

Activities between CNRS and ESC under MOU

Project Leaders

Gurvan Madec Laboratory of Ocean Dynamics and Climatology, Institute Pierre Simon Laplace, National Center for Science Research (CNRS)

Marina Levy Laboratory of Ocean Dynamics and Climatology, Institute Pierre Simon Laplace, National Center for Science Research (CNRS)

Keiko Takahashi The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Gurvan Madec ^{*1}, **Marina Levy** ^{*1}, **Keiko Takahashi** ^{*2}, **Claude Talandier** ^{*1}, **Rachid Benshila** ^{*1}, **Marie-Alice Foujols** ^{*1}, **Arnaud Caubel** ^{*1}, **Eric Maisonnave** ^{*1} and **Charles Deltel** ^{*1}

*1 Laboratory of Ocean Dynamics and Climatology, Institute Pierre Simon Laplace, National Center for Science Research (CNRS)

*2 The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

This project realized in the frame a MOU between ESC and CNRS, is composed of two main themes sharing the same dynamical core of the ocean: OPA. They aim to explore (1) the impact of very shallow ocean mixed layers on the tropical climate intraseasonal variability and (2) the impact of sub-mesoscale physics on the North Atlantic balance (heat transport, nutrient cycling, CO₂ pump), both using OPA, coupled to ECHAM5 AGCM and biogeochemical model LOBSTER respectively.

This report summarizes the technical and scientific achievements of both themes. The main technical achievement of the first theme is the setup of the high-resolution coupled model involving the ocean model OPA with 301 levels. Main scientific results of this first theme are first, the large impact of the diurnal cycle on Sea Surface Temperature (SST, up to 1°C) in high vertical resolution forced experiments. Second, the first results of the coupled model show a realistic mean state and an improved equatorial variability in comparison with previous versions of the coupled model. Further work is needed to clarify the impact on the high vertical resolution in the tropical variability. The main technical achievements of the second theme are the setup of the coupled bio-physical experiments and the developments of diagnostics for the biological trends within the mixed-layer. Main scientific results of the second theme are the large impact of resolution on the turbulent and the mean state of the physics and of the biology. Regarding the physics, we see the emergence of intense submesoscale vertical velocities with resolution, together with significant modification of the stratification of the thermocline and of mode water properties. Further analysis to identify the mechanisms of these modifications are underway. Regarding the biology, we are finalizing the investigation of the low-resolution experiments (paper in preparation). This sets the basis for the analysis of the highest resolution runs; first diagnostics already reveal impressive changes as the resolution increases, in particular regarding the subsurface nutrient reservoir.

Keywords: high resolution OGCM, mixed layer, tropical climate variability, mesoscale physics, ocean coupling with atmosphere and biogeochemistry

1. First theme: "The impact very shallow ocean mixed layers on the tropical climate intraseasonal variability"

1.1 Objective

The aim of this project is to get a better understanding and quantification of the resolved upper oceanic structures with small vertical scale that can influence the development of large scale coupled phenomena. Specific objectives of the proposed research will concern the upper ocean equatorial dynamics with a focus on the impact of diurnal cycle and the very shallow barrier layers on the tropical climate variability.

1.2 Method

To carry on this project, the use of an ocean-atmosphere coupled model is needed to explore the ocean-atmosphere interactions. The ocean component has a global 3 polar quasi-isotropic grid with a horizontal resolution of about half-degree (ORCA05) and a vertical resolution of 1 meter in the upper layers (301 levels). The Atmospheric grid is a T106 with 31 levels.

1.3 Achievements from April 2006 to March 2007

The first step of our work has been to validate the ability of the oceanic component to reproduce the impact of the diurnal cycle on SST. We therefore performed two twin experiments of the ocean forced model from 1992 to 2001 that differ only from their vertical resolution: 301 versus 31 levels (or 1 m versus 10 m in the surface layers). Upper panel of Fig. 1 shows the time-depth evolution of the temperature during April 1992 in the south of the Bay of Bengal for the experiment using 301 levels. The spring seasonal warming of the surface layers and day/night oscillations are clearly visible. Comparison of SST evolution between the 301 levels (lower panel, black lines for 2h and 5 days mean) and 31 levels (red line for 5 day mean) experiments shows that the resolution of the diurnal cycle enhances and sped-up the SST warming, in agreement with 1D experiments of Bernie et al. [2005]. SST difference on Fig. 2 shows that the

impact of the diurnal cycle has a significant spatial and temporal extent that could play a key role in the intra seasonal variability of the region as suggested by observation [Vecchi and Harrison, 2002].

