

(II-39) 準実スケールの雲物理実験と数値実験による雲粒生成過程に関する研究

中央大学理工学部 学生員 板谷越朋樹 建設省土木研究所 正員 松浦 直
中央大学大学院 学生員 萬矢 敦啓 中央大学理工学部 正員 志村光一
中央大学理工学部 正員 山田 正

1.はじめに 著者らはこれまでに鉾山の長大立坑を用いて過去10回にわたり雲物理実験¹⁾を行い、そこで得られた知見から代表的な降雨モデルの1つであるRutledge and Hobbsモデル²⁾をエアロゾルの存在を考慮した降雨モデルに改良してきた³⁾。この降雨モデルにより立坑内に発生する雲を定性的に再現できたが、観測された雲粒の粒径分布の変化を再現することが課題とされていた。本研究は雲粒粒径の成長に関して本モデルで考慮しているエアロゾルへの凝結に加え、雲粒同士の衝突・併合⁴⁾による成長を導入することにより、衝突・併合が雲粒の成長にもたらす効果を明らかにする。

2.モデルに用いる雲の発生項の概要 表1の(1)式は、本モデルに用いているケルビン効果(曲率効果)とラウール効果(溶質効果)を考慮した水蒸気から雲粒への凝結項PCONDである。本モデルは5粒径の計算を同時に行うことにより、実大気に近いエアロゾルの分布状態を表現できるようにしている。図1はJunge(1963)によるエアロゾルの典型的な粒径分布と著者らが上砂川立坑内で測定したエアロゾルの粒径分布を示したものである。これより立坑内に流入する空気は実大気と比較してそれほど変わらないことがわかる。(2)式は5粒径相互の衝突を考慮した発生項PCOLである。捕捉率Eは

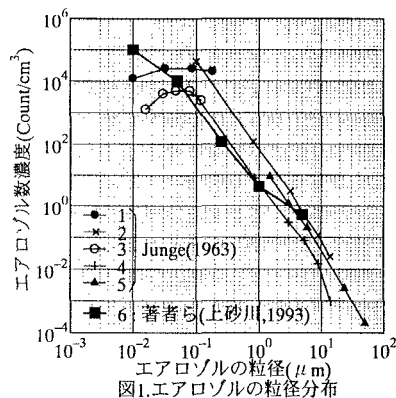


図1.エアロゾルの粒径分布

大きい粒径の雲粒の最大断面積と衝突する小さい粒径の雲粒が通過する面積の比である。大きな雲粒が、捕捉率Eに従って複数の小さな雲粒と衝突・併合し成長する。以下の計算結果は図1の観測により得られたエアロゾル数濃度を初期値 $n(r_i)$ として用い、捕捉率 $E=1.0$ を与えている。 $E=1.0$ とは大きい粒径の雲粒の真下にある、より小さな雲粒を全て捕捉することになり、理論上最大の捕捉率である。

3.計算結果及び考察 図2は著者らが立坑内で測定した気温の鉛直分布と数値計算により得られた気温の鉛直分布である。観測値・計算結果はともに坑底から高度400m以下において気温は乾燥断熱減率に従い一定の減率で低下している。450m付近で飽和点をむかえ湿潤断熱減率へと変化する。観測から得られた気温の高度変化と本モデルの計算による高度変化を比較すると、直線的な変化であるRutledge and Hobbsモデルの計算結果に対して、本モデルの気温の計算結果は曲線的に変化しきれいに観測値と一致している。このことから、気温に関して立坑内に発生する雲を再現する上で本モデルの妥当性が確認された。図3は $E=1.0$ としたときの雲粒粒径の鉛直分布を粒径別に描い

表1 雲の発生項

$$PCOND_i = \frac{dm(r_i)}{dt} = \frac{4\pi N_{0i} \rho_w r_i^2}{r_i A_i} \left\{ \left(\frac{e_i}{e_{0i}} - 1 \right) - \frac{3.6 \times 10^{-5}}{r_i T_i} + \frac{8.6 M_i'}{r_i^3 M_N} \right\} \quad (1)$$
$$r_i = \sqrt{\frac{3m_i}{4\pi \rho_w N_{0i}}} \quad A_i = \frac{l_i^2 \rho_{s,i}}{R_w T_i^2 a} + \frac{\rho_{s,i} R_w T_i}{De_{0i}} \quad i=1 \sim 5$$

