

7.1 複合材料設計支援エキスパートシステムに関する研究

田中雅夫* 西川 孝* 中谷信也* 小西和頼* 村川 悟** 林 茂雄***

* 三重県工業技術センター
** 三重県金属試験場
*** 三重県窯業試験場

1. はじめに

コンピュータの発達は、急激なものがあり、技術計算の道具として、今やコンピュータは必須のものとなっている。複合材料の設計の分野においても、このコンピュータ技術の利用が盛んになされている。

繊維強化プラスチック系複合材料 (Fiber Reinforced Plastics) の最大の魅力は、設計の自由度が大きいことにある。しかし、逆に設計が悪いと複合材料の優れた特性を引き出せなくなる。従って、複合材料の特性を十分に生かした材料として活用するためには、設計の効率的な実行を支援する知識システムの確立が必要となる。

一般に、複合材料の設計には、材料設計と構造設計がある。材料設計には基材 (マトリックス、強化材) の種類とその構成 (強化材の含有率、配向角や積層順序など) を決定するものであり、構造設計は、材料設計から得られた材料を用いて構造要素を選択したり、また、その複合構造の構造解析を行うものである。本研究では、前者の材料設計を対象とした。そして、設計目標を力学的特性に限定し、それを満足する最適な材料構成 (マトリックスおよび繊維の種類、繊維の配向角、含有率、積層順序) を決定する最適化システムと、プロダクションルール (IF~THENルール) に基づき用途別に最適な材料を選択する材料選択システムを作成した。

2. システムの概要と実行結果

2.1 有限要素解析による層構造の最適化システム

本システムのフローチャートを図1に示す。解析部分にはSACOM¹⁾ を使用しており、開発したのはSACOM の前処理プログラム・後処理プログラムに相当する部分である。

「形状・荷重の入力」では、構造体の厚み・

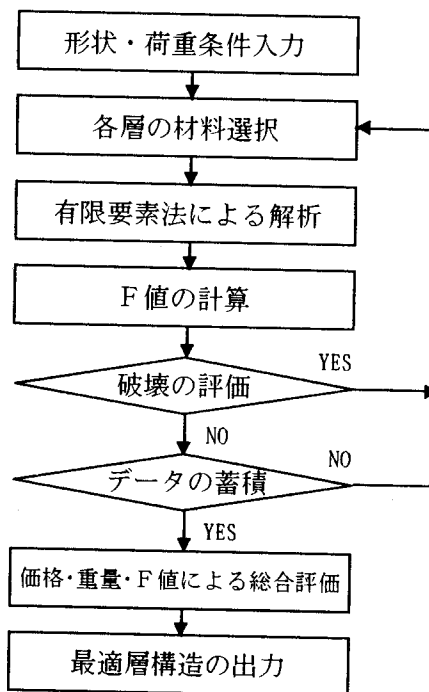


図1 有限要素解析による層構造の最適化システムのフローチャート

長さ・幅、荷重を入力するだけで、SACOMに境界条件を含めて必要なデータが自動生成される。

「各層の材料の選択」では、5種類の材料について入力が可能であり、表1に示した材

表1 材料の機械的性質³⁾

(単位 MPa)

特性値	材料名	ガラス繊維	アラミド繊維	炭素繊維	ポロン繊維	ウレタン
繊維方向のヤング率		45000	76000	132000	274000	392
繊維に直角方向のヤング率		12000	5500	10300	15000	392
繊維方向のポアソン比		0.250	0.340	0.250	0.025	0.400
繊維に直角方向のポアソン比		0.067	0.025	0.020	0.014	0.400
繊維方向の引張強さ		1000	1380	1240	1310	20
繊維に直角方向の引張強さ		34	28	45	34	20
繊維方向の圧縮強さ		40	55	62	100	20
繊維に直角方向の圧縮強さ		550	280	830	2480	20
せん断強さ		140	140	140	310	20

・マトリックス樹脂：エポキシ樹脂

・ $V_f=0.6$

料物性値が、あらかじめセットされている。

「F値の計算」では、SACOMの解析結果から、破壊パラメータ（F値）を求める部分であり、採用したF値は、式(1)に示す“Tsai-Wu”の破壊則により計算する²⁾。

$$F = F_1 \sigma_L + F_2 \sigma_T + F_{11} \sigma_L^2 + F_{22} \sigma_T^2 + F_{66} \tau_{LT}^2 + 2F_{12} \sigma_L \sigma_T \quad (1)$$

