

[光学論文賞受賞記念]

解 説**ランダム水表面の光散乱放射特性と海洋温度計測***

吉 森 久

古野電気(株)技術研究所 〒662 西宮市芦原町 9-52

(1995年4月19日受理)

**Optical Characteristics of a Random Water Surface and
Ocean Surface Thermography**

Kyu YOSHIMORI

Research Laboratory, Furuno Electric Co., Ltd., 9-52, Ashihara-cho, Nishinomiya 662

1. はじめに

本稿では、ランダム水表面の光散乱放射特性と低高度からの水表面熱映像法に関する、筆者らの研究のあらましを紹介する。水表面の赤外放射と光散乱特性のやや詳しい取扱いは以前本誌の解説¹⁾で紹介したので、今回はなるべく簡単に述べ、この研究が本来内包している海洋学、基礎光学、光計測の諸要素の相互関係と研究全体のねらいを明らかにするように努めた。

2. 研究の背景

海や湖などの広い水表面の温度分布の測定は、波長10 μm 帯における赤外域の大気窓を通して撮影された気象衛星の熱映像を受信する方法が実用化されている^{2,3)}。この方法は日本列島周辺の黒潮の温度分布やエルニーニョの暖水塊といった地球の規模の水温分布の測定に適したものである。しかし港湾や海上の船舶の周囲に広がる水面のような局所的な水域の温度分布の測定に関しては不満も多い。たとえば気象衛星 NOAA の場合、測定回数は1日4回で、空間分解能は海上の通常の船舶では1画素あたり3.2 km \times 3.2 km、温度分解能は公称0.2度であるが、その他の強い制限として、たとえば衛星が上空に飛んできて雲があると水面は観測されなくなってしまう。

さて海には所々に潮目とよばれる水温のはっきりした境界があり、その付近では豊富に発生するプランクトンを求めて魚類が集まるため、よい漁場を形成している。実際に気象衛星の熱映像を利用して操業を行う遠洋漁業の漁師は、この潮目を目指して船を出すのであるが、(幸い雲がなかったとして)気象衛星が以前に撮影した熱映像だけでは、海は広大であるから自船と潮目の位置関係がはっきりわからないようである。そこで自船の周囲の海の温度分布をあたかもレーダーのように可視化する装置に対する要望が多い。こういうわけで、筆者の水表面光散乱放射問題の研究は、船の上や海に近い丘などの低い高度から周囲の水表面の温度分布をリアルタイムかつ高い空間分解能で測定することのできる計測法の可能性を調べることから始められた(図1)。このような計測法は一方で、人工衛星が撮影した熱映像を時間的、空間的に補完する機能をもった計測法としても望ましいものである。

3. 問題点・研究方法

波浪のある水表面の温度を、低い高度から放射温度計を用いて測定する場合の問題点を考えよう。波浪のある水表面は、巨視的なスケールをもったランダム粗面とみなすことができる。この粗面を波長10 μm 程度の赤外域で水面の平均法線に対し斜め方向から観測すると、温度計の検知器には水面からの熱放射光と水面で散乱された天空光の散乱光が同時に入射する。水面の温度を決定

* 本稿は平成6年度光学論文賞受賞記念講演(1995年3月28日、東海大学)を中心として、まとめたものである。

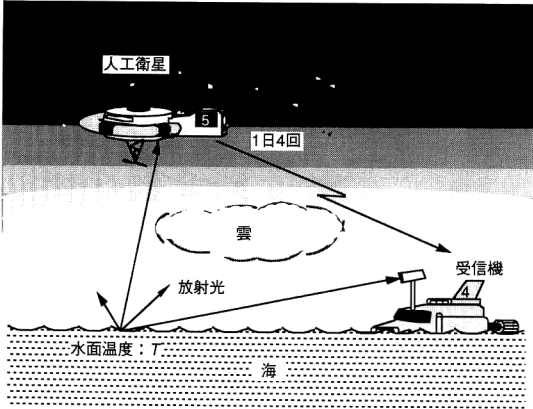


図1 低高度からの水温分布測定と人工衛星による水温分布測定

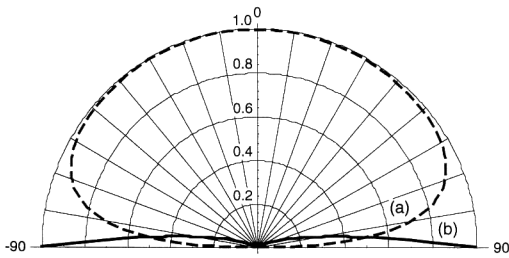


図2 平坦な水表面の放射率(a)と反射率(b)

