

第10章 野外シーディング実験*

10.1 はじめに

降雪の人工調節技術を確認するためには、自然の雲を対象とした野外観測による降雪機構の解明に加えて、人工的なシーディングに対する雪雲の内部構造の応答を十分に把握する必要がある。そのためには、シーディングに対する自然の雲の内部構造と降雪機構の応答に関する正確な情報を組み込み、信頼性の高い人工調節の数値モデルを構築しなければならない。それを用いて、種々の条件下で自然の雪雲とシーディングをした雪雲の比較を行い、最適シーディング法やシーディング効果の評価法を確立する必要がある。

オーバーシーディング時には自然には見られない高濃度の微小氷晶が局所的に生成されるので、その後の内部構造の変化はまだ十分に解明されていない。また、シーディング物質の初期の空間的広がり、通常使用される数値モデルの解像度より小さく、シーディングにより生成した氷晶プリュームの初期拡散に関する情報は、シーディングの数値実験を行う際に必要不可欠である。

AgI やドライアイスを用いたシーディング実験は1940年代後半より世界中で数多く行われてきたが、シーディングに対する雲の内部構造の物理的変化を測定した基礎的研究は、大陸性の積雲 (Cooper *et al.*, 1984) や、山岳性降雪量 (Marwitz *et al.*, 1981) に関する研究があるがその数は少ない。日本海降雪雲を含め、海洋性の対流性降雪雲を対象としたシーディング実験に関する基礎的研究はこれまでほとんど行われていない。

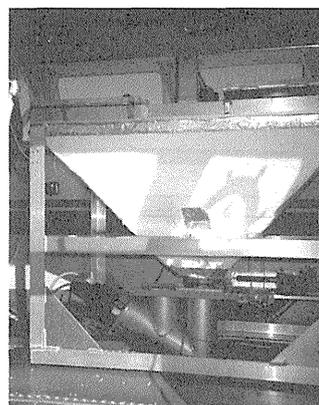
本研究では、直接人間の生活空間に影響を与えることなく、かつ日本海降雪雲と類似した性質を有する雲として、寒気吹き出し時に太平洋上に再形成される雪雲を対象として、ドライアイスペレットを用いたシーディング実験を行い、航空機による直接観測により、シーディングによる雲の内部構造の応答を調べた。

10.2 シーディング装置の開発

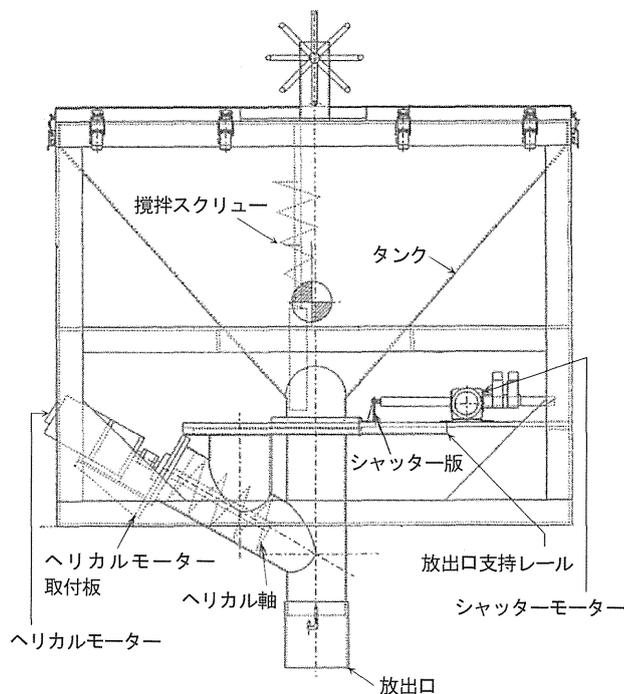
航空機から一定量のドライアイスペレットを連続して投下するために、ドライアイスポッパーを製作した。その外観写真と側面図を第10.2.1図と第10.2.2

図に示す。大きさは、横 105 cm, 奥行き 55 cm, 高さ 81 cm で、軽量化のため大部分はアルミ製である。コンテナは角すい状（開口部 100 cm×50 cm, 高さ 60 cm）で、航空機底部から機外に出す投下口以外は密閉式となっており、CO₂ ガス抜きパイプをコンテナから機外に接続し、CO₂ ガスによる酸欠等の事故防止をはかっている。

