって、使用した観測装置（いずれも富士通製、インフラアイ）は動作波長域が異なるほかは同一仕様のものである。photo. 3(a), (b)は水平線付近の高放射輝度帯が8



(a) 波長域 8~13 μm



(b) 波長域 3~5 μm

Photo. 3 2波長帯の放射輝度分布の比較  
 (沖縄県与那国島, 夏季)

~13 μmの波長域に特有の現象であることを示している。

高放射輝度帯は2.2で述べた通り、海面の自己放射および低空の大気放射によって生じる現象であり、これらはそれぞれ海面温度および下層大気温度に大きく依存することから、8~13 $\mu\text{m}$ 帯において強く現われるが(ウィーンの変位則より)、他の波長域においては弱くなり、近赤外の3~5 $\mu\text{m}$ 帯あるいは可視域ではほとんど認めることができない。しかし、昼間は近赤外域において散乱太陽光が分布しているために、水平線においてこれによる輝度差が生じることがある。

### 3.2 3海域間の放射輝度分布の比較

すでに述べた通り、高放射輝度帯は低空の気温および海面温度に依存するところが大きいことから、これらと密接な関係をもつ地形、緯度と放射輝度分布との関係を検討してみた。

観測海域は内海として本学に近い瀬戸内海燧灘、外洋として四国足摺岬付近、沖縄県与那国島付近の3海域について比較した。Photo. 4(a), (b), (c)にそれぞれの観測例を示す。これらを比較すれば、放射輝度分布がいずれ

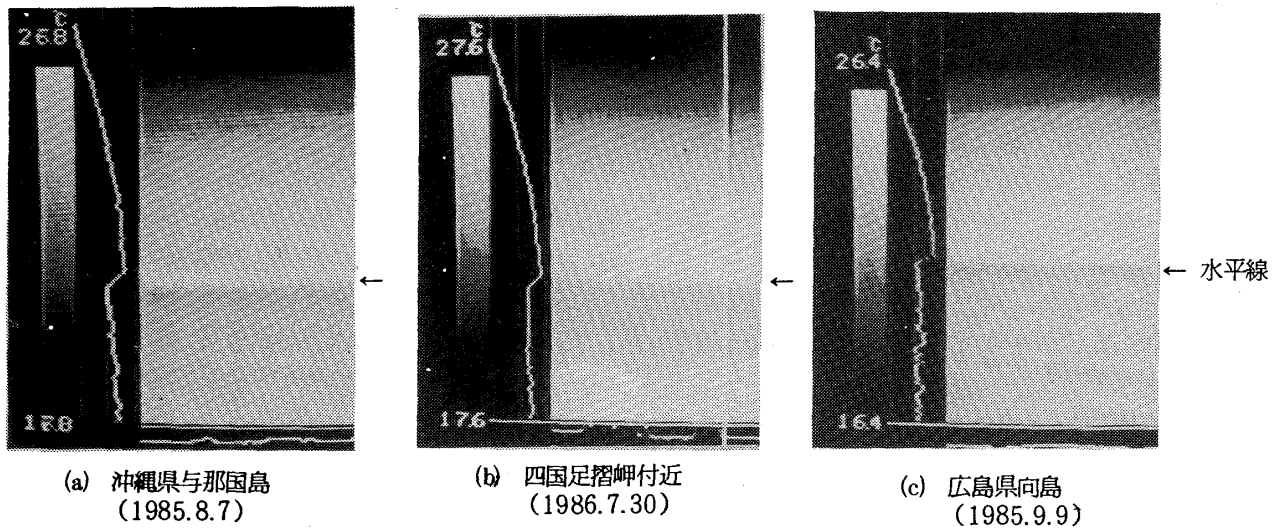


Photo. 4 3海域における放射輝度分布の比較  
(夏季, 晴天, 波長域: 8~13 $\mu\text{m}$ 帯)

も夏形の類似した分布形であって、緯度差、地形の差はほとんど認められない。3例の水平線直前の輝度分布(立ち上がり部分)が若干異なるのは、海面状態(波浪)の相違による海面反射率の違いによるものと考えられる。

