

## 降ひょう抑制とひょう研究の現状\*

小元敬男\*\*

## 1. まえがき

昨夏、水不足に悩まされた西日本で、人工降雨がいきなり本番の形で行なわれ、実際に雨が降った事例が二、三報道された。しかし、人工降雨が話題になるのはこのような時ばかりで、本格的な研究となると全く人気がなく、支援体制もない。この傾向は気象調節の研究全般についても見られる。この点、海外の事情は大いに異なる。多数の国で雲の種まき実験が行なわれており、基礎研究の重要性も認識されている。米国・ソ連など十指にあまる国では、実用的雲の種まき (operational seeding) も行なわれている。

米国では、20%前後の降雪量の増加に期待して、開発局 (Bureau of Reclamation) などがスポンサーとなり、ロッキー山脈やシエラネバダ山脈にかかる地形性雲に大規模なヨウ化銀の種まきを続けている。米国で雲の種まきを利用している地域は、人工降雨や降ひょう抑制の分も含めると日本の面積の二倍以上にもなる (第1表)。降ひょう抑制にしても、ここ10年来一貫して意欲的である。1972年に開始された降ひょう実験のナショナルプロジェクトは、当初の1975年までの計画をさらに5年間延長して、80年までとした。降ひょう抑制に限って言えば、世界の雲の種まきを行なっているのは約20ヶ国と見られる。ソ連のひょう害防護地域の総面積は400万haに達する (Battan, 1977)。スイスでは、イタリーとフランスの研究者も参加して大々的な降ひょう抑制実験が開始された。

以下に、最近の海外の降ひょう抑制活動とひょう雲の

第1表 米国で雲の種まきを実施しているプロジェクトの数および対象面積 (WMAB, 1978).

年度	プロジェクト数	総面積 (km <sup>2</sup> )
1972	—	220 200
1976	68	512 800
1977	88	673 400

構造とひょう形成・成長に関する研究を紹介してみたい。

## 2. 降ひょう抑制の方法と理論

ひょう雲に対する人類の挑戦の歴史は非常に古い。これについては、たとえば Morgan (1973) の報告が興味深く、古代の兵士が雷雲に矢を射かけている挿絵や、筒長7.5 m、口径約2 mの巨大なラッパ状のひょう砲の写真も掲載されている。このひょう砲は、19世紀末から20世紀初頭にかけて中欧諸国で盛んに使用されたらしい。同時代に既にロケットを使ったという報告もある (Abbé, 1902)。欧米の気象界の指導層が参集して「ひょう撃ちに関する国際会議」を何度か開いている。降ひょう防止はその後しばらく気象界の話題から消えていたのであるが、1950年頃から人工降雨ブームに刺激されて再び学界を賑わす話題となり、現在に至っている。雲中でTNTを爆発させるだけという前世紀と大差のない方法も、ブームの初期には雲の種まき法と共に使われていたが、1970年頃までにすっかり姿を消した。

今日行なわれている降ひょう抑制は、概念的に次の4種に大別できる (Dennis, 1977)。(1) ひょう粒の成長が過冷却水滴の付着によるところが極めて大きいところから、雲中の過冷却水滴をできるだけ氷結させてしまおう。ひょう粒が急速に成長する所の気温は $-30^{\circ}\text{C}$ 前後と考えられている (Dennis・Musil, 1973)。ふつう、過

\* A Review of Recent Hail Research and Hail Suppression Activities.

\*\* Y. Omoto 大阪府立大学農学部.

第2表 ソ連国内のひょう害保護地域の広さ  $A$  (単位 1000 ha) と被害減少率  $E$  (%) の推移 (Burtsev *et al.*, 1974より編集).

年	1968		1970		1972	
	A	E	A	E	A	E
コーカサス	785	77	960	70	986	63
アルメニア	500	—	520	80	721	70
アゼルバイジャン	86	82	240	51	320	100
タジク	160	—	220	76	320	94
ウズベク	—	—	152	81	243	92
グルジア	110	92	170	87	250	95
モルダビア	140	89	230	100	360	96
ウクライナ	47	67	100	93	110	100
グルジア (SBG, MSH)	460	67	460	93	600	76
計	2,288	78	3,052	81	3,910	87

冷却水滴は  $-40^{\circ}\text{C}$  層まで存在するが、氷晶核を大量に送り込むことによって、この高さを  $-20^{\circ}\text{C}$  か、せめて  $-25^{\circ}\text{C}$  まで引き下げることができればかなり抑制効果が期待できる (Dennis・Musil, 1973; English, 1973).

(2) 人工的にひょうの卵 (embryo) をたくさん作り、氷粒間の過冷却水滴の争奪をいっそう激しくする。これは、Iribarne・dePena (1962) が初めて提出した概念に基づいているが、ソ連では独自にこれを発展させた。Sulakvelidze *et al.* (1974) には  $R_a = R_n \cdot \sqrt{N_n / N_a}$  ( $R$  はひょう粒の平均直径、 $N$  は単位体積中のひょう粒数、 $n$  と  $a$  はそれぞれ自然状態と人工変換後の量を示す添字) の関係式が降ひょう抑制原理の説明に用いられている。

(3) ひょう雲の下の部分に凝結核を送り込んで雲粒を雨として降らせる。大田 (1970) の報告にも述べられている方法で、ソ連では今日でも食塩核を使っている。ただし、通常は (2) と併用、つまり雲の上層と下層に同時に種まきを行なう形を採ることが多い (大田, 1970; Lominadze *et al.*, 1974). (4) 落下する粒子に伴う下向きの力によって雲中の上昇流を弱める。雲の上から石灰粉やセメントの粉を撒く実験がかなり前から行なわれているが、最近では polymethyl-methacrylat という粉末性物質がテストされている (Khorgnani・Kalov, 1974).

上記の最後のアプローチは雲の力学の抑制実験としてはおもしろいかも知れないが、降ひょう抑制の目的に全く向いていないと考えられる。他の三つの概念についてもそれぞれ決め手を欠く点があり、今後も引き続き実験を要する。このところ、ひょう雲への種まきはかえって

降ひょう量を増すことにもなり兼ねないと主張する人達が出てきた (一般論として Atlas, 1976, 1977; Supercell storm について Browning・Foote, 1976; 大陸性対流雲について Paluch, 1978). 降ひょう量の分布と被害程度の分布はかなり良く似ており (小元・清野, 1978), こういった事が起こるとすれば非常に困った問題である。今までそのようなことでのトラブルは起こっていないが、種まきの効果を降ひょう状況 (降らなかつた場合も含めて) から知るのには極めて難しい。人工降雨以上に統計的判定が難しく思うられる。人為的に核粒子を送り込む場合、それがいかなる働きをするかを物理的ならびに観測によってしっかり見極めることが非常に重要である。

### 3. 海外の降ひょう抑制活動

ここで、少し気象学の問題から離れるが、海外の降ひょう抑制活動の近況を述べてみる。Weis の調査によると、1950 年以来降ひょう実験を行なった国は 22 あり (WMAB, 1978), 日本は其中で既に止めてしまった数少ない国の一つである。次に、これらを 4 グループに分け活動状況の一端を紹介する。

#### 3.1 ソ連および東欧諸国

世界的降ひょう抑制ブームにあつて常にその中心的存在のソ連では、現在もなお、ひょう害保護地域は増え続けている。この国での降ひょう防止活動による被害金額の減少率は、地区、報告者、年などによって大分違うことがあるが、60~80% というのが今日の妥当な線と言えよう。活動は国内 9 地区 (8 共和国) で行なわれ、1976

第3表 各国の降ひょう抑制用種まきロケットおよび砲弾の特性 (ソ連のデータは Bibilashvili *et al.*, 1974; ユーゴスラビアとフランスのは Federer, 1977; 日本のは Ozawa・Omoto, 1974; アメリカのは Sanborn *et al.*, 1976による)。なお, 1) は Federer のデータから 2) は Bibilashvili *et al.* の図より推定 3) は AgI の他, 助燃剤の重量を含む (内 AgI は200g と考えられる) 4) は手持の写真より推定 5) はロケット名ではなく使用プロジェクトの名称である。

名称	国名	全長 (mm)	直径 (mm)	重量 (g)	核種量 (g)	最高飛し よう高度 (m)	備考
PGN	ソビエト	4,800	82.5	4,500	170	4,200	ロケット 機体爆砕
Alazan-M	"	1,315	82.5	9,800	1,100	8,700	" "
Alazan-IM	"	845	82.5	6,500	1,100	4,600	" "
Oblako	"	2,150	125	(16,000) <sup>1)</sup>	5,200	8,000	" パラシュート降下
Elbrus-2	"	530 <sup>2)</sup>	100	1,2250	15	11,300	砲弾 爆砕
Elbrus-3	"	—	100	24,300	—	14,000	" "
NRCDP	日本	785	78.5	3,000	200	6,000	ロケット 機体燃焼
Sako-6	ユーゴ	800	80	5,000	400 <sup>3)</sup>	6,000	" 機体爆砕
(ACMG) <sup>5)</sup>	フランス	(1,000)	(100) <sup>4)</sup>	—	—	2,500	"
(NHRE) <sup>5)</sup>	アメリカ	215	42	215	97	1,980	"