ドライアイスポッパーは、コンテナ部、送出部、投下部から構成される。コンテナ部にはドライアイス



第10.2.1図 ドライアイスホッパーの外観写真。



第10.2.2図 ドライアイスホッパーの側面図。

* 村上正隆：物理気象研究部，松尾敬世：物理気象研究部（現 気象大学校）

ペレット (1 cm 角) を 50 kg 収納でき、ドライアイスペレットが自重で目詰まりを起こさないように螺旋状攪拌スクリーを中心部に取り付けてある。コンテナ内のドライアイスペレットを一旦送出器に導入して、一定速度 (低速) で散布したり、投下口をスライドさせコンテナに直結して高速で散布することも可能である。前者の場合は送出用螺旋状スクリーの回転数で散布速度を連続的に調節可能である。後者の場合は、コンテナ底部の開閉板の開口面積を 1/3, 1/2, 全開にすることによって散布速度を切り替えることができる。この二つの方法を用いることにより、0~50 kg min⁻¹の散布速度が得られる。

10.3 ドライアイスペレットの諸特性

使用したドライアイスペレットの粒径分布、質量分布を第 10.3.1 図に示す。粒径、質量は 1.3 cm, 2.6 g 付近に中心をもち、標準偏差は 0.2 cm, 0.6 g 程度である。比重は約 1.4~1.5 g cm⁻³である。

ドライアイスペレットの終端落下速度は抵抗係数 C_D が不明のため、次式から直接計算することが出来ない。

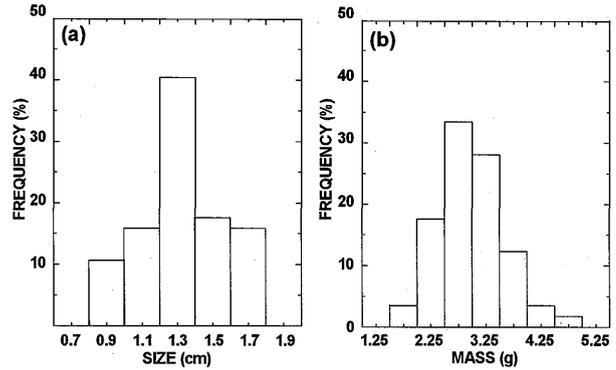
$$V^2 = \frac{2mg}{C_D S \rho_a} \quad (10.3.1)$$

そこで気象研究所本館屋上から落下実験を行い、高度差 20 m を落下するのに要する時間を測定し、

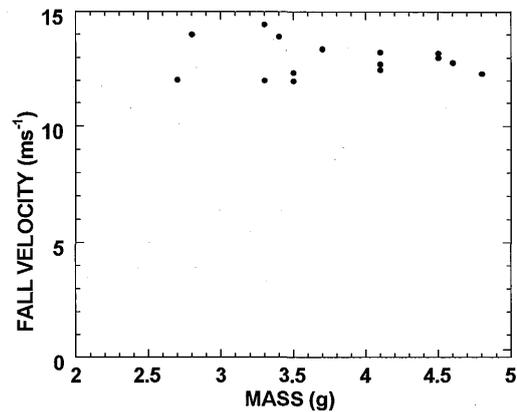
$$\frac{d^2x}{dt^2} = g - \frac{1}{2mC_D S \left(\frac{dx}{dt}\right)^2} \rho_a \quad (10.3.2)$$

$t=0, x=20, t=t_f, x=0$ の境界条件の下に解き $C_D S$ を決定し、(1)式から終末速度を求めた。その結果を第 10.3.2 図に示す。全てのドライアイスペレットの落下速度は $13 \pm 1 \text{ m s}^{-1}$ の範囲におさまる。

