

XバンドMPレーダ(XRAIN)と現地観測データの降雨検知時間差を利用した雨滴の中央粒径の推定法

Estimation of mean raindrop diameter associated with
detection time difference of rainfall intensity
between X-band Multi Parametric Radar (XRAIN) and field observation

山田 朋人¹・阿久津 博²

Tomohito J. YAMADA, Hiroshi AKUTSU

¹北海道大学大学院 工学研究院 准教授

²北海道大学大学院 工学院

要 旨

本研究は2013年度に北海道開発局によって北広島市内の水防施設内に設置されたXバンドマルチパラメトリックレーダ (XバンドMPレーダ; 以降XRAIN) に対して、XRAINと地上雨量計との降雨検知の時間差を利用したXRAINの降雨強度推定の向上を目的とする。XRAINは高い精度で降雨強度を推定するが、レーダサイトから30km以上離れた遠方では地上雨量計よりも降雨の立ち上がり・ピーク・降り終りに関して早期に降雨を検知するという特性を確認した。その降雨検知の時間差から雨滴粒径ごとの終末速度式を基に中央粒径を算出する手法を提案した。さらには、中央粒径に対する補正式を作成し、降雨強度の推定を行った。同手法は、XRAINが推定する中央粒径の検証や位相差偏波情報による降雨強度推定に用いるパラメタの修正及び改善に寄与するものである。

《キーワード：XRAIN；降雨；雨滴粒径；検知時間》

1. はじめに

本研究は2013年度に北海道開発局によって北広島市に導入されたXバンドマルチパラメトリックレーダ（XバンドMPレーダ；以降，XRAINとする）による高時空間解像度による降雨情報を用いた降雨強度推定手法について検討を行うものである．実際にXRAINの運用が開始されたのは2013年7月末からであり，2014年度に石狩市に2機目のXRAINが導入される予定であることから，本研究は2機のXRAINが本格運用される2014年以降における状況を想定し，上記の研究内容を実施した．

2. 近年の豪雨事例及びXRAINの展開

近年，全国各地で短時間スケールの豪雨が頻発しているとの指摘がなされている．全国的に見ると2013年7月28日に山口県と島根県において豪雨災害が発生し，激甚災害指定となった例が挙げられる．この豪雨事例では1時間降雨量が萩市須佐において138.5mm，津和野町では91.5mm，山口市に至っては143.0mmとなり，観測史上最大を記録し，河川の増水や土砂災害が発生した．また同年9月16日には台風18号による豪雨で近畿地方では浸水被害となった．北海道では2010年8月23夜から24日明け方にかけて線状降水帯に伴う豪雨が発生し，札幌では過去50年間で最も大きな1時間降雨量を記録した（Yamada et al. 2012）¹⁾．また2013年では道内各地において局地的豪雨が複数回発生し，道路の冠水や鉄道の運休によって人々の生活に大きな支障が生じた．

このような局地的豪雨の予測及び被害の軽減を目的に，国土交通省は2009年度からXRAINという新型降雨レーダを全国各地で配備し始めた．これは従来国土交通省や気象庁によって配備・運用されているCバンド帯（波長5cm）を有する降雨レーダと比較して時空間スケールともに高解像度に降雨情報を観測できる特徴を有する．XRAINは2012年度までには全国で27基配備されており，2013年度には北広島局のXRAINを含め計35基体制となった．この北広島局のレーダは北海道内では初となるものであり，2013年7月より運用されている．

