

技術解説

くらしと移動を豊かにする鋼材(自動車分野)

Steels and Their Applications for Life Satisfaction and Transportation

高 橋 学*
Manabu TAKAHASHI末 廣 正 芳
Masayoshi SUEHIRO越 智 達 朗
Tatsuro OCHI宮 崎 康 信
Yasunobu MIYAZAKI

1. はじめに

国内における粗鋼生産量変化が国内自動車生産台数に対応する形で増加した事実からも容易に判断できる様に、これまでの鉄鋼業の発展は自動車産業の発展、拡大と切り離して考えることはできない。

この30年程度を振り返る時、自動車分野における大きな変化の第一には燃費向上への強い要求があげられる。1970年代に米国で設定された企業平均燃費規制であるCAFE(Corporate Average Fuel Economy)を代表として、当初は石油ショックを契機とした省エネルギーの観点から、また、後には地球温暖化問題と連動しながらのCO₂排出削減を目的の一つとして燃費改善の為の技術開発が進められてきた。

この技術開発を一層加速させたのが1994年に評価試験が義務付けされた車体の衝突安全性に関する規制強化である。車体の衝突安全性向上の為には、骨格構造を中心とした構造最適化と同時に使用される素材の高強度化、厚肉化が必要であり、車体重量の増加と共に燃費を悪化させる結果となる。この相反する要求に応える為の技術開発が近年の自動車業界の最重要課題の一つと言える。第二の変化は1970年代前半から施工されて、段階的に強化されてきた環境対応の為の各種規制への対応である。NO_x、SO_xに代表される排ガスや微粒子物質による大気汚染に対する規制、Pb等に代表される化学物質に関する規制、加速・定常走行時の騒音に関する規制等、上記CO₂排出削減以外にも各種環境問題への技術的対応が進められてきた。またこれら2点に加え、製造業の共通課題である製造コストの低減も継続的に検討されている。

この30年程度の間を振り返り、①燃費向上と衝突安全性向上の両立、②環境調和性の向上、及び、③製造コスト低減(含む工期短縮)技術の3点をキーワードとして自動車分野対応技術開発の概要と今後の方向性について述べる。

2. 自動車分野における新日本製鐵の取組み状況

2.1 燃費向上と衝突安全性の両立に対する取組み

上述のように、自動車の燃費向上と車体の衝突安全性向上は相反する。ここでは、この相反する要求を満足するための材料メーカーからのアプローチを概説する。

2.1.1 衝突安全性の評価技術

車体全体の衝突特性は、最終的には実車衝突実験によって判断されるが、各種改善効果を把握するためには、車体全体や選択された部分構造、部品単体の変形特性を評価する必要がある。これらをすべて実験的に行うことはコストや時間的な制約から合理的では無く、一般的には有限要素法(FEM: Finite Element Method)をベースとした計算機シミュレーションによって評価される。図1には前突時等に認められるボックス構造部品の座屈変形を模擬した角筒圧潰時の荷重-変位関係の計算結果と落重試験によって測定された実験結果の比較を示したり。

荷重-変位曲線から得られる一定距離変形時に吸収されるエネルギーの大きさによって、その部品や材料の衝突エネルギー吸収能が判断される。この様なFEMでの評価を行う場合に最も重要なのが実際の材料に対応した精度の高

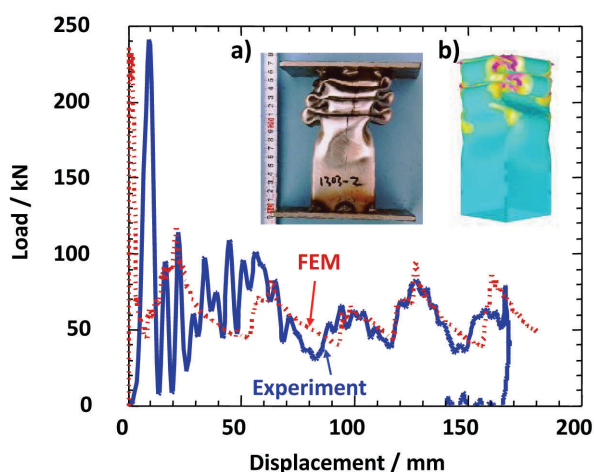


図1 角筒圧潰のFEM計算と実験結果の比較

* フェロー 技術開発本部 鉄鋼研究所 薄板材料研究部長 Ph.D. 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

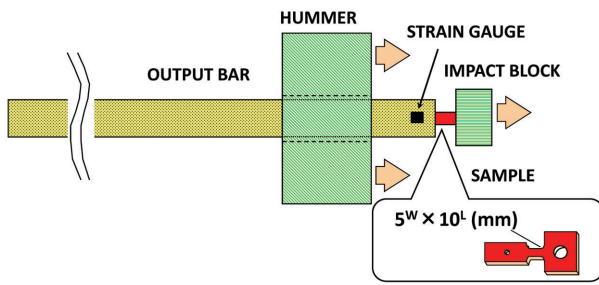


図2 one-bar式高速引張り試験装置

い材料構成式の適用である。材料構成式の形式は種々提案されており、日本鉄鋼協会の“自動車用高張力鋼板の高速変形挙動に関する共同研究会”（1997年4月～2001年2月）でも議論され、最終報告書²⁾にまとめられている。FEM計算で比較的良好に用いられる表現が（1）式に示す Cowper-Symonds型の経験式³⁾であり、ひずみ速度を変化させた実験結果から個々の材料に対するパラメーター F , ϵ_0 , D , n^* , P が決定される。

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = F \cdot (\epsilon + \epsilon_0)^{n^*} \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \right\} \quad (1)$$

角筒の圧潰の場合、ひずみ速度はコーナー部で最大で1000/s程度にも及ぶため、骨格構造に使われる薄鋼板では高速での変形挙動を実験的に調査することが重要である。図2にはこの目的で導入された高速引張試験装置を示した。車体に適用される各種材料に対し、プレス加工時の加工硬化の影響やその後の焼付硬化の影響、更には溶接部の変形挙動も含めたデータベースを構築し、衝突シミュレーションの精度向上に貢献している。

2.1.2 燃費向上と衝突安全性の両立

自動車の燃費を決定している因子は非常に多岐にわたっている。エンジンの効率向上や新しい動力システム（HEVやEV等）の導入等に加えて、車体重量の軽減は全ての場合で燃費向上に繋がると考えられる。このことから、アルミニウム合金や樹脂等の低比重材料の適用拡大に加えて、鋼材の高強度化による薄肉化の検討が進められてきた。衝突特性が主に骨格構造部品によって決定されるため、これらの部品を中心に高強度化の検討が進められてきた。

