

NACHI-BUSINESS

Materials **news**

Vol. **4** D1
August/2004

マテリアル事業

■ 技術講座

知りたい材料・熱処理 ①

「材料を強くする熱処理」

Things to Know about Material and Heat Treatment
"Material-strengthening Heat Treatment"

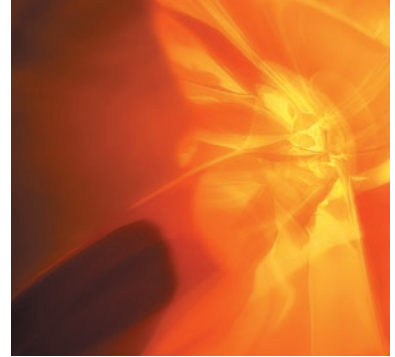
〈キーワード〉 熱処理、硬さと強さ、焼入れ、焼もどし、
時効処理、浸炭・窒化

部品事業部／技術一部

浅田 泰弘

監修 開発本部／開発三部

天野 宏地



要 旨

近年、IT化に象徴されるような産業の高度化に伴って、材料の要求特性が多様化し、熱処理技術や表面改質を複合した技術分野の重要性が、ますます高くなってきています。

NACHIは、ものづくりの上流(材料・熱処理)から下流(加工・組立・メンテナンス)までの一連のプロセスにおいて、商品・技術・サービスを提供して、成長してまいりました。

本講座によって、材料・熱処理・表面改質の技術の本質と新たな動向を捉え、今一度理解を深めることにより、その足元をしっかりと見すえていくことが、これからの“ものづくり”に欠かせないテーマであると自負しています。

Abstract

With the recent advancement in industrial technology signified in IT, the demand for diversified material characteristics has increased. As a result, the technology that combines heat treatment and surface modification has become increasingly important.

Nachi has been providing our customers with products, technology and service from the beginning processes (such as materials and heat treatment) to the completing processes (such as machining, assembly and maintenance). We have been growing as we satisfy our customer needs.

In this course, you will learn about the essence of materials, heat treatment and surface modification technologies and their trends. We strongly believe that the deeper knowledge on the essence is essential to manufacturing.

1. 熱処理とは

人類が自らの身を守る剣や刀を作るために、熱によって鉄を硬くしようとしたところから「熱処理」の歴史が始まったとされています。

日本では、日本刀の制作が熱処理の起源として知られています。1919年には東北大学に金属材料研究所が設立され、熱処理に関する研究が盛んになってきました。1929年には本多光太郎博士らの指導の下に、NACHIでハクソーが切削工具として初めて国産化されています。

熱処理とは、一言でいえば、「熱をかけることにより材料の特性・組織を変えること」といえますが、古代からの歴史にも見られるとおり、鉄に求めてきたのは「硬さ」と「粘り強さ」という相反する特性であったといえます。

日本刀や剣の性能の良しあしは、命にかかわる問題であり、この2つの特性を如何にしてバランス良く得るかについて、古くから研究・工夫されてきたことが熱処理技術発展の歴史であり、熱処理技術の進歩が近代文明の繁栄を支えてきたといえます。

ものづくりの企業として、日進月歩する今日の技術動向に合わせ、アップデートすべきデータなども取り入れて、講座を始めます。

材料技術者に限らず、広く他の分野の技術者や営業・サービスの人にも、読みものとして理解できるよう、分かり易く解説を行なうことにします。

2. 金属を硬くするとは

(硬さとは)

「硬い」ということは、いったいどんなことなのか、少し考えてみましょう。

私たちは日常でも硬い・軟らかいという言葉は当たり前のように使っていますが、実は、硬さを示す物理量は存在しないのです。しかし、硬さという概念は非常に便利なものなので、昔から硬さを何とか指数で表わそうと、さまざまな硬さ測定(指数への換算)方法が考えられてきました。

