

極域大気科学・気候科学研究の40余年を振り返って

—2021年度藤原賞受賞記念講演—

山 内 恭*

1. はじめに

この度、「わが国における極域大気科学・気候科学研究への長年にわたる貢献」なる業績で日本気象学会2021年度藤原賞を受賞させていただきました。大変光栄な由緒ある賞で、とても私には値しないと思いましたが、私一人の業績ではなく、共に歩んだ多くの先輩・同輩・後輩諸氏のご尽力の賜物と考え、敢えて受賞させていただくことにしました。

コロナ禍の下、2021年度の気象学会春季大会は全てオンラインでの開催となりましたので、受賞記念講演もZoomを通してのオンラインで行いました。ここにその要旨を記させていただきます。本来、わが国における極域大気科学・気候科学研究を網羅すべきところかもしれませんが、講演時間あるいは原稿枚数の制限もあり、ここは、私の歩んだ極域大気科学・気候科学研究の凡そ40年間を記させていただくことにしました。第1図に極域観測の系譜と私の関わりの概略を示しています。この図を眺めながら、読んでいただくと全体像がつかみやすいかと思います。なお、同様な趣旨で私が定年退職の直後、2015年春の学会での「極域・寒冷域研究連絡会」における講演のまとめを、やはり天気に掲載していますので、より詳しい研究の系譜はそちらをご参照ください(山内 2016)。

本稿では、第2章では極域科学の黎明期からの歩みを、第3、4章で、標題の40余年の歩みを記させていただいた後、第5章では、近年、私自身が関心をもつ

ている「地球温暖化の下での南極、北極の温暖化の違い」について手短かにレビューし、皆さまに考えていただきたいと思います。最後に、研究途上の若い方々へのメッセージというつもりで、幾つかの言葉をお示しし、終わりの言葉とさせていただきます。

2. 極域科学観測のはじまり

遠い未知の場所、あこがれの地としての極地探検活動が進む中、探検はナショナリズムの高揚を狙うが未知の自然を観測するには国際共同が必要であるとの認識が生まれ、1882-83年の国際極年(IPY: International Polar Year)として実現した。11カ国が参加し北極海を囲む12の観測所が設けられ、画期的な共同観測が行われた。現在でも、うらやむような共同の取り組みであった。南極では、まだ2カ所の観測所が設置されるに終わっている(Wood and Overland 2006)。しかし、その後この体制は続かず、引き続き幾つかの意識の高い探検隊の中で気象観測が行われるなどに留まった。その中では、南極点初到達を目指して1911年から12年にかけて、越冬したF. Scottの隊は、気球を使って上空の気温を測定したり、極成層圏雲の初視認ではないかと言われる雲の絵を残したりしている(Scott 1913)。わが国の白瀬 矗(しらせ のぶ)の探検隊でも、南極行きの「開南丸」船上での気象観測の記録等が残されている(白瀬 1998)。第2回国際極年(IPY-2; 1932-33年)後に始められたソ連(後のロシア)による北極海の海水漂流基地も忘れてはならない偉業であり、その後長く最近まで続いた。時代は下り、1949-52年のノルウェー、イギリス、スウェーデン3国共同探検隊は、放射収支や境界層の観測等、その後の基準となるような観測を実施し成果を上げている(Liljequist 1956など)。

* 国立極地研究所／総合研究大学院大学。

yamanou@nipr.ac.jp

—2021年7月30日受領—

—2021年9月17日受理—

第二次大戦終結後、蓄積した様々な技術を使って地球の姿を探ろうと第3回の極年が計画され、「国際地球観測年 (IGY: International Geophysical Year)」の名で実現した。その中では、人工衛星の打ち上げと南極観測が重点課題に上げられた。敗戦国であったわが国も、国際的な南極観測開始の動きに12番目の国として加わり、1956年の第1次観測隊の派遣に結実する。IGY 予備観測として1957年に昭和基地で初の越冬を成功させ、地上気象観測も始まった。本観測を担うはずの続く1958年の第2次隊は、海水状況の厳しさから昭和基地への接近に困難をきわめ、越冬を断念、次の第3次隊から高層気象観測を含む本格的な観測が始められた。しかし、予算確保の問題、砕氷船、ヘリコプターの問題等から第5次隊の越冬で一旦終了となった(第6次隊は夏のみ)。

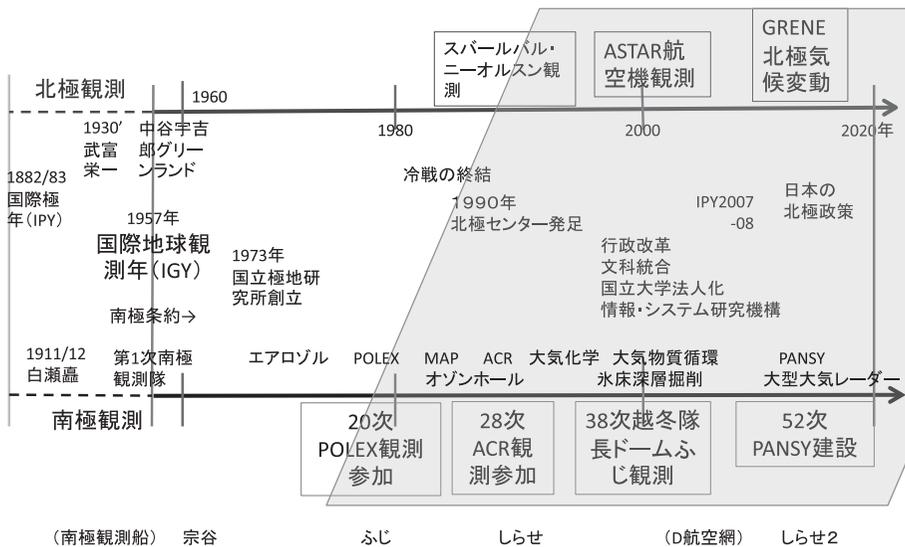
4年の空白の後、新しい観測船「ふじ」の就航とともに第7次隊から越冬観測(1966年)が再開され、以後現在まで続いている。その中で、基本的な気象観測は定常観測として続いてきたほか、日本特有の成層圏オゾンの観測、雪結晶や境界層の観測などが行われてきた。一時、気象の研究観測が途絶え、気象学会からの提言で復活したことなど、詳細は別稿を参照されたい(山内 2016)。

わが国の北極観測も実は南極と同じく、IGYの時に始まった。雪結晶の研究で有名な北海道大学の中谷宇吉郎がグリーンランドで観測を行ったのがこの時、

1957年であった。但し、わが国独自の計画ではなく、アメリカの観測計画の中でのグリーンランド行きであった。以後、北極海での氷島 T-3 (漂流していた氷山上)での越冬観測も中谷グループによって行われている。その後は、散発的に小グループでの観測が、グリーンランド、北極海、アラスカ、シベリア等で進められていた。

3. 南極観測への参加

私が初めて南極観測に参加したのは、第20次観測隊(1978-80年)であった。国際共同研究計画の極域気水圏計画(GARP/POLEX-South)3年計画の初年度である。南極氷床斜面上のカタバ風帯の熱収支を解明しようという目的で、内陸の小さなみずほ基地において、30mの観測塔を建て、気温、風速分布や放射収支の観測を行った(第2図)。特に私が担当した放射観測では、それまで放射は現場で測定するより計算で求めた方が正確であると言われていた中、なんとか精度の高い測定ができるよう努めた。日射計に関しては、特に入射角依存性が大きいので、太陽高度の低い南極での観測では特に精度が下がるところ、入射角依存性を精密に抑えた上で測定した(Yamanouchi 1983)。また、長波放射についても、それまでは日射のある際には正確な観測ができていなかったところ、初めて昼夜を通じた精密な長波放射が測定できたと思っている(Yamanouchi and Kawaguchi 1984)。風の弱い内陸高



第1図 極域観測の系譜と私の関わり (網かけ部分)。

原域では放射でほとんどの地表面熱収支が決まるのに対して、カタバ風の強い領域では顕熱輸送が盛んになり、その分、放射バランスから外れ、正味放射、即ち放射冷却は内陸にしては大きめであることが示せた。それまでのわが国の南極気象観測からは国際学術誌に発表された論文はわずかであることを残念に思い、POLEXの3年間では、各メンバーから幾つもの貴重な観測成果を国際誌に発表する努力がなされた。

南極中層大気総合研究計画 (MAP: Middle Atmosphere Program) では、中層大気の運動、組成、エネルギーが主テーマとして上げられた。この中では、第23次隊(1982年越冬)の忠鉢 繁隊員によるオゾンホールの発見が有名である。元々、MAP計画の中ではオゾン総合観測とされたが、少ない予算の中、長い極夜の期間にもオゾン全量を測ろうと、ドブソン分光光度計による月光観測が企画された。冬期のオゾン全量の変化がきれいに求められたと共に、春期のオゾン急減がオゾンゾンデ観測やドブソンによる全量観測から見つけられ、発表された (Chubachi 1984)。この発表を聞き、オゾン専門家も多いわが国気象界がもう少しサポートをして、解析研究をより深く、国際誌に発表するなどしていれば、オゾンホール発見やオゾンホール成因解明へのわが国の貢献をもっと強いものになっていたであろうと、残念であった。イギリス南極調査所 (BAS: British Antarctic Survey) 所属の J. Farman ほか3名による Nature 論文 (Farman *et al.* 1985) が極めて有名になったことはご存知の通りである。同計画の下、第24次隊では成層圏のライダー観測が行われ、極成層圏雲と呼ばれることになるエアロゾル層が初めて地上から観測された (Iwasaka 1986)。その後、アメリカの大規模な観測・研究から Susan Solomon 等によるオゾンホールの解明が進んだが (Solomon *et al.* 1986など)、わが国でも貴重で重要な観測が行われていた割には、国際的にアピールしきれなかったことは残念であった。国内サポート役であった筆者としても、力及ばなかったこともあるが、観測データを観測者だけでなくプロジェクトメンバーに共有し真の意味での共同研究がなされるべきであったのではと思う。研究・観測計画策定には力を注ぐものの、その成果とりまとめにいま一步力がいれられない状況は、今もってわが国の特質、問題ではないか。赤外分光計 (FTIR) による成層圏微量物質やサンフォトメータによる大気光学的厚さ (気柱積算エアロゾル量の指標) の観測、以後長年にわたって続けられることになる大気中 CO₂

