

# 実スケール雲生成実験による上昇風速及びエアロゾルが雲水生成 に与える影響の解明に関する研究

土屋修一<sup>\*</sup>, 岡田将治<sup>†</sup>, 山田 正<sup>‡</sup>

## A Study of the vertical velocity and aerosol effects on cloud formation using quasi-prototype experiment of cloud physics

Shuichi Tsuchiya, Masaharu Okada, Tadashi Yamada

### abstract

The purpose of this study is to propose a numerical model of rainfall considering the effects of cloud microphysics and aerosols. In order to compare the theory of cloud physics and the phenomena occurring in cloud, we constructed experimental facilities with prototype scale using the long vertical shaft of an abandoned mine. Using this facility, data such as temperature, relative humidity, air pressure, updraft velocity, cloud particle and aerosol particle consistency have been observed at different height. In this shaft it was found that clouds occurred before the air reaches the saturation level. We observed condensational growth of water vapor from vertical distribution of each diameter particle number. Through the experiments, we found the new type mechanism related to occurrence of clouds. The following results were obtained; 1) The result of linear relation between updraft velocity and amount of cloud water was obtained. 2) The result of Logarithmic relation between solution consistency and amount of cloud water was obtained. 3) The result of Logarithmic relation between supplied aerosol number and cloud water was obtained. 4) Too much supplied aerosol number and solution of consistency lets increasing cloud water restraint.

### 1 目的

著者らは鉱山内の立坑を利用し、雲及び降雨形成に関する微物理過程の解明を目的とした世界でも類を見ない実スケール雲物理実験を行っている。これまでの実験でエアロゾル粒子の存在により水蒸気は不飽和状態においても凝結し雲粒子へ相変化することを明らかにした。また、上昇流内での気温の高度変化を世界で初めて実験的に検証する等、雲及び降雨の生成過程を明らかにしてきた。本研究では、エアロゾル数濃度の変化から上昇流がエアロゾル粒子の凝結過程に与える影響について述べる。

### 2 雲物理実験の概要

釜石鉱山雲物理実験施設の概略図を Fig. 1 に示す。雲物理実験施設は高さ 425 m、幅 5.5 m、奥行き 2.8 m の鉱山内の立坑を用い、立坑坑底の横穴から流入した空気を立坑坑頂に設置した大型ファンにより吸い上げ、

---

<sup>\*</sup> 中央大学大学院

<sup>†</sup> 中央大学理工学部

<sup>‡</sup> 中央大学理工学部

立坑内の上昇流内で雲水を生成させる実験施設である．この雲物理実験施設には坑頂に2基のファンが設置しており立坑内の上昇流速を3段階に制御することができる．また、坑底で溶液噴霧装置を使用することにより立坑内に流入するエアロゾルの化学組成、溶質濃度、数濃度を制御し立坑内へ供給することができる．坑頂では気温、湿度、雲水量、エアロゾル数濃度、坑底では気温、湿度、エアロゾル数濃度の観測を行っている．また、立坑内の気温、エアロゾル数濃度の鉛直分布を観測している．相対湿度は立坑坑頂、坑内、坑底で約100%、気温は坑頂で約10.9°C、坑底では約13.1°Cでほぼ一定である．雲物理実験施設の大気条件より、実大気では雲底付近に相当する雲物理現象を対象としている．

