

## II-332 準実スケールの雲物理実験と数値実験による雲粒形成過程に関する研究

中央大学大学院 学生員○板谷越朋樹 中央大学理工学部 正員 志村光一  
 広島大学工学部 正員 萬矢 敦啓 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鉱山の長大立坑を用いて過去9回にわたり雲物理実験<sup>1)</sup>を行い、そこで得られた知見を活用して降雨モデルの1つであるRutledge and Hobbsモデル<sup>2)</sup>をエアロゾルの存在を考慮したモデルに改良してきた<sup>3)</sup>。この降雨モデルにより立坑内に発生する雲の再現計算を行ってきたが、立坑実験で得られた雲粒粒径分布の高度変化を十分には再現できていないのが現状である。本研究はこの問題の解明を行うために雲粒の成長に関して従来のエアロゾルを核とした水蒸気の凝結成長に加え雲粒同士の衝突・併合<sup>4)</sup>による成長を考慮することにより、衝突・併合が雲粒の成長にもたらす効果を明らかにすることを目的としている。

**2.モデルに用いる雲の発生項の概要** 表の(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。また、(2)式は5粒径相互の衝突を考慮した発生項PCOLである。雲粒同士の衝突は両雲粒間に速度差が必要であることを意味し、本研究では相対速度として雲粒の粒径差による落下速度の違いを考慮している。立坑内の上昇気流に乗った大小2種類の雲

表 雲の発生項

$$PCOND_i = \frac{dm(r_i)}{dt} = \frac{4\pi N_0 \rho_s r_i^2}{r_i A} \left\{ \left( \frac{e}{e_0} - 1 \right) - \frac{3.6 \times 10^{-5}}{r_i T} + \frac{8.6 M'}{r_i M_N} \right\} \quad (1)$$

$$r_i = \sqrt{\frac{3m_i}{4\pi \rho_s N_0}} \quad A = \frac{l^2 \rho_s}{R_s T^2 a} + \frac{\rho_s R_s T}{D e_0} \quad i=1 \sim 5$$

$N_0$ : 代表雲粒個数(Count/cm<sup>3</sup>)  
 $r$ : 雲粒の半径(cm)  
 $\rho_s$ : 溶液(滴)の密度(g/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_a$ : 乾燥大気(気)の密度(g/cm<sup>3</sup>)  
 $T$ : 温度(K)  
 $M_N$ : 溶質の分子量(g/mol)  
 $M'$ : 溶質の質量(g)  
 $e_0$ : 温度 T(K)における平らな水面に対する飽和水蒸気圧(hPa)  
 $M'$ : 溶質の質量(g)  
 $m$ : 雲水量(g/cm<sup>3</sup>)  
 $J$ : 潜熱(J/kg)  
 $D$ : 空気中における水蒸気の分子拡散係数(m<sup>2</sup>/s)  
 $\rho_l$ : 溶液の密度(kg/cm<sup>3</sup>)  
 $a$ : 空気の温度拡散定数(m<sup>2</sup>/s)  
 $R_s$ : 気体の状態定数(J/kg/K)

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

ただし  $r_i > r_j$  $m(r)$ : 雲水量(g/cm<sup>3</sup>)  
 $V(r)$ : 落下速度(cm/s)  
 $E(r_i, r_j)$ : 捕捉率  
 $n(r)$ : 空間数濃度(cm<sup>-3</sup>)

粒を考えると、小さい雲粒が大きい雲粒に衝突する臨界流線を臨界軌跡というのが、(2)式はこの臨界軌跡内を通過する小さい雲粒が全て大きい雲粒に捕捉されるという概念を取り入れている。よって大きな雲粒は捕捉率Eに従って複数の小さな雲粒を捕捉し成長する。捕捉率Eは大きい雲粒の最大断面積と大きい雲粒から十分離れた位置での臨界軌跡の断面積の比で表される。図1は著者らが立坑実験から得た立坑坑底におけるエアロゾルの粒径分布である。以下の計算結果は図1に示される実験結果をエアロゾル数濃度の初期値 $n(r)$ として用いている。本研究は雲粒成長における衝突の効果を確認するために理論上最大の捕捉率E=1.0を与えて計算している。