では私たちが、硬いかどうかを判断する要素は何かというと、押さえてみてへこまないとか、引っかいてみて傷がつかないとか、叩いたり物をぶつけたとき良く跳ね返る、などが考えられるのではないのでしょうか。

まさにこうした事象を定量的に測定し、数値に置き換えたのが硬さ試験で、その代表的な試験方法は表1の3つに分けられます。

硬さを指数で示そうとした試みは古くからありましたが、1822年にモースが10種類の鉱石を基準に、こすり合わせたときに傷がつくかどうかを比べることで尺度とするモース硬さを考え出したのが最初といわれています。さらに、1900年から1922年頃にかけて
※1 ※2 ※3 ※4
ブリネル硬さ、ショア硬さ、ロックウェル硬さ、ピッカース硬さなどの測定方法が考案されています。

これらの硬さはそれぞれ測定方法は違いますが、互いに換算することができる便利な面があります。こうした硬さどうしの互換性を利用すれば、被測定物にとって最も適正な試験方法を採用できるので、現場や研究での硬さ試験方法選択の自由度はたいへん大きくなります。

表1.硬さの種類

| | | |
|--------|------------------------------|-------------------------------|
| 押し込み硬さ | 所定の荷重で押し込んだときの永久変形の大きさや深さを測定 | ピッカース硬さ、ブリネル硬さ、ロックウェル硬さ、ヌーブ硬さ |
| 反発硬さ | 物をぶつけたときの跳ね返り高さを測定 | ショア硬さ |
| こすり硬さ | こすり合わせたときの傷のつきやすさを比較 | モース硬さ、マルテンス引っかき硬さ |

(強さとは)

ここに1本の木の棒があります。この棒が強いのか、弱いのか、つまり、強さを知ろうとしたら、どうすればよいのでしょうか。誰でも思いつくのは、ハンマーでたたいてみたり、折り曲げてみたりする。そう、何かその棒に力を加えて、変形したり、壊れたりする様子を観察することでしょう。

金属の場合も同じで、強さを知ろうとする金属のかたまりから、一定寸法の棒(試験片と呼ぶ)を削り出して、その両側をしっかりとつかんで引張ってみることです(引張試験といいます)。

鋼の中で最も多量に使われている軟鋼棒(SS400)から試験片を削り出して、引張試験をしてみますと、加えた力(引張力)と試験片の伸び、つまり変形量との間には、図1のような関係が見られます。

図において、A点までの間では引張試験を中断して力をゆるめると、0→Aを逆にたどって、0点、つまりほぼ元の長さにもどります。このA点までを弾性変形といいます。A点を越えて、たとえばBまで試験を進めてから、試験を中断して力をゆるめると、元の長さ(0点)にもどらずに、B→Dと変化して0→D分だけ元の長さより長くなってしまいます。(元の長さから伸びた分は塑性変形)

試験を中断せずに進めたとしますと、Cで力は最高を示し、試験片はどんどん伸びて、ついには切れてしまいます。

A点は塑性変形の始まる点(降伏点という)で、A点に相当する力 P_1 を試験片の原断面積で割った値(応力)を、降伏強さといいます(軟鋼のような明瞭な降伏点がない場合には、極めてわずかの塑性変形を与える応力を、耐力としています)。

C点に相当する力 P_3 を、元の断面積(引張試験をすると、断面積が小さくなります)で割った値を、引張り強さといいます。

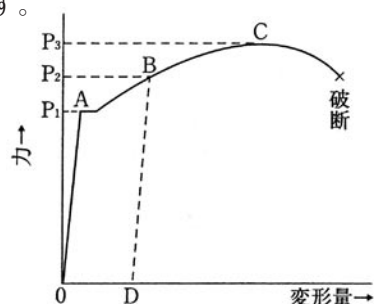


図1. SS400の引張試験結果

(硬さと強さ)

