

うねりの存在が海面 CO₂交換速度に及ぼす影響

Influence of the Presence of Swell on Air-Sea CO₂ Transfer Velocity

志賀 慧¹・桜木幸司²・杉原裕司³・津守博通⁴・芹澤重厚⁵・吉岡 洋⁶

Satoru SHIGA, Koji SAKURAGI, Yuji SUGIHARA, Hiromichi TSUMORI
Shigeatsu SERIZAWA and Hiroshi YOSHIOKA

Field measurements at a sea observation tower were made to investigate the dependence of air-sea CO₂ transfer velocity on swell conditions. Based on directional wave spectra, we classified swell conditions into three groups, i.e., Pure windsea, Swell-dominated sea and Cross swell. The present data show that the transfer velocity for Pure windsea increases monotonously with the wind speed, while the presence of swell contaminates the wind-speed dependence of the transfer velocity. Also, the transfer velocity for Cross swell seems to take larger values than the other conditions. Moreover, we examined how the transfer velocity nondimensionalized by the friction velocity depends on a nondimensional wave-energy dissipation rate. In such relations, there is no remarkable difference in three types of swell conditions. This means that the energy dissipation rate may be effective for the parameterization of the transfer velocity.

1. はじめに

地球温暖化の原因となる温室効果気体の中で最も大量に存在しているのが CO₂である。海洋は CO₂を大量に吸収・貯蔵すると考えられており、大気-海洋間における CO₂フラックスを精度良く推定することは、地球温暖化の予測を行う上で重要な課題である。海洋波や海面近傍の乱流境界層の発達状況は、吹送距離やうねりの存在によって大きく異なるため、交換速度もそれらに依存して変化することが考えられる。従来の海面境界過程の研究において、うねりの存在や風速変動などの風と風波の局所平衡性を破る因子が海面抵抗係数の分散を大きくする(鳥羽ら, 2001)ことや、風波と同じ方向にうねりが伝播する場合に海面抵抗係数が減少する(Drennanら, 1999)ことが指摘されている。このように、うねりの存在が海面抵抗係数に及ぼす影響について議論した研究はあるが、うねりが CO₂交換速度に及ぼす影響についてはこれまでほとんど検討されていないのが現状である。

本研究の目的は、海洋観測塔での現地観測を通して、様々な気象・海象条件下における CO₂交換速度を取得

し、うねりの存在が CO₂交換速度に及ぼす影響を明らかにすることである。また、砕波に関わる風波特性量である波浪のエネルギー散逸率と交換速度の関係についても検討する。

2. Webb 補正に基づく CO₂フラックスと交換速度の評価

海洋表面での CO₂の鉛直フラックス F ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) は、接水大気境界層内で測定された鉛直風速 w と CO₂ 濃度 C から、次式を用いて求めることができる。

$$F = \overline{wC} = \overline{w'C'} + \overline{w}\overline{C} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 w' (m/s) は鉛直風速変動、 C' ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$) は大気中の CO₂濃度変動、 $\overline{}$ は時間平均を示す。式 (1) において乱流拡散の効果を表す右辺第 1 項が卓越するとみなし、移流の効果を表す第 2 項を無視する場合が多い。しかし、海上では空気の密度変動が大きいため、大気の鉛直質量フラックスがゼロとなる場合でも一般に $\overline{w} = 0$ とはならない。Webb ら (1980) は、潜熱および顕熱フラックスからこの項を評価し、次式を提案した。

$$F = \overline{w'C'} + \mu \frac{\overline{C}}{\rho_a} \overline{w'\rho_v} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{C}}{T} \overline{w'T'} \dots\dots (2)$$

ここで、 $\mu = m_a / m_v$ 、 $\sigma = \overline{\rho_v} / \overline{\rho_a}$ であり、 m_a 、 m_v (kg/mol) および ρ_a 、 ρ_v (kg/m^3) は、それぞれ乾燥空気および水蒸気の分子量と密度であり、 T は絶対温度である。式 (2) の第 2 項は潜熱補正項を、第 3 項は顕熱補正項を示しており、これらを合わせて Webb 補正と呼ぶ。本研究では、式 (2) の相関量を渦相関法に基づいて算定し、CO₂フラックスを評価した。また、大気一

