

(解説)



安全・安心で持続可能な社会を支える新素材の創出に貢献する金属組織制御技術

村上俊夫*¹ (博士(工学))

Metallographic Structure Control Technology Contributing to Development of New Metallic Materials to Meet Social Demands

Dr. Toshio MURAKAMI

要旨

当社は金属材料の総合メーカーとして、社会の様々な要望に応えるために、鉄鋼、アルミニウム合金、銅合金、チタン合金、溶接材料といった各種金属材料の性能改善を進めるための要素基盤技術として金属組織制御技術の高度化を進めてきた。ここでは、持続可能な社会に貢献する軽量化ソリューションの取り組みとして自動車用超ハイテンならびにアルミニウム合金の開発を、安全・安心なまちづくりへの貢献の取り組みとして厚鋼板・溶接材料の開発を、金属組織制御技術の取り組みの事例として紹介する。また、今後、想定される大きな社会変化に対応するために今後の金属組織制御技術の方向性について述べる。

Abstract

Kobe Steel, as a comprehensive manufacturer of metal materials, has been advancing the refinement of metallographic structure control technology as a fundamental technology to enhance the performance of various metal materials, including steel, aluminum alloys, copper alloys, titanium alloys, and welding materials, in order to meet the diverse demands of society. This paper presents examples of the company's initiatives: the development of ultra-high-strength steel and aluminum alloys for automotive applications as part of its efforts towards weight-reduction solutions that contribute to a sustainable society, and the development of thick steel plates and welding materials, working toward the creation of safe and secure communities. These examples serve to showcase the application of the metallographic structure control technology. Furthermore, the paper discusses the future direction of this technology as an effective response to anticipated significant societal changes.

検索用キーワード

金属組織制御技術, 鉄鋼材料, アルミニウム合金, 軽量化

まえがき = どのような製品でも、その製品を構成する素材が必要になり、用途や性能、機能、コストなどの様々な観点から、どの素材を使用するか選択される。その中でも金属材料は、種類によって強度や延性・韌性（じんせい）、導電性、熱伝導性などの性能が多様であるとともに、良好な性能を比較的安価に、多量に供給できることが特長となっている。そのため、周期的に新素材ブームが生じて一部の用途が置き換わっても、金属材料の重要性は変わらず、社会を支える重要な素材であり続けている。金属材料が活用され続けているのは、性能が優れるだけでなく、社会構造の変化に伴い、高まる要求に応えるために、絶え間なく改善が進められてきたことが一つの要因と考えられる。

当社では、金属材料の総合メーカーとして、鉄鋼材料（線材条鋼、厚鋼板、薄鋼板、鍛造鋼品、鉄粉）、アルミニウム合金（アルミ板、アルミ鍛造品、アルミ押出材）、銅合金、チタン合金、溶接材料といった各種金属材料を生産し、自動車、鉄道車両、船舶、航空機などの輸送用機械、建設用・建築用金属製品、産業用機械、電気機械、電子部品・デバイス・電子回路などの様々な産業に提供して、最終製品に活用されている。これらの製品に適用

される金属材料の性能のうち、高強度化と成形性などの変形特性を両立できれば、自動車に代表される輸送用機械の重量低減を実現することで走行時の燃費改善によるCO₂排出量を低減、持続可能な社会の実現に貢献することができる。また、韌性や疲労特性に代表される構造材料の信頼性に関わる性能を高めることができれば、最終製品の信頼性を高め、より安全でより安心な社会に貢献することができる。

金属材料の性能はその成分に加え、金属中の「組織（microstructure）」と呼ばれるミクロンオーダーからナノオーダーの結晶分布状態が支配している。そのため、様々な金属材料の性能を制御するための「金属組織制御技術」は当社の金属材料製品の競争力を支える重要な要素基盤技術の一つである。

金属組織制御技術は、基本的に金属中の組織を要求特性に応じて、成分設計や加工、熱処理により適切な状態に制御する技術であるが、対象とする要求特性や材料に応じて制御すべき観点が変化する。例えば、自動車の骨格部品のように複雑な形状の部品に成形加工され、衝突時のエネルギー吸収のために変形する部位に適用される場合は高強度と延性を同時に確保する必要がある。そのた

