

大気海洋間における運動量輸送の特性に関する研究

Study of the characteristic of momentum transport between air and sea

学籍番号 47-126674 曾根 麗可

指導教員 林 昌奎 教授

Keywords: 海面応力, 粗度係数, 摩擦速度, 抵抗係数

Keywords: Stress of sea surface, Dynamic roughness, Friction velocity, Drag coefficient,

1. はじめに

風のエネルギーは海面を通じて海洋に伝わっている。そのため海洋と大気との境界である海面の状況は、大気から海洋に伝わるエネルギーの大きさを表していると考えられる。風の状況(風速や吹送距離、吹送時間など)と波浪の状況(波高や波齢、波長など)の関係性を調べる研究は昔から盛んに行われ、様々な研究者が関係性の解明を試みてきた。

しかし海象の複雑さ、海洋実測の難しさなどにより未だに解明されていない。

2. 研究背景

大気と海洋は Fig.1 に示すように互いに影響を及ぼし合い、様々な現象を引き起こしている。風が海面に与える摩擦応力(これより先は海面応力と呼ぶ)について考える。対数境界層において、大気が中立成層の場合に、風速は海面からの高さに対して対数分布を示す。海面からの高さを $z[m]$ として、高さ z における平均風速 $\bar{U}(z)$ [m/s]と z の関係は次のように表される^[3]。

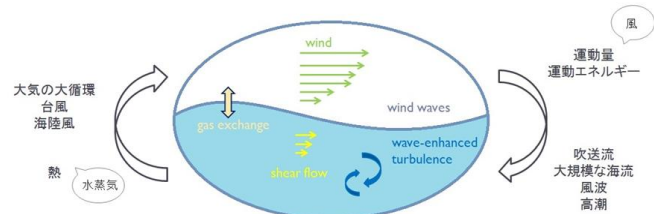


Fig. 1 Relation of wind and sea-surface

$$\frac{\bar{U}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

ここで u_* [m/s]は摩擦速度、 z_0 [m]は粗度係数と呼ばれる。粗度係数 z_0 は $\bar{U}(z) = 0$ となる時の高さ z を、 $z = z_0$ と定義したものである。波浪状況を表しており、海面の粗さを表すパラメータである。 κ はカルマン定数(≈ 0.40)である。摩擦速度 u_* は、海面応力 τ と大気の密度 ρ より、

$$u_* \equiv \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2)$$

と定義されている。これは海面応力を速度の形で表したものであり、海面応力を表すパラメータとして最も一般的である。

摩擦速度 u_* の他に海面応力を表すパラメータとしては抵抗係数 C_D がある。現在のところ摩擦速度 u_* を直接測定することはできないため、ある基準点の高さの風速から海面応力を推定する方法が用いられている。基準点の高さは海面から10mを用いることが多い。他には波長 λ の半分の長さである $\lambda/2$ を、基準点の高さとして用いた研究もある。海面応力は抵抗係数 C_D を用いて、

$$\tau = C_D \rho U_{10}^2 \quad (3)$$

と表される。ここで U_{10} [m/s]は海面から10mの高さの風速である。(2)式と(3)式を用いて、抵抗係数 C_D は次のように表すことができる。

$$C_D = \left(\frac{u_*}{U_{10}} \right)^2 \quad (4)$$

(1)式と(4)式より、

$$C_D = \frac{\kappa^2}{\left(\ln \left(\frac{10}{z_0} \right) \right)^2} \quad (5)$$

以上より風速の鉛直方向における対数分布が成り立つ境界層内では、抵抗係数 C_D は、粗度係数 z_0 と

風速を介して対応していることが分かる。そのため粗度係数 z_0 が風速やその他様々な海象パラメータによってどのような変化をするのかを明らかにし、それぞれの海象における抵抗係数 C_D 、もしくは摩擦速度 u_* を明らかにすることは海面応力の解明につながる^[3]。

3. 先行研究

粗度係数 z_0 と摩擦速度 u_* 、もしくは抵抗係数 C_D を用いて、海象状況と海面応力の関係を解明しようとする研究は 1930 年代から始まり、その後現在に至るまで盛んに行われてきた。様々な研究者がそれぞれ独自の実験や海洋観測をし、その結果から粗度係数 z_0 と摩擦速度 u_* 、もしくは抵抗係数 C_D に関する関係式を提案してきたが、それらの関係式をすべて満たすような、関係式は未だ見つかっていない。

