

## 赤外放射温度計による海表面温度の測定\*<sup>1</sup>

杉原滋彦\*<sup>2</sup>・武田靖昭\*<sup>3</sup>・実藤 了\*<sup>3</sup>・吉永 聡\*<sup>4</sup>

Sea surface temperature observed with portable thermal  
infrared radiometer

Shigehiko Sugihara\*<sup>2</sup>, Yasuaki Takeda\*<sup>3</sup>,  
Satoru Saneto\*<sup>3</sup>, and Satoshi Yoshinaga\*<sup>4</sup>

### Abstract

Sea surface temperature was observed with a portable thermal infrared radiometer(MINOLTA-505) from R/V Tenyo-maru in the western part of the Japan Sea from the beginning to the middle of both September and October. The temperature observed were compared with those derived concurrently by both a platinum thermometer mounted in the bottom of the vessel and a mercury thermometer for sampled water. The results show, in general, good agreement, suggesting the reliability of the data obtained with the thermal infrared radiometer. Some discrepancies are due to the fact that three kinds of thermometers determine the sea water temperature in the different layers; the thermal infrared radiometer and platinum thermometer measure the sea water temperature of the thin surface layer and the layer 1.5m below the surface, respectively, while the mercury thermometer measures the mean temperature of sea water between the surface and about 0.3m depth. In addition, it is stressed that the wind effect and contribution of cloud radiation reflected at the sea surface affect the temperature derived by the thermal infrared radiometer.

---

水産大学校研究業績 第1542号, 1995年12月22日受付.

Contribution from National Fisheries University No. 1542, Received Dec. 22, 1995.

\* 1 Sea surface temperature observed with portable thermal infrared radiometer

\* 2 水産大学校漁業学科漁場学講座 (Laboratory of Fisheries Biology and Oceanography, National Fisheries University)

\* 3 水産大学校天鷹丸 (Training Ship Tenyo-Maru, National Fisheries University)

\* 4 水産大学校研究科 (Graduate School, National Fisheries University)

## 1 はじめに

赤外放射温度計は物体に接触することなく、物体の表面温度を瞬時に測定できる利点を持っている。そのため、通常使われている棒状水銀温度計などで直接測定が困難な対象物、例えば非常に高温な溶鉱炉や地上から遠隔地にある雲などの温度を、測定するために使用されている。また、人工衛星から地球表面の温度を遠隔計測する場合の検出器としても利用されている。さらに、表面から内部に向かって非常に大きな温度勾配を示す物体(例えば日射の強いときの地表面)の表面温度についても、接触型温度計の受感部が有限の長さを持つため、受感部を物体表面に置いても、また内部に置いても正確な温度を示すとは考えられないので、赤外放射温度計による計測が採用されている。

これらの例のように、放射温度計は非接触法で瞬時に物体の表面温度が測定できることに加えて、比較的低価格であること、測定操作も簡単であることなどの長所を持っているが、市販されている比較的低価な放射温度計では、測定精度が公称 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ と余り高くないという欠点も持っている。そのため、放射温度計の有用性を報告した例(Sugihara et al.<sup>1)</sup>)もあるが、海洋学の分野においては余り利用されていないのが現状で、海表面温度は棒状温度計あるいはサーミスター温度計などによる、接触法によって測定されているのが普通である。

海洋学的な研究に利用されないのは、前に述べた欠点—測定精度の低さ—に加え、赤外放射温度計が海表面の僅か2, 3  $\mu\text{m}$ の厚さの層の温度(表皮水温)情報しか与えない(Barton<sup>2)</sup>)ことも一因であろう。またその余りにも薄い測定層のゆえ、蒸発による水温低下の影響を受け、風速の変動により測定値が変動し易いと言う問題も利用の障害となっている。

しかし、赤外放射温度計が瞬時に、かつ簡単に水温が測定できるという特徴は、測定環境の厳しい海洋上での観測においては非常に魅力的である。しかも、表皮水温しか与えないことも、普通の表面水温とは別の異なる情報を与えるという点で重要である。さらに、最近重要視されている人工衛星で測定された水温も同じ原理で測定されているが、この大気効果の影響を受けた測定値と海上での測定値とを比較する場合、船上からの赤外放射温度計による測定値は、同じ原理で測定したものであるだけに、貴重な資料として活用できるであろう。

そこで、赤外放射温度計、白金抵抗温度計、棒状温度計の三種類の温度計を使って同時に表面水温を測定し、放射

温度計の性能と測定値の効果的利用についての検討を行った。測定は水産大学校練習船天鷹丸が第66次(1995年9月4日~9月14日)及び第67次(10月5日~10月15日)航海として、日本海大和堆付近に向けて航海したときに行われた。

