

加工工程を熟知した「材料設計」の妙技

高強度の最先端をいく 棒鋼・線材(6)

強度や加工性を高めるために、炭素以外にクロムやモリブデンなどの元素を加えて合金化し、特殊な熱処理用に結晶組織を制御している鋼材を「特殊鋼」という。今号では、高強度・高品質を実現する「材料設計」と「組織・材料制御技術」を紹介するとともに、今後の「特殊鋼棒鋼・線材」の進む方向を展望する。

「特殊鋼棒鋼・線材および製造される部品」の強度レベルは「スチールコード」(本シリーズ第3回参照)と共に、各種鋼材の中で群を抜いている。圧延後の強度は加工性を維持する必要があるため1,000MPa程度だが、二次加工を施した後の最終製品(部品)では2,000~3,000MPaになる(図1)。

JISなどの規格通りの鋼材は海外でもつくることができるが、こうした究極の鋼材特性を実現するためには、二次加工メーカーでの切削・熱処理などの加工条件や最終の目標特性に対するプロとしての深い理解が必要となる。その上で、幅広い化学成分の中で、熱と材質の相関などを計算・制御する、さらには工業的にコストを抑えながら環境にやさしい製造工程を、部品として最終的に達成すべき強度を実現する。この一連のつくり込みを「材料設計」と呼ぶ。新日鉄の強みは、こうした技術力をベースに、大量生産される部品の特性にバラツキが出ない高品質な鋼材を安定供給できることにある。

例えば、自動車の駆動力を伝えるのに不可欠な部品である「歯車」は、通常熱間鍛造後に「焼きならし」をして切削加工(歯切)を行い、最終的に表面の硬度を高める「浸炭焼入」を施す。一方、「弁ばね」は逆に最初に「焼入れ・焼戻し」により硬度を高めた後、硬いままの状態でもコイルに巻くという極めて難しい加工がなされる。

通常過大な力がかかると「破壊」する。しかし、「歯車」や「弁ばね」には高い耐久性が求められるため鉄製の硬い小さな玉(ショット粒)を表面に高速で当てて、圧縮の残留応力を付与する「ショットピーニング」(1)を行う。そ

特殊鋼棒鋼・線材の強度レベル

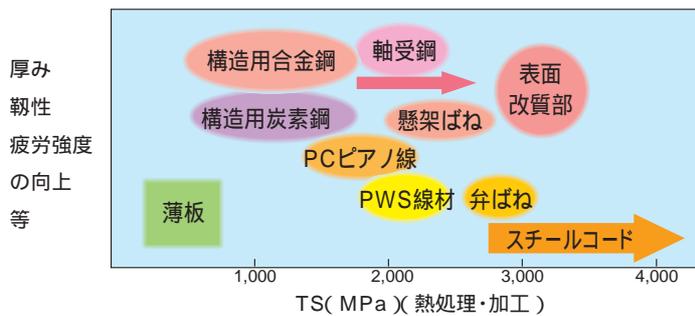
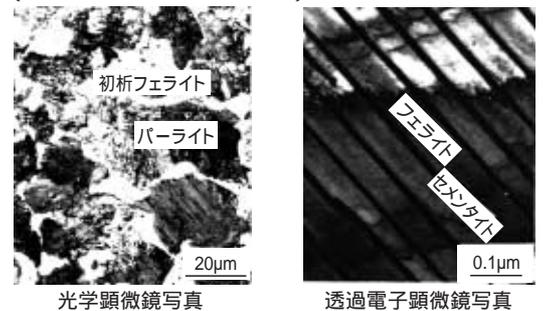


図1

加工工程での組織写真 (フェライトパーライト組織)