Forced experiments constrain SST evolution through the prescribed 2m air temperature used to compute latent heat flux. In addition, it suppresses all ocean-atmosphere feedbacks. In the continuation of this study, we therefore moved to a coupled ocean-atmosphere configuration and performed two twin experiments (301 versus 31 levels) but, this time, coupled to the ECHAM5 atmospheric model. This year, our coupled experiments results focuses on the validation of the mean state and the large-scale variability. Figure 3 displays model mean SST and its difference with observations. SST biases have a longitudinal distribution with a warm bias in the tropics and in the Antarctic area and a cold bias at mid latitudes. Note that in opposition with most of coupled

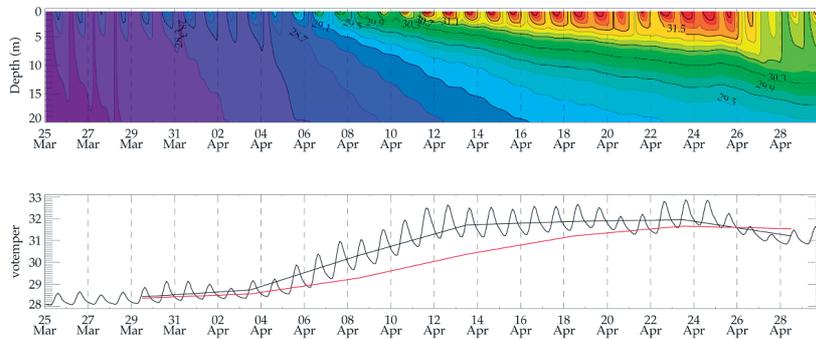


Fig. 1 Upper: time-depth evolution of the temperature during April 1992 in the south of the Bay of Bengal for the experiment using 301 levels. Lower: SST time evolution of the 301 levels (lower panel, black lines for 2h and 5 days mean) and 31 levels (red line for 5 day mean). Units=°C.

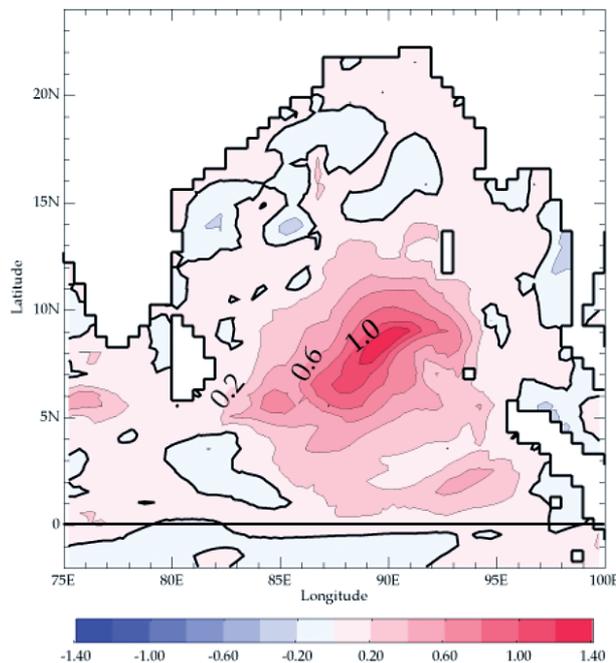


Fig. 2 15 days mean SST difference: 301 levels minus 31 levels in April 1992, Units=°C.

