

「観測とモデルを融合して全層全球海洋を診断する」 淡路敏之教授（水圏地球物理学講座）

スライドには水圏地球物理学講座ではなく「海洋物理学研究室」と書いてありますが、ずっとこれを通してありますのでご容赦下さい。本日の話は昨年10月に京都大学の春秋講義と殆ど同じですので、聞かれた方は我慢願います。

海の診断は通常、表層900mくらいまでですが、私たちは5000~6000mの深層まで診断できるよう努めています。何故かということ、後で紹介しますが最近、まあbreak throughになるような深層の現象が観測されるようになってきたことと関係しています。

さて、IPCC第4次報告で話題となった地球温暖化による海面水温の上昇、つまり今までより何度上がるかについては、先ほど原田先生がお話されましたので申し上げます。「温度が何度上がるか？」、これは日本語では予測といっていますが、予測の英語はpredictionで、欧米では温暖化予測にはprojectionを使っています。Projectionにはシナリオがあり、それに基づけばどうなるかということで、シナリオが間違っていたら意味をなくします。欧米ではアナウンサーですらprojectionと言ってpredictionと区分しています。

水蒸気は温暖化の要因とされていますが、一方で水は蒸発して潜熱を奪うことにより、大気層だけなら自然界の地上平均気温は36°となるとの推定値が、海洋・陸面と大気間での水循環によって19°程度にまで低下します。これが自然界のベースとなる平衡気温です。学生さんには「水は二面性をもっている」と話しています。

本題に戻りましょう。何故、海洋の全層を見る必要があるのか説明します。AR4報告では、最近10年間の海面上昇は年3.1mmくらいとされています。そのうち熱膨張が半分くらいで、あとは氷河が溶けること等により水位が上がります。この調子で進むと今世紀中には日本のほほすべての海岸で大土木工事が必要となるほど上昇するのではないかと言われていますが、これには海面から深さ300mまでの平均水温（300m深までの熱容量）が大切です。昨年、世界のデータ同化の先進機関が東京に集い、上層海洋の水温が全球や北太平洋、赤道等の各海域でどうなっているか、その推定結果を持ち寄り論議しました。その結果には海域によって明らかに上昇の程度に違いがあります（図1参照）。顕著なのは北大西洋で、アメリカやヨーロッパは相当な研究費を投じて調査・研究を強化し始めました。米国のGFDLグループは1年間10億円程度かけ、そのためのデータ同化を開始しました。

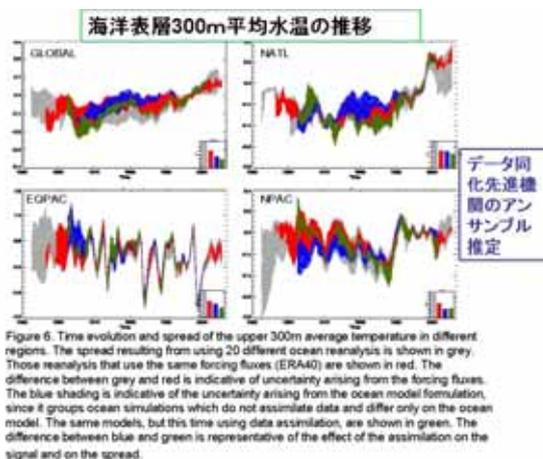


図1. 大洋別上層300m平均水温の推移

一方、世界各国の機関が協力して世界の海の状態を監視・予測しようという、約 10 年間に及んだ国際組織 GODAE(Global Ocean Data Assimilation Experiment)が昨年 12 月に成功裏に終了しました。これはモデルと観測を融合する新技術であるデータ同化を開発・適用して世界中の海を推定するとともに、それを境界条件に使用して沿岸実用予測を行うという project でした。フランスでは、ヨットレースに役立つ情報を提供するところまで公開・サービス機能が進んでいます。主な参加機関は、オーストラリアの Blue Link、わが国では K7 と呼ばれる京大・JAMSTEC 連合、気象研究所、アメリカの MIT や NASA/JPL、海軍研究所など、ヨーロッパではイギリスの UKmet、フランスの MERCATOR、イタリア、中国からは大気科学研究所等で、年に数回集まって進捗を議論し合い、調整・企画、現業化を進めてきました。それぞれの実施結果は intercomparison をして品質を相互チェックしています。

