

油汚染水面の見かけの放射温度について*

松井 松長** 宮武 将浩** 高木 亨**

要旨

海洋の油汚染を走査式赤外線放射計を用いて遠隔検出・監視する場合、汚染を判定するための唯一の情報は汚染水面と非汚染水面との間の放射温度差である。本報では、従来明確さを欠いていた両水面間の放射温度差の成因について、(1) 油膜の厚さの違いによる表面の放射率の相違が最も大きな要因であり、(2) 天空背景放射が若干の影響を与えていることを指摘している。

1. まえがき

海面の赤外線映像、すなわち放射温度分布から油汚染水域を遠隔検出する方法は、現在試みられている種々の検出法の中でも有用な方式の1種である。この方式において汚染水域であることを判定するための唯一の情報は、非汚染水域との間の放射温度差である。しかし、実際に放射計で観測された汚染水面の温度はさまざまであって、非汚染水面よりも低いこともあれば、高いこともあると報告されている。このような温度差の生じる原因については、(1) 低温の水との混合あるいは油中の揮発成分の気化などによる冷却、(2) 水面と油面との放射率の相違に起因するなどの説があるが、(Chandler; Kennedy and Wermund, 1971; Klemas, 1972) いずれも明確な説明を与えていない。

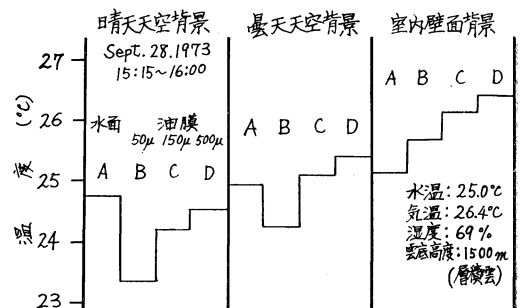
筆者らは、これまでの天空背景放射の観測(高木, 松井, 1967)、常温物体の放射率の測定などの実績から、後者の放射率の相違によるとの立場で若干の実験を行い、天空背景放射と併せて検討した結果、満足すべき結論を得た。

2. 水面および油面の温度

一般に大気に接した水面では、主として気化熱による冷却作用のために水面下1mm以内に低温層ができるといわれている(Kauth, 1965; 近藤, 渡辺, 1969)。筆者らの熱電対による測定においても気象条件により異なる

が、水面下1mmの層の上面(表面)の温度が下面よりも0.2~0.6°C低いという結果を得ている(松井, 高木, 星, 1973)。また、水面上に厚さ30~500 μm のB重油膜がある場合の油面下1mm層の両面の温度差は、いずれの膜厚の場合も0.05°C以下であった。これは油膜の蒸発抑制作用によるものと考えられる。以上のことから水面上に油膜があれば、無い場合よりも一般に表面温度が若干高くなることが推定される。

一方、放射温度計(Barnes社, IT-4A, 動作波長域8~14 μm)による表面温度の測定結果の一例を第1図に示す。これは4個の水槽にそれぞれ同量の水を入れ、水槽Aは水のみとし、B~Dにはそれぞれ水面上に50 μm , 150 μm , 500 μm のB重油の油膜を浮べせたもので、これらの表面温度をそれぞれ晴天天空、曇天天空、室内壁面の3種の背景のもとで測定した結果である。放射温度計の水面を見る角度は水面に対して65°(反射角25°)とした。第1図において各液面に対する放射温度



第1図 3種の背景のもとで測定した水面および油面の見かけの放射温度(輝度温度)

* On the Apparent Radiation Temperature of Oil on Water.

** M. Matsui, M. Miyatake and T. Takagi 京都工芸繊維大学電子工学教室
—1973年10月12日受理

計の指示値は、それぞれ晴天背景、曇天背景、壁面背景の順に、また同一背景の3種の油面では油膜の厚さが増すにつれて増加している。

ここで特に注目すべき点は、(1) 測定対象が同一温度であっても、背景の状態によって見かけの放射温度が異なること、(2) 油膜が薄い場合には、水面より若干温度が高いと考えられる油面の方が晴天背景のもとでは逆に低く観測されることである。

