

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13878

研究課題名(和文) 漂流ブイによる海上風乱流の直接観測による外洋域の海面抵抗係数と波浪の関係解明

研究課題名(英文) Elucidation of relationship between offshore wind waves and sea surface drag coefficient through direct measurements of wind turbulence by a drifting buoy

研究代表者

小松 幸生 (Komatsu, Kosei)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30371834

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、直接観測することが困難な外洋域の海上風乱流を高精度に観測する手法を開発して、外洋域の海面抵抗係数を見積もり、海面抵抗係数と波浪の関係を解明に貢献することを目的とする。そこで、新たに、3次元超音波風速計、GPS波高計、モーションセンサを搭載した漂流ブイを構築し、渦相関法により海面抵抗係数を高精度に推定する手法を開発した。この手法では、波浪によるブイの動揺が風乱流の計測に与える影響をモーションセンサによる計測値で適切に除去するアルゴリズムを導入することで、海面直上の海上風乱流を高精度(風速のRMSE=0.1 m/s)に計測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海面抵抗係数は、大気と海洋間の運動量、熱、物質の交換過程を規定する最重要パラメータであり、特に波浪との関係がこれまで多くの研究がなされてきたが、外洋域の精度の高い現場データが不足していることもあって、確定的な結論は得られていない。本研究で新たに開発したブイと推定手法により、沖合域での海面抵抗係数を正確に推定することが可能になった。この成果は、大気海洋相互作用や気候変動、さらには海洋によるCO₂の吸収といった現象の実態解明に貢献する。また、数値モデルによる台風予測や波浪予測、さらには地球温暖化の影響予測の高精度化にも直結しており、防災研究と環境研究の両面でも大きな貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to contribute to elucidation of the relationship between offshore wind waves and sea surface drag coefficient by developing a scheme to measure accurately wind turbulence near the sea surface in the offshore region. We constructed a drifting buoy equipped with a 3D ultra-sonic anemometer, a GPS wave height meter and a motion sensor, and developed a scheme to estimate the drag coefficient by eddy correlation method. The scheme achieved highly accurate measurements of wind velocity (RMSE is 0.1 m/s) by eliminating errors due to fluctuations of the buoy using motion data.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海面抵抗係数 海上風乱流 波浪 漂流ブイ 渦相関法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大気が海洋に及ぼす海面の摩擦応力は、直接的には海上風の3次元的な乱流を計測して求めることができるが、外洋域での海上風の乱流計測は困難なため、海面抵抗係数 C_D の経験式(総説: Geernaert, 1990) を介して海面基準高度 10 m における水平方向の平均風速 U_{10} から推定するのが一般的である(バルク法; e.g., Large and Pond, 1981)。現状では、抵抗係数 C_D の誤差が大きいため、例え正確な U_{10} を得ることができたとしても、正確な摩擦応力を推定できる保証はない。

大気が中立成層のとき、海面境界層における水平風速には対数分布則が成立するが、この分布則で重要なパラメータの一つが海面粗度 z_0 で、海面の凹凸の程度を表す。海面上 z_0 の高度では水平風速が 0 になる(図 1)。粗度 z_0 は海面抵抗係数 C_D と一対一の関係にあり、海面の凹凸に影響を与える波浪との関係が水槽実験や現場観測により 40 年以上研究されているが、未だに確定した結論は得られていない。 z_0 と波齢(波浪の発達状態を表すパラメータ)との関係を調べた既往研究は、波齢に依存しないとする Charnock (1955) や Wu (1986)、波齢に逆比例するとする Masuda and Kusaba (1987)、Atakturk and Katsaros (1999)、波齢に正比例するとする Toba and Koga (1986)、Toba and Ebuchi (1991) 等があり、その正否は未だ決着していない。さらに、波浪にうねりが混在しているときは状況がより複雑になる(Donelan et al., 1997)。これらの大きな要因は、外洋において海上風乱流と波浪を高精度に同時観測したデータが不足している点にある(増田他, 2004)。逆にいえば、そうしたデータさえ取得できれば、この状況を打開できる可能性が高い。

