

氏名・(本籍)	くぼかわ 久保川 厚
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 892 号
学位授与年月日	昭 和 63 年 6 月 29 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和58年 3 月 東北大学大学院理学研究科 (博士課程前期 2 年の課程) 地球物理学専攻修了
学位論文題目	Instability and Nonlinear Evolution of Surface Density Fronts and Boundary Currents (海面密度前線並びに境界流の不安定と非線形発展)
論文審査委員	(主査) 教 授 鳥 羽 良 明                      教 授 田 中 正 之 助 教 授 花 輪 公 雄

## 論 文 目 次

### Contents

- Chapter 1. General introduction
- 1.1. Motive of the present study
  - 1.2. Organization of the present paper
- Chapter 2. Nonlinear longwaves on a boundary current with a surface front
- 2.1. Introduction
  - 2.2. Formulation
  - 2.3. Semigeostrophic gravity waves
  - 2.4. Effect of ageostrophic currents  $O(\delta^2)$
  - 2.5. Intrusion of a density current along a coast
  - 2.6. Summary and discussion

Appendices to Chapter 2

Chapter 3. Instabilities of one-layer fronts

- 3.1. Introduction
- 3.2. Formulation
- 3.3. Instability of an isolated front
- 3.4. Instability of a boundary current with zero potential vorticity
- 3.5. Energetics
- 3.6. Summary

Appendices to Chapter 3

Chapter 4. Instability and nonlinear evolution of a boundary current with a surface front  
in a two-layer ocean

- 4.1. Introduction
- 4.2. Model configuration and nondimensionalization
- 4.3. Nonlinear wave equations
- 4.4. Linear stability and nonlinear wave solutions
- 4.5. Temporal evolution of nonlinear waves
- 4.6. Summary and discussion

Chapter 5. Instability and nonlinear evolution of a boundary current in a quasigeostrophic  
 $\beta$ -plane model

- 5.1. Introduction
- 5.2. Formulation
- 5.3. Linear stability and soliton solutions
- 5.4. Nonlinear growth of a solitary disturbance on a linearly stable current
- 5.5. Application to the Kuroshio trigger meander

Chapter 6. Conclusion and remarks

Acknowledgments

References

Tables and figures

# 論文内容要旨

海流の中規模スケールの変動の力学は海洋物理学の重要な研究対象のひとつである。これまでの理論的な研究では、この問題は主に準地衡流理論の枠組の中で論じられてきた。しかし、現実には海面密度前線を伴う海流も多く、また、ロスビー数も必ずしも小さくはない。そのような海流上の擾乱には水平流速の発散も重要となり、準地衡流近似を適用することはできない。そこで、本研究では、前線を伴う海流上の擾乱の力学を明らかにすることを第一の目的とした。特に、論文の後半では、非線形力学と Killworth *et al.* (1984) によって示された前線の傾圧的な不安定がともに重要である場合についての簡潔な理論を提出する。この理論は境界流並びに前線上の孤立擾乱や渦に対する新しい視点を与えるものである。同様の理論は準地衡流 2 層  $\beta$  平面モデルからも構築可能であり、これについても議論する。各章で扱った題材及び結果は以下の通りである。

2 章では、まず、海面密度前線と陸岸に挟まれた渦位が一様な境界流上の長波擾乱のふるまいについて調べた。このような海流はコリオリ力と冲向きの圧力傾度力の釣り合い（地衡流平衡）により、北（南）半球では岸を右（左）手に見て流れる。本章では、下層は十分に深く上層のみに運動が集中していると仮定した。この系には、岸に捕捉された波と前線に捕捉された波の 2 種類の波が存在する。以下ではこれら 2 つの波をそれぞれ沿岸波、前線波と呼ぶ。なお、本章では長波擾乱のみを扱ったが、この長波というのは、波長がロスビーの変形半径に比べて十分に長い波を言い、この条件下では冲向きの力のバランスは地衡流平衡によって表すことができる。

