

## 全球規模大気・海洋間 CO<sub>2</sub> 輸送における白波の面積比の影響

竹本 剛志 (近畿大学 大学院総合理工学研究科, 1533330310c@kindai.ac.jp)

鈴木 直弥 (近畿大学 理工学部, nsuzuki@mech.kindai.ac.jp)

高垣 直尚 (京都大学 大学院工学研究科, takagaki@me.kyoto-u.ac.jp)

小森 悟 (京都大学 大学院工学研究科, komori@mech.kyoto-u.ac.jp)

### Effect of whitecap coverage on the global air-sea CO<sub>2</sub> gas flux

Takeshi Takemoto (Graduate School of Science and Engineering Research, Kinki University, Japan)

Naoya Suzuki (Faculty of Science and Engineering, Kinki University, Japan)

Naohisa Takagaki (Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University, Japan)

Satoru Komori (Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University, Japan)

#### 要約

大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支を求める際に用いられるCO<sub>2</sub>輸送速度は、既往研究においては海面高度10 mの風速 $U_{10}$ のみの関数で表されていることが多いが、風波、砕波、およびうねりなどの考慮を十分考慮したモデルは未だに確立されていない。近年、鈴木・増田(2014)によってMonahan and Spillane (1984)の砕波の入れ方をより精密にした計算手法が提案された。この計算手法には砕波のパラメータとして白波の面積比(Zhao and Toba,2001)が用いられている。しかしCO<sub>2</sub>収支を正確に見積もるには、全球の高風速域での白波の面積比の影響、また白波の面積比に用いられている抵抗係数モデル・風速データ・風波周期データの相違について検討する必要がある。そこで本研究では、ECMWF波浪予報モデルによる風速・風波周期データを用いて大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支を積算し、全球規模での大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に及ぼす白波の面積比の影響を検討した。その結果、抵抗係数モデル・風速データ・風波周期データの相違は全球規模での大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に及ぼす影響が無視できるほど小さいことが示された。また、風速20 m/s以上の高風速帯における大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支が全球規模において無視できるほど少ないことを示した。さらに、全球において最も占める割合が大きい6~7 m/sの風速帯における白波の面積比が大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に大きな影響を及ぼすことが示された。

#### キーワード

大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支, 白波の面積比, 抵抗係数, 高風速, 砕波

#### 1. はじめに

近年、砂漠化や海面上昇などの地球温暖化による異常気象が問題となっている。地球温暖化の主な要因の1つとなっている大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上昇に対して、大気と地球上の約7割を占める海洋とのCO<sub>2</sub>の収支を正確に見積もることは重要である。

大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支 $F(\text{mol}/\text{m}^2\text{s})$ は以下の式で求められる。

$$F = k_L S (4p\text{CO}_2) \quad (1)$$

ここで、 $k_L$ はCO<sub>2</sub>輸送速度(m/s)、 $S$ は海水におけるCO<sub>2</sub>溶解度( $\text{mol}/\text{m}^3\text{atm}$ )、 $4p\text{CO}_2$ は大気・海洋間CO<sub>2</sub>分圧差(atm)である。またCO<sub>2</sub>輸送速度は、一般に海面高度10 mでの風速 $U_{10}$ のみの関数で表されており、多くの式が提案されている(Liss and Merlivat,1986; Wanninkhof, 1992; McGillis, 2001)。しかしながら、現場データはばらつきが大きく、また風波、砕波、うねりなどがCO<sub>2</sub>輸送速度に及ぼす影響が十分に解明されていないため、未だ確立されていない。現在、砕波によってCO<sub>2</sub>が多く取り込まれていることが明らかにされている(Merlivat and Memery, 1983)ため、Zhao et al. (2003)やWoolf (2005)、および鈴木・増田(2014)によって砕波のパラ

