

— 2013年度 日本海洋学会賞受賞記念論文 —

素過程から数十年スケールに及ぶ 海洋大気結合変動の解析研究*

見延 庄士郎[†]

要 旨

地球の2大流体圏である大気と海洋は、相互に影響を与え合っている。大気が海洋に与える影響は、強力かつ明瞭であるのに対して、海洋が大気に与える影響は未解明の部分が大きい。この報告では、熱帯太平洋の季節変動、北太平洋と周辺領域の十年スケール変動、そして中緯度の素過程研究の立場からの大気海洋相互作用について、いくつかの結果を紹介する。海洋が大気に与える影響を、特にデータ解析から明らかにするには、鍵となる特徴を解析することが有効である。熱帯太平洋の年周期変動では、大気海洋に共通する海洋の速度での伝播を、十年スケール変動では大気中の周期的な振動を、そして中緯度大気海洋相互作用では大気に海洋のスケールを見出すことをテコとしてきた。またこの論文では研究結果の紹介に加えて、その背後にある考えなどについても紹介する。

キーワード：大気海洋相互作用，大気海洋共変動，伝播，50-70年振動，20年振動，大気境界層，自由対流圏，scale-separation strategy

1. はじめに

このたびは、日本海洋学会賞を受賞させていただき、まさに身の引き締まる思いです。さて、これまでの研究を評価頂いてこの栄ある賞を受賞させて頂く訳ですが、この変化の速い時代では、それらの成果のかなりの

部分は過去のもので。そこで、特に若い方々の参考になればということで、研究の内容よりも何を考えて研究を行っていたのかを中心に紹介したいと思います。思い返せば特に若い頃は、あっち行ったりこっち行ったりを試行錯誤をずいぶんしていました。これには海洋学がどういう学問であるのか、あえて卑近な例にたとえると海洋学というゲームで自分がどういうプレーをするのが効果的なのかがなかなか分らなかったためです。しかし、一方では、科学を取り巻く状況もどんどん変わって行くなかで、そんなことは分からないのが当たり前なのかもしれません。そうであるなら、try & errorを重ねたことにこそ意味があったとも言えるでしょう。

なお、ここでご紹介する私の研究には、海洋「の」研

* 2014年3月26日受領；2014年5月14日受理

著作権：日本海洋学会，2014

[†] 北海道大学大学院理学院自然科学専攻

〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

TEL/FAX：011-706-2644

e-mail：minobe@sci.hokudai.ac.jp

究とは言えないものも多く含まれています。しかしそれも海洋の「ため」ではあるのです。海洋物理学の重要性は、気象学や海洋生物学に比べて自明ではありません。一般に重要性を主張する際に使われるよく使われるロジックは、それ自身ではない他のなにかに影響するというものです。この点で海洋物理の重要性を主張する一つの方向は、大気に影響するというものです。その証拠を見つける研究は海洋自体の研究ではなく、大気の研究になります。しかし多くの大気研究者は、海洋が大気に影響する証拠を積極的に探してはくれません。逆に少なくともしばらく前まで世界の主流は、中緯度海洋は大気に対して受動的であり、大気を駆動することはない、というものでした。今でも大きく動かすことはないだろう、という考えが大勢です。そこで海洋が大気に影響することを証明するには、大気の研究を行うことが必要になります。こういう訳で、私の研究にはどちらかと言えば気象学の範疇に入る研究も多いのですが、それも海洋が大事だと考えていればこそ行ってきたわけですので、それらを含めてご紹介することをご容赦いただければと思います。

2. 熱帯研究

海洋の道に入ったのは、北海道大学で当時助教授であった竹内 謙介先生の学部授業がおもしろく、また豪快そうに見える（実はけっこう繊細でもある）人柄に惹かれたためです。そこで4年生になる時に、海洋物理学研究室を志望しました。竹内さんの教育は、独特で、研究テーマを出す、お茶を飲む、飯を食べる、以上。というものです。午前11時半ころには「おい食事に行くぞ」、一日に1・2回は「コーヒー飲まないか」で、一緒に食事をしたりお茶を飲んだりして、少しは研究の話もしたと思いますが、ほとんどは雑談ばかりしていました。指導しない指導、とも言えます。こうすると、学生は自分で考えて自分でやるので、確かに力は着きます。ただし時間もかかります。竹内さんゆかりの方々は今海洋学会で中堅どころとして活躍していますが、誰一人岡田賞を受賞したことが無いということは、決して促成栽培を行わなかった竹内さんの教育の勲章と言えるかもしれません。現在は当時よりも早い段階で論文を書くことのプ

レッシャーが大きいので、なかなかこういうじっくりとした育て方は難しいのですが、自分は学生に指導しすぎかなと時々思います。

学部・修士時代のほとんどの期間は、研究者になろうとは思いませんでした。当時の考えていたのは「インド放浪」で、これは藤原 信也が書いた同名の写真随筆に強く影響を受けたものです。どうも私は影響を受けやすい性格のようです。修士1年の1月から3月にかけて、インドを2か月貧乏旅行して念願がかないません。帰国後は就職活動に励み、無事(株)ビー・ユー・ジーという当時30人程度のベンチャー企業に就職も決まりました。修士論文の研究で行っていた熱帯太平洋の年周期変動についての解析は、修士二年の夏から秋にかけて進み、「研究は面白い！」と思いましたが、もう就職も決っていましたので当然そちらに行きました。

しかし就職してだんだん仕事に慣れてくると、あらためて研究に魅力を感じるようになりました。仕事は仕事で、ダイナミックな社会とのやりとりという点もあって面白かったのですが、やはりいろいろと妥協は多いのです。それよりも「研究で物事を突き詰めて考える方が自分としては楽しいのでは？」と考えるようになりました。また学生時代は就職して仕事を持つのは一大事であると思っていたのですが、実際に就職してみるともっと気楽に考えていいと感じました。社会人の数ヶ月で戦力となれるほどの力がついたわけではないのですが、食いつぶれることはないだろうという自信はつきました。そこで、博士後期課程の3年をやって研究者になるのがダメならまたコンピュータ業界に戻ればよいと考えて、1年でビー・ユー・ジーを円満退社させていただき、北大に舞い戻って博士後期課程に入学しました。大学院に戻った後に竹内さんに「見延も少しはまともになったな。」と言われましたし、ビー・ユー・ジーではプログラムの書き方も仕込んでいただき、有意義な社会人の一年間でした。ビー・ユー・ジーには給料分の貢献もできませんでしたけれど、深く感謝しています。

博士後期課程に入学する時に考えていたのは、「1本メジャーな雑誌に論文を書きたい。」ということです。たとえば Journal of Geophysical Research などの我々の分野のトップジャーナルに論文を書きたいというわけです。当時はそういった雑誌に日本人の論文掲載はそれほど多

くはなく、挑戦し甲斐がありました。また論文は科学の営みが続く限り残るということも、個人の名前は残らない一般の仕事とは違うやりがいがあると思いました。

博士後期課程では、修士時代の年周期変動の研究は一旦置いて、エルニーニョの理論研究にまず取り組みました。それまで東西無限領域で得られていた、線形大気海洋結合モードの解を、より現実的な東西が区切られた海と全球熱帯大気とで得ようとしたのです。しかし、そのために式を導いたりテストプログラムを書いていた博士入学後しばらくのタイミングで、同じアイデアの論文が出版され (Hirst, 1988), この方向はあえなく潰えました。一流の研究者と同じ発想を持ったのは自信になりましたけれど、同時に「エルニーニョのような競争の激しい分野は、今の自分には難しい。」と感じました。研究には当然みんなが考える王道があり、そこに行くのだと、対象領域などで差別化をするのでもなければ、かなりの部分スピード勝負になります。しかし、学ぶべきことが多い大学院生では、それが終わっている研究者に対して、スピードでは勝負にはなりません。そこで、エルニーニョ研究からは撤退し、熱帯の年周期変動に戻ることに

しました。

熱帯太平洋の年周期研究では、海洋の赤道波の研究と大気の伝播現象の研究を行いました。海洋の研究では、海洋赤道波動の半解析的な計算とデータ解析を行い (Minobe and Takeuchi 1995), 大気の研究では年周期の伝播現象の構造を調べました (Minobe 1996)。ここで、大気中の伝播に目を着けたのは海洋の重要性を示すためです。この大気の伝播現象は、大気の高い波の伝播速度としては考えられないほど遅く、海洋の影響なしには説明できないのです (Fig. 1)。Fig. 1 は、北緯 8 度での南北風速の東西一様成分からのずれ成分が、ほぼ 1 年をかけて太平洋を横断しており、それが海洋表面水温 (SST, Sea Surface Temperature) の南北勾配 (北緯 10 度-赤道) のやはり東西一様成分からのずれと整合的であることを示しています。この伝播速度は海洋ロスビー波の速度程度であり、もしこの伝播が大気の高気圧によるのであるならそれよりも一桁以上速いはずですが。また、SST 勾配と南北風速の関係は、高 (低) SST で静水圧の関係から海面気圧が低 (高) 気圧的となり、高気圧側から低気圧側に風が吹き込むという熱帯でよく見られる関係と整

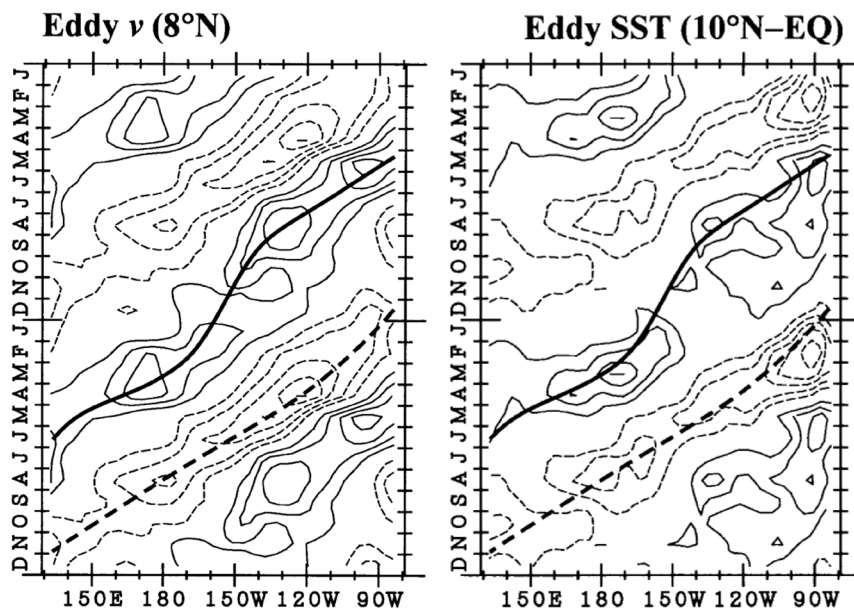


Fig. 1. (Left) Climatological eddy meridional surface wind speeds at 8°N, and (right) climatological eddy SST difference between 10°N and the equator. Eddy fields are defined as deviations from zonal average over the Pacific Ocean. Contour intervals are 0.5 m/s (left) and 0.3°C without zero contours. (after Minobe 1996)

