



入門講座

鉄鋼材料編-3

鉄器時代はまだ終わらない

—力学的性質から見た鉄と鋼—

矢田 浩

静岡理科大学 教授

Hiroshi Yada

Iron Age Still Continues -Iron and Steel Viewed from the Mechanical Properties-

1 鉄は「エコマテリアル」である

多くの新素材が広く使われるようになった。なかでもシリコンは現代産業の米と言われ、新しい石器時代の到来という声もある。歴史時代の始まり以来続いてきた鉄器時代は、終わりを告げるのだろうか。現代は情報社会と言われるが、それは人間の生活の一部を占めるにすぎない。地球上にはまだ多くの人が人間的とは言えない暮らしをしている。すべての人が快適な生活を送れるようになるためには、建造物や交通手段などのハードウェアはこれまで以上に必要であり、それらを構成する構造材料の重要性は決して小さくなることはない。その構造材料の中でも、以下のような鉄の元素としての特徴から、鉄は他の構造材料に比べ地球環境に対する悪影響が小さいと言える。すべての産業活動に地球環境を意識しなければならない時代を迎え、材料としての鉄の優位性はさらに増すのではないか。

イ) 地殻での構成比が高い

構造に利用できる元素の中で地殻中の構成比が珪素とアルミニウムに次ぐばかりではなく、原子核がきわめて安定な鉄は、地球の内部や宇宙空間にも多量に存在する。

ロ) 地殻での構成比の大きい金属元素の中で、還元に要するエネルギーがもっとも小さい

ハ) リサイクル性が優れる

現在でもリサイクル率が約60%とアルミニウムを上回っている。これは、鉄の磁性のため廃棄物からの分別回収がしやすいこと、リサイクルにより材料としての価値がほとんど低下しないこと（再利用時に容易に調整がきく元素—とくに炭素—のみを使って、かなり広い範囲で材質設計ができる）ことなどによるものであろう。

ニ) 機械的特性が優れ、バランスがとれている

ホ) 錆びて土に帰り、しかも環境を汚染しない

重いことと並ぶ鉄の欠点である錆びやすいことも、これからはむしろ長所となると言ってもよいであろう。

本稿では主に上記の(ニ)の視点から、他の構造材料と比較しながら鉄の力学的性質の特徴について述べ、地球環境

によりやさしい「エコマテリアル」を目指すための技術開発の方向についても考えてみたい。

2 鉄は主な構造材料の中で最も弾性変形が小さい

自動車のボディーが簡単に凹んだりきずがつくようでは、生産や運搬の時に安心して扱えないし、駐車していても心配である。このことが、アルミやプラスチックに比べて重い鉄が、自動車の材料としていまでも最も多く使われている理由の一つである。

一般に構造物は永久変形をしては困るので、力を加えて変形させても力を取り除くもとに戻る、弾性変形の範囲内で設計されている。表1に示すように、主な構造材料の中で鉄は弾性係数、すなわち同じ量の変形を与えるために必要な力が最も大きい（ファイン・セラミックスや炭素繊維強化FRPなどの新素材には鉄と同等以上の弾性係数を示すものもあるが）。同じ力を与えても変形量が小さいことは、構造材料としては非常に重要な性質である。アルミの重さは鉄の約1/3であるが、弾性係数も鉄の1/3なので、剛性（変形に対するこわさ）を重視した設計ではその軽量化効果はほとんど打ち消されてしまう。ほかの力学的性質と異なり、弾性係数は金属組織などの構造によってほとんど変化しない性質であるので、合金元素を加えたり製法を工夫しても大幅に変えることはできない。

我々が快適に自動車に乗れるのはばねで衝撃を吸収しているおかげであるが、ここでは鉄の高い弾性がとくに有効に利用されている。たとえばコイルスプリングに用いられている

表1 主な工業材料の縦弾性係数（ヤング率）と比重

	縦弾性係数(GPa)	比重
鉄と鋼	200-220	7.85
アルミニウムとその合金	69 - 74	2.7
銅	110	8.9
コンクリート	20 - 30	2.2-2.4
エンジニアリング・プラスチック*	2 - 5	1.1-1.4
FRP（ガラス繊維強化）*	5 - 30	1.4-2.3

