



Title	気象用フェーズドアレイレーダネットワークに関する研究
Author(s)	嶋村, 重治
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61752
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

気象用フェーズドアレイレーダネットワーク
に関する研究

嶋村 重治

2017年1月

大阪大学大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻

内容梗概

本論文は筆者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行った、気象用フェーズドアレイレーダネットワークに関する研究成果をまとめたものである。

近年、突発的豪雨や竜巻といった気象現象がもたらす災害が社会問題となっている。このような現象は数分～数十分の内に発達して地上に被害をもたらすため、従来型の大型気象レーダが有する分解能では観測が困難であった。そこで、本研究グループは気象用フェーズドアレイレーダ (PAWR)を開発した。PAWR は半径 60km 以内を 30 秒で三次元的に観測可能なレーダである。PAWR は気象現象が発生する予兆をいち早く捉え、発達から衰退までの過程を連続的に観測することができる。本研究グループでは、PAWR を複数台用いた PAWR ネットワークを運用しており、また、高精度観測機能を有する二重偏波フェーズドアレイレーダの開発を進めている。一方、PAWR が使用する X 帯では降雨減衰が問題となっており、正確な補正手法が必要となる。さらに、レーダの高分解能化はデータの大容量化を意味し、レーダネットワーク運用時のデータ転送にボトルネックが生じるため、データを効率的に圧縮する手法が必要となる。気象用フェーズドアレイレーダネットワークを実用化する上での問題を解決することが本研究の目的である。

本論文は以下の 5 章によって構成する。

第 1 章は本論文の導入部であり、従来型の気象レーダ観測について説明した上で、本論文の目的について述べる。

第 2 章は単一偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発について述べる。降雨減衰の大きい X 帯では単体レーダに対する降雨減衰補正手法である Hirschfeld-Bordan 法 (HB 法)による補正結果は不安定となる。そこで、レーダネットワーク内の各ノードの HB 解と共にその理論的分散値を算出し、分散値の逆数による重み付け平均によって、確率的に尤もらしい補正解を算出する。提案手法による推定解の精度をシミュレーションと実観測データによって検証する。さらに、PAWR ネットワークの観測データに提案手法を適用した結果について述べる。

第 3 章は二重偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法について説明する。二重偏波観測は水平・垂直偏波を用いることで降水の粒子情報を取得可能な観測手法であり、偏波間の位相差情報を用いた降雨量推定や減衰補正を高精度に行い得る

ことが知られている．一方で，X 帯における位相差観測においては後方散乱位相差の混入による位相パラメータ算出精度の低下が問題となる．提案手法では，ネットワーク観測という状況を活かし，後方散乱位相差を適切に除去した上で降雨減衰補正を行う．シミュレーションによる提案手法の精度検証を実施する．

第4章では，気象レーダデータに対するデータ圧縮手法について検討する．高分解能レーダネットワークでは，データ一括処理を実行するサーバへのデータ転送がボトルネックとなる可能性がある．本研究では，気象エコーの空間的相関性と，データの特徴に応じたアルゴリズムの調整が容易に行えるという利点を有する圧縮センシング技術の融通性の高さに着目し，気象レーダデータに対する圧縮センシングによるデータ圧縮手法の検討を行う．本研究グループで開発した PAWR と Ku 帯広帯域レーダ (Ku-band BBR) の観測データに対して圧縮および再構成を行い，その精度を検証する．

最後に，第5章では本論文で得られた結果をまとめる．

謝辞

本博士論文は、大阪大学大学院工学研究科博士後期課程における4年間、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程における2年間、そして大阪大学工学部における1年間、計7年間に得られた研究成果をまとめたものである。

本論文を執筆するにあたり、懇切かつ的確な御指導および御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科 牛尾知雄准教授に謹んで深謝の意を表します。

また、本論文を執筆するに際し、有益な御討論、御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科 馬場口登教授、丸田章博教授に謹んで深謝の意を表します。

さらに、本論文に対して有益なる御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 井上恭教授、滝根哲哉教授、三瓶政一教授、宮地充子教授、ならびに大阪大学産業科学研究所 鷲尾隆教授に深く感謝致します。

大阪大学 河崎善一郎名誉教授には本研究を遂行するにあたって多大なる御助言を賜りました事を深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、長きにわたって技術的な御指導と御助言を賜りました国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 吉川栄一氏に深く感謝の意を表します。

また近畿大学 理工学部 情報理工学科 森本健志准教授、気象庁気象研究所 吉田智氏、神戸市立工業高等専門学校 中村佳敬氏、ならびに大阪大学大学院工学研究科 元教員の金寛氏には、本研究に関して有益な御討論、御助言を賜りましたことを深く感謝致します。

本論文は、気象用フェーズドアレイレーダをはじめとする多くの気象レーダ観測に基づく研究成果をまとめたものである。気象用フェーズドアレイレーダの共同開発と運用にあたって多くの御協力を頂いた株式会社東芝 和田将一氏、水谷文彦氏、ならびに国立研究開発法人情報通信研究機構 佐藤晋介氏に謹んで御礼申し上げます。第2章、第3章に関しては、アメリカ国立気象局運用の NEXRAD のデータや CASA の IP-1 radar network のデータを提供頂き、また筆者が2013年9月より1年間客員研究員として赴任した際に有益な御指導、御助言を賜りましたコロラド州立大学 (Colorado State of University) V. Chandrasekar 教授、Haonan Chen 氏に謹んで深謝の意を表します。第4章に関しては、Ku 帯広帯域レーダによる観測キャンペーンや観測環境の整備において多大なる御協力を頂いた住友電気工業株式会社 今井克之氏、浦康彦氏、ならびに国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 又吉直樹氏に謹んで御礼申し上げます。

本論文の中でも特に4章を執筆するにあたり、圧縮センシング技術に関して多くの有益な御討論、御助言を賜りました立命館大学情報理工学部メディア情報学科 平林晃教授、ならびに大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 松田崇弘准教授に深く感謝致します。

本研究をまとめるにあたって大変お世話になりました妻鹿友昭氏ならびに菊池博史氏に深く感謝致します。また、本研究を行う上で観測機器の運用やデータ解析にご協力頂きました藤田秀平氏をはじめとする大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 情報通信工学部門 光電波工学講座 環境電磁工学領域の皆様にも深く感謝致します。

最後にこれまでの長きにわたる学生生活を支えて下さった家族に深く感謝致します。

目次

1	序論	1
1.1	従来の気象レーダ観測とその問題点	1
1.2	本研究のアプローチ	3
1.3	本研究の目的	6
2	単一偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発	11
2.1	緒言	11
2.2	単一偏波レーダネットワークにおける確率的降雨減衰補正	11
2.2.1	単一偏波観測における降雨減衰	11
2.2.2	提案手法	15
2.3	シミュレーションによる検証	19
2.3.1	シミュレーションモデルの作成	19
2.3.2	シミュレーション結果	21
2.3.3	考察	26
2.4	実観測データを用いた精度検証	29
2.5	気象用フェーズドアレイレーダネットワークへの適用	32
2.6	結言	33
3	二重偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発	37
3.1	緒言	37
3.2	二重偏波レーダネットワークにおける確率的降雨減衰補正	37
3.2.1	二重偏波観測	37
3.2.2	提案手法	41
3.3	シミュレーションによる精度検証	44
3.4	δ_{co} の推定精度の改善	47
3.5	結言	48
4	高分解能気象レーダデータに対する圧縮手法の検討	51
4.1	緒言	51
4.2	気象レーダネットワークにおけるデータ圧縮	51
4.2.1	レーダデータ圧縮の必要性	51
4.2.2	レーダデータの特徴と圧縮センシング	53
4.3	圧縮センシングを用いた圧縮手法	54
4.3.1	レーダネットワークにおけるデータ処理	54

4.3.2	CS を用いた圧縮手法	54
4.4	適用結果	56
4.4.1	圧縮再構成の事例	56
4.4.2	圧縮再構成結果の統計的評価	57
4.4.3	分解能の違いによる影響	61
4.5	結言	64
5	結論	67
	記号索引	70
	略語索引	72
	参考文献	73
	関連発表論文	79

1章 序論

1.1. 従来の気象レーダ観測とその問題点

降水を伴う気象現象に対する観測手段の一つとしてレーダによる電磁波リモートセンシングが用いられている。地上雨量計，ビデオゾンデなどの直接観測手法と比較すると，レーダリモートセンシングは数十～数百 km の遠方に至るまでの領域を地表面付近から高高度まで隈なく短時間で観測可能であり，準リアルタイムに現象を把握する手段として，幅広く活用されている。

近年，日本国内において突発的に発生・発達し，地上に突然豪雨をもたらす気象現象が社会問題となっている。このような突発的豪雨は短時間で発達する積乱雲に起因し，『ゲリラ豪雨』と呼称されている。一方で竜巻による被害も深刻化しており，2012年5月に茨城県つくば市で大惨事をもたらした竜巻被害は記憶に新しい [1]。これらの現象は，いずれも高度数 km の上空で発生・発達する積乱雲に起因している。積乱雲はしばしば降水を伴うため，気象レーダ観測が気象災害の前兆現象を捉える唯一の手段と言える。こういった突発的な気象災害軽減のためには，上空における前兆現象の発生を迅速に検知し，警戒情報を発令するシステムが求められる。そのようなシステムには気象レーダによる観測情報の提供が必須である。

気象レーダはアンテナから電磁波を大気中に送信し，雨滴による散乱によってレーダ方向に返ってきた電磁波を再びアンテナによって受信する。1つの雨滴による電磁波の散乱に対する散乱断面積の大きさは，おおよそ雨滴の粒径の6乗に比例することが知られており，降水強度の強い降雨ほど単位体積あたりに含まれる雨滴数とその粒径は大きくなる傾向にあるため，レーダで受信される電力値はそのまま降水強度の指標となる。

気象レーダ観測は20世紀半ばに始まり，S，C帯（周波数：2-8GHz）レーダによる観測が行われてきた。S，C帯は降雨による電力減衰の影響が少なく，大型アンテナと高出力増幅器を使用することで，半径百～数百 km が観測可能となる。こういった大型レーダは広い範囲の大まかな降水状況を把握することができる。しかしながらレーダ遠方においては，地球の曲率の影響により地上から数 km の上空を観測すること

となり、観測結果と実際の地表面付近の降水状況との間に差異が生じる。また、レーダから送信された電磁波は、数百 km 離れたところでは数 km の幅にまで拡がるため、空間的な分解能が劣化する。さらに大型アンテナの機械的な回転速度に制限があり、観測周期がアンテナの低速な回転に律速される。パラボラ型アンテナが搭載されたレーダの場合、ある仰角方向にアンテナを固定し、方位角方向に一度回転させながら観測を行った後、仰角を変更して次の観測を行う、というルーティンを繰り返すこととなる。大型レーダでは1つの仰角に対する観測を行うのに数十秒～1分程度の時間を要する。一方、気象レーダは少なくとも数分毎の観測周期でデータを取得することが求められるため、観測範囲は低仰角のみに限定される。そのため、先に述べた竜巻や突発的豪雨といった短時間（数分～数十分）で局所的（数百 m～数 km）に、三次元的な発生・発達過程を見せる現象に対しては、従来の大型レーダによる観測では分解能や観測範囲の観点から不十分である。そこで、このような突発的気象現象を迅速に観測することが可能なレーダシステムの開発が必要である。

一方、地上において降雨を直接観測するというアプローチも存在する。直接観測では、一定時間中にサンプリング面積内に降り注ぐ雨滴数とその大きさを各々カウントする。測定結果は単位面積当たりの単位時間平均の雨水量を表す降雨量 R [mm/h] というパラメータに変換される。 R は河川増水や土砂災害を予想するための流出モデルや地形モデルの入力値として用いられることから、その定量性が重要である。一方、従来型の気象レーダでは、単一偏波、とりわけ水平偏波のみを観測に用いている。単一偏波観測によって取得されるパラメータのひとつであるレーダ反射因子 Z と R の関係性 (Z - R 関係) が長らく研究されており [2], $Z=cR^d$ という関係が成立することが知られている。ところが、定数 c, d は降雨のタイプや強さ、また地域によって異なる値となる [3]。一般的には c は 70～500, d は 1.1～2.0 の値であるが、普遍的に係数 c, d を決定することは難しいと考えられている。そのために、 Z から R を定量的に算出することは困難である。

近年、単一偏波観測レーダに代わって、二重偏波観測機能を有する気象レーダによる観測が行われている。降水現象は大気中に数多く存在する降水粒子の集合体であり、電磁波の散乱特性は降水粒子の状態や向きによって異なる [4]。単一偏波のみの観測ではそういった降水粒子の特徴を捉えることは難しいが、二重偏波の受信信号から降水粒子のより詳細な情報を取得することができる。二重偏波観測は送信波に水平・垂直の直交する2つの偏波を用いることで、従来のレーダ反射因子に加えて偏波による受信電力の差や位相差、相関係数をパラメータ（偏波パラメータ）として取得する。偏波パラメータは雨滴の粒径情報を含んでいるので、雨滴粒径分布関数 (DSD: Drop Size Distribution) の推定に有用である [5][6]。また、偏波パラメータの一つである単位距離当たりの偏波間位相差を表す K_{dp} は、降雨量と強い相関が有ることが知られており、その相関は先に述べた Z - R 関係よりも安定している。さらに、 K_{dp} は単位距離当

たりの減衰量とも安定的な相関があり、より高精度な降雨量推定、降雨減衰補正が可能である [7][8][9]. さらにアメリカでは、CASA (Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere)による X 帯 (周波数: 8 – 12GHz)二重偏波レーダネットワークの実証実験が行われている [10][11]. 一方、国土交通省は国内主要都市部で二重偏波観測機能を有する X 帯レーダネットワーク (XRAIN [12])を運用しており、Web 上で観測情報をリアルタイムで配信している.

一方、二重偏波観測にもいくつかの問題点が存在する. 降雨をレーダで観測した際の受信信号は変動成分を含んでおり、通常、同一方向に対して複数回の観測を実施し、それらの受信信号を平均することによって変動成分を低減している. 二重偏波観測で取得される K_{dp} やレーダ反射因子差 Z_{dr} といった偏波パラメータの観測精度の確保に必要とされる観測パルス数は、単一偏波観測で取得されるパラメータである Z に比べて多くなることが知られており [13], 観測パラメータの精度を保証するためには、観測に要する時間が長くなる. また、二重偏波観測は雨滴が水平方向に扁平することを利用して、高仰角観測では雨滴の扁平に起因する偏波間の受信電力と位相差を検出できない. そのため、多くの二重偏波レーダは低仰角のみで観測を行っており、レーダ自体の直上の観測を行っていない. さらに、X 帯の二重偏波観測で取得される偏波間位相差には後方散乱の影響による正のバイアスが付加されるため、 K_{dp} の算出精度が悪化する. この K_{dp} 算出時の誤差は減衰量や降雨量の推定誤差の原因となる. 単体の二重偏波レーダにおいて観測される偏波位相差から後方散乱位相差を除去し、 K_{dp} を算出するアルゴリズムは研究されているが [14][15], 高精度な後方散乱位相差の検出には至っていないのが現状である.

1.2. 本研究のアプローチ

本研究グループでは、気象用フェーズドアレイレーダ (PAWR : Phased Array Weather Radar)を開発し、複数台の PAWR を用いた PAWR ネットワークを運用している. また、二重偏波観測機能を有する新たな PAWR の開発を行っている.

前節で述べたような気象災害に直結する現象を迅速に検知するためには、より高い時間分解能で三次元的な観測が可能なレーダシステムによる常時監視が必要となる. そのために、本研究グループは極めて高い時間分解能を有する PAWR を開発した [16]. PAWR は従来のパラボラアンテナに代わってフェーズドアレイアンテナを採用している. 128 本の無指向性スロットアンテナを縦方向に配列し、そのうちで 24 本のアンテナのみが送受信の両方を行っている. PAWR に搭載されているフェーズドアレイアンテナおよびスロットアンテナを図 1.1 に示す. 送信の際、各スロットアンテナ間の送信電磁波の位相を制御することによって所望の仰角方向に電波を送信することができる. 送信ビームとしては、その幅が 4~10 度程度のファンビームを使用している.

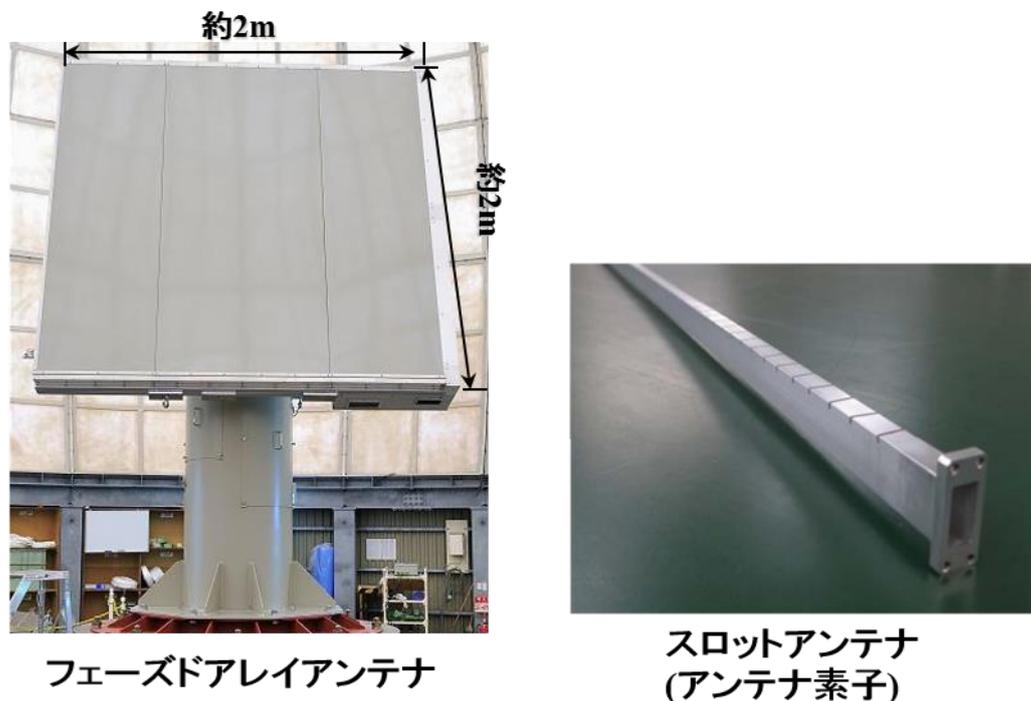


図 1.1 気象用フェーズドアレイレーダと
それを構成するスロットアンテナ

一方、受信信号を計算機でデジタル信号処理することによってビーム幅 0.9 度程度のビームに電子的に変換処理している。この一連の処理はデジタルビーム形成 (DBF: Digital Beam Forming) 技術と呼ばれ、適応信号処理によるビーム形成手法の検討が行われている [17][18][19]。DBF 技術によって仰角方向の観測を電子的な走査によって行うことができるため、アンテナの機械的な走査が不要となり、方位角方向にアンテナを 1 回転させるだけで対象範囲の三次元観測が可能となる。このことにより、従来型レーダに比べて大幅な観測時間の短縮が可能となり、半径 60km の領域に対して 30 秒という高時間分解能での観測が実現した。観測距離は 60km であり、大型レーダの観測距離に比べて短いため、観測領域内の空間分解能を高く保つことができ、地球の曲率の影響を受けにくい。

次に、PAWR ネットワークについて説明する。現在、我々の研究グループは PAWR2 台を用いた PAWR ネットワークを阪神エリアに展開し、運用している。PAWR ネットワークの観測状況を図 1.2 に示す。両 PAWR は約 53km 離れていて、それぞれ半径 60km の観測範囲を 30 秒でフルボリュームスキャンするモードで運用されており、両レーダの観測が重複する領域が広く存在する。PAWR を複数台組み合わせることにより、重複観測領域における降水現象に対しては、複数方向から 30 秒毎の情報を取得

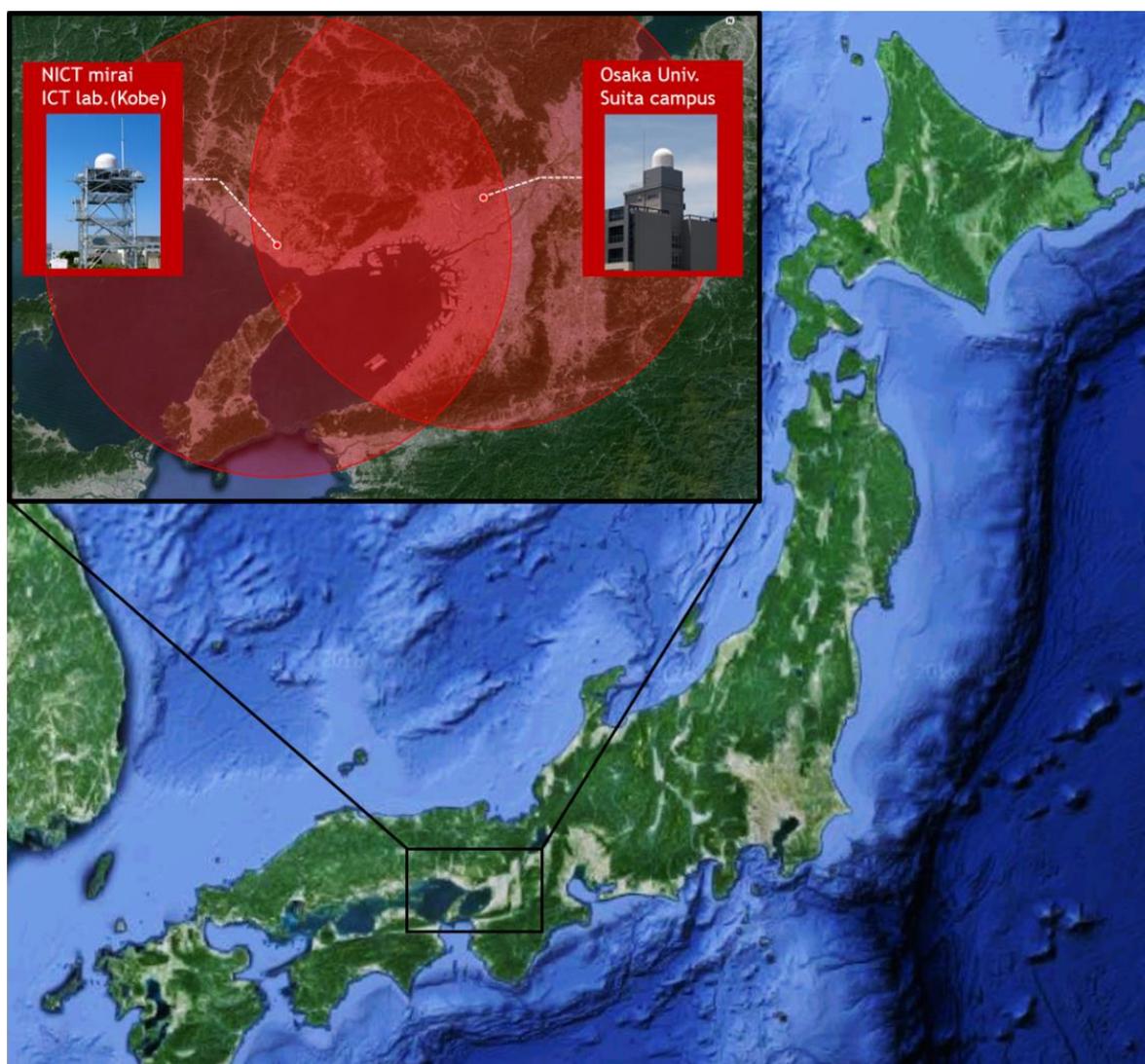


図 1.2 気象用フェーズドアレイレーダネットワークの観測状況

可能である。また、複数台の PAWR で 30 秒毎に取得されるドップラー速度情報を組み合わせることによって、より詳細な風速の推定が可能である。PAWR のような観測範囲が数十 km 程度のレーダを複数台用いた小型レーダネットワークの概略図を図 1.3 に示す。PAWR ネットワークのような小型レーダネットワーク観測によって、レーダネットワーク全体としては大型レーダに匹敵する領域を観測することが可能となる。また、地形や高層ビルによる観測不能領域を別のレーダによる観測で補完することができる。特に、狭い国土に 1000m 級の山岳が点在する日本において、大型レーダ観測における地形の影響を回避するためには、レーダを山頂付近に設置するほかない。そのため大型レーダによる観測における低高度地域の実際の状況と観測データの

差異はさらに大きくなる。よって、低高度からのレーダ観測を隙間なく行うといった観点からも、小型レーダネットワークはより高性能な観測システムである。さらに、複数台のレーダの観測が重複する領域においては同一の現象に対して多面的な観測を行うことができるので、複数のレーダからの観測情報を合成し、観測値の高分解能化ならびに高精度化を図ることができる。

次に、二重偏波フェーズドアレイレーダの開発について述べる。高速スキャニング性能を有する PAWR に続く次世代の気象レーダとして、本研究グループでは現在、二重偏波観測機能を有するフェーズドアレイレーダの開発を行っており、フェーズドアレイアンテナによる高速スキャニング性能と二重偏波観測機能の高精度な降水強度推定を両立するためのアンテナ形状の設計を行っている [20]。二重偏波フェーズドアレイレーダの実現により、30 秒～1 分毎に取得された偏波パラメータを用いた正確な降雨量推定が可能となる。さらに、二重偏波フェーズドアレイレーダを複数台用いた二重偏波フェーズドアレイレーダネットワークによって、従来の二重偏波レーダが抱えている問題点を解決し、複数レーダの観測が重複する領域では、複数の偏波パラメータを用いてより高精度な降雨量の推定が可能となる。

1.3. 本研究の目的

本節では、本研究の目的について述べる。

まず、前節で述べた気象用フェーズドアレイレーダネットワークの運用における問題点について述べる。PAWR は X 帯の周波数を使用しており、X 帯での観測においては降雨による電力減衰が大きな問題となる。同程度の降雨に対する減衰の大きさは、周波数のおよそ 4 乗に比例し、X 帯以上の周波数では損失が急激に増大する。この場合、レーダから見て強い降雨の裏側においては、降雨減衰の影響によって降雨強度が過小に評価されるだけでなく、電波の減衰によって観測不能となる場合も生じる。図 1.4 に C 帯および X 帯におけるレーダ反射因子と減衰係数 (単位距離当たりの減衰量) の関係を示す。X 帯における減衰係数は C 帯に比べて大きいことが分かる。このように X 帯以上の周波数を用いて降雨を観測する場合には、降雨減衰補正を行う必要がある。単一レーダの観測値に対する降雨減衰補正に関する研究の歴史は古く、Hitschfeld と Bordan [21] は、減衰係数とレーダ反射因子 Z の関係を仮定し、距離方向の観測値の系列を用いてレーダ近傍から補正值を算出する方法 (HB 法) を提案した。HB 法では、減衰量の推定にレーダ反射因子の観測値を用いているため、推定された減衰量も観測に含まれる誤差の影響を受ける。さらに、ある距離で算出した補正值を以遠の補正に用いるため、観測誤差の影響はレーダから遠いほど蓄積していく。そのため、減衰量の積算値 (PIA: Path-Integrated Attenuation) が大きくなる X 帯や Ku 帯では、レーダ遠方における解が不安定となる。減衰係数はレーダ反射因子に対して指

