— 総 説 —

全球乱流熱フラックス データの現状と今後の課題 *

富田 裕之[†]・久保田 雅久[†]

要 旨

大気海洋相互作用や気候変動など多くの研究分野において、全球海面熱フラックス データセットの必要性・重要性は大きい。今日では、現場観測データ、数値モデルの出力データ、人工衛星データなどの様々なデータから全球海面熱フラックス データセットが構築され利用されている。本総説論文では、現在利用できる海面乱流熱フラックスデータ (da Silva, SOC, GSSTF1/2, HOAPS1/2, NRA1/2, ERA15/40) について平均場の特徴や乱流熱フラックスの直接観測に基づく精度評価結果について比較検討した。各データセットの相互比較結果においては、平均場における全体的な特徴は定性的に似ているが、定量的には最大で 100 W m^{-2} 近くの差があることを示す。直接乱流観測データなどの現場観測値との比較結果においては、衛星乱流熱フラックス データの誤差要因の多くが、バルク パラメータ (主に風速や大気比湿) の誤差に起因することを示している。また再解析データにおいては、バルク式に起因する誤差が大きく、特に西岸境界流域などでは、乱流熱フラックスの値を過大評価する傾向がある。ただし、相互比較を行なった多くの研究では、時空間解像度や比較基準が研究によって異なるため、今後、より統一的な視点での相互比較や精度検証が行なわれることが望まれる。また、全球乱流熱フラックス データの今後の課題として、統合的なデータセットの作成や複数衛星データを用いたデータセットの作成や、各データセットの特性に最適なバルク式の検討などが考えられる。

キーワード : 乱流熱フラックス, バルク法, 渦相関法, 人工衛星データ

1. はじめに

海面熱フラックス データは、大気と海洋、またそれらの相互作用に注目した研究で幅広く利用され、その重要性は大きい。海面熱フラックスは乱流熱フラックスと放射フラックスに分けられ、前者は潜熱と顕熱フラックス、後者は長波放射と短波放射フラックスからなるが、現在では、本論文において取り上げたような

様々な種類の乱流熱フラックスのデータが利用可能である。全球乱流熱フラックスのデータを利用しようとしている研究者にとって、これら全球乱流熱フラックスのデータセットの基本的な情報や違いについて整理しておくことは有意義である。また、データセットの精度についてはまだ多くの議論を要する現状ではあるが、現在までに行なわれているデータセットの精度検証についての研究をまとめておくことも、今後のこの分野の研究にとって重要だと考える。したがって、本論文では、現在、利用可能な各種の全球乱流熱フラックス データを紹介し、その精度に関する現在までの研究の結果について述べる。なお、本文中の略号の意味

* 2004 年 5 月 12 日 受領 ; 2005 年 7 月 15 日 受理
著作権 : 日本海洋学会, 2005

[†] 東海大学海洋学部地球環境工学科 ;
〒 424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1
主著者 e-mail address : tomita@mercury.oi.u-tokai.ac.jp

または完全な綴りは付録にまとめて示している。

2. 乱流熱フラックスの観測・推定方法

乱流フラックスを推定するには、エネルギー収支法、渦相関法、バルク法、勾配法、プロファイル法など多くの方法がある (例えば, Arya, 1988)。ここでは、最も直接的な測定方法であり、精度の高い乱流熱フラックスを得ることのできると考えられる渦相関法と、衛星観測データに基づき算出された乱流熱フラックス データを含めて、ほとんどの全球乱流熱フラックス データにおいて用いられているバルク法について紹介する。

2.1. 渦相関法

現在、最も精度が良いとされている乱流熱フラックスの測定方法は渦相関法である。ただし、渦相関法を用いた乱流熱フラックスの測定には、3次元超音波風速計などを用いた、高解像度、高精度の観測が必要である。したがって、その観測の難しさが主な要因で、実際に行なわれてる観測の数はかなり少ない。また、これらの測器は観測塔や観測船に設置されるが、特に観測船での測定データには、船舶の動揺の影響や形状による流れのひずみがあると考えられ、それらを考慮したいくつかの補正作業が重要になる (例えば, Yelland, *et al.*, 1998; 塚本ら, 2001)。現在、渦相関法やプロファイル法を用いた直接乱流観測結果が、いくつかデータベース化されているが、その数は非常に少ない (NOAA ETL, ALBATROS CETP など)。しかし、最も良い精度の乱流熱フラックスのデータセットなので、これらの方法で得られたデータには非常に大きな価値がある。例えば、この高精度の乱流熱フラックスのデータを用いて、全球乱流熱フラックス データの精度を評価することが可能になる (例えば, Chou *et al.*, 2003)。また、これらのデータは、バルク係数の決定にも用いられる (例えば, Fairall *et al.*, 2003)。さらに、同時に観測される海上気象要素の観測データと併用し、全球乱流熱フラックスの推定に用いられるバルク式の精度を評価することが可能である (例えば, Brunke *et al.*, 2003)。

2.2. バルク法

乱流熱フラックスを精度良く測定できる渦相関法によるフラックス データは、その観測の困難さが主な原因で非常に少ない。また、その観測場所や期間がかなり限定されるために、実際には渦相関法に代わりバルク法などの間接的な方法によって乱流熱フラックスが計算されることが多い。バルク法とは、観測値を得ることが比較的容易な物理量 (ここではバルク パラメータと呼ぶ) と、それら物理量と乱流熱フラックスの値を関連づけた係数を用いて乱流熱フラックスを推定する方法である。この方法の最大の利点は、比較的観測しやすい物理量さえ分かれば、フラックスを算出できるという利便性にある。本論文において紹介する乱流熱フラックスのデータも、この方法によって算出されたフラックス データがほとんどである。ただし、バルク法の最大の欠点は、常にバルク係数の妥当性や一般性が問われる点である。実際に、様々な研究者によって多くのバルク係数が提案されているが、最も精度の良いバルク係数については、現在でも多くの議論がなされている。

一般的に、潜熱フラックスのバルク式では、海上風速、大気比湿、海面飽和比湿 (海面水温より算出)、顕熱フラックスの算出には、海上風速、海上気温、海面水温が必要になる。また、通常のバルク式では、これらのバルク パラメータは海面から 10 m の高度における値を仮定している。したがって、そのような観測が無い場合には、何らかの方法を用いて、高度補正を行なう必要がある。現在までに提案されているバルク式の多くは、観測高度の補正方法も同時に提案しているが、よく使われる高度補正方法は、大気境界層のモデルとして知られる Liu *et al.* (1979) で提案されている高度補正の方法 (LKB 法) である。

3. 全球乱流熱フラックスデータセットの紹介

本章では、現在までに報告されている全球乱流熱フラックス データを取り上げて検討する。全球乱流熱フラックス データは、どのようなデータを利用してフラックスを算出するかによって、ほぼ次のように分類することができる: (1) 現場観測を基にしたデータセット、

(2) 数値モデルの出力を基にしたデータセット, (3) 衛星観測を基にしたデータセット。これらの他にも, 数値モデルの結果と衛星観測の両方を利用したデータセット, ニューラル ネットワークを用いて作成したデータセットなどが存在するが, ここでは, 一般に広く用いられている上記の 3 種類のデータセットの基本的な説明と, 代表的なデータセットの紹介を行なう。また, ここで述べる 3 種類のデータセットの基本的な情報をそれぞれ Table 1~Table 3 にまとめた。

3.1. 現場観測を基にしたデータセット

現場観測 (ここでは, 主に船舶や係留ブイによる観測) に基づいたデータセットは, 全球規模で海面熱フラックスを推定する目的で, 最も歴史のある種類のデータである。現場観測値には主に COADS (例えば, Woodruff *et al.*, 1987; <http://www.cdc.noaa.gov/coads/>) に代表される, VOS や気象観測船, ブイ, 軍艦船などからの海上気象観測データが用いられる。この種類のデータの長所は, データの存在期間が長い点である。COADS データについて言えば, 1800 年代からのデータが蓄積されている。ただし短所は, 観測データ分布の空間的な範囲が限定され, さらに密度が低いことである (Woodruff *et al.*, 1987)。また, 一般の船舶は, 悪天候の海域を避けて航路を選択する傾向があるので, 観測される気象条件によってデータの分布に偏りが生じている可能性もある。また, 船舶の大型化に伴う観測高度の変化や, 目視観測に伴う観測値のばらつき, 観測方法の変化といった問題も内包するデータである (例えば, Ramage 1987)。これらの現場観測データを用いた熱フラックスの推定は, 1980 年頃より行なわれている。初期の研究 (Table 1) は, 主に気候値の算出に目的が置かれている (例えば, Esbensen and Kushnir, 1981; Hsiung, 1986; Oberhuber, 1988)。また, これらの研究で作成されたデータは, 空間の格子サイズも, 2~5 度と比較的大きい。それに対して, より最近では, より多くの観測値を得ることができるために, 気候値の他に各年各月平均値のデータセットがより小さな格子サイズで作成されている。さらに, 観測値の詳細な品質管理や, 観測方法の歴史的変化に対する補正なども行なわれている (例えば, da Silva *et al.*, 1994; Josey *et al.*, 1999)。