年の時点で被保護地域は約 400 万 ha に達した (Battan, 1977)。第 2 表にソ連国内の降ひょう防止地域の資料をまとめて示した。

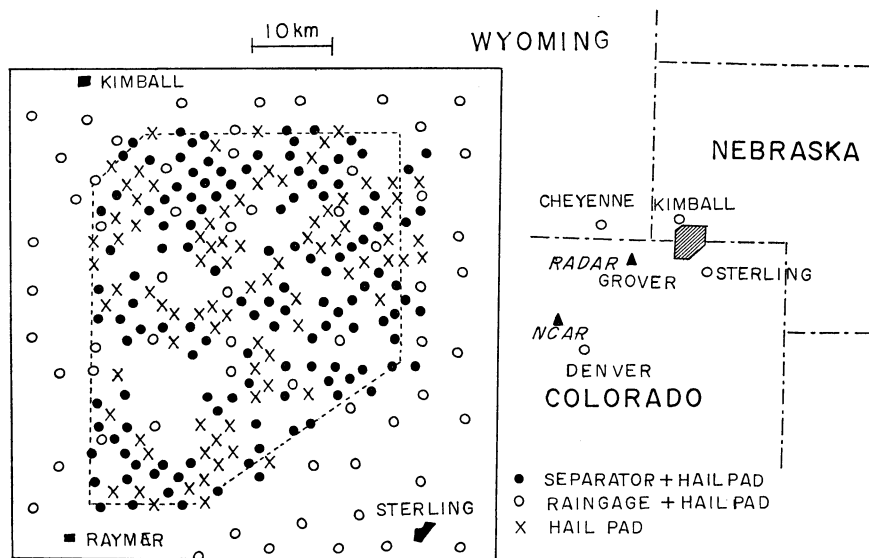
ソ連の降ひょう抑制活動の現地視察報告はたくさんあるが、数年前に「天気」に掲載された大田 (1970) と田中 (1970) の報告はかなり詳しく同国の抑制活動を紹介しており、その後とくに目立った変化もないので、参考に読んでいただきたい。米気象学会の会報には Battan (1969, 1977) と Marwitz (1973b) がさらに詳細な視察報告を書いている。ソ連の気象関係者による同国における最近の降ひょう抑制のとりまとめ的な報告としては、Sulakvelidze *et al.* (1974), Burtsev *et al.* (1974), Lominadze *et al.* (1974) がある。少し古い、Sulakvelidze *et al.* (1967) もよく引用される文献である。

ソ連式降ひょう抑制の特色は、何と言っても規模の大きさであろう。かなり大型の種まきロケットを何十発もひょう雲に打ち込む。その発射場や実験本部の人数も多い。たとえば、モルダビアの 73 万 ha の防護地区で雲の種まきに従事しているのは約 700 人 (内パートタイムが 300 人) である。過去のデータは、1000 ha 増すごとに一人の割合で作業員が増えていることを示している。このことから、Battan (1977) は、1976 年現在ソビエトで降ひょう抑制の雲の種まきに従事している人数は 3500 ~ 5000 と推定した。ここでの抑制方式が 1960 年代の中頃から余り変わっていないこと、Battan (1977) が以前に訪問した時 (Battan, 1969) より実験本部やその周辺の

道路・建物がかなり良くなっていること、被保護地域が年々広がっていることなどから見て、ソ連では降ひょう抑制が順調に行なわれているように思われる。なお、第 3 表にソ連以外のものも含めて降ひょう抑制用ロケットの性能等を示した。

気象学的な話題としては、AgI と PbI<sub>2</sub> がそれぞれ値段・毒性の点で問題があり、これらに代わる氷晶核物質として日本がパテントを持っているという AAC (Acetylacetonate copper) が近ごろ注目されている (Battan, 1977) ことが挙げられよう。一時注目されていた CuS は、期待ほどでなかったのかも知れない。予報精度の向上とかひょう雲の確認方法の改良に関する研究は今日も盛んで、レーダと高層気象観測から得られる種々のパラメータの組合法がたくさん発表されている。何ヶ所かで建設中の管の巨大な垂直風洞 (Marwitz, 1973b; 田中, 1970) を使った実験の結果はまだあまり発表されていない。

東欧諸国のユーゴスラビア、ブルガリア、ルーマニア、ハンガリーおよびチェコスロバキアでは、ソ連とはほぼ同じ方式で降ひょう抑制をやっている。中でも歴史の古さと規模の大きさで抜き出ているのはユーゴスラビアで、セルビア地方の 120 万 ha で降ひょう防止に成功していると伝えられている。約 10ヶ所の実験基地にはそれぞれ波長 3 cm と 10 cm のレーダを備え、自国製の種まきロケットを使用している。たびたびモデルチェンジをやっているようだが (Federer, 1977)、第 3 表には 1974



第1図 米国降ひょう実験 (NHRE), 1974年の観測網 (Dye et al., 1976から作図)

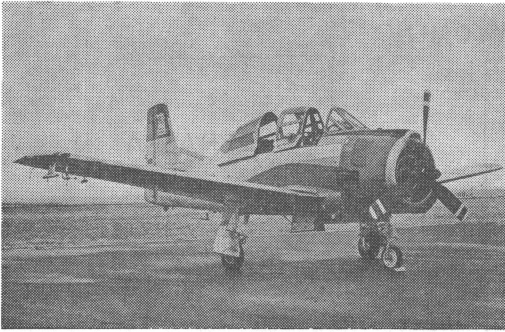
年に使用された機種種のデータを掲げた。一昨年同国の関係者が来日して7台のレーダを購入した折の話によると、セルビア地方では年間平均3千億円ものひょう害があったが、抑制活動が本格的になってからは約1/10に減ったそうだ。ブルガリアでは実用区と実験区を合わせると6000 km<sup>2</sup>を対象に降ひょう抑制活動を行なっており、良い成果を得ているらしい (Krastanov・Stanchev, 1974)。

### 3.2 米国およびカナダ

米国では、1960年の中頃まで研究あるいは営利目的のひょう雲への種まきが競って行なわれていた。今日も幾つかの民間会社が実用的効果を看板にした雲の種まきをやっているが、フィールド研究のほうはコロラド州北東部に指定された実験場での実施に一本化されている。自由競争的な研究体制からナショナルプロジェクトへの移行は、ソ連の驚異的な成功に刺激されたものと見受けられる。1966年に南ダコタ州で行なわれた Project Hailswath が、ひょう実験ナショナルプロジェクト第1号である。現在の実験場では、1968年頃から予備観測が行なわれていた。当初このプロジェクトはNECHEと呼ばれ (小元, 1970 a), 1977年までの予定であったが、本実験開始とほぼ同時に名称が NHRE (National Hail Research Experiment) と改められ、程なく期間も1980年までと大幅に延長された。実験場は約1,600 km<sup>2</sup>で、雲の種まきや各種の気象観測が行なわれている (第1図)。

このプロジェクトは、ある科学的事実が見出されると、それを考慮に入れてフィールド計画を変更してゆくという方式を採っている。学問の進歩の点からみれば非常に能率の良いやり方であるが、統計的に効果を判定しようというグループにとっては有難くない方式である。そのせいでもあるまいが、Flueck・Mielke (1977)は、1953年以降世界で行なわれた15の主な降ひょう抑制プロジェクトのうち、米国以外のものが九つあり、その八つまでが米国における最長命のプロジェクトよりも実験継続期間が長いと指摘している。最近、NHREは以前にも増して物理的效果判定に力を入れている。当然、観測体制は強化されケーススタディに重点が置かれる。膨大な観測データを使つての研究であるから、後出の引用文献から明らかなように、一つの論文が何人もの研究者達の共同作業として作成される。1978年度の研究計画をみると\*、いま進められている研究のほとんどがケーススタディあるいはこれにかなり近い研究である。昨年、同地を訪れた中村氏 (読売新聞)の話では、来年度はさらに観測を強化しケーススタディに力を入れるという。NHREの観測設備の中でとくに注目されるのに、T-28と称する観測機がある (第2図)。これは、南ダコタ鉱山工業大学が開発したひょう雲貫通観用に機体を強化し

\* NHRE Bimonthly Progress Report December 1977/January 1978.



第2図 ひょう雲貫通観測用T-28型機  
(Sand *et al.*, 1973).

て各種測器を整備した改造戦闘機である。ひょう雲内部で雲物理および力学的パラメータを直接測定するから、その構造の研究に非常に貴重なデータを提供している。

NHRE は 1972 年から 3 年間、いわゆる randomized seeding experiment を実施した。その成果は 5 巻、全 1635 頁のレポートとして関係者に配布された。その中の注目すべき結論の一つが、この間に行なわれた雲の種まき効果は降ひょう量ならびに雨量のいずれに対しても 0 (ゼロ) である (Crow *et al.*, 1976)、というものである。実測値として降ひょう量が種まき効果として 60% 増という値が出ているが、90% の信頼性で増加と判定するには 500% 増でなければならない (Long *et al.*, 1976)。なお、降ひょう量の値は separator と称する測器内で雨滴とひょう粒を分類して測る重量式降水量計で得られた。

カナダでは、アルバータ州南部でかなり長期にわたって、降ひょう観測研究とオペレーショナルなひょう雲の種まきが続けられている。近年ひょう雲の種まき効果確認のために randomized seeding が試みられたが、効果を信じて長期にわたってひょう雲の種まきを続けてきた農業関係者の圧力で中止を余儀なくされたとの事である。カナダの観測プロジェクトは非常に勝れたレーダと多数の降ひょう記録計を設置した観測網を持つとはいえず、わが国でも一ふんばりすれば実現可能な規模のものであるから、それができないのは残念である。

### 3.3 西欧諸国

フランスには今日三つのプロジェクトがあり、各々かなりの広域を対象に降ひょう抑制活動を行なっている (Federer, 1976)。その一つは、南フランスの約 7 万  $\text{km}^2$  と国境を越えたスペイン側の 2.5 万  $\text{km}^2$  を保護する (1974 年) ANLCFA である。フランス側だけで年平均 4 t 強のヨウ化銀を使用し、地上発煙法による種まきを行なっ

