

極域における雲物理学研究—「地の底 海の果」と「硝子の壁」—

2000年度藤原賞受賞記念講演

菊地 勝弘*

1. プロローグ

このたび「極域における雲物理学研究およびレーダー観測の確立への貢献」に対して日本気象学会藤原賞をいただくことができました。20世紀最後の節目の年に、また恩師の孫野長治先生が亡くなられて15年、雪の博士として知られる北海道大学(北大)理学部物理学教室の故中谷宇吉郎先生の生誕100年という記念すべき年に、極域の雲物理学研究という、雪結晶や降雪現象のレーダー観測に関するところで藤原賞をいただいたということで感慨無量のものがあります。

勿論、私は藤原咲平先生には一度もお会いしたことがありません。亡くなられた昭和25年(1950)は、私はまだ高校1年だったからです。その後、気象学を志して、何度か気象庁で開かれた気象学会に出席した時、近くの神田の古本屋で購入した『群渦』(藤原, 1950)という随筆集からと、御次男で北大理学部物理学教室出身の藤原滋水さんが函館海洋気象台長をされていた頃、私が幹事役をして毎年2回札幌周辺で開催していた中谷宇吉郎先生を偲ぶ会に何度か出席された折に、時々ポツリとお父様の話がされるのをお聞きした位でした。

中谷先生を偲ぶ会には、勿論先生の愛弟子で、学生の頃は、中谷先生の人工雪、特に暖かい温度領域の角柱結晶や針状結晶の生成にも携わった、初代の北大地球物理学教室気象学講座担当の孫野長治先生(1967年「雲物理学に関する実験的並びに観測的研究」により藤原賞受賞)や、この2000年3月に亡くなられた、元日

本雪氷学会会長で中谷教室の助教授を務め、氷の物性研究で業績を残され、岩波新書に『雨を降らせる話』(東, 1954)の著書もある東 晃先生や「降雪雲の構造的な研究」で1965年学会賞を受賞した名大名誉教授の樋口敬二先生等が出席されました。その他、直接の門下生ではありませんでしたが、先生の研究の流れを汲み、「電子顕微鏡による海霧の凝結核及び海洋性エアロゾルの物理的ならびに化学的性質の研究」で、1955年学会賞を受賞した北大低温研所長の故黒岩大助先生や同じく1960年に「雪の結晶習性に関する研究」で学会賞を受賞された北大低温研教授の故小林慎作先生等がいつも御夫妻で参加されていました。私は孫野先生の最初の弟子であったが、幹事をおおせつかって、毎回、偲ぶ会を企画し、実施した。

2. 中谷ダイアグラムと手稲山雲物理観測所

1957年4月、孫野先生のもとで、最初の大学院のゼミが始まった。「雲物理学」のゼミでは、アメリカ気象学会から出版された“Compendium of Meteorology”(1959)の中の“Cloud Physics”や“Clouds, Fogs, and Aircraft Icing”の章が使用された。“The Physics of Clouds”(Mason, 1957)が使われたのは、それから数年後であった。一方、「気象学特論(I)」では、Chalmersの“Atmospheric Electricity”(1950, 1957)が使用されたが、先生の教科書をコピーすることから始まった。コピーといっても今流のコピー機がある訳もなく、暗室内で教科書をマイクロフィルムで撮影し、1頁ずつコピー用のキャビネサイズの印画紙に引伸ばし、フェロタイプで乾燥させて作るといった手間のかかる作業であった。そんなことで、一番先に技術が上達したのは、暗室の使用法と写真のDPE技術であった。

中谷先生の「雪の研究—結晶の形態とその生成—」

* 秋田県立大学生物資源科学部,
kikuchi_snow@akita-pu.ac.jp

—2001年4月20日受領—

—2001年8月14日受理—

(1949)が岩波書店から出版されたのは1949年で当時の価格で2,500円、私が入手できたのはそれから大分後のことだった。この本にはいわゆる今日私達の中谷ダイヤグラムとっている図はなく、240頁に横軸 T_a (結晶が成長するところの気温)、縦軸に T_w (水蒸気発生源のピーカーの水温)をとって、 T_a と T_w との関係を見た結果として第78図に示すとしてある。この本の英訳版に対応する Harvard Univ. Press から出版された“Snow Crystals, natural and artificial” (Nakaya, 1954)には、Fig. 448に今日でいう中谷ダイヤグラムがのっているが、この図の説明では、 T_a - s diagram (s は氷に対する過飽和度)として紹介してあり、Index of Subjectsにも Nakaya diagram としての項目はない。そして、“ T_a - T_w との関係”は、この本では T_a - T_w diagram としてみることが出来る。1957年に出版された Mason の“The Physics of Clouds”では、Nakaya diagram と T_a - T_w diagram の紹介はなく、Nakaya が T_a - T_w diagram とした図の説明を“Relation between Nakaya's crystal forms and the temperatures T_a and T_w ”として、1971年の第2版でも (Mason, 1971)、同じ図を同じ説明で引用している。このことから、中谷ダイヤグラムは孫野先生や樋口先生が、師を慕って、若しくは、簡単のために便宜上、使った語ではないかと思われる。それで思い出されるのは、Magono and Tazawa (1966) が J. Atmos. Sci. に著した“Design of Snow Crystal Sondes”の論文に中谷ダイヤグラムを引用した時、アメリカ人の Reviewer の1人から、中谷ダイヤグラムとは何かとのコメントを貰った。当時、この論文の図版をトレースした私は孫野先生と中谷ダイヤグラムを知らない雲物理学屋が Reviewer をしているのかと思い、びっくりさせられたが、きっとこんな経緯があつてのことなのであろう。

孫野先生は、2人の院生が入ってきたことで大変張切っておられた。それまで、アメリカ気象学会誌“Journal of Meteorology”に投稿されていた初期の論文等から推察されるように (Magono, 1951, 1954)、先生は雪片の落下速度や落下中の水滴の形状といった、実験や観測的研究のほとんどを1人で行っていたからである。当時、先生は個人研究とプロジェクト研究のいくつかを同時に走らせていた。まず、高橋 劭さん (元九州大学教授、現桜美林大学教授)には、過冷却雲粒の捕捉や、霧の電荷発生機構 (Magono and Takahashi, 1963a, b) を、私には雲粒や氷晶の電荷の測定



第1図 札幌郊外手稲山頂の北大雲物理観測所 (撮影：谷口 恭)。

(Magono and Kikuchi, 1961) をテーマとして与えられた。そのためには、まず天然の雲の中に入る必要性を強く感じておられ、1957年 (昭和32年) 夏には札幌郊外の手稲山山頂 (1,024 m) に1坪 (3.3 m²) のプレハブ小屋を2戸組み立てた。1戸は高橋さんと私が寝袋で休むスペース、他の1戸は観測室で屋根には天蓋がとりつけられ、風向きによって天蓋を回転させ、雲粒を部屋の中に吸引し、直交流を重畳した電極の間を通過させて、雲粒個々の荷電量と符号を測定するのである。年間を通して、雲粒は温暖、過冷却、凍結雲粒と氷粒に分けられたが、いずれの雲粒も負電荷を有するものが多く、降雨の場合と同じように大気電場との間に鏡像関係 (大気電場の符号と降水粒子の電荷の符号が逆の場合で、連続記録をとると、両者は時間軸を挟んで鏡像関係になることから、このように呼ばれている) が成り立っていた。私達がこの研究を始めた頃、Twomey (1956) がオーストラリアのタスマニア島ウエリントン山で世界で最初に雲粒個々の電荷の測定結果を報告し、大変口惜しがったのを今でも思い出します。

一方、孫野先生はプロジェクト研究の1つとして、中谷ダイヤグラムの天然への適用の可否を考えておられ、そのためには手稲山に作ったプレハブ小屋では、大勢の人数が宿泊できないことから、次の冬には鉄筋ブロック2階建の観測所を作った (第1図)。入り口には立派な門柱が建てられ、中谷先生によって、「北大雲物理観測所」と命名された。

最初のプロジェクト研究は、「手稲山降雪総合観測」として、手稲山麓観測点 (海拔100 m) から、3合目 (300

m), 5合目:北大パラダイスヒュッテ(560 m), 8合目(800 m), 雲物理観測所(1,020 m)の5点に各2人を配置して,雪結晶の顕微鏡及びレプリカ観測と温度,湿度の観測を10分毎に行った.今から約40年前の当時は5台の自動温湿度計はなく,アスマン乾湿計を午前,午後,夜間にわたって降雪の中,イグルーを利用してのそれぞれ10分毎の3時間の観測は今ではとても考えられないことである.このように手稲山を使った鉛直分布の観測は5シーズン続いた(Magono *et al.*, 1959, 1960, 1962, 1963, 1964).その間,孫野先生はほとんど観測所に滞在し,深い雪の中,20 l入りの水囊で水運びなどをして協力していた.そして,時には中谷先生の陣中見舞いがあり興奮した.その間,厳冬期の早朝,手稲山頂から石狩湾上に発生した蒸気霧(けあらし)は,いってみれば数10 km²スケールの一種の気団変質の状況を表しており“Coastal Clouds”と名付けられた(Kikuchi, 1964).降雪観測はその後「石狩平野降雪総合観測」へと引き継がれ,降雪の鉛直分布は平野内の水平分布の観測へと変って,研究室ではじめてメソネットワークによる観測となった.この観測では,人工衛星 TIROS による雲画像で認められた帯状雲が石狩平野上での帯状降積雪域に対応するかが注目され3年間続けられた(Magono *et al.*, 1966; Kikuchi, 1967, 1968).

私は,国内の降雪観測と併行して1960年の夏には,アラスカ・メンデンホール氷河調査を,そして1962年の厳冬期には,中谷先生のプロジェクトの一環としてアラスカ州とカナダ・ユーコン準州の国境近くのピーターズ湖(69°N, 145°W)の湖水調査(Muguruma and Kikuchi, 1963, 1964)を行ったが,帰国途中で先生の訃報を聞くことになった.

一方,孫野先生の雷電気研究は更に進んで電荷発生機構を高橋 劭さんに,雷雲下の大気電場と降水粒子電荷の極性間に認められる鏡像関係現象を私に託していた.1965年5月24日~6月1日にかけて,東京の帝国ホテルと札幌では北大を会場にして,第4回国際雲物理学会議(ICCP, IAMAP)(Hatakeyama, 1965a, b)が開かれた.この大会が東京の後,会場を札幌に移して行われたのは,日本での雲物理の国際会議を強く要望していた中谷先生を記念してのものであり,北大ではクラーク会館での“The Sapporo Seminar on Precipitation Physics”と名付けられ,雲物理学の大御所達が記念講演を行った.その時の論題は以下の様なものであった.

- Fletcher, N. H. : The Theory of Ice Crystal Nucleation,
 Mason, B. J. : The Nucleation and Growth of Ice Crystals,
 List, R. : The Mechanism of Hailstone Formation
 Braham, R. R., Jr. : The Aerial Observation of Snow and Rain Clouds,
 Magono, C. : The Snowfall in the Winter Monsoon Season of Japan,
 Belyaev, V. I. : On the Equation of Kinetics of Precipitation Formation.

この後,地球物理学教室の講義室での気象学講座の研究内容をパネルやデモ実験で紹介した.当時のパネルはつい最近まで保管されていたが,昨今の大学院改革や学生の定員増によって保管場所がなくなり,私の退官を機に処分してしまった.私としては,いつか次のICCPを札幌でやる時には,この時のパネルも紹介するような企画をと考えていたのだが,果たせ仕舞になってしまった.国際会議で口頭発表の機会を与えられた私の論文は,負電荷を有する雪結晶が融解によって正電荷に変わるメカニズムについてのものだったが,(Magono and Kikuchi, 1963, 1965; Kikuchi, 1965 a, b),当時の雲物理学分野では飛ぶ鳥をも落とす勢いだったロンドン大学のB. J. Mason教授から絶賛された.それというのも,ほとんど時期を同じくしてMasonのグループも(Matthews and Mason, 1963)同じ観点から研究をしていたからである.私の発表に質問をし終わったMasonが,札幌はロンドンと違って,降雪条件に恵まれていて種々の結晶を使って研究できることが羨ましいと言った.Masonに褒められたということで嬉しくなり,早めに渋谷の宿に帰って風呂に入っていたら孫野先生も入ってこられた.先生の背中を流しながら,Masonの賛辞を2人で喜び合った.先生は修士論文ではTwomeyに先を越されたが,今度は天下のMasonに勝ったねと言われ,これ以上の喜びはなかった.中谷先生も孫野先生も褒め上手であったが私はとうとう先生を真似ることはできなかった.私の至らぬところである.私の博士論文がMasonの評価によって少なくとも1年は早くなった筈である.このような,手稲山頂での雲物理観測や降雪観測,そして厳冬期の北極域での観測経験が買われたのでしよう.1968~69年にかけての第9次日本南極地域観測隊員として,雲物理学分野では世界ではじめて南極での越冬観測の機会が与えられたのは,幸運以外の何

