

雲微物理過程に関する基礎研究と初中等気象教育での実践研究の展開 — 日本気象学会北海道支部 2022 年度「北海道支部賞」受賞に際して —

北海道教育大学名誉教授
高橋 庸哉

支部賞授賞の e-mail を頂き、不意のことでとても驚きました。私などが頂いてもとも存じましたが、私の知らない何方かが評価くださり、御推薦頂いたことは大変光栄なことと思ひ直し、受賞させて頂くことに致しました。

先ず、私の研究略歴を記します。北海道大学理学部地球物理学科から大学院と孫野長治先生、菊地勝弘先生にご指導頂きました。科学館に興味を持ち、博士後期課程を中退し、1981年に札幌市青少年科学館に就職しました。と言っても、そのような話が有った訳ではなく、札幌市事務職員採用試験を自ら受験してのことです。幸運にも1984年から1年間米国ユタ大学気象学科福田矩彦先生の下で鉛直過冷却雲風洞による雪結晶浮遊成長実験に携わることができました。出張扱いではございませんでしたが、帰国日の朝まで365日実験に明け暮れ何ものにも代え難い日々でした。帰国後は北大低温科学研究所の若濱五郎先生、遠藤辰雄先生の下で研究生として仕事を終えてからと休日に実験を続けさせて頂きました。学会発表は年休でとんぼ返りでした。その頃は気象関連の公募は皆無に近く、紆余曲折を経て、北海道教育大学教育学部附属教育実践研究指導センターにやっと1991年に転職することができました。その改組に伴い、2008年に札幌校(地学)に配置換えとなり、初めて主専門を気象学と名乗れるようになりました。正に研究者の端くれそのものです。

以下では、このような環境で私に何とか出来たことを研究開始時期順にご紹介させて頂きます。

(1) 大型垂直風洞による人工降雪実験装置の開発

低温研成瀬廉二先生、古川義純先生と理学部遠藤辰雄先生のワーキンググループに加えて頂き、1981年に開館する札幌市青少年科学館の展示物として、世界で初めて降雪過程を再現する大型垂直風洞(高さ18m)を開発した。種結晶供給後降雪は20分以上継続し、樹枝状結晶の最大径は直径2mm程で天然に匹敵する大きさに達し、雪片の形成(直径4mm以上)に初めて成功した。 <論文等1>

(2) 雪や氷の理解を図る教育実践

身近な雪や氷に科学的に親しむという視点から、降雪・積雪及び氷に関する観察実習教材を作成し、科学館でその教育実践を1982年から行った。次のような実践効果があった: 1) 普段何気なく見過ごしている現象に関心が向けられるようになった; 2) 各教材共に身近で視覚的に優れており、感動が大きかった; 3) 家庭でも容易に取り組むことができ、参加者の積極性を引出すことができた; 4) 親子での参加も多く、社会教育的意義も高い; 5) 教員の参加も多く、学校教育での活用が期待される。1991年度東レ理科教育賞佳作受賞。 <論文等2>

(3) 雪結晶レプリカ法への身近な材料の適用

雪結晶のレプリカ法は 1941 年に V. J. Schaefer に依って開発されたもので、ポリビニールフォルマールを二塩化エチレンに溶解させたものが使われた。商標名からフォルムパール法とも言われ、広く用いられてきたが、白濁を生じるなどの欠点もあった。フォルムパールには不純物としてポリビニールアルコールが含まれていることに起因していた。そこで、身近な材料の適用を検討した。アクリルと二塩化エチレンまたはトリクロロエチレン、ポリスチレンと 1,1,1-トリクロロエタンまたは四塩化炭素の組合せが次の点で優れていることがわかった: 1)水溶性不純物を含まないプラスチックで、白濁しにくい; 2)変形や二次的成長が起こりにくい; 3)トリクロロエチレンは -86°C まで使用可能; 4)1,1,1-トリクロロエタンは毒性が低い; 5)四塩化炭素は水の溶解度が低く、小さな結晶のレプリカ作成に適する。1987 年度東レ理科教育賞奨励作受賞。 <論文等 3>

