

技術論文

プレス機／金型たわみを考慮した高寸法精度金型技術の開発

Development of High Precision Die Technology That Takes into Account Deflection of Press Machine and Die

岩永修一*
Shuichi IWANAGA

田中康治
Yasuharu TANAKA

中川智裕
Tomohiro NAKAGAWA

大岡数則
Kazunori OHOKA

澤靖典
Yasunori SAWA

西村隆一
Ryuichi NISHIMURA

抄 録

環境負荷低減のため、自動車部品への超高強度鋼板の適用拡大が進んでいる。一般に鋼板の強度が高いほどスプリングバックが大きく、寸法精度を確保することが難しい。そこで超ハイテンのスプリングバックを高精度に予測するため、“プレス機や金型のたわみ”に着目した成形解析技術の確立に取り組んだ。たわみを考慮することにより、解析における下死点の金型クリアランスが実機と同等となり、スプリングバック後の形状誤差が小さい高精度な成形解析を実施可能であることを示した。さらに開発したプレス機たわみを簡易的に再現可能な手法(PS-Optモデル)および部品形状誤差を考慮した金型設計手法(デジタル型見込み)を用いることで、最小限の金型修正回数で高寸法精度を実現できることを確認した。

Abstract

To reduce environmental burdens, the use of ultra-high-strength steel sheets for automotive parts is increasing. However, it is difficult to ensure dimensional accuracy with high-strength steel sheets due to their large springback. Therefore, in order to predict springback of ultra-high strength steel sheets with high accuracy, we have developed analysis technology focusing on the “deflection of press machines and dies”. By taking deflection into account in the forming analysis, die clearance at the bottom dead center in analysis becomes the same as that of the actual machine, and it was shown that highly accurate forming analysis with a small shape error after springback can be performed. Furthermore, by using a developed method that can easily reproduce press deflection (PS-Opt model) and a die design method that takes into account part shape errors (digital die prospecting), it was confirmed that high dimensional accuracy can be achieved with a minimum number of die revisions.

1. 緒 言

環境負荷低減のため、自動車にはライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)でのCO₂を含む温室効果ガス(以下、CO₂)の排出量削減が求められている^{1,3)}。LCAでのCO₂排出量削減には、走行時に加えて素材製造および加工段階におけるCO₂排出量削減が重要であるため、車体軽量化やCO₂排出量の少ない素材の適用が重要である。これらの観点から、先進材料であるAHSS(Advanced High Strength Steel⁴⁾)を活用することが、電気自動車(Battery Electric Vehicle: BEV)、内燃機関車(Internal Combustion Engine: ICE)のいずれにおいても、ライフサイクルでの

CO₂排出量を削減する有力な方法である^{5,6)}。このようなCO₂排出量削減、車体軽量化に低コスト化を加えた3軸で価値のある自動車車体部品の開発推進のため、日本製鉄(株)ではホットスタンプを含む超高強度鋼板(以下、超ハイテン)の適用拡大による薄肉化を推進してきた^{7,9)}。しかしながら、一般に冷間プレス成形では鋼板の強度が高いほどスプリングバック量が大きいため、数値解析誤差も増加し寸法精度を確保することが難しい。そのため、超ハイテン部品の寸法精度目標を達成するための金型修正などの生産準備の工数とコストが増大する。このように、生産準備における超ハイテン部品の数値解析精度の向上が重要である。

* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部 主任研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒660-0891

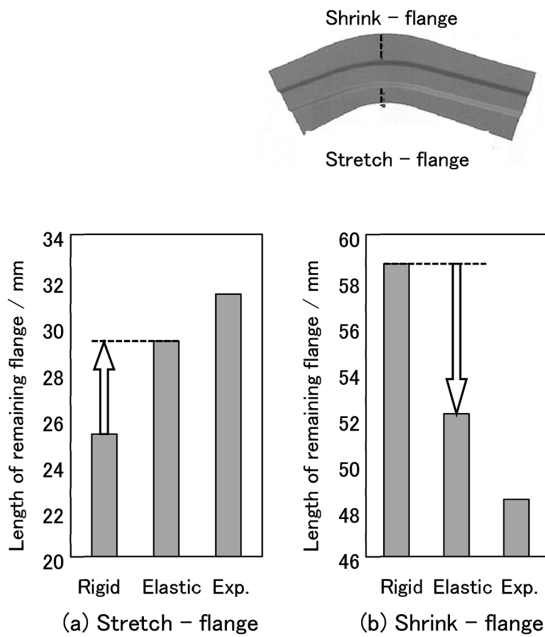


図1 たわみを考慮した成形解析による精度向上事例¹³⁾
Example of accuracy improvement by analysis considering deflection¹³⁾

