

序 文

防災とは災害を防ぐことであって、自然現象が生起し、それが災害にまで至る連鎖のどこかでこの連鎖を断ち切ることである。自然現象において、危険性のある要素を消滅させること、例えば雹(ひょう)が生長する前に雹を作りつつある機構を抑制することも、連鎖を切るという意味で有意義である。他方、このような野外実験には一種の制限がつく。試験管の中では実施できても、野外となれば、人が住み、食糧などを生産している面が広がっているわけで、実験の事前評価が必要である。簡単に言えば危険性のチェックであるが、環境に対する影響の評価として広義に考えねばならない。

気象調節は人間の災害への働きかけの最も早い段階、つまり自然現象そのものに対して行われる行為であって、これが成功するという事は極めて画期的なことではあるが、それより後段の過程に対する事前評価がそれだけに重要である。このような防災科学技術は他にあまり例がない。防災に関する総合的科学技術の推進役である国立防災科学技術センターが、この気象調節にとり組んだのはそれなりの意義があった。特にここでとり上げられたのは、沃化銀散布による積乱雲の人工制御であって、その意図するものは大へん期待されるものだったと思われる。

ただこのような研究は色々の側面を持つもので、十分に慎重に行わねばならない。「雲をつかむような話」というイディオムがあるが、しっかりした方針と判定基準を持たないと何をしているのかわからなくなる。本資料は基礎から積み上げるべく始められた沃化銀散布手法についての開発の努力の記録である。この研究はその後多くの迂余曲折をえて、現在の研究テーマに引きつがれている。またそのようなハードウェアのみでなく、当時の防災センターのこの方面の活動の一端として海外へ発表した論文及び文献目録を付録として収録した。さらに防災センターが中心となって有数の気象学研究者を集めて組織した気象調節委員会により作成されたこの分野についての広範囲かつ最も妥当な将来構想としての気象調節研究長期計画案をのせた。これらの資料はそれぞれ、かなり以前にまとめられたものであって、今日の知見からすれば改めるべき点があるかも知れないが、無為に埋もれてしまうのを恐れて、あえて今、印刷に付そうとするものである。読者のご批判とご指導をいただき、将来のこの分野の発展に供することができればこれにまさる幸はないと思う。

第一研究部長 木 下 武 雄

目 次

I	まえがき	1
II	研究経過	2
III	沃化銀散布機	13
IV	沃化銀コンポジット	15
V	あとがき	20
付 録		
1.	熱帯性積乱雲の気象調節に関するセミナー提出論文；燃焼消滅型沃化銀散布機による野外実験の予備報告（英文原稿）	21
2.	国際気象調節会議提出論文；本邦における降ひょう；国立防災科学技術センターの気象調節用沃化銀散布機について（英文原稿）	33
3.	国立防災科学技術センター研究報告論文；静止空气中で燃焼させたよう化銀コンポジットの有効氷晶核数の測定（英文要旨）	49
4.	気象調節研究長期計画案（第五稿）	50
5.	研究成果リスト	59

気象調節に関する研究

— 総合報告 —

小沢行雄 *

小元敬男 **

八木鶴平 ***

米谷恒春 ***

国立防災科学技術センター

Studies on Weather Modification

By

Yukio Ozawa, Yukio Omoto, Tsuruhei Yagi and Tsuneharu Yonetani

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The National Research Center for Disaster Prevention carried out a five-year hail suppression research project ending in 1972.

A rocket system was developed for cloud seeding. In the system, the rocket was to be launched from a mobile launcher reaching 6000–7000m above the ground, and completely burned away in the air during its falling time after seeding. The number of effective nuclei produced by the AgI composite loaded was more than 10^{12} (per gram of AgI) at -10°C .

Results of field experiments using the rockets were presented at the Seminar of Cumulonimbus Modification of Tropical Nature (Miami, USA, 15–19 Feb. 1971) and International Conference on Weather Modification (Tashkent, USSR, 1–7 Oct. 1973). Manuscripts for these are reprinted here at the end of this report, with the abstract of a paper on effectiveness measurement for the AgI composite.

I まえがき

本報告は特別研究「気象調節に関する研究」として、積乱雲の人工調節によるひょう害防止を目的に実施された研究の取りまとめである。気象・気候を人工的に調節することは、防災のために有効な手段であるばかりでなく、大気環境の改善という観点からも極めて重要であり、この研究ではまずその第一目標として積乱雲に伴う降ひょう等諸現象による災害を防

* 第1研究部異常気候防災研究室(第3研究部を経て、現在北海道農業試験場農業物理部), ** 第1研究部異常気候防災研究室(第1研究部を経て、現在大阪府立大学農学部), *** 第1研究部異常気候防災研究室, **** 第1研究部異常気候防災研究室(現在第1研究部)

除するために雲に働きかけてその雲物理学の特性を人工的に調節する手段を開発しようとして始められた。特別研究の実施期間は昭和43年度から昭和47年度の5年間である。

本報告では、総合報告として、本邦では初めての沃化銀散布機の開発過程とその諸元・性能および特別研究に関連して設けられた気象調節研究委員会の気象調節研究長期計画の策定経過を中心に述べ、研究成果については国際研究集会において発表した研究論文の原稿を再録して、国内での口頭発表・論文・解説等は一覧表としての摘記に止めた。また気象調節研究委員会で討議され、推敲を重ねた気象調節研究長期計画案はその第五稿を全文掲載した。

この特別研究は、その基礎研究の部分が発展的に特別研究「積雲対流がもたらす災害の発生機構に関する研究」に受け継がれ、降ひょうおよびひょう害の総合研究として諸成果を挙げ今日に至っている。

Ⅱ 研究経過

この特別研究が一つのプロジェクトとして発足するまでには、それに先行する2～3年の前史的準備期間があった。そして発足後も、単にロケットの開発や試作されたロケットを用いての種々の野外実験の実施ばかりでなく、プロジェクトそのものの気象調節研究のなかにおける位置づけとかさらにはわが国における気象調節研究のあり方などについての調査研究が並行的に行われるなど多彩な過程を踏んできたのである。そこでこれらの過程について一括してここでふれておくことにする。

Ⅱ.1 プロジェクトの発足まで

当センターにおいてはその発足以来、気象、気候の人工調節に関する研究を防災科学技術の立場から極めて重要な課題であると認識してきた。しかしながら、これにはその及ぼす社会的影響や評価など複雑な問題がからんでいるばかりでなく、研究の目標および方法論も当時あまり明らかではなかった。そのため、まず関連する内外の諸研究の現状をつまびらかにし、これら研究の評価を行うとともに、気象、気候の人工調節の可能性、有効性ならびに研究着手上の諸問題を検討する目的をもって、気象、気候の人工調節に関する調査研究を実施することにした。

この調査研究は、はじめ昭和40年度を初年度とする2年計画で、当時の和達清夫所長を主任研究者とし企画課ならびに第1研究部の協力のもとに発足した。しかし、初年度には関係研究機関の関連研究者による総合検討会を開催し、「気象、気候の人工調節に関する研究は対象とするスケール、調節の目標に多くの種類があるので、まずそれらを分類し、一つ一つについて検討を進める方が効率的である」との結論を得るにとどまり、あまり進展はみられなかった。調査研究が本格的に開始されたのは、当時の異常気候防災研究室長小沢行雄と流動研究官小元敬男とが調査研究に参加するようになった2年目からであり、まず既往の内

外の関連研究成果を整理して、気象、気候の人工調節問題の体系的な分類を試みた。この年度のなかばに所長が交替し、寺田一彦所長が就任してからこの調査研究は一層活発となり、また調査期間も1年延長されて3カ年計画に改訂された。

42年度に入ると、4月早々に所内に所長を長とする気象調節研究班*を結成し、当面センターで着手すべき課題は何であるか、またそれはどのようにして実施したらよいかというような面について具体的に探究が進められるようになった。このような調査研究の結果を携えた上で、6月のなかばに関連研究者に参集を願う第1回気象調節研究懇談会を開催して、種々意見をきくことにした。

この会には、東大海洋研小倉義光教授、東北大山本義一教授、名古屋大磯野謙治教授、気象庁川瀬二郎観測部長、気象研荒川秀俊所長、大田正次部長、関原彊部長、農技研栗田滉部長、気象協会小平吉男相談役が出席され、寺田所長司会のもとに進められた。当センターからは
i) 米国、ソ連における気象変換研究の概況、ii) 気象の人工調節に関する研究計画案、
iii) 積乱雲の人工制御に関する研究用観測網案、の三つの資料を提出し、小沢、小元両名が分担して説明に当った。これらの資料は過去一年有余におよぶ調査研究結果の要約であり、
i) は当時最も意欲的に取り組んでいた米国、ソ連の研究概要(内容と体制)の紹介であり、
ii) は気象調節研究分野の体系の整理結果に基づく今後のこの分野の研究方向についての展望であり、その後起草された「気象調節研究長期計画案」の萌芽となったものである。また、
iii) はこれらの検討結果から導かれた当センターとして当面着手すべき研究計画の一端を示したものである。この席上、全体計画については更に検討を重ねてゆく必要があるが、当面着手する研究課題として小規模積乱雲の調節を選定することについては大方の賛成が得られた。

そこで、当センターとしては、この懇談会のような会議は今後も継続して気象調節研究計画の策定その他を行うことを決めると共に、43年度から積乱雲調節を主目標とした特別研究をおこすことを決意した。研究班は直ちにこの研究課題の具体的なつめを行い、課題名を「積乱雲の人工制御による雹害防止に関する研究」と名付けて領域を設定すると共に、研究内容、年次計画等を次々に検討、立案して予算要求書にまとめあげた。この過程で最初におこった難問は雲の調節手段に何をを使うかをきめることであった。

雲に人工的な変化を与えるには種まきが効果のあること、また我々が最終的に目標としている雹を含む積乱雲は冷たい雨の機構であるから、沃化銀など氷晶核になる物質の種まきが適していることは分っている。問題は種まきの方法である。沃化銀の種まき方法としては、地上発煙法および航空機からの散布法の二つのやり方が従来の主流であった。しかし前者は効率が極めて悪いし、また後者では、対象が積乱雲だけに地上一万数千mの上空からの散布となり、それに適した手軽な実験機は存在しない。そこで、第三の方法としてロケットによ

* 班の構成：班長…寺田所長、班員…小沢行雄、小元敬男、福沢久勝(企画課長)、小池幸男(企画課)

る散布を考慮することにした。この方法は当時アメリカやソ連でも使われ始めていたが、我が国で使用するとなれば、国土の狭さ、人家の稠密さからどうしても用済み後のロケット機体を消滅させる必要があった。すなわち、消滅型ロケットの開発が前提となり、それが可能かどうかの見当づけが急がれた。しかし幸いなことに、シート爆薬を機体にまきつけた爆発式の消滅方法が日産自動車(株)の手によってほぼ完成の一手手前まで開発されており、また燃焼式の消滅方法も材質の選び方、燃焼剤の工夫により概ね可能であろうとの心証も得られた。そこで、研究班としては雲の調節方法としてはロケットを使用するという方式を採用することにして、特別研究の冒頭においては、消滅式ロケットの開発に全力を傾注することとした。当時、設定されたこの特別研究の研究内容や年次計画などは次のとおりであった。

〔課題名〕

積乱雲の人工制御による雹害防止に関する研究

〔課題選定理由〕

- (1) 従来の研究水準からみて実用化の可能性が比較的高いと考えられること。
- (2) 人工降雨研究との関連が深く、その研究諸成果が使えること。
- (3) 調節の規模が適切であると考えられること。

〔研究の内容〕

- (1) たねまき方法の研究
 - a) 沃化銀散布機(消滅型ロケット)の開発
 - b) 積乱雲の発達、移動に関する研究
 - c) 積乱雲の雲物理学およびメソ気象学的構造に関する研究
- (2) たねまき効果判定方法の研究
 - d) 積乱雲中でのひょうの形成に関する研究
 - e) たねまきによる積乱雲の構造変化に関する研究
 - f) 詳細な降ひょうおよび地上気象要素の分布の調査
 - g) 統計的方法による効果判定の研究

〔研究の年次計画〕

表1 研究の年次計画

43年度	44年度	45年度	46年度	47年度
沃化銀散布機の開発とテスト1) 実験区域の設定				
	種まき予備実験2)		種まき本実験	
	降雹記録計の設置と観測3)			
	研究用レーダーによる予備観測4)		本観測	
		地上観測網の設置と観測 航空機、ゾンデによる上層観測		

注 1) 消滅型ロケットの開発 2) 実際に積乱雲中にロケットを打込む 3) 降雹自動記録計を開発・簡易式と併用 4) 連続写真観測による積乱雲系の動向の研究

研究の年次計画を表1に示す。この年次計画は実際には少しずつ遅れ、何回か手直しが行われた。また当初予定の本実験はついに実施できなかった。

Ⅱ. 2 沃化銀散布機の開発経過

沃化銀散布機は本特別研究を進める上での不可欠の道具である。従ってその開発研究が何よりも先に実施されることになった。次にその経過を経年的に述べておく。

43年1月8日、43年度予算の内示があり、本特別研究に関しては沃化銀散布機の開発費2,715千円だけが認められた。かくして本格的に開発に取り組むことになり、4月には研究スタッフの増強のため航空宇宙技術研究所の武藤洋治郎主任研究官を当センター第1研究部に併任研究員として迎え、気象調節研究班に入ってもらった。2月から4月にかけて三菱重工ならびに日産自動車の担当者がロケット製作に関し当センターを来訪したので、それらの意見を聴取した。

43年4月～8月

この間、研究会議を度々重ね、ロケットの飛しょう条件、機体の構造、搭載沃化銀量、消滅方式、沃化銀の燃焼方式等を検討、決定して8月17日に製造仕様書の形にまとめ上げることができた。いま、この仕様書に記載されている項目のうち、主として性能に関するものを摘録すると次のごとくである。

(1-1) 総則 本仕様書は科学技術庁国立防災科学技術センターが計画する人工気象調節研究のため、気象災害諸現象(降ひょう・落雷・集中豪雨)による災害を防止または軽減するために雲中に沃化銀を昇華散布し、雲の物性を人工的に制御するための沃化銀散布機に関するものである。

また、沃化銀散布機は、沃化銀を散布した後空中で微細化または消滅する形式である。

(2-1) 飛しょう高度 沃化銀散布機は、発射角度 80° ・常温にて6,000 m以上上昇する能力を有するものとする。

(2-2) 発射角度 85° から 50° まで可変とする。

(2-3) 発射条件 地上温度は -5°C ～ 28°C 、風速は 10 m/s 以内の条件で発射可能とする。また発射後標的までの間に風速 30 m/s 以内の突風に遭うことを考慮する。

(2-4) 搭載量 沃化銀200 grを要求する高度まで散布できるよう搭載する。

(2-5) 沃化銀散布 沃化銀は標的とする雲中に昇華散布するものとする。拡散範囲はできうる限り広範囲であること。また沃化銀粒子は極めて微粒化することがのぞましく、昇華、微粒化の手段、方法は任意とする。

(2-6) 機体 沃化銀散布機の機体は、沃化銀散布後地上に落下するまでに、人畜、農作物等に損害を与えないよう微細化もしくは微塵に消滅すること。その方法は任意とする。但し落下物がある場合、その落下速度は 5 m/s 以下とすること。

(3-2) 諸元 沃化銀散布機の計画諸元は次のとおり。全長:約800 mm, 最大径:約85 mm, 全重量:約35 kg 総推力:約300 kg-sec, 散布機構部外殻:可燃性強化プラスチック, 時限装置:可換式延時火薬, プースタ部外殻:可燃性強化プラスチック, コンポジット系, ノズル部・不燃性もしくは可燃性強化プラスチック, 安定翼:可燃性強化プラスチック。

この仕様書では、消滅方法は一応任意となっているが、実際にはそれまでの検討結果からほぼ燃焼消滅方式を採用する方向に傾いていた。その片鱗は3-2諸元のうちの機体構成物

質の指定にうかがえる。爆砕式では万一発射直後に事故があると人身への危険があることが心配されたためであったと思う。この結果、燃焼消滅方式を勧奨していた三菱重工に製作を依頼することにし、間もなくこの消滅方式を採用することを正式に決定した。

43年9～12月

この期間に試行錯誤的に試作機の製作がくり返された。機体の燃焼方法ならびに沃化銀の昇華方法の検討が主としてなされた。

43年12月24日

昭和化成品KK戸塚工場において試作機の第1回地上立会試験を行った。成績概要は表2に示すとおりである。

表2 地上試験結果

項目番号	項目	規格	成績
1	推進燃焼秒時(sec)	30 ^{+0.45} -0.60	30.5
2	平均推力(kg)	100 ⁺²⁰ -20	106.4
3	最大推力(kg)	135以下	121
4	比推力(sec)	170以下	187
5	全推力(kg·sec)	300 ⁺⁶⁰ -45	324.5
6	全体形状	寸法および外觀検査	合格
7	ロケットエンジンチャンバ, 燃焼消滅時間(sec)	90	86
8	頭部外殻, 燃焼消滅時間(sec)	90	80

推力関係の測定値から推定される飛しょう性能はほぼ規格を満足するものであったが、機体の燃焼消滅性には多分に改良の余地が認められた。すなわち、試験項目7・8の燃焼消滅時間は数字の上ではそれぞれ86 sec・80 secとなっており一応規格内に収まっているが、それらはいずれも外殻部外側の火の消えるまでの時間であり、内部は赤くなっていた。

44年1月～3月

この間に燃焼消滅性の改良をはかった。主として外殻部が燃焼後微細な灰になるように燃焼剤や燃焼方式の改良に力が注がれたが、なかなか思うようにならずさし当りペンスリットを導入することにした。

44年4月4日

この日に、三菱重工長崎造船所堂崎試験場において第2回地上立会試験を行う。この試験の目的は、第一にロケットエンジン部と頭部沃化銀散布機構部との分離性能を検査すること、ならびに1月以来改良を重ねてきた燃焼性の向上成果をみることにおかれた。試験結果は表3に示すとおりである。

表3 地上総合試験成績

検 査 項 目		規 格 値	成 績 値
ブースタ部性能	総 推 力 (kg · sec)	3 0 0 \pm $\frac{60}{45}$	3 0 0
	平 均 推 力 (kg)	1 0 0 \pm $\frac{20}{20}$	1 1 1.4
	最 大 推 力 (kg)	1 3 5以下	— ※1
	燃 焼 時 間 (sec)	3.0 \pm $\frac{0.45}{0.60}$	2.7
	比 推 力 (sec)	1 7 0以上	1 8 2
ブースタ部外殻 燃焼消滅時間	火 炎 消 え (sec)	1 2 5以内	9 0
	常 温 冷 却 迄 (sec)		1 8 0
ブースタ部分離	作 動 開 始 時 間 (sec)	6.0 \pm $\frac{0.8}{0.8}$	1 0.2 ※2
沃化銀散布 機 構 部	着 火 時 間 (sec)	T \pm 1.5 ※4	1 5.5
	燃 焼 時 間 (sec)	3 ~ 1 0	7.1
	燃 焼 温 度 (°C)	1 5 0 0以上	1 8 0 0
沃化銀散布機構部外殻 燃焼消滅時間 (sec)			1 2 0以内※3

注※1 オーバースケールして計測出来ず、立会前予備試験分は124kgとなっている。

※2 立会前予備試験分は6.1secとなっている。

※3 計測員120secにて確認した時は既にもえつきていた。VTRでみると85sec程度となっている。

※4 沃化銀散布機構部着火時間Tは監督職員と協議の上本試験においては16secに設定した。

この表をみると分るように、供試機では分離作動開始時間が規格値を満足せず、まだ分離性能は安定性を欠くという結論が得られた。外殻の燃焼性は第1回試験時にくらべて格段の進歩が認められたが、常温冷却までの時間はまだ長くさらに短縮の必要が認められた。また今回採用したペンスリット方式は危険が伴うことならびに爆砕方式との混こうという2点であまり好ましくないという結論が得られ、燃焼性の向上はこの方式を放棄する方向で行われることになった。

44年4月～10月

この期間は、上記地上総合試験の結果欠点として指摘されたところの改良に力が注がれた。すなわち、分離機構の機能の安定化、燃焼剤の改良による外殻燃焼秒時の短縮が図られた。また、沃化銀の昇華のために与えられている燃焼温度が2300°Cとなっているが、これでよいかどうかの検討もなされている。すなわち、従来人工降雨の方での研究結果によれば、沃化銀の燃焼温度は1050°C近くが最適で±100°Cの誤差を伴うと、沃化銀のかなりの部分が沃素と銀とに分離し有効氷晶核数が激減するということが常識化されており、2300°Cという高温燃焼では到底有効氷晶核が得られないのではないかという危惧があったからである。

しかし検討の結果は、この方式で十分多量の有効氷晶核が発生することが認められた。その理由は次のように考えられる。従来の燃焼方法は比較的少量の沃化銀を長時間かけて燃焼させるのに対し、われわれの方式はこれに比べるとほとんど瞬間的に(200grのAgIの

燃焼秒時が約3 sec) 燃焼させるため、分離をおこさないのである。

44年11月14日～15日

この期間、陸上自衛隊日出生台演習場において、陸上自衛隊西部総監部の協力を得て第1回打上げ試験が行われた。この試験の目的は、ロケットの飛しょう性能、分離性能ならびに外殻部の燃焼性能を定量的に把握することにおかれた。

