

北太平洋における気候の数十年スケール変動に関する研究

—2006年度堀内賞受賞記念講演—

見 延 庄士郎*

1. はじめに

この度は、日本気象学会より堀内賞という名誉ある賞をいただき、大変光栄に思います。十年スケール変動は気象学および海洋学などの関連分野にとって非常に興味深いものです。特に、Climate Variability and Predictability (CLIVAR, 気候の変動性と予測可能性に関する研究計画) の三本柱の一つにも掲げられたことから、過去10年に渡って非常に多くの研究がなされてきました。私もこの10年余り十年スケールの気候変動研究を、主として北太平洋とその周辺の大気・海洋について、行ってきました。この解説ではその主要な成果を説明させていただきます。

2. レジーム・シフトと50-70年変動

気候のレジーム・シフトとは、「気候がある状態から他の状態へ、各々の状態の持続期間よりもはるかに短い時間で遷移すること」(Minobe 1997)です。古くはKutzbach (1970) が1920年代と1950年代とに北半球の気圧場が大きく変わったことを報告しています。わが国でも、Yamamoto *et al.* (1986) が1940年代のレジーム・シフトについて、気候ジャンプ (climatic jump) という用語を導入して先駆的な研究を行っています。気候レジーム・シフトと気候ジャンプとは、表現が違っただけで同じ現象を意味していますが、今日では気候レジーム・シフトの方がより広く使われています。

これらの1920年代および1940年代の気候変化についてある程度研究がなされていたとはいえ、気候レジ-

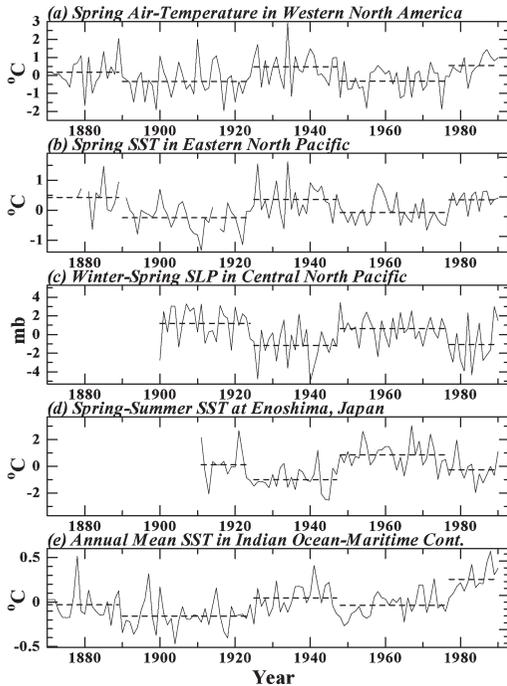
ム・シフトが気候変動研究の前面に踊り出たのは、1970年代のレジーム・シフトが注目されてからでした。この変化については、柏原 (1988) が報告し、Nitta and Yamada (1989) が熱帯を含む広い範囲の変化をまとめ、さらにTrenberth (1990) が階段状に変化する急峻な変化であることを示しています。変化が大きだけでなく、遷移が急峻であるという特徴は、それ自体重要な含意を持っていました。遷移が急に生ずるという特徴は、単一周期の線形システムでは起こり得ず、非線形が重要な働きをすることが期待されるために、物理的なメカニズムの観点からも興味深いのです。

その後1970年代のシフトは1回だけ生じた現象ではなく、20世紀を通じて1920年代・1940年代・1970年代と3回のシフトが交互に符号を変えて生じていたことを、Minobe (1997) が、次いでMantua *et al.* (1997) が報告しました。すでに述べたように、それまでも1920年代、1940年代のシフトについても散発的な報告はなされていましたが、Minobe (1997) とMantua *et al.* (1997) とは、独立な複数の物理量に共通して3つのレジーム・シフトの変化が現れていることを示し、それが北太平洋の気候変動の主要な特徴の一つであること明らかにしたのです。北太平洋の周辺では、北太平洋指数 (North Pacific Index) として知られる北太平洋中央部の気圧 (160°E-140°W, 30-65°N で平均した海面気圧, Trenberth and Hurrell 1994), 北太平洋東部の表面水温, 北米西部の気温, そして親潮南下の指標である宮城江ノ島の表面水温, また熱帯のインド洋から海大陸付近の表面水温に、共通してこれら3回のレジーム・シフトが現れています (第1図)。特に熱帯の表面水温にも変化が生じていることは、熱帯の変化が大気の橋を通じて北太平洋に影響を与えたことを示唆しています。この熱帯

* 北海道大学大学院理学院。

—2007年4月18日受領—

—2007年11月12日受理—



第1図 コヒーレントな50年スケール変動を示す時系列(細実線)とその期間平均(太破線). 平均をとっている期間は1870-1889, 1890-1924, 1925-1947, 1948-1976と1977-1990である。(a) 春(3-5月)の130°W-105°W, 30°N-55°Nで平均した北米西部の気温。(b) 春の東太平洋における SST 偏差。各々の年の春に140°W-110°W, 30°N-55°Nにおいて利用可能なデータが20%以上存在する場合に、偏差の領域平均を求めている。(c) 冬と春(12-5月)の中央太平洋(160°E-140°W, 30°N-65°N)での海面気圧偏差。(d) 春と夏(3-8月)の宮城江ノ島における SST 偏差。(e) インド洋・海大陸域(40°E-160°E, 15°S-15°N)における年平均の SST 偏差。各々の時系列において隣接する期間同士の平均の差は95%信頼限界で有意である。(Minobe 1997)。

