

風波形成時における海面表層流れと海面温度の変化

During wind wave formation surface layer flow and change in sea surface temperature

北海道大学大学院工学院 ○学生員 杉村一直 (Kazunao Sugimura)
北海道大学大学院工学院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

Powell et al.(2003)¹⁾の海洋観測によって強風下における海面抵抗係数の不確実性が報告され、Donelan et al.(2004)²⁾、Takagaki et al.(2012)³⁾などの研究で海面抵抗係数の調査が行われている。また、Komori et al.(2018)⁴⁾は強風下の風洞実験によって熱輸送係数の修正を行っている。一方で海面を介した熱輸送は Witting(1972)⁵⁾、Saunders(1967)⁶⁾、Jessup(1998)⁷⁾などの研究が行われ、波浪と風の局所的な相互作用が強く影響していると考えられており、風波の発達に応じた熱輸送形態を明らかにする必要がある。

渡部、杉村(2017)⁸⁾は非平衡風波場において波面上に発生する毛管波の渦供給が原因とみられる大規模な運動量輸送を明らかにした。風波直下の組織的渦構造が海表面の熱境界層を海中に取り込み、大気-海洋間の熱輸送に大きな影響を与えている可能性がある。また、渡部、杉村(2018)⁹⁾において吹送方向に伸長する海面温度分布が確認された。波面直上の風況が毛管波のスケールで変動し、ストリークを含む三次元的な風境界層が原因である可能性があるため、水面形と同時刻の温度分布をさらに高い分解能で計測し、調査する必要がある。

本研究は小型風洞水槽によって非平衡風波場を再現し、風波形成時における水面下の流れ構造と海面温度分布の変化を、高速可視、赤外線計測を行い調査し、海面直下に生成される渦による表面更新、表面張力波による海面温度境界層の海中への取り込みを通じた大気-海洋間熱輸送過程の解明を最終的な目標としている。

2. 実験・解析

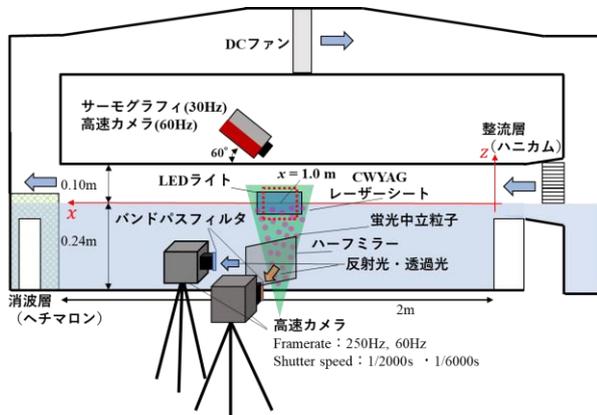


図-1 セットアップ

2.1 可視化実験

延長 2m、高さ 0.34m、幅 0.1m のアクリル製水槽に水深 0.24m まで貯められた静水上部に送風する小型風

洞水槽において実験を行った(図-1)。風洞上流端、静水面を原点とし流下方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸を定義する。 $x = 1.0\text{m}$ の計測点において、底面から YAG レーザーシート(波長 532nm)を照射し、水中に混入した蛍光中立粒子の移動を FOV 40x40mm の高速度カメラ(Framerate:250fps、解像度約 0.068mm/pix)によって高解像計測を行った。同時にバックライトを当て、ハーフミラーと高速カメラをさらに一台設置し、水面形を同期計測した。蛍光中立粒子を撮影する高速度カメラのレンズには 560nm 以上の波長を透過するハイパス光学フィルタが取り付けられ、レーザー光の水面からの乱反射の影響を受けることなく、トレーサーからの蛍光(ピーク波長約 580nm)のみを撮影することができる。また、水面形を撮影する高速度カメラのレンズには 450nm 付近の可視光のみを透過するバンドパスフィルタが取り付けられ、LED ライトの青色光のみ透過させて水面形を撮影した。

撮影画像はノイズ処理後、相互相関法と粒子追跡法のハイブリッド法である Super-resolution PIV(Watanabe et al. 2013)¹⁰⁾によって高解像流速の面的分布を取得する。得られた粒子速度は Takehara et al.¹¹⁾による MLS 補間法によって固定グリッドに補間し、流速分布、渦度分布を評価した。また、同期計測された水面形を抽出し、流速渦度分布の図にプロットした。

