

データ同化によるバーチャル海洋づくり —海宇宙の連鎖の解明に向けた情報拠点— 淡路敏之

(京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻水圏地球物理学講座)

海洋物理研究室は速水先生以来、沿岸・陸棚・縁辺海過程、さらには外洋への輸送過程ならびに海盆・海盆間輸送過程の動態の理解と支配機構の解明を目指して、データ解析、理論数値実験、数値シミュレーション等により研究教育を進めてきた。この間、①海峡を通しての潮汐交換機構、②深い対流の物理機構と深層水形成、③ベンチレーションおよび対流と傾圧流の相互作用による増幅機構、④潮流と海底地形の相互作用による新しいタイプの内部波の存在と増幅機構及び混合機構、⑤北太平洋中層水の形成機構、⑥黒潮流路の多重性機構、⑦赤道ケルビン波の増幅とエルニーニョ発生機構、⑧インドネシア通過流による熱・物資輸送過程、⑨インド洋ダイポールモード発生における太平洋・インド洋相互作用の役割、⑩診断モデルの開発と世界海洋循環の診断、⑪データ同化システム研究開発と諸現象の動態解明、等に成果を上げてきた。特に、過去を復元し、現在を捉え、未来を探る統融合アプローチであるデータ同化に関して、現場観測データを取り込み、かつ、時間空間的に空白が無く力学的・熱力学的に整合性のある4次元変分法データ同化システムを世界海洋ならびに海洋大気結合系で世界に先駆けて開発し、かつ再解析データと呼ばれる時系列統合データセットを長期間にわたり作成して、水・熱・物質循環の過去・現在の状態を診断するとともに、海にインプットされた気候変動のメモリーを解読することにより、エルニーニョや気候のレジームシフトに伴う海洋の十年スケールの変動特性と海洋の影響に関する確度の高い評価、ならびにこれらのハインドキャスト予測研究を行い、国内外からK7というグループ名で評価されるようになった。また、再解析プロダクトを関連分野への応用の一環として、海面フラックス変動と広域水循環変動との統計構造を明らかにする研究に、さらには海洋の季節～十年スケール変動と社会的に影響の大きい水産資源変動との統計モデル化に向けた異分野融合・協働データプラットフォームの構築に利用できるよう、海洋研究開発機構と共同開発を行った。以下では、海洋現象の診断と予測、ならびに異分野融合プラットフォーム構築の重要性を、当日の発表順に箇条書き的にまとめ、最後に成果の一部について説明を加える。

海の現況診断の重要性

研究のmotivation：輸送と交換・混合

対象：沿岸（風波と共に京大伝統の分野）、陸棚域、縁辺海、外洋、大洋間

沿岸規模から大洋循環規模と水塊形成と変質過程の解明

方法：数値モデル、データ同化

温暖化予測の不確実性の主な要因

- ①モデルは発達途上：特に雲、海氷のlife cycleのモデリング、海面過程が十分でない。
- ②現況把握も発展途上：我が国等による国際連携地球統合観測の一層の展開。
 - ・炭素7ギガトン放出：うち3ギガトンは自然が吸収 主に森林と海、温暖化が進むと森林が枯れ、地中のものが分解して炭素放出、海のプランクトンが死に一部は海面へ、
 - ・温暖化物質は地球圏をどのように循環していて、どのような変化が生じているのか、その現況把握は喫緊の課題、
- ③正確な初期値づくりの科学技術も発展途上

今後の課題

- ・未解明である海(地球)の無機・有機の世界の連鎖を探索・監視しつつ海洋(地球)空間・資源の活用と影響評価・対応策を一体的に推進。
- ・物理地球(無機地球)と生態系化学地球(有機地球)との連鎖の理解はこれから低炭素社会に向けての賢い対応策はこれから：学際代表である地球環境学の骨格。

