

南極昭和基地における雲物理学的研究*

—日本気象学会賞受賞記念講演—

菊 地 勝 弘**

1. はじめに

日本南極地域観測隊も既に第15次隊が越冬観測に入っていますが、この隊には気象研究部門の隊員の参加はなく、きくところによると第17次隊まで中断とのことで大変残念でなりません。昭和40年出発の第7次隊から12Z (15地方時)での高層観測が実施されるようになり、私が参加した昭和42年の第9次隊から高層観測が00Z (03地方時)になったために3名の気象定常観測と1名の研究観測が初めて認められ、第7次、8次が定常・研究観測こみで3名であったことに比して、研究観測に力を入れはじめた時に私が隊員として選ばれたことは幸運だったと思います。

地球物理研連委気象分科会が選んだ第9次隊の研究観測テーマは雲物理、大気電気であり、毎年200~300名の越冬隊員を送り込んでいるアメリカ、ソ連の各国がこの分野に関しての越冬隊員をまだ送り込んでいなかったこともまた大変ラッキーだったと思います。越冬観測の目的として、雲物理は(1)全地球的雲物理学の一環としての極地雲物理観測、および(2)南極の特殊条件下における雲物理研究、であり大気電気は(1)全地球的大気電気学の一環としての極地大気電気観測、および(2)雲物理に関連した大気電気の研究ということであった(菊地, 1970)。

2. 観測外作業

南極観測に限らず、一般に地球物理学的観測研究には、いわゆる観測そのもの以外に観測外作業が不可欠である。これは各分野観測テーマによって異なるが、場所の選定、渉外、そして設営にかなりの労働を必要とする。これが可能か否かはデータの精度、観測効率、強いては観測の成否を決めることにもなるのである。特に南極においては限られた小人数で限られた短期間に共通の基地の建設作業に従事しなければならない、従って各人

の観測準備は夜間だったりで、2月1日越冬隊成立と同時に全ての観測が開始できるなんてことは先づなく、その時にどれか一つでも作動しはじめればよしとしなければならぬのが普通なのである。今回の越冬に関しては雪結晶の観測等のために管制棟北側10mの位置に直径2m、幅0.5mのコレクターを縦に4本つなぎ、基礎コンクリート鉄筋入りの雲物理観測室を自力で作った。この建物は風速40m/sec以上のブリザードにも耐えてまだ健在ということである。一方研究室として使用した管制棟の暖房として小型の石油ストーブがあったが、夜間使用禁止となるため計器保守のための暖房として廃物を利用して次のような方法をとることにした。容量37lの深夜電力用温水器に1.5kWの投込みヒーターを取りつけ、家庭用井戸ポンプを用いて温水を強制的にラジエーターに循環させ、さらに小型扇風器で室内の空気を攪拌する方法をとった。この方法で暖房がない場合、ほとんど外気温と等しくなる室温を夜間でも最低 -8°C 、日中は石油ストーブとの併用により $+15^{\circ}\text{C}$ ~ $+20^{\circ}\text{C}$ に保つことができた。種々の測定器が悪条件下での1年間、大きなトラブルもなく使用に耐え、数多くのデータをとることに成功したのは観測外作業の成功によるところが多かったことは否めない。何によらず実験観測環境の整備完了の段階でその仕事の5割方が終了したも同然であるという実験物理屋の言がまた事実として思い出される。

3. 観測結果

越冬中、昭和基地で観測した項目および方法を第1表に示した。

3.1. 氷晶核

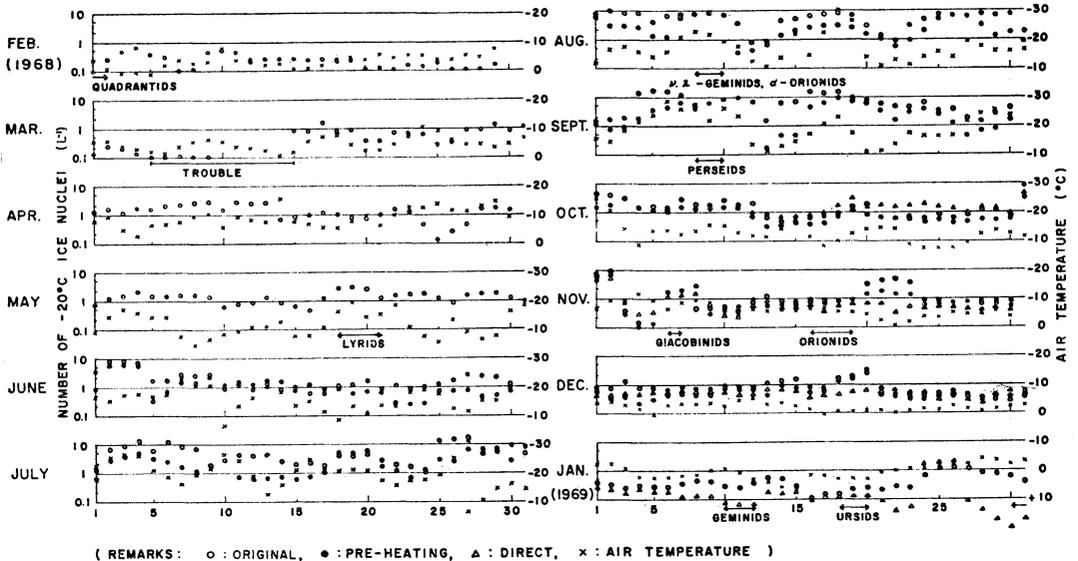
地上観測で自然氷晶核の流星塵説について言及するためには、一つには全地球的な同時観測であり、もう一つは極地での通年に亘る連続観測が考えられるが、そのいずれもが今日まで行われなかった。今回の越冬観測で得られた結果は第1図に示されている(Kikuchi, 1971a)。被検空気を通す給湿槽を変えることにより、通常、予熱、直接方式で観測が行われたが、 -20°C 核は冬期に

