論　文

# 実用的条件下での渦相関法とバルク法による海面乱流フラックスの比較

安藤雄太[*1]・立花義裕[*1,2]・根田昌典[*2,3]
内田　誠[*4]・前川陽一[*4]・中村　亨[*4]・仲里慧子[*4]

要　旨

乱流フラックスは大気海洋相互作用の素過程を理解する上で重要な要素である．本研究では，三重大学練習船「勢水丸」に常設された渦相関観測システムを用いて，外洋と内洋の境界である伊良湖水道を連続的に観測したデータを初めて解析した．厳密な条件下ではなく，実用的な船舶上での条件下での比較を行うことで，制約が少なくより多くの観測データを解析対象とすることが可能である．このデータを元に，渦相関法とバルク法（COARE3.0）で計算した乱流顕熱フラックスの違いに着目し，その差を生む原因を明らかにすることを研究目的とする．結果，変動は似ていたが，バルク法が渦相関法より大きな値を示し，その差は①風速依存性がある，②温度差依存性があることが考えられる．したがって，本研究で示された風速・大気安定度依存性のある渦相関法とバルク法の差は，風速・大気安定度依存性のあるバルク係数を改良することで，その差を小さくできる可能性があることが示唆された．

キーワード：大気海洋相互作用，超音波風速計，直接観測，大気境界層

## 1．研究背景

地球の大気圏には対流圏をはじめ特徴を持った様々な層があり，層の間には境界面が存在する．大気はこの境界面を通して，エネルギーや物質を輸送することによって緊密に結合している．そのため，境界面での相互作用は気象を解明するための重要な要素である．このうち，海洋と大気との境界面は，海面の熱や運動量などを交換して局所的に相互作用する．さらに，上空の自由大気の循環にも影響を与え，大規模な大気海洋の相互作用もする．

熱帯域に比べ，中緯度域は海面水温が低いため，海洋から大気への影響は少ないと考えられてきた．しかし，最近，中緯度域の海洋が大気に影響を与えることが明らかになりつつある（谷本・野中，2007）．

海洋から大気への影響は，海洋・大気間の熱や物質の乱流による輸送量である海面の乱流フラックスを通して行われる（Tanimoto *et al*., 2003）．したがって，乱流フラックスは大気海洋相互作用の素過程であり，これを正確に評価することは，中緯度域の海洋から大気への影響を考察する上で重要である．

乱流フラックスを直接測定するには，応答速度の速い測器を用いて風速・気温変動を計測する必要があるが，常に動揺し測器の位置が変化する船舶上でそれらの測器を用いることは容易ではないため，通常の機器で観測した風速・気温等から間接推定するバルク法が広く用いられている．しかし，バルク法は，バルク係数の風速や安定度への依存性が研究者によって異なるなどの理由により，その信頼性は現在でも議論する余地が大きい（塚本ほか，2001）．

Bunker *et al*.（1982）は，地中海と紅海を対象として，実測した海洋の熱輸送量と，バルク法により求めた乱流熱フラックスを比較し，両者の間に１桁に近い大きな不一致があることを示した．

以上のように，バルク法では，乱流フラックスを正確に評価できないことを示唆している．したがって，渦相関法による乱流フラックスの直接観測の研究が古くから行われてきた．

例えば，Mitsuta and Fujitani（1974）では，1968～70年の夏季に東シナ海などで，船舶のフォアマストに３次元超音波風向風速温度計，熱電対温度計，傾斜計から構

2013年６月24日受領　　2013年７月５日受理

[*1]三重大学大学院生物資源学研究科
〒514-8507　三重県津市栗真町屋町1577
[*2]海洋研究開発機構地球環境変動領域
[*3]京都大学大学院理学研究科
[*4]三重大学大学院生物資源学研究科附属練習船勢水丸

成される渦相関観測システムを取り付け，１時間の観測を30回以上実施した．

最近ではJAMSTEC研究船「みらい」のフォアマストに渦相関観測システムを常設し，長期間にわたる観測も行われた（Takahashi *et al*., 2005, Kondo and Tsukamoto 2007）．

現在，渦相関観測システムが常設された船舶は国内に１隻のみである．それが三重大学大学院生物資源学研究科附属練習船「勢水丸」である．勢水丸の詳細については，前川ほか（2011）や勢水丸公式HP（http://seisuimaru.bio.mie-u.ac.jp/index.html）に詳しく書かれている．勢水丸は2009年１月に新造した際に，渦相関観測システムが常設された．この観測データは現在に至るまでほぼ全期間存在する．船舶上に渦相関観測システムを常設した事例は国内では「みらい」以外に存在しないため，本研究で使用する長期間にわたる乱流フラックス観測データベースは非常に貴重なものである．本研究では，勢水丸における渦相関観測システムのデータ解析を行った最初の研究である．

