

TRMM PR データを用いた実用レーダーデータの バイアスとその時間的推移の推定

THE USE OF TRMM PR DATA TO ESTIMATE BIAS OF OPERATIONAL RADAR DATA AND TEMPORAL FLUCTUATION OF BIAS

杉本聡一郎
Soichiro SUGIMOTO

正会員 工修 (財) 電力中央研究所 流体科学部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

The interest of this study is to estimate bias error of operational ground-based radar (GR) data by comparison with coincident data from Precipitation Radar (PR) onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. The methodology of comparison is presented. Three-dimensional distribution of reflectivity factor on the Cartesian grid system is constructed by transformation and interpolation of volume scanning GR data. The interpolation uses both horizontal and vertical effective radius. The interpolated data yields values of reflectivity factor at PR-based grid points under the assumption that observations by the TRMM PR are vertical pointing. Such a procedure gives a chance for comparison between data from two separate plathomes. Analysis indicates that the GR used in this study tends to observe less reflectivity factor than the TRMM PR. This tendency is not height-dependent. However, the temporal fluctuation of bias is also found from analysis for 13 rain events occurred during about a year. This is an auxiliary result, which demonstrates the stability of the calibration of the GR system for each short period.

Key Words: bias, radar, reflectivity factor, TRMM, precipitation

1. はじめに

気象レーダーで観測される高分解能の降水分布は、実践的应用において利用価値の高い情報である。一方、その利用目的が高度化するほど、レーダーデータから推定される大気中の水分量や地上における降雨量に関する定量性がどの程度であるのかということを明確にすることが求められる。

レーダーが観測する降水に関する量はレーダー反射因子と呼ばれ、単位体積中に存在する降水粒子の粒径の6乗和で定義される。すなわち、レーダーは大気水分量や地上降雨量を直接的に観測していない。そのため、レーダー反射因子を用いた水分量や地上降雨量の推定には、

1) レーダー反射因子の観測精度

2) 推定において仮定する降水粒子の粒径分布における不確実性が存在し、推定量の定量性に関する議論を難しくしている。

もし、1) に起因した系統的な誤差（以下、バイアス）がレーダーごとに存在すれば、そのバイアス量は推定される水分量に直接的に影響する。さらに、水分量のバイアスは、気象力学に根ざした短時間降雨予測手法

（例えば、Sugimoto *et al.* (2001)¹⁾）において、降雨モデルのパラメータ同定や非断熱初期化といった重要な要素に影響する。同様に、メソスケールモデルを用いた降水予測に対するデータ同化にも影響するが、少なくとも同化に用いるレーダー反射因子や水分量のバイアス量がわかれば有意義である。

また、地上降雨量の推定には、地上雨量計による雨量 R と雨量計の真上におけるレーダー反射因子値 Z との間に指数分布 ($Z=B \cdot R^\beta$) を仮定し、過去の降雨事例に対して指数分布のパラメータ B 、および β を同定して推定に用いることが多い。レーダー反射因子のバイアス量は、パラメータ同定に対して非線形的に異なる影響を及ぼす。この影響は、ネットワークレーダーの合成による広域の降雨量推定に対して議論を投げかけるであろう。

本研究の目的は、実用レーダーで観測されるレーダー反射因子に含まれるバイアス量を推定することについての可能性を議論することである。これは上記1)の問題と関連しているが、バイアスを推定するためには、少なくとも基準となるデータが必要である。そこで、本研究は基準データとして熱帯降雨観測衛星の降雨レーダー（以下、TRMM PR）のデータに着目した。TRMM PRの高精度なキャリブレーションとその安定性については

Kawanishi *et al.* (2000)²⁾ で実証されている。

アメリカではこの TRMM PR データを用いた地上設置型レーダーのキャリブレーション精度に関する議論を高精度研究用レーダーや実用レーダー NEXRAD に対して行っている（例えば、Anagnostou *et al.* (2001)³⁾）。本研究も基本的にはこのような研究と同じ流れを踏むものである。ただし、両レーダーによるデータを比較する手法などには違いがある。

本研究の流れは以下の通りである。まず、本研究で用いる TRMM PR、ならびに実用レーダーによって得られるデータについて次章にて述べる。次に、両データを比較する方法について述べる。約1年間において両レーダーによる観測が同期した事例にこの比較手法を適用し、その結果得られる実用レーダーのバイアス量について考察を行う。最後に、5章にて諸結果をまとめる。