3. XRAINによる降雨強度推定手法の特徴

本章ではXRAINの優位性及び特徴について記す．XRAINが使用する電磁波の波長帯は3cmであり，前述のCバンドレーダの波長より2cm短い．このXRAINの短波長という特性は，Cバンドレーダよりも観測対象範囲は小さいものの，高い時空間分解能で降雨強度を推定できる優位性を意味する．また，従来使用されてきたレーダは水平偏波のみを送受信することで雨滴粒径分布情報を介して降雨強度を推定している．これに対してXRAINは水平偏波と鉛直偏波を同時にレーダから送受信することによって雨滴の粒径をより正確に求め，結果として降雨強度を精度良く推定できる．先行研究によると，雨滴は空気抵抗を受けて，水平方向に長い楕円体になることが知られている²⁾．この雨滴が多数存在する空气中をレーダで観測すると，水平偏波のレーダにより長軸径の反射因子を，鉛直偏波のレーダにより短軸径の反射因子が得られ雨滴の形状を把握することが可能であり，Cバンドレーダより正確な降雨量を特定できる．強雨時ではXバンド帯の波長が短いことによる降雨減衰が懸念されるが，水平・鉛直の二偏波を使うことによりある程度回避可能であり，現在では複数台のXRAINによる観測情報を合成することによって高い降雨推定精度を維持している．さらには水平偏波と鉛直偏波の位相差を利用した降雨粒子タイプ（偏波間位相差；以降KDP）や風向風速（ドップラー速度）の情報が得られる点もXRAINの優れた特徴である．

次にXRAINの降雨推定アルゴリズムについて説明を行う．XRAINは強降雨時（ K_DP が0.1以上）であれば K_DP を用いた降雨強度を推定する．このとき，降雨強度は以下の式で表される．

$$R=aa_1 K_{DP}^{a2} \quad (1)$$

式中の a, a_1, a_2 は降雨強度推定に必要なパラメタであり, a_1, a_2 はレーダの仰角の関数である。

一方, 弱降雨時 (KDPが0.1以下) であれば雨滴はほぼ球形をしているため偏波間位相差が小さく, そのため従来のレーダと同様にレーダ反射因子 (Z) を使用した降雨強度推定を行っており, 降雨強度推定とレーダ反射因子の関係式を以下に示す。

$$Z = B R^\beta \quad (2)$$

上式の B , と β はレーダ毎に設定するパラメタである。

4. XRAINと地上観測データの降雨検知時間差による雨滴粒径の推定手法

XRAINによる降雨強度推定精度に関する高堀ら (2009) の結果によると, XRAINはレーダから半径30km以内において従来のレーダよりも高い精度で降雨強度を推定できるものの, 前述の通り遠方になるほどその推定精度は減少する³⁾。そのため, 同地域に設置された複数のXRAINによる降雨強度の空間内挿を施すことが必要となる⁴⁾。一方, XRAINに限ることではないが, レーダは時々刻々異なる高さの仰角に向けて電磁波の送受信を行うことによって降雨強度を求める。つまり遠方になるほどレーダが観測する高度は高くなり, 従ってレーダから遠方になるほど実際の降雨よりも早期にレーダは降雨を検知する特性かつ問題点を有する。これに対して本研究ではこのレーダと地上観測による降雨探知の時間差を利用した雨滴粒径の推定手法を提案する。

図-1は2013年9~11月におけるXRAINとアメダス地上雨量観測での降雨の開始時, 降り終り時, ピーク時の時間差 (分) をレーダからの距離について示す。本研究では, 降雨の開始時, 降り終り時とは1日の降雨イベントにおいて最も長く雨が降ったイベントでの降り始め及び降り終りと定義し, また降雨のピーク時は1日の降雨イベントにおいて最も強い降雨強度を持った時間と定義する。図-1ではアメダス地上雨量観測は10分値データとXRAINの1分値を0から9分早くずらして算出した10分値データを比較し

