

(解説)



社会の安全・安心に貢献する構造・材料強度に関する予測・評価技術

内藤純也*¹ (博士(工学))・沖田圭介*² (博士(工学))・高嶋康人*³ (博士(工学))

Predictive and Evaluative Technologies Based on Structural Mechanics and Strength of Materials for Structural Failures to the Safety of Society

Dr. Junya NAITO・Dr. Keisuke OKITA・Dr. Yasuhito TAKASHIMA

要旨

当社製品や当社素材・素形材が使用されている最終製品の性能・品質・安全性の担保・向上に寄与してきたコア技術の一つである構造・材料強度に関する予測・評価技術について、構造力学および材料強度分野に分けて解説を行う。構造力学分野では、自動車車体の軽量化と衝突安全性を両立するための衝突評価技術、構造最適化技術、さらには、カーボンニュートラル社会の実現を見据えたライフサイクルにおける環境負荷低減(LCA)の観点を取り入れた部品提案についても事例を紹介する。材料強度分野では、冶金学的な因子である相変態を考慮した熱処理シミュレーションを活用した変形・組織予測および割れ予測技術を紹介する。また、材料組織設計と力学特性をつなぐマイクロメカニクス分野への取り組み事例を紹介し、新たな付加価値を持つ素材製品の創出、ものづくりの変革への可能性を展望する。

Abstract

This paper explains, divided into the fields of structural mechanics and material strength, predictive and evaluative technology related to the strength of structures and materials. This technology is one of the core technologies that have contributed to ensuring and enhancing the performance, quality, and safety of final products that utilize Kobe Steel's products and materials. In the field of structural mechanics, examples are introduced that encompass collision evaluation technology and structural optimization technology, aiming to balance weight reduction and collision safety in automobile body structures. Additionally, case studies are presented regarding component proposals that incorporate an environmental impact reduction perspective, with a view toward achieving a carbon-neutral society within the product's lifecycle (LCA). In the field of material strength, technology for deformation and microstructure prediction, as well as crack prediction, is introduced, utilizing heat treatment simulations that consider metallurgical factors such as phase transformation. Furthermore, case studies of efforts in the field of micromechanics, which bridge the connection between material structure design and mechanical properties, are introduced. This provides a glimpse into the potential for creating new material products with added value and the possibility of transforming manufacturing processes.

検索用キーワード

構造力学, 材料強度, 軽量化, 構造最適化, 衝突評価, LCA, 相変態, 弾塑性力学, マルチスケール解析, 結晶塑性解析

ま え が き = 当社製品や当社素材・素形材が使用されている最終製品の性能・品質・安全性を担保・向上させるための技術開発は、当社グループのマテリアリティのひとつである「安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献」の中で重要な役割を果たしている。このマテリアリティに関わるコア技術の一つは、「構造・材料強度に関する予測・評価技術」であり、構造物や金属製品の基本性能に関わる「構造力学分野」の技術と耐久性や安全性など、適用される材料との関わりが強い「材料強度分野」の技術に大別できる。

構造力学分野では、当社の線材、厚板製品が使用されてきた長大橋プロジェクト¹⁾に代表される土木構造物を中心に、アルミ板やアルミ押出材などの軽量素材の建築物への適用^{2), 3)}を通して、各種構造性能評価技術の開発を行ってきた^{4), 5)}。これらの性能評価技術は当社グルー

プの(株)コベルコ科研の受託試験研究メニューとしても発展を続けている⁶⁾。また、構造最適化技術の開発にも取り組み、アルミサスペンション製品⁷⁾などの自動車部品の軽量化設計に活用している。

材料強度分野では、建設機械をはじめとする機械製品、鍛造鋼などの素形材製品の疲労寿命設計を通して、数値シミュレーションを活用した応力・ひずみの評価技術⁸⁾を開発してきた。また、当社素材を用いた加工製品状態での破壊問題に関しても、ぜい性き裂の伝播停止特性評価⁹⁾のような破壊力学的なアプローチに加えて、冶金学的な要素を加えた研究開発も行っており、マイクロ組織を考慮した疲労特性予測¹⁰⁾や靱性(じんせい)予測¹¹⁾などの取り組みを破壊特性シミュレーション技術として発展させてきた。これらの強度・破壊に関する要素技術の多くは、力学的なアプローチに冶金学的な要素が加わ

