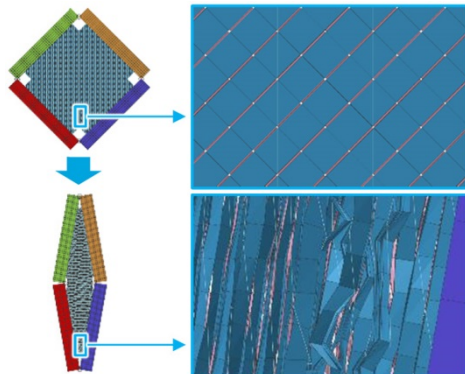


メゾスケール材料モデルを適用した 複合材の高精度成形性予測技術

High-precision Forming Simulation for Composite Material
Using Mesoscale Material Model



野間 一希*1
Kazuki Noma

新藤 健太郎*2
Kentaro Shindo

航空機を中心に適用が進められている Non-Crimp Fabric (NCF) 等の炭素繊維基材を製品形状に成形する際に、製品形状が複雑な場合は繊維のしわ等の欠陥が発生する。一般的に、成形条件の適正化により品質の改善が図られるが、品質向上には繊維基材自体の賦形性改善が有効である。三菱重工株式会社では、メゾスケールの材料モデルを用いた成形解析により材料の微視的な変形挙動を予測し、材料構成を適正化する技術を開発している。本報では、NCF のメゾスケール材料モデルを構築し、せん断試験における繊維の変形挙動を評価した結果について述べる。

1. はじめに

複合材構造の低コスト成形法として、炭素繊維で構成される NCF を用いた成形技術の研究開発が欧州を中心に行われており、航空機等の大型構造物への適用が進められている。図1に示すとおり、NCF は炭素繊維を束にした繊維束を異なる方向に配向し、複数の層をスティッチ糸により縫合一つの構造物としたシートである。織物と比較して繊維の直進性が維持されるため強度特性に優れる。

NCF のシートを製品形状に賦形する際に、形状が複雑な場合は繊維のしわ等の製造欠陥が発生し、構造物の強度特性に影響を及ぼす。一般的に成形プロセスや製品形状の修正等により品質改善が図られるが、品質向上には NCF 自体の賦形性改善が有効である。品質向上策を検討する一つの手法として、賦形解析が使用されているが、一般的な複合材のシート単位で材料をモデル化するマクロスケールの解析では成形時の繊維の動きや面内・面外のしわ(リンクル)等の材料の微視的な変形挙動は予測できない。

そこで、NCF の構成材料である繊維束とスティッチ単位のメゾスケールの材料モデルを用いた賦形解析により、成形時の面内・面外リンクルの予測精度向上を狙っている。材料の微視的な変形挙動の予測により、NCF の材料構成の適正化が可能となり、成形品質の向上が期待できる。本報では、NCF のメゾスケール材料モデルを構築し、せん断試験における繊維の変形挙動を解析と試験と比較評価した結果について述べる。

*1 総合研究所 製造研究部

*2 総合研究所 製造研究部 主席研究員 工博/技術士(金属)