濃度連続観測 (Nakazawa *et al.* 1991) など、この頃始まり、各々お手伝いをする事となった。

続いて気象関係では南極気候変動研究計画 (ACR: Antarctic Climate Research; WCRPの一環) の下、雲や海水、大気微量物質の観測に取り組んだ。私は第28次隊 (1987年越冬) に参加して、既に受信が始まっていた極軌道気象衛星 TIROS/NOAA シリーズの受信データの処理 (スーパーミニコンを持ち込み、現場でデジタル処理を実施)、地上検証を兼ねた放射収支観測、マイクロ波観測などを担当した。衛星画像はデータ量が多いため、国内に持ち帰って処理をするのでは時間がかかって現実的でないことから、現場で処理までしてしまおうという計画で、今では考えられない、ラック5本もの大型のスーパーミニコンを使って1パスの受信データを処理するのに2-3時間を要する大作業であり、富士通の専門家に隊員になってもらった (山内・瀬古 1992)。観測点の少ない南極こそ衛星データの価値は高いのだが、雪氷面上の雲の検知が困難であった。極夜も使えないといけなくて、AVHRR 画像データの赤外3つのチャンネルのデータを使い各チャンネルの輝度温度の差を使って雲の検知を行う手法を開発し、雲粒の情報が得られると共に、大部分の雲が識別できるようになった (Yamanouchi *et al.* 1987; Yamanouchi and Kawaguchi 1992; 第3図)。この研究には、何人もの大学院生の協力があり、彼らの修士論文となった。但し、パッシブ測定には限界があり、最終的にはアクティブセンサーの活用を待たねばならなかった。マイクロ波放射計は地上に設置して雲水量などの連続観測を行ったが、ちょうど航空機があるので、下向きに搭載して大陸氷床や海水を上を

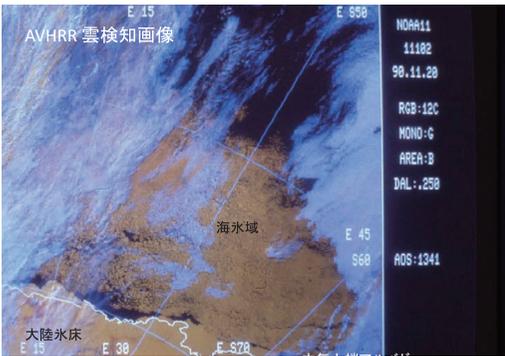


第2図 南極みずほ基地における放射観測機器と30m観測塔(1979年POLEX観測にて)。

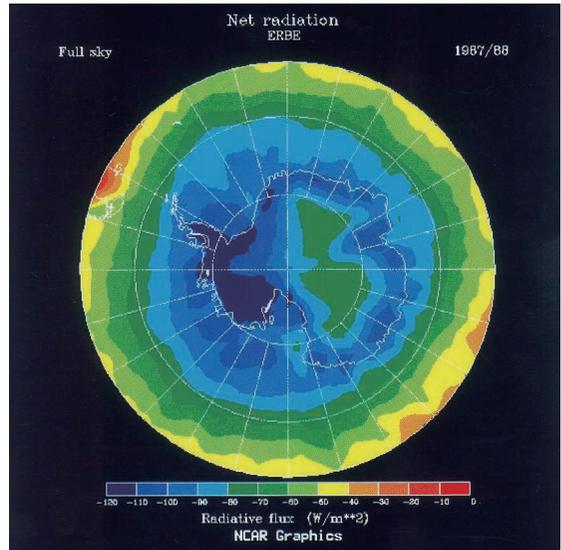
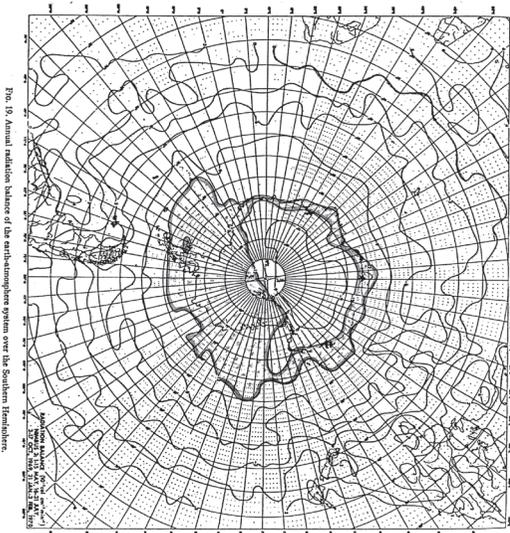
飛行し、積雪涵養量の指標となる大変貴重な記録を得ることができた(Yamanouchi and Wada 1992). ACR観測では、次年度以降、降水レーダーを持ち込んだの鉛直およびPPI (Plan Position Indicator; レーダーアンテナを一定の仰角で走査して水平分布を得る) 観測を行ったり (Konishi *et al.* 1994など)、海水観測、大気微量成分観測の充実 (大気中メタン濃度やエアロゾルの連続観測やしらせ船上での大気-海洋間CO₂交換観測を開始) をはかったりした。

人工衛星データに取り組みはじめたので、その発展

として放射収支データを扱うようになった。その10年前、文部省在外研究短期でアメリカ大気科学研究センター (NCAR) に行く機会があったが、そこで研究を始めている多くのポストドクと友人になった。その後、彼らはそれぞれ一人前に成長し、その中の一人、Tom CharlockがNASA Langley Research Centerの研究員になっており、全米研究評議会 (NRC) 客員研究員として1992-93年の1年間招聘してもらった。その機会に、同研究センターで担当していた地球放射収支観測 (ERBE) のデータを利用してもらい、未だ地域毎の詳細な解析は行われていないところで、南極域の解析をすることになった。かつて、初期の気象衛星データから南極上空の放射収支分布を示した Raschke *et al.* (1973) の結果に惹かれており、ぜひ同様な解析をやってみたかった。ちょうど、上記の昭和基地地上での放射観測を行った期間のデータを解析し、1年分だけであるが、様々な興味ある結果を得ることができた (Yamanouchi and Charlock 1995, 1997)。南極上空の大気上端の正味放射であるが、最も寒い南極大陸内陸域はマイナスで絶対値は最大にならず、むしろ大陸周辺から海水域で最大になるという、Raschkeの唱えたある種のパラドックスが確認された(第4図)。地表面は極度に冷えることで、外向き長波放射を減らしており、その効果である(冷えきって冷却能力が少ない)。北極側ではそうならず、緯度の高いほど正味放射



第3図 AVHRR 雲検知画像、南極域大陸 (下端) と海水域 (真中) に雲がかかっている。RGB 3色にチャンネル1, 2, チャンネル3-4をそれぞれ表示。



第4図 大気上端正味放射量、左) Raschke *et al.* (1973) より、右) ERBE データより1987年7月平均値 (Yamanouchi and Charlock 1997; permitted).

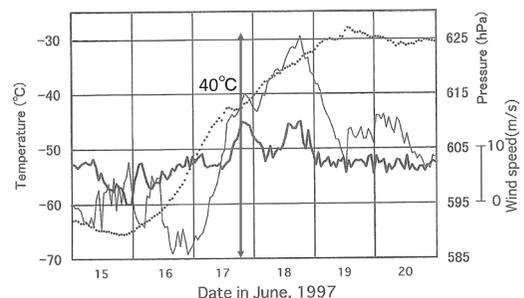
絶対値は大きい（冷却が大きい）ことは、第5章で記す。

こうして大気・地表面の放射を中心課題として研究に取り組んできたが、基本的に個人研究の域であった。しかし、国立極地研究所という大学共同利用機関に属する（南極観測、北極観測のお世話をする必要）以上、より共同研究に力を注ぐ必要を感じ、放射から密接につながる放射影響大気微量成分、即ち温室効果気体やエアロゾルの研究にも関わるように努めた。自分から新規に始めたものはないが、共同研究の方々と一緒に研究をそしてプロジェクトを進めることとなった。特に、人間活動の盛んな地域から遠い南極では、微量物質の変動は輸送に大きく依存していることに着目し、大気循環とのつながりを重視し、「大気・物質循環」を主唱した（山内 2010）。その流れで、第38次観測隊から「大気・物質循環観測計画」を立ち上げ、初年度は内陸のドームふじ基地で初の大気越冬観測をすることとなった（Yamanouchi *et al.* 2003a）。私自身は、観測隊長として昭和基地に滞在したが、冬明けの補給旅行により、ドームふじ基地を訪問している。昭和基地より1,000km内陸、標高3,800mのドームふじ基地では、当時氷床深層掘削が進んでおり、2,500mまでの掘削が行われたところであった。掘削された氷床コアは酸素同位体濃度の解析から過去の気温が、含有微粒子の解析からエアロゾル成分が、さらには含有空気中の分析から大気中CO₂濃度が調べられ、過去34万年にわたる大気環境の変動が明らかにされている（藤井 2006）。こうした、過去の微量成分の変動の解釈にも、大気場との関連が注視される場所である。その後、この問いに答えるべく、（当時大学院生であった鈴木香寿恵氏と共に）ERA-40などの客観解析データをもとにトラジェクトリー解析を重ね、昭和基地やドームふじ基地に到達する空気塊の輸送特性を抽出した。東南極に位置する両基地には、南米からの長距離輸送が大きく寄与していることが示された（Suzuki *et al.* 2008, 2013）。

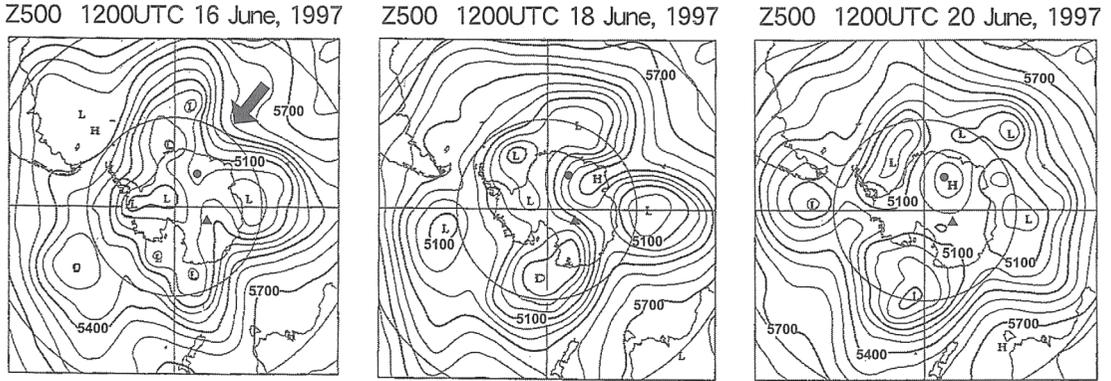
第38次隊（1997年越冬）では、ドームふじ基地にて地上エアロゾル観測やライダーによる成層圏の観測、放射収支の観測、ゾンデの飛揚による大気鉛直分布の観測などが勢力的に行われた。これらの観測で捉えられた興味ある現象に、冬の地上気温急上昇がある。第5図にあるように、冬の気温マイナス70°Cの中で、数日間でマイナス30°Cまで40°Cもの気温急上昇が起こった（Hirasawa *et al.* 2000）。風も一時強くなり、気圧も