*弾性係数は引張り弾性係数

ばね鋼は、炭素鋼に熱処理を施して弾性変形の領域を広げ、吸収できるエネルギーの大きさをさらに高めている。

3 鉄の中の転位は自由自在に動く

鋼を材料試験機で引っ張って行くと一般に図1のような変形と力の関係が得られる。この図はひずみ（単位長さあたりの変形の割合）を横軸に、単位面積あたりの力を縦軸にとった応力-ひずみ線図として画かれている。弾性変形の領域が終わるともうもとの形に戻らない塑性変形の領域に入る。塑性変形は、金属格子の欠陥の一種である転位が動くことによって起こる。転位とは、大きな絨毯がしわを動かすことで容易に動かせるように、結晶の原子間の強い力を少しずつ断ち切って小さい力で結晶の面をずらすことができる、巧みな自然の省力の仕組みである。転位の動く結晶の面と方向は結晶構造によって異なる。体心立方構造の鉄では、この組み合わせ（すべり系）は少なくとも48通り以上あり、他の構造の金属よりも4倍以上多い（たとえばアルミニウムでは12通り）。しかも結晶の性質から鉄の転位はほかのすべり面にうつりやすく、このため鉄の中の転位はほかのすべり系に移ったりして障害物を巧みにすり抜けることができ、また変形が進んで次々に生れた転位がすべり面上にたまってラッシュ状態になっても、うまく配列（セル構造）して応力を減らしさらに変形が続けられるようになる。このようなわけで、鉄では転位が動くために必要な力が大きい（従って強度が高い）のにも拘わらず、自由自在と言ってよいほど様々な形に変形ができるのである。

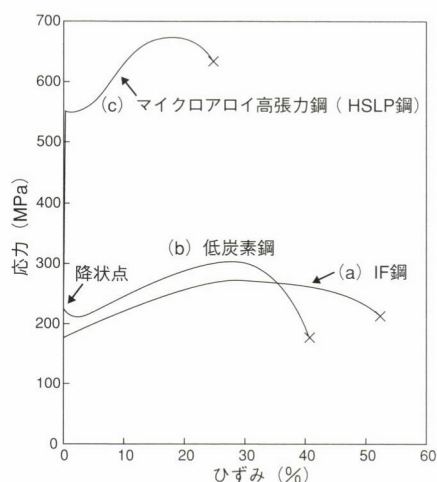


図1 鋼の応力-ひずみ線図の例

4 わずかの固溶原子が塑性変形特性を大きく変える

普通の鋼は図1の (b) のように変形応力が降伏点でいったんピークに達してから急に減少することが多い。この変形応力が降伏点でピークを示す現象は、鋼中を自由に動き

回れる極少量の炭素や窒素の原子が転位の周りに集まって転位を動きにくくするため、これも体心立方構造の金属の特有の現象であり、前に述べたように弾性変形の吸収エネルギーを増すために利用されている。

しかし降伏点降下の大きい鋼板をプレス加工をすると、ひずみが部分的に異なるためのしわ（ストレッチストレイン）を生ずるという問題がある。これを防ぐための方法として、動きやすい転位を導入する目的で普通成形加工に先立ってスキンプラスという軽い圧延を行っている。抜本的な解決法は固溶の炭素・窒素原子をほぼ完全に（1ppm以下）なくすことであるが、鋼を溶かして作るとき炭素や窒素をここまで少なくすることはきわめて難しい。そこでチタンなど炭素・窒素との結合力の強い元素を少量加えて、これらを完全に無害化した鋼が開発された。このIF鋼は加工性もきわめて優れているので、食缶や自動車の外板用に多量に使われるようになっている。

5 引っ張られ、たたかれて強くなる

図2に示すように、最も柔らかい鉄では引張強さ（最大の変形応力）はアルミ合金よりも小さいが、瀬戸大橋などの吊り橋を支えるパラレルワイヤと呼ばれる平行な線を束ねたロープ（図3）などでは引張強さはその10倍以上にもなる。他の金属では普通強化するにはさまざまな合金元素を加えるが、パラレルワイヤに用いられる硬鋼線材には、炭素やマンガンなど一般に鋼に含まれる元素のほか特別なものは添加されていない。多くの鋼では主な強化元素は全くコストのかからない炭素である。

