

「極域大気・物質循環研究」の系譜

山内 恭^{1,2*}

Progress of “Study on Polar Atmospheric Circulation and Material Cycle”

Takashi Yamanouchi^{1,2*}

(2010年2月15日受付; 2010年4月24日受理)

Abstract: An overview is given of the project of the National Institute of Polar Research (NIPR) “Study of Material Cycle in the Polar Atmosphere, Ocean and Cryosphere”. Most of the subjects in the study had been conducted under related observational projects in the Antarctic, “Atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic” (FY1996–2000), “Global Atmospheric Change in the Antarctic” (FY2001–2005), priority research project “Study on the Global Environmental System with the Interactions between Space, Atmosphere and Ocean”, monitoring study on “Atmospheric Minor Constituents”, observations in the Arctic, and analysis studies. Reviewing these 15 years of study and related projects, we find that the study revealed progress in understanding the “polar atmospheric circulation and material cycle”. Even though each study or paper showed only one part of the variation of single atmospheric constituent, as a whole, we gained good understanding of features of the “polar atmospheric circulation and material cycle”.

要旨: 国立極地研究所のプロジェクト研究「極域大気—海洋—雪氷圏における物質循環の解明」の全体像を概観した。この研究は、現場観測としては、南極での研究プロジェクト、第Ⅴ期（1996–2000年度）の「南極大気・物質循環観測」、第Ⅵ期（2001–2005年度）の「南極域における地球規模大気変化観測」、第Ⅶ期（2006–2009年度）重点プロジェクト「極域宙空—大気—海洋の相互作用からとらえる地球環境システムの研究」の一部、および各期を通しての「大気微量成分モニタリング」、そして北極域スバルバル・ニーオルスン基地を中心とした大気観測に基づくものであり、さらに大気循環の解析的研究についても含めた。全体を通して、極域の大気・物質循環研究がこの15年ではいかに進められてきたかを眺め、その研究の進展の跡をたどった。極域の物質循環、特に大気中物質の変動を中心に、大気循環との関わり、大気輸

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

² 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

* E-mail: yamanou@nipr.ac.jp

送との関連に重点をおいた。個々の研究や論文は、一つの物質の変化を限られた側面から見たに過ぎないものも多いが、全体を組み合わせることで、極域の大気・物質循環像に迫ることができた。

1. はじめに

本まとめ報告書は、国立極地研究所（以下、極地研）のプロジェクト研究（P3）「極域大気—海洋—雪氷圏における物質循環の解明」の総合報告として位置づけることが第一の目的である。我々のグループではこれまでも、大気中の物質循環についての研究はかなり進んできていたし、雪氷、海洋グループでは各々雪氷圏、海洋中の物質循環の議論はされてきていた。しかし、各圏の中での物質循環だけでなく、各圏をまたがる物質循環の重要性が認識され、そういう圏間の物質循環にも焦点をあてて総合的な解析をしようという計画であった。具体的には、南極・北極における観測によって得られた結果の解析を担うプロジェクトであった。平成16年度～21年度の6カ年計画で、極地研が大学共同利用機関法人、すなわち情報・システム研究機構となった時からこのような「プロジェクト研究」は始まったもので、実質的にはそれ以前に特別共同研究と呼ばれたジャンルと大幅に違うものではなかった。従って、「プロジェクト」とは言いながら個別のテーマの寄せ集めで、プロジェクト本来のもつべき一貫したテーマ性、集約度は弱いものになりがちであったが、なんとかまとめの報告書を作ることで、プロジェクトとしての求心力を維持しようとねらった。どこまでそのもくろみが成り立っているかは、本論をみていただくしかない。

実質的には、「大気・物質循環」の観測・研究が中心である。既に「まえがき」に記したように、大気循環、物質循環を明らかにするものだが、特に物質循環を大気循環との関係でみていくところに特徴を有する。自然的であれ、人為的であれ、発生源・吸収源の少ない極域では、物質の変動が輸送によって支配されていることが多いということで、大気の輸送過程、大気循環との関わりが特に重要になってくる。従って、大気中の物質循環が中心的な成果となっているが、一部、大気—海洋間の交換、大気中二酸化炭素の海洋への吸収や海洋生物起源物質の大気への放出、大気—雪氷間の交換、大気中物質の雪氷・氷床コアへの取り込み、反応性大気成分の雪氷からの放出などにも及んでいる。

なぜこの課題が取り上げられたか。現在の極域で最大の問題が極域変動であり、その極域変動を支配する、あるいは示す、大きな要素が物質循環と気候であろう（図1参照）。気候変動も古くから論じられてきている重要な課題であるが、今現在やり得ること、観測手法として新しい結果を得られる方法論的見通しが不十分であったことから、これはしばしば将来の課題、新しい観測のブレークスルーが得られてから取り組むこととした。一方、物質循環については、ここしばらくの観測からも新しい成果が得られており、この課題に取り組むことで、特に大気循環との関わりを考究することで、大いに進展が期待されたため

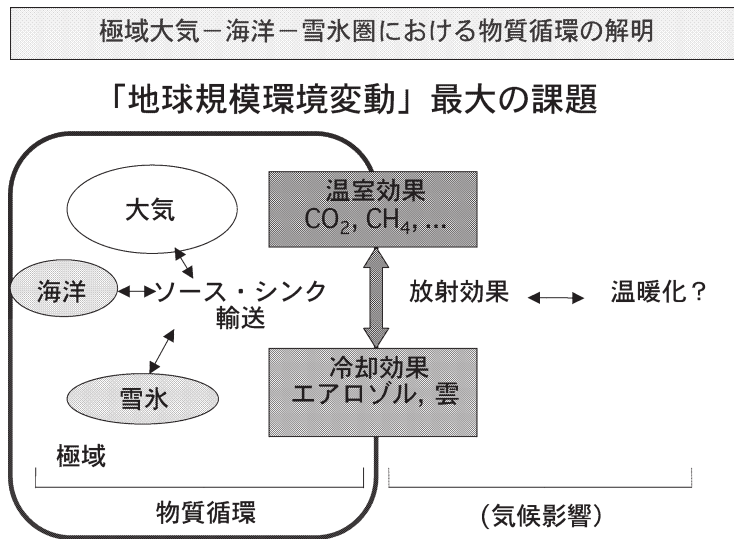


図1 「極域大気－海洋－雪氷圏における物質循環の解明」(左の囲み内)は「地球規模環境変動」最大の課題の一つである。

Fig. 1. "Material cycle in the polar atmosphere-ocean-cryosphere" is one of the largest topics of global environment change study.

である。

本研究の基盤になった観測計画は、1990年代半ばからの南極・北極にまたがる、多岐にわたるものであった。南極地域観測の中では、1996年度～2000年度の、第38次日本南極地域観測隊（以下、第～次隊）から第42次隊による「南極大気・物質循環観測」、2001年度～2005年度、第43～47次隊による「南極域における地球規模大気変化観測」が中心となったプロジェクト研究観測であり、さらに2006年度～2009年度、第48～51次隊の重点プロジェクト観測「極域における宙空－大気－海洋の相互作用からとらえる地球環境システムの研究」からも一定の結果を得ている。全期間に通奏するのは、「大気微量成分モニタリング観測」であり、観測開始以来のデータの蓄積がベースになることで、上記のプロジェクト観測も生かされてくる。一方、北極域では1990年代当初から始まったスバル・ニーオルスン基地における大気観測、それらを核にした航空機観測、グリーンランド海やバレンツ海の航海観測も資料を提供している。そして、南極・北極を通じて物質循環の一側面をもたらす大気の輸送過程を明らかにする解析も進められた。以下、本稿ではこれらの各計画でどのような結果が得られてきたかを概観する。

2. 前 史

本報告書の対象とする南極大気物質循環観測の前にも、連綿としてプロジェクト的研究観測課題が取り上げられてきた。

1976-1978 年, 第 17-19 次隊においては, 「南極におけるエアロゾルおよび微量気体成分の研究」(気象庁方式の呼称で「エアロゾル」と呼んだ) が取り上げられ, 直達日射計や分光日射計を使ったエアロゾルによる消散係数の観測から, 氷晶核, 凝結核としての雲物理的扱い, エアロゾルの粒径別数濃度観測や電子顕微鏡による観察など, 近年のエアロゾル観測の嚆矢が実施された (Ito, 1985).

1978 年の第 20 次隊からは, POLEX-South 計画として, 3 年間の計画が取り上げられた. これは, 国際的な協同研究計画である GARP (Global Atmospheric Research Program=地球大気開発計画) の一環であり, Polar Experiment の略で「極域気水圏計画」と訳されたが, 余りに一般的で特定の概念を現す言葉になっていない. 極地研および南極観測隊の気象・大気科学, 雪氷, 海水・海洋を研究する部門を「気水圏グループ」と称することになったのもこのときからである (これ以前は, 気象は超高層物理分野, 雪氷は地学分野の一部ということで, 別の研究グループであった). いずれにしても, 南極観測計画の中で, 大規模な国際協同研究計画の一端を位置づけるようになったのもこの頃からである. 南極がグローバルな中でどのような役割を果たしているかが問われるようになった. 研究・観測課題は, 放射収支, 境界層と熱収支, カタバ風, 大気-海水相互作用, 大気循環などであり, 内陸カタバ風帯のみずほ基地に 30 m の観測塔を建て, 放射や境界層観測を行ったほか, 低層ゾンデ, 広域移動気象観測, 昭和基地での海水上熱収支観測, 航空機観測, 無人気象観測, 衛星観測などを実施した. カタバ風帯での 3 年間にわたる精緻な観測は国際的にも大変ユニークなものであり, 多くの論文が出され, 引用されるようになり, わが国の南極気象学研究が世界的に一步を踏み出したものとして認められる基盤を作った (Yamanouchi, 1983; Yamanouchi and Kawaguchi, 1984; Ohata *et al.*, 1985; Inoue, 1989a, b).

1982-1985 年の 4 年間は, MAP (Middle Atmosphere Program=中層大気国際協同研究) として「南極中層大気の総合観測」を実施した. 南極上空の対流圏から電離圏に至る大気の組成, 放射, 運動を研究するもので, オゾンの総合観測により, 計画当初は全く予想しなかったオゾンホールが発見につながり, ライダーによるエアロゾル観測から極成層圏雲の確認がなされ, フーリエ変換赤外分光計 (FTIR) による微量気体成分の測定, ゾンデや航空機によるエアロゾル鉛直分布の観測, 気象ロケットによる大気重力波の観測などのほか, 大気中の二酸化炭素濃度の連続観測もこの中で開始された (Tanaka *et al.*, 1987).

1986 年度~1990 年度, 越冬年では 1987-1991 年にかけて, 第 28-32 次隊により「南極における気候変動に関する総合研究」(ACR: Antarctic Climate Research) が世界気候変動研究計画 (WCRP: World Climate Research Program) の下に取り上げられた. 昭和基地での極軌道気象衛星 NOAA の高密度データの受信と, スーパーミニコンを持ち込んだ現場での解析処理, 特に雲・海水分布の導出, 放射収支観測, 垂直および PPI レーダを持ち込

んでの雲・降水の観測、それまでの二酸化炭素に加えて、大気微量成分の観測（温室効果気体やオゾン、エアロゾル）の観測など、昭和基地に加えて南極観測船「しらせ」船上でも行った）、新しいあすか観測拠点（後に基地）での観測や、無人気象観測を含む広域気象観測などが行われた（南極資料、1997）。

1991年度～1995年度には、第33-37次隊により、「南極大気化学観測計画」が地球圏生物圏国際研究計画（IGBP: International Geosphere Biosphere Program）/国際地球規模大気化学計画（IGAC: International Global Atmospheric Chemistry）の一環として実施された。この中では、特に大気微量成分の観測が中心的に取り上げられ、エアロゾルの観測、大気中硫黄成分の観測（硫化ジメチルを含む; Koga *et al.*, 1999; Mouri *et al.*, 1999）、成層圏オゾンやオゾン破壊物質に関するヘテロダイン分光計による観測（Koide, 1997）、気球や地上での温室効果気体の観測の拡充、そしてエアロゾルに関わる（Osada *et al.*, 1998）大気中ラドン濃度の観測（Ui *et al.*, 1998）まで行われた。

航空機による対流圏での大気採取も、MAP, ACR 観測期間を通じて以前から続けられてきたものが分析、解析されている（Murayama *et al.*, 1995, 1998）。CO₂ 濃度についての季節変化は上空の方が若干早めであり、また、平均濃度も上空の方が高めであることが多いなど、対流圏上空を伝わっての低緯度から高緯度南極域へのCO₂の輸送があることが示唆された。さらに、NMC（National Meteorological Center＝米国気象センター）気象客観解析データに基づきトラジェクトリー解析が行われ、秋～冬にかけて対流圏上部を通して北半球のCO₂濃度の高い大気が輸送され、ほかの季節には南半球中緯度のCO₂濃度の低い大気が対流圏低層を通して輸送されている様子が表されるなど、本課題に関する先駆的研究がなされている（Murayama *et al.*, 1995）。

このように、本研究で取り上げる観測計画以前にも、多くの計画の中で大気中物質の観測・研究がなされてきている。1980年代半ばまでの研究については、「南極の科学3：気象」（国立極地研究所編、1988）にまとめられている。

3. 南極大気・物質循環観測

1997年、第38次隊の越冬期から、第V期5カ年計画の大気科学関係プロジェクト研究観測として「南極大気・物質循環観測」が始められた。これは、南極域における大気循環場と大気微量物質の挙動、およびその関連を明らかにすることを目的としたものである。まさに、本まとめ報告書にある全体を貫く考え方が位置づけられた最初の計画であった。気候に影響する放射活性な温室効果気体やオゾン、関連物質、エアロゾル等の微量成分、さらには水蒸気等が、低緯度から高緯度に、南極沿岸から内陸へ、成層圏から対流圏へ、さらに大気圏から氷床にどのように輸送され変質していくかという「物質循環」を、大気の流れ、大気循環との関連で捉えていこうという計画であった（山内ほか、1999; Yamanouchi

et al., 1999a).

