

# 環大西洋10年スケール変動に関する研究

—2001年度山本・正野論文賞受賞記念講演—

谷 本 陽 一\*

## 1. はじめに

この度は名誉ある日本気象学会山本・正野論文賞を頂戴することになり、大変驚きまして当惑いたしました。ご推薦していただいた方、委員会の皆様、そして共著者の謝 尚平ハワイ大学準教授に感謝申し上げます。

受賞対象の1999年気象集誌に掲載された拙論「Ocean-Atmosphere Variability over the Pan-Atlantic Basin」(Tanimoto and Xie, 1999) は、北はグリーンランドから南は少なくとも南緯40度くらいまでの大西洋において空間的に緊密に結びついた10年スケール変動を観測データから取り扱ったものです。

私はこれまで主に船舶による海上気象要素の観測データを整備し、これまで見いだされていない気候変動のシグナルを抽出すること、その結果を土台にして気候変動のメカニズムを明らかにすることに貢献したいと考えてきました(例えば、Tanimoto *et al.*, 1993)。本論文もそのモチーフの上にあります。

どのような解析にとりかかる場合でも、データの妥当性などを検証するためにまず基礎的な統計量を見ることは欠かせません。第1図は年平均された海面水温の51年間(1948年～98年)気候値に対する標準偏差を示しています。大西洋における変動の中心域はアメリカ東岸からグリーンランドの南にかけてのメキシコ湾流・北大西洋海流に沿った海域、北緯10～20度の帯状海域、そして南緯20～35度の帯状海域にあります。一方、北緯5度～10度は海盆全体にわたって極小域となっています。

これに対し同じ熱帯でもペルー・エクアドル沖の熱帯太平洋舌状冷水域においては、赤道付近を極大とし

て標準偏差が大きい海域が南北ほぼ対称に広がっていて、熱帯大西洋に見られる水温変動の極大域の空間構造とかなり異なっていることがわかります。

Chang *et al.* (1997) や Nobre and Shukla (1996) は熱帯大西洋の赤道から離れた緯度10～20度の海域を中心に海面水温場が10年スケールで変動していることを示しました。この変動の空間構造は赤道を挟んで南北反対称となっています。例えば、北半球が暖かく南半球側が冷たい水温偏差構造に対し、海面付近の気圧場には北半球側で負、南半球側で正の偏差が形成されます。そのため、大気下層の気圧傾度力により北向きの海上風偏差となりますが、赤道から離れたところではコリオリ力により北半球(南半球)の気候学的な貿易風を弱め(強め)ます。スカラー風速の変化は潜熱放出の偏差を通してはじめの水温偏差構造を維持するような正のフィードバックが働く仕組みになっています(Xie and Philander, 1994)。

このような大気と海洋が結合した変動形態は熱帯大西洋双極子と呼ばれ、これに伴う変動が赤道から離れた海域での変動を担っていると考えられます。一方、「熱帯太平洋」の10年スケール変動は少なくとも「北太平洋」中緯度海域と同期して変動していることが知られていましたので、異なる空間構造をもつ熱帯大西洋の海面水温変動場が大西洋全域の変動とどのような関連をもつのか大西洋10年スケール変動の全体像を調べることになりました。

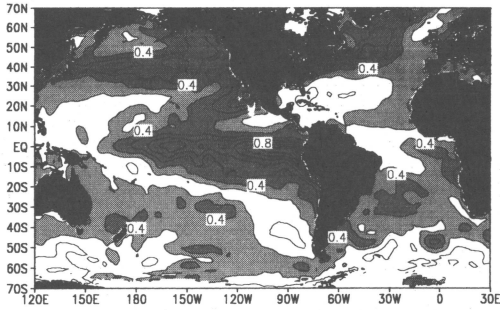
## 2. 熱帯大西洋における海面水温変動場の時空間特性

第2図に大西洋における緯度10～20度の帯状平均海面水温偏差の散布図を示します。赤道を挟んだ双極子構造が卓越するのであれば負の相関関係がみられるはずですが、しかし、赤道の南北での水温偏差は一見無相関の関係を示しています。このことは双極子構造が熱

