

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K00523

研究課題名（和文）北極温暖化増幅及び東南極温暖化抑制における雲・海水の役割に関する研究

研究課題名（英文）The role of clouds and sea ice in the Arctic amplification and the warming suppression in East Antarctica under global warming

研究代表者

山内 恭 (Yamanouchi, Takashi)

国立極地研究所・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00141995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：地球温暖化の中での北極域の温暖化増幅と東南極の温暖化抑制における雲と海水の役割を調べた。

北極、南極における観測データから、雲が発達し下向き長波放射が増大、極側を温暖化する現象が時々起こっていることが確認された。この現象は、単に雲の増大・発達ではなく、大気循環場が変化することによって、対流圏の極渦が蛇行し（ブロッキングによることが多い）リッジが高緯度側に侵入し、高温多湿をもたらし、併せて雲の発達を促し、長波放射の増大を通じて極を温めているという仕組みが明らかになった。しかし、北極側がよりこの寄与がより大きいという結果となり、標高の高い大陸の存在が南極への熱流入を抑制していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化の中で北極や南極はどうなっているのか、その変化の影響はどうかといったことが問われている。北極では気温の急上昇や海水域の急減など極めて顕著な変化が起こりつつある。一方、南極本体である東南極では目立った温暖化は起こっていない。この違いはなぜなのだろうか、その原因を調べ、ある程度の説明はついた。

今後、温暖化が進行して行く中で、北極と南極はどのように変化して行くのか、についてはある程度の見通しを得ることができた。これらが、さらに我々の生活する中緯度や世界中にどのような影響を与えていくかをあきらかにしなければならない。

研究成果の概要（英文）：The role of clouds and sea ice in the Arctic amplification and the warming suppression in East Antarctica under global warming was investigated.

From the observation data in the Arctic and Antarctic, it was confirmed that the warming of the polar region occasionally occurred with the clouds enhancements, and downward longwave radiation increases. This phenomenon was not simply the increase and development of clouds, but derived by the change in the atmospheric circulation field, which causes the polar vortex to meander (often due to blocking) and the ridge to intrude into the high latitude side, resulting in high temperature and humidity. The mechanism that promotes the development of clouds and warms the poles through the increase in longwave radiation has been clarified. The results suggested that this contribution was greater on the Arctic, due to the presence of high-altitude Antarctic continent.

研究分野：大気科学・極域気候学

キーワード：地球温暖化 北極 南極 雲 海水 放射 大気循環 子午面逆転循環

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が進む中、北極域では地球平均の2-3倍の速さで気温上昇が見られ、北極海を覆う海水が著しく減少するなど、「温暖化の増幅」が顕著である。一方、同じ極域ながら南極域、特に大陸氷床の本体をなす東南極では、昭和基地や南極点基地等、各基地で温度上昇は明瞭でなく、「温暖化の抑制」がみられ、また海水域面積は増加傾向にある。この原因については、南極のオゾンホールだという説が強いが(Thompson and Solomon, 2002)、必ずしも説明しきれていない。そこで、雲や海水の働きから、南北両極域での異なった気候変化の現れに対する原因を探ろうというのが本研究の目的である。

海水が存在すると、地表面のアルベドを高めることで日射の吸収を減らし、海面から大気への熱輸送を抑えるなど、熱収支に大きく影響する。また、雲の存在は日射、大気放射両方への働きで、気候を寒冷化したり温暖化したりする。そして、海水の存在と雲の存在が、お互いに相互作用すること、雲が氷-アルベド・フィードバックを改変している可能性があることなど、さらに複雑な影響を気候システムに与えている(Yamanouchi and Charlock, 1997)。極域では、これらのしくみ、ふるまいを正確に把握しないと、正確な気候システムの理解ができない。