### 4. 気象モデルによる分布形の考察

放射輝度分布は主に気温、水温、湿度などによってその分布形が相違することはすでに述べた通りである。ここでは気象モデルによるシミュレーションから、背景によるコントラストの低下について考察し、さらに水平線直前の海面反射率を推定した。

#### 4.1 マスキング現象と気温鉛直分布の関係

これまでの向島における観測結果から、中間赤外域では、夏季に水平線付近の背景と船舶や島とのコントラストの低下が頻繁に起こることが判明した。Photo. 5はその例であり、画面右端の距離3~10kmの因島および弓削島が見えなくなっている。これを気象モデルを用いて検討してみた。

いま、海岸または船上などの低位置からみた場合の背景の放射輝度 $N_{bg}$ は、水平線以下の範囲(海面方向)では

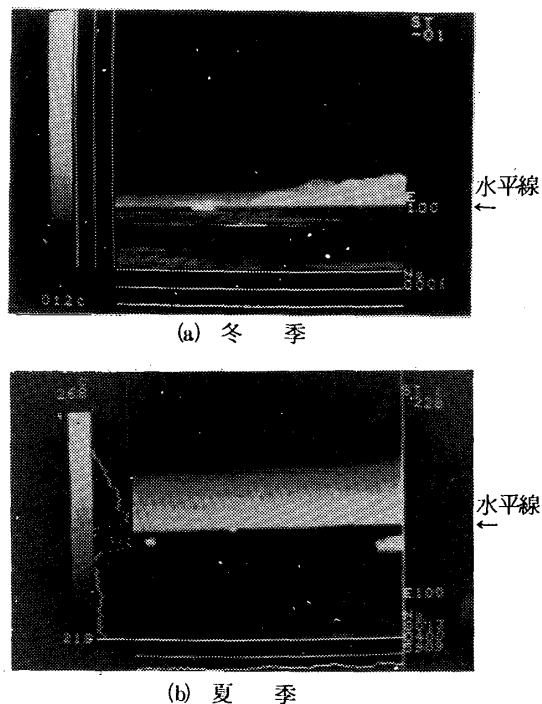


Photo. 5 夏季のコントラストの低下  
(広島県向島, 8~13 $\mu\text{m}$ 帯)

$$N_{bg}(\theta) = \tau_a(\theta) \{ \epsilon_w(\theta) \cdot N_b(T_w) + \rho_w(\theta) \cdot N_s(Z) \} + N_a(\theta) \quad (1)$$

水平線以上の方向(天空方向)においては

$$N_{bg}(\theta) = N_s(Z) \quad (2)$$

で表わされることは前報で述べた通りである。

ここでコントラストの低下およびマスキング現象に大きく影響するのは天空放射(大気放射)  $N_s(Z)$  の分布形であって、通常の気温分布においては

$$N_s(Z) \approx N_b(T_a) \{ 1 - \exp(-\alpha_a \sec^{1/2} Z) \} \quad (3)$$

であるが、逆転層が存在する場合には(3)式の分布形にならない。ただし、 $\alpha_a$  は赤外線減衰係数、 $Z$  は天頂角、 $T_a$  は気温である。

いま Fig. 4 のような夏季の下層大気モデルを仮定し、これらと式(1)を用いて検討してみる。3種の気象モデルすなわち、(1)通常の気温分布、(2)一定分布、および(3)逆転分布の場合についての計算結果を、Fig. 5 に示す。