従来の外洋域での観測では、船舶の動揺が乱流計測に与える影響や、船舶及び観測塔といった大型施設自体が海上風や波浪に与える影響を完全に排除することが難点であった。これらの点を解決する可能性を持つのが、風速計付きブイ式波高計(小松・田中, 2014)である。これは、海上風と波浪を高精度に連続して計測できるブイで、しかも、筐体が小型であるため、測器自体が風や波浪に与える影響を低減することができ、また、サイトを変えて様々な波浪状況下で観測することが可能である。

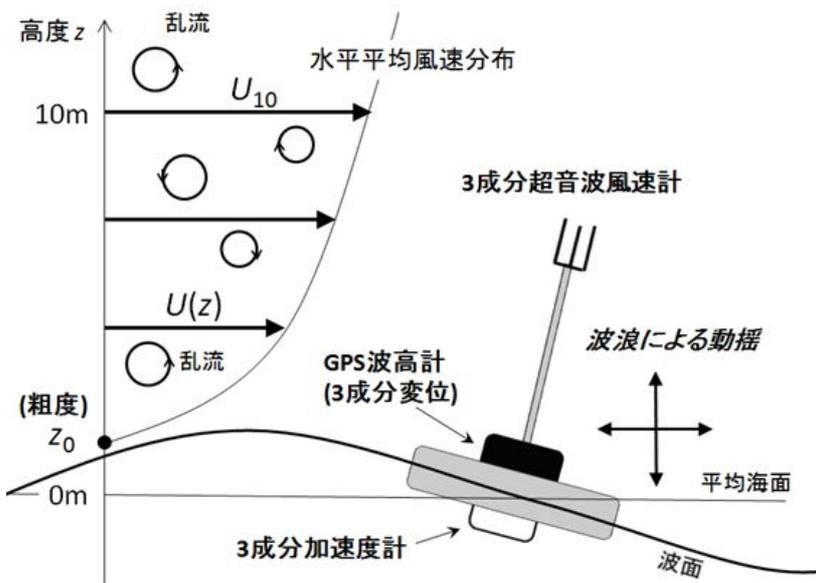


図 1. 漂流ブイによる観測の概念図

2. 研究の目的

本研究では、外洋域において小型の漂流ブイを基盤として海上風乱流を高精度に直接計測する手法の確立を目指す。この手法を用いることにより、海面抵抗係数 C_D (粗度 z_0) を算出し、同時に計測した波浪の連続データから波浪の周波数・方向スペクトルを算出して、風波とうねり各々の波齢及び非線形度と $C_D(z_0)$ との関係解明に貢献する。

3. 研究の方法

海面抵抗係数を求める方法は 3 つある。一つ目は渦相関法で、風速の水平・鉛直方向それぞれの乱流成分を計測して摩擦応力を計算する方法である。唯一の直接的な方法であり、特別な仮定を必要としないので、本質的に不確定性の最も小さい方法である。本研究ではこの方法を採用する。ただし、この方法は高感度計測が必要であり、外洋域において船上で実施するには船舶動揺の影響除去等の複雑な処理が必要である(e.g., Mahrt et al., 1996)。二つ目は分布法で、鉛直方向に複数点で水平風速を計測する方法で、乱流計測の必要がないので計測自体は簡便だが、水平風速の鉛直分布が対数分布則に従うことを前提とした間接法で、海面近くのデータが無いと精度が悪く、外洋域での適用には向いていない。三つ目は慣性散逸法で、乱流のエネルギー散逸率から間接的に推定する方法である。船舶の動揺等の影響を無視できるが(Dupuis et al., 1997)、3次元等方性や局所平衡性、Taylor の凍結乱流仮説等の前提条件を満たす必要がある。

各方法に利点と欠点があるが、渦相関法による計測が理想的であり、外洋域の観測では、現在でも、船舶の動揺の影響や船舶自体が乱流に与える影響を低減する方法の改良が続けられている (e.g., Bourass et al., 2009; 塚本他, 2001)。しかしながら、巨大構造物である船舶における渦相関法の適用では、船舶の影響に伴う不確定性の問題が残るし、そもそも、海面から数 10 m のマスト上に設置した測器での計測で、海面摩擦を適切に計測できるかどうかの疑問も残る。さらに重要な点として、波面上の気流は波浪と連動して相互作用しているため (竹原他, 2003)、波浪と海上風を同じ場所で同時に計測できるのが理想的である。外洋域において、以上の問題点を解決できる唯一の方法は、海面の変動 (波浪) に追従しながら海面直上の気流を計測できる漂流型のブイに搭載した波高計と風速計を利用する以外には今のところ候補はない。このアイデアは、世界でまだ試みられていない独創的な方法である。ただし、当然、小型のブイは波浪に伴う 3 次元的な動揺が船舶に比べて格段に激しいために、その影響を適切に除去することが大前提であり、チャレンジ性の高い課題であった。