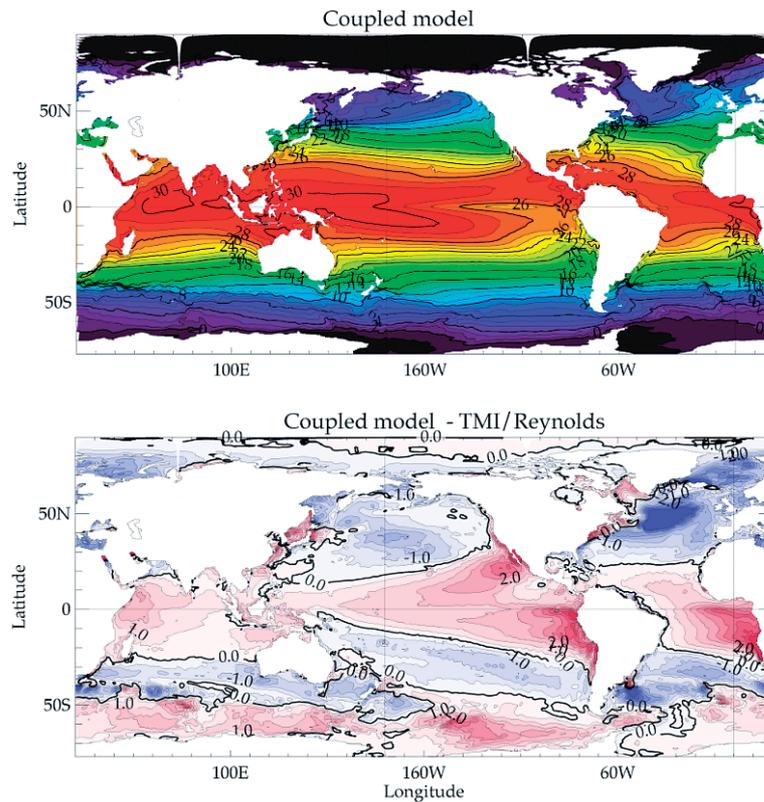


Fig. 3 Upper: model SST 50-year climatology. Lower: differences with observations (TMI and Reynolds). Units= $^{\circ}\text{C}$.

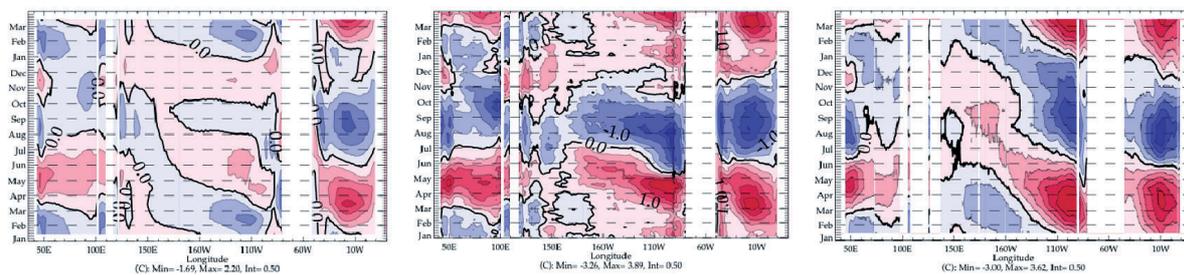


Fig. 4 Equatorial SST seasonal cycle, in old coupled model (SINTEX-F, left), new coupled model (middle) and observations (TMI, right).

model, this coupled model does not show any "cold tong bias" in the Equatorial Pacific. Introduction of a sea-ice model reduces the warm bias in Antarctic. However, tropical warm bias remains too strong. Additional tests on the closure of the heat flux budget at the top of the atmosphere shown it is a key parameter to greatly improve SST in our future simulations. Pacific and Atlantic equatorial variability has been strongly improved (Fig. 4): amplitude of the seasonal cycle is close to the observation and bi-annual cycle in the Pacific has been replaced by a realistic semi-annual cycle. As expected, differences in the mean state of the 301/31 levels experiments are weak but improvements are expected in the intraseasonal variability. This aspect of our research is just starting and will be fully explored next year.

1.4 Conclusion and Perspectives:

Step by step, we managed to build a Ocean-Atmosphere

coupled model with a very high vertical resolution in the ocean. We showed this unique configuration is able to reproduce the impact of the diurnal cycle of SST and realistically capture the main features of the earth climate. New year will be dedicated to the improvement of the model major bias and the exploration of the intraseasonal tropical variability: the main scientific target of this project.