## ２．研究目的

愛知県と三重県に囲まれた伊勢湾（内洋）と外洋の境界である伊良湖水道周辺では，各種のフロントの存在が確認されている（関根，1999）．また，周期的に変化する潮流は最大３knで渦が発生する（宇野木，1975）など海洋構造の変化が大きい．前章で記述したように，外洋での乱流フラックスの直接観測は多く行われてきた．また，和歌山県田辺湾の白浜観測塔に渦相関観測システムを設置し，沿岸海域での観測も行われた（塚本，2002）．しかし，外洋と内洋を連続的，かつ継続的に直接観測した例は存在しない．したがって，海洋構造が大きく変化する外洋と内洋上での乱流フラックスを正確に評価することで，海洋構造の変化が大気に与える影響の素過程を明らかにすることが可能である．現状では，渦相関法を用いた観測は容易に行うことができないため，多くの研究ではバルク法を使用せざるを得ない．したがって，バルク法と渦相関法との差を小さくするため，渦相関法とバルク法で計算した値を比較し，この差を生む原因を明らかにする必要がある．先行研究のような厳密な条件下ではなく，実用的な船舶上での条件下での比較を行うことで，観測条件の制約が少ないためより多くの観測データを解析対象とすることが可能であり，これを元に統計的議論が可能となる．本研究ではその第一歩として，伊良湖水道周辺を航行した一事例の期間で，渦相関法とバルク法で計算した乱流顕熱フラックスの違いに着目し，その差を生む原因を明らかにすることを目的とする．

## ３．使用データ

渦相関観測システムは，３次元超音波風向風速温度計（ソニックDA-650，TR-61A型プローブ），オープンパス型赤外線$CO_2$/$H_2O$ガス分析計（LI-COR LI-7500），ジャイロ計（Crossbow AHRS400MB-200）から構成され，高度9.4mのフォアマスト左舷側に常設されている．これらのサンプリング間隔は20Hzである．本研究では，乱流顕熱フラックスを計算するため，LI-7500以外の観測データを使用した．また，バルク法でも計算を行うことと，当時の海上気象を把握するため，風車型風向風速計（W611-Z1），水温計（KET-4），温度計（KET-2），温湿度計（HMP45A），日射計（CM-6E）の各観測データも使用した．風車型風向風速計は高度9.4mのフォアマスト右舷側，水温計は船底（水深3.3m），温度計と温湿度計は高度9.4mのコンパスデッキに常設されている（Fig.

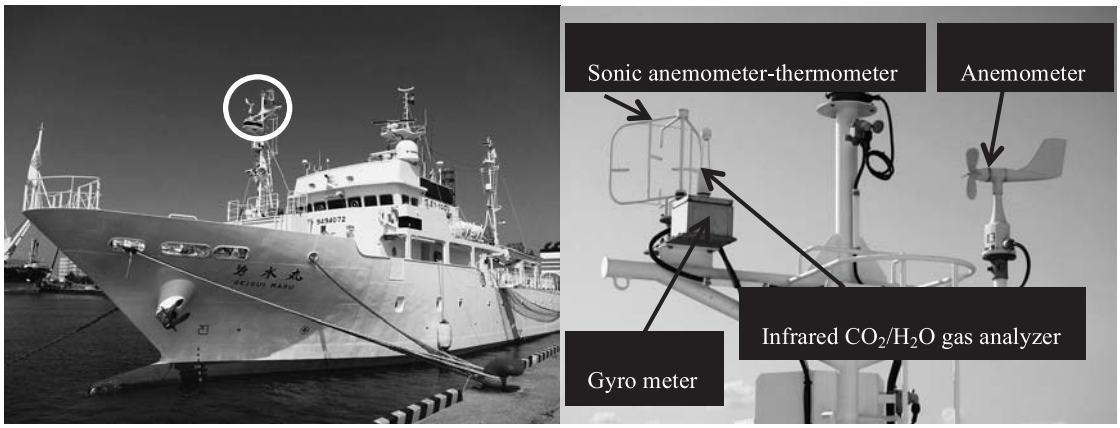


Fig. 1　The position of meteorological equipments installed on a training ship of Mie University “SEISUI MARU” (foremast).