図2から分かる通り、硬さと引張り強さとの間にはたいへん良い直線関係があります。この関係は鋼種や熱処理の状態を問わないことが特長です。

また、疲れ強さや圧縮強さなども、ある範囲で硬さと良い直線関係にあることが分かっています。

実は硬さは変形の大きさ(変形のしにくさ)を測定していますが、このことは引張ったり、圧縮したり、繰り返し曲げたりしたときの強さといった物性値に、ある意味で近い現象を測定しているといってもいいでしょう。

私たちは機械部品などの材料設計をする場合、必要な引張り強さを実際の部品から測定するには、多くの時間や費用がかかります。そのため、硬さというたいへん簡単で便利な指数を使って、さまざまな物理特性を代用しているのです。硬さ試験が広く普及している最大の理由は、測定の簡易性と物理特性との良い相関関係だといえます。

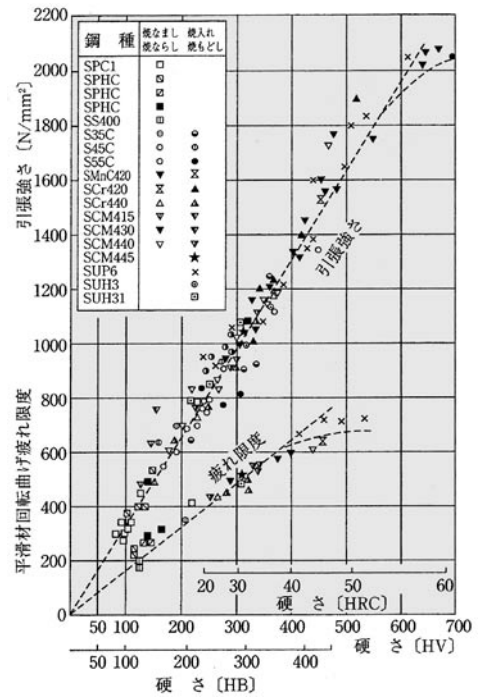


図2. 炭素鋼および合金鋼の硬さと引張り強さおよび平滑材回転曲げ疲れ限度との関係

3. 金属原子の構造と性質

(金属原子の並びかた)

話を分かりやすくするために、原子を一番外側の電子の軌道面を球面とするボールと仮定しますと、金属原子の場合にはボール1個の大きさは直径が1億分の2~3cm(1億分の1cm=10⁻⁸cm=0.1nm)くらいです。金属は結晶ですから、このボールが三次元にきちんと並んでいるのですが、その並びかたは図3に示すように面心立方形、稠密六方形、体心立方形の3種類があります。

ここでポイントなのは1つの格子の中の原子の数で、面心立方形では4個ありますが、体心立方形では2個しかありません。このことを考えると、どうも面心立方形の方が、結晶構造としては硬い(変形しにくい)と想像できます。もちろん格子定数(格子の辺の長さ)や他の状態とも関係します。

表2は、主な金属の結晶構造を示したものです。

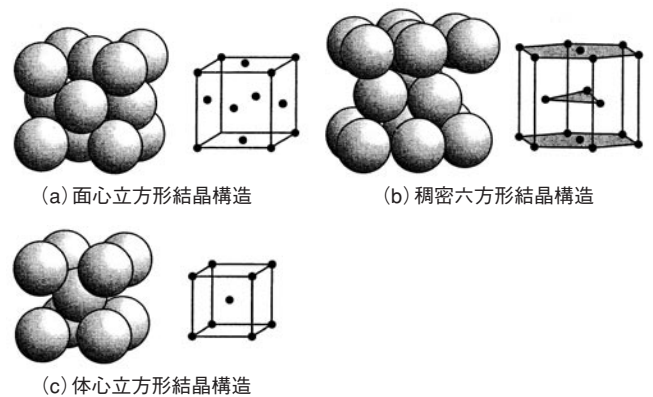


図3. 結晶構造の種類

表2. 主な金属の結晶構造

| 結晶構造 | 主な金属 |
|-------|------------------------------------|
| 面心立方形 | Au, Ag, Cu, Al, Fe(γ), Ni |
| 稠密六方形 | Zn, Ti(α), Mg, Co |
| 体心立方形 | Cr, Fe(α), Na, Mo, V |

