

全球規模での大気・海洋間運動量フラックスにおける風速変動の影響

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

三浦 洋貴 (東亜外業株式会社)

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 wind variability on global air-sea momentum flux

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

Hiroki Miura (Toa Gaigyo Co., Ltd., 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

地球温暖化等の気候変動予測において大気・海洋間の運動量・熱・CO₂輸送を正確に評価することは重要である。また、その中でも、大気・海洋間運動量輸送は大規模な海流、風波、高潮など様々な海水運動の駆動源となっている。大気・海洋間運動量フラックスに用いられる主なパラメータは風速データである。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時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・海洋間運動量フラックス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・海洋間運動量フラックスを全球規模で推定し、相互比較を行うことで、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) /6時間毎、NCEP-R2/6時間毎、ECMWF-ERA40 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts- ECMWF Reanalysis 40-years) /6時間毎、JRA-55 (Japanese 55-years Reanalysis project) /3時間毎と6時間毎の再解析データ、そしてCCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) /6時間毎の複数人工衛星データである。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・海洋間運動量フラックスの年平均を算出した。その結果、NCEP-R1、NCEP-R2、ECMWF-ERA40、JRA-55/3時間毎、JRA-55/6時間毎、CCMPはそれぞれ0.116、0.179、0.119、0.135、0.135、0.129 N/m²であり、最大で差が約54%であった。また緯度毎に比較した結果、高緯度で大きな差を示した。時間解像度による違いは見られなかった。したがって、高風速域の高緯度で空間解像度の影響が大きいと考えられる。

キーワード

大気・海洋間運動量フラックス, 全球海上風速データ, 時空間解像度, 風速変動, 地球環境

1. はじめに

大気海洋相互作用において大気・海洋間運動量・熱・CO₂輸送を正確に評価することは地球温暖化等の気候予測で重要である。その中でも、大気・海洋間運動量輸送は、風から運動エネルギーや運動量が輸送され、大規模な海流、風波、高潮など様々な海水運動の駆動源となっている。また、このような海水運動は、海洋の温度にも影響し、さらには大気へ作用する。

大気・海洋間運動量フラックスは、

$$\tau = \rho C_D U_{10}^2 \quad (1)$$

で表される。ここで、 ρ は大気密度(1.2Kg/m³)、 U_{10} は海上10 mでの風速、 C_D は抵抗係数である。また、一般的に抵抗係数は、風速の関数で表されており多く提案(Charnock, 1955; Smith, 1980; Large and Pond, 1981; Yelland and Taylor, 1996; Takagaki et al., 2012) されているが確立された式はなく、代表的にはCharnock (1955)の次式(係数はWu (1980) が提案) が用いられることが多い。

$$C_D = (0.8 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} \quad (2)$$

しかし、現場海洋観測データはばらつきが大きいと、抵抗係数を表す式に関しては、未だに多くの議論がなされているのが現状である。全球規模での風速データは、時空間解像度の異なったNCEP (National Center for Environmental Prediction)、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、JRA-55 (Japanese 55-years Reanalysis project) などから再解析データやCCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 複数人工衛星データなど多く提供されている。使用する風速データの相違によって大気・海洋間運動量フラックスに影響をおよぼすことが考えられる。さらには気候予測における予測精度にも大きく作用する。

本研究では、時空間解像度の異なる種々の全球規模風速データおよびCharnock (1955) の抵抗係数算出式を使用し、大気・海洋間運動量フラックス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種の時空間解像度の異なるデータを使用した。

米国NOAA/OAR/ESRL PSD (National Oceanic and Atmo-

spheric 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時間解像度は 6 時間毎、空間解像度は、 $1.875^{\circ} \times 1.904^{\circ}$ (Gaussian Grid) の東西 $192 \times$ 南北 94 格子である。データ範囲は東経 0 度 \sim 358.125 度、南緯 88.542 度 \sim 北緯 88.542 度である。

