

学 位 論 文 題 名

The Influence of the Okhotsk Sea—Ice Extent on the Atmospheric Circulation

（オホーツク海の海氷域変動が大気循環場に及ぼす影響）

学位論文内容の要旨

オホーツク海の海氷域の変動が大気循環場に及ぼす影響と、オホーツク海の海氷の存在に伴う大気場の応答の力学的・熱力学的特性について、データ解析及び大気大循環モデルを用いた数値実験の手法を用いて考察を行なった。

はじめに、米国気象局（NMC）作成の大気客観解析データを用いて、多氷年と少氷年の大気場の特徴を比較した。多氷年と少氷年は気象庁作成のオホーツク海海氷グリッドデータから2月の海氷面積を計算し、面積の上位4年と下位4年を単純に選んだ。続いて多氷年、少氷年それぞれ4年間の平均の2月の大気場をNMCデータより計算し、その多氷年平均と少氷年平均の大気場の差（多氷－少氷）に注目して解析を行なった。まず地上では、多氷ケースは少氷ケースに比べて、オホーツク海上では気圧が上昇し低温化、すなわち寒冷高気圧が形成されやすい。一方、東側のベーリング海、アラスカ付近では、逆に気圧の低下と高温化の傾向が顕著である。上空の対流圏中層では、オホーツク海の北東部で高度低下すなわち上空のトラフの強化が見られる。このトラフ性アノマリーの西側のオホーツク海上では、顕著な下降流のアノマリーが見られ、対流圏上層の収束場と下層の発散場がこれに対応している。この下層の発散場は地上の高気圧性アノマリーの存在と矛盾しない。一方、上空のトラフ性アノマリーの東側のベーリング海上では対流圏中層で上昇流のアノマリーがみられ、下層の収束場と上層の発散場が対応している。

このような大気場の形成についてはさまざまな要因が考えられるが、オホーツク海の海氷が大気場に影響を及ぼした結果という立場でも矛盾なく説明できる。しかし、NMCデータに基づくデータ解析の結果はあくまで大気場と海氷場の診断関係を示すもので、これらから大気－海氷間の因果関係を特定することはできない。そこで、大気大循環モデル（AGCM）を用いて、オホーツク海の海氷が大気場に及ぼす影響を調べる数値実験を行なった。

用いたAGCMは気象研／北大スペクトルモデル（T21L30）である。オホーツク海の海氷は観測に合うように12～5月まで多氷ケースと少氷ケースを月毎に境界条件として設定し、その他の条件は全て同じとし、同じ大気の初期条件でそれぞれランを行なった。自然変動の除去と結果の統計的検定のため初期条件を少しずつ変えて、多氷ランと少氷ランをそれぞれ5例ずつ計算した。

ここでは統計的に有意な1、2月の平均場の、多氷ランと少氷ランのそれぞれ平均の差について議論する（多氷－少氷）。地上では、オホーツク海付近では多氷ケースは少氷ケースに比べて気圧場の正偏差と気温場の負偏差、すなわち寒冷高気圧の形成が顕著に見られ、先

のNMCの結果と比較しても極めてはっきりした応答である。また、多氷ケースと少氷ケースの差に見られる顕著な偏差場はオホーツク海付近にとどまらず、気圧場、気温場ともに偏西風の下流方向にあたるベーリング海、アラスカ、北米方面まで統計的にも有意な正偏差、負偏差のパターンが渦列として伝播しているように見える。この地上付近に見られるオホーツク海の海氷の多少に伴う下流方向への渦列の伝播は、対流圏中上層にもはっきり見られる。中層の高度場の偏差場は地上に比べ $1/4$ 波長位相が西側に傾いており、トラフ性のアノマリーの西側に下降流、東側に上昇流のアノマリーが存在し、これらは上層と下層の収束発散場に対応している。先に述べたNMCデータによる偏差場を改めて見直すと、弱いながらも下流方向への渦列が伝播する傾向が見られ、その力学的構造も同様である。すなわちNMCデータに見られる結果はオホーツク海の海氷の多少に伴う影響が下流方向に及んでいるものと考えられる。また、これは数値実験の結果の妥当性を示すものであり、以下は数値実験の結果を基に、海氷の多少に伴うこの大気場の応答の力学的・熱力学的特性を調べる。

このオホーツク海付近から下流方向に及ぶアノマリーの渦列は、渦度と熱のバランスを調べた結果、オホーツク海付近から励起された停滞性ロスビー波の伝播として評価出来ることが分かった。相対渦度移流項、惑星渦度移流項、発散項を見積もった結果、対流圏の中上層では基本場の西風による相対渦度移流が卓越し、一方下層では西風が弱いいため擾乱の南北風による惑星渦度の移流が卓越し、それぞれ収束発散に伴う渦度生成項によってバランスすることが定量的に評価された。また、この収束発散場に対応する2次的な鉛直循環場に伴う断熱加熱・冷却は擾乱の南北風に伴う温度移流によって、更に下層では主に顕熱・潜熱フラックスによる非断熱加熱項が加わってバランスしていることも同様に評価された。これらの渦度・熱バランスの関係は傾圧大気中の停滞性ロスビー波応答を矛盾なく説明している。

