

自動車向け鉄鋼材料の性能を引き出すモデルベース開発技術

Model-based Development Technology to Enhance the Performance of Steels for Automobiles

河内 毅*
Takeshi KAWACHI

田中 康治
Yasuharu TANAKA

相藤 孝博
Takahiro AITO

阿部 雅彦
Masahiko ABE

抄 録

鉄鋼製品の素材性能を最大限に活用し、自動車の性能を向上させることを目的に、鉄鋼メーカーの視点から開発されたモデルベース開発技術を紹介する。数値解析を用いて車体剛性の弱点を抽出する剛性評価技術、衝突時の変形モードに影響を与える材料破断の予測技術、および、プレス成形によって生産される部品の形状凍結性を低下させる要因分析技術の自動車開発工程における活用事例を示し、その有効性を検証する。

Abstract

To maximize the performance of steel products and enhance the performance of automobiles, this report introduces Model-Based Development (MBD) technologies developed from the perspective of a steel manufacturer. These technologies include stiffness evaluation techniques that use numerical analysis to identify weaknesses in vehicle body stiffness, prediction techniques for material fracture that affect deformation modes during vehicle collisions, and factor analysis techniques that identify the causes of reduced shape fixation in parts produced by press forming. The report demonstrates how these technologies are utilized in the automobile development process and verifies their effectiveness.

1. 緒 言

近年の自動車には、軽量かつ高い衝突安全性、操縦安定性、NV (= Noise & Vibration: 騒音・振動) 性能、低燃費性などの多様な性能が要求され、また、それら要件を高いレベルで満たす必要がある。そのため、自動車の開発では、素材、板厚、形状など種々のパラメータを調整し、高いレベルで上記要件の両立を図っている。今後、中長期的に自動車の電動化は促進していくことが予想され¹⁾、重量のある電池を大量に搭載する電気自動車には、要求される剛性や強度耐久性がさらに高まると共に設計上の新たな課題が発生する可能性がある。このような背景に加え、開発期間の短縮や開発コストの削減に対する要求は大きく、近年、自動車産業ではモデルベース開発 (Model Based Development = MBD) 技術の導入が急速に進んでいる²⁻⁵⁾。MBDは、主にCAE (Computer Aided Engineering) 技術を活用した設計、シミュレーション、検証を統合した開発手法であり、従来の設計と試作検証を繰り返す試行錯誤的な開発プロセスに比べて効率的かつ精度の高い設計を可能にするものであ

る。開発企画段階から最終設計に至る工程においてMBD技術を適切に活用することで、開発の過程における試作や実験による評価などの物理的な検証過程を削減し、開発工期とコストを削減することが可能になる。

図1に示すように、日本製鉄(株)では、鉄鋼製品の素材性能を最大限活用し、自動車の性能向上させることを目的に、数値解析を用いて走行時の操縦安定性やNV性能を高めるために必要な車体剛性の弱点を抽出する剛性評価技術⁶⁻⁸⁾、衝突時の部品の変形抵抗や材料・スポット溶接の破断予測技術⁹⁻¹⁴⁾、自動車部品のプレス成形工程における材料の成形限界や部品形状精度を予測する技術¹⁵⁾、鋼板のスポット溶接の過程における材料の相変態を考慮した電場-温度場-応力場の連成解析による高精度スポット溶接FEM解析システム¹⁶⁾など、鉄鋼メーカー視点でのMBD技術を開発し、自動車開発における技術課題に対して有効な支援技術を提供している。

本稿では、軽量化を目的とした鋼板の薄手化に伴う車体剛性の低下に対する対策検討を効率的に実施するため、剛性上の弱点を抽出する剛性評価技術である空間ひずみ解析

* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部 主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

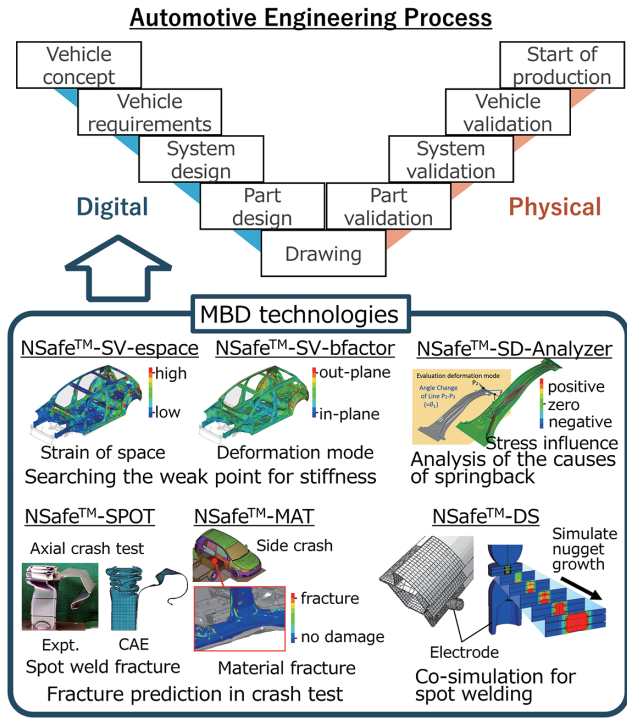


図1 自動車開発工程における MBD 技術の適用
Application of model-based development in automotive engineering processes

NSafe®-SV-espace による分析と対策例について述べる。続いて、衝突安全性の向上を目的に適用率が増加している超ハイテンと呼ばれる高強度鋼板^{17,18)}の性能を最大限引き出すための構造設計を支援するため、衝突の過程における鋼板の破断現象を CAE 解析において予測する技術 NSafe®-MAT を用いた打ち抜き端面 (エッジ) からの破断予測技術について述べる。最後に、ハイテン適用率の増加による課題の一つである、部品のプレス成形におけるスプリングバック変形、つまり、形状凍結性の低下という課題に対し、その発生要因を分析し効率的な金型修正や設計変更を支援するツールである NSafe®-SD-Analyzer を紹介し、その効果検証について述べる。

2. 剛性評価技術

2.1 薄手材適用における課題

自動車産業において、鉄鋼材料は長年にわたり重要な役割を果たしており、特に自動車用鋼板のハイテン・薄手化は衝突安全性の向上および軽量化による燃費・電費向上の実現に貢献している¹⁷⁾。一方、鋼板の薄手化は車体の剛性低下を招くため、操縦安定性や乗り心地を劣化させる懸念がある¹⁹⁾。そのため、車体剛性向上に資する取り組みの重要性が増しており、それらの内容について各メーカーから報告されている^{20,21)}。車両の開発においては、製品企画段階で設定された剛性性能を実現するため、走行中の車両が受ける荷重入力を想定した剛性・振動解析が開発初期から実施される。剛性・振動解析では、入力された荷重が各部品

