

# AMSR-E 全天候型海上風速

齊 藤 貞 夫\*・柴 田 彰\*\*

## 要 旨

マイクロ波放射計による海上風速算出には、降水下での風速推定が困難であるという問題があったが、地球観測衛星 Aqua に搭載されているマイクロ波放射計 AMSR-E の6.925GHz 帯と10.65GHz 帯水平偏波輝度温度から算出する「全天候型海上風速」は雨天でも海上風速の算出が可能である。調査の結果、全天候型海上風速は台風の強風に対しても精度よく風速が算出できていることが明らかとなり、現業的な利用が期待できることが分かった。

### 1. はじめに

衛星搭載マイクロ波放射計（以下、マイクロ波放射計という）は、地球からのマイクロ波放射を衛星で観測する測器である。この測器による観測値から、海上風速を推定することができる。Shibata (2006) (以下、S06と略す) では、マイクロ波放射計 AMSR-E を用いてハリケーンでの海上風速算出を行っており、S06の結果を利用して台風の風速を推定できる可能性がある。

現在ベストトラックで解析されている台風の風速は、Dvorak 法 (Dvorak 1984) と呼ばれる気象衛星の赤外画像の雲パターンから推定されたものである (藤田・萩原 2000など)。この手法で推定できるのは台風の最大風速であり、風速の面的分布はわからない。このため、風速の面的分布を得られる手法が望まれている。

このような状況のため、S06に基づく台風情報等現業での利用が可能な海上風速プロダクトの開発を目指

して本研究を行った。

本稿では、まず2章でマイクロ波放射計 AMSR-E の概要を説明する。次に3章および4章でマイクロ波による海上風速算出原理一般を概観した上で、S06に基づくアルゴリズムによって算出される海上風速についてその問題点を含め議論する。その問題を5章と6章で解決し、改善したプロダクトの精度評価等を7章以降で行うことにする。

### 2. 改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) の概要

AMSR-E は、正式名称を改良型高性能マイクロ波放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System) といい、宇宙開発事業団 (NASDA ; 現・宇宙航空研究開発機構 : JAXA) が開発し、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の地球観測衛星 Aqua に搭載されたマイクロ波放射計である。Aqua 衛星は2002年5月4日にアメリカ合衆国カリフォルニア州のヴァンデンバーグ空軍基地から打ち上げられ、地方時間01:30と13:30に赤道上空705kmを通過する極軌道に投入された。そのため、AMSR-E が日本付近を観測するのは日本時間午前・午後1時半頃の1日2回である。

AMSR-E の設計上の寿命は3年であるが、2004年11月4日に89.0GHzのA系受信機の出力が停止して観測できなくなった以外は大きなトラブルもなく、

\* 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター (現 : 気象庁観測部気象衛星課)。

sada-saitoh@met.kishou.go.jp

\*\* 気象研究所 (現 : 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター)。shibata.akira@jaxa.jp

—2009年3月3日受領—

—2009年10月14日受理—

2009年9月現在順調に観測を継続している。なおこのトラブルも、89.0GHzのB系受信機データを利用することによりユーザーへの悪影響は限定的なものに留められた。

AMSR-Eは今後も可能な限り継続して観測を行い、2011年度打ち上げ予定の第一期水循環変動観測衛星(GCOM-W1)に搭載される後継センサAMSR2へ引き継いでいく予定となっている。AMSR2はAMSR-Eを発展・改良したものであり、その性能はAMSR-Eと同等かそれ以上である。このため、本研究の成果はAMSR2においても同様に利用が可能である。

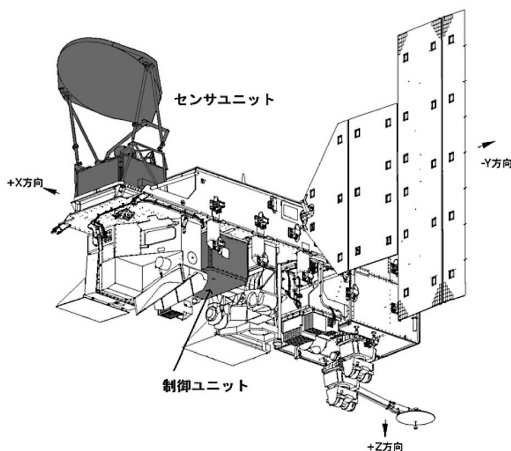
以下にAMSR-Eの概要を示す。第1図はAqua衛星の外観図で、うち灰色部分がAMSR-Eである。AMSR-Eは、衛星の進行方向(X軸)前方に取り付けられたセンサユニットと、コントロールユニットの2つのコンポーネントで構成される。また第2図は、NASDA(当時)筑波宇宙センターにて打ち上げ前試験中のAMSR-Eセンサユニットである。両図において、巨大な円盤状のアンテナが特徴的である。これは主反射鏡と呼ばれ、地球からのマイクロ波放射を受信部に反射させるための装置である。マイクロ波放射計では、主反射鏡の大きさがデータの空間分解能を決める要素の一つとなっており、空間分解能の高いデータを得るためには、主反射鏡を大きくする必要がある。AMSR-Eは直径1.6mの主反射鏡により最高約5kmの空間分解能を実現している。

AMSR-Eはセンサユニットを反時計回りに毎分40回転で回転させて地球を観測する。マイクロ波帯では観測輝度温度に強い入射角依存性があるので、このようにして観測の際の地球入射角をほぼ一定にする必要がある。この観測方法は「コンカルスキャン」と呼ばれ、AMSR-Eに限らずマイクロ波放射計全般で広く用いられている。

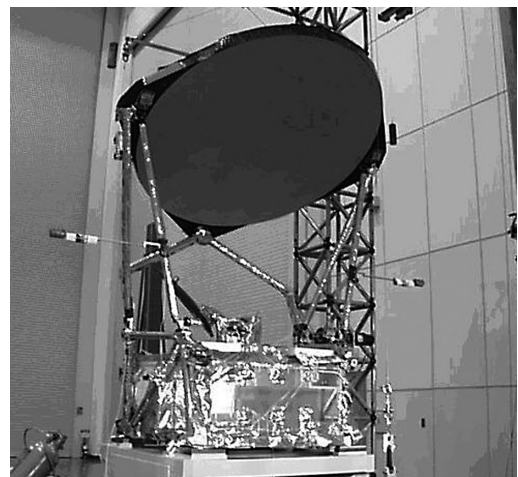
AMSR-Eは、6.925GHzから89.0GHzの間にある6つの周波数帯で垂直と水平の両偏波の輝度温度を観測する。第1表にその詳細と、本稿の議論と関連のある性能を記載した。例えば、空間分解能は解像できるスケールを決める指標であるし、温度分解能は算出される物理量の精度に影響を与える。なお89.0GHz帯はA系とB系の2系統あったが、先述したとおり2004年11月以降はB系のみで観測している。

JAXAでは、第1表に示した6周波数帯12チャンネルの観測データである輝度温度と、地球観測物理量の標準プロダクトを作成・公開している。物理量の標準プロダクトは2009年9月現在、海面水温、海上風速、降水強度、鉛直積算水蒸気量、鉛直積算雲水量、海水密度度、積雪深、土壌水分量の8種類である。本稿でこれらの標準プロダクトは、「標準」+「物理量名」の形で記載する(例:標準輝度温度、標準降水強度)。

マイクロ波放射計では特にチャンネル名称はない。そのため慣用的に「7GHz帯」などと中心周波数の数値で呼ばれることが多い。ただし、同じマイクロ波放



第1図 Aqua衛星の外観(灰色部分がAMSR-E)。



第2図 NASDA(当時)筑波宇宙センターで打ち上げ前試験中のAMSR-Eセンサユニット。

第1表 AMSR-E センサ主要諸元.