観測ブイは、岩手県大槌湾に係留・設置して 4 年以上にわたり湾内の海上風と波浪のモニタリングを行った風速計付き GPS 波浪ブイ (図 2; 小松・田中, 2014) を参考にして、アルミニウム筐体に、波高計測モジュール、風速計測モジュール、モーション (3 成分加速度・角速度・地磁気) 計測モジュール、制御基板、バッテリーを組み込んで製作した (図 3)。アルミニウム筐体と風速計設置用の支柱は (株) ゼニライトブイによるカスタム品を使用した。筐体は円筒型で、サイズは $\phi 100 \text{ cm} \times 245 \text{ cm}$ 、重量は 230 kg、全浮力は約 3.3 kN である。波高計測モジュールはヘミスフェア社製 CrescentOEM の受信機と ANTCOM 社製 3G15A-XT-1 のアンテナで構成し、風速計測モジュールは (株) クリマテック社製の Young/CYG-81000、モーション計測モジュールは (株) クレアクト社製の 3DM-GX4-25 を組み込んだ。制御基板は、CPU を (株) ルネサステクノロジ社製の H8-3029F、電源部分は (有) リーフの LXB-A01MP を使用した。また、バッテリーは GS-YUASA 社製の小型制御弁式鉛蓄電池 NP65-12 を使用した。

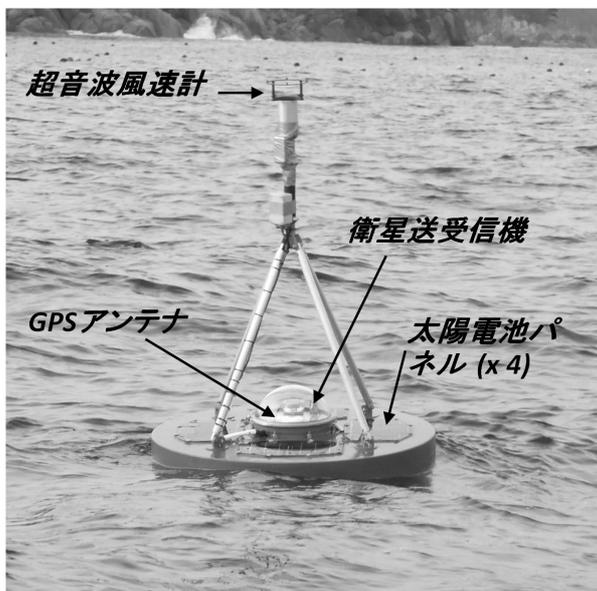


図 2. (上) 大槌湾に係留された風・波浪モニタリングブイ



図 3. (右) 新たに開発した観測ブイ

4. 研究成果

まず、2017 年 8 月 22 日～8 月 25 日に東京大学平塚沖総合実験タワーから約 100 m の場所に新たに開発した観測ブイに係留し、同タワーに取り付けた 3 次元超音波風速計、同タワー既設の超音波式波高計とともに、海上風乱流と波浪の同時計測を実施した (図 4)。観測ブイのデータとタワーで計測したデータを比較することで、塚本他 (2001) の方法をもとに、観測ブイで計測した風速データからブイの動揺の影響を除去するアルゴリズムを開発した。このブイとアルゴリズムにより、海面直上の海上風乱流を高精度 (風速の RMSE=0.1 m/s) に計測することに成功した。

続いて、2017 年 9 月 5 日～18 日に岩手県沖合域において、学術研究船新青丸の KS-17-10 航海「外洋域における海面直上の海上風と波浪の現場観測システムの構築による海面抵抗係数と波浪の関係解明 (研究代表者:小松幸生)」を実施した。開発した観測ブイを新青丸の船尾からロープで係留、浮遊させ、海面直上風と波浪を計測し、総時間で約 10 日間分の連続データを取得した (図 5)。これにより、直接観測することが困難な外洋域の海上風乱流を高精度に観測す