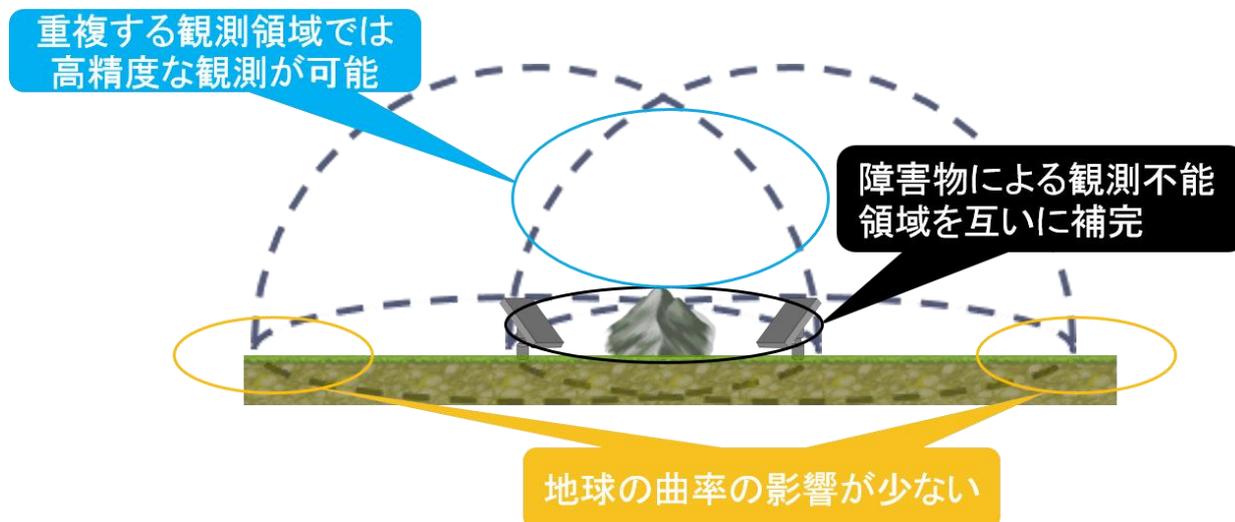


図 1.3 小型レーダネットワークの概略図

数関数的に増大するため、ガウス雑音とみなせる変動成分の影響は常に減衰量を過大評価する方向に作用する。そのため、レーダ遠方で不安定となった解はしばしば発散する。衛星搭載型の降雨レーダにおいては、地表面からの受信値を参照することで、発散を抑えるようなアルゴリズムが提案されている [22]。しかし、地上設置の気象レーダに対しては、大きな降雨減衰を補正できる効果的な手法は未だ開発されていない。そこで、PAWR ネットワークのような X 帯の小型レーダネットワークにおいて、複数台のレーダの観測値を統合的にデータ処理し、正確に降雨減衰を補正するアルゴリズムの開発が求められている。

次に、二重偏波レーダネットワークにおける問題点について述べる。X 帯二重偏波レーダネットワークが国内外で運用されていることは既に述べたが、運用中の X 帯二重偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正や降雨量推定に用いられているアルゴリズムは、前述の単体レーダに対する手法を用いており、ネットワーク観測の特徴や利点を活かしたデータ処理手法は未だ開発されていない。また、X 帯における二重偏波観測では、後方散乱位相差による影響が避けられない。そのため、レーダネットワークを利用して高精度に後方散乱位相差を除去するアルゴリズムの開発が求められている。

また、気象レーダの高分解能化は、転送および処理すべきデータ量の肥大化を招く。小型レーダを複数台用いたネットワークの実用化に当たっては、データを一括して管理・処理するメインサーバが必要となり、各レーダサイトからサーバにデータ転送する必要がある。先に述べた通り、気象レーダシステムは迅速に観測情報を公開することが求められており、システムとしては観測に必要な時間内にデータ転送、処理、出

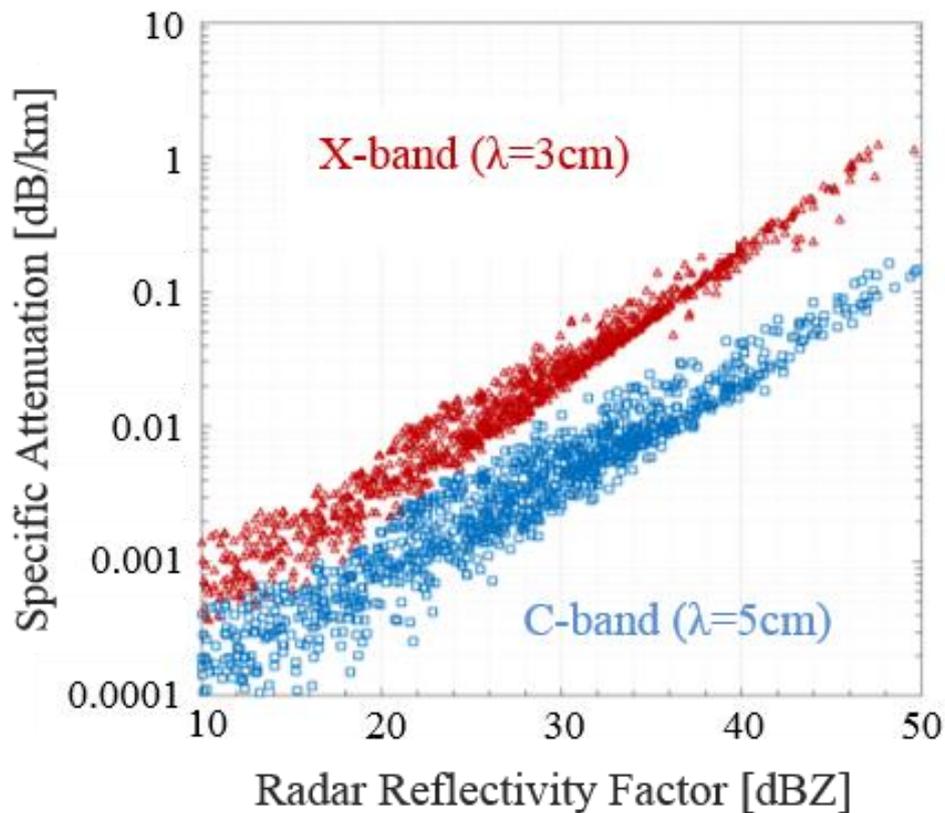


図 1.4 減衰係数とレーダ反射因子の関係
(赤 : X 帯 青 : C 帯)

力までを終えることが理想である。各レーダがデータを取得する速度がいかに高速だとしても、レーダネットワーク全体として、情報を公開するのに時間がかかっているは無意味である。ここでは、大容量データの転送時間がボトルネックとなる場合について考える。フェーズドアレイレーダは従来レーダに比べて高い時間分解能を有するため、メインサーバへのデータ転送時間を短縮する必要がある。現在稼働中の PAWR では、30 秒間に約 500MB のデータを取得しており、実用化のためには転送するデータ量を 10% 以下に抑えることが必要になる。

以上で示した問題を踏まえて、本研究における研究課題とその目的について述べる。まず、X 帯においては偏波観測機能の有無に関わらず降雨減衰は非常に大きな問題であり、ネットワーク観測という状況下において確率理論に基づく降雨減衰補正手法を開発する。また、小型高分解能レーダネットワークにおいて、データ転送に必要な時間がボトルネックとなることを回避するため、圧縮センシング技術を用いた気象レーダデータの圧縮手法についての検討を行う。気象用フェーズドアレイレーダネットワ

ークの運用に当たっての上記の研究課題を解決し、気象用フェーズドアレイレーダネットワークの実用化を推進することが本研究の目的である。

第2章では、単一偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発について述べる。降雨減衰の大きい X 帯では単体レーダに対する降雨減衰補正手法である Hirschfeld-Bordan 法 (HB 法)による補正結果は不安定となる。そこで、レーダネットワーク内の各ノードの HB 解と共にその理論的分散値を算出し、分散値の逆数による重み付け平均によって、確率的に尤もらしい補正解を算出する。提案手法による推定解の精度をシミュレーションと実観測データによって検証する。さらに、PAWR ネットワークの観測データに提案手法を適用した結果について述べる。本章の内容は、関連発表論文 A-1 に関連するものである。

第3章は二重偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法について説明する。二重偏波観測は水平・垂直偏波を用いることで降水の粒子情報を取得可能な観測手法であり、偏波間の位相差情報を用いた降雨量推定や減衰補正を高精度に行い得ることが知られている。一方で、X 帯における位相差観測においては後方散乱位相差の混入による位相パラメータ算出精度の低下が問題となる。提案手法では、ネットワーク観測という状況を活かし、後方散乱位相差を適切に除去した上で降雨減衰補正を行う。シミュレーションによる提案手法の精度検証を実施する。本章の内容は、関連発表論文 A-2 に関連するものである。

第4章では、気象レーダデータに対するデータ圧縮手法について検討する。高分解能レーダネットワークでは、データ一括処理を実行するサーバへのデータ転送がボトルネックとなる可能性がある。本研究では、気象エコーの空間的相関性と、データの特徴に応じたアルゴリズムの調整が容易に行えるという利点を有する圧縮センシング技術の融通性の高さに着目し、気象レーダデータに対する圧縮センシングによるデータ圧縮手法の検討を行う。本研究グループで開発した PAWR と Ku 帯広帯域レーダ (Ku-band BBR)の観測データに対して圧縮および再構成を行い、その精度を検証する。本章の内容は、関連発表論文 B-1 に関連するものである。

最後に、第5章では本論文で得られた結果をまとめた上で、本研究の結論について述べる。

2章 単一偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発

2.1. 緒言

本章では、現在運用中の X 帯 PAWR ネットワークに適用可能な降雨減衰補正手法について検討する。PAWR は水平偏波のみによる単一偏波観測を行っており、観測によって取得されるパラメータは降雨減衰の影響を受けるため、レーダ単体のデータから補正を行うことは困難である。そこで、ネットワーク観測という状況下において、複数レーダの観測情報から確率的に尤もらしい補正解を算出するアルゴリズムを開発した。2.2 節では、気象レーダにおける降雨減衰のメカニズム、ベイズの定理に基づいた提案手法の定式化と処理手順について述べる。2.3 節では、S 帯レーダの観測データに基づいた X 帯におけるシミュレーションによって、提案手法の精度評価を行なった結果を示す。2.4 節では、CASA が 2011 年まで運用していた二重偏波レーダネットワークの一つである IP-1 レーダネットワークの観測データに提案手法を適用し、既存の二重偏波レーダで用いられている減衰補正手法の適用結果と比較することにより、提案手法の精度検証を行なった結果について述べる。2.5 節では、提案手法を PAWR ネットワークの観測データに適用した結果を示す。

2.2. 単一偏波レーダネットワークにおける確率的降雨減衰補正

2.2.1. 単一偏波観測における降雨減衰

本節では提案手法の説明に先立って、単一偏波観測における降雨減衰のメカニズムと単体レーダに対する降雨減衰補正の従来手法について述べる。

レーダによって送信された電磁波は降水のある大気中に分布する雨粒による散乱および吸収の影響を受ける。レーダによって観測されるレーダ反射因子 Z_m [dBZ] は、降雨減衰および観測雑音を含んだ形で次式によって表される。

$$Z_m(r) = Z(r) - 2 \int_0^r k(s) ds + n_z(r) \quad (2.1)$$

ここで、 $Z(r)$ [dBZ] は距離 r [km] における真のレーダ反射因子、 $k(r)$ [dB/km] は減衰係数、 n_z は観測されるレーダ反射因子に含まれる雑音成分をそれぞれ表す。レーダ反射因子は観測体積における降雨の強さを表す指標となる。レーダ反射因子とレーダの受信電力値 Pr の関係は次式で表される [23]。

$$Pr(r) = \frac{CZ_m(r)}{r^2} \quad (2.2)$$

ここで、 C は各レーダ固有の定数を表し、アンテナゲインや送信電力、ビーム幅などによって定まる。 Pr は、観測体積内に含まれる雨滴によって後方に散乱された電磁波の電力の総和を表し、距離の2乗に反比例する。そのため、 Pr に r の2乗を乗じ、 C を除することによって、距離 r におけるレーダ反射因子を求めることができる。

各観測レンジにおける k の値は、DSD を用いて次式で定義される [24]。

$$k(r) = \log e \cdot 10^4 \int_D \sigma_{ext}(r, D) N(r, D) dD \quad (2.2)$$

ここで、 σ_{ext} [m^2] は消散断面積であり、周波数に依存する値である。 $N(r, D)$ [$\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$] は単位体積に含まれる雨滴の数密度関数である DSD を表し、 D [mm] は雨滴の粒径である。各粒径毎の雨滴の消散断面積 σ_{ext} に $N(r, D)$ を乗じて積分することにより、各観測レンジの減衰係数を計算することができる。線形スケールにおけるレーダ反射因子 ζ [$\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$] は次式で定義される。

$$\zeta(r) = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int_D \sigma_b(r, D) N(r, D) dD \quad (2.3)$$

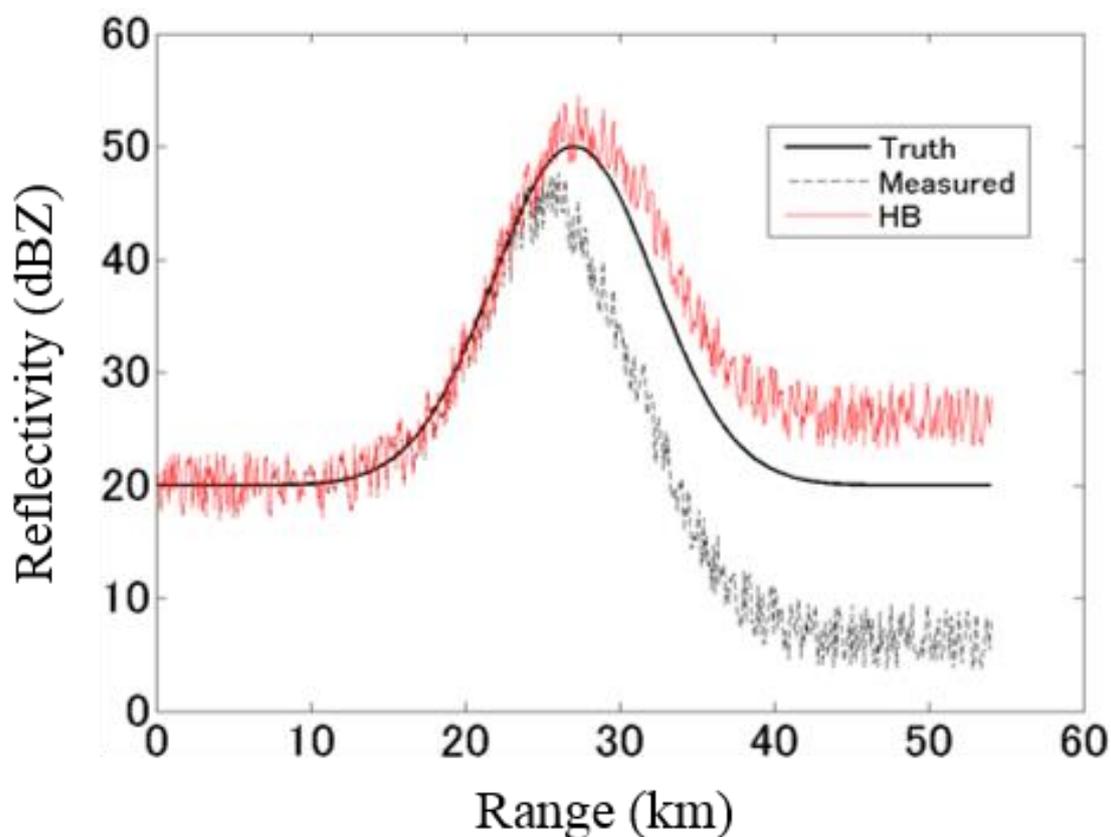


図 2.1 X 帯における HB 法のシミュレーション結果
(黒実線：真値 黒破線：観測値 赤実線：HB 解)

ここで、 $\zeta=10^{0.1Z}$ と表すことができ、 $\sigma_b(r, D)$ [m^2] は後方散乱断面積を表す。 λ [m] は波長、 K は水の誘電因子で、水の複素屈折率 m を用いて次式で表される。

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (2.4)$$

k と同様、各粒径毎に算出される雨滴の後方散乱断面積 σ_b に $N(r, D)$ を乗じて積分することにより、レーダ反射因子を計算することができる。降水中を伝搬する電磁波は経路上の散乱と吸収による電力減衰の影響を受ける [24]。

ところで、 ζ [$\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$] と Z [dBZ] との関係式は、

$$Z = 10 \log_{10} \zeta \quad (2.5)$$

であるから、(2.1)式において $n_z(r)=0$ の場合には真値 ζ と観測値 ζ_m の関係は次式で表される。

$$\zeta_m(r) = \zeta(r) \exp[-0.2 \ln(10) \int_0^r k(s) ds] \quad (2.6)$$

単体レーダにおける最も基本的な降雨減衰補正手法の一つである HB (Hitschfeld - Bordan)法 [21]では、(2.6)式を ζ についての微分方程式として考える。このとき HB 解は、

$$\zeta_{HB}(r) = \zeta_m(r) \left[1 - \frac{\ln 10}{5} \beta S(r) \right]^{-1/\beta} \quad (2.7)$$

と表される。ここで、 $S(r)$ は次式で与えられる。

$$S(r) = \int_0^r \alpha \zeta_m^\beta(s) ds \quad (2.8)$$

α と β はレーダの送信周波数に依存する定数である。 $S(r)$ には、観測値 ζ_m に含まれる変動成分が距離毎に蓄積していく。そのため、HB 解は真値に比べて過大に計算される傾向にあり、特に強い降雨によって減衰が大きくなる場合には、レーダ遠方で推定解が発散する [25]。図 2.1 に X 帯における HB 法の一次元シミュレーション結果の一例を示す。距離 20~35 [km]付近に最大 50dBZ のレーダ反射因子を持つ降水コアが存在する場合を想定しており、観測値 (黒点線)が真値 (黒実線)を大きく下回っていることが分かる。これはレーダで観測する値が経路上の降雨によって減衰しているためである。一方 HB 解 (赤実線)は距離 25km 付近以遠では真値よりも大きな値となっており、HB 法による推定が過大となっていることが分かる。井口ら (1994) [22]は、Ku 帯 (周波数：13.8 [GHz])を用いた熱帯降雨観測衛星搭載降水レーダ (TRMM-PR： Tropical Rainfall Measuring Mission – Precipitation Radar)による観測結果に対して、地表面エコーを参照することによって PIA を調節し、HB 解の発散を抑えるアルゴリズム (SRT： Surface Reference Technique)を開発した。

2.2.2. 提案手法

本節では提案手法の概要について述べる．まず，確率理論に基づいた提案手法の定式化について述べる．次に，提案手法の処理手順について説明する．

ベイズの定理に基づき，ある観測点におけるレーダ反射因子の真値 Z と観測量 Z_m に関する確率分布の関係を表すと，

$$p(Z^{(l,n)}(r) | Z_m^{(l,n)}(r)) p(Z_m^{(l,n)}(r)) = p(Z_m^{(l,n)}(r) | Z^{(l,n)}(r)) p(Z^{(l,n)}(r)) \quad (2.9)$$

となる．ここで， $p(x)$ は独立変数 x の確率密度関数， $p(x|y)$ は y が与えられた下での x の確率， l はレーダネットワーク内のノード番号， n は方位角方向の番号をそれぞれ表す．レーダによる観測をした後では， $p(Z^{(l,n)}(r))$ ， $p(Z^{(l,n)}(r) | Z_m^{(l,n)}(r))$ ，

$p(Z_m^{(l,n)}(r) | Z^{(l,n)}(r))$ ， $p(Z_m^{(l,n)}(r))$ はそれぞれ，事前分布，事後分布，尤度関数，正規化定数と見なせるので [26]，(2.9)式は次のように書き換えることができる．

$$p(Z^{(l,n)}(r) | Z_m^{(l,n)}(r)) \propto p(Z_m^{(l,n)}(r) | Z^{(l,n)}(r)) p(Z^{(l,n)}(r)) \quad (2.10)$$

ところで，観測値に含まれる雑音 n_Z が正規分布に従うと仮定すると，尤度関数は

$$p(Z_m^{(l,n)}(r) | Z^{(l,n)}(r)) = N\left(Z_m^{(l,n)}(r) \middle| Z^{(l,n)}(r) - \int_0^r k(s) ds, \sigma_Z^{(l,n)}(r)\right) \quad (2.11)$$

と書く事ができる．ここで， $N(x | m, s)$ は平均 m ，分散 s の正規分布を表し， σ_Z はレーダ反射因子の観測値の標準偏差を表す．レーダ単体による観測において，尤度関数が最大になる解は **HB** 解である．なぜなら， Z と Z_{HB} の関係は (2.7)式によるのみ拘束されるからである．各レーダにおける **HB** 解が平均 Z の正規分布に従うと仮定すると，

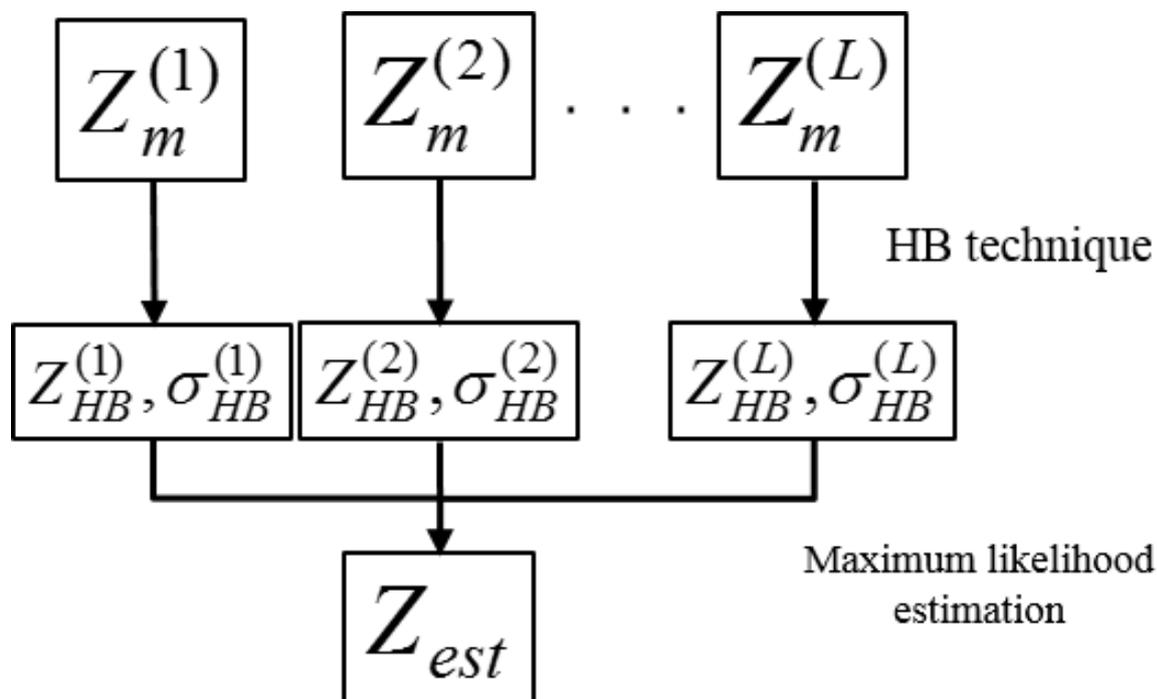


図 2.2 提案する降雨減衰補正アルゴリズムの処理手順

$$\begin{aligned}
 & p(Z_{HB}^{(l,n)}(r) | Z^{(l,n)}(r)) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{HB}^{(l,n)}(r))^2}} \exp\left(-\frac{(Z_{HB}^{(l,n)}(r) - Z^{(l,n)}(r))^2}{2(\sigma_{HB}^{(l,n)}(r))^2}\right) \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

となる．ここで、 σ_{HB}^2 は HB 解の分散値を表す． σ_{HB}^2 の導出に関しては後述する．以上の議論から、レーダネットワークにおける対数尤度関数を用いてコスト関数を次式で定義する．

$$\begin{aligned}
 J[Z_e(r)] &= -\ln p(Z_e | Z_{HB}^{(1,n_1)}(r), Z_{HB}^{(2,n_2)}(r), \dots, Z_{HB}^{(L,n_L)}(r)) \\
 &\propto \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \frac{[Z_{HB}^{(l,n_l)}(r) - Z_e(r)]^2}{(\sigma_{HB}^{(l,n)}(r))^2} \rightarrow \min \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

ここで、 L はレーダネットワークを構成するレーダの数である．上式で表されるコスト関数を Z_e で微分した関数を最小化することによって確率的に尤もらしい解が算

出される。そして **HB** 解が正規分布に従うという仮定の下では、コスト関数を最小化する解は、 Z_{HB} の重み付き平均の形で次式によって算出することができる。

$$Z_{est}(r) = \frac{\sum_{l=1}^L w_l Z_{HB}^{(l,n)}(r)}{\sum_{l=1}^L w_l(r)} \quad (2.14)$$

$$w_l = \frac{1}{(\sigma_{HB}^{(l)})^2} \quad (2.15)$$

L はレーダネットワークを構成するレーダ数を表す。提案手法の処理手順の概略を図 2.2 で示す。提案手法において、**HB** 解の分散値 σ_{HB}^2 は各レーダノードで算出される **HB** 解の非信頼度と見なされており、その逆数を各 **HB** 解に対する重み係数として用いる。 Z_{HB} は観測値 Z_m と観測点までの **PIA** の和で表される。

$$Z_{HB}(r_n) = Z_m(r_n) + 2 \sum_{m=0}^{n-1} k(m) \cdot \Delta r \quad (2.16)$$

Δr は距離方向のサンプリング間隔である。減衰係数 k は定数 α , β を用いて、

$$k(r) = \alpha Z^\beta(r) \quad (2.17)$$

と近似する。(2.17)式を (2.16)式に代入すると、

$$Z_{HB}(r_n) = Z_m(r_n) + 2\Delta r \alpha \sum_{m=0}^{n-1} Z_{HB}^\beta(r_m) \quad (2.18)$$

