

日本気象学会北海道支部創立60周年記念式典実施状況

北海道大学大学院理学研究院 稲津 將

今年は昭和32年6月に日本気象学会北海道支部が創立されて以来、ちょうど60周年に当たり、支部ではこれを記念して特別行事を行った。

長谷部支部長の挨拶のあと、気象庁札幌管区気象台長および日本気象協会北海道支社長からご祝辞をいただき、日本気象学会理事長・岩崎俊樹氏からの祝電が披露された。つづいて、前回の記念行事から30年が経過したことから、この30年の間、北海道での気象学のご研究その他に長年の功績があり、北海道に限らず近年の気象学の歴史を語っていただける講演者5名による記念講演（2016年度第2回気象講演会を兼ねる）が行われた。記念式典終了後、式場内で記念写真を撮影し、その後、同会場内で祝賀会がもたれた。最後に式次第、挨拶された方の写真、講演者の写真・略歴、集合写真の順に添付する。なお、記念式典には59名の、祝賀会には26名の参加者があった。

この場を借りて、ご祝辞ご講演をいただいた皆様および、本式典運営にご尽力いただいた支部幹事の皆様に、感謝を申し上げます。

式次第

司会 稲津 將

1. 開式の辞

2. 支部長よりご挨拶

北海道大学教授 長谷部 文雄 様

3. ご祝辞

札幌管区気象台長 林 久美 様

日本気象協会北海道支社長 守屋 岳 様

4. 祝電披露

5. ご講演

北海道大学・秋田県立大学名誉教授 菊地 勝弘 様

還暦を迎えた日本気象学会北海道支部

元気象衛星センター所長 村松 照男 様

北海道西岸地方の大雪に関する観測・調査研究・予測の変遷

北海道大学名誉教授 山崎 孝治 様

支部60年と北大大学院地球環境科学研究科
北海道大学名誉教授 藤吉 康志 様
北海道の雲科学研究
神戸大学教授 林 祥介 様
汎惑星気象・気候モデルを目指して

6. 写真撮影

7. 閉式の辞

支部長ご挨拶（長谷部文雄支部長）



ご祝辞（林久美台長）



ご祝辞（守屋岳支社長）



ご講演者の写真・略歴

菊地 勝弘 名誉会員

1934年 北海道生まれ

1962年 北海道大学大学院理学研究科
博士後期課程中退

北海道大学助手、助教授、教授、秋田県
立大学教授を歴任

日本気象学会賞、同藤原賞、日本雪氷学
会功績賞、日本大気電気学会賞、紫綬褒章、
瑞宝中綬賞、韓国気象学会栄誉賞、北海道
科学技術賞、北海道新聞文化賞(学術部門)
などを受賞

日本大気電気学会名誉会員、日本気象学会名誉会員



村松 照男 会員

1945年 静岡県生まれ

1968年 気象大学校卒業

札幌管区気象台予報課、1970年第12
次南極地域観測隊で越冬、気象衛星センタ
ー、気象研究所、気象庁予報課、札幌管区
予報課長、気象大学校教授、気象庁主任予
報官、札幌管区気象台技術部長、気象衛星
センター所長を歴任



山崎 孝治 会員

1949年 東京都生まれ

1973年 東京教育大学大学院理学研究
科修士課程修了

気象庁予報課、気象研究所予報研究部主
任研究官、気候研究部第2研究室長、北海
道大学大学院地球環境科学研究院教授を
歴任



藤吉 康志 会員

1951年1月 新潟県生まれ

1979年3月 名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程単位取得退学

北海道大学低温科学研究所助手、名古屋大学水圏科学研究所（後、大気水圏科学研究所）助教授、北海道大学低温科学研究所教授、同特任教授を歴任



林 祥介 会員

1958年 兵庫県生まれ

1984年 東京大学 大学院理学研究科博士後期課程中退

東京大学理学部助手、北海道大学大学院地球環境科学研究科助教授、東京大学大学院数理科学研究科助教授、北海道大学 大学院理学研究科教授を歴任



集合写真（ホテルマイステイズ札幌アスペンにて）



支部長挨拶

(公益社団法人)日本気象学会北海道支部 支部長 長谷部 文雄

本日は日本気象学会北海道支部創立 60 周年記念式典にご臨席をたまり、まことにありがとうございました。還暦に当たるこの節目の年に支部長を務めさせていただいていること、大変光栄であると同時に、記念事業の立案・運営にご尽力頂いた稲津幹事長をはじめとする役員の皆様方に厚く御礼申し上げます。

当支部では、1957 年 6 月の創立以来、日本気象学会の目的である「気象学の進歩を通じた社会への貢献」を実現すべく、多くの先輩方が北の大地に根を張って活動して来られました。資料を繰ってみれば、この 60 年という歳月の間に甚大な被害をもたらした自然災害に幾つも見舞われたことがわかります。昨年の台風による被害は記憶に新しい所です。この間、観測技術や予報技術の向上といったハード面の進歩は著しいものがありますが、我々の担う気象学のさらなる発展は、地域防災との関わりからも益々大きな役割を果たす必要があるのはいうまでもありません。同時に、これらの災害は地球規模の変動とも無関係ではあり得ません。現代気象学は、地球規模の視点と地域に寄り添う活動の両面が求められております。

こうした観点から、本日は、北海道で気象学の研究に長年携わって来られ、北海道における気象学研究の歴史を語っていただけのご講演者 5 名をお迎えしました。菊地先生、村松先生、山崎先生、藤吉先生、そして林先生です。お話の内容について私が拙い言葉でご紹介するよりも、一刻も早く、ご本人の生きたお言葉をお聞きしましょう。語り尽くすにはあまりにも短い時間かと思いますが、先生方、どうぞよろしくお願い致します。私ども現役世代としては、本日の先生方のお話を胸に刻みながら、次の 60 年とは言わないまでも、将来を見据えた支部活動を構想する糧とさせていただきます。いわゆる団塊世代の大量離職、少子高齢化の時代、気象学の教育・研究に支部活動はどう向き合うべきか。困難な課題ですが、気象に携わる社会人と教育・研究機関たる大学との連携の場としての学会支部活動を充実させることが一つの解だろうと考えております。それにより、学会の目的の達成と若い世代の育成に貢献してゆけたらと思います。

以上、簡単ですがご挨拶に代えさせていただきます。

祝 辞

日本気象学会北海道支部創立60周年記念にあたり

公益社団法人 日本気象学会理事長

東北大学 大学院理学研究科教授 岩崎 俊樹

日本気象学会北海道支部が創立 60 周年を迎えるにあたり、心よりお喜びを申し上げます。1957 年 6 月に創設された北海道支部は、現在、年 2 回の研究発表会を通じて自らの研鑽に努めるとともに、一般市民向けに気象講演会とサイエンスカフェを開催し、当地における気象知識の普及にも積極的に取り組まれています。会員諸氏および歴代の支部長や理事諸兄、支部事務局のご尽力のたまものと存じ、敬意を表します。



北海道支部では、一般の気象学のみならず、雪の結晶や海氷・海洋との相互作用、石狩湾小低気圧、道東の霧など、地域に特有の現象についても大変ユニークな研究活動を展開し、地域に貢献してきました。もとより、気象学の原理原則は極めて一般的なものであり、地域に特有な現象の理解は気象学一般の深化と広がり大きく寄与するものでもありました。

気象学はこの 60 年で大きな進歩を遂げ、レーダーなどの地上リモートセンシング、地球観測衛星、数値予報などの数々の新しい技術を生み出し、以前なら不可能だった多くの情報を社会に提供できるようになりました。社会もこの間大きく変化しました。2011 年の大震災を経て国民の防災意識は極めて高く、気象予測、気候変動、環境問題に対する関心はますます強くなっています。私たちは現状に満足することなく、国民の期待に応えていく必要があります。

昨年(2016 年)、北海道には 3 個の台風が大きな爪痕を残しました。防災と気候変動に対する市民の関心も高まっているものと思います。地域社会に深くかかわる気象現象の解明、知識の普及、行政機関等の科学的なバックボーンとして、北海道支部が今後とも大きく貢献されることを期待いたします。長谷部文雄北海道支部長はじめ支部の皆様今後の研究のご発展とご健康をこころより祈念いたします。

私事になりますが、札幌管区气象台に勤務した駆け出しのころ(1980~1983 年)、北海道支部にはたいへんお世話になりました。その当時、先輩諸兄にいただいた多くのご教示は、私の気象学の原点となっております。今更ではありますが、関係者の皆様にあらためて深く感謝申し上げます。

祝 辞

日本気象学会北海道支部創立60周年記念にあたり

札幌管区気象台長 林久美

昨年4月から札幌管区台長をしております林です。一言ご挨拶をさせていただきます。北海道支部が1957年6月誕生ということでちょうど還暦を迎えたこととなります。60年前と言えば、そのころに、すでに社会人であった方々は数少なくなっていますが。日本で南極観測を始めた年、ソ連がスプートニクを打ち上げたりと科学的トピックが多い年でした(東海村に原子力の火がともったのもこの年です)。このころの北海道の人口は488万人でした。その後、1998年の569万人をピークに減り続け、から2016年初頭の人口は538万人となっています。高齢化が進み学会員の数も減り続けています。

気象学会の運営にはほかの学会活動と異なり当初から気象庁とは深いかかわりを持ち続けています。発足当時は気象現象の物理的解明において未知のことが多く、衛星もレーダーもない時代でした。その後、数値予報モデルが導入されさまざまな観測方法がとられるようになり、気象庁の業務も災害の防止により力点がおかれるようになっていきます。しかし、天気予報の技術、数値予報モデルの発展は物理に裏打ちされた科学の世界です。気象庁の予報部門の高度化は、気象学の発展、情報の共有化とは切り離すことはできません。

これから、若者の人口が爆発的に増えることはありません。有限の人的リソースを多様性も保ちつつ、知識、技術の共有化、持続性を維持するためにはどうしたらいいかが今後の課題なのだと思います。母語で専門的な議論を繰り広げられる環境はとても重要です。アジアではとてもうらやましがられる環境です。また、支部としての存在は、東京にはない目線を持って自然現象を見つめられるかに意義があると思っています。それは単に北海道特有の自然現象を扱うと言う意味ではなく、“違う目線で”物事を見つめることができるということかと思っています。学会の意義はみんなが一方向を向いているのではない、ということにあります。気象庁でしたら年ごと、あるいは5年程度の中期業務目標があり政府の施策にそう必要があります。科学の世界においては、多数意見として今正しいと考えられていることが20年後に正しいかは保障されるものではありません。いろいろな考えを持った会員の情報の場を提供できるのが学会の場だと思います。今後も科学としての気象、ビッグデータとしての気象情報をどう扱っていけばいいのか、皆さんと一緒に考えることができると考えています。

データの共有を含む情報基盤網の知識や技術はなるべく共有化を図る、あるいは他の

分野の方とも情報の共有を図ることもこれからの人口減少時代には大事なことだと考えています。

簡単ですが、これで祝辞とさせていただきます。

祝 辞

日本気象学会北海道支部創立60周年記念にあたり

一般財団法人 日本気象協会
北海道支社長 守屋 岳

北海道支部創立 60 周年を迎えらましておめでとうございます。

学会運営と多くの方々の協力により、北海道内外における気象学の研究ならびに国内外の関係学会と協力して、学術文化の発達へ貢献されてきたことを気象事業者の立場よりお礼申し上げます。

歴代の支部長の方々の顔ぶれをみても、中谷先生をはじめ草々たる方々が名を連ねられ、これまでの支部の活動ならびにその影響力は大きかったことを想像します。

今から 60 年前といえますと、気象予報の現場にはまだ数値予報が無い時代であり、漸く数値予報のさきがけが始まったのが 1960 年ごろとお聞きします。私が気象の仕事についてのが 30 年前ですが、その当時先輩方々から「最近ようやく数値予報をベースに予報が組み立てるようになった」と言われた覚えがあります。それからさらに 30 年が経過し、いまや今世紀末の気候を予測し、竜巻自体の予測を目指すような時代となりました。一方、この 60 年間で札幌の平均気温は 2℃近く上昇し、道内各地で局所的豪雨が発生するなど本州と同様に短時間に強い雨が降ることによる被害や今年の夏に見舞われた台風被害等深刻な事態が発生しています。また、冬季には降雪、吹雪、雪崩といった寒冷地特有の気象現象が私たちの生活に影響を与えています。

新たな知見や技術が今日の天気予報に活かされている一方で、気候変動やその影響や局地現象など未解明な分野での知見や解析・予測技術等のさらなる向上が期待されています。気象の世界においても特に基礎的な研究を積み上げていくことが大切と感じており、北海道支部の貢献を引き続き期待するところです。

北海道においては豊かな自然との共存とともに厳しい気象環境と向き合うことも大切です。技術的な発展を期待するとともに、正しい知識等の普及にむけた活動もご期待いたします。

北海道支部のさらなるご発展・ご活躍を期待いたします。



還暦を迎えた日本気象学会北海道支部

日本気象学会名誉教授

北海道大学名誉教授

菊地 勝弘

1 はじめに

日本気象学会北海道支部が設立 60 周年を迎えた。本来は還暦と言わないと思うのだが、しかしおめでたいことには変わりはないのでこのようにしておく。支部設立は 1953 年(昭和 28 年) 4 月に北大理学部にて地球物理学科が新設され、学年進行に伴って 1957 年 4 月大学院理学研究科にて地球物理学専攻課程が増設されたことが、大きな要因になっていることには間違いない。これを見越して学会員の在札有志、特に管区气象台、北大理学部、北大低温研に所属する有志の代表として山岡保(管区台長)から、学会畠山久尚理事長宛支部設立についての申請書が提出された。当時の趣意書には北海道支部会員は約 120 名と記されている。地球物理学専攻気象学研究室に所属する 1 期生は、高橋劭、菊地勝弘は入学早々、孫野長治教授室に呼ばれ、入会手続きを取ったことは今でも鮮明に覚えている。

1957 年 6 月 1 日支部発足が認められ、本部からの交付金 10,000 円の入金。同年支部理事会開催第 1 期支部長中谷宇吉郎(北大理物理)、常任理事山岡保(札管)、八鍬利助(北大農)、孫野長治(北大理地球物理)、理事吉田順五(北大低温)、山田国親(札管)、安井豊一(函館海洋)、幹事長小林禎作(北大低温)、幹事清水良作(札管)のメンバーであった。

2. 北海道支部のスタート

第 1 期スタート時の支部長中谷宇吉郎は 2 期途中で亡くなられたため、吉田順五が 3 期をつとめ、4 期からは札管台長神原健から札管台長須田健がつとめた。9、10、11 期(1974~79 年)は北大孫野長治が、12 期からは矢崎敬三から 18 期久保田効まで札管台長が、19、20 期(1994~97)は菊地勝弘(北大理)が支部長だった。21 期の古川武彦台長から 29 期の佐々木喜一までは台長で、節目の第 30 期(2016)からは北大地球環境の長谷部文雄となぜか節目の 10、20、30 期と北大関係者が支部長をつとめている。この間、1987 年に支部創立 30 周年記念行事が行われ、それまでの支部機関誌「支部だより」が「細氷」と名称変更され、秋山勉台長のもと、盛大に式典および記念講演が行われた。また、支部機関誌「細氷」50 号記念号は 24 期(2004 年)松尾敬世台長の時には、特集記事が組まれた。

顧みて、創立 30 周年の時に私は記念講演として、所属した北大理学部気象学研究室の 30 年と題した講演を行った。これは正しく 1957 年(昭和 32 年)に発足し、その 1 期生として研究室の歴史を歩んできたからに他ならない。

3. 北大理学部気象学研究室の 30 年

支部創立 30 年記念講演では支部役員の常任理事、支部長を長くつとめられた孫野長治は 1980 年に退官され、また理事、幹事長をつとめられた小林禎作も 1987 年に亡くなられていたため、大学関係者として私が講演を行った。この講演では孫野長治が教授をつとめた 1957~80 年までの 23 年間と、その後を継いだ私の 7 年間の主たるプロジェクトの変遷を時系列で紹介した。この間の研究室の主たるテーマは雲、霧、雪、雨、雷などに関するいわゆる「雲物理学」、「大気電気学」であった。概略すれば、1957 年札幌郊外手稲山 (1,024m) 山頂に北大雲物理観測所を建設し、また道外、国外にも積極的に出かけた。1960 年代には研究環境も不十分な時に日米科学共同研究の一環として太平洋上の雲の航空機観測、アメリカ五大湖降雪共同研究を遂行した。私個人としては、1967~69 年第 9 次日本南極地域観測隊として昭和基地での越冬観測に従事した。さらに、1975 年と 78 年にはアメリカ南極点基地観測隊員として、南極点基地で -40°C の条件下での晴天降雪現象や低温型雪結晶の研究に従事した。特に、研究手段の大改革が行われたのは 1979 年の POLEX-North (北極域観測計画) の実施に伴い、新たに簡易 X バンド・レーダーを開発し、カナダ寒極の厳冬期に運用したことである。1980 年 4 月孫野長治は退官し、研究室を継いだ私は雲物理、大気電気研究に、レーダー、メソスケールの視点から研究を推進した。1985 年前後に上田博、谷口恭、遊馬芳雄氏をスタッフに加えて研究体制を充実させた。道内では札幌、羽幌、積丹半島の降雪現象、オロフレ山系、羊蹄山の大雨、道外では長崎県西海町での梅雨末期集中豪雨の観測が行われた。これらの学会発表についてのテーマの詳細については「細氷」33 号に書かれている。

4. 1987 年以降の北大理学部気象学研究室

その後、札幌市青少年科学館での設備更新で処分された X バンド・レーダーをドップラー化し、鉛直ドップラーレーダーとしても研究に使用された。北大を定年退官した 1998 年までには、上田、遊馬両氏によって北陸の冬季雷や赤道域、厳冬期のスウェーデン北極域など、国内外の研究に当たり 1998 年退官した。気象学研究室は上田助教授、遊馬講師に引き継がれたが、その後上田氏は名古屋大学教授、遊馬氏は琉球大学教授とそれぞれの研究環境を求めて移動した。

1999 年私は新設された秋田県立大学生物資源科学部生物環境科学科大気水圏環境学研究室の教授として赴任し、北海道支部会員を離れた。しかし、遊馬教授は分担研究者として、北極海ノルウェー領ベアー島に先の鉛直ドップラーレーダーを移設して 3 年半にわたって北極海の降水環境を観測した。私は秋田・青森両県にまたがる世界自然遺産に登録された白神山地の酸性雨の研究を遂行した。2007 年 3 月秋田県立大学を定年退職し札幌の自宅に戻った。この間、2004 年「細氷」50 年記念特集記事には 19、20 期の支部長としての思い出を寄稿した。

5. 札幌支部役員時代の思い出

1957 年北海道支部発足と同時に支部会員となり、1966 年幹事、1970 年幹事長、1980 年理事、1994~1998 年の 19、20 期の支部長として関係したことから、30 周年に紹介した北大気象学研究室の研究項目の概要、その後の 1998 年の北大定年退官までの研究項目の概要などの紹介ならと承諾した。

その後、私が先鞭をつけた思い出に残ることがいくつかある。先ず一つ目が、1967 年秋季大会が札幌で行われた 2 回目の秋季大会の時は、札幌でも老舗のコーヒー店「石田屋」による研究発表休憩時の本格コーヒーの提供である。店員 2 名が会場廊下でサービスし、大好評を得た。また、今では札幌大会では馴染みの懇親会場をサッポロビール園で行ったことである。今日でも支部での大会開催時の最大の問題は懇親会の地元企業からの寄付金集めである。その一つとして、サッポロビール園をその対象としてお願いしたところ、今日までそのような例がないということであった。しかし、現物支給ならなにがしかできるかもしれないということであった。当時のサッポロビール園それ程利用者は多くなかった。そこに注目して、今後各種の全国規模の学会が北大で多くなるから、懇親会場として積極的に誘致することを吹き込んだのである。その御礼として参加者全員に大きな「栓抜き」をプレゼントすることができた。ビール園が今日学会に限らず大きな会合に利用されることになったのが初めてである。また、支部活動として「夏期大学」で時々話題になっている地震や天文分野の話題、文部省科学研究費「研究成果公開発表 (B)」に申請し、採択されたこと。北大に来訪された外国人気象学者による特別講演会の開催。1987 年支部創立 30 周年を記念して、当初の支部発行機関誌の「会報」を「支部だより」としていたのを「細氷」にし、表紙を一新したこと。これは当時私のところの谷口恭助手（後に気象協会）のアイデアが採用され、表紙も彼によるものなのである。

6. おわりに

2017 年 1 月初旬、支部幹事長の稲津将氏の訪問を受けた。支部創立 60 周年記念行事の一環として、記念講演会の講師を依頼された。この機会に少しでも北海道支部の参考になればと思い受け入れることにした。北海道支部のますますの発展を祈念しております。

北海道西海岸地方の大雪に関する観測・調査研究・予測の変遷

村松 照男

1. はじめに

2010年1月17日、石狩平野中部を中心に未明から降り出した激しい降雪で石狩平野、札幌市の北西部から石狩市にかけて12時間で最大60cmを超す集中豪雪が狭い帯状の範囲に降り鉄道交通網をはじめ生活に大きな混乱が生じた。

このように北海道西岸地方の平野部においてしばしば局地的な大雪が降ると人口の集中、高速交通網の集まる都市部やその周辺地域においてJR、地下鉄、空港、路線バス、幹線道路、高速道路網など都市機能や生活道路などに深刻な影響が引き起こされる。特に濃密な都市交通網、都市機能が集中する石狩平野の札幌から岩見沢、千歳などにかけてはより深刻な影響となる。この局地的な大雪が数時間から半日くらいの中に集中に降るとき、地上天気図上1または2hPaごとの等圧線を描くと石狩湾付近に小低気圧もしくは袋状の低圧部が現れる。この局地的な大雪と結び付けて『石狩湾小低気圧』による大雪と呼ばれ始めた。図1(a)は小低気圧と局地的大雪との関連についての最も古い論文の一つであり、地上気象観測のみをもとにしたものである(長谷川;1949)。図1(b)は札幌気象レーダー観測が開始されたことにより組織化された降水(降水)、弧状エコーとして実態的に捕らえられた報告である(齋藤他;1968)。図1(c)が極軌道衛星で捕らえた雲画像をもとにモデル化したものである(岡林;1972)。図2が長谷川(1949)から66年後の『冬季の北海道西岸に生じる収束線とその成因の再整理』の発表資料である。西岸小低気圧型の典型的な大雪に係る南北帯状雲、降水粒子で見ると帯状(弧状)エコーとなる。その組織的な擾乱を予測したNHM(非静力学モデル、格子間隔5km)による同じ観測時刻の975hPa面での風と降水域の予想結果である(小谷野、2015)。帯状雲および沿海州から伸びる太い筋状雲を数値予報モデルでほぼ予想しており予測可能のレベルまで進化してきている。

この西海岸地方における大雪に関しての60数年間にわたる観測の充実・進化の変遷、現象の把握、発生発達メカニズムの解明、概念モデル化による構造の理解を図りさらに数値予報モデルの進化により詳細な降雪量の量的予測が図られつつある。現在まで変遷を以下のテーマで整理を行った。

- 1) 1957年から現在までの大雪に関する観測システムの変遷
- 2) 1950年代の黎明期から60年代の観測・解析の草分け期をへて70年代の調査研究の本格的な取り組み、そして80年末の帯状雲の理解の深化
- 3) 『都市豪雪』の取り組み(1991年～)から『降雪の量的予測(～2000年)』へ一步
- 4) 局地的大雪の降雪量の量的予測の進展(2000年～)

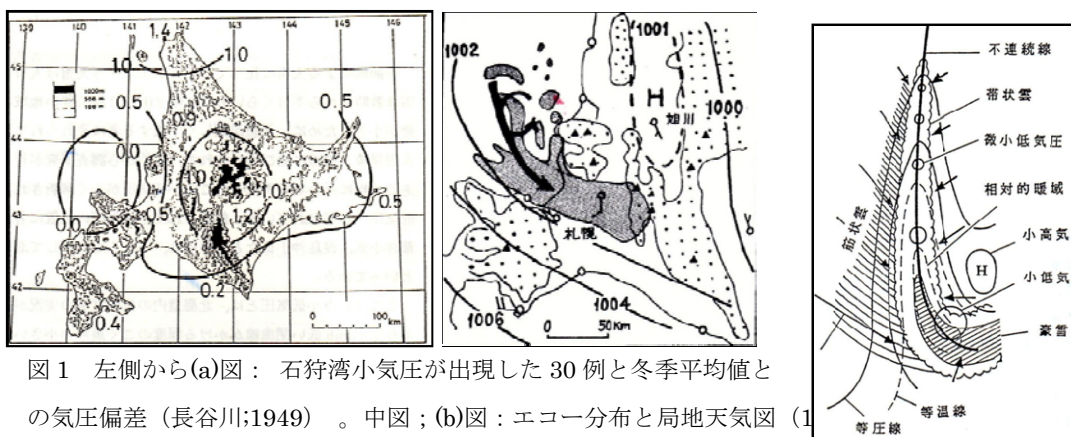


図1 左側から(a)図：石狩湾小気圧が出現した30例と冬季平均値との気圧偏差(長谷川;1949)。中図；(b)図：エコー分布と局地天気図(1月2月23日3時)：齋藤他;1968)、右図(c)図：収束雲生成と降雪モデル(岡林;1972年)

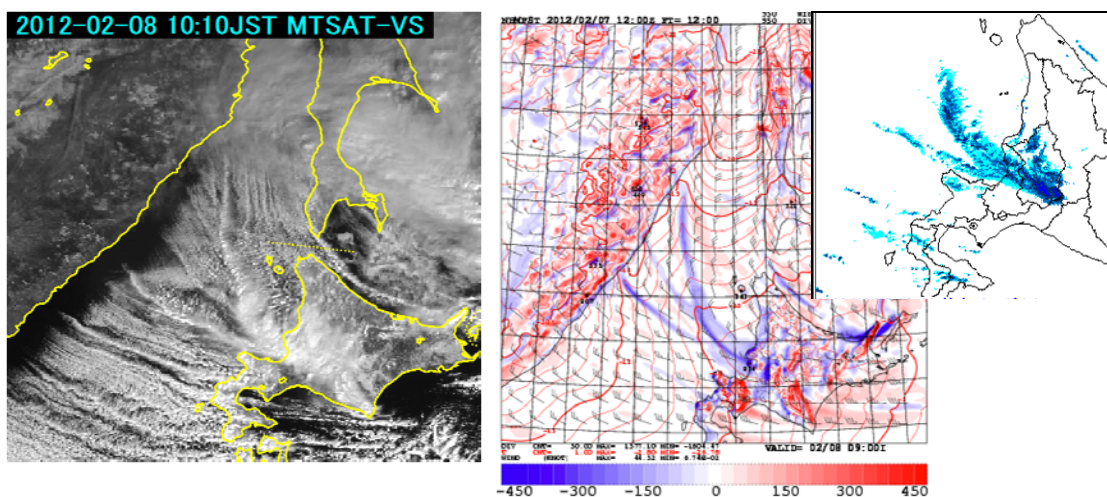


図2：ひまわり可視画像(左図(a))：とレーダー画像(2012年2月8日10時JST：右図(c))；中図(b)：非静力学モデル(NHM)で計算された冬季の北海道西岸に生ずる収束帯状雲・帯状エコーと太い筋状雲