る方法を確立した。

さらに、学術研究船新青丸により、2018年8月30日～9月8日に三陸沖合の親潮域で (KS-18-11 航海)、10月10日～21日に紀伊半島沖合の黒潮域で (KS-18-13 航海)、観測ブイを船尾から係留して外洋域における海上風乱流と波浪の観測を実施し、データを収集した。海上風乱流の強度から海面抵抗係数を算出し、波浪パラメータとの関係を検討したところ、本研究期間中に得られたデータは、いずれも波高が2 m未満であり、外洋域としては低波高で、また、平均風速も5 m/s 以下の場合がほとんどであり、データが微風・低波高のケースに偏在し、海面抵抗係数と波浪パラメータとの間に明瞭な関係を見出すことはできなかった。しかしながら、本研究で新たに開発した漂流式観測ブイは、これまで困難であった外洋域の海面抵抗係数を高精度に計測できることが実証されたので、今後、ブイを強風・高波高域に漂流させることで、強風・高波高時のデータを取得し、外洋域の海面抵抗係数と波浪の関係解明につなげたい。



図 4. 2017年8月平塚沖での観測。奥がタワー。

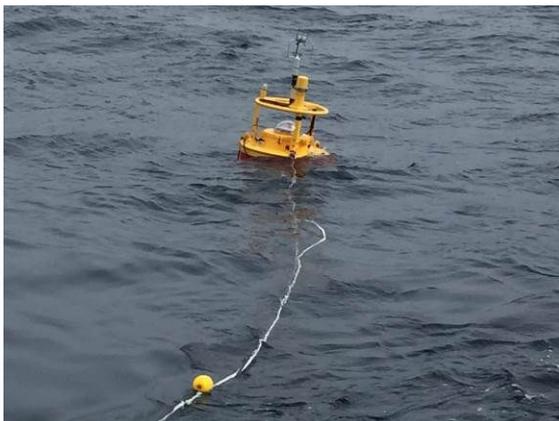


図 5. 2017年9月岩手県沖での観測。

<引用文献>

- Atakturk S. S. and Atsaros, K., Wind stress and surface waves observed on Lake Washington, J. Phys. Oceanogr., 29, 1999, 633-650.
- Bourras, D., Weill, A., Caniaux, G. et al., Turbulent air-sea fluxes in the Gulf of Guinea during the AMMA experiment, J. Geophys. Res., 114, 2009, C04014.
- Charnock, H., Wind stress on a water surface, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 81, 1955, 639-640.
- Donelan, M.A., Drennan, W.M. and Katsaros, K.B., The air-sea momentum flux in conditions of wind sea and swell. J. Phys. Oceanogr., 27, 1997, 2087-2099.
- Dupuis, H., Taylor P.K., Weill A. and Katsaros, K., Inertial dissipation method applied to derive turbulent fluxes over the ocean during the Surface of the Ocean, Fluxes and Interactions with the Atmosphere/Atlantic Stratocumulus Transition Experiment (SOFIA/ASTEX) and Structure des Echanges Met-Atmosphere, Proprietes des Heterogeneites Oceaniques: Recherche Experimentale (SEMAPHORE) experiments with low to moderate wind speeds, J. Geophys. Res., 102, 1997, 21115-21129.
- Geernaert, G.L., Bulk parameterizations for the wind stress and heat fluxes, "Surface Waves and Fluxes: Volume P" eds. Geernaert, G.L. and Plant, W. J., Kluwer Academic, Dordrecht, 1990, 91-172.
- 小松幸生, 田中潔, 大槌湾における風・波浪のリアルタイムモニタリング, 九州大学応用力学研究所所報, 146, 2014, 87-97.
- Large, W. G. and Pond, S., Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds, J. Phys. Oceanogr., 11, 1981, 324-336.
- Mahrt, L., Vickers, D., Howell, J., Edson, J., Hare, J., Højstrup, J., and Wilczak, J., Sea surface drag coefficients in RASEX, J. Geophys. Res., 101, 1996, 14327-14335.
- Masuda, A. and T. Kusaba, On the local equilibrium of winds and wind-waves in relation to surface drag, J. Oceanogr. Soc. Japan, 43, 1987, 28-36.
- 増田章, 丸林賢次, 石橋道芳, 奥野章, 津屋崎沖観測塔で観測した海上風乱流 I. 計測法と予備解析, 九州大学応用力学研究所所報, 126, 2004, 23-39.
- 竹原幸生, 大塚直, 江藤剛治, 高野保英, 辻本剛三, 水谷夏樹, 画像計測による風波界面での気流・水流の相互作用に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 50, 2003, 96-100.
- Toba, Y. and Koga, M., A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, "Oceanic Whitecaps" eds. Monahan, E.C. and Mac Niocaill, G. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1986, 37-47.
- Toba, Y. and Ebuchi, N., Sea-surface roughness length fluctuating in concert with wind and waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, 47, 1991, 63-79.

