

実スケール雲物理実験における雲粒の粒子数濃度と雲水量の鉛直構造

中央大学理工学部 学生員 ○小田村康幸  
中央大学大学院 学生員 土屋 修一

中央大学大学院 学生員 笹尾 将登  
中央大学理工学部 フェロー会員 山田 正

1. はじめに

著者らは雲及び降雨形成の解明を目的とし鉱山内の立坑を利用し、世界でも類をみない実スケール雲物理実験を行っている。この実験の主な利点は、気温、水蒸気量が一年を通して安定している条件下で実現象に近い時間空間スケールで雲の物理現象を実測することができることである。本雲物理実験は 1992 年から 2005 年までに計 17 回の実験を行っている。既往の実験観測では、坑内の上昇風速、エアロゾル成分の濃度変化によって異なる大気条件を想定した実験を行い、粒子数濃度と気温の鉛直分布が雲の生成地点において高度変化することを明らかにしてきた。本研究では、坑内における粒子数濃度の異なる初期条件が、高度変化する粒径分布に与える影響、及び雲水発生量に及ぼす影響について述べる。

2. 実験概要

雲物理実験設備の概要図を図-1に示す。雲物理実験設備は、立坑の高さ 430[m]、幅 5.5[m]、奥行 2.5[m]の立坑を用いた。立坑の上部（立坑の坑底から 430[m]地点、以後、坑頂と呼ぶ）に設置した大型ファンを用い、坑内に上昇風速を発生させ、また立坑の下部（以後、坑底と呼ぶ）からエアロゾルを噴霧することで、坑内に人工的に雲を発生させ、実験を行っている。2006 年の実験では、雲底付近における雲粒子の凝結成長による数濃度の変化を観測するために、坑底から 100m までの観測機材の設置間隔を短くするようにし、光散乱式自動粒子計測器（Kc-01D、リオン社製、以下 OPC(Optical Particle Counter)と呼ぶ、粒径が 0.3[μm]以上の雲粒を観測することが可能）を 10[m]、40[m]、50[m]、100[m]、150[m]、400[m]、坑頂の計 7 地点に設置した。雲粒子の併合過程による粒子数濃度の変化を観測するために、併合過程が行われると言われる粒径が 10[μm]以上の雲粒の計測を坑底から 10[m]、50[m]、400[m]の計 3 地点において行った（計測機器：Kc-20、リオン社製、粒径が 10[μm]以上の雲粒を観測することが可能）。坑底から 10[m]、400[m]の 2 地点には、凝集式粒子数濃度測定器（TSI3007、TSI 社製、以下 CPC(Condensation Particle Counter)と呼ぶ、0.01[μm]以上の粒子数を観測することが可能）を設置した。坑底から 100[m]地点には、落石対策のために鉄製の防護ネットが設置されている。坑底から 80[m]までの間を自作したゴンドラに、CPC と携帯型粒子測定器（Kr-12、リオン社製、OPC(Optical Particle Counter)、0.3[μm]以上の粒子を観測することが可能）を搭載し、昇降させ、坑底から 80[m]地点までの粒子数濃度の鉛直分布を 1 [m]間隔で計測した。実験条件を表-1に示す。エアロゾルとして噴霧した溶液は、雲核として陸上起源で代表的なエアロゾルである硫酸アンモニウムを使用している。上昇風速は各イベントで 1.5[m/s]を与えている。Event No.2, No.4 がエ