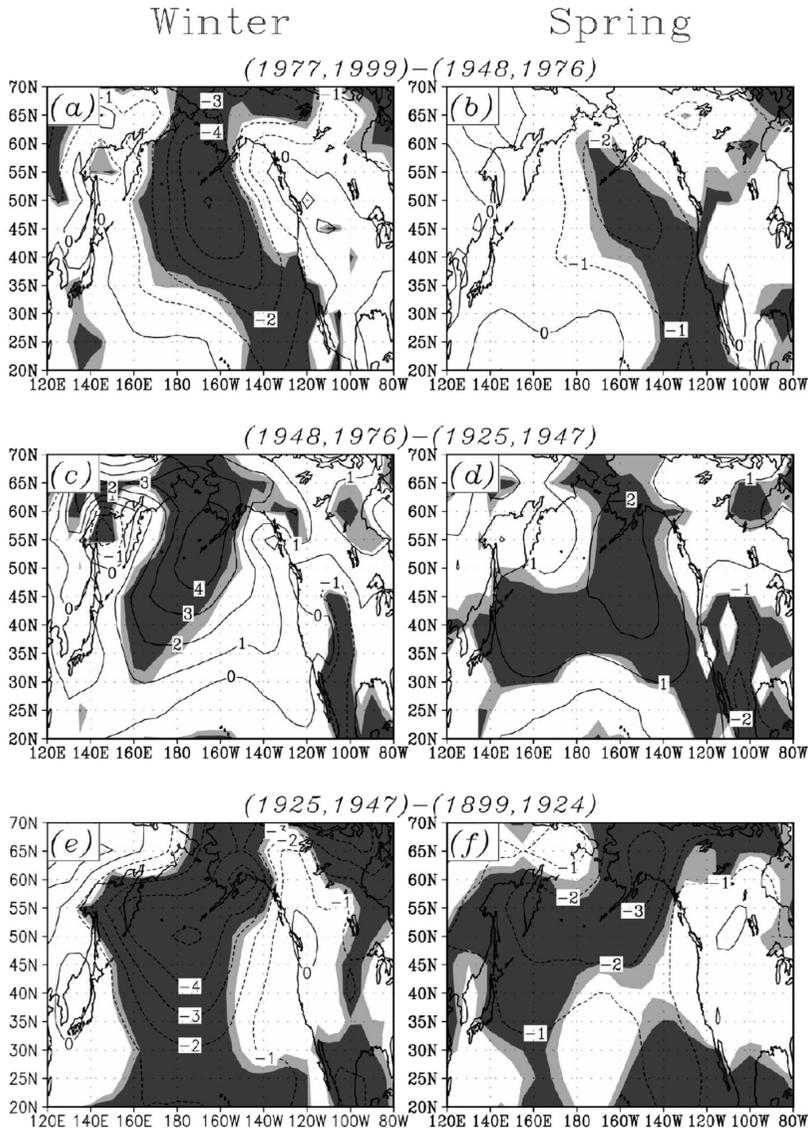
との関係については、その後 Deser *et al.* (2004) が詳しく調べ、やはりインド洋から太平洋にかけての熱帯が重要な役割を果たしたことを確認しています。なお Mantua *et al.* (1997) の Pacific (inter-) Decadal Oscillation (PDO, 太平洋(数)十年変動)というつばを心得たネーミングは、太平洋の十年スケール変動に対する今日の幅広い関心に大きく貢献しているでしょう。

これらのレジーム・シフトに対する大気海洋の変化は、おおむねアリューシャン低気圧の強化・弱化に対する応答として理解できるので、まずアリューシャン低気圧の変動の実態を知ることが重要です。第2図に冬と春について二つのレジーム間の海面気圧差を示します。大体においてアリューシャン低気圧が全体的に強化(1920年代と1970年代)、弱化(1940年代)していると言えます。ただし、興味深いことに春の海面気圧パターンは冬よりもやや北米大陸に寄っており、これが北米西部の気温では冬ではなく春にレジーム・シフトが顕著に見られる(第1図)要因になっています(Minobe 2000)。

おおむね20-30年の間隔でレジーム・シフトが生ずることは、周期的な変動であることをうかがわせます。100年程度のデータ長でもこの長周期変動の有無が統計的に有意かどうかを議論することは一応可能であり、Minobe (1999, 2000) では、ウェーブレット変換を用いて統計的に有意な振幅が、複数の指標の50年程度の周期に存在することを示しました。また、Percival *et al.* (2001) および Deser *et al.* (2004) も過去100年程度の測器観測データから有意なスペクトル・ピークが、アリューシャン低気圧に見られることを示しています。しかしやはり100年そこそこのデータから50年程度のスペクトル・ピークを議論するのは危険が大きいものです。これらの研究で行っているのは50年程度のスペクトルが背景のノイズスペクトルよりも大きいことは示しているだけで、それよりも長周期側でスペクトルが低いかどうかを十分に調べることはできないのです。つまり本当に50年のスペクトルがピークになっているかどうかを問うにはやはり、数百年のデータが必要になります。そこで Minobe (1997) では、北米西部の樹木年輪から復元された、春季の気温データを用いて、50-70年の変動が有意に存在していることを示しました。20世紀の変動はおおむね50年程度(pentadecadal, Minobe 2000)の時間スケールで特徴付けられるのに対して、樹木年輪データはそれよりもやや長い50-70年の周期を示しています(Minobe 1997)。なお古気候データにおける50年のスペクトル・ピークは、その後インド洋(Deser *et al.* 2004) および太平洋の(Pelejero *et al.* 2005) サンゴデータでも報告されています。

3. なぜ急に遷移するのか?

前節で述べたようにレジーム・シフトという現象が



第2図 冬季(12-1月, 左列) および春季(3-5月, 右列) 海面気圧偏差の2期間の差。期間は、1977-1999, 1948-1976, 1925-1947, そして1899-1924である。等値線は海面気圧差の値を、濃い(薄い)陰影は各年を独立と仮定した場合に海面気圧差が95%(90%)の信頼度で有意であることを示す。(Minobe 2000)

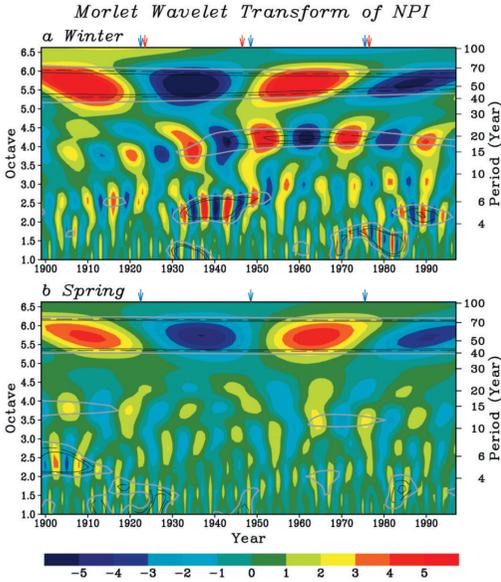
興味深い理由の一つは、シフトが急であることです。ではどういった場合に急なシフトが生じ得るのでしょうか? 可能性は二つあり、一つは矩形波的な時間発展を示す単一の現象が存在すること、もう一つはより滑らかな正弦波的に発展する二つ以上現象の重ね合わせが生じていることです。前者は例えば、ローレンツの蝶々に代表される、カオスの遷移が連想されます。そ

こで Minobe (1999) では、レジーム・シフトに伴う変動の季節依存性を、気圧について詳細に調べました。第3図に、冬と春それぞれと冬春平均の北太平洋指数のウェーブレット変換を示します。ここで有意性検定を、赤色ノイズに対するモンテカルロ法で行っています。ウェーブレット係数は、50-70年の周期帯に有意なピークを冬と春の両方に持ち、20年程度の周期帯にやや弱いピークを冬のみを示しています。20年変動と50年変動が異なる季節依存性を持つことは、これら二つの変動が異なる物理的な起源を持つことを、すなわち本質的には独立な現象であることを強く示唆しています。

