

# NACHI-BUSINESS

Materials news

Vol. **7** D2  
May/2005

マテリアル事業

■ 技術講座

知りたい材料・熱処理講座④

「使用目的を考えた熱処理の選びかた」

Things to Know about Material and Heat Treatment  
"A Proper Heat Treatment Method  
for a Proper Product Usage"

〈キーワード〉 引張強さ・疲れ強さ・耐衝撃性・  
耐摩耗性・被削性

マテリアル製造所／技術部

吉田 直純 Naozumi Yoshida

監修 開発本部／開発三部

天野 宏地 Hirokuni Amano



## 要 旨

鋼を中心とした金属材料の場合、熱処理を行なうことによって、その材料特性を大きく変えることができます。

そのため、製品の使用目的に対し、どのような材料特性が要求され、それを得るためにはどのような熱処理を選ぶことが有効なのか、良く知っておく必要があります。

「知りたい材料・熱処理技術講座」第4回目の今回は、使用目的に応じ、どのような熱処理が行なわれているのかについて説明します。

## Abstract

The material characteristics of a metal like copper can be significantly changed with a type of heat treatment. Therefore, it is necessary to know well what type of material characteristics is required for a certain usage of a product and which heat treatment must be chosen to achieve the result.

In the fourth session of "Things to Know about Material and Heat Treatment", a proper heat treatment is explained in terms of achieving a proper product usage.

## 1. 熱処理の目的もさまざま

ひとくちに熱処理と言っても、そこには多くの目的が存在し、その範囲は非常に広いものとなります。表1に熱処理の主たる目的を示します。

これら材料特性は、すべて互いに関連性を持っており、ある特性を高めるために熱処理をすると、一方で別の特性が低下するということがよくあります。例えば、強度を高める狙いで熱処理を行なうと、一方で耐衝撃性が低下するといった現象がおきます。

そのため、材料の使用目的に合った熱処理を、正しく選ぶ必要があります。

表1.熱処理の目的とそれに適応した熱処理方法

目 的	熱 処 理 方 法
強さを増すため	鋼 :焼入れ・焼もどし 非鉄合金 :溶体化処理・時効処理
疲れ強さを高めるため	鋼 : (a) 焼入れ・焼もどし : (b) 浸炭焼入れ 浸炭窒化 焼入れ 窒化 高周波焼 入れ 火炎焼入れ 非鉄合金 :溶体化処理・時効処理
耐衝撃性を高めるため	鋼 : (a) 焼入れ・焼もどし : (b) オーステンパー
耐摩耗性を高めるため	鋼 : (a) 焼入れ・焼もどし : (b) 浸炭焼入れ 浸炭窒化 焼入れ 窒化 高周波焼 入れ 火炎焼入れ
耐食性を高めるため	鋼 :焼入れ (オーステナイト化) 非鉄合金 :溶体化処理
組織を平衡状態 (均一) に するため	鋼 :焼ならし・焼なまし 非鉄合金 :焼なまし
内部応力を除去するため	鋼 :焼なまし 非鉄合金 :焼なまし
寸法の安定性を得るため	鋼 :焼なまし・サブゼロ処理
冷間加工性を高めるため	鋼 :焼なまし 非鉄合金 :焼なまし
被削性を向上させるため	鋼 : (a) 低炭素鋼 焼ならし : (b) 中高炭素鋼 焼なまし

## 2. 強度を高めるには

一般に、材料の強度を高めるには、以下の3つの方法があります。

- ①合金元素を添加する(固溶強化)。
- ②冷間加工により内部ひずみを与える(加工強化)
- ③熱処理により結晶構造を変態させたり、微粒子を析出させたりする。

①の例を上げますと、鉄の降伏強さは $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度ですが、炭素を $0.005\%$ 添加すると固溶強化により降伏強さは $200\text{N}/\text{mm}^2$ 程度になります。

また②の例として、 $0.02\%$ 炭素鋼の引張強さは $300\text{N}/\text{mm}^2$ 程度ですが、冷間加工により加工ひずみを与えると、 $700\text{N}/\text{mm}^2$ に達します。