するためにはこの放射の寄与と散乱の寄与を正確に評価する必要があります。そこでランダム水表面の放射率、および光学的散乱特性を決定するという問題が発生する。すなわち水表面を光学的散乱体、あるいは放射体として研究するわけである。

ところで風で発生する海洋波は、一般に波長の成分が数 mm から 100 m 程度の範囲に分布している。それに比べて、今考えている赤外光の波長は数 μm から 10 数 μm 程度のものである。このことは水表面による赤外光の散乱や放射を扱う場合は、水表面は局所的に平坦とみなせることを意味する。入射光線は水表面の各点において正反射するとして扱う幾何光学近似が利用でき、その際表面の各点は平坦な水表面のものと同じ放射率と反射率をもつと仮定することができる。図2は平坦な水表面の放射率と反射率の指向特性を示したものである。水表面の放射率は水面の法線方向で最も大きく、観測角が60度を超えるあたりから急激に小さくなり、水面と平行の方向でゼロとなる。一方放射率と反射率は熱平衡状態では足し合わせると1となる性質がある⁴⁾(Kirchhoffの法則)。反射率は水面と平行のとき1となるから、波浪がない場合、遠方の観測点では水表面を観てい

るつもりが実は水表面に映った空を覗いていることになってしまう。ちなみに人工衛星の場合は、放射率が大きい観測角が55度以下の方位から水面を観測するため、このことはあまり問題にならない。実際の海の水表面には波浪が存在するから、状況は随分異なっているはずである。そして波浪のある水表面は本来ランダムであるから、その統計的性質を指定する水表面モデルが必要となる。

4. 水表面モデル

そこで水表面のモデル¹⁾であるが、ここでは概要を述べるに留める。筆者らの水表面モデルは、まず水面変位の確率密度として正規分布を仮定し⁵⁾、波浪の2次元スペクトルを指定するために海洋気象予報や波浪予報で利用されている JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) スペクトル⁶⁾を採用する。そして重力波と表面張力波がある場合の微小水面波の分散関係を利用して水面の運動を指定する⁷⁾というものである。このモデルを Gaussian-JONSWAP モデル (G-J モデル) という⁸⁾。G-J モデルは入力パラメーターとして風速、風向、吹送距離を与えると波浪場の統計的特性を完全に指定することができ、さらに重力波と表面張力波を統一的に扱えるモデルである。ここで吹送距離とは海上風が観測水面に到達するまでに一様に吹いているとみなせる距離であり、波浪は海上風によって成長するわけである。後々問題となるのは、この吹送距離なるパラメーターがあるために、JONSWAP スペクトルは水面の位置によって異なったスペクトルを与えることである。すなわち G-J モデルは、空間的に非一様な波浪場のモデル⁷⁾である。

