

全球規模大気・海洋間 CO₂ 収支における種々の海上風速データセットの影響

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 a many kinds of wind speed data set on global air-sea CO₂ flux

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

地球温暖化の主な要因の1つとなっている大気中のCO₂濃度の上昇に対して大気・海洋間CO₂輸送を正確に評価することは重要である。大気・海洋間CO₂収支を求める際に用いられるCO₂輸送速度は一般に風速の関数で表されている。しかし、全球規模の風速データとしては、再解析データや人工衛星データなど空間解像度の異なった様々なデータが多く提供されている。したがって使用する風速データの相違によって大気・海洋間CO₂収支にどのような相違が生じるか影響を検討する必要がある。本研究では、大気・海洋間CO₂収支を全球規模で推定し、比較を行うことで、どのような影響があるか検討を行った。使用した風速データは、NCEP-R1 (National Center for Environmental Prediction-Reanalysis)、NCEP-R2、NCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)、ECMWF-ERA40 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts- ECMWF Reanalysis 40-years)、JRA-55 (Japanese 55-years Reanalysis project) の再解析データ、そしてCCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) の複数人工衛星データである。時間解像度は全て6時間毎である。データ使用期間は2001年の一年間とした。全球規模での大気・海洋間CO₂収支の年平均を算出した。その結果、NCEP-R1、NCEP-R2、NCEP-CFSR、ECMWF、JRA-55/、CCMPは、それぞれ3.48、-4.27、-2.76、-2.23、-2.72、-2.69 (PgC/year) であり、最大で約2 PgC/yearと2倍以上の差があった。また緯度毎に比較した結果、各風速データセットの相違は、低緯度で小さく、中・高緯度で大きな差を示した。

キーワード

大気・海洋間CO₂収支, 大気・海洋間CO₂輸送速度, 全球海上風速データ, 空間解像度, 地球環境

内実験において強風時 (~ 60 m/s) までの風速に対しての砕波を含むCO₂輸送速度を計測し、室内実験における一様流での高度U_∞を用いた式を提案した。

1. はじめに

地球温暖化の主な要因の1つとなっている大気中のCO₂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大気・海洋間CO₂収支を正確に評価することは重要である。大気・海洋間CO₂収支は、CO₂輸送速度k_L (m/s)、海水におけるCO₂溶解度S (mol/m³atm)、大気・海洋間CO₂分圧差ΔpCO₂ (atm)の積で以下の式で表される。

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

ここで、CO₂輸送速度は、一般に高度10 mでの風速U₁₀のみの関数で表わされている (Liss and Merlivat (1986)、Wanninkhof (1992)、Wanninkhof and McGillis (1999)、McGillis (2001))。しかし、現場データにばらつきがあり、まだ確立された式はない。また、全球において風波、砕波、うねりなどの影響が考慮されていないことから、Zhao et al. (2003) や Woolf (2005)、鈴木・増田 (2014)、Suzuki et al. (2015) によって白波の面積比を用いたCO₂輸送速度の式が提供されている。しかし、白波の面積比を求める際に用いられる抵抗係数においても波浪などの考慮がなされていないことが原因などで現場データにばらつきがあるため多く式が提案されており、まだ確立されていない。近年、Iwano et al. (2013) が室

$$k_L = 1.54 U_{\infty}^{1.5} (S_{\text{CO}_2} / 660)^{-1/2} \quad (U_{\infty} < 19.3 \text{ m/s}) \quad (2)$$

$$k_L = 4.17 \times 10^{-2} U_{\infty}^{2.72} (S_{\text{CO}_2} / 660)^{-1/2} \quad (U_{\infty} \geq 19.3 \text{ m/s})$$

ここで、海洋観測においてU_∞は、

$$U_{\infty} = U_{10} + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{65}{10} \right) C_D^{0.5} U_{10} \quad (3)$$

と、高度65 mでの風速として求められる。また、(3) 式の抵抗係数C_Dは、

$$C_D = 4.4 \times 10^{-4} U_{10} \times 10^{0.5} \quad (U_{10} < 33.6 \text{ m/s}) \quad (4)$$

$$C_D = 2.55 \times 10^{-3} \quad (U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s})$$

で求められる (Takagaki et al., 2012)。このようにCO₂輸送速度は、多く提案されているが、用いられる海上風速データセットも空間解像度の異なるNCEP (National Center for Environmental Prediction)、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、JRA-55 (Japanese 55-years Reanalysis project) などの再解析データやCCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 複数人工衛星データなど種々のデータセットが提供されている。したがって、使用する風速デー