* Researches on Cloud Physics at Syowa Station, Antarctica

** K. Kikuchi: 北海道大学理学部地球物理学教室

第1表 雲物理・大気電気観測項目

観測項目	観測方法	観測時間
氷晶核濃度	自動氷晶核測定装置(丸山式)	0830~1130, 1400~1700, 1900~2100
凝結核濃度	活性化方式凝結核測定装置	1000~1100, 1900~2000
海塩核濃度	手動式インパクター	1100, (その他, 東京-昭和基地, 昭和基地-南極点)
大気電場	フィールドミル電場計	連続記録
降雪, 飛雪の電荷	真空管電荷計	随時, 連続記録
雪, 氷晶の結晶形	顕微鏡, レプリカ, 繫留雪結晶ゾンデ	随時
氷霧の電荷	平行極板法	随時
雲(形態, 雲底高度, 雲底の構造)	ステレオ写真観測(50mm標準, 7.5mm魚眼, 21mm超広角レンズ使用)	随時
雲(運動)	16mm 駒撮り映画	随時



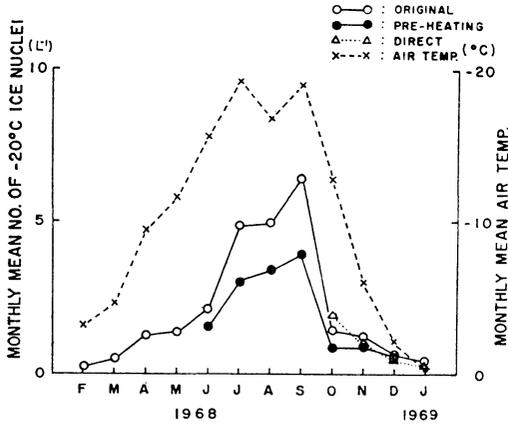
第1図 -20°C氷晶核と気温の年変化

明瞭な5日~10日周期の気温変化と対応する変動が認められ, 一般に南極の冬期に増加し, 夏期に減少するといった月平均気温と正の相関があった(第2図). このことは観測点が極高気圧に覆われた時に増加することを意味している. 流星塵との相関については第1図から容易に推測されるようにむしろ否定的であった. 南極の冬期には降雪の際の Ice Multiplication による雪粒, Blizzard によって生成される微細氷粒や, Pre-activate された広義の核として働くものが多く存在することが推測され

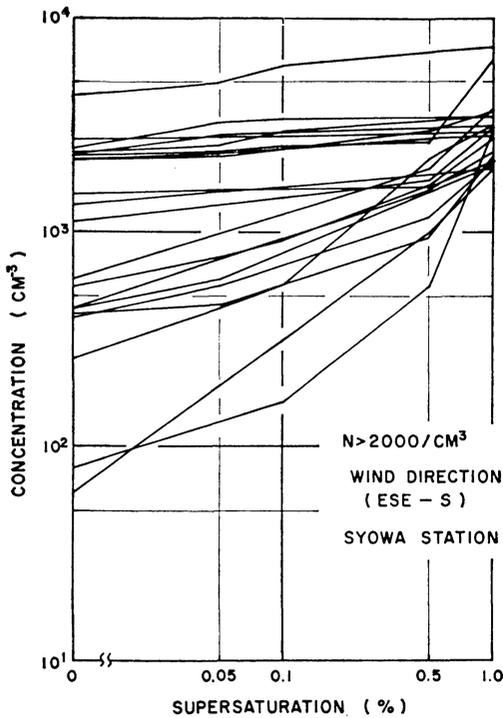
る.

3.2. 凝結核

南極では人工的な空気の汚染源がほとんどないので降水要素として氷晶核と共に重要な凝結核の濃度は低いことが想像されるが, 未だ観測例はなくそのオーダーすらわかっていない. Chemical Diffusion Chamber を使って過飽和度0%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1.0%の5段階で活性化する凝結核を同時に測定した(Kikuchi, 1971b). その結果, 昭和基地での平均濃度は過飽和度

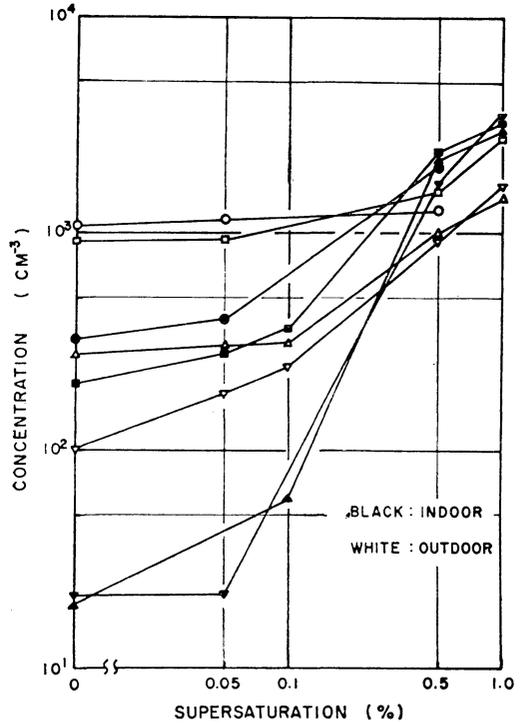


第2図 -20°C 氷晶核の月平均濃度と 月平均気温分布

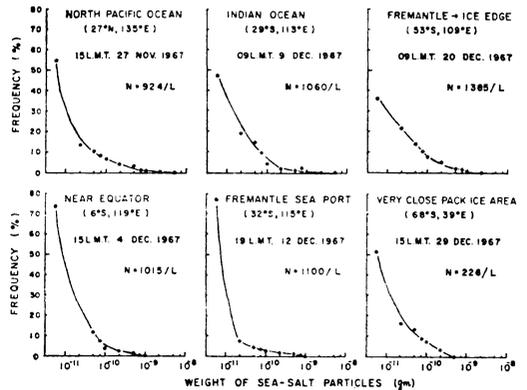


第3図 凝結核の過飽和度による濃度分布傾向

0%で $3 \times 10^2 / \text{cm}^3$, 1%で $8 \times 10^2 / \text{cm}^3$ であり, 最大濃度はそれぞれ $3 \times 10^3 / \text{cm}^3$, $4 \times 10^3 / \text{cm}^3$ であった. 過飽和度1%で $2 \times 10^3 / \text{cm}^3$ 以上の濃度を示した時の過飽和度に対する濃度のスペクトルには, はっきりした2種類の型があり, その一つは0%で $2 \sim 3 \times 10^3 / \text{cm}^3$, 1%で $2 \sim 4 \times 10^3 / \text{cm}^3$ という過飽和度にはほとんど依存しないフ