上記と提供場所の 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。NCEP-R1 とデータ範囲、時空間解像度は同じであり、本研究では、同様の 6 時間毎のデータを使用した (Kalnay et al., 1996; Kanamitsu et al., 2002)。

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時間解像度は 6 時間毎、空間解像度は、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ の東西 $144 \times$ 南北 73 格子である。データ範囲は、東経 0.5 度 \sim 359.5 度、南緯 89.5 度 \sim 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。時間解像度は、3 時間毎、6 時間毎、空間解像度は、 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ の東西 $288 \times$ 南北 145 格子である。データ範囲は東経 0 度 \sim 358.75 度、南緯 90 度 \sim 北緯 90 度である (Onogi et al., 2007; Ebita 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、時間解像度 6 時間毎、空間解像度 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 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・海洋間運動量フラックスの算出

全球規模風速データ 6 種と Charnock (1955) の (1) 式によって 2001 年の全球規模大気・海洋間運動量フラックスの年平均を算出した。その結果、NCEP-R1、NCEP-R2、ECMWF、JRA-55/3 時間毎、JRA-55/6 時間毎、CCMP は、それぞれ 0.116 、 0.179 、 0.119 、 0.135 、 0.135 、 0.129 N/m^2 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 NCEP-R1 であり、その差は約 54% であった。

図 1 に各風速データの大気・海洋間運動量フラックスの月平均を示す。図 1 より JRA-55/3 時間毎の値と JRA-55/6 時間毎の値が年間を通してほぼ同じ値を示している。また、年間を通して NCEP-R2 による値が最大を示している。NCEP-R1 が年平均では最も小さいが、月平均では 1 月から 4 月において ECMWF と近い値を示している。風速の月平均値を図 2 に示す。風速の月平均では 1 月から 4 月は ECMWF の方が大きい値をとっていることがわかる。そこで図 3 に 1 月から 4 月までの全球で占める風速毎の割合を示す。全球で風速 9 m/s 以上の割合が NCEP-R1 の方が大きい。したがって、大気・海洋間運動量フラックスの (1) 式より風速が 2 乗されるため、高風速

