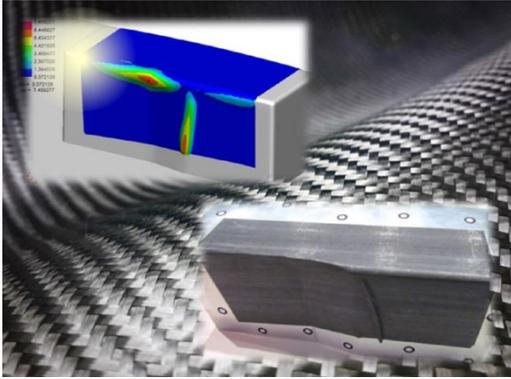


複雑形状複合材部品の 低コストかつ高品質な多層一体成形技術

Low-cost and High-quality Drape Forming Technology for Complex Shape Composite Parts



近藤 宙世*¹
Yusei Kondo

野間 一希*¹
Kazuki Noma

秋山 浩庸*²
Hiromichi Akiyama

金升 将征*³
Masayuki Kanemasu

航空機翼のスパーやストリング等に代表される、複雑形状複合材部品の成形手法として、多層プリプレグを一度に成形する手法(多層一体成形)があり、フロータイムが短く低コスト成形法として有望である。ただし、部品形状に賦形する際にプリプレグの変形挙動が不適切であると、部品の形状変化部に繊維のしわ(リンクル)等の製造欠陥が発生し、複合材部品の強度低下を引き起こすことが問題であった。そこで、プリプレグの変形挙動を予測可能な賦形シミュレーションを適用することで、低コストかつ高品質な多層一体成形技術を開発した。

1. はじめに

民間航空機分野では、機体重量の低減による燃費向上が求められている。そのため、比強度・比剛性に優れる複合材料は、航空機部品への適用が拡大しており、ボーイング 787 やエアバス A350 では機体重量の約 50%を占める。複合材料を航空機構造部品に成形する手法として、プリプレグを1枚ずつ積層・賦形するハンドレイアップ法や自動積層装置を用いた方法、また、予め平板上に積層した多層プリプレグを一体で賦形する手法(多層一体成形)が用いられてきた。

図1に多層一体成形のフローを示す。多層一体成形は、多層プリプレグを一度に成形することから、フロータイムが短く低コスト成形法として有望であるが、段差部(ジョグル)等の複雑形状に賦形する際にリンクルが発生しやすい。複合材部品におけるリンクルは構造強度を低下させるため、リンクルの低減は重要な課題である。

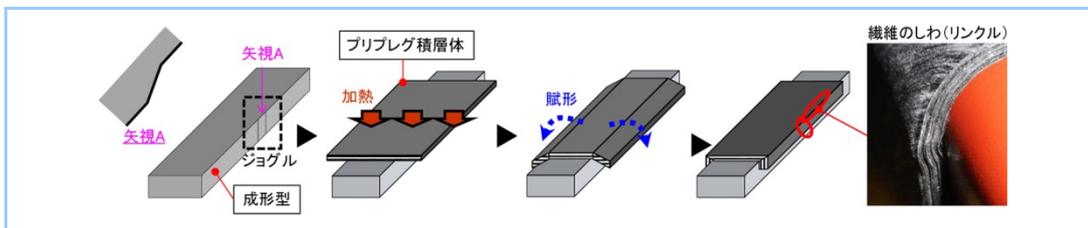


図1 多層一体成形のフロー

多層一体成形は、事前に積層したプリプレグを成形型に配置、その後加熱しプリプレグの樹脂粘度を低下させ真空引き等により型形状に賦形する。成形型に形状変化がある場合、その周囲でリンクルが発生しやすい。

この課題に対して賦形シミュレーションを適用し、賦形時のリンクル発生メカニズムの解明、及びリンクル抑制を目的とした新規多層一体成形技術の開発を推進している⁽¹⁾。本報では、ジョグル形状を有するコの字型部品を対象に、プリプレグの賦形プロセスを適正化し、リンクル抑制効果を

*1 総合研究所製造研究部

*2 総合研究所製造研究部 技術士(航空・宇宙部門)