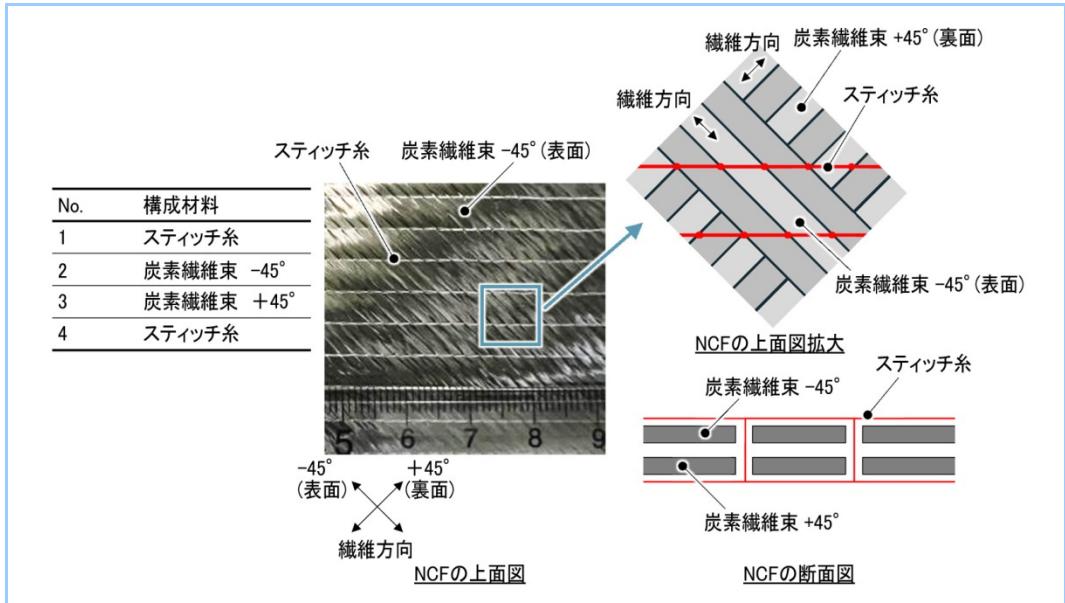


図1 対象としたNCFの構成

本報で対象とした材料(NCF)は上表の構成材料により構成される。

-45° と 45° の方向に配向された2層の炭素繊維束がスティッチにより縫合されている。

2. メソスケール材料モデル

図1に示すとおり、対象とした NCF は+45° と-45° の2層の炭素繊維束とそれらを縫合するスティッチ糸により構成される。解析ソフトは ESI Group の Virtual Performance Solution を使用した。

図2に示すとおり、炭素繊維束を三次元のソリッド要素、スティッチ糸を一次元のバー要素でモデル化し、NCF の全ての繊維束とスティッチをモデル化することで、繊維束の開閉やすべり現象を考慮可能なモデルとした。繊維束の幅や厚み、繊維束間の隙間、スティッチ間の距離は材料の実体と合わせた。繊維束間の隙間は 0.1mm に設定し、2層の繊維束の面外方向の隙間も 0.1mm とした。

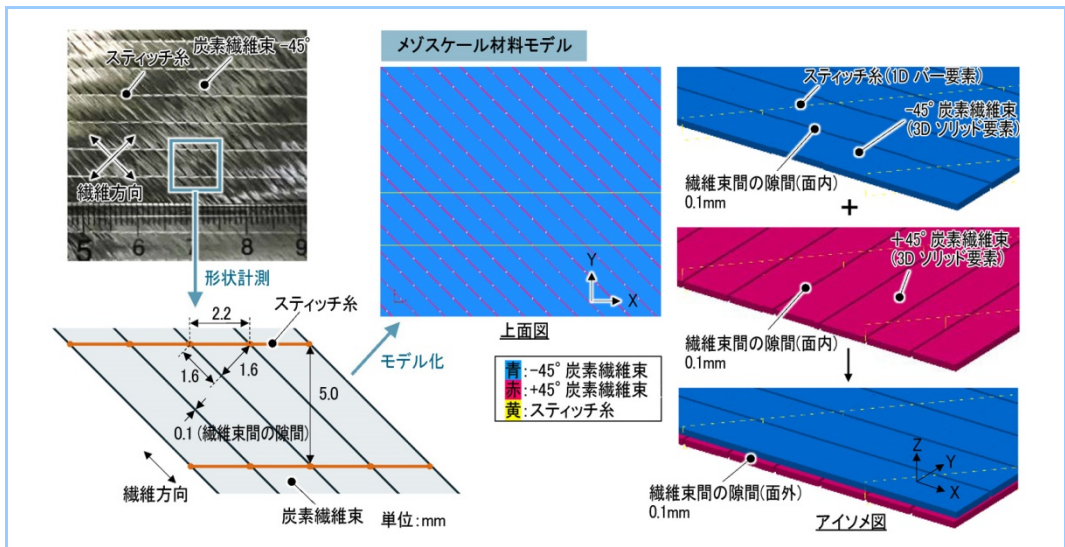


図2 NCFのメソスケール材料モデル

実際のNCFの形状を測定し、実体と合うようにメソスケールの材料モデルを作成した。-45° と+45° 方向の繊維束を三次元のソリッド要素、スティッチを一次元のバー要素でモデル化した。

3. せん断試験の再現解析

NCF のピクチャーフレーム試験における、せん断変形の挙動を解析と試験で比較評価した。NCF とピクチャーフレーム試験治具の解析モデルを図3に示す。NCF は 220mm×220mm のシートから治具のピンが配置される角部を切り欠いた形状とし、スティッチを引張方向に配向させた。

NCF の四辺を表裏から挟み拘束するためのアームと、アーム同士を接続するための内・外ピンのメッシュを作成し、各治具に並進と回転の拘束条件を設定した。アームと内ピンを一体化し、内ピンの外側に外ピンを配置した。試験の拘束条件に合わせて、治具下部の外ピンの変位は完全拘束し、上部の外ピンを上方向に引っ張ることでNCF のせん断挙動を解析した。