N_{0i} : 代表雲粒個数(Count/cm³), r_i : 雲粒の半径(cm), ρ_w : 溶液(滴)の密度(g/cm³)
 $\rho_{s,i}$: 乾燥大気中の密度(g/cm³), T_i : 温度(K), M_N : 溶質の分子量, e : 気圧(hPa)
 e_{0i} : 温度 T_i (K)における平らな水面に対する飽和水蒸気圧(hPa), M_i' : 溶質の質量(g)
 m_i : 雲水質量(g/cm³), l_i : 潜熱(J/kg), D : 空気中における水蒸気分子拡散係数(m²/s)
 ρ_i : 溶液の密度(kg/cm³), a : 空気中の水蒸気分子拡散定数(m²/s), R_w : 気体の状態定数(J/kg(K))

$$PCOL_i = \frac{dm(r_i)}{dt} = \sum_{j=1}^5 \left[V(r_i) - V(r_j) \right] \cdot E(r_i, r_j) \cdot m(r_j) \cdot n(r_j) \quad (2)$$

ただし $r_i > r_j$
 $m(r)$: 雲水質量(g/cm³), $V(r)$: 落下速度(cm/s), $E(r_i, r_j)$: 捕捉率, $n(r)$: 空間数濃度(cm³)

表2 計算条件

上砂川立坑700(m)					
$\Delta t=0.005(s), \Delta z=7(m), k=5.0(m^2/s)$					
qv	R.H.82.0%		$\frac{\partial q_v}{\partial z} = 0$		R.H.82.0%
qc	0.0(kg/kg)		$\frac{\partial q_c}{\partial z} = 0$		$\frac{\partial q_c}{\partial z} = 0$
qr	I.C. 0.0(kg/kg)	B.C. 上端	0.0	下端	$\frac{\partial q_r}{\partial z} = 0$
T	下端296.0(K)		$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$		$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
	標準大気の減率 0.66(K/100m)		初期値固定 R.H.82.0%		初期値固定 T.296.0(K)

キーワード：エアロゾル、凝結成長、雲粒同士の衝突、捕捉率、断熱減率

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 Tel.03-3817-1805 Fax.03-3817-1803

たものである。エアロゾルが上昇するにつれ徐々に凝結成長し、坑底から高度450m付近で飽和点をむかえ粒径の小さい雲粒ほど急激に凝結成長することがわかる。次に、図4と図5は捕捉率 $E=1.0$ としたときの水蒸気から雲粒への凝結量(PCOND)と雲粒間の衝突による雲粒増加量(PCOL)の鉛直分布を粒径別に描いたものである。このときもっとも小さい雲粒(q_{c1})は他の大きい粒径の雲粒($q_{c2} \sim q_{c5}$)に捕捉されるため発生項は存在せず常に消滅項となり、図5には描かれていない。雲粒(q_{c1})の次に小さい雲粒(q_{c2})の凝結量(PCOND2)と衝突による雲水増加量(PCOL2)を比較すると、坑頂(700m地点)においてもPCOL2はPCOND2の100分の1程度の値にしかならない。また、PCOL3はPCOND3の10分の1程度の値である。 $E < 1.0$ の計算結果ではいずれもPCOLの値はさらに小さい。すなわち、小さい粒径($q_{c1} \sim q_{c3}$)の雲粒の成長には衝突よりも凝結による効果の方が大きな割合を占めていることがわかる。一方、最も大きい2つの粒径の成長に関して、凝結と衝突・併合の発生項PCONDとPCOLは坑頂に至ると比較的近い値を示している。しかし、いずれも大きな雲粒(q_{c5})を成長させる発生項としては値が小さいために微量の成長を示すのみであり成長しない。また、図4、図5よりPCONDとPCOLの値が450m付近で急激に大きくなっているのがわかる。図3にあるように初期の粒径分布(0m地点)の状態では衝突する両者の体積に大きな差があるために複数の衝突が生じても体積変化は小さく粒径の成長も小さい。しかし、450m付近で数濃度が高く粒径の小さい雲粒が凝結によって10~100倍の大きさに急成長するために、PCOLの値も大きくなる。このとき、前述同様にPCOND・PCOLはともに雲粒の粒径をさらに成長させる発生量には満たないので、粒径はある程度の大きさまで成長すると定常になる。

