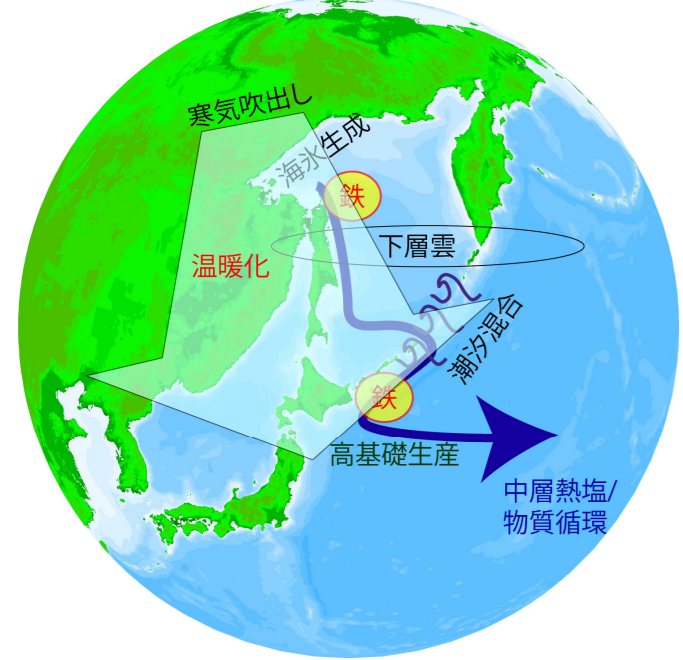


環オホーツク圏の海洋シミュレーション



概要: 環オホーツク圏(オホーツク海とその周辺地域)では科学的に興味深く社会的に重要な気候・環境の形成およびそれらの長期変動が生じており、これらのより良い理解と数値シミュレーションによる再現・予測が求められている。



- 1) 冬季には、大規模な海水生成が起こる結果、北太平洋ほぼ全域の海洋中層循環に影響を与えている。海水生成の際には、塩が不純物として排出される上に、海水が結氷点まで冷えるため、海水の密度が高くなる。この高密度海水生成と千島列島域での潮汐による鉛直混合により、オホーツク海から北太平洋に広がる中層熱塩循環が駆動される。この循環に伴い、大気・陸域・海底堆積物起源の様々な物質が北太平洋中層に取り込まれ循環する。
- 2) 環オホーツク圏では、世界最大規模の基礎生産(海洋植物プランクトン増殖)が生じている。高い基礎生産は、食物連鎖を通し豊富な水産資源を生み出し、炭素循環にも重要な役割を果たす。この基礎生産には、上述の中層熱塩循環により運ばれて来た「鉄」が重要である。鉄は2価と3価のイオンを持つことから光合成等における電子伝達に使われるが、海水には極めて溶けにくいため多くの海域で基礎生産を律速している。例外的に環オホーツク圏では、中層循環に伴う鉄供給のおかげで鉄律速がかかりづらい。
- 3) 近年、環オホーツク圏は顕著な温暖化にさらされている。オホーツク海の海水面積も減少傾向にあり、オホーツク海起源の熱塩循環・物質循環の弱化傾向が観測されていることから、基礎生産への影響が危惧されている。

研究代表者らのグループでは、環オホーツク圏の気候・環境の形成と変動のより良い理解のために、環オホーツク圏の気候・環境に重要な3つの海洋現象-(a)オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環、および、(b)潮汐による鉛直混合過程-についてシミュレーション研究を行う。加えて、これらシミュレーションの効率化と大規模化に向けて、使用する数値モデルの高速化チューニングを検討する。

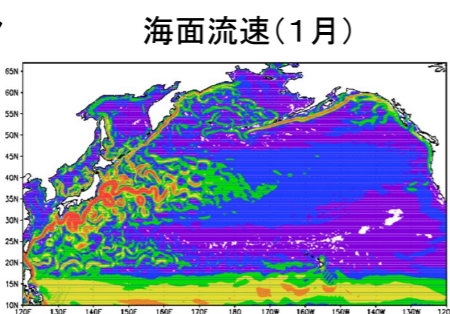
栄養物質循環／熱塩循環

(中野渡拓也・中村知裕・三寺史夫)