解析に用いた材料物性値を表1に示す。NCF のシート単位ではなく、モデル化した炭素繊維束とスティッチそれぞれの物性値を入力する必要があり、炭素繊維束には、縦弾性係数とせん断弾性係数、摩擦係数を入力した。繊維方向の縦弾性係数 E1 は繊維のカタログ値を使用し、その他の縦弾性係数 E2, E3 とせん断弾性係数、摩擦係数の値は類似論文より引用した⁽¹⁾。スティッチの縦弾性係数は、荷重-変位カーブを入力し、せん断試験と解析の荷重-変位カーブが一致するように調整した。

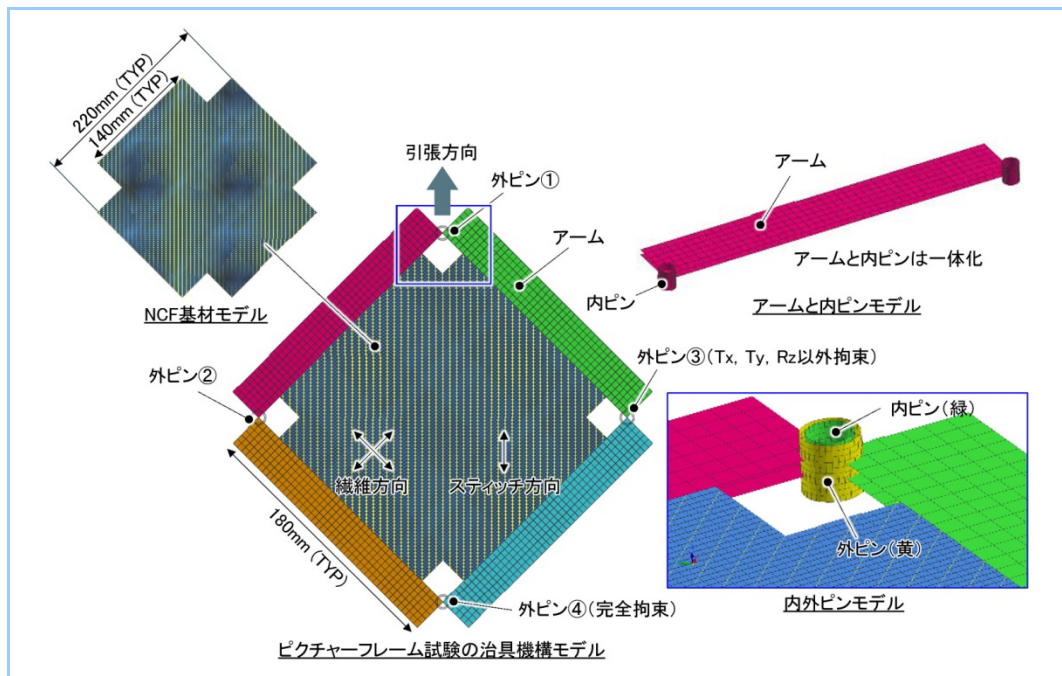


図3 NCF とピクチャーフレーム試験治具の解析モデル

表1 解析で使用した材料物性値

構成材料	材料物性	入力値
炭素繊維束	縦弾性係数	E1: 150 GPa E2: 応力-ひずみカーブ E3: 応力-ひずみカーブ
	せん断弾性係数	G12: 0.2 GPa G13: 0.2 GPa G23: 0.004 GPa
		摩擦係数
スティッチ		縦弾性係数: 荷重-変位カーブ

4. せん断試験による解析精度の検証

4.1 試験条件

解析と同一条件でせん断試験を実施し、解析精度を検証した。試験状況を図4に示す。鉄製のアーム治具により、NCF 試験片の四辺を表裏から挟み拘束した。試験は常温で実施し、クロスヘッドの移動速度は 10mm/min とした。NCF の変位をデジタル画像相関法 (DIC: Digital Image Correlation) により評価するため、NCF の片面に DIC 塗装を塗布した。また、繊維束の開閉や座屈等の変形挙動を評価するため、20mm×20mm の格子を描画した試験片も試験に用いた。