上昇している。極めて特異な現象で、循環場を調べると、第6図のように、極渦の歪み-ジェットの蛇行がブロッキング高気圧によって起されており、低緯度側からのリッジの侵入が見られた。同時期の高層気象観測からも、対流圏全層で高温の低緯度大気の侵入が明らかである。即ち、低緯度側からの湿潤暖気の流入によって気温が上昇、雲も伴い、下向き長波放射も急増し地表面を温めている。このような現象は、実はそう珍しい現象ではなく、毎年冬期に数回起こっており（Hirasawa *et al.* 2013）、高温と多量の降水をもたらすことから、積雪涵養にも効いていることが明らかにされた。ライダーから求められた雲の鉛直分布も興味あるもので、対流圏の雲が活発になるのと呼応して成層圏雲も発達していることが捉えられた（Hayashi *et al.* 2004）。

昭和基地では、地上のエアロゾルの観測が継続されるようになったとともに（Hara *et al.* 2004）、温室効果気体の観測と併せ「モニタリング観測」と位置づけられ、長期継続されることとなった（Morimoto *et al.* 2003a）。温室効果気体の輸送機構を解明すべく、鉛直分布を調べる小型航空機による大気サンプリングが行われてきたが（Murayama *et al.* 1995）、さらに成層圏の鉛直分布を調べるための回収気球実験が第39次隊主導で実施された。液体ヘリウムを使い空気を凝固サンプリングするクライオサンプラーを搭載したもので、各サンプリングシリンダーによりおよそ12高度の大気中濃度を得るものである。試料を回収しないと分析ができないので、サンプラーのゴンドラを回収できなければ意味が無い。様々なシミュレーションや実地訓練



第5図 南極ドームふじ基地における気温急上昇時における気温（細線）風速（太線）および気圧（点線）の変化。1997年6月17日から18日にかけて40°Cの気温急上昇、風速の強化、気圧の上昇が見られる（Hirasawa *et al.* 2000; permitted）。



第6図 南極ドームふじ基地における気温急上昇時(第5図)前後における500hPa 高度場の変遷. 極渦が歪み40°E 付近からリッジが侵入, 高気圧が切離していく. リッジ西縁に沿って低緯度から湿潤暖気がドームふじ基地付近の南極内陸に侵入している (Hirasawa *et al.* 2000; permitted).



第7図 回収気球実験の際の大気球(10000m³) 飛揚直前の様子, 南極昭和基地, 1998年1月.

の上, 風の弱い日を選んで実施し, なんとかゴンドラを回収することができた. 本来, 観測船しらせのヘリコプターで回収の予定であったが, ちょうど海水が割れ流出してしまった場所, 開水面に落下したため, 大きなしらせを回航してなんとか回収できた. 初の南極成層圏大気採取が実現し, 成層圏中の温室効果気体濃度鉛直分布が明らかにされた (Aoki *et al.* 2003; Ishidoya *et al.* 2006; Morimoto *et al.* 2009; 第7図). その後, 大気・物質循環観測計画の中では, 小型航空機(セスナおよびピラタス)による計画や(第41次隊; 和田ほか 2001; Hara *et al.* 2006; Osada *et al.* 2006), エアロゾルの地上からのリモートセンシング観測(マイクロパルス・ライダーやスカイ・ラジオメータ, 全天カメラによる; Shiobara *et al.* 2003), エアロゾル集中観測 (Hara *et al.* 2005, 2010, 2011, 2013, 2018) などが続いた. さらには北極での共同観測の成果(第4章参照)を受けた南極大陸沿岸域から海水域までのエアロゾル等の鉛直断面をあきらかにしようという観測がドイツ, アルフレッド・ウエグナー極地海洋研究所(AWI)との共同観測として, AWI所属航空機 Dornier228によって第49次隊で実施された. これは, 同様にドイツのノイマイヤー基地での観測と対応させて地域の違いをみたもので, 大陸斜面のカタバ風と海からのエアロゾル供給との関係に興味ある分布を知る事ができた(平沢 2017).

この間に, 国際的には国際極年(IPY) 2007-2008の動きがあった. 第3回国際極年に相当する国際地球観測年(IGY)から50年, 今回は地球物理学だけでなく, 生態系の研究も大きくなっているので, 名前も「極年」

に戻し南北両極を含むことを前面にアピールしWMO-ICSUの共同主催で実施した。延べ228課題が正式に認められたが多くがそれぞれ国際共同観測であり、わが国研究者が代表になったものも含まれている。IPY運営にWMO-ICSU Joint Committeeが組織され、途中から私も加わり国内外での国際シンポジウムの開催やまとめの出版にたずさわった (Tomasi *et al.* 2007; Sato *et al.* 2009; Turner *et al.* 2009; Bromwich *et al.* 2011; Lanconelli *et al.* 2011)。

その後立ち上げられたのが、南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) である。当時、同僚であった佐藤 薫氏が長年にわたって研鑽・準備を重ねて実現した超大型の計画である (佐藤 2019)。高解像度の測定で大気の鉛直構造、3次元の風速を求めようというもので、高解像大気循環モデルとの組み合わせが重要である。これまでの私の研究分野とはだいぶ離れてきたが、当時、成層圏-対流圏交換や圏界面のこと (Tomikawa *et al.* 2009)、成層圏-対流圏結合 (極域の気象に多くの影響を与える重要な過程の1つであるが、状況説明はなされているものの、物理的因果関係は未解明である) にも関心がわいてきたので、私も計画の一端に参加した。実際は研究内容よりも、レーダー建設のための予算獲得や第52次隊長 (史上初の60歳を超えての隊長業は厳しく、後を引いた) としてのレーダー建設に貢献する結果となった。困難を乗り越え、ようやくアンテナ建設がなったが (2011年3月初観測)、冬の間のブリザードによるドリフトの堆積など、関係者は思いもよらない苦難の連続で、ようやく全ての完成をみたのは4年後であろうか (Sato *et al.* 2014)。以後、カタバ風との関連 (Tomikawa *et al.* 2015) から圏界面の問題、成層圏、中間圏の現象まで多くの斬新な成果が生まれつつある。さらには、全球のレーダーを結び共同観測することで、南北両半球結合を調べる計画まで発展しており (ICSOM: Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling)、極域大気科学のブレークスルーをもたらすことが期待される。

4. 北極観測への関わり

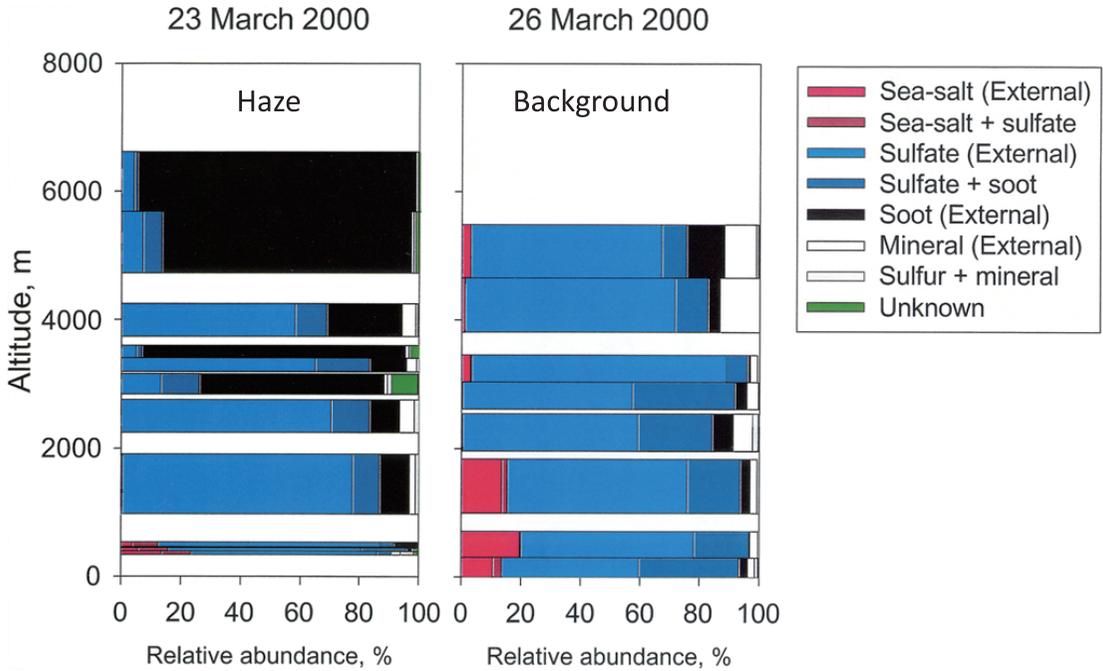
同じ極域ながら、北極への関わり方は大いに異なった。元々北極圏には8カ国が存在し、自分の領土の問題として観測も行われてきた。そこへ、北極圏の外から出かけて行って観測しようというわけである。冷戦の崩壊による北極域の解放で、北極圏外の国からの観

測も活発になった。わが国もその流れに沿って、1990年国立極地研究所に北極圏環境研究センターが設置されたり、1991年にはスヴァールバル・ニーオルスンに観測所が設けられたりした (第8図)。ニーオルスンはかつて炭坑だったところで、ノルウェーによって国際観測村として開かれた。わが国からはフィヨルドの海洋観測や氷河の観測、生態系の観測が行われたほか、大気の観測として、気象観測や大気微量成分 (温室効果気体とエアロゾル) の観測が始められた (Yamanouchi *et al.* 1996; Morimoto *et al.* 2006)。CO₂やメタンの観測結果は、南極昭和基地の結果と比較され、放出・吸収源の多い北極圏で年間の季節変動振幅が極めて大きいこと、平均値として北極側が高く、北から南への輸送による遅れを示していること等が明らかになり、南北両極観測の重要性が示唆された。以前からノルウェーによって続けられてきた放射観測データを使って、南極昭和基地との比較も行い、緯度が高いのに暖かいスヴァールバルの特徴も明らかになった (Yamanouchi and Orbaek 1995)。現在は、BSRN (基準地表面放射観測網) としてドイツが放射観測を担当している。CO₂の大気海洋交換を調べる海洋観測にも発展し、CO₂吸収能の大きい海域であることが示された (Aoki *et al.* 1996; Nakaoka *et al.* 2006)。

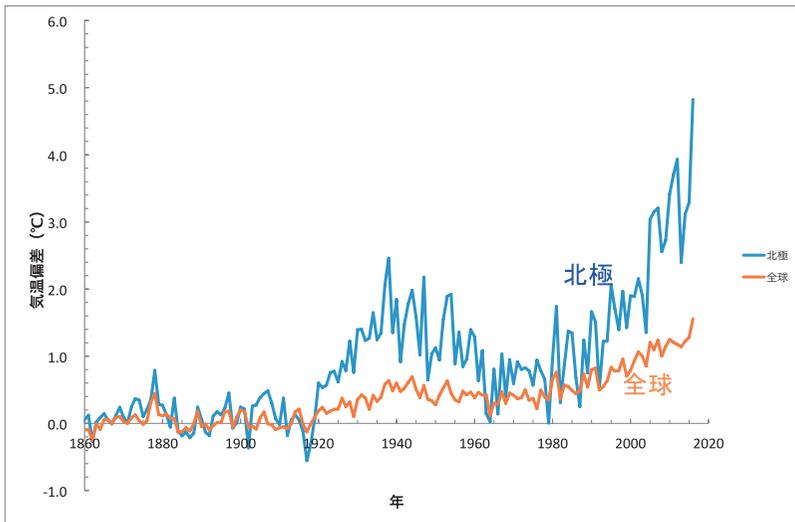
ニーオルスンでは、AWIが日本と同様、大気観測に力を入れていた。そこで、共同観測をしようという話が持ち上がり (元々、AWIのH. Gernandt博士を極地研究所に客員研究員として招聘し、南極のオゾン観測



第8図 スヴァールバル・ニーオルスンにおける国立極地研究所の観測施設 (Rabben)。地上気象観測タワー (左)、垂直レーダー (右)、ライダーのコンテナ (右の白い箱)、屋上のスカイラジオメータ (階段手すり上) などが見える。2020年より、大部分の観測機器は新建物に移転した。



第9図 ASTAR2000におけるエアロゾルの組成, 鉛直分布, バックグラウンド大気(3月26日)と汚染大気(3月23日)の比較 (Yamanouchi *et al.* 2005; permitted).