ここで

$$F_1 = \frac{1}{F_{Lr}} - \frac{1}{F_{Lc}}, \quad F_2 = \frac{1}{F_{Tr}} - \frac{1}{F_{Tc}}$$

$$F_{11} = \frac{1}{F_{Lr} F_{Lc}}, \quad F_{22} = \frac{1}{F_{Tr} F_{Tc}}, \quad F_{66} = \frac{1}{F_{LT}^2}$$

$$F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad (F_{12}^* = -0.5)$$

F_{Lr} 、 F_{Tr} はそれぞれ繊維方向と繊維の直角方向の引張強さ、 F_{Lc} 、 F_{Tc} は各方向の圧縮強さ、 F_{LT} はせん断強さを示す。

「破壊の評価」および「データの蓄積」では、F値の計算結果より破壊すると判断される場合には、層構造をより高強度な構造に、破壊しないと判断される場合には、より低強度な構造に自動的に変更される。そして、層構造の変更後、解析部分に戻る。ただし、最後の「総合評価」をするのに十分なデータが蓄積されたと判断したときは、この操作は行わず、次の「総合評価」に移る。

「総合評価」では、F値を計算して破壊しない

と判断される層構造について、価格と重量を考慮して最も最適な層構造を決定する部分であり、式(2)を満足する材料構成を計算する³⁾部分である。

$$\text{Minimize } f(X) = \text{Min. } f(F+W+C) \quad (2)$$

F, W, C: F値、重量、価格をそれぞれの最大値で正規化した値

以下にシステムの実行例について延べる。図2に示す各層の厚さが等しい4層構造の積層板において、両端支持で中央に294Nの荷重を受ける3点曲げについて実行した。その結果、積層板の最適層構造は、1層目（最下部層）から順に、カーボン繊維/カーボン繊維/ケブラー繊維/カーボン繊維となった。

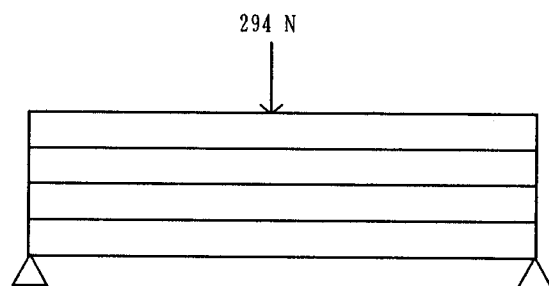


図2 積層板モデル

2.2 積層パラメータによる積層構成の最適化システム

本システムは、三木ら^{4) 5) 6)}により提案された複合材料積層板の材料設計理論を応用した計算機用プログラムである。ここでは、積層板の中央面に関し、配向角および積層素材が対称になっている対称積層板において、配向角0度、 $\pm\theta_1$ 度および $\pm\theta_2$ 度を有するアングルプライ対称積層板 (AS [Angle plied symmetric] 積層板と略する) を対称とする。

積層板の弾性理論に積層パラメータ V_1^* 、 V_2^* を導入すると積層板の有効工学的弾性係数 E_1 、 E_2 、 E_6 は

$$E_1 = \frac{U_1^2 + 2U_1U_3V_2^* - U_2^2V_1^{*2} + 2U_3U_4V_2^* - U_4^2}{U_1 - U_2V_1^* + U_3V_2^*} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{U_1^2 + 2U_1U_3V_2^* - U_2^2V_1^{*2} + 2U_3U_4V_2^* - U_4^2}{U_1 + U_2V_1^* + U_3V_2^*} \quad (4)$$

$$E_6 = U_5 - U_3V_2^* \quad (5)$$

となり⁵⁾、

V_1^* 、 V_2^* は次のようになる。

$$V_1^* = \sum_{i=1}^N v_i \cos 2\theta_i \quad (6)$$

$$V_2^* = \sum_{i=1}^N v_i \cos 4\theta_i \quad (7)$$

ここで、 v_i は配向角が θ_i のプライ群の体積含有率、 N は配向角の種類である。本システムのフローチャート図3に示す。

「材料の選択」では、代表的な5種類の一方向繊維強化複合材料から設計を行う材料を選択する。

「基礎計算」では、選択した一方向繊維強化複合材料の工学的弾性定数からTsaiらの式を用いて、弾性定数の線形結合を求める。

「AS積層板における面内剛性 E_1 、 E_2 および E_6 の変化を表示」では、有効工学的弾性定数 E_1 、 E_2

および E_6 を E_1 、 E_2 、 E_6 線図や体積含有率の座標上にグラフィックス表示する。このことにより設計者は、設計計画図案の検討が容易になる。

「AS積層板における面内剛性を基準とした積層構成の決定」では、まず工学的弾性定数 E_1 、 E_2 および E_6 を決定する。次に設計したい積層構成を選択する。そして、結果として各配向角に関する体積含有率を与えて配向角を求めるか、配向角を与えて体積含有率を求めるという処理を行う。

