

## TRMM 降雨レーダから求めた海面のレーダ散乱断面積

[Long term trend of ocean surface normalized radar cross section observed  
by TRMM precipitation radar]

小向井淳、岡本謙一 (大阪府立大)

Jun Komukai and Ken'ichi Okamoto (Osaka Prefecture Univ.)

### 1. はじめに

熱帯降雨観測衛星 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)は1997年の打ち上げ以来、現在に至るまで、熱帯・亜熱帯地方を中心とした降雨を順調に観測してきた。TRMMは世界初の衛星搭載降雨レーダ(PR:Precipitation Radar)を搭載しており、降雨の3次元分布を宇宙から観測することを可能にした。TRMMはこれまで、観測が困難であった台風やハリケーンの内部構造を明らかにし、また、エルニーニョ現象が起きる時期の降雨の全世界的な分布が通常の分布とは大きく異なることを示すことに成功した[1]。

本研究では、まず海面における無降雨時の規格化散乱断面積(NRCS:Normalized Radar Cross Section)の入射角特性について調べた。海面のNRCSはPRのレーダ入射角と海面状態によってその特性は大きく変わり、海面の状態を変化させるのは主に海上風速である。そこで、次にNRCSと海上風速の関係について調べた。具体的には、NRCSと海上風速との関係を入射角ごとに求め、両者の間に成り立つ関係式を定量的に導出した。

この無降雨時の海面のNRCSデータを基準にして、降雨による経路積算減衰量(PIA:Path Integrated Attenuation)を算出する。求めたPIAの値を降雨強度算出アルゴリズムの中に応用して、降雨強度を算出する。本研究で求められたNRCSの入射角特性と海上風速依存性に基づいて算出された降雨強度が、現在のアルゴリズムの降雨強度算出結果と比べてどのように海面上の降雨強度算出に効果があるか、海上ブイ雨量計データなどと比較して検証することを最終目的とする。

### 2. TRMM 標準アルゴリズムにおける NRCS の入射角依存性 [2][3]

衛星から送信された電磁波が海面のような2次元的な対象物によって反射され、どの程度波源方向(衛星のある方向)に戻るかという指標にNRCSを用いる。ここで、NRCSの値は対象物に対する入射角に依存し、入射角が零に近ければより強く波源方向に反射し大きくなり、入射角が大きくなるにつれてその量は小さくなっていく。図1に示すように、TRMMによる観測においては衛星の進行方向(along-track 方向)に対して垂直な across-track 方向は、アンテナビームを走査して入射角を変えながら観測している。

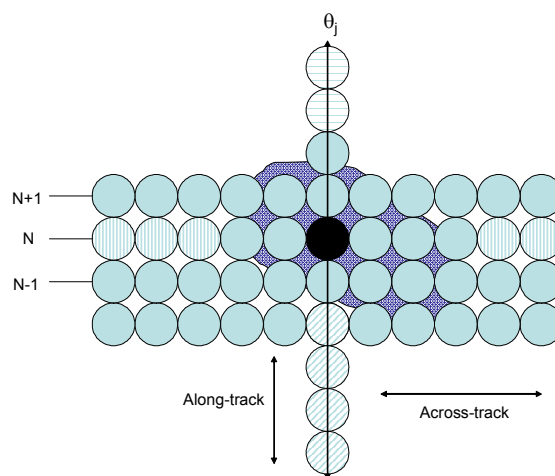


図1:TRMM衛星による観測

TRMM衛星は左右それぞれ入射角 $18^\circ$ の範囲を観測している。入射角 $0^\circ \sim 20^\circ$ の領域は準鏡面散乱領域と呼ばれ、準鏡面散乱に基づいた近似式は理論的に以下のように与えられている。

$$NRCS = \frac{R^2}{s^2} \frac{1}{\cos^4 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{s^2}\right) \quad (1)$$

ここで、Rは入射角 $0^\circ$ におけるフレネルの反射係数、 $s^2$ は表面勾配の分散の値である。

(1)式のdB値を $\theta$ の小さい範囲でマクローリン展開し、近似すると二次式になり、

$$NRCS[dB] = a\theta^2 + c \quad (2)$$

であるが、現行のTRMM標準アルゴリズムにおいては、衛星の姿勢や、風向や風速の変化の非一様性を考慮した関数型

$$NRCS[dB] = a\theta^2 + b\theta + c \quad (3)$$

を採用している。

しかし、この近似式では入射角ごとの観測値の平均値との間にバイアスが生じてしまう。また、観測値の標準偏差に関しても、入射角 $0^\circ$ 、 $18^\circ$ 付近では大きな値をとっており、この2点については改良の余地がある。