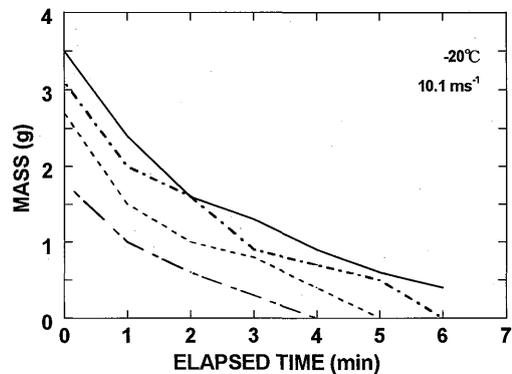
ドライアイスの昇華蒸発速度を低温実験室の垂直風洞内で測定した。実験方法はドライアイスペレットをプラスチックメッシュ上に置き、風速 4, 7, 10 m s⁻¹, 室温+8, -10, -20℃の条件下で 1 分毎に質量を測定した。-20℃, 10 m s⁻¹ の条件下の実験結果を第 10.3.3 図に示す。初期には 1 g min⁻¹ 程度の速度で昇華することが示された。この実験から、昇華速度は強い風速依存性を示すが、温度依存性は顕著でないこと



第 10.3.1 図 (a)ドライアイスペレット径の頻度分布と (b)ドライアイスペレット質量の頻度分布。



第 10.3.2 図 ドライアイスペレットの落下速度と質量の関係。



第 10.3.3 図 ドライアイスペレットの昇華蒸発による質量変化。

が確認された。実験結果は理論計算と良い一致を示した。また、落下中 (昇華中) のドライアイスペレットの表面温度は Fukuta *et al.* (1971) が計算したように約 -100℃程度に達すると考えられる。

理論式を用いて、ドライアイスペレットの落下シミュレーションを行い、昇華蒸発してなくなるまでの

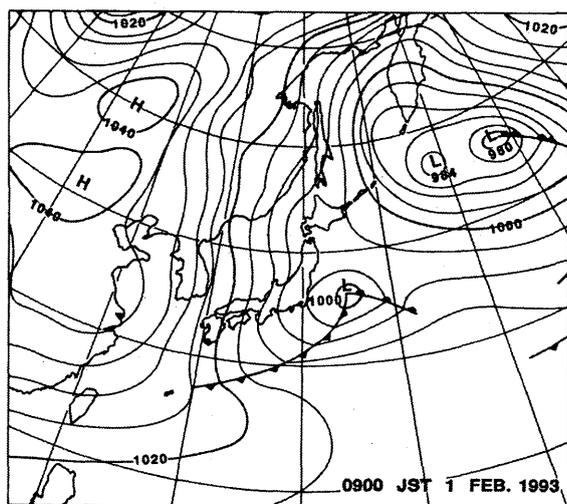
落下距離、ペレットの粒径変化、昇華蒸発速度の変化等を求めた。1g のドライアイスが昇華蒸発する間に 1×10^{13} 個の氷晶を発生させるという Fukuta *et al.* (1971) の実験結果を用いると、初期の粒径が 9 mm のドライアイスペレットが 1 cm 落下する間に発生する氷晶数は初期 (0 秒) には 2×10^6 個 cm^{-1} 、300 秒後には 7×10^6 個 cm^{-1} である。ドライアイスペレットは最初の 300 秒間で約 4 km 落下し、1.5 mm 程度になり、その間平均 1×10^6 個 cm^{-1} の氷晶を発生する。

10.4 シーディング実験

10.4.1 実験時の気象条件

1993 年 2 月 1 日、仙台沖でシーディング実験を実施した。当日は第 10.4.1 図に示すように、関東沖の低気圧が発達しながら東北東進するにつれて西高東低の典型的な冬型気圧配置になり、仙台沖は強い北西季節風が吹いていた。奥羽山脈風下側で一旦消散した雪雲が再び仙台沖～100 km で発生していた。雪雲の雲頂高度は約 3 km、温度は -20°C であった。680 hPa 付近に逆転層が存在し、相当温位 θ_e は 3.5 km より下層ではほぼ一定であったが、最下層に弱い対流不安定が見られた (第 10.4.2 図)。風は下層で北西の風 12 m s^{-1} で、上層で西北西の風 22 m s^{-1} であった。3.5 km 以下では乱流成分 (渦消散係数) が大きく、特に雲層で大きな値を示した (第 10.4.3 図)。

