熱処理が決め手 金属組織を自在に制御する

鉄は加熱したり冷却したりすることで内部の組織を変え、さまざまな特性を引き出すことができる素材です。新日鉄住金は鉄鋼製品の高機能化、お客様での加工ニーズを考えて、熱処理技術を駆使して金属組織を自在に制御し、求められる多様な鉄をつくり込み、社会インフラの形成に貢献しています。

車輪と車軸　鉄道の安全を足元で支える

きれつを防ぐ焼入れ

東海道新幹線N700A系　©東海旅客鉄道(株)

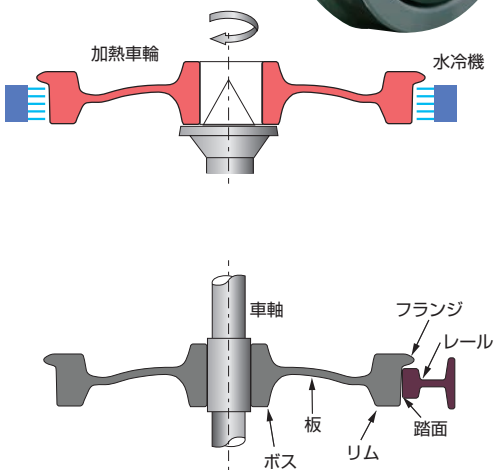


図1　車輪の焼入れ(上)と構造(下)

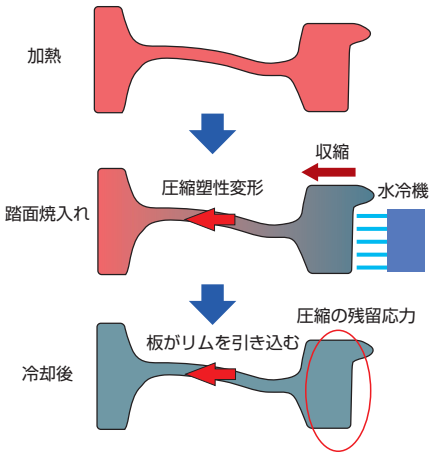


図2　圧縮残留応力のメカニズム

車輪全体を加熱したのちに、車輪を水平状態で回転させながら、外周から踏面に向けて水冷を行うことでリム部が冷却される。しかしリム部の冷却が終わって変形しなくなっても、板部は空冷により収縮しようとするため、リム部には内側に引っ張り込む圧縮応力が生じる。リム部には圧縮応力が残るため、万一微細なきれつが入っても、きれつの進展を抑えることができる

圧縮残留応力を付与して割れない車輪をつくる

鉄道の車輪と車軸は、安全走行を支える極めて重要な部品です。材料には高い信頼性が求められ、長年鉄が使われてきました。新日鉄住金は国内唯一の車輪・車軸メーカーとして、国内外で高い評価を受けています。

車輪はレールの上を転がって車両を移動させたり、停止させる役割を果たしています。そのためすり減って摩耗したり、転動疲労(※)という疲労現象が発生します。そのため、車輪の長寿命化を図るためには、レールと接触する車輪の外周面を硬くして耐摩耗性や耐転動疲労性を向上させる必要があります。また車輪には車両と乗客、貨物など大きな荷重が常にかかりますが、万一割れてしまうと大事故につながる恐れがあるため、耐割損性が大変重要になります。車輪の耐摩耗性と耐転動疲労性、耐割損性を高めるため、製造時には熱処理技術が駆使されています。

「所定の温度に加熱して金属組織をオーステナイトに変態させたあと、専用冷却器で車輪を回転させながら、踏面と呼ばれる車輪の外周部を急冷して焼入れを施しています(**図1**)。真っ赤な車輪は踏面だけを一気に冷やしていきます。加工後の踏面は完全に冷え硬くなったパーライト組織となり車輪の耐摩耗性と耐転動疲労性が向上します。一方、中心部の板は徐々に冷えていくため、リム部に圧縮残留応力(**図2**)が生じ、疲労強度の高いキュッと締まった粘り強い車輪ができるため、車輪に万一きれつが入っても進展せず、割れを防ぐことができます」(新保賢一工場長)

新日鉄住金では車輪を大阪市の製鋼所で製造しています。材料となる母材は和歌山製鉄所から安定的に供給されています。母材は高炉から転炉、二次精錬、鋳造まで一貫製造される高品質な高清浄度鋼です。製鋼所で鋼材を車輪1個分の重量に切断し、所定の温度まで加熱し、まず9000トンプレスで鍛造し、車輪の粗地をつくります。1回目の鍛造では座布団状に鍛造し、直径方向のボリューム配分を行います。2回目にフランジの付いた形状に鍛造します。そしてホイールミルで所定のサイズまで圧延したあと、回転しながら鍛造するSIRD(サード)700プレスで最終成形し、車輪素材が完成します。SIRD700は水平回転する下型と傾斜の付いた上型で鍛造することで、真円度に優れた車輪が従来の10分の1の小さな荷重で製造できる画期的なプレスです。こうした工程を経たあと、強度を高め、圧縮残留応力を付与する熱処理が施されています。

「新日鉄住金は清浄度の高い鋼材をつくっていますが、2011年に買収した北米のスタンダードスチール社でも脱ガス装置を設置し、国内同様の高品質な車輪をつくる体制を整えました。過酷な荷重条件では、車輪材料中の介在物はきれつや損傷の原因となります。特に北米の貨物鉄道では高強度な車輪が求められています。こうしたニーズにも応えるべく、日米2拠点で取り組んでいます」(新保工場長)