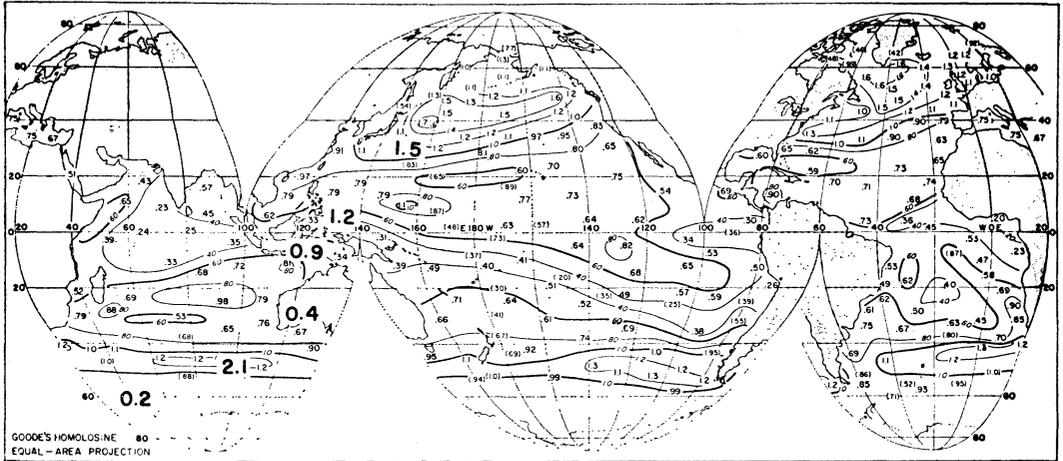
第4図 室内外の凝結核の過飽和度による濃度分布傾向



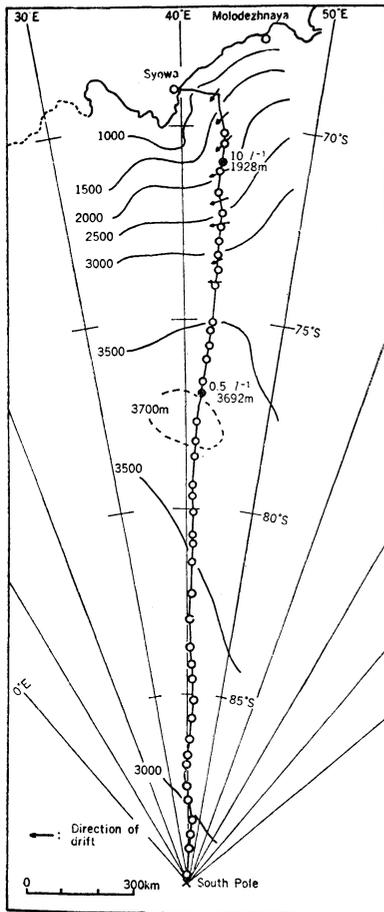
第5図 6 海域における海塩粒子の頻度分布

ラットな型と, 0%で $1 \sim 5 \times 10^2 / \text{cm}^3$, 1%で $2 \sim 4 \times 10^3 / \text{cm}^3$ の急勾配をもつものであった(第3図). この内, 後者に関しては風向および燃焼空気の過飽和度に対する濃度勾配の型(第4図)から man-made source と考えられ, 前者に関しては oceanic なものと考えられた.

3.3. 海塩核



第6図 6海域における海塩粒子の平均濃度 (太字) (原図は Toba (1966) による)