炭素による強化作用は、鉄に $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態があるため利用しやすい形で現れる。高温で安定な γ 相（オーステナイト）中で鉄の結晶の中に完全に溶けていた炭素が、常温の安定相である体心立方構造の α 相（フェライト）中にはほとんど溶けないため、鉄と炭素の化合物（セメンタイト）として鋼中に析出してくる。冷やし方によってこの析出の仕方が異なるため、鋼の様々な組織が生まれ、これに従って機械的性質も様々なに変化する。硬鋼線材では全体がフェライ

材 料	0	1000	引張強さ (MPa) 2000	3000	4000
鉄と鋼					
アルミニウムと その合金					
銅とその合金					
コンクリート*					
エンジニアリング プラスチック					
FRP(ガラス繊維)					
FRP(炭素繊維)					

*圧縮強さ

図2 工業材料の引張強さの範囲（コンクリートは圧縮強さ）

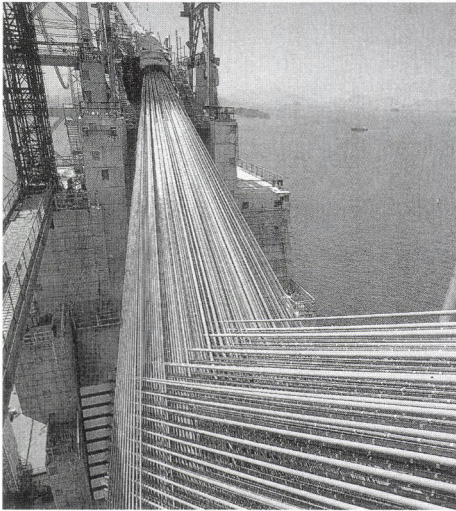


図3 吊り橋のパラレルワイヤストランド
南備讃瀬戸大橋で施工をしているところ。ストランドとは、
直径5mm程度の鋼線を数十ないし2百数十本束ねたもの
(新日本製鐵(株)パンフレット
「プレハブパラレルワイヤストランド」, (1994) より)

トとセメントととの薄い板が互いに重なり合ったパーライト組織となるが、これは一種の強化複合材料であり、その強さはそれぞれの板の厚さや間隔を冷やし方で変えることにより調節することができる。そしてこの鋼を細い線に伸線加工して行くと、セメントの板が細かく切断され、いっそう強度も増し、ねばさもむしろ加工前より改善される(図4)。パラレルワイヤはこのような状態で使用されている。

このように、金属では形を作るときの加工工程で強度が上昇する(加工硬化)が、鋼では $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態による強化が加わり、さらにその相乗効果で特性が改善されている。タイヤに入っているスチールコードが直径5.5mmの硬鋼線材から0.1-0.2mm径の細線にまでできるのも、この加工硬化特性のおかげである。ワイヤを引張って穴(ダイス)から引出して細くするとき、加工で強度が上昇するので細くなくても切れないのである。

最近では、変態に及ぼす加工の効果を意識的に利用した加工熱処理が、実用鋼材に盛んに適用されるようになってきた。結晶の粒径を細かくし、低温でのねばさを改善する厚鋼板の制御圧延法は、日本で開発され世界に普及している。多様な加工熱処理法が適用されている線材圧延では、特殊な加工熱処理を行ってから上に述べた伸線加工を行うことで4000MPaの引張強さを持つ鋼線も得られている。

一般に熱間加工はそれ自体が加工熱処理と言ってよく、これを上手に利用することで材質調整のための熱処理が省略できるようになり、省エネルギーに大いに貢献している。自動車メーカーの加工工程でも、部品を熱間鍛造した後の冷却で高強度の組織を作り込んで、その後の熱処理を省略する技術が実用化されている。

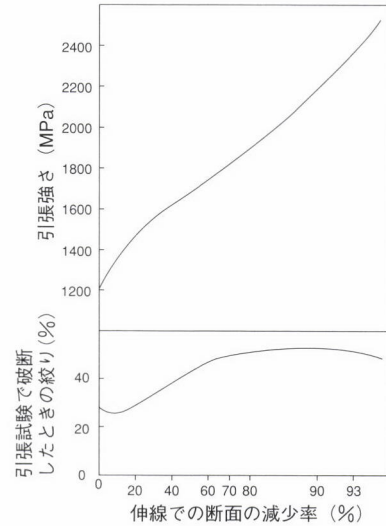


図4 硬鋼線材(それぞれ約0.8%の炭素とマンガンを含む鋼)の断面の減少率で表した加工率と、加工した線材の引張り強さおよびねばさ(引張り試験のときの断面絞り率で表す)との関係