2.2 赤外線計測

高速赤外線計測では、赤外線カメラ(Framerate:30 Hz)と高速度カメラ(Framerate:60Hz)をそれぞれ水槽上部と側方に設置し、計測点において水槽横断方向中央部の海面温度と同一フェッチの水面形を同期計測した。風洞は気温 25.5°Cの恒温状態を維持し、水槽内の初期水中温度を 22.1°Cとし、10 分間隔のインターバル毎に 1 分間の計測を行った。

熱画像はメディアンフィルター処理を行い、スパイクノイズを除去した後、初期水温を差し引き、偏差温度分布を算出し、中央 10x10mm に対して平均温度と標準偏差を求めた。

また、高速度カメラ(Framerate:60fps)を水槽上部と側方に設置し、バックライトで水面形を照らし計測点の波面と水面形を同期計測した。

3. 結果

3.1 流速・渦度分布

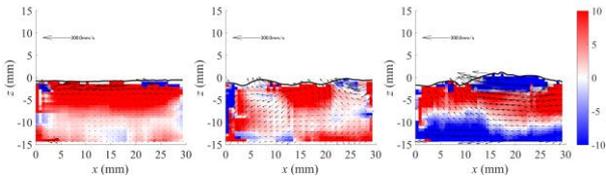


図-2 代表的な流速・渦度分布（吹送方向は右から左、吹送流発生時、表面張力波発生時、定常状態時）

送風開始直後、波は発生せず吹送流のみが発生しており、海面直下では吹送方向に高い水平流速、正の高渦度が発生している。表面張力波発生時は不規則な波動性の流速変動が観察される。風波が定常状態に達したとき、渡部、杉村(2018)⁹⁾で見られたような毛管波直下における正の高渦度が観察された。

3.2 海面温度分布

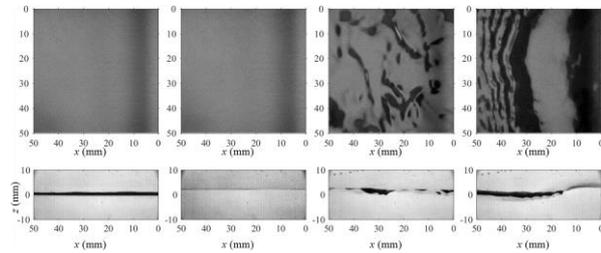


図-3 波面と水面形（吹送方向は右から左、左から静水状態、吹送流発生時、表面張力波発生時、定常状態時）

図-3 は送風開始後、静水状態から風波が定常状態に達するまでの計測点における波面の画像である。横軸が x 、縦軸が水槽横断方向としている。送風開始直後は波が発生せずに吹送流のみが発生し、多数の表面張力波が発生した後、重力波が形成され、波峰前方に毛管波が発生した風波が発達する。

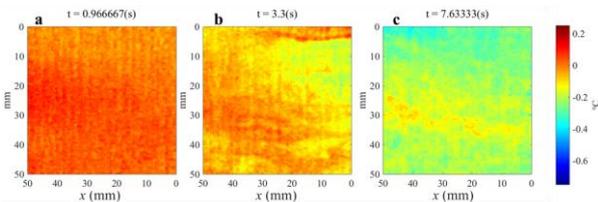


図-4 偏差温度分布（吹送方向は右から左、静水状態 a, 吹送流発生時 b, 表面張力波発生時 c）

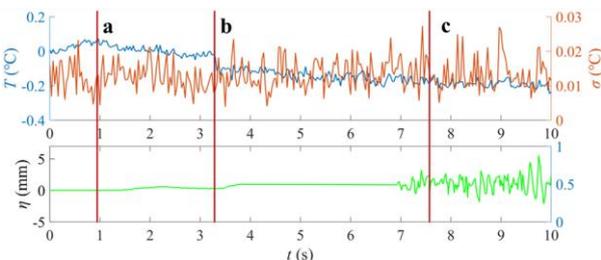


図-5 平均温度・標準偏差, 水位変動の時系列

図-4 は計測点中央部分 50mm 四方の偏差温度分布で

あり、横軸が x 、縦軸が水槽横断方向を表している。図-5 は送風開始後の偏差温度分布の中央 10mm 四方を平均して算出した平均温度・標準偏差と水位変動の時系列を表している。偏差温度分布はそれぞれ赤線が引かれた時刻に対応している。静水状態の海面温度分布は a で、初期海面温度が比較的高い状態で送風を開始した。送風開始直後、平均温度が急低下する瞬間の温度分布は b となる。このとき波は発生せず、吹送流のみが発生している。c は表面張力波が多数発生したときの温度分布を表しており、全体的に温度が減少し、位置によって高温の領域と低温の領域が観察される。