およびスポット溶接、ボルト締結、接着剤などの部品間結合部を模擬した要素・節点を介して伝達されることで、車両モデル全体が静的あるいは動的に変形する。その変形に伴い、車体を構成する各部品にひずみエネルギーが生じ、元の形状に戻ろうとする反力が働く。このとき、系の剛性を最大化することはすなわち系のひずみエネルギーの最小化と同義であり²⁰⁾、ひずみエネルギー密度が大きい部品の板厚を増加させる、あるいは形状を見直すことで剛性向上を狙うことは、広く認知されており、実効性の高い剛性対策手法であるといえる。ただし、部品間の結合が弱い箇所は剛性の弱部となり得るにもかかわらず、生じるひずみエネルギーは小さいため、ひずみエネルギー密度による分析では検知できないという問題がある。そこで、部品間の相対変位に着目した剛性弱部の抽出手法および抽出した剛性弱部の対策構造導出手法 NSafe®-SV-espace の有効性を評価した。

2.2 部品間の相対変位に着目した剛性弱部の抽出手法

図2に部品間に生じる相対変位の概念図を示す。複数の部品で構成される構造体はある程度一体となって変位するものの、部品間の結合の強弱や各要素に生じるひずみによって相対的に変位する。その相対変位の変化率を下式のように空間ひずみ (部品間の相対変位を定量化した指標) として定義する。

$$\epsilon_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{L'_{Ai} - L_{Ai}}{L_{Ai}} \right|$$

これは、評価節点と評価領域内節点との距離変化率の平均値であり、空間ひずみが小さいほど周辺の部品と連動しており、部品間の結合が強いと評価できる。また、評価領域の大きさは想定する構造対策の大きさ程度に設定することが望ましい⁶⁾。図3に二つのハット部品が一枚の背板で結

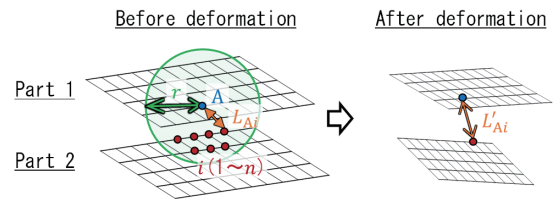


図2 部品間に生じる相対変位の概念図
Schematic image of relative displacement between parts

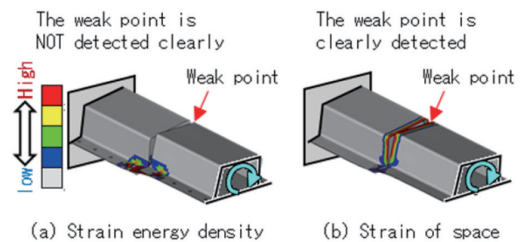


図3 結合弱部に対する評価方法の比較
Comparison of evaluation methods for weak point of bonding

合された閉断面構造のねじりにおいて、結合弱部（二つのハット部品が互いに隣接する領域）に対するひずみエネルギー密度と空間ひずみの比較を示す。ひずみエネルギー密度は上記結合弱部で大きくなく、あくまでも現状構造を変えない前提において重要な箇所を可視化するのに対し、空間ひずみは上記結合弱部で大きくなるため、ホワイトボディ（補剛部品を含めた車体）のような複雑な構造体でも結合弱部を検出し、構造対策が必要な箇所を可視化するという特徴がある。

2.3 剛性弱部の対策構造導出手法の開発

前節で紹介した手法は剛性弱部を抽出するものの、具体的な対策構造までは得られないため、効果的な対策構造の導出にかかる工期とコストの削減効果は限定的である。そこで、空間ひずみを活用し、剛性向上に効果的な対策構造を導出する手法を開発した。空間ひずみが大きい節点を起点とし、上記起点を中心とした一定の範囲内にある節点のうち、起点との距離変化率が大きい節点を終点とする剛体結合要素を複数作成する。なお、終点は各部品で一節点のみ、あるいは終点同士の距離を一定以上にするにより、類似した剛体結合要素の作成を回避する。作成した各剛体結合要素を適用した場合の剛性向上率を評価し、剛性向上に効果的な剛体結合要素を抽出する。上記一連の処理を半自動化することで、具現化を検討すべき対策構造を短工期かつ低コストで導出する。

2.4 各評価手法を活用した対策検討と効果検証

本節ではさらなる剛性向上を検討するうえで、ひずみエネルギー密度や空間ひずみといった評価手法を活用し、対策構造検討を試み、その効果を検証した。構造検討の領域は図4に示すプラットフォームリア構造とし、車体のねじり剛性（後ダンパー締結点を拘束し、左右の前ダンパーに反平行に荷重を与えることで、車体を前後軸周りに振る際の剛性）を評価値とした。

まず、従来手法であるひずみエネルギー密度を活用した

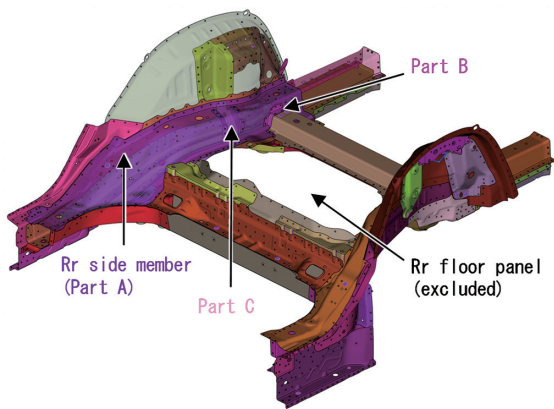


図4 構造検討の範囲
Analysis area

対策検討事例を示す。図5に示す車体ねじり変形におけるひずみエネルギー密度分布において、リアサイドメンバー（部品A）、リアフロアパネル後部のクロスメンバーと部品Aの継手部品（部品B）、部品A内部の補剛部品（部品C）でひずみエネルギー密度が大きい。ひずみエネルギーが大きい箇所は剛性上重要な部位であるとみなすことができるため、上記部品の板厚を増加させることにより、剛性向上を試みた。リアサイドメンバーを板厚1.4から1.6mmに、部品Bの板厚を1.2から2.0mmに、部品Cの板厚を1.25から2.0mmにすることによる剛性向上率と質量増を評価した。

