

自動車の外板面ひずみを抑制する 設計・製造・材料統合シミュレーション技術の開発

Integrated Simulation Technology for Design, Manufacturing, and Materials
to Reduce Surface Distortion of Automotive Outer Panels

古 沢 透 流¹

Toru FURUSAWA

高 見 滋²

Shigeru TAKAMI

豊 岡 洋 一¹

Yoichi TOYOOKA

内 山 政 夫²

Masao UCHIYAMA

横 井 栄一郎¹

Eiichiro YOKOI

田 中 義 規²

Yoshinori TANAKA

要 旨

自動車の高意匠な外観デザインを実現するためには、従来製造工程で車体の外板表面のひずみが生じる場合があり、仕様の手戻りを伴う対策の必要があった。そこで開発段階においてひずみが目視確認できない仕様の成立性が予測できる設計、製造、材料の各要因を統合した新たなシミュレーション技術を開発した。

まず車体の設計出図前のモデルから製作所の製造工程（プレス成型、スポット溶接、塗装乾燥）を一気通貫してひずみを予測するデジタル開発のコンセプトを立案し、次に製造工程における蓄積したひずみを解析するシミュレーション技術を構築し、実機を用いて検証した。

そして本技術を新機種の開発運用ルールに導入することにより、長年未解決であった製作所ごとにおけるひずみの対策手戻りを抑制し、効率的な外板意匠面のデザインの実現が可能となった。

ABSTRACT

When producing highly stylized exterior designs for automobiles, conventional manufacturing processes can cause surface distortions on the outer body panels, which require countermeasures in order to meet specifications. To address this issue, we have developed a new development-stage simulation technology. This technology integrates design, manufacturing, and materials factors to predict the potential for a design to be achieved without visible distortions.

We began by proposing a digital development concept that predicts distortions throughout all the plant manufacturing processes (stamp forming, spot welding, and paint curing) based on models made prior to the production of vehicle body design drawings. We then created a simulation technology to analyze the distortions that accumulate throughout all the manufacturing processes, and verified it on actual vehicles.

The technology was then integrated into the development operational rules for new models. This made it possible to reduce reworking due to distortions occurring in plants that had resisted resolution for many years, and thereby enable efficient production of stylized surface designs.

1. まえがき

近年、自動車の開発ではデジタル開発環境を活用して開発期間の短縮を図ると共に、性能や品質の向上を図る取組が盛んになっている⁽¹⁾。中でも車体の開発においては、図面の設計仕様を数値要件化し、製造プロセスの管理基準を設定している。性能に関しては剛性、衝突、強度耐久、NVHといった各機能のCAEが実施される。また、製造プ

ロセスに関しても、プレス成型、溶接、塗装等の各工程のCAEが実施され、車体開発におけるMBDやデジタルツインのシミュレーション解析技術が進化している。

しかしながら、車体外板の外観意匠性を最終的に判断する品質検査工程において確認されるひずみは、設計仕様に基づいた各製造工程における変形ひずみ量の蓄積結果であるために、各工程の影響要因の感度や相互作用はわかっていない。車体設計に関しては、モデルの進化により外観

¹ 材料研究センター

E-mail: toru_furusawa@jp.honda

² 本田技研工業株式会社

意匠性や軽量化、安全性や機能性の向上が進み仕様が多様化している。製造に関しては、電動車用の生産技術や工場環境負荷削減が進み、また製作所ごとに製造条件が異なる。車体用材料に関しては、高強度軽量素材やリサイクル材の適用が進み材料仕様が多様化している。このような要求項目の多様化に伴い、外板のひずみに影響する要因が増え複雑化してきている。そのため、従来の報告例⁽²⁾⁻⁽⁶⁾や既存技術だけでは十分に解決が図れていない。

そこで、自動車の高意匠な外観デザインを実現するために、車体開発における設計、製造および材料の外板に関連する要因をデジタル開発環境を用いて連動させ、外板面ひずみを予測する CAE 技術を開発した。

2. 開発のねらい

設計段階において外板のひずみの発生を予測して防止するため、車体材料から部品、車体製造工程を一気通貫した統合シミュレーション技術を構築する。

まず、設計仕様に基づき製造工程（プレス成型、スポット溶接、塗装乾燥炉）における応力やひずみの蓄積を解析する CAE 技術を開発することで、実際の工程のひずみの時刻歴変化を予測できるようにする。

次に、車体材料や設計仕様、各製造工程の各種条件を基準とその振れ幅の範囲においてシミュレーションをおこない、ひずみの発生原因を特定することで、目視でひずみが確認できない仕様や条件を設定する。