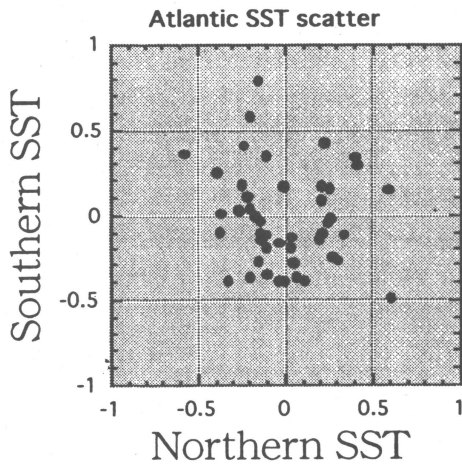
\* 北海道大学大学院地球環境科学研究科。

—2002年5月7日受領—

—2002年7月11日受理—



第1図 1948年から1998年の51年気候値に対する年平均海面水温偏差の標準偏差。等値線の間隔は0.1度、0.3度と0.4度の間をもつ海域に薄いハッチ、0.4度以上の海域に濃いハッチをかけている。

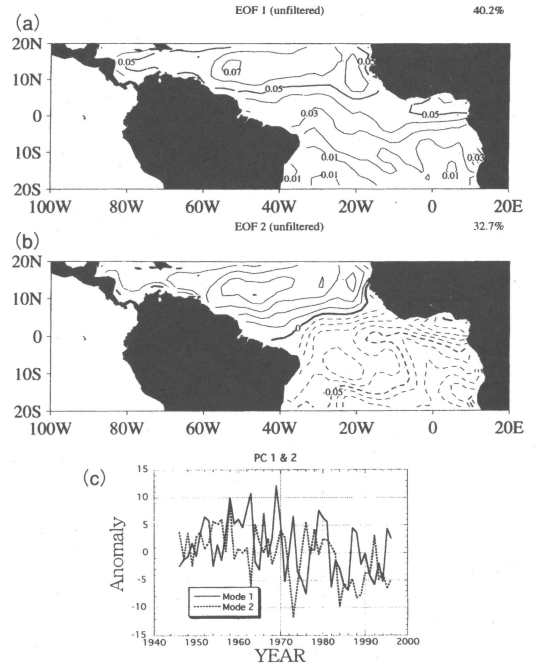


第2図 緯度10-20度で帯状平均（ただし、海洋上のみ）された海面水温偏差の散布図。横軸（縦軸）は北半球（南半球）の偏差。

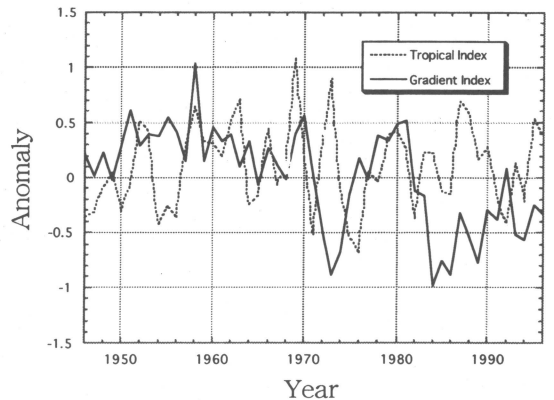
帯大西洋において唯一の変動形態でないことを示唆しています。

第3図に見られるように、緯度20度以内での51年間にわたる海面水温変動場に対する主成分解析は第1主成分に海域全体で同符号の変動場（赤道対称モード）、第2主成分に双極性構造（赤道反対称モード）を示しました。全変動量に対する割合はそれぞれ40%、32%とほぼ同じ変動量を持ちます。そのため、第1主成分と第2主成分として抽出される変動形態のどちらか一方ではなく、双方に着目しながら解析をすすめていく必要がありました。

