

全球規模での大気-海洋間 CO₂ 輸送における砕波を考慮した計算手法

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

増田 循 (株式会社エクセディ, j-masuda@exedy.com)

Estimation method of the global air-sea CO₂ gas flux considering wave breaking

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

Jun Masuda (EXEDY Corporation, Japan)

要約

現在、大気・海洋間CO₂収支を求める際に用いられる海面でのCO₂輸送速度は、一般に高度10 mでの風速 U_{10} のみの関数で表わされていることが多いが、まだ確立されてない。その主な理由は、全球において風波、砕波、うねりなどの影響が十分考慮されていないことである。その中でも、砕波によってCO₂が多く取り込まれていることは既往研究によって明らかにされている。本研究では、Monahan and Spillane (1984)の式において、風速のみの関数であるWanninkhof (1992) の式とZhao and Toba (2001) による白波の面積比と風波レイノルズ数の関係式を用いることで、砕波の入れ方をより精密にした新たな大気・海洋間CO₂輸送速度の計算手法を提案した。そしてECMWFによる風速 U_{10} および風波の周期データセットを使用して全球規模での大気・海洋間CO₂収支を積算した。その結果、-1.47 PgC/yearであり、風速のみの関数であるWanninkhof (1992) に比べて差は約25%であった。また緯度毎に比較した結果、本研究の計算手法は高風速域である中緯度帯ではWanninkhof (1992) よりも大きい値を示し、低風速域である低緯度帯で、Wanninkhof (1992) に近い値を示した。したがって、主に低風速である低緯度帯では風速のみに依存するが、主に高風速である中緯度帯では砕波の効果が顕著であることを示していると考えられる。

キーワード

大気・海洋間CO₂収支, 大気・海洋間CO₂輸送速度, 砕波, 風速, 地球温暖化

1. はじめに

大気CO₂濃度の上昇に対して、地球規模の炭素循環のプロセスを解明することは重要である。特に、地球上の約7割を占める海洋は、人類活動によって放出されたCO₂の巨大なリザーバーとして注目されており、大気・海洋間の炭素循環を理解することは、特に重要である。

大気・海洋間CO₂収支は、

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

で求められる。ここで、 k_L はCO₂輸送速度、 S は海水におけるCO₂溶解度、 $\Delta p \text{CO}_2$ は大気・海洋間CO₂分圧差である。またCO₂輸送速度は、一般に高度10 mでの風速 U_{10} のみの関数で表わされている。代表的な式として、Liss and Merlivat (1986)、Wanninkhof (1992)、Wanninkhof and McGillis (1999)、McGillis (2001)、Iwano et al. (2013) など多く提供されているが、現場データにばらつきがあり、まだ確立されてない。その主な理由は、全球において風波、砕波、うねりなどの影響が十分考慮されていないことである。その中でも、砕波によって水中に取り込まれる気泡は、海面における乱れの増大や気泡を介した直接的な気体輸送により、大気・海洋境界面におけるCO₂交換に大きく寄与していることが明らかにされている(Merlivat and L. Memery, 1983; Famer et al., 1993)。

Monahan and Spillane (1984)、Zhao et al. (2003)、Woolf (2005) は、砕波の効果として白波の面積比として大気・海

洋間ガス輸送速度に用いることで、砕波を考慮した式を提案した。しかし、Monahan and Spillane (1984) は、白波の面積比が風速のみの関数で従来と同じ風速依存、またZhao et al. (2003) とWoolf (2005) は、白波領域と非白波領域の区別がなされていないなど、正確に海面状態が考慮されているとは言い難い。したがって、風波の波高や周期等による海面状態の直接的なパラメータを導入し、風波の効果を考慮する必要がある。