高周波焼入れで車軸の疲労強度を高める

車軸もまた和歌山製鉄所の母材を使い、製鋼所でつくられています。車軸は2本のレール上にある2枚の車輪をつなぎ、モーターの駆動力を車輪に伝える役割を果たしています。なかでも新幹線の車軸は軽量化を図るため中ぐり車軸(**写真1**)を開発し、300系以降の車両全てに採用されています。軸内に直径60ミリの孔を加工することにより、1本あたり約50キロの重量軽減が可能になるとともに、内側から超音波探傷ができることからメンテナンス性に優れた特性を持っています。

新幹線車軸では疲労強度の向上を図るため、高周波焼入れ(**図3**)を施しています。高周波焼入れとは、車軸表面だけを高周波で加熱し、急速冷却したあと、焼戻しを行う熱処理方法です。これによって金属組織は、内部はフェライト-パーライトなのに対して、表面は高硬度で体積の大きなマルテンサイトとすることで、表面に圧縮残留応力を生じさせ、疲労強度を高めています。熱処理後には探傷試験や硬さ試験、残留応力測定などを実施し、品質を保証しています。

「車軸は全長にわたって、さまざまな形状をしているため、それらの部位を均一に焼入れすることは非常に難しく、新日鉄住金の技術力が発揮されています。熱処理をはじめ、車輪と車軸の製造には数多くの独自技術が駆使されています。絶え間ない技術革新で、これからも新たなニーズに応え、国際競争力を高めていきます」(新保工場長)

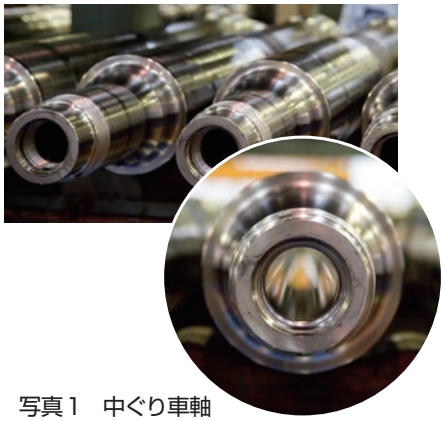


写真1　中ぐり車軸

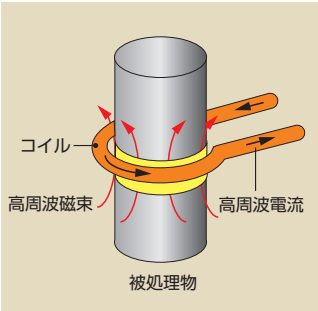


図3　高周波焼入れのメカニズム

高周波電流による電磁誘導を起こし、表面を加熱させて焼入れを行う熱処理の手法

新日鉄住金(株)
交通産機品事業部　製鋼所
輪軸製造部　輪軸冷間工場
新保 賢一 工場長

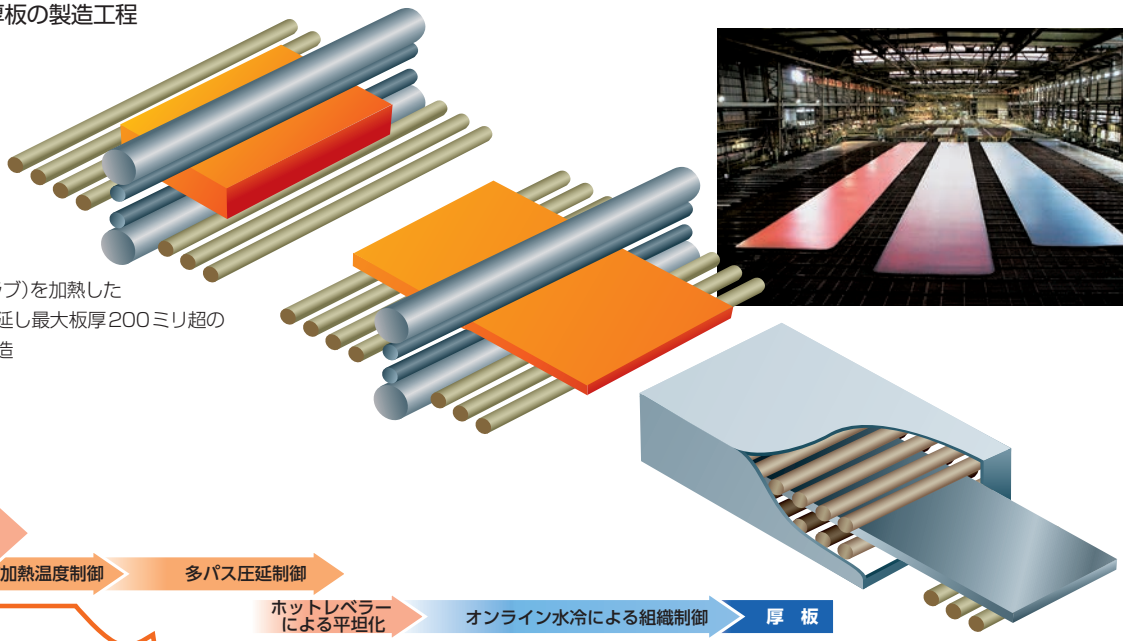
※ 転動疲労：車輪とレールがある力で押しつけられて転がり接触するとき、接触表面(踏面)や表面(踏面)下に微細なきれつが発生し、それが進展する現象

