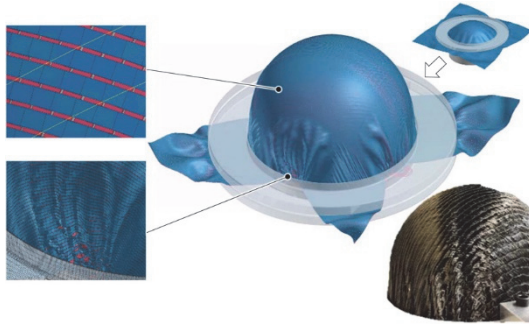


# メソスケール材料モデルを適用した 複合材成形シミュレーション技術

Composite Forming Simulation Using Mesoscale Material Model



野間 一希\*<sup>1</sup>  
Kazuki Noma

新藤 健太郎\*<sup>2</sup>  
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成形性改善が有効である。三菱重工業株式会社では、メソ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、解析精度の向上及び材料構成の適正化を図る技術を開発している。本報では、NCF のメソスケール材料モデルを構築し、要素部品の成形解析と試験を比較評価した結果と、NCF の材料構成による成形性への影響を解析で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させ、複数の層をスティッチ系により縫合し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、強度特性に優れる等の特徴を持つ。

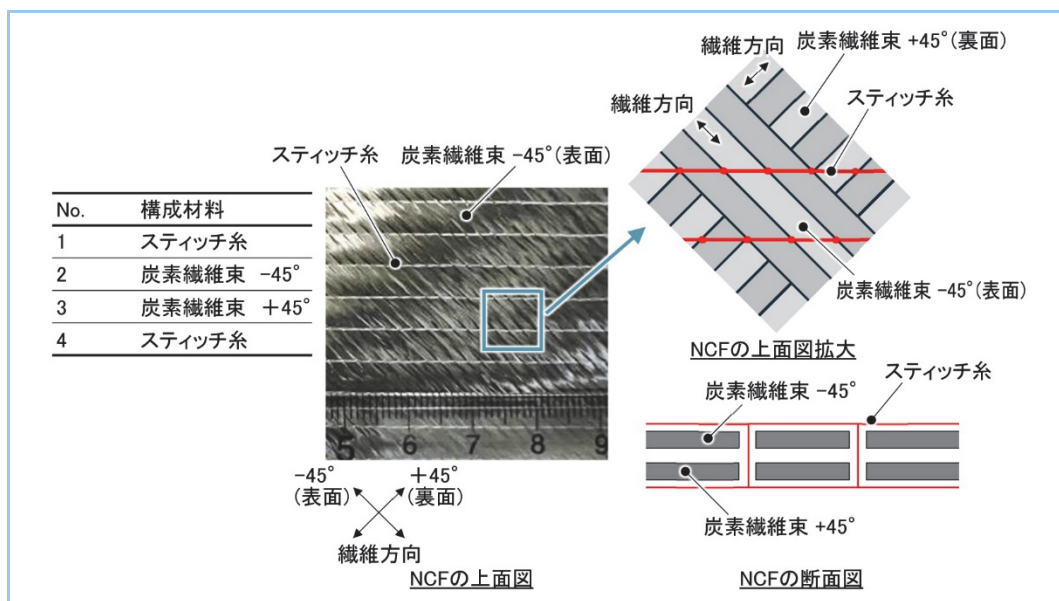


図1 対象とした Non-Crimp Fabric の構成

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。

\*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)

NCF のシートを製品形状に成形する際に、形状が複雑な場合は繊維のしわ(リンクル)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 自体の成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、成形解析が使用されているが、複合材のシート単位で材料をモデル化する一般的なマクロスケールの解析では成形時の繊維の微視的な変形挙動の予測は困難である。

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成形解析により、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、解析精度の向上と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、要素部品の成形解析と試験を比較評価した結果と、NCF の材料構成による成形性への影響を解析で評価した結果について述べる。

## 2. メゾスケール材料モデル

図1のとおり、対象としたNCF は $+45^{\circ}$  と $-45^{\circ}$  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のとおり、炭素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、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。繊維束間の面内方向の隙間は0.1 mm に設定し、2層の繊維束の面外方向の隙間も0.1 mm とした。

