

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289306

研究課題名(和文) 航空機複合材構造のバードストライクに関する損傷モデリング

研究課題名(英文) Modeling of bird-strike damage in aircraft composite components

研究代表者

矢代 茂樹 (Yashiro, Shigeki)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：00452681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではバードストライクを受ける航空機複合材構造の信頼性評価技術の確立を目指し、柔軟体衝突によるCFRP積層板の損傷を予測する解析技術を構築した。特に、粒子法(SPH)において、粒子を計算空間に写像することによって粒子の不均一な配置を可能とし、計算効率を改善する新たな手法を開発した。本手法に、き裂進展に伴うエネルギー吸収を表す材料軟化モデルを導入して、積層板の層間はく離の進展を予測した。本手法を用いてバードストライク損傷を予測し、実験結果をよく再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to establish an integrity evaluation technology for aircraft composite structures against bird strike events and developed a numerical method to predicting bird-strike damage of CFRP laminates. More specifically, we developed an improved smoothed particle hydrodynamics (SPH) that achieved inhomogeneous initial particles arrangement and resulting reduction of calculation cost. Moreover, a material softening model was introduced into the constitutive equation of a particle to represent energy absorption due to crack extension. This approach enabled us to analyze extension of delamination in composite laminates. We finally predicted bird-strike damage of CFRP cross-ply laminates, and demonstrated that the present method could represent the damage extension observed in the experiments.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料・物性 航空宇宙工学 高速衝撃 解析・評価 粒子法 SPH

1. 研究開始当初の背景

(1) 新規開発されている航空機では、軽量化による燃費性能の向上や疲労特性の改善を目指し、胴体や翼、ターボファンエンジンのブレードやファンケースに炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの複合材料が適用されている。複合材料が使用された航空機が遭遇するバードストライク事故はその安全性に致命的な影響を及ぼす。したがって、複合材料の柔軟体衝突損傷メカニズムを解明し、バードストライクに対する信頼性評価技術を確立することが急務の課題である。

(2) 事象の重大さゆえ、これまでもバードストライクに関する実験研究は行われている。しかし、翼前縁部など部材の変形を議論したものが多数を占める。複合材料の損傷に着目した研究^①も報告されているが、柔軟体衝突損傷のメカニズムを系統的に明らかにする研究はなされていない。

(3) 近年では実験に加えて有限要素解析を行い、バードストライクによる複合材構造の挙動を調べる研究^②がなされている。しかし、この方法では、柔軟体と複合材構造の接触の扱いが困難である、破壊現象を詳細に議論できないという問題点がある。さらに、バードストライクを有限要素法で再現することは技術的に困難であるという報告^①もある。

(4) 粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) は、流体・固体ともに解析可能であるとともに、異物の衝突、物体の大変形や飛散といった現象を予測するのに適している。しかし、構造部材 (例えば翼前縁部) を粒子法で解析するには抜本的な計算効率の改善が必須である。

2. 研究の目的

そこで、本研究ではバードストライクを受ける航空機複合材構造の信頼性評価技術の確立を目指し、下記の項目に取り組むことを目的とした。なお、実験・解析ともに、柔軟体衝突後の CFRP 積層板の詳細な損傷形態に着目する点は、基本的であるにも関わらず報告は極めて少なく、本研究の特色の一つである。

(1) CFRP 積層板の柔軟体衝突試験を実施する。柔軟体の衝突による CFRP 積層板の変形挙動や材料の詳細な損傷形態を把握する。

(2) 粒子法 (SPH) を用いた複合材料積層板の柔軟体衝撃損傷進展シミュレーションを開発する。より具体的には、粒子を計算空間に写像することによって計算効率を改善する新しい SPH を開発する。

