

氏名・(本籍)	ほそ だ こうたろう 細 田 皇太郎
学位の種類	博 士(理 学)
学位記番号	理博第1907号
学位授与年月日	平成13年9月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Mesoscale Variabilities in the Interior Ocean -Focusing on Effects of Bottom Topography- (海洋内部領域における中規模変動特性-海底地形の効果に着目して-)
論文審査委員	(主査) 教授 花 輪 公 雄 教授 川 村 宏, 岩 崎 俊 樹 助教授 須 賀 利 雄, 江 淵 直 人

## 論 文 目 次

1. General introduction
  - 1.1. Background
  - 1.2. Structure of the thesis
2. Mesoscale variability with 180-300 day period in the interior region detected by satellite altimeter
  - 2.1. Introduction
  - 2.2. Data and method
    - 2.2.1. Data
    - 2.2.2. Method
  - 2.3. General description using the spectral analysis
  - 2.4. Global distributions of characteristics of 180-300 day variability
    - 2.4.1. Amplitude and phase speed
    - 2.4.2. Spatial scale
  - 2.5. Relation among characteristics of 180-300 day variability
    - 2.5.1. Internal radius of deformation and spatial scale
    - 2.5.2. Amplitude and phase speed
    - 2.5.3. Dispersion relation
    - 2.5.4. Summary
  - 2.6. Discussion on 180-300 day variability in the North Atlantic
    - 2.6.1. Amplitude and vertical scale of interface displacement
    - 2.6.2. Phase speed and spatial scale
    - 2.6.3. Geostrophic velocity and Rhines scale
    - 2.6.4. Effect of bottom topography on disturbance scale
    - 2.6.5. Summary and discussion

- 2.7. Conclusion
- 3. A spectral theory of nonlinear quasigeostrophic motion over topography**
  - 3.1. Introduction
  - 3.2. Governing equations
    - 3.2.1. Introduction
    - 3.2.2. Review of 1.5 layer general geostrophic system
    - 3.2.3. Review of two layer general geostrophic system
    - 3.2.4. Evaluation of parameters
    - 3.2.5. Summary
  - 3.3. Resonant condition between barotropic wave and baroclinic wave over topography
    - 3.3.1. Introduction
    - 3.3.2. Case without mean flow
    - 3.3.3. Case with mean zonal current in upper layer
    - 3.3.4. Summary
  - 3.4. Direct Interaction Approximation in N-layer quasigeostrophic dynamics
    - 3.4.1. Introduction
    - 3.4.2. Basic equations
    - 3.4.3. Direct interaction decomposition
    - 3.4.4. Closed system of equations I: the streamfunction and the response function
    - 3.4.5. Closed system of equations II: the correlation functions
  - 3.5. Discussion on Direct Interaction Approximation
    - 3.5.1. Introduction
    - 3.5.2. The response function
    - 3.5.3. Topographic effect on the energy transfer function
    - 3.5.4. Summary
  - 3.6. Summary
- 4. Energy flux by eddy-topographic interactions in a numerical quasigeostrophic barotropic model: Comparison with DIA results**
  - 4.1. Introduction
  - 4.2. The numerical model
  - 4.3. Results
  - 4.4. Summary

## 5. Summary

### Acknowledgements

### Appendix

- A. General geostrophic dynamics over topography**
- B. Comparison between statistical mean and temporal mean in numerical quasigeostrophic barotropic model**
  - B.1. Introduction
  - B.2. Comparison between statistical mean and temporal mean:  $R_\sigma=0.252$
  - B.3. Effect of large or small Rossby number

#### B.4. Summary

#### References

#### Tables and Figures

## 論文内容要旨

海洋における空間スケール 100km程度の中規模変動は、数値モデルの研究などにより海盆規模の循環の形成への寄与が大きいことが知られている。中規模変動はRossby波として伝播することで海洋のspinup過程に関与し、また、その乱流的な性質は渦粘性の決定に大きく関わる。さらに、海洋の内部領域において渦運動エネルギーは平均の運動エネルギーを卓越することが知られており、中規模変動の振舞いの理解は海洋循環全体の理解に必須である。近年、中規模変動の伝播・波長および変動の強さに、海底地形が影響を与えていることが衛星観測のデータ解析から示唆されてきた。特に周期数ヵ月程度以上の低周波の変動における海底地形の影響が指摘されている。本研究では、低周波の海洋中規模変動の特性を衛星海面高度計による海面高度偏差データセットを用いた解析から考察するとともに、海底地形が中規模変動に作用する力学過程を準地衡近似の下で考察した。