メータとして白波の面積比を用いたCO<sub>2</sub>輸送速度の式が提供されている。白波の面積比は、Zhao and Toba (2001)によって提供された式が用いられており、主に抵抗係数、風速、風波周期によりまとめられることを示している。しかし、抵抗係数は風速のみの関数で表されており、現場データにばらつきがあるため抵抗係数モデルが多く提案(Charnock (1955)、Smith (1980)、Large and Pond (1981)、Yelland and Taylor (1996)、Large and Yeager (2004)、Takagaki et al. (2012))されているが、未だ確立されていない。したがって、使用する抵抗係数モデルによって白波の面積比に影響を及ぼす可能性が考えられる。さらに、風速・風波周期データにも様々な空間解像度のデータが存在するため、使用する風速データ・風波周期データによって白波の面積比に影響を及ぼす可能性が考えられる。そのため、抵抗係数モデル・風速データ・風波周期データの相違が白波の面積比に及ぼす影響について検討する必要がある。さらに、高風速での白波の面積比が大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支にどのように影響を及ぼしているのかについても検討する必要がある。

本研究では鈴木・増田(2014)の計算手法を用いて、全球規模での大気・海洋間CO<sub>2</sub>輸送における抵抗係数モデル・風速データ・有義波高データの相違を含む高風速などでの白波の面積比の影響を検討する。

#### 2. 大気・海洋間 CO<sub>2</sub> 輸送モデル

鈴木・増田(2014)のCO<sub>2</sub>輸送速度の計算手法は、以下の式

で表されている。

$$k_L = 0.31U_{10}^2(SC_{CO_2}/660)^n(1-W) + k_e W(SC_{CO_2}/SC_{radon})^n \quad (2)$$

ここで、 $Sc$ はシュミット数、 $U_{10}$ は海面高度10m風速(m/s)、 $k_e$ は白波領域の輸送速度(475.04 cm/h)、 $W$ は白波の面積比、 $n$ は $U_{10} < 3.6$  (m/s)の時 $n = 2/3$ 、 $U_{10} > 3.6$  (m/s)の時 $n = 1/2$ である。

シュミット数による $CO_2$ とradonガスは海表面温度 $T$  (°C)から下式のように見積もられる(塩分 $S = 35$  ‰と仮定した海水)。

radonガス:

$$Sc_{radon} = 3412.8 - 224.307T + 6.79547T^2 - 8.3 \times 10^{-2}T^3 \quad (3)$$

$CO_2$ ガス:

$$Sc_{CO_2} = 2073.1 - 125.62T + 3.62767T^2 - 4.3219 \times 10^{-2}T^3 \quad (4)$$

白波の面積比 $W$ にはZhao and Toba (2001)による

$$W = 3.88 \times 10^{-7}R_B^{1.09} \quad (5)$$

が用いられている( $R_B$ :風波レイノルズ数( $R_B = u_*^2/\nu_a\sigma_p$ )、 $u_*$ :摩擦係数( $u_* = C_D^{1/2} \times U_{10}$ 、 $C_D$ :抵抗係数)、 $\nu_a$ :空気の動粘性係数( $15.4 \times 10^{-6}(m^2/s)$ )、 $\sigma_p$ :ピーク角周波数( $\sigma_p = 2\pi/T$ 、 $T$ :風波周期(s))。

### 3. 抵抗係数モデルの相違による影響

使用データは、海面高度10m風速 $U_{10}$ 、および風波周期 $T$ に6時間毎のECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) 波浪予報モデルデータ(空間解像度:  $720 \times 361$  格子)、 $\Delta pCO_2$ にTakahashi et al. (2009)、海表面温度データにECMWF再解析データを用いた。対象年はエルニーニョ期・ラニーニャ期を含まない2001年を選んだ。

抵抗係数モデルは以下に示すCharnock (1955)、Smith (1980)、Large and Pond (1981)、Yelland and Taylor (1996)、Large and Yeager (2004)、Takagaki et al. (2012)の6つの式

を用いた。図1には、これらの抵抗係数モデルの抵抗係数 $C_D$ と海面高度10m風速 $U_{10}$ の関係を示す。ここで、6つの抵抗係数モデルの中で最新の抵抗係数モデルであるTakagaki et al. (2012)のみ高風速域まで考慮されている。そこで本研究では、他の5つの抵抗係数モデルでも全風速域で成り立つと仮定して使用した。

Charnock (1955);

$$C_D = (0.80 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} (1 < U_{10}) \quad (6)$$

Smith (1980);

$$C_D = (0.61 + 0.063U_{10}) \times 10^{-3} (6 < U_{10} < 22) \quad (7)$$

Large and Pond (1981);

$$C_D = 1.2 \times 10^{-3} (4 < U_{10} < 11) \quad (8)$$

$$C_D = (0.49 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} (11 < U_{10} < 25) \quad (8)$$