タの相違によって大気・海洋間CO₂収支に影響、さらには気候予測における予測精度に大きな影響をおよぼす可能性がある。

本研究では、空間解像度の異なる種々の全球規模風速データおよびIwano et al. (2013)のCO₂輸送速度算出式を使用し、大気・海洋間CO₂収支を全球規模で推定し、比較を行うことで、どのような影響があるかを検討することが目的である。

2. 全球規模海上風速データ

本研究で使用する全球規模海上風速データとしては以下の6種の空間解像度の異なるデータを使用した。時間解像度は6種全て6時間毎を使用した。

米国NOAA/OAR/ESRL PSD (National Oceanic and Atmospheric Administration/Oceanic and Atmospheric Research/Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division)の提供するNCEP/NCAR (National Center for Atmospheric Research) Reanalysis 1 (以下NCEP-R1)再解析データは、地球規模で過去40年間分の大気場における解析データを提供するプログラムである。使用した風速データの空間解像度は、1.875°×1.904° (Gaussian Grid)の東西192×南北94格子である。データ範囲は東経0度～358.125度、南緯88.542度～北緯88.542度である。

NCEP-R1と同様にNOAA/OAR/ESRL PSDの提供するNCEP/DOE (Department of Energy)再解析データ (通称NCEP-R2と呼ばれている)は、NCEP-R1を元に作成され、エラーおよび物理的プロセスの更新し、細分化された再解析データである。本研究では、NCEP-R1と同じデータ範囲のデータを使用した (Kalnay et al., 1996; Kanamitsu et al., 2002)。

NCEP-R1およびNCEP-R2と同様にNOAA/OAR/ESRL PSDの提供するNCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)再解析データは、1979年から2010年まで31年間分の大気場における解析データを提供するプロジェクトである。空間解像度は0.5°×0.5°の東西720×南北361格子であり、データ範囲は、東経0度～359.5度、南緯90度～北緯90度である (Saha et al., 2010)。

ECMWFより提供されているECMWF-ERA40 (ECMWF Reanalysis 40-years)再解析データ (以下ECMWF)は1957年9月から2002年8月までの観測データと数値予報モデルと同化することで作成された再解析データである。使用した風速データの空間解像度は、2.5°×2.5°の東西144×南北73格子である。データ範囲は、東経0.5度～359.5度、南緯89.5度～北緯89.5度である (Simmons and Gibson, 2000; Uppala et al., 2005)。

気象庁により提供されているJRA-55長期再解析データは、解析期間を従来のJRA-25のものから大幅に拡大し、1958年の55年間を対象とし、JRA-25における品質の問題点を改善した再解析データである。空間解像度は、1.25°×1.25°の東西288×南北145格子である。データ範囲は東経0度～358.75度、南緯90度～北緯90度である (Onogi et al., 2007; Ebata et al., 2011; Kobayashi et al., 2015)。

米国のNASA (National Aeronautics Space Administration)のJPL (Jet Propulsion Laboratory)のPO-DAAC (Physical Oceanography Distributed Archive Center)により提供されているCCMP

複合人工衛星データ (以下CCMP)は、米国のDMSP (Defense Meteorological Satellite Program) -F08、-F10、-F11、-F13、-F14、-F15、-F17のそれぞれの人工衛星に搭載されたマイクロ波放射計SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) センサ、米国と日本の共同のTRMM/TMI (Tropical Rainfall Measuring Mission/TRMM Microwave Imager)、米国のQuikSCAT/SeaWinds (Quick Scatterometer)、米国の人工衛星Aquaに日本が開発したマイクロ波放射計AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System) およびAMSRセンサ、日本のADEOS-II/SeaWinds、米国のCoriolis/WindSatなどの複数人工衛星からの風速データを結合することで時間的に均一にでき、空間解像度0.25°×0.25°で提供されている (Atlas et al., 2011)。

使用したデータ期間は、エルニーニョ・ラニーニャ期を含まない2001年の1年間を対象とした。

3. 大気・海洋間CO₂収支の算出

風速データセット6種とIwano et al. (2013)の(2)式を(1)式に用いることで、2001年の全球規模大気・海洋間CO₂収支の年平均を算出した。ここでCO₂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、海表面温度は6時間毎のNCEP-R1データセット、塩分濃度は35‰一定と仮定した。