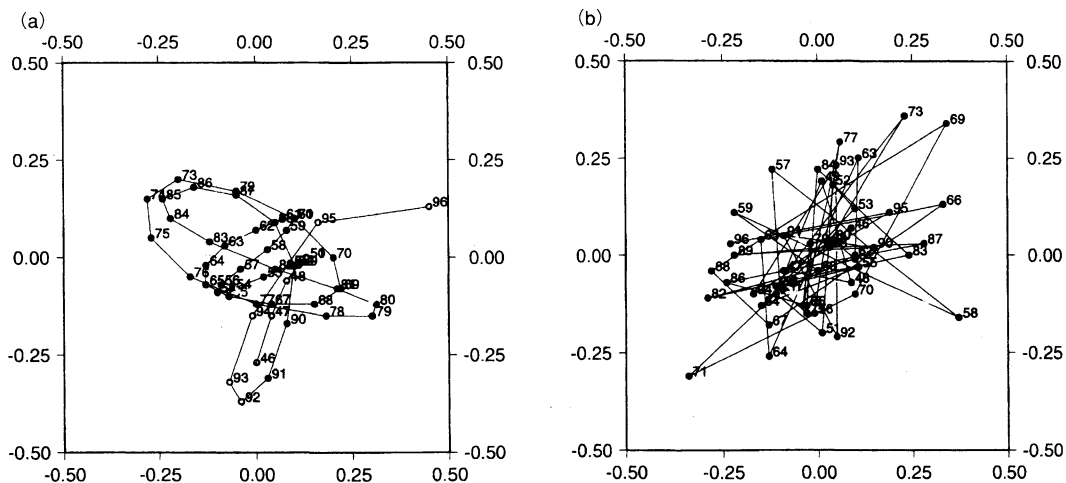
同じような統計的なモード分解解析は Houghton



第3図 熱帯大西洋（緯度20度以内）の年平均海面水温偏差に対する主成分解析の結果。(a) 第1主成分（寄与率40.2%）の固有ベクトルの分布 (b) 第2主成分（寄与率32.7%）の固有ベクトルの分布。等値線の間隔はそれぞれ0.01。実線（破線）は正（負）の値を示す。(c) 主成分に対する時係数。実線（破線）のカーブは第1（第2）主成分のもの。



第4図 北緯及び南緯10-20度での帯状平均の差の時系列（実線）と和の時系列（破線）。本文中では、実線を反対称モードインデックス、破線を対称モードインデックスと称している。



第5図 第2図と同じ。ただし、各格子点において時間フィルターを施した後、帯状平均を求めている。(a) 10年変動スケール(周期8~16年)、(b) 経年変動スケール(周期5年以下)。

and Toure (1992) によってもなされてきました。示されている結果は第3図とほぼ同じであり、彼らによる見解でも、熱帯大西洋海面水温変動場には2つの変動形態があることを示しています。彼らの解析では変動形態を空間的に局在化させる回転 EOF 解析を採用しているため、第3図に比べると大きな振幅をもつ領域が第1主成分では南半球に、第2主成分では北半球に偏っているようにも見えます。そのため、統計解析の結果の解釈としては北半球側と南半球側がそれぞれ独立して変動しているというもので、それまでの熱帯双極子そのものに対する研究 (Chang *et al.*, 1997; Nobre and Shukla, 1996) や熱帯双極子の変動がブラジルあるいはアフリカの降水変動に強く影響しているとした研究 (Folland *et al.*, 1986; Wagner, 1996) と整合しません。

観測データに対する結果がほぼ同じであるにもかかわらず、解釈の違いによって物理的な意味合いが異なるのは好ましい状況ではありません。統計的なモード解析は対象とする期間や領域を変えると結果に微妙な差をもたらしてしまうことがあります。そのため本研究では、熱帯大西洋の海面水温変動構造に対する解釈の不整合に対して、空間構造の把握をモード分解解析だけに頼ることを避け、時間スケールの概念を加えた解析によって第3図に見られたような赤道対称・反対称モードを明確にすることにしました。

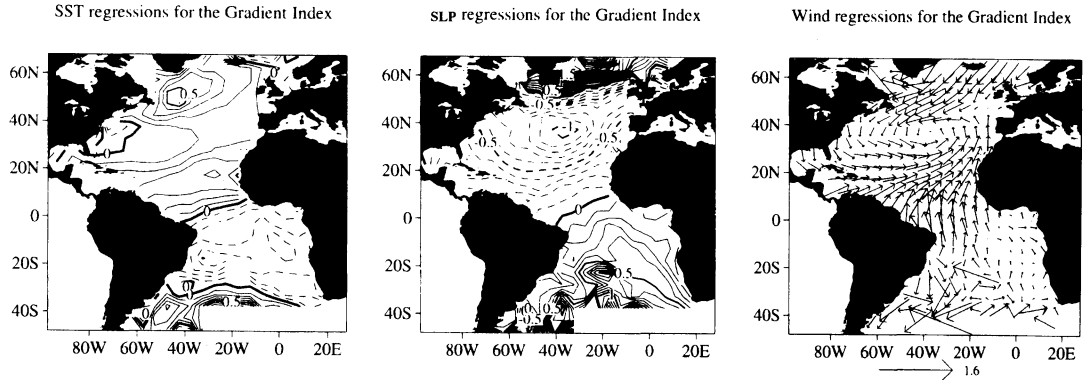
反対称モード(対称モード)を北半球側、南半球側それぞれの帯状平均海面水温偏差の差(和)として考