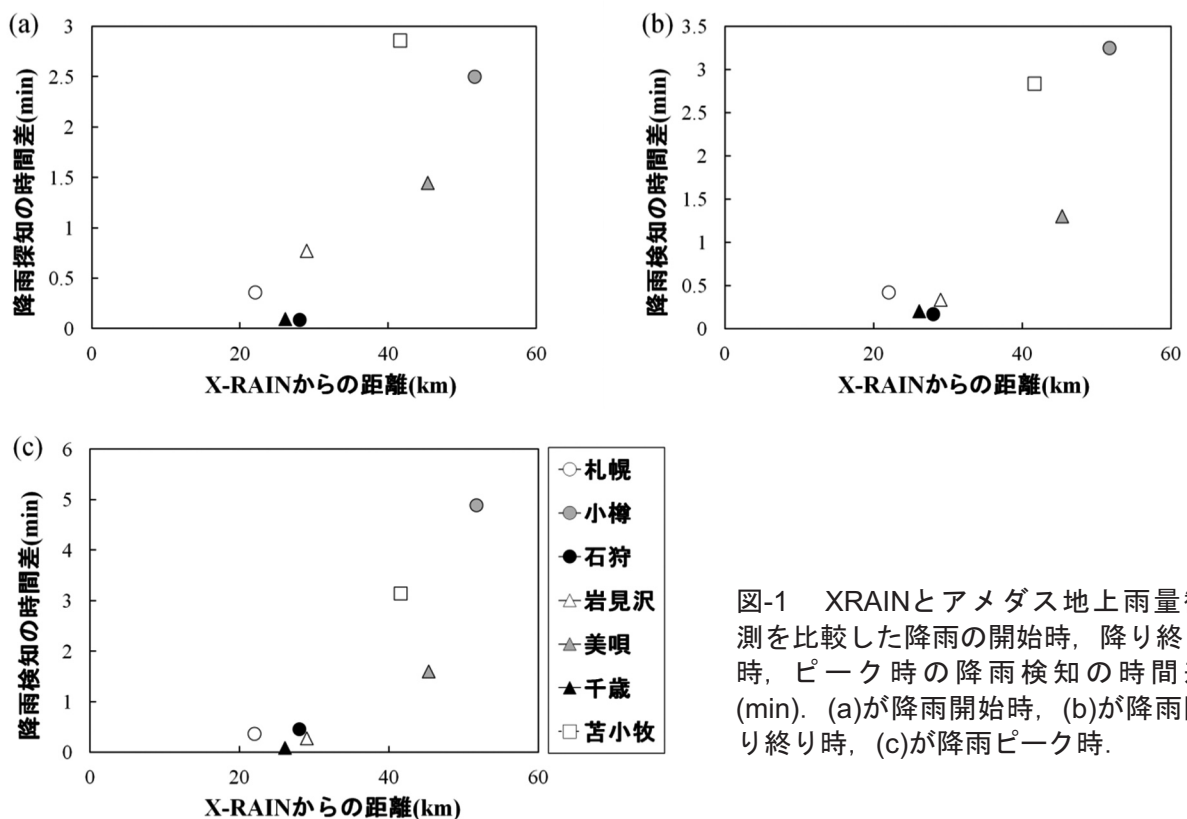


図-1 XRAINとアメダス地上雨量観測を比較した降雨の開始時, 降り終り時, ピーク時の降雨検知の時間差 (min). (a)が降雨開始時, (b)が降雨降り終り時, (c)が降雨ピーク時。

て降雨検知の時間差を導出している。降雨の開始時においては1日の最も長く雨が降ったイベントでの降雨の開始から1時間のXRAINとアメダス地上雨量観測の分散値が最も低いものを降雨探知の時間差、降り終り時においては降雨の降り終りまでの1時間の分散値が最も低いものを降雨探知の時間差、降雨のピーク時は前後30分の分散値が最も低いものを降雨探知の時間差としている。

この図から降雨の開始時、降り終り時、ピーク時それぞれレーダから遠方ほどXRAINと地上雨量では大きな時間差を有することがわかる。レーダは1分ごとに2種類の低仰角 ($\theta_0=1.8^\circ$ と $\theta_1=2.5^\circ$) で降雨強度を観測しており、レーダと観測地点間の距離と仰角から実際にレーダが観測している高度を求めることが出来る。この高度と図-1に示す時間差に以下の雨滴の終末速度式を与えることで各時刻の粒径の中央値を推定する。

$$v(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6 D) \quad (3)$$

上式の v は雨滴の終末速度 (m/s)、 D は粒径 (mm) を示す。

次にXRAINがKDPから雨滴粒径の中央値を算出する式を以下に示す。

$$K_{DP} = \left(\frac{180}{\lambda}\right) 10^{-3} C_k W (1 - \bar{r}_m) \quad (4)$$