2. Second theme: "The impact of sub-mesoscale physics on the North Atlantic balance (heat transport, nutrient cycling, CO_2 pump)"

2.1 Objectives:

The scientific objective of this project is to get a better understanding and quantification of the contribution of sub-mesoscale physics (eddies and filaments) on tracer distributions and on large scale budgets (nutrient cycling, heat transport, salt transport). Specific questions are:

- (1) Is there depletion or enrichment of nutrients in the euphotic layer on the seasonal time scale due to sub-mesoscale physics?
- (2) What is the contribution of the sub-mesoscale physics to the subduction of organic matter and thus nutrient cycling on longer time scales?

2.2 Method

To answer these question, we have set up a tilted wind and buoyancy forced double-gyre configuration (3000*2000 Km) that mimics the North Atlantic known as a crucial region of CO₂ sink. This configuration reproduces the western boundary current, the subtropical and subpolar gyres and the subtropical mode waters. We focus on five simulations, differing in the horizontal resolution and lateral dissipation (Fig. 5). Our most complete simulation has a resolution of 1/54° and couples the ocean dynamics (using the model OPA9) with an online biogeochemical model (called LOBSTER). The impact of the small-scales are assessed by:

- Comparing the mean state of the model (equilibrated heat, salt, and primary production distributions) for the various model resolutions
- Evaluating the transport trends at fine scales and at large scales, in the mixed-layer and in the thermocline for each experiment
- Running biogeochemical off-line experiments degraded in time and space to dissociate the effect of turbulence on the biological response

2.3 Achievements from April 2006 to March 2007

Model developments and simulations

- Sensitivity tests for the choice of the advection scheme and of the diffusion parameter
- 50 years spin-up of the coupled bio-physical experiments (the highest resolution is still running)
- Development of an on-line module to diagnose the transport trends in the mixed-layer, for heat, salt and biogeochemical tracers
- Set up of the first off-line experiments

Analysis

- Physics alone: our results have highlighted an unexpected sensitivity of the mode water properties and thermocline stratification to the biharmonic diffusion parameter, even in the case of what is generally considered as "diffusivity to ensure numerical stability".
- Physics alone: Emergence of intense vorticity filaments associated with strong vertical velocities when the resolution is increased (Lévy, 2006).
- Physics alone: The resolution change from 1/9° to 1/54° have consequences as dramatic as the resolution change from 1° to 1/9° (current state of the art of global ocean model). The mean differences concern the penetration of the eddy kinetic energy into the gyres, the stratification of the thermocline and the mode water properties.
- Validation and analysis of the coupled experiment at 1/3°: our analyses suggest the low nutrient content of subtropical mode waters (Fig. 6) is due to winter pro-

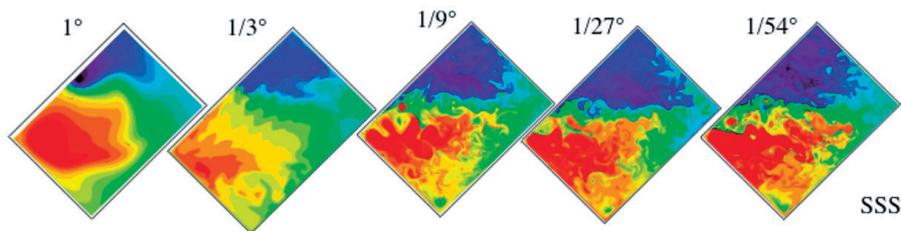


Fig. 5 Sea Surface salinity in the experiments ranging from 1° to 1/54° resolution. The increase in resolution is associated with the emergence of energetic mesoscale activity, which modifies the mean state. Outputs are shown after a spin-up phase of 100 years.

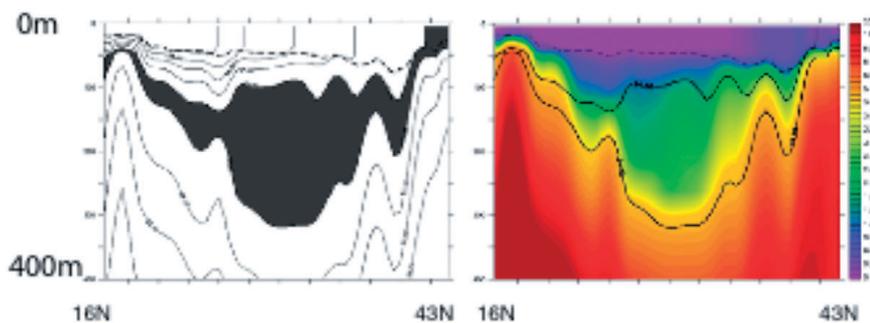


Fig. 6 Cross section of potential density (left) and nitrate (right) in October in the 1/3° simulation. The black water mass is the Subtropical mode waters and is characterized by relatively low nitrate concentration.

duction at the time of subduction. We also explored the impact of this poor water mass on the large scale productivity. The next step will be to see how the results are changed when the resolution increases.