実験領域の上空 (推定 5000 m) には氷晶雲が存在し、この雲から弱い自然のシーディングがあったが、その

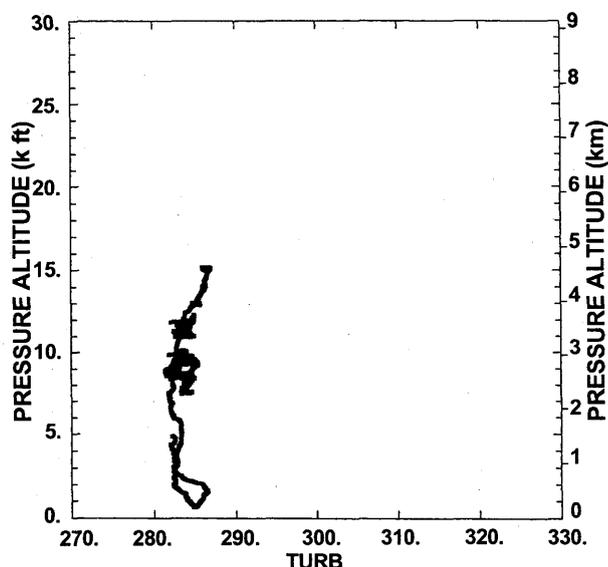


第 10.4.1 図 1993 年 2 月 1 日の 09 時 (日本時間) の地上天気図。

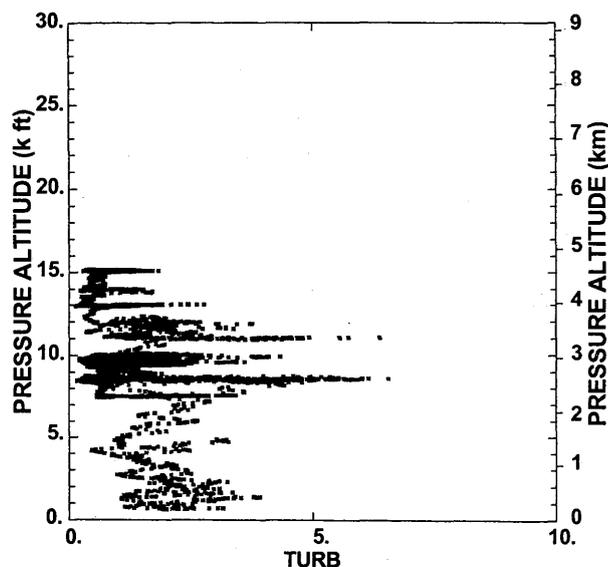
影響は顕著ではなかった。シーディング以前に所々弱い降雪があり、シーディング効果を現業用レーダで検出するのは難しい状況にあった。

10.4.2 実験方法

雲観測用航空機 Super King Air (B200T) とシーディング用航空機セスナ 402 は実験領域南西側で合流し、King Air が先に雲内を飛行し、発生初期で氷晶濃度の低い雲を探し、それに対してシーディング実験を実施した。King Air は雲頂下 1000 ft を飛行し、セスナ

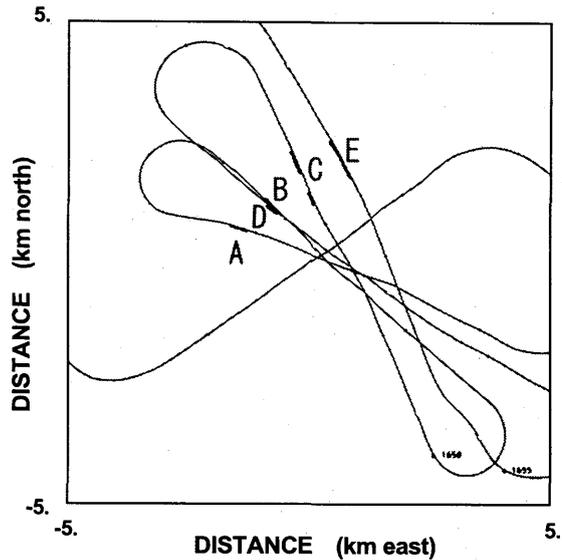


第 10.4.2 図 航空機による SOUNDING から得られた相当温位の鉛直分布。



第 10.4.3 図 航空機による SOUNDING から得られた渦消散係数の鉛直分布。

402 は雲頂上 1000 ft を King Air より後方風上側 4000 ft を飛行しながらドライアイスペレットを風向にほぼ直交する方向に直線的に散布した。散布速度は 1 kg min^{-1} で数分間シーディングを実施した。ドライアイスペレットが風に流されることを考慮して風上側 4000 ft でシーディングを計画したが、飛行中に目測で 4000 ft を確保するのは困難で、実際にはさらに風上側を飛行しながらシーディングしたことが第 10.4.4 図から分かる。シーディング後、King Air はポインターシステムを利用してシーディングプリュームを追跡観測した。移動する雲に相対的な King Air の航跡図と 2D-C プロブで測定した氷晶濃度が 50 個 L^{-1} 以上の部分を太線で示す。高濃度氷晶域が直線的に並び、容易にシーディングプリュームを同定できる。