3.2. 大気数値モデルの出力を基にしたデータセット

今日では, 数値気象予報から得られる情報は, 我々の社会生活に密接に関係していることもあり, アメリカをはじめヨーロッパや日本でも数値気象に関する技術は進歩を続けている。数値気象予報モデルの出力の一部として, 海面フラックス データが存在する (例えば, ECMWF; <http://www.ecmwf.int/> や NCEP; <http://www.ncep.noaa.gov/>)。ただし, これらの数値気象予報モデルは予報を行なうことを目的としているため, 予報を行なう時点での最新のモデルと, 手に入る観測データのみを同化して予報計算を行なっている。そのために, ある程度の長期間のデータを利用する際には, モデルの変更, データ同化手法の変化に起因する不連続性が現れる可能性がある。また, 観測から通報までの時間的な問題で予報には利用できなかった観測データもあり, それらを十分に利用できていないデータでもある。こういった問題を解決したものが再解析データである。即ち, 予報モデルとして最新のモデルを用いて, リアルタイムの予報では同化することが出来なかった多くの観測データも用いて, 過去にさかのぼり長期間の積分を再度行なったものが再解析データである。

現在, 最も広く利用されている再解析データセットは, NCEP/NCAR Reanalysis (以後 NRA1) と ECMWF Reanalysis (以後 ERA15) であろう (Kalnay *et al.*, 1996; Gibson *et al.*, 1997)。また, アメリカの NASA/Goddard で作成されている GEOS-1 も良く知られている (Schubert *et al.*, 1993)。さらに, NRA1 における既知の問題点を改善した, NCEP/DOE AMIP2 Reanalysis (以後, NRA2, Kanamitsu *et al.*, 2002) も公開されている。ブイ データとの比較研究から, NRA2 のデータは, 乱流熱フラックス, もしくはそれを構成する海上パラメータに関して, NRA1 のデータと比べて精度の改善が確認されている (Sun *et al.*, 2003)。また, ECMWF も, 15 年間の再解析にとどまっていた ERA15 を, データ同化の方法を含めて多くの改善を行ない, 期間の拡張を行なった再解析データを公開している (ERA40)。NRA1/2 と一部の ERA15/40 は, 研究に用いる場合には, 現在無料で利用できる。ただし,

Table 1. Turbulent heat flux data based on the *in situ* observation data.

Product	ESBENSEN and KUSHNIR	HSIUNG	OBERHUBER	da Silva	SOC
URL	none	none	none	http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.DASILVA/	http://www.soc.soton.ac.uk/JRD/MET/fluxclimatology.php
Reference	Esbensen and Kushnir (1981)	Hsiung (1986)	Oberhuber (1988)	da Silva <i>et al.</i> (1994)	Josey <i>et al.</i> (1999)
Geo. Area	Global	Global	Global	Global	Global
Available Period	Clim.	Clim.	Clim.	1945.01~1993.12	1980.01~1993.12
Temp. Grid Size	monthly	monthly	monthly	Clim., monthly	Clim., monthly
Spatial Grid Size	4° by 5°	5° by 5°	2° by 2°	1° by 1°	1° by 1°
LHF Bulk	Liu <i>et al.</i> (1979)	Bunker (1976)	Large and Pond (1982)	Large and Pond (1982)	Smith (1988)
SHF Bulk					

Table 2. Turbulent heat flux data based on numerical weather prediction model.

Product	NRA1	NRA2	ERA15	ERA40	GEOS-1
URL	http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/	http://wesley.wvb.noaa.gov/reanalysis2/index.html	http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/er/index.html	http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html	http://gmao.gsfc.nasa.gov/data_stuff/daoData.html
Reference	Kalnay <i>et al.</i> (1996)	Kanamitsu <i>et al.</i> (2002)	Gibson <i>et al.</i> (1997)	Simmons and Gibson (2000)	Schubert <i>et al.</i> (1993)
Geo. Area	Global	Global	Global	Global	Global
Available Period	1948.01~2005.05	1979.01~2004.12	1979.01~1994.02	1957.09~2002.08	1980.03~1993.11
Temp. Grid Size	6 hourly	6 hourly	6 hourly	6 hourly	6 hourly
Spatial Grid Size	gaussian	gaussian	1.125° by 1.125°	1.125° by 1.125°	2.0° by 2.5°
LHF Bulk	none	none	Beljaars (1995a,b)	Beljaars (1995a,b)	Large and Pond (1981) and Kondo(1975)
SHF Bulk					

ERA15/40 の高解像度のデータは有料である。また、2001 年からは、我が国の気象庁の数値予報モデルを基にした再解析プロジェクト (JRA) も始動しており、本格的なデータ公開が待たれている。これら再解析データの利点は、データの存在期間が長く、かつ、欠測等のない均一なデータが様々な気象要素で高頻度のデータとして得られる点であろう。すべての再解析データは 6 時間ごとのデータが、比較的長期間で公開されている

(Table 2)。空間の格子サイズに関しては、NRA は gaussian の不等間隔格子であるが約 210 km の格子サイズ、ERA に関しては 1.125 度、GEOS-1 が 2 度 × 2.5 度と、いずれも最近の現場観測データや衛星観測を基にしたデータと比べて多少大きなサイズである。また、再解析データの精度評価を現場観測値を用いて行なう際には、両者の独立性が問題となる場合がある。これは、再解析データが多くの現場観測値の同化された結

果である。したがって、現場観測値との比較などを行なう際には、その現場観測値が再解析の際に同化されているデータなのかを十分に注意する必要がある。また、最近では、人工衛星による観測データも同化されており、人工衛星データとの相互比較を行なう際には両者の独立性にはやはり十分に注意する必要がある。

3.3. 衛星観測を基にしたデータセット

近年のリモートセンシング技術の発展は著しく、海洋学、気象学をはじめ様々な分野でも大きな恩恵を受けている。全球規模で海面フラックスを推定することに関してもその例外ではない。衛星観測を基にしたデータにおいても、他の種類のデータセットと同様にバルク式によって乱流熱フラックスが推定される。その際の入力パラメータとして用いるバルクパラメータ（風速、大気比湿、気温、海面水温）に、それぞれ衛星観測データが用いられる。

衛星観測を基にした主なデータセットを Table 3 に示す。アメリカの NASA/Goddard で作成されている、GSSTF1/2 (Chou *et al.*, 2003)、ドイツで作成されている HOAPS1/2、そして我々の研究グループが作成している J-OFURO (Kubota *et al.*, 2002) があり、それぞれインターネットを介して世界中にデータセットが公開されている。また、潜熱フラックスデータに関しては、Bentamy *et al.* (2003) や Bourras *et al.* (2002) などによる研究があるが、一般にデータ公開がなされていない。データの存在期間は、使用している人工衛星の運用期間に依存している。J-OFURO や GSSTF1/2、そして HOAPS1/2 のに関しては、使用している衛星やデータの作成した時期によって多少異なるが、いずれも人工衛星 DMSP の運用期間である 1987 年から 2000 年にかけてのデータが作成されている。Bentamy *et al.* (2003) に関しては、DMSP に加えて ERS や NSCAT のデータを使用しているため、短い NSCAT の運用期間にデータの期間が制限されているようである。時空間の格子の大きさに関しても、それらは使用している衛星センサーの観測効率や空間解像度に依存する。Table 3 を見ると、J-OFURO では 3 日平均値、GSSTF1/2、HOAPS1/2 に関しては日平均値のデータを作成している。DMSP/SSMI では、約 3

日間の観測ではほぼ全域の観測値を得ることができることから、J-OFURO では 3 日平均値としてデータを作成している。それに対して、GSSTF1/2 や HOAPS1/2 では、複数の SSMI センサを利用してデータを作成しているためか、日平均値のデータを作成している。空間解像度に関しても、DMSP/SSMI による観測の空間解像度に依存し、GSSTF1 を除き 0.5~1.0 度のデータが作成・公開されている。

また、衛星データを基にした乱流熱フラックスデータにおいて特に注意すべきは、各々のデータセットで各物理量を推定する手法やバルク式に違いがあることである。Table 4 に、各プロダクトで用いられているバルクパラメータを求める手法のリストを示す。

風速に関しては、現在、マイクロ波放射計、マイクロ波散乱計の衛星データが一般に使用できるが、GSSTF、HOAPS、J-OFURO では、風速と同じセンサーで同時に大気比湿の推定にも用いることができることから、マイクロ波放射計である SSMI のデータを風速の推定に用いている。それに対して、Bentamy *et al.* (2003) では、SSMI に加えてマイクロ波散乱計 ERS-2 と NSCAT の衛星データを複合的に用いている。SSMI データからの風速の推定方法は、HOAPS を除く全てのデータにおいて同じであり、Remote Sensing Systems より提供される Geophysical Data (Wentz, 1994; 1997) に収録されているデータを用いている。HOAPS に関しては、独自の方法を採用しているが、HOAPS1 の風速値には大きなバイアスがあることが指摘されている (Kubota *et al.*, 2003)。また、HOAPS2 に関しては、ニューラルネットワークを利用した新しい推定方法が採用されたようであるが、その詳細については未だ記述されていない。

大気比湿に関しては、どのプロダクトもマイクロ波放射計 SSMI のデータを用いているが、プロダクトによって、その算出アルゴリズムが異なる。一般に、水蒸気量、降水、大気比湿といった物理量は、その時空間変動が大きいこともあり、衛星観測から潜熱フラックスの算出に十分な精度で大気比湿を推定することは大変難しいとされている。したがって、衛星データから大気比湿を推定する方法に関しては、どのプロダクトでも様々な試行錯誤が行なわれている。マイクロ波

Table 3. Turbulent heat flux data based on satellite observation.

