

凝結過程における気象因子の鉛直構造

中央大学大学院 学生会員 小田村康幸
中央大学理工学部 正会員 山田 正

中央大学理工学部 正会員 加藤拓磨

1. はじめに

近年、都市部において突発的な集中豪雨による河川氾濫や内水氾濫が及ぼす被害が深刻な問題となっている。その原因として都市部におけるヒートアイランド現象や産業活動による大気中のエアロゾル数の増加が挙げられる。雲の核となるエアロゾルが水蒸気と凝結し、雲となる過程は未だ未解明な部分が多い、それは実大気においては同じ現象を2度と見ることができなく現存する実験施設では10m以下ものしかなく実大気で起きている現象のごく一部の再現しかできないからである。エアロゾルの量、種類が雲形成過程に及ぼす影響を解明することが今後の降雨予測の精度向上にあたってのキーポイントとなっている。そのため著者らは雲の微物理過程の厳密な解明とモデル化を目的とし鉾山の長大立坑を用いて雲物理実験を行っている。この実験の利点は、気温、絶対湿度が一年を通して安定しており、準実スケールで再現性のある実験をできることである。本雲物理実験は1992年から2007年までに計18回実験を行い、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や噴霧溶液の分子量、上昇流の強さの違いが雲水発生量に影響するなど多くのことを解明してきた。本論文では高度上昇に伴う粒子数濃度と雲粒の粒径分布の高度変化について述べる。

2. 実験施設概要

雲物理実験の概要：雲物理実験施設は岩手県釜石市にある廃坑となった鉾山内の排気用の高さ430m、幅5.5m、奥行き2.8mの立坑を使用している。雲物理実験施設の概要図を図-1に示す。この立坑は海拔250m～680mに存在し250m以下は水没している、また立坑内の相対湿度はほぼ100%を維持している。実験は立坑の下部（以後、坑底と呼ぶ）の横穴から流入した空気を立坑上部（以後、坑頂と呼ぶ）に設置した大型ファンにより、上昇流を発生させ、雲水を生成させる実験施設である。坑底に設置する溶液噴霧装置により坑内に流入させるエアロゾル数濃度を制御することができる。機材を各高度に設置することにより定点観測が可能であり、本研究では定点観測で、粒子数濃度、気温の鉛直分布、坑頂での雲水量計測を行い、また坑頂部からゴンドラに観測機材を載せ、上下方向に移動させる移動観測を行い、立坑内における大気圧、上昇風速、粒子数濃度、気温を計測している。