周波数 (GHz)	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5	89.0-A	89.0-B
分解能 (km)	43.2×75.4	29.4×51.4	15.7×27.4	18.1×31.5	8.2×14.4	3.7×6.5	3.5×5.9
バンド幅 (MHz)	350	100	200	400	1000	3000	3000
温度分解能 (K)	0.34	0.7	0.7	0.6	0.7	1.2	1.2
偏波	垂直および水平						
観測幅 (km)	1450						

射計である米国の軍事気象衛星 (DMSP) 搭載の SSM/I や、日米共同ミッションの熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載の TMI との間で相互に中心周波数が微妙に異なっていることがある。本稿では、文中出現頻度の高い6.925GHzと10.65GHzの水平偏波チャンネルを「7GHz帯」、「10GHz帯」と省略して記載する。それ以外のチャンネルは、正確な中心周波数値と偏波を記して表現する (例えば、89.0GHz 垂直偏波など)。

なお、AMSR-E およびその観測システムの詳細については、Kawanishi *et al.* (2003) などを参照していただきたい。

### 3. マイクロ波による海上風速算出の原理

海上風速を推定できる衛星搭載マイクロ波センサは大別して「マイクロ波放射計」と「マイクロ波散乱計」の2つのタイプに分類できる。AMSR-E や SSM/I・TMI は前者に属し、後述する SeaWinds は後者に分類される。両者の大きな違いは、「受動型」と「能動型」である。受動型は、センサ自らはマイクロ波を出さず、地表面や大気が射出・反射・散乱したマイクロ波放射を観測するのに対して、能動型は、センサが自らマイクロ波を射出し、観測対象 (散乱計の場合は、海上風の影響を受けて変化した海面) により反射・散乱したものを観測するという違いがある。

風速推定原理は異なるものの、両者とも海上風の影響を受けて変化した海面をマイクロ波で観測し、間接的に海上風速を算出するという点では共通する。このため、本稿では海上風のみを扱う。

柴田 (1996) によれば、風による波や海面への変化がマイクロ波放射に与える効果は次の2種類ある。

- i. 波がつくる海面の傾斜による射出角の変化と回

折の効果

- ii. 風により励起される白波や泡の効果

Wentz (1992) によると、風速 7 m/s 以下では i の効果が、それ以上では ii の効果が卓越する。本稿は強風時の風速推定が主目的のため、i の効果は無視できるとして、ii の効果のみを考慮する。

マイクロ波放射計による海上風速算出原理を言葉で

表現すると以下ようになる。

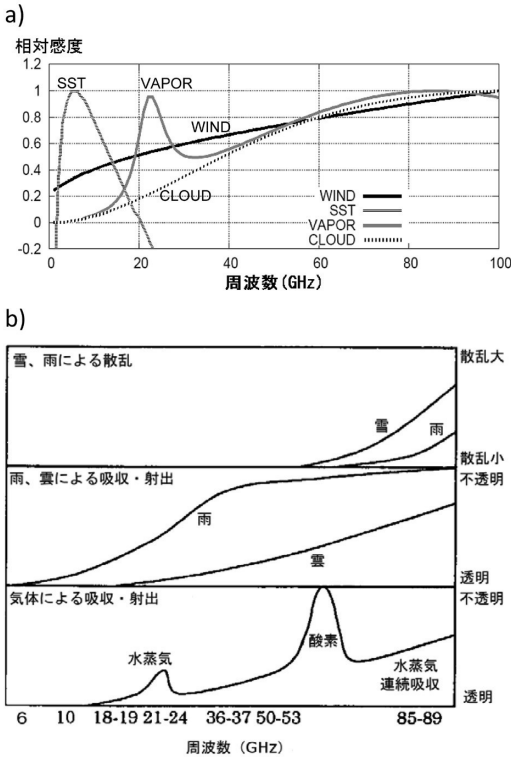
「白波や泡にはマイクロ波放射を増加させる効果があるので、白波・泡が多いほどマイクロ波放射は増加する。一方、強風時ほど白波や泡が多くなるので、マイクロ波放射の増加量から風速を算出できる。」

第3図 a はマイクロ波帯における海上風速・海面水温・水蒸気・雲水の輝度温度に対する相対感度の周波数依存性を示したものである。ここでの「相対」は、物理量毎に最大値が1.0になるよう規格化してあることを意味している。そのため、異なる物理量間での相対感度値の比較には意味がない。また、第3図 b は大気中の水の様々な状態におけるマイクロ波帯への感度を表している。

第3図 a から、海上風速の輝度温度への感度は周波数が高いほど良いことがわかる。一方第3図 b から、周波数が高くなると降水に対しても同時に感度が高まることがわかる。柴田 (2009) によれば、標準海上風速は降水の影響の大きい36.5GHzの水平・垂直偏波輝度温度を主に用いて算出しているため、弱い雨でも海上風速の算出が不可能である。

第4図 a はその実例で、2007年5月20日の17時 (UTC) 頃の台風第2号の標準海上風速分布である。以降、時刻は UTC 表示を基本とし、図中の斜線領域はアルゴリズム上の条件や、観測範囲外等の理由で有効な観測値がないことを表す。この図から、図中+印で示した台風の中心を囲む広い範囲で風速が算出できていないことがわかる。

このように、標準海上風速が台風の風速観測に関して有効とは言い難いため、雨天でも風速算出が可能な全天候型の海上風速算出アルゴリズムが望まれている。



第3図 マイクロ波帯への各物理量の感度の周波数特性. a)海上風速, 海面水温, 水蒸気, 雲水の輝度温度への相対感度 (JAXA/EORC 今岡啓治氏提供). b) 水の大気中でのさまざまな状態による輝度温度への感度. 竹内 (1999) より.

#### 4. AMSR-E 全天候型海上風速算出の原理とその背景

S06では, 7GHz帯と10GHz帯の輝度温度を用いた海上風速算出アルゴリズム (以下, 「全天候型海上風速」または All Weather Sea Surface Wind の頭文字をとり AWSSW という) を提案している. 詳細は S06の本文を参照していただきたいが, 本稿の主題であるアルゴリズムの改良とその精度評価に必要な S06の概要と問題点を以下に示す.