これら3種の気温分布はいずれも夏季のモデルである

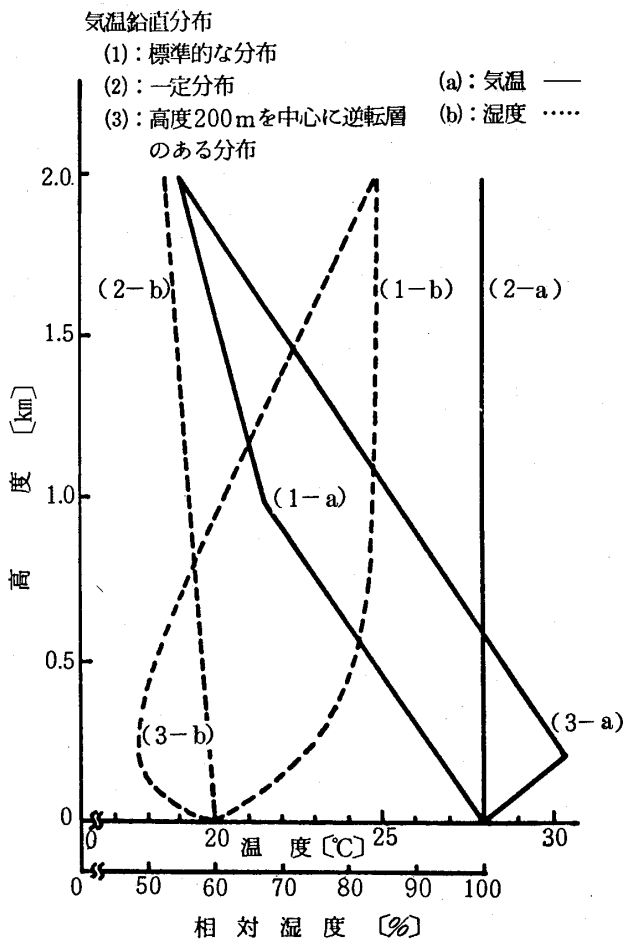


Fig. 4 夏季の下層大気モデル (鉛直気温・湿度分布)