5. 非一様な波浪場の統計的定式化

図3は、波浪場を統計的に分類したものである。一般の波浪場は、時間的に定常な場と非定常な場に分けるこ

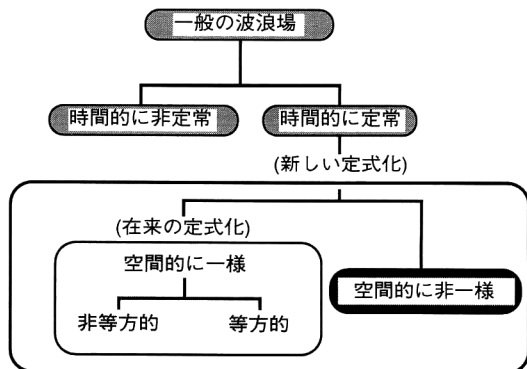


図3 波浪場の統計的分類

とができ、さらに定常な場は空間的に一様な場と非一様な場に分類される。G-Jモデルは、空間的に非一様な波浪場のモデルである。ところが1950年代につくられた在来の波浪場の統計的定式化⁹⁾は、2次元の波数スペクトル密度を基本スペクトルとして構成されており、厳密には時間的に定常でかつ空間的に非一様な波浪場のみを記述しうるものであることがわかった⁷⁾。一方空間的に非一様な場の取扱いは光学の世界ではすでに知られており、具体例としては Gaussian Shell モデルが有名であるが、非一様場の基礎的な定式化は、Wolf による放射エネルギー伝達の理論^{10,11)}にみられる。この理論は電磁場の場の量の角度・スペクトル表示を基礎として構成されており、光学の世界で長い間利用されてきた現象論的な放射伝達理論の物理的基礎とみなされるものである。そこで筆者らは電磁場の定式化の手法を参考にして空間的に非一様な波浪場の統計的定式化を行い、水表面光散乱放射問題の研究の出発点とした^{7,12)}。こうして得られた新しい定式化は、在来の空間的に一様な波浪場の定式化の厳密な一般化となっており、G-Jモデルで採用した JONSWAP スペクトルの物理的基礎となるものである。

6. G-J 水表面の光散乱放射特性

次の段階は、G-J 水表面の光散乱放射特性を調べることである。筆者らの計測法では水表面を極端に斜め方向から観測することになるため、水表面では shadowing (水面上のある点が前方にある水面の凸部の陰に入る現象) が頻繁に発生するものと予想される。そこで、Wagner と Smith による粗面の幾何学的 shadowing の理論^{13,14)} の考え方を利用して、大きな観測角に対するランダム水表面の実効放射率と実効反射率を決定した¹⁵⁾。この解析の結果、G-J 水表面の実効放射率は、遠方の海上においても平坦な水表面の放射率ほど小さくならず、また波浪の状況にたいする依存性も緩慢であるため、遠方まで温度測定できる可能性のあることがわかった。また実効反射率はその解が入射角と観測角に関する関数として得られるため、画像計測に用いても高速に計算できる。これらの成果をふまえて、低い高度からでも利用できる統計的水表面熱映像法を考案した^{8,16-18)}。

7. 統計的水表面熱映像法

図4は統計的水表面熱映像法 (statistically corrected ocean thermography ; SCOT) の原理を示したものである⁸⁾。熱映像装置は水表面 (海) と背景である天空の

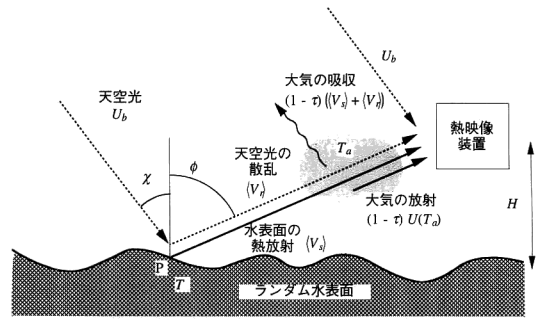


図4 統計的水表面熱映像法の原理

赤外面像を2次元的に記録する。すなわち水表面の温度分布を得るために、空の輝度分布も測定するわけである。このとき水面上の点Pの方位から入射する放射束Vは次のように表される。

$$\langle V \rangle = \langle V_s \rangle + \langle V_r \rangle \tau(R) + U(T_a)(1 - \tau(R)) \quad (1)$$

ここで V_s は水面からの熱放射束、 V_r は水面で反射された天空光の放射束であり、 $\langle \rangle$ は水表面状態に関する統計的平均を意味する。 $\tau(R)$ は途中の光路長 R における大気赤外透過率であり、気温と湿度から求めることができる¹⁹⁾。式(1)の第2項は光路中の大気の放射の寄与であり、 $U(T_a)$ は気温 T_a をもった黒体の放射束である。一方 $\langle V_s \rangle$ と $\langle V_r \rangle$ は観測角 ϕ 、入射角 χ に関する実効放射率 $\epsilon_{\text{eff}}(\phi)$ と実効反射率 $w_1(\chi, \phi)$ を用いて次のように表される。

$$\langle V_s \rangle = U(T) \epsilon_{\text{eff}}(\phi) \quad (2)$$

$$\langle V_r \rangle = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\chi U_b(\chi) w_1(\chi, \phi) \quad (3)$$