図2は2005年1月における全世界の緯度経度 $1^\circ \times 1^\circ$ グリッドの平均値について現行のTRMM標準アルゴリズムによる近似であり、プロットは平均値、エラーバーは標準偏差を示している。

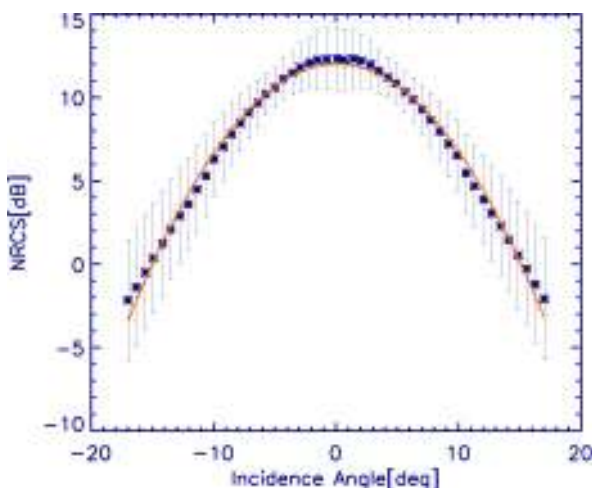


図2;TRMM標準アルゴリズムによる近似

図2より左右ともに入射角 $10^\circ$ 、 $18^\circ$ 付近においてはバイアスが生じていることが分かる。また、標準偏差は入射角 $5^\circ$ 付近で $1.2 \sim 1.3$ dB程度で最小となっており、最も安定しているという結果を得た。また、PRの入射角の最大の角

度である $18^\circ$ で最大となっており、海上風速が最も大きな要因と考えられる海面状態の変化に最も敏感な角度であることが分かる。

### 3. NRCSの入射角依存性の関数近似

上述したように現行のTRMM標準アルゴリズムでは左右を区別して(3)式で近似しているが、係数bは係数a,cに比べて無視できるくらい小さいので、NRCSの入射角特性の関数近似について調べるために左右の入射角の違いを考慮しないNRCSデータについて図3に示すと同時に(2)式、(3)式で近似した。破線は(2)式で近似したもの、実線は(3)式で近似したものを示している。左右の入射角の違いを考慮しない場合の(2)式による近似の結果は係数bが非常に小さいため、現行のTRMM標準アルゴリズムの算出結果に近いものと考えられる。

バイアスを減少させる手段として左右の入射角の違いを考慮しないで(3)式で近似したわけであるが、結果は(2)式で近似した結果よりも良く近似されており、平均値と近似曲線上の値との間の誤差を(2)式で近似した場合の80%までに抑えられることが分かった。

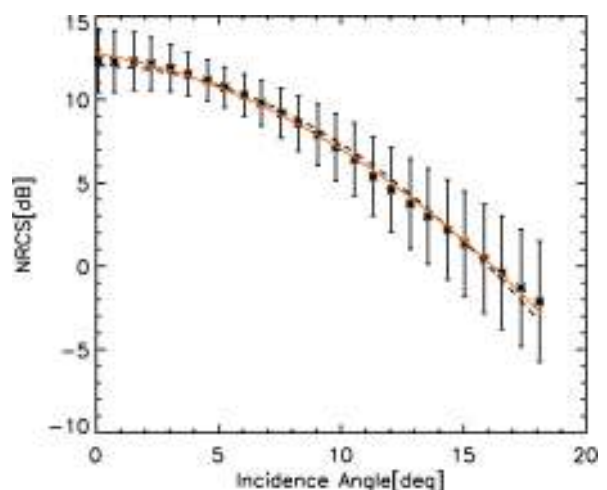


図3;NRCSの入射角特性[1]

もう一つのバイアスを減少させる手段として2本の近似曲線で近似することを考えた。図4は入射角 $12^\circ$ で2本の近似曲線に分けたときの出力結果である。

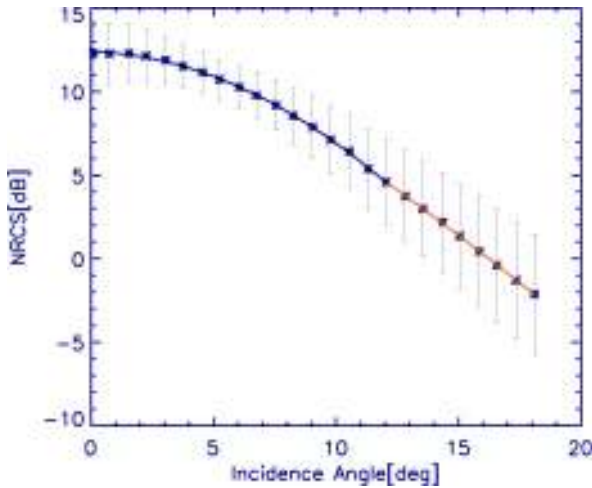


図 4:NRCS の入射角特性[2]