供試総機体数は4個で、そのうち3機を14日、1機を15日に打上げた。試験結果は表4に要約したとおりである。

表4 打上げ試験結果

項目	第1回	第2回	第3回	第4回
打上げ時刻	14日 14:40	14日 15:30	14日 16:20	15日 16:00
供試機番	NRDCP-I-2	NRDCP-I-4	NRDCP-I-3	NRDCP-I-5
同上特徴	自記高度計搭載	発煙剤搭載	自記高度計搭載	発煙炸薬搭載
打上時地上風速	約6 m/s	約6 m/s	約10 m/s	1～2 m/s
打上角 { 方位角 仰角	25.0° 84.8°	25.0° 84.8°	25.0° 84.8°	27.0° 7.5°
使用ランチャー	1*	2**	1	1
点火状況	良好	良好	良好	良好
ランチング状況	正常	途中から風向に向う姿勢をとり約180°向きを変えた	正常	正常
飛しょう状況	正常	方向変換後は正常	打上げ2秒後キリミ運動を4回位行い方向を変えたがその後は正常にかえる	正常
推進燃焼秒時	約3秒	約3秒	約3秒	約3秒
切離し秒時	約5秒	約5秒	約5秒	約7秒
ロケットモーター着地までの時間	57秒	61秒	48秒	78秒
発煙剤の発煙	切離しと同時に(予定どおり)	切離しと同時に(予定どおり)	切離しと同時に(予定どおり)	切離し後約2.0秒(ほぼ予定どおり)
モーターチャンバーの燃焼状況	途中炎を噴きながら落下、着地後も燃焼をつづけ黒煙を発生	同左	同左	落下途中チャンバーは2分割したが燃焼状況は前と同じ
問題点	燃焼消滅性	同左 ランチングの悪さ(ランチャーの為?)	同左 飛しょう性の悪さ	同左

* 使用ランチャー1はランチャー有効長の長いもの

** ク 2はランチャー有効長の短いもの

この表をみればわかるように、点火・切離し・延時等については良好、またランチングもランチャーが適切であれば問題はない。しかし肝心の飛しょう状況がたとえ1機であれ著しく不良のものができたことはこのロケットがまだ不安定であることを物語る。チャンバーの燃焼時間については規格値は満足していたので、この規格値自体が問題なわけであり、打上げ後40秒くらいまでに燃焼が終了するようにしなければ安全でないことが判明した。

44年12月～45年2月

この期間は、上記の問題点を解決するために費された。主たる改良の努力は燃焼消滅性の

向上に向けられ、飛しょう性能については、製作をていねいに行うこと、製作後の外観、寸法、重量検査を厳重にすることによって様子を見ることにした。燃焼速度を大きくするためには、第一に燃焼剤の改良、また第二には推薬燃焼終了後チャンバーへの着火までのあそび時間をなくすことの2点を主たる検討項目として取りあげた。

45年3月18日～19日

2か月の改良の成果をテストするために群馬県立浅間牧場において飛しょう実験を行った。この実験は元来沃化銀散布予備実験ということで計画されたものであり、そのため新造の車載式レーダを動員して沃化銀散布によって雲がどのような変化をおこすかを観察しようとした。しかし予定の実験期間中には適当な雲が飛来しなかったため、結果的には打上げテストとレーダの試運転に終わった。

表5 打上げ試験結果 (於 浅間牧場)

散布機記号	N R C D P - 7	N R C D P - 8	N P C D P - 9	N P C D P - 10
推薬燃焼秒時	3 sec	3 sec	雲 中	3.2 sec
一・二段切り離し秒時	6 sec	6 sec	雲 中	雲 中
散布秒時 開始	10 sec	10 sec	12 sec	雲 中
終了	20 sec	不 明	雲 中	雲 中
一段消滅秒時	23 sec	30 sec	雲 中	雲 中
二段消滅秒時	32 sec	42 sec	36 sec	雲 中
発射方向	N 88° E	N 85° E	N 82° E	N 80° E
発射上下角	63.8°	45°	65.5°	50°
地上風向	WNW	WNW	WNW	WNW
地上風速	8.5 m/s	4.5 m/s	8.5 m/s	6.8 m/s
地上気温		-4.7°C		-7.5°C
天 気	晴	晴	晴	晴
発射日時 (1970年)	3月18日11時05分	3月18日15時40分	3月19日11時24分	3月19日15時43分

備考：測定値はすべて地上からの目視による。

試験結果は表5に示すごとくであり、1・2段切離し、沃化銀の散布、外殻の燃焼消滅などすべて計画どおりに行われているのがわかる。飛しょう状態を日出生台実験の時にみられたようなゆらぎは一つもみられず、全部目標方向に向ってきれいに飛んで行った。ロケット外殻の火災が発射後40秒内外で消えた(地上からの高度は約1,500m以上)のは大きな進歩であり、これによって消滅型沃化銀散布機の試作はほぼ完了した。

II. 3 野外実験経過

44年度までに消滅型沃化銀散布機の開発をほぼ終了して、45年度からはこれを使用した種まき本実験に入った。また、調節の対象にしている積乱雲の構造や発生、移動条件等の究明のために積乱雲観測を、更に降雹分布の調査のため降雹記録計の委託観測網を張りめぐらした降雹調査を開始した。

これら三種の野外における実験・調査のうち、種まき実験と積乱雲観測の実施期間や参加人員等を一括すれば表6および表7のとおりである。

表6 種まき本実験実施一覧表

実施期間	場 所	参 加 人 員
45年10.7~15	*群馬県北群馬郡榛東村 陸上自衛隊相馬ヶ原演習場	○小沢行雄, △小元敬男, 岩切 敏 八木鶴平, 米谷恒春, 寺田一郎, 井上君夫, 斉藤 高
46年6.12~19	同 上	○小沢行雄, △小元敬男, 岩切 敏 小野瀬英光, 八木鶴平, 米谷恒春, 井上君夫, 片桐一美
47年6.15~23	同 上	○小元敬男, △岩切 敏, 小野瀬英光 幾志新吉, 水谷武司, 米谷恒春, 片桐一美

注) *レーダおよび高層気象観測場所は藤岡市水道山々上台地
○実験責任者 △第2班(レーダ, 高層気象観測)責任者

表7 積乱雲観測実施一覧表

実施期間	場 所	参 加 人 員
45年7.17~23	群馬県藤岡市水道山山上台地	○小元敬男, 八木鶴平, 米谷恒春
46年7.21~28	同 上	○小元敬男, 八木鶴平, 米谷恒春
47年7.27~8.5	同 上	○小元敬男, 米谷恒春, 清野 裕

注) ○観測責任者

種まき本実験の際には, 併行して積乱雲観測が行われたので, 観測回数は合計6回となる。

これら実験・調査の結果は本報告の付録および研究成果リストの各発表論文・報告のなかで詳しく述べられている。

II. 4 気象調節研究委員会の歩み

第2回気象調節研究懇談会

前年6月13日の第1回懇談会(前出)に引きつづき, 43年6月28日グリーン会館において第2回目の会合が開かれた。この日の出席者は下記のとおり。

東北大理学部山本義一教授, 東大理学部柳井迪雄助教授, 九州大農学部武田京一教授, 気象研川瀬二郎所長, 同太田正次部長, 気象協会小平吉男相談役, 同久保時夫部長, (防災センター)寺田一彦, 有賀世治, 福沢久勝, 小沢行雄, 小元敬男, 武藤洋次郎

この会合での主な検討および決定事項は次のとおりである。

1) 防災センターが計画している気象調節関係の課題, 降ひょう抑制に関する研究・降雪分布修正に関する研究の2つについて実施計画概要が説明され, 現段階としては課題選定の仕方が当を得たものとして了承された。また, 川瀬所長からはこれらの研究に対し気象研としてできるだけ援助をしてゆきたい旨の発言があった。

但し後者について人員不足その他の理由で実際には実施できなかった。

2) 気象調節研究の全般的な推進方針が討議され, 直接的な調節研究ばかりでなく, その

基礎となる気象学的問題点を幅広く包括した研究体制を考える必要のあることを了解しあった。

3) 上のような考え方をおり込んだ気象調節研究長期計画をできるだけ早く策定することが必要である。そのため、「気象調節研究委員会」を発足させその事務局は防災センターが担当することを合意した。

このようにして、気象調節研究懇談会は第2回で発展的に解消し、主として長期計画策定のための研究委員会が防災センター内部に設けられることになった。そしてこの委員に対しては防災センター専門委員を委嘱することになった。

長期計画策定のための小委員会

研究委員会事務局では、第1回委員会に提案する長期計画を作成するため小人数からなる小委員会を開催することにした。この会議は43年12月25～26日の両日にわたり箱根観光ホテルで開催され、事務局原案の長期計画案についての討議を行った。この小委員会への出席者は下記のとおりである。

名古屋大磯野謙治教授、小平吉男、小沢行雄、小元敬男、気象協会内藤晴夫

会議は小沢幹事の司会で進行され、小元幹事から事務局提案資料（気象調節研究長期計画草案）の内容説明があった後、討論に移った。

この席上、出された意見に基づき、上記長期計画草案を全面的に改訂し、気象調節研究長期計画（案）第1稿としてとりまとめた。

第1回気象調節研究委員会

44年3月17日～18日、一ツ橋学士会館会議室で開催された。出席者は下記の通りで、山本義一委員は欠席。

（専門委員）孫野長治（北大理教授）、磯野謙治、武田京一、柳井迪雄、太田正次、小平吉男

（防災センター）寺田一彦、小沢行雄、小元敬男

（気象協会）内藤晴夫

事務局からの配布資料は次の2種類であった。

i) 気象調節研究長期計画（案）第一稿 ii) 積乱雲制御NO.1, NO.2, (小元敬男執筆)

会議は寺田所長の司会で進行され、初め資料ii)の内容について小元幹事から説明、降ひう抑制研究の進め方について種々の討論が重ねられた。この討議は以後の防災センター特別研究の具体的な推進に多大の裨益があった。長期計画案については小沢幹事から説明があり、若干の討議が行われたが、その集中的な審議は6月頃開催を予定していた第2回委員会を実施することにした。なお、この会でも出された意見により、長期計画案第一稿に若干の改訂を加え第二稿を作成した。

第2回気象調節研究委員会

44年6月10日、虎ノ門共済会館で開催されたが、出席者は次のとおりで山本・柳井両委員は欠席された。

(専門委員) 小平吉男, 太田正次, 孫野長治, 磯野謙治, 武田京一

(防災センター) 寺田一彦, 有賀世治, 小沢行雄, 小元敬男, 武藤洋治郎, 湯原浩三, 八木鶴平

(気象協会) 内藤晴夫

主たる提出資料は次のごとくであった。

i) 気象調節研究長期計画案第二稿 iii) 人工降雨研究の今後の問題点 (武田委員)

ii) 積乱雲調節NO.3 (小元敬男執筆) iv) 人工降雨研究の計画について (磯野委員)

資料 ii) ~iv) はすべて資料 i) の内容に包括さるべきものであり, 提案者から内容についての説明と若干の討議の後, 取扱い方をきめて長期計画案の審議の時間の大部分を費した。

第3回気象調節研究委員会

45年6月12日, 国立教育会館会議室において開催された。出席者は次のとおりであった。

(専門委員) 孫野長治, 山本義一, 太田正次, 小平吉男, 磯野謙治, 武田京一, 岸保勘三郎 (東大理教授)

(防災センター) 寺田一彦, 有賀世治, 福沢久勝, 小沢行雄, 小元敬男, 武藤洋治郎ほか4名
会議は寺田所長の司会で進められ, はじめに大田委員, 小元幹事からそれぞれソ連・アメリカにおける降ひょう抑制研究の視察談があった後議事に入った。

この日の第1議題は気象調節研究に関する日米協力問題で, 大学側は現在は参加が困難であるが防災センター・気象研が中心となってアメリカと協力することについては異議がなかった。第2議題は長期計画案の審議で, この日の時間の大半がこれに費された。

第2回委員会においては気象調節研究長期計画案第二稿が審議され, その結果第三稿が生れてこれが第3回委員会で検討の対象となった。第三稿に対しても種々の改訂意見が出されたが, その後の取りあつかいは気象研究所と防災センター関係者に一任となった。

そこで, 当センターでは小沢・小元両幹事を中心にして第3回委員会における討議結果をふまえ第三稿を手直して第四稿を作成して, これをただちに気象研究所に送付して意見を求めた。気象研究所では関係者が慎重な検討を加えて意見書を作成し, 庁議に報告の後, 当センターに送付したということである。そこでセンターでは, 提出された意見を全面的に取入れて更に第5稿を作成した。

気象調節研究委員会は種々の事情があってこの第3回委員会のあとは開かれていない。従って長期計画案も第5稿までで審議終了となり, ついに日の目をみるに至らなかった。その後2~3年間に情勢が大きく変り, 現在はこれを審議していた頃と比べて気象調節研究に対する姿勢が著しく後退してしまった。しかし, この案そのものは1つの歴史的所産であり, 近い将来再び同種の論議がおこるならば重要な参考文献となるであろうから, 本報告書に付録として全文を登載することにした。

Ⅲ 沃化銀散布機

沃化銀散布機は沃化銀コンポジットをペイロードとする固体ロケットで、その形状・諸元を図1に示す。沃化銀コンポジットはロケットエンジンによって雲中へ運ばれてエンジン部と切り離され、その後あらかじめ設定された時間に着火され、昇華し、散布される。以下に主要部の諸元・材質および性能について述べる。なお、散布機はⅡ研究経過で記してあるように44年度に一応の完成をみたわけであるが、その後もささいではあるが改良が加えられている。ここで示しているものは、昭和46年度に製造された最終的な沃化銀散布機の数値である。

Ⅲ.1 沃化銀散布機の概説

(1) エンジンチャンパー

材質はFRP (Fiber Reinforced Plastics) であるが、ロケットの燃焼室としてその内圧に充分たえられるようグラス・テロン混紡クロスで強度を保持している。バインダーは

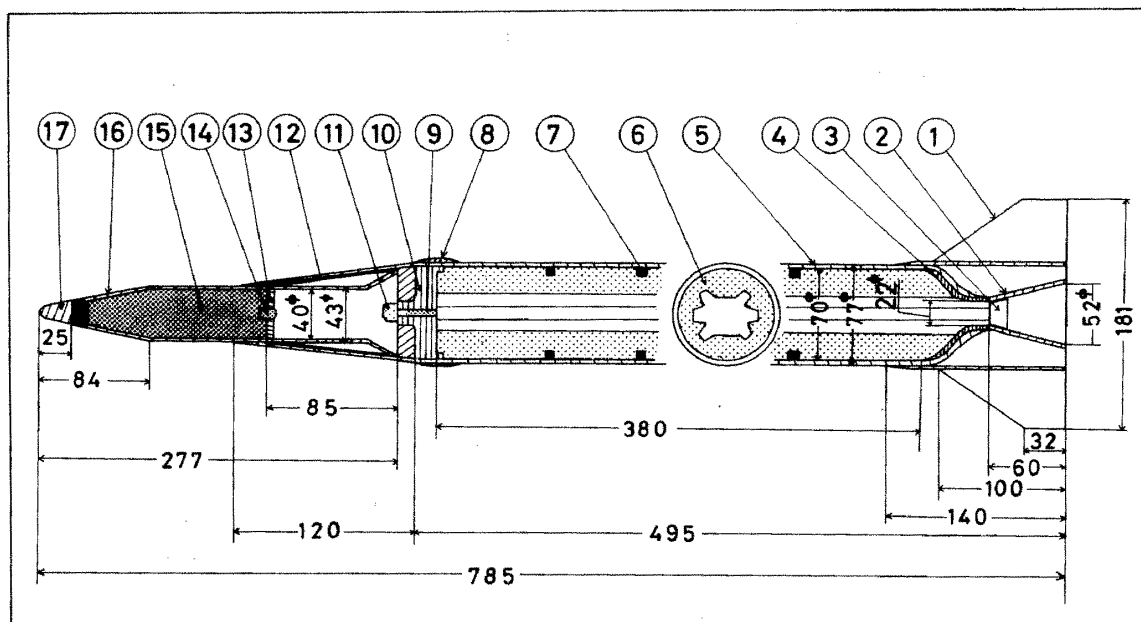


図1 沃化銀散布機, NRCDP-Iの形状・諸元. 図中の番号に対応する部分の名称と材質は次のとおりである.

番号	名 称	材 質	番号	名 称	材 質
1	翼	FRP	10	エンジンプレート	FRP
2	スロート	FRP	11	放 出 薬	黒色火薬
3	ノズルクロージャ	アセチル板	12	放 出 筒	FRP
4	ノ ズ ル	FRP	13	フェルト	
5	エンジン, チャンパー	FRP	14	ペイロード着火薬	NC系
6	推 進 薬	ポリウレタン系	15	ヨウ化銀コンポジット	AgIと昇華剤
7	着 火 薬	クロム酸バリウム系	16	ペイロードチャンパー	FRP
8	ランチングバンド	FRP	17	ペイロードキャップ	FRP
9	延 時 薬	クロム酸バリウム系			

エポキシ系樹脂であり、チャンバーに燃焼性をもたせるために酸化剤として過塩素酸カリウムを添加してある。

形状は内径70φ外径77φ内厚3.5mmの円柱であり、その前方はペイロード部と接合させるためにテーパをなし、テーパ部の内面に放出筒を含んでいる。放出筒後部にエンジンプレートがあり、その後方に推進薬を内包する。エンジンプレート部の外側にはランチングバンドを有している。ノズル部はチャンバーと一体であり、その内面は高温に耐えるようカーボクロスが使用されている。

(2) 推進薬

外径70φ、内面燃焼方式で変形六光芒のスター形式である。材質はポリウレタン系推進薬で酸化剤は過塩素酸アンモニウムである。総推力310kg-sec、燃焼秒時3.5秒、質量は1,700gである。推進薬の燃焼終了後迅速にチャンバーが燃え始めるように6個の着火薬が含まれている。

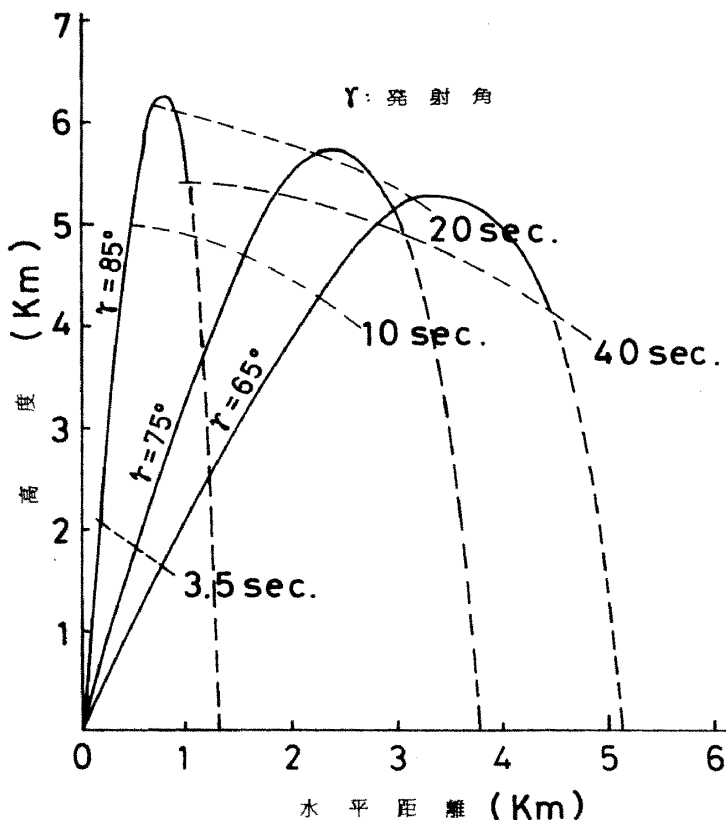
(3) 延時薬・放出薬

エンジンプレートの中心部にはめ込まれている延時薬はイグナイターにより推進薬と同時に点火され、予定延時秒(7秒)燃焼して放出薬に着火する。放出薬は黒色火薬であり、この爆発力によりペイロード部はエンジン部と切り離される。

(4) ペイロード

ペイロードは沃化銀とこれの燃焼剤である。この沃化銀コンポジットはロケットエンジンと分離されてから0-10秒後に燃え始めるが、燃焼秒時は着火薬によって調整される。コンポジットの組成は、沃化銀200g、ほう素70g、硝酸カリウム130gである。沃化銀コンポジットの燃焼温度は約2,300°Cである。ペイロードのチャンバーは沃化銀を燃焼昇華させる熱で点火され燃焼消滅する。チャンバーの材質はエンジン部と同じエポキシ樹脂に過塩素酸カリを混合したもので、これにグラスクロスを用いたFRPである。このチャンバーは飛しょう中の安定をドラッグスカートでもたせているが、これも1つの特色になっている。また、

図2 沃化銀散布機, NRCDP-Iの飛しょう経路図



スカート部の周囲4カ所を切り欠いて弾性をもたせ、これをロケットチャンバー前部に差し込んで外側に張らせ、この力を利用してペイロードとロケットエンジンとを接合させている。

Ⅲ. 2 飛しょう性能

発射角を変えたときの性能計算の結果を図2に示す。

Ⅲ. 3 ランチャー

発射設備であるランチャーは沃化銀散布機のデザインが固まった昭和45年度に設計・製作された。このランチャーは車載式で発射筒を3筒もっており、沃化銀散布機を3機まで連射することが可能である(写真1, 2参照)。発射操作はランチャーの角度付がなされ、散布機がランチャーに乗せられてからは遠隔操作でおこなうようになっている。ランチャーの有効長は1.8 mである。

