

HOKKAIDO UNIVERSITY

曲線繊維複合材およびスマート複合材の 最適設計に関する研究



Control Control Contr

Outline

- 1. 曲線状強化繊維によって強化された積層複合材の多目的最適化
 - ・目的関数: 機械的特性, 繊維の曲率
 - ・設計変数:曲線定義関数の係数
 - ・最適化手法: 非優越ソート遺伝的アルイゴリズム(NSGAII)
 - ・可視化: 自己組織化マップ(SOM)
- 2. 小型スマート複合材の振動制御性能に関する統合最適化とレー ザー加振技術による実験的検証
 - ・目的関数: スマート複合材の振動制御性能
 - ・設計変数: 複合材の繊維配向角度,アクチュエータ配置,制御系重み
 - ・最適化手法: データベースの援用による単純遺伝的アルゴリズム
- 3. 自己組織化マップを適用した振動制御

・SOMによるモデル化レス,オンライン制御手法の提案





HOKKAIDO UNIVERSITY

1. 曲線状強化繊維によって強化された 積層複合材の多目的最適化

本田 真也(北大), 五十嵐 輝樹(元北大院), 成田 吉弘(北大)

繊維配向技術の発展

- 曲線状繊維による複合材料
- 自動繊維牽引技術
- 自然界の材料 (例: 牛骨)
- Hap結晶方位の配向方向
- 局所的な異方性を最適に配置.



Source: Giri et al. (2008)



Source: Cincinnati Machine

Source: Lopes et al. (2008)



1. Background & Objectives

その他の曲線状繊維作成装置





Pinch device

タジマ工業株式会社 HPより, http://composites.tajima.com/index.html



Tow material compaction also Resin film (a) Pressing zone Gripping zone Stiffing Stiffing Cripping zone Gripping zone Cripping zone Gripping zone Cripping zone Gripping zone

(b)

Tow guide rolls

Byung Chul Kim, Kevin Potter, Paul M. Weaver, Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites, Composite Part A, Vol. 43 (2012) 1347–1356



これまでの研究成果:

- 曲線状繊維は直線繊維よりも高い機械的特性を示す.
- 高い曲率を示し、製造困難な繊維形状が多い
- 機械的特性と繊維曲率の間にトレードオフの関係が存在.
- 多目的最適化によりパレート解の算出





2-1. 繊維形状の表現

曲線状繊維形状は, 三次元多項式局面 *f*(*x*, *y*) の等高線を水平面に 対して射影することで定義する...

surface:
$$f(x, y) = c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2 + c_{30}x^3 + c_{21}x^2y + c_{12}xy^2 + c_{03}y^3$$

Example)	C ₁₀	C ₀₁	C ₂₀	C ₁₁	C ₀₂	C ₃₀	C ₂₁	C ₁₂	C 03
	0.8	-0.8	0.2	-0.5	0.2	-1	-0.9	1	1





Fig. Discrete fiber shape in the FEA



2. Analysis & Optimization

2-2. 有孔平板の有限要素モデル

<u>Plate</u>:有限幅無限長を模擬した1/4モデル

$$w = 0.1[m], a = 0.05[m], c = 0.7[m], \sigma_x = 10[MPa]$$



全要素数:400

<u>Material</u>: Graphite/epoxy (CFRP)
対称8積層アングルプライ板 [+/-/+/-]s

$$E_1 = 138$$
 [GPa], $E_2 = 8.96$ [GPa], $G_{12} = 7.1$ [GPa], $v_{12} = 0.30$



Sym. $[+\theta/-\theta/+\theta/-\theta]s$



2-3. 目的関数

1. 円孔周りの面内強度の最大化

➡ Tsai-Wu の破壊指標 Φ の最小化

 $\Phi = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{66} \tau_{12}^2 \qquad (\Phi \ge 1 : \text{Failure})$

 $\begin{cases} F_1 = (X_c - X_t)/(X_c X_t), & F_2 = (Y_c - Y_t)/(Y_c Y_t) \\ F_{11} = 1/(X_c X_t), & F_{22} = 1/(Y_c Y_t), & F_{12} = 1/(X_c X_t Y_c Y_t)^{1/2} \\ F_{66} = 1/S^2 \end{cases} X_t = X_c = 144800 \text{ N/cm}^2, \\ Y_t = 20685 \text{ N/cm}^2, & Y_c = 5171 \text{ N/cm}^2, \\ S = 9008 \text{ N/cm}^2 \end{cases}$

 n_e : number of element, $f_*^{(k)}$: partial difference in the kth element



2. Analysis & Optimization

2-4. 多目的最適化手法

Improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)

