

雨滴の衝突・分裂により生じる微小水滴の粒径分布と蒸発

Size Distribution and Evaporation of Minute Water Droplets
caused by Collision and Division of Raindrops

坂本康*・三枝倫**

By Yasushi SAKAMOTO and Hitoshi SAEGUSA

Forest canopy can divide raindrops to minute water droplets by collisions with branches and leaves. This may promote evaporation and suspension of water and influence the water budget in forest area. Therefore, we investigated the size distribution of minute water droplets caused by the collisions. Experimental results showed that the size distribution of droplets could be represented by $N=N_0\exp(-ar^3-br^2)$, where N, r : number and radius of droplet, and N_0, a, b : constants, better than by exponential equation especially in both ends of distribution curve. Estimated evaporation during 20m fall of minute droplets was about 1-3%.

Keywords: droplet size distribution, evaporation, collision

1. はじめに

降雨は樹冠に達したとき枝葉に衝突して微小な水滴に分裂する。このことが、森林中での水の移動、蒸発、ひいては水収支に影響を与えているかもしれない。たとえば、降雨中の蒸発を葉の表面でだけ起こると考えると蒸発量は少なく見積もられるが、実際は、雨滴が分裂してできる微小な飛沫の蒸発、空中での浮遊によりみかけの蒸発量は多くなるかもしれない。そこで本研究では、雨滴の衝突によって生じる微小水滴の粒径分布を検討し、その蒸発量を見積もることを試みた。粒径分布では、エネルギー的視点による分布式を提案している。

2. 理論と仮説

2.1 微小水滴の粒径分布

大気上空での雨滴の粒径分布には、一般に指数分布を用いることが多い。しかし、実験により観測された分裂後の水滴では、小さい径の水滴数が指数分布で想定されるよりも少なくなる。そこで、この特徴に適応した分布形も想定することとした。衝突による分裂を考えると、運動量的視点とエネルギー的視点での検討が考えられる。しかし、分裂は新しい界面の形成でもあることを考慮すると、エネルギー的視点によりふさわしいように考えられる。そこで、エネルギー的視点をとることとした。エネルギー ϵ をとる分子の個数 N に関する式については、物理化学では以下のボルツマン分布が普通用いられる。

* 正会員 工博 山梨大学 工学部土木環境工学科

(〒400 山梨県甲府市武田 4-3-11)

** 学生員 山梨大学大学院 土木環境工学専攻

$$N = N_0 \times \exp(-\beta \varepsilon) \quad (1)$$

ここに、 N :分子の個数、 β , N_0 :定数、 ε :分子のエネルギーである。ここで、式(1)のエネルギー項(ε)を分子数・体積に比例する項と表面張力・表面積に比例する項の和と仮定した。このとき、分布式は以下になる。

$$N_r = N_0 \times \exp(-ar^3 - br^2) \quad (2)$$

ここに、 N_r :半径 r の水滴の数、 r :水滴半径、 N_0 , a , b :定数である。

定数 N_0 , a , b は、3. 実験方法に示した実験より得た実測値を用い、対数表示後、最小二乗法により決定した。

2.2 微小水滴の落下中の蒸発

実際には、雨滴は樹冠最上部から地表までの落下の途中で繰り返し樹木に衝突し、分裂する。また、気流に乗って移動したり、その後樹体に付着したりする。これらのことが、すべてなんらかの形で蒸発に影響を与えている可能性がある。しかし、これらについては不明な点が多いため、本研究では、一回の衝突によりできた微小水滴が樹冠から地表までの高さに相当する距離を鉛直に落下したときの蒸発量を試算することにした。蒸発の評価では、神田ら¹⁾の蒸発による水滴の半径変化の式(3)を差分化して用いた。

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{S - A}{L^2 M \rho_L A / KRT^2 + \rho_L RT / e_s(T) D_i M} \quad (3)$$

