

圧縮焼入法に関する諸問題

大 島 聡 範 *

Some Problems in Compression Quench Hardening

TOSHINORI OSHIMA

Department of Mechanical Engineering

要 旨

本稿は、圧縮焼入法における鋼の硬化因子について他の加工熱処理法と比較しつつ検討を加え、その特質および今後の課題について述べたものである。

Synopsis

This paper deals with some considerations for hardening mechanism of Compression Quench Hardening in comparison with other hardening methods.

I 緒 言

鋼のマルテンサイトは、過冷オーステナイトからの変態に際して、原子拡散を伴うことなく、従って母相と同一組成を有しつつ、しかも母相と coherent な関係を保ちつつ生成するところの、無拡散変態生成物である。

このことは、マルテンサイト変態の本質的特徴ともいうべきものであり、これが原因となって結晶格子に大きなひずみを生じ、極めて高い変形抵抗を示すことになるのである。したがって、反応過程に対する外部応力の影響は他の変態の場合に比べると非常に大きくいわゆる strain sensitive あるいは stress sensitive な挙動を示すことになる。マルテンサイト変態に対する外部応力の影響については多くの報告がなされているが、未だに不明の点が多い。しかし、応力増加によって変態が促進されるという点に関しては大方の見解の一致するところである。

しかるに一方、Ford Morter の Harvey 等の実験⁽¹⁾に端を発したオースフォーミングの研究が一段と活発化するに及んで、マルテンサイト変態に対する応力の効果は、ややもすれば、準安定オーステナイトに加工変形を与えた場合の附随的效果として見過ごされ勝ち

な傾向を呈している。しかし、オースフォーミングにおいて見られる、準安定オーステナイトの加工に伴う加工硬化的因子と、マルテンサイト変態の促進作用としての応力効果とは、共通のものではない。塑性変形には必ず応力附加を要すること、また、弾性限度内の応力による変態促進効果が比較的小さいことなどによって、両者を分離して考える場合、現象が交錯し複雑化しているにすぎないのである。

著者等は先に、高炭素合金工具鋼のマルテンサイト変態過程に圧縮応力を附加することにより、変態を促進させると共に残留オーステナイトを減少させ、鋼の硬度を増加させる方法を見出し、これを圧縮焼入法と名づけて学会誌上に発表した。⁽²⁾

本稿では、この圧縮焼入法に関して、先の報告で意のつくせなかった点、ならびに今後の問題点などについて、小論を展開してみたい。

本文の構成は次の如くである。

まず、IIにおいて圧縮焼入法の基本原理としての応力によるマルテンサイト変態の促進について概説する。つぎに、他の加工熱処理法と比較しつつ圧縮焼入の硬化因子とその特質について検討を加え、つづいてIVでは、オースフォーミング効果と残留オーステナイト減少効果の相互関係について論ずる。Vではさらに、深冷処理後の時効による顕著な硬化現象を取りあげ、二三の見解を提示する。

* 講師 機械工学科

Ⅱ マルテンサイト変態に及ぼす外部圧縮応力の作用

マルテンサイト変態に対する応力附加の影響については古くから研究されており、Fe-Ni 合金に一定荷重を与えつつ冷却すると変態が促進されることが認められていた。(3) (4)

マルテンサイト変態は要するに、すべり変形や双晶変形と同様の微視的塑性変形的一种であり、外部応力が機械的雙晶の形成と類似の働きをすることによって、変態を促進させるという外部応力の剪断応力効果が認められている。(5) したがって、変態を促進するものは変形の駆動力であり、それはオーステナイトとマルテンサイトの自由エネルギーの差に基づくものである。という考え方によって前述の現象を説明することができる(6)

マルテンサイト変態の自由エネルギーは、 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 変態に伴う化学的变化に基づく化学的自由エネルギー項 (chemical free energy) と、それ以外の因子による非化学自由エネルギー項 (non-chemical free energy) の和であって、応力効果に関連するのは、変態に伴う歪応力や界面エネルギーの変化などに基因するところの、非化学自由エネルギーである。

マルテンサイト変態の起る自由エネルギー条件を考えれば

$$\Delta F_T \rightarrow M_{\text{chemical}} + \Delta F_{\text{non-chemical}} \leq 0 \quad (1)$$