第1章では序論として本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を示した。

第2章ではTOPEX/POSEIDONによる海面高度偏差データセットを用い、海洋内部領域の中規模変動の特性を記述した。海底地形の影響が指摘されてきた低周波の変動として180-300日周期に着目し、海面高度変動の空間スケール、位相速度および振幅から中規模変動の特性を考察した。ただし、中規模変動の空間スケールは衛星軌道に沿った海面高度偏差のピークを中心としたcompositeを作成し、その e-folding スケールと定義した。また、位相速度は格子化データセットを用いてラグ相関係数行列から求めた。その結果、空間スケールは傾圧第1モードの内部変形半径と比例関係にあることが示された。また、e-folding スケールが内部変形半径の2.5倍程度の変動の振幅が大きいことが示された。このことから、この周期帯の変動の空間スケールが海洋の内部成層に支配されていることが示唆される。その一方で、分散関係の考察からこの変動の伝播が順圧モードに強く影響を受けていることが示唆された。

北大西洋は180-300日周期の中規模変動が平均流の弱い海洋内部領域で明瞭なため、特に議論を加えた。位相速度は海盆東部と海盆西部で顕著に異なっており、海盆西部における位相速度は5cm/sを越える一方、東部では1~3cm/s程度である。また、海盆東部では海盆西部に比べて変動の空間スケールが小さいことも示された。分散関係から、海盆西部では順圧モードが支配的であるのに対し、海盆東部では傾圧モードの存在も示唆される。典型的な海底地形の空間スケールは東部では短く、西部では長い。このスケールと擾乱の空間スケールは同程度の大きさであり、内部領域ではこの2つの空間スケールの間には弱いながらも有意な相関が存在することが示された。このことから、海底地形が中規模変動の空間スケールに与える影響が示唆される。

第3、4章では、準地衡力学の枠組において、海洋の中規模変動にそれと同程度の空間スケールをもつ海底地形が与える影響について考察を加えた。これらの章では中規模変動は $\beta$ 効果によって線形Rossby波として振舞うと考え、海底地形を介したRossby波-Rossby波の相互作用の観点から海底地形の効果を考察した。第3章では準地衡力学における理論的な手法、第4章では準地衡数値モデルを用いた。

第3.3節では、準地衡2層モデルにおいて弱非線形を仮定し、共鳴理論による相互作用条件とRossby波の分散関係を用いて、地形を介した順圧・傾圧モードのモード間相互作用を3波非線形相互作用のモード間相互作用と比較した。考察した場合は、平均流が無い場と上層にのみ一様な東西流を加えた場であり、モ

ード間相互作用(傾圧波との相互作用)が可能な順圧波の波数ベクトルの範囲を求めた。平均流の有無に関わらず、非線形3波相互作用では傾圧波と相互作用ができない順圧波が、地形を介することで傾圧波と相互作用できることが示された。このことは、地形上でモード間相互作用が起こりやすくなることを意味する。上層に一様流が存在するときには、地形を介した波-波相互作用および非線形3波相互作用いずれにおいても、モード間相互作用が不安定を生じ得ることが過去の研究で示されている。この節の結果から、地形の存在がモード間相互作用を起こしやすくし、変動を活発化することが示唆される。

第3.4節では乱流理論における直接相互作用近似の方法を、準地衡・ $N$ 層モデルに適用することで地形を介した相互作用と非線形相互作用によるエネルギー変化を表す方程式を求めた。この方程式は流線関数と、非線形過程を組み込んだ応答関数、同時刻相関関数および異時刻相関関数で書かれる。この方程式系を用いて、第3.5節では特にエネルギー伝達関数に着目して地形の効果を考察した。ここで、エネルギー伝達関数とは非線形相互作用および地形を介した相互作用によって、流線関数の同時刻相関に与えられる時間変化項である。その結果、地形を介したエネルギー伝達関数の大きさが地形の波数ベクトルの方向に依存することが示された。すなわち、地形の南北方向波数( $k_y$ )が東西方向波数( $k_x$ )よりも大きいとき( $k_y > k_x$ )、地形の影響によりエネルギーが効率的に伝達される。これは1層モデルにおける順圧モードにおいて特に顕著に現れる。