ている。第 2 のグループは、ACMG と呼ばれ、南西フランスで 9000  $\text{km}^2$  を対象にロケットによる雲の種まきを行なっている。両側に数本の簡単なランチャーを取り付けたマイクロバスが目的地に移動して発射する。ロケットはほぼ真上に発射されるらしい。到達高度約 2500 m の比較的小型のものである。第 3 のグループは、ACMG とほぼ同じメンバーが指導しているようだ。フランス東部のアルプスに近い地域の約 8000  $\text{km}^2$  を対象に、同じ方法で種まきをしている。この ACMG のグループは、2.8 km の格子間隔に 300 台の簡単な記録器 (hail pad) と 100 台の雨量計を設置した観測網を使って、ひょうと雨量分布の関係を研究している (Admirat, 1974)。

イタリアでは、1960 年代の中頃までは爆発法が盛んに用いられ、そのためのロケット Italiati を国外にもかなり輸出していた。今日はヨウ化銀による雲の種まき方法だけになったようだ。数年前までは降ひょう抑制活動のほとんどが農民と保険業者の手で行なわれたらしいが、現在は政府関係機関の研究者も相当熱心にこの問題に取り組んでいる。立体的に降ひょう状況を記録する hail cube (Vento, 1972)、風も測定できる hail wind sensor (Vento・Morgan, 1976)、雨滴とひょう粒を分離してそれぞれについて降水量値が得られる hail recorder (Castaldo, 1976) による観測が行なわれ、興味深いデータが得られている。

スイスでのひょう研究は、以前から基礎的カラーが濃く、降ひょう抑制にしてもよく計画された種まき実験が行なわれた。たとえば、Grossversuch III (1957-63) の成果は今日もたびたび引用されている。1976 年には 5 年計画で Grossversuch IV が始められた。この実験の目的はソ連のモルダビアで採られているものと同じ方法で、ひょう雲の種まきを行ない、農作物の被害データだけからではなく気象学・統計学的に効果を調べようというものである。約 1000  $\text{km}^2$  の実験地域は 5 地区に分割され、各々に Oblako 型種まきロケットの発射基地が設けられている (Federer, 1976)。米国を初め (Crow *et al.*, 1976) 世界中の降ひょう抑制研究者はその成果に注目している。

### 3.4 その他の諸国

他に、現在、本格的に降ひょう抑制研究に取り組んでいる国としては、ケニアとアルゼンチンが挙げられる。後者の様子はよくわからないが、ケニアの方は 1965 年に日本で国際雲物理会議が開かれた折すでに降ひょう抑制

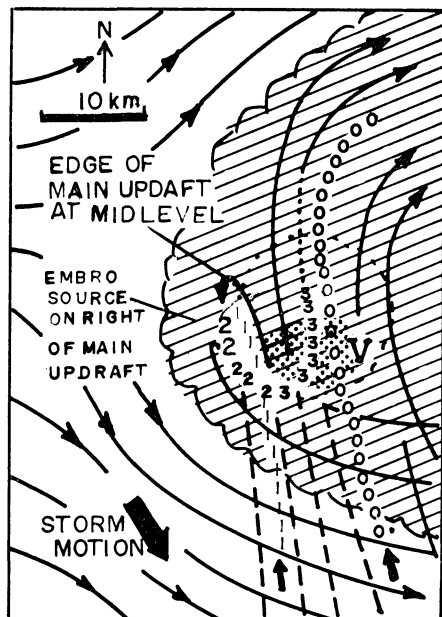
に関する論文を提出しており、その後もほぼ切れ目なしに手を変え品を変えて抑制研究活動が続けられている。熱帯では普通ひょうがあまり降らないのだが、ここでは赤道直下であるにも拘わらず非常に頻繁にひょうが降る。約1万 ha (東京23区のはぼ1/6) の茶園地帯における降ひょう日数は年平均132日、多い年は177日といった工合である (Alusa, 1976)。降ひょう抑制に大きな関心が持たれるのは当然であろう。何年か前には、米国から業者を呼んで航空機による種まきもやっている。他のアフリカのいくつかの国と中国でもひょう雲の種まきを実施しているようだが、手元に資料がなく事情がわからない。

#### 4. ひょう雲の構造

雲の種まきによる降ひょう抑制は純然たる雲物理過程の人工変換である。しかし、その成否はひょう雲の構造の理解にかかっていると看しても過言ではない。撒かれた人工核が期待される効果を発揮する場所は人工増雨(雪)の場合よりもはるかに狭く、ひょう雲内の風の場は複雑でしかも風速の鉛直成分は非常に大きい。その上ひょう雲にはいくつかの種類があり、各々について種まきの時期や場所を考えなければならない。筆者はこれまでの経験から、関東地方に現われるひょう雲は少なくとも4種類はあると見ている。今のところ、ひょう雲は単に超細胞 (supercell) 型と多細胞 (multicell) 型に分けられているに過ぎないが、さらに細かな分類の必要性が海外でも認められて来ているようである。

##### 4.1 Supercell 型ひょう雲

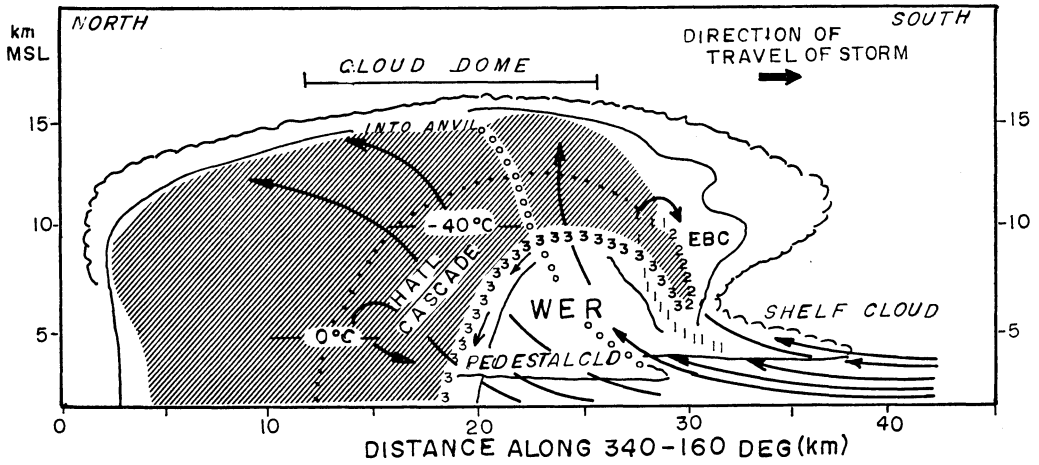
Browning (1964) は、降ひょうやトルネードを伴う局地あらし (severe local storm) の中に、普通の雷雨セルよりはるかに大きい単一セル的な性質を持つ系の存在を指摘し、その雲物理・力学的な構造モデルを示した。その後、このタイプの対流系について数多くの研究が行なわれている。Supercell storm のレーダ構造で最も興味深い特徴は、激しいあらしの起こっている部分と隣合わせに反射強度の非常に小さな空洞状の部分が存在することである。これは、初め vault と名付けられたが、近頃は WER (Weak Echo Region) と呼ぶ人が多い (Marwitz, 1972; Chisholm, 1973; Browning 1977)。この部分は、さらに下方だけ開き側壁がほとんど閉じた大伽藍状の BWER (Bounded WER) と、側壁の一部が欠けた UWER (Unbounded WER) とに分類されている (たとえば、Chisholm, 1973)。WER の成因が非常に強い上昇流であることはかなり以前から定性的な



第3図 a Supercell storm の構造 (Browning・Foote, 1976より作図)。ここで斜線はかなとこ雲の領域を示す。Vと印した楕円型の陰影部分は vault で強い上昇流域 (点で画かれた円) の南縁に位置している。雲域を避けるように発散する流線は対流圏中層の風、破線部分は雲に流入する低層での収束流を示す。数字1, 2, 3は各成長段階における降水粒子の位置を平面に投影したもので、2は embryo, 3はひょう粒にほぼ対応する。

議論により推定されていたが、その後観測機によっても確かめられている。たとえば、WER の雲底付近で  $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  (Chisholm, 1973)、WER 内  $3 \sim 4 \text{ km}$  付近で  $9 \sim 27 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$  (Marwitz, 1973) といった値が得られている。後のほうのデータは、WER 内に chaff の束を放出して測ったものである。

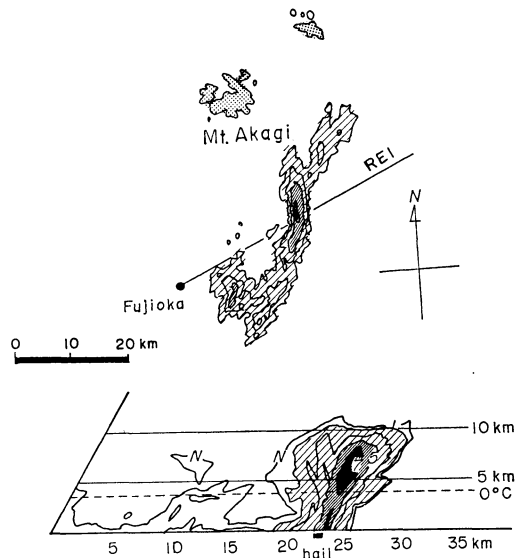
Supercell storm のほとんどが降ひょうを伴う。Browning・Foote (1976) は、NHRE の膨大な資料を使って supercell 型ひょう雲の構造を詳細に調べた。第3図 a, bにこの雲の鉛直断面と水平断面の二つのモデルを示す。この図から、ひょうの卵が振れた軌跡を描きながらひょう粒へと成長していく有様がわかる。第3図 aはまた、ひょうの核になる固体物質はひょう雲の前方の薄い気層内にあるものに限られていることを示す。それは、雲粒、さらに降水粒子の核になって WER の前面の縁