2. 用いるレーダーデータ

本研究は、雷レーダーによるレーダー反射因子を実用レーダーデータの一例として用いる。以下、比較の基準として用いる TRMM PR データと合わせ、解析にとって重要な事項について述べる。

(1) TRMM PR

レベル 2A25 の降雨減衰が補正されたレーダー反射因子データを用いる。TRMM PR は用いる電波の波長 (2.17 cm, Ku-band) が降雨による減衰を受けやすいレーダーであるが、高性能な地上設置型レーダーとの比較結果 (Bolen and Chandrasekar (2000)⁴⁾, Schumacher and Houze Jr. (2000)⁵⁾, および Liao *et al.* (2001)⁶⁾ は、Iguchi and Meneghini (1994)⁷⁾ をベースとしたハイブリッド補正アルゴリズムの有効性が非常に高いことを示している。ただし、信号雑音比から 17 dBZ より小さいレーダー反射因子は解析に用いない。

データの空間分解能は、水平方向が約 4 km (高度変更前の地上レベルでの値；ただし、本研究で用いるデータは高度変更後のデータのため、より粗い分解能になっている。)、鉛直 (ビーム) 方向は 250 m である。

PR は nadia を中心として $\pm 17^\circ$ のスキャン幅を持っているが、Bolen and Chandrasekar (2000)⁴⁾ のシミュレーション結果により、PR による観測は鉛直真上から行われたもの (Vertical Pointing) であると仮定する。

(2) 雷レーダー (C-band)

6 分間で行われるレーダー観測の 1 周期のうち、3 分間で行われる仰角 0° 以外の 16 仰角分の PPI データを用いる (図-1)。データのビーム方向の分解能は 1 km である。また、水平ビーム幅は 1.29° であるため、レーダーの中心から 35 km 以内における方位方向の分

解能は 1 km 未満となる。

この雷データは強エコーの探知を重視した運用を行っており、ある閾値以下のエコーはカットされている。本研究ではその閾値に近い 12 dBZ より小さいレーダー反射因子は解析に用いない。

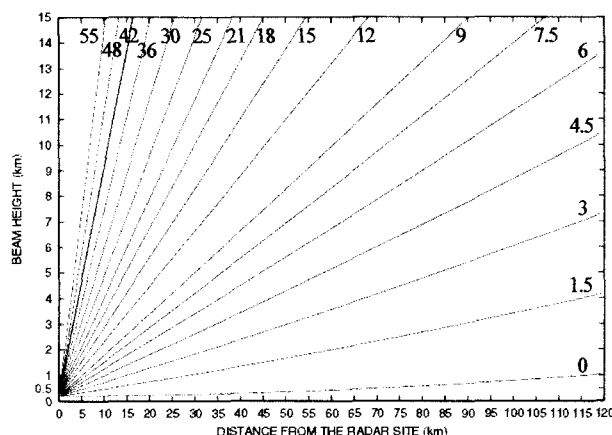


図-1 雷レーダーのビームパターン (図中の数値は仰角を表す。本研究では 0° の仰角を解析に用いない。)

3. 解析手法

雷レーダーと TRMM PR 両データの比較は、雷レーダーを中心として設定したデカルト座標系を基本とする。デカルト座標系の水平格子間隔は 1 km、鉛直格子間隔は 250 m とする。比較する手順は以下の通りである。

まず、雷レーダーの CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) を上記デカルト座標系において作成する。この際、各格子点値の算定には格子点周りに影響楕円体 (水平方向半径 R_H : 3 km、鉛直方向半径 R_Z : 1 km) を設け、その中に入るデータを Cressman フィルター (Cressman (1959)⁸⁾) と共に用いる。この場合、算定対象の格子点から距離 D_i にあるデータの重みは

$$W_i = \frac{R_i^2 - D_i^2}{R_i^2 + D_i^2} \quad (1)$$

となり、式 (1) 中の R_i は式 (2)、および (3)

$$R_i = \frac{R_H R_Z}{(R_H^2 \sin^2 \psi_i + R_Z^2 \cos^2 \psi_i)^{1/2}} \quad (2)$$

$$\psi_i = \tan^{-1} \left[\frac{z_i}{(x_i^2 + y_i^2)^{1/2}} \right] \quad (3)$$

によって表される。ただし、 x_i , y_i , z_i は格子点からの相対的な位置を表す。

影響楕円体の水平方向半径は TRMM PR の水平方向分解能と対応させた。また、鉛直方向半径については、雷レーダーの中心から数 10 km 地点以遠のビーム密度が低いことを考慮している (比較対象領域は下記参照)。

