

人工衛星マイクロ波放射計 SAC-D/Aquarius から得られる全球規模海上風速 Level 3 データの精度検証

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

塚本 誠二 (株式会社朝日ファシリティズ)

Accuracy of the Level 3 data of oceanic winds obtained from SAC-D/Aquarius

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

Seiji Tsukamoto (Asahi Facilities Inc., Japan)

要約

大気・海洋間の運動量・熱・CO₂乱流輸送における促進力として海上風速は重要なパラメータである。したがって、全球規模で海上風速を観測可能な人工衛星データが有用である。人工衛星による海上風観測は、マイクロ波散乱計・放射計が用いられる。海上風速・風向のみであれば、マイクロ波散乱計が高解像度で全球観測に優れているが、軽量であり関連した他の観測パラメータを同時に観測できるという利点からマイクロ波放射計を搭載した人工衛星も多い。現在の最新では、SAC-D/Aquarius (Satellite de Aplicaciones Cientificas-D/Aquarius) が海表面塩分濃度の観測目的で海上風速もマイクロ波放射計で観測している。また、最近グリッド化されたLevel 3データの配布が開始されたため、精度検証をすることが重要である。本研究では、SAC-D/Aquariusの風速Level 3データをブイデータと比較することで精度検証を行った。ブイデータは、TAO (Tropical Atmosphere Ocean) /TRITON (Triangle Trans-Ocean Buoy Network) ブイ (26点)、PIRATA (Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic) ブイ (16点)、RAMA (Research Moored Array for African-Australian Monsoon Analysis and Prediction) ブイ (20点)、NDBC (National Data Buoy Center) ブイ (19点) である。データ使用期間は2012年の一年間とした。全球規模におけるブイ風速に対するSAC-D/Aquarius風速のRMS差を算出した結果、1.76 m/sとなり公証測定精度1.5 m/sより高く、精度が悪くことが示された。また海域毎に分けてRMS差では、インド洋、北大西洋、北太平洋が、それぞれ1.73、2.15、2.49 m/sと精度が悪く、赤道太平洋、赤道大西洋は、それぞれ1.46、1.30 m/sで精度が良かった。全体的な傾向としてSAC-D/Aquarius風速がブイ風速より大きく見積もる傾向も示された。

キーワード

Aquarius, 風速, マイクロ波放射計, ブイ風速, 全球規模

1. はじめに

海上風によって海洋に運動量が与えられ、海表面の海水を駆動させる。また、大気・海洋間熱やCO₂の乱流輸送のパラメータとして重要なパラメータであるため、正確な海上風速データが必要である。これまで、海上風速の観測は船舶やブイが主流であったが、船舶観測は航路沿い、ブイは赤道域に集中しているため、空間的に不均一である。そこで全球規模において人工衛星による観測は有用である。

人工衛星による海上風速の観測は、マイクロ波散乱計や放射計が用いられる。マイクロ波散乱計は、海面に向けてマイクロ波を送信し、海面からの後方散乱強度を観測して風速と風向を算出するものであり、風速・風向観測に特化している。一方、マイクロ波放射計は、海面から自然に放射される微弱なマイクロ波の強度を観測して風速を算出するものである。マイクロ波放射計は、風向は算出できないが、軽量であり、周波数帯によって海表面温度や水蒸気などを算出することができるため、他の観測項目と同時に観測することができる利点がある。

実用的なマイクロ波放射計は、1987年に打ち上げられた米国空軍のDMSP/SSM/I (Defense Meteorological Satellite Program/Special Sensor Microwave/Imager) が最初である。2002

年に日本のJAXA (宇宙航空研究開発機構) がADEOSII/AMSR (Advanced Earth Observing Satellite-II/Advanced Microwave Scanning Radiometer)、同年に米国NASA (National Aeronautics Space Administration) の人工衛星EOS-Aqua/AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) に日本の改良型センサを搭載するなど、多くの人工衛星にマイクロ波放射計は搭載されている。近年では2011年にアルゼンチンのCONAE (Comision Nacional de Actividades Espaciales) とNASAによってSAC-D/Aquarius (Satellite de Aplicaciones Cientificas-D/Aquarius) が打ち上げられた。なお、SAC-D/Aquariusは、一般的に利用しやすいグリッド化されたLevel 3データが2014年に配布されたばかりである。Level 2データの時点での精度検証は行われているが (Biswas et al., 2012; Fore et al., 2014)、Level 3データにおいてもグリッド化するモデルが使用されるため精度検証が必要である。なお、人工衛星は海面の状態を観測しているため間接的な観測値であるため、実際に風速を計測しているブイでの観測値と比較する必要がある。また、人工衛星からの風速データは高度10 mでの風速に変換されているため、ブイデータにおいても高度10 mでの風速のデータを使用しなければならない。

