

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 15日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740314

研究課題名（和文） 吹送流の季節変動機構・特性に関する数値実験

研究課題名（英文） Numerical Experiments on Seasonal Variations of the Wind-Driven flow and its Mechanics

研究代表者

吉川 裕 (YOSHIKAWA YUTAKA)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：40346854

研究成果の概要（和文）：

これまでの観測により明らかとなった吹送流の季節変動の機構を解明するため、数値実験を行った。その結果、熱フラックスの日周変化の季節変動が、吹送流の季節変動に重要であることが判明した。さらに単純化解析解を導出し、吹送流の季節変動のパラメータ依存性を明らかにした。この依存性をもとに全球の吹送流分布を推定したところ、日周変化の影響は冬季高緯度域に顕著であることが判明した。漂流など吹送流が関与する現象の再現・予測精度の向上には、日周変動を考慮することが重要であると判明した。

研究成果の概要（英文）：

To clarify mechanism and characteristics of observed seasonal variations in the wind-driven flow, numerical experiments were performed. We found that seasonal variations in the diurnal cycle of a surface heat flux play most significant roles in the variation of the wind-driven flow. A global distribution of the surface wind-driven flow is estimated by deriving analytical solutions of the wind-driven flow under the diurnal cycle. The global distribution indicates a large impact of the diurnal cycle at higher latitudes in winter. These results suggest diurnal cycle of surface heat flux should be taken into account for more accurate predictions of the wind-driven flow and surface drift.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学

キーワード：海洋物理

1. 研究開始当初の背景

吹送流の鉛直分布は、風から与えられた運動量が海面下で乱流混合され下方に輸送される様子で決まる。ところが、一般に乱流混合過程は複雑であり（図1）、その様子が異なると吹送流の鉛直分布も変化し、海面にお

ける吹送流の流速・流向は変化する。このように同じ風でも乱流混合の様子に依存して吹送流は変化するため、例えば水産資源や瓦礫などの漂流予測を行う際には、乱流混合過程を理解し、海面における吹送流を精度良く推定する必要がある。また、海面流速は大気

海洋間の諸フラックスに影響を与えるから、大気海洋結合システムを正しく理解する上でも吹送流の正確な見積もりが重要となる。

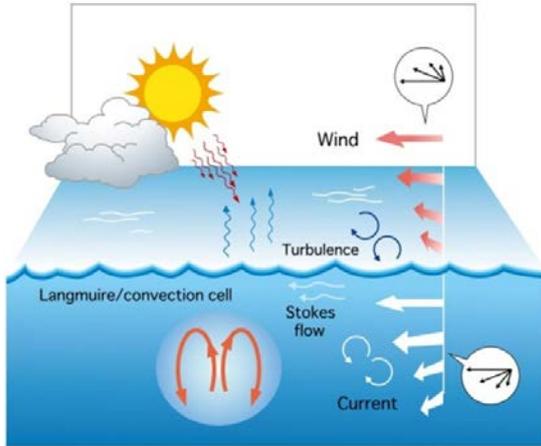


図 1：海洋表層の乱流の様子の模式図

しかしながら、洋上での高精度観測が難しいこと、乱流混合過程が複雑なことにより、吹送流の実態は不明な点が多い。このような状況を打破するため、申請者らが精力的な観測を行った結果、海面における吹送流の流速・流向が季節により大きく変化していることを世界で初めて定量的に評価された (Yoshikawa and Masuda 2009)。この観測結果を手がかりとすれば、吹送流の鉛直分布や乱流混合の様子をより深く解明できることが期待された。

2. 研究の目的

そこで本申請課題では、観測された吹送流構造の季節変化を数値実験により再現し、乱流混合過程を解析することで、吹送流の力学機構を解明することを目指す。さらに、広範なパラメータのもと感度実験を行ってその結果を普遍化することで、現実の海洋で生じる運動量の乱流混合過程と吹送流の変動特性を理解する。また、吹送流の季節変化を再現しうる単純化モデルの構築も試みる。