*3 総合研究所製造研究部 主席研究員

検証した結果を報告する。

2. 複合材賦形シミュレーション

賦形シミュレーションには、複合材賦形シミュレーションソフト PAM-FORM(ESI Group 社製)を使用した⁽²⁾。プリプレグの材料異方性や、温度・速度依存性等を考慮したシミュレーションが可能で、賦形過程におけるプリプレグの変形挙動からリンクルの形成過程を予測できるため、賦形条件、及び成形型形状の適正化に有用である。

図2に賦形シミュレーションの概要を示す。まず、プリプレグの繊維配向ごとの機械物性(引張, 曲げ, せん断等), 層間の摩擦係数・粘着性等を入力した後に、賦形条件(温度, 圧力, 速度等)を設定する。シミュレーション結果として賦形中のプリプレグの変形挙動, 形状, 繊維配向, 応力, ひずみ等が得られ, これらを分析することでリンクルの形成過程を詳細に把握することが可能である。

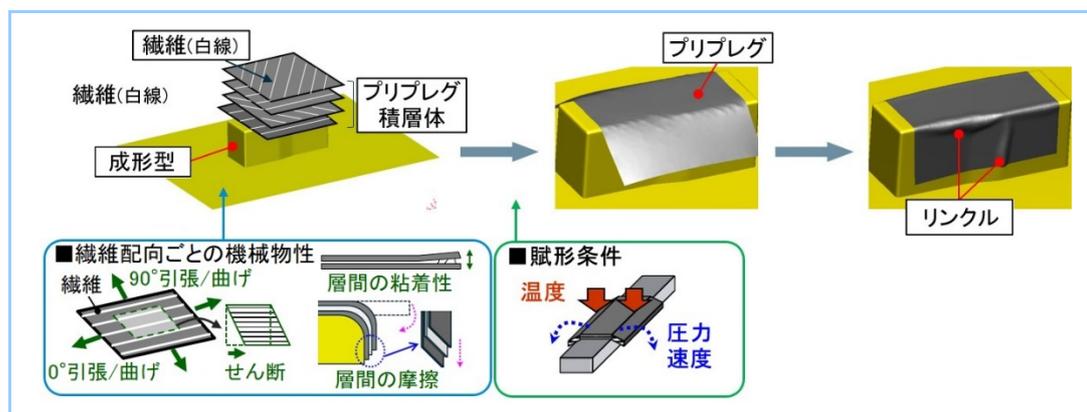


図2 賦形シミュレーションの概要

賦形シミュレーションの概要を示す。材料物性, 成形条件を入力し, 計算を実行すると, 賦形後の形状が出力される。賦形途中の変形挙動を分析することで, リンクル等の形成過程を把握することが可能である。

3. シミュレーション精度検証

成形型形状, 及びシミュレーションモデルを図3に示す。本検証では, 成形型にプリプレグを積層した後に, 全体を柔軟なゴムシートで密閉し, ゴムシート内を真空引きすることでプリプレグを成形型形状に賦形する手法(真空バッグドレープ成形法)を対象とした。成形後のコの字型断面形状に対し, 上面をウェブ, 側面をフランジと呼称する。図3のジョグルを1か所含む領域に, 一方向炭素繊維/エポキシプリプレグ(サイズ:500mm×230mm)を8ply積層し, 左右対称となるシンメトリックモデルとした。成形温度におけるプリプレグの繊維配向ごとの機械物性(引張, 曲げ, せん断), 及びプリプレグ層間の摩擦係数を取得し, シミュレーションに入力した。プリプレグのメッシュサイズは, 図4に示す通り, 変形が顕著なコーナーR部で最も細かく設定し, 次いでフランジ, ウェブの順に粗くした。真空引き時にゴムシートを保持し, プリプレグに張力を付与する役割を担うスタンドオフブロックは, 成形型と平行に配置した。最後に, 全体を覆うようにゴムシートを適用し, ゴムシート面直方向に真空圧と同一の圧力を付与することで真空引きを模擬した。賦形温度は, プリプレグの曲げ剛性が低下し, すべり性を十分に確保できる温度に設定した。