本計画に先立って、前章で示したようないくつかの計画が積み重ねられ実施されている。これらの中で、例えば大気中二酸化炭素濃度等の精密な測定が昭和基地で継続され、その結果、北半球中緯度と似たような経年変化で増加傾向を示すが、数年の遅れを伴っていること、明瞭な季節変化はあるものの、位相、振幅とも際立った違いがあること、経年変化傾向には年々の変動が顕著である事等が明らかになってきた (Morimoto *et al.*, 2003a)。

1997年の第38次隊では、内陸のドームふじ基地で越冬しての大気観測が最大の課題であった。もともと氷床深層掘削が行われた基地であるが、南極大陸内陸の標高3800mのドームの頂上ということで代表性が大きく、大気科学にとっても世界的に珍しく、極めて興味ある場所である。地上気象観測は、その2年前から延べ3年間にわたって有人観測が行われたが (Japan Meteorological Agency, 1996, 1997; 気象庁, 1998), その他、ヴァイサラ社製のゾンデを使った高層気象観測 (Hirasawa *et al.*, 1999), オゾンゾンデ観測, 地表放射収支観測 (平沢・藤田, 2008a), エアロゾル観測, 地表オゾン観測, ライダーによるエアロゾルの鉛直分布観測 (林, 2001) が実現した。これらの大規模な大気観測は、1年間ながら、ほかに例をみない大変貴重な観測であった。

観測期間中、冬季の6月に、1日余りの間に地上気温が -70°C 台から -30°C 以上へと急上昇する地上気温の「突然昇温」が捉えられた。これは、西からの大気の流れが止められるブロッキング高気圧の発生によるもので、高気圧前面に大気の低緯度から高緯度への流れが起こり、高温多湿の大気を持ち込まれたためであることが解明された (Hirasawa *et al.*, 2000)。このような内陸域の地上気温急上昇をもたらすブロッキング現象は、毎年数例は発生しており、決して珍しい現象ではないことが明らかにされていたが (Enomoto *et al.*, 1998), この1997年6月ほど顕著な、昇温の大きい現象は珍しいものであった。この時には地上および対流圏だけでなく、成層圏も大きく影響を受けており、中緯度の大气構造が侵入してきた形になり、圏界面も著しく上昇し、特異な大気の流れの場が生じている (Hatsushika and Yamazaki, 2000)。そのことを反映して、ライダーで捉えたエアロゾル・雲粒子の鉛直分布にも、成層圏での活発な粒子・極成層圏雲 (PSCs) の存在、元の極域冬の圏界面と新しい中緯度圏界面の間の層に極めて活発な粒子の存在がみられ、さらには対流圏上層にも活発な層、すなわち雲の発達がみられ、成層圏と対流圏になんらかの同期した雲・粒子活動が起ることが示された (Hayashi *et al.*, 2004; Yamanouchi *et al.*, 2003a)。

昭和基地では、地上のエアロゾルの粒径別粒子数濃度の連続観測が行われ、小型の航空機により、エアロゾルの鉛直分布および水平分布を調べる観測を実施した。2機の航空機のうち、ピラタス機が前次隊での故障により持ち帰られ、より小型のセスナ機での観測となり、最高高度も5000mまでに制限された。秋～冬、春、夏の観測が行われ、季節により異なった高度分布の特徴が得られた (Yamanouchi *et al.*, 1999b)。特に、8月の飛行はブリ

ザードをもたらした低気圧の通過直後のものであったが、低気圧に伴って水蒸気とともにエアロゾルの濃度の高い層が侵入してきていることは、大気循環に伴う物質の変動を如実に語る結果であった。第 38 次隊以降、エアロゾルゾンデが定常気象部門と共同で観測され、成層圏のオゾンホールに対応する変化がみられた（林, 2001）。

その後、2000 年からの第 41 次隊では、ピラタス機とセスナ機、2 機での越冬観測となり、内陸のみずほ基地に航空拠点を置きつつ、昭和基地から内陸側への断面図を描く観測が計画された。しかし、この年は冬明けから春にかけて天候が極めて悪く、ほとんど飛行が実現しなかった。わずかに期間最後に実現したフライトから、沿岸から内陸への飛行ルートでのエアロゾル大粒子と微小粒子の粒径別数濃度の分布が得られた（和田ほか, 2001; Hara *et al.*, 2006）。

昭和基地でのエアロゾルの特徴、粒径分布の季節変化などが、第 37-39 次隊での地上観測から導かれた（岩坂ほか, 1998; Osada *et al.*, 2001）。さらに、サンプリング等で得られたエアロゾルの化学的性質を中心に、海塩粒子の働きなどの議論が行われている（Hara *et al.*, 2005）。そして、ドームふじ基地での観測結果と併せ、南極大陸の沿岸から内陸にかけてのエアロゾルの特徴を議論している（Hara *et al.*, 2004）。また、「しらせ」船上での大気サンプリングから、硫化ジメチル等揮発性硫黄化合物濃度（Inomata *et al.*, 2006）や海洋上での様々な有機成分の緯度分布、陸域起源などが調べられた（Yokouchi *et al.*, 1999, 2000, 2008）。

温室効果気体等についても、上空、特に成層圏の濃度を調べるための空気をサンプリングする「回収気球実験」が企画された。昭和基地地上での濃度変化は詳しく観測されているが、その変化をもたらす主因は大気中の輸送であり、それを調べるには上空の濃度分布を知る必要がある。既に日本国内では、宇宙科学研究所（当時）の三陸大気球観測所において、1980 年代から成層圏大気採取の観測が行われてきていた。同様の観測を南極でも実現しようということで、サンプリング容器を載せた気球ゴンドラを回収する手法の訓練を何年にもわたって継続した。初めは気象のゾンデから、そして小型のグラブサンプラーの飛揚へと進め（Honda *et al.*, 1996a, b）、ようやく回収できる目処がたった。第 39 次隊の夏期、1998 年 1 月本番の実験で大気球 B30 により、液体ヘリウムを用いて凝固採取を行うクライオサンプラーを搭載したゴンドラを飛揚したが、落下地点にあるはずの海水が流出してしまい、困難のなか南極観測船「しらせ」により回収を成功させた。世界で初めての高度 30 km までの南極成層圏大気の採取であった。北極圏キルナでの 1 年前の実験等と併せて解析されている（Yajima *et al.*, 1999; Honda *et al.*, 2000; Aoki *et al.*, 2003; Toyoda *et al.*, 2004）。

第 42 次隊では、生物エアロゾル（バイオエアロゾル）観測ということで、飛来したエアロゾルに生物起源のものが含まれていないかが調べられた。氷床コア中にみつかる成分と

の関連で、過去にあった現象で現在の実態との関連等、大気・物質循環の観点からも、極めて興味ある重要な課題である。しかし、露岸域や氷床上を含め、この期の観測では、自然起源エアロゾルではほとんど検知されなかった。唯一、昭和基地内では、バイオ生物起源物質が観測された (Nakashima *et al.*, 2003)。

また、第 42 次隊夏期に「しらせ」船上、同越冬期に昭和基地において、エアロゾルのリモートセンシング観測が拡充された。すなわち、船上ではスカイラジオメータによる大気中エアロゾル光学厚さ (AOD: Aerosol Optical Depth) および天空散乱光観測が始められ、「しらせ」航路上に沿った南北半球でのエアロゾル情報の取得が目指された。併せてエアロゾルの光学特性観測も始められ、「しらせ」の国内巡航や東京―フリーマントル間の航路から、まずはアジア域のエアロゾルについての知見が得られた (Yabuki *et al.*, 2003; Shiobara *et al.*, 2007)。昭和基地では、同じくスカイラジオメータや光学特性の観測に加えて、小型ライダーであるマイクロパルス・ライダー (MPL) による観測が始められた。これは、NASA を中心としたグループが開発し、世界中に MPL ネットとして展開している装置で、複雑な調整を必要とせず、主としてエアロゾルの鉛直分布の長期継続観測をねらったものである。第 42 次隊、2001 年の越冬期の観測から、重力波起源の極成層圏雲が見いだされた (Shibata *et al.*, 2003)。もともと大気は清浄でエアロゾル量が少ない南極域において、エアロゾルの情報よりも雲分布の情報がまずは有効であった (Shiobara *et al.*, 2003)。第 42 次隊越冬期中のエアロゾル採取から、エアロゾル中の化学組成が分析され、重金属や炭素成分の季節変動が得られている (Kobayashi *et al.*, 2003)。

最後に、氷床コアの解釈で鍵となる、大気から雪氷への空気を取り込み、大気―雪氷圏交換が調べられた。掘削現場では、フィルン (積雪層) エアーサンプリングと言って、掘削孔からある深さの積雪層を通して空気を採取し、CO₂ 濃度等の成分分析からその空気を取り込まれた時代を推定し、さらに積雪の年代との比較から空気取り込みの仕組みの解明が試みられた。第 39 次隊によって氷床上 H72 で実施され、その後ドームふじ基地、みずほ高原 YM85 等でも実施され、また理論的な考察も行われた。大気から雪氷へのトランスファー・ファンクションが、氷床コア解析において氷体と含有空気との年代差をもたらすものとして記述され、積雪層内の「対流層」の厚さが効いていることが議論された (Sugawara *et al.*, 2003a, b; Kawamura *et al.*, 2006; Ishijima *et al.*, 2007)。また、雪氷表面での積雪の性質、その変化を同位体比やイオン成分等の詳細な現場観測から調べることも行われてきた (Iizuka *et al.*, 2004; Motoyama *et al.*, 2005)。

4. 南極域における地球規模大気変化観測

2002 年、第 43 次隊の越冬期から、第 VI 期 5 年計画として大テーマ「南極域からみた地球規模環境変化の総合研究」の中で、「南極域における地球規模大気変化観測」が実施され

た。ここではより広い視野から、地球規模変動との関わりで、地球規模の変化が南極をどのように左右するか、また逆に南極の変化が地球規模の変化にどのように影響するかが基本的視点となった。具体的対象は、第Ⅴ期の大気・物質循環観測と大きくは変わらず、実質的に継続したものが多い。大きく4つの課題、1) 対流圏—成層圏間の物質輸送の研究、2) 大気—海洋間の物質交換過程の研究：エアロゾルの集中観測、3) 雪氷・海洋表面状態及びエアロゾル・雲・降水の時空間分布の研究、4) 新しい観測システムの開発、が挙げられた。

第1の課題、対流圏—成層圏間の物質輸送の研究では5カ年の中で前半に力点がおかれたが、その内の項目として、①中小規模擾乱—対流圏から成層圏への重力波の伝播、②成層圏オゾン、③成層圏の温室効果気体を取り上げられた。項目①では観測計画を実行する前の予備的解析として、昭和基地での定常気象観測で得られている高層ゾンデ観測から毎分の高時間分解能データが解析され、重力波活動度のクライマトロロジー、南半球特有の重力波の季節変化等が明らかにされた (Yoshiki and Sato, 2000; Yoshiki *et al.*, 2004)。第43次隊により、2002年の1年間を4期にわけて高層気象ゾンデ集中観測が実施された。各期約2週間にわたる3時間ごとの高密度の観測が実施され、詳細な変化が追跡され、極渦から重力波が生起されていること等が明らかにされた (Tomikawa *et al.*, 2006; Sato and Yoshiki, 2008)。2002年は南半球の成層圏が特異な年で、極渦が早期に崩壊し、南半球では起らないと言われた成層圏突然昇温の大昇温が起った (木津ほか, 2007)。なお、この課題1)に関連して、「白鳳丸」の航海において大気の鉛直分布の南北子午線断面を描くゾンデ観測が行われている (Sato *et al.*, 2003)。

