光学式降雨検知システムを用いた降水粒子の粒径分布特性に関する検討

Characteristics of Raindrop Size Distributions with a Laser-Based Optical Disdtometer

北海道大学　学生員　阿久津博（Hiroshi AKUTSU）
北海道大学　正会員　山田朋人（Tomohito YAMADA）

１．はじめに

現在我々が画的に使用している降雨情報はレーダーを用いて観測されており，このレーダー観測において降雨強度を算定している重要な１因子に雨滴粒径分布の存在がある。

降雨強度(R)はn(d)を雨滴の数，d を雨滴粒径，Uを雨滴の落下速度，ρa を空気の密度，ρを雨滴の密度，g を重力加速度として，

$$R = \int n(d)(\pi d^3/6)U \,\mathrm{d}\, d \qquad \cdots(1)$$

で表せる。

また，雨滴の落下速度は自由落下速度であるので，

$$R = \int n(d)(\pi d^3/6)\sqrt{(\rho/\rho_a)gd}\,\mathrm{d}\, d \qquad \cdots(2)$$

で表記することができる。

式(2)で明らかなように，降雨強度は雨滴粒径とその個数，つまり雨滴粒径分布によって算定される。

似たような降雨形態に関わらず雨滴の大きさには驚くほどの差がある（Bentley, 1904）。降雨形態や気候特性などの自然要因によって雲内部の物理過程が変化し，雨滴の粒径は様々な大きさの分布が描かれる。

まず，雨が降るまでの過程を説明する。雲は上昇する空気塊が冷やされることによって形成されるが，雲内部では凝結により雲粒が生まれ，その小さな雲粒（0.001mm~0.01mm）に凝結された水蒸気が付加しいく。そして，雲内部で雲粒同士衝突することにより併合し，最終的に雨滴（0.1mm 以上）まで成長する。

図１は示すMarshall・Palmer が提案した雨滴粒径分布（M-P 分布）は，主にレーダー反射強度から降雨強度の変換に活用されている。つまり，気象レーダー観測にとって，雨滴粒径分布は降雨強度を算定するための重要な因子である。さらに，数値モデルによる降水形成過程の計算や土砂への降雨圧の計算など幅広く活用されている。また，雨滴粒径分布は世界各地で測定されており，その気候学的研究も行われている（Bringi .,2003）。

しかし，図１を見れば明らかであるが 1.5mm 以上の観測値では実直線にのっているが，それ以下の大きさのものでは実直線上にのらず，このままで降雨強度に変換した場合正確な値は出せない。そして，小さな雨滴における雨滴粒径分布は検討の余地が残されている。

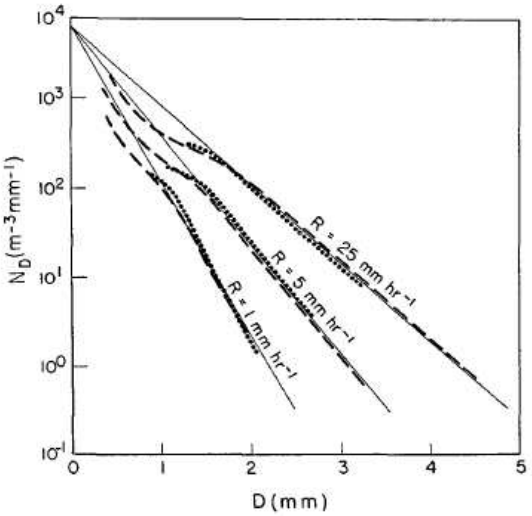

図１　M-P 分布（D : 直径，ND : 雨滴の個数，R : 降雨強度）

実直線：$N_D = N_0 \cdot e^{-(\wedge D)}$　　・・・(3)

ここで　$N_0 = 0.08cm^{-4}$　　・・・(4)

$\wedge = 41R^{(-0.21)}cm^{-1}$　・・・(5)