S06では, 以下の2つの仮定を置いた上で7GHz帯と10GHz帯の輝度温度から全天候型海上風速を算出し, ハリケーンの最大風速と比較を行った.

① 7GHz帯と10GHz帯の観測視野内での雨雲分布が空間的に均一であること

② 強い雨の時も輝度温度の飽和が起きないこと

※以降, 単に仮定といった場合このことをいう.

その結果, 海上風が強まるほど泡や白波によるマイクロ波放射が増加する関係がハリケーンに伴う暴風のもとでも成り立っていることと, S06のアルゴリズムが雨天でも精度よく風速算出が可能な全天候型であることの2点を示した.

ただし S06では, 算出した風速をおよそ100kmスケールに平滑化してベストトラック風速と比較しているため, 個々の地点で仮定成立の有無は考慮していない. 特に, 台風本体やその近傍における組織化して発達した積乱雲域では, 仮定を満たしていない地点の存在が予想される. このため, 次章以降でその検証を行った.

#### 5. 輝度温度空間分解能の改良

仮定①を満たさないことによる不自然な風速分布となった具体例として, 2007年5月20日の台風第2号の事例を挙げる.

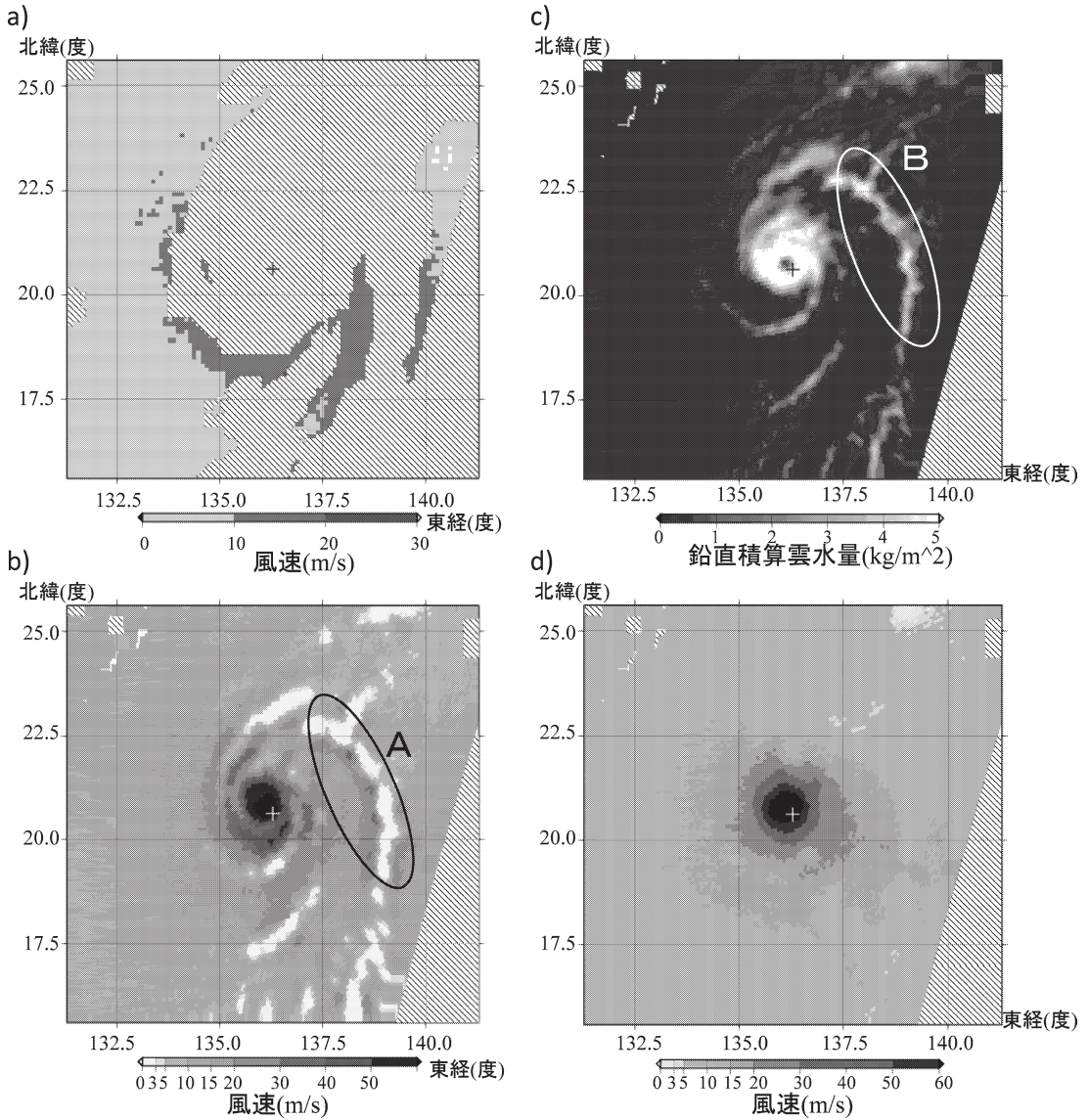
第4図bが20日17時頃のS06による海上風速で, 第5図が AMSR-E から約4時間遅れた20日21時頃の QuikSCAT 衛星搭載のマイクロ波散乱計 SeaWinds による海上風速である. このケースでは, ベストトラックの解析結果などから, この4時間で顕著な強度の変動はしていないと推定できるので, 台風の風速場全体を見た時に両者は同一傾向をしている必要がある.

第5図は中心の南東側で強風域が広がっており, 古くから知られている台風の風速分布 (例えば, 山岬1982など) となっている. 一方, 第4図bでは図中Aに示される台風の雲バンドによく似た螺旋状の形をした極端に風速の弱い領域が見られるなど, 両者のパターンは大きく異なっている.

ところで, 第4図cは第4図bと同軌道の標準鉛直積算雲水量の分布図である. b図中のAとc図中のBとが良く対応しているように, 第4図bとのパターンの類似性は第5図よりむしろこちらの方が高い. また, 不自然と思われる風速パターンが見られる場所が, 活発な雨雲が一樣に広がる中心付近でなく, 雨雲の分布が一樣でない台風の周辺部に広がっている. これらの事実は, この原因が仮定①が成立していないためであることを示唆している.

なぜ, このように降水分布の非一様性が不自然な風速分布の原因となるのだろうか.