となる。**HB** 解の分散 σ_{HB}^2 は(2.18)式の分散を計算することによって、

$$\sigma_{HB}^2(r_n) = \text{Var}(Z_{HB}(r_n)) = \text{Var}\left(Z_m(r_n) + 2\Delta r \alpha \sum_{m=0}^{n-1} Z_{HB}^\beta(r_m)\right) \quad (2.19)$$

と表される. $\text{Var}(x)$ は変数 x の分散値を表す. ここで, 距離 r_n における Z_m と距離 r_0 から r_{n-1} における Z_{HB} の値の間に相関が無いと仮定すると, (2.19)式は次のように変形することができる.

$$\text{Var}(Z_{HB}(r_n)) = \text{Var}(Z_m(r_n)) + \sum_{m=0}^{n-1} \text{Var}(2\Delta r \alpha Z_{HB}^\beta(r_m)) \quad (2.20)$$

提案手法においては, 観測点から雨滴による反射が生じる点に向かう経路上でのデータの無相関性を仮定しているが, 実際は観測値および HB 解は距離方向の相関性を有している. この仮定の妥当性については 2.3.3 節で論じる. このような仮定の下では, 距離 r_n におけるレーダ反射因子の分散値は距離 r_{n-1} におけるレーダ反射因子の分散値に置き換えることができる. なぜなら, 各距離における観測値の理論的分散値は, 送信波長, パルスの繰り返し時間, パルス数といったレーダの観測パラメータのみによって決定されるためである. さらに, (2.20)式において総和の項内の $m=n-1$ の項を総和項の外に出すことによって, 次式に示す変形を行うことができる.

$$\begin{aligned} \text{Var}(Z_{HB}(r_n)) &= \text{Var}(Z_m(r_{n-1})) + \sum_{m=0}^{n-2} \text{Var}(2\Delta r \alpha Z_{HB}^\beta(r_m)) + \text{Var}(2\Delta r \alpha Z_{HB}^\beta(r_{n-1})) \\ &= \text{Var}(Z_{HB}(r_{n-1})) + \text{Var}(2\Delta r \alpha Z_{HB}^\beta(r_{n-1})) \end{aligned} \quad (2.21)$$

線形近似を用いて右辺の第2項を微分すると [27],

$$\text{Var}(2\Delta r \alpha Z_{HB}^\beta(r_{n-1})) = 2^2 (\Delta r)^2 \alpha^2 \beta Z_{HB}^{\beta-1}(r_{n-1}) \cdot \text{Var}(Z_{HB}(r_{n-1})) \quad (2.22)$$

(2.22)式を(2.21)式に代入することによって, 次式が導かれる. よって, 距離 r_n における HB 解の分散値を距離 r_{n-1} における HB 解で表すことができる.

$$\text{Var}(Z_{HB}(r_n)) = \text{Var}(Z_{HB}(r_{n-1})) \left\{ 1 + 2^2 (\Delta r)^2 \alpha^2 \beta Z_{HB}^{\beta-1}(r_{n-1}) \right\} \quad (2.23)$$

さらに, レーダの最近接距離 (r_0) までは減衰の影響を受けないものと仮定し, HB 解の分散値を観測値の分散値と同一とする.

$$\text{Var}(Z_{HB}(r_0)) = \text{Var}(Z_m(r_0)) \quad (2.24)$$

(2.24)式を初期値として、(2.23)式を逐次的に計算することにより、各距離におけるHB解の分散値を計算することができる。実際にはレーダ付近の強い降雨やアンテナを保護するレドームの影響によって最近接距離よりも手前で減衰が生じる可能性がある。この仮定の妥当性については2.3.3節で論じる。

2.3. シミュレーションによる検証

2.3.1. シミュレーションモデルの作成

提案した減衰補正アルゴリズムを評価するため、シミュレーションで求めた観測値に対して提案アルゴリズムを適用し、真値との比較による精度検証を実施した。本節で紹介するシミュレーションでは、S帯レーダの観測値が降雨減衰の影響をほとんど受けないという事実を利用する。また、Chandrasekar と Lim [28]は、降雨観測によって取得されるS帯とX帯の水平レーダ反射因子 Z_h とレーダ反射因子差 Z_{dr} には対応関係が存在することを明らかにしている。半径数百 km の広範囲を観測対象とするS帯の二重偏波レーダ (e.g., NWS WSR-88DP network)による観測がアメリカ国内で行われており、その内、テキサス州で観測を行っているレーダ (i.e., KFWS radar)で取得したデータを今回のシミュレーションに使用する。また、先行研究におけるDSDを使用した散乱シミュレーションによって取得されたS帯とX帯のレーダパラメータの関係式を本シミュレーションに用いる。X帯における水平レーダ反射因子 $Z_{h,X}$ とその減衰係数 $\alpha_{h,X}$ は、S帯における水平レーダ反射因子 $Z_{h,S}$ とレーダ反射因子差 $Z_{dr,S}$ によって、次式を用いて算出される。

$$Z_{h,X} = a_1 + b_1 Z_{h,S}^{c_1} + d_1 Z_{dr,S}^{e_1} \quad (2.25)$$

$$\alpha_{h,X} = \begin{cases} 1.3 \times 10^{-4} \times \zeta_{h,S}^{0.7632} & ; Z_{h,S} < 25 \text{dBZ} \\ 0.1098 \times 10^{-4} \times (Z_{dr,S} / 4.4452)^{-0.66184} \times e^{Z_{h,S} / 4.452} & ; 25 \text{dBZ} < Z_{h,S} < 40 \text{dBZ} \\ 0.51135 \times 10^{-11} \times 0.63^{Z_{dr,S}} \times Z_{h,S}^{10.514} & ; 40 \text{dBZ} < Z_{h,S} < 50 \text{dBZ} \\ 0.1921 \times 10^{-1} \times e^{(-0.4828 Z_{dr,S} + 0.21352 \times 10^{-2} \times Z_{h,S}^2)} & ; Z_{h,S} > 50 \text{dBZ} \end{cases} \quad (2.26)$$

ここで, $\zeta_{h,S}$ および $\zeta_{dr,S}$ はそれぞれ線形スケールで表した S 帯の水平レーダ反射因子とレーダ反射因子差を表す. (2.25)式における係数値を表 2.1 に示す. (2.25)式で計算される値に減衰の影響は含まれて居ない. 一方, X 帯において降水内の伝搬に起因する電力減衰の影響を加味したレーダ反射因子の観測値 $Z'_{h,X}$ は次式で表される.

$$Z'_{h,X} = Z_{h,X} - 2 \int_{r_0}^r \alpha_{h,X}(s) ds \quad (2.27)$$

本節で行う提案手法に対する評価においては, 2 台のレーダによる観測を想定した一次元シミュレーションによる検証を行う. 一次元シミュレーションでは, 二次元または三次元によるシミュレーションと異なり, 各レーダ間の観測体積の違いによる影響などを無視できる. 図 2.3 に S 帯レーダの観測で取得された観測値と算出された X 帯における値を示す. S 帯と X 帯の真のレーダ反射因子を比較すると, その差は 1~2dB となる. 次節で紹介する一次元シミュレーションでは, 図 2.3 に示す 2 次元データを方位角毎に独立した 720 (S 帯データの方位角分解能は 0.5 度)の別ケースとして扱う. 60km の直線上に分布する降雨に対し, 60km 離れた 2 台のレーダ (レーダ 1 およびレーダ 2) が互いの方向を向かい合って観測している状況を想定し, レーダ 1 は図 2.3 における原点 (0,0) に位置し, レーダ 2 は反対側, すなわち半径 60km の円周上の各点に位置すると仮定する. それぞれのレーダで観測した一次元データに対して, 提案する降雨減衰補正手法を適用し, その精度を評価する. 次節では, 代表例として 2 つの一次元データへの適用結果を示す. ケース 1 は図 2.3 における方位角 350.17°, ケース 2 は方位角 307.69°のデータをそれぞれ使用した.

表 2.1 (2.25)式における各係数値

Parameters					Condition
a_1	b_1	c_1	d_1	e_1	
-0.19	1	1	1	0	$Z_{h,S} < 25$ dBZ
0	0.768	1.056	2.813	0.553	$Z_{h,S} \geq 25$ dBZ

2.3.2. シミュレーション結果

本節では、2.3.1 節で説明したシミュレーションモデルを用いた一次元シミュレーションの結果について述べる。提案手法が効果的に機能するケース (Case 1), 提案手法による補正が失敗するケース (Case 2), そして最後にシミュレーションの統計的な評価について述べる。

(a) Case 1

一次元シミュレーションによって求めたレーダ反射因子の一例を図 2.4 に示す。レーダ 1 は距離 0km, レーダ 2 は距離 60km に位置している。図 2.4 (a)および (b)に各々のレーダにおける真値, 観測値, HB 解, HB 解の分散値を示す。降水は距離 13km から 57km に分布しており, レーダ 1 の HB 解は距離 35km 付近から推定値が過大となり, 最遠方では真値に比べて 15dB 程度過大に推定されている。一方, レーダ 2 の HB 解は距離 40km 付近より過大となり, レーダ遠方では値が発散している。両レーダの HB 解の過大推定がレーダ遠方になるにつれて大きくなると共に, HB 解の分散値も大きくなっている。提案手法の適用結果 (赤線)を図 2.4 (c)に示す。シミュレーション結果 (点線)は真値 (実線)とほぼ一致していることが分かる。このとき HB 解の分散値の合成値は次式で表される。

$$(\sigma_{HB,int})^2 = \frac{\sum_{l=1}^2 w_l \sigma_{HB}^{(l)}}{\sum_{l=1}^2 w_l} = \frac{2(\sigma_{HB}^{(1)})^2 (\sigma_{HB}^{(2)})^2}{(\sigma_{HB}^{(1)})^2 + (\sigma_{HB}^{(2)})^2} \quad (2.28)$$

分散値の合成値もレーダ反射因子の推定値と同様に 重み付け平均によって計算され, レーダ反射因子の推定値と同様にその値が小さくなっていることが分かる。

(b) Case 2

図 2.5 には別の事例に対するレーダ反射因子のシミュレーション結果を示しており, 提案手法による減衰補正が正しく行われなかった事例である。図 2.5 (a)および (b)では, PIA が大きすぎるために, 両レーダの HB 解は距離 30km から 40km の領域で共に発散している。HB 解と同じく, レーダ 1 の分散値は距離 30km 付近から徐々に増大しはじめ, レーダ 2 の分散値も距離 45km 付近から増大している。分散値 σ_{HB}^2 が HB 解自体の信頼度と関連していることを顕著に示す結果と言える。

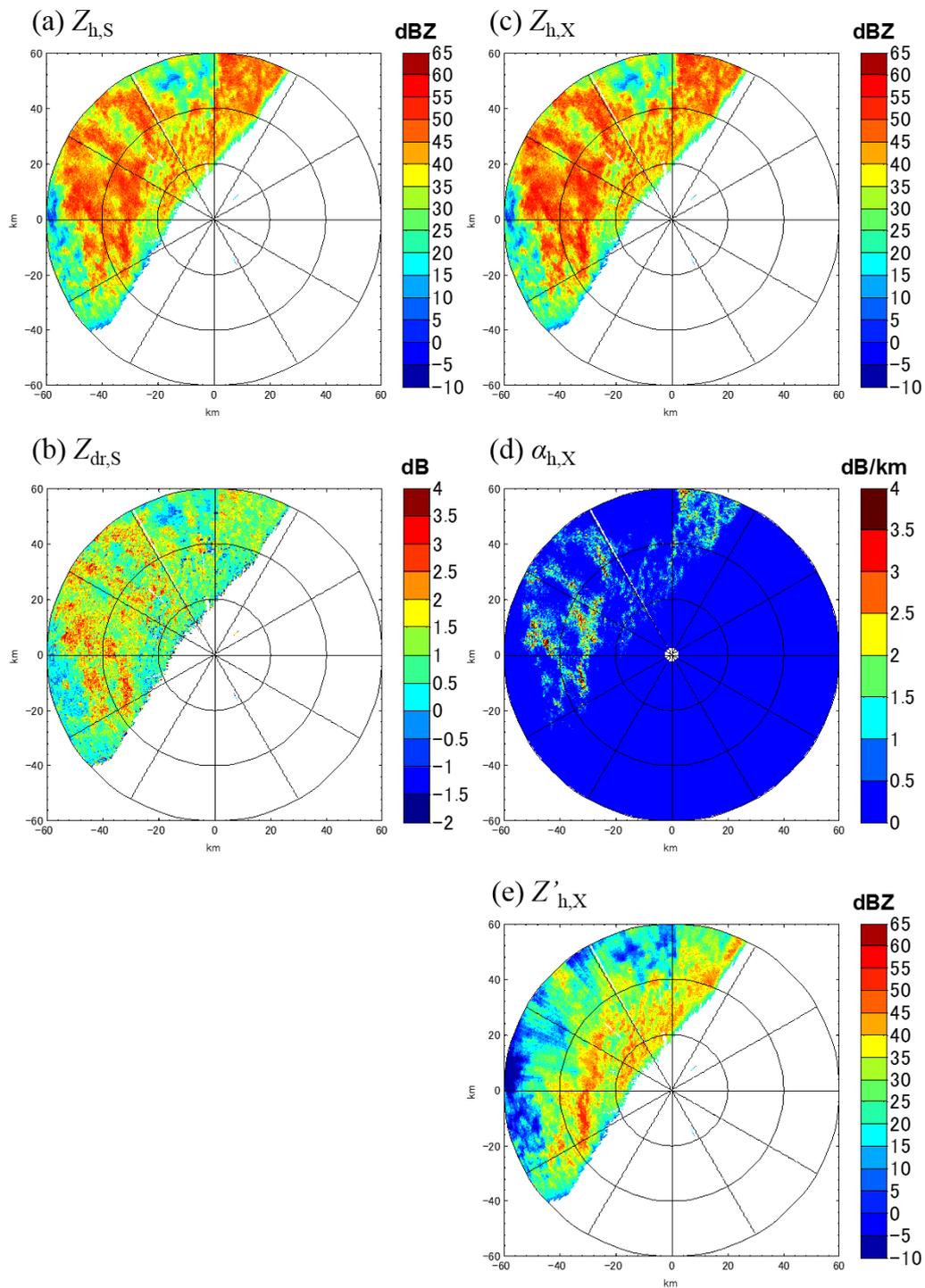


図 2.3 S 帯レーダによる観測値と X 帯におけるシミュレーション値
 (a) S 帯水平レーダ反射因子 (観測値), (b) S 帯レーダ反射因子差 (観測値),
 (c) X 帯レーダ反射因子 (計算値), (d) X 帯減衰係数 (計算値),
 (e) 観測される X 帯レーダ反射因子 (計算値)

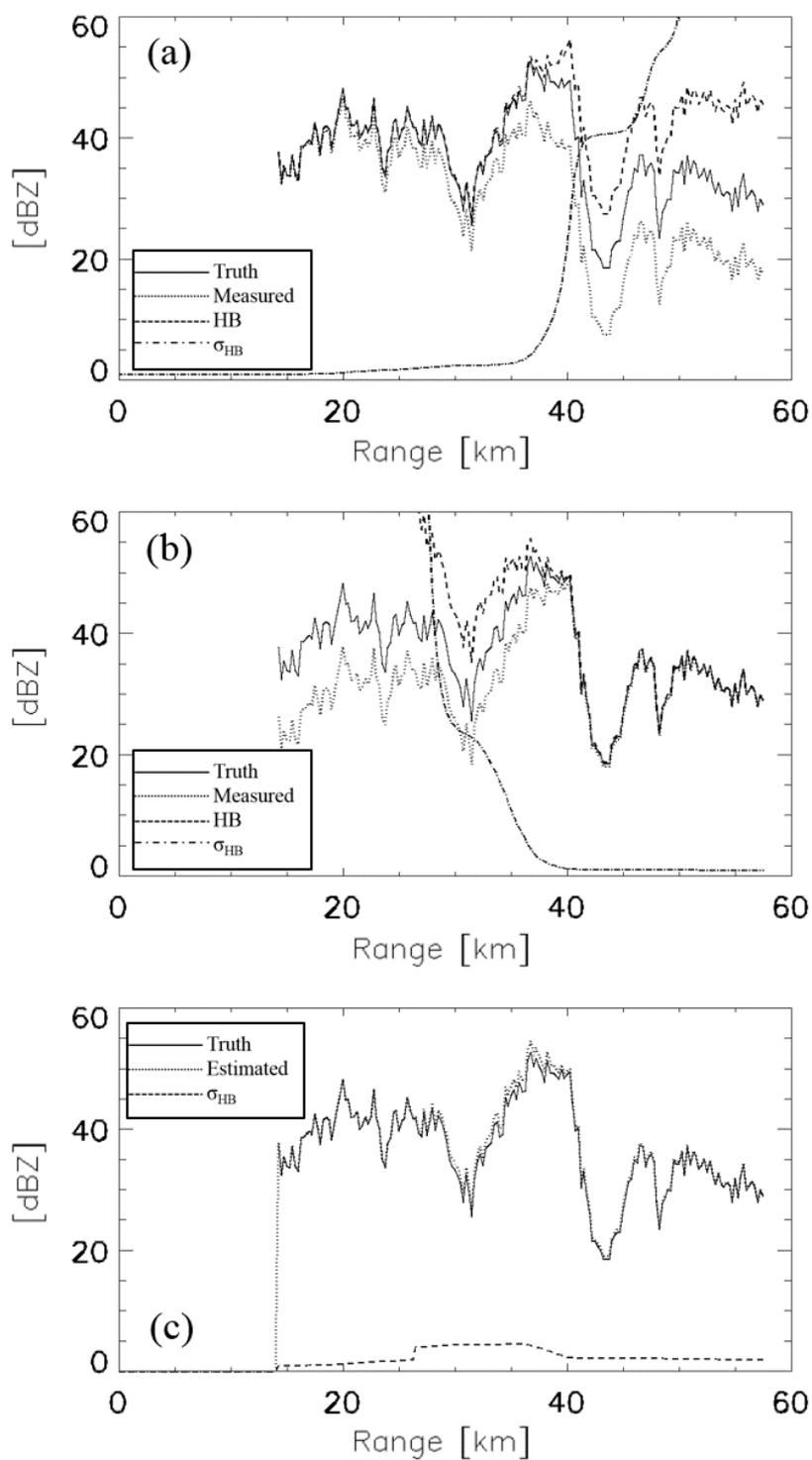


図 2.4 シミュレーション結果・事例 1 (方位角 350.17°)
(a) レーダ 1, (b) レーダ 2, (c) 合成結果

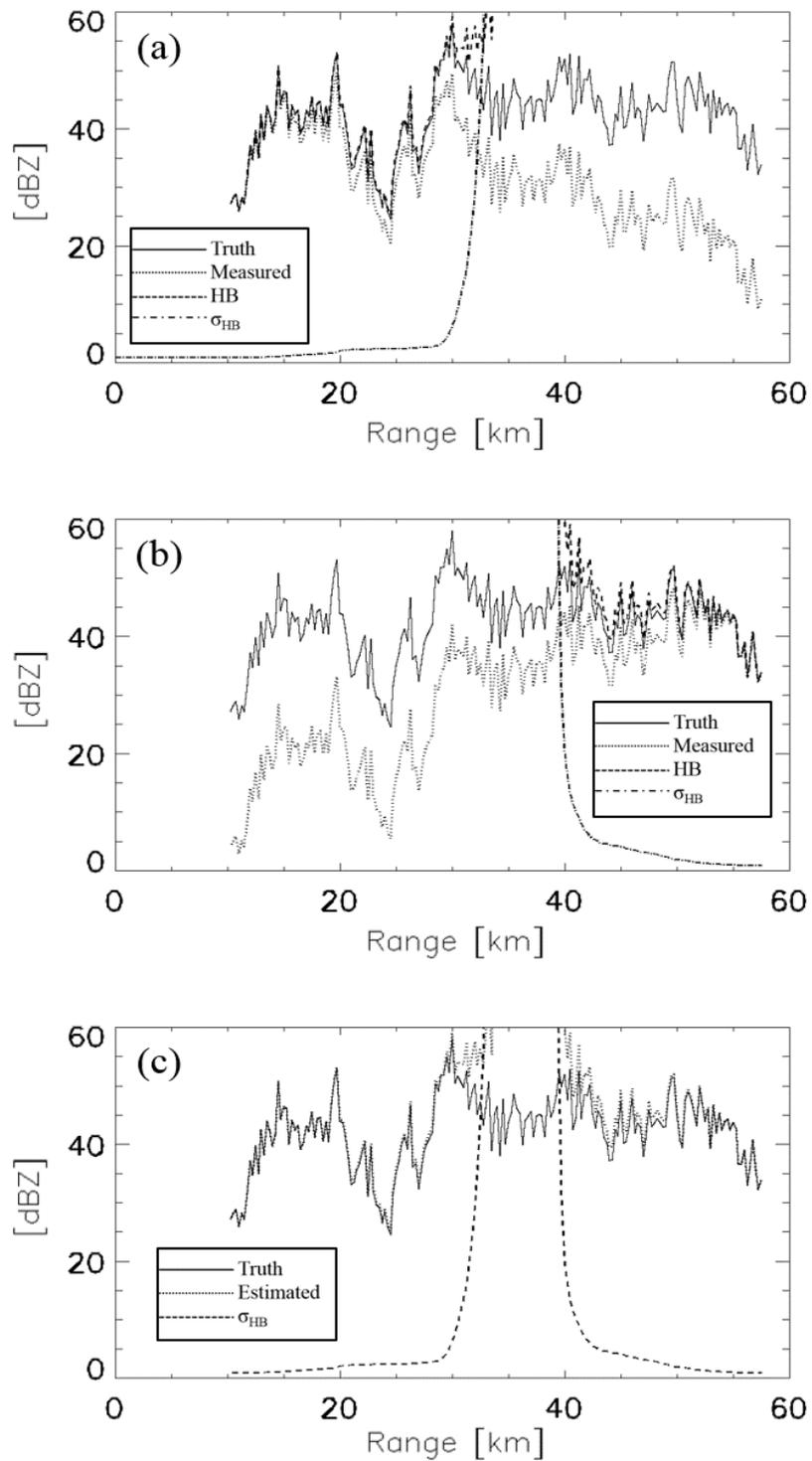


図 2.5 シミュレーション結果・事例 2 (307.69°)
(a) レーダ 1, (b) レーダ 2, (c) 合成結果

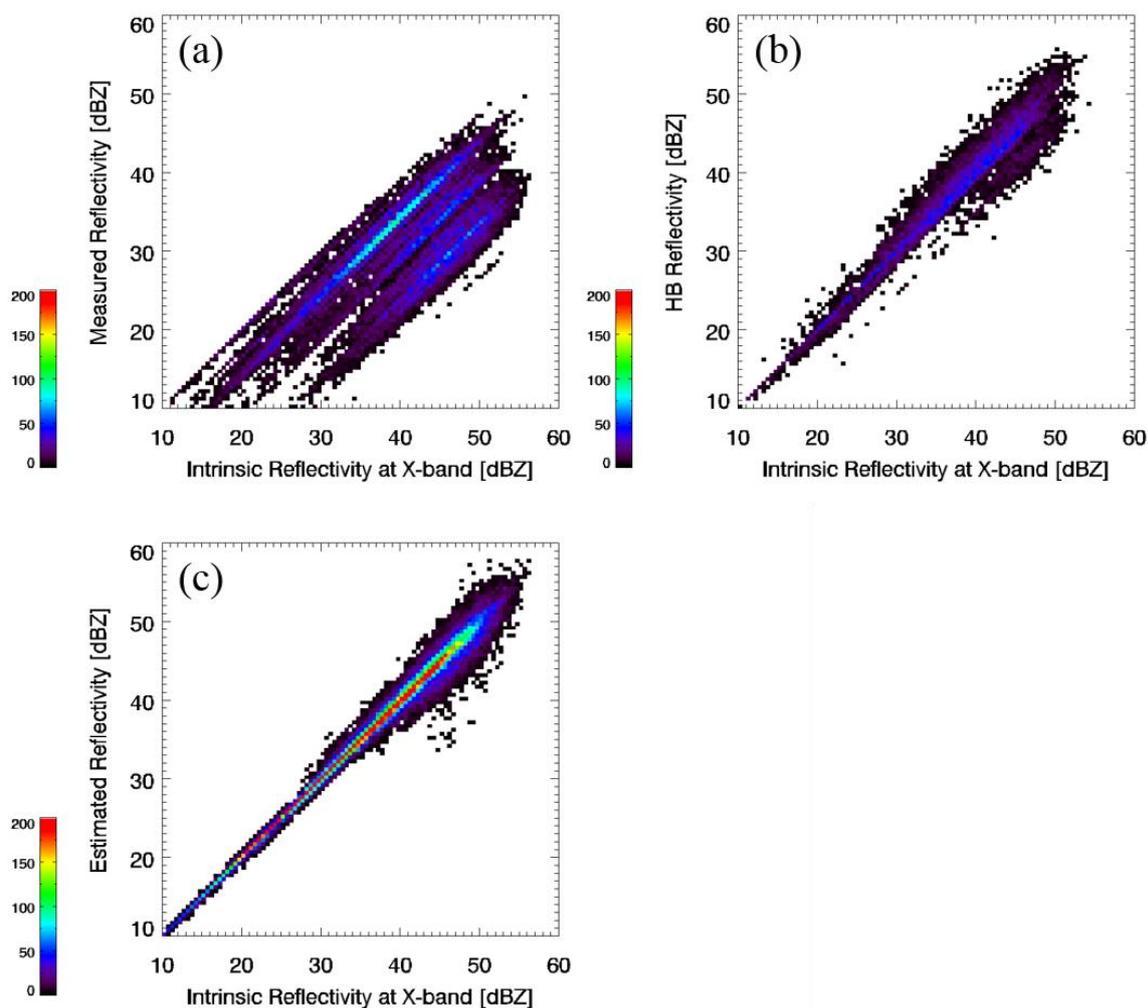


図 2.6 シミュレーションに対するレーダ反射因子の統計的評価
 (a) 観測値, (b) HB 法による減衰補正結果, (c) 提案手法による
 減衰補正結果

(c) 統計的評価

本節では 720 のシミュレーション事例に対する統計的評価について述べる．図 2.6 に，レーダ反射因子の (a)観測値，(b) HB 解，(c)提案手法による真値と推定値を比較した結果を示す．HB 解は両レーダの HB 解の単純平均である．ここで，色は $0.5\text{dBZ} \times 0.5\text{dBZ}$ で分割された各ピクセルに含まれる点数を表す．観測値は降雨減衰の影響を受けて $10\sim 15\text{dB}$ の負のバイアスを持つ．一方，提案手法による推定結果はバイアス誤差が 0.6dB に抑えられている．しかし，HB 解の単純平均ではバイアス誤