3. 技術内容

3.1. 車体材料から部品および車体製造の工程間を一気通貫した統合シミュレーション技術の開発

3.1.1. 外板面ひずみの解決の考え方

(1) 外板面ひずみの影響要因 車体の外板にひずみが検出されるまでのフローの概念図を Fig. 1 に示す。車体開発では、設計者が要求仕様を満たすモデルのレイアウトをおこない図面を発行する。その後、試作車を製作し製造工程においてプレス成型、スポット溶接、塗装、組み立てをおこない基準となる製造条件を定める。しかし外観検査工程で目視でわかる程のひずみが発生した場合、製造条件の再設定や部品の再設計が必要になる。特に、センターピラー上部の T 字交差面、下部サイドシル、ルーフパネルのアーチ近傍などにひずみが生じることが多い。これらの箇所は製造工程において部品加工時の変形、熱応力、振れなどの外力により応力が集中したり蓄積しやすい面内であることから、負荷が過大となり素材の降伏点を超えた際に部品が塑性変形したことで外板面ひずみが生じたものと考えられる。

これまでも過去の発生事象の対策を反映した仕様の図面

化や試作車を用いた検証をおこなってきたものの、事前に発生を予測することができなかった。その原因として、新機種では外観の意匠性向上を狙いとして従来にない形状仕様が適用されたり、製作所ごとの生産技術や設備が異なったりすることが原因と考えられる。実際に車体の外板面ひずみに影響する要因は数百以上に上るものの、溶接打点による板間の隙間や測定ができず CAE 解析のみが可能な残留応力など、従来の製造工程の生技性管理項目では考慮できていない項目の影響が大きいと考え、解析項目としてはこれらも新たに追加した。

(2) 工程を一気通貫したひずみの蓄積の評価 Fig. 2 にひずみ評価の概念図を示す。開発機種により、外板のデ

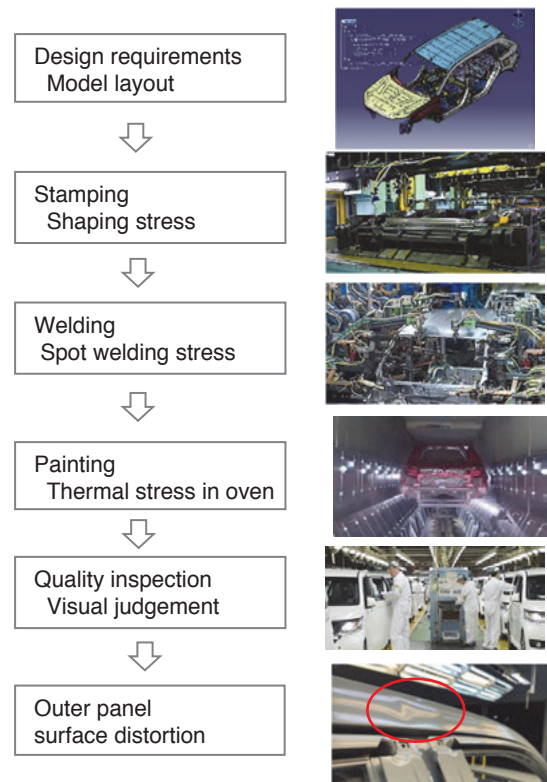


Fig. 1 Surface distortion in automotive body panel manufacturing

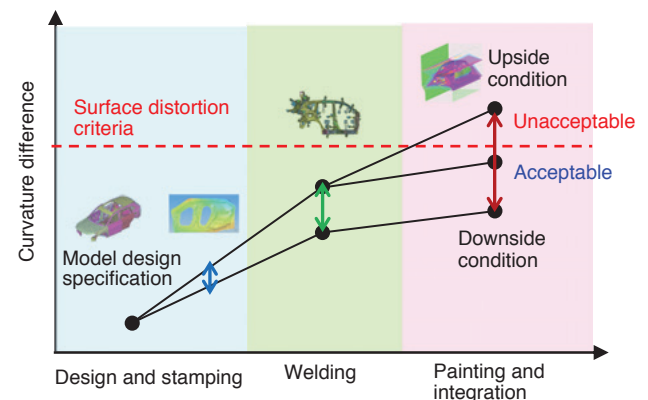


Fig. 2 Evaluation approach of surface distortion criteria for outer panels during development process

ザイン形状やサイズが異なり、内板やその間に位置するスティフナーの設計諸元も異なる。また製作所ごとに設備仕様や加工条件も異なる。工程内では、納品された素材の板から部品、車体の加工へ流動する間に、外板の形状寸法が変化し残留応力やひずみが蓄積される。