Yelland and Taylor (1996);

$$C_D = (0.29 + 3.1/U_{10} + 7.7/U_{10}^2) \times 10^{-3} (3 < U_{10} < 6) \quad (9)$$

$$C_D = (0.60 + 0.070U_{10}) \times 10^{-3} (6 < U_{10} < 26) \quad (9)$$

Large and Yeager (2004);

$$C_D = (0.142 + 0.076U_{10} + 2.7/U_{10}) \times 10^{-3} (1 < U_{10} < 25) \quad (10)$$

Takagaki et al. (2012);

$$C_D = 0.44U_{10}^{0.5} \times 10^{-3} (U_{10} < 33.6) \quad (11)$$

$$C_D = 2.55 \times 10^{-3} (33.6 < U_{10}) \quad (11)$$

全球での1年間の大気・海洋間 $CO_2$ 収支を積算し、Charnockは-1.63 (PgC/year)、Smithは-1.58 (PgC/year)、Large and Pondは-1.56 (PgC/year)、Yelland and Taylorは-1.60 (PgC/year)、Large and Yeagerは-1.56 (PgC/year)、Takagaki et alは-1.61 (PgC/year)の結果を示した。抵抗係数モデルによる相違の最大はCharnockとLarge and Yeagerの3.97%と小さく、抵抗係数モデルによる大気・海洋間 $CO_2$ 収支への影響は小さいと考えられる。

### 4. 風速・風波周期データの相違による影響

本セクションではセクション3で用いたデータに加えて、時間解像度は同じ6時間毎であるが、空間解像度が異なるECMWF波浪予報モデルの風速・風波周期データ(空間解像度:  $240 \times 121$  格子)、抵抗係数モデルは最新のTakagaki et al. (2012)を用いた。

異なる空間解像度の風速・風波周期データを用いて全球での1年間の大気・海洋間 $CO_2$ 収支を積算した結果、ECMWF(空間解像度:  $720 \times 361$  格子)では吸収量は-3.32 (PgC/year)、放出量は1.68 (PgC/year)、収支は-1.62 (PgC/year)であった。一方、ECMWF(空間解像度:  $240 \times 121$  格子)では吸収量は-3.22 (PgC/year)、放出量は1.68 (PgC/year)、収支は-1.51 (PgC/year)であった。空間解像度の異なる風速・風波周期データによる相違は吸収量、放出量、収支に関してそれぞれ2.96%、0.13%、6.07%と小さいため、風速データ・風波周期データの空

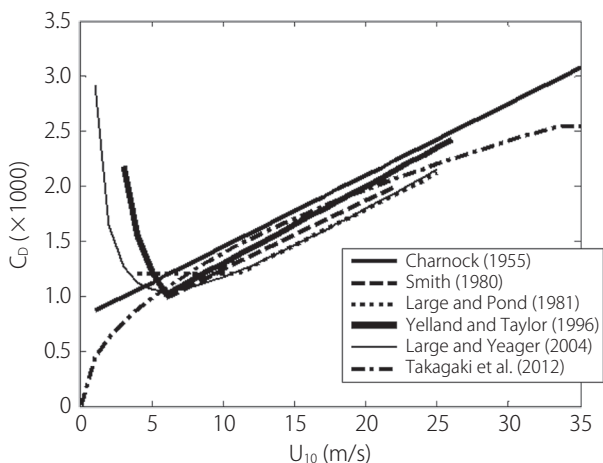


図1: 抵抗係数 $C_D$ と海面高度10m風速 $U_{10}$

間解像度による大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支への影響は小さいと考えられる。

### 5. 高風速による影響

セクション5以降の使用データにはセクション3で用いた海面高度10 m風速 $U_{10}$ 、風波周期 $T$ に6時間毎のECMWF波浪予報モデルデータ（空間解像度：720×361格子）、 $\Delta p\text{CO}_2$ にTakahashi et al. (2009)、海表面温度データにECMWF再解析データ、抵抗係数モデルは最新のTakagaki et al. (2012)を用いた。