続いて、空間ひずみを活用した対策検討事例を示す。図6に示す空間ひずみ分布は車体骨格を構成する部品のみを対象、評価領域半径を100mmとして、各節点の空間ひずみを評価・可視化したものであり、空間ひずみはリアサイドメンバーの車体内側で大きい。前節で紹介した剛性弱部の対策構造導出手法により得られた剛性向上率が大きい剛体結合要素を図7に示す。空間ひずみが大きいリアサイドメンバーの車体内側を起点（ P_0 ）とし、起点との距離変化率が大きいリアサイドメンバーの車体外側（ P_1 ）、リアフロアパネル前部のクロスメンバー（ P_2 ）との結合を強化することで剛性向上が見込まれる。図8に示すリアサイドメンバー内への新規部品（部品D）およびリアフロア前部のクロスメンバーとリアサイドメンバーとの継手部品（部品E）の追加による剛性向上率と質量増を評価した。

検討した対策構造によるねじり剛性向上率と質量増を図

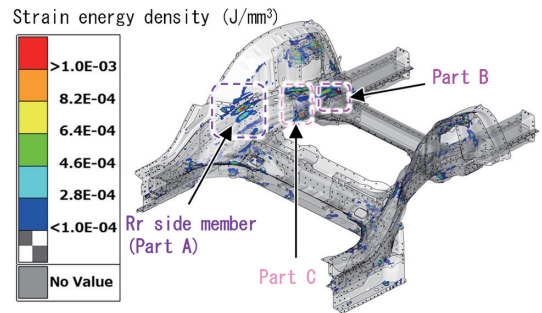


図5 車体ねじり変形におけるひずみエネルギー密度分布
Strain energy density distribution in body torsion

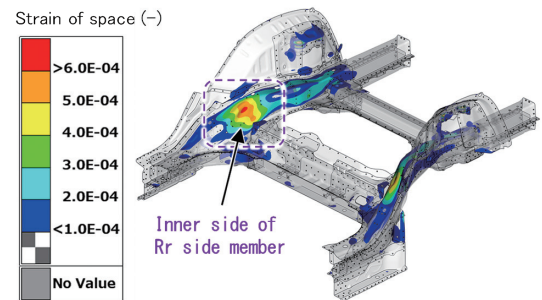


図6 車体ねじり変形における空間のひずみの分布
Strain of space distribution in body torsion

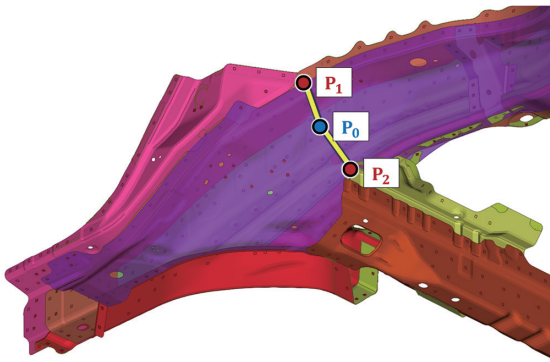


図7 剛性向上が大きい結合
Connections with high stiffness improvement

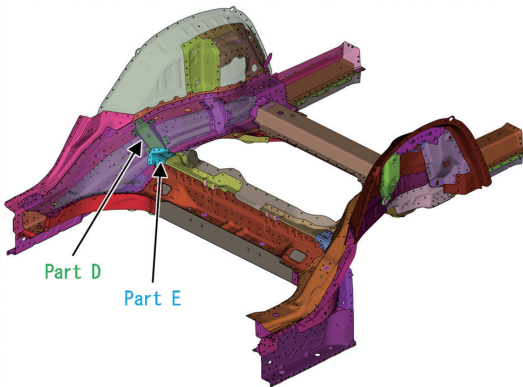


図8 空間のひずみをもとにした対策構造
Modified structure based on strain of space

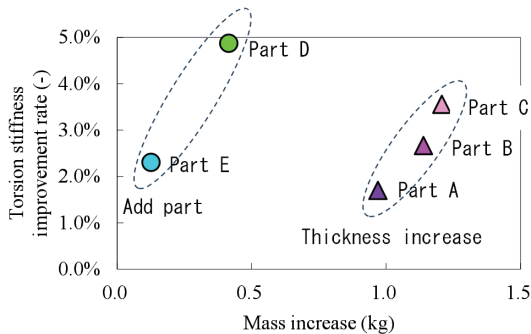


図9 各対策によるねじり剛性向上率と質量増
Torsional stiffness improvement rate and mass increase
for each modification

9に示す。ひずみエネルギー密度が大きい部品の板厚UPに比べ、空間ひずみをもとにした部品追加は、より高い質量効率でねじり剛性が向上した。以上により、空間ひずみに着目した剛性弱部の抽出手法・対策構造導出手法 NSafe[®]-SV-espace の有効性を確認した。

3. 衝突性能予測技術

3.1 超ハイテン化による衝突性能面での課題と対応

自動車車体への超ハイテン材適用比率は年々高まっており^{17,18)}、衝突試験において骨格部材が狙いの変形モードとならない場合、十分な吸収エネルギーが得られない可能性

もある。超ハイテン材を車体骨格部材に適用した場合、前突時のバンパーやフロントサイドメンバー、側突時のセンターピラー、サイドシル等において材料およびスポット溶接部破断が懸念される。破断は変形モードを崩す要因の一つとなりうるため、従来に比べ車体設計の難しさが増してきている。超ハイテン材の材料破断の特徴として、圧潰部の局所的な座屈変形による曲げ破断が挙げられる。それに加え、例えば衝突体が車体に侵入することで引張が加わる部位に穴や切欠きが設定されている場合、その材料端部(エッジ)のひずみ集中部を起点とした伸びフランジ破断が発生する場合があります、性能(衝突反力)低下に繋がる可能性がある²²⁾。

これら破断現象を、FEM解析を用いて事前に予測し、対策を打つことが求められている。そのため、車両全体モデルのような大規模モデルへの適用を前提として比較的粗いメッシュサイズであっても適用可能な材料破断予測ソフト NSafe[®]-MATが開発されている^{23,24)}。これまでは、鋼板の面内変形や曲げ変形に対応した破断予測機能を開発してきており、今回新たに超ハイテン材で懸念される穴や切欠き部での伸びフランジ変形に対応したエッジ破断予測機能を開発したので報告する。