ここで $U(T)$ は水温 T をもった黒体の放射束であり、

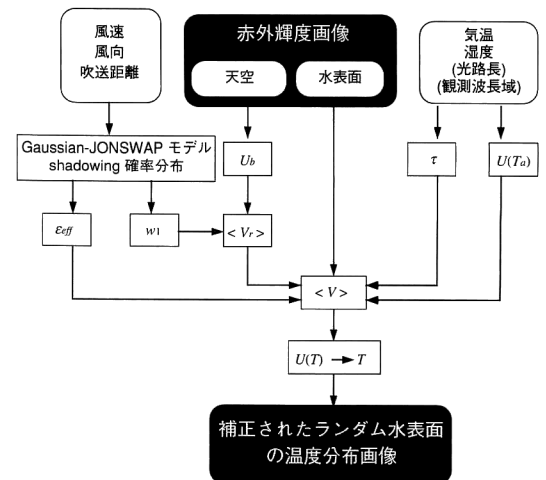


図5 統計的水表面熱映像法 (SCOT) のアルゴリズム

$U_b(x)$ は x 方向の天空の輝度である。以上の3式を $U(T)$ に関して解くと温度補正式

$$U(T) = \frac{\langle V \rangle - \langle V_r \rangle \tau(R) - U(T_a)(1 - \tau(R))}{\epsilon_{\text{eff}}(\phi)\tau(R)} \quad (4)$$

が得られる。そこで風に関するパラメーターを測定して G-J 水表面モデルから実効放射率と実効反射率を決定すれば、温度補正式から水温 T を求めることができる。こうして画像処理の手法としての統計的水表面熱映像法は、水表面輝度画像の各画素における天空の輝度画像の反射の寄与を水表面の実効反射率から決定し、水面の熱放射量のみを抽出して水温分布画像を構成するものであることがわかる。統計的水表面熱映像法のアルゴリズムを図5に示す。

8. 統計的水表面熱映像法の効果

フィールド実験は大阪湾の関西新空港付近の防波堤で行われた^{8,18)}。実験系を図6に示す。熱映像装置の平均海面からの高度は6.9mであり、測定波長帯域は8~13 μm である。波浪のスペクトルは風速と風向を測定し、さらに観測地点から風上にある淡路島までの距離を吹送距離として JONSWAP モデルから決定した。また乾湿計で気温と湿度を測定し、大気の透過率を決定している。図7(a)に入力画像である海と空の輝度画像を示す。画角は海が23度、空が60度、幅が25度である。(b)~(d)は水面の温度分布画像であり、水平線より上の部分は取り除いてある。(b)は補正を行わない輝度温度で、遠方になるほど温度が低くなっていることがわかる。(c)は統計的水表面熱映像法で温度補正を行った画像で、水平線近傍まで一様な温度になっている。(d)は比較のために水

表面を平坦と仮定し、平坦な水面の放射率と反射率を用いて補正を行ったものである。水面中央上部に温度の高いバンドが2箇所みられるが、これらは空の雲の切れ目が補正の際に水面に反射して映ったものである。図8は