式中の K_{DP} は偏波間位相差、 λ は電磁波の波長、 C_k は3.75、 \bar{r}_m は粒子径の分布で重み付きされた平均軸比である。また \bar{r}_m と W は以下の2式で得られる。なお、 D_m は K_{DP} に起因する雨滴粒径の中央値、 f はレーダ周波数を意味する。

$$\bar{r}_m = 1.03 - 62 D_m \quad (5)$$

$$W = 3.565 \left(\frac{K_{DP}}{f}\right)^{0.77} \quad (6)$$

これらの式を整理することで K_{DP} に起因する雨滴粒径の中央値 D_m は

$$D_m = \frac{K_{DP}^{0.23}}{844,5663} \quad (7)$$

として求めることができる。

図-2はある降雨イベントにおける式(7)によるKDPを用いた粒径の中央値(青丸)と降雨検知の時間差による結果(赤線)をそれぞれ示す。降雨検知の時間差による値はレーダが観測した高度と地上との間の平均値と考えることができる一方、XRAINから直接求まる中央粒径値はXRAINが計測した高さにおける中央粒径値を意味する。これまでレーダによって観測された雨滴粒径は地上でのディストロメータによる雨滴粒径との比較が成されてきたが、本研究が提案する降雨検知時間のずれから求まる中央粒径値は、転倒ます雨量計のみさえ存在すればXRAINが推定する中央粒径を検証する手段となる。また、図が示す通り、検知時間差から求める粒径の方が大きな値を示している。これは式(1)におけるKDPを用いた降雨強度推定式に利用するパラメタの向上に寄与する可能性を有するものである。なお、検知時間差による値の時間方向の分布が粗いが、その理由はXRAINが1分ごとに観測しているのに対して地上降雨データは10分ごとのみ利用可能なためである。2014年度には、著者らの観測サイトにおける降雨データを1分ごとに収集することで、より高い時間スケールで同様の解析を試みるとともに、ディストロメータを用いた粒径分布も含めた比較を実施する予定である。