2. 北海道西岸地方の大雪と西海岸小低気圧型大雪

この大雪をもたらす基本的な構造には、冬季、ユーラシア大陸上に滞留した厚さ3kmにも及ぶシベリア寒気が偏西風の蛇行とともに北西流となって北部日本海上に氾濫し、気団変質・湿潤化し積雲対流に組織化されて収束停滞して北海道西海岸地方に集中的な大雪をもたらす。この対流雲の収束帯(気流系の収束線に伴う)を形成、維持するために日本海北部を取り巻く周辺の地理的な特別な条件が存在する。すなわち主役はシベリア寒気団を滞留させるにアムール川流域の広大な平原があり、北西流に直行する走行を持つ幅およそ200km、標高2000m級の山を含むシホテアリン山脈が日本海と平原を隔ており、さらに北海道の北にはオホーツク海があり季節の進みとともに海氷(流氷)域を拡大、大陸の東岸には間宮海峡を挟んでサハリンの陸地があり、それらが密接に関係して湿潤化した気流の収束を生じさせ北海道西海上に帯状雲を発生させる。この構造は本州の日本海側の地方に

大雪をもたらす『日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) と類似性が強い。シベリア大陸の下層寒気の氾濫、その付け根の長白山脈の影響が風下側に伸び、朝鮮半島の陸地と日本海西部の海域とのコントラストで日本海西部での収束帯を形成し帯状雲の発生、その風下側で大雪となる。JPCZ との対比として『日本海北部寒帯気団収束帯 (NJPCZ)』と呼べよう。また北海道西海上ではシホテアリン山脈を越流した寒気氾濫による発生した流れに沿うロングチュードモード (Tモード) の筋状雲の中で風上地形による強化されたより一段と太い筋状雲 (いわゆる「村松バンド」と呼ばれる、線状降水雲) の停滞による大雪も存在する。(村松,1979)。

石狩湾小低気圧型の大雪は発生の位置から北から羽幌沖小低気圧から南は渡島沖小低気圧などと呼ばれこれら総称して北海道西岸小低気圧型大雪 (西岸小低型大雪) と呼ばれている。この大雪現象が起こっている全ての事例を 10 年間の気象衛星画像での事例調査をもとに分類された。その大項目とその発現割合は、南北帯状雲型 (発生率 42%)、曲折帯状雲型 (7%)、状雲型 (51%) である。最終的にはこの風下側の北海道の収束した雲域が流れ込む地形分布で迂回、せき止め効果の脊梁山脈と広義の石狩平野、太平洋に抜ける石狩地溝帯の存在が降雪の集中をもたらしている。

3. 1957 年から現在までの大雪に関する観測システムの変遷

北海道西岸地方における大雪をももたらす帯状雲、長大な筋状雲を捕らえる観測システムの進化の変遷は、以下のように整理される。

ー1950 年ー

(1)1950 年代：地上気象観測のみの時代・・・大雪時、石狩湾、北海道西海上に低圧部もしくは弱い低気圧循環が捕らえられていた (長谷川 1949)。

(2) 1957 年：稚内、札幌、根室の高層観測 (自動追跡システム) 開始により気温、湿度、風の鉛直方向の資料が詳しく入手でき総観スケール、中規模スケールにおける立体構造の把握が可能となり、大雪時の観測手段の高度化がスタートした。

(3) 1963 年：札幌レーダー観測開始・・・冬季の気団変質による北海道西海上、西海岸地方におけるおよそ 300km の範囲の降水 (降雪) エコーとして観測され、降雪エコーセルの動きとともに帯状エコー、筋状エコーとして大雪現象をとらえ、時間分解能、空間分解能のより詳細な構造を捉え始めた。

ー1960 年ー

(4) 1960 年以降：水利水害対策、農業気象観測による降水量、降雪量等の観測網の充実が図られ日降雪量、日降水量の把握が従来の气象台、測候所の観測網よりより細かな情報が得られた (1974 年のアメダスの先駆的な観測網)。

(5) 1968 年以降：極軌道衛星 ESSA,NOAA による観測データの受信が開始され、衛星画像でシベリア大陸から日本海北部、北海道、オホーツク海の雲分布を広域に把握可能となり、西岸小低型の大雪の雲画像として全画像を捕らえた。時間分解能は NOAA で約

6 時間間隔であった。

－1970 年－

(6) 1971 年～73 年： 観測船啓風丸による、北海道西海上における『石狩湾小低気圧に関する大雪の特別観測』を実施し、札幌レーダーの探知範囲を越えた西海上域における降雪エコーの動的構造の把的がより詳しく観測された。図 3 は最も典型的な帯状（弧状）エコーが観測されたもので、帯状エコーを境に西側は季節タイプの北西流に沿った筋状雲、東側は東よりの陸風の晴天域となっていた。

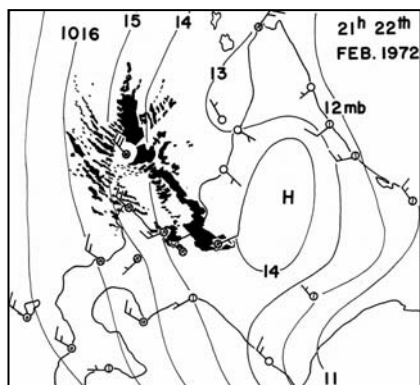


図 3 石狩湾低気圧にかかる典型的な帯状(弧状)エコー1972年2月22日

(7) 1974 年以降： アメダス運用開始(積雪深計観測開始は 1979 年)。地上観測における時間分解能(1 時間)、地上観測分布の分解能 (20km) をリアルタイムで観測通報されレーダー観測と合わせて現象の推移の実況把握に大きく進展した。

帯状(弧状)エコー1972年2月22日

(8) 1977 年： 静止気象ひまわり(1号) 打ち上げ・・・連続観測による常時観測の定常化(時間分解能の最小 30 分、分解能は赤道直下で 1.25km (可視画像) 5km (赤外画像)、動が画可能となり現象の動的変化をより広域的の捉えることが可能となった。

－1980 年－

(9) 1984 年： SDAS (ひまわり受信システム) 開始、地方官署及び民間気象情報会社などでもリアルタイムで衛星資料が見ることが可能となった。これと札幌市少年科学館の気象レーダーの 15 分間隔を用いた降雪の短時間予測実験が試みられた。

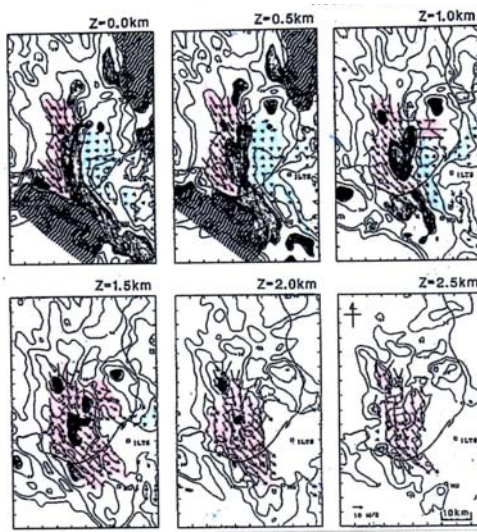


図 4 2 台のドップラーによる帯状収束雲の観測、各高度の気流系 (佐藤他、1991)。

(10) 1985 年： 北海道大学 (以下北大と略す) X バンド 3 次元ドップラーレーダー観測開始。帯状エコーの構造断面を気流の流れとして捕らえた。

(11) 1988 年： 北大 X バンドドップラーレーダーの複数観測により降雪雲の 3 次元気流構造、動的な構造が把握された (図 4)。図 4 の上段右から地上、下段左高度 1.5km で青の部分が下層の東よりの

陸風、赤い部分が主要な北西流場の気流を表す。下層は東よりが卓越しているが、高度を増すほど北西風系が拡大する構造となっていた。

－1990 年－

1991～92 年： 北大グループの複数観測点と気象庁観測船など集中観測の実施、石狩湾で発生した渦状エコー擾の 3 次元構造を解析し発生発達のメカニズムの解明を図った。

(12) 1992 年 3 月、道央自動車道でアイスバーン状態下、ホワイトアウトとなり 186 台の

自動車の多重衝突が発生した。降雪強度が短時間で変動し視程を悪化させていたとみられ、高速交通網への降雪量予測の重要性が指摘され取り組みの必要性が焦眉の急となった。

1993年：札幌総合情報センター、札幌圏を対象に『降雪予測システム』の観測・予報業務を開始。

(13) 1996年：石狩湾周辺、複数のドップラーによるレーダー集中観測が実施された。

－2000年－

(14) 2003年：北大、新観測システム、新ドップラーシステムの観測開始。大雪時の擾乱の3次元構造の観測・研究が進捗した。

(15) 2005年：ひまわり6号（3軸衛星の運輸多目的衛星）、赤外4チャンネルが加わり多チャンネル化時間分解能の向上が図られた。

(16) 2015年：ひまわり8号打ち上運用開始。高解像度、多チャンネル化：観測頻度や水平分解能を向上させ台風や集中豪雨等の監視機能を強化（全球の観測が10分間隔となり、水平分解能が半分に、観測種別が5バンドから16バンドに増加）降雪雲の詳細な動きを常時監視機能で捕らえることが可能となった。

4. 1950年代の黎明期から60年代の観測・解析の草分け期をへて70年代の調査研究の本格的な取り組み、そして80年末の帯状雲都の理解の深化

(1) 1961年～62年札幌管区气象台による『石狩平野の局地的大雪調査(特別観測)』は大雪と石狩不連続線（北陸豪雪と北陸不連続線との関係の類似性）を調査し、1965年には北海道地方予報技術検討会のテーマとして西岸小低気圧による大雪が取り上げられた。1963年～66年、北大では石狩平野積雪観測を計画し40km四方の中の100本の電柱を雪尺替わりにして積雪深観測を行い、1972年からは小中学校に依頼して毎日、雪尺の観測を行い帯状に集中した降積雪域を解析するなど、ユニークな観測が実施された。

(2) 大雪の予測のためメカニズムの調査が一段と進捗（1970～75年）

気象レーダーに気象衛星写真を加えて、帯状収束雲（岡林1972）のと降雪機構モデルが提案され、71年～73年の間、『石狩湾小低気圧による大雪に関する研究』をテーマ気象研究所との地方共同研究が実施された。1972年～73年、啓風丸の特別観測が実施され貴重な海上レーダー観測や高層観測資料などが得られ、1973年、気象庁の全国予報技術検討会では『石狩平野における局地的大雪の構造について』、74年も同様なテーマで主要な技術的検討が行われた。1974～75年には北大と札幌管区气象台との共同研究が実施され、石狩湾小低気圧型の大雪のメカニズムを含む、この時点までの総合報告としてまとめられた（村松；1975,1976）。1975年の日本気象学会札幌大会のシンポジウムテーマとして『冬の低気圧に関するシンポジウム』で取り上げられ、低気圧の後面の流れのなかでの西岸地方の大雪が報告された。

(3) 北大において『都市の豪雪災害』の研究（1979年～81年）が始め、「降雪短時間予測実験」（81年～）、『西岸帯状収束帯』（84年～）、『集中豪雪の動的構造』198年7～など研

究の取り組みが進んだ。

(4) 1987年：日本気象学会札幌大会のシンポジウムテーマで『“どか雪”－日本海における中小規模擾乱』が取り上げられ発表と討議がされた。その中で北海道西岸の“どか雪”のテーマとして；i)石狩平野の降雪の特徴(菊地 1988)、ii)降雪雲の動的構造(若濱,1988)、iii)北海道西岸における小低気圧(木部,1988)が報告された。3次元ドップラーレーダーによって降雪雲を観測し温暖前線型構造の不連続線の動的構造が報告された。

(5)『北海道西岸に発生する小低気圧による大雪に関する地方共同研究』(1986～89年)が実施され、『北海道西岸に発生する小低気圧の研究(札幌管区気象台、1989)を含め、1980年代の西岸小低による大雪に関しての総合報告としてまとめられた。この大雪をもたらす雪雲の今後の動向を予測し発生発達消滅過程の把握を予報担当者の概念の共有化するための分類を行った。過去10年間の衛星画像からの全てのケース276例を抽出、雲型から見た西岸小低気圧の分類－大雪をもたらす雲の形態別分類と総観場の特徴－で分類した。実例を例示し131ページにわたり詳細に分析し、それぞれ具体事例が上げられた。主な分類としては、南北帯状雲型、曲折帯状雲型、うず状雲；の3種である。それぞれぞれの出現率は以下のとおりである。

大分類	小分類	500 mbの特徴	850 mbの特徴	地上気圧配置等の特徴	雲型の特徴・その他の特徴	備考
南 北 帯 状 雲 型	(A型) (一過性) (停滞型)	・東谷か谷場 ・寒冷低はオホーツク海からカムチャッカ付近で停滞 ・強風帯は本州	・西海上相対的に暖域となる ・二寒気軸 ・弱風域内 (20 kt 以下)	・季節月末期・袋状低気圧部 ・主低気圧はカムチャッカ周辺(停滞性強い) ・北海道は明方内陸高気圧が顕在化することが多い ・気圧傾度は緩い	・帯状雲は南北に立ち西側に弧状にふくらんでいる ・西側は筋状雲、東側は晴天 ・下層の収束域が雲域に対応 ・帯状雲は等圧線に沿う形 ・寿命はさまざま(～2日)	向林モデル(1967) 村松・他(1975) 若原(1987)
	(B型) (一過性)	・東谷か谷場 ・西日本東西流か西谷 ・寒冷低は北方で不定 ・強風帯は本州	同上 (500 mbの強風帯とは50kt以上)	・発達した低気圧の後面 ・発達中の低気圧は本州南岸沿いに北東から東北東進 ・主低気圧の強い循環がねけた袋状の低気圧が発生 ・主低気圧の後面800～1,500 kmの所で大雪発生	・主低気圧が本州南岸にある時北～北北東走向の帯状雲が1～3本できる。 ・主低気圧が東海上に去ってから帯状雲は1本にまとまって陸上部に流入する ・寿命は短い(～6h)	・含村松エトロフ型 ・斎藤・他(1968)
	(C型) (一過性)	・谷場又は東西流の中をトラフが東進 ・寒冷低は北方で不定 ・強風帯がやや北上する	・寒気軸は1つで、日本海中部からやや北部 ・弱風域内	・発達中の低気圧は北海道の南岸近くを東～東北東進 ・以下前項(南北・B型)に同じ	・主低気圧の前側では西海上の雲雲は消散(対流雲) ・主低気圧が東海上に去ってから帯状雲が陸上に流入する ・寿命は短い(～6h)	含村松エトロフ型

図5 雲型から見た西岸小低気圧の分類 - 大雪をもたらす雲の形態別分類と総観場の特徴－北海道西岸沖に発生する小気圧に関する総合報告－南北帯状雲の部分の抜粋(札幌管区気象台、1989)

I. 南北帯状雲型(全体に対して発生率 35%)

- ① A型(21%)・最も一般的な型で、季節風吹きだし末期の弱風領域。西寄り季節風域が筋状雲、西岸からの東風の晴天域の境界に収束域で発生、袋状低気圧部、2寒気軸、寿命は様々で～2日で一番長く持続する。
- ② B型(7%)・南北のスケールが最も長い、低気圧の強い循環内の流れの場。寿命は6時間程度と短い。

③ C 型 (7%) ・ ・ B 型と同種だが、西側には筋状雲が明瞭。

II. 曲折带状雲型 (発生率 6%) ・ ・ 南北带状雲 A 型が変形し折れ曲がった形状。

III うず状雲型 (発生率 28%)

① A 型 (8%) ・ ・ 暴風雪型。パイラル状の対流雲列と暴風雪域の明瞭な循環で。小さな目がある。上空の深まりつつあるトラフか寒冷渦に関連、メソサイクロン型。

② B 型 (3%) ・ ・ 気圧傾度が弱い。循環場の強さが弱い。日本海北部の中央部に発生。

③ C 型 (17%) ・ ・ 明瞭な小低気圧、うず渦の中で最大の規模スケールの雲の渦巻、曲折带状雲から移行。

5. 『都市豪雪』の取り組み (1991 年～) から『降雪の量的予測』へ一歩進捗 (～2000 年)

(1) 1991～92 年：(北大グループ中心)。『都市の豪雪災害の予測と軽減化・防除に関する研究』(北大を中心とした石狩周辺、都市豪雪の集中観測・特別観測の実施；1993 年：『都市の豪雪災害の予測と軽減化・防除に関する研究』の約 600 ページの総合報告にまとめられた。札幌管区气象台も共同研究『豪雪の実態(1992 年 1 月 22～24 日と予報)』で分担。

(2) 1992 年：日本気象学会秋季大会 (札幌) シンポジウムテーマ『”都市豪雪” - ここまできた降雪の観測と予測 - 』の中で；i).豪雪の実態の予報の現状， ii) 石狩湾周辺で発生する渦状擾乱の内部構造， iii) 下層雲から見た石狩湾上の降雪雲の形成過程；等のテーマで発表討論が行われた。

(3) 1991 年～93 年：(札幌管区气象台地方共同研究実施)、『北海道における雨雪、気温、風の面的予報技術の開発』。その中で『北海道における降雪の面的予報技術の開発。降雪量予想の開発』(1994 年)。予報担当者のこの種の大雪の発生期、発達期、最盛期、消滅期など構造把握のため『小低気圧に伴う大雪のメソ天気系概念モデル』を作成情報の一般化共有化モデルを作成した。また天気予報の二次細分区 (石狩地方なら南部、中部、北部に分轄) を対象に MOS (統計的) 手法による降水量予報をもとに雪水比 (降雪量と降水量の比) で換算し 10cm 単位程度の予測を行ったが、大雪の集中性の表現は難しい段階であった。従って小低型の収束带状雲のパターンを予測し収束雲の流入予測を行い統計的手法で量的予測を行った。

(4) 1993 年：(札幌総合情報センター)、 『降雪予測観測システム』冬期間継続的に除排雪、都市交通網の雪害対応のために札幌市とその周辺を細かな地域に分轄し降雪量、気温、などの実況・予測の情報提供が開始された。

(5) 1997～99 年：(札幌管区气象台地方共同研究実施)：『降水の集中・強化をもたらすメソスケール場の解析と予測に関する研究』のなかで冬型の気圧配置時の降水予測、収束線の構造と降雪構造、収束線の分類と特徴；などの研究で大雪の集中性、位置、持続性に関して収束域、収束線の重要性が調査された。このことは数値予報モデルによる降雪量の量的予測の精度向上に必須となるからである。まとめは札幌管区气象台(2000)で報告された。

(6) 1998年：『降雪量の量的予測』として、天気分布予報(格子間隔 20km)、時系列予報(3、時間ごと)の向こう 24 時間予報先までの予報業務が開始された。積雪深計の観測があるアメダス観測点では雪水比で換算して降雪量の予測をおこなった。

(7) 2000年以降：(北大他、ドップラーレーダーを使っての降雪雲、帯状エコーの3次元構造の観測、解析について多く報告された。

6. 局地的大雪の降雪量の量的予測の進展 (2000年～)

数値予報モデルの改良、細密化とともに客観的な降雪量予測が改善されてきた。

(1) 2001年：(気象庁)；『静力学メソスケールモデル(格子間隔 10km: MSM)

(2) 2003年(北大)、新観測システム：3次元ドップラーライダーシステム、複数のドップラーレーダーで降雪雲の立体構造観測の充実。(藤吉、2003)

(3) 2004年：(気象庁)；『非静力学数値予報メソモデル』の現業化が図られ、

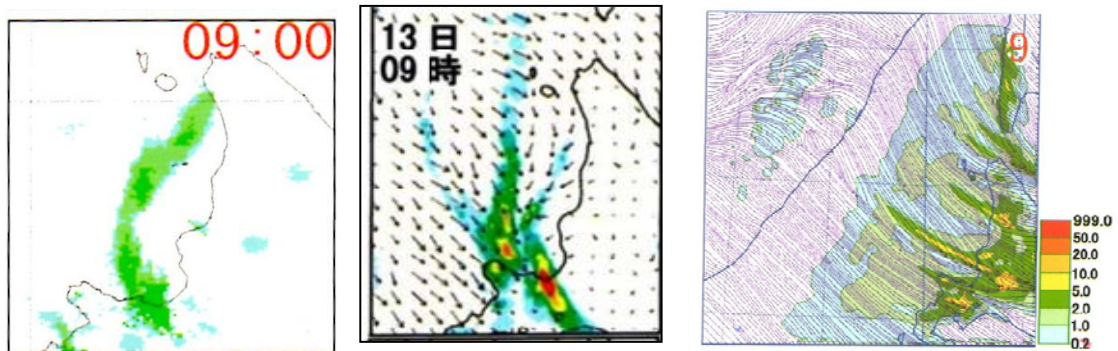


図6 左図：北海道西海岸の帯状雲(降雪エコー) 中図：同時刻を予想したNHMの1時間降水量と地上風ベクトル 右図：防災情報モデルの12時間先の予想1時間降水量と風の流線。特定地点から伸びる太い筋状雲と地形を迂回して合流し収束が明瞭；札幌管区气象台(2006)

2003年～2005年；札幌管区气象台において、『非静力学数値予報モデルによる大雪に関する地方共同研究』が実施され、この数値予報モデルを用いて、『冬型降雪に関する地域特性』をこのモデルで再現実験が行われた。第5図は帯状雲の予想(中図)とその時の1時間積算雨量の実況値(エコーの累積)の対応がよい。沿海州の特定地点から伸びる太い筋状雲(村松バンド)に対応した1時間積算降水量の予想(右図)。筋状バンドと流線がほぼ対応していた。

(4) 2007年： 気象庁非静力学モデル(JMANHM)、格子間隔 5km で改良された数値予報モデルが実用化された。さらに初期場の改良が進んだ。

(5) 2009年： 『寒気吹きだし時に日本海北部に発生する太い筋雲の形成メカニズム』報告(Ohtake, H., et al, 2009)。沿海州シホテアリニ山脈中央部のある特定の場所付近から風下側に周辺の筋雲寄りも幅の広降雪バンド(太い筋雲)が発生し(“村松バンド”、村松:1979)、北海道西海岸地方に局地的な大雪をもたらす。このバンドの形成メカニズムを数

値モデル

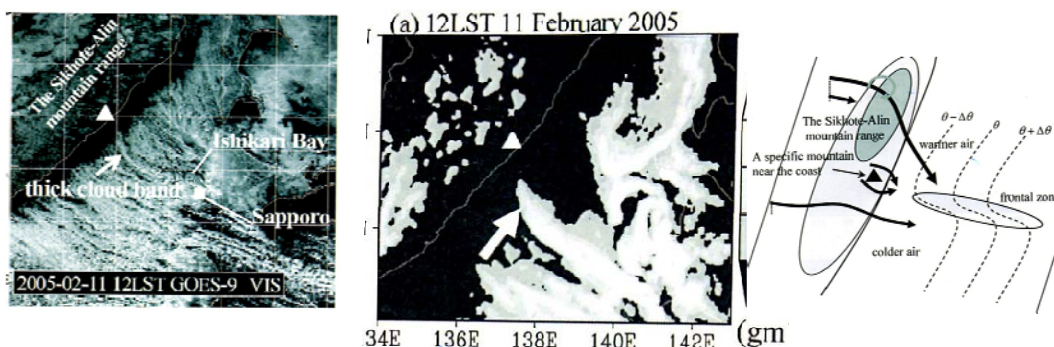


図7『寒気吹きだし時に日本海北部に発生する太い筋雲の形成メカニズム』の数値実験（大竹他、2009）：左図、衛星可視画像と太い筋雲の発生、 中図：数値計算で計算された対応する太い降雪バンド雲；右図：太い筋雲の形成メカニズムの模式図；点線は海上で下層の温位の等値線。（Ohtake, H., et al, 2009）。

で計算し、山岳の南北の高低差により流出した寒気の温位差を生じ前線が形成されると明らかにした。ほぼ同じ位置に停滞しやすく局地的な大雪をもたらす、一方で収束帯状雲の側面から合流収束し風下側より強い降雪なる(図2参照)。

(6) 2009年：『北海道の降雪雲』報告（藤吉,2009）の中で、北海道に豪雪をもたらす雪雲として以下の整理を行っている。i) 北海道西岸帯状雲、ii) 渦状擾乱、iii) 村松バンドと地形効果、iv) 筋状雲内の気流構造、⑤雪雲と地形効果などのテーマで、Xバンド3次元ドップラーの観測をもとに北大低温研究所における降雪科学部門の新設（1981年）以降の取り組みがまとめている。

(7) 2012年： 西海岸低気圧に伴う収束帯状雲と沿海州の山岳の特定地点から伸びる太い筋状雲（村松バンド）が交互に現れ岩見沢地方を中心に記録的な豪雪に見舞われた（金田,他,2012）。

(8) 2015年： ひまわり8号運用開始。高解像度、画像取得間隔が短くなりセルなどの動きを詳細に見ることができるようになった。多チャンネル観測が可能となった。

(9) 2015年： NHM を使った『冬季の北海道西岸に生じ収束線とその成因の再整理（その2）』（小谷野,2015）は、図2の中図 JMANHM-5km 格子の 975hPa 面予想図(2月8日10時)。 図8は収束線の要因となる下層風系について北海道西岸に生じる収束雲の要因となる下層風としては、①大陸から吹きだす北西風、②大陸の地形によって変形された北西風、③間宮海峡を吹き抜ける北風、④オホーツク海からの

