

II-395 実スケールの雲物理実験とエアロゾルを考慮した雲モデルの改良

中央大学大学院 松浦 直 中央大学理工学部 池永 均 山田 正 北海道開発局 斎藤大作
 名古屋大学大気水圏研 藤吉康志 北海道大学理学部 播磨屋敏生 三井建設 稲毛正昭
 国立環境研究所 福山 力 北海道大学工学部 太田 幸雄

1.はじめに 著者らはこれまで、実スケールでの雲物理実験の意義を唱え、長大立坑を用いて雲及び降雨の形成に関する微物理過程の解明を目的とした実験、観測を行ってきた。この実験により水蒸気が不飽和状態においても雲粒に相変化していることが観測された。また著者らは、雲粒子形成の核として“親水性、溶解性に富んだ乾いたエアロゾルの存在-湿潤化-活性化”というプロセスが存在し、これが雲粒子の形成において本質的であることを明らかにしてきた。¹⁾ 本論文は今回の実験で採取した雲水の成分分析から、本実験立坑内で生起している雲に関して考察したものであり、さらに著者らが提案しているエアロゾルを考慮した降雨モデルを用いて、立坑内での雲物理現象を再現することによりモデルの適用性を検討したものである。

2.実験概要 著者らはこれまでに北海道上砂川町にある三井石炭鉱業内の立坑(以下上砂川立坑:長さ710m)で5回、岩手県釜石市にある釜石鉱山内の立坑(以下釜石立坑:長さ430m)で2回の計7回の雲物理実験を行ってきた。観測は各種観測機器を搭載した観測用ゴンドラ(縦1m×横1.2m×高1.5m)を立坑内に発生した雲の中で昇降、停止させることによって行う。実験時、立坑内には上端に設置した大型ファンにより上砂川立坑で1.3~2.2m/s、釜石立坑で0.6~1.2m/sの強制上昇風が発生している。今回(第7回)の実験では観測用ゴンドラに搭載された雲(霧)水サンプラーにより、雲の中間部(高度193m)と雲頂付近(高度383m)の2高度で雲水を採取した。

3.雲水の成分分析 図1は雲(霧)水サンプラーにより立坑内で採取した雲水中の各イオンの等量濃度を示したものである。高度193m地点の雲水中の全イオン濃度は陰・陽イオンともに約1800 $\mu\text{eq/l}$ であるが、高度383m地点では約600 $\mu\text{eq/l}$ と上方に行くほどイオン濃度が小さくなっていることがわかる。これは立坑下方でエアロゾルを核として生成した雲粒が立坑内を上昇するのにともなって水蒸気を凝結させ成長し、雲粒子としての溶液が希釈されたためである。また、各高度での雲水中には NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} が多く含まれていることがわかる。雲水中に SO_4^{2-} が多く存在するのは立坑下端から SO_4 ガスを流入させて実験を行ったからである。図2は1995年10月に奈良県の大台ヶ原山頂付近(標高約1500m)の雲内で採取した雲水中の各イオン濃度を示したものである。この時、雲は標高約1000mより上方で発生しており、雲水の採取地点は雲底から約400~500m上方にあたる。従って立坑実験(図1)での高度383m地点の雲水の分析結果と比較すると、全イオン濃度はどちらも約500 $\mu\text{eq/l}$ と等しく、雲水中の各成分の比率も同様の傾向を示していることがわかる。これは立坑内の大気状態が自然の大気状態に近いことを示している。

4.エアロゾルを考慮した雲モデル これまでに著者らは、代表的な降雨モデルの一つであるSteven-Hobbsモデル²⁾にエアロゾル数濃度を考慮したハルカパラメータを導入した降雨モデルを提案してきた。両モデルとも水蒸気から雲への凝結や蒸発、雨水への転換などを含み、水蒸気量、雲水量、雨水量についてはハルカのパラメータ化されている。表1に溶質効果と曲率効果を含んだ本モデルにおける雲水の凝結・蒸発(PCOND)項を示す。計算条件は表2に示す。雲粒1個に含まれるエアロゾルの質量 M' は、採取された雲水の成分分析などから求めた質量に近い値を用いている。また立坑内で採取

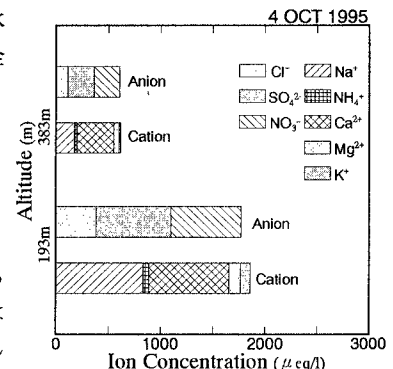


図1.雲水のイオンバランス
(釜石鉱山立坑実験)

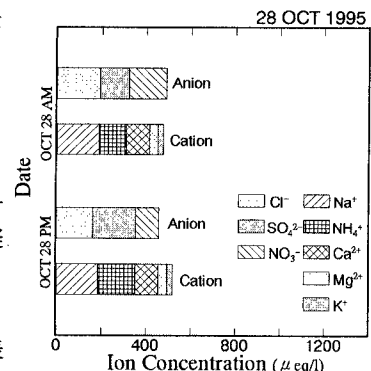


図2.雲水のイオンバランス
(奈良県大台ヶ原山頂)

表1.本モデルにおける雲水の凝結・蒸発(PCOND)項

$$PCOND = \frac{dm}{dt} = \frac{4\pi N_0 \rho_w r^2}{rA} \left\{ \left(\frac{e}{e_0} - 1 \right) - \frac{3.6 \times 10^{-5}}{rT} + \frac{8.6M}{r^3 M_N} \right\}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi \rho_w N_0}}, \quad A = \frac{l^2 \rho_s}{R_w T^2 a} + \frac{\rho_s R_w T}{De_0}$$