南極域の雲は放射収支を通じて気候に強い影響を与える。研究代表者は、この問題を早くから取り上げ、POLEX-South(極域気水圏計画)における南極みずほ基地での観測で、氷床上の放射収支の特徴、中・低緯度とは違い通年にわたり雲は地表面を温めるという、特異な雲の働きを明らかにした(Yamanouchi, 1983; Yamanouchi and Kawaguchi, 1984)。南極氷床上では代表性のある観測結果ではあったが、北極を含む様々な気候状態にある極域全てのしくみを解明するためには広域の観測が必要であり、そのためには衛星による観測が必須となった。衛星データから雲の分布を求めるには、地表面が雪や氷で覆われている極域では困難が多い。日射に対する高いアルベド、逆転層の発達した著しい低温のためである。このような困難の中、衛星画像から雲や海水を識別する研究を行い(Yamanouchi et al., 1987; Yamanouchi and Kawaguchi, 1992)、国際的にも進んでいた成果であったため、当時進められていたWCRP/国際衛星雲気候計画(ISCCP)などにも貢献した(Rossow and Garder, 1993)。その後の南極域における雲研究についてはBromwich et al. (2012)により概観され、新しい衛星からの能動的観測器(雲レーダーやライダー)が有効であることが指摘されており、この方向の研究を広く進める。

放射収支についても、グローバルな分布を求めるべく、衛星を使って大気上端の放射収支を求めるERBE(地球放射収支観測計画)が行われた。極域については、研究代表者が詳しい解析を行い、南極域における放射収支の雲、海水依存性が明らかにされた(Yamanouchi and Charlock, 1997)。Gorodetskaya et al. (2006)は同様の解析をさらに進め、気候の数値モデルと対比し、雲の氷-アルベド・フィードバックへの働きは未だ不確かであることを示している。北極域の雲と放射、海水についてはCurry et al. (1996)が以前の研究をまとめており、北極気候システムにおいて、雲は海水とも関係し強いフィードバックをもつと結論づけている。Yamanouchi (2007)はスバルバルでの観測から、この30年の雲量の増加と日射、大気放射いずれも増加を示しているとの初期的な結果を示した。1980、90年代を通じて北極海水減少は明瞭であり、2000年代に入ると気候モデルで予測されたよりもはるかに著しい減少傾向となり、21世紀中頃には夏の北極海の海水は消滅するのではないかとの予測も現れた。このような海水減少の中で雲の役割も焦点の一つで、2007年の著しい海水減少は雲の分布の偏りによる大気放射の増大が原因となっているという解析結果も出されている(Schweiger et al., 2008)。

長年にわたって研究が続けられているが、南極、北極域の気候-温暖化-における雲と海水の役割は、未だ確かなものでなく(IPCC, 2013)、引き続き取り組むべき極域気候研究における重要課題である(Yoshimori et al., 2014)。そこで、北極温暖化増幅と東南極温暖化抑制という、一見相反するような気候変化の中での雲や海水の働きを解明することが、極域気候の理解に必須である。

## 2. 研究の目的

地球温暖化が進む中、北極域では地球平均の2-3倍の速さで気温上昇が見られ、北極海を覆う海水が著しく減少するなど、「温暖化の増幅」が顕著である。一方、同じ極域ながら南極域、特に大陸氷床の本体をなす東南極では、温度上昇は明瞭でなく、場所によっては気温が低下し、海水域面積が広がる所もあるなど、「温暖化の抑制」がみられる。このような、南北両極域で異なった気候変化が現れるのはなぜか。気候の仕組みで最も不確実な雲や海水の果たす役割を明らかにすることで、その違いの原因を解明することが目的である。両極域における地上観測や衛星データ解析を通じて、雲や海水の役割、雲が海水の氷-アルベド・フィードバックに対する働きなどを解明し、極域気候変化の理解を深め、気候モデルを通じた将来予測の高精度化に貢献する。

## 3. 研究の方法

地上観測、地上リモートセンシング観測、衛星データの解析、気象客観解析データにより、マクロな雲、海水変動と放射収支の関係、放射強制力、気象場との関係を明らかにすることで、極域気候システムにおける雲・海水の役割を解析する。即ち、南極では昭和基地で取得されている種々の気象パラメータ、リモートセンシングデータを入手解析し、北極では主にスバルバル諸島ニーオルスン基地で取得された同様のデータを入手し、雲、海水の存在と気象場との関わりを解析する。これらの解析を通じ、北極温暖化増幅への雲、海水の働き、対照的な東南極温暖化抑制に対する雲、海水の寄与を解明する。

#### 4. 研究成果

地球温暖化の中での北極域の温暖化増幅と東南極の温暖化抑制における雲と海水の役割を調べた。

初年度は、平成25年以来、GRENE北極気候変動研究プロジェクトでスバルバル・ニーオルスンに整備された雲レーダーを中心に観測データの解析を行い、ニーオルスンの気候と雲の関わりを調べた。冬のスバルバルは、北極気団の中で寒冷な時期と大西洋からの海洋性気団に覆われて温暖な時期とがあることが、以前の研究(Yamanouchi and Orbeak, 1995)で指摘されているが、10月～3月の冬半年の長波放射の変化を解析することで、あらためて確認した。

既に、正味の長波放射の絶対値が小さい時と大きい時があり、曇天か晴天かに対応しているという結果が報告されているが、ここでは正味放射ではなく、下向きの長波放射そのものを見ることで、単に曇り、晴れの違いを越えた大きな違いがある。それは大規模な大気循環場の違い一極渦の内外の違い一で起こることが明らかになった。即ち、各々の状況の中で曇り晴れの違いが重なっており、2重の大きな違いになっている。この場合に現れる雲について、雲レーダーデータから、温暖湿潤な海洋性気団の中での厚い雲と寒冷な北極気団の中では薄い層状性の雲が現れやすいという違いがあることが示された。この顕著な2値をもつことが大西洋側北極の冬の気候の特徴になっている。結果は論文として公表した(Yamanouchi, 2019)。

一方、南極では、第58次観測隊により、大陸氷床上斜面のS17地点で集中観測が行われ、その中で、高層気象ゾンデ観測等で大気鉛直構造と雲の出現等を対比させるデータが取得された。夏期間に限られるが、様々な気象場の中での雲の出現特性と気象状況との対比が期待できる。

かつて、内陸ドームふじ基地での越冬観測が行われた際に捉えられた、冬季の気温急上昇現象をまず再度検証した。その結果、北極でみたのと同種の現象であり、ブロッキング現象が起こって、ジェット気流が蛇行し、極渦は歪み、リッジが南極大陸内に深く侵入していたことが確認された。この現象に伴い、北極同様に、地上観測している長波下向き放射が著しく増大していることも、ドームふじ基地、昭和基地合わせて確認できた。

南北両極で同様な現象が起こり、温暖化に寄与していることは確認できたが、南北の違いがあるのか否かを調べた。この10年(2007年～2016年)の間、下向き長波放射量にして最大値の90%以上をとる事例数(1時間平均値)をみると、年によっては南北の違いがあまり見られないこともあったが、多くの年では北極で多くの発生頻度がみられた。即ち、北極の方がより強い、低緯度からの湿潤暖気流入があることが分かった。これが、熱的に、定量的にどのくらいの寄与であるのかは、今後の課題である。

その他、先に実施した、GRENE北極気候変動研究のまとめのレビュー論文を執筆し、投稿に至った(Yamanouchi and Takata, 2020)。上記の北極における低緯度からの熱輸送が、北極温暖化増幅に重要な役割を果たしているとの研究成果を含むものである。

期間延長した中では、これまでの成果発表に加え、新しい視点での南北温暖化コントラストの解明を進めた。前者については、平成31/令和元年度までの4年間の成果をSCAR(南極研究科学委員会)のOSC(公開科学シンポジウム)に投稿した。

南北温暖化コントラストに関しては、南極オゾンホールによる極渦・大気循環場の変化から南極温暖化抑制が起こっているという説の他、南極大陸の標高が高いということが標高0メートルの北極とは違い温暖湿潤大気流入(これまで解析してきた)を止める効果があること、氷-アルベドフィードバックが南極大陸域では起こり難く(氷床は急激には変化しない)より低緯度の海水縁付近であること、そして世界の海洋大循環(海流のコンベアーベルト)である子午面逆転循環(MOC)特に大西洋子午面循環(AMOC)が主要な役割を果たしていることを調べ確認した。この結果は、一般向けに出版した「南極と北極-地球温暖化の視点から」(丸善出版サイエンス・パレット037)にも記述した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takashi Yamanouchi	4. 巻 21
2. 論文標題 Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Alesund, Svalbard	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 110-116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2018.10.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamanouchi and K. Takata	4. 巻 25
2. 論文標題 Rapid change of the Arctic climate system and its global influences - Overview of GREEN Arctic Climate Change Research Project (2011-2016)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 1-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2020.100548	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamanouchi	4. 巻 5
2. 論文標題 Arctic warming amplification and warming suppression in East Antarctica - Contribution of MOC to north-south asymmetry -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Okhotsk Sea and Polar Oceans Research	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Takashi Yamanouchi and Naohiko Hirasawa
2. 発表標題 Contribution of warm-moist air intrusion to the longwave radiative forcing in the polar region.
3. 学会等名 IUGG2019/IACS（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Yamanouchi
2. 発表標題 North-south contrast in radiative forcing due to warm-moist air intrusion into the polar regions.
3. 学会等名 10th NIPR Symposium on Polar Sciences, 3-5 December 2019, Tokyo, Japan. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内 恭・平沢尚彦
2. 発表標題 南極での雲放射強制を伴う湿潤暖気流入の加熱への寄与
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Yamanouchi
2. 発表標題 Warming by moist air intrusion and cloud radiation in the Arctic and Antarctic
3. 学会等名 POLAR2018 (SCAR/IASC Open Science Conference) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Yamanouchi and Naohiko Hirasawa
2. 発表標題 Radiative forcing due to warm-moist air intrusion into the Antarctic
3. 学会等名 The 9th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamanouchi, T., T. Takano, M. Shiobara, H. Okamoto, M. Koike and J. Ukita
2. 発表標題 Arctic Cloud Study at Ny-Alesund, Svalbard in GRENE Arctic Climate Change Research Project.
3. 学会等名 Session 3 (Arctic clouds, aerosols and climate effects), ASSW2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山内 恭
2. 発表標題 スバルバル・ニーオルスンの長波放射にみる冬の2つの気候状態
3. 学会等名 日本気象学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamanouchi, T.
2. 発表標題 Influence of clouds and warm-moist air intrusion on the two distinct Arctic winter atmospheric states.
3. 学会等名 8th NIPR Symposium on Polar Sciences (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamanouchi, T.
2. 発表標題 Intrusion of Lower Latitude Warm-Moist Air Contributing to the Arctic amplification.
3. 学会等名 S-1, ISAR-5 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamanouchi, T. Takano, M. Shiobara, H. Okamoto, M. Koike and J. Ukita
2. 発表標題 Polar Cloud Observatory at Ny-Alesund in the GRENE Arctic Climate Change Research Project
3. 学会等名 EGU 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山内 恭
2. 発表標題 GRENE北極気候変動研究プロジェクトにおける雲観測
3. 学会等名 日本気象学会2016年春季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山内 恭
2. 発表標題 ニールスンにおける大気観測の歩みとその気候学的位置づけ
3. 学会等名 第7回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Yamanouchi and N. Hirasawa
2. 発表標題 Warm-moist air intrusion into the polar regions enhancing cloud longwave radiation and contributing to the warming
3. 学会等名 Scientific Committee on Antarctic Research SCAR-OSC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 山内 恭	4. 発行年 2017年
2. 出版社 日本気象学会	5. 総ページ数 37
3. 書名 南極の雲と放射収支・南極氷床と大気物質循環・気候（気象研究ノート第233号）第19章	

1. 著者名 山内 恭	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 200
3. 書名 南極と北極－地球温暖化の視点から	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------