

2019年春季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告

—南極の広域をより高い精度で観測する—

平 沢 尚 彦^{*1}・栗 田 直 幸^{*2}・佐 藤 和 敏^{*3}・林 政 彦^{*4}

1. はじめに

担当世話人：平沢尚彦（国立極地研究所／

総合研究大学院大学）

http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index

地球温暖化の下、今後の南極の変化は人類の関心事である。西南極の温暖化と氷床の消耗は進んでいるが、南極氷床の主要部である東南極の変化は比較的小さい。しかし、東南極でも変化が起こっていることを示唆するデータがないわけではない。今後の南極の変化を知るためには、広域の、できるだけ正確な観測が必要である。南極は代表的な観測空白域の一つであるが、南極の研究に携わるものが現在どのようにアプローチしているのかを紹介し、今後、学会員から広く協力を得る場とした。2019年5月15日に気象学会春季大会の会場に約20名の参加をいただき、質疑、意見交換が行われた。以下に講演内容の抄録を記す。

2. 最近の南極の気候的变化

平沢尚彦（国立極地研究所／総合研究大学院大学）

南極の気候的变化について平沢（2017）に沿って講演した。東南極の温暖化が抑制されていることは多くの研究が示している（Steig *et al.* 2009など）。しかし、その仕組みに取り組んだ研究はほとんどない。南極上空のオゾンホール成長と成層圏の極渦の経年的な強化が対流圏の極渦の強化を引き起こし、結果として東南極の温暖化を抑制しているという Thompson and

Solomon（2002）、Thompson *et al.*（2011）の議論が唯一である。

一方、Turner *et al.*（2006）は南極の対流圏に強い温暖化シグナルが出ていることを示しており、対流圏の極渦強化とは対立している。Thompson and Solomon（2002）、Thompson *et al.*（2011）は夏を中心とした12月～5月の平均場、Turner *et al.*（2006）は通年の平均場を解析しており、両者の矛盾を解くには季節性を調べる必要がある。また、講演時に極地研の山内氏から、オゾンホールの成長に伴う放射場の変化が地上気温の低温化に関わる可能性について Steig *et al.*（2009）がコメントしていることが強調された。

日本が活動する昭和基地やドームふじ基地は東南極に位置しているが、その領域で最近観測された温暖化を伺わせる現象について紹介した。その一つは2012/13年夏季に観測された氷床表面融解と高温である。標高1000mを超える地域で氷床表面に氷の部分が散在していることが発見された。融解の痕跡である。融解の時期や高温の仕組みを追究したところ、昭和基地の地上気温が2013年1月7日に8.6°Cの高温になっていたことが分かった。また、昭和基地の観測が開始されて以来、夏季の最高気温が徐々に低下していたこと、8.6°Cを上回る気温は過去30年に亘って観測されていなかったことなどが分かった。すなわち、この調査で東南極の少なくとも夏季の温暖化抑制（または、低温化）と最近の温暖化の顕在化に触れた可能性がある。

もう一つは降雪量の増加である。昭和基地は島の上にあるが、大陸に上がるとつき岬という場所からドームふじ基地までの1000kmに亘って2kmごとに雪尺と呼ぶ竹棒を立てている。ドームふじに向かう道すがら雪面上に出ている部分の長さを測り続けている。前回の測定値との差がその間に堆積した雪の深さを示す。このデータを分析すると、2002年頃から堆積

*1（連絡責任著者）Naohiko HIRASAWA, 国立極地研究所。総合研究大学院大学。hira.n@nipr.ac.jp

*2 Naoyuki KURITA, 名古屋大学宇宙地球環境研究所

*3 Kazutoshi SATO, 北見工業大学

*4 Masahiko HAYASHI, 福岡大学理学部地球圏科学科

© 2020 日本気象学会

量が増えていたことが分かった。降水量の増加は温暖化の特徴の一つであるし、南極氷床の質量収支においてその涵養を担うのは降水である。そして南極氷床の質量収支は温暖化で懸念されている海水準上昇の主役であるから、この傾向は今後も注視していく必要がある(本山 2017)。

この堆積量を増やしている気象のメカニズムを解明する目的を持って数値モデルの解析と現地での長期観測(次の講演で紹介)を始めた。数値モデルを用いて総観規模擾乱に伴う南極氷床上の降水の仕組みを調べたところ、沿岸域と内陸域とで降水形成の仕組みに明瞭な違いがあることが分かった。沿岸域では地形との相互作用によって、内陸域よりも効率的に降水が形成される(平沢・山田 2017)。これには沿岸域に強風を作る orographic blocking (Yamada and Hirasawa 2018) の仕組みも関与している。南極への総観規模擾乱の影響がどう変化してきたのか、どう変化しつつあるのかは、南極の気候研究に残された新しい視点だと思う。

