

渦相関一慣性散逸併用法に基づく海面風応力の変動特性に関する研究

桜木 幸司*1・杉原 裕司*2,†・安東 卓哉*3
芹澤 重厚*4・吉岡 洋*5

(平成20年1月31日 受理)

Evaluating the Variability of Sea-surface Wind Stress by the Combined Use of Eddy Correlation and Inertial Dissipation Methods

Koji SAKURAGI, Yuji SUGIHARA, Takuya ANDO,
Shigeatsu SERIZAWA and Hiroshi YOSHIOKA

†E-mail of corresponding author: sugihara@esst.kyushu-u.ac.jp

Field measurements of wind stress over the ocean surface were made at a sea observation tower by the combined use of the eddy correlation and inertial dissipation methods, which are referred to as “ECM” and “IDM” hereafter, respectively. The values of the wind stresses obtained from both methods should agree well under ideal surface layer conditions. Thus, confirming the degrees of agreement between the stresses from ECM and IDM makes it possible to reveal how air-sea momentum transfer varies depending on wave-field conditions. The present data show the degrees of agreement to depend significantly on the wave age in the case of pure windsea. This means that imbalance factors in the turbulent kinetic energy equation become large with increasing the wave age. Also, the degrees of agreement between ECM and IDM are found to vary with the deflection of the wind stress vector from the wind direction, which is caused by the presence of swell.

Key words: *wind stress, friction velocity, eddy correlation method, inertial dissipation method, air-sea interaction, sea observation tower*

1. 序論

大気と海洋は、海面を通して運動量、熱および二酸化炭素(CO₂)等を交換している。これらの交換過程(海面境界過程)は、気相と液相の境界面に起こる波動、乱流、砕波、飛沫・気泡生成といった素過程が複雑に絡み合った現象であり、地球環境の変動に大きな影響を与えている。海面境界過程を記述する最も基本的な特性量が海面風応力であり、その変動特性を明らかにすることは極めて重要な課題である。

Geernaert et al.¹⁾は、現地観測の結果に基づいて、海面風応力ベクトルの方向が主にうねりの伝播方向に支配されることを見出している。彼らは、うねりが局所的な風向に対して斜めに伝播している場合、風応力ベクトルの向きが局所風向とうねりの伝播方向の間に概ね存在するとしている。Drennan et al.²⁾は、低風速の場

合には、海面風応力ベクトルの偏角はばらばらであり、平均風向から時計回りに偏向する場合もあれば、反時計回りに偏向する場合もあると指摘している。彼らは、このようなばらつきは海面風応力の値が小さいことに起因しており、そのような状況下で測定された海面風応力は信頼性が低いと主張している。また、Grachev et al.³⁾は、海面風応力ベクトルを平均風向とうねりの伝播方向の成分に分解した。彼らは、風速が比較的大きい場において平均風向に対してうねりが斜めに伝播する場合には、海面風応力がうねりの伝播方向に偏向することを報告している。これらの研究は、うねりの作用が海面での運動量伝達を変化させる力学的なコンタミネーションとして作用することを示しており、海面境界過程を理解する上で極めて興味深い。

現地観測において海面風応力を測定する代表的な手法として、渦相関法(Eddy Correlation Method: ECM)と慣性散逸法(Inertial Dissipation Method: IDM)がある。ECMは、乱流変動成分の相関を直接算定するもので、係数の不確定性や相似則を仮定する必要がないため信