代表的な関係式としては次の Charnock の関係式^[6]がある。

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = \alpha_{ch} \quad (6)$$

Charnock は摩擦速度 u_* と粗度係数 z_0 の関係が α_{ch} の定数で表せるとした。 α_{ch} は提案された当初、 1.8×10^{-2} の定数と考えられていたが、その後外洋では 1.1×10^{-2} 、沿岸域では 1.8×10^{-2} と海域によって分けて用いられてきた。近年は海域による違いではなく、何らかの海象パラメータに依存すると考えられ、そのパラメータの解明が試みられている。例えば増田ら^[5]は津屋崎沖観測塔での観測データをもとにし、次のような関係式を導いた。

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = \frac{2}{3} \frac{\omega_p u_*}{g} \quad (7)$$

その他の近年の研究例としては、鈴木ら^[1]は風波飽和度 B_n^2 を用いて次のような関係式を提案した。

$$C_D = 0.00194(B_n^2)^{-0.592} \quad (8)$$

風波飽和度 B_n^2 は次のように定義されている。

$$B_n^2 = \frac{1}{0.062^2} \frac{H^2}{gu_* T^3} \quad (9)$$

以上のように海象状況と海面応力の関係を様々なパラメータを用いて解明しようとする研究は多くあるが、未だ決定的な解明はなされていない。その理由としては、実海域に観測塔を設置する難しさや、様々な影響を受け複雑に変動している実海域に対して精度の良い観測をすることの難しさなどが挙げられる。

4. 研究目的

波浪や高潮など海象を予測するためには、海面に作用する風応力の情報が必要となる。風応力を表す一般的なパラメータは摩擦速度 u_* であるため、摩擦速度 u_* を様々な海象パラメータを用いて定式化する研究や、摩擦速度 u_* と風速によって定義されている抵抗係数 C_D を様々な海象パラメータを用いて定式化する研究が行われてきた。しかしこれまでに述べたように、海面応力が海象状況によってどのように決定されているのかについて、未だに解明されていない。

本研究では波浪状況を表すパラメータである粗度係数 z_0 と、海面応力を表すパラメータである摩擦速度 u_* を様々な海象状況における実海域観測データ算出し、それらのデータから海象と海面応力の関係を明らかにすることを目的とする。

観測データは東京大学で所有している平塚沖総合実験タワーにおいて観測したデータを用いた。長期間の連続した風の鉛直分布のデータと、波浪や海水温、気温のデータも同時に取得しているため、様々な海象の海面応力に対する影響を複合的に評価できることがこの研究の特徴である。

5. 解析方法

5.1 平塚沖総合実験タワーと観測機器

今回観測データを用いた平塚沖総合実験タワー(これより先は平塚タワーと略す)は平塚沖約 1km の場所に位置する高さ 24m の海洋観測塔である。平塚タワーは相模湾の奥、真中辺りに位置し、東は三浦半島、西は伊豆半島に囲まれている。平塚タワーの場所を Fig.2 に示す。また、設置された場所の水深は約 20m である。計測機器の説明をする。風向風速計に関しては、平塚タワーの西側に鉛直方向に取り付けてある 4 台と、タワー屋上に設置されている 1 台のデータを用いた。4 台の風向風速計の位置は、L.W.L.から 8.0m、10.0m、12.0m、20.7m である。波高に関しては、タワー北側に取り付けてある超音波波高計のデータを用いた。気温に関してはタワー屋上に設置されている温度計のデータを、水

温に関しては L.W.L.より 3m 下に設置されている水温計のデータを用いた。

5.2 解析に用いたデータ

2012 年 7 月から 2013 年 3 月までの 9 ヶ月間のデータを解析対象とした。連続した 0.3 秒ごとの瞬時データである。解析に用いたデータの種類は全部で 20 種類である。計測値を平均した風速、風向、有義波高と、それらの計測値から計算し用いた、吹送時間、吹送距離、有義波速、波向、波長、波周期、波齢、波形勾配、風向と波向の相対角、気温と水温の温度差、摩擦速度、粗度係数、抵抗係数、無次元粗度、風波飽和度である。摩擦速度と粗度係数は分布法を用いて算出した。平均の算出方法に関しては、気象庁の方法に準拠した。また、データが計測できていなかった時間帯や、測定機の誤差と思われるデータについては対象から除いた。

5.3 解析の流れ

海象パラメータごとの海面応力と海面状況の関係性を見るために、横軸縦軸のパラメータの組み合わせを 3 種類設定しデータをプロット、海象パラメータごとに色分けをした。その後、特に明らかな傾向の見られた海象パラメータに関しては、海面応力と海面状況の関係を式に表すことを試みた。