3. 南極内陸への AWS の展開 (JARE-AWS 観測の過去・現在・将来)

栗田直幸(名古屋大学宇宙地球環境研究所)

日本の南極地域観測隊(以後、南極観測隊)が長年観測を行っている東南極地域は、厚さ3000mを超える氷床で覆われており、陸水の消耗・融解は深刻な海水準の上昇を引き起こすと懸念されている。幸いにも、東南極地域では地球温暖化による影響が未だに報告されていないが、温暖化の影響が顕在化した際には、北極域のように予測を上回る速さで環境変化が進行する可能性がある。それゆえ、将来起こりうる海水準変動をすばやく捉えるため、温暖化が当該地域の環境に及ぼす影響を早期に検出できる気象観測網を整えることが望まれる。本発表では、日本の南極観測隊が取り組んできた東南極地域における無人気象観測の歴史を振り返り、温暖化影響の評価に利用できる長期気象データセットの構築可能性について議論した。

南極観測における無人気象観測の歴史は1980年代まで遡ることができる。1980年代前半には極低温下でも動作する半導体メモリー(CMOS)を記憶媒体として用いた AWS が開発され(菊地・牧野 1988)、1987年から91年にかけて実施された南極気候計画(ACR)、1991年から実施されたドームふじ深層掘削計画を通じて耐寒性能の向上が行われた(高橋ほか 1998など)。そして、 -80°C という極低温下でも動作するよう測器

の改善が行われた後、1993年からは S16(大陸氷床上の観測点の一つ、後出の H128も同じ)からドームふじ基地までのルート上に CMOS 型の AWS (CMOS-AWS) を設置し通年観測が開始された。CMOS-AWS を使った観測は、地点毎に観測期間が異なるが、ドームふじ基地については2009年まで継続して実施されている。また、1993年から2001年までに得られた観測データは、Takahashi *et al.* (2004) にまとめられている。

東南極地域では、国産の CMOS-AWS 以外にも、米国ウィスコンシン大学のグループが開発した ARGOS 型 AWS (NOAA 衛星に観測データ送信が可能な Wisconsin2B 型 AWS) を使った観測も行われてきた(Lazzara *et al.* 2012)。1995年には中継拠点とドームふじ基地に設置され、2001年からはみずほ基地でも Wisconsin 2B-AWS を使った観測が行われている。これらのデータは、ウィスコンシン大学からダウンロードできる(<https://amrc.ssec.wisc.edu> 2019.10.19閲覧)。しかし、Wisconsin 2B-AWS は CMOS-AWS と比較して耐低温性能が低く、冬期の気温が -80°C を下回るようなドームふじ基地周辺域では、測器の稼働率が低いという問題点があった。それゆえ、2010年には商用の CR1000 データロガーを用いた Wisconsin CR1000-AWS への更新が行われ、更新後は冬期に停止することなく通年データを取得できるようになった。

近年では、国産の ARGOS-AWS 開発が進み、寒冷域でも連続したデータ取得が可能な測器が利用可能となってきた(Aoki *et al.* 2014)。さらに、国産 ARGOS-AWS では、積雪深や放射収支の観測も可能であり、質量収支や熱収支研究にも応用が可能となった。そこで、2015年以降、S16からドームふじ基地までのルート上に国産 ARGOS-AWS を設置し通年観測を行っている。2019年6月現在では、H128、中継拠点、新ドームふじ(NDF)の3地点にて設置が完了している。

東南極地域における無人気象観測は、1993年の観測開始から約25年の歴史があり、その間に4種類の AWS が利用されている。そのため、これらの観測データをつなげて長期データを作成するには、観測高度の違いや各測器間の器差を評価する必要がある。また、最新の国産 ARGOS-AWS 観測以外は、強制通風ではなく自然通風式の通風筒を用いて温湿度の観測が行われており、日射の影響によって通風筒内部の温度が外気よりも高くなるという問題点が指摘されている。それゆえ、上記の作業に加えて、日射の影響を取り除く作業も必要である。このように、温暖化影響の

