

曲面に沿う三次元境界層の不安定

伊藤 信毅*

Instability of Three-Dimensional Boundary Layers Along Concave Walls

Nobutake ITOH

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

A three-dimensional boundary layer along a concave wall encounters three possible kinds of instability, namely the Tollmien-Schlichting instability, the cross-flow instability and the Taylor-Görtler instability. Prediction of the most dangerous mode among these instabilities is made with comparison of the critical Reynolds numbers to small disturbances of the three types.

Key Words: boundary layer, instability, concave wall

1. はじめに

航空機の後退翼表面に発達する三次元境界層の安定性を定量的に評価することは、翼の設計に必要な遷移点予知法や高速航空機の抵抗削減をめざす境界層制御技術の発展に欠くことのできない課題である。三次元境界層では、粘性型のトルミーン・シュリヒティング不安定(T-S不安定)以外に、ねじれ速度分布に特有な非粘性変曲点型の横流れ不安定(C-F不安定)が発生し¹⁾、さらに翼の下面のように壁面が凹の曲率を持つ場合には、遠心力に由来するテイラー・ゲルトラー不安定(T-G不安定)の可能性も生じる²⁾。翼面上の各点において与えられる横流れ速度の強さと壁面曲率の大きさに対してこのような原因の異なるいくつかの不安定性を総合的かつ系統的に評価する場合に最も簡単で便利な尺度は臨界レイノルズ数であるが³⁾、遠心力不安定に対して従来の平行流近似に基づく攪乱方程式は無小波数の位置に臨界点を与え、実験等で観察される実際の現象とは異なる。本研究では、遠心力が作用するときの三次元境界層に対して、モデル方程式を用いた簡単で数量的な安定性の評価を行なう。

2. モデル方程式と計算結果

ここで用いるモデル方程式は本質的にはゲルトラーの平行流近似方程式に非平行性の一部を付け加えただけの簡単な常微分方程式である。この非平行項を省略すればゲルトラー方程式に、さらに曲率項を省略すればオル・ゾンマーフェルト方程式に帰着される。方程式と境界条件については文献4)を参照されたい。

基本流としてFalkner-Skan-Cooke流を選ぶとき、攪乱方程式と境界条件で定まる固有値問題は、複素固有値 ω を実波数 α と β 、レイノルズ数 R 、基本流に含まれるパラメーター r と m および壁面曲率 κ の関数として定める。固有値の虚部 ω_i は時間的増幅率を与え、中立安定の条件を課すことによって曲面 $\omega_i(\alpha, \beta, R) = 0$ が定義される。さらに、この曲面上で R が最小になる点が臨界点 (α_c, β_c, R_c) 、そのときの R_c が臨界レイノルズ数である。

はじめにここで用いるモデル方程式と平行流近似方程式の比較を行う。図1には外部流に直角な方向に波数ベクトルを持つT-G型攪乱に対して圧力勾配 m の三つ値について中立曲線を比較している。実線はモデル方程式の結果であり、破線は平行流近似方程式を接合境界条件にしたがって解いたもの、細かい点線は平行流近似方程式に打ち切り境界条件を適用したときの結果である³⁾。 $m=0$ のときに基本

