

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04835

研究課題名(和文) 時間スペクトル法による高速数値計算を用いたフラッターの不確実性評価の研究

研究課題名(英文) Uncertainty Quantification of Flutter Simulations by the Fast Time-Spectral Method

研究代表者

宮路 幸二 (Miyaji, Koji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60313467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：航空機の翼の空力-弾性連成自励振動であるフラッターの高速数値計算手法を開発した。流体と構造の非定常方程式を時間発展的に解く従来法に代えて、フーリエ級数展開を用いて新たな基礎式を導出し、その定常解として一周期中のサンプル時刻の解を求める時間スペクトル法を用いた。特にフラッター振動数を求めるために、周期解でゼロとなるべき流体方程式の残差を最小化する手法を提案し、実証した。また、計算条件や計算モデルの不確かさが計算結果に及ぼす影響を定量的に評価するために、多項式カオス展開法を開発させ、マルチエレメント多項式カオスとマルチウェーブレット基底展開を用い、不連続的な応答曲面を適切に予測する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した時間スペクトル法により、航空機の巡航条件である遷音速域の翼フラッターを、従来法よりも高速に予測することが可能になった。本法は特にフラッターの安定/不安定境界付近の構造応答の予測に有効である。また本研究で開発した応答曲面を用いた不確かさ解析は、高い汎用性を持ち、広範な問題に適用可能である。本研究の成果は航空機の多分野統合最適化設計の主要な部分を担い、より安全で、経済性と環境適合性に優れた航空機開発に大きく貢献する。

研究成果の概要(英文)：A high-speed numerical calculation method has been developed for flutter, which is an aerodynamic-elastic coupled self-excited vibration of an aircraft wing. A time-spectral method was used, in which a new basic equation is derived using Fourier series expansion instead of the conventional method of solving unsteady equations of fluid and structure in a time-evolving manner, and the solution of the sample time in one cycle is obtained as the steady-state solution. In particular, for the flutter frequency, we proposed and demonstrated a method to minimize the residual of the fluid equation that should be zero in the periodic solution. In addition, in order to quantitatively evaluate the effect of calculation conditions and calculation model uncertainties on calculation results, we developed a response surface method using multi-element polynomial chaos and also multi-wavelet basis expansion. Discontinuous responses were appropriately predicted by the proposed method.

研究分野：流体力学，航空宇宙工学

キーワード：フラッター 空力弾性 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

複雑形状に対する流体の数値解析技術の向上と計算機の性能向上に伴い、航空機の空力解析・設計において、実機形状の流れ解析が日常的に行われるようになった。しかし、非定常流れや多分野連成問題、さらにその両者の特徴を持つ翼の空力-弾性連成振動（フラッター）は依然として計算負荷が高く、その計算時間の長さから、最適設計の反復過程に組み込まれるに至っていない。また、特に遷音速では計算条件や空力・構造モデルの変化がフラッター境界に大きく影響するため、これらの条件が、ある確率でばらつき（不確かさ）を持つ場合に、計算結果に及ぼす影響を定量的に予測することが求められている。

2. 研究の目的

実問題に対する忠実度と信頼性の高いフラッター予測計算を日常的に行えるよう、新たな高速計算手法を開発する。周期問題に限定されるが、流体単独で大幅な高速化が実現された手法を空力弾性問題に拡張し、流体単独問題と同様に 10 倍の高速化を目指す。また、計算条件や計算モデル（入力）の不確かさが、構造応答やフラッター境界（出力）に及ぼす影響を定量的に予測する手法（不確実性解析）の確立を目指す。これらフラッター計算の高速化と不確かさ解析を用いて、将来的な航空機の多分野統合設計の高度化に資することを目的とする。

3. 研究の方法

フラッター予測の数値計算の高速化のために、周期解を効率的に求めることができる時間スペクトル法を用いる。同手法は、過去の流体単独の研究においてその有効性が示されており、流体-構造連成による変位の振幅や振動数が未知の問題を解けるよう拡張する。また、不確かさ解析には、解析コードの変更を伴わず、入力に対する解析結果出力から応答曲面を構築する手法を用いる。単純な多項式で表されない応答曲面に対応するために、入力を区間分割するマルチエレメント多項式カオスと、ウェーブレット基底を用いた関数展開の 2 つの手法を開発する。