本研究ではMonahan and Spillane (1984) の式の砕波の入れ方をより精密にした新たな大気・海洋間CO₂輸送速度の計算手法を提案する。

2. 砕波の効果を考慮した大気・海洋間CO₂輸送の計算手法の構築

大気・海洋間CO₂輸送速度 k_L を求める式に対して風速のみの式として一般的に用いられるWanninkhof (1992)

$$k_L = 0.31 U_{10}^2 (Sc_{CO_2}/660)^{-1/2} \quad (2)$$

(Sc : シュミット数)、また、砕波を考慮した式としてMonahan and Spillane (1984)による

$$K_{radon} = K_m (1 - W) + K_e W, \quad (3)$$

$$k_L = K_{radon} (Sc_{CO_2}/Sc_{radon})^{-n} \quad (4)$$

$$W = 3.84 \times 10^{-6} U_{10}^{3.41}. \quad (5)$$

が提案されている。ここで、 K_m は白波でない領域の輸送速

度(9.58mc/h)、 K_e は白波領域の輸送速度(475.07 cm/h)、 W は白波の面積比である。 n は $U_{10} < 3.6$ m/sのとき $n = 2/3$ 、そして $U_{10} > 3.6$ m/sのとき $n = 1/2$ である。シュミット数による、 CO_2 とradonガスは海面温度 T (°C) から次のように見積もられる(塩分 $S = 35$ %と仮定した海水)。

radonガス：

$$Sc_{radon} = 3412.8 - 224.30T + 6.7954T^2 - 8.3 \times 10^{-2}T^3 \quad (6)$$

CO_2 ガス：

$$Sc_{CO_2} = 2073.1 - 125.62T + 3.6276T^2 - 4.3219 \times 10^{-2}T^3 \quad (7)$$

白波の面積比 W の式(5)は風速のみの関数である。Zhao and Toba (2001)は、Toba and Koga (1986)から提案された風波レイノルズ数 $R_B (=u_*^2/\nu_a\sigma_p)$ ； u_* は摩擦速度、 ν_a は空気の動粘性係数($15.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、 σ_p はピーク角周波数を用いて、波浪の効果を考慮した白波の面積比の式(8)が提案された。

$$W = 3.88 \times 10^{-7} R_B^{1.09} \quad (8)$$

また、Monahan and Spillane (1984)によって提案された式(3)では、 K_m は非白波領域の輸送速度9.58 cm/hrと定数で表されているが、非白波領域では大気・海洋間 CO_2 輸送速度は風速に依存すると考えられる。

本研究は、Monahan and Spillane (1984)の式の非白波領域の輸送速度 K_m に対してWanninkhof (1992)の式(2)を用い、また、白波の面積比 W には上記と同様にZhao and Toba (2001)の式(8)を用いた以下の式(2.8)を提案する。

$$k_L = 0.31 U_{10}^2 (Sc_{CO_2}/660)^{-n} (1 - W) + K_e W (Sc_{CO_2}/Sc_{radon})^{-n} \quad (9)$$

ここで、 $K_e = 475.07$ cm/h、 $U_{10} < 3.6$ m/sのとき $n = 2/3$ 、 $U_{10} > 3.6$ m/sのとき $n = 1/2$ でMonahan and Spillane (1984)モデルと同じである。

3. 大気・海洋間 CO_2 収支の積算

大気・海洋間 CO_2 収支は、本研究提案の大気・海洋間 CO_2 輸送速度計算手法の式(9)を式(1)に使用して積算した。また、 CO_2 溶解度 S はWeiss (1974, 1980)の経験式、 $\Delta p\text{CO}_2$ には、Takahashi et al. (2009)のデータセットを使用した。大気・海洋間 CO_2 輸送速度を求めるために、風速 U_{10} には6時間毎(1.5 × 1.5格子)のECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 40 years Reanalysisデータ、風波の周期には、6時間毎(1.5 × 1.5格子)のECMWF波浪予報モデルデータを使用した。海面温度には6時間毎(Gaussian grid)のNCEP (US National Center for Environmental Prediction) reanalysis 2データを使用した。塩分濃度は35 %一定と仮定した。白波の面積比に用いられる摩擦速度 u_* は、Wu (1988)の海面抵抗係数の式($C_D = (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3}$)から計算した。なお、対象年としてはエルニーニョ期・ラニーニャ期を含まない2001年を選んだ。