シミュレーションと試験の結果を図5に示す。シミュレーション結果は, 成形型表面からプリプレグ最表面までの距離を表しており, 試験結果は3D スキャナにより同一の測定をしたものを示す。赤色の箇所は, プリプレグが型形状から逸脱しリンクルが発生していることを表している。両結果を比較すると, ジョグル近傍のコーナーR部, 及びフランジ部に発生したリンクル位置が概ね一致していることがわかる。さらに, 各リンクルの高さを誤差10%以下の精度で予測できた。

以上の結果から, 本シミュレーション手法は実現象を模擬するために十分な精度を有していると判断した。

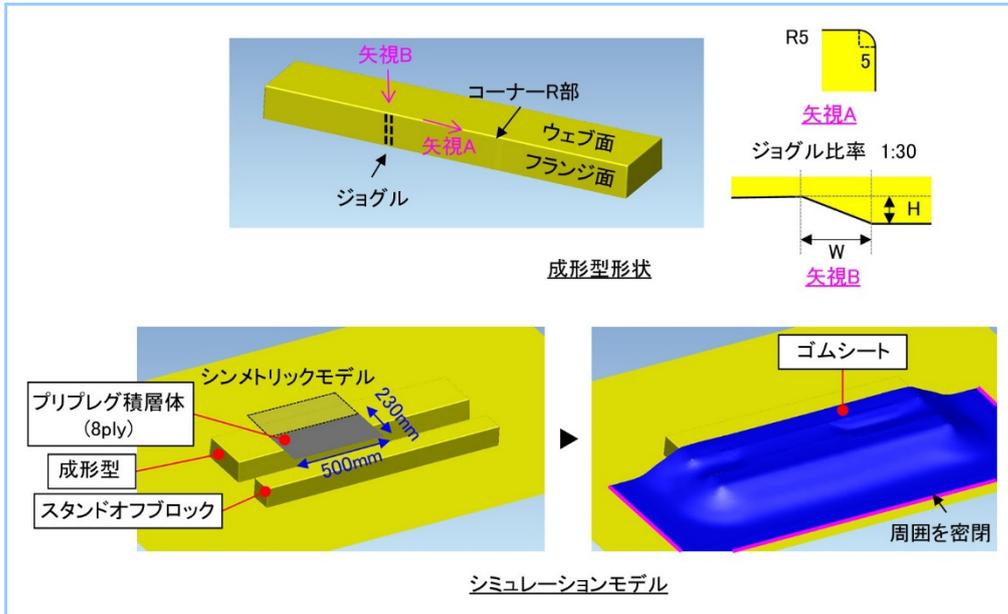


図3 賦形シミュレーションモデル
真空バッグドレープ成形法の賦形シミュレーションモデルを示す。

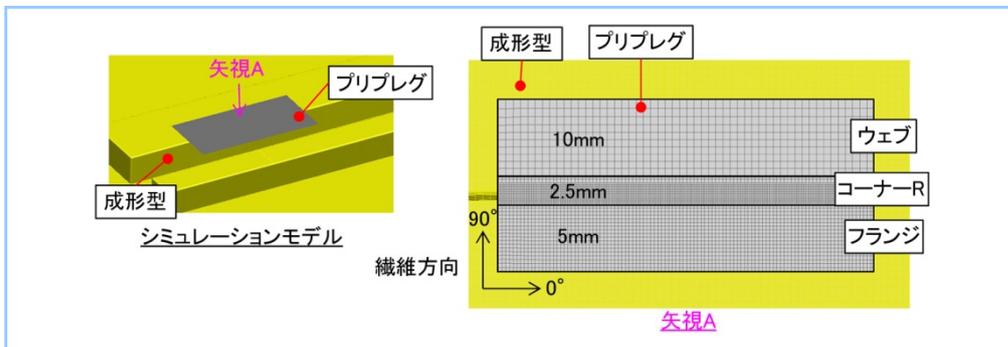


図4 プリプレグのメッシュサイズ
プリプレグのメッシュサイズは、成形型形状や品質評価の優先度に応じて設定した。

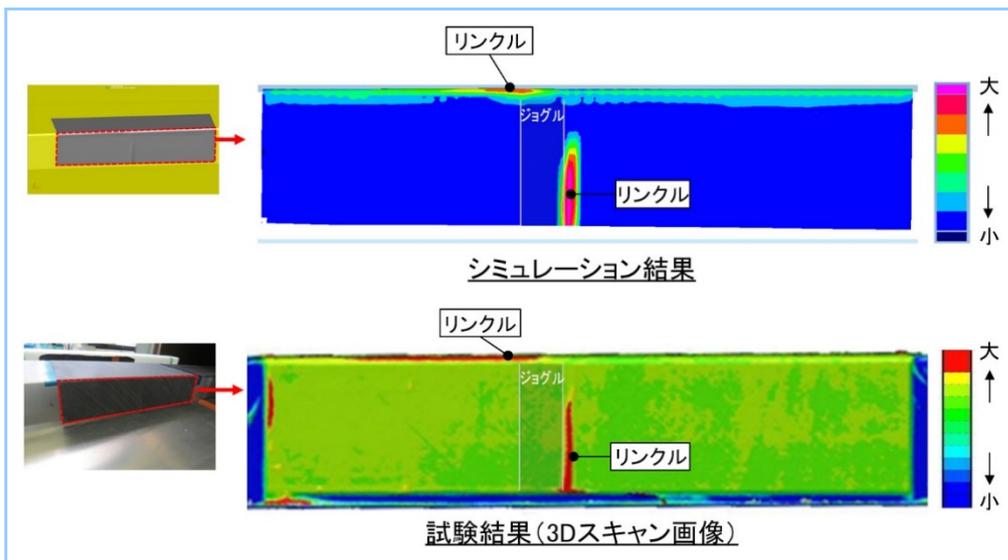


図5 シミュレーション・試験結果の比較