また、重要なこととして、前章で雷レーダーの最小値

に関する閾値を 12 dBZ としているため、内挿で得られた値が 15 dBZ 以下の値を以下の計算で用いないこととした。このように 3 dBZ のオフセットをさらに考慮するのは、12 dBZ 以下のエコーが実際に対象格子点周辺に存在し、内挿値が実際よりも大きくなる場合を省きたいからである。

次に、雷レーダーの CAPPI を用いて、TRMM PR の観測ポイントでの雷レーダーの値を算定する。PR による観測は Vertical Pointing と仮定しているため、ポイントの緯度・経度がわかれば、デカルト座標系のどこにポイントが位置するかがわかる。そこで、ポイントの周りを囲む近い 3 点の CAPPI の値をポイントからの距離の逆数で重み付けした上で内挿に用いる。その結果得られる内挿値を比較に用いる。

TRMM PR に対しては、鉛直上下 1 km の範囲に入るデータを用いて平均化する。これは雷レーダーに対する影響楕円体の大きさと対応させるためである。また、平均値が 20 dBZ 以下の値は比較に用いない。この理由は雷レーダーに対する理由と同様である。

このようにして得られた、ある TRMM PR の観測ポイントにおける不定でない 2 つのレーダー情報から得られる内挿値や平均値を比較する。その際、雷レーダーを中心とした 70 × 70 km の矩形領域に入る TRMM PR の観測ポイントを対象とする。また、鉛直方向には 2 ～ 4 km 高度 (250 m 間隔) を比較する。

比較の結果、バイアス B 、および t -分布を仮定した有意水準 5 % の信頼度範囲 L

$$B = \frac{1}{n} \sum_n (Z_{GR} - Z_{PR}) \quad (4)$$

$$L = \pm t_a \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

を各事例の各高度、もしくは全高度に対して求め、評価に用いる。ここで、 n は比較に用いるポイント数、 Z_{GR} 、および Z_{PR} はそれぞれ雷レーダー、および TRMM PR によるレーダー反射因子値である。また、 t_a は自由度 n に対する t -分布において有意水準 5 % 以上になる値を表す。式 (5) 中の σ は標準偏差であり、式 (4) のバイアス B を用いて、

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_n [(Z_{GR} - Z_{PR})^2] - B^2 \quad (6)$$

と表される。

4. 事例解析

(1) 解析事例の概要

バイアス量を推定するために解析した降雨事例は、2002 年 6 月 30 日から 2003 年 6 月 18 日までの約 1 年間に生じた 13 事例である。これらの事例に関する情報を表-1 にまとめた。ただし、ある事例のある高度における信頼度範囲 L が 1.5 dBZ より大きい場合、平均バイアス量の推定に好ましくないとして、この高度のデータは除外する。分散の大きさに起因して信頼度範囲が大きくなる原因の一つに両レーダーによる観測時刻差に伴う誤差が考えられるが、後述にて議論を行う。

表-1 解析対象の降雨事例

降雨事例	年月日	TRMM 通過時刻 (UTC, 推定)	TRMM 軌道番号	比較ポイント 総数	平均レーダー反射因子 値 (TRMM PR) [dBZ]
Case 1	2002/6/30	1825, 29 June	26353	1277	25.26
Case 2	2002/7/10	1307, 10 July	26521	1996	35.31
Case 3	2002/8/23	1459, 23 Aug.	27208	1068	25.70
Case 4	2002/10/1	1909, 30 Sep.	27803	1804	27.53
Case 5	2002/11/25	1447, 25 Nov.	28673	1160	27.33
Case 6	2002/12/21	0209, 21 Dec.	29070	1594	24.89
Case 7	2003/1/19	1121, 19 Jan.	29528	1550	24.04
Case 8	2003/3/1	1423, 01 Mar.	30169	2107	31.40
Case 9	2003/3/25	0155, 25 Mar.	30535	367	26.92
Case 10	2003/4/5	2037, 04 Apr.	30703	1019	26.11
Case 11	2003/5/19	2230, 18 May	31390	126	24.59
Case 12	2003/6/4	1455, 04 June	31650	291	24.79
Case 13	2003/6/18	0650, 18 June	31863	853	25.80

