

学 位 論 文 題 名

Form drag in quasigeostrophic flow over
sinusoidal topography

(サイン型地形上を流れる準地衡流における形状抵抗)

学位論文内容の要旨

南極大陸の周りのドレーク海峡の緯度帯は、大陸に遮断されことなく地球を一周することのできる唯一の緯度帯である。このため、この海域では、海洋循環論の基本的枠組であるスベルドラップバランスが成り立たず、力学の理解が遅れている。

この海域では、偏西風により南極周極流と呼ばれる強い流れが駆動されている。底が平らなモデルで適当だと考えられる粘性係数を使って南極周極流の流量を計算すると実際の流量よりもはるかに大きな流量になってしまい、逆に実際の流量になるようにするには粘性係数を非常に大きな値にしなければならないという問題があった (Hidaka のジレンマ)。それに対し Munk and Palmén (1951) が南極周極流の運動量のシンクは海底地形による形状抵抗であると提唱し、現在ではその考えが最も支持されている。しかし、その一方で、形状抵抗という概念が分かりにくいことから、この考えに否定的な人もいる (Warren et al. 1996)。実際、形状抵抗は、流量に直接的に依存しないため、形状抵抗と海面風応力が釣り合ったときに、流量がいくらになるかということとは不明のままである。

そこで本研究では、形状抵抗と流量の関係を調べることを目的とし、数値計算、数値実験を行った。形状抵抗と流量の關係に焦点をあてるために、帯状運動量のシンクが形状抵抗のみであるような非常に単純な系で研究を行った。モデルは順圧準地衡流、領域はサイン型海底地形をもつ東西方向にのびる β 平面水路とした。与える風応力は時間的にも空間的にも一定とし、 $\text{curl}\tau = 0$ とした。これは、矩形の海洋循環とは異なり、水路海洋においては、 $\text{curl}\tau$ ではなく τ そのものが重要だと考えられるからである。このモデルにおいては、流量は帯状平均流速に比例する。

まず系の定常解を変形マルカート法 (LMM 法) を使って求め、得られた定常解の線形安定性を調べた。LMM 法は初期推測解を必要とし、その推測解に近い定常解が得られる。本研究では、まず非粘性厳密解を初期推測解として与えて定常解を求めた。このとき得られる定常解は線形近似解に近い準線形解である。

帯状平均流速 U をパラメタとして、 $U = 0$ から U を大きくしていき定常解を求めていくと、安定な準線形解が得られる U には上限があり、それを越えると定常解は求まらないか、あるいは求まっても不安定な定常解であった。この臨界流速は、海底地形よりも高次のロスビー波の位相速度の大きさにほぼ一致し、非線形項による強制により高次モードが共鳴することが原因と推察された。

臨界流速より大きい U に対し、準線形解が不安定だった場合に、その不安定定常解を初期値とし、 U を定数にして数値積分を行うと、形状抵抗が非常に大きい 2 種類の強非線

形定常解が存在することが示された。1つは、奇モードに対し不安定な対称モードからなる定常解で、もう1つは非対称なモードからなる安定な定常解である。これらの解は、臨界流速より小さい U に対して得られた安定な準線形解とつながっており、それがビッチフォーク型分岐したものである。臨界流速より大きい U に対して形状抵抗の大きな安定定常解が存在するということは、高次モードの位相速度に対応する臨界流速を境として、形状抵抗が急激に大きくなることを意味する。このような解の性質を広いパラメタ空間 (帯状平均流速 U , 拡散係数, 海底地形の振幅 η_0) において詳細に調べた。その結果、海底地形の振幅が大きくなればなるほど臨界流速はより高次のロスビー波の位相速度の大きさへと移っていった。すなわち、より小さい帯状平均流速を境にして安定な準線形解がなくなっていく。しかし、どのケースにおいても臨界流速以下では安定な準線形解が存在し、臨界流速より大きい U に対しては、形状抵抗の大きい強非線形定常解が2種類存在するという解構造は共通である。通常重要であると考えられている海底地形と同じ波数を持つ波の共鳴は解の性質に影響を与えなかった。

次に静止状態の水路海洋に風応力 τ を与える数値実験を行った。 τ が十分小さく、安定な準線形解が存在する場合には、その定常解に収束し、 τ の増加とともに定常時の U も大きくなった。 τ が十分大きく安定定常解が得られていない場合には無限に加速された。その中間の τ の場合には、帯状平均流速 U は幅広い τ の値に対し、 τ の値によらず、ある一定の値の近傍で定常になるかあるいは振動するかであった。振動する場合でも、最大値と最小値の平均値はほぼ一定の値となった。この値は海底地形よりも高次の波の位相速度の大きさ近傍になっており、 η_0 が大きいほど、より高次の波のものになっている。すなわち、LMM法で得られた臨界流速近傍になった。

LMM法で得られた形状抵抗の大きい強非線形定常解のうち、安定で非対称な解は U が変動する場合には、形状抵抗不安定になるため (Tung and Rosenthal, 1985), この数値実験では実現されない。一方、奇モードに不安定な定常解が存在する大きさの風応力を与えた場合には、一旦、その不安定解で加速が止まる。しかし、不安定成長する奇モードの振幅が十分大きくなると再び加速が始まりそれ以降加速が止まることはない。加速が止まり定常に達したり振動したりする場合は、帯状平均流速 U は臨界流速近傍であり、それ以外の場合は無限に加速され、数値実験においても海底地形との共鳴流速近傍で定常に達したり振動したりするケースは見られなかった。