*¹ 技術開発本部 ソリューション技術センター *² 技術開発本部 機械研究所 *³ 技術開発本部 材料研究所

ることによって独自のコア技術となった。当社が素材事業と機械・エンジニアリング事業の両方を有し、その要素技術開発を同時に担う組織があったことがこのコア技術を生み出す一因となっている。

本稿では、構造力学分野のコア技術の活用例として、自動車分野における軽量化設計に関する技術群を、また、材料強度分野のコア技術の活用例として、相変態を考慮した力学評価、破壊力学評価について解説する。また、構造力学・材料強度分野と材料の冶金学的な挙動や組織設計とをつなぐ技術として、マイクロメカニクス分野への取り組み事例とその将来についても展望することとした。

1. 材料特性を活かした構造部材の性能予測技術 (構造力学分野)

構造力学分野の予測・評価技術は、構造物の変形や耐荷力を数値シミュレーションで予測すること、および、その挙動を実験で再現し、安全性を検証することで発展してきた。近年、これらの技術は、主に自動車分野におけるソリューション技術提案で適用を拡大、進展してきており、ここでは自動車分野における適用事例を紹介する。

1.1 自動車部品の衝突評価技術

環境負荷対策として、自動車車体の軽量化と衝突安全性を両立する車体設計を実現することが自動車メーカの継続的な課題であるが、自動車の衝突試験は1回につき車両1台の準備を必要とすることや試験そのものも大がかりな設備が必要である。そのため、車両の試作、衝突試験を実施する前段階として、個々の部品単位で車両衝突試験と同等の変形状態を再現できる試験評価を行いな

がら詳細検討することが有効である。当社では、保有する衝突試験設備を活用した車体全体の衝突性能評価¹²⁾、¹³⁾とフルカー衝突シミュレーションの精度向上に取り組み¹⁴⁾、車体全体の衝突挙動へのノウハウを蓄積しつつ、部品単位での評価試験手法の開発を行ってきた。図1に側突時のフルカー衝突解析事例、部品単位(サイドシル)の衝突評価シミュレーション結果を示す。部品単位で切り出した際の境界条件の与え方を工夫することにより、試作部品での性能評価が可能となり、短時間で高精度な軽量構造の検討環境を実現している。

また、車体の軽量化と衝突安全性を両立させるには、

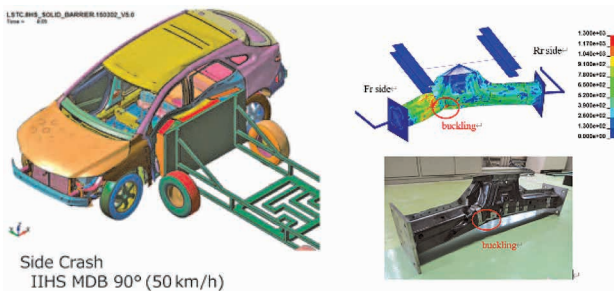


図1 フルカー衝突シミュレーションと部品単位衝突評価事例
Fig.1 Full vehicle crash simulation and example of a part-unit collision evaluation

材料の高強度化が有効であるが、一般的に金属材料は高強度化に伴って延性が低下する性能相反性があるため、衝突時の材料破断を予測する必要がある。当社では、2章で述べる材料強度分野に関連する技術として、衝突時の材料破断挙動と相関の高い機械的特性を分析し¹⁵⁾、数値シミュレーション上で高精度に破断現象を予測する技術の開発¹⁶⁾も行っている。