地球表面の70%を占める海の現況把握はどの程度なされたか？、海は十分賢いはずであったが、現状はどうか？

- ・水の物質的特殊性が大気海洋結合を強化
- ・潜熱大：サーモスタット、熱的結合
- ・解離力大：物質循環、生命体

海洋物理の未解決課題

- (1) ブロッカーのコンベアーベルト循環は地球化学・物質循環から見れば存在しないという指摘
 - ・この指摘は、海洋循環に伴う熱・物質のラグランジュ輸送の理論が未だ不十分であることを突いている。この種の問題は大気ではフェレル循環(間接循環)、成層圏のブリューワー・ドブソン循環の研究(中緯度起源の波による運動量収束)で理解できたようだったが、最近、残差循環(one-cell residual overturning)の存在が対流圏界面周辺で明確となり、熱帯起源の定在ロスビー波で形成されているのではないかというホットな話題になっている。
 - ・地球の熱・物質のプールである海での大循環ラグランジュ輸送を担うプロセスと仕組みの診断、メカニズムの解明は、他圏との相互作用とともに、人類史的課題である地球環境の根幹的要素。観測的知見・発見、その有要情報を拡充・利用できるハード・ソフト一体の技術の革新が鍵
- (2) 無機と有機の統合バーチャル海洋・地球環境システム学の環
 - ・海の構造はおおよそわかった。海の変化の法則と連鎖の仕組みを知り(予測科学・予防科学)、海の現代史を統合的に理解できる突破口が要請
 - ・本課題はより長いレンジの課題で、地球環境学を結節する要素。温暖化時での『海の酸性化』と関連して推進『海の変化と気候や生態系への影響解明』の情報発信ができる
 - ・海洋物理学：「海の動態解明に関する知の体系」だと定義すれば、従前の物理的動態に加え、異分野複合動態の物理的側面の解明も時代の要請。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。この成果を体系化し、学問分野として認知されれば、若手も集積。「目の前の不可思議な現象を解明するのが科学」
 - ・Ocean OBS2009: important target 『Integrated Earth System Syntheses』, e.g., K7 4DVAR coupled data assimilation

ブロードバンドの輸送船機能を担うことが現代海洋物理学に要請
海の現況診断の重要性

- ・ 正しい現状認識はメカニズムの解明、適応対策、精度の高い将来予測の基本
- ・ それには、全球全層の現況診断（海面から海底まで、赤道域から極域まで）と、過去からの経緯の解読が必要
- ・ 過去を材料に物理を解明。既知である

過去を復元・予測（hindcast <->forecast）して予測能力を判断。

学際科学適応策の探求：分野横断のデータとモデルを組み合わせた赤池数理モデルにより、経験的知恵を技術化し、継承と発展を目指す。

- ・ 温暖化による異分野の要素の変化を反映したシステム応答科学を研究
- ・ 国際連携でのマルチモデルアンサンブルによる不確定性の低減が確度の高い水産資源予測に効果的過去の解読の現況の診断の将来予測の一体的推進

「海を知る2大手段」：(a) 観測 と (b) モデル

革新的統融合（総力戦）：データ同化

(a1) 人工衛星観測：

特徴 広域同時性に優れるが電波計測ゆえ海面状態に限定
海面水温(SST)、海面高度(SSH)、海上風、降水量、雲など

(a2) 現場観測：船舶やブイ等

特徴 時空間的に断片的だが海洋内部構造を観測（水温、塩分、流速）

先端観測例

人工衛星によるocean state(海面水温と海面高度等)

http://ioc3.unesco.org/oopc/state_of_the_ocean/all/ <http://www.noaa.gov/>

自働ブイ「ARGO」による水温、塩分プロファイリングの炭素、酸素も

http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/osap/projects/argo/graphics_e/thm

戦略的海洋監視

観測基盤としてのArgoは維持した上で、

- ・ 海洋環境変動研究の「カギ」となる海域・プロセスを、フロートを中心とした多様な(自動)観測機器を用いて戦略的に監視。
- ・ Argo計画実行により蓄積された知見を、監視システムの構築・運用に活用。
- ・ 監視システムの高度化に不可欠な「次世代自動昇降型ブイ」を開発。

海洋・結合再解析データの国際的な貢献

OceanObs'09においてProf. Stammerによりこの10年間の全球を対象とした長期観測データ統合研究の総括があった。日本からはK-7 (JAMSTEC・京大グループ) プロダクトが上位同化システムの一部としてエントリーされた。

OceanObs'09でのkeynote speech (Dr.Rienecker)では“Integrated Earth System Analyses”に向けた先駆的な研究としてK-7結合同化システムが紹介された。

海洋・気候・水産に関する融合知のブレイクアウトの一例の紹介

海洋再解析プロダクトを 1960 年代まで拡張し、より長期間にわたって海洋の状態推定を行い、さらに顕著現象の履歴や要因の特定に優れたユニークな変分法逆追跡データの作成と並行して、社会的に影響の大きなエルニーニョの発生や北太平洋十年変動を特徴付けるメカニズム等について調

べる協働プラットフォーム（バーチャル海洋）を構築し、図1に示すような成果を上げた。これにより、例えば、気候のレジームシフトとそれに伴う海洋の中緯度亜表層循環変動との関連やエルニーニョ現象発生の不規則性の理論、中高緯度変動とのリンク、さらに大気海洋結合同化システムによるエルニーニョの先行予測と広域水循環変動への影響といった最新の研究成果を俯瞰できる四次元水・熱フロー長期マップをユーザにわかりやすい形で可視化した。