## 2 使用温度計

### 2.1 赤外放射温度計

本実験に使用した温度計はMINOLTA-505で、重量は約650gである。大気の吸収の少ない、いわゆる窓領域である波長8  $\mu\text{m}$ ~14  $\mu\text{m}$ の赤外線強度を検出して、温度値に換算している。測定値はデジタル表示で0.1 $^{\circ}\text{C}$ 刻み、すなわち小数点以下第1桁まで表示される。測定間隔は0.25秒(1秒間に4回)である。温度計からの信号をノート型計算機に入力して、連続的に記録できるが、本測定では10個毎の測定値を平均して、その平均値を記録するようにした。したがって、2.5秒間の平均値が記録されることになる。

航海中の天鷹丸が作る波が放射温度計の視野に入らないこと、また波のしぶきから温度計を避けるため、赤外放射温度計は前甲板から三脚を使って海上に出し、ほぼ真下の海面を見るようにした。そのため、普通の状態であれば、航海中においても連続測定が可能である。

赤外放射温度計の視野は平面角1.7 $^{\circ}$ の円内にある。また、放射温度計の設置場所から水面までの高さは約5mであるので、直径が約15cmの円の内部に入る海表面の平均温度を測定していることになる。

### 2.2 白金抵抗温度計と棒状水銀温度計

白金抵抗温度計は、天鷹丸の水面下約1.5mの冷却水の取水口に取り付けられているものである。白金抵抗温度計の信号は船内に送られ、0.1 $^{\circ}\text{C}$ 刻みにデジタル表示される。また測定値を計算機に入力して、記録できるようになっている。測定間隔は1秒である。

棒状温度計は吉野計器製作所製Y-432で、最小目盛り0.1 $^{\circ}\text{C}$ である。気象庁検定付のもので、 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の器差である。舷側より採水し採水容器に温度計を入れて約1分後に読み取った。

## 3 測定結果

Fig. 1は第66次航海における、9月13日境港出港後の7時40分から9時20分頃までの放射温度計による表面水温記

録 ( $T_R$ ) を示す。このときの天鷹丸の航跡を Fig. 2 に示す。また比較のため Fig. 1 には白金抵抗温度計の測定値 ( $T_T$ )、及び棒状温度計で測定した水温 ( $T_S$ ) も示した。 $T_T$  は 1 秒毎に表示されるが、この測定時においては計算機に入力せず、2 分毎に表示水温を読み取った。 $T_S$  は約 10 分毎に舷側より採水し、棒状温度計で測定したものである。

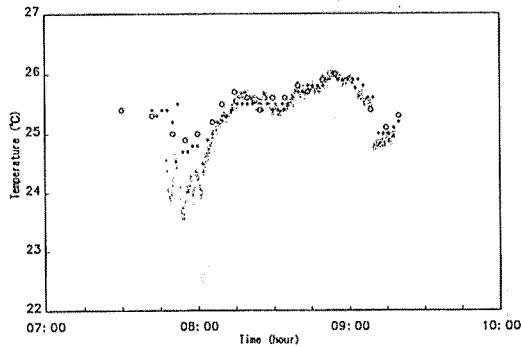


Fig.1 Sea surface temperature observed after departure from the port of Sakai-minato on Sep.13, 1995, by means of the infrared radiometer (·), platinum thermometer (+) and mercury thermometer (○).

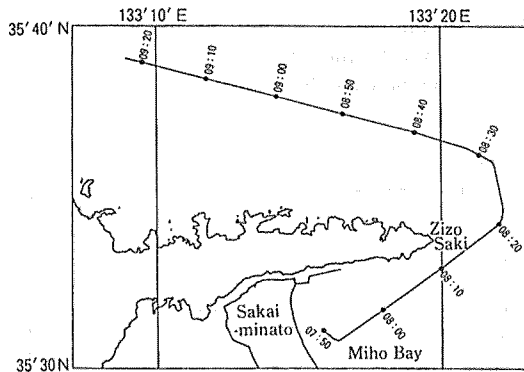


Fig.2 Track of R/V Tenyo-maru just after departure from the port of Sakai-minato. Numbers attached to the track line show passing time of Tenyo-maru.

8 時 00 分以前において、 $T_T$  と  $T_S$  がほぼ一致するのに対し、 $T_R$  は  $T_T$  と  $T_S$  から  $0.5^\circ\text{C}$  以上低い場合がしばしば見られる。これは、 $T_R$  が表面の薄い層の水温を測定しているのに対し、 $T_T$  は表面下 1.5m の水温を、 $T_S$  は表面と約 20cm (採水容器の高さ) の深さの海水の平均的の水温を示すことに起