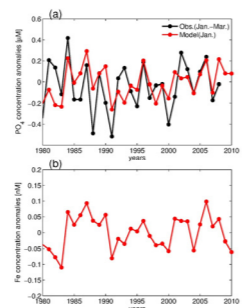
オホーツク海陸棚由来の栄養物質(鉄)が、海洋熱塩循環で運ばれ、基礎生産を高める。

これまで(H22-H26年度):

- ・熱塩循環
 - 経年変動シミュレーションと要因解析
 - 高分解能熱塩循環シミュレーション
 - 同モデルの感度実験

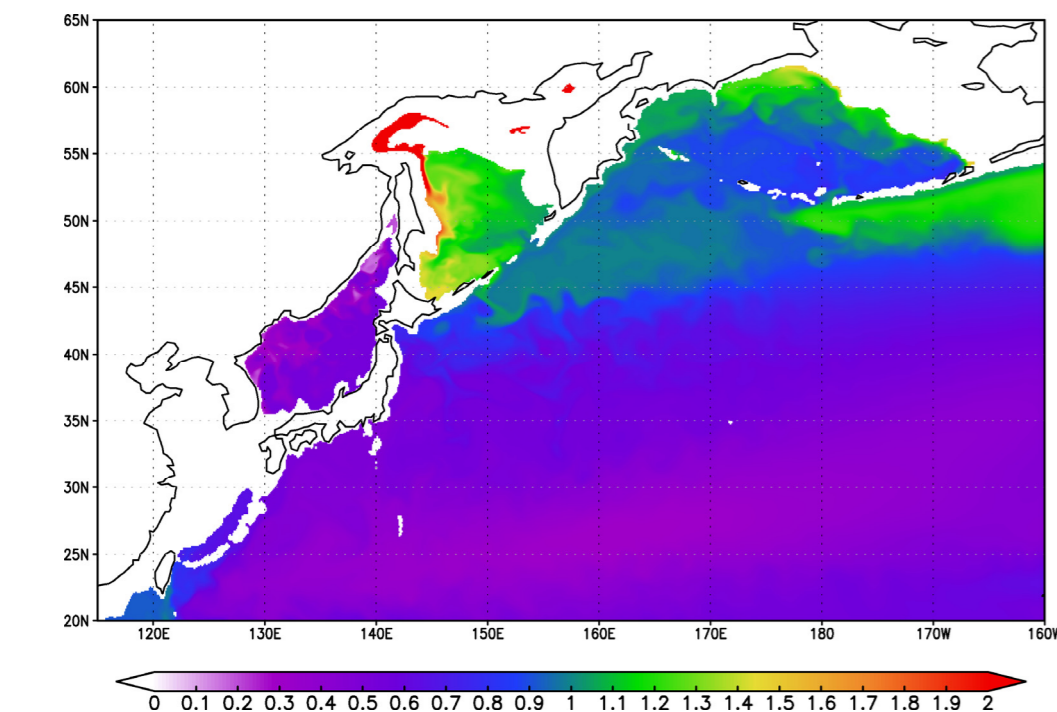


- ・物質循環
 - フロン循環シミュレーション
 - 鉄化学モデルの構築とOGCMへの組み込み
 - 鉄循環 気候学的季節変動シミュレーションとその要因解析
 - 鉄循環 経年変動シミュレーション
 - 同モデルの感度実験

