



Title	立坑を用いた雲物理実験設備の構成と雲物理特性
Author(s)	播磨屋, 敏生; HARIMAYA, Toshio; 佐々木, 聰 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 61, 23-33
Issue Date	1998-03-20
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.61.23">https://doi.org/10.14943/gbhu.61.23</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14257">https://hdl.handle.net/2115/14257</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	61_p23-33.pdf



## 立坑を用いた雲物理実験設備の構成と雲物理特性

播磨屋敏生・佐々木 聰

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

山田 正

中央大学理工学部土木工学科

藤吉 康志

北海道大学低温科学研究所

稲毛 正昭

三井建設(株)環境技術部

(1998年1月7日受理)

## Construction and Cloud Physical Properties of the Artificial Cloud Experimental System Using a Long Vertical Mine Shaft

Toshio HARIMAYA and Akira SASAKI

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Tadashi YAMADA

Department of Civil Engineering, Chuo University

Yasushi FUJIYOSHI

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Masaaki INAGE

Technical Department of Environment, Mitsui Construction Co. Ltd.

(Received January 7, 1998)

An artificial cloud experimental system, using a long vertical mine shaft, was constructed to investigate cloud physics and cloud chemistry. The vertical mine shaft has a quasi-real scale of natural clouds, and the experimental system allows us to obtain data easily and to control environmental conditions. The vertical shaft has a depth of 710 m and inside diameter of 5.5 m. A fan was installed at the top of the shaft, generating a constant updraft of about 2.0 m/s, and clouds were formed in the vertical shaft. Data for various environmental conditions and microphysical processes of cloud formation could be obtained using various observational instruments installed in the vertical shaft.

The cloud physical properties of this artificial cloud experimental system were as follows. The concentrations of aerosols, which were larger than  $0.3 \mu\text{m}$  in size, were  $10\text{--}100 \text{ cm}^{-3}$ . Most of the effective CCN contained NaCl originating from groundwater. Humidity was increased by sprinklers, and relative humidity increased by about 8%. It was confirmed that the cloud droplet spectra of clouds formed in the vertical shaft changed with change in aerosol concentrations at the bottom of the shaft. Thus, clouds with the desired cloud droplet spectra could be

made by adjusting the aerosol concentration. However, major reconstruction of the experimental system is need to control temperature in the shaft.

## I. ま え が き

最近、地球温暖化、酸性雨、オゾンホール等の地球環境の悪化が憂慮されている。それに対応して、地球環境を保全するための研究がなされつつある。地球環境問題は複雑な系をなしていて、各分野に関係する総合科学的側面を持っている。その要の一つは雲であるので、雲に関する研究が重要である。例えば地球温暖化を考える際に、産業活動の活発化によって二酸化炭素の増加とともにエアロゾルが大気中に排出され、その一部が凝結核として働いて、雲粒を積極的に作り、その雲による太陽エネルギーの反射による冷却が考えられる。しかし、この物理過程が複雑で、未だに不確定なことが多いために、先年 IPCC (気候変動に関する政府間パネル) が行った全球気候モデルを使ったシミュレーションによる地球温暖化のアセスメントには、この効果が組み込まれていない。気候モデルが段々と精密になり、二酸化炭素の効果が適切に組み込まれはじめている現在では片手落ちと考えられる。

また、酸性雨の形成において、大気中の二酸化硫黄ガスが雲粒に吸収され、雲粒内で酸化されて硫酸へ変換する。その過程での雲粒へのガス状物質の移行速度、雲粒のサイズ効果等未解明の問題があり、早急な解明が望まれている。上記のような問題解明のためには、現実の雲に近いモデル雲を作り、その人工雲での実験・観測により新たな知見を得ることが必要不可欠と考えられる。

雲物理学と雲化学のための実験施設として人工雲実験設備の計画案(List et al., 1986)がアメリカで提出されたことがあるが、いまだ実現されていない。一方日本においては、鉱山の立坑を利用して雲物理実験を行うことを目的として、平成2年5月に雲物理現象研究会が設立された。その後雲物理実験設備が整備され、各種の雲物理実験を行うことが可能になった(例えば、藤吉他, 1993; Fujiyoshi et al., 1993; Yamada et al., 1993)。本研究では、その雲物理実験設備の構成と雲物理特性を述べる。