因していると考えられる。この時間帯は、境港の防波堤付近から地蔵岬に至る水路に対応している。裏付ける資料はないが、この様な湾内においては、密度の低い河川水が表層を覆っているのが一般的であり、水温の水平、及び鉛直構造は複雑である。そのため、表面の薄層 ( $T_R$ ) とそれ以深の層 ( $T_T$  と  $T_S$ ) との間に水温差が生じても不思議ではない。むしろ、この複雑な水温分布を  $T_R$  が敏感に捉えていることが伺え、放射温度計が湾内水の流動や混合の研究に有効な器具として利用できることを示している。

一方、8 時以降においては、 $T_R$ 、 $T_T$ 、 $T_S$  間の差は殆ど全ての資料において  $0.2^\circ\text{C}$  以内に入る。したがって、湾内から離れるに従い、薄層とそれ以深の層との水温差が少なくなったことを示す。また同時に、放射温度計の測定値は、10 個の平均値をとるとき、白金抵抗温度計、および棒状温度計の測定値との差が  $0.2^\circ\text{C}$  以内になることを示している。

興味深いのは、9 時 9 分頃において  $T_R$ 、 $T_T$ 、 $T_S$  の三者が一致して共に約  $1^\circ\text{C}$  の急激な水温の低下を示すことである。9 時 10 分には海表面に多くの浮遊物が帯状に集積していたのが肉眼でも観察されたので、潮目を通じたに違いない。

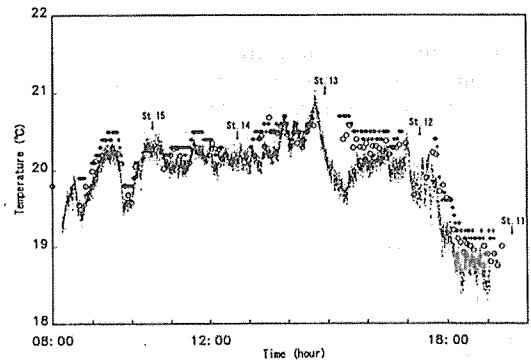


Fig.3 Sea surface temperature obtained along the  $135^\circ\text{E}$  line on Oct.12, 1995 by means of the infrared radiometer (·), platinum thermometer (+) and mercury thermometer (○).

Fig. 3 は第 67 次航海において 10 月 12 日の 8 時前後から 18 時 30 分前後までの航走中、及び観測点 (St.16~St.11) に停船中の水温 ( $T_R$ 、 $T_T$ 、 $T_S$ ) の記録である。この時間帯は、Fig. 4 に示すように、舞鶴の北方から真北に大和堆に向かう水路に対応していて、南北全距離は約 100 海里である。Fig. 3 に示した  $T_T$  は 1 分毎の測定値である。但し、C T D 観測のため停船している時間 (約 40 分) には  $T_T$  と

$T_S$ は測定していない。細かい水温変動が見られるが、三者共に15時30分頃における資料を除き同じ傾向で変動しているように見える。そこで、 $T_R$ と $T_T$ 、 $T_R$ と $T_S$ 、 $T_T$ と $T_S$ との関係をそれぞれFigs. 5, 6, 7に示した。相関係数はそれぞれ、0.94, 0.94, 0.98である。 $T_R$ と他の二つの測定方法の相関がやや低いが、前述したように測定対象深度が異なることを考慮すると、相関は満足すべきものと考えて良い。しかし、15時30分前後においては、 $T_R$ は $T_T$ より約

1°C、また $T_S$ より約0.7°C低く、しかも $T_R$ は $T_T$ および $T_S$ とは、時間変化が同じ傾向を示さない。15時30分頃の資料を始め、全般的に $T_R$ が $T_T$ と $T_S$ より低い傾向が伺える。すなわち平均で $T_T$ より約0.3°C、 $T_S$ とは約0.2°C低い。この $T_R$ が $T_T$ と $T_S$ より低い原因は風の影響と考えられるが、これについては次節で検討する。 $T_R$ は $T_T$ に比べ低いばかりでなく、より敏感に変動しているように見える。特に18時以降では、両者の変動傾向は似ているが、 $T_R$ の変動幅が $T_S$

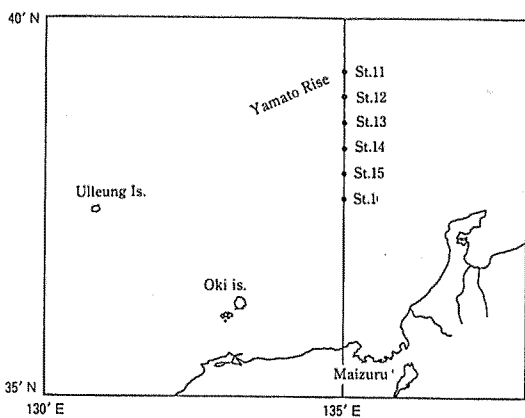


Fig.4 Temperature measurements in Fig.3 were made on Oct.12, 1995 along the 135° E line between Sts. 16 and 11 which are CTD stations.