その結果、大気から海洋への輸送 (以降、吸収とする) をマイナス、海洋から大気への輸送 (以降、放出とする) をプラスとしてNCEP-R1、NCEP-R2、NCEP-CFSR、ECMWF、JRA-55、CCMPは、それぞれ、-3.48 PgC/year (放出: 5.62、吸収: -9.10)、-4.27 PgC/year (放出: 8.16、吸収: -12.43)、-2.76 PgC/year (放出: 7.12、吸収: -9.88)、-2.23 PgC/year (放出: 6.78、吸収: -9.01)、-2.72 PgC/year (放出: 7.60、吸収: -10.32)、-2.69 PgC/year (放出: 7.25、吸収: -9.94)となった。最も大きい値を示したのはNCEP-R2で、最も小さい値を示したのはECMWFであり、その差は2.04 PgC/yearと2倍以上の相違を示した。

図1に各風速データセットに対する月毎の大気・海洋間CO₂収支を示す。どのデータセットにおいても8月が最もCO₂の放出量が大きく、1月が最もCO₂の吸収量が大きい。また、どのデータセットも1月から6月までと11、12月は吸収、7月から9月までは放出となっているが、10月のみNCEP-R1とNCEP-R2のみ吸収で他のデータセットは放出となっている。放出ではJRA-55が最も大きく、NCEP-R1が最も小さい値を示しているが、吸収ではNCEP-R2が最も大きく、ECMWFが最も小さい値を示している。年間を通してNCEP-CFSRとCCMPが同様な値を示している。また、NCEP-R1において放出が他のデータセットよりも非常に小さい値であるが、吸収では他のデータセットと同様な値を示していることから1年間の収支において大きな値を示していると考えられる。

風速との関係性を見るために、各風速データセットの月平均値を図2に示す。年間を通してNCEP-R2が最も大きく、NCEP-R1とECMWFが同様な風速値で最も小さいことがわかる。JRA-55、CCMP、NCEP-CFSRは同様な値を示している。年間を通してNCEP-R2の風速が大きいことから、1年間の大気・