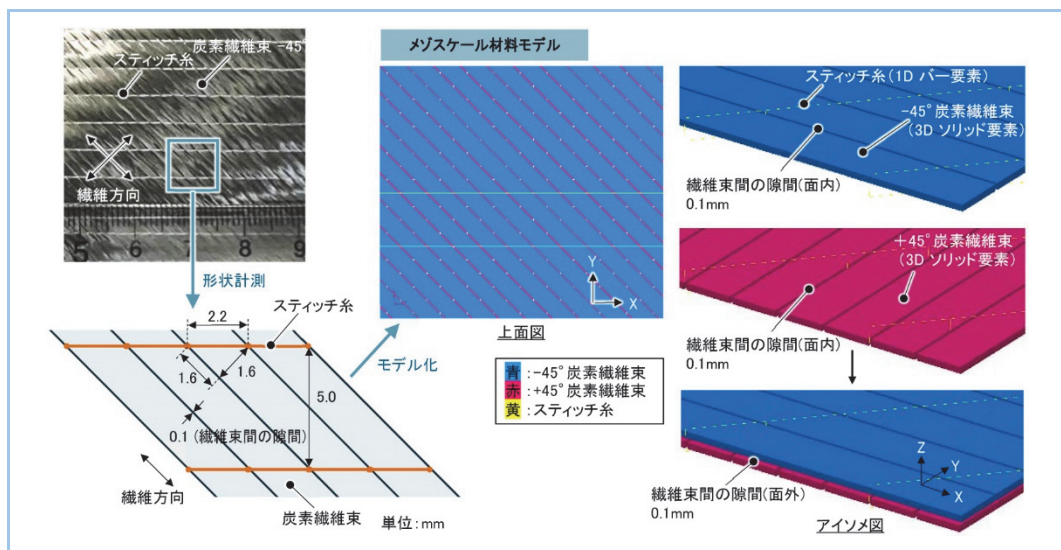


図2 Non-Crimp Fabric のメゾスケール材料モデル

実際の NCF の形状を測定し、実体と合うようにメゾスケールの材料モデルを作成した。 $-45^{\circ}$  と $+45^{\circ}$  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. 要素部品の成形性予測精度の検証

### 3.1 解析条件

開発した材料モデルと導出した材料物性値の妥当性を検証するため、半球形状の型への成形解析を実施した。半球は成形する際に引張、せん断、曲げ、圧縮等が複合した複雑な変形モードとなるため、解析の妥当性を評価する上で適切なモデルである。解析モデルを図3に示す。直径200 mm、高さ150 mmの半球型上に400 mm×400 mmのNCFを配置し、リング状のブランクホルダーによりNCFを上下から挟んだ状態でブランクホルダーを下降させて成形した。

解析に用いる材料物性値は、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、摩擦係数等を入力した。繊維方向の縦弾性係数 E1 は繊維のカatalog値を使用し、その他の縦弾性係数 E2, E3 とせん断弾性係数は測定が困難のため、曲げ試験や圧縮試験とその再現解析結果が一致するように物性値を導出した。繊維束間の摩擦係数の値は類似論文<sup>(1)</sup>より引用し、ステッチのバー要素には、ピクチャーフレーム試験とその再現解析における荷重-変位カーブが一致する縦弾性係数を入力した<sup>(2)</sup>。