第3図 b Supercell storm の鉛直断面構造のモデル (Browning・Foote, 1976より作図)。斜線部分は強いレーダエコーの領域で前方に垂れ下った部分 (EBC) が「ひょうの卵のカーテン」と呼ばれる所である。大きなひょう粒は1→3で示された径路を画く。WERの天井付近では上昇流の強さの変化に伴い多小の上下運動はするが、ひょうとなってからの径路はゆっくり上昇後下降と、比較的単純である。ここで数字の意味は第3図aと同じ。斜線域内の孤状の点線は限界状態で成長する小さなひょう粒の道筋を示す。また。は強い上昇流によって降水粒子に成長する間もなく-40°C層を越えて雲頂(かなとこ)に達してしまう粒子の軌跡を示す。流線は雲に相対的な気流を表わしている。

を上昇し、「ひょうの卵のカーテン」と呼ばれる、反射強度の大きな、厚い垂幕状の部分に入る。核がWERの内部を上昇する気流に乗ってしまうと、降水粒子に成長する間もなく、気温が-40°C以下になる高さに吹き上げられてしまい、ひょう粒の形成にはほとんど寄与しない。「ひょうの卵のカーテン」の中にあられ (graupel) が存在することは、T-28の貫通観測によってほぼ認められている。ひょうの卵とは実際何であるかについては後述するが、それが成長して地上にひょう粒あるいはひょう塊として降ってくる経路は図に示した通りと考えられる。この論文 (Browning・Foote, 1976) ではさらに雲の種まき効果を播種法ごとに検討し、「ひょうの卵のカーテン」からひょう成長域に送り込まれるひょうの卵の数は自然の力学的メカニズムによって制御されており、ひょうの卵を増すだけでは抑制効果はあまり期待できないと述べている。

日本にはアメリカ中西部にたびたび現われるような巨大な supercell storm はめったに発達しない。筆者はたまたまそのような例を二つほど詳細に解析したが、いずれも関東平野をほぼ対角線状に横切るものであった。このことから巨大な supercell storm は地形の複雑なところでは発達しないと考えるのは早計であって、その一つ



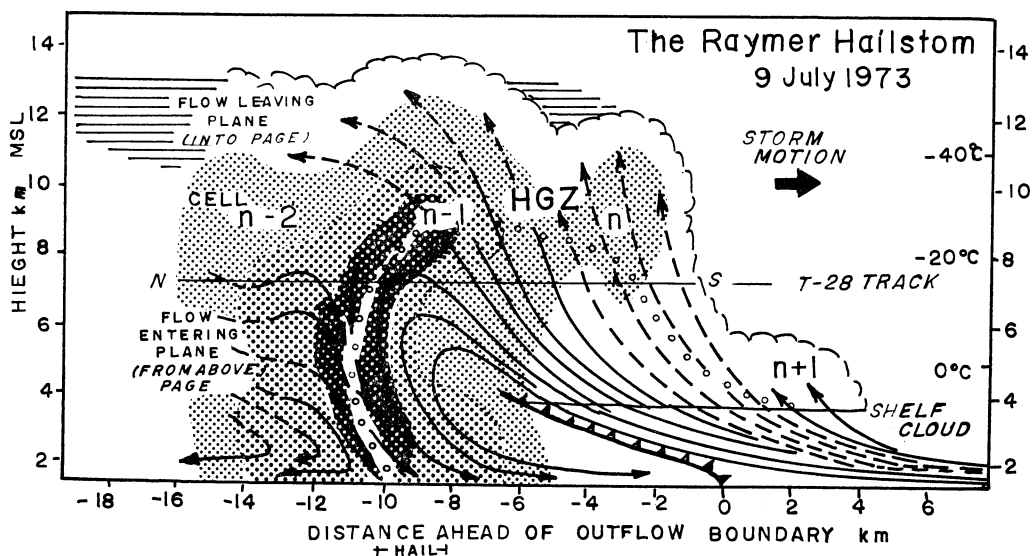
第4図 藤岡市に設置したレーダで観測された弱い supercell storm の構造。群馬県新田町で激しくひょうが降っていた昭和50年6月9日20時43分頃の状態を示す。数字1, 3, 5, 7はそれぞれ雨量強度1, 4, 16, 64 mm・hr<sup>-1</sup>に対応する。

である1976年7月19日の supercell storm は北アスブスの立山付近に発生した。当時は、管内で豪雨が起っていたため、夜通しの観測が行なわれており、寿命約6時間に及ぶこのひょう雲の全生涯が東京レーダのフィルムに完全に記録された。ほぼ直進したこの系の心臓部(おそらく WER が存在したであろう部分)が比較的谷間を通り抜けていたことが、長野県と群馬県西部山間地帯の上を潰れずに通り抜けて関東平野に出た理由と考えられる。降ひょう帯の長さは、群馬県富岡市付近から千葉県佐原市付近までほとんど切れ目なしに約160km、途切れた部分も含めると降り始めから末端まで約250kmに達するものであった。ちなみに、カナダでは降ひょう域の長さ535km、寿命約12時間という supercell storm が観測されている (Paul, 1973)。

Supercell storm の構造と行動は、一般に定常的な対流系として扱われるが、実際の降ひょうには明瞭な強弱の変動が見られ、時にはこれがかなり規則的に起こる(小元, 1970c)。それが一つの対流セルの脈動的变化で

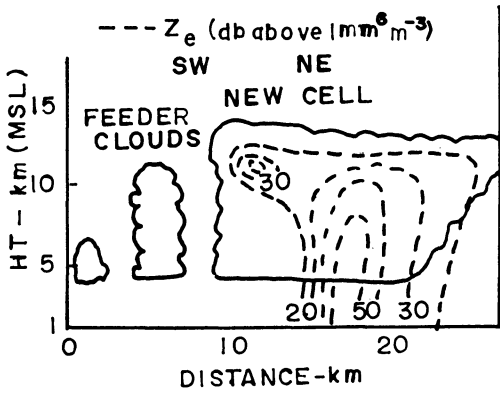
あるのか、それとも実際 multicell とあまり異ならない構造と関連しているのかまだわかっていない。1976年7月19日のひょう雲の東京レーダ記録からは降ひょうの激しさの変動に対応するエコー構造の変化は見出されなかった。

なお, supercell storm と見られるひょう雲の中に Browning (1964) のモデルといくぶん違った構造を持っているものがある。Phillips (1973) と Musil *et al.* (1973) によって報告された、コロラド北東部に弱い降ひょうをもたらした対流系がその一つである。レーダ PPI 構造がこれと非常に良く似たひょう雲が、群馬県南部の伊勢崎市と境町付近によく現われる。第4図は藤岡に設置した国立防災科学技術センターのレーダで観測された例である(小元ほか, 1976)。このひょう雲は群馬県新田町に大きな被害をもたらしたが、降ひょう強度が規則的に13分周期で変動したことが、レーダの記録と地上の降ひょう分布で確かめられた(小元・清野, 1978)。



第5図 Multicell 型ひょう雲の鉛直断面構造モデル (Browning *et al.*, 1976から作図)。流線は雲への相対的な気流分布を示す。破線部分は気流が実際は紙面に対して直角成分を持っている所である。図の右側つまり雲の前の部分では手前から紙面に入り込む成分(南寄の風)がある。この系から降った大きなひょうは並んだ。の道筋を通って来たと考えられる。 $n+1$ と $n$ は発達中のセルである。 $n-1$ はひょうを降らせているセルで陰影の濃さはレーダ反射強度の強弱を表わす。N-SはT-28の貫通観測が行なわれた高度を示す。モデル図ではあるが、だいたいセル $n-1$ と $n-1$ の境界付近ならびにそのやや左( $n-1$ の字の下)で $15\sim 20\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ の強い上昇流を観測した。また、レーダ反射強度が50 dBZの部分(もっとも濃い陰影の部分)で激しい乱気流に遭遇した。図中HGZはYoung (1977)によってひょう成長域と名付けられた場所である。



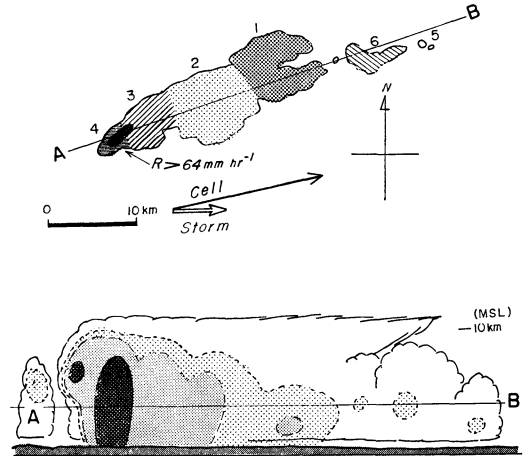


第6図 南ダコタ西部に現われるひょう雲のモデル (Dennis et al., 1970). 東進する雲の北東-南西断面である。

4.2 Multicell 型ひょう雲

1973年7月9日コロラド州北東部の Raymer 付近を通過した multicell 型ひょう雲は、Browning et al. (1976), Chalon et al. (1976), Fankhauser (1976), Musil et al. (1976), Strauch・Merrem (1976) によって詳細に解析された。第5図は、Browning et al. (1976) による鉛直断面構造である。この図で第3図bの「ひょうの卵のカーテン」に似ている部分は、ひょうを降らせるセル ( $n-1$ ) の次に発生したセル ( $n$ ) で、ひょうの卵をすでに抱いているものと考えられる。これがひょうを降らせる頃には、次の ( $n+1$ ) にひょうの卵ができていると考えてよかろう。なお、これは鉛直断面であり、( $n-2$ ) 以前にできたセルは既に紙面外に去っている。

