

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420528

研究課題名(和文) 大気-海洋間のガス交換速度のモデル化と海面二酸化炭素収支に及ぼす定量的インパクト

研究課題名(英文) MODELING OF AIR-SEA GAS TRANSFER VELOCITY AND ITS QUANTITATIVE IMPACT ON EVALUATION OF CARBON DIOXIDE EXCHANGE ACROSS SEA SURFACE

研究代表者

杉原 裕司 (SUGIHARA, YUJI)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70243970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、数値シミュレーション、室内実験、フィールド観測を通して、大気-海洋間におけるガス交換速度のモデル化について検討した。特に、風波砕波パラメータを組み込んだ二酸化炭素交換速度の波浪依存型ハイブリッドモデルに着目し、気象モデルWRFと波浪推算モデルSWANを用いた大気-波浪結合計算による交換速度のマッピングを行って、波浪依存型のガス交換速度モデルが海面二酸化炭素収支に定量的なインパクトを与えることを示した。また、フィールド観測データに基づいてガス交換速度モデルのモデル表現とモデル定数値の修正を行った。

研究成果の概要(英文)：Modeling of the air-sea gas transfer velocity has been investigated by means of numerical simulations, laboratory experiments and field observations. An atmosphere-wave coupled numerical simulation using meteorological and wave models, i.e., WRF and SWAN has been carried out to evaluate the validity of a wave-dependent hybrid model for the gas transfer velocity of carbon dioxide including breaking wind-wave parameters. The results of the mapping of the gas transfer velocity show that such a wave-dependent hybrid model gives a quantitative impact on the evaluation of carbon dioxide exchange across the sea surface. Also, the model expression and the model constants of the hybrid model have been modified on the basis of field observation data.

研究分野：地球環境水理学

キーワード：ガス交換 風波 砕波 乱流 二酸化炭素 地球温暖化 地球環境水理学 界面水理学

1. 研究開始当初の背景

大気 - 海洋間の CO₂ フラックス F は、次式のように、ガス交換速度 k_L 、CO₂ の海水への溶解度 S 、海洋表層と大気中の CO₂ 分圧差 $\Delta p\text{CO}_2$ の積で表される。

$$F = k_L S \Delta p\text{CO}_2 \quad (1)$$

ガス交換速度 k_L については、これまで多くの経験式が提案されているが、そのほとんどが単なる海上高度 10m の風速との相関式である。しかし、同一の海上風速においても吹送距離や吹送時間が異なれば風波乱流境界層の状態が大きく異なるため、ガス交換速度は海上風速のみで定式化できないはずである。

近年、ガス交換速度 k_L を、(非砕波)乱流による寄与 k_t と砕波による寄与 k_b に分離して評価するハイブリッドモデルが注目されている (Woolf 2005, Soloviev et al. 2007)。

$$k_L = k_t + k_b \quad (2)$$

また、我々は、先行研究 (宮崎ら 2012) において、Woolf と Soloviev et al. のモデル化の知見に基づいて次式のモデルを定式化した。

$$k_t = b \left[\frac{u_{*w}^4}{\kappa c_1 v_w (1 + Ke_w / Ke_{wcr})^2} + \frac{\alpha (Ke_w / Ke_{wcr})^{3/2} u_{*w}^3}{\kappa c_b (1 + Ke_w / Ke_{wcr})^{3/2} H_s} \right] v_w Sc^{-2} \quad (3)$$