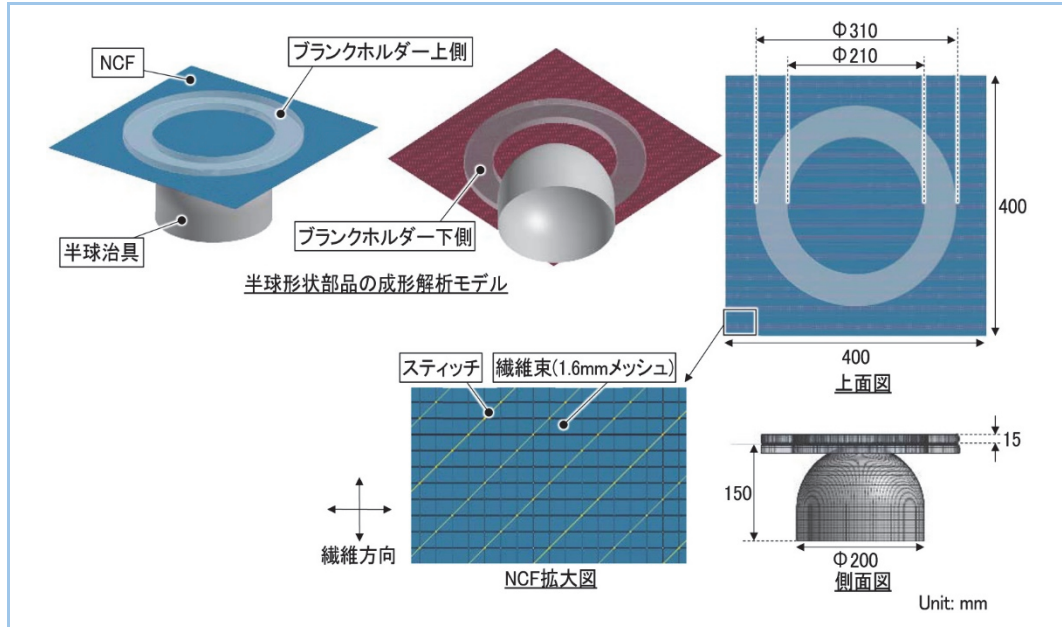


図3 半球形状部品の成形解析モデル

### 3.2 解析結果

解析結果を図4に示す。繊維の目開きの大小や、半球下部に集中した繊維余りが顕著な面外リンクルとなって発生する挙動が予測された。また、ブランクホルダーで挟まれた半球下端の位置では繊維が引っ張られ、上側と下側の繊維層が分離する詳細な状況も再現された。従来のマクロスケールの材料モデルでは再現されない材料の微視的な変形挙動を予測可能であり、開発したメゾスケールモデルの有効性を示した。

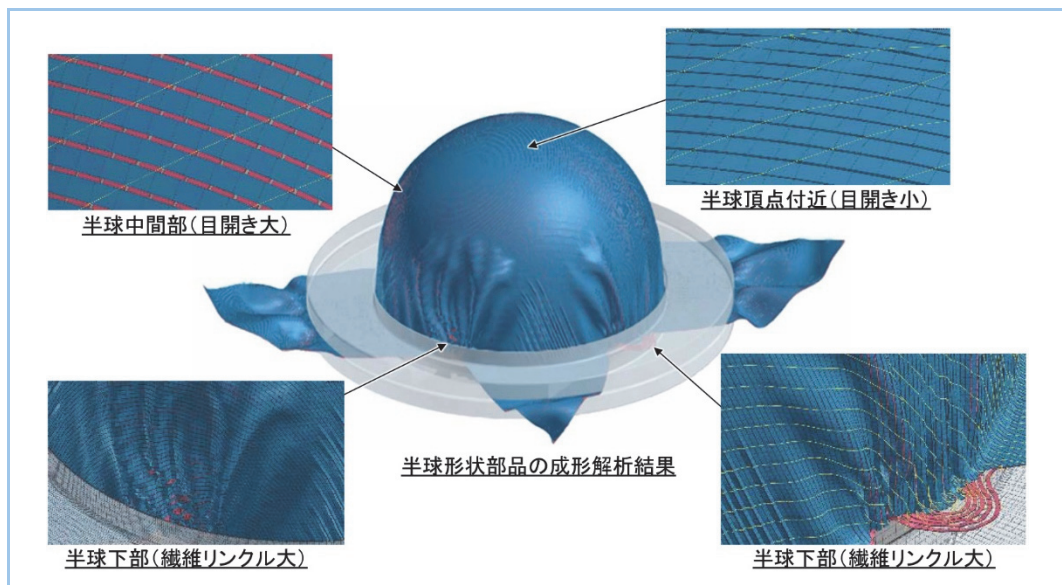


図4 半球形状部品の成形解析結果

### 3.3 成形試験による解析精度の検証

解析精度の検証のため、解析と同一条件で成形試験を実施した。試験の状況を図 5 に示す。半球型を強度試験機の下側に取り付け、NCF を挟んだ上下のブランクホルダーと試験機上側のクロスヘッドを固定した。ブランクホルダーを一定速度で下降させ、NCF を半球型へ成形した。