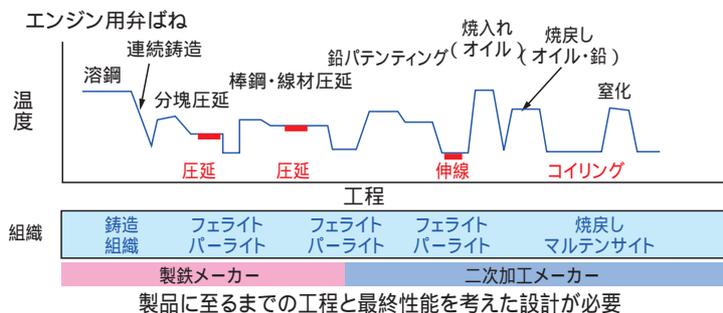
写真1



光学顕微鏡写真

透過電子顕微鏡写真

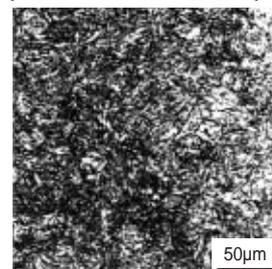
製品に至るまでの熱履歴と組織変化(弁ばねの例) 図2



製品に至るまでの工程と最終性能を考えた設計が必要

最終ばねの組織写真 (焼戻しマルテンサイト)

写真2



伸線加工時の組織は加工性の優れたフェライトパーライトとし、最終のバネでは十分な強度を付与する焼戻しマルテンサイトにする。

1 ショットピーニング: 無数のショット材を金属表面にたたきつけるもので、金属表面改質法の一つ。ショットピーニングにより、金属表面の硬度が増し、一定の深さで圧縮応力を持った層が形成され、疲れ強さが増す。

れによってより強い力が加わっても壊れないトランスミッション用の歯車やエンジン用の弁ばねが製造される。

こうした複雑な加工工程で鋼材が熱処理を受けたときに、材料の状態、特に介在物や鉄の組織、析出物(2)がいかに変化するかを理解し、最終製品として目的の特性に到達させるため、加工工程での熱の履歴と変形を織り込み緻密なシナリオづくり、つまり「材料設計」を行っている(図2)。

高強度でもコイル状に巻ける「粘り」

ここで「材料設計」がいかに重要かを示す具体例を一つ紹介する。

コイルで提供される「弁ばね」用の線材は、まず、糸巻き状になったコイルから線材を引き抜いて径を細くする(伸線加工)。その伸線加工をしやすくするために、線材は加工メーカーへ納品される時には鉄の組織を「フェライト」と「セメンタイト」が層状に並んだ状態にしている(写真1)。本シリーズの第4回で述べたように、「スチールコード」はこの伸線加工で飛躍的に強度を高めて最終製品となる。

しかし弁ばねの場合は、その後、焼入れ・焼戻しを行い、炭素を0.55%含んだ硬いマルテンサイト組織にして(写真2)さらに「ショットピーニング」や、「へたり」(ばねが使用中にその負荷方向へ塑性変形を生じてしまうこと=「降伏」)を抑えるためにばねが降伏しないように強度を高める「セッチング」などの工程を経る(図3)。

その中で、特に材料への負荷が厳しいのは、2,000MPa級の強度のまま冷間でコイル状に巻くコイルング工程だ。材質が悪いとその段階で折れてしまう。それだけの強度とコイル状に巻く「粘り」を合わせ持つ材料を製造できるのは、新日鉄をはじめとする日本の鉄鋼メーカーだけだ。

海外の鉄鋼メーカーでは、コイル状に巻くために鋼材の強度を落とさなければならず、必然的にでき上がった弁ばねも低強度で大きくなりエンジンも小型化できない。そのため現在、日本の自動車メーカーは海外生産化を進める中で、この「弁ばね」についてはほとんどが日本国内から直接調達している。