このような加工や熱処理の工程でどのような組織変化が起こるかの基礎研究も進歩して、成分と作り方から組織と機械的性質を定量的に予測したり、作り方の設計をしたりすることのできる計算機プログラムが開発されている。

6 「焼きを入れ」られて強くなる

あまりよい意味で使われない「焼きを入れる」という言葉は、もともと鍛冶屋さんが鋼を強くするために用いた方法からきたことは言うまでもない。機械部品などでは加工による強化では不十分なことが多いので一般に焼入れで強化することが多い。図5にオーステナイト状態から冷却するときの冷却速度と硬さの関係を示す。完全に焼きが入るとセメントが析出する暇がなくマルテンサイト組織となるが、この組織では炭素が無理矢理狭いところに閉じこめられているため、がちがちに硬くなる。ただしマルテンサイトは一般にじん性(ねばさ)が不足で、炭素量が高い場合はあまり伸びずに切れてしまうほどろい(普通引張強さはここに示したビッカース硬さに比例している。しかし脆くなると硬さが大でも引張る途中で切れてしまい強度は高くない)。これでは安全に使えないので、さらに「焼戻し」と言う熱処理を行い、図6のような焼戻し特性を参考にじん性を改善するのが普通である。この焼入れ—焼戻し処理は材質の調節がしやすいため、調質処理と呼ばれて機械部品などの一般的な強化法となっている。

表面での硬さがとくに必要な歯車などの機械部品は、製造がしやすくじん性の高い比較的低炭素の鋼で形を作っておき、熱処理のとき表面から炭素をしみこませ(浸炭)これを焼入れして表面だけ硬くして使っている。これは一種の「傾斜機能材料」と言うことができる。

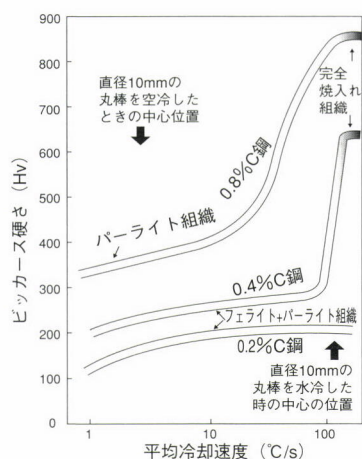


図5 構造用炭素鋼を高温から冷却したときの冷却速度と硬さの関係

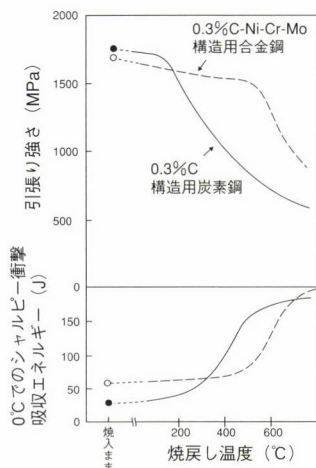


図6 炭素0.3%の普通鋼およびニッケル・クロム・モリブデンを含む合金鋼をマルテンサイト組織とした後焼戻したときの、焼戻温度と力学的性質の関係（じん性をシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーで示す）

7 「金属疲労」にも安心な設計ができる

「金属疲労」ということばが人間や社会のことがらに使われることがある。これはジェット旅客機が出現して以来、コメット機の連続墜落や御巣高山に激突した日本航空のジャンボジェットなど、機体に原因がある大きい航空機事故の多くが金属の疲労現象によることが広く知られるようになったためだろう。金属の疲労は、降伏点以下の弾性変形として扱われる範囲内の応力でも、材料に繰り返しかかるやがて割れ目が発生し、その割れ目がだんだんと大きくなってついには破局的な破壊に至る現象である。このようなことが起こるのは、小さな応力でもすべり面上の転位の一部が動き、これがすべり面を往復運動をしているうちに材料の表面に鋭い突起が生じ、そこに応力集中が生じて割れ目ができるためである。材料の表面に凸凹があると割れ目がさらに発生しやすいので、機械部品では表面仕上げが安全のためにも大事である。