えることにしますと、Chang *et al.* (1997) あるいは Nobre and Shukula (1996) が示したように反対称モードでは10年スケール変動が明瞭でした。第4図は仮に反対称モードと対称モードとが存在したとして、それらがどのような時間発展をしているかを示したものです。反対称モードインデックスはこの変動の時間経過を表し、やはりここでも10年スケール変動が卓越しています。これに対し、対称モードインデックスはより短い数年の変動スケールが顕著に見えます。

それぞれのインデックスにおいて卓越する時間スケールが明らかに異なっていることを根拠に、第2図と同様な水温偏差の帯状平均値に対する散布図を周期8~16年の10年スケール変動と周期5年以下の経年変動スケールのそれぞれについて別々に作成しました(第5図)。上記の周期成分を抽出する時間フィルターを緯度10~20度にある各格子点の時系列に対しそれぞれ施したあと、帯状平均値を求めています。

第5図aは10年スケール変動に対する散布図です。軌跡は第2象限から第4象限に長軸をもつ楕円を持ち、赤道反対称の構造が顕著です。軌跡の回る方向は時計回り・反時計回りの双方があり南北半球間の位相差までは明確ではありませんし、軌跡の始点・終点に近いところでは時間フィルターがよく機能していないところがあります。これは、データセットの期間が短いためであり、今後の観測の継続、歴史的データの復元 (Manabe, 1999) が大きく期待されるところです。

一方、経年変動スケールの軌跡(第5図b)は概ね第



第6図 反対称モードインデックス（第4図の実線）に対する回帰係数分布図。左から海面水温偏差（等値線間隔0.1度）、海面気圧偏差（等値線間隔0.1 hPa）、海上風偏差ベクトルに対するもの（リファレンスの矢印は図の下に表示されている）。実線（破線）は正（負）の値を示している。

1象限と第3象限を年毎に移動する赤道対称構造を明瞭に表しています。

どちらの散布図においても、振幅はほぼ同じ程度です。つまり変動量が同じ程度で、一方が正相関、もう一方が負相関をもった変動が熱帯大西洋に混在していることを示唆します。この海域において卓越する2つの時間スケールが完全に独立であるとは言い切れないものの、第2図は第5図の2つを重ね合わせた結果であると解釈できます。

Xie *et al.* (1999) では、簡単な数値モデルを用いて赤道対称モードと反対称モードのどちらが卓越するかは海盆の経度の広さで決まることを示しています。さらに、彼らの結果は反対称モードの周波数特性が低周波帯で、対称モードが高周波帯で変動エネルギーのピークを持つことを示しています。このような理論的考察は、以下の観測事実、一狭い熱帯大西洋では赤道反対称の構造を持つ10年スケール変動と赤道対称構造の経年変動スケールの双方があること、広い太平洋には赤道対称構造をもつエルニーニョ・ラニーニャの経年変動スケールのみが卓越すること、とよく整合しています。ただし、大気海洋結合モデルの中では太平洋にも反対称構造が現れることもあり (Yukimoto *et al.*, 2000)、どの構造が選択されるのかについてはさらなる検証が求められます。

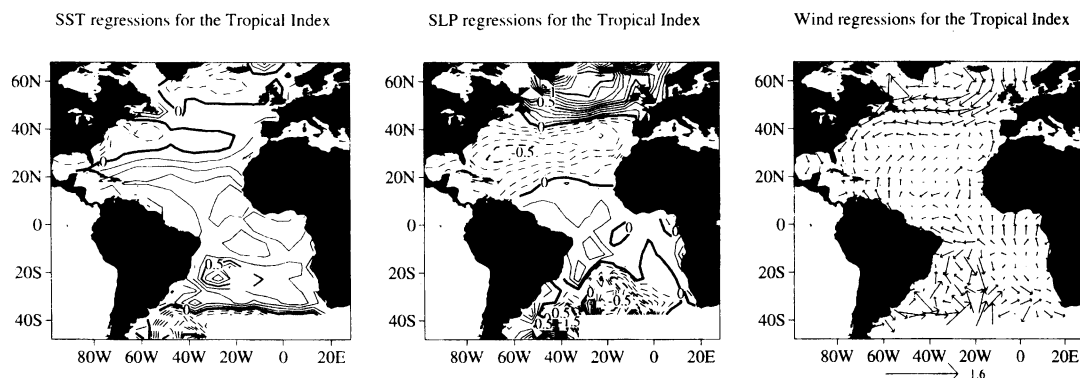
### 3. 熱帯大西洋双極子と環大西洋10年スケール変動

熱帯太平洋域の海面水温変動が少なくとも北太平洋上の大気大循環場や太平洋を取り囲む陸域の気候変動に強く影響を与えることはこれまで良く知られていま

した (Trenberth *et al.*, 1998)。ところが不思議なことに熱帯大西洋の大気海洋結合変動を対象にした観測的研究では、熱帯 (Servain, 1991; Nobre and Shukla, 1996) と中高緯度 (Deser and Blackmon, 1993; Kushnir, 1994) を別々な場として捉えているものがほとんどでした。