ここまでは表層・上層の話をしてきましたが、JAMSTEC の深澤さんのグループが 2003 年に北太平洋北部の深海 5000 ~ 6000m で、この 10 年間に 0.01 から 0.003 くらい昇温している事実を発見しました。表層の厚さは数 100m 程度ですが、深層は層が厚く数 1000m といった厚さをもっていますので、水位上昇に相当程度影響する可能性があります。深層温暖化という予想外の発見は Nature に掲載されましたが、どうしてそうなったのかは分からないままでした。私たちのグループはその原因を突き止めるべく、4 次元変分法データ同化システムを使って逆解析を行い、そのルートも含めほぼ解明しました。

一方、人類起源の CO₂ は 4~5 年かかって表層から中層に沈み込み、循環しながら一部は数十年後に熱帯の海面から大気へ逆放出されるのではないかとされています。このような物質循環をしっかりとモニターしなければいけません。温暖化物質がらみで言いますと、表面から中層までの海の状態を知らねばなりません。

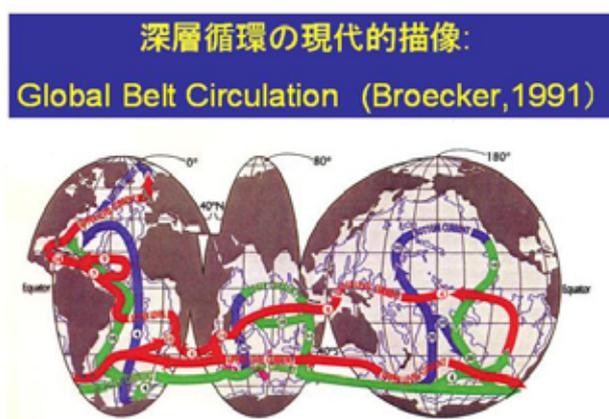


図 2 . 世界海洋循環の模式図(Broecker(1991)より)

以上から、表層から深層まで現況診断できるようなシステムを作る必要があります。特に大気にくらべ海質量は約 300 倍、熱容量は約 1000 倍で、海はゆっくりと動きますので、温暖化や物質循環は長期的に考えることが大切です。この図(図 2)は全球での海水の動きで、2000 年から 3000 年かけて世界の海を巡ります。Global Belt Circulation と呼ばれています。

なぜ現況診断が大切かといえは、たとえばメカニズムを解明するには正しい現況認識が必要で

す。実証主義です。それが解った上で対策を練ることが必要で、精度のよい将来像づくりに重要です。現状は、やっと現状認識ができそうなツールが出来たという段階で、使用可能な多種多様なデータを使いながら現象を復元し、メカニズムを解明して行こうとしているところです。こうすれば過去の事象とその物理が分かりますし、予測能力の向上に役立つだろうと考えています。海を知る手段に観測とモデルがあり、お互い一長一短があります。これらの良いところ取りをするのがデータ同化です。全てを利用・組み合わせることになりますので、読売新聞社が取材にこられたときに「総力戦をやるんですね」と言われました。