写真1 ランチャー

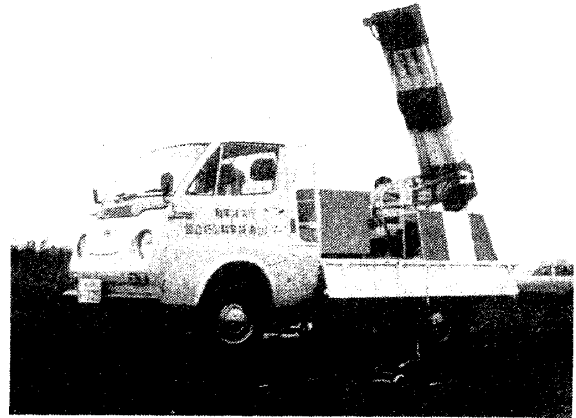
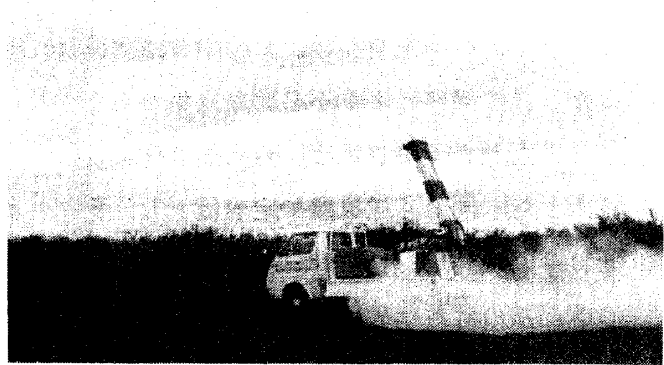


写真2 沃化銀散布機の発射。昭和45年10月の種まき実験時

Ⅳ 沃化銀コンポジット

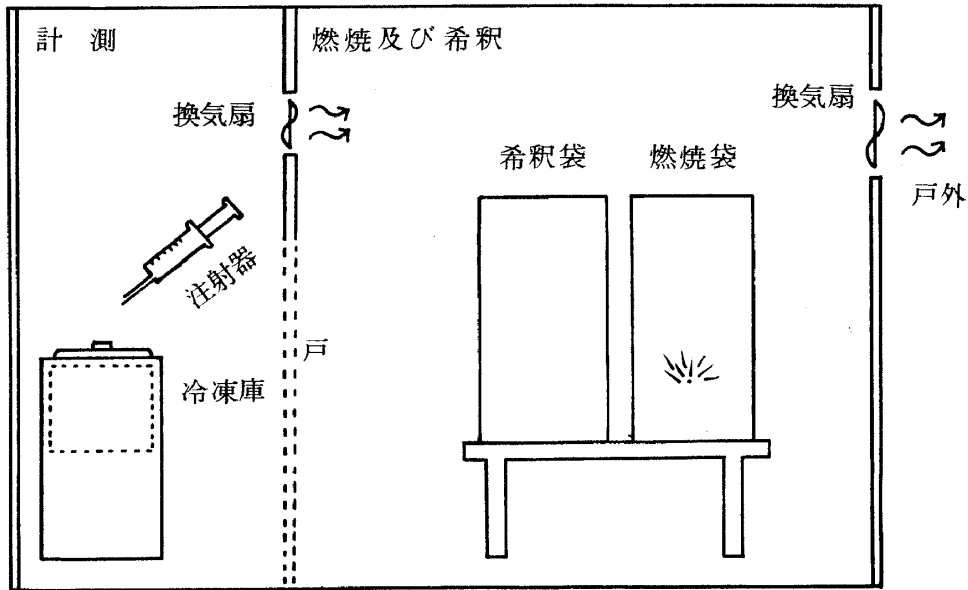
沃化銀散布機の頭部に積載する沃化銀コンポジットが発生させる有効氷晶核数は以下の実験により求められた。一般に有効氷晶核数の計数は、実際の燃焼散布状態に近い条件で、コンポジットを燃焼させて測定するのが望ましいが、大型の特殊な装置を必要とするので、本報告では予備的な計測として実験室内において静止空気中で燃焼させた測定結果について述べる。散布機の頭部に積載される沃化銀コンポジットの量は400 gで、その組成は、沃化銀50%、硝酸カリウム34%、およびほう素16%である。なおこの実験は昭和45年12月から翌年2月にかけて行った。



Ⅳ. 1 測定方法

図3の燃焼希釈室の実験台上にやぐらを組み、容積約 1 m^3 ($82 \times 82 \times 150\text{ cm}$)の

図3 実験システムの模式図



ポリ袋を2袋設け、一方を燃焼袋、他方を希釈袋とした。戸を隔てた測定室には容積約130ℓ(54×54×46cm)の商用冷凍庫を設け、砂糖溶液法による測定そうとした。両室内の空気は、測定中矢印の方向に換気された。また燃焼希釈室に試料採集後の残った燃焼気体、希釈気体を戸外高く捨てるため、ダクトを設けてある。実験室内の空気の汚染を少なくするためである。

沃化銀散布機に積載しているコンポジットは固形だが、計測に用いた試薬は、固める前の粉末である。これを薬包紙に包みニクロム線を巻いて、燃焼袋の中で点火した。試薬は化学てんびんで計量し、測定温度により、十数mgから百数十mgまで加減した。燃焼に際しては、燃焼生成物が速やかに拡散し、袋の中で均一な濃度になるよう、袋はあらかじめ容積の2/3ほどの空気をつめ、その中で点火直後、送風機で新たに空気を送り込み測定容積とした。この操作により不必要な凝集がある程度は避けられたはずである。更に袋を外部から揺すりなおよくかきまぜ、点火後3分で、燃焼気体を200ccの注射器に引き隣の希釈袋に注入した。同じく送風機で定容積とし、更に外部よりよくかきまぜた。3分たった希釈気体を200ccの注射器で採集し、有効氷晶核計数のための試料とした。

氷晶核の計数は砂糖溶液法によった。過冷却霧は呼気により供給した。3～4回の吹込みで底まで充満した。温度については、棒状温度計を図4のように底から5, 17, 30及び40cmの高さに置き、呼気を吹込む前の値と種まき後氷晶が降下した後の値、計8個の読取値を平均して、その計数に対する活性化温度とした。図に示すような位置に砂糖溶液を入れたシャーレを4個並べ、成長した氷晶を写真記録し、単位面積当りの数を出し、4個の値を平均した。大体2～6個/cm²ぐらいになるよう沃化銀コンポジットの燃焼量を加減した。冷凍庫の内壁はビロード張りにシグリセリンを塗希して霜を防いだ。庫壁の冷却による下降気流は1～2cmの薄い層に起こることが観察される。シャーレはこの層より離れたのでほ

図4 シャーレおよび温度計の配置図

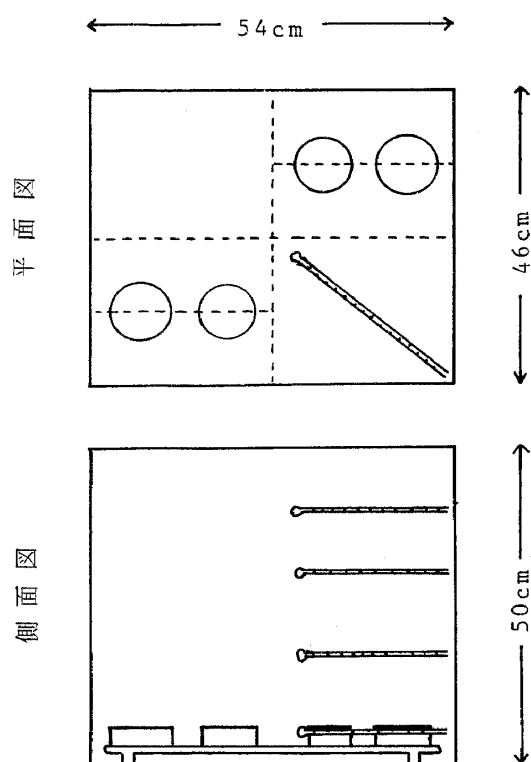
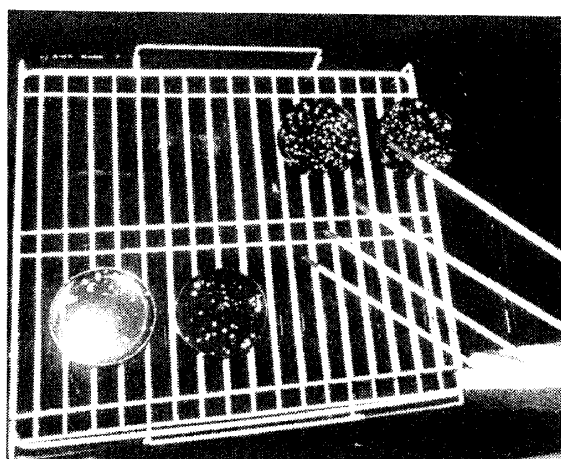


写真3 砂糖溶液中で成長した氷晶の一例。温度 $-1.2.8^{\circ}\text{C}$ で 20.0 mg のコンポジットから 1.4×10^{13} 個/g AgI の氷晶が発生した。



レの器壁に大きな樹枝状結晶がみられる。これは落下氷晶が溶液表面で成長する以前に発生していたもので、計数の際、あまり広い面積にわたり発達していない限り、コロノメーターで補正してそのシャーレも有効とした。やや中央よりのハレーションはこの写真撮影のため

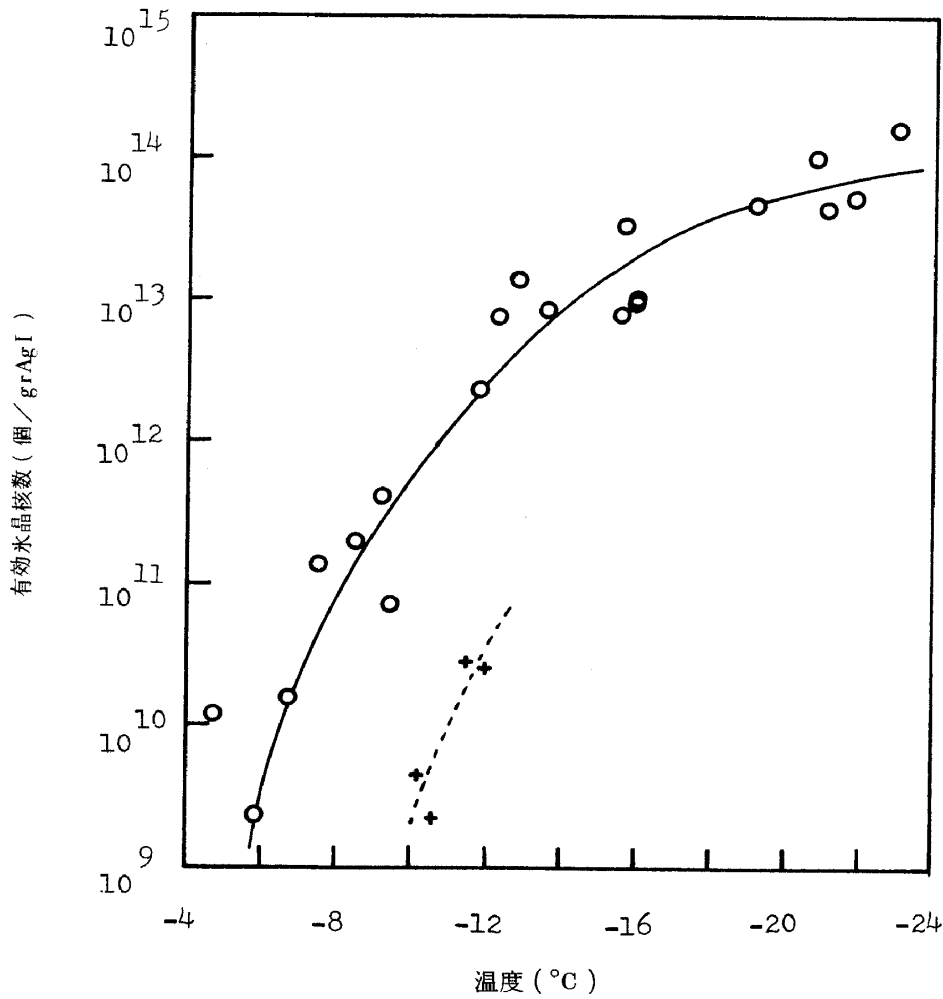
とんど影響はなかった。むしろ種まきの時の注射器の噴射の方向にやや多く庫底の落下氷晶密度のかたよりが見られた。庫内温度の設定は、予定した測定温度以下にいったん下げて冷却を止め、再びその温度に自然上昇させた。砂糖溶液の冷却の遅れを補うためである。溶液の温度はサーミスタ温度計で測定した。

測定順序は、庫内温度及び溶液温度がおおむね測定予定温度に近くなった時、あらかじめ準備しておいた燃焼袋内の試薬に点火し、前述の手順で 200 cc の試料を作る。この間約6分で、その後庫内温度を検温し、過冷却霧を作る。次に試料をまく。この間1分強、したがって試料の希釈気体は、1分と少しの間 200 cc 注射器の中に貯留されている訳である。試料を注入すると、高い温度で数十秒後、低い温度で数分後には落下した氷晶がシャーレ中で成長を始め、

1～2分から5～6分で写真に撮れて数えられる大きさになる。種まき後しばらくして再度4本の温度計を読み取る。最下部と最上部の温度の差は 1.5°C 以内、過冷却霧を作る前と種まき後の温度差は 1.0°C 以内であった。

写真3はシャーレ内の氷晶成長例を示す。燃焼させた沃化銀コンポジットは 20.0 mg 、測定温度は $-1.2.8^{\circ}\text{C}$ である。種まき後1分弱の状態である。有効氷晶核数は 1.4×10^{13} 個/g AgI であった。最も左のシャー

図5 測定された沃化銀コンポジットの有効氷晶核発生数の温度依存曲線を実線で示す。破線は希釈を行わない場合を示す。

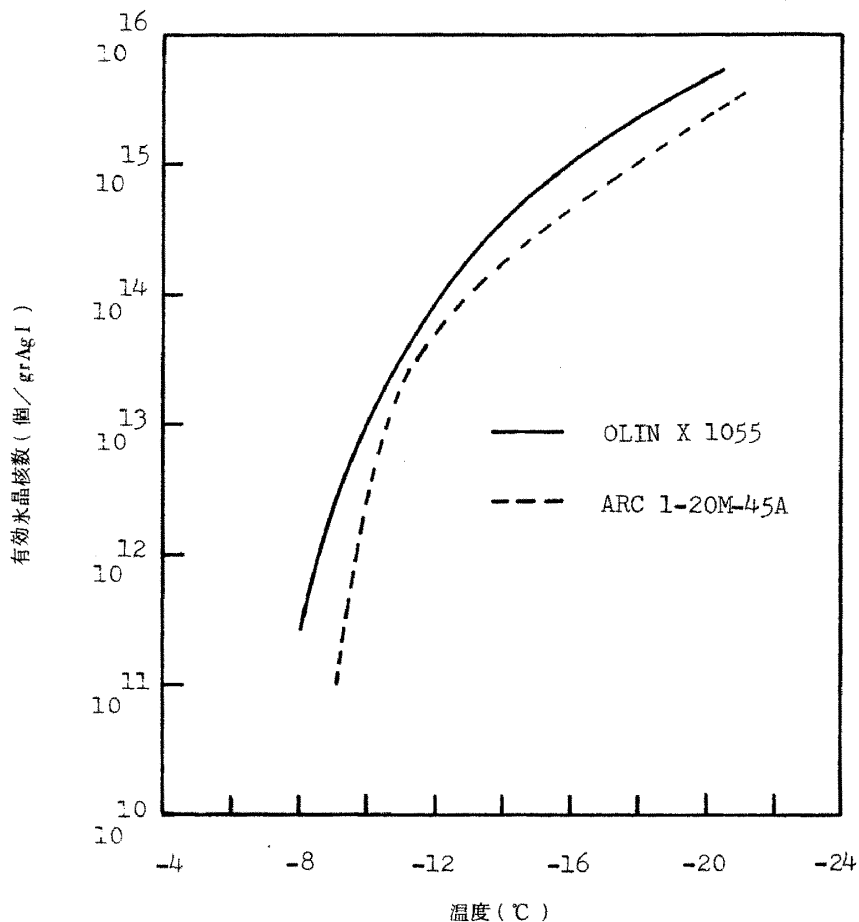


のストロボである。計数のための撮影記録は各シャーレ別々に庫外で行った。

Ⅳ. 2 測定結果

このような方法で -5°C から -23°C までの間で約60回の測定を行った。このうち、試薬の燃焼希釈中に砂糖溶液の温度が下がりすぎて結氷してしまったり、あるいは燃焼試薬の量が多すぎて過剰に種まきして数えられなかったり等実験操作上うまく機能が発揮できなかった場合を除いて、20例をプロットしたのが図5の白丸印である。横軸は測定温度で -4° ～ -24°C 、縦軸は沃化銀1g当りの有効氷晶核発生数で $10^9 \sim 10^{15}$ 個を目盛ってある。10度核は沃化銀1g当り 10^{12} 個、15度核で 10^{13} 個、20度核で 5×10^{13} 個程度であった。参照のため図6にJ. Simpson *et al.* (1970, *J. Appl. Meteor.*, 9)の測定結果を示す。これらはパイロテクニクス型の氷晶核発生試薬を風洞で燃焼希釈させて計数した値であり、計数方法も異なる。したがって厳密な比較評価は意味をなさないが、おおむねの傾

図6 J. Simpson *et al.* (1970)によるコンポジットOLIN X 1055およびARC 1-20M-45Aの気流中で燃焼させた場合の測定値.



向として、(イ) -10°C より高い温度ではだいたい同じ氷晶核発生数を示し、(ロ) -12°C でわれわれの試薬は Simpson *et al.*より1オーダー低く、(ハ)それより開きは大きくなり -20°C では2オーダー近く低くなっているということがいえる。これは計数方法の違いもあるが、主として Sano *et al.* (1956, *J. Meteor. Soc. Japan*, 34)の実験あるいは Fl-etcher (1959, *J. Meteor.*, 6)の理論から、われわれの計数に準備した燃焼希釈試料が比較的大きな燃焼生成粒子で構成されていたといえるだろう。実際われわれの沃化銀コンポジットを静止空气中で点火すると、その煙は沃化銀特有の黄色を呈するのがわかる。これは煙を構成する粒子群が可視光線の波長あるいはそれ以上の大きさの沃化銀粒子を多量に含むということで静止空气中ではあまり効率の良くないこと、すなわち図5白丸印程度の効率であることを示している。ちなみに図5プラス印は、希釈をしないで、燃焼袋から直接過冷却霧に種まきした場合の例である。希釈を経た白丸印の測定結果と比べて約2オーダー低い値で、主として濃度の高い状態で注射器内に貯留したための凝集によると考えられる。このように燃焼及び希釈の方法がみかけの効率に大きく影響を与えることがわかる。しかし沃化銀散布機で天然の雲中に散布する場合は、沃化銀を積載した頭部は空気と相対的な速度

を持ちその飛跡にまくので、気流中の燃焼散布になる。この場合、冷却拡散が速やかに行われれば、凝集が極端に避けられ生成粒子の粒径分布は、今回静止空气中で燃焼希釈した粒子のそれより、かなり小さい方へ寄るはずであると考えられる。その結果有効氷晶核の効率曲線は、全体として上にあがり、その傾きは立ってくるだろう。このことを実証するには、固形核種の効率測定用の燃焼希釈風洞で計測を行わなければならない。ともあれ、今回の測定値より、気流中で燃焼させた場合に期待される効率の方が下まわることはないと考えられ、図5はわれわれの開発した沃化銀コンポジットがかなりの効率を期待できるであろうことを示すものと考えてよい。

V あとがき

この特別研究は降ひょうを伴う積乱雲へ沃化銀を散布するという本実験の実施には至らなかったが、沃化銀散布機の開発および気象調節研究長期計画案の策定（第5稿まで）においては有益な成果を残し、また同時に実施された気象レーダーによる積乱雲の観測、簡易降ひょう記録計網による降ひょう分布観測、高層気象観測などに関連した基礎研究においても巻末リストのような成果が挙げられた。また日本学術振興会の支弁による日米科学協力セミナーの一環として、熱帯性積乱雲に関する気象調節セミナー（1971年2月15日～19日、米国マイアミ市）を企画推進するとともに、開発された沃化銀散布機についての発表を行った。さらに1973年10月1日～7日、ソ連邦タシケント市で開催された国際気象調節会議において、燃焼消滅型沃化銀散布機を用いた予備実験の結果および本邦における降ひょうについて発表した。これら3編の論文は付録にその原稿をそのまま掲載した。

最後に、今後わが国において、本特別研究でとりあげた降ひょう抑制実験あるいは渇水対策としての人工降雨実験など気象調節に関する種々の試みがなされるにあたって、この総合報告が参考資料の1つとして有益に活用されんことを願ってやまない。

謝 辞

この特別研究を実施するにあたり、関係機関各位には様々の形で御世話になりまた御支援、御助力を賜った。ここに記して深く感謝の意を表わしたい。

気象調節研究委員会	群馬県	航空宇宙技術研究所
気象庁	藤岡市など群馬県内関係市町村	日本学術振興会
防衛庁	群馬県農業共済組合連合会	

また最後にこの特別研究の発足と推進に御尽力下さった寺田一彦元所長に感謝致します。

(1978年10月16日原稿受理)

付録 1

Manuscript presented at the Seminar of Cumulonimbus
Modification of Tropical Nature (Miami, 1971)

ON THE NRCDP ROCKET SYSTEM FOR
CLOUD MODIFICATION EXPERIMENT

by

Yukio Ozawa and Yukio Omoto

National Research Center for Disaster Prevention

1. INTRODUCTION

In 1968 the National Research Center for Disaster Prevention started a hail suppression project, as a part of the weather modification program. The main purpose of the project is, of course, to reduce hail damage in Japan. However, we realize the importance in finding methods to modify cumulonimbus in general. We decide to use a rocket system for seeding, as we consider dispersion of artificial nuclei with high concentration into a proper portion of a hail cloud is the most promising method for hail suppression. The rocket will be launched from the ground, as we cannot use aircraft for the project.

Considering the thermal structure of the atmosphere in hail season over the area for the experiment, the rocket is designed to reach 6-7000m above the ground. Since the rocket will be used over land of not so sparsely populated area, the body must be disintegrated into small pieces or dissipated in the air. This is one of the most important requirements of the NRCDP rocket. It is also desirable that the rocket is handled easily, small, and light weighted.