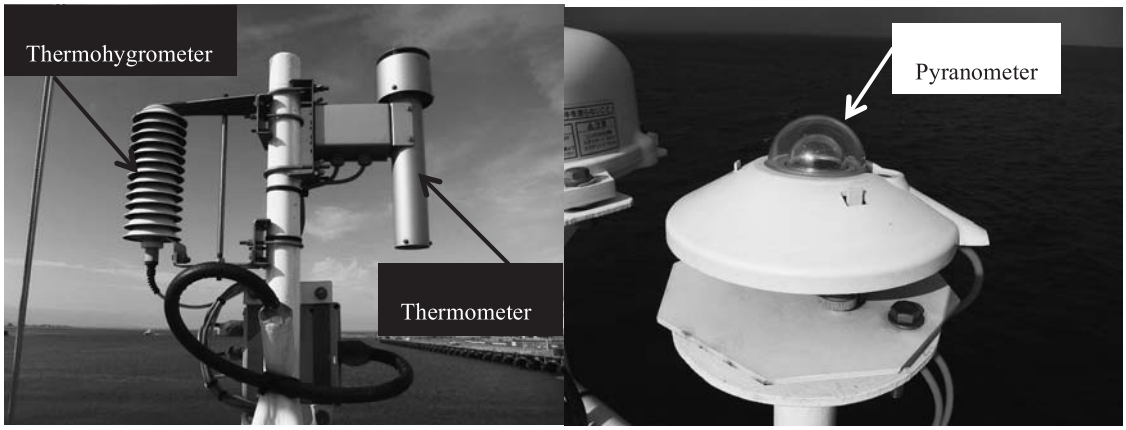


Fig. 2　The position of meteorological equipments installed on a training ship of Mie University "SEISUI MARU" (compass deck).

Table 1　The observation equipments

| Observation equipment | Model number | Height of installation (place), +: above water, −: under water |
|---|---|---|
| Sonic anemometer-thermometer | SONIC TR-61A | +9.4 m (foremast) |
| Infrared $CO_2/H_2O$ gas analyzer | LI-COR LI-7500 | +9.4 m (foremast) |
| Gyro meter | Crossbow AHRS400MB-200 | +9.4 m (foremast) |
| Anemometer | W611-Z1 | +9.4 m (foremast) |
| Thermometer | KET-2 | +9.4 m (compass deck) |
| Thermohygrometer | VAISALA HMP45A | +9.4 m (compass deck) |
| Pyranometer | Kipp & Zonen CM-6E | +9.4 m (compass deck) |
| Water thermometer | KET-4 | −3.3 m (bottom of the ship) |

1, 2)．これらのサンプリング間隔は1分ごとの瞬間値である．本研究で使用した測器の一覧は，Table 1にまとめた．

解析対象期間は，志摩半島沿岸を北上し，伊良湖水道を通過後，松阪港に向かって航行した2011年3月10日12：30JST～15：30JSTの3時間である（Fig. 3）．この期間の船速は約10 kn，13：20～30頃，伊良湖水道を通過した際には9 knほどであった．

## 観測時の状況

観測時の伊良湖水道付近では，海面水温が15～9℃と急激に変化する水温フロントが存在する（Fig. 4，関東・東海海況速報より引用）．また大気の状況を見ると，海洋ほど顕著ではないが，伊勢湾上と外洋の間に気温フロントが存在する（Fig. 5）．図示はしないが，09：00JSTの時点で，日本東方沖に1004 hPaの低気圧，東シナ海に1030 hPaの高気圧が存在する冬型の気圧配置である．したがって，伊良湖水道付近も強い北西風が吹く典型的な冬の天候パターンである．

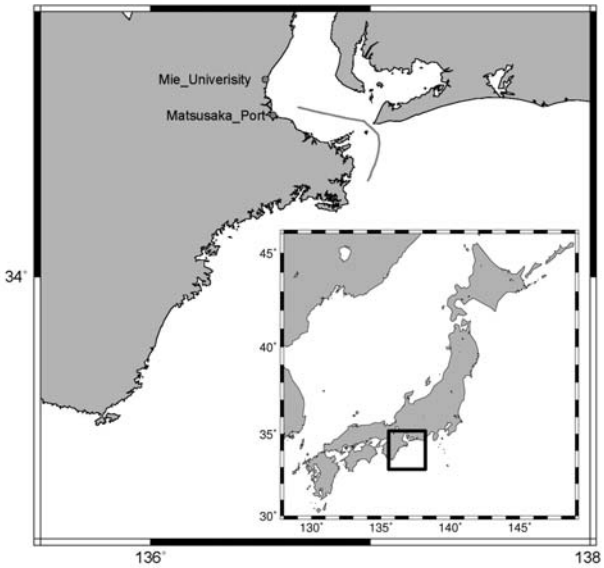


Fig. 3　Cruise track of "SEISUI MARU". Large map is expansional map which square black line in small one. "SEISUI MARU" was sailing toward the Matsusaka Port.