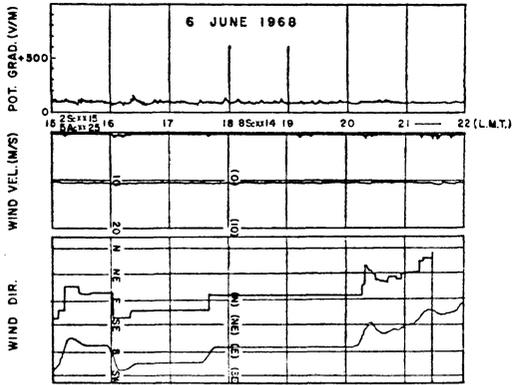


第7図 南極大陸上の海塩粒子の濃度分布

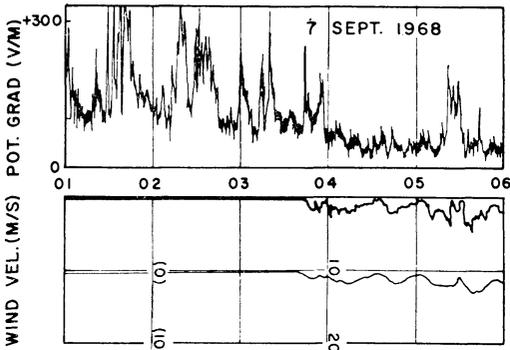
東京からオーストラリアの西海岸フリーマントルを経て昭和基地に至る 海洋上, および 昭和基地での1年間と, 昭和基地から南極点までの氷床上での海塩核の測定を行なった. 東京から昭和基地までを航路に沿って6区域に分けると, 北太平洋, インド洋, 暴風圏と赤道付近, フリーマントル港内, 海水域とでは期待されるように海塩粒子の質量分布に顕著な差が認められた(第5図). また各区域における平均濃度は第6図の太字で示されるように Toba (1966) の計算結果をよく表わしていた(Kikuchi and Yaura, 1970). 昭和基地での結果は年間を通して 100/l の濃度を越えることは減多になく, 約半数は殆んど認められなかった. このことは基地周辺部は沿岸から数10km 以上にわたって海氷に覆われていること, また海水の少ない夏期は非常に安定した天候であること, 冬期の強風時には常に降降雪を伴うため wash-out により除去される為と考えられる. その証拠に snow drift の融けた12月頃に風送塩の現象が卓越風向に沿って顕著にみられることから納得される(菊地・矢浦, 1970). 一方昭和基地から南極点までの結果は第7図に示されている(Kikuchi and Fujiwara, 1971). 南緯71度の10/l は沿岸からの距離, drift の方向, 基地の11月の平均濃度が3/l であることから期待できるとしても, 南緯77度の氷床上でも僅かながら浮遊していることは興味深い.

3.4. 大気電場

南極における大気電氣的な観測は Simpson (1919) によって最初に行われ, 最近相ついで観測が行われたが, それらのいずれもは主として blizzard に注目したもの

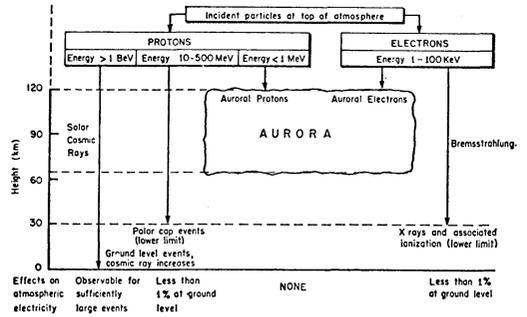


第8図 昭和基地における静穏な大気電場の記録



第9図 昭和基地におけるオーロラによるとと思われる大気電場の擾乱の記録

である (Barré, 1953, Herman, 1964, Wishart and Radok, 1966, Buis, 1968). 昭和基地においても blizzard を含めていくつかの興味あるデータが得られたが (Kikuchi, 1970b), 特にいわゆる静穏電場に顕著な日変化が認められなかったことである。南極においては年間を通して数 m/sec 以上の風が吹くということは、それがその儘、低い地吹雪などの降水現象を伴うので最終的には大気電場に非常に大きな影響を与えることになる。にもかかわらず Carnegie 号の観測結果以来 (Mauchly, 1926), 大気電場は1800U.T. に peak をもつ日変化を示すという結果が数多く報告されてきた。しかしながら先に述べたように、降水の有無、風速の強弱、波浪の大小といったことについての考慮には触れず静穏電場の定義もはっきりしていないように思われる。第8図は昭和基地で得られた静穏電場とその時の風速の記録の一部を示したものであるが、この例では50時間にわたってこの状態が続いており、電場変動の範囲



第10図 大気圏上部への入射粒子と大気電場への影響 (Pakiam and Johnson, 1967)

を静穏電場値の2倍以内で20時間以上継続し、風速4 m/sec 以下という条件で日変化を括めると、最大値は2000U.T. 頃にあるが、その値は最小値の僅か13%増しか示さないという結果が得られた。第9図はオーロラの影響と思われる例を示したものである。一般に電場は降水や雲によって大きく影響されるが、この例では03時の観測では雲量0、無風、オーロラのみ活潑だったことが報告されている。最近 Pakiam and Johnson (1967) は以上のエネルギーを持つプロトンのみが地上大気電場に影響を与える可能性があることを示唆しているが (第10図)、両者の関係については両論あり今後の研究が待たれる。

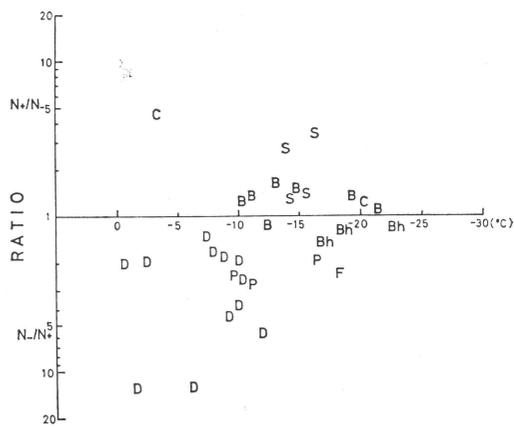
3.5. 降、飛雪の電荷

年間を通しての降雪、また blizzard の際の雪粒の電荷を測定した。特に降雪粒子の電荷発生機構の観点から雪結晶の電荷と結晶形の関係をみるために多くの降雪の電荷の測定と同時に顕微鏡、レプリカ法による結晶形の同時観測が行われた (Kikuchi, 1973)。その結果、第11図に示される如く、樹枝状六花 (D)、角板 (P) は負の電荷を有するものが多く、それに対して角柱 (C)、砲弾集合 (B)、側面結晶 (S) は正の電荷を有するものが多かった。これらの結果は、観測場所が清浄な南極であること、大きな雪片や雲粒付結晶や霰がほとんど降らないこと、天然の降雪でしかも各降雪毎の測定個数が500~20000個と非常に多いこと、大気電場の変動にいわゆる wave pattern がなかったことなどから信頼のおけるものと思われる。

