

— 解 説 —

衛星搭載マイクロ波散乱計による海上風ベクトルの観測

北海道大学低温科学研究所 江淵 直人

1. はじめに

マイクロ波散乱計は、衛星に搭載されたセンサーから海面に向けてマイクロ波を送信し、海面からの後方散乱の強度を観測して海上風の風速・風向を観測するものである。1978年に打ち上げられた海洋観測衛星 Seasat に初めてマイクロ波散乱計が搭載され、わずか3ヶ月あまりの運用ではあったが、その有用性が示された。その後、散乱計を搭載した衛星はしばらく途絶えていたが、1991年に European Space Agency (ESA) によって打ち上げられた European Remote Sensing Satellite-1 (ERS-1) 衛星に C-バンド (5.3 GHz) のマイクロ波散乱計 AMI (Active Microwave Instrument) が搭載された。AMI による海上風ベクトル観測は、その後、1995年打ち上げの後継機 ERS-2 に引き継がれ、2001年の運用停止まで、約10年間の継続したデータセットが得られている。1996年には日本の地球観測衛星 ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite, 愛称「みどり」) に、National Aeronautics Space Agency (NASA) が開発した Ku-バンド (14 GHz) マイクロ波散乱計 NASA Scatterometer (NSCAT) が搭載された。NSCAT は1997年6月の ADEOS 衛星の事故によって、約10ヶ月で観測を停止した。しかし、NSCAT は短い観測期間ながら、気象学・海洋物理学の研究および気象予報などの現業利用に大きなインパクトを与えた。その結果、NASA/Jet Propulsion Laboratory (JPL) は NSCAT の代替機としてマイクロ波散乱計 SeaWinds を搭載した衛星 QuikScat (QSCAT) を急遽計画し、1999年6月に打ち上げた。QSCAT/SeaWinds は、現在も継続して運用されている。今年11月には、ADEOS の後継機 ADEOS-II の打ち上げが予定されている。この ADEOS-II には、QSCAT に搭載されたものと全く同じ散乱計 SeaWinds が搭載され、観測が引き継がれることになっている。図1に ADEOS, QSCAT, ADEOS-II のイラストを示した。

マイクロ波散乱計によって全球規模で繰り返し観測される海上風ベクトルのデータは、気候システムの重要な要素である大気海洋相互作用や海洋表層の風成循環などの研究において、従来の船舶等による観測の少ない外洋域における貴重な観測資料として用いられている。1991年の ERS-1/AMI 散乱

