

積層材料の加工シミュレーション手法に関する研究（第2報）

片山 聡*

A Study on Simulation Methods for Plastic Forming of Laminated Sheets (Part2)

KATAYAMA Satoshi*

抄 録

積層材料に対するシミュレーション精度の向上を目的に、異方性材料の材料特性値を同定する方法について検証した。その結果、ねじり試験において軸方向の移動量を拘束すると、試験トルクに横弾性係数だけでなく、縦弾性係数の影響も現れることを確認した。また、このような多軸応力状態の試験結果から材料特性値を同定する場合、機械学習によるアプローチが有効であることを確認した。

1. 緒 言

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）や紙などの積層材料は、方向によって異なる強度特性を有する異方性材料である。そのため、これらの材料を用いた強度・塑性加工シミュレーションにおいては、異方性材料に適した材料モデルを使用するほか、方向ごとに材料特性値を正しく定義する必要がある。

そこで本研究では、ANSYS, Inc.製構造解析ソフトウェア Ansys Mechanical（以下、Ansys）および Ansys LS-DYNA（以下、LS-DYNA）に搭載される異方性材料モデルの種類や材料特性値の定義方法について調査した。併せて、強度試験による材料特性値の取得方法についても調査した。なお、本報告書においては積層材料の主軸方向を X 軸、主軸直交方向を Y 軸、板厚方向を Z 軸、XY 平面を面内方向とする。

2. 異方性材料モデルの種類

2.1 Ansys に搭載される異方性材料モデル

Ansys（Workbench 環境）では、弾性および塑性の特性値を個々に定義して、異方性材料モデルを構築する。弾性においては直交異方性弾性と異方性弾性が選択可能であり、前者では X、Y、Z 方向の縦弾性係数(E_x , E_y , E_z)、ポアソン

比(ν_{xy} , ν_{yx} , ν_{xz})および横弾性係数(G_{xy} , G_{yz} , G_{xz})を、後者は剛性マトリクスの係数($c_{11} \sim c_{66}$)を定義する仕様となっている。塑性は多直線近似のほか、n 乗硬化則や Voce 則が定義可能であるが、Hill の異方性降伏基準（方向ごとの降伏応力比）を用いることで、直交 3 方向およびせん断 3 方向で異なる挙動を模擬することが可能となっている。減衰については Rayleigh 減衰が、粘弾性については Prony 級数を用いたせん断緩和および体積緩和が設定可能となっている。

2.2 LS-DYNA に搭載される異方性材料モデル

LS-DYNA では Ansys と異なり、CFRP や紙など、各素材に特化した異方性材料モデルが用意されている。LS-DYNA に搭載されている主な異方性材料モデルを表 1 に示す。基本モデルは

表 1 主な異方性材料モデル (LS-DYNA)

MAT 番号	詳細
002	異方性弾性モデル
022	複合材料モデル
058	積層複合繊維材モデル
108	汎用異方弾塑性モデル
157	金属向け異方弾塑性モデル
213	複合材料弾塑性モデル
249	UD 材向け弾塑性モデル
274	紙専用弾塑性モデル

* 技術統括センター

MAT_002 であり、これに塑性や破壊基準を追加したものが MAT 番号の大きな材料モデルとなる。

弾性の定義方法は Ansys の直交異方性弾性と同様であるが、ポアソン比についてはマイナーポアソン比（面内方向においては ν_{yx} ）を入力する仕様となっている。塑性を定義可能な材料モデルは限定されるが、MAT_108 や MAT_157 では、Hill の異方性降伏基準を定義することが可能となっている。また、MAT_213 や MAT_274 では方向だけでなく、荷重極性（引張、圧縮）に対して異なる塑性を定義可能となっている。なお、塑性の設定項目がない材料モデルにおいても、MAT_ADD_INELASTICITY を用いることで、多直線近似型の等方硬化特性を付加可能となっている。減衰については Rayleigh 減衰を設定可能であるが、これは部品単位での適用となるため、積層材料においては層ごとに別部品としてモデル化する必要がある。粘弾性は MAT_ADD_INELASTICITY により、Prony 級数によるせん断緩和を材料モデルに付加可能となっている。

以上のように、ソフトウェアに搭載される異方性材料の種類や形式は Ansys と LS-DYNA で異なっているものの、その定義方法は共通する部分が多いことがわかった。