(金属は格子欠陥のある不完全結晶)

日常的に目にする金属は多結晶体であるといいましたが、その1つ1つは原子がそれぞれの結晶構造にしたがって整然と並んでいるのでしょうか。これも残念ながら特別のものを除いては、欠陥だらけのものなのです。不完全な結晶、つまり、格子欠陥のある結晶なのです。

図4のように、線状に欠陥のある場合は、線状欠陥あるいは転位といい、刃状転位とらせん転位の2つの種類があります。また、原子面の重なりかたが狂っている箇所ができたとき、これを面欠陥あるいは積層欠陥といいます。

(転位と塑性変形)

転位は、金属の性質に特に大きな影響を及ぼすので、もう少し詳しく説明しておきましょう。金属の結晶に力を加えますと、図5のように変形をします。ちょうどトランプのカードを積み重ねておいて、指で押したときと同じようなかっこうになります。このような変形のしくみを塑性変形といいます。

(加工硬化)

ところで、実際の金属の塑性変形に要する力を測ってみますと、トランプのカードを指で押すときのように、原子のきちんと並んだ面をいっせいに動かすのに要する力よりずっと小さい力で変形が起こるのです。(理論値の1/500~1/1000)

これにはなにか仕組みがあるに違いありません。その仕組みは、図6に示したように、転位が尺取り虫が動くように移動していく方式であることがわかりました。また、塑性変形は転位の運動によって起こるのですが、一方では塑性変形によって転位が著しく増殖すること、塑性変形が進むと増殖した転位がもつれ合ったり、からみ合ったりして移動しにくくなること(加工硬化)などがわかってきました。

また、図4に見るように、刃状転位の部分はすき間が大きくなっていて、ここに炭素や窒素など、侵入形の固溶原子が入り込みやすくなっています。一度入り込むと抜け出しにくくなり、転位が移動するのを妨げ、金属を強化する効果を発揮したりします。

(侵入形の固溶と置換形の固溶)

ほとんどの金属は、不純物元素を含んでいて、純金属を得ることは非常に困難です。逆に、1つの金属にほかの元素を積極的に添加することによって、たいへん多くの、いろいろな性質をもつ合金が得られます。

たとえば、鉄-鉛合金のように、単なる混合物でそれぞれ別に結晶を作って混ぜり合っているものもあります。また、完全に溶け合っているいわゆる固溶体になって結晶を作っているものもあります。さらに、特定の割合で混ぜり合って、比較的複雑な結晶構造を示す化合物も存在します。

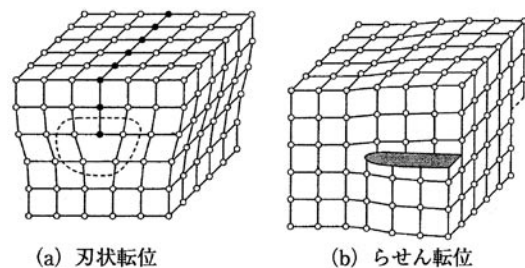


図4. 転位の種類

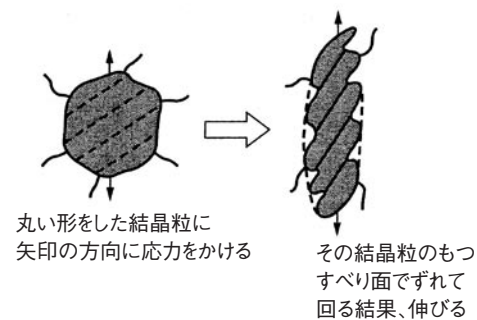


図5. 結晶粒の塑性変形の仕組み

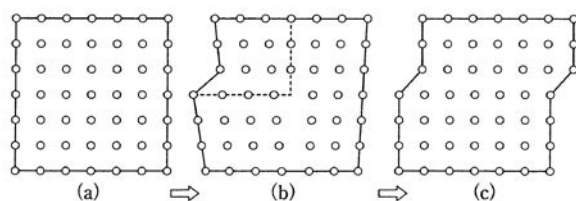


図6. 転位によるすべり機構(テイラーによる)

