

# 強風下における高速表面水温計測を用いた風波の熱輸送変調の解析

Modulations of the heat transfer across wind wave surfaces in high wind speed

北海道大学大学院工学研究院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)  
 北海道大学大学院工学研究院 ○学生員 田代晃基 (Koki Tashiro)  
 寒地土木研究所 正員 大塚淳一 (Junichi Otsuka)  
 北海道大学大学院工学研究院 学生員 大山高弘 (Takahiro Oyama)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

## 1. はじめに

大気から海洋への輸送フラックスは従来海上風速に対して単調増加する経験的に決定された海面抵抗係数の下でモデル化されてきた。しかし、近年の観測結果から暴風域の大気海洋間界面過程の不確実性が明らかになり (Powell 2003), 強風時の砕波に伴って生じる海面の気液二相化について現在世界中で研究が進められている。海面熱輸送を決定するファクターは次の3つの機構から決定できるものと従来考えられている。(1)水面境界層の圧縮伸長(Witting 1972), (2)波面に沿う風による運動量境界層に対する熱伝導(Saunders1967), そして(3)砕波乱流に起因する表面更新(Jessup 2003)である。さらに、砕波が生成する組織的渦構造は表面更新を支配する一因であり、砕波規模によっても熱輸送フラックスは有意に変化する(Watanabe and Mori 2008)。これらの結果は、従来風速のみをパラメータとして決定されてきたフラックスでは風波砕波が発達するステートの熱輸送過程を適切に予測しえないことを示唆している。さらに、強風下に発達する乱流せん断力と波面形状及び熱境界層への影響、誘発され顕著に発達する砕波乱流による表面更新と回復のメカニズム、特に風波の非平衡なステートに対するそれぞれの機構の寄与率について未解明な問題が多い。そこで本研究では風波化に発達する砕波を伴う水温分布の高速熱画像計測を行い、海上風、波浪条件に依存した水温変動の特徴の変化を抽出し、特に波峰近傍の乱れ並びに風波砕波による表面更新の大気海洋間熱輸送に対する寄与を明らかにしようとするものである。

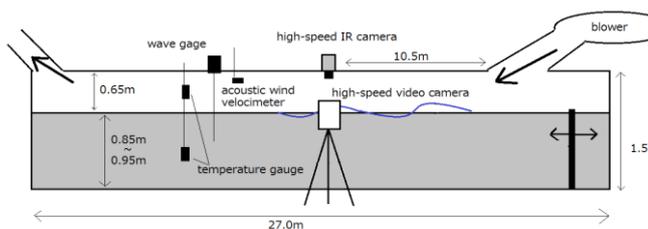


図 1 実験装置図

Case	$U_w$ (m/s)	$U_{10}$ (m/s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
1	10.26	14.20	7.2	0.60
2	12.02	19.51	10.8	0.68
3	13.37	20.80	12.4	0.73
4	14.14	22.88	13.0	0.72
5	15.32	27.03	13.3	0.75
6	17.32	31.14	14.9	0.80
7	18.56	26.26	14.1	0.81

表 1 風速条件と生じた風波諸元

## 2. 実験方法

実験は渡部ら(2014)と同一のピストン式造波装置が一端に設置された長さ 27.0m, 幅 0.6m, 高さ 1.5m の風洞水槽で行われた(図 1 参照)。風は造波装置上部に設置された送風機で生成され、送風ガイド板を經由して造波装置前面の送風口から風洞内へ供給される。本実験では水深を 85cm, 95cm に設定した。

水面温度分布の計測は、フェッチ 10.5m の位置に設置した高速サーモグラフィ(480×320 画素, 撮影周波数 300Hz, 積算時間 860 μs)により行った。このサーモグラフィに同期された高速度ビデオカメラを同一計測地点の水槽側方に設置し、水温と同時刻の水位変動を計測した。風洞内の気温は水温より低く設定した。計測地点下流側に設置した超音波風速計を鉛直方向にトラバースして風速分布を取得し、同一地点において容量式波高計によって水位変動を計測した。渡部ら(2014)が行った水深 0.85m に固定した 30 ケースに加え、水深を 0.95m に増加させより強風下で風波を発生させたケース(case7)の計 31 ケースに対して、それぞれ 3 回の試行実験を行った。図 2 は造波していない条件での case1~7 の風速の鉛直分布である。この風速プロファイルから対数則を用い抵抗係数、摩擦速度、 $U_{10}$  を算出し風波の水面温度変化の特徴を調べた。

図 3 は風のみを発生させたときの波高スペクトルである。サンプリングレート 100s, サンプリング周波数 100Hz で計測を行った。風速の増加に伴いピーク値と勾配が変化することが確認された。