沿岸波は、ある極限で初等的なケルヴィン波に一致する下流へ伝播する波であり、他方、前線波は流れに相対的に上流へ伝播する波である。非線形性により、凸型の擾乱を考えた場合には、沿岸波は下流側に、前線波は上流側に突っ立つ傾向を持つ。弱非線形性と非地衡性もしくは有限波長の効果を考慮するとこれらの波動は Korteweg-de Vries (KdV) 方程式に支配されることがわかる。また、このとき、沿岸波の下流向きの位相速度は波長が短いほど小さくなり、前線波では逆に大きくなる。これらの結果は、以下の章での議論の基礎となる。

2 章の後半では先に得られた長波理論の直接の適用として、回転系での岸に沿う密度流の侵入を扱った。この場合には弱非線形の仮定は使えず、また、分散性も重要とはなりえない。そこで、沿岸波の衝撃波としてモデル化した。モデルの妥当性を調べるために室内実験を行いモデルの結果と比較した。実験における流れの幅並びに密度流の先端の侵入速度は、理論モデルの予測とほぼ一致した。また、実験では密度流の先端で波動の発生が観察されたが、この波動の伝播速度は前線波の長波極限でのそれとよい一致を見た。

2 章の擾乱が KdV 方程式に支配されるという結果は、沿岸境界流上に比較的安定な孤立擾乱が存在しうることを示唆する。安田 他 (1988) によって観測された津軽暖流の孤立擾乱はそのような現象の候補ではあるが、他の海流では不安定波と思われる擾乱がよく観測される。

そこで、3章では、広い波数領域の擾乱に対する海流及び前線の安定性を調べた。この章でも上層の運動のみを扱った。準地衡流モデルでは、流れが不安定であるためには渦位の傾きがどこかで逆転していなければならない。しかし、この系には準地衡流理論が適用出来ないので、以下で見るようにこの条件は緩和される。

本章では、まず、外洋の黒潮前線のようなものを念頭に置き、渦位がほぼ一様な孤立前線の安定性を調べた。この場合岸が存在しないので、可能な波は前線波のみである。もし、この前線波の臨界点において渦位が前線向きに減少しているならば流れは不安定化することが示された。次に、2章で考えたような境界流の安定性を渦位がゼロという条件下で調べた。この場合には、海流の幅がある臨界値より広い場合には不安定になる。この不安定は前線波と沿岸波の結合によって生じる。

本章の後半では、前線モデルに現れる不安定波動をエネルギー論の立場から議論した。まず、『正のエネルギーの波』と『負のエネルギーの波』という概念を導入した。ここで、沿岸波は『正のエネルギー』を、前線波は『負のエネルギー』をもつ。もし渦位傾度が前線向きに正（負）ならば正（負）のエネルギーの波が不安定化されること、また、もし渦位が一様に分布しているならば、エネルギーがゼロの波のみが成長しようが示された。エネルギーゼロの波は正のエネルギーの波と負のエネルギーの波が分散図上で出会った場合に生じる。これらの結果は、流れの安定性について詳細な計算を行うことなく、ある程度の予測を行うことを可能にする。

ここまでの議論では、下層が十分に深く、運動が上層のみに集中しているという仮定を用いてきた。しかし、現実の海洋では下層の流体の運動も重要である。Killworth *et al.* (1984) は孤立前線についてこの問題を調べ、下層の運動を考慮に入れると孤立前線は上層の渦位分布によらず常に不安定であることを見出している。この不安定は、密度境界面の傾きに伴う下層の渦位傾度を復元力とする渦度モードの波と、前線波が結合することによって生じる傾圧的なものである。4章では、前線を伴う境界流について、弱い非線形性を考慮して定式化を行った。上層が下層に比べて薄い場合には、下層の渦位傾度は小さくなる。他方、前線波の長波極限での伝播速度は、海流の岸での流速が小さい場合には小さくなる。それ故、そのような場合には傾圧的に不安定な波の波長は長くなる。そこで、本研究では長波のみに焦点を当て、また、簡単化のために、上層の渦位がゼロであると仮定した。この場合には3章で議論した不安定は現れない。2章で論じたように、沿岸境界流上の前線長波はKdV方程式に支配される。下層の運動も考慮すると、上層の方程式には下層とのカップリングを許す新たな項が加わる。