以下にシステムの実行例について述べる。面内剛性値： $F_1=100$ 、 $F_2=60$ 、 $F_6=20$ (GPa) を有する積層板の積層構成を決定する問題について実行した。その結果を表2に示す。ここで、Case 1 と Case 2 は、積層数を規定した場合で、Case 3 と Case 4 は、配向角を規定した場合である。

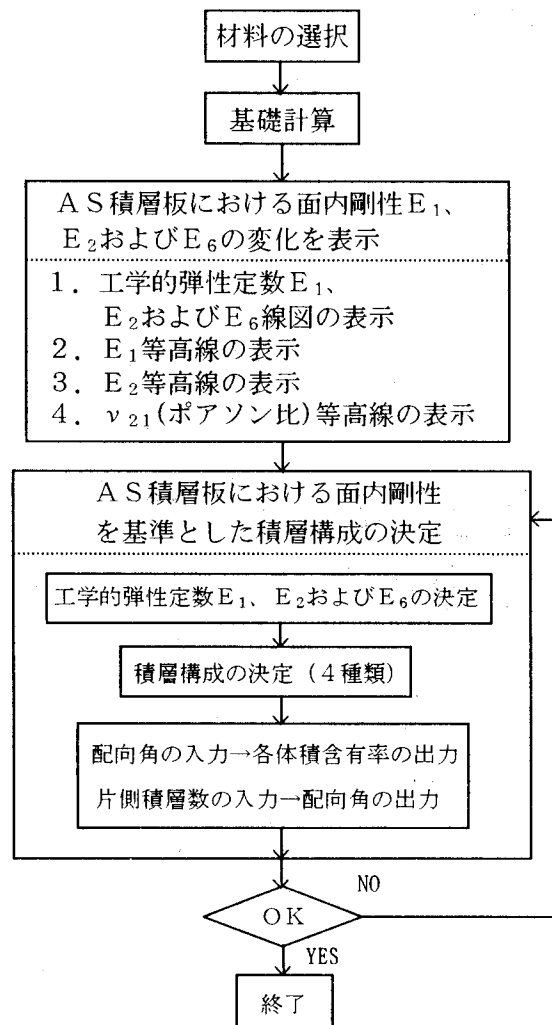


図3 積層パラメータによる積層構成の最適化システムのフローチャート

表2 最適積層構成

Case	体積含有率			配向角 $\pm \theta$ (°)		
	V_0	V_1	V_2	0	θ_1	θ_2
1	0.4	0.2	0.4	0	26.0	67.3
2	0.2	0.4	0.4	0	67.8	17.4
3	0.320	0.391	0.290	0	30	80
4	0.515	0.375	0.110	0	60	70

全積層数：20枚

2.3 複合材料選択システム

強度、価格、重量、使用温度等を考慮して用途に最適な材料を選択するシステムである。用途として、スポーツ・レジャー用品、ロープ・ベルト、船舶、建材、宇宙・航空機、電気機器部品を、対象材料として、E-ガラス、T-ガラス、カーボン(T-300)、アラミド(ケブラー49)、ボロンの各繊維を取り上げた。