(3) 新規開発する計算効率を改善した SPH に、き裂進展に伴うエネルギー吸収を表す材料

軟化挙動を導入して、厳密に損傷進展を予測する手法を開発する。

(4) 実験・解析両面から複合材構造の柔軟体衝突損傷メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 通常の SPH では各方向に一定の粒子間隔を前提とするため、FEM のように特定の方向に高い空間解像度を持たせることができない。すなわち、CFRP 積層板をモデル化する際に、板厚方向の空間解像度を維持するとモデル全体で莫大な粒子数となり、非現実的に高い解析コストとなる。そのため、これまでは現実的なサイズの SPH モデルによる解析が困難だった。この問題を解決するために、空間解像度を方向によって可変とする新たな SPH を提案する。

新たに提案する SPH の計算過程を図 1 に模式的に示す。まず、正規直交座標系 (物理空間) において粒子を配置する。モデルの粒子間隔が各方向で等しくなるような一般化座標系 (計算空間) の基底ベクトルを考え、物理空間から計算空間へと物理量を写像する。そして、計算空間で書き直した SPH 支配方程式 (質量保存則、運動量保存則) および構成方程式を解き、座標や応力などの物理量を計算する。計算結果を出力する際は、計算空間において求められた座標情報や応力分布などの各物理量に逆写像を行い、物理空間における成分を出力する。これら一連の操作によって、必要な方向のみに高い空間解像度を持たせたモデルの解析が可能となり、現実サイズの CFRP 積層板モデルを解析可能になる。

本手法の妥当性と有効性を検証するため、片持ちりの曲げ試験を解析した。従来手法と提案手法で、ほぼ同じ粒子数で板をモデル化し、応力分布を比較した。

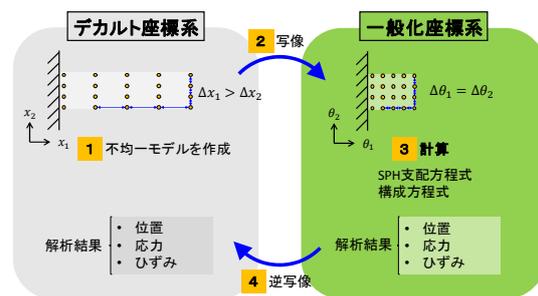


図 1 空間解像度可変 SPH の概要

(2) バードストライクを模擬した柔軟体の高速衝撃試験を実施した。図 2 に実験装置の概要を示す。単段ガス銃を用い、飛行体を主砲にセットしたのち圧力タンク内の空気を解放することにより飛行体を加速した。飛行体は質量割合で水 4 に対してゼラチン 1 を溶かしたものであり、直径は 20mm、質量は 4.3g の球状に成形した。ゼラチン球は発泡材製のサボに装着された状態で発射されるが、サボ

はストッパーにより分離され、ゼラチン球がターゲットの CFRP 積層板に衝突する。CFRP 積層板は 165mm×50mm×1mm、積層構成は $[0_2/90_2]_s$ である。CFRP 積層板の上部 25mm は完全固定され、片持ち梁状態である。ゼラチン球は、拘束された部分を除く CFRP 積層板の中央に速度 155m/s で衝突させた。

柔軟体が衝突する際の CFRP の動的挙動をハイスピードカメラで撮影した。試験後、CFRP 積層板の損傷を光学顕微鏡で観察するとともに、内部損傷を超音波 C-scan によって非破壊検査した。

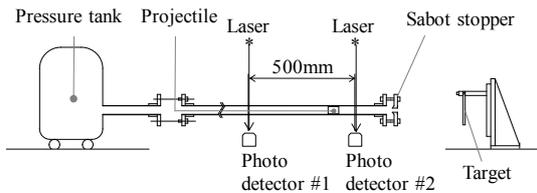


図2 柔軟体高速衝撃試験の模式図

(3) 前項(2)で実施した柔軟体高速衝撃試験に対応する解析を行った。ここで、柔軟体と CFRP 積層板ともに新規提案した SPH によってモデリングした(図3)。実寸法と同一の対称性を考慮した 1/2 モデルを作成し、板面内方向の粒子間隔を板厚方向の粒子間隔の2倍として粒子数を削減した。板厚方向には8粒子で分割し、各層には直交異方性の線形弾性構成則を適用した。柔軟体の構成則には、高速衝撃では静水圧成分が偏差応力成分に比べて卓越するため、ユゴニオ状態方程式によって圧力だけ計算した。総粒子数は1,040,000である。ここで、CFRP 積層板内の損傷は考慮せず、マクロな動的変形挙動を実験と比較した。