塚本修, 文字信貴, 伊藤芳樹, 乱流変動による運動量・顕熱・潜熱 (水蒸気)のフラックス測定, 気象研究ノート, 199, 2001, 19-56.

Wu, J., Roughness elements of the sea surface – their spectral composition, *Tellus*, 38A, 1986, 178-188.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

Sakamoto, T., Komatsu, K., Shirai, K., et al., Combining microvolume isotope analysis and numerical simulation to reproduce fish migration history, *Methods in Ecology and Evolution*, 査読有, 10, 2018, 59-69.

Komatsu, K. and Tanaka, K., Swell-dominant surface waves observed by a moored buoy with a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan, *J. Oceanogr.*, 査読有, 73, 2017, 87-101.

Ishizu, M., Itoh, S., Tanaka, K. and Komatsu, K., Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan, *J. Oceanogr.*, 査読有, 73, 2017, 115-131.

Tanaka, K., Komatsu, K., Itoh, S., et al., Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan, *J. Oceanogr.*, 査読有, 73, 2017, 25-38.

Sakamoto, T., Komatsu, K., Yoneda, M., et al., Temperature dependence of $\delta^{18}\text{O}$ in otolith of juvenile Japanese sardine: Laboratory rearing experiment with micro-scale analysis, *Fisheries Research*, 査読有, 194, 2017, 55-59.

〔学会発表〕(計11件)

Komatsu, K. and Tanaka, K., Swell-dominant surface waves inherent in the shape of the rias coast facing the western North Pacific, *JPGU Meeting 2019*, 2019, Chiba, Japan.

Komatsu, K., Sato, K., Goto, Y., Yonehara, Y., Sakamoto, K.Q. and naruoka, M., Measuring the air-sea interface using a bird-attached logger, *SOLAS OpenScience Conference*, 2019, Sapporo, Japan.

Komatsu, K. and Tanaka, K., Swell-dominant surface waves inherent in the shape of the rias coast facing the western North Pacific, *PICES 2018 Annual Meeting*, 2018, Yokohama, Japan.

小松幸生, 廣江豊, 黒潮域における水平拡散係数のスケール依存性II, 日本海洋学会 2018 年度秋季大会, 2018, 東京.

Komatsu, K. and Tanaka, K., Topography-dependent relation between offshore wind field and swell-dominant surface waves observed inside bays on the Sanriku ria coast of Japan, *JPGU-AGU Jpint Meeting 2017*, 2017, Chiba, Japan.

小松幸生, 廣江豊, 黒潮域における水平拡散係数のスケール依存性, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会, 2017, 仙台.

小松幸生, バイオロギングによる波浪現場観測, 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「バイオロギングと海洋・大気変動予測の未来」, 2016, 柏.

小松幸生, 廣江豊, 黒潮域における水平拡散係数の実態について, 水産海洋学会 2016 年度研究発表大会, 2016, 東京.

小松幸生, 廣江豊, 高解像度漂流ブイによる黒潮域における水平拡散係数のスケール依存性, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016, 鹿児島.

小松幸生, 田中潔, 三陸内湾域における波浪と沖合海上風との関係, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016, 鹿児島.

小松幸生, 田中潔, 三陸リアス湾内におけるうねり性波浪と沖合海上風との関係, 日本流体力学学会年会 2016, 2016, 名古屋.

〔図書〕(計1件)

Komatsu, K. and Hiroe, Y., Structure and impacts of the Kuroshio nutrient stream, "*Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*", eds. Nagai, T. et al., John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, 2019, in press.

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/kosei/photo.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。