結果、平均値と近似曲線上の値との間の誤差は現行の TRMM 標準アルゴリズムの 20%にまで抑えられることが分かった。

#### 4. NRCS の平均値と標準偏差の長期トレンド

図 5 に 1998 年から 2005 年にわたる 8 年間の月ごとの NRCS データについて示す。

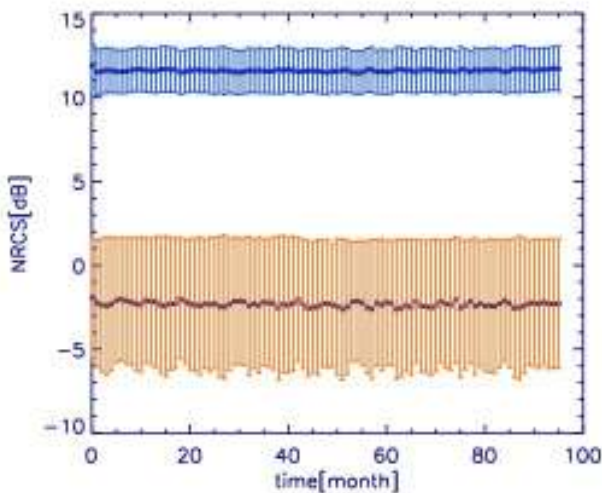


図 5:NRCS の標準偏差の経年変化  
(上;入射角 4.5°、下;18°)

○印が平均値、エラーバーが標準偏差を表しており、上が標準偏差の最も小さい入射角が 4.5° のときで、下が標準偏差の最も大きい 18° のときを示している。

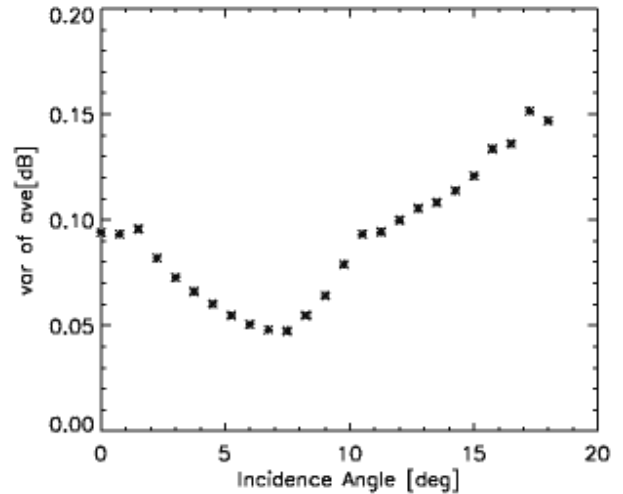


図 6:8 年間の平均値の標準偏差

8 年間の各入射角の月ごとの平均値の標準偏差に関しては図 6 で示されているように非常に小さな値で、まとまったデータが得られていることが分かる。よって月ごとの平均値を近似することに関しては、どの月に関しても 2 本の近似曲線を用いる方法が良いと思われる。

しかし、実際に得られる瞬時的な NRCS データのバラつきは図 5 で示されているように、18° 付近で大きく、このバラつきの主な原因である海上風速についても考慮する必要があると考えられる。

#### 5. NRCS の海上風速依存性

海上風速については TMI から得られたデータを用いる。ここで用いる海上風速はマイクロ波放射計(TMI:TRMM Microwave Imager)データから Wentz によって算出されたものである[4]。

NRCS と海上風速の両者についてそれぞれ無降雨時、1° × 1° グリッド、1 ヶ月間の平均値を世界中で算出し、それぞれのグリッドでの両者の値を比較した。

図 7 の(1)に 2005 年 1 月の海上風速の分布を示し、(2)、(3)、(4)に 2005 年 1 月の入射角が 0°、18°、7.5° のときの NRCS の分布を示す。