固溶体には図7に示すように侵入形と置換形があります。

侵入形とは、元となる金属(溶媒原子)の結晶のすき間に、溶け込む原子(溶質原子)がもぐり込む形で固溶体を作るものです。ですから溶質原子は小さなものに限られて、たとえば鉄の場合ですと、鉄原子よりもずっと小さい酸素、水素、窒素、炭素などの元素が侵入形の固溶をします。

ところが、原子の直径の差が±15%以下の金属どうしになりますと、固溶の形態はお互いの位置を交換しあう置換形となります。鉄に対してクロムやニッケルなどは、このタイプの固溶体を作ります。

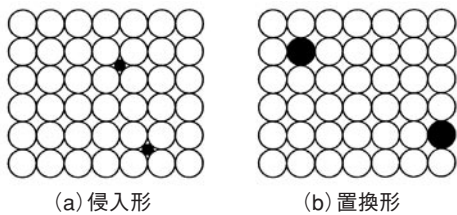


図7. 固溶体中への溶質原子の入りかた

(鋼の中の炭素の拡散)

鋼の基本成分は鉄-炭素です。鋼の中に炭素は侵入形で固溶すると述べましたが、この炭素原子は常温ではほとんど動きません。ところが、温度が高くなると、炭素原子は比較的自由に鉄の結晶中を動き回ります。こうした炭素原子が鉄の結晶格子中を移動することを拡散といいます。

拡散は金属原子どうしても起こりますが、やはり、大きな金属原子どうしの拡散は、原子と原子が置き換わる置換形の拡散となります。(図8)

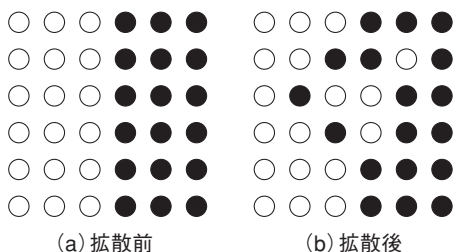


図8. めっきの境界の原子配列

(温度と金属原子)

温度による金属原子の動きについて、考えてみましょう。

先ほど炭素原子は鉄の結晶格子間に侵入形固溶すると説明しましたが、鉄の原子は 2.5 \AA (オングストローム)で炭素の原子は 1.5 \AA (オングストローム)ですから、常温においては炭素はほとんど固溶することができません。

金属原子は最外殻の電子を共有し、互いに結合の手で結ばれています。ところが、温度が上がりますと原子の熱エネルギーは運動エネルギーに変わり、原子どうしの結合を振りほどこうと振動し、結合の手がバネのように伸びるとともに結びつきの力が弱まります。(図9)

- つまり温度上昇により、金属は、
- ①膨張し、結合の力(硬さ)が低下する。
 - ②格子間の距離が長くなるため、固溶が容易になり、常温では固溶できない量の元素を固溶させることができる。
 - ③原子が自由に動きやすくなり、歪みを持った結晶の再配列が起こり、残留応力の開放や再結晶による組織の調整が進む。などの現象が起きるのです。