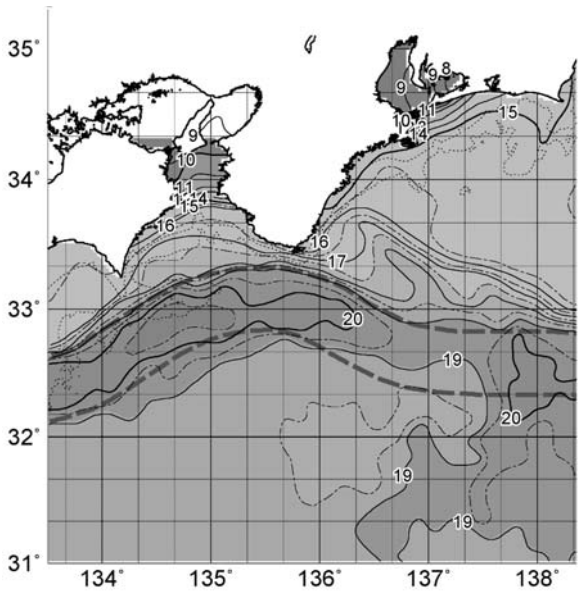


Fig. 4　The distribution map of sea surface temperature (SST) on March 10, 2011; the dashed line represents the limitation of Kuroshio, the solid line represents the SST; the contour intervals are 1°C . Source: Oceanic Conditions Report of Kanto and Tokai form Mie Prefecture Fisheries Research Institute.

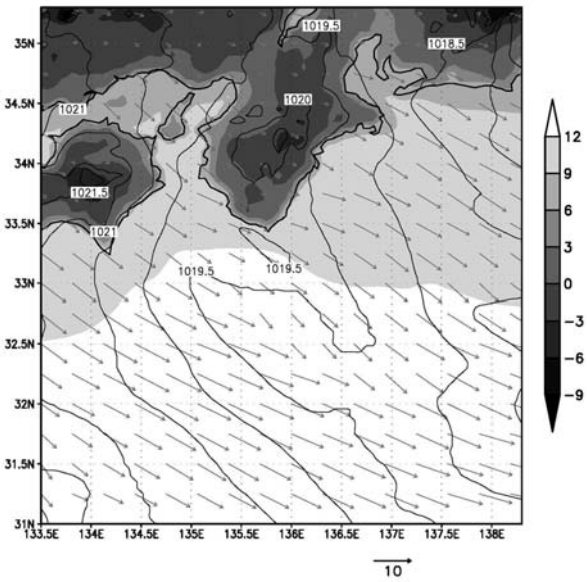


Fig. 5　Meso Scale Model (MSM) of surface air temperature (SAT) is represented. The shaded lines represents the SAT (°C), the vector represents the surface wind speed ($ms^{-1}$) and the solid line represents the sea level pressure (SLP) (hPa) (14:00JST March 10, 2011). Contour intervals for the SLP are 0.5 hPa.

## 4．解析方法

観測期間中の乱流顕熱フラックスについて，渦相関法とバルク法を用いて計算を行った．本研究でのバルク法の位置づけは，大まかな傾向は正しいとして渦相関法との比較に使用するものである．フラックスの平均化時間は10分とした．これは陸上の固定点で乱流フラックス観測を行う場合は，30～60分が適当であることと比べると短い時間である．しかし，観測点が移動することから，長い平均時間中に環境場が大きく変わる可能性があるため，短い10分を採用した．

### 渦相関法

渦相関法は，渦相関観測システムで観測された鉛直風と気温のそれぞれ偏差を元に計算を行う((1)式)．本研究では，10分平均の乱流顕熱フラックスとして計算した．平均流による輸送は無視する．

$$Q_H = \rho C_p \overline{w'T'} \approx \rho C_p \overline{(w-\overline{w})(T-\overline{T})} \qquad (1)$$

ここで，$\rho$：空気密度［$kgm^{-3}$］，$C_p$：定圧比熱［$JK^{-1}\cdot kg$］，$w'$：鉛直風（重力の逆方向を正）の変動成分［$ms^{-1}$］，$T'$：気温の変動成分［deg. C］である．

＜渦相関法でのデータ処理方法＞

基本的には，塚本ほか(2001)と同様の方法である．通常は船体動揺補正の他に，吹き上げ角補正が必要だが，船首方向や船速を一定に保って航行する条件下での研究例は存在するものの，それ以外の条件下での研究例が存在しないため，本研究の観測データに適用可能か十分検証する必要がある．したがって，本研究では，観測条件による制約の少ない船体動揺補正のみ行った．手順は①→②→③→④の順である．