本研究では、人工衛星マイクロ波放射計SAC-D/Aquariusから得られる海上風速データをブイデータと全球規模で比較することにより精度検証を行うことが目的である。

2. 全球規模海上風速データおよび検証方法

2.1 人工衛星マイクロ波放射計 Aquarius データ

SAC-D/Aquarius (以降Aquarius) はCONAEとNASAによって共同開発され、2011年6月に打ち上げられた。Aquariusは海表面塩分濃度の観測を主な目的としている。高度657 km、軌道傾斜角98°、回帰日数7日、周期98分の太陽同期ダウンタスク軌道である。海上風速、降水、水蒸気、雲水量、海氷を観測するマイクロ波放射計MWR (Microwave Radiometer) も搭載されている。観測幅380 kmにわたり空間分解能50 kmで海上風をカバーでき、1日に地球表面の約80%を観測する。風速データの提供は、一般的に使用できるグリッド化されたLevel 3データの配布が2014年5月30日に開始された。空間分解能は1°×1°、時間分解能は1日毎である。現在、利用できるデータ期間は2011年8月25日から2014年12月31日である(Aquarius User Guide, 2014)。

2.2 ブイデータ

精度検証に用いたデータは、熱帯太平洋海域に展開しているTAO (Tropical Atmosphere Ocean) ブイおよび東インド洋西部海域において展開しているTRITON (Triangle Trans-Ocean Buoy Network) ブイで通称TAO/TRITOを使用した。米国のNOAA/PMEL (National Oceanic and Atmospheric Administration/Pacific Marine Environmental Laboratory) と日本の海洋科学技術センター (Japan Marine Science and Technology Center : JAMSTEC) によって運用されている。1979年から展開されており、67基が東西方向に137°E-95°W、南北方向に9°N-8°Sの海域で稼働している。本研究では、熱帯太平洋海域の26基のブイを使用した。

大西洋海域ではPIRATA (Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic) ブイを使用した。このブイは、アメリカ、フランス、ブラジルが協力し、NOAA/PMELにより管理されている。1997年から展開されており、20基が東西方向で38°W~8°E、南北方向で19°S~21°Nの海域で稼働

している。本研究では、16基のブイを使用した。

インド洋海域ではNOAA/PMELが運用・管理しているRAMA (Research moored Array for African-Asian-Australian Monsoon analysis and prediction) ブイを使用した。1993年から展開されており、27基が東西方向で55°E~100°E、南北方向で16°S~15°Nの海域で稼働している。本研究では、20基のブイを使用した。

米国NDBC (National Data Buoy Center) が東太平洋、ハワイ周辺、西大西洋海域において管理しているブイを使用した。1979年から展開しており、110基の係留ブイと50基のC-MAN(Coastal-Marine Automated Network) Stationが展開されている。本研究では、19基のブイを使用した。

上記の観測されたブイデータは米国NDBCによって配信されている。どのブイも1年間連続して観測されているわけではないため、本研究では長期間連続して観測しているブイを選択して使用した。使用したブイの位置を図1に示す。

2.3 検証方法

データは2012年の1年間分のデータに対して精度検証を行った。データの観測時刻について、ブイから提供される風速データが10分毎となっているが、Level 3のAquarius風速データの時間解像度が1日毎であるため、ブイも日平均のデータを使用し精度検証を行った。

検証の方法として、全球規模・海域別・局所別において、ブイの風速データに対してAquarius風速データをプロットした分布図を出した。またRMS差 (Root Mean Square) による比較を行い、精度検証を行った。Aquarius風速の公証測定精度はなかったため、マイクロ波放射計を搭載している人工衛星の中で公証測定精度の一番厳しいAqua/AMSER-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) の公証測定精度1.5 m/sより検証を行った。なお、RMS差は次式によって求められる。