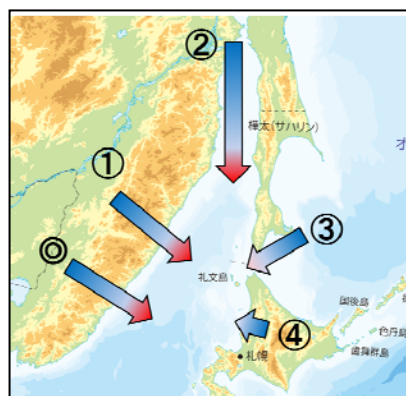


図8 冬季、北海道西岸沖に発生する主要な4本の収束線の要因となる下層風系(i1)。(小谷野、2015)。

北東風、④北海道内陸部から吹きだす陸風；の合計4本が主要なものとなる。

(10) 2016年:1月29日大雪事例から探る石狩湾周辺の降雪強化メカニズム』(小谷野、2016)は石狩平野に局地的な大雪をもたらす沿海州の山岳影響によってもたらされる太い筋状の収束状雲、降雪バンドが積丹半島付近通り石狩平野に侵入する時に降雪が強化される効果が指摘されていることを、気象庁非静力学モデルによって数値予報の再現実験を行った報告である。これによると内陸に形成された降水蒸発による冷気層の影響(乗り上げる)が重要で積丹半島の地形効果がなく手稲山系の迂回流の効果が大きく降水強化に寄与していることが示めされている。今後さらなる事例解析が必要であるが、大雪の量的予想が帯状雲そのものの発達、停滞、維持、そしてその先端である降雪が集中する平野の周辺地形による降水強化が最終的に大きく寄与するだろう。

7. 北海道西海岸地方の大雪まとめ

シベリア大陸のアムール川流域に滞留する寒気が日本海北部で気団変質し不安定化し雲列を発生する。4方向からの気流系の組み合わせで収束線、収束帯にでき集中し南北帯状雲、曲折帯状雲を形成し循環が強化されて渦状雲となる。それらの風下側では北海道の地形の影響による降雪の集中やその位置、期間の予想、降水による冷気塊の強化などで帯状の集中豪雪となる。また西北西流に沿って発生する筋状雲が沿海州の山岳で強化されたものが停滞、集中化で雪雲が停滞もしくは上陸・陸地へ侵入し、西海岸地方に降雪が集中する。大雪とメカニズムの解明に理解が進み、次のステップとして、気象庁非静力学モデルや(格子間隔5km)、局地モデル(2km)を用いてno量的予報が期待される。モデルの精緻化で最終的に陸上でいかに集中的な降雪域が予想されるかが目標・課題となる。初期場の改善するか、非静力学数値予報モデル(NHM)の改良進化の両輪で北海道西海岸地方における降雪量の予想の詳細化を期待したい。基本的には大雪現象を素早く理解しどの段階であるかどうか変化するかを見きわめる予報担当者の目ききの鋭さが重要さということと言うまでもない。

謝辞：

本稿は日本気象学会北海道支部60周年記念講演の中で発表した『北海道西岸地方の大雪に関する観測・調査研究・予測の変遷』をまとめたものである。講演の機会を頂いた北海道支部の長谷部支部長をはじめ関係者各位にお礼を申し上げます。支部が結成された1957年は北海道における高層観測の自動化が始まった年で近代的な観測システムの草分けとなった象徴的な年であった。次いで札幌レーダー、気象衛星、ドップラーレーダーと観測手段が次々進化し北海道西岸の大雪現象のメカニズムの微細構造の解明と予測が大きく進捗した。北海道大学や各大学研究機関の研究者の各位、大雪の予測、量的予測を図り、数値予報モデルによる予測の段階までに至った气象台、業務化に努めた日本気象協会、札幌圏の都市豪雪災害防止、生活道路の除排雪を目指して業務化を図った札幌総合情報セン

ターなどなどの関係各方面による観測・調査研究・予測への歴史的な努力により今日の大
雪の量的予測が実用化に進捗した。この歴史的な変遷の一端をまとめ紹介する機会を得た
ことに感謝をいたします。

引用文献

- 岡林俊雄, 1972: 気象衛星から見た雪雲と降雪について. 気象研究ノート, 113, 74-106.
- 藤吉康志, 若濱五郎, 1987: 気象衛星”ひまわり”画像による北海道西岸帯状収束雲の発現過程の
分類. 低温科学, 46, 171-178.
- 藤吉康志, 坪木和久, 小西啓之, 若濱五郎, 1988: 北海道西岸帯状収束帯のドップラー観測 (I)
—温暖前線型—. 天気, 35, 427-439.
- 藤吉康志, 2003: 北大低温研の新気象システムの紹介. 細氷, 49, 14-15.
- 藤吉康志, 2009: 北海道の降雪雲. 日本雪氷学会北海道支部 50 周年記念誌, 1-5.
- 長谷川徳太郎, 1949: 北海道西海岸に発生する副低気圧について. 研究時報, 1, 207-212.
- 金田康弘, 他, 2012: 2011-2012 年冬期北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その
1). 北海道の雪氷, 31, 115—118.
- 木部俊一郎, 1988: 北海道西岸における小低気圧, 「どか雪」—「日本海における中小規模じょう
う」報告. 天気, 35, 146-151.
- 菊池勝弘, 1987: 北第理学部気象研究室の 30 年 (気象学会北海道支部 30 周年記念講演). 細氷,
33, 7-23.
- 菊池勝弘, 1988: 石狩平野の降雪の特徴『 “どか雪” —「日本海における中小規模じょう」報
告. 天気, 35, 137 - 140.
- 河野安威, 孫野長治, 1967: 石狩湾小低気圧の研究. 北海道大学地球物理学研究報告,
18, 71-81.
- 小谷野 陽介, 2015: 冬季北海道西岸に生じる収束線とその成因の再整理(その2): 平成 27 年度
気象学会北海道支部研究会要旨. 細氷, 7-8.
- Mgono, C., 1971: On the localization phenomena of snowfall, *J. Meteor. Soc. Japan*, 49, 824-835.
- 村松照男, 小倉士郎, 小林尚治, 1975: 北海道西海岸小低気圧の大雪. 天気, 22, 369-379.
- 村松照男, 1976: 石狩湾小低気圧による大雪. 札幌気象 100 年記念論文集, 31-49.
- Muramatsu, T. 1979: The cloud line enhanced by upwind orographic features in winter monsoon
situation. *Gophys. Mag.*, 38, 1-15.
- Ohtake, H., M. Kawasima, and Y. Fujiyosi, 2009: The formation mechanism of a thick cloud band
over the northern part of the Sea of Japan during cold air outbreaks. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 289-308.
- 斉藤 実, 陣岡富二男, 松田 一, 里見穂, 小花隆司: 北海道石狩湾付近の降雪のレーダー 解
析. 天気, 15, 42-50.
- 札幌管区気象台, 1989: 北海道西岸に発生する小低気圧の研究, 技術時報別冊 38 号, 1-137.

- 札幌管区气象台,1994: 北海道西岸における雨雪, 気温, 風の面的予報技術の開発.
技術時報別冊 45 号,1-127.
- 札幌管区气象台,2000: 降水の集中・強化をもたらすメスケール場の解析と予測に関する研究,
技術時報別冊 50 号,47-102.
- 札幌管区气象台,2006: 非静力学モデルによる地域気象特性の研究, 技術時報別冊 54 号, .
予報技術検討会資料, 1973 : 石狩平野における局地的大雪の構造について. 札幌管区气象台 ,
1-48.
- 予報技術検討会資料, 1974: 北海道西岸の小低気圧にともなう西部の大雪. 札幌管区气象台,
1-66.
- 若濱五郎,1988 : 降雪雲の動的構造, 『 “どか雪 “ — 「日本海における中小規模じょう乱—』
報告. 天気, 35,141 - 146.

支部60年と北大大学院地球環境科学研究科

北海道大学 名誉教授 山崎 孝治

1 日本気象学会北海道支部創立60年

本稿では北海道支部創設のころについて筆者が支部機関誌を基に調べたことを報告する。また、筆者が属していた北海道大学地球環境科学研究科についても述べる。

日本気象学会は1882年「東京気象学会」として創設され、2017年現在、創立135年を迎える。一方、北海道支部は1957年（昭和32年）に創設され、今年60年の還暦を迎えることになった。第1回の理事会は同年7月11日に札幌管区気象台台長室で開催され、支部長に中谷宇吉郎会員（北海道大学教授）が選出された。この記事に掲載した支部機関誌は「会報」No.1であり、原稿用紙に手書きで作成されたと思われる。会報のNo.2からはガリ版刷りとなっている。草創期の会計報告を見てみると、収入39,300円に対し、支出20,644円、残高18,636円とあり、「残高が多いのは来年度の全国大会に備えたものである」と但し書きがある。筆者が支部役員をしていたころが思い出された。5年に一度、秋の全国大会が札幌で開催されるので、それに備えて一種の積み立てが支部会計で行われていた。

支部創立初期にも研究発表会や講演会を精力的に行っていた様子が窺える。支部創立はちょうど1957～1958年にかけての国際地球観測年（International Geophysical Year: IGY）の頃である。極地の観測、豪雪、霧、雪結晶、オゾンなど北海道らしい研究テーマの他に、大気汚染など時代性が感じられるテーマも取り上げられていた。

1962年（昭和37年）から支部機関誌は「支部だより」と名称変更し、1966年（昭和41年）からは活字印刷となった。1965年（昭和40年）には国際雲物理会議札幌大会が開催された報告が掲載されている（支部だよりNo.5）。レディファーストを失念した失敗談など当時をしのばせる記事がある。

支部だよりNo.7（昭和42年）は前年秋に札幌で行われた全国大会の感想が掲載されている。その中からいくつか紹介しよう。「地元の気象官署からもっと研究発表を」という記事からは、昔も今も変わらない状況を彷彿とさせる。「コーヒブレイクは良い試みだった」という記事には「気象学会の大会では初めての試みで、実施に踏み切られた北海道支部の大英断であった。時間的には僅かの時間であるが、記憶の新しいうちに個人的に討論ができるし、...と非常に好評であった。」とあり、札幌大会で先進的な試みが行われていたことに感心する。また「スライド係のこと」という記事には、さもありません愚痴が吐露されている。今では研究発表はPCのパワーポイント等のファイルを液晶プロジェクターで投影するのが普通であるが、1970年代くらいまでは、写真のネガスライドをスラ

イドプロジェクター（映写機）で投影していた。以下に抜粋する。

『スライドをプロジェクターに入れる方向を示す矢印が間違っていたり、なかったりすると大変である。薄暗い中で、会場の目が一斉にスライド係に向けられる。....ピンボケスライドなのに「焦点を合わせて下さい」などとやられるともうお手上げである。.... また、事前に連絡もなく、「前のスライドを」とか「何枚前のを」などとやられる.... どうか今後スライド係をにらまないで.... 』

筆者も「あるある」とこの当時を思い出した。スライドは発表の数日前には制作に回さねばならないし修正もできない。スライドの時代の後、OHP（オーバーヘッドプロジェクター）の時代となり、コピー機で気軽に発表原稿が作れるようになった。OHP シートをプロジェクターの上に乗せたまま、線を入れたり書いたりすることもあった。いわば、投影する黒板としても使われた。OHP の後は PC 時代の到来で現在に至っている。

「支部だより」は 1987 年（昭和 62 年）から現在の名称の「細氷」に変更された。この年が支部創立 30 周年であり、細氷 33 号は 175 ページという大部の支部創立 30 周年記念号となっている。支部の歴史も詳しく書かれているので参考にされたい。またそこには初代から 24 期までの歴代支部長のリストが掲載されており、支部長からの原稿もある。以下に 24 期以降の支部長リストを掲載する。札幌管区気象台長が支部長を務めることが慣例であったので、1 年で交代する支部長が多かったが、第 30 期は北海道大学の長谷部教授が支部長なので長くその任に当たることになりそうである。

第 24 期（前半）	松尾 敬世	2004～
第 24 期（後半）	濱田 信生	2005～
第 25 期（前半）	濱崎 雅憲	2006～
第 25 期（後半）	岡野 誠	2007～
第 26 期（前半）	岡野 誠	2008～
第 26 期（後半）	大島 隆	2009～
第 27 期（前半）	中井 公太	2010～
第 27 期（後半）	川津 拓幸	2011～
第 28 期（前半）	牧原 康隆	2012～
第 28 期（後半）	高野 清治	2013～
第 29 期（前半）	高野 清治	2014～
第 29 期（後半）	佐々木 喜一	2015～
第 30 期	長谷部 文雄	2016～

2 地球環境科学研究科

1977年（昭和52年）4月1日に北海道大学に大学院環境科学研究科が設立された。1993年（平成5年）4月1日には発展的に解消して大学院地球環境科学研究科となった。この研究科は学部がない独立大学院である。翌年1994年にその4番目の専攻として「大気海洋圏環境科学専攻（以下、簡単のため大気海洋専攻とする）が新設された。当時の北大低温科学研究所の竹内謙介教授と若土正暁教授が専攻新設に努力されたと伺っている。この専攻は大気と海洋が一緒になった全国的に見てもユニークな専攻であった。基幹講座の教官はすべて札幌キャンパス以外から来た。特に、物理系の「大循環力学講座」と「気候モデリング講座」の教官10名は全員、北大以外からの人で構成した全く新しい講座であった。化学物質循環講座は函館の水産学部から異動した。もう一つの「極域大気海洋講座」は北大低温科学研究所の教官から成っていた協力講座である。この専攻は、大気の研究者和海洋の研究者が融合した形になっており、全国の先駆的存在であった。当専攻は大気・海洋相互作用を名実ともに、科学の上でも人的交流の上でも、実践する場である。

何と言っても大気海洋専攻物理系の目玉は東京大学から定年を1年残して赴任された松野太郎教授であると思う。松野教授は北大に在籍中に「学士院賞」を受賞され、賞金を寄贈いただき、優秀な修士論文に贈る「松野賞」が創設された。2013年に松野教授が「ブループラネット賞」を受賞された際にご寄付くださったお金を原資として2015年からは環境科学院（現在の教育組織の名称）で優れた研究を行った在学生または元在学生を顕彰する「松野環境科学賞」となっている。

大気海洋専攻の設立当初は現在の建物はなかった。そのため、基幹講座の教官・学生は取り壊される予定だった病院の病棟に住むことになった。松野教授は婦長室にオフィスを構え、筆者は看護婦控え室、学生は病室（大部屋）に住んだ。学生部屋（＝旧病室）にはまだナースコールのボタンが残されていた。ただし、電源は切られていてボタンを押してもナースステーションには伝わらないのだが。講義・セミナーはレントゲン検査室で行った。ここは雨漏りがひどかった。化学系の実験室は第Xサティアンと呼ばれていた。時代がわかろうというもの。旧病院にいと、たまに患者さんが迷ってこられることもあった。24時間暖房で良い点もあったが、低温研究所に行くときに近道をするとう霊安室の前を通らなければならなかったので少々気味が悪かった。

1996年12月に現在の建物のB棟が竣工し、翌1997年度からは、基幹講座は新しい建物に移動した。2000年（平成12年）3月にはC棟が竣工し、4月からほぼ現在の場所に移った。2005年4月には改組されて、教員組織は大学院地球環境科学研究所となり、教育組織としては（学生の所属は）大学院環境科学院となって、現在に至っている。大気海洋専攻の多くは旧地圏専攻と一緒に、「地球圏科学専攻」となった。また、一部は旧専攻から人を集めて新たに作られた「環境起学専攻」を主専攻とすることとなった。この起学（「きがく」と読む。造語）は様々な環境問題の解決を目指す学問を新たに起こすことを目的とした総合的実践的専攻として設立された。この改組には池田元美研究科長が尽力された。

現在地に移動してから、天候が許せば、4月の入学式に物理系の学生の記念写真を雪山の前で撮るのが慣例となった。雪山は科学院の敷地を除排雪して残ったもので、人工的とも言えるが、ある意味では一冬の総降雪量の指標となるだろう。1999年4月の雪山の高さが高かったのが（写真1）、調べてみた。気象庁のデータによると、1998～99年の冬の札幌の総降雪量は632cmで、以後、これより多い年はない。

大気海洋専攻草創期に学生として在籍していた人が現在では各方面で活躍しており、社会の中核となっている。写真1に写っている学生の中にも現在は研究者や大学教員として活躍されている方が多くいる。気象庁や気象業界、気象学会で大気海洋物理系に限らず、元北大の学生が活躍しているのを見るのは喜ばしい限りである。今後とも若い人が活躍して気象関連業界をますます発展させてゆくことを祈念して本稿の巻尾とする。



写真1 1999年4月入学式の日。大気海洋物理系の新入生と教員の集合写真。

北海道の雲科学研究—観て、時に盲点に気付いた 35 年—

北海道大学低温科学研究所名誉教授 藤吉 康志

1 はじめに

1981 年 9 月に北大低温研に着任して以来、日本気象学会北海道支部に携わった約 35 年間の研究活動をどのような切り口でまとめようかと思案していた折り、孫野長治先生の藤原賞受賞記念講演（孫野 1967）の以下の文章が目飛び込んできた（下線部は藤吉による）。

「気象現象を天気図や断面図の形でとらえる人もありますし、微分方程式の形であつかう人もあります。もちろんこれが本筋と考えます。私は目に見えないことは一切信用しないというわけではありませんが、目に見えないと感激しないのです。

（中略）

目に見える気象現象ばかりを追いかけていたのでは、目に見えない大事なことを見落とす危険があります。しかし一目でわかることは一目で理解するにこしたことはありません。その意味で目に見えない気象現象を目に見えるようにする努力も大切だろうと存じます。

目に見える限りは何らかの「形」が存在し、「形」にはそれなりの意味があるであろう。私たちの研究グループがこれまで北海道で行ってきた研究成果の概要については、「低温科学便覧」13 章（藤吉・川島 2015）に書いているので、ここでは重複を避けるために、雲科学を構成する雪・雨・雲・風の「形」をどのように観てきたのか、そして時にどのような盲点に気づいたのかを中心に話をまとめた。

2 雪片の形

赴任当時、北大・低温研の物理学部門グループ（小林禎作教授、黒田登志男助教授、古川義純助手）は、疑似液体層の概念を導入することで晶癖変化の温度依存性を理論的・実験的に解明しつつあった。私は降雪物理学部門（若浜五郎教授、遠藤辰雄助教授、山田知充講師）に所属したので、院生時代を過ごした名古屋大学水圏科学研究所の樋口敬二教授の勧めもあり、降雪の強さと「雪片を構成する個々の雪粒子」の関係に着目した。

そのためには、雪片を壊さずに受け、その後雪片をほぐす際に雪結晶を破壊したり融かしたり昇華蒸発させてしまうことを防ぐ必要がある。試行錯誤の結果、0℃以下に冷やしたシリコンオイルを入れたガラス容器と、先端が柔らかく変形する竹串を用いることにした。さらに、折角ほぐした雪結晶が振動などで再び重なってしまうことを防ぐため、粘度の低いシリコンオイル中でほぐした雪粒子を、やや粘度の高いシリコンオイルに押し付けるよ

うにして固定した（つまりシリコンオイルは上下二層とした）。ほぐす前と後の雪片を接写し、さらにほぐした雪片を加熱して融かすことでできた水滴を接写することで、結晶形や粒径ばかりではなく個々の質量とその総和である雪片の質量も測定できる。熟練後でも1個の雪片ほぐしには約10分程度かかるため、降雪時は外で、雪が止むと低温室で長時間雪片をほぐし続けた。中には雪結晶同士が絡み合ってもどう頑張ってもほぐせないものもあり、さらに、写真集や文献で見慣れたものとはほど遠い複雑な形をした雪結晶が多く、「天からの巻物」の解説には苦勞した (Fujiyoshi and Wakahama 1985)。これらの作業から、雪片を構成する雪結晶は、併合後も雲粒付着や昇華成長を行っていること、すなわち、「雪片は生きている」ことを実感した。

当時の雪片併合モデルは、鉛直方向と水平方向の速度のゆらぎは考慮していたが、雪片の形は単純な球か扁平楕円体であった。そこで、雪片成長モデルに形の効果を取り入れるため、雪粒同士が併合しながら次第に複雑な形となるアルゴリズムを導入した (Maruyama and Fujiyoshi 2005)。この手法は、当時低温研の理論惑星科学分野で独立に行われていた、宇宙塵から微惑星が形成されていくモデルとほぼ同じであった (和田ほか 2007)。ただし、雪片の衝突分裂・自発分裂は重要なプロセスではあるが、観測・実験データが不足しており、モデルに組み込むことは今後の課題である。

3 霰、凍雨の形

雪片採取を行っていたある日、霰が降ってきた。霰はほぐす必要が無いのでそのまま接写し、雪片の形が残る融解初期からほとんど雨滴に見える融解後半まで順に画像を並べてみた。その際、雪片が融けて雨滴に変化する過程を今まで誰も見たことが無かったという盲点にはたと気付く、今に至るまで一番書きやすい論文ができあがった (Fujiyoshi 1986)。その後、雪片の融解中の含水率の湿球温度依存性を定式化することはできたが (Misumi *et al.* 2014)、雪片の融解中のフラクタル次元などの形状因子、落下速度、分裂の有無の湿球温度依存性を定量的に表現する研究は現在も進行中である。

一方、温暖前線のように下層の冷氣の上に暖気が入ってくるような場合、上空で雪粒子が融けてできた雨滴が落下中に再度 0°C 以下に冷やされてしまうこともある。過冷却状態の雨滴が地面に衝突後に凍結した場合は着氷性の雨氷、上空で再凍結して氷粒子として降ってきた場合は凍雨と呼ばれる。このような現象は札幌ではほとんど論文として報告されていないが、1923年4月19日に札幌で約7時間半降った凍雨 (松川 1923) とほぼ同時期の2005年4月10日に、約10時間に亘って凍雨が降った。この時には最新の装置を用いて連続観測を行い、凍雨の形状から凍結速度の違いが落下速度の違いをもたらしたことを明らかにした (Nagumo and Fujiyoshi 2015, 2017)。また、先に凍結した水滴から発生した数多くの氷の細片との接触によって、周囲の過冷却水滴が凍結したという仮説を立てたが、今後の検証が必要である。

さらに、雪粒子が融けてできた雨滴あるいは霰粒子が再凍結後に再度融解すると、レー

ダー画像上ではダブルブライトバンドや、時にはさらに複雑なブライトバンドが発生する(図1)。札幌での観測から、ダブルブライトバンドは温暖前線の北西側で頻繁に発生することが分かってきた。過冷却水滴によって引き起こされる広域で甚大な雨水災害は北米、ヨーロッパ、中国で実際に発生しており、地球温暖化との関連も議論されている(Cortinas 2000; Ding *et al.* 2008)。また、一部融解した後再凍結したザラメ状の雪片は砕けやすく、これまではあまり注目されていなかったが、積雪中に弱層を形成して大規模な雪崩を起こす可能性があることから、融解層の研究は今後も重要な研究テーマである。

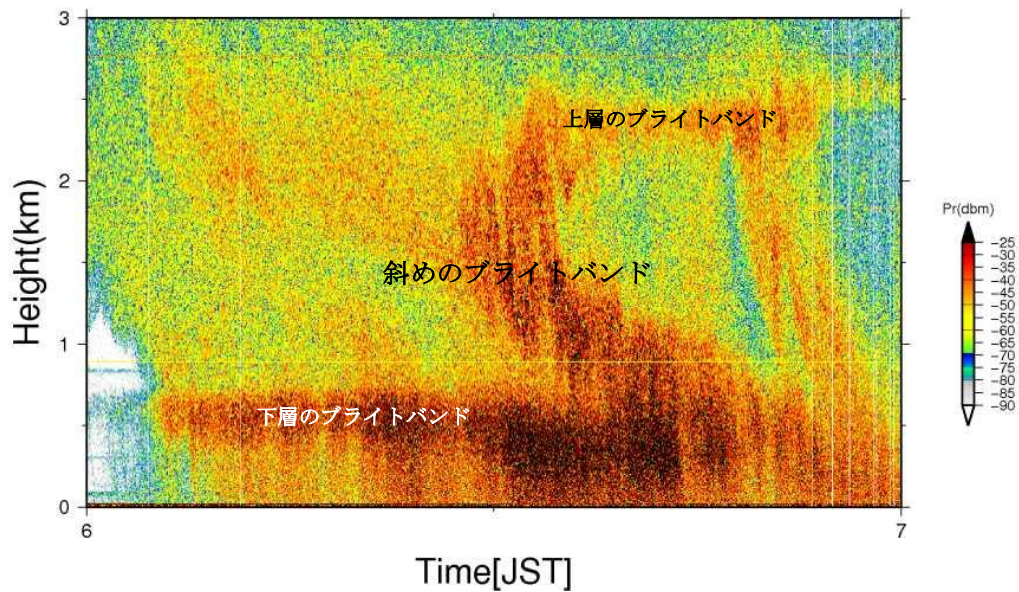


図1： 2015年4月3日のレーダーエコー強度の時間(6時~7時)・高度(地上~3km)変化。6時~6時半までブライトバンドは高度0.5km付近に存在していたが、6時半以降は高度2.5km付近にも存在し、6時半以降、上下のブライトバンドをつなぐ斜めのブライトバンドも出現した。

赴任当時は、各研究者が個別に開発した装置はあったが、落下中の降雪粒子の形・粒径・落下速度を同時に長時間自動計測できる市販品は無かった。その後、2次元ビデオディストロメーター(2DVD)が開発され(Schönhuber *et al.* 1994)、国内で比較的早い時期に導入することができた。しかし、雪片や霰粒子のような複雑な形状を再現し、そのデータを用いた電磁波の散乱計算を実施するにはまだ情報不足である。そこで最近では画像処理能力が高まったこともあり、5台のカメラあるいはイメージセンサーを使って3次元形状を再現する装置も出始めている(Notaroš *et al.* 2016; Kleinkort *et al.* 2017)。我々も名大・理学部の民田晴也技官が開発したMSI(Multi-angle Snowflake Imager)(Minda *et al.* 2017)の改良に協力しており、今後さらに高速・自動・高精度化されていくであろう。北大の気象学研究室でも独自に開発した粒子観測装置を石狩平野に数点設置して観測を開始しており、関係諸氏に心からのエールを送りたい。