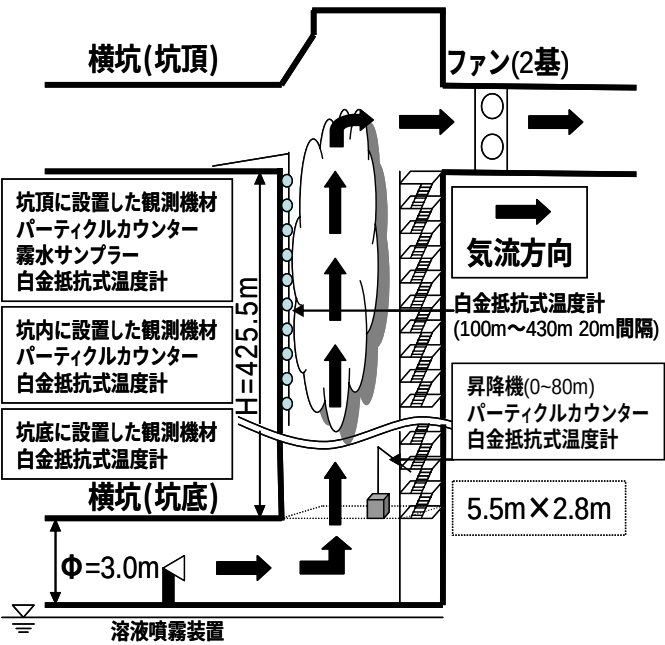


図 - 1 実験設備概要図

表 - 1 実験条件

|            | TIME                | event no. | 溶液噴霧条件                                                                    | 上昇風速<br>[m/s] |
|------------|---------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 2006/11/28 | 10:00~16:00         | 1         | 無噴霧                                                                       | 1.5           |
| 2006/11/29 | 10:30~14:30         | 2         | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [/cm <sup>3</sup> ] 10g/l | 1.5           |
| 2006/11/29 | 14:30 ~ 11/30 10:30 | 3         | 無噴霧                                                                       | 1.5           |
| 2006/11/30 | 10:30~14:30         | 4         | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [/cm <sup>3</sup> ] 10g/l | 1.5           |
| 2006/11/30 | 14:30~16:00         | 5         | 無噴霧                                                                       | 1.5           |
| 2006/11/30 | 16:00~24:00         | 6         |                                                                           | 0.7           |