最近では人工衛星を使って広域を准同時に測ることができるようになりました。これは大変有効ですが、残念ながら電波計測のため、海の中は分かりません。そこで、海中は従来同様、船舶等現場観測に頼らざるをえません。最近では自動ブイの ARGO (アルゴ) フロートという先端計測器が出現しました。これは大体 10 日間かかって 2000m くらいまで沈降し、水温、塩分を測りながら 20 日周期で上昇、周辺を通る人工衛星に情報を伝えてまた潜航するという優れものです。これまでは水温と塩分だけを計測していましたが、ごく最近、目的アルゴが開発されて炭素も測る、また沿岸付近ではライダー観測をやるうとか、観測手法も随分賑やかになりました。海も大気と同様、機動的な観測が実現されつつあり、先端的な観測データを使いながら状態推定をやってみようということです。

人工衛星は海面情報を正確に与えてくれます。例えば 2008 年 10 月 1 日の海面水温(SST)の全球の状況だという図を見せられても、皆様はほとんど疑いません。全球で水温の最も高い西武熱帯太平洋の warm water pool とされる所の熱が東部へ移りますとエルニーニョが発生します。高水温域が移動すると大気を温める煙突の位置が変わるので、大気循環が変わり気候変動が生じます。海面高度(SSH)のデータから地衡流平衡を使えば海の表層循環の概容は分かります。外洋域ではジオイドの精度が良いので、衛星の時系列アノマリーデータを使って大規模から中規模スケールまでの表層の流れの実況は大体分かるようになりました。しかし、陸の近くではジオイドがかなり不正確で、海面高度計だけからでは流れの絶対場は分かりづらい。衛星データから情報の精度と応用可能性を高めるにはどうしたらよいか、付加価値のあるデータセットが求められており、その一つの有効な候補がデータ同化だと期待されています。

アルゴと呼ばれる自動ブイの長さは 1m 程度で、2000m まで潜り込んでは這い上がるという動作を周期約 10 日で水温・塩分を計測しつつ繰り返します。これによって、水温や塩分の 3 次元分布が飛躍的に分かるようになってきました。図 3 はアルゴブイの 2001 年以降の放出の空間分布とその後のブイの動きの様子を示しています。北太平洋の大部分は日本が、北大西洋はアメリカとヨーロッパが連携しながら調べています。3000 個のブイで全球がカバーできちるようには見えませんが、実際の空間分解能は 4 度とか 5 度で、まだまだ不十分です。役所にお見せするときは図中の丸印を小さくしないと、これで十分だと誤解される可能性があります。このようなアルゴと船舶やライダーなどを使って、全球の海洋の現況をそれなりに推定できます。

広域的なアルゴフロートバイ展開と3次元な熱・淡水輸送の把握

- アルゴフロートの全球的展開(A)により、海中(0-2000m)の水温(熱)、塩分(淡水)の分布が月毎に把握できる(B)、(C)。
- 密度分布も分かるため、衛星データと組み合わせることにより海中の流れが得られ、熱・淡水の輸送が計算可能となる。

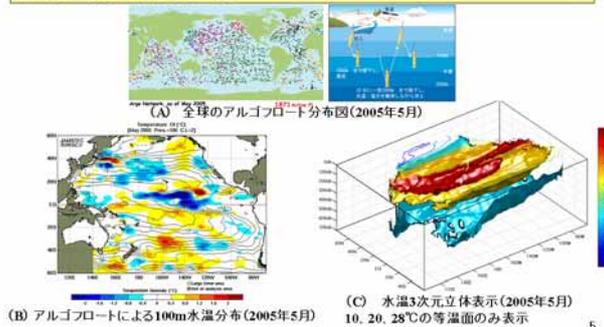


図3 . アルゴフロートの全球展開と結果の例

さて、知る基礎となる観測データですが、2000m 以深のデータは現実には極めて限られます。従って、深層まで知ろうとすると、現状の観測データは不十分で、上・中層のデータ情報を下層まで延伸できれば好都合です。これはモデルのがんばりどころです。すなわち、水平方向同様、鉛直方向にも多くのデータのある表層からデータの少ない深層へモデルにより情報を何とか橋渡しをしてやろうという訳です。このような数値モデルによる観測データの力学補間もデータ同化の役割です。データ同化は広義には、観測データと数値モデルの双方から有用情報を取り出して数理物理学的に組み合わせ、最適な場や条件を求める手法です。