前突や後突では骨格構造部品が塑性変形することによって、衝撃エネルギーを熱エネルギーに変えて吸収し、乗員への負荷を低減する。また側突の場合には塑性変形領域が限られるために、骨格構造を極力剛にすることで、塑性変形量を制限する。従ってこれら2つの特徴的な部品群には異なった高強度鋼板が適用される。ここで重要なことは、これらの部品が巧みに車体の空間を埋めながら機能するために、3次元の複雑な形状が選択されており、結果として非常に良好なプレス成形性が要求されることである。

鋼板のプレス成形性は、塑性異方性（ r 値）によって支

配される深絞り成形性、延性（加工硬化率）に依存する張出し成形性、局部変形能と対応する伸びフランジ成形性、及び曲げ性の4つの変形様式で議論することが出来る。鋼板の高強度化は一般的にはこれらすべての成形性を劣化させる為に、部品設計の形状自由度が低下する。従って、成形性を劣化させない鋼板の高強度化が強く要求された。高強度鋼板では一般的に r 値を向上させることが困難であるため、特に延性と伸びフランジ特性、曲げ性を対象に特性の向上が検討されてきた。

前後突時に必要な塑性変形による衝撃エネルギーの吸収能は鋼材の強度上昇と共に向上するが、一方では低強度ほどプレス成形性が良好であるため、プレス時には柔らかく、使用時には硬くなる鋼板、即ち強度のひずみ速度依存性が大きな鋼板が望ましい。鋼板強度のひずみ速度依存性は鋼板強度の上昇と共に低下する。この傾向の中で、変形の主体を柔らかいフェライトで分担する複合組織鋼は、析出強化鋼等の従来鋼に対して大きなひずみ速度依存性を示すことが分かった。軟質フェライトと硬質第二相の複合化は延性の向上にも有利であることから、複雑な形状を有する前後突対応部品に適していると言える。

この様な複合組織鋼板の代表がフェライト+マルテンサイトのマイクロ組織からなるDP（Dual Phase）鋼であり、更に延性を向上させたものが、フェライト、ベイナイトに残留オーステナイトを分散させた低合金TRIP型複合組織鋼板である。図3にはプレス成形性の指標の一つである延性と角筒圧潰時の吸収エネルギーの関係を示した⁴⁾。複合組織鋼板は良好な延性と衝撃エネルギー吸収能を示すことが分かる。この良好な衝撃エネルギー吸収能は上述の軟質フェライトの存在と共に、大きな焼付け硬化特性（プレス成形により予ひずみを加えた後に180℃で20分程度の塗装焼付けを行うことによって強度が上昇する現象）、及び低合金TRIP型複合組織鋼板では高速変形時の残留オーステナイトからマルテンサイトへの変態促進にも依存している。

一方、側突対応部品は極力高強度化することが望ましい。この為、780、980更には1180MPa級の超高強度鋼板が開発されている。これらの鋼板では延性と共に切断端部

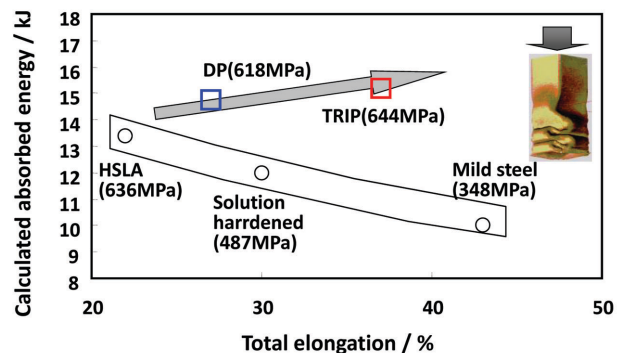


図3 角筒圧潰エネルギー吸収量と鋼板延性の関係

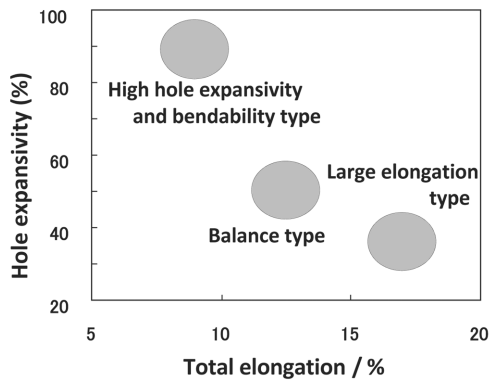


図4 延性と穴広げ性バランスが異なる980MPa級高強度鋼

の成形性や曲げ性等を支配する良好な伸びフランジ成形性が要求される。伸びフランジ成形性向上の為にはミクロ組織の均一性が重要とされており、複合組織の組織間硬度差を小さくすることが有効で、延性向上と相反する。この為、図4に示すように延性と伸びフランジ成形性(指標として穴広げ性で表示)の特性バランスが異なる鋼板のメニュー化を行い、部品形状に応じた鋼板の選択を推奨している⁵⁾。

また、これら高強度鋼板がベルトラインよりも下の部品に適用される場合には高い耐食性が要求される。この要求に応えるために、上記各高強度鋼板に合金化溶融亜鉛めっきを施したメニューも実用化が進んでいる⁶⁾。

側突対応やバンパー等で更に高強度化が要求される場合には、オーステナイト域まで加熱した後に金型による焼入れを利用して高強度化するホットスタンプ技術も適用されている⁷⁾。ホットスタンプ技術は1500MPaという非常に高い強度を達成することが可能である。この成形法では成形後の硬度変動を小さくするために、部位による冷却速度の違いが影響しないような成分設計がなされている。また、金型内で拘束された状態でマルテンサイト変態が進行するために、残留応力が解放され、強度の割には非常に高い形状凍結性が担保されることもメリットの一つとなっている⁸⁾。ホットスタンプ時の成形解析技術の開発も進められている⁹⁾。この成形解析では、鋼板の機械的特性や摩擦係数等の温度依存性、金型との間の熱伝達等が考慮されている。

2.1.3 高強度鋼板適用のためのアプリケーション技術

高強度鋼板を衝突対応部品に適用するためには、高度なプレス成形技術と接合技術が要求される。

鋼板の高強度化による成形性の低下を補償するために、鋼板の延性や伸びフランジ成形性を向上させる努力が継続されているが、高強度化による形状凍結性は変形応力とヤング率に依存しているため、その劣化を材質で改善することは困難である。

