



鉄鋼のさらなる高強度化の可能性

牧 正志
Tadashi Maki

京都大学 工学研究科
材料工学専攻 教授

Possibilities of Further Increase in Strength of Steels

1 はじめに

現在、実用に供されている鉄鋼材料の最高強度はマルエージ鋼の約2.5GPaである(ただし、細線ではピアノ線の約3.0GPa)。この2.5~3GPaという値は鋼の理想強度の1/4程度であり、我々は鉄鋼の有する本来の強度能力をいまだ十分に利用していない。実は、鉄鋼材料に限らず、チタン合金やアルミ合金でも実用合金の最高強度は理想強度の1/4~1/5程度であり、この辺りにすべての金属材料に共通した高強度化の大きな壁が存在しているように見える。鉄鋼材料はどこまで強くなるのであろうか。

強化の難かしさは、それを阻害する要因(例えば、溶接性、プレス成形性、被削性などの加工性、および疲労破壊、遅れ破壊などの各種破壊)を克服せねばならぬところにある¹⁾。しかしここでは、このような阻害要因については触れず、主として組織制御の観点から、鉄鋼材料のさらなる高強度化の可能性と問題点について考えてみる。

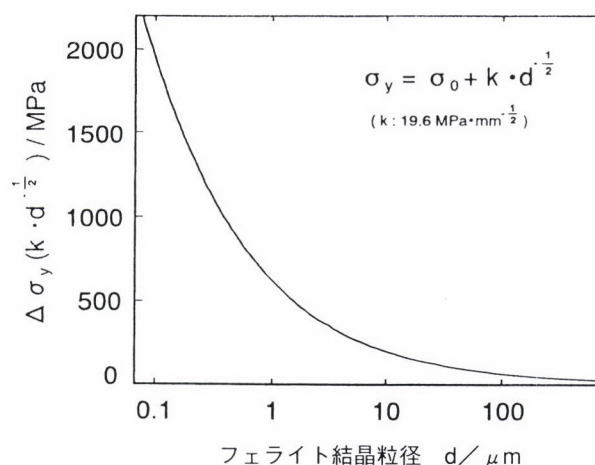


図1 フェライト結晶粒径と強度の関係

2 強化の素機構から見た高強度化の可能性 析出強化の重要性一

強化の素機構には、固溶強化、転位強化(加工強化)、粒界強化、析出(分散)強化があり、転位論によって定量的に強度を予測することができる²⁻⁴⁾。我々は各種強化機構の強化能力を現在どの程度まで利用しているのであろうか。

固溶強化は、合金元素の固溶量に制限があるため、本質的に大きな強化は望めない(ただし、後述する炭素鋼のマルテンサイトの場合は例外である)。粒界強化(強度は結晶粒径の $-1/2$ 乗に比例する)および転位強化(強度は転位密度の $1/2$ 乗に比例する)による強度上昇を図1および図2に示す。結晶粒径および転位密度がある値を越えると強度上昇が著しくなるのが分かる。現在、実用鋼で種々の方法を駆