- Analysis of the coupled experiments at $1/9^\circ$ and $1/27^\circ$: the first results show significant changes in the subsurface nutrient reservoir when the resolution is increased. This result still has to be confirmed, and would significantly change our current understanding of the impact of mesoscale eddies on primary production. We believe that this effect is the primary cause of the difference in primary production that we observe.

References

- Bernie, D. J., S. J. Woolnough, J. M. Slingo and E. Guilyardi, Modeling 2005 : Diurnal and Intraseasonal Variability of the Ocean Mixed Layer., *J. Climate*, vol 18 (8), 1190-1202.
- Lévy, M., 2007: The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence, *Lecture notes in Physics, Transport in Geophysical flow: Ten years after*, in press.
- Vecchi, G. A., and D. E. Harrison, 2002: Monsoon breaks and subseasonal, sea surface temperature variability in the Bay of Bengal. *J. Climate*, 15, 1485-1493.

Activities between CNRS and ESC under MOU

プロジェクトリーダー

Gurvan Madec Laboratory of Ocean Dynamics and Climatology, Institute Pierre Simon Laplace, National Center for Science Research (CNRS)

Marina Levy Laboratory of Ocean Dynamics and Climatology, Institute Pierre Simon Laplace, National Center for Science Research (CNRS)

Keiko Takahashi The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

著者

Gurvan Madec^{*1}, Marina Levy^{*1}, Keiko Takahashi^{*2}, Claude Talandier^{*1}, Rachid Benshila^{*1}, Marie-Alice Foujols^{*1}, Arnaud Caubel^{*1}, Eric Maisonnave^{*1}, Charles Deltel^{*1}

*1 Laboratory of Ocean Dynamics and Climatology, Institute Pierre Simon Laplace, National Center for Science Research (CNRS)

*2 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

本プロジェクトは、ESCとCNRSとの間の共同研究のための覚書(MOU)に基づき推進されている。2つの主要なテーマ；(1)熱帯気候の季節変動における海洋混合層表層の影響、(2)北大西洋における熱輸送、栄養循環、CO₂ポンプの各バランスにおけるサブ-メソスケール物理の影響、について研究を推進する。いずれのテーマにおいても海洋大循環モデルOcéan PAralisé (OPA)を、テーマ(1)では大気大循環モデルECHAM5と結合し、テーマ(2)では生物地球化学モデルLOBSTERと結合する。

本報告では、上記2つのテーマについて技術的および科学的側面からの成果をまとめる。テーマ(1)の技術的な主な成果は、鉛直301層の海洋モデルOPAを用いた高解像度の結合モデルを設定したことである。主たる科学的成果としては、まず、鉛直方向に高解像度のOPAによる数値実験において、海洋表面温度(Sea Surface Temperature: SST)は、日変化において強い影響を受ける(最高1°C)という結果である。2つ目は、本研究の結合モデルによる結果は、以前の結果と比較して、現実に近い平均場を示し、赤道上的変動も改善したことである。赤道上的変動に対する高解像度による影響を明らかにするためには、さらなる研究が必要である。テーマ(2)の技術的な主な成果は、結合モデルによる生物物理学的な数値実験を設定し、海洋混合層内における生物学的傾向を診断するための開発を行ったことである。科学的な成果としては、乱流に関して、物理的かつ生物学的な平均場においても、解像度の違いによる大きな影響があることを示したことである。解像度の違いや温度躍層の成層、モード水の特性における顕著な変化に伴う強いサブ-メソスケール鉛直速度が現れる。これらの変化のメカニズムの同定については、現在、解析を進めている。生物学的観点から、低解像度での数値実験結果の解析をほぼ終了し、論文としてまとめている。これらの結果は、高解像度の数値実験結果の解析の基礎となるものであり、解像度が高くなることに伴う興味深い変化、特に、表層下の栄養分蓄積に関する変化が、すでに確認されている。