3. 水面上の油膜の反射率、透過率、および放射率

中間赤外域においては油膜は半透明体である。McMahon (1950) は同種の媒質に挟まれた半透明体の放射についてのべているが、ここでは油膜は空気と水の異種の媒質に挟まれているから膜の上面と下面の反射率は異なる。従って、多重反射を考慮した油膜の上面の見かけの放射率 ρ_{0a}^* は

$$\begin{aligned} \rho_{0a}^* &= \rho_{0a} + \rho_{0w} \tau_0^2 (1 - \rho_{0a})^2 + \rho_{0a} \rho_{0w}^2 \tau_0^4 \\ & (1 - \rho_{0a})^2 + \dots + \rho_{0a}^{m-1} \rho_{0w}^m \tau_0^{2m} (1 - \rho_{0a})^2 + \dots \\ & = \rho_{0w} + \sum_{n=0}^{\infty} \tau_0^{2n} \rho_{0w} (1 - \rho_{0a})^2 (\tau_0^2 \rho_{0a} \rho_{0w})^n \\ & = \rho_{0a} + \frac{\tau_0^2 \rho_{0w} (1 - \rho_{0a})^2}{1 - \tau_0^2 \rho_{0a} \rho_{0w}} \end{aligned} \tag{1}$$

ただし、 ρ_{0a} は油と空気との境界面の反射率、 ρ_{0w} は油と水との境界面の反射率、 $\tau_0 (= e^{-\alpha_0 d})$ は厚さ d の油膜の透過率、 α_0 は油の吸収係数であって、いずれも波長の関数である。同様に下面では

$$\rho_{0w}^* = \rho_{0w} + \frac{\tau_0^2 \rho_{0a} (1 - \rho_{0w})^2}{1 - \tau_0^2 \rho_{0a} \rho_{0w}} \tag{2}$$

油膜の見かけの透過率 τ_0^* は

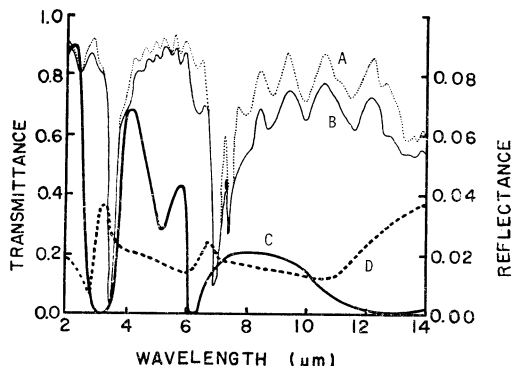
$$\tau_0^* = \frac{\tau_0 (1 - \rho_{0a}) (1 - \rho_{0w})}{1 - \tau_0^2 \rho_{0a} \rho_{0w}} \tag{3}$$

また、油膜上面の放射率 ϵ_{0a} は

$$\epsilon_{0a} = \frac{(1 - \rho_{0a})(1 - \tau_0)(1 + \tau_0 \rho_{0w})}{1 - \tau_0^2 \rho_{0a} \rho_{0w}} \tag{4}$$

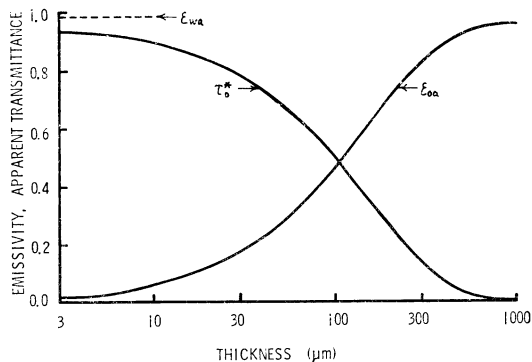
となる。第2図に赤外域における水と油の分光透過率ならびに水の分光反射率を、第3図に8~14 μm の波長域における油膜の厚さと平均透過率および平均放射率との関係、ならびに水と空気との境界面の平均放射率 (ϵ_{wa}) を示す。

水の上記の波長域における平均透過率は、第2図より



第2図 赤外域における水の分光透過率および分光反射率、ならびに原油とB重油の分光透過率

A : B重油の分光透過率 (厚さ25 μm),
B : 原油の分光透過率 (厚さ25 μm), C : 水の分光透過率 (厚さ30 μm), D : 水の分光反射率 (垂直入射), (C, Dは文献 (McAlister, 1964) による)



第3図 油膜の厚さと透過率、放射率との関係
波長域: 8~14 μm , $\rho_{0a}=0.04$, $\rho_{0w}=0.004$,
 $\alpha_0=65.3$, $\rho_{wa}=0.015$ とした場合