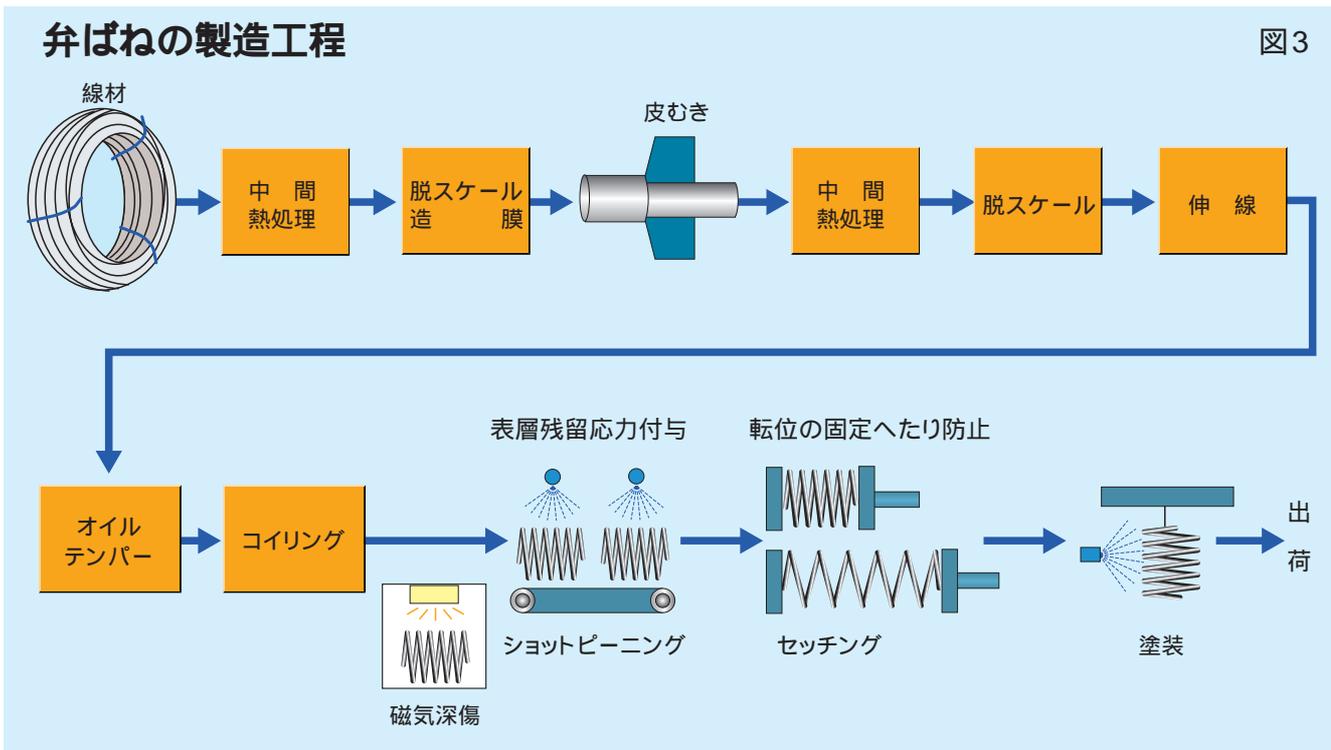
“邪魔もの”を味方に 「組織・材質制御技術」のキー、 「オキサイドメタラジー」

そうした「材料設計」における品質を達成するための重要な技術が、「組織・材質制御技術」だ。

もともと自動車部品に使われる特殊鋼の分野は、電炉メーカーが先行して事業化し、高炉メーカーは後発だった。電炉メーカーの材料設計は、不純物が多いスクラップを原料とする中で、熱処理などを経て特定の機能を発揮させるために「元素を足していく」方向にあった。

一方、鉄鉱石から鋼を作る高炉メーカーの材料設計は、「きれいな鋼」をベースに添加物をできるだけ入れずに鋼材組織をコントロールする。そして、現在では、より清浄度の高い鋼にする各種技術が開発、実用化されて高い評価を受けている。

新日鉄では、特殊鋼の「組織・材質制御」にそのキーとなる「オキサイドメタラジー」を最初に導入した。オキサイドメタラジーとは、それまで“邪魔もの”としてしか見られていなかった酸化物=介在物を、高度に組成、形状、分散状態を制御することにより、鋼材特性をコントロールする機能材料開発の要素技術だ。