Product	J-OFURO	GSSTF1	GSSTF2	HOAPS1	HOAPS2	Bentamy
URL	http://dtsv. scc.u-tokai. ac.jp/j-ofuro/	http://daac. gsfc.nasa.gov/ CAMPAIGN_ DOCS/hydro logy/hd_gs stf1.0.html	http://daac. gsfc.nasa.gov/ CAMPAIGN_ DOCS/hydro logy/hd_gs stf2.0.html	none	http://www. hoaps.zmaw. de/	none
Reference	Kubota <i>et al.</i> (2002)	Chou <i>et al.</i> (1997)	Chou <i>et al.</i> (2003)	Grassl <i>et al.</i> (2000)	none	Bentamy <i>et al.</i> (2003)
Geo. Area	Global	Global	Global	Global	Global	Global
Available Period	1992.01 ~2000.12	1987.07 ~2000.12	1987.07 ~2000.12	1987.08 ~1998.12	1987.08 ~2000.12	1996.10 ~1997.06
Temp. Grid Size	3 days mean	Daily mean	Daily mean	Daily mean	Daily mean	Weekly mean
Spatial Grid Size	1° by 1°	2.0° by 2.5°	1° by 1°	0.5° by 0.5°	0.5° by 0.5°	1° by 1°
LHF Bulk	Kondo (1975)	Chou (1993)	Chou (1993)	Smith (1988)	COARE 2.5b	Modified
SHF Bulk	none- Bowen Ratio				(Fairall <i>et al.</i> , 1996a)	Smith (1988)

Table 4. Bulk parameters used in each satellite product.

	J-OFURO	GSSTF1	GSSTF2	HOAPS1	HOAPS2	Bentamy
Wind Speed	SSMI/Wents (1994, 1997)	SSMI/Wents (1994)	SSMI/Wents (1997)	SSMI/ Schlussel and Luthardt (1991)	new developed neuronal network algorithm (not published yet)	ERS-2, NSCAT, SSMI
SST	Reynolds and Smith (1994)	Reynolds and Smith (1994)	NRA1	NOAA/NASA Ocean Pathfinder	Kilpatrick <i>et al.</i> (2001)	AVISO/Meteo- France SST analysis based on Reynolds and Smith (1994)
Air Specific Humidity	SSMI/ Schlussel <i>et al.</i> (1995)	SSMI/Chou <i>et al.</i> (1995, 1997) and Schulz <i>et al.</i> (1993)	SSMI/Chou <i>et al.</i> (1995, 1997) and Schulz <i>et al.</i> (1993)	SSMI/Schulz <i>et al.</i> (1993)	Bentamy <i>et al.</i> (2003)	SSMI/modified Schulz <i>et al.</i> (1993, 1997)
Air Temperature		ECMWF	NRA1	assume 80% constant RH	the mean of 2 methods: 1) assume 80% constant RH and 2) assume the DT(1K)	

放射計を用いて大気の水蒸気量を推定する試みはあるが (Shibata, 1994; Takamura, 1996 など), 先に紹介した Wentz (1994, 1997) による SSMI Geophysical Data に含まれている積算水蒸気量が幅広く用いられている。Liu (1986) は, 月平均値の現場観測データを用いて大気の水蒸気量と海上の大気比湿の間に統計的な関係を見出し, 積算水蒸気量より大気比湿を推定する方法を提案した。この方法により, 地球規模での大気比湿が推定可能である。しかし, この研究では積算水蒸気量と大気比湿との統計的な関係を月平均値のデータを基に用いているため, 日平均値などの推定に適用できるかどうかは疑問である。HOAPS1 では, Schulz *et al.* (1993) の方法を基にした推定方法を用いている。Schulz *et al.* (1993) は, 積算水蒸気量と大気下層 500 m での積算水蒸気量との間に統計的な関係があり, さらに大気下層 500 m での積算水蒸気量と海上の大気比湿との間に統計的な関係を見だし, これらの関係を用いて SSMI のデータから海上の大気比湿を推定する方法を提案した。この方法は, Liu (1986) よりも, より正確に海上の大気比湿を推定することが可能である。実際には, 極域のバイアスを修正した Schlusser (1996) の方法が用いられている。さらに, SSMI の輝度温度データと海上の大気比湿を直接的に関連づけた Schlusser *et al.* (1995) の方法が存在し, 同方法が J-OFURO での大気比湿の推定に用いられている。この方法の特長は, SSMI による輝度温度と海上の大気比湿を直接的に関連づけているため, 大気の水蒸気量や大気下層の水蒸気量などの物理量を介して大気比湿を推定する先の二つの方法と比べて, 統計的な関係式の不確定性が小さい点である。実際に, 現場観測値との比較から, この方法によって推定された SSMI の大気比湿の精度が, 先の二つの方法と比べて良いことが明らかにされている (Schlusser *et al.*, 1995)。GSSTF1/2 では, 大気下層の水蒸気量より大気比湿を推定する際には, Schulz *et al.* (1993) を用いているが, 大気下層の水蒸気量を推定する方法は, Schulz *et al.* (1993) で提案されている方法と異なる方法を用いている。Bentamy (2003) に関しても基本的には Schulz *et al.* (1993, 1997) の方法を用いているが, COADS やブイによる現場観測との差を小さくするように係数の修正が行なわれている。

海面水温データに関しては, どのプロダクトも熱赤外放射計による観測を基にしたデータを用いている。J-OFURO, GSSTF1 では, Reynolds SST (Reynolds and Smith, 1994) が用いられている。ただし, このデータは週平均値として公開されているので, J-OFURO と GSSTF1 では, 3 日平均値と日平均値に内挿されたものが, それぞれ使用されている。HOAPS1/2 でも, 熱赤外放射計である AVHRR のデータ (Kilpatrick *et al.*, 2001) が用いられている。GSSTF2 においては, 再解析データである NRA1 の海面水温を用いているが, これは実際には Reynolds SST データを日ごとに内挿したデータが基となっている。

気温データは, 顕熱フラックスの推定, または, 大気の安定度の計算に必要な不可欠なデータである。人工衛星データから気温データを推定する方法は幾つか提案されているが (例えば, Konda *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2003), フラックスの推定に十分な精度を持つ気温データを推定することは, 現在のところ困難である。したがって, GSSTF1/2 では, 衛星データではなく, ECMWF と NRA1 の気温データをそれぞれ用いている。また, HOAPS1 では, 海面での湿度を 80% と仮定して, 概略の気温を推定している。HOAPS2 では, HOAPS1 で用いられた方法と, HOAPS2 の海面水温 -1°C として推定した気温の平均値を使用している。J-OFURO の顕熱フラックスの推定方法は, これらとはかなり異なる。J-OFURO では, 気温データからバルク式を用いて顕熱フラックスを推定することはせず, 顕熱フラックスの推定にボーエン比を用いている (Kubota and Mitsumori 1997)。ボーエン比とは, 顕熱フラックスと潜熱フラックスの比 (SHF/LHF) で表される。J-OFURO では, このボーエン比の長期間に渡る月平均値を ECMWF の予報値から算出し, それらに人工衛星データから算出した潜熱フラックスを掛けることによって, 人工衛星顕熱フラックスを推定している。

4. 全球乱流熱フラックスデータセットの相互比較

3 章で紹介した様々な乱流熱フラックス データセットについて相互比較を行なうことは, それぞれのデー

タの特性や問題点を理解することに役立つ。したがって、ここでは、3章で紹介した主な全球乱流熱フラックスデータの平均場の分布に注目して、それぞれのデータの相違について検討した。