大気・海洋間 CO_2 輸送速度の式において、一般的なWanninkhof (1992)の式、そして白波の面積比を使用している既存のMonahan and Spillane (1984)とWoolf (2005)の式を比較として使用した。

全球規模で1年間の大気・海洋間 CO_2 収支を積算した結果、Wanninkhof (1992)は-1.16 PgC/year、Monahan and Spillane (1984)は-0.91 PgC/year、Woolf (2005)は-1.04 PgC/year、本研究の計算手法は-1.47 PgC/yearとなった。本研究の計算手法が最も大きな値をとり、既存のMonahan and Spillane (1984)の結果が最も小さい値となった。また、本研究の計算手法の結果と風速のみの関数であるWanninkhof (1992)の結果の差は約25 % (0.29 PgC/year)であった。なお、Valsala and Maksyutov (2010)の生化学モデル、Park et al., 2010の26年間の診断モデルでは-1.47 PgC/yearが提案されており、本研究の計算手法の結果は同様な値を示している。

図1に各式の月毎の全球規模での大気・海洋間 CO_2 収支を示す。各式を比較すると7月から9月は差が小さく、他の月で大きな差を示している。また、1月から7月、10月から12月において、本研究の計算手法の結果は、他の式よりも大きい値を示している。

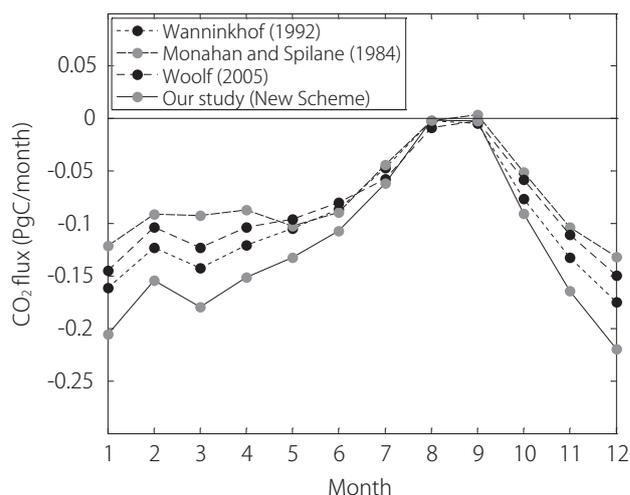


図1：各 CO_2 輸送速度式における月毎の全球規模大気・海洋間 CO_2 収支の分布

図2に1年間の大気・海洋間 CO_2 収支を $N63.75^\circ \sim S63.75^\circ$ において、緯度 7.5° 毎にプロットした結果を示す。風速のみの関数であるWanninkhof (1992)の式と本研究の計算手法を比較した結果、中緯度において大きな差を示した。また、主に低風速である低緯度帯において本研究の計算手法とWanninkhof (1992)の結果は近い値を示した。また、低緯度においてMonahan and Spillane (1984)の結果は、本研究の計算手法およびWanninkhof (1992)と近い値を示しており、Woolf (2005)の結果のみが低い値を示している。Woolf (2005)では、Jahne et al. (1987)によって風波水槽実験から構築された風速のみの式を使用しているため、小さい値を示したと考えられる。高緯度においては、Monahan and Spillane (1984)とWoolf (2005)が同様な値を示し、小さい値を示した。図2と