- | | | |
|---|------|-----------------------------------|
| 1 | 修(工) | (株)トヨタ自動車 |
| 2 | | 九州大学大学院総合理工学府 大気海洋環境システム学専攻 |
| 3 | 正会員 | 博(工) 九州大学助教授 大学院総合理工学研究院流体環境理工学部門 |
| 4 | 正会員 | 博(工) (独)国立環境研究所 地球環境研究センター |
| 5 | | 京都大学助手 防災研究所流域災害研究センター |
| 6 | 正会員 | 理博 愛知県立大学教授 情報科学部地域情報科学科 |

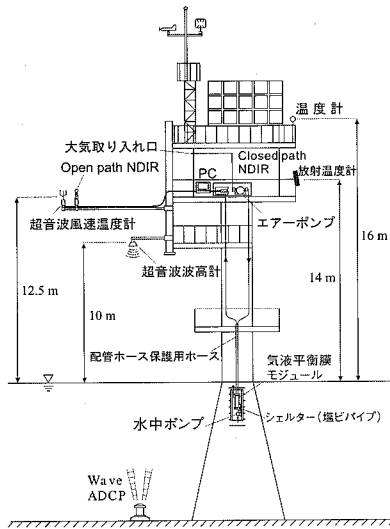


図-1 観測塔および計測システム

海洋間の CO₂ フラックスは次のようなバルク式によって表される。

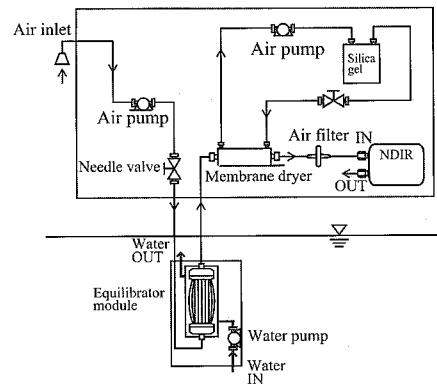
$$F = k_L \cdot S \Delta p \text{CO}_2 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 k_L (m/s) は CO₂ の気体交換速度、 S (mol/m³/atm) は CO₂ の海水への溶解度 (Weiss, 1974)、 $\Delta p \text{CO}_2$ (μatm) は大気—海洋間の CO₂ 分圧差である。本研究では、得られた CO₂ フラックスと CO₂ 分圧差から、式 (3) を用いて交換速度を算定した。

3. 現地観測の概要

現地観測は、和歌山県西牟婁郡白浜町の田辺湾沖合約 2 km (東経 135°20'08", 北緯 33°42'19") に位置する田辺中島高潮観測塔 (京都大学防災研究所流域災害研究センター所有) において実施された。本研究では 3 月 23 日 0 時から 3 月 27 日 23 時までの期間において得られたデータセットについて解析を行った。観測塔の設置海域は南西方向が外海に面しており、比較的大きなうねりは主に南西方向から伝播してくることになる。

図-1 に観測塔および観測システムの概略図を示す。平均海面から 12.5 m の位置に設置した超音波風速温度計と Open path 型非分散赤外線ガス分析計 (NDIR: LI-COR Li-7500) を用いて、風速変動、温度変動、水蒸気濃度変動、CO₂ 濃度変動を測定し、Webb 補正を施した渦相関法から CO₂ フラックスを算定した。海水中の CO₂ 濃度計測システムの概略図を図-2 に示す。本研究では、新たに製作した中空糸膜モジュールから成る気液平衡器をシェルターに収納し、平均水深約 2 m の位置に固定して連続測定を行った。図に示すような気液平衡器を経由する管路を構築し、大気取り入れ口から採取

図-2 海水側 CO₂ 濃度測定システム

した空気を管路内にエアポンプで循環させた。海水中に設置された気液平衡器において、海水中と管路内の CO₂ が中空糸膜を通して交換され、管路内の気体の CO₂ 分圧は海水中の CO₂ 分圧と平衡状態になる。得られた平衡気体をシリカゲル (SiO₂ · nH₂O) で除湿後に Closed path 型 NDIR (LI-COR LI-840) に取り込み、その CO₂ 分率 (ppm) を測定した。得られた分率に気圧を乗じることにより、海水中の CO₂ 分圧 (μatm) を評価した。また、波浪の観測には観測塔より南西に 20 m 離れた海底に設置した WAVEADCP を用いた。得られた波浪データから算定された波の方向スペクトルに基づいて波浪場がどのような風波成分波とうねり成分波から構成されているのかを詳細に検討した。