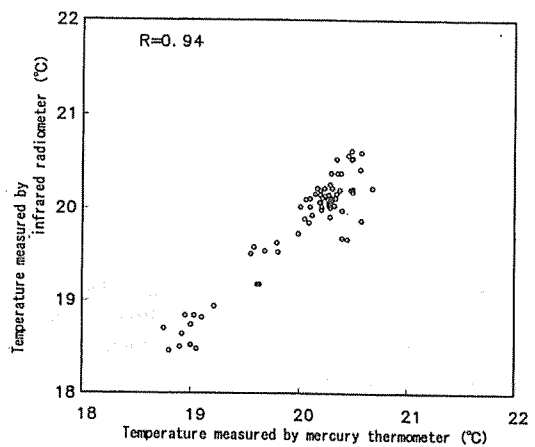


Fig.6 Comparison of sea surface temperature observed by the infrared radiometer and that by the mercury thermometer.

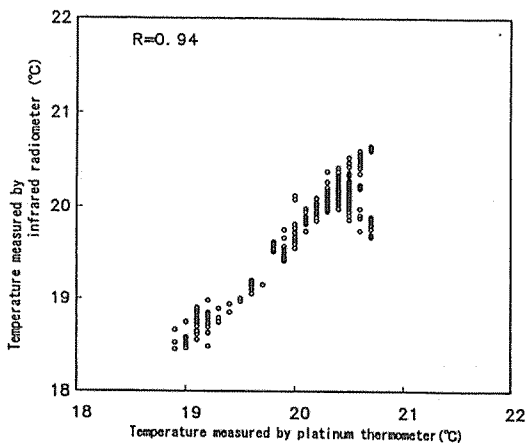


Fig.5 Comparison of sea surface temperature observed by the infrared radiometer and that by the platinum thermometer.

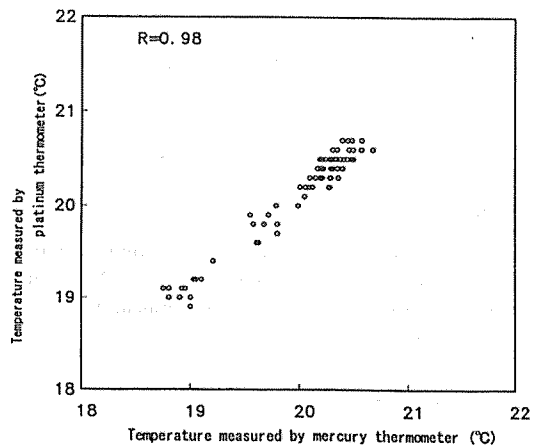


Fig.7 Comparison of sea surface temperature observed by the platinum thermometer with that by the mercury thermometer.

のそれに比べ大きい。風速との関係を調べたが相関は低く原因は不明である。実際には表面における水温の水平分布が、水中におけるそれに比べ複雑なことに起因しているのかも知れない。もしこれが事実であれば、 $T_R$ は貴重な情報を提供していることになる。特に、棒状温度計や白金抵抗温度計と併用すれば、これらの資料を放射温度計が補足することもできるし、また他の異なる情報を提供する場合があり得るので、複雑な分布を示す水域においては特に有効であろう。

#### 4 考察

##### 4.1 平均値採用の効果

前述のごとく、赤外放射温度計は1秒間に4回の割合で温度を測定するが、本実験では10回の資料を平均化して記録した。しかし、放射温度計の測定値の変動特性を調べるには、平均化する以前の全ての測定値から検討を始めた方が良いであろう。

Fig. 8は室内に置かれた布の温度を約10分間測定した結果である。平均値は $24.05^{\circ}\text{C}$ であり、最小値の $23.5^{\circ}\text{C}$ と最大値の $24.5^{\circ}\text{C}$ の間には $1^{\circ}\text{C}$ の差がある。この時間内においては室温も布の温度も一定と考えてよい。事実、棒状温度計での測定値は $23.2^{\circ}\text{C}$ の一定値を示した。Fig. 9はFig. 8で使用した資料の頻度分布を示したものである。ほぼ正規分布に従っている。標準偏差は $0.14^{\circ}\text{C}$ である。予想した通り余り精度がよいとは言えない。しかし、正規分布を示

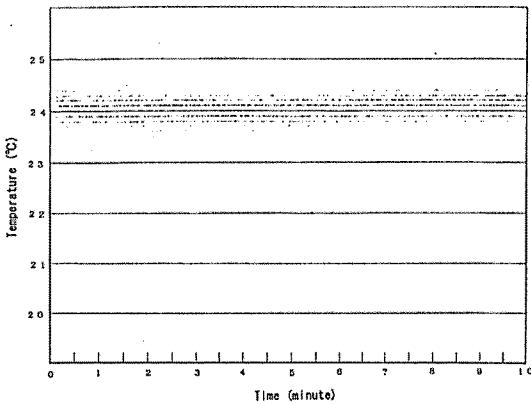


Fig.8 Observed temperature variation at surface of the cloth placed at the laboratory. Output signals from the thermal infrared radiometer were recorded every 0.25sec.