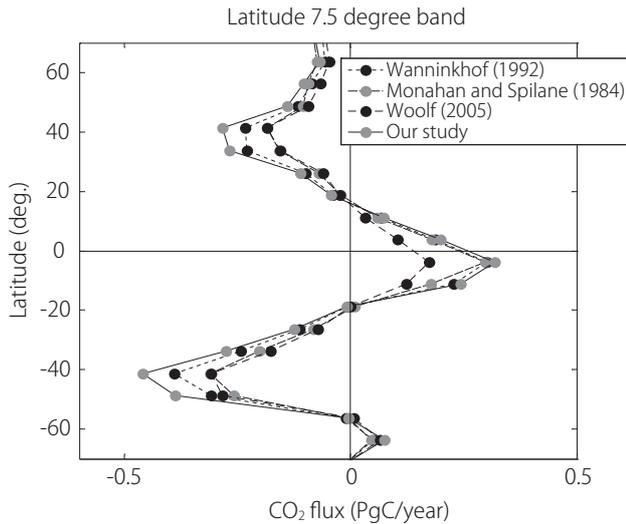


図2：緯度別の大気・海洋間CO₂収支(PgC)

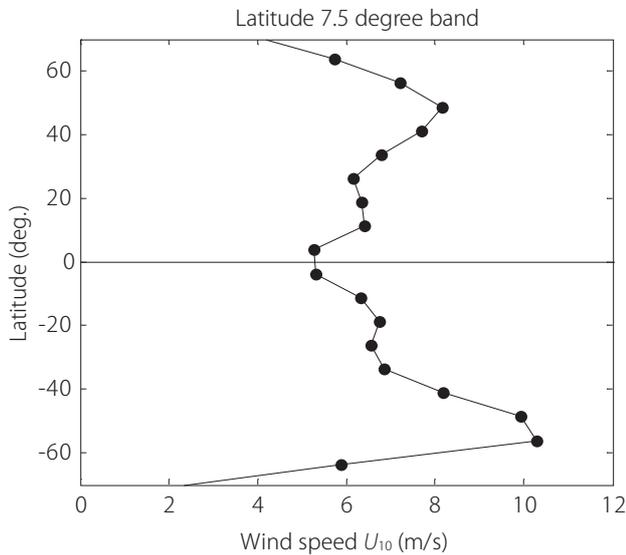


図3：緯度別のECMWFの平均風速U₁₀

同様に風速U₁₀をN63.75°～S63.75°において緯度7.5°毎にプロットした結果を図3示す。風速U₁₀は中緯度で高い値、低緯度で低い値を示している。したがって、高風速域では砕波の効果が大きくなり風速のみの関数であるWanninkhof (1992)と大きな差が生じ、逆に低風速では風速のみに依存することでWanninkhof (1992)の結果と近い値を示したと考えられる。

本研究では、全球を8つの領域(北太平洋、赤道(太平洋)、南太平洋、北大西洋、赤道(大西洋)、南大西洋、赤道(インド洋)、南インド洋)に分けて局所的な大気・海洋間CO₂収支を見積もった。その結果を表1に示す。どの赤道域でも本研究の計算手法の結果は、図2の緯度7.5°毎にプロットした結果と同様にWanninkhof (1992)と近い値を示した。また、どの領域においても全球規模での大気・海洋間CO₂収支と同様に大きい値を示した。全球規模での大気・海洋間CO₂収支では、Monahan and Spillane (1984)が最も小さい値を示したが、南インド洋以外の領域ではWoolf (2005)が最も小さい値を示した。これはCO₂が大気から海洋への吸収、海洋から大気への放出の両方があるため赤道域でも他の領域でもWoolf (2005)より大きい値を取るMonahan and Spillane (1984)が全球で計算すると値が小さくなったと考えられる。

Monahan and Spillane (1984)とWoolf (2005)は、白波の面積比のパラメータを使用しているが、大気・海洋間CO₂収支は小さい。これは、Monahan and Spillane (1984)は、白波の面積比が風速の関数であり、波のパラメータを含んでいないことが考えられる。またWoolf (2005)は、白波の面積比に波パラメータを含んでいるが、白波領域でない風速のみの式が、Jahne et al. (1987)による風波水槽実験から構築された式を用いているためと考えられる。

