

オホーツク海の海氷の経年変動に対する秋季の大気の影響

佐々木 克徳, 見延 庄士郎 (北大・院・理)

1. はじめに

過去にオホーツク海の海氷の経年変動と、大気との関係について多くの研究がなされてきた。Parkinson (1990), Tachibana et al. (1996)は、オホーツク海の冬季の海氷と、アリューシャン低気圧、シベリア高気圧との関係を議論した。また、Fang and Wallace (1997)は、西太平洋(West Pacific)パターンがオホーツク海とベーリング海の海氷変動に重要であることを示した。山崎 (2000)や Ogi et al. (2004)は、北大西洋振動/北極振動とオホーツク海の海氷の関係について明らかにした。これらの研究では一般に、海氷と大気の間の変動の関係は、両者が同時期、あるいは大気が1ヵ月先行させた場合に最も強いとしている。

しかし、最近の研究から秋季の大気的重要性が示唆されている。Ohshima et al. (2005)は、オホーツク海北西部での海氷形成時期の早さと、10—11月における海洋から大気への熱放出量が強い相関を持つことを示した。また、山崎 (2000)は、1—2月平均の海氷面積に対し、1月の初めの海氷面積も重要であることを示した。そこで本研究では、オホーツク海の海氷面積が最大となる2—3月平均の海氷について、その経年変動と秋季の大気変動との関係について調べる。

2. データと解析手法

オホーツク海の海氷密接度のデータは、Nimbus-7 と DMSP シリーズの衛星観測から bootstrap アルゴリズムで計算された月平均値を使用した(Parkinson et al, 1999)。期間は1979年—2003年である。空間解像度は25×25kmグリッドのものを0.5°×0.5°グリッドに内挿して使用した。大気データはNCEP-DOE reanalysis-2 (Kanamitsu et al., 2002)の、1000hPa等圧面高度上の東西・南北風速、700hPa等圧面高度(Z700)、700hPa等圧面高度上の気温(T700)を用いた。

手法はSVD(Singular Value Decomposition)解析を用いる。これは2種類の多変量のデータ間で強い共分散関係の強いモードを抽出するものである(Bretherton et al., 1992)。本研究では、このSVD解析を2ヶ月平均したオホーツク海の海氷密接度と、同じく2ヶ月平均した40°—67.5°N, 130°—170°Eでの大気成分(東西風, 南北風, T700)を結合させたデータ間で行う。大気成分を用いる理由は、東西・南北風は大気—海洋間の熱交換と海氷の移流に影響し、またT700は大気—海洋間の熱交換に影響するためである。大気各成分は各々の領域平均時系列の標準偏差を用いて規格化した。

海氷と大気の関係の全体像を得るために、海氷、大気とも時期をずらしてSVD解析を行う。すなわち、海氷は11—12月平均から、3—4月平均まで、大気は9—10月平均から、3—4月平均までそれぞれ1ヵ月ずつずらして、SVD解析を行う。各々のモードについての統計的有意性の検定はモンテカルロ法(例えば、Sasaki and Minobe, 2005)を用いる。また、本研究ではSVD解析第1モードのみ議論する。これは第2モード以降は2—3月平均の海氷の経年変動の分散を10%以下しか説明しないためである。

3. 結果

3.1 SVD 第1モードの全体的な結果

図1に時期をずらして計算したSVD解析第1モードの二乗共分散と、大気時間関数が海氷の経年変動を説明する割合を示した。2—3月平均の海氷に注目すると、二乗共分散では、10—11月平均の大気の影響が秋季から冬季まで続いて、2—3月平均の海氷変動に対して影響を与えている。また、良く知られた大気が海氷に対して1ヶ月先行した場合(例えば、Tachibana et al., 1996; Fang and Wallace, 1998)にも統計的に有意な関係が存在する。すなわち、2—3月平均