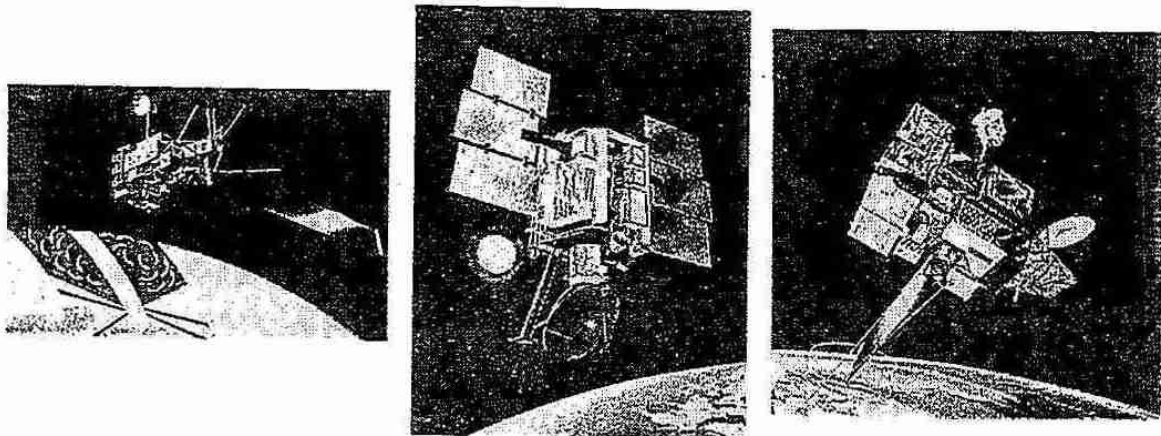


図1. ADEOS, QSCAT, および ADEOS-II

計より ERS-2/AMI, ADEOS/NSCAT, QuikSCAT/SeaWinds と継続する海上風のデータは、ADEOS-II/SeaWinds のミッションによって 15 年以上の期間におよぶことになり、ENSO などの全球規模の経年変動の現象の把握・解明にも大いに役立つものと期待されている。また、研究用のデータとは別に、準リアルタイムでの処理・配布も行われており、気象予報などにも利用されている。現在、QSCAT/SeaWinds のデータは、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) および European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) の客観解析に用いられており、日本の気象庁でも現業利用のための研究が進められている。

本稿では、マイクロ波散乱計による海上風ベクトル観測の原理、SeaWinds の観測方式の概要、およびその観測データと海洋気象ブイデータとの比較結果などについて紹介する。

2. 海面からのマイクロ波後方散乱の特性とマイクロ波散乱計の観測原理

マイクロ波散乱計は、海上の風速・風向を直接観測するものではなく、センサーから発射したマイクロ波が海面で後方散乱された信号から風速・風向を観測する。入射角が 20° 程度以上の場合、マイクロ波の波長(数 cm 程度)と同じ程度のスケールを持ち、電波の入射方向に進む海面の波との共鳴散乱(Bragg 散乱)が、海面におけるマイクロ波の後方散乱に支配的であることが知られている(たとえば Wright, 1968)。このような共鳴散乱を起こすスケールの海面波は、局所的な風速・風向と非常に対応がよいため、後方散乱の強度を観測することで、風速・風向を算出することができる。

図 2 は、海面におけるマイクロ波の後方散乱断面積(単位面積あたりに規格化したもの)の風速、風向依存性を示したものである(Naderi et al., 1991 より引用)。入射角が大きいときには、散乱断面積は、風速に対して指数的に増加する。風向に対しては、風上および風下に向けて入射する時に極大値をとり、風に直交する方向に入射する時に極小値をとる。このような海面の後方散乱特性を利用して、同一の海面を複数の方位角方向から観測することにより、風速・風向を算出する。あらかじめ散乱断面積を入射角・風速・風向などの関数として表現しておく(この関数を geophysical model function と呼ぶ。以下 GMF と略記する)、複数の入射角・方位角から観測された散乱断面積から逆問題を解き、風速・風向の解を得る(詳しくは Long and Mendel, 1991 参照)。未知数として風速・風向の 2 つを考えれば、独立な散乱断面積の観測値が 2 つあれば解が求まるが、実際には散乱断面積の観測誤差等を考慮し、3~4 つの散乱断面積の観測値を用いることが一般的である。