6. 解析結果

6.1 海象パラメータによる傾向

ここでは特に明らかな関係性が見られた海象パラメータのグラフのみを例として載せ、海象パラメータと海面応力と海面状況の関係性を説明する。

Fig.3 は摩擦速度 u_* と粗度係数 z_0 によってデータをプロットし、風速によって色分けをしたグラフである。摩擦速度 u_* は、風速が大きくなるにつれて大きくなるということが分かった。これは同じ粗度係数 z_0 ごとにデータを比較した場合に明らかな傾向として表れた。これは風速が大きい方が、海面応力が大きくなるということを意味する。これは先行研究^[2]における海面の抵抗係数 C_D が風速に依存するという結果と一致している。

Fig.4 は風波飽和度 B_n^2 と抵抗係数 C_D によってデータをプロットし、波形勾配 H/L によって色分けをしたグラフである。風波飽和度 B_n^2 が同じ値を取るデータを比較した場合に、波形勾配 H/L が大きいデータの方が、抵抗係数 C_D が大きいという傾向が見られる。反対に抵抗係数 C_D が同じ値を取るデータを比較した場合に、波形勾配 H/L の大きいデータの方が、風波飽和度 B_n^2 も大きいという傾向が見られた。このグラフに見られる風波飽和度 B_n^2 と抵抗係数 C_D の関係は、鈴木ら^[4]によってまとめられた、他の観測データ及び実験データに見られる関係と同じであり、値の幅もほぼ同値のため、傾向として一致していることが分かった。

6.2 関係式の提案

Fig.4 より波形勾配 H/L によって風波飽和度 B_n^2 と抵抗係数 C_D の関係が決められていることが分かる。ここではこの関係性の解明を試みる。波形勾配 H/L ごとに値が変わるような係数 c を用いて、 $y = a/x^b + c$ の線の上にデータが集まっていることが分かる。波形勾配 H/L がほぼ同じデータでも、プロットに幅があることから、さらに何らかの海象パラメータによって係数 a や係数 b が変化しているものと考えた。Fig.4 の横軸と縦軸を対数スケールに変え、更に次の(10)式によって回帰直線を引いたものが次の Fig.5 である。回帰直線を引くにあたって最小二



Fig. 2 Location of tower

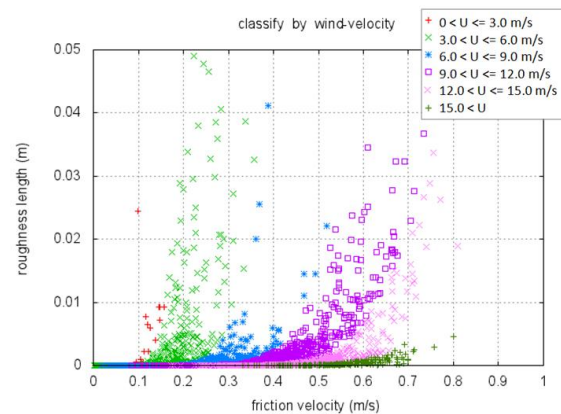


Fig.3 Classify by wind velocity

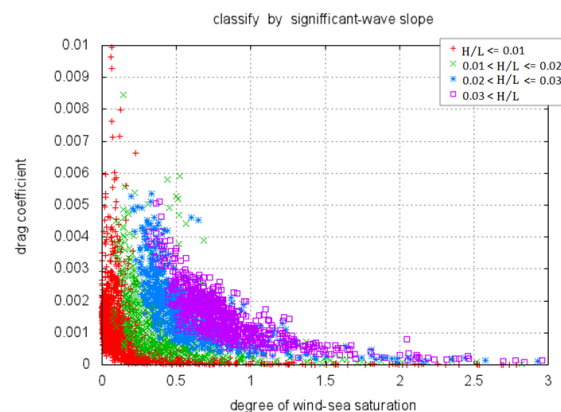


Fig.4 Classify by wave slope

乗法を用いた。係数 β は波形勾配 H/L の値によって、式(11)のように求まることが分かった。

$$\ln C_D = \alpha(\ln B_n^2) + \beta \quad (10)$$

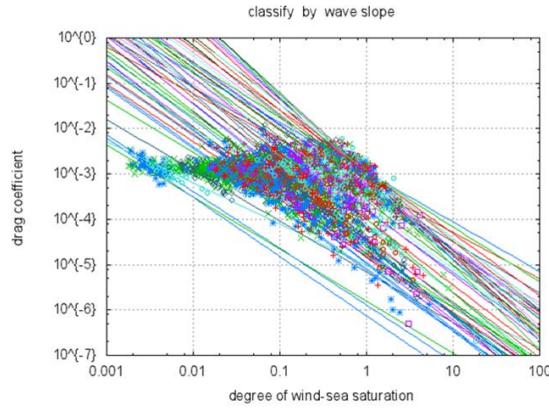


Fig.5 Classify by wave slope (log-scale)