*¹ 技術開発本部 材料研究所

めには、高強度だが延性が低い組織と低強度でも延性の高い組織を混在させるような組織制御や、金属結晶の方向を変形しやすいようにコントロールするような組織制御が活用される。いっぽう、建築物や船舶など、使用中に壊れてはいけないう構造物に適用される場合は、靱性、疲労特性などの構造物の信頼性に関わる性能が求められるため、金属組織の均一性や結晶粒の微細化など破壊を抑制する組織制御が活用される。

そのほかにも、主に高強度化と相反する性能である耐水素脆化特性、伸線性、易加工性と両立が求められる場合や、高温環境で活用される材料の場合は高温強度や耐クリープ特性、機能系の電磁気特性や熱伝導性などの様々な性能に対して、それぞれに応じた組織制御技術が求められ、所望の組織を実現するための技術開発を進めてきた。

本報告では、金属組織制御技術のうち、持続可能な社会を実現するための軽量化ソリューションおよび安全・安心で持続可能な社会の実現につながる取り組みについて紹介する。

1. 持続可能な社会を実現するための軽量化ソリューションに向けた金属組織制御技術

持続可能な社会を実現するための一つの取り組みとして、地球温暖化を緩和するためにCO₂排出量低減を進めることが求められている。このうち、国内の2割弱を占める輸送部門、とくに自動車のCO₂排出量を抑制することは重要な取り組みの一つとなっている。この取り組みにおいて、走行時のCO₂排出量低減を実現するには、自動車の軽量化による燃費向上が重要となる。その実現に向け、当社では素材メーカーとしての軽量化ソリューション技術構築を進めており、その中心的な取り組みとして軽量化材料を創出するための金属組織制御技術の深化を進めてきている。

代表的な取り組みとしては、自動車用高強度鋼板、いわゆる超ハイテンの開発があげられる。自動車の衝突安全性能の確保と軽量化の両立には骨格部品用材料の高強度化が必要で、そのため、高強度で成形可能な延性を同時に確保した鋼板を実現するための技術開発に取り組んできた。1980年代には強度と延性の兼備を狙い、軟質なフェライトと硬質なマルテンサイトを混在させたDual Phase鋼（DP鋼）の検討が進められた^{1), 2)}。DP鋼では強度を確保しながら、延性の指標で強度と相反するとされている伸びと伸びフランジ性を両立させるための組織制御技術を開発した。具体的にはフェライトとマルテンサイトの分率、マルテンサイト中のC濃度、さらにマルテンサイト中の炭化物サイズの制御による伸びと伸びフランジ性のバランスの向上である^{3), 4)}。

いっぽう、さらなる延性向上のニーズに対し、残留オーステナイト（以下、残留 γ ）の加工誘起変態を活用したTRIP鋼が候補と考えられていたが、TRIP鋼は伸びが良好だが伸びフランジ性が比較的低位となる。この原因は残留 γ が塊状に存在するためと考え、信州大学との共同研究を通じて、残留 γ を微細に分散させる組織制御技

術を開発した。その結果、焼鈍前組織をマルテンサイトとして、マルテンサイトのラス間に残留 γ を微細に分散させたTAM鋼（TRIP aided Annealed Martensite鋼）^{5), 6)}や、母相をベイニティックフェライトとし、ベイニティックフェライト間に残留 γ を微細に分散させたTBF鋼（TRIP aided Bainitic Ferrite鋼）⁷⁾という組織コンセプトを構築した。このコンセプトを各種強度クラスに適用し、伸び-伸びフランジ性バランスに優れた980 MPa級鋼（図1）⁸⁾、1,180 MPa級鋼⁹⁾、1,470 MPa級鋼¹⁰⁾といった材料を開発した。

また、さらなる軽量化に向け第3世代超ハイテン（Generation 3もしくは3rd Generation）¹¹⁾と呼ばれる、比較的省合金で強度-延性バランスに優れた高強度鋼板に関する研究が盛んとなり、国内でも国プロジェクトにて引張強度1.5 GPa-伸び20%を目指した取り組みが進められた。当社ではこのプロジェクトの中で、中高炭素鋼を用いて、残留 γ の増加と安定度の制御¹²⁾や、Q&Pプロセスの適用による微細化により目標の強度-伸びを達成し、さらに伸びフランジ性も兼備できる組織制御技術を開発した¹³⁾。本技術の実用化には種々の課題が残されているが、ここで開発した組織制御技術を活用しながら、将来のさらなる軽量化に資する鋼板の提案に繋げていく。