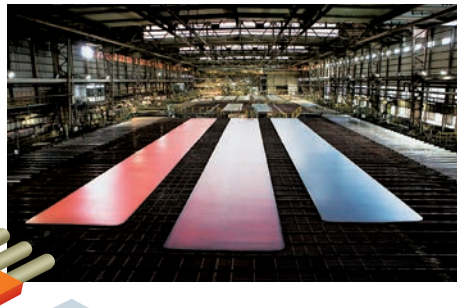
厚板

社会インフラを形成する

加工熱処理技術 TMCP

図１　厚板の製造工程





厚板

鋼片（スラブ）を加熱した状態で圧延し最大板厚200ミリ超の鋼板を製造

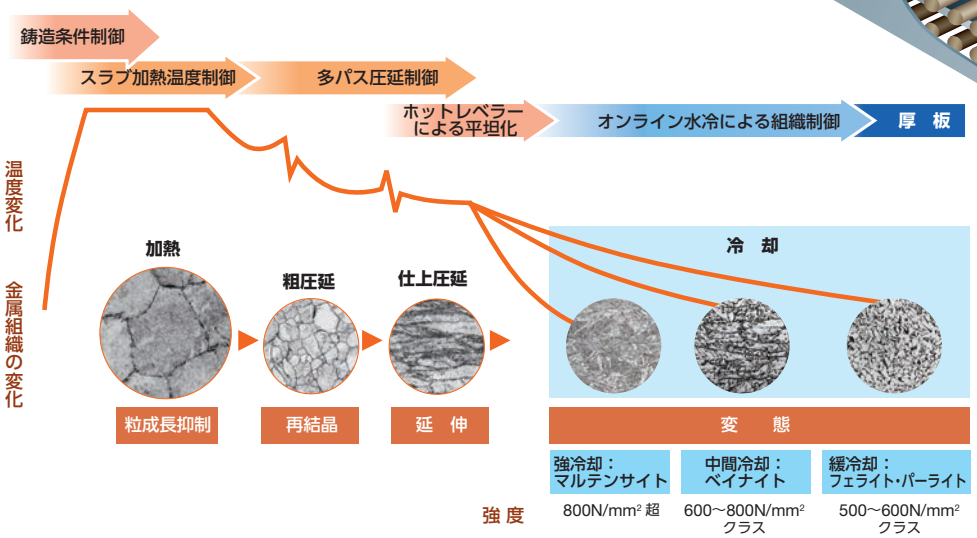


図２　金属組織を連続的に制御するTMCP

スラブの加熱、圧延、冷却に至る各工程で、連続的に金属組織を制御することにより、厚板製品に求められる鉄の特性を引き出している

強度、靭性、溶接性の三大特性を確保するために

厚板と呼ばれる主として厚さ6～200ミリ超の鋼板は、ビルや船舶、橋梁、建設産業機械、液化天然ガスや石油の貯蔵タンク、海底油田掘削用の海洋構造物、パイプライン、発電プラントなど多岐にわたって使われ、社会を支えています。これら社会インフラに発生するトラブルは人命や地球環境に直接影響を及ぼすため、安全性と信頼性の確保が何よりも優先されます。そこで厚板の特性には、構造物を維持するための強度、安全性を十分に確保するための靭性(粘り強く壊れにくい性質)と接合時の良好な溶接性(割れが生じにくいなどの性質)が求められます。この厚板の三大特性をつくり込む技術の1つが熱処理です。

しかし三大特性をすべて併せ持つ厚板をつくることは容易ではありません。通常、強度を上げるため、鉄の中に炭素や合金元素を加えます。これらの元素は強度を向上させる一方、靭性や溶接性を低下させてしまうこともあります。こうした技術課題を克服する最も有力な方法が、金属組織の結晶粒の微細化でした。新日鉄住金は結晶粒の飛躍的な微細化を可能にし、これらの特性の制御範囲を大きく広げたTMCP(Thermo-Mechanical Control Process：加工熱処理法)技術を駆使して、さらには必要に応じて焼戻しなどの熱処理を組み合わせて、高品質な厚板製品を供給しています。

「TMCPとは圧延による加工と圧延後の冷却を組み合わせた加工熱処理技術です。厚板工場では厚さが例えば300ミリのスラブを加熱して、お客様の注文に応じた所定の板厚、幅、長さの鋼板に、まず熱間圧延していきます(**図1**)。何℃でどのくらいの板厚にするのか、そのあと冷却開始までどのくらいの時間をおくのか、冷却はどのくらいの速度で何℃から何℃まで冷やすのか。それらの組み合わせは無限にあります(**図2**)」(中村浩史主幹研究員)

圧延と冷却の制御で金属組織を微細化する

それではTMCPのキーテクノロジーである結晶粒の飛躍的な微細化をどのように実現したのでしょうか。その基本的な考え方は、厚板の中をより多くの結晶粒で埋め尽くし、結晶粒一つひとつの大きさを小さくすることでした。そこでTMCPでは、まず圧延により多くの結晶が生まれる場所をつくります。

「厚い鋼片を圧延すると、板厚が薄くなるのに応じて、一つひとつの結晶粒もつぶされ、長く伸びた形になります。鋼の化学成分によりますが、例えば900℃以上の高い温度で圧延すると、伸びた結晶粒は原子がきれいに並んだ安定的な結晶に戻ろうとするため再結晶してしまいます。一方、800℃以下の低い温度で圧延すると結晶粒は伸びたまま残ります(**図3**)。その伸びたまま残った結晶粒では、圧延終了後に温度が下がる過程でオーステナイトからフェライトへ結晶構造が変化するとき、原子配列が乱れた場所から新しい結晶粒が生まれます。新たに生まれた結晶粒は、時間とともに成長して大きくなります。そのため圧延終了後の早い段階で冷却し、一つひとつの結晶の成長を抑えます。つまり次々とたくさんの結晶粒が生まれ続けるなか、冷却して一つひとつの結晶がなかなか成長しないようにすることで、結晶粒の微細化を実現しています」(中村主幹研究員)

また、このとき課題となるのが板の寸法精度の確保です。低温で圧延すると、高温に比べて硬いため、狙いどおりの寸法を得ることが難しくなります。さらに圧延後の加速冷却でも板が変形することがあります。こうした課題を克服する温度制御技術を開発し、さまざまなサイズで、さまざまな用途の厚板製品をつくり込んでいます。

