



偏波レーダーを用いた積乱雲上部の霰の体積量推定に関する研究

小川, まり子

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2016-03-25

(Date of Publication)

2018-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6633号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006633>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 8)

論文内容の要旨

氏 名 小川 まり子

専 攻 市民工学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

偏波レーダーを用いた積乱雲上部の霰の体積量推定に関する研究

指導教員 大石 哲

近年の日本において、人的被害を及ぼすような豪雨による自然災害が多発している。2008年7月の神戸市都賀川での水難事故では、突然発生発達した積乱雲により、10分間で20mm程度(降雨強度、120mm/hr程度)の強い雨を観測し、10分間で1.34mの水位が一気に上昇したことで避難が遅れ、5名の尊い命が失われた。このような短時間で発達する積乱雲に対して、1分、5分でも早い避難が求められている。豪雨の危険性を早い段階で知っておくことが重要である。

本論文は、豪雨の危険性把握の手段の一つとして、雨滴が生成される前の積乱雲上部の霰(あられ)に着目する。積乱雲内では、氷点高度よりも上空の積乱雲上部において多数の氷晶と水滴(過冷却水滴)が共存する空間では水滴と氷晶の相互作用によって霰が生成されやすいと予想される。積乱雲上部の霰が落下・融解過程を経て、地上付近の雨量の最大可能性を把握するための第一歩として、積乱雲上部の霰の体積量を、偏波レーダーと直接観測機器(ビデオゾンデ)の同期観測から推定した。

偏波レーダーを用いた霰の定量的観測の根本的な問題は、複数のレーダーの偏波情報(レーダーパラメータとする)を定式化する際に、実際の霰の形状や密度を考慮した誘電率を表現することが難しく、想定した散乱モデルを計算することが難しいことにある。

偏波レーダーを用いて霰の体積量を求めるには、単位体積あたりに含まれる粒子個数を関数で表現したもの、粒径分布パラメータが必要である。また、豪雨を引き起こすような降水システムの理解を深めるために、霰の成長過程の把握として、「径に関する統計量」をレーダーパラメータから推定することも必要である。

本論文は、これらの課題を解決し、豪雨の危険性把握、さらには霰の成長過程の把握のために、「レーダーパラメータ」から「粒径分布のパラメータ」および「径に関する統計量」を明らかにした。

本論文は主として第2章～第5章で構成されている。

第2章においてレーダーパラメータの式を導出した。

第3章においては「径に関する統計量」と「粒径分布のパラメータ」の関係を検討した。すなわち第3章では、光学式の粒径分布測定機器を用いた地上の雪片観測を通じて、粒径に関する3つの物理量を用いてガンマ分布の3つの粒径分布パラメータ(N_0 , μ , A)を推定し、粒径分布パラメータの推定結果を粒径分布の形および体積にもとづいて検証した。粒径に関する物理量とは、体積の50, 99パーセンタイルに相当する粒径(それぞれ D_{50} , D_{99})と単位体積あたりに含まれる粒径の6乗和(つまり、レーダー反射因子 Z)である。

3つの物理量を用いてガンマ分布の3つの粒径分布パラメータを推定する際には、粒径が1mm以上の粒径分布を正確に表現することが重要である。その理由に、 Z が大きい粒子に影響されやすだけでなく、体積が過小推定となるのを防ぐことがあげられる。体積が過小推定となるのを防ぐことは、将来、積乱雲上部の霰の体積量から、地上付近の雨量推定を行う際に重要となる。上空の霰の体積量から推定された地上付近の雨量情報は河川付近や

(氏名： 小川まり子 NO. 2)

地下鉄など、浸水によって避難が必要とされる場所への立ち入り規制を強化することにつながるからである。

観測された雪片のヒストグラムは、 D_{50} と D_{99} の間においてガンマ分布と良く合っていた。観測された雪片体積を推定された雪片体積と比較したところ、相関係数は0.989であり、この高い相関結果には、粒径分布の形状パラメータ μ における品質管理や、雪片粒径が1mm以上において雪片のヒストグラムが連続確率関数であることが必要であることが示された。

第4章においては、偏波レーダーにもつづいた霰の体積量推定の検証用として必要な、ビデオゾンデに関する定量性を統計的手法から検討した。ビデオゾンデで捕捉された粒子を用いて粒径分布を推定するための補正係数を決定した。まず、地上の雨滴計（ディストロメータ）で得られた単位体積あたりの雨滴個数 $nd(I)$ (I は粒径クラス)を真値として、高度2500m以下における4分間毎のビデオゾンデ観測と1分間毎のディストロメータの観測から得られた単位体積あたりの雨滴個数 ($nd(I)$) の比率を算出した。異なる2つの観測機器を用いていることから、時間・場所・高度・観測粒子の種類の違いによる降雨の変化が小さいかどうかを多群検定により判定した。次に、ビデオゾンデで捕捉された雨滴の個数を補正するための最適な補正係数 ($1/ratio(I)$) を、個数比率の分位数と4分間にビデオゾンデで捕捉された観測総個数 (wa) によって決定した。