ここに、 r :水滴半径、 t :時間、 S :大気相対湿度、 L :水の蒸発潜熱(540cal/g)、 M :水の分子量(18g/mol)、 ρ_L :水の密度(1g/cm³)、 R :気体定数(8.3144/4.2cal/deg/mol)、 T :気温、 e_s :飽和水蒸気圧、である。ただし、神田ら¹⁾にならい、水分子・空気分子の水滴への付着係数は1、 A :水滴表面の湿度は $1+B/r-C/r^3$ ($B=3.2 \times 10^{-5}/T$, $C=8.6m/M$, m :溶質の質量)、 D_i :水蒸気の拡散係数は0.220cm²/sec、 K :空気熱伝導率は $2.41 \cdot 10^{-4} \times 0.2388\text{cal/cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{sec}$ とした。単純化のために、微小水滴は純水で球形と仮定した。落下速度についてはAllen域での以下の式を用いた。

$$V_{(D)} = 4.278 \times 10^3 \cdot D \quad (4)$$

ここに、 $V_{(D)}$:落下速度[m/s]、 D :粒径[m]である。計算では、気温は10℃、相対湿度は10%に設定し、時間きざみ0.1秒で、落下距離が20mに達するか、または径が実験で観測された最小径、0.05mmより小さくなるまで計算した。この計算によって、初期粒径分布が20m落下後どう変化しているか、落下の間の蒸発量はどの程度かを求めた。ただし、計算では(3)式の定数を上記のように仮定しているため、計算値は正確な蒸発量ではなく、あくまで蒸発量を比較する上での目安と考えられる。

3. 実験方法

2. の理論・仮説を適用するデータを得るため、実際の枝葉を使って水滴の衝突・分裂実験を行った。衝突・分裂の測定が目的であるため、水が滞留しにくい針葉樹(ニッコウバ)の枝葉を用いた。この枝葉は、水滴を衝突させるまでは乾燥した状態であった。実験では、この枝葉(長さ約10cm)の上空0.75mの位置から水滴を落下させた(図-1)。衝突・分裂後の微小水滴は、枝葉の直下0.25mの位置で、縦横3枚×3枚、計9枚の亚克力板を用いて捕捉した。一つの亚克力板は10cm四方であるため、捕捉範囲は30cm×30cmの範囲である。亚克力板の表面にはTanaka²⁾の方法に従いポリビニルアルコールを10倍に希釈した液を塗装し、乾燥させた。これにより、亚克力板上に微小水滴落下時に痕跡が残るようにした。この痕跡の直径をノギス(最小目盛り0.05mm)で測り、次式を用いて実際の水滴径に変換した。

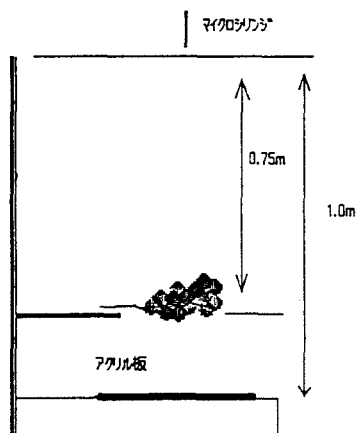


図-1 実験の概要

$$d = 0.209 \times D^{1.25}$$

(5)

ここで、 d :実際の水滴の径[mm]、 D :アクリル板上の水滴痕の径[mm]である。

ただし、式(5)の形はTanaka²⁾によったが、式の中の定数の値はTanaka²⁾の値ではなく、新たにキャリブレーションのための実験を行って求めた値である。水滴の供給はマイクロシリンジ(50 μ l)を用いて行った。この際、一滴として落とす量を調整して、3種類の大きさの水滴を作った。各水滴が球と仮定したときの各水滴の半径は、それぞれ0.93mm、1.13mm、1.21mmである。実験では、一つの大きさの水滴について、3滴を落下させる実験を3回づつ行い、計9個の水滴の衝突・分裂によってできた微小水滴の粒径分布を測定した。また、実験は夏期に室内で行い、気温は32~33℃であった。

4. 実験結果と考察

4.1 粒径分布関数

分裂後の最大の雨滴の半径は、およそ0.7~0.9mm程度であった。9個の水滴の分裂によって生じた微小水滴の総数は、0.93mmで191個、1.13mmで29個、1.21mmで355個であ