さらに③の例としては、 $0.8\%$ 炭素鋼の引張強さは $650\text{N}/\text{mm}^2$ 程度ですが、これを熱処理(焼入れ焼もどし)すると $1300\text{N}/\text{mm}^2$ に上昇します。

表2. JISに記載された代表的特殊鋼の標準的な熱処理条件

鋼種	焼入れ(固溶化)	焼もどし
SUS304	(1010~1150°C 急冷)	
SUS420J2	920~980°C 油冷	700~750°C 急冷
SUS440C	1010~1070°C 油冷	100~180°C 空冷
SK105(SK3)	750~810°C 水冷	150~200°C 空冷
SKH51	1220°C 油冷	560°C 空冷
SKS3	830°C 油冷	180°C 空冷
SKD11	1030°C 空冷	180°C 空冷
SKD61	1020°C 空冷	550°C 空冷

鋼の強度を高めるための熱処理としては、マルテンサイトの生成により、直接材料の強度を向上させるほかに、<sup>※2</sup>パテンティングなど他の強化手法の前処理として熱処理を行なう例があります。

マルテンサイトを生成させるには、第2回の講座で述べたように焼入れ処理が必要で、適切な加熱温度と急冷速度が求められます。

焼入れにより材料の強度を向上することは広く実用化されており、JIS(鉄鋼Iなど)に標準的な熱処理条件が記載されている鋼種もあります(表2)。

例えば、冷間金型によく使用される合金工具鋼SKD11の場合、焼入れ温度は $1030^\circ\text{C}$ 、焼もどし温度は $180^\circ\text{C}$ となっています。また、切削工具の代表鋼種である高速度工具鋼SKH51の場合は、焼入れ温度は $1220^\circ\text{C}$ 、焼もどし温度は $560^\circ\text{C}$ といった熱処理条件が書かれています。

ただ、実際には、この条件で必ず熱処理しなければならないというのではなく、目的により熱処理条件の微調整が必要です。一般に焼入れ温度を上げると材料の強度は向上しますが、温度が高すぎると過熱組織となり、靱性が著しく低下します。一方で、温度が低すぎると合金元素の固溶不足により、所定の材料強度が得られないといった問題が発生します。

## 3. 疲れ強さを高めるには

繰り返し加えられる応力により、材料強度(引張強さ)より低い応力であるにもかかわらず、金属部品が破壊されるケースが多く見られます。無限に繰り返し応力を加えても破壊しない限度の応力、すなわち疲れ限度を高めることは、機械部品においては非常に重要なことです。

一般に、疲れ強さは引張強さの高いものほど高く、図1のようにほぼ直線関係にあると言えます。したがって、疲れ強さを高める熱処理としては、焼入れによる強度向上が有効です。

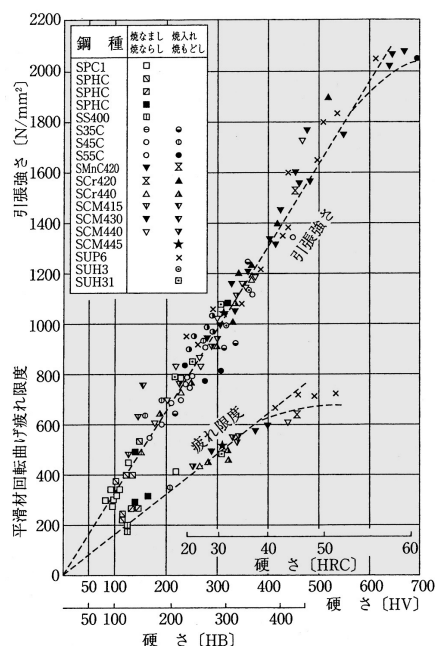


図1. 炭素鋼および合金鋼の硬さと引張強さおよび平滑材回転曲げ疲れ限度との関係

引張強さ1000N/mm<sup>2</sup>以下の範囲では、次のような関係があります。

$$\sigma_{wb} = K \cdot \sigma_B$$

$\sigma_{wb}$ : 回転曲げ疲れ限度 [N/mm<sup>2</sup>]  
 K : 係数 (マルテンサイト系鋼で0.35~0.5)  
 $\sigma_B$  : 引張強さ [N/mm<sup>2</sup>]

$$\sigma_{wz} = 0.8\sigma_{wb} = 0.8K\sigma_B$$

$\sigma_{wz}$ : 両振り引張り、圧縮疲れ限度 [N/mm<sup>2</sup>]