「圧延による加工と圧延後の冷却を組み合わせたTMCP技術をさらに発展させ、強度や靭性、溶接性だけでなく、その他の性能にも優れた厚板を能率よく製造できる技術を開発したいと考えています。基礎となる理論に基づきながら、過去の膨大な研究で明らかになっている先人の知恵を活かして、新技術の開発を続けていきます」(中村主幹研究員)

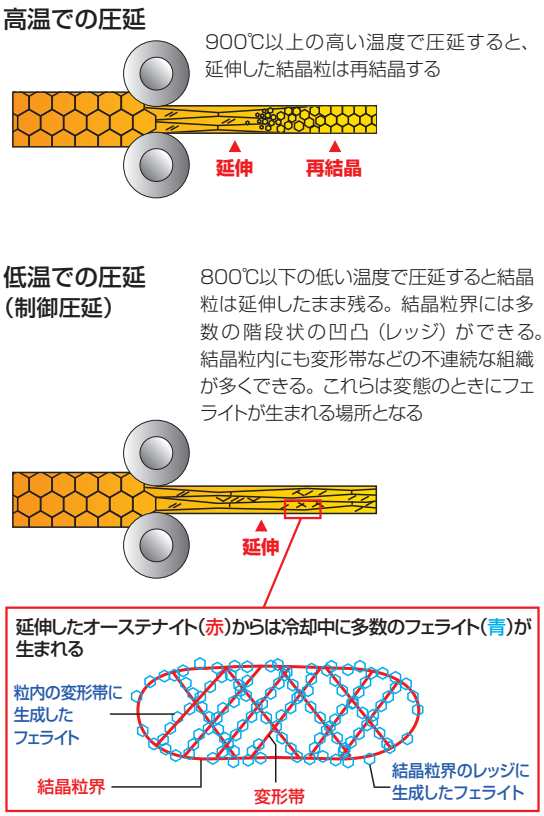


図3　金属組織制御における圧延の効果

新日鉄住金(株)
技術開発本部
鉄鋼研究所　厚板・形鋼研究部
中村 浩史 主幹研究員

薄板ハイテン

自動車の軽量化と衝突安全性を実現する

ヒートパターンチューニング

1180MPa級ハイテンが採用されたカムリ

©トヨタ自動車(株)

1180MPa級ハイテンが採用されたマキシマ

©日産自動車(株)

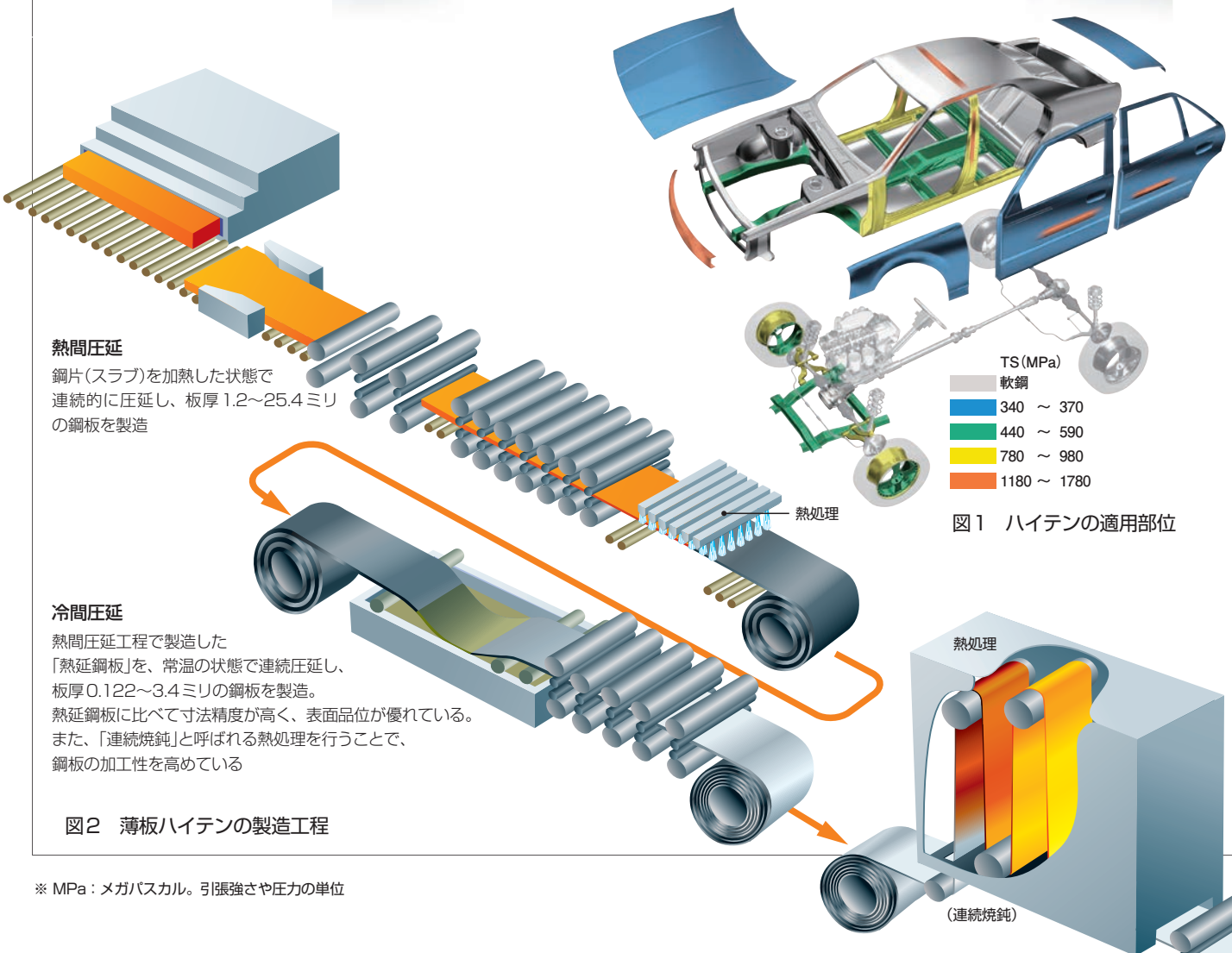


図1　ハイテンの適用部位

熱間圧延

鋼片(スラブ)を加熱した状態で
連続的に圧延し、板厚1.2～25.4ミリ
の鋼板を製造

冷間圧延

熱間圧延工程で製造した
「熱延鋼板」を、常温の状態で連続圧延し、
板厚0.122～3.4ミリの鋼板を製造。
熱延鋼板に比べて寸法精度が高く、表面品位が優れている。
また、「連続焼鈍」と呼ばれる熱処理を行うことで、
鋼板の加工性を高めている