4. 結言

本研究では、Monahan and Spillane (1984)の式において、風速のみの関数であるWanninkhof (1992)の式とZhao and Toba (2001)による白波の面積比と風波レイノルズ数の関係式を用いることで、砕波の入れ方をより精密にした新たな大気・海洋間CO₂輸送速度の計算手法を提案した。そして全球規模において6時間毎のECMWF 40 years Reanalysisの風速データおよびECMWF波浪予報モデルの風波の周期データを使用して大気・海洋間CO₂収支を積算した。その結果、本研究の計算手法は-1.47 PgC/yearでWanninkhof (1992)、Monahan and Spillane (1984)、そしてWoolf (2005)と比較して最も高い値であった。緯度7.5°毎の比較においては、本研究の計算手法は高風速域である中高緯度帯で砕波の影響、低風速域である低緯度帯で、風速依存であることが示された。また、全球8つの領域に分けて検討した結果も緯度毎と同様に、本研究の計算手法は、南大西洋・南インド洋・北大西洋・北太平洋の高風速時において砕波の影響、低風速域である赤道で、風速依存であることが示された。

以上のことから、主に低風速である低緯度帯では風速のみ

表1：8つの領域別の大気・海洋間CO₂収支(PgC/year)

	北太平洋	赤道 (太平洋)	南太平洋	北大西洋	赤道 (大西洋)	南大西洋	赤道 (インド洋)	インド洋
Wanninkhof (1992)	-0.49	0.56	-0.34	-0.34	0.10	-0.19	0.12	-0.38
Monahan and Spillane (1984)	-0.38	0.50	-0.28	-0.30	0.09	-0.17	0.11	-0.29
Woolf (2005)	-0.35	0.33	-0.25	-0.26	0.05	-0.16	0.06	-0.30
Our study	-0.58	0.60	-0.38	-0.41	0.10	-0.24	0.13	-0.44

に依存するが、主に高風速である中高緯度では砕波の効果が顕著であることが示されたと考えられる。

現在、大気・海洋間CO₂輸送速度を求めるのに風速のみの関数で表された式が一般的に用いられているが、本研究の結果は、ガス輸送現象における砕波などの詳細な情報を正確に考慮していくステップになるだろう。

引用文献

- Iwano, K., Takagaki, N., Kurose, R. and Komori, S. (2013). Mass transfer velocity across the breaking air-water interface at extremely high wind speeds. *Tellus B*, Vol. 65, 21341, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.21341>.
- Jahne, B., Munnich, K. O., Bosinger, R., Dutzi, A., Huber, W. et al., (1987). On the parameters influencing air-water gas exchange. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, 1937-1949.
- 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, Washington, 113-129.
- 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. Jirka (eds.), D. Reidel Publishing Company, 495-503.
- Park, G.-H., Wanninkhof, R., Doney, S. C., Takahashi, T., Lee, K., Feely, R. A., Sabine, C., Trinanés, J. and Lima, I. (2010). Variability of global air-sea CO₂ fluxes over the last three decades. *Tellus B*, Vol. 62, 352-368.
- 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., Yoshikawa-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 pCO₂ and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research II*, Vol. 56, 554-577.
- Toba, Y. and Koga, M. (1986). A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress. In: Oceanic whitecaps, E. C. Monahan and G. MacNiocaill (eds.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 37-47.
- Valsala, K. V. and Maksyutov, S. (2010). Simulation and assimilation of global ocean pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes using ship observations of surface ocean pCO₂ in a simplified biogeochemical offline model. *Tellus B*, Vol. 62, 821-840.
- Wanninkhof, R. H. (1992). Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, c5, 7373-7381.
- Wanninkhof, R. H. and McGillis, W. R. (1999). A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, 1889-1892.

Weiss, R. F. (1974). Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a nonideal gas. *Marine Chemistry*, Vol. 2, 203-215.

Weiss, R. F. and Price, B. A. (1980). Nitrous oxide solubility in water and seawater. *Marine Chemistry*, Vol. 8, 347.

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

Wu, J. (1988). Wind-stress coefficients at light winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 5, 885-888.

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 CO₂ transfer velocity formula as a function of breaking-wave parameter. *Tellus B*, Vol. 55, 478-487.

(受稿：2014年9月29日 受理：2014年10月15日)