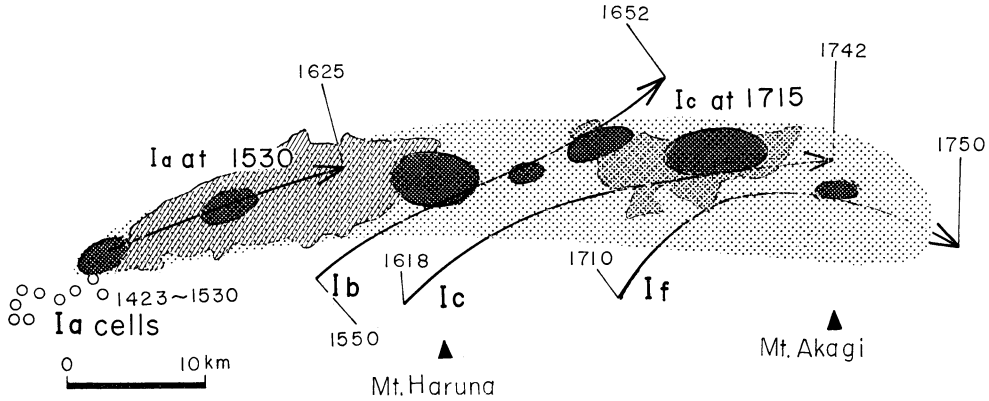
以上のように、supercell storm とちょっと似てはいるが構造上かなりの違いがあり、一見 WERに見える所がセルの境界であることに特に注意されたい。しかし、ここには強い上昇気流があるので、図中の HGZ と記された部分をひょう成長域とするモデル (Young, 1977) すらある。一方、T-28の貫通観測のデータは、明瞭にわかれた強い上昇域 ( $>20\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) の存在を示しており (Musil et al., 1976)、このタイプの雲の構造の理解が難しいことを暗示している。Multicell 型ひょう雲でも、ひょうの卵が形成される領域に前方から流入する空気は地面近くの極めて薄い層 (20 km 先で  $\leq 500\text{m}$  の厚さ、Fankhauser, 1976) に限られている。昆虫や土壌粒子が核となったひょう粒も見出された (Knight・Knight, 1978)。Dennis et al. (1970) によって作られた南ダコ



第7図 北関東に現われる一つのタイプのひょう雲のモデル。上:PPI エコーで各セルの発生順に1から6まで番号を付した。セル3と4にまたがって  $R \leq 64\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$  の強いレーダ反射域が存在する。この例では、各セルの移動速度は ENE  $50\sim 60\text{km} \cdot \text{hr}^{-1}$  で系全体としての速度は約  $20\text{km} \cdot \text{hr}^{-1}$  であった。下は上図の A-B に沿った鉛直断面のモデル。陰影の濃度はレーダ反射強度を定性的に示す。雲を横切る線は上の PPI の高度に対応する。

タ西部の典型的ひょう雲のモデル (第6図) は、Raymer hailstorm のモデルとちょっと違っている。第5図が北西-南東断面であるのに対しこれが北東-南西断面であることも、異なった印象を与える一因であるが、ここで注目されるのは、daughter cloud (図中、feeder cloud) という特徴である。これは、既存のひょう雲の後方に発生し (時には  $30\text{km}$  も離れて)、15~40分後に東進する母雲の南西側で併合し、ひょうを降らせる。レーダにエコーとして現われるのは合併のほんの少し前で、ひょうの卵を持つようになってからである。これによく似たひょう雲が北関東の山間部でしばしば観測される。第7図は、昭和50年6月9日に群馬県北西部で観測されたひょう雲である。ひょう雲自体は初め非常にゆっくりと動いており、個々のセルがその中を通り抜けるように移動する状態が解析された。この雲の鉛直断面モデルを下に示したが、Dennis et al. (1970) のモデルにヒントを得たものである。断面の取り方がやや違っているので、この図には daughter cloud が一つしか入っていない。

上述の例は、良く組織化された multicell 型ひょう雲である。内部の気流やセル構造を単純なモデルで表わす



第8図 やや変わったタイプの multicell 型ひょう雲 (降ひょう系)。ここで、1a は第7図上から30分後のひょう雲の状態。左側の小円の群は大きなひょう雲の後方に現われすぐに併合した daughter cloud と見做される小エコーの発生点。母雲の東進につれて発生位置も次第に東に移った。塗りつぶされた領域は激甚被災地。

ことが難しいひょう雲も少なからず観測される。時にはいくつかのひょう雲が系統的に発生・消滅を繰り返し、あたかも一個のひょう雲がもたらしたかのように带状にひょう害が発生する場合もある。第8図は実例を図解したもので、Ia は第7図のひょう雲である。Ib, Ic, If はそれぞれ始点に書かれた時刻にエコーが現われたひょう雲の径路である。これらのエコーは、その前に発生したひょう雲エコーの南方数 km に離れて発生、南西側から近付いて合併した。この過程は南ダコタ西部のひょう雲の daughter cloud の場合と似ているが、合併する時点で新旧二つのエコーがほぼ同じ大きさになっている点が違っているようだ。

5. 播種 (seeding) の方法

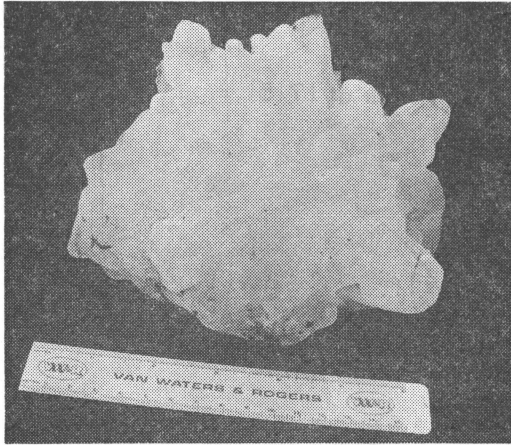
ひょう雲の種まき方法は、(1) 場所を指定せずにどちらかというと雲全体に種まきをする broadcast seeding, (2) 上昇流に種まきする updraft seeding, (3) 人工的に雲物理過程の変化を起こそうとする場所に直接播種する direct injection の3通りに分類することができる (Dennis, 1977)。

最初の broadcast seeding は、たいてい地上発煙によって行なわれる。自然の風にまかせるわけであるから効率はかなり悪い。この方法を採用しているプロジェクトにおける播種日の平均沃化銀使用量が、他の方法を用いている所よりだいたい一桁多いのもそのためである。ロケットや飛行機を使うのに比べるとずっと容易に播種対象地域を設定できるという長所はあるが、人工降雨と異なり効果が期待できる場所は極めて狭いので、良い方

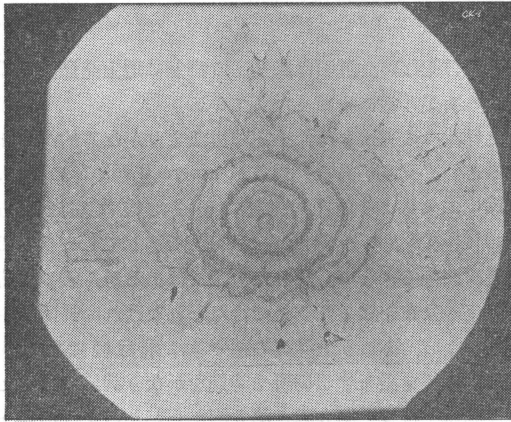
法とは言えない。近頃は降ひょう抑制に地上発煙法を採用する所が非常に少なくなっている。

上昇流への種まきは、上記の方法よりかなり的がしぼれるという利点がある。対象が supercell storm の場合、WER に入るような上昇気流に乗った核は雲底から -40°C の高度に短時間 (<10分) で達してしまうので効果は期待できない。勝れた方法ではあるが、雲の構造と気流の分布を知ったうえで行なわれなければ長所は生かされない。ふつう上昇流の種まきは飛行機で行なうから、核種を撒布する場所や時期をかなり調節できるという利点を持つ。第3図と第5図からわかるようにひょう雲の前方の相当低層で発煙することになるが、Dennis et al. (1970) のモデルのような multicell 型ひょう雲の場合は、daughter cloud に種まきをする。北ダコタ西部で1969~72の4年間にわたって、主としてこの方法で行なわれた雲の種まきの効果をひょう害保険データの rank test によって調べたところ、農作物の被害が実際に減少したという結果が出た (Miller et al., 1975)。

(3) の直接注入は、目標空間が狭くしかも航空機による種まきがほとんど不可能な危険な場所であるため、ロケットによる高度の播種技術が要求される。ソ連ではこの方法で過去十数年にわたってひょう害の軽減の著しい成果を挙げてきたと言われる。しかしひょう雲内部の気流の状態を考慮すると、撒布された核がその場所で果たして期待どおりの働きをするのか疑問である。加えて、氷晶核の直接注入の狙い自体に最近別の観点から疑問が持たれ始めた。この方式によるソ連の降ひょう抑制は、



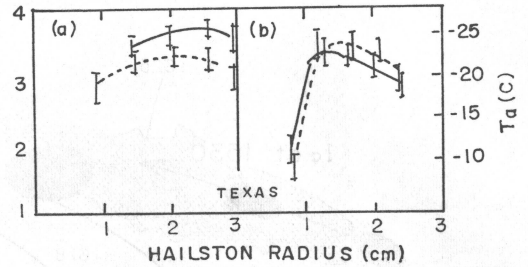
(上)



(下)

第9図 米国カンサス州で採集された巨大なひょう塊 (本文を参照されたい)。手前の物指の目盛は 15.4 cm (6 インチ) までついている。下はその断面で中心の embryo の直径は約 6 mm である (NCAR, Photo)。

蓄積帯 (accumulation zone) と呼ばれる、過冷却水滴が大量 ( $20\sim 30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  Sulakvelidze *et al.*, 1967) に溜まっている領域の存在を仮定している。ところが T-28 の観測データが増えるにつれて、その存在に疑いが持たれ出した (たとえば Browning, 1977)。過冷却水滴が  $20\sim 30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  という値の場所がなかなか見付からない。レーダによって蓄積域に相当すると見做された部分 ( $\geq 50\text{ dBZ}$ ) で実際に観測される粒子のほとんどが、雪、あられ、ひょうのいずれかで、過冷却水滴はあったとしてもごく僅かに過ぎないそうだと (Knight *et al.*, 1979,