線形安定性並びにこの方程式に支配されるクノイダル波と孤立波解については解析的に調べ、擾乱の非線形発展については数値的に調べた。海流は流速がある臨界値よりも大きい場合には線形安定となる。しかし、そのような場合にもある振幅領域にはクノイダル波や孤立波解は存在しない。その臨界振幅、 $a_c$  と  $a'_c$  ( $a_c < a'_c$ ) は海流の強さと波長の関数である。この振幅領域に存在する孤立擾乱は下層に渦対型の構造を伴って成長する。そして、その振幅が  $a'_c$  を越えた後に大振幅の孤立波が下層の渦対型の構造から分離し、上流に向けて進行する。他方、

線形不安定な場合には微小振幅波は成長するが、この不安定モードも無限に成長する訳ではなく、 $a'_c$ を越えた後に最大振幅をとる。そして、その後振幅は時間的に振動する。複数の不安定波を初期値として与えた場合は、不安定波間の非線形相互作用により孤立擾乱が生成される。個々の孤立擾乱は成長と減衰を繰返し、乱流的な現象が生じる。

この章で扱った非線形不安定論において、線形安定な場合とは、上層に捕捉された前線波動の伝播速度が波数によらず下層の渦度モードの波より速い場合である。しかし、前線波は2章で論じたように KdV 方程式に支配され、その伝播速度は振幅にも依存する。すなわち、有限振幅前線波は線形の前線波の最小の伝播速度よりも小さい伝播速度を持つことができる。それ故、線形安定な場合でも、有限振幅波を考えれば、渦度モードの波との結合による不安定が可能になる。

上述の理論では、海面前線の存在と上層の渦位がゼロであるという仮定を用いているので、その適用可能な対象はケルヴィン波の伝播方向に流れる強い海流に限られる。そこで、5章では、同様の問題を準地衡流  $\beta$  平面モデルに基づいて再定式化した。準地衡流渦位方程式は水平シアを伴う流れの中の非線形波動の研究にしばしば用いられてきており、シア一流中の弱非線形長波が KdV もしくは変形 KdV 方程式に支配されることはよく知られている。したがって、4章と同様の摂動法と  $\beta$  効果が弱いという条件を用いれば、東西に流れる傾圧境界流上の弱非線形長波は4章のものと同種の方程式に支配されることが予想される。

方程式の導出後、まず、単純な流れのプロファイルを仮定し、線形安定性と孤立波解について調べた。もし  $\beta = 0$  ( $f$  平面) ならば、4章のものと定性的には同じ結果が得られる。しかし、 $\beta \neq 0$  のときには西向きに伝播する中立波はロスビー波として冲向きに放射され、岸近くには捕捉されない。換言すれば、西向きの波は連続モードとなる。流れが西向きのときは上層のシアー波がこの連続モードの波と結合するため、海流の強さによらず不安定となる。他方、東向きの流れは、 $f$  平面の場合と同様、岸での流速がある臨界値よりも大きい場合に安定となる。この臨界値は  $\beta$  の関数であり、 $\beta$  が大きい程小さくなり、 $\beta$  がある値よりも大きくなると流れは流速によらず安定になる。また、この場合には、 $f$  平面の場合とは違い、上流へ向かう孤立波解は存在しない。