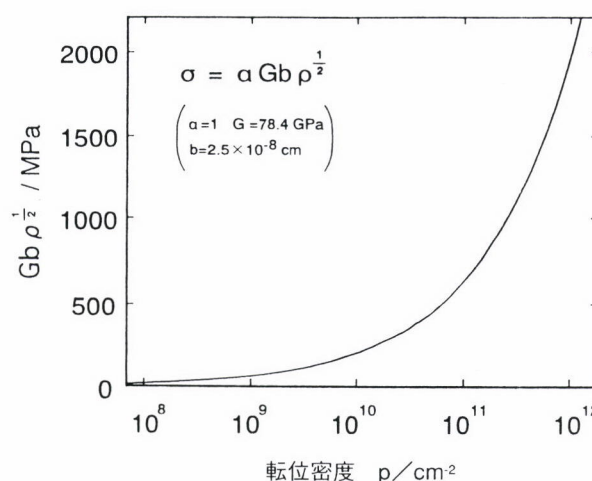


図2 鉄中の転位密度と強度の関係

使して得られている最も微細な結晶粒径は数 μm 程度、最高転位密度は高々 $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 程度である。皮肉なことに、これらの値はちょうど強度上昇が急速に大きくなり始めるあたりの組織状態にある。実用金属材料の最高強度が長年頭打ちになっているひとつの理由はおそらくここにあるのであろう。これらの強化機構の有する強化能力を最大限に引き出すには、結晶粒径で $1 \mu\text{m}$ 以下の超微細粒、転位密度で $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以上の超高密度転位組織という、現状の組織制御手段では到達し難い大きな壁を破らねばならない。

四つの強化機構のうち、強化能力が最も大きいのは析出強化である。図3はオロワン機構によって強度が決まるとしたときの析出粒子間距離(λ)と強度の関係を示す。析出強化の場合も、粒子間距離がある値(約30nmあたり)以下になれば急激に強度が上昇するのが分かる。図4は球状析出物が均一に分散した場合の、析出物の直径(d)、体積率(f)と粒子間距離(λ)の関係を示す。通常の析出粒子の大きさが数nmから数10nm程度であることを考えれば、粒子間距離30nm以下という析出組織を得ることはそれほど困難なことではない。特に、析出物の量が10~20%と多くなると、比較的大きな析出物でも小さい粒子間距離が得られる。つまり、析出強化はその強化能力を最大限に活用することが出来る最も現実的な強化法なのである。

析出強化の研究や利用が最も進んでいるのはアルミ合金である。鉄鋼材料においても、析出強化を利用したマルエージ鋼や二次硬化鋼があるが、アルミ合金に比べるとまだまだ研究が少なく、析出強化による高強度化の可能性を徹底的に追求していく必要があると思われる。時効析出に関しては、アルミ合金から教わることは多い。

過去に鉄鋼材料の極限強度を最も精力的に追求したが、河部らの金材技研のグループであろう。彼らは、マル

エージ鋼を対象に特殊加工熱処理を駆使し実験的に最高強度4.4GPaを得ているが、通常は3GPa程度で強度が頭打ちになる傾向があり、それ以上の強化は極めて困難であることを示している⁵⁾。析出強化を最大限に利用したマルエージ鋼の強度が、なぜ3GPa程度で頭打ちになるのだろうか。これは、このような高強度にすると低応力破壊がおこるようになり強度上昇が制限を受けるためである。この壁を破る方法は、母相オーステナイトの微細化にあることが河部⁵⁾によって指摘されている。つまり、低応力破壊の開始は結晶粒径に大きく依存し、マルエージ鋼では図5⁵⁾に示すようにオーステナイト粒径が $5 \mu\text{m}$ 程度(現実に得られる最も微細な粒径)なら実際に得られる最高強度は3.5GPa程度であり、たとえそれ以上に強化(硬化)されても引張試験すれば低応力破壊を起こして強度が出ない。これが、マルエージ鋼の最高強度が3GPaあたりで停まっている理由である。しかし、オーステナイト粒径を $2 \mu\text{m}$ 程度にできれば引張強さ4GPaが得られ、もし $0.5 \mu\text{m}$ の超微細オーステナイト粒が得られれば4.5GPaを越す超高強度が達成されることを図5は示唆している。マルテンサイト鋼において、析出強化を最大限に活用出来るかどうかの鍵は母相オーステナイト粒の超微細化にある。

3 セメンタイトの析出強化への活用

鉄鋼材料の大きな魅力のひとつは、炭素の添加で比較的簡単に強化できることである。炭素鋼の室温組織は炭素をほとんど固溶しないフェライト(bcc)と鉄炭化物(セメンタイト、 Fe_3C)の二相から構成されている。つまり、純鉄の中に第二相として硬いセメンタイトが存在している組織である。析出強化を考える場合、前述したように析出物の体