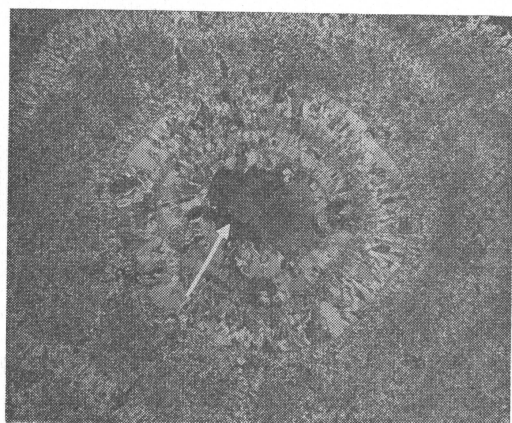
第10図 結晶粒の大きさ (点線) と C 軸方向の分布 (実線) から推定したテキサスで採集されたひょう粒の trajectory. 縦軸左の目盛は  $Z-Z_0$ , ここで  $Z_0$  は凍結高度である (Macklin *et al.*, 1975)。

未印刷)。

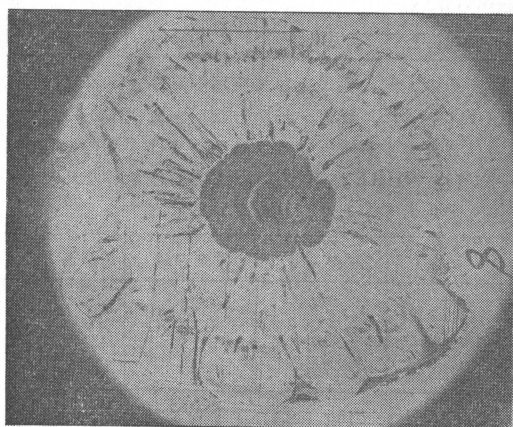
## 6. ひょう粒の成長

ひょう研究者が分析した最大のひょう塊は、1971年米国カンサス州で採集された重さ 766 g, 周囲の長さ 44 cm のものである (第9図)。これが一個のひょうとして成長したことは断面写真から明らかである。これほど大きなひょうがどのようにして育ったかは誰もが興味を抱くことであり、多くの人がこの問題に取り組んできた。1970年代前半までの成果について、播磨屋 (1974) が詳しくまとめているので、ここではそれ以後の進展を簡単に記すにとどめる。

一つのひょう粒を分析してその成長の歴史を辿ることは、かつて考えられていたほど容易ではない。断面に見られる年輪状構造は、いわゆる wet growth と dry growth が交互に起こっていることを物語っているが、なぜそしてどのような状態からそうなるのかはわかっていない。不透明層の密度が透明な部分よりは小さいことは知られているが、その差は  $0.05\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  程度で、各地で採集されたひょう粒の平均密度のばらつきと大きさが余り変わらない。Macklin (1977) は、ひょう粒の平均密度は  $0.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  としてしまっで良いと述べている。ひょうの薄片の偏光顕微鏡写真に見られる単結晶構造の分析から、その粒の歴史を探る試みも大分なされて来た。Macklin *et al.* (1975) は、C 軸方向の分布と結晶粒の大きさの分布から各層が形成された時の気温を推定している。二つの方法による値はかなり良く合っている (第10図)。また、deuterium および tritium, その他異物質の含有量を調べる (Knight *et al.*, 1975; Knight・Knight, 1978) など、化学的アプローチもひょう粒の成長過程や付着する過冷却水滴の源を深るのに役立つ。こうした詳



(上)



(下)

第11図 円錐型 embryo の写真。上は偏光顕微鏡写真で矢印の先に円錐の頂点が見える。下は別のひょうの普通光の写真である (Dr. Knight の好意による)。

細な分析から、ひょう粒の数々の成長段階を明らかにする試みは正攻法ではあるが気の遠くなる程の時間がかかるという見方もある (List, 1977)。

かつて、大きなひょう粒は雲の中を何度も上下することによって成長すると考えられていた。今日では、たとえば第3図に示されたような比較的単純な道筋を通過して降ってくるとされている。氷晶からひょう粒に成長するまでの時間については、最近数値計算によりかなり現実的と考えられる値が得られている。第4表に実際の雲について計算された値を示した。

ひょう中心に直径数 mm から 1 cm 位の、ひょう本体と区別できる部分が存在し、embryo と呼ばれている。

1979年1月

第4表 二つの multicell 型ひょう雲内におけるひょう成長特性に関するデータの比較 (Browning, 1977)。

	Raymer hailstorm	Alberta hailstorm
ひょうの最大粒径	マール (ビー玉)	> ゴルフ玉
降ひょう範囲	孤立 (分散?)	広域
新しいセルの発生間隔	15 min	5 min
ひょうの卵の成長時間 (直径)	10~15 min (0→5 mm)	< 5 min (0→2 mm)
ひょうの成長時間 (直径)	~13 min (5→15 mm)	6~12 min (2→10 mm)
First echo の高度 (MSL)	6.5~7.5 km	6~10 km (MSL)
ひょう成長域の高度 (気温)	8~10 km (-20から-30°C)	7~10 km (-20から-40°C)

これまで本文でひょうの卵と称してきたものである。これについては播磨屋 (1974) もかなり詳しく述べているが、降ひょう抑制関係者が最も注目する降水粒子なので、ここでも少し触れておきたい。

実は、embryo は今日でも明確に定義されていない。本節で述べた程度のあいまいな表現で終わっている場合が多い。第11図に二つのひょう粒の embryo を示した。一つは偏光顕微鏡写真で、他の一つは普通の光を使っている。いずれの場合も embryo は円錐状のものであることがわかる。地理的にひょう雲のタイプが少し異なるせいも多少の違いはあるが、embryo の大部分はこのような形をしている。Carte・Kidder (1966) や Knight・Knight (1970 a) 等の報告から、少なくとも60~70%が円錐形と見做される。List (1960) はスイスのひょうの約80%はあられ (graupel) であると述べている。一方、ソ連の降ひょう抑制関係者の中には、過冷却の大雲粒あるいは雨滴が凍結した embryo に着目する者が少なくない。実際、それらしい球状または楕円状の embryo も発見されている。

円錐状のひょうの卵から、球形、楕円体、あるいは上の写真のようなひょうが形成される過程は興味を持たれる問題の一つである。外観的な特徴のほか、lobe 構造もひょうの成長条件を調べる手掛りになるものとして注目されている。形状の急激な変化は落下の姿勢に不連続的

な変化が起こることを意味する。さらに、外見上のもう一つの特徴、つまり大きなひょうほど顕著な突起を持つ原因を明らかにするためには、どうしても落下中の状態を知らなければならない。これに関しては模型実験と理論的考察(List *et al.*, 1973等)あるいは実物の詳細な分析による推測(Knight・Knight, 1970c, 等)といったアプローチがなされているが、空から落ちてくるひょう粒(または模型)を実際に観察すべき段階に来ているという見方が強まっている(Knight・Knight, 1970b; List, 1977)。

7. 実用レベルでの抑制活動と関係して

地上発煙法ではあまり良い効果が期待されないので、通常降ひょう抑制の種まきはロケットあるいは飛行機を使用する。米国と少数の国を除いて、オペレーショナルレベルで雲の種まき用航空機を何台も用意することは難しく、現在のところロケットによる方法が最も普及している。しかし、以下に述べるように使用上の種々の問題があるので、もし上昇流への種まきが良いとわかれば航空機による種まきが広く利用されるだろう。

ロケットによるひょう雲の種まきで実験関係者が一番頭を痛めているのは、落下する機体の問題である。ふつうは上空で機体を爆破させてしまう方法が採られている。しかし、不発のまま落ちてきて地上で爆発する事故があるらしく、ソ連もこの爆砕型ロケットは輸出しないことにしているようだ。わが国でもかつて国立防災科学技術センターが、降ひょう抑制実験用に、燃焼してしまふ機体を持つ種まきロケットを開発した(Ozawa・Omoto, 1974)。ガラス繊維強化プラスチック製の機体は上空で燃えて灰になるという方式で、海外の降ひょう抑制プロジェクト関係者もかなり注目していたが、単価が余りに高いため利用されるには至らなかった。ソ連は、パラシュートで機体を降下させる方法も開発した。スイスの実験で使用されることになった Oblako 型種まきロケットがそれである。機体の重さ 16 kg, 長さ約 2 m という大きなもので、もしパラシュートが開かなかつたらちょっとしたビルの屋根など突き抜けてしまうだろう。ソ連でも、市街地の方角は避けて発射しているとのことである。

ロケットが嫌われるもう一つの理由は、対航空機の問題である。どの国でもロケットによる種まき実施時間帯には、上空の飛行を禁止する手続きを取っている。ロケットの上昇高度にもよるが、航空管制上たいへん厄介である。NHRE の場合は、おもちゃロケット程度ならと

第5表 ひょう害の多い地域住民の降ひょう抑制に対する反応 (Borland, 1977に引用された Krane・Haas, 1974のデータより編集)。\*は「雲の種まきが雨を増やすことができるか」という質問に“‘Yes’”の答の百分率。なお、イリノイ州とコロラド州の“‘Yes’”は50%前後であった。

(1) 若しあなたの住んでいる地域の雲の種まきで降ひょうが抑制されるとしたら、それは貴方にとって経済的に有益・有害・関係ないのどれですか(%)。

	コロラド	南ダコタ	イリノイ
有害	3	1	1
関係ない (わからない)	15	23	38
有益	82	76	60

(2) その地域の住民として実用的降ひょう抑制プログラムに、反対・わからない・賛成である、のどれですか。コロラドについては「現在の実験(注 NHRE を指す)の結果として行なわれるであろう」と付記されている。