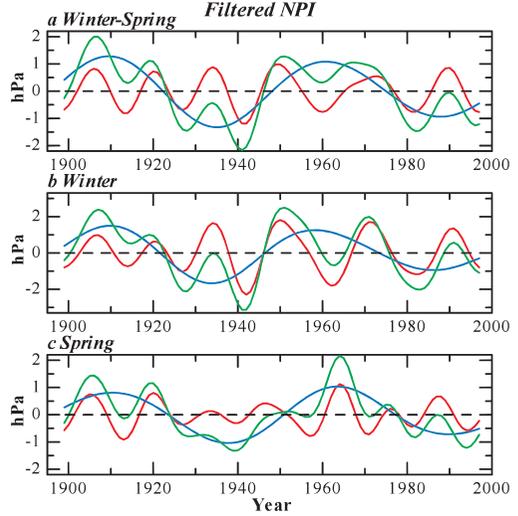
これらの二つの時間スケール変動を、10-30年、30-80年のウェーブレット・バンドパス・フィルターによって分離しましょう。以下では簡単のために10-30年バンドパス・フィルターで抽出した変動を20年変動、30-80年で抽出した変動を50年変動と呼びます。

1920年代・40年代・70年代の気候レジーム・シフトは、10-80年フィルター時

系列における冬・春の平均および冬に明瞭に見て取れます(第4図 a, b)。興味深いことに、これらのレジーム・シフトの付近で20年変動と50年変動の両方が、その符号を同じ向きに変えています。すなわち、1920年代・70年代には、20年変動と50年変動が共にアリューシャン低気圧が強化されるように符号を変え、1940年代には逆方向に符号を変えているのです。一つ



第3図 冬(12-2月)(a)と春(3-5月)(b)の北太平洋指数のウェーブレット変換係数の実部(カラー)と係数の絶対値の有意水準(等値線)。有意水準は赤色ノイズモデルに基づき、黒実線、黒破線、灰色線がそれぞれ、95%、90%、80%の信頼度で有意であることを意味する。左側の縦軸はオクターブと呼ばれる量で、右の縦軸は周期(年)である。各パネルの上の青矢印は、50-70年変動を取り出す30-80年フィルターを用いた冬春平均の北太平洋指数(時系列は図4aに示す)の符号反転の位置を示す。パネルaの上の赤矢印は、20年変動を取り出す10-30年フィルターを用いた冬平均の北太平洋指数(時系列は図4bに示す)について、50-70年変動の符号反転の近傍での20年変動の符号反転の位置を示す。(Minobe 1999)



第4図 バンドパス・フィルターをかけた(a)冬春平均、(b)冬、(c)春の北太平洋指数。緑線は10-80年の、赤線は10-30年の、青線は30-80年のバンドパス・フィルターをかけたものである。(Minobe 1999)

のレジームは50年変動の半周期に相当し、それはまた20年変動の1.5周期に対応しています。結局、50年変動と20年変動とは、周期比1対3で同期していると言えます。20世紀における20年変動の符号反転の数から推定される周期は17年であり、この3倍は51年であり、前述の通り20世紀に見られる50年変動の周期と一致することも、周期比1対3の同期と矛盾しません。

春季の50年変動の振幅は、冬・春平均の50年変動の振幅とほぼ同じであるにもかかわらず、春季の10-80年フィルター時系列には、気候レジーム・シフトは明瞭ではありません。これは、1950年頃には20年変動が

50年変動と逆方向に変化し、1970年代には20年変動が50年変動よりもはるかに振幅が弱いことを反映しています。したがって、20年変動と50年変動が同程度の振幅を持ち、同時期に同じ方向に符号反転することが、気候レジーム・シフトと呼ばれる急峻な遷移の発生に必要であると結論できます。また Minobe (1999) ではモンテカルロ法によって、20年変動と50年変動がほぼ同時に符号反転することは、統計的に有意であることを示しました。つまりこれら二つの変動が無関係であるなら、これほど近接して符号反転することは偶然のためということになりますが、そうである可能性は5%以下なのです。

このように、50年変動と20年変動は共に気候レジーム・シフトに重要な役割を果たしています。50年変動は気候レジーム・シフトが20~30年毎に生ずるという全体的な時間スケールを与えている一方、20年変動はシフトが急峻であるという特徴を付加しています。

さらにこのような20年変動と50-70年変動の組み合わせでレジーム・シフトが説明されることは、北太平洋十年変動指数(Pacific Decadal Oscillation Index)および、アラスカや北米西部の気温についても整合的であることを Minobe (2000) では確認しました。

4. 同期の基礎理論

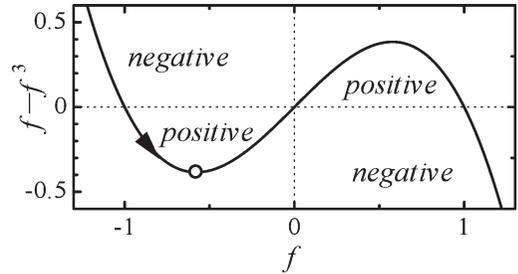
レジーム・シフトの現れについては、周期比が1対3の20年変動と50-70年変動の重ね合わせとして解釈することができたわけですが、こういう周期比の同期が生じるしかるべき理由があるのでしょうか？この問題の基礎を Minobe and Jin (2004) で調べました。なるべく単純なシステムで説明するために、Suarez and Schopf (1988) の遅延振動子モデルに周期的な外力を加えたモデルを扱います。このモデルは無次元化して次式で示されます。

$$\frac{df}{dt} = f - f^3 - \alpha f(t - \tau) + A_F \cos\left(\frac{2\pi t}{T_F}\right) \quad (1)$$

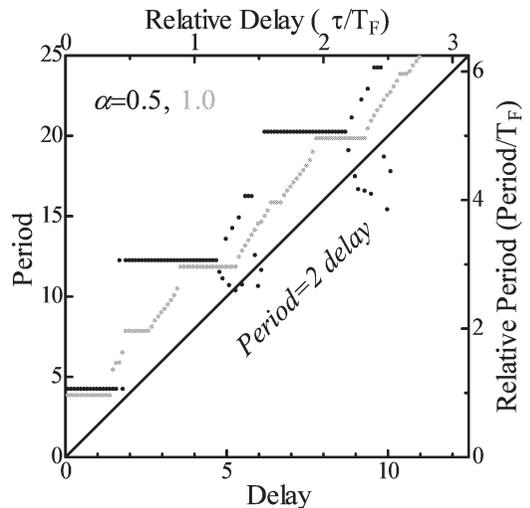
ここで、 f は考えている物理系の代表的な振幅、 t は時間、 $f - f^3$ は同時フィードバック、 $\alpha f(t - \tau)$ は遅延反転フィードバックを表し、 α はフィードバックの強さを表す係数、 τ は遅延時間です。