図 6 に示すとおり、位置 A～D における解析と試験の主要リンクルの発生位置と形態に相関が見られ、解析モデル及び材料物性値の妥当性が示された。また、3D スキャナにより試験の面外方向のリンクル高さを計測し、解析結果と比較した。位置によってリンクル高さが大きく異なるため、半球の上部、下部中央、下部外側の 3 箇所に分け、各位置におけるリンクル高さの平均値を比較した結果、試験との誤差は 0.1～28%となり、リンクル高さの予測精度も概ね妥当と考えられる。

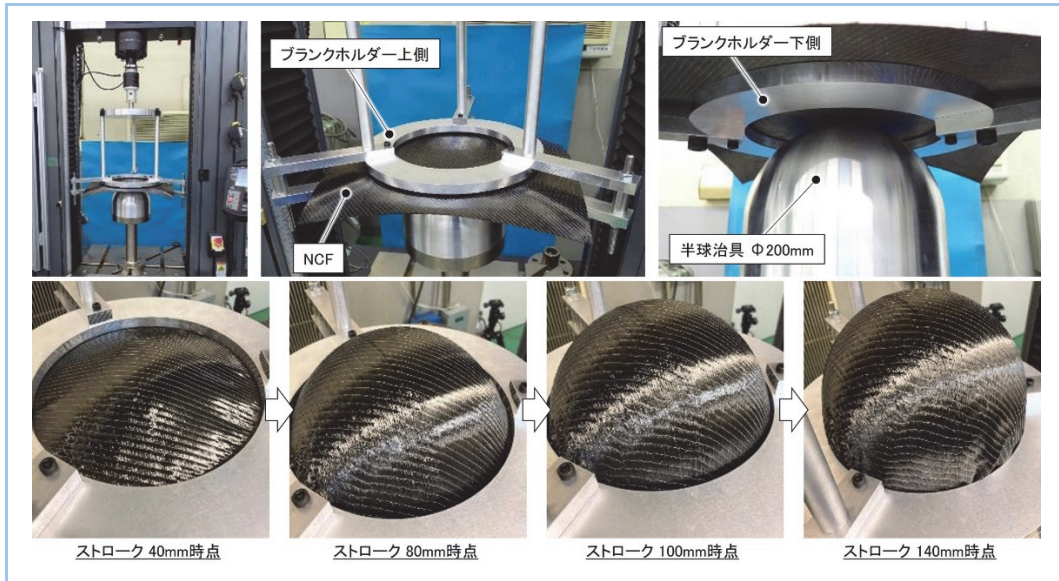


図5 半球形状部品の成形試験

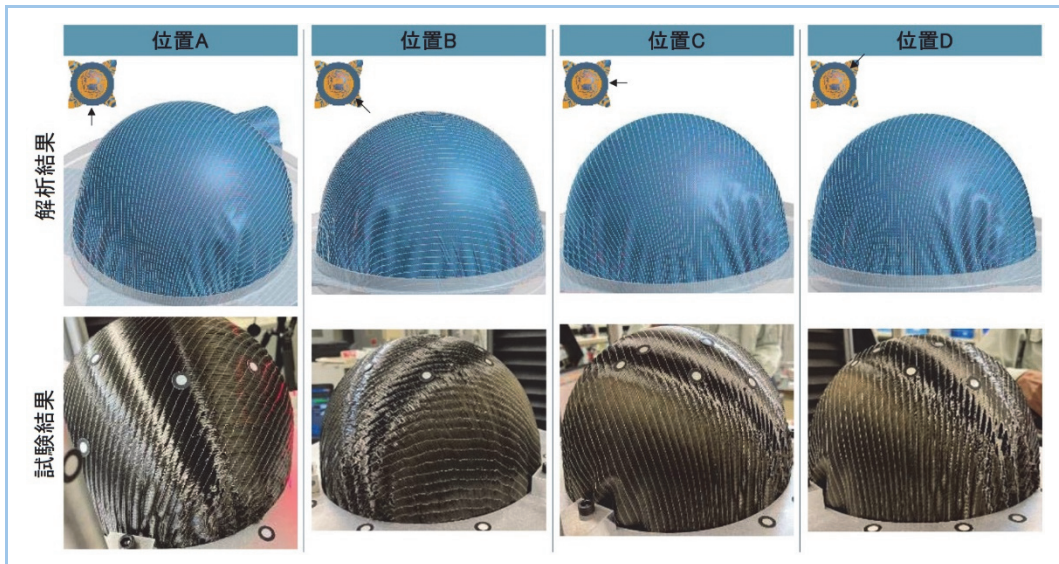


図6 成形解析と試験の比較結果

## 4. NCF 材料構成による成形性への影響評価

成形品質向上のための NCF 材料構成の適正化に向けて、図 7 に示す 3 種類の異なる材料モデルに対して半球成形解析を実施した。前項で評価した実体の NCF モデルを基準として、スティッチの本数を半減したものと、繊維束の幅(スティッチ長)を 2 倍に広げたモデルを比較評価した。

基準材と比較して、スティッチ本数を半減したモデルではスティッチによる繊維の拘束が弱まる