4.1. 潜熱フラックスの分布

Kubota *et al.* (2003) は、J-OFURO, HOAPS 1, GSSTF1, ECMWF, NRA1 の全球潜熱フラックスデータの比較を行ない、それぞれのデータの特徴の違いについて研究している。また、Chou *et al.* (2004) では、同様に、GSSTF2, HOAPS1, NRA1, da Silva の4種類のデータの相互比較を行なっている。Fig. 1(a) は、J-OFURO の1992~1993年の期間の全平均潜熱フラックスの空間分布を示している。また Fig. 1(b)~Fig. 1(k) は、他のデータセットと J-OFURO の潜熱フラックスとの差 (各データセットの値から J-OFURO の値を引いたもの) の空間分布を示す。なお、これらの図は、Kubota *et al.* (2003) や Chou *et al.* (2004) に示されている同様の図を、最新のデータセットを用いて再描したものである。

これらの図より、J-OFURO と各データセットの値の差 (Fig. 1b-l) は概ね潜熱フラックスの値 (Fig. 1a) の10%以下にとどまっていることが分かる。したがって、各データセットの全体的な分布の特徴は相互に類似している。しかし、定量的な差に注目すると、最大で 100 W m^{-2} 近くにも達している。また、差の大きな場所は共通しており、平均場の絶対値が極端に大きい場所、もしくは小さい場所において差が大きい傾向が存在する。具体的には、暖流である西岸境界流と冬季に大陸から吹く乾いた偏西風の影響で大きな潜熱フラックスを示す北太平洋の西岸境界流域では、多くのデータは J-OFURO に対して過大評価する傾向がある。また、年を通し大きな風速値を示し、大きな潜熱フラックスを示す貿易風帯においては、多くのデータは、J-OFURO よりも小さな値を示す傾向がある。潜熱フラックスの平均場の小さな海域として知られる、熱帯域、特に西部熱帯太平洋、東部熱帯太平洋、東部熱帯インド洋などでは、多くのデータは J-OFURO よりも数十 W m^{-2} 大きな値を示す傾向がある。

次に、各データセットごとの特徴に注目する。現場

観測値を基にしたデータである da Silva と SOC の特徴は類似しており、他のデータセットと異なり全体的な空間分布が細かなパターンを示している。衛星観測を元にしたデータに関しても、お互いの空間パターンの特徴は似ている。特に GSSTF2 のデータは、データの作成方法が似ていることもあり、J-OFURO との差は小さい。ただし、GSSTF2 の潜熱フラックスの空間分布には、全球域で人工的な周期パターンが顕著であり、その影響は Fig. 1(e) にも見られる。同様な分布の特徴が、GSSTF2 の潜熱フラックスの推定に用いられている NRA1 の海面水温データにも見られるために、その影響が潜熱フラックスに現れていると考えられる。また、GSSTF2 のデータには平均値としても、所々にフラックスの推定出来ない海域がある。これは主に衛星大気比湿のデータの欠測に起因するもので、J-OFURO にも多少見られるが GSSTF2 ほどではない。HOAPS1 は、緯度 30 度以内の大部分で、 50 W m^{-2} 以上も潜熱フラックスを過小評価することで特徴づけられる。これは HOAPS1 の潜熱フラックスの算出に用いられている風速の推定アルゴリズムに大きな問題がある (Kubota *et al.*, 2003)。再解析データ同士のデータも良く似ている。特徴として、衛星データと比べると細かな空間パターンが見られる点が挙げられる。この特徴は da Silva や SOC のデータとも似ており、現場観測値のデータ同化の影響があるかもしれない。また、GSSTF2 のデータで見られた人工的な周期パターンは、NRA1/2 のデータでも確認できるので、NRA の海面水温データに問題があることを示している。

4.2. 顕熱フラックスの分布

Fig. 2 は、顕熱フラックスに関して Fig. 1 と同様の分布を示したものである。Fig. 2(a) から明らかなように、顕熱フラックスは地球規模で見ると多くの海域では 0 に近い値を示す。値の大きな場所は、潜熱フラックスと同様に、北半球の西岸境界流域で存在するが、その値は約 40 W m^{-2} と潜熱フラックスの値と比べると 1/5 程度の大きさである。また、両半球の高緯度域でも比較的大きな値が見られ、場所によっては負の顕熱輸送も存在する。

次に他のデータとの差について検討する。平均場と

Fig. 1. Spatial distribution of (a) J-OFURO mean latent heat flux during 1992–1993 and the mean differences between J-OFURO and each product of (b) da Silva – J-OFURO, (c) SOC – J-OFURO, (d) GSSTF1 – J-OFURO, (e) GSSTF2 – J-OFURO, (f) HOAPS1 – J-OFURO, (g) HOAPS2 – J-OFURO, (h) NRA1 – J-OFURO, (i) NRA2 – J-OFURO, (j) ERA15 – J-OFURO and (k) ERA40 – J-OFURO. Units in W m^{-2} .

して大きな値を示した西岸境界流域では、J-OFUROとSOC, GSSTF1/2, HOAPS1/2との間の差はほとんどない。それに対して、SOCと再解析データである

NRA1/2, ERA15/40は、J-OFUROよりも大きな値を示している。特にNRA1/2のデータは、この海域で 50 W m^{-2} も大きな値を示し、J-OFUROと比べると

Fig. 1. Continued.

2倍以上の差があることになる。また南半球の中高緯度域に注目すると、分布に関しては大きな差は見られないものの、その大きさはデータセットによってかなり異なる。例えば、HOAPSのデータは、J-OFUROのデータと比べて 50 W m^{-2} 程度と、かなり大きな値を示す。それに対して NRA のデータは 30 W m^{-2} 過小

評価する傾向がある。

Fig. 2. The same as Fig. 1 except for the sensible heat flux.

5. 全球乱流熱フラックス データセットの精度評価

データセットに関する最も重要な情報として、そのデータセットの精度がある。一般に、現在の海面熱フラックス データの精度は、大気海洋相互作用を定量的

に理解するためには、まだ十分ではないと言われている。例えば、太平洋熱帯域の海面水温を変動させるプロセスのうち、海面での熱的強制の見積りに大きな不確実性があり、その原因として海面熱フラックスの推定に大きな誤差があることが指摘されている (例えば、Taylor *et al.*, 1996; Wang and McPhaden, 1999;

Fig. 2. Continued.

2000)。また、4章において論じたように、各種乱流熱フラックス データセットの相互比較からは、それぞれのデータセットは空間分については定性的に良く一致するもの、定量的にはかなりの差がある (Taylor, 2000; Kubota *et al.*, 2003; Chou *et al.*, 2004)。したがって、現在入手可能な様々な乱流熱フラックス データセット

のうち、どのデータセットの精度が良いのか、また、それらがデータ利用者の目的にとって十分な精度をもつのかは非常に重要である。ここに、乱流熱フラックスデータの精度評価を行なった研究について検討した。

5.1. 乱流熱フラックス データの精度評価

データセットの精度は、それを真の値と比較することによって得られる情報である。乱流熱フラックスの精度評価を行なう方法の一つは、最も精度の良い乱流熱フラックスの観測値、すなわち渦相関法による観測データとの比較を行なうことである。しかし、渦相関法による観測データを長期間に広範囲で得ることは非常に困難であるから、地球規模でのデータセット精度の十分な評価はほぼ不可能であると言ってよい。ただし、数少ない渦相関法による観測データとの比較を行なうことでデータセットの精度評価を試みている研究もある。

Chou *et al.* (2003) は、GSSTF2 データの精度評価のために、NOAA/ETL による直接乱流観測データとの比較を行なった。研究に用いられた直接乱流観測は、比較的長期間のデータが得られている 5 種類のクルーズからのデータであり、熱帯域と高緯度域も含んでいる。その結果は、日平均値の潜熱フラックスで、RMS 誤差が 35.7 W m^{-2} 、バイアスが 0.8 W m^{-2} 、相関係数が 0.83 であった。同じく日平均値の顕熱フラックスでは、RMS 誤差が 12.0 W m^{-2} 、バイアスが 6.4 W m^{-2} 、相関係数が 0.84 であった。この比較の結果は、バルク式の不確定性を伴わない精度の高い現場観測値との比較であるという点において価値がある。統計値については、バイアスに関して、潜熱と顕熱フラックスともに、 10 W m^{-2} 以下と比較的小さな値を示していた。このことから、比較的長い期間における平均値としては、GSSTF2 の乱流熱フラックスは良い精度を持つと思われる。それに対して、RMS 誤差は、潜熱、顕熱フラックスのそれぞれに対して、 35.7 、 12.0 W m^{-2} と比較的大きく、平均場よりむしろ変動場の精度に問題がある。残念なことに、現在まで直接乱流観測データとの比較が行なわれている地球規模の乱流熱フラックス データは、この衛星観測を基にした GSSTF2 データのみである。ただし、4 章や Kubota *et al.* (2003) による各データセット間の相互比較結果は、GSSTF2 のデータは同様の衛星観測を基にしたデータである J-OFURO と非常に良く似たデータであることを示している。このことから、J-OFURO に関してもおおよそ同程度の精度