上図は賦形シミュレーション結果、下図は試験結果の3Dスキャン画像であり、いずれも成形型表面からプリプレグ最表面までの距離を表している。

4. リンクル抑制賦形プロセスの開発

4.1 リンクル発生メカニズム

3章のシミュレーション結果をもとに、リンクル発生メカニズムを検討した。図6は、コーナーRリン

クルが最大となる位置の断面図を示す。賦形途中のプリプレグは面外に容易に変形し、プリプレグのコーナーR部が完全に賦形される前に、フランジ部が成型型に先に接触した。これは、剛直な炭素繊維がジョグル部のコーナーR形状に馴染みにくい一方で、プリプレグのフランジ部が、真空引きによるゴムシートからの圧力で容易に変形してしまうためである。プリプレグのフランジ部が先行して成型型と接触することで、コーナーR部でプリプレグと成型型の間に空間が生じる。その後、真空引きによりフランジ部が成型型に拘束されるため、コーナーR部に繊維余りが取り残され、賦形完了時にリンクルが残存することが明らかになった。

また、図7に示す通り、フランジ部ではジョグル形状に起因して赤線方向に圧縮力が生じ、プリプレグは面外に座屈する。真空引きが進行することでフランジ部に生じた繊維余りが圧縮力の中心方向に集中し、リンクルを引き起こしたと考えられる。