項目②については、第44次隊によるオゾン集中観測が行われた。各国の南極基地7カ所で大気の流れに同期して行われたオゾンゾンデ国際共同観測 (南極 Match) や、これを含めた年間100回のオゾンゾンデ集中観測の結果、さらには人工衛星 ILAS-II の結果を併せてオゾンホール盛衰が解析され、オゾンホール生成期や消滅期のオゾン変化の高度分布の特徴、地球規模大気循環との関連や経度依存性等が解明された (佐藤ほか, 2006; Sato *et al.*, 2009)。また、高高度オゾン気球観測も大気球を使って実施されている。

項目③については、再び第45次隊による回収気球実験が2003年12月~2004年1月にかけて計2回実施され、厳しい条件ながら気球の回収に成功し、試料を得ることができた (菅原ほか, 2005)。各種温室効果気体、 H_2 、 O_2/N_2 比および各同位体比の分析が進められた。第39次隊の夏期から6年後に実現したもので、成層圏での6年間の二酸化炭素濃度増加がおよそ9.4 ppmv、年増加率にして1.5 ppmv/yr と、対流圏下層や地表と大きくは変らない結果であった。ただ、詳細については慎重な議論が必要で、気球観測からは成層圏の遅れの増大、すなわち、空気年代がより古くなり気味であることが指摘されている (Engel *et al.*, 2009) のに対し、客観解析や数値気候モデルからはむしろ年代は若返る方向、すなわち、

成層圏の循環は速まっているのではないかとされており(逆の結果も出ているが)、今後の研究が待たれる。また、 O_2/N_2 比が対流圏のみならず成層圏においても経年的に減少傾向にあることが初めて明らかにされ、大気主要成分の重力分離効果が成層圏において検出可能であることも初めて指摘された (Ishidoya *et al.*, 2006, 2008a)。

第2の課題、大気―海洋間の物質交換過程の研究: エアロゾルの集中観測については、既に原(2003)によりレビューされている問題意識に基づき、第44次隊から始まり、第45-47次隊でエアロゾル集中観測として実施された。第45次隊では昭和基地でこれまでのエアロゾル観測に加え、さらに小さい粒子の観測、超微小粒子観測が行われ、新粒子生成、特に海洋(生物)起源エアロゾル生成の把握がねらわれた。エアロゾル粒径分布の季節変化や、夏に高く、冬に低い濃度の季節変化、さらに夏季には、海洋生物起源が示唆される微小なエアロゾルの濃度増大が見いだされた。昭和基地でのエアロゾル観測は、これまで「観測棟」とよばれる建物で実施されていたが、基地中心部に近く、基地活動の影響を受けやすく汚染物質の混入する機会が多いことから、別途、中心部から離れた場所に新しく「清浄大気観測室」を建て、そこでエアロゾルの現場観測を行うこととした(長田ほか, 2006)。また、小型航空機による観測もこの時期を最後とすることとなり、上空の対流圏中層までの鉛直分布が観測され、衛星データ等との比較も通じ、海洋起源の微小粒子が中層に捉えられた (Osada *et al.*, 2006)。その他、大気中ヨウ化メチル (CH_3I) 濃度の1年間にわたる季節変化も調べられ、地球全体では最低レベルである上、極域では特に日射量と反比例する変化がみられた (Yokouchi *et al.*, 2008)。これは、周辺に発生源の少ない極域では中緯度からの長距離輸送が支配的であり、輸送途中での日射による光解離が効くためであると解釈された。

第46次隊では、昭和基地で第45次隊以来の観測を継続し、特に冬季、これまでも時々発生していた、視程が低下し、もやのような状態が出現することが捉えられた。「南極ヘイズ」と名付けられ、特に吸収性のエアロゾルやブラック・カーボンの影響で、森林火災などによる低緯度側の大陸からの長距離輸送によるものではないかとの議論がなされた (Hara *et al.*, 2010)。ブラック・カーボンについては、昭和基地での2004年から3年間にわたる観測から、季節変化や夏の日変化など、興味ある現象が報告されている (Hara *et al.*, 2008)。第46次隊ではまた、上空の境界層内でのエアロゾル分布、自由大気での濃度との相違などの解明を目指し、気温、湿度、エアロゾルの係留気球観測 ($0.3\ \mu m$ 以上の粒子を OPC 光学式粒子計測装置、 $10\ nm$ 以上を CPC 凝縮粒子計測装置により観測) が行われた (原ほか, 2007)。地上風速が $5\ m/s$ 以上、上空の風速 $10\ m/s$ 以上では係留が難しいなど、厳しい気象条件の中では観測可能な状況に限られるが、予想以上の、最高高度 $2500\ m$ までを含め、1年間に延べ27回の観測が実現した。特に、境界層上部に濃いエアロゾル層がみられることがあり、前述の航空機観測の結果 (Osada *et al.*, 2006) と併せ、興味ある事実

として今後も追跡が必要である。第46次隊では、さらに大気中ラドン濃度の観測も行われた。これは、ラドンがエアロゾルに付着して同時に輸送される現象や、ラドンの輸送過程を調べることで、エアロゾル輸送に対しても手がかりとなり得ることからであった。昭和基地では、周囲が露岩であるためにラドンのローカルな発生もあり、寿命の短いトロンを併せて測ることで、ローカルと長距離輸送を分離しつつ解析した。通年の観測から、ブリザードなどの強風時にラドン濃度の増大がみられ、低緯度側の大陸からの輸送が示唆された。また、「しらせ」船上での観測も行われ、周囲の海面からのラドン供給がある一定程度あること、風が強いと海面からの放出が活発化すると共に、大陸からの長距離輸送も盛んになることでラドン濃度が高まることが示された(田阪ほか, 2011)。両原因が成り立てば、ラドン濃度が上がるとは言えても、逆にラドン濃度が上がった場合、どちらの原因に帰するかを単純には決定できない。

この課題の最終年、第47次隊では新しく多波長ライダーを持ち込み、エアロゾルや雲の鉛直分布を観測し、その動態を明らかにすること、さらにはエアロゾル-雲相互作用の把握をねらった(矢吹ほか, 2007)。エアロゾルから雲に変質していく様子が何例かで捉えられたほか、極成層圏雲(PSCs)が出ているときに対流圏上層の雲も活発になっている事例がいくつも見られ、第3章に記した1997年のブロッキング時にドームふじ基地でのライダー観測から捉えられたものと同様の、対流圏と成層圏のつながり-相互作用-が、特にブロッキング現象に伴わなくともあり得ることが示された。近年の衛星搭載のライダー観測で捉えられている現象と同じものと考えられる(Yamanouchi, 2009)。

エアロゾル以外に、海洋および湖沼における溶存メタンの観測が第45次隊で行われた。「しらせ」航路上の南大洋では、南極プレート境界近傍の海底より少し浅い層で溶存メタンの異常が見つかったほか、リュツォ・ホルム湾では、テーレンおよびストラニツバ沖海底にて高濃度の溶存メタンが観測された。また、露岸域の多くの湖沼から高濃度の溶存メタンが測定された。大気中メタン濃度に対する平衡濃度を大きく超えるものがあり、大気中メタン源としての役割も議論された(Sasaki *et al.*, 2009, 2010)。

一方、直接的な大気-海洋間物質交換については、様々な船による観測が実施された。これは、時を同じくして海洋生物分野の主導により実施された「専用船観測」多船時系列観測(STAGE)の一環として行われたものである。第43次隊に相当する2001/02年シーズンでは、ニュージーランドの砕氷船「タンガロア」号をチャーターし、「白鳳丸」(東大海洋研)も加わり、「しらせ」往路-「タンガロア」-「白鳳丸」-「しらせ」復路と、4期にわたって航海観測がセットされた。続く第44次隊、2002/03シーズンには、「しらせ」往路-「海鷹丸」-「タンガロア」-「しらせ」復路とセットされた。その後、東京海洋大学の「海鷹丸」は第44次隊に引き続き、第46-47次隊、第49-50次隊と3シーズンに2回の割合で参加を得て、昭和基地における観測との対比や連携をすべく、南極沿岸での観測を担って

いる。本報告に関係する大気科学関連の課題は、大気－海洋間の二酸化炭素交換および海洋生物起源硫化ジメチルの発生と、大気中エアロゾルという2大テーマであった。東経140度、110度線上の南極沿岸近くまでの二酸化炭素交換には、海洋生物の夏季増殖に伴う著しい吸収が示されたほか (Nakaoka *et al.*, 2009)、昭和基地沖の海水域で、硫化ジメチルをもとにしたエアロゾル生成の可能性が得られ、その他のエアロゾルについての特性も得られた (日本周辺「しらせ」巡航での予備的観測から、海塩粒子の変質が議論されている; Kawakami *et al.*, 2008)。

大気中揮発性有機化合物の動態を調べるために昭和基地で行われたサンプリングから、HCF等、代替フロン濃度の顕著な増加が検出されたほか、ヨウ化メチル等の自然起源ハロカーボンの特異な季節変化が見いだされ、また、春季地表オゾン減少時にアセチレンも同時に減少していることが明らかとなり、北極域と同様に、臭素がオゾン破壊に関与していることが示唆された (Yokouchi *et al.*, 2008)。

第3の課題、雪氷・海洋表面状態及びエアロゾル・雲・降水の時空間分布の研究については、雪氷表面の人工衛星観測 (ADEOS-II/GLI) の地上検証として、昭和基地近傍の海氷上で放射収支や分光反射測定が、またドームふじ基地において積雪断面や粒径測定が行われている。これらの結果と GLI データ、さらに ADEOS-II 衛星が短期間で故障・運用停止に至ったため代替の MODIS データを用いた結果、南極大陸氷床上の積雪表面粒径の春から夏への増大といった季節変化や、高度の低い場所で大きく、高い場所で小さいという標高依存性が明らかになった (本吉, 2008)。この課題は、地球観測衛星モニタリングと密接に関係している (第5章「大気微量成分モニタリングほか」を参照)。また、ドームふじ基地での越冬観測が再び2003年から第44次隊において行われ、雲・降水の状況を調べるシーロメータ観測などによって、氷床の涵養への大気側からの寄与の仕組みが調べられた (平沢・藤田, 2008b)。

第4の課題、新しい観測システムの開発では、観測を高度化、効率化するための装置の開発や無人航空機の開発、小型回収気球の開発が進められた。装置の開発では、これまで難しかったメタン中の炭素ならびに水素同位体を高精度で分析するシステムが開発された (Morimoto *et al.*, 2009a; Umezawa *et al.*, 2009)。また、昭和基地での連続観測装置を国内から遠隔監視するシステムの開発が進められ (森本・田中, 2005)、現場での人手をより節約する体制作りを目指した。

無人航空機については、長い検討の歴史を有する。以前から温室効果気体のサンプリングを第一目的に、有人航空機に替わる成層圏までの高高度、広域 (長距離・長時間) 飛行を実現する機体の導入を検討してきたが (山内・和田, 1998)、実用化に至らなかった。そこで全く発想を転換し、むしろ小型の模型飛行機から発展した方式が実現した (Funaki *et al.*, 2008, 平沢ほか, 2009)。その後の第48-49次隊において、南極での実飛行にまで到達

することができた。

一方、大気採取を目指すサンプリングシステムの開発も進められた。無人航空機での大気採取を目指し、搭載可能な小型システムの開発として始まったものだが（山内・和田，1998），そのための無人航空機の実現が遠のいたため，まずは気球搭載型を目指した。先に述べてきたように，成層圏までの大気サンプリングは成功したものの，液体ヘリウムを使ったクライオジェニックサンプラー，それを飛揚させる大気球と，装置が大掛かりになり，また観測オペレーションも極めて複雑かつ高度で，多くの人手や予算を必要とするため，簡便で小回りの利く観測には不向きであった。特に，大気科学で必須の季節変化を求めようとする，夏季以外に気球を回収する観測オペレーションが実現されねばならず，このような大規模な実験では到底実現不可能であった。そこで，より小型で簡便な実験を可能とするサンプリング装置を開発することが求められた。低温寒冷を実現するために液体ヘリウムを用いるのではなく，高圧ネオンガスを急膨張させるときのジュールトムソン(JT)効果を利用して寒冷を作り出し，空気を凝固採取しようというものである。市販されている JT クーラーと呼ぶ製品を利用したもので，装置の小型化は可能となったが，現実成層圏のような低圧環境での大気採取システムの構築に苦労があった。10 年以上にわたる長年の開発努力の結果，まず実験室内で空気採取に成功，さらに気球搭載プロトタイプの開発が進められ，ついに第 49 次隊の 2007/08 年夏期に昭和基地で実験に成功した（森本ほか，2009a, b; Morimoto *et al.*, 2009b）。