ここで重要なのは同時フィードバックで、このフィードバックの役割を理解するために、 $df/dt = f - f^3 + G$ という系を考えましょう (第5図)。ここで、 G は遅延項や外力項などの合計です。この系で、 f が-1から1に変化するとします。この符号反転の途中に同時フィードバックは負の極大である-0.38 (○印) を取り、そこで df/dt が正であるためには同時フィードバック以外の項の和 G が0.38よりも大きくなくてはなりません。すなわち、この0.38が符号反転に必要な閾値としての役割を果たしているのです。

この符号反転に必要な閾値に、遅延項と外力項がどちらも単独では及ばず、しかし両方の合計が閾値を越える場合には、両方の符号が揃っている場合にのみ符号反転が可能となります。これは例えて言うと、跳び箱を飛び越すのに、踏み切り板の助けを借りるようなものです。しかし式 (1) では踏み切り板も振動しています。つまり、踏み切り板が跳び箱の右に来たり左に来たりするのです。まず、踏み切り板が跳び箱の右に来た時にそれを使って跳び箱を飛び越して、跳び箱の左に来るとしましょう。次に跳び箱を飛び越すには、自分が今いる跳び箱の左側に踏み切り板が来るタイミングでしか飛び越せません。右にあった踏み切り板がその後左に来るのに要する時間は、踏み切り板の移動周期の0.5, 1.5, 2.5, ...倍であり、このタイミングで符号反転が可能となります。符号反転が2回で1周期ですから、結局人の移動の1周期は踏み切り板の移動周期の1, 3, 5, ...倍という奇数倍周期となる



第5図 振幅の関数としての同時フィードバック。振幅が-1から1に変化する場合を考えると、その符号反転の途中に同時フィードバックは負の極大である-0.38 (○印) を取り、この絶対値が符号反転に必要な閾値となる (Minobe and Jin 2004) (白黒のため一部改変)。



第6図 (1)式のシステムにおける、遅延時間の関数としての平均周期。右側の軸は、外力周期に対する相対的な周期を表している。黒点、灰色点はそれぞれ遅延係数 α が0.5と1.0に対応し、点の重なりを避けるために、それぞれ左の軸で+0.2 (-0.2) 上にシフトしている (Minobe and Jin 2004) (白黒のため一部改変)。

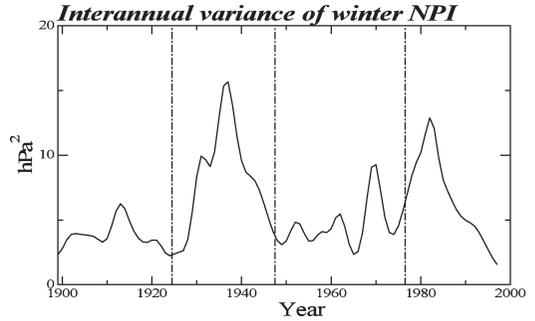
るのです。実際に適当なパラメータで、遅延時間を変化させて式 (1) の系を数値積分してその周期を求めると、第6図に示すように確かに奇数倍周期で安定した同期が見られます。このように、微小振幅で正・大振幅で負という非線形フィードバックが働くシステムに、周期的な外力が加われば、その外力の奇数倍同期

が生じ得るのです。

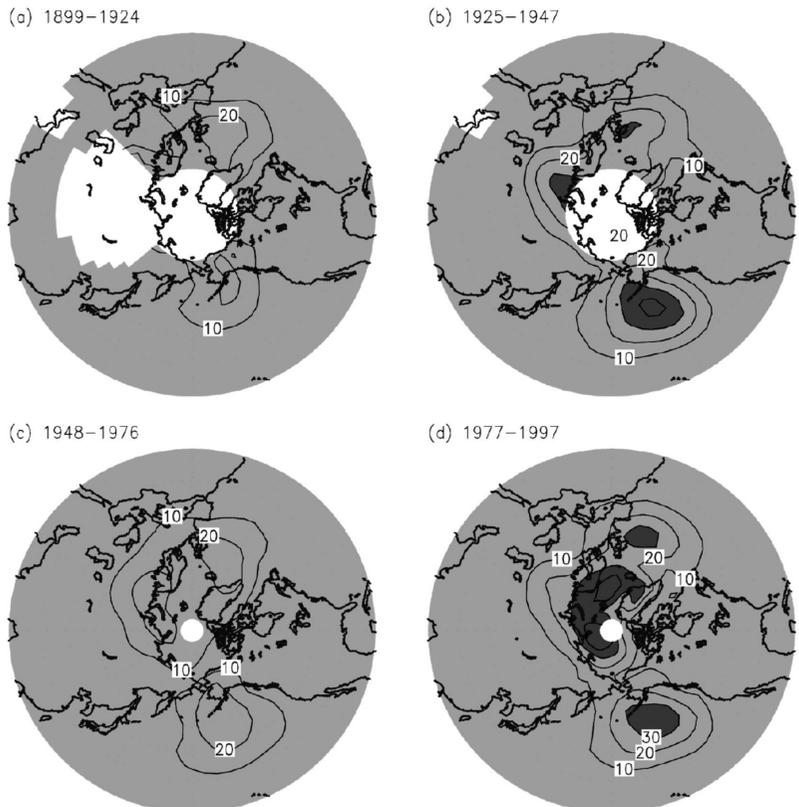
また一方、周期的な外力ではなく、同時フィードバックが周期的に変調されるという系も考えられます。この場合は、偶数倍同期が卓越します。このシステムは例えて言うなら、跳び箱の高さが周期的に高くなったり低くなったりするものです。符号反転が可能であるのは、跳び箱が低くなっている時に限られます。これは跳び箱が伸縮する周期の1, 2, 3, …倍同期となります。このタイミングで跳び箱を飛び越して、次のチャンスにまた飛び戻って1周期になりますから、振動の周期は2, 4, 6という偶数倍同期が卓越することになるわけです (Minobe and Jin 2004)。

こういった subharmonic な同期は、エルニーニョの年周期変動への位相同期で、ある程度研究されました。しかし、位相同期のふらつきを説明するために研究の中心がカオスの方に行っていたために (例えば Tziperman *et al.* 1994; Jin *et al.* 1994), 案外ここで述べたような基本的な同期メカニズムは説明されていませんでした。上の説明が新しいかどうかには、幸い北大に短期滞在した気候力学では第一人者の Jin 教授が「新しい」と太鼓判を押してくれたので、安心して論文にまとめることができました。