## II. 実験設備と測定機器

本実験設備は、北海道空知郡上砂川町にある三井石炭鉱業(株)所有の南部排気立坑内にある。南部排気立坑は、直径が5.5 mの円形の断面をもち、地表から底までの深さが約900 mあり、非常に長大なものである。この立坑下部に直径4 mほどの坑道が接続しており、ここから坑内排気が流入する。この坑道の位置から地表までは約710 mである。これ以後は、この立坑下部に繋がる坑道の位置を坑底(高度0 m)と表現する。坑底より下の立坑部分については、水没しており繋がる坑道も無いことがわかっているため、空気の流入という点からは無視することができる。また、立坑途中に接続するような坑道が存在しないことから、この立坑全体は上端と下端を除いて閉じられた巨大円筒形空間とみなすことができる。立坑上端部には排気用立坑としての既設設備であるファンが取り付けられており、常時運転されているため、この立坑内部には常に上昇気流が存在している。上昇流速は約2.0 m/sで、高度によらずほぼ一様であることが観測されている。この上昇流によって雲が形成され、雲物理実験設備としての使用が可能となるが、実際に形成される雲の厚さは様々な条件によって変動する。例えば、季節変化に伴って鉱山内に導入される空気の絶対水蒸気量が変化することにより、坑底における相対湿度は大きく変化する。具体的には、冬季については空気中に含まれる水蒸気量が少ないため雲が形成されない、ということが過去の観測から明らかになっている。坑底に繋がる坑道の途中には、空気中の水蒸気量を増やすことを目的として、天井部に数台のスプリンクラーを設置した。この

スプリンクラーによる撒水を行なった場合には、水蒸気量が増える。

Fig. 1 に示されているように、坑道と立坑との接続部付近には、流入する空気に関する物理量を測定するために、エアロゾルサンプラー、パーティクルカウンター、及びその他様々な測器を設置した。また、立坑内の鉛直方向についても物理量測定を行なえるよう、地上に巻上げ機を設置し、ワイヤーで吊り下げた観測用ゴンドラを上下させられるようにしてある。実際の観測は、高度 0 m (坑底) から高度 700 m までの範囲で、ゴンドラを上昇させながら行なった。正確なデータが得られるよう、高度 50 m ごとに 5 分間ゴンドラを停止させている。このゴンドラには、温度計、湿度計、風速計、気圧計、CCD カメラ、雲水採取装置、雲粒粒径分布計、他様々な測器を搭載した。ただし、一度に搭載できる測器重量の制限のため、実際には、測器の組み合わせを変えた 2 つのゴンドラを用意した。1 回の観測ではどちらか一方のゴンドラのみを使用するため、得られたデータの種類の観測ごとにそれぞれ若干異なっている。

本研究で使われたデータ取得について次に述べる。エアロゾルの数濃度は、パーティクルカウンターで測定された。これによって粒径 0.3, 0.5, 1, 2, 5  $\mu\text{m}$  以上のエアロゾル数濃度が求まる。また組成は、エアロゾルサンプラーでエアロゾルをフィルター上に捕集し、後に走査型電子顕微鏡で形態を、X 線マイクロアナライザーで元素組成を同定した。

立坑の実験設備内では、Fig. 2 に示されているゴンドラ内に搭載された測定機器類によって測定された。温度、湿度、気圧と風速の一般気象要素の高度分布以外に雲粒粒径分布、雨滴粒径分布、雲水の化学組成、CCD カメラによる雲存在確認のための視程、粉塵量の高度分布等が測定された。

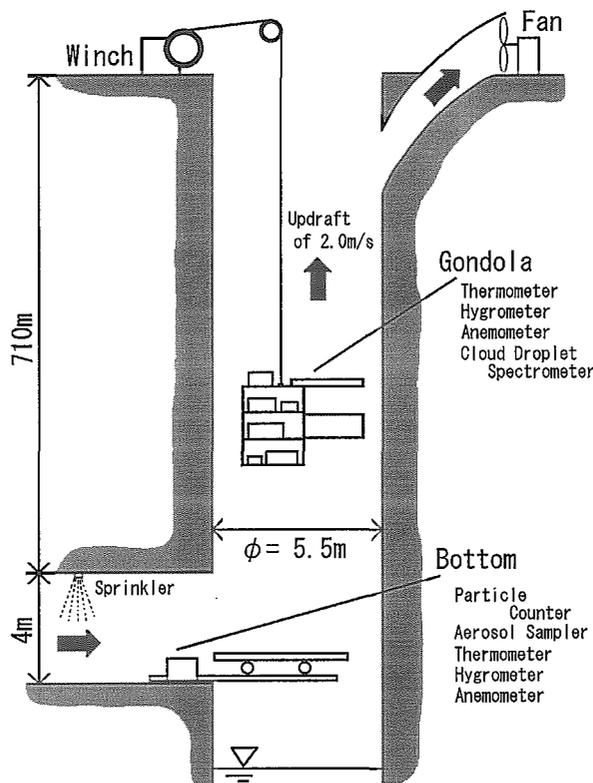


Fig. 1. Arrangement of observational instruments.