第2節で説明したように、熱帯大西洋海域の海面水温変動には2つのタイプの変動形態がありますので、それぞれが熱帯の外側の大気海洋変動とどのような関係にあるのかを見るために、第4図のインデックスを用いた回帰係数分布図を海面水温偏差、海面気圧偏差、海上風偏差ベクトルに対して作成しました。第6図は反対称モードインデックスに対するものです。当然ながら、熱帯域の海面水温構造は双極子構造を示しています。さらに、中高緯度海域を含めると北半球側ではグリーンランドの南、アメリカ東海岸沖、熱帯大西洋の北側の3つの活動中心域が見られます。また、南半球側では熱帯大西洋の南側とあまりはつきりしません。南緯40度付近に帯状の構造をもつ変動域が見られ、大西洋全体として緯度方向に5つの活動中心域が並ぶ構造を示しています。

海面気圧偏差の回帰係数分布図は緯度20~40度付近に中心をもつ双極子構造を示しています。赤道から離れた貿易風帯では海面気圧偏差と海上風偏差がほぼ地衡流バランスを満たしています。北半球側ではさらに極よりの北緯60度以北を中心とする正の気圧偏差が示され、中高緯度全体で北大西洋振動 (NAO) がよく表されています。当時はまだ北極振動 (AO: Thompson and Wallace, 1998) が認知されはじめてばかりでした



第7図 第6図と同じ。ただし、対称モードインデックス（図4の破線）に対するもの。

ので、NAOかAOかという議論(本田・山根, 2002; 中村, 2002)には触れていません。

赤道付近の北向きの気圧傾度力に伴い海上風ベクトルは赤道上をまたがる北向き偏差を示しています。赤道を越える大気の流れがある以上、南北両半球は完全に独立して変動できないことを示唆しています。つまり、海上風偏差は必ず海面水温偏差場を形成するので、海面水温偏差場も南北が完全に独立に変動することは不可能です。赤道は Kelvin 波を捕捉するといった見えない壁の役割を持ちますが、物理的に壁で仕切られているわけではないので南北間で空気塊・水塊が移動していないとする解釈は成り立たないように思います。

このように海面水温と対流圏下層では大西洋全体に空間的に緊密な関連性をもつ10年スケール変動が熱帯大西洋の反対称モードを含んだ形で存在していることを示してきました。本研究を含めた一連の研究ではこの時空間特性をもった変動を環大西洋10年スケール変動 (PADO: Pan-Atlantic Decadal Oscillation) としました。PADO は大西洋全体を含めた海域での第1主成分となることから、この主成分の時係数をもって PADO index とし、著者の web ページ<sup>11</sup>上で公開しています。

熱帯双極子に伴う海面水温偏差は赤道を挟んでほぼ同程度の振幅を示しています。一方、海面気圧・海上風ベクトルの分布は北半球側に比べて南半球側は振幅も小さく、組織だった構造もしていません。この理由の1つとして、南半球側の船舶観測が極端に少ないために、サンプリング誤差が大きいことが挙げられます。