*1 大気海洋環境システム学専攻修士課程

*2 大気海洋環境システム学専攻

*3 工学部エネルギー科学科

*4 京都大学防災研究所流域災害研究センター

*5 愛知県立大学情報科学部地域情報科学科

頼性の高い手法として広く用いられている。一方、IDMは、風速変動の慣性小領域スペクトルから乱流エネルギー散逸率を評価し、その値を用いて海面風応力を算定する手法である。IDMは仮定の多い手法であるが、理想的な海面上においては、ECMとIDMによって評価された海面風応力の値はよく一致するはずである。しかしながら、実海洋上での観測において、それぞれの測定法によって求められた海面風応力の値が一致しないことが多い。これは、海面上の接水大気境界層の乱流構造が、波浪状態に依存してIDMの前提条件から大きく変化するためであると考えられる。前述の研究例で言えば、IDMは平均風向と海面風応力ベクトルの向きが一致することを前提としているため、平均風向に対して海面風応力ベクトルが偏向する場合には、ECMとIDMによって算定された海面風応力の値が一致しないことが予想される。したがって、ECMの値を仮に真値であるとみれば、ECMとIDMのデータ適合度と波浪状態との関係を検討することによって、海面での運動量伝達を乱す力学的コンタミネーションとして波浪場がどのように影響しているのかを定量化することができるものと考えられる。

本研究の目的は、海洋観測塔での現地観測においてECMとIDMを併用した海面風応力の算定を行い、両者の適合性を乱す（風応力を変動させる）波浪場の影響について検討することである。特に、ここでは、風波の発達状態を表す波齢と平均風向に対する海面風応力ベクトルの偏向性に着目する。

2. 海面風応力の算定

ECMでは、風速の乱流変動成分を応答性の高い測器を用いて計測し、次式に基づく相関計算から直接的に海面風応力 τ (N/m²)を算定する。

$$\tau = -\rho_a \overline{u'w'} = \rho_a u_*^2 \quad (1)$$

ここで、 u' (m/s)、 w' (m/s)はそれぞれ平均風向および鉛直方向の風速変動、 u_* (m/s)は摩擦速度、 ρ_a (kg/m³)は空気の密度であり、 $-$ は時間平均を示す。

一方、IDMは、乱流運動エネルギー方程式(TKE方程式)において、シアーと浮力による生成項と散逸項がバランスする乱流場の局所平衡性を仮定して、接水大気境界層の乱流エネルギー散逸率 ε を用いて海面風応力 τ を算定する手法である。風速変動の乱流エネルギースペクトル $E(k)$ は次式で表せる。

$$E(k) = C \varepsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad (2)$$

ここで、 k は波数、 C は定数である。本研究では ε の算定において平均風向の風速変動スペクトルを対象としており、Large and Pond⁴⁾に倣って $C=0.55$ を用いている。実際の乱流観測においては、通常、風速の空間変化ではなく時間変化を測定するため、Taylorの凍結乱流仮説より、

$$\frac{dk}{df} = \frac{2\pi}{U} \quad (3)$$

を用いて、式(2)を周波数スペクトル $P_u(f)$ に変換すると次式が得られる。

$$P_u(f) = C \left(\frac{2\pi}{U} \right)^{-\frac{2}{3}} \varepsilon^{\frac{2}{3}} f^{-\frac{5}{3}} \quad (4)$$

ここで、 U (m/s)は時間平均風速であり、 f (1/s)は周波数を示す。平均風向風速 u のパワースペクトルから、慣性小領域にあたる3点($f=0.5, 1.0, 2.0$ Hz)における周波数スペクトル P_u を求める、そして、それぞれの $P_u(f)$ を式(4)に代入して ε を算定し、求めた ε を平均する。無次元化されたTKE方程式は次式で表される。

$$-\frac{\kappa z}{u_*^3} \left(\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\kappa z}{u_*^3} \frac{g}{T_v} \overline{w'T_v'} - \frac{\kappa}{u_*^3} \frac{\partial \overline{w'e}}{\partial z} - \frac{\kappa}{u_*^3} \left(\frac{1}{\rho_a} \right) \frac{\partial \overline{p'w'}}{\partial z} = \frac{\kappa \varepsilon z}{u_*^3} \quad (5)$$