観測データの少ない深層を含む場合、従来の同化に良く使われてきた OI と呼ばれる最適内挿法では無理があり、モデルもさらに機能的にしなければならないし、高度な同化手法を使わなければなりません。では、現状のシミュレーションの完成度はどの程度でしょうか。このムービーは地球シミュレータセンターのグループが行った結果です。分解能は全球約 10km で海面水温分布を示しています。季節変化や黒潮続流域の渦、湾流の変動がうまく表現されています。

北大西洋と北太平洋の決定的な違いは、前者では湾流の高温高塩水が北岸近くまで北上するため、北部海域では猛烈に海水が蒸発し、冷やされて重くなり、さらに海氷が生成される際にブラインと呼ばれる高塩水が吐き出されるので、4000 ~ 5000m まで沈む高密度水ができる。一方、後者では高温高塩な黒潮水は房総から東流後南下するので、北太平洋の北部では冷やされてもそれほど高塩なブラインは排出されず数千 m まで沈降する高密度水はできません。シミュレーション結果が示すように、喜望峰沖を通りインド洋から大西洋へ向かう表層の経路の実態は流れではなく渦輸送です。このようにモデルは定性的だけでなく定量的にも良くなっているのですが、一体どのくらいのレベルなのか、いろいろ調べました。これは先ほどの結果のスナップショットです。モデラーが重視する季節変化を見ますと、観測結果とよく合っているように見えます。しかし anomaly についてであって、絶対温度場を見ると観測結果と結構相違しています。要するに、水温の年平均場の再現に未だ問題があります。海洋と大気の熱交換は絶対海面水温が 28 を超えると非線形的に活発になると言われていますので、anomaly だけで済む問題ではありません。

実際に、エルニーニョの発生海域である西部熱帯太平洋で、熱帯海面水温が 30、29、28、27 の場合を想定した大気海洋結合モデル実験を行った結果を紹介します。大気モデルは里村先生の非静力モデル、海は我々の京大海洋モデルです。よーいドンで 4 ケースを走らせると、28、

27 では海面水温が時間とともに下がり大気海洋間の熱・水交換は活発とはならない。一方、30、29 では初めにちょっと海面水温は下がるが概ね初期の高水温状態が維持される。つまり、活発な大気海洋相互作用が起こる。調べてみたら、強い雨が降ると海面付近の密度が小さくなり、その直下に barrier layer という安定な層ができます。この安定度が強くなると夜間の海面冷却で重くなくても下層の暖水との混合が起こらず翌朝までに冷えてしまいます。海面水温が高いと飽和水蒸気がどんどん増えるために結合が活発になると言われていましたが、実はそれだけではなく、海洋の混合層過程を巻き込んだ熱と水（降水と蒸発）の交換が大事で、そのようなプロセスが再現されないとエルニーニョのトリガーである西風バーストの連続発生を予報できないことは分かりました。Anomaly 予測だけでは駄目なのです。因みに IPCC の第 4 次報告で 21 世紀はどうなるかということで昨年 Nature に一連の論文が出ましたが、殆どは anomaly でごまかしていました。昨年 10 月に CLIVAR/GSOP Intercomparison という国際会議を東京で開いた際、Nature に掲載された著者がきていましたが、終始黙ったままで自覚されているようでした。