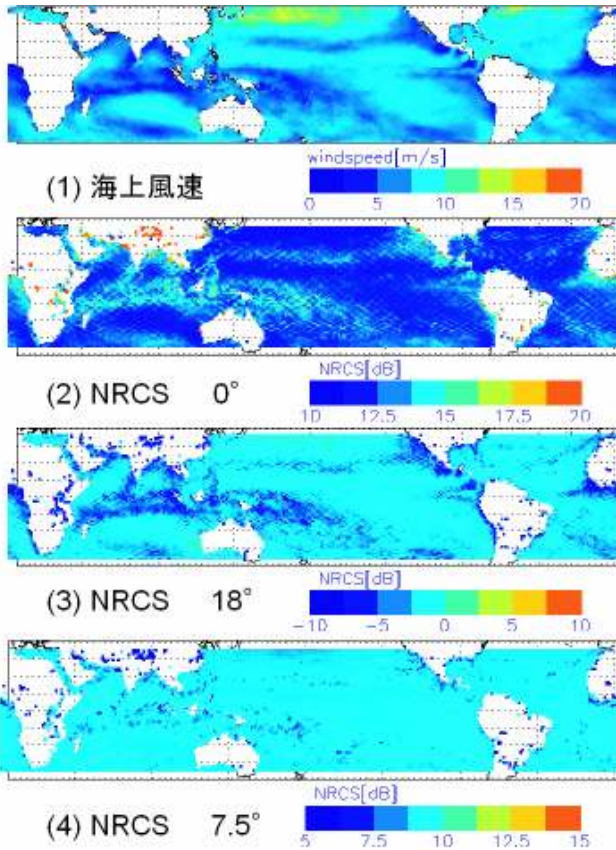


図7;海上風速(1)とNRCS(2)(3)(4)の分布  
[(2)入射角 $0^\circ$  (3)入射角 $18^\circ$  (4)入射角 $7.5^\circ$ ]

図7の分布図から、入射角 $0^\circ$ では分布の傾向は同じであるが色が逆転しているため海上風速とNRCSに負の相関があることが分かる。

同様に、入射角 $18^\circ$ では分布の傾向も色も同じであるため正の相関があることが分かる。

また、入射角 $7.5^\circ$ では海上風速の値に関わらず世界中でほぼ一定の値になっていてNRCSが海上風速に依存しない入射角であるといえる。

それぞれのグリッドにおけるこれらの結果を元に、縦軸にNRCSのdB値を、横軸に海上風速を対数目盛の上にプロットし、直線近似したものを図8に示す。

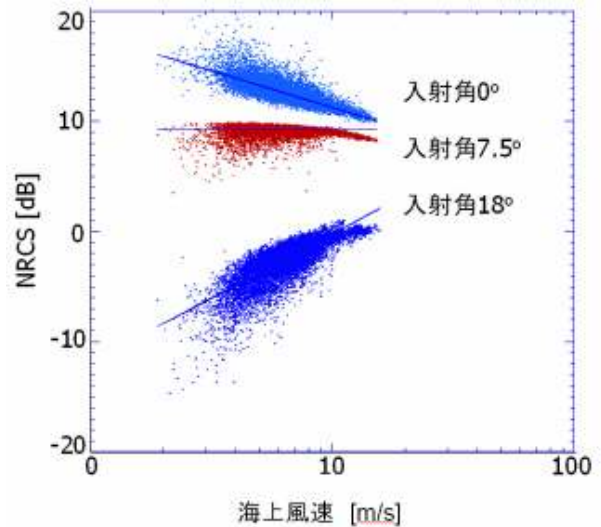


図8;海上風速とNRCSの相関

TRMM衛星の観測している全25入射角についての近似直線をまとめたものを図9に示す。

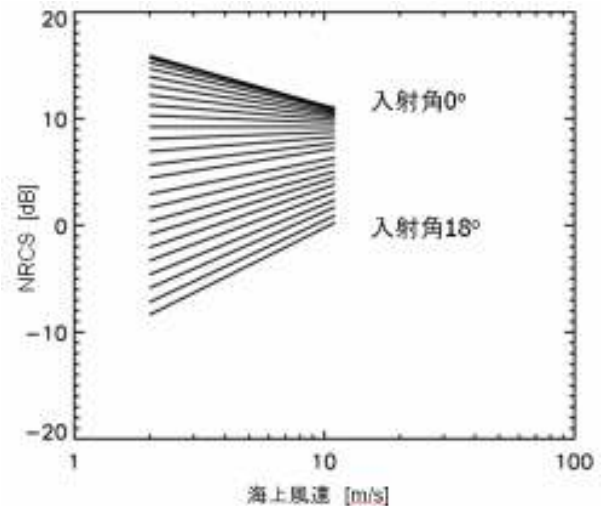


図9;海上風速とNRCSの相関のまとめ

図9より、NRCSと海上風速の関係は入射角 $0^\circ$ のとき負の相関があり、入射角が大きくなるにつれて正の相関へと移行しているのが分かる。また、入射角が $7.5^\circ$ あたりで無相関であることが分かる。