ここで、 κ (=0.4)はKarman定数、 g (m/s²)は重力加速度、 T_v (K)は仮温度、 e (m²/s²)は乱流エネルギー、 p (N/m²)は圧力、 z (m)は海面から測定点までの高さを表す。また、左辺第1項はシアーによる生成項、第2項は浮力による生成項、第3項は乱流拡散項、第4項は圧力拡散項、右辺は散逸項を表す。ここで、無次元化したTKE方程式を、大気安定度補正関数 ϕ_m 、インバランス関数 ϕ_{imb} を用いて書き直すと次式のようになる。

$$\phi_m - \frac{z}{L} + \phi_{imb} = \frac{\kappa \varepsilon z}{u_*^3} \quad (6)$$

ϕ_m は式(5)のシアー項に、 ϕ_{imb} は乱流拡散項、圧力拡散項および式(5)で考慮されていない因子を含んでいる。 L はMonin and Obukhov⁵⁾の大気安定度を表す長さスケールであり、次式で定義される。

$$L = -\frac{u_*^3 T_v}{g \kappa w' T_v'} \quad (7)$$

ϕ_m については、本研究では、Large and Pond⁴⁾を参考に、次式で与えられる経験式を用いた。

$$\phi_m = \begin{cases} 1 + 7 \frac{z}{L} & (0 < \frac{z}{L}) \\ \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{-\frac{1}{4}} & (-2 < \frac{z}{L} < 0) \end{cases} \quad (8)$$

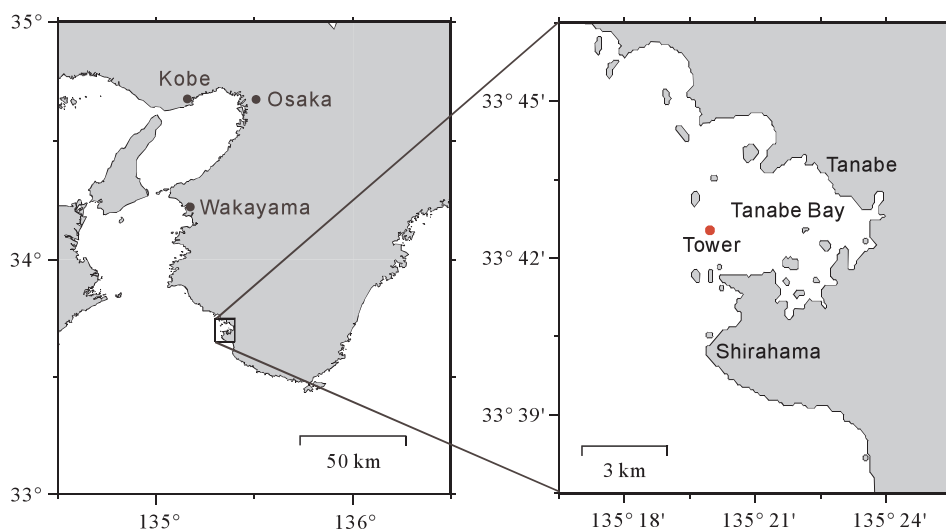


Fig.1 Location of sea observation tower.

一方、 ϕ_{mb} については研究例がほとんどなく、IDMでは一般に、式(6)において左辺第1項、第2項と右辺がバランスすると仮定して $\phi_{mb} = 0$ としている。本研究においてもこの仮定を用いている。 u_* を評価するには、式(6)と(7)に u_* が含まれているために、 u_* の値が収束するまで繰り返し計算を行う必要がある。本研究では、前後の u_* の相対誤差が0.1%以内に収まるまで繰り返し計算を行った。

3. 現地観測の概要

3.1 海洋観測塔

観測は、和歌山県西牟婁郡白浜町の田辺湾沖合約2 km (東経135° 20' 08", 北緯33° 42' 19")に位置する田辺中島高潮観測塔(京都大学防災研究所流域災害研究センター所有)において実施された(Fig.1参照)。観測塔の設置海域は南西方向が外海に面しており、付近の平均水深は約30mである。ただし、観測塔は海域にある水深約10mの岩礁の上に設置されている。岩礁は比較的狭いため、波浪は海底地形の影響をほとんど受けずに観測塔に到達してくる。ここでは、比較的大きなうねりは主に南西方向から伝播してくることになる。観測は、2006年3月22日から5月4日の45日間に渡って実施された。