形状凍結不良は、1) 角度変化、2) 壁反り、3) 3次元的不良(ねじれ、稜線反り)、に大別することが出来る。1)、2) は直線形状の単純なハット成形でも発生するが、3) は複雑な3次元形状で発生し、パネル面内の応力不均一に起因する。単純曲げの角度の戻りを示すスプリングバック量は鋼板強度の上昇と共に大きくなる。また、壁反りは鋼板の曲げー曲げ戻し加工履歴に起因するため、例えばプレス成形時に張力を付加することで低下する。

形状凍結性の改善技術としては、1) クリアランスやダイ肩Rを制御することでクリアランス内で逆曲げを利用する方法、2) プレス成形後期にBHFを高くする可変ビード法等による縦壁の張力付与、3) 決め押しによる板厚方向応力の付加の適用、4) 引張り強度が低下する温間での成形、等に加え、5) 成形方法としてフォーム成形やフォームドロー成形が提案されている。フォーム成形はブランクホルダーによるしわ押さえ荷重を加えない成形であり(図5)¹⁰⁾、ダイ肩での曲げ変形量を小さくできるために壁反りを押さえることが出来る。但し、しわ発生の危険性というデメリットもある。一方、フォーム成形の下死点手前で張力を加えることによって縦壁部に張力を加えるのがフォームドロー成形である。通常の絞り成形(ドローベンド成形)と上記2つの成形法によるハット部材の幅開き量の比較を図6に示した¹⁰⁾。成形方法を工夫することによって高強度鋼板でも比較的良好な形状凍結性が達成できることが分かる。

衝突変形時に期待通りのエネルギー吸収能や変形特性を

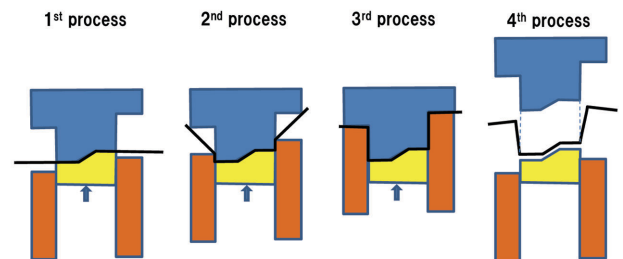


図5 バンパーモデル型フォーム成形過程

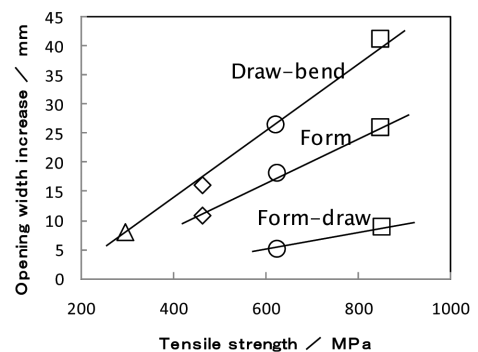


図6 幅開き量に及ぼす加工方法の影響

示すためには、部材そのものと同時に接合部の健全性が重要となる。自動車車体組立工程ではスポット溶接を用いる場合が多く、その他、レーザー、接着、機械接合及び足回りなどではアーク溶接等が適用される。高強度化に伴いスポット溶接部剥離強度が低下することが懸念されるが、これには、高強度化に伴う炭素当量の増加と共に、部品形状劣化の影響等も考慮する必要がある。衝突時のスポット溶接部強度予測については後述するが、接合を点溶接からレーザーによる連続溶接にすることにより、角筒形状部品の軸圧潰時のフランジ部変形挙動を制御することが可能であり、その結果衝突エネルギー吸収能を向上させることも可能である¹¹⁾。

2.1.4 その他の軽量化への取組み

衝突特性に貢献する骨格構造部品以外にも軽量化による燃費向上を目指す活動がなされている。例としてシャーシー・足回り部品での軽量化の取組みについて紹介する。

足回り部品は比較的板厚の厚い熱間圧延鋼板が適用される。これらの部品には延性と伸びフランジ成形性の両立が強く要求される。また、車重を支えつつ走行時に種々のモーメントを受けることから重要保安部品として高い疲労耐久性と、厳しい環境の中での腐食耐久性も要求される。

シャーシー系部品には440MPa級鋼板が広く採用されているが、ホイールディスクの軽量化に貢献した590、780MPa級のDP鋼や、伸びフランジ成形性を高めた540MPa以上の強度を持った熱間圧延鋼板を開発し、実用化が進んでいる。直近では低炭素化した鋼で固溶強化等によって各組織間の硬度差を少なくしたフェライト+ペイナイトの複合組織を利用した780MPa級の熱間圧延鋼板が開発され、ローアームへ適用されている。この鋼は良好な延性と伸びフランジ成形性のバランスを有するのみならず、強度上昇に見合った疲労特性の向上も確認されている¹²⁾。

性能向上や軽量化が期待されるスチールラジアルタイヤではスチールコードの高強度化が重要な役割を担っている。1970年当時に0.2mm径で2800MPa程度だったスチールコードは1998年頃には4000MPaにまで達した。この極限までの高強度化には、1) パテント後のパーライト組織の組織制御による強度と加工硬化特性の両立、2) 表面潤滑性の向上や工具形状等の最適化による伸線加工量増、3) 均一変形促進による伸線時加工硬化率の増加、等が必要であった。また前提として、中心偏析や非金属介在物を極限まで低減した高纯净度鋼製造技術を確認した。この結果、デラミネーションの無い延性に優れた0.2mm径の4000MPa級スチールコード製造技術を確認し、カーカスコードとして実用化した¹³⁾。

弁ばねはエンジンの吸気・排気を調整する弁を動かす精密ばねであり、エンジンの小型化・軽量化を図るために、高強度化が強く求められている。弁ばねを高強度化するた

めには、非金属介在物の形態制御・微細化、および窒化による表面硬さの増加とショットピーニングによる圧縮残留応力の付与がポイントである。窒化処理を効果的に行うためには、窒化温度においても内部硬さが軟化しない、いわゆる軟化抵抗を有した鋼材組成とすることが必須であり、そのためにCr、V、Moを適量添加した鋼材が開発されている¹⁴⁾。開発鋼は、従来の高強度弁ばねよりもさらに35%以上の疲労強度の向上を実現している¹⁵⁾。硬さを上げることでより疵に対する感受性が増大するために延性向上などの対策が重要である。中間工程での過冷組織抑制技術などを適用することにより、高強度弁ばね用鋼の製造を実現している。