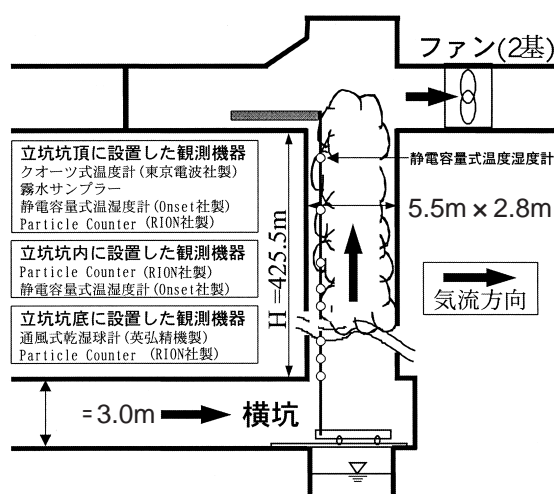


Fig. 1 釜石鉱山雲物理実験施設概要図

### 3 エアロゾル計測

著者らは計測器を坑底、坑頂及び坑底から18m、32m、53m、74mの坑内の計6地点に設置し0.3  $\mu\text{m}$ 以上の粒径のエアロゾル数濃度を計測している．2003年11月の実験では溶液濃度10[g/L]と300[g/L]の2パターンの $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ の噴霧エアロゾル数濃度（乾燥粒径0.05  $\mu\text{m}$ 以上）を30～3600 [count/cm<sup>3</sup>]まで間で7段階の変化を与えて噴霧している．また、各溶液濃度、噴霧エアロゾル数濃度の条件で上昇風を3段階に変化させている．

### 4 エアロゾル数濃度の時間変化

立坑内の各高度におけるエアロゾル数濃度 ( $d > 0.3 \mu\text{m}$ ) の時系列を Fig. 2 に示す．溶液噴霧によりエアロゾル数濃度が増加していることがわかる．噴霧エアロゾル数濃度が多いほど、上昇風速が大きいほどエアロゾル数濃度の増加率が大きいことがわかる．さらに立坑内において高度が高いところほど数濃度が多く、溶液噴霧による増加率が大きいことがわかる．しかし、坑頂の数濃度は坑底とほぼ同数の数濃度であることがわかる．これは、坑頂付近のエアロゾル粒子が10  $\mu\text{m}$ 以上に凝結成長し雲粒となり、さらに併合成長することにより大粒径の雲粒、雨粒に成長し側壁へ結露しているためだと考えられる．