3. 材料特性値の同定方法

3.1 概要

異方性材料モデルの材料特性のうち、面内方向の縦弾性係数 E_x および E_y 、ポアソン比 ν_{xy} は、ビデオ伸び幅計や DIC（デジタル画像相関法）装置を用いた引張試験により取得することが可能である¹⁾。面外方向の材料特性値（ E_z 、 ν_{yz} 、 ν_{xz} ）についても原理的には圧縮試験から取得可能であるが²⁾、実際には試験機のたわみやひずみ計測分解能の問題で、材料が薄くなるほど取得するのが困難となる。代替試験として、超微小硬さ試験機による測定が考えられるが³⁾、試験力の大きさや結果の評価方法については、その妥当性を事前に検証する必要があるといえる。

等方性材料モデルにおける横弾性係数 G は縦弾性係数 E とポアソン比 ν を用いて式(1)で決定される。しかし、異方性材料モデルにおける横弾性係数は縦弾性係数から独立した値となるため、式(1)を適用することはできない⁴⁾。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots (1)$$

異方性材料における横弾性係数は、CFRP のように構成部材（繊維、樹脂）の材料特性値や構成比率が既知の場合には、理論式や均質化法によって算出することが可能であるが⁵⁾、これらが不明な場合には材料試験より取得する必要がある。等方性材料、異方性材料によらず、横弾性係数を得る試験方法としてはせん断試験があるが²⁾、試験の容易さからねじり試験も多く用いられている⁶⁾。板材のねじり試験における回転角度 θ と試験トルク T の関係は、板材の把持間隔を L 、断面形状によって決まるねじり定数を J （幅 b 、厚さ t が $b \gg t$ の場合、 $J \approx bt^3/3$ ）とすると式(2)で表されるが⁷⁾、式中の横弾性係数 G は等方性が前提であるため、これを異方性材料および積層材料へ適用するのは困難と考えられる。そこで本研究では、シミュレーションと機械学習を用いてねじり試験結果から横弾性係数を同定する方法について検証した。

$$\theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad \dots (2)$$

3.2 シミュレーションモデルの妥当性検証

Ansys で作成したねじり試験シミュレーションモデルを図 1 に示す。試験片は幅 20mm、厚さ 1mm、把持間隔 100mm とし、高次四辺形シェル要素でモデル化した。要素寸法は 1.0mm とした。境界条件は両端の把持面に与え、一方を完全固定面、もう一方をリモート回転面（強制回転： 8° ）とした。また、リモート回転面におけるねじり方向以外の並進・回転自由度はすべて拘束した。この境界条件はねじり試験に使用した INSTRON 社製疲労試験機 ElectroPuls

E10000 の把持状態を模擬したものである。シミュレーションでは完全固定面に生じるモーメント反力と軸方向反力を取得した。これは試験機のロードセルに生じる試験トルクと軸力に相当する結果となる。

シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、試験結果とシミュレーション結果を比較した。本研究の対象材料は異方性材料であるが、モデル検証においては現象を単純化するため、試験、シミュレーションとも試験片には材料特性値が既知の等方性材料(SUS304 材)を用いた。使用した材料特性値を表 2 に示す。

ねじり試験結果およびシミュレーション結果を図 2 に示す。ロードセル容量に対する試験値が小さく、試験結果にはノイズが加わっているが、ねじれ角に対するモーメント反力の線形性や、ねじれ角が増すにつれ軸方向反力の変化量が大きくなる傾向は、試験結果とシミュレーション結果で概ね一致しており、現実を模した妥当なモデルであると考えられる。なお、軸方向反力は軸方向変位を拘束した場合に発生するものであるが⁸⁾、本シミュレーションモデルでは大変形解析機能を有効にすることで、これを再現している。