点線 : Marshall と Palmer によるオタワにおける観測値

破線 : Law と Parson の結果

（Marshall and Palmer，1948）

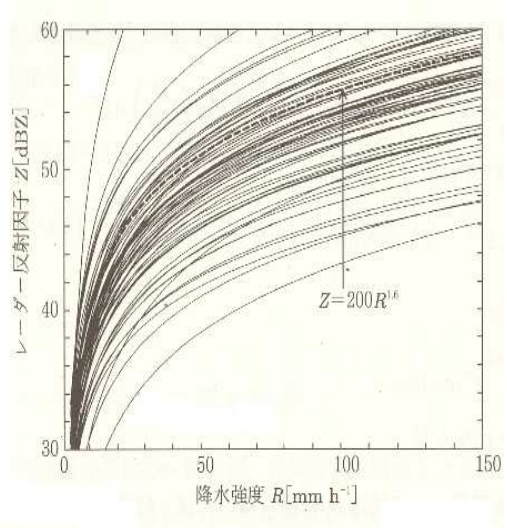

図２　Battan による各種降雨に対する Z-R 関係

一般にレーダー反射因子と降雨強度の関係は

$$Z = aR^b \qquad \cdots (6)$$

(Z:レーダー反射因子，R:降雨強度，a・b:定数)

と表せるが，図2で示すように降雨パターンによっても様々である。そしてこのばらつきは雨滴粒径分布の違いによって生まれる。雨滴粒径分布については完全に解明されていないので，多数の降雨例をもとに経験的にa・bを算出しているのが現状である。例えば，日本では $Z = 200R^{1.6}$ を用いており（気象と大気のレーダーリモートセンシング：深尾昌一郎・浜津享助），随時適したものに変更して使用されている。

また，１粒の雨粒について着目した際，雨粒が下からの空気圧により変形し，雨滴の表面張力による形状の維持ができなくなることで雨滴は崩壊する。１粒の雨滴に対する崩壊により様々な大きさの雨粒が生み出されるが，それによる雨滴の粒径分布はおおよそM-P分布にそうものであるとの結果が最近明らかにされている（Villermaux and Bossa，2009:Nature)。

これまで，雨滴粒径分布は雲の内部で決定されると考えられていたが，上記の研究成果は１粒の雨滴が雲から落下していく過程もまた雨滴粒径分布を決める１因子であることを述べた興味深い結果である。

本研究では実際の降雨を測定して雨滴粒径分布を作成することにより得られる雨滴粒径特性を議論する。

２．雨滴粒径測定装置 Parsivel を用いた観測結果

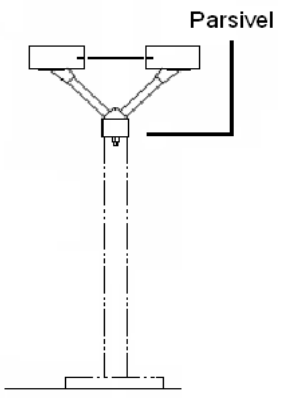

図３　雨滴粒径測定装置概要

本研究ではレーダーや人工衛星による降雨観測のアルゴリズムの作成や検証に使用されている雨滴粒径測定措置装置 Parsivel を用いた（図2)。

Parsivel の測定原理としては，片方からレーザーを出し，もう片方でレーザーを受信する。雨滴が落下していく過程でレーザーを遮る事による信号の変化量から雨滴の粒径・雨滴の落下速度・雨滴の個数を計測し，降雨強度・降雨量などを測定するものである。

Parsivel を用いた降雨測定は北海道大学のキャンパス内で実施されており，本論文では 11 月 2 日 13:34:20～14:06:50 まで測定された結果にいて報告する。観測時の気温は約 9℃であった。