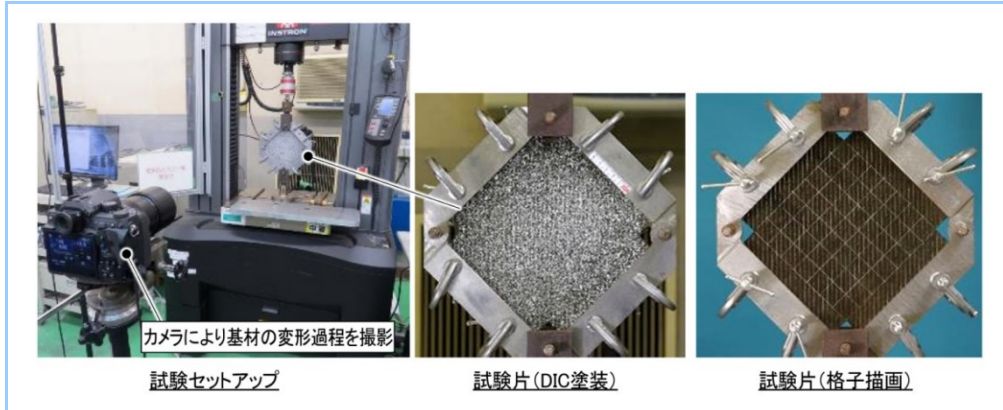


図4 せん断試験の状況

4.2 NCF の変形挙動の評価

解析と試験の NCF 形状の比較結果を図5に示す。全ストローク範囲において、解析と試験が同様の基材形状となり、移動量 80mm 時点の純せん断を超えた領域での NCF の大変形の状況が再現された。

図6に DIC で取得した NCF の変位と解析の比較結果を示す。クロスヘッドのストロークが 40mm 以上では、DIC の塗装潰れにより画像解析が不可となったが、ストローク 40mm までの範囲では、評価点5点の X・Y 方向の変位が ±20% の誤差範囲で試験と一致することを確認した。

図7にストローク 80mm 時点における NCF の面内・面外リンクルの再現状況を示す。せん断変形の初期時点では繊維束が等間隔に配置されているが、変形が進むにしたがって試験と同様に繊維束の開閉や面外の座屈が顕著に再現された。マクロスケールの解析モデルでは、この挙動は予測不可であり、構築したメゾスケール材料モデルの優位性を示した。