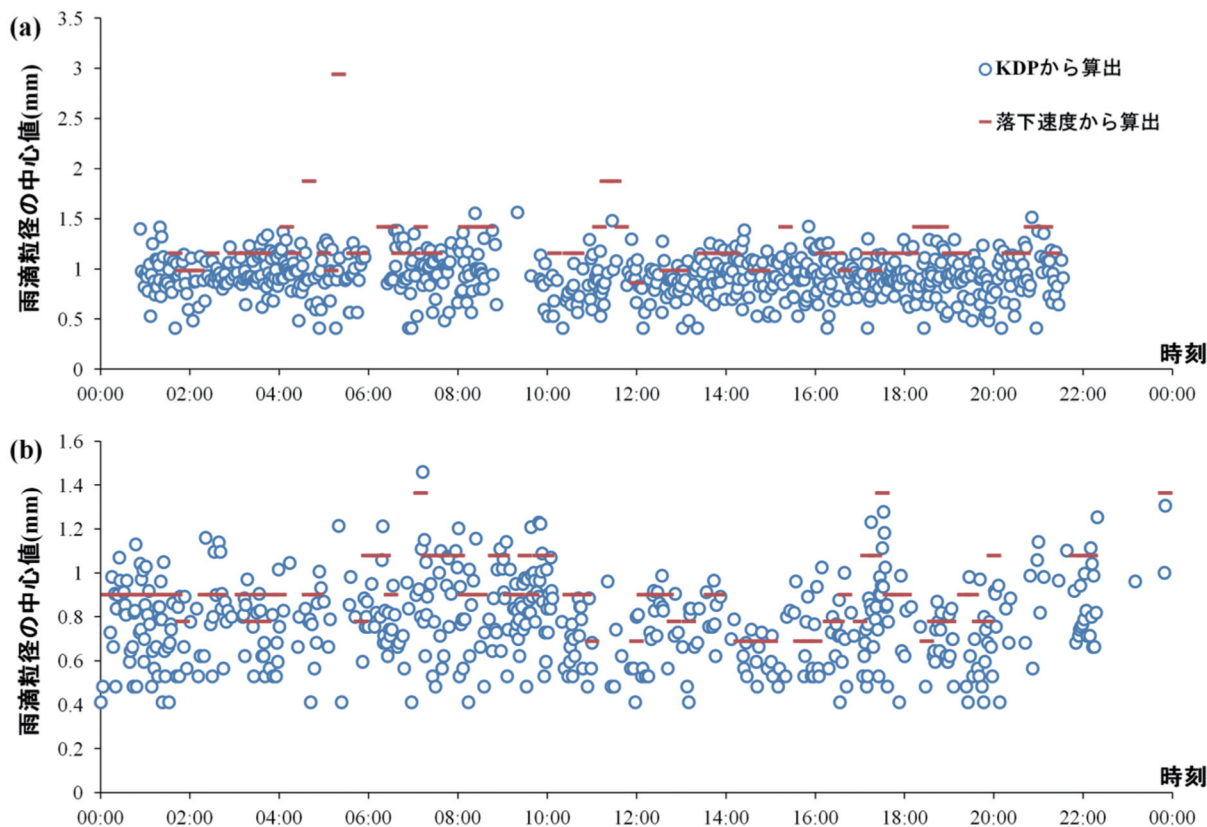


図-2 ある降雨イベントにおける式(7)によるKDPを用いた粒径の中央値と降雨検知の時間差を用いた粒径の中央値による結果 (a)が小樽, (b)が苦小牧.

続いて小樽, 苦小牧, 美唄, 月形におけるKDPによる雨滴粒径中央値と降雨検知時間のずれから推定された結果との比較を行う. これらの4地点はいずれも北広島のXRAINサイトから30km以上遠方に位置する. 図-3に示す通り, 各地点ともにKDPから求まる雨滴粒径中央値は降雨検知時間の時間差から得られる中央値よりも約15~20%程度過小評価であることがわかり, 図-3(e)はXRAINサイトからの距離に応じてその差が線形に大きくなることが示されている. 前述の通り, 実際の降雨強度推定にはKDPに3つのパラメタが加味されているため, この過小評価の影響は概ね考慮されているものの, 本研究からレーダからの距離及び降雨強度ごとにパラメタを動的に決定できる可能性が示唆される.

図-3(e)から得られた雨滴粒径中央値の違いを式(1), (8)に示すKDPを用いた降雨強度式に適用した結果について議論を行う.

$$\alpha = 1.2 \times 0.8331 \times e^{0.0083x} \quad (8)$$

なお, 式中の α, a_1, a_2 は降雨強度 R を推定するために使用されている全国一律のパラメタであり, a_1, a_2 は前述の通り仰角の関数である. また, x はXRAINサイトからの距離(km)を意味する. 図-4(a)は小樽, 苦小牧, 美唄における2013年10~11月(計13日間)のXRAINによる降雨強度と地上雨量との関係(相関係数は約0.43)を, 図-4(b)は図-3(e)によって得られたXRAINサイトからの距離に関する雨滴中央値の補正式を考慮した結果(相関係数は約0.62)である. 図-4から本補正式を考慮した結果によってXRAINが推定する降雨強度の精度は向上することがわかる. しかしながら本補正式は式(1), (8)で採用されている現行のパラメタをそのまま使用しているため, 今後は時々刻々動的なパラメタ同定を行うことによってXRAINのさらなる降雨強度の精度向上が期待される. また, 本研究が提案する降雨検知の時間差を利用した雨滴中央値の推定は全国のXRAINに適用できる普遍的な手法であるため, 今回解析を行った北広島のXRAINだけではなく, 2014年度に石狩市に設置・運用されるXRAINや他の都道府県