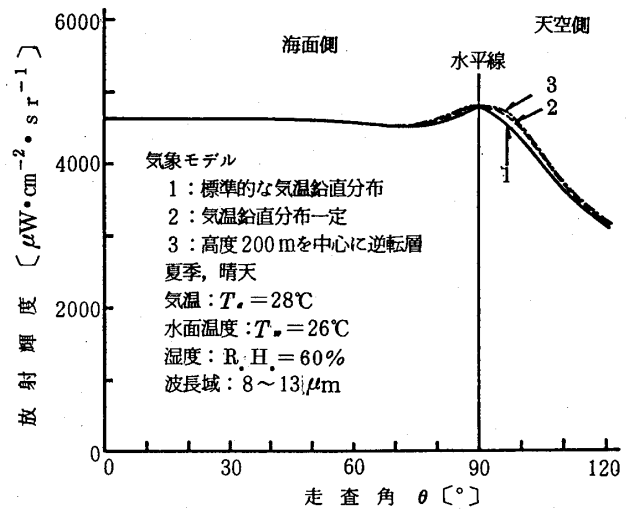


Fig. 5 3種類の気温鉛直分布モデルより求めた放射輝度分布

が、曲線1の通常の分布に対して、曲線3の逆転分布(高度200 mで最大)の場合は全般にレベルが高く、かつ頂部が平坦になっていて、マスキングが起こりやすい。

この傾向は接地逆転になればさらに強くなることが考えられる。

マスキング現象を明らかにするために、コントラスト低下時の水平線付近(走査角80~100°)の島と背景の放射輝度分布を比較してみた。(Fig. 6)。島が水平

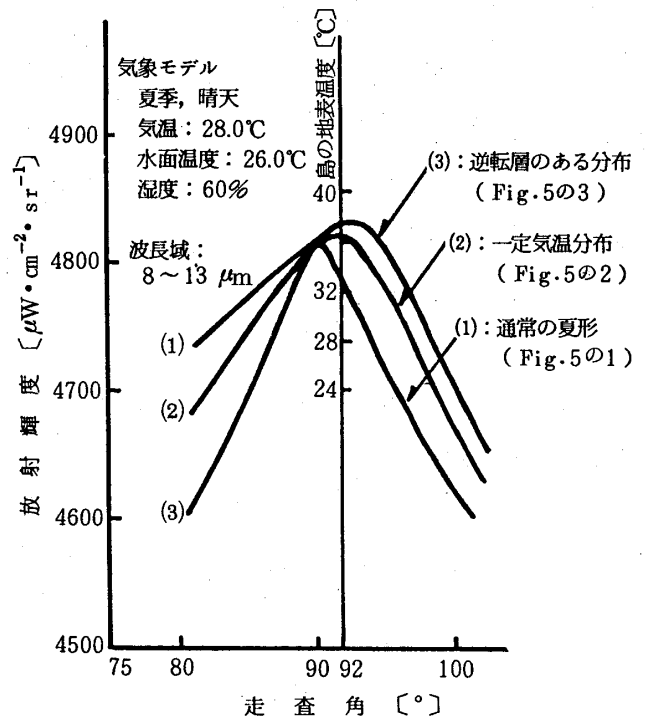
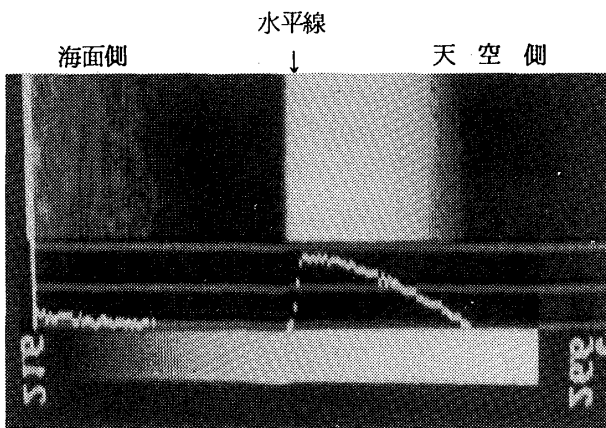


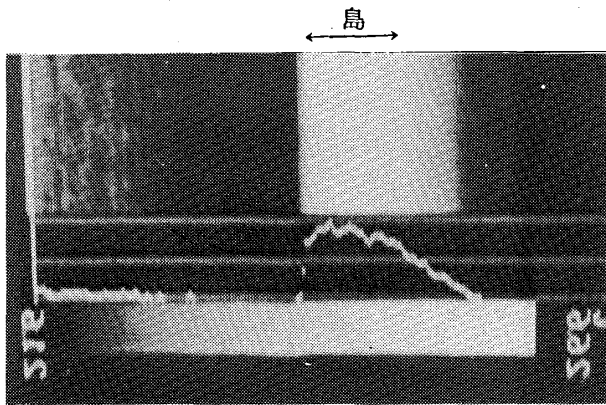
Fig. 6 夏季の気象モデルより求めた水平線付近の放射輝度分布 (コントラスト低下時の島と背景の輝度の比較)

線上0~3°(走査角90°~93°)の範囲にあるとして(距離5kmで260mの山に相当),その放射率を0.95,温度を29~38°Cとしたときの島の放射輝度と3種類の夏形の大気モデルによる背景放射輝度分布とを対比させた。Fig. 6(2)のモデルの場合,島の温度が36°C以下であればマスクされることを意味している。(3)のモデルについても同様に考えることができる。

Photo. 6はこれに類似したマスクング時の観測例である。この場合,背景と島の放射輝度分布が極めて近いことから,島はほとんど識別不可能である。



(a) 背景のみの場合



(b) 島がある場合

Photo. 6 背景と島の放射輝度分布  
(広島県因島方向, 8~13μm, 夏季)

#### 4.2 水平線直前の海面反射率の推定

これまでの気象モデルによる夏季および冬季の放射輝度分布は,海面を鏡面とみなしたときの計算値であった。これに対して,実際の海面は鏡面状態である場合は極めて稀である。水平線直前の輝度分布について実測値と計算値を比較した場合,その分布形が異なっているが,これについては文献3)から,水平線直前の方向すなわち

反射角 80~90°の海面反射率が海面状態のわずかな変化によっても変わること起因するものと考えられる。

以上のことから,観測値とモデルによる計算結果より水平線付近の海面反射率を推定してみた。観測値より放射輝度分布の反射率を求めるには(1)式を変形して

$$\rho_w(\theta) = \frac{[N_{bg}(\theta) - N_e(\theta)] / \tau_a(\theta) - \epsilon_w(\theta) \cdot N_b(T_w)}{N_e(Z)} \quad (4)$$