	コロラド	南ダコタ
反対	9	28
わからない	15	39
賛成	76	33

(3) Cloud seeding は降ひょうを抑制すると思うか、の質問に“‘Yes’”と答えた人の割合(%)。

	コロラド		南ダコタ	
	実験地内	実験地外	調節プログラム開始前	調節プログラム開始後
1972	49	36	19	39
1973	59	26	(48)*	(74)*
1974	63	39		

いうことで許可されたため、第3表のごとく他国のものより一まわり小さいロケットを使用することになった。これは、飛行機から真上に向けて発射される(Sanborn *et al.*, 1976)。

オペレーショナルな降ひょう抑制は、社会的面でもいろいろと考慮しなければならない問題を伴う。これに関しては、Borland (1977), Davis (1977) および Krane・Haas (1974) が参考になる。最初の文献は非常に充実したものであるが、「ここに述べられた情報が1966年の時

点でわかっていたなら、米国は降ひょう抑制の国家的プログラムを組まなかったであろう。たとえ組んだとしても、過去10年間に辿ったものとは別の方向に進んでいたであろう」(Changnon, 1977) というコメントも見逃せない。この中には、第5表にまとめたような興味深いデータも数多く含まれている。自然科学と社会科学の境界領域の問題として、気象調節を取り上げている文献はたいへんな数にのぼる。ここでは、ごく最近出版された次の二つの総合報告書を記すにとどめる。「Legal and Scientific Uncertainties of Weather Modification (ed. W. A. Thomas, 1977)」および「The Management of Weather Resources (WMAB, 1978)」。

### 8. あとがき

降ひょう抑制は、今日なお気象調節の分野で重要な位置を占めている。米国ではこの問題がビッグ・サイエンス的に扱われており、NHREでも社会科学的な課題を取り上げている。気象学的にもいろいろな角度から研究され、ここ2、3年、学会誌等に発表されるひょう関係の論文は目立って増えている。

なお、紙面の都合で全く触れずにしまった重要な問題には(1)ひょう粒の成長、ひょう雲の力学に関する数値モデル研究(2)降ひょう状況の観測とひょう雲内外の雲物理・力学的データの測定技術(3)レーダまたはゾンデ観測によるひょう雲の識別と降ひょう予報に関する研究(4)人工氷晶(凝結)核の発生技術と効率、ならびに降水粒子からの検出(5)降ひょうの気候学的研究、がある。昨年末に発行された米気象学会の Meteorological Monograph (Foote・Knight, ed., 1977) は、長年上記の問題に取り組んで来た研究者による review を集めたものであり(いくつかの論文と review に対するコメントも含まれている)、この一冊で近年のひょう研究のほぼ全貌を知ることができる。

米国は、この数年間に莫大な費用を降ひょう実験プロジェクトに投入した。米連邦政府が1972~78年の間に支出した気象調節研究費は約1億3500万ドル、うちNHRE関係分は10~12%を占めている。当然、他の国ではとうてい真似のできない充実した観測が実施された。その結果、ひょう現象とこれを伴う大型積乱雲の構造に関する知識は著しく増大した。反面、実用レベルでの降ひょう抑制の可能性に関しては一歩も前進していない。この点について厳しい批判もあるようだが、科学的に降ひょう抑制の可能性を追究するのが気象研究者の任務である。だからといってオペレーショナルなひょう抑制活

動を禁止すべきだというのではなく、両者は並行して進められて差し支えないと筆者は考える。今までのところ、ひょう雲の種まきによってひょう害が減ったという報告はたくさんあるが(実施者だけでなく農民側からも)、被害が増えたとする不満は極めて少ない。

将来この問題はどうか展開するのであろうか。ソ連の関係者が長年にわたってかくまで確信を持って発表し続けて来た成果が、否定されるとは考え難い。だが一方で、主として西欧のひょう研究者の間に、可能性への疑いが深まって来ているという事実がある。スイスの実験はソ連式の種まき効果についてかなり信頼のおける気象学的データを出すだろうが、それ等は統計的判定の資料に止まるものと思われる。ひょう雲に送り込んだ核の行方と、それが起こす筈の雲物理過程の人工変化を知るには、播種された雲(seeded cloud)の徹底的観測と膨大な資料の分析をやらなければなるまい。降ひょう抑制に関して、気象学者の大部分によって受け入れられる結論が出るのは、まだまだ先のことになるだろう。その日までこの研究に対する社会の支持が続くことを願っている。

### 謝辞

本稿を書くに際し、NCARのKnight博士から写真と資料を頂戴した。南ダコタ鉱山工業大学大気科学研究所(Dennis 所長)からたびたび送られて来た資料もたいへん参考になった。今夏NHREを訪問した読売新聞の中村政男氏からは、同地の近況やWeather Modification Advisory Boardの報告など最新の資料を頂戴した。ここに記して厚く御礼申し上げる次第である。

### 文 献

- Abbé, C., 1902: The third international congress on hailshooting, Mon. Wea. Rev., 30, 33-35.  
 Admirat, P., 1974: Natural "hailcores" and their abilities to estimate the efficiency of hail prevention system, Proc. Sci. Conf. Wea. Mod., Tashkent, WMO, No. 399, 197-206.  
 Alusa, A.L., 1976: The occurrence and nature of hailstorm in Kericho, Kenya, Second WMO Sci. Conf. Wea. Mod., Boulder, WMO, No. 443, 249-256.  
 Atlas, D., 1976: The present and future of hail suppression, Second WMO Sci. Conf. Wea. Mod., Boulder, WMO, No. 443, 207-216.  
 ———, 1977: Hail suppression: Uncertainties, risks and implication, Legal and Scientific Uncertainties of Weather Modification, ed. W.A. Thomas, Duke Univ. Press, 81-95.

- Battan, L.J., 1969: Weather modification in the U.S.S.R.-1969, *Bull. Ame. Met. Soc.*, 50, 924-945.
- , 1977: Weather modification in the Soviet Union-1976, *Bull. Ame. Met. Soc.*, 58, 4-19.
- Bibilashvili, N. Sh., I.I. Gaivoronski, G. G. Godoage, A.I. Kartsivadze and R.N. Stankov, 1974: Anti-hail rockets and shells, *Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Wea. Mod.*, Tashkent, WMO, No. 399, 333-351.
- Borland, S.W., 1977: Hail suppression; progress in assessing its costs and benefits, *Met. Monogr.*, No. 38 *Amer. Met. Soc.*, 215-224.
- Browning, K.A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds, *J. Atmos. Sci.*, 21, 634-639.
- , 1977: The structure and mechanism of hailstorms, *Met. Monogr.*, No. 38, 1-60.
- , J.C. Fankhauser, J-P. Chalon, P.J. Eccles, R.C. Strauch, F.H. Merrem, D.J. Musil, E.L. May and W.R. Sand, 1976: Structure of an evolving hailstorm, Part V: Synthesis and implications for hail growth and hail suppression, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 603-610.
- , and G.B. Foote, 1976: Airflow and hail growth in supercell storms and some implication for hail suppression, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 102, 499-533.
- Burtsev, I.I., I.I. Gaivoronski and A.I. Kartzivadze, 1974: Hail process investigation and hail suppression activities in the U.S.S.R., *Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Wea. Mod.*, Tashkent, WMO, No. 399, 189-196.
- Carte, E., and R.E. Kidder, 1966: Transvaal hailstones, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 92, 382-391.
- Castaldo, A., 1976: Hailstorm at Negar (Verona, Italy), August 27, 1971, *Agricultural Met.*, 16, 185-192.
- Chalon, J-P, J. C. Fankhauser and P.J. Eccles, 1976: Structure of an evolving hailstorm, Part I: General characteristics and cellular structure, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 564-575.
- Changnon, S.A., Jr., 1977: Response to "hail suppression": Progress in assessing its costs and benefits, *Met. Monogr.*, No. 38, 177-180.
- Chisholm, A.J., 1973: Alberta hailstorm, Part I: A radar study and model, *Met. Monogr.*, No. 36, 1-30.
- Crow, E.L., P.W. Summer, A.B. Long, C.A. Knight, G.B. Foote, J.E. Dye, 1976: Experimental result and overall summary, *Final Rept. Natl. Hail Res. Exp., Randomized Seeding Experiment, 1972-74; I*, NCAR, 259 pp.
- Davis, R.J., 1977: Legal uncertainties of weather modification, *Legal and Scientific Uncertainties of Weather Modification*, ed. W.A. Thomas, Duke Univ. Press, 32-64.
- Dennis, A.S., 1977: Hail suppression concepts and seeding methods, *Met. Monogr.*, No. 38, 181-192.
- , and D.J. Musil, 1973: Calculations of hailstone growth and trajectories in a simple cloud model, *J. Atmos. Sci.*, 30, 278-288.
- , C.A. Schock and A. Koscielski, 1970: Characteristics of hailstorms of western South Dakota, *J. Appl. Met.*, 9, 127-135.
- Dye, J.E., A.J. Hemsfield, I. Paluch and D.W. Breed, 1976: Precipitation measurements, *Final Rept. Natl. Hail Res. Exp., Randomized Seeding Experiment, 1972-74 II*: NCAR, 530 pp.
- English, M., 1973: Alberta hailstorm, Part II: Growth of large hail in the storm, *Met. Monogr.*, No. 36, 37-98.
- Fankhauser, J.C., 1976: Structure of an evolving hailstorm, Part II: Thermodynamic structure and airflow in the near environment, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 576-587.
- Federer, B., 1977: Method and results of hail suppression in Europe and in the USSR., *Met. Monogr.*, No. 38, 225-236.
- Flueck, J.A. and P.W. Mielke, Jr. 1977: Design and evaluation of hail suppression experiments, *Met. Monogr.*, No. 38, 225-236.
- Foote, G.B. and C.A. Knight, ed., 1977: Hail; A review of hail science and hail suppression, *Met. Monogr.*, No. 38, 277 pp.
- 播磨屋敏生, 1974: あられ・ひょう, 雲物理特集Ⅲ, 気象研究ノート, 123, 193-235.
- Iribarne, J.V. and R.G. dePena, 1962: The influence of particle concentration on the evolution of hailstones, *Nubila*, 5, 7-30.
- Khorguani, V.G. and Kh. M. Kalov, 1974: On the possibility of generating downdrafts by introducing a high concentration of coarse aerosol particles in the atmosphere, *Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Wea. Mod.*, Tashkent, WMO, No. 399, 301-308.
- Krane, S. and J.E. Haas, 1974: The public view toward weather modification in Illinois: a social assessment, *Rept. to Illinois State Water Survey, Human Ecology Research Service, Inc.*, Boulder, 90 pp.
- Knight, C.A., C.B. Foote, and P.W. Summer, 1979: Result of a randomized hail suppression