評価に利用できる長期気象データセットの構築は簡単ではなく、越えるべき多くの高いハードルが待ち構えている。しかしながら、東南極地域の内陸域における気象観測データは先人の努力の賜物であり、世界に先駆けて日本が行った観測である。この貴重なデータを最大限活かし、極域気象研究の進展につなげていくためにも、長期気象データセットの構築が望まれる。

4. YOPP-SH への貢献—より高精度の総観規模循環の把握に向けて—

佐藤和敏（北見工業大学）

観測点の少ない極圏では、予報モデルに用いる初期値の不確実性が大きく、予報精度を悪化させる原因となっている。そのため、北極海や北極海周辺の観測所で通常よりラジオゾンデ観測の回数を増加させると、北半球全域の予報精度に影響することがわかってきている（Sato *et al.* 2017, 2018a）。しかし、これまでの研究では、南極海や南極大陸で実施されたラジオゾンデ観測の影響は明らかになっていない。南極圏は、北極圏に比べて観測所が少ないことから同化されているデータ数も少なく、予報精度に大きく影響していることが指摘されている（Sato *et al.* 2018b）。

そこで本研究では、海洋研究開発機構が地球シミュレータ用に開発した大気大循環モデル（Ohfuchi *et al.* 2004）及びアンサンブルデータ同化システムである LETKF（Miyoshi and Yamane 2007；Enomoto *et al.* 2013）を用いて、南極圏に常設されている観測所や南極海の船上で取得されたラジオゾンデ観測が南半球の予報精度に与える影響を調べた。具体的には、2017年12月～2018年1月に日本のドームふじ基地や砕氷船「しらせ」により実施された追加観測（それぞれ1日2回）を同化・非同化した再解析データを作成し、それぞれを初期値として63メンバーのアンサンブル予報実験を行い、それらのアンサンブル平均の差を調べた。観測データの影響を調べるため、特別観測が実施された2018年1月上旬に日本の昭和基地へ接近した低気圧に着目した。この低気圧は、発達しながら昭和基地に接近し、2019年1月3日に昭和基地周辺で最も気圧が低くなっていた。

南極大陸や南極海での追加観測データを含んだ予報実験は、低気圧の発達をよく再現しており、中心気圧の低下を予報できていた。一方、追加観測データを同化していない予報実験では、中心気圧の低下は再現できておらず、低気圧の発達は予報できていなかった。

これらの結果やアンサンブルスプレッドの差を追跡した解析から、観測データが乏しくなる高緯度で不確実性が大きくなり、この不確実性が南極海へ伝播することで、南極海の現象の予報精度を悪化させていることがわかった（Sato *et al.* 2020）。

5. 無人飛行機で南極を観測する

林 政彦（福岡大学理学部地球圏科学科）

福岡大学は、国立極地研究所、九州大学と共同で南極昭和基地周辺における無人飛行機観測に取り組んできた。ここでは、①株式会社スカイリモートとの共同開発となるデルタカイト状のキール翼を主翼とした小型無人飛行機（カイトプレーン）をプラットフォームとした無人飛行機観測システムを中心として、②九州大学と共同で開発運用している小型固定翼グライダー機観測システムの開発・運用状況について紹介する。

我々のグループの南極における無人飛行機観測の主な目的は、エアロゾル観測であった。1998年からカイトプレーンに着目し、試験運用とともに開発にも協力し、2000年ころには、国内および中国で黄砂の観測を実施している。南極に初めてカイトプレーンを持ち込んだのは第48次南極地域観測隊（JARE48）におけるS17航空拠点（以後、S17と記載）での観測である（平沢・原 2007；山内ほか 2008）。その後、JARE58計画としてS17に一月半滞り、本格的なプロジェクト観測としてのカイトプレーンによるエアロゾル観測を成功させた（林ほか 2017）。

JARE58では、凝結核計数装置（CPC）と光散乱粒子計数装置（OPC）を搭載して、大陸縁辺部の標高600mのS17上空の海拔高度700mから18km離れた海水面上まで水平フライトを行い、海拔高度1200mでS17まで帰還させる自動制御飛行を中心として19回の観測飛行を成功させた。その結果として、境界層内のエアロゾル濃度の高い一様性の確認、接地カタバ風層の低濃度、境界層内における凝結核粒子濃度の増大などの特徴的な現象を見出した。JARE60では、海拔高度3000mまでの観測にも成功しており、ペイロード重量5kgでの水平方向に数10km、鉛直方向に3kmのスケールで飛行速度15m/sec程度の観測が可能になったと考えている。