合的です。この研究を通じて、データ解析の面白さに目覚め、それまでの理論・計算的な研究よりも、これ以降発見的なデータ解析研究に向かうことになります。またこの大気伝播現象は、日射の年周期変動によって生ずる東西一様な変動に覆い隠れてそのままでは見えないのですが、東西一様成分をさっ引くときれいに見えることを発見した点で、「これはいい論文だ！」と自信を持っていました。しかし実際には今日までの引用数がわずか二つというように、ほとんど評価されない研究となりました。評価が低いのは、この論文を出してもなく熱帯の研究から他に移ったので、この研究をアピールする機会が少なかったためかもしれません。とはいえ、「自分が良い研究だと思っても、周りはそう思ってくれないこともある。」ということをよく理解できました。

熱帯研究を行っている際に苦労したのは、投稿論文を書くことです。何をどう書いていいかよく分からなかったのです。当時はいわゆるテクニカルライティングの情報も少なく、五里霧中でした。さいわい適当な本にも行き当たり、なんとか論文を書けるようになりました。論文を書けるようになるのに時間がかかったことを反映して、博士論文がまとまって学位をいただいた1994年には、博士入学からは6年後の31歳になっていました。投稿論文が初めて出版されたのは翌年なので、今では考えられない遅さでしょう。もっとも時間がかかった理由の一つには、博士課程中退で助手になっていましたので、講義、演習、実験、メールサーバーの世話などなどにも時間を取られたということもあります。一方、苦労した分だけ論文の書き方、そしてより一般的ないわゆる理系の文章の書き方が身につく、分析もできるようになりました。その後卒論や修論を直す際に毎年同じことを言わずにすむようにとホームページにまとめたところ、講談社の編集者の方に目をつけていただき、論文の書き方の本としてまとめることになりました(見延 2008)。あれほど苦手だった論文書きで、本を出版することになるとは分からないものです。

3. 十年変動研究

博士論文がまとまった1994年に、文部省の在外研究で3ヶ月海外に行くことができました。そこで、1992年

に参加した日米エルニーニョ会議の開催場所であり、とても美しい大学で「こんな所に来れたら良いな。」と思っていたワシントン大学のJISAO (Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean) に、Edward Sarachik 教授にホストになっていただくことにしました。JISAO では、ちょっと気になっていた赤道 deep jets の計算を試みることにしました。赤道 deep jets とは、赤道直下の深層に比較的強い東西流が鉛直方向に交互に生じている現象です。これはなにかの不安定ではないかと考えて、まず東西・時間方向に波数展開した原始方程式系の安定性解析をやってみました。するとメモリーを大量に使ったのか、ネットワーク化されていた JISAO のワークステーション群をガクッと遅くしてしまい、「お前は何をやったんだ。」と言われる始末です。それではと、メモリーがはるかに少なくすむ、時間発展方程式にして解いてみました。Deep jets っぽいものはできたのですが、その特徴が鉛直粘性係数に大きく依存することが、現実的と思えず、それ以上研究するのはやめました。というように、直接研究が進んだわけではないのですが、実はこの JISAO 滞在は大きな転機になりました。

JISAO に行く少し前に調べていた日本海の長期変動に関係して、1940年代に太平洋規模の気圧場の変化が生じていることに気がつきました。そこで、ある日やはり当時 JISAO にいらっしゃった Mike Wallace 教授に図を見せて、この変化について知りませんかと聞いてみたのです。Wallace 先生は、テレコネクションを提案された気候研究の第一人者で、データ解析では先生の貢献を超える研究者は今後出ないのではと思われるほどの方です。気になっていた変化はかなり大きいので、きっと Wallace 先生ならすでにご存知だろうと思ったのです。しかし予想に反して、「知らない。」と言われました。世界の Wallace 先生が知らないなら誰も知らない、つまり新しいのではないかと考えました。そこで、日本海ではなく北太平洋全体の十年変動研究にチャンスを見て、それがその後十年変動研究に取り組む大きなきっかけになりました。

熱帯の年周期変動研究の次に、なにを研究するのかは大いに迷いました。そこで、できるだけ大きなスケールと小さなスケールの両方を試してみることにしました。どっちは当たるだろうという訳です。大きなスケール

が十年変動研究です。気候の変動についての研究は、データの蓄積にしたがって季節変動研究、経年変動研究とその対象の時間スケールを長くして行きます。エルニーニョ研究が1980年代に盛り上がったのは、まさにこういう発展の歴史からも、ちょうど良いタイミングであったということが言えるでしょう。すると次は経年変動よりも長い時間スケールをやろうという話になるのは当然で、実際次の国際プロジェクトであるCLIVAR (Climate Variability and Predictability, 1998～2013)では十年スケール変動が重要になるという話が少し聞こえて来ていた記憶があります。また当時なかで、東西冷戦構造の解消、つまりベルリンの壁の崩壊が科学と社会のありかたを変え、社会が科学により利益を求めるようになるという文章を読み、影響されやすい私はそれに応えられるような科学でありたいと考えました。この点でも、十年変動研究は適切な研究分野であると思いました。

小さいスケールでは、水平数百mスケールの海洋中の対流などの数値計算研究を行ってみることにしました。対流の数値実験には、太平洋や日本海などの数値実験よりもはるかに小さい格子間隔が必要だけでなく、静水圧の近似を使わない非静水圧モデルを用いなくてはなりません。日本で当時海洋非静水圧モデルを開発・使用していたのは、京都大学だけだったと思います。そこで半年ほどの勉強の後に、矩形海洋で水平は二重周期境界と言う簡単な設定ではありますけれど、ゼロから非静水圧モデルを2週間の突貫で作成し、それを使って大学院生と研究をしたり、当時北大・地球環境にいらした岡田直資さんにも使ってもらいました (Okada *et al.* 2004)。大学院生の研究をもとにまとめた、マルチメディア論文 (Minobe *et al.* 2000) では、対流運動の三次元可視化ムービーも作りました。しかしもともと気候畑で研究を始めたので十年変動研究の方が性に合い、またそっちが忙しくなったので、非静水圧モデルを用いた研究は、そこまで打ち止めとなりました。

十年変動研究では、周期性を重んじる立場を取りました。なぜかというなら、大気と海洋の両方に長期的な周期性があるなら、メモリーが数週間といわれる大気だけでその周期性が生じるということはまず考えられず、海洋が重要な役割を果たすと推測できるからです (見延2001)。特に十年またはそれ以上という長い振動周期が

存在するなら、波動の伝播速度が速い熱帯だけではなく中・高緯度が重要な働きをしている可能性が大きくなります。この立場は、中高緯度の海洋が重要であるという作業仮説、またはそうあって欲しいという願望が背景にあるわけで、そんなことはないだろうと思っている大気研究者が大部分である研究コミュニティの大勢から見るとバイアスがかかった立場です。ただし多数が正しいとは限りません。もしこちらの作業仮説が正しいなら、大勢の方が可能性を見ずに素通りしているわけですから、逆にそこがチャンスになります。

十年変動で最初に取り組んだのは、北太平洋に50-70年程度の時間スケールの振動があり、それが北太平洋とその上の大気のいわゆる気候レジーム・シフトに重要な役割を果たしているという研究です。気候レジーム・シフトとは、ある気候状態から他の気候状態に、それぞれの状態の持続時間よりも短時間で遷移する現象です。すでに1980年代終わりから1990年代前半に、1970年代のレジーム・シフトは大きな注目を集めていました (Yamamoto *et al.* 1986, Nitta and Yamada 1989, Trenberth 1990)、1920年代・1940年代にも変化が生じていたことはいくつかの研究が報告していました (Kutzbach 1970)。Minobe (1997) では、これらの現象が個別のもので現象ではなく、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発表しました (Fig. 2)。この変化は、春季の北米西部の気温と北太平洋東部のSST (Fig. 2ab)、冬春平均したアリューシャン低気圧の強さを表す太平洋中央部の気圧 (Fig. 2c)、親潮の南下の指標となる春夏平均した江島 (宮城県) のSST (Fig. 2d)、そしてインド洋・海大陸域での年平均SST (Fig. 2e) に共通して見られます。また、1890年付近にも、そこまでデータが利用可能な時系列にはもう一つの変化が生じています。そのすぐ後に、同様の結果をMantua *et al.* (1997) も報告し、太平洋十年振動 (Pacific (inter-) Decadal Oscillation, PDO) と名付けています。Minobe (1997) とMantua *et al.* (1997) は、独立な複数の物理量に共通して20世紀には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。この研究に関して、東北大学の花輪公雄先生に1996年にカナダで行われた北太平洋海洋研究

開発機構 (PICES) の年次大会の Science board symposium に invite していただきました。33 歳での、初めての国際的な研究集会での招待講演で、とても励みになりました。さいわいにもその発表に対して Best Paper Award をいただき、花輪先生にも喜んでもらえました。なお、50-70 年振動は、北米西部の樹木年輪 (Minobe

1997)、熱帯太平洋 (Pelejero *et al.* 2005) とインド洋 (Deser *et al.* 2004) のサンゴデータにも見られます。

50-70 年振動だけでは気候レジーム・シフトの特徴である急峻な遷移を説明することはできません。そこで、次の論文では 20 年振動と 50-70 年振動の間に周期比 1:3 の非線形同期が生じることで、ある気候状態の 20-30

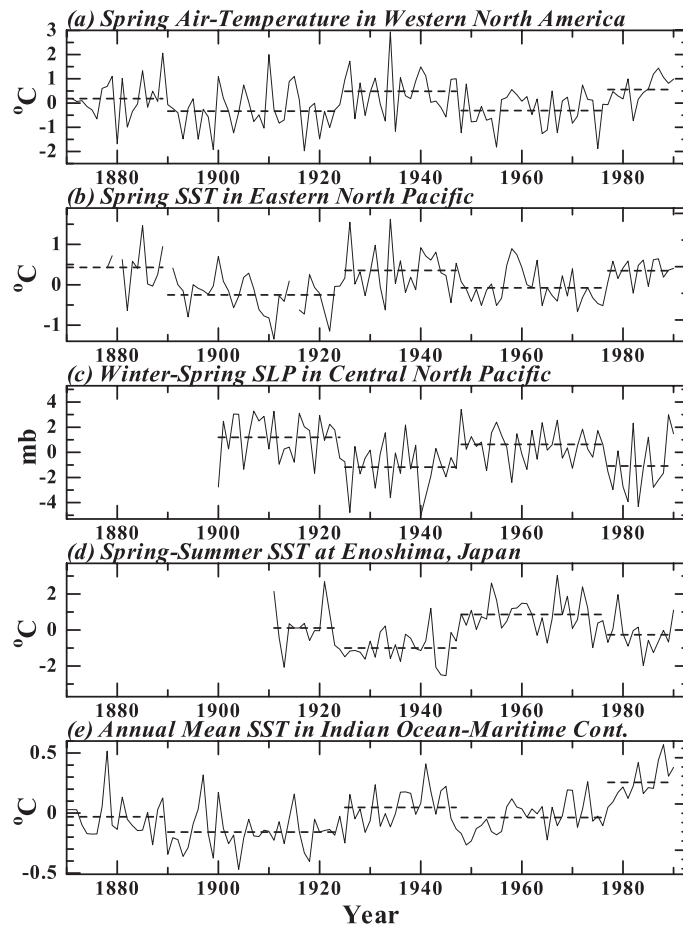


Fig. 2. Time series of anomalies exhibiting coherent interdecadal climate changes (thin solid curve), with temporal averages of the anomalies for the periods 1870-1889, 1890-1924, 1925-1947, 1948-1976 and 1977-1990 (thick dashed lines). (a) Spring (Mar.-May) air-temperature anomalies in western North America averaged over $130^{\circ}\text{W}-105^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{N}-55^{\circ}\text{N}$. The air temperature anomaly is calculated relative to 1930-50 at each station, and then the anomalies are averaged spatially. (b) Spring SST anomalies in the eastern North Pacific averaged over $140^{\circ}\text{W}-110^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{N}-55^{\circ}\text{N}$. The average is calculated when available grid points are more than 20% of total grid points in the spring of respective years. (c) Winter-spring (Dec.-May) SLP anomalies in the central North Pacific averaged over $160^{\circ}\text{E}-140^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{N}-65^{\circ}\text{N}$. (d) Spring-summer (Mar.-Aug.) SST anomalies at Enoshima, Japan. (e) Annual mean SST anomalies in the Indian Ocean-maritime continent region averaged over $40^{\circ}\text{E}-160^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\text{S}-15^{\circ}\text{N}$. All differences in the temporal average between successive periods are significant at the 95% confidence level in each time series. (after Minobe 1997)