1.2 自動車軽量化部品の開発・設計

鉄、アルミ両方の素材事業を有する当社では、自動車車体に使用される主要な金属である鋼材とアルミを平等に比較し、お客様の製品ニーズに合わせて材料の選択ができるソリューション提供を目指している。また、軽量化部品設計にあたっては、最適化解析手法を駆使し、製造上の制約条件などに開発者のノウハウや知見を加え、実用性の高い部品開発・設計を行っている。

図2に高強度鋼板製ロールフォームバンパとアルミ押出バンパを対象にパラメトリック最適化解析を適用した性能予測をもとに軽量化設計を実施し、重量と曲げ耐力を比較した事例を示す。図2左のように外形寸法が小さい断面では高強度鋼板とアルミ押出材に重量差異がなく、コスト観点で高強度鋼板が有利になり、図2右のように外形寸法が大きい断面では、軽量化効果はアルミ押出材のほうが高いことを示している。このように、高強度鋼板、アルミ押出材それぞれが有利な断面の外形寸法領域を明らかにしている¹⁷⁾。

図3に軽量化設計を行ったドアのLCA (Life Cycle Assessment) 分析事例を示す。鋼製、アルミ製、鋼と

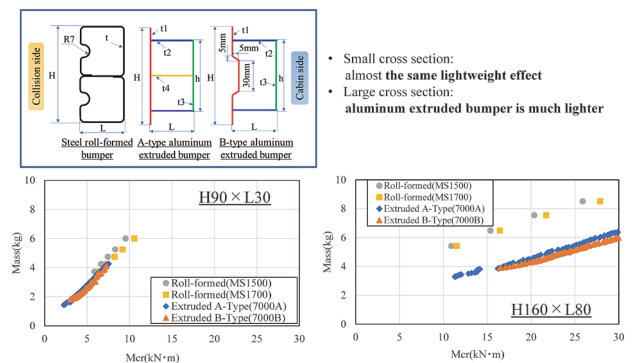


図2 高強度鋼板製バンパとアルミ押出バンパの最適設計事例
Fig.2 Comparison between steel roll-formed and aluminum extruded bumpers with different external dimensions

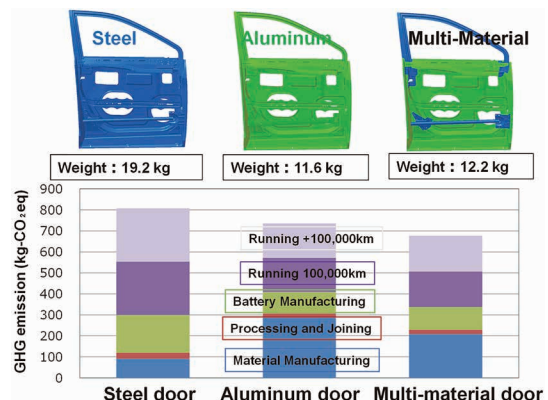


図3 フロントドアの軽量化設計とLCA
Fig.3 Design of light weight door and LCA

アルミを組み合わせたマルチマテリアルの3ケースのフロントドアの設計を行い¹⁸⁾、重量とライフサイクルにおけるGHG (Greenhouse Gas, 温室効果ガス) 排出量の比較を行っている¹⁹⁾。グラフ中の素材製造に着目すると鋼製が最もGHG排出量が少なく、アルミ製のGHG排出量が大きいが、ライフサイクル全体ではアルミ製、マルチマテリアル製が鋼製よりも少なくなり、走行距離によってもその順位は異なる。そのため、今後は、①軽量化効果、②軽量化に要するコスト、これらに加えて③LCA (ライフサイクルでのGHG排出量) を加味した部品開発が必要と考えている。

2. 冶金学的因子を考慮した強度・破壊予測技術 (材料強度分野)