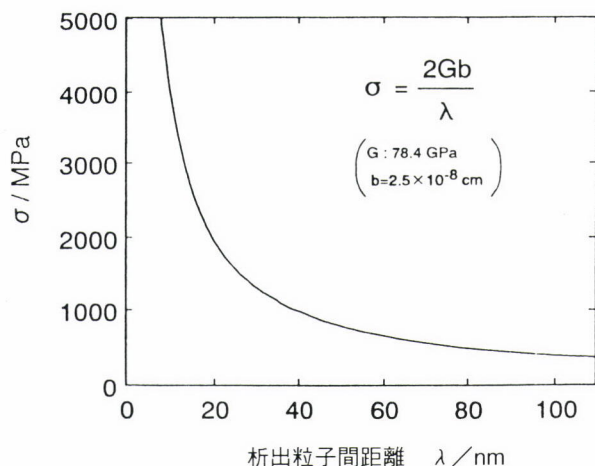


図3 鉄中の析出粒子間距離と強度の関係(オロワン機構による強化量)

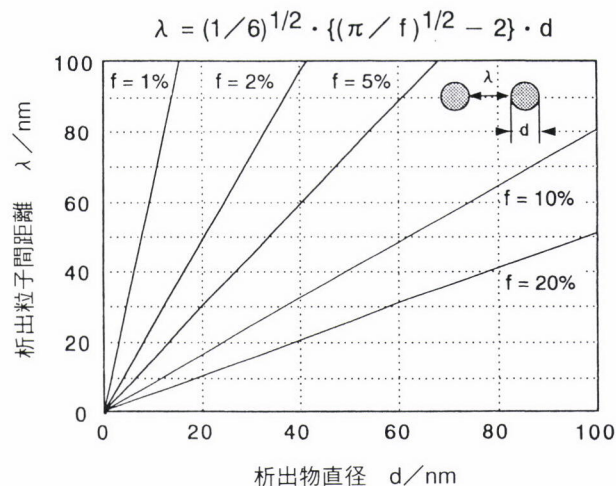


図4 析出物の直径、体積率と粒子間距離の関係

積率を大きくするのが効果的である。合金鋼では、通常、析出強化のために合金炭化物(Mo_2C , V_4C_3 など)や金属間化合物(Fe_2Mo , Ni_3Al など)が用いられている。しかしこの場合、合金元素量の関係で析出物の体積率はそれほど多くなく、高々5~10%程度までである。オーステナイトには炭素が最大2.1mass%固溶するので、室温ではセメンタイトの体積率は最大約30%にもなる。共析鋼(0.8mass%C)でも12%程度のセメンタイトを含む。Fe-C合金は高温のオーステナイト相では炭素を多量に固溶し、低温のフェライト相は炭素をほとんど固溶せず添加した炭素はすべてセメンタイトという化合物として存在するわけで、この特徴は析出強化の点から見れば非常に好ましい合金といえる。

実は我々は、セメンタイトが第二相として多量に存在するという炭素鋼の特長をすでに最大限に利用しているのである。それが、パーライト変態であり、高炭素鋼のマルテンサイトの低温焼もどしである。セメンタイトの形態は変態組織やその後の熱処理によって様々に変化するが、パーライトでは非常に薄い板状であり、マルテンサイトの低温焼もどしでは細かい球状(実際には ϵ 炭化物)で均一に分散している。

共析変態によって生成するパーライト組織は、軟らかいフェライト地に硬くて薄いセメンタイト板が0.1~0.5 μm という極めて細かい間隔で層状に積層された素晴らしい天然の複合材料である。このような組織を我々は人工的に作る事が出来るであろうか。パーライト組織は鉄鋼材料の貴

重な財産であり、これのお陰で炭素添加によって比較的高強度を簡単に得ているのである。さらに、この組織は大きな加工硬化を示すために、図6³⁾に示すように極細線ではあるが鉄鋼材料の実験室的最高強度(5.7GPa)が得られる基地組織になっている。