第10図 北極温暖化増幅を表す, 全球平均と北極の平均気温の年々変化, 1880-1900年からの偏差 (HadCRUT4より作成).

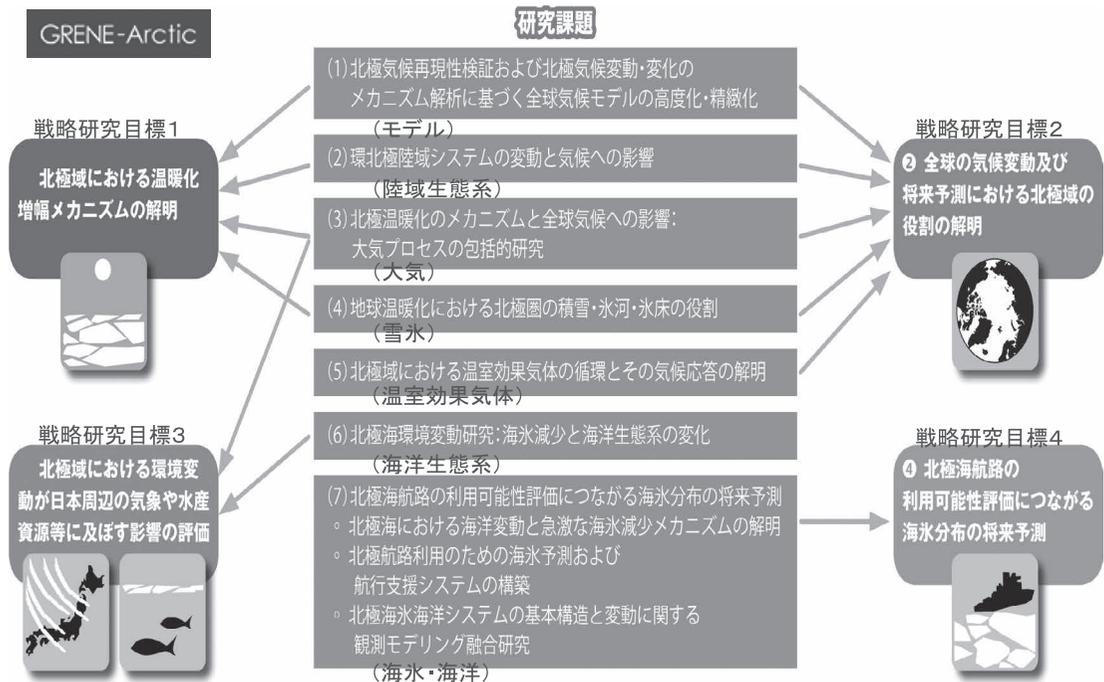
のデータ比較等を共同で進めた経緯があった), 地上観測している上空の大気を航空機から観測しようということとなった. AWIは航空機を2機 (Dornier 228) 所有しているが, 大気関係では境界層のフラックス観測にしか使われておらず, 大気中の成分の観測等は未経験であった. そこで, わが国の経験から, エアロゾルカウンターとサンプリングを担当し, AWIはサンフォトメータ観測を担当した. こうして, 北極エアロゾル放射総合観測 (ASTAR 2000: Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation) が実現, 2000年3~4月, ノルウェー, ロングイェール

ビーンのスヴァールバル空港を拠点に1ヶ月余の飛行観測を行った。春先で北極大気が汚染されることのできる季節で、北極本来の清浄大気とヨーロッパやシベリアの汚染源からの輸送が効いている汚染大気(「北極ヘイズ」と呼ばれる)の違いを観測する事に成功した(Hara *et al.* 2003; Thomason *et al.* 2003; Treffeisen *et al.* 2004, 2005; Yamanouchi *et al.* 2005; 第9図)。大規模な観測ではなかったが、以後、北極で盛んになる航空機観測の先駆けの役割を果たしたと思っている(Yamagata *et al.* 2009など)。

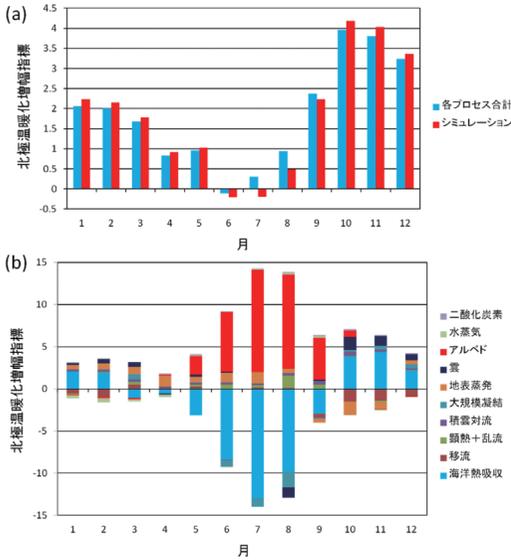
実はその2年前、私は南極観測に参加中に、塩原匡貴氏主導によるわが国の航空機(ダイヤモンドエアサービス社のGulfstream-II)を使った北極海横断航空機大気観測(AAMP98)というものが行われていた(南極資料 2002)。これを受けて、再びAWIと共同でこの2回目の北極海横断航空機大気観測(AAMP02)を実施した。AWIは引き続きサンフォトメータによる大気光学的厚さ(AOD)観測、わが国からは多くのメンバーが参加し、ドロップゾンデの観測からエアロゾル、雲の観測、大気サンプリングによる温室効果気体や同位体比分析、オゾン濃度観測などが行われ、北

極海上空の下部成層圏の様相や、着陸点付近の鉛直分布、ポーラーローの挙動などが明らかにされた(Yamanouchi *et al.* 2003b; Morimoto *et al.* 2003b; Treffeisen *et al.* 2006; Ishidoya *et al.* 2008)。

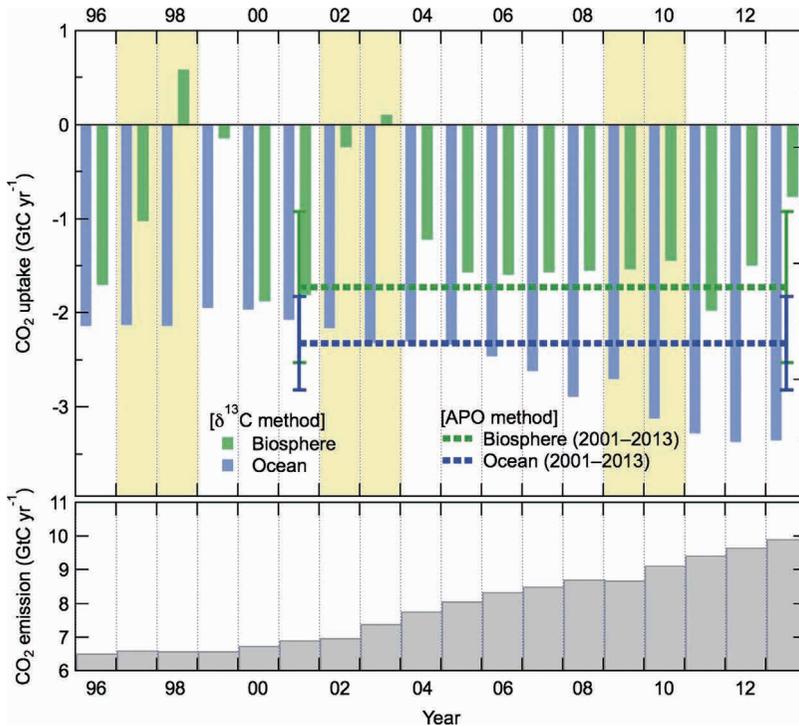
1990年代に入ると、北極域の異常な温暖化が話題になるようになり(第10図)、“Changing the Arctic”と言われ緊急ワークショップなどが開かれ(Morison *et al.* 1998)、北極研究の緊急な必要性が唱えられた。20世紀に入って以降、地球温暖化の進行はあるものの、その2-3倍の勢いで北極域は温暖化している。これは「北極温暖化増幅」と呼ばれ、特に1970年代以降の温暖化が激しい。しかし一方、北極の気温推移をみると、1930-40年代にも大きな温暖化が見え、近年の人為起源CO₂増加による温暖化とは異なるのではないかと議論を呼んでいる(Yamanouchi 2011など)。また、温暖化の進展で、海水の減少が著しく、2007年には夏の水氷域面積が1980年代の半分に減ってしまった(その後2012年がこれまでの最小記録)。こういう背景の下、さらにはわが国の北極研究の存在感を高めたいという希望とが相まって、文部科学省主導のプロジェクトがグリーン・ネットワークオブエクセレンス(GRENE)



第11図 GRENE 北極気候変動研究プロジェクト「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の解明」の構成。4つの戦略目標に対して、7つの研究課題が取り組む。



第12図 温暖化増幅の季節進行. 温暖化増幅指標の季節変化 (a) と要素毎の温暖化増幅 (b) (吉森 2014; 許諾).



第13図 CO₂取り込み (吸収) 量の年々変動, 陸上植物と海によるものの比較 (上) と年々の全 CO₂排出量 (下). $\delta^{13}\text{C}$ および酸素濃度を指標とする APO (Atmospheric potential oxygen) 法による (Goto *et al.* 2017; permitted).