補正係数の結果を用いて粒径分布および Z の検証を行った。ビデオゾンデで捕捉された単位体積あたりの雨滴個数 ($nv(I)$) を1~4.7倍 (粒径クラスや wa によって決定される) すると、推定された雨滴粒径分布がディストロメータの粒径分布とよく合っていたことが確認された。また補正係数を用いてビデオゾンデから推定された Z と、ビデオゾンデ経路上の実際のレーダーパラメータ Z (水平偏波を使用) の平均値を用いて、 $RMSE$ (Root Mean Square error) を算出した。補正係数を用いた場合の $RMSE$ は4.2dBZ、補正係数を用いなかった場合の $RMSE$ は13.0dBZとなり、雨滴個数を補正した効果が得られた。ただし、この $RMSE$ の算出条件として、粒径が1.5~2.4mmの大きい粒径クラスのグループにおいて粒径クラス毎の観測個数が3個以上であること、推定後の粒径分布では表現されなかった粒径分布のテール部分の粒径クラスが2クラス未満であることが必要とされた。以上より、放球されたビデオゾンデを用いて雨滴粒径分布および Z を十分に推定できる場合があることが明らかになった。

第5章において複数のレーダーパラメータ (偏波レーダーパラメータともいう) が取得可能な偏波レーダーとビデオゾンデを用いて、実際の偏波レーダーパラメータとビデオゾンデで得られた粒径分布との照らし合わせを行い、霰の密度の代表値を推定した。推定された密度の代表値を用いて、2つの偏波レーダーパラメータとビデオゾンデで推定された μ - A 関係から最適な粒径分布パラメータ (N_0 , μ , A) を決定した。本章では、ガンマ分布の計算を容易にするため、以下のような D_{50} を固定した手法を提案した。具体的には、2つの偏波レーダーパラメータおよび $\mu=0$ から推定された D_{50} を固定して、ビデオゾンデで推定された μ - A 関係から最適な μ , A を決定した。

(氏名： 小川まり子 NO. 3)

D_{50} を固定した粒径分布推定の結果、推定された体積量および径に関する統計量 D_{99} の $RMSE$ (Root Mean Square error) が0.18mmであった。これは、2つの偏波レーダーパラメータおよび $\mu=0$ から推定された粒径分布に対する D_{99} の $RMSE$ (0.33mm) よりも小さくなった。 D_{50} を固定した粒径分布推定手法を用いることで D_{99} の推定精度の向上が確認された。ビデオゾンデで推定された μ が2以下のときに D_{50} を固定して推定された粒径分布はビデオゾンデで推定された粒径分布に合っていた。このとき、 D_{50} を固定して推定された体積量とビデオゾンデで推定された体積との誤差の比率 RE は-0.09~0.98であった。この RE は、地上の光学式の機器で得られた粒径分布よりも0に近づいたことから、 D_{50} を固定した粒径分布推定方法は体積を適正に推定できたといえる。

以上の構成に沿って、積乱雲上部の霰について「レーダーパラメータ」から「粒径分布のパラメータ」および「径に関する統計量」を明らかにし、偏波レーダーを用いた霰の体積量推定を行った。

氏名	小川 まり子		
論文 題目	偏波レーダーを用いた積乱雲上部の霰の体積量推定に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	大石 哲
	副査	教授	飯塚 敦
	副査	教授	藤田 一郎
	副査	准教授	小林 健一郎

要 旨

本研究の背景として、日本のみならず世界的に増加している短時間豪雨についての、正確でよりリードタイムの長い予測の需要があり、それに対して本研究では、レーダーを用いた上空の霰の体積量を推定する手法によって予測精度の向上とリードタイムの延長を提案している。

短時間豪雨は主として対流雲の急速な発達によってもたらされると考えられており、その正確な予測のためには、数値解法と観測および定量的推定による方法があるが、本研究では後者のアプローチをとった。従来の観測による手法では、主として融解層よりも低層の降水粒子の体積量やその落下速度を考慮した降雨強度を測定して、予測にはその水平方向の移動と発達・衰弱を考慮するという手法をとっていたが、本研究では、レーダーを用いて融解層よりも高層も含む3次元的な積乱雲の観測をすることで、上空にある固体降水粒子の量を推定している。観測された固体降水粒子は種々の雲物理過程を経て融解して雨になって地上にもたらされることが既往研究から示唆されているので、上空の固体降水粒子の測定によっていわば局地豪雨の根本をなす物理量を推定するという課題に挑戦している。