に気象観測値を代入する。

Fig. 7に観測値および計算値を示す。Fig. 8は上記に基づいて推定した観測時の海面の反射率である。

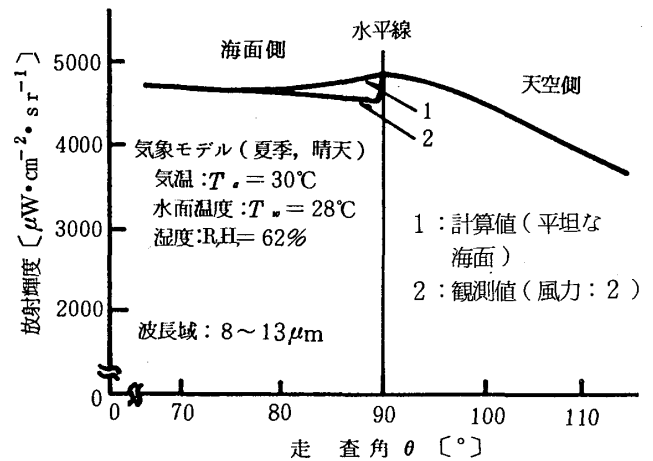


Fig. 7 水平線近傍の放射輝度分布  
(観測値と計算値の比較)

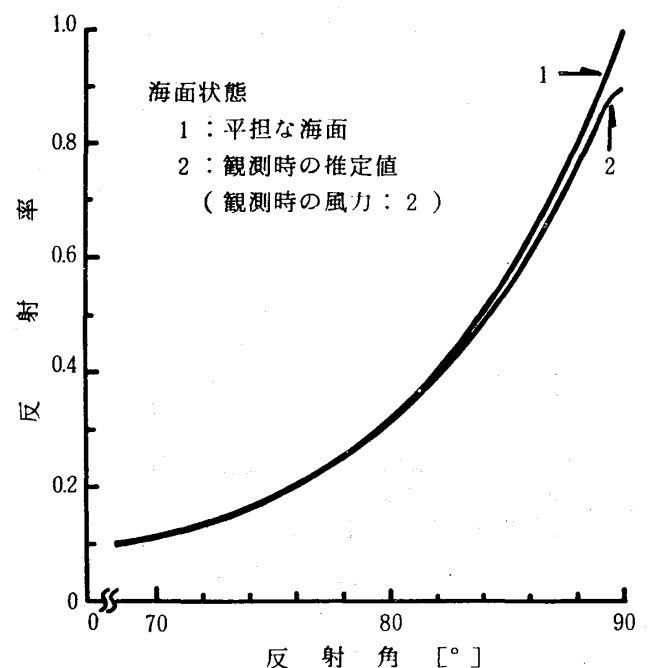


Fig. 8 海面反射率の観測例による推定

5. 水平線付近の赤外映像の画像処理

赤外線映像装置は不可視像を可視化するには有力な手段であるが、表示画面に低コントラスト、高輝度微小目標物、複雑な分布状態などの部分が含まれる場合には、

これらにさらに画像処理を施すことにより、必要な情報が入手し易くなる。本研究では海洋観測によって得た赤外映像を Fig. 9 に示すようなシステムを用いて処理を行なった。