4. 研究成果

(1) まず、従来の時間進行法に代えて、時間スペクトル法によるフラッター解析手法を開発した結果を示す。検証問題として、過去に多くの計算が行われている、二次元翼（NACA64A010）の曲げ・振り二自由度構造モデルの遷音速フラッター特性を対象とする。図 1 は、過去の我々の研究を含め、時間進行法の計算により得られたフラッター境界である。横軸は一様気流マッハ数、また縦軸 V^* は空力弾性方程式を無次元化する際に現れるフラッター速度インデックスであり、一様気流速度を振り固有振動数と半翼弦長で無次元化し、更に翼と気流の質量比の平方根で割ったものである。フラッター速度インデックスを大きくすることは、翼の剛性を下げること、または一様気流の圧力を上げることに相当する。図 1 に示すように、フラッター境界の下方は、構造に与えた初期擾乱が減衰・消失する安定領域、境界の上方は、擾乱が増幅する不安定領域である。遷音速では翼面上に衝撃波が生じ、翼の曲げ・振り変位によって衝撃波が移動して変位が無限大に発散するのを防ぐため、一定振幅に至る。同じマッハ数とフラッター速度インデックスでは、初期擾乱の与え方によらず同じ振動に至り、これをリミットサイクル振動と呼ぶ。新たに開発した時間スペクトル法によるフラッター解析手法では、時間発展法のように初期擾乱の時間的成長を調べるのではなく、フーリエ級数展開を用いて導出される新たな空力弾性方程式の定常解として、リミットサイクル振動一周期中のサンプル時刻における解を直接求める。サンプル時刻は、フーリエ級数展開の次数 N_H に応じて一周期を等分割したものであり、解のサンプル数 $N = 2N_H + 1$ の関係がある（図 2）。

流体と構造の時間発展方程式は、同様の形式で表せる。従って、過去の研究において開発した流体に対する時間スペクトル法の定式化が、構造にも同様に適用できる。次に新たな計算手法のために最も重要な課題は、フーリエ級数展開の基本周波数（今の場合フラッター振動数に等しい）の設定である。時

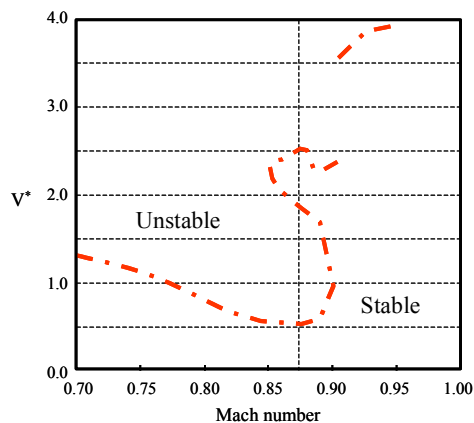


図 1. NACA64A010 翼型のフラッター境界

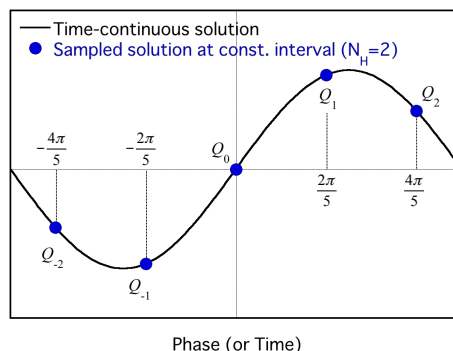


図 2. 時間スペクトル法のサンプル解の意味

間進行法では連成計算の結果として得られるフラッター振動数を、時間スペクトル法では陽に指定する必要がある。フラッター振動数に対する原理的な基礎式は無いため、それを求めるための制約条件を課す必要がある。本研究では、周期解でゼロとなるべき流体の基礎式の残差を評価関数として、それを最小化するように周波数の値を逐次的に更新することとした。一方、構造の基礎式は、流体に比べて未知数の数が少ないため、時間スペクトル法の基礎式が帰着する連立一次方程式を直接法により求めることができ、従って残差は常にゼロである。