事業「北極気候変動分野」として始まった。「急変する北極気候システム及びその全球的影響の解明」(2011–16年度)というテーマで国立極地研究所が実施主体となり、私がプロジェクト・マネージャーを担った。ここでは、4つの戦略研究目標が文科省側から提示され、それに答える研究課題を公募し、22件の応募から7件を選びプロジェクトを実施した(第11図)。トップダウンとボトムアップが有機的に組み合わせられたユニークな形でのプロジェクトとすることができた。温暖化増幅は主にアイス・アルベド・フィードバックによるので、日射の有効な夏に発現するが、実際の温暖化増幅は秋から冬に起こっているという疑問を解明すべく、気候モデル計算から温暖化増幅の季節進行が明らかにされ、海洋による熱の吸収-放出が効いていることが示された(Yoshimori *et al.* 2014など; 第12図)。北極温暖化の中緯度大気への影響に関する研究では、以前からわが国研究者が世界をリードしてきており、北極温暖化のユーラシア大陸東岸、日本などの寒冬・豪雪への影響が盛んに研究されていたが、GRENE北極プロジェクトにより成層圏を通じた影響伝播が示

れるなどさらに進展をみた(Nakamura *et al.* 2015; Mori *et al.* 2014など)。その他、新しくニーオルスンに設置した雲レーダー(95GHz, FMCWレーダー、千葉大学鷹野敏明氏製作・設置)のデータも使って、低緯度からの湿潤暖気流入が雲や長波放射を通じて北極温暖化に寄与していることも示された(Yamanouchi 2019)。以前から続けられてきたスヴァールバル・ニーオルスンでの観測を受け、CO₂の中の炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ や、酸素濃度の変化から、吸収源(シンク)を明らかにする解析が進められ、陸上生物圏と海洋による吸収の寄与が明らかにされた(Goto *et al.* 2017; 第13図)。さらには、陸上生態系による地上でのCO₂吸収

観測やモデル化されたフラックス評価と大気観測からの評価が比較検証された (Takata *et al.* 2017). その他、雪氷圏、海洋・海水、陸上・海洋生態系の研究等が活発に進められた。オールジャパンによる異分野融合、観測モデル連携を目指した研究プロジェクトであり、多くの関連研究者の参加を得ることができた。北極温暖化増幅を中心課題とした様々な要素のつながりは、まとめのレビュー論文を通じて第14図のように示した (Yamanouchi and Takata 2020). 全てが達成されたとは言えないが、分野を越えた、そしてモデルと観測の境をまたいだ交わりが盛んになり、新しい方向性が生まれたことは確かである。さらには人文・社会科学を巻き込んで、その後の北極域研究推進プロジェクト (ArCS; 2015-20)、北極域研究加速プロジェクト (ArCS II; 2020-25) に発展している。

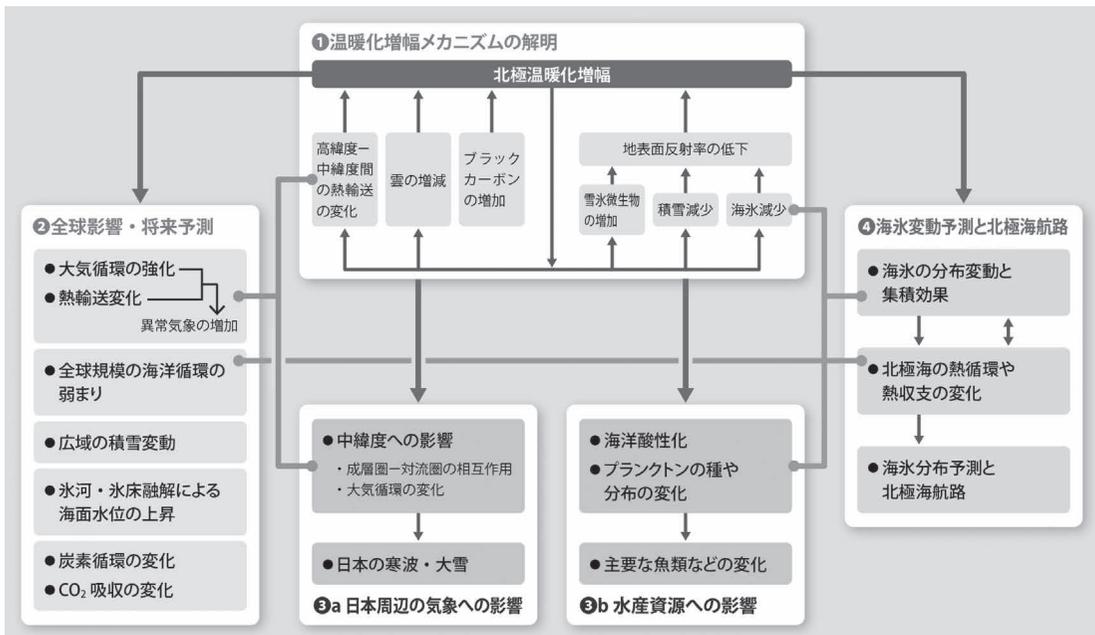
5. 南北温暖化のコントラスト

南極、北極のことを一通りやってくると、両者の同じ面、違う面に興味が出てくる。同じ極域なのに、地球温暖化の下での振る舞いがこうも違うのはどうしてなのだろうかと疑問がわいてくる。北極は地球全体の平均より2倍以上の速さで温暖化が進んでおり (第10

図参照)、「温暖化増幅」と言われる。一方、南極それも本体の東南極では温暖化が顕著でなく、「温暖化抑制」と呼んでいる。地球温暖化の中での極域の役割・影響が様々な議論されている中で、この問題が、私が定年退職する前後から頭から離れない大きな課題となった。自分の解析が進んでいるわけではないが、勉強したことをご紹介して、皆さんのご意見をうかがいたい (真鍋さんが早くに指摘されていました)。

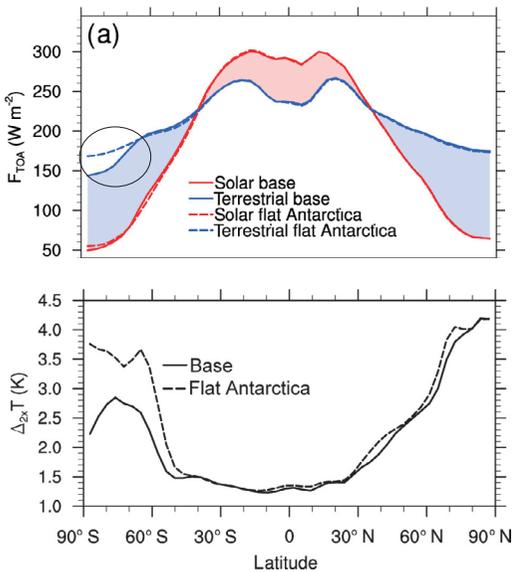
近年よく言われるのは、オゾンホールの影響で南極は温まらないという Thompson and Solomon (2002) 以来の説である。元々低温の南極上空の成層圏、オゾンが減ったことでさらに冷却が進み、低温化、成層圏の極渦は強化され、それが対流圏、地上にもおよび (成層圏-対流圏結合) 対流圏の極渦・西風ジェットも強化 (南極振動=環状モード SAM 正に)、低緯度からの熱輸送を抑え温暖化を抑えるというものである。現在、オゾンホールは解消のきざしが見えてきているので、数十年後には結果が判明するはずである。

第4章で記した、低緯度からの湿潤暖気流入による温暖化加速 (Yamanouchi 2019) が北極温暖化増幅にどのくらいの寄与があるかは未だ未解明だが、南極でも同様な事例は第3章で示した Hirasawa *et al.* (2000)

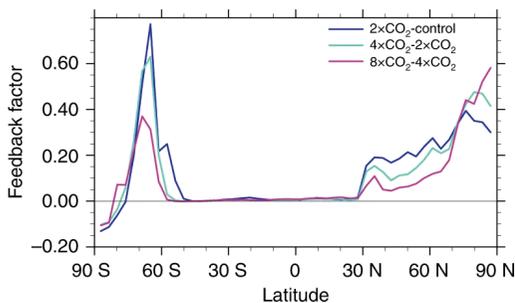


第14図 GRENE 北極気候変動研究プロジェクトのまとめ、北極温暖化増幅のしくみと影響。北極温暖化増幅に寄与する各要素の関係と温暖化増幅の全球影響のしくみ。①~④は、提示された戦略研究目標 (第11図参照) (GRENE 北極気候変動研究事業2011-2016成果報告概要より)。

などのように見られる。これらが、南北で違うか、まさに研究途上であるが、例えば極端な下向き長波放射増大は北極で頻度が高く、どちらかというとな極では寄与が少なそうな結果になっている。その解釈としては、南極氷床の標高が高いこと、即ち、平均標高2200mの南極大陸に阻まれて大気の流れ、即ち熱輸送が抑えられるだろうとの予想である。実際にそのことはモデルでの検証が行われており (Salzmann 2017), CO_2 を2倍にした場合に、南極を平らにした場合と現状の高い大陸がある場合との違いを計算し、標高を下



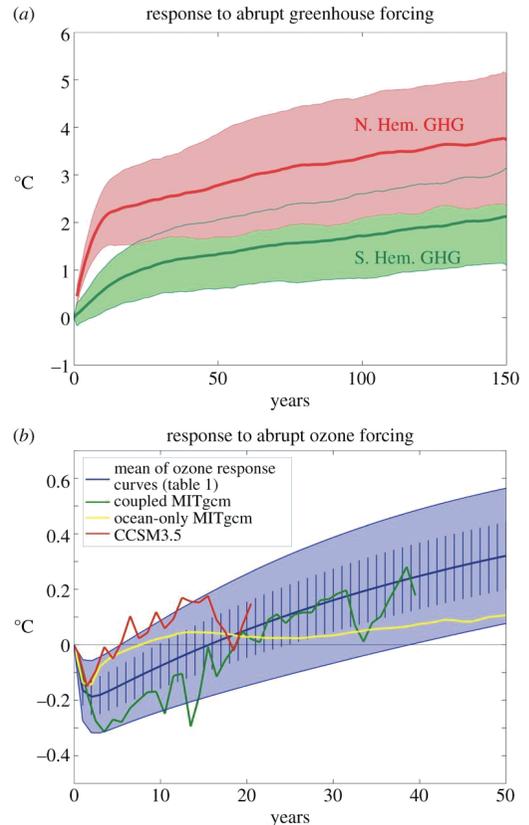
第15図 南極大陸高度の影響。(a) 大気上端の放射収支。(b) $2\times\text{CO}_2$ による地上気温の変化。各々南極大陸標高が現状の場合と平らにした場合 (Salzmann 2017; permitted)。



第16図 アルベド・フィードバックファクターの緯度分布 (Goosse *et al.* 2018; permitted)。南極域では海水の変化する60°S付近が最大で、南極氷床(大陸)上では小さい。

げると熱輸送が大きくなっていること、温暖化が大きくなっていること、ひいては大気上端外向き長波放射も大きくなっていることが示されている(第15図)。標高が下がって地表面気温が高くなっていることの証左だが、同時に短波吸収との差、即ち正味放射損失(冷却)が、そして補われる低緯度からの熱輸送が増大することと整合している。

極域が温暖化増幅する最大の要因は雪氷の存在によるアイス・アルベド・フィードバックにあるが、その効き方の南北での違いも予想される。即ち、雪氷域が短い時間で変動し得る状態でないとか効かないはずである。北極域では海水も陸上の積雪域も短い時間で応答し得る。一方、南極域では、大陸周辺の海水域は短時間で変化し得るが、南極大陸の氷床は少しの短時間の