ここで、 $Ke_w = u_{*w}^3 / g v_w$ は風波クーリガン数、 Ke_{wcr} は砕波発生の臨界風波クーリガン数、 Sc はシュミット数、 $A_w = g / (\omega_{pw} u_{*a})$ は波齢、 $R_H = u_{*w} H_s / v_w$ は風波レイノルズ数である (u_{*a} : 気流側摩擦速度、 u_{*w} : 水側摩擦速度、 H_s : 有義波高、 ω_{pw} : ピーク波角周波数、 v_w : 水の動粘性係数、 g : 重力加速度)。また、式中の $b, c, c_1, c_b, \alpha, \beta, \gamma$ はモデル定数である。上記のガス交換速度モデルは、風波砕波の効果を取り込んでいるという意味で、従来の経験式よりも物理的に妥当なモデルである。ただし、含まれるモデル定数の値を従来の経験式との比較から暫定的に決めており、定式化やモデル定数値の妥当性が十分吟味されていない。従って、室内実験やフィールド観測、さらに数値シミュレーションによる検討を通して、ガス交換速度モデルの有効性を検討する必要がある。さらに、ガス交換速度モデルが海面 CO₂ 収支にどの程度の定量的な差異をもたらすかを検討することはモデルの有用性を明らかにする上で重要である。

2. 研究の目的

海洋は CO₂ の巨大な吸収源であり、地球温暖化の予測を正確に行うためには大気-海洋間の CO₂ 交換量を正確に見積もる必要がある。

従来用いられている大気 - 海洋間における CO₂ ガス交換速度モデルの多くは海上風速との単なる相関式であり、風波砕波機構を適切に反映したものではない。また、近年、大気-海洋-波浪結合数値計算が技術的に可能となってきた。従って、次世代型の温暖化予測に実装するモデルとして、波浪推算と結合したガス交換速度モデルを開発する必要がある。本研究の目的は、数値シミュレーション、室内実験、フィールド観測を通して、風波砕波パラメータを組み込んだ CO₂ 交換速度の波浪依存モデル (ハイブリッドモデル) について検討することである。大気-波浪結合計算によるガス交換速度のマッピングを行い、このような波浪依存型のガス交換速度モデルが海面 CO₂ 収支に及ぼす定量的なインパクトについて調べる。また、フィールド観測データを CO₂ 交換速度のハイブリッドモデルに適合させて、モデル表現とモデル定数値の修正についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーションによるハイブリッドモデルの乱流項の評価

気液界面乱流の重要な要素を備えた最も単純な流れ系の一つが開水路乱流場である。そこで、物理モデルを用いない直接数値シミュレーション (DNS) によって、開水路乱流場のガス交換を支配するメカニズムを明らかにし、ハイブリッドモデルの乱流項 k_t に関する検討を試みた。本研究では、風応力、水面動揺、側壁、温度成層がガス交換機構に及ぼす影響について検討したが、本報告では、風応力と水面変動の影響について記述する。

底面せん断応力に対する風応力の相対的な強度の変化がガス交換に及ぼす効果について検討した。本計算では、 $Re_\tau = 150$ とし、計算機環境の制約からシュミット数を $Sc = 1$ とする。シュミット数は、二酸化炭素の値に比べて非常に小さいが、乱流輸送現象の基本的メカニズムは同様であると考えている。本計算では、風応力として気液界面にせん断応力を付加的に与える。底面摩擦速度 u_{*b} に対する風応力摩擦速度 u_{*s} の比 $Rs = u_{*s} / u_{*b}$ を定義した。本計算では Rs を 0, 0.1, 0.5 に変化させて解析を行った。また、本研究では、微小水面変位理論に基づいて、水面変位を考慮した DNS を実行し、水面変動がガス交換機構にどのような影響を及ぼすのかについても検討した。本計算では $Re_\tau = 150$, $Sc = 1$, $Fr_\tau = 0.02$, 0.04 , $Fr_m = 0.28$, 0.55 とした。

(2) 室内実験による溶存 CO₂ 濃度計測とガス交換速度の評価

透過膜式気液平衡器を用いた溶存 CO₂ 濃度の精密な計測とガス交換速度の評価に関する実験研究を行った。本研究では、疎水性多孔質膜チューブ (孔径約 1 μ m, 空隙率約 60%) をコイル状に巻いた透過膜式の気液平衡器を製作した。室内実験には、乱流強度を機械的に

