

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560818

研究課題名（和文）

構造不確定性評価の理論的研究

研究課題名（英文）

Theoretical Investigation for Evaluation on Structural Uncertainty

研究代表者

上田 哲彦 (UEDA TETSUHIKO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10358682

研究成果の概要（和文）：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。複合材の電気特性につい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電導率に現れる不確定性を表現できる数学モデルを構築した。また、フラッタ解析における構造不確定性に関して、フラッタ速度推定法に経験的モード分解法を用いることを提案し不確定性の少ないフラッタ指標による推定法を得た。

研究成果の概要（英文）：The effects of uncertainty in composite structures were in the scope of the present research and their analytical treatment and evaluation of the parameters which have influence on the strength of materials and the electric properties were pursued. A simulation technique for the electric conductivity with some uncertainty has been developed and compared with actual composite plates. For the uncertainty in the estimation of flutter boundary, new technique accompanied with the empirical decomposition method was proposed and demonstrated for its validity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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

こ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、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が求められた。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の外荷重にとり入れた解析はみられるものの、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。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

設計にも当てはまる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が求められた。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で、特に航空宇宙の分野で構造材として用いられる軽量にして高強度である炭素繊維複合材が、今後さらにその利

用が拡大していくことが促進される。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をクローズアップする必要があった。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。このため、まず先行研究として炭素繊維強化複合材の座屈荷重について、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見ることを行い、不確定性を表現する有限要素法梁モデルの構築が行われた。

2. 研究の目的

先行研究に引続き、構造設計において材料そのものの不確定性と、その構造に起因する不確定性を評価することが出来るようにすることを本研究課題の目的とした。構造特性は静的な強度ばかりではなく空力弾性現象に対する特性も評価の対象となる。複合材構造は軽量構造としての大きな利点が期待され今後さらなる実機への適用の拡大が見込まれるが、金属構造に比べて材料そのものに、より不確定性を含む。したがって、その設計においては不確定性の影響を受けにくい構造形態が望まれる。そのためには、まず不確定性の評価が適切になされなければならない。本研究はそれを評価する方法を追求する

3. 研究の方法

空力弾性解析の基礎モデルである代表断面について、2次元非圧縮非定常空気力に、定常近似空気力、準定常空気力、厳密な非定常空気力を用いた解析において、構造パラメータに不確定性を織り込むことにより、実際のフラッタ限界値をどう評価すればよいかを算定し、これを踏まえて、さらに実用的に信頼性のある解析評価技術に発展させる。

不確定性を考慮した強度評価法を、実用機の新製法である樹脂含浸複合材製造法 Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) で製造された構造に適用し、この構造に対して材料特性を踏まえた構造不確定性の評価を数値シミュレーションにより理論的に試みる。

構造設計においては材料そのものの不確定性と、その構造に起因する不確定性を評価することが必要である。構造特性は静的な強度や空力弾性現象に対する特性が評価の対象となる。複合材構造は、軽量構造としての大きな利点が期待され、今後さらなる実機へ

の適用の拡大が見込まれるが、金属構造に比べて材料そのものに、より不確定性を含むことが考えられる。したがって、その設計においては不確定性の影響を受けにくい構造形態が望まれる。そのためには、不確定性の評価が不可欠である。これらの評価法を検討するため、まず、実際に起きる剥離現象についての解析を、圧電素子を張り付けた梁について試みた。構造的な剥離の不確定性が素子の性能にどう効いてくるかを見出し、剥離領域と性能の関係を明らかにした。また、複合材強度評価法を実用機の単純な構造を適応対象とすることを狙い、国産機として採用が計画されている尾翼の複合材構造製造法が Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) と呼ばれる新製法であり、この構造に対して材料特性の不確定性の評価がどのように効くかを明らかにするため、そのベースとなる材料データを取得し、不確定性の感度を把握した。更に、空力弾性現象に対する構造パラメータの検討例として、双尾翼の干渉フラッタについて解析および実験を行い、翼形状および取り付けパラメータの感度を明らかにするとともに、風洞実験時に推定法の評価のために、ウェーブレット変換および経験的モード分解法を用いたフラッタ速度推定法を適用しその信頼性の評価を行った。

4. 研究成果

空力弾性解析の基礎モデルである代表断面について、2次元非圧縮非定常空気力に、定常近似空気力、準定常空気力、厳密な非定常空気力を用いた解析を検討したが、実用的な解析評価のためには3次元非定常空気力を使った解析が必要であり、そのためのシミュレーションツールを構築した。また、新たなフラッタ現象の推定法について研究を進めた。