高風速である風速20 m/s以上での1年間の大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支を算出した結果、吸収量は-0.0383 (PgC/year)、放出量は0.0127 (PgC/year)、収支は-0.0253 (PgC/year)であった。これは全風速帯における吸収量、放出量および大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に対して1.15%、0.76%、1.57%であることから高風速帯における大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支は全風速帯における大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に比べて無視できるほど小さいことが示された。また、1年間の全球海洋において高風速である風速20 m/s以上の占める割合は全風速の0.14%を示した。したがって、高風速の大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支への影響が小さくなったのは全球において高風速の割合が小さいためと考えられる。

### 6. 白波の面積比による影響

CO<sub>2</sub>輸送速度モデルにおいて風速のみの関数で表されているWanninkhof (1992)と風速および白波の面積比の関数で表される鈴木・増田(2014)で比較を行い、砕波のパラメータとして用いられている白波の面積比が大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に及ぼす影響を検討する。

全球での1年間の大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支を積算した結果、Wanninkhof (1992)が-1.30 (PgC/year)、鈴木・増田(2014)が-1.61 (PgC/year)となり、相違は19.5%と大きいため、砕波のパラメータである白波の面積比の効果が示された。そこで、白波の面積比の大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支への影響について検討する。

図2に白波の面積比0.5%毎の大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支の吸収量、および放出量の関係を示す。ここで図中に示された破線および点線はそれぞれ全球の吸収量、放出量の10%を示したものである。図2より、大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支の吸収量では白波の面積比0~1.5%において全球の10%を超える結果となったが、放出量では白波の面積比0~1.0%で全球の10%を超える結果を示した。

そこで、図2で吸収量、放出量共に全球の10%を超えた白波の面積比0~1.0%間における風速の確立頻度を図3に示す。また、図4に全球での全風速帯の確立頻度を示す。図3、図4より、共に6~7 m/sの風速帯で最も割合が大きい結果となった。したがって、全球において最も占める割合の大きい6~7 m/sの風速帯における白波の面積比が大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

### 7. 結言

本研究では、鈴木・増田(2014)においてECMWF波浪予報モデルデータを用いて、大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に影響を及ぼ