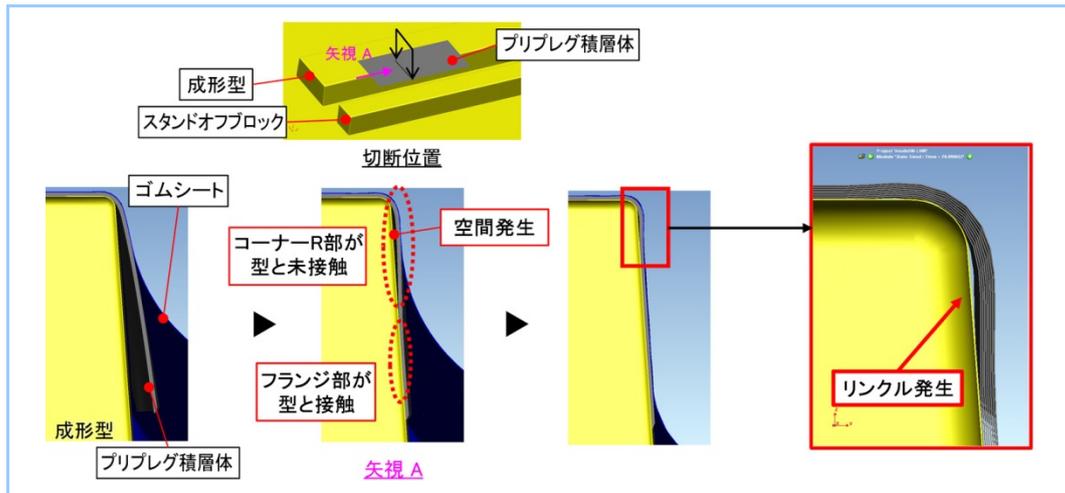


図6 コーナーR部のリンクル形成過程

断面図は、上図の切断位置を矢視Aから見た結果である。プリプレグのフランジ部が先に成型型と接触したことで、コーナーR部に繊維余りが取り残された。

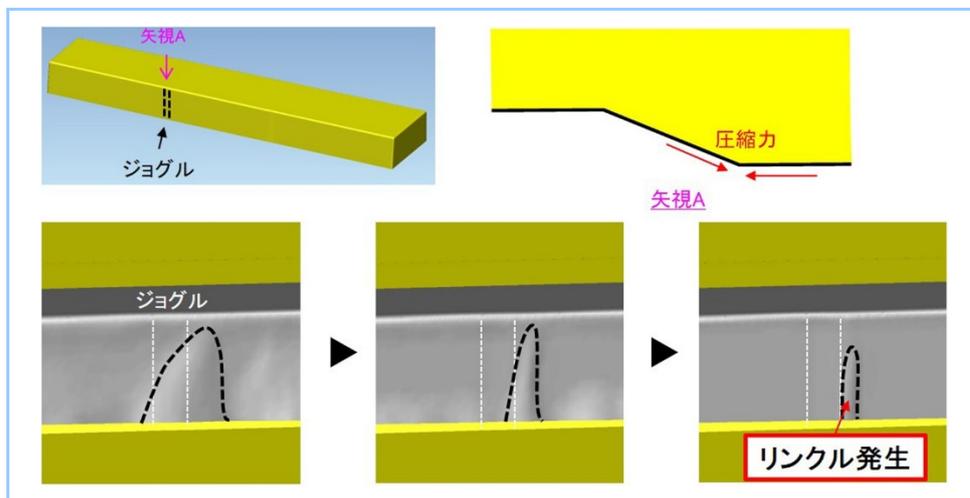


図7 フランジ部のリンクル形成過程

フランジ部は、ジョグル形状に起因した圧縮力によりプリプレグが面外変形しリンクルが発生した。

4.2 賦形プロセスの適正化

4.1 の結果から、リンクルを抑制するためには、賦形中におけるフランジ部の面外変形を抑制し、コーナーR部が賦形された後にフランジ部が賦形されるプロセスへと適正化する必要があることがわかった。そこで、プリプレグの面外変形を拘束するために、プリプレグに面外変形制御板を適用した状態で賦形する工法を考案した。本手法は、一般的な真空バグドレープ成形法に対し、面外変形制御板を作製・適用・取り外す工程を追加するだけでよく、多層一体成形法が本来有する低コスト性を損なうことなくリンクルの抑制効果が期待できる。