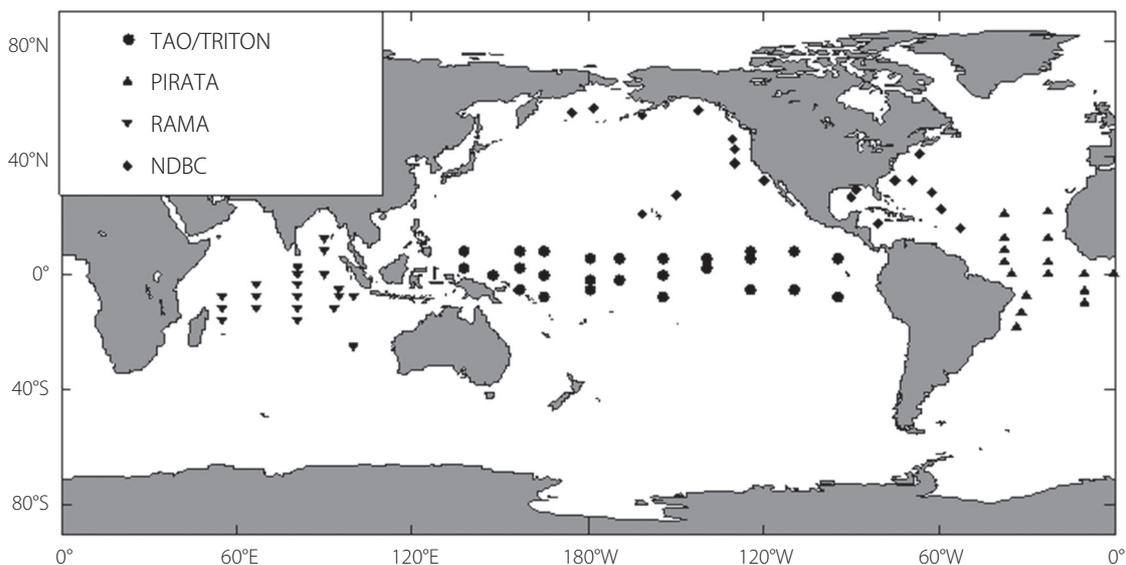


図1：使用したブイの位置

$$RMS差 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{e_i} - X_{b_i})^2}{N}} \quad (1)$$

ここで、 X_{e_i} はAquarius風速、 X_{b_i} はブイの風速データ、 N はデータ数である。

3. 結果

全球規模でのブイ風速に対するAquarius風速データのRMS差は1.76 m/sとなり公証測定精度1.5 m/sを超えたため、精度が良いとは言えない。図2にブイ風速に対するAquarius風速の分布図を示す。13 m/s以下でばらつきが大きいことがわかる。また、10 m/s以上でAquarius風速側にプロットが寄っているため、高風速域でAquarius風速が過大評価する傾向にあることがわかる。