すことは平均値を採用すれば、安定した結果を得られることを示唆している。

前述のごとく、天鷹丸における測定では、1秒間に4回という余りにも多くの資料を記録する必要はないと考え、計算機に送信されてきた10個の資料の平均値を計算した後、これを記録した。そこで同様の記録方法により、室内の同じ布の温度を約10分間測定した結果をFig.10に示す。予想されたように変動幅がかなり小さくなっている。また $0.02^{\circ}\text{C}$ 間隔の頻度分布を示したのが、Fig.11である。1秒間に4回の資料の場合と同じく正規分布を示す。この場合、標準偏差は $0.04^{\circ}\text{C}$ で、平均値は $24.33^{\circ}\text{C}$ である。最大値( $24.44^{\circ}\text{C}$ )と最小値( $24.24^{\circ}\text{C}$ )との差は $0.2^{\circ}\text{C}$ で、当然ながら平

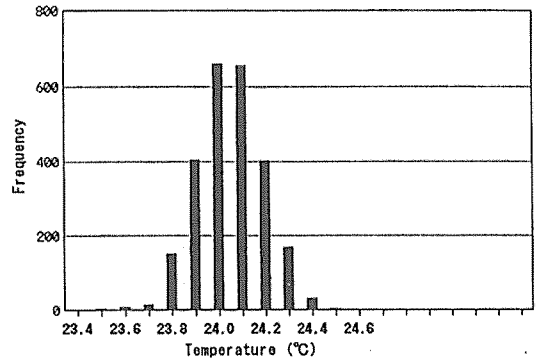


Fig.9 Frequency distribution of temperature plotted in Fig.8.

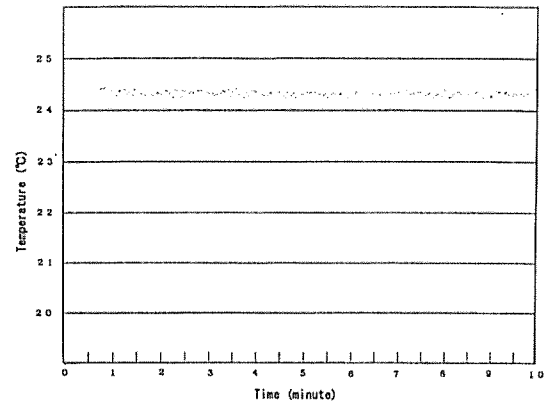


Fig.10 Mean temperature variation at surface of the cloth placed at the laboratory. They were averaged over 10 original records (2.5sec duration) and plotted as a function of time.

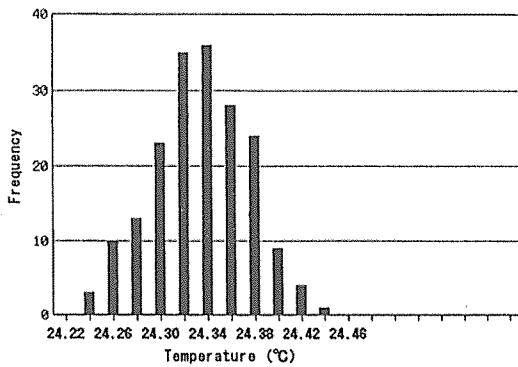


Fig.11 Frequency distribution of temperature on the basis of the data used in Fig.10.

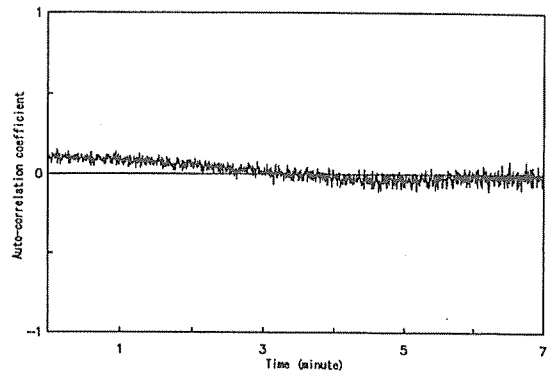


Fig.12 Auto-correlation coefficients for the temperature variation which are the same data as those plotted in Fig.8.