無人飛行機観測を行っている、どうしても、時空間分解能の細かい、その場所の風情報が欲しくなってくる。無人飛行機観測の取り組み当初からこの課題は重視してきたが、近年のセンサーデバイスの小型・高

精度化、GPSに代表されるGNSS系の進歩が後押しする形で、高精度の風計測が可能となってきた。国際的には、この方面の研究はかなり活発に行われており、マルチコプターの位置、姿勢安定のために必要なローター間の出力の違いなどをデータとした風情報の取得なども試みられている。福岡大学でも、一定高度を周回させる間の対地速度ベクトルの hodograph から時間分解能1分程度、水平分解能300m程度の風速を求める試みや、対地速度ベクトルと、対気速度ベクトルから時間分解能1秒、空間分解能10m程度で風ベクトルを求める試みを行ってきた。長崎県福江島、大分県久住町での観測における実証試験で0.2m/sec程度の精度でその場所での風観測が行えるようになったと考えており、今後は、南極観測にも利用する予定である。

九州大学と国立極地研究所は、固定翼小型無人飛行機による磁場探査に2004年頃から取り組んでおり、2010～12年には、サウスシェトランド諸島の磁場探査に成功している(Funaki *et al.* 2013)。九州大学は同種の機体による大気観測、エアロゾル観測に取り組んできた。JARE48ではS17にカイトプレーンとともに固定翼小型無人機を持ち込んだ。2008年には、JARE49として、昭和基地沖のオングル海峡での気象観測フライトに成功している。現在は、ペイロード重量5kgで航続距離約1000km、高度6kmまでの観測が可能な機体の開発を行っている。これが実現すると、昭和基地から海氷縁、開水域までの観測が可能となり、大気、海洋、雪氷の相互作用に関する研究観測に資することができると考えている。

九州大学と福岡大学は、気球で無人飛行機を成層圏高度まで飛揚させて自律航行により観測基地まで帰還させる観測システム開発に取り組んでいる(Higashino *et al.* 2014)。機体重量は、搭載機器重量1kgで総重量10kg以下(3kg以下が望ましい)を目標としている。風の弱い夏季の観測ではあるが、現在のところ、JARE56で固定翼グライダー機を用いて高度23.5kmまで(国立極地研究所 2015)、JARE58ではカイトプレーンを用いて高度5kmまでの観測に成功している。この観測システムは、極夜の成層圏エアロゾルサンプルの回収や高度30kmからの昼側オーロラの高時間分解能撮影の実現を目指して、開発を継続中である。

気球浮揚カイトプレーンを用いた新たな取り組みとして、現在越冬中のJARE60においては、昭和基地に設置されているPANSYレーダーとの乱流同期観測を予定している。先行研究としては、京都大学とフラン

スのグループによる信楽のMUレーダーとDataHawkと呼ばれる小型無人機の同時観測(ShUREX)で、高度5kmまでの乱流パラメータの同期観測が行われている。これを南極のPANSYレーダーで、目標高度を10kmとして、カイトプレーンとの同時観測計画が進行中である。

現在、昭和基地には、毎年マルチコプターが持ち込まれ、積雪状況の観測などが行われている。境界層内の詳細な時空間変動の観測には、マルチコプターは有力なプラットフォームになると考えられる。JARE60でもパイサラの気象モニタを搭載したマルチコプターを持ち込み、試験観測を試みている。

2000年ころから取り組み始めた無人飛行機観測であるが、ようやく安定的な運用が可能なレベルに達したところで、活用分野の広がりも見せ始めているところである。しかし、社会的な無人飛行機の普及とその活用の広がりに対して、地球科学分野における活用は思いの外進んでいないというのが率直な考えである。興味が少しでもあるようでしたら、声をかけていただければ、実現の可能性を検討させていただきます。気軽に無人機の利用も考えていただければと思います。

謝 辞

講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。また、会場の準備をしていただいた大会実行委員会の皆様に感謝いたします。

略語一覧

ACR: Antarctic Climate Research
 AWS: Automatic Weather Station
 CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor 相補型金属酸化膜半導体
 GNSS: Global Navigation Satellite System 全地球航法衛星システム
 CPC: Condensation Particle Counter 凝結核計数装置
 GPS: Global Positioning System 全地球測位システム
 JARE: Japanese Antarctic Research Expedition 日本南極観測
 MUレーダー: The middle and upper atmosphere radar
 NDF: New Dome Fuji 新ドームふじ
 OPC: Optical Particle Counter 光散乱粒子計数装置
 PANSY: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar 南極昭和基地大型大気レーダー計画
 ShUREX: Shigaraki UAV-Radar Experiment 信楽無人航空機レーダー実験