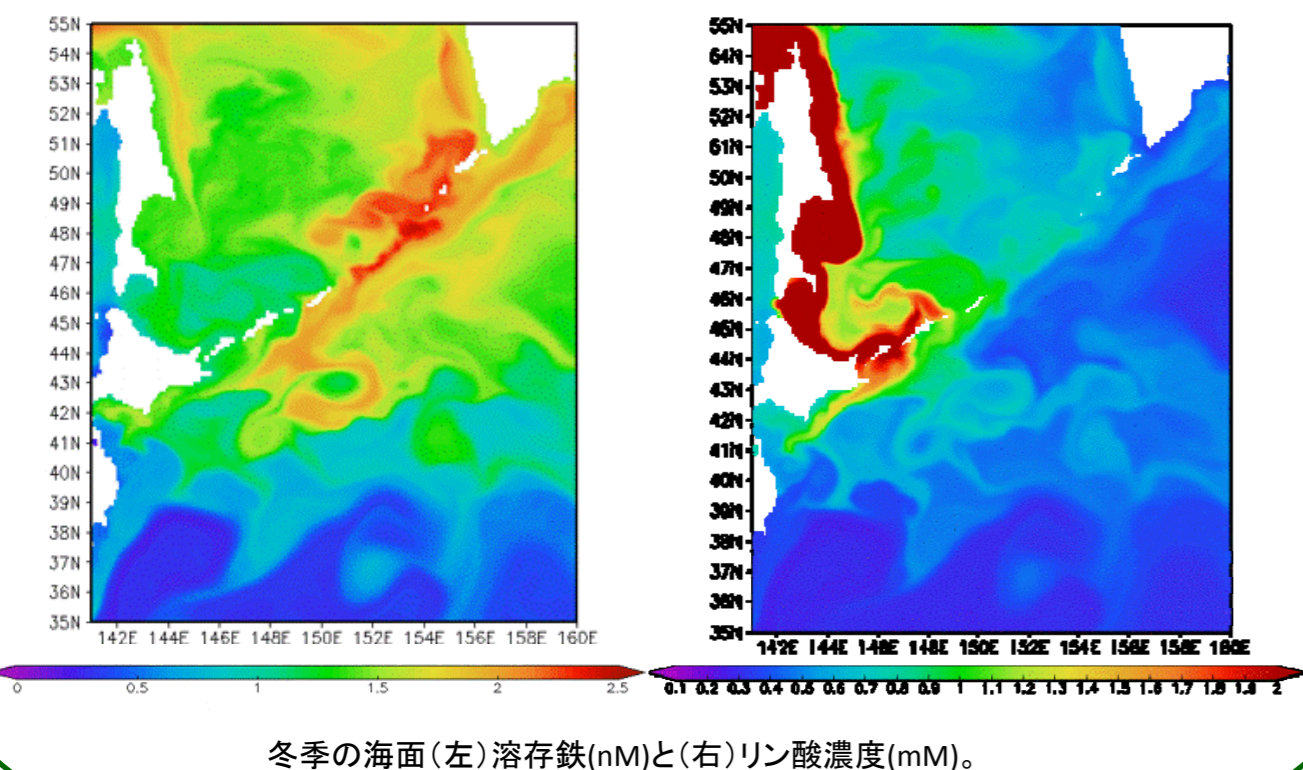


昨年度(H27年度)

- ・高分解能・鉄循環シミュレーション(気候学的季節変動場)



高分解能・鉄循環シミュレーションの結果。中層(27.0σ_θ等密度面上)における溶存鉄(nM)濃度。図は北太平洋北西部を中心に示しているが、モデル領域は太平洋の大部分をカバーしている。



冬季の海面(左)溶存鉄(nM)と(右)リン酸濃度(mM)。

今年度: 高分解能鉄循環モデルの感度実験

前年度の高分解能鉄循環シミュレーションの再現性を検討したところ、一部海域で鉄濃度が過大評価されるなど改善の余地があった。そこで今年度は、再現性向上のため、最も不確定な要素である「海底堆積物からの鉄供給」を中心に感度実験を行う。

モデルの高速化

(大宮学・中村知裕)

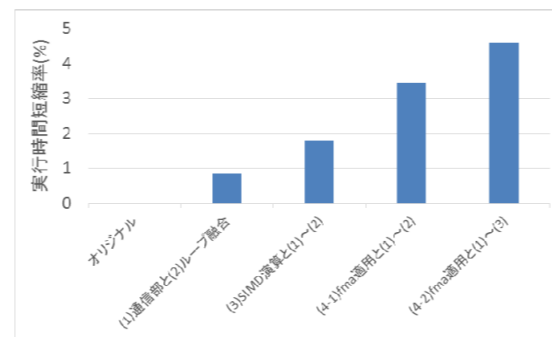
高速化チューニングによりモデルの長期積分と高分解能化そして実験の効率化を図る。

これまで(H22-H26年度):