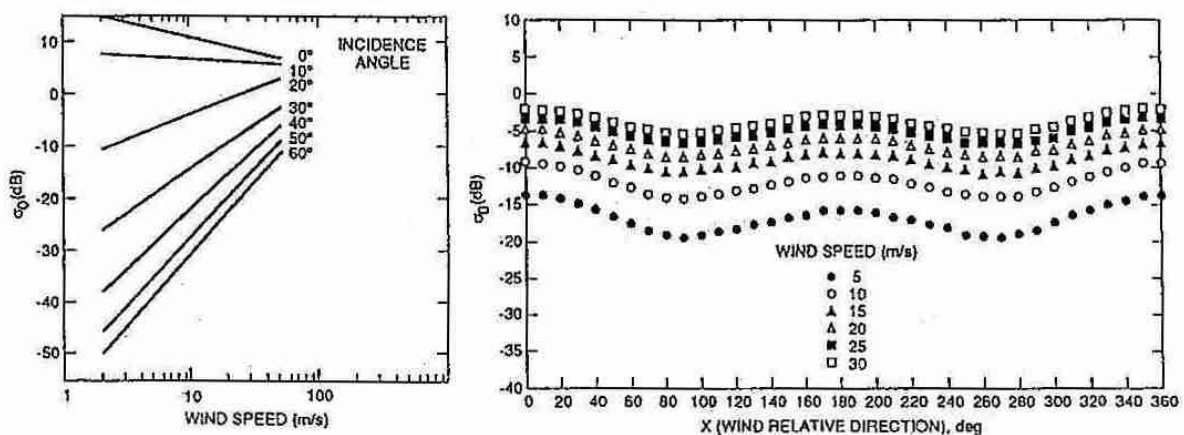


図 2. 海面の規格化後方散乱断面積の風速、風向依存性 (Naderi et al., 1991 より引用)

上述のようにマイクロ波散乱計は、海面の数 cm スケールの波からの後方散乱を観測して、海上風の風速・風向を求めているため、原理的には、海面上のある高さの風速よりは、海面に働く風の応力、もしくは摩擦速度に対応する風速を計っているものと考えられる。そこで、通常 GMF を作成する際の基準風速としては、摩擦速度と 1 対 1 の関係にある海面上 10 m の中立成層相当の風速を用いる。

3. SeaWinds の観測方式

図 3 は Seasat, ERS/AMI, ADEOS/NSCAT, SeaWinds の各散乱計の観測方式を模式的にまとめたものである (Liu, 2002 より引用)。従来の ERS/AMI や ADEOS/NSCAT などのマイクロ波散乱計は、方位角を固定した複数のスティックアンテナが作る幅の狭いファンビームを用いて散乱断面積を観測する方式を用いていた。それに対して、SeaWinds は 13.4 GHz の 2 本のペンシルビームをコンカルスキャンすることにより、同一地点からの後方散乱を異なる 4 つの方位角で観測する方式を採用している。QSCAT/SeaWinds の観測方式の概略図を図 4 に示した。

SeaWinds は直径 1 m のパラボラアンテナを毎分 18 回転させ、水平偏波一入射角 46° および垂直偏波一入射角 52° の 2 つのビームで地球表面をスキャンする。図 5 に示すように、衛星の飛行とともにそれぞれのビームは、地球表面を幅 1800 km および 1400 km にわたって観測する。また、図 6 に示したように、それぞれのビームの観測から、同一地点を異なる入射角・方位角で 4 回観測することになる。この 4 つの散乱断面積の観測値から風速・風向を算出する。

QSCAT 衛星は高度 803 km、軌道傾斜角 98.616° 、回帰周期 4 日の太陽同期極軌道を飛行し、観測幅 1800 km にわたって、空間分解能 25 km で海上風ベクトルが観測できる。これにより、1 日の観測で海氷域以外の全球の海面の 90 % をカバーすることが可能である。SeaWinds のペンシルビーム・コンカルスキャン方式の利点は、パラボラアンテナを用いることにより S/N 比が向上すること、センサーが小型化できること、衛星直下点を含む観測ができることにより観測幅が広がること、および GMF のパラメータが少なく済むこと、などが挙げられる。

Spaceborne Scatterometers

	SEASAT	ERS-1/2	NSCAT	QuikSCAT
Frequency	14.6 GHz	5.3 GHz	13.995 GHz	13.402 GHz
Scan Pattern				
Polarization	V-H, V-H	V ONLY	V, V-H, V	V, H
Inc. Angle	22° - 55°	18° - 47° , 24° - 57°	18° - 57° , 22° - 63°	46° , 54°
Beam Resolution	Fixed Doppler	RANGE GATE	Variable Doppler	SpoI
Resolution	50 km	50 km	25 km	25 km
Swath	500 km 500 km 	500 km 	600 km 600 km 	1800 km
Daily Coverage	Variable	41%	77%	93%
Dates	6/78 - 10/78	8/91-1/01	8/96 - 6/97	6/99 +

図 3. Seasat, ERS/AMI, ADEOS/NSCAT, SeaWinds の各散乱計の観測方式 (Liu, 2002 より引用)