当社のコア技術の一つである金属製品と構造物の耐久性や破壊の予測および評価技術は、安全性と生産性の向上を果たすために活用される。強度や変形は弾塑性力学に基づく数値シミュレーションで予測できるが、熱処理や加工を施す製造工程においては、物性値の逐次変化や相変態が生じるため、それらを考慮することが重要である。当社では、浸炭や偏析、相変態などの冶金学的因子を考慮することで予測評価技術の高度化を進めてきた。また、破壊力学は、製品の損傷許容設計を可能にする技術であり、一般的には疲労き裂進展量の予測や製品に影響しないき裂を許容できるかの診断に利用されている。いっぽう、当社では金属組織制御などの材料工学もまたコア技術の一つとしている強みを活かし、破壊力学と材料工学を融合させて技術開発に取り組んでいる。ここでは、相変態を考慮した独自の強度・破壊予測技術の事例として、焼入れ時の変形・焼割れ防止や連続鋳造後の鋳片置割れ防止について紹介する。

2.1 相変態を考慮した焼入れ時の変形予測、組織予測

当社製品 (クランク軸、圧縮機の大型歯車など) だけでなく、当社素材を使っていただく場合 (自動車用歯車、軸材、ボルトなど) でも熱処理は行われる。熱処理によって不可避免的に生じる変形や残留応力を低減することは、製品品質の向上のために重要であり、そのための冷却プロセスや部品形状の影響把握が不可欠である。しかしながら、焼入れ中に生じる現象は、組織 (相変態)、

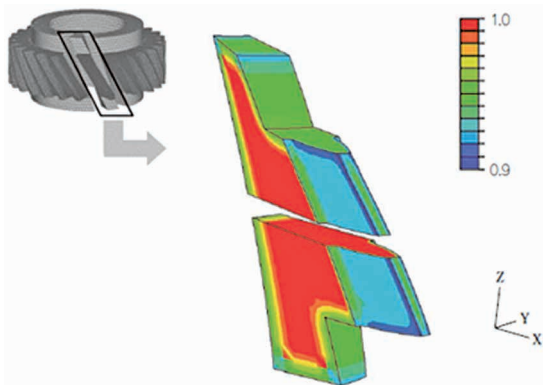


図4 浸炭歯車のマルテンサイト相分率の予測例
Fig.4 Calculated result of martensite volume fraction of carburized gear

応力/ひずみ (力学)、温度 (伝熱) が相互に影響し合う極めて複雑なものとなる。そこで、これらを連成させた熱処理シミュレーションを開発し、社内製品の課題解決や、お客様へのソリューション提案に活用している。

図4は自動車用浸炭歯車に対する適用事例²⁰⁾であり、浸炭シミュレーション²¹⁾と熱処理シミュレーションを組み合わせてマルテンサイト相分率を予測した例である。表面の浸炭層は炭素濃度が高く、マルテンサイト変態温度が低くなるため、表面の浸炭層の方が内部より遅れて変態膨張し、表層に圧縮残留応力が形成される。このように、冷却中の変形・変態の進行挙動を精査することで、熱収縮や変態膨張に起因した熱応力・変形の発生メカニズムが明らかとなり、それを制御するための材料特性、冷却プロセス、部品形状の具体化が可能となる。

上記の事例は、均一材料として扱ってきたが、大型鋳塊を扱う場合には、成分偏析が生じるため材料特性が不均一となり、焼割れの原因となる²²⁾。そこで、新たな取り組みとして、上工程での組織影響を考慮し、偏析起因の局所的な応力も評価可能とすることで、割れ原因究明やその対策に向けた活用の検討を始めている。

2.2 連続鋳造スラブの置割れ予測と折損防止

線材、薄鋼板、厚鋼板といった当社の様々な鉄鋼製品は、連続鋳造したスラブやブルームなどの鋳片から圧延工程を経て製品化している。鋼の強度を高めるために合金元素の添加量を多くすると、鋳造後の冷却時に鋳片の置割れ²³⁾が発生する頻度が増え、製造歩留の低下が課題となる。この割れを防止するには、冷却時に鋳片内部で生じる熱応力の制御が重要と考えられ、徐冷することで古くから経験的に対応していた²⁴⁾。しかし、熱応力を内部残留応力として実測することは極めて労力を要する作業であり、冷却条件に応じて材質 (靱性) も変化することがあるため、定性的に安全側の対策を講じている状