AMSR-E が地球を観測する視野 (以下, Field of view の頭文字をとり FOV という) は, 径が周波数

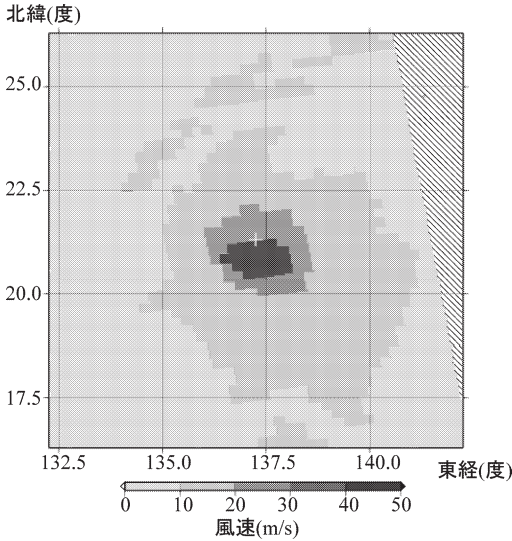


第4図 AMSR-Eの各物理量による2007年5月20日17時頃の台風第2号(同一軌道). a)標準海上風速分布. b)S06による海上風速分布. c)標準雲水量分布. d)全天候型海上風速分布.

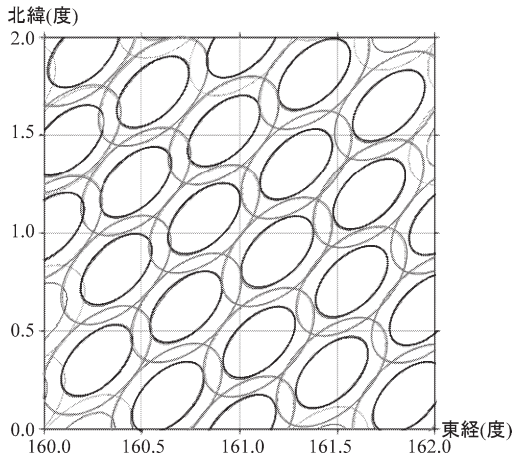
にほぼ反比例して短くなる楕円形をしている. 第6図に, AMSR-Eの7GHz帯と10GHz帯のFOVの輪郭を図示した. 外側の淡色楕円が7GHz帯のFOVで, 内側の濃色楕円が10GHz帯のそれである. この2つの異なったFOVをもつデータが対になって同一地点の観測データとして風速の算出に利用される. 第1表にあるFOVの径から, 10GHz帯のFOVの外側に7GHz帯のみFOVとなっている領域が幅10km以

上あることがわかる. 一方, 台風に伴うものを含めて一般に, 発達した降水セル単体の水平スケールは10kmのオーダーなので, 活発な積乱雲が散在する状況では仮定①を満たさなくなる.

このように, 雨雲分布の空間的不均一による問題は7GHz帯と10GHz帯の空間分解能の違いにより顕在化する. つまり, 両チャンネルの空間分解能の違いを適切に考慮すれば雨雲の空間分布は必ずしも均一である



第5図 マイクロ波散乱計 SeaWinds による2007年5月20日21時頃の台風第2号の風速分布。



第6図 AMSR-Eの7GHz帯(淡色)と10GHz帯(濃色)のFOV。

必要はない。分解能の違いを考慮する方法は複数考えられるが、本研究では輝度温度の解像度を一致させることで分解能の違いを解消する手法を採用した。

具体的には、標準輝度温度から Backus and Gilbert (1970) の原理に基づいて全てのチャンネルの解像度を7GHz帯相当に一致させた輝度温度(以下、リサンプリング済み輝度温度という)を作成し、リサンプリ

ング済み輝度温度から風速を算出した。

その結果が第4図dである。第4図bでAの部分にあった螺旋形状が消え、第5図に似た風速分布になっており、リサンプリングによる顕著な効果があったことがわかる。ただし、これは一つの例を示したに過ぎず評価として不十分である。そこで、第7章で実際のドロップゾンデによる風速の観測データを用いて本改良の効果を再確認する。

以降の議論では、リサンプリング済み輝度温度を用いて算出した風速を「全天候型海上風速」とし、リサンプリングしていない標準輝度温度から算出した風速は「S06による海上風速」として区別する。

なお、今回利用した輝度温度リサンプリングは、空間分解能の劣る方にしか解像度を合わせられないため、全天候型海上風速の空間分解能は7GHz帯輝度温度と同じ約50km(正確には $43.2 \times 75.4$ km)となる。このため、後述する通り台風の眼の中心における弱風域等、局地性の強い現象は解析が困難である。

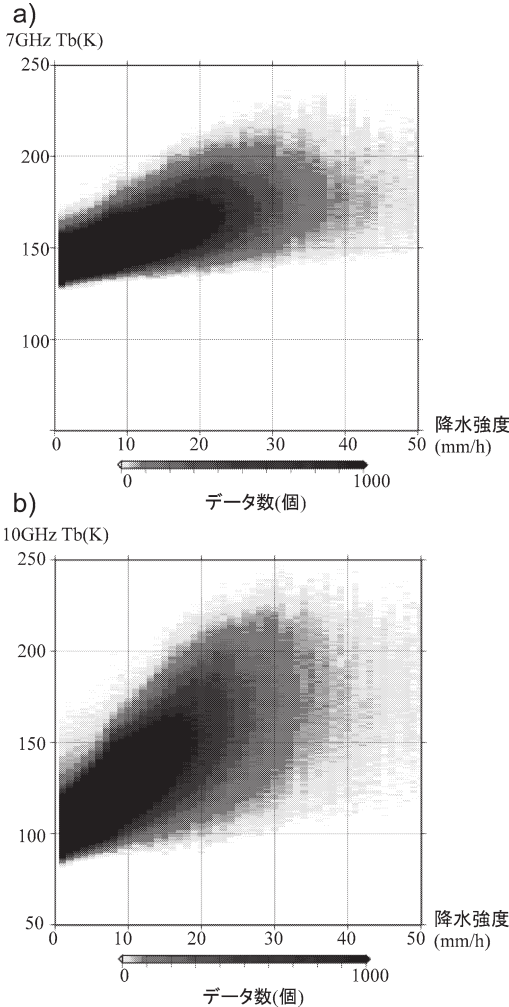
## 6. 強雨下での全天候型海上風速の特性

第3図bで示したように、降水によるマイクロ波帯の輝度温度への影響は周波数が高いチャンネルほど大きい。全天候型海上風速で利用される7GHz帯と10GHz帯では、影響は相対的に小さいが全くないわけではない。特に10.65GHz帯の輝度温度は、降水量推定にも利用されている(Aonashi and Liu 2000)ことから強雨時には仮定②が成り立っていないことが想定される。そこで、強雨時における仮定②の成立状況について調査を行った。

第7図は、2006年8月1か月間の7GHz帯(a)と10GHz帯(b)の輝度温度と標準降水強度の頻度分布を示したものである。両図からだけでは強い降水による輝度温度の飽和傾向を明確に見出すことは難しい。ただし、第7図bでは30mm/h以上の強雨領域で輝度温度が飽和傾向にあるようにも見えることから、強雨時の輝度温度の飽和は7GHz帯よりも10GHz帯で生じていると考えられる。

主に10GHz帯で飽和した輝度温度から風速を算出した場合、以下に示すS06の特性から風速を過大に算出すると予想される。

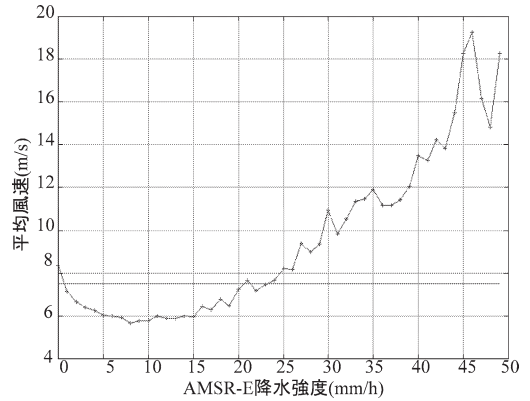
輝度温度の飽和や頭打ちは、10GHz帯で大きく、7GHz帯では小さい。このため、10GHz帯では輝度温度が飽和している分降雨量を小さく見積もる。一方で、7GHz帯では降雨による輝度温度の飽和が小さ



第7図 2006年8月の標準降水強度と輝度温度の度数分布. a)降水強度と7GHz帯輝度温度. b)降水強度と10GHz帯輝度温度.

