

# 風波上の気流の剥離の発生頻度とその要因について

## Occurrence Frequency of Air-flow Separation over Wind Waves

水谷夏樹<sup>1</sup>・Edwin A. Cowen<sup>2</sup>・宮島昌弘<sup>3</sup>

Natsuki MIZUTANI, Edwin A. COWEN and Masahiro MIYAJIMA

We carried out the visualization experiment on air-flows over wind waves to investigate an occurrence frequency of an air-flow separation behind a wind wave crest. An air-flow separation behind a wave crest strongly depends on a local wave shape around the wave crest, but the occurrence frequency of the air-flow separation can be explained by the wave steepness. Physical surface roughness (significant wave height) grows as wind speed increases. However, the surface roughness length,  $z_0$ , doesn't grow. If the air-flow separation occurs over wind waves, the air-flow travels from the wave crest to the next wave crest. Then, the air-flow doesn't sense as physical surface roughness as significant wave height. Therefore, the surface roughness length doesn't grow as wind speed increases.

### 1. 緒言

気流から海面に伝わる運動量フラックスは一般的に、海面から10mの高さにおける風速、 $U_{10}$ を用いて以下のように表される。

$$\tau = \rho_a C_D U_{10}^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\tau$ は運動量フラックス、 $\rho_a$ は空気の密度、 $C_D$ は海面抵抗係数と呼ばれる無次元量で、海面に輸送される運動量フラックスを評価する量として用いられる。

これまで海面抵抗係数は風速とともに増大すると考えられてきたが、30m/sを超えるような強風下においては風速の増加とともに海面抵抗係数が一定値に収束あるいは低下する場合があることが最近の観測データより明らかにされている（例えばPowellら、2003）。

Donelanら（2004）は、高風速時に対応する海面抵抗係数の変化特性について室内実験による確認を行い、その結果、観測値において見られた変化を室内実験でも同様に確認し、高風速時に海面抵抗係数が一定値に収束する原因を波面からの気流の剥離ではないかと推測している。つまり、高風速時には波面の形状が急峻となり波頂部において気流が波面から剥離して下流側の次の波頂部付近に再付着する。これにより実質的な海面の粗度が物理的な粗度（波浪の発達度合い）ほど増大しないことを指摘している。

Donelanら（2004）の根拠となっているのが、Reulら（1999）の可視化実験結果である。Reulら（2008）では、

さらに詳細な検討を行い、気流の剥離域で海面への接線応力が低下していることを示している。しかし、Reulら（1999）やReulら（2008）の結果は純粋な風波上の気流を取り扱ったものではなく、あらかじめ決まった場所で碎波するように設定された波列を機械的に造波して、その上に気流を作用させたものである。通常、風洞水槽内に発生する風波は数波が連なって連続的に碎波し、前後の波浪諸元も類似のものが連なるケースが多い。すなわち一波だけが特出した波高を持ち、碎波するケースとは周囲の気流の状況が大きく異なるものと考えられる。また、気流の剥離が海面抵抗係数の収束につながると思えば、次なる疑問は剥離の頻度が海面抵抗係数の変化特性にどのような影響をもたらし、平均的にどのような特性を有するかということになる。

本研究では、大型風洞水槽を用いて風のみで風波を発生させ、可視化実験によって気流の剥離を確認し、その発生要因や特性を明らかにするとともに、剥離の発生頻度を求めて海面抵抗係数や粗度長さに対する影響を検討する。

### 2. 可視化手法の概要

#### (1) 実験装置と計測手法

実験は、図-1に示すようにコーネル大学が所有する全長20.0m×幅1.0m×高さ0.8mの両側面ガラス、底面ステンレス、天井部木製の風洞付き水槽を用いた。水深は0.39mに設定したため、気流部の高さは0.41mとなった。

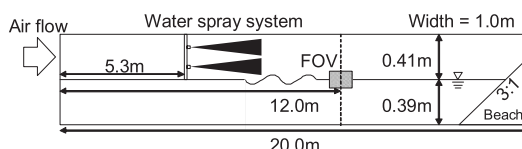


図-1 実験水槽の概略図

- |       |      |                                                                                    |
|-------|------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 大阪産業大学 准教授<br>工学部都市創造工学科                                                           |
| 2     | Ph.D | Cornell University, Associate Professor,<br>School of Civil and Environmental Eng. |
| 3 正会員 |      | 大阪産業大学 専任講師<br>工学部都市創造工学科                                                          |