Fig.2に観測塔および計測システムの概略図を示す。観測塔の高さは、海上約23 mである。本研究では、平均海面からの高度(以下、高度)12.5mの位置に高応答の超音波風速温度計を設置し、風速の3方向成分および温度変動の瞬時値が取得された。測器から出力された電圧信号は20Hzのサンプリング周波数でAD変換され、得られたデータを15分間毎のブロックに分けて統計平均量を算定した。本研究では、得られた瞬時値の15分平均値より、海上高度12.5mの平均風速 $U_{12.5}$ 、平均風向

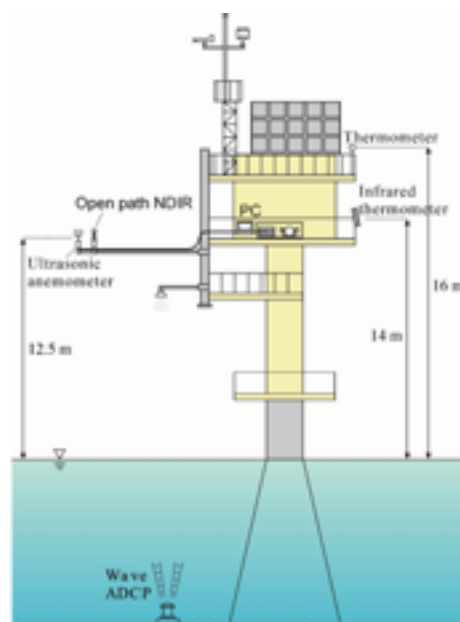


Fig.2 Schematic diagram of measurement systems.

WD 、摩擦速度 u_* 、運動量フラックスおよび顕熱フラックスを算定した。観測塔では、別に、高度23 mの位置に超音波風速計とプロペラ型風向風速計が設置されており、風速の定時観測が行われている。高度23 mおよび12.5mにおける超音波風速計において、風速 U 、風向 WD の15分間平均値を算出して相互比較を行った結果、両者は概ね一致することを確認している。また、高度16mの位置には気温 T_a を測定する温度計が、高度14mの位置には海表面温度 T_s を測定する放射温度計が設置されている。これらのデータは、30秒間隔で記録されており、大気安定度を示す $\Delta T (= T_a - T_s)$ を評価するために用いられた。また、気圧 P_a が30秒間隔で記録されており、全ての気象データについて15分間平均値を算出した。