ものでもなかった。

3. 南極観測

3.1 昭和基地における雲物理学, 大気電気学越冬観測

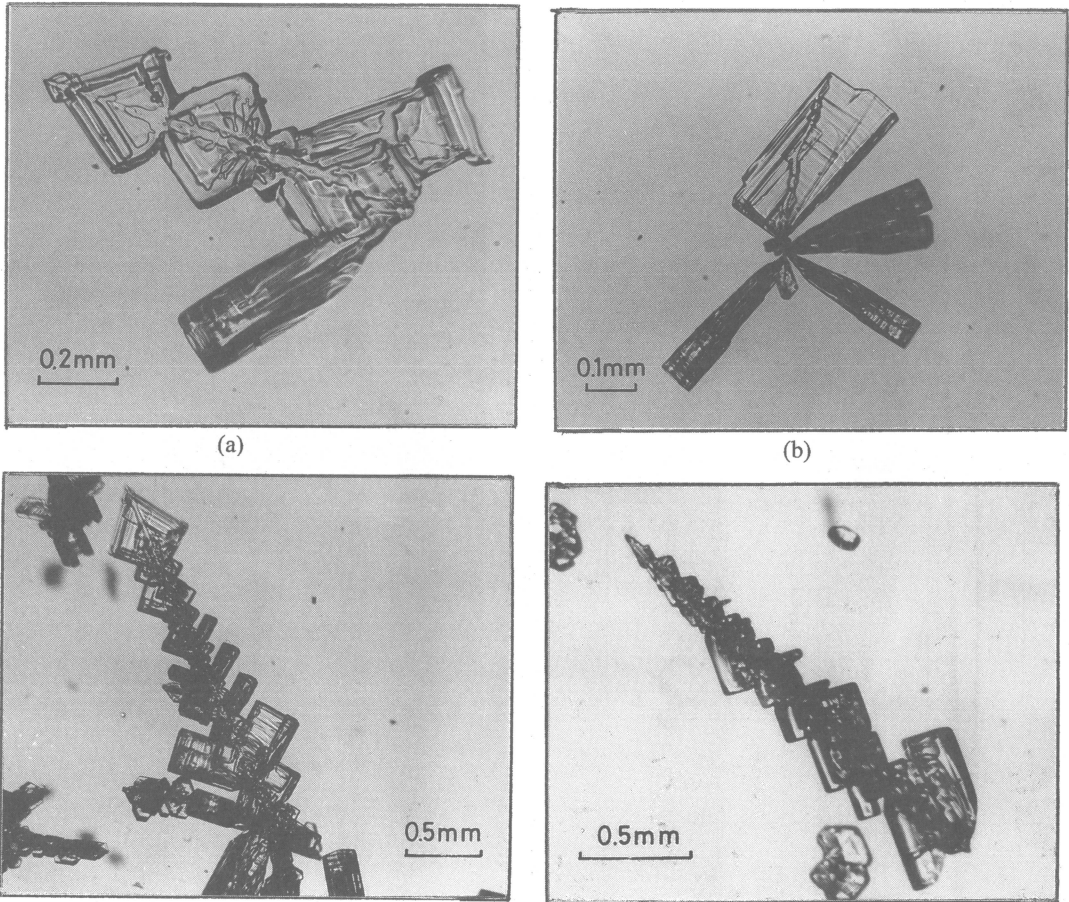
1966年12月地球物理学研究連絡会議気象分科会幹事より、孫野先生の越冬隊員候補者の推薦についての気象研究観測のテーマは、雲物理学では(1)全地球的雲物理学の一環としての極地雲物理観測、(2)南極の特殊条件下における雲物理研究であった。一方、大気電気学では(1)全地球的大気電気学の一環としての極地大気電気観測、(2)雲物理に関連した大気電気研究、というものであった。当時の南極における雲物理学、大気電気学研究観測の目的および意義として、孫野先生は「20年前に誕生した雲物理学の従来の観測は、すべて温帯または亜熱帯地方に限られていたが、地球物理学に属する学問の特性として、全地球的な視野に立った観測が当然必要であり、雲物理学の進展の度合からみて、正にその時期が到来したものと考えられる。現在の時点で、雲物理学者が世界で最初の南極における雲物理の観測研究に特に期待する点は下記の如くであり、これが達成されれば、貢献するところ極めて大きなものがある。」と書いており、氷晶核(Kikuchi, 1971a)、凝結核(Kikuchi, 1971b)、海塩核(Kikuchi and Yaura, 1970; Kikuchi and Fujiwara, 1971)、大気電場(Kikuchi, 1970b)、降・飛雪粒子の電荷(Kikuchi, 1973)、雪・氷晶の結晶形(Kikuchi, 1969, 1970a; Magono *et al.*, 1971; Kikuchi and Yanai, 1971)、雲の観測(菊地ほか, 1976)などがあげられた(菊地, 1970)。

これまでの諸外国における南極での雲物理学分野の観測は、例えば、オーストラリア・CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) の Bigg and Hopwood (1963) の氷晶核観測があるが、それは南極の夏の僅か1か月間だけのもので、通年観測は全くなかった。そんな訳で、当時大変話題になった全地球的な降雨日が流星群と相関があるという、Bowen (1956a, b) の氷晶核としての宇宙塵説を確かめるためにも通年観測が必要だったのである。先に挙げた観測項目のそれぞれの結果についての概略は、1974年の学会賞受賞記念講演(菊地, 1974a)にゆずるとして、ここでは -20°C 氷晶核の月別変動(Kikuchi, 1971a)と、いわゆる外形が六方対称とはほど遠い、低温型雪結晶について簡単に紹介したい(Kikuchi,

1969, 1970 a; Magono *et al.*, 1971)。

Bowenが流星群説を発表して以来、日本ではMaruyama (1961)がいち早く自然氷晶核数の年変動とその発生原因についての観測結果を報告し、流星群との正相関を強調していた(Maruyama and Kitagawa, 1967)。しかし、それらの観測は全て通年観測ではなく、特定の流星群をはさむ、前後10日間位の観測期間の場合が多く、また観測場所がこの種の観測には必ずしも適しているとは考えられなかった。そのような理由から、南極での通年観測は、流星群説の真偽を確かめるためには格好な場所なのである。観測の結果、 -20°C 核は南半球の冬に増加し、夏に減少するといった月平均気温との相関が高く、流星群との相関については否定的な結果となった。また、冬季の南極においては、強風を伴う降雪粒子の自己増殖過程 (Ice Multiplication) による雪粒、ブリザード(雪嵐)によって生成される微細氷粒や、氷晶核として一度活性化したことのある、いわゆる Pre-activate された広義の氷晶核として働くものが数多く存在し、極地方ではいわゆる自然氷晶核として多いであろうと結論づけられた。

1969年4月に帰国し、その5月の気象学会の春季大会で報告した、昭和基地で観測された奇形雪結晶(第2図)は、その外形のあまりの奇妙さに当時の雲物理学の先生方は、スライドを見るなり雪結晶ではなく雪面で成長した霜だという意見が多かった。次の冬は、札幌近郊で注意深く観測し、同じような結晶のあることを発見して報告したが、これも雪結晶とは認めて貰えなかった。当然「気象集誌」に投稿した論文も天然の雪結晶ではないというコメントと、たまたま見付かなかっただけというコメントで不採用にされかけたが、何度か意見交換の後、やっと受理された(Kikuchi, 1969, 1970a, 1972a, b)。その後、かつて石狩平野で放球、回収された「雪結晶ゾンデ」(Magono and Tazawa, 1966)のレプリカ・フィルムを再精査したところ、高度3,000 m付近、気温 -30°C 前後で多くの低温型雪結晶を発見できたことで(菊地, 1971, 1974a, b)、やっとこれらの結晶が認知されたのである。今では、これらの雪結晶を疑う者はいないが、それにしても、どうして小さな発見をおろそかにするのだろうか? 今でもこれらの結晶の写真を見ると、当時のことが思い出される。しかし、使用された顕微鏡は偏光でなかったために、外形が四角形や菱形をした部分が、柱面(Prism-plane)であろうとの推測が出来たが、最終的



第2図 南極昭和基地で観測された代表的な低温型雪結晶 (Kikuchi, 1969, 1970a, 1972a, b).

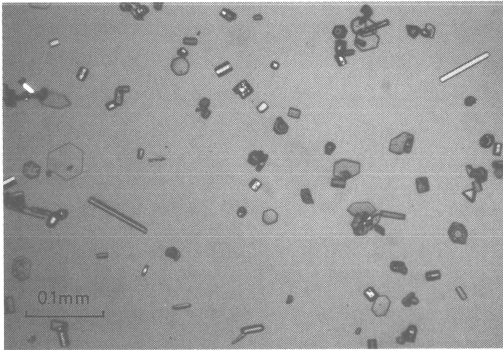
な結論は偏光顕微鏡による将来の観測待ちということになった。

3.2 南極点基地の Clear Sky Precipitation

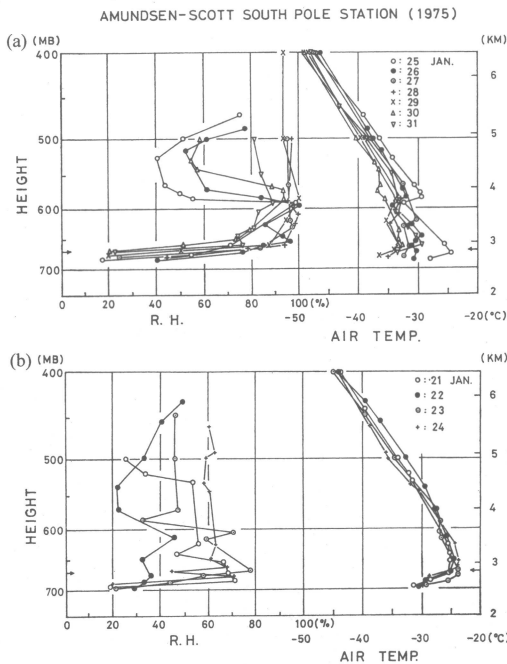
1974年4月ニューヨーク州立大学オーバニー校大気科学研究センター (SUNYA-ASRC) の A. W. Hogan から1通の手紙を受取った。Hoganは一昨年まで、Elsevierから発行されている“*Atmospheric Research*”のco-editorであったHoganだが、この年、彼は南極にあるいくつかのアメリカ基地周辺のエアロゾル数濃度の観測のため、Amundsen・Scott南極点基地に滞在中、氷晶に関するいくつかの興味ある現象を観測したというのである。特に、10日間程の南極点基地滞在中は、(1) 毎日のように晴天のもと微小角柱が非常に低い層から降っていたこと、(2) ラジオゾンデから水飽和の層が常に650~600 hPaの間に存在していたこと (南極点基地の平均海面高度は2,854

m, 平均気圧は684 hPa)、(3) その水飽和層があっても、その上を乾燥した気塊が通過したり、また絹雲がないと降水がないということ、などである。これらのことから、水和層からの降水は、その上を通過する絹雲からの氷晶の種まきによる効果であると考え、この氷雲の発生機構、高度を確かめるために、1975年1月から1か月間南極点基地に行こうというのである。(彼はこの降水をはっきりした雲がないことから、Clear Sky Precipitationとか、Cloudless Precipitation (晴天降水)と呼んでいた)。この申し出は、私の低温型雪結晶の観測には、まったく渡りに舟であった。

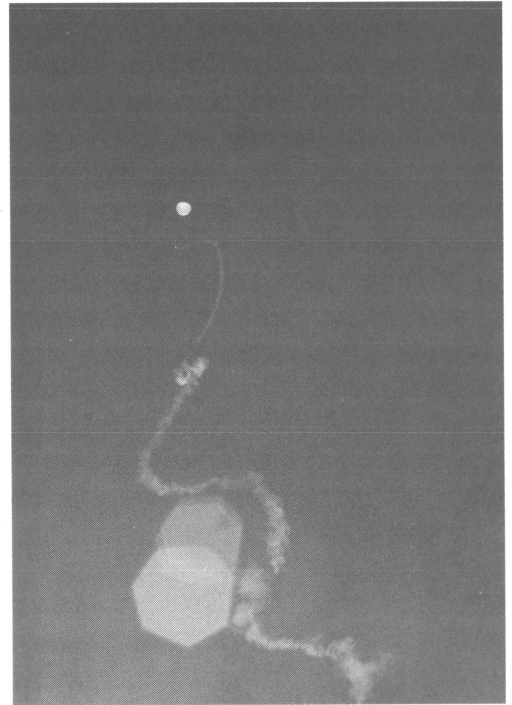
1975年1月2日真冬の札幌を発って羽田を経て、真夏のニュージーランド南島のクライストチャーチへ。ここで、ロスアンゼルスからやって来た、アメリカ南極観測隊員 (United States Antarctic Research Programs: USARP) と合流し、隊員の目印の赤い



第3図 代表的なダイヤモンド・ダストの偏光顕微鏡写真(菊地).



第4図 1975年1月南極点基地における状態曲線. 気温(°C:右側)と相対湿度(%:左側)の鉛直分布. (a)ダイヤモンド・ダスト発生時, (b)未発生時, (図中の数字は観測日を示す)(Kikuchi and Hogan, 1976).



第5図 気球につけたドライアイスによる種まきによって発生したコントレイル(Kikuchi and Hogan, 1976).

からは機付きのC-130型機に乗り換え9時間で南極大陸での最大規模のマクマード基地へ. ここで1泊して, ここから3時間で南極点基地である. クライストチャーチからマクマード間の飛行ですっかり慣れたC-130内では, 耳栓をはずして満載した荷物の上で寝る者, 床の上に防寒服のまま寝る者とそれぞれだったが, 汚れた小さな窓から見えるクイーンモウド山脈の峻険な頂き, 流れ出る氷河, 山頂にかかる積雲を見てみると, 南極大陸の息づかいみたいなものを感じ, 興奮して眠るどころではなかった. 真夏とはいえ南極点基地では -30°C ~ -40°C 前後, 防寒重装備して高度も考えずに張り切り過ぎて, 高山病に悩まされたりしたが, 昭和基地とは違って何らの共同作業もなく, 自分の研究観測だけをすればよいのでこんな幸せなことはなかった.