① 生データのチェック

解析対象期間中の観測データに異常値がないかを確認した（Fig. 6, 7）．本研究で使用するデータには異常は見られなかった．また，超音波風速計がフォアマストに設置されていることから，相対風を前方から受けた場合，問題はないが，後方から受けた場合，船体の影響を受けた風を観測することになるため，これを欠損値として扱う（Fig. 8が超音波風速計・ジャイロ計の軸の取り方であり，$v$が正の値の時，前方から相対風を受けている）．本研究で使用するデータは，全て$v$は正の値であるので，欠損値処理は行わなかった．

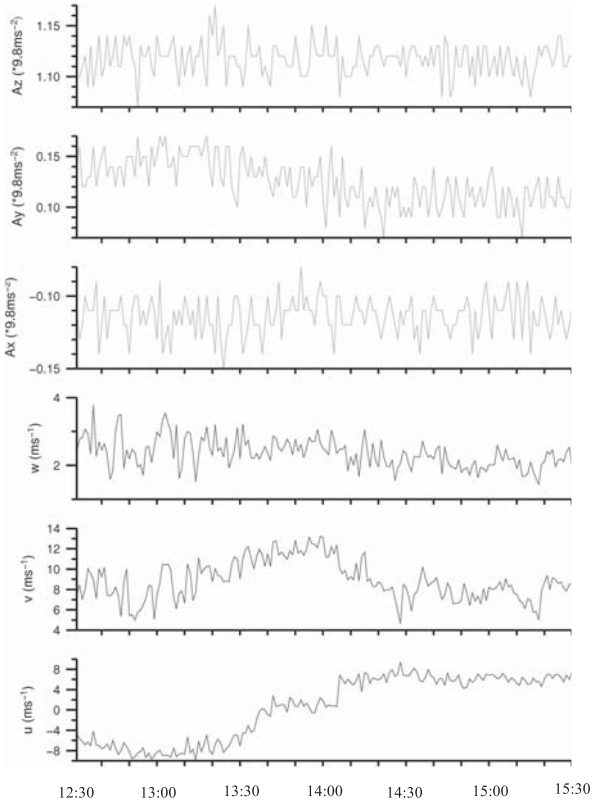


Fig. 6 The observation data of the Sonic anemometer-thermometer and the Gyro meter (1 minute average). *u*, *v*, and *w* represents the wind speed and *Ax*, *Ay*, and *Az* represents the acceleration. The horizontal axis interval is 1 minute. The convention sign is based on the right handed (*x*, *y*, *z*) coordinate system with *x* positive to port, *y* positive forward (to bow), *z* positive upward, *Ax* positive forward, *Ay* positive to port, and *Az* positive downward.

### ② 高周波ノイズの除去

20Hzの生データを見ると，自然の変動ではない高周波ノイズが多く含まれているので，10個ごとに平均処理し，2Hzのデータに変換した．

### ③ ジャイロ計のバイアス除去

勢水丸のジャイロ計には，バイアスが存在する．したがって，十分長い解析期間中の平均値である角速度（*x*, *y*, *z*）＝（0.0，0.0，0.0）と加速度（*x*, *y*, *z*）＝（0.0，0.0，1.0）を基準として，解析期間の各値の平均値をバイアスとして除去する．

### ④ 船体動揺補正

塚本ほか（2001）の方法と同様である．また，Fig. 9は補正前後の鉛直風の比較図である．

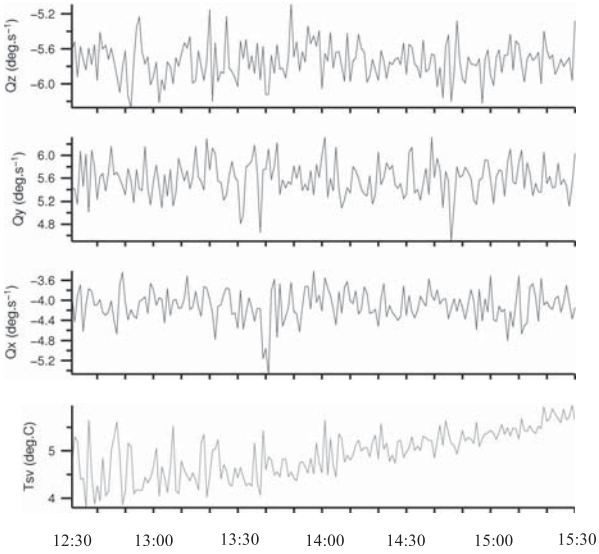


Fig. 7 The observation data of the Sonic anemometer-thermometer and the Gyro meter (1 minute average). *Tsv* represents the air temperature (Sound virtual temperature) and *Qx*, *Qy*, and *Qz* represents angular velocity. The horizontal axis interval is 1 minute. The convention sign is based on a right handed (*x*, *y*, *z*) coordinate system with *Qx* positive for the port side rolled up, *Qy* positive for the bow pitched down, and *Qz* positive for the ship's bow yawed clockwise from north.