シミュレーションモデルを図8に示す。面外変形制御板は、ジョグル形状に合わせて3分割し、プリプレグのフランジ部へ適用した。

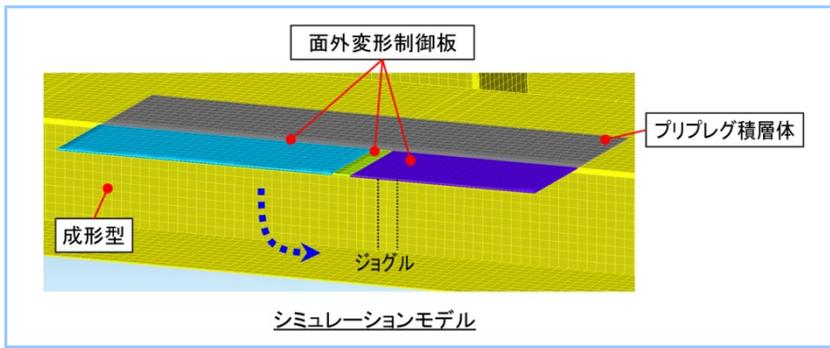


図8 面外変形制御板の適用

面外変形制御板を適用したシミュレーションモデルを示す。面外変形制御板はジョグル形状に合わせて3分割してプリプレグに固定した。

シミュレーション結果を図9に示す。面外変形制御板を適用したことでコーナーR部のリンクル高さが30%以上減少することを示した。さらに、フランジ部の面外変形が抑制されたことで、フランジ部のリンクルが消失した。図10に示す断面図から、プリプレグはコーナーR部からフランジ部にかけて理想的な順序で賦形されることを示した。コーナーR部の繊維余りがフランジ部に逃げ、賦形完了時にコーナーR部のリンクルが減少したと考えられる。

