

学 位 論 文 題 名

A study of modulation in interannual sea-ice patterns  
in the Southern Ocean in association  
with large-scale atmospheric mode shift

(南大洋における海氷変動パターンの変調と大気大循環パターンの  
シフトに関する研究)

学位論文内容の要旨

南大洋はほぼ季節海氷域であり、面積も大きく年々変動する。海氷生成域は南極底層水が作られ、大気海洋間の熱交換が活発であり、赤道域と共に気候変動を駆動している。南大洋における海氷の変動は全球的な気候形成に大きく関与し、南大洋の海氷の年々変動と大気場の関連性を研究することは地球の気候変動メカニズムの解明に通ずる。その南大洋の気候形成メカニズムは2つの仮説が提唱されている。一つは南極周極波動(ACW)と呼ばれ、海氷の張り出しなどの年々偏差がおよそ4年周期で変動し、東西波数2で南極大陸の周りを東向きに8年で1周する[White and Peterson, 1996]。一方はAntarctic Dipole, ADPと呼ばれ、海氷の張り出し等の年々偏差は東西波数2を形成する。しかしその変動は西南極で顕著となり、弱い東進成分を含む準定在波である[Yuan and Martinson, 2000]。エルニーニョ現象が大気場を通じて南大洋へ伝播するPacific South American (PSA)テレコネクションパターンが海氷量偏差の強制源である。そこで本研究では、より長期に渡る海氷データを解析することで、この二つの仮説の解決に取り組んだ。

冬季における海氷データのEOF解析の結果、1984年～1994年にかけてのみ海氷量偏差は連続的に東進していたことがわかった。同様に大気場(高度場)についてのEOF解析を行った結果、長期間データでは第1モードには南半球環状モード(SAM)と呼ばれる中高緯度におけるシーソーパターンが、第2モードにはPSAパターンが抽出された。しかし海氷場が回転している1984～1994年にかけてのみEOF解析を行うと第1モードと第2モードが逆転することがわかった。そして海氷量偏差パターンの東進は、約4年周期で変動していたPSAパターンによる温度移流と風応力に対する海氷場の応答であった。つまり海氷場はACWのように東進している時期はあるが、その期間は限られた。振幅も西南極でのみ大きく、ACWとADPを足し合わせたような特徴を示してい

た。弱い東進モードと定在モードから形成されるADPの東進成分が、この期間には強くなっていたとも言えよう。また海氷量偏差パターンの年々変動の変調（非回転期間→回転期間→非回転期間）に関連して、10年規模の大気大循環モードのシフトの存在も明らかになった。

次に本研究では長期（1958-2007）における大気大循環モードのシフトの要因についても考察を行った。まずPSAパターンの分散が大きかった時期（1984～1994）と小さかった時期（1974～1984）での平均場の違いを調べたところ、中部熱帯太平洋域と南太平洋収束帯の東側における海水面温度（SST）が有意に1984～1994年の方が大きかった。そこで大気大循環モデルを用いて、その海域のSSTのみを $1^{\circ}\text{C}$ 増加（ $+1^{\circ}\text{Crun}$ ）、減少（ $-1^{\circ}\text{Crun}$ ）させたモデル実験を行った。その結果 $-1^{\circ}\text{Crun}$ と比べ、 $+1^{\circ}\text{Crun}$ のPSAを含む渦成分の寄与率が大きく、降水活動の両実験の平均値の差では、中部熱帯太平洋において有意な差が見られる。 $-1^{\circ}\text{Crun}$ に比べSST分布を $1^{\circ}\text{C}$ 上昇させた海域の北側において対流活動が活発になっていることが考えられ、PSAパターンの活動が活発になるには、中部熱帯太平洋のSSTの上昇が重要である可能性が示された。以上から、大気場の大循環モードのシフトにはこの海域の海水面温度の変動が重要であることが示唆された。

また本研究では、大気大循環モードのシフトの要因の一つとして考えられるSAMとPSAの非線形作用についても解析した（SAMとSPAは線形的には独立である）。その結果、PSAの変動性（分散）とSAMの位相には正の有意な相関関係があることがわかった。つまり、PSAパターンの位相が正もしくは負の値（ $\pm 0.5$ 標準偏差以上）の時、SAMの位相は正になりやすい傾向にある。またPSAパターンの位相が小さな正もしくは小さな負の値（ $\pm 0.5$ 標準偏差以内）の時には、SAMの位相が負になりやすいという関係である。このメカニズムとしては、PSAパターンに伴う擾乱による運動量輸送の結果、東西風が変化し、その東西風分布がSAMの位相決定に寄与しているためであった。ただし、この寄与はSAMの位相を絶対的に決めるものではなく、部分的な寄与であった。SAMの位相決定の主要メカニズムは大気の内力学の結果であると考えられる。

最後に、本研究での成果は、地球の気候変動メカニズムの解明への一歩であり、地球温暖化問題解決へ向けた科学的側面からの寄与が期待される。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	山崎孝治
副査	教授	大島慶一郎
副査	准教授	青木茂
副査	教授	見延 庄士郎 (理学研究院)
副査	教授	立花 義 裕 (三重大学大学院 生物資源学研究科)