これらを予測するために、各工程におけるひずみに影響する要因の基準と振幅の範囲においてシミュレーション評価をおこなった。次に、ひずみがある場合、ない場合、それぞれ外板の曲率分布を求め、両者の差である曲率差分 (Curvature difference) を指標に外板のひずみ量を評価した。これまで検査員が目視検査で検知できるひずみ量に関しては曲率差分との相関データとして蓄積されていることから⁽⁷⁾、シミュレーション上で求められたひずみ量の曲率差分と過去のデータを比較することで、ひずみの発生を抑える仕様設定が可能となる。

3.1.2. 一気通貫した統合シミュレーション手法の開発

従来、製造工程 (プレス成型、溶接、塗装乾燥) ではそれぞれのプロセスに特化した CAE ソルバーが用いられており、工程を連動させた統合的な解析手法は実現されていない。そこで、工程間における解析設定 (メッシュ、ノードのデータ形式) の差異に対応してデータを引き渡す方法を設定した。また外板面ひずみに影響する要因を CAE 解析手法の入力データに反映した。Fig. 3 に製造プロセスのフローおよびシミュレーションを用いた工程間のデジタル連動の概念図を示す。その中で特にひずみへの感度が高い要因について、基準条件から世界の製作所の条件の振れ幅の範囲で評価を実施した。以下に詳細を述べる。

(1) 解析対象 外板面ひずみを解析する対象部品として、例としてセンターピラー上部、サイドシル、ルーフの三箇所を設定した。

解析には設計要件 (基準寸法、基準線における曲率半径、隙間や段差の棚形状寸法、ビード面剛性、座屈耐力等) のデザインデータや過去の設計ノウハウを反映した CAE モデルが必要となる。そこで、車両性能の CAE 解析に用いられているモデルのメッシュサイズや結合モデルを転用することで、新たなモデル作成のための工数を増加させず解析をおこなった。

(2) 材料仕様 外板部品や接合部を構成する材料として、鋼板、アルミ板、接合部の接着剤やシーラーなどが挙げられる。解析に入力する材料特性は、素材の強度や組成ごとに応力歪線図や温度依存性が異なる。また板厚の標準値と公差の上下限によっても、解析結果が大きく影響を受けるため、材料特性の詳細な実測値を元にして社内で蓄積した材料データベース⁽⁸⁾を用いた。

(3) プレス工程 外板のプレス成型工程におけるひずみは、ドローやフォームなどの絞り成型がトリム、リスト、ベンド、ピアス、カットなどの切断、曲げ成型工程よりも影響が大きい。ここでは陽解法ソルバーである株式会社 JSOL 製 JSTAMP を用い、平板をドロー成形およびフォーム成形した場合の塑性ひずみと板厚減少率を計算した。圧縮方向の応力から発生する外板面ひずみには、塑性ひずみによる鋼板の耐力の変化が重要な要因となるため、加工硬化による塑性ひずみを反映した。また自重による影響を反映して解析した結果を次工程の溶接解析に引き継いだ。

(4) 溶接工程 外板の溶接工程には、設備仕様、溶接仕様、クランプ仕様などに含まれる非常に多くの条件パラメーターが存在する。その中でひずみの要因としては、生技性の管理上、固定治具の位置、スポット溶接打点の板間隙間、打点位置の順番による残留応力の伝播の影響が挙げられる。そのため、陰解法ソルバーである日本イーエスア