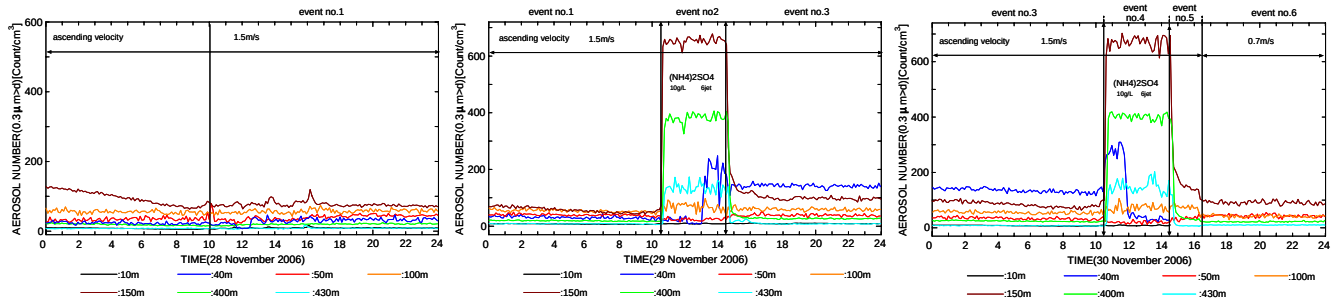


図 - 2 各高度における粒子数濃度の時系列

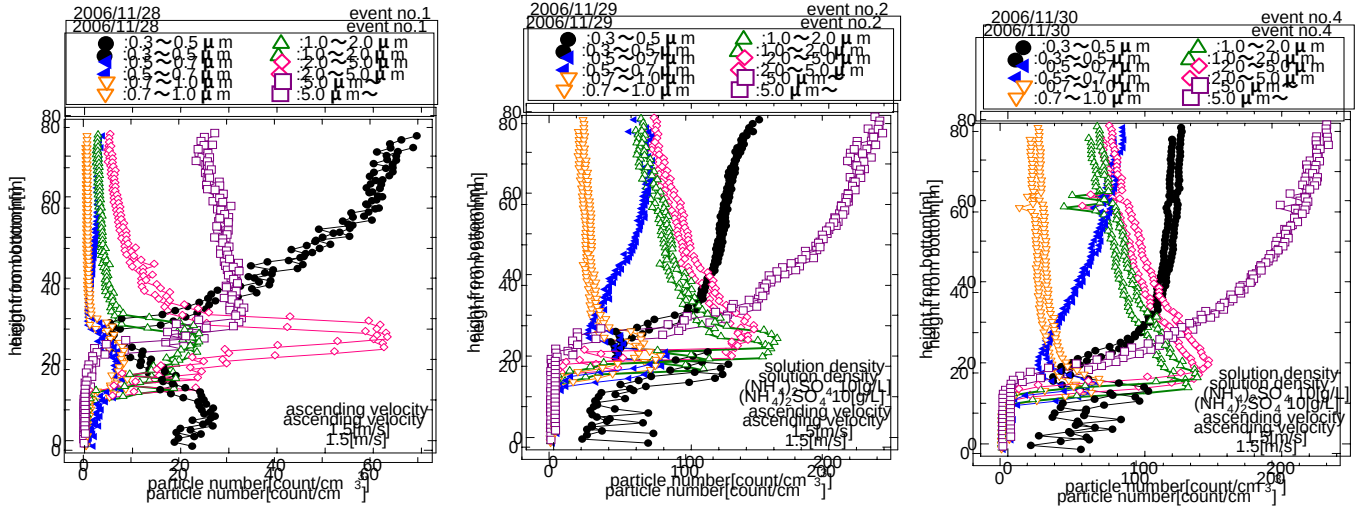


図 - 3 粒子数濃度の鉛直分布

アロゾルとして溶液を噴霧しており、Event No.1, 3, 5, 6 は溶液噴霧を行わず上昇風速をのみを与えている。

### 3. 各高度の粒子数濃度変化

坑内各高度で観測した  $0.3[\mu\text{m}]$  粒径以上の粒子数濃度の時系列を図 - 2 に示す。溶液を噴霧した Event No.2, Event No.4 において、 $100[\text{m}]$ ,  $150[\text{m}]$ ,  $400[\text{m}]$ ,  $430[\text{m}]$  地点で  $0.3[\mu\text{m}]$  以上の粒子数濃度が増加する。これは、坑底から噴霧したエアロゾルが供給され、水蒸気と凝結し  $0.3[\mu\text{m}]$  以上の粒径に成長したと考えられる。エアロゾルの坑内への供給を行わない Event No.3, Event No.5 では、坑底から  $100[\text{m}]$ ,  $150[\text{m}]$ ,  $400[\text{m}]$ ,  $430[\text{m}]$  地点で粒径が  $0.3[\mu\text{m}]$  以上の粒子数濃度が減少する。これは坑底からエアロゾルの供給量が減少したことで、雲粒に成長する雲核の総数が減少したためと考えられる。さらに、溶液噴霧を行わない Event No.1 と Event No.3 は、上昇風速も同じであり、実験条件として同じ条件だが、Event No.1 と溶液を噴霧した Event No.2 の後の Event である Event No.3 とを比較して、坑底から  $40[\text{m}]$  地点で  $30 \Rightarrow 140 [\text{count}/\text{cm}^3]$  へ、坑底から  $100[\text{m}]$  地点で  $50 \Rightarrow 70 [\text{count}/\text{cm}^3]$  へ、坑底から  $150[\text{m}]$  地点で  $50 \Rightarrow 100 [\text{count}/\text{cm}^3]$  と、粒子数濃度は増加していた。