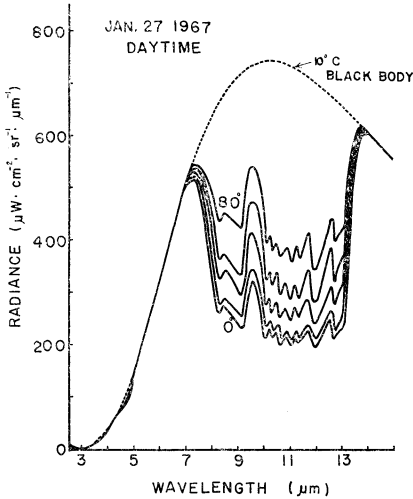
厚さが60 μm 以上になると1%以下となり、実際の海洋ではこれよりもはるかに厚いから不透明体とみなすことができる。従って水面の放射率は反射率のみで決まる。なお純水と通常の海水との光学定数の差は極めて小さい (Friedman, 1969)。

4. 天空背景放射

第1図において、同一液面の見かけの放射温度が異なった値を示しているのは、背景を除けば同一測定条件であることから、背景放射の相違に起因していることは明らかである。

中間赤外域における天空背景放射はいわゆる大気放射

であって、8~14 μm の大気窓の領域での晴天時の放射は、太陽方向を除けば天頂角、気温、湿度に依存する。従って可視域とは異なり昼夜間の差は小さく、第4図に示すような分光分布をなしている(高木、松井、1967)。一方、曇天時の天空背景放射の分光分布は雲底温度とほぼ等しい温度の黒体放射に類似している。



第4図 晴天時の天空背景放射の分光分布(冬季)
天頂角: 0°, 30°, 60°, 75°, 80°, 気温: 10°C
観測地点: 京都市左京区松ヶ崎

5. 油面の放射温度と油膜の厚さ、背景放射との関係

一般に放射温度計、赤外線映像装置などの個々の装置定数はそれぞれ異なるから、ここでは観測装置の受光面上の単位面積、単位立体角に入射する放射束、すなわち観測点における液面の放射輝度について検討する。

いま水面の鉛直上方から水面温度を測定したとする。前述の油膜からの赤外放射および天空背景放射を考慮すれば、水面(非汚染水面)からの放射束 J_w は

$$J_w = \tau_a(\epsilon_{wa}J_{wa} + \rho_{wa}J_b) + J_a \quad (5)$$

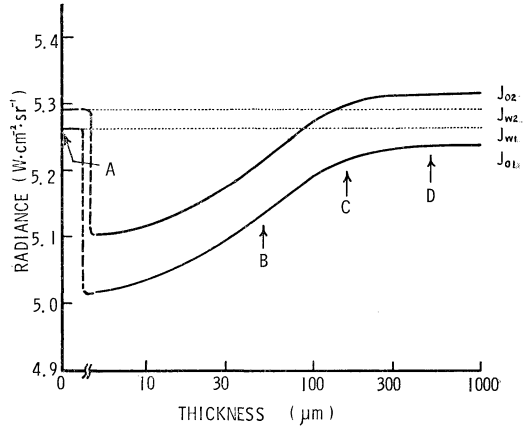
(W·cm⁻²·sr⁻¹)

油面からの放射束 J_o は

$$J_o = \tau_a(\epsilon_{oa}J_{oa} + \tau_o^*J_{wo} + \rho_{oa}^*J_b) + J_a \quad (6)$$

ここで、 τ_a は液面と放射温度計との間の大気の透過率、 $\epsilon_{wa}J_{wa}$ は水面からの放射、 ρ_{wa} は水面の反射率、 J_b は背景の放射、 J_a は液面と放射温度計間の大気の放射、

$\epsilon_{oa}J_{oa}$ は油面からの放射、 $\tau_o^*J_{wo}$ は油面を通して出てくる水からの放射、 $\rho_{oa}^*J_b$ は油面で反射された背景放射である。 J_{wa} 、 J_{oa} 、 J_{wo} はそれぞれ水面、油膜、油膜下の水の温度に等しい黒体の放射であって Planck の放射式で与えられる。



第5図 水面上の油膜の厚さと放射温度計の入射放射束との関係

水面温度: 24.6°C, 油面温度: 24.95°C, 雲底温度: 18.0°C, 反射角: 25°, 晴天背景の放射輝度: $2.85 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu^{-1}$, 曇天背景の放射輝度: $4.80 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu^{-1}$, 大気の透過率 $\tau_a = 1.0$ (距離1mのため)とした場合,
 J_{w1} : 晴天時の水面からの放射, J_{w2} : 曇天時の水面からの放射, J_{o1} : 晴天時の油面からの放射, J_{o2} : 曇天時の油面からの放射, A, B, C, Dは第1図の各油膜の厚さに対応する。