自動車車体軽量化に対して、もう一つ有力な材料としてアルミニウム合金があげられる。アルミニウム合金は鋼材に対して、剛性同等とした際の重量を1/2にできることから、とくに剛性が必要なパネル材、例えば、フード、トランクリッド、バックドア、ルーフなどに適用が広がっている。パネル材に求められる材料特性としては、強度、成形性、ヘム曲げ性と呼ばれる折り曲げ後に

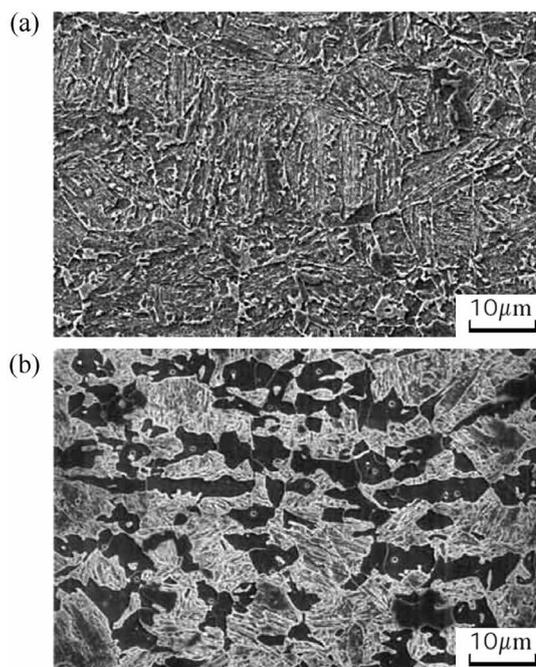


図1 (a) 開発980 MPa級鋼（TBF鋼）、
(b) 従来980 MPa級鋼（DP鋼）のSEM組織写真
Fig.1 SEM micrographs of (a) developed 980 MPa grade steel (TBF steel),
(b) conventional 980 MPa grade steel (DP steel)

押し潰す加工特性、成形後の表面品質などがあげられる。ここでは強度、とくに塗装焼付後の強度確保のための組織制御技術、および、プレス成型後の表面品質のための組織制御技術について述べる。

パネル材の中でも、車体の外側に適用されるアウトパネル材は、機能、デザインの両面から形状が決定されるため、複雑な形状に精度よく成形できることが求められる。そのため、成形時には低強度であること、いっぽう、最終製品に対しては、へこみに対する耐性の評価指標である耐デント性のために高強度であることが求められる。自動車の製造工程ではプレス成型後に塗装焼付と呼ばれる170~180℃程度で数十分加熱される工程が存在し、この加熱工程で硬化する性能をバークハード (BH) 性と呼ぶ。成形時の強度が低くても、BH性が高ければ製品強度が高められるため、BH性を高めるための研究が活発に進められている。

塗装焼付熱処理で強度が向上するのは、熱処理中に析出物やクラスタと呼ばれるナノスケールの組織が形成されるためである。BH性向上には、予備時効や、予備時効と予ひずみの組合せが有効^{14)~16)}であり、各項目を最適化すればBH性が最大化できる。いっぽう、BH性を支配するクラスタは溶質元素 (6000系アルミニウム合金ではMg, Si) や原子空孔が集まった数nm程度の微小な組織であり、汎用的な微視構造を観察する手法である透過型電子顕微鏡 (TEM) では明確に観察できない。そのため、3次元アトムプローブと呼ばれる原子配置を3次的に観察する技術を活用し、**図2**に示すように熱処理過程でのクラスタの形成挙動を解析^{17), 18)}した。その結果、予備時効を施すことで自然時効に比べてMg/Si比が0.4超のクラスタの数密度が増加し、時効時に強度向上に寄与する β'' 相に遷移することでBH性が向上することを示した。

プレス成型後の表面品質に関する課題としては、6000系Al-Mg-Si合金板材においてプレス成型後に表面にリジングマーク (もしくはローピング) とよばれる模様が生じる場合があり、自動車のアウトパネルに適用するためには、外観品質の観点からリジングマークの形成を抑制することが求められている。

リジングマークが形成される原因として、金属の変形能の異方性があげられる。金属の変形は転位と呼ばれる結晶の連結性が乱れた領域が形成、移動することで生じる。アルミニウムでは転位の移動できる方向が鋼に比べて限られており、転位が移動できる方向に応力を加えると変形しやすいが、変形方向がずれると変形しにくくなる。このように変形方向と結晶方向の関係によって変形しやすさが変化する。リジングマークの発生にはCube方位と呼ばれる張出性の向上に有効な集合組織の存在が影響している。