また、取得した高速熱画像は、初期水温分布を差し引いた偏差温度分布にメディアンフィルター操作を行い、

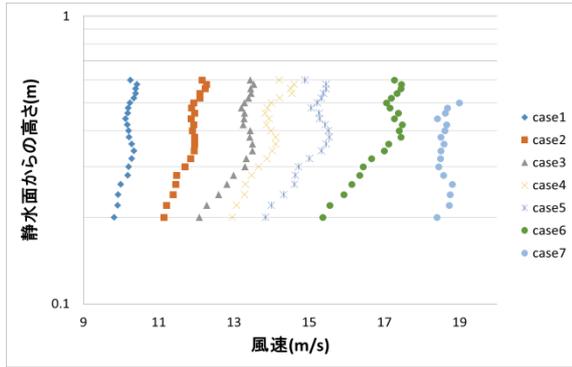


図 2 造波無し準定常状態での風速プロファイル

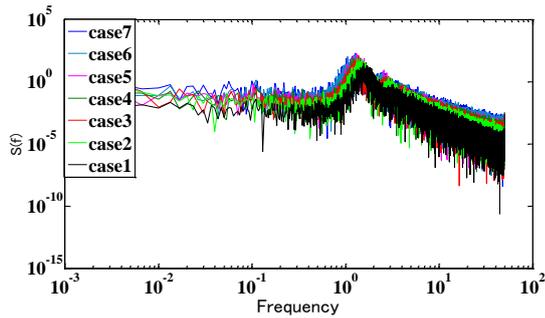


図 3 各ケースの波高スペクトル

スパイクノイズを除去すると同時に、実座標との更正值を基に行う線形座標変換により実座標へとマッピングした。水面形の可視画像は、輝度補正、メディアンノイズ処理後、適当な閾値の下で二値化を行い、実座標との更正值を基に実水位変動へと変換した。

### 3. 結果

図3は送風後、準定常状態における砕波を伴う風波の通過時の水温分布の一例を表したものである。気温の低い風によって冷却された表層膜面を砕波による乱れが崩壊し相対的に高温のバルク水塊との混合により小スケールの変動をもって水面温度が上昇する典型的な表面更新が広領域で確認できる。特に波頂の通過後位相差をもって砕波による表面更新が卓越するのが重要な特徴である。ここでは水温分布の分散が砕波あるいは風の乱れによる表面更新を記述すると考え、乱れが水面表層温度に与える影響を議論していく。

Toba and Koga(1996) は風と風波を結合するパラメータである風波レイノルズ数  $R_B = u_*^2 / \nu \sigma_p$  を提案し砕波率や抵抗係数を整理した。本研究でもこの  $R_B$  をパラメータとして風波の波面温度の特徴を記述していく。

Witting (1972) は、線形波の進行に伴う断面的な水面上の流れの収縮と発散に起因する水面境界層厚の変化が与える水面温度の変化を次式で導いた。これは波峰近傍の水面伸縮による膜厚の増加と、波底部の発散流による膜厚の低下により、境界層を通した一定の熱フラックスに対する水温の波の位相に応じた変化を記述したものである。その相対温度振幅  $\Delta\tau_s / \Delta\tau_0$  は次式により表される。

$$\frac{\Delta\tau_s}{\Delta\tau_0} = \frac{(2\pi k T)^{\frac{1}{2}} (a/l)}{\delta} \quad (1)$$

ここで  $\Delta\tau_s, \Delta\tau_0, k, T, (a/l), \delta$  はそれぞれ最大と最小の水面温度差、平均表面温度バルク水温の差、熱拡散率、周期、波形勾配、温度勾配を線形で仮定できる水深である。

図4は計測時の気液温度差で正規化した水温振幅と風波レイノルズ数の関係である。渡部ら(2014)の結果に加え水深 0.95m で平均風速 18.56m/s のケースを新たにプロットした。砕波を誘発するための造波波浪を含むケースにおいて、 $R_B \sim 2 \times 10^5$  付近までは相対水温振幅が減少する傾向があるが、 $R_B > 2 \times 10^5$  の領域においては増加することが観測された。新たなケースでは風波レイノルズ数の増加は確認できなかったが、相対水温振幅は増加する傾向にあることがわかった。式(1)に本実験条件を代入して得た  $\Delta\tau_s / \Delta\tau_0$  を  $R_B$  の関数としてプロットしたものが図5である。算定相対温度は、 $R_B$  に対して正の勾配を持つ単調増加を示し、本実験結果(図-8)と傾向が異なり、かつ水温振幅を過大評価してしまう。これは、式(1)では砕波及び波峰背後に複雑な気流を想定していないため表面更新の寄与は極めて小さく、熱境界層の伸縮の影響が相対的に支配したものと考える。この結果の逸脱から、強風時の水面温度変化にはこの境界層伸縮の影響を考慮する必要がなく、異なるメカニズムが