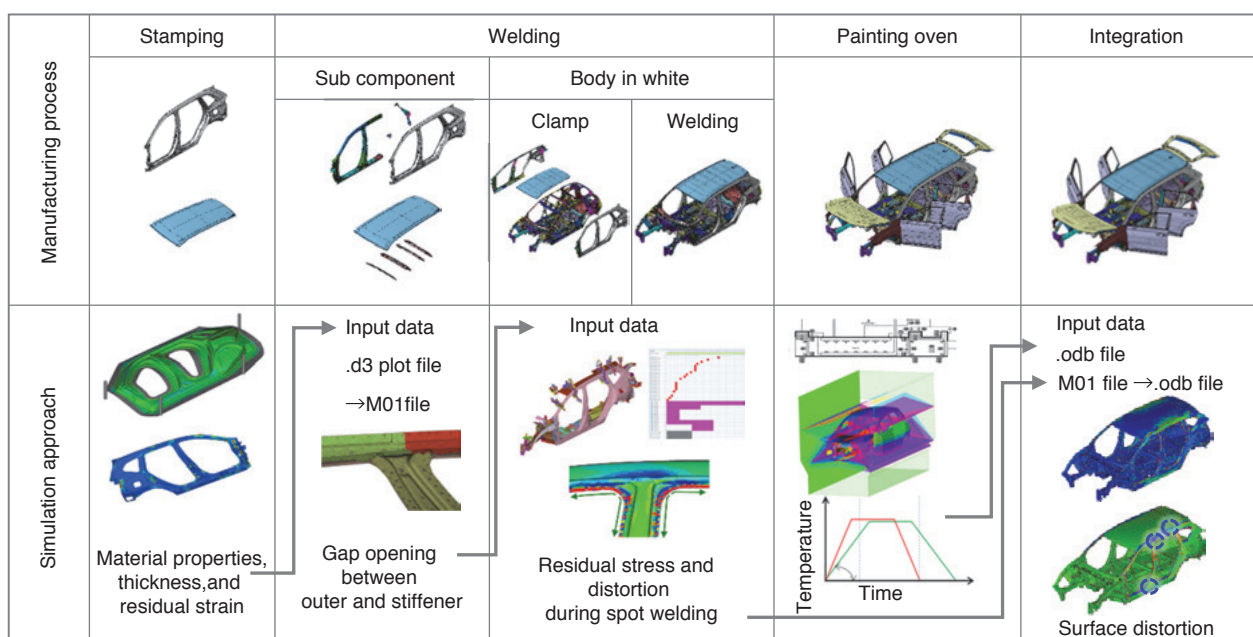


Fig. 3 Integrated simulation approach along manufacturing processes

イ株式会社製 Visual-Assembly を用い、溶接のクランプ位置と打点順、板間のギャップをパラメータとして設定した。また、スポット溶接打点後の残留応力、ひずみ、変形形状のデータを次工程の塗装乾燥炉解析に引き継いだ。

(5) 塗装乾燥炉工程 外板の塗装工程では、上屋車体が台車に支持されて 100m 以上の長さの乾燥炉（電着炉から中塗り炉、上塗り炉、リペア炉）内を 1 時間以上流動する。その間に常温からおよそ 200℃ まで昇温して塗料を焼付け硬化させた後、常温まで冷却される。乾燥炉の壁面ノズルからの高温噴流が直接当たる外板が先に昇温され、その後に循環した熱風により内側部品が昇温する。その際の内外板の温度差に伴う熱膨張差が、ひずみの要因として挙げられる。しかし CFD による熱流体解析をおこなう場合には計算時間が長く開発の中で実施することが容易ではない。そこで、計算時間短縮のために、熱流体を熱伝達係数や熱放射でモデル化した伝熱解析ソルバーである ARRK Engineering GmbH 製 THESEUS-FE を用いた。まず車体温度の空間分布や時刻歴の変化を把握するため、製作所ごとに異なる乾燥炉の仕様を反映した 3D モデルを作成し、実機の塗装乾燥条件を反映した。解析結果から車体モデルの各メッシュノードに関して温度プロファイルデータを出し、次工程の最終的な車体の構造解析の入力負荷データとして出力した。

(6) 製造履歴を反映した構造解析 (1) から (5) で示した各製造工程におけるひずみは蓄積し続けるため、各工程の履歴を引き継いだ CAE 解析が必要となる。そのため、解析ファイル形式としてプレス工程の .d3 plot file から溶接工程の M01 file、塗装乾燥工程および最終的な構造解析の .odb file ヘデータ形式を連動するスクリプトを作成した。最終的な車体構造の応力解析には陰解法ソルバーであるダッソー・システムズ株式会社製 Abaqus を用いた。

以上のように、車体の設計仕様 DPM、入力材料特性、各製造工程（プレス成型、スポット溶接、塗装乾燥）に起因して蓄積されたひずみを連動し、開発プロセスを一貫通貫した統合シミュレーション手法を構築した。

3.1.3. 検証の考え方と測定手法構築

実際の製造ラインまたは検証用ラインの環境下で、試作車を用いてひずみに関連する要因を実測して、シミュレーション結果に対する比較検証をおこなった。

(1) 検証環境 検証試験は世界の製作所の基準である寄居製作所で実施し、試作車はラインを流動する車種として外板パネルの面積が大きい SUV タイプ 1 機種を用いた。

プレス工程は寄居製作所の量産プレス設備を用いた。溶接工程は寄居製作所の実証用試作ラインにおいて量産同等の溶接をした。塗装工程は量産ラインの乾燥炉を用いて車両を流動させた。