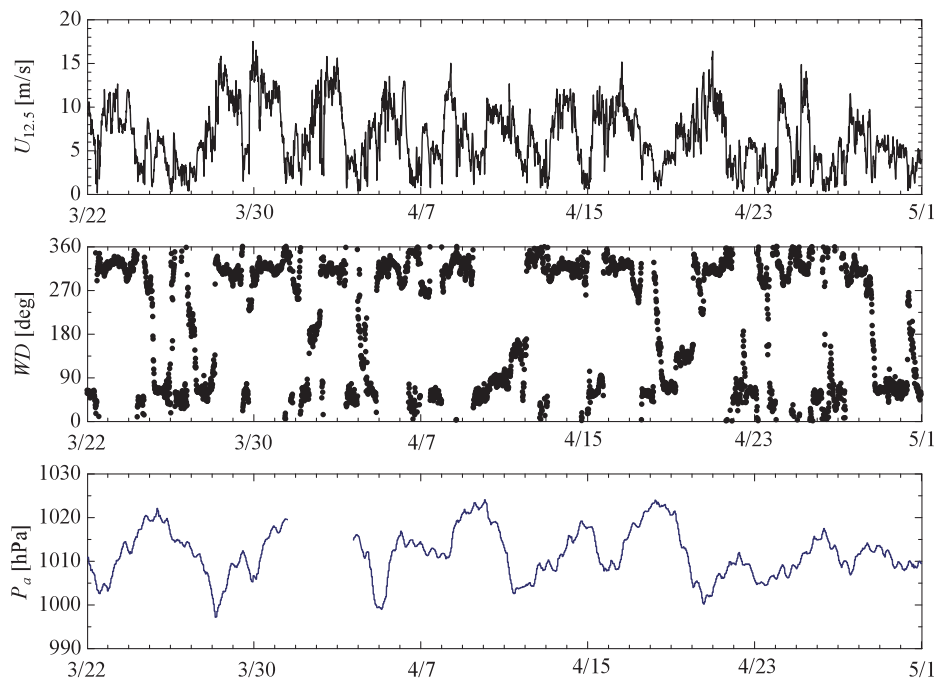


Fig.3 Time series of wind speed $U_{12.5}$, wind direction WD and air pressure P_a .

波浪の観測には超音波波浪流速分布計 (Wave Acoustic Doppler Current Profiler : WAVEADCP) を用いた。観測塔から南西に20m離れた海底にWAVEADCPを設置し、毎時20分間その直上の水位変動を測定した。WAVEADCPにより得られたデータから、波浪特性量として、ピーク波周期 T_p 、波浪の周波数スペクトルおよび方向スペクトルを評価した。得られた波浪の周波数スペクトルおよび方向スペクトルに基づいて海象条件を分類した。

4. 結果および考察

4.1 気象特性量の時系列

Fig.3に、観測期間における平均風速 $U_{12.5}$ 、平均風向 WD および大気圧 P_a の時系列を示す。図中の風速および風向は、高度 12.5 m に設置された超音波風速温度計のデータから算定されており、15 分間平均値(毎時4点)を表している。なお、大気圧についても15分間平均値(毎時4点)がプロットされている。観測期間における最大平均風速は 17 m/s 程度であった。風向に関しては、各観測期間を通じておおよそ2つの卓越風向 (NW, E) が見られることがわかる。本研究では、超音波風速温度計の設置位置が塔の南側であるために、風向が $\pm 45^\circ$ の範囲にあるデータを解析対象から除外している。大気圧については風速の変動と概ねよく対応しており、大気圧が高くなると風速は小さくなり、低くなると大きくなることからわかる。観測期間における

気圧の変化は約 20hPa 程度であった。

4.2 波齢特性量

Fig.4にECMとIDMによって算定された u_* の比較を示す。ここでは、風波が卓越する波浪場 (Pure windsea) とそれ以外の波浪場 (Others : うねりと風波が混在する波浪場) の二つのデータ群に分類されている。ここで、図中の実線は両者が等しい場合の比例関係を示している。2つの破線に挟まれた領域のデータは相対誤差が $\pm 20\%$ 未満に収まるものに対応する。この図より、データの分散は比較的大きいがECMとIDMによって算定された両者の u_* の値はほぼ1:1の関係をとっているように見える。特に注目すべきことは、ECMとIDMの適合度はPure windseaのデータの方が高く、うねりが混在する場合には両者の適合度が低下するように見えることである。このことは、うねりが存在する場合に、IDMの前提条件が破綻しやすいことを示唆している。特にECMによって算定された u_* の値の小さい領域において、IDMの値がECMの値に比べて大きな値をとることがわかる。このことは、風速が小さい場合にうねりの影響を受けやすいことを示唆している。

ECMとIDMの適合性が風波の発達状態にどのように依存性しているのかを調べるために、IDMとECMによる u_* の比 u_{*IDM}/u_{*ECM} と、波齢 C_p/u_* の関係をFig.5に示す。ここで、 C_p は風波の位相速度である。波齢は