変速機などの駆動系部品として用いられる歯車は、自動車重量の大きな比率を占めており、AT、CVTなどの変速機の構造変革に際して、高強度化による軽量・コンパクト化の指向が強い。歯車に必要な強度特性は、歯元曲げ疲労強度と歯面強度(ピッチング強度)の二つである。浸炭材の曲げ疲労強度は、浸炭時に形成される表面異常層(粒界酸化層および不完全焼入れ層)の影響を受けるため、鋼中の酸化傾向の強いMn等の元素の低減が高強度化に有効である。一方、ピッチング強度を向上させるためには、Cr添加などによる焼戻し軟化抵抗の増加が有効である。このような考え方に基づいて、優れた歯元曲げ疲労強度とピッチング強度が得られる高強度歯車用鋼が開発されている^{16,17)}。ショットピーニングによる圧縮残留応力の付与は歯元曲げ疲労強度の向上法として有効である¹⁸⁾。図7は、高強度歯車用鋼に、近年普及しつつあるエアノズル方式によるハードショットピーニングを施した実歯車について、一歯曲げ疲労試験を行った結果である。現行材の通常ショットピーニング材に比較して、高強度歯車用鋼のハードショットピーニング材は、30%を超える極めて高い歯元曲げ疲労強度を得ることができている¹⁶⁾。

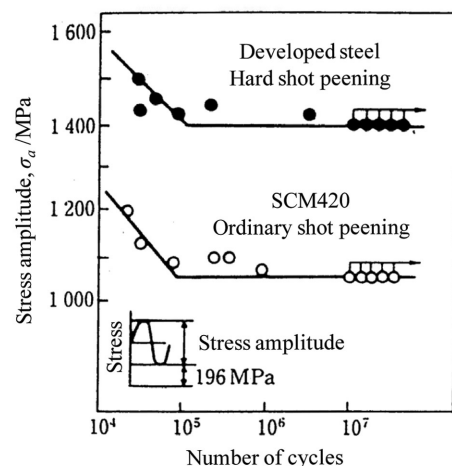


図7 高強度歯車用鋼ハードショットピーニング材の一歯曲げ疲労特性

2.2 環境調和性向上への取組み

環境対応の為の各種規制への対応として、排ガス、規制化学物質不使用への取組みの例を述べる。

2.2.1 排ガス規制対応

排ガス規制では排出される一酸化炭素、窒素酸化物、炭化水素類、黒煙、粒子状物質等の大気汚染物質が制限される。

自動車には排ガスによる大気汚染を緩和する目的で触媒コンバータと呼ばれる排ガス浄化システムが搭載されており、炭化水素と一酸化炭素を二酸化炭素と水に変え、 NO_x 類とを窒素と酸素に変える。このコンバータの触媒担体にはセラミックス担体とともにフェライト系ステンレス鋼箔を用いたメタル担体がいられる。メタル担体は熱衝撃性が小さく、熱容量が小さいという特徴を持つ。高い高温特性や耐酸化特性が要求されるコア用のステンレス鋼としてFe-20%Cr-5%Al（重量%）を開発し、更に酸化被膜の密着性を向上させた商品を実用化している¹⁹⁾。

排気系の他の部位にも種々のステンレス鋼が用いられている。騒音防止にも役立つ、燃焼効率向上の為の高温排ガスにも耐えるエキゾーストマニホールド、触媒コンバータの前方に位置するフロントパイプやフレキシブルチューブ、後方に位置するセンターパイプとメインマフラーに高温特性と耐食性に優れたフェライト系ステンレス鋼や加工性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼が適用されている。

2.2.2 規制化学物質対応

環境汚染や人体への有害性を考慮した各種化学物質の使用制限が進められている。その代表例がPbである。

従来燃料タンクには使用上の特性バランスに優れたPb-Sn合金めっき鋼板が主に用いられていた。燃料タンクに要求される特性は、1) タンク内面のガソリン耐食性、2) タンク外面の塩害耐久性、3) 半田や抵抗溶接性、及び4) 複雑形状へのプレス成形性である。これらの要求に対し、従来材と同等の製造性を有し、より優れた耐久性を示す溶融Sn-Znめっき鋼板を開発した²⁰⁾。ここではめっき中にZnを微細に分散させることでSnの延性と耐食性、Znの犠牲防食性を兼備させる為に、共晶組成以下の7～9重量%Znで設計している。また、低コスト化を指向するために、溶融ZnめっきであるGIをベースに、耐劣化ガソリン性が良好なNi電気めっきを施した2相めっきも開発した。この鋼板は低負荷腐食環境でPb-Snめっきとほぼ同等の特性を示すことが確認されている²⁰⁾。

Pbを用いて向上させていた別の特性例が被削性である。被削性を向上させる元素としてはBiやSが提案されているが、疲労特性や鍛造性等の課題があり、必ずしも十分な代替元素とは言えなかった。これに対し、形態とサイズを

制御したMnSを利用することによってPbを含まず、他の機械的特性にも優れた快削鋼を開発した。Sを従来鋼の0.02重量%レベルから0.15重量%程度まで増加させ、MnS粒子のアスペクト比やサイズを変化させずその粒子数だけを増加させることに成功した結果、例えば深穴ドリル穿孔にて従来材と同等以上の工具寿命と切削抵抗を達成し、引張り特性や疲労特性も従来鋼と同等である高強度鋼材を実用化した²¹⁾。

2.3 製造コスト低減に向けた取組み

素材メーカーとして自動車メーカーとWin-Winの関係を構築するためには、製造コストにおいても自動車メーカーの競争力強化に貢献できる技術開発が重要となる。以下にはこの様な取組みの代表的例を概説する。

2.3.1 CAE（Computer Aided Engineering）技術の進歩

構造体としてのパフォーマンスを評価するためにCAE技術が利用されていることを上述したが、この構造最適化を可能とする各種塑性加工のCAE検討は、自動車製造工程における最適化の為に繰返し作業が削減でき、開発工期短縮や金型修正回数の削減などの経済的なメリットをもたらす。この様な各種CAE検討の際に重要となるのは各種材料毎の材料構成式と個々の課題へのFEM適用技術である。前述した各種高強度鋼の適用も、このCAE技術なしには具現化が困難となる。

プレス成形のFEM解析で事前に割れやしわの予測が可能であれば、実際に金型を製作する前に形状変更等の最適化を実行することが可能となり、大きな工程省略に繋がる。割れについては各変形モードでの成形限界を示すFLD（成形限界曲線）とFEMで得られるひずみを比較することで判断できる。しかしながら、プレス成形時に変形経路が変化した場合には比例負荷時のFLDをそのまま適用することはできない。これに対し、変形経路が変化した場合でも同一のFLDで評価することが出来る応力FLDを提案した²²⁾。この手法はプレス成形時のみならず、衝突時の破断判定にも適用可能である。