しかし、厳密には、疲れ強さと引張強さは完全に比例するとは言えず、図1にあるように、引張強さの増加にともなって疲れ強さの増加は徐々に鈍っていきます。これは引張強さが約1000N/mm<sup>2</sup>を超えると顕著になります。

疲れ強さは、組織の影響も受けます。例えば、同じ引張強さであっても、焼ならし材より調質材の方が組織が均一で応力集中を受けにくく、疲れ強さが良好であると言えます。

※3  
 浸炭、浸炭窒化、窒化、高周波焼入れなどの表面硬化も鋼の疲れ強さ向上に大きな効果があります。これは、材料表面の硬化層に圧縮残留応力を生じさせ、引張応力の集中を緩和し、疲れ限度を高めるからです。

## 4. 耐衝撃性を高めるには

一般に金属材料の靱性について語るときは、衝撃抵抗値で代表されています。しかしながら、衝撃抵抗値は衝撃試験片の吸収エネルギーの単位 (例えばシャルピー衝撃試験の場合J/cm<sup>2</sup>) で与えられますので、直後の応力と対応できないことも多いため、注意が必要です。

通常、鋼は鍛造や圧延のままのものに比べて、焼ならしをすると同じ強度レベルでも耐衝撃性は増し、加えて焼入れ焼もどしを施すと、さらに大きな向上を示します。

ただし、焼入れ焼もどし処理を行なっても、もし焼入れが不完全で (例えば素材径が大きく、材料内部で所定の冷却速度が得られない場合)、内部まで硬化していない状態であれば、焼入れ焼もどし後の衝撃値は低下します。

完全焼入れされていれば、炭素鋼でも合金鋼でも、同一強さにおける衝撃値は同じようなレベルで、図2のように、焼入れ焼もどし硬さと衝撃値は、概ね逆比例の関係にあります。

完全焼入れされた場合の衝撃値は、加熱時のオーステナイト結晶粒サイズに大きく影響されます。図3は、共析炭素鋼の小試験片を焼入れした後に、

※4  
 硬さ50HRCに焼もどした時のオーステナイト結晶粒度が衝撃値におよぼす影響を示したものです。オーステナイト結晶粒が微細になる、すなわち結晶粒度が大きくなると、衝撃値が向上します。

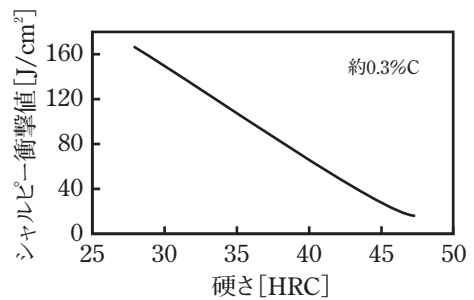


図2. 完全焼入れ焼もどし材の衝撃値と硬さ

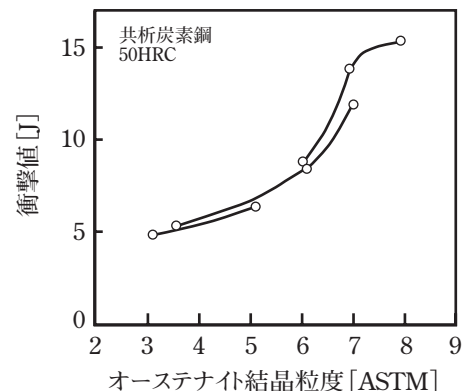


図3. 焼入れ、焼もどし後の衝撃値とオーステナイト結晶粒度の関係

## 5. 耐摩耗性を高めるには

金属材料の耐摩耗性を高めるためには、硬さ・靱性・表面の平滑度がポイントであり、中でも特に硬さが重要な要因となることはよく知られています。

図4は、炭素鋼の炭素量と熱処理の種類による摩耗量の関係を示したものです。一般に、鋼の耐摩耗性は、硬さが高いほど、また炭素量の多いものほど良くなりますが、同じ硬さだからといって、必ずしも同一の耐摩耗性が得られるとは限りません。鋼の耐摩耗性には、炭化物の存在が非常に効果的な影響を与え、さらに、これが球状化していると最良となることがあります。