4.まとめ 1)上砂川立坑実験の再現計算から、初期半径が(q_{c1})~(q_{c3})程度のエアロゾルの成長は衝突よりも凝結による効果が大いことがわかった。初期粒径が(q_{c4}),(q_{c5})程度のエアロゾルはPCONDとPCOLの両発生項により成長するが値が小さいためにあまり成長しない。2)雲粒の衝突による発生項PCOLは粒径が小さく数濃度の高い雲粒が凝結成長することによって大きくなる。

謝辞:本研究は三井石炭工業(株)、釜石鉱山(株)の多大なる協力により行われた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献: 1)山田正ら:実スケールの雲物理実験と降雨モデルによる雲の微物理過程の考察,土木学会論文集, No.509, II-30, 1-13, 1995.2. 2)Steven A.R. and Hobbs P.V.: Journal. Atmos. Sci., 40, 1185 -1206, 1983. 3)山田正ら:大気中のエアロゾルが降雨現象に及ぼす影響に関する研究,土木学会論文集投稿中. 4)浅井富雄ら著:大気科学講座2, 東京大学出版会, 1981.

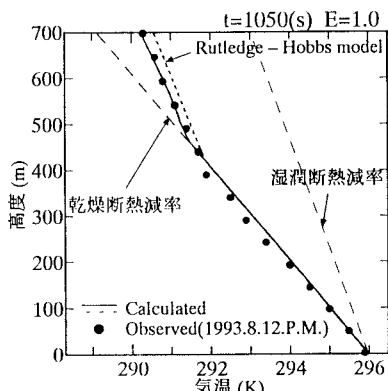


図2.上砂川立坑内の気温の鉛直分布と数値計算による気温の鉛直分布

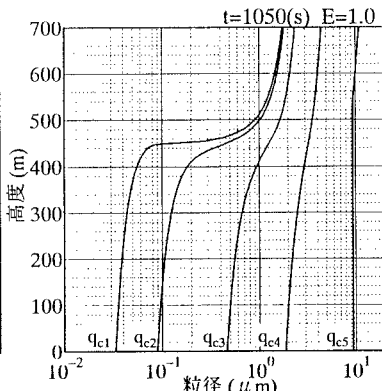


図3.数値計算による雲粒粒径の鉛直分布

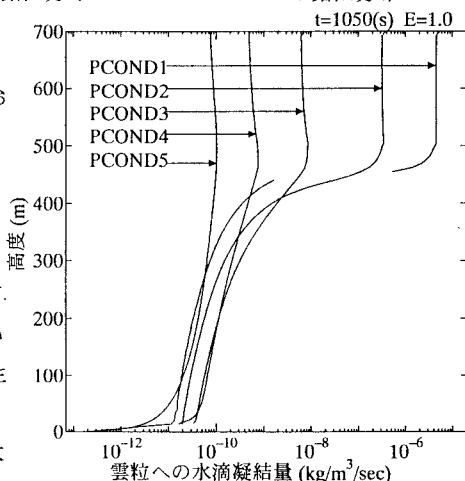


図4.凝結による発生項(PCOND)の鉛直分布

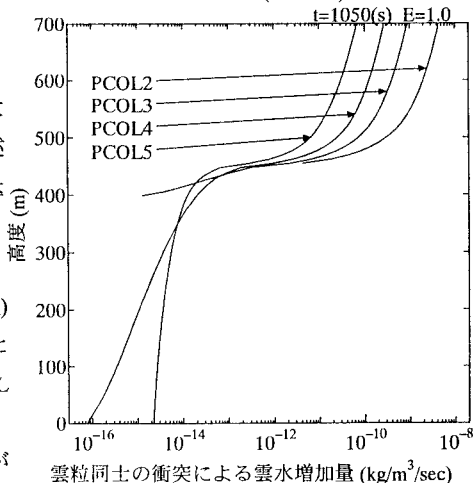


図5.衝突による発生項(PCOL)の鉛直分布