伸びフランジ評価には従来穴抜き試験が用いられてきたが、実際の部材成形では穴抜き試験とは異なったひずみ勾配で破断が生じることが多い。このような状況に対応した試験法として、素材の伸びフランジ成形性をフランジのコーナー半径とコーナー高さが異なる試験片を用いて測定し、これを伸びフランジ成形時の成形限界曲線として部材成形時の形状との比較から割れを判定する方法を提案した²³⁾。

高強度鋼板の適用の為には形状凍結性の改善が必要であり、各種のプレス成形技術が開発されていることは既に述べた。スプリングバックがFEM計算によって事前に予測することが可能となれば、対策や形状による工夫も可能と

なる。曲げ戻し変形をうける部位では、バウシinger効果や応力除荷時の見かけのヤング率低下現象の考慮も必要であり(図8), Lemaitre-Chaboche モデルや、吉田-上森モデルに加えて、材料の微視的構造変化を内部状態変数の発展則として記述した Teodosiu モデルのパラメータを単純せん断試験等を利用して決定して汎用FEMプログラムに組み込み、精度の高い形状予測とそれに基づいた対策技術開発を可能とした²⁴⁾。

CAE技術の成功例の一つが、衝突特性の評価である。車体に利用される各種材料の高速変形特性評価から(1)式を用いて部品の圧潰特性を解析することで、材料の最適配置や形状最適化を提案してきた。実際の車体の衝突時にはスポット溶接部の破断がエネルギー吸収挙動に影響を及ぼし、その破断挙動は鋼板材質に加えて、板厚、溶接条件、形状、荷重の入力条件等多くの因子の影響を受ける。この現象に対し、ナゲット周りの変形拘束を考慮した応力集中係数を用いて表現する方法を開発した²⁵⁾。図9には破断時の均一応力と母材の変形応力の比 α (応力集中係数)とナゲット径と板幅の比の関係を示した²⁵⁾。この関係は鋼種、板厚、溶接条件、試験片形状等の影響を受けないことが実験的に確認されており、FEM計算に導入することで任意の条件における衝突時のスポット溶接部の破断の有無を計

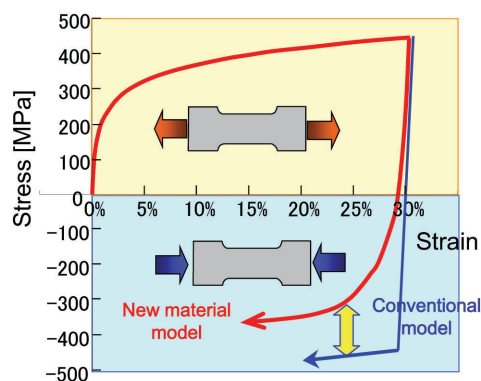


図8 反転負荷時の応力ひずみ曲線

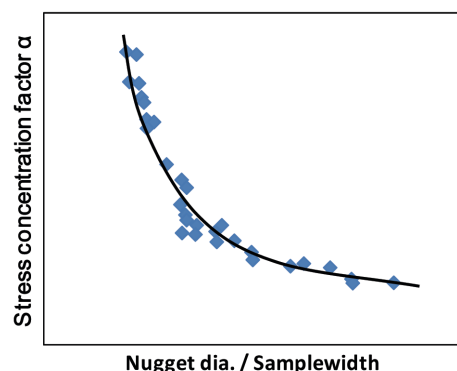


図9 スポット溶接部への応力集中

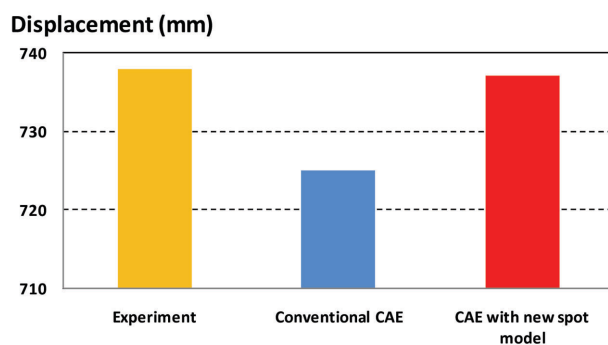


図10 実車衝突解析時の特定部位における変位量の実験と計算の比較

算することが可能となった。この結果をフルカーでの衝突解析に適用した結果、図10に示すような精度向上を確認した²⁶⁾。

2.3.2 製造コスト低減に寄与する各種技術

上述のCAE技術に加え、製造コスト低減に寄与する色々な技術開発がなされている。自動車製造工程でのコストダウンの一つの方向性は一体成形化による金型の数の削減と部品での接合線長の削減である。

特にサイドパネルアウター等の複雑形状部品用には、超高純度鋼に熱間圧延鋼板の細粒化と析出物の制御を適用した高 r 値、高 n 値鋼板が開発された。しかしながら、部位によって耐食性や板厚の要求が異なる場合が多いことから、部位毎に適正な鋼板を事前に溶接して一体成型するテラードブランク(TB)技術が導入された。TBの溶接技術としては、レーザー溶接、マッシュシーム溶接やプラズマ溶接法が用いられる。TBのプレス成形では板厚や強度が異なることによって、変形が片側の鋼板に集中する場合があります。溶接線の移動も含めた事前FEM解析技術も提供している²⁷⁾。

通常の冷間プレス成形ではないが、部品点数を削減することで溶接線長を著しく削減することが出来る技術の一つとして、鋼管の液圧成形であるハイドロフォーム工法も提案している。内圧と同時に鋼管の軸方向に圧縮力を付加することで複雑な形状への成形が可能であり、エンジンクレイドル等の多部品構造の一体化に成功している。国内ではセンターピラーの補強材に最初に適用され、順次拡大している。

また、広く用いられているGA等のめっき鋼板の表面が金型と凝着することによって成形性を劣化させる場合がある。この様な課題を解決するために、プレス後の各工程に悪影響を与えず、車体としての長期耐久性も維持できる高潤滑被膜としてMn-P系無機被膜を開発した。この被膜により成形性が向上し、プレス生産性の向上や、金型修正回数の低減、更には低グレード鋼板の適用が可能になること

で、自動車製造工程の低コスト化に貢献している²⁸⁾。

駆動系部品として用いられる歯車などの部品についても、製造コスト低減のニーズが強い。歯車は、通常、機械構造用合金鋼の圧延棒鋼を熱間鍛造により粗加工した後、切削加工により所定の形状に加工し、その後浸炭焼き入れにより表面硬化する工程で製造されている。歯車の製造コスト低減のキーワードは冷鍛化と表面硬化熱処理方法の変革である。