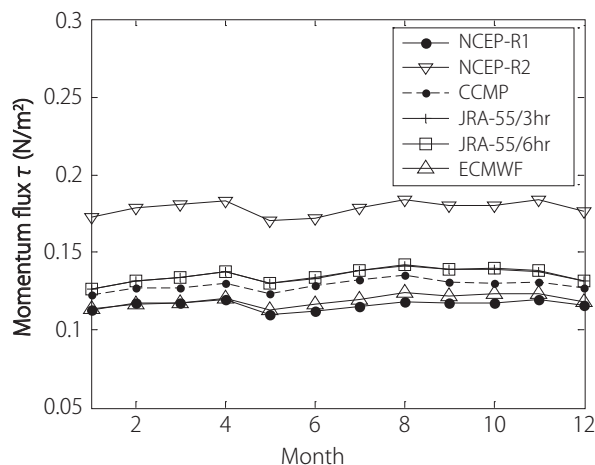


図 1: 各風速データにおける全球規模大気・海洋間運動量フラックスの月平均分布

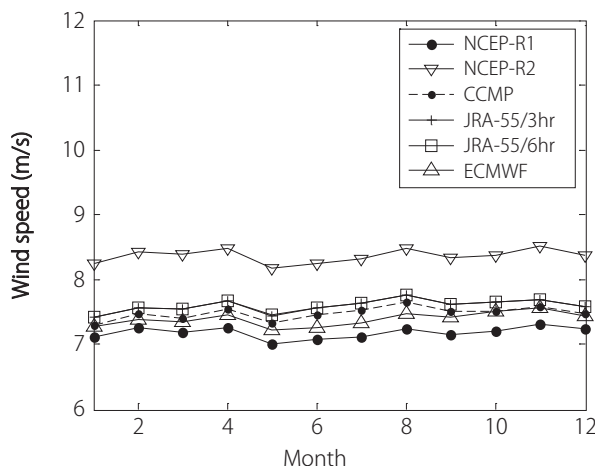


図 2: 全球規模における各風速データの月平均分布

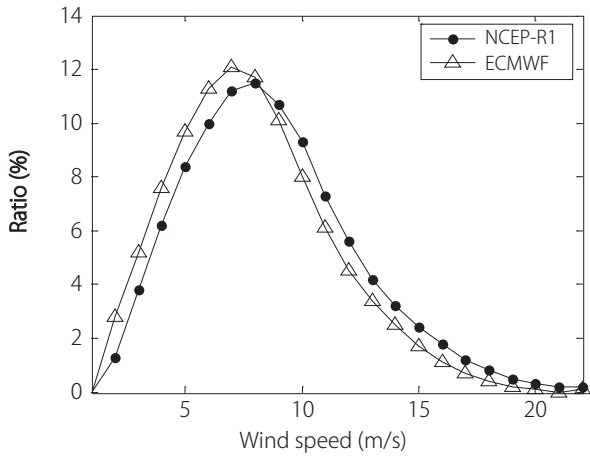


図3：NCEP-R1とECMWF風速データの1月から4月までの全球風速における各風速帯の占める割合

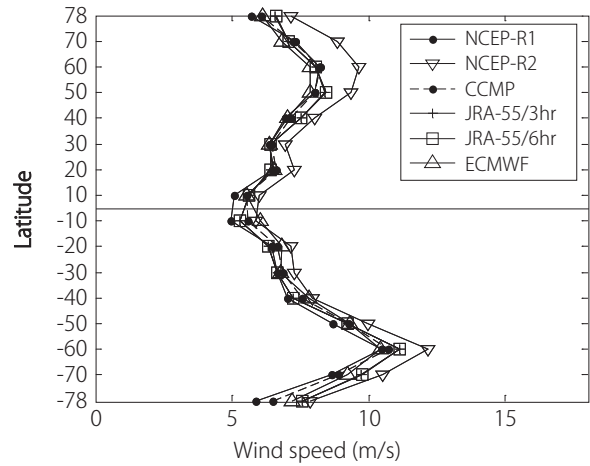


図5：緯度毎の各風速データの月平均分布

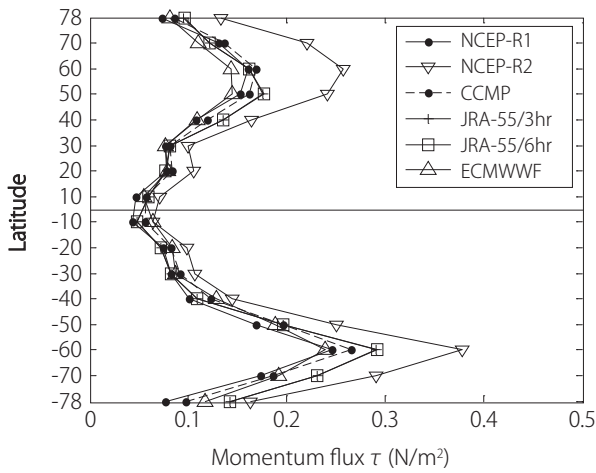


図4：緯度毎の全球規模大気・海洋間運動量フラックスの年平均分布

の割合が大きいNCEP-R1の大気・海洋間運動量フラックスがECMWFに近い値を示したと考えられる。また、図2の風速の月平均において10月から12月のCCMPとECMWFが近い値を示しているが、大気・海洋間運動量フラックスでは差が生じている。これも同様にCCMPの高風速の割合がECMWFよりも大きいためと考えられる。

図4に大気・海洋間運動量フラックスの北緯78°から南緯78°まで緯度10°毎の年平均を示す。どの風速データにおいても同様な傾向となり、中・高緯度で大きな値、低緯度で小さい値を示した。全球年平均および月平均の結果と同様にJRA-55/3時間毎とJRA-55/6時間毎は同様な値を示した。また、どの緯度帯においてもNCEP-R2が最も大きな値となった。最も差が大きかったのは南緯60°でNCEP-R2とECMWFの差が約58%となった。低緯度では各風速データの差は小さいことが

