

南半球大気大循環の変調に関連した海氷変動パターンの変化

*宇田川佑介（北海道大学・大学院環境科学院・地球圏科学専攻）

山崎孝治（北海道大学・大学院地球環境科学研究院）

立花義裕（海洋研究開発機構）

1. Introduction

南極域における経年気候変動に関して2つの相反する観点が現在、提唱されている。1つは南極周極波動(Antarctic Circumpolar Wave, ACW)と呼ばれ、周期4年、波数2で東進する波である。これは海氷の広がり(Sea-Ice edge), 海水面温度(SST), 海面気圧(SLP), 南北風応力の偏差が南極大陸の周りを東進しているとし、大気の波動も東進伝播で特徴づけられると主張されている[e.g., White and Peterson, 1996; Motoi et al., 1998]。一方で、南極周極における気候変動(海氷、表面温度、表面温度; Surface air temperature, SAT)はENSOに強く関連した地理的に位相が固定された準定常な波によって支配されていると主張されている[Yuan and Martinson, 2000, 2001, Yuan, 2004]。この準定常な波はAntarctic Dipole (ADP)と呼ばれ、南極海の中央・東太平洋セクターと大西洋セクターにおける上記物理量の偏差場の逆位相関係によって特徴付けられる。また、このダイポールモードは強い定在モードと弱い伝播運動から形成される。前者の観点に関連して、南大洋における海面高度の偏差もACWに関連したSSTと共に東進しており、ACWの維持において海洋は重要な役目を果たしているとされている[Jacobs and Mitcheel, 1996]。またその維持には大気海洋相互作用が必要とも主張されている[White et al., 1998]。また、後者の観点に関しては、ADPパターンは南太平洋にお

ける大気のプロッキングに関連して増幅する大気の定在波によって形成、維持されている[Kwok and Comiso, 2002, Kidson and Renwick, 2002, Renwick 2002]。その定在波はENSOによって励起される大気ロスビー波の伝播が原因であり[Renwick and Revell, 1999]、その伝播はPacific South American (PSA)テレコネクションパターンと呼ばれる[Hoskins and Karoly, 1981, Karoly 1989]。

海氷は海洋と大気のインターフェースとして機能し、その両方の影響を受けるため、海氷の、特に年々変動に着目した研究は、上記の相反する主張を解決するために有用であると考えられる。そこで本研究ではまず、海氷偏差場が東進しているのか？定在しているのか？そして、その時間的継続性(期間)を調べた。その上でそれに関連した大気場の変動を調べた。

2. Data

南大洋の海氷の経年変動を調べるためNational Snow and Ice Data Center (NSIDC)のNASA team algorithmによる衛星観測海氷密接度(sea-ice concentration, SIC)データを用いた[Cavalieri et al., 1997]。またNOAAのoptimal interpolation sea surface temperature (OISST)データ[Reynolds and Smith, 1994]とNCEP/NCARの大気場データ[Kalnay et al., 1996]を用いた。解析期間は1979-2003年の7月から10月である。

3. Results

3.1 Sea-ice variability

図1はSICのEOF1,2モード空間パターン(以下、SIC-EOF1,2)とその時系列(以下、SIC-EOF1,2-index)である。解析期間は1979-2003年である。SIC-EOF1は西大西洋セクターと西太平洋セクターに正偏差(寒色)を、アムンゼン海と西インド洋セクターに負偏差(暖色)を示している。SIC-EOF2は東大西洋セクターとロス海に正偏差を、ベリングスハウゼン海と東インド洋セクターに負偏差を示している。両 EOF 空間パターンは波数 2 の形をしており、それぞれ 25.8%と 14.3%の分散を持つ。SIC-EOF2 の空間パターンは SIC-EOF1 のそれをおよそ 45 度東方にずらしたような形である。SIC-EOF1 index の年々変動はおよそ 1 年のラグを伴っているが SIC-EOF2 index のそれと著しく似ている。これらの結果は EOF が東方への伝播モードを 2 つの standing mode に分解していることを示している。このことを確認するために、SIC-EOF1 index と SIC-EOF2 index の lag 相関を行った。その同時相関係数は定義から 0 となり、1-year lag (lead) での相関係数は 0.57 (-0.48) となり 99%統計的に有意である。2-year lag (lead) では -0.14 (-0.06) である。