(注記) 1,1,1-トリクロロエタンは修正液の薄め液にも使われる程一般的であったが、オゾン層破壊物質のため現在は使用できない。

(4) 霰のエンブリオの観測

先行研究では霰の薄片を作って調べられたが、霰エンブリオが薄片から外れたところにある可能性もある。そこで、シリコンオイル中に霰を採取し、顕微鏡下で注意深くほぐして霰全体をくまなく調べた。ソルトレークシティと札幌の二冬で約 1500 個ほぐした。雪結晶の融解または昇華変態によると思われる氷粒子や凍結水滴、雪結晶やその破片がエンブリオとして見い出された。また、下記(5) 実験で指摘した等方的結晶がエンブリオとなっている場合もあった。しかし、大半の霰には一見明らかなエンブリオは存在しなかった。雪結晶上の捕捉雲粒塊がちぎれたり、霰の分裂したものがエンブリオになったと考えられる。エンブリオタイプ毎に霰の成長開始の閾値を見い出した。 <論文等 4>

(5) 鉛直過冷雲風洞による降雪粒子自由落下成長実験

これまでの人工雪生成実験は兎の毛等の支持物の上に雪結晶を成長させたもので、天然雲内で自由落下しながら成長する雪結晶とは成長環境条件(温度場及び水蒸気場)を異にするという本質的な問題があった。本実験で用いた風洞は雪結晶の落下速度に等しい上昇流を与えて、雪結晶を 30 分以上一点に浮かせながら成長させ得るのが他に類を見ず、大気中での雪結晶の自由落下成長過程が実験室内に世界で初めて再現できるようになった。

水飽和で雪結晶の気相成長及び雲粒捕捉成長に関する実験を行った。a 軸方向には -15°C 付近、c 軸方向には -5.5°C 付近で成長が速く、落下速度が小さかった(それぞれ樹枝状及び針状結晶の成長に対応)。等方的結晶の成長は気相成長、遷移成長及び霰成長期に分けられ、それぞれ、結晶質量は時間の 1/2 乗、2 乗及び 6 乗に比例した。降水粒子の落下は気相成長、霰成長期ではそれぞれストークスの抵抗法則、ニュートンの抵抗法則に従った。“LOOK JAPAN” 誌 1988 年 1 月号で紹介された。 <論文等 5>

ユタ大学から戻った後、低温研で同様の装置を制作させて頂き、実験を続けた。雪結晶の晶癖変化は角板($>-4.0^{\circ}\text{C}$)、角柱($-4.0\sim-8.1^{\circ}\text{C}$)、角板($-8.1\sim-22.4^{\circ}\text{C}$)、角柱($<-22.4^{\circ}\text{C}$)であった。 -5.5 、 -12 、 -14.5 、 -16.5 及び -18°C 付近で行った実験では結晶形は時間とともに変化した。等方的結晶の質量増加は Maxwell 型で、形状変化を示す場合にはこれより速く、水蒸気がより効率的に昇華凝結することがわかった。板状結晶では通風効果が認められたが、針状結晶では明瞭ではなく、流れを規定しているのが a 軸の長さであることを示している。通風効果はレイノルズ数が 2 (扇形) または 5 (樹枝) を超える頃から顕著となった。また、抵抗係数とレイノルズ数の間には両対数表示で直線関係が見いだされた。得られた結果は雲物理学の代表的教科書に図表付きで引用されている: 例

例えば、“Microphysics of Clouds and Precipitation, 2nd edition” (Pruppacher & Klett 著) 及び “Physics and Dynamics of Cloud and Precipitation” (Wang 著)。また、論文掲載の写真がドイツ気象局発行気象啓蒙雑誌 “promet” 1993 年 1 号の表紙 を飾った。 <論文等 6 >

更に、これらの研究と静的雲箱の中での氷晶成長の測定及び関連する理論的考察を福田先生とまとめた。浅く・対流の弱い冬の雲では拡散成長が、深く・対流の活発な夏の雲では霰／雹型の雲粒捕捉成長がそれぞれ卓越することを簡単な理論的考察により示した。 <論文等 7 >