歯車の切削加工費は部品コストの大半を占めるため、切削加工の簡略化による切削コストの削減が最大の課題である。熱間鍛造に比較して冷間鍛造は鍛造ままで高精度の形状および表面性状が得られるため、切削加工作業の大幅な削減が可能となる。歯車を冷間鍛造工程で製造する場合、通常、冷鍛前に軟化焼鈍が必須となる。これに対して、図11に示したように低温圧延、さらに圧延後カバー徐冷による緩冷却を適用することにより、圧延までの軟質化が可能になり、従来必須とされていた軟化焼鈍の省略を可能とした軟質冷鍛用鋼材が開発されている^{29,30)}。厚板分野では高強度化法として低温圧延が用いられているが、冷鍛用棒鋼線材の分野では、全く逆の軟質化法として低温圧延が活用されている。

さらに、成分の最適化とTMCP技術を組み合わせることにより一層の軟質化を図り、球状化焼鈍の省略を可能にした軟質冷鍛歯車用鋼も開発されている。TMCP技術により圧延ままでベイナイトの生成を抑制し、フェライトパーライト組織にした軟質鋼において、ボロン添加と低温圧延を組み合わせることによってフェライト分率を増加させることでさらに軟質化を図った。ボロン添加は、浸炭熱処理に際して、焼入れ性の確保に有効に寄与するとともに、最終製品においては、粒界強度を増加させ、疲労強度等の強度特性の向上に寄与する³¹⁾。以上の知見をもとに、圧延ままで球状化焼鈍の省略が可能なレベルまで軟質化を図った冷鍛歯車用鋼が開発されている³²⁾。図12に示すように開発鋼の圧延まま材の冷間変形抵抗は、従来鋼の球状化焼鈍

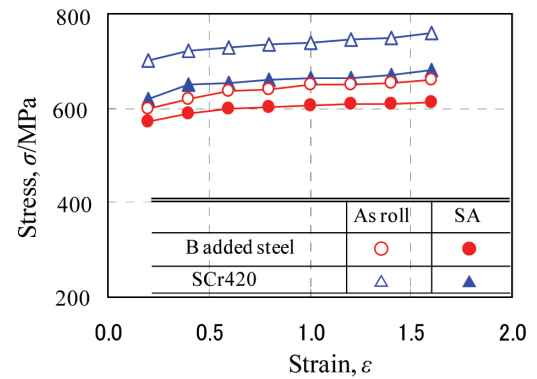


図12 SCr420系開発鋼(B添加鋼)の冷間変形抵抗

材(SA材)と同等以下である。

また、冷間鍛造において鋼材の延性が律速するような場合に適した冷鍛用鋼として、TMCP技術と、その後の球状化焼鈍との組み合わせで優れた鋼材延性を実現する鋼材も開発されている³³⁾。

冷間鍛造用鋼の課題の一つは、冷鍛ままで浸炭すると粗大粒が発生しやすいことである。これは、冷間加工によって浸炭加熱時の初期オーステナイト粒が微細化し、浸炭時の異常粒成長の駆動力が大きくなるためである。これに対して、AlN, Nb(CN), TiC等の微細な析出物をピン止め粒子として多量分散させることにより粗大粒防止を可能にした冷鍛用鋼が開発されている³⁴⁾。

歯車の製造コスト削減のもう一つのアプローチは、表面硬化熱処理方法の変革である。歯車は通常浸炭焼き入れにより表面硬化処理が施されているが、インライン化による生産性向上の観点から、高周波輪郭焼き入れ法への切り替えが検討されている。高周波輪郭焼き入れでは、超急速加熱により歯型形状に沿って硬化層を形成させることにより、高い圧縮残留応力が生成し、0.53%C程度の中炭素鋼でも高い曲げ疲労強度を実現することが特徴である。高周波輪郭焼き入れにおいては、超急速加熱による均一溶体化が必須であり³⁵⁾、これに適した鋼材が開発されている³⁶⁾。

2.3.3 高強度鋼板をつなぐ各種接合技術

上述のように、鋼板を高強度化すると、スポット溶接部の剥離強度は低下する傾向にある。スポット溶接部での破断の有無は車体衝突時のエネルギー吸収特性に影響を及ぼすため、剥離強度に優れた接合技術の開発が必要である。スポット溶接継手の十字引張試験を弾塑性破壊力学を用いて考察すると、鋼板高強度化に伴う溶接部の靱性低下が剥離強度低下の原因と考えられた³⁷⁾。そこで、図13に示すように、スポット溶接時に本通電に加えて後通電を付与する方法を開発した³⁸⁾。この後通電により剥離強度が向上したが、その理由としては、溶接部凝固組織中の不純物元素の偏析が緩和されたことに伴う靱性向上が考えられてい

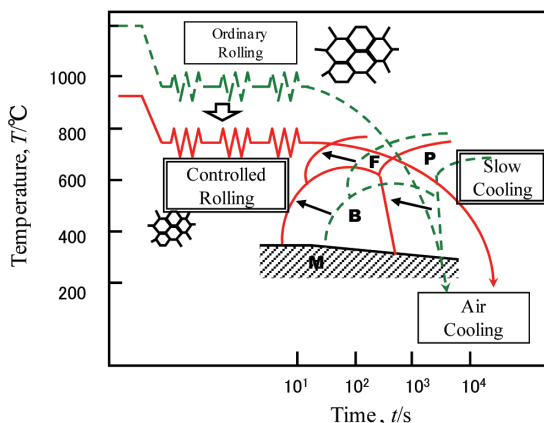


図11 制御圧延-制御冷却による合金鋼の軟質化の機構

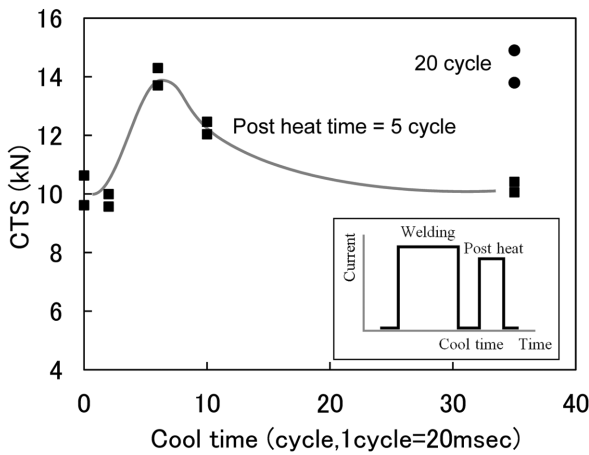


図13 後通電による1 470MPa級鋼板(板厚2.0mm)継手の剥離強度(CTS)向上効果

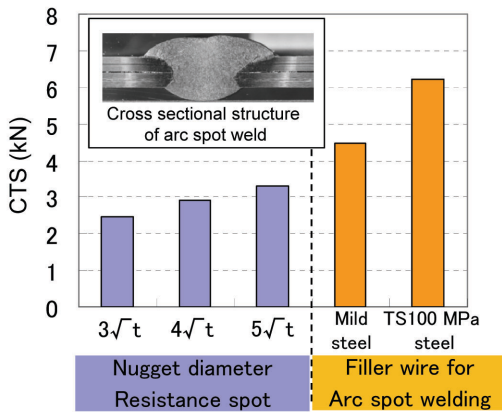


図14 1 470MPa級鋼板(厚板1.0mm)継手の剥離強度(CTS) (アークスポットの“軟鋼”は軟鋼向け溶材, “ハイテン”はハイテン向け溶材を使用した結果)

