

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

Development of Evaluation Method for Automotive Outer Panel Surface Distortion
Using Curvature Difference and Application to Body Design

豊岡 洋一¹
Yoichi TOYOOKA
高見 滋²
Shigeru TAKAMI

古沢 透流¹
Toru FURUSAWA
内山 政夫²
Masao UCHIYAMA

横井 栄一郎¹
Eiichiro YOKOI
田中 義規²
Yoshinori TANAKA

要 旨

自動車の製造工程において発生する外板面ひずみを開発段階で予測するためには、人の目視検査と相関する定量的な評価手法が不可欠である。本研究では曲率差分を用いた定量的なひずみの評価手法を提案し、開発段階での予測シミュレーションによる仕様判定を可能にすることを目指した。曲率とは曲面の勾配変化率を指し、基準形状とひずみ部との曲率の差を曲率差分と定義することで、ひずみの程度を定量化できる。この手法により、外板面ひずみと目視評価との相関性について良好な一致が得られた。そこで設計段階のシミュレーションにおいて曲率差分を判定基準として取り入れることで、開発から製造現場に至るまで一貫した評価指標として活用が可能となった。本稿では評価手法の詳細と有効性について報告する。

ABSTRACT

A quantitative evaluation method that correlates with human visual inspection is important in helping to predict outer panel surface distortion that may occur in the development phase of the automobile manufacturing process. This study proposes a quantitative evaluation method for distortion using curvature difference, in order to determine specifications through predictive simulations in the development phase. Curvature refers to the rate of change of the slope of a curved surface. The degree of distortion can be quantified by defining the difference in curvature between the standard shape and distorted areas as the curvature difference. The proposed method achieved reliable correlation between outer panel surface distortion and visual evaluation. Therefore, by incorporating curvature difference as one criterion in design phase simulations, it can be utilized as a consistent evaluation index from development to the manufacturing site. This paper reports the details and effectiveness of this evaluation method.

1. まえがき

近年、自動車開発においては、デジタル開発環境の活用により開発期間の短縮と品質や性能の向上を図る取り組みが加速している。中でも車体開発では、設計図面による仕様要件の定義や、製造プロセスにおける管理基準の設定に加え、剛性、衝突安全性、強度、耐久性、NVH（騒音、振動、乗り心地）などの性能に対するシミュレーションが広く実施されている。また、プレス成形、溶接、塗装といった製造

工程においてもシミュレーションが導入され、MBD（モデルベース開発）やデジタルツイン技術の進展により、車体開発のシミュレーション技術は高度化している。筆者らはこれまでに、設計、製造および材料の各部門が連携し、外板に関連する要因を統合的に扱うことで、外板面ひずみを予測可能なシミュレーション技術⁽¹⁾を開発した。しかしながら、製造現場におけるひずみ検査では目視評価が重要な判断基準となっており、シミュレーションによる寸法での予測結果と現場での目視との判定が一致しないケースが

¹ 材料研究センター

E-mail: yoichi_toyooka@jp.honda

² 本田技研工業株式会社

課題として残されていた。そのため目視評価にたよらず定量的に判断できるひずみの評価手法を作り、それをシミュレーションにも取り入れる必要があった。

人間の視覚は、表面の滑らかさや連続性の乱れ、曲率の不連続や急激な変化に非常に敏感である。たとえば、光の反射が不自然に変わる、連続していた写像が曲がるといった違和感は、いずれも曲率の急激な変化に起因し、人が感じる滑らかさが損なわれるためである^{(2), (3)}。特に自動車の外板のような光沢面では、わずかな凹凸でも光の反射が変化し、目視評価に大きな影響を与える。過去のひずみの定量化や評価について以下に示すが、各々に課題があり Honda での車体開発においては実用化されていない。

(1) 非接触 3D 測定による寸法差分による評価⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾

面の微細な起伏を高精度に捉えることができるが、人の目視による光のうねりや折れの評価と非接触 3D 測定による評価との相関が実証されておらず、目視評価と一致するひずみ量を設定することが難しい。

(2) 曲率を用いた評価^{(7), (8)}

(1) の評価手法同様に外板表面の 3D 形状を測定し、面の曲率や曲率変化を算出することで、面ひずみの分布を定量的に評価する。ただし本稿で扱う製品図面に記載された最終製品の形状であるデザイン面は、元々曲率が大きかったりデザインによる曲率変化がある。そのため、外板面ひずみの微小な曲率の変化では元のデザイン面の曲率に埋もれてしまい、ひずみ部分の曲率だけを極値として抽出することが難しい。

