

中央大学理工学部

学生員

○坂 憲浩

中央大学大学院

学生員

蓑島 弥成

中央大学理工学部

正 員

日比野忠史

中央大学理工学部

正 員

山田 正

1. はじめに

近年、降雨量の広範囲の推定はレーダ雨量計によって行われるようになってきた。降雨強度はレーダ反射因子Zにより推定されているが、レーダ反射因子は理論的に雨滴の粒径Dの6乗に比例して増大する¹⁾ために、レーダがとらえている上空での雨滴粒径分布を正確に求めることが必要となる。また、レーダがとらえた上空での雨滴粒径分布は地上に雨滴が到達するまでに雨滴の蒸発、分裂及び併合により変化している。地上での雨滴粒径分布は計測可能²⁾であるが、上空での雨滴粒径分布の推定は困難である。本研究は計測可能である地上での雨滴粒径分布から上空での雨滴粒径分布を推定するために雨滴の成長に大きく影響する雨滴の衝突係数について検討したものである。

2. 本研究の概要

雨滴の終末落下速度はその質量に比例しているために、大水滴とその下方にある小水滴は大・小水滴の落下速度の差によって衝突する。図1は計算開始の状態及び大水滴と小水滴が衝突する範囲(経路)を示している。図1に示すように初期状態は雨滴の落下方向を鉛直方向とすると、大水滴と小水滴が互いに影響を及ぼさないほど鉛直距離を十分大きくとっている。水平方向については小水滴の中心が大水滴の中心を通る鉛直軸と重なる点を初期位置として計算をしている。小水滴を初期位置から水平方向に次第に離してゆき小水滴が大水滴に衝突しなくなる限界値を y_c とする。この y_c を使って衝突係数Eは幾何学的な衝突断面積 $\pi(a_L + a_s)^2$ と実際の衝突断面積 πy_c^2 の比

$$E \equiv \frac{\pi y_c^2}{\pi (a_L + a_s)^2} = \frac{y_c^2}{(a_L + a_s)^2} \quad (1)$$

で定義されている^{3), 4)}。ここに、 a_L, a_s は大、小水滴の半径である。本研究では y_c を求めるために大水滴のまわりの空気の流れにポテンシャル流れとストークス流れの2つの流れを与えて両者の結果と既存の実験値^{5), 6), 7)}とを比較検討した。

小水滴の雨滴の軌跡について運動方程式(表1)を用いて解析した。座標系は図2に示すように大水滴を基準とした相対座標系で示されている。

雨滴の運動方程式に用いる抵抗係数 C_D はRe数4000以下で最もよく球の抵抗係数 C_D 曲線に合う式としてSchiller et al.による $C_D = 24 / Re \times (1 + 0.15 Re^{0.687})$ が用いられている。

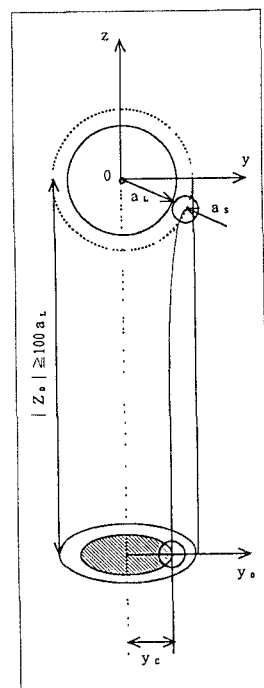


図1 衝突範囲(経路)

表1 運動方程式

$$(m + m') \alpha = D - mG + B \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{dU_s}{dt} = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_a}{\rho_w + \rho_a / 2} \cdot \frac{1}{a_s} (U - U_s) \cdot q - G \frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_w + \rho_a / 2}$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}); \text{Schiller et al. による球の抵抗係数} \quad (3)$$

ここで、

a_s : 小水滴の半径 (mm)

ρ_a : 空気の密度 $[0.1319 (\text{kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^3)] (0^\circ\text{C})$

ρ_w : 水の密度 $[101.96 (\text{kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^3)] (0^\circ\text{C})$

$m = \frac{4}{3} \pi a_s^3 \rho_w$; 小水滴の質量 (g)

$m' = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi a_s^3 \rho_a$; 仮想質量 (g)

$U = (u, v, w)$; 大水滴のまわりの空気の流速 (mm/sec)

$U_s = (u_s, v_s, w_s)$; 小水滴の速度 (mm/sec)

$q = |U - U_s|$; 小水滴の空気に対する相対速度 (mm/sec)

$D = (D_x, D_y, D_z)$; 小水滴にかかる抗力 $(\text{g} \cdot \text{mm} / \text{sec}^2)$

$\alpha = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$; 小水滴の加速度 $(\text{mm} / \text{sec}^2)$