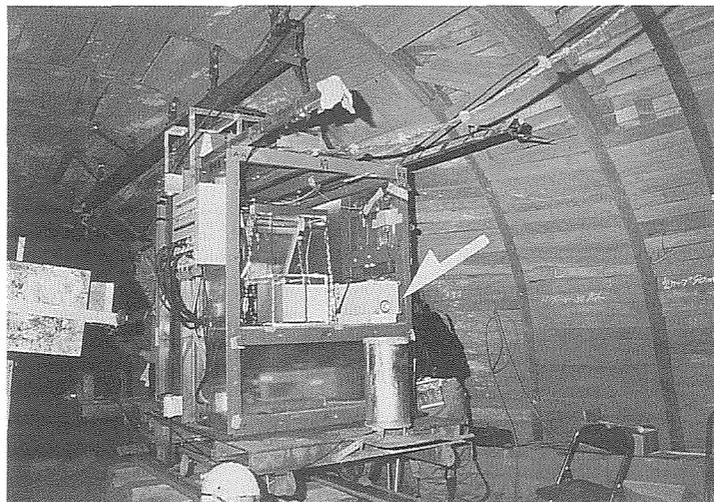


Fig. 2. Cloud droplet spectrometer (arrow) and other instruments installed in a gondola.

### III. 観 測 結 果

この実験設備内で雲が形成されるかどうかがまず重要であるので、それを確認するためにビデオ画像観測を行った。1992年7月1日の雲発生高度は520 mであった。これは、それより下の高度434 mと上の高度584 mのビデオ画像とを比較することによって雲の発生が確認できた。通年観測を実行した結果は、雲はいつでも発生するのではなく、気象条件によることが分かった。

この立坑実験設備の下端における温度と湿度の季節変化を Fig. 3 に示す。温度は冬季の21.5°Cから夏季の24.5°Cまで年較差で約3°Cある。夏季には坑外の暖かい空気が坑底で冷やされるので湿度が高く、冬季には坑外の冷たい空気が坑底で暖められるので湿度が低くなるので、湿度に関しては、冬季の約50%から夏季の約80%まで変化する。実験設備の下端での湿度の値によって、すなわち湿度の高い夏季には雲が形成されるが、湿度の低い冬季には雲が形成されないことになる。

上記のように雲の発生が設備の下端の湿度に依存している。また同様に形成された雲の雲底高度や雲の性質も下端の湿度に依存することが考えられる。それで下端で散水することによって湿度の増加を試みた。その1例を Fig. 4 に示す。横軸は湿度で、縦軸は高度である。散水しない場合を黒丸印で、散水した場合を白丸印で示し、雲底高度を矢印で示した。図に示されるように散水によって湿度が8%増加し、雲底高度が約100 m低下したことが認められる。この設備において、散水によって雲の厚さをこの程度の範囲で制御できることが分かった。

この実験設備の下端での流入する空気中に含まれるエアロゾル数濃度の時間変化を Fig. 5 に示す。この図は、エアロゾル数濃度が粒径0.3, 0.5, 1, 2, 5  $\mu\text{m}$  以上の総数というように5段階で表示されている。粒径0.3  $\mu\text{m}$  以上の総数で見ると、散水のない場合の Case 2 のように比較的経時変化がない場合がある一方、Case 1 と Case 3 のように経時変化がある場合もある。この原因の一つとしては、坑道内は乾燥しているために横坑道での人間の動きやその他の原因によって粉塵が舞い上がることが考えられる。これについては現在のところ制御することができていない。

次に設備内の湿度を増加させた Case 4, Case 5 と Case 6 の場合を見てみる。Case 4 では変動が少なく、経時変化が少ない。しかし、Case 5 のように経時変化が激しい場合もあり、またその中間的な

