

氏 名 佐藤 和敏

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1795 号

学位授与の日付 平成27年9月28日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 北極海上の降水活動の変化と海水変動の因果関係に関する
マルチスケール解析

論文審査委員 主 査 准教授 猪上 淳
教授 榎本 浩之
准教授 塩原 匡貴
教授 立花 義裕 三重大学大学院
教授 浮田 甚郎 新潟大学大学院

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

北極海上の降水活動の変化と海氷変動の因果関係に関するマルチスケール解析

北極海の海氷は、その面積が最大となる春頃に北極海全域を覆い、最小となる夏頃には海面が拡大する季節的な変動が見られる。他領域より顕著な温暖化の影響は、海氷にも及び、特に夏期の海氷は最近10年で大幅に減少している。北極海の海氷減少は、海洋から大気への熱や水蒸気の供給を促進し、下層大気の大気対流混合を強めることで雲や降水特性を変化させ、地表の熱収支や降水・降雪量を変化させる。アルベドの低い海面の拡大で、太陽放射の吸収量が増加し、海面が暖まることでさらに海氷が減少する。また、夏期の海洋中の貯熱量増加は、海洋の結氷時期を遅らせ、海氷形成の遅延や海氷成長の鈍化を引き起こす。そのため、熱放出は秋や冬まで継続する。この熱放出は、局所的な現象だけでなく、季節を越えて大気循環場など総観スケールの現象も変化させ、その変化を通じて中緯度にも影響が及んでいる。

これまでの研究では、海氷減少に伴い北極圏全域で降水や降雪量が増加していることを指摘しているが、領域毎や月毎の議論は十分に行われていない。降水量の増加は、海洋からの熱放出増加だけでなく、水蒸気の水平移流も影響するため、北極海だけでなく中緯度も含めた議論を行う必要がある。また、海氷上での降水量増加は、海氷からの熱放出を抑制する雪を増加させるが、最近の積雪深変化やその変化が海氷形成・成長へどのように影響しているか未解明である。本研究では、降水量変化を引き起こす原因を領域毎に調べ、さらに海氷形成や成長に与える影響について調べた。

まず、NCEPのClimate Forecast System Reanalysis (CFSR) 再解析データを用いて、北極海全体の降水量変化や海氷上の積雪深変化に着目した。初めに、広範囲の海氷上の積雪深変化を議論するのにCFSR再解析データが適当であるか確認するため、Cold Region Research and Engineering Laboratory (CREEL) が多年氷上に設置したIce Mass Balance (IMB) ブイの観測データとの比較を行い、CFSRによる海氷上データの再現性を調べた。CFSRの海氷上積雪深は、春や冬に正のバイアス、冬に負のバイアスを持つが、季節変動は概ね再現できており、特に10~12月は相関係数が0.7以上と再現性が良いことがわかった。

チャクチ海北側やポーフォート海では、10月や11月に低気圧活動が活発になるため降水量が増加し、海氷上の積雪深も増加していた。これらの領域では、夏期の著しい海氷減少の影響で海氷形成が遅れ、海面が拡大するため降水に対する蒸発量の寄与が大きくなっている。そのため、海氷が形成され全域を覆う12月には、降水量の寄与は小さくなっていた。バレンツ海やグリーンランド海では、他の領域より降水量が多く、10~12月の降水量の季節変化が小さい。これらの領域では、降水量に対する水蒸気の水平移流による寄与が蒸発の効果を上回る傾向があることがわかった。したがって、北極海の太平洋側と大西洋側では降水量変化が季節も要因も異なる状況である。

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

そこで、北極海を太平洋側と大西洋側に分類し、領域毎の降水システムに着目した。まず太平洋側北極海の海氷減少による影響を調べるため、1999-2014年の地球海洋研究船「みらい」による北極航海の観測データを用いて、従来海氷上に発生していた層状性の雲が海氷の消失によってどのように変化するかを解析した。シーロメータやラジオゾンデ観測では、海洋上での熱供給の増加によって対流性雲が発達し、高雲底高度の雲の発生頻度が高いことを明らかにした。特に、2013年の「みらい」北極航海では、ポーラーローヤメソスケールの降水帯などの観測頻度が高く、対流性雲の発生頻度の増加が顕著であった。また、10月に海氷縁付近で実施した定点観測では、短時間に強い降雪をもたらす現象がドップラーレーダーにより観測された。海氷や融氷水で表面付近に形成された冷気に、南から流入した暖気が押し上げられると対流が強化され、強い降雪が生じることが観測データや再解析データから確認できた。これまで行われた数値実験では、海氷縁付近で発生する降水システムの議論が行われてきたが、ラジオゾンデやドップラーレーダーなどの観測データにより、その構造が明らかになった。

次に、大西洋側北極海の海氷減少が著しいバレンツ海に着目し、降水量・積雪量に対する蒸発量増加や大気応答の影響を調べた。当該海域では、海氷減少に伴う低気圧の経路の変化で北極海中央部へ侵入する低気圧が増加していた。そのため、海氷上で降水量が多くなり、フラム海峡やバレンツ海の北側で海氷上の積雪が増加していた。バレンツ海付近にあるベアーアイランドでは、例年よりも暖かい暖冬年と寒い寒冬年で大気循環が異なっており、暖冬年は降水量が多くなっていた。暖冬年は、南風に伴う暖気移流の影響で海洋からの蒸発量が小さく、降水量増加は水蒸気の水平移流による寄与が大きいことが示された。しかし、暖冬年はバレンツ海の海氷が後退することで、北側の一部で放出量が多くなり、海氷面積減少も降水量増加に影響していた。