制御できる振動格子乱流水槽を用いた。気相側CO₂分率と液相側溶存CO₂分率の測定からガス交換速度 k_L を算出した。フィールド観測の溶存CO₂濃度の測定では、同じ透過膜式の気液平衡器を用いている。本実験では、水面状態を、水面変動なし、水面動揺、界面崩壊の3種類に分類してデータを整理・検討した。(3)大気-波浪結合計算によるガス交換速度のマッピング

本研究では、領域気象モデル WRF と波浪推算モデル SWAN を用いて大気-波浪結合計算を実行した。本研究で使用した WRF は V3.3.1, SWAN は Ver. 40.91 である。図 1 に、本研究で行った数値シミュレーションの概念図を示す。海上風型経験式に関しては、WRF によって得られた U_{10} の値を代入してガス交換速度を算出する。また、波浪依存型ハイブリッドモデルについては、 U_{10} に加えて SWAN から得られた有義波高やピーク波周期などの波浪状態量を代入してガス交換速度を算定する。大気-波浪結合計算によるガス交換速度モデルの有効性に関する検討では、先行観測でデータが得られている、2006 年 3 月 21 日 - 5 月 5 日を計算対象とした。WRF の計算領域は、広領域と狭領域を組み合わせた 2 重ネストであり、2 way nesting を採用した。WRF の海上風速 U_{10} の 10 分出力値を SWAN に入力することで、風波波浪場を発生させた。境界条件には、JONSWAP スペクトルを適用し、静止状態を初期条件とした。なお、潮汐による水面変動は計算に取り込んでいないため、本計算では潮流は発生しない。

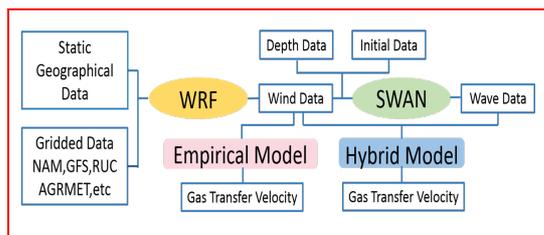


図 1 WRF-SWAN 結合計算の概念図

(4) フィールド観測による CO₂ フラックス・ガス交換速度の評価

本研究では、海洋観測塔において、海上風、CO₂ フラックス、CO₂ 分圧差、波高・周期等に関するフィールド観測を行い、ガス交換速度モデルの有用性を検討した。フィールド観測は、和歌山県田辺湾沖合 2 km に位置する田辺中島高潮観測塔（京都大学防災研究所所有）において行われた。観測では、超音波風速温度計（SAT550）、赤外線 CO₂ ガス分析計（NDIR：大気側 LI-6252、海洋側 LI-820）、多孔質膜チューブによる透過膜式気液平衡器、超音波波高計等の観測機器を使用した。観測は、大気側については 2016 年 3 月 12 日 11:30 から 16 日 9:40 にかけて自動観測を実施した。また、海洋側の溶存 CO₂ 濃度の観測については 3 月 12 日 9:00 から同日 11:30 まで観測船からの係留による有人観測を行った。

疎水性多孔質膜チューブをコイル状に巻いた透過膜式気液平衡器を水深 3m 付近に係留した。平均海面高度 22m に設置された超音波風速温度計から 1 時間平均風速値 U を算定し、その風速値および風速で定義された波齢から、海面抵抗係数 C_D を算定して気流側摩擦速度 u_{*a} を評価した。また、CO₂ フラックスの算定にはプロファイル法を適用した。平均海面高さ約 3m, 6.5m, 18.5m の高度から空気のサンプリングを行い、PC 制御によるフローコントローラを用いて 30 分のローテーションで 3 高度の空気のサンプリングと CO₂ 分率の測定を繰り返した。各高度の平均 CO₂ 濃度を時間内挿することで、同時刻における濃度値を評価した。フラックスの算定には、6.5m と 3m の平均値（海上高度 4.75m の値と見なす）と 18.5m の値に対数則を適合することによって大気側 CO₂ フラックスを評価した。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーションによるハイブリッドモデルの乱流項の評価