高炭素鋼のマルテンサイトを150~200℃の低温で焼もどすと、数nm程度の非常に微細な ϵ 炭化物($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$)が多量に析出し、大きな析出強化によって高強度、高硬度が得られる⁶⁾。しかし、600~700℃での高温焼もどしではセメンタイトが粗大になるため、大きな強化作用はない。セメンタイトは比較的容易に粗大化するのが欠点であり、この粗大化を抑制する工夫をすれば、より高温での焼もどしまで高強度が維持できるであろう。多量に存在するセメンタイトを均一微細に分散させる方法として、マルテンサイトの焼もどし以外にも、例えばパーライト組織を出発材とし加工熱処理によって微細な間隔のラメラセメンタイトを微細球状化させること、なども考えられる。

合金元素に頼らない単純組成の鋼を対象に高強度化を図ろうとする場合には、セメンタイトのより積極的な利用の検討が不可決の課題であると思われる。

4 超微細組織形成のための大ひずみ加工の利用

2節で述べたように、現状では実用的に到達していない超微細結晶粒や超高密度転位組織を得ることができれば、極めて大きな強化が期待できる。このような組織形成のひとつの有効な手段は大ひずみ加工の利用であろう。この場合、大ひずみ加工の作用は大きく分けて二つある。一つは、大ひずみ加工によって相変態・再結晶前の母相中にできるだけ多くの格子欠陥を導入し、核生成サイトを増したり、駆動力を大きくして核生成速度を大きくする作用であり、もう一つは、変態後の組織を大ひずみ加工によって物理的

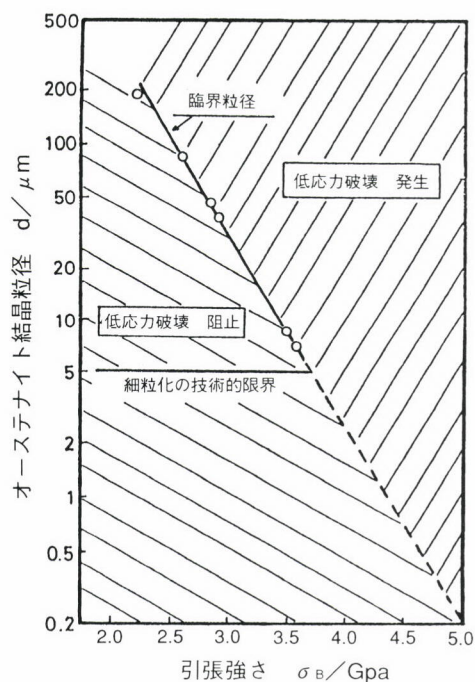


図5 低応力破壊が発生する臨界オーステナイト粒径と引張強さの関係(マルエージ鋼)

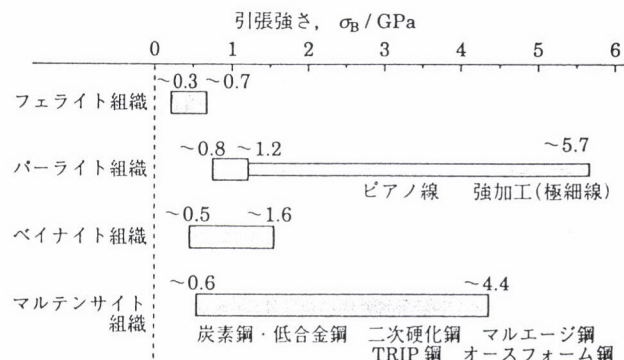


図6 実験室レベルで到達している各種組織の強度レベル

に分断・細分化する作用である。

バルク材で結晶粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒を得ることが鉄鋼材料の大きな目標の一つになっている。相変態・再結晶によって結晶粒を微細化する方法では、現在実用的には制御圧延・制御冷却(TMCP)で得られる数 μm 程度のフェライト粒が最も小さい粒径である。しかし、実験室的にはすでに $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒組織がバルク材で得られている⁷⁻⁹⁾。これらはいずれも80~90%という大圧下圧延が施されている。高木ら⁸⁾は、準安定オーステナイト系ステンレス鋼においてオーステナイトを室温で強圧延してほぼ100%の加工誘起マルテンサイト組織にした後加熱し、逆変態と再結晶を巧みに利用することにより約 $0.2\mu\text{m}$ という超微細オーステナイト粒を得るのに成功している。筆者の知る限り今のところこれがバルク材の加工熱処理で得られた最も微細な組織である。