なお、本報告中で示される図表については、紙面の制約上、英文本文中の図表を参照していただきたい。

キーワード: high resolution OGCM, mixed layer, tropical climate variability, mesoscale physics, ocean coupling with atmosphere and biogeochemistry

1. 第1テーマ：熱帯気候の季節変動における海洋混合層表層の影響

1.1 目的

このプロジェクトの目的は、大きなスケールの結合現象の発達に影響をあたえる可能性のある小さな鉛直スケールを解像して表層海洋の構造をよりよく理解し、定量化することである。本研究の目標は、日変化と非常に浅いバリエーションの熱帯気候変動へのインパクトに焦点をあてた赤道域の海洋表層ダイナミクスの解明である。

1.2 手法

本プロジェクトの遂行には、大気と海洋の相互作用を研究するための大気海洋結合モデルが必要である。海洋コンポーネントは、全球対応の3つの極を持つ準一様グリッド系であり、約2分の1度(50km)の水平解像度のORCA05である。大気モデルの解像度は、水平T106(約100km)鉛直31層である。

1.3 2006年度の業績

最初のステップは、SSTの日変化のインパクトを再現す

るために、海洋モデルの性能を検証した。1992年から2001年までの強制力を与え、鉛直解像度だけが301層と31層(表層グリッドの深さがそれぞれ1mと10mに相当する)の異なる2つの実験を実行した。Fig. 1上図は、鉛直301層での数値実験におけるベンガル湾南域における1992年4月の温度の時間発展を示している。春の季節進行にともなう表層の温度上昇と昼夜の変動がよく再現されている。Fig. 1下図における301層の結果(2時間平均温度の推移と5日平均の温度の推移を黒線で示している)と31層の結果(5日平均の温度の推移)から、解像度が高いと昼夜のサイクルが強化され、かつSSTの上昇を加速しており、Bernie et al. [2005]の1次元実験の結果と一致する。Fig. 2に示すSST日平均の違いは、日変化の影響が時空間的なひろがりをもっており、Vecchi and Harrison [2002]の観測によって示唆された領域の季節変化に重要な役割を果たしていることが示されている。

本数値実験では、潜熱フラックスを計算するために、2m高さの気温として換算された値を境界値として使用し、SSTの変化を計算した。この設定はすべての大気海洋間フィードバックを抑制することになる。そこで、大気海洋結合モデルにおいて鉛直301層と鉛直31層の2つの実験を行うことにした。この実験では、大気モデルとしてECHAM5を用いる。今年度の、結合モデルでの実験では、平均場と大きなスケールの変動についての検証に焦点をあてた。Fig. 3は、SSTの平均分布と観測値との差を示している。SST分布は、熱帯域および南極域において経度方向に温度が高い傾向にあり、中緯度域においては低い傾向がある。他の大気海洋結合モデルによる結果のほとんどの示される、太平洋赤道域における“コールドタン・バイアス”がないことに注目する必要がある。海水モデルの導入により、南極域における高温傾向は解消されるが、赤道域の高温傾向はまだ強すぎる。追加テストでは、大気上端における熱フラックス収支が、SST分布の改善のために重要なキーパラメータであることを示していた。太平洋および大西洋の赤道域における変動は非常によく改善され(Fig. 4)、季節サイクルの振幅は観測値に近い値を示し、太平洋における年間サイクルは、現実的なサイクルを示している。予測されたように、鉛直301層と鉛直31層の実験における平均場の相違は小さいが、季節内変動性においては改善が期待できる。これらの課題については、研究を開始した段階であり、来年度において十分な解析を行う予定である。

1.4 結果と展望

非常に高い鉛直解像度の海洋モデルを用いた大気海洋結合モデルを構築した。その結果、SSTの日変化サイクルにおける大きなインパクト再現し、地球気候の主要な特性を捕らえることができることを示した。2007年度は、モデル主要なバイアスの改良と熱帯域における季節内変動についての解析が、本プロジェクトの科学的な主要目標である。