さて, 問題の晴天降水だが, ほとんど雲らしい雲がなく, 22° ハローと, 時には 46° ハローが見られる時, ダイヤモンド・ダスト(細氷)の名で知られる微小角柱や微小角板の小さな水晶が細かい銀糸を何本も青空に引いたようにして降ってくるのである(第3図). そし

パーカ等防寒用具一式を受取り, ネームタグを首に下げて, 正真正銘の観測隊員となるわけである. もっとも, このUSARPのメンバーは輸送を一手に引き受けるアメリカ海軍軍人等からはやっかみなのか敵対心なのか, Useless Scientists And Ridiculous Programsと皮肉られ, 何とも不思議な気持ちにさせられた. こ

て、降水の有無は状態曲線にも明瞭に現れ (Kikuchi and Hogan, 1976) (第4図), 気球にガーゼで包んだドライアイスをおろ下げた種まき (seeding) 実験でも、雪面上数10 m 上には水飽和の層の存在が確かめられ (第5図), 雪結晶ゾンデによる過冷却雲粒の直接捕捉にも成功した。そして、偏光顕微鏡による低温型雪結晶の観測から、先に推察したように異常に成長した四角形の部分は間違いなく柱面の成長で、結晶は多結晶だったのである (Kikuchi and Hogan, 1976)。さらに、 -35°C の温度条件下で観測された氷晶の空間濃度の時間変化、結晶形、主軸の長さや軸比、成長様式の解析が行われ、特に $-37\sim-34^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で、半数以上の氷晶が板状結晶であるといった結晶の晶癖に対して新たな問題点が提起された (Kikuchi and Hogan, 1979; 菊地, 1988)。

2度目の USARP の隊員として南極点基地での観測は、1978年11月に行われ、1975年のデータと合わせた種々の雲物理量が計算され、その結果、最大降水強度は $0.01\sim 0.2\text{ mmhr}^{-1}$ 、粒径分布は他の降水粒子と同じく、 $N_D = N_0 \exp(-\Delta D)$ の形で表され (Δ は定数)、また計算によるレーダー反射強度因子 (Z) と降水強度 (R) の間には、 $Z = 10 R^{1.0}$ の関係など、極域の降水の特徴がはじめて明らかになった (Sato *et al.*, 1981)。このようにわれわれは係留気球に雪結晶ゾンデ、ドライアイスによる種播き、偏光顕微鏡にレプリカ法といった手動観測で晴天降水のメカニズムの解明に当たったが、ネバダ大学の Warburton のグループ (Smiley *et al.*, 1980) は、アメリカからライダーを移設しての対処だった。その結果、平均的にはライダーのリターン・シグナルのピークが雪面上200 m と8,000 m にあることをつきとめ、上層を seeding layer (種まき層)、下層を precipitation layer (降水層) と名付けた。この観測に限ってみれば、両者の観測手法は正に第2次世界大戦時の日本軍の竹槍と連合軍の機関銃の違いを思い出させる笑えぬ事実だった。手法の違いはあれ、晴天降水のメカニズム、そしてそれからの降水の雲物理学の特徴が明らかにされた。

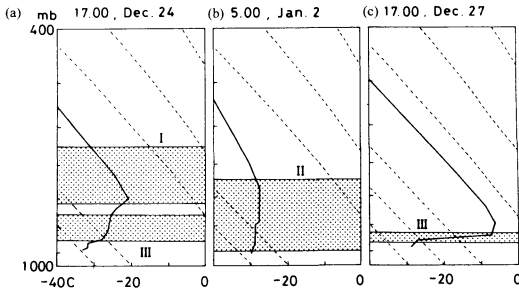
帰国途中、SUNYA (State University of New York at Albany) でセミナーの後の雑談では、南極点での風向はどのようにして決めるのか、標準時はどこのものを使っているのかという質問があった。もっともな疑問だと思った。その後、雲物理学の大御所、SUNYA-ASRC (Atmospheric Science Research Center) の V. J. Schaefer 教授の自宅に招待された。地下室では

彼の趣味の1つである小石をポリッシュするグラインダーが静かに回り続けていた。そして、書斎の壁には彼が General Electric 社に居た頃、最初に行った人工降雨の想像図のスケッチが貼られていた。そのスケッチに感嘆した私に、中谷先生、孫野先生へと続いた交友関係の一端を孫を見ているような眼差しで微笑んでいたのが想い出される。また、海塩核の研究をした Dr. D. C. Blanchard の研究室では、丁度彼が“Snow Crystals” (Bentley and Humphreys, 1931) に掲載された雪結晶写真の乾板を近くの女子高校の図書館で見つけたところで、その乾板を手にとってみるのが出来たもの幸いだった。2000年8月ネバタ州リーノで行われた第13回国際雲物理学会議に参加して、今、雲物理学研究者の大きな世代交替の波を肌でいやというほど感じた。

4. 北極観測

4.1 最初の国際学術研究海外学術調査

1976年度、孫野先生を研究代表者とする雲物理学研究グループの記念すべき最初の文部省 (当時) 科学研究費海外学術調査 (現在の基盤研究 (A)、国際学術) が採択された。「カナダ寒極雪結晶学術調査」がそのタイトルなのだが、低温型雪結晶をもっと多角的な面から研究しようというものである。観測地点として、カナダ北極域の海岸に近いノースウェスト準州のイヌビックと内陸の穀倉地帯であるサスカチュワン州ノースバトルフォードが選ばれた。海外学術調査で一番恐ろしいのは自然、人的災害は勿論のこと、対象とする現象に遭遇できるか否かである。この地域の降雪の特徴が十分に把握できないこともあって、Saskatchewan Research Council の Dr. J. Maybank のアドバイスを貰い、沿岸部と内陸部の2か所に観測点を設けることにした。これによって、降雪機構の相違によっても、どちらかの地点がチャンスに恵まれるだろうとの思いからだった。約1か月間の観測中、ノースバトルフォードでは、異常な暖冬に遭遇し、満足な雪の観測は出来なかった (Magono, 1978) が、イヌビック ($68^{\circ}22'\text{N}$, $133^{\circ}42'\text{W}$) では、予想以上にほぼ毎日のように何らかの降雪現象に恵まれた。特に、昭和基地や南極点基地で発見されたような、いわゆる低温型雪結晶が頻繁に見られ、一連の解析から、平均で全結晶数の2%、時には5%になることもあった (Kajikawa *et al.*, 1980)。そして、その外見から便宜上名づけたV字型やかかもめ型に代表される結晶の新たな知見が得られ



第6図 POLEX-NORTH 観測期間中に記録された代表的な雲内の温度の鉛直分布. 図中の実線は気温, 点線は乾燥断熱線, ハッチは雲層を示している. (a) 断熱型, (b) 等温型, (c) 逆転型 (Takeda *et al.*, 1982).

たのである (Kikuchi and Kajikawa, 1979). また, イヌビョク上空の最高気温が -12°C 以下であったにも拘わらず, 小雨滴や凍結水滴が観測され (Magono and Kikuchi, 1980), 降水機構に対するアラスカ湾からの暖気移流の重要性が指摘された. 氷点下での雨滴や凍結雲粒はその後の北極域の観測でもしばしば観測されている (Kajikawa *et al.*, 1988; Harimaya *et al.*, 1993; Kajikawa *et al.*, 2000). この結果は, この後の POLEX-NORTH を初めとするこの地域における私達グループによるレーダー観測の発端ともなったのである.

4.2 北極域観測計画

極域観測計画 (POLEX; Polar Experiments) は, 3つのサブプログラムからなっており, それらは南極域観測計画 (POLEX-SOUTH), 北極域観測計画 (POLEX-NORTH) とモデリングである. この内, 南極域観測計画は1978年から南極観測隊のプログラムに組込まれ, モデリングは1979年から南極大陸の放射収支, 南大西洋の熱輸送や北半球の大気と北極海水との相互関係といったサブプログラムが先行していた. そして, 北極域観測計画は「雲と降水」の観測を通して北極域の熱収支の変動, とりわけ厳冬の雲と降水のメカニズムに主眼がおかれ, 観測は1979年11月から翌年1月にかけて, カナダ・ノースウェスト準州イヌビョクで遂行された. イヌビョクが観測地点に選ばれたのは先の私達による観測実績があり, またカナダ環境局の地上, 高層観測所があって, 気象ルーチンデータが得られること, 大型航空機の定期便がある等の利点により, 極地研究における, いくつかの難点が解決されたからである (Higuchi *et al.*, 1981; 菊地,

1982).

このプロジェクトでは初めて, 極域に名古屋大学(名大)の鉛直ミリ波レーダーと北大の X バンドレーダーが設置され, 極域研究におけるレーダーの運用が可能になったのは, その後の研究に計り知れない効果をもたらした. また, この観測で得られた降雪粒子の連続観測に初めてビデオカメラを使う方法が開発された (Kikuchi *et al.*, 1982). 高層気象観測データとレーダーデータとの解析から厳冬期には雲内の温度分布が3つのタイプに分類され(第6図), 総観場から暖気団と寒気団それぞれに対して PPI (Plane Position Indicator) レーダーエコーは対流性と層状性のエコーに分類され, 雪結晶も雪片から雲粒付, 霰そして角柱状, 交差角板に, また, ミリ波レーダーによるエコー頂高度と雲頂高度にも特有な構造を示していた (Takeda *et al.*, 1982; Kikuchi *et al.*, 1982; Fujiyoshi *et al.*, 1982). 更に砲弾集合結晶の雪片の形成過程についての新しい知見が得られた (Fujiyoshi and Kikuchi, 1984). この研究では Alberta Research Council の Dr. R. G. Humphries の協力によるところが大きかった.

4.3 その後のカナダ, ノルウェー, グリーンランド観測

孫野先生を研究代表者とする「カナダ寒極雪結晶学術調査 (Magono, 1978)」, 「北極域観測計画 (Higuchi *et al.*, 1981)」とつづいたので, イヌビョクにはもう行く機会がないものと思っていた. しかし, 文部省(当時) 科学研究費「低温型雪結晶と極域エアロゾルの研究」によって, またまたカナダ北極域のイヌビョク ($68^{\circ}22'\text{N}$, $133^{\circ}42'\text{W}$) とイエローナイフ ($62^{\circ}28'\text{N}$, $114^{\circ}27'\text{W}$), ノルウェー北極域のアルタ ($69^{\circ}56'\text{N}$, $23^{\circ}16'\text{E}$) とカウトケイノ ($69^{\circ}01'\text{N}$, $23^{\circ}03'\text{E}$), グリーンランドのゴッドハウン ($69^{\circ}15'\text{N}$, $53^{\circ}34'\text{W}$) とゴッドホープ ($64^{\circ}10'\text{N}$, $51^{\circ}45'\text{W}$) と3冬季にわたって連続北極での観測の機会に恵まれた. それらの観測概要は Kikuchi (1987b, 1989), Kikuchi and Uyeda (1992) に括められている.

5. 水滴の凍結実験と三次元多結晶雪結晶

5.1 水滴の凍結実験

従来の凍結実験が主として, Bigg (1953) や Hallett (1964) の実験にみられるように過冷却度, 凍結速度, 水滴の純度, 凍結方法などと凍結温度の関係におかれていたのに対して, 立体樹枝, 放射樹枝, 交差角板, 砲弾集合結晶などに代表される三次元多結晶雪結晶の

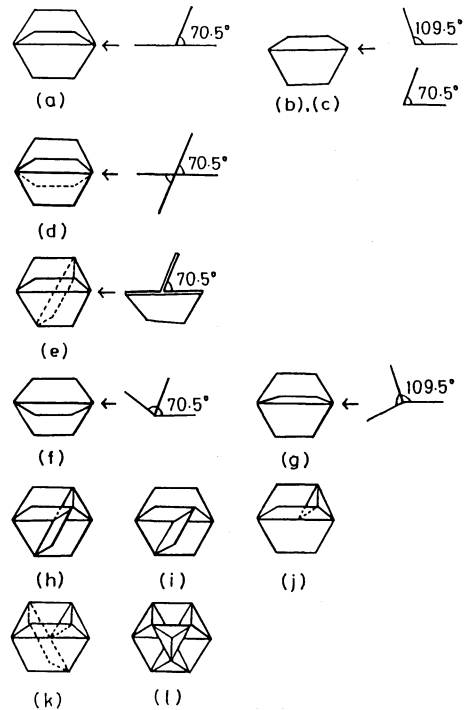
生成や低温型雪結晶、特に御幣（ごへい）型や鷗（かもめ）型に代表される結晶が過冷却雲粒の凍結時の多結晶化に関連するという考え方もある。

そのようなことから、凍結水滴の結晶主軸の方向性に注目した実験を行った（Uyeda and Kikuchi, 1976 a）。その結果、立体構造をなす雪結晶の主軸相互のなす角度 70° と双晶構造に基づく計算結果（Kobayashi *et al.*, 1976）とが一致した。特に冷却速度が毎時 12°C と 30°C の場合には、凍結水滴の結晶数は2～3個で、毎時 60°C の時には5～6個となり、砲弾集合結晶の単砲弾の数とよい対応を示した（Kikuchi, 1968）。更に、凍結水滴の隣合った結晶相互の主軸のなす角度の温度依存性を確かめるために、直径 $0.6\sim 1\text{ mm}$ の過冷却水滴を $-10\sim -25^\circ\text{C}$ の温度範囲で単結晶の霜を用いて凍結させ、 $-10\sim -15^\circ\text{C}$ では大部分が霜の主軸と同じ単結晶に、 $-20\sim -25^\circ\text{C}$ では約 70° になることを明らかにした（Uyeda and Kikuchi, 1978）。