集合組織は、熱間圧延や冷間圧延の過程で変形に優位な結晶方位の組織が発達し、さらに、その加工組織から圧延過程やその後の熱処理時に再結晶と呼ばれる加工ひずみが含まれない結晶粒が形成される過程で、特定の方位の結晶粒の形成や成長が優先されることで生じる。そ

のため、アルミの製造工程における冷間圧延¹⁹⁾や溶体化処理²⁰⁾、さらにその前工程である熱間圧延工程も含めた熱延工程での集合組織の制御技術を構築した。また、結晶の変形能の異方性を考慮した結晶塑性理論を用いて解析する技術を構築し、リジングマークが形成される集合組織状態がGoss方位やCube方位と呼ばれる集合組織の偏在が要因であることを示した (**図3**)²¹⁾。これらの知見を活用し、リジングマークを抑制しながら成形性に良好なアルミパネルを実現する組織制御技術を構築してきている。

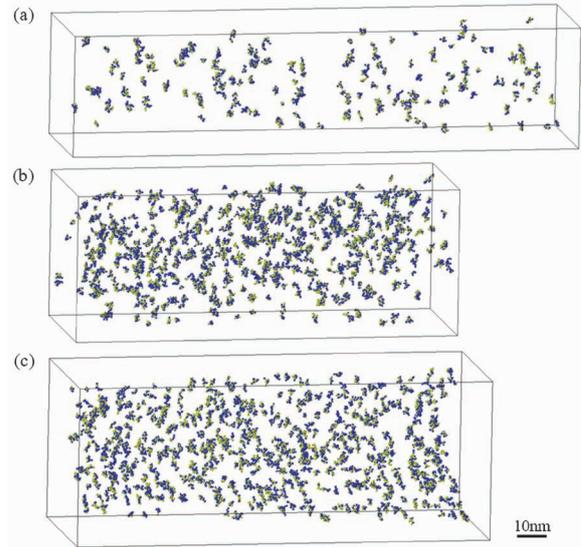


図2 3次元アトムプローブによるMg-Siクラスタの三次元分布図 (緑: Mg原子, 青: Si原子)
(a) 自然時効 10.8 ks, (b) 360 ks, (c) 2.8×10^4 ks

Fig.2 Atom maps showing 3D elemental distribution of Mg (green) and Si (blue) atoms of Mg-Si cluster in the specimens natural-aged for (a) 10.8 ks, (b) 360 ks, (c) 2.8×10^4 ks observed by 3D atom probe

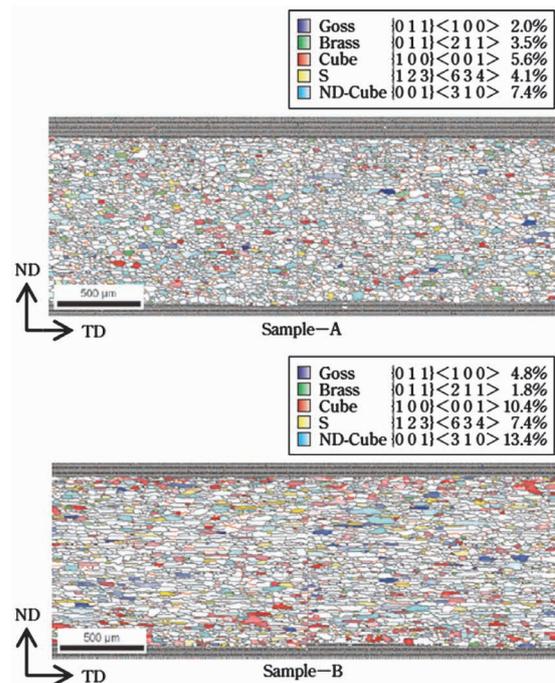


図3 アルミパネル材のSEM-EBSD解析結果
(a) リジングマーク抑制, (b) リジングマーク発生
Fig.3 SEM-EBSD maps of aluminum sheets (a) without ridging and (b) with ridging