3. 研究の方法

本申請課題では、はじめに数値実験を行い、現実的な吹送流を再現し、その変動機構を調べる。吹送流の再現には、乱流混合過程を精度良く再現する必要がある。このため本申請課題では、現状の数値模型で最も精度良く乱流混合を再現可能なラージエディシミュレーション (LES) を用いた。吹送流の季節変動が観測された対馬海峡を想定し、幅 160m、深さ 80m 程度の矩形海に、観測される風応力および熱フラックスを一様に与えて実験を行った。(図 2)

さらに本申請課題では、数値実験結果を普遍化するため、単純化解析解の導出や、実験結果を検証するために観測資料解析などもあわせて行った。

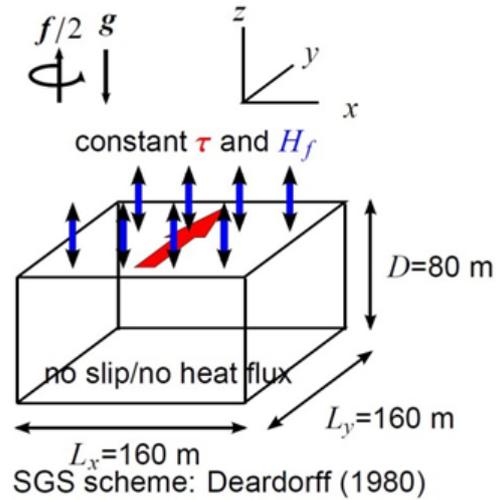


図 2：数値模型の概略図

4. 研究成果

ここでは、数値実験で得られた成果と、解析解を導出して得た成果、数値実験結果を元に導出し観測資料で検証したスケールング則に関する成果、さらに吹送流に及ぼす波浪の影響に関する成果に分けて記述する。

(1) 数値実験から得られた成果

対馬海峡で観測された夏季と冬季の吹送流構造の違いが、夏季と冬季の海面熱フラックスに起因すると考え、対馬海峡の夏季と冬季に典型的な風応力および熱フラックス (一定値) を与えて実験を行った。冷却時には対流混合により吹送流は鉛直に一樣化される一方、加熱時には薄い混合層が形成されるため吹送流は海面付近に集中し、流速・流向とも大きくなる (図 3)。しかし、夏季を想定した実験結果は観測結果と概ね一致しているものの、冬季の実験結果は海面における流速が半分であるなど、観測結果と大きな不一致が見られた。この不一致は、対馬海峡における吹送流が、冬季の平均的な海面冷却率から予想されるほど対流鉛直混合していないことを示すものであり、乱流混合過程を明らかにする上で極めて重要な結果であった。

そこで不一致の原因として海面熱フラックスに日周変化に着目し、日周変化を加えた熱フラックスで実験を行った。その結果、日周変化は夏季には大きな影響をもたらさないものの、冬季には加熱時に吹送流を海面近傍に留めるため、日周変化が無い場合よりも海面の流速を効率的に増大させることが明

らかとなった。

さらに日平均熱フラックスや日周変化幅を変えた実験をいくつか行い、パラメータ依存性を調べた。その結果、海面の吹送流は加熱時間、加熱率と冷却率の比に最も大きく依存し、また緯度にも依存することがわかった。なお、先行研究 (Price et al. 1986) で調べられた LOTUS 観測を想定した実験を行ったところ、吹送流の流速が風速に依存するという先行研究と異なる結果を得た。この違いの要因として、波浪に伴う鉛直混合の影響が考えられた。