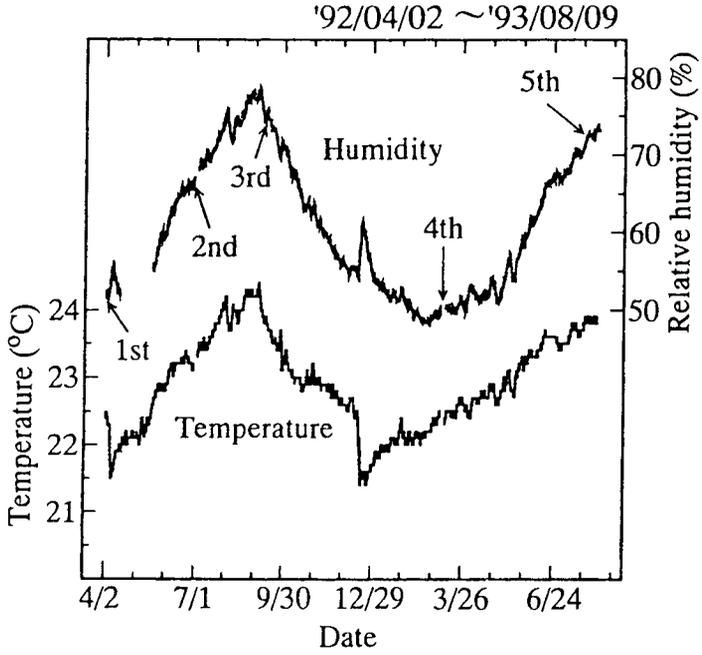


Fig. 3. Seasonal changes in temperature and humidity at the bottom of the shaft.

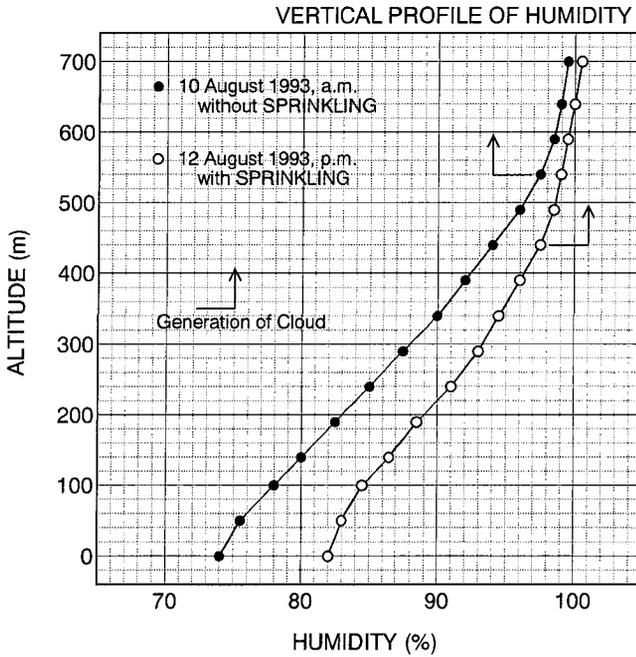


Fig. 4. Humidity increase at the bottom of the shaft and decrease in cloud base height by use of sprinklers.