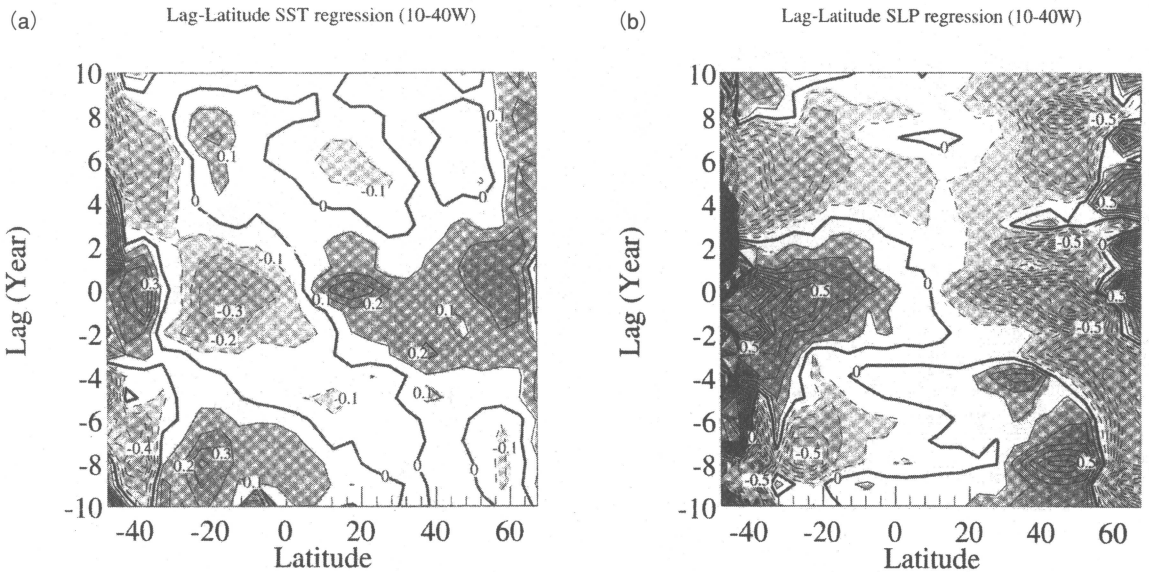
近年、マイクロ波散乱計を用いた人工衛星による海上風ベクトルの観測は急速に進展し、これまでに10年ほどの蓄積があります。人工衛星計測による観測は原理的に地域的なサンプリング誤差の違いはありません。今後も含めて衛星計測の充実は、第6図に見られる海面気圧偏差・海上風偏差ベクトルの南北非対称性が船上観測のサンプリング誤差によるものか、また別のプロセスが海面水温偏差に関与しているかの問題に大きく貢献すると期待されます。

第7図は対称モードインデックスに対する同様な回帰係数分布図です。海面水温偏差には大西洋版エルニーニョと言えるほどの赤道に捕捉された舌状構造は示されていません。北緯40度付近の海面気圧と海上風ベクトルは地衡流バランスを満たすものの、弱い偏西風の下で海面水温は上がっており、大気海洋間の整合がつかっていません。このように、対称モードインデックスと環大西洋域の変動との関連性は反対称モードインデックスに見られたほど明確でありませんでした。

NAOを理解する手がかりとして、Sutton *et al.* (1997)が大西洋の海面水温変動場を下部境界条件として大気大循環モデルを用いた数値実験によりNAOの年々変動の再現に成功した直後から、大西洋海面水温変動に対する大気大循環モデルの感度実験がかなり盛んになりました。

以下は私の想像ですが、熱帯と中高緯度との関連性の視点は無論それまでにもあったはずですが、しかし、熱帯大西洋には大西洋版エルニーニョ/ラニーニャ (Zebiak, 1993) が強く見られないために太平洋で培われた視点—観測面では Horel and Wallace (1981)、数値実験では Hoskins and Karoly (1981) や Blackmon *et al.* (1983) をパイオニアとするエルニーニョ・ラニー

<sup>11</sup> URL: <http://www.woa.ees.hokudai.ac.jp/tanimoto>



第8図 (a) 反対称モードインデックスに対する海面水温偏差のラグ帰帰係数のラグ-緯度断面図。ラグ帰帰係数は各緯度帯で帯状平均されている。等値線の間隔は0.1度。絶対値が0.1度を超える領域に薄いハッチ, 0.2度を超える領域に濃いハッチをかけている。(b) 左と同じ。ただし、海面気圧偏差についての断面図。等値線間隔は0.1 hPa。絶対値が0.1 hPaを超える領域に薄いハッチ, 0.2 hPaを超える領域に濃いハッチをかけている。

ニャに伴う中高緯度大気大循環場のテレコネクションの視点—のアナロジーが機能せず、研究コミュニティ全体としてちょっとした混乱があったように思います。

しかしながら、本論文を含めた大西洋の気候変動の研究が盛んになった1997年頃以降、相次いで熱帯大西洋海面水温変動に対する大気大循環モデルの感度実験が発表されるようになります。日本の(特に若い!)研究者による貢献も大きく、Watanabe and Kimoto (1999), あるいは Okumura *et al.* (2001) は赤道反対称構造をもつ海面水温場が環大西洋変動の励起に不可欠であることを明確に示しました。