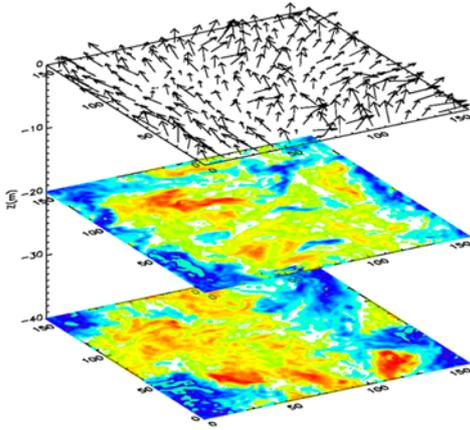


図3：LES結果の一例。矢印が海面流速を、カラーが鉛直流速を示す。

(2) 解析解の導出

数値実験で得られた吹送流に及ぼす日周変化の影響をより深く理解し体系化するため、鉛直一次元の境界層方程式 (エクマンの方程式) を解析的に解き、解の構造を調べた。この際、渦粘性・拡散係数を混合期・非混合期にわけ、それぞれの期間では一定値とすることで、乱流混合の強弱を単純化して表現した。渦粘性・拡散係数を適切に選ぶことによって、LES結果を良く再現する解析解の導出に成功した。

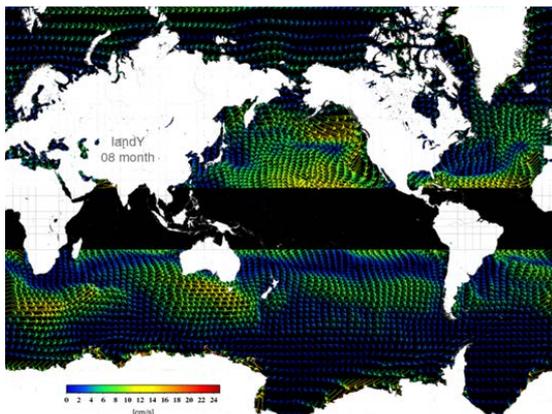


図4：吹送流の全球分布の推定値

解析解はエクマン螺旋解と慣性振動解に分けることができるが、日平均流速はエクマン螺旋解が、日平均流向はエクマン螺旋解と慣性振動解が重要であることがわかった。

さらに単純化解析解により、海面における吹送流の流速と流向を、平均加熱率、日周変化幅などの外部パラメータで表現することに成功した。この結果と風および熱フラックスの全球データを用いて、吹送流の全球分布を容易に推定することが可能となった。日周変動を考慮しない従来の吹送流の推定値と比べると、特に冬季高緯度地域で違いが顕著となり、これらの地域ではとりわけ熱フラックスの日周変化が重要であることを見出した。

(3) 吹送流のスケーリング則

海面加熱時における吹送流は、風による混合促進と、加熱および地球自転による混合抑制のバランスで決まる。本申請課題で得られたLESの結果を用いて、吹送流および乱流混合が、風速、海面加熱率、コリオリ加速度にどのように依存するかを調べたところ、吹送流の深さ (混合層の深さ) は大気の研究 (Zilitinkevich et al. 2002) で提唱されたスケーリングに従うこと、鉛直粘性・拡散係数の鉛直分布は混合層深度と摩擦速度の積で普遍的にスケーリングできること、またこの渦粘性・拡散係数の普遍分布を用いれば、吹送流や混合層内成層の鉛直分布も普遍的に表現できることが明らかになった。

これらのスケーリング則の妥当性を調べるため、全球の混合層深度データ (MILA-GPV) を解析し、本申請課題で得られたスケーリング則と比較した。その結果、今回提案したスケーリング則は広範なパラメータで妥当であることを確認できた。

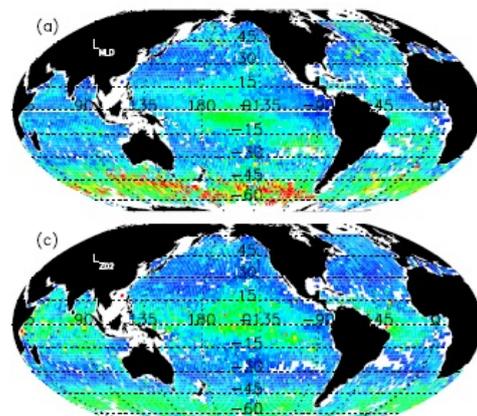


図5：混合層深度の観測値 (上) とスケーリング則からの推定値 (下)