次に過冷却した直径約 1 mm の半球状の水滴を $-17\sim -26^\circ\text{C}$ の温度範囲で針状の霜の基底面や柱面を接触させて凍結させる実験を行った。その結果、全ての温度領域において結晶相互のなす角度の約 70° に顕著なピークが認められ、特に基底面の接触では、貫入双晶と考えられる結晶化が生じた（Uyeda and Kikuchi, 1980）。

5.2 三次元多結晶雪結晶

低温室や低温箱を使った一連の水滴の凍結実験に並行して、天然の三次元多結晶雪結晶の軸角や母結晶と二次枝とのなす角度の測定も行われた。これまで母結晶に付着凍結した雲粒からランダムに成長しているのではないかと思われていた、立体枝に規則性があるらしいことが指摘されながら立体樹枝や放射樹枝等の三次元多結晶の軸角についての測定数が少なかったこともあって、これらの軸角の再測定を行い、 70° 付近のピークを再確認した（Uyeda and Kikuchi, 1976b）。また、中谷の装置を用いて積極的に凍結水滴から立体樹枝、放射樹枝の結晶を成長させた（Kikuchi and Ishimoto, 1974）。こんな経緯から立体的な各種の雪結晶上の凍結雲粒や軸角の特徴に注意が払われた。イヌビョウでの測定から、多結晶に凍結した雲粒は単結晶に凍結した雲粒よりも大きく、立体樹枝状結晶であっても、凍結雲粒の80～90%は母結晶と同じ結晶主軸を持つ単結晶と判ったが、立体枝付近の雲粒は、多結晶か、または母結晶と異なる主軸を持つ単結晶であった（Kikuchi and Uyeda, 1979a）。更に、立体枝



第7図 多結晶初期氷晶の分類。(a)～(l)は単純な構造から複雑な構造への過程を示している。（Kikuchi *et al.*, 1992a, b, 1996）。

が母結晶の中心からどの範囲で成長するのかや、立体枝の成長方向の議論も行われた（Kikuchi and Uyeda, 1979b）。また、昭和基地で採集されたレプリカの中から265個の砲弾集合結晶を選びだし隣接する2本の砲弾のなす卓越角度が約 70° で、 55° 、 40° と 90° のものも僅かながらあることを明らかにした（Uyeda and Kikuchi, 1979）。更に、低温型雪結晶の主軸に直交して角板や樹枝状六花が成長した結晶の解析から、 90° の軸角を有する双晶であることも明らかになった（Uyeda and Kikuchi, 1990a）。

6. 多花結晶と多結晶初期結晶

6.1 十二，十八，二十四花結晶

Nakaya (1954) が、十二花結晶は樹枝状六花等の結晶が降ってくる途中で偶然それぞれ中心付近を重ね合わせたように併合したものであろうという、「雪片説」とでもいべき形成過程に言及して以来、きれいな写真の報告はあってもその形成機構に関する研究はなかった。ところが、Kobayashi and Furukawa (1975) は、Kobayashi and Ohtake (1974) の撮影した角柱

結晶の中央部にグループの入った1枚の写真をもとに、十二花結晶の成長は回転双晶説(主として、角柱結晶の副軸方向に出来た1本の筋を挟んで上下の結晶が、結晶主軸を回転軸として、ある角度回転させたとき、回転させた上の結晶の位置が結晶学的に下の結晶と同じ位置関係になることがある。この時、この結晶を回転双晶という)によるものと断定した。しかし、回転双晶によるとした十二花結晶上下の結晶の接合部分のずれが、角柱から成長したとするとあまりにも離れ過ぎていることから疑問を持っていた私達は、十八花結晶の発見(Kikuchi, 1987a)から、凍結雲粒説(過冷却雲粒が凍結する時、時として中央付近に裂け目が入って、その上下の結晶が回転したり、また凍結した2つの雲粒が結晶主軸の向きが同じで、互いに副軸を異にして付着し、それから板状結晶が成長する)(Kikuchi and Uyeda, 1987)とでもいうべき考え方もあることを提唱した。その後、北極圏ノルウェーで観測された十二花結晶を顕微鏡下で光軸に垂直に立てるなどの考察から(Uyeda and Kikuchi, 1990b)、成長機構は回転双晶説、凍結雲粒説などよりも、雪片説の方が頻度が高いのではないかと考えられた。その後の二十四花結晶の発見によって多花結晶の成長機構は、雪片説がより確固たるものと考えられるようになった(Kikuchi and Uyeda, 1998)。

6.2 多結晶初期氷晶

細氷(ダイヤモンドダスト)や氷霧の顕微鏡写真に見られるように、多くの氷晶は微小角柱(minute column)や微小角板(minute plate)に代表される単純な単結晶と考えられてきた。しかし、極域での観測データが蓄積されるにしたがって、交差角板結晶の初期状態と思ほしき結晶が数多く見られるようになった。これらの結晶は多結晶であることから私たちは多結晶初期氷晶とよんだ。

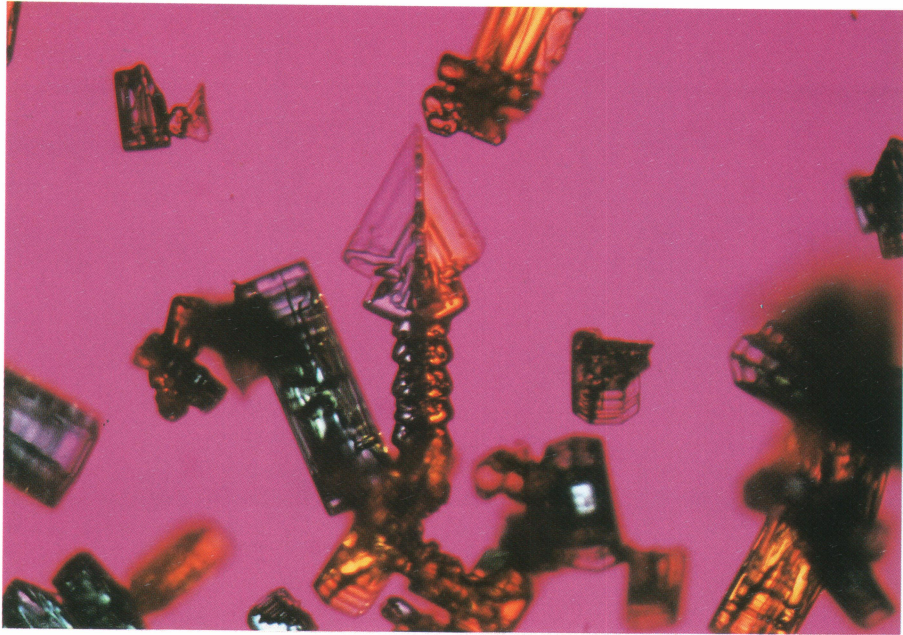
昨今の地球環境問題の内、気候変動や地球大気の温暖化に関連して、雲、特に上層の絹雲や積乱雲の鉄床状の部分や巻層雲が放射に及ぼす影響が非常に大きいと考えられ、多くの研究が行われてきた。我が国の大学関係機関においても「雲と放射」というサブタイトルのもとに航空機による雲と放射の関係についての観測が行われた(Kikuchi *et al.*, 1993, 1994)。これらの観測では、海上の層積雲の水雲か氷雲に対してしか行われなかったが、最終的には上層雲の結晶構造の相違に対しての検討が行われるべきものである。そのような観点から多結晶初期氷晶の形態の結晶学的分類が行

われ12種類に分類された(第7図)(Kikuchi *et al.*, 1992a, b; 1996)。更に、これらの結晶を低温箱を使って、ドライアイスやヨウ化銀の種まきによって成長させ、単結晶に対する頻度が調べられた。その結果、多結晶初期氷晶は低温になるほどその頻度は増加し、 -35°C では約3%になることが明らかにされた(Kikuchi *et al.*, 1992b)。現在は、北大低温科学研究所内の低温風洞実験室内に温度、湿度を制御できる大型垂直人工雲装置(W:1.8m×D:2.4m×H:4.8m)を構築し、氷晶の雲物理パラメーターの変化と光学的特性の実験が行われている(菊地, 1998)。

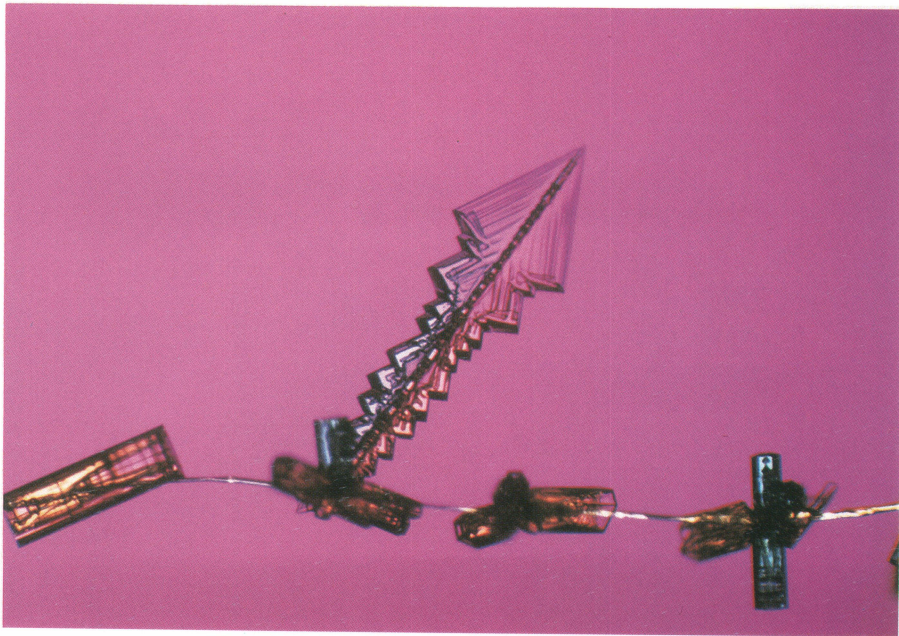
7. 低温型雪結晶の人工生成

主として極域の低温下の条件で報告された低温型雪結晶(当初は一括して奇形雪結晶、後からはその外形から御幣型、鷗型等と具体的に呼ばれた)を人工的に成長させることに努力が払われた。倒立顕微鏡のステージの上に液体窒素を循環させて温度制御を行う、拡散型低温箱を試作し(Kikuchi, 1983; 佐藤・菊地, 1983)、これらの結晶の人工生成に成功した(第8図)。更にこれらの結晶を成長機構として、Kobayashi *et al.* (1976)が提唱した双晶の共在点格子理論から説明した(Sato and Kikuchi, 1985)。また、鷗型結晶と矛先型結晶(Kikuchi and Kajikawa, 1979)の両者の共通点を比較し、矛先型は基本的には鷗型の羽根の1本であること、そして、それは御幣型であってその先端の角度は 56° と 78° にピークがあることを明らかにした(Kikuchi and Sato, 1988)。低温条件下での結晶の成長に関して、中心核として働く固体粒子が結晶の形態とどのような関係になっているかも実験的に明らかにした(Sato and Kikuchi, 1988)。その後、拡散型低温箱を熱伝素子を使って小型化し、イヌビョックで低温型雪結晶を採集し、その場で成長、蒸発実験を行い、成長が母結晶に作用されていることを明らかにした(Sato and Kikuchi, 1989)。更に、その場観察実験を継続し、御幣型は、成長の段階でいくつかの制約のあることを確かめた(Sato *et al.*, 1998a)。また、イヌビョックと北極スウェーデン・キルナで、氷晶核の数濃度と成分、それに降雪との関係を調べ、氷晶核数と降雪現象の間には正相関があり、氷晶核の主成分は、土壌物質と人間起源によるものが多く、海塩粒子は気団の相違に依存していることがわかった(Sato *et al.*, 1998b)。

これらの低温型雪結晶の主たる特徴は、特定の柱面

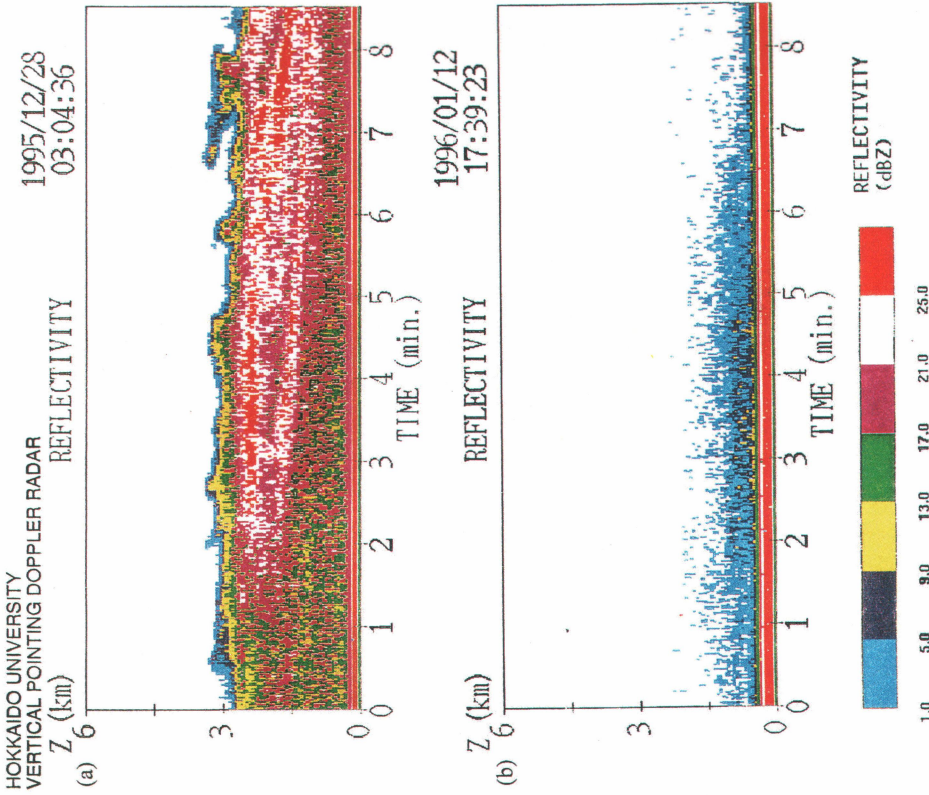


(a)