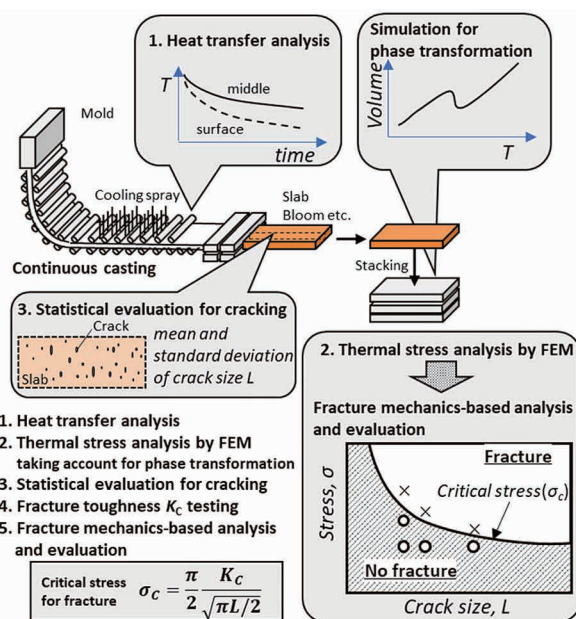


図5 凝固・伝熱・相変態を考慮した応力シミュレーションと破壊力学による連続鋳造材の置割れ予測評価技術

Fig.5 Fracture mechanics-based prediction for brittle fracture of slab account for thermal stress and phase transformation

況であった。鋳片に生じる熱応力の定量予測には、有限要素法による伝熱解析を単純に用いるのみでは適切に評価できず、鋳造した鋳片の冷却中に生じる相変態による発熱や膨張を考慮する必要がある。当社では、独自開発した伝熱・凝固解析ソフト²⁵⁾や連続冷却中の相変態予測²⁶⁾をはじめとする材料工学のコア技術を有しており、これらを活用することで鋳片内部の応力状態の定量化を数値シミュレーション的アプローチで可能とした。連続鋳造時の温度履歴を計算し、さらに、鋳造機を通過して切断された鋳片の放冷や段積み保管中の温度変化を伝熱解析しながら変態予測モデルを組み合わせる相変態挙動を考慮し、鋳片内部の応力状態を計算した。これにより、置割れに関与する熱応力を定量的に扱うことができるようになった。

また、置割れは鋳片内部の微細な割れ（固液界面の凝固割れで、液相側から溶鋼が流れ込むため実態は割れでは無いが偏析している部分）を起点として生じる事実をふまえ、内部割れの発生頻度を統計解析し、その大きさに応じて破壊力学的アプローチで置割れの発生リスクを評価する技術²⁷⁾を構築した。この技術（図5）では、前述の相変態を考慮して数値シミュレーションで求めた内部応力 σ_c と、内部割れ長さ L や鋳片の破壊靱性値 K_c の関係を破壊力学で定式化し、それと実験結果が対応することを検証できている。置割れが発生しない冷却速度など管理すべき条件を明確化できる。このような技術は、鋳片の内部割れを起点とした置割れ防止だけでなく熱延開始時の表面からの孔空き防止にも活用でき²⁷⁾、当社製品の製造歩留の改善や安全で合理的な製造工程管理を実現するに至っている。

3. 材料の微視構造を考慮した材料モデリング技術（マイクロメカニクス分野）

材料のマクロな機械的特性は、マイクロな金属組織から成り立っており、また、巨視的な破壊現象も元をたどれば、材料の微視的な欠陥からのき裂を起点としている。したがって、より複雑化する力学的な技術課題や多様化する材料ニーズに対する対応力、本質的課題解決に向けて、材料内部の微視組織を考慮した材料モデリング技術の高度化が必要である。そこで当社では、材料変形の不均一性を考慮した結晶塑性解析やマイクロとマクロをつなぐマルチスケール解析に取り組んできた。ここでは、それぞれの適用事例を紹介するとともに、今後の取り組みについて触れる。