３．測定された雨滴粒径分布

Parsivel で観測された雨滴の分布降雨強度別に図４と５に示す。

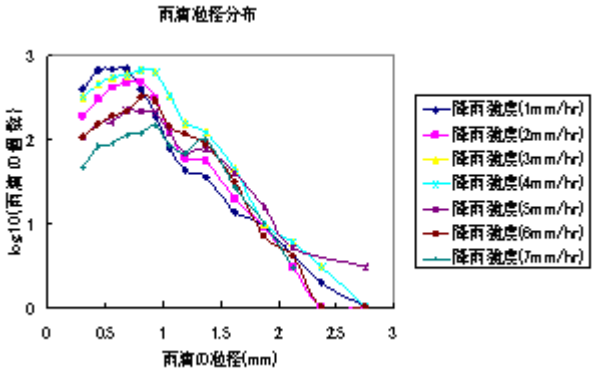

図４　降雨強度 1mm/hr～7mm/hr の雨滴粒径分布

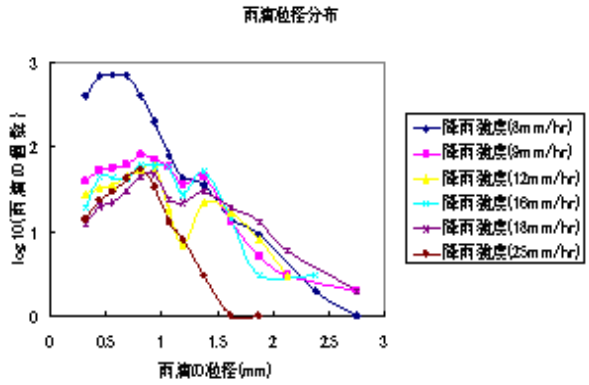

図５　降雨強度 8mm/hr 以上の雨滴粒径分布

今回の観測された降雨は平均降雨強度 2.87mm/hr，積算降雨量 18.6mm であった。また，雨滴総数は 22875 である。

図 4, 5 において降雨強度 9mm/hr 以上の雨滴はデータ数の不足により M-P 分布とかけ離れたものとなったが，1mm/hr～8mm/hr の雨において雨滴１mm 以上では M-P 分布と同様に単調減少を示していることがわかる。

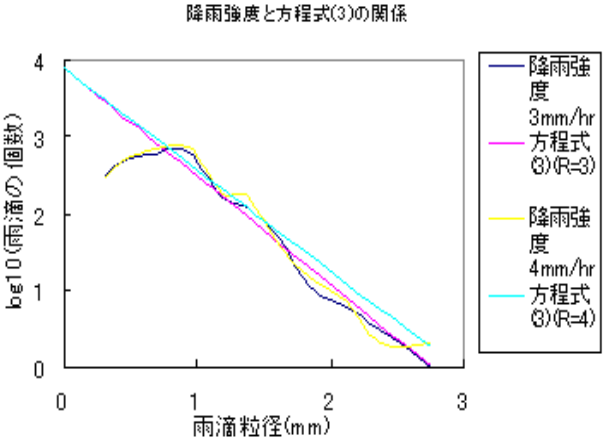

図６　降雨強度と方程式(3)の関係

図６において示すとおり，3mm/hr，4mm/hr に関しては式(3)に概ね一致していた。

一方, 降雨強度別に見ると 1mm/hr～7mm/hr において雨滴粒径分布に明瞭な違いが見られない。

この結果に至った原因としては各々の沿う雨滴数に偏りがあること，降雨強度 1，2mm/hr の際に大きな粒径の個数が多い降雨形態であったことが考えられる。

図４，５の結果から，0.25mm～0.5mm の雨滴の分布は降雨強度の強さがある程度上昇するまでは単調に多くなっていくが，5，6mm の粒径を契機に減少するとの特徴が見られる。