3. 上昇風速の鉛直分布

次にファン可動時と可動してな

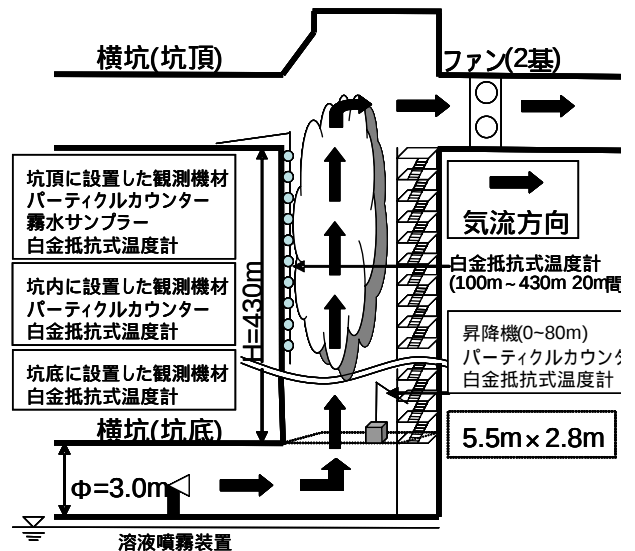


図-1 実験施設概要図

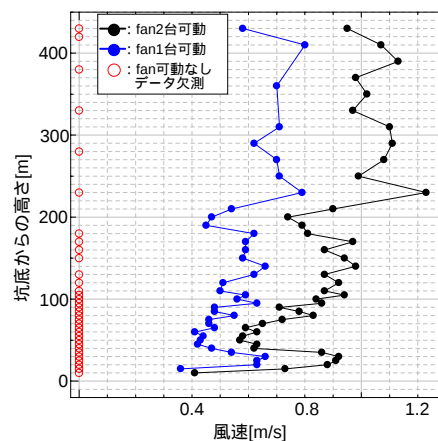


図-2 上昇風速の鉛直分布

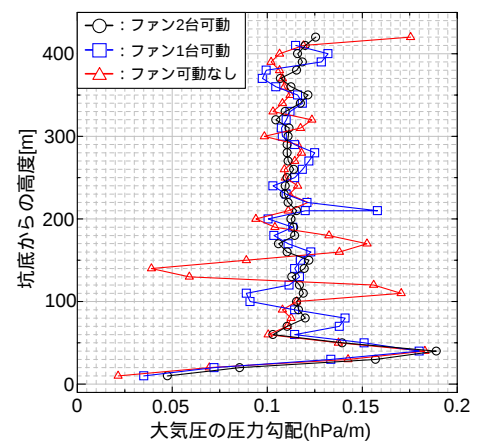


図-3 大気圧の圧力勾配の鉛直分布

キーワード：過飽和度、雲物理、エアロゾル

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 Tel: 03-3817-1805 Fax: 03-3817-1803

い時の立坑内の上昇風速の鉛直分布を図-2に示す。ファン可動の台数を増加させると立坑内の上昇風速が大きくなる。ファン可動時の上昇風速の鉛直分布を見ると、各高度における風速分布は高度により増減しはばらあるが風速は高度上昇に伴い増加する。そして坑底から10m～30m、の高度間において風速がファン2台可動時で風速が0.45m/s 0.9m/s、ファン1台可動時で風速が0.75m/s 1.2m/sに増加する、坑底から210m～230mの高度間においてファン2台可動時で風速が0.75m/s 1.22m/s、ファン1台可動時で風速が0.45 m/s 0.8m/s増加する。一方、坑底から30m～40mの高度間においてファン2台可動時で風速が0.9m/s 0.6m/s、ファン1台可動時で風速が0.65 m/s 0.43 m/sに減少し、坑底から230m～250mの高度間においてファン2台可動時で風速が12.2 m/s 0.88 m/sに減少するなど定性的に現象は同じであることがわかる。次に大気圧の圧力分布の鉛直分布を図-3に示す。この各高度における大気圧の圧力勾配は、その高度から10m上の地点で計測した大気圧と10m下の地点で計測した大気圧から2地点間の大気圧の圧力勾配を算出したものである。坑底から10～40mの高度間においてファン可動に関わらず大気圧の圧力勾配が1.5hPa/m以上増加する。また坑底から40～60mの高度間において大気圧の圧力分布が0.7hPa/m以上減少していることがわかる。坑底から60～410mの高度間においての大気圧の圧力勾配はファンの可動台数により大気圧の圧力勾配の変動値は異なるが、高度上昇に伴い増加 - 減少 - 増加 - 減少という挙動をしている。ファンが可動してない時の上昇風速は計測をできなかったが大気圧の圧力勾配の差が生じているため、ファン可動してない状態においても微弱だが立坑内に上昇風速が吹いていると思われる。また今回測定に使用したベーン式の風速計は起動風速が0.3m/sであるため、風速が測定できなかったと思われる。

4. 気温の鉛直分布

気温の鉛直分布を図-4に示す。ファン可動有無にかかわらず、気温は坑底から10m～60mの高度と坑底から210m～380mの高度において湿潤断熱減率と同じ減率を示している。坑底から60m～200mの湿潤断熱減率より低い気温の減率を示している。坑底から10m～60mの高度間は相対湿度が100%である飽和層であると考えられ、坑底から60m～200m

の高度間においては水蒸気の相変化に伴う潜熱が多く発せられているため、相対湿度が100%以上である過飽和層があると考えられる。

5. 坑頂における粒子数濃度の変化

坑頂における粒子数濃度の時系列を図-5に示す。ファンを2台可動すると粒径が2.0～5.0 μm の雲粒子が2 6count/cm³に増加し、5.0 μm 以上の雲粒子も2.5 3.5count/cm³に増加していることがわかる。次にファンの可動台数を2台から1台に

