

学 位 論 文 題 名

Physical interpretation of unstable modes of a linear shear flow in shallow water on an equatorial beta plane

(赤道 β 平面浅水系の線形シア一流中で発生する
不安定モードの物理的解釈)

学位論文内容の要旨

慣性不安定現象は、複数の惑星大気中で起こっていると言われている。地球の冬期に於ける上部成層圏赤道域では、正負の温度偏差が鉛直方向に交互に重なって現れる、パンケーキ構造が衛星によって観測されている (Hitchman *et al.*, 1987 ; Fritts *et al.*, 1992; Hayashi *et al.*, 1998 ; Smith and Riese, 1999). Hitchman *et al.* (1987) や Hayashi *et al.* (1998) らはこの構造の現れる場所がポテンシャル渦度 PV とコリオリ・パラメータ f の積が負となる領域 (後述する慣性不安定領域) に対応していること、擾乱の空間構造が慣性不安定モードのそれとよく似ていること、を根拠としてパンケーキ構造は慣性不安定であると論じている。一方、地球だけではなく、金星やタイタンでも赤道付近に慣性不安定領域が存在しうることが、GCM シミュレーションにより示されている (Allison *et al.*, 1994). また、木星型惑星においても、慣性不安定による角運動量の混合が、上層における帯状風プロファイルの維持機構の一つとして働いていると議論されている (Allison *et al.*, 1995).

本研究では、以上の世の中の議論に対して、2つの問題を提起する。1つめは言葉の濫用の問題である。地球大気で観測されたパンケーキ構造は、東西非対称な構造をしており、いわゆる東西対称な慣性不安定 (Eliassen, 1952; Charney, 1973) とは異なる。しかし、理論的な考察が十分なされていないにもかかわらず、パンケーキ構造は慣性不安定モードであるという議論が定着してしまった。赤道域の慣性不安定の理論的な考察は、Eliassen(1952), Charney(1973) による f 平面上の慣性不安定の議論を赤道 β 平面に適用した Dunkerton (1981) や Stevens (1983) に始まる。彼らは、東西対称基本場を用いて、 $PV \cdot f$ が負となる領域 (以下では、慣性不安定領域と呼ぶ) が存在する場合には慣性不安定が発生することを示した。これを受けて、Boyd and Christdis (1982), Dunkerton (1983) は、赤道 β 平面上の東西対称基本場に発生する東西非対称な不安定モードについて考察した。彼らは、東西非対称な不安定モードの振幅も慣性不安定領域で大きくなることを示し、この結果をもとに彼らが得た東西非対称な不安定モードを慣性不安定モードと呼んだ。Hitchman *et al.* (1987) や Hayashi *et al.* (1998) はこの結果をもとに、東西非対称なパンケーキ構造を慣性不安定である、と言った。しかし、Boyd and Christdis (1982), Dunkerton (1983) が得た東西非一様な不安定モードがいわゆる慣性不安定と同じメカニズムで生じているかどうかはまったく検討されていない。現状では、慣性不安定という言葉があまりに安易に使われている。

2 つめの問題として、赤道域のシア一流中に発生する不安定に関する理解は意外にも浅いものだという点がある。赤道域のシア一流中に発生する不安定のメカニズムとして、Boyd and Christdis(1982) は、南北シアーが小さい場合には赤道ケルビン波が不安定化し、南北シアーが大きい場合には赤道ケルビン波が不安定化したものが慣性不安定モードになることを議論している。Natarov and Boyd (2001) では、シアーの大きさを方程式系を漸近展開することで、シアーがある場合には赤道ケルビン波は必ず不安定化することが示されている。ところが、両論文ともに、なぜ赤道ケルビン波が不安定化するのかといった物理的な解釈は行われていない。また、複数の惑星大気で慣性不安定が発生する可能性が指摘されているにもかかわらず、惑星大気を想定した広いパラメータ範囲にわたって赤道のシア一流中で発生する不安定モードにはどのようなものがあるのか、それら不安定ではメカニズムの相違はあるのかということは調べられていない。ケルビン波以外に不安定化する波は存在しないのかどうかもまったく調べられていない。赤道域から亜熱帯や中緯度域にまで拡張した系で不安定モードを探索した例 (Stevens and Ciesielski, 1986; Winter and Schmitz, 1998; Iga and Matsuda, 2003) では、複数の種類の不安定モードが存在するらしいということが示されているのだがいずれも基本場が難しいなどの理由により各不安定モードの解釈は不十分なものとなっている。