計測点の吹送距離を12.0mとした。

波高の計測には容量式波高計を用い、気流はPIVによって計測を行った。カメラはCCDカメラ（UC-680CL, Uniq Vision製、656×494pixel, 10bitモノクロ, 60fps）を使用し、照明としてダブルパルスYagレーザー（PIV-400, Spectra Physics製、300mJ）を用い、シリンDRICALレンズを用いてシート光を作った。気流可視化用のトレーサーには微水滴を使用し、水滴の噴霧にはコンプレッサーを用いたスプレイ装置を風洞の入り口から5.3mの位置に設置した（図-1）。スプレイ装置はノズルを4カ所備えており、風洞断面全体に渡って粒径10 $\mu$ m程度の水滴を噴霧することができる。コンプレッサーによる水滴の加速の影響については、ファンを停止した場合に水滴が計測点のはるか前方で落下し、気流を発生させた場合には計測点において十分に気流速度になじんでいることを確認した。

PIV計測については、タイムストラドリング・テクニックを用いてYagレーザーのペア画像に対する発光間隔を各風速に合わせて最適化した。気流の3次元性による微水滴のレーザー面からの奥行き方向への逸脱も考慮して、画像内における水滴の移動量を最大で4pixel程度とし、エラーベクトルの発生数を最小限に抑えるように設定した。計測精度については異なる画像サイズによる平均風速分布の結果にほとんど差異がないことから、本研究の計測は以後の議論に対して十分な精度を有していると考えられる。

## (2) 実験条件

波高の計測は、サンプリング周波数を200Hzとし、各

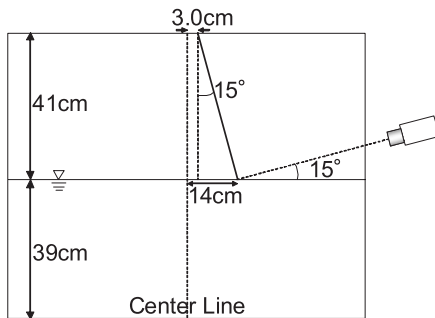


図-2 水槽断面におけるレーザー面の設定

表-1 実験条件

| Case | $U_{10}$<br>[m/s] | $u_*$<br>[m/s] | $z_0$<br>[mm] | $H_{1/3}$<br>[cm] | $f_p$<br>[Hz] | $C_p$<br>[m/s] |
|------|-------------------|----------------|---------------|-------------------|---------------|----------------|
| 01   | 4.73              | 0.144          | 0.0225        | 0.56              | 4.41          | 0.354          |
| 02   | 7.02              | 0.238          | 0.0743        | 1.43              | 3.16          | 0.494          |
| 03   | 8.16              | 0.252          | 0.0236        | 2.11              | 2.66          | 0.587          |
| 04   | 9.35              | 0.271          | 0.0110        | 2.82              | 2.33          | 0.670          |
| 05   | 11.18             | 0.336          | 0.0246        | 3.60              | 2.18          | 0.717          |

ケース180秒の計測を3回ずつ行った。また、取得されたデータに20Hzの移動平均を行って風洞ファンのモータによるノイズを取り除いてから波浪統計量を求めた。

PIV解析のために撮影した画像は、約20×15cmのサイズとし、波面を含む水面付近、波頂部よりやや上方の対数則領域および気流断面の中央付近（水面から20cm程度）の3カ所について撮影を行った。なお、水面付近を撮影する場合については、図-2の様に鉛直面から15°傾けてレーザー面を構築した。これはレーザー面より手前の波面によって隠れてしまうレーザー面と水面との交線を実に捉えられるようにするためとレーザー面全体にカメラの焦点を合わせるためである。また、結果のばらつきを考慮するため、同一条件下において3回の計測を行い、各計測において1200枚（600ペア）の画像を取得した。