年間の持続と、急峻な遷移の両方の特徴が説明できると提案しました (Figs. 3, 4) (Minobe 1999)。50-70 年振動が 20-30 年というレジームの長さを規定し、50-70 年振動と 20 年振動が同時に同じ方向に符合反転することで急峻な遷移が生じるのです。また Fig. 3 のアリューシャン低気圧の強弱のウェーブレット解析にみられるように、50-70 年振動は冬と春の両方に現れるのに対して、20 年振動は冬のみが生じるので、これらの二つの振動は物理的に別な起源を持つことを示唆しました。Fig. 4 のアリュー

シャン低気圧の強さに 10 年から 80 年の十年フィルターをかけた時系列 (緑線) では、冬季そして冬春平均では 20 年代、40 年代、70 年代のシフトを見て取れます。これらのシフトでは、20 年変動と 50-70 年変動が同時に符号反転しています。しかし 20 年振動が弱い春季には、十年フィルターをかけた時系列において、20 年代と 40 年代にはシフトが生じているようには見えません。したがって、20 年振動と 50-70 年振動の季節依存性の違いが、レジーム・シフトの季節性の違いをもたらしていると結論

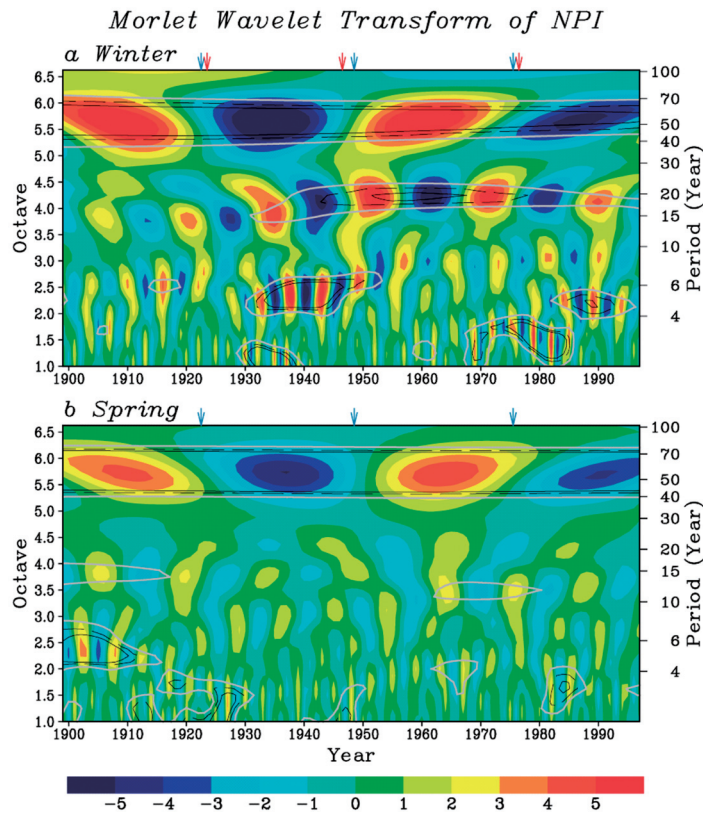


Fig. 3. Wavelet transform coefficient of the North Pacific Index (NPI), which expresses strength of Aleutian low as NPI is area-averaged sea-level pressures over an area 30° - 65° N, 160° E- 140° W, for (a) the winter season (Dec.-Feb.) and (b) the spring season (Mar.-May). The colors indicate the amplitude of the real part of the wavelet coefficient. The black-solid, black-dashed and gray contours indicate that the local wavelet spectrum (which is defined as the square of the absolute wavelet transform coefficient) is significant at the 95, 90 and 80 % confidence levels, respectively. The significance of the wavelet amplitude is evaluated by a Monte Carlo simulation based on a red-noise (AR-1) model for the observed lag-1 correlation coefficient using 10,000 surrogate time series. The blue arrows at the top of each panel indicate the phase-reversal years for the pentadecadal-filtered winter-spring NPI shown in Fig. 4a, and red arrows indicate the corresponding phase-reversal years for the bidecadal-filtered winter NPI in Fig. 4b. An octave for the left axes is given by $\log_2(a)$, where a is a scale dilation parameter in units of years. (after Minobe 1999)

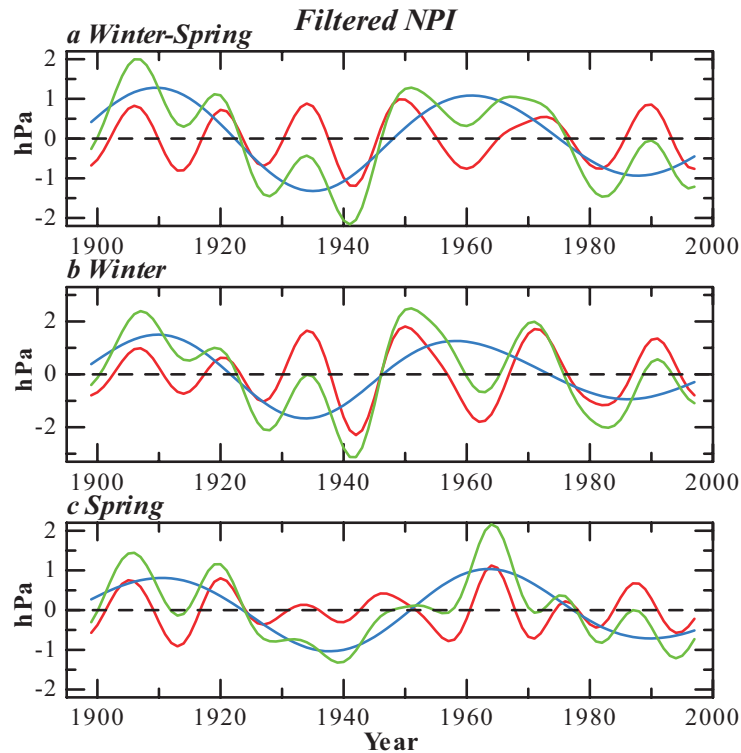


Fig. 4. Filtered NPI (a) in the winter-spring, (b) in the winter and (c) in the spring season. The green curves indicate the 10-80-year band-pass filtered NPI data, the red curves indicate the 10-30-year band-pass filtered (bidecadal filtered) NPI data, and the blue curves indicate the 30-80-year bandpass filtered (pentadecadal filtered) NPI data. (after Minobe 1999)

できます。

またこの99年論文には、後の楽しみも一つ仕込んでありました。それは次の気候レジーム・シフトが1999/2000年から2006/2007年の間に生じるだろうというもの。もちろん、もし実際にそうになったら、「すでに予想していた」と言えるわけです。外れる可能性もありますが、その場合はおそらく忘れられるだけですから、それほど問題はありません。実際にどうだったかという点、Chavez *et al.* (2001) では、予想範囲よりも1年早い1998/99年にシフトが生じたことを提案しています。そのパターンは北太平洋では特に大気がそれまでの主要なレジームとは違い (Minobe 2002), アリューシャン低気圧の変化は2005年くらいに生じたのでその点では当たったと言えるのかもしれませんが。

実は、この99年の論文で目指したのは、「怪しい論文を書こう」ということです。それまで気候変動の研究で

の重要な成果は、かなりの程度欧米に持っていかれてしまっているように感じていました。これは一つには日本人が、十分な証拠に立脚した、正しい論文を書こうとしないからではないか、と思ったのです。研究の王道では、みな似たようなことを考えます。もし8割の証拠が集まるまで論文を書かなければ、4割・5割の証拠で論文を書いてしまう研究者との競争には勝てません。特に英語の論文を書く速度にハンディキャップがある、日本人研究者ならなおさらです。もちろん4割の証拠では、確定的な結果を示す論文は書けないですけど、重要な仮説を提案するなどこれは出版する価値があると思わせる論文は書けます。その場合弱い証拠を補うだけの文章力が必要で、気候変動研究を続けるにはそれをぜひ身につけたいと考えました。そこでこの論文では結果の図はなるべく少なくしました。アリューシャン低気圧の強さについて当時気候研究でも使われるようになった wavelet

解析をお化粧として行った図と (Fig. 3) と、同じデータをフィルターした時系列を並べた図 (Fig. 4) の、二つだけです。あとは文章力で認めさせようとしてきました。怪しい論文として出版できればよいというねらいだったので、多くの引用をいただいたのは望外の幸運でした。

怪しい論文を書くだけでなく、堅い論文で「しっかりとした知識と能力があることを示す。」ことも大事だろうと考えていました。怪しい論文がハイリスク・ハイリターンだとすれば、堅い論文はローリスク・ローリターンということになるでしょう。怪しい論文だけを出すだけで

は山師と思われてしまいかねません。かといって堅い論文だけでは、リターンは低く、科学的な貢献も小さくなるでしょう。もちろん堅い論文でも、数で圧倒できれば問題ありませんけれど、なかなかそうもいかないものです。そこで、次の Minobe (2000) ではがっちりと大気データに見られる 50-70 年変動と 20 年変動とを記述しました。この論文は、Progress in Oceanography 誌の North Pacific Climate Regime Shift の特集号の表紙に採用していただきました。この論文の図から Fig. 5 に冬と春について 2 つのレジーム間の海面気圧差を示します。アリュー