そのため、切削工具やベアリングなどは、炭化物の球状化焼なましをした後に、焼入れ焼もどしが施され、マルテンサイト組織化して使用されています。

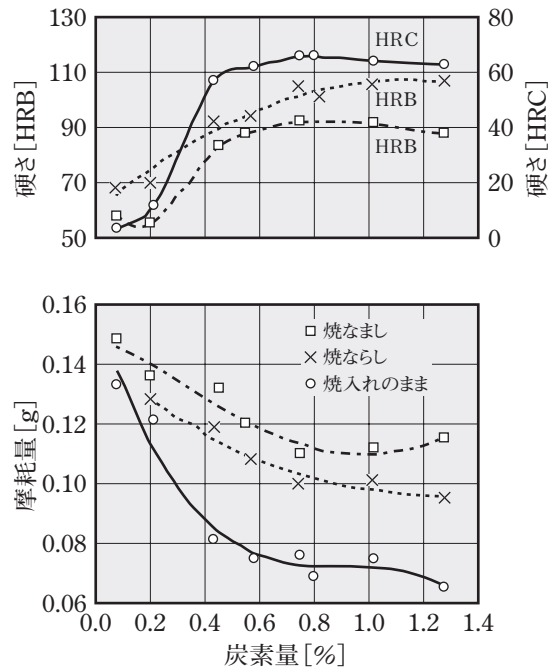


図4. 炭素鋼の耐摩耗性におよぼす炭素量の影響

## 6. 耐食性を高めるには

鋼はミクロ的に見れば不均一なものであるため、電解質水溶液中に浸漬した場合、イオン化しやすい部位と、しにくい部位との間でミクロな局部電池をつくります。局部電池が形成されると、陽極部分がイオン化し腐食されることとなります。しかし、陽極部と陰極部は反応の進行によって移動するため、実際には材料の表面全体が腐食されます。そのため材料が単一相でミクロ的に均一であれば、腐食はされにくいこととなります。

例えば、マルテンサイト系ステンレス鋼を熱処理した場合、ある程度焼入れ温度を上げないと、母相中に比較的大きな炭化物が残留し、母相と炭化物とで局部電池を構成し、耐食性が低下するという問題が発生します。そのため、十分に焼入れ温度を上げ、炭化物を母相中にしっかりと溶け込ませることが重要となります。図5は、SUS420J2の組織が耐食性におよぼす影響を示しています。

また、SUS304のようなオーステナイトステンレス鋼では、組織の均質化を狙った溶体化処理と呼ばれる

熱処理を行いません。これは、製造工程中など高温下で析出したCr炭化物や $\sigma$ 相などをオーステナイト生地に固溶させ、耐食性、機械的性質を適した状態にする目的で行なわれます。

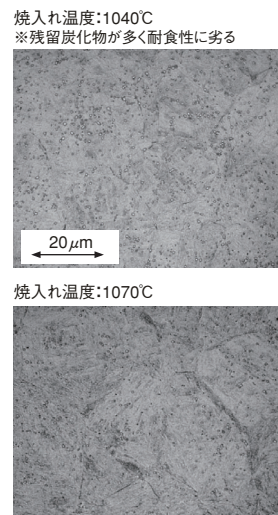


図5. マルテンサイト系ステンレス鋼の焼入れ温度、ミクロ組織と耐食性

## 7. 組織を均一な状態にするには

鋼を製造するとき、最初の工程が溶解および造塊(鑄型に溶けた鋼を流し込むこと)になりますが、できあがった鋼塊内部はマクロ的にもミクロ的にも成分元素や不純物が偏析した状態になっています。