(3) プロファイラによるラインスキャン測定

接触式または非接触式の表面プロファイラを用いて、一定の測定長における表面の高低差を連続的に測定し、面ひずみの定量化に利用するが、面として測定ができないため、実パネルのような広域での評価が難しい。

そこで外板面ひずみシミュレーションの予測結果と現場での目視評価を一致させる新しい定量評価手法を構築することを目指した。

2. 開発のねらい

外板面ひずみの評価のためには判断基準となるクライテリアを設定する必要がある。それに伴い外板面ひずみの定量化が必要である。本稿では定量化の手法としてデザイン面と車体の製造工程における変形後の外板面の曲率の差分を取る手法に着目した。人の目視でひずんでいると感じるのは反射が不自然に変わるためであるが、これは滑らかに曲率に変化する途中で急に曲率が変わることに起因する。そのため元の曲率とひずみを含む曲率との差分をとることで、ひずみ部分が効果的に抽出できると考えた。まずは人の目視評価と、実車外板の曲率差分の算出値との相関取りをおこない、次にこの相関により設定した定量指標のクラ

イテリアを用いて、シミュレーション上での設計仕様の検討をおこなった。最後にひずみに対し有効な設計仕様で作製した実車と比較することで有効性を検証した。

3. 外板面ひずみの定量化方法

曲率差分を用いた外板面ひずみの定量化原理を以下に示す。xy 座標平面のある曲線を $y = f(x)$ とした場合、x 方向の曲率 κ は式 (1) で定義される。デザイン面の曲率を κ_1 とし、ひずみを含む面の曲率を κ_2 とした場合その差分である式 (2) を曲率差分 $\Delta\kappa$ と定義した。

$$\kappa = \frac{f''(x)}{(1+f'(x)^2)^{3/2}} \quad (1)$$

$$\Delta\kappa = \kappa_1 - \kappa_2 \quad (2)$$

Fig. 1 に単純な曲線を使った一例を示す。Fig. 1(a) が設計で意図した曲線であり、Fig. 1(b) はそれに対して、一部にひずみを与えた線である。両者はほぼグラフ上では見分けがつかない。次に両者の曲率分布を Fig. 1(c), (d) にそれぞれ示すが、曲率分布からもひずみの有無は判別できない。しかし曲率分布の差分を求め Fig. 1(e) のようにプロットすると、ひずみの発生位置に曲率分布の差分の極値が現れる。曲率差分を算出した結果が人の目視との相関があることが実証できれば定量的な評価が可能となる。

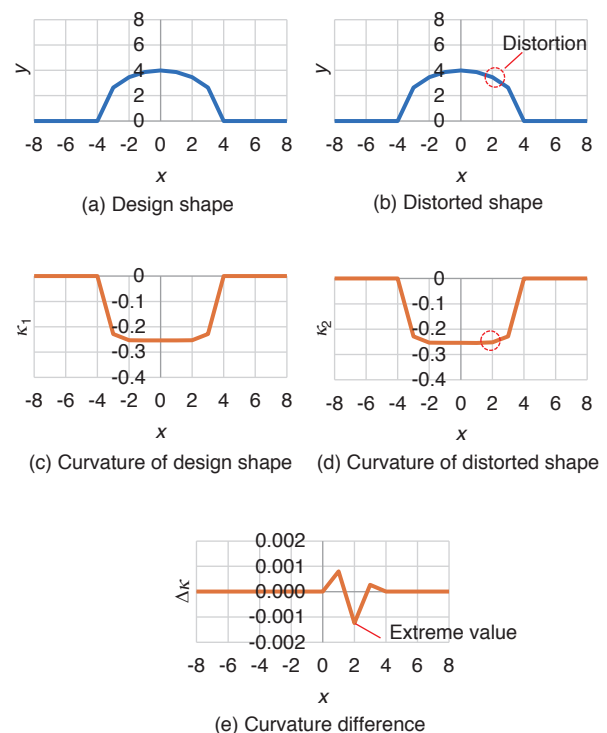


Fig. 1 Example of distortion extraction using curvature difference

4. 実車での原理実証

4.1. 実車測定データを用いた曲率差分算出方法

外板面ひずみの曲率差分による定量値と目視評価の相関を調べるため、実車の外板パネルの曲率差分を算出した。本稿では実車の3D形状データ測定にはGOM社製の光学スキャン(測定器: ATOS 5X)を用いた。データは平均メッシュサイズを1 mmとしたランダムメッシュデータで出力される。曲率差分の算出フローをFig. 2に示す。外板の形状データから曲率差分を算出するために、全体で四つのステップに分けて処理をおこなった。