4. うねりの条件の分類方法

本研究では、うねりの条件を分類するために、解析対象とした時間帯における全ての波の方向スペクトルを算出した。それらの結果から、うねりの条件を、風波が卓越する波浪場 (Pure windsea)、うねりが卓越する波浪場 (Swell-dominated sea)、風向に対して横から交差するようにうねりが伝播する波浪場 (Cross swell)、風向と逆向きにうねりが伝播する波浪場 (Counter swell)、風向と同じ向きにうねりが伝播する波浪場 (Following swell) の 5 つグループに分類することを試みた。ここでは、風向に対して $\pm 135^\circ \sim 225^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合を Counter swell, $\pm 45^\circ \sim 135^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合を Cross swell, $\pm 45^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合を Following swell とした。この分類基準は、Donelan ら (1997) および Drennan ら (1999) が風波とうねりの伝播方向の偏角に基づいて行った分類方法に準じている。ただし、うねりと風波が明瞭に判別できない条件のデータは解析対象から除外した。その結果、Counter swell および Following swell のデータは解析対象には含まれなかった。図-3(a)~(c) は、それぞ

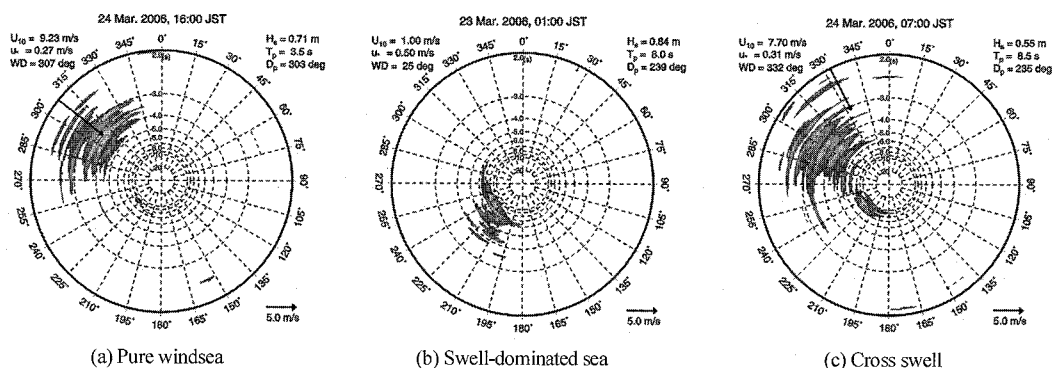


図-3 波浪の方向スペクトルの一例

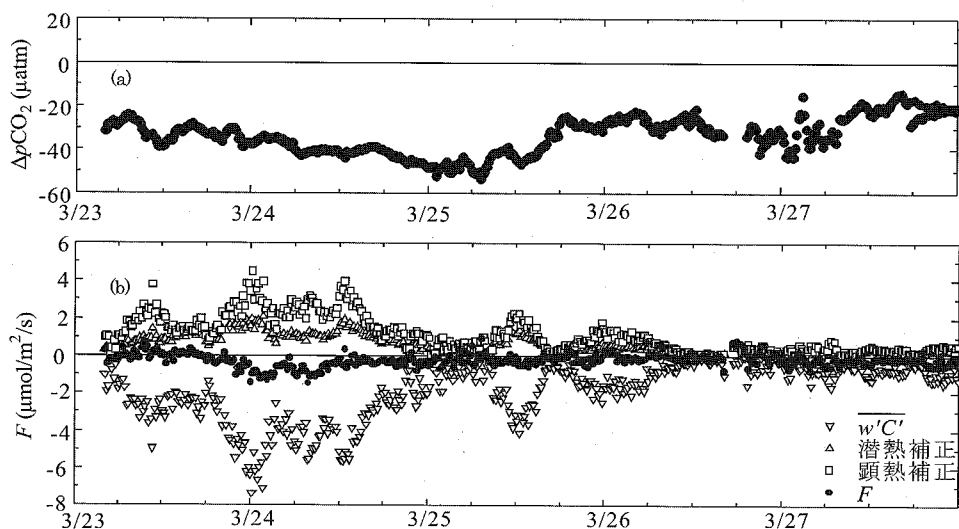


図-4 観測データの時系列

(a) 大気-海洋間の CO_2 分圧差, (b) CO_2 フラックスおよび各項の

れ Pure windsea, Swell-dominated sea, Cross swell の条件における方向スペクトルの一例を示す。ここで、図中の矢印は風速ベクトルを示しており、方向スペクトルの方位は波が伝播してくる方向を表していることに注意する。これらの図より、うねりは外洋に面している南西方向から主に伝播してくることがわかる。