そのほかにも、ばね鋼の耐水素脆化特性や耐へたり性制御のための結晶粒微細化や析出物制御^{22), 23)}, 5000系アルミ板のセレーション抑制のための析出・クラスタ制御^{24), 25)}, アルミ鍛造材の予備時効短時間化のための二段時効を活用した析出制御²⁶⁾, アルミ押出材の耐衝撃性改善のための再結晶集合組織制御²⁷⁾, 車載用電装部品用端子向け銅板の強度, 導電率, 耐力力緩和特性の両立のためのNi, P複合添加による転位の引きずり抵抗の活用²⁸⁾や析出物分散状態の制御²⁹⁾など, 高強度化と, 強度と相反する各種特性の両立を狙った組織制御技術を開発し, 自動車軽量化に貢献してきている。

2. 安全・安心なまちづくりに貢献する金属組織制御技術

大型構造物である建築物, 橋梁などには厚鋼板が使用され, 厚鋼板同士をつなぐために溶接材料が用いられる。近年, 都心部中心にビルの高層化や, 鋼構造物の構造の合理化などに対応するため, 材料の高強度化が進められてきた。また, 建設コストの観点から溶接施工の生産性を高めるため, 溶接時に加える熱エネルギー(入熱量)を高め, 一度の溶接で多量の溶接材料を溶かす大入熱溶接への対応が求められてきた。

厚鋼板の高強度化や溶接の大入熱化を進める際の課題としては, 靱性の確保があげられる。靱性とは破壊に対する抵抗力の評価指標であり, 構造物が急激に脆性(ぜいせい)破壊することを避けるために必要な特性である。脆性破壊が大災害につながる事例としては, 米国の戦時標準船 Schenectady 号の事故³⁰⁾が有名なので, 参考にしていただきたい。大型構造物でこのような破壊が起こると社会的に多大な影響を及ぼすため, 鋼材はもちろん溶接部の靱性を確保することが必要不可欠となっている。

鋼材の靱性を支配する組織因子としては, 脆性き裂が進展する際の単位となる結晶粒径が最も重要なパラメータであり, 結晶粒径が微細なほど靱性が向上する。また, 破壊の起点となる鋼中の硬質な第二相組織の微細化および低減も, 靱性向上に有効な手段となる。

いっぽう, 厚鋼板の溶接部では, 溶接時の高温にさらされる熱影響部(Heat Affected Zone, HAZ)において, 高温相であるオーステナイトが生成するとともにオーステナイト結晶粒の粗大化が進行し, その後の冷却中にオーステナイト結晶粒界からフェライトやベイナイトといった組織が粗大に形成されることで靱性が劣化する。

そのため, HAZの靱性確保の手段としては, 溶接時の高温におけるオーステナイト結晶粒の粗大化を分散粒子によるピン止め効果を活用して抑制するか, 冷却中の変態挙動を制御してフェライト, ベイナイト組織を微細に形成させることが有効な手段となる。当社では, この二つを組み合わせ, 高温で安定なTiNをピン止め粒子として活用するとともに, 図4に示すように組織が微細な低炭素ベイナイトを活用した組織制御技術を構築し, 大入熱HAZ靱性が良好な高強度鋼を開発した^{31), 32)}。また, ピン止め効果を高めるためにTiNを微細化して

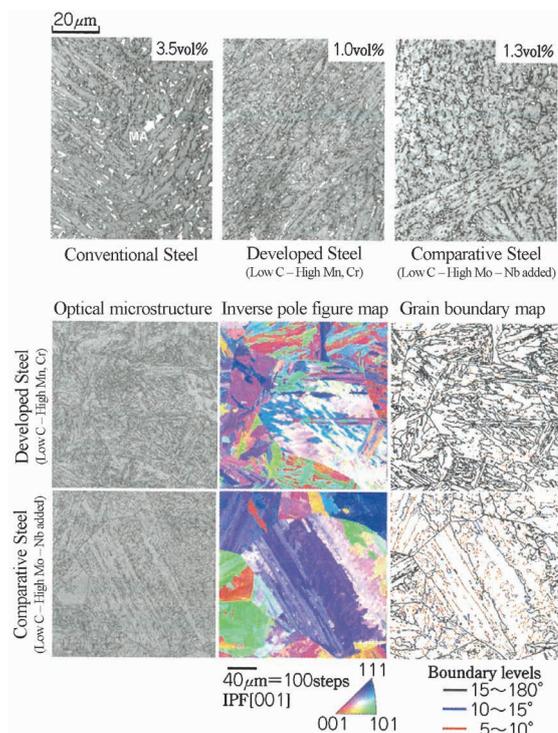


図4 再現熱サイクル材の光学顕微鏡像とEBSD解析結果
Fig.4 Optical microstructure and EBSD analysis results of simulated HAZ (Heat Affected Zone)