4 雪雲の形

今から約 30 年前、3 次元気流場内で形成され流されながら成長する降水粒子の動きを可視化するために、雪雲の 3 次元構造を短時間（3 分以内）に観測する高速 3 次元ドップラーレーダーを導入した（藤吉ほか 1987）。次に必要なものは、今ならば簡単に入手できるが当時はハードとソフト共に開発段階であった 3 次元可視化表示技術である。レーダーエコーのホログラフィーなども作成してみたが、最終的にマーチングキューブというボリュームレンダリング法を採用した（Fujiyoshi *et al.* 1991）。その結果、擬人化するならば、滑らかな雲の顔の作成に成功し、時々刻々変化する雲の表情を観ることができるようになった。レーダーエコーの 3 次元表示が最も効果的であったのは、石狩湾に発生した渦状エコーが形成されていく過程を可視化した時であり、水面に発生する渦とは全く異なる 3 次元プロセスの重要性に気付かされた（Kawashima and Fujiyoshi 2005）。

北大・低温研付属流氷研究施設の 3 基の C バンド流氷レーダーは、オホーツク海沿岸で 30 年間も観測を継続してきたため老朽化が進んだが、更新が困難であった。そこで、それまで気象観測に使っていた X バンドドップラーレーダーを紋別市の大山山頂に移設し、札幌から遠隔制御し、かつ観測データをほぼリアルタイムにホームページで公開することで、流氷研施設廃止後も地元関係者に流氷レーダーと同等以上の情報を提供することを考えた。当初は不安であったが結果は予想以上であり、北海道のオホーツク海沿岸に発生する帯状雲やメソ渦と同時に流氷をドップラーレーダーで検出できるようになり（Fujiyoshi *et al.* 2013）、さらに、最新の 3 次元可視化技術で雪雲と流氷の質感の違いも表現できるようになった（図 2）。現在ドップラーレーダーは紋別市に無償貸与され流氷監視ばかりではなく気象観測にも貢献している。オホーツクガリンコタワー（株）を含め関係諸氏に心からのエールを送りたい（<http://www.okhotsk-mombetsu.jp/radar/>）。

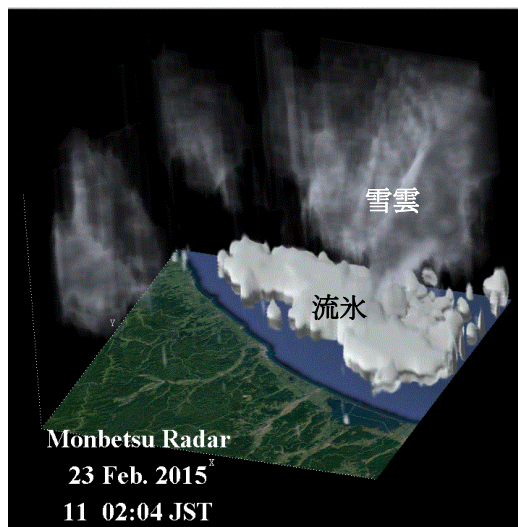


図 2 紋別市に設置した X バンドドップラーレーダーで観測した雪雲と流氷の 3 次元表示画像。

可視化ソフト（AVS/Express）で作成。

5 風の形と気層学

ドップラーレーダー観測では雨や雪が存在している極く限られた空間の流れを可視化できるが、その周囲の風を観ることができない。また、我々も参加していた **GEWEX (Global Energy and Water cycle Exchanges)** プロジェクトでは、陸面からの潜熱・顕熱の乱流輸送量の見積もりが重要な課題であったが、従来の測定法ではせいぜい地上から高さ数 10 m までしか見積もれず、雲を発生させる高さ数 km までの熱輸送過程と関連付ける必要性を感じていた。そこで雪雲と同じように、地上から大気境界層上端までの「風の顔」(例えば等風速面の 3 次元形状)を見たいという欲求から、3 次元走査型コヒーレントドップラーライダーを導入した(藤吉ほか 2005)。導入当時この装置は開発途上であり、トラブルや改良など維持に苦勞したが、その一方、得られたデータを動画表示した風の実態は驚きの連続であり、既に大気境界層研究に使われていたラージエディシミュレーションモデルと相俟って、組織化した乱流(サーマル、ダストデビル、ストリーク)の研究に貢献することができた(Fujiyoshi *et al.* 2006; 藤吉 2008; Fujiwara *et al.* 2011; Yagi *et al.* 2017)。

上記の乱流構造以上に予想外であったのは、対流圏というのは、実は「対流も時に起こる成層大気圏」であることに気付かされたことである。そもそも空気は等温位面上を移動し、対流圏でも成層圏ほどではないにしろ空気は上下に混ざりにくいため、対流や乱流による上下混合が起こらない場所では大気は成層構造をしているはずである。過去にも、そのような指摘はたびたびあったが、あまりに雲や風の乱れが身近に感じられたため、私にとっては完全に盲点であった。これまでの我々の観測によれば、地表付近の乱流混合層の上に弱い気温逆転層に挟まれた厚さの薄い層が何層も重なっていることが多く、これらの層内でいわゆる層雲が形成されている。このような大気が多層構造がメソスケールの水平規模と寿命を持って存在し、雲の多層構造の形成及び大気の流れに関与していることが目に見える形で示された(藤吉 2013)。地球温暖化予測の不確実性を減らすためには、エアロゾルの間接効果に直接関連する「気層学」の研究を進展させる必要があり、2019年に打ち上げ予定の雲エアロゾル放射ミッション(**EarthCARE**) (菊池 2017) 関係諸氏に心からのエールを送りたい。

6 おわりに

様々な雲の形を楽しむ一番オーソドックスな方法は写真であるが、静止画では雲の美しさを愛でることはできるが面白さは伝わらない。院生時代には 16 ミリカメラでコマ撮り(手動)し、その後、8 ミリカメラやビデオカメラを改造して(大井・藤吉 2000) インターバル自動撮影を行った。そこまではフィルムに画像を記録していたため、再生や配布が面倒であった。ここ 10 年は電子媒体に記録できる監視カメラを使って、北海道に限らず日本各地で長期連続撮影を実施してきた。中でも、変化の速い積乱雲はもちろん、動きの遅い流

氷、摩周湖の霧やトマムの雲海などの下層雲、そして意外にも巻雲や高積雲なども高速で動画再生をすると面白い動きが見られる。2015年から気象庁の「ひまわり8号」の高頻度観測が開始され、地上と衛星の両方で撮影した雲の動画比較も楽しい。また、本来は流水監視のために紋別のオホーツクスカイタワーに設置したカメラが、中間圏に発生する夜光雲を偶然とらえ、これが正式に認められた我が国初の観測例となったことは (Suzuki *et al.* 2016)、まさに想定外であった。今後、このような動画像を地域の観光資源として役立てたいと考えている。

我々のドップラーレーダーを紋別市に移設した背景として、小樽と千歳にある気象庁のドップラーレーダーに加えて、国交省の X-MP レーダーが北広島と石狩の2か所に設置されたことにより、少なくとも札幌周辺はレーダー環境が十分に整ったという事情がある。そこで、これらのレーダーでは観ることができないより詳細な降雨・降雪雲の構造を観るために、5年ほど前から船舶レーダーを用いた観測を低温研屋上で実施している。このレーダーはドップラーレーダーや X-MP レーダーと比べて圧倒的に安価で、移動観測も容易である。観測範囲は水平方向に±3.5 km、鉛直方向に7 kmと狭いが、空間分解能は10～15 m、時間分解能は2秒で、現在話題になっているフェーズドアレイレーダーよりも時間・空間分解能は優れている（もちろんフェーズドアレイレーダーは3次元で、船舶レーダーは2次元観測という圧倒的に大きな違いはある）。監視カメラの画像と同様に、2秒毎のレーダー画像を高速動画再生することで、これまで扱ってきた数分、数100 mのレーダーエコーデータでは見落としていた現象が数多くみついている。雲内放電や斜面下降流の可視化、対流エコーのジャンプ現象の発見などはその極く一例である。さらに船舶レーダーは昆虫や鳥エコーのような微小飛翔体の検出に優れており、古くから知られている怪雨（の一部）が鳥からもたらされていることを実証したり、ウンカの追跡や羽蟻の大発生といったレーダー昆虫学 (Radar Entomology)、バードストライクの回避を可能とする鳥の行動解析など、気象災害とは別な防災・防疫的な応用研究にも使える。

冒頭で引用した「目に見えない気象現象を目に見えるようにする」ということの中には、観測装置やプログラムを用いた可視化作業も含まれるであろうが、今まで気付かれることも無く見逃されている「盲点に気付く」という意味も含まれている。グローバルな環境変動は緩慢であっても、それに伴って起こる大気現象はより狭い時間・空間に集中しやすい。予想外の新たな現象に伴う災害を予知・軽減するためには、文献や既成の概念にとらわれて自ら視野狭めることなく、虚心坦懐に自然を観ることこそ必要であろう。日本気象学会北海道支部の諸賢の、なお一層の研鑽を期待します。

謝辞：北大・低温研の川島正行助教や大井正行元技官を初めとして、これまでお世話になり、また迷惑をおかけしてきた国内外の多くの方々に深甚の謝意を表します。

引用文献

- Cortinas, J. V., Jr., 2000: A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3574–3588.
- Ding, Y. H., Z. Y. Wang, Y. F. Song, and J. Zhang, 2008: Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming. *Acta Meteorologica Sinica*, **66**, 808825 (in Chinese).
- Fujiwara, C., K. Yamashita, M. Nakanishi and Y. Fujiyoshi, 2011: Dust devil-like vortices in an urban area detected by a 3-D scanning Doppler lidar. *J. Appl. Meteor. Climatology*, **50**, 534-547.
- Fujiyoshi, Y. and G. Wakahama, 1985: On snow particles comprising an aggregate. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1667-1674.
- Fujiyoshi, Y., 1986: Melting snowflakes. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 307-311.
- 藤吉康志, 遠藤辰雄, 山田知充, 若濱五郎, 1987: 降雪観測用高速三次元ドップラーライダー. *低温科学. 物理篇*, **45**, 133-137.
- Fujiyoshi, Y., M. Ohi and G. Wakahama, 1991: Three-dimensional display of radar echoes using the technique of marching cubes. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **8**, 869-872.
- 藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠, 2005: 3次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる大気境界層の流れの可視化. *天気*, **52**, 665-666.
- Fujiyoshi, Y., K. Yamashita and C. Fujiwara, 2006: Visualization of streaks, thermals and waves in the atmospheric boundary layer. *J. Visualization*, **9**, 359.
- 藤吉康志, 2008: LES の気象への応用 (藤吉編集、分担執筆)、*気象研究ノート*, **219**, pp. 164.
- 藤吉康志, 2013: ドップラーライダーによる流れの観測と物質輸送. *ながれ*, **32**, 301-306.
- Fujiyoshi, Y., K. Osumi, M. Ohi, Y. Yamada, 2013: Sea ice identification and derivation of its velocity field by X-band Doppler radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **30**, 1240-1249.
- 藤吉康志, 川島正行, 2015: 低温科学便覧 13 章, 北海道大学低温科学研究所編, 丸善出版(株), pp. 383.
- Kawashima, M. and Y. Fujiyoshi, 2005: Shear instability wave along a snowband: Instability structure, evolution, and energetics derived from dual-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 351-370.
- 菊地麻紀, 2017: 新用語解説「雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)」, *天気*, **64**, 379-381.
- Kleinkort, C., G. Huang, V. Bringi, and B. Notaroš, 2017: Visual hull method for realistic 3D particle shape reconstruction based on high-resolution photographs of snowflakes in freefall from multiple views. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **34**, 679-702.
- 孫野長治, 1967: Visible Meteorology (眼で見る気象学), *天気*, **14**, 241-243.
- Maruyama, K. and Y. Fujiyoshi, 2005: Monte Carlo simulation of the formation of snowflakes. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1529-1544.

- 松川哲美, 1923 : 凍雨と其形状に就て, *気象集誌第2 輯*, **1**, 95-97.
- Minda, H., N. Tsuda and Y. Fujiyoshi, 2017: Three-dimensional shape and fall velocity measurements of snowflakes using a multi-angle snowflake imager. *J. Atmos. Ocean. Tech.* doi:10.1175/JTECH-D-16-0221.1, in press.
- Misumi, R., H. Motoyoshi, S. Yamaguchi, S. Nakai, M. Ishizaka and Y. Fujiyoshi, 2014: Empirical relationships for estimating liquid water fraction of melting snowflakes. *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, **53**, 2232-2245.
- Nagumo, H. and Y. Fujiyoshi, 2015: Microphysical properties of slow-falling and fast-falling ice pellets formed by freezing associated with evaporative cooling. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4376-4392.
- Nagumo, H. and Y. Fujiyoshi, 2017: Synoptic-Scale Environmental Features of the Long-Lasting Ice Pellet Event in Northern Japan on 10 April 2005. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 899-907.
- Notaroš, B. M. and Coauthors, 2016: Accurate characterization of winter precipitation using multi-angle snowflake camera, visual hull, advanced scattering methods and polarimetric radar. *Atmosphere*, **7**, 81.
- 大井正行, 藤吉康志, 2000 : 家庭用ビデオカメラへのコマ撮り機能の付加. *天気*, **47**, 851-853.
- Schönhuber, M., H.E. Urban, J. P. V. Poireres Baptista, W.L. Randeu and W. Riedler, 1994: Measurements of Precipitation Characteristics by a New Distrometer. *Proceedings of "Atmospheric Physics and Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields"*, Rome, Italy, November 15 - 18, 1994
- Suzuki, H., K. Sakanoi, N. Nishitani, T. Ogawa, M. K. Ejiri, M. Kubota, T. Kinoshita, Y. Murayama and Y. Fujiyoshi, 2016: First imaging and identification of a noctilucent cloud from multiple sites in Hokkaido (43.2–44.4° N), Japan. *Earth, Planets and Space*, **68**:182. DOI 10.1186/s40623-016-0562-6
- 和田浩二, 田中秀和, 陶山 徹, 木村 宏, 山本哲生, 2007: ダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーション:ダストの圧縮・破壊と構造進化. *低温科学*, **66**, 55-64.
- Yagi, A., A. Inagaki, M. Kanda, C. Fujiwara and Y. Fujiyoshi, 2017: Nature of streaky structures observed by a Doppler lidar. *Boundary-Layer Meteorol.*, **163**. 19-40.

汎惑星気象・気候モデルを目指して

神戸大学 理学研究科 惑星学専攻／惑星科学研究センター
林 祥介

1 はじめに

惑星の気象や気候の多様性を、惑星半径や自転角速度あるいは太陽定数などのパラメタ空間に議論し、これを掌握することは、理論物理学的な普遍的理解を目指す 20 世紀中庸の流行の末裔、いわゆる理論的な理解を嗜好する人々には、夢とされてきた。地球流体力学 (GFD、Geophysical Fluid Dynamics) は、第二次大戦後 von Neumann の下、数値天気予報の実現を目指すことをきっかけにして立ち上がった分野であるが、これは、流体運動の普遍的構造、すなわち回転成層流体の力学、を見出し、大気海洋の運動をその上に位置づけることで理解しよう (計算可能にしよう) という、そのような流れの最たるものである。1963 年に選ばれた GFDL という名称には、Smagorinsky をはじめとして当該組織の立ちあげに尽力しあるいはその企てに参画することになった人々の、気象・海洋・気候系に対する普遍的理解の追求を目指すことへの矜持あるいはその必要性への賛同がこめられているように思う (林 2007)。「汎」惑星気象学・気候学というのはそのような理論的考察の延長上に位置する捉え方である。そんなこと GFD ぐらいの単純システム (基本、流体力学「だけ」) じゃなきゃ無理よ、とか、一般論ってたいてい”general nonsense”で役に立たないよね、とかの批判にはまったくもって同意するところであるが、嗜好してしまうものは止められない。

惑星を議論することが多くの人々の興味を引き、惑星科学として急速に発展していったのは、やはり、米ソ冷戦構造を背景にした惑星探査時代の到来によるといわねばなるまい。1957 年ソ連のスプートニクにはじまる米ソの宇宙開発競争は、ソ連崩壊の前夜 80 年代中庸まで続いた (松井, 2011)。そこで得られた画像データをはじめとする質的量的に画期的なデータ群は、これまで知ることのできなかつた惑星の諸相を次々と明らかにし、これらを説明・理解しよう、あるいは、探査計画立案に際し予測しようという理論的な考察の進展を促した。たとえば、木星の三層雲構造論文として知られる Weidenschilling and Lewis (1973) は Pioneer 10 号による初の木星最接近 (1973 年 12 月) に際しての仕事である。日本でも、火星大気構造の Moriyama (1974) にはじまる三部作や金星大気構造の Matsuda and Matsuno (1978) などの研究がなされた。Manabe and Strickler (1964) から約 10 年、同様の鉛直 1 次元放射対流平衡モデルによる考察が各惑星に対しても行なわれるようになった、ということである。様々な惑星に関する知見の蓄積は、各惑星の特徴を相互に比較して議論

する「比較惑星学」という捉え方を可能にし、さらには、各惑星の様相をパラメタ空間上に議論することを実証的な科学的課題に引き上げた。パラメタ空間に相似則的な関係を見出して、各惑星大気の特徴を位置づけることを試みた古典的工作として Golitsyn (1970)がよく参照されるが、これはこのような背景の下で実現し注目された仕事である。日本でも、仮想的な惑星によって海洋の存在を議論し、暴走温室状態の発現に至る射出限界 (Nakajima et al. 1992 が Komabayashi-Ingersoll 限界と名づけたもの) の存在を Ingersoll(1969)に先駆けて議論した Komabayashi (1967)、金星大気 of 超回転状態の存在を Gierasch (1975) を拡張して議論し、パラメタ空間上に地球型の循環と金星型の循環を定義分類し、その多重性を発見した Matsuda (1980)などの仕事が現れた。これらは普遍的な構造を探索しその中に個々の惑星での実現を位置づけあるいは理解しようとする試みであると言えよう (松田 2000)。

惑星探査の時代は同時に、惑星あるいは惑星系の起源と進化を説明する理論的考察 (惑星 (系) 形成論) が展開した時代でもあった (ソ連の Safronov モデル(Safronov 1969)や京大林忠四朗グループの京都モデル(Hayashi et al. 1985))。太陽系の存在以外にはほぼまったく観測の手がかりのない中、理論物理学の手法の延長上、主として熱力学と天体力学的考察の上に、惑星あるいは惑星系の進化をいわば物理的必然として導出しよう、というわけである。一方、惑星の起源に関する実証的物質的研究は、月の石という例外をのぞけば、地球上にある (南極大陸で収集された極地研の膨大な隕石コレクションなど) 隕石を手がかりに進められ、希ガス同位体の情報などから大気や海洋の起源が議論されるようになってきてはいたが、それにもまして惑星形成に関する理論的探求の進展は、個々の惑星の起源・進化と惑星系形成過程とを整合的に語っていこうという強い動機付けを与えたのだと想像する。いずれにせよ、Manabe and Strickler (1964) から約 20 年、80 年代中層には各惑星の大気に対して、現在の構造のみならず惑星形成時の大気構造を議論することが重要な仕事として認識されるようになり、そのための放射伝達が研究され、鉛直 1 次元放射対流平衡モデルによる議論がなされた。初期地球の表層環境を議論した Kasting (1988) や Abe and Matsui (1988) などがそれである。その延長上に惑星系一般の生命生存可能圏 (habitable zone、与えられた恒星に対して、液相の水が惑星表層に存在することが可能と思われる軌道領域) を議論する Kasting et al (1993)、Abe (1993) があり、地球・金星・火星のおかれた状態とそれらの運命を議論することを、パラメタ空間をさらに拡張して惑星系一般の議論として展開するようになった。Mayor and Queloz (1995) が系外惑星の存在を確認する 2 年前の仕事である。

ちなみに、Manabe and Strickler (1964) の鉛直 1 次元放射対流平衡モデルに対を成す、Budyko (1969) や Sellers (1969) 等の南北 1 次元エネルギーバランスモデル (EBM) が惑星パラメタ空間に本格的に進出していったのは、その始まりが理論的でパラメタ研究的であったことを考えると不思議なことに、鉛直 1 次元モデルより 10 年ほど遅れて 1990 年代にはいつてからであると思う (たとえば火星環境を議論した Nakamura and Tajika 2001)。惑星あるいは惑星表層の全球平均的な構造の議論から惑星表層の地理的構造の議論に進化する

のに時間を要したのであろう。EBMによって地球史を議論することでさえ、90年代にはいつてから活発化したように思うが、海底堆積物からの化石分析や年代学の進展による地質学的・歴史地理学的知見の蓄積が必要とされていたからであろう。

これらのエネルギー収支的議論に対し、流体運動を陽に表現するパラメタ研究的議論、特に、全球の大気運動に関する議論は80年代に入り、いわゆるスーパーコンピュータ（つまり100x100x100の格子点情報が主記憶に乗る計算機で、要すれば、3次元の流体計算ができた気になれる機械）の登場を得るまで原理的に不可能であった。その登場をもってしても、計算機をフルスペックで使う天気予報や気候予測と同等の大規模な数値計算は、それ専用に酷使できる計算機資源を有する国家的な拠点組織（日本なら気象庁や気象研究所）でなければ実行困難であり、そのような場所で計算資源を惑星大気の流体計算などにわりふってもらうことはなかなか考えにくいことであった。回転系の強制二次元乱流現象として木星で見られるような縞帯構造を見出したWilliams (1978) や、地球型惑星大気の子午面平均循環構造の自転角速度依存性を議論したWilliams (1988) など、Williamsによる一連の研究は、GFDL以外の場所ではたとえ思いついたとしても実現が困難な仕事であったと思う。GFDL的な目的で全球数値モデルを精力的・先駆的に用いたのは、筆者の記憶によればECMWFのモデル開発に際して活動できたHoskinsのグループであると思うが、世界の普通の理論的研究者にはそのような「なにか」がなければ、3次元流体計算に必要とされる計算環境はなかなか手に入らなかった。

というわけで、ここに筆者らのブレークポイントあるいは破滅の畏があった。おりしも80年代前半わが国では、IBMを追従する汎用国産計算機振興政策がその成果をあげ、国産汎用計算機たちが米国製を凌駕し、ついに、スーパーコンピュータにおいて世界の頂点に達したのである。大学にいた研究者・学生にとって幸運だったことは、それらが、いわゆる大学共同利用大型計算機センター群に国策としてほぼ自動的に配備され、潤沢な計算資源が（そこそこの、しかし、世界の競争相手に比べれば圧倒的に安価な計算機使用料で）提供されたことである。気が付いたらGFDLでしかできない計算は日本でならできないわけではないようになっていた。これが水惑星実験（Hayashi and Sumi 1986）が生まれる一つの背景であり、筆者が汎惑星気象・気候モデル開発とやらにはまっていっかけていくきっかけである。

「汎惑星」という単語は、たぶん、まだあまり流通していない用語である。現在の太陽系の惑星たちのみならずそれらの過去や将来、あるいは、まだ見ぬ太陽系外の惑星たち、さらに、これらを包含するパラメタ空間に存在が想像できる仮想的な惑星たちをも含む総称を意図していることはたぶん説明する必要はないだろう。さらに説明を付け加えるべき、「汎」に秘められた「仮想的」の意図は、GFDLあるいは理論物理の流れをくむ理解の系図の上に惑星の諸事を位置づけること、すなわち、理解のための簡略化あるいは階層化を含むことである。汎惑星気象・気候モデルというのは、計算機という道具をつかって、様々な設定に置かれた多様な惑星の可能な姿を探求するのみならず、そのような計算の正当性

や計算結果の理解を進めるための理論的な議論を可能にする、様々な複雑度のモデル階層からなるソフトウェア群であることを企図しての名称である。階層的モデル群の必要性に関しては、Schneider and Dickinson (1974)や天気予報モデルで GFD をはじめた Hoskins (1983)など、ほとんど数値計算の開闢時の古き時代からその提唱はある。しかし、いわゆる気象学・気候学の主流の天気予報モデルや気候モデルがどんどん大規模複雑化していくにつれて、GFD 的な理解を欲する研究者がこれを陽に主張するようになってきた (Held 2005, Polvani et al. 2017)。筆者が「地球流体電脳倶楽部」(<http://www.gfd-dennou.org/>) という怪しげな名前の同人組織を塩谷雅人 (現在京大生存圏科学研究所教授)、酒井敏 (現在京大人間・環境学研究科教授) らとともに立ち上げたのはまだ日本のインターネット前夜の 1987 年であった (林 1995)。当初のプロダクトは塩谷起源の Fortran 描画ライブラリ (DCL) だけであったが、筆者の企図目標は階層的モデル群の構築にあった。構想自体は世界最先端であったと自負しているが、スーパーコンピュータの登場を経てようやく CFD (計算流体力学) という単語が流通しだしたに過ぎない 80 年代の終わりに、そのような怪しい対象を相手に流体計算を陽に行うシミュレーションを目指す、というのはまず間違いなくクレイジーな目標 (いまどきの言い方をすれば「論文書けるんかい?」) であった。天文観測技術の進歩により系外惑星が数多く発見され、2010 年代には、系外惑星に期待される環境を、我々が良く知る GCM 等の流体計算を陽に行うシミュレーションモデルを駆使して推測し、生命生存可能な環境を探索することがまっとうな科学的課題となる、など、当時、想像だにしていなかった。宇宙にどのような惑星表層環境が存在しうるか、な徒という問題は、たぶん SF やアニメ・漫画やハリウッドの管轄であると認識されていた。

2 怪しい計算のルーツ：水惑星 1986

さて、汎惑星気象・気候モデルの構築という野望のルーツ、水惑星実験 (APE, Aqua Planet Experiment)、Hayashi and Sumi (1986) である。現実には存在しない単純化した設定の下に実現するであろう大気環境を数値的に表現することでこれを探求可能にし、そこになんらかの構造を見出すことによって、翻って、その構造をもってより複雑な状況にある現実の系の振る舞いを記述し、あるいはこれを理解する言語となす、という大それた目論みである (今日でも)。Hayashi and Sumi (1986) では、当時得られた (Levitas だったかな?) 世界の海の海面水温データを東西平均し、南北対称成分だけをとりだして与えた。陸の影響や海面水温 (東西) 分布の影響を除去すると、どのような世界 (降水分布) が得れるか、を問うた。理論的・GFD 的な着想を、水過程を含む GCM に持ち込んだ、モデルユーザとしてのおそらく最初の試みであった (真鍋らも当然開発段階で同様の実験を行ない、水惑星では無くて *nude model* と呼んだとのこと、私信)。

1980 年代前半は、全球観測網の展開と衛星観測の進展もあって、熱帯域の雲活動の統計的描像が得られつつあり、季節内変動だとか ENSO だとかが注目を集める現象となっていた。対応して、いわゆる Matsuno-Gill パターン (Matsuno 1966, Gill 1980) に象徴される、