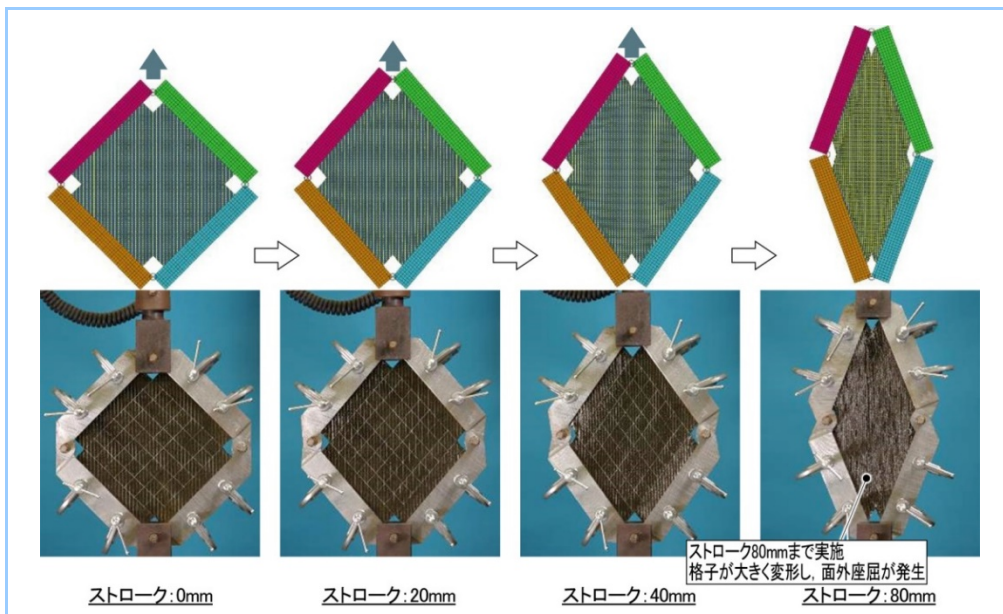


図5 解析と試験の NCF 形状の比較結果

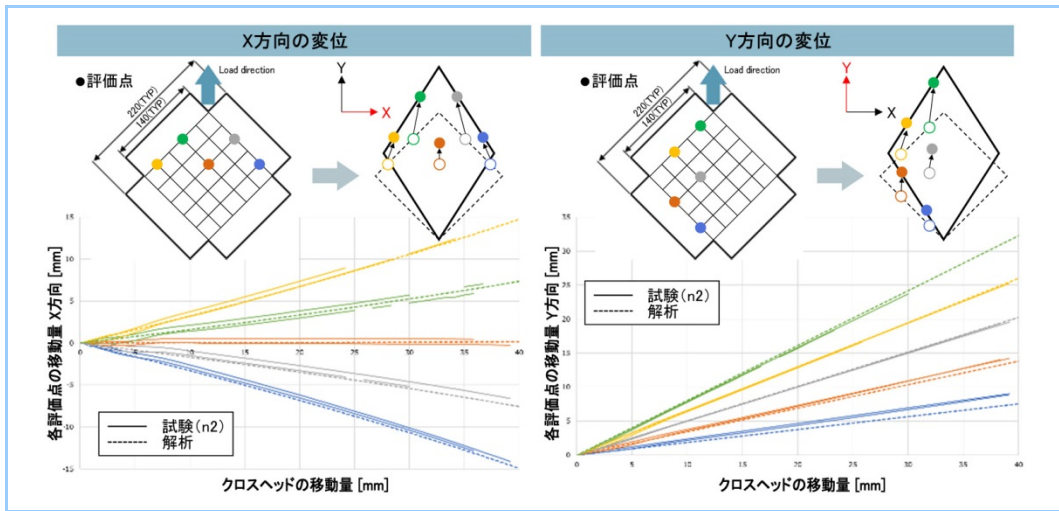


図6 繊維束の変位の比較結果

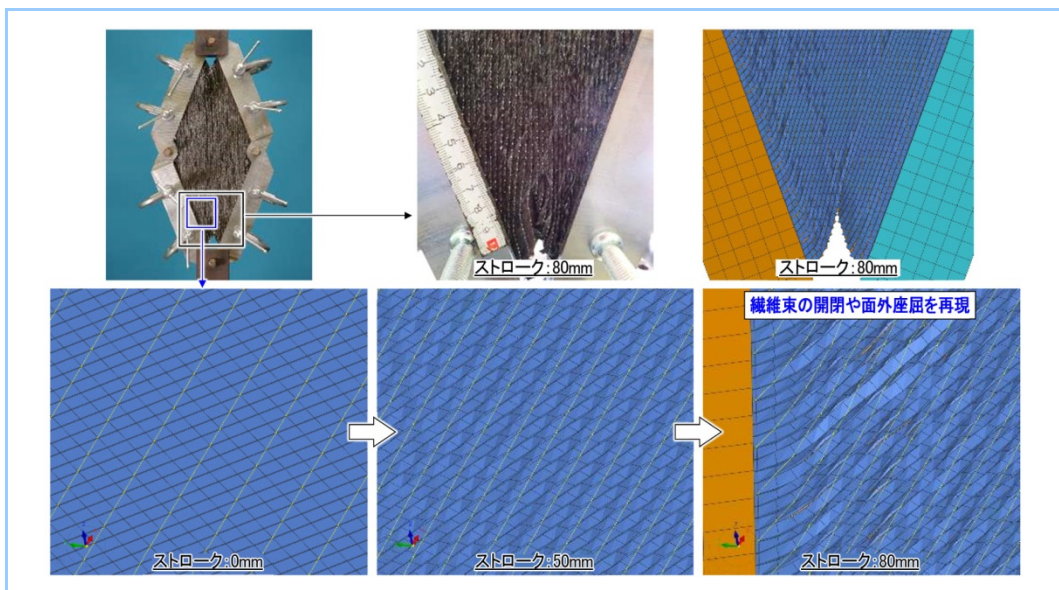


図7 面内・面外繊維リンクルの再現状況

5. まとめ

本報では、NCF の繊維束を三次元のソリッド要素、スティッチ糸を一次元のバー要素で構成するメゾスケールの材料モデルを構築し、ピックアップフレーム試験と解析の比較検証を行った。その結果、各繊維束の間隔変化と面外の座屈挙動が再現され、NCF 材料の成形性予測への適用性を確認した。今後、本報で述べたせん断以外の曲げや、圧縮等の変形モードにおける解析の精度評価と材料物性値の導出を実施した後に、繊維束の幅・配向角度やスティッチ配置等の材料構成の適正化を図り、成形品質の向上に繋げる。

参考文献

- (1) J. Sirtautas et al., A mesoscopic model for coupled drape-infusion simulation of biaxial Non-Crimp Fabric, Composites: Part B, Vol.47 (2013), p.48-57