海洋変動の信頼できる絶対場を知るには、正確だが時間的空間的に偏りがある観測データと、4 次元格子値を求められるがバイアスがある大循環モデル結果の双方を補完できる先端的な 4 次元変分法データ同化手法を用いて、空間 3 次元、時間 1 次元の 4 次元解析値データセットを作れば良いのではないかと考えました。ご存知のように、海の変動の起源はすべて海面にあります。海水とその性質は海面で規定され、それをほぼ保持しながら海中を動く。そのエネルギー源は海面での風や太陽放射である。4 次元変分法データ同化は最適な初期値と海面での風応力や潜熱・顕熱などの境界条件を推定できる。例えばモデル実験において、ある海面での熱・塩条件で水温・塩分が特性づけられて垂表層を移動する海水が、観測データのある格子を通過した時に、観測値と違えば予報モデルの随伴モデルを使って時間軸を遡り、初期値や境界条件を修正して観測値との差が規定値以下になるまで予報演算と逆戻りする随伴演算を繰り返すというものです。お使いに行った子が目的を果たせなかったら、家に帰ってお母さんに聞きなおしてもう一度行きなさい、というようなものです。モデルは一つしか使いませんが、全球で操作を何回も繰り返す。アンサンブル・カルマンはいくつものモデルを使いますが操作は時間軸順方向に一度だけで、トレードオフの考え方が対比的です。4 次元変分法は OI やナッジング法と異なり、海水の移動中に暖めたり冷やしたりしませんから、再解析データは力学解析に好都合であるだけでなく、モデルの不確定性の大きな要因である初期条件や境界条件の改善に優れ、さらに随伴モデルを使って感度実験をすれば、変動の原因海域や効果的・効率的な観測システムの設計に使えます。異分野の情報を合わせて可視化も簡単にできます。

このような長期の再解析データを、海洋研究開発機構の同僚と協働して 2 種類作りました。一つは 1980 年以降の全球海洋再解析データセットで、中層より上に焦点を当てたものです。このデータセットはつい最近、深層 6000m まで、1957 年からの 50 年間をカバーするように拡充しました。もう一つは大気海洋結合系の 4 次元変分法データ同化システムを世界で初めて開発し、史上最大といわれる 1997/98 のエルニーニョをはじめ様々なタイプのエルニーニョが起こり、また顕著なインド洋ダイポールモード現象が起こった 1990 年代の再解析データセットを結合系で作成しました。ともに、地球シミュレータをフル運用し、電気代だけで年数億円かかったと思います。これにより、エルニーニョの指標である NINO3.4 海域の時系列観測データ、ダイポールモード指標、インドネシア通過流量、今話題の大西洋子午面循環の時系列を良好に復元できま

した。先ほどの GSOP 国際会議で、世界最高峰の ECMWF やドイツ、イギリス、フランス、イタリア、米国などのトップ機関と相互比較した結果、当グループ（K7 という名称）は良い結果だと褒められました。随伴モデルを使った Inversion の結果にも驚かれた様子でした。

さらに、再解析データを用いた理論解析により、現在主流の re-charge 理論に、赤道ロスビー波の伝播に伴う非定常南北輸送とケルビン波による西岸からの熱アノマリーの東進効果を加えれば、エルニーニョ発生の不規則性を説明できることを K7 グループのメンバーが発表しました。（この論文は本年 3 月下旬に JGR に掲載され、JGR 掲載論文中の週刊ダウンロード数が第 4 位でした。）また、そのデータを使って計算した表層 300m までの貯熱量の 50 年時系列データは、観測データの神様、仏様といわれる Levitus さんの結果と一部異なっていましたが、最近 Levitus さんが結果を修正され、我々の結果と概ね同様になりました。どうも測器の異常が最近判明し、それが原因であったようです。この結果、われわれのデータは 50 年間くらいの長期間で使えることがわかり、PPO もかなりよく再現できていることがはっきりしました。これを初期値に使えば POD の予測精度が向上すると考えられるので現在取り組んでいます。