*航空宇宙技術研究所

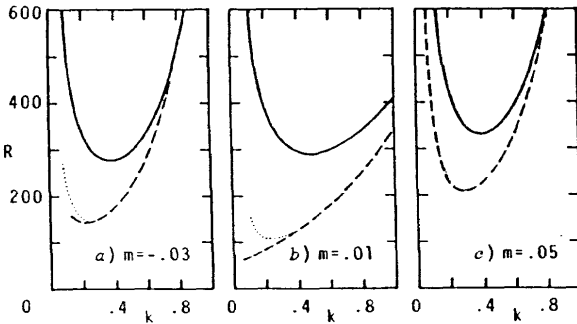


図1 T-G不安定中立曲線の比較

流は二次元となり、平行流近似の中立曲線は波数の減少とともに単調に減少することが知られている。 $m=0.01$ の場合の破線がこの事情を反映しており、他の2例は m が0から離れると波数の小さい領域で中立曲線が上昇することを示している。この事実は遠心力不安定において二次元流だけが極めて特殊な傾向を示しており、その原因は平行流近似の採用にあることを示唆している。打ち切り境界条件を用いるとこの特異性は幾らか緩和されるけれども、本質的には平行流近似の特異性から逃れることは出来ない。これに対してモデル方程式の結果は m の大きさによらず小波数領域で中立曲線の上昇を示し、平行流近似の欠陥を十分補っていることが判る。

つぎに本モデル方程式を用いて、凹曲面に沿う三次元境界層の安定特性を調べる。図2は、外部流線の傾き角を $\tau=1$ に固定した場合について、曲率 κ をパラメータとして $m-R_c$ 平面上に臨界レイノルズ数の変化を示したものである。 $\kappa=0$ のときにはT-S不安定(鎖線)とC-F不安定(破線)だけが存在し、 $m=0.05$ において両者の臨界値の大小が入替わる。これに対して、 $\kappa=-2 \times 10^{-4}$ の曲率に対しては逆圧力勾配の領域でT-S不安定が R_c の下限を与えるが、 m が正の領域ではT-G不安定(実線)がずっと低い R_c を与え、 m が増加するにつれてその値は高くなる。 m が0.1に近いところおよびそれより大きいところではC-F不安定が支配的であるからその間にT-G不安定とC-F不安定の交代が起こるはずであるが、その移り変わりは急変的ではなく、緩やかに攪乱の性質が変化して行くようである。図中には攪乱の振動数が0になる位置を丸印で示してあり、その左側で負の振動数を持つT-G攪乱が、右側で正の振動数を持つC-F攪乱が支配的になる。T-S不安定の臨界曲線は図に示した程度の弱い曲率の変化に対しては非常に鈍感で、図中ではほとんど区別できない。これらの臨界曲線

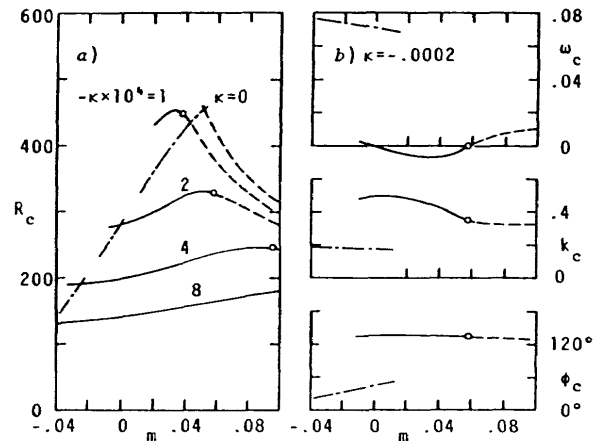


図2 三種類の臨界曲線と攪乱特性

に対応する攪乱の振動数、波数ベクトルの大きさおよびその角度の変化を見ると、T-G不安定とC-F不安定の攪乱振動数がT-S不安定のそれに比べて一桁小さいこと、およびT-S攪乱の波数ベクトルが m の増加と共に緩やかに角度を増すのに対して、T-G攪乱とC-F攪乱の波数ベクトルが外部流線方向にほぼ直交していることが特徴的である。

3. むすび

三次元境界層が凹の曲率をもつ壁面に沿う場合には、T-S、C-F、T-Gの三種類の不安定が発生する。各不安定の発生強度を比較するための最も便利な尺度は臨界レイノルズ数であるが、従来の平行流近似に基づく境界層安定計算では、T-G不安定の臨界点が波数0の極限に位置し、これが計算実行上の難点になる。本論文では、有限な波数領域に臨界点が定まるように、境界層の非平行性の一部を取り入れたモデル方程式を用いた。この方程式によって、三種類の不安定性がそれぞれ最低の臨界レイノルズ数を与えるパラメータ領域を定量的に区分するなど、流れの安定性を総合的に評価することに成功した。

参考文献

- 1) Itoh, N.: Fluid Dyn. Res. 7 (1991), 37-50.
- 2) Floryan, J.M.: Prog. Aerospace Sci. 28 (1991), 235-271.
- 3) Itoh, N.: Fluid Dyn. Res. 13 (1993), 81-95.
- 4) 伊藤信毅: 第25回乱流シンポジウム講演論文集(1993), 100-103.