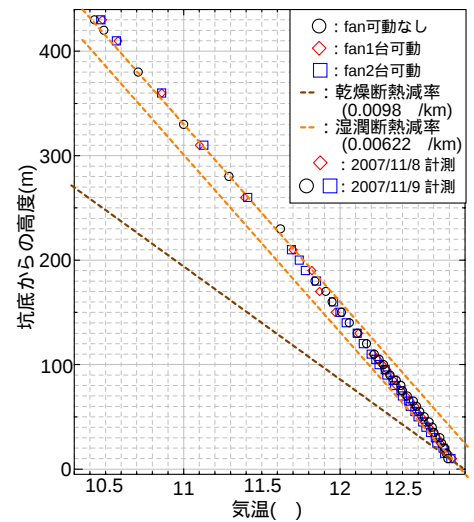


図 - 4 立坑内の気温の鉛直分布

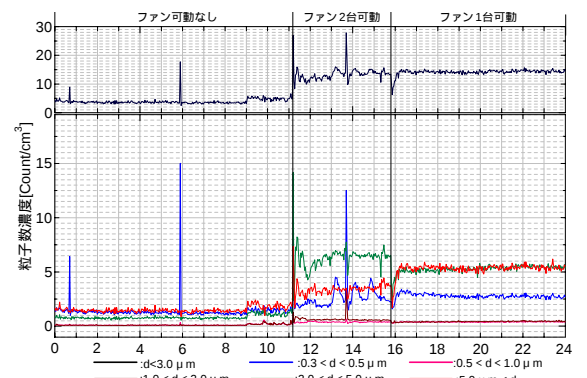


図 - 5 上昇風速の鉛直分布

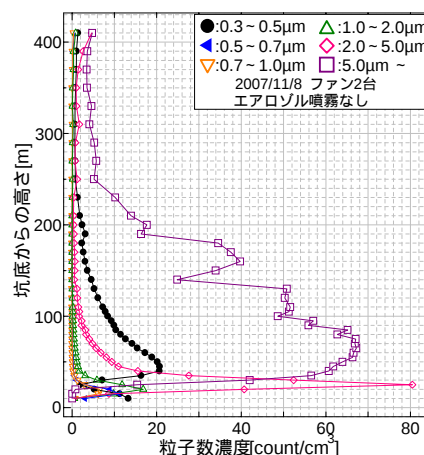


図 - 6 粒子数濃度の鉛直分布

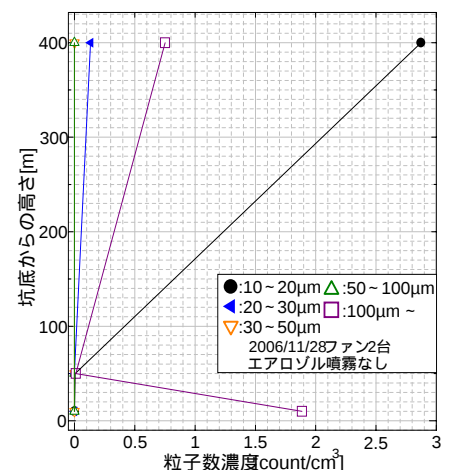


図 - 7 粒径が10 μm 以上の粒子数濃度の鉛直分布

した時、 $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度の全ての雲粒子数は $13\text{count}/\text{cm}^3$ で変動はないが、 $2.0\sim 5.0\mu\text{m}$ の粒子数濃度は $7\sim 5\text{count}/\text{cm}^3$ に減少し、 $5.0\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度は $3.5\sim 5.5\text{count}/\text{cm}^3$ に増加しているのがわかる。ファンを可動させると坑頂における粒子数濃度が増加するのは、ファン可動により立坑内の上昇風速が増し坑内に供給される水蒸気フラックス量が増えるため、過飽和度が増しエアロゾルの乾燥粒径が小さいものも水蒸気と凝結成長が促進されたためと考えられる。