Dissipation of seeding rockets by using explosive compound has been used for hail suppression experiments in USSR and other countries. However, in Japan use of such system is undesirable (with the same reason anti-aircraft gun could not be used). Therefore, we decided to develop a method so that the rocket body will be completely burned in the air during fall. In order to make the payload as small as possible, we make an effort to minimize combustible mixture with AgI. After two years for development and for improvement of the NRCDP rocket system we now have the seeding rocket for practical

use. In this paper we describe the characteristics of our rocket, and give some results of cloud seeding experiments.

2. CHARACTERISTICS OF THE NRCDP ROCKET

As mentioned above it took two years until we have the rocket used for the test in the last March and the seeding experiment in the last October. During this two years period, we modified models as a couple of times. But here we describe only the most recent one.

1) Structure: The structure of the NRCDP rocket is given in Fig. 1. Some of the important characteristics shown in Fig. 1 are as follows:

- i) It is a two stage rocket. The first stage is the propulsion part with nozzle, fins and engine plate. The second stage is the seeding part, which is set in the head of the first stage.
- ii) As given in the figure, total length of the rocket is 785 mm, with maximum diameter being 78.5 mm, which we believe very small one as a rocket of this kind. Total weight of the rocket is about 3.5 kg, in which the second stage occupies 0.5 kg. The figures for other parts of the rocket are given in Table 1.
- iii) The first and the second stage are fixed by springy characteristics of the materials used for the body. We are confident that the connection is firm and steady. The separation of the second stage from the first during the flight is made by timed explosion using small amount of black powder.
- iv) The propellant is loaded in the engine chamber with starlike opening in the core. A part of propellant compound remains after engine burn out. The remnant of the compound in the engine chamber is to be used again for assisting burning the rocket body, for the first stage of combustion of the engine chamber.

Table 1. Sizes and weights of some parts of the NRCDP rocket

Parts	Length (mm)	Parts	Diameter (mm)	Parts	Weight (kg)
Total	785 ^{mm}	First stage	78.5	Total	3.5
First stage	615	Second stage	43.0	First stage	3.0
Second stage	277	Nozzle throat	22.0	Second stage	0.5
Fin width	181	Throat exit	52.0	Propellant	1.7
				Silver iodide	0.2

2) Materials: With exception of a very small portion, the entire body of the rocket is made of combustible fiber grass reinforced plastics (FRP). Only nozzle enclosure is made of incombustible material. The other parts such as fin, throat, nozzle, engine chamber, cylinders for the first and the second delay composition engine plate, cylinder containing release compositions, head cap, bottom of the second stage, are all burned to be disintegrated into short stringy remnant.

The head chamber and engine chamber, occupies the greater portion of the rocket body. The composition of these two parts are as follows:

Composition of the chamber materials: (weight ratio)
 binder : fiber cloth = 4 : 1 ,

Composition of the binder = resin : oxidizer : appendices
 = 10 : 8 : 0.5

where; resin = epoxide

oxidizer = potassium perchlorate

appendices = cupper and chromic acid
 or the sort

3) Performance: The performance for flights and dissipation are given in Table 2. In the following we shall describe the performance of the rocket including results during flight test.

A: Flight performance: The predicted flight paths computed by means of data shown in Table 1 are given in Fig. 2. We are not yet able to measure exactly the actual flight performanc

Table 2. Performance characteristics of the rocket

Total thrust	310 kg sec	Dissipation (burn out) of the first stage*	30 sec
Mean thrust	89 kg sec	Dissipation of the second stage*	40 sec
Maximum thrust (<)	135 kg sec	Cut off	6.5 sec
Burn	3.5 sec	Ignition of pyrotecnic mixture (variable)	0-10 sec
Specific impulse	180 sec	Ignition delay (<)	0.2 sec

* From the moment the engine is ignited.

However, we made observations by naked eyes and by using field glasses for a number of launching into clear sky. Some of the data taken such a way are given in Table 3 and Table 4.

Table 3. The results of the ground test.

1. Place: Shirakawa Plant of the Showakaseihin In
2. Date : October 1, 1970.

Items	Unit	Standard	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Total thrust	kg·sec	310	310	344	322	314	338
Mean thrust	kg	89	82	89	87	89	90
Maximum thrust	kg	135	98	107	115	108	115
Burn	sec	3.5	3.8	3.9	3.7	3.7	3.8
Specific impulse	sec	180 or above	202	215	212	205	207

Table 3 shows the extract from the most recent ground test; i.e., the test to measure characteristics by fixing the rocket at the ground. Although the measured maximum thrust is far below of the standard value, it means that the thrust is given more or less uniformly, thus providing the rather good behavior of the rocket. The fact that the total and specific thrust values exceed the required values, this suggests that these rockets may reach higher levels than the computed trajectories given in Fig. 2.

Table 4. The results of the flight tests

1. Place: The Gunma prefectural pasture
(Asama Bokujo)

2. Date : March 18, 1970

Identification of the rocket	NRCDP-I-7	NRCDP-I-8
Burn(propellant)	3 sec	3 sec
Cut off	6 sec	6 sec
Start seeding	10 sec	10 sec
End seeding	20 sec	—
Dissipation of first stage	23 sec	30 sec
Dissipation of second stage	32 sec	42 sec
Direction of launcher (azimuth)	N 88°E	N 85°E
Elevation of launcher	64°	45°
Surface wind direction	WNW	WNW
Surface wind speed	8.5 m/s	4.5 m/s

Table 4 shows some examples of the results of the flight test. Because the test was made in March instead of June, for this test, we decreased the amount of the propellant compared with the rocket to be used during hail season, in order to make the maximum height lower. The results proved that the performance of the rockets were satisfactory.

It will be worthy to mention that during the flight test in 1969, using the earlier model, it was confirmed that by a sonic measurement, the rocket reached at least 7000 m above the ground.

Considering these and other observational evidences, we feel that NRCDP rocket may reach higher, or further than the computed trajectories given in Fig. 2.

B: Performance of the chamber combustion (burn): Critical values for complete combustion of chambers are given in Table 2. The first stage should be burned to become ashes within 30 seconds after the rocket was launched, and the second stage after 40 sec. Detection of the difference of complete burn

between the chambers of the first and the second stage is very difficult by the ground test. However, in one of the ground test, it was measured giving 50 seconds, after the engine was ignited, for the complete burning. Measurements made for the flight tests of the complete combustion of the chambers are given in Table 4. The data indicate that 23 and 30 sec for the first stage and 32 and 42 sec for the second stage, respectively. These values are not far from those of assigned values. Since the rate of chamber combustion should depend on the speed of the burning body relative to the air, slow burning during the ground test does not mean poor performance. During the flight test, in most cases, rocket bodies burned out to dissipated about 2500 m above the ground. The falling rocket body on fire will not inspire fear to people on the ground, when the fire will be put off at this height.

4) Pyrotechnic generator:

A: Generation of AgI particles: After separated from the first stage, the second stage begins to release AgI particles starting the given time. We can control this time by using delay compounds which can be adjusted between 0 - 10 sec after the separation. The pyrotechnic mixture with weight ratio 1 : 1 of AgI and other materials, is ignited when the second delay composition burned out. AgI sublimation take place in 3 - 5 seconds, with temperature approximately 2300°C, the particles are ejected from the end opening of the second stage. Contents of the pyrotechnic mix in the second stage are as follows:

AgI 200 gr.; Potassium perchlorate 130 gr.;
Powdered Boron 70 gr.

B: Number of effective nuclei: This should be the most important property of the seeding rocket. In order to obtain this quantity it is desirable to use a temperature controlled wind tunnel for the laboratory experiment so that we can simulate the similar condition for burning the reagent when used in cloud. Since we do not have facilities for such purpose, we could only try qualitative evaluation by burning the pyrotechnic mixture in a stagnant air. Our pyrotechnic mixture can be ignited easily, for example, by a hot microme wire.

Color of the mixture is more or less brown, yielding yellowish smoke when burned. It suggests the production of relatively large AgI particles.

By burning a very small amount of the pyrotechnic mixture in a polyethylene bag of 1 m³, then suck out a small amount of air from this bag, and injected into the second bag, then from the second to the third. The air with thinned smoke with AgI micro-particles is released into a cold box, and counted by the sugar solution method. This experiment have recently started, need considerable improvement of facilities for obtaining even the estimation of order of magnitude for number of effective nuclei per 1 gr. of AgI. We only could confirm a large number of effective nuclei are produced by burning our pyrotechnic mixture.

3. THE RESULTS OF CLOUD SEEDING EXPERIMENT OF 10-15 OCTOBER, 1970

The first cloud seeding experiments using our rocket was made in the middle of October, 1970 at Somagahara (a reserved land for manuever of the Defence Army), located about 100 km north of Tokyo. The rocket launcher was set at the south end of the reserved field. The rockets were launched to the north so that the rocket will fall within the field, in case of the accident such as when the body does not burned completely during fall. Our mobile radar (wave length 3.2 cm) was set at Suido Hill, of Fujioka City, which is located about 25 km south of the launcher site. Two rawinsonde soundings were made at the radar site each day during the one week period of the experiment. We set two camera sites about 6 km to the south of the launcher site. This plan to make stereo-photographic observations of cloud modification experiments was failed because of poor weather situation throughout the period of the field experiment.

In Table 5 the results of the experiments were listed. Here we give some descriptions of the experiment run No. 2 and 3. In case of the No. 2 experiment, the seeding rocket were launched in two minutes intervals between 11^h05^m - 11^h09^m. The sounding at 9:00 a.m. at the radar site is given in Fig. 3. The clouds

over the launcher site were nimbostratus with the base about 1,000 - 1,500 m above the ground. Through some openings of the lower clouds, we could see altostratus layer above. From the sounding data, we decided to make seeding at the highest level from the rocket. No apparent change was observed by radar. Rain began to fall at the launcher site from 11^h48^m, about 40 minutes after the last rocket was launched. Considering the weather in this morning it is difficult to say that this is due to our seeding experiment.

Table 5. The results of the seeding experiment of October, 1970

Run No.	Date	Time	Rocket No.	Launching angles		Expected height of seeding	Remarks
				Azimuth	Elevation		
1	10	14.36	NRCDP-I -21	N 341°E	75	4000	Began to rain at 15.20 continued to 15.45. No radar echo
		14.49	-22	"	"	4500	
		14.55	-23				
2	13	11.05	-24	N 350°E	81°	4700	Began to rain at 11.48 continued to 11.58. Radar echo 11.53 - 11.56
		11.07	-25	"	"		
		11.09	-26	"	"	5200	
3	13	15.30	-27	N 350°E	80°	4700	Began to rain at 15.40 continued to 15.50. Radar echoes 15.34 - 15.40 and 15.41 - 15.46.
		15.33	-28			5200	
4	13	15.52	-29	"	78	4600	No rain, no radar echo
		15.54	-30	"		5100	
5	14	10.44	-11	N 350°E	81	4100	No rain, no radar echo
		10.46	-12				
		10.58	-13			4600	
		10.59	-14				

In the same afternoon, we made the Run No. 3 experiment based upon the sounding data at 2:30 p.m. As shown in Fig. 4, there was a saturated layer between 2500 - 6000 m. Temperature of the top of this saturated layer was about -10°C , thus we decided to make seeding in the upper portion of the saturated layer. The sky condition over the launcher site was almost the same as for the morning experiment. Two NRCDP rockets were launched, the first one at $15^{\text{h}}30^{\text{m}}$ and the second one at $15^{\text{h}}33^{\text{m}}$.

In this case when the first rocket was launched, there was no echo in REI-scope of our radar oriented to the direction of the launcher site. After 4 minutes a small echo appeared at about 6000 m above the ground, which descended in a manner as shown in Fig. 5. This echo disappeared by $15^{\text{h}}40^{\text{m}}$, then the second echo appeared at $15^{\text{h}}41^{\text{m}}$ about the same place as the first one appeared. The second one also descended and disappeared about $15^{\text{h}}40^{\text{m}}$. The people at the launcher site observed moderate rain between $15^{\text{h}}40^{\text{m}}$ and $15^{\text{h}}50^{\text{m}}$. From these observations we feel the seeding experiment in the afternoon cause modification of the altostratus clouds above.

4. REMARKS AND FUTURE PLANS

So far our effort has been mainly to develop a model of a rocket system which will dissipate in the air and will not give damage on properties and people on the ground, nor inspire fear to the people on the ground. We feel that in these regards, we reached almost satisfactory level. The problems to be considered for future are as follows: (1) to make rocket with dependable dissipating performance; i.e., no inferior product: (2) to remove some incombustible portion: e.g., nozzle closure: (3) to increase flight distance without increasing cost of the rocket: and (4) quantitative evaluation of performance of the rocket for meteorological use.

The last item is the most important and the most interesting problem for us. However, this will be a very difficult one, unless considerable improvement for number of people in our project and for facilities are achieved. At the present, our

group consists of only 4 members, who works as technicians in case of field experiments. In all field experiments several staff members in the other groups of the National Research Center for Disaster Prevention joined to help us.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The field experiment we made so far were possible with assistance of several dozen of local people, several local government organizations, Japan Defense Agency and Japan Meteorological Agency. Without their cooperation, these experiments could not be made. The launching of the NRCDF rockets were made under permission of the traffic control officers of the Japan Aviation Agency. The rockets were made at the factories of Showakaseihin Inc. under the contract of Mitsubishi Co.

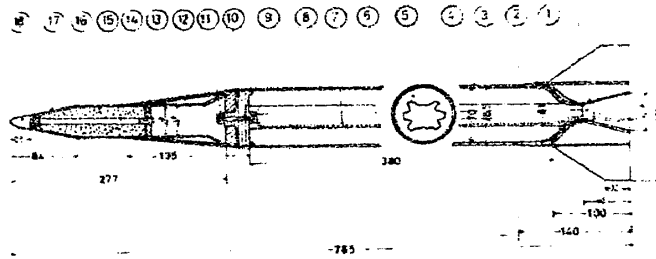


Fig. 1

Composition of parts of the NRCDP rockets:

No.	Names	Material	No.	Names	Material
1	Fin	FRP	11	Release composition	Black powder
2	Throat	FRP	12	Cylinder for release composition	FRP
3	Nozzle closure	Acetylene plate	13	Base of the second stage	FRP
4	Nozzle	FRP	14	The second delay composition	
5	Engine chamber	FRP	15	Cylinder for the second delay composition	FRP
6	Propellant	Composite	16	Pyrotechnic mixture	AgI, $KClO_3$
7	Lead wire	Coated wire	17	Head chamber	FRP
8	Igniter	Alcropollet	18	Head cap	FRP
9	Cylinder for first delay composition	Aluminum			
10	Engine plate	FRP			

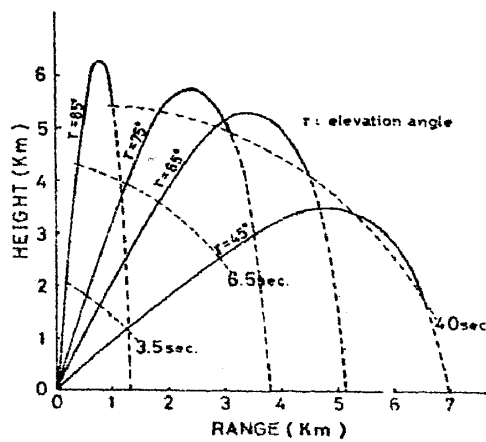


Fig. 2

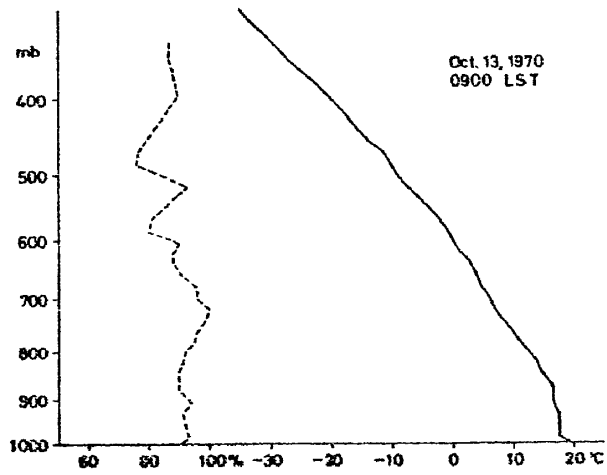


Fig. 3

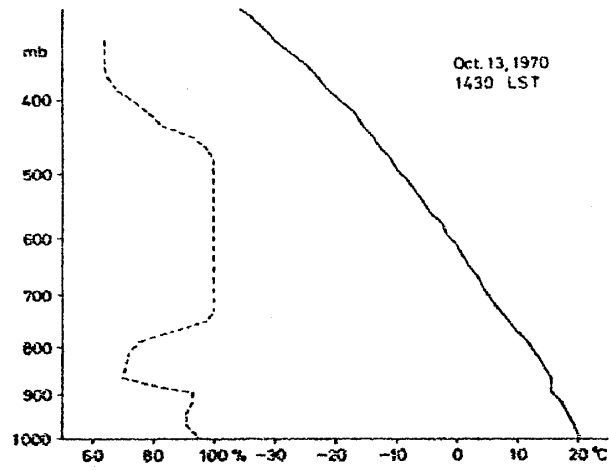


Fig. 4

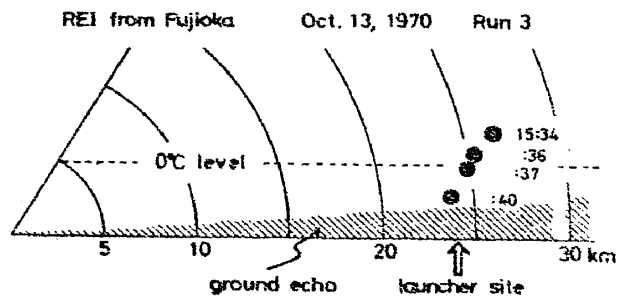


Fig. 5

Manuscript presented at the International Conference
on Weather Modification (Tashkent, 1973)

HAILSTORMS IN JAPAN

by

Yukio Omoto
National Research Center for Disaster Prevention
Tokyo, Japan

1. Introduction

It is an essential part of a hail suppression research project to obtain knowledge on characteristics of hailstorms which appear in the area under consideration. In Japan, there were relatively few studies on hail, especially before mid-1960's. Such a circumstance is at least partly due to smaller amounts of damage by hailstorms compared with some other phenomena such as typhoons, cool summers, and rainstorms. However, there were areas where hail is a serious problem to farmers. In the central and east-central portions of the main island Honshu (i.e., Kanto-Koshin District), among various weather events, hail is the most frequent hazard and causes greatest amount damage to agriculture compared with other meteorological disasters. Between 1965 and 1969 this area was suffered unusually great amount of damage by hail. About this time, the National Research Center for Disaster Prevention was planning to promote weather modification researches in Japan. Encouraged by news of success in the USSR and several other countries in hail suppression, the organization decided to chose hail suppression as object of the first field program. Nevertheless the main task of the project was development of a system of seeding rocket usable over land areas of Japan for cumulonimbus modification (see a paper presented in this meeting by Ozawa and Omoto), efforts to obtain basic meteorological knowledge on hailstorms had to be carried out simultaneously. The present paper gives summaries of recent research results on various aspects of hailstorms in Japan.

2. Climatology

Using data of 140 first class weather stations and about 1300 cooperative climatological stations of the Japan Meteorological Agency, distribution of number of hail days of Japan was obtained (Omoto, /1/). It was found that the frequency maxima appearing in the annual distribution map (Fig. 1a) may be classified into two different kinds of hailstorms. The maxima in the inland portions of large islands are due to hailstorms in warm season (Fig. 1b), and those along the coast of the Japan Sea are due to hailfall during cold season. Areas along the east and the south coast of Japanese islands suffer rarely by hail. This feature is quite similar to hail climatology of the United States, (e.g., /2/).

There are distinct difference in the general characteristics of hailstorms in cold season and those in warm season. For example, there is little diurnal variation of occurrence in cold season hailstorms (Fig. 2a), but warm season hailstorms develop mainly in the afternoon (Fig. 2b). Cold season hail often accompanied by thunderstorms, but not so frequent as those of warm season type.

Climatology of warm season hailstorms in the Kanto-Koshin district

was studied in detail. In some parts within this region, hail damage is the major disaster to agriculture. Hail season for this area is May through August. However, there is systematic regional difference in annual frequency pattern within this area (Omoto, /3/). For example, as shown in Fig. 3, in Gunma Prefecture the peak occur in early June with gradual decrease toward summer, but there is a distinct early August peak when whole region is concerned. Distribution of hail damage for recent 10 year period of this district were examined using data given in the Unusual Weather Report of Tokyo District Meteorological Observatory (Omoto, /3/, /4/). It was found that frequency of hail occurrence is related to ground topography both in smoothed (area average) and unsmoothed (superposition of damage areas obtained from the report). One of the noteworthy features of unsmoothed hail day distribution shown in Fig. 4 is the existence of several narrow bands with relatively frequent hail occurrence. These belts are called as hyo-michi (hail street) by local farmers. Locations of these hail streets suggest that isolated mountains are preferred regions of hailstorm formation. In order to obtain accurate data, a relatively dense hail observation network with 100 hail pad stations was established in the southern part of Gunma prefecture covering approximately 3,000 km² area where several hyo-michi cluster. Unfortunately relatively small number of hail days were recorded during the last few years, in particular for the network area. At any rate, it was found that the number of hail days obtained from the network data were considerably larger than given in the official report despite the network was operated only for periods of mid-June through end of August for both 1971 and 1972. (Table 1). Our obser-

	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Whole district (50,000Km ²)	10	12	7	25	24	11	9	14	12
Network area (3,000 km ²)	3	7	2	10	6	1	0	3	3
Netowrk data (3,000 km ²)	-	-	-	-	-	-	-	10	7

Table 1. Number of hail days in Kanto-Koshin region. Data for upper 2 rows are taken from official reports of the Tokyo District Meteorological Observatory. The data in the last row are based on the NRCDP network during 1971 and 1972 hail seasons.

vations confirmed that the existence of two small areas where hail occurrence is much greater than neighbourhood. These places have been known by local farmers by experience.