変態組織に大ひずみ加工を施し高強度化する例として、すでにパーライト組織を強伸線加工したピアノ線がある。ピアノ線は実用鋼で最高強度を示すもので、実験室的には図6に示したように極細線で5.7GPaの引張強さが得られている¹⁰⁾。ピアノ線はパーライト組織が大きな加工硬化を示すという特徴を利用して高強度を得ているが、強伸線後の加工組織の詳細は、極細線であるための観察の困難さや組織の複雑さのためにほとんど不明であった。しかし、近年、最新の解析機器を用いた研究により、パーライト組織を強伸線加工すると、ラメラセメンタイトがナノ粒子化(20nm程度)することや¹¹⁾、セメンタイトの一部が溶解してフェライト中に炭素が過飽和に固溶すること¹²⁾、など今まで想像しなかった現象が起きていることが明らかになってきた。ピアノ線は古い材料であるが、その超高強度化の謎や内部組織の秘密が最近になってようやく明らかになり、その結果、大ひずみ加工によって大変面白い組織変化が起こることを我々に教えてくれた。

最近、強伸線加工以外にも種々の大ひずみ加工法による超微細組織形成の研究が盛んになっている。粉末のメカニカルミリングによって、純鉄で 25nm ¹³⁾、オーステナイト系ステンレス鋼で 200nm ¹⁴⁾の超微細粒が得られている。バルク材を得る方法としては、繰返し重ね接合圧延によって、純鉄で $0.5\mu\text{m}$ 粒が得られている¹⁵⁾。また、鉄鋼への適用は今のところないが、せん断変形を繰返し与えるECAP(Equal-Channel Angular Pressing)法によって、 $0.2\mu\text{m}$ 粒のAl合金のバルク材が得られている¹⁶⁾。バルク材の大ひずみ加工はメカニカルアロイングで起きている種々の複雑な現象をバルク材で実現させることが可能で、超微細組織を得るための新しい組織形成手段として興味深い方法である。

5 鋼のマルテンサイトの魅力

鋼のマルテンサイトの有用性は図7に示すように二つある。ひとつは、変態生成物が硬くて強い組織であるため、高強度鋼の基地組織としての重要性であり、他は、せん断型変態に由来する外形変化(形状変化)を利用した種々の新しい機能の出現である。

鉄鋼材料が他の金属材料に見られぬ非常に広範囲の強度レベルをカバーできるのは、硬くて強いマルテンサイト組織のお陰である。マルテンサイトは通常焼もどして使用されるため、その強化の主因は析出強化である。析出強化という視点から見ると、鋼のマルテンサイトの素晴らしさを再認識させられる。例えば、図8(a)に示したように、通常の溶体化処理により過飽和固溶体を得たのち時効する材料では溶体化時の合金元素の固溶量に制限があるため、析出物の体積率はそれほど大きく出来ない。それゆえ、より高強度化のためには時効前に加工を施す加工熱処理が行われ、加工によって導入された転位を核生成サイトとして析出物を出来るだけ細かく均一に分散させるようにしてい