を持つと予想されるが、より詳細なデータセットの評価のためには、今後より多くの全地球規模のデータセットと直接乱流観測データとの比較が行なわれ、それらの結果が相互比較される必要がある。そして、これらの差の要因について検討する必要があるだろう。考えられる要因としては、主に衛星データで用いているバルク式の誤差とバルク パラメータの誤差がある。さらに、船舶による航路上の観測データと比較をしていることから、両データの時空間の差も大きく影響すると考えられる。それぞれの要因でどの程度の誤差が生じているのかを調べることは、データセットの問題を把握する上で重要である。

渦相関法による乱流熱フラックスの観測データとの比較結果は、最も精度の良い乱流熱フラックス データとの比較という意味で、非常に貴重な情報であることは確かである。しかし、渦相関法による乱流熱フラックス データの得られる海域、期間がかなり限定されることから、その一般性に関しては大きな疑問が付きまとう。実際に、Chou *et al.* (2003) が行なった比較も、対象としている海域と観測期間がかなり限定されている。そこで、もう少し一般性のある乱流フラックスの精度の評価が必要となる。例えば、直接乱流観測と比べて比較的広範囲の海域をカバーし、かつある程度長期間の連続的な観測値が得られる係留ブイ データや船舶データが、フラックス データの評価に用いることが行なわれている。ただし、一般的な係留ブイではフラックスの高精度観測は行なっておらず、主に、海上気象パラメータの観測を行なっているにとどまる。したがって、ブイ データや船舶データから何らかのバルク法を用いて乱流熱フラックスを推定し、それと全球乱流熱フラックス データとを比較することになる。このとき、全地球規模のプロダクトで使用しているバルク式と、ブイデータや船舶データからのフラックス算出に用いているバルク式が同じであるならば、それはバルク式に起因する誤差を無視した、すなわち、海上物理パラメータの誤差に起因したプロダクトの誤差の評価を行なうことになる。

このような方法で衛星フラックス データのバルク パラメータに起因する誤差を調べた研究を挙げると、Esbensen *et al.* (1993), Taylor (2000), Brunke *et*

al. (2002), Bentamy *et al.* (2003) などがある。

Esbensen *et al.* (1993) は, SSMI のデータから月平均値の蒸発量 (潜熱フラックス) を算出し, 同じバルク式を用いて算出した COADS の蒸発量データをとの比較を行なった。その結果, 両者の間には, 50 W m^{-2} を超えるような差が存在することを示し, また Esbensen *et al.* (1993) のデータが冬期に過大評価であり, 夏期に過小評価であるとする誤差の大きさが季節的に変化する傾向が明らかになった。

また, Esbensen *et al.* (1993) は各バルクパラメータに関しての誤差の評価も行なっている。その結果より, 大気比湿の誤差の分布と蒸発量の誤差の分布の空間パターンが良く対応することから, 衛星から見積もった蒸発量データの誤差の主な要因を, 衛星大気比湿データの誤差であると結論づけている。この結果は, 風速や海面水温といったバルクパラメータよりも時空間の変動の激しい大気比湿を, 人工衛星で正確に見積もることが困難であることを示唆している。ただし, 蒸発量とバルクパラメータの誤差の分布を比べて誤差の要因を決めるという方法はかなり大雑把な把握であり, より定量的な評価が必要であると考えられる。また, COADS データを比較対象として用いているため, 船舶観測の乏しい熱帯域や南半球などでは正確な評価が出来ないと思われる。実際に COADS などのデータから算出されたフラックスの分布は, 中部太平洋や熱帯域, 南半球で不自然な分布をしている (4章参照)。

Bentamy *et al.* (2003) は, 彼らの作成した衛星潜熱フラックスデータと, 太平洋の熱帯域に係留される TAO ブイによる観測から同じバルク式を用いて得られた潜熱フラックスとの比較を行なった。TAO ブイは NOAA/PMEL の努力により太平洋熱帯域の全域に連続的に係留されているため, 熱帯域での乱流熱フラックスを評価する上で価値のあるデータである。Bentamy *et al.* (2003) の比較結果は, 週平均値でバイアス 4 W m^{-2} , RMS が 26 W m^{-2} , 相関係数が 0.79 であった。Chou *et al.* (2003) の比較結果と同様に, バイアスは 4 W m^{-2} と小さく, それに対して RMS 誤差が 26 W m^{-2} と比較的大きいとする特徴は類似している。

HOAPS1 のデータに関しては, Subduction Experiment ブイ (Moyer and Weller, 1997) との比較結果が

報告されている (Taylor, 2000)。月平均値を用いた比較からは, 両者の変動は非常に良く一致しており, 少なくともブイの場所における乱流熱フラックスの変動を見る上では, HOAPS1 のデータに大きな問題がないことが示された。しかしながら, ブイデータとの比較は, 顕著なバイアスが存在することも示した。バイアスに関しては, 北半球のブイでは HOAPS1 の値が, ブイの値より大きい正のバイアス, 逆に南半球のブイでは負のバイアスが見られた。そして, 北半球の正のバイアスは, 風速の正のバイアスに起因し, これはブイのデータの過小評価が原因であると結論づけられている。しかし, 南半球のブイでの負のバイアスは, 海面水温の負のバイアスに起因し, これは主にピナツボ火山によるエアロゾルによって引き起こされた誤差であることが確かめられた。また, 大気比湿に関しては, バイアスがほぼ 0 であることも示された。

これら衛星観測を基にした乱流熱フラックスデータの精度評価結果を相互比較することは, それぞれのデータセット, 比較対象, 比較基準が異なることから困難であるが, これらの結果は, 衛星乱流熱フラックスデータにおいて, バルクパラメータに起因する誤差がかなり大きいことを示している。それらの多くは, 風速と大気比湿の観測精度に起因する。ただし, 評価しているデータの時間スケールや, 海域的な違いも大きく, これらの結果の一般性について, より詳細な検証が必要である。

また, ブイデータを用いた, 再解析データの評価も行なわれている。Sun *et al.* (2003) は, 大西洋のブイデータを用いて, NRA1, NRA2, そして ECMWF のオペレーショナルデータ (以後単に ECMWF) の評価を行なった。その結果, どの数値モデルデータも, 大西洋においては, 潜熱, 顕熱フラックスを過大評価する傾向にあることを示した。さらに, このバイアスは, バルク式をブイのフラックスの推定に用いている式 COARE アルゴリズム (Fairall *et al.*, 2003) と同じにすると, かなり小さくなるか, 逆に過小評価傾向に変わることが判明した。すなわち, 数値モデルデータのバイアスの大部分が, フラックス算出の際に用いているバルク式の問題に起因することが明らかになった (Sun *et al.*, 2003)。沿岸域に関しては, 気温や比湿といったバルク

パラメータのバイアスが外洋域と比べると大きく、バルクパラメータのバイアスが乱流熱フラックスのバイアスに反映していることも明らかになった。

再解析データの乱流熱フラックスの評価は、Weller *et al.* (1998), Zeng *et al.* (1998), Smith *et al.* (2001), Wang and McPhaden (2001), Josey (2001), Moore and Renfrew (2002), Weller *et al.* (2004) による研究でも行なわれ、Sun *et al.* (2003) で指摘されているようなバイアスは、大西洋だけでなく、西部熱帯太平洋やインド洋などでも存在することが指摘されている。また、その問題の多くが、大気数値モデルを基にしたプロダクトのバルク式にあるということを指摘している。

4章で示された、各種の全球乱流熱フラックスデータの相互比較では、全ての再解析データが、J-OFUROを始めとする衛星観測を基にしたデータと比べて、大きな差を示す傾向にあった。例えば、NRA1の乱流熱フラックスは、J-OFUROの値と比べて、北太平洋の西岸境界流域で潜熱フラックスを約 50 W m^{-2} 、顕熱フラックスを 40 W m^{-2} も過大評価している。Moore and Renfrew (2002) は、北大西洋の西岸境界流域における係留ブイデータとの比較から、NRA1の乱流熱フラックスの値が、冬季において約 30 W m^{-2} 過大評価していることを示した。この結果より、再解析データの乱流熱フラックスデータは、西岸境界流域では著しく過大評価する傾向があると考えられる。