これらの結果は、EOF2 空間パターンが卓越する年は EOF1 空間パターンが卓越した年の 1 年後に起きる傾向にあること示す。EOF2 の卓越した 1 年後に逆符号の EOF1 空間パターンが卓越し、逆符号でも同様のことを繰り返す。そして EOF1 空間パターンが 4 年後に再び卓越する。それ故に波数 2 の海水空間パターンは 4 年周期で東方に向かって回転する傾向にある。

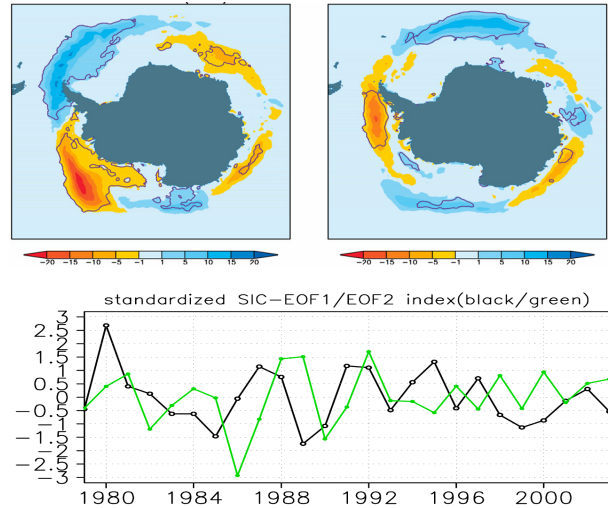
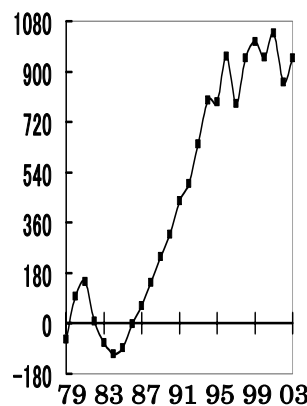


図1 7,8,9,10月の4ヶ月平均した海氷密度偏差場のEOF1(左上)及びEOF2(右上)の空間パターンおよびその時系列(下)。陰影が寒(暖)色に濃いところ程、正(負)の変動が激しい。Indexは黒がEOF1、緑がEOF2。

そして EOF 解析の定義より index1 と index2 は直交座標とみなせるので、それを極座標へ変換することで海水量変動の振幅と位相を求めた。その位相の年々変動を調べることで、海水量偏差の大陸周りの回転の強さを客観的に調べることができる。図2は海水量変動の位相の年々変動を表しており、海氷偏差が東進(西進)している年は位相が加算(減算)される。この結果から



から1984年~1994年にかけてのみ連続的に回転していたことがわかる。従って海水量偏差はこの期間では回転していたがそれ以外の年代はしていない事が客観的に

図2 位相の年々変動 横軸が年[year]、縦軸が[°]を表す

示された。

また回転している年代としていない年代に分けて、それぞれ EOF 解析を行った。前者の場合、第 1, 2 モードに年代を分けずに EOF 解析を行った場合と同様の空間パターンが再び現れた。その index 同士のラグ相関ではより高い相関係数が得られた (ラグ ±1 年で $r = \pm 0.9$)。後者の場合では、EOF1 は同様の空間パターンであったが、EOF2 は異なった。そして index 同士のラグ相関でも上記のような相関関係は得られなかった。以上の結果は 1984 年～1994 年にかけて回転していたということを裏付けている。

3.2 Atmospheric variability

1984-1994 年における海水変動パターンは他の期間とは異なっていたことを前節では示したが、このことから海水を強制する大気の変動もまた異なると考えられる。ここでは海水変動パターンのシフトに関連した大気大循環パターンの違いに注目する。

まず、南極域 (30S-90S) における大気の順圧変動成分を抽出するために、質量重みをかけ鉛直平均 (1000hPa-300hPa) したジオポテンシャルハイトの偏差に EOF 解析を行った。解析は①全期間 (1979-2003)、②海水量偏差が東進していた期間 (1984-1994) と、②していなかった期間 (1979-1983, 1995-2003) で行った。EOF 解析の結果、①全期間および③海水変動が東進していなかった期間では第 1 モードに南極振動 (AAO) が、第 2 モードに地理的な位相が固定された波の伝播モードが現れた。その分布から PSA パターン [Hoskins and Karoly, 1981, Karoly, 1989] であることがわかる。確認のために Nino3.4 index との同時相関解析を行ったところ、有意な結果を示したため第 2