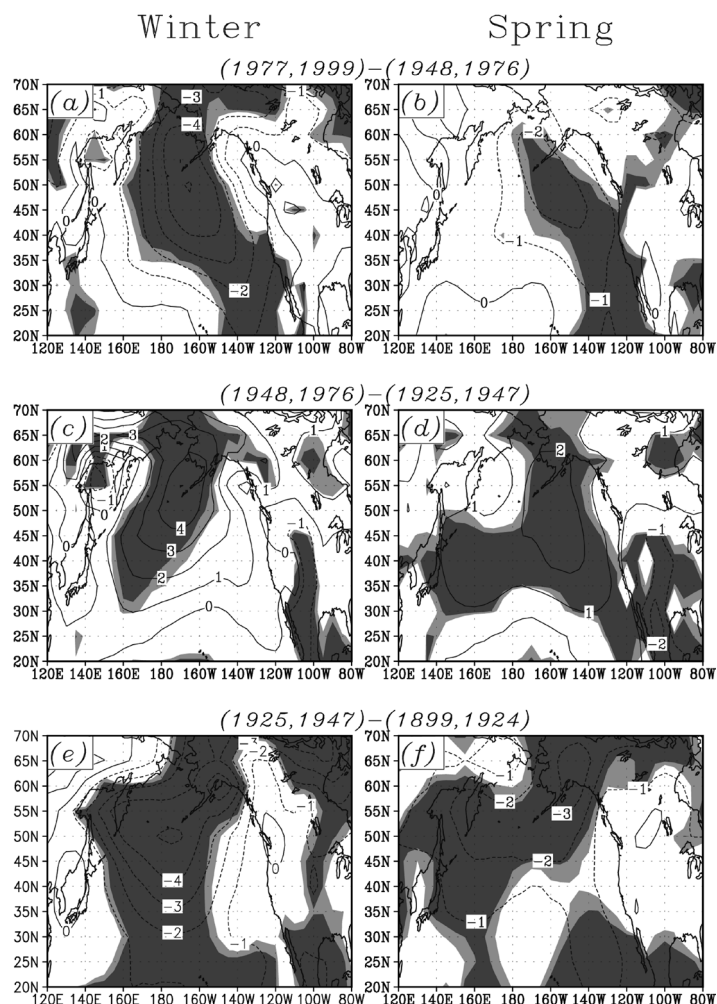


Fig. 5. SLP difference between two successive periods in winter (left panels) and spring (right panels). The periods are defined as 1977-1999, 1948-1976, 1925-1947 and 1899-1924. The contour indicates the amplitude of the difference and the dens and weak shades indicate the regions where the difference is significant at the 95 % and 90 % confidence limits, respectively, assuming each year is independent. (after Minobe 2000)

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側に寄っており、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 (Fig. 2) 要因になっています (Minobe 2000)。また別の堅い研究としては、十年スケールでアリューシャン低気圧が強いレジームでは、年々変動の振幅が強くなることも示しました (Fig. 6) (Minobe and Mantua 1999)。Fig. 6 は、wavelet によって求めた、2~8 年の経年変動成分の分散で、通常分散が時系列全体を通じて一つだけ定義されるのとは違って、時間の関数として表されています。アリューシャン低気圧が長期的に強かった、1924/25~1947/48 と 1976/77 以降という二つのレジームで、このアリューシャン低気圧の経年変動の分散は強くなっています。

なお、Minobe (1999) の怪しい論文を出すにも、データにおける表れに加えてもう少し裏付けがないと不安だったので、理論的な若干の説明も用意していました。いわゆる遅延振動子という、エルニーニョ研究などで使われていた、シンプルな非線形遅延常微分方程式を連立させて、非線形性がどのように周期比 1:3 の同期をもたらすかを見通しよく説明する、というものです。どこまで新しいのかに自信がなかったので、論文にする踏ん切りがつかないのですが、たまたま北大を訪問した非線形気候力学の第一人者のハワイ大の Fei-fei Jin 教授と議論して、これは新しいとお墨付きをいただいて無事論文にまとめることができました (Minobe and Jin 2004)。状態間の遷移ということでは非線形性によって生じるカオス的な遷移を連想されるかもしれませんが、たしかに急峻な遷移には非線形性が働く必要がありますけれど、カオスになるとは限りません。可能性としてはカオスではない方が多いのです (例えば Tziperman *et al.* 1994)。この論文では、微小振幅に対して正のフィードバックが働く非線形システムでは、符号反転に必要な条件に一種の閾値が存在するので非線形同期が生じることを、簡明に示すことができたと考えています。

北太平洋の十年スケール変動の主要成分と考えていた、50-70 年振動と 20 年振動のうち、後者の 20 年振動については 100 年間利用可能なデータにも何周期分かが含まれますので、50-70 年振動よりも詳細な研究が可能で

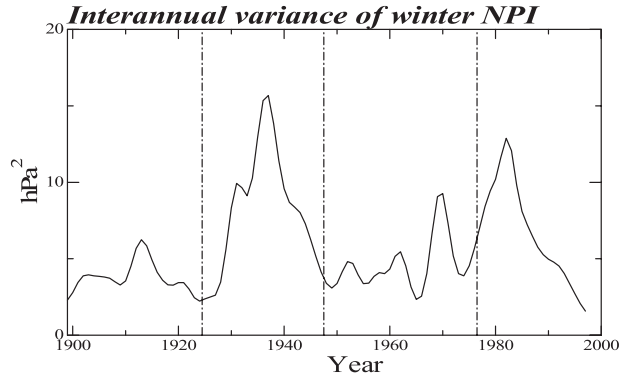


Fig. 6. Interannual (2 year < periods < 8 year) variance of winter NPI. Dotted lines indicate the time of regime shifts at 1924/25, 1947/48, 1976/77. In the regimes with the strong mean Aleutian lows, interannual variances of Aleutian low are enhanced. (after Minobe and Mantua 1999)

す。そこで 20 年周期振動の時間・空間構造を詳しく調べました (Fig. 7) (Minobe *et al.* 2002)。Fig. 7 では 20 年振動の気圧分布パターンが 20 世紀を通じて、徐々に変化している様子を、wavelet 解析に基づいて示しています。また当時大学院生だった中野渡 拓也さんと降水量との関係も研究しました (Minobe and Nakanowatari 2002; Nakanowatari and Minobe 2005)。この降水量研究は布石でもありました。「社会にも重要な降水について、20 年振動との関係を押さえておけば、おそらく 20 年振動はその存在が証明されるだろうから、その際には重要な研究となるだろう。」という訳です。幸い Minobe and Nakanowatari (2002) は気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第四次報告書にも引用していただきましたけれど、20 年振動の存在が広いコンセンサスを得るにはならず、この布石は残念ながら不発というところでした。

また十年変動に関連して、データが整備されていなかった日本海やオホーツク海は、学生と一緒に新しいデータセットを作って、それらの領域では初めてとなる総合的な経年・十年変動の記述もしました (Minobe *et al.* 2004; Minobe and Nakamura 2004)。日本の第二次世界大戦以前の SST データが利用可能となったことを受けて、新しい SST データを作成して、1940 年代のレジーム・シフトに伴う SST 変化は、1970 年代の SST の変化

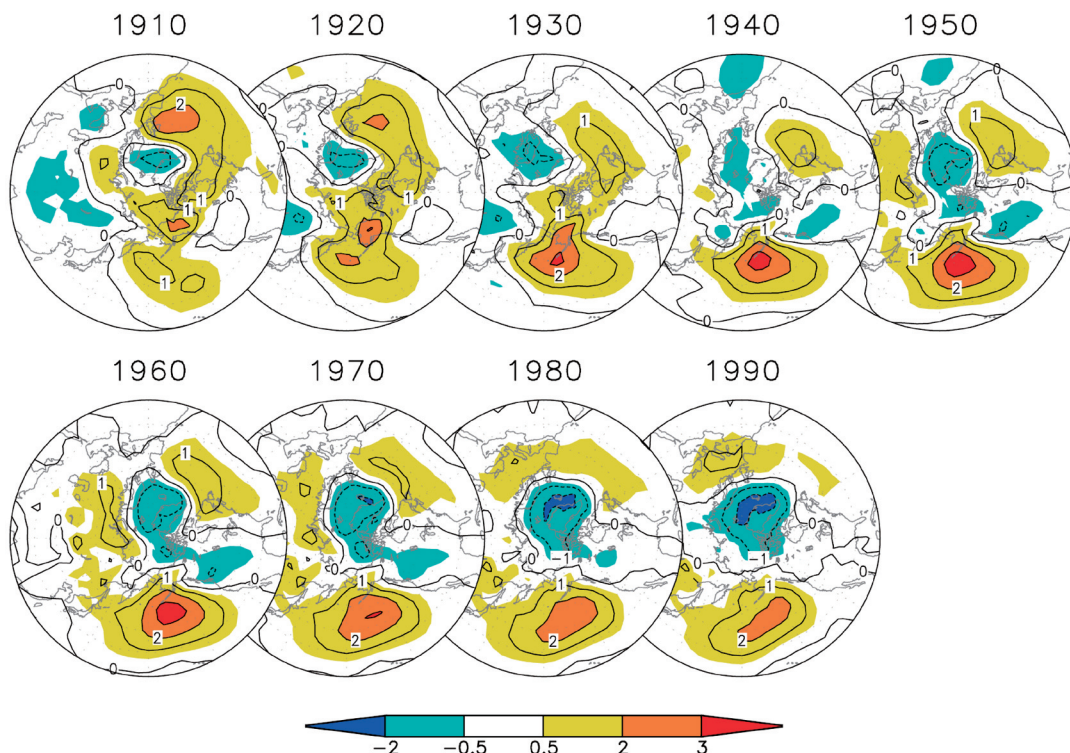


Fig. 7. Real part of the wintertime relative maximal wavelet-filtered SLPs with respect to 50°N , 165°W from 1910 to 1980 at a 10-yr interval. Contour interval is 1 hPa. Systematic changes in the bi-decadal oscillation pattern are seen in the North Pacific and North Atlantic. (after Minobe *et al.* 2002)

とは違って西部北太平洋で大きく変わったという結果も報告しました (Minobe and Maeda 2005)。これらの一連の研究は、非常に労力のかかった堅い研究です。なお、この1940年代の気候レジーム・シフトでのSSTの変化は、黒潮続流と亜寒帯フロントの間の領域で顕著に昇温するという、興味深い特徴を示します (Fig. 8)。おそらくは黒潮系の水の割合が黒潮親潮混乱水域で増えたのだらうと思いますが、なぜそういった変化が生じたのかは不明です。日本周辺ではこの1940年代のシフトに伴う昇温は、過去100年のデータでも大きいものであり、将来の温暖化のパターンとの関係を議論する上でも、そのメカニズムについて今後の解明が待たれます。

十年変動研究に関連して海洋学会から推薦いただいて、36歳の時に1999年のイギリス・バーミンガムで行われたIUGGでコンビーナーをさせていただきました。実はこの時に、もう少しで大失敗をするところでした、米国のコンビーナーであるStephen Griffies博士と相談し

て大勢 invited speaker を呼んだところ、その後の事務局との折衝でそれに見合うだけの invited speaker のスロットを得ることができなくなりそうで、ずいぶん心配しました。万一のために、実はかくかくしかじかで、ひょっとしたら invited speaker にできないかもしれないというメールをそれらの偉い研究者のみなさんに送りもしました。それに対して、イギリス海洋研究センターのPeter Killworth 教授から「大丈夫だ。僕はもっとひどい失敗をしたことがある」という励ましのメールをいただいたのは、ありがたかったです。幸いスロットが足りなくなることもなく、盛況なセッションとなりました。最後には2日の全部のまとめを5分で行いました。これは実はそれ以前に国際学会の会合で当時東大の山形 俊男先生が鮮やかにサマリーをされたのを見て、それに倣ったものです。この辺もやはり私の影響のされやすさが出ているかと思います。私の場合は鮮やかとはいきませんでしたけれど、何年も後にカナダのマギル大学のLawrence My-