表1：各風速データにおける海域毎の大気・海洋間運動量フラックスの年平均分布

| (N/m ²) | NCEP-R1 | NCEP-R2 | CCMP | JRA-55/3hr | JRA-55/6hr | ECMWF |
|---------------------|---------|---------|-------|------------|------------|-------|
| 北太平洋 | 0.109 | 0.165 | 0.123 | 0.120 | 0.120 | 0.113 |
| 赤道(太平洋) | 0.039 | 0.060 | 0.056 | 0.053 | 0.053 | 0.059 |
| 南太平洋 | 0.137 | 0.201 | 0.149 | 0.146 | 0.146 | 0.126 |
| インド洋 | 0.130 | 0.191 | 0.140 | 0.142 | 0.142 | 0.122 |
| 南大西洋 | 0.150 | 0.221 | 0.157 | 0.164 | 0.165 | 0.136 |
| 赤道(大西洋) | 0.047 | 0.064 | 0.046 | 0.040 | 0.040 | 0.040 |
| 北大西洋 | 0.096 | 0.145 | 0.096 | 0.093 | 0.093 | 0.091 |

表2：海域毎の各風速データの年平均分布

| (m/s) | NCEP-R1 | NCEP-R2 | CCMP | JRA-55/3hr | JRA-55/6hr | ECMWF |
|---------|---------|---------|------|------------|------------|-------|
| 北太平洋 | 7.07 | 8.12 | 7.31 | 7.33 | 7.33 | 7.29 |
| 赤道(太平洋) | 4.82 | 5.75 | 5.69 | 5.60 | 5.60 | 5.82 |
| 南太平洋 | 7.89 | 8.96 | 8.16 | 8.01 | 8.01 | 7.75 |
| インド洋 | 7.50 | 8.59 | 7.71 | 7.64 | 7.64 | 7.42 |
| 南大西洋 | 8.26 | 9.36 | 8.26 | 8.41 | 8.42 | 7.99 |
| 赤道(大西洋) | 5.25 | 5.99 | 5.15 | 4.77 | 4.75 | 4.94 |
| 北大西洋 | 6.61 | 7.68 | 6.42 | 6.33 | 6.33 | 6.43 |

わかる。図5に示す風速の緯度 10° 毎の年平均を見ると、中・高緯度で大きい値、低緯度で小さい値をしめしており、大気・海洋間運動量フラックスに風速の傾向が反映されていることがわかる。

海域においても特性が異なることが考えられるため、全球を7つの海域（北太平洋、赤道（太平洋）、南太平洋、インド洋、南大西洋、赤道（大西洋）、北大西洋）に分けて大気・海洋間運動量フラックスを算出した。表1に各海域・各風速データにおける大気・海洋間運動量フラックスの年平均を示す。JRA-55/3時間毎とJRA-55/6時間毎は海域毎においても同様な値となっている。また、どの海域においてもNCEP-R2が最も大きい値を示している。最も差が大きいのは南大西洋のNCEP-R2とECMWFで約62%であった。表2に各海域における各風速の年平均を示す。ここで南大西洋においてNCEP-R1とCCMPの風速が同じであるが、大気・海洋間運動量フラックスでは差が生じている。これは図6の南大西洋での占める風速の割り、CCMPの方が高風速域の割合が大きいことがわかる。大気・海洋間運動量フラックスの式より2乗されるため風速の平均が同じであっても大気・海洋間運動量フラックスでは差が生じたと考えられる。赤道（太平洋）では、各風速データの差が最も小さいことがわかる。