2 析出物：固体状態の鉄の中に溶けていた物質が、温度や加工の影響により炭化物や窒化物となるもの。

粒内フェライトにより 組織を微細化し、靱性を高める

その活用方法には2つの方向がある。一つは鋼材中の「組織制御で組織(3)を微細化する」ものだ。

特殊鋼が使用される多くの部品は、強度のほかに強い衝撃にも壊れないような高い靱性を必要とする。しかし、組織が大きいと鋼材自体が脆くなっていく。

従来、クランクシャフトや足回り部品は、1,200 での熱間鍛造後、このままでは組織が100から200 μm と大きいため、最終部品の強度と微細な組織を確保するために、部品形状ができ上がった後で再加熱して焼入れ焼戻し(850)を行い、再び組織の大きさを整える工程が必要だった。そこで、新日鉄では「オキサイドメタラジー」を駆使し、焼入れ焼戻しなしで、熱間鍛造ままの組織を微細化する組織制御技術を、いち早く完成し実用化した。

その手法は、直接組織を微細化するのではなく、組織の中に異なる第二相(フェライト)を発生させ、組織を微細にする方法だ。すなわち、熱間鍛造ままの組織の大部分を占める大きなパーライト中に、細かい粒内フェライトを生成させ、細かな組織と同じような特性を実現したものだ(写真3)。

技術のポイントは「粒内フェライトの生成」だ。まず製鋼後に鋼が固まっていく段階で、微細なマンガンの硫化物をつくり、そこにバナジウムの窒化物(VN)を角のように析出させる。さらにバナジウムの窒化物とフェライト(鉄)は結晶の構造が似ているため、温度が下がっていく過程でバナジウムの窒化物を核にしてフェライトが生成する。残った周りのオーステナイト(鉄)は、温度がさら

に下がっていくとパーライトに変態していくが、粒内にフェライトを多く生成・分散させることでパーライトが結果的に細かい組織になっていく(写真4)。

結晶粒の粗大化を抑える「ピン止め効果」

もう一つの方向は、「結晶粒(4)を微細化する」ものだ。

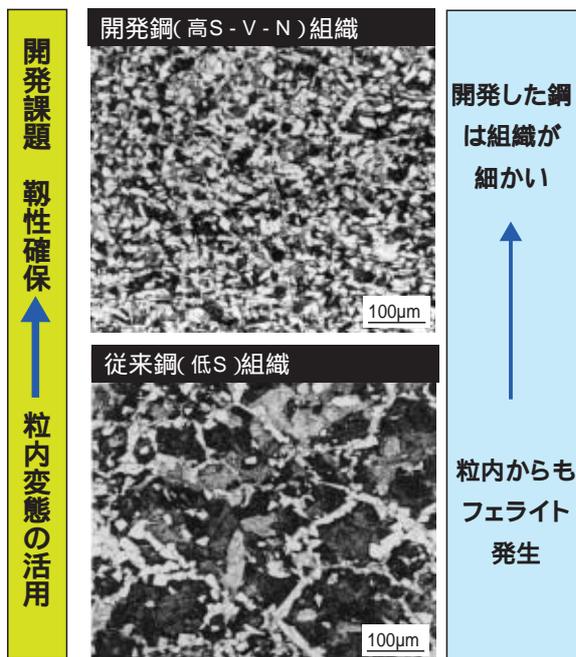
近年、歯車製造工程でのCO₂生成の抑制や製造コストの抑制のため、浸炭温度の高温度(短時間化)や冷間鍛造歯車の取り組みが盛んに行われるようになってきた。しかし従来は問題となっていなかった「結晶粒の粗大化」が顕在化し、浸炭後の部品で局所的な結晶粒の粗大化が部品強度や歪に悪影響をもたらすこととなった(写真5)。

「結晶粒の制御」で大きな役割を果たしているのが、結晶粒の粗大化を抑える「ピン止め効果」(5)だ。しかし、ピン止め効果を有効に作用させるには、炭化物や窒化物等の析出物を形成する元素を入れておけば良いという訳ではない。切削などの加工性や部品特性を損なうことなく析出物の種類・大きさ・量を制御し、部品が浸炭処理される時に析出物の状態が最適になるようにすることがポイントだ。