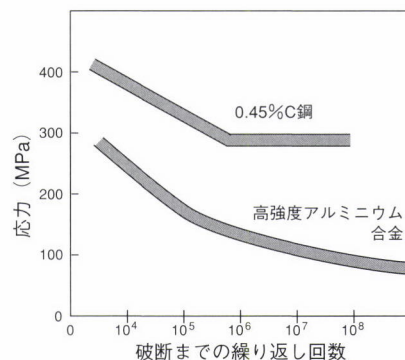


図7 疲労試験での応力と破断までの繰返し回数との関係（S-N曲線）

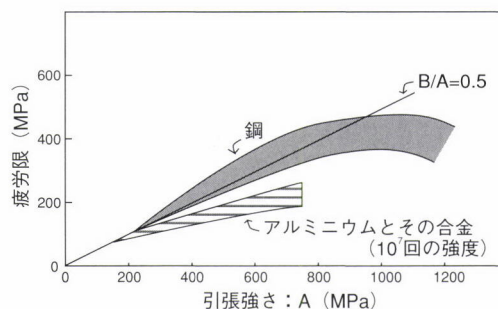


図8 引張強さと疲労限との関係

壊れるまでの繰返し回数は、加える応力が大きいほど小さく、横軸に繰返し回数の対数を取り縦軸に加える応力をとると、図7のように材料によって大体決まった形の曲線（S-N曲線）が得られる。疲労破壊の可能性のある構造物では、一般にこの曲線をもとに設計を行っている。この図に示されているように、鋼ではある応力以下では繰返し回数をいくら増加しても全く破断しない。この応力を疲労限（疲労限度、または疲労強度とも呼ぶ）という。構造物の設計応力を疲労限以下にすれば、いくら長期間使用しても疲労破壊の心配はない。疲労限は図8のように大体その鋼の引張強さに比例し、その比は1:2程度である。上に述べた表面硬化法は、これと同じ理由で疲労の発生を防ぐのに有効である。なおこの図で分かるように、高強度になるとこの比が低下することを注意しなければならない。Alなどの非鉄合金では低い応力でも繰返し回数を増やせばいつかは破断するので、1000万回の繰返しの時の応力を疲労限の代わりにとるが、図8中に示すように引張強さに対するこの応力の比は鋼より低い。

腐食環境下では疲労破壊が促進され、鋼でも疲労限がなくなる腐食疲労と呼ばれる現象があるので注意が必要である。また腐食環境では、繰返し応力でなくてもある時間後に低応力で破断する、応力腐食や遅れ破壊と言われる現象がある。これらは鉄鋼材料に限ったものではないが、金属にはそれぞれ不得手な腐食環境があるので注意しなければならない。このことは来月号で詳しく述べられる予定なので詳細は省く。

8 鉄のアキレス腱—ぜい性破壊

重いこと、錆びやすいことに次ぐ鉄の欠点は、厚手の鋼材が低温でぜい性破壊を起こすことである。第二次大戦中アメリカはリバティー船という鋼船を大量に建造し物資輸送を行ったが、この船が図9のように寒い海域で真っ二つに割れて沈没する事故をしばしば起こした。この型の船では溶接が全面的に採用されていたが、当時の溶接技術では溶接部に欠陥が残るのは避けられず、これから走り出した割れ目が溶接で一体となっている船体を横断してしまったのである。これ以降ぜい性破壊の研究が懸命に行われ、どのような材料がどのような条件下で壊れるかが詳しく分かってきた。

図10は一般に行われているねばさ（じん性）の評価法であるシャルピー衝撃試験の結果の一例である。炭素量を増すとぜい性破壊領域に移行する温度（ぜい性遷移温度）が高くなり、また延性破壊域でも吸収する衝撃のエネルギーも低くなる。従って現在用いられている造船用鋼材では炭素量を少なくし、その代わりマンガンなどの合金元素を加えて強度を補っている。低炭素化は溶接部の割れの防止にも役立っている。溶接技術も著しく高度化し、また溶接部の欠陥を非破壊で検査する技術も著しく進歩しているので、現在では実際の構造物でぜい性破壊が起こる心配はなくなったと言ってよい。アラスカのような極寒地で高压に耐えるラインパイプに安心して用いられる鋼材も、上に述べた制御圧延技術で大量に製造されるようになった。さらに低い温度には、塑性変形特性を変えるニッケルを含む鋼が開発されており、 -162°C の液化天然ガスタンクなどに使