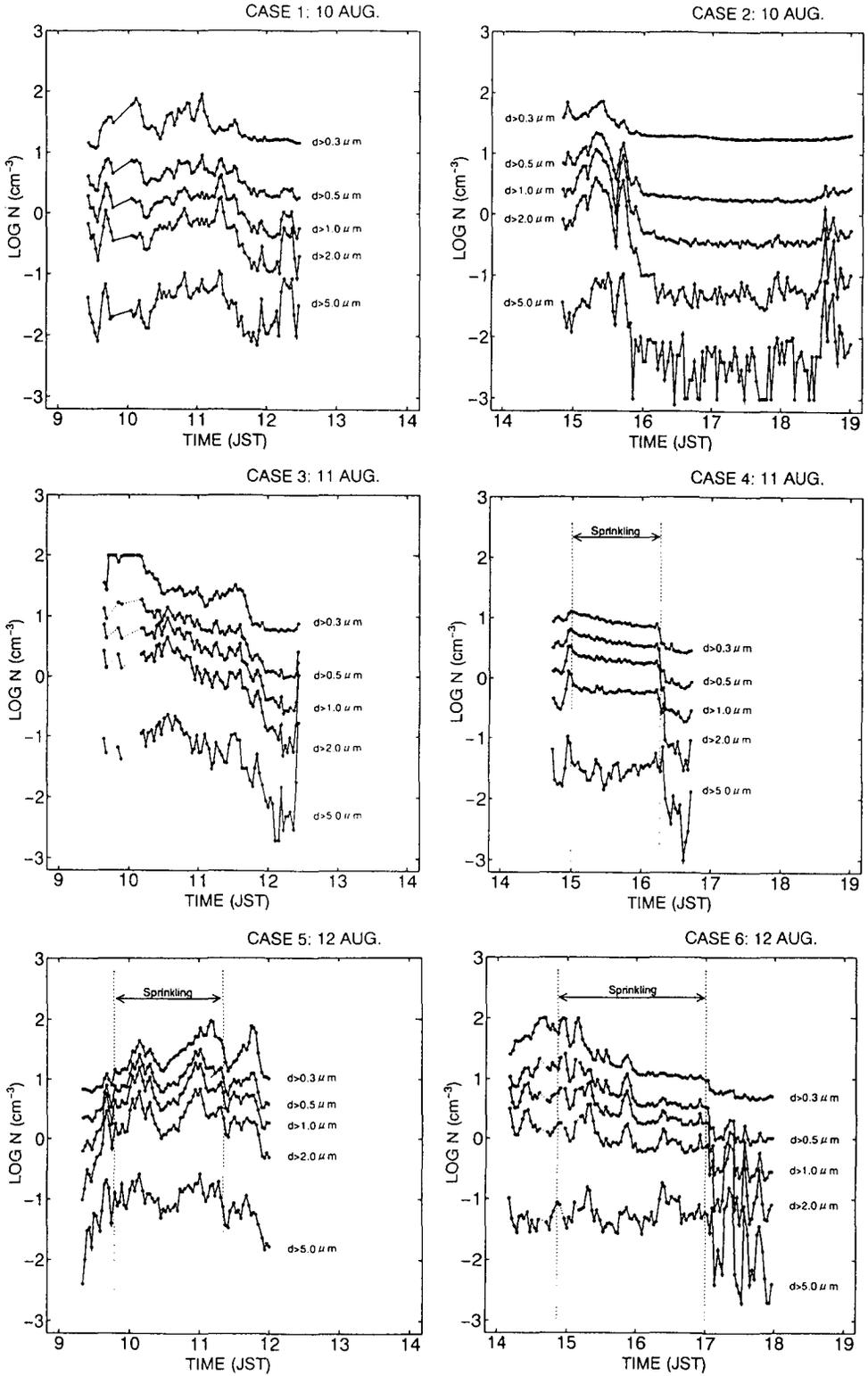


Fig. 5. Temporal changes in aerosol concentrations at the bottom of the shaft.

変動をする Case 6 の場合もあった。散水した Case 4 では、他のケースより数濃度が 1 桁程度減少しているのが見られるが、Case 5 と Case 6 のようにそれ程減少しない場合も見られる。このようにエアロゾル数濃度についての散水の効果はよく分からない。以上のように、散水してもエアロゾル数濃度の制御ができていないので、当分の間は無制御下で実験観測を行い、エアロゾル数濃度の大小に対して結果をまとめる手法をとることにする。将来的には横坑道にフィルターを設置して、流入する空気を清浄化する案、エアロゾルを人為的に発生させる案などが検討されている。

エアロゾルのうち凝結核として働く粒子はどのくらいの割合であるかは、粒子の大きさとともに粒子の組成によって異なると考えられる。それで次にエアロゾルサンプラーで空気中のエアロゾルをフィルター上に捕集したものの走査電子顕微鏡による形態の観察と X 線マイクロアナライザーによる元素分析の結果をみてる。Fig. 6 の例は、粒径が  $0.6 \mu\text{m}$  程度で塊状の粒子である。X 線マイクロアナライザー分析によると、ケイ素とアルミニウムが検出されたので土壌粒子と考えられる。Fig. 7 の例は、大きさが約  $0.7 \mu\text{m}$  の立方体でナトリウムと塩素が検出されたので塩化ナトリウムと考えられる。Fig. 8 の例は、大きさが約  $0.8 \mu\text{m}$  でケイ素、アルミニウム、ナトリウムと塩素が検出されたので土壌粒子と塩化ナトリウムとの混合粒子と考えられる。

以上の元素分析の結果を、粒径  $0.3\text{--}0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.5\text{--}2 \mu\text{m}$ 、 $2\text{--}5 \mu\text{m}$  の 3 段階でまとめたものの