表-1 によれば、平均レーダー反射因子値の大きさの違いと季節の違いとの間に有意な関係は見られない。また、Case 2 と Case 4 は台風による降雨である。

(2) バイアスの推定例

表-1 で示した全てのケースにおいて、各比較高度（高度 2 ～ 4 km, 250 m 間隔）に対してバイアス量を推定した。両データの散布図をバイアス量、標準偏差、信頼区間 L とともに示した例が図-2 である。

図-2 によれば、データの対応関係におけるばらつき具合は各ケースで異なるものの、雷レーダーによる

観測値は一貫して、負のバイアス（TRMM PR の観測値より小さい値を観測する傾向）を有していることが明確に把握できる。このバイアス量や、散布図において見られる対応関係のばらつきについて、以下でより詳細に議論する。

(3) バイアス量の時間推移

推定されたバイアス量がケースごとにどのように変動するかを示したのが図-3 である。バイアス量は全ての高度に対するバイアスを平均したものとしている。冬の時期にバイアスが -5 dBZ 弱になっているが、レー

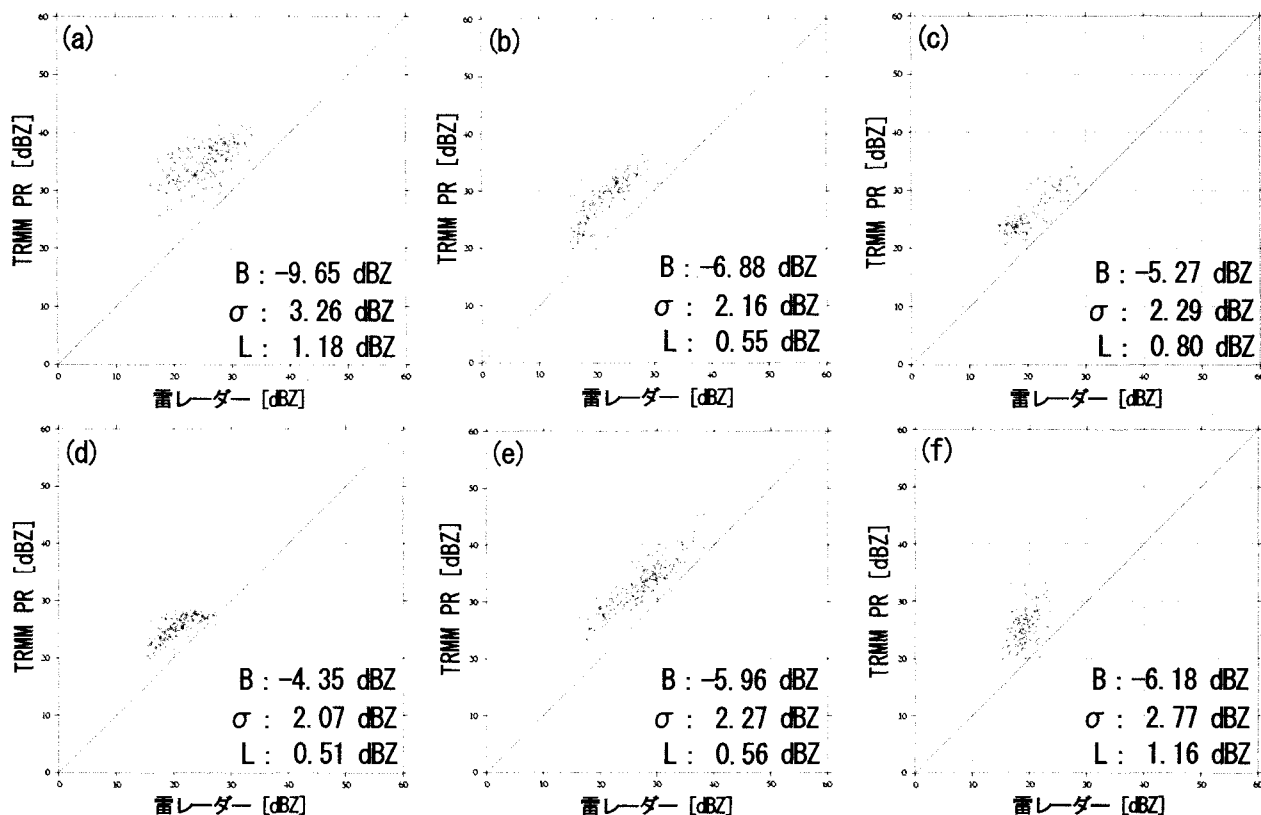


図-2 雷レーダーと TRMM PR による観測値の比較、およびバイアスB、標準偏差σ、信頼度区間 L の推定値

(a) Case 2 ; 高度 3.5 km, (b) Case 4 ; 高度 3.5 km, (c) Case 5 ; 高度 3.5 km,
(d) Case 7 ; 高度 2 km, (e) Case 8 ; 高度 2.75 km, (f) Case 13 ; 高度 2.5 km)

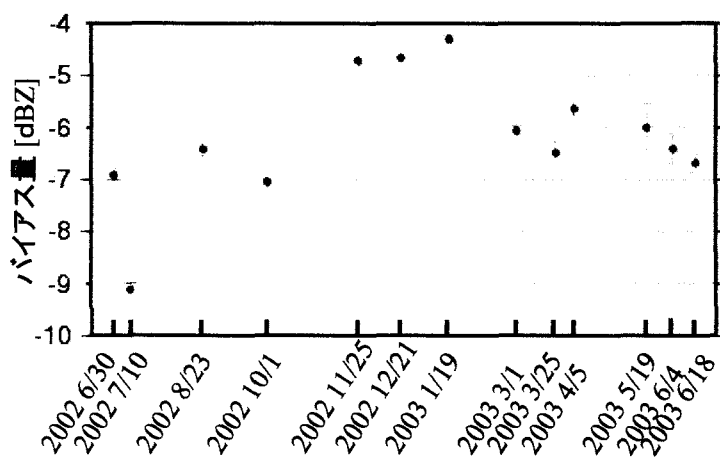


図-3 バイアス量と信頼度区間の時系列

ダー反射因子の平均値によれば、これは季節の違いを反映したものではない。