風応力が作用した開水路乱流場では、界面発散と界面ガスフラックスの空間構造は風応力の作用方向にストレッチされ、両者の一致度が低下する。風応力が作用する気液界面では、風応力に起因する力学機構がガス交換を促進させることが示唆された。ガス交換速度の界面発散モデルと本計算結果を比較した。風応力が作用しない場合、局所ガス交換速度は局所的な界面発散の平方根に比例して大きくなるが、風応力が大きくなるとモデル解との乖離が大きくなることを示した。これは、風応力が作用するとガス交換機構が単純な界面発散型から移行することを示しており、ハイブリッドモデルの乱流項に修正を加える必要があることを示唆する。

水面変動が存在する開水路乱流場では、底面で発生する管状渦が崩壊し、水表面に到達することで水面変動をもたらすことを確認した。水面上昇域では界面ガスフラックスが定性的に増大することがわかった。水面変動がある場合でもガス交換と界面発散運動は密接に結び付いていることが示された。界面発散が小さい領域では、フルード数依存性が見られず水面変動がない場合と同様の挙動を示すが、界面発散が大きい領域ではフルード数の影響が相対的に大きくなり、水面変動がガス交換速度を増大させることを示した。

(2) 室内実験による溶存 CO₂ 濃度計測とガス交換速度の評価

図 2 に無次元化されたガス交換速度 $k_L Sc^{1/2} / U_{HT}$ と Re_L の関係を示す。ここで、 Re_L は乱流速度 U_{HT} で定義されたレイノルズ数である。図中のプロットは (a)水面変動なし、(b)水面動揺、(c)界面崩壊の 3 つの水面状態の実験値である。実線は -1/2 乗のべき乗則を、破線は -1/4 乗のべき乗則を表しており、それぞれ積分スケールに基づいた Large eddy model とエネルギー散逸スケールに基づいている。

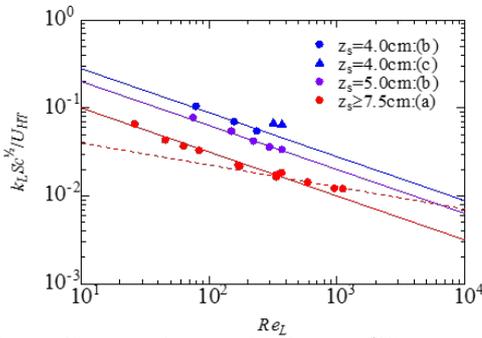


図 2 ガス交換速度のレイノルズ数依存性に関する実験結果

Small eddy model に相当する．これより，(a) の場合は $Re_L=3.9 \times 10^2$ 付近を境に $-1/2$ 乗から $-1/4$ 乗のべき乗則に遷移することがわかる．このことは，レイノルズ数に応じてガス交換を支配する乱流スケールが異なることを意味しており，ハイブリッドモデルの乱流項の基盤となる Small eddy model が高レイノルズ数領域で有効であることを示している．

(3) 大気-波浪結合計算によるガス交換速度のマッピング

図 3 に SWAN より計算された有義波高 H_s ，ピーク波周期 T_p ，ピーク波向き D_p に関する計算値と観測値の比較を示す． H_s の変動特性やその大きさは期間を通して概ね一致している．ただし， T_p は計算値の方が若干小さな値を示している．これは，比較的狭領域である domain2 のみで計算を行っているため，波の発達が抑制されているからである．ピーク波向き D_p については，計算値は観測値の変動特性を大まかに再現できているようである．ただし， 180° から 270° の間では，両者の再現性が低下している．これは，この方位（南西方向）が，太平洋に海が開けた方向に対応しており，主として外海からのうねりが伝播するためである．