(Deb et. al,. 2002)





2. Analysis & Optimization

2-5. 多目的最適化問題の定式化

Minimizing: $(\Phi)_k$ (k = 1, 2) and $(\overline{\kappa})_k$ (k = 1)Design variables: c_{ij} (i, j = 0, 1, 2, 3)Subject to: $-2.0 \le c_{ij} \le 2.0$ $(\Delta c_{ij} = 0.1)$ (i, j = 0, 1, 2, and 3) $c_{10} = c_{01} = c_{11} = c_{12} = c_{21} = 0$

- 対称8積層アングルプライ板に限定 [+/-/+/-]s
- 曲率の評価範囲を限定, 0 ≤ x, y ≤ 0.1
- 世代数: 400, 人口数: 400





HOKKAIDO UNIVERSITY



B HOKKAIDO UNIVERSITY



3-3. ランダムサーチとの比較

- 200,000 回のランダムサーチ

4目的最適化問題

モデルと最適化条件		
積層構成	+層と-層のアングルプライ対称積層 [(+/-) _{NI/4}] _s	
寸法	<i>a</i> = 0.14 m, <i>b</i> = 0.14 m, <i>r</i> = 0.01 m	
境界条件	(i) $F_x = 1400 \text{ N}$, $F_y = 0 \text{ N}$ (ii) $F_x = 0 \text{ N}$, $F_y = 1400 \text{ N}$ (iii) $F_x = 700 \text{ N}$, $F_y = 700 \text{ N}$	
要素·節点数	400, 1280	
目的関数	Tsai-Wuの破壊指標_1 Tsai-Wuの破壊指標_2 Tsai-Wuの破壊指標_3 繊維の最大曲率	
設計変数	$c_{10}, c_{01}, c_{20}, c_{11}, c_{02}$	
人口·世代	200, 400	

⇒193種の設計案を含む四次元のパレート解 ⇒SOMの10000回の学習によって可視化

U-matrix

19

HOKKAIDO UNIVERSITY

20

Conclusions

本報では曲線状繊維を有する繊維強化複合材の最適化問題に対して,機械的特性および,曲線状繊維の製造コストの指標となる繊維の最大曲率を目的関数とした多目的最適化 手法を適用した.

- 1. 2目的最適化の結果, パレート解には過去の曲線状繊維形状の単目的最適化では得られなかった, 製造コストが低く, 十分機械的特性を向上させている設計案が多数含まれていた.
- 2. 3種類の応力状態を考慮した4目的最適化の結果,四つの目的関数の間にトレードオフの関係が現れたパレート解が得られた.しかし,四次元のパレート解は多次元の情報をもつために可視化が困難であるため,本研究ではSOMによる学習によって結果を二次元平面に射影した.その結果,非常に情報量の多い多次元のパレート解を視覚的に解釈することができた.
- 以上より,曲線状繊維を有する複合材料に対して提案した多目的最適手法を適用することによって,多様な設計案を獲得し,設計者がパレート解から任意に優秀な設計案を選択することを可能とした.

2. 小型スマート複合材の振動制御性能に関する統合最適化とレーザー加振技術による実験的検証

本田 真也(北大), 渡邊 一希(北大院), 成田 吉弘(北大), 梶原 逸朗

Outline

- 1. Background & objectives
- 2. Experimental & optimization methods
 - レーザー加振技術
 - ハンマー加振(従来法)とインパルス加振の比較
 - 小型スマート複合材の制作条件とモデル化
 - 最適化問題の定式化
 - 統合最適化の流れ
- 3. Results & discussions
 - 統合最適化結果(数値計算)
 - アクチュエータ配置と振動モード
 - 実験結果: パワースペクトラム
 - 実験結果と数値計算結果の比較

1. Background & Objectives

小型スマート複合材の開発

- 応用事例; HDD, デジタルカメラ, スマートフォン等の駆動部品
- 高周波帯域での振動抑制が必要
- スマート構造化による振動制御
- スマート構造の制振性能 → モード形状やアクチュエータ位置に依存
- CFRP複合材 → 設計可能な異方性構造
- モード形状とアクチュエータ配置 → 統合最適化
- 小型構造の制振実験 → 正確な加振が困難
- レーザーアブレーションを用いたレーザー加振技術の適用

Fig. Hard Disc Drive head

Fig. Example of optimized smart structures

レーザー加振技術 (1/2)

- 高出力のパルスレーザーが加振対象に照射 → 原子, 分子, イオンなどを 含む粒子群が瞬時に発生
- 放出された粒子群は、質量 Δm および速度vを持つ \rightarrow 運動量 Δmv
- 反作用として、インパルスカが加振対象に与えられ、インパルス加振が実現
- 使用しているパルス幅は5nsec → 理想的なインパルス加振が可能