・Step 1: 3D メッシュデータの取得

xyz軸の3D座標上のデータとし、ひずみを評価する板面をxy面と平行に配置した。デザインデータについてはCADデータからメッシュデータに変換をおこなった。

実車の3Dデータについては光学スキャンの測定データを用いた。

・Step 2: 等間隔のメッシュデータへの変換

ランダムメッシュデータに対して、xおよびy座標を等間隔にし、そのxy座標に対応してz座標の線形補間をおこなった。

・Step 3: 曲率差分の算出

デザインデータと測定データにおけるx方向の1階および2階微分を中心差分法により算出し、x方向のデザインデータの曲率 κ_1 とx方向の測定データの曲率 κ_2 を算出した。最後に曲率 κ_1 と曲率 κ_2 の差分を取り曲率差分 $\Delta\kappa$ とした。

4.2. 節で後述するが、本稿では目視評価と曲率差分との相関性の確認には、ルーフ、ルーフサイド、サイドシルを対象としたため、各部位の長手方向をx軸と同方向に配置し、過去のひずみ発生状況を鑑みてx方向のみの評価をおこなった。

・Step 4: 曲率差分のマッピング

算出した曲率差分値をステップ2のメッシュデータの座標にマッピングすることでデータの可視化をおこなった。曲率差分の正負の符号については、直感的に変形の傾向を把握できるように、プラスを人の目視に対して凸方向、マイナスを凹み方向として定義しカラーマップで表示した。

Fig. 3に実際のルーフの寸法差分と曲率差分を算出しカラーマップにした結果を示す。(a)でルーフ中央部のz軸+方向の変位が確認できるが、寸法差分の大きい部位が目視でひずみとして認識できない場合がある。これは寸法差分