る。また、スポット溶接では溶接部の組成が母材の鋼板と同じであるが、アーク溶接により溶加材を供給すれば溶接部の組成を変えることができる。図14に示すように、アークスポット溶接において適切な溶加材を選定すれば、スポット溶接部に比べ、約2倍の剥離強度を得られることが分かった³⁹⁾。一方、鋼板を高強度化し補強部材を減らすと、薄い外板と厚い高強度鋼板2枚(補強板と内板)からなる3枚重ねの接合が必要になる。スポット溶接では、溶接中、水冷された銅電極への熱伝導により鋼板表面が冷却され、薄い外板と厚い高強度鋼板の界面にナゲットを形成することが困難となる。こうした、高板厚比3枚重ねの板組の溶接に対して、厚い鋼板同士の溶接はスポット溶接で行い、外板との溶接をリモートレーザ溶接で行うハイブリッド溶接法を提案している⁴⁰⁾。溶接では鋼板を溶融させるため、いかに入熱を低減しても鋼板の組織を変えてしまう。そこでブラインドリベットによる高強度鋼板の機械的接合

の可能性についても検討した。この接合方法では強い鋼板強度を反映し、鋼板が高強度になるほど剥離強度が上がることを確認している⁴¹⁾。

3. 新しい動きと将来への展望

3.1 HV, EVの台頭

今自動車分野の今後の動向を議論する場合には、動力源の変化に注目する必要があることは明らかである。従来のレシプロエンジン単独に加え、モーターとのハイブリッド(HV)やモーター単独(EV等)等が想定される。エンジンとしてはガソリンエンジンと欧州で広まっているディーゼルエンジンが選択の対象となる。また、ガソリンに一部アルコールを混合することでCO₂排出を抑える工夫がされている地域もある。モーターの場合、電力供給を電池に頼るか、水素を利用して直接発電するか、現時点では明確ではないが、CO₂排出削減やガソリンなどの化石燃料使用量の低減などの目的でその重要性が増している。この動向に対応して、モーター用電磁鋼板、電池やモーター周辺機器用材料等での貢献が期待できる。

モーター用電磁鋼板に要求される代表的な特性は、発進から低速走行時のモーターの高トルク化に対応した高磁束密度化と、高速走行時に問題となる高回転速度での低鉄損化である。ハイブリッド車や電気自動車の増加に合わせて、図15に示すような高機能のモーター用電磁鋼板を開発し、実用化している⁴²⁾。また、高速回転化に対応すべく、電磁鋼板の高強度化も要求されており、鉄損を大きく損なうことなく降伏強度を上げた電磁鋼板も開発されている⁴²⁾。

実際のモーターでの鉄損は電磁鋼板そのものの鉄損だけではなく、磁束の不均一さや高調波の影響と共に、モーター製造工程での打ち抜きやかしめ起因するひずみや応力にも依存する。このような劣化要因を定量的に把握して最小化する目的で各種測定技術と共に、電磁場解析技術の開発を行い、応力やひずみの影響も含めたモーター全体としての最適化にも貢献している⁴²⁾。

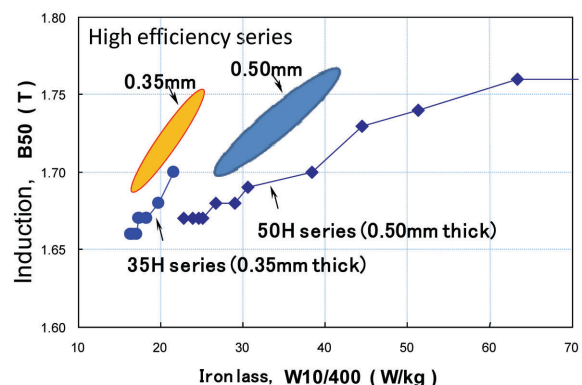


図15 高効率電磁鋼板シリーズの磁気特性

3.2 今後の展望

自動車分野では、今後HVやEVが拡大する傾向は確実であるが、燃料選択は有るとしても、当面は自動車の主流がレシプロエンジンを動力とすることは間違いないと言える。注目を集めている様に、電池の低コスト化と電力供給インフラストラクチャシステムの構築が今後のHV、EVの拡大速度を大きく左右することは明確である。

一方、高度道路交通システムが精力的に検討されているものの、都市部以外までこの様な理想的システムが完備されるにはまだ相当の時間が必要であると考え、どの様な動力システム配分が採用されるとしても、その状況での省エネルギー（燃費向上）と衝突安全性の確保向上の両立は不変の課題と言える。従って今後の自動車分野においては、これまでと同様に、経済性を確保しつつ更なる軽量化指向と強化される衝突安全性に対する要求を満足するために、一層の高強度化と構造最適化が望まれると考えられる。この為には、成形性や利用特性に優れた高強度鋼とその利用技術の一層のブラッシュアップが必須である。

伸び、伸びフランジ性および溶接性に優れた高強度鋼薄板、冷間鍛造性に優れた中・高炭素鋼薄板・棒鋼、このような高強度鋼群の新しい成形技術、溶接継手性能向上技術、溶接部等を中心とした耐食技術、超高強度鋼で問題となる水素脆化対策技術等に加え、アルミニウムやチタン及び樹脂等との最適なマルチマテリアル構造に対応するための各種技術（成形、接合、耐食等）開発が必要である。このような材料開発、利用技術開発はボーダーレスとなった自動車分野における国際競争力確保・強化の基盤となると同時に、ものづくり立国である我が国の基幹産業を支える技術の一つになるものと考えられる。