以下に計算結果を示す。図1は非粘性計算の結果であった。粘性計算ではフラッター境界の形が変化し、より単純な境界形状になることが報告されている。本研究の目的のためには、非粘性の複雑なフラッター境界を時間スペクトル法によっても捉えられることを示し、またリミットサイクル振動の諸量を時間進行法と比較するのが適当である。マッハ数 $M=0.875$ に固定し、 V^* を幅広い範囲で変化させた。図3に、共通の初期値 0.3 (二自由度構造モデルの2つの固有振動数の中間値) から、様々な V^* におけるフラッター振動数の更新の様子を示す。振動数が一定値に収束するものは、図1の不安定領域に属する条件と分かる。一方、初期値から急速に減少し振動数0となるものは、安定領域に属し、リミットサイクル振動の解を持たないものである。また、図2に示したサンプル時刻(位相)における曲げと振り変位も、それぞれの計算ケースでリミットサイクル振動に対応する一定値に収束した。予備計算において、正解の振動数を与えて固定した場合と、収束するまでの計算回数はほぼ同じであり、本研究で開発した手法の有効性を示している。図4, 5はそれぞれ、 $V^*=1.2$ と 2.65 の場合の曲げ変位と振り変位の時間履歴を示す。時間進行法による解と、時間スペクトル法の結果から時間履歴を構築したものを比較する。曲げ、振りとも2つの計算手法

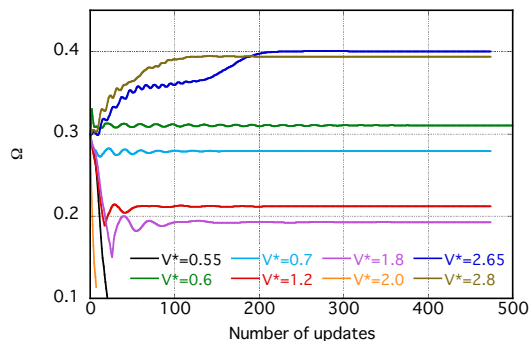


図3. 時間スペクトル法によるフラッター振動数

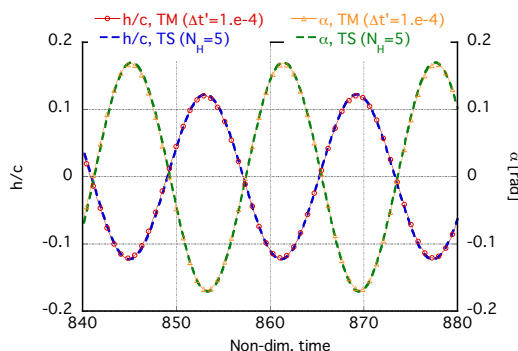
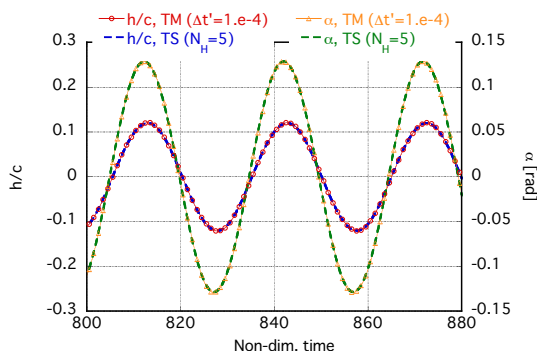


図4. 時間スペクトル法, 進行法の構造応答 ($V^*=1.2$) 図5. 時間スペクトル法, 進行法の構造応答 ($V^*=2.65$)

