

短波放射の日周変動に対する大気・海洋結合境界層の応答に関する研究

窪田, 雅也
九州大学大学院総合理工学府

吉川, 裕
京都大学大学院理学研究科

<https://doi.org/10.15017/1526166>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 146, pp.123-127, 2014-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

短波放射の日周変動に対する 大気・海洋結合境界層の応答に関する研究

窪田 雅也*1 吉川 裕*2

(2014年1月31日受理)

Study on Response of Air-Sea Coupled Boundary Layer to Diurnal Variations in Solar Radiation

Masaya KUBOTA and Yutaka YOSHIKAWA

E-mail of corresponding author: m-kubota@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

Recent studies revealed that an atmospheric boundary layer responds significantly to spatial variations of sea surface temperature (SST). Here we investigate responses of an air-sea coupled boundary layer to diurnal variations in solar radiation, by conducting one dimensional numerical experiments and analyzing moored-buoy data and satellite data. Significant responses of the coupled boundary layer (SST and sea surface wind (SSW)) are identified in both observed buoy data and numerical experiments. Satellite data show significant dependence of diurnal amplitude of SSW variations on latitude and season. Numerical experiments suggest that this dependence is related to latitudinal difference in mean wind speed and mean heat flux between atmosphere and ocean.

Key words: *Air-Sea Interaction, Coupled Boundary Layer, Diurnal Variations, Response to Solar Radiation*

1. 緒言

大気海洋相互作用は、エルニーニョ・南方振動やモンスーンなどに代表されるような、我々の生産活動や日常生活に大きく影響しうる気象現象の発生・維持機構に密接に関連している。その大気海洋相互作用を考える上で、海面熱フラックスは最も重要な気象要素のひとつだと考えられている。そのため、海面熱フラックスの時空間的な変化がどのようにして、またどの程度大気・海洋に影響しうるのかを正しく理解することは、気象・海象分野において非常に重要な主題である。近年では、Small et al. (2008)や Chelton et al. (2004)といった、海洋フロント周辺における海洋大気境界層に焦点を当てた研究によって、海面水温(SST)の空間的な変化が海面風応力に影響を与えていることが示唆されている。一方、SSTは時間的にも変化し、とりわけ日周期変動は他の周期変動に比べて時間スケールに対する変化量が大きく、大気・海洋の状態変化に大きく寄与している可能性がある。しかしながら SST の日変化に対する大気・海洋応答に関して、その素過程については未だ十分な

議論がなされていない。このような観点から、本研究では熱フラックスの日変化成分が大気・海洋結合境界層に与える影響について調べることを目的とし、大気海洋結合モデル及びブイ・衛星による観測資料を用いて大気・海洋結合境界層の日周期変動について調べた。

本稿では、初めに鉛直1次元の大気海洋結合モデルを用いて数値実験を行い、熱フラックスの日変化に対する境界層の応答の素過程を調べた(第2節)。その後、観測資料を解析し、実験に現れた応答過程が現実にも見られるか検討した(第3節)。観測資料解析においては、まず多くの気象要素を高時間分解能で観測可能であるブイによる観測データを用いて、予想される大気・海洋応答が実際に見られるか検証した。また、広域の観測が可能である極軌道衛星による観測値を用いて、その時空間依存性についても議論した。

2. 数値実験

2.1 数値模型

支配方程式は、鉛直一次元の大気・海洋についての非圧縮、ブジネスク近似下での運動方程式、浮力加速度の拡散方程式である。

*1 九州大学大学院総合理工学府

*2 京都大学大学院理学研究科

$$\frac{\partial u_{ai}}{\partial t} = f_0 \epsilon_{ij3} (u_{aj} - U_{Gj}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_a \frac{\partial u_{ai}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} = f_0 \epsilon_{ij3} u_{sj} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial u_{si}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial b_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_a \frac{\partial b_a}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial b_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_s \frac{\partial b_s}{\partial z} \right)$$