差こそ抑えられているものの、図 2.6 (b)に表示されている点数が少なくなっており、これは HB 解が発散して無効値 (NaN)となる等、その推定値が不安定であるためである。提案手法ではより安定的な補正が行えており、従来手法に対する優位性を示すことができた。

また、提案手法の推定誤差と HB 解の分散値の合成値 $(\sigma_{HB,ini})^2$ の関係性を評価するため、 $(\sigma_{HB,ini})^2$ の値と推定された点数、バイアス誤差、分散誤差を表 2.2 にまとめた。 $(\sigma_{HB,ini})^2$ の幅を「10 未満」から「5 未満」、「3 未満」、そして「2 未満」と狭めていくと、推定点数は少なくなり、バイアス誤差や分散誤差も徐々に小さくなった。推定値の分散値である $(\sigma_{HB,ini})^2$ を用いることで、推定値の精度をある程度見積もることができると言える。

2.3.3. 考察

提案手法では定式化や推定アルゴリズムの簡略化のために様々な仮定を用いている。さらに提案手法の実装においては、いくつかの考慮すべき事項が存在する。本節では、そのような仮定および考慮すべき事項について、推定精度への影響の観点から考察する。

(a) 提案手法におけるレーダ較正誤差の影響

気象レーダにおける較正の誤差は、観測されるレーダ反射因子の大きさ、すなわち、降水強度推定の定量性にも少なからず影響を与える。本節では、レーダ較正誤差が提案手法の推定結果に与える影響を評価する。一次元シミュレーションにおける 2 台のレーダでのレーダ反射因子の観測値にそれぞれ -2dB から +2dB のバイアスを与え、その場合の提案手法による推定解の誤差を算出した。表 2.3 に各ケースの平均誤差、標準偏差、推定点数を示す。レーダシステムの較正誤差は提案手法による推

表 2.2 提案手法の推定誤差と分散値の関係

	$\sigma_{HB}^2 < 10$	$\sigma_{HB}^2 < 5$	$\sigma_{HB}^2 < 3$	$\sigma_{HB}^2 < 2$
Number of valid points	46979	42111	35318	26336
Bias (dBZ)	0.39	0.24	0.22	0.21
Standard error of estimated reflectivity (dBZ)	1.5	1.2	1.1	1.0

定値に影響し、正の較正誤差、つまり実際に観測されるべき値よりも大きな値を観測している場合には HB 解がより発散しやすくなり、そのために推定点数が減少する。提案する降雨減衰補正手法は 2dB 以下の較正誤差の場合でもそれほど大きな影響を受けることなく機能することが分かる。

(b) HB 解のレンジ相関性による影響

提案手法の定式化、特に、(2.19) ~ (2.21)式において、距離方向に対する HB 解には相関性がないという仮定を用いている。しかしながら、レーダの受信信号は高い距離方向の相関性を有することが知られている [27][29]。前述の一次元シミュレーションにおける HB 解の平均自己相関関数を図 2.7 に示す。1レンジ間 (約 260m)、5レンジ間 (約 1.3km)、10レンジ間 (約 2.6km)における相関は各々、-19.7dB、-29.4dB、そして -35.7dB であった。隣接する観測レンジ間における相関は約-20dB であることから、提案手法におけるレンジ相関は無視しても問題無いと言える。

表 2.3 2 台のレーダの観測値にバイアスを与えた場合に提案手法を適用したレーダ反射因子の推定結果

Radar1 bias (dBZ)	Radar2 bias (dBZ)	Mean error of estimated reflectivity (dBZ)	Standard error of estimated reflectivity (dBZ)	Number of valid points
0	0	0.39	1.5	46979
1	0	0.99	1.2	43334
2	0	1.62	1.3	41451
1	1	1.72	1.2	41215
-1	0	-1.18	1.4	48386
1	-1	1.00	1.7	45706
2	-2	2.10	1.8	44575

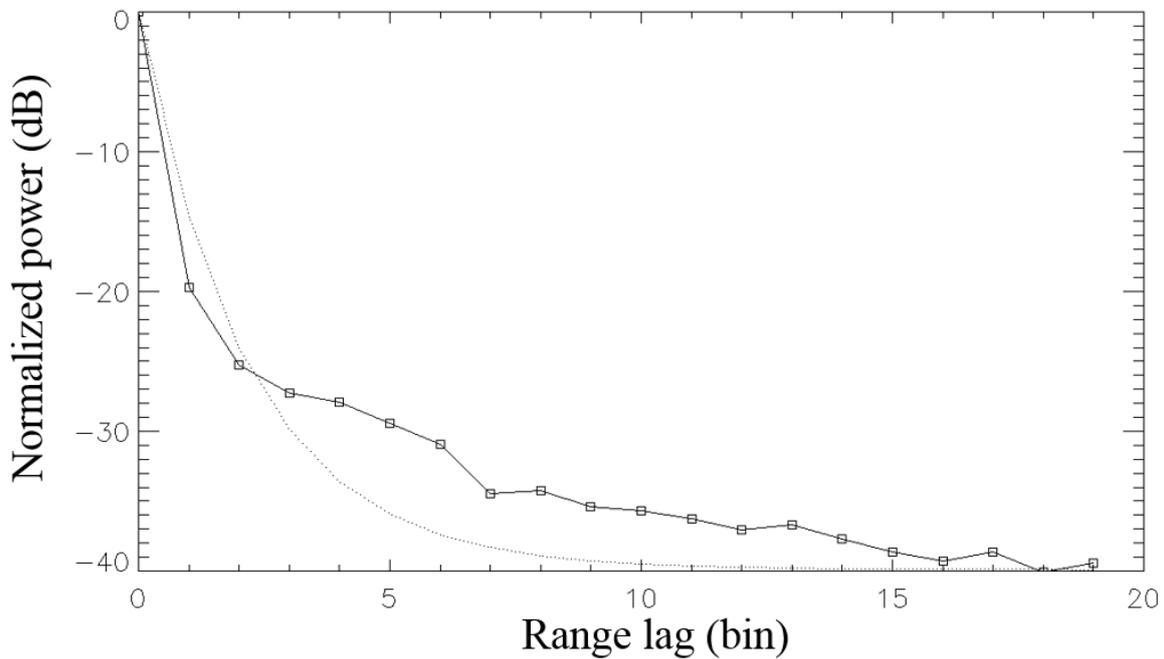


図 2.7 HB 解の距離方向に対する相関
(四角付き実線：HB 解の平均自己相関関数 点線：近似曲線)

(c) k - Z 関係の変化による影響

(2.2), (2.3) 式に示すとおり, レーダ反射因子と減衰係数の関係 (k - Z 関係)は降雨の種類や状況, すなわち, DSD によって変化する. 特に, (2.16)式における係数 α の値は場所や時間によって刻々と変動する. 一方, 提案手法においては, HB 法を適用する際には固定された α および β の値を用いており, 算出された全ての HB 解は k - Z 関係を固定したことによる誤差を含んでいる. HB 法では, この誤差が距離方向に蓄積し, 遠方における解が不安定 (発散)となることが問題となる. しかし提案手法においては, より誤差の少ない HB 解に大きな重みを与えることにより, 係数値を固定したことによる影響は抑えられている.

(d) レドームによる減衰の影響

X 帯ではレーダ直上より降り注ぐ強い降水に対するレドームによる減衰が問題となる. (2.7)式で示される HB 解において, レーダ自体とレーダに最も近い観測レンジの間で生じる減衰 (例えばレドームによる減衰)は厳密には考慮されていない. し

かしながら提案手法は、複数のレーダから取得されたレーダ反射因子の観測値を用いて推定値を求める手法であり、あるレーダの観測値が近くに存在する強い降雨域の影響を受けて激しく減衰していたとしても、別のレーダでそれを上手く補完することができ、レドームによる減衰の影響も低減することが可能である。

2.4. 実観測データを用いた精度検証

本節では、CASA が運用していた IP-1 レーダネットワークの 2007 年 5 月 8 日 7 時 16 分 (UTC) のデータに提案手法を適用し、実観測データを用いた精度検証を行う。本レーダネットワークはアメリカのオクラホマ州で運用されており、KSAO, KCYR, KRSP, KLWE の 4 台の X 帯二重偏波レーダで構成される。図 2.8 に各レーダの位置および観測範囲を示す。各レーダは二重偏波観測機能を有しており、水平レーダ反射因子 Z_h だけではなく、レーダ反射因子差 Z_{dr} 、偏波間位相差 Φ_{dp} 、そして、偏波間相関係数 ρ_{hv} などの偏波パラメータを取得可能である。約 24km 離れた KRSP レーダと KSAO レーダを結ぶ直線上で観測された Z_h に対して適用した。提案手法による推定値と Φ_{dp} によって減衰補正した結果を比較し、提案手法の妥当性を検証した。 Φ_{dp} は水平方向に対して扁平に変形した雨粒によって生じる偏波間の位相差情報を含んでおり、降雨による電力減衰の影響を受けないため、 Φ_{dp} を用いた減衰補正手法は k - Z 関係を用いた減衰補正手法よりも安定かつ高精度であることが知られている [7]。図 2.9 にその比較結果を示す。距離 0km に KRSP レーダ、距離 24km に KSAO レーダが位置しており、2 台のレーダ間の一次元データに提案手法と Φ_{dp} による補正手法を適用した。40dBZ を超えるような強い降水が距離 1 ~ 10km に存在しており、距離 6km 付近では 50dBZ にも達する。図 2.9 (a) には KRSP レーダの観測値と HB 解を示しており、その差は最大で 20dB となっている。一方、図 2.9 (b) に示す KSAO レーダによる観測値と HB 解にはそれほど大きな差はなく、それらの差は最大でも 2dB 程度である。HB 解が不安定であるために、2 台のレーダで推定された減衰量には、このような差異が生じていると考えられる。他にも観測時刻の違いや方位角の差異による観測体積の違いを理由として挙げることもできる。こういった様々な要因が考えられるが、図 2.9 (c) における提案手法の推定値と Φ_{dp} による補正值は良く一致している。距離 12~16km では 2 つの推定値の間に 5~10dB の差が生じている。これは KRSP レーダが降雨減衰による影響のためにレーダ反射因子を観測することができず、KSAO レーダによる観測値のみで推定を行なっているためである。

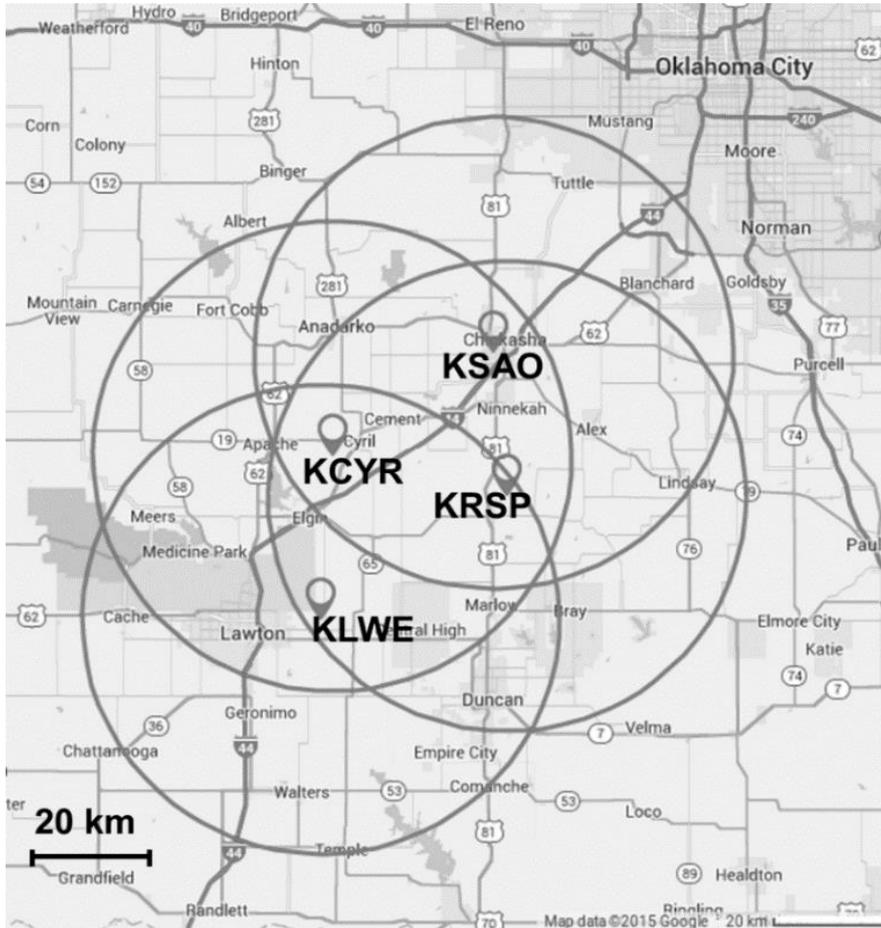


図 2.8 CASA IP-1 レーダネットワークの構成

3 時間分のレーダ反射因子の観測データに提案手法を適用した結果と、 Φ_{dp} による補正手法による結果との相関を図 2.10 に示す。0.5dBZ \times 0.5dBZ のピクセルに含まれる点数を色で表しており、 Φ_{dp} による補正手法に対する提案手法のバイアスは 1.0dB、標準偏差は 3.8dB となっている。 Φ_{dp} によるレーダ反射因子に対する減衰補正は信頼できる手法として知られており、今回の結果から提案手法による補正がそれと遜色無い精度を有すると結論付けられる。すなわち、ネットワーク観測という状況下においては、単一偏波観測によって取得された観測値のみを用いた降雨減衰補正が、二重偏波パラメータを用いた降雨減衰補正に匹敵する精度を有することを示すことができた。

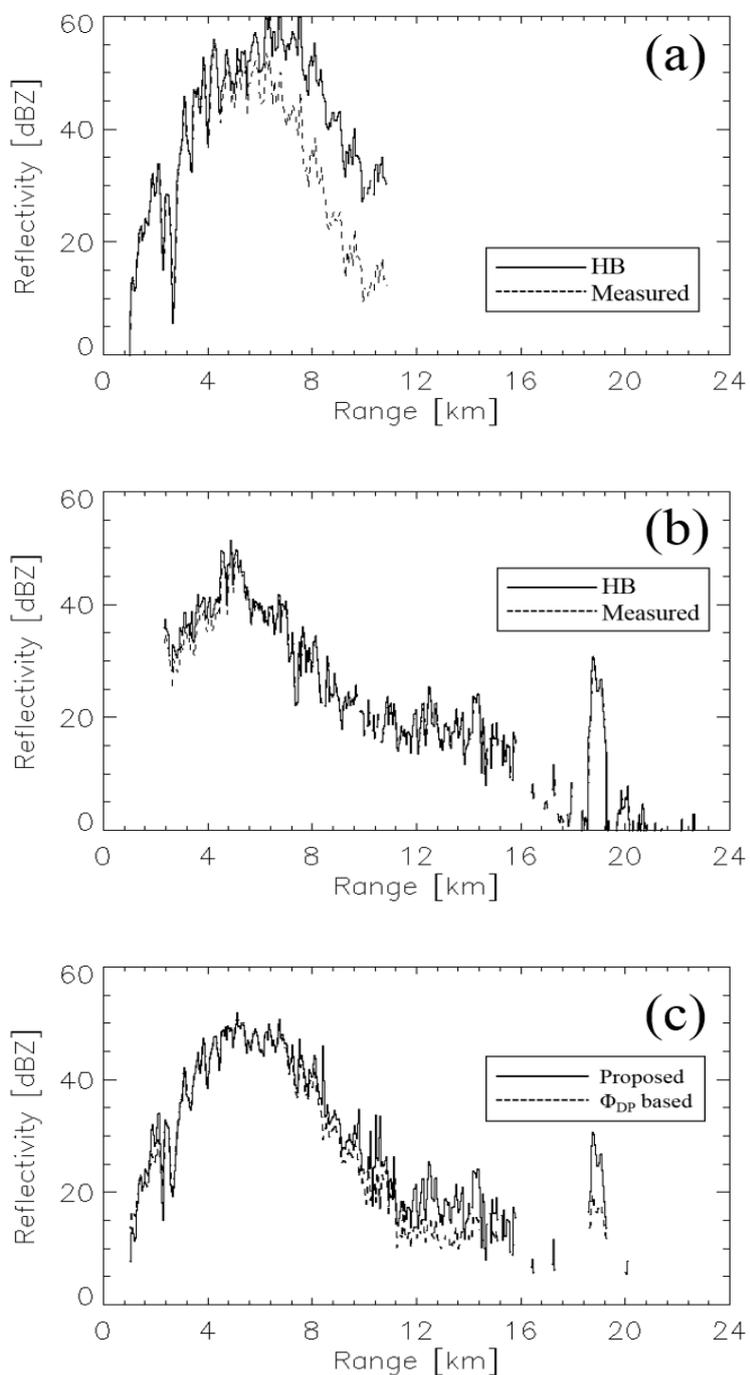


図 2.9 CASA IP-1 レーダネットワークで取得したデータに提案手法を適用した結果
(a) KRSP レーダ, (b) KSAO レーダ (実線: HB 解, 破線: 観測されたレーダ反射因子),
(c) 提案手法の適用結果 (実線: 提案手法による推定値 破線: Φ_{dp} を用いて減衰補正した結果)

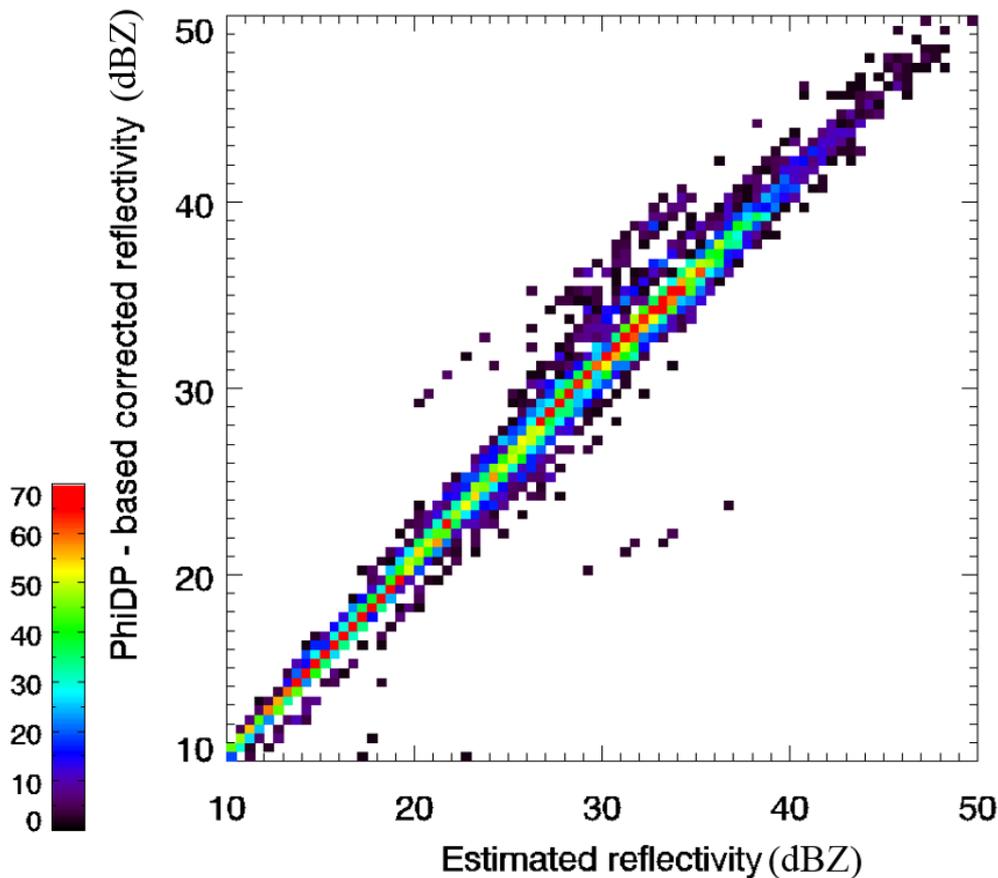


図 2.10 提案手法と偏波パラメータを用いた補正手法による結果の相関

2.5.気象用フェーズドアレイレーダネットワークへの適用

2.3節および2.4節において、シミュレーションによって算出したデータと実観測データに提案手法を適用し、その精度検証を行った。その結果、提案手法は十分な精度と安定性を有することが示された。本節では、提案した降雨減衰補正手法を阪神エリアで運用している PAWR ネットワークの実観測データに適用した結果を紹介する。

現在運用中の PAWR ネットワークおよびネットワークを構成する2台の PAWR の位置関係を図 1.2 に示す。Suita PAWR は大阪府吹田市の大阪大学吹田キャンパス工学研究科の建物の屋上に設置されており、2013年夏より観測を行っている。Kobe

PAWR は兵庫県神戸市の情報通信研究機構未来 ICT 研究所に設置されており，2014 年より観測を行っている．両レーダ間の距離は 53.84km である．2 台の PAWR は半径 60km を 30 秒で観測するモードで運用しており，レーダ間の重複観測領域内において，提案する降雨減衰補正手法を適用する．

図 2.11 に 2016 年 8 月 29 日 10 時 55 分 (JST) の PAWR ネットワークの観測データに提案手法を適用した結果を示す．(a) および (b) の観測値を見ると，PAWR ネットワークの重複観測領域だけではなく，Kobe PAWR の西側に降雨域が広く分布していることが分かる．一方，重複観測領域内の北側において，Kobe PAWR では降雨が観測されているが，Suita PAWR では降雨が観測されていない領域が存在する．これは Suita PAWR の北方が山で囲まれているため，観測不能領域が生じているからである．さらに，Suita PAWR の西南西方向に観測値が途切れている方位が存在する．これは Suita PAWR が設置されている西南西方向に高いビルが隣接しており，低仰角においてはその方向を観測できないためである．次に，各 PAWR の HB 解では，降雨減衰が補正され，全体的にレーダ反射因子の値が観測値に比べて大きくなっている．ところが (d) に示す Suita PAWR の HB 解では，レーダ西方で明らかに値が不安定となっている領域 (赤色のレーダ反射因子が連続的に分布する領域) が存在しており，これは HB 法による補正の過程で，レーダ近傍からの雑音による減衰量推定誤差の蓄積によって解が不安定となった結果であると考えられる．(e) に示す合成結果では，Suita PAWR が抱える観測不能領域では Kobe PAWR によって値が補完されている．また，Suita PAWR の HB 解が不安定となっていた領域では，Suita PAWR の HB 解の重みを下げることによって，安定的に降雨減衰補正が成されていることが分かる．

2.6. 結言

本章では，単一偏波レーダネットワークにおける確率理論に基づいた新たな降雨減衰補正手法を提案し，シミュレーションおよび実観測データを用いて補正精度の検証を行った．また，提案手法を気象用フェーズドアレイレーダネットワークに適用し，その有効性を示した．

X 帯においては，降雨減衰による降水強度の過小評価が問題となっており，降雨減衰補正の従来手法である HB 法では，解が不安定になるという問題が生じる．提案手法では，各レーダにおける HB 法による補正解の重み付け平均を計算することによって，ベイズの定理における尤度関数を最大化することで，確率的に尤もらしい解を算出する．HB 法は単体レーダのある方向のデータに対して，減衰についての微分方程式の解を計算する決定論的手法であるが，その解は X 帯において不安定となる．特に，レーダから見て強い降雨域の裏側においては，HB 解は真値に比べて過

大に推定される傾向がある。提案手法では、HB 解の理論的な分散値を HB 解の信頼度の指標と見なし、分散値の逆数を重み付け平均の係数として使用することにより、安定的な推定結果が得られた。

提案手法の精度と安定性を検証するために、S 帯の実観測データに基づいた X 帯における一次元シミュレーションを行った。シミュレーションに先立ち、先行研究 [28] によって提案された大量の DSD の観測データに基づいた関係式を使用し、S 帯レーダで観測されたレーダ反射因子とレーダ反射因子差を X 帯におけるレーダ反射因子と減衰係数に変換した。提案手法による補正解の誤差は平均誤差 0.6dB、分散誤差 3.0dB となった。推定された点数による比較から、HB 解に比べてより安定的に減衰補正を行い得ることを示した。

単一偏波のみによる観測を行う気象用フェーズドアレイレーダネットワークに適用可能な新たな降雨減衰補正手法を提案し、提案手法は二重偏波観測で用いられている位相差による降雨減衰補正手法と同等の精度を有することを証明した。気象用フェーズドアレイレーダネットワークにおいては、単体のフェーズドアレイレーダが有する高速スキャニング性能に加え、提案手法を用いた高精度な降雨減衰補正が可能となり、従来型レーダよりも迅速に捉えた上空の降水コアの定量的評価を行うことができる。