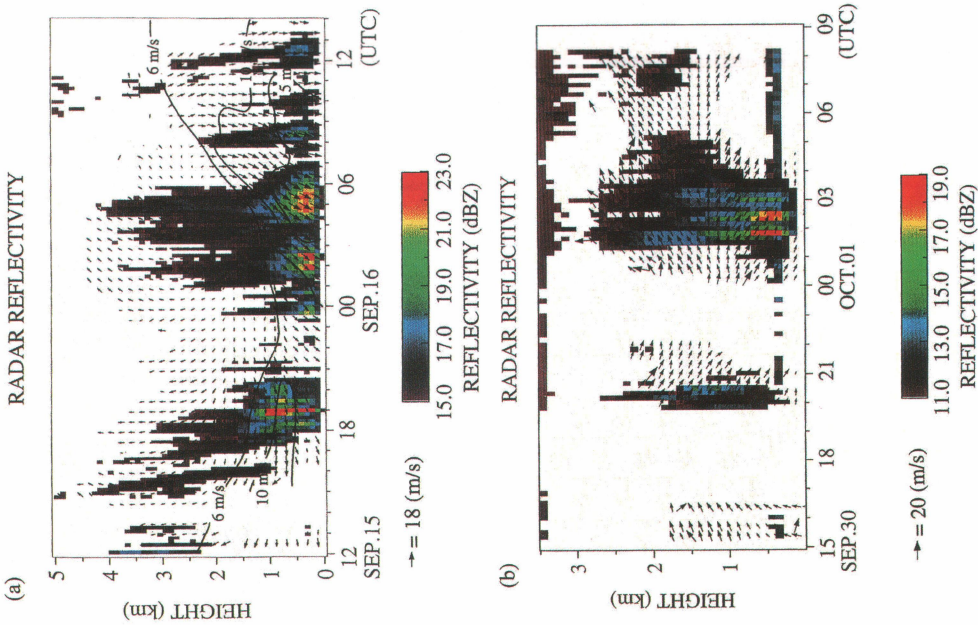


(b)

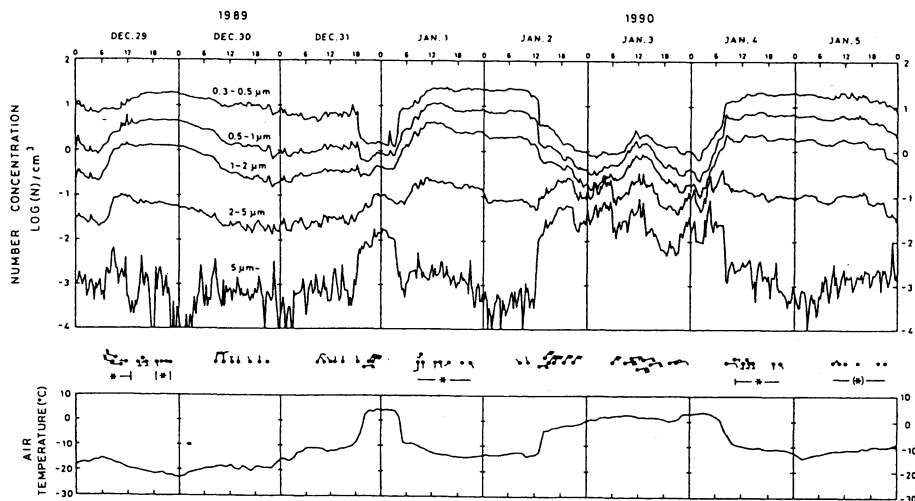
第8図 最も代表的な低温型雪結晶(御幣型), (a)カナダ・イヌビピックで観測されたもの, (b)拡散型低温箱によって人工的に成長させたもの(Kikuchi, 1983; Sato and Kikuchi, 1985).



第13図 北大鉛直ドップラレーダーによるレーダー反射因子の時系列の高度分布, (a) 対流性エコー, (b) 層状性エコー (Kikuchi and Asuma, 1999; Asuma *et al.*, 2000).



第11図 1994年9月15~16日及び9月30~10月1日にわたってカナダ・タクトヤクタクで観測された擾乱のレーダー反射因子と水平風 (矢印) の時間高度断面図, (a) “Pacific Origin” タイプ, (b) “Storm Track” タイプ (遊馬, 1997; Asuma *et al.*, 1998).



GODHAVN, GREENLAND

第9図 1989年12月29日から1990年1月5日までのグリーンランド・ゴッドハウンにおける1 cm³当たりのエアロゾル数濃度(上図:縦軸は常用対数)と気温(下図:°C)の変動(数濃度のグラフは、上から下へ粒径0.3~0.5 μm, 0.5~1 μm, 1~2 μm, 2~5 μm, 及び>5 μmについて描かれている。フェーン現象による変動は12月31日18時~1月1日04時, 1月2日12時~1月4日06時に見られる)(Kikuchi et al., 1996).

が異常成長したものであり, 詳細な理論的考察は, Kobayashi *et al.* (1976) によって主に行われた。

8. グリーンランドでのエアロゾル観測

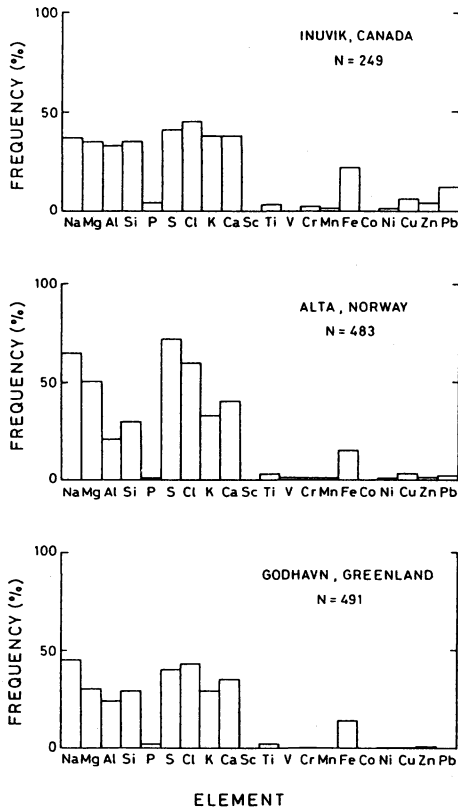
極域のエアロゾルの数濃度や成分についての研究はいわゆる地球環境問題が今日的な話題になる以前から, バックグラウンド汚染として数多く行われてきたが, 低温型雪結晶との関連における中心核との関係についての研究は行われていなかった。私達は低温型雪結晶の中心核依存性を明らかにするために, 走査型電子顕微鏡(SEM)とエネルギー分散型分析装置(EMAX)を使って北海道の大雪山麓で採集した低温型と通常型雪結晶の比較の予備観測を行い, 低温型結晶には海塩粒子成分の寄与を示唆した(Kikuchi *et al.*, 1982b; Murakami and Kikuchi, 1982)。更に実際にイヌビョックで雪結晶の中心核と大気エアロゾルを初めて同時測定し, やはり低温型雪結晶が海塩粒子に依存していることらしいことを指摘した(Kikuchi *et al.*, 1990)。また, 北極ノルウェーでの降雪とエアロゾル粒子の化学成分濃度の分析を行い, 北風系と南風系では, それぞれの成分およびpHに大きな差のあることを確認した(Lee *et al.*, 1989)。グリーンランド・ゴッドハウンにおける観測では, エアロゾル数濃度が

フェーンによって極端に変動することが確かめられた(第9図), 風系によって成分にも特徴的な変化のあることが明らかになった(Kikuchi *et al.*, 1996)。そして, ほぼ北緯70°線上に位置するカナダ・イヌビョック, ノルウェー・アルタ, グリーンランド・ゴッドハウンの3地点での厳冬期のエアロゾルの元素成分はほぼ同じような傾向にあることがわかった(第10図)。

9. 北極域の降雪のレーダー観測

9.1 BASEプロジェクト(Beaufort and Arctic Storms Experiments)

カナダ北極域における厳冬期の降水機構やその実態を, 日本からレーダーを移設して観測が出来るなんて到底考えられないことだった。それが可能になったのも東西緊張緩和の恩恵によるものであろう。既に述べたように, カナダ北極域ノースウェスト準州イヌビョックでのレーダー観測はPOLEX-NORTH(Kikuchi *et al.*, 1982c)が最初であったが, Xバンドレーダーの運用については十分満足できるものではなかった。しかし電波を出すことが可能になったということは以後の研究観測に対して何よりも大きな実績となった。Xバンドレーダーの本格的な運用は思いがけず早くやってきた。文部省科学研究費海外学術調査「中緯



第10図 70°N 線上に位置するカナダ・イヌビック (上図), ノルウェー・アルタ (中央図) 及びグリーンランド・ゴッドハウ (下図) の3地点におけるエアロゾル粒子の元素成分分布。(Kikuchi *et al.*, 1996).

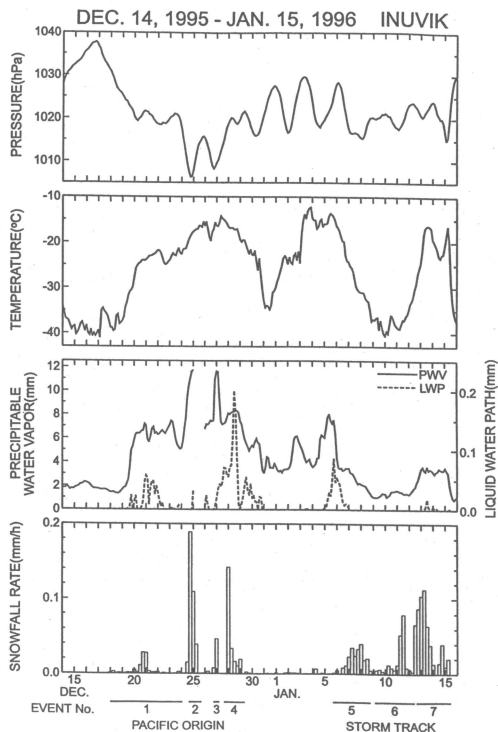
度の気象・気候に与える極気団の形成と活動に関する研究 (研究代表者: 東京大学 (東大) 海洋研究所木村龍治教授) によるプロジェクトとカナダ環境局が推進し, 実行するBASEの時期が一致し, 彼等もレーダーの運用を最重要課題としていた (Kimura and Tsuboki, 1997). その頃, 既にドップラー化してあった北大気象学研究室レーダーは, イヌビックの北, 約100 km ボーホート海沿岸のマッケンジー河口近くの巨大なピングで有名なタクトヤクタック (69°27'N, 133°02'W) で運用することになった. ここではかの有名なDEW (Defense Early Warning) Line (南北緊張時の北緯70°線に沿って設置されたアメリカの遠隔防空警戒線のレーダー網) の超大型防空レーダーが沢山の兵舎とともに撤収されずに残っており, ここでXバンドレーダーの電波発信の許可など思いもよらぬことだった.

既に晩秋から初冬にかけてのこの地域での気象擾乱の特徴を解析していた彼等にとって, レーダー観測はどうしても必要な項目だったに違いない. カナダサイドの地上, 高層観測要員, 北大理学部の遊馬博士のグループと当時東大海洋研究所の坪木博士等による同一アパートに宿泊しての観測が1994年9月から10月にかけて1か月以上にわたって続けられ“Pacific Origin”と“Storm Track”タイプの擾乱のレーダーによる内部構造や総観場の解析から, それらの特徴が見事に明らかにされた (遊馬, 1997; Asuma *et al.*, 1998).

この観測期間中に得られた“Pacific Origin”タイプの擾乱の典型的な例である地上天気図によると, アラスカ湾とボーホート海北部に強い低気圧が定常的に存在していて, 両者の間に北極前線がある. アメリカ大陸西岸のロッキー山脈, 海岸山脈に続くアラスカ山脈等によって, アラスカ湾上の低気圧は進路をブロックされているが, その後 Lee Cyclogenesis が起り二次的な低圧部が湾上の低気圧から発生して東進し, 北極前線上で急激に発達した. この二次的に発生, 発達した低圧部の東進に伴う擾乱が“Pacific Origin”タイプである. 仰角10°のPPI画像からのレーダー反射因子と水平風の時間高度断面図を第11図aに示した. 上層では弱い南風で降水強度が弱く, 下層では風が強く内陸からの東風が, 北寄りのボーホート海から吹き始めると降水が強くなり, 地上に到達するようになる. 一方, “Storm Track”は, ボーホート海の氷縁に沿って低気圧が発生して東進し, この低気圧に伴う寒冷前線には比較的低い対流性の雲と, 温暖前線には比較的高い層状の雲が広がっていて, それらからの降水エコーが観測された (第11図b).