のレーダにも有効な手段である。

5. おわりに

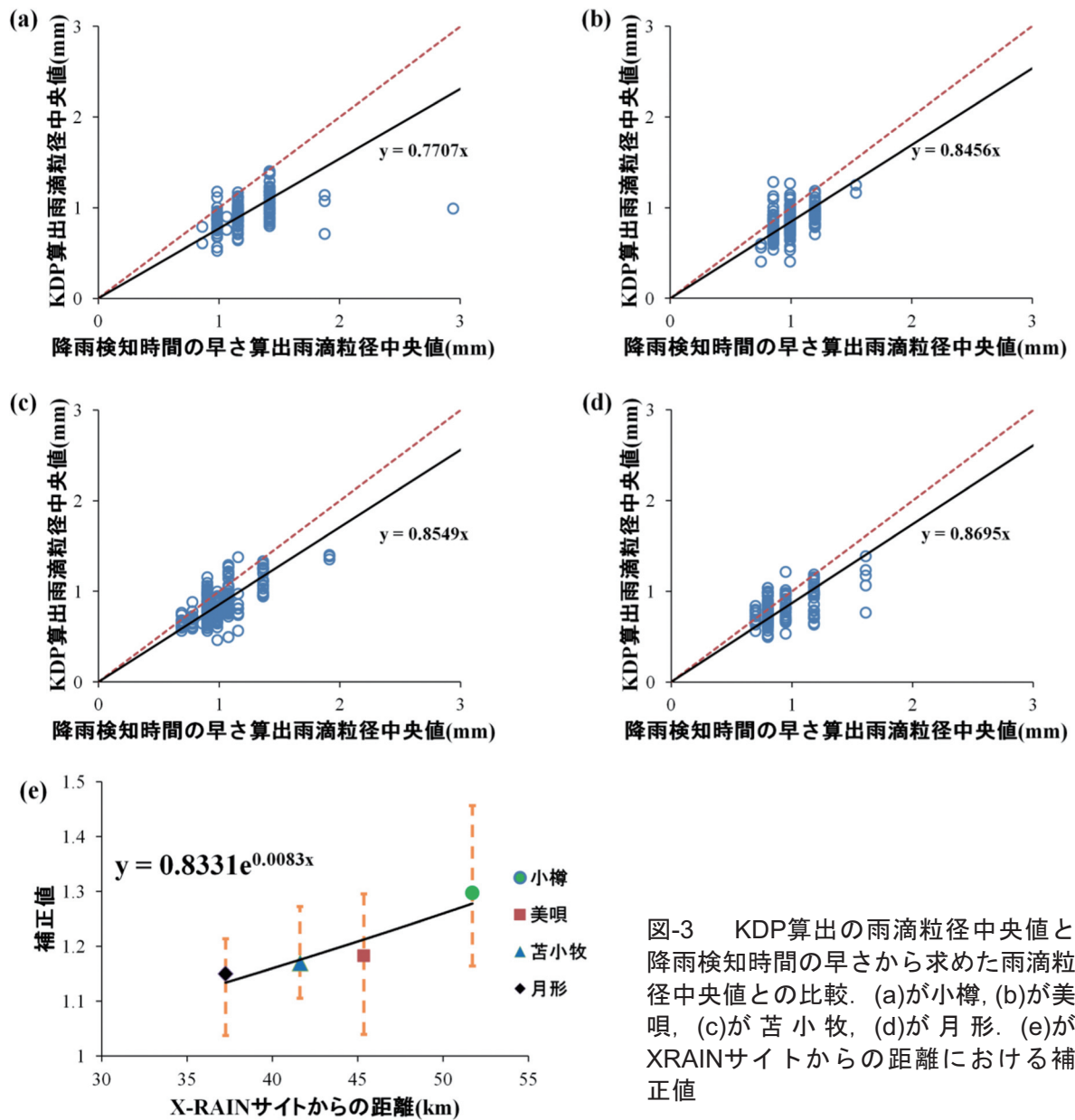


図-3 KDP算出の雨滴粒径中央値と降雨検知時間の早さから求めた雨滴粒径中央値との比較. (a)が小樽, (b)が美唄, (c)が苫小牧, (d)が月形. (e)がXRAINサイトからの距離における補正值