6. 粒子数濃度の高度変化

各粒径の粒子数濃度の鉛直分布を図-6 に示す。坑底から $10\text{m}\sim 30\text{m}$ の高度間において、粒径が $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ の粒子数濃度は $13\sim 2\text{count}/\text{cm}^3$ に減少し、その後粒径が $0.5\sim 5.0\mu\text{m}$ の粒子数濃度の増加し始める。坑底から 15m 地点で粒径が $0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ の粒子数濃度と粒径が $0.7\sim 1.0\mu\text{m}$ の粒子数濃度は、ピークとなりその後、 $15\text{m}\sim 40\text{m}$ の高度間で高度上昇に伴い減少していき、粒径が $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$ の粒子数濃度も、坑底から 20m 地点でピークとなりその後、 $15\text{m}\sim 40\text{m}$ の高度間で減少していく。粒径が $2.0\sim 5.0\mu\text{m}$ の粒子数濃度も坑底から 25m の高度でピークとなり $25\text{m}\sim 140\text{m}$ の高度間で減少していく。一方、坑底から $25\text{m}\sim 40\text{m}$ の高度間において、粒径が $0.3\sim 0.5$ の粒子数濃度は $2\sim 21\text{count}/\text{cm}^3$ に増加し、坑底から $20\sim 60\text{m}$ の高度間で粒径が $5.0\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度は $0\sim 68\text{count}/\text{cm}^3$ に増加する。坑底から 45m 地点で粒径が $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ の粒子数濃度はピークとなりその後減少していく。また、坑底から 70m 地点で粒径が $5.0\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度はピークとなりその後、坑底から 250m 地点まで減少していく、そして坑底から $250\sim 400\text{m}$ の高度間において粒径が $5.0\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度は $2.5\text{count}/\text{cm}^3$ になる。次に粒径が $10\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度の鉛直分布を図-7 に示す。坑底から $10\text{m}\sim 50\text{m}$ の高度間において、粒径が $10\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度は $1.9\sim 0\text{count}/\text{cm}^3$ に減少する。坑底から 50m において $10\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度は $0\text{count}/\text{cm}^3$ である。一方、坑底から 400m 地点において粒径が $10\sim 20\mu\text{m}$ の粒子数濃度は $2.9\text{count}/\text{cm}^3$ になり、また粒径が $20\sim 30\mu\text{m}$ の粒子数濃度は $0.2\text{count}/\text{cm}^3$ 、粒径が $100\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度は $0.5\text{count}/\text{cm}^3$ になる。図-6 で示された坑底から 50m 地点まで粒径が $0.3\sim 0.5$ の粒子数濃度が増加して、その後減少するのは初期の乾燥粒径が他のエアロゾルと比べ小さいものが水蒸気と凝結成長するが、その後さらに大きい粒径の雲粒になるための過飽和度が足りずに蒸発したため、粒径が $0.3\sim 0.5$ の粒子数濃度が減少していったと考えられる。坑底から $70\text{m}\sim 250\text{m}$ の高度間で粒径が $5.0\mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度が減少していくのは雲粒子同士の併合が起こることにより粒径が大きい雲粒子となり粒子の数が減少していく、もしくは雲粒子の粒径が $5.0\mu\text{m}$ 以上になるために水蒸気が凝結することで過飽和度が減少し、平衡水蒸気圧が保てず蒸発したと考えられる。