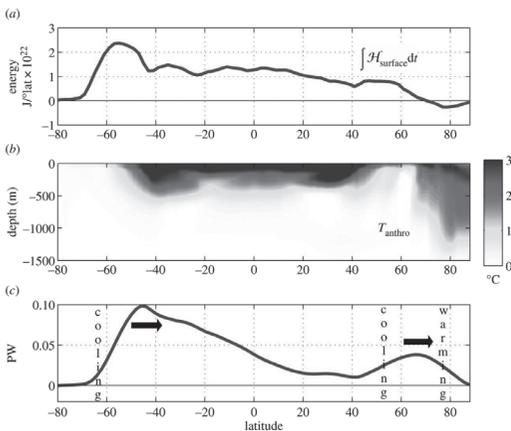
第17図 海面気温の気候応答関数 (CRF) の $4\times\text{CO}_2$ に対する応答。CMIP5モデル15個によるアンサンブル平均、50°N以北の北極 (N. Hem) と50°~70°Sの南極 (S. Hem) の比較。太線、と1標準偏差の範囲が影付 (Marshall *et al.* 2014; permitted)。

気温変化では大きく融解したりしないので、短時間での応答はない。このことも、既に論文化されており (Goosse *et al.* 2018), 南極域では、高緯度ではアイス・アルベド・フィードバックは起こらず、低緯度側で起こることが第16図のように示されている。

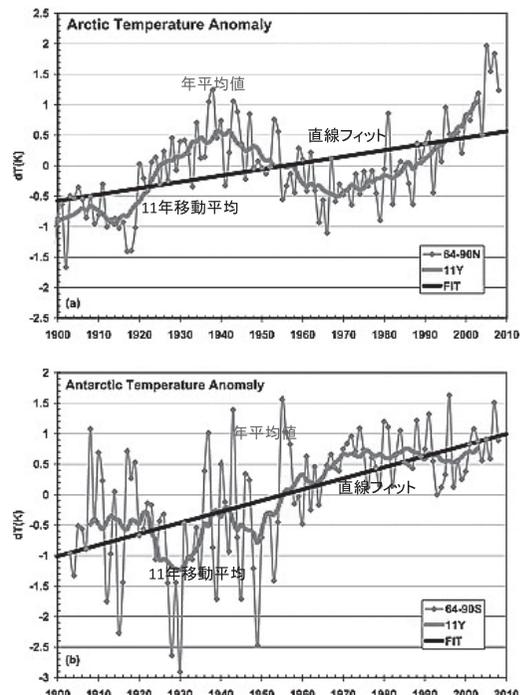
ここまでは、私も認識していた項目であるが、次に述べる海洋循環の影響は私の認知外で大変な驚きであった (周囲の研究者からも聞かされた覚えが無い; Yamanouchi 2021). “The ocean’s role in polar climate change: asymmetric Arctic and Antarctic responses to greenhouse gas and ozone forcing” という題名も私の問題意識にピッタリとしている (Marshall *et al.* 2014). まずは、CO₂を4倍にした100年後の SST の偏差が、大気と海洋の影響を組み入れた大気海洋結合モデルによる結果と海洋の効果だけを入れた海洋モデルでの結果で極めて酷似していることを示された。大気の影響は小さいとつきつけられた。温室効果気体 (GHG) CO₂が4倍に対する気候応答が第17図のように示され、北半球に比べ南半球ではその応答が著しく遅くなっている。その原因は海洋の熱塩循環 (世界の海洋を巡る海流コンベアベルト; Broecker 1987; MOC: Meridional Overturning Circulation), 特に大西洋子午面 (逆転) 循環 (AMOC; 敢えて「逆転」と言いたい) の影響であると、第18図に示された。即ち、AMOC の表層近くの北向き流れにより、いずれ

の半球においても北向きの熱輸送があり、表面吸収熱量は南半球の方が多いのにも関わらず、その熱は北向きに運ばれ、最終的に北極を温める。海洋の寄与が中心かとガッカリしていたが、実はこの北向き流れは大気中の西風で強化されるので、オゾンホールによる SAM 強化にも影響を受けるということで、南北の温暖化コントラスト—bipolar seesaw—には大気も関わっている (Wang *et al.* 2015).

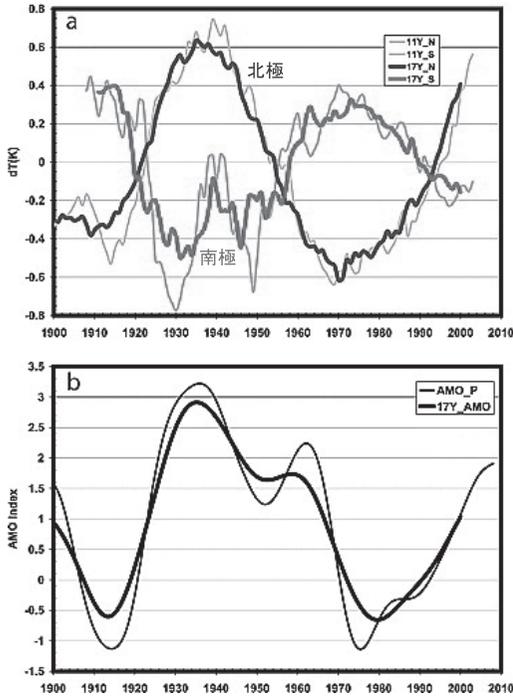
遡って、Chylek *et al.* (2010) は、南極と北極の気温偏差の数十年規模変動が反対称になっており (第19図)、その変動は大西洋数十年規模振動 (AMO) との相関が良いということを示した (第20図)。南北気温の反対称はあまり言われたことがなく、元々南極域の気温データも限られていることから信頼性は落ちるが (1950年代半ば以前は変動が極めて大きい)、確かにそう言われればその通りに見える。そして AMO は AMOC に原因があるということ (Knight *et al.* 2005), 前の段落の説につながる。かつて話題にした20世紀前半温暖化 (Yamanouchi 2011) もきれいに説明



第18図 第17図の条件での100年後の (a) 表面積算熱量、(b) 帯状平均水温変化の子午面断面、(c) 子午面海洋熱輸送の偏差、加熱域と冷却域の緯度帯が表記されている (Marshall *et al.* 2014; permitted). 南半球、北半球いずれにおいても北向き熱輸送で、南極は冷却され北極は加熱される。



第19図 1903~2003年平均からの気温偏差、年平均値と11年移動平均、直線フィット、(上)北極と(下)南極、データはNASA GISSによる (Chylek *et al.* 2010; permitted).



第20図 (a) トレンドを除いた北極と南極の気温時系列11年(細線)ないし17年(太線)移動平均値, (b) AMO指数年々値(細線)と17年移動平均(太線) (Chylek *et al.* 2010; permitted).

される。

ということで、一件落着のような印象があるが、AMO, AMOC, MOC (子午面循環)はまだまだ分からないことが多い。古気候の議論で水期における数千年の変動(ダンスガード・オシュガー・サイクル)が南北でシーソーを示し、その要因がMOCにあることは以前から聞いていたが、2桁も短い数十年のスケールでも変動しているという。大西洋では近年精力的にAMOC表層の流れの実測が行われており、平均的には15~18Sv ($10^6\text{m}^3/\text{s}$; Sverdrup)である。そして最近それが減速してきているということが大きな話題になっている(Caesar *et al.* 2021)。減速するとは北向き熱輸送が縮小し、北極温暖化も弱まるのであろうか？

最近出された韓国の知己の論文で、南極の東西の温暖化の非対称が議論されている(Jun *et al.* 2020)。上記では、本来東南極温暖化抑制を全体で1つと捉えて議論してきたが、実は南極の中で、東南極は温暖化抑制であるが、西南極は南極半島を含め極めて温暖化が進展しているという、大きなコントラストがある。再

解析データとモデルを使って検証しているが、東西の温暖化の違いは、ここ60年近くの地表気温変動の経験的直交関数(EOF)解析により、EOF 2モードと類似性をしめしていることが明らかになり、その要因は気候システムの内部にあり、主に地形の影響であると結論づけられている。ここでも、本章の第3段落目で述べた、南極大陸の標高の高さが寄与(東南極と違い、西南極は全体的に標高が低い)している。さらには、MOCの大西洋側(北上;冷却)と太平洋側(南下;温める)での相違による寄与もあるのではないかと考えたいが、いかがであらうか。

各要素が南北コントラストに寄与していることは間違いないさそうであるが、どの要素がどれだけの寄与をしているかは未解明で今後の課題である。しかし、要は、「南極は大陸(氷床)、北極は海(氷)」が本質で、それにより1)大気の循環が規定され(南極、低緯度からの湿潤暖気流入を抑える、オゾンホールへの寄与、極渦強化、熱流入抑制)、2)アイス・アルベド・フィードバックの効く領域の違いをもたらしさらに、3)海洋子午面循環(MOC)を規定するのだろうか?という論理関係にあるか。将来的にコントラストは弱まる傾向にはあるが、依然残るものと予想される。

6. 終わりにあたってのメッセージ

極域科学(特に大気、雪氷、海洋)が単に遠く離れた場所の特異な現象を扱っているだけではなく、グローバルな仕組み、気候システムを支配する要因を捉えていることから、その重要性は分かっていたかと思う(山内 2009, 2020)。50年近くの研究生活で印象に残った、皆さんにお伝えしたい言葉を挙げたい。

- 観測する人は、観測結果を徹底的に使い尽くす、しゃぶり尽くすことがまず大切。その後でモデルにも及ぶ。解析不十分で、直にモデルには頼らない。
- 研究者は一流たらしめるともかなわない時がある。二流には二流なりの、三流には三流なりの適性があり、それぞれがなくてはならない。研究の流れの方向を変えたり新しい流れを起したりする偉大な業績をあげるの一流の研究者であろうが、それを支える二流、三流の研究者もなくてはならない。私はそうあろうとした(早川幸男「性にあった流儀を選べ」学術月報1985)。私(山内)もそうあろうとした!
- 1つのことを究める—その分野については世界の第一人者になる。異分野融合、学際的研究が推奨される世の中ではあるが、それなくして学際研究はない。

- 自分の専門だけでなく、広い分野に精通—他のことでも勝負できる、学問、文化、芸術、趣味—複線が必要（単線の方は弱い）。単に教養—リベラルアーツ—toに停まらない、生き方の根源、知性。さらに知性だけでなく感性も必要。広く、楽しく！
- 「学者にとっての最大の幸福、よき師、よき友、よき弟子」（貝塚茂樹、「最終講義」西脇順三郎ほか著、実業之日本社、1988より）
- この言葉とともに、ありがとうございました。