この同期メカニズムに必須である正のフィードバックの強さは、現象の周期が長ければ長いほど小さくてよいのです。例えば、20年周期の変動を仮に外力と考えると、5年の時間スケールを持つ正のフィードバックが存在するなら、非線形同期の結果として60年変動が生じることも可能です。もちろん、今考えているのは抽象的なシステムであっ



第7図 冬季北太平洋指数の経年変動成分 (周期 < 8年) の分散。一点鎖線は1924/25, 1947/48, 1976/77のレジーム・シフトの発生年を示している。(Minobe and Mantua 1999)



第8図 1899-1924, 1925-1947, 1948-1976, そして1977-1997年のそれぞれの期間における経年変動成分 (yr < 8) の海面気圧の分散。等値線間隔は10 hPa²である。濃い陰影は30 hPa²を超える分散を、薄い陰影は分散が計算されている領域を示す。(Minobe and Mantua 1999)

て、直ちに現実の気候変動に適用できるとは言えませんが、こういう基礎的な振る舞いが存在し得ることが明確になったことには、気候システムの理解の上で一定の意義があるでしょう。

5. レジーム・シフトに伴う経年変動の変調

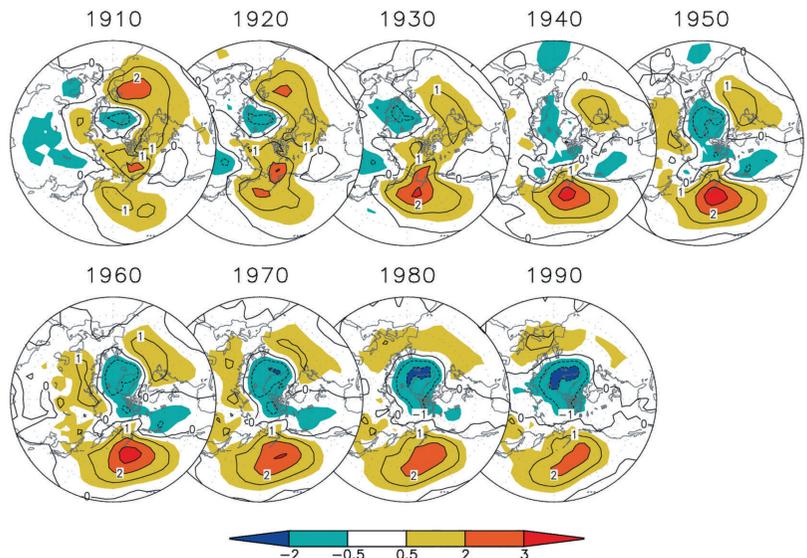
レジーム・シフトはまた、より時間スケールが短い変動にも影響を与えます (Minobe and Mantua 1999)。第7図は、ウェーブレット変換を用いて求めた、冬季の北太平洋指数の8年よりも短周期成分の分散です。1925~47年および1977~最後(1999年)までのアリューシャン低気圧が強いレジーム(第1図)に、大きな分散が生じていることが見て取れます。また連続する2期間の分散の相違は、1920年代と1940年代のシフトについては95%の信頼度で有意、1970年代のシフトはそのままでは有意になりませんが、1977年から1989年までの期間を取ると有意となります。ここで1989年は、北極振動が著しく正に振れ(Thompson and Wallace 1998)、アリューシャン低気圧を弱めた(Tachibana *et al.* 1996)年なので、その影響があると考えられます。つまり、アリューシャン低気圧が平均的に強い時期には、おおむねアリューシャン低気圧の経年変動も強いと結論できました。

対応する分散の変化の空間分布は、アリューシャン低気圧の経年変動が強い(弱い)時期には、北極海および北大西洋西部でも気圧の経年変動の分散が強かった(弱かった)ことを示唆しています(第8図)。この論文を書いた当時には、どうして北太平洋と北大西洋や北極海の気圧変動が関連するのかは分かりませんでしたけれども、最近の研究ではいわゆるアリューシャン低気圧・アイスランド低気圧シーソーの長期的な変調が重要であることが指摘されています(Honda *et al.* 2005)。

6. 20年変動

50-70年変動と共にレジーム・シフトに重要な20年変動は、それ自体興味深いものです。20年変動は第3図にも示したように、20世紀半ばに振幅が強まり、また周期も若干長くなるという特徴を持っています。この周期変調が、どういった空間パターンの変化と関係しているかをMinobe *et al.* (2002)で調査しました。この研究では、第3図のウェーブレットの中心振幅を追跡する、ウェーブレット・フィルターという手法を定義して、空間構造を同定しました。その結果20世紀を通じて、20年変動が徐々に北太平洋を南下しているという結果が得られました(第9図)。20年変動は最近、日周期の潮汐が18.6年周期で変調されることが重要ではないかという大変興味深い仮説(Yasuda *et al.* 2006)が提案されています。そうであるなら、長期予測もできることとなりますが、肝心の20年変動は1950-60年以降徐々に弱くなっています(第9図)。20年変動の原因は潮汐の変調なのかもしれませんが、さらになにが20年変動を変調しているのかが現象の理解にも将来予測にも重要です。