以上より、全体として停滞性ロスビー波の構造が維持されていることは理解されたが、続いてこの停滞性波動の伝播特性（起源、方向、量）を理解するため、波の活動度フラックスを評価してみた。多氷と少氷の差を摂動場とみなして活動度フラックスを評価した結果、波の活動度はまずオホーツク海付近で上向きに励起されて下流方向に伝わっている様子がみられた。すなわちこれはオホーツク海付近を起源とした停滞性ロスビー波の伝播を表す。顕熱・潜熱フラックスの差（多氷－少氷）の分布から、海氷分布の多少に伴うオホーツク海付近の冷熱源分布のアノマリーによって波の活動度が励起されていることも分かった。また、アラスカ付近からも波の活動度が上向きに励起されており、この停滞波の伝播を再強化しているが、これはオホーツク海の海氷分布の多少に伴いアラスカ付近の風系が変化し、新たに冷源が形成された結果を反映したものである。

数値実験の結果、オホーツク海の海氷の存在の有無は、オホーツク海付近のみならず、下流方向の大気循環場の波動パターンにも影響を及ぼしていることが分かった。多氷ケースと少氷ケースに対する大気場の応答の差は、渦度・熱バランス、波の活動度フラックスを用いた解析から、オホーツク海付近に形成された冷熱源分布のアノマリーによって励起された停滞性ロスビー波の伝播として定量的に評価出来ることも示された。またNMCデータを用いた解析からも同様の傾向が見られ、実際の大気場にも海氷の影響がはっきりと現れていることを示唆するものであると同時に、数値実験の結果の妥当性を示すものでもある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 竹 内 謙 介

副 査 教 授 菊 地 勝 弘

副 査 助 教 授 遠 藤 辰 雄

副 査 教 授 山 崎 孝 治 (大学院地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

The Influence of the Okhotsk Sea – Ice Extent on the Atmospheric Circulation

(オホーツク海の海水域変動が大気循環場に及ぼす影響)

海水は大気や海洋の循環の影響を極めて受けやすい一方、大気と海洋の熱交換を著しく低減する等、気候に与える影響も非常に大きく、近年、気候変動における役割が注目されている。しかし、大気循環が海水域の変動に影響を与えていることを示唆する研究は幾つかあるものの、海水から大気への影響については因果関係を明確にした研究は無かった。

本論文が対象としたオホーツク海は、海水が広範囲に出現する海洋としては世界中で最も低緯度にあり、海水域の経年変動が大きい。冬季にはシベリヤからの強い寒気が南下に伴って多量の熱が海洋から大気に輸送される為、海水域変動の影響が大きいと考えられる。

本論文ではまず、海水域面積の経年変動と大気大循環の関係を調べた。海水が最も発達する2月につき、最近20年での海水域面積の上位4年と下位4年をとり、その時の大気循環のコンポジットを作成し比較した。その結果、地上気圧においては多氷年にはアリューシャン低気圧が発達するのに対して、少氷年には中央部が弱まり、東西に分裂するような傾向が見られた。また上空500hp面高度分布では、多氷年には北極からオホーツクにかけてのトラフが発達するのに対し、少氷年にはその発達が弱く、アラスカ付近のトラフがやや発達することが示された。一方、シベリア域には顕著な差が見られなかった。

これらを多氷年と少氷年の差で見ると、地上ではオホーツク海、ベーリング海、カナダ中部に高、低気圧が交互に現れるような偏差が見られ、500hp面ではそれがやや西に位相がずれている。またこれに伴って、オホーツク海域だけでなく、アラスカでも7度Cに達する気温の変動が示された。これらの変動はオホーツク海の海水の多寡に伴う海面熱フラックスの変動を起源とする停滞ロスビー波の偏西風下流方向への伝播として説明することが可能であり、海水域変動が大気循環場に影響を与えている可能性を示唆している。

しかし、データ解析だけでは因果関係の特定は不可能である。その為、本研究では大気大循環モデルによる数値実験をおこなった。オホーツク海に通常年、多氷年、少氷年のそれぞれの海水分布を与え、そのほかの条件は同一にし、数値積分を行った。データ解析と同様、2月の大気循環場を調べたところ、多氷年、少氷年にそれぞれデータ解析で示されたのと同様な偏差が生じることが示された。このことは数値モデルが現実を良く再現していることを示すと共に、データ解析で示された大気循環場の変動の原因がオホーツクにおける海水分布であることを示している。

本研究では、さらに数値モデルの結果を詳細に解析し、偏差の東方への伝播が定在ロスビー波によるものであること、またその循環の変動に伴うアラスカ沖での二次的な熱フラックス変

動による影響もあること等を解明した。

以上の様に本研究はデータ解析と数値モデルを併用することにより、海氷が大気循環に影響を与えることを初めて明確に示したこと、その影響が海氷域付近だけでなく、数千キロも離れた場所にも現れること、そのメカニズムを明らかにしたこと等、価値の高い知見を得たものであり、気候変動研究に対する貢献も大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。