TiN粒子数を増やす方法として, Tiの拡散速度が速くTiNが粗大化しやすい δ フェライト温度域を小さくする成分設計³³⁾や, 酸化物を起点に形成される粗大なTiNを低減するため, Ca添加により酸化物を改質する技術³⁴⁾を開発し, さらなるHAZ靱性向上を実現した。

冷却時の変態による組織微細化の手段としては, オーステナイト粒内に変態核となりうる粒子を分散させて, 粒内からも組織を形成させる方法も知られている。このような観点では, 粒内核生成サイトとしてBNを分散させ大入熱溶接に対応した鋼板³⁵⁾や, Ti・希土類元素(REM)・Zrの複合酸化物を活用したHAZ組織微細化技術³⁶⁾を開発した。

このような粒内核生成の技術は, 酸化物が多量に含まれる溶接金属で積極的に活用されている。例えば, 高強度鋼用溶接金属において, $MnTi_2O_4$ ^{37), 38)}を粒内核生成サイトとして活用することで, 組織微細化を可能にし, 靱性に優れた溶接金属を実現した。また, 溶接金属にLiを添加することで, いっそうの組織微細化と靱性向上が得られることを見出している³⁹⁾。

本章で述べたように, 鋼材, 溶接材料の両面から, 大型建築物, 橋梁(きょうりょう)などの構造物において使用素材の高強度化と大入熱溶接に対応した靱性確保により, 安全・安心なまちづくりを, より効率的に実現できる金属組織制御技術を構築してきた。近年, 高度経済成長期に建設された構造物の老朽化が進んでおり, 次の50年, 100年の社会インフラの安全性の実現が求められている。これまでの靱性という観点だけでなく, 疲労や腐食に代表される長期信頼性に必要な特性を兼ねるための技術開発を進めている。

3. 今後の金属組織制御の方向性

これまで述べたように様々な課題にこたえるために金属材料の開発を進めてきたが、要求性能のレベルが高くなってきており、それに対応するための金属材料開発の難度が高まっている。いっぽうで社会変化が加速してきており、新しい金属材料の開発にかかる時間の短縮が求められている。そのような状況に対応する一つの方向性として、金属組織の形成や得られた金属組織の材料特性を物理現象に基づいて計算する組織予測技術や特性予測技術を深化させてきた^{40)~43)}。これにより、冶金現象に対する理解を深めるとともに、成分・プロセスから金属組織、そして材料特性を定量的に予測できるようになることで、技術者の知識や経験に加え、計算技術も活用しながら材料開発を進めることを目指している。

また、近年のデジタルトランスフォーメーション(DX)の流れの中、材料技術のDX化としてMI(Materials Informatics: 機械学習に代表される情報科学を活用した材料開発支援技術、もしくは、Materials Integration: 材料科学の理論、実験、解析、シミュレーション、データベース、データマイニングなどを融合した材料開発支援技術)と呼ばれる技術領域が注目されている。金属材料の分野では、実験データを多量に採取することが困難であるため、純粋なデータ駆動型MI技術はハードルが高いと考えられており、これまでに培ってきた予測技術を併用しながらMIを活用することが有用と考えられる。その事例として、厚鋼板の溶接熱影響部を対象に、組織形成挙動や形成した組織から靱性を予測する技術に機械学習を組合せ、所定の溶接条件に対して特性・合金コストなどの目標値をインプットすることで、その目標を満足できる成分を提示できる開発支援技術を構築した⁴⁴⁾。このような技術をさらに高度化させていくためには、材料特性に関わる各種情報を定量化し、データ解析に用いることができるようにする必要がある。特性を支配する組織画像などの定量化技術や物理分析解析技術などの関連する要素基盤技術と連携しながら、金属組織制御技術の高度化を図っていく。

むすび=以上のように、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献するために、継続的に金属組織制御技術を発展させてきた。本稿では自動車車体軽量化、大型構造物を対象にした組織制御技術を解説したが、そのほかにも、航空機(チタン、アルミ)や船舶(厚鋼板、溶接材料、鍛鋼品)などのほかの輸送用機械の軽量化、自動車の内燃機関(線材・条鋼)の効率化やエネルギー産業(厚鋼板、溶接材料)における発電効率の向上、さらに各種金属製品を用いた製品の製造工程の省工程化によるCO₂削減への貢献など、多岐にわたる領域においても活用してきている。