3.1 塑性加工における結晶塑性解析の適用事例

結晶塑性理論に基づく力学解析の特徴は、結晶構造の異方性を直接的に扱うことが可能であり、巨視的塑性応答と材料の微視的構造変化の関係を物理的意味が明確な力学量で記述できることである。軽量化に向けてますます厳しくなる展伸材の加工性スペックを満たす材料開発、あるいは成形条件の適正化に向けて、現在も様々な荷重経路に対応可能な結晶塑性構成則の高度化に取り組んでいる²⁸⁾。

ここでは例として、けい素鋼板の単結晶体の引張試験

について紹介する^{29), 30)}。引張軸と結晶方位のなす角 α を変えて引張試験したときの変形状態に関する実験結果と計算結果の比較を図6に示す。 $\alpha=90^\circ$ での板幅方向の局所変形、 $\alpha=0^\circ$ での板厚方向の局所変形、 $\alpha=45^\circ$ での斜め方向のせん断帯の発生という、それぞれの特徴を極めてよく表すことができている。本技術は、自動車パネル用の6000系アルミ板材において、成型加工後の表面に発生するリジングマークと呼ばれる模様への集合組織の影響評価や変形機構の解明に活用され、外観品質の向上に貢献している³¹⁾。

3.2 材料の微視構造を考慮したマルチスケール解析

本手法の特徴は、各マイクロ組織の機械的特性を入力データとして計算することで、マクロな機械的特性を予測するだけでなく、材料内部で生じるミクロ的な力学現象まで分析できることである。当社では、金属組織の微視構造を数値化してモデリングする手法、および均質化弾塑性理論に基づくFEMコードを独自に構築している。ここでは、代表的な高張力鋼材のDual-phase鋼（以下、DP鋼）に対して、マルチスケール解析を適用し、マイクロ構造内の力学挙動を評価した例³²⁾を紹介する。DP鋼はフェライト相とマルテンサイト相から構成される複合組織を有しており、各単相での引張試験結果を元にシミュレーションしている。図7(b)は伸び率20%時における相当塑性ひずみ分布を示しており、硬いマルテンサイト相が密集する領域近傍で、フェライト相に塑性ひずみが集中していることが分かる。また、マルテンサイト相にも数パーセントオーダーの塑性ひずみが生じており、単相材では極低ひずみで破断する同相でもDP鋼内では高い変形能があることが示唆された。このように、各相の機械的特性のみならず、それらの組織形状・サイズや分散状態などの相互作用の分析・評価が可能となるとともに、その結果として現れるマクロな機械的特性への影響も考察可能となる。これにより、所望のマクロな機械

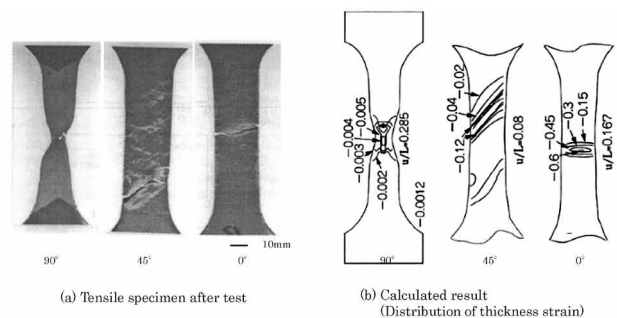


図6 けい素鋼板に生じる不均質変形
Fig.6 Localized strain in tensile specimen of silicon steel sheet

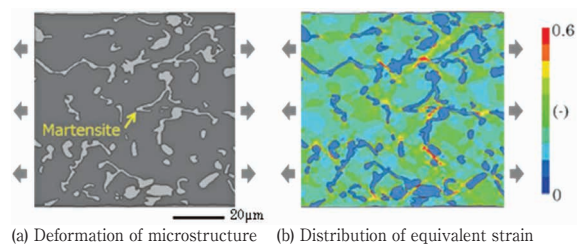


図7 ミクロ組織における変形状態（伸び率20%時）
Fig.7 Deformation state of microstructure (at 20% elongation)