### 4. 雲底付近の粒子数濃度変化

溶液噴霧を行わない Event No.1 と溶液噴霧をした Event No.2, Event No.4 での  $0 \sim 80[\text{m}]$  地点における各粒径の粒子数濃度の鉛直分布を図 - 3 に示す。Event No.2 の粒子数濃度の鉛直分布では、坑底から  $13 \sim 20\text{m}$  の高度間で粒径が  $0.3 \sim 0.5[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度が  $30 \Rightarrow 130 [\text{count}/\text{cm}^3]$ 、粒径が  $0.5 \sim 0.7[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度が  $0 \Rightarrow 80 [\text{count}/\text{cm}^3]$  へ増加した。坑底から  $16[\text{m}]$  付近で粒径が  $0.3 \sim 0.5[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度はピークを取り、 $16 \sim 23[\text{m}]$  の高度間で、高度とともに減少する。坑底から  $20[\text{m}]$  で粒径が  $0.5 \sim 0.7[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度は、ピークとなり、その後に、坑底から  $20 \sim 23[\text{m}]$  に高度が高くなるに従い減少する。

一方、粒径が  $0.7 \sim 5.0[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度について、坑底からの  $15 \sim 27[\text{m}]$  の高度間で粒径が  $0.7 \sim 1.0[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度が  $0 \Rightarrow 80 [\text{count}/\text{cm}^3]$ 、粒径が  $1.0 \sim 2.0[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度が  $0 \Rightarrow 160 [\text{count}/\text{cm}^3]$ 、粒径が  $2.0 \sim 5.0[\mu\text{m}]$  の粒子数濃度が  $0 \Rightarrow 140 [\text{count}/\text{cm}^3]$  と増加した。粒径が  $0.7 \sim 1.0[\mu\text{m}]$  の粒子は坑底から  $20[\text{m}]$  で、 $1.0 \sim 2.0[\mu\text{m}]$  の粒子は  $23[\text{m}]$  で、 $2.0 \sim 5.0[\mu\text{m}]$  の粒子は  $25[\text{m}]$  で、粒子数濃度がピークをとり、その後、高度が高くなるに従い、粒子数濃度は減少していく。さらに、粒径が  $5.0[\mu\text{m}]$  以上の粒子については、坑底から  $21[\text{m}]$  の高度で数濃度が増加し始め、高度と共に増加して