5. 重点プロジェクト「宙空圏—大気圏—海洋圏結合に関する研究」

第 48-51 次隊は，変則的であるが第Ⅶ期 4 カ年計画として，極地研の大学共同利用機関法人としての 6 カ年の中期計画と同期させる（終了年度を同じ区切りにする）べく，予算年度として 2006 年度～2009 年度にかけて実施された。なお，第Ⅷ期以後は 6 カ年計画となる予定である。ここでは，これまでの分野ごとに分かれてプロジェクト研究を行ってきたことに対して，外部の評価委員などから「旧態依然であり，新しいサイエンスが生まれにくい」との批判を受け，既に分野ごとに計画作りをしていた途上，急遽，分野をまたがる「重点研究プロジェクト」を立ち上げた。そのテーマが，「極域における宙空—大気—海洋の相互作用からとらえる地球環境システムの研究」ということで，宙空から大気，海洋まで一連のつながった研究課題を進めることとなった。しかし，この 3 圏をいきなりつなげることは無理が多く，まずは噛み砕いて，既に関連のある極域の宙空圏—大気圏結合研究，極域の大気圏—海洋圏結合研究と 2 つのサブテーマで実行することとなった。特にこの期間は国際極年（IPY）2007-2008 と重なることから，関係したプロジェクトが多い。

宙空圏—大気圏関連での大気科学関係は（他に宙空分野固有の課題は多いがここでは触れない），第 48 次隊において，成層圏オゾンに関連してオゾンゾンデ観測の強化観測が第

2 回目の Match 観測として実施され、わが国からの IPY 2007-2008 プロジェクト ORACLE-O3 (Ozone layer and UV radiation in a changing climate evaluated during IPY) への一環として位置づけられた。IPY に対しては、予算的に特別に裏付けられることもなかったため、わが国からの貢献はあまり積極的であったとは言い難いが(山内, 2007), その中でこの課題は重要な貢献となった (Nakajima *et al.*, 2008)。また、オゾン破壊物質を測る目的で超高分解能分光計 (FTIR: フーリエ変換赤外分光計) を、そして成層圏の粒子や極成層圏雲の観測のために、むしろ分解能の低い FTIR を持ち込んだ観測を実施することができた。さらに加えて、エアロゾルの鉛直分布を調べるエアロゾルゾンデの飛揚も行われた。

一方、大気圏-海洋圏の関連では、各年次で様々な観測が計画された。第 48 次隊夏期には前年の地球物理観測に続き、2006 年 12 月~2007 年 1 月にかけて日本-ドイツ共同の航空機大気観測 (ANTSYO-II) が行われ、IPY 2007-2008 の前哨戦とされた (Herber *et al.*, 2006)。アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所 (AWI: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 以下, AWI) 所有の航空機 (Dornier 228) を使って、日本側は極地研を中心に福岡大学から参加を得て、ドイツ側からは AWI のほか、ドイツ航空宇宙センター (DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) の研究者やスウェーデン・ストックホルム大学の研究者も加わった国際共同観測として実施した (平沢・原, 2007)。大西洋セクターでは、ノイマイヤー基地を中心に内陸のコーネン基地まで合計 22 フライトを実施し、インド洋セクターの昭和基地側では、大陸上 S17 拠点をベースに内陸および海洋上水平分布と鉛直分布を取得する観測飛行を合計 15 フライト実施した。エアロゾルの物理、光学、化学特性の 3 次元分布を得たと共に、温室効果気体の鉛直分布を得るための大気試料採取も行った。南極大陸沿岸域でも、西経側に位置するノイマイヤー基地周辺では大気が南極半島側から輸送されることが多く、一方、東経側に位置する昭和基地では、南大洋を越えて南米大陸からの輸送の多さがエアロゾルの性質を特徴づけていること、さらに昭和基地近傍で、内陸からの大気の中にも黒色炭素の多いエアロゾルが見られることが明らかになった。そのほか、昭和基地での観測や、「海鷹丸」における観測と併せ、海洋起源物質の寄与の解明も期待される。

第 49 次隊の越冬観測として、エアロゾルの高度な観測を実施すべく、蛍光 X 線分析顕微鏡 (XRF) やヘリウム・マイクロ波誘導プラズマ発光分析装置 (He-MIP-AES) を持ち込んで現場での分析を行い、サンプル持ち帰りでは変質してしまう成分を含めて、高精度の成分組成分析を実現した。また、温室効果気体である二酸化炭素の発生・消滅過程をより良く把握するため、新しく大気中酸素濃度の観測も開始された (Morimoto *et al.*, 2009c)。酸素は大気中に約 21% と大量に存在するが、生物の関わる炭酸同化作用や呼吸では、少ないながら必ず CO₂ の変化に応じて酸素濃度も変化するはずであるとの理論が確認され、海

洋への吸収と生物圏との交換を分離する手段の一つとして、その濃度の観測が有効であることが分かったためである。

第 50 次夏隊の専用観測船「海鷹丸」では、プロトン移動反応質量分析計 (PTR-MS) を新しく導入し、海洋生物起源硫化ジメチル (DMS) の大気中濃度の高精度測定を目指した。引き続き第 51 次夏隊においても、新しい南極観測船「しらせ」に同機を持ち込んで DMS の観測を実施した。

6. 大気微量成分モニタリングほか

第 38 次隊、第 V 期計画より、「モニタリング研究観測」という枠組みが設けられた。これは、これまで行われてきた研究観測のうち、プロセス解明を中心に比較的短期間に集中的に行う研究観測を「プロジェクト研究観測」とし、それ以外の、長期間データを取り続けることで現象が見えてくるものをモニタリング研究観測としたものである。すなわち、第 37 次隊以前まで研究観測として実施された内の一部、そして「定常観測」の内、極地研が担当してきた課題である地震、地球物理（極光・夜光、地磁気）、海洋生物を含めるものとした。ここに盛り込まれるべき観測計画は概念的条件として、①中長期的に見て自然現象が把握される観測、②地球システムを監視する種類の観測、③南極域で観測することにより有利性のある観測、④国際的、社会的要請のある観測、⑤観測手法が確立している観測、⑥データの公開が可能であり、かつ継続観測が可能な各条件を満たすものとされた。以上の枠組みの中で、これまで代々研究観測の中で行ってきたものを「大気微量成分モニタリング」として位置づけることとした。

大気微量成分モニタリングは、既に第 24 次隊から始められた二酸化炭素濃度のサンプリング観測をはじめとした、大気中二酸化炭素濃度連続観測 (Aoki *et al.*, 2000; Morimoto *et al.*, 2003a, b)、メタン濃度連続観測、地表オゾン濃度連続観測、オゾン層破壊に影響するフロンなども含む（第 23 次隊以来の観測; Shirai and Makide, 1998）関連成分を分析できるように、大気サンプリング等を昭和基地において、また、「しらせ」船上における東京一昭和基地間の、海洋表面二酸化炭素分圧差観測（大気中濃度＝分圧と表層海水中分圧を独立に測定）、地表オゾン濃度連続観測といった温室効果気体観測が中心となり、ほかにエアロゾル粒径別濃度観測を位置づけた。また、定常気象部門に依頼して観測を開始していた基準地表面放射観測網 (BSRN: Baseline Surface Radiation Network) としての昭和基地での地上放射収支観測も、モニタリングの関連観測と位置づけ、極地研も気象庁高層気象台と共に対応機関となっている。地表オゾンに関しては、観測開始当初から春季にオゾン急減現象 (SOD) が発見され、それまでの北極域でしかみられないという説を覆した (Wessel and Aoki *et al.*, 1998)。その後、SOD のふるまいや成因についての議論が続いている (江崎ほか, 2011)。

その後次第に観測項目も増え、温室効果気体の観測の中で、直接の温室効果はあまりないものの、大気中でのメタン消滅過程の OH ラジカル量変動に寄与する一酸化炭素 (CO) の連続観測が第 41 次隊から開始された (Morimoto *et al.*, 2002a). 一方、エアロゾルの遠隔探査や、リモートセンシングを行うスカイラジオメータと、小型のライダーであるマイクロパルス・ライダーによる観測 (NASA/GSFC の MPLNET で公開; <http://mplnet.gsfc.nasa.gov/>) も、第 VI 期計画の、第 43 次隊以来、モニタリング観測の一つに位置づけられた。

別な課題に位置づけられた「地球観測衛星モニタリング」も、本課題にバックグラウンド情報を提供する役割を担った。1980 年の第 21 次隊から続いている NOAA 衛星高分解能データの受信、そして第 28 次隊から行われてきた現場処理については、第 38 次隊からモニタリング観測として、より簡便で効率的な受信・処理・解析ができる新しいシステム (Terra Scan/Sea Space) が導入され、受信データは容易に保存・公開されるようになった (http://www.nipr.ac.jp/center/SATELLITE/noaa_data_j.html; Hirasawa and Yamanouchi, 2000). 1997 年のデータを使って、内陸ドームふじ基地での越冬観測結果により検証しつつ、氷床上の雲導出方法を検討した (Yamanouchi *et al.*, 2000; Kadosaki *et al.*, 2002). さらに、ドームふじ基地、昭和基地での地上検証を通じて雲導出アルゴリズムを作成し、海氷域を含む広域の雲分布特性を検討した (門崎, 2004).

昭和基地開設以来続いている定常気象観測 (定常観測と呼ばれるようになったのは、南極観測再開の第 7 次隊以降) から、基本となる気象特性が得られた。50 年にわたる地上気象観測のデータを整理・解析し、様々な気象特性、気候が示されたほか、特に地上気温や風速、海面気圧の日変化が季節ごとに興味ある形を示すことが明らかにされ、大気中物質の変動にも大いに影響し得ることが考察された (佐藤, 2004; Sato and Hirasawa, 2007). また、同じく放射収支に関わる雲量についても長年の変化傾向が示され、温暖化との関連等が議論された (Yamanouchi and Shudou, 2007). さらに、エアロゾルの気柱量を示す指標である AOD がサンフォトメータで観測されてきているが、各国による南極・北極での観測結果を比較し、長年の変化が調べられている (Tomasi *et al.*, 2007). 南極での基底値は平均的に、波長 500 nm で 0.02 程度と極めて小さい値、きれいな空気を示しており、1981 年、1992 年等の後の数年は、火山噴火の影響を引きずり高い値が続いている。

7. 北極観測

北極域における地球環境変動の顕在化と冷戦構造の崩壊に伴って、内外の北極域への関心が高まっている。極地研でも北極圏環境研究センターが 1990 年に設立され、1991 年よりスバルバル・ニーオルスンに観測基地が設置され、大気科学の観測も始められた (Yamanouchi *et al.*, 1996). 観測開始当初は、極地研による地上気象観測 (Aoki *et al.*, 1996a; Morimoto *et al.*, 2000, 2002b, 2005) と地表オゾン濃度の連続観測、温室効果気体

分析用大気サンプリング (Morimoto *et al.*, 2001), 垂直レーダー観測 (Wada *et al.*, 1996), 名古屋大学太陽地球環境研究所 (当時) による極成層圏雲 (PSCs) のライダー観測や, エアロゾルゾンデ観測等がその内容であった (岩坂, 2000; Shibata *et al.*, 1996; Hayashi *et al.*, 1998; Daneva *et al.*, 2003; Daneva and Shibata, 2003; Shiraishi *et al.*, 2003; Watanabe *et al.*, 2004). その後, 上部成層圏までのオゾン濃度の高度分布の測定をねらう高高度気球 (光学オゾンゾンデ) 観測が東北大学を中心に, 同じニーオルスン基地で大気科学に活発な AWI や極地研と共同で進められた (Okano *et al.*, 1996; Murata *et al.*, 2009). 1990 年代後半からは対流圏エアロゾルの観測も活発化し, 地上での様々なエアロゾル観測 (Hara *et al.*, 1999, 2002a, b), リモートセンシングによる観測 (スカイラジオメータ, マイクロパルス・ライダー; Shioabara *et al.*, 2008), さらに関連する雲水量, 水蒸気量のマイクロ波放射計による観測も行われるようになった. ニーオルスン基地での雲水や降水の観測から, 大気中のエアロゾルや化学成分の議論がなされた (Wada and Igarashi, 1998, 2002, 2004; Endoh *et al.*, 2004). 衛星ライダーによる雲観測の地上検証としても, マイクロパルス・ライダーによる観測が比較され (Shiobara *et al.*, 2006), また混合層雲についての議論がなされた (Campbell and Shiobara, 2008). そのほか, 煙霧がニーオルスン基地の観測で検知され, 東ヨーロッパからの長距離輸送であることが示された (Stohl *et al.*, 2007; Myhre *et al.*, 2007). また, ニーオルスン基地でのメタン濃度およびその炭素同位体比の年々変動の解析から, メタンの発生源の割合が推定され, 高緯度の湿地帯がメタン増加率の変動に最も大きく寄与していることが示された (Morimoto *et al.*, 2006).

北極の地上観測で明らかにされた二酸化炭素濃度の大きい季節変動も, その理由の一つが周辺北極海への強い吸収の現れではないかとの仮説があり, これを確認すべく, 海洋表層での二酸化炭素交換を調べる航海観測が, グリーンランド海, バレンツ海で 10 年近くにわたって実施された. その結果, 春季に海洋表層の CO_2 分圧が著しく低くなる季節変化が捉えられ, 風速, 海水分布などの変化から季節変化の偏倚性は抑えられるが, 両海域は強い吸収源であることが確認された (Aoki *et al.*, 1996b; Nakaoka *et al.*, 2006).