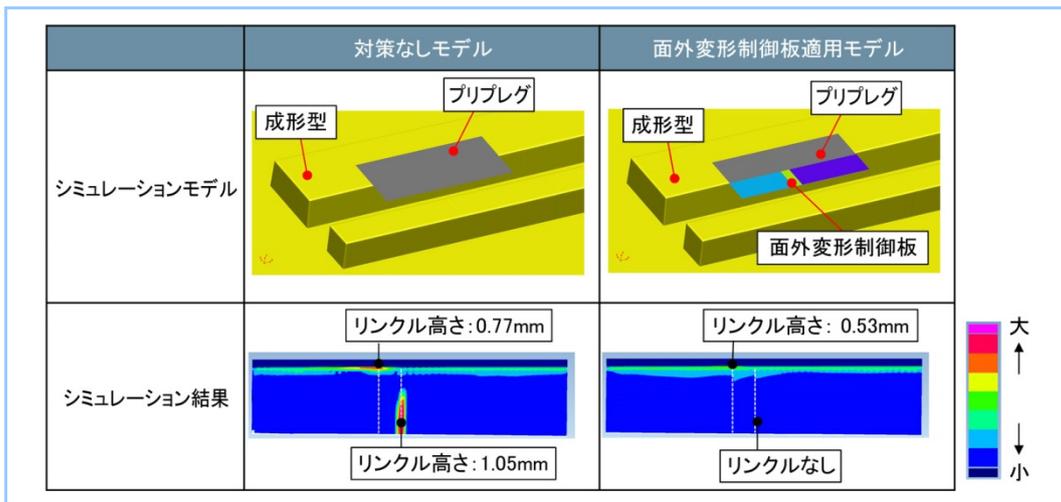


図9 シミュレーション結果

面外変形制御板の適用により、コーナーR部のリンクルが31%減少、フランジ部のリンクルが消失した。

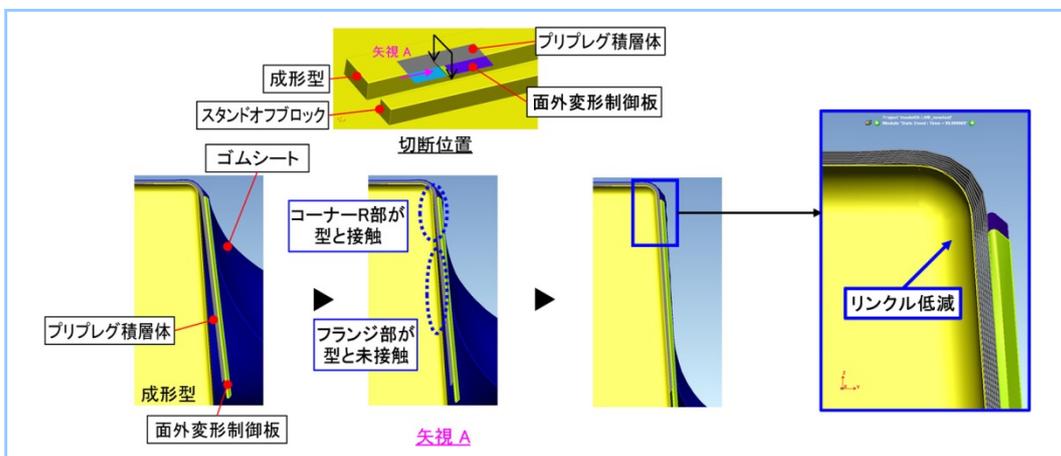


図10 面外変形制御板によるコーナーR部のリンクル抑制

断面図は、上図の切断位置を矢視Aから見た結果である。面外変形制御板の適用により、プリプレグのコーナーR部が先に成形された後にフランジ部が賦形されたため、コーナーR部のリンクルが低減した。

以上の結果から、提案手法はリンクルを抑制する有効な手段であり、複雑形状複合材部品の低コストかつ高品質な多層一体成形技術を実現できる目処を得た。

5. まとめ

本報では、賦形シミュレーションを用いて複雑形状複合材部品の多層一体成形時におけるリンクル発生メカニズムを解明し、面外変形制御板を適用した賦形プロセスによりリンクル抑制効果が得られることを示した。さらに、**図 11** に示す通り、本シミュレーションを開発フローに組み込むことで、トライ&エラーによる成形試験の繰り返しが不要となり、試験費用を大幅に削減できる。さらに、成形型形状の適正化にも活用可能であるため、成形試験と成形型製作の繰り返しが不要となる見込みである。

今後、より厚肉・長尺な部品に対しても有効な賦形プロセスとすべく、面外変形制御板の形状・物性・適用位置等を最適化し、更なるリンクル抑制効果向上を図っていく。

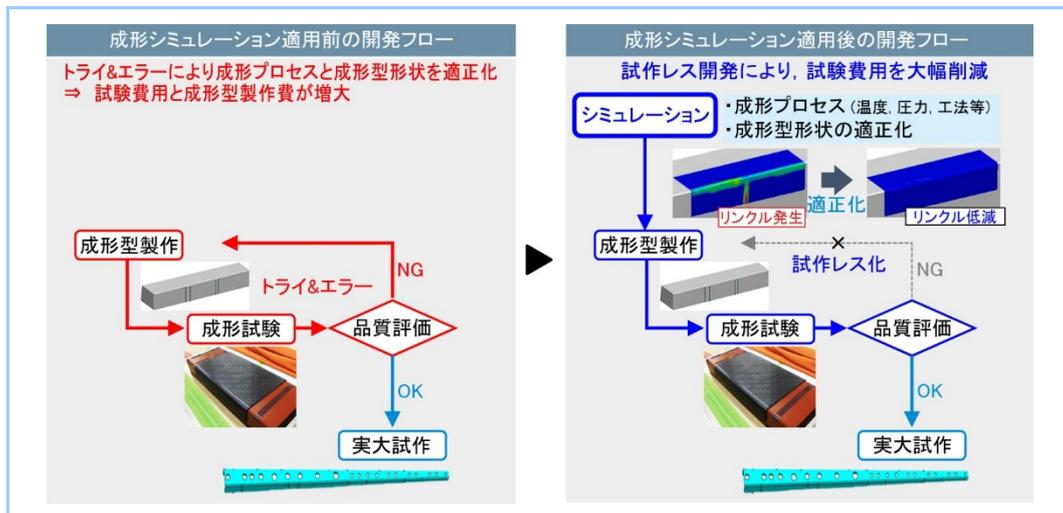


図 11 賦形シミュレーション適用前後の開発フロー

賦形シミュレーションを開発フローに適用したことで、試作レス化に貢献し試験費用を大幅に削減できた。

参考文献

- (1) Kondo, Y., et al., Development of Drape Forming Process for Composite Structure Using Forming Simulation, SE Conference 20 Amsterdam, (2020)
- (2) ESI Group, <https://jp.esi-group.com/>