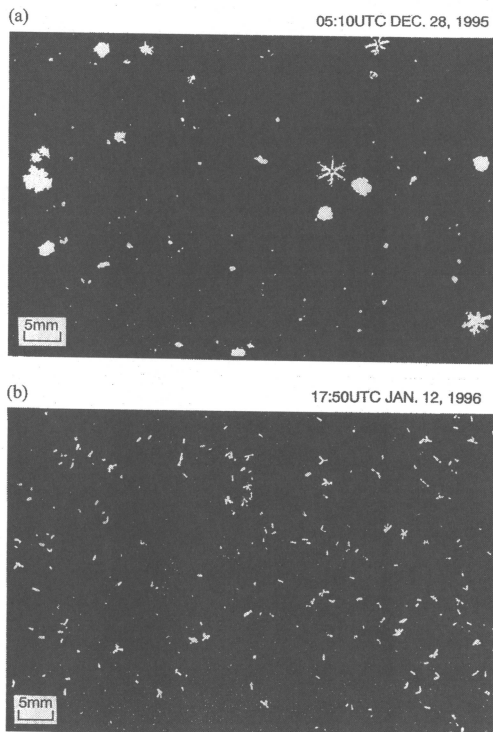
9.2 WANTS (Water vapor, Aerosols and Nuclei Transportation and Snow crystals)—Arctic Experiments (カナダ北極圏・イヌビック, 1995~1996年)

BASEプロジェクトに協力した翌年, 今度は文部省科学研究費海外学術調査「冬季の北極域における水蒸気, エアロゾルの輸送過程と多結晶雪結晶に関する研究」が行われた. 観測期間は1995年12月4日から翌年1月15日までの約1か月半であった. この観測では, 北大気象学研究室の2台目のレーダーである鉛直ドップラーレーダーをイヌビックに移設し, 同時に秋田大学のマイクロ波放射計による可降水量や積算雲水量, それに降水粒子の詳細な観測が行われた (遊馬, 1997; Kikuchi and Asuma, 1999; Asuma *et al.*,



第12図 カナダ・イヌビックにおける WANTS-Arctic Experiments 期間中の上から地上気圧 (hPa), 気温 (°C), 可降水量 (左側の軸: mm), と積算雲水量 (右側の軸: mm) 及び降水強度 (mmh⁻¹) の時系列. “Pacific Origin” 型の降水イベントの期間 (1~4), 並びに “Storm Track” 型の降水イベントの期間 (5~7) を図の下に示す. (遊馬, 1997; Kikuchi and Asuma, 1999; Asuma *et al.*, 2000).

2000). 第12図に観測期間中の各種データの時系列を表し, 下段に降水量を基にした降水イベントを示してある. 12月18日から30日にかけては “Pacific Origin” タイプの擾乱が, また1月5日から15日にかけては “Storm Track” タイプの擾乱の計7例のイベントが観測された. “Pacific Origin” のケースでは気温が高く, 可降水量, 積算雲水量ともに多く, 降水は短時間で最大降水強度が大きく, エコーは対流性で(第13図 a), 降水粒子は濃密雲粒付樹枝状六角花や立体樹枝, 霰が多く観測された(第14図 a). これに対して, “Storm Track” のケースでは気温が低く, 可降水量が少なく, 積算雲水量はほとんど記録されず, 降水は比較的長く降水強度が弱く, エコーは層状性で(第13図 b), 降水粒子は交差角板, 砲弾集合などの低温下で成長する結晶形のみで, 雲粒付結晶は認められなかった(第14図

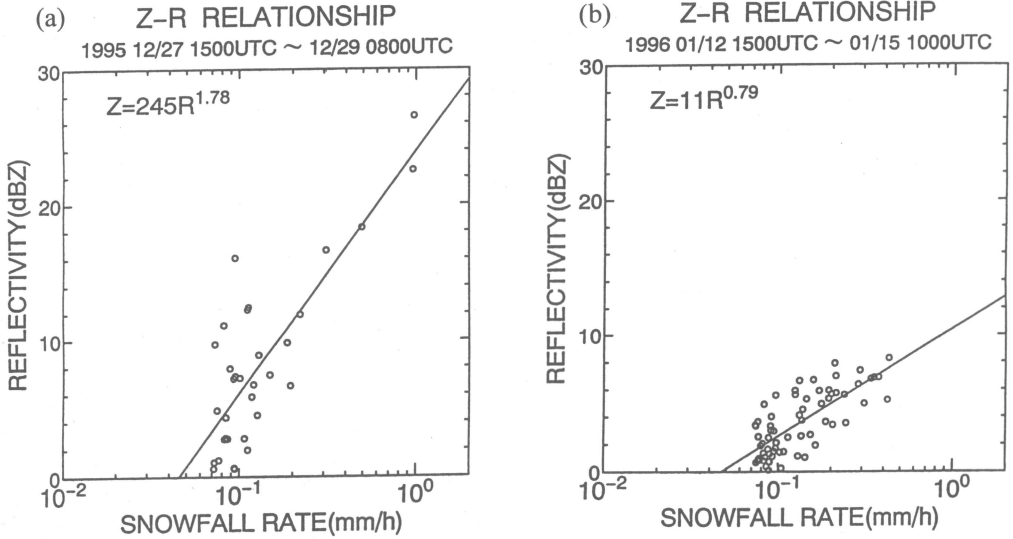


第14図 第13図のエコーに対応する降雪粒子の接写写真, (a) 対流性エコー; 霰や雲粒付樹枝状結晶のみ, (b) 層状性エコー; 無垢の砲弾集合結晶や角柱結晶のみ (Kikuchi and Asuma, 1999; Asuma *et al.*, 2000).

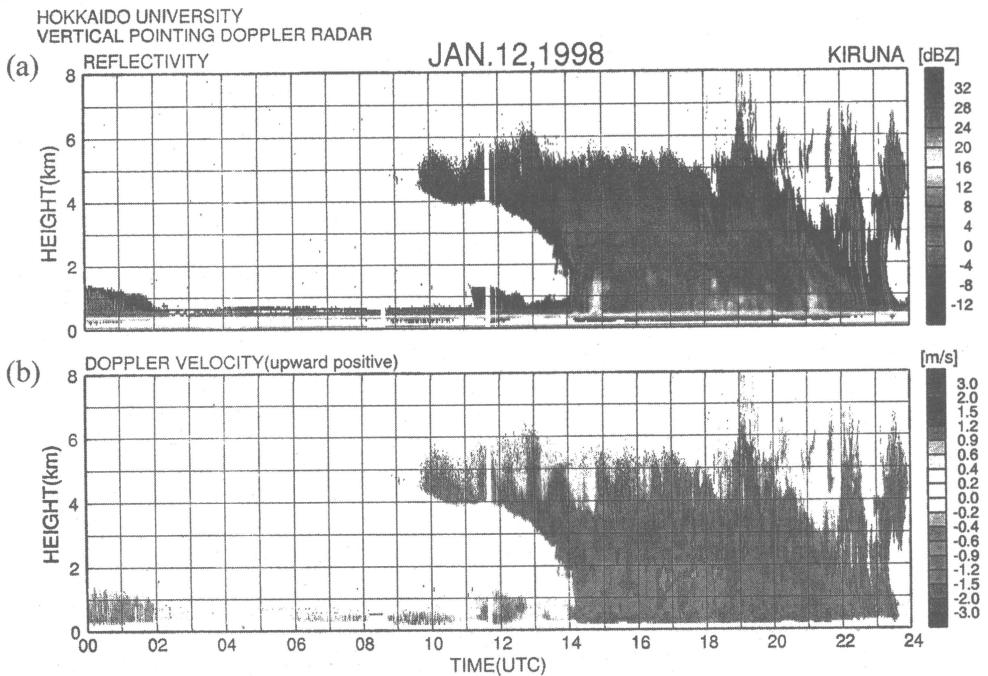
b). 両者のイベントの水蒸気フラックス, 水蒸気量, 氷水量などの平均値の高度分布は極端に異なっていた. また, それぞれのケースの $Z-R$ 関係は, 第15図 a, b に見られるように, “Pacific Origin” では, $Z = 245R^{1.78}$, “Storm Track” では, $Z = 11R^{0.79}$ であった. この観測期間には針状結晶の併合についての考察も行われた (Kajikawa *et al.*, 2000b).

9.3 WANTS-Arctic Experiments (スウェーデン 北極圏・キルナ, 1996~1998年)

カナダ北極圏イヌビックの降水機構に “Pacific Origin” と “Storm Track” があり, 両者間に雲物理量や降水強度, 雪の結晶形に極端な違いのあることがわかった. 気流系から見れば, アラスカ湾の暖かい海と北極海の冷たい海からの移流といった見方は, スカンジナビア半島北部の北側の暖かいメキシコ暖流の影響と, 南側の冷たいボスニア湾からの移流といった南北の位置関係は異なるものの, この地域での降水機構,



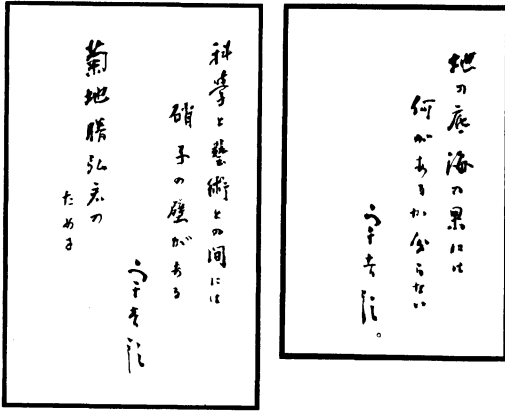
第15図 第13, 14図に対応するレーダー反射因子 Z : (dBZ) と降水強度 R : (mmh^{-1}) との関係を示した図 (Z - R 関係図). (a)対流性エコー, (b)層状性エコー. (Kikuchi and Asuma, 1999; Asuma *et al.*, 2000).



第16図 スウェーデン・キルナにおける WANTS-Arctic Experiments 期間中に鉛直ドップラーレーダーで観測された擾乱に伴う (a) 反射因子, (b) ドップラー速度の高度分布の時系列. (遊馬ほか, 2001).

水蒸気の移流にも大変興味を持たれた。そんなことから翌年の鉛直ドップラーレーダーによる観測地点としてスウェーデン北極圏のキルナ ($67^{\circ}50'N$, $20^{\circ}28'E$) が

選ばれた。この地にはスウェーデン宇宙物理研究所 (IRF) があり、既に日本からいくつかの大学が協力してもらった実績があり、観測室、宿泊施設等も完備し



第17図 中谷宇吉郎先生が著者を書いて下さった色紙。

観測しなければ何も分からないという孫野先生の指導方針に端を発している。振り返って、何が私を極地研究にかりたててることになったのだろうか。恩師孫野長治先生の「現場を観て確かめる」をモットーに、中谷先生の随筆集の1冊『イグアノドン』(中谷, 1952)の見開きに書いて頂いた、「地の底 海の果には何かがあるか分からない」が大きく身体全体を支配しているのも事実である。2000年は中谷先生の生誕100年の記念すべき年で、石川県加賀市片山津町では「中谷宇吉郎雪の科学館」を通していくつかの企画がなされ、10月には日本雪氷学会全国大会が開催された。そして、この冬、やはり100年記念の企画テーマのひとつに「科学の心と芸術」がある。先生に書いて頂いたもう1冊の随筆集『寺田寅彦の追想』(中谷, 1947)の見開きには「科学と芸術との間には硝子の壁がある」(第17図)であり、この記念企画のコンセプトにぴったりなのである。

中谷先生によって先鞭をつけられた雪の研究、雷の研究を始めとする北大での雲物理学研究は、孫野先生に引き継がれ、先生が御退官後、私もそれらを発展させるべく努力をしてきたつもりなのだが、「科学と芸術との間の硝子の壁」は、私にはまだ十分見透せないでいる。2000年10月に生誕100年を期して岩波書店から刊行中の『中谷宇吉郎集』(全8巻)(2000, 2001)と、「科学の心と芸術」の展示企画が私にとって「硝子の壁」を知るひとつのきっかけになるかもしれないと思っている。

ところが最近、ひょんなことから岩波書店発行の『寺田寅彦全集』第10巻月報10(1997)で、津田青楓画伯による「寺田さんの忍苦(抄録)」を読む機会があり、その中に寺田寅彦の物の見方についての文章を見つけた。「寺田さんの物の見方はなんでも、すぐに裏側をばぐって見、未だそれでも満足できぬので縦横十文字に、四方八方から見る式で、そこに科学者らしい値うちがあるんだろうが、然し、また自分の専門の話になると散々愉快そうに話して、物理だって客観的に調べるばかりでは能がないので、矢張り芸術文学同様な人間の頭脳に創作的なひらめきがあって、そこからヒントを得て演繹しなければ大きな発見や、発明はできない、というようなことも言って居られた」という文章である。寺田寅彦がしばしば言ったであろうこの言葉を、中谷先生はわたしに「科学と芸術の間には硝子の壁がある」という言葉で表して下さったのではないだろうか。きっとそうだ、だって「硝子の壁」の言葉は持参した3冊の先生の随筆集の中の『寺田寅彦の追想』に書い