謝 辞

お世話になった方々はとても多く、お一人一人記す余地がありません。所属された組織名を挙げて替わりとさせていただきます。

東京工業大学理学部応用物理学科
 東北大学大学院理学研究科地球物理専攻
 （大気海洋変動実験観測センター）
 南極地域観測第20次、28次、38次、52次隊
 国立極地研究所
 気水圏研究グループ
 南極圏環境モニタリング研究センター
 北極環境研究センター
 情報科学センター
 情報図書室
 総合研究大学院大学極域科学専攻
 気象研究所
 各大学・研究所
 GRENE 北極気候変動研究プロジェクト
 北極環境研究コンソーシアム JCAR
 日本気象学会
 南極圏の気象（月例会）
 極域・寒冷域研究連絡会
 日本雪水学会
 日本地球惑星科学連合
 日本学術会議（気象研連、極地研連など）
 IPY 2007-08 Joint Committee
 University of Cambridge
 British Antarctic Survey (BAS)
 Alfred-Wegener Institute on Polar and Marine
 Research (AWI)
 Arctic and Antarctic Research Institute (AARI)
 University of Alaska, Geophysical Institute ;
 International Arctic Research Center
 Ohio State University (OSU), Byrd Polar Research

Center

NASA Langley Research Center
 NASA Goddard Space Flight Center
 National Center for Atmospheric Research
 (NCAR)
 National Oceanic and Atmospheric Administration
 (NOAA)
 National Science Foundation (NSF)
 Colorado State University (CSU)
 University of Washington
 Universität zu Köln
 Ny-Ålesund Science Managers Committee (NyS-
 MAC)
 Scientific Committee on Antarctic Research
 (SCAR)
 International Arctic Science Committee (IASC)
 Intergovernmental Panel on Climate Change
 (IPCC)
 World Meteorological Organization (WMO)
 World Climate Research Programme (WCRP)

参 考 文 献

- Aoki, S., S. Morimoto, S. Ushio, H. Ito, T. Nakazawa, T. Yamanouchi, N. Ono and T. Vinje, 1996: Carbon dioxide variations in the Greenland Sea. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 51, 299-306.
- Aoki, S., T. Nakazawa, T. Machida, S. Sugawara, S. Morimoto, G. Hashida, T. Yamanouchi, K. Kawamura and H. Honda, 2003: Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica. *Tellus B*, 55, 178-186.
- Broecker, W.S., 1987: The biggest chill. *Nat. Hist. Mag.*, 97, 74-82.
- Bromwich, D., A. Stohl, T. Yamanouchi *et al.*, 2011: Polar atmosphere. *Understanding Earth's Polar Challenges: International Polar Year 2007-2008*, ICSU/WMO, 137-154.
- Caesar, L., G. D. McCarthy, D. J. Thornalley, N. Cahill and S. Rahmstorf, 2021: Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geosci.*, 14, 118-120, doi:10.1038/s41561-021-00699-z.
- Chubachi, S., 1984: Preliminary results of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 34, 13-19.
- Chylek, P., C. K. Folland, G. Lesins and M. K. Dubey, 2010: Twentieth century bipolar seesaw of the Arctic and

- Antarctic surface air temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L80703, doi:10.1029/2010GL042793.
- Farman, J. G., B. G. Gardiner and J. D. Shanklin, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature*, **315**, 207-210.
- 藤井理行, 2006: 南極氷床コアから探る過去の地球環境. 日本地球惑星科学連合ニューズレター誌, **2** (1), 3-5.
- Goosse, H. *et al.*, 2018: Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nature Commun.*, **9**, 1919, doi:10.1038/s41467-018-04173-0.
- Goto, D., S. Morimoto, S. Ishidoya, S. Aoki and T. Nakazawa, 2017: Terrestrial biospheric and oceanic CO₂ uptakes estimated from long-term measurements of atmospheric CO₂ mole fraction, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ at Ny-Ålesund, Svalbard. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **122**, 1192-1202, doi:10.1002/2017JG003845.
- Hara, K., S. Yamagata, T. Yamanouchi, K. Sato, A. Herber, Y. Iwasaka, M. Nagatani and H. Nakata, 2003: Mixing states of individual aerosol particles in spring Arctic troposphere during ASTAR 2000 campaign. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108** (D7), 4209, doi:10.1029/2002JD002513.
- Hara, K., K. Osada, M. Kido, M. Hayashi, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, T. Yamanouchi, G. Hashida and T. Fukatsu, 2004: Chemistry of sea-salt particles and inorganic halogen species in Antarctic regions: Compositional differences between coastal and inland stations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **109**, 0208, doi:10.1029/2004JD004713.
- Hara, K., K. Osada, M. Kido, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, G. Hashida and T. Yamanouchi, 2005: Variations of constituents of individual sea-salt particles at Syowa station, Antarctica. *Tellus B*, **57**, 230-246.
- Hara, K., Y. Iwasaka, M. Wada, T. Ihara, H. Shiba, K. Osada and T. Yamanouchi, 2006: Aerosol constituents and their spatial distribution in the free troposphere of coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, D15216, doi:10.1029/2005JD006591.
- Hara, K., K. Osada, M. Yabuki, G. Hashida, T. Yamanouchi, M. Hayashi, M. Shiobara, C. Nishita and M. Wada, 2010: Haze episodes at Syowa Station, coastal Antarctica: Where did they come from? *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D14205, doi: 10.1029/2009JD012582.
- Hara, K., K. Osada, C. Nishita-Hara and T. Yamanouchi, 2011: Seasonal variations and vertical features of aerosol particles in the Antarctic troposphere. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 5471-5484, doi:10.5194/acp-11-5471-2011.
- Hara, K., K. Osada and T. Yamanouchi, 2013: Tethered balloon-borne aerosol measurements: seasonal and vertical variations of aerosol constituents over Syowa Station, Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9119-9139, doi:10.5194/acp-13-9119-2013.
- Hara, K., K. Osada, M. Yabuki, H. Takashima, N. Theys and T. Yamanouchi, 2018: Important contributions of sea-salt aerosols to atmospheric bromine cycle in the Antarctic coasts. *Sci. Rep.*, **8**, doi:10.1038/s41598-018-32287-4.
- Hayashi, M., M. Sudo, K. Shiraishi, N. Hirasawa, T. Yamanouchi, T. Shibata, Y. Iwasaka, M. Nagatani and A. Nakada, 2004: Data of Project on Atmospheric Circulation and Material Cycle in the Antarctic, Part 3. Back-scattering Properties of Tropospheric Clouds and Aerosols Observed by a Lidar at Dome Fuji Station in 1997. *JARE Data Rep. Meteor.*, **38**, 105pp.
- 平沢尚彦, 2017: 南極氷床縁辺部のエアロゾル分布の特徴とカタバ風の関わり. *気象研究ノート*, (233), 287-295.
- Hirasawa, N., H. Nakamura and T. Yamanouchi, 2000: Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1911-1914.
- Hirasawa, N., H. Nakamura, H. Motoyama, M. Hayashi and T. Yamanouchi, 2013: The role of synoptic-scale features and advection in prolonged warming and generation of different forms of precipitation at Dome Fuji station, Antarctica, following a prominent blocking event. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 6916-6928, doi:10.1002/jgrd50532.
- Ishidoya, S., S. Sugawara, G. Hashida, S. Morimoto, S. Aoki, T. Nakazawa and T. Yamanouchi, 2006: Vertical profiles of the O₂/N₂ ratio in the stratosphere over Japan and Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13701, doi:10.1029/2006GL025886.
- Ishidoya, S., S. Morimoto, S. Sugawara, T. Watai, T. Machida, S. Aoki, T. Nakazawa and T. Yamanouchi, 2008: Gravitational separation suggested by O₂/N₂, $\delta^{15}\text{N}$ of N₂, $\delta^{18}\text{O}$ of O₂, Ar/N₂ observed in the lowermost part of the stratosphere at northern middle and high latitudes in the early spring of 2002. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L03812, doi:10.1029/2007GL031526.
- Iwasaka, Y., 1986. Lidar measurement on the Antarctic stratospheric aerosol layer: [II] The changes of layer height and thickness in winter. *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 99-109.
- Jun, S.-Y., J.-H. Kim, J. Choi, S.-J. Kim, B.-M. Kim and S.-I. An, 2020: The internal origin of the west-east asymmetry of Antarctic climate change. *Sci. Adv.*, **6**, doi:10.1126/sciadv.aaz1490.
- Knight, J. R., R. J. Allan, C. K. Folland, M. Vellinga and M.E. Mann, 2005: A signature of persistent natural

- thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20708, doi:10.1029/2005GL024233.
- Konishi, H., M. Wada and T. Endoh, 1994: Seasonal variation of precipitating clouds near Syowa Station, Antarctica derived from liquid water content data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 709-717.
- Lanconelli, C., M. Busetto, E. G. Dutton, G. Konig-Langlo, M. Maturilli, R. Sieger, V. Vitale and T. Yamanouchi, 2011: Polar baseline surface radiation measurements during the International Polar Year 2007-2009. *Earth Syst. Sci. Data*, **3**, 1-8, doi:10.5194/essd-3-1-2011.
- Liljequist, G. H., 1956: Energy exchange of an Antarctic snow-field. *Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition 1949-1952, Scientific Results, vol. 2, Part 1*, Norsk Polarinstitut, Oslo, 184pp.
- Marshall, J., K. C. Armour, J. R. Scott, Y. Kostov, U. Hausmann, D. Ferreira, T. G. Shepherd and C. M. Bitz, 2014: The ocean's role in polar climate change: asymmetric Arctic and Antarctic responses to greenhouse gas and ozone forcing. *Philos. Trans. Roy. Soc.*, **A372**, 20130040, doi:10.1098/rsta.2013.0040.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geosci.*, **7**, 869-873.
- Morimoto, S., T. Nakazawa, S. Aoki, G. Hashida and T. Yamanouchi, 2003a: Concentration variations of atmospheric CO₂ observed at Syowa Station, Antarctica from 1984 to 2000. *Tellus B*, **55**, 170-177.
- Morimoto, S., T. Watai, T. Machida, M. Wada and T. Yamanouchi, 2003b: In-situ measurement of the ozone concentration in the Arctic Airborne Measurement Program 2002 (AAMP 02). *Polar Meteor. Glaciol.*, **17**, 81-93.
- Morimoto, S., S. Aoki, T. Nakazawa and T. Yamanouchi, 2006: Temporal variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric methane observed at Ny-Ålesund, Svalbard from 1996 to 2004. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01807, doi:10.1029/2005GL024648.
- Morimoto, S., T. Yamanouchi, H. Honda, S. Aoki, T. Nakazawa, S. Sugawara, S. Ishidoya, I. Iijima and T. Yoshida, 2009: A new compact cryogenic air sampler and its application in stratospheric greenhouse gas observation at Syowa Station, Antarctica. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**, 2182-2196.
- Morison, J., K. Aagaard and M. Steele, 1998: Report on Study of the Arctic Change Workshop held November 10-12, 1997, University of Washington, Seattle, Washington. Report No. 8, Polar Science Center, Applied Physics Laboratory, University of Washington, 34pp.
- Murayama, S., T. Nakazawa, K. Yamazaki, S. Aoki, Y. Makino, M. Shiobara, M. Fukabori, T. Yamanouchi, A. Shimizu, M. Hayashi, S. Kawaguchi and M. Tanaka, 1995: Concentration variations of atmospheric CO₂ over Syowa Station, Antarctica and their interpretation. *Tellus B*, **47**, 375-390.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa and J. Ukita, 2015: A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 3209-3227, doi:10.1002/2014JD022848.
- Nakaoka, S., S. Aoki, T. Nakazawa, G. Hashida, S. Morimoto, T. Yamanouchi and H. Yoshikawa-Inoue, 2006: Temporal and spatial variations of oceanic pCO₂ and air-sea CO₂ flux in the Greenland Sea and the Barents Sea. *Tellus B*, **58**, 148-161.
- Nakazawa, T., S. Aoki, S. Murayama, M. Fukabori, T. Yamanouchi, H. Murayama, M. Shiobara, G. Hashida, S. Kawaguchi and M. Tanaka, 1991: The concentration of atmospheric carbon dioxide at the Japanese Antarctic Station, Syowa. *Tellus B*, **43**, 126-135.
- 南極資料, 2002: 北極圏航空機観測 (AAMP 98) 成果特集. **46**, 286pp.
- Osada, K., K. Hara, M. Wada, T. Yamanouchi and K. Matsunaga, 2006: Lower tropospheric vertical distribution of aerosol particles over Syowa Station, Antarctica from spring to summer in 2004. *Polar Meteor. Glaciol.*, **20**, 16-27.
- Raschke, E., T. H. Vonder Harr, W. R. Bandeen and M. Pasternak, 1973: The annual radiation balance of the earth-atmosphere system during 1969-70 from Nimbus 3 measurements. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 341-364.
- Salzmann, M., 2017: The polar amplification asymmetry: role of Antarctic surface height. *Earth Syst. Dyn.*, **8**, 323-336.
- 佐藤 薫, 2019: 南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) と高解像中層大気力学研究—2018年度藤原賞受賞記念講演—. *天気*, **66**, 5-15.
- Sato, K., Y. Tomikawa, G. Hashida, T. Yamanouchi, H. Nakajima and T. Sugita, 2009: Longitudinally dependent ozone increase in the Antarctic polar vortex revealed by balloon and satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1807-1820.
- Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagishi and T. Yamanouchi, 2014: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*,