#### 4. 熱帯と中高緯度との双方向相互作用

これまで熱帯大西洋反対称モードは10年スケールで振動しているものとして研究内容の紹介をすすめてきました。しかしながら、このスケールでの振動のプロセス(=振動子)はまだよくわかっておりません。Xie (1999)によると、熱帯大西洋域の大気海洋結合変動系のスペクトル構造には低周波帯の明瞭なピークがなく、全体として赤色ノイズの状態にあることを示しました。これは、熱帯域の大気海洋系のみでは振動子になり得ず、中高緯度側からの強制が10年スケール変動

にとって必要なことを示唆します。

熱帯の外側からの強制そのものは必ずしも10年スケールである必要はありませんし、熱帯の北側と南側で逆位相である必要もありません。Xie and Tanimoto (1998)は、亜熱帯域に北半球と南半球側で相関関係のないランダムな東西風の強制を与えても、熱帯の大気海洋系には選択的に南北反対称な10年スケール変動が生じることを示しています。

しかしながら、観測的には強制そのものが10年スケール変動である可能性も示唆しています。第8図は反対称インデックスに対する帯状平均したラグ帰帰係数のラグ-緯度断面を示しています。ラグゼロ近傍で海面水温と海面気圧の双極子が形成される数年前から南北の高緯度から海面気圧偏差が赤道方向に伝播している様子を捉えています。また、Halliwell (1997)は大西洋上で帯状平均した海面気圧偏差が約10年の時間をかけて北緯50度から北緯25度くらいまで赤道向きに伝播していることを示し、第8図の実体が存在することを示唆しています。

このような中高緯度から熱帯へ戻ってくるようなプロセスを示唆するものに対し、熱帯双極子の大気海洋結合変動は熱帯だけで閉じているとする見解も提示されており (Chang *et al.*, 2001), 双極子構造に伴う10

年スケール振動メカニズムの決着さえまだついていません。

## 6. おわりに

大西洋全体における10年スケール変動がPADOの枠組みだけで説明できるわけではありません。熱帯太平洋のエルニーニョ・ラニーニャからの影響、NAO(あるいはAO)に代表される大気の内力学によるもの、あるいは海洋の表層・亜表層に関わる変動と例を挙げていけばキリがありません。PADOの内容にしても国際的には完全に受け入れられているわけではなく、大気海洋結合モデルには再現されないことから熱帯双極子構造の実在に対してさえ否定的な報告(Mehta, 1998; Enfield *et al.*, 1999; Dommenget and Latif, 2002)もされています。

このような状況の中で観測データから変動の実体かなにものなかを明確にするためには丹念に状況証拠を集めていくことが何よりも大切だと思っています。残念ながら、すべてのプロセスを観測データから把握することは困難ですから、変動全体のメカニズムを明らかにすることには数値モデルとの協調なしに実現はできません。ただし、非常に高度化された大気海洋結合モデルによるシミュレーションをもってしても観測面からの検証は欠かせないことも事実だと思います。今後も、海域や時空間スケールに拘ることなく大気海洋相互作用の視点から研究をすすめていく所存です。

## 謝辞

受賞対象論文は共著の謝尚平ハワイ大学気象学科準教授との共同研究の成果です。謝さんとは大西洋の10年スケール変動について理論・数値モデルによるアプローチと観測的なアプローチを突き合わせ、札幌-東京間で(今でもホノルル-札幌間で)メールが行き来するととても有意義な共同作業でした。

私自身がこの分野に入ったきっかけは東北大学に在学中によるところが大きく、鳥羽良明先生、花輪公雄先生をはじめとする海洋物理学講座の諸先生・先輩方の丹念なご指導と激励なしにはなかったものと思っております。

また、学位取得後もいくつかの研究教育組織に所属いたしまして、さまざまな貴重な経験をさせていただきました。東京大学気候システム研究センター、ワシントン大学大気海洋共同研究施設、東京都立大学理学研究科、地球フロンティア研究システムにいらした多