均値を採用したことにより大幅に分散が小さくなる。このことは、測定温度の変動が、検出器の感度が正規分布に従うように変化していることを示す。

さらに、検出器内部の電気回路などの特性から生ずる出力変動の影響を調べるため、室内で1秒間に4回記録したときの資料につき自己相関係数を計算した。結果をFig.12に示す。いずれの時間においても相関係数は非常に低く、温度変動が検出器感度などの変化によるものでないことを示唆している。

#### 4.2 風の影響

放射温度計は表面海水の薄層の温度を測定しているため、蒸発により表面から気化熱を奪われると敏感に応答する。そのため、海上風の影響を強く受けることが想像できる。そこで、風が水温低下へ及ぼす影響を調べるため、実験室において種々の風速下で、放射温度計により水温を測定した。容器に20.5°Cの水道水を満たし、扇風機で水表面に風を送った。風速の制御にはスライダックを使い、扇風機の入力電圧を制御した。放射温度計は容器の真上約1mに取り付けた。また容器の風下側にはピラム式風速計を置き、風速を測定した。室温は22.3°Cで、湿度は42.1%であった。室温と水温との差は約2°Cである。Fig.13は各測定水温と初期水温との差を風速の関数で表したものである。水温の安定性が良くないので変動が大きいが、僅かな風速により水温が低下することがわかる。すなわち、0.2m/secの風で、約0.5°Cの減少を示す。風速が0.5m/sec以上になると水温の低下率は徐々に少なくなり、-1°Cに近づいて行く。両者の関係は水温低下を $\Delta T$ 、風速をUm/secで表すと、

$$\Delta T = 1 - \exp(-4.335U)$$

で近似的に表すことができる。このように僅かな風速に対しても $T_R$ は減少を始めるが、風速1m/sec以上となると、水温の低下は約1°Cを保持し変動は少なくなる。

海上では、風速が1m/sec以上となることは普通であるから、海上で測定した $T_R$ は常に真の値より低く表示されることが一般的なはずである。しかし、この実験は、室温が水温より約2°C高い場合である。相対的に気温が水温より高い場合、表面水温は顕熱により上昇、潜熱により降下させられるから、両者の効果が互いに打ち消される可能性がある。本実験では、潜熱による低下が顕熱による上昇を上回り、全体として温度が降下したことになる。一方、気温の方が水温より低いときには、顕熱と潜熱による降下が重なって水温降下はさらに増大するであろう。

10月12日における $T_R$ が、 $T_T$ と $T_S$ より低いことを前に述べた。この日の正午には、北の風で風速は1.6m/secが観測されている。したがって、 $T_R$ が $T_T$ や $T_S$ に比べ低い場合が多くなるはずである。また、正午における気温は約18°C、水温は約20°Cで、気温が水温よりも低いため、水温低下は一層増大されてよい。そのため、 $T_R$ と $T_T$ あるいは $T_S$ との差は、室内実験結果から判断すると、少なくとも1°C以上と見積もれる。それにもかかわらず、前にも述べたように、実際の差は平均で0.3°C以下であった。

実測値の示すこの比較的小さな温度差を説明するには、風速の変動、すなわち、風の息を考慮する必要がある。上記の室内実験では、一定の風を水面に吹かせた場合であるのに対し、実際には風速は一定でなく激しく変動している。そのため、風速が弱ったときには、水温の低下が停止し、

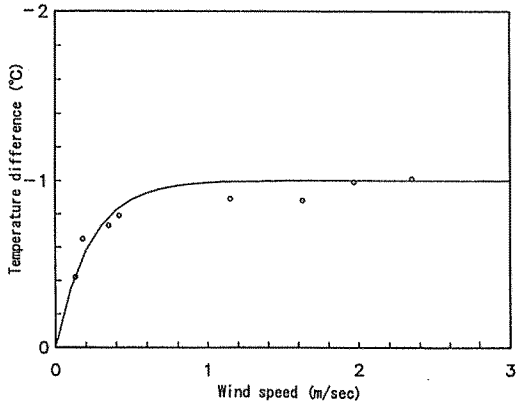


Fig.13 Difference in the apparent temperature observed with infrared radiometer from the initial value as a function of wind blowing speed.

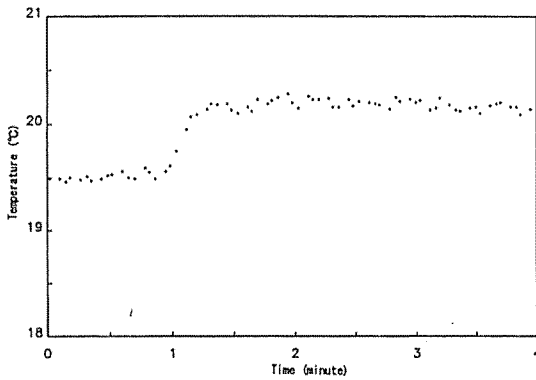


Fig.14 Sudden increase in the apparent temperature observed by infrared radiometer just after ceasing of wind blowing of 2.4m/sec.