参考文献

- 1) Uenishi, A., Kuriyama, Y., Usuda, M., Suehiro, M.: IBEC' 97. Automotive Body Materials. Automotive Technology Group Inc., Michigan USA, 1997, p.59
- 2) 自動車用材料の高速変形に関する研究成果報告書. 日本鉄鋼協会, 東京, 2001
- 3) Cowper, G.R., Symonds, P.S.: Brown University Division of Applied Mech. Report No. 28, 1952
- 4) Hiwatashi, S., Takahashi, M., Sakuma, Y., Usuda, M.: Proc. of Int. Conf. on Automotive Technology and Automation. Germany, 1993, p.263
- 5) 野中俊樹, 後藤貢一, 谷口裕一, 山崎一正: 新日鉄技報. (378), 12 (2003)
- 6) 吉永直樹, 佐久間康治, 樋渡俊二, 塩崎克美, 高木潔: 自動車技術会2004年秋季学術講演会前刷り集. 20045745
- 7) Cornette, D., Hourman, H., Hudin, O., Laurent, J.P., Reynaert, A.: SAE Tech Ser. SAE-2001-01-0078, 2001, p.19
- 8) 瀬沼武秀, 楠見和久, 末廣正芳: ふえらむ. 11 (2), 28 (2006)

- 9) 野村成彦: 平21塑加春講論. 2009, p.25-26
- 10) 吉田亨, 片山知久, 橋本浩二, 栗山幸久: 新日鉄技報. (378), 25 (2003)
- 11) 古迫誠司, 上西朗弘, 宮崎康信: 新日鉄技報. (385), 32 (2006)
- 12) 高橋学, 河野治, 林田輝樹, 岡本力, 谷口裕一: 新日鉄技報. (378), 7 (2003)
- 13) 田代均, 樽井敏三: 新日鉄技報. (378), 77 (2003)
- 14) 柳瀬雅人 ほか: ばね技術研究会1994年度秋季講演会論文集. 1994, p.21
- 15) 安田茂, 中野修, 伊澤佳伸, 近藤覚, 小野田光芳, 鎗田博, 子安善郎, 内田尚志: ばね論文集. 42, 1 (1997)
- 16) Kanisawa, H., Ochi, T., Koyasu, Y.: Nippon Steel Technical Report. (64), 50 (1995)
- 17) 越智達朗, 久保田学, 田中洋一: 鉄と鋼. 97 (11), 592 (2011)
- 18) Naito, K., Ochi, T., Takahashi, T., Suzuki, N.: Proceedings of the Fourth International Conference on Shot Peening. Tokyo Japan, Oct., 1990, p.519
- 19) 井上宣治, 菊池正夫: 新日鉄技報. (378), 55 (2003)
- 20) 黒崎将夫, 松村賢一郎, 伊崎輝明, 真木純, 布田雅裕, 宮坂明博, 鈴木眞一: 新日鉄技報. (378), 46 (2003)
- 21) 橋村雅之, 平田浩, 蟹沢秀雄, 内藤賢一郎: 新日鉄技報. (378), 68 (2003)
- 22) 米村繁 ほか: 自動車技術会2007年春季講演大会前刷集. 21-07, 20075066, 2007
- 23) Nitta, J. et al.: IDDRG2008. 2008, p.93
- 24) 鈴木規之, 樋渡俊二, 上西朗弘, 桑山卓也, 栗山幸久, Lemorene, X., Teodosiu, C.: 塑性と加工. 46 (534), 636 (2005)
- 25) 吉田博司 ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集. 49-05, 20045205, 2004, p.1
- 26) 吉田博司 ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集. 21-07, 20075067, 2007, p.5
- 27) 宮崎康信, 橋本浩二, 栗山幸久, 小林順一: 新日鉄技報. (378), 35 (2003)
- 28) 落合忠昭, 鈴木眞一, 宮坂明博, 福井政治, 平田雅裕, 伊藤健: 新日鉄技報. (378), 43 (2003)
- 29) 岡敏博, 熊野兼一, 中村邦夫, 梨本勝宣, 松本次男, 馬場誠, 佐坂晋二: 新日鉄技報. (343), 63 (1992)
- 30) 内藤賢一郎, 森俊道, 奥野嘉雄, 八塚隆, 海老原達郎: CAMP-ISIJ. 2, 1752 (1989)
- 31) 越智達朗, 蟹沢秀雄, 佐藤洋, 渡邊忠雄: 鉄と鋼. 83 (10), 665 (1997)
- 32) Ochi, T., Takada, H., Kubota, M., Kanisawa, H., Naito, K.: Nippon Steel Technical Report. (80), 9 (1999)
- 33) 内藤賢一郎, 森俊道, 奥野嘉雄: CAMP-ISIJ. 1, 1877 (1988)
- 34) Kubota, M., Ochi, T.: Nippon Steel Technical Report. (88), 81 (2003)
- 35) 越智達朗: ふえらむ. 12 (12), 776 (2007)
- 36) 伊藤誠司, 蟹沢秀雄, 三阪義孝, 川寄一博: CAMP-ISIJ. 11, 550

(1998)

- 37) 渡辺史徳, 浜谷秀樹, 宮崎康信, 野瀬哲郎: 溶接学会全国大会講演概要89集. 2011, p.41-42
- 38) 浜谷秀樹, 渡辺史徳, 宮崎康信, 田中智仁, 真木純, 及川初彦, 野瀬哲郎: 溶接学会全国大会講演概要89集. 2011, p.44-45
- 39) 古迫誠司, 児玉真二, 宮崎康信: 溶接学会全国大会講演概要89集. 2011, p.60-61

- 40) 内藤恭章, 村山元, 宮崎康信: 溶接学会全国大会講演概要89集. 2011, p.52-53
- 41) 崎山達也, 宮崎康信: 溶接学会全国大会講演概要89集. 2011, p.58-59
- 42) 藪本政男, 開道力, 脇坂岳顕, 久保田猛, 鈴木規之: 新日鉄技報. (378), 51 (2003)



高橋 学 Manabu TAKAHASHI
フェロー
技術開発本部 鉄鋼研究所 薄板材料研究部長
Ph.D.
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



越智達朗 Tatsuro OCHI
室蘭技術研究部長
工博



末廣正芳 Masayoshi SUEHIRO
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター所長
工博



宮崎康信 Yasunobu MIYAZAKI
鉄鋼研究所 接合研究センター
主幹研究員

執筆協力



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE
鉄鋼研究所 接合研究センター所長
工博



古迫誠司 Seiji FURUSAKO
鉄鋼研究所 接合研究センター
主任研究員



渡辺史徳 Fuminori WATANABE
鉄鋼研究所 接合研究センター
研究員