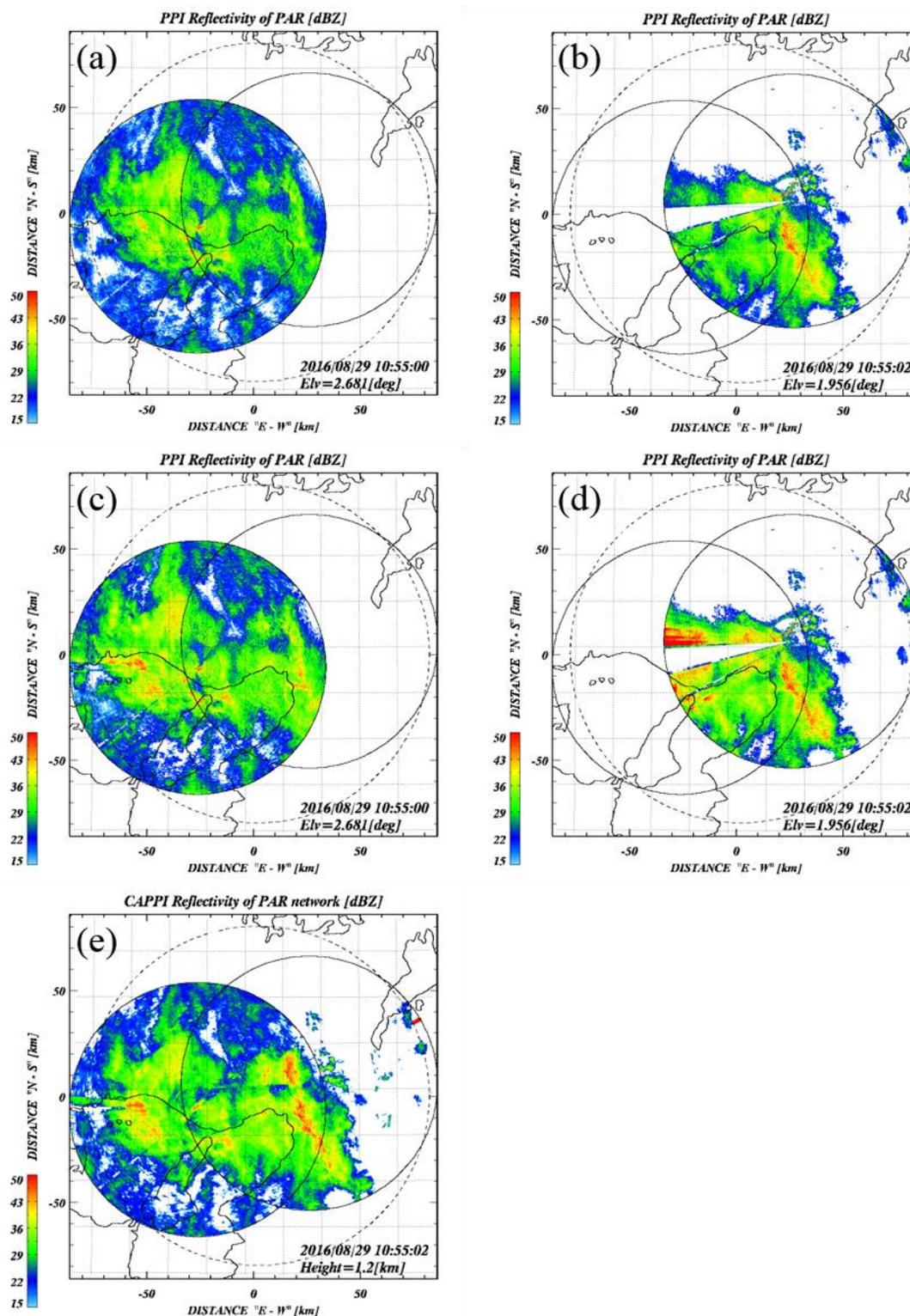


図 2.11 PAWR ネットワークに提案手法を適用した結果 (a) KobePAWR 観測値, (b) SuitaPAWR 観測値, (c) KobePAWR の HB 解, (d) SuitaPAWR の HB 解, (e) 合成結果

3章 二重偏波レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発

3.1. 緒言

二重偏波レーダは単一偏波レーダに比べてより多くの有意なデータを取得し、より高精度な降雨減衰や降雨量推定が可能である。しかし二重偏波レーダネットワークに適用可能なデータ合成手法は未だ確立されておらず、ネットワーク観測という好状況を活かしきれていないのが実情である。そこで、二重偏波レーダネットワークに適用可能な確率的に最適な減衰補正の解を算出するアルゴリズムを提案し、シミュレーションによる評価を行った。3.2節では、二重偏波観測と二重偏波レーダにおける降雨減衰のメカニズム、ベイズの定理に基づいた提案手法の定式化と処理手順について述べる。3.3節では、シミュレーションによる精度検証の結果を示す。3.4節では結論を述べる。

3.2. 二重偏波レーダネットワークにおける確率論的降雨減衰補正

3.2.1. 二重偏波観測

本節では二重偏波観測によって取得される観測パラメータについて示し、偏波間位相差の観測原理について紹介する。

二重偏波レーダは、大気中に水平偏波と垂直偏波の電磁波を送信し、受信した電磁波の偏波間の電力差や位相差を観測パラメータとして取得する。二重偏波パラメータであるレーダ反射因子差 Z_{dr} と比偏波間位相差 K_{dp} は DSD を表す $N(D,r)$ と両偏波に対する散乱振幅を用いて次のように表わされる [13]。

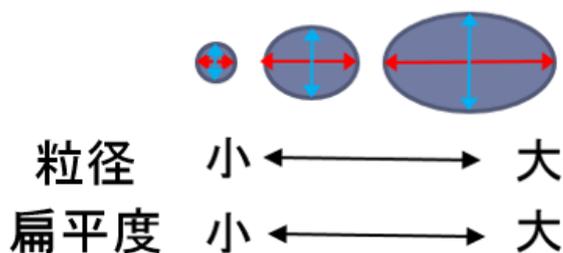


図 3.1 大気中を落下する雨滴の扁平

$$Z_{dr}(r) = 10 \log_{10} \zeta_{dr}(r) = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_D |s_{hh}(D)|^2 N(D,r) dD}{\int_D |s_{vv}(D)|^2 N(D,r) dD} \right) \quad (3.1)$$

$$K_{dp}(r) = \frac{180\lambda}{\pi} \int_D \text{Re}[f_{hh}(D) - f_{vv}(D)] N(D,r) dD \quad (3.2)$$

ここで、 ζ_{dr} は線形スケールにおけるレーダ反射因子差を表す。 λ は波長、 D は雨滴の粒径、 s_{hh} , s_{vv} は各々水平偏波の後方散乱振幅、垂直偏波の後方散乱振幅、 f_{hh} , f_{vv} は各々水平偏波の前方散乱振幅、垂直偏波の前方散乱振幅を表し、 $\text{Re}[*]$ は[*]内の複素数の実数成分を表す。大気中を落下する雨滴は空気抵抗によって扁平に変形しており、雨滴の粒径が大きくなるに従って扁平の度合いも大きくなる。図 3.1 にその様子を模式的に示す。扁平に変形した雨滴に対する水平、垂直偏波間の各散乱振幅には差が生じ、観測される各パラメータにその差が表れる。

(3.2)式で表される K_{dp} を用いた、レーダ反射因子や Z_{dr} の降雨減衰補正、降雨量推定は高精度であることが知られており、 K_{dp} は非常に有用なパラメータである。 K_{dp} は単位距離当たりの位相差を表しており、直接観測される値ではなく、偏波間位相差を微分することで求められる。

$$K_{dp}(r) = \frac{1}{2} \frac{d}{dr} \phi_{dp}(r) \quad (3.3)$$

ここで、 ϕ_{dp} は偏波間位相差を表し、観測点までの前方散乱による位相差の往復分を積算した値となる。ところが、実際に観測される偏波間位相差には、観測点における後方散乱による位相差 δ_{co} が含まれる。図 3.2 に二重偏波観測における位相差測定の概略図を示す。距離 $r = n$ において観測される偏波間位相差 $\Psi_{dp}(r=n)$ は、距離 $r = n-1$

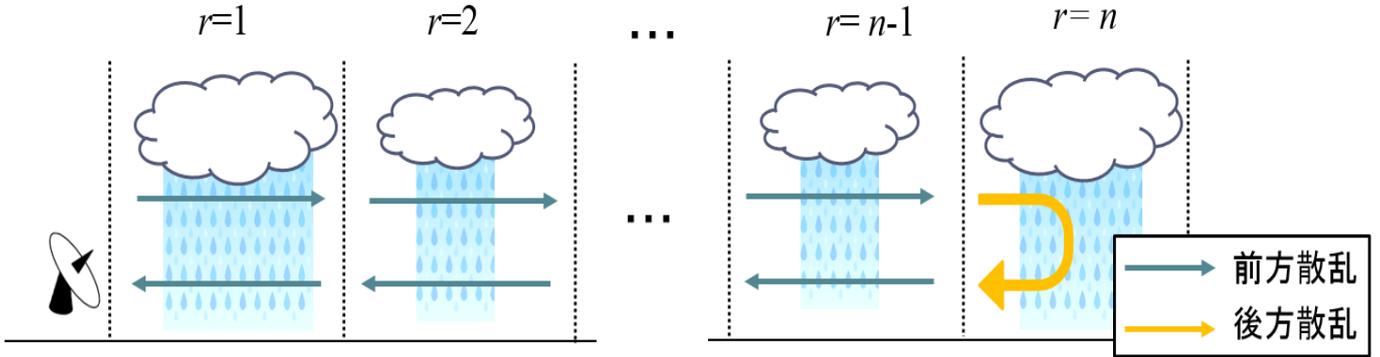


図 3.2 偏波間位相差観測の概略図

までの前方散乱の往復積算値 $\Phi_{dp}(r)$ と観測レンジ r における後方散乱位相差 $\delta_{co}(r)$ の和で表される。後方散乱の影響による位相シフト δ_{co} は次式で表わされる。

$$\delta_{co}(r) = \arg \left[\int_D N(D, r) |s_{hh}(D) s_{vv}(D)| e^{j[\delta_{vv}(r, D) - \delta_{hh}(r, D)]} dD \right] \quad (3.4)$$

ここで δ_{hh} および δ_{vv} は各々、水平偏波の電磁波の後方散乱位相、垂直偏波の後方散乱位相を表し、 $\arg[*]$ は偏角を表す。実際の観測によって取得される偏波間位相差 Ψ_{dp} は Φ_{dp} と δ_{co} の和として表される。

$$\Psi_{dp}(r) = \Phi_{dp}(r) + \delta_{co}(r) \quad (3.5)$$

降雨による散乱がレイリー散乱で近似できる S 帯や C 帯では、 δ_{co} の影響は無視できるが、ミー散乱となる X 帯では、 δ_{co} は数度程度の正の値となり、(3.3)式による K_{dp} 算出に影響を及ぼす。図 3.3 に X 帯におけるシミュレーションによって求めた Ψ_{dp} と Φ_{dp} のグラフを示す。レーダから離れるにつれて単調増加する Φ_{dp} に対して、観測値 Ψ_{dp} は正のバイアスを持つことが分かる。 K_{dp} の算出に際して δ_{co} の影響を除去するアルゴリズムは既に研究が進んでおり、Hubbert ら (1993) [14] は移動平均によるフィルタリング処理によって δ_{co} を除去するアルゴリズムを開発した。しかし移動平均の計算により、距離方向の分解能が犠牲となるため、観測されていたはずの降雨プロファイルの細かな変化の情報が失われるといった欠点を有する。また、Otto ら (2011) [15][30] は $\delta_{co} - Z_{dr}$ 関係と Z_{dr} の減衰係数である A_{dp} と K_{dp} の間に存在する関係に着目し、散

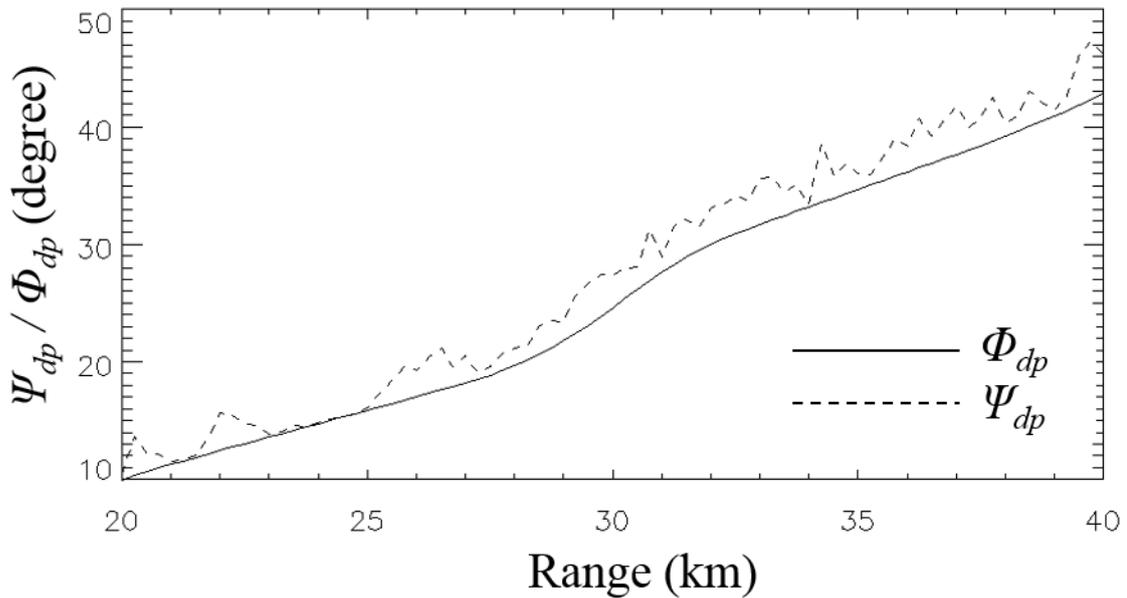


図 3.3 X 帯における偏波間位相差の観測シミュレーション
(実線：前方散乱による位相差 Φ_{dp} , 破線：観測される位相差 Ψ_{dp})

乱シミュレーションによって導出されたそれらの関係式を用いた再帰的アルゴリズムによって δ_{co} を除去し, Z_{dr} の減衰を補正する手法を開発した. A_{dp} は次式で定義される [31].

$$A_{dp}(r) = 20 \log_{10} e \cdot \lambda \int_D \text{Im}[f_{hh}(D) - f_{vv}(D)] N(D, r) dD \quad (3.6)$$

ここで $\text{Im}[*]$ は $[*]$ 内の複素数の虚数成分を表す. $\delta_{co} - Z_{dr}$ 関係と $A_{dp} - K_{dp}$ 関係は周波数帯によって異なっており, X 帯においては次に示す 2 式が用いられる [32][33].

$$\delta_{co}(r) = 0.632 \times Z_{dr}^{1.71}(r) \quad (3.7)$$

$$A_{dp}(r) = 0.044 \times K_{dp}(r) \quad (3.8)$$

上記 2 式は様々な降雨状況の観測データに基づいた代表値であり, 個々のケースに応じた最適な係数値を用いているわけではない. そのため, 推定解の精度に影響を与える可能性がある.

3.2.2. 提案手法

本節では、二重偏波観測で取得されるレーダ反射因子差の減衰と、その補正手法について述べる。

二重偏波レーダで実際に観測されるレーダ反射因子差 Z_{drm} と観測される偏波間位相差 Ψ_{dp} は観測雑音を含んでおり、次のように表すことができる。

$$Z_{drm}(r) = Z_{dr}(r) - 2 \int_r A_{dp}(r) dr + n_{Z_{dr}}(r) \quad (3.9)$$

$$\Psi_{dp}(r) = \Phi_{dp}(r) + \delta_{co}(r) + n_{\Psi_{dp}}(r) \quad (3.10)$$

ここで、 $n_{Z_{dr}}(r)$ と $n_{\Psi_{dp}}(r)$ は雑音成分であり、それぞれ Z_{drm} と Ψ_{dp} の統計的性質に対応したランダム変数である [13]。前方散乱による影響で生じる偏波間位相差 Φ_{dp} は K_{dp} の往復積算で表すことができる。

$$\Phi_{dp}(r) = 2 \int_r K_{dp}(r) dr \quad (3.11)$$

二重偏波レーダネットワーク観測の状況下において、ベイズの定理における尤度関数を最大化することで Z_{dr} のみならず、降雨状況に応じて最適な A_{dp} - K_{dp} 関係と δ_{co} - Z_{dr} 関係を導出する。

A_{dp} と K_{dp} の間に比例関係を仮定し、その係数を α (定数) とする。

$$A_{dp}(r) = \alpha K_{dp}(r) \quad (3.12)$$

また、 δ_{co} と Z_{dr} には強い相関関係が存在することが知られており、その関係を次式で表されると仮定する。

$$\delta_{co}(r) = a Z_{dr}^b(r) \quad (3.13)$$

ここで、 α , a , および b は DSD に依存する定数である。

提案手法におけるアルゴリズムの処理手順を図 3.4 に示す。 N 台の二重偏波レーダで構成されるネットワークを想定する。(3.12), (3.13)式に含まれる定数と Z_{dr} の初期

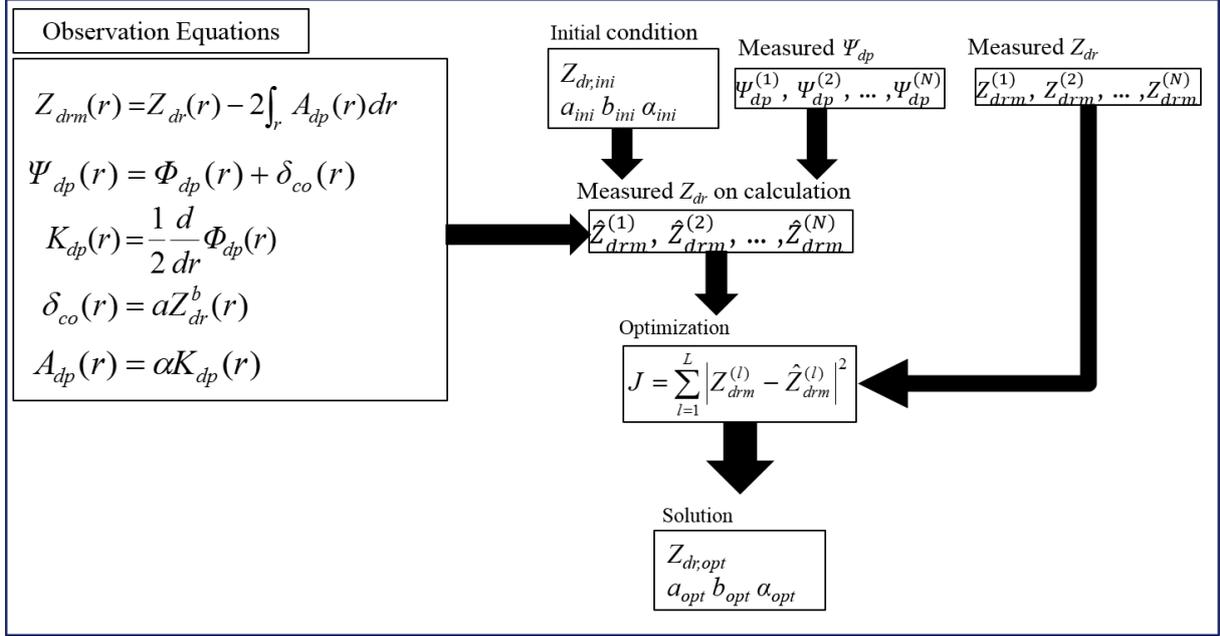


図 3.4 提案手法の処理手順の概要

値は、先行研究における散乱シミュレーションから得られた値とそれに基づく補正結果を使用する[15][33]。(3.9)式右辺第2項の積分を有限幅のサンプリング間隔 Δr 毎の和の形に書き換えると、 Z_{dr} の観測値 \hat{Z}_{drm} は次式で求められる。

$$\hat{Z}_{drm}^{(l)}(r_n) = Z_{dr}^{(l)}(r_n) - 2 \sum_{k=1}^n A_{dp}(r_k) \cdot \Delta r \quad (3.14)$$

ここで、 l はレーダネットワーク内におけるレーダ番号であり、同様にして、(3.11)式を代入した(3.10)式は次のように書き換えられる。

$$\psi_{dp}^{(l)}(r_n) = 2 \sum_{k=1}^n K_{dp}(r_k) \cdot \Delta r + \delta_{co}^{(l)}(r_n) \quad (3.15)$$

(3.12)式から(3.15)式より、次式が導出される。

$$\hat{Z}_{drm}^{(l)}(r_n) = Z_{dr}^{(l)}(r_n) - \alpha \left\{ \psi_{dp}^{(l)}(r_n) - a \left(Z_{dr}^{(l)}(r_n) \right)^b \right\} \quad (3.16)$$

各係数值および Z_{dr} の初期値, そして Ψ_{dp} を (3.16)式に代入することで, \hat{Z}_{drm} を求めることができる.

Z_{drm} のばらつきが正規分布に従うと仮定すると, l 番目のレーダにおける尤度関数は次のように書くことができる.

$$p \left(Z_{drm}^{(l)} \begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \right) = N \left(Z_{drm}^{(l)} \mid \hat{Z}_{drm}^{(l)}, \sigma_{Z_{dr}}^{(l)} \right) \quad (3.17)$$

ベイズの定理によると, l 番レーダにおける事後確率は次のように表現できる.

$$p \left(\begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \mid Z_{drm}^{(l)} \right) \propto p \left(Z_{drm}^{(l)} \begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \right) p \left(\begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \right) \quad (3.18)$$

ここで, 無情報事前分布を仮定すると, 事後確率の合成は次のように書くことができ,

$$p \left(\begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \mid Z_{drm}^{(1)}, Z_{drm}^{(2)}, \dots, Z_{drm}^{(L)} \right) \propto \prod_{l=1}^L p \left(Z_{drm}^{(l)} \begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \right) \quad (3.19)$$

このとき, (3.19)式の右辺は非線形のコスト関数に変換することができる.

$$J = -\ln \left\{ \prod_{l=1}^L p \left(Z_{drm}^{(l)} \begin{bmatrix} Z_{dr}^{(l)} \\ a \\ b \\ \alpha \end{bmatrix} \right) \right\} \propto \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \frac{(Z_{drm}^{(l)} - \hat{Z}_{drm}^{(l)})^2}{\sigma_{Z_{dr}}^2} \longrightarrow \text{minimized} \quad (3.20)$$

ここで $\sigma_{Z_{dr}}$ は Z_{dr} の観測値の標準偏差である.

さらにコスト関数は次のように簡略化することができる.

$$J = \sum_{l=1}^L \left| Z_{drm}^{(l)} - \hat{Z}_{drm}^{(l)} \right|^2 \quad (3.21)$$

(3.21)式で表されるコスト関数を最小化することによって最尤推定を行い, 最適解 ($Z_{dr,opt}$, a_{opt} , b_{opt})を得る.

3.3. シミュレーションによる精度検証

前節で述べた提案手法の推定精度を検証するために, 2章と同様の, 60km離れた2台のレーダが互いの方向に向かい合って観測しているという条件で, S帯のデータ (WSR-88DPのKFWSレーダ)に基づくX帯の一次元シミュレーションを実施した. DSDを用いた散乱シミュレーションから導出されたS帯とX帯のレーダパラメータの関係式を使用し, X帯における Z_{dr} とその減衰量を算出した [28]. また, 算出されたX帯における Z_{dr} から δ_{co} - Z_{dr} 関係を用いて δ_{co} の真値を計算し, 偏波間位相差の観測を推定した. さらに, K_{dp} は周波数に比例する値であると仮定し, S帯とX帯の周波数の違いによる K_{dp} 値の変換を行った.

図3.5に一次元シミュレーションの結果を示す. レーダ1は距離0km, レーダ2は距離60kmに位置している. (a)および(b)に示す各レーダで観測される Z_{drm} は, 遠方においては降雨減衰の影響を受けて真値に比べて小さな値となっている. 一方, (c)に示す提案手法によって補正された Z_{dr} は, 真値とほぼ一致している. また, (c)から分かるように, 提案手法によって推定された δ_{co} は真値に対して全域にわたってバイアスを有する結果となった. シミュレーションを実施した全てのケースにおける推定値と真値との比較結果を図3.6に示す. Z_{dr} と δ_{co} でそれぞれ, 0.5dB × 0.5dBメッシュ, 0.05度 × 0.05度メッシュに含まれる推定値の点数を色で表している. 推定された Z_{dr} の平均誤差は0.03dB, 標準偏差は0.16dBであり, 高精度の補正が行われていることが分かる. 一方推定された δ_{co} は平均誤差が-1.0度, 標準偏差は3.0度と, 正確な推定が行われているとは言えない. 減衰量推定や降雨量推定に有用とされる K_{dp} には0.1度/km単位の精度が求められており, δ_{co} の推定誤差は K_{dp} の推定誤差に大きく影響を与える可能性がある.