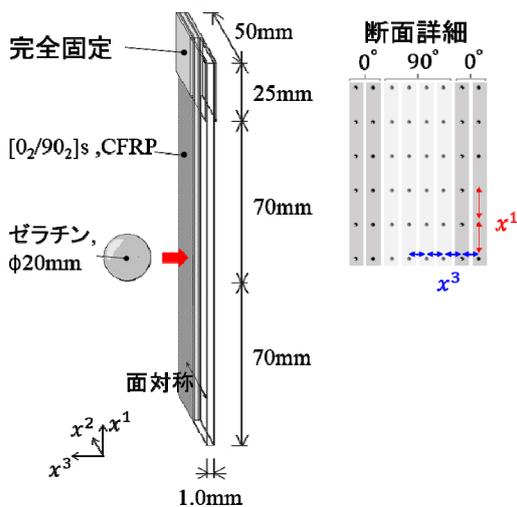


図3 柔軟体高速衝撃の解析モデル

(4) CFRP 積層板の損傷を予測するため、前項(1)で提案した SPH に Smeared Crack Model を導入した。本損傷モデルは、ある粒子にお

ける材料の強度と粒子内のき裂の進展によるエネルギー吸収を考慮する(図4)。特に、CFRP 積層板における層間はく離の進展では脆性的な破壊挙動を示さないため、蓄えられたひずみエネルギーの散逸を考慮する必要がある。

この損傷モデルを導入した新規 SPH を用い、CFRP 積層板への柔軟体高速衝撃を解析した。積層構成は $[0/90/0/90/0]$ であり、片持ちはり状に固定した CFRP 板の中央に、斜め 40 度の方向に柔軟体を速度 280m/s で衝突させた。板厚方向にのみ粒子を細かく配置して積層構成を表現する一方で、面内の粒子間隔を大きくすることで、試験片全体をモデル化した。CFRP 積層板に生じる損傷状態を、実験結果^①と比較した。