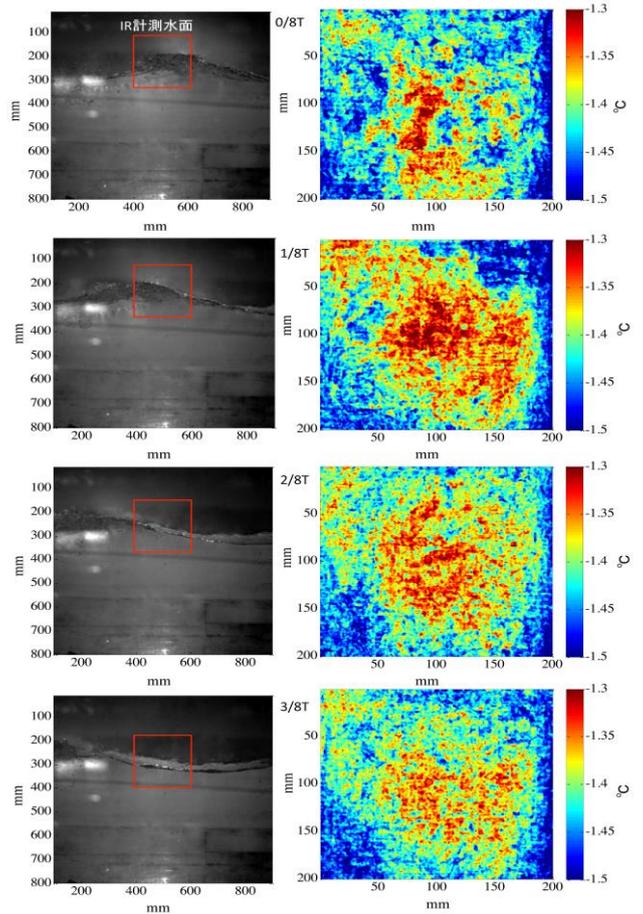


図 4 準定常状態における各位相の水位変動(左)と表面温度分布(右); case 7.