$G = (0, 0, g)$; 重力加速度 $[g = 9806.65 (\text{mm} / \text{sec}^2)]$

$B = (0, 0, B)$; 浮力 $[B = 4/3 \pi a_s^3 \rho_a (\text{mm} / \text{sec}^2)]$

$Re = \frac{2 a_s \cdot q}{\nu_a}$; レイノルズ数

ν_a : 空気の動粘性係数 $[13.2 (\text{mm}^2 / \text{sec})] (0^\circ\text{C})$

3. 解析結果と考察

一般に雨滴の粒径は0.1mm以上とされているため、今回は大水滴の粒径が0.1mmの場合について検討した。この水滴の落下速度は0.30m/sであり、Re数は2となるのでストークス流れの適用上限と思われる。

しかし、実験値(図3)は小水滴が大水滴に併合される割合を示す併合係数 $E_{\dots}$ と衝突係数 E との積で表される捕捉率 E_c ($E_c \equiv E \times E_{\dots}$ ……(4)ここに、 $E_{\dots}$; 併合係数) (<1)であることを考慮すると、計算結果は実験値より大きくなければならない、ストークス流れによる計算結果は不適となる。なお、粒径比が1に近づくにつれて解析結果では衝突係数が小さくなるのは大小2つの雨滴の相対速度が小さくなることにより、小水滴が運動方程式(2)の水平方向の力を長い時間受けるためである。実験値では粒径比が1に近づくにつれて大小水滴が接近したときに、雨滴間の流速が速くなるために圧力が低下し、互いの接近が促進され捕捉率が1に近づく。従来、大水滴まわりの流れとしてストークス流れ、ポテンシャル流れを与えて解析されてきた。大小2つの雨滴の衝突係数を求めるに当りポテンシャル流れを用いるべきであるという結論を得た。大水滴まわりの流れにはポテンシャル流れを用い、今後雨滴の併合係数を求める予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、(財)河川情報センターより研究助成金の補助を受けている。ここに、記して感謝の意を表す。

5. 参考文献

1)小平信彦:気象研究ノート第112号, 日本気象学会, 19722)沖大幹, 虫明功臣:水工学論文集第37巻, pp. 9-14, 1993. 3)Klett, J. D., and Davis, M. H.: J. Atmos. Sci., 30, 107-117, 1973. 4)Schlamp, R. J., Grover, S. N., Pruppacher, H. R., and Hamielec, A. E.: J. Atmos. Sci., 33, 1747-1755, 1976. 5)Telford, J. W., N. S. C. Thorndyke, and E. G. Bowen: Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 81, pp. 241-250, 1955. 6)Woods, J. D., and Mason, B. J.: Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 91, pp. 35-43, 1965. 7)Beard, K. V., and Pruppacher, H. R.: J. Geophys. Res., 73, 6407-6414, 1968. 8)G. I. Taylor: Scientific Papers, 3, pp. 236-243, 1963. 9)I. Langmuir: J. Meteor., 5, pp. 175-192, 1948. 10)山田正, 日比野忠史, 養島弥成, 鈴木敦: 水文・水資源学会1993年研究発表要旨集, pp. 206-207, 1993.

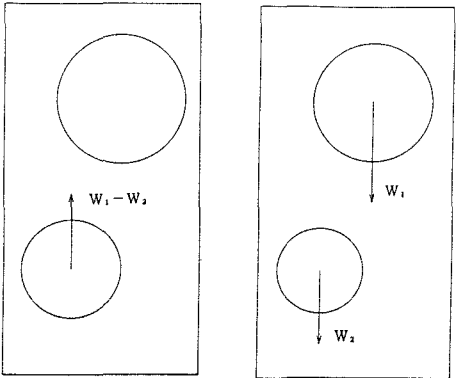


図2-2 相対座標系 図2-1 絶対座標系

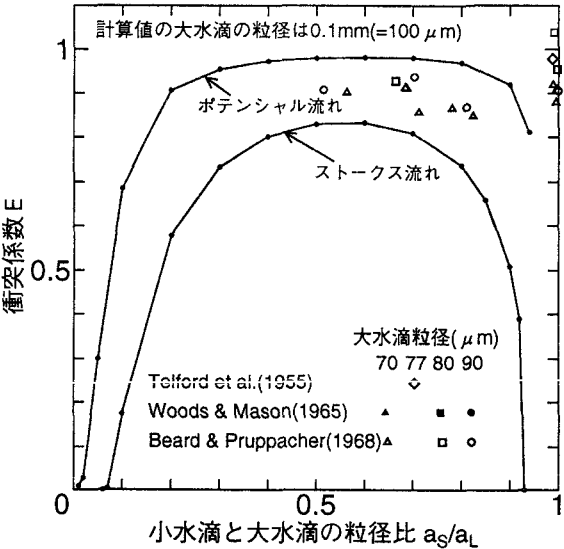


図3 衝突係数の計算値及び実験値