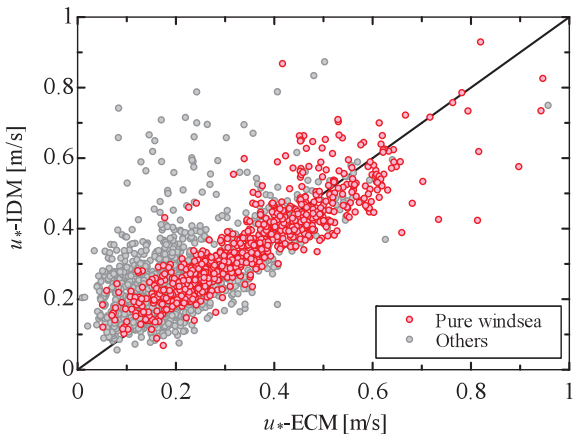


Fig.4 Comparison of u_* from ECM and IDM.

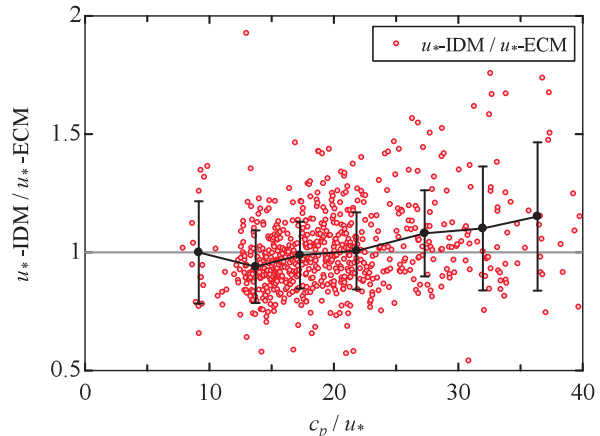


Fig.5 Relation between u_{*_IDM}/u_{*_ECM} and wave age.

風波が卓越する波浪場を記述する特性量であることから、ここではFig.4のPure windseaのデータのみがプロットされており、実線で結合されたプロットはデータ数と波齢の範囲を考慮して求めた平均値を、Error barは平均したデータの標準偏差を示している。この図より、波齢とともに u_{*_IDM}/u_{*_ECM} の値が増加することがわかる。また、波齢が十分小さい領域では、 u_{*_IDM}/u_{*_ECM} の値は1に漸近するように見える。これらのことは、風波が発達するまでは接水大気境界層の乱流平衡性は波浪場にほとんど影響されないが、波齢が25を超える付近からその影響が現れることを示している。

Mahrt⁶⁾は、IDMで用いる大気安定度補正関数 ϕ_m が、大気安定度パラメータ z/L のみの関数ではなく、 z/λ や波齢等に依存することを指摘している。ここで、 λ は卓越波の波長である。本研究の結果は、Mahrt⁶⁾の指摘の妥当性を支持している。本研究の結果から波浪状態量を考慮した新たな大気安定度補正関数 ϕ_m の関数形を提案することは難しいが、本研究の結果は海洋気象学の観点からも興味深いものであると考えられる。

このことをより詳細に議論するために、Fig.6に $\kappa \epsilon z / u_*^3$ と $-z/L$ の関係を示す。ここでは、波齢をパラメータとして、データを波齢が0より大きく15以下のもの、15より大きく25以下のもの、25より大きいものの3つのケースに分類し、データ数と $-z/L$ の範囲を考慮して平均化された値がプロットされている。また、Large and Pond⁴⁾、Kader and Yaglom⁷⁾、Brutsaert⁸⁾の経験式から算定した $\phi_m - z/L$ の値も併せて示されている。ここで、Error barは平均したデータの標準偏差を示している。もし、海面上の運動量伝達において従来の経験式が適用できるとすれば、観測データと経験式との差がTKE方程式(式(6))におけるインバランス関数 ϕ_{mb} の大きさに対応する。この図より、波齢が比較的小さいケースでは $\kappa \epsilon z / u_*^3$ の値は経験式から評価される値に一致するが、波齢が大きいケースでは経験式からの差が増大することがわかる。これは、波面によって誘起される