北太平洋の冬季の亜寒帯は昔なら船舶が折れるくらい荒れるので有名で、その観測データはかなり少ないのが実状です。そのような海域で日本の研究者は興味深い水塊構造を見つけています。すなわち、冷たい水は重いので相対的に暖かい水の下にあるのが通例ですが、北太平洋亜寒帯の表層には逆の構造が存在し、中暖中冷構造と名付けられました。北太平洋亜寒帯では降水が蒸発を上回るので、表層の塩分値は小さく海水は軽くなるため、冷たくても軽い水塊が表層の上部を占めるためです。このような特異な水塊構造が私たちの再解析ではきちりと再現されています。さらにアジョイントの利点を使って逆解析をした結果、未知であった中暖水の起源は黒潮続流域とアラスカ海からやってくる海水であることがわかりました。解析をさらに進めると、中暖中冷構造はエルニーニョ変動と相関が高く、大気を懸け橋として熱帯変動と連動していることが判明しました。

中暖中冷構造より下層の 500 ~ 700m 深には北太平洋中層水と呼ばれる塩分極小層が存在します。しかし、その形成機構は謎でした。この問題に当時大学院生であった中村知裕さんと一緒に取り組み、「起源はオホーツク海である」ことを明らかにすることが出来ました。縁辺海のオホーツク海が外洋の中層大循環を引き起こしているとは誰も考えていませんでした。また最近では、温暖化物質をたくさん溶け込ませた海水がオホーツク海から北太平洋に流れ込んで循環していることがわかり、地球温暖化の観点からも注目されるようになってきました。これも分からなかったことですが、大気起源のフロンの極小層が黒潮続流上流域で観測される理由を地球化学の専門家から尋ねられました。海洋物理の関係者に聞いても答えてもらえないと言われたので、看過できないと考え知恵を絞りました。計算機は単に計算するだけですので、形成シナリオを設定し、辛うじて極小構造の再現に成功しました。想定したとおり、周辺の海面から鉛直拡散で下方に輸送されるものと、北のオホーツク海で中層水に溶け込み輸送され、前者の下に存在するリモートモードのコアがあり、その間に極小層ができることがわかりました。

もっと深い 5000 ~ 6000m の海洋深層において最近発見された温暖化の再現と原因の探索を試みた全球全層 50 年再解析実験結果についてお話しします。その実施に必要な観測データは日本には整備されてないので、UKmet（イギリス気象局）の友人の Mike Bell にコンタクトをとり、品質管理済みの膨大な観測データセットを入手し、時間軸順解析と逆解析を行いました。逆解析の結

果は、北太平洋深層の温暖化シグナルは深層東岸壁をケルビン波で南下して赤道に達すると（逆追跡であることに注意）、赤道ケルビン波として赤道西岸の深層に伝わり、その後は深層の西岸壁をケルビン波と陸棚波の連携プレーで南極周極流に辿り着き、一部はロスビー波として西に伝播するが、多くは海底山脈にガイドされながら南極大陸沖のアデリー海面へ戻ることが判明しました。この結果は北太平洋深層の温暖化は南極大陸のアデリー海での沈降が地球温暖化で弱まっていることを意味しており、南極海で採取された海氷中のメタンスルホン酸濃度の変化傾向と符合し、信頼できるものだとわかりました。昨秋のことです。外国で話すとどなたも驚かれるぐらい大きなインパクトがあります。「ここじゃないかと思っていたがお前らがやったな」と言われたり、ある方は「昔ね、どうも南極海に興味があり、アデリー辺りの沈み込みが変化していると思って観測しようと流速計を入れたが、荒れて駄目だった。やっぱりそうだったか」と褒めていただきました。現在は変化のシグナルは波として伝わってきているだけですが、本体は流れであり、これからゆっくりと時間をかけてやってきます。さすれば海面水位は20%程度上昇するかも知れません。地震でいえばP波は早く伝わり、S波は遅れてやってくるのと似た状況です。卒業生の増田さんが現在Natureへ論文を書いています。深層循環のサイクルは2000~3000年ですので、この結果は温暖化の監視は長期にわたることを意味しています。