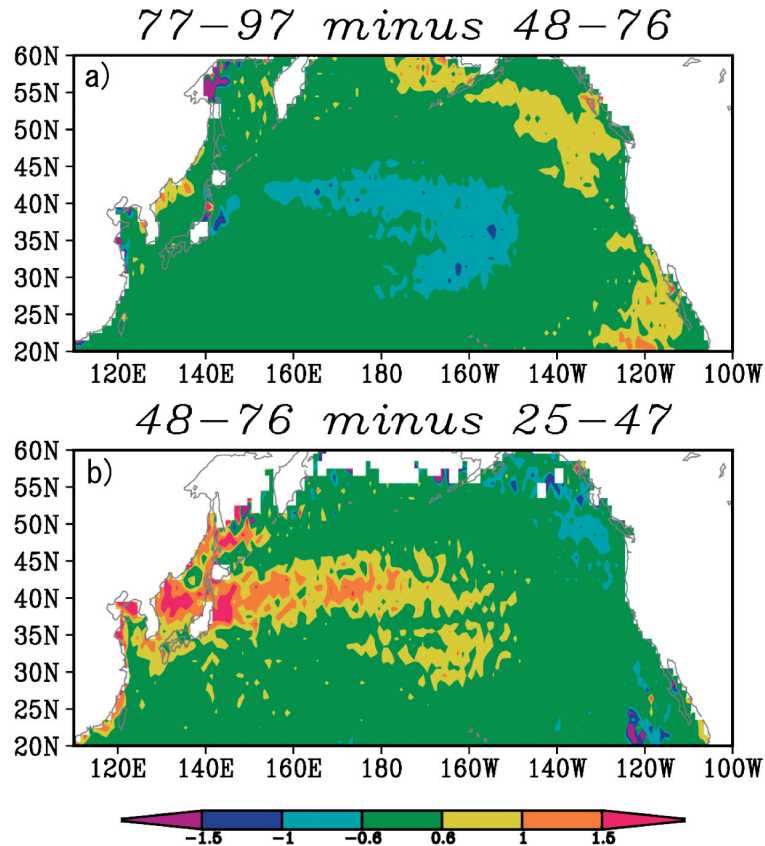


Fig. 8. Winter-spring SST anomaly differences between successive two epochs of a regime associated with the 1970s (top panel) and 1940s (bottom panel) climatic regime shifts. The SST difference is calculated between 1977-1997 and 1948-1976 for the upper panel, and 1948-1976 minus 1925-1947 for the lower panel. (after Minobe and Maeda 2005)

sak 教授が私をどなたかに紹介する際にそこを憶えていてほめていただきましたので、アピールにはなったのだろうと思います。

十年変動研究をある程度やって行くと、だんだん自分ができる面白いことが減っていきました。研究を始めたころには気がついてなかったのですが、私が一番力を入れていた発見的な研究が重要になるのは、ある研究分野が成長していく段階です。その後は、現象の解明の方に重点が移ります。発見が一巡したら、もう発見するべきことは無くなるわけです。発見的な研究を志向すると、研究分野の参加者が増え、パーティーが盛り上がっているその時に、そこを離れることになるというちょっと寂しい役回りになります。そこで解明も手掛けてみよう、東大の気候システム研究センター(当時)が開発した大気

海洋結合モデルをお借りして、北大のスーパーコンピュータで回してみましたが、計算代金の制約から十分な長期積分はできず、結合モデルでの解明研究は断念しました。

世界的な十年変動研究では、いくつか残念な点や残された課題もありました。残念な点の一つは観測研究を十年変動自身にはやりようがないので、観測研究者を巻き込んで盛り上がれなかったことです。次に研究を行う分野を探す際には、観測とより接点を持ちやすい研究分野がいいと感じました。他方、残された課題で最大のもは、結局北太平洋の十年変動の本質が何か、メカニズムが何であるかにコンセンサスが得られなかったことです。研究を始める前に思い描いていた十年変動研究の発展は、データ解析屋が十年変動の特徴を発見・記述すれば、

理論屋・モデル屋がメカニズムを解明するという経過でしたけれど、そうはなりません。メカニズムの提案は多数あったのですけれど、どれが正しいかのコンセンサスは得られなかったのです。その大きな理由は、現象に対して十分長い観測データが得られていないことです。なお、このコンセンサスの欠落は、現在盛んな十年予測 (decadal prediction) の北太平洋研究にも、暗い影を投げかけています。その一方で、やり残されたメカニズムの俯瞰的理解と一定の合意が、十年予測研究を通じて可能となるかもしれないという希望もあります。

十年変動のメカニズムが決着できなかった理由の一つが、中緯度の海洋が大気に与える影響がよく分からないことです。数年程度の時間スケールでは SST 変動の多くは、大気変動によって生じますけれど、大気は基本的に白色的なスペクトルであるのに対して海洋は赤色のスペクトルを持つので、長周期では海洋が大気に影響する可能性は高くなります。しかし、大気上層や海洋の垂表層から中層の水温観測は、高々 50 年程度のデータしかありません。そこから影響の有無を 20 年やそれよりも長周期の現象について判断するのは不可能です。それなら数値計算で調べようということになるのですが、Kushnir *et al.* (2002) が、中緯度海洋が大気に与える影響はモデルによってバラバラであることを明確に示して、数値モデルで結論を得るという方向も暗礁に乗り上げました。こういった問題から、大気に対する海洋の寄与の有無を調べるには、何が起きているかを素過程研究の立場から一步一步着実に明らかにして行くことが必要だろうと思うようになりました。ただし最終的な結論を得られるまでには、おそらく相当長い時間がかかります。

4. 中緯度大気海洋相互作用研究

十年スケール変動の次の研究分野をどうしようかと意識し出した少し前に、ハワイ大の謝尚平さんや北大の谷本陽一さん、時長宏樹さん、そして海洋研究開発機構の野中正見さんが、継続的に海上風速を計測する初めての衛星である QuikSCAT のデータを用いた研究を開始していました。それまで見ることでできなかった海洋が大気に与える効果を、明確に示す斬新な結果が次々出てきました (Xie *et al.* 2001; Nonaka and Xie 2003)。Quik-

SCAT はまさに大気海洋相互作用研究にブレークスルーをもたらしたのです。この海上風自体魅力的な研究対象ではありますが、しかしそれだけでは直接には高度 10 m での風を表すだけですし、その示唆するところも高度数百 m から 1 km までの大気境界層に限られます。一方、経年変動や十年変動に伴う中高緯度での大気の変動では、10 km を超える対流圏全層がおおむね同じ方向に動く、等価順圧と呼ばれる運動が卓越します。それらの変動で大事になるのは大気境界層よりも上の自由対流圏と呼ばれる大気層が海洋に応答するかどうかです。ここに足がかりを見つければ、もっと面白いだろうと考えました。

自由対流圏の応答を代表する観測データとして、一番脈がありそうなのは衛星で計測される雨だろうと思って、ちょっと時間があつた時に衛星降水データをダウンロードしてその図を描いてみました。すると、目を疑うほど綺麗にメキシコ湾流にそった降水帯が見えました (Fig. 9a)。これはメキシコ湾流がその上の大気に直接的な影響を与えていることを意味し、中緯度大気海洋相互作用研究においてブレークスルーとなる可能性を持ちます。そこで、「これを膨らませて Nature か Science に挑戦しよう」と考えました。そのためには、衛星データ解析だけでは迫力不足なので、(独)海洋研究開発機構の小守信正さん、吉田聡さんを共同研究にお誘いしたところ快諾していただき、AFES (Atmospheric General Circulation Model for Earth Simulator) の結果も含めてまとめることにしました (Fig. 9bc)。Fig. 9a の結果だけでも、メキシコ湾流が降水帯をもたらしていることを強く示唆するものですが、決定的とまでは言えません。データ解析では、変動については相関を計算して統計的に有意であることを示せますが、定常状態については強い証拠を示すことは難しいのです。そこで数値計算で現実的な SST を与える実験と (Fig. 9b) と滑らかにした SST を与える実験を行って (Fig. 9c)、確かに現実的な SST が、すなわちメキシコ湾流に伴う SST フロントが、メキシコ湾流上の降水帯に重要であることを示すことができました。また当方の学会発表で興味を持った謝さんも参加していただき、密接に相談できたことは論文を高めるのに非常に効果的でした。

この研究 (Minobe *et al.* 2008) を行っていた時に考え

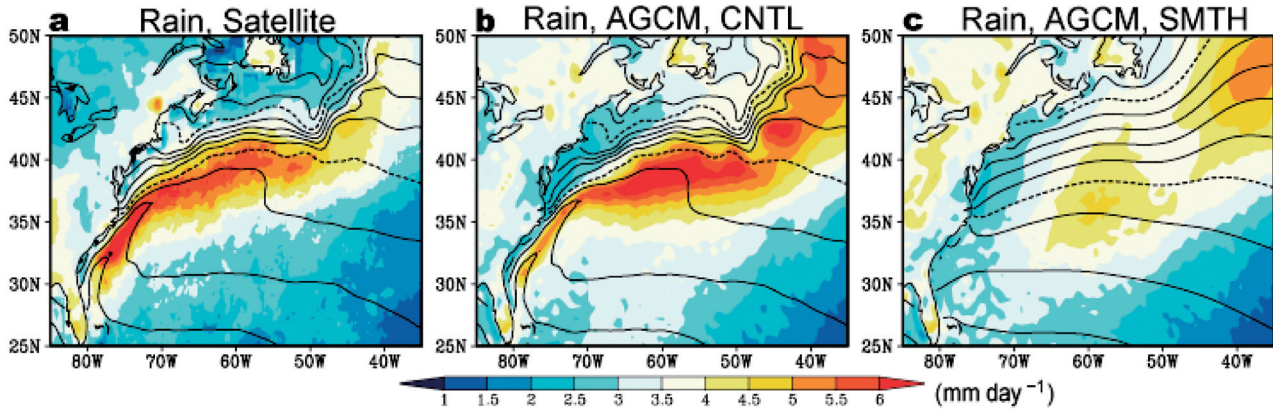


Fig. 9. Annual climatology of rain rate (a) observed by satellites, (b,c) in the atmospheric general circulation model with observed (b) and smoothed (c) SSTs. Contours are for SST, with 2°C interval and dashed contours for 10°C and 20°C. (after Minobe *et al.* 2008)