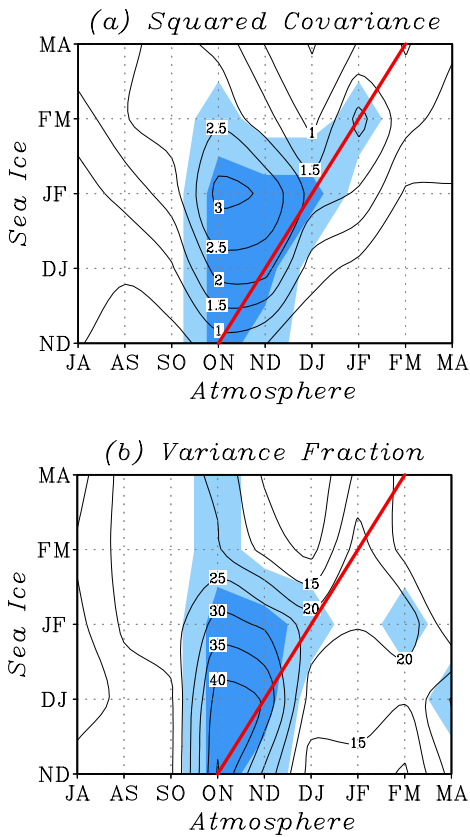


図 1. 2ヶ月平均した海氷密接度と大気(東西・南北風, T700)を結合させたデータ間でのSVD解析第1モードの(a)二乗共分散と(b)海氷の経年変動の説明される割合。縦軸は海氷, 横軸は大気の時期を示している。等高線間隔はパネル(a)が $0.5 \times 10^9 \%$, (b)が5%であり, 薄い青と濃い青はそれぞれ統計的有意性の信頼度95%と99%を示している。赤線は, 大気の時期が海氷の時期に対し1ヶ月先行していることを示している。

の海氷は1-2月平均と10-11月平均の大気に強い影響を受けている。

また, この秋季の大気と冬季の海氷の強い関係は海氷分散の説明される割合にも明らかである(図1b)。したがって, 2-3月平均の海氷の経年変動に対し, 1ヶ月先行した大気だけではなく, 秋季(10-11月)の大気の影響も重要である。

3.2 秋季の大気に対するSVD解析第1モード

図2に2-3月平均の海氷密接度と10-11月平均の大気(東西・南北風, T700)の間のSVD第1解析モード(以

Autumn SVD-1 SCF=76.5%
(a) SIC FM VARF=20.5%

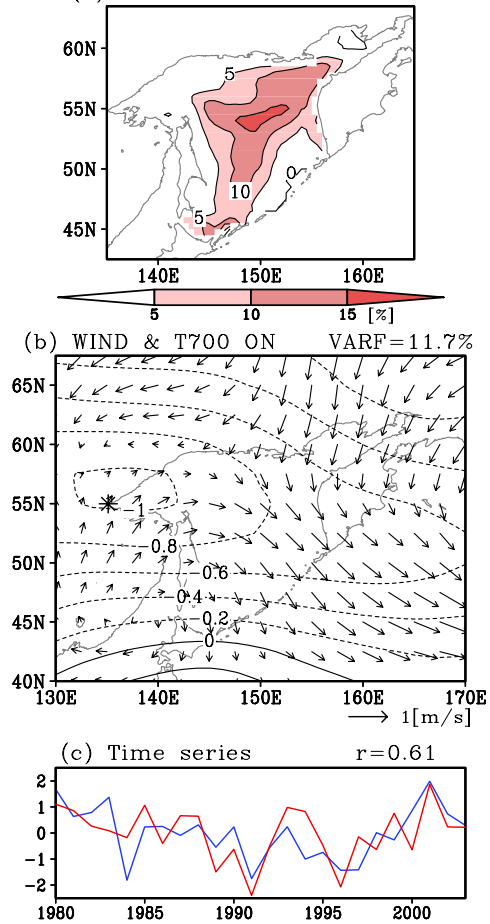


図 2. 1980年から2003年の2-3月平均の海氷密接度と, 4ヶ月先行させた10-11月平均の大気(東西・南北風, T700)の間のSVD解析第1モード。(a)海氷密接度の異質回帰図。等値線間隔は5%である。(b)1000hPa等圧面高度上の風速(矢印)とT700(等値線)の異質回帰図。等値線間隔は 0.2°C で, 基準の矢印は 1m s^{-1} である。星印は予測式(1)で用いたT700の位置を示している。(c)正規化した海氷密接度(赤線)と大気(青線)の時間関数。大気の時間関数は1年遅らせて示している。

