

平成22年 5月 1日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560758

研究課題名（和文） 構造不確定性の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical Investigation on Structural Uncertainty

研究代表者

上田 哲彦 (UEDA TETSUHIKO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10377806

研究成果の概要：

複合材の強度解析において材料パラメータの不確定性が積層板など、構成された複合材に対する影響を検討し、複合材強度のバラツキの評価およびその制御を解析的に行なう手法を模索した。バラツキの要因が多く、実際の航空機への多用が見込まれる炭素繊維強化複合材料の座屈荷重に対し、材料パラメータのバラツキと座屈データのバラツキの相関を検討した。

解析では有限要素はりモデルを使って不確定性をシミュレーションする手法を試み、実際の実験データの座屈荷重に現れる不確定性をよく表現できる数学モデルを構築した。

また、航空機のフラッタ設計解析における構造不確定性について検討した。フラッタ限界速度を左右するいくつかの要因において、その不確定性がどのように影響するかを明らかにした。さらに、フラッタ速度推定法にウェーブレット変換を用いることを提案し、不確定性のすくないフラッタ指標による推定法を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,500,000	480,000	2,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：数値シミュレーション、複合材の不確定性、フラッタ限界値、ウェーブレット変換

## 1. 研究開始当初の背景

航空宇宙の分野で構造材として用いられる複合材料が、軽量にして高強度である炭素繊維複合材を筆頭に、今後さらにその利用が拡大することが見込まれている。しかし、複合材料の実構造適用に障害となっている要因が製造の品質管理と信頼性にあることがクローズアップされた。複合材料の信頼性を左右する不確定性の関与について、理論的取り扱いを検討し、実製品における信頼性の定量的評価に結び付けることが求められた。

また、実際の航空機の構造設計において、実用化のときに避けられない不確定性の扱いやその評価法が問われた。

## 2. 研究の目的

それまでに行われてきていた構造設計のための構造解析は決定論的な強度解析に基づくが、本研究は、さまざまな不確定性を想定し、これを前提にした構造設計の考え方を示す。このような考え方は、既存の荷重解析では大気擾乱による突風荷重の扱いなどでみられるものの、機体の構造パラメータまでに取り込むことはなされていなかった。構造材料に含まれるバラツキとなって現れる不確定性を解析の前提とし、その感度を検討することにより、より堅牢で高信頼性をそなえる設計を実現することに結び付けようとする試みである。本研究は、航空宇宙機のみならず、一般的な機械、あるいは地上構造物の高度な設計にも当てはめることができるものである。この観点から構造設計の基本的考え方を見直し、設計に道具として用いる構造解析手法について、その基本に立ち不確定性を前提とした新たな構造解析手法の開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

まず構造設計上信頼性の向上を図るべき問題点を抽出する。そして、複合材に関して、その不確定性を組み込んだ数学モデルを構築する。これにより、実際の強度データなどの結果を模擬し、設計法として使えることを示す。

また、パラメータが複合的に作用する事象が現実の構造解析で考えられ、その典型例が航空機のフラッタ解析である。フラッタは、

解析が線形解析においても複素数固有値問題に帰すように、影響するパラメータの効果は単に比例関係にない。したがって、このような場合は各パラメータの感度を十分に把握し、機体設計にその不確定性の影響を吟味した設定をすることが信頼性を確保する上で重要である。これを明らかにするための手法として、構造解析モデルを作成し、これを用いてモンテカルロシミュレーションを行い、強度やフラッタ限界値などの設計標定における不確定性の顕在化を評価する。同時に、実験モデルにおいても不確定性にかかわるデータを実験的により取得し、解析手法の検証を行う。

また、フラッタ試験における限界値の推定法についての不確定性に対して、実際の風洞実験により得られたデータおよび疑似実験データを使って、その不確定性を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 複合材に関する不確定性

複合材複合材の強度解析において材料パラメータの不確定性が積層板など、構成された複合材に対しする影響を検討し、複合材強度のバラツキの評価およびその制御を解析的に行なう手法を模索した。具体的には、ガラス繊維複合材料の剛性値と座屈特性実験について数値シミュレーション解析を行い、実験データとの比較を行った。その結果、不確定性を組み込むパラメータは、複合材板において製造上の板厚精度にある空間的なブロックについてガウス分布をもって考慮することにより、座屈強度の数値シミュレーションが実験結果をよく表すことを明らかにした。