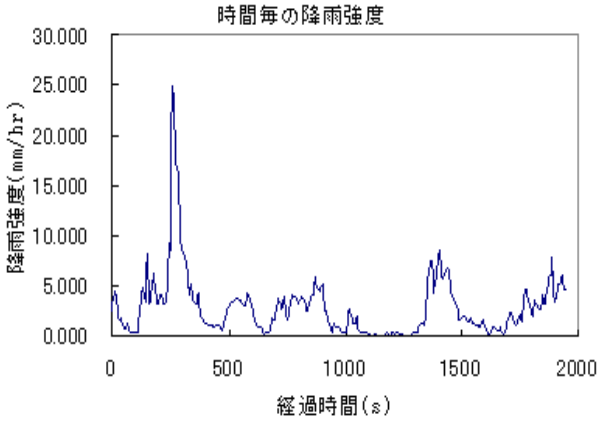

図７　対象とする降雨イベントの降雨強度時間変化

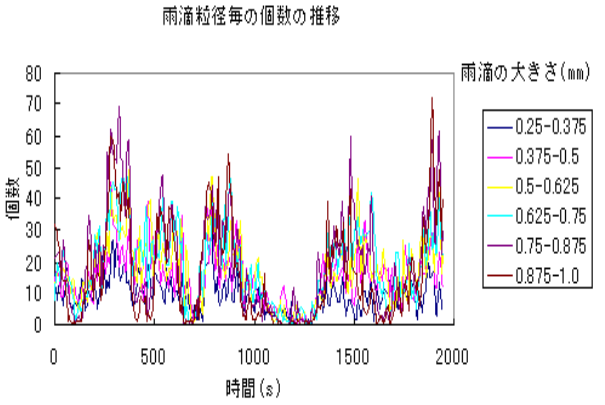

図８　雨滴粒径毎の個数の時間的推移

図 7 は本研究において対象とする降雨イベントの降雨強度の時間変化を図８は雨滴粒径毎に粒子個数の時間変化を示す, 図８より，0.25mm～1.0mm の雨滴に絞って個数の時間毎の推移を見てみると降雨強度と比例関係にあることがわかる。しかし，雨滴粒径 0.25～0.375mm に注目すると上記の比例関係が明瞭でなくなる。つまり，雨滴の分布は 0.75~1.0mm あたりが増加することで降雨強度が高まると推測する。このことからも 0.25mm～0.5mm の雨滴の分布は降雨強度の強さがある程度上昇するまでは単調に増加するが，5・6mm/hr の降雨強度を契機に減少することを裏付けるものであろう。

４．考察

今回は観測データが少ないこともあり, 推測の裏打ちとなるには説得力が欠けるものとなってしまった。今回得られたこの推測に関しては, 降雨強度 6～8mm/hr の観測雨滴個数が相対的に増加する場合状況も変化するかもしれない。

５．　今後

今回，降雨観測により雨滴粒径を考察してきたが，１粒の雨粒がもたらす降雨分布についての検討を行う予定である。

また，雲内部の雨滴生成の核となる凝結核となるエアロゾル（aerosol）というものが存在する。エアロゾルには塩化ナトリウム（海面のしぶきから形成）・硫酸・硫酸アンモニウム（自動車の排気ガス・海中のプランクトンの活動）などがあるが，このエアロゾルに含まれる成分によって雨滴の表面張力が変わっていくことにより M-P 分布に違いが現れることが推測される。

１粒の雨滴におけるエアロゾルによる雨滴粒径分布の結果がどのような意味を持つことかを考察することを目標とする。

１粒の雨滴の観測については, 図９のように上から注射針で雨滴を落下させる。さらに下から送風することによって雨滴を終末速度にし，雨滴粒径ごとの分裂過程をスピードカメラで撮影することにより，雨滴粒径分布特定の検討を行う予定である。

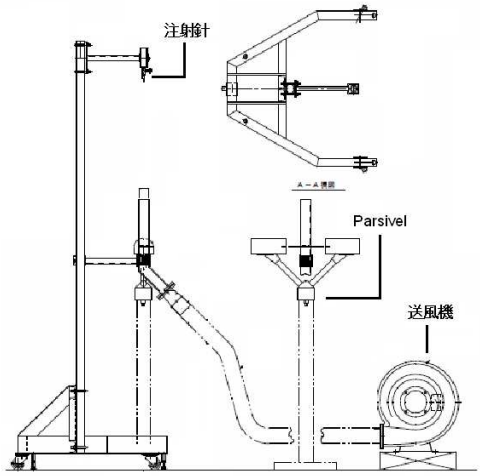

図９　雨滴落下形状に関する実験装の概要

参考文献

The Distribution of raindrops with size. J. Meteorol.5, 165-166 (Marshall,J.S & Palmer,W.M.)(1948)

Raindrop size distribution in different climaticregimes. J.atomos.Sci., 60,354-365(Bringe2003)

Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops. Nature physics,697-702(Villermaux & Bossa)

流体力学(日野幹雄)

気象と大気のレーダーリモートセンシング(深尾昌一郎 & 浜津享助)

雨の科学-雲をつかむ話(武田喬男)