下, 秋季モード)の異質回帰図と時間関数を示す。このモードは海氷の経年変動の20.5%を説明する。海氷偏差の大きな領域は, オホーツク海北部に位置している。これに対応し大気変動は, T700はオホーツク海上全域で負の偏差を持ち, 海上風の偏差はシベリアから, オホーツク海上へと吹き込む偏差を持つ。したがって, 秋季モ

ードの大気変動は、大気-海洋間の熱交換を通じて冬季の海氷に影響していることを示唆する。

秋季モードと大規模な大気変動との関係を知るために10-11月平均のZ700と、秋季モードの大気の時間関数との回帰係数を求めた。この結果、オホーツク海での正の海水偏差に対応して、負のZ700偏差がオホーツク海とベーリング海上に広がっているパターンが得られた(図示せず)。これにより東アジアのジェット気流は強化、かつ南下してオホーツク海上へと吹き込んでおり、オホーツク海上でのT700の負の偏差と整合的である。

秋季モードの時間関数間の相関係数は0.61であり、両者にデータの初めから1990年代中頃までの海氷減少のトレンドとそれ以降の増加傾向、2001年の正のピークが共通している。また、海氷の時間関数は、2-3月平均の海氷面積と強い相関($r=0.996$)を持ち、このモードはオホーツク海全体での海氷の増減を表している。また、1990年代の終わりから2000年にかけての海氷増加は1998/99年の北太平洋全域にわたる気候変動(例えば、Minobe, 2002)と関係がある可能性がある。1998/99年にかけての秋季の大気変動は過去の研究では記述されていないが、興味深い変動も見られる。例えば1998年以降にはジェット気流が強化しており、オホーツク海の海氷増加と整合的である。

3.3 冬季の大気に対するSVD解析第1モード

秋季モードと比較をするため、2-3月平均の海氷密度と1-2月平均の大気間のSVD解析第1モード(以下、冬季モード)を図3に示す。このモードは海水の経年変動を22.7%説明し、この値は秋季モードと同程度である。海水偏差はほぼ全域で正であり、値の大きい領域はオホーツク海南部に位置し、秋季モードに比べ南寄りである。冬季モードのT700の負の偏差の中心もオホーツク海南東部に位置し、冬季モードのT700の負の偏差に比べ南に位置している。風の偏差は、正の海水偏差の上には北西風