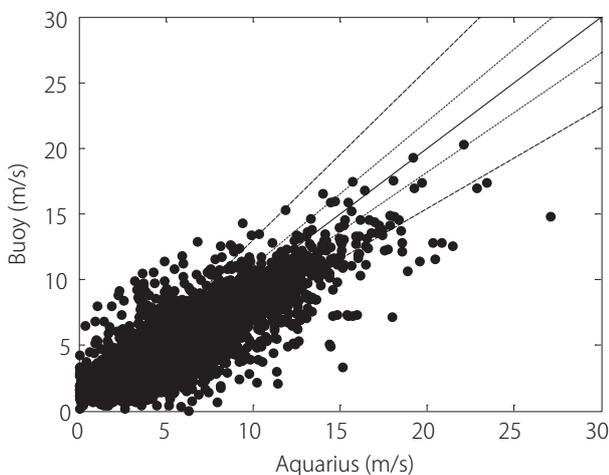


図2：全球規模でのAquarius風速に対するブイ風速の分布

注：直線／Aquarius風速とブイ風速が等しい、点線／誤差±10%、破線／誤差±30%

全球規模に対して公証測定精度を超えた原因を調べるために、赤道太平洋、赤道大西洋、北太平洋、北大西洋、インド洋の5つの海域に分けて検証を行った。各海域でのRMS差は、赤道太平洋、赤道大西洋、北太平洋、北大西洋、インド洋においてそれぞれ1.46、1.30、2.49、2.15、1.73 m/sとなり、北太平洋、北大西洋、インド洋は公証測定精度を超え精度が悪く、赤道太平洋と赤道大西洋は公証測定精度以内となり精度が良かった。図3に各海域のブイ風速に対するAquarius風速の分布図を示す。どの海域においてもAquarius風速が過大評価する傾向が見られる。精度の良かった赤道太平洋と赤道大西洋は、分布図において他の海域に比べてばらつきが少なく、プロットが中心に集まっていることがわかる。特に精度の悪かった北太平洋と北大西洋は、ばらつきが大きいのがわかる。なお、各海域のブイ地点毎のRMS差を表1から5に示す。海域では精度が良かった赤道太平洋と赤道大西洋においても公証測定精度を超えるブイ地点があることがわかる。逆に精度の悪かった海域におけるブイ地点のほとんどが公証測定精度

を超えているが、その中でも公証測定精度以内の精度の良いブイ地点も見られる。精度向上のため、各海域内で最も精度が低いブイ地点において原因を調べた。

インド洋で最も精度が低かったブイ地点は、表1より5°S95°EでRMS差は3.68 m/sである。この地点では、夏季は南西モンスーンが吹き、反時計回りの海流となり、冬季は北東モンスーンが吹き、時計回りの海流となる。海流と同方向に風が吹く場合と海流と逆方向に風が吹く場合では、海流がない場合と比べて海面の粗さが大きくことなり、海面の粗さを測定している人工衛星の精度が悪くなることが示唆されている (Kelly et al., 2001)。これによって精度が低下したと考えられる。

北太平洋で最も精度が低かったブイ地点は、表2より54°N161°WでRMS差は2.76 m/sである。この地点では、アラスカ海流が流れており、Kelly et al. (2001) で示唆されている海流上に風が吹く場合に精度が低下することから精度が低下したと考えられる。

北大西洋で最も精度が低かったブイ地点は、表3より41°N67°WでRMS差は3.51 m/sである。この地点では、世界2大海流の一つであるガルフストリームがある。この海流によってKelly et al. (2001) で示唆されている海流上に風が吹く場合に精度が低下することから精度が低下したと考えられる。

赤道太平洋で最も精度が低かったブイ地点は、表4より8°S165°EでRMS差は2.01 m/sである。南太平洋海流が南東方向に流れており、貿易風が北西方向に吹いており、海流と風向が逆向きであるため、Kelly et al. (2001) で示唆されている精度低下の状態と同様であり精度が低下したと考えられる。

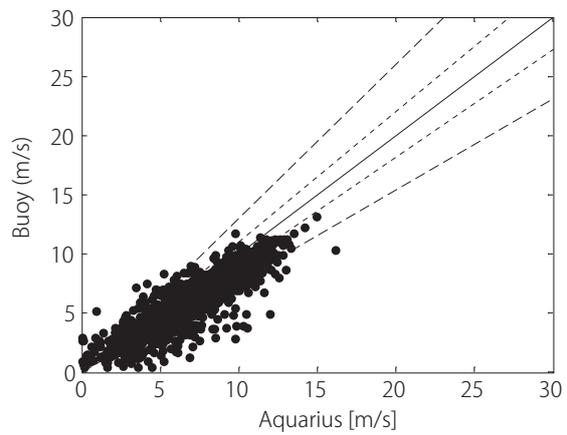
赤道大西洋で最も精度が低かったブイ地点は表5より、4°N23°WでRMS差は1.80 m/sである。赤道逆流が東向き、貿易風が南西向きであり、海流と風向が逆向きであるため、ここでもKelly et al. (2001) で示唆されている精度低下の状態と同様であり精度が低下したと考えられる。

赤道域ではエルニーニョ、ラニーニャなど全球の気候に影響を及ぼす気候変化が生じる海域であるため、多くのブイが展開されており、詳細な物理メカニズムや気候変化の調査がされており、その結果が人工衛星の風速推定アルゴリズムに反映されているため、赤道太平洋と赤道大西洋の精度が良かったと考えられる。しかし、インド洋、北太平洋、北大西洋では赤道域に比べてブイの展開数が少なく、風速や水温の変化も激しいこともAquarius風速の精度が低下の原因と考えられる。