(6) 日常語にみる誤った自然認識—気象用語を例として

誤った認識が広まった日常科学用語では科学的理解が著しく妨げられる場合がある。そこで、国語辞典中の気象用語を例として、日常語における自然認識の誤りを調査した。その結果と小・中学校理科用教科書での関連記述の問題点を議論した。水に関連した大気現象を表す語、特に降水粒子の成長メカニズム（雨・雪・霰）、霧に類似した現象（もや・煙霧・スモッグ）や水蒸気とその相変化（水蒸気・もや・氷霧など）が取り上げられた。 <論文等 8 >

（注記）卒論で国語辞典を再度調べてみた。学会発表時に新聞やNHK ニュースでも取り上げられたので変更されているかとも期待したが、版を重ねても訂正されていないものも多かった。

(7) 降雪粒子の成長機構が降水酸性化に与える影響

氷は異物質を取り込まないので気相成長する雪結晶は酸性とならないというのが定説であった。そこで、降雪粒子の成長機構（気相成長あるいは雲粒捕捉成長）による降水の化学組成の違いを明らかにするために、札幌市内中心部・郊外で観測を行った。案に相違して、気相成長したサンプルの場合でも pH が 4 近くの酸性を示した。この場合には NO_3^- と nss-Cl^- が寄与しており、 HNO_3 と HCl ガスの取り込みによると推定される。雲粒捕捉成長の場合には局所都市大気汚染を受けていないサンプルでも nss-SO_4^{2-} の濃度が高かった。札幌市内中心部のサンプルでは降雪の初期に nss-Ca^{2+} の濃度が高く、中和されていた。 <論文等 9 >

(8) 教育現場へ気象衛星画像を提供するシステム及び教材活用ソフトウェアの開発

教育現場での気象衛星画像の利用は新聞天気図を台紙に貼ってぺらぺらめくりしたり、2 台のスライドプロジェクターで可視・赤外画像合成をしたりといったところに留まっていた。そこで、校内ネットワークやソフト開発に精通した小中学校教諭の土田幹憲先生、鈴木宏宣先生、廣野達也先生と‘気象情報ネットワーク研究会’を立ち上げ、1993 年から活動を始めた。

科研費が追加採択され、授業で活用できるように気象衛星画像を提供するシステムを開発した（サーバにしたパソコンが 100 万円、画像を保存するための倍速 CD-ROM ライターが 25 万円という時代でした）。最初はパソコン通信だったが、直に Web からの提供となった。このシステムでは、受信データは自動的に処理され、一定時間間隔毎に更新される。気象衛星画像のデータ・ダウンロード時間を短縮するために受信した 8 ビット画像を 4 ビットに変換し、4 分割で送られてくる画像から全球画像を合成した。非損失圧縮を採用し、16 階調で表示でき、画質が良かった。 <論文等 10 >

併せて、児童・生徒や先生が気象衛星画像を容易に操作できる表示ソフトウェアを開発した。利用者は一覧の中で日付・時間を指定すれば、その画像をすぐに表示でき、動画も行うことができる。動画の期間や繰り返し、速度を指定することができる。また、メモの

記入・保存及び雲頂温度の表示、特定温度あるいは輝度域の色付け、赤外面像と可視画像の重ね合わせ機能も有する。 <論文等 1 1 >

更に、この表示ソフトウェアと共にひまわり画像及び日々の天気図 1 年分を収録した CD-ROM 教材画像集を作成した。ソフトには天気トピックス表示や天気図重ね合わせ、各地の天気表示機能を加えた。 <論文等 1 2 >

2007 年「気象・気候の学習に気象衛星画像を活用するソフトウェア開発とその適用」で日本科学教育学会「科学教育実践賞」受賞。全国学校図書館協議会選定コンピュータ・ソフトウェアに選出。