北極における温室効果気体の分布やエアロゾルの動態, その雲との相互作用, エアロゾルと雲の極域における役割, 気候への影響を解明することを目的に, 一連の航空機観測を実施した. 地上で連続的に精密な観測を行っているニーオルスン基地において, その変動を司るものは上空を通ってきた大気の輸送であることが多いことから, 大気中物質の上空での鉛直分布, 広域の水平分布といった 3 次元分布を知る必要があるという問題意識からのものである. 第一のキャンペーンは, 日本から北極海を横断してジェット機を飛ばし, スパールバル・ロングイヤービンに至り, さらにスパールバル周辺の飛行をしようという意欲的な計画であった. 国立極地研究所北極圏環境研究センターによる「北極環境観測」国際共同研究 (1995-1998 年度) の一環として, 北極圏航空機観測計画 (Arctic Airborne

Measurement Program 1998: AAMP 98) が 1998 年 3 月に実施された (Shiobara *et al.*, 1999; 遊馬ほか, 2002; 南極資料, 2002; Inomata *et al.*, 2003; Wada *et al.*, 1998).

その後、ニーオルスン基地で大気観測を精力的に行っている AWI と共同で、AWI 所有の航空機 (Dornier 228 型機) により、「北極対流圏エアロゾル放射総合観測 (Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation: ASTAR 2000)」を「科学研究費特定領域研究」(1999-2004 年)の一環として実施した (Yamanouchi and Herber, 2001). 2000 年 3 月~4 月にかけて、ニーオルスン基地上空を中心に、スバルバル近傍にて大気中エアロゾルの粒径別濃度、散乱係数、吸収係数 (日本側担当)、光学的厚さ (AWI 担当) の鉛直分布を観測した. 北極域のバックグラウンドというべき清浄な大気から、シベリア北部から汚染大気が及んで「北極ヘイズ」というエアロゾル濃度の高い状態までの変動が観測された (Yamanouchi *et al.*, 2005; Hara *et al.*, 2002c, 2003; Treffeisen *et al.*, 2004). 人工衛星からの観測結果と比較して、地上検証の役割も果たした (Thomason *et al.*, 2003). さらに、これらの結果を基にモデル (Rinke *et al.*, 2004) を使って放射影響が評価された (Treffeisen *et al.*, 2005).

2002 年 3 月には再び、日本から北極海を横断する航空機大気観測 (Arctic Airborne Measurement Program: AAMP 02) を、今度は AWI の協力を得て実施した. 1998 年の観測項目のほかに、AWI によるサンフォトメータ観測、極地研によるドロップゾンデ観測などを加え、フル装備で観測を実施し (Yamanouchi *et al.*, 2003b), エアロゾル情報の他、人工衛星との比較 (Treffeisen *et al.*, 2006), オゾン濃度の高度分布、同位体を含む大気成分の重力分離などが観測された (Morimoto *et al.*, 2003c; Ishidoya *et al.*, 2008b).

2004 年 5-6 月には、再度 AWI と共同で、前述の同航空機 2 機を使った「北極対流圏エアロゾル雲放射総合観測 (ASTAR 2004)」を実施した. スバルバル・ロングイヤー空港を拠点に 19 回の飛行観測を行った. 航空機による散乱係数、吸収係数とも汚染の度合いが高かった、北極ヘイズの活発な時期であった ASTAR 2000 の 3-4 月の結果に比べ、いずれも低めの値が示されたほか、黒色炭素粒子が硫酸液滴に取り込まれた内部混合粒子が卓越すること等が明らかにされた (Matsuki *et al.*, 2010). また、地上では降水に伴うエアロゾルの除去過程が観測され (Yamagata *et al.*, 2009), エアロゾルと雲の相互作用が類推された. さらにその後、同じ 2 機体制でヨーロッパ各国の参加をあおぎ、ASTAR 2007 が IPY 2007-2008 の一環として 2007 年 4 月に実施されたが、日本からはマンパワーの不足から航空機観測そのものには参加できず (一部測器を搭載)、地上観測で対応した (Hoffmann *et al.*, 2009).

8. 大気循環の解析ほか

上記のように、大気中物質の様々な変転には、大気の循環場に依存する大気輸送が支配

的であることは第1章以降で述べてきた通りである。このような課題に取り組む重要な手段の一つが、大気の流れを時間ごとに追って、その経路を示す「流跡線解析」(トラジェクトリー)という手法である。気象学、大気科学の世界で一般的である、全球グリッド気象データセットとして、気象庁(JRA25: Japanese 25-year Reanalysis project)、アメリカ環境予報センターおよび大気科学研究センター(NCEP/NCAR: National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)、ヨーロッパ中期気候予報センター(ECMWF: European Centre for Medium Range Weather Forecasts)等のデータセットに対応するトラジェクトリー計算プログラムが開発され(Tomikawa and Sato, 2005)、Webベースでユーザーが簡単に計算できるソフトが整備された。これらを使って、様々な輸送過程の類推が議論された。さらにまた、このような大気の輸送過程、輸送経路がどのような特徴をもつのか、季節変化、輸送経路の起源はどの領域にあるのか、氷床コアの解析にもつながる氷床上の水蒸気の起源はどこにあるのかなどについて、先のトラジェクトリー計算プログラムを使った研究が行われた(Suzuki *et al.*, 2004, 2008)。大きな描像としては、大気循環場のパターンが、昭和基地西側が低圧偏差になる時に低緯度側からの輸送が活発で水蒸気も多く運び込まれ、南大洋・大西洋・南米大陸を起源とする長距離輸送が盛んになる。逆に、昭和基地西側が高圧偏差の時にはインド洋側から大陸上を通る輸送経路がみられ、輸送距離も短い。夏に比べて冬は一般に風速が強いことから、より長い輸送距離がとられる。これが典型であり、昭和基地でも高度によって、また内陸のドームふじ基地でも詳細は異なるが、基本的には同様であった。このような循環場の特徴から輸送過程が示され、大気中物質の変動を説明することになる。

9. 終わりに

以上、この15年近くにわたる極域大気・物質循環研究の足跡をたどってきた。南極から北極へ、そして解析的な研究へと、実に多彩な研究が進められてきたことが分かる。一部の研究や論文においては限られた対象についての限定的な議論で、「大気・物質循環」になっていないものもみられる。しかし、その多くでやはり「大気・物質循環」の底流が感じられ、さらに本論にみるように、全ての研究や論文を並べてみると実に壮観で、まさに「大気・物質循環」が語られていることが明瞭になる。「まえがき」および第1章で記したように、この大気・物質循環という課題を認識し、研究テーマに取り上げて以来、多くの研究が進められてきた。その中で、極域大気・物質循環の像が描かれてきている。

今後の進むべき道を語る一つの例が、成層圏—対流圏交換の研究にみられる。大気鉛直温度分布の特徴から、極域では冬期に圏界面が極めて不明確になり(西村, 2009; Tomikawa *et al.*, 2009)、その状態での成層圏—対流圏間の物質輸送に興味を持たれる。これまで取り上げられてこなかった、新しい大気・物質循環の課題である。

今、南極昭和基地には、大型大気レーダー (PANSY) が設置されようとしている。これは、対流圏下層から成層圏、中間圏までの広い高度範囲において大気の3次元の風の分布を測るものとして、大気の力学的な研究に役立つ巨大な装置である。そのことから、極域の気候形成の仕組みを理解することがこのシステムの大きな課題と考えられるが、同時に、大気・物質循環研究にも大きく貢献するものと期待できる。直接的には、大気の流れの場を捉えるものであるが、そのことは物質循環にも大きく寄与するものである。このように、今後気候研究とともに、大気・物質循環研究にも新しいブレイクスルーが期待される。

文 献

*は南極観測によるもの

- Aoki, S., Nakanishi, Y., Wada M. and T. Yamanouchi (1996a): Meteorological data at Japanese Ny-Ålesund Observatory, Svalbard in 1992 and 1993. NIPR Arctic Data Rep. **1**, 111 p.
- Aoki, S., Morimoto, S., Ushio, S., Ito, H., Nakazawa, T., Yamanouchi, T., Ono, N. and Vinje, T. (1996b): Carbon dioxide variations in the Greenland Sea. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **51**, 299-306.
- *Aoki, S., Nakazawa, T., Morimoto, S., Hashida, G., Shiobara, M. and Yamanouchi, T. (2000): Atmospheric CO₂ concentration observed at Syowa Station from 1984 to 1992. JARE Data Rep., **251** (Meteorol. ; **34**), 55 p.
- *Aoki, S., Nakazawa, T., Machida, T., Sugawara, S., Morimoto, S., Hashida, G., Yamanouchi, T., Kawamura, K. and Hond, H. (2003): Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica. Tellus, **55B**, 178-186.
- 遊馬芳雄・福田陽子・菊地勝弘・塩原匡貴・和田 誠・Moore, G.W.K. (2002): ノルウェー海上のポーラーローの航空機観測。南極資料, **46**, 243-260.
- Campbell, J.R. and M. Shiobara (2008): Glaciation of a mixed-phase boundary layer cloud at a coastal arctic site as depicted in continuous lidar measurements. Polar Sci., **2**, 121-127.
- Daneva, D., Shibata, T., Iwasaka, Y., Nagatani, M., Shiraishi, K. and Hayashi, M. and Fujiwara, M. (2003): The mixing state of polar stratospheric cloud particles in "sandwich structure" observed by lidar 1: determination of the mixing state of PSC particles. J. Meteorol. Soc. Jpn., **81**, 747-757.
- Daneva, D. and Shibata, T. (2003): The mixing state of polar stratospheric cloud particles in "sandwich structure" observed by lidar 2: numerical simulations of the optical properties of the liquid and solid particles with external mixture of STS and NAT particles. J. Meteorol. Soc. Jpn., **81**, 759-777.
- Engel, A., Möbius, T., Bönisch, H., Schmidt, U., Heinz, R., Levin, I., Atlas, E., Aoki, S., Nakazawa, T., Sugawara, S., Moore, F., Hurst, D., Elkins, J., Schauffler, S., Andrews, A. and Boering, K. (2009): Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years. Nature Geosci., **2**, 28-31, doi:10.1038/NGEO388.
- Endoh, T., Takahashi, T., Noguchi, I., Koga, S., Kurita, N., Tanaka, N. and Wada, M. (2004): Polar night investigation of chemical components in fresh snow particles and aerosol/gas in the atmosphere at Ny-Aalesund. 14th International Conference on Clouds and Precipitation. Bologna, Italy, 19-23 Jul. 2004, ICCP. 440-443 (Proceedings ; v. 1).
- *Enomoto, H., Motoyama, H., Shiraiwa, T., Saito, T., Kameda, T., Furukawa, T., Takahashi, S., Kodama Y. and Watanabe, O. (1998): Winter warming over Dome Fuji, East Antarctica and semiannual oscillation in the atmospheric circulation. J. Geophys Res., **103** (D18), 23103-23111.
- *江崎雄治・平沢尚彦・林 政彦・山内 恭 (2011): 南極昭和基地における地上オゾン急減現象 (SOD) とそのバックトラジェクトリー解析—1997年8月28-29日のSODの事例解析—。天気。掲載予定。