添加量が多すぎると途中で溶けずに粗大化したまま残り、最後の析出時に役立つような中ぐらいの大きさの析出物が少なくなってしまう。また、少なすぎると析出物自体が少なくなり、ピン止め効果が発揮できない。それに加え、単純に成分量を調整しただけでは、製鋼の鑄造段階で析出物が生成されてしまい、目的とする現象をコントロールできない。強度を確保する最後の熱処理時にちょうど良く効果が現れるように設定する技術は極めて高度であり、単に化学成分と製造プロセスを知っただけでは同じような棒鋼製品をつくることはできない。

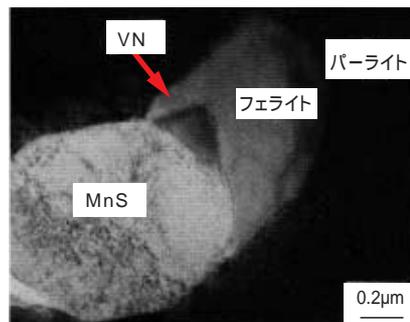
従来鋼と粒内フェライト型 熱鍛非調質鋼の比較

写真3



熱鍛非調質鋼の粒内フェライト変態核

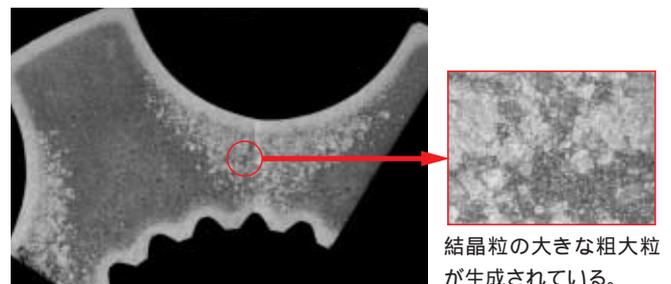
写真4



MnS+VN上に変態した粒内フェライトTEM像

粗大粒発生例

写真5



- 3 組織：顕微鏡観察時に金属表面を腐食させることで、見ることができる模様。金属材料の種類、化学組成あるいは処理状態で異なる。フェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイト等。
- 4 結晶粒：氷の結晶のように核を中心に無数の結晶が成長し、隣接する結晶同士が互いに衝突した境界面(結晶粒界)で囲まれたもの。熱処理材では各組織の境界が結晶粒界となる場合もある。

そこに新日鉄のモノづくりのノウハウが活きる。化学計算に基づく元素量と化学成分バランスをベースに、各温度でどのように元素溶解して析出するかといった現象を把握しているからこそ可能になる。最初は多めに析出物が出るようにして、途中で溶けて最後に再び適量が再析出するという部品の製造工程に合わせた緻密なシナリオが必要だ(図4)。

また、棒鋼製品として提供する段階で、最終的な強度を達成するために最適な析出物の量と状態を設定するだけでなく、粘りのあるきれいな鋼を提供するために不純物は徹底的に除去している。例えば、チタンやアルミは、窒素が多い場合には有用な析出物となるために必要な元素だ。

しかし、その添加量が多いと加工性は低下する。清浄度の高い鋼をベースに制御することで、加工性や強度などの特性のバランスを取り、高温浸炭や冷鍛工程に適用できる高品質の浸炭用鋼材を提供することができる(写真6)。

近年、新日鉄では析出物制御により、需要家あるいは部品ごとに加工工程、熱処理条件に合わせた「組織と結晶粒を微細化する材料設計」を行っている。すなわち、熱間鍛造では約1,200、浸炭処理では最大1,050に対応する商品体系化している(図5)。この「組織と結晶粒微細化技術」を適用した棒鋼製品は、環境にやさしく、また部品のコスト削減にもつながることから、すでに多くの自動車メーカー、自動車部品メーカーで採用され高い評価を得ている。

高性能化と信頼性向上で社会貢献を

量産の鉄鋼材料の中で、「特殊鋼棒線・線材」ほどさまざまな機能を求められる鋼材はありません。また、自動車が開発され1世紀を過ぎたこの間、高性能化、原価低減、燃費向上さらには環境問題などの多くのニーズに応える形で、自動車の発展とともに特殊鋼棒鋼・線材は進化してきました。