- (1) 大気モデルの高速化
 - SMP並列チューニング (自動並列化の一部抑止、スレッドローカル化、強制SMP並列)
 - MPI並列チューニング (水平2次元領域分割)
- (2) 海洋非静水圧モデルの高速化 (SMP・MPIハイブリッド並列のチューニング)
 - ループ融合によるキャッシュ・チューニング
 - 融合後の最外ループでのSMP並列化
- (3) 鉄化学モデルの高速化
 - ノード内ハイブリッド並列化
 - SMP並列チューニング (インライン展開と強制SMP並列化)
- (4) 高分解能熱塩循環モデルの高速化
 - ループ融合による
 - ・キャッシュヒット率向上
 - ・SMP並列での演算負荷均等化
 - 境界部通信の重ね合わせ

昨年度(H27年度)

- (5) 高分解能「鉄」循環モデルの高速化
 - 通信部の改良
 - ・配列コピー時のSMP並列を、鉛直層数が多いときは鉛直層に、少ないときは水平格子に対して行うように変更。
 - ・通信と配列コピーの順序調整
 - SIMD演算用のループ修正とSIMDの一部抑止
 - fma適用



高速化チューニングによる実行時間の短縮率(%)

今年度: 海洋非静水圧モデルの高速化チューニング

潮汐による鉛直混合過程の数値実験に用いている3次元非静水圧モデルの高速化チューニングを検討する。このモデルは以前にチューニングしたことがあるが、その後コードが新しくなった部分が多いため、そこを中心に検討する。

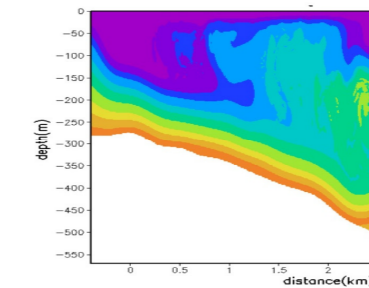
潮汐混合

(伊藤薫・中村知裕)

潮汐起源の内部重力波や力学的不安定による混合は、熱塩循環／物質循環に大きく影響する。

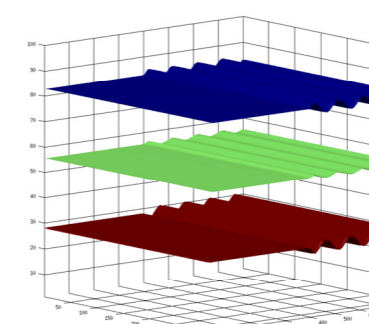
これまで(H22-H26年度):