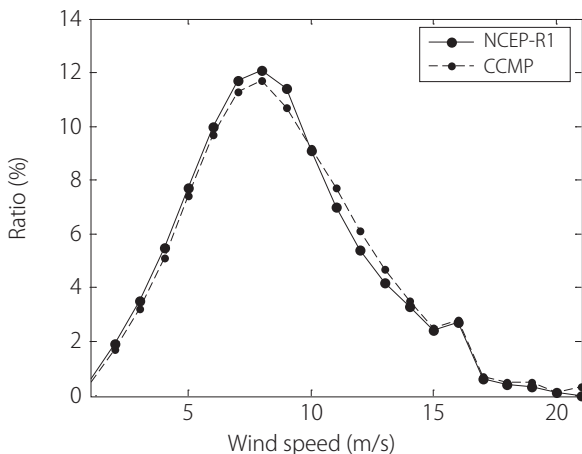


図6：NCEP-R1とCCMP風速データの南大西洋における各風速帯の占める割合

北太平洋における大気・海洋間運動量フラックスの月平均を図7に示す。ここでもJRA-55/3時間毎とJRA-55/6時間毎は年間を通してほぼ同じ値を示している。全体的な傾向はどの風速データも同様である。また、風速と傾向を調べるために図8に風速の月平均を示す。9月から12月においてCCMP、JRA-55、ECMWFの風速の月平均はほぼ同じ値を示しているが、大気・海洋間運動量フラックスでは差が生じている。そこで北太平洋における9月から12月までに占める風速帯の割合を図9に示す。高風速割合がCCMP、JRA-55、ECMWFの3種で異なっていることがわかる。これにより大気・海洋間運動量フラックスは式より風速が2乗されるため、大気・海洋間運動量フラックスの値が異なると考