炭素・りん・いおうなどの偏析や添加合金元素の濃さの片寄りによってできた偏析相は、鍛造や圧延といった熱間加工で、加工方向に伸びる性質があります。このため圧延鋼材では、加工(圧延)方向に伸びた縞状偏析が形成されやすくなります。

この不均一は、鍛造や圧延といった熱間加工で、ある程度均一化されますが、高温(1100~1200℃)での長時間の加熱処理、いわゆる拡散焼なましによって均質化されます。図6は、拡散焼なましを行なった場合としなかった場合の合金鋼のミクロ組織を示しています。いずれにしても、鋼の組織に不均一さが残る

と機械的性質が不均一になるばかりでなく、焼入れ効果も不均一となり、焼割れの原因にもなります。

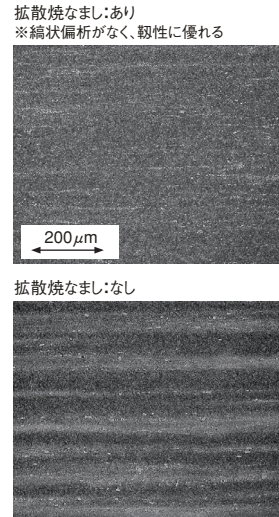


図6. 合金鋼の縞状偏析におよぼす拡散焼なましの影響

## 8. 残留応力を除去するには

残留応力とは、外力がかかっていない時、その材料に存在する応力のことです。鋼を鑄造した後や、溶接したまま、熱間あるいは冷間加工したまま、また、焼入れしたままの状態では、熱応力、変態応力、そして、加工応力が足し合わさった状態での残留応力が存在します。

切削加工や研削加工、ショットピーニングなどによっても、大なり小なりの残留応力が発生します。

残留応力が存在すると、時効変形、時効割れ(置割れ)、加熱変形、加工変形、応力腐食割れなどを誘発し、また残留応力が引張応力の場合、疲れ強さが低下するなど、機械的な性質を低下させるケースが多くあります。

また、焼入れによって生じるマルテンサイトや強加工を受けた材料には、ミクロ的に不均一な残留応力が存在することから、靱性や強さ、疲れ強さ、耐摩耗性などの材料特性を低下させる一因ともなるため、残留応力を除去する必要があります。

残留応力は、材料を適当な温度に加熱すること

により除去できます。加熱温度が高いほど残留応力は緩和除去されやすくなりますが、一般には650℃以下の温度が用いられます。

図7は、炭素工具鋼の焼もどしによる機械的性質の変化を示したものです。焼もどし温度によってミクロ的残留応力の解放具合が異なり、材料特性は大きく変化します。

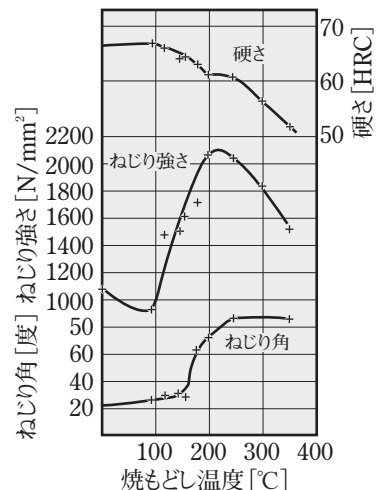


図7. 焼入れ鋼の機械的特性におよぼす焼もどし温度の影響

## 9. 寸法の安定性を得るには

鉄のように熔解、鋳造したもの、あるいは溶接したもの、塑性加工したものでは、熱応力や加工応力が残っており、後にひずみを生じます。特に工作機械のように寸法精度の厳しいものでは、このひずみは致命傷になります。そのためこのひずみの原因である残留応力を除去するため、応力除去焼なましが施されます。

焼入れした鋼の場合にも、同じように経年変形が生じては問題となる製品（ゲージ類や軸受など）が多くあります。しかしながら、これらの製品は高い硬さが必要とされることから、残留応力を除去するための焼もどし温度が、200℃以下の低温焼もどしとなります。そのため、完全に応力が除去できないこともあります。また、焼入れした鋼に含まれる残留オーステナイトは、長時間放置しておくと、徐々にですが、マルテンサイトに変態して、体積が膨張します。そのため、一般には、氷点以下に冷却してマルテンサイトに変態させる方