鋼板の主要な材料特性の一つとして、エッジ部の打ち抜きによるダメージを考慮した局部延性を表す指標として穴広げ率が用いられているが、穴広げ試験は軸対称変形であり、周方向にひずみがほとんど分布せずに破断に至る。一方で実際の部材の衝突変形においては、この打ち抜き時のダメージに加え、切欠き形状に起因した様々なひずみ勾配が生じており、その破断限界は、ひずみ勾配の影響を受け変化することが知られている。そのため、材料特性を定義する指標に新たに穴広げ率を加えることで、打ち抜きダメージの影響を考慮しながら、任意の要素サイズであっても、エッジ部に局所的に生じているひずみ勾配を予測し、変形中に逐次変化するひずみ勾配の変化に対応可能なエッジ破断予測機能を新たに構築した。

3.2 エッジ破断予測機能の開発

エッジ破断のクライテリアを定めるため、図10に示す Type I, II および III の形状の切欠きを有する試験体を引張ることで、引張試験中の切欠き底からのひずみ勾配を種々変化させることが可能な片側切欠き引張り試験方法を開発した。さらに、打ち抜きダメージの影響を破断予測に取り込むために、穴広げ試験と同じφ10mmの打ち抜き穴(板厚クリアランス11%)が切欠き部(Notch)となるように試験片を切り出している。図11に示すように、Type I および II は、最大応力到達時に亀裂が発生した。一方、Type III は切欠き底でくびれが発生した後に亀裂が発生したが、この場合、くびれを不良現象とみなし、最大応力到達時を破断開始と定義した。

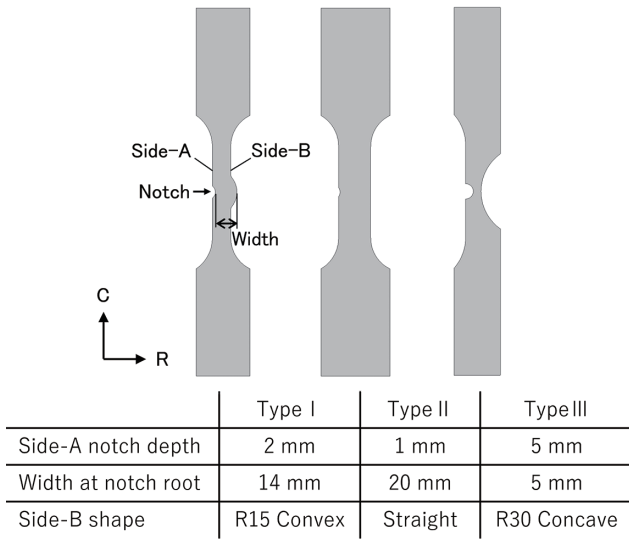


図 10 片側切欠き引張試験片形状
Developed one-sided notched tensile test specimen shape

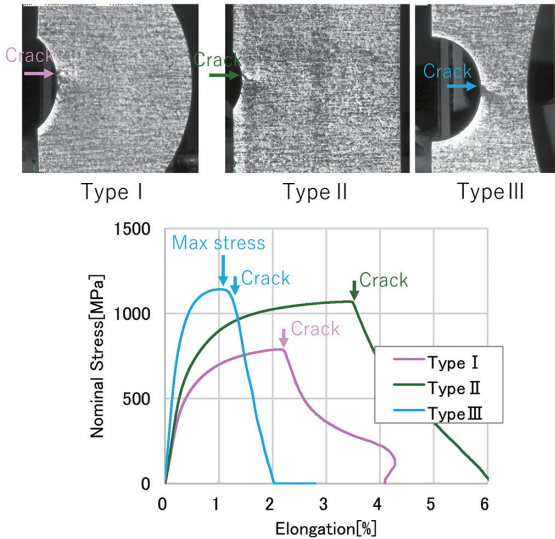


図 11 片側切欠き引張試験結果 (ゲージ長さ 50mm)
Developed one-sided notched tensile test result (Gauge length 50 mm)

図 12 に破断発生タイミングにおける最大主ひずみ分布図および切欠き底からの半径方向および周方向の主ひずみ分布を示す。Type I は切欠き底の周方向に最大主ひずみが高い要素が並んでいる、つまり切欠き底と隣接要素間の周方向のひずみ勾配は小さく、半径方向には高いひずみ勾配が生じている。一方、Type III は切欠き底の半径方向に最大主ひずみが高い要素が並んでいる、つまり切欠き底と隣接要素間の半径方向のひずみ勾配は小さく、周方向には高いひずみ勾配が生じている。Type II はその中間的なひずみ勾配を示している。これら片側切欠き引張試験を穴広げ率の異なる種々の材料で実施することで、穴広げ率とひずみ勾配と破断限界ひずみの関係を整理した。さらに FEM 解析に用いる要素サイズとの相関性を新たな指標を用いて見出すことで、任意の要素サイズに対応したエッジ破断予測

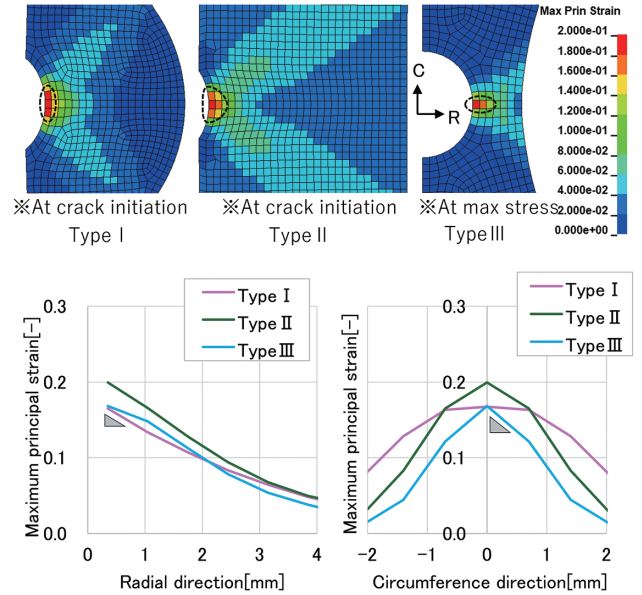


図 12 片側切欠き引張試験再現 FEM 解析による破断発生時の最大主ひずみ分布
Maximum principal strain distribution at fracture occurrence by FEM analysis of one-sided notched tensile test