ここで、 u_i は水平方向($i=1$ は x 方向、 $i=2$ は y 方向)の流速、 b は浮力加速度、添字 a, s は大気・海洋の変数であることを示す。 t は時間、 z は海面からの高度であり、後者は上向きを正とする。 ϵ_{ij3} は交代記号、 U_{Gi} は地衡風速、 f_0 はコリオリ係数である。なお、浮力加速度 b_a, b_s は鉛直平均温位からの温位偏差に対する量として以下のように定義する。

$$b_a \equiv -g \frac{(\rho_a - \bar{\rho}_a)}{\bar{\rho}_a} = g \frac{(\theta_a - \bar{\theta}_a)}{\bar{\theta}_a}$$

$$b_s \equiv -g \frac{(\rho_s - \bar{\rho}_s)}{\bar{\rho}_s} = g \alpha (\theta_s - \bar{\theta}_s)$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ は密度、 $\bar{\rho}$ は鉛直平均密度、 θ は温位、 $\bar{\theta}$ は鉛直平均温位、 α は海洋熱膨張率である。渦粘性係数 μ 、渦拡散係数 κ のパラメタリゼーションには、Mellor and Yamada(1982)の改良版であるKitamura(2010)のLevel 2.0を用い、Plandtlの混合距離理論に基づき

$$\mu = sm \cdot q \cdot L$$

$$\kappa = sh \cdot q \cdot L$$

として与える。ここで sm, sh は修正係数、 q は乱流速度、 L は混合長である。初期条件として、

$$\mu_a(z) = \frac{|U_G|^2}{f_0} \times 10^{-6}$$

$$\mu_s(z) = \frac{\bar{\rho}_a}{\bar{\rho}_s} \mu_a(0)$$

を鉛直一様に与えた際の変数の定常解を与える。大気上端、海洋下端における境界条件として、運動量フラックス及び熱フラックスを零とする。海面における大気海洋結合条件としてバルク公式を適用し、熱フラックス(Hf)、運動量フラックス(Mf)を以下のように与える。

$$Hf_a = Q_s$$

$$Hf_s = Q_s + SR + LR$$

$$Mf_i = \rho_a C_D W \Delta u_i$$

ただし、 Q_s は海面からの顕熱フラックス、 SR は短波放射、 LR は長波放射である。この際、潜熱フラックスの日変化量は顕熱に比べ十分小さいと仮定し、長波放射に含めた。また、熱フラックスは全て上向きを正とし、

日の出に相当する加熱開始時刻を $t=0$ とする。

Q_s, SR, LR は以下のように与えた。

$$Q_s = \rho_a C_a C_H W \Delta \theta_0$$

$$SR = \begin{cases} -H_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{24}t\right) & \text{if } 0 < t < 12[\text{hour}] \\ 0 & \text{if } 12 \leq t \leq 24[\text{hour}] \end{cases}$$

$$LR = - \int_0^{24} SR dt$$

ここで、 C_D, C_H はバルク係数、 W は海面直上における風速強度、 Δu_i は海面付近における大気海洋間の流速差($u_{ai} - u_{si}$)、 C_a は大気比熱、 $\Delta \theta_0$ は海面付近における大気海洋間の温度差($\theta_s - \theta_a$)、 H_{max} は最大短波放射強度である。 C_D, C_H はBusinger et al.(1971), Paulson et al.(1970)より、以下のように与える。

$$C_D = k^2 / \{ \ln(z_1/z_0) + \psi_M \}^2$$

$$C_H = k^2 / [\{ \ln(z_1/z_0) + \psi_M \} \{ \ln(z_1/z_0) + \psi_H \}]$$

ただし、

$$\psi_M = \begin{cases} 5 \frac{z_1}{L_{MO}} & \text{if } Q_s \leq 0 \\ \ln \left\{ \frac{8}{(1+x)^4} \right\} + 2 \tan^{-1} x - \frac{\pi}{2} & \text{if } Q_s > 0 \end{cases}$$

$$\psi_H = \begin{cases} \psi_M & \text{if } Q_s \leq 0 \\ -2 \ln \{ (1 + \alpha^2) / 2 \} & \text{if } Q_s > 0 \end{cases}$$

$$x = \left(1 - 15 \frac{z_1}{L_{MO}} \right)^{-4}$$

である。ここで、 k はKalman定数(=0.40)、 $z_1 = 1[\text{m}]$ 、 z_0 は粗度長、 L_{MO} はMonin-Obukhov長である。ここで得た Hf を用いて、浮力フラックス(Bf)を以下の関係式より求める。

$$Bf_a = \kappa \frac{\partial b_a}{\partial z} = \frac{g}{\bar{\theta}_a \bar{\rho}_a C_a} Hf_a$$

$$Bf_s = \kappa \frac{\partial b_s}{\partial z} = \frac{g \alpha}{\bar{\rho}_s C_s} Hf_s$$