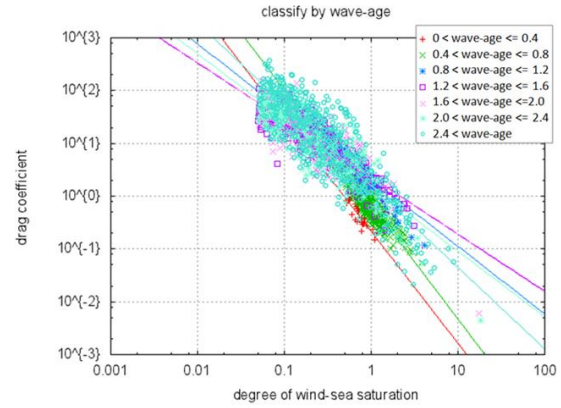


Fig.6 Classify by wave age (log-scale)

$$\beta = 58.2485 H/L - 4.90736 \quad (11)$$

次に係数 β による波形勾配 H/L の影響を取り除き、係数 α を求める。海象パラメータの中でも関係性明らかに見えていた波齢 c_p/U_{10} によってデータを分類した。分類した波齢 c_p/U_{10} ごとに (12)式によって回帰直線を引いた。Fig.6 に示す。

$$\ln C_D - \beta = \alpha(\ln B_n^2) + \gamma \quad (12)$$

α と γ は波齢 U_{10}/c_p によって次のように表されることが分かった。

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.86957 \frac{c_p}{U_{10}} - 3.15247 & \gamma &= 1.20292 \frac{c_p}{U_{10}} - 0.880151 \quad (U_{10}/c_p < 1) \\ \alpha &= -0.394031 \frac{c_p}{U_{10}} - 0.429004 & \gamma &= -0.201884 \frac{c_p}{U_{10}} + 0.659791 \quad (U_{10}/c_p > 1) \end{aligned} \quad (13)$$

4. 結論

海面応力を表すパラメータとして抵抗係数 C_D を、海面状況を表すパラメータとして風波飽和度 B_n^2 を用いて、関係式は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \ln C_D - \left(58.2485 \frac{H}{L} - 4.90736\right) &= \left(1.86957 \frac{c_p}{U_{10}} - 3.15247\right)(\ln B_n^2) + 1.20292 \frac{c_p}{U_{10}} - 0.880151 \quad \left(\frac{c_p}{U_{10}} < 1\right) \\ \ln C_D - \left(58.2485 \frac{H}{L} - 4.90736\right) &= \left(-0.394031 \frac{c_p}{U_{10}} - 0.429004\right)(\ln B_n^2) - 0.201884 \frac{c_p}{U_{10}} + 0.659791 \quad \left(\frac{c_p}{U_{10}} > 1\right) \end{aligned} \quad (14)$$

c_p/U_{10} によって関係式は上記の様に 2 式に分かれる。波齢 c_p/U_{10} (その海面における代表有義波の波速と、海面からの高さが 10m の点における代表風速の関係)と、波形勾配 H/L によって海面応力と海面状況の関係は表されることが分かった。

5. 参考文献

- [1] 鈴木靖, 鳥羽良明:風波飽和度の概念に基づく海面摩擦係数測定データの再評価, 京都大学防災研究所年報, 2011, 第 54 号 B
- [2] Toba, Y.:Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (III) Study by use of a wind flume, 1961, Mem. Coll. Sci., Univ. of Kyoto, Ser. A., Vol. 29, pp. 313-344
- [3] 光易恒:土木学会論文集, B1, 「海面に及ぼす風の応力」, 1-17, 1983
- [4] 鈴木靖, 鳥羽良明, 鈴木直弥:風波スペクトルの飽和度に関連する海面抵抗係数の変動, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2010, vol.66 No.1 101-105
- [5] 増田章, 丸林賢次, 石橋道芳 等:津屋崎観測塔で観測した海上風乱流 1.計測法と予備解析, 九州大学応用力学研究所所報, 2004, 第 126 号(23-39)
- [6] Charnock H.:Wind stress on a water surface, Q. J. of Royal Meteorological Soc., 1955, vol.81 issue 350 pp.639-640