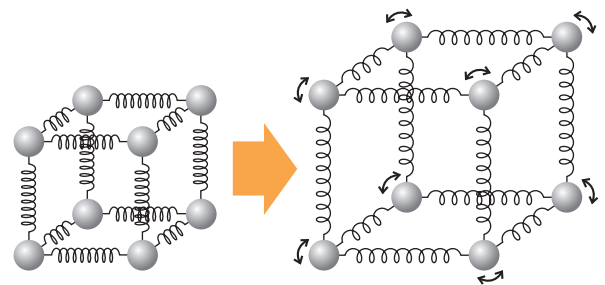


図9

4. 熱処理の種類と目的

さて、これまで説明してきた硬さ(強さ)や、もう一つの特性である「粘り強さ」を必要に応じてコントロールする主な熱処理の種類とその目的について整理してみましょう。

(焼入れ)

鋼を加熱(約800~1200℃)した後、急冷することにより、硬い組織に変化させることが焼入れで、その組織をマルテンサイトと呼んでいます。

この際の加熱温度や冷却速度の微妙な違いは、鋼の特性(硬さ)に大きく影響しますし、もちろん鋼の成分の違いによっても影響します。

刀鍛冶が玉鋼を槌で叩いて延ばし、真っ赤な状態で水の中にジュッと入れるのが焼入れで、加熱や冷却する水の温度も熟練と秘伝の技で、愛弟子にも簡単には教えなかったといわれています。

(焼もどし)

焼入れした後、基本的には必ず焼もどしを行いません。焼入れした状態は急冷による熱応力が残っており、またマイクロ組織も安定していません。

この残留応力(歪み)は耐衝撃性などの機械的性質を低下させるので、焼入れだけでは、硬いけれど脆い状態なのです。この残留応力を除去し、マイクロ組織を均一安定な状態にするために、100℃から650℃に加熱することを焼もどしといいます。

焼もどし温度を上げることにより、残留応力(縦軸プラスが引張応力、マイナスが圧縮応力)がどのように除去されるかを図10で示します。温度を高くすることにより、残留応力は徐々に除去され、500℃×1hrの焼もどしにより、残留応力はほぼ完全に除去されているのが判ります。焼入れ後に焼もどしすることにより、「硬さ」と「粘り強さ」を兼ね備えた鋼になります。

(焼なまし・焼ならし)

焼鈍ともいいますが、材料を加工し易くするため、加熱することにより、残留応力が無く、軟らかい状態にすることを焼なましといいます。

また、焼なましの一種である焼ならしは、通常の焼なまし温度より高い温度から徐冷し、偏析の軽減やマイクロ組織の均一化、結晶粒の微細化をはかる処理です。

(時効処理)

焼入れによる強化以外に、時効処理と呼ばれる析出硬化による強化方法があります。

析出硬化型ステンレスは加熱後に急冷(溶体化処理)し、添加元素を固溶させ、その後一定温度に加熱・保持をする時効処理を行いません。時効処理によって、添加されているニッケルは他のアルミニウム、チタン、ニオブ、モリブデンなどと金属間化合物を形成・析出し、硬化します。

(浸炭・窒化)

浸炭や窒化は鋼の表面に炭素または窒素を拡散浸透させる熱処理方法で、その後焼入れ焼もどしをすることにより、高い表面硬さが得られます。

炭素も窒素も鋼の内部には侵入型で拡散しますが、炭素の方が原子量が小さいので比較的簡単に深く入り込むことができますが、窒素は原子量が大きい分、炭素ほど深くは侵入しませんが、結晶に大きな歪みを与えるため、高い硬さが得られるのが特長といえます。