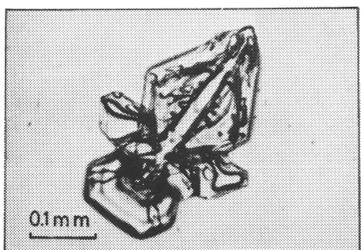
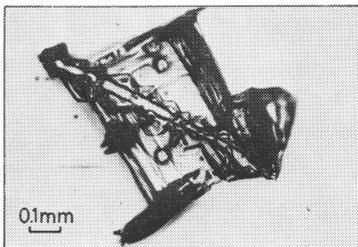
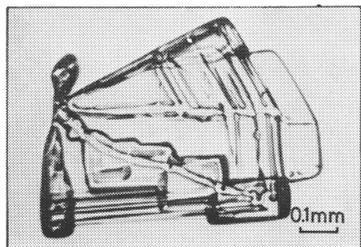
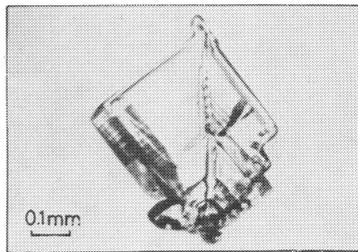
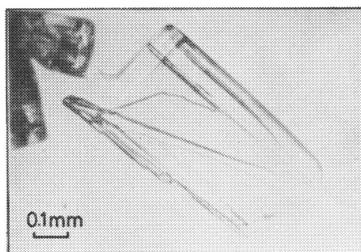
3.6. 雪、氷晶の結晶形

越冬期間中に発見された特異な形の雪結晶については既に報告してきたが (Kikuchi, 1969, 1970a, Kikuchi and Yanai, 1971, Kikuchi, 1972a, b)。その後のデータ

—も含めてそれらは第12, 13図に代表されるであろう。これらの結晶が報告された時点では種々議論が沸騰したが、その後菊地 (1971) の北海道, 岩井 (1972) の志賀高原と報告されるに及んで最近では天然雪の畸形として扱われるようになった。この畸形雪結晶がどの程度の割合で見出されるかどうかは、もちろん降雪によって異なるが、例えば1972年1月30日の石狩の例 (第14図) では、上段のレプリカの中に下段に示した4個の畸形雪結晶が含まれていることがわかる。過去の Snow Crystal Sonde のフィルムをこの点から見直してみると第15図のA~Fに示される結晶がそれぞれ -30°C (680mb) 付近で集中的に捕捉され、想像していたよりかなりあることが確認された (菊地, 1974)。今回の畸形雪結晶、さらに Bentley and Humphreys (1931), Nakaya (1954), Клинов (1960), 樋口 (1968b), Ohtake (1970) 等に



第11図 雪の結晶形と電荷符号との関係 (B: 砲弾および砲弾集合, C: 角柱, D: 樹枝状六花, F: 凍結雲粒, P: 角板, S: 側面結晶, Bh: 中空砲弾)

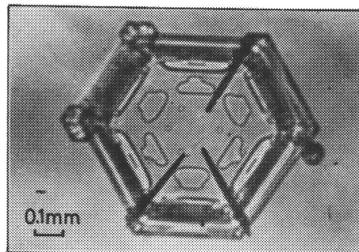
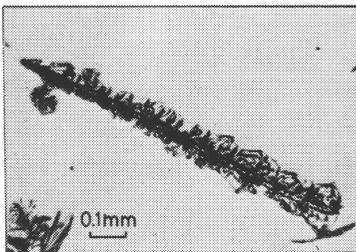
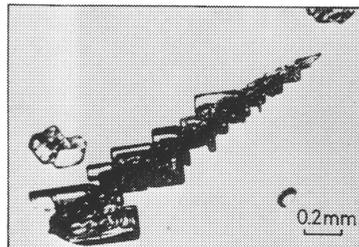
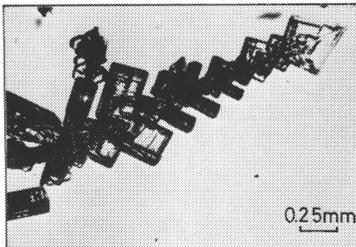
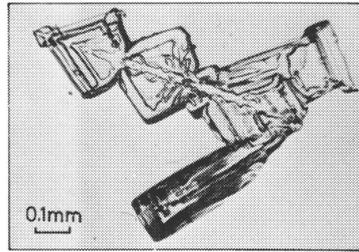
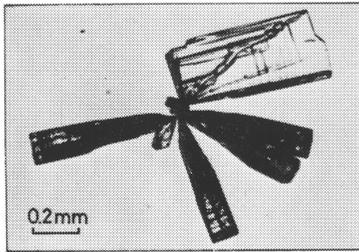