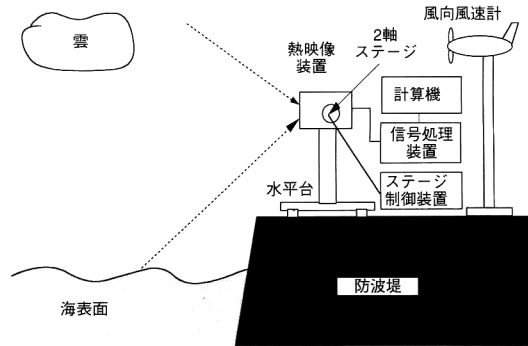


図6 フィールド実験の実験系

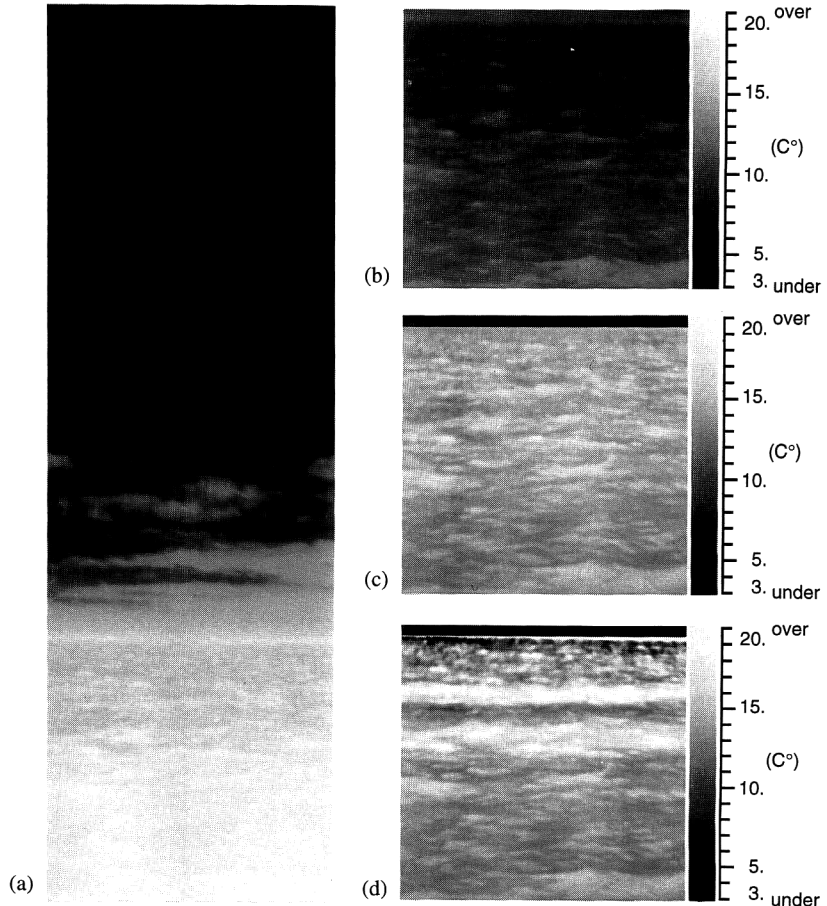


図7 (a)波長10 μm 帯における海と天空の輝度画像(入力画像), (b)~(d)海水表面の温度画像:(b)もとの輝度温度, (c)統計的水表面熱映像法による温度, (d)平坦な水表面の放射率と反射率を用いた補正による温度。

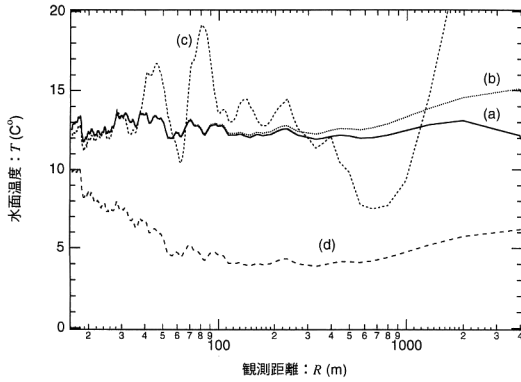


図8 図7の温度画像の横一列の画素の平均温度を観測距離の関数として表したものの (a)統計的水表面熱映像法, (b)統計的水表面熱映像法において、大気吸収の補正を行わなかったもの, (c)平坦な水表面の放射率と反射率を用いた補正, (d)もとの輝度温度。

水面の温度分布の画像の横一列の画素の平均温度を観測距離の関数として表したものである。(a)が統計的水表面熱映像法で補正を行ったもので、高度6.9mからの測定で4km近くまで一様な温度が得られている。実験海域周辺の水温は、激しい潮の流れから一様とみなすことができる。(b)は統計的水表面熱映像法で大気吸収と放射の補正を行わなかったものである。大気の影響は、観測距離が大きい場合に現れることがわかる。しかし次に示す波浪を無視した場合ほどの影響はみられない。(c)は水面を平坦と仮定したときのものである。観測距離が数十m以上の遠方で、大きな温度の振動が現れる。(d)は補正を行う以前の輝度温度で、遠方で水表面の放射率が小さくなるためいったん低くなり、さらに遠方では大気放射のために再び高くなっている。

9. 最近の研究成果と多重散乱の比率

統計的水表面熱映像法の基礎となる水表面光散乱放射特性の取扱い¹⁵⁾は、水面のある断面の形状のみに注目した1次元問題である。しかしG-Jモデルは風によって成長し特定の方向に進行する2次元の波浪場を記述するモデルであるから、光散乱放射問題も2次元的に扱うことが望ましい。この一般化は水表面の平均勾配が一般に10度程度であることを考慮すると容易に実行することができる²⁰⁾。図9は2次元理論による実効反射率の計算例であり、ある観測角で水表面を観測したときの水表面で反射したような天空の強度分布になっている。波浪の進行方向とそれに直交する方向での水表面の非等方性