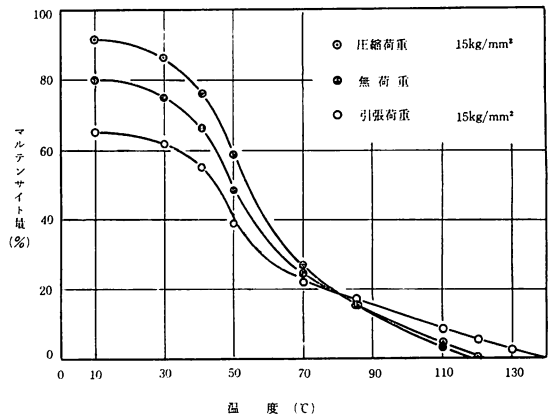
応力に関連する第二項は更に二つの因子より成り立っている。

$$\Delta F_{\text{non-chemical}} = \Delta F_{\text{surface}} + \Delta F_{\text{shear}} \quad (2)$$

(2)式の第一項は、母相オーステナイトから新たな界面を持ったマルテンサイト晶が生成するときの界面生成エネルギーであり、第二項は、マルテンサイト晶形成の際の塑性変形や剪断応力に基づく不可逆的な kinetic エネルギーである。ここで、変態に対する外部応力効果が、この kinetic エネルギーを減少させる方向に働くならば、応力による変態の促進が行なわれることになる。

すなわち、附加された外力の剪断応力成分は変態の駆動力を助けることにより、「剪断応力効果」とも称すべき、変態促進作用としての応力効果を生ずる。そして、この効果は外力の方向の如何に拘らず、引張り圧縮ともに変態促進作用となる。しかし、これらはいずれも M_s 点附近における外部応力附加の実験結果に基づく考え方であり、変態過程に対する影響について

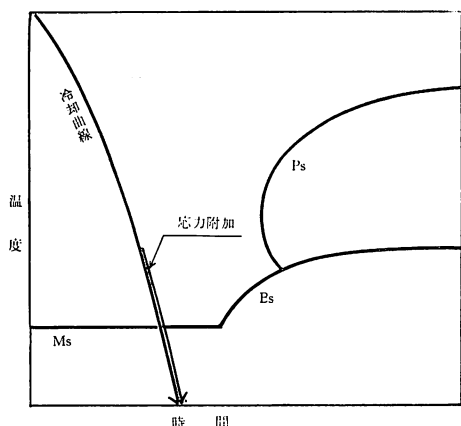
のものではない。変態過程中に外部応力を附加した場合、従来の説では予測し得ない現象が生じたのである。



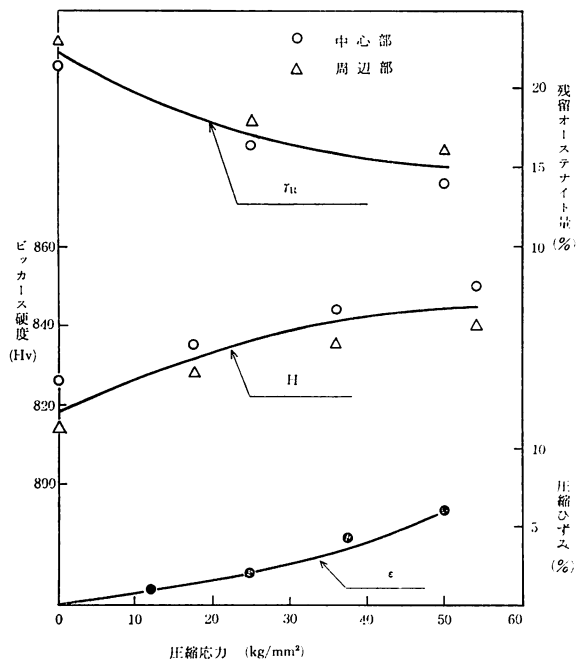
第1図 マルテンサイト変態に対する応力の影響

第1図(7)は高炭素合金鋼のオーステナイト域からの冷却過程で 350°C より応力を附加しつ、 M_s 点以下の各温度まで冷却した場合の変態量と、附加応力の関係を示したものである。これによれば、変態初期では引張り応力による M_s 点の上昇が見られるが、中期では圧縮応力が変態量を増加させるのに対し、引張り応力は無荷重の場合よりもむしろ変態量を減少させることになり、このような結果は、従来の応力効果理論からは予想し得ない。このような現象を説明するものとして導入されたのが、核数に対する応力効果の概念である。(7)