(2) 測定条件 ひずみの変化量を工程内、工程間において明確にするために、3D 形状、工学的ひずみ（以下

Strain と呼ぶ）、板間隙間、温度の時刻歴変化をモニタリングして、塑性ひずみの発生タイミングと発生箇所の相関性を検証した。Fig. 4 に検証手法一覧を示す。非接触の 3D 形状測定は各製造工程の前後で実施し、実車の変形挙動を詳細に測定した。溶接工程ではクランプ、溶接、アンクランプ、において外板と内板の隙間とその変化量をすきまゲージを用いて測定した。さらに溶接工程から塗装乾燥工程では、ひずみの発生量を時系列で連続的に取得するために、光ファイバーを用いた面分布のひずみから三次元的な変形量を測定した。塗装乾燥工程では、外板、内板、そしてその間に位置するスティフナーに熱電対を設置し、内外板の温度差によるひずみの影響を評価した。その際、光ファイバー及び熱電対の測定器やデータロガーは専用に製作した耐熱ボックスの中に格納し、車両乾燥炉内の約 200℃ においてもひずみと温度の経時変化を測定した。

3.1.4. 各製造工程の検証結果

(1) プレス工程 サイドパネルのプレス成型時の変形は、Fig. 5 に示すスクライブドサークル（変形前後の長軸と単軸の変化率からひずみを計測）や板厚の減少率を測定した。Fig. 6 に板厚の減少率の実測と 3.1.2. 項 (3) シミュレーションの比較結果を示す。減少率の差異は 6.6% 以下でありよく一致することが確認できた。

(2) 溶接工程 外板面ひずみへの影響が大きいスポット溶接の打点順に伴う Strain の変化について、光ファイ

○ : Measured, — : Not measured

Verification test methods, measurement data	Process		
	Stamping	Welding	Painting
Optical 3D scan, 3D shape 	○	○	○
Feeler gauge and gap width 	—	○	—
Strain optical fiber, strain 	—	○	○
Thermocouple, temperature 	—	—	○

Fig. 4 Verification test methods for vehicles in factory

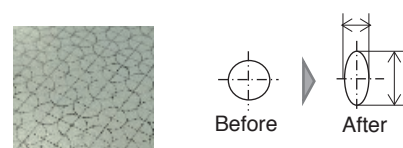


Fig. 5 Measurement method of stamping strain (scribed circle)

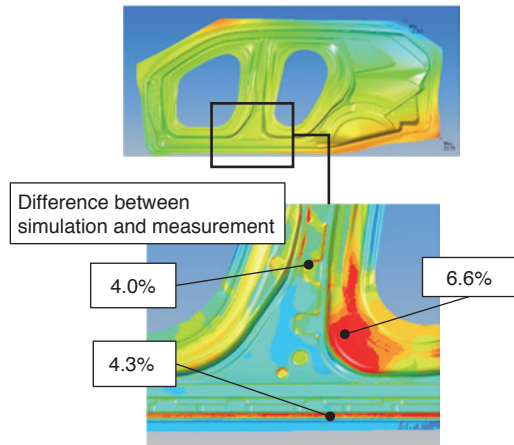


Fig. 6 Simulation of outer panel stamping and comparison of thickness results between simulation and measured reduction in sidesill area

バーを用いた計測と 3.1.2. 項 (4) に述べたシミュレーションの比較結果を Fig. 7 に示す。ルーフ、ルーフサイド、サイドシルの三箇所の評価において溶接打点のタイミングと Strain 変化が良く一致することが確認できた。

(3) 塗装乾燥炉工程 3.1.2. 項 (5) に述べた塗装工程のシミュレーションにおいて、寄居製作所の電着乾燥工程の入口流量、温度条件下でサイドシル外板温度の計算と測定を比較した結果を Fig. 8 に示す。温度プロファイルが良く一致することが確認できた。また、サイドシル外板とその内側に位置するスティフナーの温度差と、光ファイバーを用いた Strain 測定結果を Fig. 9 に示す。温度差が最大のタイミングで Strain 変化の絶対値が最大になることが示された。このことから製造中の熱膨張差による応力が降伏応力を超える場合に塑性変形に至ることが予想された。

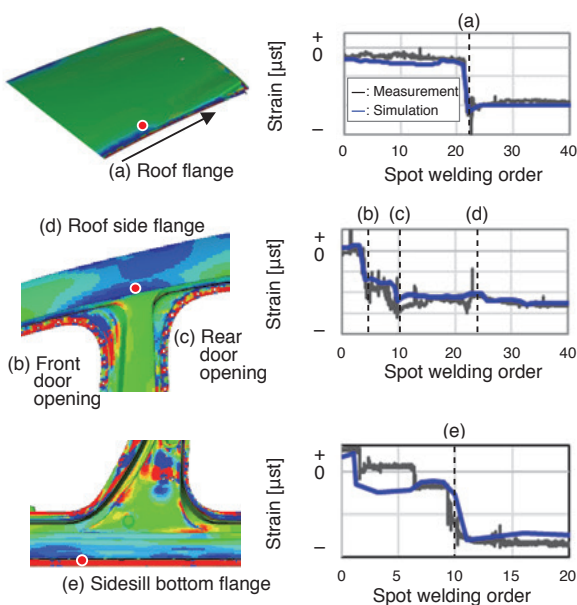


Fig. 7 Comparison of strain results between simulation and measurement along spot welding order