超ハイテンのスプリングバックを高精度に予測するため、“プレス機および金型のたわみ”¹⁰⁻¹²⁾に着目した。一般的な成形解析では金型を剛体とするが、実機のプレス成形ではプレス機や金型が弾性変形によりたわむため、成形解析誤差が生じると考えられる。図1に金型のたわみを考慮した成形解析による、590MPa級冷延鋼板を用いた湾曲ハット部品のフランジ残り量の予測精度向上事例を示す¹³⁾。伸びフランジ変形部および縮みフランジ変形部のフランジ残り量は、たわみを考慮することで従来の剛体解析よりもそれぞれ実験結果に近づき、解析精度が向上している。このように、たわみ考慮による解析精度向上の取り組みは、比較的材料強度の低い絞り成形等では見られるが、曲げ成形主体の超ハイテン成形では検討事例が少ない。

そこで本報では、まずたわみを考慮した超ハイテンの成形解析技術の確立に取り組んだ。工数低減のため、簡易化したプレス機剛性最適化モデル (Press machine Stiffness Optimization model: PS-Opt モデル) を開発し、解析精度向上効果を検証した。さらに部品形状誤差を考慮した金型設計手法 (デジタル型見込み) を開発した。これら開発手法を用いることで、最小限の金型修正回数で高寸法精度を実現できることを確認した。

2. プレス機のたわみ計測

プレス機や金型のたわみを考慮した解析技術の妥当性確認や、後述する PS-Opt モデルのパラメータ決定には、プレス機のたわみ量を正確に把握することが必要である。そこでプレス機のたわみを計測することとした。

図2に示すルーフクロス模擬成形品の曲げ成形を対象とし、供試材は板厚1.0mmの1470MPa級冷延鋼板とした。

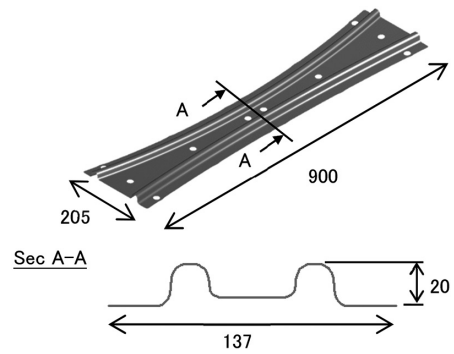


図2 ルーフクロス模擬成形品
Schematic drawing of press formed sample that imitates roof cross

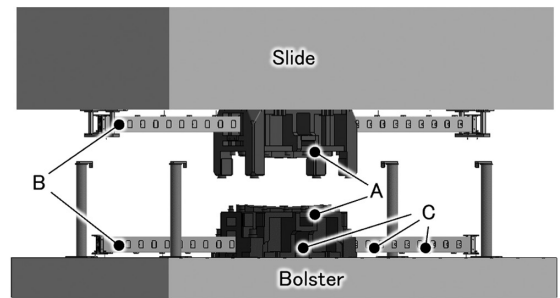


図3 プレス機のたわみ計測
Press machine deflection measurement

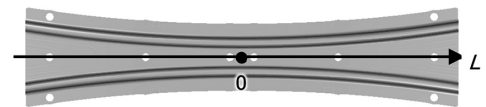


図4 パンチ - ダイ間の金型クリアランス計測箇所
Measurement position of clearance between punch and die

図3に、プレス機のボルスタおよびスライドのたわみ計測装置の外観を示す。計測装置は計測用金型(A)、治具(B)およびレーザー変位計(C)で構成される。レーザー変位計で、スライド面およびボルスタ面と変位計の距離を計測することでプレス機のたわみ量(Δz)を評価した。また、プレス機のたわみ量の計測と同時に金型クリアランスを計測した。図4に示すように、成形品の幅方向中央部の線上Lに沿って、金型クリアランス(CL)を計測した。なお、ボルスタ、スライド寸法等の異なるプレス機2種(A, B)に対して、最大7000kNまでプレス荷重を加え計測を行った。