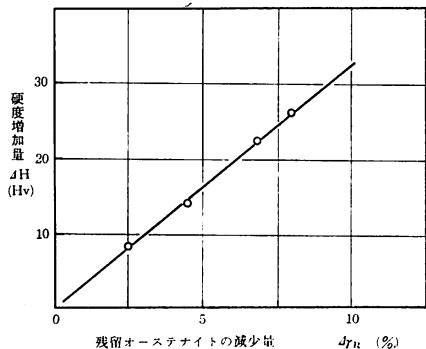
マルテンサイト変態は一種の微視的塑性変形であるから、オーステナイトからマルテンサイトへの変態が達成されるためには、いわゆる Bain の格子ひずみ (Bain's lattice distortion) の発生が伴わねばならない。したがって、附加応力が、変態に必要なだけのひずみの発生を助長するか妨げるかによって、冷却途中におけるマルテンサイトの strain embryo が, embryo から核へと生長し得るか否かが左右されることになろう。このように、従来の説が変態の駆動力として、主に剪断応力の効果のみを考えたのに対して、引張応力で核数を減少させ、圧縮応力で核数を増加させる方向に働くような応力作用の存在を考えたのである。核が生成すれば、その後は変態の駆動力の問題となり、これは一般の応力効果理論に従うものとなる。



第2図 圧縮焼入の概念図



第3図 圧縮応力に伴う、硬度、残留オーステナイト、圧縮ひずみの変化



第4図 圧縮焼入における硬度増加量と残留オーステナイト減少量の関係

Ⅲ 圧縮焼入法の特長と他の加工熱処理法との比較検討

圧縮焼入法の基本原理は、Ⅱで述べた冷却過程中的圧縮応力増加によるマルテンサイト変態の促進である。その詳細については既報(2)にゆずるが、オーステナイト域からの冷却過程において、マルテンサイト変態前から変態中のある温度範囲にわたって圧縮応力を附加しつつ焼入するものである。第2図にその概要を示し、第3図は圧縮焼入における応力の変化に伴う圧縮歪 ϵ 、硬度 H 、残留オーステナイト γ_R の変化を示す。ここで応力に伴う H の変化率は γ_R と対応しているが、 ϵ とは逆の関係となっている。いま、無荷重

(応力がゼロ)の場合に対する H の増加量、 γ_R の減少量をそれぞれ ΔH 、 $\Delta \gamma_R$ とすれば、両者は第4図の如く直線関係を有する。これは圧縮焼入の硬化因子が主として残留オーステナイトの減少に関連するものであることを示しているが、他の因子の影響もまた無視することはできない。

応力によってマルテンサイト核数が増加すれば残留オーステナイトは減少するが、同時に応力に伴う塑性変形は、準安定オーステナイトの加工に起因するオースフォーミング的硬化因子を生ぜしめ、さらに前記マルテンサイト核の増加によるマルテンサイト自体の微細化も硬度増加の一因となり得るであろう。これらについては今後の課題として、本節では他の加工熱処理法との比較検討を試みつつ圧縮焼入法の特徴について述べる。

圧縮焼入法は加工熱処理法の一つであると考えられる。加工熱処理法はいうまでもなく加工と熱処理を組合わせたものであるが、加工を行なう時期の相違によって第1表に示すような分類がなされている。圧縮焼入は一見これらのすべてを合わせた方法であるとも考えられるが、詳細に検討すれば種々の異なる点を有しているのである。

第一に、普通の加工熱処理法が、加工の指標として変形量に重点をおいているのに対し、圧縮焼入では変形量よりはむしろ附加された応力に注目し、その応力増加も変態前から変態中にかけて、ある温度範囲にわたって行なわれるものである。これに対して、Iaのオースフォーミングを例にとれば、準安定オーステナイト域で多量の加工変形を等温的に与えた後にマルテンサイト変態を行なわせるものであって、方法的に異なっている。また、 M_s 点以上における多量の変形

第 1 表 加工熱処理法の分類

I 変態前の加工	a. 安定オーステナイト域で加工後 マルテンサイト変態
	b. 準安定オーステナイト域で加工後 マルテンサイト変態
	c. 準安定オーステナイト域で加工後 パーライト, 又は, ペイナイト変態
II 変態中の加工	a. マルテンサイト変態途中の加工
	b. パーライト 又は ペイナイト変態途中の加工
III 変態後の加工	a. マルテンサイトの加工
	b. 焼戻しマルテンサイトの加工
	c. パーライト 又は ペイナイトの加工

は準安定オーステナイトに加工硬化を与え, これはマルテンサイト変態の促進を妨げるオーステナイトの加工安定化現象を生ぜしめることになり, 残留オーステナイトを減少させることは期待できないであろう。軸受鋼についての実験結果 (9) では, オースフォーミングによって, 硬度, 疲労強度などは増加したが残留オーステナイト量は殆ど変化していない。圧縮焼入法の主要硬化因子が残留オーステナイトの減少にあることを考えると, これは重要な相違である。また, 準安定オーステナイトの加工硬化に関連した例では, Raymond らの実験 (9) がある。これによれば, 準安定オーステナイトを引張り加工したときの加工硬化曲線を