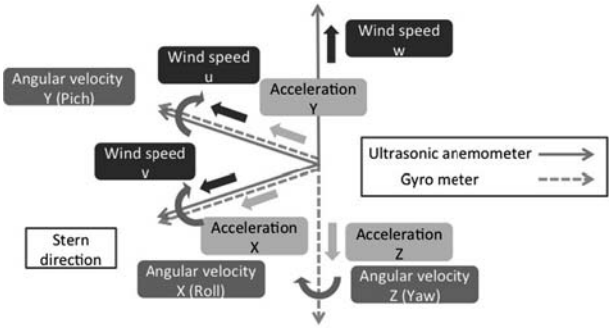


Fig. 8 Representation of the Sonic anemometer and the Gyro meter axis.

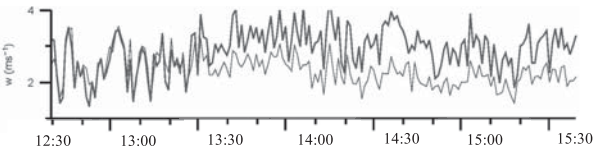


Fig. 9 The vertical wind velocity; observed (thin line) and corrected (thick line) indexes. (1 minute average). The horizontal axis interval is 1 minute.

以上の処理を行った渦相関法による乱流顕熱フラックスであるが，高周波の変動が大きく（Fig. 11），バルク法と比較するのが難しいため，3区間の移動平均をとり高周波成分を除去した．

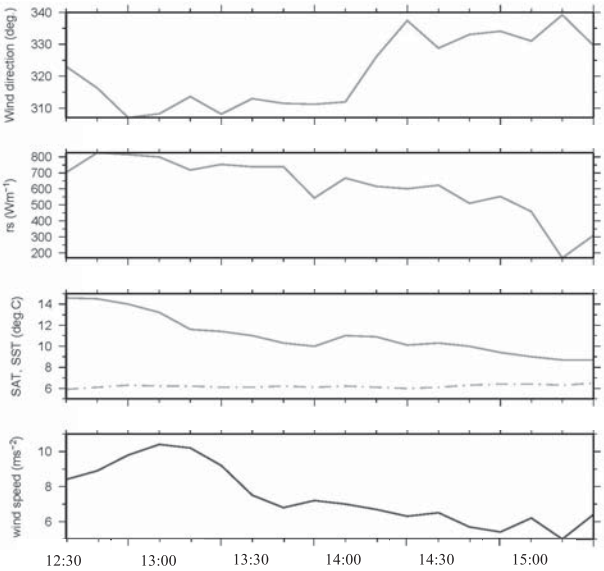


Fig. 10 The observation data of the meteorological equipments (10 minutes average). *rs* represents downward shortwave radiation, *SAT* represents the surface air temperature (dashed line), *SST* represents the sea surface temperature (solid line). The horizontal axis interval is 10 minute.

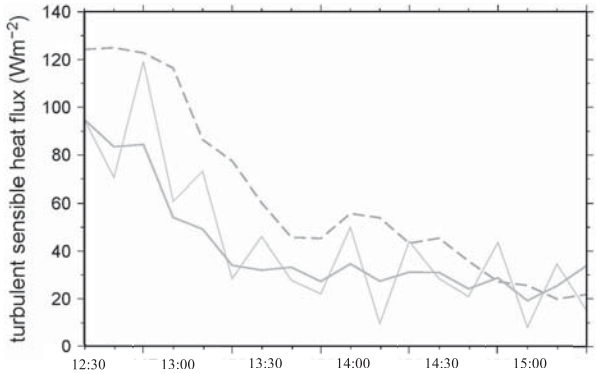


Fig. 11 Turbulent sensible heat flux calculated by Eddy Covariance (thin line), Eddy Covariance with moving average (thick line), and calculated by bulk method (dashed line). The horizontal axis interval is 10 minute.