法（サブゼロ処理）が有効で、広く行なわれています。

図8は、焼入れ後にその鋼を常温以下に下げた場合の、残留オーステナイトとマルテンサイトの量を比較したものです。温度を下げると、残留オーステナイト量が減少していくことを示しています。

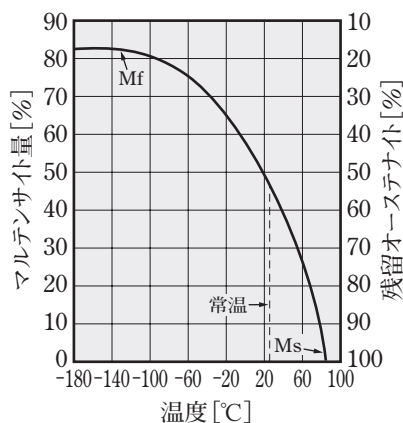


図8. 1.12%C、4.98%Ni鋼を1000℃から焼入れし、サブゼロ処理したときのマルテンサイト量と温度の関係

## 10. 冷間加工性を高めるには

素材から切りくずやスケールを出さずに、精度よく、希望する形状・寸法の部品をつくり出す技術として、冷間塑性加工が広く利用されています。この冷間加工の能率を上げるには、設備自体はもちろん、プレス、ダイ、パンチの材種の選択、潤滑油剤など重要な因子が多くあります。そして、ワークとなる素材の熱処理方法もおろそかにできません。素材が鋼の場合、鍛造や圧延をした直後の材料は不均一な組織になっています。つまり、マルテンサイト変態が中途半端なため、その中間の不安定な組織状態で停止しており、硬さは高く、冷間加工性は悪くなっています。図9は、熱間圧延材の炭素量と機械的特性の関係を示したものです。中炭素鋼や高炭素鋼では、熱間圧延したままの状態では冷間加工性が非常に悪く、使用できないくらいです。そのため、材料を軟らかくするために、<sup>※5</sup>A1変態点前後で、焼なまし処理を行ないます。

また、冷間加工の工程中に、加工硬化した素材の硬さを下げ、加工性をよくすることも必要になります。この場合には、適当な温度に加熱した後、ゆっくり冷却する、軟化焼なましを行ないます。

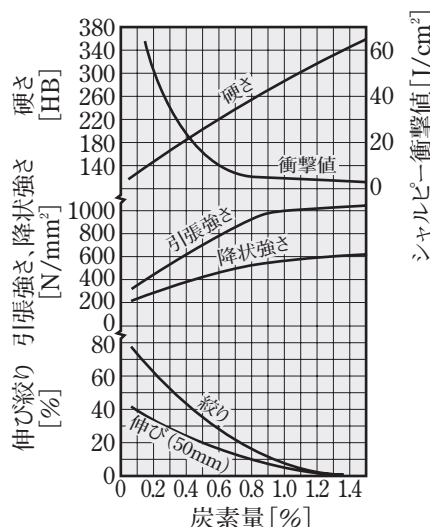


図9. 直径25mmの炭素鋼丸棒の圧延のままの機械的特性と炭素量との関係

# 11.被削性を向上させるには

被削性とは、特に機械加工分野で問題にされることですが、切削加工における難易度を指すものです。その判定の基準となるのは、切削抵抗、工具寿命、仕上げ面粗さ、切りくず形状などです。一般的には、被削性は、硬さとの関係が強いです。図10は炭素鋼の炭素量と熱処理方法と被削性の関係を示しています。

鋼の場合、被削性は適度な硬さと靱性をもったときに一番良くなります。炭素鋼では、炭素量が0.4%以下のものは焼ならしを施すことで、被削性を良くすることができます。しかし、炭素量が0.2%以下の低炭素鋼の場合、軟らかいフェライト相が多く、工具の構成刃先の生成を早めますので、冷間加工で硬さを高めておくことも、被削性を良くする有効な方法です。炭素量が0.4%を超える場合は、焼なましで硬さを下げることが良く、0.6%以上の炭素鋼の場合は、球状化焼なましにより、炭化物の形状を整えることが良い結果を生みます。