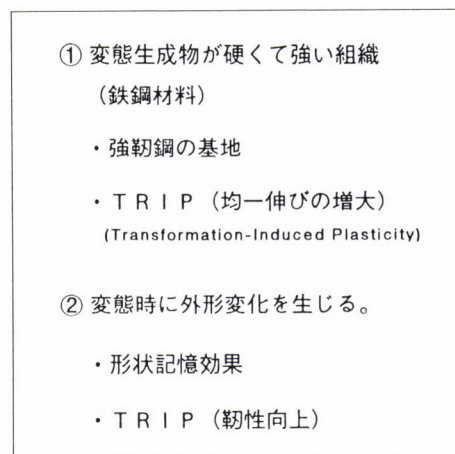


図7 鋼のマルテンサイトの有用性

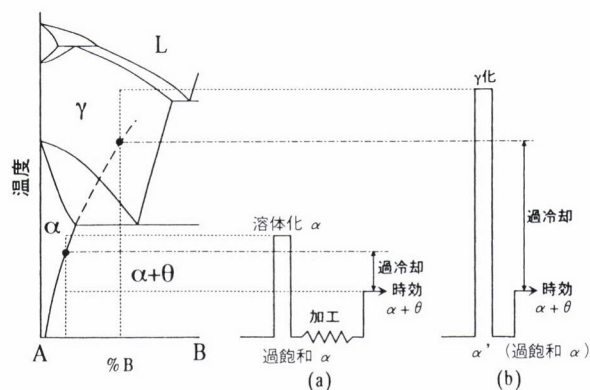


図8 溶体化材(a)および焼入れ材(b)の時効析出の比較

る。ところが、図8 (b)のようにマルテンサイト変態は合金元素を多量に固溶する高温相を母相とするため、著しい過飽和固溶体を得ることが出来る手段である。しかも、マルテンサイトには高密度の格子欠陥が存在しているので、焼入れたままで図8 (a)の加工熱処理を施した状態になっているとみなせる。さらに、マルテンサイトの焼もどしは、図8 (b)に示すように非常に過冷度が大きい状態で析出させていることになる。過冷度が大きいほど核生成のための駆動力が大きくなり、臨界核の大きさが小さくなる。つまり、マルテンサイトは、多量の析出物を均一微細に生成するための極めて好ましい条件を自然に備えており、析出強化を最大限に利用出来る優れた組織であり、鋼の超高強度化には欠かせない重要な変態生成物である。

マルテンサイト変態は、せん断型変態であるため変態時に外形変化(形状変化)を生じる。変態時の形状変化によって周囲の母相に応力を発生する。逆に、母相中に残留応力があったり変形時に応力集中が起こると、マルテンサイト変態によってそれを軽減することができる。このような作用を巧く利用すると、材料の靱性・延性が向上する。その一例が、加工誘起変態を利用したTRIP(Transformation-induced Plasticity: 変態誘起塑性)現象である。

TRIPによる延性および靱性向上の理由を模式的に図9¹⁷⁾に示す。安定なオーステナイトを引張試験すると、ある程度の均一変形をした後くびれが発生し、そこに変形が集中して破断に至る。ところが準安定オーステナイトの場合には、くびれが生じるとその部分の応力が高くなるので加工誘起マルテンサイトが生成する。鋼のマルテンサイトは強いので、くびれの部分が強化されそこでの変形が起らなくなり、他の部分で変形が進行する。このように、加工誘起マルテンサイト変態によってくびれの進展が抑制される結果、大きな均一伸びが得られるようになる。さらに、変形中にマルテンサイトが生成すると靱性も向上する。こ

れは、クラック先端の応力集中部に適当なバリエーションのマルテンサイトが生成することにより変態時の外形変化によって応力集中が緩和されるからである。このように、TRIP現象を伴う材料は、材料にかかる応力を感知して準安定オーステナイトがマルテンサイト変態を起こし、変形中に発生する破断や割れの原因を自ら取り除いているわけで、まさしく知能材料の典型的な例といえよう。

マルテンサイトの利用は、超強力鋼の基地組織として重要であるとともに、同時に、応力によって生成する(加工誘起変態)という特徴や、形状変化を伴うという特徴を巧く利用することにより、強靱性に優れた新しいタイプの鉄鋼材料や、新しい機能を有する材料(その代表的な例が形状記憶合金である)の開発が可能である。