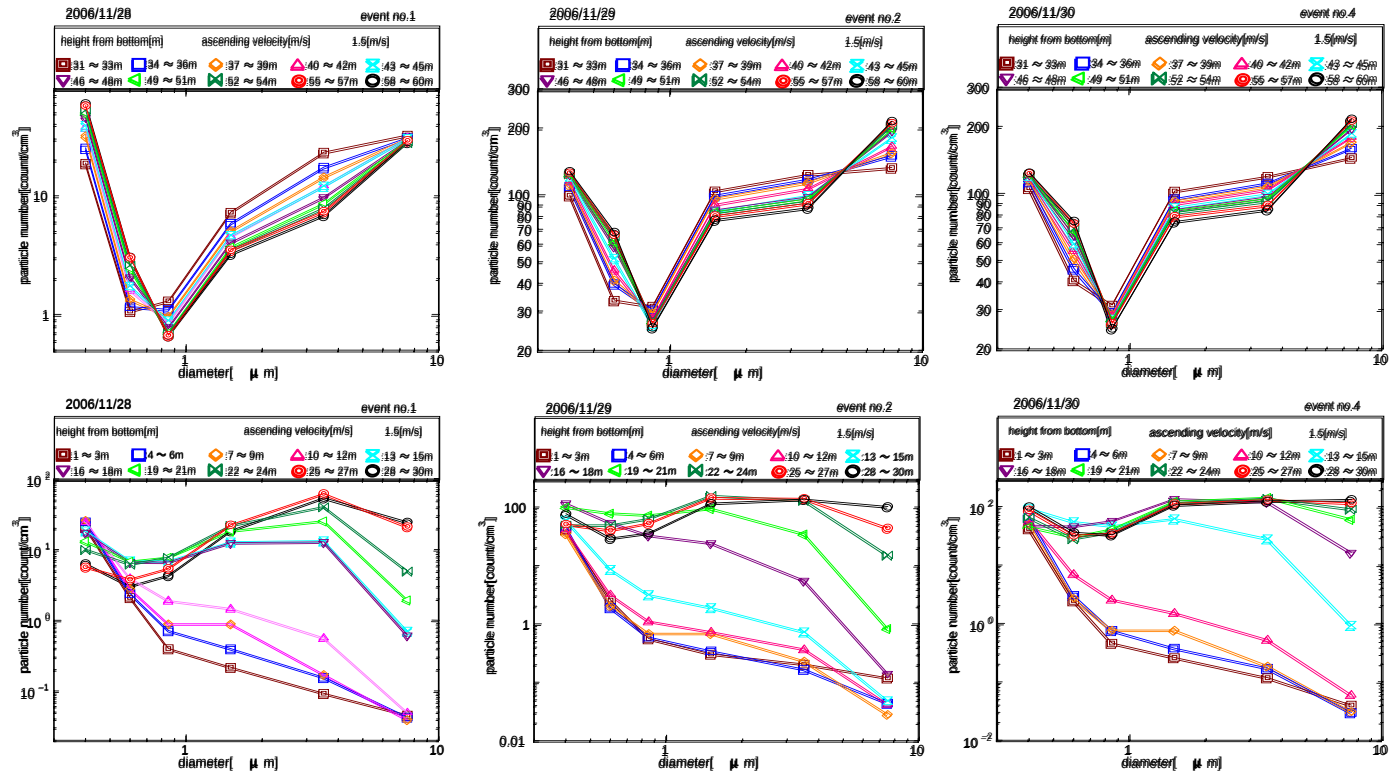


図 - 4 各高度の粒径分布

いく。坑底から 20~30[m]の高度間で粒径が 5.0[μm]以上の粒子の数濃度が増加し、0.7~5.0[μm]の粒子数濃度が減少するのは、0.7~5.0[μm]の中で、粒径が 5.0[μm]以上に凝結成長する雲粒と、水蒸気と凝結できずに蒸発する雲粒が存在するためであると考えられる。

Event No.5 における 0~80[m]での各粒径の粒子数濃度の鉛直分布について、10~20[m]の間で、粒径が 0.3~0.5[μm]の粒子数濃度が  $40 \Rightarrow 100$  [count/ cm<sup>3</sup>]、粒径が 0.5~0.7[μm]の粒子数濃度が  $0 \Rightarrow 60$  [count/ cm<sup>3</sup>]と増加する。粒径が 0.7~1.0[μm]の粒子については、粒子数濃度が  $0 \Rightarrow 64$  [count/ cm<sup>3</sup>]、粒径が 1.0~2.0[μm]の粒子は  $0 \Rightarrow 136$  [count/ cm<sup>3</sup>]、粒径が 2.0~5.0[μm]の粒子は  $0 \Rightarrow 142$  [count/ cm<sup>3</sup>]に増加した。粒径が 5.0[μm]以上の粒子数濃度も増加し始める。14~18[m]の高度間で、0.7~1.0[μm]の粒子数濃度は 15[m]、1.0~2.0[μm]の粒子は 17[m]、粒径が 2.0~5.0[μm]の粒子は坑底から 19[m]でピークとなり、その後、高度とともに減少する。これより Event No.2 において坑底から 23[m]地点で、Event No.4 においては坑底から 15[m]地点で粒径が 0.7~5.0[μm]の雲粒子の中で、粒径が 5.0[μm]以上に凝結成長できずに蒸発する雲粒があることから、Event No.2 の坑底から 23[m]地点と Event No.4 の坑底から 15[m]地点において不飽和となっていると考えられる。