フラッタ現象の推定法である経験的モード分解法を活用して新しいフラッタ推定パラメータを提案した。コード分解によって得られる時間履歴フラッタに近づくにつれて $a_i(t)$ が増加することに着目し、 $a_i(t)$ を用い

$$HF_j = \frac{1}{\sum a_j(t)}$$

とパラメータ HF_j を定義し、その内、最も値の小さいものを HF とし、 HF とその時間帯における平均動圧 q をフラッタ発生時における動圧 q_f で割った無次元動圧の組 $(q/q_f, HF)$ を作る。更にその中から、一定流速下において最も値の小さい HF をフラッタ推定パラメータ HF_{min} とする。例として実際の試験データから計算された $(q/q_f, HF)$ と $(q/q_f, HF_{min})$ を表示すると図1のようになる。

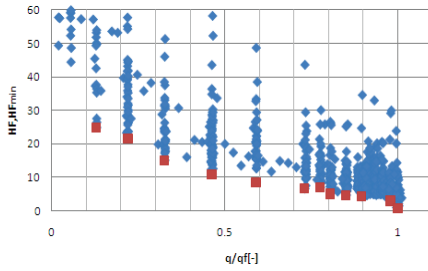


図 1. $(q/q_f, HF)$, $(q/q_f, HF_{min})$

フラッタ速度を推定するには上記の HF_{min} を最小二乗法により線形近似を行い、その近似直線とグラフの横軸が交わる点を推定されたフラッタ発生速度(動圧)とする。

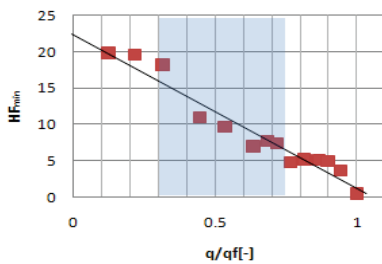


図 2. フラッタ速度の推定

この推定法が減衰値を使う方法や ARMA モデルを仮定した推定法などより、サブクリティカル応答から精度よくフラッタ限界速度を予測出来ることを明らかにし、結果を纏めた。

一方、複合材の不確定性については、不確定性を考慮した強度評価法を、実用機の新製法である樹脂含浸複合材製造法 Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) で製造された試験片に適用し、この試験片に対して材料特性を踏まえた構造不確定性の評価を数値シミュレーションにより理論的に試みた。吸水、乾燥繰返しによる強度劣化について、樹脂の劣化がみられはじめるまでの実験データに基づき不確定性の解析的扱いを検討した。複合材としての強度劣化の不確定性に変化はみられなかったが、さらなる繰返しによる実験データが必要であり、今後それを踏まえた評価を行った。また、積層複合材料のボルト結合部における破壊挙動について有限要素法により解析を行った。さらに試験片の衝撃強度に対する構造不確定性の評価を、実験から得られた材料強度および材料靱性値を材料特性として用いた数値シミュレーションにより検討し、解析的に扱える可能性を示した。

また、同じ手法で製造された試験片に対し、吸水、乾燥繰返しによる強度劣化について、樹脂の劣化が現れ始めるまでの実験データに基づき、この不確定性の理論的扱いを平成 22 年度において検討した。平成 23 年度には、さらなる繰返しによる実験データを取得し、長時間の吸水環境においては樹脂の溶解が見られることを明らかにした。一方で、太陽光を対象とした耐環境劣化試験もを行い、樹脂の劣化データを得た。

VaRTM 法で製造した平織積層板について、板厚方向の電気特性を改善するため、樹脂に炭素系の介在物を混入させて層間に塗布し、その導電性を調べた。これを理論的に扱うために積層板繊維に垂直方向となる板厚方向の樹脂の導電性に対して、混入粒子同士の確率的接触についての解析モデルを用いてパーコレーション解析を行う方法を考案した。

格子点に電導粒子を不規則に分布させ、隣接する粒子があれば導通の有りとして全体の電導率を算定する方法を提案した。

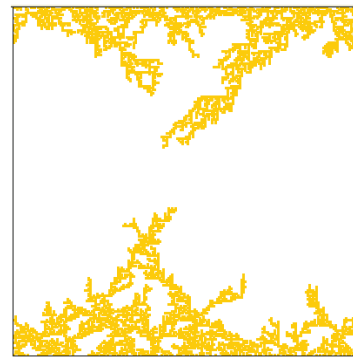


図 3. 粒子が導電粒子の確率 65%(体積含有率 51.0%)で繋がらない画像

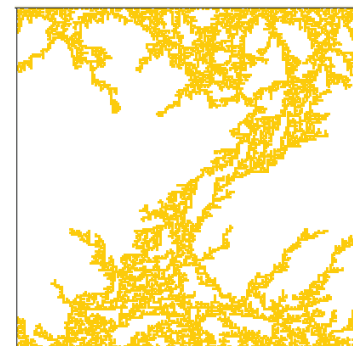


図 4. 粒子が導電粒子の確率 66%(体積含有率 51.8%)

これら 2 つの図はパーコレーション解析の結果の一例であり、黄色の部分には導電性粒子が占有し、上端、または、下端に繋がっていると導電性を有することになる。上下が繋がりはじめたのは格子点に導電性粒子が存在する