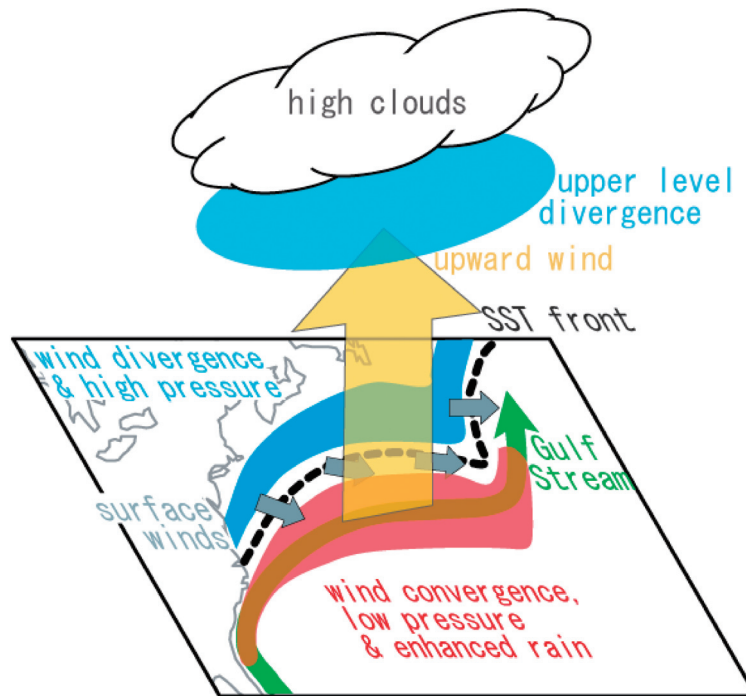


Fig. 10. Summary of the climatic responses to the Gulf Stream. On the offshore flank of the SST front (black dashed curve) of the Gulf Stream (green long arrow), surface wind convergence associated with low pressure (positive SLP Laplacian), and enhanced rain occur (red shade). On the onshore flank of the front, surface wind divergence associated with high pressure (negative SLP Laplacian) occurs (blue shade). The distribution of the wind convergence and divergence is closely associated with surface winds across the SST front (short gray arrows). Anchored by the wind convergence and enhanced precipitation, upward motion penetrates into the upper troposphere (yellow arrow). The upward wind velocity is associated with the upper-level horizontal divergence (blue oval) and frequent occurrence of high-level clouds. (after Minobe *et al.* 2008)

ていたのは、「ネタ3倍盛りで Nature か Science での出版を目指す。」というものです (Fig. 10)。この論文には、海上風の収束発散には海面気圧が応答する気圧調整メカニズムが重要でありそれが海面気圧のラプラシアンで評価できること、降水と高い雲の頻度そして上昇風がメキシコ湾流上で強く対流圏全体で海洋に応答していること、そして主要な特徴が AFES で再現できかつ SST を滑らかにするとそれらの特徴がなくなること、というそれぞれ十分一つの論文になるネタを圧縮して盛り込みました。おかげ様で、この論文は Nature に採用され、また非常に幸運なことに表紙を飾りました (Fig. 11)。表紙にするかどうかは科学の質によるのではない、と Nature のホームページにははっきり書いてあるのですが、やはり Nature の表紙というのは強い印象を与えるので、研究をアピールする上で非常に大きな効果があったと思います。この論文は、欧米でも幅広く報道していただきました。多くの方からお祝いの e-mail もいただきましたが、その中には面識の無いコンペヤーベルトで有名な Wallace Broecker 博士もいらっしゃいます。

実はこの 2008 年の論文を投稿する以前から「一回でいいから Nature か Science に論文を出したい。」と思っていました。そのモチベーションを高めるために、Science 誌の個人購読もしていました。身銭を切ると、意識がちょっとは違うのではと考えたのです。もっとも Nature ではなく Science を購読したのは、そちらが安かったからです。実際に自費だと送られてきた雑誌を全く見ないのは惜しいので、ある程度は目を通します。そうすることで、Nature や Science に出るにはどれだけの質が必要なのかが、だんだん見えてきたように思います。その視点からこの論文は、十分な価値があることは確信していました。といっても、これらの雑誌に載るかどうかは運の要素も強いので、実際に挑戦しよう、これができたら満足だと考えていたのは「Nature, Science にキャリアを通じて 10 回挑戦しよう。」というものです。なぜ 10 回かという、以前読んだ Nature の資料に日本人著者論文の掲載確率が 8% とあり、そこまでやれば採択確率を 5 割に持っていけるので (実際には 9 回で連続失敗確率が 5 割を切ります $0.92^9 = 0.47$)、5 割まで持っていける努力をすればダメでも納得できると考えたのです。もっともだんだん見る目もよくなるだろうから、10 回出すつも



Fig. 11. Cover of Nature journal in 13, Mar. 2008, for which Minobe *et al.* (2008) is adapted. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd., Nature Vol. 452, 13 March 2008, copyright 2008)

りなら、途中の 5 回目くらいではうまく行ってほしいとは期待していました。もちろん Nature, Science に出る論文がよい研究であるというわけではありませんけれど、よい研究をしようという動機付けにはなりました。

さらに中緯度大気海洋相互作用研究を豊かにしようと、現在も研究を続けています。夏と冬に異なる大気応答がメキシコ湾流上で生じていることをデータ解析から示して (Fig. 12), 大気 of 非断熱加熱の違いから deep heating mode, shallow heating mode と名付けました (Minobe *et al.* 2010)。Fig. 12 に示すように、メキシコ湾流の上昇気流は、冬季 (12 ~ 2 月) には対流圏下層 (気圧 850 hPa) に最大値を持ち、対流圏上層 (気圧 300 hPa) ではメキシコ湾流に対応した分布は失われる一方で、夏季 (6 ~ 8 月) には対流圏中層 (気圧 500 hPa) に最大値を持ち、対流圏上昇でもメキシコ湾流に対応した分布を示します。また、これらの大気応答の違いをもたらす、重要な要因が大気の成層であることを数値実験から示しました (Kuwano-Yoshida *et al.* 2010)。この二つ

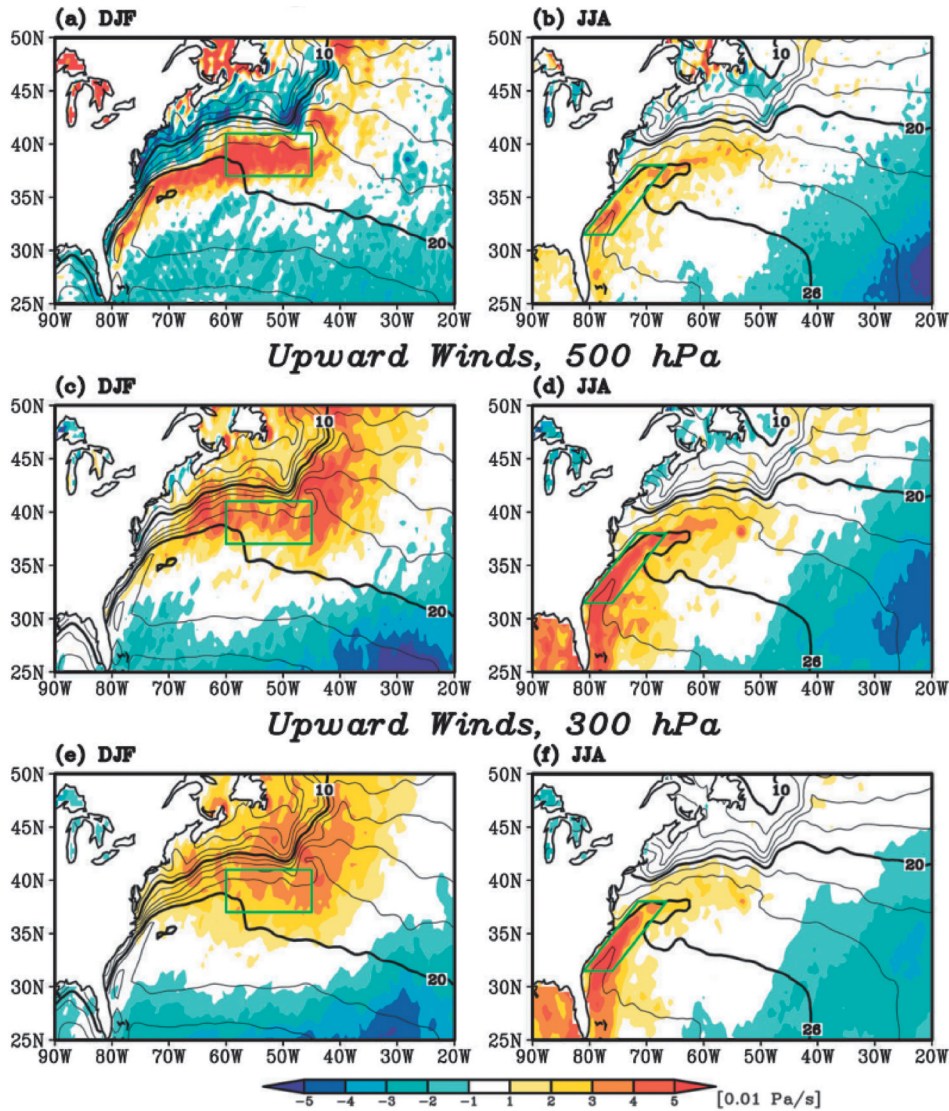


Fig. 12. Upward wind velocity ($10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) at (top) 850, (middle) 500, and (bottom) 300 hPa in winter (December–February, left) and summer (June–August, right). (after Minobe *et al.* 2010)

の大気応答モードのうち、shallow heating mode は普遍的に存在すると思われませんが、deep heating mode は大気対流による潜熱が重要であり、対流が生じるのに必要な高い SST が中緯度ではあまり見られないので、deep heating mode が存在する領域は限られます。その一つが梅雨期の東シナ海であり、ここでの黒潮上の大気応答もまた deep heating mode であることを示しました (Sasaki *et al.* 2012)。中高緯度の強い deep heating mode はおそらくこれらの二つの領域だけであり、このことは東シナ

海の黒潮に対する大気応答が、梅雨期という日本の社会生活に重要な季節にも、夏期の湾流上の大気応答とも共通する科学的な普遍性を持っていることを意味します。また新しい衛星データを利用する試みとして、東北大学の島田 照久さんと一緒に、衛星観測の大気温度分布から気圧調整メカニズムが普遍的に生じていることを示しました (Shimada and Minobe 2011)。

これらの研究のうち観測データの解析では、scale-separation strategy (Minobe *et al.* 2014) を用いています。

Scale-separation strategy は、大気の空間スケールは海洋の空間スケールよりも大きいので、大気場の中に海洋の空間スケールで、かつ海洋のフロントなどの構造と対応がよい構造を見つけられれば、それは海洋が大気に影響していると結論できる、という戦略です。この戦略を可能にするには、高空間分解能のデータが必要になります。例えば黒潮の幅は 100 km 程度ですから、それをある程度は解像できることが望めます。QuikSCAT データの緯度経度 0.25 度という格子解像度は、初めてこの戦略を使うこと可能にして、ブレイクスルーをもたらすことができました。

なお今度は十年研究の経験を生かして、パーティーが盛り上がっている最中に帰らなくてもよいように、数値モデルも取り入れました。大循環モデルをぶん回すのは無理でも、領域モデルなら十分な計算ができます。特に、当時大学院生だった高玉 孝平さんとの研究では、それまでになかった表層風のメカニズムの診断方法を立案し (Takatama *et al.* 2012), 原因解明に足がかりをつけることができました。

観測もやろうということで、愛媛大(当時)の磯辺 篤彦さん、鹿児島大学の中村 啓彦さん、長崎大学の万田 敦昌さん、情報通信研究機構の佐藤 晋介さんにご協力いただき、長崎大学長崎丸と鹿児島大学かごしま丸による船舶観測にも取り組みました。対象は以前から目をつけていた(たとえば Small *et al.* 2008) 東シナ海の黒潮における大気海洋観測です。東シナ海の黒潮は、上に述べた通り研究対象として興味深いですし、その位置が地形に固定されているため、計画を立てやすいという利点もあります。たとえば 2011 年と 2012 年の 6 月に行った、黒潮上を各年 3 往復した観測も、黒潮の位置が決まっているから可能でした。この 6 月の観測には、私も修士 2 年の白鳳丸の航海以来、実に 25 年ぶりに乗船しました。果たして見延は使いものになるだろうかと心配されたのですが、鹿児島大学の仁科 文子さんお勧めの船酔い薬のアポミン(現在は製造終了)を飲んで全く船酔いもせず、充実した航海でした。観測結果は、強力な観測メンバーのおかげで、Kasamo *et al.* (2014) をはじめとして、いくつかの論文としてまとまる予定です。