むしろ低下から上昇に転ずるであろう。

Fig.14は、室内で2.4m/secの一定の風を5分間水面に送って水温低下が生じた後、風を停止させた場合の水温変動を示したものである。風の停止後、急速な水温の上昇が見られる。20秒間に約19.5°Cから、20.1°Cまで約0.6°Cの上昇（上昇率0.03°C/sec）を示している。このことから、平均値で比べた場合の温度差が予測値よりも小さかったことが説明できる。しかも、室内の容器内の水と異なり、海水の流動は激しいのが一般的であるので、風の影響は室内での実験時よりも少ないであろう。このことについては今後検討する必要がある。さらに、波の谷や風下側の斜面の部分では、風速が他の部分に比べて弱くなるのが普通であ

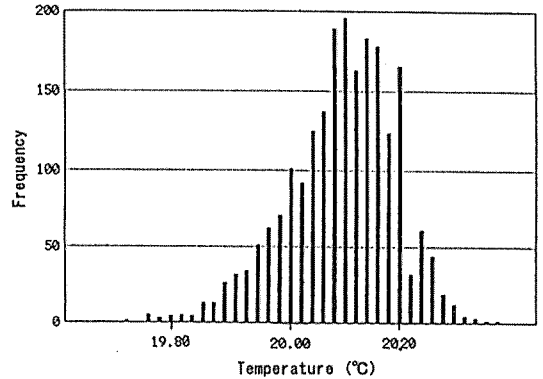


Fig.15 Frequency distribution of sea surface temperature collected with infrared radiometer on Oct.12, 1995.

ろうから、これらの部分が放射温度計の視野内に入っているときには、風の影響は少なくなる。このことも $T_R$ の温度降下が低い一因となっているのであろう。

Fig.15は10月12日の水温の頻度分布を示したものである。この分布は正規曲線と比べ、水温の低い方で頻度が多いことが分かる。風が停止するときもあるから、このように低水温側でのみ、正規分布から外れる現象が起こったものと考えられる。

以上のように $T_R$ は海上で風が吹いているときには、 $T_T$ と $T_s$ よりも低い値を示すのが一般的である。特に、気温が海水温に比べ非常に低いときには、水温降下が大きくなるから注意すべきである。しかし、今回の実験のように水温と気温の差が2°Cと小さいときには、風の及ぼす影響は0.3°C以内と推定できる。

#### 4.3 空中からの放射の影響

雲の放射を初めとし、空から海面に達した放射の一部は再び海面で反射される。この放射は当然放射温度計にも入射するから、放射温度計は空からの放射によっても影響を受ける。雲の温度と海面の反射率が与えられれば、空中(宇宙空間)からの放射の影響を定量的に見積ることができる。そこで、海面の反射率はフレネルの式に従うものとして0.0204（垂直入射のとき）とし、放射温度計への寄与を空中の温度の関数として計算した結果をFig.16に示す。-50°Cの空中からは約0.25°C、+20°Cでは約1.18°Cの寄与がある。

9月8日の午前中は晴ときどき曇りであって、このとき青空と雲の温度を放射温度計で測定している。その結果は9時30分の青空で-45°C、10時30分の雲は16.0°Cであった。

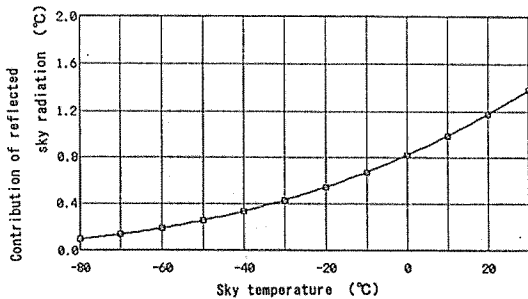


Fig.16 Contribution of sky radiation to the sea surface temperature observed with the infrared radiometer.

そのため、この値を使うと前者では $0.3^{\circ}\text{C}$ 、後者では $1.0^{\circ}\text{C}$ 高い水温を表示していることになる。

ここでは海面の反射率は垂直入射の場合のみを考え、 $0.0204$ と仮定したが、これは鏡のように滑らかな海面に垂直入射する場合である。もし海面に波があれば、反射率は海面の傾斜によって変動する。しかし海面傾斜が $30^{\circ}$ の場合でも、反射率は $0.022$ でほぼ垂直入射の時と余り差はないことが、フレネルの式から予想できる。そのため波静かな海況では、入射角度が $30^{\circ}$ 以下が期待できるから反射率は $0.02$ 程度と考えてよい。したがって、雲と青空の下での水温はそれぞれ約 $1.0$ と $0.25^{\circ}\text{C}$ 高く表示されることになる。

以上は放射温度計の視野内では水面の傾斜が一定と考えた場合である。視野内に多くの傾斜を含む場合で、しかも波高が高くなると、反射率が增大することが、Cox and Munk<sup>3)</sup>によって報告されている。その結果によると波高の高い場合の海面反射率は $0.05$ 程度の値まで増大する。そのため、波高の高い場合においては、 $0^{\circ}\text{C}$ の雲があると、計算上約 $4^{\circ}\text{C}$ 温度が上がることになる。しかし、波高が高い場合は、一般に風も強いので、前述したように温度が降下するので $4^{\circ}\text{C}$ もの差は生じないものと予想できる。