そこで本研究では、赤道域の線形シアー中に生じる不安定モードを広いパラメータ範囲にわたって求め、得られた不安定モードのそれぞれが物理的に性質の異なるものであるかどうかを検討した。解釈を行なうことが可能となるように、基本場には簡単な線形シアー流を用いる。赤道 β 平面浅水方程式系を用いて固有値計算をおこない、赤道 β 平面上のシアー流中に発生するあらゆる不安定モードを求めた。さらに、中立波の共鳴という観点から、得られた東西対称な不安定モードと東西非対称な不安定モードが物理的に性質の異なるモードであるかどうかを検討した。慣性不安定と呼ばれてきた東西非対称不安定モードを本当に慣性不安定と呼んで良いのかどうかに対して答えを提示する。

まず、無次元パラメータである Lamb パラメータ E を変化させて、不安定モードの有無・モードの構造・方程式中の各項のバランスを調べた。その結果、 $\log E < -1.0$ では不安定モードは存在しないこと、 $-1.0 < \log E < 1.2$ の場合には東西非対称な不安定モードのみが出現すること、 $1.2 < \log E < 2.0$ では東西非対称不安定モードが東西対称不安定モードよりも大きな成長率で出現すること、 $\log E > 2.0$ では東西対称不安定モードが東西非対称不安定モードよりも大きな成長率で出現すること、などが分かった。さらに、得られた不安定モードのそれぞれが物理的に性質の異なるモードであるかどうかを検討するため、中立波の共鳴 (Iga, 1993) という観点から分散曲線の交差を詳細に調べた。その結果、安定な $\log E < -1.0$ の領域では、正負の擬運動量を持つ中立モードの共鳴は見られなかった。東西非対称不安定モードのみが存在する $-1.0 < \log E < 1.2$ の領域では、それぞれ正負の擬運動量を持つ赤道ケルビン波と連続モードの共鳴で不安定が発生する。 $\log E > 1.2$ では、東西非対称不安定モードを構成する分散曲線の組が変わり、少なくとも混合ロスビー重力波と赤道ケルビン波との共鳴で不安定が発生することが明らかになった。一方、 $\log E > 1.2$ の領域で発生する東西一様不安定モードは、分散曲線上では、赤道ケルビン波と連続モードの共鳴で発生する不安定モードにつながっていることもわかった。以上の結果より、東西非一様不安定モードは、いわゆる東西一様な慣性不安定モードとは異なる中立モードの組合せで発生する場合があることが示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 崎 孝 治
副 査 教 授 久保川 厚
副 査 助教授 藤 原 正 智
副 査 教 授 林 祥 介 (大学院理学研究科)
副 査 助教授 伊 賀 啓 太 (九州大学応用力学研究所)

学 位 論 文 題 名

Physical interpretation of unstable modes of a linear shear flow in shallow water on an equatorial beta plane

(赤道 β 平面浅水系の線形シアー流中で発生する
不安定モードの物理的解釈)

慣性不安定現象は、複数の惑星大気中で発生していると言われている。地球の冬期赤道域上部成層圏では、パンケーキ構造と呼ばれる東西非対称な温度擾乱が存在し、慣性不安定によるものと論じられてきた(Hitchman et al., 1987 ; Hayashi et al., 1998 ; Smith and Riese, 1999). Hitchman et al. (1987) らは、この構造が現れる領域では慣性不安定が起こり得ること、擾乱の空間構造が、東西非対称な慣性不安定モードを求めたと主張する Dunkerton (1983) の結果と良く似ていること、を根拠としてパンケーキ構造は慣性不安定であると論じた。一方、地球だけではなく、金星やタイタン、さらに木星型惑星においても赤道付近に慣性不安定な領域が存在しうることが示唆されてきた(Allison et al., 1994, 1995).