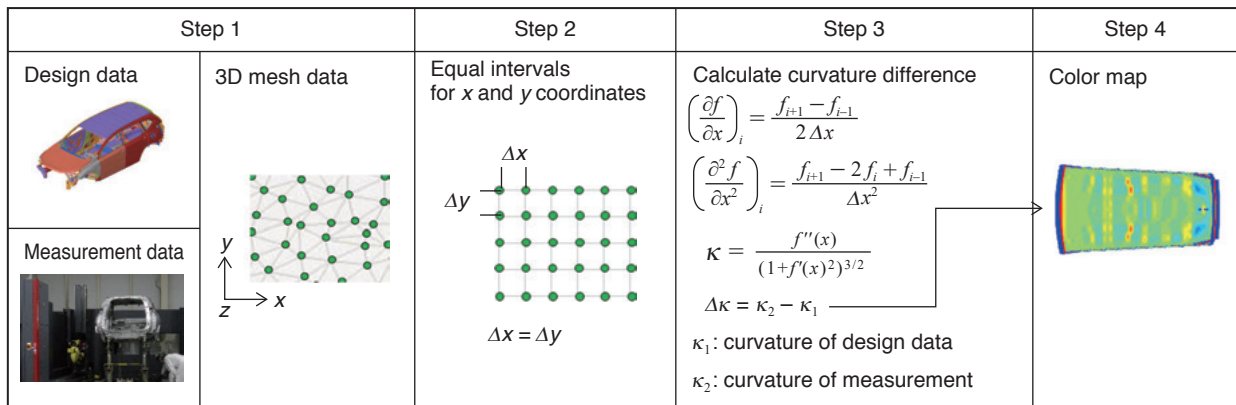


Fig. 2 Curvature difference calculation flow

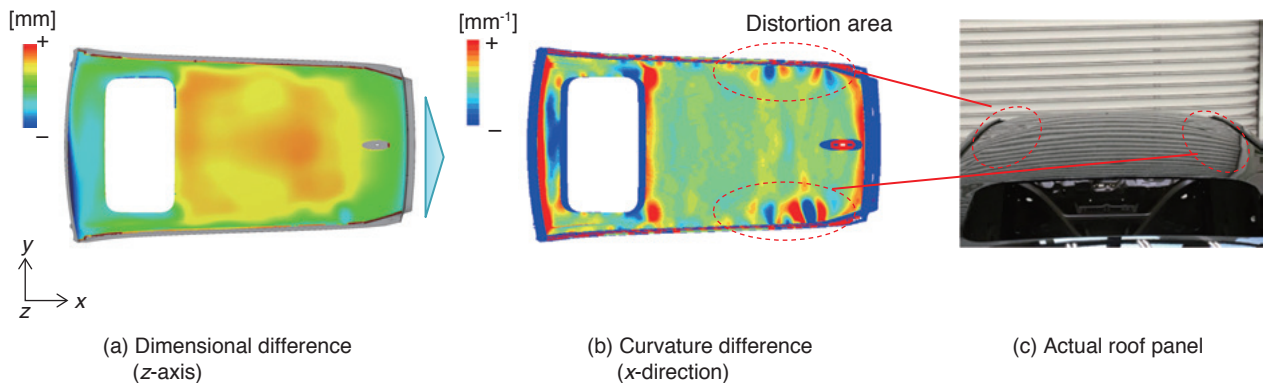


Fig. 3 Example of dimensional difference and curvature difference in measurement data

がデザインデータと測定データの変位を示す一方で、局所的な変形やうねりといった視覚的な違和感が微小な変位として存在するため、その微小な変位が埋もれてしまい捉えにくいのである。対して (b) の曲率差分においては、ルーフ端部のうねりが明確に抽出されており、(c) の写真のひずみ部位と一致することが確認できた。このことから、曲率差分は目視評価と高い相関性を持ち、目視に近い評価指標として有効であることが示された。

4.2. 目視評価と曲率差分の相関検証

目視と曲率差分との相関性を確認するため、ひずみの程度が小さいものから大きいものまでサンプルとなる車体を5台用意し検証をおこなった。車種は外板パネルの面積が大きくひずみが発生しやすいセダントype2台とSUVタイプ3台を用意した。目視評価についてはルーフ、ルーフサイド、サイドシルの3部位に対し、Fig. 4の例のように曲率差分の値が極値のポイントをあらかじめ抽出した。それらのポイントに対しTable 1に示す10段階の目視での点数付けをおこなった。評価点6以上が量産製品として合格となるボーダーラインとした。評価環境については、蛍光灯を等間隔に配置し光の反射具合の変化でひずみが検出しやすい検査場で実施した。エキスパートの検査員55名が、抽出したポイントに対し評価付けをおこない、平均値を評価点とした。この評価点を各ポイントの曲率差分の値と比較し、相関の確認をおこなった。

ルーフ、ルーフサイド、サイドシルのそれぞれの確認結果をFig. 5, 6, 7に示す。グラフの縦軸を目視評価点、横軸を曲率差分とし、Fig. 4に示したポイントに対して目視評価点の平均値と曲率差分の関係を車種ごとにプロットした。Fig. 7のサイドシルについては、セダントypeは樹脂のガーニッシュ部品が付くため評価せず、SUVタイプのプロットのみを示す。

結果からどの外板部位においても目視による評価が低くなるほど曲率差分の絶対値が大きくなるという傾向が明確

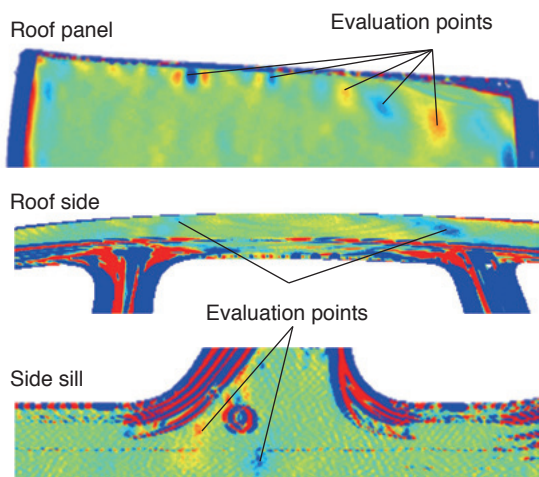


Fig. 4 Example images of visual evaluation points

Table 1 Visual evaluation scores

Score	Judgement	Reactions
10	EXCELLENT	No distortion
9	VERY GOOD	Undetectable even by experts
8	GOOD	Detectable by experts
7	ACCEPTABLE	Recognized but acceptable by experts
6	BORDERLINE	Acceptable but noticeable if customers pay attention
5	UNACCEPTABLE	Detectable by customers
4	UNACCEPTABLE	Complaint
3	POOR	Strong complaint
2	VERY POOR	Repair request
1	N/A	Rejection