(9) 科学リテラシー育成に向けての大気科学に関する理解増進

1999 年に英国エジンバラで行われた「学校及び一般気象・海洋教育国際会議」で知己を得た坪田幸政先生（慶応義塾高校、現在桜美林大学）と「リテラシーとしての気象教育プロジェクト」を立ち上げ、生徒向けプログラムから教員研修へと活動を進めた。教員研修では参加者から児童・生徒、同僚へと波及効果が期待できる点に着目した。坪田先生は気象教育のスペシャリストで、様々な教材や指導法をご教授頂いた。スーパーサイエンスハイスクール事業で大雪山での校外研修も一緒に実施した。

a. 気象情報を題材とする中高生対象科学体験学習プログラムの開発と実践

身近な気象情報の原理・読み方の基礎と実社会との関わりを理解を図る、中学生を主対象とした体験学習活動プログラムの開発、実践を行った。気象衛星「ひまわり」による観測の仕組みと画像の見方及びセンサーによる建物内や山での大気計測、大気に関する簡単な実験、実地見学（空港内の航空測候所や航空会社運航部門等）からなる。2000～03 年日本学術振興会ふれあいサイエンスプログラム等で中学生対象サイエンスキャンプ（3 日間）として実施。 <論文等 1 3 >

b. 気象情報と大気の実験に関する教員研修プログラムの開発と実践

上記の成果を活かし、学校教育現場へ普及を図るために、教員研修プログラムを開発・実践した。教員全体のレベルアップが不可欠であり、理科を専門としない小学校教諭や大学で気象を履修しなかった中学校理科教員を主対象とした。実際に授業で使えることに力点を置いた。2000 年から 2009 年まで年 1～2 回理科教育指導力向上研修事業等でワークショップを実施した。学年末調査により、参加者の 7 割がワークショップで取り上げた内容を自身や同僚による授業、教員研修会等で実際に利用したことや 1 回のワークショップ開催で延べ 8 千名程の中学生が提供した教材を使った授業を受けたことがわかった。例えば、気象衛星画像教材を利用した小学校教員の 85%が大変役立った・役立ったと評価し、児童は雲や台風の動きについては天気の変化を視覚的に理解できたとコメントしており、児童の理解を改善することができた。参加者に止まらず、児童・生徒、同僚へと研修効果を波及させることができた。 <論文等 1 4 >

尚、a 及び b の実践では（8）で制作した気象衛星画像表示ソフトウェアを活用した。

c. 米国気象学会教育プログラムとの交流

世界的な科学教育改革の流れの中で、大気科学で世界最大の米国気象学会が教育プログラムに 1990 年から取り組んでいる。その教員研修事業「Project Atmosphere」に招待参加すると共に、同プログラムディレクターを招き（日本学術振興会外国人招聘プログラムによる）、日本気象学会 2000 年京都大会等で講演会を実施した。また、同プログラムが制作した教師向け図書を翻訳・出版した。極めて組織立って実施されておりとても真似できなかったが、このプログラムには随分触発され、上記活動に結びついた。 <論文等 1 5, 1 6 >

2009年「科学リテラシー育成に向けての大気科学に関する理解増進」で科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞」受賞。

(10) 地域素材を活かした雪学習情報の発信と教育現場への普及

子どもたちに雪の結晶形を問うと、約半数は誤った認識を持っており、五角形や八角形、四角形と答える者が多い。雪を何とはなしに見ているが、良くは観ていない。雪は日々の生活とも密着している。例えば札幌市の雪対策関連予算は2022年度当初予算で215億円程であるが、市政に関する要望で一番多いのは生活道路の除雪など除雪に関することである。除雪の頻度を上げれば税金が増える。費用をあまり掛けずに市民としてもっとできることはないだろうか。雪は子どもたちの興味・関心をそそり、地域の特色を活かした素材となり得る。しかし、全国ほぼ均一な教育内容の中で教育現場に雪の学習に関する蓄積はほとんどなかった。そこで、総合的な学習の時間創設を契機に、授業の達人である北海道教育大学附属札幌小学校新保元康先生と共同で「北海道雪プロジェクト」を2000年に立ち上げ、20年間に亘って雪の学びの教育現場への普及を図ってきた。プロジェクトには有志の道内教員や学芸員に多数参加頂いた。

a) 『雪』学習情報の発信

Web ページ『北海道雪たんけん館』を開発し、2001年から雪の学習情報を発信した（インターネットが教育現場にも普及し始めた頃で Web コンテンツの先駆けであった）。雪の観察や雪と暮らし、雪と生物、雪と英語、カードゲームなど様々な雪に関する学習情報を提供した。開設以来100万件を超えるトップページへのアクセスがあり、2000余件の質問に答えてきた。〈論文等17〉