的特性を得るためのマイクロ構造を推定できるようになり、今後は組織制御技術と組み合わせた材料開発への適用を考えている。さらに、本技術の特徴を活かし、初期欠陥を含む素材マトリックスのマイクロ損傷挙動や、塑性加工中における介在物の変形・破壊挙動に関する解析・評価、およびそれによる素材内部品質の向上への適用検討も開始している。

むすび＝本稿では当社のコア技術の一つである「構造・材料強度に関する予測・評価技術」を、構造力学分野、材料強度分野に分けて各要素技術を活用例紹介とともに解説した。さらに、冶金学系のマイクロな領域とマクロな力学領域をつなぐマイクロメカニクス分野への取り組みについても述べた。マイクロメカニクス分野のコア技術に関しては、他のコア技術であるナノスケールの物理分析解析技術、さらには、マテリアルズインテグレーション³³⁾との親和性が高く、ナノスケールからマクロスケールをつなげる横断的な予測・評価技術へ発展させることで、構造材における新しい材料コンセプト創出につながっていくと考えている。また、製造工程もつないだプロセスシミュレーションへの展開も構想しており、さらなる品質安定化や生産性向上も期待できる。新たな付加価値を持つ素材製品の創出、そのものづくりを通して、安全・安心な社会の発展に持続的な貢献を続けていきたい。

参 考 文 献

- 1) 穂山正幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.2, p.2-7.
- 2) 橋村 徹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.1, p.73-76.
- 3) 杵淵雅男ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.1, p.81-86.
- 4) 中川知和. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.3, p.44-49.
- 5) 山田岳史ほか. 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集. 2008, p.231-236.

- 6) コベルコ科研. 事業概要. 機械・構造物分野一覧<https://www.kobelcokaken.co.jp/contract/machine/list.html>. (参照2023-06-08)
- 7) 細井寛哲ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.84-89.
- 8) 沖田圭介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.12-15.
- 9) 田村栄一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.6-10.
- 10) 横幕俊典ほか. 日本機械学会論文集 A編. 1997, Vol.63, No.614, p.2114-2121.
- 11) 井元雅弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.31-36.
- 12) Watanabe, K. at el. SAE international, 2006, SAE Technical paper. 2006-01-1403.
- 13) 船田健介ほか. 自動車技術会論文集. 2022, 第53巻3号, p.535-540.
- 14) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 15) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.69-75.
- 16) 鎮西将太ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.76-81.
- 17) 史棟 勇ほか. 自動車技術会論文集. 2022, Vol.53, No.4, p.796-801.
- 18) KOBELCOアルミ/鋼マルチマテリアル軽量ドア. <https://www.youtube.com/watch?v=GtsQNBSPPEw>. (参照2023-06-08)
- 19) 江崎澄代ほか. 第18回日本LCA学会研究発表会. 2023, 2-B3-02.
- 20) 沖田圭介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.70-74.
- 21) 野村正裕ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.1, p.28-31.
- 22) 有川剛史ほか. 日本機械学会論文集. 2017, Vol.83, No.845, p.16-00442.
- 23) 山田利郎ほか. 鉄と鋼. 1982, Vol.68, No.11, p.S884.
- 24) 株式会社神戸製鋼所. 三宅和郎. 高張力鋼の連铸片の置き割れ防止方法. 特開2007-83274 (P2007-83274A). 2007-04-05.
- 25) 藪 忠司ほか. R&D神戸製鋼技報. 1987, Vol.37, No.4, p.99-100.
- 26) 村上俊夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.13-17.
- 27) 株式会社神戸製鋼所. 藪内 惇ほか. 高張力鋼のスラブの製造方法. 特開2023-47054 (P2023-47054A). 2023-04-05.
- 28) Hama, T. at el. Materials Transactions. 2021, Vol.62, No.8, p.1124-1132.
- 29) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.1, p.47-51.
- 30) 北川 浩ほか. 日本機械学会論文集A編. 1995, Vol.61, No.590, p.2259-2263.
- 31) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.39-42.
- 32) 黒澤瑛介. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.8-12.
- 33) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」<https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html>. (参照2023-06-08)