図11に、高炭素鋼の熱処理条件と工具寿命の関係を示します。

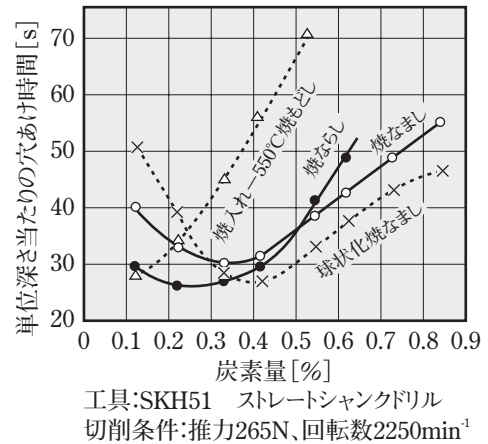


図10. 炭素鋼の炭素量と被削性

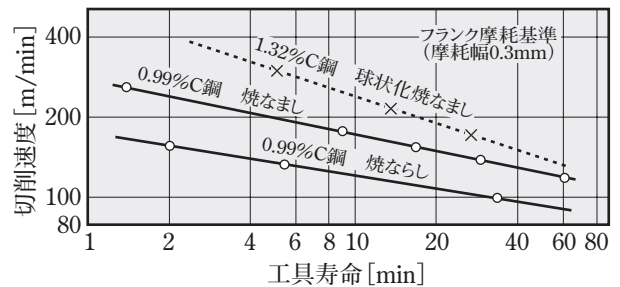


図11. 高炭素鋼の熱処理と被削性の関係

## 用語解説

- ※1 引張強さ  
引張試験において、測定された最大引張荷重を試験片平行部の原断面積で割った値。
- ※2 パテンティング  
熱処理後に伸線加工して、ピアノ線のような硬鋼線の強化に古くから採用されている方法。操作は900~1000℃に加熱し、空冷あるいは鉛浴で400~550℃に冷却して微細パーライト組織にした後、伸線加工することにより強化します。
- ※3 高周波焼入れ  
高周波電流による誘導加熱作用で加熱して行う焼入れのこと。主に鉄鋼材料の任意の表面または一部分を焼入れする場合に用いる。
- ※4 オーステナイト結晶粒度  
鋼を焼なまし、焼ならし、焼入れ、浸炭その他の目的で変態点以上または固溶化熱処理の温度に加熱したとき、その温度および保持時間によって定まる結晶粒の大きさ。
- ※5 A1変態点  
フェライトからオーステナイトへの相変化が生じる温度。

## 〈注記〉

本稿は、不二越熱処理研究会著「新・知りたい熱処理」ジャパンマシニスト社を引用しています。

## 一口メモ

### 「オースフォーミング」

オーステナイト化(例えば930℃に加熱)した鋼を準安定オーステナイト範囲(例えば540℃)まで急冷し、その温度で加工した後、つづいて冷却によりマルテンサイト変態を起こさせ、最後に焼もどし(例えば300℃に加熱)を行なう処理。靱性をそれほど犠牲にすることなく、著しく強度を上げることができます。

### 「オーステンパ」

炭素鋼、低合金鋼に用いられる熱処理。恒温変態を利用してベイナイト組織にします。0.78%C炭素鋼の例では、焼入れ焼もどしした材料に対しオーステンパした材料は、耐衝撃性が2.7倍にも達します。

## 関連記事

- 1) 浅田泰弘：知りたい材料・熱処理①「材料を強くする熱処理」  
NACHI-BUSINESS news Vol.4 D1、August/2004
- 2) 河口誠司：知りたい材料・熱処理講座②  
「硬さと粘り強さをあえる焼入れ焼もどし」  
NACHI-BUSINESS news Vol.5 D1、November/2004
- 3) 河口誠司：知りたい材料・熱処理講座③  
「熱処理にまつわる問題点・トラブルとその防止策」  
NACHI-BUSINESS news Vol.6 D1、February/2005