2. 第2テーマ：北大西洋における熱輸送、栄養循環、CO₂ポンプの各バランスにおけるサブメソスケール物理の影響

2.1 目的

本プロジェクトの科学的な目的は、トレーサ分布や栄養循環、熱輸送、塩分輸送などの大きなスケールの収支における、渦やフィラメントなどサブメソスケール物理の寄与について、よりよい理解と定量化を行うことである。科学的な課題として下記が挙げられる。

- (1) サブメソスケール物理に起因した季節時間スケールでの真光層における栄養分が消費あるいは強化されることがあるか？
- (2) 有機物質のサブダクションや栄養循環におけるサブメソスケール物理の寄与は何か？

2.2 手法

CO₂が蓄積される重要な領域として知られる北大西洋を模擬して、3000km*2000 kmの規模で、偏向風と浮力を強制力とするダブル・ジャイア(二つの渦)を設定した。この設定は、西岸境界流、亜熱帯、極域に近い領域のモード水を再現するものである。Fig. 5に示すように、水平解像度と散逸が異なる5ケースのシミュレーションに着目した。最も現実に近い設定でのシミュレーションは、水平1/54度の解像度であり、生物地球化学モデル(LOBSTER)と海洋モデル(OPA9)をオンラインで結合したモデルによるシミュレーションである。小規模なスケールの影響は、以下の観点から評価した：

- ・異なる解像度に対する、熱的平衡状態、塩分の平衡状態、主要な生産物の分布等の平均場の比較
- ・各数値実験における混合層および温度躍層における大小異なるスケールでの輸送傾向の評価
- ・乱流の生物の応答における乱流の効果を分離するために、時間的、空間的条件をともに限定した生物地球化学モデルのオフライン実験の実行。

2.3 2006年度の業績

(1) モデル開発とシミュレーション

- ① 移流スキームと拡散パラメータを選定するための感度実験
- ② 生物—物理を結合したモデルを使用した50年のスピニングアップ数値計算(最も高い解像度でのスピニングアップは現在も進行中である)
- ③ 熱、塩分、生物化学トレーサの混合層における輸送傾向を診断するためのオンラインモジュールプログラムの開発
- ④ オフライン実験のための設定

(2) 解析

① 物理学的な解析

- ・一般に“数値計算上の安定性を確保するための拡散”として考えられる場合においてさえ、biharmonicスキームにおける拡散パラメータに対するモード水特性や温度躍層の予測より大きな感度に着目した解析。
- ・解像度を高くした場合における、速い鉛直速度に

伴うフィラメントの強い渦度の発生についての解析 (Lévy, 2006)。

- ・ 解像度を1/9度から1/54度まで変化させた結果は、1度から、全球海洋モデルでは最先端に位置づけられる1/9度まで変化させた場合と同じくらいの劇的な変化を示している。渦、温度躍層の成層、あるいはモード水特性への渦運動エネルギーの輸送に関連した平均場の相違。
- ② 1/3度の結合モデル実験結果の検証と解析
 - ・ 解析結果 (Fig. 6) は、亜熱帯モード水の低栄養濃度が、サブダクション時における冬季生成に起因することを示唆している。この大規模スケールにおける生成において水量が不足することの影響を解析した。次のステップでは、解像度を高くしたときに結果が変化するかについて解析する予定である。
- ③ 解像度 1/9度と1/27度それぞれの結合モデルによる実験結果の解析
 - ・ 解像度を高くした場合には、亜表層における栄養蓄

積が大きく変化する。この結果については、さらなる検証をしなければならない。この大きな変化は、主要産物のメソスケール渦による影響についての、現時点の私たちの理解に変化をもたらすだろう。この効果が、観測されている主要産物との相違点の主要な原因であると考えている。

参考文献

- Bernie, D. J., S. J. Woolnough, J. M. Slingo and E. Guilyardi, 2005: Modeling Diurnal and Intraseasonal Variability of the Ocean Mixed Layer., *J. Climate*, vol.18 (8), 1190–1202.
- Lévy, M., 2007: The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence, *Lecture notes in Physics, Transport in Geophysical flow: Ten years after*, in press.
- Vecchi, G. A., and D. E. Harrison, 2002: Monsoon breaks and subseasonal, sea surface temperature variability in the Bay of Bengal. *J. Climate*, 15, 1485–1493.