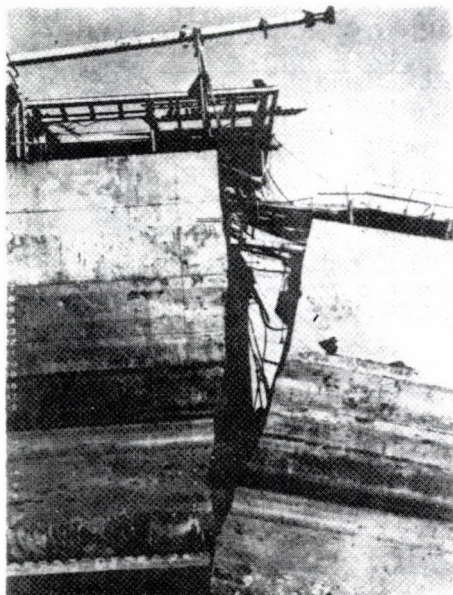


図9 真っ二つに割れたリバティー船
(門間改三、須藤一著：構成金属材料とその熱処理、
日本金属学会、(1977)、P.73)

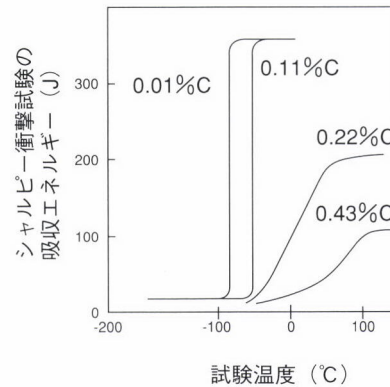


図10 焼きなました炭素鋼のシャルピー衝撃吸収エネルギーの温度変化

用されている。面心立方構造のオーステナイト系ステンレス鋼は、アルミ合金と同様低温でぜい化しないので、極低温で安心して使用できる。

ところで1995年1月の阪神大震災では鉄筋コンクリートの構造物が多く倒壊したのに対し鋼製の構造物は一般にほとんど被害は見られなかったが、その中で鋼製の橋脚にぜい性破壊による割れが発生した例が報告された。温暖な日本では普通建造物ではぜい性破壊をそれほど意識した設計はしていないため、とくに気温の低いときの、しかも想定以上の強さの今回の地震では、溶接欠陥などからの割れの発生が防げなかったのであろう。これを教訓として鋼材・施工について基準の見直しがされている。

9 引っ張っても厚みの変わらない板

ビールやコーラなど内圧がかかっている缶飲料はほとんどアルミ缶であるが、缶自体に強度が必要なその他の缶は鉄製が多い。図11のように、鉄板がダイスを押し込まれていっぺんに缶の形になり、ふたをつけて出来上がりとなるのにはちょっとびっくりさせられる。ぎょうぎの皮などで試して見れば分かるが、底の角のところは薄くなって破れ、押し込み型に引きずり込まれるところではしわが寄ってしまう。強度の高い鉄が、どうしてこのようにたやすく絞り込めるのだろうか。実はこのような深絞り加工用の鋼板は、引っ張ったとき幅方向には縮むが、厚さ方向には薄くなら

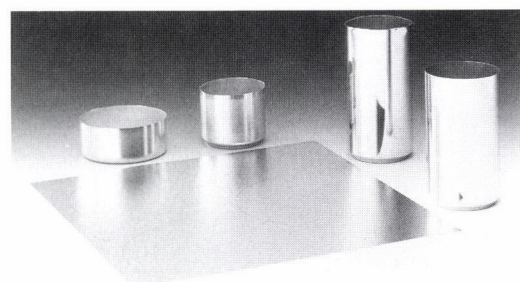


図11 IF鋼板の深絞りの例
鋼板に画いている円は成形する前に打ち抜く円盤（ブランク）の大きさ
(新日本製鐵（株）PR資料より)

ない特別の性質（塑性異方性）を持っている。上に紹介したIF鋼では、幅の方向のひずみと厚さ方向のひずみの比（ランクフォード値）が2以上にもなる。この鋼では、圧延の条件と、圧延で硬くなった板を焼きなまして柔らかくする時の条件とをコントロールすることにより、結晶の向きを揃えて（集合組織）望ましい塑性異方性を持たせている。このときにも鉄の $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態がうまく利用されている。ほかの金属では、一般にこのような都合のよい集合組織を作することは難しい。