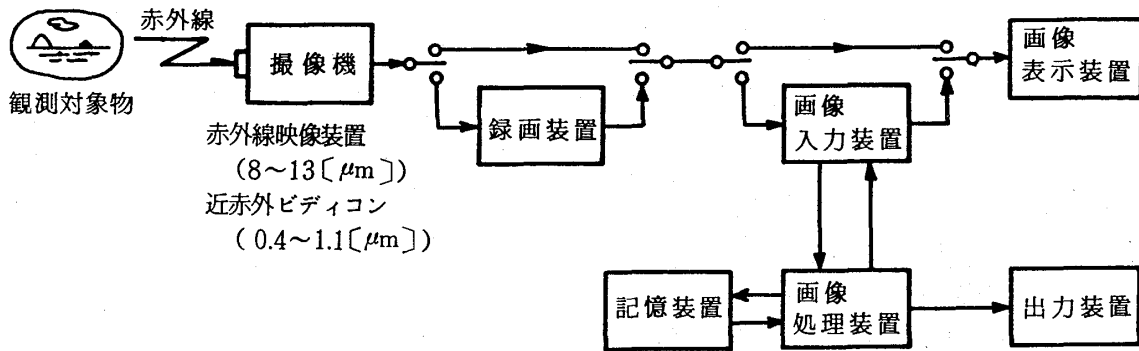


Fig. 9 使用した画像処理システム

5.1 コントラストの低下した赤外映像の2値化処理

8~13 $\mu\text{m}$ の窓領域において、夏季に背景と検出目標物とのコントラストが著しく低下することは前章で述べた。この場合、背景と目標物の微小な放射輝度差に着目して、2値化処理を行うことにより、比較的原形に近い画像が得られるものと考えられる。すなわち、原画像 Photo. 5 (b)を64輝度レベルで量子化し、島(一般的には検出目標)の映像について、島のレベルが16~19、水平線直上部の天空背景のレベルが20~23であることから、しきい値を19として処理した例がPhoto. 7である。このように、一般にコントラストの低下した

画像は2値化処理を行うことにより、目標物の識別が容易になる。

5.2 輝度レベルによる海面状態の表示法

海面の原画像から直接海面状態を端的に読みとることは困難である。(Photo. 8(a))。

一般に静穏な海面に比べて、風波の高い海面においては、放射輝度差が大きくなることから、画面の水平方向の同一座標上の輝度分布を集約し、これを垂直方向の各座標について表示すれば、Photo. 8(b)右端に示すように海面上の波の高低が輝度差として表示される。

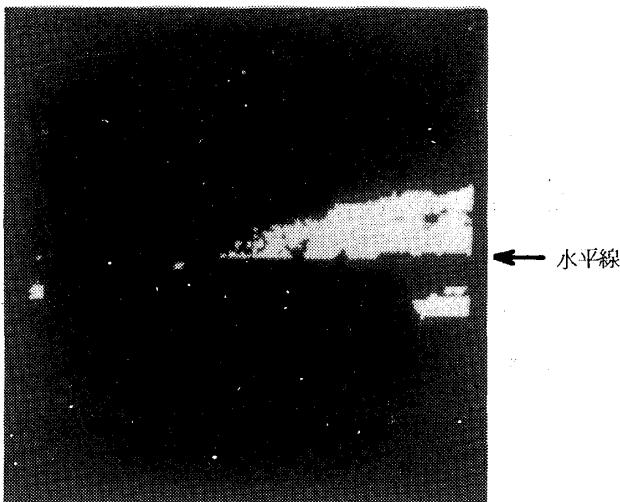
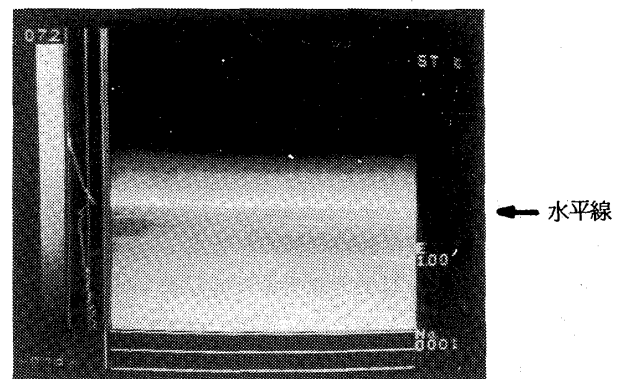


Photo. 7 コントラストの低下した赤外映像の処理例 (Photo. 5 (b)の画像を処理)