機能を構築した。

3.3 エッジ破断予測機能の精度検証

図 13(a) に穴広げ率や n 値の異なる 3 種類の鋼種 (Material A, B および C) で作製した Type I, II および III の片側切欠き引張試験における破断伸び (ゲージ長さ 10 mm) を示す。Type I では穴広げ率が高い鋼種ほど破断伸びが高くなる傾向があり、Type III は n 値が高い鋼種ほど破断伸びが高くなる傾向が見られた。つまり、ひずみ勾配の状態によって破断伸び向上に寄与する鋼板特性 (穴広げ率もしくは n 値) が変化することが判った。

次に、これら各鋼種の片側切欠き引張試験実験から得られた破断伸びを開発した NSafe[®]-MAT エッジ破断予測機能を用いて予測した結果を図 13 (b), (c) および (d) に示す。比較として NSafe[®]-MAT の従来機能である面内引張に対応した応力 FLD¹⁴⁾ を用いた場合、特にエッジの状態を考慮に入れていないことから破断を検知するタイミングが大幅に遅い結果となった。一方で、開発したエッジ破断予測機能においては、入力された穴広げ率の影響を考慮しながら、変形中の切欠き底のひずみ勾配の状態に応じてクライテリアを変化させながら破断判定を行うことで、鋼板特性の異なる鋼種で作製したすべての試験片 Type (ひずみ勾配状態) において、いずれも精度良く破断伸びを予測できることが確認できた。

さらに、より自動車部材に近い状態で破断予測精度を検証するため、フロントサイドメンバーの前突試験を模擬した、ハット部材を用いた圧縮曲げ試験を行った²⁵⁾。ハット部材は幅 100×高さ 40×長さ 300 mm とし、980MPa 級鋼板 (板厚 1.6 mm, VDA 曲げ角度 66°, 穴広げ率 28%) を用い

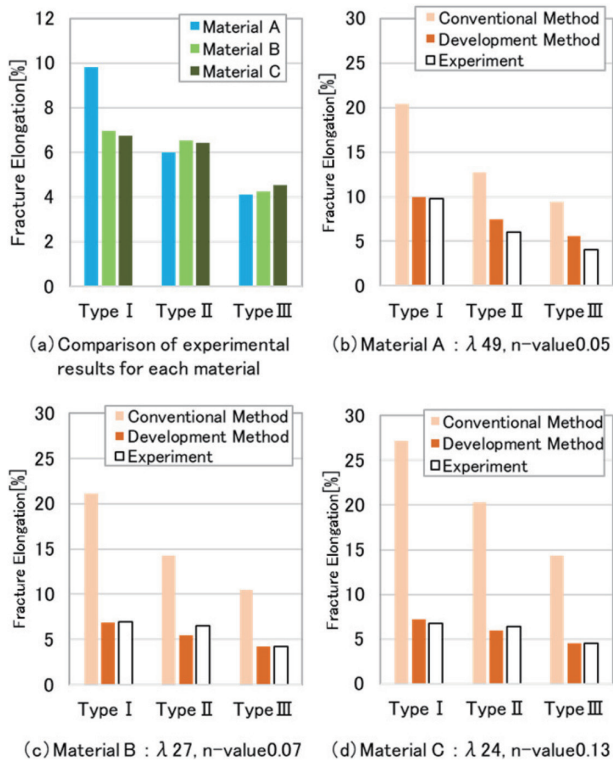


図 13 片側切欠き引張実験結果および NSafe[®]-MAT による破断伸び (ゲージ長さ 10 mm) 予測結果

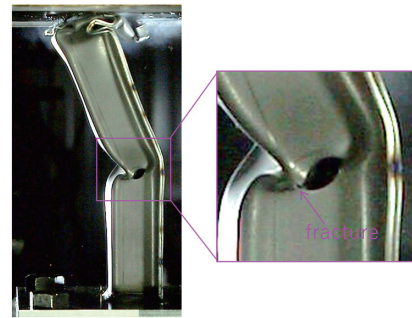
One-side notched tensile test results and fracture elongation (gauge length 10 mm) prediction results by NSafe[™]-MAT

ている。ハット部材上端部から 190 mm の位置で縦壁高さ方向中央位置に ϕ 15 mm の打ち抜き穴を開けている。なお、ハット部とクロージングプレートは、同鋼種、同板厚でフランジ部を 25 mm ピッチでスポット溶接している。また、ハット部材上端部から 180 mm の位置に横折れ変形を誘発する折れ切っ掛けが付与されている。

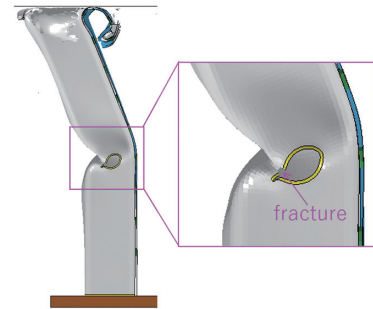
図 14 (a) にフラットインパクト (重量 75 kg, 速度 23 km/h) で落錘試験を実施した際の高速カメラ画像を示す。ハット部材上端で圧潰変形した後、横折れ変形が開始した直後の 60 mm ストロークにおいて打ち抜き穴縁を起点にエッジ破断が発生することが確認できた。これら試験条件を再現した FEM モデルを作成し、NSafe[®]-MAT で破断を予測した結果、ハット部材上端の圧潰変形部の曲げ破断を予測すると共に、69 mm ストロークにおいて打ち抜き穴縁からの破断も開発したエッジ破断予測機能で精度良く予測できることが確認できた。

これまで困難であった打ち抜きダメージの影響やひずみ勾配の影響を破断予測に取り込むことで高精度なエッジ破断予測機能を新たに開発した。これによって、従来から NSafe[®]-MAT に備わっている面内変形および面外変形 (曲げ変形) に対応した破断予測機能と組み合わせることで、自動車部材で発生しうるほぼ全ての破断形態に対応した統合的な材料破断予測が可能となった。

また、エッジ破断予測機能は穴広げ率を入力として衝突



(a) Fracture from the edge of the punched hole at 60 mm stroke (High-speed camera image from experiment)



(b) Fracture from the edge of the punched hole at 69 mm stroke (NSafe[™]-MAT prediction)

図 14 前突模擬ハット部材圧縮曲げ落錘試験における打ち抜き穴縁からのエッジ破断予測結果

Prediction results of fracture from hole edge in compression bending drop weight test for frontal collision