熱帯の大气・海洋の挙動をひもとくことが流行していた。筆者も二層程度の単純モデルを作って wave-CISK だとか大気海洋結モデルだとか称して遊んでいたのであるが、その手の単純モデルでは「結合」は適当な係数を勝手に導入してそれっぽくしているだけであった。最初に「結合」の工夫を発明した研究は、現象をモデル化したという価値があるが、その先に進もうとするとどうしても結合部分の定量性を担保する陽な表現が必要になる。ウォーカー循環とかいうけれど、与えられた任意の海陸分布・海面水温分布の下で降水分布が統計的にどう決まるのが「自然」（物理的必然）なのか、陸の影響はとっぱらって海面水温の分布（だけ）にした場合を考えてみてはどうか、そもそも一様な海面水温分布の場合にはどういう雨の降り方をすべきなのか、ITCZ は本来どこにあるべきなのか、そのような考察を順番に組み上げて考えていくのが楽しそうではないかとかとっていたのではあるが、適当な手段がなかったので妄想で終わっていた。Gill 流の単純モデルで遊ぶことはできたが、そのようになるようにすればそのようになる、ではちょっとつまらない、文字通りお遊びでしかない、と思うようになっていた。単純モデルは、所詮はイラストレーション、複雑な現象の簡略な説明なので、具体的な現象から離れると意味を失う（実際には、無論、単に愚かであっただけで、まだまだ考えねばならないことがいっぱいあった。たとえば、Emanuel (1987) の WISH, Wind Induced Surface Heat exchange などには考えが及んでおらず、プレプリントもらったときには、あっ！と思ったものである）。

状況は筆者の能力・努力とは関係なくしかるべく展開していった。米国と対等あるいは凌駕しつつあった国産汎用大型計算機（あるいはスーパーコンピュータ）が拠点大学の共同利用計算機センターに配備されたからといって、ソフトウェアがなければ始まらない。当時東京大学では岸保勘三郎研究室の助手であった中村一が 3 次元格子点数値モデルの開発研究を進めてはいたが、1984 年岸保の後任で教授となった松野太郎は研究室を刷新、1985 年に入って住明正を気象庁より助教授に招聘、開発最終段階にあった気象庁の全球数値予報スペクトルモデル (Kanamitsu et al. 1983) を大学現場に導入した。1985 年当時、気象庁と東大の大型計算機センターは日立製作所のスーパーコンピュータ S810 が導入された直後であり、同じ機種であるのでソフトウェアの移植はさほど難しくないと思定されていたのかもしれないが、それでも移植には 2~3 ヶ月ほどの時間を要したように記憶している。いわゆるメインフレーム汎用計算機は設置センターによって運用環境が全く異なっていたのだ。気象庁で許されていたようなメモリアクセスやディスクアクセスなどの使い方はできなかった。筆者は、数値計算も計算機も不得手であり、導入作業にはまったくタッチしなかった（技術的に戦力外でお呼びでなかった）。住と後に助手になった増田耕一がこれに協力して実現したと記憶している。増田は、当時、FGGE (The First GARP Global Experiment, 1978-1979) データ解析を進めており、そのデータ処理に端を発して大型計算機の利用にすぐれた能力を発揮し、大型計算機センター界限では「生き字引」として知られるようになっていた。ちなみに、当時、非常にプリミティブな命令セットしかなかった描画環境も、増田の貢献により整備され利用できるようになっていた。岸保研究室時代に

中村が NCAR から輸入したグラフィックスソフトウェア NCARG を増田とさらに万納寺信嵩・楠昌司（現在すでに気象研究所定年あるいは気象庁嘱託？）ら院生陣が移植に協力して実装していたように記憶している。いずれにせよ当時の計算環境の整備において筆者が一切役に立たなかったことだけはまちがいない。どう考えても、いまどきの基準なら、共著者には増田がはいってないといけなかつたろう。議論にもっとも長い時間をかけたのは松野であったが、松野は指導学生の論文に自分の名前を連ねることを主張あるいは指導したことはなかつたように思う。古きよき理論家の、研究、特に博士論文は自分でテーマを見つけて料理して仕上げるもんだ、という雰囲気放っていた。院生はその暗黙のルール、あるいは界限の伝統におおむね従って、自分でテーマを切り出せるようになったら、教員団が議論に参加しても論文は自分で書き上げて院生の単著で投稿出版することが少なくなかつたように思う。このときはいわば例外的に、住との共著にするように指導されたが、思えばかの研究室においてこれが始めて筆頭著者自身が開発したのではないソフトウェアを使った仕事であった。他の人々の評価に関しては、グループによる議論を評価することとか、ソフトウェアライブラリの開発を評価することとかいう類の問題認識を筆者自身が持つようになったのは自分でそういうことに関わって後のことであり、増田のみならず気象庁でソフトウェア開発に従事した人たちの寄与をどう評価するかとか、論文執筆時には助手に採用されていたにもかかわらずまったく無頓着であり、愚かなことであった。

いずれにせよ、Gill 流のシンプルモデルでは、愚かにもアイデア不足で行き詰っていた筆者の前に、全球スペクトルモデルが降臨（光臨？）された。これを使って、湿潤全球世界に対して、GFD における流体実験（キッチン実験）と同様なことを、数値的にやってみることができるようになった。海面水温分布に対して降水活動は統計的にどう応答するのか、東西一様な海面水温分布に対して降水活動はどう応答するのか、数値実験して答え見ながら考えよう、理論的考察の手がかりを得ようというわけである。お膳立ても他力本願なら、発想も安直に発進したのであったし、さらに最初の実験は超簡単であった。水惑星設定するにはパラメタをひとつゼロにすればよいだけであった（地形・海岸線データを読み込まないというテスト用オプションスイッチが存在していた）。初期値の生成と海洋データから SST の全球分布の東西平均・南北対称成分を取り出して境界条件としての海面水温分布を与えることぐらいは自分でやったような気がする（あらためて昔の論文引っ張り出してみたら境界条件の生成詳細が何にも書かない、困った論文だ）。数値計算のサイズは T42×L12 (128×64×12)、S-810 の東大の大型計算機センターで、あまり記憶が定かではないが、30 日積分するのに D ジョブ(CPU 時間 1 時間、約 1 万円)一本、ジョブ投入から待ち計算終了まで待ち時間含めて数日かかったように記憶している。すみやかにセンターのディスクからダウンロードしないと記憶スペースの課金がかかる。当時の最大記録容量のオープンリール磁気テープ(直径 40cm ぐらいの 2400 フィート 6250bpi オープンリール磁気テープ、一本あたり数十 Mb!)を台車に山積みして、研究室の保管庫とセンターとを往復していた。かなりのケースのパラメタ計算を行ったように思うが、公の形にしたのは、くだんの論文

ともう一つ Nakazawa and Hayashi (1987)だけである。研究室の（松野・住の稼いできた研究費の）金食い虫であった。

3 地球流体電脳倶楽部へ

魔法ツールを召喚するとかならずしっぺ返しが来るのが古来の教えである。筆者も例外ではなかった。その後、水惑星に関する解析や新たな実験が進められなかったのであるが、ソフトウェアの中身を全然理解していないまま計算にとりかかってしまったこと、必要なデータ解析・可視化のノウハウあるいはそのためのツールをなにも持っていなかったことによる。気象庁の全球数値予報モデルは現業予報解析サイクルの厳しい時間管理に適合させるべく佐藤信夫（当時数値予報課プログラム班？）が、予報解析サイクルで規定される時間に入るよう高速化に尽力したプログラムであり、言い換えると、センスの無いシロートが片手間に読めるような代物ではなかった。正直、手も足も出なかった。GFD 的考察を行うためにはデータを切り出し出力する新たなルーチンをつけ加えねばならず、モデルコードを理解していなければ不可能である。当たり前ではあるが、出力データの解析・可視化ルーチンも別途作成しなければならなかった。まだインターネット前夜であり、netCDF もなければ、GrADS もない。中村らにより NCARG は移植されていたが、それは基本描画ソフトウェアであり、データを食わせれば絵を描いてくれるようなものではない。筆者のような者は、専門家と組まなければ、歩を進めることは直ちにはできなかった。ちなみに、当時院生であった中島健介（現在九州大学理学研究院助教）は、同様の GFD 的思想の下、雲解像対流モデルを用いて湿潤対流の一般論（ベナール対流に対する湿潤対流論）の構築を試みつつあったが、中島はきちんと雲解像対流モデル（非弾性近似）をスクラッチアップしてことに望んだので、いわゆる論文として整理できた仕事は少ないものの、自在にこれを操り世界の先頭をリードする存在となっていた（Nakajima and Matsuno 1992, Nakajima 2011）。筆者とは対照的である。

筆者は 87-88 年と W. R. Young（現在 Scripps 海洋研究所教授）に招聘されて MIT で R. S. Lindzen・C. Wunsh の博士研究員の席を得ることになったが、日本的なスーパーコンピュータがない環境で、さてどうしたものかなとさらに途方にくれた。驚いたことに MIT の数値計算環境はどれもこれもあまりに貧弱あるいはとても高価で、先方の予算で雇用されていたにもかかわらず特にミッションが指定されていない自由な処遇をされていた筆者は、逆に、その利用に躊躇した。MIT では当時すでにイーサネットケーブルが引き回され、ネットワーク時代が始まっていた（というよりは推進していた）が、まだインターネットは太平洋を越えておらずリモートで日本の計算機を動かすなどという時代が来るのはそれからだいぶ先のことである（筆者自身が後にその敷設に関わるとは想像だにしていなかった）。MIT の海洋物理グループでは、資金潤沢な Wunsh が導入した、当時、日本の情報科学研究者の垂涎の的であった、SUN-3（ワークステーションと呼ばれていた計算機）が情報科学研究ではなく海洋物理学研究のために多数導入され、梱包を解かれんとしていたが、

筆者のような潤沢な数値計算環境から来たお気楽計算者にとってはこれらの最先端機材は「おもちゃ」でしかなかった。

ところがそこに酒井がいた。酒井はたまたま同時期にたまたま同じく Young の博士研究員として MIT の海洋物理グループに滞在しており、同じく「おもちゃ」であったはずの、たまたま使い手のいなかったパソコン (IBM PC/AT) を研究室の個人机に設置占有し、これに Fortran コンパイラとグラフィックディスプレイを装備して (PC9801 など漢字を表示しなければならない日本のパソコンは最初からグラフィックディスプレイでゲームができたけど、PC/AT は違った) これらを使いこなしていた。50×50 の四角い領域で浅水方程式を解く、という計算をさくさくとパソコンで実現し、グラフィックディスプレイに絵を描かせていたのである。共有計算機であった十万ドル SUN-3 群よりも、文字通りの占有計算機として使用された千ドルの PC/AT のほうがはるかに使い物になっていた。Fortran がパソコン上で実用に耐えるということにも驚愕したし、大型計算機よりもパソコン上でプログラム編集したほうが極めて快適であることも知った (Emacs の DOS 版的な Epsilon というエディターがあっけきわめて軽快であった)。酒井は、Fortran によって書かれたパソコン用のグラフィックソフトウェアライブラリの構想について熱心に語った。後に DCL、電脳倶楽部ライブラリとなるライブラリの始まりである。そもそも、共用することを前提としたソフトウェアライブラリを自分たちで作る、という発想がなかった筆者には斬新であった。逆に、ネットライブラリになれている今の日本の若者にも、そんなものを自分たちで作るなんて斬新かもしれない。当時は米国製ソフトウェアを日本の計算機 (大型であれパソコンであれ) に導入することは簡単ではなかった (まず不可能であった) のである。日本の環境は日本で作らなければならなかった。MIT のキャンパスでの雰囲気刺激されたこともあってか、今後はソフトウェアの開発力の涵養が世界をリードできるか否かの鍵になるという思いを強くし、教育機関のソフトウェアのあり方、公開と改変の自由、なども議論した。数値計算は数学的手法のすなおな延長上に置かれるべきであり、したがって、数値計算ソフトウェアは、数式が自由に使え追跡可能であるように、自由に使え、あるいは、検証に付されるようになっていないといけない。教科書も変わっていくだろう、ソフトウェアと称されているものと融合していくだろう、GCM のような大規模数値モデルは、単なる計算ツール・実験装置ではなく、気象学・気候学の集大成としての知見集積プロダクト・理論プロダクトでもあり、したがって、教科書の延長上のソフトウェア部分として存在するようなものの必要性が生じるはずだ。そういったことが着想され、数値計算モデル群を整理アーカイブするなどという大それた方向を考えるようになった。ソフトウェア開発を推進し、その上に数値計算を実現する、そういったことが夢物語ではないような気になっていた。気象庁数値予報モデルのお気楽ユーザが、あまりのお気楽を反省したのは良いけれど、驚きの反転である。仲間がいると、自分ではできなことも可能になるので、恐ろしいことを企てしまうものである。

MIT 滞在中、まっとうな研究はあまりできずにぶらぶらしていた結果、SUN-3 や MIT

が中核となっていた X-window プロジェクトの実装実験、AI ラボ（現在は CSAIL）やメディアラボのセミナーたち、大学周囲の研究所・ベンチャー企業群（MIT ってまずは地主・大家・不動産屋さんであることを知った）の活動、そういったものに触れることができ（MIT 海洋物理の院生だった福森一郎（現在 JPL）、が MIT の日本人会の運営にも関与していたくさんの人、今はどうか知らないが当時は Japan as #1 の時代で数多くの日本企業が MIT に留学生を派遣していた、を紹介してくれた）、それによってコンピュータといえば数値計算しか知らずスーパーコンピュータは米国を凌駕したとか思っていた筆者が、情報科学者がいったい何をやってきたのか、やろうとしているのかを体感し、米国では計算機は全然違った方向（情報科学）に向けて発展しつつあったことを理解することができた。遊ばせてくれた Lindzen や Young や Wunsh には感謝に堪えないやら申し訳ないやらである。しかし、それだけだったら、当時まだ複雑な発展途上国意識が色濃かった日本的感想、つまり「なんだ、全然遅れていたんだ（日本がこういう雰囲気になるにはあと 10 年ぐらいかかるんじゃないのかな）」しか抱かなかったであろうと思う。

おかしなことに、真に筆者にインパクトを与え、こういう問題は我々自身の問題でもあると気づかせてくれたのは Nicholas Negroponte ではなく酒井と彼が司る PC/AT であった。ゲームにあまり興味の無い筆者には、それまで文章の清書道具か大型計算機の端末としての価値しかなかったパソコンが全く違った「使えるもの」そして「使うべきもの」に変わった。低価格化によって実現した個人化と記憶媒体の大容量化によって、計算機は、個々人の頭脳の外部化、知的生産の道具となろうとしていることがパソコンを通して見えてきた。理論家にとっての紙と鉛筆（数値計算ができて絵がかける）、清書道具ではなくて思索を展開記録蓄積するノート（文章が書いてハードディスクにとっておける）、それが、ゲームができるおもちゃ、すなわち、個人が購入できる価格帯で手に入る。誰もがもっていてしかるべき文房具たりうる。文系（文字文化）の人々には日本でも「ワープロ」という装置が当時急速に普及して、「ワープロ」はそのような知的生産の装置として機能するようになっていたが、理系的な計算や絵を必要とする思索のための装置としてはその名のとおり「ワークステーション」が開発されてきたことを MIT で知った。しかし、筆者には「ワークステーション」は高価すぎて、情報科学の専門家の単なる実験装置にすぎず、そこに展開されている情報科学的成果を個人的な知的生産のための日常装置として位置づける気にはなれなかった。しかし、酒井の実践により、個人による占有が期待できる安価な機器である「パソコン」にワークステーションの実現を見て、知識や知的生産の形が変わる、と感じたのである（ちなみに、まだ Windows はなかったけど、このころ「爆弾」で有名な MacIntosh は米国では世に出回りつつあったが、筆者の印象は、なんだ、ワープロじゃん、だったように記憶している。X window system を多国語化対応させるのが博士論文だったようなところで、Mac は当然英語しかしゃべらなかつた）。

数値計算は GFD 的な思考になくなくてはならない手段となっていたが、水惑星実験に関与することにより、今後、GCM のようなモデルも理論的思考に必須の手段となるであろうこと

が体得はされた。一方、数式による GFD の議論と数値計算の間には断絶があった。式変形はたやすく追跡できるが数値計算はソフトウェアを作らなければ追跡できない「実験」であった。しかし、大容量化（といっても MB 単位）した記憶装置を有するパソコンならば、文章もプログラムも絵も同じように扱える。好きに計算して好きに表示すれば確かめられる。GCM といえども例外ではない。地球流体力学とか気象学・気候学とかの情報化とは、我々の分野が蓄積してきた知的経験を計算機に載せていく事であり、知的活動全般に計算機を活用できるようにすることである、そういったことは我々が着手しなければならない我々の問題だ、そう思うようになっていった。気象庁の数値予報モデルのユーザとして「実験」し、後処理で途方にくれたことがトラウマとなり、酒井のライブラリ構想に刺激されて、逆に、理解できることに重点をおいたモデル群を自らが作成すればいいんだ、そういう発想（妄想）に取り付かれていった。Smagorinsky が目指したのであろう、GFD からの気象学・気候学、パラメタ空間に惑星気象・気候を位置付けることを、昔なら組織がなければできなかったことを、個々人がパソコンを持つ情報化された街場ならできるんじゃないだろうか、というわけである。

かくして、地球流体電脳倶楽部が始まった。1988 年の春帰国するや、数多の院生たちにつきあってもらって（巻き込んで）、大騒ぎを開始した。教育現場にふさわしい数値計算とその足回りのためのソフトウェアの共同開発と共有、それに必要となる知識の集積と共有。自分が欲しい環境は自分が作らなければ誰も作ってくれない。かといってセンスと才能がなければ共有資源にふさわしいライブラリなど作れるわけがない。高い能力を有する大学院生たちがいなければ結局なんにもできなかったに違いない。帰国後、酒井はグラフィックスライブラリの開発に着手したが、塩谷（当時京都大学理学部助手）が開発をすすめていた SGKS（Fortran のグラフィックス規格の GKS の縮小規格ライブラリ）の存在を知り、これを中核にすえて DCL とすることになった。筆者は、一台のワークステーションより十台のパソコンと称して、松野・住研究室の院生環境の一人一台占有パソコン化を進め（よくまあ好き勝手にお金をつかわせてもらったものだ）計算情報環境を整えた。院生たちは速やかに DCL を使いこなすようになり、これを進化させ、塩谷・酒井らの開発にフィードバックできるようになっていった。おりしもたまたま、大型計算機センター利用のための専用回線を増設する一般設備費が認められ、村井純大計センター助手（当時）のアドバイスに従って、MIT で見たイーサネット（当時は黄色の同軸ケーブルが定番だった）を筆者自身が引き回すことになった。そのとき引いた大型計算機センターから理学部への光ファイバーが最初の日米インターネット専用線接続である TISN（東京大学国際理学ネットワーク、1989 年 8 月運用開始）に使われ、村井純らの WIDE プロジェクトのバックボーンの一部として一時機能した。TISN の地球物理学科サーバ（SONY NEWS）が実は地球流体電脳倶楽部サーバの元祖である。院生のパソコンたちは、わが国では最も早くインターネット接続され大型計算機とのネットによるデータ転送が実現、手元のパソコン上でソフトウェアを作成し、デバッグし、小さなサイズなら手元で計算し、大きなサイズにしたいとき

に初めて大型計算機にもっていく、そのような仕事の流れは完成した。以後、筆者がその後着任する先々（たとえば北海道大学地球環境科学研究科で気象・海洋グループの設立の際）で基本的にこの形、ネットワーク基盤を設計し、情報サーバと各人の個人機材を展開し、計算情報環境を提供する、を繰り返すことになった。

一方、知的集積としてのモデル群の集積構築をめざす、というのは何のことも無い、個体発生は系統発生を繰り返すということである。いきなり最先端の気象庁数値予報モデルに手をだしたから、分不相応、痛い目にあった。しかし、時代は大学の研究教育現場にもそのような数値計算手段の導入を必要としている。ならば、そこに至る道筋を整理し、トレス可能にしなければならない。さらに、地球の天気予報のための道具から踏み出して、GFDからの気象学・気候学、パラメタ空間に惑星気象・気候を位置付けことに使えるような数値計算世界に至らなければならない。そのような世界にいたることを目標に、地球流体の基礎方程式を導出・再検討したり、一次元放射対流平衡問題や南北一次元エネルギーバランス問題をトレスしたり、軸対称大循環論をトレスしたり、…、をはじめた。いくつかは論文にまで至った（Nakajima et al. 1992、Satoh and Hayashi 1992、Satoh 1993）が、ほとんどは研究にはならない水面下の仕事、マニュアル作りになった。地学セミナーと称して、対照されるべき地球や惑星の観測値・気候値のデータを集積することも試みた。後に沼口敦（2001年カヌー事故で死去、当時、北海道大学地球環境科学研究科助教授）のGCM開発が進展するのにもない、GCMセミナーと称して、佐藤正樹（現在東京大学大気海洋研究所教授）と沼口とがリードし気象庁の数値予報モデルの定式化を理解し、これを自分たちのドキュメント（モデル定式化解説、プログラム解説、コードリファレンス、使い方など）に落とし込むことも行った。地球流体力学セミナーを再起動し、人々が参集し情報を提供交換収集でき、若手の育成につながる場とすることにした。

1990年初頭までに筆者がやったことは、結局、京都の酒井・塩谷から、計算情報環境とその使い方、DCLなどのソフトウェアを東京に導入展開しただけである。遊園地をつくただけで、数値モデルの開発は、従来どおり院生たちが自分の研究のために自主的自律的に必要な開発を行っていたにすぎない。教科書の電子化・ライブラリ化はずっと先の話で、まずは、個体発生は系統発生をくりかえさなければならないという脅迫観念に犯されていた。ソフトウェア開発の状況を動かしていったのは、沼口である。沼口は気象庁数値予報モデルによる水惑星実験を継承し（Numaguti and Hayashi 1991a, b）、筆者と違ってソフトウェア能力も博高く、気象庁の数値予報モデルを良く理解するようになっていたが、研究教育現場用のソフトウェア・GCMが必要だという思想に影響を受けたか、もともとそのつもりだったか、博士課程にはいつか気象庁のモデルの理解を基に自身によるモデル開発に着手し、これを実現してしまった（Numaguti 1993）。沼口の手によるAGCM5.3がほぼ完成したのは東京大学気候システム研究センターが設立される前夜のことである。沼口はDCLのソフトウェア設計に大きな刺激を受けたように思う。DCLの開発では、Fortran77による書法をずいぶんと研究し、可読性の担保や、ENTRY文の活用による変数値の制御な

どあれこれ考案したのだが、沼口はこれらの書法を速やかに理解し、自分のソフトウェアに組み込んでいった。ソフトウェアのライブラリ化共有化という考え方は沼口にとってもフィットしたようで、ライブラリ化には積極的に貢献し、これをリードした。その優れた作品が、DCLの機能を活用しその上に作られたGTOOL3、格子点データ解析可視化ツール(ライブラリ)である。その特色は、数値モデルのデータI/Oをライブラリとして切り離し、モデル間でI/Oライブラリを共有できるようにしたこと、GTOOL3データ形式を提案してシミュレーションデータと観測データとの融合(容易な比較の実現)したこと、そして、手軽な解析可視化を実現したことである。データの属性情報が書き込めるヘッダーが用意されていて格子点データであれば定番の絵が機械的に作成される。GTOOL3の機能や構造、GCM本体との切り分け等含むソフトウェア構造と書法(変数名のつけ方やサブルーチンの呼び方など)についてはずいぶんと熱く議論したように記憶している。流体計算を含まない物理過程だけの鉛直1次元モデルや南北1次元モデルの切り出し、軸対称二次元モデル、鉛直水平二次元モデル、平面三次元モデル(球面では無くて二重周期境界のf平面モデル)などの様々な幾何学設定に、容易に対応できるソフトウェア構造を考案した。アイデアを提案すると翌日には実装プログラム案ができてくる、というペースでもあった。筆者は、沼口モデルやライブラリの仕様検討でコメントを述べた(だけに過ぎない)。設計方針や実装方針で沼口がもっとも頼りにしていた相棒は、山中康弘(現北大地球環境学研究院教授)であったように思う。筆者のところに議論(というよりは新製品のお披露目?)にくるころには、主要な検討は沼口・山中で終わっていた。沼口モデルAGCM5.3は気候システム研究センターの主力モデルのプロトタイプとなりその後センターで本格的な気候モデル化(MIROC)がすすめられ、さらにJAMSTECやNIESへも広がっていくことになったわけであるが、一方、沼口の思想は自由に参照・改変してもよいソフトウェア基盤の提供であったため、気候システム研究センター設立時の版でもって暖簾分けすることに同意してもらい、地球流体電脳倶楽部版AGCM5.3という形で固定公開された。これは沼口亡き現在も地球流体電脳倶楽部のサーバ上に上記の版が置かれている。90年代の初頭、中島雲対流モデルDEEPCONVと、沼口AGCM5.3が主力モデルとなり、これに竹広真一(現在京都大学数理解析研究所准教授)の回転球殻対流モデル(ブシネスク流体モデル)が加わって、地球流体電脳倶楽部ではGFD的視点での数値計算環境提供していますの最低限の格好がついた。

数値モデル群やデータ解析ツール群の共通基盤として、沼口のGTOOL3を進化させることは90年代中庸には懸案となっていた。これをFortran90化し、数値計算のI/O、「時計」、エラー処理等の汎用基盤ライブラリとして確立することには、豊田英司(現在気象庁)が東京大学大学院生/北海道大学委託時代にオブジェクト指向プログラム思想をもってこれに挑戦した。残念ながらFortranの範囲で解析可視化ルーチンをも含むGTOOL3のすべてを継承実装することは実際的ではなかったが(プログラムが複雑になりメモリ管理も困難であった)、Fortran90をもちいたプログラミングに関する経験の大きな蓄積を築いた。状