(a) 処理前の画像

Photo. 8 海面状態の表示および目標物の抽出処理例

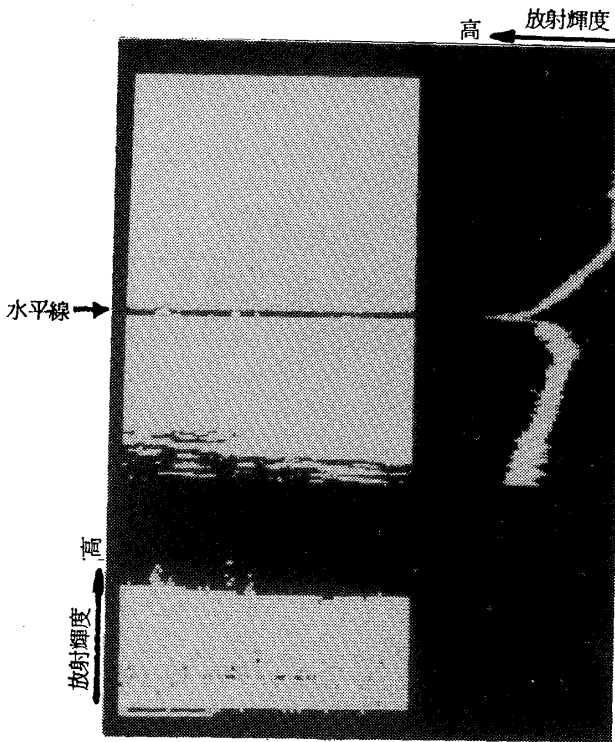


Photo. 8 (b) 処理後の画像

この表示法は赤外放射を利用した海面状態の表示法として、今後特に夜間の海面状態を把握するうえで有用である。

### 5.3 輝度レベルによる検出目標物の抽出法

検出目標物が高輝度物体であっても、それが画面上で微小面積で表示されているときは、識別が容易ではない。この場合も前節で述べた手法を用いることにより、簡単に微小目標物を識別することができる。従って、画面の垂直方向の同一座標上の輝度分布を集約すれば Photo. 8(b)の下部の通り高輝度部分が上位に表示され識別が容易になる。

### 6. あとがき

夏季、中間赤外域において現われる水平線付近の高放射輝度帯は、海上を対象とする赤外線探査・探知システムの機能を著しく低下させる。本報ではこれまでの多数の水平線観測のデータを、高放射輝度帯の発生メカニズムおよび海面赤外映像の処理法について、種々の角度か

ら検討した。これらの結果を要約すれば次の通りである。

- (1) 夏季には水平線付近の高放射輝度帯が広がり、その分布曲線の尖鋭度は冬季の $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{1}{4}$ まで鈍化する。
- (2) 水平線付近の高輝度帯は $8\sim 13\ \mu\text{m}$ の波長域における特有の現象である(気温、水温に対する最大放射の波長と関連する)。
- (3) 夏季における水平線付近の高輝度帯の分布形は、海域により若干の相違はあるが、いずれも幅の広い夏形の分布形である。
- (4) 気温の逆転層は水平線の高輝度帯の幅を増加し、コントラストの低下を助長する。
- (5) 気温と水温が等しくなる時期には、高放射輝度帯が消滅することがある(中緯度の海域では晩春と初秋と推定される)。
- (6) 放射輝度分布の観測値と気象モデルによるシミュレーションから水平線付近の海面反射率が推定できる。
- (7) コントラストの著しく低下した赤外映像は、2値化処理により識別が容易になる。
- (8) 輝度差表示により海面状態の把握、および高輝度微小物体の判別が容易になる。

最後に本研究を進めるに当たり、海洋の赤外線観測において当赤外線工学研究室の卒業研究生諸君の協力を得た。ここに付記して謝意を表します。

なお、本報告の概要は昭和61年11月電気四学会中国支部連合大会および電気学会光応用・視覚研究会(昭62<sup>6)</sup>)において発表した。

### 文 献

- 1) 松井松長, 玉重繁良, 高木亨: 福山大学工学部紀要 No.7 (1985) 10.
- 2) 松井松長, 玉重繁良, 高木亨, 中村理: 電気四学会中国支部連合大会, 100616(昭59); 020606(昭60).
- 3) C. Cox and W. Munt: J. Opt. Soc. Am, 44(1954), 838.
- 4) W. L. Wolfe, G. J. Zissis (ed.): The Infrared Handbook, Chap. 3(1978) ER IM.
- 5) 松井松長, 玉重繁良, 高木亨: 電気四学会中国支部連合大会, 040621(昭61).
- 6) 松井松長, 高木亨, 中辻俊一: 水平線近傍の赤外放射の測定, 電気学会光応用・視覚研究会資料, LAV-87-3(1987).