Size distribution of warm season hailstorms in the project area for the three observational periods (1971,1972,1973) were obtained from the collected hail pads. It is found that 80% of hailstones fell on the network pads were 10 mm or smaller in diameter. However, stones with diameters larger than 30 mm are recorded also. There were 3 hailstones which were estimated as 45 mm in diameter or larger. The largest stone which fell within our network area was the one reported as with diameter nearly 10 cm. However, due to poor storing of the stone by keeping it in a home refrigerator caused the stone melt quickly, before an accurate measurement. The largest in Japan reported in a reliable publication is the one observed after the storm of 29 June,1917 (Geophysical Review,1917;published by the Central Meteorological Observatory). The haistone was described

as pumpkin size, having peony flower shape, and weighed 900 monme (3.4 kg). It was reported that there were a number of grapefruit size stones. Official survey of the Kumagaya Meteorological Station counted 40 hail holes in 1 tsubo (3.3 m²) of a paddy rice lot. The smallest of these was 12 cm, and the largest was 51 cm in diameter. Many severe hailstorms in Kanto-Koshin region accompany hailstones of egg size. Duration of hailfall observed at the first class weather stations are usually in order of few minutes rarely exceeds 10 minutes. However, much longer hailfall durations have been reported. So far as recent hailstorms which occurred within our network is concerned, reported hailfall exceeding 20 minutes were proved to be incorrect.

3. Conditions of Hailstorm Developments

Many intense hailstorms in the Kanto-Koshin region develop in the vicinity of cold fronts. However, passage of a cold front during a hail-season does not always mean hail occurrence. A part of hail season coincides with Bai-u (Japanese rainy season) of the area. There are three types of Bai-u; (1) of persistent cloud and rainy days, (2) with localized heavy rains, (3) with relatively little rains. Years with high frequency of hail in June and July belongs Bai-u of the type (2). Mean sea-level pressure charts were made for hail days and for no-hail days for the period of 28 May through 30 June, 1967. In the mean hail day map a distinct meso-scale depression appear in the central mountain region during daytime, and dissipates in the evening. This feature is very weak for no-hail day mean map. Thus combination of development of a heat low and passage of a cold front is a dangerous sign of occurrence of hail in the area. Formation of inland heat low is related to two kinds of favorable situations of hailstorm developments during daytime. First, it is an indication of increase in instability of low level atmosphere due to heating. The other is formation of low-level flow pattern favorable to cloud formation along heated mountain slopes by forced ascent.

It was found that combination of 500 mb temperature and stability of troposphere show good relation with occurrence of hail, thunderstorm without hail. An example, when this relation held well is given in Fig. 7. Maximum vertical velocity or cloud top computed by a simple cumulus model also shows good relation with hail occurrence when it is combined with 500 mb temperature. Nevertheless low level temperature rise during daytime adds favorable conditions for development of convective clouds as mentioned above, instability in deep layers seems to be more effective factor. Synoptic scale vertical velocity is also an important factor to be considered in forecasting development of severe convective storms.

Vertical distribution of mean wind speed are computed for 15 severe hail days during 1960-1969 period, all hail days during hail seasons of 1967 and 1968, and no hail days for the latter period. As shown in the figure 6, compared with other two types, the mean for severe hail days has the largest maximum wind speed, the lowest height of level of maximum and the weakest low level wind speed (below 3 km). Therefore, vertical wind shear within the mid-troposphere on severe hail day is the largest. However, there were two severe hail day cases when winds were weaker throughout troposphere. General appearance of Fig. 6 is quite similar

* Note: This unit of area is given in the "Meteorological Disasters in Saitam Prefecture" published by the Kumagaya Local Meteorological Observatory (1970). This implies that even large hailstones fell very densely.

to those obtained for Colorado hailstorms by Modahl /5/. Mean vertical wind shears between 2 km and 10 km for these three types are, $2.3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ for no hail day mean; $2.9 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ for all hail day mean, and $4.8 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ for severe hail day mean. The mean shear for severe hail cases in this area is quite large, for, this value is about the same or even larger than many supercell storm cases studied by other investigators (e.g., /6/).

4. Storm Behavior and Structure

Most of hail damage areas in Kanto-Koshin district are relatively small, i.e., with long axis of several kilometers to 20 - 30 kilometers. However, not a few hailswaths extend more than 50 km. In case of the hailstorm of 7 June 1966, one the the hailswaths extended 160 km with an average width of 30 km. Detailed damage survey of this hailswath revealed that the existence of systematic variation of hail intensity which may be explained well if hail producing cells appear more or less periodically at the right flank of a rotating convective system /7/. Possibility of existence and mechanisms of rotating severe convective system were discussed by several investigators (e.g., /8/). A detailed analysis was made /9/. It was concluded that the storm which produced this extensive hailswath was a typical supercell type SR-storm named by Browning /10/. Most of hailstorms in Kanto-Koshin district appears to be multicell type convective systems moving in the direction to the right of mean wind in a cloud layer. General disrection of movement of hailstorms in this area is between east and southeast /3/. Splitting of convective system were observed during our radar observational period. In one of such cases, split occurred almost identical with the one case shown by Hirschfeld /11/.

According to radar data for several hailstorms, in most cases a hail area in this region locates at the right rear flank of the system. Instantaneous hailfall areas are generally very small compared with total area of radar echo of the system. In an unusual case, the hail area was first located at the right rear flank, then after about 1 hour break of hailing, it reappeared left rear flank of a severe storm (Fig.9). Hailfall on the ground usually begins couple of hours after the first radar echo of the storm appears. However, this does not mean growth of hail takes so much time within hailclouds in this area. For, hail are usually observed young portion of convective storms. Considering air circulation within a hailstorm, only a small portion which gives radar echo seems effective for seeding.

According to data given in special report by the Tokyo District Meteorological Observatory for hailstorms occurred during the period of 28 May - 22 June, 1967, about a half of echo tops were 10 and 11 km. There were a few with echo tops were below 6 km. These data suggest that hail echoes of this area are relatively short. It may of important to note that not a few echoes of thunderstorms in a hail season reach higher than 15 km even though they do not accompany hail. However, too few hailstorms have been observed quantitatively to obtain typical radar characteristic of hailstorms in this area. At the present we have not developed method to distinguish hail cells from many thunderstorm echoes most of which do not produce damaging hail.

5. Concluding Remarks

Considering operational aspects of such project and climatology

of hail suffering regions of Japan, operation using anti-aircraft guns or rockets from the ground seems unpractical in Japan. Of course, such methods are useful for experimental stages of cumulonimbus modification. Methods by launching rockets from aircrafts or dropping pyrotechnic from aircrafts seems more practical approach. Methods of seeding from aircrafts flying under storm cloud bases are inadequate in Japan, for, cloud base are relatively low over mountaneous hail suffering regions. Compared with operational hail suppression projects in other countries known to us, much more efficient operation is required in Japan. Further studies on hailstorms are required in order to make a conclusive decision for feasibility of operationa hail suppression in Japan.

REFERENCES

- /1/ Omoto, Y. (1967). Characteristics of hailstorms in Japan. J.Agr.Meteor., 23, pp. 115-121.
- /2/ Flora, S. D. (1956). Hailstorms of the United States. Univ.Okla. Press, Norman. 201pp.
- /3/ Omoto, Y. (1968). Hailstorms in the Kanto-Koshin District (1). J.Agr.Meteor., 24, pp. 33-37.
- /4/ Omoto, Y. (1971). Hailstorms in the Kanto-Koshin District (3). J.Agr.Meteor., 26, pp. 211-217.
- /5/ Modahl, A. C. (1969). The influence of vertical wind shear on hailstorm development and structure. Atmos.Sci.Paper No.137. Colo.State Univ. 55pp.
- /6/ Marwitz, J. D. (1972). The structure and motion of severe hailstorms, Part I; supercell storms. J.Appl.Meteor., 11, pp. 169-179.
- /7/ Omoto, Y. (1970) A note on the behavior of a hailstorm deduced from the damage pattern. J.Agr.Meteor., 26, pp. 151-153.
- /8/ Fujita, T. and H. Grandoso. (1968). Split of a thunderstorm into anticyclonic and cyclonic storms and their motion as determined from numerical experiments. J.Atmos.Sci., 25, pp. 416-439.
- /9/ Omoto, Y. (1970). Hailstorms in the Kanto-Koshin District (2). J.Agr.Meteor., 26, pp. 91-100.
- /10/ Browning, K. A. (1964). Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J.Atmos.Sci., 21, pp. 634-639.
- /11/ Hitschfeld, W. (1960). The motion and erosion of convective storms in severe vertical wind shear. J. Meteor., 17, pp. 270-282.

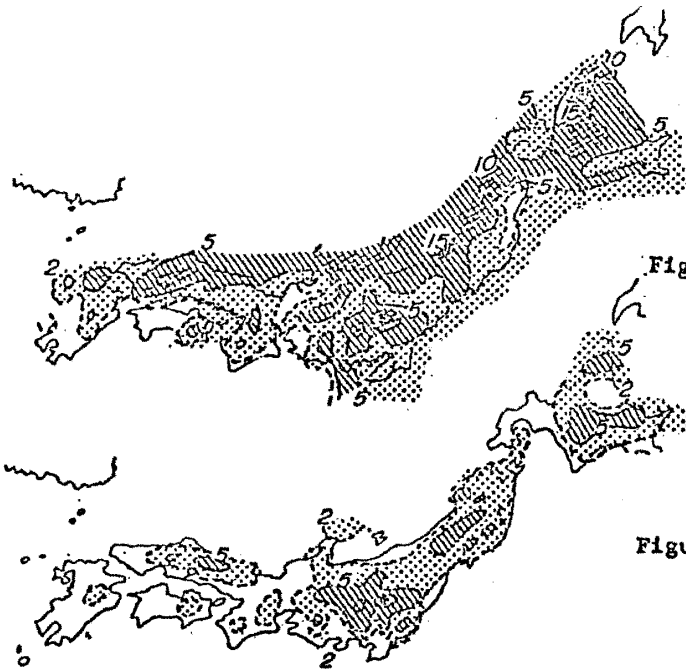


Figure 1a. Distribution of number of days with hail during 1954-1964 period.

Figure 1b. Distribution of number of days with hail in the warm season (April-September) of the 1954-1964 period.

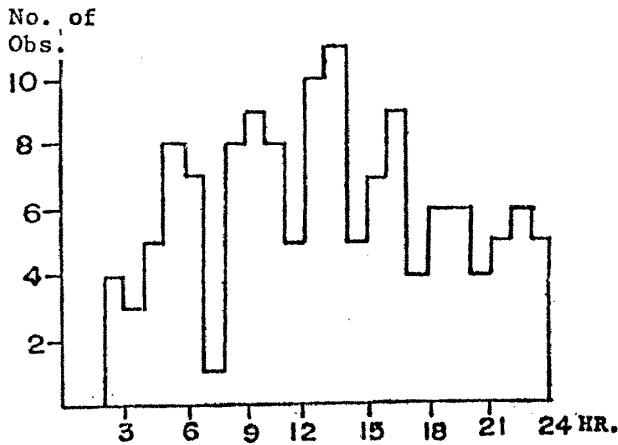


Figure 2a. Number of hail occurrence by hours at Akita(1917-1966) where most hailstorms are cold season type.

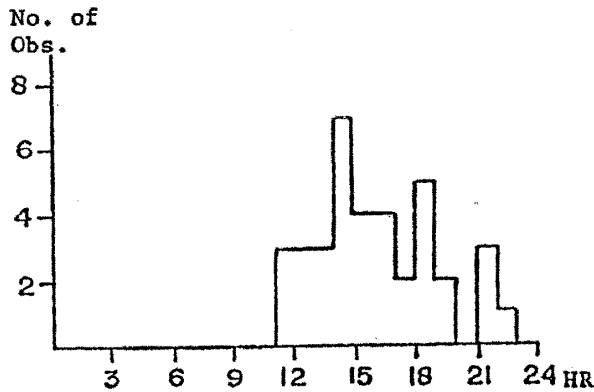


Figure 2b. Number of hail occurrence by hours at Maebashi(1917-1966) where most hailstorms are warm season type.

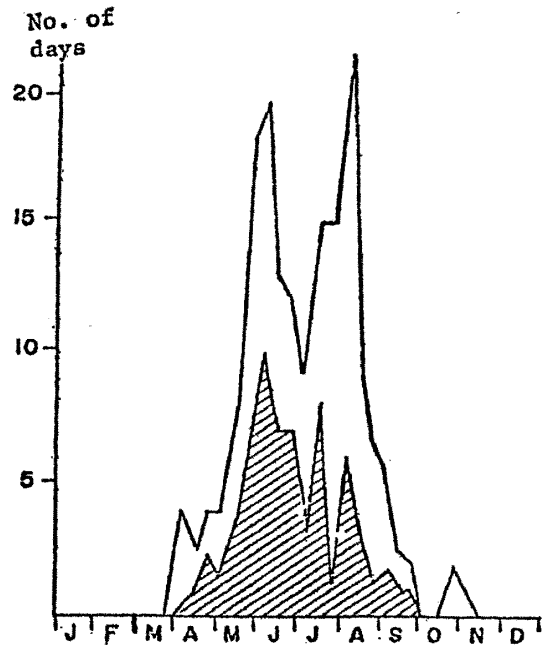


Figure 3. Number of days with damaging hailstorms in Kanto-Koshin District (upper curve), and that for Gunma Prefecture (lower curve). Data are taken from the Unusual Weather Report for the period of 1960-1972. A month is divided into three periods of approximately 10 days each.

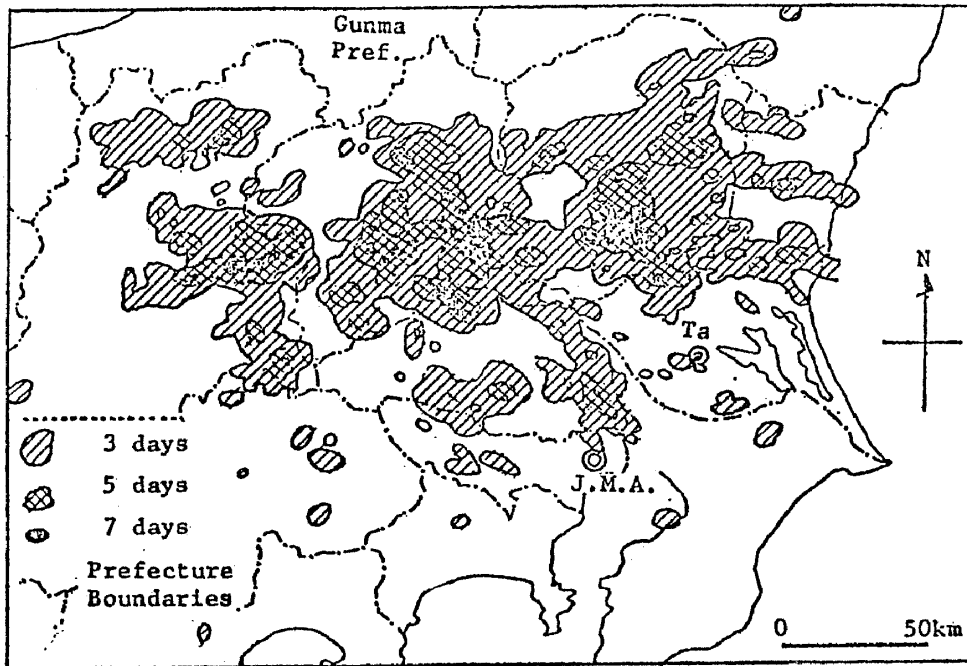


Figure 4. Distribution of number of days with hail in warm seasons (April-September) of 1960-1969. © J.M.A. and © Ta indicate locations of the Japan Meteorological Agency and the Tatano Aerological Observatory, respectively.

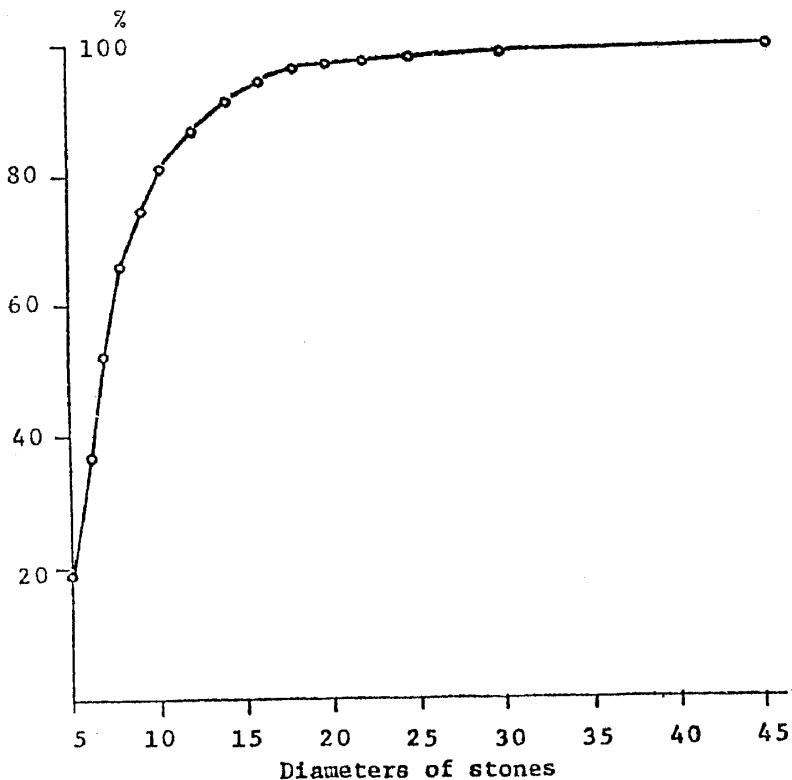


Figure 5. Cumulative frequency distribution of diameters of hailstones which fell to hail pads of NRCDF network 1971-1973.

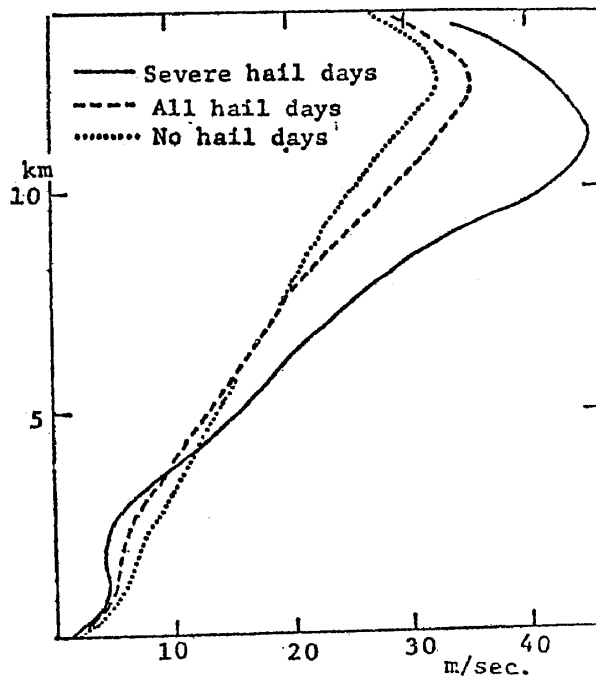


Figure 6. Vertical distribution of mean wind speeds at Tateno for severe hail days, all hail days and no hail days. See text for the periods the data are taken.

Manuscript presented at the International Conference
on Weather Modification (Tashkent, 1973)

PRELIMINARY RESULT OF EXPERIMENTS USING
SEEDING ROCKETS WITH COMBUSTIBLE SHELLS

by
Y.Ozawa and Y.Omoto
National Research Center for Disaster Prevention
Tokyo, Japan

1. Introduction

The National Research Center for Disaster Prevention of Japan had carried out a five year hail suppression research project ending 1972. We decided to use a rocket system for seeding. It has been considered that dispersion of artificial nuclei with high concentration into some proper portions of hail producing clouds is the most effective method for hail suppression. Since it was not possible to use aircraft nor anti-aircraft gun for the experiment for this project, we had to chose a method using rockets to be launched from the ground. A mobile launcher was prepared for the experiment.

The rocket was designed to reach 6-7000m above the ground at the highest point. This was determined from consideration of the mean thermal structure of the atmosphere in hail season over the area for the experiments. Since the rocket will be used over lands of more densely populated areas compared with hail suppression project fields in other countries, no large piece of rocket should fall to the ground. This is one of the strict requirements in performance characteristics of our seeding rocket. It is also desirable that the rocket is light and small and can be handled safely.

Dissipation of seeding rockets by using explosive compounds has been used for hail suppression experiments in all foreign projects we knew at the time. However, it was recognized that use of such a system over public lands is extremely difficult in Japan. Consequently, we decided to develop a method by which the rocket body will be completely burned to ashes in the air after seeding. After two years for development of this system, the NRCDP-I rocket of satisfactory characteristics in this regards was completed. In this paper we describe the characteristics of our rocket, and give a result of a cloud seeding experiment using this rocket system.

2. Characteristics of the NRCDP-I rocket

The seeding rocket was developed and made by the Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. and the Nihonkoki, Inc. which was called Showakaseihin Inc. during the early stage of our contract. The first model was tested at the end of the fiscal year 1968. However, some modification was necessary until the NRCDP-I type was completed which is safe to use over public lands. In this section we describe the characteristics of this rocket.

2.1. Structure:

The structure of the NRCDP-I rocket is given in Fig. 1. Some important characteristics shown in the figure above are described below.