が実効反射率に反映されることがわかる。この2次元理論による実効反射率を利用すると、より広い画角をもつ水表面輝度画像の温度補正が可能となる²⁰⁻²²⁾。

ところで筆者らの実効反射率と実効放射率の取扱いは、入射方向や観測方向に関する粗面のshadowingを考えて、水表面で発生する単散乱と単一放射の寄与のみを取り出したものである。そのため多重散乱や高次の放射の詳しい様子は知るべくもないが、全散乱光のエネルギーのうち2次以上の多重散乱が占める割合を調べることができる¹⁵⁾。そのためには1次の実効反射率 w_1 をすべての入射方向に関して積分した1次のイラディアンシリフレクタンス ρ_1 と実効放射率 ϵ_{eff} を足し合わせて、エネルギー保存則を調べればよい。図10はこの両者の和を計算したものである。この和の値が1であれば単散乱のみが発生していることになるが、観測角の余接が水表面の平均勾配と等しくなるあたりでエネルギーの損失が現れる。したがって水面の平均勾配と平行になる程度の斜め方向から水表面を観察したとき、2次以上の多重散乱が比較的頻繁に発生しているものと予想される。そして全散乱光における単散乱の比率は約0.95である。

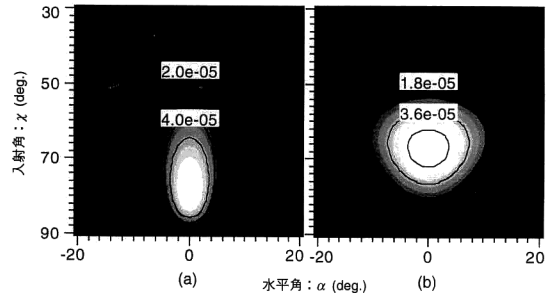


図9 2次元理論による実効反射率 風速8.7m/s, 吹送距離40km, 観測角60度。(a)波浪の進行方向, (b)波浪の進行方向と直交する方向。

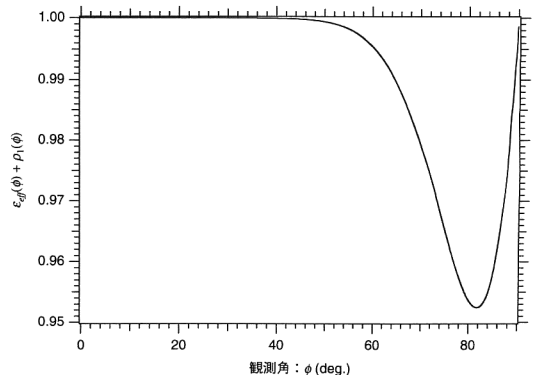


図10 多重散乱を除いた単散乱の比率

この予想は、高次の散乱まで扱えるモンテカルロシミュレーション²³⁾を併用して、今後調べてゆく予定である。

10. ま と め

本稿では、ランダム水表面の光散乱放射特性と統計的水表面熱映像法に関する研究の概要を述べた。第1に、非一様な波浪場の統計的定式化を提案している。すなわち在来の波浪場の定式化は、空間的に一様な場合に限られていたのに対し、筆者らの提案した一般化された定式化は空間的に非一様な波浪場にも適用することができる。そして非一様な場の定式化の手本は、電磁場のコヒーレンスと放射伝達の理論にある。第2にランダム水表面の光散乱放射特性を研究している。ここでは水表面をG-Jモデルによって指定し、shadowingを考慮することにより大きな観測角に対する水表面の実効反射率と実効放射率を導いている。特に実効反射率は入射角と観測角に関する関数として求められているので、短時間で散乱特性を予想することができる。そしてこれらをふまえて第3に低高度から利用できる温度補正式を導き、さらに画像処理的手法としての熱映像構成法を考案している。ここで導かれた温度補正式は入力パラメータとして、風速、風向、吹送距離、気温、湿度を指定すると決定され、これらはいずれも海の測定現場で決めることができる。そしてこの熱映像構成法の効果は、大阪湾におけるフィールド実験において希望のもてる結果が得られている。