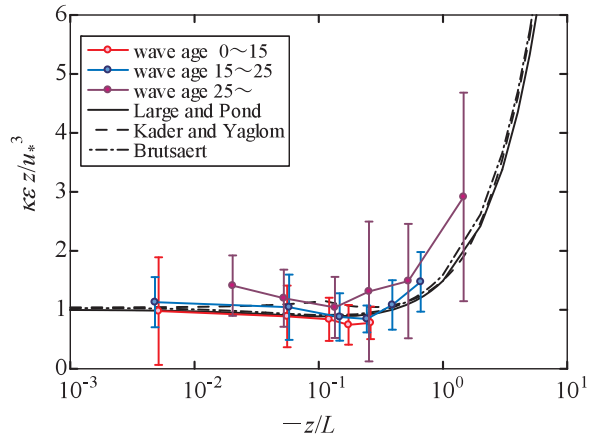


Fig.6 Relation between $\kappa \epsilon z / u_*^3$ and $-z/L$.

周期的な変動が接水大気境界層に浸透するためには、ある程度大きな波長が必要であり、波が十分発達した場合にしかその影響が現れないためと考えられる。

4.3 うねりの影響

うねりが混在する波浪場において、海面風応力ベクトルが平均風向からどの程度偏向するのを示すパラメータとして次式の R を定義する。

$$R = \frac{\overline{v'w'}}{u'w'} \tag{9}$$

ここで、 v' は平均風向に直交する向きの風速変動である。Fig.7に、うねりと風波が混在する波浪場のデータに対して、ECMおよびIDMから算定された u_* の比較を示す。ここでは、データを R が0より大きく0.5以下のもの、0.5より大きく1.0以下のもの、1.0より大きいものの3つのケースに分類している。図中の実線は、両者が等しい場合の比例関係を示している。この図より、 R が大きなデータ群ほど、ECMに比べてIDMによる u_* の方が相対的に大きな値を示すことがわかる。また、

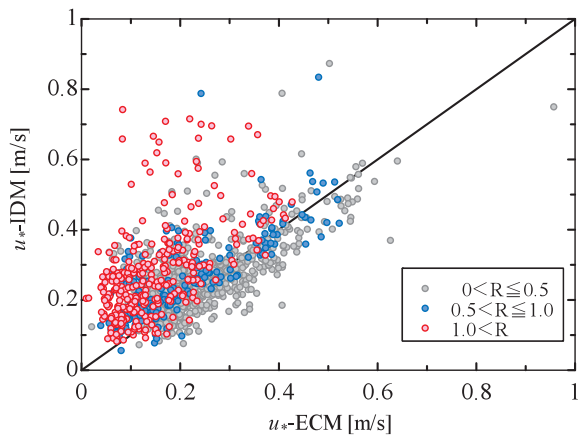


Fig.7 Comparison of u_* from ECM and IDM classified by R .

R が大きいデータは、 u_{*ECM} の小さい領域に集中するように見える。このことは、平均風速が小さい場合に風応力ベクトルが偏向しやすいことを示している。IDMでは、 $R=0$ に対するTKE方程式を用いているため、 R の影響が大きいのは当然であると考えられるが、データの分散から見ても R はECMとIDMの適合性を乱す主要な因子であると思われる。

Fig.8に u_{*IDM}/u_{*ECM} と R の関係を示す。ここで、実線で結合されたプロットはデータ数と R の範囲を考慮して求めた平均値を、Error barは平均したデータの標準偏差を示している。これより、 R が1を超えると u_{*IDM}/u_{*ECM} が急激に増大することがわかる。また、 $R \rightarrow 0$ において u_{*IDM}/u_{*ECM} は1に漸近している。このような現象は、風速に対して相対的にうねりの作用が大きい場合に現れるはずであり、 R は比較的低風速の場合に大きな値を示すことになる。このことは、Fig.7で見られた傾向と整合する。海上風とうねりがどのように相互作用して海面風応力の直交成分が発生するかについては、現段階でその機構を説明することは難しいが、本研究の結果は実海洋上での運動量伝達特性を明らかにする上で重要な知見を示していると思われる。