いため、その分を風速の効果と誤判断する。その結果、算出された風速値が過大となる。もし、全天候型海上風速と降水強度を直接比較して降水強度の増加と風速の増加が一対一に対応していれば、仮定②が成立していないことが疑われる。

第8図は、降水強度階級1mm/h毎に平均した全天候型海上風速の値である。データ期間は第7図と同じ2006年8月で、7.7m/sに引いてある横線は図の作成に利用した全データの平均風速を示している。この図から、降水強度の強まりに従って風速も同時に大き



第8図 2006年8月のAMSR-E標準降水強度階級における全天候型海上風速の平均値.

くになっており強雨時には仮定②が成立していないことが示唆される。しかし、台風などの熱帯低気圧では強雨と強風が同時に発生しているため、多少は降水強度の増加に伴って平均風速が大きくなる関係があっても必ずしも不自然ではない。また、平均風速が降水強度階級の増加とともに徐々に大きくなっていることから、仮定②が成り立つ降水強度の上限を明確に決めるのは難しい。

そこで本研究では、明らかに仮定②が成り立っていないと考えられる複数の事例で強雨域と算出風速の対応状況を調査した結果から、経験的に30mm/hを仮定②が成り立つ上限降水強度とした。すなわち、「降水強度30mm/h以上の地点では、仮定②が成り立っていない可能性が高い」として算出した風速を利用しない。

このことにより、強雨域の多い熱帯じょう乱の中心付近では利用可能となる風速データは減少する。この減少割合の平均は第2表の通りである。中心から200km以内で平均約9%のデータが「降水の影響あり」と判定される。この数値はQuikSCAT衛星搭載のマイクロ波散乱計SeaWindsの「降水フラグ」の割合25.39%よりも小さい。従って、仮定②を満たしていない地点を除外することの影響は限定的といえる。

### 7. 全天候型海上風速の精度評価

全天候型海上風速の精度の検証等を米国国立ハリケーンセンター（以下、NHCという）の観測したドロップゾンデデータ（以下、ゾンデという）およびベストトラックデータを用いて行った。なお、以降の議

第2表 熱帯じょう乱における標準降水強度30mm/h以上の割合とSeaWindsの降水フラグの割合(%)

中心からの距離(km)	標準降水強度30mm/h以上	SeaWinds降水フラグ
100	16.83%	43.57%
200	8.85%	25.39%
500	2.80%	15.04%

論では特に断ることがない限り、以下の(ア)から(エ)の条件を前提とする。

- (ア) 検証等に利用される「ベストトラック最大風速(中心位置)」はベストトラックの最大風速(中心位置)を対応するAMSR-Eの観測時刻に時間内挿したものとす。
- (イ) NHCベストトラックの最大風速は1分平均値であるため、Simiu and Scanlan (1978)による風速比(0.871)を乗じて10分平均に換算して利用した。
- (ウ) ベストトラックと比較・検証を行う全天候型海上風速の最大風速(以降、AWSSW最大風速という)は、「ベストトラック中心位置から200km以内の風速の最大値」として定義する。ただし、風速算出地点数が、中心から200km以内の最大地点数の6割に相当する1200地点以下であった場合にはデータ数不足として最大風速は定義しない。
- (エ) 平均誤差(バイアス)は、「全天候型海上風速からベストトラック風速あるいはゾンデ風速を引いた差」として定義する。このため、バイアスの正(負)の値は全天候型海上風速が過大(過小)であることを示す。

#### 7.1 NHCベストトラックデータによるパラメータ作成と精度検証

NHCベストトラック最大風速とAWSSW最大風速を用いて全天候型海上風速の風速算出のためのパラメータチューニング及び精度検証を行った。その際、精度を高めるためにNOAAのCoastal Service Centerのハリケーンレポート(<http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/reports.jsp>)から、AMSR-E観測時刻前後のベストトラックにゾンデ又は航空機による強度の直接観測が反映されていると判断できるものを手作業により抽出した。その結果、2002年から2006年

までの期間で49事例が該当することが分かった。このうち、2002～2004年の16事例を風速算出パラメータ作成に利用し、2005～2006年の33事例を精度検証に利用することとした。

第9図aとbはそれぞれ、2002～2004年および2005～2006年のNHCベストトラック最大風速とAWSSW最大風速の散布図である。また、両者の統計値(平均誤差, RMS, 相関係数)は第3表の通りである。

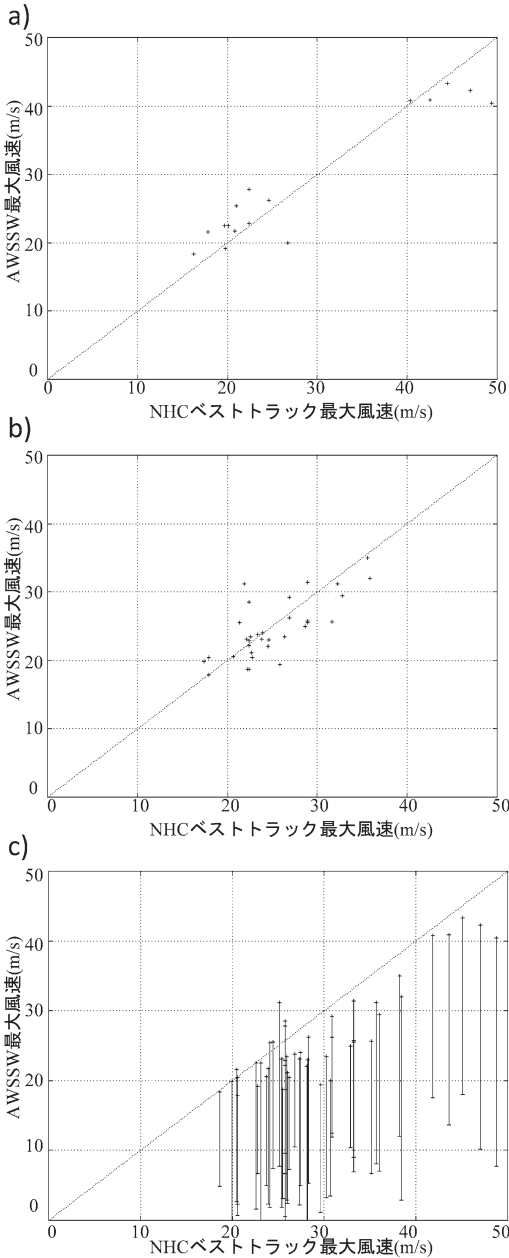
従属資料による検証である2002～2004年の結果がよいのは当然のことであるが、2005～2006年の独立資料による検証でも従属資料によるものと遜色のない精度をもっていることが分かった。ただし、2005～2006年には40m/sを超えるような強いハリケーンの事例がなかったため、その領域での風速を独立資料で検証することができなかった。