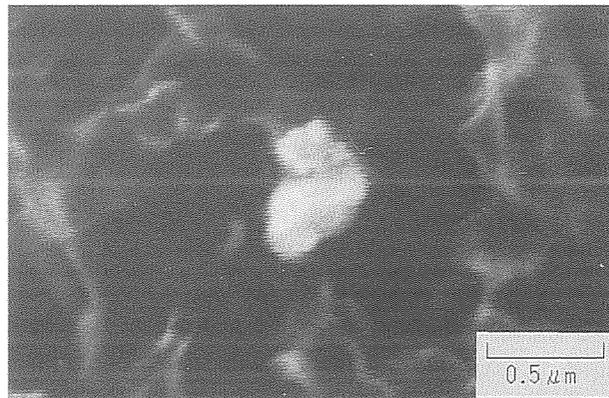
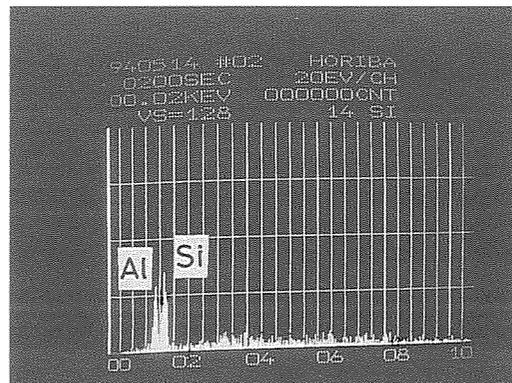


Fig. 6. Energy dispersive x-ray microanalyzer spectrum (upper part) and the scanning electron microscope photograph (lower part) of aerosol particle.

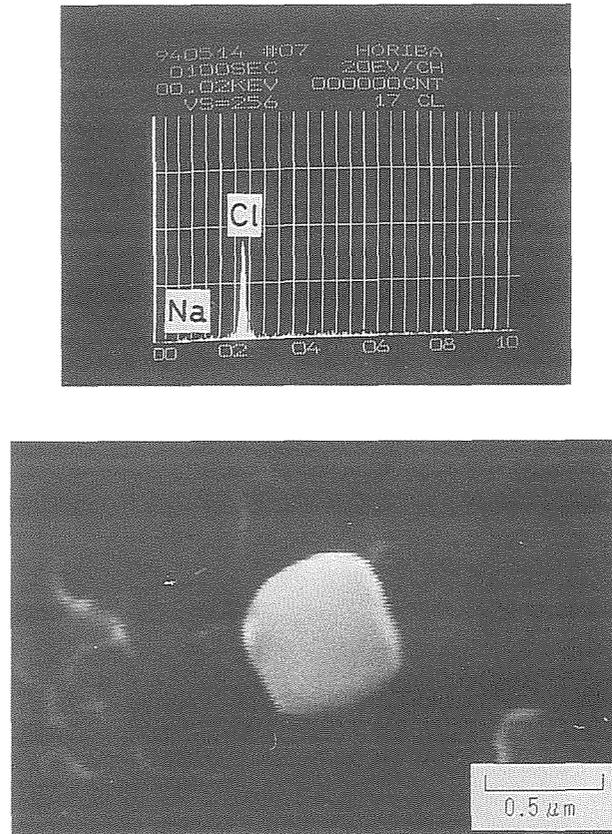


Fig. 7. As in Fig. 6.

1例が Fig. 9 である。この図は粒径  $0.5 - 2 \mu\text{m}$  のエアロゾルについてまとめたもので、白い棒グラフは散水しない場合、黒い棒グラフは散水した場合である。各々について 30 個ずつの粒子を元素分析し、検出された元素をすべて総計したものの百分率で示してある。散水しない場合では、鉄、ケイ素、アルミニウム、ナトリウム、カルシウム等が卓越元素である。ところが散水した場合には、塩素、ナトリウム、ケイ素が非常に増加した。これは散水した水の分析によると、非常に多くのナトリウムと塩素が含まれていたことから、散水のために増加したと考えられる。また散水しない場合もナトリウムと塩素が比較的多いのは、坑道から舞い上がる粉塵対策として塩化ナトリウムの散布した事実から説明できる。とにかくエアロゾルが塩化ナトリウムならびに塩化ナトリウムを含む混合粒子であることは、凝結核としての能力が非常に高い粒子であることになる。エアロゾルの組成によつての雲粒粒径分布の変化を見るためには、流入口にフィルターを張って流入空気を清浄化して、かつ研究対象の組成を持つエアロゾルを発生させることによって可能となる。