現在、実用鋼の最大強度は4,000MPaですが、鉄の理論強度10,000MPa以上ですから、まだまだ強度アップが可能です。また、ハイブリッドカーをはじめとして、コモンレールやCVT等の新たな部品に対しての「特殊鋼棒線・線材」のニーズは、今後ますます高度化するものと考えています。

今後も高度化するニーズに応え、さらに高性能化でき、

かつ信頼性の高いさまざまな「特殊鋼棒線・線材」を開発・提供し、自動車の発展に寄与し、社会貢献をしていきたいと考えています。

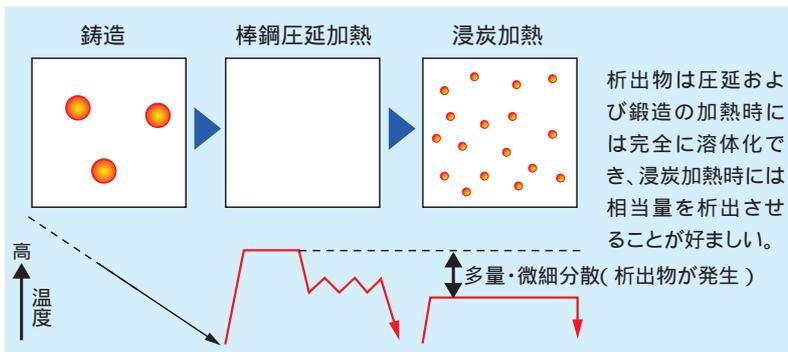


監修 棒線事業部室蘭製鉄所
製品技術部部長
蟹澤 秀雄 (かにさわ・ひでお)

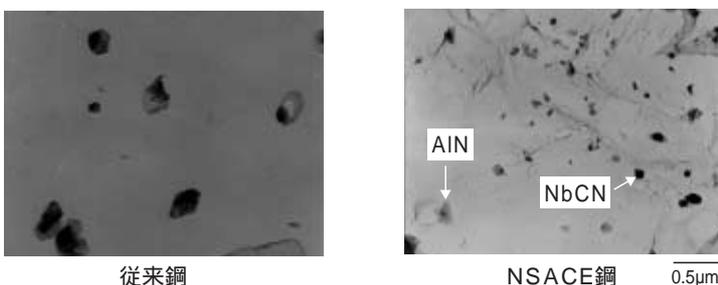
プロフィール
1955年生まれ。東京都出身。
1978年 入社。
一貫して特殊鋼棒鋼・線材の研究開発に従事。
2002年 室蘭技術研究部長。2006年より現職。

ピン止め効果の考え方

図4

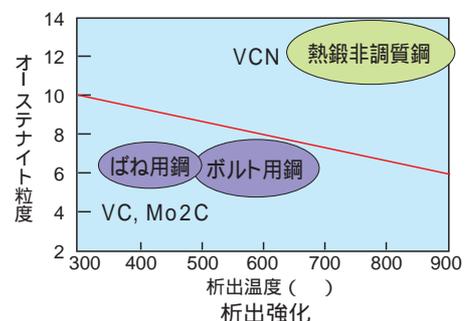
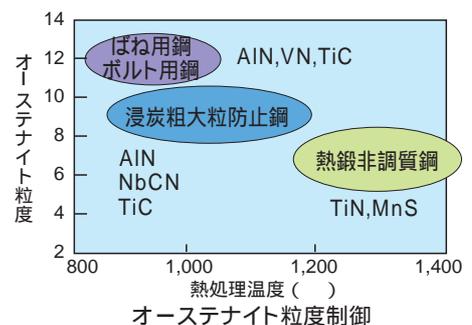


ピン止め効果を最適化した粗大粒防止鋼(NSACE鋼)写真6



マイクロアロイング・析出物制御を活用した棒線商品

図5



5 ピン止め効果：結晶粒の粗大化を防ぐために酸化物や硫化物の微細な粒子を数多く分散させ、結晶粒の成長を抑制する。