った。また、各水滴径での水量の回収率はそれぞれ39%、22%、21%であった。粒径分布を片対数紙上にプロットしたものを図-2, 3, 4に示す。また、粒径毎の個数の分布を水量の分布に書き直したものを図-5, 6, 7に、各分布に用いた定数は表-1, 2に示す。これらの図には指数分布を示す線と式(2)の分布を示す線も示してある。図のように分布はほぼ指数分布のように見えるが、半径約0.1mm以下と0.5mm以上では適

合性が悪くなっている。また、初期水滴半径が0.1mm以下の比較的小さい雨滴の個数は、初期の雨滴径が大きいほど大きな値をとった。そして、粒径が小さい部分で個数が頭打ちになる現象、および粒径が大きいところでの水量がそれほど小さくならない現象に対しては、式(2)の分布の方が指数分布よりよくあてはまっているように見える。これは、指数分布では、粒径の小さい部分に適合させようとすると粒

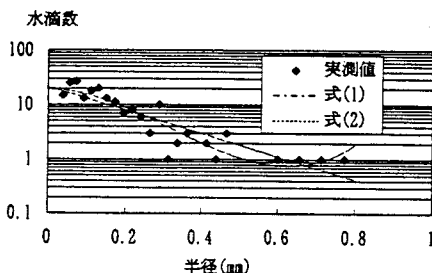


図-2 粒径分布(1)(初期水滴半径 $r=0.93\text{mm}$)

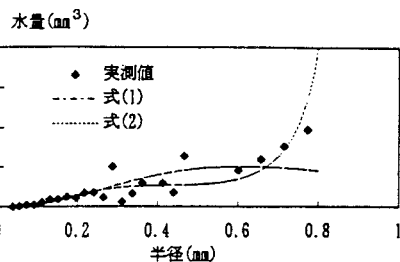


図-5 水量分布(1)(初期水滴半径 $r=0.93\text{mm}$)

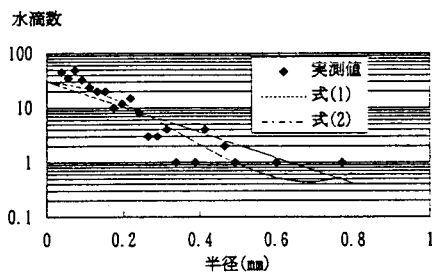


図-3 粒径分布(2)(初期水滴半径 $r=1.13\text{mm}$)

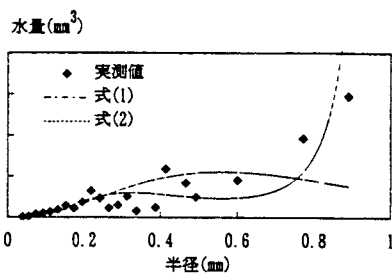


図-6 水量分布(2)(初期水滴半径 $r=1.13\text{mm}$)

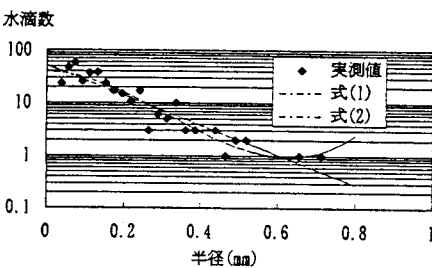


図-4 粒径分布(3)(初期水滴半径 $r=1.21\text{mm}$)

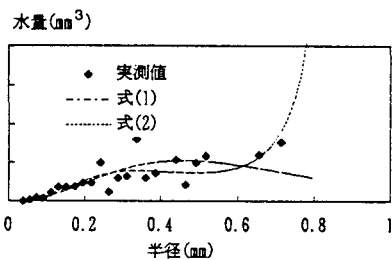


図-7 水量分布(3)(初期水滴半径 $r=1.21\text{mm}$)

表-1 (1)式の各定数

	N_0	β	相関係数
$r=0.93\text{mm}$	21.1	4.9	0.886
$r=1.13\text{mm}$	30.3	5.36	0.858
$r=1.21\text{mm}$	51.4	6.51	0.933