次に雲粒の高度変化を見てみる。散水した場合の Case 5 においては、散水による設備下端での湿度の増加によって雲底高度が  $450 \text{ m}$  と低下した。設備下端でのエアロゾル数濃度は Fig. 5 に見られるように Case 1 とほぼ等しいが、雲粒数濃度は増加した。これは散水によって塩化ナトリウムの混合粒子、すなわち凝結核が増えたことによると考えられる。実験設備内に形成された雲内の雲粒粒径分布の例として、散水した場合の Case 4 の雲粒の高度変化を Fig. 10 に示す。高度  $700 \text{ m}$  での雲粒粒径が大きいことがわかる。エアロゾル数濃度が少ないために、1 個 1 個の粒子は多くの水蒸気を凝結させることができた結果と考えられる。また雲底下 (高度  $300 \text{ m}$ ) でも少数ではあるが、雲粒が認められる。散

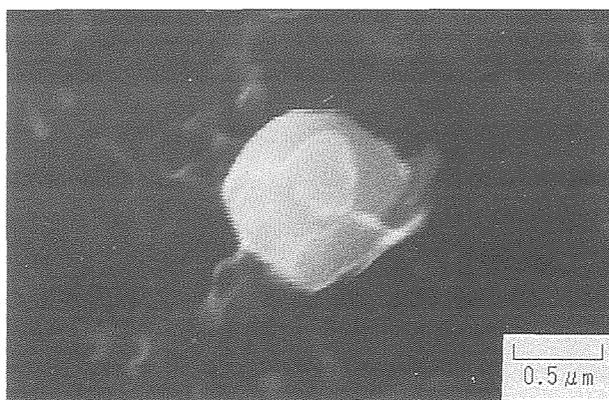
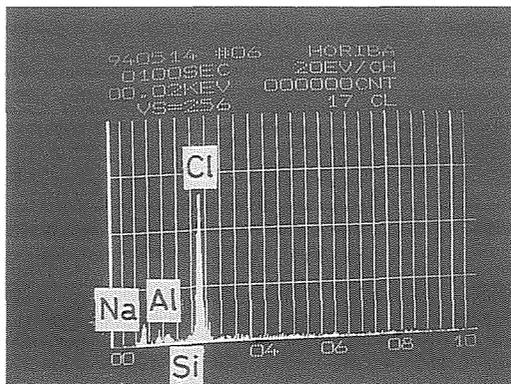


Fig. 8. As in Fig. 7.

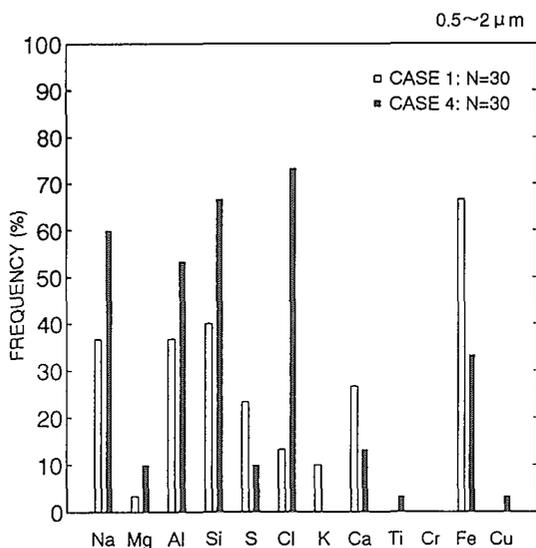


Fig. 9. Frequencies of elemental components of aerosol particles in the case of sprinkling (CASE 4) and no sprinkling (CASE 1).