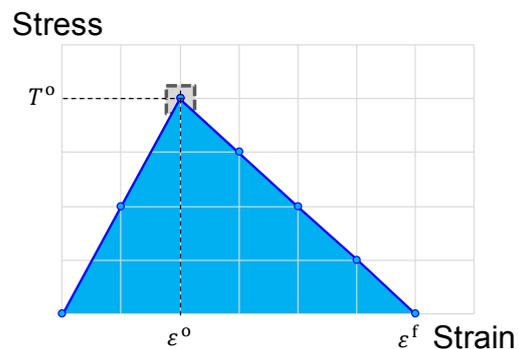


図4 Smeared crack model の模式図

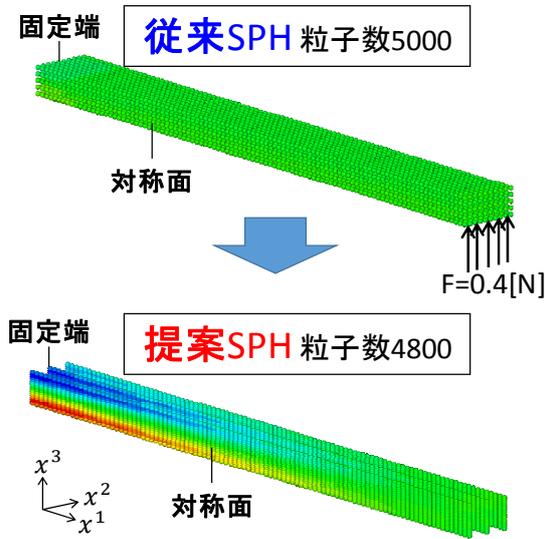
4. 研究成果

(1) 一般化座標系への写像を応用した SPH を構築し、片持ちはりの曲げ解析を行った。対称性を考慮して 1/2 領域(長さ 40mm、厚さ 2mm)をモデル化した。右端部の外力を徐々に増加させることで、準静的負荷を模擬した。材料は線形弾性体とし、Al の材料物性を用いた。従来 SPH (等間隔配置) による粒子数は 5000 であり、それと比較して板厚方向に細かく、幅方向に粗く粒子を配置した提案 SPH では、粒子数は 4800 である(図5(a))。

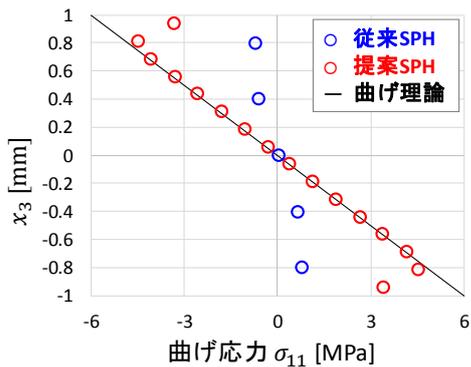
固定端における曲げ応力を、従来手法と提案手法で比較した。従来手法では板厚方向への分割数が不足したため、得られた応力分布曲げ理論と大きく異なった。この相違は、SPH が、各粒子の持つカーネル(重み関数)を重ね合わせることによって空間分布を構築することに起因する。応力の勾配が大きい板厚方向に細かく粒子を配置した提案手法では、従来手法とほぼ同じ粒子数にもかかわらず、曲げ理論に一致する応力分布が得られた。なお、板の表面で応力の絶対値が減少するのは、その座標における応力をカーネルの重ね合わせによる空間補間で求めている際に、最表面では内部よりも補間に関わる粒子数が少ないためである。以上により、本手法の妥当性を実証した。

スケールを変更した写像後の計算空間で SPH のアルゴリズムを実施することで、物理

空間における不均一な粒子の配置による粒子数の削減を実現し、計算効率の抜本的な改善を達成した。この手法は世界的に研究例がなく、独創的なアイデアである。



(a) 粒子モデルの比較



(b) 固定端における曲げ応力分布
図5 片持ちばりの曲げ解析

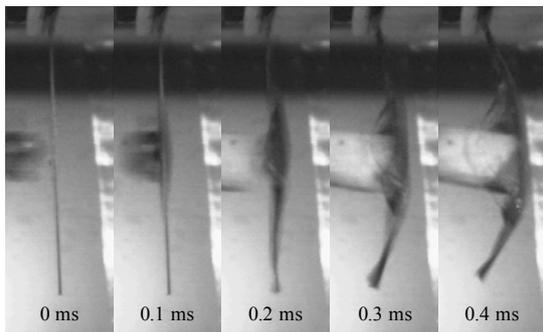


図6 柔軟体衝突によるCFRPの変形挙動

(2) 図6に柔軟体高速衝突試験における高速カメラの映像を示す。衝突後0.1ms~0.2msにかけてCFRP積層板は3次モードで変形し、0.3ms~0.5msにかけては2次モードで変形した。試験片は最終的に固定端で破壊し、試験後の内部損傷観察により、それ以外の場所に損傷は発生しなかったことを確認した。ゼラチン球は衝突後0.2msまでは飛散せずに形

状を保ったが、0.3ms以降は飛散し流体のような振る舞いを見せた。

(3) まず、柔軟体が剛体板に衝突する際の圧力の時間履歴を、従来手法と提案手法で比較した。衝突方向に垂直な面内に粒子間隔を大きくした柔軟体モデルと、等間隔に粒子を配置した柔軟体モデル(従来手法)では、同一の圧力履歴が得られた。また、解析で得られる最大圧力は、文献に報告されている実験結果とおおむね一致し、柔軟体モデルが妥当であることを確認した。