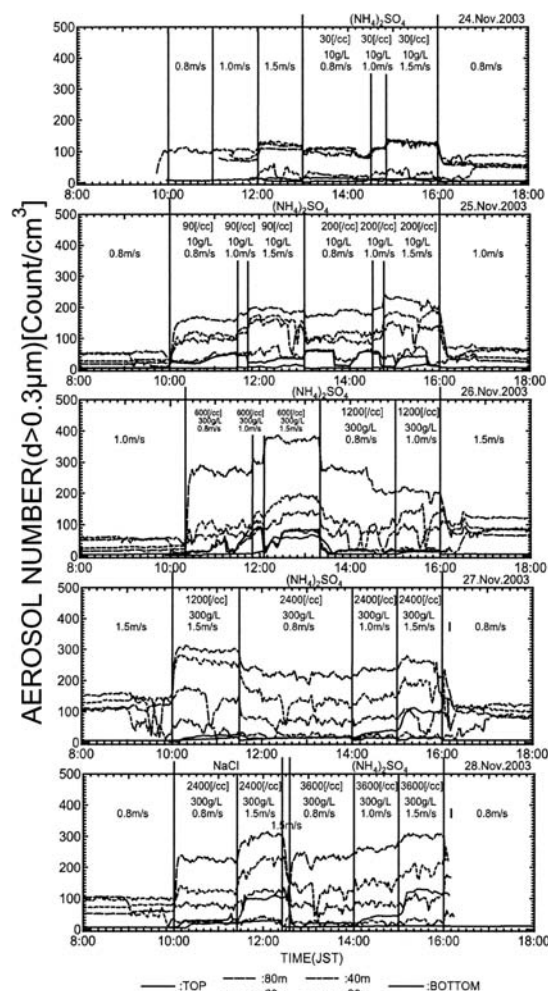


Fig. 2 エアロゾル数濃度の時間変化

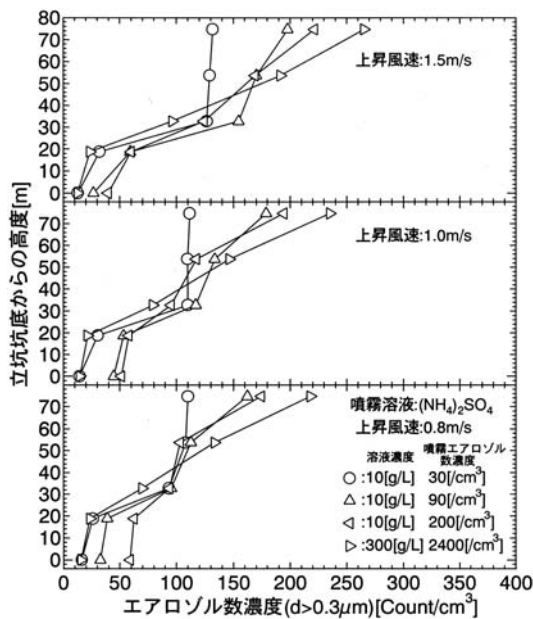


Fig. 3 上昇流によるエアロゾル数濃度 ( $d > 0.3 \mu\text{m}$ ) の鉛直分布の変化

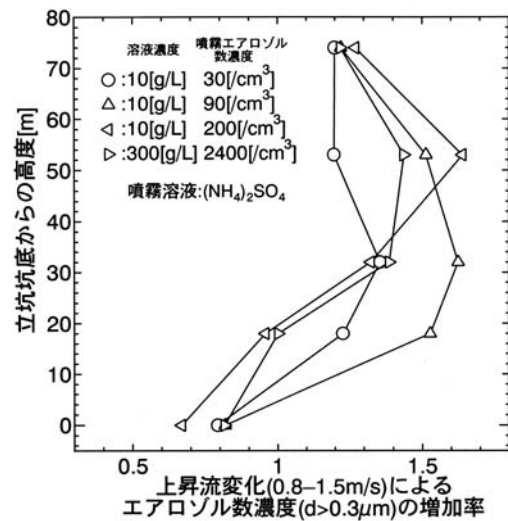


Fig. 4 上昇流の変化によるエアロゾル数濃度 ( $d > 0.3 \mu\text{m}$ ) の増加率の鉛直分布

## 5 上昇流によるエアロゾル数濃度の変化

高度 80 m までの各上昇流によるエアロゾル数濃度 ( $d > 0.3 \mu\text{m}$ ) の鉛直分布の変化を Fig. 3 に示す。上昇流を増加させることによりに各高度でエアロゾル数濃度が増加しており、上昇流が凝結成長を促進させていることがわかる。すべての条件において、高度 18 ~ 53 m で急激に数濃度が増加し凝結成長が急激に行われていることがわかる。また、高度が高くなるに従い数濃度の増加が見られる。これは、噴霧エアロゾル中の  $d < 0.3 \mu\text{m}$  のエアロゾル粒子が凝結成長し  $d > 0.3 \mu\text{m}$  となるためである。しかし、30 [ $\text{cm}^3$ ] の噴霧条件では、高度 32 m 以上においては数濃度の増加が見られない。これは噴霧溶液中の  $d < 0.3 \mu\text{m}$  のエアロゾル粒子が、すべて  $d > 0.3 \mu\text{m}$  に凝結成長したためだと考えられる。上昇流を 0.8 m/s から 1.5 m/s に変化した時のエアロゾル数濃度 ( $d > 0.3 \mu\text{m}$ ) の増加率の鉛直分布を Fig. 4 に示す。噴霧エアロゾル数濃度 30 [ $\text{cm}^3$ ]、90 [ $\text{cm}^3$ ] では 32 m で、200 [ $\text{cm}^3$ ]、2400 [ $\text{cm}^3$ ] では 53 m で数濃度の増加率は最大となっている。高度 74 m では噴霧条件によらず増加率は約 1.3 であった。このことより、低濃度の噴霧エアロゾル数濃度では急激に凝結が行われている層の低層で、高濃度の噴霧エアロゾル数濃度ではその層の高層でエアロゾル粒子は上昇流の増加による影響を大きく受け凝結成長が促進されていることがわかる。

## 6 上昇流によるエアロゾル数濃度の粒径分布の変化

上昇流を 0.8 m/s から 1.5 m/s に変化したときにおける各粒径のエアロゾル数濃度の増加率について Fig. 5 に示す。上昇風の増加が各粒径のエアロゾル数濃度を増加させていることがわかる。噴霧エアロゾル数濃度 30 [ $\text{cm}^3$ ]、90 [ $\text{cm}^3$ ] では高度 18 m で  $0.5 < d < 1.0 \mu\text{m}$  に、高度 32 m、53 m、74 m では  $1.0 < d < 5.0 \mu\text{m}$  で数濃度の増加率は最大となっていることがわかる。高度の低いところでは小粒径が、高度の高いところでは大粒径が上昇風の影響を大きく受け数濃度が増加していることがわかる。また、噴霧エアロゾル数濃度が高くなると、小粒径に増加率のピークが移動してくることがわかる。