ており、車の提供も受けることができた。観測は1996年12月25日から翌年1月15日と1997年12月19日から翌年1月14日までの2冬季間にわたって行われた。この期間、秋田大学の梶川教授のご協力によるマイクロ波放射計、東北大学早坂助教授(当時)の雲底高度計による観測も併行して行われた。1998年1月12日の1例が第16図に示されている(遊馬ほか, 2001)。前線がキルナ上空を14時頃には通過したが、通過前には弱い降水が上空4~5 kmにあり、西北西の風であった。しかし、前線通過後は西風になり、その下層では南風となって、降水エコーは3 kmより下層では急激に強くなった。このことから、前線に伴う上層からの弱い降水が山岳性の雲との相互作用によって強化され、いわゆる Seeder-Feeder メカニズムによって地上で強い降雪になったものと推測される。

地形的にみて、キルナはスカンジナビア山脈の南東側にあり、したがって風系によって地形が降雪に大きな影響を与えていた。ボスニア湾からの東南東の風系では風は弱く、降水量は多く、雲水も多く観測された。しかし、西風の場合は降水の出現数は多いものの、降水量は非常に少なく、雲水はほとんど観測されなかった。これは、山脈を越える時点で、北西斜面に多くの降雪をもたらす、山越え時にはほとんどの雲水を消費してしまったためであろう。

10. エピローグ

私の雲物理学研究は、手稲山、石狩平野を中心に行われた降雪観測での中谷ダイヤグラムの検証と、雷電気発生に関係した雲の中の出来事は、雲の中に入って

て下さったのだから(菊地, 2000)。

確かにひとつの解釈だが、しかし、私にはまだ何か別のことがあるような気がしてならない。

私には、とても孫野先生や中谷先生のようなことは言えないのだけれども、敢えて言わせてもらえるならば、「観ようと思えば見える」という言葉で、この受賞のお礼とさせていただきます。雲物理学分野に限らず何事も、観ようという気持、心構えがあれば、その現象の裏側にあるものも自然と見えるようになるということを書いておきたかったからです。サブミクロンの凝結核、凍結核から出発して、数 μm から数10 μm の凍結雲粒、そして初期氷晶から氷晶、雪結晶、雪片への一連の成長過程は、まだ十分に理解されているとはいえないが、僅か100 μm にも満たない氷晶の中に低温型雪結晶の成長にみられるように、神秘的な謎が含まれているのである。

謝 辞

1957年4月開設された、北大大学院理学研究科気象学研究室のスタッフだった孫野長治教授(故人)、樋口敬二助教授(現名大名誉教授)、織笠桂太郎助手(現室蘭工大名誉教授)、そして手稲山雲物理観測所で起居を共にしながら観測した高橋 劭(現桜美林大教授)の諸氏に、今日この日に改めて感謝いたします。たった1台のライツの光学顕微鏡とキャノンカメラ、ベンドルフ電位計から出発した北大の雲物理学、大気電気学研究は、約45年を経た今、2台のドップラーレーダー、ドップラーソーダー、SEM-EMAX, PMS-FSSP, 2 DP プロブといった、レーダー気象学、メソ気象学、極地気象学、リモートセンシング気象学へと徐々にその間口を広げることができ、1998年3月私の停年退官で楽しかった北大での研究生活は終わった。私が孫野先生御退官後、気象学講座を担当するようになってから、助教授、講師、助手として私をサポートしてくれた遠藤辰雄、播磨屋敏生、上田 博、谷口 恭、遊馬芳雄、真木雅之の諸氏、また当時の文部省科学研究費計画研究、豪雨、豪雪、WCRP、GEWEX、北極、南極研究等に協力して下さった桜井兼市(北海道教育大学旭川校)、梶川正弘(秋田大学)、佐藤 昇(大阪府教育センター)、早坂忠裕(当時東北大学)、武田喬男(当時名古屋大学)、藤吉康志(現北大低温研、当時名古屋大学)の諸氏に、特に、上田 博、遊馬芳雄の両氏には多数の学部学生、大学院生、外国人留学生の研究指導を含めて言葉では尽くせない協力を得た。御二

人の協力なくして今回の藤原賞の受賞は勿論、1996年度の北海道科学技術賞受賞、1997年度の紫綬褒章(気象学研究功績)の受章もなかったと考えられ、お礼の言葉もありません。また、学部、大学院を通して一緒に研究をしてきた学部学生、大学院生、研究に協力された方々にも感謝いたします。特に、極地研究に当たっては、種々便宜をはかられた国立極地研究所、ニューヨーク州立大学大気科学研究センター、カナダ・イヌビック科学研究センター、カナダ・アルバータ州立研究所、カナダ・サスカチュワン州立研究所、ノルウェー極地研究所、スウェーデン・キルナ宇宙物理学研究所、グリーンランド・コペンハーゲン大学北極観測所及び研究観測にいろいろ協力、便宜をはかってくれた関係各位、機関に深く感謝いたします。

秋田県立大学にきて、生物と大気環境との関係の研究を行っていますが、やはりこれまでの極地研究の雰囲気私を鼓舞させるのでしょう。科学研究費補助金基盤研究(A)(海外学術調査)の研究代表者として、2001年から4年間、極北のバレンツ海に浮かぶノルウェーの小島ペアー・アイランド(74°30'N, 19°01'E)に、これまで北極研究を一緒に行ってきた仲間と、北海道大学大学院気象学研究室の鉛直ドップラーレーダーを設置し、北極域での降水活動、水循環とポーラー・ローとの関連の研究を開始することになりました。これも藤原賞受賞が一つの励みになったものと、改めて関係各位に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- American Meteorological Society, 1951: Compendium of Meteorology, Boston, 1334 pp.
- 遊馬芳雄, 1997: 北極圏の大気環境と物質循環, 日本気象学会1997年度秋季大会シンポジウム要旨集, 6 pp.
- 遊馬芳雄, 巢山志津香, 佐藤淳一, 横山 誠, 菊地勝弘, 梶川正弘, 佐藤 昇, 早坂忠裕, 2001: 冬季スカンジナビア半島周辺での降水現象と低気圧の特徴, 日本気象学会2001年春季大会講演予稿集, 126.
- Asuma, Y., Y. Inoue, K. Kikuchi, M. Kajikawa, N. Sato and T. Hayasaka, 2000: Wintertime precipitation behavior in the western Canadian Arctic region, *J. Geophys. Res.*, **105**, D 11, 14927-14939.
- Asuma, Y., S. Iwata, K. Kikuchi, G. W. K. Moore, R. Kimura and K. Tsuboki, 1998: Precipitation features observed by Doppler radar at Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada, during the Beaufort and Arctic Storms Experiment, *Mon. Wea. Rev.*,

- 126, 2384-2405.
- Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931 : Snow Crystals, McGraw-Hill Book Co., 226pp.
- Bigg, E. K., 1953 : The supercooling of water, Proc. Phys. Soc., **B**, 66, 688-693.
- Bigg, E. K. and S. C. Hopwood, 1963 : Ice nuclei in the Antarctic, J. Atmos. Soc., **20**, 185-188.
- Bowen, E. G., 1956a : The relation between rainfall and meteor showers, J. Meteor., **13**, 142-151.
- Bowen, E. K., 1956b : A relation between meteor showers and the rainfall of November and December, Tellus, **8**, 392-402.
- Chalmers, J. A., 1950 : Atmospheric Electricity, Oxford Univ. Press, 175pp.
- Chalmers, J. A., 1957 : Atmospheric Electricity, Pergamon Press, 327pp.
- 藤原咲平, 1950 : 群渦, 羽田書店, 293pp.
- Fujiyoshi, Y. and K. Kikuchi, 1984 : On snowflakes of cold temperature types observed in the Arctic Canada (POLEX-North), Part 4, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.), **7**, 295-305.
- Fujiyoshi, Y., T. Takeda and K. Kikuchi, 1982 : Observation of wintertime clouds and precipitation in the Arctic Canada (POLEX-North), Part 3, J. Meteor. Soc. Japan, **60**, 1227-1237.
- Hallett, J., 1964 : Experimental studies of the crystallization of supercooled water, J. Atmos. Sci., **21**, 671-682.
- Harimaya T., K. Kikuchi and K. Sakurai, 1993 : On snow crystals with small raindrops observed in Greenland, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.), **9**, 341-353.
- Hatakeyama, H., 1965a, b : Proceedings of the ICCP, Meteorological Society of Japan, 522pp, 185pp.
- 東 晃, 1954 : 雨を降らせる話 (岩波新書181), 岩波書店, 209pp.
- Higuchi, K., T. Takeda and K. Kikuchi, 1981 : Observations of Clouds and Precipitation in the Arctic Canada, Org. Comm. for POLEX, 189pp. 岩波書店, 1996-1999 : 寺田寅彦全集, 全30巻. 岩波書店, 2000-2001 : 中谷宇吉郎集, 全8巻.
- Kajikawa, M., K. Kikuchi, Y. Asuma, Y. Inoue and S. Sato, 2000a : Supercooled drizzle formed by condensation-coalescence in the mid-winter season of the Canadian Arctic, Atmos. Res., **52**, 293-301.
- Kajikawa, M., K. Kikuchi, Y. Asuma, Y. Inoue and N. Sato, 2000b : Aggregation of needle snow crystals, Atmos. Res., **55**, 131-138.
- Kajikawa, M., K. Kikuchi and C. Magono, 1980 : Frequency of occurrence of peculiar shapes of snow crystals, J. Meteor. Soc. Japan, **58**, 416-421.
- Kajikawa, M., K. Sakurai and K. Kikuchi, 1988 : Characteristics features of supercooled raindrops in the mid-winter season of Arctic Canada, J. Meteor. Soc. Japan, **66**, 393-398.
- 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奇形雪結晶, 北大地球物理学研究報告, **25**, 167-180.
- 菊地勝弘, 1974a : 南極昭和基地における雲物理学的研究, 天気, **21**, 496-506.
- 菊地勝弘, 1974b : 天然雪, 特異な雪, 多結晶雪を中心として, 気象研究ノート, **123**, 767-811.
- 菊地勝弘, 1982 : 北極域観測計画 (POLEX-North) 現地観測あれこれ, 天気, **29**, 101-108.
- 菊地勝弘, 1988 : 南極の科学 3, 気象, 古今書院, 202-220.
- 菊地勝弘, 1998 : 低温下で成長する雪結晶の微物理・光学的特性が気候変動に及ぼす影響の実験的研究, 北海道大学, 204pp.
- 菊地勝弘, 2000 : 硝子の壁—中谷先生との出会い—, 中谷宇吉郎集第3巻, 月報, **3**, 4-6.
- 菊地勝弘, 福谷 博, 笠原喜美子, 1976 : 魚眼レンズカメラ2点観測による南極昭和基地の夏季の雲高について, 南極資料, **57**, 1-16.
- Kikuchi, K., 1964 : On some coastal clouds over Ishikari Bay, Hokkaido, J. Meteor. Soc. Japan, **42**, 341-353.
- Kikuchi, K., 1965 a : On the positive electrification of snow crystals in the process of their melting (3), J. Meteor. Soc. Japan, **43**, 343-350.
- Kikuchi, K., 1965 b : On the positive electrification of snow crystals in the process of their melting (4), J. Meteor. Soc. Japan, **43**, 351-358.
- Kikuchi, K., 1967 : On the characteristic distribution of snow crystals during a snowfall on the Ishikari Plain, Hokkaido, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.), **3**, 37-47.
- Kikuchi, K., 1968 : On snow crystals of bullet type, J. Meteor. Soc. Japan, **46**, 128-132.
- Kikuchi, K., 1969 : Unknown and peculiar shapes of snow crystals observed at Syowa Station, Antarctica, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.), **3**, 99-116 (with Plates 13).
- Kikuchi, K., 1970 a : Peculiar shapes of solid precipitation observed at Syowa Station, Antarctica, J. Meteor. Soc. Japan, **48**, 243-249.
- Kikuchi, K., 1970 b : Observations of the atmospheric