図5に、プレス荷重7000kNでのプレス機A, Bのボルスタ面のたわみ分布の計測結果を示す。なお、たわみ分布は、図5のボルスタ面に示すプレス機長手方向に沿った線上とした。いずれのプレス機も中央部に近いほどたわみ量が大きい傾向を示した。また、たわみ量はプレス機により大きく異なることを確認した。なお、スライドも同様にたわんでいることを確認した。図6に成形荷重3500kNおよび7000kNでのプレス機Bの下死点における上下金型クリアランスの計測結果を示す。金型クリアランスはプレス機(ボルスタやスライド)のたわみに対応して、中央部が広が

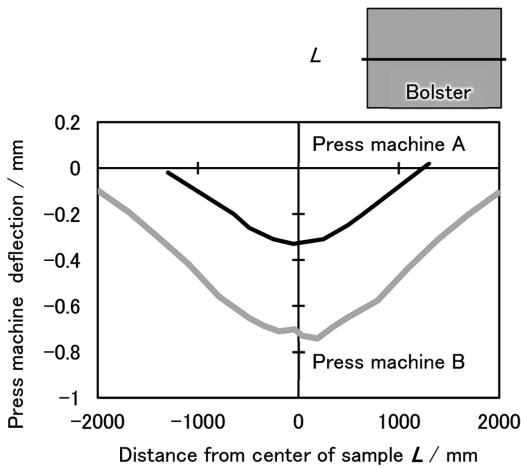


図5 ボルスタたわみ量分布
Distribution of bolster deflection

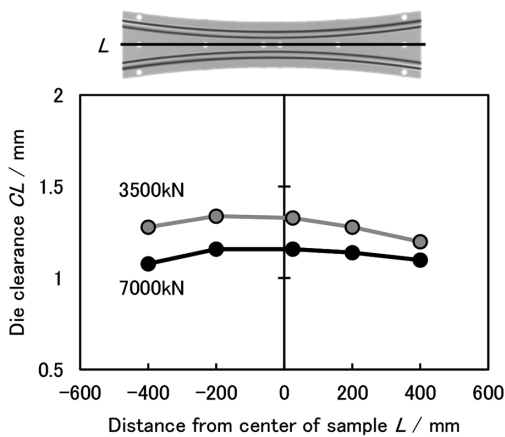


図6 パンチ - ダイ間の金型クリアランス分布
Distribution of clearance between punch and die

るように分布しており、また成形荷重の増加に従い金型クリアランスが小さくなっている。

以上から、プレス機は中央部のたわみ量が最も大きくなるようにたわんでおり、たわみ量には機差があることもわかった。さらにプレス機のたわみは、下死点近傍における成形面の金型間クリアランスにも影響を及ぼしており、寸法精度に及ぼす影響は大きいと考えられる。

3. たわみを考慮した成形解析

実プレス機の成形では、プレス機および金型にたわみが生じていることを述べたが、成形解析は一般的にはたわみを考慮せずに行われる。そこで、たわみ考慮による解析精度向上の検証のため、プレス機および金型たわみを考慮した成形解析を検討した。

3.1 たわみを考慮した成形解析手法

図7に、従来の金型剛体解析モデル(図7(a))、プレス機や金型のたわみを考慮した2種の解析モデル: ①プレス機フル解析モデル(図7(b))、②PS-Optモデル(図7(c))の模式図を比較して示す。プレス機フル解析モデルおよび