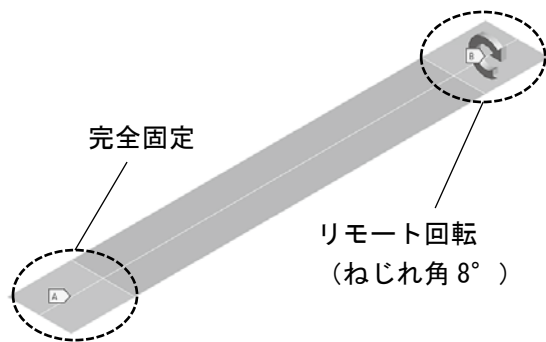


図 1 ねじり試験シミュレーションモデル

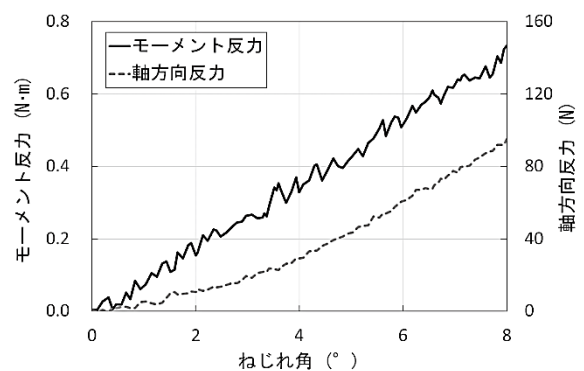
表 2 材料特性値 (SUS304 材)

特性名	値
縦弾性係数 (GPa)	180
ポアソン比	0.28
横弾性係数 (GPa)	70.3

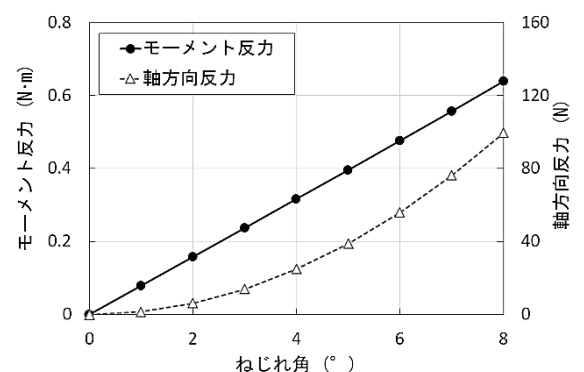
3.3 機械学習を用いた横弾性係数の同定

前節のシミュレーションモデルに対し、表 3 に示す材料特性値を適用してねじり試験シミュレーションを実施し、表 4 に示す結果から材料特性値を同定できるか試みた。同定作業には Ansys DesignXplorer の応答曲面最適化機能を使用し、(1)シミュレーションによる学習点の作成、(2)応答曲面の作成、(3)ねじり試験シミュレーション結果に対する逆解析（最適化）の順に作業を進めた。

応答曲面最適化において、入力変数は材料特性値 (9 変数) とした。入力変数の変動範囲を表 5 に示す。目的変数はモーメント反力および軸方向反力とした。学習点は 1000 点とし、最適空間充填設計 (中心 L2) でサンプリングした。応答曲面作成には遺伝的集合アルゴリズムを、最適化には多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。



(a) 試験結果



(b) シミュレーション結果

図 2 ねじり試験, 同シミュレーション結果

表 3 同定対象の材料特性値

縦弾性係数 (GPa)	E_x	280
	E_y	110
	E_z	110
ポアソン比	ν_{xy}	0.18
	ν_{yz}	0.40
	ν_{xz}	0.18
横弾性係数 (GPa)	G_{xy}	40
	G_{yz}	90
	G_{xz}	40

表 4 ねじり試験シミュレーション結果

モーメント反力(N・m)	503
軸方向反力(N)	249

表 5 入力変数の範囲

縦弾性係数 (GPa)	E_x	100~300
	E_y	100~300
	E_z	100~300
ポアソン比	ν_{xy}	0.15~0.45
	ν_{yz}	0.15~0.45
	ν_{xz}	0.15~0.45
横弾性係数 (GPa)	G_{xy}	35~100
	G_{yz}	35~100
	G_{xz}	35~100