モードは熱帯からの強制を示していることがわかる。

しかし②東進していた期間では、第 1 モードに PSA、第 2 モードに AAO のようなパターンが現れた。図 3 にその空間パターンと時系列 (index) を示す。このことは大気場の変化もしくは変調が海水場の変動パターンを変化させた可能性を示唆している。そこで第 1 モードとして現れた PSA と海水変動の関係を調べるために、海水密接度場に対して相関回帰解析 (同時、ラグ 1 年、2 年) を行った。その結果を図 4 に示す。図中において寒色 (暖色) を示すエリアは海水量を増やす (減らす) 強制が PSA によって働いていると考えられる海域である。その分布状況およびその年々変動から PSA により波数 2 の海水量偏差パターンが形成され東進していく様子が見られる。

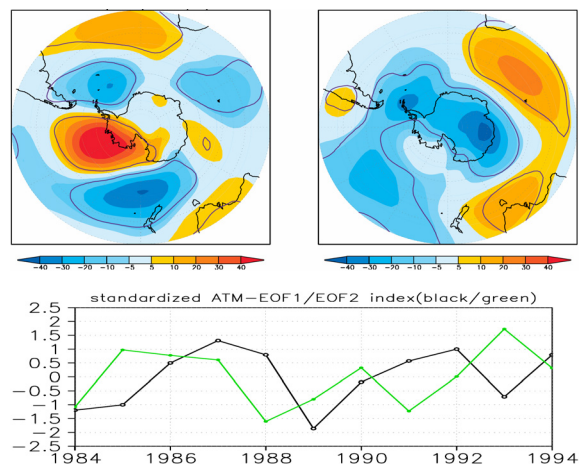


図 3 PSA(左),AAO(右)空間パターン
及びその時系列(下、黒が PSA、緑が AAO index)

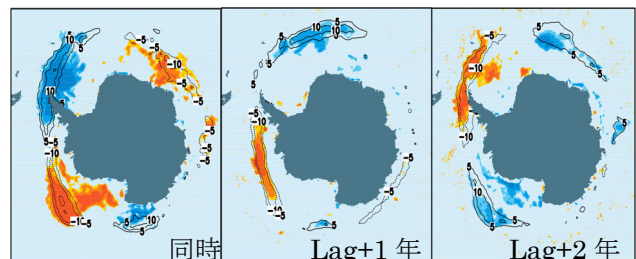


図 4 PSA index と海水密接度場とのラグ相関
回帰図 左から同時,ラグ 1 年,ラグ 2 年を示す

また、大気場から海水場への強制を調べるために、925hPa 温度移流場と 10m 風応力の $\text{Curl}(\tau)$ (curl τ 場)を求め、PSA index と同様のラグ相関回帰解析を行った (図は省略)。その結果、同時相関およびラグ 2 年で有意な波数 2 のパターン (ただしラグ 2 年では位相は逆位相) が現れた。この結果は、海氷偏差パターンが回転 (東進) していた期間では、大気場は周期 4 年で定在的強制を海水場に与えていることを示唆する。また SST 場とも同様の解析を行ったところ同時、ラグ 1 年、ラグ 2 年と全てで有意な波数 2 のパターンが現れ、年々東進していく様子が見て取れた。ある冬から翌年の冬までの海氷量偏差の伝播は海氷近辺の東進している海洋の熱慣性によって運ばれていることをこの結果は示唆する (南極海には南極周極流という東進する海流がある)。詳しくは Martinson [1993] and Gloersen and White [2001]。

以上の結果から大気場は波数 2 の海氷量偏差パターンを形成するような強制を与えるが、その与えられた強制は海洋の熱慣性と東向きの海流によって翌年の冬まで運ばれる。そしてその強制が減衰する翌々年には、逆位相を伴った強制が大気場から与えられることにより逆位相の波数 2 の海氷量偏差パターンが形成される。その結果として海氷量偏差パターンが東進していることがわかった。

また海氷量偏差場に波数 2 の空間パターンを強制する大気場・PSA パターンは 1984 年~1994 にかけてのみ卓越し、かつおよそ周期 4 年で振動していた。そのために海氷量偏差パターンが波数 2 でこの期間東進し続けることができたと考えられる。また、他の期間では PSA は減衰しており、卓越し