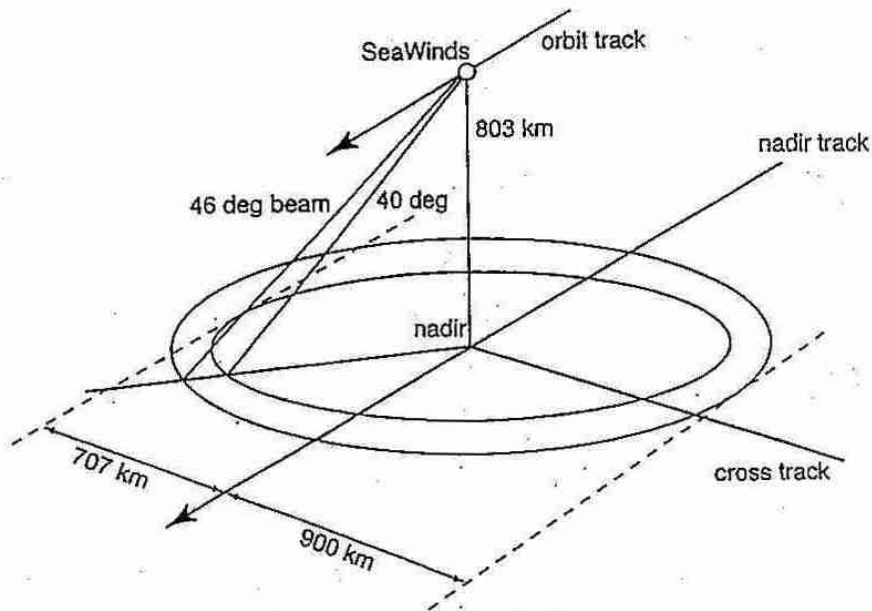


図4. QSCAT/SeaWindsの観測方式

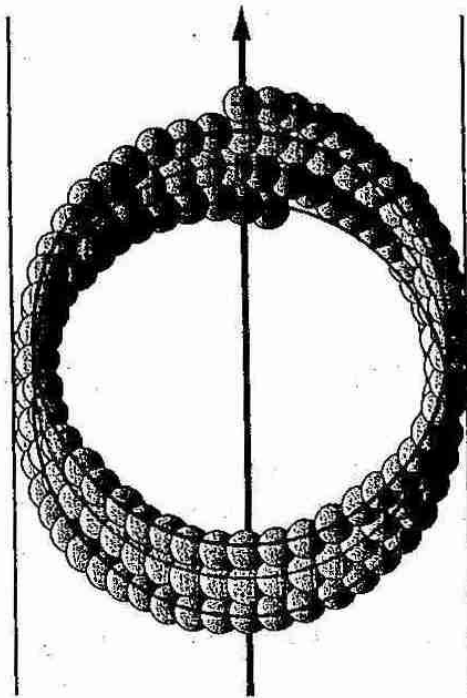


図5. 1つのビームによるスキャンパターン

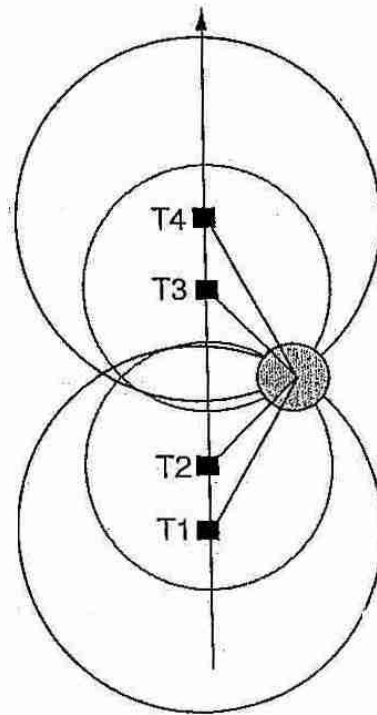


図6. 2つのビームによる同一海面の4回の観測

3. 海洋気象ブイとの比較結果および観測例

図7に、QSCAT/SeaWindsによって観測された海上風の風速・風向を海洋気象ブイの観測データと比較した結果を示した (Ebuchi *et al.*, 2002 より引用)。気象庁, National Data Buoy Center (NDBC), Tropical Atmosphere/Ocean-Triangle Trans-Ocean buoy Network (TAO-TRITON) によって運用されている計 101 基のブイのデータを用いた。外洋の水深 100 m 以上の海域に係留されたブイのみを用いた。