確かにケースごとにバイアス量は変動しているが、ある数ヶ月の期間ではそのバイアス量の変動は小さく、比較的安定している。例えば、バイアス量の大きさをグループ分けするとすれば、2002 年 6 月～10 月、2002 年 11 月～2003 年 1 月、2003 年 3 月～6 月といった 3 つに分けられる。各グループにおけるバイアス変動の小ささはシステムの安定性を示唆している。Anagnostou *et al.* (2001)³⁾ は、レーダーシステムのメンテナンスによる影響がグループ間でのバイアス量の違いの一因である例を示しているが、本研究の解析結果にこの影響が関連しているかどうかはわからない。

一方、Case 2 (2002/7/10) に対する推定値は、同じグループ期間における他の推定値とは大きな差をもつ。この降雨事例は Case 4 (2002/10/1) とともに台風に伴う降雨であるが、Case 2 においては台風の中心位置が比較領域にかなり接近しており、上空の風速が非常に強かった。そのため両レーダーによる観測時刻差がより敏感に推定値に影響したと考えられる。この根拠については (5) で触れる。

散布図に見られる両データの対応関係のばらつきの原因として、他に次のようなことも考えられる。降雨が強い対流性を有し、降雨の盛衰が激しいことは、観測時刻差による影響を敏感にさせる要因である。また、両レーダーが観測する単位ボリュームの違いやデータの内挿による誤差もばらつきを誘引する。

このうち、内挿による誤差に関しては、レーダーの観測仰角などの特性をよく考慮した上で実用レーダーの座標変換を行わなくてはならない。杉本 (2003)⁹⁾ は、Case 2 と Case 4 に対して、本研究で用いた半径よりも小さい鉛直方向の影響半径を雷レーダーの座標変換に用いてバイアス推定を行った。その際、本研究で行っている領域よりかなり広い、雷レーダーを中心とした 180×180 km の矩形域を比較領域とし、本研究で考慮している閾値に関する設定は行っていない。その推定結果と比べると、本研究において推定されたバイアス量の絶対値はやや小さく、標準偏差も小さい。雷レーダーの中心位置から遠い地点は観測密度が特に小さい (図-1 参照) が、そのような領域に対して小さい鉛直半径を用いると、内挿値はある一つの仰角データに基づくものとなる。これは、内挿データの誤差につながる。