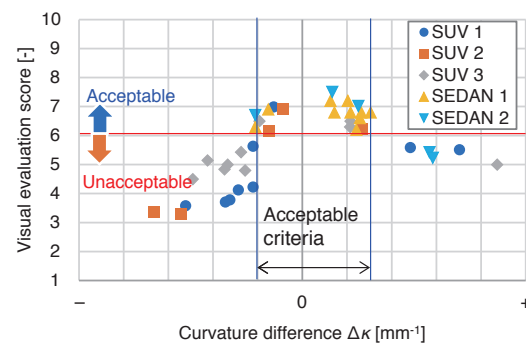


Fig. 5 Correlation between visual evaluation scores and curvature difference of roof panel

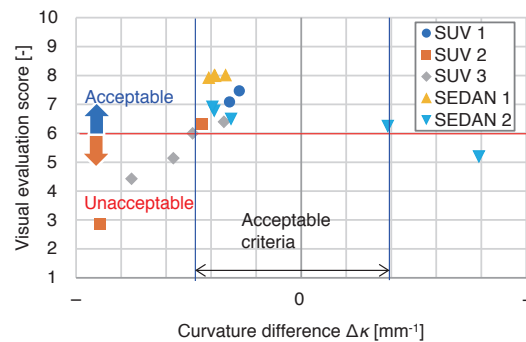


Fig. 6 Correlation between visual evaluation scores and curvature difference of roof side

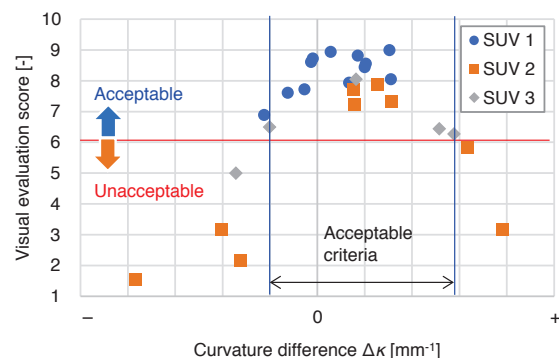


Fig. 7 Correlation between visual evaluation scores and curvature difference of side sill

に表れ、想定していた相関性が確認できた。ルーフ、ルーフサイド、サイドシルではそれぞれ合格となるクライテリアの範囲が違うが、これは部位ごとのデザインの曲率が違うためと考えられる。デザインの曲率が小さい、すなわちより平滑な面だと、曲率差分が小さい場合でも目視ではひずみを感知しやすく、反対にデザイン面の曲率が大きいと、曲率差分が大きくても目視では感知しにくいためと考えられる。この結果から目視点検が6点以上になる曲率差分の範囲をひずみのクライテリアとして設定することで、人の目視と実車のひずみの定量指標との相関取りができた。このクライテリアによりシミュレーションと比較できるようになり、不具合時の原因究明や、設計変更時の事前予測が精度よくできるようになった。

今回のクライテリアは既存機種の外板を広くカバーして作られており、新機種の開発にも対応できると考える。ただし、今後車体が進化することで、これまでと大きく異なるデザインの車体が現れることに備えて、より細分化してデータを蓄積することで、精度の向上に努めていく必要がある。

5. シミュレーションへの適用

Fig. 8は2022年モデルのCR-Vのルーフにおけるひずみの発生を抑制するための設計過程をルーフを例に示したものである。ルーフ端部には車体フレームとルーフパネルのスポット溶接部があるため、比較的ひずみが発生しやすい箇所である。Fig. 8の(a)、(b)には初期設計と耐性向上設計の2種類の設計案に基づく外板面ひずみの予測シミュレーションによる曲率差分算出結果を比較している。初期設計(a)では、溶接フランジの溶接起因でルーフ外観部に