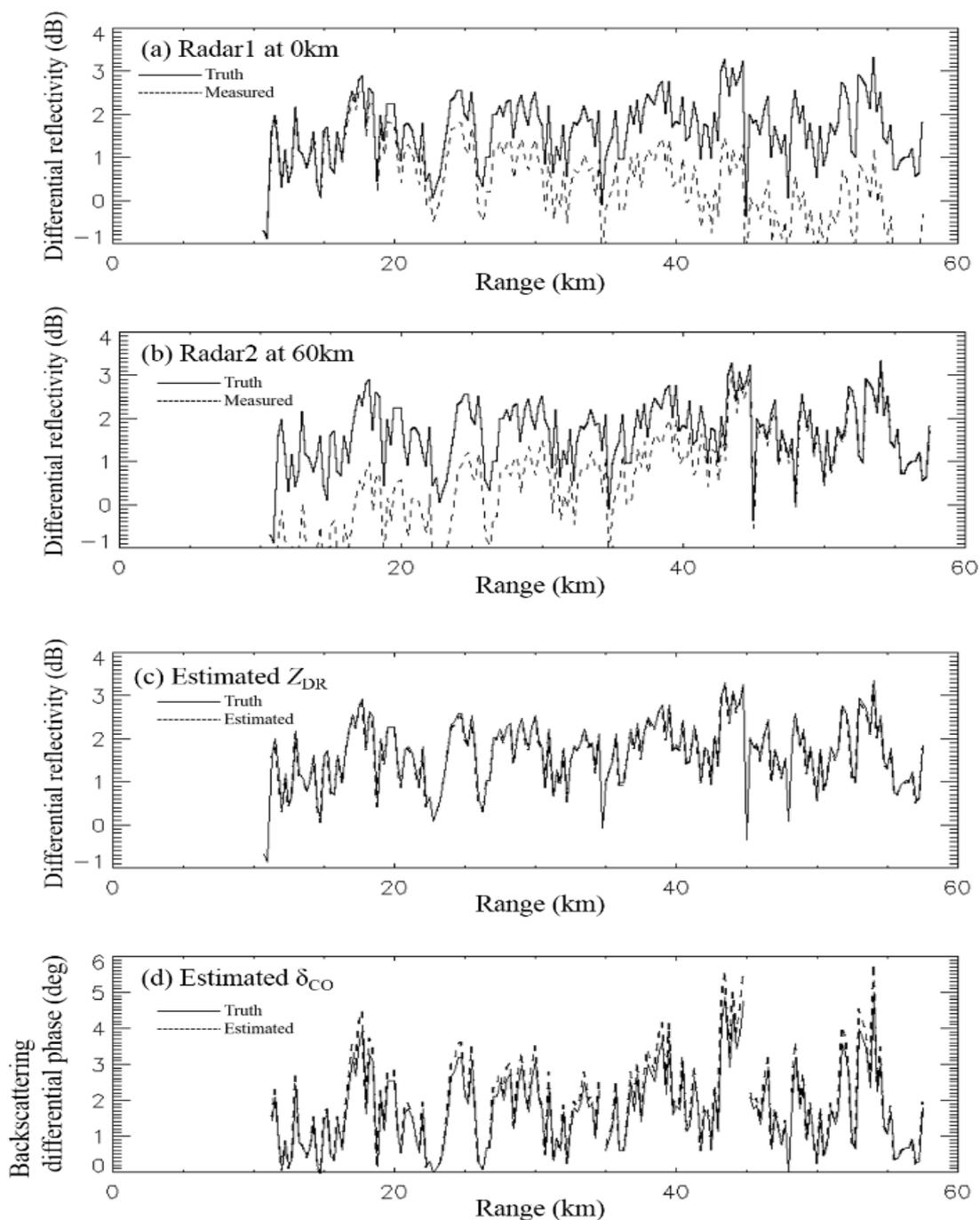


図 3.5 一次元シミュレーション結果 (a)(b) 各レーダ単体によるレーダ反射因子差の真値および観測値, (c)提案手法によるレーダ反射因子差の推定結果, (d) 提案手法による後方散乱位相差の推定結果

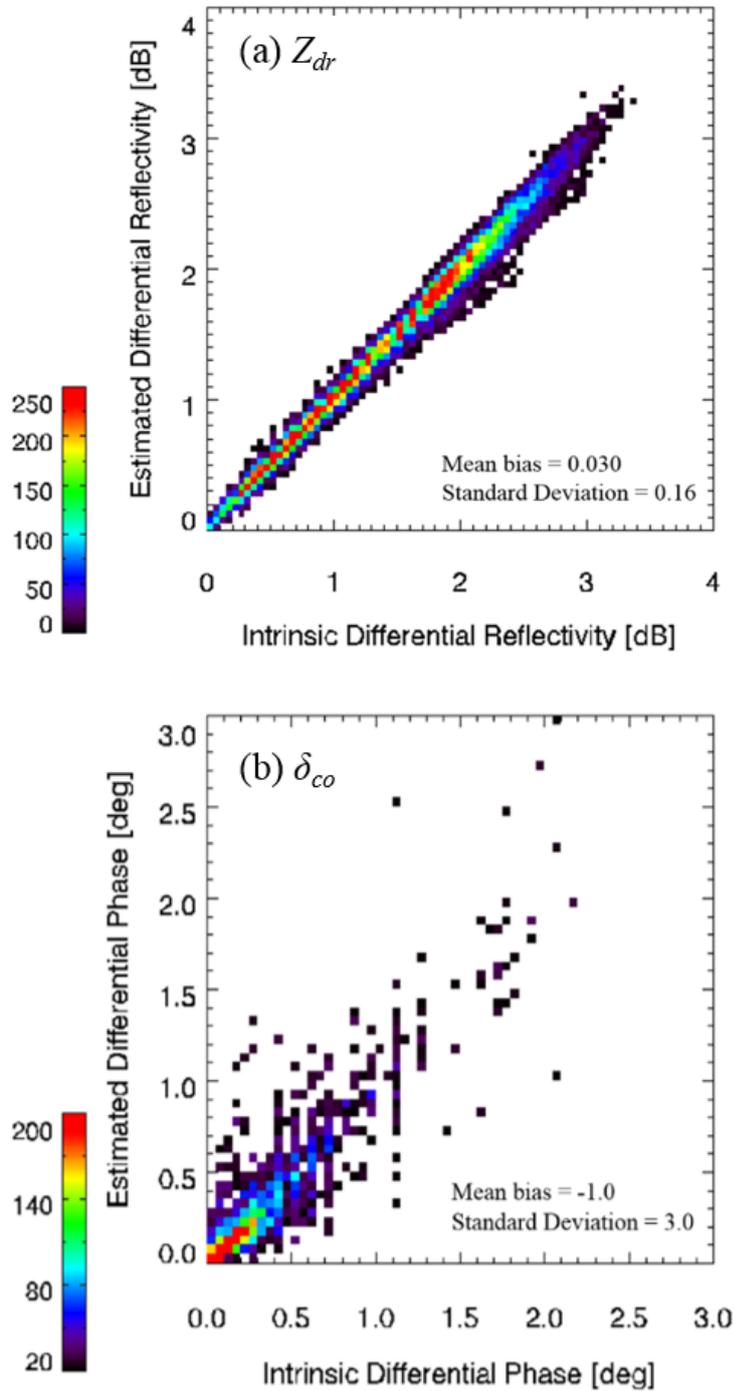


図 3.6 一次元シミュレーションの統計的評価 (a) 推定されたレーダ反射因子差と真値の比較, (b) 推定された後方散乱位相差と真値の比較

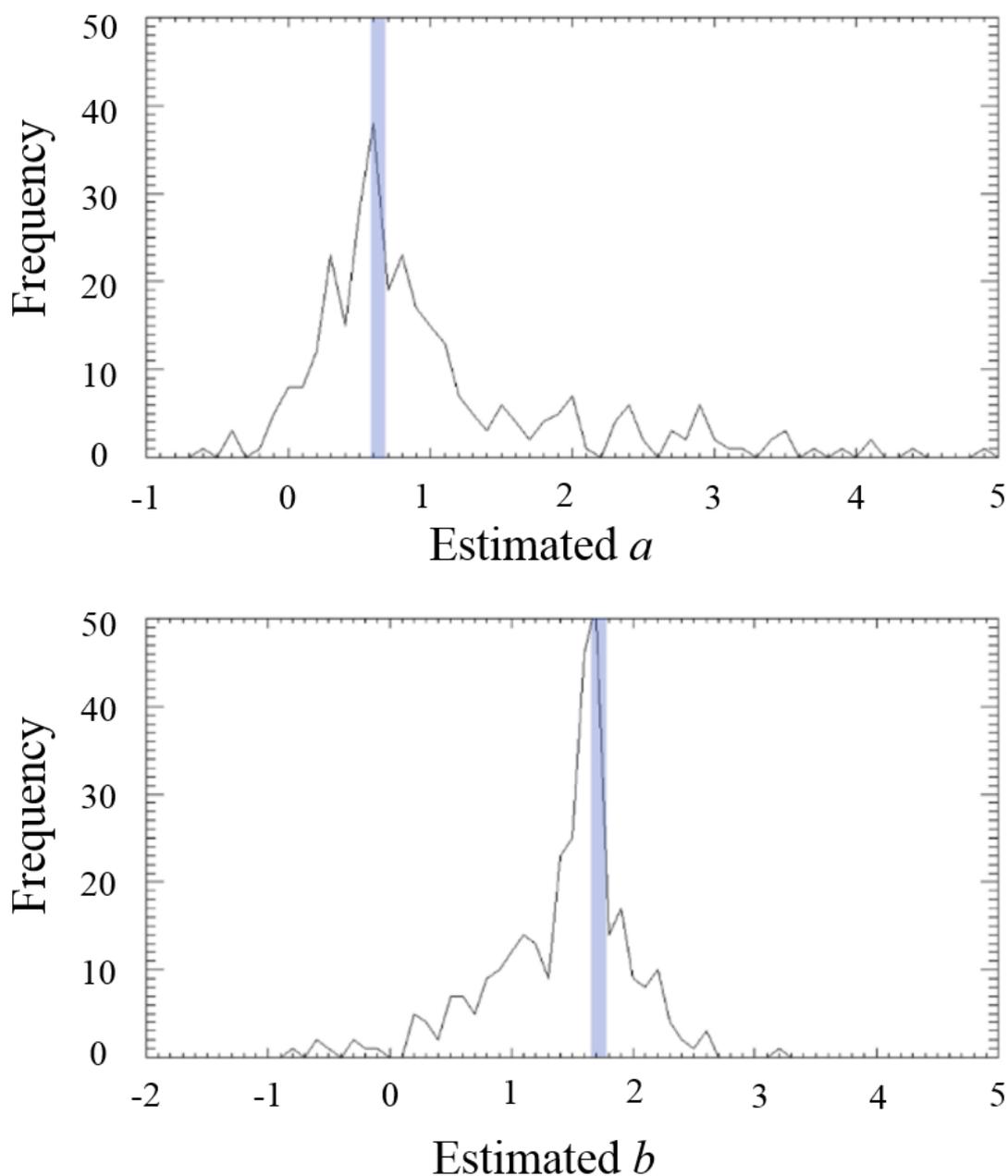


図 3.7 推定された係数 a, b のヒストグラム

3.4. δ_{co} の推定精度の改善

提案手法を用いて推定された δ_{co} の精度の問題については前節の最後で述べた。まず、その理由について考察する。推定された Z_{dr} の精度が高いにも関わらず、 δ_{co} の推定が不安定であるという結果は、提案手法で算出された δ_{co} - Z_{dr} 関係の係数値 (a, b)

が正確に算出されていないということを示唆している。そこで、シミュレーションで得られた係数 a, b のヒストグラムを図 3.7 に示す。青い帯がシミュレーションにおける真値を示す範囲である。推定された両係数が真値に対して幅広く分布していることが分かる。これは (3.21)式で設定したコスト関数に δ_{co} についての制約条件がないため、 δ_{co} - Z_{dr} 関係の係数の推定が不安定となっていることがその理由として考えられる。そこで、次式に示すように、(3.21)式のコスト関数に δ_{co} に関する制約項を追加した。

$$J = \sum_{l=1}^L \frac{|Z_{drm}^{(l)} - \hat{Z}_{drm}^{(l)}|^2}{\sigma_{Z_{dr}}^2} + \frac{|\delta_{co}^{(l)} - \hat{\delta}_{co}^{(l)}|^2}{\sigma_{\delta_{co}}^2} \quad (3.22)$$

ここで、 $\sigma_{Z_{dr}}$ および $\sigma_{\delta_{co}}$ は各々、 Z_{dr} および δ_{co} の観測値の標準偏差の大きさである。

コスト関数を変更する前と変更後の推定精度を表 3.1 にまとめて示す。これを見ると、コスト関数を変更した後の δ_{co} の平均誤差は 0.30 度、標準偏差は 0.58 度であり、推定精度は大きく改善されており、それに伴って Z_{dr} の推定精度も僅かながら向上していることが分かる。以上の結果から、コスト関数に δ_{co} に関する制約条件を付加したことにより、 Z_{dr} の推定精度を保持したまま、 δ_{co} の推定精度を向上させることが分かった。

3.5. 結言

本章では現在開発中の X 帯二重偏波フェーズドアレイレーダネットワークに適用可能な、確率理論に基づく降雨減衰補正手法を開発し、シミュレーションによってその精度検証を行った。

X 帯で観測される偏波間位相差の値には、観測レンジにおける後方散乱位相差 δ_{co} の値が正のバイアスとして付加され、比偏波間位相差 K_{dp} を算出するには後方散乱位相差の除去が必要である。また、X 帯で観測されるレーダ反射因子差 Z_{dr} は降雨減衰の影響を受けるため、補正が必要となる。本章ではネットワーク観測という状況下における観測情報の冗長性を活かし、X 帯における後方散乱位相差と降雨減衰という 2 つの問題を同時に解決可能な手法を提案した。提案手法では、X 帯における δ_{co} を Z_{dr} の累乗の形で近似し、また Z_{dr} の減衰係数 A_{dp} を K_{dp} の一次関数で近似し、ベイズの定理に基づく最尤推定によって、降雨状況に適した A_{dp} - K_{dp} 関係と δ_{co} - Z_{dr} 関係の係数値および Z_{dr} の補正值を推定した。

一次元シミュレーションの結果、 Z_{dr} を平均誤差 0.03dB、標準偏差 0.16dB で、高精度に推定することができたが、 δ_{co} - Z_{dr} 関係から求められた δ_{co} の平均誤差は -1.0 度、標準偏差は 3.0 度となり、不安定な結果となった。そこで、最尤推定の際のコスト関数に δ_{co} についての拘束項を追加し、再度シミュレーションを行った。その結果、 δ_{co} を平均誤差 0.30 度、標準偏差 0.58 度で推定することができ、推定精度を大きく改善することができた。すなわち、 Z_{dr} の推定精度を維持した上で、 δ_{co} の推定精度を向上させることができた。

提案手法は二重偏波フェーズドアレイレーダネットワークのみならず、現在稼働中の二重偏波レーダネットワークに対しても適用可能な手法である。今後は提案手法を適用することによって、X 帯の二重偏波レーダネットワークによる降雨減衰補正の精度向上や算出された K_{dp} から推定される降雨量精度の向上が見込まれる。

表 3.1 コスト関数の変更によるレーダ反射因子差と後方散乱位相差の推定精度の変化

Cost Function	Z_{dr}		δ_{co}	
	Bias	SD	Bias	SD
Eq. (3.21)	0.03	0.16	-1.0	3.0
Eq. (3.22)	0.01	0.09	0.30	0.58

4章 高分解能気象レーダデータに対する圧縮手法の検討

4.1. 緒言

本章では、気象用フェーズドアレイレーダネットワークをはじめとする小型レーダネットワークでは、大容量の観測データを転送する際に問題が生じる。本章では、このボトルネックを解消するためのデータ圧縮手法とその適用結果について述べる。4.2節では、高分解能レーダネットワークにおけるデータ圧縮の必要性とデータの特徴、気象レーダデータに対する圧縮センシングによる圧縮の有効性について述べる。4.3節では想定されるレーダネットワークにおけるデータ処理と、圧縮センシングを用いたデータ圧縮手法の概要について説明する。4.4節では、提案するデータ圧縮手法を本研究グループで開発した高分解能レーダのデータに適用した結果について述べる。4.5節では結論を述べる。

4.2. 気象レーダネットワークにおけるデータ圧縮

4.2.1. レーダデータ圧縮の必要性

本節では、高分解能気象レーダの観測データの諸元とデータ転送時におけるデータサイズ削減の必要性について述べる。

本研究グループで開発した PAWR は観測半径 30 km に対して時間分解能 10 秒、観測半径 60 km に対して時間分解能 30 秒であり、距離方向のサンプリング間隔を 100m として 1 次元アレイアンテナ（アンテナ 128 素子で構成）を用いてフルボリュームスキャンを行う気象レーダである。通常時は半径 60km 以内を 30 秒間で観測するモードを使用して運用している。気象レーダの観測データはレーダの位置を中心とした球面座標系に対応してデータが取得される。PAWR のレンジ方向のサンプリング点数は 600 点（100m 毎）で、方位角方向は 300 方位（360 度を 1.2 度毎）、仰角方向 110 点（0-90 度を 0.9 度毎）、計 19,800,000 点の全天スキャンデータを 30 秒



図 4.1 Ku 帯広帯域レーダの外観 (庄内空港滑走路横に設置)

で取得する。各点は受信電力，ドップラー速度およびその速度幅を含む計 13 種類の観測データが保存されており，一全天スキャンデータ容量は約 500 MB となる。

本研究グループでは現在，PAWR を 2 台用いた PAWR ネットワークを運用しており，将来的には二重偏波フェーズドアレイレーダネットワークの運用も計画している。複数台のレーダを用いたレーダネットワークを運用する場合，各レーダで得られた観測データを統合的に処理するメインサーバへのデータ転送が必要となる。PAWR の場合，30 秒で取得した 500MB のデータを観測時間以内にデータ転送しようとする，求められる通信速度は約 133Mbps となり，通常のインターネット回線では対処不能である。そこで，観測で取得したデータをそのまま送信するのではなく，データを圧縮した後に送信することによって，データ転送時のボトルネックを解消する必要がある。PAWR で取得した全てのデータを 10Mbps 程度の通常のインターネット回線で転送することを考えた場合，データサイズを 7~8%にまで圧縮する必要がある。さらに本研究グループでは，PAWR の他に Ku 帯広帯域レーダ (BBR) [34] (送信周波数：15.75GHz)を開発し，運用している [35]。BBR は数 m という極めて高い距離分解能を有し，1 分で半径 15~20km 以内の近距離を 3 次元観測可能なレーダである。図 4.1 に BBR の外観を示す。本研究グループでは，BBR を大阪平野に 3 台設置した BBR ネット

トワークを構築し、重複する観測領域においては数 m メッシュという高い空間分解能による観測を実現している [36]. この BBR は 1 分間に約 180MB のデータを取得する.

以上で述べたように、高時間・高距離分解能レーダによる観測では、短時間に膨大な観測データが得られる. これらのレーダをネットワークかして観測を行う場合には、各レーダからの観測データをリアルタイムで統合処理することにより、気象災害の解明や短期予測に利用する. しかし、現状のネットワーク環境では通信速度がボトルネックとなり、リアルタイムの統合処理は難しい. そのため、高精度の復元が可能な、気象データ圧縮手法の開発が急務である.

4.2.2. レーダデータの特徴と圧縮センシング

本節では、気象レーダデータが持つ特徴について説明し、次に、圧縮センシングを用いた気象レーダデータ圧縮の可能性について述べる.

前節で PAWR ネットワーク実用化のためには 10%未満の極めて高い圧縮率を実現する必要があることを述べた. ところが、可逆圧縮でそこまでの圧縮率を実現することは事実上不可能である. 一方、不可逆圧縮の場合には圧縮データ解凍後の再構成の精度が問題となる. 不可逆圧縮においては、圧縮率と再構成精度の間には基本的にトレードオフの関係があるため、高圧縮率と高精度の再構成を実現するためには、気象レーダのデータに適した圧縮手法を用いる必要がある. また気象レーダデータは、データの使用者やデータを入力するシステムによって必要とされる範囲や精度が異なることが予想される. そこで、必要とされる状況に応じて自由に圧縮率や精度を変更可能な手法が、気象レーダデータの圧縮に適していると言える.

ところで、気象現象はその発生から衰退に到るまで、空間的にも時間的にも連続的に変化する事象である. そのため、気象エコーは空間的かつ時間的な相関性が高いという特徴を有している. よって、気象レーダのデータを離散コサイン変換や離散ウェーブレット変換によって周波数領域に変換すると、限られた低周波成分に大きな値が集中し、高周波成分の値はほとんど値を持たない. このようにあるベクトルの要素の内、限られた要素のみが値を持ち、その他ほとんどの要素がゼロであるという性質をスパース性と呼ぶ.

圧縮センシング (Compressed Sensing : CS) [37][38]は、スパース性が仮定できる対象に対して、効果的な圧縮を可能にするデータ処理手法である. データ自体がスパース性を持たない場合でも、適切な基底で展開することによりスパース性を有するデータ列に変換することで、CS の適用が可能となる. 気象レーダに観測される気象エコーは空間的相関性が高いという特徴を有しているため、適切な基底で展開することにより観測データがスパースな信号として取り扱うことができ、CS の適用が可能とな

る。CSを用いる利点としては、その融通性の高さが挙げられる。CSでは、元データの特徴に合わせた基底の選択、状況に合わせた圧縮率の調整等、必要に応じたアルゴリズムの変更が容易である。前述のように気象レーダシステムでは、同じデータでもデータの利用者やシステムによって必要とされる範囲や精度が異なる場合が考えられる。CSによる圧縮は、各々の状況に最適な基底、圧縮率を選択可能な柔軟さを有する。また、データの性質に応じたスパースコーディングや辞書学習 [39]から、最適な基底を使用することによって、目標とする高圧縮率を高精度で実現可能な唯一の方法であると考えられる。

4.3. 圧縮センシングを用いた圧縮手法

4.3.1. レーダネットワークにおけるデータ処理

本節では、想定される小型高分解能レーダネットワークにおけるデータ処理について述べる。

図 4.2 に、想定する気象レーダネットワークのデータ処理手順の概要を示す。クライアント側では各サイトの気象レーダで観測されたデータが 4.3.2 節で述べる CS により指定する圧縮率で正規乱数行列を用いて圧縮される。圧縮された各データはサーバ側に転送された後、各圧縮データに対して l_1 ノルム最小化問題を解くことによって圧縮データの復元処理が行われる。復元された各データを統合し、降雨減衰補正やドップラー速度の算出、3次元風速場の算出を行う。取得した各指標を用いてゲリラ豪雨や竜巻の検知や警報情報を提供する。本論文では、受信電力、距離、レーダ定数の関係から算出される代表的なパラメータであるレーダ反射因子を対象として、提案する圧縮手法の適用可能性を検証する。

4.3.2. CS を用いた圧縮手法

本節では、圧縮センシングを用いた気象レーダデータの圧縮手法について説明する。

ある 1 方向に対する観測データを要素とするベクトルを $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ とする。ただし、 x_m ($m = 1, 2, \dots, M$) はレーダから m 番目の距離での観測値であり、 M はデータ総数である。また、 \mathbf{x} の離散コサイン変換 (Discrete cosine transform : DCT) あるいは離散ウェーブレット変換 (Discrete wavelet transform : DWT) を \mathbf{s} とし、 $\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{s}$ と表す。ただし、 \mathbf{W} は逆 DCT 変換行列および逆ウェーブレット変換行列であ

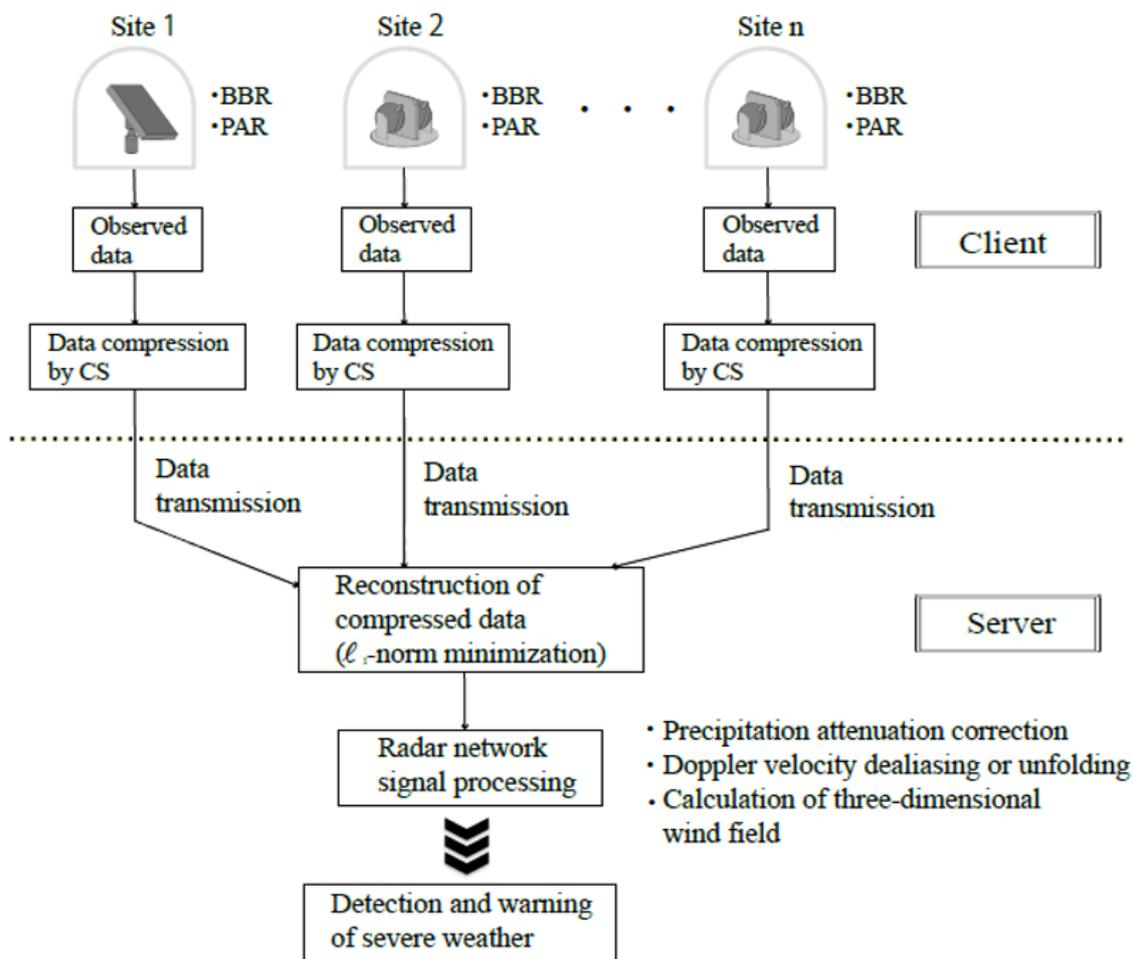


図 4.2 高分解能レーダネットワークにおけるデータ処理手順

る。観測データ \mathbf{x} の圧縮データは、正規乱数により生成される $N \times M$ ($N < M$) の行列 \mathbf{A} を用いて、 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ により得られる。このとき、観測データの圧縮率は N/M である。圧縮データ \mathbf{y} の復元には、以下の最適化問題（主双対内点法 [40] の利用）を解き、 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}\hat{\mathbf{s}}$ により得られる。

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s}} \|\mathbf{s}\|_1 \quad \text{subject to } \mathbf{A}\mathbf{W}\mathbf{s} = \mathbf{y} \quad (4.1)$$

$$\|\mathbf{s}\|_1 = \sum_{m=1}^M |s_m| \quad (4.2)$$

ここで、 $\|\mathbf{s}\|_1$ は \mathbf{s} の l_1 ノルムを表す。

圧縮および復元処理は、1方位角方向のデータ（PAWR については 600 点、BBR については 8,192 点）に対して 1次元の圧縮・復元を各方位角および各仰角に対してそれぞれ実行する。気象レーダのデータは距離方向だけではなく、方位角および仰角方向、さらには時系列に関しても、連続的な相関性を有しているが、レーダでは距離方向にデータ取得するのが一般的で、最もシンプルな方法であるため、本章では距離方向に対する一次元のデータ圧縮について検討する。

4.4. 適用結果

4.4.1. 圧縮再構成の事例

4.3.2 節で紹介した圧縮手法を PAWR と BBR のデータに適用し、再構成を行った。データ圧縮・再構成実験に用いた観測されたデータの概要を表 4.1 に示す。本

表 4.1 提案する圧縮手法を適用する観測データ

Case	Radar	time	day	year	Location of radar
1	PAWR	17:38:19	May 10	2013	Suita campus
2		16:00:27	June 19		
3		20:00:29	Jan. 8	2014	
4		9:00:21	March 30		
5		4:00:18	Oct. 6		
6		4:01:48	Oct. 6		
7	BBR	15:43	July 20	2012	Toyonaka campus