ここで、 C_s は海洋比熱である。

以上の式を空間的には中央差分法、時間的にはRunge-Kutta法を用いて数値的に解く。格子数は、大気は2000、海洋は400とし、格子間隔はそれぞれ1m、0.5mとする。積分時間は大気・海洋における流速変化が準定常状態に十分達する十日間とし、解析には最後の一日の結果を用いる。

2.2 数値実験結果

2.2.1 大気・海洋結合による影響

まず、大気・海洋間の熱フラックス結合が大気・海洋境界層に与える影響について評価するため、海面での熱フラックスについての結合条件をSR+LR=0としたNDH(No Diurnal Heat flux)実験を行い、2.2.1で示した結合条件を適用し熱放射を日変化させたDH(Diurnal Heat flux)実験の結果と比較した。なお、両実験において $f_0=10^{-4}[s^{-1}]$ 、 $\bar{\theta}_s - \bar{\theta}_a = 0[K]$ 、 $U_G = (10,0)[ms^{-1}]$ とし、DH実験のみ $H_{max}=800[Wm^{-2}]$ とした。

両実験における熱放射(HR)、海面風応力(SSS)、海上風速(SSW)、吹送流速(SSC)の時系列を Fig.1 に示す。NDH 実験では外部強制を付与しないため、各要素に日変化は見られない。一方、DH 実験においては大気・海洋境界層は熱放射の日周変動に応答し、各要素はいずれも熱放射とおおよそ正の相関を持って変動している。また、両実験において海上気温(SAT)、SSTを除く各要素の日平均成分も異なっている。熱フラックス結合によって、SSS, SSW, SSC の日平均値はそれぞれ+6.24%, -1.51%, +22.4%変化しており、熱フラックスの日変化は特に SSS, SSC に比較的強い影響を与えることが示唆される。

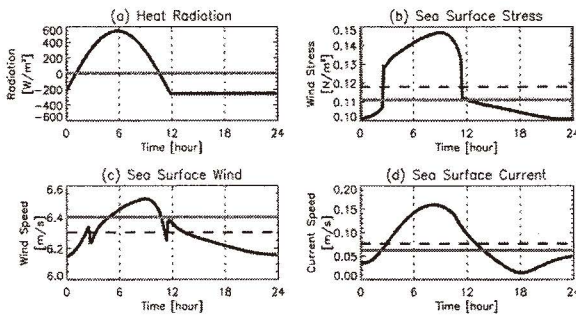


Fig. 1 Time series of (a) heat radiation (SR+LR), (b) sea surface stress, (c) sea surface wind speed and (d) sea surface current speed. Black and gray lines are DH and NH experiments, respectively. Dashed line indicates mean value of DH experiment.

2.2.2 大気・海洋応答のパラメータ依存性

大気・海洋境界層は熱放射の日周変動に反応して日変化することが示された。ただし、各要素の日平均値や日変化量、位相は f_0 、 $\Delta\bar{\theta} = \bar{\theta}_s - \bar{\theta}_a$ 、 H_{max} 、 U_G などに大きく依存していると考えられる。そのため各パラメータを変えた複数の実験を行い、その影響について検証する。代表的な結果として、Table 1 に SSS, SSW, SSC, SST-SAT (= $\Delta\theta_0$) の日平均値、SSW の日振幅のパラメータ依存性を示す。後の衛星データ解析に対する考察のため、 $t=7.5$ の値を日中、 $t=19.5$ の値を夜間のものとし、その差を日振幅とする。まず、各日平均値のパラメータ依存性について調べる。緯度を変えた実験では、高緯度ほど SSC のみ減少し、他は増加している。 $\Delta\bar{\theta}$ 、 U_G を変えた場合、いずれも $\Delta\bar{\theta}$ 、 U_G が大きいほど増加している。 H_{max} を変えた実験では、SSS、SSW はほとんど変

わらないが、SSC、 $\Delta\theta_0$ は H_{max} が大きいほど増加している。また、SSW の日振幅はいずれのパラメータにも大きく依存しており、特に緯度との関係性は非線形的である。以上より、SSS、SSW、SSC の日平均値は緯度、地衡風速に特に依存しており、また $\Delta\theta_0$ の日平均値及び SSW の日振幅はいずれのパラメータにも大きく依存していることが示された。特に後者は平均場の熱フラックスが風速の日変化量に影響を与えることを意味しており、後述の衛星データ解析にも関連する結果である。