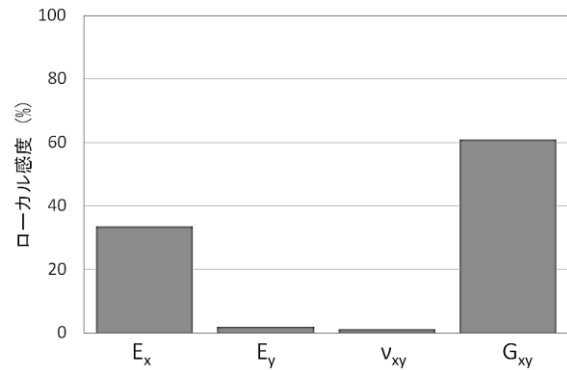
表 6 同定結果

縦弾性係数 (GPa)	E_x	280
	E_y	118
	E_z	118
ポアソン比	ν_{xy}	0.17
	ν_{yz}	0.37
	ν_{xz}	0.17
横弾性係数 (GPa)	G_{xy}	40
	G_{yz}	96
	G_{xz}	40

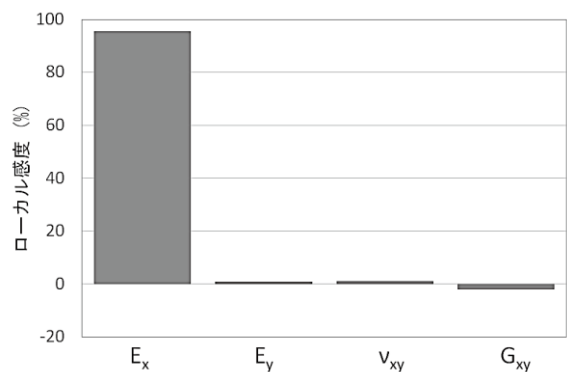
Ansyes DesignXplorer によって示された非劣解の最上位候補値（同定値）を表 6 に示す。同定結果は横弾性係数 G_{xy} だけでなく、他の材料特性値も表 3 に近いものとなっており、機械学習を用いた材料特性値の同定手法の有効性を確認することができた。

3.4 応答曲面に対する寄与度分析結果

同定作業において作成した応答曲面に対する入力変数の寄与度分析結果を図 3 に示す。なお、



(a) モーメント反力



(b) 軸方向反力

図 3 材料特性値の寄与度分析結果

シェル要素（薄板）の場合、面外方向の特性値は意味を持たないため⁹⁾、寄与度分析は面内方向の材料特性値だけを対象とした。図より、モーメント反力は横弾性係数 G_{xy} だけでなく、縦弾性係数 E_x の影響も受けていることがわかる。その影響度は比較的大きく、横弾性係数 G だけで構成されている式 (2) に対しては、本シミュレーション結果を適用できないことがわかる。

4. 結 言

- (1) ねじり試験において軸方向の変形を抑制した場合、結果として得られるモーメント反力に縦弾性係数の影響が現れ、理論式を用いた横弾性係数の同定が困難となる。
- (2) 上記の試験結果を用いた材料特性値の同定には、機械学習による逆解析（最適化）が効果的な方法のひとつとなる。

参考文献

- 1) 片山聡ほか, “プレス成形シミュレーションの高精度化に向けた引張試験方法に関する研究”, 工業技術研究報告書, no.54 (2024), pp.55-62.
- 2) Weerayut JINA et al., “Finite element analysis of the folding process of creased white-coated paper-board using a combined fluffing resistance and shear yield glue model”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, vol.12, no.2 (2018).
- 3) 翁拓也ほか, “ナノインデンテーション法によるヤング率測定の精度検証”, 長野県工業技術センター研究報告書, no.15 (2020), pp.30-33.
- 4) 杉本直ほか, “FRTP と FRP の動的破壊特性を考慮した FEM シミュレーションモデルの構築”, 日本大学生産工学部第 49 回学術講演会講演概要, (2016), pp.89-92.
- 5) 片山聡ほか, “マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械特性評価に関する研究”, 工業技術研究報告書, no.45 (2015), pp.17-24.
- 6) 吉田勉ほか, “異方性材料のねじり試験による横弾性係数値の測定”, 日本機械学会材料力学部門後援会講演論文集, (2003), pp.885-886.
- 7) ねじり剛性を理解する: 工学における原理, 計算, 応用, <https://firstmold.com/ja/tips/torsional-rigidity/>, (閲覧 2026-03-26).
- 8) JFE テクノリサーチ(株) ねじり(回転)付与時の軸方向荷重計測試験, <https://www.jfe-tec.co.jp/download/pdf/3E3J-172-00.pdf>, (閲覧 2026-03-26).
- 9) 山本剛大ほか, “板厚方向の変形を考慮したシェル要素の開発”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, (2013).