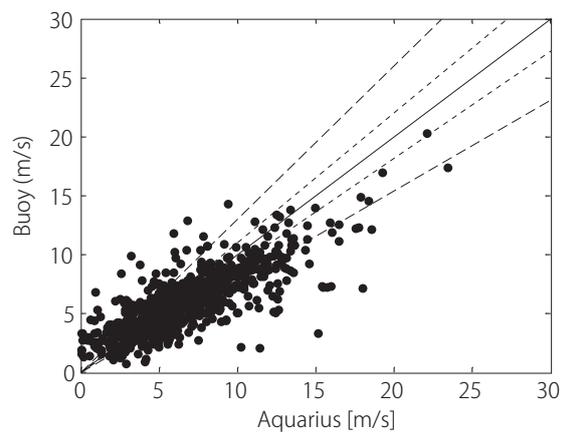
4. 結言

本研究では、人工衛星マイクロ波放射計SAC-D/Aquariusによる全規模海上風速データの精度についてブイの風速データと比較し散布図およびRMS差（公証測定精度1.5 m/s未満）で精度検証を行った結果、以下のことが言える。

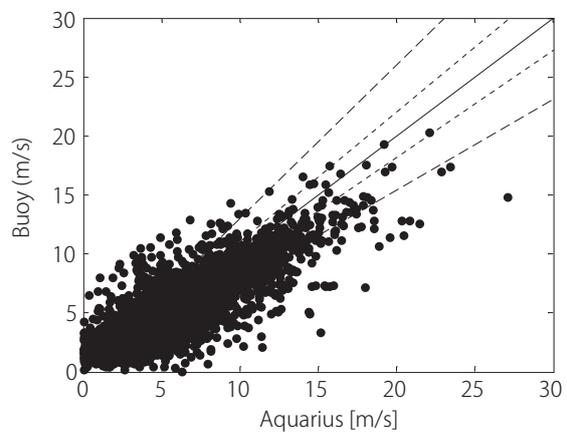
- (1) 全球規模におけるSAC-D/Aquarius風速のRMS差は1.76 m/sであり風速の精度は良いとは言えなかった。
- (2) インド洋、北太平洋、北大西洋のSAC-D/Aquarius風速のRMS差はそれぞれ1.73、2.07、2.49 m/sであり精度が悪く、



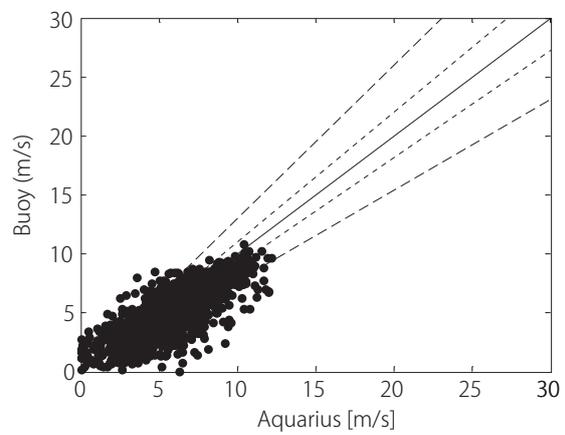
(a) インド洋



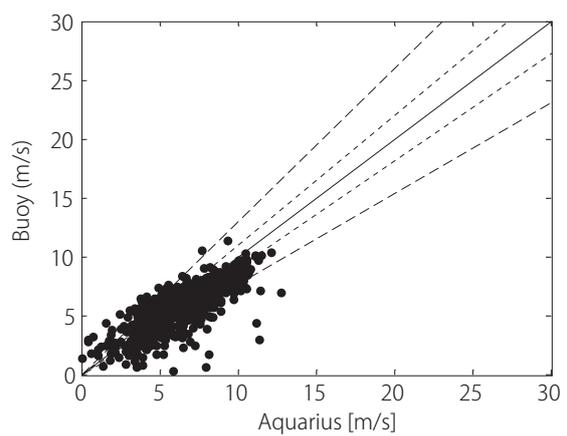
(b) 北大西洋



(c) 北太平洋



(d) 赤道太平洋



(e) 赤道大西洋

図3：各海域でのAquarius風速に対するブイ風速の分布
 注：直線／Aquarius風速とブイ風速が等しい、点線／誤差±10%、破線／誤差±30%

表1:インド洋での各ブイ地点でのAquarius風速のRMS差 (m/s)