第 10.4.4 図 雲システムに相対的な航空機の飛行経路。太線部分は氷晶数濃度が 50 個 L^{-1} 以上の部分を示す。

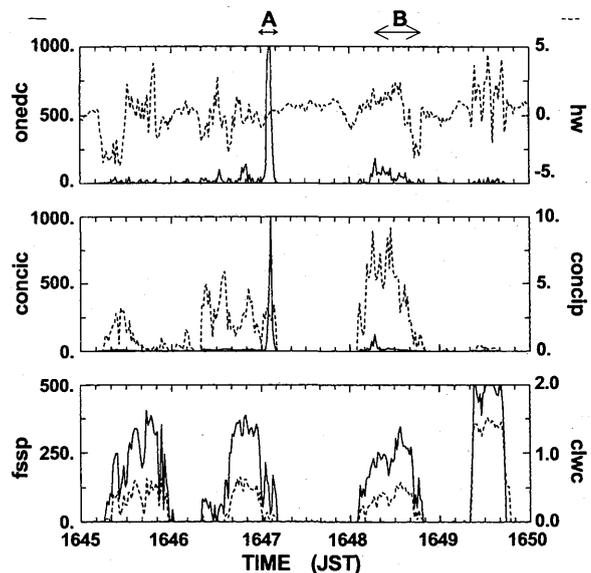
10.4.3 シーディング前

シーディング前（自然）の雪雲は、その発生初期には $0.5 \sim 1.5 \text{ g m}^{-3}$ の雲水量を含み、平均粒径 $15 \mu\text{m}$ 、数濃度 $400 \sim 500 \text{ 個 cm}^{-3}$ の雲粒から成っていた。氷晶濃度は 1 個 L^{-1} 以下で、最大 5 m s^{-1} 程度の上昇流を含んでいた。降雪を伴う最盛期の雪雲内では、一般に雲水量は 0.5 g m^{-3} 以下に低下し、逆に氷晶濃度は増加した。しかし、雲頂温度が $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の雲では、その値は高々 $20 \sim 30 \text{ 個 L}^{-1}$ で 50 個 L^{-1} を超えることはまれであった。

第 10.4.4 図は、移動する雪雲に相対的な King Air の航跡図で、太線部分は氷晶濃度が 50 個 L^{-1} 以上の部分を示す。King Air の西南西—東北東の flight track に平行に風上側 $\sim 1.5 \text{ km}$ のところに高濃度氷晶域が直線的に並んでおり、シーディングの跡を示している。 $\sim 1.5 \text{ km}$ のずれは、飛行中の 2 機の航空機間の目視による位置決め困難さを反映している。

10.4.4 シーディング後

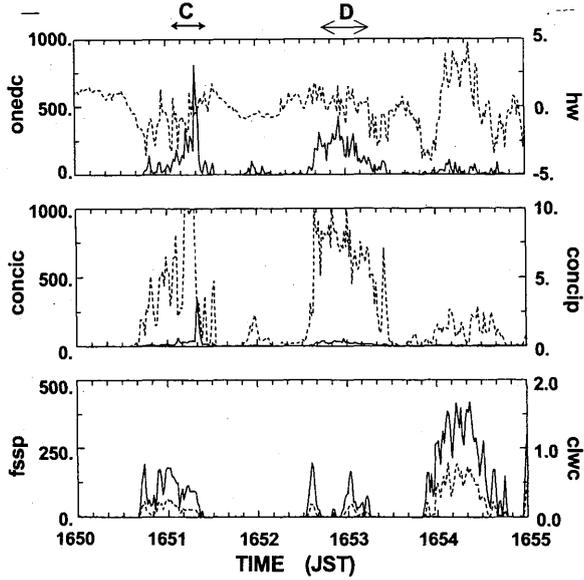
シーディング後の各微物理要素の時間変化を第 10.4.5 図～第 10.4.7 図に示す。図中の A～E は第 10.4.4 図の A～E に対応する。第 10.4.5 図の 164705 付近に、氷晶の高濃度域がスパイク状に見られる。これは約 3.5 分前のシーディングによって生成された氷晶プリュームでその幅は約 300 m で、その中の氷晶の最大数濃度は 1000 個 L^{-1} を超えている。氷晶プリュームの周辺部では雲水量が 0.5 g m^{-3} 程度であるが、プリ



