

2 周波の偏波レーダーを用いた豪雨観測と火山灰観測

神戸大学都市安全研究センター 大石哲・小川まり子
 神戸大学大学院工学研究科 佐藤卓弥
 京都大学防災研究所 山口弘誠・中北英一

1. はじめに

気象レーダーの黎明期は雨雲からの散乱電波の強さを輝度でブラウン管表示していたが、デジタル技術の進展などにもとまって、短い時間間隔で高い空間分解能を持つ降雨強度計測装置として進展してきた。一方で過去には散乱電波の強さと地上雨量計の間をべき乗則で関係づけていたため、比較的わかりやすかったが、さまざまな観測パラメータによって降雨強度を算出するようになってプロセスのブラックボックス化が危惧されるようになった。そこで、本稿ではレーダーによって高い時空間分解能で比較的正確な降雨強度を算出する方法を説明する。

2. 雨滴程度の大きさの空中浮遊物質による電波散乱

レーダーはアンテナから電波を一定時間送信する。その電波は空中浮遊物質にあたると散乱される。散乱された電波の広がりや強さは空中浮遊物質の大きさや材料によって異なる。散乱電波のうち、アンテナの方向に返ってくるものを後方散乱電波という。実際には空中浮遊物質の1粒ずつからの後方散乱電波がある計測時間単位でまとまって受信される、その計測時間単位で受信された電波のエネルギーの強さのことをレーダー反射因子といい、計測時間単位に光速を乗じたものがレーダーのビーム方向の空間解像度となる。電波は直径2mのパラボラアンテナによって0.5度程度の仰角・方位角に限定されて射出されるのでビームと呼ぶ。理想的には送信された電波と同じ仰角・方位角の電波だけを受信する。

したがって、レーダーではビーム方向の空間解像度の長さや仰角・方位角で規定される観測単位体積の散乱電波情報の積分値あるいは統計値が観測値となる。この積分値から1粒ごとの後方散乱電波情報を再構成して空中浮遊物質（一般的には雨粒）を再現し、それが落ちてくる状態（同じく降雨強度）を推定するため、レーダーによる降雨強度推定は積分方程式のパラメータ推定問題となる。

電磁気学の散乱に関する理論では、散乱された電波は、Maxwell 方程式を変形した微分方程式に、散乱に関する境界条件を与えることによって求められる。その計算方法はいくつかあるが、空中浮遊物質の大きさなどが分布として分かっているならば、その1粒ごとの後方散乱を算出して、積分結果としてのレーダー反射因子を算出することができる。一方、水文学的には積分されたレーダー反射因子を観測値として用いることで、雨粒の構成を推定して、それが降雨強度を推定する、すなわち逆問題を解くことになるという問題がある。

一般的に雨粒の材質は液体の水、形は大きさに依存した楕円形であると固定できる。雨粒の粒径ごとの個数である粒径分布は3つのパラメータからなるガンマ関数の形をしていると仮定すると、同一の観測体積から3つの観測値を得ることができれば粒径分布の3つのパラメータを推定することができる。

最近使われている MP レーダー は Multi Parameter Radar の略で同一の観測体積から複数の観測値を求めようとするものである。そのために MP レーダーは全く同時に垂直偏波と水平偏波をもつ電波を送信することができ、それぞれのレーダー反射因子を独立して計測することができる。その比（ログスケールで差）を取ったものがレーダー反射因子差であり、空気抵抗で扁平になった雨滴の粒の縦軸と横軸の比を表していると考えられている。

また、MP レーダーでは電場のエネルギーの強さとともに受信する垂直・水平偏波の位相差を計測することができ、それを伝搬位相差という。伝搬位相差も雨滴の縦軸と横軸の比を表していて、強い雨は大きな雨滴を多く含むので扁平になって伝搬位相差が大きくなる。エネルギーの情報であるレーダー反射因子は散乱によって減衰するため減衰量を推定する必要があるが、位相情報は減衰しない。したがって伝搬位相差を使