の振幅と周期は一致し、また、2つの変位の位相差 ($V^*=1.2$ ではほぼ位相差無し、 2.65 では約 π の差) も一致している。このように、時間スペクトル法によって、同一の初期値から、 V^* に応じて変化するリミットサイクル振動を正しく予測することができた。また、図6に時間進行法に対する計算速度向上率を示す。フーリエモード次数 2, 5 いずれの場合も、第一次振動モード ($0.5 < V^* < 2$) では時間スペクトル法が速い。特に、フラッター境界付近 ($V^* \sim 0.5, 2$) での速度向上が著しい。これは、時間進行法では、フラッター境界付近の振幅の成長が緩やかなためである。一方、第二次振動モード ($V^* > 2.5$) では、計算時間は時間進行法と同等以下である。しかし、速度低下率は第一次モードの速度向上率よりも大幅に小さく、また、実機では第一次モードフラッターの発生を防止することから、開発した手法の有用性は高い。

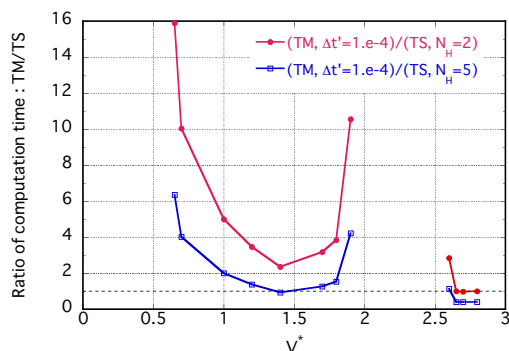


図6. 計算時間 : 時間進行法 / スペクトル法

(2) 次に、計算条件や計算モデルのパラメータの変化が出力に与える影響を予測するための、不確かさ解析の成果を示す。前項目(1)は計画最終年度の後半に上記の成果が得られたため、ここには別の流体問題として、超音速風洞のノズル形状の不確かさが、ノズル内流れ、特に衝撃波の位置に及ぼす影響の結果を示す。図7は、図中の下方の3つの曲線がノズル形状を表し、ノミナル形状と、第二スロート高さが $\pm 1\%$ だけ異なる形状を示す。同図中の上方の3つの曲線

がそれぞれの形状に対するノズル壁面の圧力分布である。ノミナルと+1%に大きな差は無いが、-1%では衝撃波が風洞測定部上流にジャンプし、超音速流れが成立しない。(1)で述べたフラッターの場合も、 V^* が不安定領域になると、それまでゼロであった振動振幅が急激に増大する不連続的応答を示す。図8は第二スロート高さが±10%の範囲で変化するときの、壁面圧力の応答曲面を示す。横軸が流れ方向の座標、縦軸が形状のばらつきを表す確率変数である。(a)がモンテカルロシミュレーションであり、不確かさ解析としての正解を示す。(b)はルジャンドル基底による応答曲面であり、正解の示す不連続的な圧力の応答と大きく異なる。(c)が多項式次数2、解像度レベル3のマルチウェーブレットを基底とした結果であり、大幅に正解に近い結果を示す。また(d)は確率空間を8分割し、各区間の多項式次数2としたマルチエレメント多項式カオスであり、更なる改善が見られる。これらは圧力のヒストグラムより、定量的にも正解に近づくことを確認している。