節では、PAWR のデータ (Case 1~6)への適用結果について述べ、BBR のデータ (Case 7)に関しては4.4.3節で述べる。大阪大学吹田キャンパスに設置された Suita PAWR で2013年に観測された2事例 (Case 1, 2) および2014年に観測された4事例 (Case 3~6) の計6事例のレーダ反射因子のデータに対して、圧縮率 $N/M = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ および 0.6 における DWT (前処理の分析結果から Level 5 とし、Haar 基底を使用) による圧縮および再構成を行った。その一例として Case 6 において観測されたレーダ反射因子の元データと各圧縮率に対する再構成結果の一部 (PAWR の設置：東西方向、南北方向各 0 km の位置、仰角 6.3 度の等仰角断面) を図 4.3 (a)~(f)に示す。レーダ反射因子が 36dBZ 以上の強い降雨域 (レーダの設置位置から西方向約 22 km 付近、北方向約 14 km 付近) において、復元誤差が生じていることが分かる。誤差は圧縮率 20% の場合の再構成結果で最も顕著に表れており、圧縮率 60% においては、見た目にはほとんど差異が無い。誤差の要因として考えられるのは、DWT による変換後のベクトルが完全なスパースベクトルではないことや、DWT による変換が急激な気象エコーの変化に弱いことが挙げられる。図 4.4 は各方位角における各圧縮に対する再構成率 $((1 - \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| / \|\mathbf{x}\|) \times 100)$ を示す。表 4.2 に各圧縮率に対する全方位の平均再構成率を示す。平均再構成率は圧縮率 20, 30, 40, 50, 60% に対してそれぞれ、73.8, 81.9, 86.9, 90.7 および 93.3% となっており、圧縮率 20% の場合を除いて 80% 以上の再構成率が実現されている。図 4.3 と図 4.4 から、4.3.2 節で述べた行列 \mathbf{A} の N の値が大きくなるにつれて、再構成の精度が高くなっていることが分かる。図 4.4 において方位角 50 度付近では雨が少なく、110 度、130 度付近では降雨があるがその量は少ない。圧縮対象となるベクトル内に連続的ターゲットである降雨領域が多く存在している方が、DWT による変換後のベクトルのスパース性が高まり、再構成が高精度で行われることが分かる。また、このように降雨域が少ない方位の再構成でも、圧縮率が小さい場合には再構成の誤差を抑えることができている。1 例として方位角 270 度における元データと、圧縮率 30%, 50% の復元データとの比較結果を図 4.5 に示す。(a)の青線が元データ、黒線と赤線はそれぞれ圧縮率 30% と 50% の場合の再構成されたデータである。(b)にはその誤差を示す。圧縮率を 50% とすると、誤差は概ね 5dBZ 以内に収まっている。

4.4.2. 圧縮・再構成結果の統計的評価

PAWR で観測された 6 事例のレーダ反射因子の値が 10dBZ 以上、20dBZ 以上および 30dBZ 以上の各データに対する再構成データと元データとの平均誤差を図 4.6 と表 4.2 に示す。図 4.6 において青線、黒線および赤線はそれぞれ 10dBZ 以上、20dBZ 以上および 30dBZ 以上の平均誤差を表す。10dBZ 以上と、20dBZ 以上の平均誤差にはそれほど差異は無いが、30dBZ 以上とレーダ反射因子の値が大きい場合には、大きな

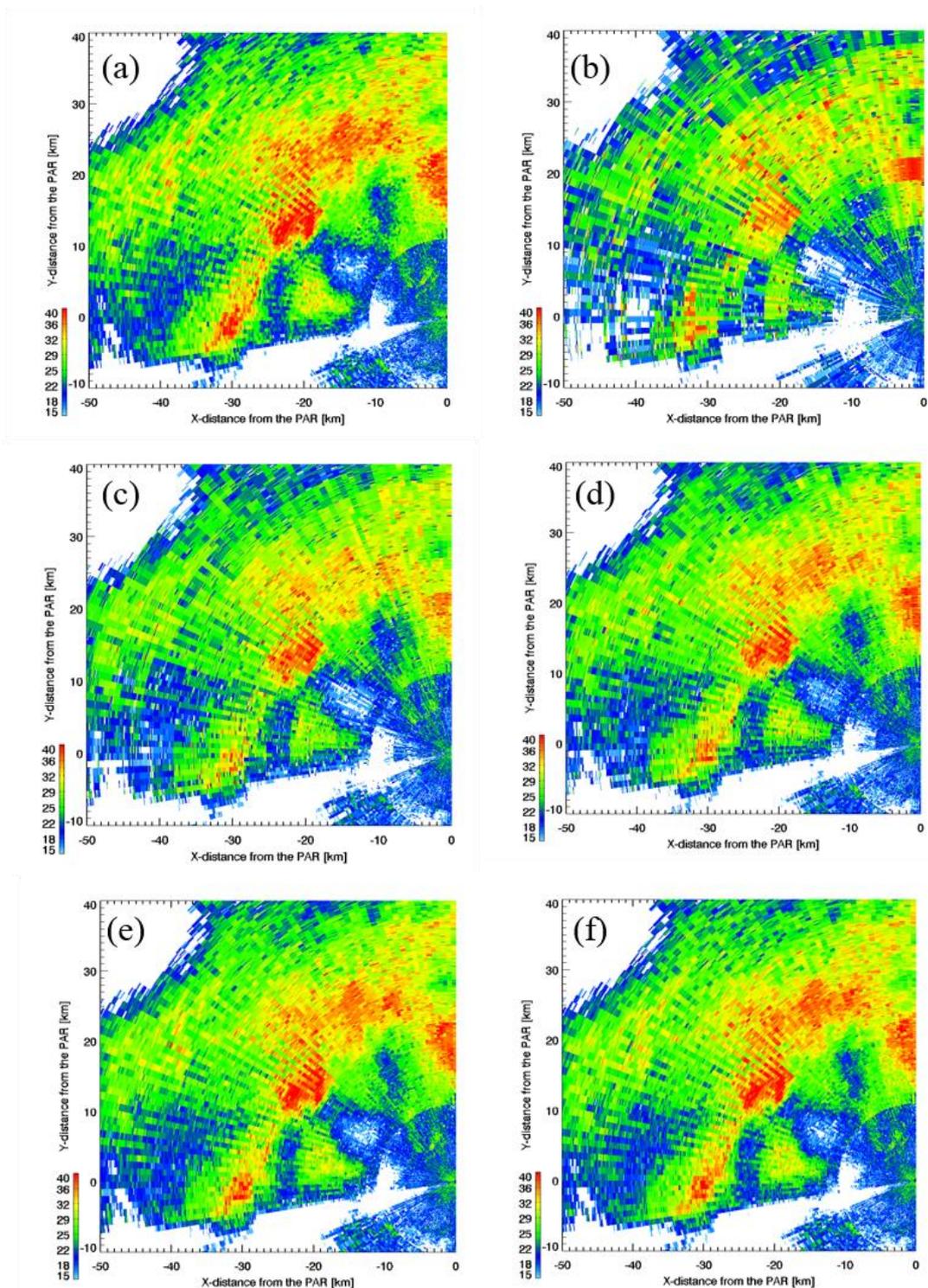


図 4.3 Case6 のデータに対する DWT を用いた圧縮・再構成の結果
(a)元データ, (b)圧縮率 20%, (c) 圧縮率 30%,
(d) 圧縮率 40%, (e) 圧縮率 50%, (f) 圧縮率 60%

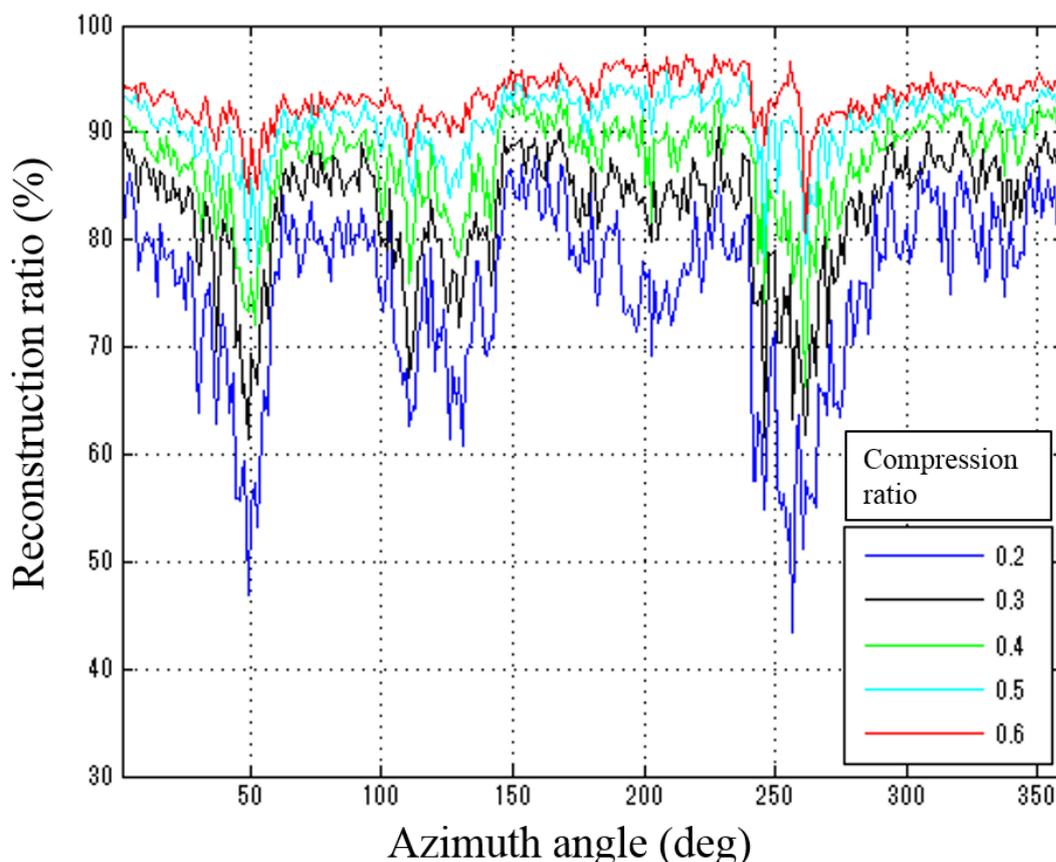


図 4.4 Case 6 の各方位角データにおける再構成率 (青：圧縮率 20%， 黒： 圧縮率 30%， 緑： 圧縮率 40%， 水色： 圧縮率 50%， 赤： 圧縮率 60%)

誤差が見られた。30dBZ 以上の平均誤差は圧縮率 20, 30, 40, 50, 60% に対してそれぞれ, -4.55, -2.72, -1.57, -1.00, -0.73 dBZ であり, 全体的に過小評価されている。また, これらの平均誤差を一時間当たりの降雨量 [mm/h] に換算した場合, それぞれ -1.31, -0.89, -0.55, -0.37 および 0.27 mm/h となる。気象観測システムに求められる降雨量の推定精度は 30dBZ 以上の場合には 1mm/h 前後である。この推定精度を保証するためには, 圧縮率は 30% が妥当である。レーダ反射因子の観測値には数 dB 程度の誤差が含まれることが知られており [27], 再構成率が 80% 以上であれば, 圧縮によって生じる誤差は, 観測誤差の範囲内であると言える。CS におけるデータの圧縮率は N の値に依存し, N の値が小さくなれば圧縮率が高くなると同時に, 再構成処理にかかる計算時間も短縮することができる。PAWR の 1 方位角あたりのデータ点数は 600 点であり, BBR の 8,192 点に比べて少ないため, 計算時間は問題にならない。ただし,

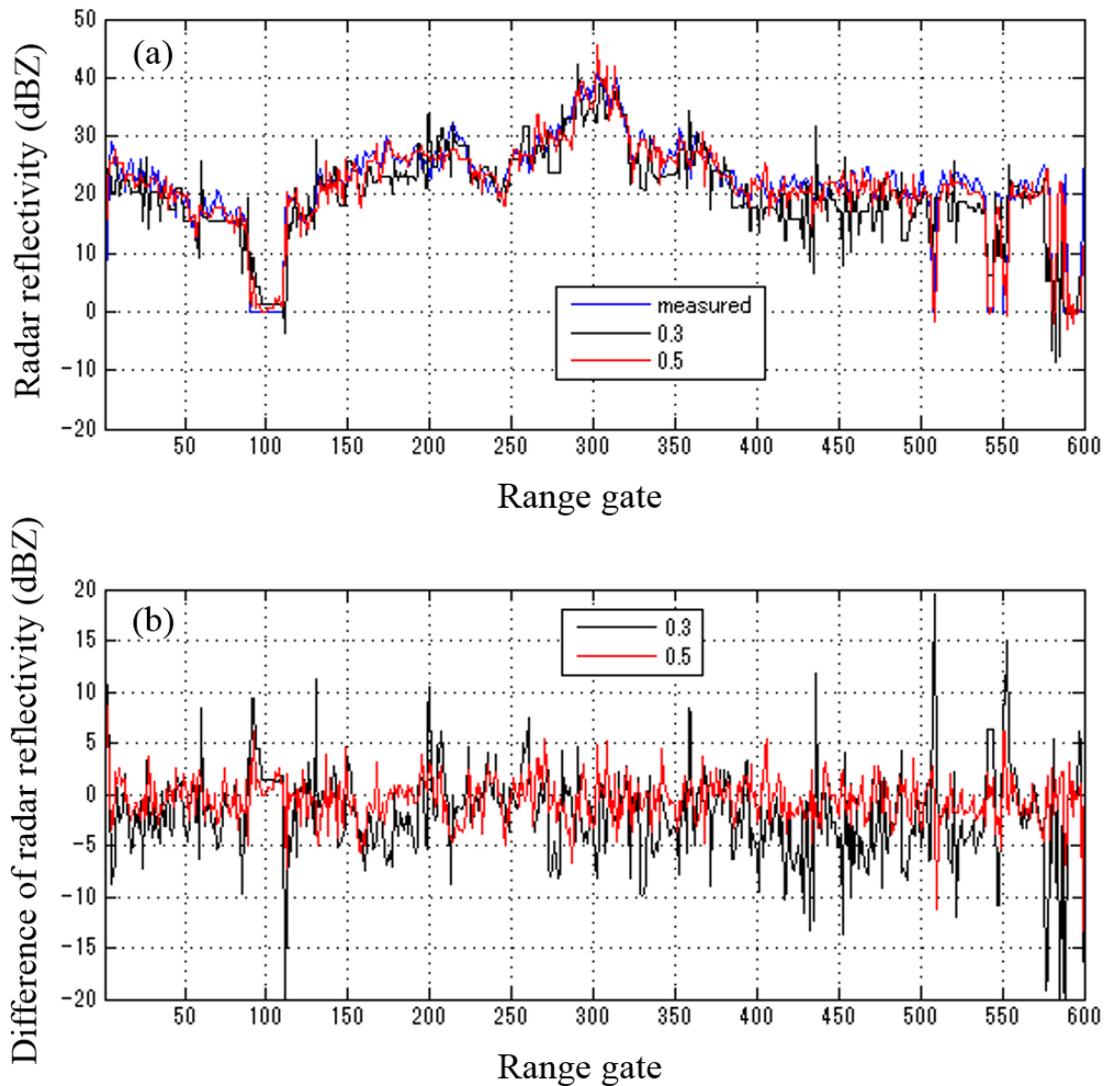


図 4.5 Case 6 の方位角 270 度の一次元データへの適用結果(圧縮率 30%および 50%) (a) 観測値と再構成結果, (b) 観測値に対する誤差

全天スキャンデータの圧縮・再構成処理を行う場合には、リアルタイム処理が可能な圧縮・再構成手法が必要となることはいうまでもない。また、同じデータに完全可逆圧縮することのできる RAR, Zip 形式の圧縮法を適用した際の圧縮率は、32.1%と 35.7%であり、CS の圧縮率は 30%が妥当である（降雨量 1mm/h の精度を保证する）ことを考えると、現状では圧縮率の値で数%程度優位である。また、高精度な再構成手法 [41][42]を適用することによって圧縮率をさらに高められる可能性がある。

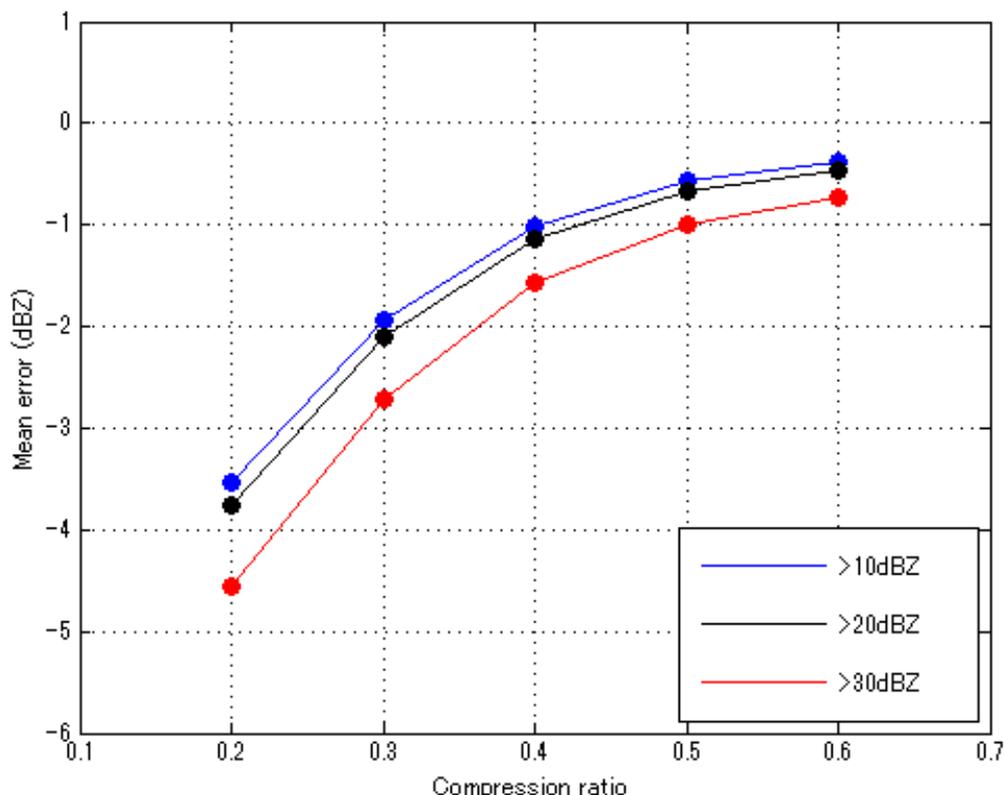


図 4.6 圧縮率と再構成率の関係

(青： 10dBZ 以上， 黒： 20dBZ 以上， 赤： 30dBZ 以上)

4.4.3. 分解能の違いによる影響

PAWR の観測データに対して CS を適用した結果がレーダの分解能によってどのように変化するかについての検討を行った。本節では、その検討結果について議論する。対象となるレーダは時間分解能が約 1 分，空間分解能が数 m であり，50m の低高度からの観測が可能な BBR である。BBR はサンプリング間隔を 2.44m として，レンジ方向に 8,192 点で 0-20km をカバーし，方位角方向に 3 度毎に 120 点で 0-360 度をカバーする。また，仰角方向にも 3 度毎に 30 点で 0-90 度をカバーして，総計 29,491,200 点の全天スキャンデータを約 1 分で取得する。各観測点におけるデータは受信電力，視線方向風速度，およびその速度幅からなり，一全天スキャンデータの容量は約 180MB である。大阪大学豊中キャンパスに設置された BBR で 2012 年に観測された 1 事例 (Case 7) のレーダ反射因子のデータに対して，圧縮率 30%，40% および 50% における DCT または Level 6 の Haar 基底を用いた DWT によって圧縮お

表 4.2 各圧縮率に対する再構成率とレーダ反射因子に生じる
平均誤差と標準偏差

Compression ratio (%)	Reconstruction ratio (%)	Mean error (dBZ)		
		>10dBZ	>20dBZ	>30dBZ
20	73.8	-3.53(5.31)	-3.76(5.23)	-4.55(5.11)
30	81.9	-1.95(3.80)	-2.10(3.72)	-2.72(3.63)
40	86.9	-1.03(2.99)	-1.15(2.94)	-1.57(2.90)
50	90.7	-0.57(2.24)	-0.67(2.23)	-1.00(2.24)
60	93.3	-0.39(1.73)	-0.47(1.75)	-0.73(1.78)

Numbers in () indicate value of standard deviation.

よび再構成を行った。レーダ反射因子の元データと圧縮率 40%の DCT または DWT による圧縮・再構成の結果の一部（東西方向、南北方向各 0 km の位置に BBR を設置、仰角 6-9 度の等仰角断面）を図 4.7 (a)~(c)に示す。レーダ反射因子が 40dBZ 以上の強い降雨領域（レーダの設置位置から東方向に約 2 km, 北方向に 3km の付近）において、再構成誤差が生じている。これは PAWR に対する適用例と同様、DCT や DWT 後のデータが完全なスパースではないこと、DCT, DWT のいずれも急激な気象エコーの変化に弱いなどのためであると考えられる。DCT と DWT を用いた圧縮に対する再構成率と、30dBZ 以上のデータに対する平均誤差を表 4.3 に示す。表 4.3 より DCT と DWT はほぼ同じ性能であり、いずれの場合にも 80%以上の再構成率を達成できており、平均誤差も PAWR に対する適用事例と同様の精度を確保できている。

本節に示した結果から、CS による圧縮手法は分解能が異なる PAWR と BBR のいずれの観測データにも適用可能であることが示された。BBR の空間分解能は数 m で、PAWR のそれと比較すると観測データのサンプリング間隔がかなり小さいため、空間相関がより高い。したがって周波数変換後のベクトルは低周波成分が大部

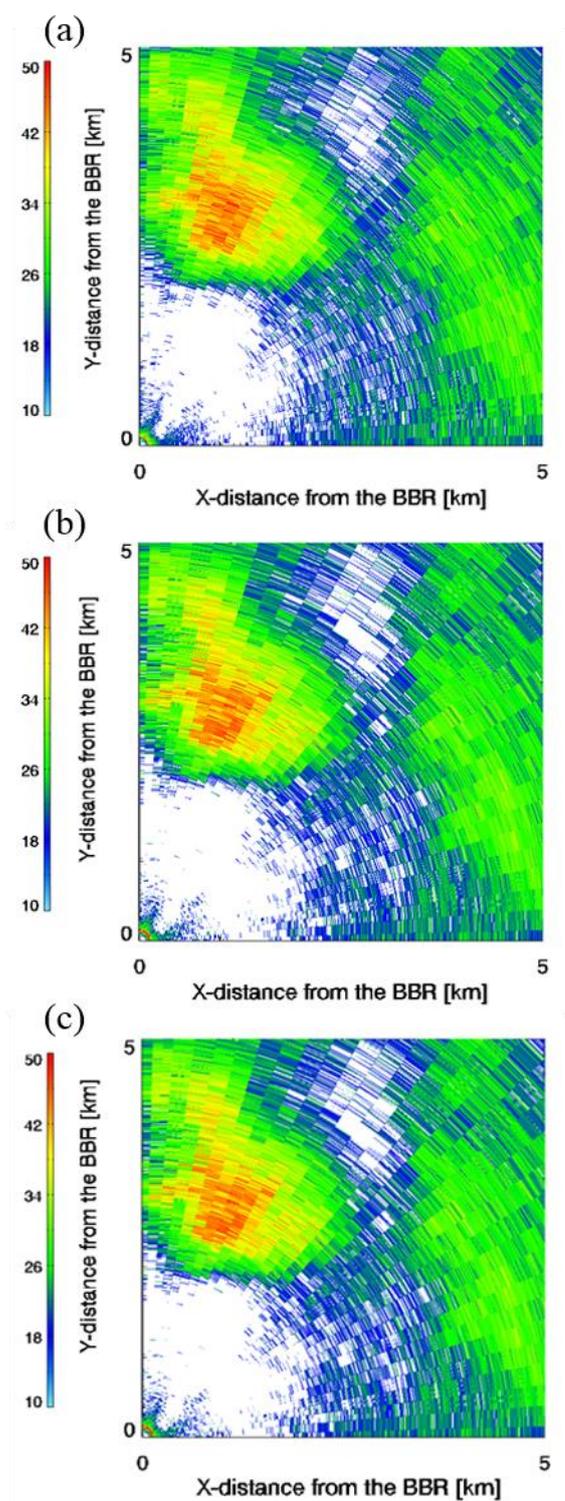


図 4.7 Case7 の BBR データに対する圧縮・再構成の結果
(a) 観測データ, (b)DCT による圧縮率 40%の再構成の結果,
(c)DWT による圧縮率 40%の再構成の結果

分を占めるため、大域的 DCT を用いる方が適している。一方、PAWR の観測データのサンプリング間隔は 100m で BBR のそれと比べてかなり大きいため、より急激な変化に対応可能な局所的基底である DWT を用いる方が適していると考えられる。

BBR の観測データに対して CS を適用するにあたっては、距離方向の観測点数が 8,192 点と多いため、最適化問題を解く計算時間が長くなるといった問題点がある。そのため、実際にリアルタイムで運用する場合には、並列演算処理やデータ点数の分割などを行い、高速化のための処理方法を考慮する必要がある。

また、研究用途への利用には、高精度の再構成（降雨量 1 mm/h の精度の保証）が必要となるため N の値を大きく、地域に提供する警報情報伝達への利用には警報の迅速な発出が必要となるため N の値を小さくするなど、利用目的によって N の値を変化させればよい。

4.5. 結言

本章では、CS を用いた気象レーダデータの圧縮手法を提案し、PAWR と BBR によって観測されたレーダ反射因子の大容量データを、距離方向の一次元データに分割した上で圧縮および再構成を行うことによって、CS による気象レーダデータ圧縮の実用性の初期検討を行った。その結果、得られた再構成率や平均誤差から一次元データにおいても効果的な圧縮が可能であることを示した。PAWR のデータに対して適用した場合には、圧縮率 30% 以上で再構成率 80% 以上を達成し、平均誤差を含む換算降雨量から、圧縮率 30% で降水量を 1 mm/h の精度で保証できることを示した。気象レーダのデータは距離方向のみならず、方位角方向、仰角方向、さらには時系列においても高い相関性を有しており、特に PAWR で 30 秒毎に得られるデータの時系列の相関性は非常に高いことが予想される。すなわち、二～四次元のデータに対して圧縮を行うことにより、さらなる高精度で、高い圧縮率によるデータ圧縮の実現が期待される。本章では、DCT や DWT によってスパースベクトルへの変換を行っていたが、辞書学習等の手法によって最適な変換基底を用いた変換を行うことで、再構成精度の改善が可能である。そのようなアルゴリズムの改良により、将来的には目標とする 10% 以下の圧縮率で、再構成精度 10% 以上の高精度なデータ圧縮が十分実現可能であると考えられる。

本章で提案した気象用レーダの大容量観測データに対する CS の適用により、小型レーダネットワークにおける転送問題の解決が可能である。一方、サーバ側において圧縮された観測データの再構成を行う際に、観測データが大きくなると、再構成に必要な最適化問題を解く計算時間が長くなり、リアルタイム処理を行うことが難しくなる。そのため、圧縮適用範囲の分割、並列処理手法の開発を行い、データ処

理の高速化を図る必要がある。また、現在はランダム行列の乗算による圧縮を行っているが、ランダム間引きに変更することによって大幅な計算時間の削減が見込まれる。

表 4.3 変換基底の違い (DCT と DWT)による再構成精度の比較

Compression ratio (%)	Reconstruction ratio (%)		Mean error (dBZ) >30dBZ	
	DCT	DWT	DCT	DWT
30	80.8	80.6	-2.70	-2.45
40	83.1	83.0	-1.96	-1.76
50	85.2	85.1	-1.43	-1.36

