

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 出垣 貴章

修士(工学)出垣貴章 提出の論文は「遷音速フラッタのアクティブ制御に関する研究」と題し、本文6章よりなる。

航空機翼のフラッタは、空気力、弾性力、慣性力が連成して発生する自励振動である。飛行中にフラッタが発生すると、構造破壊を招く危険があるため、飛行領域内でフラッタが起きないことを保証せねばならない。特に遷音速飛行領域においては、衝撃波を伴う複雑な流れが翼まわりに発生するため、フラッタ速度が著しく低下することが知られており、この現象はトランソニック・ディップと呼ばれている。そのため、遷音速域を飛行する航空機の開発にあたっては、すべての機体形態に関してフラッタが発生しないことを保証するために多大な労力が必要となる。また、試験中にフラッタが発生した場合には、これを回避するための設計変更により予期せぬ機体重量増加を招く場合が多い。アクティブ制御技術によってフラッタを能動的に制御しようとする試みは、こうした背景から世界的に精力的な研究が続けられている。フラッタの制御問題にはさまざまな技術的課題が残されているが、遷音速フラッタに関していえば、マッハ数や形状のわずかな違いによって変動する空気力の違いを許容できる制御方式がいまだ確立されていないことがある。論文提出者はスライディング・モード制御と呼ばれる制御方式のフラッタ制御への適用を検討し、その設計法を提示するとともに、オイラー・コードによる詳細な数値流体計算によってその有効性を検証しようとしている。

第1章は序論であり、本研究の背景と、過去の研究動向を概観し、本論文の特色を整理している。この中で、遷音速フラッタの制御法としては、二通りの方向が存在することを指摘している。一つは、空気力の変動を積極的に同定し、制御則を同定結果に応じて実時間で更新する適応制御を用いるものである。もう一つは、制御対象のモデル化誤差を許容したロバスト制御則を適用するものである。適応制御に関しては、事前に空気力モデルを構築することが不要な反面、その手法上、あらかじめ加振による同定プロセスが必要な上、急激な変動に追従することが困難であるとしている。またロバスト制御に関してはH無限大制御による設計例も報告されているが、同一マッハ数で、動圧を変動させた場合の結果しか発表されておらず、マッハ数の変化に関して十分なロバスト性が実証されていない点を指摘している。

第2章では本論文で使用される翼モデルに関して説明がなされている。本論文では2次元翼モデルが使用される。これはスパン方向に一様な2次元翼を対象にしているが、3次元的な直線翼の近似モデルにもなっていることが示されている。

第3章では本論文で使用する制御理論が説明されている。後に有効性が示されるスライディング・モード制御の説明のあと、比較のために実施されたLQR制御、LQG/LTR制御がまとめられ

ている。LQR制御は基本的にはスライディング・モードと同じ空力・弾性モデルを使用し、空力モデルとしては準定常モデルを使用する。LQG/LTR制御は空気力の非定常性をモデル化するために検討したもので、非定常性を表現する状態量を推定するためにカルマン・フィルターを採用し、ロバスト性を向上するために一巡伝達関数の回復をおこなうものである。

第4章はフラッタモデルの検証結果をまとめている。本論文では空気力の計算のためにオイラー・コードによる数値計算プログラムを使用している。オイラー・コードはナビア・ストークス方程式から粘性項を省略したもので、通常のフラッタ計算に使用される微小擾乱法よりも厳密なモデル化となっている。この数値計算法を翼の運動モデルと連成して数値時間積分するシミュレータを作成し、数値風洞として使用している。このシミュレータの検証を行うために、定常・非定常空気力、フラッタ速度の各項目に関して他に公表されているデータと比較検討し、シミュレータの信頼性を確認している。

第5章では制御結果が示されている。対象としたモデルではマッハ数0.7から0.88に関してトランソニック・ディップによるフラッタが発生していることが示された後、各制御則の適用結果が比較検討されている。スライディング・モード制御とLQR制御においては、空気力モデルをトランソニック・ディップの最も深い谷であるマッハ数0.85における準定常空気力から作成している。制御能力の検討は、この空気力モデルではなく、数値風洞において検証され、マッハ数や動圧の変動に対するロバスト性が調査された。なお、数値風洞は、スライディング・モード制御におけるモデル化誤差の見積もりにも使用された。モデル化誤差の評価結果によると、マッハ数の変動による空気力の変化はゲイン変動が大きく、周波数領域でモデル化誤差を表現するH無限大制御よりも、状態方程式で直接に誤差の大きさを指定するスライディング・モード制御を用いる方が有利であることを指摘している。数値風洞による比較の結果、スライディング・モード制御もLQR制御もマッハ数の変動に対してはロバストな制御が可能であるが、マッハ数を固定して動圧を変化させた場合には、スライディング・モード制御が大きなフラッタマージンを有していることが明らかになった。なお、非定常空気力モデルを採用するために使用したLQG/LTR制御は、制御成績の観点からは最も劣った結果となった。非定常性を考慮することで空気力モデルが精密になった反面、空気力の非定常を表現する状態変数を推定する必要があり、結果的にロバスト性が損なわれたと考察している。

第6章は結論で、本論文の主な成果を要約している。

以上、要するに本論文では遷音速領域でのフラッタをスライディング・モード制御によって能動的に制御する方法を提案し、2次元翼に対する計算から、広いマッハ数変動と動圧変動に対して大きなフラッタマージンを有していることを、他の制御手法と比較して検証している。その検証は単純化された制御モデルではなく、空気力を計算するオイラー・コードと翼の運動・制御モデルを連成させた詳細な数値シミュレーションから実施しており、航空工学上寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格とみとめられる。