海域	ブイ	座標	RMS差
インド洋	RAMA	0n81e	1.80
		0n90e	2.48
		2n81e	1.53
		4s67e	1.48
		4s81e	2.10
		5s95e	3.68
		8n90e	1.35
		8s55e	1.80
		8s67e	2.00
		8s81e	1.76
		8s95e	1.62
		12n90e	1.10
		12s55e	1.33
		12s67e	1.37
		12s81e	2.00
		12s93e	2.08
		8s100e	1.08
		16s55e	1.76
16s81e	1.69		
25s100e	1.80		

表2:北太平洋での各ブイ地点でのAquarius風速のRMS差 (m/s)

海域	ブイ	座標	RMS差
北太平洋	NDBC	20n161w	2.55
		27n150w	2.24
		32n120w	1.42
		38n130w	2.41
		43n130w	2.57
		46n131w	2.51
		54n161w	2.76
		55n175e	2.53
		56n142w	2.01
		57n178w	2.59

表3:北大西洋での各ブイ地点でのAquarius風速のRMS差 (m/s)

海域	ブイ	座標	RMS差
北大西洋	PIRATA	20n38w	1.61
		21n23w	1.70
		22n59w	1.04
		26n90w	1.84
	NDBC	28n63w	1.48
		29n88w	1.87
		32n69w	2.06
		41n67w	3.51

表4:赤道太平洋での各ブイ地点でのAquarius風速のRMS差 (m/s)

海域	ブイ	座標	RMS差
赤道太平洋	TAO/TRITON	0n147e	1.93
		0n155w	1.24
		0n165e	1.30
		2n137e	1.40
		2n140w	1.06
		2n156e	1.84
		2s170w	0.97
		5s110w	1.24
		5n95w	1.48
		5s125w	0.97
	5s156e	1.78	
	5s180w	1.57	
	8n110w	1.95	
	8n125w	1.72	
	2s180w	1.28	
	5n125w	1.49	
	5n140w	1.22	
	5n155w	1.42	
	5n170w	1.89	
	5n180w	1.75	
8n137e	1.40		
8n156e	1.71		
8n165e	1.26		
8s155w	1.24		
8s165e	2.01		
8s95w	1.14		

表5:赤道大西洋での各ブイ地点でのAquarius風速のRMS差 (m/s)

海域	ブイ	座標	RMS差
赤道大西洋	NDBC	14n46w	0.78
		15n53w	0.97
		17n81w	1.27
		0n0e	1.71
		0n10w	1.54
		0n23w	0.90
		0n35w	1.33
	PIRATA	4n23w	1.80
		4n38w	1.70
		6s10w	0.99
		8n38w	1.09
		8s30w	1.16
		10s10w	0.87
		12n23w	1.12
12n38w	1.08		
14s32w	1.13		
19s34w	1.72		

-
- 赤道大西洋、赤道太平洋ではそれぞれ1.46、1.39 m/sとなり風速の精度が良かった。
- (3) 全球規模およびどの海域においても、SAC-D/Aquarius風速が過大に見積もる傾向が見られた。

引用文献

- Aquarius User Guide, (2014). Aquarius Dataset Version 3.0, Guide Version 6.0, NASA/PO.DAAC/JPL, JPL D-70012 AQ-010-UG-0008.
- Biswas, S., Jones, L., Rocca, D. and Gallio, J.-C. (2012). Aquarius/SAC-D microwave radiometer (MWR): Instrument description & brightness temperature calibration. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6350705.
- Fore, A., Yueh, S., Tang, W., Hayashi, A. and Lagerloef, G. (2014). Aquarius wind speed products: algorithms and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 5, 2920-2926, doi: 10.1109/TGRS.2013.2267616.
- Kelly A. K., Dickinson, S., McPhaden, M. J. and Johnson, G. C. (2001). Ocean currents evident in satellite wind data. *Geophysical Research Letter*, Vol. 28, 2469-2472.

(受稿：2015年2月26日 受理：2015年3月18日)