5章 結論

本論文では、気象用フェーズドアレイレーダネットワークの運用に当たっての諸問題の解決法を提案し、その有効性について議論した。現在運用中の気象用フェーズドアレイレーダネットワークに適用可能な高精度の降雨減衰補正手法の開発、現在開発中の二重偏波フェーズドアレイレーダネットワークに適用可能な高精度の降雨減衰補正手法の開発、そして、高分解能気象レーダデータに対する圧縮センシング技術を適用した圧縮手法の初期検討を行った。本章では、本研究で得られた主要な結果をまとめて結論とする。

2章では、気象用単一偏波フェーズドアレイレーダを複数台用いたレーダネットワークに適用可能な確率的降雨減衰補正手法を提案した。単一偏波レーダにおける降雨減衰補正手法は長年研究されてきたが、降雨減衰の激しいX帯で従来手法を適用した場合、レーダ遠方では解が不安定となることが問題であった。提案手法では、従来手法による解の不安定性の程度を示すために、解の理論的分散値を新たに定義し、レーダネットワーク内の複数のレーダで求めた解を分散値の逆数によって重み付け平均した値が、確率的に尤もらしい推定解に帰着することをベイズの理論に基づいて数学的に証明した。次に、提案手法の推定精度を検証するために、実観測データに基づく次元シミュレーションを実施した。降雨減衰の影響を受けないS帯レーダの観測データをX帯におけるデータに変換し、向かい合った2台のX帯レーダによる同時観測を想定して、提案手法を適用した。従来手法によって減衰補正された解は降雨減衰の影響による負のバイアスこそ軽減されるものの、一部の解は過大推定となったり、発散したりする現象が見られた。一方、提案手法による推定解は安定的に降雨減衰の影響を補正できることを示した。また、提案手法の実用性を検証するために、アメリカ・オクラホマ州で運用されていたCASA IP-1レーダネットワークの観測データに提案手法を適用した。提案手法による補正結果と二重偏波観測で得られる偏波間位相差による減衰補正手法の適用結果を比較することで、提案手法は二重偏波パラメータを用いた降雨減衰補正と同等の精度を有することを実験的に証明した。さらに、提案手法を実際に阪神エリアで運用中の気象用フェーズドアレイレーダネットワークのデータに適用した。吹田市に設置されたフェーズドアレイレーダはレーダ北側に位置する山やレーダ西方の高層ビルの影響を受け、観測の不能領域があるが、ネットワーク観測による合成結果では、神戸市のフェーズ

ドアレイレーダによってその領域データを十分な精度で補完することができた。また、各々のフェーズドアレイレーダに従来の降雨減衰補正手法を適用すると、一部の領域で解が不安定となったが、提案手法による補正では安定的な補正結果を得ることができた。

3章では、二重偏波フェーズドアレイレーダネットワークにおける確率的な降雨減衰補正手法を提案した。近年国内外で主流となっている二重偏波観測では、レーダ単体に対するデータ処理手法の検討が行われており、単一偏波レーダでは取得できない偏波間の位相差情報を用いた高精度な降雨減衰補正手法や降雨量推定手法が開発されている。X帯二重偏波レーダを複数台用いたレーダネットワークにおいても、データ処理自体は各レーダで個別に行われているのが現状である。一方、減衰補正や降雨量推定に用いられる単位距離あたりの偏波間位相差は直接観測される値ではなく、観測される位相差から算出されるパラメータである。X帯においてはミー散乱の影響による後方散乱位相差の問題が生じる。後方散乱位相差は単位距離あたりの偏波間位相差の算出精度に影響を与えるため、単位距離あたりの偏波間位相差を用いた補正手法による推定値の精度にも影響を与える。提案手法では、X帯二重偏波レーダネットワークにおいて、統合的なデータ処理を行い、後方散乱位相差の除去を行った上で偏波パラメータの一つであるレーダ反射因子差に対する減衰補正を行った。提案手法の精度を検証するために、2章と同様にS帯レーダの実観測データに基づいた一次元シミュレーションを行った。その結果、高い精度でレーダ反射因子差を補正することができたが、後方散乱位相差の推定結果は不安定となった。そこで、設定したコスト関数に後方散乱位相差に対する拘束項を付加し再度シミュレーションを行い、レーダ反射因子差の推定精度を維持したまま、後方散乱位相差の推定精度を向上させることができた。

4章では、気象レーダデータに対する圧縮手法の初期検討として、圧縮センシング技術を用いたデータ圧縮手法を提案した。気象用フェーズドアレイレーダをはじめとする高分解能レーダでは単位時間あたりの取得データが大容量化するため、レーダネットワーク運用の際にデータ転送がボトルネックとなる可能性がある。一方、気象レーダの観測データは空間的な相関が高いという特徴を有しており、周波数領域に変換することで、スパースなベクトルと見なすことができる。そこで、スパースなベクトルを圧縮対象とする圧縮センシング技術を応用した気象レーダデータの圧縮手法を提案した。本研究ではその初期検討として、レーダデータを一次元データに分割した上で圧縮および再構成を行い、圧縮率を変えた場合の再構成精度を比較した。その結果、圧縮センシングを用いた気象レーダデータ圧縮の有効性を示すことができた。

本研究の結果をまとめる。従来の大型レーダによる観測には、低分解能や低高度における観測不能領域といった問題が存在し、竜巻や突発的豪雨の検知には不向き

であった。そこで大型レーダ観測に代わる新たなレーダ方式として、小型高分解能レーダネットワークによる観測の必要性が高まっている。本研究グループは極めて高い時間分解能を有する気象用フェーズドアレイレーダを開発し、気象用フェーズドアレイレーダを複数台用いた気象用フェーズドアレイレーダネットワークを運用している。気象用フェーズドアレイレーダネットワークは気象現象を迅速かつ三次元的に限なく観測することが可能であることから、突発的に発生・発達する現象による災害を未然に防ぐ有効な手段として期待される。一方、送信周波数に X 帯を用いている気象用フェーズドアレイレーダネットワークでは降雨減衰による降雨強度に対する過少評価の問題を抱えており、それを解決する有効的な手段は現在のところ提案されていない。また、高速スキヤニング性能を有する気象用フェーズドアレイレーダネットワークを実運用に際し、データの転送時間がボトルネックとなることが想定される。本研究では、レーダネットワークにおいて複数レーダの観測情報を統合的に用いて確率的最適解を求めることによって降雨減衰の問題を解決した。さらに、観測データに対して圧縮センシングを用いたデータ圧縮手法を提案し、データ転送時間の削減に成功した。すなわち、本研究によって、気象用フェーズドアレイレーダネットワークをはじめとする小型高分解能レーダネットワークが抱える本質的な問題を解決したと結論付けられる。

今後、気象用フェーズドアレイレーダネットワークを実用システムとして運用していくことが求められる。そのためにはまず、データ圧縮と再構成処理を含めたデータ転送手法を確立し、提案した降雨減衰補正手法をリアルタイムに適用する必要がある。さらに、二重偏波観測機能を有するフェーズドアレイレーダが現在開発中であり、近い将来、二重偏波フェーズドアレイレーダを含んだフェーズドアレイレーダネットワークによる観測網が構築される予定である。将来的には、30 秒毎に取得される高精度な三次元降水強度分布や風速度分布を高速で処理し、突発的豪雨や竜巻の発生を迅速に予報するシステムを開発することによって、気象災害による被害を少しでも軽減することが期待される。

記号索引

記号	英語	日本語
A_{dp}	specific differential attenuation	レーダ反射因子差の減衰係数
a, b	coefficients on $\delta_{co}-Z_{dr}$ relationship	$\delta_{co}-Z_{dr}$ 関係における係数値
c, d	coefficients on $Z-R$ relationship	$Z-R$ 関係における係数値
D	diameter of raindrop	雨滴の粒径
$f_{hh,vv}$	forward scattering amplitude on horizontal and vertical polarization	水平及び垂直偏波における前方散乱振幅
Im[]	imaginary part of	複素数の虚部
K	dielectric factor of water	水の誘電因子
K_{dp}	specific differential phase	比偏波間位相差
k	specific attenuation	レーダ反射因子の減衰係数
m	complex refractive constant of water	水の複素屈折率
$N(r,D)$	drop size distribution function	雨滴粒径分布関数
n_Z	noise factor of radar reflectivity	レーダ反射因子に含まれる観測ノイズ
n_{Zdr}	noise factor of differential reflectivity	レーダ反射因子差に含まれる観測ノイズ
$n_{\psi dp}$	noise factor of measured differential phase	偏波間位相差に含まれる観測ノイズ
Pr	radar received power	レーダ受信電力
$p()$	probabilistic density function	確率密度関数
R	rainfall rate	降雨量, 降水量
Re[]	real part of	複素数の実部
r_n	n th range	n 番目の観測レンジ

$S_{hh,vv}$	back scattering amplitude on horizontal and vertical polarization	水平及び垂直偏波における後方散乱振幅
Z	intrinsic radar reflectivity	レーダ反射因子
Z_{dr}	intrinsic differential reflectivity	レーダ反射因子差
Z_{drm}	measured differential reflectivity	観測されるレーダ反射因子差
Z_h	horizontal radar reflectivity	水平レーダ反射因子
Z_m	measured radar reflectivity	観測されるレーダ反射因子
α, β	coefficients on k - Z relationship	k - Z 関係における係数値
δ_{co}	back scattering differential phase shift	後方散乱による位相シフト
$\delta_{hh,vv}$	back scattering phase at horizontal and vertical polarization	水平及び垂直偏波における後方散乱位相
ζ	intrinsic radar reflectivity in linear scale	レーダ反射因子 (線形スケール)
ζ_{dr}	intrinsic differential reflectivity in linear scale	レーダ反射因子差 (線形スケール)
ζ_m	measured radar reflectivity in linear scale	観測されるレーダ反射因子 (線形スケール)
λ	wave length	波長
σ_b	back scattering cross section	後方散乱断面積
σ_{ext}	extinction cross section	消散断面積
σ_{HB}	standard deviation of HB reflectivity	HB 解の標準偏差
σ_{Zdr}	standard deviation of differential reflectivity	レーダ反射因子差の標準偏差
$\sigma_{\psi_{dp}}$	standard deviation of measured differential phase	偏波間位相差の標準偏差
Φ_{dp}	forward scattering differential phase	前方散乱による偏波間位相差
Ψ_{dp}	measured differential phase	観測される偏波間位相差

略語索引

BBR	Broad Band Radar
CASA	Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere
CS	Compressed Sensing
DBF	Digital Beam Forming
DCT	Discrete Cosine Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
DSD	Drop Size Distribution
HB	Hitschfeld Bordan
PAWR	Phased Array Weather Radar
PIA	Path Integrated Attenuation
SRT	Surface Reference Technique
TRMM-PR	Tropical Rainfall Measuring Mission – Precipitation Radar
XRAIN	eXtended Radar Information Network

参考文献

- [1] H. Yamauchi, H. Niino, O. Suzuki, Y. Shoji, E. Sato, A. Adachi, and W. Mashiko, "Vertical structure of the Tsukuba F3 tornado on 6 May 2012 as revealed by a polarimetric radar", *Proc. 36th AMS Radar Conference*, Paper No. 320, 2013.
- [2] D. Atlas and A. C. Chmela, "Physical-synoptic variations of raindrop size parameters", *Proc. Sixth Weather Radar Conference*, pp. 21-29, 1957.
- [3] M. Fujiwara, "Raindrop-size distribution from individual storms", *J. Atmos. Sci.*, Vol. 22, No. 5, pp. 585-591, 1965.
- [4] 深尾昌一郎, 浜津享助, "気象と大気のレーダーリモートセンシング", 京都大学学術出版会, 2005
- [5] E. Yoshikawa, V. Chandrasekar, and T. Ushio, "Raindrop Size Distribution (DSD) Retrieval for X-Band Dual-Polarization Radar", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 31, No. 2, pp. 387-403, 2014.
- [6] H. Chen, V. Chandrasekar, and E. Yoshikawa, "A Rain Drop Size Distribution (DSD) Retrieval Algorithm for CASA DFW Urban Radar Network", *Proc. 36th Conference on Radar Meteorology*, Paper No. 330, 2013.
- [7] V. N. Bringi, T. D. Keenan, and V. Chandrasekar, "Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1906-1915, 2001.
- [8] S. Y. Matrosov, R. Cifelli, P. C. Kennedy, S. W. Nesbitt, S. A. Rutledge, V. N. Bringi, and B. E. Martner, "A comparative study of rainfall retrievals based on specific differential phase shifts at X-and S-band radar frequencies", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 23, No. 7, pp. 952-963, 2006.
- [9] H. Chen and V. Chandrasekar. "Estimation of light rainfall using Ku-band dual-polarization radar", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 53, No. 9, pp. 5197-5208, 2015.

- [10] F. Junyent, V. Chandrasekar, D. McLaughlin, E. Insanic, and N. Bharadwaj, "The CASA Integrated Project 1 Networked Radar System", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 27, pp. 61–78, 2010.
- [11] H. Chen and V. Chandrasekar, "The quantitative precipitation estimation system for Dallas–Fort Worth (DFW) urban remote sensing network", *J. Hydrol.*, Vol. 531, No. 2, pp. 259-271, 2015.
- [12] M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi, S. G. Park, H. Moriwaki, K. Maruyama, I. Watabe, D. I. Lee, M. Jang, H. K. Kim, V. N. Bringi and H. Uyeda, "Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar", *Atmos. Sci. Lett.*, Vol. 6, No. 1, pp. 12-18, 2005.
- [13] V. N. Bringi and V. Chandrasekar, "Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications", *Cambridge University Press*, Chap.6, pp. 294-377, 2001.
- [14] J. Hubbert and V. N. Bringi, "An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 12, No. 3, pp. 643-648, 1995.
- [15] T. Otto and H. W. J. Russchenberg, "Estimation of specific differential phase and differential backscatter phase from polarimetric weather radar measurements of rain", *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 988-992, 2011.
- [16] 平野裕基, 円尾晃一, 嶋村重治, 吉田智, 牛尾知雄, 水谷文彦, 佐藤晋介, "気象用フェーズドアレイレーダの精度検証", *電気学会論文誌 A*, Vol.134, No. 4, pp. 204-210, 2014.
- [17] E. Yoshikawa, T. Ushio, Z. Kawasaki, S. Yoshida, T. Morimoto, F. Mizutani, and M. Wada, "MMSE beam forming on fast-scanning phased array weather radar", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 51, No. 5, pp. 3077-3088, 2013.
- [18] 菊間信良, "アレーアンテナによる適応信号処理", 科学技術出版, 1998.
-

-
- [19] 円尾晃一, 嶋村重治, 吉川栄一, 吉田智, 牛尾知雄, 水谷文彦, 佐藤晋介, “気象用フェーズドアレイレーダにおける最小二乗平均誤差法を用いたクラッタエコー低減の観測的検討”, 電気学会論文誌 A, Vol.134, No. 4, pp. 197-203, 2014.
- [20] H. Kikuchi, T. Tashima, T. Wu, G. Kim, T. Ushio, H. Goto, and F. Mizutani, “Application of Adaptive Digital Beam Forming for Polarimetric Phased Array Weather Radar”, *Proc. 2015 URSI-Japan Radio Science Meeting*, Paper F7, 2015.
- [21] W. Hitschfeld and J. Bordan, “Errors Inherent in the Radar Measurement of Rainfall at Attenuating Wavelengths”, *J. Meteor.*, Vol. 11, No. 2, pp. 58–67, 1954.
- [22] T. Iguchi and R. Meneghini, "Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 11, No. 6, pp. 1507-1516, 1994.
- [23] 吉野文雄, "レーダ水文学", 森北出版, 2002.
- [24] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, “Microwave Remote Sensing: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry Vol. 1”, *Addison-Wesley publishing company, advanced book Program/world science division*, Chap.2, pp. 61-92, 1981.
- [25] R. Meneghini, "Rain-rate estimates for an attenuating radar", *Radio Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 459-470, 1978.
- [26] C. M. Bishop (元田浩, 栗田多喜夫, 樋口知之, 松本裕治, 村田昇 監訳), "パターン認識と機械学習 (上) ベイズ理論による統計的予測", 丸善出版, 2007.
- [27] V. N. Bringi and V. Chandrasekar, “Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications”, *Cambridge University Press*, Chap.5, pp. 211-293, 2001.
- [28] V. Chandrasekar and S. Lim, "Simulation of X-band rainfall observations from S-band radar data", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 23, No. 9, pp. 1195-1205, 2006.
- [29] R. J. Doviak and D. S. Zrnica, “Doppler Radar and Weather Observations second edition”, *Academic Press*, chap.5, pp. 87-121, 1993.
-

- [30] S. Trömel, M. R. Kumjian, A. V. Ryzhkov, C. Simmer, and M. Diederich, “Backscatter differential phase—Estimation and variability”, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 52, No. 11, pp. 2529-2548, 2013.
- [31] V. N. Bringi and V. Chandrasekar, “Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications”, *Cambridge University Press*, chap.4, pp. 160-210, 2001.
- [32] M. Schneebeli and A. Berne, “An extended Kalman filter framework for polarimetric X-band weather radar data processing”, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, No. 29, No. 5, pp. 711–730, 2012.
- [33] G. Scarchilli, E. Goroucci, V. Chandrasekar, and T. A. Seliga, “Rainfall estimation using polarimetric techniques at C-band frequencies”, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1150-1160, 1993.
- [34] E. Yoshikawa, T. Ushio, Z. Kawasaki, T. Mega, S. Yoshida, T. Morimoto, K. Imai, and S. Nagayama, “Development and initial observation of high-resolution volume-scanning radar for meteorological application”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 48, No. 8, pp. 3225-3235, 2010.
- [35] S. Shimamura, E. Yoshikawa, S. Yoshida, T. Ushio, N. Matayoshi, “Preliminary Study on Low-Level Turbulence Advisory System with Ku-band Broadband Radar at Shonai Airport Yamagata Prefecture”, *Electron. Commun. in Japan*, Vol. 98, No. 11, pp. 1 – 8, 2015.
- [36] E. Yoshikawa, T. Ushio, Z. Kawasaki, and V. Chandrasekar, "Dual-directional radar observation for preliminary assessment of the Ku-band broadband radar network", *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 29, No. 12, pp. 1757-1768, 2012.
- [37] E. J. Candes and M. B. Wakin, “An Introduction to compressive sampling”, *IEEE, Signal Processing Magazine*, Vol. 25, No. 2, pp. 21-30, 2008.
- [38] 田中利幸, "圧縮センシングの数理", 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ *Fundamentals Review* No. 4. Vol. 1, pp. 39-47, 2010.
- [39] 平林晃, "圧縮センシングの基礎と最近の話題", システム制御情報学会誌, Vol. 58, No. 10, pp. 414-419, 2014.
-

[40] E. Candes and J. Romberg, “ ℓ_1 -MAGIC: Recovery of Sparse Signals via Convex Programming”, URL: [www.acm.caltech.edu/l1magic/downloads/l1magic .pdf](http://www.acm.caltech.edu/l1magic/downloads/l1magic.pdf), pp. 1-19, 2005.

[41] M. Aharon, M. Elad, and A. Bruckstein, “K -svd: An algorithm for designing over-complete dictionaries for sparse representation”, *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 54, No. 11, pp. 4311–4322, 2006.

[42] A. Hirabayashi, N. Inamuro, A. Nishikawa, and K. Mimura, “High-quality recovery of non-sparse signals from compressed sensing -Beyond ℓ_1 norm minimization-”, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E98-A, No. 9, 2015.

関連発表論文

A. 学会誌発表論文（査読あり）

1. S. Shimamura, V. Chandrasekar, T. Ushio, G. Kim, E. Yoshikawa, and H. Chen, “Probabilistic attenuation correction in a networked radar environment”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 54, No. 12, pp. 6930 – 6939, 2016.
2. 嶋村重治, 菊池博史, 松田崇弘, 金寛, 吉川栄一, 中村佳敬, 牛尾知雄, “圧縮センシングを用いた気象用レーダの大容量観測データの圧縮”, 電気学会論文誌 A, Vol. 135, No. 11, pp. 704-710, 2015. Also translated in English: “Large-Volume Data Compression Using Compressed Sensing for Meteorological Radar”, *Electron. Commun. in Japan*, Vol. 99, No. 10, 103 – 111, 2016.
3. 嶋村重治, 吉川栄一, 吉田智, 牛尾知雄, 又吉直樹, “Ku 帯広帯域レーダによる山形県庄内空港における低層擾乱アドバイザリシステムの検討”, 電気学会論文誌 A, Vol. 134, No. 4, pp. 182-187, 2014. Also translated in English: “Preliminary Study on Low-Level Turbulence Advisory System with Ku-band Broadband Radar at Shonai Airport”, Yamagata Prefecture, *Electron. Commun. in Japan*, Vol. 98, No. 11, 1 – 8, 2015.
4. 平野裕基, 円尾晃一, 嶋村重治, 吉田智, 牛尾知雄, 水谷文彦, 佐藤晋介, “気象用フェーズドアレイレーダの精度検証”, 電気学会論文誌 A, Vol.134, No. 4, pp. 204-210, 2014.
5. 円尾晃一, 嶋村重治, 吉川栄一, 吉田智, 牛尾知雄, 水谷文彦, 佐藤晋介, “気象用フェーズドアレイレーダにおける最小二乗平均誤差法を用いたクラッタエコー低減の観測的検討”, 電気学会論文誌 A, Vol.134, No. 4, pp. 197-203, 2014.
6. 菊地亮太, 三坂孝志, 大林茂, 牛尾知雄, 嶋村重治, 又吉直樹, “空港周辺で発生する低層風擾乱の気象モデルと LES による融合解析”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 61, No. 6, pp. 159-166, 2013.

B. 国際学会 (査読あり)

1. S. Shimamura, T. Ushio, G. Kim, E. Yoshikawa, and V. Chandrasekar, “Probabilistic Attenuation Correction in Dual-pol Radar Network”, *IGARSS 2016*, Paper No. 2380, 2016.
2. T. Ushio, T. Mega, H. Kikuchi, S. Shimamura, T. Wu, and G. Kim, “Cross Sensor Validation of the GPM/DPR with Phased Array Radar at X band”, *37th Conference on Radar Meteorology*, Paper 8A. 3, 2015.
3. E. Yoshikawa, T. Fujiwara, S. Shimamura, H. Kikuchi, T. Mega, and T. Ushio, “MMSE approach for estimating radar Doppler spectrum”, *37th Conference on Radar Meteorology*, Paper 2B. 4, 2015.
4. S. Shimamura, V. Chandrasekar, T. Ushio, and E. Yoshikawa, “Probabilistic Approach for Precipitation Attenuation Correction in Multiple Radar Network”, *IGARSS 2015*, Paper No. 9024, 2015.
5. Y. Hirano, T. Mega, S. Shimamura, T. Wu, H. Kikuchi, T. Ushio, E. Yoshikawa, and V. Chandrasekar, “Ground Validation of Dual Precipitation Radar (DPR) on GPM by rapid scan Phased Array weather Radar”, *AGU Fall Meeting 2015*, Paper H13B-1080, 2014.
6. T. Ushio, S. Shimamura, H. Kikuchi, T. Mega, T. Wu, G. Kim, F. Mizutani, M. Wada, S. Satoh, T. Iguchi, and E. Yoshikawa, “Cross sensor comparison of the phased array radar at X band”, *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, Paper 9259-32, 2014.
7. T. Ushio, S. Shimamura, H. Kikuchi, T. Wu, T. Mega, F. Mizutani, M. Wada, S. Satoh, T. Iguchi, and E. Yoshikawa, “DEVELOPMENT AND OBSERVATION OF THE PHASED ARRAY RADAR AT X BAND”, *31st URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Paper No. 1102, 2014 (invited).
8. T. Ushio, S. Shimamura, H. Kikuchi, T. Wu, F. Mizutani, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, “Development and Observation of the Phased Array Radar at X band”, *AOGS2014*, HS17-D4-PM1-EB-001, 2014.
9. T. Ushio, S. Shimamura, H. Kikuchi, T. Wu, S. Mega, Y. Hirano, T. Iguchi, and T. Kubota, “The Use of Phased Array Radar in GPM”, *AOGS2014*, AS29-D2-AM2-EC-014, 2014.

10. T. Ushio, S. Shimamura, T. Wu, H. Kikuchi, S. Yoshida, Z-I. Kawasaki, F. Mizutani, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, “Development and Observation of the Phased Array Radar at X band”, *AGU Fall Meeting 2014*, AE13B-0346, 2013.
11. S. Shimamura, E. Yoshikawa, S. Yoshida, T. Ushio and K. Imai, “A Bayesian approach for precipitation attenuation correction with a Ku-band Broad Band Radar network”, *36th Conference on Radar Meteorology*, Paper No. 144, 2013.
12. S. Satoh, T. Ushio, S. Shimamura, K. Maruo, F. Mizutani, M. Wada, H. Hanado, S. Kawamura, S. Uratsuka, and T. Iguchi, “Three-dimensional Fine Structure of Localized Heavy Rainfalls Measured by Phased Array Weather Radar”, *36th Conference on Radar Meteorology*, Paper No. 157, 2013.
13. S. Yoshida, T. Ushio, S. Yoshida, S. Shimamura, K. Maruo, and N. Takada, “The Structure of Convective Systems Observed by Phased Array Radar in the Kinki Region, Japan”, *36th Conference on Radar Meteorology*, Paper No. 139, 2013.
14. T. Ushio, S. Shimamura, T. Wu, H. Kikuchi, E. Yoshikawa, S. Yoshida, F. Mizutani, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, “Observation and initial comparison of the Phased Array Radar at X band”, *36th Conference on Radar Meteorology*, Paper 4B.3, 2013.
15. M. Wada, H. Goto, F. Mizutani, T. Ushio, S. Shimamura, S. Yoshida, S. Kawamura, H. Hanado, S. Sato, and T. Iguchi, “Development of Dual Polarization Phased Array Radar”, *36th Conference on Radar Meteorology*, Paper 4B.1, 2013.
16. T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, Z. Kawasaki, “Development and Observation of the Ku-band Broadband Radar (BBR) Network”, *The 7th European Conference on radar in Meteorology and Hydrology*, Paper No. 141, 2012.
17. T. Ushio, E. Yoshikawa, N. Wakayama, S. Shimamura, S. Yoshida, T. Morimoto, and Z. Kawasaki, “Development of the broadband radar network with high resolution”, *The XXXth URSI General Assembly*, Paper E02-7, 2011 (invited)