以上の結果から、このような水路海洋を加速させた場合には、定常に達したときに取り得る帯状平均流速は、 τ よりも海底地形の振幅 η_0 や拡散係数に依存して決まっていて、海底地形よりも高次の波の位相速度の大きさ近傍になっている可能性があることが示唆される。海底地形よりも高次の波の非線形共鳴によってその波の共鳴流速で形状抵抗が大きくなるためと考えられる。現実の南極周極流の流量もこのようなメカニズムによって決定されているならば、南極海に吹いている偏西風の強さが大きく変化しても南極周極流の流量はほとんど変化しない可能性がある。

学位論文審査の要旨

主査	教授	久保川	厚
副査	教授	池田	元美
副査	教授	三寺	史夫
副査	教授	増田	章 (九州大学応用力学研究)
副査	助教授	向川	均 (京都大学防災研究所)

学位論文題名

Form drag in quasigeostrophic flow over sinusoidal topography

(サイン型地形上を流れる準地衡流における形状抵抗)

南極海のように大陸に遮断されることなく等緯度線に添って地球を一回りできる海洋では海洋循環論の基本的枠組であるスベルドラップ平衡は成り立たず、その流量がどのように決まるのかは必ずしも明らかではない。南極海には、強い偏西風により、南極周極流と呼ばれる東向きの海流が作られている。偏西風によって海洋に与えられた運動量が何らかの形で取り除かれな限り海流の流量は非常に大きくなる。Munk and Palmén (1951) は運動量シンクを海底地形による形状抵抗に求め、現在ではその考えが最も支持されている。しかし、形状抵抗の数学的表記は帯状流速を陽には含まず、それ故、それによって流量がいくらになるかははっきりしない。また、近年に至っても、この考えに否定的な意見もある (Warren et al. 1996)。

そこで、申請者は、帯状運動量のシンクが形状抵抗のみであるような単純な系で、帯状流と形状抵抗の関係を明らかにすべく研究を行った。モデルは順圧準地衡流 β 平面水路、底地形はサイン型とし、与える風応力は時間的にも空間的にも一定とした。底地形がサイン型の順圧 β 面水路という単純な系での流れと底地形の相互作用に関する研究は、気象学の分野で大気ブロッキング現象等との関連で多くなされてきている (Charney and DeVore 1979, Rambaldi and Mo 1984 等)。しかし、この研究はそれらよりも散逸が小さくて非線形効果の強いパラメータ領域を扱っており、その点が異なる。

申請者はまず系の定常解を変形マルカート法 (LMM 法) を使って求め、さらに、得られた定常解の線形安定性を調べた。まず、帯状平均流速 U を制御パラメータとして定常解を求めることにより、解析的に得られる線形解に近い解 (準線形解) は、ある臨界流速越えると不安定化する、もしくは、LMM 法では得られなくなることを見出した。この臨界流速は南北波数が地形のものよりも大きなロスビー波の位相速度に対応していた。申請者は線形解析により、この位相速度でも共鳴が起きうることを示した。さらに、広いパラメータ (地形の振幅、粘性係数) 空間で計算を行い、この臨界流速は、地形の振幅と粘性係数

に依存することを示した。地形の振幅が大きい、もしくは、粘性係数が小さい場合には、より高波数のモードの位相速度で遷移が起った。この臨界流速よりも大きな U に対しては、異なる初期推測解を用いた LMM 法により、形状抵抗が非常に大きい 2 種類の強非線形定常解が得られた。1 つは、奇モードに対し不安定な対称モードからなる定常解で、もう 1 つは非対称なモードからなる安定な定常解である。これらの解は、臨界流速より小さい U に対して得られた安定な準線形解とつながっており、それがピッチフォーク型分岐したものである。臨界流速より大きい U に対して形状抵抗の大きな安定定常解が存在するということは、高波数モードの位相速度に対応する臨界流速を境として、形状抵抗が急激に大きくなることを意味する。

次に、申請者は、静止状態の水路海洋に風応力 τ を与える数値実験を行った。 τ が十分小さく、安定な準線形解が存在する場合には、その定常解に収束し、 τ の増加とともに定常時の U も大きくなった。ある程度 τ が大きく、定常時の U が臨界流速近傍まで来ると、幅広い τ の値に対し、帯状平均流速 U は τ の値によらず、臨界流速近傍で定常になるかあるいは振動するかであった。定常に達する場合は LMM 法で得られた定常解に一致した。振動する場合でも、最大値と最小値の平均値はほぼ一定の値であり、LMM 法で得られた臨界流速近傍になった。安定定常解が得られていない大きな τ に対しては、海底地形との共鳴流速近傍で定常に達したり振動したりすることもなく、無限に加速された。

申請者は、LMM 法と数値実験により、この系の解の振る舞いを丹念に調べた。地形の波数よりも南北波数の大きなロスビー波の位相速度における解の遷移は、申請者のこの研究によりはじめて見いだされたものである。また、このモデルにおける臨界流速近傍での急激な形状抵抗の増大は、平均帯状流速が風応力よりも海底地形の振幅や粘性係数に依存して決まることを意味し、もし、現実の南極周極流の流量もこのようなメカニズムによって決定されているならば、南極海上の偏西風の強さが大きく変化しても南極周極流の流量はあまり変化しない可能性があることが示唆される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また、研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が博士(地球環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。