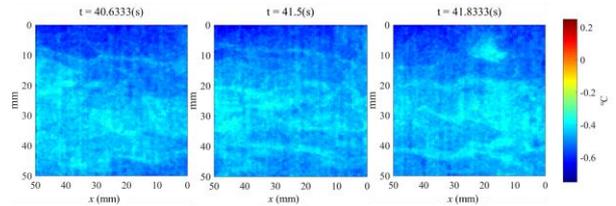


図-6 偏差温度分布（吹送方向は右から左、定常状態時）

図-6 は風波が定常状態に達したときの偏差温度分布であり、吹走方向に延びる高温の筋のようなものを観察できる。このような海面温度の変動は波や風場のストリークが影響している可能性があると考えられる。

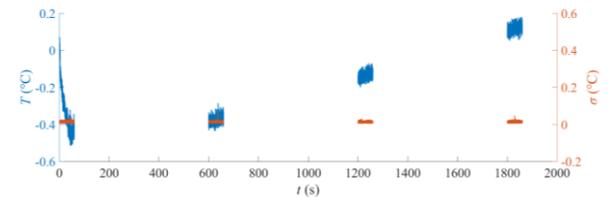


図-7 平均温度・標準偏差の時系列（送風開始から 1860 秒間）

図-7 は送風開始から 1860 秒間の平均温度・標準偏差の時系列を表している。平均温度は送風開始直後急激に低下し、送風の継続に伴い単調に増加しており、水温より相対的に温度が高い空気温度に漸近していると考えられる。

4. まとめ

静水状態から風波が定常状態に達するまでの流速・渦度分布、海面温度を計測した。送風直後に海面温度が急激に低下し、送風の継続に伴い平均水温が単調に上昇した。また、定常状態に達したとき、縦に伸びる筋状の高温領域を確認した。今後、海面温度と波形をより高い分解能で同期計測し、より短時間で起こる海面温度と水位変動の関係を調べる必要がある。

参考文献

- 1) Powell, M. D. et al., Reduced drag coefficient for high

wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 422 (2003)

2) M. A. Donelan et al., Linear and nonlinear propagation of water wave groups, *Journal of Geophysical Research: Oceans* 97.C4: 5607-5621 (1992).

3) Takagaki, N., Komori, S., Suzuki, N., Iwano, K., Kuramoto, T., Shimada, S., Kurose, R., and Takahashi K., Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39 (2012), L23604, doi:10.1029/2012GL053988.

4) Komori, S. et al., Laboratory Measurements of Heat Transfer and Drag Coefficients at Extremely High Wind Speeds. *J. Phys. Oceanogr.*, 48, 959–974 (2018).

5) Witting, James., Temperature fluctuations at an air-water interface caused by surface waves., *Journal of Geophysical Research* 77.18: 3265-3269 (1972).

6) Saunders, P.M., The Temperature at the Ocean-Air Interface. *J. Atmos. Sci.*, 24, 269–273 (1967).

7) Andrew T. Jessup. Et al., Simulation of ocean skin temperature modulation by swell waves., *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103.C2: 3149-3161 (1998)

8) 渡部靖憲, 杉村一直, 風波発達過程における水面せん断層の発達と運動量輸送, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 73.2 (2017): I_73-I_78 (2017)

9) 渡部靖憲, 杉村一直, 風波下の海面表層流れと海面温度との関係、混相流シンポジウム、No789、pp.56-78、2018.

10) 渡部靖憲, 堀井正輝, 新井田靖郎: 遡上波の力学的バランスと流れ構造, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69.2: 66-70., 2013.

11) Takahara, K. et al., Measurements of vortex generation and motion at wind wave surfaces, *Proc. Int. Conf. on Coastal Engineering* (2012)