4章では、擾乱の非線形発展は数値計算のみによって扱われたが、この章では、線形安定な東向流上の成長する孤立擾乱の解析解を求めた。さらに、数値計算により  $\beta$  平面上のこの解の発展を調べた。第2の臨界振幅、 $a'_c$ を越えるまでは、定性的には4章の発展と同じであるが、 $a'_c$ を越えた擾乱は上流(西)へ伝播しながら、ロスビー波を放射する。このロスビー波の放射に伴ない、西向き伝播速度はゼロに近づく。さらに本章では、この成長擾乱を黒潮が直進流路から蛇行流路に移る時に観測される黒潮小蛇行(引金蛇行)と比較した。その結果、Yoon and Yasuda (1987) の数値実験で再現された引金蛇行の特徴並びにその時間スケールを、この成長する孤立擾乱によってかなりの部分まで説明できることが判った。

最終章である6章では本研究の結果をまとめるとともに、密度前線モデルに現れる波と準地

衝流モデルに現れる波の関係について議論した。本研究は、密度前線並びに境界流の長波の非線形性、分散性、不安定性について総合的に調べたものであるが、簡単化のために多くの仮定が導入されており、観測と定量的な比較を行ってよいというものではない。現実と定量的に比較するためには観測に基づいてモデルを作成する必要がある。しかし、複雑な数値モデルの結果等を正しく理解するためにも、また、限られた観測データから現象を的確に把握するためにも、このような単純化されたシステムでの基礎的な研究は必要不可欠である。今後は本研究の結果を基礎とし、仮定を緩める、もしくは、ここで考慮していない効果を含めること等により、現実を理解する上において、より有効な理論へと発展させていく必要がある。特に、4章と5章で扱った非線形成長擾乱の発展に及ぼす高次の非線形性等の影響の研究は今後の重要な課題である。

## 論文審査の結果の要旨

海流並びに海流上の中規模擾乱についての従来の理論の多くは、密度や流速が水平方向にはゆるやかに変化するという仮定に基づいている。しかし、現実の海洋では海水の密度は必ずしも水平方向にゆるやかに変わっているわけではなく、所々で急激に変化している場合も多い。このような密度の異なる海水が接している面が海面に露出している所を海面密度前線と呼ぶ。前線は密度差に伴う圧力傾度力と前線に沿う流れによるコリオリ力の釣り合いによって維持されるが、近年、人工衛星の赤外画像による海面水温分布構造の観測によつて、前線上には波動状の擾乱や孤立した擾乱が存在することが明らかになってきた。本研究は、主に、このような海流に伴う前線上の擾乱並びにその非線形発展について理論的に調べたものである。

申請者は、まず2章において、下層が静止したモデルを用いて前線を伴う沿岸境界流上の非線形長波の性質について調べ、擾乱の振幅が小さい場合には、この系に現れる前線捕捉波と沿岸捕捉波はともに Korteweg-de Vries 方程式に支配されることを示している。このことは、境界流上には孤立した擾乱が存在しうることを意味し興味深い。さらに、回転系での静止海への低密度水の侵入について、非線形非分散方程式に基づく簡便な理論を提出し、水槽実験との比較を行っている。また、3章では同種のモデルを用い、孤立した前線や前線を伴う沿岸境界流の線形擾乱に対する安定性を調べてる。特に、エネルギー論からの考察により、この系に現れる3種類の不安定を明確に分類している。

4章では、申請者は弱非線形理論を下層の運動も重要である場合に拡張している。この場合には下層の渦位傾度を復元力とする波と前線捕捉波の結合による不安定も起きる。その結果、海流が線形擾乱に対して安定であったとしても、ある振幅領域の波は成長できること、また、線形不安定な波の振幅と位相速度が振動するなど興味深い結果を提出している。申請者は、5章において同様の理論を準地衡流渦位方程式を用いて再定式化し、この理論が前線を必要としないことも示している。さらに、線形安定な海流上の孤立した成長擾乱の解析解を提出し、地球上のコリオリパラメータの緯度変化の影響も論じている。この非線形不安定論は海流の安定性に対して新しい基礎を与えるものと期待されている。

このように本論文は、堅実な理論的取扱いにより、海面密度前線並びに境界流の不安定と非線形発展について、種々の興味深い新知見を得たものであり、久保川厚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。よつて、久保川厚提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。