参 考 文 献

- Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H. Motoyama, 2014: Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) project in Greenland in 2011–2013. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 3–20.
- Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, S. Kuwano-Yoshida, N. Komori and S. Yamane, 2013: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications Vol. II* (S. K. Park and L. Xu, eds.), Springer, 509–526.
- Funaki, M., S. Higashino, S. Sakanaka, N. Iwata, N. Nakamura, N. Hirasawa, N. Obara and M. Kuwabara, 2014: Small unmanned aerial vehicles for aeromagnetic surveys and their flights in the South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Sci.*, **8**, 342–356.
- 林 政彦ほか, 2017: 第58次南極地域観測隊による南極氷床S17における無人後期観測. 日本気象学会2017年度秋季大会講演予稿集, C107.
- Higashino, S., M. Hayashi, S. Nagasaki, S. Umemoto and M. Nishimura, 2014: A balloon-assisted gliding UAV for aerosol observation in Antarctica. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, **12** (APISAT-2013), a35–a41.
- 平沢尚彦, 2017: 地球温暖化と現在の南極. 気象研究ノート, (233), 5–14.
- 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, 山田恭平, 2017: “ブリザード”に伴う南極域の降水分布. 日本気象学会2017年度秋季大会講演予稿集, C106.
- 菊地時夫, 牧野章汎, 1988: 南極東クィーンモードランド前進拠点における無人気象観測. 天気, **35**, 39–46.
- 国立極地研究所, 2015: 無人観測航空機, 高度22kmの南極成層圏エアロゾルのサンプルリターンに成功! 国立極地研究所プレスリリース (2015年3月13日). <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150313.html> (2019.7.11閲覧)
- Lazzara, M. A., G. A. Weidner, L. M. Keller, J. E. Thom and J. J. Cassano, 2012: Antarctic automatic weather station program: 30 years of polar observation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1519–1537.
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2007: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841–3861.
- 本山秀明, 2017: 雪尺観測から見える氷床表面質量収支の変動. 気象研究ノート, (233), 193–204.
- Ohfuchi, W. *et al.*, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator –Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator)–. *J. Earth Simulator*, **1**, 8–34.
- Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, J.-H. Kim, M. Maturilli, K. Dethloff, S. R. Hudson and M. A. Granskog, 2017: Improved forecasts of winter weather extremes over midlatitudes with extra Arctic observations. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122**, 775–787.
- Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, J.-H. Kim, A. Makshtas, V. Kustov, M. Maturilli and K. Dethloff, 2018a: Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations. *Sci. Rep.*, **8**, 12104, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30594-4>.
- Sato, K., J. Inoue, S. P. Alexander, G. McFarquhar and A. Yamazaki, 2018b: Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 11406–11413.
- Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, N. Hirasawa, K. Sugiura and K. Yamada, 2020: Antarctic radiosonde observations reduce uncertainties and errors in reanalyses and forecasts over the Southern Ocean: an extreme cyclone case. *Adv. Atmos. Sci.*, **37** (4), 印刷中.
- Steig, E. J. *et al.*, 2009: Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, **457**, 459–463.
- 高橋修平ほか, 1998: 南極における日本の無人氣象観測 (1992~1997). 雪氷, **60**, 463–472.
- Takahashi, S., T. Kameda, H. Enomoto, H. Motoyama and O. Watanabe, 2004: Automatic weather station (AWS) data collected by the 33rd to 42nd Japanese Antarctic Research Expeditions during 1993–2001. *JARE Data Rep.*, **276**, 416pp.
- Thompson, D. W. J. and S. Solomon, 2002: Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, **296**, 895–899.
- Thompson, D. W. J., S. Solomon, P. J. Kushner, M. H. England, K. M. Grise and D. J. Karoly, 2011: Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geosci.*, **4**, 741–749.
- Turner, J. *et al.*, 2006: Significant warming of the Antarctic winter troposphere. *Science*, **457**, 459–463.
- Yamada, K. and N. Hirasawa 2018: Analysis of a record breaking strong wind event at Syowa Station in January 2015. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 13643–13657.
- 山内 恭ほか, 2008: 2007年春季極域・寒冷域研究連絡会の報告. 天気, **55**, 696–702.