本研究の成果によってレーダから遠方ほどXRAINと地上雨量では大きな時間差を有していることが示された. この時間差を用いた雨滴粒径の中央値とXRAINで観測されたKDPを用いた雨滴粒径の中央値を比較することによって, レーダから遠方ほどKDPを用いた雨滴粒径の中央値の方が検知時間の時間差を用いた雨滴粒径中央値より過小評価されていることが確認された. この結果から, XRAINサイトからの距離に関する補正式を用いた降雨強度と今現在使われているXRAINの降雨強度を, アメダス地上雨量計を用いて精度検証を行った. 精度検証の結果, 本補正式を考慮することによってXRAINの降雨強度の精度はさらに向上することが確認できた. 今後は, 著者らの観測サイトにおける降雨データを1分ごとに収集することで, より高い時間スケールで同様の解析を試みるとともに, ディスドロメータを用いた

粒径分布も含めた比較を実施し、XRAINのレーダサイトから遠方を対象とした降雨推定精度の向上に向けた研究を継続する予定である。

謝辞：本研究で使用したXRAINのデータは国土交通省北海道開発局から提供されたものである。また、XRAINのデータ解析の際、防災科学研究所のmlitx2ncと気象庁のnc2rt_mpxを使用させて頂いた。ここに感謝の意を表す。

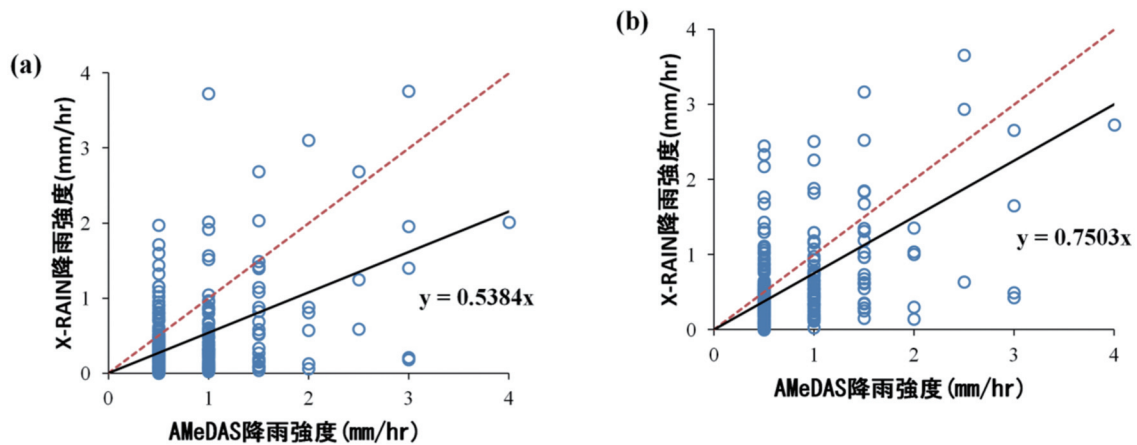


図-4 XRAINとアメダス地上雨量計による降雨強度の散布図. (a)が既存の降雨強度推定式を用いたXRAIN降雨強度との比較, (b)が既存の降雨強度推定式に補正を用いたXRAIN降雨強度との比較.

参考文献

- 1) Yamada, T. J., J. Sasaki, and N. Matsuoka : Climatology of line-shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010, Atmospheric Science Letters, Vol.13, Issue 2, pp.133-138, 2012.
- 2) 深尾昌一郎, 浜津享助 : 気象と大気のレーダリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 2009.
- 3) 高堀章, 前坂剛, 三隅良平 : Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定 - 複数仰角PPIデータを用いた改善効果について -, 防災科学研究所報告, 第73号, 2009.
- 4) Maki, M. and 11 co-authors : Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar, Atmospheric Science Letters, Vol. 6, pp.12-18, 2005.