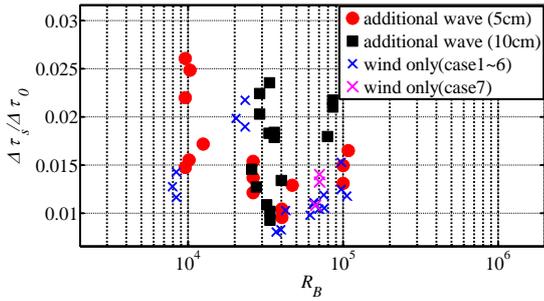


図 5 相対温度振幅 $\Delta\tau_s/\Delta\tau_0$  と $R_B$ の関係

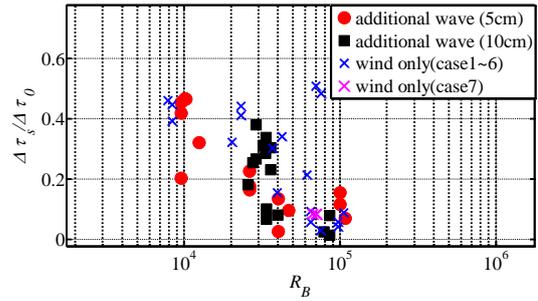


図 8  $\Delta t_m/T$  と $R_B$ の関係

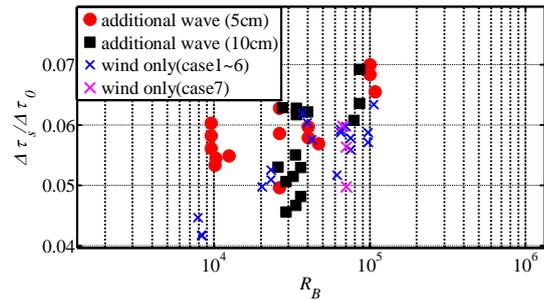


図 6 式(1)に実験条件を代入して得た $\Delta\tau_s/\Delta\tau_0$  と $R_B$ の関係

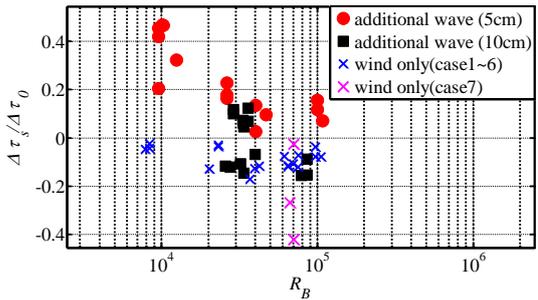


図 9  $\Delta t_s/T$  と $R_B$ の関係

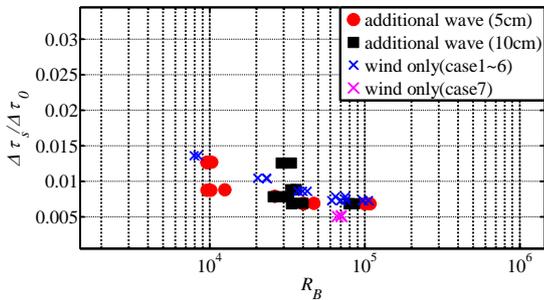


図 7 式(2)に実験条件を代入して得た $\Delta\tau_s/\Delta\tau_0$  と $R_B$ の関係

支配するということが考えられる。

Saunders (1967) は、熱フラックスに対する熱境界層の熱伝導から水面温度差を与えるモデルを提案した(式 2).

$$\Delta\tau_s = \frac{\lambda q v}{k(\sigma/\rho_w)^{1/3}} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda, q, k, v, \sigma, \rho_w$  はそれぞれ、定数、熱フラックス、熱伝導率、海面せん断力、水の密度である。式 2 に本実験条件を代入し、図 6 に示す相対水温差と $R_B$  の関係を取得した。熱フラックスとしては長波放射、潜熱、顕熱を与え、長波放射は Stefan-Boltzmann の法則により求め、潜熱、顕熱の計算にはバルク法を用い求めた。式 (2)には調整が必要な定数が含まれるため水温差の絶対

値を直接比較できないが、図 5 とは異なり、 $R_B$  に対して減少する傾向は本実験結果と同様である。しかしながら $R_B > 1 \times 10^4$  のレンジで実験結果と異なり再度上昇する傾向を見られず、また全ケースにおいて $R_B$  に対する勾配には有意な差異があり、式(2)に加え、適当な乱れのパラメータを導入する必要があるものとする。

相対平均水温の水位変動への相対遅れ時間( $\Delta t_m/T$ )は $R_B$  に対して約 0.5 から 0 に渡って減少する傾向を持つ(図 7 参照)。即ち、相対的に $R_B$  の低い条件では、風波の波峰の半波長程度背後で水温が上昇する変化を示す一方、風速の増加と共に位相差は減少し、 $R_B > 2 \times 10^5$  程度では、ほぼ波峰と同位相において最大平均水温が達成される。

同様に、水温分布の標準偏差と水位との相対遅れ時間( $\Delta t_s/T$ )を $R_B$  に対して整理したものが、図 8 である。風のみを発生させた場合には case7 で遅れ時間のばらつきが大きくなるものの、どの風速においても波峰の前方で乱れが発生しているのが確認された。case7 でばらつきが大きくなった理由として高風速であるため波峰の前方で発達した乱れが広範囲にわたっているからであると考えられる。そして、造波により非平衡場を模擬し砕波を誘発したケースでは $R_B \sim 3 \times 10^4$  近傍を境に波浪との位相差が逆転しているのがわかる。即ち $R_B < 3 \times 10^4$  では、波峰の背後に乱れによる表面更新が現れ、 $R_B > 3 \times 10^4$  では、波峰の前方にすでに乱れが境界層を攪乱していると考えられ、異なるメカニズムによる水温変動が発生している。

#### 4. 結論

強風時の水面の温度変化を水面境界層の圧縮伸長のみを考慮したモデルでは再現できない。低風速域で平衡場の熱輸送は波面に沿う風による運動量境界層に対する熱伝導の影響が大きい非平衡場での熱輸送は砕波による表面更新をパラメータとしたモデルによる予測が不可欠であり、強風時には風波砕波の影響を陽的にパラメータ化する必要がある。

大気海洋間の熱輸送機構のメカニズムの解明に関して、強風時の風波の気液二相乱流化についてさらに詳細な研究が必要である。

#### 参考文献

- Powell M.D., Vickery P.J. and Reinhold T.A.(2003): Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature* 422, 279-283 (20 March 2003) — doi:10.1038/nature01481; Received 18 September 2002; Accepted 4 February 2003
- Saunders P.M.(1967): The temperature at the ocean-air interface. *J. Atom. Sci.*, 24, pp 269-273 .
- Toba, Y and M. Koga (1986): A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, *Oceanic Whitecaps*, Eds. E. C. Monahan & G. Mac Nicoil, D. Reidel Publishing Company, pp. 37-47.
- Witting, J. (1972): Temperature fluctuations at an air-water interface caused by surface waves, *J. Geophysical Research*, VOL. 77, pp 3265-3269
- 渡部靖憲, 田代晃基, 大塚淳一, 大山高弘, 山田朋人 (2014); 風波下の高速表面水温計測による波面を通じた熱輸送の変調の解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70 (2014) No. 2 p. I\_56-I\_60