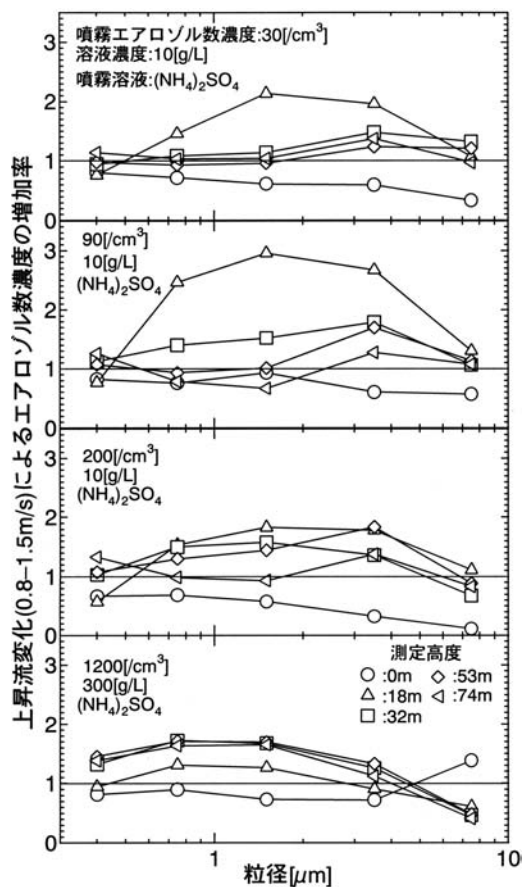


Fig. 5 上昇流の変化による各粒径のエアロゾル数濃度の増加率

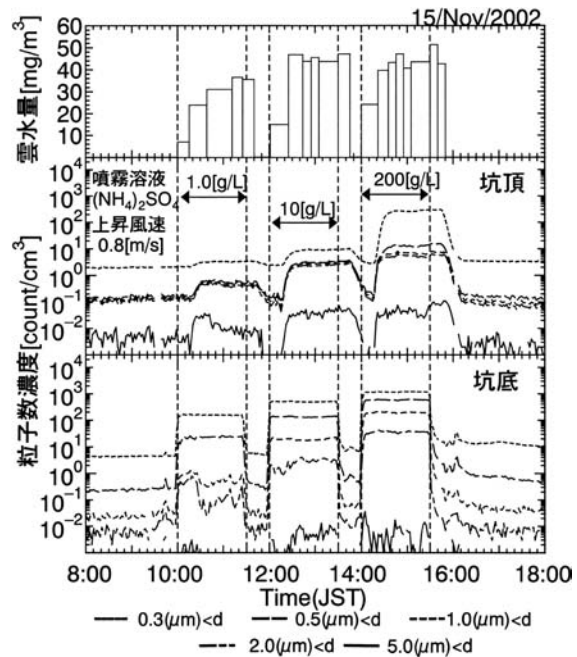


Fig. 6 雲生成実験におけるエアロゾル噴霧による粒子数濃度及び雲水量の時系列

## 7 エアロゾル噴霧による雲水の生成及び粒子数濃度の変化

雲水量及び立坑坑頂、坑底のエアロゾル数濃度の時系列を Fig. 6 に示す。雲水量はサンプリングした雲水を計測した重量であるため、坑内の雲水の相対的な変化を示している。溶液を噴霧により発生したエアロゾル粒子が立坑内へ供給されることによりエアロゾル数濃度が増加、雲水が生成されることがわかる。噴霧する溶液が高濃度になると坑底、坑頂でエアロゾル数濃度が増加し雲水の生成量が増える。また、坑頂では  $d > 2.0 [\mu\text{m}]$  の粒子の数濃度が増加している。