風速は計測点において微小な風波が発生するケースから碎波によって水中に気泡が発生し始めるまでの5ケースについて行った。表-1に実験条件を示す。ここで10m高度の平均風速、 $U_{10}$ と気流の摩擦速度、 $u_*$ および気流の粗度長さ、 $z_0$ は計測された平均風速分布に対数則を当てはめて求めたものである。また、 $H_{1/3}$ は波高計により計測された水面変位の記録から求められた有義波高、 $f_p$ は同じく水面変位の記録から求められたスペクトルのピーク周波数、 $C_p$ はピーク周波数に対して線形分散関係を用いて求められた波速である。

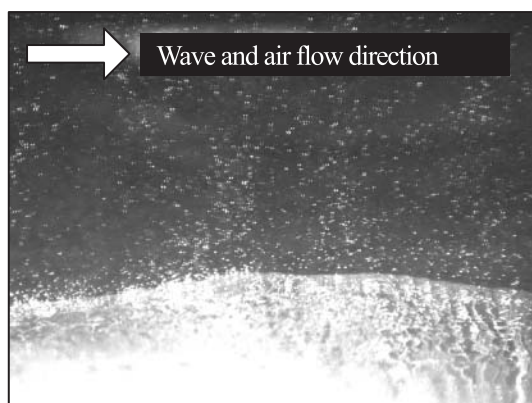
## 3. 実験結果

### (1) 気流の剥離の可視化

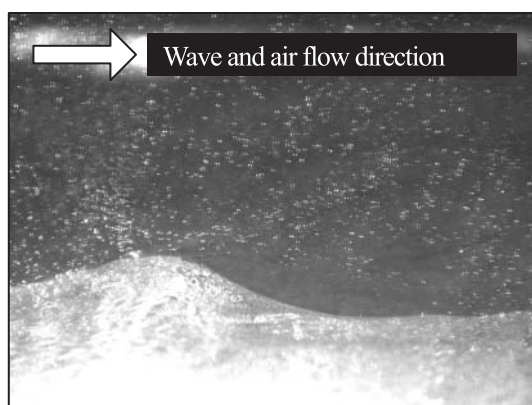
風洞水槽において風速を大きくしていくと波面から気流が剥離する現象が現れる。水谷ら（2002）は、剥離域における気流の可視化を行い、気流の特性と波形との関係について述べた。しかしながら実際には、気流の剥離域内の可視化は極めてまれにしか行うことができず、水谷ら（2002）の実験においても1000枚の画像のうち数枚程度で流速のデータが取得されたに過ぎない。ほとんどが図-3のように剥離域内において可視化粒子が“見えない”状態で撮影される。

図-3は本研究で撮影された波面上の可視化粒子の分布である。(a)の緩やかな波面の場合、波頂部に対して上流側は可視化粒子が水面に多数接しており、水面がはっきりと確認できないほどである。下流側においても水面のごく近傍まで可視化粒子が存在しており、気流が波面に沿って流れていることが分かる。

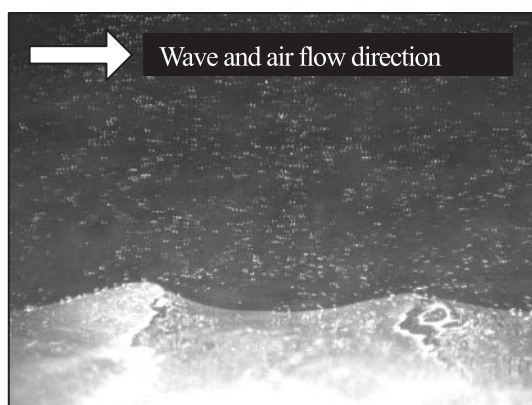
一方、(b)の様に波面が急峻になると波頂部の下流側に気流の全く存在しない領域が現れる。波頂部の上流側から波面に沿って流れてきた気流は波頂部で波面から剥離し、波面の上空を通過して下流側の波谷部に再付着する。一連の現象はバックステップ流れと極めて類似している。



(a) 緩やかな波面上の場合 (Case03)



(b) 急峻な波面上の場合 (Case03)



(c) 急峻な波面上の場合 (Case01)

図-3 波面上の可視化粒子の分布図

また (c) は, Case01 の風速が弱いケースである。  $U_{10}$  が 5m/s 未満のケースでは, 図のように波長が高々 10cm 程度であるが, 図中の左側の波頂部の下流側には可視化粒子が水面付近に存在しない領域が現れている。画像中央の波谷部から右側の波頂部にかけて再び可視化粒子が