くの方のお世話になりました。

気ままな私を暖かく見守ってくださった以上の方々に改めて感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- Blackmon, M. L., J. E. Geisler and E. J. Pitcher, 1983 : A general circulation model study of January climate anomaly patterns associated with interannual variation of equatorial Pacific sea surface temperature, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1410-1425.
- Chang, P., L. Ji and H. Li, 1997 : A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interaction, *Nature*, **385**, 516-518.
- Chang, P., L. Ji and R. Saravanan, 2001 : A hybrid coupled model study of tropical Atlantic variability, *J. Climate*, **14**, 361-390.
- Deser, C. and M. L. Blackmon, 1993 : Surface climate variations over the North Atlantic Ocean during winter : 1900-1989, *J. Climate*, **6**, 1743-1753.
- Dommenget, D. and M. Latif, 2002 : A cautionary note on the interpretation of EOFs, *J. Climate*, **15**, 216-225.
- Folland, C. K., T. N. Palmer and D. E. Parker, 1986 : Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-1985, *Nature*, **320**, 602-607.
- Enfield, D. B., A. M. Mestas-Núñez, D. A. Mayer and L. Cid-Serrano, 1999 : How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?, *J. Geophys. Res.*, **104**, 7841-7848.
- Halliwel, G. R., 1997 : Decadal and multidecadal North Atlantic SST anomalies driven by standing and propagating basin-scale atmospheric anomalies, *J. Climate*, **10**, 2405-2411.
- 本田明治, 山根省三, 2002 : 北極振動をめぐる最近の動向—2001年米国地球物理学連合 (AGU) 秋季大会セッション「北極振動/北大西洋振動一定義とメカニズム—」の報告一, *天気*, **49**, 661-666.
- Horel, J. D. and J. M. Wallace, 1981 : Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 813-829.
- Hoskins, 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.
- Houghton, R. W. and Y. M. Tourre, 1992 : Characteristics of low-frequency sea surface temperature fluctuations in the tropical Atlantic, *J. Climate*, **5**,

- 765-771.
- Kushnir, Y., 1994 : Interdecadal variation in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric circulation, *J. Climate*, **7**, 141-157.
- Manabe, T., 1999 : The digitized Kobe Collection, Phase I : historical surface marine meteorological observations in the archive of the Japan Meteorological Agency, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 2703-2715.
- Mehta, V. M., 1998 : Variability of the tropical ocean surface temperatures at decadal-multidecadal timescales. Part I : the Atlantic Ocean, *J. Climate*, **11**, 2351-2375.
- 中村 尚, 2002 : 「北極振動」, *天気*, **49**, 687-689.
- Nobre, P. and J. Shukla, 1996 : Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America, *J. Climate*, **9**, 2464-2479.
- Okumura, Y., S.-P. Xie, A. Numaguti and Y. Tanimoto, 2001 : Tropical Atlantic air-sea interaction and its influence on the NAO, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1507-1510.
- Servain, J., 1991 : Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications, *J. Geophys. Res.*, **96**, 15137-15146.
- Sutton, R. T. and M. R. Allen, 1997 : Decadal predictability of North Atlantic sea surface temperature and climate, *Nature*, **388**, 563-567.
- Tanimoto, Y., N. Iwasaka, K. Hanawa and Y. Toba, 1993 : Characteristic variations of sea surface temperature with multiple time scales in the North Pacific, *J. Climate*, **6**, 1153-1160.
- Tanimoto, Y. and S.-P. Xie, 1999 : Ocean-Atmosphere Variability over the Pan-Atlantic basin, *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 31-46.
- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 1998 : The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Trenberth, K. E., G. W. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N.-C. Lau and C. Ropelewski, 1998 : Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures, *J. Geophys. Res.*, **103**, 14291-14324.
- Wagner, R. G., 1996 : Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic, *J. Climate*, **9**, 2010-2019.
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 1999 : Tropical-extratropical connection in the Atlantic atmosphere-ocean variability, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2247-2250.
- Xie, S.-P., 1999 : A dynamic ocean-atmosphere model of the tropical Atlantic decadal variability, *J. Climate*, **12**, 64-70.
- Xie, S.-P. and S. G. H. Philander, 1994 : A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific, *Tellus*, **46A**, 340-350.
- Xie, S.-P. and Y. Tanimoto, 1998 : A Pan-Atlantic decadal climate oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2185-2188.
- Xie, S.-P. and Y. Tanimoto, H. Noguchi, T. Matsuno, 1999 : How and why climate variability differs between the tropical Atlantic and Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1609-1612.
- Yukimoto, S., M. Endoh, Y. Kitamura, A. Kitoh, T. Motoi and A. Noda, 2000 : ENSO-like interdecadal variability in the Pacific Ocean as simulated in a coupled general circulation model, *J. Geophys. Res.*, **105**, 13945-13964.
- Zebiak, S., 1993 : Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region, *J. Climate*, **6**, 1567-1586.

## Pan-Atlantic Decadal Oscillation

Youichi TANIMOTO

*Graduate School of Environmental Earth Science Hokkaido University*  
*E-mail : tanimoto@ees.hokudai.ac.jp*

(Received 7 May 2002 ; Accepted 11 July 2002)