## 5. 粒径分布の高度変化

Event No.1, Event No.2, Event No.4 における坑底から 1~60[m] (計 60 地点) の粒子数濃度の粒径分布を図 - 4 に示す。横軸は代表粒径として各観測粒径範囲の中間値を用いている。1~30[m]地点において、Event No.2 の粒子数濃度の粒径分布は、坑底から 12[m]地点までの間では、0.3~0.5[μm]以下の雲粒のみ存在し、13~15[m]地点で粒径が 0.5~1.0[μm]の雲粒が増加し始める。16~19[m]地点で粒径が 3.5[μm]以下の雲粒子が増加する。22~24[m]地点で、粒径が 5.0 [μm]以上の雲粒が増加し始める。1~30[m]地点における Event No.4 の粒子数濃度の粒径分布では、坑底から 9[m]地点までは、粒径が 0.3~0.5[μm]以下の雲粒のみ存在し、10~12[m]地点で粒径が 0.5~1.0[μm]の雲粒が増加し始め、13~15[m]地点で粒径が 2.0~5.0[μm]以下の雲粒が増加する。16~18[m]地点で、粒径が 5.0[μm]以上の雲粒が増加し始める。これより Event No.2, Event No.4 の両方の Event において、坑底から 13~15[m]地点で粒径が 0.5~1.0 [μm]雲粒が増加し始める。Event No.4 では 10~12[m]地点で 0.5~1.0 [μm]粒径が増加し始めることから Event No.2 では 13~15[m]地点に、Event No.4 では、13~15[m]地点にそれぞれ過飽和層が存在し、凝結成長が始まる凝結高度があると考えられる。また、Event No.2 において 25[m]地点以上の高度、Event No.4 においては 19[m]地点以上で、高度が高くなるにつれて粒径が 0.7~5.0[μm]の雲粒の数濃度が一様に減少し、粒径が 0.5[μm]以下と 5.0[μm]以



上の雲粒が一様に増加していくことがわかる。これは、粒径が  $0.5 \sim 5.0 [\mu\text{m}]$  の雲粒子に本実験における粒子の臨界飽和度が存在し、過飽和度の高度変化に伴い凝結成長する粒子と、蒸発し小粒径に変化していく粒子が存在すると考えられる。

## 6. 粒子数濃度の高度変化率

坑底から 80m 地点における粒子数濃度の高度変化率を図 - 5 に示す。小型ゴンドラを用いた粒子数濃度の観測結果から以下の式により算出した。

$$\frac{dN}{dz} = \frac{N_i - N_{i-1}}{\Delta z} \quad \dots (1) \quad N: \text{粒子数濃度} [\text{count}/\text{cm}^3] \quad \Delta z: 1[\text{m}]$$

$\Delta z$  は小型ゴンドラで計測した高度間隔である 1[m] である。10~20[m] 地点において各粒径共に増減を示し、40m 地点以上では  $\pm 5[d(\text{count})/\Delta z]$  の範囲である。無噴霧時と噴霧時を比較すると、噴霧時における雲底付近の変化率のほうが無噴霧時よりも最大で  $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$  粒径で 22m 地点の約 10 倍大きな値を示していることから、溶液を噴霧することにより飽和層において活発に凝結・蒸発過程が行われていると考えられる。

## 7. 雲水体積濃度の鉛直分布

0~80m 地点における粒子数濃度から算出した雲水体積濃度の鉛直分布を図 - 6 に示す。

$$V = \sum_{i=1}^5 \frac{4}{3} \pi r_i^3 N_i \quad \dots (2)$$

ここで  $V$ : 雲水体積濃度  $[\mu\text{m}^3/\text{cm}^3]$ ,  $r$ : 代表粒径の半径  $[\mu\text{m}]$ ,  $N$ : 粒子数濃度  $[\text{count}/\text{cm}^3]$  である。溶液を噴霧しない時と溶液噴霧時における雲水体積濃度を比較すると坑底から 15[m] 地点においては溶液噴霧時の方が 2 倍から 3 倍大きい値を示している。また坑底から 15[m] 地点以上においては噴霧時の雲水体積濃度が最大で 15 倍大きい値を示している。坑底から 10~20[m] 高度間において、粒子数濃度から算出された雲水体積濃度に event2 と event4 で最大  $90 [\mu\text{m}^3/\text{cm}^3]$  の差がでる。これは、雲水体積濃度は、粒子数濃度の粒径に依存するので、event4 で雲水体積濃度が坑底から 10~20[m] 高度間で event2 より多く算出されるのは、event2 より event4 のほうが、低い高度で凝結成長が行われる事が考えられる。