(4) 波浪の効果

対馬海峡における吹送流に及ぼす波浪（ストークスドリフト）の影響を明らかにするため、観測の行われた日の風、熱フラックス、および波浪を外部強制力としてLES計算を行い、観測値との比較を行った。その結果、観測時は海面加熱の効果が大きく、波浪が引き起こす混合の影響は表層に限定されること、対馬海峡における観測データのこの結果を支持することを明らかにした。

(5) 波及効果

これらの成果は、最初に述べたように漂流予測の高精度化に重要であるだけでなく、最近活発に研究されている大気海洋相互作用にも重要である可能性が高く、今後この分野にも研究対象を広げる必要があると思われる。また、海洋中層水の潜り込み過程にも風による混合と吹送流は重要であり（Yoshikawa et al. 2012）、この分野にも本申請課題の成果が波及する可能性が考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① John P. Matthews and Yutaka Yoshikawa, Synergistic surface current mapping by spaceborne stereo imaging and coastal HF radar, *Geophysical Research Letters*, 査読有り, vol. 39, L17606, 2012, doi: 10.1029/2012GL052546
- ② Yutaka Yoshikawa, Craig M. Lee, and Leif N. Thomas, The Subpolar Front of the Japan/East Sea. Part III: Competing Roles of Frontal Dynamics and Atmospheric Forcing in Driving Ageostrophic Vertical Circulation and Subduction, *Journal of Physical Oceanography*, 査読有り, vol. 42, pp. 991-1011, 2012, doi: 10.1175/JPO-D-11-0154.1
- ③ 吉川 裕, 増田 章, 丸林 賢次, 石橋 道芳, 対馬海峡における表層海流変動、月刊海洋、査読無し、42 巻、534-541、2010

〔学会発表〕（計 23 件）

- ① 吉川 裕, 海面加熱時の混合層深度のスケーリング則、2013 年度日本海洋学会春季大会、2013 年 3 月 24 日、東京海洋大学
- ② 吉川 裕, 海面加熱下での吹送流と風成乱流のスケーリング則、第 6 2 回理論応用力学講演会、2013 年 03 月 07 日、東京工業大学

- ③ 吉川 裕, 増田 章, 石橋 道芳, 丸林 賢次, 対馬海峡における表層海況変動とその機構、2012 年度九州沖縄地区合同シンポジウム、水産大学校
- ④ Y. Yoshikawa, A. Masuda, M. Ishibashi and K. Marubayashi, Seasonal Variation of the Wind-Driven Flow and Surface Geostrophic Current in the Tsushima (Korea) Strait, Ocean Radar Conference for Asia, 2012 年 05 月 18 日、Seoul, Korea
- ⑤ Y. Yoshikawa, J. P. Matthews, and Y. Ide, Surface currents obtained from HF radar and satellite images: Synergistic approach for vertical shear estimation near the surface, Radiowave Workshop 2012, 2012 年 04 月 17 日、Toulon, France
- ⑥ Y. Yoshikawa and Y. Ide, The wind-driven turbulence and flow under surface heating, Ocean Sciences Meeting 2012, 2012 年 02 月 20 日、Saltlake City, U.S.A.
- ⑦ Y. Yoshikawa and A. Masuda, Seasonal variations of the wind-driven Ekman flow estimated from HF radar, a part of an intensive monitoring system in the Tsushima strait, 2011 IUGG General Assembly, 2011 年 07 月 02 日、Melbourne, Australia
- ⑧ 吉川 裕, 増田 章, 丸林 賢次, 石橋 道芳, 対馬海峡における表層海流変動、2010 年度九州沖縄地区合同シンポジウム、2010 年 12 月 08 日、鹿児島大学
- ⑨ 吉川 裕, 海洋前線域での潜り込み過程に関する数値実験：大気強制力の効果、黒潮続流域での海面フラックスに関する研究集会、2010 年 11 月 28 日、名古屋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 裕 (YOSHIKAWA YUTAKA)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 40346854

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号