AWSSW最大風速をNHCベストトラック最大風速によって検証した結果、全天候型海上風速は高い精度で算出できていることがわかった。しかし、ここで検証できたのは、ハリケーンというシステム全体としての最大風速に対する精度であって、個々の地点データの精度ではない。そこで、ゾンデによる観測データを用いて、個々の風速値の精度検証を行った。

事前評価として、まず前項のチューニング・検証に利用した49件全てのAWSSW最大風速の算出に利用した中心から200km以内の風速のばらつき傾向を明らかにする。その理由は、もし中心からの距離200km以内の領域での風速のばらつきが小さければ、ゾンデ風速と全天候型海上風速の値が一致することは当然のこととなり、検証には利用すべきではないからである。しかし逆に、差が大きければゾンデデータを使って個々の地点の風速を検証することで、「AWSSW最大風速はハリケーンシステム全体で見た時に偶然一致していた」のか、「最大風速をとる地点の風速を正しく推定できた結果、最大風速を精度よく算出できた」のかを見極めることが可能である。

第9図cに示すとおり、ほとんど全ての事例で最大と最小風速の差が10m/s以上あることがわかった。これらの49事例における最大最小風速の差の平均は23.5m/sであった。この値は全天候型海上風速の精度より明らかに大きい。この結果から、従属資料期間のゾンデデータについても「地点ごとの風速値の品質評価」といった観点からは利用が可能と考えられる。そのため、観測データ数確保のためにも、2002年から





第9図 NHC ベストトラック 最大風速と AMSR-E 最大風速の散布図。 a)2002～2004年 (従属資料)。 b)2005～2006年 (独立資料)。 c)2002～2006年。ただし、ハリケーン中心から200km 以内の領域での風速範囲をエラーバー表示。

第3表 全天候型海上風速のベストトラックおよびゾンデによる検証結果。

	ベストトラック		ドロップゾンデ	
	NHC		気象庁	
期間	2002-2004	2005-2006	2002-2006	2002-2006
データ数	16	33	379	1628
平均誤差 (m/s)	-0.015	0.575	-2.506	-0.319
RMS (m/s)	3.859	3.293	6.438	3.226

7.2 ゾンデデータによる検証

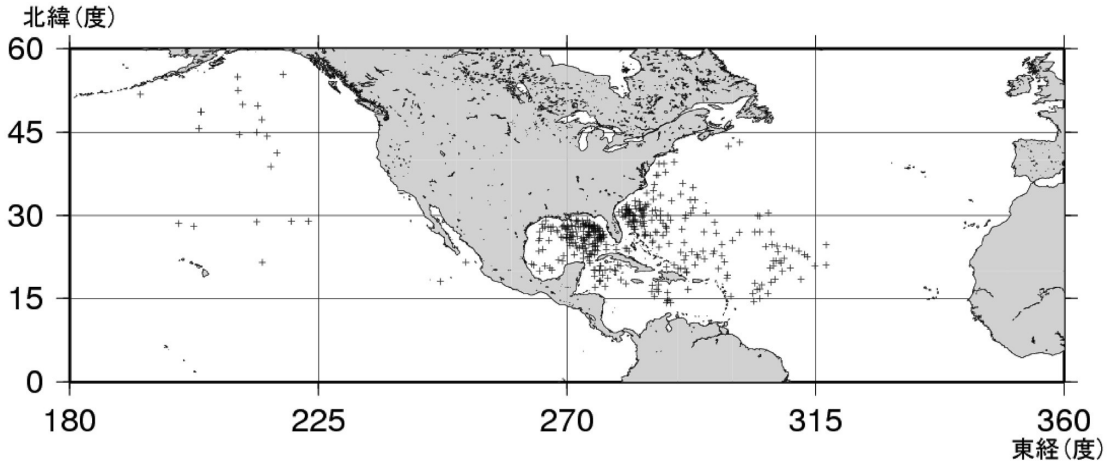
2002年6月から2006年12月まで期間で、NHC 観測のゾンデデータと AMSR-E 全天候型海上風速を、両者の観測時間差±1.5時間以内かつ距離10km 以内の条件で、両者のマッチアップデータを作成し風速の検証を行った。この条件で利用可能なゾンデデータの数は414個、データの分布状況は第10図の通りである。第10図からは、このデータセットが主に北西大西洋とメキシコ湾およびカリブ海におけるハリケーンの観測データで構成されているが、それ以外の地域の観測データも含まれていることがわかる。

第11図 a はゾンデ海上風速と全天候型海上風速の散布図である。この図では、ゾンデが弱風を観測している時に全天候型海上風速が過大に算出している事例が多数見られる。この原因は第3章にて既に述べた全天候型海上風速の空間分解能に起因するハリケーン中心付近での弱風を表現できていないためであると推定される。

この仮説を明らかにするため、第12図にハリケーンを中心からの距離と全天候型海上風速からゾンデ風速を引いた風速差をプロットした。この図から、ハリケーン中心からの距離が小さいところで全天候型海上風速が正のバイアス傾向をもつことがわかる。中心から50km 以内のバイアスの平均値は5.3m/sであった。正バイアス、すなわち全天候型海上風速が過大であることは、全天候型海上風速の空間分解能が弱風域のスケールより大きいため、眼での弱風を解像しきれないことが原因であるという仮説を立証するものとなっている。

NHC のゾンデデータは、WMO (1995) に基づく TEMP DROP 報のフォーマットで報じられている。このフォーマットでは観測地点の状態を報じることが

2004年のゾンデデータも含めて検証を行う。



第10図 検証に利用したドロップゾンデの地域分布。

でき、本データセット内には、EYE, EYEWALL, RAINBAND の観測である旨が報じられているデータが存在している。この条件を用いて、検証に不向きと考えられる以下の条件に該当するゾンデデータの利用をしないことにした。

- (a)EYE, EYEWALL における観測と報じているゾンデデータ
- (b)ベストトラックによるハリケーンの中心位置からの距離が50km 以内のゾンデデータ