## CASE 4: 11 Aug.

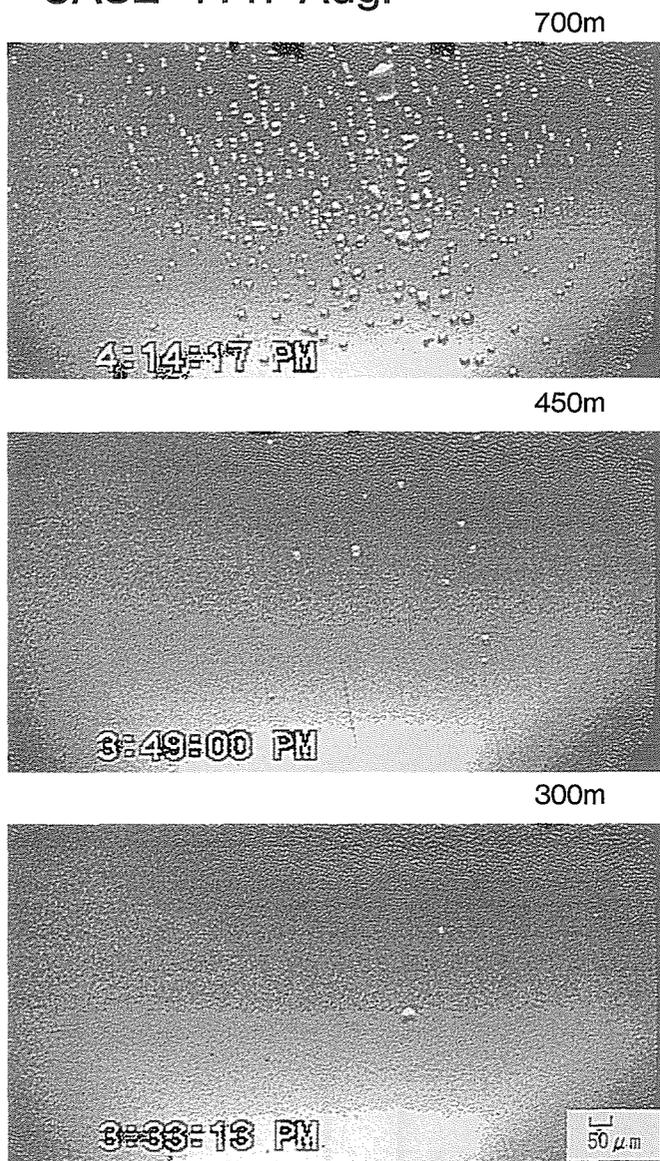


Fig. 10. Changes in height of cloud droplets.

水しなかった Case 1 の雲粒の高度変化では、雲底高度は 550 m であり、高度 600 m と高度 700 m においては雲粒が存在するが、数は少ない。また雲底下（高度 450 m）においても少数であるが 20 数  $\mu\text{m}$  の雲粒が認められる。これは吸湿性の組成を持ち、かなり大きいエアロゾルから形成された雲粒と考えられる。このようにエアロゾル数濃度によって雲粒粒径分布が変化することが確認された。

#### IV. ま と め

散水なしとありの実験の結果、本実験設備の特性が次のようであった。実験設備の下端での粒径  $0.3 \mu\text{m}$  以上のエアロゾル数濃度は  $10\text{--}100$  個/ $\text{cm}^3$  で、組成は塩化ナトリウムの混合粒子が卓越していた。湿度は散水によって増加させることができ、その増加幅は  $8\%$  であったと特定された。実験設備の下端でのエアロゾル数濃度値が変化すると形成される雲の粒径分布が変化することが確認された。このことは、将来形成された雲を使用するいろいろな実験において、望む雲粒分布を作成する可能性が開けたことを意味する。この設備の温度を制御することは、今のままでは困難であり、大幅な改造が必要となる。

**謝辞** 実験設備の設営、観測にあたっては、上砂川町、三井石炭鉱業(株)、三井建設(株)、(株)SMS に協力して頂いた。ここに記して感謝申し上げます。この研究の一部は、文部省科学研究費補助金・基盤研究(B) (課題番号 06452081 代表 播磨屋敏生) によって行われた。

#### 文 献

- 藤吉康志・播磨屋敏生・若濱五郎, 1993. 準実スケールの人工雲物理実験計画の紹介. 天気, **40**, 213–216.
- Fujiyoshi, Y., T. Yamada, M. Inage and T. Harimaya, 1993. Tentative Results of Artificial Cloud Experimental System (ACES). Proceedings of IAMAP-IAHS (Yokohama), J4.3–19.
- List, R., J. Hallett, J. Warner and R. Reinking, 1986. The Future of Laboratory Research and Facilities for Cloud Physics and Cloud Chemistry. Bull. Amer. Meteor. Soc., **67**, 1389–1397.
- Yamada, T., T. Hibino, G. Fukawa, M. Matsuura, Y. Fujiyoshi, T. Harimaya and M. Inage, 1993. Quasi-prototype Experiments of Cloud Physics Using Long Shaft in the Mine. Proc. 25th Congress of I. A. H. R. (Yokohama), 113–118.