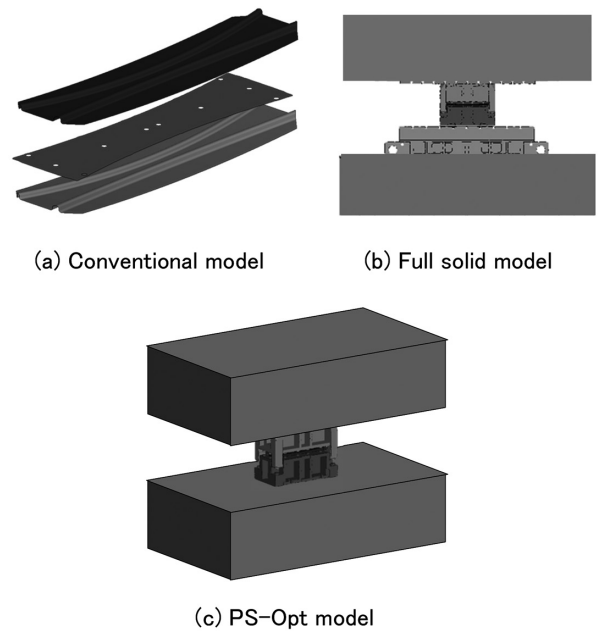


図7 従来の解析モデルとたわみを考慮した解析モデルの模式図

Schematic drawings of conventional and analysis considering the deflection model

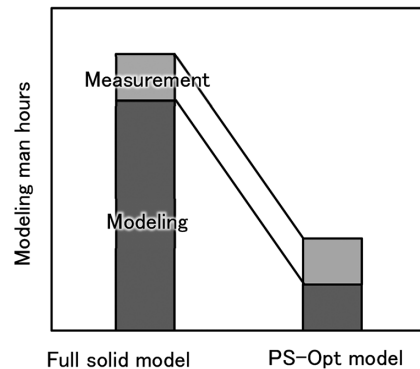


図8 PS-Optモデルによる工数の削減効果
Effect of reducing man hours by the PS-Opt model

PS-Optモデルでは、プレス機および金型を弾性体のソリッド要素、鋼板材料を弾塑性体として扱った。プレス機フル解析モデルでは、プレス機および金型の形状を忠実に再現したが、PS-Optモデルでは、実用性を加味した工数削減のためプレス機を直方体状として、実測したプレス機たわみ量を簡易的にCAE上で再現するモデルとした。図8に、PS-Optモデルでの工数低減効果を示すが、プレス機モデリング工数が大幅に低減可能である。

3.2 たわみ考慮による解析精度の向上

プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルによる解析精度向上効果を検証するため、図2のルーフクロス模擬部品を対象としてプレス機Bでの成形試験および解析を行った。鋼板材料の材料モデルは吉田-上森モデル¹⁴⁾を用いた。実成形品の形状は非接触式形状計測装置(GOM製ATOS5)を用いて評価した。

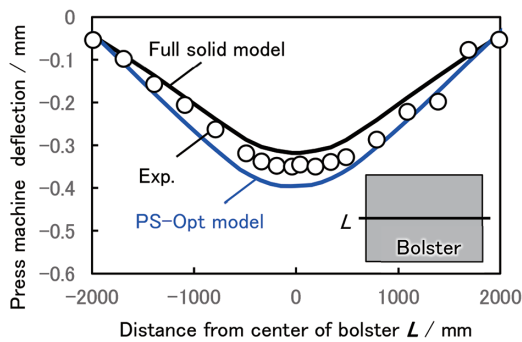


図9 たわみを考慮した解析および実機におけるプレス機たわみ分布の比較
Comparison of press machine deflection distribution between deflection aware analysis and experiment

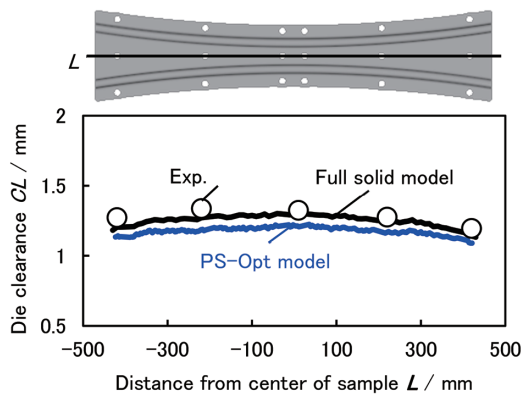


図10 成形下死点における金型クリアランス
Die clearance at bottom dead center of press forming

図9に、荷重3500kNを付与した場合のボルスタの中央部におけるたわみ分布を、プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルでの解析と実験結果で比較して示す。プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルは、実験結果のたわみを精度良く再現できている。さらに図10に、荷重3500kNの場合の上下金型間クリアランスを、プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルでの解析と実験結果で比較して示す。プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルは、実験結果の成形面の上下金型間クリアランスを精度良く再現できている。以上より、プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルともに、寸法精度に関する解析精度向上が期待できる。