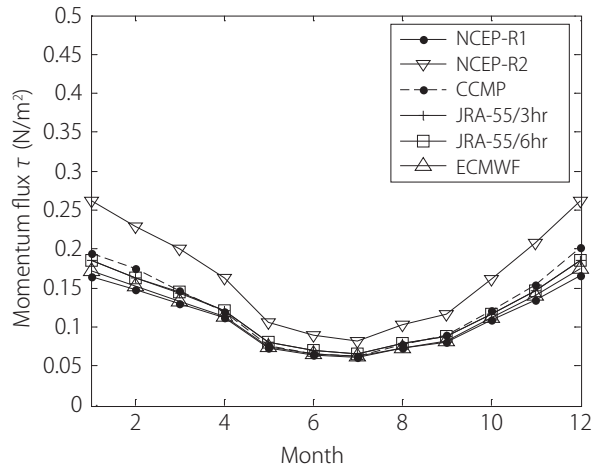


図7：各風速データにおける北太平洋での大気・海洋間運動量フラックスの月平均分布

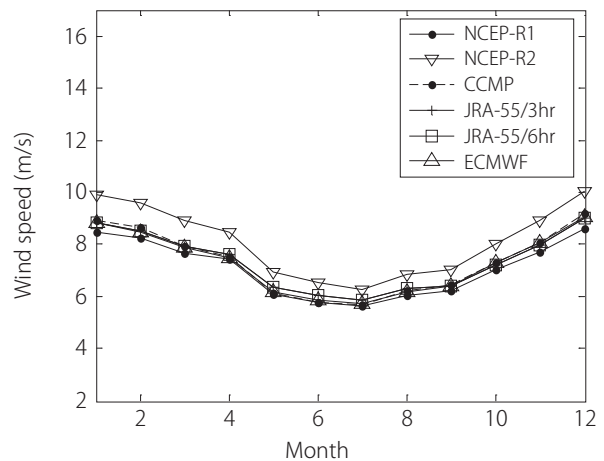


図8：北太平洋における各風速データの月平均分布

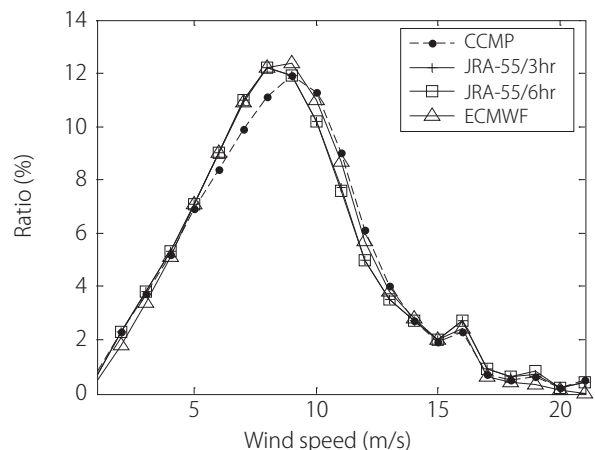


図9：CCMP、JRA-55/3時間毎と6時間毎、そしてECMWFの風速データの9月から12月までの北太平洋における各風速帯の占める割合

えられる。南大西洋と北太平洋以外の他の海域においては、大気・海洋間運動量フラックスは風速と同様の傾向を示した。

風速の平均値と大気・海洋間運動量フラックスの平均値が異なり、風速帯の割合が関係していることがわかった。これは、低空間解像度と高空間解像度の差で、低空間解像度の場合は、風速値が広範囲で平均化されてしまうため、高空間解像度の方が高風速域の割合が高くなっていると考えられる。低空間解像度では実際に風速変動が激しい領域でも平均化されてしまうが、高空間解像度では風速変動が考慮されるため、月平均や局所で見た場合に大気・海洋間運動量フラックスの値に影響が出てくると考えられる。なお、ECMWFの3時間毎と6時間毎において時間解像度の相違は、見られなかった。

4. 結言

本研究では、時空間解像度の異なる全球規模風速データとしてNCEP-R1、NCEP-R2、ECMWF、JRA-55/3時間毎、JRA-55/6時間毎、CCMPの6種、およびCharnock (1955) の抵抗係数算出式を使用し、大気・海洋間運動量フラックス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・海洋間運動量フラックス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・海洋間運動量フラックスの最大はNCEP-R2、最少はNCEP-R1となり、その差は約54%と大きな差となった。月平均ではNCEP-R1とECMWF、CCMPとECMWFにおいて空間解像度の相違による風速変動の影響と考えられる風速の平均値との相違が見られた。

緯度10°毎では、各風速データによる大気・海洋間運動量フラックスの差は、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°で最大の差をとり約58%であった。

7つの海域に分けて検討した結果、南大西洋でNCEP-R2とECMWFの差が約62%と最大となった、また、南大西洋におけるNCEP-R1とCCMP、そして北太平洋におけるCCMP、JRA-55、ECMWFにおいて空間解像度の相違による風速変動の影響と考えられる風速の平均値との相違が見られた。

JRA-55/3時間毎とJRA-55/6時間毎はほぼ同じ値となり、時間解像度の相違による風速変動の影響は見られなかった。

以上より、使用する風速データによって大気・海洋間運動量フラックスに大きな差が生じることが示された。したがって、気候変動予測において、この差を考慮することで予測精度の評価に繋がるもの考えられる。また再解析データを作成するモデル等の精度向上にも貢献するだろう。

大気・海洋間運動量フラックスを算出する際に用いられる抵抗係数の式が多く提案されていることについて、式の相違による大気・海洋間運動量フラックスの影響を正確に評価する必要があるだろう。

引用文献

- Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K. 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.
- Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, Vol. 81, 639-640.
- 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.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J. Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fiorino, M. and Potter, G. L. (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, K. C., 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, doi: 10.2015/jmsj.2015-001.
- 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.
- Simmons, A. J. and Gibson, K. J. (2000). The ERA-40 project plan. ERA-40 project report series, 1, Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U.K., 62 pp.
- Uppala, S. M., Kallberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., daCosta Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, K. J., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, A. G., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, P. R., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, A. M., Beljaars, M. C. A., 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, J. B., Isaksen, I., Janssen, M. E. A. P., Jenne, R., McNally, P. A., Mahfouf, F. J., Morcrette, J. J., Rayner, A. N., Saunders, W. R., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, E. K., 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.

Wu, J. (1980). Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions: A revisit, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 10, 727-740.

(受稿：2015年2月26日 受理：2015年3月18日)