ことで面内への変形が助長され、半球下部の面外リンクルが分散される傾向が見られた。繊維束の幅を2倍に広げたモデルでは、ステッチ長が2倍になる分、ステッチによる繊維の拘束点が半減することで繊維の面内の目開きが増加し、面外のリンクルが減少した。解析の結果、半球部品の成形においては、ステッチ本数よりもステッチ長の方が成形性への影響が大きいことが示唆された。

以上の結果から、開発したメゾスケール材料モデルにより材料構成による成形性の差異を評価可能であり、実機部品に対する材料構成の適正化に解析を活用できる見通しが得られた。

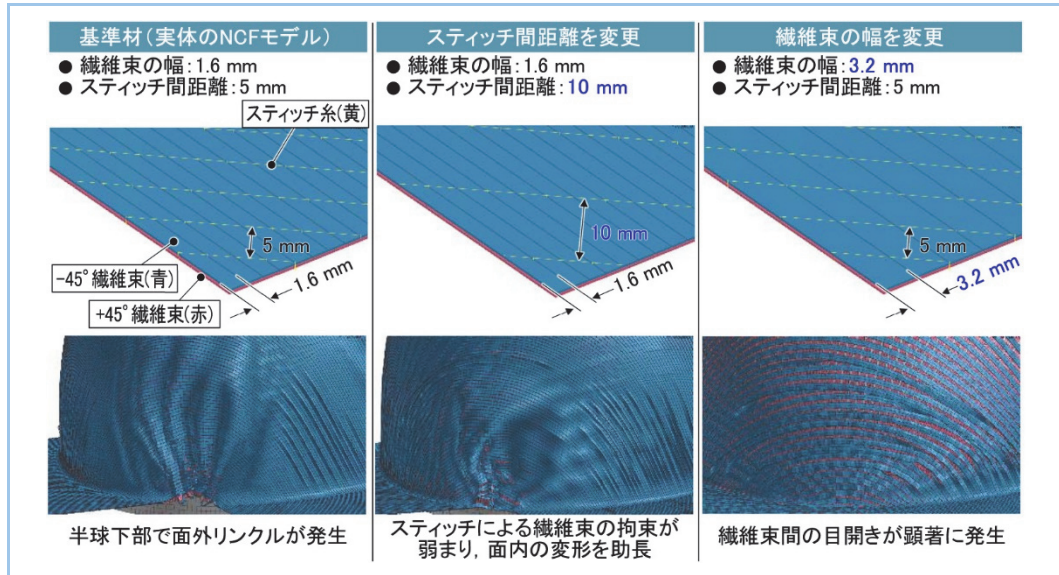


図7 NCF 材料構成による成形性への影響評価

## 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、要素部品の成形解析を実施した。その結果、繊維の目開きの大小や、面外リンクルが予測され、主要リンクルの発生位置及び形態が試験結果と良好に一致した。また、NCF 材料構成による成形性の差異を解析で評価し、実機部品に対する材料構成の適正化に解析を活用できる見通しが得られた。今後、実機への適用を見据え、大型・多層部品に対する解析技術の開発を進めていく。

## 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
- (2) 野間一希ほか, 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, 三菱重工技報 Vol.61 No.1 (2024)