## 8. まとめ

(1) 初期条件において異なる粒子数濃度を与えた場合、粒子数濃度が多いほどエアロゾルが凝結し成長し始める高度、つまり凝結高度の低下が観測より得られた。

(2)  $0.5 \sim 5.0 [\mu\text{m}]$  粒径に本実験における凝結粒子の臨界半径が存在し、過飽和度に伴い成長する粒子と、蒸発し小粒径に変化していく粒子が存在する粒径が  $0.5 [\mu\text{m}]$  以上  $5.0 [\mu\text{m}]$  以上の雲粒が増加し雲粒が一様に増加することがわかった。

### 参考文献

- 1) 山田正ら: 実スケールの雲理実験と降雨モデルによる雲物理過程の考察, 土木学会論文集, No.509, II - 30, pp.1 - 13, 1995.2
- 2) 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, No.614, II - 46, pp.1 - 20, 1999.2
- 3) 笹尾将登, 土屋修一, 山田正: 上昇風速及びエアロゾルが雲粒の成長に与える影響, 第 60 回土木学会年次講演会, II - 002, 2005.9
- 4) 土屋修一, 笹尾将登, 山田正: 実スケール雲物理実験によるエアロゾル数濃度と雲水発生量の関係, 第 61 回土木学会年次講演会, 2-051, 2006.9

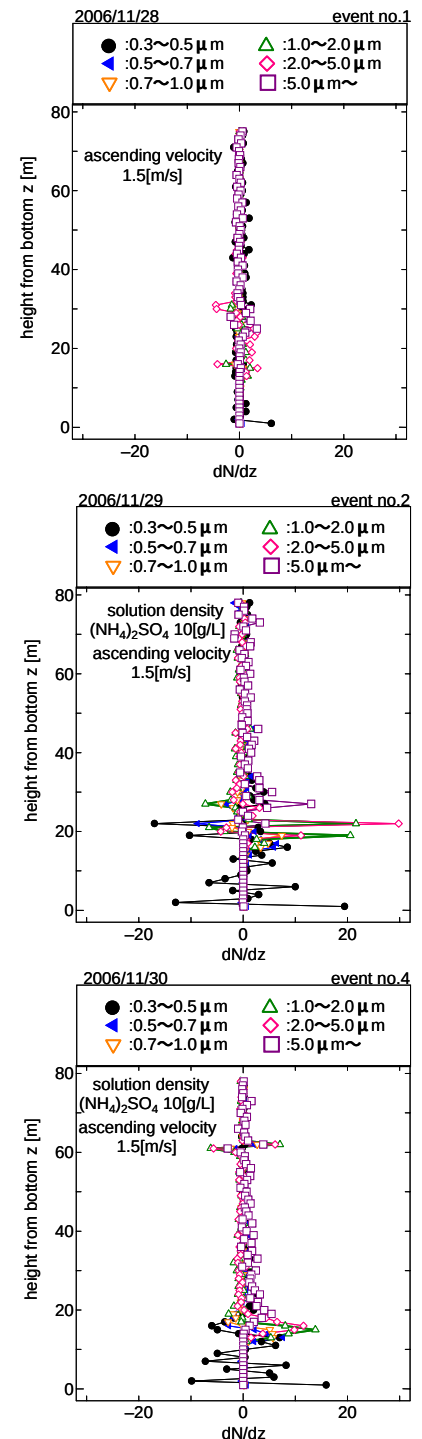


図 - 5 粒子数濃度の高度変率

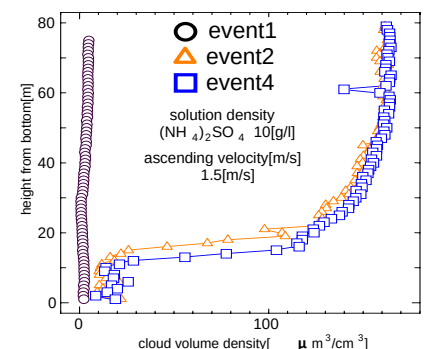


図 - 6 雲水体積濃度の鉛直分布