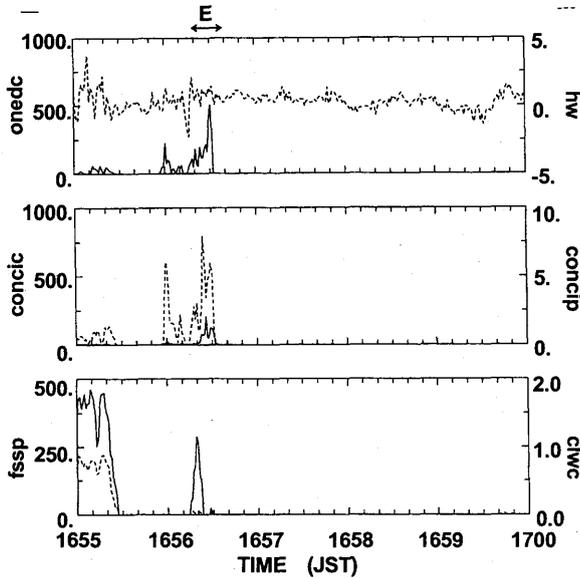
第 10.4.5 図 シーディング後の 1D プロブによる粒子数濃度 (onedc)、鉛直流 (hw)、2D-C プロブによる粒子数濃度 (concic)、2D-P プロブによる粒子数濃度 (concip)、FSSP による雪粒数濃度 (fssp)、熱線式雲水量計による雲水量 (clwc) の時間変化。

ューム内では 0.1 g m^{-3} 程度に減少している。また、2D-P プロブで測定した $200 \mu\text{m}$ 以上の降雪粒子の濃度は 5 個 L^{-1} 程度であった。

第 10.4.5 図の 164815 付近はシーディング 5 分後の氷晶プリュームに対応しており、その中の氷晶最大濃度は $\sim 100 \text{ 個 L}^{-1}$ 、雲水量も 0.3 g m^{-3} と比較的大きな値を示した。雲水量が比較的大きかった理由として、シーディングむらによりシーディングにより発生した

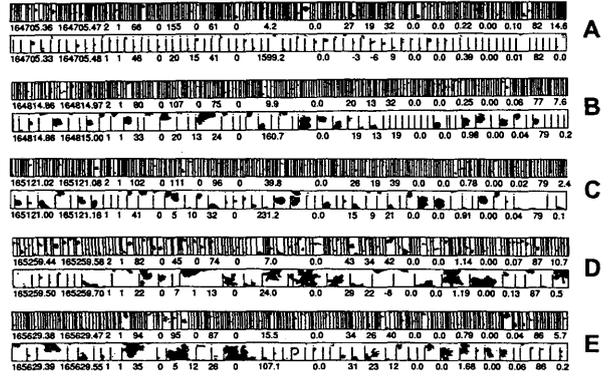


第 10.4.6 図 第 10.4.5 図と同様。ただし 16:50~16:55 のデータ。



第 10.4.7 図 第 10.4.5 図と同様。ただし 16:55~17:00 のデータ。

氷晶数が少なかったことと、 $2\sim 3\text{ m s}^{-1}$ の上昇流域にあり雲水生成が持続していたことが考えられる。第 10.4.6 図の 165120 付近はシーディング後 8 分の氷晶プリュームであり、その中の最大氷晶濃度は 300 個 L^{-1} 、雲水量 $0.1\sim 0.2\text{ g m}^{-3}$ である。プリュームの右端で 1D-C、2D-C 濃度がスパイク状に高く、雲水量がゼロ、2D-P 濃度も低い。それに対して、左側では 1D-C、2D-C 濃度が比較的 low、2D-P 濃度が 10 個 L^{-1} 、雲水量も $0.1\sim 0.2\text{ g m}^{-3}$ と高くなっていた。これは右端が