(4) 比較高度間でのバイアス量の違い

全高度を平均したバイアス量には時間的な変動が存在するが、ある事例における高度間でのバイアス量の差異はそれほど大きくはない。図-4 はバイアス量の高度に対するプロファイルの一例を示したものである。データ間の対応性にばらつきの大きかった (分散値の

大きい) Case 2 以外の事例では、高度の変化に対するバイアスの変動が 1 dBZ 程度以内に収まっている。

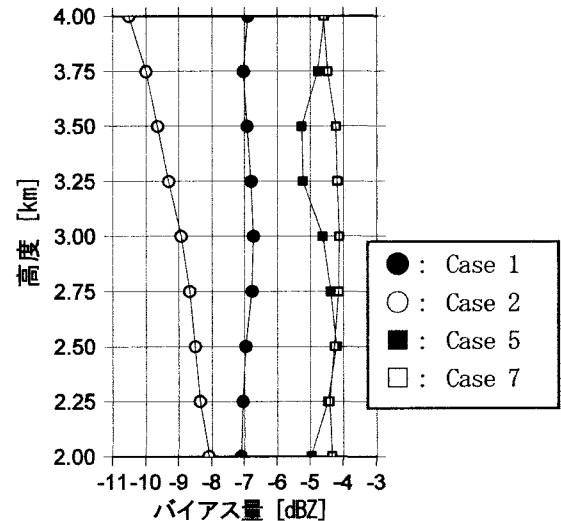


図-4 推定バイアス量の高度に対する変動例

(5) 観測時刻差が及ぼす両者の一致度の違い

TRMM PR と雷レーダーの観測時刻差がバイアス推定、ないしは両レーダーによるデータの対応関係に及ぼす影響を調べる。図-5 は、Case 4、および 8 に対

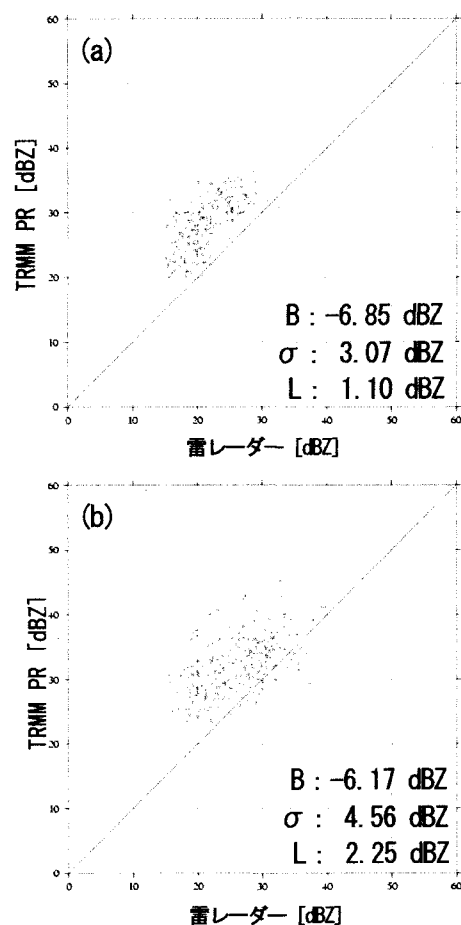


図-5 観測時間差に伴う対応関係のばらつき

(雷レーダーは表-1の観測時刻より6分先のデータを使用、

(a) Case 4, (b) Case 8)

して6分ずらした雷レーダーのデータを比較に用いた際の散布図を示したものである。図-2に示す当該ケースの散布図と比べると明らかに標準偏差が大きくなっているのがわかる。これは、比較データの観測時刻差に伴う降雨場の移動、または変形がバイアス推定にとって重要なファクターであることを示唆するものである。風速の非常に強かった Case 2 において、両データの対応関係のばらつきが大きかったのはこの影響が大きかったものと考えられる。