- experiment in northeast Colorado, Part IX: Overall discussion and summary in the context of physical research, *J. Appl. Met.*, 18, (to be published).
- , D.H. Ehhalt, N. Roper, and N.C. Knight, 1975: Radial and tangential variation of deuterium in hailstone, *J. Atmos. Sci.*, 32, 1990-2000.
- , and N.C. Knight, 1970 a: Hailstorm embryos, *J. Atmos. Sci.*, 27, 659-666.
- and ———, 1970 b: Lobe structure of hailstones, *J. Atmos. Sci.*, 27, 667-671.
- and ———, 1970 c: Falling behavior of hailstones, *J. Atmos. Sci.*, 27, 672-681.
- Knight, N.C. and C.A. Knight, 1978: Some observations on foreign material in hailstones, *Bull. Ame. Met. Soc.*, 59, 282-286.
- Krastanov, I. and K. Stantchev, 1974: Review of recent work on hail suppression in Bulgaria, *Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Wea. Mod.*, Tashkent, WMO, No. 399, 239-241.
- List, R., 1960: Growth and structure of graupel and hailstone, *Monogr.*, No. 5, AGU. *Physics of Precipitation*, 317-324.
- , 1977: Response to "The characteristics of natural hailstones and their interpretation" *Laboratory hail research—a critical assessment*, *Met. Monogr.*, No. 38, 89-92.
- , U.W. Rentsch, A.C. Byram and E.P. Lozowski, 1973: On the aerodynamics of spheroidal hailstone model, *J. Atmos. Sci.*, 30, 653-661.
- Lominadze, V.P., I.T. Bartishvili, and Sh. L. Gudusharuri, 1974: On the result of practical protection of valuable agricultural crops from hail by the THRI (ZAMNIGMZ) method (the results of five year work), *Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Wea. Mod.* Tashkent, WMO, No. 399, 225-230.
- Long, A.B., E.L. Crow and A.W. Huggins, 1976: Analysis of the hailfall during 1972-74 in the National Hail Research Experiment, *Second. WMO, Sci. Conf. Wea. Mod.*, Boulder, WMO, No. 443, 256-272.
- Macklin W.C., 1977: The characteristics of natural hailstones and their interpretation, *Met. Monogr. No.*, 38, 65-88.
- , J.N. Carras, and P.J. Rye, 1976: The interpretation of the crystalline and air bubble structures of hailstones, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 102, 24-44.
- Marwitz, J.D., 1972: The structure and motion of severe hailstorms, Part I: Supercell storms, *J. Appl. Met.*, 11, 180-188.
- , 1973 a: Trajectories within the weak echo regions of hailstorm, *J. Appl. Met.*, 12, 1174-1182.
- , 1973 b: Hailstorms and hail suppression techniques in the U.S.S.R.—1972, *Bull. Ame. Met. Soc.*, 54, 317-325.
- Miller, J.R. Jr., E.I. Boyd, R.A. Schlessener and A.S. Dennis, 1975: Hail suppression data from western North Dakota, 1969-1972, *J. Appl. Met.*, 14, 755-762.
- Morgan, G.H., 1973: A general description of the hail problem in Po Valley of Northern Italy, *J. Appl. Met.*, 12, 338-353.
- Musil D.J., 1970: Computer modeling of hailstone growth in feeder clouds, *J. Atmos. Sci.*, 27, 474-482.
- , E.L. May, P.L. Smith, Jr. and W.R. Sand, 1976: Structure of an evolving hailstorm, Part IV: Internal structure from penetrating aircraft, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 596-602.
- , W.R. Sand and R.A. Schlessener, 1973: Analysis of data from T-28 aircraft penetration of a Colorado hailstorm, *J. Appl. Met.*, 12, 1364-1370.
- 大田正次, 1970: 南コーカサスのひょう抑制実験, *天気*, 17, 521-525.
- 小元敬男, 1970 a: 米国およびソ連における気象調節, *天気*, 17, 301-319.
- , 1970 b: 関東甲信地方の降ひょうについて (2), *農業気象*, 26, 91-100.
- , 1970 c: ひょう害分布と降ひょう系の行動, *農業気象*, 26, 151-153.
- , 清野 豁, 1978: 降ひょう特性と農作物の被害率の関係, *農業気象*, 34, 65-76.
- , 八木鶴平, 清野 豁, 1976: 昭和50年6月9日の群馬県の降ひょう, *国立防災科学技術センター研究速報*, 22, 31 pp.
- Ozawa, Y. and Y. Omoto, 1974: Preliminary result of experiments using seeding rockets with combustible shells, *Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Wea. Mod.*, Tashkent, WMO, No. 399, 363-372.
- Paul, A.H., 1973: The heavy hail of 23-24 July 1971 on the Western prairies of Canada, *Weather*, 28, 463-471.
- Paluch, I.R., 1978: Size sorting of hail in a three-dimensional updraft and implication for hail suppression, *J. Appl. Met.*, 17, 763-777.
- Philips, B.B., 1973: Precipitation characteristics of a sheared, moderate intensity, supercell-type Colorado thunderstorm, *J. Appl. Met.*, 12, 1354-1363.



- Sanborn, R.W., J.C. Fankhauser, G.B. Foote, C.A. Knight, G.J. Biter, T.J. Kelly, R.E. Reinhart, M.E. Solak, P.W. Summer, and C.G. Wade, 1976: Hail declaration procedures and seeding operations, Final Rept. Natl. Hail Res. Exp. Randomized seeding experiment, 1972-74, III, NCAR, 207 pp.
- Strauch, R.G. and F.H. Merrem, 1976: Structure of an evolving hailstorm, Part III: Internal structure from doppler radar, Mon. Wea. Rev., 104, 588-595.
- Sulakvelidze, G.K., N. Sh. Bibilashvili, V.F. Lapcheva, 1967: Formatio of precipitation and modification of hail process, (English translation) IPST, 207 pp.
- , B.J. Kiziriya, and V.V. Tsykunov, 1974: Progress of hail suppression work in the USSR., Weather and climate modification, ed. W.N. Hess, John Wiley & Sons, 410-431.
- 田中豊顕, 1970: ヲ連における雲物理の研究状況, 天気, 17, 526-538,
- Thomas, W.A., ed.: 1977: Legal and scientific uncertainties of weather modification, Duke Univ. Press, Durham, N. C., 155 pp.
- Vento, D., 1972: La determinazione della energia di impetto della grandine, Rev. Ital. Geophys., 21, 73-77.
- , and G.M. Morgan, Jr., 1976: Statistical evaluation of energy imparted to hail by wind in Europe and United States, Second WMO Sci. Conf. Wea. Mod., Boulder, WMO, No. 443, 281-285.
- WMAB, 1978: The management of weather resources, I: Proposal for a national policy and program, Report to the Secretary of Commerce, Weather Modification Advisory Board, 299 pp.
- Young, K.C., 1977: A numerical examination of some hail suppression concepts, Met. Monogra. No. 38, 195-214.



宮沢清治著

## 天気図と気象の本

国際地学協会発行, 1978, A 5 版, 127頁, 650円

天気図とか気象の本は、地球科学の分野としては昔からポピュラーな本として数多く出版されてきた。それにもかかわらず、多くの社会人の要望に答える適切な本は、残念ながらあまり見当たらなかった。それは、幅広く、わかりやすく、ざん新で、しかも深い本質を盛ったものでなければならぬからである。

その点、この本は三つの点で心より推薦できる。第1は構成の見事さである。第1章に気象の基礎として、大気、身近な観測、気象の観測体制、第2章に天気図として、天気図の書き方と読み方、四季の天気図、第3章に気象と生活として、日本の気候、気象災害、気象とレジャー、生物季節、気象と健康、気象と交通、異常気象が

掲載されている。また、付Iに日本の主な気象記録、付IIに外国の主な気象記録、付IIIに天気のことわざが付加されている。これだけの幅は他に類例があまりない。

第2として、著者の人間と経験がしみ出てくる点である。およそ良き著述は表面的な表現力の良否で済むものでなく、その人の人間性が陰に陽に表われてくるものでない人と対して説得力がない。著者は長く予報技術にタッチしたベテラン予報官であり、とくに降雪の研究としてはエキスパートである。また、気象庁の天気相談長所、災害・国会担当の主任予報官として社会との第1線の接触者として苦斗された。その経験からまた著者自身の人格からしみ出た著述には、気象学の本質と応用の調和が深く感ぜられる。とくに第3章の着眼点に敬服する。

第3に、手軽さの点も見逃がせない。いくら良い本でも部厚なものは敬遠される。簡潔にしかも内容を落とさないこと、これも著者の経験からまとめられたものと思われる。図表も多く、見やすく、きれいだである。

現在のように本や雑誌の洪水の中で、この種の本の良き普及を願っている。

(内田英治)