バレンツ海の暖冬年は、より上流の中緯度に位置するメキシコ湾流の湾軸が北上することで対流活動領域が変化し、その結果北極へ侵入する低気圧経路が変化していることが示された。線形傾圧モデル(LBM)を用いた大気応答実験では、メキシコ湾流の水温分布の変化で大気加熱が減少し、スカンジナビア半島に高圧偏差を形成することでバレンツ海の海氷域の北上(減少)を促進させていることがわかった。

北極海の降水量増加は、海氷上での積雪深を増加させ、海氷成長量にも影響を与える。最近の11月のチャクチ海北側では、過去に比べて積雪深が8cm厚くなっており、海氷成長量が約20%減少していることが1次元モデルからわかった。また、最近の気温上昇は、海氷成長量を約10%抑制しているものの、積雪深増加に伴う海氷の成長抑制の効果がより大きいことを確認した。以上のことから、北極海では降水量が増加することで海氷上の雪が増え、海氷成長に影響していることが本研究で示された。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

この論文では、利用可能な様々な時空間スケールのデータ、すなわち船舶による観測データ、漂流ブイによる領域スケールのデータ、北極圏全体をカバーする大気再解析データ等を補完的に駆使し、北極圏全体及び海域毎の降水量変化と海氷変動の因果関係を明らかにすることを目的としている。

一般に、海氷上の積雪は表面熱収支を司る重要な気候パラメータであるとともに、その断熱作用から海氷の成長速度にも大きな影響を与える。しかし、海氷上の降水現象は観測例が乏しく、大気再解析データでも再現が困難とされている。そこで著者はまず、北極海上の積雪を観測できる23個の漂流ブイデータを用い、広域解析の要となる大気再解析データの氷上積雪深の検証作業を行った。それを受けて、統計的に信頼性が高かった10～12月の北極海氷上の積雪深の長期トレンドについて解析した結果、バレンツ海やチャクチ海など海氷の減少が著しい海域では氷上の積雪が減少し、ボーフォート海などでは低気圧活動に伴う降水の増加に伴って氷上の積雪も増加傾向であることが示された。

次に、降水の起源を調べるための水蒸気の収支解析を行ったところ、太平洋側北極海の降水は海氷減少域からの蒸発の効果が大きく、一方、大西洋側北極海ではトレンド成分において蒸発の効果は減少傾向・水平輸送の効果は増加傾向という特徴があった。太平洋側では局所的影響、大西洋側では遠隔的影響が卓越していると考えられるため、上記2つの海域について以下の追加解析を行った。

(1) 太平洋側北極海の雲・降水現象に関しては、海洋地球研究船「みらい」の北極航海で著者が取得したラジオゾンデ、シーロメータ、ドップラーレーダーなどの観測データを利用したプロセス研究を実施した。雲底高度の頻度分布解析から、海氷面積の減少に伴う海面からの熱フラックスの強化で対流混合層が発達し、過去の海氷域で覆われた状況と比較すると雲底高度が上昇していることが示された。また、レーダー観測によるドップラー速度場の解析から、海と海氷の温度勾配が強い海氷縁域で降水が強化されていることが明らかとなった。これらの結果は、海氷減少が誘起する雲・降水系の強化プロセスであるとともに、海氷縁での雪ごおり生成をも促進する可能性がある。

(2) 大西洋側北極海では、水蒸気の長距離輸送に伴うトレンド成分が卓越していたため、低気圧経路の変化等が、降水現象や海氷の分布に影響を与えていると推察した。そこでバレンツ海の入り口に位置するベアーアイランドの12月の月平均気温データから暖冬年と寒冬年を抽出し、その偏差を合成解析することで暖冬年に特徴的な気象場を調査した。暖冬年はバレンツ海上で南風が卓越し、海氷が北へ押し流されるとともに、降水域もフラム海峡やスバル諸島で多く、近傍の氷上では正の積雪偏差が生じていた。これらはメキシコ湾流の海面水温分布変動から励起される大気循環偏差が遠隔的に関与していることが線形傾圧モデルから確認できた。

総合討論の部分では、氷上積雪の断熱効果は温暖化による海氷の成長抑制の効果よりも影響が大きいことを海氷次元モデルから示している。また、将来予測モデルの出力結果から、海氷の減少トレンドは氷上の積雪過程の取り扱いの差異に部分的に依存する可能性も指摘している。このように温暖化を起因とする北極海の降雪・氷上積雪の変化は、薄くなった海氷に対して感度が高いため、海氷の将来予測の不確定性を低減するには降雪・氷上積雪の精緻な取り扱いが必要なことを意味する。

以上の結果は、近年の北極海上での降水増加と海氷減少を関係づける総合的な知見を提供すると共に、数値モデルや再解析データの精緻化に貢献する内容であると高く評価され

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

た。本博士出願論文の 4 章は、査読付き国際学術雑誌 2 報に掲載された。また、他の部分も、投稿準備中である。したがって審査委員会は、提出された論文を極域科学専攻の学位論文に値するものと全員一致で認めた。