水面に付着しており, この領域で上流側から剥離した気流が再付着している様子が分かる。このように気流の剥離は高風速時に限った現象ではなく, 低風速時においても局所的な波形の尖りに依存した現象である。

風波の発生機構に Miles の理論がある。Case01 における剥離現象が Miles 理論に該当するかどうかは, 剥離域内での流線が見えないため確認できないが, 理論では波頂部付近に波速と風速が一致する臨界高さが存在する。波頂部での風速は波速を大きく超えており, 臨界高さが存在しない。よって Miles の理論には該当しない現象であると考えられる。

気流の剥離が発生すると, ほとんどの画像は図-3 の様に可視化粒子の見えない画像となる。可視化粒子が存在しない波頂部の下流側は, 当然のことながら PIV ベクトルを求めることができず, 流速の情報を得ることができない。そこで本研究ではこの見えない領域が現れる頻度をカウントし, 気流が剥離する頻度を風速ごとに求めることとした。

Kawai (1982) は, 観測波数に対する気流の剥離の頻度を求めているが, 本研究では撮影した画像の枚数が多いこと, また高風速, 長距離の吹送距離を採用していることから波浪が発生し, 波長全体を画像内に一度に捉えることが出来ない。また, 画像内を伝播する間に波形が変化し, 気流の剥離が途中で開始または終了することがあることから波数を母数とした計測は不可能と判断した。

よって本研究では, 図-3 に示した画像の中央に鉛直線を設定し, その線が剥離域に入った数を目視によりカウントして頻度を求めた。すなわち各剥離の頻度の母数は 1 ケースの画像のペア総数である 600 となる。

## (2) 気流の剥離と発生要因

図-4 は風速ごとに気流の剥離の発生頻度を示したものである。図中の白丸は 3 回計測した各ケースの個々のデータを示したものであり, 黒丸はそれらの平均値である。気流の剥離は, 微小な風波が発生し始める Case01 でも発生しており, 気流の剥離が高風速の場合に限った現象ではないことが分かる。基本的に風速が大きくなると発生

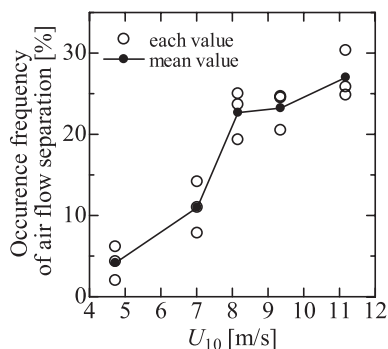


図-4 気流の剥離の発生頻度

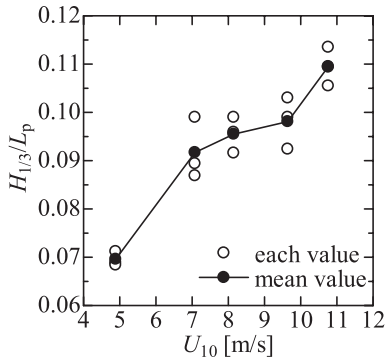


図-5 波形勾配の変化

頻度も高くなるが、Case03では単調増加から外れた分布を示している。実験を詳細に観察すると、Case02からmicro breaking現象が現れ始め、Case03程度の風速において波頂部が前方に崩れる風波の碎波が顕著となり始める。

Kawai (1982) も気流の剥離の頻度について調べているが、風速7m/s程度、吹送距離3.7mの条件下で79波中21波(26.6%)に剥離が発生していると報告している。風速から言えば本研究でのCase02に当てはまるが、吹送距離が異なることから発生頻度は大きく異なっている。

水谷ら(2002)は、気流の剥離が波頂部の局所的な波形に大きく依存することを明らかにしている。本研究では個々の波の局所的な波形については検討しなかったが、平均的には波形勾配が波形の急峻化を示していると考えた。図-5は風速ごとの波形勾配を示したものである。波形勾配を求めるにあたっては、有義波高、 $H_{1/3}$ とスペクトルのピーク周波数に対応する波長、 $L_p$ を線形分散関係から求めて用いた。