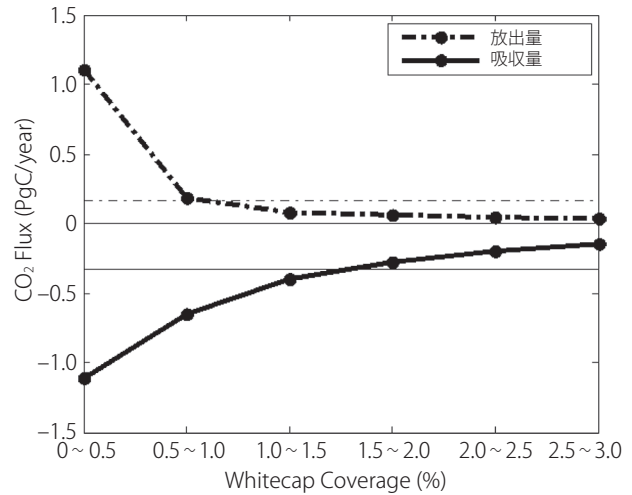


図2：白波の面積比0～3.0%間の大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支

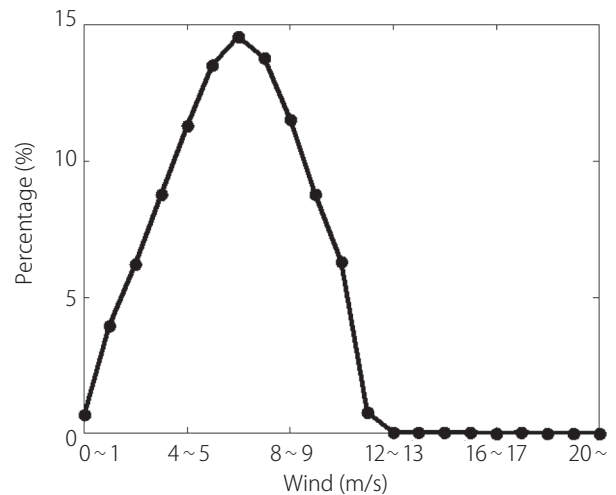


図3：白波の面積比0～1.0%間の風速の統計

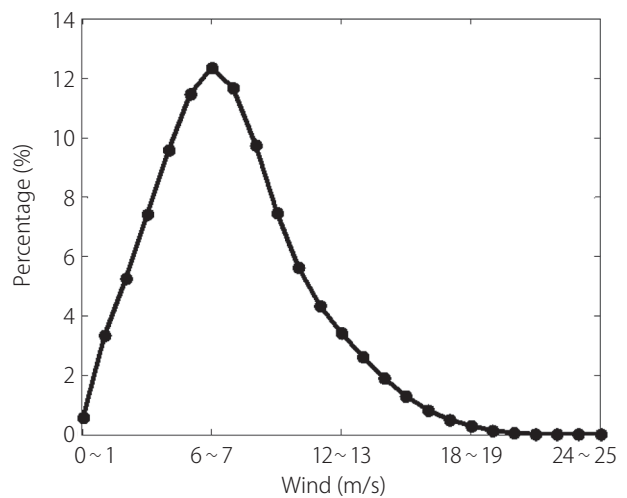


図4：全球風速の統計

すと考えられる抵抗係数モデル・風速データ・風波周期データの相違を含む高風速などでの白波の面積比の影響を検討した。その結果、抵抗係数モデル・風速データ・風波周期データの相違による大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支への影響は小さいことが示された。また、高風速帯における大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支は、全風速帯における大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に比べて無視できるほど小さいことが示された。さらに、全球において最も割合の大きい6～7m/sの風速帯における白波の面積比が大気・海洋間CO<sub>2</sub>収支に大きな影響を及ぼすことが示された。

## 引用文献

Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 81, 639-640.

Large, W. G and Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of physical Oceanography*, Vol. 11, No. 3, 324-336.

Large, W. G and Yeager, S. G. (2004). Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies. National Center for Atmospheric Research.

Liss, S. P. and Merlivat, L. (1986). Air-sea gas exchange rates; Introduction and synthesis, in the role of air-sea exchange in geochemical cycling, Advanced Science Institutes Series, P. Buat-Menard (ed.), D. Reidel, 113-129.

McGillis, W. R., Edson, J. B., Hare, J. E. and Fairall, C. W. (2001). Direct covariance air-sea CO<sub>2</sub> fluxes. *Journal of geophysical Research*, Vol. 106, No. C8, 16729-16745.

Merlivat, L. and Memery, L. (1983). Gas exchange across an air-water interface: Experimental results and modeling of bubble contribution to transfer. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, No. C1, 707-724.

Monahan, E. C and Spillane, M. C. (1984). The role of oceanic whitecap in air-sea gas exchange. Gas transfer at water surface, W. Brutsaert and G. H. Jikra (eds.), D. Reidel publishing Company, 495-503.

Smith, S. D. (1980). Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 10, 709-726.

Takagaki, N., Komori, S., Suzuki, N., Iwano, K., Kuramoto, T., Shimada, S., Kurose, R. and Takahashi, K. (2012). Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, No. 23.

Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Watson, A., Bakker, D. C. E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshizawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Sabine, C., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Körtzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., de Baar, H. J. W., Wong, C. S., Delille, B. and Bates, N. R. (2009). Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO<sub>2</sub> and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 56, No. 8, 554-577.

Wanninkhof, R. H. (1992). Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, C5, 7373-7381.

Woolf, D. K. (2005). Parameterization of gas transfer velocities and sea-state-dependent wave breaking, *Tellus B*, Vol. 57, 87-94.

Yelland, M. and Taylor, P. K. (1996). Wind stress measurements from the open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 26, 541-558.

Zhao, D. and Toba, Y. (2001). Dependence of whitecap coverage on wind and wind-wave properties. *Journal of Oceanography*, Vol. 57, 603-616.

Zhao, D., Toba, Y., Suzuki, Y. and Komori, S. (2003). Effect of wind waves on air-sea gas exchange: Proposal of an overall CO<sub>2</sub> transfer velocity formula as a function of breaking-wave parameter. *Tellus B*, Vol. 55, 478-487.

鈴木直弥・増田循 (2014). 全球規模での大気-海洋間CO<sub>2</sub>輸送における砕波を考慮した計算手法. *科学・技術研究*, Vol. 3, No. 2, 173-176.

(受稿：2015年3月27日 受理：2015年5月13日)