5. 観測結果および考察

(1) 大気-海洋間における CO_2 分圧差およびフラックス

図-4(a), (b) は、それぞれ大気-海洋間における CO_2 分圧差 $\Delta p\text{CO}_2$ (μatm) および、 CO_2 フラックス F ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) とフラックスに対する渦相関量 $w'C'$ 、潜熱補正量、顕熱補正量の寄与の時系列を示している。ここで、各々の値の変化が非常に大きく、異常値と思われる時間帯のデータは除外されている。図(a)より、 CO_2 分圧差 $\Delta p\text{CO}_2$ は最大で $50\mu\text{atm}$ 程度の値を示しており、

解析対象とした観測期間を通してほぼ負の値であったことがわかる。これは、観測期間のほとんどの時間帯において、 CO_2 が大気から海洋へ吸収されていることを示している。また図(b)より、渦相関量はほぼ常に負の値をとっており、乱流拡散の効果は下向きのフラックスに寄与していることがわかる。一方、潜熱および顕熱補正量は観測期間を通じて正の値をとっており、これらは上向きのフラックスに寄与している。なお、顕熱フラックスが正の値であるということは、大気の状態が不安定であることを示す。これらの補正量は渦相関量には及ばないが、大気-海洋間における CO_2 交換において潜熱および顕熱の寄与が無視できないことがわかる。また、 CO_2 フラックスと分圧差の向きは、観測期間を通じて概ね一致している。

(2) うねりの条件に対する CO_2 交換速度の依存性

この節では、うねりの条件がパラメータになることを考慮して、 CO_2 交換速度と海上風速の関係について検討

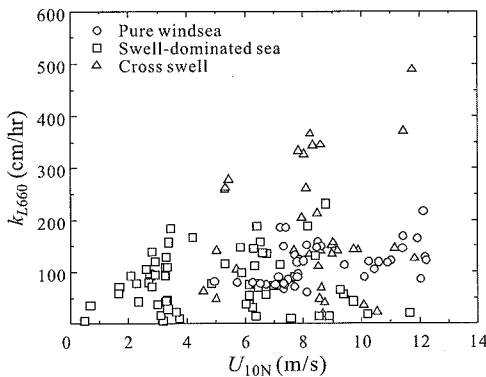
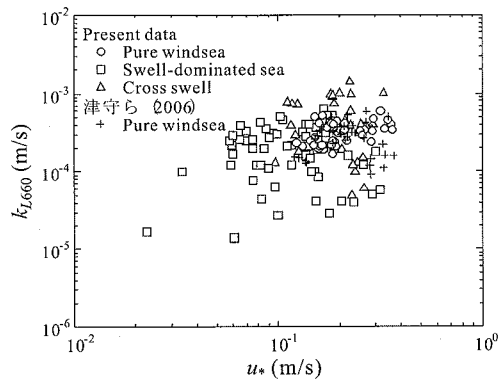
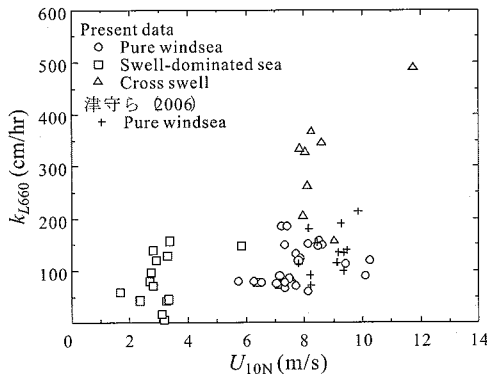


図-5 うねりの条件を指標とした気体交換速度と風速の関係

図-7 うねりの条件を指標とした k_{L660} と u_* の関係図-6 うねりの条件を指標とした $24 < g/\omega_p u_* \leq 36$ の気体交換速度と風速の関係