(4) 製造履歴を反映した構造解析の検証 製造履歴を反映したひずみ解析の有効性を検証するため、サイドシルの初期デザイン面に対する塗装乾燥後の変化量の実測と、シミュレーション結果を Fig. 10 に示す。実測 (a) に対して

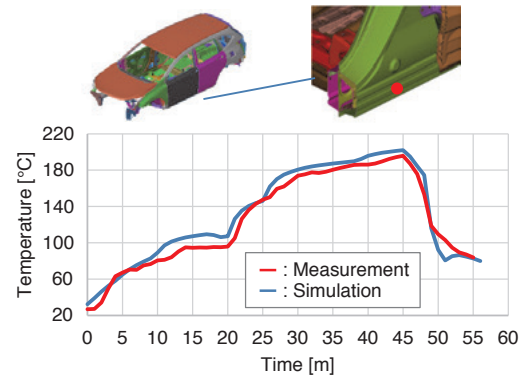


Fig. 8 Comparison of temperature results between simulation and measurement during paint oven process

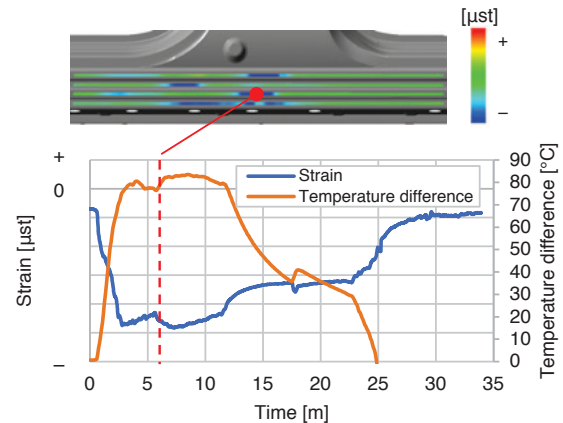


Fig. 9 Measurement results of strain on sidesill outer and temperature difference between sidesill outer and stiffeners

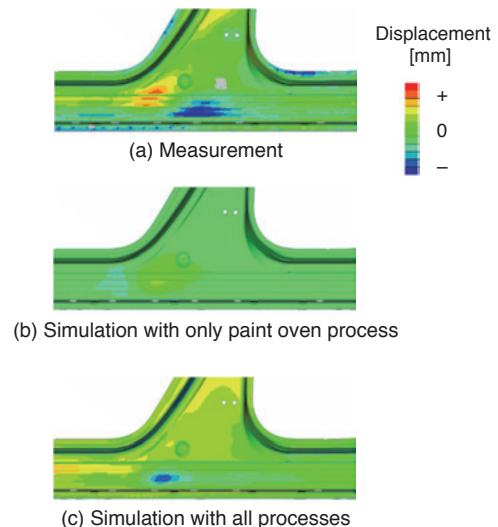


Fig. 10 Comparison of displacement results between measurement and simulation with processes on sidesill

一部製造履歴を考慮しない場合 (b) のシミュレーション結果では変形量が微小となった。一方、全ての製造履歴を考慮した場合のシミュレーション結果 (c) では、実測と同様の位置における同等のマイナス方向 (凹み) の変形が見られ良い一致が確認できた。

次に、塗装乾燥炉工程における光ファイバー測定を用いたサイドシルの時刻歴ひずみ量の実測と計算の比較結果を Fig. 11 に示す。縦軸に、Strain 測定値と外板素材の鋼板の弾性率を乗じた応力値が耐力を超えて塑性変形を生じる領域を示す。昇温開始と共にひずみが増大し、実測では数分経過後に塑性変形が生じた。シミュレーション結果について、塗装乾燥炉工程を考慮しない条件でのシミュレーションでは塑性変形を生じない耐力内の応力であった。一方、製造履歴を考慮した場合では、耐力を超えて塑性変形を生じる結果となり実測と同じ傾向を示した。