- *Funaki, M., Hirasawa, N. and the Ant-Plane Group (2008): Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for Antarctic research. *Polar Sci.*, **2**, 129–142.
- 原圭一郎 (2003): 南極対流圏のエアロゾル. *エアロゾル研究*, **18**, 200–213.
- Hara, K., Osada, K., Hayashi, M., Matsunaga, K., Shibata, T. and Iwasaka, Y. and Furuya, K. (1999): Fractionation of inorganic nitrates in winter Arctic troposphere: coarse aerosol particles containing inorganic nitrates. *J. Geophys. Res.*, **104** (D19), 23671–23679.
- Hara, K., Osada, K., Matsunaga, K., Sakai, T., Iwasaka, Y., and Furuya, K. (2002a): Concentration trends and mixing states of particulate oxalate in Arctic boundary layer in winter/spring. *J. Geophys. Res.*, **107** (D19), 4399, doi:10.1029/2001JD001584.
- Hara, K., Osada, K., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Shibata, T. and Furuya, K. (2002b): Atmospheric inorganic chlorine and bromine species in Arctic boundary layer of the winter/spring. *J. Geophys. Res.*, **107** (D18), 4361, doi:10.1029/2001JD001008.
- Hara, K., Osada, K., Nishita, C., Yamagata, S., Yamanocuchi, T., Herber, A., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Nagatani, M. and Nakata, H. (2002c): Vertical variations of sea-salt modification in the boundary layer of spring Arctic during the ASTAR 2000 campaign. *Tellus*, **54B**, 361–376.
- Hara, K., Yamagata, S., Yamanocuchi, T., Sato, K., Herber, A., Iwasaka, Y., Nagatani, M. and Nakata, H. (2003): Mixing states of individual aerosol particles in spring Arctic troposphere during ASTAR 2000 campaign. *J. Geophys. Res.*, **108** (D7), 4209, doi:10.1029/2002JD002513.
- *Hara, K., Osada, K., Kido, M., Hayashi, M., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Yamanocuchi, T., Hashida, G. and Fukatsu, T. (2004): Chemistry of sea-salt particles and inorganic halogen species in Antarctic regions: compositional differences between coastal and inland stations. *J. Geophys. Res.*, **109**, D20208, doi:10.1029/2004JD004713.
- *Hara, K., Osada, K., Kido, M., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Hashida, G. and Yamanocuchi, T. (2005): Variations of constituents of individual sea-salt particles at Syowa Station, Antarctica. *Tellus*, **57B**, 230–246.
- *Hara, K., Iwasaka, Y., Wada, M., Ihara, T., Shiba, H., Osada, K. and Yamanocuchi, T. (2006): Aerosol constituents and their spatial distribution in the free troposphere of coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res.*, **111**, D15216, doi:10.1029/2005JD006591.
- *原圭一郎・長田和雄・山内 恭 (2007): 南極昭和基地での係留気球を用いた下部対流圏エアロゾル観測に関する報告. *南極資料*, **51**, 13–34.
- *Hara, K., Osada, K., Yabuki, M., Hayashi, M., Yamanouchi, T., Shiobara, M. and Wada, M. (2008): Measurement of black carbon at Syowa Station, Antarctica: seasonal variation, transport processes and pathways. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **8**, 9883–9929.
- *Hara, K., Osada, K., Yabuki, M., Hashida, G., Yamanouchi, T., Hayashi, M., Shiobara, M., Nishita, C. and Wada, M. (2010): Haze episodes at Syowa Station, coastal Antarctica: where did they come from? *J. Geophys. Res.*, **115**, D14205, doi:10.1029/2009JD012582.
- Hatsushika, H. and Yamazaki, K. (2000): Heat and moisture budget and trajectory analysis of a warming event observed in June 1997 at Dome Fuji Station, Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **14**, 78–91.
- 林 政彦 (2001): Optical particle counter による対流圏・成層圏エアロゾルの観測. *エアロゾル研究*, **16**, 118–124.
- Hayashi, M., Iwasaka, Y., Watanabe, M., Shibata, T., Fujiwara, M., Adachi, H., Sakai, T., Nagatani, M., Gernandt, H., Neuber, R. and Tsuchiya, M. (1998): Size and number concentration of liquid PSCs: balloon-borne measurements at Ny-Ålesund, Norway in winter of 1994/95. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **76**, 549–560.
- *Hayashi, M., Sudo, M., Shiraishi, K., Hirasawa, N., Yamanouchi, T., Shibata, T., Iwasaka, Y., Nagatani, M. and Nakada, A. (2004): Data of project on atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic, part 3: backscattering properties of tropospheric clouds and aerosols observed by lidar at Dome Fuji Station in 1997. *JARE Data Rep.*, **278** (Meteorol. ; **38**), 105 p.
- *Herber, A., Gernandt, H., Jokatz, W., Nixdorf, U., Steinhage, D., Miller, H., Treffeisen, R., Yamanouchi, T., Shiraishi, K., Nogi, Y., Shibuya, K. and Wada, M. (2006): Joint AWI-NIPR

- airborne operations in the past and the future. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **20**, 40–52.
- *Hirasawa, N. and Yamanouchi, T. (2000): Data of project on atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic, part 2: NOAA AVHRR images received at Syowa Station, Antarctica in 1997. *JARE Data Rep.*, **248** (Meteorology; **33**), 216 p.
- *平沢尚彦・原圭一郎 (2007): 第 48 次南極地域観測夏隊の S17 航空拠点における活動報告一日共同航空機観測に関連して一. *南極資料*, **51**, 273–297.
- *平沢尚彦・藤田耕史 (2008a): ドームふじにおける放射観測. *南極資料*, **52**, 170–181.
- *平沢尚彦・藤田耕史 (2008b): シーロメータにより観測されたドームふじの雲・降雪の鉛直分布と季節変化. *南極資料*, **52**, 159–169.
- *Hirasawa, N., Hayashi, M., Kaneto, S. and Yamanouchi, T. (1999): Data of project on atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic, part 1: aerological sounding data at Dome Fuji Station in 1997. *JARE Data Rep.*, **238** (Meteorology; **32**), 183 p.
- *Hirasawa, N., Nakamura, H. and Yamanouchi, T. (2000): Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1911–1914. doi:10.1029/1999GL011039.
- 平沢尚彦・尾塚馨一・林 政彦・船木 實 (2009): 北海道紋別市で行った大気観測における無人航空機の飛行特性と気象測器の動作状況. *天気*, **56**, 61–67.
- Hoffmann, A., Ritter, C., Stock, M., Shiobara, M., Lampert, A., Maturilli, M., Orgis, T., Neuber, R. and Herber, A. (2009): Ground-based lidar measurements from Ny-Ålesund during ASTAR 2007. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 9059–9081.
- *Honda, H., Morimoto, S., Akiyama, H., Hashida, G., Aoki, S., Ui, H., Nakazawa, T., Yajima, N. and Yamanouchi, T. (1996a): A newly developed grab sampling system for collecting stratospheric air over Antarctica. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **40**, 156–168.
- *Honda, H., Aoki, S., Nakazawa, T., Morimoto, S. and Yajima, N. (1996b): Cryogenic air sampling system for measurements of the concentrations of stratospheric trace gases and their isotopic ratios over Antarctica. *J. Geomag. Geoelectr.*, **48**, 1145–1155.
- *Honda, H., Yajima, N., Yamagami, T., Aoki, S., Hashida, G., Machida, T. and Morimoto, S. (2000): Balloon operation for stratospheric air sampling at Antarctica, *Adv. Space Res.*, **26**, 1369–1372.
- *Iizuka, Y., Fujii, Y., Hirasawa, N., Suzuki, T., Motoyama, H., Furukawa, T. and Hondoh, T. (2004): SO_2^- minimum in summer snow layer at Dome Fuji, Antarctica, and the probable mechanism. *J. Geophys. Res.*, **109**, D04307, doi:10.1029/2003JD004138.
- Inomata, Y., Iwasaka, Y., Morimoto, S., Shiobara, M., Machida, T. and Sugawara, S. (2003): Carbonyl sulfide concentration in the Arctic lowermost stratosphere and stratosphere-troposphere transport. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **81**, 1471–1484.
- *Inomata, Y., Hayashi, M., Osada, K. and Iwasaka, Y. (2006): Spatial distributions of volatile sulfur compounds in surface seawater and overlying atmosphere in the northwestern Pacific Ocean, eastern Indian Ocean, and Southern Ocean. *Global Biogeochem. Cy.*, **20**, GB2022, doi:10.1029/2005GB002518.
- *Inoue, J. (1989a): Surface drag over the snow surface of the Antarctic plateau 1: factors controlling surface drag over katabatic wind region. *J. Geophys. Res.*, **94** (D2), 2207–2217.
- *Inoue, J. (1989b): Surface drag over the snow surface of the Antarctic plateau 2: seasonal change of surface drag in the katabatic wind region. *J. Geophys. Res.*, **94** (D2), 2219–2224.
- *Ishidoya, S., Sugawara, S., Hashida, G., Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T. and Yamanouchi, T. (2006): Vertical profiles of the O_2/N_2 ratio in the stratosphere over Japan and Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13701, doi:10.1029/2006GL025886.
- *Ishidoya, S., Sugawara, S., Morimoto, S., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2008a): Gravitational separation of major atmospheric components of nitrogen and oxygen in the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L03811, doi:10.1029/2007GL030456.
- Ishidoya, S., Morimoto, S., Sugawara, S., Watai, T., Machida, T., Aoki, S., Nakazawa, T. and Yamanouchi, T. (2008b): Gravitational separation suggested by O_2/N_2 , $\delta^{15}\text{N}$ of N_2 , $\delta^{18}\text{O}$ of O_2 , Ar/N_2 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.
- *Ishijima, K., Sugawara, S., Kawamura, K., Hashida, G., Morimoto, S., Murayama, S., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2007): Temporal variations of the atmospheric nitrous oxide concentration and its $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for the latter half of the 20th century reconstructed from firn air analyses, *J. Geophys. Res.*, **112**, D03305, doi:10.1029/2006JD007208.
- *Ito, T. (1985): Study of background aerosols in the Antarctic troposphere. *J. Atmos. Chem.*, **3**, 69–91.
- 岩坂泰信 (2000): 北極圏の大気科学: エアロゾルの挙動と地球環境. 名古屋, 名古屋大学出版会, 229 p.
- *岩坂泰信・長田和雄・林 政彦・長谷正博・宇井啓高・山内 恭・深津 徹・橋田 元 (1998): 南極・昭和基地で観測されたエアロゾル粒子サイズ-数濃度の変動—II—. 第21回極域気水圏シンポジウム プログラム・講演要旨. 東京, 1998-11, 国立極地研究所. 95-96.
- *Japan Meteorological Agency (1996): Antarctic meteorological data obtained by the Japanese Antarctic Research Expedition: meteorological data at Syowa Station and Dome Fuji Station in 1995, **36**, 358 p.
- *Japan Meteorological Agency (1997): Antarctic meteorological data obtained by the Japanese Antarctic Research Expedition: meteorological data at Syowa Station and Dome Fuji Station in 1996, **37**, 223 p. (also published in CD-ROM).
- *門崎 学 (2004): 南極域における NOAA 衛星 AVHRR データによる雲の検出と分布特性に関する研究. 総合研究大学院大学, 158 p. 博士論文.
- *Kadosaki, G., Yamanouchi, T. and Hirasawa, N. (2002): Temperature dependence of brightness temperature difference of AVHRR infrared split window channels in the Antarctic. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **16**, 106–115.
- Kawakami, N., Osada, K., Nishita, C., Yabuki, M., Kobayashi, H., Hara, K. and Shiobara, M. (2008): Factors controlling sea salt modification and dry deposition of nonsea-salt components to the ocean. *J. Geophys. Res.*, **113**, D14216, doi:10.1029/2007JD009410.
- *Kawamura, K., Severinghaus, J.P., Ishidoya, S., Sugawara, S., Hashida, G., Motoyama, H., Fujii, Y., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2006): Convective mixing of air in firn at four polar sites. *Earth Planet. Sc. Lett.*, **244**, 672–682.
- *気象庁 (1998): 南極気象資料 1997 年—第 38 次日本南極地域観測隊 昭和基地及びドームふじ観測拠点. 東京 (CD-ROM).
- *木津暢彦・金濱 晋・鎌田浩嗣・上野圭介・長井勝栄 (2007): 第 43 次南極地域観測隊気象部門報告 2002. 南極資料, **51**, 35–94.
- *Kobayashi, H., Hara, K., Shiobara, M., Yamanouchi, T., Osada, K. and Ohta, S. (2003): Seasonal variation of chemical composition of aerosols at Syowa Station, Antarctica in 2001. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **17**, 68–80.
- *Koga, S., Nagao, I., Tanaka, H. and Mouri, H. (1999): Methanesulfonate and non-sea-salt sulfate concentrations in aerosols at Syowa, Antarctica. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **77**, 155–164.
- *Koide, M. (1997): Studies on the Antarctic ozone hole using infrared laser heterodyne spectroscopy. Thesis presented for the degree of Doctor of Science, Tohoku University, 164 p.
- 国立極地研究所編 (1988): 南極の科学 3: 気象. 東京, 古今書院, 334 p.
- Morimoto, S., Aoki, S., Nakanishi, Y., Wada, M. and Yamanouchi, T. (2000): Meteorological data at Japanese Ny-Ålesund observatory, Svalbard from 1996 to 1998. *NIPR Arctic Data Rep.*, **4**, 254 p.
- Morimoto, S., Aoki, S. and T. Yamanouchi (2001): Temporal variations of atmospheric CO_2 concentration and carbon isotope ratio in Ny-Ålesund, Svalbard., *Mem. Natl Inst. Polar Res.*, Spec. Issue, **54**, 71–79.
- *Morimoto, S., Wada, M., Sugawara, S., Aoki, S., Nakazawa, T. and Yamanouchi, T. (2002a): In-situ measurement of the atmospheric CO concentration at Syowa Station, Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **16**, 95–105.
- Morimoto, S., Aoki, S., Nakanishi, Y., Wada, M. and Yamanouchi, T. (2002b): Meteorological