- i) The rocket is a two stage type with the first stage as propulsion part and the second part is for seeding.
- ii) Total length of the rocket is 785 mm, with maximum diameter as 78.5 mm. The length of the first stage is 615 mm, and that of the

second stage is 277 mm. End portion of the second stage is inserted into the head portion of the first stage.

iii) The first and the second stages are fixed by springy character of the materials used for the bodies. The connection is firm and these two is separated by timed explosion during a flight.

iv) The total weight of the rocket is about 3.5 kg, in which the first stage takes about 3.0 kg. The weight of the second stage with 400 g of pyrotechnic compound is 500 g. Amounts of silver iodide in the second stage of a rocket is 200 g.

v) The propellant is loaded in the engine chamber with a hollow of starlike cross-section. It burns outward from the surface of the hollow. When it reaches to the outermost limit, it put fire on the chamber of the first stage.

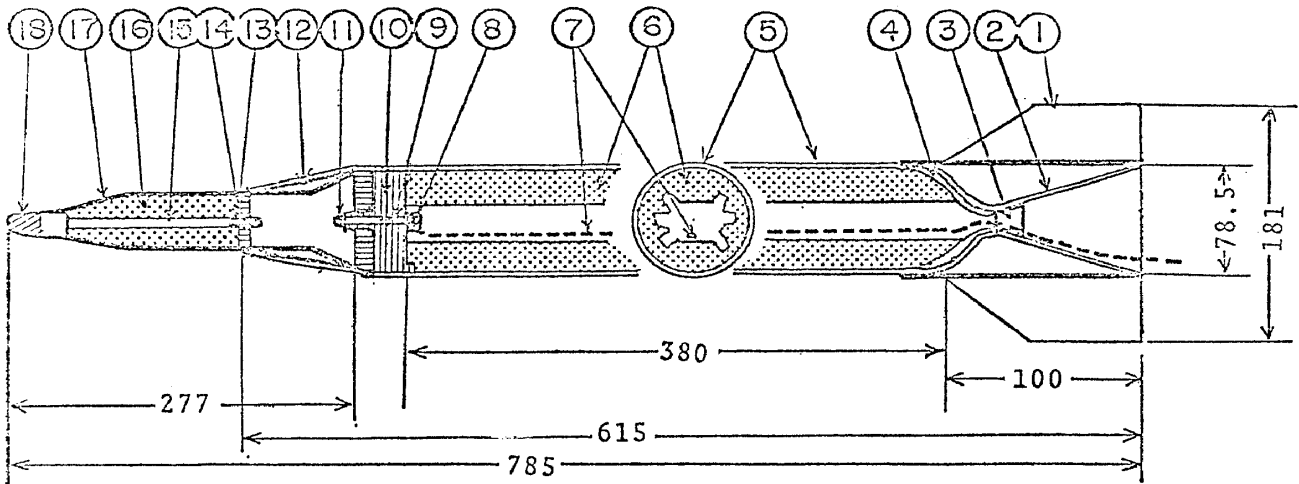


Figure 1. Compositions of parts of the NRCDP-1 rocket. Explanations for numbers in the figure are given in the table below.

No.	Names of parts	Materials	No.	Names of parts	Materials
1	Fin	FRP	12	Cylinder for release composition	Black powder
2	Throat	FRP	13	Base of the second stage	FRP
3	Nozzle closure	Acetylene plate	14	Second delay composition	
4	Nozzle	FRP	15	Cylinder for the second delay comp.	FRP
5	Engine chamber	FRP	16	Pyrotechnic mixture	AgI·KClO ₃
6	Propellant	Composite	17	Head chamber	FRP
7	Lead wire	Coated wire	18	Head cap	FRP
8	Igniter	Alcrobe-let			
9	Cylinder for first delay Comp.	FRP			
10	Engine plate	FRP			
11	Release	Black powder			

2.2. Materials:

With an exception of a very small portion, i.e., the nozzle closure, the entire body is made of combustible fiber glass reinforced plastic (FRP). The head chamber and engine chamber occupies the greater portion

of the rocket body. Composition of these chamber materials in a weight ratio is given as, binder : fiber glass = 4 : 1. Composition of the binder in weight ratio is as follows, i.e.,

Resin : oxidizer : appendices = 10 : 8 : 0.5,
 where resin is made of epoxide, oxidizer is potassium perchlorate, and appendices are copper and chromic acid and of this sort.

2.3. Performance:

Some data from ground and flight tests compared with specified flight and dissipation performances of the NRCDP-I rocket are given in Tables 1 and 2, respectively.

Items	Unit	Spec.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Total thrust	kg·sec	310	310	344	322	214	338
Mean thrust	kg	89	82	89	87	89	90
Maximum thrust	kg	135	98	107	115	108	115
Burn of Prop.	kg	3.5	3.8	3.9	3.7	3.2	3.8
Specific impulse	sec	180	202	215	212	205	207

Table 1. The results of a ground test conducted at the Shirakawa plant of the Showkaseihin Inc. in October, 1970. Data for five samples are shown.

Identification of tested rockets	Spec.	NRCDP-I-7	NRCDP-I-8
Burning of propellant	3.5 sec	3 sec	3 sec
Cut off	6.5 sec	6 sec	6 sec
Start seeding	10 sec	10 sec	10 sec
End seeding	20 sec	20 sec	20 sec
Dissipation of the first stage	30 sec	23 sec	30 sec
Dissipation of the second stage	40 sec	32 sec	42 sec

Table 2. The results of the flight tests of NRCDP-I rockets carried out at the Gunma Prefectural Ranch on March 18, 1970.

2.3.1. Flight Performance: Computed flight paths launched at various elevation angles are given in Fig. 2. We have not yet able to measure exactly an actual flight path of a rocket. However, observations by naked eyes and by field glasses were made for many flights. It is apparent that the rocket reaches higher and travels farther than calculated trajectories shown in the figure. This may be predicted from data of the ground tests shown in table 1. For, the total thrust measured during the ground test were generally greater than specified values. The maximum thrusts for the tested rockets were considerably smaller than specified values. Comparing the total thrust and the maximum thrust, this indicates the thrust is given more uniformly than expected values. The data given in the table 2 are from the clear sky flight tests carried out in March. Because of cold climate for the test period compared with that of actual hail season for the area, the amounts of propellant were reduced from those to be used for hail season so that seeding might take place at a lower level for this particular experiment.

2.3.2. Performance of the chamber combustion (burn): Critical values for complete combustion of chamber are given in table 2 as specified values for dissipations of the first and the second stages. Namely

requirements for the first stage to burn out to become ashes is within 30 seconds after the rocket is launched, and the second stage the critical value is 40 seconds. These times are determined from the computed trajectories of the rocket launched at reasonable elevation angles as shown in the figure below. By ground tests, it is very difficult to determine times required for complete burn of each of the first and the

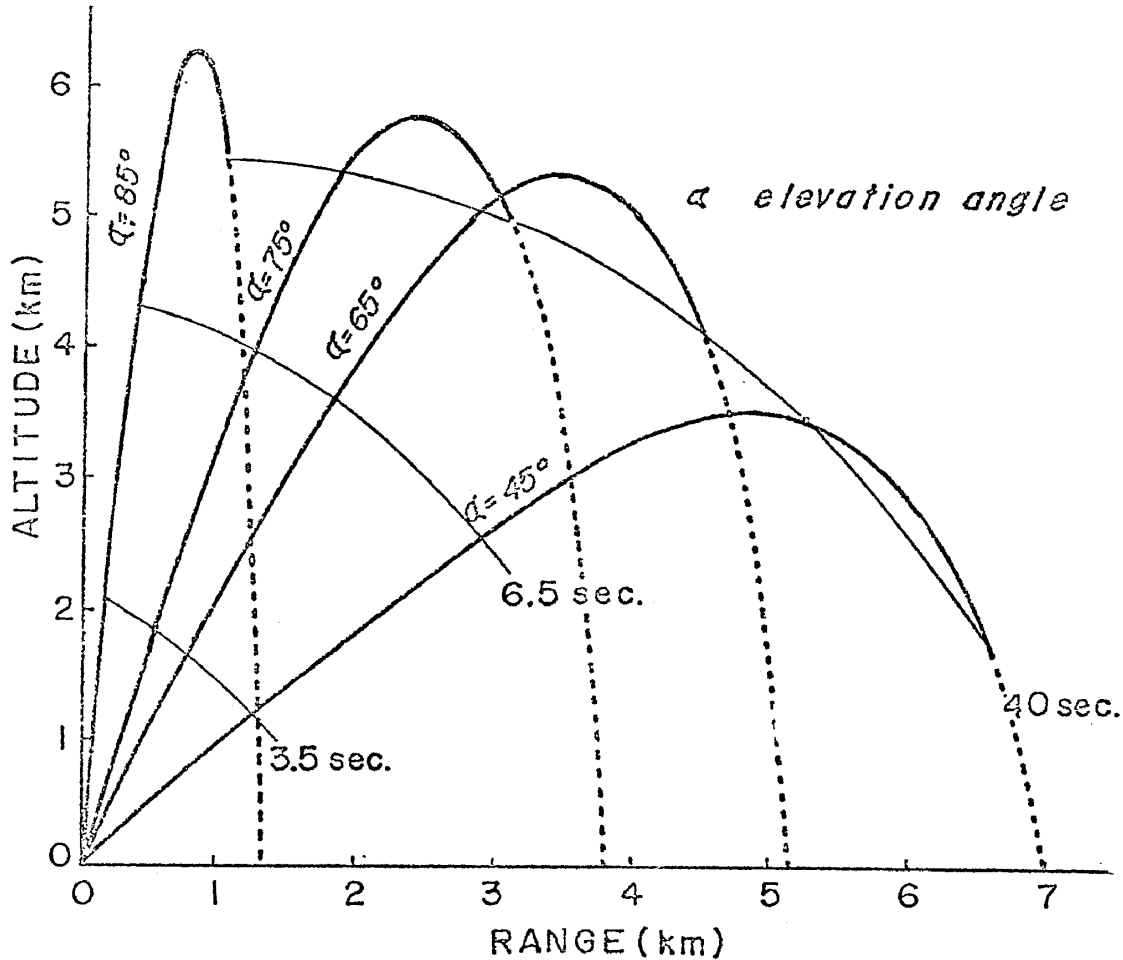


Fig. 2. Computed trajectories of NRCDP-I rockets launched at different angles

second stage. Measurements for several tests gave longer than 50 seconds for complete burn of the first stage only. On the other hand, the values obtained from flight tests were almost equal or more often shorter than critical values. Longer durations for complete burning in ground tests were expected. For by this type of tests rockets had to be fixed firmly to supporting frames thus ventilation which affects burning rate is very much smaller than actually occurring during flight or falling conditions. During flight tests and in some seeding experiments, whenever sky conditions allowed observations, fire extinguished usually quite high above the ground.

Fiber glass cloths used for reinforcement of the plastic body is

actually not entirely made of glass fibers. Glass fibers are used for warps, and regular fibers are used for wefts. Weaving in this manner is necessary in order that the remnant of burned cloths used for reinforcement of the rocket chambers tear apart during fall. This type of weaving also quicken burning rate of the body.

2.2. Pyrotechnic generator:

2.4.1. Generation of artificial nuclei: After separated from the first stage, the second stage begins to release AgI smoke after a set time interval. We can control the timing by using delay composition which can be adjusted between 0 - 10 seconds after the separation. The pyrotechnic mixture with weight ratio 1 : 1 of AgI and other materials is ignited when the second delay composition burned out. Vaporization of AgI takes place in several seconds, with temperature estimated approximately $2,300^{\circ}\text{C}$. Smoke issues from the end opening of the second stage. Composition of the pyrotechnic mixture in the second stage is as follows: Silver iodide 200 gr, potassium perchlorate 130 gr, and powdered boron 70 gr.

2.4.2. Number of effective nuclei: Accurate measurement of this important quantity has not been made because of the lack of suitable facilities at our laboratory. Only a qualitative measurements by burning small quantities of our pyrotechnic mixture in a polyethylen bag of 1 m^3 were made. Chemists at the Nihonkoki Inc. had informed us that $4 \cdot 10^{13}$ ice nuclei per 1 gram of AgI at temperature -10°C was their evaluation.

3. Results of Cloud Seeding Experiments

Three cloud seeding experiments by the NRCDP-I rockets were carried out, namely, October, 1970; June 1971; and June, 1972. Each experimental period was about 10 days. Only 20 rockets were prepared for each test. Due to such limitations and to unfavorable weather conditions for all of these periods (the days had to be set a few month ahead of time); we were unsuccessful to make experiments with observable seeding effect in convective clouds. Only during a series of launching performed in October 1970, some evidences of artificial echo formations within a thick stratified cloud layer. In this section we only describe some results of this experiment.

The experiments were carried out during a period 10 - 17 October, 1970, at Somagahara at the foot of Mt. Haruna one of the famous for hailcloud formation. The place is a reserved land for manuever of the Defence Agency. A mobile launcher was set at the south end of the reserved field. Rockets were launched to the north-northwest direction so that the body may fall within the reserved field even if it fail to burn completely. Our mobile radar (wave length 3.2 cm) was set at Suido Hill of Fujioka City, which is located about 25 km south of the launcher site. Two rawinsonde observations were made at the radar site each day. Figure 3 shows a map giving locations of experimental sites, including the one carried out in March 1970. The general area shown in this map is approximately 100 km northwest of the center of Tokyo. A curve in the map shows 100 km from the Japan Meteorological Agency.

In table 4 the result of experiments conducted on 13 October is given. In case of the No.1 experiment, three rockets were launched in two minutes intervals between $11^{\text{h}}05^{\text{m}}$ and $11^{\text{h}}09^{\text{m}}$. The cloud over the launcher site was stratus with its base at about 1,000 - 1,500 m

above the ground. Through some openings of the lower clouds, we could see altostratus layer above. From the 9 am sounding data, we decided to seed at the upper layer of the cloud. After seeding, however, no apparent change was observed by our radar. A weak shower began at the launcher site from 11^h48^m, which was about 40 minutes after the last rocket was launched. Considering weather in this morning it is unlikely that this was effect of seeding.

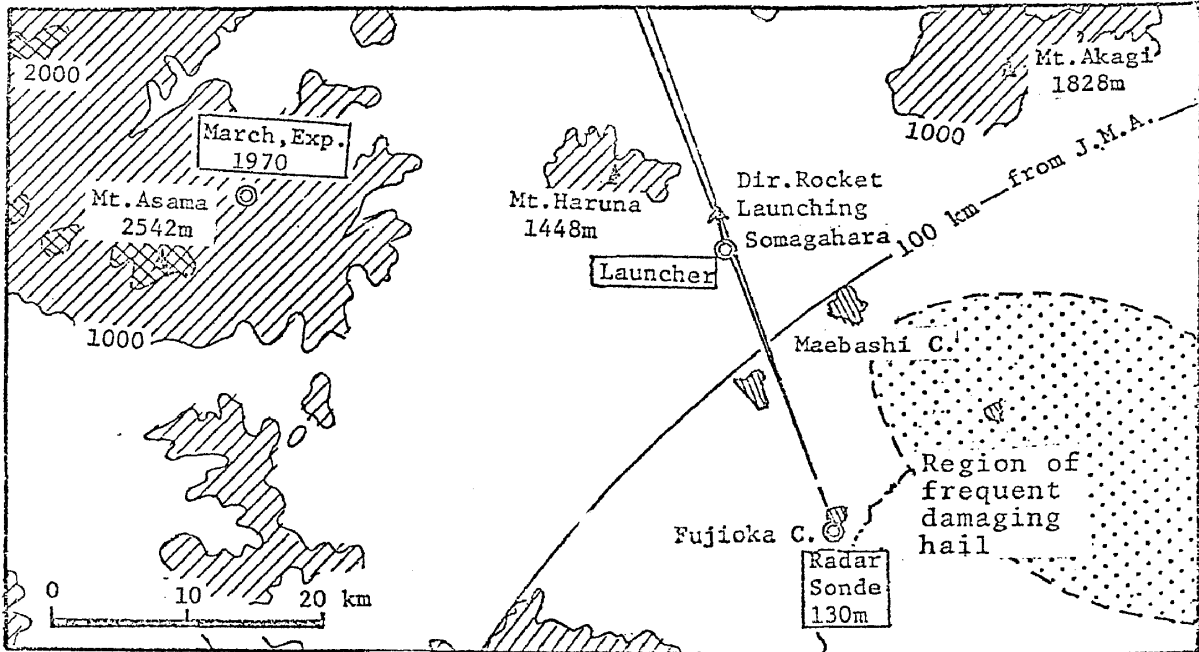


Figure 3. A map showing general area of experiment.

In the same afternoon, we made two series of launching. In the earlier experiment, two NRCDP-I rockets were launched, the first one at 15^h30^m and the second one 15^h33^m. The sounding data at 14^h30^m is shown in Fig. 4. It is seen that there was a thick saturated layer between

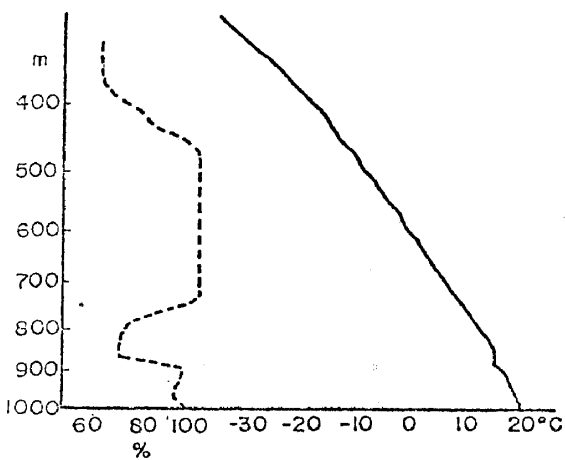


Figure 4. Vertical distribution of temperature (solid curve), and relative humidity (dotted curve), at 14:30 observed at Fujioka radar site.

2,500 - 6,000 m. Temperature of the top of this saturated layer was about -10°C . We decided to make seeding in the upper portion of the saturated layer. The sky was almost the same as for the morning experiment. For this test, when the first rocket was launched, there was no echo in RHI-scope of our radar oriented to the direction of the launcher site (see Fig.3). After 4 minutes of launching a small echo appeared at about 6,000 m above the ground, which descended in a manner illustrated in Fig 5 together with a photograph taken at 15^h37^m of this echo. This echo merged to the ground echo and became indistinguishable at about 15^h40^m. Shortly before the first echo disappeared, the second similar echo appeared almost the same position with the first one. It seems the second one correspond to the second rocket. Personnel at the launcher site observed a brief rain shower of moderate intensity between 15^h40^m and 15^h50^m. These two echoes were quite likely to be the effects of seeding. Another series of launching were made at 15^h52^m and 15^h54^m. However, no echo was observed after seeding.

Experiment No. 13, Oct. 1973	Time of launching	Launcher's azimuth	Launcher's elevation	Height of seeding
1	11:05	350°	81°	4,700 - 5,200
	11:07	"	"	"
	11:09	"	"	"
2	15:30	350°	80°	4,700 - 5,200
	15:33	"	"	"
3	15:52	350°	78°	4,600 - 5,100
	15:54	"	"	"

Table 3. Data of seeding experiment of 13 October, 1970.

4. Concluding Remarks

The NRCDP-I rocket described above exhibited generally satisfactory performances in regard to flight, dissipation, and seeding. However, it is desirable to carry out more seeding experiments with larger number of rockets in order to obtain more data concerning seeding effects, especially for convective cloud cases. For this purpose, however, some improvement is desirable concerning the rocket system. As mentioned above there is a small portion of the rocket which remains unburned. Although the chance is slight, a possibility of danger is not entirely averted. Due to financial limitations we could use very small numbers of rocket in each test, this made the cost of one NRCDP-I rocket very expensive. Mass production will reduce cost per one rocket, yet we feel need of modification of the rocket body itself to put the price to a more reasonable one. We had to adopt a method to put ignitor just before launching which require careful handling by experienced technicians. This inconvenience was brought about by traffic regulations concerning the transport of such an object, and not from technological matter.

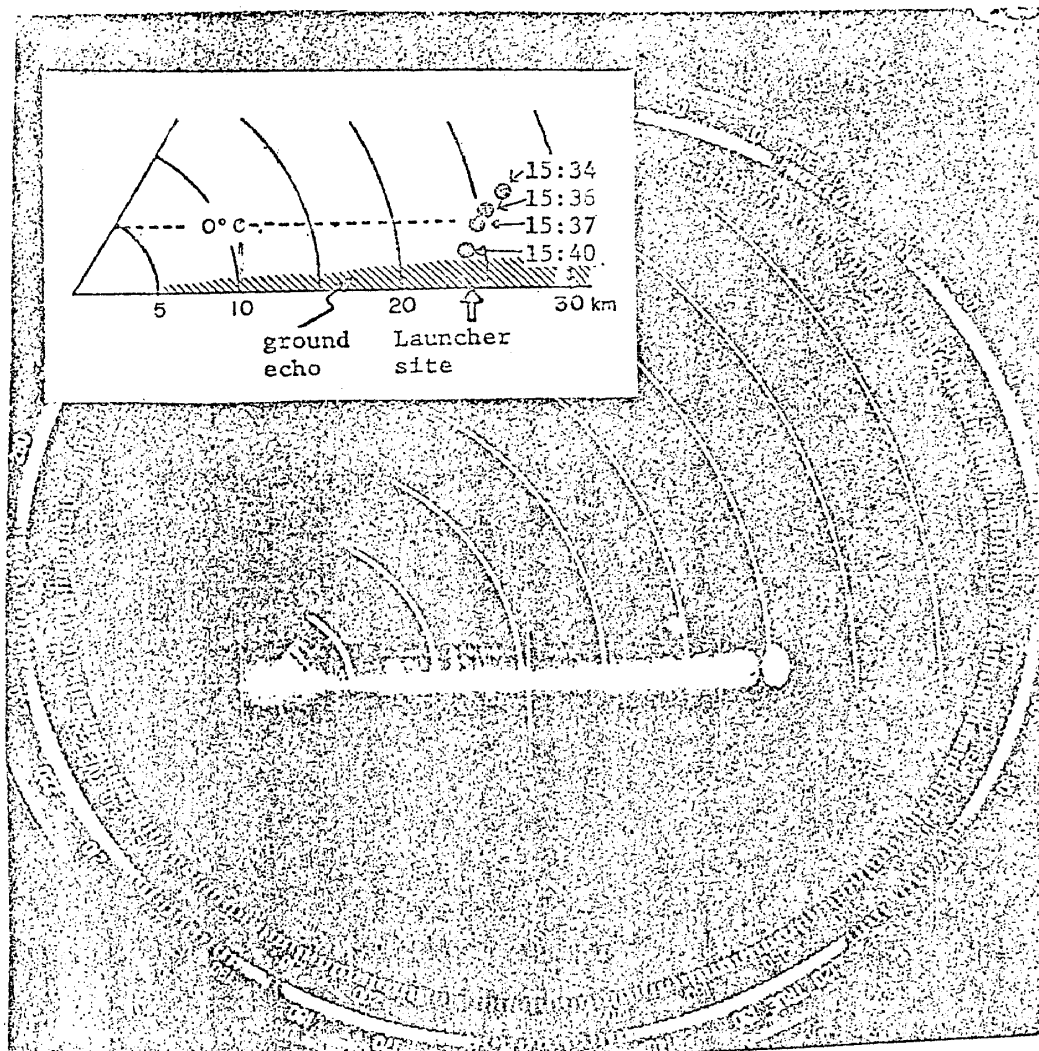


Figure 5, RHI photograph of an artificial echo produced by a rocket seeding (the picture was taken at 15^h37^m, 13 October, 1970). The behavior of the echo is illustrated above.