システムの作成にあたり、知識ベースの構造は、

プロダクションルール (IF~THENルール) を用い、前向き推論と後ろ向きをミックスした推論方式とした。システムの基本設計を図4に示す。

なお、このシステムは、31のルールより成り立っており、各ルールには確信度サポートを行い、確信度の最終決定には平均値法を採用した。

「最重視項目の選択」では、ロープ・ベルト、船舶、建材、宇宙・航空機の用途を選択した場合、最も重要視する性能について、価格、重量、力学的特性の中から選択する。

「特性値の入力」では、用途に要求される特性値(引張強さ、引張弾性率、重量、使用温度、価格)について入力する。

「結論の表示」では、用途に適した材料が確信度の大きい順に表示され、最も大きい値が最適な材料となる。

以下にシステムの実行例について述べる。用途として宇宙・航空機を選択し実行した。結果は、

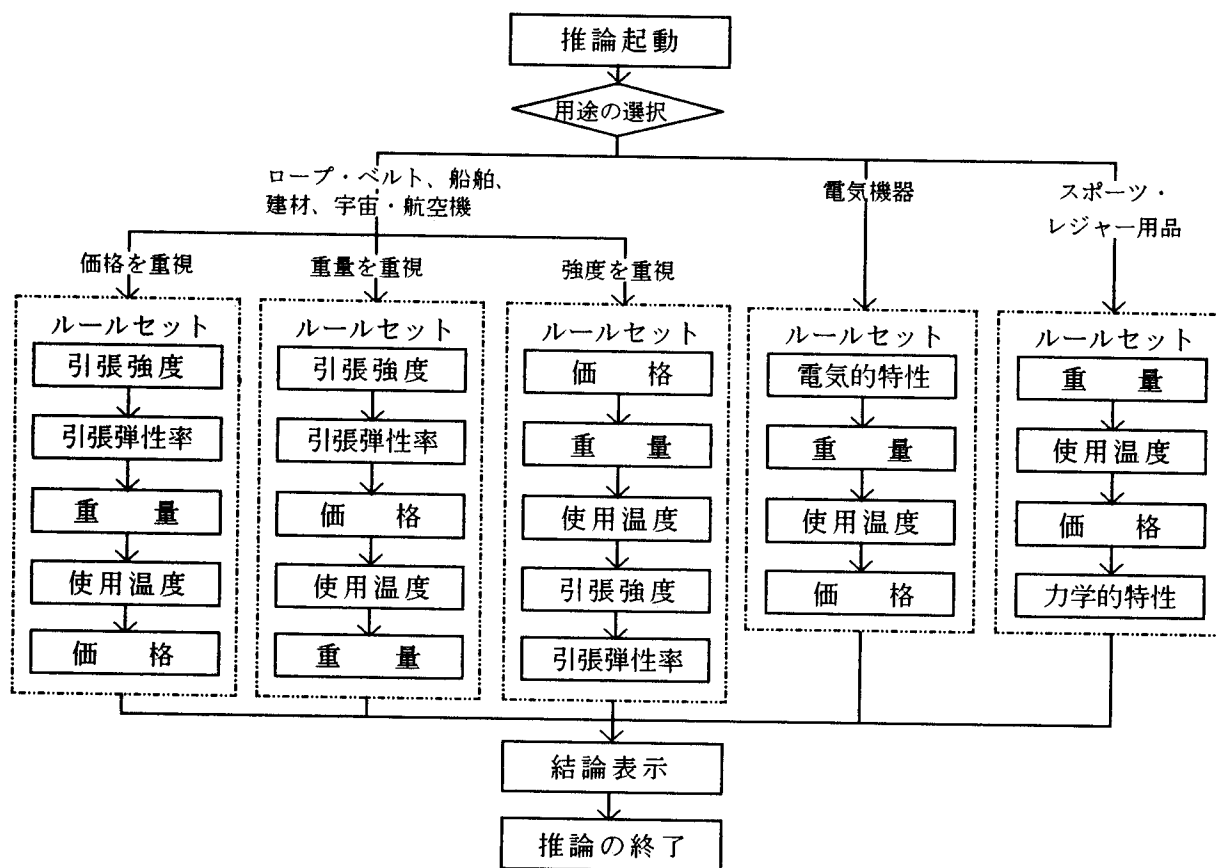


図4 複合材料選択システムのフローチャート

図5に示すようにアラミド（ケブラー49）繊維が最適となった。



図5 材料選択システムの推論結果

3. ま と め

複合材料設計支援エキスパートシステムのプロタイプシステムの構築にあたり、2つの最適化システムと材料選択システムを作成し、その実行例を示した。

システムの動作環境は、ハードウェアが、PC-9801シリーズおよびその互換機で、OSはMS-DOSを採用した。各システムとも対話形式とし、利用者は技術計算の背景となっている理論の厳密な理解をしなくても、結果が得られるようにした。

しかし、本システムを構成している3つのシステムは、それぞれが独立しており、その適用については限定されている。今後、各システムを有機的に結合したシステムとして構築する予定である。

参 考 文 献

- 1) 座古勝：数値複合材料力学、(1989)、養賢堂
- 2) S.W.Tsai and E.M.Wu.J.Composite Mat., 5, 58, (1971)
- 3) 座古勝、辻上哲也、材料、41、1440 (1992)
- 4) 三木光範、材料、30、943 (1981)
- 5) 永守正道、三木光範、材料、30、105 (1981)
- 6) 三木光範、強化プラスチック、27、377 (1981)