- data at Japanese Ny-Ålesund observatory, Svalbard in 1999 and 2000. NIPR Arctic Data Rep., **5**, 204 p.
- *Morimoto, S., Nakazawa, T., Aoki, S., Hashida, G. and Yamanouchi, T. (2003a): Concentration variations of atmospheric CO₂ observed at Syowa Station, Antarctica from 1984 to 2000. *Tellus*, **55B**, 170–177.
- *Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., Hashida, G. and Yamanouchi, T. (2003b): Atmospheric CO₂ concentration observed at Syowa Station from 1992 to 2001. JARE Data Rep., **269** (Meteorology ; **35**), 62 p.
- Morimoto, S., Watai, T., Machida, T., Wada, M. and Yamanouchi, T. (2003c): In-situ measurement of the ozone concentration in the Arctic Airborne Measurement Program 2002 (AAMP 02). *Polar Meteorol. Glaciol.*, **17**, 81–93.
- *森本真司・田中洋一 (2005): 連続観測システムの遠隔監視用小型データ収録装置の開発. 南極資料, **49**, 182–191.
- Morimoto, S., Aoki, S., Wada, M. and Yamanouchi, T. (2005): Meteorological data at Japanese Ny-Ålesund observatory, Svalbard in 2001 and 2002. NIPR Arctic Data Rep., **6**, 112 p.
- Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T. and Yamanouchi, T. (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:10.1029/2005 GL024648.
- *Morimoto, S., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2009a): High precision measurements of carbon isotopic ratio of atmospheric methane using a continuous flow mass spectrometer. *Nankyoku shiryô* (Antarct. Rec.), **53**, 1–8.
- *Morimoto, S., Yamanouchi, T., Honda, H., Aoki, S., Nakazawa, T., Sugawara, S., Ishidoya, S., Iijima, I. and Yoshida, T. (2009b): 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.
- *Morimoto, S., Ishidoya, S., Goto, D., Ogi, A., Aoki, S. and Nakazawa, T. (2009c): High precision continuous measurement system of the atmospheric O₂/N₂ ratio using a fuel cell oxygen analyzer. 14th WMO/IAEA Meeting of experts on carbon dioxide, other greenhouse gases and related tracers measurement techniques. Helsinki, Finland, 10–13 Sep. 2007. Geneva, WMO, 67–70 (GAW Report ; **186**, WMO/TD ; **1487**).
- *森本真司・山内 恭・本田秀之・青木周司・中澤高浩・菅原 敏・石戸谷重之・飯嶋一征・吉田哲也 (2009a): J-T クーラーを用いた小型成層圏大気クライオサンプラーの開発. 大気球研究報告, 63–74 (宇宙航空研究開発機構研究開発報告 ; JAXA-RR-08-001).
- *森本真司・浅野 比・青山朋樹・吉見英史・内田洋子・望月隆史・岩淵真海・水野大治・堤 雅基・本田秀之・飯嶋一征・吉田哲也・山内 恭・和田 誠 (2009b): 小型クライオサンプラーを用いた昭和基地での成層圏大気採取実験: 第 49 次隊実験報告. 南極資料, **53**, 95–109.
- *Motoyama, H., Hirasawa, N., Satow, K. and Watanabe, O. (2005): Seasonal variations in oxygen isotope ratios of daily collected precipitation and wind drift samples and in the final snow cover at Dome Fuji Station, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **110**, D11106, doi:10.1029/2004JD004953.
- *本吉弘岐 (2008): 衛星リモートセンシングによる東南極氷床域の積雪粒径の分布に関する研究. 総合研究大学院大学, 87 p. 博士論文.
- *Mouri, H., Nagao, I., Okada, K., Koga, S. and Tanaka, H. (1999): Individual-particle analyses of coastal Antarctic aerosols. *Tellus*, **51B**, 603–611.
- Murata, I., Sato, K., Okano, S. and Tomikawa, Y. (2009): Measurements of stratospheric ozone with a balloon-borne optical ozone sensor. *Int. J. Remote Sensing*, **30**, 3961–3966.
- *Murayama, S., Nakazawa, T., Yamazaki, K., Aoki, S., Makino, Y., Shiobara, M., Fukabori, M., Yamanouchi, T., Shimizu, A., Hayashi, M., Kawaguchi, S. and Tanaka, M. (1995): Concentration variations of atmospheric CO₂ over Syowa Station, Antarctica and their interpretation. *Tellus*, **47B**, 375–390.
- *Murayama, S., Yamazaki, K., Nakazawa, T. and Aoki, S. (1998): Interpretation of high mixing ratios of O₃ observed in the upper troposphere over Syowa Station, Antarctica using a

- trajectory analysis. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1177–1180.
- Myhre, C.L., Toledano, C., Myhre, G., Stebel, K., Yttri, K.E., Aaltonen, V., Johnsrud, M., Frioud, M., Cachorro, V., de Frutos, A., Lihavainen, H., Campbell, J.R., Chaikovsky, A.P., Shiobara, M., Welton, E.J. and Tørseth, K. (2007): Regional aerosol optical properties and radiative impact of the extreme smoke event in the European Arctic in spring 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 5899–5915.
- Nakajima, H., Saeki, K., Murata, I. and Nagahama, T. (2008): Bi-polar polar stratospheric clouds (PSC) observations related to polar ozone depletion with FTIR spectrometer at Ny-Ålesund, Svalbard. The First International Symposium on the Arctic Research (ISAR-1): drastic change under the global warming, 4–6 Nov. 2008, Miraikan, Tokyo, Japan: extended abstract. [Tokyo], ISAR-1 Organizing Committee, 58–61.
- *Nakashima, H., Hamada, N. and Yamanouchi, T. (2003): Airborne microorganisms in the indoor environment of Syowa Station in Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **17**, 61–67.
- Nakaoka, S., Aoki, S., Nakazawa, T., Hashida, G., Morimoto, S., Yamanouchi, T. and Yoshikawa-Inoue, H. (2006): Temporal and spacial variations of oceanic $p\text{CO}_2$ and air-sea CO_2 flux in the Greenland Sea and the Barents Sea. *Tellus*, **58B**, 148–161.
- *Nakaoka, S., Nakazawa, T., Yoshikawa-Inoue, H., Aoki, S., Hashida, G., Ishii, M., Yamanouchi, T., Odate, T. and Fukuchi, M. (2009): Variations of oceanic $p\text{CO}_2$ and air-sea CO_2 flux in the eastern Indian sector of the Southern Ocean for the austral summer of 2001–2002. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L14610, doi:10.1029/2009GL038467.
- 南極資料 (1997): 特集:「南極の気候」—南極域における気候変動に関する総合研究報告一. **41**(1), 468 p.
- 南極資料 (2002): 北極圏航空機観測 (AAMP 98) 成果特集. **46**(1A), 286 p.
- 西村八代 (2009): オゾンゾンデを用いた極域対流圏界面の研究. 総合研究大学院大学, 75 p. 修士論文.
- *Ohata, T., Kobayashi, S., Ishikawa, N. and Kawaguchi, S. (1985): Structure of the katabatic winds at Mizuho Station, East Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **90** (D6), 10651–10658.
- Okano, S., Okabayashi, M. and Gernandt, H. (1996): Observations of ozone profiles in the upper stratosphere using a UV sensor on board a light-weight high-altitude balloon. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 225–231.
- *Osada, K., Hayashi, M., Ui, H. and Iwasaka, Y. (1998): Ionic constituents in aerosol particles at Syowa Station, East Antarctica, during 1996. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **12**, 49–57.
- *Osada, K., Hara, K., Kido, M., Kai, H., Yamanouchi, T., Hashida, G., Matsunaga, K. and Iwasaka, Y. (2001): Sulfate depletion in snow over sea ice near Syowa Station, Antarctica, in relation to the origin of sulfate depleted sea salt aerosol particles in winter. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **15**, 21–31.
- *Osada, K., Hara, K., Wada, M., Yamanouchi, T. and Matsunaga, K. (2006): Lower tropospheric vertical distribution of aerosol particles over Syowa Station, Antarctica from spring to summer in 2004. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **20**, 16–27.
- *長田和雄・林 政彦・塩原匡貴・原圭一郎・和田 誠・橋田 元・森本真司・矢吹正教・山内 恭 (2006): 南極・昭和基地における清浄大気観測室の設置について. 南極資料, **50**, 86–102.
- Rinke, A., Dethloff, K. and Fortmann, M. (2004): Regional climate effects of Arctic Haze. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16202, doi:10.1029/2004GL020318.
- *Sasaki, M., Imura, S., Kudoh, S., Yamanouchi, T., Morimoto, S. and Hashida, G. (2009): Methane efflux from bubbles suspended in ice-covered lakes at the Syowa Oasis, East Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **114**, D18114, doi:10.1029/2009JD011849.
- *Sasaki, M., Endoh, N., Imura, S., Kudoh, S., Yamanouchi, T., Morimoto, S. and Hashida, G. (2010): Air-lake exchange of methane during the open water season in Syowa Oasis, East Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **115**, D16313, doi:10.1029/2010JD013822.
- *Sato, K., Yamamori, M., Ogino, S., Takahashi, N., Tomikawa, Y. and Yamanouchi, T. (2003): A meridional scan of the stratospheric gravity wave field over the ocean in 2001 (MeSSO2001). *J. Geophys. Res.*, **108** (D16), doi:10.1029/2002JD003219.

- *佐藤 薫 (2004): 南極昭和基地の気象. 天気, **51**, 869-879.
- *佐藤 薫・富川喜弘・橋田 元・門倉 昭・麻生武彦・山内 恭・並木道義・松坂幸彦・山上隆正・村田 功・中島英彰・杉田考史 (2006): 気球および衛星観測に基づく南極オゾン層回復過程 3 次元構造の研究. 大気球シンポジウム平成 17 年度. 神奈川, 2006-1, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 92-95.
- *Sato, K. and Hirasawa, N. (2007): Statistics of Antarctic surface meteorology based on hourly data in 1957-2007 at Syowa Station. *Polar Sci.*, **1**, 1-15.
- *Sato, K. and Yoshiki, M. (2008): Gravity wave generation around the polar vortex in the stratosphere revealed by 3-hourly radiosonde observations at Syowa Station. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3719-3735.
- *Sato, K., Tomikawa, Y., Hashida, G., Yamanouchi, T., Nakajima, H. and Sugita, T. (2009): Longitudinally dependent ozone increase in the Antarctic polar vortex revealed by balloon and satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/2008JAS2904.1.
- Shibata, T., Iwasaka, Y., Fujiwara, M., Hayashi, M., Shiraishi, K., Adachi, H., Sakai, T., Susumu, K., Nakaura, Y. and Watanabe, M. (1996): Lidar observed polar stratospheric clouds over Svalbard in mid-December 1994. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 217-223.
- *Shibata, T., Sato, K., Kobayashi, H., Yabuki, M. and Shiobara, M. (2003): Antarctic polar stratospheric clouds under temperature perturbation by nonorographic inertia gravity waves observed by micropulse lidar at Syowa station. *J. Geophys. Res.*, **108** (D3), 4105, doi:10.1029/2002JD002713.
- Shiobara, M., Fujii, Y., Morimoto, S., Asuma, Y., Yamagata, S., Sugawara, S., Inomata, Y., Watanabe, M. and Machida, T. (1999): An overview and preliminary results from the Arctic airborne measurement program 1998 campaign. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 99-110.
- *Shiobara, M., Yabuki, M. and Kobayashi, H. (2003): A polar cloud analysis based on Micro-pulse Lidar measurements at Ny-Alesund, Svalbard and Syowa, Antarctica. *Phys. Chem. Earth*, **28**, 1205-1212.
- Shiobara, M., Yabuki, M., Neuber, R., Spinhirne, J.D., Welton, E.J., Campbell, J.R., Hart, W.D., Berkoff, T.A. (2006): Arctic experiment for ICESat/GLAS ground validation with a Micro-Pulse Lidar at Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **20**, 28-39.
- *Shiobara, M., Hara, K., Yabuki, M. and Kobayashi, H. (2007): Optical and chemical properties of marine boundary-layer aerosol around Japan determined from shipboard measurements in 2002. *Atmos. Environ.*, **41**, 4638-4652.
- Shiobara, M., Yamano, M., Kobayashi, H., Aoki, K. and Yabuki, M. (2008): Sky-radiometer measurement for monitoring column aerosol optical properties in Ny-Ålesund: recent results from the spring 2006-2007 measurements. *Polarnet Tech. Rep. PTR-1/2008*, 32-35.
- *Shirai, T. and Y. Makide (1998): Rapidly increasing concentrations of CFC alternatives (HFC-134a, HCFC-141b and HCFC-142b) in the atmosphere as observed in Hokkaido and Antarctica. *Chem. Lett.*, **27**, 357-358.
- Shiraishi, K., Fujiwara, M., Shibata, T. and Iwasaka, Y. (2003): Lidar observations of polar stratospheric clouds over Ny-Aalesund in the winters of 1994/95-1996/1997: impact of the temperature and the temperature history on the PSC structure. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **81**, 1457-1470.
- Stohl, A., Berg, T., Burkhardt, J.F., Fjæraa, A.M., Forster, C., Herber, A., Hov, Ø., Lunder, C., McMillan, W.W., Oltmans, S., Shiobara, M., Simpson, D., Solberg, S., Stebel, K., Ström, J., Tørseth, K., Treffeisen, R., Virkkunen, K. and Yttri, K.E. (2007): Arctic smoke: record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 511-534.
- *Sugawara, S., Kawamura, K., Aoki, S., Nakazawa, T. and Hashida, G. (2003a): Reconstruction of past atmospheric CH₄ concentration from the firn air data at Dome Fuji. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **57**, 153-160.
- *Sugawara, S., Kawamura, K., Aoki, S., Nakazawa, T. and Hashida, G. (2003b): Reconstruction of past variations of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO₂ from its vertical distribution observed in the firn