ACKNOWLEDGMENTS

The hail suppression project was established and strongly supported by Dr. Kazuhiko Terada, the former director of the National Research Center for Disaster Prevention. Messers T.Yagi and T.Yonetani of our laboratory carried out studies to obtain necessary data for the development of the seeding rocket. Field experiments were carried out by all the staff members of the Climatic Anomaly Laboratory with assistance of many other staff members in the various sections of the Research Center. The Japan Defence Agency and the Japan Meteorological Agency offered valuable assistance during our field experiments. Also personnel of Gunma Prefectural Government kindly offered various sorts of assistance. Launching of rockets were made under the permission of Japan Aviation Agency. The present authors would like to express sincere gratitude to all mentioned above. Without their contributions the field experiments described above could not be carried out.

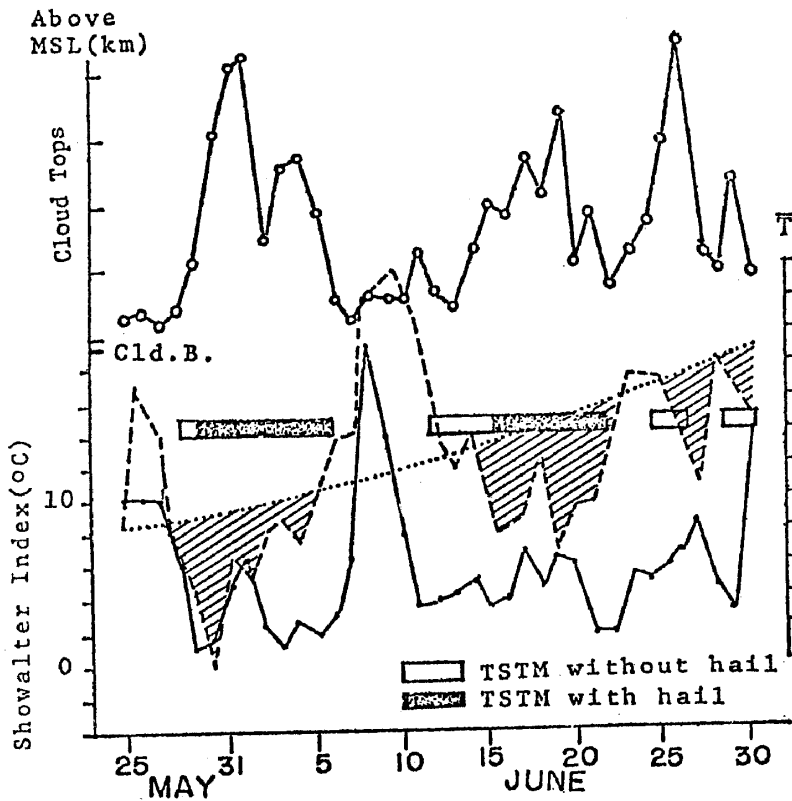


Figure 7. Changes of environmental conditions for the period of 25 May to 30 June, 1967. During this period hail occurred relatively frequently in the Kanto-Koshin District. The upper heavy solid line shows change in the computed cloud tops for 9. am sounding at Tateno. The dashed line gives change in mean 500mb temperature of Tateno and Wajima, the parts below shaded portions are below normal. The thin solid line gives change of Showalter Index at 9 am at Tateno.

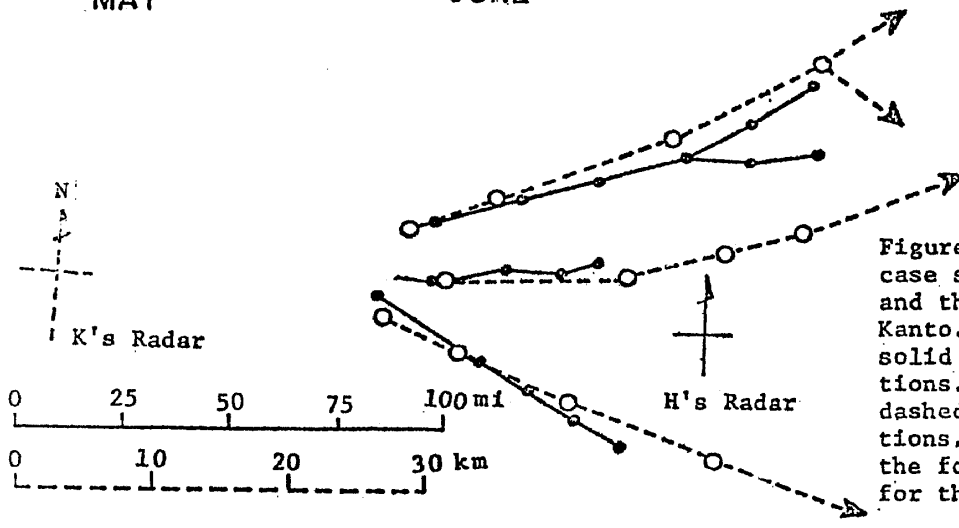
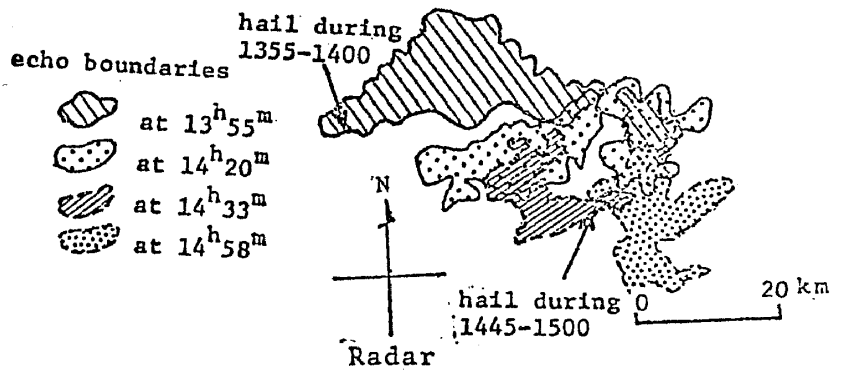


Figure 8. Comparison between a case shown by Hitschfeld (1960) and the July 19, 1970 storm in Kanto. The former is given by solid lines with 30 min. positions. The latter is given by dashed lines with 20 min. positions. Scales are in miles for the former, and in kilometers for the latter.

Figure 9. Traces of radar echoes of one of the hailstorms of 3 Aug. 1972. Note significant change in shape of the storm between 14^h20^m and 14^h33^m.



Abstract from the Report of the National Research Center
for Disaster Prevention No. 9, 1974

A Measurement of the Effectiveness-Temperature Relationship for the AgI Composite Developed by the NRCDP

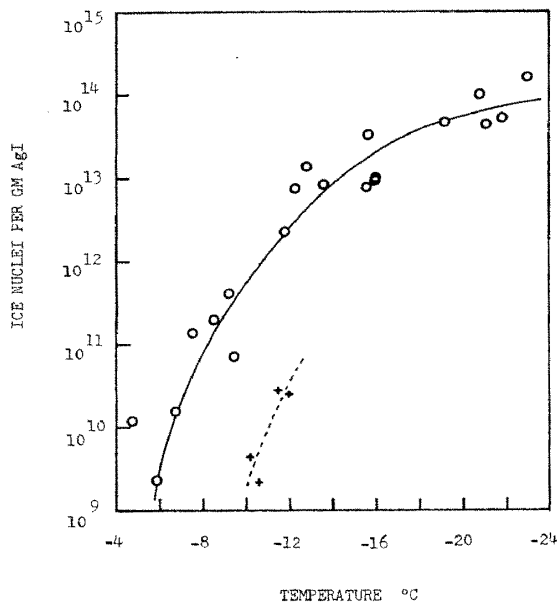
By

Tsuruhei Yagi

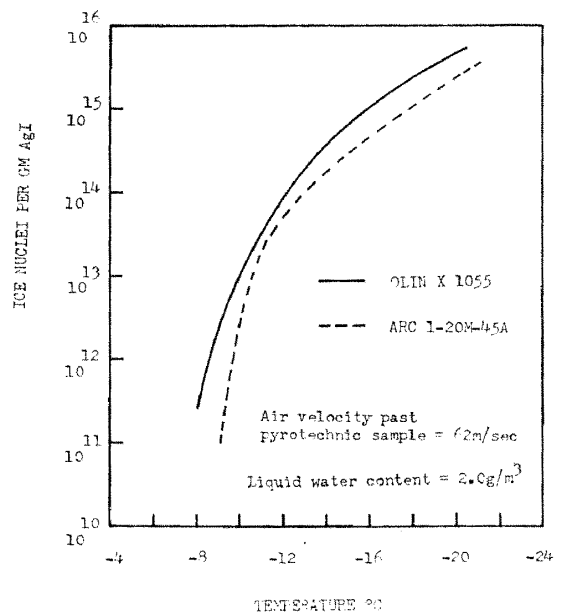
National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

The number of effective ice-nuclei per gram of AgI from the NRCDP silver iodide composite was measured by the sugar solution method. A small amount of the composite was burnt in a 1-m³ polyethylene bag, with a successive static dilution of a factor of 5,000 by a syringe. It was found that about 10¹² effective nuclei were produced at the temperature of -10°C, 10¹³ at -15°C and 5 × 10¹³ at -20°C, with a relatively weak dependency on temperature. This may suggest that the particles produced in a stagnant air are considerably larger in size than expected in the case of an in-flow combustion, which could prevent an effect of coagulation. The two-stage seeding rocket loading the composite with 200 g of AgI will, after the cutoff of the booster, introduce nuclei as exhaust into a cloud along its flight path. A higher efficiency could therefore be expected in case of actual cloud seeding than that obtained here in a calm state.



Solid line indicates the measured effectiveness against temperature with a static dilution. Dotted line shows the case without any dilution.



A measured value of J. Simpson *et al.* (1970) by dynamic dilution (compare with the author's).

付 録 4

気象調節研究長期計画(案), 第五稿

昭和45年9月30日

気象調節研究委員会

まえがき

われわれをとりまく大気環境を人工的に改変すること — たとえば干天に雨を降らせたり, 酷寒の水原を緑野に変えたりすることなど — ができたらとは昔から人間が抱いてきた夢であった。しかしながら, 大気現象そのものについての深い洞察と改変の手段を支える技術を欠いては所詮はこの願望も夢の領域を踏み出すことはできなかった。

だが, ルネッサンス以降諸科学の進展は人間の自然認識に徹底的な変革をもたらした。とくに20世紀に入ってから科学の発展速度は年を追って加速され, 大気現象の解明を目指す気象学の進展も例外ではない。かくて往時は一片の夢物語にすぎなかった気象の人工的改変も, いまや漸次人間の手のとどく領域に組み込まれようとしている。

一方, 近年における全世界の産業の急速なる発展, 人間の生活形態の変化は大気や海洋の大幅な汚染をもたらして, これはまた無意識裡の大気環境変革の因となっている。現在すでに世界の主要都市は生活の場としての適性を急速に失っており, このままに放置すれば極く近い将来, 全地球的規模で人間が生活の場を失うという事態にもたちいたりかねない危惧が増大している。

大気環境を人間生活にとって好適であるよう維持すること, また進んで好ましい方向に人工的に改変すること — これこそ気象調節の目的である — は今日人間に課せられている極めて切迫した課題であるといわなければならない。

現在すでに調節に成功している分野もある。たとえば過冷却水滴からなる霧層の消散や, ある種の雲に対する種まきによる増雨効果などがあげられよう。更に, 飛行場などの暖かい霧の消散, 降ひょう抑制などが成功の目安がつけかけており, 調節可能の分野は漸次拡大の一途をたどっている。そしてこれらが可能になったときの経済効果はかなり大きなものとなるであろう。

しかしながら, 気象調節の最大のねらいは大気環境を人間生活の場として快適な状態に維持ないしは改変することであろう。このため, 米国やソ連では連邦政府の強力な援助のもとに, いわゆるビッグサイエンスとして大がかりな研究体制が生まれ, 広範な分野における気象調節の成功を目指した探究が推進されている。また他の諸外国においても, それぞれの国情に応じて研究が進められており, いまや気象調節研究はそれ単独で大きな国際会議を開催するまでに成長しつつある。

このような情勢にかんがみ, かつは日本の風土・研究者層の厚さ・経済力等を勘案した上で, われわれはわが国の事情に即した気象調節研究の方針・計画・体制を早急に確立する必要を痛感するものである。

I 気象調節研究の対象

一口に気象調節といっても, その研究対象は極めて広範である。またそれを分類するにも, 現象のスケールによるもの, 研究の進展度合いによるものなどいろいろな方法が考えられる。しかし, ここでは研究計画立案上の便宜という観点から, それが現に行われている種類のものであるか, 今後着手すべきものであるかということに主眼をおいて次のような分類を試みた。

現在までに着手されている研究対象

- 小規模の気象調節
- 雲およびストーム系の調節

今後着手さるべき研究対象

- 大規模の気象調節
- 不注意による大気的人工変換

次にこれら各項目についてやや具体的にその内容にふれてみよう。

I 現在までに着手されている研究対象

ここで着手・未着手とは必ずしもわが国における情況のみを指すわけではなく、国際的な視点からの判断によるものとする。このような意味で現在までに研究に着手されている分野といえば、霜害防止や蒸発抑制等微気象の改変を目指した小規模の気象・気候の調節ならびに、人工降雨・降ひょう抑制等の雲およびストーム系の調節との二つにほぼ限定されよう。

(1) 小規模の気象調節

小規模の気象調節は農作物の被害を減少させるために実施されるようになった類が多く、そのなかには霜害防止法や防風林のように古い歴史を持っているものがある。

A 霜害防止法

農作物の霜害を防ぐ一つの手段は夜間の下層大気の冷却をやわらげることである。このため、①物を燃焼して熱を発生させる、②人工的に風をおこして空気層に上下攪拌をおこす、③作物体上に物を被覆して放射冷却をゆるめる、④あるいは固形物の代りに煙で被覆する、などの方法が昔から実施されてきた。これらの各方法はいずれもある程度の効果があることが認められており、一部実用化もされている。

B 防風林等による気象調節

防風林や防風垣によって農作物の風害を防ぐということにかなり長い歴史をもっている。従って、これらの風速減殺効果や温度・湿度環境の改変効果に関する研究も数多く行われてきた。

また、北海道や東北地方の沿岸部では海岸防風林によって海霧の侵入防止を図っており、これを防霧林と称している。1950年から4年間、北大低温研を中心とした防霧林に関する総合研究が行われ、防霧林の霧粒捕捉効果や乱流効果・温度効果などが解析されている。

C 蒸発抑制

わが国では主として水田の水溫調節の目的で、諸外国ではダムや貯水池の水量減少防止の目的で実施されてきた。いずれも、水面に高級アルコールを散布して単分子膜を形成させるという方法がとられているが、効果の判定までには、まだ問題がかなり残っているようである。

D 融雪促進

農作業の開始を早めるため、あるいは水利用の効率を高めるために融雪を促進する方法が早くから行われている。主としてカーボンブラックなどを散布してアルベドを小さくする方法がとられているが10～20日の促進効果があるようである。

以上例示した事項は、いずれも自然(屋外)の環境調節であるが、小規模気象調節にはこれらのほかに全く性格の異なった次のような分野もある。

E 温室・建造物内の気象調節

ガラス室・ビニールハウスなどの環境制御は現在施設園芸農業の中心課題の一つであり、また建造物内の気象調節は製品の貯蔵や生活環境の改善のため建築学にとってきわめて重要な問題になっている。

このような、いわば閉じられた小空間の環境調節もやはり気象調節の一分野であり、それ自体としては極めて重要である。しかし、ここでは気象調節を主として自然(屋外)のそれを指すことに限定して、

以下研究の対象としては屋内のそれは論議外におくことにする。

さて、この分野を除外した小規模気象調節を考察するとき、それらの基本となっているものは接地境界層におけるエネルギー変換の改変であることがわかる。従って、境界層におけるエネルギー変換の様相そのものについての基礎研究の充実が即小規模気象調節の効率化に結びつくことを知るのである。

(2) 雲およびストーム系の調節

降水調節・霧の消散・降ひょう抑制等現在までに試みられている気象調節の問題は大部分がこの範疇に含まれており、今後も当分の間は研究の中心となる分野である。

A 霧の消散

今まで手がけられているのは飛行場の滑走路のような極く限られた場所の霧の消散であって、スケールの上からいえば前節の小規模気象調節のなかにも含めうるものである。しかも現在成功しているのは過冷却霧の消散であって、ドライアイス・沃化銀又は液体プロパンなどを種まきして微水滴として地上に落下させるという方法がとられている。

しかしながら、わが国では過冷却霧の発生回数は極く一部の地帯を除いてあまり多くないので、実用性の観点からはむしろ温かい霧の消散の方が問題である。温かい霧に対しては塩の噴霧法やプロパンガスなどによる下層からの加熱法、あるいは上空からの散水法などが試みられ部分的に成功はしているが、なかなか実用的消散法として確立されるまでは至らない。最近、アメリカではこれらと全く異なり、電気的あるいは化学的方法で霧粒同志の併合を促進し大気中の霧粒数を減らそうという研究が進められている。今後の航空運輸の発展を考えると、このような飛行場における温かい霧の消散方法の研究は更に推進されなければならない。

霧の問題は、他に北日本太平洋近海上や瀬戸内海における海霧や山間地の山霧なども無視できない。前者はしばしば海難をひきおこすし、後者は高速道路の発展にともなって問題化しつつある。これらに対する対応策も十分に進められねばならない。

B 降水の調節

1946年秋、LangmuirとSchaeferとによるCloud seedingの成功は気象調節研究の一つのエポックを画した事件であった。その直後から世界各国で人工降雨の野外実験が盛んに行われるようになり、わが国でも昭和22年秋早くも実験が開始され26年からは本格化した。そして27年初頭には、電力会社と大学気象学教室と气象台との間で研究連絡会が設立され2～3年の間は非常に熱心に実験的研究が進められた。

しかしながら、研究者の興味は漸次人工降雨そのものよりもそこから投げかけられた雲物理学的問題の探究へと向けられ、人工降雨研究は中途半端のままいつしか下火になってしまった。昭和36年度から5年計画で科学技術庁の委託により総合研究も行われ、学術的には意味のある結果も生み出されているが、これも本格的実験に入る前に期限を迎え研究費が打切りになってしまった為、問題提起の段階で終っている。現在わが国では僅か2・3か所で実用実験が継続されているのみで、学術的研究は殆んど実施されていない。

アメリカでは降水量増加に関する研究はいまお頗る盛んである。それらは①冬季に山岳地帯の降雨量を増加しようとするもの、②夏季の降水量増加を目的とするもの、③降水分布を人工的に調節しようとするもの、などに分類できる。ソ連でも各地で実験が継続されているようである。

わが国でもこれらの課題を究明しなければならない必要性は少しも変っていない筈である。研究者の側も、また資金を出す側ももっと長期的な視野にたつて継続的に努力をすることがのぞまれる。そしてこの面の研究が再開されるとすれば、現段階では以下のような課題があげられよう。

a 氷晶核について

- a - 1 核形成の機構
- a - 2 核化物質の探索
- a - 3 自然氷晶核物質の空間密度
- a - 4 雲中の氷晶数と氷晶核数との関係
- b 氷晶核による過冷却雲の氷晶化およびこれに続く過程の解明
 - b - 1 数値実験
 - b - 2 室内実験
 - b - 3 野外実験
- c 長期種まき実験と統計的判定法の確立
- C 降ひょう抑制

降ひょう抑制は人工降雨について実用化の日程にのせられようとしている課題であり、すでにソ連やユーゴでは実用化の段階に入っていると伝えられている。アメリカでは降ひょう抑制のためのオペレーションこそあまり行われていないが、それを目標にした基礎研究は極めて活発に行われている。

降ひょう抑制は積乱雲制御の一つであり、電光抑制や集中豪雨抑制あるいは人工降雨等とも関連するところが多い。また降ひょうという現象は局地的スケールのものであるので、抑制活動が周囲気象場に及ぼす波及効果はほとんどないと考えられる。このような理由から、比較的着手しやすい課題であり、防災センターが最初の研究対象として選定した所以でもある。