第 10.4.8 図 シーディングプリューム A~E 内で観測された粒子の 2D イメージ。2D-P (上段) と 2D-C (下段) イメージの縦方向の幅はそれぞれ 6.4 mm と 0.8 mm 。

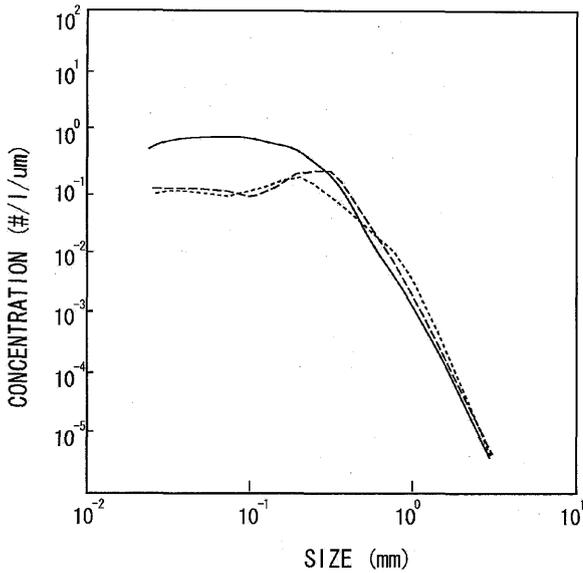
雲の周辺部に位置し、元々雲水量も低く、シーディングにより生成された高濃度の氷晶が十分成長できなかったものと考えられる。165300 付近はシーディング後 9.5 分の氷晶プリュームであり、2D-C 濃度は拡散希釈で 50 個 L^{-1} 程度に低下しているが、1D-C 濃度が 200 個 L^{-1} 以上の領域は幅 2 km 以上に拡大していることがわかる。プリュームの中央部では氷晶の成長に消費され雲水量はゼロとなっているのに対し、その両側では 0.2 g m^{-3} の値となっている。第 10.4.7 図の 165630 付近は、シーディング後 13 分の氷晶プリュームで、2D-C 濃度は最大で 200 個 L^{-1} で、プリューム内に雲水は存在しなかった。

第 10.4.8 図に示すようにシーディング後 3.5 分 (164705) のプリューム内には $200\text{ }\mu\text{m}$ 以下の等方的な結晶が多数存在し、粒径がほぼ一樣なことからほぼ同時刻に発生したものと思われる。また、シーディング後 10 分以後 (165300, 165630) に、雪片形成が顕著になっていた。

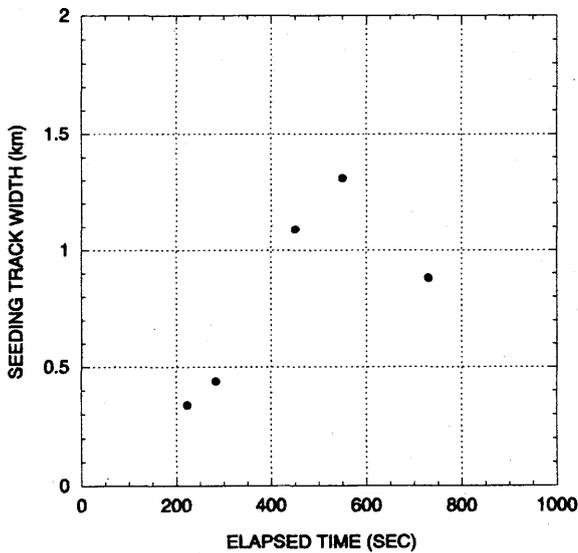
10.5 考察

第 10.4.4 図からも分かるように、シーディングトラックは目標とした過冷却雲 (混合雲) の中心より北西側にズレ、必ずしも高濃度の過冷却雲水域とは対応しない所もあった。それに加えて、ドライアイスのシーディングむらの影響もあるので、シーディングからの経過時間の異なる測定値をコンポジットして、シーディング後の雲の微物理構造の時間変化を議論する場合には注意を要する。

シーディングトラック内の氷晶濃度 (2D-C 濃度)



第 10.5.1 図 シーディングプリューム内の粒子の粒径分布. シーディングから 3.5 分後 (実線), 5 分後 (破線), 8 分後 (点線).