況を改善したのは塩谷（当時北海道大学地球環境科学研究科教授）で、オブジェクト指向スクリプト言語 **Ruby** に着目し、これをデータ解析に導入しようとしたことによる。**Ruby** の導入には当時北海道大学の数学の大学院生だった後藤謙太郎（現在株式会社シングラム）の貢献が大きき力となった。塩谷と当時北海道大学理学研究科にいた筆者とで **Ruby** のまつもとゆきひろを招いての講演会（1999年9月9日北大理学大講堂）を開催したりした。まだ **Ruby** 黎明期であり、そもそも **Ruby** で実数や配列をどう扱うか、のようなところから考えなければならなかった。当時京大 RASC（現在の生存圏科学研究所）助手に着任したばかりの堀之内武（現在北海道大学地球環境科学研究院准教授）はこれに大きく貢献した。**Fortran90** では無理がある（往々にしてコンパイラが対応していなかった）問題も、設計が一貫してオブジェクト指向であった **Ruby** においてはスムーズに解決することができた。結果、**Fortran** の役割は数値計算部分に限定できるようになり、**GTOOL3** は I/O 等の数値モデル基盤として進化させればよいことになった。豊田の後、歴代の北大院生、森川靖大（現在トライコーン株式会社）さらに佐々木洋平（現在京大数学教室）が引き継いで改造・改良はつづけられ、これは **Gtool5** となって現在に至っている (Ishiwatari et al. 2012)。一方、**Ruby** での解析可視化が実践的になったのには西澤誠也・大塚成徳（両者とも現在理化学研究所 AICS）・神代剛・水田亮（両者とも現在気象研究所）ら当時大学院生（多くは京都大学）だった人々の寄与が大きい。西澤の研究開発力により **GFDnavi** (Horinouti et al. 2010、Nishizawa et al. 2010) というネットワーク透過な解析可視化プラットフォームの試行までおこなうことができた。プログラム開発環境の整備においては森川が、ソースコードからコードリファレンスマニュアルの自動生成を **Ruby** で行えるようコード書法と生成ツールの整備を行った (森川 他, 2007)。現在では科学計算や解析を司るオブジェクト指向スクリプト言語は **Python** に席卷された感があり、少々残念ではあるが、21世紀00年代、**Python** の言語構造はあまりよくなく、**Ruby** はだいぶリードしていたように思う。こういった試みを種にして大きな流れに持っていきたいのだが、筆者の不徳の致す所か、そもそもわが国の文化の問題か、なかなか実現できないでいる。

数値計算モデル群の方も遅々として進化した。スペクトルモデル群は石岡圭一（現在京都大学理学研究科准教授）によるスペクトル計算ライブラリ **ISPACK** の開発 (石岡 1998) によりスペクトル変換の性能が大幅に向上し（実際、**ISPACK** の **FFT** は世界最速を争う水準にある）、21世紀にはいって、竹広と小高正嗣（現在北海道大学理学研究院助教）が中心となってこれに **Fortran90** のカバーをかけ、**Fortran90** の特性を生かして可読性を高めた地球流体力学のための階層的スペクトルモデル群 **SPMODEL** を構築提供するに至った (Takehiro et al. 2006)。展開関数をえらぶことにより、2次元や3次元、平面や球面の流体方程式が比較的容易に記述できることが特徴である。現在我々が用いている浅水モデル、球殻対流モデル (Takehiro et al. 2011) や佐々木の球殻対流ダイナモモデル (Sasaki et al. 2011) などはこの **ISPACK/SPMODEL** の一貫として提供されているソフトウェアである。また、**AGCM5.3** の利用者であった石渡正樹（現在北大理学研究院准教授）は、森川や当時

PDとして北大に滞在していた高橋芳幸（現在神戸大学理学研究科准教授）らとともに、力学過程としてこの ISPACK/SPMODEL を用いることにより、沼口 AGCM5.3 を全面的に書きかえて Fortran90 化することに着手した。Fortran90 化は沼口亡き後の懸案であったが、計画に着手した当初はオブジェクト指向にこだわりすぎて、実行性能が出ないばかりか、かえって可読性や可搬性を失う（プログラムセンスの低い一般 GFD 研究者・学生にはコードが難しくて数理モデルとの対応がつきにくく、そもそも読めない）という失敗をつみかさねた。しかし、東北大学の院生時代に、独力で独自コードの全球モデルの構築を行い火星の研究（Takahashi et al. 2003）を展開していた高橋の本格参加によって、FORTRAN77 の AGCM5.3 の性能をあまり落とすことなく、Fortran90 で書かれた、研究教育現場で実際に使い物になるモデルに進化させることができた。DCPAM（地球流体電脳倶楽部惑星大気モデル）と名づけられたそのモデル（Takahashi et al. 2016）は、現在、静力学近似の汎惑星気象・気候モデルとして我々の活動の中核となるに至っている。一方、雲対流解像モデルに関しては、非圧縮モデルであった中島 DEEPCONV を書き直して、これを準圧縮系にすることを小高と大学院生であった杉山耕一郎（現在松江高専）が行った。坪木和久（現在名古屋大学地球水循環研究センター教授）グループの CReSS（Tsuboki 2000）を参考にわざわざ新たなコードを作成したのであるが、その理由は、DCPAM とできるだけ同じ書法・変数名等で大気モデル群のソフトウェアをそろえて階層的なモデル群の名前にふさわしい形にしたかったからである。DEEPCONV による最初のプロダクトは杉山による木星大気の雲対流シミュレーション（Sugiyama et al. 2009）であったこともあり、未だ地形が未実装だったりする。実際、2010 年代の火星探査計画の立案に協力して行った着陸地点設計シミュレーションにおいては DEEPCONV は役に立たず、小高・杉山らは坪木グループに協力を依頼し、榊原篤志や加藤雅也らの助力を得てオリジナルの CReSS に対する火星設定化を実現、CReSS-Mars としてこれに着陸候補地点周辺の地形を導入してそこでの典型的な気象条件を探ることを行った。

4 汎惑星気象学・気候学的？計算

(ア) GFD 的な計算

ここで言う GFD 的な計算とは狭義の「GFD」、すなわち、放射や相変化・化学反応等々が関与しない、力学ワールドに閉じた数値計算である。「汎惑星」としてのこの方面のメインテーマは木星大気に象徴される縞帯構造の存在と磁場の存在である。現実の木星・土星の縞帯構造の説明や金星には磁場が無いことの説明には当然当該惑星の現象と呼ぶにふさわしい物理過程が導入されていなければならないが、そもそも、たとえば縞帯構造の生成と維持という問題は、大規模な計算機による長時間の積分が必要な乱流散逸問題でもあり、抽象化した単純な設定の下においてなにが起こるのか、未だにわかっていない問題であるといつてよい。現象を語るべき基本単語がまだ整理されていないのである。実際、Williams (1978) において提起された、回転球面二次元強制乱流による、木星大気を想像させる縞帯

構造の発現が、実は数値積分の途中経過でしかなく、系の最終安定平衡状態は大きな南北幅をもつジェット二・三本であることが示されたのは比較的最近のことである (Obuse et al. 2010)。二次元系といえども、あるいは、逆カスケードする二次元系であるからこそ、強制系での乱流エネルギーの平衡状態に至る数値計算はきわめて長時間の積分を要する計算となるためであった。

回転球面乱流あるいは回転球殻対流さらに回転球殻対流ダイナモは、ISPACK/SPMODEL によってかなり容易に着手できるようになった。それによって、Yoden and Yamada (1992) の回転球面二次元散逸乱流問題 (極高気圧渦生成問題) は、Ishioka et al. (1998) の高分解能計算を経て、これを浅水系に拡張することができた (Hayashi et al. 2007)。この間 15 年である。また、北海道大学の大学院生時代から MHD の考察に着手した佐々木は、ISPACK/SPMODEL の枠組みを整備しつつ、回転球殻対流ダイナモ計算を実現し、球殻外側境界条件を応力なし、下端境界条件を粘着条件とすることで、弱いダイナモ解を発見するとともに、その初期値磁場強度依存性と強いダイナモ解からの遷移を議論した (Sasaki et al. 2011)。MHD のからまない単純な回転球殻対流問題はダイナモ発現の基本場でもあり、現在、佐々木はその大規模長時間計算に挑んでいる。Obuse et al 2010 で見られたようなジェットの消失が、二次元的性質が発露するであろう三次元球殻対流系においても現れる可能性が、予備的な計算から示唆されつつある (気象学会 2017 秋発表予定)。

縞帯問題とは異なり、ガス惑星の赤道超回転問題に関しては、回転球殻対流による運動量再配分の結果は、凝った設定をあたえなければたいていは赤道超回転に至る。これは球殻内に存在する準二次元的ロスビー波の伝播特性と角運動量輸送の性質によるわりと硬い力学構造として理解される (Takehiro 2008)。しかし、この結果は近年ホットジュピターとして知られるような軌道が中心星に近い位置にあるガス惑星に関してあてはめてはいけない。近年の衝撃的な観測結果は系外惑星に関するものである。Louden and Wheatley (2015) はホットジュピター HD 189733b の明け方側と夕暮れ側のドップラーシフトを分離観測することに成功し、その平均東西風速を推測し、赤道超回転であることを明らかにした。このよう惑星では内部熱源による対流駆動ではなく中心星からの加熱駆動による循環が表層を支配しているはずであり、回転球殻熱対流のレジームにあるとは考えにくい。中心星に近いこのような惑星は自転周期が公転周期に同期する、同期回転状態にあるとされ (Louden and Wheatley (2015) はその上でさらにそのずれを解析した) る。一方、近年の GFD 的研究によれば、自転周期が遅く赤道変形半径が惑星半径程度以上になるような同期回転惑星では、大気は赤道超回転に至ることが予想されるようになった (後述)。なんと、このような設定の計算が天文観測によって検証される時代になってしまったのである。系外惑星の大気観測が現実のものとなり、ALMA の稼動に象徴される天文観測装置の進展は、より温度の低いあるいはより小さな惑星の大気循環の手がかりを与えてくれるようになりそうである。

(イ) 水惑星その後

実際に、世界でももっとも怪しい計算に最初に着手したのは石渡（当時東京大学で大学院生博士課程）であった。鉛直一次元モデルで大気放射と大気熱力学に関する指導を阿部豊（現在東京大学理学系研究科准教授）に仰ぎ、Nakajima et al. (1992) でもって暴走温室状態の構造を一応理解したつもりになったので、AGCM5.3 で Nakajima et al. (1992) の設定の三次元計算を行うという荒技に着手したのである。水惑星設定ではあったが、Hayashi and Sumi (1986) とは異なり、熱収支を閉じさせるべく沼（swamp）設定の惑星表面条件を用いた。最低限の水循環を表現し、鉛直対流は湿潤対流調節で表現し、凝結水はただちに降水として除去し、雲は存在しない。日射は吸収せず、灰色吸収係数を持つ水蒸気が唯一の吸収物質である。構想から初期成果発表（Ishiwatari et al. 1998）を経て本格的論文の完成（Ishiwatari et al. 2002）にいたるまで約 10 年かかった（幸いにして石渡は北海道大学地球環境科学研究科助手の任にあった）。やってみると、通常の地球大気でよく知られている状況とは異なる状態を計算するのであるから当然であるが、スキームの精度が足りなくて放射伝達がうまく計算できていなかったり、大気波動が暴れて長時間計算ができなかったり、あまたな問題が噴出した。気候状態を求める三次元流体計算であるから、計算時間をかせがなければならず、潤沢な分解能をとることができない。切ったり削ったりを繰り返してなんとかパラメタ空間を押さえたのである。三次元化しても暴走温室状態の発生は、結局鉛直一次元モデルでの説明と大差なく、全球平均の入射エネルギーが鉛直一次元モデルで定義される射出限界を超えたところで概ね発生することが示された。いずれにせよ、この実験は暴走温室状態に関する世界初の GCM 実験となった。

石渡のさらなる挑戦は、この暴走温室状態を許容する水惑星気候の太陽定数依存性を調べることで、Budyko-Sellers 流の気候図を完成させることであった（Ishiwatari et al. 2007）。Nakajima et al. (1992) の放射パラメタでは、全球凍結状態と暴走温室状態が多重解として共存し、氷なし解はかなり限られたパラメタでしか存在しなかった。地球環境と類似の環境をもつ系外惑星の可能性を考える上で、これもまた先駆的な仕事となっており、今日では、太陽定数の増加に対しては、全球凍結解から暴走温室状態に環境がジャンプする可能性があることは良く知られるようになっている。一方、本家の阿部は、水（海洋）の量が有限であった場合に着目して、その気候を GCM で調べることを進めた。これは優れた発想であった。水の量が有限であることにより、惑星状での水輸送の効果が顕著に現れる。過去の火星気候への示唆や生命生存可能領域への示唆を含む様々な興味深い結果を得ることになった（Abe et al. 2005、Abe et al. 2011）。石渡らは、これに対するに、どうやら水（が潤沢な）惑星が伝統芸能化してしまった感があり安直におなじ設定を繰り返している感が否めないが、系外惑星観測の進展とともに、再び水惑星（あるいは海惑星）の気象学・気候学は注目される対象となってきた。惑星海洋を動的に扱う結合モデルでの惑星気候学にむかって、今度は神戸大学院生の河合佑太が現在歩を進めつつある。

水惑星の気候計算のパラエティエーの一つとして我々が行った実験に、同期回転惑星の気

候というのがある。同期回転惑星とは、公転軌道が中心星の近傍にあり、潮汐相互作用により自転周期と公転周期が一致し、惑星の半球が常に昼、残りの半球が夜という状況におかれた惑星である。同期回転惑星は系外惑星に数多くその存在が期待されているが、特に、M型星であるならば中心星の近傍でも、岩石が溶ける、というような高温にはならないだろうことが期待される。そのような惑星は暴走温室状態には至らず、生命生存可能惑星であるのか、系外惑星が多数発見されるようになり、こういった問題に人々が興味をもつようになった。これには神戸大学の院生だった野多哲史（現在京都大学理学研究科博士研究員）が水惑星設定の下で挑戦し、平均入射エネルギーが鉛直次元モデルで定義される射出限界を超えなければ、同期回転水惑星は比較的マイルドな環境に保たれることが示された。これはAGCM5.3からDCPAMへ移行しての初の論文作品となった(Noda et al. 2017)。この仕事、計算に着手したころは決して遅れてはいなかったように思うが、あれこれこだわっているうちに5年以上の年月を費やし、残念ながら後塵を拝する研究となってしまったのは少々残念である。惑星環境の怪しい研究が、天文学の中心的課題になってきたために、普通の意味で競争が厳しくなってしまった（進歩が早くなってしまった）からである。系外惑星の研究はホットジュピターの発見でブームとなり、00年代には先に言及したようにホットジュピターでの大気循環構造という見地から同期回転惑星の大気大循環研究は始まっていたのであった。同期回転惑星の気象において興味深い発見としては、自転角速度の遅い同期回転惑星では、大気大循環は赤道超回転となることがあったが、これはすでにShowman and Polvani (2011) でかなり詳しく論じられていた。そのメカニズムはいわゆるロスビー波の低緯度から高緯度への射出ではなく、熱強制 Matsuno-Gill パターンによる赤道東西風の加速であった。Matsuno-Gill パターンには赤道加速構造が内在されていて、解としては矛盾的（強制散逸波であって中立波ではないから非加速定理の範疇外）であったということに気づけなかったのは、松野の末裔として赤道波に多少心得があると自負していた身にはかなり悔しい。しかし、同期回転ではないが遅い自転角速度を持つ金星大気の超回転問題でも、熱潮汐波という形を介して同じ構造が関与している可能性があり、このあたりの解の接続が気になる。まだまだこれから楽しめそうな問題である。

水惑星の古典的実験となった Hayashi and Sumi (1986) の延長では、暖水域影響実験というのをしばらくおこなっていた。熱帯西太平洋域サイズの暖水域の存在はどのような影響を降水分布に統計的にあたえるのか、という問いである。この問題には東京大学の大学院生であった保坂征宏（現在気象研究所）が AGCM5.3 で着手し、暖水域の西側に乾燥領域ができることを発見した (Hosaka et al. 1998)。豊田はその原因を探るべく暖水域のアンサンブルスイッチオン実験を実行し、ノイズの大きな T42 レベルの分解能の降水分布生成の初期発展を追跡することに成功した (Toyoda et al. 1999, Nakajima et al. 2004)。これらは結構野心的ないい仕事だと自己評価しているが、提唱したメカニズムがマイナーであった（ロスビー波応答に伴う大気加熱による対流活動の抑制）ためか、時期を逸した（より現実的なモンスーン場で議論する雰囲気であった）かで残念ながらあまり知られていな

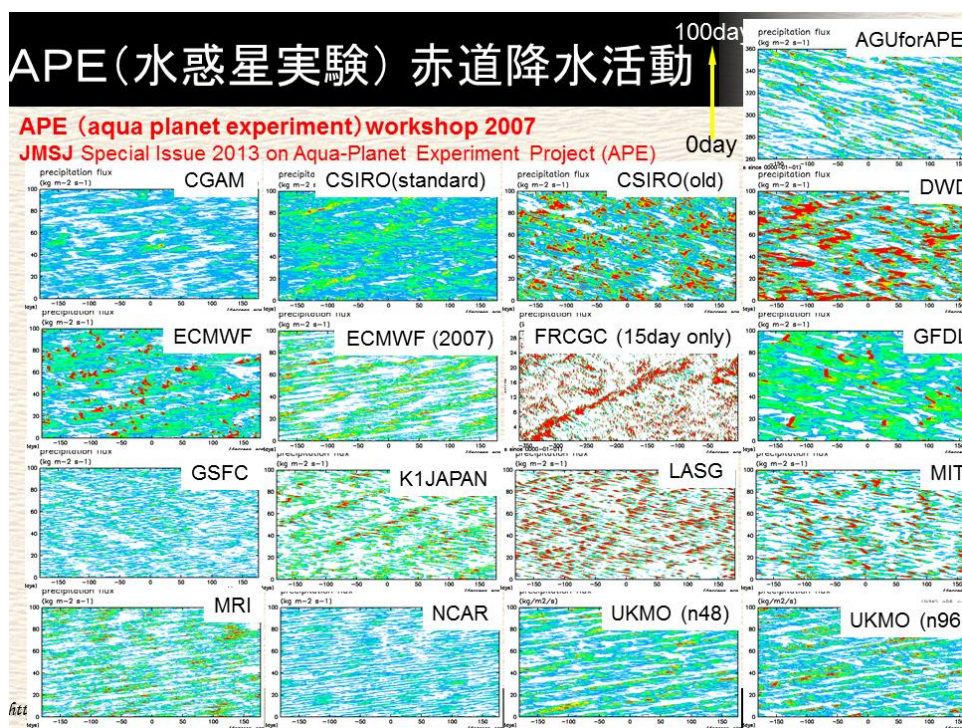


図 1：水惑星国際比較実験（The APE Project）での、各グループモデルの赤道降水の時間経度分布。FRCGC(いわゆる NICAM)を除き 100 日分が表示されている（山田由貴子作成）。

い。現実の暖水域西側の降水減少はロスビー波応答に伴う南北からの低水蒸気塊の移流によるといわれている（Adam Sobel、私信、FDEPS2016にて）。

そんななか、Neale and Hoskins (2000) は、このような水惑星実験を大気大循環モデルの標準テストとして位置づける提案を行い、実際、国際水惑星比較実験（The Aqua-Planet Experiment Project）が実施されることになった。その全貌に関してはプロジェクトの取りまとめを担っていた Michael Blackburn によるページに詳しい（<http://www.met.reading.ac.uk/~mike/APE/>）。水惑星設定（海面水温分布は東西一様のみならず暖水域設定も含む）では、降水活動に対して強い強制となっているであろう陸の存在が無いため、モデルの物理過程の選択と実装の違いが、降水分布の違いに如実に反映することになる。モデル相互比較にはもってこいの設定であると、理論家が思うのは当然であった（正解が無い設定での実験を批判する向きもあった）。参加した主要グループは IPCC AR4 で用いたモデルを Neale and Hoskins (2000) が指定する水惑星設定にして走らせてデータを提供した。その収集と解析には北海道大学理学研究科の大学院生だった山田由貴子（現在、藤澤、総務省統計局）が大きく貢献した。図 1 は山田によって作成された各グループの赤道域降水活動の時間経度分布の、2007 年に銚子で開催したワークショップ時での暫定報告図である。各モデルの降水特性がみごとにバラバラであったことがわかる。我々は、JAMSTEC の地球シミュレータセンター（当時）にいた大淵済（現在神戸 CPS 研究員）の呼びかけに応じて AGUforAPE というグループでこのプロジェクトに参加した。CCSR/NIES AGCM ver. 5. 4. 02 をベースに地球シミュレータに最適化された AGCM であ

る AFES (AGCM for the Earth Simulator : Ohfuchi et al. 2004、 Enomoto et al. 2008) を用いての参加であった。開始時、地球流体電脳倶楽部のモデルは AGCM5.3 であり、IPCC のモデル群とはレベルが違っていたので、直接の比較実験にはこれを用いなかった。AGUforAPE グループは地球シミュレータの能力を活用して当時の最大分解能での計算を実施してデータを提供した (Yamada et al. 2005)。APE の膨大なデータを図表にまとめた David L. Williamson の超大作である APE Atlas (上記 APE ページからたどれる) を経て、我々の報告 (Nakajima et al. 2013a、 2013b) などを含む国際水惑星比較実験の報告は、2013 年の JMSJ の特集号 91A として公開された。巻頭論文 (Blackburn and Hoskins 2013) は APE 哲学である。モデル相互比較実験においては、モデルの振る舞いの違いが如実である場合には、モデルになんらかの問題点が存在していることは明らかになり、振る舞いの違いからモデルのチューニングの手がかりも得られることはある。水惑星実験の場合は、スーパークラスター的な東進降水構造を実現させることは、CAPE をためるなどして積雲加熱を上部対流圏に積み上げるように積雲パラメタリゼーションを調整するとその可能性が上がることなどは予想できるようになった。しかし、振る舞いの違いがどのように発生したのかを細かく追跡することは容易ではない。互いに独立複雑に進化したモデル間の実装の違いを完全に消去することは困難だからである。チューニングにより振る舞いの違いが見えにくくなったとしても、複数の実装の影響が相殺された可能性は否定できない。国際水惑星比較実験に参加してみて、自分たちのモデルに、他のモデルの物理過程を差し込んでみるのでなければ、振る舞いの違いの原因にはなかなか近づけない、少なくとも体感できないことを実感した。

(ウ) 放射対流計算

放射伝達と鉛直対流という軸は、全球熱バランスと大循環という軸と対をなす、大気構造考察の基本軸の一つ、Manabe and Strickler (1964)の延長上に位置し、惑星大気構造を議論する上でも要でもある。中島は、放射(熱的)強制にバランスする対流活動の統計的振る舞いを陽にもとめてこれを観察するという目的で DEEPCONV を開発し、もっぱら 2次元世界に限定することにより大領域・長時間計算を行い、雲対流の統計的性質の研究を実現した (Nakajima and Matsuno 1988, Nakajima, 2011) のであったが、これを用いて湿潤対流の一般論(凝結分子量効果や断熱線と凝結線の勾配効果など)を試み (Nakajima et al. 1998)、木星大気対流圏での分子量効果(大気主成分である H_2 に比べて H_2O はずいぶん重たい)の重要性を指摘した (Nakajima et al. 2000)。小高は DEEPCONV を火星大気に改造、火星大気の放射伝達の簡便軽量なモデルを導入し、火星大気の日変化を念頭においた対流計算に用いた (Odaka 2001、 Odaka et al. 2001)。構想当時の 1995 年、火星大気の対流計算を試みる者などまだ見当たらず、熱的強制を外から与えた予備計算 (Odaka et al. 1998) は、たぶん、初の試みであったと思う。しかし、90 年代後半の米国の火星探査シリーズの特に、Mars Pathfinder の着陸(1997 年 7 月)と Mars Global Surveyor の軌道投入成功(1997 年 9 月)後、火星気象学は大ブームとなり(返す返すも日本の火星探査

機「のぞみ」の失敗は残念である)、日変化計算に関してもあつというまに、地球気象学レベルの圧縮性3次元計算が主流になってしまった。

CReSS を参考に小高・杉山によって遅ればせながら準圧縮化された DEEPCONV が最初に扱った対象は木星大気であった。杉山は、雲対流の運動計算に着手する前段階として雲層の熱力学を極め、木星雲層研究の老舗である Weidenschilling and Lewis (1973) の熱力学平衡雲層モデルを再考し、任意の原子組成と反応生成物に対するギブスの自由エネルギー情

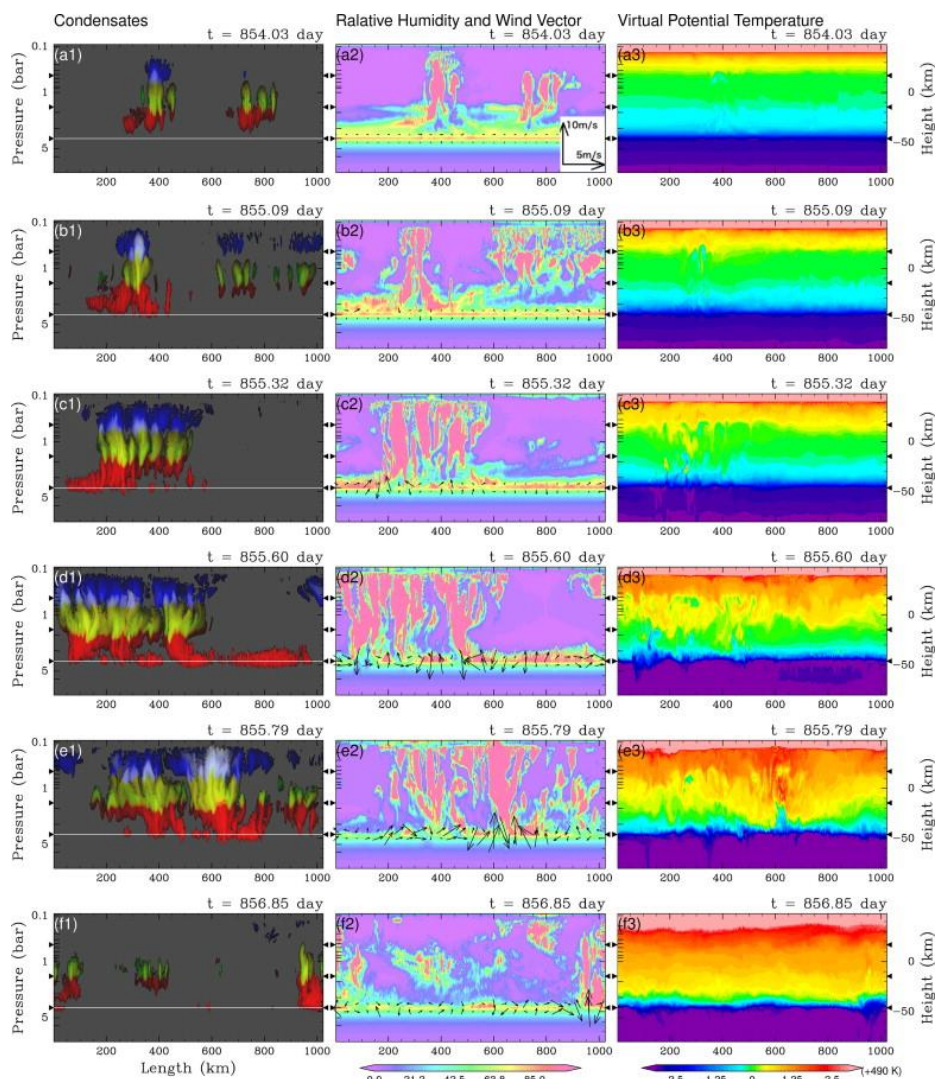


図2 2次元準圧縮モデルで表現された、 H_2O 凝結により激しく混合している時期の木星雲層の鉛直水平断面図の瞬間図。上から下に向かって時刻が進行している。左から順に、雲物質の混合比、相対湿度と H_2O 凝結高度付近の風速場(矢印)、仮温度である。雲物質は H_2O を赤、 NH_4SH を緑、 NH_3 を青で表示し、複数物質が存在する場合は三色を物質量に比例混合させて表示している(よく混ざっている領域では白表示される)。左パネルの白線は H_2O 、パネル枠の▲は NH_3 , NH_4SH , and H_2O のそれぞれ凝結高度を示す。Sugiyama et al. (2014) から転載。