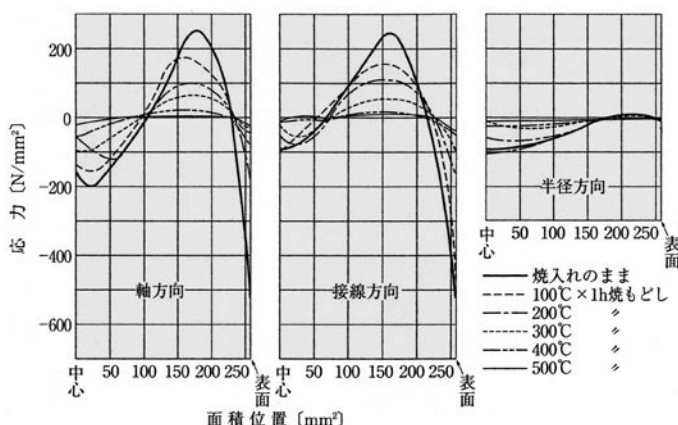


図10. 焼入れしたとき残留応力分布に及ぼす焼もどし温度の影響

5. 「知りたい材料・熱処理」講座のはじまり

これまで熱処理を理解するための基本的な話をしてきましたが、この後は何回かにわたって、もっと具体的に熱処理についての解説をしていきます。

その例としては

- ・焼入れ焼もどしで、どんなことがおきているのか
- ・焼入れ焼もどし時のトラブル事例とその対策
- ・使用目的を考えた熱処理の選びかた
- ・使用目的と熱処理を考えた材料の選びかた
- ・表面硬化処理(浸炭・窒化)の目的と方法などについて解説します。

熱処理の理論といえば、何かと敬遠されがちですが、できるだけ分かり易く、具体的な事例をまじえながら解説を進めていきます。

用語解説

※1 ブリネル硬さ

鋼球又は超硬合金球の圧子を用い、試験面に球分のくぼみを付けたときの試験荷重とくぼみの表面積から求めた硬さ。他の硬さ試験に比べて、試験荷重が大きく、また、くぼみも大きい。試料の平均的硬さを求めるのに適している。素材、圧延材、鍛造品、鋳物などの硬さ試験に用いられる。HBで表示。

※2 ショア硬さ

ショア硬さは、ダイヤモンドハンマを一定の高さから落下させ、その跳ね上がり高さに比例する値として得られる。小型軽量で、操作が極めて簡単だから、非常に短時間で硬さ値が得られる。他の試験機ではできないような大型試料でも試験ができ、くぼみも小さく完成品の硬さ測定に適している。HSで表示。

※3 ロックウェル硬さ

3段階の試験荷重とダイヤモンド、鋼球圧子の組合せによって広い範囲の硬さ測定に利用される。個人誤差や測定誤差が少なく、しかも圧痕が比較的小さく、熱処理した仕上げ品の硬さ測定に適している。HRA、HRB、HRCなどで表示。

※4 ビッカース硬さ

正四角錐のダイヤモンド圧子を用い、試験面にくぼみを付けたときの試験荷重とくぼみの表面積から求めた硬さ。小さい試料や薄い試料、脱炭層、残留オーステナイトなどの非常に微小な部分、または浸炭層、窒化層など表面からの硬さ分布など、微小試料の検査に適している。HVで表示。さらに、荷重の小さいマイクロビッカース硬さも用いられる。

※5 Å (オングストローム)

1億分の1cm。10⁻⁸cm。
原子1個の半径の大きさに相当。

一口メモ

硬さ測定の基準片について、矢野 宏著「単位の世界をさぐる」(講談社)に、次のような記述があります。

「当時国内では、硬さ基準値片のメーカーは二社あり、さらにベアリングメーカーとして東洋ベアリング(現NTN)と不二越が自社内で使うロックウェル硬さ基準片を作っていました。ベアリングメーカーが自社製のを使ったというのは、外部のものが信用できないということと、自社のベアリングの熱処理技術への自信からだと思います。

特に、不二越の場合は、製鋼(材料製造)の技術も自社内にあったということが、このような試みにつながったと思います」

硬さの基準に関してはかなり長い間、計量研硬さ、東大硬さ、不二越硬さなどがありましたが、1955年頃から工業技術院計量研究所が、数十年の年月をかけて、精度の向上と基準の統一を進めてきて現在に至っています。

皆さんにたいへん身近な「硬さ」ではありますが、その基準に関しては国際的にも未だに完全に解決されたとは断言できない問題といえるのは、少し不思議です。

<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。