する。図-5にうねりの条件を指標とした CO₂交換速度 k_{L660} と U_{10N} の関係を示す。ここで、 k_{L660} は水温 20℃ の海水における値 (シュミット数 $S_c=660$ の値) に規格化された交換速度であり、 U_{10N} は中立状態に換算された海上高度 10 m での平均風速を示す。得られたデータは、Pure windsea, Swell-dominated sea, Cross swell の3つのグループに分類されており、ここでは波齢 ($g/\omega_p u_*$) の値は固定されていないことに注意する。ただし、 g は重力加速度、 ω_p は風波成分波の角周波数、 u_* は摩擦速度である。風速とともに単調に増大するのは Pure windsea のデータである。一方、うねりを含むデータは Pure windsea と比較して相対的にばらつきが大きく、特に Cross swell の状態が交換速度に及ぼす影響が最も大きい。これらのことは、うねりの影響が交換速度と風速の連動性を乱す力学的コンタミネーションとして作用することを意味する。

図-6に、波齢の値を 24 より大きく 36 以下のものに絞った場合における k_{L660} と U_{10N} の関係を示す。なお、図中には津守ら (2006) において Pure windsea と判断されたデータも併せてプロットされている。波齢を描え

ることによって、 k_{L660} に対するうねりの影響をより明確に表現することができると考えられる。この図より、Swell-dominated sea のデータは低風速領域に集中していることがわかる。一方、Pure windsea と Cross swell のデータは高風速領域に集中している。両者を比較すると、Pure windsea のデータはバラツキが少ないが、Cross swell のデータはバラツキが大きく上に相対的に大きな値を示していることがわかる。従来の研究において、うねりの存在が白波砕波を抑制するという結果が得られている (Sugihara ら, 2007)。白波砕波が気体交換を促進するとすれば、上記の結果とは一見矛盾するように見える。しかし、うねりの存在は水表面近傍の乱流強度を増大させるという研究結果 (Cheung・Street, 1988) もあるので、気体交換に対してはうねりの影響は相反する2つの効果を持っている可能性がある。このようなうねりの作用については、現状では明らかになっていないことが多く、今後詳細に検討する必要がある。

図-7にうねりの条件を指標とした交換速度 k_{L660} (m/s) と摩擦速度 u_* (m/s) の関係を示す。この図より、交換速度は摩擦速度とともに増大する傾向が見られる。また、Pure windsea のデータは他のうねりの条件のデータと比較すると、バラツキが相対的に小さいことがわかる。しかしながら、交換速度を摩擦速度で表示する場合においても、波浪依存性を表現できないという問題が残る。

図-8にうねりの条件を指標とした k_{L660} と波浪のエネルギー散逸率 ε_i (kg/s^3) の関係を示す。この図より、交換速度は波浪のエネルギー散逸率とともに増大する傾向が見られることがわかる。波浪のエネルギー散逸が大きいということは、波のスケールも大きいと考えられる。従って、波が発達するほど、気体交換が促進されることになる。

図-9にうねりの条件を指標とした無次元交換速度 k_{L660}/u_* と無次元エネルギー散逸率 $\varepsilon_i/\rho_w u_*^3$ の関係を示