## 学位論文題名

### A study of modulation in interannual sea-ice patterns in the Southern Ocean in association with large-scale atmospheric mode shift

(南大洋における海水変動パターンの変調と大気大循環パターンの  
シフトに関する研究)

南大洋はほぼ季節海氷域であり、面積も大きく年々変動する。海氷生成域は南極底層水が作られ、大気海洋間の熱交換が活発であり、赤道域と共に気候変動を駆動している。南大洋における海氷の変動は全球的な気候形成に大きく関与し、南大洋の海氷の年々変動と大気場の関連性を研究することは地球の気候変動メカニズムの解明に通ずる。その南大洋の気候形成メカニズムは2つの仮説が提唱されている。一つは南極周極波動(ACW)と呼ばれ、海氷の張り出しなどの年々偏差がおよそ4年周期で変動し、東西波数2で南極大陸の周りを東向きに8年で1周する[White and Peterson, 1996]。一方はAntarctic Dipole, ADPと呼ばれ、海氷の張り出し等の年々偏差は東西波数2を形成する。しかしその変動は西南極で顕著となり、弱い東進成分を含む準定在波である[Yuan and Martinson, 2000]。エルニーニョ現象が大気場を通じて南大洋へ伝播するPacific South American (PSA)テレコネクションパターンが海氷量偏差の強制源である。そこで本研究では、より長期に渡る海氷データを解析することで、この二つの仮説の解決に取り組んだ。

冬季における海氷データのEOF解析の結果、1984年～1994年にかけてのみ海氷量偏差は連続的に東進していたことがわかった。同様に大気場

(高度場) についてのEOF解析を行った結果、長期間データでは第1モードには南半球環状モード(SAM)と呼ばれる中高緯度におけるシーソーパターンが、第2モードにはPSAパターンが抽出された。しかし海氷場が回転している1984~1994年にかけてのみEOF解析を行うと第1モードと第2モードが逆転することがわかった。そして海氷量偏差パターンの東進は、約4年周期で変動していたPSAパターンによる温度移流と風応力に対する海氷場の応答であった。つまり海氷場はACWのように東進している時期はあるが、その期間は限られた。振幅も西南極でのみ大きく、ACWとADPを足し合わせたような特徴を示していた。弱い東進モードと定在モードから形成されるADPの東進成分が、この期間は強くなっていたとも言えよう。また海氷量偏差パターンの年々変動の変調(非回転期間→回転期間→非回転期間)に関連して、10年規模の大気大循環モードのシフトの存在も明らかになった。

次に本研究では長期(1958-2007)における大気大循環モードのシフトの要因についても考察を行った。まずPSAパターンの分散が大きかった時期(1984~1994)と小さかった時期(1974~1984)での平均場の違いを調べたところ、中部熱帯太平洋域と南太平洋収束帯の東側における海水面温度(SST)が有意に1984~1994年の方が大きかった。そこで大気大循環モデルを用いて、その海域のSSTのみを $1^{\circ}\text{C}$ 増加( $+1^{\circ}\text{Crun}$ )、減少( $-1^{\circ}\text{Crun}$ )させたモデル実験を行った。その結果 $-1^{\circ}\text{Crun}$ と比べ、 $+1^{\circ}\text{Crun}$ のPSAを含む渦成分の寄与率が大きく、降水活動の両実験の平均値の差では、中部熱帯太平洋において有意な差が見られる。 $-1^{\circ}\text{Crun}$ に比べSST分布を $1^{\circ}\text{C}$ 上昇させた海域の北側において対流活動が活発になっていることが考えられ、PSAパターンの活動が活発になるには、中部熱帯太平洋のSSTの上昇が重要である可能性が示された。以上から、大気場の大循環モードのシフトにはこの海域の海水面温度の変動が重要であることが示唆された。

また本研究では、大気大循環モードのシフトの要因の一つとして考えられるSAMとPSAの非線形作用についても解析した(SAMとSPAは線形的には独立である)。その結果、PSAの変動性(分散)とSAMの位相には正の有意な相関関係があることがわかった。つまり、PSAパターンの位相が正もしくは負の値( $\pm 0.5$ 標準偏差以上)の時、SAMの位相は正になりやすい傾向にある。またPSAパターンの位相が小さな正もしくは小さな負の値( $\pm 0.5$ 標準偏差以内)の時には、SAMの位相が負になりやすいという関係である。このメカニズムとしては、PSAパターンに伴う擾乱による運動量輸送の結果、東西風が変化し、その東西風分布がSAMの位相決定に寄与しているためであった。ただし、この寄与はSAMの位相を絶対的に決めるものではなく、部分的な寄与であった。SAMの位相決定の主要メカニズムは大気の内力学の結果であると考えられる。

最後に、本研究での成果は、地球の気候変動メカニズムの解明への一歩であり、地球温暖化問題解決へ向けた科学的側面からの寄与が期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。