図2　薄板ハイテンの製造工程

※ MPa：メガパスカル。引張強さや圧力の単位

車体に幅広く採用

自動車は燃費を向上させて環境負荷を低減するため、車体の軽量化が図られています。使われている板厚を単純に薄くすれば軽くなりますが、同じ性能の鋼板では万一の事故のとき衝突安全性を確保する強度を維持できません。そのため、より強い鋼板が求められています。しかし鋼板の強度を上げていくと、加工しにくくなり成形性が下がってしまうという課題がありました。

新日鉄住金は強いだけでなく、複雑な形状に加工できる成形性にも優れた各種ハイテンを開発しています。ハイテンとは引張強さが高い鋼板のことで、一般の鋼板が引張強度270MPaであるのに対して、340～780MPaを高張力鋼板（ハイテン）と呼びます。新日鉄住金は世界最高強度を誇る1180MPa以上の超ハイテンを製造しています。ハイテンは車体の約60％に適用され、外板パネル類、足回り類、内板・構造部材・補強部材など幅広く使われています（**図1**）。これらハイテンは熱処理技術を駆使してつくられています。

「最も強度の高い金属組織はマルテンサイトです。加工性に優れる軟らかいフェライトでは強度が出せません。しかし強度を上げるため組織をマルテンサイトだけにすると、成形時に割れてしまいます。したがってマルテンサイトだけでなく、その他の組織を含めて最適な組織配合を設計し、その理想的な組織をどのように熱処理でつくり込んでいくかを私たち研究者は懸命に考えてきました。熱処理は熱延工程や連続焼鈍工程で行うのですが、単純な焼なまし、焼入れ、焼戻し、焼ならしではなく、お客様の求める特性に合わせてさまざまなヒートパターンを組み合わせて組織をチューニングしています」（匹田和夫主幹研究員）

知見を積み上げ、高強度化を加速

それではハイテンは製鉄所でどのようにつくられているのでしょうか。高炉で鉄鉱石からできた銑鉄は、転炉で炭素量などの成分調整をしたあと、連続鋳造で薄板の形状などに応じた大きさに固められた鋼片になります。その鋼片を加熱した状態で連続的に熱間圧延（熱延）していきます（**図2**）。

「熱延工程で圧延された板は長いテーブルの上を高速で走り、巻き取られていきます。その間、どういう組織をつくればいいのかを考えた熱処理を行っています。巻き取られたコイルは塊になるため、突然冷却速度が遅くなります。わずか十数秒での組織制御と数時間かけた組織制御を組み合わせて、熱延鋼板をつくります。冷延鋼板はその後、冷延工程を経て、連続焼鈍がなされます。ここでは鋼板を数分加熱し、ほんの数秒の急冷、そして、数分保熱で冷延鋼板をつくり込むことで、ハイテンが出来上がります。異なる時間オーダーを駆使した熱処理、まさに匠の世界です。そのノウハウが新日鉄住金の技術先進性の源泉となっています」（岡本力上席主幹研究員）

ハイテンは製鉄所から自動車部品メーカーに出荷されると、さまざまな形状の部品に加工され、その部品が自動車メーカーで組み立てられ1台の自動車が完成します。

「今や高強度化は大前提で、どれだけ成形できるようにするかが勝負の鍵を握っています。そこで利用加工技術の開発にも注力しています。お客様に対して、高強度材を使って、こういう成形法で部品をつくってくださいというソリューションを提案しています。その一つがホットスタンプです」（匹田主幹研究員）

ホットスタンプとは、ハイテンを約900℃に加熱して軟らかくした状態でプレス加工し、同時に金型との接触に伴う冷却による最適なヒートパターンの焼入れ効果（**図3**）によって、最高1800MPa級の強度と良好な部品の寸法精度を実現します。

「590MPaが開発の主流だった20年前は、フェライトをメインに材料設計していました。しかし組織制御への理解が深まると、マルテンサイトをこう使ってみようとか、ほかの組織を入れてみようと発想が広がり、多様なヒートパターンを駆使して3倍の高強度化を可能にしました。今後も知見を積み上げ、ハイテン開発に取り組んでいきます」（岡本上席主幹研究員）

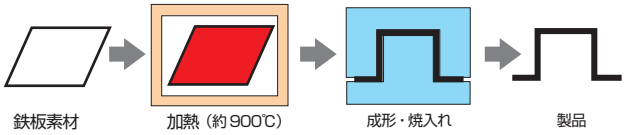


図3　自動車部品メーカーでのホットスタンプ製造工程

1800MPa級ホットスタンプが採用されたCX-5　©マツダ(株)

新日鉄住金(株)
技術開発本部
鉄鋼研究所　薄板研究部
岡本 力 上席主幹研究員

新日鉄住金(株)
技術開発本部
鉄鋼研究所　薄板研究部
匹田 和夫 主幹研究員

鋼管の利用技術3DQ

焼入れ効果で高強度化

自動車に乗る人たちの
安全を守る

新型NSX

©本田技研工業(株)