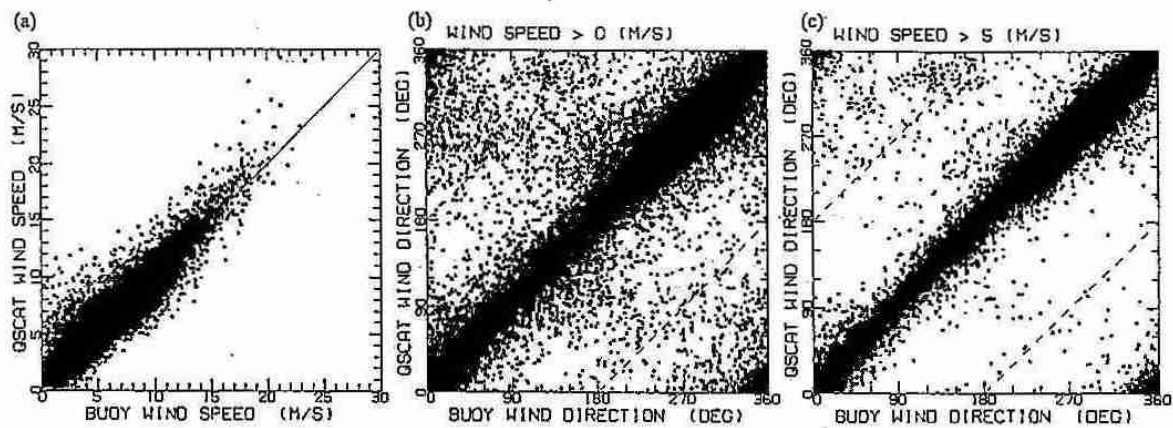


図7. 観測された風速・風向の海洋気象ブイとの比較結果

データの期間は1999年7月19日～2000年12月31日である。ブイで観測された風速は、Liu and Tang (1996) のアルゴリズムを使用して高度補正および安定度補正を行い、中立成層・高度10 m相当の風速の値に変換した。QSCATとブイの同期データセットは、ブイの保留位置に最も近いQSCATデータとQSCATの観測時刻に最も近い時刻のブイデータにより作成した。同期の条件は、観測時間差30分以内、ブイと散乱計観測セルの中心との距離25 km以内とした。また、低風速時に強い降雨が散乱計の観測に影響を与えることが知られているため、QSCATデータの降雨フラッグに従って降雨の影響を受けたデータは比較から除外した。

図7(a)の風速の比較結果は、データ数48540点、残差の平均0.02 m/s、残差の標準偏差1.01 m/sと、非常によく一致している。また、ここでは結果は示さないが、風速15 m/sまでは、風速に依存する系統的なバイアスは見られなかった。風向の比較結果は、図7(b)の全風速域では残差の標準偏差29.6°と若干ばらつきがあるが、(c)の風速5 m/s以上のデータのみで比較を行えば、標準偏差は19.5°となり、よく一致する結果となった。風速・風向ともに、従来のマイクロ波散乱計を上回る非常に高い観測精度を持つことが示されている。

図8は、2000年の台風6号に伴う海上風場の変化をQSCATデータを使って示したものである。日付は「年-日T時:分:秒」(UT)で示されている。この緯度帯では1日2回の観測が3日続き、丸1日の欠測が入る観測パターンとなっている。沖縄付近の海上から北上し、九州西方沖の東シナ海から日本海へ抜ける様子が非常によく捉えられている。