Table 1 Parameter Dependence of Daily Average of SSS, SSW, SSC and Anomaly of SSW

		Daily Average				Anomaly* (Day-Night) SSW [$10^{-3}ms^{-1}$]
		SSS [$10^{-3}Nm^{-2}$]	SSW [ms^{-1}]	SSC [$10^{-3}ms^{-1}$]	SST-SAT [$10^{-2}K$]	
Latitude [°N] ($f_0[10^{-4}s^{-1}]$)	10(0.25)	8.34	5.41	9.51	-0.70	11.52
	30(0.73)	10.96	6.12	9.13	-0.12	-3.07
	50(1.11)	12.08	6.36	7.16	-0.28	1.93
$\Delta\bar{\theta}$ [K]	-5	10.64	6.16	7.48	-3.73	0.47
	0	11.80	6.30	7.65	-0.29	2.58
	5	11.92	6.32	7.68	0.04	2.88
H_{max} [Wm^{-2}]	400	11.75	6.31	6.95	-0.10	0.49
	800	11.80	6.30	7.65	-0.29	2.58
	1200	11.77	6.28	8.28	-0.57	4.11
U_G [ms^{-1}]	6	4.41	4.06	4.66	-0.23	4.36
	10	11.80	6.30	7.65	-0.29	2.58
	14	22.54	8.37	10.96	-0.18	1.79

3. 観測資料解析

3.1 ブイデータ解析

3.1.1 解析手法

上述の数値模型を用いた大気・海洋境界層の短波放射に対する応答実験により、SSW、SSC をはじめとする境界層内の各気象要素が日周期変動成分を含んでいることが示された。ここでは係留ブイによる高時間分解能の定点時系列データを解析することで、現実にも各要素の日周変動シグナルが見られるのか検証を行う。本研究においては、National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA, <http://www.noaa.gov>) により公開されている KEO(Kuroshio Extension Observatory) のデータを使用した。また解析結果と数値実験結果を比較することで、暖流域における鉛直次元モデルの妥当性についても議論する。観測海域は KEO が設置されている黒潮続流域(32.4°N, 144.6°E)であり、解析期間は 2005 年 5 月から 2009 年 5 月までの 4 年間とする。解析にあたっては、HR(=SR+LR)、 $\Delta\theta_0$ (SST-SAT)、SSW、SSC の各時系列データに 24±1.5 時間幅のバンドパスフィルターを使用し、準日周変動シグナルを抽出した。

3.1.2 解析結果

SST、SAT の日振幅が同程度であった 2008 年 5 月 22 日の解析結果と、KEO を想定し $f_0 = 7.79 \times 10^{-5}[s^{-1}]$ 、 $\Delta\bar{\theta} = 2.5[K]$ 、 $H_{max} = 600[Wm^{-2}]$ 、 $U_G = 7.5[ms^{-1}]$ とし

た数値実験結果を Fig.2 に示す。SST の日振幅は SR が大きく SSW が小さいという条件下で顕著になることが、多くの先行研究により報告されている(例えば Price et al.(1986); Soloviev and Lukas(2006); Kawai and Kawamura(2002))。ここで示す一日は上記の条件を満たしており、昼夜の水温差が大きいと十分に日変化した熱フラックスに対して大気・海洋が応答していると考えられるため、この日を解析対象とする。Fig.2 において、観測された各気象要素の日変化成分は、いずれも数値実験と同程度の位相・振幅で日変化している。このことから、短波放射の日周変動に対する大気・海洋境界層の応答が現場観測において見られる事例が存在し、また日変化が卓越する条件が満たされる場合、大まかな応答プロセスは単純な鉛直一次元モデルでも表現可能であることが示唆された。なお、他の期間における各要素の日振幅は、HR、SST、SAT については夏季に大きく冬季に小さいという季節性が見られたものの、SSW、SSC に関しては明瞭な季節依存性は確認されなかった。