数値シミュレーション解析では1次元はり要素のFEMモデルを用いた。解析においてヤング率  $E$ 、試験片幅  $b$ 、厚さ  $t$  を不確定要素が関与するパラメータとして扱い、長さ  $l$  に対しては、相対誤差が小さいためその不確定性を考慮しないモデルとした。それぞれの試験片に対して実験データ値である試験片寸法、標準偏差になるように正規乱数を発生させ、発生した正規乱数を不確定要素として試験片ごとに与えた。正規乱数の生成方法として、まず混合型合同法により一様乱数を発生させ、中心極限定理を用いて正規分布にする手法により行った。

次に1つの試験片に対する不確定要素のパラメータの導入を空間的に検討した。24個のはり要素に対して2か所でパラメータを与える場合（つまり連続した6要素ごとに異なるパラメータ）が最も実際のデータの不確定性を表現できるという結果を得た。この数学

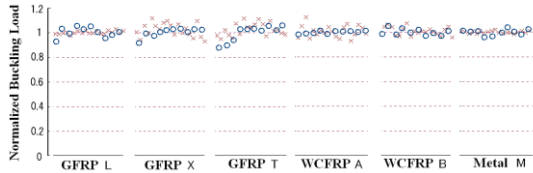


図1 数学モデルによる不確定

性

シミュレーション結果と実験値との比較

モデルを使ってシミュレーションを行った結果と実際の実験データと比較した結果が図1である。

この図の縦軸は、実験値とシミュレーションにおいてそれぞれの平均値で無次元化した座屈荷重である。ここで、GFRPは3種類のガラス強化複合材、CFRPは3種類の炭素繊維複合材で、一番右側のMetalは複合材の特性と比較するためのアルミ金属についての結果である。この図に示されるように、構築された数学モデルが実際の材料特性についての不確定性をよく表す結果を得た。

## (2) 空力弾性設計における不確定性

フラッタ限界速度における不確定性をみるために、解析的な2次元非圧縮準定常空気をを用いた代表翼断面システムについて、モンテカルロシミュレーションを行い、影響パラメータの不確定性が限界速度に与える不確定性を明らかにした。

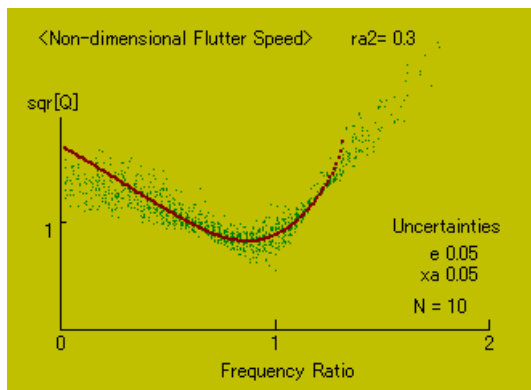


図2 無次元フラッタ限界速度

図2は、その計算例を示している。横軸は振り固有振動数を基準とする振動数比を表し、縦軸は動圧の2乗根をとった限界速度である。実線は、無次元2乗慣性能率が0.3の場

合の振動数比に依存するフラッタ限界速度を表している。このとき、設計パラメータである弾性軸位置および重心位置にそれぞれ独立に変動係数0.05の正規分布を仮定した不確定性があったときの限界値を点で示してある。この結果では、振動数比の低いところでは弾性軸位置および重心位置に不確定性があると、それらはフラッタ速度を低下させる方向に偏った限界値の分布をあたえることを示しており、不確定性をもつパラメータの平均値が、限界値の平均値と対応せず、危険側に影響している。また、振動数比が1の近傍では、極端にフラッタ速度が低下する可能性を示している。このようなことから、フラッタ限界値に対しては、このような手法により設計時に不確定性の影響を明らかにすることが非常に重要であることが示された。

## (3) フラッタ速度推定における不確定性

不確定性の少なく信頼性の高いフラッタ速度推定法として、連続ウェーブレットを用いる方法を提案した。周波数領域に変換した情報では、時間に関する情報が失われるが、ウェーブレット変換では、周波数領域の情報とともに時間領域の変化も同時に抽出することができる。これをフラッタ速度推定に用いる方法を考案した。