解析における自動車部材からの破断の発生有無を評価できるため、狙いの衝突性能を得るために必要な穴広げ率を逆算して知ることができる。それによって、例えば材料開発の初期段階において最終製品である自動車部材に必要な穴広げ率の値を知ることができ、開発目標を明確にした手戻りのない効率的な材料開発に繋げることもできる。

4. スプリングバック分析技術

4.1 超ハイテン化による生産技術面での課題と対応

車体骨格部品の材料高強度化や一体大型化等による生産技術面での課題として、成形性低下による割れおよびしわの抑制困難化と、スプリングバック量増大による金型玉成の工期、コストの増加があげられる。成形性低下に対して、日本製鉄では鋼板の破断限界ひずみが高いせん断変形を活用したプレス工法 NSafe[®]-FROM シリーズ^{26,27)}を開発、提案しており、各種部品の超ハイテン化を実現している。

一方、超ハイテン材の大型部品ではスプリングバック量が 10~20 mm 以上となる場合も多く、金型の見込修正での対応が困難となる。この様な部品の寸法精度確保には、スプリングバック変形の原因であるプレス成形後の残留応力 (変形原因応力) を分析し、設計変更や中間成形形状を修正することにより変形原因応力を低減して、スプリングバック変形自体を抑制することが有効である。この場合、変形原因応力の分析が重要になるが、日本製鉄では FEM によるスプリングバック解析をベースに短時間で詳細な分析を行う

ための自動分析システム“NSafe®-SD-Analyzer (Springback Deformation Analyzer)”を開発している。以下に変形原因応力の分析手法と自動分析システム NSafe®-SD-Analyzer を使って変形原因応力を分析した結果を述べる。

4.2 スプリングバック変形の原因応力の分析方法および自動分析システム

スプリングバック変形原因応力の基本的な分析手法は以下の様である。スプリングバック解析は、プレス成形解析で求めた成形下死点のプレスパネルの形状と応力を持った FEM モデルの金型による拘束を外した条件での弾性変形解析である。ここで、このスプリングバック解析モデル(ベースモデル)に対し、プレスパネルの一部の領域の応力を変化させた仮想的な条件のモデル(応力変化モデル)を作成して弾性変形解析を行い、ベースモデルの変形と応力変化モデルの変形を比較することにより、当該領域の応力変化に対するスプリングバック変形量の感度(応力影響度)を求める。さらに、プレスパネルの複数の領域について応力影響度を求めて比較することにより、応力影響度の高い領域を特定し、ベースモデルの特定した領域の応力を確認することにより変形原因応力を分析することが可能になる。

例えば、図 15 (a) にスプリングバック変形を示す部品のベースモデルに対し、図中の領域 A の応力を一定の係数 α を掛けた値に変更したモデル(応力変化モデル)を作成し、その解析結果をベースモデルと比較する。最大変位となる点 P_1 の z 方向変位を変形モードとして、係数 α を変化させた場合のスプリングバック変形量 γ を図 15 (b) に示す。 γ と α は完全な線形の関係にはならないので応力影響度の定義は種々考えられるが、例えばベースモデル(即ち α が 1.0)と α を 0.9 とした場合の γ の差 $\Delta\gamma$ をもとに、応力変化の割合を考慮して領域 A の応力影響度 β は次のように算出される。

$$\beta = \frac{\Delta\gamma}{1-\alpha} = \frac{z_b - z_c}{1-\alpha} = \frac{21.97 - 21.32}{1-0.9} = 6.5 \quad [\text{mm}]$$

ここで、 z_b および z_c は、それぞれ、ベースモデルと α が 0.9 の場合の γ である。

さらに、図 15 (a) のベースモデルに対し、図 16 (a) に示す様に五つの領域に分けてそれぞれの領域の応力影響度を同様にして求めると、図 16 (b) のグラフの様になって部品全体に渡る応力影響度を把握できる。

しかし、図 16 の分析結果では複数の変形モードが重なっており、かつ分析領域の分割が粗いため詳細な変形原因応力の把握は難しい。実部品でのスプリングバック変形は、ひねり、キャンバー、壁反り、口開き等の複数の変形モードが重なった状態であるので、変形モード毎に分析する必要がある。特に図 17 に示す様な面内応力の偏差応力成分に起因する変形と平均応力成分に起因する変形は、変形モードが異なるので、分離して分析すると変形原因応力の

特定が容易になる。さらに、分析領域も応力分布と対応が取れるレベルまで細かくする必要がある。

この様な詳細な分析を手動で行うのは負荷が高く、実用上困難である。そこで、詳細な分析を行うための自動分析システム(NSafe®-SD-Analyzer)を開発した。

NSafe®-SD-Analyzer では、初めに寸法精度解析のベースモデルの応力を編集し、偏差応力成分のみを持つモデル(偏差応力ベースモデル)と平均応力成分のみを持つモデル(平均応力ベースモデル)を作成する。次に、設定したサイズの領域に部品全体を自動で分割し、偏差応力ベースモデルと平均応力ベースモデルのそれぞれに対し、領域毎に応力変化モデルの作成、解析実行、解析結果読み取りおよび応力影響度の算出を行う。さらに、応力影響度の分布を部品形状上にコンター表示を行う。また、評価するスプリングバック変形は、節点の変位のみだけでなく、2点間距離、ねじれ、反り、角度変化などの各種の変形モードに対応できる。解析の実行においては、複数の応力変化モデルの並

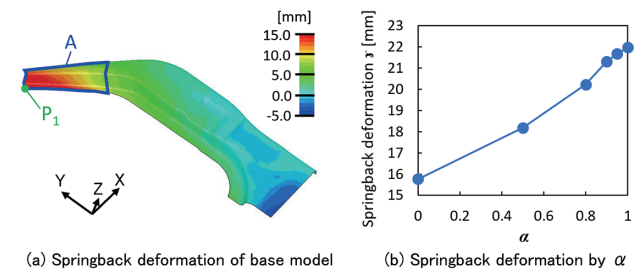


図 15 ベースモデルのスプリングバック変形と α の影響
Springback deformation of the base model and the effect of α