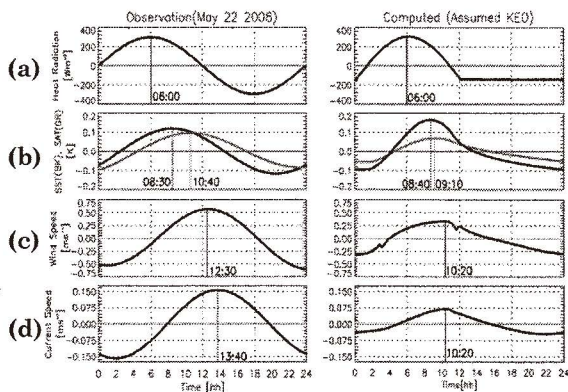


Fig. 2 Time series of (a) heat radiation, (b) sea surface temperature (black) and surface air temperature (gray), (c) sea surface wind speed and (d) sea surface current speed. (Left) Observed data at KEO. Band-pass filter (24 ± 1.5 hour) was applied. (Right) Corresponding numerical experiment. Time at which each value becomes largest is indicated for each time series.

3.2 衛星データ解析

3.2.1 解析手法

Remote Sensing System (RSS, <http://www.remss.com>) において公開されている高性能マイクロ波放射計、AMSR-E のプロダクトを使用し、海面熱フラックスの日変化が大気に与える影響に時空間特性が見られるか検証を行う。AMSR-E は極軌道衛星 Aqua に搭載され、全球に渡って海面水温、海上風速、積算雲水量、降水強度などを 1 日に 2 回観測し、その時刻は現地時刻における 01:30 と 13:30 である。なお、AMSR-E は 2011 年 8 月に運用停止しており、ADEOS-2 衛星搭載の後継機である AMSR-2 が同様の観測を行っている(2014 年 1

月現在)。解析対象海域としては、SST フロントや低気圧の発生・通過といった総観規模の大気擾乱による影響が比較的小さいことから、北太平洋東部(180~230°E, 0~50°N)を選択した。また、解析期間は 2003 年 1 月から 2009 年 12 月までとする。解析方法として、海面水温の日振幅(ΔSST)、海上風速の日振幅(ΔSSW)に対して月毎にコンポジット平均をとり、それらの時空間的な変動特性及び関連性について議論した。その際の抽出条件として、同一地点においてある日の 13:30 とその 12 時間前及び 12 時間後の 01:30 という 3 つの観測値が存在し、且つ水温の日変化が卓越していたと判断される日のみを選択する手法を採用した。なお、水温の日変化が卓越した日であるかを判断する基準として、Stuart-Menteth et al.(2003)で用いられた手法を参考に、以下の条件を満たすことと定義した。

$$\begin{aligned}\Delta SST_{k1} &\equiv dSST_k - nSST_k \\ \Delta SST_{k2} &\equiv dSST_k - (n+1)SST_k \\ \Delta SST_{k1} &> 0.2[K] \cap \Delta SST_{k2} > 0.2[K] \\ (k &= 1, 2, 3, \dots, N)\end{aligned}$$

ここで、添字 k は解析開始日からの日数であり、 N は期間内における合計日数である。 $dSST_k$ 、 $nSST_k$ はそれぞれ k 日における昼、夜の水温、 $(n+1)SST_k$ は $(k+1)$ 日における夜の水温である。

3.2.2 解析結果

夏季、冬季における ΔSST 、 ΔSSW 、 $\Delta SST > 0.2[K]$ となる頻度の空間分布を Fig.3 に示す。日昇温頻度が比較的高い北緯 30° 以北において、 ΔSST は冬季、夏季いずれも約 1.0K であるのに対し、 ΔSSW は同海域において冬季に 0.5~1.0m/s、夏季に -0.5~0.5m/s と明瞭な季節依存性が見られる。したがって、熱フラックスの日変化への応答として現れる海上風速の日変化シグナルは低緯度域よりも高緯度域に、また夏季よりも冬季において増大する傾向があることが示唆される。

このような時空間特性の成因について、前節の数値実験結果を用いて検証する。まず緯度依存性の成因について考察する。Table 1 によれば、 f_0 の減少に伴い風速の日変化は大きくなるはずであるが、衛星データからはそのような f 依存性は見られない。そのため、衛星解析が示す風速日振幅の緯度依存性には他の要因が考えられる。低緯度域では貿易風が強い(図示せず)が、それに伴い海洋表層の鉛直混合が強まり、日中の海面昇温がほとんど生じず、熱フラックスの日変化量が小さいことが考えられる。これは、前節の数値実験における U_G 依存性と定性的に符合する。また季節特性につい