10 鼻薬でタフになる

これまで述べたように、多くの鋼ではもともと含まれている炭素を巧みに利用し、圧延して形を作る途中で加工や冷却の条件をコントロールし、あるいはさらに熱処理を加えて望ましい組織とすることで様々な性質を作りだしているが、さらに特別の性質を得るために合金元素を加えた鋼が古くから作られてきた（マイケル・ファラデーが系統的に合金鋼を研究した最初の人と言われている）。大きな機械部品にはクロム、モリブデンなどを加え、焼入性を上げ強度を高めた低合金鋼が広く使われている。また、他の講義で紹介されるように、クロムやニッケルを大量に加えたステンレス鋼、トランスの鉄心などで電気の損失を減らす珪素鋼など、特別な性質をもつさまざまな鋼が作られている。

最近とくに多くなってきたのは、鼻薬程度の微量の合金元素を添加して性質を改善するマイクロアロイ鋼である。上述の制御圧延鋼では、図12の例のように、0.01-0.03%程度の微量のニオブが様々なはたらきをして結晶粒を細かくし、強度を高めたり、じん性を改善したりする。ボイラーなど高温で使用する鋼には以前からモリブデンを含む鋼が使用されてきたが、最近鉄骨建造物に耐火性が要求される

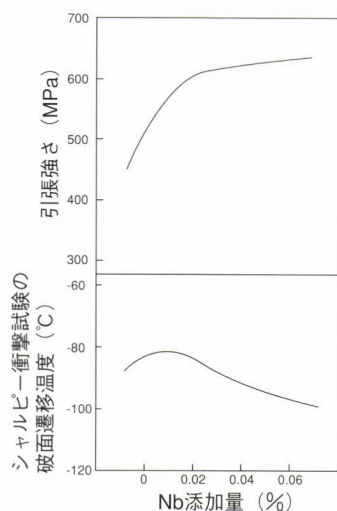


図12 マンガン、チタンなどを含む低炭素鋼の制御圧延したときの、力学的性質に対するニオブの効果

ようになりモリブデンを含む鋼材が建築物にも使われるようになった。図6からも分かるように、普通の鋼が温度上昇とともにセメントタイトの強化作用が失われ急速に軟化するのに対し、モリブデンは炭素と結びついて 600℃前後まで強化作用を示すためである。このようにチタン、ニオブ、モリブデンなどの元素は鋼中の炭素や窒素と結びついて様々な働きをして鋼の特性をより豊かにしている。

11 鋼の性質を今後どのように作り込むか

鋼の性質がその構造（組織）と密接に結びついていて、他の工業材料では見られない多彩な性質を示すことを大急ぎで見てきた。はじめに述べたように、今後も主要な構成材料として鉄の位置は変わることはないであろうが、地下資源やエネルギーを大量に消費する素材産業は今後大幅な技術革新を迫られることは必至である。日本の鉄鋼業は世界に先駆けて資源・エネルギーの節約を推し進めてきたが、今後さらに抜本的な対策が必要になると思われる。

資源・エネルギーの節減には、リサイクルの比率を高めることが最も有効である。高いレベルの品質が要求される鋼では、これまで市中のスクラップを主原料とする電炉鋼は適していないとされてきた。これからは高級鋼といえども、リサイクルを前提とした製造方法を考える必要がある。リサイクルによる性質の劣化を防ぐためには、特殊な合金元素の使用をできるだけ避け、メッキや複合化もできるだけ行わないことが望ましい。それには鋼の材質設計の原点に立ち返って、炭素の強化効果と加工に伴う加工硬化とを徹底して利用することが唯一の方向である。このように単純化した成分で様々な高度な材質の要求に応えるには、加工熱処理技術をさらに発展させる必要がある。そしてその条件を正確に設計・制御する組織・材質の予測技術はそのための有力な道具となるであろう。

また現在の鋼の製造工程はまだかなり複雑で、見直しが必要な部分が残っていると思われる。鋼に要求される特性を作り込むために最小必要限の工程は何かを考えることから出発して、もっと簡潔な製造プロセスを組み立てて行く余地があるのではないかな。

以上のような鋼の作り方の見直しは、その鋼が廃棄され再利用されるまでの全過程の中で最も無駄を小さくするような方向で、利用・加工技術をも含めた見直しを進める必要がある。製品のトータルとして地球環境への影響を定量的に評価するLCA（ライフサイクル・アセスメント）と言う手法が、様々な産業で取り入れられようとしている。鉄鋼のエコマテリアルへ向けての一層の前進には、この手法が重要な指針を与えてくれることになるであろう。

(1995年11月30日受付)