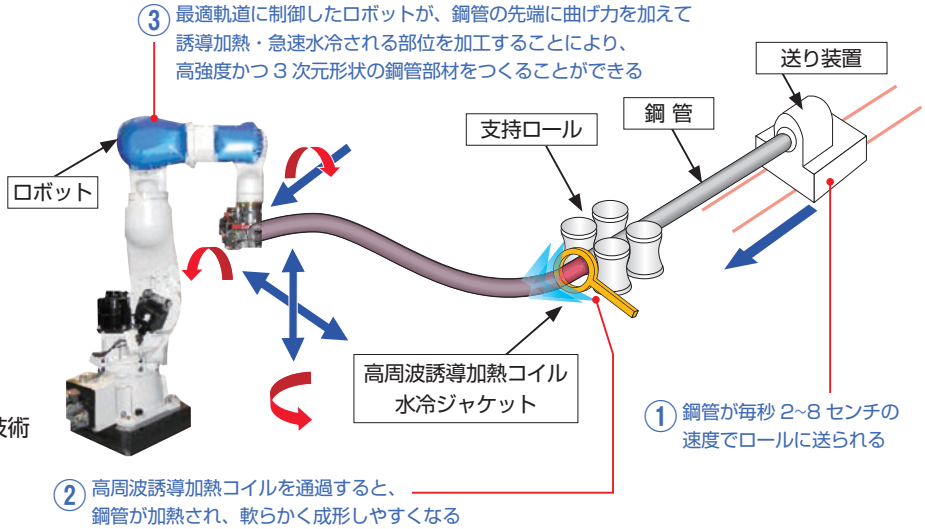


図１　3DQ量産加工技術

3DQ超高張力鋼管の採用例

©マツダ(株)

３列目座席下部クロスメンバーフレーム

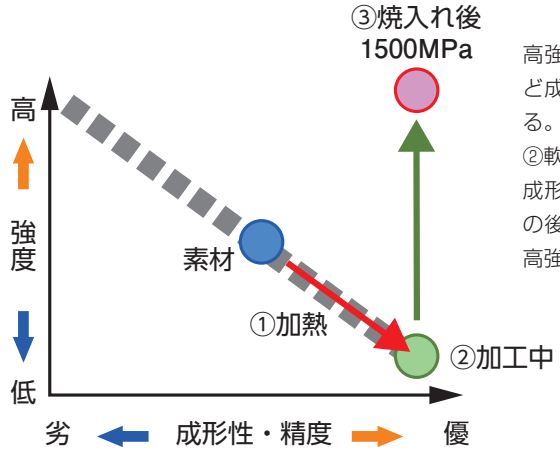


図２　3DQの強度と加工性の関係

高強度鋼管は強度が上がるほど成形性と加工精度が低下する。3DQ技術では、①加熱し、②軟らかくして加工するため、成形性と加工精度が良く、その後、③急速冷却することで高強度化を達成できる

1500MPa級超高張力鋼管で複雑な形状加工を実現

自動車の軽量化を図るため、骨格部品にさまざまな素材が使われているなか、新日鉄住金は従来部材と同じ剛性(※1)と強度を確保しながら、大幅な重量低減を実現する鋼管の利用技術3DQ(※2)を開発しました。

自動車の車体は、金型を用いてプレス加工した部材を使って製造するのが一般的です。成形部材同士をスポット溶接して断面が閉じた構造をつくり、曲げやねじりに対する剛性を向上させるとともに、ハイテン材と呼ばれる高強度鋼板を用いて薄肉化することで衝突特性を高めながらも軽量化が図られています。しかし、もともと断面が閉じた構造の鋼管であれば、溶接部のフランジ(のりしろ)が不要となり、さらなる軽量化が可能になります。そこでハイテン鋼管に期待が寄せられますが、従来のハイドロフォーム(※3)や冷間曲げ(※4)で複雑形状部品に加工するには980MPa級までが限界でした。一方アルミニウム製の管材を使った車体用の部材は実用化されているものの、高コストであるため、量産車への採用は限定的でした。3DQが開発されたことで、こうした課題が解消され、金型を用いずに超高張力鋼管製の部材を複雑な形状に製造できるようになりました。

「熱処理は鋼管出荷後に部品への加工プロセスのなかで行われます。3DQは鋼管の片方をロボットに持たせ、鋼管を送りながら高周波加熱を行います。銅コイルに電流を流して誘導発熱により鋼管を加熱し、ロボットを部品の形状に合わせて動かします(**図1**)。鋼管は加熱された狭い領域だけが軟らかくなり、変形します。その直後に水をかけるため、焼入れが起こります。真っ赤な状態はごく短い時間です。急に冷やすことが肝で、マルテンサイト変態を使って鉄を硬く強くしています。600MPa級の鋼管で焼入れ後に1500MPa級以上の高い強度が得られます(**図2**)」(植松一夫主幹研究員)

トータルパッケージで利用技術を提供

3DQでは焼入れしたあと、焼戻しは行いません。熱処理技術の基本原理では焼入れすると鉄は硬くなるものの、もろくなるため、焼戻しをして粘り強くしなければならないのではないかという素朴な疑問が浮かびます。

「急冷しても、もろさが顕著にならないように、鉄に含まれる炭素量を調整するとともに合金元素を添加することで、焼戻しを施さなくても、もろくない高強度な鉄をつくり込んでいます。約900℃まで加熱することで鋼管は50MPaの強度まで下がり、ロボットの力でも十分加工できるようになります。ロボット軌道の繰り返し精度は非常に高いものですが、部品形状から計算される軌道そのままではロボットアームや焼入れ後の鋼管の微妙なたわみなどにより正規の形状からずれることがあります。そこで形状補正プログラムも開発しました。装置だけではなく形状の直し方のノウハウまでパッケージで利用技術を提供しています」(植松主幹研究員)