5.2. バルク式の評価

現在までに数多くのバルク係数が提案され、乱流熱フラックスの推定に用いられている。しかし、バルク式は、限られた海域で得られた数少ない真の乱流熱フラックスデータに対してパラメータ化されるために、そのような係数をグローバルな海域で使用するには、その精度や一般性について細心の注意が必要である。したがって、バルク式自体の精度評価と相互比較に係わる研究は非常に重要である。Zeng *et al.* (1998) は、TOGA COAREの船舶データと、TAOブイデータを用いて、NRA1やERA15, GEOS-1などの再解析プロダクトで用いられているバルク式を含む6種類のバルク式から算出された乱流熱フラックスの相互比較を行なった。その結果、ERA15のアルゴリズムは、GEOS-1や

NRA1のアルゴリズムよりも良い一致を示し、GEOS-1はTOGA COAREのデータとも良く一致するという結果を示した。また、NRA1/2のアルゴリズムは、高風速時に潜熱フラックスを過大評価する傾向にあることも示された。

ところで、渦相関法によって推定された乱流熱フラックスデータと、それに伴う海上物理パラメータの観測データがあれば、バルク式自体の精度評価が可能である。Brunke *et al.* (2002, 2003) は、この方法によって、一般的に用いられているバルク式の評価を行なった。Brunke *et al.* (2003) において評価されたバルク式は、本論文で紹介している乱流熱フラックスデータの推定に用いられている式を含む12種類のバルク式である。バルク式の評価は、直接乱流観測によるフラックスデータと、それに伴うバルクパラメータの観測値を用いて12種類のバルク式で算出されたフラックスデータとの間のバイアスとRMS誤差をそれぞれ計算し、その結果から12種類のバルク式の精度に順位を付けるという形で行なわれた。順位付けの結果は、潜熱フラックスに関しては、COARE3.0やGEOS-1などのバルク式の精度が良く、最も精度が悪かったのはECMWFやJ-OFUROに用いられているバルク式(Kondo, 1975)であった。顕熱フラックスに関しては、COARE3.0やGEOS-1などのバルク式の精度が良く、また潜熱フラックスとは正反対に、ECMWFのバルク式も良い結果を示した。最も精度の悪かったのは、衛星プロダクトであるGSSTF2やJ-OFUROのバルク式であった。しかし、J-OFUROの顕熱フラックスの算出には、ECMWFより得られた気候学的なボーエン比に衛星潜熱フラックスを掛けるという方法をとっているために、実際には顕熱フラックスの算出のためにバルク式を用いてはいない。そこで、Brunke *et al.* (2003) では、ECMWFのボーエン比と潜熱フラックスのバルク式から、顕熱フラックスのバルク係数を逆算し評価を行なっている。したがって、J-OFUROの顕熱フラックスのバルク係数の評価結果には、ECMWFのボーエン比の誤差が含まれ、さらに潜熱フラックスのランキングの結果が、大きく反映されていることになる。

また、この研究には大きな問題があると考えられる。それは、バルク式の評価の際に用いている渦相関法に

よって推定された乱流熱フラックス データの大部分が、COARE3.0 のアルゴリズムの作成の際に用いられていることである。すなわち、評価に用いている渦相関法による乱流熱フラックス データと COARE3.0 によって推定された乱流熱フラックス データは独立ではなく、Brunke *et al.* (2003) の順位付けは COARE3.0 に有利に働いている可能性がある。したがって、独立した現場観測データを用いたバルク式の再評価を行なう必要がある。

Chou *et al.* (2003) も、GSSTF2 のバルク式に対して、Brunke *et al.* (2003) と同様な比較を行なっている。その結果は、潜熱フラックスのバルク式に対して、バイアス 4.5 W m^{-2} , RMS 誤差 20.1 W m^{-2} , 相関係数 0.91, 顕熱フラックスのバルク式に対して、バイアス -0.2 W m^{-2} , RMS 誤差 7.3 W m^{-2} , 相関係数 0.82 であった。また、高風速時の GSSTF2 のバルク式の過小評価傾向も明らかになった。ただし、バルク式の精度評価は、ともに NOAA/ETL による 1 時間ごとの観測値を基に行なわれている。したがって、今後、衛星プロダクトなどの、日平均やそれ以上の時間スケールで平均されたバルク パラメータに対しての同様の評価が必要である。

実際に、GSSTF2 の潜熱フラックス データは、高風速時に過大評価する傾向がある。これは、Chou *et al.* (2003) で調べられたバルク式の評価結果とは逆の傾向である。すなわち、バルク式の誤差はバルク パラメータに起因する誤差によって相殺され、結果として高風速時に過大評価する傾向を示していることを意味している。また、低風速域においては、GSSTF2 のバルク式は比較的良好な精度であるが、実際の GSSTF2 の潜熱フラックス データは過小評価する傾向がある。このことから、バルク式とバルク パラメータのどちらに起因する誤差が大きいかについては、バルク パラメータに起因する誤差の方が、結果として得られる潜熱フラックスの誤差に大きなインパクトを持つと考えられる。

6. 今後の展開

本論文では、既存の全球乱流熱フラックス データを、データ ソースで分類して総説した。それぞれのデータ

ソースから作られたデータセットには、それぞれ長所と短所がある。したがって、次世代の全球乱流熱フラックス データセットは、SST や海上風のデータセット構築の際には、すでに行なわれているように (Reynolds and Smith, 1994; Legler *et al.*, 1989), 種々のデータソースを複合したプロダクトになると思われる。Yu *et al.* (2004) も、人工衛星データと大気数値モデルベースのデータを複合して作成し、大西洋における乱流熱フラックスの推定を行なっている。今後、地球規模でのフラックス推定にも、いくつかの種類のソース データを統合したデータセットが出てくるであろう。ただし、このような様々な種類のデータを基に作成されたデータセットの評価を行なう際には、比較の対象となるデータとの独立性に十分に注意を払う必要がある。

また、衛星データに限っても、複数の衛星データを使うメリットは大きい。例えば、海面水温に関しては、赤外放射計とマイクロ波放射計を複合したデータセットが整備されつつある (例えば、Guan and Kawamura, 2004)。風速や大気比湿の衛星観測には極軌道衛星が用いられるが、太陽同期の極軌道衛星による観測では基本的に 1 日あたり午前と午後の 2 回の観測しか得られないことになる。そのような観測値から算出される日平均値には、1 日内の変動 (日変化に限らない) が大きい場合には、大きな誤差が含まれることになる。ブイの観測データから衛星観測時刻のみデータを抜き出して、衛星の観測を再現すれば、この誤差を評価することができる (Tomita and Kubota, 2005)。その誤差は、衛星の観測時刻や海域にもよるが、風速で 1 m s^{-1} 以上の RMS 誤差をもたらす場合もある。これを乱流熱フラックスの誤差に換算すると、 30 W m^{-2} 以上の誤差になる。このような誤差は、複数の衛星センサー データを用いて観測頻度を上げることで確実に小さくすることができると考えられる。幸いにも、風速に関しては、比較的多くの衛星センサーが運用されているので、複合衛星データを作成しやすい状況にある。実際に、Bentamy *et al.* (2003) では、風速のデータセットとして、マイクロ波放射計 SSM/I のデータに加え、マイクロ波散乱計の ERS-2 と NSCAT のデータの複合データを作成している。今後、より良い精度で風速を観測することができる QuikSCAT/SeaWinds や、マイクロ波放射計の

Aqua/AMSR-E, ADEOS2/AMSR の利用が期待される。特に, Aqua/AMSR-E の観測は, 他のマイクロ波放射計の観測時刻が現地時刻の 6 時~11 時に集中しているのに対して, Aqua/AMSR-E の観測時刻は現地時刻の 1 時 30 分と大きく異なるため, 他の衛星と独立した情報が得られる利点がある。今後, 本格的に始まると期待されている GPM プロジェクトによって, 多くのマイクロ波放射計のデータが得られる可能性があり, それらの利用も期待される。

5 章で紹介した Brunke *et al.* (2003) のバルク式の精度評価結果は, COARE3.0 (Fairall *et al.*, 2003) のバルク式が最も良い精度を示した。COARE3.0 には, 海面のごく表層のみの冷却を表現する Cool Skin や, 風が弱い条件などで短波放射が表層のみを温める Warm Layer など多くの物理過程を考慮している (Fairall *et al.*, 1996a)。また Brunke *et al.* (2003) の結果は, 現在の衛星乱流熱フラックスの推定に用いられている, 比較的単純なバルク式 (例えば, Chou, 1993; Smith, 1988; Kondo, 1975) よりも精度が良いことを示している。ただし, 実際問題として数値モデルや衛星データを利用したグローバルな乱流熱フラックスの推定に, この COARE3.0 が最も適しているかに関しては未だ議論の余地がある。例えば, COARE3.0 を用いて潜熱フラックスを推定するには, 風速, 海面水温, 気温, 湿度, 短波放射, 長波放射といった入力パラメータが必要である。これら全てのパラメータを人工衛星データを用いて推定できるかどうか, また仮に推定できたとしても, そのバルクパラメータがそのバルク式への入力として, 十分な精度を持つかどうか, といった議論が必要になるであろう。また, 5 章においても指摘したように, Brunke *et al.* (2003) の評価方法には, 評価の基準として使用している渦相関法による観測データと, バルク式 COARE3.0 が独立でないという点に大きな問題があると考えられる。今後, 独立した観測データを用いたバルク式の再検証が必要である。