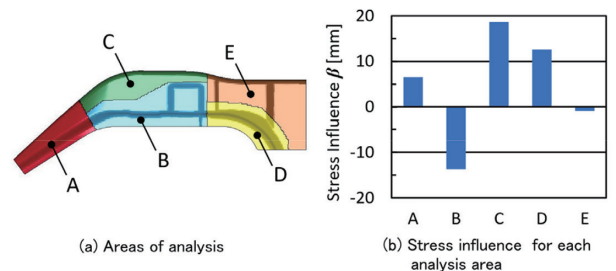


図 16 分析領域と応力影響度
Analysis area and stress influence

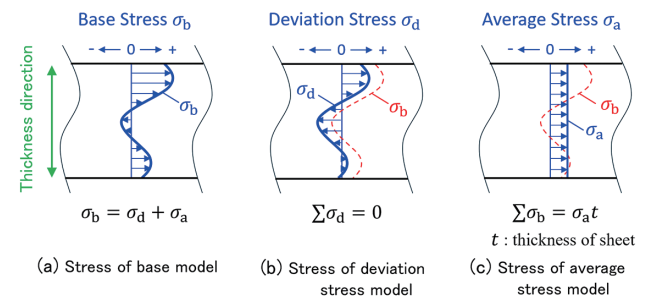


図 17 偏差応力と平均応力
Deviation stress and average stress

列計算処理が可能である。解析ソルバーは市販の汎用ソルバーを用いることもできるが、独自のアルゴリズムで計算を高速化した専用ソルバーを備えている。

以下に、NSafe®-SD-Analyzerによる詳細な分析の結果を述べる。

4.3 分析モデルおよび分析方法

分析モデルは自由曲げ工法 (NSafe®-FORM-LT)²⁷⁾ でプレス成形した図 18 に示す超ハイテン材のセンターピラーとした。汎用動的陽解法ソルバーを用いて行った成形解析結果の下死点の形状、応力データよりベースモデル、偏差応力ベースモデルおよび平均応力ベースモデルを作成した。図 19 (a), (b), (c) にそれぞれモデルのスプリングバック解析結果を示す。さらに、部品を図 20 に示すような約 2~4mm サイズの 8396 個の小領域に分割し、偏差応力ベースモデルと平均応力ベースモデルのそれぞれに対して係数 α を 0.9 として個々の領域の応力変化モデルを作成して、全ての領域の応力影響度を求めた。なお、ベースモデル作成以降の処理は自動実行される。

4.4 応力影響度分析結果

応力影響度分析結果の代表例として、図 19 (c) に見られる平均応力に起因する①アッパー部のひねりと、②ロア端

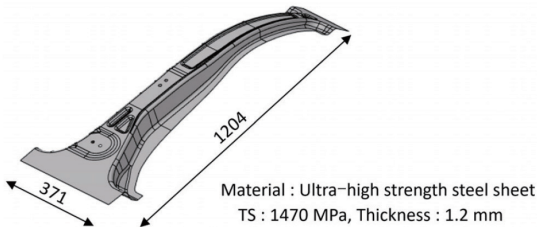


図 18 分析モデル
Analysis model

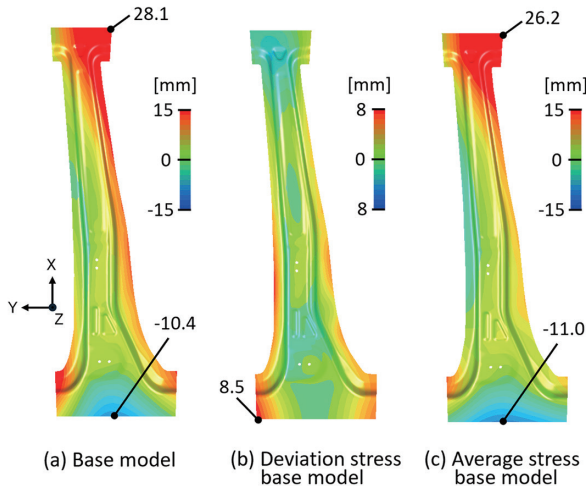


図 19 スプリングバック解析結果 (z 方向変位)
Springback simulation results (z-direction displacement)

部のたわみの二つのスプリングバック変形モードの分析結果を図 21 に示す。それぞれの変形モードの評価値は図中に示す様に、直線 P_2-P_3 の角度変化 (Mode 1) と角 $P_4 P_5 P_6$ の角度変化 (Mode 2) とした。応力影響度のコンター図で赤くなっている部分が変形原因応力の発生領域である。複

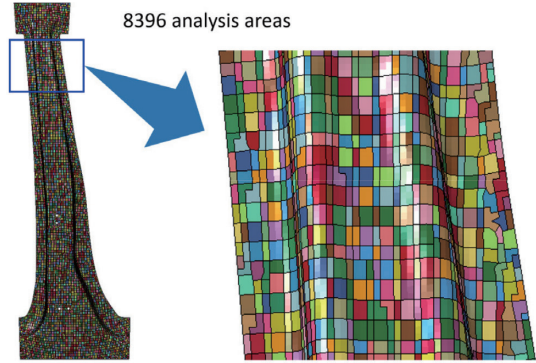
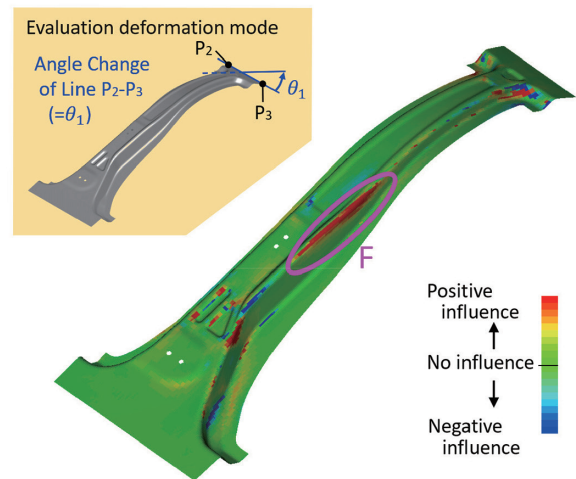
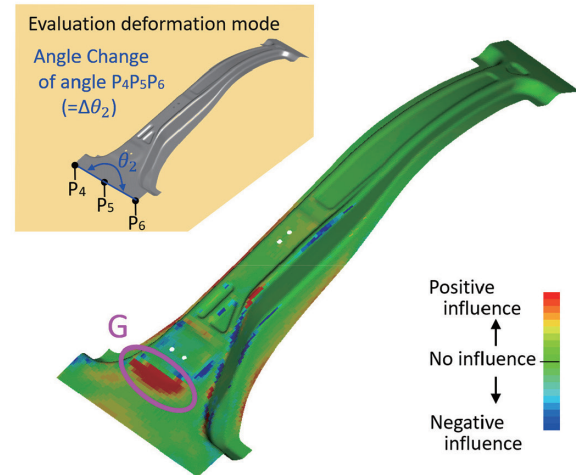