3DQに適した鋼管は炭素量や合金元素を調整してつくり込まれた熱延コイルを母材に新日鉄住金グループで製造しています。ロボット制御技術は(株)安川電機と共同開発し、形状補正などの加工ノウハウは新日鉄住金と日鉄住金鋼管(株)で構築しました。また3DQの設備設計から据付工事、メンテナンスまで日鉄住金テックスエンジ(株)が行っています。新日鉄住金グループの総合力と他企業との共同開発力が発揮されています。

鉄だからこそ強く細く美しい部材ができる

3DQを用いて加工された1500MPa級の超高張力鋼管の適用が広がっています。ミニバンの3列目座席下部のクロスメンバーフレームなどに採用され、従来部材と同等の剛性や強度を確保しながら軽量化を実現しました。

続いてホンダのスーパーカー「新型NSX」のフロントピラーに採用されました。大幅な軽量化ができる上、断面を極限まで最小化できたことでフロントピラーのスリム化に成功し、ドライバーの前方視界を広げ、運転しやすいデザインを実現しています。また万一の事故で横転してもルーフクラッシュを防ぐ強度で安全性も確保しています。

「アルミニウムは比重が鉄の3分の1で軽いものの、鉄と同じ強度を発揮するためにはフロントピラーを太くしなければならず、軽量化と安全性、そしてデザイン性を両立できませんでした。鉄だからこそ、強く細く美しいフロントピラーをつくることができたのです。今後は電気自動車や水素自動車が増えていきます。したがって人だけでなく、床下に設置される電池や水素タンクも守らなければなりません。衝突安全性が求められる部位に特長を発揮し、環境にやさしい自動車づくりに貢献していきます」(植松主幹研究員)

フロントピラー ©本田技研工業(株)
((株)エイチワンと共同開発)

新日鉄住金(株)
技術開発本部
鉄鋼研究所　利用技術研究部
植松 一夫 主幹研究員

※1. 剛性：外力に対する物体の変形しにくい性質　※2. 3DQ(3 Dimensional Hot Bending and Quench)：3次元熱間曲げ焼入れ
※3. ハイドロフォーム：金型内に装着された鋼管に、圧力をかけることで複雑な形状に成形する技術　※4. 冷間曲げ：加熱せず常温で曲げる加工技術

DLP線材

世界の長大橋ケーブルの高強度化ニーズに応える

塩浴で熱処理

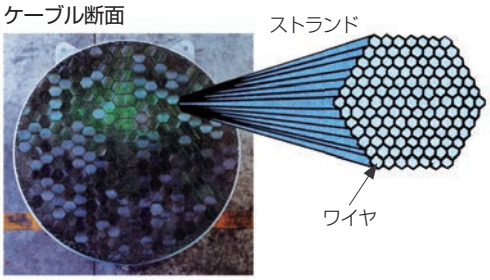


図１　吊橋の構造とメインケーブルの断面

メインケーブルは、亜鉛めっきワイヤを平行に束ねたストランドをさらに束ねた構造になっている。ケーブル１本に合計約数万本のワイヤが使用され、長さは橋の全長間で継目なく数キロにも及ぶ