## 8 雲水量と上昇風速の関係

2001 年に行われた観測より得られた立坑坑頂でサンプリングした雲水量と上昇風速の関係を Fig. 7 に示す。2001 年の観測では噴霧機材にはアキミストを使い液体を霧状にして噴霧し、立坑内へエアロゾルを供給している。噴霧する溶液の濃度により発生する雲水量が異なり、濃い溶液濃度ほど発生量が多いことがわかる。また、発生する雲水量と上昇風速はほぼ直線関係にあるが、噴霧溶液が NaCl の場合では上昇風速  $1 \text{ m/s}$  以上では、ほとんど雲水量は増加せず他の溶液と異なる傾向を示している。上昇風速を大きくし凝結成長がより促進される条件としても、エアロゾル粒子の組成によって発生する雲水量の最大値が存在するということが考えられる。

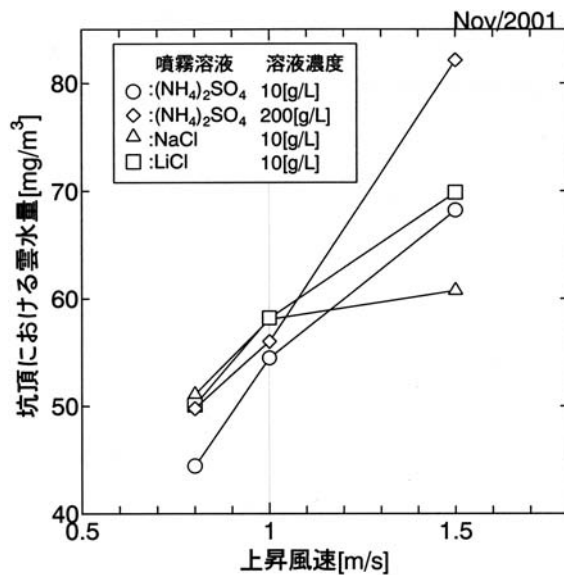


Fig. 7 雲水量と上昇風速の関係

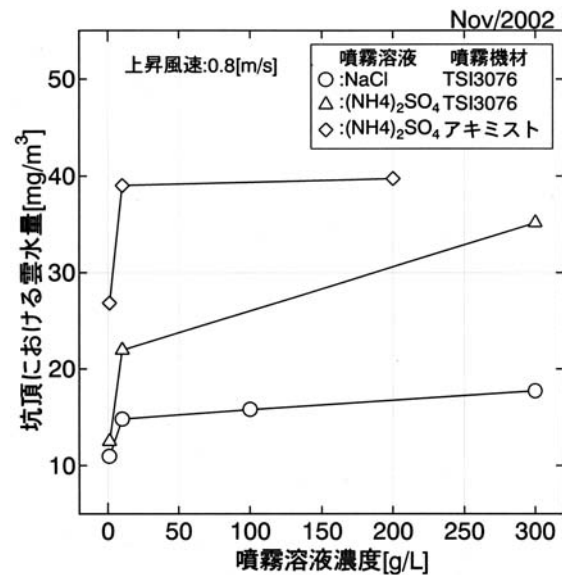


Fig. 8 雲水量と噴霧溶液濃度の関係

## 9 雲水量と噴霧溶液濃度の関係

2002 年に行われた観測より得られた立坑坑頂でサンプリングした雲水量と坑底より噴霧した溶液濃度の関係を Fig. 8 に示す．噴霧溶液が高濃度であるほど発生する雲水量も増加するがその関係は対数関数的であり，噴霧溶液の濃度を高くしていても発生する雲水量の増加率は低くなる．2002 年の観測では噴霧機材に TSI3076(TSI 社) とアキミストを使用している．立坑坑頂及び坑底で観測した噴霧機材別のエアロゾル数濃度の粒径分布 Fig. 9 に示す．坑底と坑頂を比較すると，坑底では  $d < 2.0[\mu\text{m}]$  の小粒径のエアロゾル数濃度が高く，坑頂では， $d > 2.0[\mu\text{m}]$  の大粒径の数濃度が高くなっており，坑内を上昇する間に小粒径から大粒径へ成長していることがわかる．大粒径多く，立坑坑頂流の増加による影響を大きく受け凝結成長が促進されることがわかる．TSI3076 では噴霧時にインパクタを使用し大粒径のエアロゾル粒子を除去している．そのため，Fig. 9 から明らかなように TSI3076 使用時には噴霧エアロゾル数濃度は少なく，アキミスト使用時のほうが発生する雲水量が多くなっている．