図 4 に WRF と SWAN の結果から計算されたガス交換速度の値を，対象海域にマッピングしたコンター図を示す．なお，比較のために代表的な海上風型経験式の結果と，有義波高とピーク波周期の結果も併せて示す（2006 年 3 月 24 日 1:00 の結果）．海上風型経験式は風速のみに依存するモデルであるため，当然ながら各経験式の交換速度は，おおよそ類似の空間変動パターンを示す．ただし，交換速度の推定値については，各経験式の比例係数やべき指数の違いから，定量的にはかなりの差異が生じることが明らかである．例えば，Liss and Merlivat の経験式から算出された値と Jacobs et al. のものとを比較すると，かなりの差が見られる．Woolf のハイブリッドモデルは海上風速型経験式に比較的近いようにも見える．これは同モデルには有義波高は考慮されているが，ピーク波周期を含んでいないため，ハイブリッドモデルでありながら，比較的風速との連動性が高いモデルになっているためと思われる．一方，宮崎らのモデルにはピーク波周期が取り入れ

られており，そのため波齢の効果をより強く受けるものと考えられる．宮崎らのモデルでは，明らかに波浪場，特にピーク波周期の空間構造を反映した分布特性を示している．

図 5 は，海上風型経験式とハイブリッドモデルのガス交換速度に，観測値の大気-海洋間 CO_2 分圧差と溶解度を乗じることで， CO_2 フラックスの時系列を算定したものである．定点でのフラックスの比較においては，海上風型経験式と波浪依存型モデルの時間変動パターンは定性的には類似しているように見える．しかし，定量的には大きく異なっており，また図 4 で見たように，海上風速では吹送距離によるフラックスの空間分布が表現できないので，この点からも波浪依存型モデルは広域の CO_2 収支に大きなインパクトを与えることがわかる．交換速度の空間分布のマッピングは，炭素循環の広域シミュレーションを行う上で有用であり，WRF-SWAN の結合シミュレーションは，次世代の温暖化予測のサブモデルとして重要な数値解析手法になるとと思われる．

(4) フィールド観測による CO_2 フラックス・ガス交換速度の評価

本研究の観測データと宮崎ら(2012)の波浪依存型ハイブリッドモデルの比較・検討を行う．ここでは，宮崎らのモデルが観測データの挙動を再現できるように，モデル表現とモデル定数値の修正を試みる．なお，観測データの品質が低いと思われたスタート時と後半部分のデータを解析対象から除外した．溶存 CO_2 濃度の計測は観測船での透過膜式気液平衡器の係留観測によるため，全期間において観測データが存在しない．海洋側の CO_2 濃度は急激に時間変化するとは考えられないため，有人観測において得られた約 2 時間半の時間平均値が解析期間（2.5 日程度）の間持続していたものと仮定して解析を行った．

図 6 に平均海上高度 22m における平均風速 U と海面抵抗係数 C_D の時系列を示す．観測期間は比較的短いですが，その間に 15m/s 近い高風速が形成されていることがわかる．図 7 に観測において計測された有義波高と有義波周期の時系列を示す．ここで，有義波高は概ね風速と連動しているが，有義波周期は観測期間前半では比較的大きな値を示している．

図 8 にフィールド観測により得られた CO_2 フラックスの観測結果と宮崎らのモデルに修正を施した修正モデルの k_L に，観測で得られた大気-海洋間の CO_2 分圧差を掛けることで評価されたモデル値が比較されている．元のモデルではあまり観測値に適合していなかった．そこで，本研究では，検討の余地があると思われる下記の点についてモデルの修正を行った．宮崎ら(2012)は，式(3)のモデル定数 b を先行研究にならって 0.2 と与えている．しかし，これは水表面の変動が小さい場合を想定した値である．海面が複雑に変動する場合には，海面の表面積が急激に増大するであろう．そこで，砕波臨界付近 ($Ke_w = Ke_{wcr}$)