8年間という長期間にわたる膨大なデータより統計的に得られたこれらの近似式を用いることによって、NRCSを単なる入射角のみの一変数関数ではなくて、入射角と海上風速の二変数関数で表すことを現在行っている。

更に、そのようにして算出したNRCSが現行の

TRMM 標準アルゴリズムが算出する NRCS と比べてどの程度の精度なのかを検証する。

最後に、これらの参照データを基に PIA、降雨強度と算出していき、現行の TRMM 標準アルゴリズムの算出結果と比較してどのような効果が及ぼしているかを考察する。

## 6. まとめ

8 年間の PR から得られた海面の NRCS の値を解析することによって入射角  $5^\circ$  前後のときの標準偏差は  $1.2\sim 1.3$  dB 程度であり、NRCS の値が最も安定しているという結果を得た。また、NRCS の標準偏差の値は PR の入射角の最大の角度である  $18^\circ$  において最大になることが分かった。このことは、海上風速が最も大きな原因と考えられる海面状態の変化に最も敏感な角度が PR の入射角の最大の角度であることを意味する。この入射角における NRCS と同じ TRMM 衛星に搭載されているマイクロ波放射計の海上風速のデータを比較すれば、TRMM 降雨レーダの NRCS データから海上風速のリモートセンシングが行えると考えられる。

これらのことを踏まえて、PR が観測した海面の NRCS と TMI が観測した海上風速を比較することで、海面の NRCS の風速依存性を定量的に導出した。PR においては  $18^\circ$  の入射角の範囲の中で  $0^\circ$  及び  $18^\circ$  に近いほど、海面の NRCS の海上風速依存性が大きく、逆に入射角が  $7\sim 8^\circ$  の時に海上風速依存性が小さいといえる。

NRCS と海上風速の関係式を利用すれば、TMI 程の観測幅は無いが TMI よりも水平分解能の良い PR で海上風速が観測できることになる。

ここで、得られた結果はあくまでもセンサ同士のデータの比較であって、地上からの観測データ、いわゆるシートゥルースデータとの比較はなされていない。TMI の海上風速データはシートゥルースデータとの比較が既に行われていて実際に使われている。本研究ではその実用的なデータを使って解析を行ったので、導出された関係式はある程度正確であると思われるが、

相対的な比較であるので必ずしも有効性が高いとは言えない。よって、今後の課題として本研究で導出された関係式がどれほど有効なものをシートゥルースとの絶対的な比較を行うことで確かめなければならない。

最後に、本研究では参照となる無降雨状態の NRCS の入射角と海上風速の関数としての近似式を算出する新たな方法の開発に留まったが、この参照データを現行の TRMM 標準アルゴリズムに導入することによって経路積算減衰量 (PIA)、降雨強度 R を算出し、その結果が現在の TRMM 標準アルゴリズムの出力する結果と比較して、どのような効果があるか検証する必要もあると考えられる。この方法が有効ならば、次世代衛星搭載降雨レーダなどへの応用、また、より高精度な地球観測の発展に役立つと考えられる。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご指導を賜りました大阪府立大学工学部航空宇宙工学科岡本 謙一 教授、重 尚一 助教に深く感謝いたします。そして、数多くの助言とご協力をいただきました大阪府立大学工学部航空宇宙工学科岡本・重研究室の院生の方々、特に博士後期課程 1 年生の木田 智史 先輩に感謝いたします。この場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 岡本謙一、リモートセンシングによる宇宙からの降雨観測、日本地球惑星科学連合ニュースレター、Vol.2、No.3、pp.6-8、2006 年 8 月。
- [2] R. Meneghini, T. Iguchi, T. Kozu, L. Liao, K. Okamoto, J. A. Jones, and J. Kwiatkowski, "Use of Surface Reference Technique for Path Attenuation Estimates from the TRMM Precipitation Radar", J. Applied Meteorology, Vol39, pp. 2053-2070, 2000.
- [3] R. Meneghini, J. A. Jones, T. Iguchi, K.

Okamoto, J. Kwiatkowsky, "A Hybrid Surface Reference Technique and Its Application to the TRMM Precipitation Radar", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.21, pp.1645-1658, 2004.

[4] Remort Sensing Systems

(URL : <http://www.remss.com/>)