以上のように、天頂方向が青空であれば、青空の温度が低いため、放射温度計の測定値への影響は小さい。しかし天頂方向に雲があるときには、雲の温度が一般には高いため(Liou<sup>4)</sup>)、約 $1^{\circ}\text{C}$ 高い値を示すであろう。しかし9月13日と10月12日の資料においては、 $T_R$ が $T_T$ と $T_S$ より高い場合は少ない。これは晴天の場合が多かったこと、また風による表面水の温度低下と打ち消し合っていることによるものと考えられる。

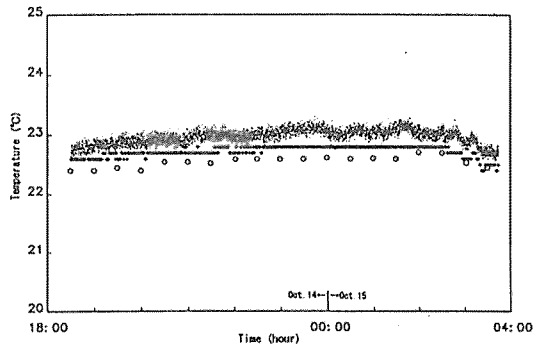


Fig.17 Comparison of  $T_R(\cdot)$  with  $T_T(+)$  and  $T_S(\circ)$  during the period between evening of Oct.14 and early morning of Oct.15, 1995.

明かに $T_R$ が $T_T$ と $T_S$ より高い場合が10月14日の夕方から15日未明かけてみられる。これをFig.17に示す。これは、見島付近において測定された結果で、船は停船中で、風は平均約 $2.2\text{m/sec}$ と比較的弱く、しかも空は曇っていた。その結果、 $T_R$ が $T_T$ および $T_S$ よりも $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 高い結果となったと思われる。

以上の結果から、放射温度計の測定精度は公称 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ とされているが、以下の条件を満たせば $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 程度あるいはそれ以下と推定できる。

- i) 10個以上の平均値の採用
- ii) 風速が比較的小さく(約 $2\text{m/sec}$ 以下)、しかも変動している
- iii) 気温と水温の差が小さい
- iv) 快晴下の測定値

## 5 まとめ

1. 1995年9月と10月日本海において水産大学校練習船天鷹丸より、赤外放射温度計を使用して海面水温を測定した。また、天鷹丸に備え付けられた白金抵抗温度計、及び棒状水銀温度計により表層水温を同時に測定した。

2. それらの測定値を比較した結果、三者の相関は満足すべきもので、放射温度計の測定値が信頼性の高いものであることが示された。

3. しかし詳細に見ると、放射温度計の測定値は他の温度計の測定値と相違がある場合があり、この原因の一つは、放射温度計が表皮水温を測定しているのに対し、白金抵抗



温度計が水面下4 mの水温, また棒状温度計が表面水の平均水温を測定していることによると考えられる。

4. 一方, 室内での放射温度計の性能試験から, 平均値を採用することにより, 測定値の分散が小さくなることがわかった。すなわち, 10個の測定値の平均値(2.5秒間)を用いると, 標準偏差は0.04℃となる。

5. また, 風の影響についても室内実験を行い, 僅かな風(0.1m/sec)でも水温低下の影響を与えることがわかった。しかし, 風速0.5m/sec以上の風では, 水温の低下は約1℃に漸近することが示された。

6. さらに, 空からの放射の影響について検討を加え, 波静かな海面の真上に雲があるときには, 1℃程度高く表示される場合があることを示した。

7. 放射温度計の測定精度は, i) 10個以上の平均値の採用, ii) 風速が比較的小さく(約2 m/sec以下), しかも変動している, iii) 気温と水温の差が小さい, iv) 快晴下の測定値であるという条件を満たせば,  $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 程度あるいはそれ以下と推定できる。

## 謝辞

水産大学校漁業学科千手智晴博士には, 本論文に対する御校閲と有益な御助言を賜った。また, 天鷹丸における観測では, 乗組員の方々, および漁業学科4年生平田貴文氏と松原奈穂氏に親切なご協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) S.Sugihara, T.Ishiyama and T.Yoshimura : Int. J. Remote Sensing.14(7), 1339-1346(1992).
- 2) L.J.Barton : J.Clim.Appl.Meteor., 24, 508-516(1985).
- 3) C.Cox and W.Munk (1956) : Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. Calif., 6, 401-488.
- 4) K.N.Liou (1976) : J. Atmos. Sci., 33, 789-805.