こういった大気海洋相互作用研究は、上に述べた通り谷本さん、野中さん、時長さんといった先駆的な研究も

あり、また東大の中村 尚先生をリーダーとする新学術領域研究「気候系の hot spot: 熱帯と寒帯が近接するモンスーンアジアの大気海洋結合変動」(2012 ~ 2016 年度)が強力で押し進めたことによって、国際的に見ても日本が大きな貢献を果たした研究分野であろうと思います。その新学術領域研究の 9 名の計画研究班代表のうち、3 名 (JAMSTEC・野中 正見さん、三重大・立花 義裕さん、見延) が、また黒潮大蛇行が低気圧の経路と東京の降雪に影響するという、大反響を呼んだ論文 (Nakamura *et al.* 2012) を主導した鹿児島大学の中村 啓彦さんも、竹内 謙介さんと同じ研究室で過ごしています。そのつもりがあつてかどうかはさておき、竹内さんが播いた大気海洋相互作用研究の種が、大きく育ったと言えるかと思えます。また北大・理の海洋物理学研究室を立ち上げた教授である、金成 誠一先生も TOGA-COARE (The Tropical Ocean Global Atmosphere-Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment, 熱帯海洋全球大気-結合海洋大気応答実験) における、熱帯大気海洋相互作用の観測に参加され、日本の大気海洋相互作用研究に重要な役割を果たされています。

5. 学際複合研究

前節のような海洋が大気与える影響の研究をして行くと、その動機が海洋の重要性を示すためにであっても、内容的にはどちらかと言えば海洋学というよりも気象学の色が強くなります。ここ数年は特に気象学的な研究を中心に行ってきたので、今はもう少し海洋学の方にウェイトを置きたいとも考えています。その際、「はじめに」で述べたように、海洋の物理の重要性を主張しようとする、海洋の物理以外を少なくとも視野に入れる研究を行う必要が出てきます。そこで最近、論文にするにはまだ至ってはいませんが、海洋生物地球化学の研究者と共同して海洋の物理的な変化が、生物地球化学の場に与える影響の研究も行っています。

海洋物理学と海洋生態系や海洋生物地球化学を絡める研究には、特有の難しさもあります。それらを「視野に入れる」研究を、海洋物理の研究者が行うことはできても、海洋生態系や海洋生物地球化学「自体」の研究を行うのは困難です。したがって、他分野との関係を保ちつ

つ海洋物理としての研究ができて論文も書け、研究費も取れる、うまい着地点を見つける必要があります。この点は、学際研究における「エコシステム」をデザインする上でも重要です (Minobe 2014)。もちろん、海洋生態系研究に共著者として参加するというやり方もあり、私自身も、マイワシ (Yasuda *et al.* 1999) や海鳥 (Byrd *et al.* 2008; Watanuki *et al.* 2009; Bond *et al.* 2011) や化石サンゴ (Watanabe *et al.* 2011) を対象として、いくつかの研究に加わらせていただきました。しかしそれだけでは、海洋物理の研究者が第一著者として論文を書けないですし、自分が主になって研究費も取れません。これは特に若い研究者にとっては、本筋としてやっていける方向ではないのです。そこで海洋生態系や海洋生物地球化学にも影響する、海洋の物理環境の変化や物理プロセスを明らかにして、「海洋物理研究の価値を高める」ことができると考えています。

また海洋物理学自身で社会にも重要な研究分野としては海面上昇があります。特に日本の東方沖では全球平均よりも大きい海面上昇が予想されているので (たとえば Yin *et al.* 2010; Church *et al.* 2013), 我が国にとっても重要な問題です。東日本大震災に関連して、しばしば「想定外」という言葉を聞きました。そこで感じたのは、「不可避の想定外もあるだろうけれど、怠慢や意図的な想定外は、特に重要な帰結をもたらしかねない場合には許されない」、ということです。将来の海面上昇が日本のどこでどれだけ上がるのかを、妥当な方法で推定し、合理的な想定を提供することは、おそらく測地学や気象学などの他分野との共同も必要となるでしょうけれど、我が国の海洋学として重要な責務であろうと考えています (岡ら 2013)。また海面上昇は、社会的な重要性和学際性が高い一方、従来から知られている海洋循環の強化弱化やロスビー波・沿岸捕捉波の伝播や (たとえば Sasaki *et al.* 2008), ハワイ大にいた当時の佐々木 克徳さんが見出したジェット捕捉ロスビー波 (Sasaki and Schneider 2011a,b; Sasaki *et al.* 2013) も日本沿岸の水位変動に影響する (Sasaki *et al.* 2014) というように、海洋力学の本流とも密接に関係するという点でも海洋物理学の研究者としてやりがいの大きい研究分野でもあります。

これらの研究分野では、温暖化にともなう気候変化を意識せざるをえません。そこで重要になるのが、IPCC

報告書に用いられている、Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) にアーカイブされている大気海洋結合モデル結果です。実は私は、将来予測を行う数値モデルには軽い不信感を持っていました。多分、観測データのデータ解析を主に行っていたため、観測データと比較できないモデルだけの世界を怪しく感じたのでしょう。しかし最近の研究を見ていて認識を改めました。CMIP5 が提供するものは、多数のバーチャルな地球です。現実の地球では実験ができないという地球科学の本来の限界を、多くのバーチャルな地球を調べることである程度克服できます。また、現実の地球においてフロンティアが縮小していくなかで、バーチャルな地球群が新しいフロンティアとなってもいます。日本はこの新たなフロンティアへのゴールドラッシュに乗り遅れた感がありますが、かといって今後もそこを使わないという訳にはおそらくいかないでしょう。バーチャルな地球群が、気候研究では科学基盤の一つとなりつつあるからです。我々の研究室でもこの1年ほどCMIP5の解析を行っています。データの取得や加工を含めてなかなか大変です。一部のデータを取得しただけでも、オリジナルデータで6 TB、我々が使いやすく変換したデータを含めると10 TBほどになります。日本からだと欧米のセンターのデータを入手するにも、地理的な条件からダウンロード速度が遅くて時間がかかりますし、海洋のデータはサイズも大きく扱いもいろいろと厄介です。私自身相当な時間を費やして、ダウンロードやデータ変換を行うプログラム・スクリプトを整備し、実際のダウンロード作業を行っています。こういった作業を研究者自身が行わなくてはならないのがサポータースタッフが乏しい日本の弱点の一つであり、日本の海洋または大気海洋コミュニティとして、この新しいフロンティアを活用するために体制の整備が必要ではないかと思えます。

6. おわりに

以上のように、主に大気と海洋の関係を明らかにするための研究を行ってきました。海洋から大気への影響を見出すために、大気だけでは説明できない海洋の寄与を示す特徴を、大気の中に探してきました。熱帯研究では大気の遅い伝播に、十年変動研究では大気に見られる周

期性に、大気海洋相互作用研究では海洋の空間スケールでありながら大気中に生じる構造に、海から大気への影響を求めてきたのです。これらを核にして、関連する研究も行ってきました。その一方では、撤退したり、ある程度は行ったけれどやめたり、うまく行かなかったり、不発だったということも、ご紹介したようにたくさんあります。ひょっとすると、私は失敗の率が多い方かもしれません。それも含めて、全体としては良かった、tryしたから errorもあるのだということにしておきたいと思えます。

さて50歳を過ぎると、少しは「日本のために」、などと私も考えるようになりました。具体的には、「国際的な土俵を、少しでも日本にメリットがあるように整えられないか」と思っています。というのも、欧米が中心となっている今日の気候・海洋研究では、国際的なテーマ設定なども、それらの国がしたい方向になりがちだからです。東北大学の須賀 利雄さんから CLIVAR Pacific Panel と PICES の連携を相談しないかという話があったこともあり、ここ2・3年は CLIVAR でもっと日本の周辺領域を含め、北太平洋研究が盛んになるよう働きかけてもいます。もちろん熱帯や極域の研究も重要ですが、日本の研究が一番盛んである北太平洋中緯度域とその縁

辺海は CLIVAR の研究活動では空白域になっているので、日本の研究がより高く評価されるようにする上でも大事な領域だと考えています。そこで、2012年の4月にはニューカレドニアの CLIVAR Pacific Panel meeting に押しかけ、2013年5月にはドイツの CLIMVAR science stirring group meeting に参加し、同年7月には中国の Pacific panel meeting に出て、ドアをたたいています。Fig. 13 は2013年の Pacific Panel meeting に持っていった図で、それまで CLIVAR が中心としてきた大気海洋相互作用の方向だけではなく、海洋の物理的な状態がどう海洋生態系・生物地球化学に影響するのかも、重要な方向であるということを示しています。この図は、当時の CLIVAR の共同議長によって、CLIVAR SSG 会合などでも使ってもらっていました。もっとも国際的な働きかけが具体的に進むかという、なかなかうまくは行きません。ただ札幌に居るとなかなか中央のことはタッチしがたいと感じているので、国際的な面をできるかぎり(=旅費が続くかぎり)頑張るとするのが、自分ができる貢献の一つでしょう。こういった面では、若いこれからのプレーヤーのために、コート整備をしていこうという気持ちです。

もっとも、自分でももう少しはプレーしたいとも考え

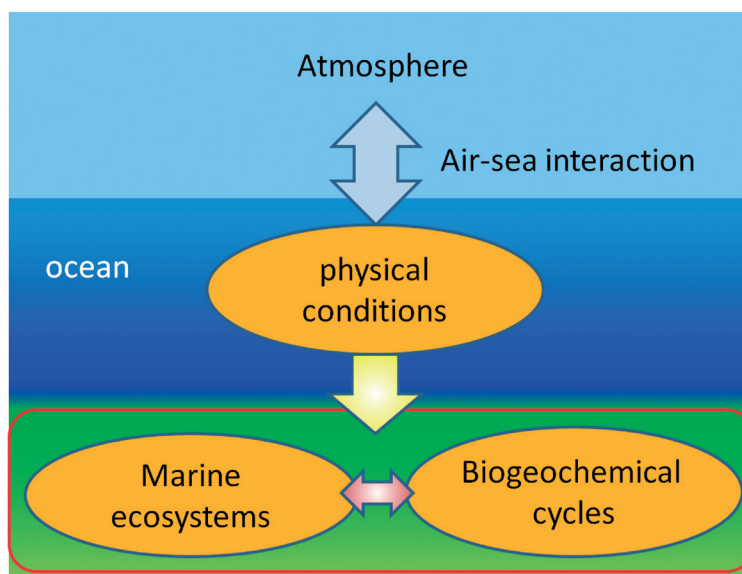


Fig. 13. A schematic indicating that physical conditions of the oceans are important in the atmosphere and in marine ecosystem/biogeochemical cycles.