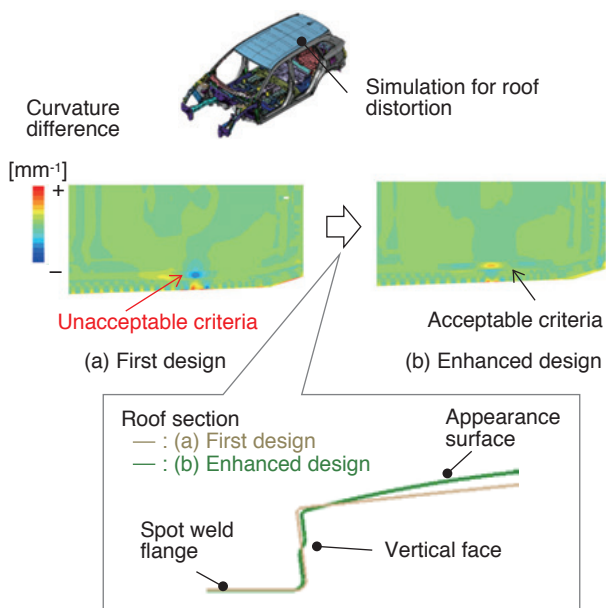


Fig. 8 Design process to reduce distortion in roof

変位が及び、ひずみが発生するため、赤字で示す部分の曲率差分がクライテリア不適合となることがわかった。耐性向上のため設計(b)として外観面および垂直面の二つの断面形状について、プレス成形性、機能面、意匠性など他の開発要件に対しネガティブな要素が出ない範囲で寸法検討をおこなった。外観面については外観面の曲率を小さくし剛性を上げ、垂直面については二段形状を設定し、溶接時の変形がデザイン面に及び難いよう寸法を設定した。その結果、曲率差分の値がクライテリア内になることが確認できた。

Fig. 9に実車のルーフの曲率差分測定結果を示すが、ひずみ耐性を向上させた設計(b)においてクライテリア範囲内に収まっていることが確認できた。

以上の結果から、曲率差分によるひずみの定量化により設計段階における外板面ひずみの予測シミュレーションと実際の車体の整合性を示すことができた。

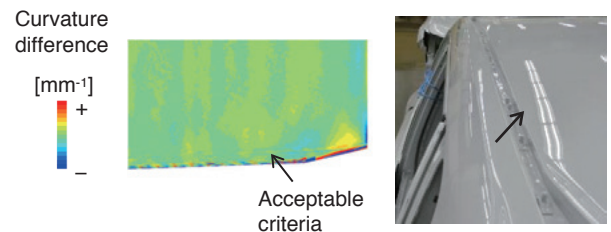


Fig. 9 Measurement of actual roof curvature difference

6. まとめ

車体の外板面ひずみのシミュレーション技術構築に必要であるひずみの定量評価手法について、曲率差分を用い人の目視と相関した定量指標を設定した。実測およびシミュレーションのメッシュデータから曲率差分の算出が可能なフローを設定することで、シミュレーションデータ上での仕様検証が可能となった。外板面ひずみの予測シミュレーションと合わせて実際の開発現場で運用することが可能となり、車体の開発効率を高める技術を構築することができた。

参考文献

- (1) 古沢透流, 豊岡洋一, 横井栄一郎, 高見滋, 内山政夫, 田中義規: 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, Honda R&D Technical Review, Vol. 38, p. 107-113
- (2) 高三徳, 吉田貞彦, 桜井俊明, 五十嵐三武郎: 自由曲線・曲面の滑らかさの評価方法について, 図学研究 38巻, (2004), doi: 10.5989/jsrgs.38.Supplement1_129

- (3) 大崎純:曲線の滑らかさと力学, traverse : kyoto university architectural journal, 4 巻, p. 47-54, (2003), doi: 10.14989/traverse_4_47
- (4) 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)
- (5) 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 2025/7/22)
- (6) 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
- (7) 米村繁, 吉田亨, 上西朗弘, 樋渡俊二, 小杉聡史, 中川淳一:自動車外板パネル性能向上のための予測評価技術, 新日鉄技報, 第 393 号, p. 11-17, (2012), <https://www.nipponsteel.com/tech/report/nsc/pdf/393-03.pdf>, (参照 2025/7/22)
- (8) 一条尚樹, 岩田徳利, 岩田隆道, 三田太一, 蔦森英夫:プレス成形に伴う面ひずみ評価技術および予測技術の開発, 塑性と加工, 54 巻, 628 号, p. 421-425, (2013), doi: 10.9773/sosei.54.421

■ 著 者 ■



豊岡 洋一



古沢 透流



横井 栄一郎



高見 滋



内山 政夫



田中 義規