加熱された水平円柱まわりの自然対流のカオス的挙動 (円柱上方にある水平板の影響)

小 泉 博 義* 細 川 巖* 三 好 弘 孝*

Chaotic Behavior of Natural Convection Around a Horizontal Isothermal Cylinder (Effect of the Upper Plate)

Hiroyoshi KOIZUMI, Iwao HOSOKAWA and Hironori MIYOSHI
University of Electro-Communications

ABSTRACT

This study aims at revealing the effect of the upper plate on the flow and heat transfer performance around a horizontal isothermal cylinder. We show various flow patterns depending on Rayleigh number, the distance between the plate and the cylinder, and the temperature condition of the plate. The unsteady flows are shown to be chaotic by calculating a set of Liapunov exponents from the observed time series of a single variable.

Key Words: natural convection, horizontal isothermal cylinder, heat transfer performance, chaos, effect of the upper plate

1. は し が き

壁や容器の影響を受ける物体まわりの自然対流は、無限空間中のそれとは大きく異なる^{1),2)}。有限容器内の物体位置や二重円筒^{3),5)}間距離の違いによる流動パターンの変化については多くの研究がなされているが、無限空間中の平板近くに置かれ一方にのみ壁の影響を受ける物体まわりの時空間伝熱特性を明らかにする研究はない。また、最近地球温暖化の主要因とされるCO₂を回収し、シャーベット状のクラスレートにして深海へ封じ込める構想がある。CO₂を深海に固定する必要があるが、地上から海底に敷設されたパイプラインで輸送し深海で流出したCO₂が、パイプまわりに生ずる強い渦によりその付近での溶解速度が高まる問題が指摘されている⁶⁾。

本研究では、上方に水平板のある加熱水平円柱を実験系に選び、レイリー(Ra)数、平板と円柱上端間の距離(H/D)ならびに平板の温度条件が、円柱まわりの流動ならびに時空間伝熱特性に及ぼす影響を明らかにする。実験は、静止無限空間中に置かれた円柱まわりの流れが層流であるRa数 1.0×10^7 以下の場合について行う。また、円柱まわりの

流れがカオス的であると大きな拡散効果を生ずるので、非定常な流れをカオスの立場から理解することも試みた。

2. 実験装置ならびに方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。円柱はレイリー数を変化させるため、長さ560mm(肉厚3.0mm)で外径25.4mm, 38.1mm, 50.8mm, 63.5mm, 76.2mm, 114.3mm(肉厚5.0mm), 152.4mmの7種類の銅製円筒を用いた。円筒内側の電気絶縁したステンレスはくを直流電源にて通電加熱し、円筒を加熱した。円筒は、長手方向中央部400mmでは1K以内の一定温度で、平板と円筒面の温度差は約40Kとした。円筒は外乱を防ぐため $1000 \times 600 \times 1200 \text{mm}^3$ の容器内に入れた。容器側壁と床面を厚さ8mmの透明アクリル板で作製し、上方平板は温度条件による伝熱特性の違いを明らかにするため、8mm厚のアルミ製水槽内の水を攪拌し一定温度とした場合(等温壁と呼ぶ)と断熱壁に近い熱伝導率の小さい泡ガラスの場合を調べた。アクリル容器壁と平板温度とは誤差2K以内で室温である。Ra数は 4.8×10^4 から 1.0×10^7 の範囲で、H/Dをさまざまに変えて実験を行った。