第12図 代表的な畸形雪結晶

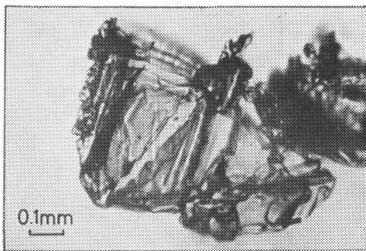
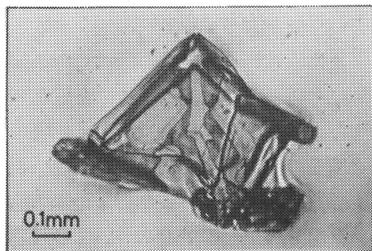
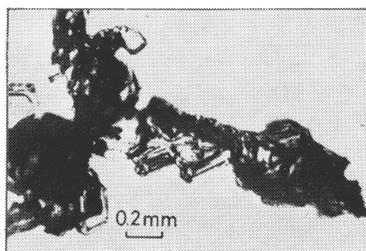
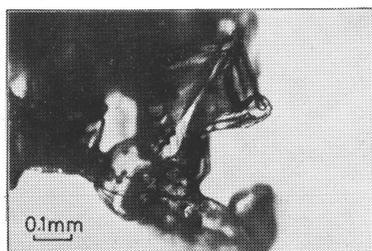
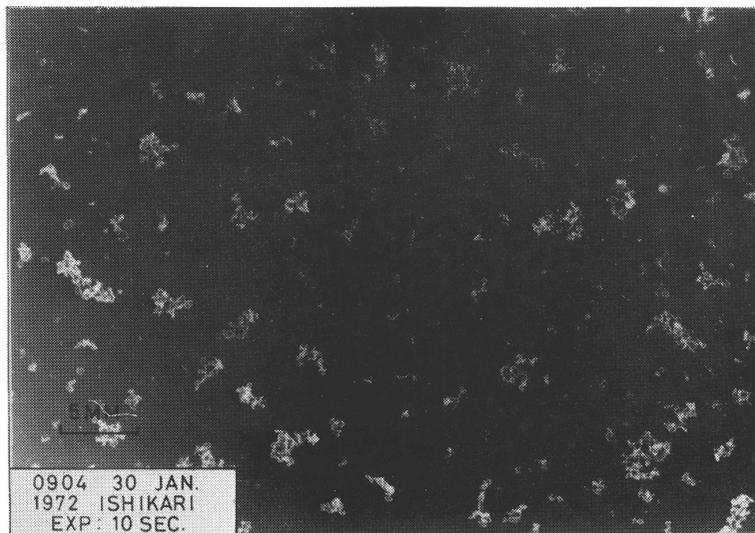
よって報告されたものを集録し、これらの相互の關係の系統化を試みたのが第16図である。この図では必ずしも左の結晶から右の結晶へ成長するというを示している訳ではなく相互に關係があることを意味しているのだが、これらの結晶の成長が何に依存しているかについては現在のところよくわかってはいない。もちろん従來の結晶と同様温度、過飽和度による他、核の種類大きさ等を強調する人もいるし、更に放射冷却を強調する人もいる（樋口、1968a）。畸形雪結晶の大部分は温度に関して -35°C 以下（最近は -25°C 以下とも考えられる）であるということはかなり確率の高い観測事実なのだが、しかし Yamashita (1971, 1973) のようにドライアイスや液体窒素の種播きで $-1.9\sim-11.1^{\circ}\text{C}$ 、 -20°C 以下でも数多くの外形が類似の結晶が発生し、しかも両方の温

第2表 正常、非正常で分類した雪結晶

正常な結晶	非正常な結晶	
(単結晶) ◦ 角板 ◦ 樹枝状 ◦ 角柱 ◦ 単砲弾等	(多結晶) ◦ 立体樹枝 ◦ 放射樹枝 ◦ 交叉角板 ◦ 砲弾集合等	いわゆる畸形
		(単結晶) 畸形 ◦ 針状角柱 ◦ 針状砲弾 ◦ 14面体 ◦ 20面体等 (単または多結晶) ◦ 特定の角柱面の成長した結晶 ◦ 四角板、長方形角板 ◦ 三角板 ◦ 立体針状付角板 ◦ 菱形の組合せ ◦ 約 15° 、 30° ずれた結晶等



第13図 代表的な畸形雪結晶



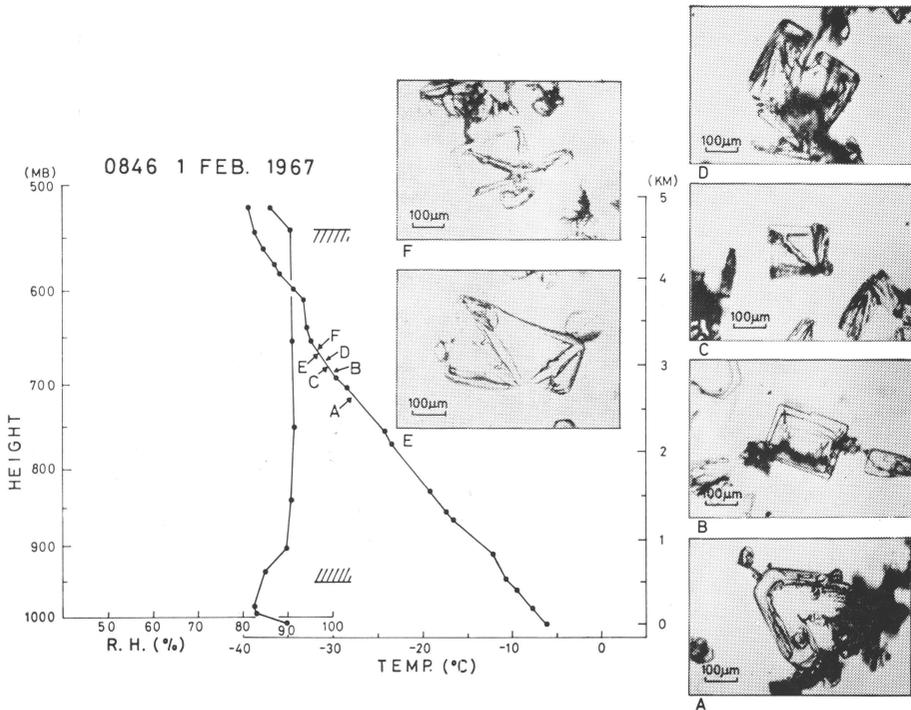
第14図 地上でのレプリカ観測によって得られた畸形雪結晶

度領域での結晶習性は大体同じらしいという実験事実もあるので、今後は天然雪の畸形の観測データの集積と山下の実験事実を combine する factor は何かということが問題となろう。

第16図に示したような結晶の多くが今日までPeculiar, Unknown, Uncommon, Unusual とか特異な、めずらしい、畸形といった表現で報告されてきたものであるが、“特異な雪”を今後の研究においてどのように定義したらよいか、またそれらに対する“正常な雪”とは何を指

すかが問題となるであろう。このように考えてみると、これらの関係は第2表のように括められるのではなからうか。

つまり“正常な結晶”とは小林(1970)が提唱しているような微小六角柱を基本として主軸方向へ鞘状成長、針状成長するものまたは副軸方向へ扇形成長、樹枝状成長するもので、“縁からの成長”、“角からの成長”で表現される成長機構で成長した樹枝状結晶、角板、角柱結晶などで代表される雪結晶は全て“正常な結晶”とするの