- (1) 鉛直2次元での内部重力波生成・砕波と不安定
 - 高分解能シミュレーション
 - 理想化実験とパラメータ走査
 - 力学解析と理論化



ポテンシャル密度の鉛直断面図。暖色が高密度、白抜きは海底地形。右向きは潮流により生成された内部重力波とその砕波。

- (2) 3次元数値実験: 内部重力波と渦の相互作用
 - 力学解析
 - 高分解能シミュレーション

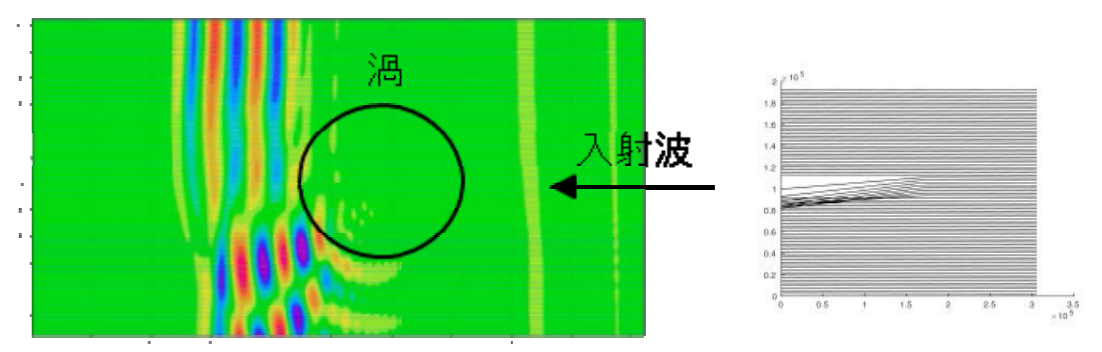


3つの密度面の時間発展。(左)右から入射した内部重力波が、(中央)渦により増幅され砕波し、(右)砕波領域がさらに広がる様子。

昨年度(H27年度)

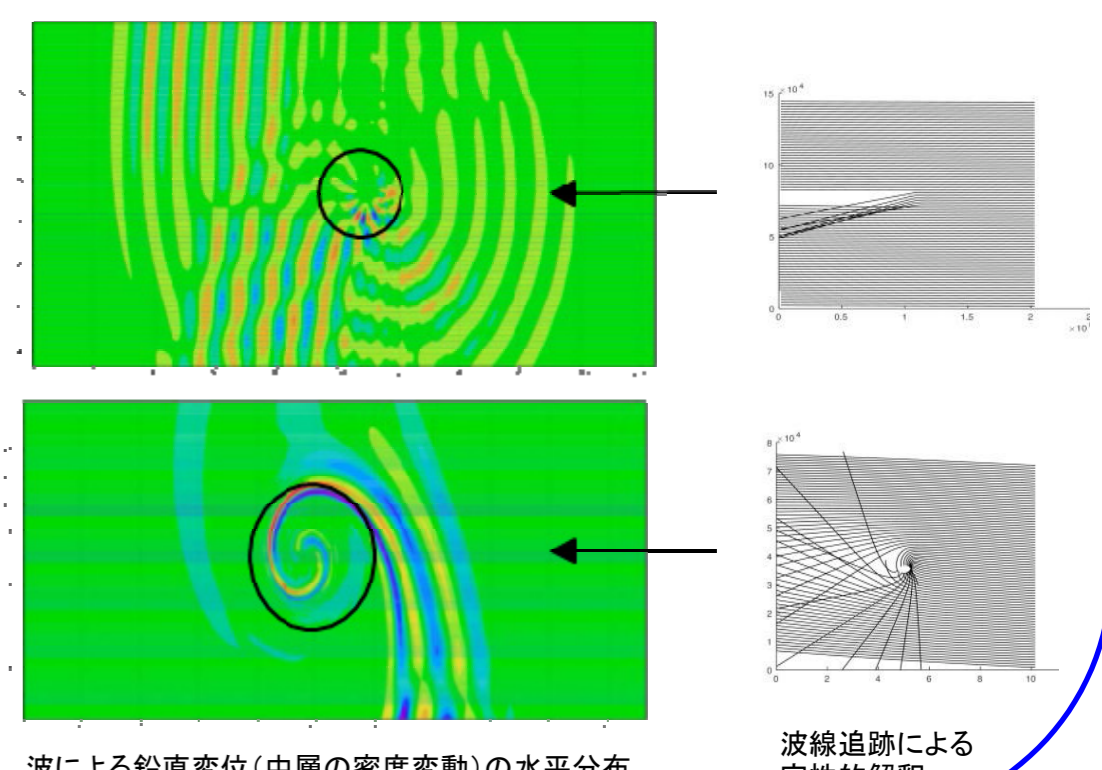
様々な力学レジームにおける高分解能数値実験と力学解析

$\epsilon \ll 1$
(波と比べて相対的に弱いまたは大きい渦)



無次元パラメータ $\epsilon = \frac{V}{cKR}$

$\epsilon \sim 1$
(波と比べて相対的に強いまたは小さい渦)



波による鉛直変位(中層の密度変動)の水平分布と波線追跡による定性的解釈

今年度: 異なる形状の渦の場合について数値実験

理論的解析の結果、渦の形状も相互作用に影響しうることが分かった。そこで今年度は、異なる形状の渦の場合について数値実験を行う。