第5図は、第1図の測定条件に近い条件を推定し、種々の厚さの油膜に対する式(5)、(6)の結果を図示したものである。ただし、水面および油面の真温度 T_{wa} と T_{oa} との関係は前述のとおり $T_{wa} < T_{oa}$ とする。

第5図より、油膜の厚さが薄い場合には、晴天・曇天のいずれの背景においても油面からの放射レベルは水面からのものよりも低く、従って油面の方が見かけの放射温度が低くなっている。これに対して、油膜がある厚さ以上になると逆に油面の方が高くなり、温度が逆転する厚さは、天空背景放射の増加につれて左に移動する。

ここで、第1図の測定時の真の液面温度および背景放射と第5図の各推定値との間に若干の相違があり得ることを考慮すれば、2~3°以内の狭い温度範囲では放射温度は入射放射にはほぼ比例することから、第1図の膜厚対放射温度の関係は第5図の膜厚対放射輝度の関係と比

較的よく一致している。このことは式(5), (6), が正しいことを裏づけている。

6. むすび

静穏な天候のもとにおいては、油汚染水面と非汚染水面との見かけの放射温度差は、油膜の厚さに大きく依存し、これに加えて天空背景放射が若干の影響を与えることを指摘した。

第5図は、汚染水面の赤外線映像から油の流出範囲のみでなく、理論的には油膜の厚さも求められることを示している。しかし実際には同時に真の水面温度、油面温度、ならびに天空背景放射の測定を行う必要がある。

また、実際の海面では波浪の影響はさげがたいが、風力4以下の場合には反射角30°以下の反射率の変化は極めて小さく(Cox, Munk, 1954), また油膜には波の抑制作用もあることを考慮に入れて実用性を検討せねばならない。

最後に、実験に協力された本学学生三木敏文(現三菱重工), 大野貴久の両君に対して謝意を表します。

文 献

Chandler, P.B.: Remote Sensing of Oil Polluted Seawater, North American Rockwell, Report No. SD 70-377.
 Cox, C. and W.Munk, 1954: Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter, J. Opt. Soc. Am.,

44, 838-850.
 Friedman, D., 1969: Infrared Characteristics of Ocean Water (1.5-15μ), Applied Optics, 8, 2073-2078.
 Kauth, R. 1965: Handbook of Military Infrared Tech. (W.L. Wolf, ed.), U.S. Gov't Printing Office, 166-170.
 Kennedy, J.M., and E.G. Wermund, 1971: Oil Spills, IR and Microwave, Photogrammetric Eng., 1235-1242.
 Klemas, V., 1972: Detecting and Measuring Oil on Water, Instrumentation Tech., 54-59.
 近藤純正, 渡辺英雄, 1969: 水面近くの薄い層の水温について, 天気, 16, 501-511.
 松井松長, 高木亨, 星隼人, 1973: 水面温度の測定と背景放射の影響, 第12回 SICE 学術講演会予稿集, No. 2405, 431-432.
 McAlister, E.D., 1964: Infrared Optical Techniques Applied to Oceanography, I. Measurement of Total Heat Flow from the Sea Surface, Applied Optics, 3, 609-612.
 McMahan, H.O., 1950: Thermal Radiation from Partially Transparent Reflecting Bodies, J. Opt. Soc. Am., 40, 376-380.
 高木亨, 松井松長, 1967: 中間赤外域における背景放射の分光分布, 分光研究, 16, 112-118.

気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
第8回夏季大学 「新しい気象学」教室	昭和49年7月29日～8月1日	気象学会	気象庁講堂
シンポジウム 「雨量予報の現状と問題点」	〃 8月21日	気象学会東北支部	仙台
第6回レーザーレーダ国際会議	〃 9月3日～6日	レーザーレーダ国際 会議組織委員会	仙台市民会館
自然災害科学総合シンポジウム	〃 10月18日～19日		名古屋大学
高層気象	〃 10月24日	気象学会	気象庁内
秋季大会	〃 11月6日～8日	気象学会	電気ビル(福岡市)
シンポジウム「冬の低気圧」	〃 11月27日	気象学会北海道支部 ・札幌管区气象台	札幌管区气象台
第21回風に関するシンポジウム	〃 11月下旬	気象学会他共催	気象庁講堂
第3回「海陸風と 大気汚染に関するシンポジウム」	〃 12月3日～4日	日本気象学会関西 支部	広島合同庁舎2号館6階
構造物の耐風性に 関する第3回シンポジウム	〃 12月5日～6日	電気学会, 土木学 会, 日本建築学会 日本鋼構造協会	気象庁講堂