降ひょう抑制研究においては、まず第1に大切なことは降ひょうの正確な予想である。そのためには積乱雲の発達・移動やひょうの生成に関する機構が明らかでなければならない。このような基礎研究の成果の上に立脚して、确实安全な抑制手段の開発・研究が結実することをのぞむものである。

D 電光抑制

アメリカの森林では落雷のための火災が多く、山火事の原因の半分以上を占めているといわれる。このため、種まきによる雷雲抑制の可能性が提案されると、営林局では直ちに抑制のための実験を開始した。この実験は、Project Skyfire と呼ばれ1952年に発足し現在もなお継続している息の長い仕事である。沃化銀の種まきによって降水を早く始めさせる。またより低い高度で降り出させることによって雷雲の成長を抑えようというものである。最近5か年の成果では種まきによって、しない場合にくらべ落雷が平均33%少くなるという報告もあるが、まだ決定的な結論は得られていない。

他方、ESSA研究所では、金属でコーティングしたナイロン針（チャフという）を多数雷雲中に散布して電場の抑制を試みている。1965年の予備実験では、散布後5～10分してコロナ放電が発生して電場が弱まったことが認められている。

このように電光抑制についても若干の研究はあるが、そもそも雷雲の帯電機構は大気現象のなかでも最も難解なところとされているだけに、この分野の研究計画に当っては帯電現象の基礎問題の解決にかなりの重点を置かなければならないであろう。

E 集中豪雨（雪）抑制

集中豪雨は局地的に大きな被害をひきおこす現象として近年とみに注目を浴びているが、諸外国ではいまのところ抑制研究の対象とはなっていない。

集中豪雨は、現象そのものについての知識がまだ貧弱であり、予報も極めて困難である。最近、気象研究所では西九州を舞台として集中豪雨のメカニズム解明のための特別観測に着手して予報精度の向上に努めており、その成果が期待される。

積乱雲を制御して集中豪雨による被害を軽減するには、①積乱雲を弱めて水蒸気の凝結量を減少させる、②集中豪雨の区域を他へ移す、③降雨域を拡げて集中性を緩和する、等の方式が考えられるが、いずれにせよ現段階では現象そのもののより一層の解明が先行しなければならない。

暖候期の集中豪雨に対して、寒候期には裏日本地帯がしばしば集中豪雪に見舞われる。近年、気象研究所では北陸地方の豪雪機構について特別観測を実施した。また北大気象学教室は石狩平野に侵入してくる雲系からの降雪機構についての詳しい観測を行っており、裏日本豪雪の機構も漸次解明されつつある。従って、今後一層特別観測を積みあげて機構の解明に努力するならば、集中豪雨と違って、極く近い将来に抑制実験にとりかかりうる可能性が大きい分野である。

F 台風抑制

台風災害はわが国の自然災害のなかでは最も激烈かつ大規模な被害を与える災害である。それだけに、この防除のための方策は諸方面から真剣に講ぜられているのであり、またわが国で気象調節の研究に着手する以上、台風抑制問題を避けて通ることはできない。しかしながら、台風そのものについての基本的知識の不満足さ、この分野における研究者層の薄さ、研究装備の貧困さ等から考えると、わが国でいま直ちに台風抑制のための実験活動に入ることは時期尚早といわねばならない。

一方、台風とならぶ擾乱ハリケーンについてのアメリカの対処の仕方をみると、ここではすでに1962年にハリケーン抑制を目標にしたProject Stormfuryが発足している。この研究はESSAと海軍・空軍との共同事業であり、ハリケーンの眼の周囲の環状積乱雲への沃化銀種まきによって風速の減少効果をねらっているものである。1969年8月18日・20日の両日、ハリケーンDebbieに対してそれぞれ2時間おきに5回ずつ実施された種まきの結果によると、18日には水面上3,600mにおける最大風速が182 km/hrから126 km/hrへ、20日には同じく183 km/hrから156 km/hrへ減少したという。現在のところ、このような変化が確実に種まきによる効果であるか否かを確認するに至っていないが、研究の一步前進であることは疑えない。

アメリカではこのような大規模な抑制実験を進めてはいるが、ハリケーン抑制研究にとって最も緊急なことはハリケーンを発生から消滅まで詳細に継続観測することであるという考え方をとっており、そのための研究が重視されている。

わが国で台風抑制の研究に着手する際には、このアメリカにおけるハリケーン抑制研究の方針ならびに成果が教訓として活用されるべきである。また、できるだけ早く抑制研究にとりかかるためには、まず専用の観測用飛行機を備えるとか、船舶や島を利用して大洋上に臨時観測所を設けるなどして、台風の研究観測態勢の飛躍的な増加をはかることが先決である。

2 今後着手すべき研究対象

(1) 大規模な気象調節

大規模な気象調節としては、たとえば河川の流路を変えたり海中にダムを造って海流を改変したりあるいは大きな湖を造成したりして、広域の気候を改造するというような計画がアイデアとして提出されたことはあるが、いずれも科学的な検討にいたらぬ間に立消えになっている。このような大規模気象調節になると、その波及効果は当然グローバルな大気の動きにまで及ぶと考えなければならないので、大気の動きのメカニズムに対する基本的知識が必ずしも十分ではない現在、軽卒に調節のための活動に入るべきでないことはもちろんである。

しかしながら、気象調節研究の終局の目的は全地球的規模における気象・気候の改良の可能性の検討とその実現にあると考えられるので、このような大規模気象調節の研究ができるだけ早く着手できるよう、その基盤の整備に努力すべきである。

現在、WMOはworld weather watch (W.W.W.)を、またWMOとICSUとはGlobal Atmospheric Research Program (GARP) を実施中であり、これらは全世界的規模での気象観測網の充実によって豊富なデータを獲得して、大気の動きのメカニズムについての基本的知識の増強を図ろうとするものである。大規模気象調節の研究のためにはこのような仕事のより一層

の増強が必須条件であり、わが国においてはこれらに積極的に参加し協力する姿勢を一段と高めることが大切である。

現段階では地球の規模の気候又は大気大循環に、予想される変化を人工的にひきおこす方法はない。しかしこのことは将来とも巨大な大気系に反応をおこさせるに足るじょう乱をひきおこし得ないことを意味するものではない。上述のような基礎研究がより積極的に展開されるならば必ずやその糸口は発見できるであろう。

この際、大規模気象調節研究の基礎として米国科学院の気象調節研究特別委員会が次の三課題の遂行を特に重要視していることは大きな参考になるであろう。

A 自然の気候変化に関する包括的な理論の確立

過去の気候変動のパターンなどについては徐々に解明されているが、現在の気候状態は比較的安定なものなのか又は急変しうるものなのかという疑問に対する解明が急がれている。気候変動に関する適切な理解はこのような問題に対して示唆を与えるであろう。

B 大気大循環の理論的シミュレーション

全地球的大気運動の理論的シミュレーションは気候理論の考査の一方法であると共に、天気や大気循環の大規模な特徴の改変に関する提案を考査する最も有望な方法であると考えられる。そこで高速度計算機による数値積分のために、大気循環の理論的モデルをより一層発展させることに力を傾注すべきである。ただし、このためには二つの障害 — 不適当な計算機と世界的資料の不足 — を克服しなければならない。

C 地表面と大気境界層におけるエネルギー交換についての研究

多くの気候改変の計画が地表面の特徴を機械的に変更することに基礎をおいているにもかかわらず、大気対地面および大気対海洋の境界面における相互作用についての認識が不十分であることは致命的な欠陥となる。このため境界層におけるエネルギー交換についての研究は一層進められなければならない。

(2) 不注意による気象の人工変化

現在全世界的に進行している大気環境の汚染は極めて深刻なものである。しかも、燃料の利用・都市の建設・航空機の飛行・ロケットの発射というような文化的活動は今後なお指数的に増加してゆくことが予想されるので、CO₂増加による気候の温暖化や都市を中心とした広域の大気汚染、中間圏や熱圏の汚染等の問題がますます重要になってゆくであろう。そしてこれらが世界的規模において現在の気象・気候にどのような変化をもたらすか全く予測がつかない状態にあるので、これに対処する術もない。

われわれはこのような問題についての基本的知識を早急に充実させなければならない状況におかれている。更に、これらの知識を活用して、このような環境汚染が結果として無意図的に気象をどのような方向にどの程度まで変えてゆくかを的確に予測しなければならない。また、その変化を好ましい方向に誘導するためには如何なる手段を講じたらよいかを早急にさぐり出すことが大きな任務として課せられているといえよう。

II 気象調節研究の体制について

わが国の気象研究者の間には、従来米国やソ連の研究者達にくらべて気象調節研究を不当に敬遠もしくは軽視してきたきらいがある。このため人工降雨研究を除いてはこの分野での研究経験がほとんどないといっても過言でない。このような状況下で研究の体制作りをするには幾多の困難が予想されるが、大事なことはまず第1に気象学界が気象調節研究の重要性を認識し、これと真正面から取り組む姿勢をとることであろう。

わが国の気象学研究の水準は国際的にみてかなり高いものである。しかしながらその割には研究者の層は厚くない。しかもこの手薄な陣営から海外に流出する研究者が後を絶たない状態にある。

気象調節という気象学の新しい分野を開発するに当っては、この様な事情は早急に改善されなければならない。そしてそのためには次のような措置を講ずることが必要である。

- (1) 大学等教育機関における気象学講座を飛躍的に強化して、研究者を養成し層の増大をはかる。
- (2) 気象研究所・国立防災科学技術センター等の国公立研究機関の定員を大幅に増員し、国内で養成された研究者の収容力の増加をはかる。

以上2項目は気象研究全体に関する問題であり、日本気象学会策定の気象学長期計画案(1965年)に述べられてあるとおりでである。とくに、気象調節研究の促進をはかるためには、更に次の処置を講ずる必要がある。

- (3) 気象研究機関における気象調節研究用設備・備品の格段の充実をはかること。

気象調節研究は問題に応じて多くの研究機関ならびに大学において実施されることがのぞましいが、わが国の研究機関はそのための施設が著しく欠乏している。著しく高価なもの、大型なもの等で一か所があればよい施設については、いずれか適当な研究機関に設置して研究者の共用に供するようにする。大型電子計算機・大型風洞・大型Cloud chamberなどがこのような共同設備の実例として考えられよう。

- (4) 各研究機関(大学を含む)はそれぞれ実情に応じて研究課題を選定して独自に研究を進めるものとするが、これらのうち必要なものについては関係研究機関および大学の研究者からなる合同プロジェクトとして発足させる。

- (5) 気象調節研究の推進をはかるため、関係研究機関の担当者および学識経験者からなる委員会を設置する。この委員会には事務局を付置し、諸機関における研究の計画ならびに実施上の連絡調整の役に当る。

- (6) 研究の国際性にかんがみ、諸外国との情報交換や共同研究の実施などについて十分なる配慮をすることが大切である。この際上記委員会事務局がその窓口になれば便利であろう。

気象調節研究の各プロジェクトは、いままでのわが国の気象研究予算と比べて極めて多額の経費を要することが多いであろう。また、効果の判定までには長期にわたる実験の繰返しによる慎重な検討が必要である。恐らくは一つ一つの研究が10年あるいはそれ以上にわたるかなり長期のものになるであろう。従って、徒らに目前の功をあせって大局を見誤ることのないように運営することが特に重要である。

また気象調節研究は気象研究全体の正常な発展にささえられてはじめて開花するものであるから、これが推進をはかるためには気象学全体に対する投資を格段に増強することが大切であることを強調しておく。

Ⅲ 気象調節に関連する諸問題

気象調節研究を推進するに当ってはいろいろと考慮しておかなければならない問題が多い。すなわち、研究の基礎となる気象学の進歩についてはもちろんのこと、気象学以外の問題としても法律・経済・社会等多岐な範囲にわたって考慮しておかなければならない。以下これらについてふれてみよう。

1 関連した気象学研究

気象調節を直接の目的としたものではないが、その成果がこの分野の進歩に著しく貢献すると考えられる気象学的研究に対しては、それらが正常かつ急速に展開されるよう配慮しなければならない。

気象調節研究の進展のためには、大気中の物理的プロセス、とくに熱的・力学的相互作用が解明されなければならないが、そのためにはたとえば、

- a) 降水機構・雲・霧に関する物理気象学的研究
- b) 凝結の潜熱放出の大気運動に及ぼす影響の研究
- c) 大気放射、大気と海洋・地表面との相互作用についての研究

d) 大気じょう乱(台風・積乱雲等)の構造の研究
などが格段に進展される必要がある。またこれらを研究するための測定機器の開発も極めて大切である。

2 気象学以外の諸問題

(1) 経済的問題

気象調節に関連した経済的問題としては、

- a) 気象調節によって受ける利益や損失をどう評価するか、
- b) それらの利害をどう配分するか

というようなことが漸次大きな問題となってくると思われる。

例えば、人工降雨の場合を考えても、これによって利益を受ける側と損害を蒙る側とがあるであろう。この時損害に対する評価はどのようにするか、またその損害は補償さるべきものであるかどうか。反対に利益をどう評価し、利得に対する負担をどう考えたらよいか、というようなことも当然大きな問題となるであろう。

(2) 社会的問題

たとえば、

a) 気象調節のための実験やオペレーションが頻繁に行われるようになり、特に大量の種まきが行われると種まきされた物質がかえって汚染源にならないかどうかというような問題がある。

気象調節は人間にとって好ましいように気象を改良することを目的としているのであるから、その手段がかえって大気環境の悪化をもたらすとすれば大きな社会問題である。そのような可能性があるかどうかは事前に十分に検討されなければならない。

b) 気象調節にはすべての人が賛成するかどうか。ものによっては反対もあろう。もしかなり強力な反対があった時、これにどう対処すべきか、というような問題もいずれは解決をしておかなければならないであろう。

3) 法律的問題

わが国では現在、気象調節に関連した法律は制定されていない。しかしながら、気象調節のための活動がさかんになると、たとえば、

a) 野外実験が原因となって被害が発生するとか、あるいはその疑いがかけられるというような事態が起ることもあろう。そのときの責任の所在や補償問題をどう解決するか。

b) 気象調節を私的団体が営利事業として行うことを認めるかどうか。

というような問題に対して立法措置による法律的規制をする必要が生じてくるであろう。

4) 国際的問題

気象現象は国境をこえて発現するので、その改変をねらう気象調節の波及効果もまた国境をこえる場合がある。そこには当然、利害の相反することも生じうるので気象調節活動を開始するに当っては国際間の協議を前提としなければならないこともある。特に大規模な気象調節においてはそうである。

国際問題としては、上述のようなトラブルを未然に防ぐための処置に関する問題のほかに、研究協力問題がある。気象調節は課題の性格上研究の国際的協力が極めて大切で、うまく協力が行われるか否かは研究の進展上の重要な鍵の一つでもある。

(5) 生態系への影響の問題

現在、地球上においては現在の環境に順応したところで人間をも含めたひとつの生態系が成立している。ところが、将来大規模な気象調節が成功するとそれは地上の環境に著しい変化をもたらすことになるであろう。そしてそのことは現在の生態系の平衡関係に重大な作用を及ぼすことになるかもしれない。もしこのような作用があるとすればそれは人間にとって終局的に好ましいものであるのか否か、これを的確に予測することが極めて大切なことである。大規模気象調節に際しては、この問題の解決を前提と

しなければ実施は不可能である。

以上、気象調節活動が進展するにつれて提起されるであろう諸問題の一面を概観してみた。それらはすべて今直ちに解決を迫られているわけではないが、遅かれ早かれ問題視されるようになることは間違いない。従っていやしくも気象調節に着手するからには、このような問題が存在することを心得ておかなければならない事はもちろん、更に進んでこのような問題を解決するための努力をはじめることが必要であろう。

さきに、われわれは気象調節研究を推進するためには、研究の全体計画を審議するための委員会の発足が必要であることを提議した。この委員会を構成する関係機関の担当者および学識経験者は気象専門家が中心となることが考えられている。しかしながら研究が進展すると、気象学やその関連分野の専門家ばかりでなく、法律・経済・社会・生物学等の専門家を含めたもうひとつ別の総合委員会を発足させて、ここに述べたような気象調節に関連した諸問題の検討に当ることが必要となるであろう。

付 録 5

研究成果リスト

(口頭発表)

- 1) 小元敬男・米谷恒春(1970): 降ひょう予報について(序報). 昭和45年度日本気象学会秋季大会.
- 2) 小元敬男(1970): 降ひょうと地形の関係. 昭和45年度日本気象学会秋季大会.
- 3) 八木鶴平(1971): 沃化銀コンポジットの氷晶核発生について. 昭和46年度日本気象学会春季大会.
- 4) 小元敬男・米谷恒春(1971): 関東地方の降雹予報. 昭和46年度日本農業気象学会大会.
- 5) 小沢行雄他(1971): 防災センターの降雹抑制実験について. 昭和46年度日本気象学会春季大会.
- 6) 小元敬男・八木鶴平(1971): 降水を伴う対流セル群の行動について. 昭和46年度日本気象学会春季大会.
- 7) 小元敬男・米谷恒春(1971): 降ひょう予報について(第2報). 昭和46年度日本気象学会春季大会.
- 8) 米谷恒春(1972): 雷雨の消長と台風の進路. 昭和47年度日本気象学会春季講演会.
- 9) 米谷恒春(1972): 雷雨と下層大気. 昭和47年度日本気象学会春季大会.
- 10) 小元敬男(1972): 簡単な記録計による降ひょう分布調査. 昭和47年度日本気象学会秋季大会.
- 11) 小元敬男・米谷恒春(1973): 降ひょう日の大気垂直構造. 昭和48年度日本気象学会春季大会.
- 12) 小元敬男・清野 豁・八木鶴平(1973): 北関東における降ひょう系の行動. 昭和48年度日本気象学会春季大会.
- 13) 八木鶴平・小元敬男(1974): 北関東における積乱雲の構造と行動, その1. 昭和49年度日本気象学会春季大会.
- 14) 清野 豁・小元敬男(1974): 北関東における積乱雲の構造と行動, その2. 昭和49年度日本気象学会春季大会.
- 15) 小元敬男・米谷恒春(1974): 簡単な積雲対流モデルによる面積雨量予報. 昭和49年度日本気象学会春季大会.
- 16) 八木鶴平・清野 豁・小元敬男(1974): 北関東における積乱雲の構造と行動, その3. 昭和49年度日本気象学会秋季大会.
- 17) 小元敬男・八木鶴平・米谷恒春・清野 豁(1975): 群馬県における降ひょう分布観測. 昭和50年度日本気象学会春季大会.

(論文)

- 1) Y. Ozawa and Y. Omoto (1971): On the NRCDP Rocket System for Cloud Modification Experiment. The Seminar of Cumulonimbus Modification of Tropical Nature, Miami USA, Feb. 15-19, 1971.
- 2) Y. Ozawa and Y. Omoto (1973): Preliminary Result of Experiments using Seeding Rockets with Combustible Shells. Inter-

- national Conference on Weather Modification, Tashkent USSR, Oct. 1-7, 1973, WMO NO. 399, 363-372.
- 3) Y. Omoto (1973): Hailstorms in Japan. International Conference on Weather Modification, Tashkent USSR, Oct. 1-7, 1973, WMO NO. 399, 207-216.
 - 4) 米谷恒春(1974): 北関東地方の雷雨発生日の気象安定度. 国立防災科学技術センター研究報告, 9, 47-53.
 - 5) 八木鶴平(1974): 静止空气中で燃焼させたよう化銀コンポジットの有効氷晶核数の測定. 国立防災科学技術センター研究報告, 9, 55-60.
 - 6) T. Yonetani (1975): Characteristics of Atmospheric Vertical Structure on Days with Thunderstorms in the Northern Kanto Plain. *J. Met. Soc. Japan*, 53, 139-148.
 - 7) 八木鶴平・清野 豁・小元敬男(1976): 北関東に豪雨およびひょう害をもたらした昭和47年8月2日の雷雨群のレーダーエコー解析. 国立防災科学技術センター研究報告, 14, 37-52.
 - 8) 清野 豁・小元敬男(1976): 1972年8月3日のひょう雲の構造と行動. 国立防災科学技術センター研究報告, 14, 53-63.
 - 9) 小元敬男・八木鶴平・清野 豁・米谷恒春(1978): 群馬県における降ひょう観測(1971~1975). 農業気象, 34, 17-21.
 - 10) 清野 豁・米谷恒春・八木鶴平(1978): 群馬県藤岡市における高層気象観測資料(1970~1972, 1974~1976). 防災科学技術研究資料, 32.
(調査・解説等)
 - 1) 寺田一彦(1968): 米国駆け足旅行—気象調節を中心として—. 防災科学技術, 5, 7-9.
 - 2) 小元敬男(1968): ひょう害とその対策. 防災科学技術, 6, 8-10.
 - 3) 小元敬男(1968): 気象および気候の人工変換—現状と問題点—. 農業気象, 23, 195-204.
 - 4) 小元敬男(1970): 降ひょうとその抑制. 電力と気象, 19, 24-36.
 - 5) 小元敬男(1970): 米国の気象調節. 防災科学技術, 13, 1-5.
 - 6) 八木鶴平(1970): 氷晶. 防災科学技術, 13, 6-7.
 - 7) 小沢行雄(1970): 雹を消すために. 防災科学技術, 14, 6-9.
 - 8) 小元敬男(1970): 米国およびソ連における気象調節研究. 天気, 17, 301-309.
 - 9) 小元敬男(1970): 米国とカナダの気象調節研究機関を訪れて. 農業気象, 26, 51-56.
 - 10) 小元敬男(1971): ひょう害と対策. 予防時報, 86, 30-35.
 - 11) 小元敬男(1971): 熱帯性積乱雲の気象調節. 防災科学技術, 19, 1-5.
 - 12) 小元敬男(1971): 人工制御. 気象研究ノート, No. 109, 164-174.