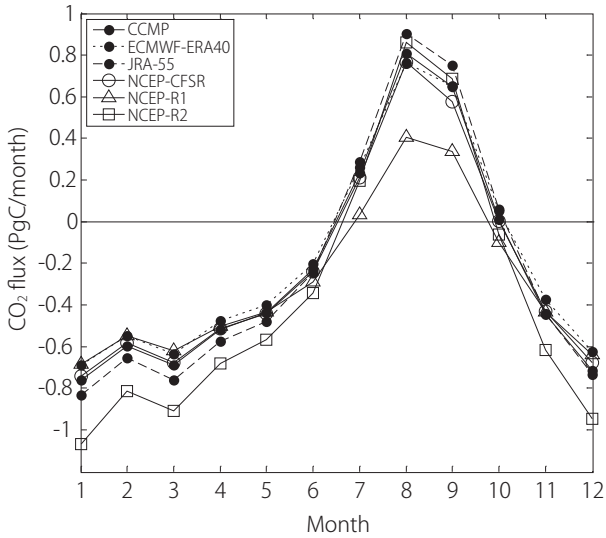


図1：各風速データセットにおける月毎の全球規模大気・海洋間CO₂収支の分布

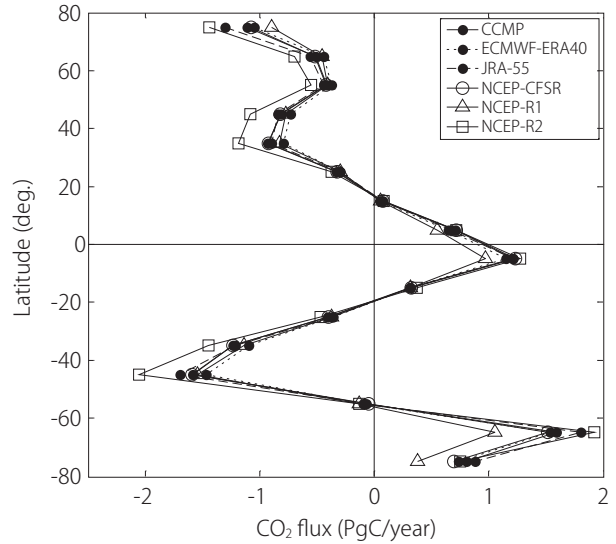


図3：各風速データセットにおける緯度10°毎の大気・海洋間CO₂収支の分布

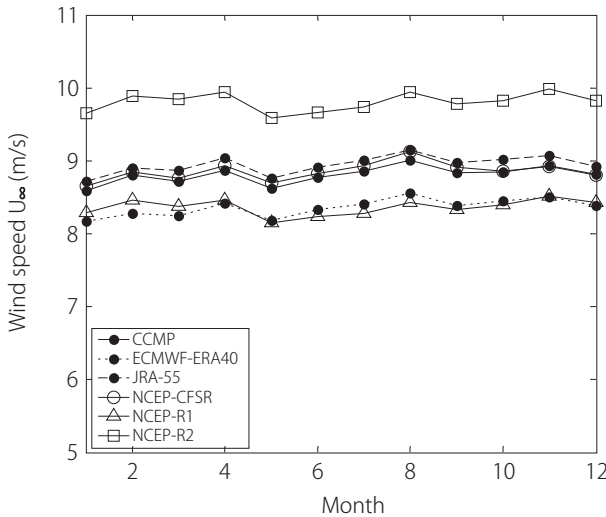


図2：各風速データセットの月平均の分布

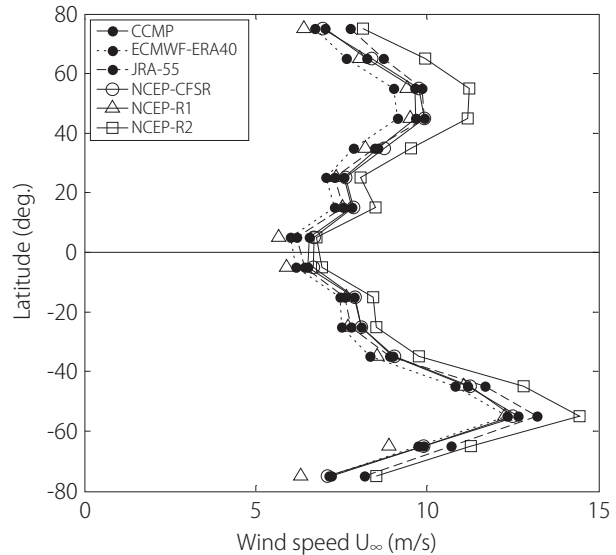


図4：各風速データセットの緯度10°毎の年平均分布

海洋間CO₂収支でも最も大きい値となったと考えられる。しかし、月毎における放出の月ではJRA-55が最も大きい値を示している。これは、NCEP-R2では放出も大きい吸収も大きいため、収支として見た場合としてJRA-55の方が収支として最も大きくなったと考えられる。また、大気・海洋間CO₂収支は海洋から大気への放出と大気から海洋への吸収の総和であり、その場所が放出であるか吸収であるかは大気・海洋間CO₂分圧差で決定され、さらには放出と吸収の領域は緯度や海域によって異なる。したがって、風速は輸送の促進力であるが、風速が大きければ、大気・海洋間のCO₂収支も大きくなるとは限らないことがこの結果から考えられる。

図3に1年間の大気・海洋間CO₂収支を緯度10°毎にプロットした結果を示す。中・高緯度で各風速データセットの差が大きく、低緯度で差が小さいことがわかる。図1の月毎の結果と同様に、緯度毎でも全体的にNCEP-R2が最も大きく、NCEP-R1が小さい値を示している。最も差が大きかったのは、

南緯60°～70°におけるNCEP-R1とNCEP-R2で0.87 PgC/yearの差を示した。図4に1年間の各風速データセットを緯度10°毎にプロットした図を示す。各風速データセットの差は、低緯度で小さく、中・高緯度で大きく、この傾向が大気・海洋間CO₂収支を緯度10°毎にも反映されていると考えられる。

全球を7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)に分けた局所的な大気・海洋間CO₂収支を表1に示す。どの海域においてもNCEP-R2が最も大きい値を示している。また、最も大きな差を示しているのは北太平洋でNCEP-R2とECMWFで約46% (差0.29 PgC/year)の相違を示した。赤道(大西洋)においては、どの風速データセットも同様な値を示している。海域毎においても全球および緯度毎と同様にNCEP-CFSR、JRA-55、CCMPは近い値を示しており、北大西洋においては3種とも同じ値を示している。どの風速データセット

表1：各風速データにおける海域毎の大気・海洋間CO₂収支

[N/m ²]	NCEP-R1	NCEP-R2	NCEP-CFSR	ECMWF	JRA-55	CCMP
北太平洋	-0.66	-0.92	-0.72	-0.63	-0.71	-0.70
赤道(太平洋)	0.50	0.73	0.67	0.66	0.69	0.69
南太平洋	-0.66	-0.89	-0.70	-0.63	-0.72	-0.71
インド洋	-0.49	-0.64	-0.49	-0.45	-0.52	-0.50
南大西洋	-0.36	-0.48	-0.35	-0.32	-0.39	-0.35
赤道(大西洋)	0.36	0.41	0.34	0.30	0.32	0.32
北大西洋	-0.50	-0.70	-0.54	-0.47	-0.54	-0.54