確率が65% (樹脂に内在する電導粒子の体積含有率は51.0%) からで、図3と図4がその条件時の画像である。しかし、この存在確率の時は、20回ほど繰り返してようやく上下が繋がる画像が得られるくらいで、ほとんどが、図3のように上下が全く繋がらない状態になった。また、66% (体積含有率は51.8%) の場合も67% (体積含有率52.6%) の場合も、繋がったり繋がらなかったりするが、徐々に上下端が繋がる回数が増えていく。そしてさらに、70% (体積含有率55.0%) で黄色の占有する領域が急に広がるという結果を得た。図5ではほとんどが黄色で占有されるようになっており、また、500回繰り返しても上下端はつながり続けた。この値であれば、かなり導電性粒子自体の導電率に近づくはずである。このように、対応する実験と比較し、確率的な手法を用いた数値シミュレーションが実際の電導率を推定できることを明らかにした。

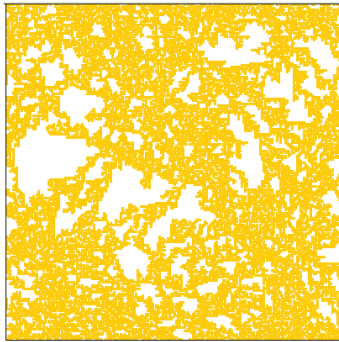


図5. 粒子が導電粒子の確率
70%(体積含有率55.0%)

不確定性を確率的に盛り込んだ数値解析法により、実際に不確定性をもつ現象を扱った個々の問題に対して評価できることを明らかにしたものの、初期の目論見の手法の普遍化までには至らなかった。

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 小林実、榎本清志、上田哲彦「複合材補強パネルに対する圧縮座屈許容設計の適応性検討とその簡易強度計算方法の提案」設計工学、46巻2号、査読有、2011、pp.102-110

[学会発表] (計13件)

- ① 上田哲彦「複合材部品製造技術とナショナルコンポジットセンター(NCC)について」第48回中部・関西支部合同同期季大会、2011.11.25、神戸市産業振興センタ

ー (兵庫県)

- ② 内藤進、上田哲彦、池田忠繁、仙場淳彦「グラフェン複合材における電気抵抗特性に関する研究」第48回中部・関西支部合同同期季大会、2011.11.25、神戸市産業振興センター (兵庫県)
- ③ 森皓平、上田哲彦、池田忠繁「VaRTM複合材の衝撃剥離についての実験と解析」第53回構造強度に関する講演会講演会、2011.6.29、秋田県民会館 (秋田県)
- ④ 伊藤雄真、上田哲彦、池田忠繁「経験的モード分解法を用いたフラッタ発生速度推定法の推定精度」第53回構造強度に関する講演会講演会、2011.6.28、秋田県民会館 (秋田県)
- ⑤ 尾崎綾亮、上田哲彦、池田忠繁、石田雄一「VaRTM複合材強度の環境依存性」第53回構造強度に関する講演会講演会、2011.6.27、秋田県民会館 (秋田県)
- ⑥ T. Ueda "A novel approach to traditionally linear flutter analysis", Sixth M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2011.6.15, Boston, USA
- ⑦ 小笠原博道、上田哲彦、池田忠繁、仙場淳彦「積層複合材料のボルト結合部における破壊挙動」第47回中部・関西支部合同秋季大会、2010.11.26、名城大学天白キャンパス (愛知県)
- ⑧ 伊藤雄真、上田哲彦、池田忠繁「経験的モード分解法を用いたフラッタ発生速度推定法」第52回構造強度に関する講演会、2010.7.23、とりぎん文化会館 (鳥取県)
- ⑨ 尾崎綾亮、上田哲彦、池田忠繁、岩堀豊「F VaRTM 複合材の吸水乾燥繰り返しによる強度変化」、第52回構造強度に関する講演会、2010.7.22、とりぎん文化会館 (鳥取県)
- ⑩ 池田忠繁、西前誠、上田哲彦「平織複合材料の強度特性」第51回構造強度に関する講演会、2009.7.24、和歌山県立情報交流センター Big・U (和歌山県)
- ⑪ 西島宏幸、上田哲彦、池田忠繁「フラッタ速度推定法の信頼性検討」第51回構造強度に関する講演会、2009.7.23、和歌山県立情報交流センター Big・U (和歌山県)
- ⑫ 上田哲彦、尾崎綾亮、池田忠繁、青木雄一郎「VaRTM 複合材の信頼性評価及び成形性に関する研究」第51回構造強度に関する講演会、2009.7.23、和歌山県立情報交流センター Big・U (和歌山県)
- ⑬ 長福紳太郎、上田哲彦、池田忠繁、野村隆之「双尾翼フラッタに関する研究」第51回構造強度に関する講演会、2009.7.23、和歌山県立情報交流センター Big・U (和歌山県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 哲彦 (UEDA TETSUHIKO)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：10358682

(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

(2) 研究連携者なし