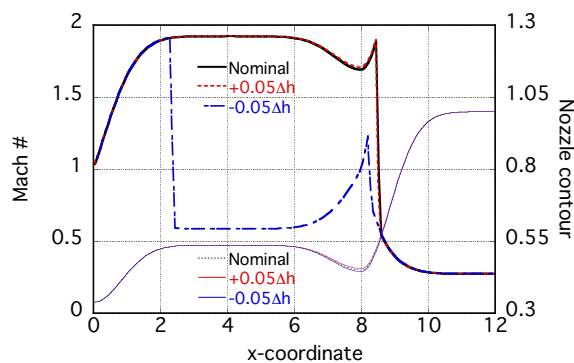


図7. ノズル形状の不確かさと壁面圧力応答

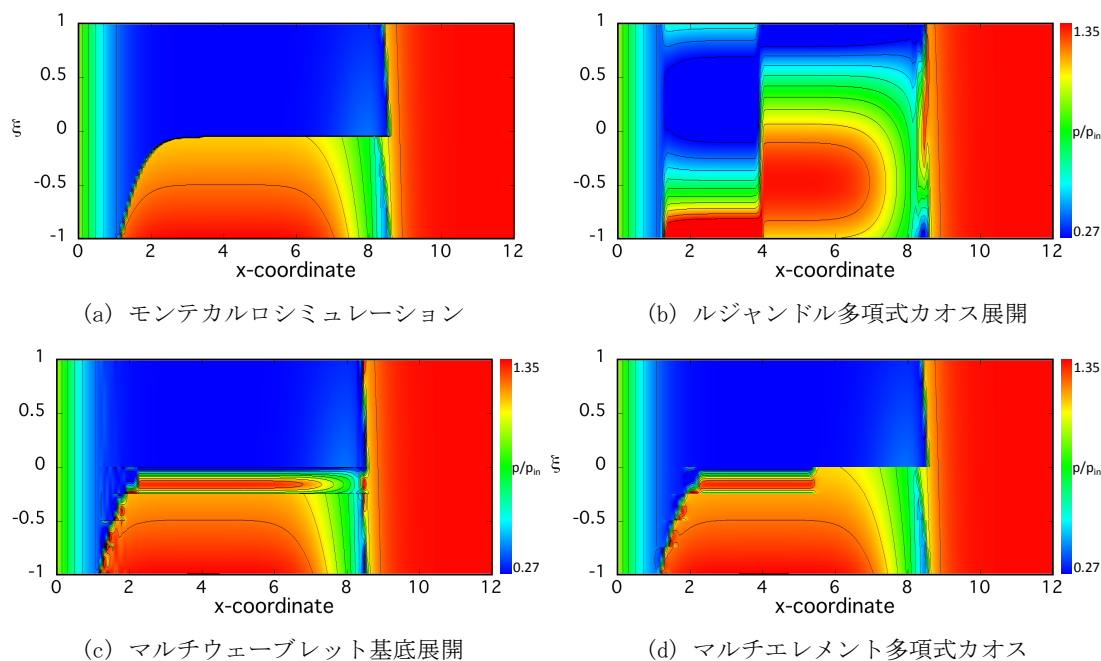


図8. 第二スロート高さの不確かさによる壁面圧力の応答曲面

以上の連続的な入力の変化に対する出力の不連続的な変化の予測法は、フラッター問題への適用にとどまらず、様々な問題に適用可能な一般的な成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大島亮祐, 宮路幸二	4. 巻 20
2. 論文標題 時間スペクトル法CFDによる自励振動予測手法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.20.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koji Miyaji and Yu Yoshida	4. 巻 62 (6)
2. 論文標題 Prediction of Aircraft Dynamic Stability Derivatives Using Time-Spectral Computational Fluid Dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 291-298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.62.291	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akifumi Sakai, Koji Miyaji, Tomonari Hirotoni, Tetsuya Sato, Takeshi Tsuchiya, and Hideyuki Taguchi	4. 巻 18 (1)
2. 論文標題 Numerical Analysis of Aerodynamics and Flight Trajectory of JAXA's High-Mach Integrated Control Experiment (HIMICO)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.18.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koji Miyaji and Takumi Inoue	4. 巻 15 (1)
2. 論文標題 Evaluation of Discontinuity Treatment in Intrusive Polynomial Chaos for Uncertainty Quantification of a Nozzle Flow in CFD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2020jfst0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ryosuke Ohshima and Koji Miyaji
2. 発表標題 Numerical Simulations of Free-to-Roll Wing Rock Phenomena by the Time Spectral CFD
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Inoue and Koji Miyaji
2. 発表標題 Non-Intrusive Uncertainty Quantification Method for Flows with Discontinuity
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroto Takegawa and Koji Miyaji
2. 発表標題 Prediction of Aeroelastic Limit Cycle Oscillation by the Time Spectral CFD
3. 学会等名 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川村 恭己 (Kawamura Yasumi) (50262407)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------