（注記）現在も公開されているが、Flash がサポート切れのため、残念ながら動かないページも多い。

b) 『雪』学習のサポート

単元のねらい及び評価基準、単元計画、本時の展開例を示した教師向け「雪の学習プラン集」（Vol. 1 及び 2）を制作した。授業で使うものとして、児童用「雪のワークシート」（シリーズ1～8）や「雪のテキスト」（シリーズ1～8）、資料集を開発した。各教科や総合的な学習の時間での実践を念頭に置き、どんなバックグラウンドを持つ教員でも雪の学習を容易に取り組めることを基本コンセプトとしている。この他、小学校での雪の結晶に関する出張授業等も行った。

c) 『雪』授業を広める

道内教員を主対象に「雪の学習研究会」を2002年～2020年に毎冬実施した。公開授業及び提案などからなる。また、児童・生徒の調べ学習のゴールとして、その成果を発表する場があると学習への意欲を高める。そのような場として、「雪と暮らしおはなし発表会」（札幌市建設局・教育委員会主催）が設けられた。

札幌市が2009年度から学校教育の重点で「北国札幌らしさを学ぶ【雪】」を共通に取り組むテーマの一つに位置づけたことは活動の大きな成果である。2006年「教師が作る・授業で役立つ・身近な『雪』を活かす情報発信」で文科省主催インターネット活用教育実践コンクール「朝日新聞社賞」及び2010年第16回マイタウンマップコンクール「日本科学未来館館長賞」等受賞。

(12) 樹枝状雪結晶の形態多様性の解明

樹枝状雪結晶と言われているものには羊歯六花や樹枝六花、星六花などがあり、主

枝の形態や副枝の密度により多様であるが、その成長条件は不分明のまま残されてきた。そこで、(5)と同じ鉛直過冷却雲風洞を用いて、気温と雲水量を変えながら実験に取り組んだ。実験を何度も繰り返し、データとのにらめっこが何年も続いた。

樹枝状結晶の多様性は気温に主に依存し、 -12.5°C 以上で扇六花、 $\sim -13.0^{\circ}\text{C}$ 広幅六花、 $\sim -14.5^{\circ}\text{C}$ 星六花、樹枝六花、羊歯六花、 $\sim -14.8^{\circ}\text{C}$ 樹枝六花、 $\sim -15.7^{\circ}\text{C}$ 星六花、それ以下で扇六花と変化する。また、雲水量にも依存し、 -13.3°C から -14.5°C では星六花→樹枝六花や樹枝六花→羊歯六花へと遷移する。Fog Effect（雲粒による水蒸気・潜熱輸送促進効果）による結晶質量増を実証し、結晶を取り巻く雲粒が副枝の成長ばかりでなく、結晶の厚みの増大に寄与していることがわかった。また、結晶質量及び大きさの気温変化は星六花が成長する -14.9°C で極大を示し、副枝が発達する羊歯六花は -14.3°C で成長する。 <論文等 18>

雲微物理過程に関する基礎研究と教育現場に資する実践研究を織り交ぜながら私なりに研究を進めてきた。とても有難いことに北大低温研の共同研究で今も実験をさせて頂いており、楽しい日々を過ごしております。

ご指導頂きました本文中に記載の諸先生に深謝申し上げます。また、北海道雪プロジェクトには多くの教育現場の先生方にご参集頂きました。全員の芳名を書けませんことをお詫び申し上げますと共に、ご協力に心よりお礼申し上げます。雪に関する Web ページのデザイン・制作等は太田真（ピコグラフ）氏に依る。北海道教育大学卒業生で、素案の意図を汲んで 120%的確に具体化してくれた。彼なくしては『北海道雪たんけん館』は語れません。