CFRPクロスプライ積層板の実寸法モデルに柔軟体が155m/sで衝突した際の変形挙動を解析した。得られたCFRP積層板の変形状態と長手方向の垂直応力 T_{11} の分布を図7に示す。CFRP積層板内の損傷は考慮していないものの、衝突から0.15msにおいてCFRP積層板は局所的に変形し、3次モード的な変形状態となった。この傾向は実験結果と一致した。また、本解析には一般的なワークステーションを利用しており、バードストライク現象と途中であるが、0.15msまでの解析に要した時間は約289時間であった。以上により、提案手法が、現実的な解析コストでCFRP積層板のマクロな動的変形挙動を予測できることを実証した。

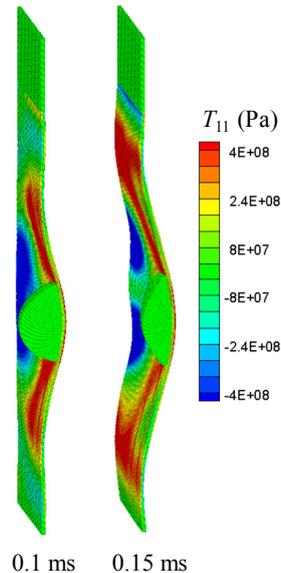


図7 柔軟体高速衝撃解析の結果

(4) 第(1)(3)項で提案、検証した一般化座標系SPHに応力基準の破損則と粒子の即時破壊モデルを適用してバードストライク損傷を予測したところ、脆性的な損傷進展挙動を示し、文献^①と比較して過剰な層間はく離が予測された。このような脆性的な損傷進展挙動を改善するべく、粒子の応力-ひずみ関係における軟化挙動とエネルギー吸収を表現するSmearred crack modelを実装した。

まず、単軸引張荷重を受ける棒の中央面で損傷判定を行い、解析手法の妥当性を検証し

た。得られた応力-ひずみ関係は、解析条件として入力した通りの双線形型の軟化挙動を示した。また、CFRP 一方向積層板のモード I 層間破壊靱性試験 (DCB 試験) に対応する解析を行った。解析的に得られたき裂長さ-開口変位関係は、き裂進展の初期段階を除いて実験結果とおおむね一致した。き裂進展の初期段階で観察されたき裂長さとは合わなかったことは解析モデルの初期条件が実験と異なることが原因である。以上より、提案 SPH に導入した Smearred crack model の妥当性を実証し、破壊靱性を考慮した損傷解析を可能となった。

本解析手法を用い、CFRP クロスプライ積層板に対する柔軟体高速衝撃解析を実施した。ここで、繊維破断 (即時破壊) と層間はく離 (Smearred crack model) を判定した。解析で得られた損傷状態を文献^①に報告されている実験結果と比較した (図 8)。予測した層間はく離などの損傷形態は報告されている実験結果とおおむね一致し、積層板の脆性的な損傷進展挙動は改善された。また、衝突速度を変えて解析を行い、損傷が発生する速度が実験結果と一致することを示した。以上より、新たな SPH によるバードストライク損傷解析の妥当性を実証した。