(6) 推定バイアス量を加味した補正

図-3にて示したバイアス量の時系列を勘案して、これまで扱ってきた13ケースの降雨事例とは異なる事例に対して推定バイアス量を加味する。つまり、バイアス量を加えたレーダー反射因子の各スキャンデータをを用いて、3章で述べた手法により比較地点でのレーダー反射因子値を算定する。図-6は2002年10月7日に生じた降雨事例を対象とし、1時51分の雷レーダー情報と同期 TRMM PR データとの対応関係（高度3.5 km）を示したものである。考慮するバイアス量は、Case 4 に対する推定結果をもとに -7 dBZ とした。データ間でばらつきを伴うものの、データの全体的なバイアスは修正できている。これは、TRMM PR で得られる日本上空のデータは間欠的ではあるものの、地上設置型レーダーのバイアスを補正するのに有効であることを示唆している。

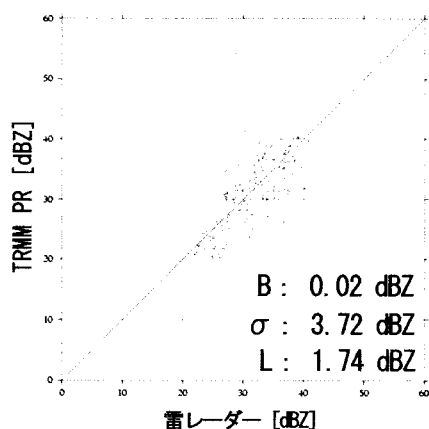


図-6 推定バイアス量を加味した雷レーダー情報と TRMM PR データとの比較例

5. 結論

本研究は地上設置型の実用レーダー（一例として雷レーダー）によるレーダー反射因子のバイアス量を見積もるために、衛星搭載型降雨レーダー TRMM PR によるデータを用いた検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

まず、各降雨事例に対する推定バイアス量から、雷レーダーが一貫して TRMM PR よりも小さいレーダー反射因子を観測していることが示唆された。比較高度（2～4 km）において、高度によるバイアス量の差異は小さいが、事例ごとにバイアス量は変動していた。また、両レーダーによる観測時刻差が、レーダー間の対応関係のばらつきに影響していることがわかった。

一方、ある一定期間では雷レーダーはシステムとして安定した観測を行っていることをバイアスの変動が示唆していた。衛星搭載型レーダーによるデータと推定バイアス量は間欠的なものであるが、地上設置型レーダーの観測特性をモニタリングするには適したデータであるといえる。

謝辞：本研究で用いた TRMM PR データは、宇宙開発事業団による公募研究（代表者：中北英一）において配布されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Sugimoto, S., Nakakita, E., and Ikebuchi, S. : A stochastic approach to short-term rainfall prediction using a physically-based conceptual rainfall model, *J. Hydrol.*, 242, pp. 137-155, 2001.
- 2) Kawanishi, and Coauthors : TRMM precipitation radar, *Remote Sen. Appl.: Earth Atmos. Oceans*, 25, pp. 969-972, 2000.
- 3) Anagnostou, E. N., Morales, C. A., and Dinku T. : The use of TRMM Precipitation Radar observations in determining ground radar calibration biases, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, pp. 616-628, 2001.
- 4) Bolen, S. M., and Chandrasekar, V. : Quantitative cross validation of space-based and ground-based radar observations, *J. Appl. Meteor.*, 39, pp. 2071-2079, 2000.
- 5) Schumacher, C., and Houze Jr., R., A. : Comparison of radar data from the TRMM satellite and Kawajalein oceanic validation site, *J. Appl. Meteor.*, 39, pp. 2151-2164, 2000.
- 6) Liao, L., Meneghini, R., and Iguchi, T. : Comparisons of rain rate and reflectivity factor derived from the TRMM Precipitation radar and the WSR-88D over the Melbourne, Florida, site, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, pp. 1959-1974, 2001.
- 7) Iguchi, T., and Meneghini, R. : Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11, pp. 1507-1516, 1994.
- 8) Cressman, G. W. : An operational objective analysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 87, pp. 367-374, 1959.
- 9) 杉本聡一郎：TRMM PR データを用いた地上設置型レーダーのバイアス推定，第58回土木学会年次学術講演会，II-001, pp. 1-2, 2003.

(2003. 9. 30受付)