25

レーザー加振技術 (2/2)

ハンマー加振(従来法)とレーザー加振の比較 加振対象: 台形状,対称6積層板[0/0/0]s

小型スマート複合材の制作条件とモデル化

- 台形状,積層数は対称6積層 → 厚さを揃えるため
- プリプレグ(graphite/epoxy)より大気圧で圧縮しながら硬化
- 制御用アクチュエータとして,小型のPZT(15 x 2 x 0.5 mm)を表面に添付
- AIチップを添付 → レーザーアブレーションによるダメージを避けるため
- 数値計算では,有限要素によりモデル化(ANSYS14.0)
- PZT材の剛性・質量は無視し、制御入力点としてのみモデル化
- AI材はモデル化に含めない

最適化問題の定式化

H_∞理論に基づき、制御系を設計する.

Minimizing: $H_{z1}(\eta_L, \eta_C, \eta_{AC})$ Subject to : $H_u(\eta_L, \eta_C, \eta_{AC}) < H_u^{max}$

Objective function	$H_{_\infty}$ ノルム(制御応答)				
Constraints	$H_{_\infty}$ ノルム(制御入力)				
	<i>η</i> 」: 積層構成インデックス				
Design variables	η _c : 制御重み				
	η _{AC} : アクチュエータ配置(節点)				
Optimizer	単純遺伝的アルゴリズム - 二点交叉 - 突然変異 - エリート戦略				

Fig. Example actuator placements

統合最適化の流れ

3. Results & discussions

統合最適化結果(数値計算) 他の代表的な積層構成を有する板との比較.

Minimum value of objective function

アクチュエータ配置と振動モード 得られた最適積層構成[-15/-15/-15]_sのモード形状とアクチュエータの配置 >第一次,第二次モード → モード形状の等高線に垂直または節線を跨ぐ >第三次モード → 等高線に平行

Fig. Calculated frequency response function

3. Results & discussions

実験結果と数値計算結果の比較

Lay-ups	[-15/-15/-15] _s (opt)	[0/0/0] _s	[0/90/0] _s	[45/-45/45] _s	
Numerical	-16.30dB	-6.60dB	-8.66dB	-0.65dB	
Experimental	-15.28dB	-13.68dB	-12.36dB	-3.98dB	

Maximum reduction

Minimum reduction

Summary

- 小型スマート複合材の振動制御性能最大化を目的とした統合最適化手法の提案を行い、レーザー加振技術を用いて数値計算結果の妥当性を確認した。
- 目的関数は制御応答のH_aノルムとし,設計変数は,積層構成,アクチュエータ配置,制御量の重み係数とした.
- 最適化手法には単純遺伝的アルゴリズムを用い、予めモーダルパラメータに関する データベースを作成することで、計算の効率化を図った。
- 一般的な積層構成に対してアクチュエータ配置と制御重み係数のみを最適化し、結果を比較した。

Conclusions

- 統合最適化の結果,得られたモデルは,一般的な積層構成を有するものより優れた 制御性能を有していることがわかった。
- 振動制御実験による検証では、数値計算結果との差異により第2次以降の振動数で振動抑制は行えなかったが、第1次の振動数の制御性能は、最適解が最も優れていることが示された。

HOKKAIDO UNIVERSITY

3. 自己組織化マップを適用した振動制御

本田 真也(北大), 木田 直宏(北大院), 成田 吉弘(北大)

モデル化無し 環境の変化への適応

◆自己組織化マップ(Self-Organizing Map: SOM)

- ・脳の神経回路を模擬
- 自ら学習を行う
- ・多次元データを二次元マップに写像 データの類似性,相関関係

5次元データ(色(RGBの3次元)・ベクトル(2次元))

2-2.自己組織化マップのアルゴリズム

39

系の出力を観測 状態量子化マップの勝利ノード

状態量子化マップに対応した制御入力 初期:ランダム→学習が進む:効果的

目標値に近づく→状態の改善 目標値から遠ざかる→状態の悪化 $R(k) = -(y(k) - y_d)^2$

状態の改善→学習を行う 状態の悪化→学習を行わない

4.数値解析モデル

5-2.数値解析結果(ステップ応答)

44

自己組織化マップを用いスマート構造物の適応型振動 制御の数値解析を行った.

6 %=

数値解析の結果,高次モードは増加したが,1次モード は減少し,振動の抑制がなされた.

高次のパワースペクトルの増加はマップの収束の遅さ が原因ではないかと考えられる