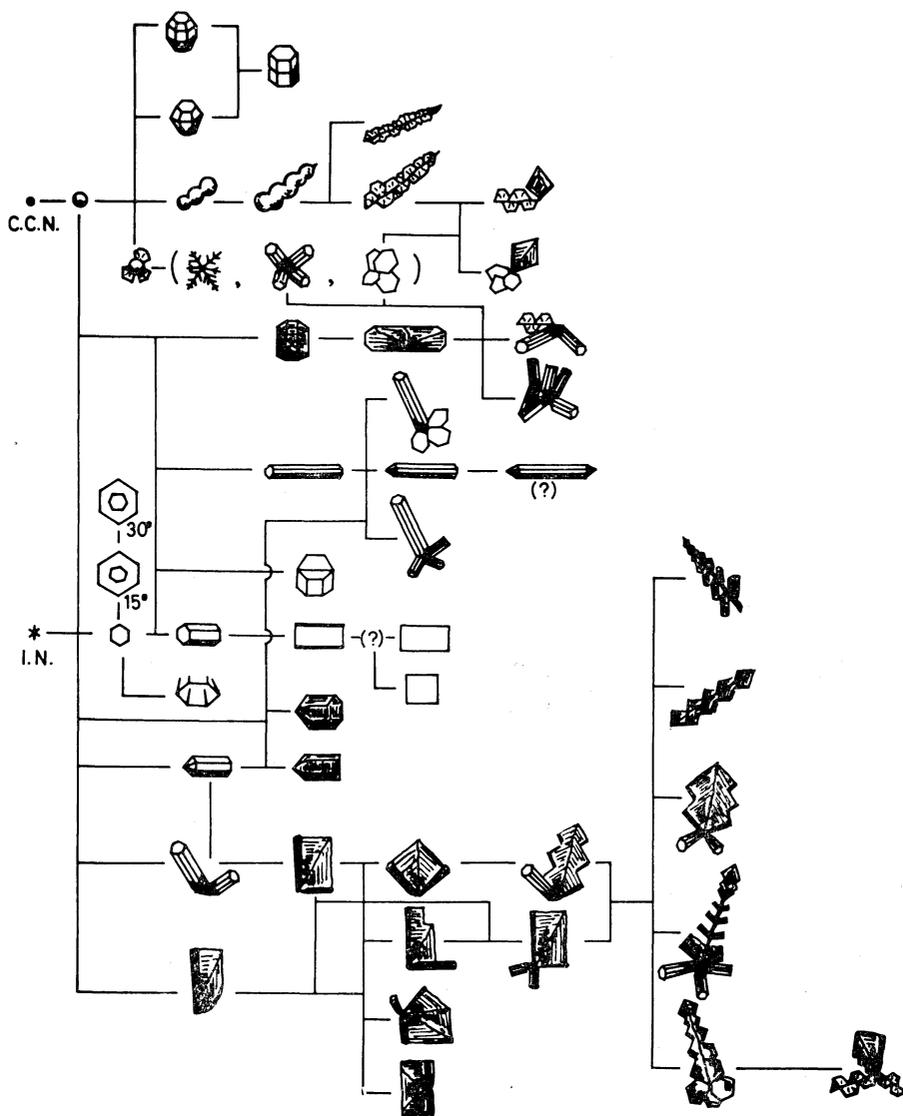
第15図 UD-Sonde, Snow Crystal Sonde の同時飛揚によって得られた状態曲線と畸形雪結晶

がよいであろう。またこれらは全て単結晶である。これに対してよく知られた立体樹枝、放射樹枝、交叉角板（従来の側面結晶）、砲弾集合等をここでは“非正常な結晶”としたが、正常な結晶の単結晶に対して多結晶であること、しかし温帯地方では容易に観測されること、また完全とはいえないまでもその成長機構に関する実験および観測事実等からしておおよその成因が掘められていることなどから、いわゆる畸形とは区別した方がよいであろう。従ってこの流儀でゆくと、従来の畸形は“いわゆる畸形”を扱ってきたことになる。しかし“いわゆる畸形”でも針状角柱、針状砲弾、14面体、20面体等の各結晶は全て単結晶であり、針状角柱に関してはその成長機構も解明されており（Kobayashi, 1965）、14、20面体結晶に関しても高次の面が現われてもそれは正常な六角柱への過渡的なものであるため、今後の“畸形雪結晶”は第2表の“畸形”の欄の特定の角柱面の成長した結晶、三角板、四角板、長方形角板、立体針状付角板、菱形の組合せ、約15°、30° ずれた結晶等ということになるであろう。しかしこの内、三角板、四角板、長方形角板は単結晶と考えられ、特定の角柱面の成長した結晶とは別の観点から考察しなければならず、また立体針状付角

板（第13図右下）にいたってはいわゆる小林（1970）の“^{かど}角からの成長”とは異なる成長であり、明らかに多結晶である。菱形の組合せの菱形結晶は基底面であるらしいのだが未だデータ不足である。更に六角板状結晶内部にみられる約15°、30° 副軸のずれた結晶にいたってはやっとその事実気付いたばかりである。このようにしてみると“畸形雪結晶”には目下のところ単結晶、多結晶の両方が含まれているが近い将来多結晶だけが“畸形”として残り、また新たに多結晶が“畸形”として登録され、その成因についての議論や実験が為されるであろう。

4. おわりに

越冬中に得られたデータの全てが解析し終わっているわけではないが、現在までに発表した結果の一部を紹介しました。今回報告した結果の多くはどちらかといえば問題提起という形が多いので、今後この方面の研究がますます発展することを願っております。幸い日本気象学会に南極委員会が発足し、第17次隊からまた研究観測が再開される予定と聞いております。また春季大会ではPOLEX-NORTH, SOUTHの Informal Meetingが行われ、秋季大会には極気象のセッションが設けられる