6 複合組織の面白さ

鉄鋼の組織には、フェライト、パーライト、マルテンサイト、ベイナイト、オーステナイトがある。各組織には、それぞれ長所と短所がある。適当な二相(もしくは多相)を複合させることにより、互いの長所を生かし、短所を補うことができる複合組織鋼は、材質向上のための有効な手段である。重共析鋼のフェライト+パーライト組織は典型的な複合組織鋼であり、軟らかいフェライト地に硬いマルテンサイトを分散させたdual phase鋼や強いマルテンサイト地に靱いオーステナイトを分散させた9%Ni鋼なども有名である。強度-延性(靱性)バランスで不連続な飛躍的な向上が見られることがあるが、それらは複合組織化をした時に出現している場合が多い。二相組織や三相組織の組み合わせは数多くあり、まだまだ残されている有望な複合組織がありそうである。

複合組織を得るための代表的な熱処理が、フェライト+オーステナイトなどの二相域を利用した二相域熱処理である¹⁸⁾。この熱処理の面白さは、低合金鋼でありながら二相域での加熱保持中におこる二相間の合金元素の分配を利用し、マトリックス中に高合金の性質を持った第二相を分散させることが出来ることにある。さらに、複合組織は熱処理中の粒成長が遅くなるので、微細粒を得やすいという利点もある。複合組織化の一層の検討が望まれる。

7 加工熱処理の今後の展開

加工熱処理は鋼の強靱化法として極めて有効である。加工熱処理が登場した約35年前から現在に至るまで多くの加工熱処理が開発されてきたが、その時々主役となる加工熱処理が存在し、それらが鉄鋼材料研究を活性化してきた。

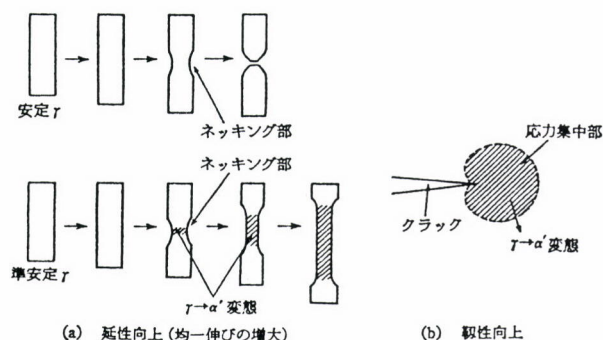


図9 TRIP現象による延性(均一伸び)および靱性向上の説明図

その間の代表的な加工熱処理の変遷をまとめると図10¹⁹⁾のようになる。マルテンサイトを対象にしたオースフォームから始まり、TRIPを経て、加工熱処理の主役が拡散変態(主としてフェライト)を対象にした制御圧延・制御冷却(TMCP)に移行し、最近では再びマルテンサイトを対象にしたものに関心が戻っている。約30年前に大きな注目を浴びたオースフォームやTRIPは、処理の複雑さ、困難さや高合金という制約のために、当時は実用的には成功しなかった。しかし最近、これらの加工熱処理が昔とは少し形を変えて(合金組成や処理温度などに昔には無かった新しい思想が導入され)再び関心が高まり、実用化が可能になり、新しい高強度鋼が開発されている。優れた原理を有する現象は、種々の制限のために日の目を見ず一度忘れられても、必ず時期が来れば再登場するという、典型的な例である。他にも過去の研究の中に多くの宝が埋もれているはずである。

加工熱処理の目的が強靱化にあるため、図10からも分かるように、歴史的に見てマルテンサイトを対象にした加工熱処理が圧倒的に多い。鉄鋼材料の主要組織の中で、組織制御の観点から見て最も遅れているのが、ベイナイトであろう。また、パーライトもピアノ線と関連して加工硬化挙動に関する研究は最近でも活発になされているが、組織制御という観点から見ると重要な組織にもかかわらず非常に研究が少ない。これらの組織は、まだまだ組織制御や加工熱処理によって性質の向上が図られる余地がありそうである。