報から平衡物質分布を計算するプログラムを開発 OBORO として地球流体電脳倶楽部サーバ上に公開、外惑星大気雲層の成層安定度と鉛直物質分布の統合的な議論を実現した (Sugiyama et al. 2006)。その熱力学的知見の蓄積を DEEPCONV の地球雲微物理過程に導入して、Nakajima et al. (2000)から歩を進めて、凝結性成分として $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{S} \cdot \text{CH}_4$ を組成として持つ $\text{H}_2\text{-He}$ 大気の雲層モデルを完成し (Sugiyama et al. 2009)、木星大気の雲構造の議論に世界で初めて力学的効果を導入した。三種の雲が存在するのでカラー表示を工夫してその記述を行ったところが楽しい。

Weidenschilling and Lewis (1973) の熱力学平衡雲層モデルで予想されるような雲の三層構造 (NH_3 雲、 NH_4SH 雲、 H_2O 雲) は、 H_2O の凝結が引き起こす間歇的な強い鉛直混合によって破壊され、定常的には見られない可能性を示した (図 2、Sugiyama et al. 2014)。

DEEPCONV によって切り開かれたもつとも未踏な(怪しい)領域は、北海道大学理学の大学院生だった山下達也(現在国土地理院)による、大気主成分が凝結する場合の対流の数値的研究である (Yamashita et al. 2016)。凝結性成分が存在する大気においては、湿潤対流の効果が働くと大気の鉛直構造は乾燥断熱線ではなく湿潤断熱線に従う、というところは我々が良くなじんでいるところであるが、凝結性成分が大気の主成分になると、この断熱線が一本しか引けなくなる、つまり、飽和蒸気圧曲線そのものになってしまう。凝結性成分が高々パーセントのオーダーしか含まれない地球大気では、湿潤空気塊への凝結の効果はいわゆる「凝結加熱」と

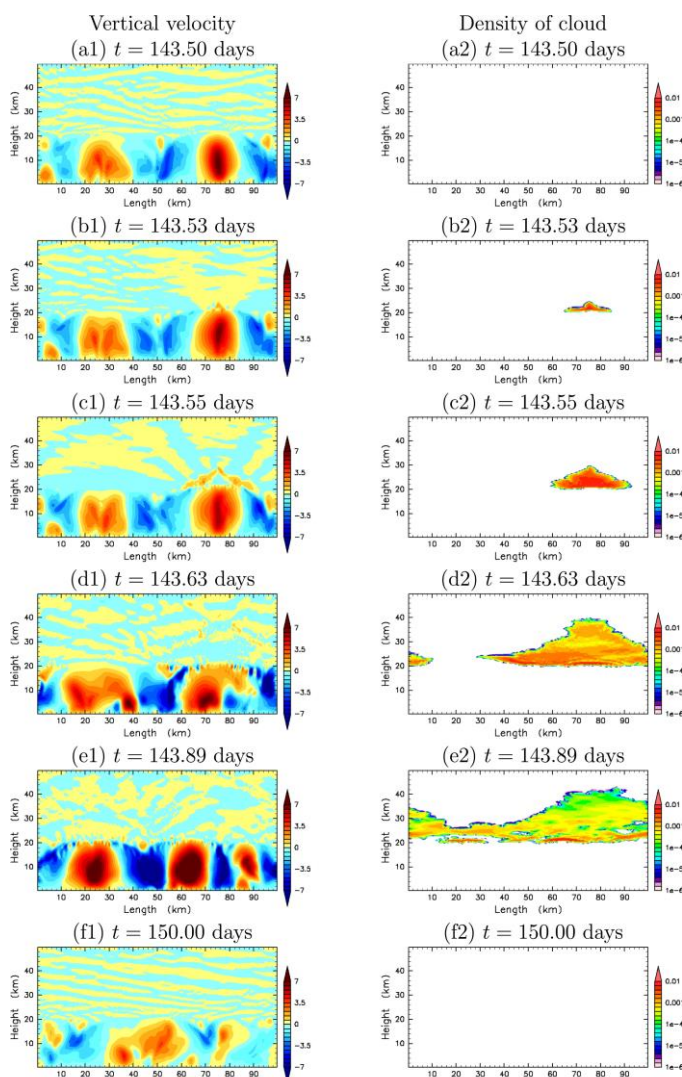


図3 主成分凝結対流の時間発展の様相。左：上昇下降流 (m s^{-1})、右： CO_2 氷雲密度 (kg m^{-3})。臨界可飽和度 1.35、雲凝結核数 $5.0 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$ 。Yamashita et al. (2016)から転載。地表面から凝結高度までは乾燥対流で強い上昇下降流が見られるが、凝結層は安定成層であり、凝結領域の先端で貫入する上昇流が見られるのみ、凝結層の他の部分では重力波様の構造をとる。

いう形で考慮すればまあよい。しかし、凝結性成分が大気主成分である場合には、準静的な仮定をおいてしまうと、凝結層では大気構造そのものが飽和蒸気圧曲線に拘束され、かつ、凝結空気塊といえどもやはり飽和蒸気圧曲線上に存在しなければならないので浮力が生じえない。このような状況は、現在の火星環境でも極域であれば生じえるが、空間的時間的に限られた現象であるのに対し、初期の火星大気ではより大規模に生じていた可能性がある (Colaprete and Toon 2003 ; Mitsuda 2007、北海道大学理学研究科倉本圭の指導で、初期火星での雲層による散乱温室効果を論じた光田千紘による博士論文)。このような層の放射冷却対流は、大気運動と雲物理過程を陽に導入して準静的条件をはずすことにより初めて生じるわけであるが、この問題に挑戦したのが山下であった。得られた対流構造は、準静的な熱力学的拘束をどうはずすか、すなわち、雲凝結核数と臨界可飽和度に大きく依存する。いずれにせよ大きな浮力は得られないので、地球大気の積雲対流のような強い上昇流域は生じない。また、山下の計算では、温暖な火星環境を雲層の散乱温室効果でもたらすには、雲量がたらない、という結論になった。この結論は、二次元性の仮定の有効性という問題に加え、雲微物理の詳細に大きく依存するという問題があるので、三次元空間でのパラメタ計算により解の構造の固さを抑えて確認される必要がある。

5 おわりに：今後の開発、ライブラリ化と多様性の担保

以上のように、地球流体電脳倶楽部としてアーカイブしてきた資源でもって、それなりの怪しい世界を計算することは、ある程度できるようにはなった。が、明らかに、ほとんど伝統芸能の力学計算の域を出てはおらず、「汎惑星気象・気候モデルをめざして」というにはまだまだである。現在、放射伝達や物質科学的側面に関しては、阿部にはじまり倉本そしてはしもとじょーじ（現在岡山大学准教授）らの指導の下、DCRTM プロジェクトが進行中であり、北海道大学大学院生の高橋康人が外惑星大気の放射計算を根気強く行っている。また、大西将徳（現在京都大学学術研究支援室リサーチ・アドミニストレータ）は厚い H_2O 大気の放射計算を試みてきたが、これを受けて現在は高橋が、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 大気の暴走温室状態から暴走凝結状態まで（つまり生命生存可能領域全体）をカバーすることを念頭においた汎用放射伝達モデルとそのための放射パラメタセットの提案ならびにソフトウェア構造の設計、鉛直次元モデルの構築と DCPAM への実装を試行しているところにある。海の存在、海氷・氷床の存在に関しては、河合が海惑星に着手し結合系を試みてみたといったところであろうか。地球流体電脳倶楽部では、ISPACK、SPMODEL、DEEPCONV、DCPAM、DCRTM、OBORO、…、といった個々のソフトウェア資源の開発活動を束ねて全体を DCMODEL プロジェクトとすることにより、GFD 計算から汎惑星気象・気候モデルまでをカバーしようという志の実践となしている。DCMODEL は各要素モデルへのエントリである (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode/>)。

「怪しい計算」と言ってきたものは、それらが理論的興味に基づいて着手されたにすぎず、観測による検証が困難、あるいは、不可能な題材たちだからである。「危ない研究」と

も言われる。論考の正当性を担保する方法は、結局、あの手この手で同じことをやってみて同じ結論に至るのか、という論考の厚みを増やすことでしかない。これもまた「ある論考を正当化するためには十分たくさん数の研究を行なえばよい」と揶揄される道ではある。そのような論理の縮退に陥らないようにするためには階層的モデル群の存在が必須である。考察の枠組みや物理対象の異なるモデルによる論考を組合すことによって、要素過程や結果の解釈の正当性を担保しつつ論考を進めることを、できるだけ簡便に実現してくれる思考環境を用意して、問題に臨むということである。要すれば、単に、地球大気や海洋の構造を調べる際に人々が行ってきたこと、現に行っていることを、仮想空間で繰り返す必要があると言っているに過ぎない。また基本的な知識はやはり地球での経験によって積み上げられているので、その知識を使うことは、結局、地球のことを良く知っているかという問題に常に帰着する。地球に関して積み上げてきた知識のみならず、その積み上げ方をも含めてこれを精査し、とある近似やそれを正当化するモデルはどういう条件で得られてきたのかをいちいち再検討し、必要に応じてこれを作り直す、という膨大な作業をサボらず地道におこなうことしかない。このような方法論的必要から、それが数少ない同好者と有限の時間でどの程度可能かはさておき、我々はその中身を理解しているモデル群を近しい関係者で一セット有していることに固執してきた。

太陽系の各惑星は、そのような作業の数少ない検証点として位置している。地球大気に関して培われてきた大気循環構造の知見や様々なパラメタリゼーションが果たして機能するのかしないのか、それらを実証的に試すことが期待できる貴重であり、場合によっては地球に関する理解を深め、精密化することにつながる。よく知られた挑戦的課題は、火星の全球ダストストームの発生消滅の謎（火星表層のような熱容量の小さな世界で、全球ダストストームのような顕著な現象が季節進行に同期せず、発生する年としない年があるのはとても不思議、たとえば **Kahre et al. 2006** 参照）、金星大気のスーパーローテーション、木星・土星大気の縞帯構造の力学、木星・土星大気の赤道超回転と天王星・海王星大気の赤道亜回転、…、などが挙げられよう。これらに対する手がかりは望遠鏡による遠隔観測もさることながら惑星探査による現場観測が大きな力を発揮する。火星に関しては前世紀の終わりから探査観測が再開され、金星に関してはまさに今日「あかつき」によってデータの収集がすすめられつつある。**JUNO** による木星大気画像はいまさらながら画像観測の重要性を印象付けた。われわれの想像力は限られており、やはり、太陽系探査の進展は大きな駆動力となるのは否めない。

このうち特に金星大気の大循環に関しては、**Lebonnois et al. (2013)** にまとめられた **GCM** 力学コア比較実験の結果はなかなか衝撃的であった。金星大気は放射時定数が長く長時間積分が要求されるため、その **GCM** は比較的分解能の粗い軽量なものが用いられてきたのではあり、波と平均流の相互作用の非線形発展は想定はされていたものの、単純な熱的強制に対する東西平均風応答がモデル（力学コア）によって全く違う、ということの人々は予期していなかった。近年、**Yao and Jablonowsk (2015)** は、**Held and Suarez** 力学コ

Genealogy of Japanese models for planetary atmospheres

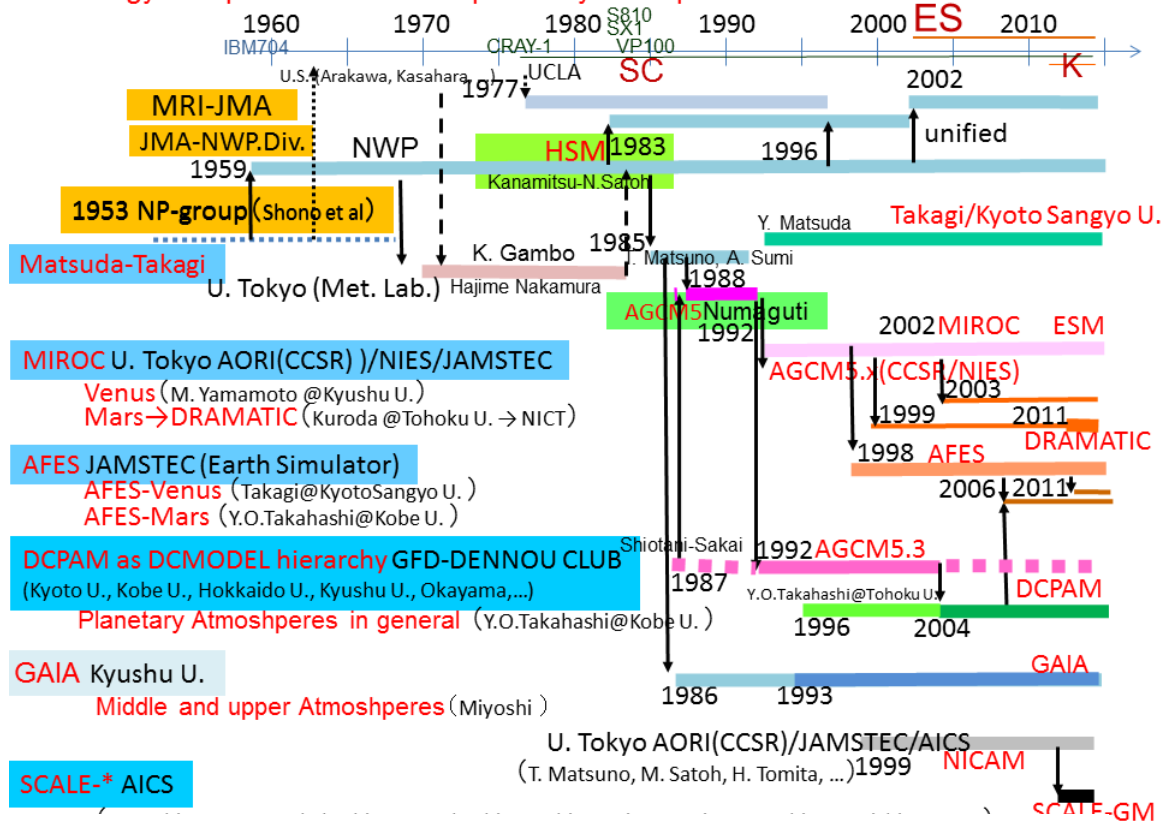


図3 わが国における惑星大気研究のための主要な GCM たちとその系図

ア標準実験 (Held and Suarez 1994) の高高度領域化実験の結果を報告しているが、これは我々が未だモデル内での力学表現をあまりよく理解していないことを暴露している。Held and Suarez 力学コア標準実験は、対流圏の場の比較を念頭に設計されているが、これを成層圏に拡張すると、QBO 的振動が発生すること、しかもその表現は、力学コアの実装に強く依存することが示された。実は、現在、樫村博基 (神戸大学特任助教) が、富田浩文 (理化学研究所 AICS) グループの SCALE-GM (球面正二十面体非静力学コアモデル、SCALE= Scalable Computing for Advanced Library and Environment、<https://scale.aics.riken.jp/>) を用いて、これを高分解能非静力学全球惑星大気シミュレーションに用いるべく、高高度化実験を行っているのであるが、その基礎実験の一つとして Held and Suarez 力学コア標準実験をおこなったところ、QBO 的振動を「発見」、文献を調べたところ上記報告を見出した次第である。樫村は現在「京」による高分解能実験を進めており、逐次発表されると思うが、QBO 的振動の発現とその数値的収束性にはまだ謎な部分が多い。金星大気の力学コア問題も、単に分解能の問題、ではすませられない奥行きが想像されないでもない。「あかつき」撮像によりなんらかの「答あわせ」が進むことを期待したい。

このように、我々の関係者の研究においては、AFES、CReSS、SCALE、(現在の) 気象庁予報モデルなど地球流体電脳倶楽部外のモデルたちを用いて数値実験を行う場合も多々ある。AFES は地球シミュレータに最適化されたソフトウェアで軽快に動いてくれる。

SCALE シリーズは「京」で（も）稼動する優れたものである。「京」に象徴される今日的な HPC（高性能計算機）環境を活用するためには、その環境に最適化されたソフトウェアで臨まなければ謳われている「高性能」を活用することは困難であるが、その最適化は容易くはない。AFES に関しては、国際水惑星比較実験に参加して以来、これを地球型惑星すなわち火星や金星の設定に変更して高分解能実験を実現するプロジェクトをすすめてきた。火星に関しては、DCPAM にも実装されている高橋の火星物理過程をこれに導入、AFES-Mars としている。金星に関しては、松田他の金星力学グループの協力を得て AFES を放射強制を外部的に与える金星力学モデル化し、AFES-Venus として数値実験に供している。杉本憲彦（慶応大学准教授）はこの AFES-venus を用いて、雲層低安定度層が傾圧不安定波をもたらすこと（Sugimoto et al. 2014a, b）、安藤紘基（京都産業大学博士研究員）はその計算結果に欧州の探査機 Venus Express で見出されていた周極低温域と類似の構造を見出した（Ando et al. 2016）。現在、樫村は「あかつき」で観測されたストリーク構造と類似の構造を計算結果から抽出し、その解析を進めている。また、西澤は SCALE-LES（Nishizawa et al. 2015）に Odaka et al. (2001)の放射加熱を与えて、火星表層の日変化対流層の大領域高解像度実験を行い、生じる渦（旋風）の統計的性質をあきらかにした（Nishizawa et al. 2016）。その計算結果を用いてのダスト巻上げに関する解析を、現在、村橋究理基（北海道大学大学院生）が進めている。

2011 年、CBLEAM (<https://cbleam.aics.riken.jp/>、「気象・気候モデルのための共通基盤ライブラリ環境」の構築) という活動を理研 AICS の富田・西澤が中心になって立ちあげた。曰く「現在、国内・外において、複数の気象・気候モデルが開発されている。それぞれのモデル開発グループでは、ほぼ独自に各モデルコンポーネントの開発を行なうことが多く、それによりモデル間の独立性を保ってきた。このモデル多様性は、数値モデル研究における健全性にとって非常に重要なことである。しかしながら、今後より効率的に成果を生み出すためには、各モデルで共有できる部分を、協力して整備していくことが必須になると考えられる。特に、今後、複雑化するコンピューターアーキテクチャや、データ爆発へ対応するためには、計算機科学との連携が不可欠であり、各モデルグループが別々に対応することは困難である。そこで、日本での主要なモデル開発チームが参画し、気象・気候モデルのための共通基盤ライブラリ環境の開発を行うこととなった。モデルコンポーネントの統一インターフェースの策定、力学過程・物理過程、IO 等モデル間で共有できるコンポーネントの開発、ドキュメントの整備、テストケースの整備などにより、気象・気候科学が今後計算機上でより効率的に成果を生み出すための枠組みを創出する」。国際水惑星実験のところでも述べたように、モデル比較実験を経験すると、今度は自分たちのモデルの中にとある物理過程の異なるサブモデルを導入して比較実験を行うことの必要性を感じる。複数グループが共有できる共通の枠組みが考えられれば、このような実験の実行が容易になる。汎惑星気象学・気候学においては、地球の気象・気候に精通したモデル（たとえば数値予報課の天気予報モデル）の物理過程を移植して比較実験を行うことにより、

地球で蓄積された知見の再検討がより容易に行えるようになる。HPC の進展に応じた最適化手順が基盤的なソフトウェアで吸収できれば、物理過程の開発者はこれを気にしないでモデル開発に勤しむことができるだろう。これらのすべてをとあるグループがそれぞれに行うことは困難である。放置しておけば体力勝負となり、開発力が維持できる一つのモデルしか残らなくなるかもしれない。あるいは、可視化ソフトウェアが外国製でもかまわないと思うように、大気モデルも外国製で十分とされ（実際その傾向はある）、わが国からモデル開発が消滅してしまうことになるだろう。

モデルはそのモデルが狙う目的（たとえば天気予報）にあわせた設計思想の下で構成される。人的資源を集中しひとつのモデルにフォーカスしてしまう（あるいはせざるを得なくなる）と、そのモデルの目的と設計思想のみが許されることとなり、他の方向性への展開がやりにくくなる。できるだけ多くの多様性を許すようにしておくことが科学的にのぞましい展開である。図 3 は惑星大気研究に参加しているわが国の主要な GCM たちの系図をつくってみたものである。そのほとんどが沼口の AGCM5.3 からはじまったといっても過言ではないが、ここで強調しておきたい重要な点は、いずれにせよ、個々のモデルにはその目的と思想があり、特に、対象の物理的構造が良くわからない惑星大気に対しては、それを研究するモデルが多様であることがその活発さの証であるということだ。

CBLEAM はなかなかの野心的な呼びかけであり、実現は遠い彼方のような気もする。実際、2011 年、気象庁数値予報課を含む国内の主要モデルグループへの呼びかけを行い、好意的な反応は得られたが、ソフトウェア整備の実働部隊を組織する予算の獲得には至っていない。現在も主要メンバーによって努力が続けられているが、歩を進めるには至っていない。わが国では残念ながらソフトウェアを作り直すこと（整理し共通基盤化し人々に提供すること）は研究とはみなされず、これに研究費がつくことはなかなかない。しかし、複雑化するソフトウェアと高度化する計算機を前に、汎惑星気象・気候モデルは言うまでも無く、気象・気候モデルの開発を今後も続けていこうと思うのであれば、このような方針、すなわち、共通化できる部分は共通化し、多様性を維持したいところはこれを維持できるようにすることは必須である。

謝辞：

なにやら長い文章になってしまった。北海道支部創立 60 周年に際し、その「かたりべ」の一人として登壇せよとの指令を稲津將教授より受けたものの、さて、北海道支部員だったころは気象学会運營業務にあまり貢献してはおらず、さらには、北大を離れてはや 10 年たちで、少々困惑した。1990 年代以降の大学院重点化や大学法人化のまっただなかを北海道支部にて過ごしたので（今も文科省と国立大学たちは、政府の基本方針に従い、あきもせずはずっと「改革」とやらを続けているし）、あることないこと尽きることなく話ができそうだが、そういう話を聴きたいわけではないに違いない。結局、「汎惑星気象・気候モデル」という伝統芸能のお話をすることにした。改めて振り返ってみるに、怪しい気象

学・気候学の数値計算は北海道大学の理学研究科時代にかかなりの進展をみたことにいまさらながら気が付いた。それは、筆者がよくも悪しくもそのような目論見をもって着任した帰結ではあるが、それを実現したのはもちろん（もう中堅になってしまった）若い衆があきれたばかりの研究につきあってくれたおかげである。ここにまずは謝意を表しておきたい。以下この機会に「かたりべ」部分も少々。

筆者は大きく三度にわたって北海道の地（北大）にお世話になった。一度目は大学院博士課程1～2年だった1983-84年。妻が札幌管区气象台に着任、二年間勤務していたことにより、春・夏・冬は、海洋学の竹内（竹内謙介助教授、当時）部屋の居候となり、大島院生（大島慶一郎、現在低温研教授）の邪魔をしながら、ITCZの安定性の議論などしていた。東大と北大の大型計算機が同じHITACであったのも好都合であった。ふりかえてみるに、ずいぶんとにぎやかな時期であったように思う。大気海洋の力学を回転成層流体の力学として共通の枠組みで扱う地球流体力学という考え方が浸透し、Pedlosky (1979) や木村竜治 (1983) などの地球流体力学の教科書が相次いで登場したころであった。一方、ひまわり初号機が打ち上げられ、FGGEのデータが出揃い、Wallace and Gutzler (1981) や Gambo and Kudo (1983) などでテレコネクションパターンが描かれ、全球数値天気予報が実現しようとしていた。衛星観測によって初めてその全貌が掌握されたのは1982-83年 ENSO であり、Philander et al (1984) などの大気海洋相互作用の数理的定式化が登場した。そんな雰囲気でもあり、竹内氏にはずいぶん遊んでもらったように思う。一方、84年当時の札幌管区气象台台長は、我らが怪しい研究のルーツである Komabayashi (1967) の駒林誠氏であったと記憶している。もっとも、その当時はまだ Nakajima et al. (1992) 以前であり、駒林台長が暴走温室状態とかいう怪しい問題を世界に先駆けて（実に Nakajima et al (1992) の25年も前に）考察されておられたことなど、知る由もなかった。記憶によれば气象台では Pedlosky の教科書の読書会をやっていて、GFD な話題をあれこれ議論したように思うが定かではない（議論したのは全く別の時期・場所であったかも）。

二度目は地球環境科学研究科大気海洋圏環境科学専攻（当時）立ち上げの1994-95年の1年間であった。北海道大学では大学院重点化が難産しており、地球環境科学研究科は状況をブレイクするべく、1977年設立の環境科学研究科を母体にこれを発展改組する形で1993年に立ち上げられた部局であった。理学部長として重点化に向けて苦勞していた堀浩教授はじめとする理学部からの人々と低温研の人々などが研究力の牽引役となって重点化を実現したと聞いている。大気海洋圏環境科学専攻は一年遅れの1994年に発足した新研究科中核専攻で、新設の気象海洋物理系（大循環力学講座＋気候モデリング講座）に教授4＋助教授4＋助手2（助手の定員配分は遅れた）という「更地」が、堀浩初代地球環境科学研究科長と関係者の努力で確保された。当時、研究バブルとか環境バブルとか言われてはいたが、それにしても、東大気候センター発足時と同程度サイズのものを作り上げたのだから、かなりすごいことである。北大は、一躍、大気海洋関係研究者が全国で最多レベル、空間密度的に最も濃い大学となった（東大はキャンパスがばらばらだった）。その一員として、当