結合モデルを使った最先端のデータ同化システムで行った予測例もありますが、計算で求めたエルニーニョの絵だけをお見せします。史上最大のエルニーニョと言われる1997/98年エルニーニョを対象に再解析を初期値に使うアンサンブル予測を行い、1.5年から2年の先行予測ができるようになりました。これは世界で最長の予測（チャンピオン予測）だと思います。海はゆっくりと変化しますので、数日のweather modeを取り去って10日より長い成分の解析値を作成し、それを初期値に用い、weather modeの成分は乱れとして与えました。ある時点におけるすべての成分に忠実なデータを与えるのではなく、見たい成分にフォーカスした初期値化を行うやり方は気象のものと決定的に違うところで、国内や米国の気象グループからいつもたたかれますが、ECMWFの季節予報グループは我々の方法を取り入れるようです。

最近海洋の再解析を使って海洋変動は水産資源にどんな影響を与えているかについても調べています。諸般の事情で皆様がスーパーでよく見られるアカイカ類に注目して調べました。驚いたことに、資源捕獲の詳細データは一般には見せてくれません。どこで取れたかを知られると外国が捕獲するので国益保護のためだそうです。やっと見せてもらったのが外洋性のアカイカだったというわけです。調べてみると日本人はイカをむちゃくちゃ食べている。イカは人間だけでなく大型魚類の餌であり、この資源変動を知ることは大事なことで察し、水産庁に出向いてデータ提供をお願いしました。ご覧の写真はアメリカオオアカイカで、横に人間が写っていますが体長は1mを超えます。ロールイカと呼ばれるイカは全部これです。ロールイカを見ると外国人は皆笑います。昔は食べられませんでした。普段は深いところに居るため浸透圧の関係でアンモニア成分が多くて臭みがあったからです。現在では食品化学が発達してアンモニアを上手に抜く方法があり、食べられるようになりました。このオオアカイカがエルニーニョの前に激減するのですが、その理由が分からず、水産の人たちから調べてくれと言われ、海洋変動との関連を統計解析しました。「経験を統計モデル化しよう」という考えでやっています。調べた結果、エルニーニョの前年あたりにはペルー沖で上昇流が弱まり、イカの生育場所への栄養塩の供給が1年以上弱まるので、激減するのだとわかりました。さらに、約150m深に餌の元であるクロロフィルが多く

存在する層があり、その挙動が関係することも解りました。水産の人が衛星データを駆使しても signal が見えなかったのも当然でした。分野外の者による研究でしたのでなかなか信用してもらえませんでした。海洋物理環境変数を用いて過去の漁獲量を再現する統計回帰モデルを作って、流し網規制がなければこの程度の漁獲が想定されるとの結果を示すとやっと喜んでいただけました。今でも疑心暗鬼の方はおられますが、「油が高くなったので、遠路はるばる行って、獲れなかったらエライこっちゃ。だからここに行けば必ず獲れる場所を言ってくれ」というお役人もおられます。現状の大循環モデルでは漁獲域である 10km 幅の streamer の場所など予測できませんので、それは無理で、せいぜい漁場の形成条件についての情報がやっとですと応えています。また、獲れるところがわかれば自分が出漁して一攫千金を狙いますよとかわしています。これからはこのような問題にも取り組む予定です。それがどうして地球物理かとも言われますが、川下の波及効果というところまでやらないと相当程度の予算付けは難しくなっています。そういうご時世ですが、海洋物理学が海の動態解明に関する知の体系だとすれば、従前の物理的動態に加えて、それと連環した動態現象の総合的解明なしに海洋環境は理解・予測できないというのも事実です。前者は物理法則を知るものであり、後者は連鎖複合系の変動メカニズムの解明で、成果を体系化して若手へ新パラダイムを提示できるよう努めたいと考えています。従前の枠にこだわらずに、目の前の不可思議の現象を解明するのが本学の研究者の真骨頂でしょうから。

他にもいろいろありますが、かなり時間を超過していますので、このあたりで終わらせていただきます。