この条件による検証結果を第11図bおよび第3表に示す。第11図aと比較して分布のばらつきが明らかに小さくなっている。25m/sを超えるとデータ数が極端に減少しているものの、35m/s付近まではゾンデによる観測データがあり、比較的よい対応をしていることが確認できた。この結果から、全天候型海上風速は熱帯じょう乱の最大風速を推定するためだけでなく、個々の地点の風速値としても信頼性があり、風速場の分布情報への利用が期待できることがわかった。ただし、空間分解能が50km程度と粗いため台風の中心から50km以内の地点のデータは使わない等といった利用上の工夫が必要である。

次に、本ゾンデデータとS06による海上風速を比較することでリサンプリングの有効性を調べる。

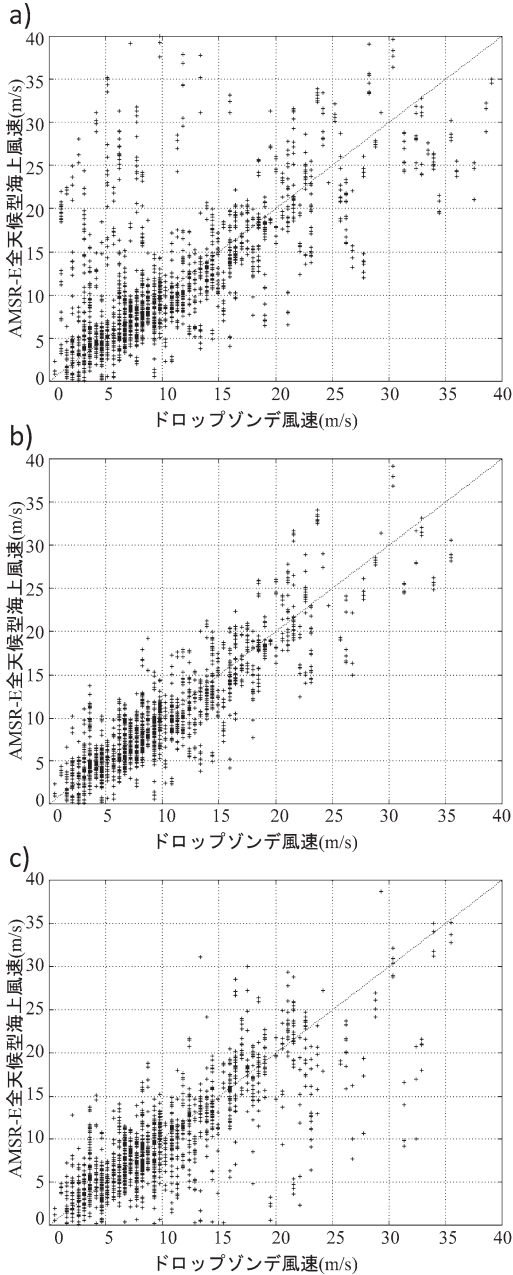
第11図cは、第11図bと同条件でのS06による海上風速とドロップゾンデ風速の散布図である。第11図bと比較して極端に風速を弱く算出しているケースが数多く見受けられる。このことから、リサンプリング処理が風速算出の精度向上に有効であることが分かる。

## 8. まとめと台風情報への利用可能性

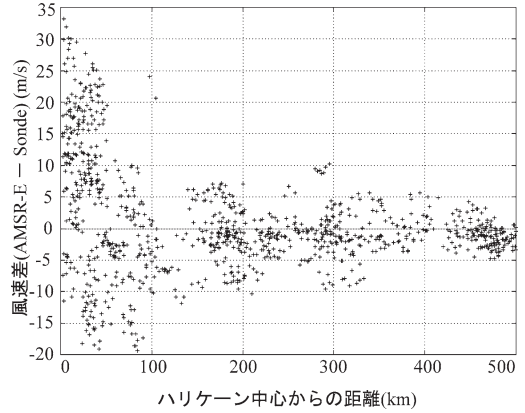
全天候型海上風速は、NHC ベストトラック最大風速による校正・検証によって、誤差3.5m/s程度の精度を有していることが明らかになった。また、空間分解能の制約から熱帯擾乱の中心付近の弱風は表現できない問題点はあるが、全天候型海上風速はドロップゾンデの風速との比較により地点データの風速が35m/s付近までは3.5m/s程度の精度を有していることが確認された。このため、現在気象庁が観測、発表している台風情報（最大風速、暴・強風域）への利用が期待できる。

そこで、北西太平洋の台風に対してAWSSW最大風速を算出しその特徴を調査した。期間は2002～2006年で、最大風速算出の条件はNHC ベストトラックによる検証時の条件(ア)から(エ)と同じである。ただし、気象庁ベストトラックの最大風速は10分平均風速であるので、風速換算は行っていない。

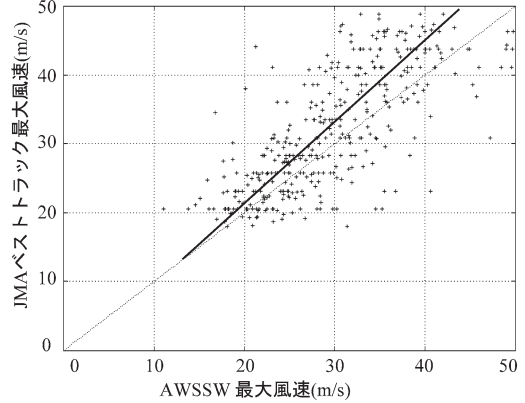
第13図および第3表の右から2列目がその結果である。なお、図中の直線は後述する(1)式を表している。NHC ベストトラック最大風速による検証の結果は、3.5m/s程度の誤差であったが、対気象庁ベストトラックではほぼこの倍の値となっている。また、最大風速が40m/s程度の台風では、AWSSW最大風速がベストトラック最大風速に対して弱めに風速を算出する傾向があることもわかる。前章で述べたとおり、本アルゴリズムは米国のデータを用いてチューニングが行われている。一方、気象庁ベストトラックは、日本独自の改良（木場ほか1990など）を施したDvorak



第11図 ゾンデ風速と全天候型海上風速の散布図. a)全データ利用. b)中心から50 km 以内のデータ及び眼, 眼の壁のデータを除外. c) b)と同条件. ただし, S06による海上風速.



第12図 ハリケーン中心からの距離と風速バイアス (全天候型海上風速-ゾンデ風速).



第13図 気象庁ベストトラック最大風速とAWSSW 最大風速 (2002~2006年).