以上のように、製造工程を統合した本シミュレーション手法は、実測で塑性変形を起こすタイミングやひずみ量を予測できており、その有用性が確認できた。

3.2. 統合シミュレーションを用いた外板面ひずみの抑制仕様の成立性予測

車両モデルのルーフ、サイドシル、センターピラー上部に対して、外板面ひずみの影響要因の各種条件をふりひずみを抑制する仕様のシミュレーションをおこなった。仕様の成立性の予測の観点として、設計仕様の板厚や外板面曲率、プレス成型工程による板厚減少率の変化、溶接工程でのスポット板間隙間、塗装乾燥工程における昇温速度について、基準条件とその振れ幅の影響を比較した。サイドシルについては、Fig. 12 に示すように、プレス成型時の板減、溶接時の板間隙間は比較的影響が小さいが、塗装乾燥の昇温速度の基準と振れ幅上限側の条件を比較した場合に差異が大きい結果が得られた。そこで実機を用いて実測をおこなった結果、シミュレーションと同一の塗装乾燥昇温速度の基準条件ではひずみが発生しなかった。一方、振れ幅上限を超える条件では発生したひずみがクライテリアを超え、シミュレーション結果と一致した。

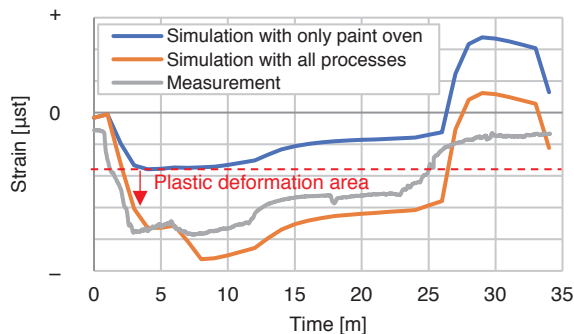


Fig. 11 Comparison of strain results on sidesill between measurement and simulation during paint oven process

またその際に、Fig. 13 に示すように、シミュレーション結果 (a) と実測結果 (b) を比較すると同様なひずみの曲率差分の分布傾向が得られた。この結果から振れ幅の範囲を見直し、最適な昇温速度を製造条件に反映することができた。

次にルーフパネルのシミュレーションをおこなった。Fig. 14 に示すように、基準条件では溶接工程においてひずみは増加するが、塗装乾燥工程の影響は比較的小さいことがわかった。また、溶接条件の振れ幅上限の解析結果、ひずみが増加し、そこに塗装乾燥条件の振れ幅上限の条件

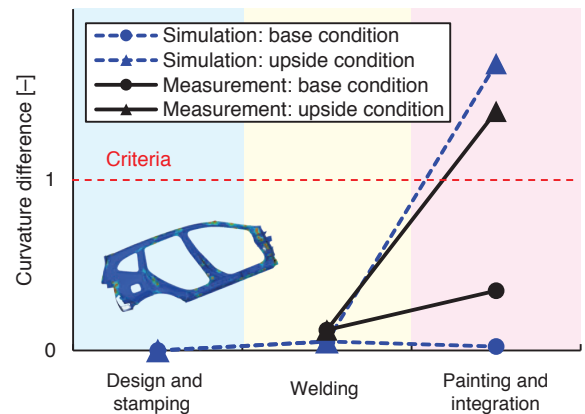


Fig. 12 Comparison of curvature difference results on sidesill

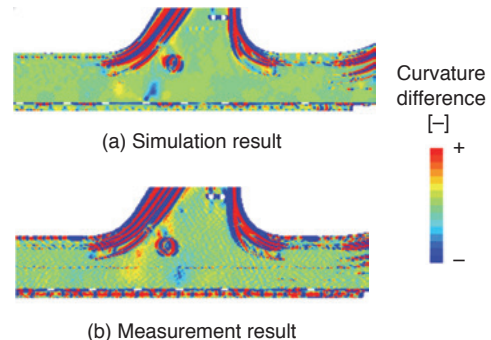


Fig. 13 Simulation and measurement results of curvature difference with all processes on sidesill

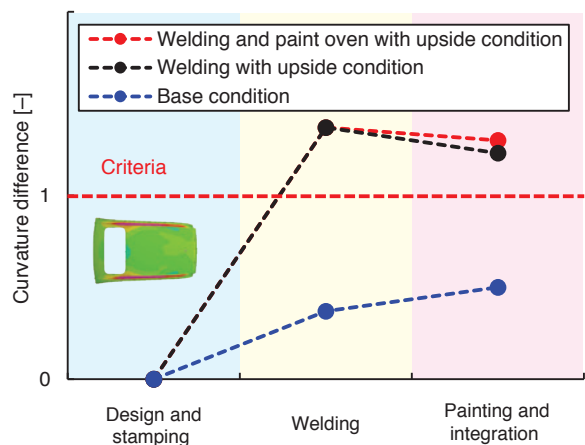


Fig. 14 Simulation comparison results of curvature difference on roof panel

を追加しても影響が小さい結果から、溶接工程がひずみにもっとも影響を与えていることが分かった。

これは、Fig. 15 に示すようにスポット溶接打点時の板間の隙間が大きい程、矩形構造の変形が大きくなることでルーフ面への応力が過大となり、ひずみが発生したものと考えられる。そこで溶接条件を変更し最適な製造条件に反映することで外板面ひずみを抑制することができた。