## 10 雲水量と噴霧エアロゾル数濃度の関係

2003 年に行われた観測より得られた立坑坑頂における雲水量と坑底より噴霧したエアロゾル数濃度の関係を Fig. 10 に示す．2003 年の観測では，噴霧機材にジェットアトマイザ (TSI 社) を使用し，噴霧するエアロゾルの数濃度を制御しシリカゲル管を経由させ乾燥粒径  $0.05[\mu\text{m}]$  以上の粒子を噴霧している．雲水量は噴霧したエアロゾル数濃度に対して溶液濃度と同様に対数関数的な傾向を示し，高濃度の噴霧エアロゾル数濃度になるにつれて雲水量の増加率は低くなる．これは，エアロゾル数濃度が高濃度になることでエアロゾル粒子一つあたりに凝結する水蒸気量が少なくなるためであると考えられる．

## 11 まとめ

本研究より得られた知見を示す．1) 上昇風速と発生する雲水量はほぼ直線関係にあるが，上昇風速を増加させ凝結成長がより促進される条件としても，エアロゾル粒子の組成によって発生する雲水量の最大値が存在す

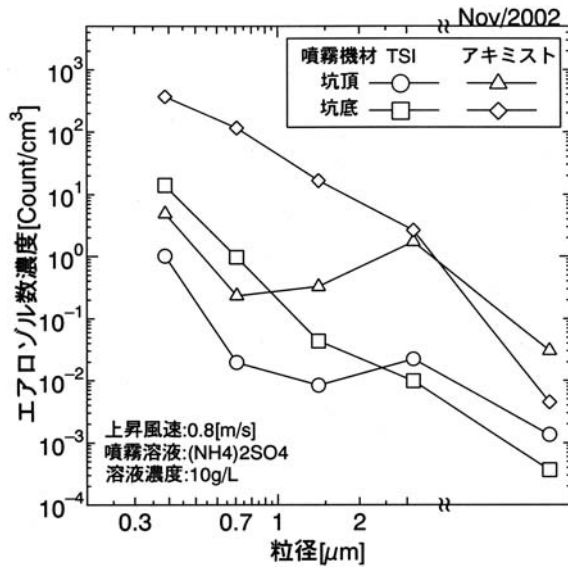


Fig. 9 立坑坑頂及び坑底の粒径分布

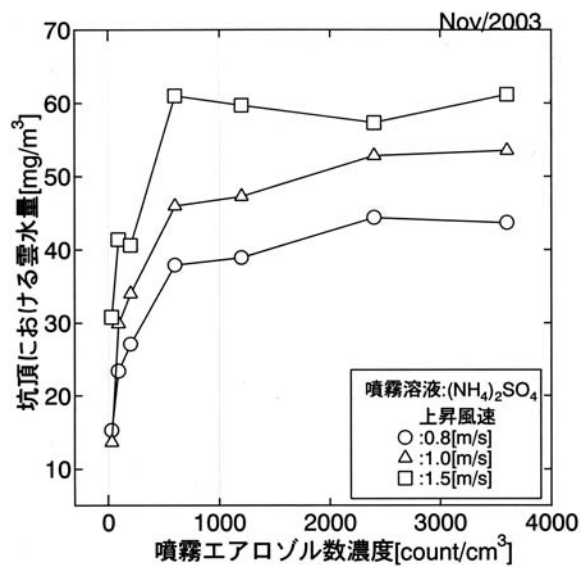


Fig. 10 噴霧エアロゾル数濃度と雲水量の関係

る．2) 噴霧する溶液の濃度により発生する雲水量が異なり，溶液濃度が高いほど雲水の発生量が多くなる．3) 噴霧溶液が高濃度であるほど発生する雲水量も増加するがその関係は対数関数的であり，噴霧溶液を高濃度としても発生する雲水量の増加率は低くなる．4) 雲水量は噴霧したエアロゾル数濃度に対して溶液濃度と同様に対数関数的な傾向を示す．エアロゾル数濃度が高濃度になることでエアロゾル粒子一つあたりに凝結する水蒸気量が少なくなり雲水となる大粒径への成長効率が低くなるためであると考えられる．