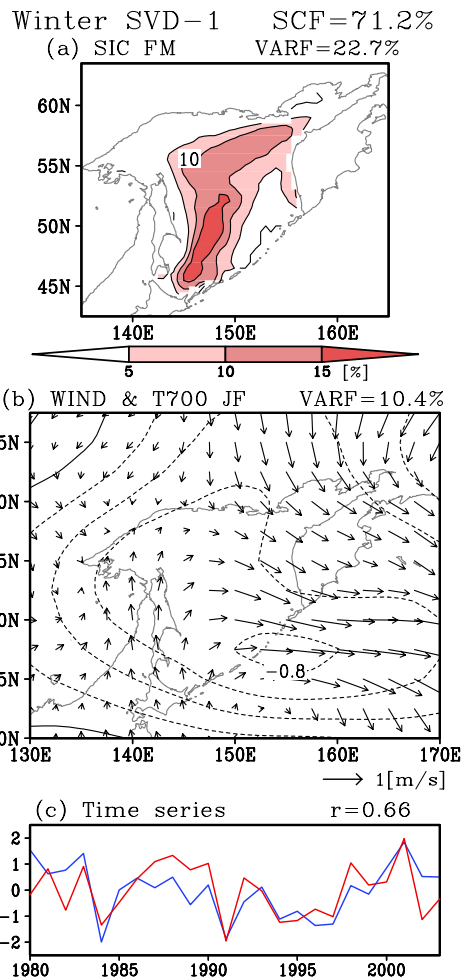


図3. 図2と同じ。ただし、2-3月平均の海氷密度と、1ヵ月先行させた1-2月平均の大気(東西・南北風, T700)の間のSVD解析第1モードである。

偏差、あるいは西風偏差が存在する。海氷は海上風の右30°の向きに移流されるので(Overland et al., 1984)、これらの風の偏差は海氷を沖合いへと移流する。したがって、大気の状態は海氷の増加に整合的である。秋季モードと同様に、冬季モードの大気の時間関数でも1-2月平均のZ700との回帰係数を計算した結果、得られたパターンはカムチャッカ半島上に負の偏差、北太平洋西部の広い範囲に正の偏差が位置し、西太平洋パターンに類似している(図示せず)。これはFang and Wallace (1998)と整合的である。

秋季モードと冬季モードの時間関数を比較すると、海氷の時間関数は2つのモードでほぼ一致している($r=0.99$)が、大気の時間関数は異なる

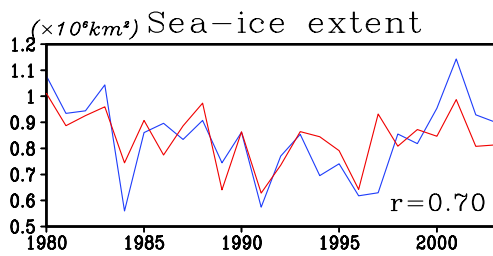


図 4. 2-3 月平均のオホーツク海の海氷面積の観測値(青線)と、式(1)による海氷面積の予測値(赤線).

る($r=0.33$). これは秋季と冬季の大気変動が独立に冬季の海氷変動に影響していることを示している. 冬季モードの大気の時間関数は 1984 年と 1989 年の海氷変動の負のピーク, そして 1990 年代中頃からの海氷の増加傾向を説明している.

3.4 海氷面積の予測可能性

秋季モードで得られた海氷と大気の強い関係は, 冬季のオホーツク海の海氷が秋季の大気の状態でも予測できることを示唆する. これを確認するため, 次の海氷面積の予測式を提案する

$$Y = -4.5795 - 0.7131 X \quad (1).$$

ここで Y は 2-3 月平均の海氷面積($\times 10^6 \text{ km}^2$)の予測値であり, X は 55°N , 135°E での 10-11 月平均の $T700(^{\circ}\text{C})$ である(位置は図 2b の星印で示した). X の位置は秋季モードの異質相関係数が最大になる点とした(図示せず). 実際の海氷面積とこの予測値との相関係数は 0.70 にのぼり(図 4), 海氷面積の経年変動を 49%説明する. したがって, この秋季の大気と冬季の海氷の関係は, オホーツク海の最大になる時期(2-3 月)の海氷面積の季節予測について大変有益である.

4 まとめと議論

オホーツク海の 2-3 月平均の海氷密接度の経年変動と大気との関係について, 海氷密接度と東西風, 南北風, $T700$ を結合させたデータの間で SVD 解析を行い調べた. SVD 解析第 1 モードの結果から, 秋季(10-11 月)の大気変動は秋季から冬季にかけての海氷変動に強く影響し,

その影響は冬季の大気変動と同程度である. 秋季モードと冬季モードの大気の時間関数間の相関が無いことから, 秋季と冬季の大気は独立に海氷に影響している.

本研究で得られた秋季の大気と冬季の海氷の関係から, 地球温暖化の現れとして注目されていた(例えば, Parkinson et al., 1999; Wang and Ikeda, 2001), データの初めから 1990 年代中頃までの海氷の減少トレンド(図 3)について重要な知見が得られる. 秋季モードの大気の時間関数にもまた 1980 年から 1996 年にかけて減少のトレンドが存在する(統計的信頼度 94%)(図 2c).