5. 結論

本研究では、海洋観測等において渦相関法 (ECM) と慣性散逸法 (IDM) を併用した海面風応力の評価を行った。また、両者の適合性を乱す (風応力を変動させる) 波浪場の影響について検討した。本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

1. ECM と IDM によって算定された摩擦速度 u_* の比較を行った結果、両者の適合度は、Pure windsea のデータの方が高く、うねりが混在する波浪場においては両者の適合度が低下することがわかった。
2. Pure windseaのデータにおいて、ECMとIDMの適

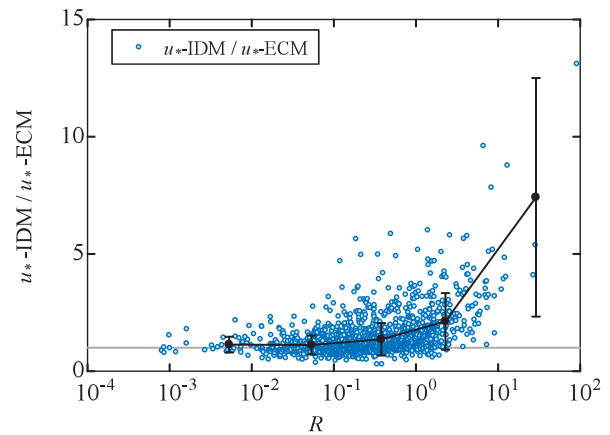


Fig.8 Relation between u_{*IDM}/u_{*ECM} and R .

合性と波齢の関係について検討した。その結果、波齢が25を超える辺りからECMとIDMの適合性が顕著に低下することがわかった。これは、波が発達することによって式(6)におけるインバランスが増大するためであると考えられる。

3. うねりと風波が混在する波浪場において、ECMとIDMによって算定された u_* の比較を行った。その結果、 R が大きなデータほどECMに比べてIDMによる u_* の方が相対的に大きな値を示すことがわかった。さらに、ECMとIDMの適合性と R の関係について検討した結果、 R が1を超えると両者の適合性は急激に低下することがわかった。海上風とうねりがどのように相互作用して海面風応力の直交成分が発生するかについて説明することが今後の課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり、国立環境研究所津守博通氏、九州大学松永信博教授にご助言を頂きました。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C) (代表者：杉原裕司) および京都大学防災研究所一般共同研究 (代表者：杉原裕司) の援助を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Geernaert, G. L.: Measurements of the angle between the wind vector and wind stress vector in the surface layer over the North Sea, *J. Geophys. Res.*, **93**, pp.8215-8220, 1988
- 2) Drennan, W. M., K. K. Kahma and M. A. Donelan: On momentum flux and velocity spectra over waves, *Bound.-Layer Meteor.*, **92**, pp. 489-515, 1999.
- 3) Grachev, A. A., C. W. Fairall, J. E. Hare, J. B. Edson and S. D. Miller: Wind stress vector over ocean waves, *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, pp. 2408-2429, 2002.
- 4) Large, W. G. and S. S. Pond: Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, pp. 324-336, 1981.

- 5) Monin, A. S. and A. M. Obukhov: Basic regularity of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere, *Trudy Geophys. Inst. Akad. Nauk, SSSR*, **24**, pp. 163-187, 1954.
- 6) Mahrt, L.: The coastal zone, Air-Sea Exchange: Physics, Chemistry and Dynamics, edited by G. L. Geernaert, pp. 247-267, 1996..
- 7) Kader, B. A. and A. M. Yaglom: Mean fields and fluctuation moments in unstable stratified turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, **212**, pp. 637-662, 1990.
- 8) Brutsaert, W.: Evaporation into the Atmosphere, *History, and Applications*, **299**, 1995.