最後にこの研究の機会を与えていただいた古野電気株式会社、研究をまとめるにあたり懇切なご指導をいただいた大阪大学大学院工学研究科の伊東一良助教授と岡芳樹教授、波浪場のスペクトルに関する適切な助言をいただいた神戸商船大学の井上篤次郎教授に心から御礼を申し上げます。

文 献

- 1) 吉森 久：“ランダム水表面の赤外放射・散乱特性”，光学，**24** (1995) 159-164.
- 2) E. P. McClain, W. G. Pichel and C. C. Walton: “Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures,” J. Geophys. Res., **90** (1985) 11587-11601.
- 3) 高島 勉, 高山陽三：“赤外域を利用した衛星による海面温度測定”，日本リモートセンシング学会誌，**2** (1982) 2.
- 4) R. Siegel and J. R. Howell: *Thermal Radiation Heat Transfer* (Hemisphere Publishing, New York, 1981) p. 57.
- 5) B. Kindsman: *Wind Waves* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1965) p. 344.
- 6) D. E. Hasselmann, M. Duncel and J. A. Ewing: “Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973,” J. Phys. Oceanogr., **10** (1980) 1264-1280.
- 7) K. Yoshimori, K. Itoh and Y. Ichioka: “Statistical formulation for an inhomogeneous random water surface: a basis for optical remote sensing of oceans,” J. Opt. Soc. Am. A, **11** (1994) 723-730.
- 8) K. Yoshimori, K. Itoh and Y. Ichioka: “Statistically-corrected ocean thermography,” Appl. Opt., **33** (1994) 7078-7087.
- 9) O. M. Phillips: *The Dynamics of the Upper Ocean* (Cambridge University Press, Cambridge, 1966) p. 72.
- 10) E. Wolf: “New theory of radiative energy transfer in free electromagnetic fields,” Phys. Rev., **D13** (1976) 869-886.
- 11) E. Wolf: “Coherence and radiometry,” J. Opt. Soc. Am., **68** (1978) 6-17.
- 12) K. Yoshimori, K. Itoh and Y. Ichioka: “New statistical formulation for an inhomogeneous ocean surface,” *Topical Meeting of IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Digest* (1994) pp. 455-459.
- 13) R. J. Wagner: “Shadowing of randomly rough surface,” J. Acoust. Soc. Am., **41** (1967) 138-147.
- 14) B. G. Smith: “Geometrical shadowing of a random rough surface,” IEEE Trans. Antennas Propag., **AP-15** (1967) 668-671.
- 15) K. Yoshimori, K. Itoh and Y. Ichioka: “Thermal radiative and reflective characteristics of a wind-roughened water surface,” J. Opt. Soc. Am. A, **11** (1994) 1886-1893.
- 16) 吉森 久, 伊東一良, 岡芳樹：“波浪のある水表面の熱映像構成法”，光学，**23** (1994) 50-57.
- 17) 吉森 久, 伊東一良, 岡芳樹：“赤外面像によるランダム海水水面の温度計測”，第8回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集 (1993) pp. 41-46.
- 18) 吉森 久, 伊東一良, 岡芳樹：“赤外面像による低高度からの水面温度測定法”，画像ラボ (日本工業出版)，**5**, No. 2 (1994) 51-54.
- 19) R. D. Hudson, Jr.: *Infrared System Engineering* (John Wiley & Sons, New York, 1969) p. 144.
- 20) K. Yoshimori, K. Itoh and Y. Ichioka: “Optical characteristics of a wind-roughened water surface: a two-dimensional theory,” Appl. Opt. (1994) in press.
- 21) K. Yoshimori, K. Itoh and Y. Ichioka: “Correction of thermal image of wind-roughened water surface for nonuniform sky-background,” *Topical Meeting of the International Commission for Optics Digest* (1994) p. 266.
- 22) 吉森 久, 伊東一良, 岡芳樹：“統計的水表面熱映像法(2次元水表面散乱特性の決定と応用)”，光学連合シンポジウム浜松'94講演予稿集 (1994) pp. 193-194.
- 23) 佐藤美喜, 吉森 久, 大中幸三郎, 伊東一良, 岡芳樹：“波浪のある水表面の高次散乱特性”，第40回応用物理学学会学術講演会講演予稿集，**3**, 28 p-ZC-3 (1995) p. 890.