- electric field at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 452-460.
- Kikuchi, K., 1971 a : Observations of concentration of ice nuclei at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 20-31.
- Kikuchi, K., 1971 b : Observations of cloud condensation nuclei at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 376-383.
- Kikuchi, K., 1972 a : Sintering phenomenon of frozen cloud particles observed at Syowa Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 131-135.
- Kikuchi, K., 1972 b : 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., 1983 : Studies on snow crystals of cold temperature types, Hokkaido Univ., 153pp.
- Kikuchi, K., 1987 a : The discovery of eighteen-branched snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 309-311.
- Kikuchi, K., 1987 b : Studies on the Snow Crystals of Low Temperature Types and Arctic Aerosols, Hokkaido Univ., 283pp.
- Kikuchi, K., 1989 : Studies on the Snow Crystals of Low Temperature Types and Arctic Aerosols (The Second Expedition), Hokkaido Univ., 183pp.
- Kikuchi, K., T. Aoyama, Y. Asuma, T. Taniguchi, T. Tanaka, T. Hayasaka, T. Takeda and Y. Fujiyoshi, 1994 : Roughness of cloud top surfaces of winter stratocumulus clouds over the ocean, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **9**, 381-403.
- Kikuchi, K. and Y. Asuma, 1999 : Studies on the Water Vapor, Aerosols and Nuclei Transportation and Snow Crystals of Low Temperature Types in the Arctic Regions (WANTS-ARCTIC), Hokkaido Univ., 353pp.
- Kikuchi, K., Y. Asuma, T. Taniguchi, M. Kanno, M. Tanaka, T. Hayasaka, T. Takeda and Y. Fujiyoshi, 1993 : Structure and reflectance of winter maritime stratocumulus clouds, *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 715-731.
- Kikuchi, K. and K. Fujiwara, 1971 : Observation of giant sea-salt particles from Syowa Station to the South Pole, JARE Scientific Report, Special Issue 2, Polar Res. Center, 110-112.
- Kikuchi, K., M. Harada and H. Uyeda, 1992 a : The structure of polycrystalline initial ice crystals, *Phys. and Chem. of Ice*, Hokkaido Univ. Press, 328-335.
- Kikuchi, K., M. Harada and H. Uyeda, 1992 b : Morphological studies on the polycrystalline snow germs, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **9**, 235-251.
- Kikuchi, K., M. Harada and H. Uyeda, 1996 : Nucleation characteristics of polycrystalline ice crystals, *Nucleation and Aerosols*, 1996, Helsinki, 361-364.
- Kikuchi, K. and A. W. Hogan, 1976 : Snow crystal observations in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **5**, 1-20.
- Kikuchi, K. and A. W. Hogan, 1979 : Properties of diamond dust type ice crystals observed in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 180-190.
- Kikuchi, K. and K. Ishimoto, 1974 : Role of frozen cloud droplets on the growth of snow crystals of certain shapes, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **4**, 69-80.
- Kikuchi, K. and M. Kajikawa, 1979 : Comments on V-shaped snow crystals observed in Arctic Canada, *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 484-487.
- Kikuchi, K., M. Murakami and Y. Sanuki, 1982 : Preliminary measurements of the center nucleus of snow crystals using an energy dispersive X-ray microanalyzer, *Memoirs of National Inst. of Polar Res., Special Issue*, **24**, 157-174.
- Kikuchi, K. and N. Sato, 1988 : Characteristic features of the snow crystals of low temperature types, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **8**, 243-257.
- Kikuchi, K., T. Taniguchi and H. Tsujimura, 1990 : Relation between the center nucleus of snow crystals and aerosol particles in Arctic Canada, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **8**, 415-435.
- Kikuchi, K., T. Taniguchi and H. Uyeda, 1996 : Characteristics of the concentration and composition of aerosols during Foehn in west Greenland, *Tellus*, **48B**, 372-386.
- Kikuchi, K., S. Tsuboya, Y. Asuma and K. Inatsu, 1982 a : A new method for measuring snow crystals (Snow Crystal Measuring System), *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **7**, 159-164.
- Kikuchi, K., S. Tsuboya, N. Sato, Y. Asuma, T. Takeda and Y. Fujiyoshi, 1982 c : Observation of wintertime clouds and precipitation in the Arctic Canada (POLEX-North), Part 2, *J. Meteor. Soc.*

- Japan, 60, 1215-1226.
- Kikuchi, K. and H. Uyeda, 1979 a : Cloud droplets and raindrops collected and frozen on natural snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, 57, 273-281.
- Kikuchi, K. and H. Uyeda, 1979 b : On snow crystals of spatial dendritic type, *J. Meteor. Soc. Japan*, 57, 282-287.
- Kikuchi, K. and H. Uyeda, 1987 : Formation mechanisms of eighteen-branched snow crystals, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 8, 109-119.
- Kikuchi, K. and H. Uyeda, 1992 : Studies on the Snow Crystals of Low Temperature Types and Arctic Aerosols (Greenland Expedition), Hokkaido Univ., 178pp.
- Kikuchi, K. and H. Uyeda, 1998 : Formation mechanisms of multibranching snow crystals (Twelve-, Eighteen-, and Twenty-four-branched crystals), *Atmos. Res.*, 47/48, 169-179.
- Kikuchi, K. and K. Yanai, 1971 : Observation on the shapes of snow crystals in the South Pole region in the summer, *Antarctic Records*, 41, 34-41.
- 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, 452-460.
- Kimura R. and K. Tsuboki, 1997 : Influence of the Arctic on Mid-latitude Weather and Climate, Univ. of Tokyo, 405pp.
- Kobayashi, T. and Y. Furukawa, 1975 : On twelve-branched snow crystals, *J. Crystal Growth*, 28, 21-28.
- Kobayashi, T., Y. Furukawa, K. Kikuchi and H. Uyeda, 1976 : On twinned structures in snow crystals, *J. Crystal Growth*, 32, 233-249.
- Kobayashi, T. and T. Ohtake, 1974 : Hexagonal twin prisms of ice, *J. Atmos. Sci.*, 31, 1377-1383.
- Lee, Dong-In, K. Kikuchi and T. Taniguchi, 1989 : Chemical compositions of aerosol particles and snowfalls at Alta, Northern Norway, *Environ. Sci., Hokkaido Univ.*, 12, 169-178.
- Magono, C., 1951 : On the fall velocity of snowflakes, *J. Meteor.*, 8, 199-200.
- Magono, C., 1954 : On the shape of water drops falling in stagnant air, *J. Meteor.*, 11, 77-79.
- Magono, C. (ed.), 1978 : Snow Crystals in the Arctic Canada, Hokkaido Univ., 172pp.
- Magono, C and colleagues, 1959 : Preliminary investigation on the growth on natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 1, 195-221.
- Magono, C. and colleagues, 1960 : Investigation on the growth and distribution of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically, 2, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 1, 267-282.
- Magono, C., K. Higuchi, K. Orikasa, T. Takahashi, K. Kikuchi, T. Nakamura, T. Kimura and K. Sakurai, 1962 : Investigation on the growth and distribution of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically, 3, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 1, 373-391.
- Magono, C. and K. Kikuchi, 1961 : On the electric charge of relatively large natural cloud particles, *J. Meteor. Soc. Japan*, 39, 1-11.
- Magono, C. and K. Kikuchi, 1963 : On the positive electrification of snow crystals in the process of their melting, *J. Meteor. Soc. Japan*, 41, 270-277.
- Magono, C. and K. Kikuchi, 1965 : On the positive electrification of snow crystals in the process of their melting, (2), *J. Meteor. Soc. Japan*, 43, 331-342.
- Magono, C. and K. Kikuchi, 1980 : Some observations of snowfall and meteorological conditions in Arctic Canada, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1656-1664.
- Magono, C., K. Kikuchi, T. Kimura and S. Lee, 1963 : Investigation on the growth and distribution of natural snow crystals, 4, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 2, 49-78.
- Magono, C., K. Kikuchi, T. Kimura, S. Tazawa and T. Kasai, 1966 : A study on the snowfall in the winter monsoon season in Hokkaido with special reference to low land snowfall, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 2, 287-308.
- Magono, C., K. Kikuchi, S. Lee, T. Endo and T. Kasai, 1965 : An observation of snow crystals and their mother cloud, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, 2, 123-148.
- Magono, C., K. Kikuchi and N. Yamami, 1971 : On the meteorological conditions for the growth of snow crystals in colder temperature regions, as revealed by radio-sonde data in the Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, 49, 171-183.
- Magono, C. and T. Takahashi, 1963 a : On the electric phenomena during riming and glazing in natural supercooled cloud droplets, *J. Meteor. Soc. Japan*, 41, 71-81.

- Magono, C. and T. Takahashi, 1963 b : Experimental studies on the mechanism of electrification of graupel pellets, *J. Meteor. Soc. Japan*, **41**, 197-210.
- Magono, C. and S. Tazawa, 1966 : Design of "Snow Crystal Sondes", *J. Atmos. Sci.*, **23**, 618-625.
- Maruyama, H., 1961 : On the annual variation of concentration and the origin of ice nuclei in the atmosphere, *Papers in Meteor. Geophys.*, **12**, 216-246.
- Maruyama, H. and T. Kitagawa, 1967 : Relation of meteor stream to natural ice nuclei and precipitation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **45**, 126-136.
- Mason, B. J., 1957 : *The Physics of Clouds*, Oxford Univ. Press, 481pp.
- Mason, B. J., 1971 : *The Physics of Clouds (2nd Ed.)*, Clarendon Press, 671pp.
- Matthews, J. B. and B. J. Mason, 1963 : Electrification accompanying melting of ice and snow, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **89**, 376-380.
- Muguruma, J. and K. Kikuchi, 1963 : Lake ice investigation at Peters Lake, Alaska, *J. Glaciology*, **4**, 689-708.
- Muguruma, J. and K. Kikuchi, 1964 : The origin of vertical c-axis ice on Peters Lake, Alaska, *J. Glaciology*, **5**, 372-374.
- Murakami, M. and K. Kikuchi, 1982 : Some considerations on the center nuclei of snow crystals, *Memoirs of Nat'l Inst. Polar Res.*, Special Issue, **24**, 157-174.
- 中谷字吉郎, 1947 : 寺田寅彦の追想, 甲文社, 319pp.
- 中谷字吉郎, 1952 : イグアノドンの唄, 文芸春秋新社, 342pp.
- 中谷字吉郎, 1949 : 雪の研究—結晶の形態とその生成—, 岩波書店, 161pp, 319図版.
- Nakaya, U., 1954 : *Snow Crystals : Natural and artificial*, Harvard Univ. Press, 510pp.
- 佐藤 昇, 菊地勝弘, 1983 : 低温型雪結晶の人工生成, 北大地球物理学研究報告, **42**, 37-50.
- Sato, N. and K. Kikuchi, 1985 : Formation mechanisms of snow crystals at low temperature, *Annals of Glaciology*, **6**, 232-234.
- Sato, N. and K. Kikuchi, 1988 : The effect of nucleation on the morphology of snow crystals in low temperature, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **8**, 259-280.
- Sato, N. and K. Kikuchi, 1989 : In situ growth experiments of snow crystals of low temperature types observed at Inuvik in Arctic Canada, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **8**, 333-354.
- Sato, N., K. Kikuchi, Y. Asuma and M. Kajikawa, 1998 a : In situ growth experiments on "Gohei Twins" snow crystals observed at Inuvik in Arctic Canada, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **11**, 335-344.
- Sato, N., K. Kikuchi, Y. Asuma, H. Uyeda and M. Kajikawa, 1998 b : Relationship between ice nuclei and snowfalls observed in the Arctic regions, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **11**, 345-361.
- Sato, N., K. Kikuchi, S. C. Barnard and A. W. Hogan, 1981 : Some characteristic properties of ice crystals precipitation in the summer season at South Pole Station, Antarctica, *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 772-780.
- Smiley, V. N., B. M. Whitcomb, B. M. Morley and J. A. Warburton, 1980 : Lidar determinations of atmospheric ice crystal layers at South Pole during clear-sky precipitation, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1074-1090.
- Takeda, T., Y. Fujiyoshi and K. Kikuchi, 1982 : Observation of wintertime clouds and precipitation in the Arctic Canada (POLEX-North) Part 1, *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 1203-1214.
- 津田清楓, 1997 : 寺田さんの忍苦(抄録), 寺田寅彦全集, 第10巻, 月報, **10**, 7-8.
- Twomey, S., 1956 : The electrification of individual cloud droplets, *Tellus*, **8**, 445-452.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1976 a : On the orientation of the principal axis of frozen water droplets, *J. Meteor. Soc. Japan*, **54**, 267-275.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1976 b : Remeasurement of the axial angle between spatial branches of natural polycrystalline snow crystals, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII (Geophys.)*, **5**, 21-28.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1978 : Freezing experiment of supercooled water droplets frozen by using single crystal ice, *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 43-51.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1979 : Observations of the three dimensional configuration of snow crystals of combination of bullet type, *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 488-492.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1980 : Measurements of the principal axis of frozen hemispheric water droplets, *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 52-58.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1990 a : Low temperature type snow crystals with capped dendrites or plates, *J. Crystal Growth*, **99**, 1238-1241.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1990 b : Formation mecha-

nisms of twelve-branched snow crystals, J. Meteor.

Soc. Japan, 68, 549-556.

Studies on the Cloud Physics in the Polar Regions

Katsuhiro Kikuchi*

* Faculty of Bioresource Sciences, Akita Prefectural University, Shimoshinjo-Nakano,
Akita 010-0195, Japan

(Received 20 April 2001 ; Accepted 14 August 2001)

≡≡≡支部だより≡≡≡

九州支部「気象教室」開催報告とお知らせ

九州支部では、気象学の普及を目指して「気象教室」を2001年8月18日(土)に電気ビル(福岡市中央区)会議室で開催しました。支部初の試みなので、参加者がどの程度集まるのか見当が付きませんでした。中学生から70歳代までの49名が参加し、会議室はほぼ満席となりました。

3人の講師が約1時間ずつ講演を行いました。

「オゾン層の破壊と気象」

九州大学理学研究院 廣岡俊彦 教授

「天気図の見方」

福岡管区気象台 金崎 厚 気候・調査課長

「気象キャスターよもやま話」

日本気象協会九州支社 吉竹顕彰 課長

講演は多少時間をオーバーするほどでしたが、参加

者はとても熱心に聴いていたようです。直後に行ったアンケート(42名回答)では、講義の内容について22名が満足したと回答し、大多数の38名が来年も同様の催しがあれば参加したいと答えていました。この結果をもとに来年度も更に充実した催しを企画・実施したいと考えています。

お知らせ

九州支部では、支部会員の情報伝達を円滑に行うことを主な目的として、支部のホームページの作成をすすめ、公開することとなりました。URLは、<http://www16.u-page.so-net.ne.jp/zb4/msj-kysh/index.htm>です。

是非アクセスしてみてください。