第4章では、第3章の直接相互作用近似から求められた結果を数値モデルを用いて検証した。用いたモデルは準地衡順圧数値モデルで、周期境界条件の下randomな初期擾乱を与え、乱流が平衡状態になるまで15000時間積分し、その平衡状態におけるエネルギー伝達関数を解析した。水平解像度は5km×5kmで格子点の数は512×512、層全体の深さは1000mである。ここでは、単色波の海底地形による影響を評価した。地形の高さは200m、波長は269kmで、波数vectorの方向を変えた4例の実験を行った。その結果、第3.5節で求められた結果と定性的に一致する特徴を示した。すなわち、地形の波数vectorにおいて $k_y > k_x$ であるとき、エネルギー伝達関数が大きくなることが示された。

第5章では、本研究のまとめと今後の課題を述べた。本研究では、内部領域における中規模変動の振舞いに着目し、衛星観測による海面高度偏差のデータからその力学的な特徴を記述した。また、中規模変動と同程度の空間規模を持つ海底地形が変動に与える影響を準地衡力学において考察した。

理論的考察の結果から、擾乱が増幅するモード間相互作用は地形上で活発であることが示唆される。このことは東部北大西洋における、空間スケールの小さい地形による擾乱の増幅を示唆する。順圧波の波数に対する束縛条件から、 $k_y > k_x$ の順圧擾乱が活発であることが期待される。これは直接観測などによって今後検証する必要がある。理論および数値モデルの結果から示唆されるエネルギー伝達関数の非等方的な性質は、渦-地形相互作用による渦粘性のパラメータ化に反映されることが求められる。

## 論文審査の結果の要旨

海洋には直径数百キロメートル、周期数カ月程度の中規模変動(あるいは中規模渦)が充満している。しかし、これら中規模変動の形成・伝播・消滅過程などの詳しい実態や、大循環に及ぼす効果などはまだよくわかっていない。

細田皇太郎提出の論文は、海洋内部領域における中規模変動の実態を、1992年に打ち上げられたTOPEX/POSEIDON衛星搭載の高度計の資料を用いて観察し、さらにそこで見出された変動特性の空間分布を、海底地形を介した波動間の弱非線形相互作用の観点から理論的・数値的に説明を試みたものである。

まず海面高度資料の詳細な解析から、全海洋における周期180日から300日の中規模変動の実態を考察した。その結果、卓越している中規模変動の空間スケールは傾圧第1モードの内部変形半径の約2.5倍と比例関係にあること、また分散関係の考察から順圧モードに影響を受けていることを示した。次に中規模変動が特に卓越する北大西洋の内部領域を対象として、海底地形と中規模変動の関連を詳しく解析した。その結果、大西洋中央海嶺を挟み、その東西で変動特性に顕著な差異が存在することを見出した。すなわち、海盆西部では東部に比較して位相速度、空間スケール、ともに大きい。この空間スケールは海底地形の代表的スケールと同程度であり、海底地形と中規模変動との相互作用を強く示唆するものであった。

以上観察された中規模変動特性の差異の一端を説明するため、海底地形を介した波動の弱非線形相互作用を理論的に考察した。その結果、波動同士による3波共鳴相互作用よりも地形を介した2波相互作用がより広範な波数空間で不安定になりやすいことが示された。この傾向は、上層に集中した流れ、すなわち鉛直シアが存在すると一層顕著になる。さらに、変動場に乱流理論における直接相互作用近似を適用し、海底地形の存在がエネルギー輸送に与える影響を示した。ある条件下では海底地形の存在は、その波数よりも低波数側の変動へのエネルギー輸送を促進する。さらに、数値モデルによりこの直接相互作用近似で求められた理論的結果の検証を試みた。その結果、理論で求められた結果が実際モデルでも再現されることを示した。

以上の研究成果は、本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、細田皇太郎提出の博士論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。