DLP線材(開発鋼)が採用されたトルコ共和国のオスマン・ガーズィー橋（イズミット湾横断橋）

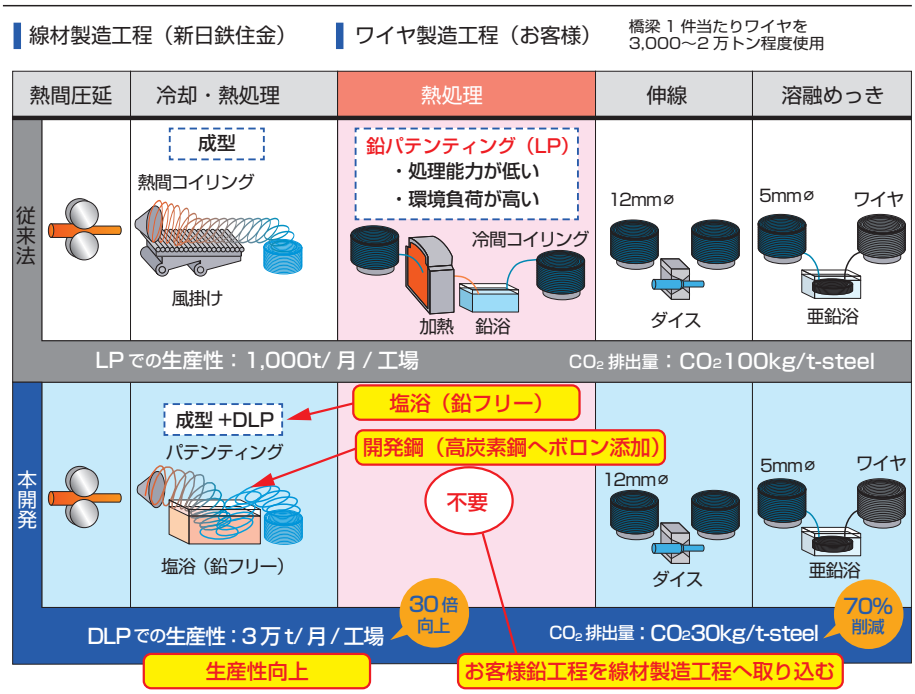


図２　線材からワイヤができるまで

ワイヤ製造メーカーでの生産性を30倍向上、鉛フリー化、CO_2排出量70%減に貢献

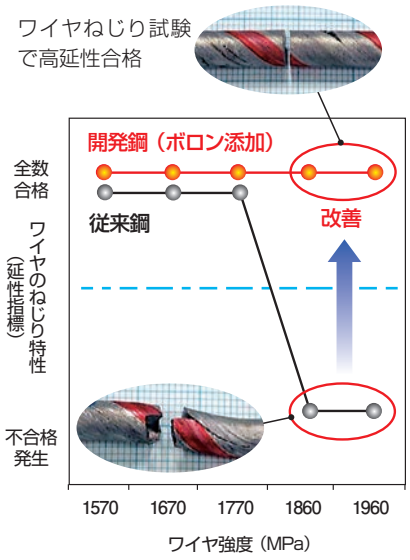


図３　ボロン添加による金属組織の健全化と延性向上効果

金属組織が健全化し、ワイヤの延性が向上

微細なパーライト組織をつくり込む

吊橋は主塔とそれに渡されるメインケーブルからなり、メインケーブルから垂らしたハンガーロープで橋桁を吊って支える構造となっています。そのためメインケーブルには長期間の使用に耐え得るための耐食性と、橋の大きな自重に耐え得る強度が求められます。

例えば、明石海峡大橋のメインケーブルは、直径5ミリ強の亜鉛めっきワイヤを平行に127本、6角形に束ねたストランドを、さらに直径約1メートルの太さに束ねた構造になっています(**図1**)。ケーブル1本に合計約3万7000本のワイヤが使用され、長さは橋の全長間で継目なく数キロにも及びます。そのワイヤの材料となる高強度線材を新日鉄住金は供給しています。明石海峡大橋に代表される長大橋建設は、日本では90年代に一段落しましたが、90年代後半から2000年代にかけ中国をはじめ新興国を中心に交通インフラの整備に伴う長大橋建設計画が数多く立ち上がり、ワイヤの一層の高強度化と急増する需要への供給対応が急務となっていました。

ワイヤは直径約12ミリの線材に、ワイヤ製造メーカーが鉛パテンティング(Lead Patenting：以下LP(※))を施し、伸線と溶融亜鉛めっき処理を行い製造されます。しかし海外ではLPを実施できる工場が少ないことに加え、LPでは1工場当たりの月間処理量は1000トンと生産性が低く、加熱によるCO_2排出や鉛使用による環境への影響も問題となっていました。そこで新日鉄住金はワイヤ製造メーカーでのLP工程を省略するDLP(Direct in-Line Patenting：直接パテンティング)線材を開発しました。これにより、30倍もの生産性向上、鉛フリー化、CO_2排出量70%削減を実現しました。

「DLP設備は線材の成型直後にパテンティング処理を実施するもの(**図2**)で、コイル状の線材をそのまま溶融塩に浸漬する熱処理を施しています。DLPは、1985年に君津製鉄所で稼働した設備ですが、パイロットプラントは当時の光製鉄所にあり、開発当時は熱プロセス、設備プラントを含め、多くの人が関係する一大プロジェクトでした。

強度と延性を併せ持つ微細なパーライトの金属組織をつくるためには、オーステナイト域に加熱された鉄を最適な冷却速度で冷却し、適正な温度域に保持する恒温変態処理を施すことがポイントです。冷媒には風、砂、水などさまざまなものがありますが、パーライト組織には溶融塩槽につける塩浴が最適であることを突き止め、実用化しました。すでに、コンクリート建造物の補強鋼やピアノ線はDLP設備から製造されており、こうした技術の積み上げを活用して橋梁用のDLP線材を開発しました」(磯 新主幹)

ベイナイト生成のメカニズムを世界で初めて解明

しかしDLP設備で高強度橋梁用ワイヤを製造するには、越えるべき技術の壁がありました。高強度橋梁用のワイヤには、高炭素鋼にシリコンが多く添加されていますが、DLP設備が元々シリコンを高めた化学成分を対象とした設計ではなかったために、線材表層にベイナイトという金属組織が発生し、ワイヤの延性が低下していました。また、DLPはコイル状に成型された状態での熱処理で、単線で熱処理を行うLPに比べて冷却速度のばらつきが生じやすく、品質が安定しないという課題もありました。

そこで、ベイナイト組織を発生させずに安定的に高強度パーライト組織をつくり込むため、ベイナイト組織の生成過程をナノメートルオーダーで検証しました。そして、ベイナイト組織が生成する核が粒界フェライトであることを突き止め、この粒界フェライトを抑制するために、高炭素鋼においては適用例のないボロンの添加を検討しました。

ボロンは、0・3%以下の炭素を含む低～中炭素鋼では広く活用されていますが、橋梁のような0・8%以上の炭素を含有する高炭素鋼に対しては、本来パーライト組織を形成するセメンタイトとなるべき炭素原子が炭化物として析出してしまうため、有害とされていました。

しかし、勝算はありました。フェライトを抑制するとの観点ではボロン添加は理にかなっていたからです。ボロンが原子状態で鋼材中に存在できる状態(固溶状態)とすべく、熱処理試験を重ね、ボロン炭化物の析出を制御し、ボロンを有効活用して粒界フェライトを抑制することに成功しました。これにより、高強度と高延性の両立を実現することができました(**図3**)。開発鋼はトルコのオスマン・ガーズィー橋にも採用されています。

「橋梁ケーブル用線材のさらなる高強度化に向けた次の研究開発にチャレンジしているところです。合金元素の添加だけでなく、圧延の手法も変えて、さらに微細化した組織をつくり込むことが求められています。熱処理も現在は塩浴ですが、新しい冷媒を活用することができれば、さらにバリエーションが広がる可能性があります。これからも鉄の未知の可能性を引き出していきたいと考えています」(磯主幹)

新日鉄住金(株)
棒線事業部
棒線技術部　棒線商品技術室
磯 新 主幹

※ Lead Patenting：鋼材の加工性を維持しながら強度を高めるための調整冷却(550℃前後の熱処理)。この技術は19世紀にイギリスで特許(パテント)第1号となったことから「パテンティング」と名付けられた