

論文の内容の要旨

論文題目 遷音速フラッタのアクティブ制御に関する研究

氏名 出垣 貴章

超音速で飛行する航空機は、加減速時の一瞬の間だけ遷音速領域に突入する。しかし空力弾性的には、その一瞬で通過する遷音速領域においてもっとも過酷な状況にさらされ、飛行の大部分を占める超音速ではそれほどの問題は発生しない。これはフラッタ速度が遷音速領域において急減し、さらにマッハ数を上げると再びフラッタ速度が増加という現象のためである。この遷音速領域で生じるフラッタ速度の一時的な低下を遷音速ディップという。

図 1 にある高度におけるフラッタ速度の概念図を示す。マッハ数が低い領域ではフラッタ速度はマッハ数に依存せずほぼ一定であり、非圧縮フラッタとして扱える。亜音速領域に入り圧縮性が問題となり始めると、フラッタ速度は徐々に下がり出す。ただし非圧縮と亜音速との境界は厳密には決まっていない。遷音速領域に入るとフラッタ速度は急激に低下し、底を打った後マッハ数とともに急上昇する。これは揚力傾斜のマッハ数による変化もさることながら、空力中心が後退するためである。

遷音速を超え超音速領域に入った場合でもマッハ数とともにフラッタ速度が上昇し続けるわけではない。超音速では翼厚の影響によりフラッタ速度が著しく低下することが知られている。また空力加熱による剛性低下も空力弾性現象に重大な影響を及ぼす。その結果、超音速領域では再び空力弾的に酷な状況にさらされる。しかしこれは高超音速領域に限られ、低超音速飛行ではそれほど問題にはならない。

ある高度においてフラッタの生じるマッハ数領域を求めるには、その高度での音速を用いて、飛行速度とマッハ数の関係を表す直線を引く。飛行速度の直線がフラッタ速度の曲線を上回っている領域においてフラッタは発生する。すべてのマッハ数においてフラッタ速度が飛行速度より高ければ、その高度ではフラッタは発生しない。フラッタ速度と飛行速度との差はフラッタに対する余裕を表すのでフラッタ余裕と呼ばれることがある。

このフラッタマッハ数決定法は高度一定の場合であるが、高度が異なればフラッタ速度は異なり、また音速も異なる。通常は高度が上がればフラッタ速度は上昇し、音速は低下する。したがって高度を上げればいずれはフラッタが生じなくなり、最もフラッタが生じやすいのは通常の飛行機では海面上であると考える良い。

これまでの議論は二次元翼の場合であり、後退翼では多少の修正が必要である。また縦横比の小さいデルタ翼などでは亜音速から超音速に突入しても、二次元翼の場合ほど空力中心は移動せず、必ずしも遷音速領域が空力弾性的に最酷なわけではないことを指摘しておく。

以上、フラッタに関する特徴を勘案すれば、超音速で飛行する飛行機に対して遷音速ディップに相当するマッハ数領域においてのみアクティブにフラッタを制御することが考えられる。つまり遷音速ディップでのみ制御器をオンにして、それ以外のマッハ領域ではもともとフラッタは生じないので制御器をオフにする。これにより翼の剛性を上げることなく、すべてのマッハ数領域でフラッタを生じさせずに飛行できる。その結果、飛行機的设计段階では想定していなかったミッション要求や予定外の搭載物により翼のフラッタ特性が変化した場合にでも対応が可能である。

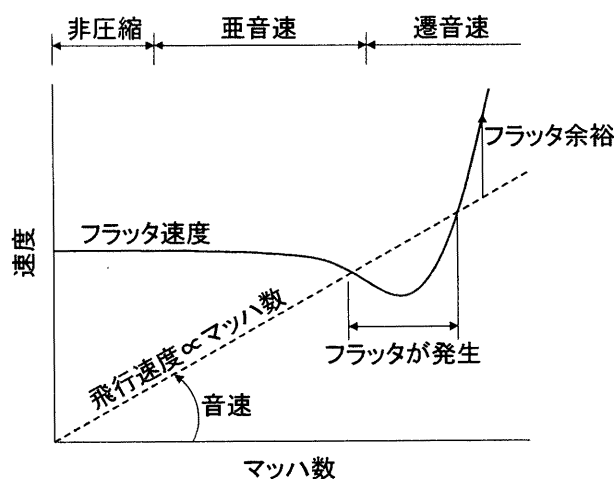


図 1 フラッタ速度と遷音速ディップ。

遷音速フラッタのアクティブ制御を考えるとときに最も問題となるのは、空力モデルをどうするかということである。また遷音速ディップ間でのフラッタ制御を考えるならば、遷音速空力モデルの作成に加えてマッハ数によって大きく変化する遷音速空気力をどう扱うかということも問題となる。現在までに適応制御やロバスト制御(制御器が本来持つロバスト性に頼るものも含む)による方法が提案されている。