データセットの精度評価に関しても課題がある。現在では多くの種類の乱流熱フラックスデータが存在するが, それぞれのデータセットに対しての精度評価が必ずしも十分に行なわれているとは限らない。Chou *et al.* (2003) で行なわれている, 真値との比較による絶対

的な乱流熱フラックスデータの精度評価は, 今後も積極的に行なう必要がある。そのためには, 渦相関法などの直接乱流観測データの充実が必要不可欠であることは言うまでもない。さらに, ブイのデータを利用したデータセットの評価も, 現状では, 十分に行なわれているとは言えない。TAO/TRITON ブイ, NDBC ブイ, Subduction Experiment ブイ, JMA ブイなど, いくつかある係留ブイによる貴重な観測データを用いてより包括的に比較が行なわれるべきであると考えられる。また, 本論文で紹介した精度評価に関連する研究は, それぞれのデータセットで, 真値のデータ, 時空間解像度, 比較基準などがそれぞれ異なり, データセットの精度評価結果の定量的な相互比較を行なうのはかなり困難な状況である。したがって, 今後, 統一的な視点での, 相互比較, 精度評価が行なわれることが望まれる。

謝 辞

本研究の一部は, JAXA および文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト」課題 7 の援助を受けて行ないました。

References

- Arya, S. P. (1988): *An Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, 420 pp.
- Beljaars, A. C. M. (1995a): The impact of some aspects of the boundary layer scheme in the ECMWF model. *Proc. Seminar on Parameterization of Sub-Grid Scale Physical Processes*, Reading, United Kingdom, ECMWF.
- Beljaars, A. C. M. (1995b): The parameterization of surface fluxes in large scale models under free convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 255-270.
- Bentamy, A., K. B. Katsaros, A. M. Mestas-Nunez, W. M. Drennan, E. B. Forde, and H. Roquet (2003): Satellite estimates of wind speed and latent heat flux over the global oceans. *J. Climate*, **16**, 637-656.
- Bourras, D., L. Eymard, and W. T. Liu (2002): A neural network to estimate the latent heat flux over oceans from satellite observations. *Int. J. Remote Sens.*, **23**, 2,405-2,423.
- Brunke, M. A., X. B. Zeng, and S. Anderson (2002): Uncertainties in sea surface turbulent flux algorithms

- and data sets. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **107**, –, doi:10.1029.
- Brunke, M. A., C. W. Fairall, X. B. Zeng, L. Eymard, and J. A. Curry (2003): Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? *J. Climate*, **16**, 619–635.
- Bunker, A. F. (1976): A computation of surface energy flux and annual cycle of the North Atlantic Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1,122–1,140.
- Chou, S. H. (1993): A comparison of airborne eddy-correlation and bulk aerodynamic methods for ocean-air turbulent fluxes during cold-air outbreaks. *Boundary-Layer Met.*, **64**, 75–100.
- Chou, S. H., R. M. Atlas, C. L. Shie, and J. Ardizzone (1995): Estimates of surface humidity and latent-heat fluxes over oceans from SSM/I data. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2,405–2,425.
- Chou, S. H., C. L. Shie, R. M. Atlas, and J. Ardizzone (1997): Air-sea fluxes retrieved from special sensor microwave imager data. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **102**, 12,705–12,726.
- Chou, S. H., E. Nelkin, J. Ardizzone, R. M. Atlas, and C. L. Shie (2003): Surface turbulent heat and momentum fluxes over global oceans based on the Goddard Satellite retrievals, version 2 (GSSTF2). *J. Climate*, **16**, 3,256–3,273.
- Chou, S. H., E. Nelkin, J. Ardizzone, and R. M. Atlas (2004): A comparison of latent heat fluxes over global oceans for four flux products. *J. Climate*, **17**, 3,973–3,989.
- da Silva, A. M., C. C. Young, and S. Levitus (1994): Atlas of surface marine data 1994. *NOAA Atlas NESDIS*, 74 pp.
- Esbensen, S. K. and Y. Kushnir (1981): The heat budget of the global ocean: *An atlas based on estimates from surface marine observations*. Climatic Research Institute Report No. 29, Oregon State University, 624 pp.
- Esbensen, S. K., D. B. Chelton, D. Vickers, and J. Sun (1993): An analysis of errors in special sensor microwave imager evaporation estimates over the global oceans. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **98**, 7,081–7,101.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. S. Godfrey, G. A. Wick, J. B. Edson, and G. S. Young (1996a): Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **101**, 1,295–1,308.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, D. P. Rogers, J. B. Edson, and G. S. Young (1996b): Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean global atmosphere coupled ocean atmosphere response experiment. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **101**, 3,747–3,764.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev, and J. B. Edson (2003): Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *J. Climate*, **16**, 571–591.
- Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Hernandez, A. Nomura, and E. Serrano (1997): ECMWF Re-Analysis Project Report Series 1 ERA description. ECMWF, 71 pp.
- Graßs, I. H., R. K. Jost, J. Schulz, P. Bauer, and P. Schlüssel (2000): The Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and fluxes from Satellite data (HOAPS): A climatological atlas of satellite-derived air-sea-interaction parameters over the oceans. *Max-Planck-Institute für Meteorologie*, Rep. No. 312.
- Guan, L. and H. Kawamura (2004): Merging satellite infrared and microwave SSTs: Methodology and evaluation of the new SST. *J. Oceanogr.*, **60**, 905–912.
- Hsiung, J. (1986): Mean surface energy fluxes over the global ocean. *J. Geophys. Res.*, **91(C9)**, 10,585–10,606.
- Josey, S. A., E. C. Kent, and P. K. Taylor (1999): New insights into the ocean heat budget closure problem from analysis of the SOC air-sea flux climatology. *J. Climate*, **12**, 2,856–2,880.
- Josey, S. A. (2001): A comparison of ECMWF, NCEP-NCAR, and SOC surface heat fluxes with moored buoy measurements in the subduction region of the North-east Atlantic. *J. Climate*, **14**, 1,780–1,789.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **77**, 437–471.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter (2002): NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **83**, 1,631–1,643.
- Kilpatrick, K. A., G. P. Podesta, and R. Evans (2001): Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **106**, 9,179–9,197.
- Konda, M., N. Imasato, and A. Shibata (1996): A new method to determine near-sea surface air temperature by using satellite data. *J. Geophys. Res. -Oceans*, **101**, 14,349–14,360.
- Kondo, J. (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Boundary-Layer Met.*, **9**, 91–112.