8 おわりに

実用鋼の最高強度は四半世紀以上もの間停滞している。これでは素材としての鉄の魅力が失われるばかりである。最近、次世代を支える新しい鉄鋼材料の開発を目指した国家プロジェクトがスタートし^{20,21)}、鉄鋼材料研究が再び活性化してきた。実験室的にはすでに理想強度の約1/2の強度が得られている。鉄鋼材料を強くする方策はまだ多く残されている。鉄の魅力を再認識させるためにも、今こそ、もう一度新しい視点から鉄鋼の高強度化の限界に挑戦する好機であろう。

参考文献

- 1) 鉄鋼の高強度化と信頼性向上, 日本鉄鋼協会, 材料の組織と特性部会 鉄鋼の高強度化研究会編, (1997)
- 2) 高木節雄: 第141・142 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1992), 1.

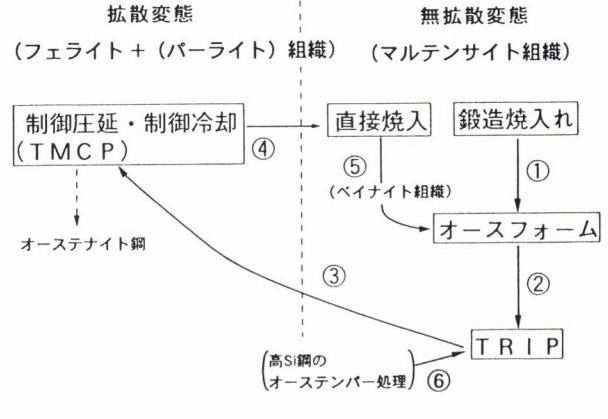


図10 鋼の代表的な加工熱処理の変遷

- 3) 牧 正志: 第29・30回白石記念講座, 日本鉄鋼協会編, (1995), 65.
- 4) 高木節雄: までりあ, 36 (1997), 675.
- 5) 河部義邦: 鉄と鋼, 68 (1982), 2595.
- 6) G. Krauss: ISIJ Int., 35 (1995), 349.
- 7) 飴山 恵, 松村直巳, 時実正治: 熱処理, 28 (1988), 233.
- 8) 高木節雄: 鉄と鋼, 80 (1994), N529.
- 9) 林 透, 梅澤 修, 鳥塚史郎, 津崎兼彰, 長井 寿: CAMP-ISIJ, 11 (1998), 566.
- 10) 落合征雄, 西田世紀, 大羽 浩, 川名章文: 鉄と鋼, 79 (1993), 1101.
- 11) 横井浩一, 家口 浩, 南田高明, 鹿磯正人, 茨木信彦, 隠岐保博: 鉄と鋼, 83 (1997), 514.
- 12) H. G. Read, W. T. Reynolds Jr., K. Hono and T. Tarui: Scr. Mater., 37 (1997), 1221.
- 13) Y. Kimura and S. Takaki: Trans. JIM, 36 (1995), 289.
- 14) 飴山 恵, 広光 誠, 今井信幸: 鉄と鋼, 84 (1998), 37.
- 15) 齊藤好弘, 辻 伸泰, 谷川修一, 宇都宮裕: CAMP-ISIJ, 11 (1998), 560.
- 16) 堀田善治 他: 日本金属学会会報, 32 (1993), 898.
- 17) 牧 正志: 鉄と鋼, 81 (1995), N547.
- 18) 牧 正志: 日本金属学会会報, 27 (1988), 623.
- 19) 牧 正志: 熱処理, 37 (1997), 5.
- 20) 湯川憲一, 下斗米道夫, 阿部義男: までりあ, 36 (1997), 147.
- 21) 佐藤 彰: ふえらむ, 3 (1998), 88.

(1998年8月13日受付)