機による直接観測は一部の例外的事例を除き行われていない. このように, 算出法が大きく異なる両者の最大風速が高い精度で一致することはそもそも期待できない. このため, この程度の誤差やバイアスの存在はやむを得ないものと考えて, 気象庁ベストトラック最大風速に合うような補正式を提案することで, 全天候型海上風速データの実利用への可能性を示すことにしたい.

$$W_{JMA} = 1.181 \times W_{AWSSW} - 2.366 \quad (1)$$

法によって静止気象衛星の赤外画像から解析されたものである. その際, 気象庁ではドロップゾンデや航空

(1)式は, 第13図の両最大風速を Passing-Bablok 法 (Passing and Bablok 1983) によって線形回帰分

析して得られた式である。Passing-Bablok 法は、主に臨床生化学検査の分野において、2つの測定法間の直線関係を解析するために用いられる手法である。今回は以下の2点の理由から、ノンパラメトリックな回帰分析であるこの手法を利用することにした。

- i. 誤差を持つ AWSSW 最大風速と気象庁ベストトラック最大風速間の回帰分析であること。
- ii. 誤差の風速依存性が想像できるものの具体的な値が分からないこと。

(1)式による補正は、右辺第1項の AWSSW 最大風速を、左辺の気象庁ベストトラック最大風速に合わせこむことが目的であり、気象学的に本質的な意味があるわけではない。このため、本式の精度や有効性を検証することは行わず、実利用手法の例としての提案だけにとどめておく。

7.2節のゾンデデータによる検証により、風速の地点値に精度があることを確認できたということは、全天候型海上風速を使って強風場の情報を抽出することが可能であるということの意味している。

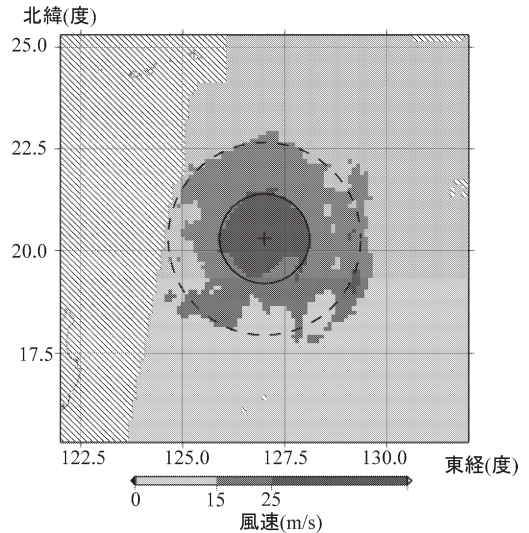
第14図はその例で、2006年9月13日17時頃の台風13号の全天候型海上風速と同日18時の気象庁ベストトラックによる暴風域（実線円）と強風域（破線円）である。全天候型海上風速の方も暴風・強風域に対応するように、15m/s未満、15m/s以上25m/s未満、25m/s以上、の階級で強風ほど濃い色になるよう濃度分けしてある。この図から、両者が極めてよい対応をしているものの、全天候型海上風速では台風の東側やや広く、西側ではやや狭く推定している。

このように、全天候型海上風速は台風の最大風速推定のみならず、強風の面的な把握にも有効であり、現実的な利用が期待できる。例えば、本プロダクトに台風の中心位置を与えることで、自動的に最大風速の算出や暴風・強風域の抽出が可能になる。台風の中心位置は台風情報による中心位置と移動速度から精度よく時間外挿できるので、処理の完全自動化も可能であろう。

また、今回は特に例を示さないが、発達した温帯低気圧や強い冬型による強風事例についても本プロダクトは利用が可能であると考えられる。

なお、本プロダクトは JAXA/EORC にて作成・公開しており、以下のアドレスからアクセスすることができる。

[http://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/amsw/ocean\\_wind/ocean\\_wind.cgi?&LANG=1](http://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/amsw/ocean_wind/ocean_wind.cgi?&LANG=1)



第14図 2006年9月13日17時頃の全天候型海上風速による台風第13号の風速分布と、同日18時の気象庁ベストトラックによる暴風域（実線円）と強風域（破線円）。

## 謝辞

最後に本研究を行うにあたり、NOAA/NHC よりハリケーンのベストトラックおよびドロップゾンデデータを、Remote Sensing System 社より QuikSCAT 衛星の SeaWinds による海上風速データを、気象庁より台風ベストトラックデータを、宇宙航空研究開発機構地球観測研究センターの今岡啓治氏より第3図aの提供を、気象庁予報部予報課の西村修司氏には有益なコメントをいただきました。また、三菱スペース・ソフトウェア株式会社の谷口悠司氏よりサンプリング輝度温度の作成プログラムの提供を受けました。この場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- Aonashi, K. and G. Liu, 2000: Passive microwave precipitation retrievals using TMI during the Baiu period of 1998. Part I: Algorithm description and validation. *J. Appl. Meteor.*, 39, 2024-2037.
- Backus, G. and F. Gilbert, 1970: Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A266, 123-192.
- Dvorak, V. F., 1984: Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Rep. NESDIS 11, 47pp.

- 藤田由起夫, 萩原武士, 2000 : 気象衛星による台風観測. 気象研究ノート, (197), 1-75.
- Kawanishi, T., T. Sezai, Y. Ito, K. Imaoka, T. Takeshima, Y. Ishido, A. Shibata, M. Miura, H. Inahata and R. W. Spencer, 2003 : The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 41, 184-194.
- 木場博之, 萩原武士, 小佐野慎悟, 明石秀平, 1990 : 台風のCI数と中心気圧および最大風速との関係. 研究時報, 42, 59-67.
- Passing, H. and W. Bablok, 1983 : A new biometrical procedure for testing the equality of measurements from two different analytical methods. Application of linear regression procedures for method comparison studies in clinical chemistry, Part I. J. Clin. Chem. Clin. Biochem., 21, 709-720.
- 柴田 彰, 1996 : 海面のマイクロ波放射計リモートセンシング. 気象研究ノート, (187), 53-63.
- Shibata, A., 2006 : A wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer : Wind speed inside hurricanes. J. Oceanogr., 62, 351-359.
- 柴田 彰, 2009 : 海面水温・海上風速算出アルゴリズムの開発. 日本リモートセンシング学会誌, 29, 167-173.
- Simiu, E. and R. H. Scanlan, 1978 : Wind effects on structures. Wiley-Interscience, New York, 458pp.
- 竹内義明, 1999 : マイクロ波放射計. 数値予報課報告・別冊, (45), 気象庁予報部, 75-96.
- Wentz, F. J., 1992 : Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30, 960-972.
- WMO, 1995 : Manual on Codes, International Codes, Volume I.1, Part A-Alphanumeric Codes. WMO Publication, (306), 523pp.
- 山岬正紀, 1982 : 台風—最もはげしい大気じょう乱. 気象学のプロムナード, 10, 東京堂出版, 206pp.

---

## AMSR-E All Weather Sea Surface Wind Speed

Sadao SAITOH\* and Akira SHIBATA\*\*

\* *Japan Aerospace Exploration Agency (Present affiliation : Japan Meteorological Agency, 1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan).*

\*\* *Meteorological Research Institute (Present affiliation : Japan Aerospace Exploration Agency).*

(Received 3 March 2009 ; Accepted 14 October 2009)

### Abstract

All weather sea surface wind (AWSSW) is estimated from AMSR-E 6.925 and 10.65 GHz horizontal brightness temperature on the earth observation satellite Aqua. AWSSW can estimate wind speed even in rainy condition. From this research, it is revealed that AWSSW can estimate wind storm around typhoon and that its operational use can be expected.

---