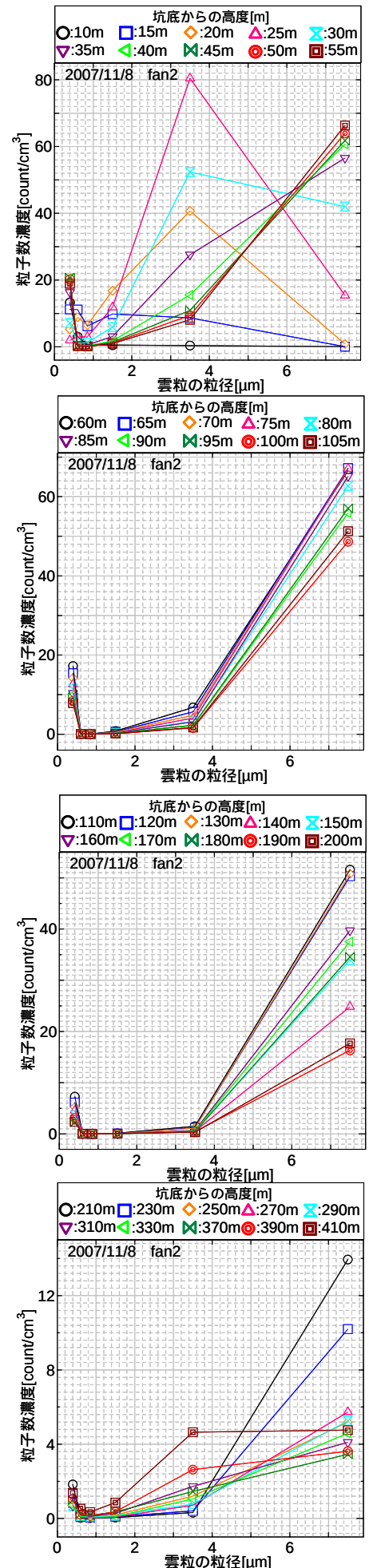


図-8 粒子数濃度の粒径分布

7. 粒子数濃度の粒径分布の高度変化

坑底から 10～420m の高度間の粒子数濃度の粒径分布を図-8 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．坑底から 10m までは $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 以下の雲粒子のみ存在し，10～20m の高度間で粒径が $0.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$ の粒子数濃度が増加し始める．坑底から 25 地点から粒径が $5.0 \mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度が増加し始め，坑底から 30～60m の高度間において粒径が $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ と $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度が増加する．坑底から 80～230m の高度間においては全ての粒子数濃度が減少しているのがわかる．坑底から 250～390m の高度間においては粒径が $4 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度が増加し始め，坑底から 410m 地点において粒径が $3 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度が多く存在していることがわかる．

8. 実験条件による坑頂付近における粒径分布の変化

坑底から 400m 地点における粒子数濃度の粒径分布を図-9 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．エアロゾルを無噴霧時の粒子数濃度は上昇風速が大きい時，粒径が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度を除く全ての粒径の粒子数濃度で大きい値を示している．また，エアロゾル噴霧時における粒径が $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度はエアロゾル噴霧量が少なく，上昇風速が大きい時ほど大きくなる．更にエアロゾルの噴霧量，及び上昇風速の強さに起因せずどの実験条件においても粒径が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度が一番大きい値を示していることがわかる．どの実験条件においても絶対値は異なるが粒径が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度が一番多い傾向を示すのは，粒径が $20 \mu\text{m}$ 以上の雲粒に成長するための水蒸気量が立坑内に供給されていないか，立坑内に元より存在するエアロゾルと立坑内に散布されたエアロゾルの乾燥粒径が小さい粒子が多いためと考えられる．

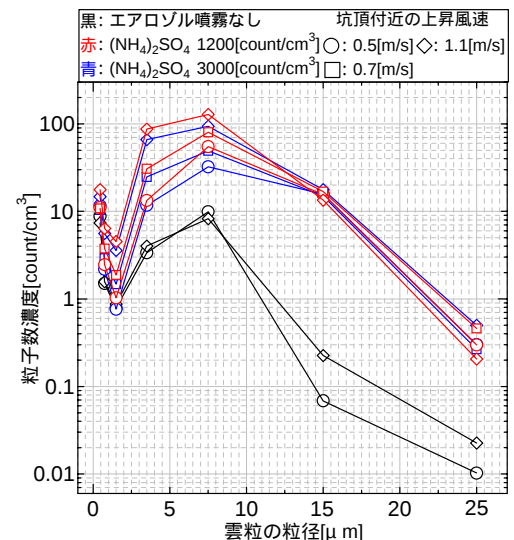


図 - 9 坑頂付近における粒子数濃度の粒径分布

9. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す．

- (1) 坑底から 70 m～250m の高度間で粒径が $5.0 \mu\text{m}$ 以上の粒子数濃度が減少していくのは雲粒子同士の併合が起こることにより粒径が大きい雲粒子となり粒子の数が減少していく，もしくは雲粒子の粒径が $5.0 \mu\text{m}$ 以上になるために水蒸気が凝結することで過飽和度が減少し，平衡水蒸気圧が保てず蒸発したと考えられる．
- (2) どの実験条件においても絶対値は異なるが粒径が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の粒子数濃度が一番多い傾向を示すのは，粒径が $20 \mu\text{m}$ 以上の雲粒に成長するための水蒸気量が立坑内に供給されていないか，立坑内に元より存在するエアロゾルと立坑内に散布されたエアロゾルの乾燥粒径が小さい粒子が多いためと考えられる．

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物理過程の考察,土木学会論文集, No.509, -30,pp.1-13,1995,2Robinson, S. K.:
- 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, -46,pp.1-20,1999.2
- 3) 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
- 4) Twomey, S.: J.Atmos. Sci., 34, 1149-1152 (1977)
- 5) 笹尾将登, 土屋修一, 山田正: 実スケール雲物理実験における時空間変化する粒子数濃度と雲水量の関係, 水工学論文集, 第51巻, 2007年2月