図11に、金型剛体解析モデル、プレス機フル解析モデル、PS-Optモデルでの解析結果と実成形品の形状差をコンター図で示す。プレス成形荷重は3500kNとした。また図12に、形状差分布を面積率で示す。従来の金型剛体解析モデルに対して、たわみを考慮したプレス機フル解析モデル、PS-Optモデルは形状差が小さく、解析精度が大幅に向上している。解析誤差0.5mm以内の面積率は、従来手法の36%に対してたわみを考慮することで80%以上と大きく向上している。また簡素化したPS-Optモデルはプレス機フル解析モデルと同等の解析精度を示している。

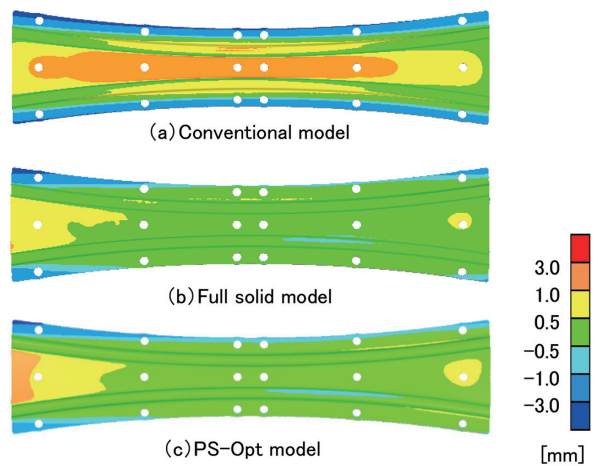


図11 たわみ考慮解析手法による解析精度の向上
Improvement of analysis accuracy by the method considering deflection

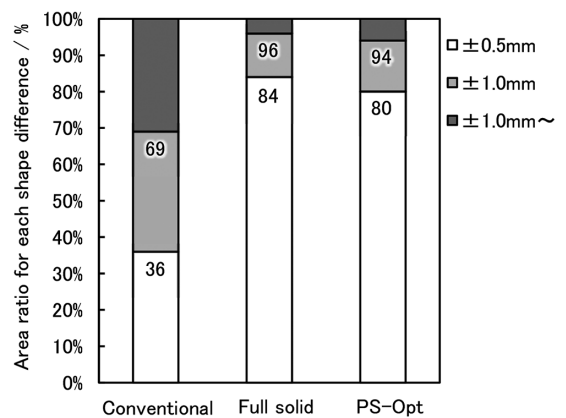


図12 形状差ごとの面積比率の比較
Comparison of analysis accuracy between each model

4. PS-Optモデルとデジタル型見込みによる型製作での有効性検証

前章までに述べたPS-Optモデルの金型製作における有効性を検証するため、PS-Optモデルを用いた見込み金型設計を行い、見込み金型を用いたプレス実験を行った。その際、PS-Optモデルで用いることができ収束性の高いデジタル金型形状を、成形解析結果から半自動的に作成できるデジタル型見込み手法を開発した。

自動車骨格部品を模擬した長尺ハット形状の部品を対象とした。供試材には1180MPa級合金化溶融亜鉛めっき銅板を用い、板厚は1.2mmとした。なお本検討においては、難易度の高い見込み量大の条件(フランジ部の最大スプリングバック量:約14mm)で検討を行うため、スプリングバック抑制対策は行わないこととした。プレス機で初回の見込み金型(1st)でのプレストライ後に、見込み外れを考慮し再度見込み直すことで、修正金型形状(2nd)を導出した。