またこのように、部品によって外板面ひずみへの支配的な要因が異なることもわかった。

以上より、車1台の外板に関して設計仕様から製造各工程におけるひずみの蓄積を考慮した上で仕様の成立性を予測できた。また、部品や部位によって影響要因の感度や相互作用が異なり、車1台分の複雑な事象下のひずみの発生を抑制するためには、一気通貫で統合したシミュレーション手法が有効であることが明らかとなった。

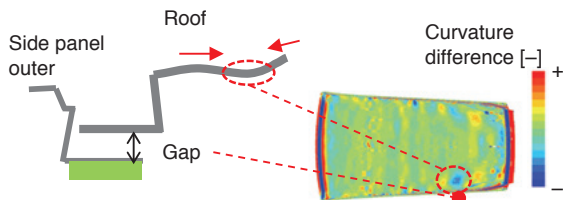


Fig. 15 Simulation result of curvature difference due to gap on roof panel

4. まとめ

自動車の高意匠な外観デザインを実現するために、設計段階において外板面ひずみの発生クライテリアを予測するシミュレーションを構築した。本技術を新機種開発の運用フローへ展開し、世界各地の製作所で生じていた外板面ひずみを対策する手戻りを防ぎ、設計の開発効率を高めることができた。

- (1) 車体材料、設計仕様から製造工程（プレス成型、スポット溶接、塗装乾燥）を一気通貫で評価するため、ひずみや応力の蓄積データを引き継いだ CAE 技術を構築した。実機を用いて検証した結果、塑性変形の発生タイミングも予測できるようになった。
- (2) 構築した統合シミュレーション手法を用いて、外板の部位によってひずみへの影響が大きい要因が異なるメカニズムを把握した。そして要因となる設計仕様や製造条件を最適化することで、ひずみの発生を抑制できるようになった。

参考文献

- (1) <https://www.nvidia.com/ja-jp/omniverse/solutions/digital-twins/>, (参照 2025/7/1)

- (2) 福本幸司, 高木康夫, 岩瀬哲:自動車パネルの熱変形解析設計技術, R&D 神戸製鋼技報, Vol. 62, No. 2, p. 29-33, (2012)
- (3) 濱田幸一:外板パネルの塗装熱ひずみ解析技術, 日本製鉄技報, 第 412 号, p. 92-96, (2019), <https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/412-14.pdf>, (参照 2025/7/1)
- (4) Kim, M. S., Lee, M. S., Park, S. C., Jeong, J. Y., Shin, Y. C., Shin, S. C., Joo, G. H., Ko, S. Y., Jang, J. H., Lee, I. H., et al.: Analysis of Car Body Performance and Thermal Distortion in Paint Drying Oven when applying a Laser Brazed Aluminum Roof, 2020 JSAE Congress (Autumn) Proceedings, (2020)
- (5) 檜山武士, 大堀敏郎, 塩原学, 村野義行, 松本拓哉: 耐水耐熱変位計による電着槽および乾燥炉内での車体変形の実測と CAE との比較, 自動車技術会論文集, 53 巻, 4 号, p. 821-826, (2022), doi:10.11351/jsaeronbun.53.821
- (6) Cai, W., Bondy, M., Carlson, B., Baylis, M.: Prediction of automotive body-in-white distortion in paint baking process, Manufacturing Letters, Vol. 41, p. 270-280, (2024), doi: 10.1016/j.mfglet.2024.09.032
- (7) 豊岡洋一, 古沢透流, 横井栄一郎, 高見滋, 内山政夫, 田中義規: 曲率差分を用いた自動車の外板面ひずみの評価手法の構築と車体設計への適用, Honda R&D Technical Review, Vol. 38, p. 114-119
- (8) 伊藤剛, 石井達子, 本田寛, 杉本直, 豊岡洋一, 古沢透流: マテリアルズインフォマティクスを活用した高効率開発のための材料データベース, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 107-114

■ 著 者 ■



古沢透流



豊岡洋一



横井栄一郎



高見滋



内山政夫



田中義規