**3.計算結果及び考察** 図2は立坑坑底に流入するエアロゾル量と坑頂で発生した雲水量の関係を示している。○は計算結果、△は実験より粉塵計を用いて算出した雲水量である。図2より雲水量は共に絶対量は異なるものの増加傾向にあることがわかる。図3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付近でエアロゾルへの凝結が行われ潜熱を放出するために減率は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。以上のことから、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4はE=1.0としたときの雲粒粒径の変化を粒径別に鉛直分布で描いたものである。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付近で凝結し始め、粒径の小さい雲粒は

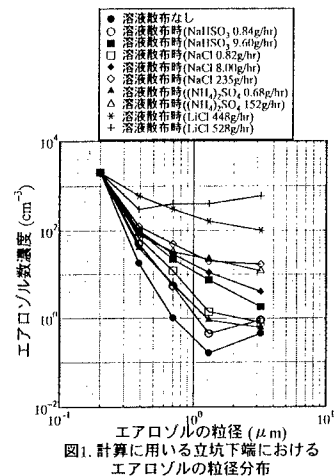


図1. 計算に用いる立坑坑底におけるエアロゾルの粒径分布

キーワード: エアロゾル、雲水生成量、凝結成長、雲粒同士の衝突、捕捉率

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

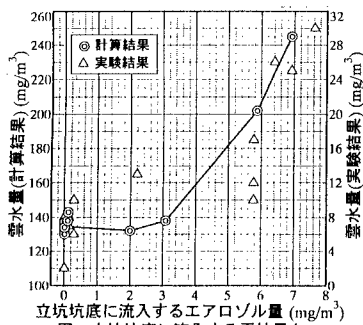


図2. 立坑坑底に流入するエアロゾル量と上端における雲水量の関係

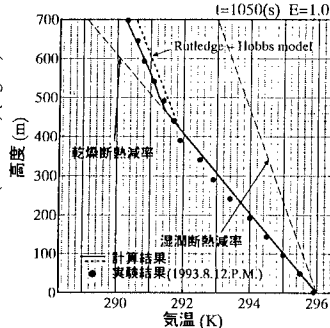


図3. 上砂川立坑内の気温の鉛直分布と数値計算による気温の鉛直分布

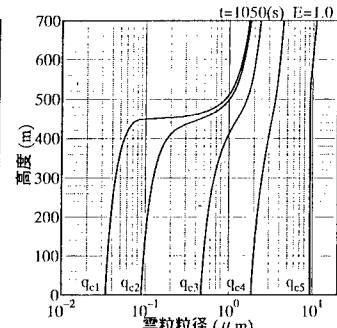


図4. 数値計算による雲粒径の鉛直分布

ど急激に凝結成長することがわかる。次に、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)と雲粒同士の衝突による雲水増加量(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。そこで雲粒 $q_{c1}$ 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。このことから、小さい粒径( $d<1\mu m$ )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、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 $q_{c5}$ を成長させる発生量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4にあるように初期の粒径(0m地点)の分布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小さい雲粒が大きい雲粒に衝突しても、体積変化は小さく大きい雲粒はほとんど成長していない。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ほとんど成長しなくなる。

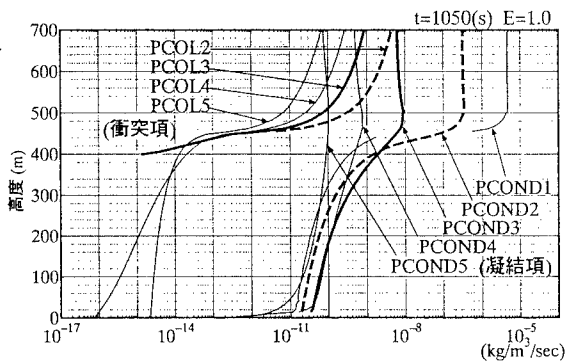


図5. 凝結による発生項PCONDと衝突による発生項PCOLの鉛直分布

4.まとめ 1)本モデルによる雲物理実験の再現計算より、初期粒径の小さいエアロゾル( $d<約1\mu m$ )の成長は衝突よりも凝結による効果が大きいことがわかった。初期粒径が大きいエアロゾル( $d>約1\mu m$ )はPCONDとPCOLの両発生項により成長するが、大きい雲粒に対して衝突する小さい雲粒が体積的に非常に小さいためわずかな成長しか示さないことがわかった。2) 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、雲粒の衝突の効果による発生項PCOLは、大きな値をもつことがわかった。

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) 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.