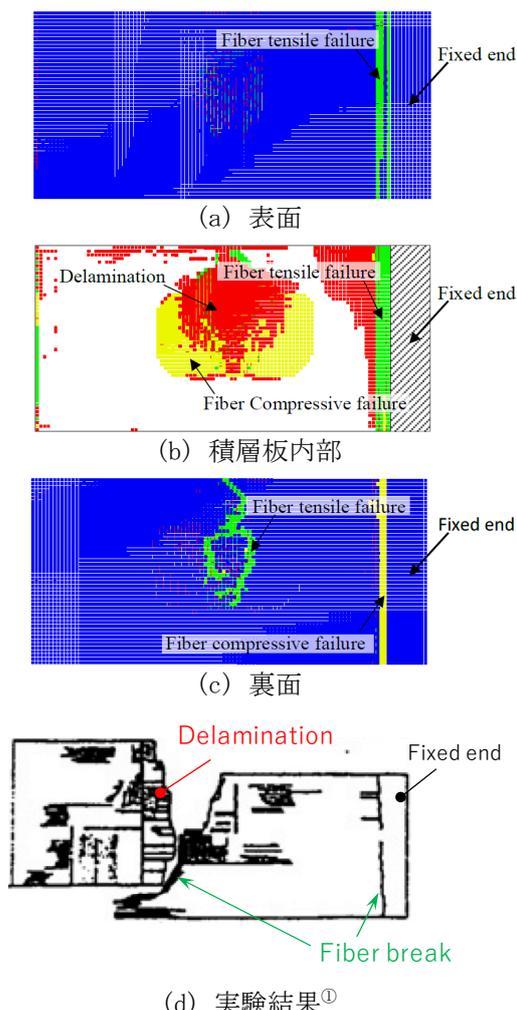


図 8 バードストライク損傷の比較

<引用文献>

- ① J.P. Hou, C. Ruiz. Soft body impact on laminated composite materials. Composites Part A, Vol. 38, pp. 505-515, 2007.
- ② M. Guida et al. SPH - Lagrangian study of bird impact on leading edge wing. Composite Structures, Vol. 93, pp. 1060-1071, 2011.

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① Shigeki Yashiro, Tomonaga Okabe. Smoothed particle hydrodynamics in a generalized coordinate system with a finite-deformation constitutive model. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 査読有, Vol. 103, pp. 781-797, 2015. DOI: 10.1002/nme.4906
- ② Shigeki Yashiro, Keiji Ogi, Akinori Yoshimura, Yoshihisa Sakaida. Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part II- prediction by smoothed particle hydrodynamics. Composites Part A, Vol. 56, pp. 308-318, 2014. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.04.012
- ③ Shigeki Yashiro, Keiji Ogi, Tsukasa Nakamura, Akinori Yoshimura. Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part I- experiment, Composites Part A, Vol. 48, pp. 93-100, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.12.015

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① Shigeki Yashiro. Numerical analysis of bird strike on CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics in a generalized coordinate system. Next generation transport aircraft workshop 2016, February 22, 2016, Honolulu (HI, USA).
- ② Shigeki Yashiro, Keiji Ogi, Akinori Yoshimura, Yoshihisa Sakaida. Experimental and numerical characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates. 20th International Conference on Composite Materials (ICCM20), July 24, 2015, Copenhagen (Denmark).
- ③ 猪川哲平, 矢代茂樹, 岡部朋永, 坂井田喜久. 一般化座標 SPH を用いた CFRP 積層板への柔軟対衝突解析. 第 40 回複合材料シンポジウム, 2015 年 9 月 18 日, 金沢工業大学扇が丘キャンパス (石川県野々市市).
- ④ 猪川哲平, 矢代茂樹, 岡部朋永, 坂井田喜久. 一般化座標系を応用した SPH 法の

提案と柔軟体衝突問題への適用. 第 6 回
日本複合材料会議 (JCCM-6), 2015 年 3
月 4 日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東
京都葛飾区) .

- ⑤ Shigeki Yashiro, Ryuji Ono, Keiji Ogi,
Yoshihisa Sakaida. Prediction of
shear-cutting process of CFRP cross-ply
laminates using smoothed particle
hydrodynamics. 16th US-Japan
Conference on Composite Materials,
September 9, 2014, San Diego (CA, USA).

[図書] (計 1 件)

- ① Shigeki Yashiro, Keiji Ogi (editor:
Vadim V. Silberschmidt). Woodhead
Publishing. High-velocity impact
damage in CFRP laminates (Chapter 7) in
Dynamic Deformation, Damage and
Fracture in Composite Materials and
Structures. 2016, pp. 169-191.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tsyashi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢代 茂樹 (YASHIRO SHIGEKI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号 : 00452681