第16図 現在までに報告された畸形雪結晶の相互関係

と聞いております。是非ともこの分野の研究が遂行されて欲しいものです。

今回の受賞に際しまして、私に越冬の機会を与えられました地球物理研連委気象分科会の諸先生、学会で討論して下さい下さった方々、特に雲物理、大気電気関係の方々に厚く御礼申し上げます。

研究観測の計画、実施、その後の討論については全面的に北海道大学理学部教授孫野長治先生の御指導をいただきました。氷晶核の観測については故丸山晴久博士、凝結核では現長期予報課長内田英治博士、海塩核では東

北大学理学部鳥羽良明教授、大気電場では埼玉大学工学部北川信一郎教授、気象研究所小林正治氏にお世話になりました。また昭和基地では第9次隊村山雅美隊長（現国立極地研究所次長）、気象定常部門山崎道夫（佐賀地方気象台長）、井部良一（沖縄気象台）、福谷博（気象庁高層課）の各隊員および機械担当の関野保（いすゞ自動車）隊員には種々御協力をいただきました。心から謝意を表します。

文 献

- Barré, M., 1953: Propriétés électriques du blizzard, *Ann. de Géophysique*, **9**, 164-183.
- Bentley, W.A. and W.J. Humphreys, 1931: *Snow Crystals*, McGraw-Hill Book Co. 266pp.
- Buis, P.M., 1968: Expédition Antarctique Belgo-Néerlandaise 1964, "Atmospheric Electricity", Exantar, Bruxelles, 1-40.
- Herman, J.R., 1964: On the electrical properties of blowing snow, *Ann. de Geophysique*, **20**, 235-241.
- 樋口敬二, 1968a: 極地に降る雪, *自然*, **23**, No. 8, 38-46.
- 樋口敬二, 1968b: パローで観察した氷晶の特徴. 日本気象学会秋季大会講演予稿集, **14**, 62.
- 岩井邦中, 1972: 志賀高原で観測された特殊な雪について. 信大志賀自然教研業績, **11**, 81-91.
- 菊地勝弘, 1970: 南極昭和基地における雲物理・大気電気観測報告, *天気*, **17**, 193-202.
- 菊地勝弘, 1971: 北海道で観測された南極形畸形雪結晶. 北大地球物理学研究報告, **25**, 167-180.
- 菊地勝弘, 1974: いわゆる畸形雪結晶について, 日本気象学会春季大会講演予稿集, **25**, 62.
- Kikuchi, K., 1969: Unknown and peculiar shapes of snow crystals observed at Syowa Station, Antarctica, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **3**, 99-116.
- Kikuchi, K., 1970a: Peculiar shapes of solid precipitation observed at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc., Japan*, **48**, 243-250.
- Kikuchi, K., 1970b: Observations of atmospheric electric field at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc., Japan*, **48**, 452-460.
- Kikuchi, K., 1971a: Observations of concentration of ice nuclei at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc., Japan*, **49**, 20-31.
- Kikuchi, K., 1971b: Observation of cloud condensation nuclei at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc., Japan*, **49**, 376-383.
- Kikuchi, K., 1972a: Sintering phenomenon of frozen cloud particles observed at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc., Japan*, **50**, 131-135.
- Kikuchi, K., 1972b: On snow crystals with small raindrops, *J. Meteor. Soc., Japan*, **50**, 142-144.
- Kikuchi, K., 1973: On the polarity of the electric charges on snow crystals of the various shapes, *J. Meteor. Soc., Japan*, **51**, 337-345.
- Kikuchi, K. and K. Fujiwara, 1971: Observation of giant sea-salt particles from Syowa Station to the South Pole, *JARE Sci. Rep. Special Issue, No. 2*, 110, -112.
- Kikuchi, K. and K. Yanai, 1971: Observation on the shapes of snow crystals in the south pole region in summer, *Antarctic Record*, **41**, 34-41.
- 菊地勝弘・矢浦省吾, 1970: 昭和基地における海塩核の観測, 日本気象学会春季大会講演予稿集, **17**, 13.
- Kikuchi, K. and S. Yaura, 1970: Observations of giant sea-salt particles over the ocean from Tokyo to Syowa Station Antarctica, *J. Meteor. Soc., Japan*, **48**, 377-380.
- 小林禎作, 1970: 雪の結晶—自然の芸術をさぐる—講談社, 304pp.
- Kobayashi, T., 1965: Vapour growth of ice crystals between -40 and -90°C , *J. Meteor. Soc., Japan*, **43**, 359-367.
- Nakaya, U., 1954: *Snow Crystals, natural and artificial*, Harvard Univ. Press, 510pp.
- Ohtake, T., 1970: Unusual crystal in ice fog, *J. Atmos. Soc.*, **27**, 509-511.
- Pakiam, J.E. and D.W. Johnson, 1967: The effects of particle radiation from a disturbed sun on atmospheric electricity, *Canad. J. Phys.*, **45**, 1337-1351.
- Simpson, G.C., 1919: *Brit. Antarc. Exped, 1910-13. Meteorology*, **1**, 302-312.
- Toba, Y., 1966: On the giant sea-salt particles in the atmosphere. III, An estimate of the production and distribution over the world ocean, *Tellus*, **18**, 132-145.
- Wishart, E.R. and U. Radok, 1966: Electrostatic changing of aerial wires during antarctic blizzards, *Univ. of Melbourne, Meteor. Dept., Publication*, No. 8, 1-26.
- Yamashita, A., 1971: Skelton ice crystals on nonhexagonal shape grown in free fall, *J. Meteor. Soc., Japan*, **49**, 215-231.
- Yamashita, A., 1973: On the trigonal growth of ice crystals, *J. Meteor. Soc., Japan*, **51**, 307-317.
- Клинов, Ф.Я., Вода в Атмосфере при Низких Температурах. Издательство Академии Наук СССР. 170pp.