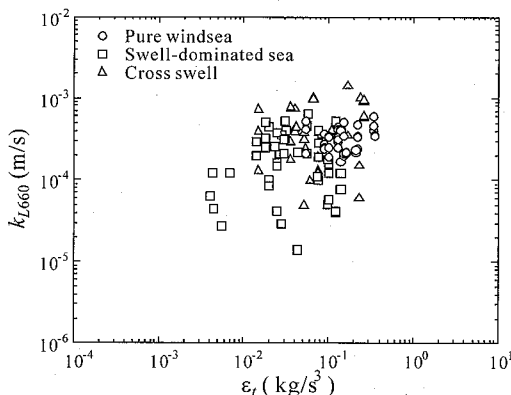


図-8 うねりの条件を指標とした k_{L660} と ε_t の関係

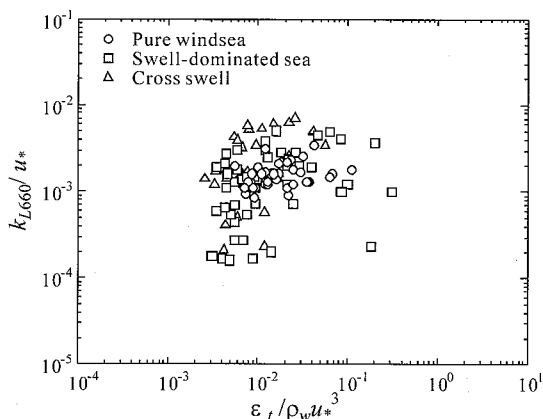


図-9 うねりの条件を指標とした k_{L660}/u_* と $\varepsilon_t/\rho_w u_*^3$ の関係

す。ここで、 ρ_w は海水の密度である。この図より、 k_{L660} と ε_t の関係と同様に、交換速度は無次元エネルギー散逸率とともに増大する傾向が見られる。また、図-5ではデータの分散の度合いがうねりの条件に依存性していたが、ここではそのような傾向はほとんど見られないことがわかる。このことは、波浪のエネルギー散逸率のような碎波に直接関わる風波特性量を用いることで、うねりの条件に依存しない普遍的な CO_2 交換速度のパラメタリゼーションを行うことが可能であることを示唆している。ただし現状では、他のパラメータに比べてうねりの条件への依存性が小さくなるというだけで普遍的なパラメータであると結論づけるのは難しい。しかし、これまでの研究において気体交換速度と波浪のエネルギー散逸率の関係が議論されたことはなく、新たな知見を示すことができたと思われる。

6. 結 論

本研究では、海洋観測塔において現地観測を行い、Webb 補正に基づく渦相関法から CO_2 フラックスを算定した。さらに、中空糸膜モジュールから成る気液平衡器を用いた海水中の溶存 CO_2 濃度の連続測定および、WAVEADCP による波の方向スペクトル等の波浪特性量の同時計測を行った。得られた CO_2 フラックスと大気-海洋間の CO_2 分圧差から CO_2 交換速度を評価し、うねりの存在が交換速度に及ぼす影響について検討した。 CO_2 交換速度 k_{L660} と風速 U_{10N} の関係において、Pure windsea のデータはバラツキが少ないが、Cross swell のデータはバラツキが大きい上に相対的に大きな値を示すことがわかった。このことから、うねりの存在が、 k_{L660} と U_{10N} の関係を変化させる大きな要因であることが明らかとなった。また、 k_{L660}/u_* と $\varepsilon_t/\rho_w u_*^3$ の関係においては、うねりの条件への依存性がほとんど見られなかった。このことは、交換速度の普遍表示を行う上で、波浪のエネルギー散逸率のような碎波特性量を用いることが有用であることを示唆している。

本研究を行うにあたり、九州大学松永信博教授にご助言を頂きました。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (C) (代表者：杉原裕司) および京都大学防災研究所一般共同研究 (代表者：杉原裕司) の援助を受けました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 津守博通, 志賀 慧, 畠山文香, 杉原裕司, 芹沢重厚, 吉岡洋 (2006): 大気-海洋間における CO_2 交換速度の波浪条件依存性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 51-55.
- 鳥羽良明, 鈴木 靖, 小森 悟, 趙 棟梁 (2001): 不安定な交換係数, 運動量と気体の大気海洋間交換係数, 2001 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 84.
- Cheung, T. K. and R. L. Street (1988): The turbulent layer in the water at an air-water interface, J. Fluid Mech., Vol. 194, pp. 133-151.
- Donelan, M. A., W. M. Drennan and K. B. Katsaro. (1997): The air-sea momentum flux in conditions of wind sea and swell, J. Phys. Oceanogr., Vol. 27, pp. 2087-2099.
- Drennan, W. M., K. K. Kahma and M. A. Donelan. (1999): On momentum flux and velocity spectra over waves, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 92, pp. 489-515.
- Sugihara, Y., H. Tsumori, T. Ohga, H. Yoshioka and S. Serizawa (2007): Variation of whitecap coverage with wave-field conditions, J. Marine Systems, Vol. 66, pp. 47-60.
- Webb, E. K., G. I. Pearman and Leuning, R. (1980): Correction of flux measurements for density due to heat and water vapor transfer, J. R. Met. Soc., Vol. 106, pp. 85-100.
- Weiss, R. F. (1974): Carbon dioxide in water and seawater, The solubility of non-ideal gas, Mar. Chem., Vol. 2, pp. 203-21.