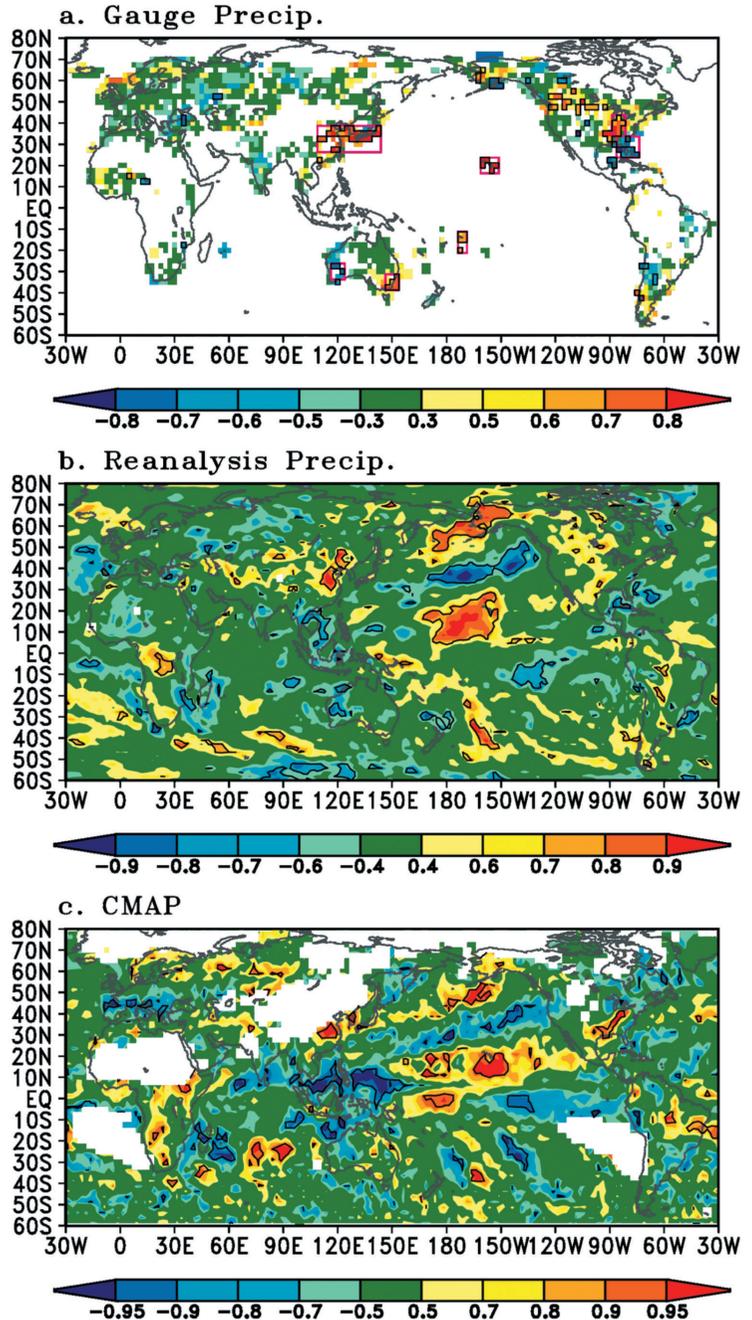
20年変動についてはまた降水量変動も研究しました。降水量変動はもちろん社会生活への影響という点でも、非常に興味深い対象です。50年スケールよりも短い20年変動であれば、測器観測の降水量データでも



第9図 北半球冬季の海面気圧の20年変動の空間パターンの変化。空間パターンは 50°N , 165°W に相対的なものとしている。等値線間隔は1 hPaである。(Minobe *et al.* 2002)

確実性の高い議論をすることができます。しかし単一の降水量データで、時間・空間的に欠損が少なく信頼性も高いというものはありません。そこで1930年から1995年と長く比較的信頼できるけれども有効な領域が少ない雨量計データ、信頼性はいまひとつだけれど50年間欠損なしに利用できるNCEP再解析、衛星および雨量計観測に基づいて最近20年に限られるがNCEP再解析よりも信頼できるCMAPという三つのデータを組み合わせて解析しました (Minobe and Nakanowatari 2002)。第10図に10年から30年のバンドパス・フィルタを取った冬季の北太平洋指数と降水量との相関マップを三つのデータ・セットについて示します。これらの三つの相関マップは、ある程度共通するパターンを示しています。北太平洋の海上では熱帯で正、中緯度で負、高緯度で正というパターンが特徴的です。陸上雨量計でもこの熱帯の正の相関に対応して、ハワイで強い正の相関が生じています。また興味深いことに、日本の南半分と中国東部にかけて強い正の相関が分布しています。これらの20年変動に関する降水量変動は、コヒーレンシー解析でも有意なピークとして確認されます。

さらに Nakanowatari and Minobe (2005) では、

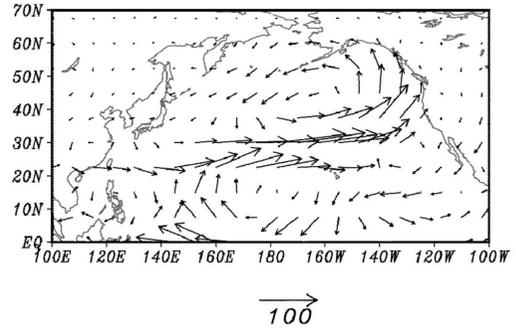


第10図 10-30年のバンドパス・フィルタを用いた冬季の北太平洋指数と、(a) 1930-1995年の雨量計降水量、(b) 1949-2000年のNCEP再解析降水量、(c) 1979-1999年のCMAP降水量との相関係数と95%信頼度 (aの黒枠とb, cの黒等値線)。相関係数のカラーバーは、おおむね同じ色が同じ有意性に対応している。有意性検定は、モンテカルロ法を用いている。白抜き領域はそれぞれの期間内に欠損があるため相関係数を求めなかったことを示している。(Minobe and Nakanowatari 2002)

なぜ20年変動に関係する特定の降水量変動パターンが生じるのかを水蒸気フラックス解析で説明しました。全体として蒸発よりも水蒸気輸送の水平発散・収束が重要で、また月よりも長い時間スケール変動による水蒸気輸送偏差が支配的でした。特にハワイの降水については、アリューシャン低気圧変動と逆符号の気圧変動が熱帯太平洋中央部に生じ、それがもたらす水蒸気フラックス輸送が大きく寄与しているという結果が得られました。第11図に月よりも長い時間スケールの水蒸気輸送の、(符号を反転した)北太平洋指数への回帰マップを示します。回帰計算に先立って、やはり10~30年のフィルターをかけています。この図で示すようにアリューシャン低気圧が強いときには北太平洋の30°N以北で低気圧性の水蒸気輸送が生じる一方、その南には高気圧性の水蒸気輸送が生じています。この高気圧性の水蒸気輸送は、ハワイ付近に水蒸気輸送偏差の発散を伴い、ハワイに少雨をもたらしているのです。この低緯度の高気圧性循環は気圧でみると弱いのですが、緯度が低いためにコリオリパラメーターが小さく、一方水蒸気量が大きいことから、水蒸気輸送については北部北太平洋と同じくらいの強さになります。

7. 海洋変動の格子化とその記述

十年スケール変動は大気のみならず海洋にも重要な影響を与えます。しかし、海洋変動の実態は大気以上によく分かっています。その理由の一つは、扱いやすい格子データが乏しいことです。特に日本付近は古くから比較的豊富な観測がなされてきましたけれど、その蓄積を研究に生かすために必要な格子データの整備はいまだに不十分です。海洋表面水温については、神戸コレクション (Manabe 1999) の解析作業部会に入れていただいた縁から、神戸コレクションを含めた海洋表面水温の格子化にも取り組みました。この格子化では、あえて空間方向に補間やスムージングをせず、ノイズである一方、実効空間解像度が高いデータ・セットを作成しました。その結果前述の1940年代のレジーム・シフトの水温場における詳しい構造を得ることができました (第12図) (Minobe and Maeda 2005)。Nakamura *et al.* (1997) が1970年のレジーム・シフトについて指摘したように、太平洋では亜寒帯フロントと亜熱帯フロントが変動の中心であることは1940年代のレジーム・シフトについても共通していますけれど、1940年代のレジーム・シフトでは1970年