**バルク法**

バルク法は，風速，海面水温と気温の差が主な変数である（(2)式）．バルクアルゴリズムは，COARE3.0（Fairall *et al*., 2003）を使用した．このアルゴリズムの検証結果はFairall *et al*.（2003）に詳しく書かれている．本研究では，COARE3.0に勢水丸の風速計，気温センサと海面水温センサの高度を入力した．また，本研究での解析対象期間は，Cool-skin/Warm-layer効果を計算するために必要な下向き長波放射量の測定値がないことから，この効果をoffにした．Cool-skin layer（Saunders, 1967）とは，海面表層１㎜以浅に常に存在する冷水層であり，Warm-layer（Fairall *et al*., 1996）は，日射量が多く風速が小さい場合，海面表層５ｍ以浅に形成される暖水層である．バルク法で計算する際に使用する海面水温は，大気と直接接する表層の水温データを使用するのが理想的だが，現実には連続的に計測可能な水深数ｍの船舶水温センサデータを使用することがほとんどである．したがって，この水温と表層との温度差を考慮するのがCool-skin/Warm-layer効果である．Cool-skin/Warm-layer効果をoffにすると，計算に使用する海面水温は表層水温として処理される．この結果を渦相関法と比較し，異なる値を示した場合，Cool-skin/Warm-layer効果によって差が生じる可能性が存在する．渦相関法と同様，10分平均の乱流顕熱フラックスとして計算した．

$$Q_H = \rho C_p C_H U (T_0 - T) \qquad (2)$$

ここで，$C_H$：バルク係数（顕熱），$U$：風速［m s$^{-1}$］，$T_0$：海面水温［deg. C］，$T$：気温［deg. C］である．

## ５．結　　果

船舶で観測された海面水温，気温，風速，下向き短波放射量について考察する（Fig. 10）．海面水温は，関東・東海海況速報で示されたものとほぼ同等の14. 5～8. 5℃という急激な水温勾配の存在を確認することができた．風速も伊勢湾内では弱風であることが分かる．同時に，風向にも変化が見られる．一方，気温はほとんど変化せず，Meso Scale Model（MSM）で示された伊勢湾内ほど低温という気温フロントは確認できなかった．観測時刻は12：30JST～15：30JSTであるため，下向き短波放射量は減少傾向である．

乱流顕熱フラックスについて，渦相関法とバルク法でそれぞれ計算した値の時系列を比較した（Fig. 11）．前半が高く，後半にかけて減少する傾向は，両者とも一致した．この期間の平均値は，41. 6 Wm$^{-2}$（渦相関法），62. 9 Wm$^{-2}$（バルク法）であり，バルク法は渦相関法との差が平均＋21. 3 Wm$^{-2}$，最大＋62. 9 Wm$^{-2}$となった．渦相関法とバルク法の差について詳しく見ると，渦相関法とバルク法の差が大きい箇所では，海面水温と気温の差が大きく，かつ風速が大きい．一方，渦相関法とバルク法の差は小さい箇所では，海面水温と気温の差が小さく，かつ風速が小さい．これらの特徴は，乱流顕熱フラックスの大小を決定する要素であるので，乱流顕熱フラックスの大きさと渦相関法とバルク法との差が正相関であることを意味する．

## 6．まとめ

外洋と内洋の境界である伊良湖水道付近の乱流顕熱フラックスを，渦相関法とバルク法で計算し比較を行った．本研究では，渦相関法の補正は船体動揺補正のみ，バルク法はCool-skin/Warm-layer効果をoffにしている．この条件は，船首方向や船速を一定に保つ，短波・長波放射量を計測するという観測条件の制約がないため，より多くの観測データを解析対象とすることが可能である．したがって，この条件下で渦相関法とバルク法を比較することは十分意味がある．ただし，本研究では2 Hzデータを元にフラックス計算を行ったが，これが実際の値より小さく見積もる原因となっていないか確認する必要はある．

結果，バルク法が渦相関法より大きな値が得られ，外洋ほどその傾向が大きいことが明らかになった．この差は①風速依存性がある，②海面水温と気温の差依存性があることを示している．これは，Kondo（1975）をはじめとする先行研究で指摘されているバルク係数の風速・大気安定度依存性と関連するものだと考えられる．したがって，本研究で示された風速・大気安定度依存性のある渦相関法とバルク法の差について，COARE3.0で考慮されたバルク係数の風速・大気安定度依存性のアルゴリズムでは不十分であり，これをさらに改良することで，その差を小さくできる可能性があることを示唆している．

ただし，この仮説の検証には，今回の観測データだけでは不十分である．渦相関法とバルク法の差が一般的な比較条件でも現れるものか，本研究の比較条件下のみで現れるものか検証する必要がある．したがって，渦相関観測システムが常設されている利点を生かし，今後の継続的な観測によって様々な条件下での伊良湖水道を通過する際の観測データを収集し，渦相関法とバルク法の差の風速・大気安定度依存性等を詳細に調べることで，この海域における乱流フラックス変動の外洋と内洋における違いを明らかにすることが可能である．