また、海洋物理環境変動と水産資源変動との統合解析を可能にする等の異分野輻合プラットフォームの構築により、新たな学際知を創出できた。これにより、海洋再解析データを長期的かつ高解像度で整備し、より多くの魚種についての資源アセスメントに供するために、その第一歩として、我が国の主要消費魚の一つであるイカ類に着目し、ペルー沖のアメリカオオアカイカや北太平洋のアカイカ資源変動と海洋物理環境変動との統計解析にを行い、これまで不明であった資源変動メカニズムの解明につながる解析結果及びそれに基づいた従前より確度の高い資源推定手法等の初期成果を得た。なお、四次元変分法による長期再解析はNASA/JPL・MIT・Scripps 研究所・ハンブルグ大学連合(ECCO)が実施しているのみであり、アジア太平洋域を中心にこの種のデータを世界に提供することは大きな意義がある。

以上のような統合解析が可能な異分野融合・協働プラットフォームを構築・拡充し、将来的には地球化学物質へと発展させることにより、海洋における温暖化等の診断機能を持った海洋統合情報空間拠点としての発展が見込める。

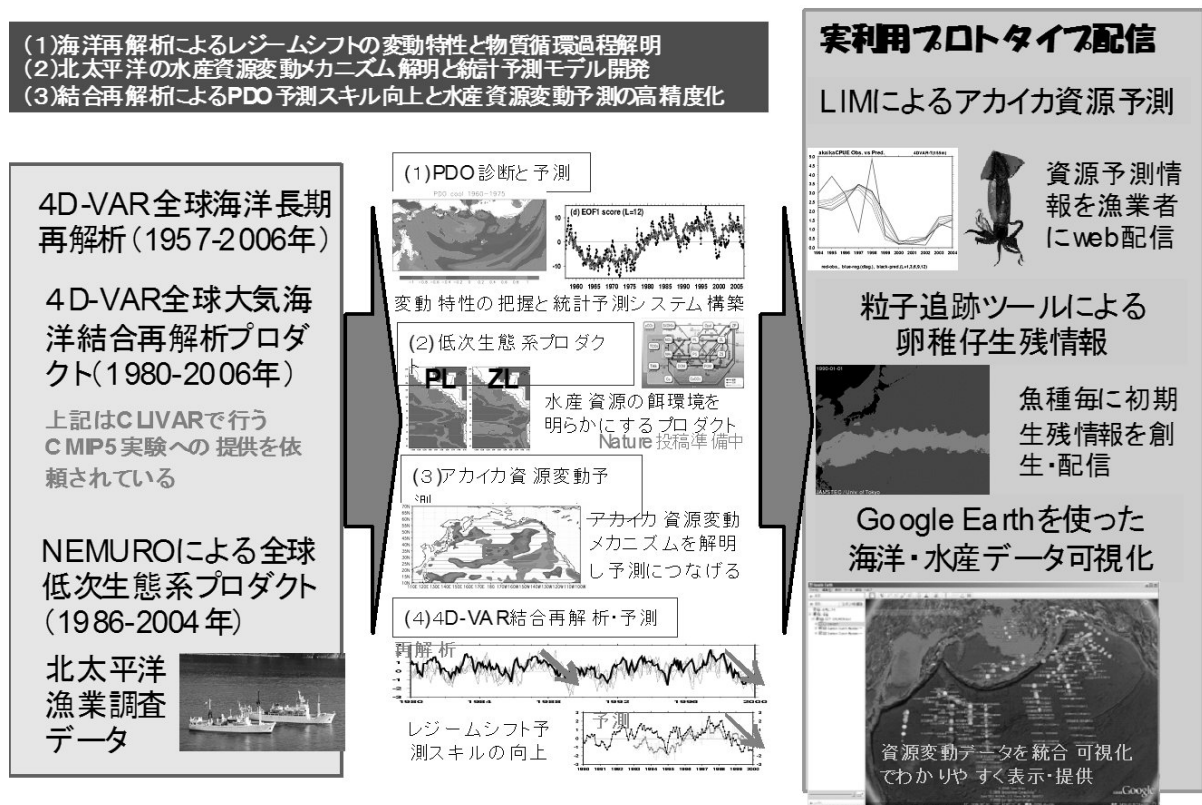


図1: 海洋における熱・水・物質循環過程の診断と気候変動に対する影響評価ならびに水産資源データとの融合研究開発