においても赤道領域が放出であり、他の海域は全て吸収となっている。

4. 結言

本研究では、NCEP-R1、NCEP-R2、NCEP-CFSR、ECMWF、JRA-55、CCMPの6種の全球規模風速データセットおよびIwano et al. (2013) のCO₂輸送速度算出式を使用し、大気・海洋間CO₂収支を全球規模で推定し、全球規模・緯度毎・海域毎で比較を行うことで、大気・海洋間CO₂収支にどのような影響があるかを検討した。

全球規模では、大気・海洋間CO₂収支の最大はNCEP-R2、最少はECMWFとなり、その差は約2 PgC/yearと大きな差となった。緯度10°毎では、各風速データセットによる大気・海洋間CO₂収支の差は、低緯度で小さく、中・高緯度で大きいことがわかった。また、南緯60°～70°で最大の差0.87 PgC/yearであった。また、7つの海域に分けて検討した結果、全球規模および緯度毎と同様にNCEP-R2が全ての海域で最も大きく、北太平洋でNCEP-R2とECMWFの差が約46%と最大となった。全球規模、緯度毎、海域毎におけるどの比較においてもNCEP-CFSR、JRA-55、CCMPの3種は似たような傾向および値を示した。

以上より風速の相違によって大気・海洋間CO₂収支は大きく異なり、風速に対する依存性が大きいことが示された。最近の再解析データが複数人工衛星のCCMPと同様な結果は、人工衛星データの同化技術が向上した結果と考えられる。本研究結果は大気・海洋間CO₂収支を正確に評価していくうえで重要な結果となるだろう。

引用文献

Atlas, R., Hoffman, N. R., Ardizzone, J., Leidner, M. S., Jusem, C. J., Smith, K. D. and Gombos, D. (2011). A cross-calibrated multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 92, 157-174.

Ebita, A., Kobayashi, S., Ota, Y., Moriya, M., Kumabe, R., Onogi, K., Harada, Y., Yasui, S., Miyaoka, K., Takahashi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Soma, M., Oikawa, Y. and Ishimizu, T. (2011). The Japanese 55-year reanalysis "JRA-55". an interim report, *SOLA*, Vol. 7., 149-152.

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.

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, K. S., Hnilo, J. J., Fiorino, M. and Potter, L.G. (2002). NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, 1631-1643.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, C.K., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. and Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, 437-471.

Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K. (2015). The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics, *Journal of Meteorological Society Japan*, Vol. 93, No. 1, 5-48.

Liss, S. P. and Merlivat, L. (1986). Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis. *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, Vol. 185, 113-127.

Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobatashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N. and Taira, R. (2007). The JRA-25 reanalysis. *Journal of Meteorological Society Japan*, Vol. 85, 369-432.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, L.H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, T.Y., Chuang, H., Juang, H. H.-M., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Delst, V.P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, W.R., Rutledge, G. and Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 8, 1015-1057.

Simmons, A. J. and Gibson, J. K. (2000). The ERA-40 project plan. ERA-40 Project Report Series No. 1, Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U.K.

- Suzuki, N., Donelan, A. M., Komori, S. and Takagaki, N. (2015). Estimation of the global air-sea CO₂ gas flux considering wave breaking. *Journal of Oceanography*, Vol. 71, 199-204.
- 鈴木直弥・増田循 (2014). 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. 科学・技術研究, Vol. 3, No. 2, 173-176.
- 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 shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L23604.
- Takahashi, T., Sutherland, C. S., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, A. R., Chipman, W. D., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Watson, A., Bakker, C. E. D., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Sabine, C., Olafsson, J., Arnarson, S. Th., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Körtzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., de Baar, W. J. H., Wong, S. C., Delille, B. and Bates, R. N. (2009). Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO₂ and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research Part II*, Vol. 56, No. 8, 554-577.
- Uppala, S. M., Kallberg, W. P., Simmons, J. A., Andrae, U., daCosta Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J. F., Morcrette, J. J., Rayner, N. A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P. and Woollen, J. (2005). The ERA-40 reanalysis. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, Vol. 131, No. 612, 2961-3012.
- 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, A. B. (1980). Nitrous oxide solubility in water and seawater. *Marine Chemistry*, Vol. 8, 347.

(受稿：2015年4月2日 受理：2015年5月13日)