うことで特に減衰が大きくなる強い雨の時の降雨強度推定を向上させている。

空中浮遊物質が雨粒の場合には、大きな雨粒の方が扁平しやすいこともあって散乱されて受信される鉛直偏波と水平偏波の間には相関が高いのだが、氷柱のような場合には落下姿勢によって散乱が変化するため相関が小さくなる。MP レーダーでは偏波間相関係数も計測できるので、それを使って空中浮遊物質が雨粒なのか氷粒なのかを推定することができる。それを降水粒子判別と呼んでいる。

3. MP レーダーパラメータによる降雨強度推定

上述したレーダー反射因子、レーダー反射因子差、伝搬位相差および偏波間相関係数が MP レーダーによる主な観測パラメータであり、実際にはこれらを組み合わせたファジィ理論で空中浮遊物質の降水粒子判別を行い、また、粒径分布の 3 つのパラメータをレーダー観測パラメータから推定する。実際にはレーダー反射因子、レーダー反射因子差、伝搬位相差に相関があって独立していないこと、雨滴の場合には偏波間相関係数の変動が小さいことから粒径分布の 3 つのを決めることが困難である。そこで、降雨強度推定に影響が小さいと考えられている小さな雨滴の粒径分布推定に影響があると考えられる 1 つの粒径分布パラメータは 0 として固定する。それによって粒径分布はガンマ関数ではなく指数関数となり、残った 2 つの粒径分布パラメータをレーダー反射因子、レーダー反射因子差、伝搬位相差という 3 つのレーダー観測パラメータから推定する。

推定された降水粒子の粒径分布に、粒子の密度と体積および粒径に応じた落下速度を乗じて粒子の最小径と最大径までを積分することは指数分布の 4 次モーメントの計算に相当する。最小径は 0mm、最大径は ∞ にすることで解析的な積分を行うことができる。一方で、上述の方法をいくつかの場所で開催して求められた積分後のべき関数は、上記の方法を厳密に行うよりも高速に降雨強度を推定でき、その精度も統計的には確保されているので、そちらを用いる方が実用的である。

ここまで述べてきた方法では、従来のレーダー反射因子だけをもちいた降雨強度推定よりも、より高い精度の降雨強度推定を行うことができる。しかし、レーダーで推定しているものと、地上の雨量計が計測しているものは異なっている。レーダーでは、上空 500m から 4000m の高度で 10^6m^3 以上の体積の代表的な降雨強度を 1 分から 5 分ごとに推定しており、アメダスで用いられている地上雨量計では 30cm^2 の面積を 10 分間に通過した雨滴の体積を計測している。どちらが正しいとか、間違っているというわけではなく、計測したいものの時空間変動特性、または時空間相関を勘案して測定されているものの誤差特性をモデル化した上でそれを時空間積分することによって誤差範囲を考慮した計測が可能になる。

4. 最先端のレーダーの利用方法とレーダーそのものの紹介

気象レーダーを用いて火山灰量の推定を行う研究が日本でも盛んになってきた。火山灰は雨滴と違って個体であるため粒子が回転楕円体をしているとは仮定できないなどの困難があるが、今まで雲や噴煙に覆われて見ることができなかった噴出された火山灰の上空での動きや、火砕流の高さ、それをもたらす噴出物の熱量などの現象の理解につながるし、降下した堆積物が地上に堆積している厚さを即時に推定することにもつながると考えられる。

最後に最近になって注目されているレーダーを 1 つ紹介する。現業の気象用レーダーとして用いられているレーダーは波長が 5cm 程度の C バンドレーダーと、波長が 3cm 程度の X バンドレーダーであるが、最近になって波長が 1cm 未満のミリ波レーダーが研究用に用いられるようになってきた。レーダーの波長と、レーダーが探知する空中浮遊物質の大きさには単調増加関係があり、X バンドレーダーでは直径が 0.5mm 程度よりも小さなものは探知しにくい。すなわち、小さな雨粒の感度が弱い。ミリ波レーダーであれば数 $10\mu\text{m}$ 程度の雲粒にも感度があって、雨雲になる以前の空中に漂っている雲を探知できるため、降雨予測の予測時間を延長したり X バンドレーダーでは無視してきた小さな雲粒の粒径分布の推定に使えると期待している。