た年があったとしてもおよそ周期 4 年では振動していないために、海氷量偏差パターンは東進し続けることはできないとも言えるだろう。

最後に、本研究の目的は始めに述べた矛盾した主張を解決することであったが、今回の解析の結果では、海氷量偏差パターンは 1984~1994 年にかけてのみ東進していたが、その強制となる大気場は定在パターンであるため、両主張の足し合わせに近い。ただし、海氷量偏差パターンの東進は西南極側 (ベリングスハウゼン海、アムンゼン海、ウェッデル海、東太平洋セクター) で顕著であった。その点を踏まえると、南極域での気候変動は Antarctic Dipole により支配されているが、1984~1994 年の Antarctic Dipole は強い定在モードと強い伝播運動から形成されていたと言える。また、海氷偏差場には東進する期間とそうでない期間があり、それに関連して南半球大気大循環場が変調していたこともわかった。

Acknowledgements

「異常気象と長期変動」研究集会に参加するにあたり、京都大学・防災研究所より旅費の補助を受けました。本研究集会主催 (研究代表者) の山崎孝治教授 (北海道大学大学院地球環境科学研究院)、また共催者の木本昌秀教授 (東京大学気候システム研究センター)、余田成男教授 (京都大学大学院理学研究科)、中村尚准教授 (東京大学大学院理学研究科)、向川均准教授 (京都大学防災研究所) に感謝致します。

References

Cavalieri, D. J., P. Gloerson, C. L. Parkinson, J. C. Comiso, and H. J. Zwally (1997),

- observed hemispheric asymmetry in global sea ice change, *Science*, 278, 1104–1106.
- Connolley, W. M. (2003), Long-term variation of the Antarctic Circumpolar Wave, *J. Geophys. Res.*, 108(C4), 8076, doi:10.1029/2000JC000380
- Gloerson, P., and W. B. White (2001), Reestablishing the circumpolar wave in sea ice around Antarctica from one winter to the next. *J. Geophys. Res.*, 106(C3), 4391–4395.
- Hoskins, B. J., and D. J. Karoly (1981), The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1179–1196.
- Jacobs, G. A., and J. L. Mitchell (1996), Ocean circulation variations associated with the Antarctic Circumpolar Wave, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2947–2950.
- Kalnay, E., et al. (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–471.
- Karoly, D. J. (1989), Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño–Southern Oscillation Events, *J. Climate*, 2, 1239–1252.
- Kidson, J. W., and Renwick, J. A. (2002), The Southern Hemisphere evolution of ENSO during 1981–1999, *J. Climate*, 15, 847–863.
- Kwok, R., and Comiso, J. C. (2002), Southern Ocean climate and sea ice anomalies associated with the Southern Oscillation, *J. Climate*, 15, 487–501.
- Martinson, D. G. (1993), Ocean heat and seasonal sea ice thickness in the Southern Ocean, in *The Climate System*, vol. 12, edited by W. R. Peltier, pp. 597–609, Springer-Verlag, New York.
- Motoi, T., A. Kito, and H. Koide (1998), Antarctic Circumpolar Wave in a coupled ocean–atmosphere model. *Ann. Glaciol.*, 27, 483–487.
- Renwick, J. A., and M. J. Revell (1999), Blocking over the South Pacific and Rossby wave propagation, *Mon. Weather Rev.*, 127, 2233–2247.
- Reynolds, R. W., and T. M. Smith (1994), Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, 7, 929–948.
- Renwick, J. A. (2002), Southern Hemisphere circulation and relationships with sea ice and sea surface temperature, *J. Climate*, 15, 3058–3068.
- White, W. B., and R. G. Peterson (1996), An Antarctic Circumpolar Wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent, *Nature*, 380, 699–702.
- White, W. B., S.-C. Chen, and R. G. Peterson (1998), The Antarctic Circumpolar Wave: A beta effect in ocean-atmosphere coupling over the Southern Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 2345–2361.
- Yuan, X., and D. G. Martinson (2000), Antarctic sea ice variability and its global connectivity, *J. Climate*, 13, 1697–1717.
- Yuan, X., and D. G. Martinson (2001), The Antarctic dipole and its predictability, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3609–3612.
- Yuan, X. (2004), ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms, *Antarctic Science*, 16, 415–425.