波形勾配の変化を見ると、Case02～Case04の間の増加がその前後に比べて鈍化している。先に述べたように、この間でmicro breaking現象が始まり風波の碎波に移行していることから、風の運動量が水面に伝わって波は発達するものの、同時に碎波を伴うために波形勾配の増加につながっていないものと考えられる。Case03の気流の剥離の頻度が局所的に大きくなることは、碎波による波形の前傾化や波頂部付近の局所的な波形の変化と対応していることが推察され、波形勾配の変化と一致するものと考えられる。

一方、風洞水槽内では上記の一連の碎波現象が現れるが、風速がそれを超えると再び波は発達を始める。Case05における波形勾配の増加は、こうした碎波現象が現れる領域を超える風速に対するものである。

### (3) 気流の剥離と抵抗係数の関係

図-6は風速に対する有義波高の変化である。有義波高は風速に対してほぼ比例している。つまり、この風速域においては、風速が増大すると波面の物理的な粗度(波高)

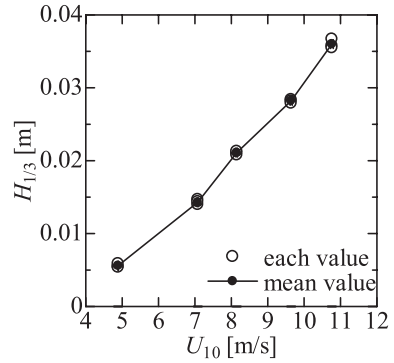


図-6 有義波高の変化

は比例して増大していることが分かる。

一方、図-7に示すのは水面の粗度長さの変化である。粗度長さ、 $z_0$ は水平方向の平均風速の鉛直分布に対数則分布を最小二乗法により当てはめ、摩擦速度、 $u_*$ とともに求めたものである。この方法は平均水面の位置の変化に鋭敏に反応するため、値のばらつきを考慮して水面付近を撮影した3ケースに加え、波頂部より上の対数則領域を撮影した3ケースについても求めて平均値を算出した。

粗度長さの変化を見ると、Case02を除いてほぼ一定値を示しており、有義波高の変化に見られたような物理的な粗度が増大しているにも関わらず、流体力学的な粗度はほとんど変化がない。つまり、風速の増大に伴って気流の剥離の頻度が増加すると、気流は物理的な波面に沿って流れるのではなく、波頂部の高さに沿って(波頂部から下流側の波頂部へ)流れることから、気流側から見た流体力学的な粗度は増加しないものと考えられる。

次に抵抗係数、 $C_D$ について検討した。図-8の抵抗係数の変化を見ると、図-7の粗度長さの変化と類似の傾向が見られ、Case02を除いてほぼ $C_D = 0.03$ で一定値を取っている。