## 7．謝　辞

ソニック取締役の伊藤芳樹氏には，超音波風速計等の測定機器資料を提供して頂きました．岡山大学大学院自然科学研究科の塚本修教授，国立環境研究所の近藤文義博士には，船体動揺補正について多くの助言を頂きました．文部科学省科学研究費補助金　2205「新学術領域研究『気候系のhot spot』」の構成員の皆様には機会のある度，幅広い助言を頂くなど，大変お世話になりました．また，勢水丸乗員の皆様には，観測の成功のために多大なご協力を頂き感謝の念に堪えません．本論文の執筆にあたり，２人の査読者の方には，具体的かつ的確な助言を多く頂きました．最後に，船舶に常設される機会がほとんどない渦相関観測システムを勢水丸に常設することを計画された三重大学福山薫名誉教授に深く感謝いたします．福山名誉教授は，2012年10月に急逝されました．ご冥福をお祈りすると共に本論文を福山名誉教授に捧げます．

## 8．参考文献

Bunker, A. F., H. Charnock and R. A. Goldsmith (1982): A note on the heart balance of Mediterranean and Red Seas. J. Mar. Res., **40**, 73–84.

Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. S. Godfrey, G. A. Wick, J. B. Edson and G. S. Young (1996): Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature. J. Geophys. Res., **101**, 1295–1308.

Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev and J. B. Edson (2003): Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. J. Climate, **16**, 571–591.

Kondo, F. and O. Tsukamoto (2007): Air-sea CO2 flux by Eddy Covariance technique in the equatorial Indian Ocean. J. Oceanogr., **63**, 449–456.

Kondo, J. (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. Boundary-Layer Meteorology, **9**, 91–112.

前川陽一・中村　亨・仲里慧子・小池　隆・竹内淳一・永田豊　(2011)：　潮岬周辺海域の微細構造．　三重大学大学院生物資源学研究科紀要．**37**，45-55.

Mitsuta, Y. and T. Fujitani (1974): Direct measurement of turbulent fluxes on a cruising ship. Boundary-Layer Meteorology, **6**, 203–217.

Saunders, P. M. (1967): The temperature at the ocean-air interface. J. Atmos. Sci., **24**, 269–273.

関根義彦（1999）：伊勢湾内外の沿岸フロントの季節変動観測．沿岸海洋研究ノート，**37**，69-76.

Takahashi, S., F. Kondo, O. Tsukamoto, Y. Ito, S. Hirayama and H. Ishida (2005): On-board automated Eddy flux measurement system over open ocean. SOLA, **1**, 37–40.

Tanimoto, Y., H. Nakamura, T. Kagimoto and S. Yamane (2003): An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux. J. Geophys. Res., **108**. C103304, doi:10.1029/2002JC001750.

谷本陽一・野中正見（2007）：中高緯度の大気海洋相互

作用．天気，**54**，525-528.
塚本　修・文字信貴・伊藤芳樹（2001）：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，第199号，19-56.
塚本　修（2002）：海面フラックスの季節変動に関する観測的研究．京都大学防災研究所.
宇野木早苗（1975）：伊勢湾・三河湾の物理学．沿岸海洋研究ノート，**15**，143-154.

## Comparison between the air-sea turbulent flux according to the Eddy Covariance and the Bulk Method under the practical conditions

Yuta ANDO[*1], Yoshihiro TACHIBANA[*1,2], Masanori KONDA[*2,3], Makoto UCHIDA[*4], Yoichi MAEKAWA[*4], Toru NAKAMURA[*4], Keiko NAKAZATO[*4]

Abstract

The air-sea turbulent flux is an important factor for understanding the physical processes of the air-sea interaction. In this study, we first used the observation data of Eddy Covariance (EC) equipments installed on a training ship of Mie University "SEISUI MARU", the unique vessel in Japan having those equipments. The purpose of the study is to explain the cause of difference between the turbulent sensible heat flux (SHF) calculated by the EC and by the bulk method (COARE3.0) under the practical conditions. The results show that the variations of both of SHF calculated by the EC and by the bulk method are similar, however the conventional bulk method tends to generate a larger flux value compared to the EC. We consider that the cause of the difference could be the wind velocity or the sea surface temperature (SST) —the surface air temperature (SAT). Therefore, we could suggest that we can decrease the difference between SHF calculated by EC and by the bulk method in improving the bulk coefficient which depend on the wind velocity or SST-SAT.

Key words: air-sea interaction, sonic anemometer, direct observation, atmospheric boundary layer

Received 24 June 2013　　Accepted 5 July 2013

[*1] Graduate school of Bioresources, Mie University
[*2] Research Institute for Global Change, Japan Agency Marine-Earth Science and Technology
[*3] Graduate school of Science, Kyoto University
[*4] Training ship SEISUI MARU, Graduate school of Bioresources, Mie University