- Kubota, M. and S. Mitsumori (1997): Sensible heat flux estimated by satellite data over the North Pacific. *Space Remote Sensing of Subtropical Oceans*, 127–136.
- Kubota, M., N. Iwasaka, S. Kizu, M. Konda, and K. Kutsuwada (2002): Japanese ocean flux data sets with use of remote sensing observations (J-OFURO). *J. Oceanogr.*, **58**, 213–225.
- Kubota, M., A. Kano, H. Muramatsu, and H. Tomita (2003): Intercomparison of various surface latent heat flux fields. *J. Climate*, **16**, 670–678.
- Large, W. G. and S. Pond (1981): Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 324–336.
- Large, W. G. and S. Pond (1982): Sensible and Latent heat flux measurements over the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 464–482.
- Legler, D. M., I. M. Navon, and J. J. O'Brien (1989): Objective analysis of pseudostress over the Indian Ocean using a direct-minimization approach. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 709–720.
- Liu, C. C., G. R. Liu, W. J. Chen, and H. Y. Yang (2003): Modified Bowen ratio method in near-sea-surface air temperature estimation by using satellite data. *IEEE. T. Geosci. Remote*, **41**, 1,025–1,033.
- Liu, W. T., K. B. Katsaros, and J. A. Businger (1979): Bulk parameterization of the air-sea exchange of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *J. Atm. Sci.*, **36**, 1,722–1,735.
- Liu, W. T. (1986): Statistical relation between monthly mean precipitable water and surface-level humidity over global ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1,591–1,602.
- Moore, G. W. K. and I. A. Renfrew (2002): An assessment of the surface turbulent heat fluxes from the NCEP-NCAR reanalysis over the western boundary currents. *J. Climate*, **15**, 2,020–2,037.
- Moyer, K. A. and R. A. Weller (1997): Observations of surface forcing from the subduction experiment: A comparison with global model products and climatological datasets. *J. Climate*, **10**, 2,725–2,742.
- Oberhuber, J. M. (1988): An atlas based on the 'COADS' data set: The budgets of heat, buoyancy and turbulent kinetic energy at the surface of the global ocean. *Max-Planck-Institut für Meteorologie Rep.*, **15**, 20 pp.
- Ramage, C. S. (1987): Secular change in reported surface wind speeds over the ocean. *J. Climate Appl. Met.*, **26**, 525–528.
- Reynolds, R. W. and T. M. Smith (1994): Improved global sea-surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, **7**, 929–948.
- Schluessel, P. and H. Luthardt (1991): Surface wind speeds over the north sea from special sensor microwave/imager observations. *J. Geophys. Res.*, **96**, 4,845–4,853.
- Schluessel, P., L. Schanz, and G. Englisch (1995): Retrieval of latent-heat flux and longwave irradiance at the sea-surface from SSM/I and AVHRR measurements. *Adv. Space Res.*, **16**, 107–116.
- Schluessel, P. (1996): Satellite remote sensing of evaporation over sea, p. 431–461. In *Radiation and Water in the Climate System: Remote measurements*, edited by Erhard Raschke, NATO ASI Series.
- Schubert, S., J. Pfaendtner, and R. Rood (1993): An assimilated data set for each science application. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **74**, 2,331–2,342.
- Schulz, J., P. Schluessel, and H. Grassl (1993): Water-vapor in the atmospheric boundary-layer over oceans from SSM/I measurements. *Int. J. Remote Sens.*, **14**, 2,773–2,789.
- Schulz, J., J. Meywerk, S. Ewald, and P. Schluessel (1997): Evaluation of satellite-derived latent heat fluxes. *J. Climate*, **10**, 2,782–2,795.
- Shibata, A. (1994): Determination of water-vapor and liquid water-content by an iterative method. *Meteor. Atm. Phys.*, **54**, 173–181.
- Simmons, A. J. and J. K. Gibson (2000): The ERA-40 Project Plan. *ERA-40 Project Report Series 1*. Shinfield Park, Reading, UK, 63 pp.
- Smith, S. D. (1988): Coefficients for sea surface wind stress, heat flux and wind profiles as function of wind speed and temperature. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15,467–15,472.
- Smith, S. R., D. M. Legler, and K. V. Verzone (2001): Quantifying uncertainties in NCEP reanalyses using high-quality research vessel observations. *J. Climate*, **14**, 4,062–4,072.
- Sun, B. M., L. S. Yu, and R. A. Weller (2003): Comparisons of surface meteorology and turbulent heat fluxes over the Atlantic: NWP model analyses versus moored buoy observations. *J. Climate*, **16**, 679–695.
- Takamura, T. (1996): A method to retrieve precipitable water content using a microwave spectroradiometer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 37–47.
- Taylor, P. K., E. C. Kent, S. A. Josey, and M. J. Yelland (1996): Comparative assessment of existing surface flux field estimates, p. 35–41. In *WCRP Workshop on Air-Sea Flux Fields for Forcing Ocean Models and Validating GCMs*, England, ECMWF.
- Taylor, P. K. (2000): *Intercomparison and validation of ocean-atmosphere energy flux fields, Final report of the Joint WCRP SCOR Working Group on Air Sea Fluxes* (SCOR Working Group 110), 305 pp.

- Tomita, H. and M. Kubota (2005): Usage of multi-satellite data for estimating accurate daily-mean surface latent heat flux. (Submitted to *J. Atmos. Ocean. Tech.*).
- 塚本 修・文字 信貴・伊藤 芳樹 (2001): 第3章 乱流変動法による運動量・顕熱・潜熱 (水蒸気) のフラックス測定, p. 19-55. 気象研究ノート, 199, 塚本 修・文字 信貴 編, 日本気象学会, 東京.
- Wang, W. M. and M. J. McPhaden (1999): The surface-layer heat balance in the equatorial Pacific Ocean. Part I: Mean seasonal cycle. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 1,812–1,831.
- Wang, W. M. and M. J. McPhaden (2000): The surface-layer heat balance in the equatorial Pacific Ocean. Part II: Interannual variability. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 2,989–3,008.
- Wang, W. M. and M. J. McPhaden (2001): Surface layer temperature balance in the equatorial Pacific during the 1997-98 El Niño and 1998-99 La Niña. *J. Climate*, **14**, 3,393–3,407.
- Weller, R. A., M. F. Baumgartner, S. A. Josey, A. S. Fischer, and J. C. Kindle (1998): Atmospheric forcing in the Arabian Sea during 1994-1995: observations and comparisons with climatology and models. *Deep-Sea Res. Part II*, **45**, 1,961–1,999.
- Weller, R. A., F. Bradley, and R. Lukas (2004): The interface or air-sea flux component of the TOGA coupled ocean-atmosphere response experiment and its impact on subsequent air-sea interaction studies. *J. Atmos. Ocean Tech.*, **21**, 223–257.
- Wentz, F. J. (1994): User's manual SSM/I-2 geophysical tapes. Vol. 070194, *Tech. Rep., Remote Sensing Systems*, 20 pp.
- Wentz, F. J. (1997): A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *J. Geophys. Res. - Oceans*, **102**, 8,703–8,718.
- Woodruff, S. D., R. J. Slutz, R. L. Jenne, and P.M. Steurer (1987): A comprehensive ocean-atmosphere data set. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **68**, 1,239–1,250.
- Yelland, M. J., B. I. Moat, P. K. Taylor, R. W. Pascal, J. Hutchings, and V. C. Cornell (1998): Wind stress measurements from the open ocean corrected for air-flow distortion by the ship. *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 1,511–1,526.
- Yu, L. S., R. A. Weller, and B. M. Sun (2004): Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlantic Ocean (1988-99) by a synthesis approach. *J. Climate*, **17**, 373–393.
- Zeng, X. B., M. Zhao, and R. E. Dickinson (1998): Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. *J. Climate*, **11**, 2,628–2,644.

付 録 略語一覧

ADEOS	ADvanced Earth Observing Satellite
ALBATROS	AUTOFLUX Linked Base for Automatic Transfer at the Ocean Surface
AMIP	Atmospheric Model Intercomparison Project
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
CETP	Centre d'Etude des Environments Terrestre et Planetaires
COADS	Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set
COARE	Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment
DOE	Department of Energy
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERS	ESA Remote-Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
ETL	Environmental Technology Laboratory
GEOS	Goddard Space Flight Center's Earth Observing System reanalysis
GPM	Global Precipitation Measurement
GSSTF	Goddard Satellite-based Surface Turbulent Fluxes
GTS	Global Telecommunications System
HOAPS	Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite data
JMA	Japan Meteorological Agency
J-OFURO	Japanese Ocean Flux Data Sets with Use of Remote Sensing Observations
JRA	Japanese Reanalysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NDBC	National Data Buoy Center

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	SST	Sea Surface Temperature
		TAO	Tropical atmosphere Ocean Array
NSCAT	NASA Scatterometer	TRITON	Triangle Trans-Ocean buoy Network
SOC	Southampton Oceanography Center	VOS	Voluntary Observing Ships
SSMI	Special Sensor Microwave Imager		

The Present State and Future Perspectives of Global Turbulent Heat Flux Data Sets

Hiroyuki Tomita * and Masahisa Kubota *

Abstract

Global surface heat flux data sets are crucial for many studies such as those on air-sea interaction and climate variation. Currently, various global surface heat flux data sets are constructed using the *in situ* observation data, output data from numerical models, and satellite data. In this paper, we have reviewed the state of the art on various surface turbulent heat flux data sets (da Silva, SOC, GSSTF1/2, HOAPS1/2, NRA1/2, and ERA15/40) and their accuracy, and discussed their future development. The results of the intercomparison of mean fields show that the overall characteristics are qualitatively similar. However, there exist large differences between the various data sets, with a maximum difference of approximately 100 W m^{-2} . In particular, in J-OFURO, the latent heat flux over the western boundary current region is underestimated as compared to other data sets, whereas the latent heat flux over the trade wind region is overestimated. The results from the comparison with the *in situ* observations reveal that the error in satellite-derived bulk parameters such as wind speed and surface air specific humidity cause the error in satellite-derived turbulent heat flux. On the other hand, in reanalysis data sets, the turbulent heat flux over the western boundary current region is overestimated because of the error in the bulk method. Since there are many differences in comparative studies, a uniform comparison and intercomparisons are required. In order to obtain a more reliable global data set, the construction of an integrated data set, use of multisatellite data, and development of a more reliable bulk formula are shown to be necessary.

Key words: turbulent heat flux, bulk method, eddy-correlation method,
satellite-derived data

(Corresponding author's e-mail address: tomita@mercury.oi.u-tokai.ac.jp)

(Received 12 May 2004; accepted 15 July 2005)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2005)

* School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1, Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan