

令和 3(2021)年 11 月 16 日

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立大学法人北見工業大学

北極海の海氷減少で雲の性質が変化 ～強風による波しぶきにより氷雲の割合が増加～

極域で海氷が消失した海域では、それまで氷に遮られていた大気と海洋が接することで、熱・運動量・物質が従来よりも活発に交換されるようになります。海洋は気温や風の影響で海面が冷やされ、海洋内部はよく攪拌されるようになります。大気は海面水温の影響を受けて鉛直構造や循環が変化します。このように大気と海洋の相互作用が活発化すると、大気中に浮かぶ雲の状態も変化すると考えられます。雲は大気と海洋の境界である海面の熱収支を大きく変化させ、海氷の生成過程にも影響を与えるため、海氷の減少で雲の状態がどのように変化するかを実測することは、気候モデルの精緻化にとって極めて重要です。

国立極地研究所の猪上淳准教授、^{いのうえじゅん} 當房豊助教、^{とうぼうゆたか} 海洋研究開発機構の竹谷文一主任研究員、^{たけたにふみかず} 北見工業大学の佐藤和敏助教の^{さとうかずとし}研究チームは、海洋地球研究船「みらい」の北極海航海(首席研究者:猪上淳、^{みずぐも} 図 1)で 2018 年 11 月に取得した観測データの^{こおりぐも}解析を行い、雲の相状態(水雲か氷雲か)が海上の風や波高で著しく変化することを明らかにしました。具体的には、しぶきが多量に形成される強風時には、氷晶の核となりうる粒子が海から大気中に多量に供給され、雲の下層部分で氷晶の割合が多くなることが確認されました。また、船上で採取したエアロゾルには有機物が多く含まれており、その時の海水は深さに関わらず濁度が著しく高かったことから、海底に堆積していた有機物が攪拌され海面まで浮上し、大気中で氷晶の核として働くことによって、雲内での氷晶の生成を促進していたことが、可能性の一つとして考えられました。

環境変化の激しい極域において、海氷の減少により海洋起源の氷晶核粒子の供給が増加するのであれば、気候モデルの雲計算過程を精緻化する上で考慮すべき過程であると言えます。この成果は、8 月 21 日付の *Geophysical Research Letters* 誌オンライン版に掲載されました。



図 1 : 気温 -10°C 以下の海氷のない北極海で海洋観測をする「みらい」。2018 年 11 月 19 日。北緯 73 度付近にて。(写真:猪上淳)

<研究の背景>

雲は日射の反射率が高いため、その時間・空間変動は地球表面に到達するエネルギー量を左右します。雲には水雲と氷雲の2種類があり、それぞれ水滴、氷晶でできていますが、北極域ではその両者が含まれる混相雲(注1)が頻繁に観測されます。混相雲内での氷晶の割合が増えると、雲の放射特性の変化(日射の透過量増加や反射量の減少など)や寿命の変化(短くなる)が起こるため、水雲と氷雲の割合(雲の相状態)は極域の海面熱収支(注2)や降水過程を調べる上でも重要です。

全球の雲の分布は衛星観測で把握できるようになりましたが、海面付近の雲の相状態は十分に観測できていません。また、気候予測モデルでは雲の相状態の再現性に誤差があり、その精緻化も課題となっています。北極海でも、観測された雲の特徴を気候モデルで再現することは難しく、それが海面熱収支の再現の誤差を大きくしています(文献1)。

氷雲の氷晶は、大気中に浮遊する微粒子(エアロゾル)が氷晶核粒子(注3)として機能することで生成されると考えられています。最近の研究によって、北極圏の上空で氷晶核粒子として機能するエアロゾルの正体の1つは、北極域の氷河の浸食作用によって細粒化された岩盤の微粒子とそこに含まれるわずかな有機物であることがわかってきました。この北極域起源のダストは、低～中緯度の乾燥地帯で発生するダストよりも氷晶核粒子としての能力(氷晶核能)が圧倒的に高く(文献2)、急速に進行する北極域の氷河の後退によって地面が露出することでこのような氷晶核粒子が今後増えるとも言われています。

北極域の変化は、氷河などの陸域だけでなく、海氷の減少に代表されるように海でも進行しています。海氷がなくなると、海面が露出し、波が高くなる機会が増えます(文献3)。氷晶核粒子として作用する有機物は海洋表層や海底にも豊富に存在しうるため、波が高くなることによって、海洋中の氷晶核粒子が波しぶきに伴って大気へ放出される量や頻度が増える可能性があります。

そこで、国立極地研究所の猪上淳准教授らの研究チームは、波浪や海洋状態が氷雲の生成に与える影響を調べるため、2018年11月に実施した海洋地球研究船「みらい」の北極海航海(首席研究者:猪上淳)で、氷晶核粒子と雲の観測を実施しました(図1)。

<研究の内容>

海洋地球研究船「みらい」を利用し、2018年11月10日から11月21日までの12日間、北極海上の氷縁付近において、毎日同じラインに沿って観測を行い(図2の水色の太線)、結氷期の大気・海氷・海洋の時間変化データを取得しました。この年は11月としては海面水温が平年値より高い状態で推移し、例年よりも海氷域の拡大は遅れていました(文献4)。

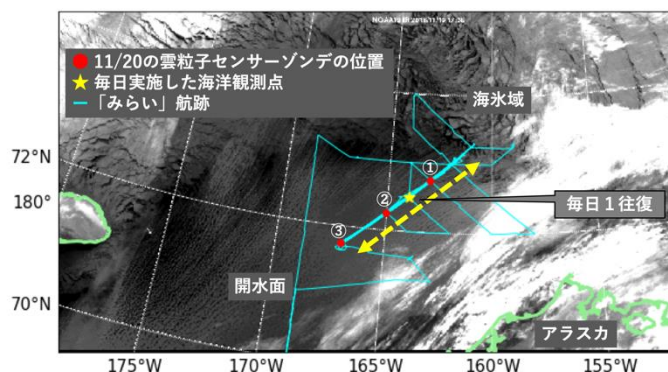


図2: 2018年11月19日の衛星画像(白い部分: 海氷や背の高い雲、黒い部分: 海面や背の低い雲)に「みらい」の航跡(水色)、雲粒子センサーゾンデ観測点(赤色、番号は図4に対応)、海洋観測点(黄色)を図示。海氷域から海面へ寒気が流れ込み、海面上では背の低い筋状の雲が形成されている。

具体的には、観測ライン上の同じ位置で停船し、観測器を沈めて海水温、塩分、濁度などの観測を毎日実施するとともに、雲が存在する場合には、雲の相状態を計測する雲粒子センサーゾンデ観測を実施しました(図 2 赤丸)。並行して、船上では各種の海上気象・表層海洋観測(海水温、塩分、濁度など)とエアロゾルのサンプリングを実施しました。エアロゾルの試料は航海終了後、実験室に持ち帰り、氷晶核能や化学組成の分析を行いました。

観測の結果、この期間の前半は比較的風速も波高も低かった一方、期間の後半は風速 10m/s 以上の日が 5 日間持続し、海氷域からの寒気の吹き出しが強い状態でした(図 2、3a, b)。特に最終日の 11 月 21 日は 14m/s の強風下で波高が 3mを超えていました(図 3b,c)。

船上のエアロゾルの化学成分を調べると、海塩(NaCl)と有機物の量が、観測最終日の 11 月 21 日に明瞭に増加していました(図 3e)。これはしぶきと共に海洋起源の有機物がエアロゾルとして大気中に供給されていることを示すものです。さらに採取したエアロゾルの氷晶核能を分析した結果、このエアロゾルは -10°C 以上でも氷晶を形成可能であることが分かりました(図 3d)。このような比較的高温でも氷晶を形成する海洋起源のエアロゾルは期間前半には見られませんでした。海洋内部の濁度(注 4)を見ると、期間前半は海底付近で高濁度であったのに対し、11 月 20 日以降は海底から表層まで一様に高濁度となり、強風で海がよく混ざった状態が観測されました(図 3f)。したがって、海底の有機物が強風による海洋の攪拌によって海面まで到達し、さらに波しぶきによって大気下層に放出されたことで、氷雲が形成されやすい大気環境になっていたと考えられます。実際、11 月 20 日に実施した雲粒子センサーゾンデの結果から、下層の雲は氷雲の割合が多い状態が観測され、期間前半の水雲の多い状態とは明瞭に異なる状況でした(図 4)。

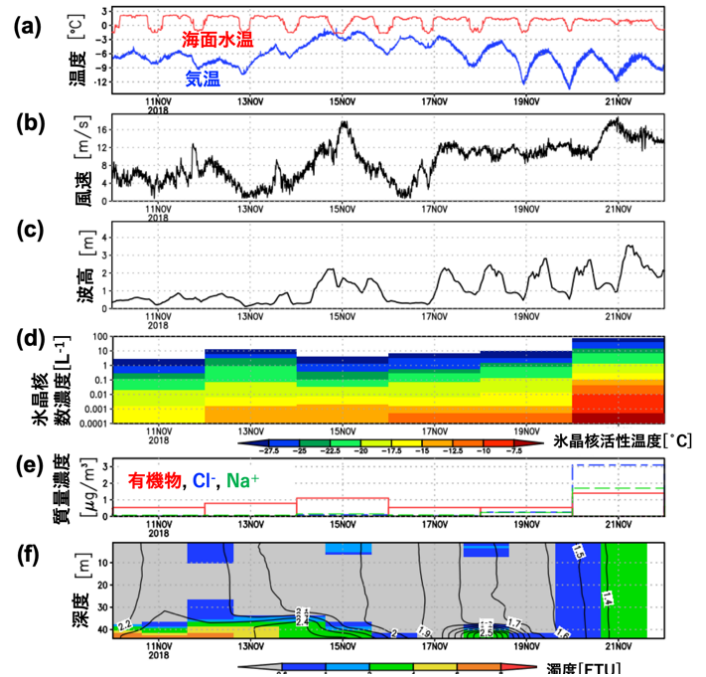


図 3：各種パラメータの時系列。(a)気温・海面水温、(b)海上風速、(c)波高、(d)活性温度別の氷晶核粒子の数濃度、(e)海水中の各物質の質量濃度、(f)濁度の深度分布。

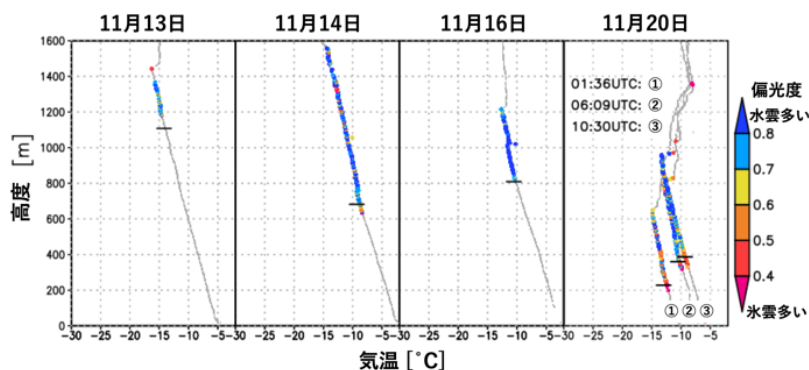


図 4：雲粒子センサーゾンデから得られた気温(グレー)と雲の相状態(カラー)。黒線は雲底計で計測した雲底高度。11 月 20 日の観測位置は図 2 に示す。

<今後の展望>

雲の相状態が変化すれば、海面熱収支も変化し、その影響はさらに海洋循環・大気循環へフィードバックしますが、IPCCで使用されている気候予測モデルにおいては依然として極域における雲の再現性は低く、それにより海面水温が実際よりも高く予測されてしまうなど、気候予測に不確実性をもたらしています。急激に変化する極域においては、大気(雲を含む)―海洋気候システムの一連の変化を意識した観測が必要不可欠で、本研究成果は海底―海面―大気のつながりを示した画期的なものです(図5)。しかしながら、極域における雲の相状態の地域差がどのような要素で規定されるのかを知る観測データは依然として不足しています。本成果で明らかとなった過程がどの程度一般性があるのかを調べるためにも、海水の減少以外の現象、例えば、南極域やグリーンランドなど氷床融解が著しい地域で同様の大気と海洋の総合的な観測が望まれます。国立極地研究所では2022年度から、南極地域観測事業において南極観測船「しらせ」を用いた南大洋上での雲の観測研究を開始する予定です。

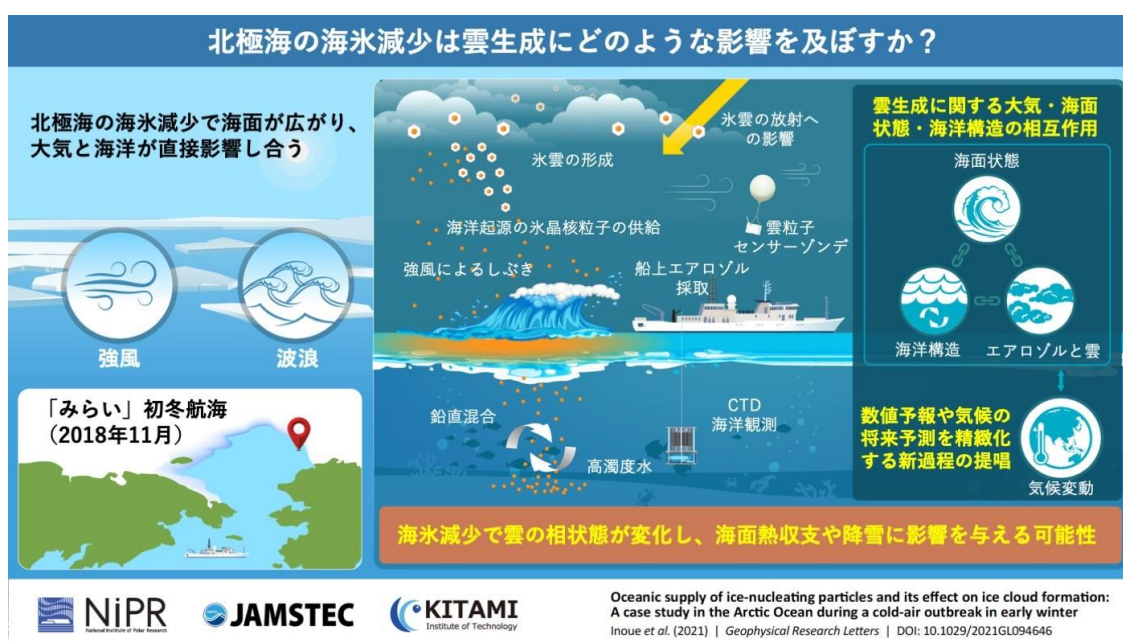


図5：本研究で明らかになった海底―海面―大気のつながり。

<発表論文>

掲載誌: *Geophysical Research Letters*

タイトル: Oceanic supply of ice-nucleating particles and its effect on ice cloud formation: A case study in the Arctic Ocean during a cold-air outbreak in early winter

著者:

猪上淳 (国立極地研究所 気水圏研究グループ 准教授)

兼 国際北極環境研究センター 准教授)

當房豊（国立極地研究所 気水圏研究グループ 助教

兼 国際北極環境研究センター 助教）

竹谷文一（海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター 主任研究員

兼 北極環境変動総合研究センター 主任研究員）

佐藤和敏（北見工業大学 工学部 助教）

URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021GL094646>

DOI: 10.1029/2021GL094646

論文出版日: 2021年8月21日(オンライン公開)

<注>

注1 混相雲:

約 -36°C ~ 0°C の温度条件下でみられる過冷却水滴と氷晶によって構成される雲。混相雲内での氷晶の形成は、氷晶核粒子として働くエアロゾルを含んだ水滴が凍結することで誘発されると言われている。

注2 海面熱収支:

海氷面や海面での熱バランス(海氷や海が冷却傾向にあるか加熱傾向にあるかの指標)。熱源としては、日射による短波放射、大気・雲や海面/海氷面からの長波放射、大気-海洋間の温度勾配等によって決まる乱流熱フラックスがある。

注3 氷晶核粒子:

大気中で氷晶が形成される際に、「核」として働く能力をもつエアロゾルのこと。一般的には、固体の微粒子であることが多い。氷晶核粒子として働くエアロゾルが存在しない場合、雲の中での氷晶の形成は、温度が約 -36°C 以下にならないと活性化されない。

注4 濁度:

海水の濁り具合の指標。この海域では春に増殖した植物プランクトンやその他の生物粒子などの有機物が海底に集積して高濁度となることが知られる。

<文献>

文献1

国立極地研究所プレスリリース「北極海の結氷予測は「雲」がカギ〜「みらい」北極海航海データを利用した、数値モデルの検証プロジェクトから〜」(2021年1月27日)

<https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20210127.html>

文献2

国立極地研究所プレスリリース「北極陸域から発生するダストが雲での氷晶形成を誘発する」(2019年3月26日)

<https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20190326.html>

文献 3

東京大学、国立極地研究所プレスリリース「海水減少で最大波高が上昇～北極航路上の安全航行に備える～」(2018年3月15日)

<https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20180315-2.html>

文献 4

東京大学、国立極地研究所プレスリリース「太平洋側北極海の昇温と結氷遅延メカニズムの一端を解明～太平洋十年規模振動とブロッキング高気圧に伴う海洋熱輸送～」(2020年12月2日)

<https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20201202.html>

< 研究サポート >

本研究は、JSPS 科研費国際共同研究加速基金(JP18KK0292)、基盤研究 A(JP24241009)、基盤研究 B(JP19H01972)、ArCS(北極域研究推進プロジェクト、JPMXD 1300000000)の助成を受けて実施されました。

お問い合わせ先

(研究内容について)

国立極地研究所 気水圏研究グループ 准教授 猪上 淳(いのうえ じゅん)

E-mail: inoue.jun@nipr.ac.jp

国立極地研究所 気水圏研究グループ 助教 當房 豊(とうぼう ゆたか)

E-mail: tobo.yutaka@nipr.ac.jp

海洋研究開発機構 主任研究員竹谷 文一(たけたに ふみかず)

E-mail: taketani@jamstec.go.jp

北見工業大学 工学部 助教 佐藤和敏(さとう かずとし)

E-mail: satokazu@mail.kitami-it.ac.jp

(報道について)

国立極地研究所 広報室

TEL: 042-512-0655 E-mail: kofositu@nipr.ac.jp

海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 広報課

TEL: 045-78-5690 E-mail: press@jamstec.go.jp

北見工業大学 総務課広報戦略担当

TEL:0157-26-9116 E-mail: soumu05@desk.kitami-it.ac.jp