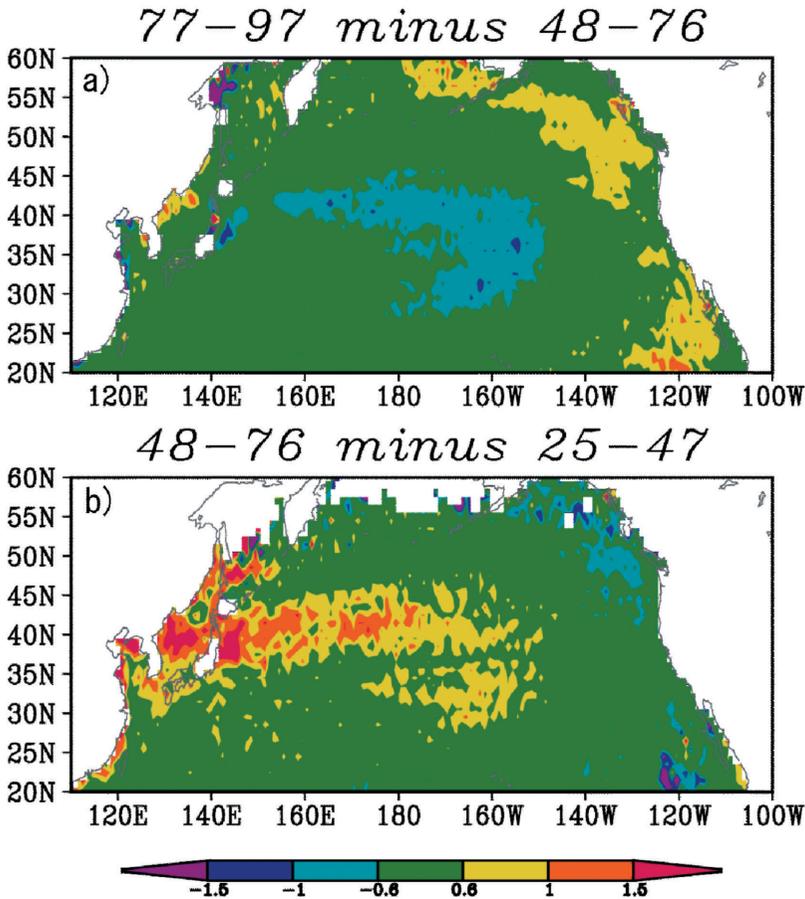


第11図 10-30年のバンドパス・フィルター適用した、冬季の符号を反転した北太平洋指数と、月よりも長い時間スケールの水蒸気フラックス移流の回帰係数。参考矢印は $100 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ を表す。(Nakanowatari and Minobe 2005)

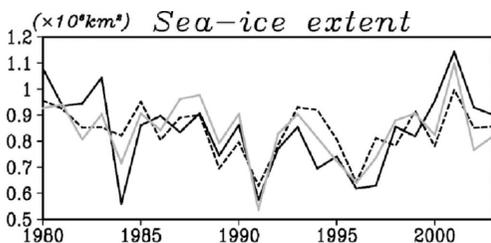
代のレジーム・シフトに比べて日本付近の水温上昇が大きくなっています。より詳細に見ると日本海では亜寒帯前線が、太平洋の日本付近では黒潮続流と親潮フロントに挟まれた領域が、大きく昇温していることが明らかです。この、黒潮続流と親潮フロントに挟まれる領域の昇温は、一時はレジーム・シフトかと強い関心がもたれた (Chavez *et al.* 2003) 1998/99年の北太平洋規模の気候変化にも共通しています (Minobe 2002)。なぜこういう温度上昇が生じたのかのメカニズムについては、黒潮からの渦輸送が重要ではないかと考えていますが、より詳しくは今後の研究にまたなくてはなりません。

適切な格子化データ・セットが無いという問題は、海洋表面水温以上に海洋の中の水温や他の量について深刻です。例えば、大規模場の解析によく利用される White (1995) の上層水温のデータ・セットの格子間隔は $2^\circ \times 5^\circ$ で、実効解像度はもっと低くなります。これでは幅が 10° 程度しかない、日本海やオホーツク海の変動を解像することはできません。そこで、Minobe *et al.* (2004) では日本海を、Minobe and Nakamura (2004) ではオホーツク海の経年~十年変動を解析できる上層水温格子化データ・セットを初めて作成し、3次元的な水温変動を記述しました。興味深いことに、どちらの縁海でも、北極振動の準十年スケール変動と関係する水温変動が顕著に見られています。

また海水の変動についても、ベーリング海 (Sasaki and Minobe 2005) およびオホーツク海 (Sasaki



第12図 冬春平均の海洋表面水温の (a) 1977-1997年と1948-1976年, (b) 1948-1976年と1925-1947年との期間平均の差. (Minobe and Maeda 2005)



第13図 観測された2-3月平均のオホーツク海の水氷面積 (黒実線), 秋季の大気場による予測値 (黒点線), 秋季と冬季の大気場を用いた予測値 (灰色線). (Sasaki *et al.* 2007)

et al. 2007) で, 十年スケール変動の解析を行ってきました. 特にオホーツク海では, 1980年から1996年にかけての水氷面積の低下とその後の2001年への増加という長期変動がそれまで一般に考えられてきた冬季よりも秋季の大気変動が強く寄与していることが明らかになりました. 秋季の大気変動が重要であるということは, オホーツク海の水氷勢力の季節予報にも道を開くものです. 実際に, オホーツク付近の秋季の大気データを用いて, 海水が最盛期となる2-3月の水氷面積を統計的に予測すると, 相関係数0.62という良好な予測スキルを持つことが示されました (第13図).

8. おわりに

以上のように, なゼレジーム・シフトという面白い現象が太平洋の気候に存在するのだろうか? という興味からはじまって過去

十年あまり十年スケール変動の研究に取り組んできました. 科学の発展の方向と合っていたということもあり, 多くの研究者に論文を読んでいただいたことは望外の幸運でした.