ています。若い頃のようにはいきませんが、やはり研究は面白くエキサイティングです。学生の皆さんの成長を見るのも、うれしいことです。気候システムの中の海という視点でこれまで楽しく研究ができ、大変に幸運であったと思います。その幸運に感謝し、少しでも恩返しをできるよう、これからも努力し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。海洋学の道に入るきっかけを作っていただき、時間がかかるところを見守り、自分の力を伸ばす指導をしていただいた竹内 謙介先生には深く感謝しています。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。池田 元美先生には、アラスカ・フェアバンクスの国際北極研究センターに参加させていただきました。日比谷 紀之先生には、その深い研究内容を身近に見ることができ、研究者としてのあり方を含めてとても勉強になりました。林 祥介先生には、運営で鍛えていただき、その後いろいろな場面で自信を持つことができました。若土 正暁先生、植松 光夫先生、齋藤 宏明さん、にはそれぞれの大型プロジェクトに参加させていただき、大きな支援と刺激を受けました。現在研究室を一緒にさせてもらっている、稲津 将さん、佐々木 克徳さん、Hanna Na さんには、研究でもまた運営でも大変助けてもらっています。博士研究員として一緒に働いていただいた、須股 浩さん、青木 邦弘さん、Chris O'Reilly さんには、プロジェクトを支えていただきました。また、様々な研究を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、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が、熱心により研究をしていただき心から感謝しています。また、推薦・選考して下さいの方々、ならびに学会員の皆様に厚く御礼申し上げます。

References

- Bond A. L., I. J. Jones, W. J. Sydeman, H. L. Major, S. Minobe, J. C. Williams and G. V. Byrd, (2011): Reproductive success of planktivorous seabirds in the North Pacific is related to ocean climate on decadal scales. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **424**, 205–218.
- Byrd G. V., Sydeman, W. J., Rennera, H. M., and S. Minobe, (2008): Responses of piscivorous seabirds at the Pribilof Islands to ocean climate, *Deep Sea Res. II*, **55** 1856–1867.
- Chavez, F. P., J. Ryan, S. E. Lluch-Cota, and Niquen, (2001): From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, **299**, 217–221.
- Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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.
- Hirst, A. C. (1988): Slow instabilities in tropical ocean basin-global atmosphere models. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 830–852.
- Kasamo, K., A. Isobe, S. Minobe, A. Manda, H. Nakamura, K. Ogata, H. Nishikawa, Y. Tachibana, and S. Kako (2014): Transient and local weakening of surface winds observed above the Kuroshio front in the winter East China Sea. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 1277–1291, doi:10.1002/2013JD020610.
- Kushnir, Y., W. A. Robinson, I. Blade, 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.
- Kuwano-Yoshida, A., S. Minobe, and S.-P. Xie, (2010): Precipitation response to the Gulf Stream in an atmospheric GCM. *J. Climate*, **23**, 3676–3698.
- 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. Am. Met. Soc.*, **76**, 1069–1079.
- Minobe, S., and K. Takeuchi, (1995): Annual period equatorial waves in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **100**, 18,379–18,392.
- Minobe, S., (1996): Detection of an annual westward propagating signal in the meridional wind component along 8°N in the Pacific. *J. Climate*, **9**, 1661–1668.
- 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., and N. Mantua, (1999): Interdecadal modulation of interannual

- atmospheric and oceanic variability over the North Pacific. *Progress in Oceanography*, **43**, 163–192.
- Minobe, S., (2000): Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Progress in Oceanography*, **47**, 381–408.
- Minobe, S., Y. Kanamoto, N. Okada, H. Ozawa and M. Ikeda, (2000): Plume Structures in Deep Convection of Rotating Fluid. *Nagare Multimedia 2000*. (internet journal, <http://www.nagare.or.jp/mm/2000/minobe/index.htm>)
- 見延 庄士郎, (2001): 日本の気候変動と中高緯度の大気・海洋変動, in 海と環境: 海が変わると地球が変わる, pp88–98, 日本海洋学会編, 講談社, pp. 244.
- Minobe, S., T. Manabe, and A. Shouji, (2002): Maximal wavelet filter and its application to Bi-Decadal Oscillation over the Northern Hemisphere through the 20th century. *J. Climate*, **15**, 1064–1075.
- Minobe, S. and T. Nakanowatari, (2002): Global structure of bidecadal precipitation variability in boreal winter. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1396, doi: 10.1029/2001GL014447, 22 May 2002.
- Minobe, S. (2002): Interannual to interdecadal changes in the Bering Sea and concurrent 1998/99 changes over the North Pacific. *Progress in Oceanography*, **55**, 45–64.
- Minobe, S., and M. Nakamura, (2004): Interannual to decadal variability in the southern Okhotsk Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S05, doi: 10.1029/2003JC001916.
- 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. 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
- Minobe, S., and A. Maeda, (2005): 1-degree SST dataset compiled from ICOADS from 1850 to 2002 and Northern Hemisphere frontal variability. *Int. J. Climatol.*, **25**, 881–894.
- 見延 庄士郎, (2008): 理系のためのレポート・論文完全ナビ, 講談社, pp.160.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie, and R. J. Small, (2008): Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, **452**, 206–209, doi: 10.1038/nature06690.
- Minobe, S., M. Miyashita, A. Kuwano-Yoshida, H. Tokinaga, and S.-P. Xie, (2010): Atmospheric response to the Gulf Stream: Seasonal variations. *J. Climate*, **23**, 3699–3719.
- Minobe S. (2014): More attractive science ecosystem design for FUTURE and beyond: A personal view from a researcher in a peripheral field. *PICES Press*, **22**, 6–8.
- Minobe S., B. Qiu, M. Nonaka, and H. Nakamura, (2014): Air-sea interaction over the western boundary currents in the western North Pacific. In *Indo-Pacific Climate Variability and Predictability*, Vol. 7, World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, edited by T. Yamagata and S. Behera, World Scientific, Singapore, in press.
- Nakanowatari, T. and S. Minobe, 2005: Moisture balance for bidecadal variability of wintertime precipitation in the North Pacific Using NCEP/NCAR reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **83**, 453–469.
- Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe, 2012: Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, **25**, 7772–7779.
- 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.
- Nonaka M., and S.-P. Xie, (2003): Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmosphere feedback. *J. Climate*, **16**, 1404–1413.
- 岡 英太郎・磯辺 篤彦・市川 香・升本 順夫・須賀 利雄・川合 義美・大島 慶一郎・島田 浩二・羽角 博康・見延 庄士郎・早稲田 卓爾・岩坂 直人・河宮 未知生・伊藤 幸彦・久保田 雅久・中野 俊也・日比谷 紀之・寄高 博行, (2013): 海洋学の10年展望(1) —日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から—, 海の研究, **22**, 191–218.
- Okada, N., M. Ikeda and S. Minobe, (2004): Numerical experiments of isolated convection under polynya. *J. Oceanogr.*, **60**, 927–943.
- 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., S. Minobe, N. Schneider, T. Kagimoto, M. Nonaka, and H. Sasaki, (2008): Decadal sea level variability in the South Pacific in a global eddy-resolving ocean model hindcast. *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 1731–1747.
- Sasaki, Y. N., and N. Schneider, (2011a): Decadal shifts of the Kuroshio Extension jet: Application of thin-jet theory. *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 979–993.
- Sasaki, Y. N., and N. Schneider, (2011b): Interannual to decadal Gulf Stream variability in an eddy-resolving ocean model. *Ocean Modelling*, **39**, 209–219.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, T. Asai, and M. Inatsu, (2012): Influence of the Kuroshio in the East China Sea on the early summer (Baiu) rain. *J. Climate*, **25**, 6627–6645.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, and N. Schneider, 2013: Decadal response of the Kuroshio Extension Jet to Rossby waves: Observation and thin-jet theory. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 442–456.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, and Y. Miura (2014), Decadal sea-level variability along the coast of Japan in response to ocean circulation changes, *J. Geophys. Res. Oceans*, **119**, 266–275, doi: 10.1002/2013JC009327.
- Shimada T. and S. Minobe, (2011): Global analysis of the pressure adjustment mechanism over sea surface temperature fronts using AIRS/Aqua data. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi: 10.1029/2010GL046625.
- Small, R.J., S.P. deSzoeke, S.P. Xie, L. O'Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, and S. Minobe (2008): Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn. Atmos. Oceans*, **45**, 274–319.
- Takatama, K., S. Minobe, M. Inatsu, and R. J. Small, (2012): Diagnostics for near-surface wind convergence/divergence response to the Gulf Stream in a regional atmospheric model. *Atmos. Sci. Lett.*, **13**, 16–21.
- Trenberth, K. E., (1990): Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Am. Met. Soc.*, **71**, 988–993.
- Tziperman, E., Stone, L., Cane, M. A., and H. Jarosh, (1994): El-Nino chaos-overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, **264**, 72–74.
- Watanabe, T., A. Suzuki, S. Minobe, T. Kawashima, K. Kameo, K. Minoshima, Y. M. Aguilar, R. Wani, H. Kawahata, K. Sowa, T. Nagai and T. Kase, (2011): Permanent El Niño during the Pliocene warm period. *Nature*, **471**, 209–211.
- Watanuki Y, Ito M, Deguchi T, and S. Minobe, (2009): Climate-forced seasonal mismatch between the hatching of Rhinoceros Auklets and the

- availability of anchovy, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **393**, 259–271.
- Xie, S.-P., W. T. Liu, Q. Y. Liu, and M. Nonaka. (2001) Xie : Far-reaching effects of the Hawaiian islands on the Pacific Ocean-atmosphere system. *Science*, **292**, 2057–2060.
- Yamamoto, R., T. Iwashima, N. K. Sanga, and M. Hoshiai, (1986). An analysis of climate jump. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **64**, 273–281.
- Yasuda, I., H. Sugusaki, Y. Watanabe, S. Minobe and Y. Oozeki, (1999) : Interdecadal variations in Japanese sardine and ocean/climate. *Fish. Oceanogr.*, **8**, 18–24.
- Yin, J., S. M. Griffies and R. J. Stouffer (2010) : Spatial variability of sea level rise in twenty-first century projections. *J. Climate*, **23**, 4585–4607.

Analytical studies from processes to decadal scale air-sea coupled variability

Shoshiro Minobe[†]

Abstract

Two major fluids of the earth are the ocean and the atmosphere, each of which influence the other. The influence of the atmosphere onto the ocean is strong and clear, while the opposing oceanic influence onto the atmosphere is not well understood. In this paper, several results of co-variability of the ocean and the atmosphere and interaction between them are introduced. Specific topics are seasonal variability over the tropical Pacific, decadal variability over and around the North Pacific, and mid-latitude air-sea interaction from a point of view of process-oriented studies. In order to identify oceanic impacts onto the atmosphere, especially using data analysis, it is useful to detect key features. Such key features are propagation signal commonly found in the atmosphere and the ocean with a speed of oceanic propagation for annual variability over the tropical Pacific, oscillation in the atmosphere for the decadal variability, and atmospheric signatures on oceanic spatial scales for the mid-latitude air-sea interactions. Some ideas behind the studies are also introduced.

Key words : air-sea interaction, atmosphere-ocean variability, propagation, pentadecadal oscillation, bidecadal oscillation, atmospheric boundary layer, free troposphere, scale-separation strategy

(Corresponding author's e-mail address: minobe@sci.hokudai.ac.jp)

(Received 26 March 2014; accepted 14 May 2014)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2014)

[†] Department of natural history sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
N10, W8, Kitaku, Sapporo, 060-0810, Japan
TEL/FAX: +81117062644
e-mail: minobe@sci.hokudai.ac.jp