しかし, 冬季モードの時間関数には統計的に有意なトレンドは存在しない(図 3c). これは海水減少のトレンドに秋季の大気が重要な役割を果たしていることを示唆する. したがって, 将来の地球温暖化(例えば, Houghton et al., 2001)によるオホーツク海の海氷変化を知るためには, 冬季だけではなく秋季の大気の変化について知ることも重要である.

オホーツク海の海氷が大気変動に対して記憶の役割を果たす, すなわち秋季の大気の影響を記録し, その影響を冬季の大気へフィードバックする可能性がある. 本研究の結果は秋季の大気が冬季の海氷偏差に影響する. 一方, 冬季のオホーツク海の海氷偏差がベーリング海, アラスカ, 北アメリカ上の広範囲の大気にロスビー波を通じて影響することが, 大気大循環モデルを用いた数値実験から得られている(Honda et al., 1999; Alexander et al., 2004). この場合, 秋季の大気の変動は, オホーツク海の海氷を記憶として, 冬季の海氷に影響するであろう. したがって, 秋季の大気の変動は, 冬季のオホーツク海の変動と同様に, 冬季の大気自体の変動にも影響する可能性がある.

謝辞

本研究の一部は文部科学省 21 世紀 COE プログラム(北海道大学 新・自然史科学創成)の助成による.

参考文献

- Alexander, M. A., U. S. Bhatt, J. E. Walsh, M. S. Timlin, J. S. Miller, and J. D. Scott, 2004: The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter. *J. Clim.*, **17**, 890–905.
- Bretherton, C. S., C. Smith, and J. M. Wallace, 1992: An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Clim.*, **5**, 541–560.
- Fang, Z.-F., and J. M. Wallace, 1998: North-Pacific sea-ice and Kuroshio SST variability and its relation to the winter Monsoon. *Pol. Meteorol. Glaciol.*, **12**, 58–67.
- Honda, M., K. Yamazaki, H. Nakamura, and K. Takeuchi, 1999: Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *J. Clim.*, **12**, 3347–3358.
- Houghton T. et al., Climate Change, 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Am. Met. Soc.*, **83**, 1631–1643.
- Minobe, S., 2002: Interannual to interdecadal changes in the Bering Sea and concurrent 1998/99 changes over the North Pacific. *Progr. Oceanogr.*, **55**, 45–64.
- Ohshima, K.-I., S. C. Riser, and M. Wakatsuchi, 2005: Mixed layer evolution in the Sea of Okhotsk observed with profiling floats and its relation to sea ice formation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L06607, doi:10.1029/2004GL021823.
- Ogi, M., K. Tachibana, and K. Yamazaki, 2004: The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk High. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **82**, 905–913.
- Overland, J. E., H. O. Mofjeld, and C. H. Pease, 1984: Wind-driven ice drift in a shallow sea. *J. Geophys. Res.*, **89**, 6525–6531.
- Parkinson, C. L., 1990: The impact of the Siberian high and Aleutian low on the sea-ice cover of the Sea of Okhotsk. *Ann. Glaciol.*, **14**, 226–229.
- Parkinson, C. L., D. J. Cavalieri, P. Gloersen, H. J. Zwally, and J. C. Comiso, 1999: Arctic sea-ice extents, areas, and trends, 1978–1996. *J. Geophys. Res.*, **104**, 20,837–20,856.
- Sasaki, Y. N., and S. Minobe, 2005: Seasonally dependent interannual variability of sea-ice in the Bering Sea and its relation to atmospheric fluctuations. *J. Geophys. Res.*, **110**, C05011, doi:10.1029/2004JC002486.
- Tachibana, Y., M. Honda, and K. Takeuchi, 1996: The abrupt decrease of the sea-ice over the Southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian Low. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **74**, 579–584.
- Wang, J., and M. Ikeda, 2001: Arctic sea-ice oscillation: Regional and seasonal perspectives. *Ann. Glaciol.*, **33**, 481–492.
- 山崎 孝治, 2000: オホーツク海の高氷面積と冬の
大気循環との相互作用. *雪氷*, **62**, 345–354.