しかしいまだに十年スケール変動はなぜに満ちています. 特に十年スケール変動の振幅が相対的に経年変動に比べて大きい中高緯度の海洋が, 大気に対してどのような役割を果たしているのか (あるいは果たしていないのか), は非常に興味深い問題です. 大気の大循環モデルの結果では, 中高緯度の海洋の寄与は弱いという見方が一般的です (例えば Kushnir *et al.* 2002). しかし Latif and Barnett (1994) が提案したように, 中緯度の海洋から大気へのフィードバックが本質的に重要な役割を果たして, 十年スケール変動が生じるのではないかと考えもあります. 最近で

は、大気海洋結合モデル (NCAR-Community climate system model ver. 3) に見られる50年変動に、中高緯度の海洋から大気へのフィードバックが不可欠であるという結果も得られています (Zhong *et al.* 2008). 今後は十年変動とともに、より一般的に大気海洋間のフィードバックにも焦点を当てて、さらに研究を進めていきたいと考えています。

謝 辞

私がここまで研究を続けてくることが出来たのは、多くの方々のご指導、ご鞭撻、そしてご協力のおかげです。気候変動研究を始めたのは、指導教員であった竹内謙介先生がこの道に導いていただいたおかげです。竹内先生の指導は直接のアドバイスはあまりされないものの、暖かいサポートの下、自分で研究を進める力がつく名指導でした。大学教員として自分が学生を指導する身になると、なかなかできる指導ではなく大変ありがたく感じています。また金成誠一先生には、大学院生時代そして教員になってからもアドバイスをいただき、大変感謝しています。十年スケール変動、また関連する気候・海洋変動の研究は多くの学生と共に行ってきました。特に博士論文をまとめてくれた、西野茂人さん、坂本 天さん、中野渡拓也さん、博士課程でまた博士進学を目指してがんばっている佐々木 克徳さん、高玉孝平さん。皆さんのおかげで、多くの研究ができました。修士課程を修了した方々も、私の筆が遅いために修士論文を出版論文にまとめることができたのはごく一部ですけれど、よい研究をしていただいております。また、推薦・選考して下さい下さった方々、ならびに学会員の皆様にも厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Chavez, F. P., J. Ryan, S. E. Lluch-Cota and M. Niquen, 2003: From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, **299**, 217-221.
- Deser, C., A. S. Phillips and J. W. Hurrell, 2004: Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and North Pacific during boreal winter since 1900. *J. Climate*, **17**, 3109-3124.
- Honda, M., S. Yamane and H. Nakamura, 2005: Impacts of the Aleutian-Icelandic low seesaw on surface climate during the twentieth century. *J. Climate*, **18**, 2793-2802.
- Jin, F.-F., J. D. Neelin and M. Ghil, 1994: El-Nino on the Devils staircase: Annual subharmonic steps to chaos. *Science*, **264**, 70-72.
- 柏原辰吉, 1987: 北太平洋を中心とした最近の冬季の冷化について. *天気*, **34**, 47-51.
- Kushnir, Y., W. A. Robinson, I. Bladé, N. M. J. Hall, S. Peng and R. Sutton, 2002: Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation. *J. Climate*, **15**, 2233-2256.
- Kutzbach, J. E., 1970: Large-scale features of monthly mean Northern Hemisphere anomaly maps of sea-level pressure. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 708-716.
- Latif, M. and T. P. Barnett, 1994: Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, **266**, 634-637.
- 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.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis, 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
- Minobe, S., 1997: A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 683-686.
- Minobe, S., 1999: Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 855-858.
- Minobe, S., 2000: Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **47**, 381-408.
- Minobe, S., 2002: Interannual to interdecadal changes in the Bering Sea and concurrent 1998/99 changes over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **55**, 45-64.
- Minobe, S. and N. Mantua, 1999: Interdecadal modulation of interannual atmospheric and oceanic variability over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **43**, 163-192.
- Minobe, S. and T. Nakanowatari, 2002: Global structure of bidecadal precipitation variability in boreal winter. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1396, doi 10.1029/2001GL014447.
- Minobe, S. and F.-F. Jin, 2004: Generation of interannual and interdecadal climate oscillations through nonlinear subharmonic resonance in delayed oscillators. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16206, 10.1029/2004GL019776.

- Minobe, S. and M. Nakamura, 2004 : Interannual to decadal variability in the southern Okhotsk Sea based on a new gridded upper water temperature data set. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S05, doi : 10.1029/2003JC001916.
- Minobe, S. and A. Maeda, 2005 : A 1° monthly gridded sea-surface temperature dataset compiled from ICOADS from 1850 to 2002 and Northern Hemisphere frontal variability. *Int. J. Climatol.*, **25**, 881-894.
- Minobe, S., T. Manabe and A. Shouji, 2002 : Maximal wavelet filter and its application to bidecadal oscillation over the Northern Hemisphere through the twentieth century. *J. Climate*, **15**, 1064-1075.
- Minobe, S., A. Sako and M. Nakamura, 2004 : Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 2382-2397.
- Nakamura, H., G. Lin and T. Yamagata, 1997 : Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 2215-2225.
- Nakanowatari, T. and S. Minobe, 2005 : Moisture balance for bidecadal variability of wintertime precipitation in the North Pacific using NCEP/NCAR reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 453-469.
- Nitta, T. and S. Yamada, 1989 : Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 375-383.
- Percival, D. B., J. E. Overland and H. O. Mofjeld, 2001 : Interpretation of North Pacific variability as a short- and long-memory process. *J. Climate*, **14**, 4545-4559.
- Pelejero, C., E. Calvo, M. T. McCulloch, J. F. Marshall, M. K. Gagan, J. M. Lough and B. N. Opdyke, 2005 : Preindustrial to modern interdecadal variability in coral reef pH. *Science*, **309**, 2204-2207.
- 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.
- Sasaki, Y. N., Y. Katagiri, S. Minobe and I. G. Rigor, 2007 : Autumn atmospheric preconditioning for interannual variability of wintertime sea-ice in the Okhotsk Sea. *J. Oceanogr.*, **63**, 255-265.
- Suarez, M. J. and P. S. Schopf, 1988 : A delayed action oscillator for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3283-3287.
- 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. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 579-584.
- 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., 1990 : Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 988-993.
- Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell, 1994 : Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.*, **9**, 303-319.
- Tziperman, E., L. Stone, M. A. Cane and H. Jarosh, 1994 : El-Nino chaos : Overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, **264**, 72-74.
- Yamamoto, R., T. Iwashima, N. K. Sanga and M. Hoshiai, 1986 : An analysis of climatic jump. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 273-281.
- Yasuda, I., S. Osafune and H. Tatebe, 2006 : Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08606, doi : 10.1029/2005GL025237.
- White, W. B., 1995 : Design of a global observing system for gyre-scale upper ocean temperature variability. *Prog. Oceanogr.*, **36**, 169-217.
- Zhong, Y., Z. Liu and R. Jacob, 2008 : Origin of Pacific multidecadal variability in Community Climate System Model, version 3 (CCSM3) : A combined statistical and dynamical assessment. *J. Climate*, **21**, 114-133.

Study on Decadal-Scale Climate Variability around the North Pacific Ocean
—Memorial Lecture of Horiuchi Award in 2006—

Shoshiro MINOBE*

* *Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, 060-0810, Japan.*

(Received 18 April 2007 ; Accepted 12 November 2007)