時低温研教授であり新専攻の発足に尽力していた竹内氏と若土正暁氏に呼んでいただいた。大気海洋圏環境科学専攻の新講座グループにはまだ建物もなく、たまたま新築移転して空き家となっていた病院（その第三内科跡）にスペースを確保してもらっての出発であった。ネットワークを引っ張りまわすところから始めるとか、サーバ買ってもらわないといけなとか、学生の計算情報環境を用意する必要があるとか、まあ覚悟してはいたが、堀研究科長にはそのための予算を次々と捻出してもらうことになった。そのうちに挨拶が「で、次はなにが要るんだね？」となってしまった。驚くべきことにこれらが次々と予算措置されたのだが、それだけ当該研究科を立ち上げることの学内優先順位が高かったと想像できるが、堀研究科長の御力によるところ大であったと思う。初期病院メンバーは教授陣が池田元美、久保川厚、山崎孝治、松野太郎（半年遅れ）、助教授陣が謝尚平、向川均、安田一郎（半年遅れ）、そして筆者であった。病棟の面会室はそのままお茶室兼セミナー室に活用され、テレビも買ってもらって、快適、かつ、初年度は今にして思えば大変暇だった（？過去の流れで低温研チームには院生も多々所属していたが、新二講座あわせて M1 一人だった）ので、特に暇（？）そんな久保川氏や謝氏や向川氏を捕まえては無駄話（時には議論）にお付き合いいただいた。一方、あまりにナイーブに楽しくやっていたので当初自覚がなかったのだが、理学関係者からはだいぶ警戒されていたようである。地球環境科学研究科は基本的には大学院のみの研究科であり、当然、理学系院生の取り合いになるわけだが、新参者はこの問題を深く考えてはおらず、物事を円滑にすすめる外交努力をしていなかった。院生教育のために読書会を企画したのだが、理学の学生にも声かけしたところ、邪教（たしかに？）に誘うなど怒られたりで、ついには「事件」が発生するに至った。実は、大気海洋圏環境科学専攻の教授 1 と助教授 1 は理学部地球物理からの席であったので、この 2 名は理学部教授会のメンバーでもあり学部教育の権利・義務が与えられていた。当然、地球環境側では理学部の専門教育（いわゆる講義と若干名の卒論指導）への関与が期待されているものと想定していたが、それらにはタッチすることはかなわず、かわりに全学教育の理学部配分を一部分担させられるという処遇がなされた。環境新人グループは事情がわからなかったのでそういうものかと思って引き受けたのだが、状況が理解されてくるとこれは禍根を残すことになった。松野氏が理学研究科（理学部も大学院重点化が行われた）の菊地勝弘教授に改善の交渉（？）に行った結果さらに事態は紛糾し、結局、地球環境側では、理学は信用できない、もう付き合わないことにしようということになってしまったのだ。世に紛争の種は尽きまじ。記憶によれば理学担当は松野氏と筆者が充てられていると思うのだが、要は、私が最初の半年間まだ存在していない多忙な松野氏に代わってきちんと情報収集・外交努力をしておかなければならなかったのだと思う。そういうことが自分の仕事だとはまったく気づいていなかったことだけは間違いないし、理学の教授会はなんだかんだでほとんど出席できなかったので心証が悪かったのは避けようも無かったように思う。

そのような楽しい日々にもかかわらず、とある日に東大数理科学方面より電話がかかっ

てきたので、東京に小さい娘たちを残しての単身赴任であったこともあり、師匠でもある松野氏とは東大時代に既に科学や運営において考え方の不一致が顕著になっており（筆者がトラウマにはまって電腦倶楽部化していた）距離をおかねばと思っていたこともあり（今にして思えばもう少しまくやればよかったかもしれない）で、これを受けることにした。苦勞して研究科新専攻を立ち上げ、筆者に声をかけてくださった方々（特に竹内・若土両氏）にはなんとも失礼なことをしてしまったと、当時は愚かなことにあんまり深く考えてなかったが、今は恥ずかしく思わんでもない。地球環境での最期の仕事は新棟の設計でネットワーク基盤を設計することで、ちょっと重厚にしすぎだ、とか後で怒られたが、その竣工をまたずに、阪神・淡路大震災や地下鉄サリン事件の喧騒の95年春、北大を一旦去ることになった。

三度目は1998年春から2007年春までの9年間である。地球環境離職時、堀研究科長からは、数学文化はきっと合わないからすぐにまた出て行くことになるに違いない、と餞をいただいたのだが、出て行くにしろまさかまた戻ってくることになるとは思ってはいなかった。東京大学の数理科学研究科は思った以上に懐が深く自由で快適な場所であったが、研究教育文化は確かにかなり違って、研究室という概念がなく、純粹数学の強力な伝統の中にケンブリッジ流の応用数学な学生の流れを作ることはできなかった（最初から当然?）。そんな中、なにやら画策していたのは北海道大学の理学研究科地球惑星科学専攻地球惑星物質科学の山本哲生教授（当時）で、地球惑星科学専攻という新しい看板にふさわしい専攻の「惑星化」を推進しようと目論んでおられた。地球環境とは違って火中の栗っぽい場に、しかも出戻り再単身赴任で、と諸事躊躇したが、最終的にはこれに応じることになった。さすがに人事は公募の時代になっていたから、よく採用にまで至ったものだと思う。結果、惑星化推進の尖兵として、北大にはなかった超高層・宇宙空間物理学の分野の渡部重十氏とともに、理学の気象・海洋の伝統の二教授（菊池・金成誠一両氏）の後席に、攪乱要因のいわゆる落下傘教授として着任することになった。蓋をあけてみると、大学院重点化に際し、従来の地質学鉱物学科と地球物理学科とが融合して地球惑星科学専攻になったとされていたが、ほぼ完全に別組織のままであり、由緒正しいしきたりがあって運営が異なるのは当然、単位教授あたりの「資産」（早い話がポスト）が歴史の古い地質学鉱物学科系と戦後の新参者である地球物理学科系とでは大きく異なっていたりで、「処遇」にずいぶんと差があったのには驚いた（地球環境時代に堀氏のおっしゃっておられたとおりはあった）。一方、地球物理学科系の中では地震・火山系が伝統を守る巨大勢力でしばしば軋轢が生じることとなった。専攻としての融合平準化を進め、地震・火山の伝統保守圧力を排し、看板にふさわしい惑星化を進める、なんて政治的なことは一人では試みもできなかっただろうが、渡部氏とで二人だったこともあり、着任の使命と思っていたこともありでじたばたすることになってしまった。結果、播磨屋敏生教授（当時）には多大なるご迷惑をおかけしたに違いないのだが、それにもかかわらず大筋への支持と数々のご協力をいただいたことは感謝に堪えない思いである。遊馬芳雄講師（当時）には文字通り迷惑な存在

でしかなかったにちがいない。まことに申し訳なく思う。上田博助教授（当時）は名古屋に展開されることになり、非常に喜ばしく思った。理学の惑星化構想、結局、できは 50% といったところであっただろうか。宇宙理学専攻／宇宙惑星科学分野として教育研究に関する諸権限を有する独立組織を立ち上げ、干渉を排するところまではこぎつけたが、資源の平準化にはあまり成功せず（要すれば物理や物質の固体系を切り崩すことにあまり成功せず）、臨界サイズしか確保できなかったのは残念であった。諸事削減圧力がかかる今日なかなか苦しい出発点しか確保できなかったのは申し訳なく思う。惑星化に際しては、理学からポストをさらに二つほど移して低温研を含む地球環境科学研究科の大気海洋グループが北大における気象学海洋学の理学部教育から大学院研究教育までを司る、という統合形を目論んだのだが、理学部の卒業研究生を 4 名ほどどうけいれてもらうようにしたこと（現在も続いている？）を除いては、これは全く未完で終わった。要は、当の地球環境側が理学のごたごたに巻き込まれることを好まずか、これにあまり乗ってもらえなかったからであり、それはしごく常識的な判断であったかもしれない。結果として、地球惑星ダイナミクス分野には気象海洋学が残ることになり、見延庄士郎教授、そして、今日の稲津氏に至る。その後、筆者は 2007 年春に神戸大学に転出し、2008 年には北大宇宙理学グループの全面協力で神戸北大連携の G-COE プロジェクトを実現し、惑星科学研究センター（CPS）なるものの活動を開始することができたわけだが、残念ながら、厳しい昨今、CPS は未だ予算化を得るには至らず、北大には大きなフィードバックをできずで、気分的には大きな借金をかかえたまま今日を迎えてしまった。

文字通り「阿呆の血のしからしむるところ」のこのような顛末で北海道時代にはたくさんの方々にお世話になり、あるいは、ご迷惑をおかけしましたゆえ、この機会を好機とし、自らの行いを忘却する前に覚えていることだけでも懺悔し、お詫びとお礼を表明するべくしたためてみた。数々の失礼の段どうかご容赦いただければ幸い。

引用文献

- Abe, Y., 1993: Physical state of very early Earth. *Lithos*, 30, 223-235.
- Abe, Y., A. Abe-Ouchi, N. H. Sleep, K. J. Zahnle, 2011: Habitable zone limits for dry planets. *ASTROBIOLOGY*, 11, 443-460.
- Abe, Y. and T. Matsui, 1988: Evolution of an impact-generated H₂O-CO₂ atmosphere and formation of a hot proto-ocean on earth. *J.Atoms.Sci.*, 45, 3081-3101.
- Abe, Y., A. Numaguti, G. Komatsu, Y. Kobayashi, 2005: Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars. *ICARUS*, 178, 27-39.
- Ando, H., N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, and Y. Matsuda, 2016: The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model. *Nature Comm.*, 7, 10398, 8pp.

- Blackburn, M. and B. J. Hoskins, 2013: Context and aims of the aqua-planet experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, 91A, 1-15.
- Budyko, M. I., 1969: The effect of solar radiation variations on the climate of the earth, *Tellus*, 21, 611-619.
- Colaprete, A. and O. B. Toon, 2003: Carbon dioxide clouds in an early dense Martian atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 108, 5025.
- Emanuel, K. A., 1987: An air-sea interaction model of intraseasonal oscillation in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 44, 2324-2340.
- Enomoto, T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2008: Description of AFES 2: Improvements for high-resolution and coupled simulations. In K. Hamilton and W. Ohfuchi (Eds.): *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, 77-97
- Gambo, K. and K. Kudo, 1983: Three-dimensional teleconnections in the zonally asymmetric height field during the northern hemisphere winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61, 36-50.
- Gierasch, P., 1975: Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1038-1044.
- Gill, A. E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106, 447-462.
- Golitsyn, G. S., 1970: A similarity approach to the general circulation of planetary atmospheres. *Icarus*, 13, 1-24
- Hayashi C., K. Nakazawa, and Y. Nakagawa, 1985: Formation of the solar system. *Protostars & Planets II*, In D.C. Black and M. S. Matthews (Eds.): *The University of Arizona Press, Tucson*, 1100-1153.
- 林祥介, 1995: 気象学におけるインターネット (7) 地球流体電脳倶楽部 (GFD-DENNOU Club) 大学現場でのインターネット・情報計算環境の発展史と問題点を交えて. *天気*, 54, 937-940.
- 林祥介, 2007: 地球流体力学 (GFD). *天気*, 54, 937-940.
- Hayashi, Y.-Y. and T. Nakazawa, 1989: Evidence of the existence and eastward motion of superclusters at the equator. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 236-243.
- Hayashi, Y.-Y., S. Nishizawa, S. Takehiro, M. Yamada, K. Ishioka, S. Yoden, 2007: Rossby Waves and Jets in Two-Dimensional Decaying Turbulence on a Rotating Sphere. *J. Atmos. Sci.*, 65, 4246-4269.
- Hayashi, Y.-Y. and A. Sumi, 1986: The 30-40 day oscillations simulated in an "aqua planet" model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64, 451-467.
- Held, I. M., 2005: The gap between simulation and understanding in climate modeling. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 86, 1609-1614.

- Held, I. M., and M. J. Suarez, 1994: A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, 1825–1830.
- Hoskins, B. J., 1983: Dynamical processes in the atmosphere and the use of models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109, 1–21.
- Horinouchi, T., S. Nishizawa, C. Watanabe, A. Tomobayashi, S. Otsuka, T. Koshiro, Y.-Y. Hayashi, and GFD Dennou Club, 2010: Gfdnavi, Web-based Data and Knowledge Server Software for Geophysical Fluid Sciences, Part I: Rationales, Stand-alone Features, and Supporting Knowledge Documentation Linked to Data. *Lecture Notes in Computer Science*, 6193, 93-104.
- Hosaka, M., M. Ishiwatari, S. Takehiro, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi, 1998: Tropical precipitation patterns in response to a local warm SST area placed at the equator of an aqua planet. *J. Meteor. Soc. Japan*, 76, 289-305.
- Ingersoll, A. P., 1969: The runaway greenhouse: A history of water on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 26, 1191–1198.
- 石岡圭一, 1998: ISPACK: 科学計算のための FORTRAN77 ライブラリ.
<http://www.gfd-dennou.org/library/ispack/> 地球流体電脳倶楽部.
- Ishioka, K., M. Yamada, Y.-Y. Hayashi, S. Yoden, 1999: Pattern Formation from Two-dimensional Decaying Turbulence on a Rotating Sphere. *Nagare*, 18, 410-411,
<http://www2.nagare.or.jp/mm/99/ishioka/>
- Ishiwatari, M., K. Nakajima, S. Takehiro, and Y.-Y. Hayashi, 1998: The dependency of the structure of the three-dimensional gray atmosphere on the solar constant and the runaway greenhouse states. *Nagare*, 17(3) CDROM,
<http://www2.nagare.or.jp/mm/98/ishiwata/>
- Ishiwatari, M., K. Nakajima, S. Takehiro, and Y.-Y. Hayashi, 2007: Dependence of equilibrium states of gray atmosphere on solar constant: from the runaway greenhouse to the snowball states. *J. Geophys. Res.*, 112, D13120, 9pp.
- Ishiwatari, M., S. Takehiro, K. Nakajima, and Y.-Y. Hayashi, 2002: A numerical study on appearance of the runaway greenhouse state of a three-dimensional gray atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 59, 3223-3238.
- Ishiwatari, M., E. Toyoda, E., Y. Morikawa, S. Takehiro, Y. Sasaki, Y., S. Nishizawa, M. Odaka, N. Otobe, Y. O. Takahashi, K. Nakajima, T. Horinouchi, M. Shiotani, Y.-Y. Hayashi, and Gtool development group, 2012: "Gtool5": Fortran90 library of input/output interfaces for self-descriptive multi-dimensional numerical data, *Geosci. Model Dev.*, 5, 449-455.
- Kahre, M. A., J. R. Murphy, and R. M. Haberle, 2006: Modeling the Martian dust cycle and surface dust reservoirs with the NASA Ames general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 111, E06008, 25pp.

- Kanamitsu, M., K. Tada, T. Kudo, N. Sato, and S. Isa, 1983: Description of the JMA Operational Spectral Model. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 61, 812-828.
- Kasting, J. F. 1988: Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus. *Icarus*, 74, 472-494.
- 木村竜治, 1983: 地球流体力学入門—大気と海洋の流れのしくみ (気象学のプロムナード 第 13), 東京堂出版, 247pp.
- Komabayashi, M. 1967: Discrete equilibrium temperatures of a hypothetical planet with the atmosphere and the hydrosphere of one component-two phase system under constant solar radiation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 45, 137-139.
- Lebonnois, S., C. Lee, M. Yamamoto, J. Dawson, S. R. Lewis, J. Mendonca, P. Read, H. Parish, G. Schubert, L. Bengtsson, D. Grinspoon, S. S. Limaye, H. Schmidt, H. Svedhem, and D. V. Titov, 2013: A comparative analysis of simplified general circulation models of the Venus atmosphere. In L. Bengtsson, R.-M. Bonnet, D. Grinspoon, S. Koumoutsaris, S. Lebonnois, and D. Titov (Eds.): *Toward understanding the climate of Venus: Application of terrestrial models to our sister planet*. ISSI Scientific Report Series, 11, 129-156.
- Louden, T. and P. J. Wheatley, 2015: Spatially resolved eastward winds and rotation of HD 189733b. *Astrophys. J. Lett.*, 814:L24, 5pp.
- Manabe, S. and R.F. Strickler, 1964: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment. *J. Atmos. Sci.*, 21, 361–385.
- Matsuda, Y., 1984: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58, 443-470.
- 松田佳久, 2000: 惑星気象学, 東京大学出版会, 204pp.
- Matsuda, Y., and T. Matsuno, 1978: Radiative–convective equilibrium of the Venusian atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 1–18.
- 松井孝典, 2011: 探査機でここまでわかった太陽系 —惑星探査機とその成果— (知りたい!サイエンス), 技術評論社, 304pp.
- Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 44, 25-42.
- Mayor, M. and Queloz, D. 1995: A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378, 355–359.
- Mitsuda, C., 2007: Scattering greenhouse effect of radiatively controlled CO₂ ice cloud layer in a Martian paleoatmosphere (in Japanese). Ph.D. thesis, Hokkaido University, 115pp.
- 森川靖大, 石渡正樹, 堀之内武, 小高正嗣, 林祥介, 2007: RDocを用いた数値モデルのドキュメント生成. *天気*, 54, 185-190.

- Moriyama, S. 1974: Effects of dust on radiation transfer in the Martian atmosphere. I. On infrared cooling. *J. Meteor. Soc. Japan*, 52, 457-462.
- Nakajima, K., 2011: Idealized numerical experiments on the space-time structure of cumulus convection using a large-domain two-dimensional cumulus-resolving model. CGER's supercomputer monograph report, Center for Global Environmental Research, National Institute of Environmental Studies, Japan, Vol.16, 1-72, <http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i097/en/>.
- Nakajima, K. and T. Matsuno, 1988: Numerical experiments concerning the origin of cloud clusters in the tropical atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 309-329.
- Nakajima, K., S. Takehiro, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi, 1998: "Cloud convections" in geophysical and planetary fluids. *Nagare*, 17(3), CD-ROM, <http://www2.nagare.or.jp/mm/98/nakajima/>
- Nakajima, K., S. Takehiro, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi, 2000: Numerical modeling of Jupiter's moist convection layer. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3129-3132.
- Nakajima, K., E. Toyoda, M. Ishiwatari, S. Takehiro, and Y.-Y. Hayashi, 2004: Initial development of tropical precipitation patterns in response to a local warm SST area: An aqua-planet ensemble study. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 1483-1504.
- Nakajima, K., Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Y.-Y. Hayashi, 2013a: The variety of spontaneously generated tropical precipitation patterns found in APE results. *J. Meteor. Soc. Japan*, 91A, 91-141.
- Nakajima, K., Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Y.-Y. Hayashi, 2013b: The variety of forced atmospheric structure in response to tropical SST anomaly in the Aqua-Planet experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 91A, 143-193.
- Nakajima, S., Y.-Y. Hayashi, and Y. Abe, 1992: A study on the "runaway greenhouse effect" with a one-dimensional radiative-convective equilibrium model. *J. Atmos. Sci.*, 49, 2256-2266.
- Nakamura, T. and E. Tajika, 2001: Stability and evolution of the climate system of Mars. *Earth Planets Space*, 53, 851-859.
- Neale, R. B. and B. J. Hoskins, 2000: A standard test for AGCMs and their physical parameterizations. I: The proposal. *Atmos. Sci. Letters*, 1, 101-107.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393-3419.
- Nishizawa, S., T. Horinouchi, C. Watanabe, Y. Isamoto, A. Tomobayashi, S. Otsuka, and GFD Dennou Club, 2010: Gfdnavi, web-based data and knowledge server software for geophysical fluid sciences, Part II: RESTful web services and

- object-oriented programming interface. *Lecture Notes in Computer Science*, 6193, 105-116.
- Nishizawa, S., M. Odaka, Y. O. Takahashi, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, S. Takehiro, H. Yashiro, Y. Sato, H. Tomita, and Y.-Y. Hayashi, 2016: Martian dust devil statistics from high-resolution large-eddy simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4180-4188.
- Noda, S., M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y. O. Takahashi, S. Takehiro, M. Onishi, G. L. Hashimoto, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi, 2017: The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: Dependence on planetary rotation rate, *Icarus* 282, 1-18.
- Numaguti, A. and Y.-Y. Hayashi, 1991a: Behavior of cumulus activity and the structures of circulations in an "aqua planet" model. Part I: The structure of the super clusters. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69, 541-561.
- Numaguti, A. and Y.-Y. Hayashi, 1991b: Behavior of cumulus activity and the structures of circulations in an "aqua planet" model. Part II: Eastward moving planetary scale structure and the intertropical convergence zone. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69, 563-579.
- Numaguti, A., 1993: Dynamics and energy balance of the Hadley circulation and the tropical precipitation zones: Significance of the distribution of evaporation. *J. Atmos. Sci.*, 50, 1874-1887.
- Obuse, K., S. Takehiro, and M. Yamada, 2010: Long-time asymptotic states of forced two-dimensional barotropic incompressible flows on a rotating sphere. *Physics of Fluids*, 22, 031004PHF, 9pp.
- Odaka, M., 2001: A numerical simulation of Martian atmospheric convection with a two-dimensional anelastic model: A case of dust-free Mars. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 895-898.
- Odaka, M., K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, 2001: A numerical simulation of Martian atmospheric convection. *Nagare*, 20, 507-508.
<http://www2.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/>
- Odaka, M., K. Nakajima, S. Takehiro, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, 1998: A numerical study of the Martian atmospheric convection with a two-dimensional anelastic model. *EPS*, 50, 431-437.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X.-D. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, 1, 8-34.

- Pedlosky, J., 1979: *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer, 626pp.
- Philander, S. G. H., T. Yamagata, and R.C. Pacanovsky, 1984: Unstable air-sea interactions in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 41, 604-613.
- Polvani, L. M., A. C. Clement, B. Medeiros, J. J. Benedict, and I. R. Simpson, 2017: When less is more: Opening the door to simpler climate models, *Eos*, 98, <https://doi.org/10.1029/2017EO079417>.
- Safronov, V. S., 1969: *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets*. Moscow: Nauka Press, (Trans. NASA TTF 677, 1972).
- Sasaki, Y., S. Takehiro, S., Y.-Y. Hayashi, K. Kuramoto, 2011: Weak-field dynamo emerging in a rotating spherical shell with stress-free top and no-slip bottom boundaries., *Phys. Earth Planet. Inter.*, 188, 203–213.
- Sato, M., 1994: Hadley circulations in radiative-convective equilibrium in an axially symmetric atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 51, 1947-1968.
- Sellers, W. D., 1969: A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *J. Appl. Meteor.*, 8, 392-400.
- Schneider, S. H., and R. E. Dickinson, 1974: Climate modeling. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12, 447–493.
- Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda, 2014a: Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM. *J. Geophys. Res.*, 119, 1950–1968.
- Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda, 2014b: Waves in a Venus general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7461–7467.
- Sugiyama, K., M. Odaka, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi, 2006: Static stability of the Jovian atmospheres estimated from moist adiabatic profiles. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03201, 4pp.
- Sugiyama, K., M. Odaka, K. Nakajima, and Y.-Y. Hayashi, 2009: Development of a cloud convection model to investigate the Jupiter's atmosphere. *Nagare*, 28, 357-358, <http://www2.nagare.or.jp/mm/2009/sugiyama/>
- Sugiyama, K., K. Nakajima, M. Odaka, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi, 2014: Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states. *ICARUS*, 229, 71-91.
- Takahashi, Y. O., H. Fujiwara, H. Fukunishi, M. Odaka, Y.-Y. Hayashi, and S. Watanabe, 2003: Topographically induced north-south asymmetry of the meridional circulation in the Martian atmosphere. *J. Geophys. Res.* 108E3, 5018, 16pp.
- Takahashi, Y. O., H. Kashimura, S. Takehiro, M. Ishiwatari, S. Noda, M. Odaka, T. Horinouchi, Y.-Y. Hayashi, DCPAM Development Group, 2016: DCPAM: planetary atmosphere model, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, GFD Dennou Club.

- Takehiro, S., 2008: Physical interpretation of spiralling-columnar convection in a rapidly rotating annulus with radial propagation properties of Rossby waves. *J. Fluid Mech.*, 614, 67–86.
- Takehiro, S., M. Odaka, K. Ishioka, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, and SPMODEL Development Group, 2006: SPMODEL: A series of hierarchical spectral models for geophysical fluid dynamics. *Nagare*, 25, 485-486, <http://www2.nagare.or.jp/mm/2006/spmodel/>
- Takehiro, S., M. Yamada, and Y.-Y. Hayashi, 2011: Retrograde equatorial surface flows generated by thermal convection confined under a stably stratified layer in a rapidly rotating spherical shell. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 105, 61-81.
- Toyoda, E. K. Nakajima, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi, 1999: Response of the tropical atmosphere to a localized warm SST area: Time-development observed in an aqua-planet ensemble experiment. *Nagare*, 18, 414-415, <http://www2.nagare.or.jp/mm/99/toyoda/>
- Tsuboki, K., 2000: CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator). http://www.rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~tsuboki/cress_html/index_cress.html
- Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784-812.
- Weidenschilling, S. J. and J. S. Lewis, 1973: Atmospheric and cloud structure of the jovian planet. *Icarus*, 20, 465-476.
- Williams, G. P., 1978: Planetary Circulations: 1. Barotropic Representation of Jovian and Terrestrial Turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1399-1426.
- Williams, G. P., 1988: The dynamical range of global circulations – I., *Climate Dynamics*, 2, 205-260.
- Yamada, Y., T. Sampe, Y. O. Takahashi, M. K. Yoshioka, W. Ohfuchi, M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y.-Y. Hayashi, 2005: A resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model. *Theoretical and Applied Mechanics in Japan*, 43, 289-297.
- Yao, W. and C. Jablonowsk, 2015: Idealized quasi-biennial oscillations in an ensemble of dry GCM dynamical cores. *J. Atmos. Sci.*, 72, 2201-2226.
- Yoden, S. and M. Yamada, 1993: A numerical experiment on two-dimensional decaying turbulence on a rotating sphere. *J. Atmos. Sci.*, 50, 631-643.