N_0 : 代表雲粒個数 (個/cm³), r : 雲粒の半径 (cm), ρ_w : 溶液 (滴) の密度 (g/cm³)
 ρ_s : 乾燥大気密度 (g/cm³), T : 温度 (K), M_N : 溶質の分子量
 e : 気圧 (mb), e_0 : 温度 T (K) における平らな水面に対する飽和蒸気圧 (mb)
 M : 溶質の質量 (g), m : 雲水量 (g/cm³), l : 潜熱 (J/kg)
 ρ_s : 溶液の密度 (kg/m³), D : 空気中における水蒸気分子の拡散係数 (m²/s)
 a : 空気温度の熱拡散定数 (m²/s), R_w : 気体の状態定数 (J/kg/K)

表2.計算条件

上砂川立坑 (700m)			
$\Delta t = 0.1s, \Delta z = 5m, k = 5.0m^2/s$			
N_0, M', M_N については各計算結果を参照			
q_c	R.H. 82.0%	$\frac{\partial q_c}{\partial z} = 0$	R.H. 82.0%
q_e	0.0 (kg/kg)	$\frac{\partial q_e}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial q_e}{\partial z} = 0$
q_r	0.0 (kg/kg)	0.0	$\frac{\partial q_r}{\partial z} = 0$
T	下端 296.0K	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
	標準大気減率 0.66 (K/100m)	初期値固定 (R.H. 82%)	初期値固定 (296.0K)

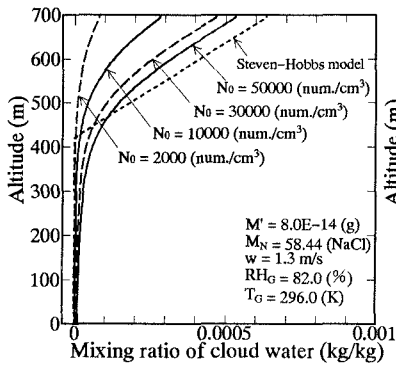


図3.雲水混合比の鉛直分布

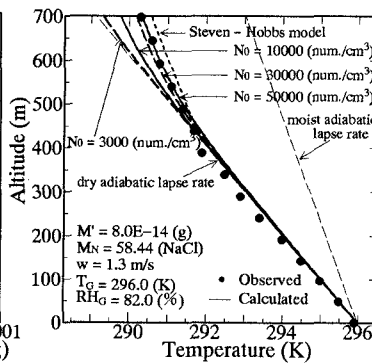


図4.気温の鉛直分布

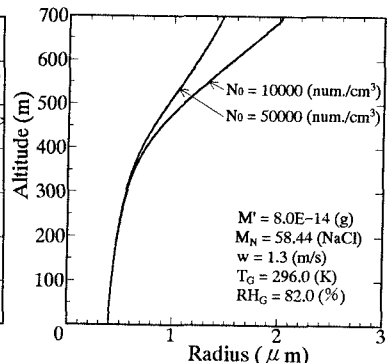


図5.雲粒粒径の高度変化

された雲水にはNa⁺、Cl⁻が多く含まれていたため、エアロゾルの成分は吸湿性の凝結核となり得るNaCl(分子量MN=58.44)とした。その他の大気条件は立坑下端部における流入大気の観測値を用いている。

5. 計算結果 図3は1993年8月12日P. M. (第5回実験:上砂川立坑)の大気条件で計算した、立坑内の雲水混合比の鉛直分布を示したものである。Steven-Hobbsモデルは、相対湿度が100%以上になると雲が発生するモデルであり、この図より、高度420m以上で水蒸気が過飽和状態であることがわかる。これに対して本モデルでは、水蒸気不飽和の状態である低高度から雲が発生していることがわかる。また本モデルでは、立坑上方に行くに従い雲水混合比が連続的に増加している様子を表現できている。図4は同様に立坑内の気温の鉛直分布の観測値と計算値を比較したものである。この図より、観測値、計算値とも雲の発生高度以上で気温減率が減少していることがわかる。これは、水蒸気が雲水に相変化する際に放出する潜熱のためである。図5は本モデルによる雲粒粒径の高度変化の計算値を示したものである。この図より高度の上昇にともない雲粒の粒径が成長していることがわかる。エアロゾル個数濃度No=10000(num./cm³)の場合とNo=50000(num./cm³)の場合を比較すると、雲粒の粒径はエアロゾル数濃度の小さいNo=10000(num./cm³)の場合の方が大きく成長していることがわかる。これはエアロゾル数濃度が多くなりすぎると、水蒸気の奪い合いが起き、一つ一つのエアロゾル粒子に凝結する水蒸気量が減少するために、雲粒が大きく成長できないことを表している。

6. まとめ 本研究により以下のことが明らかになった。1)実験立坑内で生じた雲水の成分は自然の雲水の成分とほぼ等しい。2)降雨モデル中にエアロゾルの効果を導入することで立坑内での雲物理現象をより的確に表現することができる。3)エアロゾル個数濃度が増加しすぎると、雲粒一つ一つは大きく成長できず、降雨強度はかえって小さくなる。

謝辞: 本研究は釜石鉱山(株)の多大なる協力により行われた。さらに文部省科学研究費一般研究(C)(代表山田正(中央大学))の補助を受けている。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献: 1)山田正・日比野忠史・深和岳人・松浦正典・藤吉康志・播磨星敏生・稲毛正昭・中津川誠: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.: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the "Seeder-Feeder" process in warm-frontal rainbands. Jour. Atmos. Sci., 40, 1185-1206, 1983.