図 20 分析領域分割
Analysis area segmentation



(a) Stress influence of angle change of line P2-P3 (Mode 1)



(b) Stress influence of angle change angle P4P5P6 (Mode 2)

図 21 応力影響度の分析結果 (平均応力ベースモデル)
Stress influence analysis results (Average stress base model)

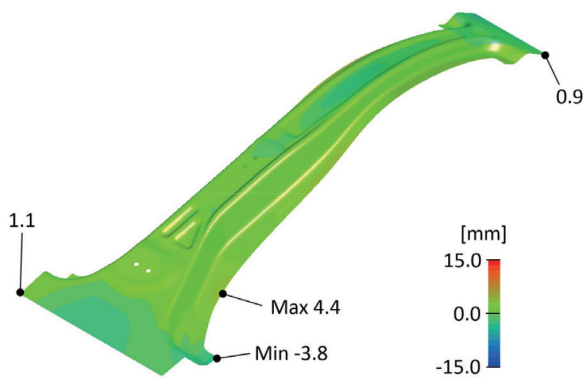


図 22 主要原因応力除去後のスプリングバック変形
Springback deformation after removal of dominant causal stress

数箇所に応力影響度が高い箇所が見られるが、主要な変形原因応力の発生領域は Mode 1 は図 21 (a) の F 部、Mode 2 は図 21 (b) の G 部であることが分かる。

この分析では偏差応力ベースモデルと平均応力ベースモデルに対し合計で 16792 個の応力変化モデルの作成、解析実行、結果読み取りおよび応力影響度算出を自動で行っている。合計計算時間は 48 core を用いた 48 JOB の並列計算処理で 11 時間 16 分であった。計算時間は領域数に比例するので、分析の解像度を下げる、または、分析する領域を限定することにより計算負荷低減が可能である。

4.5 分析結果の検証

分析結果の応力影響度コンター図より、偏差応力については 4 箇所部品に対する合計面積割合が 14.5% の領域を、平均応力については 15 箇所部品に対する合計面積割合が 22.6% の領域をスプリングバック変形の主要な変形原因応力の発生領域として特定した。分析結果の検証を行うために、ベースモデルに対し特定した変形原因応力を除去したモデルのスプリングバック解析を行った結果を図 22 に示す。図 19 (a) のベースモデルと比較し、スプリングバック変形量の最大値が 28.1mm から 4.4mm へ大幅に抑制されており、分析の有効性が確認された。

5. 結 言

日本製鉄が開発したモデルベース開発 (MBD) 技術を用いた自動車開発支援技術について紹介した。剛性評価技術では、NSafe®-SV-space を用いて車体剛性の弱点を特定し、効率的な剛性向上対策を実施する方法を示した。衝突性能予測技術では、NSafe®-MAT を用いて材料の打ち抜き端面からの破断予測を行い、衝突時の材料破断を事前に予測する技術を紹介した。スプリングバック分析技術では、NSafe®-SD-Analyzer を用いてスプリングバック変形の原因

応力を特定し、効率的な金型修正や設計変更を支援する方法を示した。これらの技術により、自動車開発における様々な技術課題に対して有効な解決策を提供し、開発プロセスの効率化、製品の品質向上、コスト削減を実現することができる。今後も、本稿で紹介した技術に加え、他の日本製鉄独自の MBD 技術群も含めて、さらなる技術開発と応用展開を推進し、自動車産業の持続可能な発展に寄与していく。

参考文献

- 1) 経済産業省 製造産業局 自動車課：第 4 回蓄電池産業戦略推進会議。東京、2025-3、経済産業省
- 2) 尾形永：第 49 回自動制御連合講演会。49 (19), 27 (2006)
- 3) 藤川智士：マツダ技報。 (31), 44 (2013)
- 4) 脇谷伸 ほか：工学教育。66 (1), 80 (2018)
- 5) 安徳光郎：日産技報。 (89), 1 (2023)
- 6) 常見祐介 ほか：自動車技術会論文集。51 (5), 789 (2020)
- 7) 河内毅 ほか：自動車技術会論文集。50 (5), 794 (2020)
- 8) 河内毅 ほか：自動車技術会論文集。53 (5), 799 (2022)
- 9) 吉田博司 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集。 (8-04), 1 (2004)
- 10) 吉田博司 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集。 (49-05), 9 (2005)
- 11) 相藤孝博 ほか：日本製鉄技報。 (409), 120 (2017)
- 12) 米村繁 ほか：鉄と鋼。93 (4), 317 (2007)
- 13) 上西朗弘 ほか：新日鉄技報。 (393), 32 (2012)
- 14) 相藤孝博 ほか：日本製鉄技報。 (412), 86 (2019)
- 15) 吉田亨 ほか：新日鉄技報。 (392), 65 (2012)
- 16) 上田秀樹 ほか：新日鉄住金技報。 (409), 108 (2017)
- 17) 高橋学：鉄と鋼。100 (1), 82 (2014)
- 18) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック。第 4 版。東京、薄鋼板成形技術研究会、2017、p.10
- 19) Matschinsky, W.: Road Vehicle Suspension. 1st ed. London, Professional Engineering Publishing Limited, 2000, 359p
- 20) 里村彰 ほか：日本機械学会論文集。91 (941), 1 (2025)
- 21) 和田尚美 ほか：自動車技術会論文集。55 (1), 160 (2024)
- 22) 佐藤健太郎 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集。 (38-13), 1 (2013)
- 23) 米村繁 ほか：自動車技術会学術講演会前刷集。 (46-14), 1 (2014)
- 24) 相藤孝博 ほか：日本製鉄技報。 (412), 86 (2019)
- 25) 相藤孝博 ほか：自動車技術会大会学術講演会講演予稿集 (web)。2025 春季, 107 (2025)
- 26) 田中康治 ほか：ぶらすとす。6 (72), 725 (2023)
- 27) 田中康治 ほか：塑性と加工。60 (705), 283 (2019)



河内 毅 Takeshi KAWACHI
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主幹研究員 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



相藤孝博 Takahiro AITO
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主幹研究員



田中康治 Yasuharu TANAKA
名古屋製鉄所 品質管理部
上席主幹 博士(工学)



阿部雅彦 Masahiko ABE
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主任研究員