第 10.5.2 図 シーディングプリューム幅の時間変化.

の最大値は ~ 1000 個 L^{-1} で, ドライアイスペレットの昇華速度, 航空機の対気速度, 初期のシーディングトラックの幅, 1g のドライアイスから生成される氷晶数から計算した理論値 2600 個 L^{-1} にほぼ一致する.

次に, 雲内の雲・降水粒子の粒径分布変化を第 10.5.1 図に示す. 3.5, 5, 8 分後の 2D-C による粒径分布から, そのピークはそれぞれ 75 μm , 180 μm , 150 μm に位置している. 氷晶の平均成長速度は, 0.36 $\mu m s^{-1}$, 0.6 $\mu m s^{-1}$, 0.31 $\mu m s^{-1}$ となり, $-15^{\circ}C$ 付近での水飽和条件下の成長速度 $\sim 1 \mu m s^{-1}$ に近い値となってい

る. 平均成長速度は, シーディングプリューム中の雲水量が大きいほど速くなっていた. 雲水量は 1 秒平均値 (80 m 平均値) を用いており, より小さなスケールで見ると雲水の存在する空間としない空間が混在していたと考えられる. 雲水の存在しないところでは, 水未飽和となり氷晶成長速度が低下し, 氷晶の平均成長速度を減じたと考えるのが妥当であろう.

昇華凝結成長だけでは, 氷晶は 10 分間に 1 mm 以上には成長できない. 10 分程度で, ミリサイズの降水粒子にまで成長するには, 雲粒捕捉成長あるいは氷晶同士の衝突併合成長が必須となる. 今回のシーディング実験の条件下では, 第 10.4.8 図の 2D-C イメージに示されるように, 樹枝状結晶からなる雪片形成がミリサイズの降水粒子生成に寄与していた.

シーディングプリュームのトラックに直交する方向 (平均風向に平行) への拡散速度は, 第 10.5.2 図に示すように, 概ね 1 km/10 分であった. シーディング直後には最大値 1000 個 L^{-1} を超える鋭いピーク状の分布を示すが (第 10.4.5 図), 時間とともに最大数濃度も減少し, 分布幅も広がっている. しかし空間分布は必ずしも連続的ではなく, 雲内の複雑な気流構造を反映していくつかのピークを示すこともある (第 10.4.6 図, 第 10.4.7 図).

10.6 まとめ

1993 年 2 月 1 日, 寒気吹き出しに伴って仙台沖の太平洋上に再発生した雲頂温度 $-20^{\circ}C$ (高度 3 km) の降雪雲に対して, ドライアイスシーディングを実施し, その後の雲の微物理構造の変化を研究観測用航空機を用いて観測した. シーディング実験から次のことが明らかとなった.

- (1) シーディング直後には, 雲内に 1000 個 L^{-1} を超える高濃度の氷晶が発生した. この値は理論的に予想される値とほぼ一致した.
- (2) 氷晶の粒径分布のピーク径から求めたシーディングプリューム内における氷晶成長速度は, 十分な量の雲水が共存する場合は 0.6 $\mu m s^{-1}$ 程度で, 水飽和条件下における氷晶成長実験から得られる値に近い値を示した.
- (3) シーディング 10 分後から雪片形成が顕著となった.
- (4) シーディングプリュームの幅は, 3 分後に \sim

300 m, 10 分後に~1 km まで広がった. このよう
な, シーディング直後の雲の微物理構造の変化
や, シーディングプリュームの拡散に関する知
見は, 今後, 数値モデルによるシーディング実
験の信頼性を向上させるため, 更に降水増加や
降水域の移動を目的とした最適なシーディング
方法を考察する際に必要不可欠なものである.
今後, 種々の気象条件下でのデータ取得が望ま
れる.

参考文献

- Cooper, W. A., and R. P. Lawson, 1984: Physical interpretation of results from the HIPLEX-1 experiment. *J. Appl. Meteor.*, **23**, 523-540.
- Fukuta, N., W. A. Schmeling, and L.F. Evans, 1971: Experimental determination of ice nucleation by falling dry ice pellets. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 1174-1179.
- Marwitz, J. D., and R. E. Stewart, 1981: Some seeding signatures in Sierra storms. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 1129-1144.