引き続き、現在取り組んでいる課題解決に向けた技術のブラッシュアップを進めていくが、将来想定される大きな社会変化、例えばカーボンニュートラルに向けた水素・アンモニアや再生可能エネルギーの活用拡大、自動

車のEV化/FCV化に代表される輸送機器の脱化石燃料化、次世代空モビリティの実現、宇宙産業の発展などの中で金属材料がこれまでと異なる環境や用途で使用されることが想定され、従前とはことなる取り組みも必要になってくる。例えば、極低温や超高温に代表される各種極限環境での性能発現、電磁気特性をはじめとした新機能の付与、画期的な比強度や比剛性の実現など、これまでとは異なる観点での特性が要求されることも想定される。そのような課題の変化に対しても対応可能な性能を有する金属材料を創出・提供しつづけることで、安全・安心で持続可能な社会基盤構築に貢献できるよう、金属組織制御技術の高度化を進めていく。

参考文献

- 1) 宮原征行ほか. R&D神戸製鋼技報. 1985, Vol.35, No.4, p.92-96.
- 2) 田中福輝ほか. R&D神戸製鋼技報. 1992, Vol.42, No.1, p.20-23.
- 3) 村上俊夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.61-64.
- 4) 村上俊夫ほか. 鉄鋼材料の組織と延性破壊研究会報告書. 日本鉄鋼協会, 2014, p.57.
- 5) K. Sugimoto et al. ISIJ International. 2002, Vol.2, p.910.
- 6) 橋本俊一ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, p.400.
- 7) K. Sugimoto et al. ISIJ International. 2004, Vol.44, p.1608.
- 8) 三浦正明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.15-18.
- 9) 村田忠夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.17-20.
- 10) 粕谷康二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.36-40.
- 11) E. De Moor et al. Iron and Steel Technology. 7 (2010), p.133.
- 12) 村上俊夫. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.29-32.
- 13) 新構造材料技術研究組合. 革新構造材料とマルチマテリアル輸送用機器の軽量化のための材料・接合・設計技術-下巻 プロジェクト成果総覧. 2023, オーム社, p.2-9.
- 14) 増田哲也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.13-17.
- 15) 増田哲也ほか. 軽金属. 2011, Vol.60, p.283.
- 16) Y. Takaki et al. Materials Transaction, 2014, Vol.55, p.1257.
- 17) 有賀康博ほか. R&D神戸製鋼技報. Vol.66, No.2, p.42-47.
- 18) 有賀康博ほか. 軽金属. 2017, Vol.67, p.144.
- 19) 松本克史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.3, p.47-50.
- 20) 松本克史ほか. 軽金属. 2005, Vol.55, p.113.
- 21) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.39-42.
- 22) 増本 慶ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.67-70.
- 23) 吉原 直ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.54-58.
- 24) 松本克史ほか. 軽金属. 2015, Vol.65, p.331.
- 25) K. Matsumoto et al. Materials Transaction, 2016, Vol.57, p.1101.
- 26) 堀 雅是ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.7-11.
- 27) 伊原健太郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.43-47.
- 28) 野村幸矢. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.53-58.
- 29) 穴戸久郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.63-67.
- 30) 金沢 武. 高圧力. 1966, Vol.4, p.16.
- 31) 畑野 等ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.2, p.105-109.
- 32) 山口徹雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.16-19.
- 33) 高岡宏行ほか. CAMP-ISIJ. 2007, Vol.20, p.1226.
- 34) 加藤 拓ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.32-35.
- 35) 高橋祐二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.42-46.
- 36) H. Nako et al. ISIJ International. 2015, Vol.55, p.250.
- 37) 岡崎喜臣ほか: 溶接学会論文集. 2009, Vol.27, p.131.
- 38) H. Nako et al. ISIJ International. 2014, Vol.54, p.1690.
- 39) 伊藤孝矩ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2020, Vol.107, p.62.
- 40) 難波茂信. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, p.37.
- 41) 村上俊夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.13-17.
- 42) 逸見義男ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.2, p.47-51.
- 43) 堤 一之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.19-23.
- 44) 井元雅弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2021, Vol.71, No.1, p.31-36.