では、日平均場の上向き海面熱フラックスが夏季に負、冬季に正であることが成因だと予想される。同様に Table 1 を参照すると、日平均熱フラックスの符号を決める $\Delta\theta$ の上昇に伴い ΔSSW は増大している。解析結果は $\Delta\theta$ が大きい冬季に ΔSSW が増大することを示しており数値実験結果と同様の傾向であることから、大気・海洋間の温度差が大気応答強度の季節依存性の成因であると考えられる。

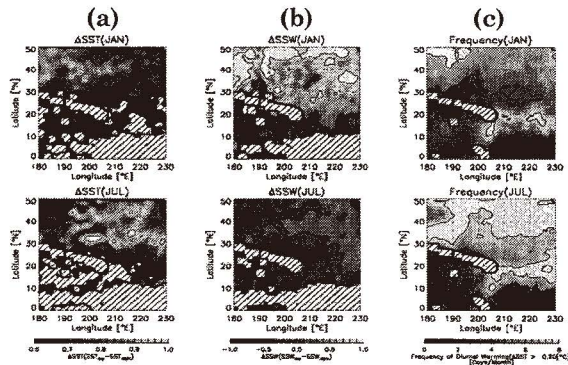


Fig. 3 Distributions of (a) delta SST, (b) delta SSW and (c) frequency of large diurnally cycling days (days per month). (Upper) January, (Lower) July. Shaded area indicates the area of no diurnal cycles, due for example to high wind speed and/or thick cloud (weak solar radiation).

4. 結言

数値模型を用いて熱放射を外部強制とした大気・海洋結合境界層の応答実験を行い、海面熱フラックスの日周変動が海面風応力、海上風、吹送流の日変化を駆動することが示された。また海面熱フラックスの日周変動を考慮することで、その日振幅を零とした場合に比べ諸量の日平均成分も増加・減少し、その変化量は緯度、平均場の海面熱フラックス、最大放射強度、地衡風速に依存していることも確認された。ブイデータ解析からは、短波放射の日周変動に対する大気・海洋境界層の応答が観測資料解析においても見られ、単純な鉛直一次元モデルでも現実の応答プロセスは再現可能であることが示された。また衛星データ解析により、北太平洋東部海域においては中高緯度で海面水温、海上風速の日周期変動が顕著になり、夏季よりも冬季に海上風速の日振幅が大きくなることが示され、明瞭な時空間特性が確認できた。特に風速日振幅の季節依存性については、夏季と冬季で平均場の海面熱フラックス量が異なることが成因であることが数値実験結果から示唆された。

このような日変化は、水温や風応力の日平均値を変化させることで大規模な大気海洋場に影響を与えている可能性が示唆され、今後その影響についてさらに詳しく検討する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、応用力学研究所海洋変動力学研究室の増田章特任教授には貴重なご指導を頂き、深く感謝します。同研究所海洋環境解析学研究室の市川香准教授には、様々な方面から懇切丁寧にご指導、ご指摘を頂きました。また、独立行政法人海洋研究開発機構の川合義美博士からは、先行研究に関する非常に有益な情報を提供して頂きました。皆様の多大なるご協力へ心より感謝の気持ちと御礼を申し上げます。謝辞にかえさせていただきます。

参考文献

- 1) Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi, and E. F. Bradley, 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181-189.
- 2) Chelton, D. B., M. G. Schlax, M. H. Freilich, and R. F. Millif, 2004: Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds. *Science*, **303**, 978-983.
- 3) Kawai, Y. and A. Wada, 2007: Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A review. *J. Oceanogr.*, **63**, 721-744.
- 4) Paulson, C. A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 857-861.
- 5) Small, R. J., S. P. deSzoeke, S. P. Xie, L. O'Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, and S. Minobe, 2008: Air-Sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn. Atmos. Oceans*, **45**, 274-319.
- 6) Stuart-Menteth, A. C., I. S. Robinson, and P. G. Challenor, 2003: A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **108**, 148-227.
- 7) Van de Wiel, B. J. H., A. F. Moene, G. J. Steeneveld, P. Baas, F. C. Bosveld, and A. A. M. Holtslag, 2010: A conceptual view on inertial oscillations and nocturnal low-level jets. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2679-2689.