論文等

1. Takahashi, T., C. Inoue, Y. Furukawa, T. Endoh and R. Naruse, 1986 : Vertical wind tunnel for snow process studies. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **3**, 182-185.
2. 高橋庸哉・志摩長生・紺野高裕, 1994 : 雪を科学するー地域環境の教材化と活用ー. 子どもと環境ーしなやかな教科教育を求めてー所収, 東京書籍, 168-181.
3. Takahashi, T. and N. Fukuta, 1988 : Ice crystal replication with common plastic solution. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **5**, 129-135.
4. Takahashi, T. and N. Fukuta, 1988 : Observations of the embryos of graupel. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3288-3297.
5. Takahashi, T. and N. Fukuta, 1988 : Supercooled cloud tunnel studies on the growth of snow crystals between -4 and -20°C . *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 841-855.
6. Takahashi, T., T. Endoh, G. Wakahama and N. Fukuta, 1991 : Vapor diffusional growth of free-falling snow crystals between -3 and -23°C . *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 15-30.
7. Fukuta, N. and T. Takahashi, 1999 : The growth of atmospheric ice crystals — a summary of findings in vertical supercooled cloud tunnel studies. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1963-1979.
8. 高橋庸哉, 1993 : 日常語にみる誤った自然認識ー気象用語を例として. 教科と子どもとことばー言語で探る教科教育ー所収, 東京書籍, 52-63.
9. Takahashi, T., Endoh, K. Muramoto, T. Nakagawa and I. Noguchi, 1996 : Influence of the growth mechanism of a snow particle on its acidification. *Atmos. Environ.*, **30**, 16

83-1692.

- 1 0. M. Tsuchida, H. Suzuki and T. Takahashi, 2003 : Providing weather satellite images to a classroom using the World Wide Web (WWW). *J. Computers in Mathematics and Science Teaching*, **22**, 141-150.
- 1 1. T. Takahashi, H.S uzuki, M. Tsuchida and Y.Tsubota, 2006 : Development of software for using satellite images in weather and climate studies. *J. Science Education in Japan*, **30**, 241-251.
- 1 2. 気象情報ネットワーク研究会, 1997(Ver. 1)・1998(Ver. 2)・2001(Ver. 3), 雲の観察ひまわり V i e w. (CD-ROM 教材) 東京書籍.
- 1 3. 高橋庸哉・坪田幸政, 2004 : 気象情報を題材とする中学生向け科学体験学習プログラムの開発. *科学教育研究*, **28**, 335-345.
- 1 4. T. Takahashi and Y. Tsubota, 2006 : Development and evaluation of an elementary school teacher workshop on weather directly linked with classes. *Proc. 7th Intern. Conf. on School and Popular Meteorological and Oceanographic Education*, 8pp.(in http://ams.confex.com/ams/EWOC/techprogram/meeting_EWOC.htm)
- 1 5. 高橋庸哉, 1999 : アメリカ気象学会の教育普及プログラムー指導的教員のための大気科学トピックスに関するワークショップに参加してー. *天気*, **46**, 65-69.
- 1 6. 高橋庸哉・坪田幸政, 2000 : 理科年表読本 ワクワク実験 気象学 (訳書) . 丸善, 226pp.
- 1 7. T. Takahashi, M., Shimbo, T., Wariishi, Y. , Sato, Y. , Kambayashi, H. , Ogasawara, H., Sano, K. , Sakata, T. , Hosokawa, T. , Watanabe, K. , Domon, M. Ota, Tsuchida, 2007 : Development of a Web-based resource on various snow-related topics for teachers and students. *SITE 2007 Proceedings*, 3498-3503.
- 1 8. Takahashi, T., 2014 : Influence of liquid water content and temperature on the form and growth of branched planar snow crystals in a cloud. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 4127-4142.