図3は、フラッタ風洞実験で得られた信号にウェーブレット変換を施したものである。横軸は時間の推移を表しており、縦軸は振動数に対応している。これは、フラッタが起こる前の信号で、2個の異なる固有振動（20Hz近傍）が風洞の乱れによって励起され、変化している様子を示している。当初の試みでは、この様な信号変化から直接フラッタ限界

図3 ウェーブレット変換された信号

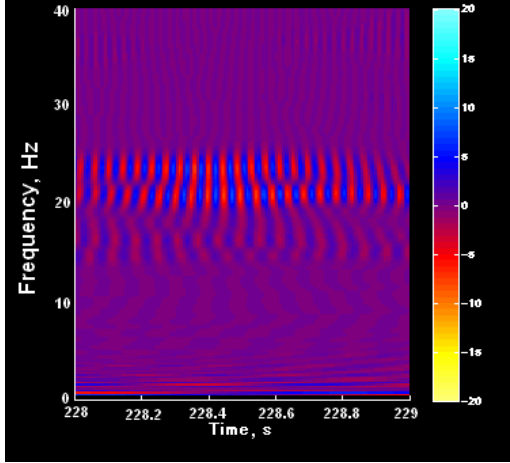
値の予測が出来るのではないかと信号変化を分析したが、的確な処理法には至らなかった。そこで、この変換信号の強さを使った指標

$$F = \frac{1}{\sum_j |f_{\psi}^w(b_j, a_0)|}$$

を考え、これを風速に対して表示することにより、図4に表されるような結果を得た。

図4 風速に対するフラッタ指標 F

風速の低い領域では、指標の値に不確定性が大きく現れているが、フラッタ限界値に近づ



くに従って、不確実性が少なくなっていることが分かる。さらに、これを処理するために下端値の包絡線を用いると精度のよい推定値が与えられることを明らかにした。この方法を使うことにより、実際の実機開発のときに求められるフラッタ速度の87%の範囲でのデータからの推定で、誤差が10%以下の高精度で限界値を推定できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

1. T. Ueda, M. Iio, and T. Ikeda” Flutter Prediction Using Continuous Wavelet Transform” Transaction of JSASS, Vo.51, 2009, pp.275-281 「査読有」
2. 上田哲彦、高瀬昇平、池田忠繁、岩堀豊「複合材料の圧縮座屈に対する不確実性の影響とその数値シミュレーション」日本複合材料学会誌、34巻、2008、pp.141-147 「査読有」

[学会発表] (計 7件)

1. T. Ueda,” Historical View on Flutter Analysis and Recent Research in Aeroelasticity”, Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering, 2008.10.17, Brno, Czech
2. 飯尾正信、上田哲彦、池田忠繁「離散ウェーブレット変換を用いた超音波探傷試験の判定簡易化」第50回構造強度に関する講演会講演会、2008.8.1、北九州市
3. 西前誠、上田哲彦、岩堀豊、池田忠繁「複合材料の信頼性検討(不確実性を考慮した平織複合材料の圧縮強度特性)」第50回構造強度に関する講演会講演会、2008.7.30、北九州市
4. 小林実、上田哲彦、池田忠繁「リブ付き複合材料パネルの圧縮座屈特性」第51回宇宙科学技術連合講演会、2007.10.28、札幌市
5. 上田哲彦、西前誠、岩堀豊、池田忠繁「複

合材の信頼性検討(その3:不確実性を考慮した炭素繊維平織複合材料の強度解析)」第49回構造強度に関する講演会、2007.7.25、福島市

6. T. Ueda, M. Iio and T. Ikeda,” Flutter Prediction Using Wavelet Transform”, 48<sup>th</sup> SDM Conference, 2007.4.26, Honolulu, Hawaii, US

7. 飯尾正信、上田哲彦、池田忠繁「ウェーブレットフラッタ推定法」第56回理論応用力学講演会、2007.3.9、日本学術会議、東京都

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

上田 哲彦 (UEDA TETSUHIKO)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10377806

### (2)研究分担者

池田 忠繁 (IKEDA TADASHIGE)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40276271  
仙場 淳彦 (SENBA ATSUHIKO)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助授  
研究者番号: 60432019