図9はQSCAT/SeaWindsの観測データをもとに作成した2000年1月の月平均海上風場である。偏西風や貿易風、モンスーン、季節風、収束帯などの風域の地理的分布が非常によく捉えられている。図では、見やすさのために5°格子で風ベクトルを描いたが、実際には、より細かい間隔での時空間格子データの作成も可能である。

4. おわりに

本稿では、マイクロ波散乱計の観測原理、QSCAT/SeaWindsの観測方式およびその観測データと海洋気象ブイデータとの比較結果について簡単に紹介した。現在、QSCAT/SeaWindsの海上風データは、

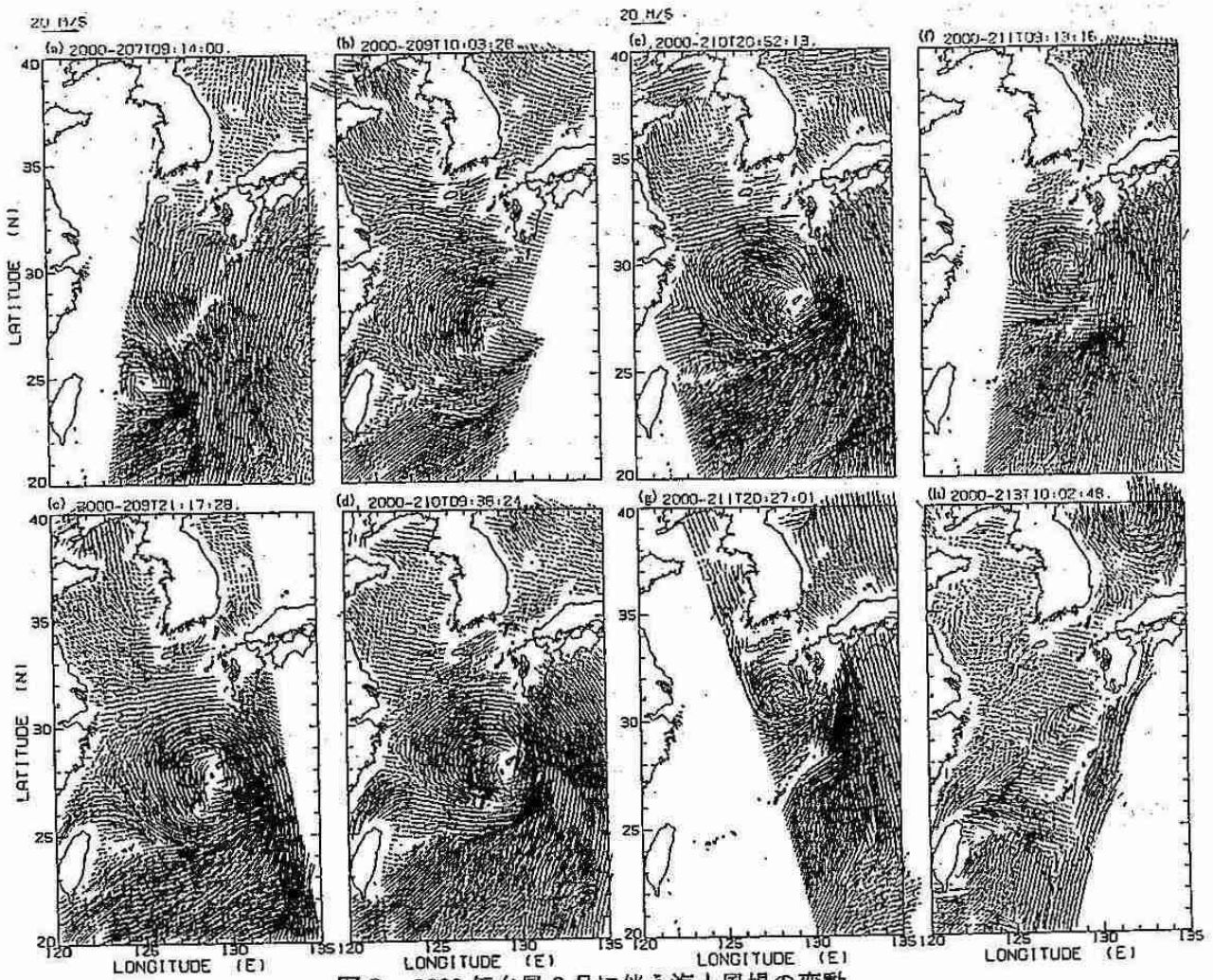


図8. 2000年台風6号に伴う海上風場の変動

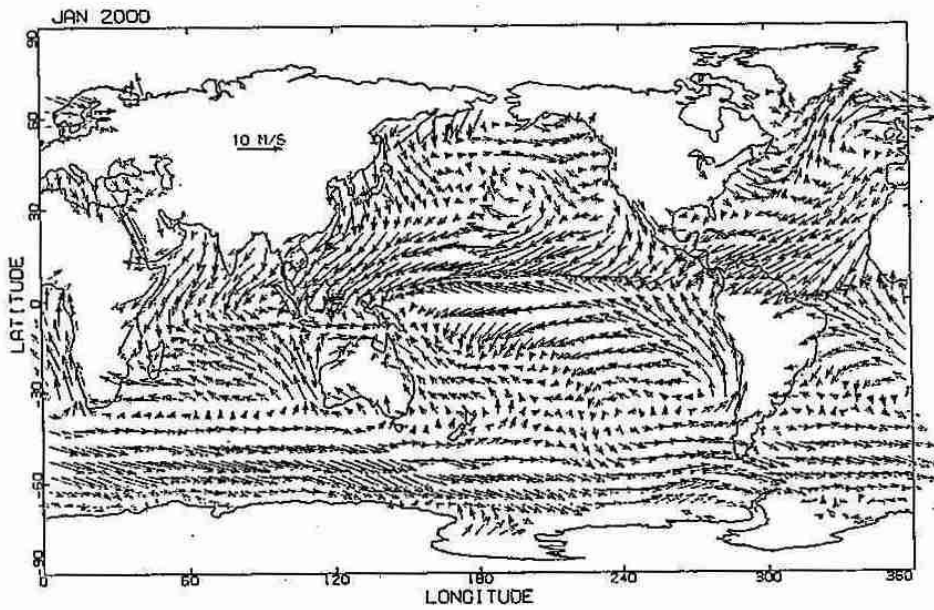


図9. 全球の風速分布の例 (2000年1月)

研究目的のユーザについては、NASA/JPL Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO-DAAC) の FTP サイトからダウンロードできるようになっている。詳細については PO-DAAC の WWW サイト <http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/> を参照されたい。このサイトからは、QSCAT ミッションおよび SeaWinds センサーの解説、マニュアル、フォーマット解説書などのドキュメントおよびデータ読みとりのためのサンプルプログラムなどの情報も取得できる。またリンク先をたどれば、いくつかの研究機関で作成されている風速ベクトルと雲画像の合成図や時間・空間格子化データセットなどの情報も得られる。

参考文献

- Ebuchi, N., H.C. Graber, and M.J. Caruso, 2002: Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. *J. Atmos. Oceanic Tech.* (in press).
- Liu, W.T., 2002: Progress in scatterometer applications. *J. Oceanogr.*, **58**, 121-136.
- Liu, W.T., and W.Q. Tang, 1996: Equivalent neutral wind. *JPL Publ. 96-19, Jet Propul. Lab.*, Pasadena, USA, 8 pp (この文書は <http://airsea-www.jpl.nasa.gov/data.html> より入手可能)。
- Long, D.E. and J.M. Mendel, 1991: Identifiability in wind estimation from wind scatterometer measurements. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, **GE-29**, 268-276.
- Naderi, F.M., M.H. Freilich, and D.G. Long, 1991: Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean. - An overview the NSCAT scatterometer system. *Proc. IEEE*, **79**, 850-866.
- Wright, J.W., 1968: A new model for sea clutter. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-16**, 217-223.