表-2 (2)式の各定数

	N_0	a	b
$r=0.93\text{mm}$	19.2	-24.8	26.4
$r=1.13\text{mm}$	28.8	-26.8	26.1
$r=1.21\text{mm}$	39.1	-28.4	30.2

径の大きい部分での粒子の出現確率を小さく見積もってしまうためと考えられる。

4.2 推定蒸発量

2.2の方法で推定した20m落下後の各粒径の個数と水量を図-8, 9, 10に示す。また、初期粒径のままで落下したときの蒸発量がもとの水量の0.1%未満となるのに対し、一回分裂後に落下したときの蒸発量はそれぞれ1.3%、2.5%、1.7%であった。このように分裂により蒸発は促進される傾向にある。前述のように、計算に用いた定数は必ずしも現実に対応していないので、定量的検討のためには今後も実験・観測を続けていく必要がある。また、実際には微小水滴の空中での浮遊の効果も見かけの蒸発量の算定では、影響が大きいと考えられる。

5. まとめ

樹木には雨滴を微小水滴に分裂させる作用もある。この微小水滴が森林内での水の移動、収支に影響を与えている可能性があるという観点から、本研究では分裂後の微小水滴の粒径分布を検討し、さらに蒸発に与える影響を見積もった。得られた主な結果は以下である。

(1) 水滴の衝突・分裂では、初期半径が大きいほど0.1mm以下の小さい水滴が少なくなる現象が見られた。

(2) エネルギー的視点で仮定した分布式 $N_r = N_0 \cdot \exp(-ar^3 - br^2)$ は粒径分布曲線の両端の部分での適合性が指数分布よりもよかった。

(3) 1回の衝突・分裂後20m落下するという条件での蒸発量の見積もりでは、分裂のないときの蒸発量がもとの水量の0.1%未満であったのに対し、1.3%~2.5%であった。ただし、この値はいくつかの仮定に基づいて算出されたものであるために、今後、実験による実測結果と比較・検討する必要がある。

今後は、蒸発量の実測とともに、横風を受けたときの水滴の落下速度なども実測することで、衝突・分裂の影響をさらに定量的に評価していきたい。

参考文献

- 1) 神田学・巻田将聡・竹内邦良：飛沫水粒子の蒸発メカニズムに関する基礎的研究, 水文水資源学会研究発表会要旨集, pp274-275, 1994
- 2) Tanaka, T. : The Method for Measuring Water Droplets by Means of Polyvinyl Alcohol (Poval) Film. 気象研究報告第23巻, 第4号, pp287-306, 1972

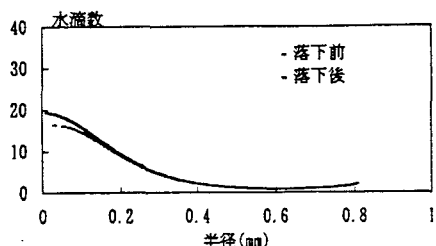


図-8 落下前後の粒径分布(1)(初期水滴半径 $r=0.93\text{mm}$)

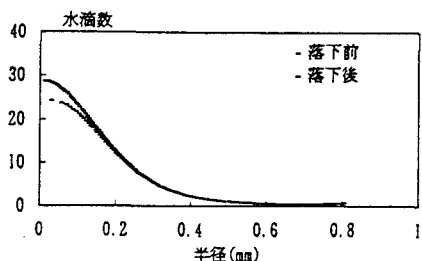


図-9 落下前後の粒径分布(2)(初期水滴半径 $r=1.13\text{mm}$)

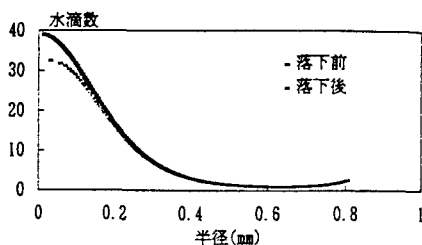


図-10 落下前後の粒径分布(3)(初期水滴半径 $r=1.21\text{mm}$)