- at Dome Fuji, Antarctica. *Tellus*, **55B**, 159-169.
- *菅原 敏・橋田 元・石戸谷重之・並木道義・飯島一征・森本真司・青木周司・本田秀之・井筒直樹・中澤高清・山内 恭 (2005): 第45次南極地域観測隊によるクライオジェニックサンプラー回収気球実験. 大気球研究報告, 77-88 (宇宙航空研究開発機構研究開発報告; JAXA-PR-04-015).
- Suzuki, K., Yamanouchi, T., Hirasawa, N. and Yasunari, T. (2004): Seasonal variation of air transport in the Antarctic and atmospheric circulation in 1997. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **18**, 96-113.
- Suzuki, K., Yamanouchi, T. and Motoyama, H. (2008): Moisture transport to Syowa and Dome Fuji stations in Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **113**, D24114, doi:10.1029/2008JD009794.
- *Tanaka, M., Nakazawa, T., Shiobara, M., Ohshima, H., Aoki, S., Kawaguchi, S., Yamanouchi, T., Makino, Y. and Murayama, H. (1987): Variations of atmospheric carbon dioxide concentration at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E), Antarctica. *Tellus*, **39B**, 72-79.
- *田阪茂樹・松原正也・田口彰一・長田和雄・山内 恭 (2011): 南極海における大気中ラドン濃度観測. *天気*, **58**, 31-38.
- Thomason, L.W., Herber, A.B., Yamanouchi, T. and Sato, K. (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.
- *Tomasi, C., Vitale, V., Lupi, A., Di Carmine, C., Campanelli, M., Herber, A., Treffeisen, R., Stone, R.S., Andrews, E., Sharma, S., Radionov, V., von Hoyningen-Heuene, W., Stebel, K., Hansen, G.H., Myhre, C.L., Wehrli, C., Aaltonen, V., Lihavainen, H., Vakkula, A., Hillamo, R., Ström, J., Toledano, C., Cachorro, V.E., Ortiz, P., de Frutos, A.M., Blindheim, S., Frioud, M., Gausa, M., Zielinski, T., Petelski, T. and Yamanouchi, T. (2007): Aerosols in polar regions: a historical overview based on optical depth and in situ observations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D16205, doi:10.1029/2007JD008432.
- Tomikawa, Y. and Sato, K. (2005): Design of the NIPR trajectory model. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **19**, 120-137.
- *Tomikawa, Y., Yoshiki, M. and Sato, K. (2006): A neutral wave observed in the Antarctic polar vortex. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **84**, 97-113.
- Tomikawa, Y., Nishimura, Y. and Yamanouchi, T. (2009): Characteristics of tropopause and tropopause inversion layer in the polar region. *SOLA*, 2009, **5**, 141-144, doi:10.2151/sola.2009-036.
- *Toyoda, S., Yoshida, N., Urabe, T., Nakayama, Y., Suzuki, T., Tsuji, K., Shibuya, K., Aoki, S., Nakazawa, T., Ishidoya, S., Ishijima, K., Sugawara, S., Machida, T., Hashida, G., Morimoto, S. and Honda, H. (2004): Temporal and latitudinal distributions of stratospheric N₂O isotopomers. *J. Geophys. Res.*, **109**, D08308, doi:10.1029/2003JD004316.
- Treffeisen, R., Herber, A., Ström, J., Shiobara, M., Yamanouchi, T., Yamagata, S., Holmén, K., Kriews, M. and Schrems, O. (2004): Interpretation of Arctic aerosol properties using cluster analysis applied to observations in the Svalbard area. *Tellus*, **56B**, 457-476.
- Treffeisen, R., Rinke, A., Fortmann, M., Dethloff, K., Herber, A. and Yamanouchi, T. (2005): A case study of the radiative effects of Arctic aerosols in March 2000. *Atmos. Environ.*, **39**, 899-911.
- Treffeisen, R.E., Thomason, L.W., Ström, J., Herber, A.B., Burton, S.P. and Yamanouchi, T. (2006): Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II and III aerosol extinction measurements in the Arctic middle and upper troposphere. *J. Geophys. Res.*, **111**, D17203, doi:10.1029/2005JD006271.
- *Ui, H., Tasaka, S., Hayashi, M., Osada, K. and Iwasaka, Y. (1998): Preliminary results from radon observation at Syowa Station, Antarctica, during 1996. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **12**, 112-123.
- *Umezawa, T., Aoki, S., Nakazawa, T. and Morimoto, S. (2009): A high-precision measurement system for carbon and hydrogen isotopic ratios of atmospheric methane and its application to air samples collected in the western Pacific region. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **87**, 365-379.
- Wada, M. and Igarashi, M. (1998): Atmospheric observations of liquid water in cloud and of

- chemical species in aerosols and gases near the ground and in fallen snow at Svalbard, Arctic. *Atmos. Res.*, **46**, 383–389.
- Wada, M., Konishi, H. and Yamanouchi, T. (1996): Variation of monthly precipitation and frequency of radar echo existence at some altitudes in Ny-Ålesund, Svalbard, Arctic. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 239–246.
- Wada, M., Asuma, Y. and Ogitali, N. (1998): Observation of clouds and precipitation at Ny-Ålesund, Svalbard and recent airborne observation over the Norwegian Sea. “Polar Low Workshop” ed. by G. Heinemann, Copenhagen, EPLWG, 21–24.
- *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.
- Wada, M., Konishi, H., Morimoto, S. and Yamanouchi, T. (2002): Size distributions of aerosol and snow particle in different type airmasses. The changing physical environment: proceedings from the sixth Ny-Ålesund international scientific seminar. Editors, Ørbæk, J.B. *et. al.*, Tromsø, Norway, 8–10 Oct. 2002, Norsk Polarinstitutt. 45–48 (Norsk Polarinstitutt Internrapport ; **10**).
- Wada, M., Konishi, H., Morimoto, S. and Yamanouchi, T. (2004): Size distributions of snow and aerosol particles in a continuous precipitation with a change of surface ozone concentration at Ny-Ålesund, Arctic. 14th International Conference on Clouds and Precipitation. Bologna, Italy, 19–23 Jul. 2004, ICCP. 1765–1768 (Proceedings ; v. **3**).
- Watanabe, M., Iwasaka, Y., Shibata, T., Hayashi, M., Fujiwara, M. and Neuber, R. (2004): The evolution of Pinatubo aerosols in the Arctic stratosphere during 1994–2000. *Atmos. Res.* **69**, 199–215.
- *Wessel, S., Aoki, S., Winker, P., Weller, R., Herber, A., Gernandt, H. and Schrems, O. (1998): Tropospheric ozone depletion in polar regions: a comparison of observations in the Arctic and Antarctic. *Tellus*, **50B**, 34–50.
- *Yabuki, M., Shiobara, M., Kobayashi, H., Hayashi, M., Hara, K., Osada, K., Kuze, H. and Takeuchi, N. (2003): Optical properties of aerosols in the marine boundary layer during a cruise from Tokyo, Japan to Fremantle, Australia. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **81**, 151–162.
- *矢吹正教・塩原匡貴・山内 恭・和田 誠 (2007): 多波長ライダーを用いた南極昭和基地上空における雲特性の研究. 第 30 回極域気水圏シンポジウム プログラム・講演要旨. 東京, 2007-11, 国立極地研究所. 71.
- *Yajima, N., Honda, H., Aoki, S., Hashida, G., Morimoto, S., Machida, T. and Okano, S. (1999): Improved scientific ballooning applied to the cryo-sampling experiment at Syowa Station. *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, **13**, 167–175.
- Yamagata, S., Kobayashi, D., Ohta, S., Murao, N., Shiobara, M., Wada, M., Yabuki, M., Konishi, H. and Yamanouchi, T. (2009): Properties of aerosols and their wet deposition in the arctic spring during ASTAR2004 at Ny-Alesund, Svalbard. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 261–270.
- Yamanouchi, T. (1983): Variations of incident solar flux and snow albedo on the solar zenith angle and cloud cover, at Mizuho Station, Antarctica. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **61**, 879–893.
- *Yamanouchi, T., and Kawaguchi, S. (1984): Long wave radiation balance under a strong surface inversion in the katabatic wind zone, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **89** (D7), 11771–11778.
- *山内 恭・和田 誠 (1998): 無人航空機観測用超小型高能率大気サンプリングシステムの開発. 平成 9 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (A) (1)) 研究成果報告書 (研究課題番号: 07558076). [東京], [国立極地研究所], 140 p.
- Yamanouchi, T. and Herber, A. (2001): Arctic study of tropospheric aerosol and radiation, ASTAR 2000-field plan. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **54**, 101–106.
- *山内 恭 (2007): 大気科学における国際共同観測と IPY. 極地, **43**, 3–9.
- *Yamaonuchi, T. and Shudou, Y. (2007): Trends in cloud amount and radiative fluxes at Syowa Station, Antarctica. *Polar Sci.*, **1**, 17–23.
- *Yamanouchi, T. (2009): Polar cloud-radiation climatology, stratosphere-troposphere interaction and MST radar (PANSY). Proceedings EarthCARE Workshop 2009. Kyoto, 10–12 June 2009, NICT, JAXA, ESA, 181–186.
- Yamanouchi, T., Aoki, S., Morimoto, S. and Wada, M. (1996): Report on atmospheric science

- observations at Ny-Ålesund, Svalbard. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 153–163.
- *Yamanouchi, T., Hirasawa, N. and Hayashi, M. (1999a): Report of observation project on “Atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic” by JARE-38. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 157–162.
- *Yamanouchi, T., Wada, M., Fukatsu, T., Hayashi, M., Osada, K., Nagatani, M., Nakada, A. and Iwasaka, Y. (1999b): Airborne observation of water vapor and aerosols along Mizuho route, Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 22–37.
- *山内 恭・平沢尚彦・林 政彦 (1999): 「南極大気・物質循環観測」の開始. *天気*, **46**, 157–162.
- *Yamanouchi, T., Hirasawa, N., Kadosaki, G. and Hayashi, M. (2000): Evaluation of AVHRR cloud detection at Dome Fuji Station, Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **14**, 110–116.
- *Yamanouchi, T., Hirasawa, N., Hayashi, M., Takahashi, S. and Kaneto, S. (2003a): Meteorological characteristics of Antarctic inland station, Dome Fuji. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **57**, 94–104.
- Yamanouchi, T., Wada, M., Shiobara, M., Morimoto, S., Asuma, Y., Yamagata, S., Yamazaki, T., Ishidoya, S., Kawahara, T., Yabuki, M., Inomata, Y., Herber, A., Graeser, J., Hara, K., Hirasawa, N., Aoki, S., Sugawara, S., Machida, T., Watai, T. and Treffeisen, R. (2003b): Preliminary report of “Arctic Airborne Measurement Program 2002” (AAMP 02). *Polar Meteorol. Glaciol.*, **17**, 103–115.
- Yamanouchi, T., Treffeisen, R., Herber, A., Shiobara, M., Yamagata, S., Hara, K., Sato, K., Yabuki, M., Tomikawa, Y., Rinke, A., Neuber, R., Schumacher, R., Kriews, M., Ström, J., Schrems, O. and Gernandt, H. (2005): Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation (ASTAR) 2000: Arctic haze case study. *Tellus*, **57B**, 141–152.
- *Yokouchi, Y., Li, H.-J., Machida, T., Aoki, S. and Akimoto, H. (1999): Isoprene in the marine boundary layer (Southeast Asian Sea, eastern Indian Ocean, and Southern Ocean): comparison with dimethyl sulfide and bromoform. *J. Geophys. Res.*, **104** (D7), 8067–8076.
- *Yokouchi, Y., Nojiri, Y., Barrie, L.A., Toom-Sauntry, D., Machida, T., Inuzuka, Y., Akimoto, H., Li, H.-J., Fujinuma, Y. and Aoki, S. (2000): A strong source of methyl chloride to the atmosphere from tropical coastal land. *Nature*, **403**, 295–298.
- *Yokouchi, Y., Osada, K., Wada, M., Hasebe, F., Agama, M., Murakami, R., Mukai, H., Nojiri, Y., Inuzuka, Y., Toom-Sauntry, D. and Fraser, P. (2008): Global distribution and seasonal concentration change of methyl iodide in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **113**, D18311, doi: 10.1029/2008JD009861.
- *Yoshiki, M. and Sato, K. (2000): A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17995–18011.
- *Yoshiki, M., Kizu, N. and Sato, K. (2004): Energy enhancements of gravity waves in the Antarctic lower stratosphere associated with variations in the polar vortex and tropospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, **109**, D23104, doi:10.1029/2004JD004870.