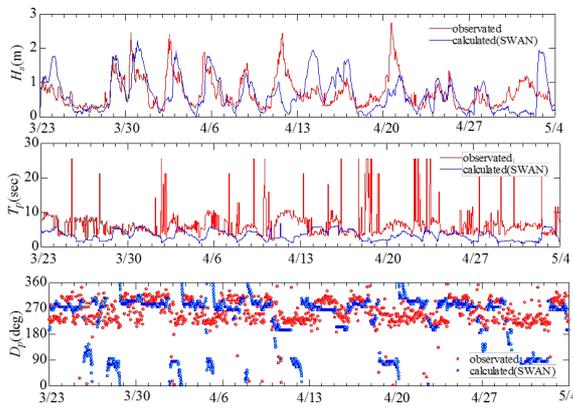


図3 SWANによる計算値と観測値の比較

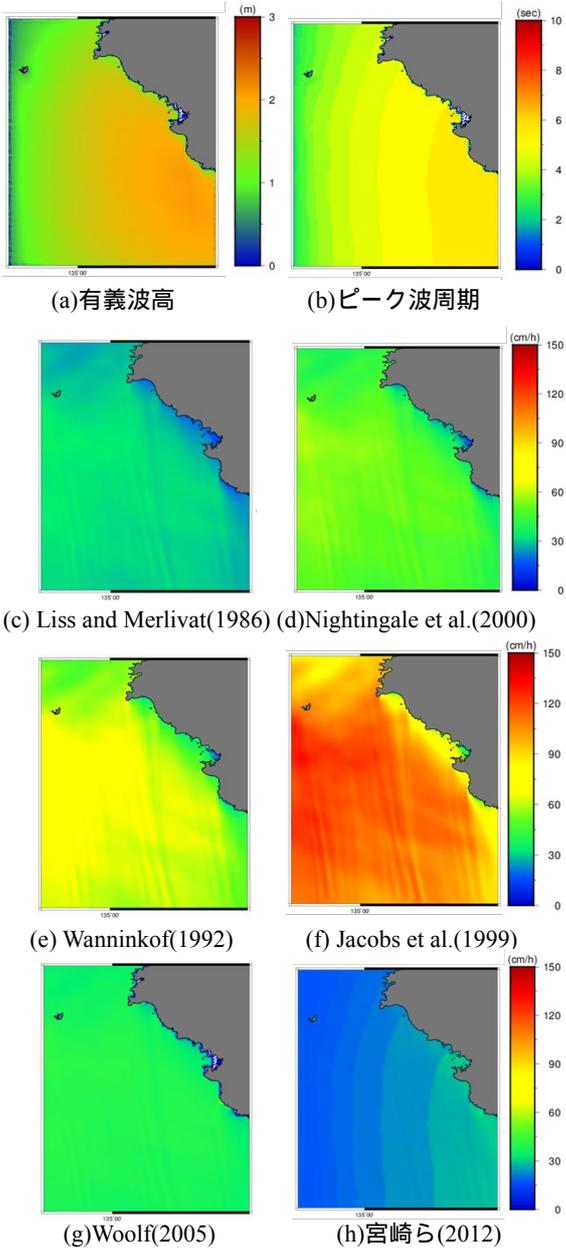


図4 ガス交換速度のマッピング

までは0.1~0.4程度に変化し、その後急激に増加するものとして次のモデル化を考えた。

$$b = 0.1(1 + Ke_w / Ke_{wcr})^2 \quad (7)$$

また、砕波項 k_b に関しては、かなり細かな係

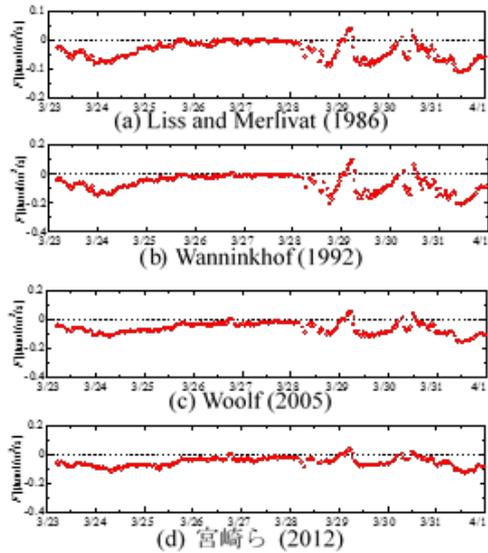


図5 CO₂フラックスの計算値の時系列

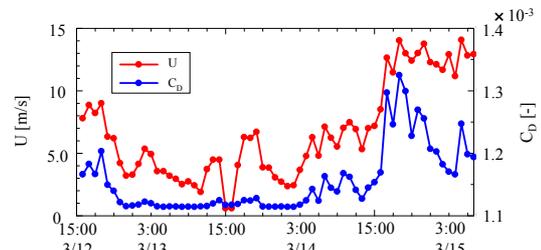


図6 平均風速と海面抵抗係数の時系列

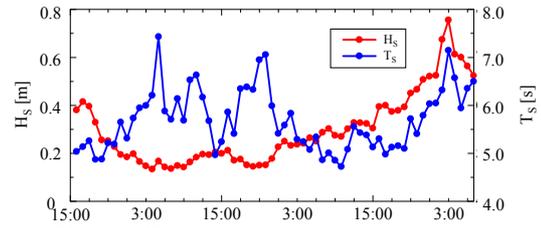


図7 有義波高と有義波周期の時系列

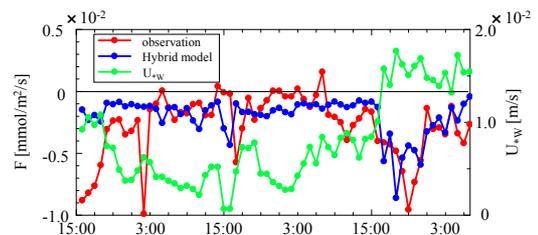


図8 観測結果と修正モデルの比較

数設定となっていたが、ここではこれらの数値をもう少しきれいな値に修正する。

$$c = 7.0 \times 10^{-8} (5.56 \times 10^{-8}), \beta = 2.8 (2.79) \quad (8)$$

括弧内の数値は元のモデル定数値を示す。修正したモデルは観測結果の挙動を比較的良く再現しているように見える。

本研究では、気液界面の変動特性を風波クーリーガン数の関数として表現する修正を施した。その結果、風速と波浪の両方の影響をより適切に取り込んだモデルに修正できたと考えている。WRFとSWANの結合計算に基づくガス交換速度の広域マッピングは有用な手法であり、ガス交換速度における波浪依存性の効果は海面CO₂収支の評価に有意な

インパクトを与えると結論づけられる。

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7件)

寺岡諒祐, 杉原裕司, 松永信博, 水面変動を考慮した開水路乱流の二次流構造と気液界面のガス交換機構に関する数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, 72(4), I_517-I_522, 2016
Ryosuke Teraoka, Yuji Sugihara, Takuya Nakagawa, Nobuhiro Matsunaga, Direct numerical simulations of secondary flow and air-water gas transfer in open-channel turbulence, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A2 (Applied Mechanics), 査読有, 71(2), I_765-I_772, 2015

http://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_765

寺岡諒祐, 杉原裕司, 松永信博, 水面変動が気液界面のガス交換機構に及ぼす影響に関する乱流数値シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 71(2), I_31-I_36, 2015

http://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_31

寺岡諒祐, 杉原裕司, 中川拓弥, 松永信博, 温度成層を伴う開水路乱流場における水表面の乱れ特性に関する数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, 71(4), I_583-I_588, 2015