このように、場が慣性不安定であれば東西非対称な擾乱であっても、そこで生じる流れを慣性不安定と考える、という議論がなされてきたが、東西非対称な循環構造を慣性不安定と安易に呼んでしまうのは問題である。なぜなら、いわゆる慣性不安定によって生じる流れとして、一般的に想定されるのは対称的な構造を持つ循環であるからである。実は、Boyd and Christdis (1982) や Dunkerton (1983) らが求めた東西非対称擾乱を東西対称ないわゆる慣性不安定(Dunkerton, 1981; Stevens, 1983)と認識して良いかどうか子細に検討されていないのである。また、複数の惑星大気で慣性不安定が発生する可能性が指摘されているにもかかわらず、惑星大気を想定した広いパラメータ範囲にわたる調査はこれまで行われてこなかった。

そこで本研究では、赤道 β 平面浅水方程式系を用いて固有値計算を行い、赤道 β 平面上のシアー流中に発生しうるあらゆる不安定モードを求めた。さらに、中立波の共鳴と

いう観点から、得られた東西対称不安定モードと東西非対称不安定モードが物理的に性質の異なるモードであるかどうかを検討した。

まず、無次元パラメータである $E (= \gamma^4 / (gH\beta^2))$ (γ : 基本場の南北シアの大きさ, g : 重力加速度, H : 等価深度, β : コリオリパラメータの南北傾度)を変化させて、不安定モードの有無・モードの構造・方程式中の各項のバランスを調べた。その結果、 $\log E < 1.2$ の場合には非重力波的な構造を持つ東西非対称な不安定モードのみが出現すること、 $1.2 < \log E < 2.0$ では重力波的な構造を持つ東西非対称不安定モードが東西対称不安定モードよりも大きな成長率で出現すること、 $\log E > 2.0$ では重力波的な構造をもつ東西対称不安定モードが東西非対称不安定モードよりも大きな成長率で出現すること、等が分かった。さらに、得られた不安定モードのそれぞれが物理的に性質の異なるモードであるかどうかを検討するため、中立波の共鳴 (Iga, 1993) という観点から分散曲線の交差を詳細に調べた。その結果、東西非対称不安定モードのみが存在する $\log E < 1.2$ の領域では、それぞれ正負の擬運動量を持つ赤道ケルビン波と連続モードの共鳴で不安定が発生することが分かった。一方、 $\log E > 1.2$ では、赤道ケルビン波と西進混合ロスビー重力波との共鳴で不安定が発生する事が明らかになった。さらに $(k, \omega r)$ 平面上の分散曲線を調べることで、赤道域シア一流中で発生する中立波、不安定波の成長率を解析的に導出し $k \rightarrow 0$ の極限を調べることで、この2つの検討により $\log E > 1.2$ の領域で発生する東西一様不安定モードは赤道ケルビン波と西進混合ロスビー重力波の共鳴で発生する東西非対称不安定モードの分散曲線上に存在することも分かった。以上の結果より、 $1.2 < \log E < 2.0$ で発生する東西非対称不安定モードは、 $\log E > 2.0$ で発生する東西対称ないわゆる慣性不安定モードと同種の不安定モードであると結論された。このことから、Boyd and Christdis (1982) や Dunkerton (1983) が得た東西非対称不安定モードは、Dunkerton (1981) や Stevens (1983) が得た東西対称ないわゆる慣性不安定モードと同種の不安定モードであると解釈できた。さらに、外部パラメータ E の変化を自転角速度の変化と捉えることにより、金星のような低回転の惑星ではケルビンモードと西進混合ロスビーモードの共鳴による不安定が出現する可能性があること、木星のような高回転の惑星ではケルビンモードと連続モードの共鳴による不安定が出現する可能性があることが示唆された。

当研究によって、赤道 β 平面浅水系の線形シア一流中で発生する東西非対称なさまざまな不安定モードを広いパラメータ領域で精査することができ、それらの物理的解釈ができるようになった。この成果は、地球大気・海洋のみならず、惑星大気にも適用できるものであり、将来の発展が期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者が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、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と判断した。