- 118, 2-15.
- Scott, R. F., 1913: Scott's Last Expedition. Vol. I. Being the Journals of Captain R. F. Scott, R. N., C. V. O. (arranged by L. Huxley), Smith, Elder & CO., London, 633pp.
- Shiobara, M., M. Yabuki and H. Kobayashi, 2003: A polar cloud analysis based on Micro-pulse Lidar measurements at Ny-Ålesund, Svalbard, and Syowa, Antarctica. *Phys. Chem. Earth*, **28**, 1205-1212.
- 白瀬 轟, 1998: 私の南極探検記. 日本図書センター, 298pp.
- Solomon, S., R. R. Garcia, F. S. Rowland and D. J. Wuebbles, 1986: On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, **321**, 755-758.
- Suzuki, K., T. Yamanouchi and H. Motoyama, 2008: Moisture transport to Syowa and Dome Fuji stations in Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D24114, doi:10.1029/2008JD009794.
- Suzuki, K., T. Yamanouchi, K. Kawamura and H. Motoyama, 2013: The spatial and seasonal distributions of air-transport origins to the Antarctic based on 5-day backward trajectory analysis. *Polar Sci.*, **7**, 205-213.
- Takata, K. *et al.*, 2017: Reconciliation of top-down and bottom-up CO₂ fluxes in Siberian larch forest. *Environ. Res. Lett.*, **12**, 125012, doi:10.1088/1748-9326/aa926d.
- Thomason, L. W., A. B. Herber, T. Yamanouchi and K. Sato, 2003: Arctic study on tropospheric aerosol and radiation: Comparison of tropospheric aerosol extinction profiles measured by airborne photometer and SAGE II. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1328, doi:10.1029/2002GL016453.
- Thompson, D. W. J. and S. Solomon, 2002: Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, **265**, 895-899.
- Tomasi, C. and T. Yamanouchi *et al.*, 2007: Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **112**, D16205, doi:10.1029/2007JD008432.
- Tomikawa, Y., Y. Nishimura and T. Yamanouchi, 2009: Characteristics of tropopause and tropospheric inversion layer in the polar region. *SOLA*, **5**, 141-144.
- Tomikawa, Y., M. Nomoto, H. Miura, M. Tsutsumi, K. Nishimura, T. Nakamura, H. Yamagishi, T. Yamanouchi, T. Sato and K. Sato, 2015: Vertical wind disturbances during a strong wind event observed by the PANSY radar at Syowa Station, Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1804-1821.
- Treffeisen, R., A. Herber, J. Ström, M. Shiobara, T. Yamanouchi, S. Yamagata, K. Holmen, M. Kriews and O. Schrems, 2004: Interpretation of Arctic aerosol properties using cluster analysis applied to observations in the Svalbard area. *Tellus B*, **56**, 457-476.
- Treffeisen, R., A. Rinke, M. Fortmann, K. Dethloff, A. Herber and T. Yamanouchi, 2005: A case study of the radiative effects of Arctic aerosols in March 2000. *Atmos. Environ.*, **39**, 899-911.
- Treffeisen, R. E., L. W. Thomason, J. Strom, A. Herber, S. P. Burton and T. Yamanouchi, 2006: Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II and III aerosol extinction measurements in the Arctic middle and upper troposphere. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, D17203, doi:10.1029/2005JD006271.
- Turner, J., T. Yamanouchi *et al.*, 2009: Observations, data accuracy and tools. *Antarctic Climate Change and the Environment: A Contribution to the International Polar Year 2007-2008* (J. Turner *et al.* eds.), *Sci. Comm. Antarctic Res.*, 526pp.
- 和田 誠, 猪原 哲, 芝 治也, 2001: 第41次南極地域観測隊航空機大気観測報告2000-2001. *南極資料*, **45**, 257-278.
- Wang, Z., X. Zhang, Z. Guan, B. Sun, X. Yang and C. Liu, 2015: An atmospheric origin of the multi-decadal bipolar seesaw. *Sci. Rep.*, **5**, 8909, doi:10.1038/srep08909.
- Wood, K. R. and J. E. Overland, 2006: Climate lessons from the first International Polar Year. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1685-1697.
- Yamagata, S., D. Kobayashi, S. Ohta, N. Murao, M. Shiobara, M. Wada, M. Yabuki, H. Konishi and T. Yamanouchi, 2009: Properties of aerosols and their wet deposition in the arctic spring during ASTAR2004 at Ny-Ålesund, Svalbard. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 261-270.
- Yamanouchi, T., 1983: Variation of incident solar flux and snow albedo on the solar zenith angle and cloud cover, at Mizuho Station, Antarctica. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 879-893.
- 山内 恭, 2009: 南極・北極の気象と気候 (気象ブックス 27). 成山堂書店, 204pp.
- 山内 恭, 2010: 「極域大気・物質循環研究」の系譜. *南極資料*, **54**, 245-273.
- Yamanouchi, T., 2011: Early 20th century warming in the Arctic: A review. *Polar Sci.*, **5**, 53-71.
- 山内 恭, 2016: 極域気象研究の系譜と極域・寒冷域研究連絡会. *天気*, **63**, 157-171.
- Yamanouchi, T., 2019: Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Sci.*, **21**, 110-116.
- 山内 恭, 2020: 南極と北極—地球温暖化の視点から (サイエンスパレット37). 丸善出版, 190pp.
- Yamanouchi, T., 2021: Arctic warming amplification and

- warming suppression in East Antarctica-Contribution of MOC to north-south asymmetry-. *Okhotsk Sea Polar Oceans Res.*, **5**, 1-6.
- Yamanouchi, T. and T. P. Charlock, 1995: Comparison of radiation budget at the TOA and surface in the Antarctic from ERBE and ground surface measurements. *J. Climate*, **8**, 3109-3120.
- Yamanouchi, T. and T. P. Charlock, 1997: Effects of clouds, ice sheet, and sea ice on the earth radiation budget in the Antarctic. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**, 6953-6970.
- Yamanouchi, T. and S. Kawaguchi, 1984: Longwave radiation balance under a strong surface inversion in the katabatic wind zone, Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **89**, 11771-11778.
- Yamanouchi, T. and S. Kawaguchi, 1992: Cloud distribution in the Antarctic from AVHRR data and radiation measurements at the surface. *Int. J. Remote Sens.*, **13**, 111-127.
- Yamanouchi, T. and J. B. Orbaek, 1995: Comparative study of the surface radiation budget at Ny-Ålesund, Svalbard and Syowa Station, Antarctica, 1987. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteor. Glaciol.*, **9**, 118-132.
- 山内 恭, 瀬古勝基編, 1992: NOAA 衛星から見た南極一雲・氷・雪. 国立極地研究所, 91pp.
- Yamanouchi, T. and K. Takata, 2020: Rapid change of the Arctic climate system and its global influences-Overview of GRENE Arctic climate change research project (2011-2016). *Polar Sci.*, **25**, doi:10.1016/j.polar.2020.100548.
- Yamanouchi, T. and M. Wada, 1992: Microwave signature of polar firn and sea ice in the Antarctic from airborne observation. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteor. Glaciol.*, **6**, 16-35.
- Yamanouchi, T., K. Suzuki and S. Kawaguchi, 1987: Detection of clouds in Antarctica from infrared multi-spectral data of AVHRR. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 949-962.
- Yamanouchi, T., S. Aoki, S. Morimoto and M. Wada, 1996: Report of atmospheric science observations at Ny-Ålesund, Svalbard. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 153-163.
- Yamanouchi, T., N. Hirasawa, M. Hayashi, S. Takahashi and S. Kaneto, 2003a: Meteorological characteristics of Antarctic inland station, Dome Fuji. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **57**, 94-104.
- Yamanouchi, T., M. Wada, M. Shiobara, S. Morimoto, Y. Asuma, S. Yamagata *et al.*, 2003b: Preliminary report of the "Arctic Airborne Measurement Program 2002" (AAMP 02). *Polar Meteor. Glaciol.*, **17**, 103-115.
- Yamanouchi, T., R. Treffeisen, A. Herber, M. Shiobara, S. Yamagata, K. Hara, K. Sato, M. Yabuki, Y. Tomikawa, A. Rinke, R. Neuber, R. Schumacher, M. Kriews, J. Strom, O. Schrems and H. Gernandt, 2005: Arctic study of tropospheric aerosol and radiation (ASTAR) 2000: Arctic haze case study. *Tellus B*, **57**, 141-152.
- 吉森正和, 2014: 北極温暖化増幅. 細氷 (日本気象学会北海道支部報), **60**.
- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, M. Watanabe, A. Oka and T. Ogura, 2014: Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of the MIROC GCM. *J. Climate*, **27**, 6358-6375.

Memories of more than 40 years studies in polar atmosphere and climate sciences

Takashi YAMANOUCHI*

* *National Institute of Polar Research and the Graduate University for Advanced Sciences (SOKENDAI), Tokyo 190-8518, Japan*
E-mail: yamanou@nipr.ac.jp

(Received 30 July 2021; Accepted 17 September 2021)