Donelanら(2004)の推論通り、本研究においても気流の剥離する頻度は増加し、抵抗係数はほぼ一定値を示している。しかしながら、従来の研究成果を見ると本研

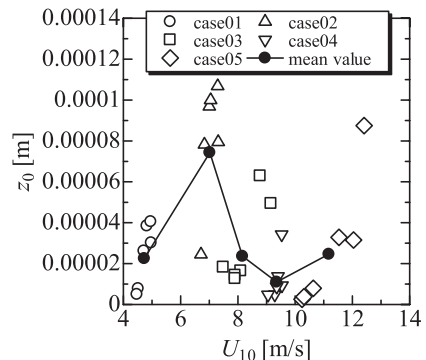


図-7 水面の粗度長さの変化

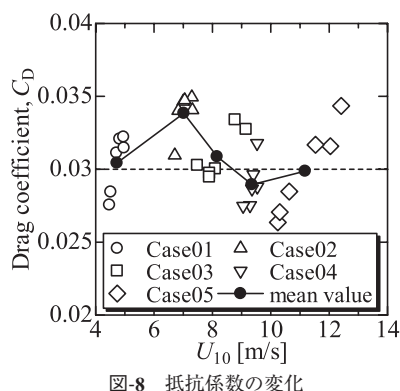


図-8 抵抗係数の変化

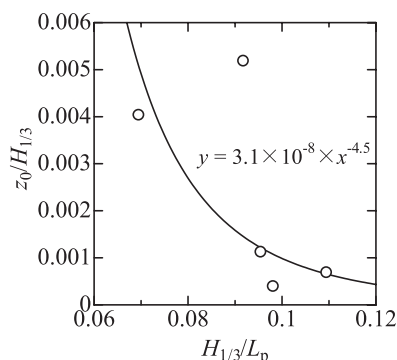


図-9 無次元粗度長さと波形勾配の関係

究で行った範囲の風速域では、抵抗係数は風速に対して単調増加するものが多く(例えばOcampo-Torresら, 1994), 本多・光易 (1980) の式は,  $U_{10}$  が 8m/s 以下の場合に逆に風速に対して抵抗係数が減少するようになっているものもあり、一義的な関係を見出すにはさらに検討が必要である。

また近年では、粗度長さは海面の状態を反映するものとして、波齢や波形勾配などに依存すると考えるのが一般的であり、本研究においても気流の剥離が波形勾配に関係し、粗度長さに影響を及ぼしていると推察されることから、粗度長さと波形勾配には何らかの関係があると考えられる。

図-9は無次元粗度長さと波形勾配の関係である。図中の曲線は回帰曲線であるが、波形勾配の増加に対して、無次元粗度長さが低下するという関係を示している。気流の剥離を考えれば、波形勾配の増大は気流の剥離の頻度を増加させ、粗度長さの増加を抑える効果がある。一方、波形勾配の増加は、有義波高の増加を伴うことから、波形勾配の増加は無次元粗度長さの低下を招くという結果は矛盾なく受け入れることができる。

しかしながら、Taylor and Yelland (2001) が示したように、観測データにおける粗度長さの波形勾配によるスケリングは、波形勾配の増加に対して粗度長さが増大する方向で記述されている。これが観測データと室内実験データによる差異なのか、気流の剥離による粗度長さの抑制なのかは、現状では判断することができず、さらなる検討を要する。

#### 4. 結語

本研究は、風洞実験水槽を用いて波面上の気流の可視化実験を行い、波面上で発生する気流の剥離現象について検討を行った。主な結論は以下の通りである。

(1) 可視化実験により、波頂部からの気流の剥離は高風速時に限った現象ではなく、低風速時においても発生する現象であることが分かった。

- (2) 気流の剥離の頻度は、波形勾配の変化と関係が認められ、碎波に伴う波形の前傾度や波頂部付近の局所的な波形に依存した現象であることが推察された。
- (3) 風速の増大に伴って有義波高は増大するものの、流体力学的な粗度である粗度長さは増加せず、気流の剥離による粗度長さの抑制が確認された。

**謝辞:** 本研究を行うにあたって、京都大学防災研究所の森信人准教授には、示唆に富んだ資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

また本研究は、大阪産業大学海外長期留学制度によるコーネル大学への留学の成果の一部であり、科学研究費基盤研究 (C) (No. 20560482) による研究成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 本多忠夫・光易 恒 (1980) : 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.90-93.
- 水谷夏樹・佐藤裕司・橋本典明 (2002) : PIV計測による白波碎波上の気流の剥離特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 61-65.
- Donelan, M.A., B.K. Haus, N. Reul, W.J. Plant, M. Stiassnie, H.C. Graber, O.B. Brown and E.S. Saltzman (2004) : On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18306, doi:10.1029/2004GL019460.
- Kawai, S. (1982) : Structure of air flow separation over wind wave crest, *Boundary Layer Meteorol.*, 23, pp.503-521.
- Ocampo-Torres, F.J., M.A. Donelan, N. Merzi and F. Jia (1994) : Laboratory measurements of mass transfer of carbon dioxide and water vapor for smooth and rough flow conditions, *Tellus, Ser. B*, 46, pp.16-32.
- Powell, M.D., P.J. Vickery and T.A. Reinhold (2003) : Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 422, pp.279-283.
- Reul, N., H. Branger and J.-P. Giovanangeli (1999) : Air flow separation over unsteady breaking waves, *Phys. Fluids*, 11, 1959-1961.
- Reul, N., H. Branger and J.-P. Giovanangeli (2008) : Air flow structure over short-gravity breaking water waves, *Boundary-Layer Meteorol.*, 126, pp.477-505.
- Taylor, P.K. and M.J. Yelland (2001) : The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, *J. Phys. Oceanography*, 31, 2, pp.572-590.