図13に、1stおよび2ndプレストライによって得られた実成形品形状と目標形状との形状差分布を面積率でそれぞれ

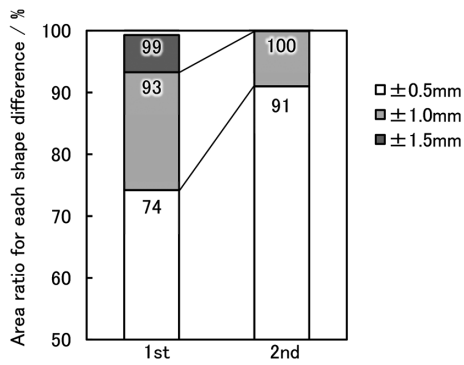


図 13 PS-Opt モデルとデジタル型見込みを用いた型作製による寸法精度改善
Improvement of dimensional accuracy by applying the PS-Opt model and digital die prospecting

れ示す。1st プレストライでは±0.5mm 以内の面積率が 74%，2nd プレストライでは同面積率が 91%，1.0mm 以内の面積率は 100%となった。このように、金型修正 1 回 (2nd) で寸法精度が良好な金型が得られ、PS-Opt モデルとデジタル型見込みを用いることで金型修正工数の低減が期待される結果が得られた。

5. 結 言

LCA での CO₂ 排出削減を追求した超ハイテンの適用拡大のため、“プレス機および金型のたわみ”に着目しプログラミングバックを高精度に予測する解析技術群の確立に取り組んだ。本研究ではたわみを考慮した解析手法を提案し、解析モデルの妥当性や精度向上効果について検討を行った。

(1) 実機で生じているたわみを計測した結果、プレス機は中央部が最もたわみ量が大きくなるようにたわんでおり、たわみ量には機差があることもわかった。さらにプレス機のたわみは、下死点近傍における成形面の金型間クリアランスにも影響を及ぼしていることを明らかにした。

- (2) 解析精度の向上のため、たわみを考慮した成形解析技術である①プレス機フル解析モデル、② PS-Opt モデルを開発した。プレス機フル解析モデルに対して、PS-Opt モデルはプレス機モデリング工数が大幅に低減可能である。
- (3) プレス機フル解析モデル、PS-Opt モデルは、実験結果のたわみおよび成形面の上下金型間クリアランスを精度良く再現できており、また従来工法と比較していずれも解析精度が大幅に向上している。
- (4) 開発した PS-Opt モデルとデジタル型見込み手法を用いた見込み金型設計を行い、見込み外れを考慮し再度見込み直すことで、金型修正 1 回で寸法精度が良好な金型が得られ、金型修正工数の低減が期待される結果となった。

参照文献

- 1) Kubo, M. et al.: JSAE Annual Congress (Spring) - Summarized Paper Issued. 281 (2022)
- 2) 樋渡俊二：表面技術. 73 (8), 390 (2022)
- 3) 畑村耕一：自動車技術会論文集. 50 (2), 564 (2019)
- 4) 中澤嘉明 ほか：日本製鉄技報. (412), 14 (2019)
- 5) 久保雅寛 ほか：自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会講演予稿集. 文献番号 20225281 (2022)
- 6) 久保雅寛 ほか：日本製鉄技報. (425), 21 (2025)
- 7) 樋渡俊二：ぶらすとす. 6 (63), 121 (2023)
- 8) 岡本力：ぶらすとす. 7 (75), 119 (2024)
- 9) 西村隆一 ほか：日本製鉄技報. (412), 14 (2019)
- 10) 中本裕汰 ほか：塑性と加工. 65 (764), 131 (2024)
- 11) 久野拓律：ぶらすとす. 6 (65), 258 (2023)
- 12) 石渡亮伸 ほか：塑性と加工. 56 (651), 311 (2015)
- 13) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック. 第 4 版. 日刊工業新聞社, 2017, p.700
- 14) Yoshida, F. et al.: Int. J. Plasticity. 18, 661 (2002)



岩永修一 Shuichi IWANAGA
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
主任研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



大岡数則 Kazunori OHOKA
名古屋製鉄所 品質管理部 ソリューション室



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)



澤 靖典 Yasunori SAWA
薄板事業部 自動車鋼板営業部
主幹



中川智裕 Tomohiro NAKAGAWA
名古屋製鉄所 品質管理部 ソリューション室



西村隆一 Ryuichi NISHIMURA
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第一部
室長 博士(エネルギー科学)