これまでにレーダーやその他の実用的方法によって上空の固体降水粒子の量を推定することができなかった理由は、1つには融解層における電波減衰、2つ目には上空の固体降水粒子が空間の単位体積あたりに存在する粒径あたりの個数、すなわち粒径分布についての知見を活用した体積量推定手法の欠落が挙げられる。そのうち、第1の理由については、昨今のXバンド偏波ドップラーレーダーの性能向上と多数のレーダーの配備によって、電波減衰の影響を除去する方法が米国の研究者などによって提案されて解決されてきている。

そのような現状を踏まえると本研究で上記の第2の困難さを克服するという目標は合理的であり挑戦的であった。すなわち、本研究では粒径分布を2つおよび3つのパラメータによって表現して、そのパラメータを推定する手法、すなわちパラメトリックな方法を提案している。その際の固体降水粒子としては霰を対象としている。

本研究の新規性は以下の2項目である。

1) 本研究では、ビデオゾンデという、上空の固体降水粒子を観測する装置を用いて直接霰粒子の粒径分布を計測している。ビデオゾンデを用いて霰を含む上空の固体降水粒子を観測した例はあるが、粒径分布を計測した研究例はなく、直接上空の霰の粒径分布を計測しているという点が、本研究の新規性である。

2) 本研究では、粒径の50パーセンタイル値(D50)、99パーセンタイル値(D99)という2つの物理量を用いることで、偏波レーダーによって粒径分布を推定することを可能にしている。D50は平均粒径、D99は最大粒径と置き換えることができる。本研究ではレーダーの偏波パラメータからD50、D99を算出する方法を考案して、レーダーだけから上空の霰粒子の粒径分布推定を可能とした。

このように本研究では2つの新たな知見をもたらすことで、レーダーを用いて上空の霰粒子の体積量を求めようとする中で科学的な進歩をもたらしている。

また、本研究においては、これまでなされたことのない上空の霰粒子の観測のために、地上における雪片の粒径分布の観測や、ビデオゾンデと地上粒径分布観測装置との比較といった、定量性に関する緻密な検討も行っている。

氏名	小川 まり子
<p>本研究では、上記の成果を上げるために6つの章に分けて研究を進めている。</p> <p>まず、第1章ではレーダーを用いた霰の定量的観測についての従来の知見を整理することを試みて、その困難さを列挙して、それについて本研究でのアプローチを紹介している。</p> <p>第2章では、降水粒子の粒径分布とレーダーパラメータとの関係を記述している基礎方程式を展開して、問題を定式化している。</p> <p>第3章では、地上の雪片の観測データを用いてパラメトリックな粒径分布の推定手法について検討している。すなわち光学式の粒径分布測定機器を用いた地上の雪片観測を通じて、粒径に関する3つの物理量を用いてパラメトリックな粒径分布の3つの粒径分布パラメータを推定し、粒径分布パラメータの推定結果を粒径分布の形および体積にもとづいて検証している。</p> <p>第4章では、地上付近の雨滴観測とビデオゾンデによる低空の雨滴観測を比較して、ビデオゾンデを用いた粒径分布推定の定量性や精度について統計的手法を用いて検討している。</p> <p>第5章では、レーダーと直接観測機器であるビデオゾンデを用いて積乱雲上部の同期観測を行い、直接観測データを用いて密度を考慮した仮想のレーダーパラメータを表現して、レーダーから得られるレーダーパラメータとの比較から密度を推定するという手法を展開して、粒径分布パラメータおよび体積量推定手法を論じている。また、レーダーパラメータに用いた霰の粒径分布推定結果を検証して、レーダーパラメータと霰の径に関する統計量との関係性を検討して、合理的な仮定とビデオゾンデ観測によって導かれた粒径分布パラメータの関係を用いて3つの粒径分布パラメータを同定する手法を提案している。その結果、既存の手法の誤差を半分減らすことに成功している。</p> <p>第6章では論文の各章で得られた成果をとりまとめて1つの成果を導き出している。</p>	
<p>審査では、予備検討で行われた本研究の背景についての検討、本研究で用いている手法の科学的根拠について検討、さらに、本研究の新規性について検討を行い、それらの再確認がなされた。さらに、本研究の成果について検討を行い、第2章、第3章、第4章、第5章の成果については、科学的根拠と科学的手法を用いて適切に導出された成果であると認識され、特に第5章の成果は相当なインパクトを与える可能性があるものと認められた。</p> <p>論文目録に記載された1編の論文は、複数の査読者によるピアレビューを経て信頼できる学会(日本気象学会)から専門的な科学雑誌として出版された査読付き論文であることが確認された。また第4章は同様の査読付き論文への投稿を準備していること、第5章の成果も同様に査読付き論文へ投稿されることが確認され、十分に採択されるものとして認められた。</p>	
<p>本研究は短時間豪雨の源とも言える空中における霰の量の定量的推定について、特別な観測手法と斬新なアイデアをもってその粒径分布パラメータを算出する手法について研究したものであり、豪雨をもたらす雨雲と、偏波ドップラーレーダーによる短時間豪雨の予測について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の 小川 まり子 は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	