適応制御は、遷音速空気力を含めた空力弾性系を未知の系であるとし、それを同定しながら同時に制御もするというものである。したがって制御器の設計段階でモデルを作成する必要はなく、制御の実行時に制御器が自動的にモデルを作成してくれる。同定は逐次実行されるため、遷音速空力特性が時々刻々変化しても、その時々マッハ数での空力特性を制御に用いることができる。この適応制御は、制御系設計に空力弾性モデルが不必要である反面、フラッタが生じる前に予備的なシステム同定が必要であり、またどのような飛行経路をどのように加速するかが制御性能に大きく影響するなどの欠点もある。

ロバスト制御は、制御器の設計段階で何らかのモデルが必要となるが、そのモデルに多少のモデル化誤差があっても制御器が有効に働くようにするものである。したがって遷音速領域のように正確なモデルが得られない場合でも、簡易なモデルとロバスト制御により、フラッタ制御は可能である。またマッハ数による空力特性の違いは、実際のマッハ数における空力特性と制御器の設計マッハ数での空力モデルとの間のモデル化誤差であると考えることができる。そこで設計点で制御器を設計し、その他のマッハ数においては制御器の持つロバスト性によって対処する。現在までに、ダブレット・ポイント法による空力モデルを用いて LQG や H_{∞} 制御器を設計し、フラッタ動圧を上げることに成功している。しかしこれは設計マッハ数におけるフラッタ動圧の上昇であって、遷音速ディップ間のマッハ数変化に対しても有効であるかは分からない。遷音速領域ではマッハ数変化による空力特性の変化が顕著に現れ、ロバスト性の低い LQG では制御器の有効性は期待できない。また H_{∞} 制御は通常高周波帯域にモデル化誤差を含む系に対して用いるが、マッハ数による空力特性の変化をモデル化誤差と考えたときに、それは高周波帯域のみに存在するわけではない。したがってこれらの方法は設計点でのフラッタ制御は可能であっても、遷音速ディップ間のすべてのマッハ数にわたるフラッタ制御に関してはその有効性に疑問が持たれる。

この論文ではスライディングモード制御による遷音速フラッタ制御を検討する。スライディングモード制御は位相平面や非解析的な微分方程式の理論が基礎となって発展し、「スライディングモード」という言葉は 1934 年にロシアにおいて初めて用いられた。理論としては 1950 年代頃の旧ソ連において誕生し、

英訳版の出版によって世界的に知れ渡るようになった。その後、電機モータ・車両制御・磁気軸受け・構造物の制振などに応用されている。このスライディングモード制御は可変構造制御の一種であり、何らかの制御入力により状態量を相空間の部分空間に拘束しつつ原点に収束させるという特徴を持つ。モデル化誤差がマッチング条件を満たす場合には、この部分空間内においてノミナルモデルが擾乱モデルと同じダイナミクスを持つようにでき、極めてロバストな制御器になることが知られている。さらに代表的なロバスト制御である H_{∞} 制御がモデル化誤差を周波数領域で評価するのに対し、スライディングモード制御はそれを時間領域で評価する。したがってモデル化誤差の存在する周波数帯域を高周波のみに限定せず、しかもモデル化誤差が状態量の非線形な関数であってもよい。この性質を利用すると、制御器の設計点での空力モデルと各マッハ数での実際の空気力との差をモデル化誤差とみなすことにより、スライディングモード制御を用いた遷音速ディップ間のアクティブフラッタ制御が可能であると考えられる。

この論文では、NACA 64A006 の二次元振動剛翼の遷音速フラッタ制御を考えた。CFD によりオイラー方程式を解き、フラッタ速度を $M=0.6\sim 0.9$ の各マッハ数について計算した。ある高度で加速するときフラッタが生じるマッハ数は $M=0.7\sim 0.88$ であった。 $M=0.85$ を設計点としてスライディングモード制御設計し、それを用いればフラッタの生じるマッハ数領域 $M=0.7\sim 0.88$ のすべてのマッハ数で制御可能であることが分かった。そのときの制御性能は設計点でのそれとほぼ同じであった。さらにフラッタ速度は制御しないときのフラッタ速度の数倍以上に上げることができた。比較のために LQR でも同様のフラッタ制御を試みた。LQR を調整することにより制御性能をスライディングモード制御によるものとほぼ同様にすることができる。しかし制御入力はスライディングモード制御を用いた場合よりも大きくなる。LQR でもある程度はフラッタ速度をあげることはできるが、その度合いはスライディングモード制御ほどではない。さらに同定した非定常空力モデルを LQG/LTR に組み込み、上記と同様な比較を行った。設計点での制御性能を同じにするように調整できるが、フラッタ速度はそれほど上がらなかった。これは空力モデルの向上よりもオブザーバを用いる制御器のロバスト性の劣化が上回った結果であると考えられる。