http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_583

寺岡諒祐, 杉原裕司, 中川大輔, Koji SHIONO, 風応力が作用する気液界面におけるガス交換機構の直接数値シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 70(2), I_46-I_50, 2014

http://doi.org/10.2208/kaigan.70.I_46

杉原裕司, 森塚陽, 田中雅一, 宮崎大輔, 平石哲也, 馬場康之, 久保輝広, 大気海洋界面の運動量・CO₂輸送の変動要因, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, 70(4), I_1183-I_1188, 2014

http://doi.org/10.2208/jscejhe.70.I_1183

杉原裕司, 中川大輔, 寺岡諒祐, Koji SHIONO, 開水路乱流場の動力学を考慮した気液界面における高シュミット数ガス交換の解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, 70(4), I_865-I_870, 2014
http://doi.org/10.2208/jscejhe.70.I_865

[学会発表](計11件)

中川拓弥, 杉原裕司, 寺岡諒祐, 李洪源, 松永信博, 水面変動と温度成層を考慮した開水路乱流場の直接数値シミュレーション, 第19回応用力学シンポジウム, 2016年5月22日, 北海道大学(札幌市)

杉原裕司, 有地大貴, 中川拓弥, Eljamal Osama, 李洪源, 透過膜式気液平衡器による溶存CO₂濃度計測に基づくガス交換速度の評価, 第19回応用力学シンポジウム, 2016年5月21日, 北海道大学(札幌市)

寺岡諒祐, 杉原裕司, 松永信博, 水面変動を考慮した開水路乱流の二次流構造と気液界面のガス交換機構に関する数値解析, 第60回水工学講演会, 2016年3月15日, 東北工業大学(仙台市)
寺岡諒祐, 杉原裕司, 松永信博, 水面変動が気液界面のガス交換機構に及ぼす影響に関する乱流数値シミュレーション, 第62回海岸工学講演会, 2015年11月11日, タイム24ビル(東京都江東区)

寺岡諒祐, 杉原裕司, 中川拓弥, 松永信博, 開水路乱流場における二次流と気液界面のガス交換に関する直接数値シミュレーション, 第18回応用力学シンポジウム, 2015年5月17日, 金沢大学(金沢市)

寺岡諒祐, 杉原裕司, 中川拓弥, 松永信博, 温度成層を伴う開水路乱流場における水表面の乱れ特性に関する数値解析, 第59回水工学講演会, 2015年3月11日, 早稲田大学(東京都新宿区)

寺岡諒祐, 杉原裕司, 中川大輔, Koji SHIONO, 風応力が作用する気液界面におけるガス交換機構の直接数値シミュレーション, 第61回海岸工学講演会, 2014年11月12日, ウィンクあいち(名古屋市)

杉原裕司, 寺岡諒祐, 中川大輔, Shiono Koji, 開水路乱流場の気液界面における表面更新渦の特性, 第17回応用力学シンポジウム, 2014年5月11日, 琉球大学(沖縄県中頭郡)

杉原裕司, 津守博通, 鶴丸純司, 一様成層せん断乱流場における $k-\epsilon$ モデルのキャリブレーション, 第17回応用力学シンポジウム, 2014年5月11日, 琉球大学(沖縄県中頭郡)

杉原裕司, 中川大輔, 寺岡諒祐, Koji SHIONO, 開水路乱流場の動力学を考慮した気液界面における高シュミット数ガス効果の解析, 第58回水工学講演会, 2014年3月6日, 神戸大学(神戸市)

杉原裕司, 森塚陽, 田中雅一, 宮崎大輔, 平石哲也, 馬場康之, 久保輝広, 大気海洋界面の運動量・CO₂輸送の変動要因, 第58回水工学講演会, 2014年3月5日, 神戸大学(神戸市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

杉原 裕司 (SUGIHARA YUJI)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号: 70243970