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

ここで σ : 真応力

K : 強化係数

ε : 真のひずみ

n : 加工硬化係数

この場合の加工硬化率は

$$\partial \sigma / \partial \varepsilon = K n \varepsilon^{n-1} \quad (2)$$

(2)式で ε が大きくなると $\partial \sigma / \partial \varepsilon$ は小さくなり, いま, $\varepsilon = 100\%$ としたとき最小となって, 近似的には次の如くである。

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon=100\%} = K n \quad (3)$$

したがって, 準安定オーステナイトの加工硬化率は近似的に Kn の値で示され, この値が大きいかほどオースフォーミング後のマルテンサイトの強化が大きくなる。ここで重要なのは, オースフォーミングの効果が, 準安定オーステナイトの加工硬化率と密接な

関係を有すること, 加工が引張り応力によって行なわれたことの二点である。圧縮焼入において, 引張りと圧縮ではマルテンサイト変態に対する応力効果が異なること, 特に引張り応力が変態を阻止し残留オーステナイトを増加させることは II において述べた。また, 準安定オーステナイトの加工硬化も残留オーステナイトの減少に対してはマイナス因子として働くのである。したがって上記の二点はオースフォーミングと圧縮焼入の相違点を明確に示すものである。オースフォーミング効果は応力によるマルテンサイト変態の促進ではなくして, 準安定オーステナイトの加工硬化がマルテンサイト中に継承された結果として生ずるものであろう。このことについて, 著者等は既に指摘したが, (2)その後, 五弓らの実験 (10) でオースフォームされたマルテンサイトの強度は, オースフォームしない場合のマルテンサイトの強度に, 準安定オーステナイトの加工硬化による強度増加がそのまま加わったものであること, マルテンサイトの降伏強度の増加がオーステナイトの加工硬化に基づく flow stress の増加と全く等しいこと, などが明らかになった。

つぎに, II に属する方法との比較であるが, これは一般に不安定オーステナイト域で加工変形を与え, 転位密度の高い, いわゆる加工マルテンサイトを得ようとするものであって, この場合, 加工マルテンサイトの生成と M_s 点の上昇が, その特徴としてあらわれる。これに対して, 圧縮焼入に用いた応力では, 荷重温度内において加工マルテンサイトの発生は認められず, また, 応力を附加しつつ常温まで冷却する間に,

M_s 点は殆ど変化せず、むしろ降下する傾向を示したのである。これについては第1図にも同様の結果が認められる。

最後にⅢとの比較であるが、高炭素鋼のマルテンサイトを加工変形するには、非常に大きな応力が必要なので、圧縮焼入で用いられた 50 kg/mm^2 程度の応力では問題にならない。しかし、この件については変態塑性の問題も考えられ、また、低温度で生成した、いわゆる virgin マルテンサイトが非常に軟らかいものであること (11) などに関連してくるので、一概にはいえない。しかし、応力による変態の促進に主眼をおいている点で、圧縮焼入はこの方法に属するものとは考えられない。

以上述べてきたように、圧縮焼入は従来の加工熱処理法と比較して種々の点で異なっているのであるが、オースフォーミングでは 0.6% 以上の高炭素鋼に対して、その効果が減じてくること (12) などを考慮して、高炭素合金工具鋼、軸受鋼 などに対する適用が考えられる。したがって、その目的も、一般の加工熱処理法が目指している強度と靱性の増加とは多少異なり、硬度、耐摩耗性、寸法安定性、などの向上を主目的とすることになろう。今後、時効硬化、深冷処理等との組合わせによって更に高硬度の、より安定な材料を得ることが将来の課題である。

Ⅳ 圧縮焼入における硬化因子の検討

(オースフォーミング効果と残留オーステナイト減少効果との相互関係)

ⅡおよびⅢにおいて、圧縮焼入における硬度増加の主因は残留オーステナイトの減少によるものであることを述べた。しかし、少量なりといえども圧縮応力附加にともなう加工変形が生じているのであるから、準安定オーステナイトの加工硬化が生じ、それに起因するオースフォーミングの効果が発生していることを考慮に入れねばならない。

圧縮焼入の硬度は残留オーステナイト量に対応して変化し、 ΔH と Δr は直線関係を有するのであるが、しかし、 ΔH と Δr が比例関係にあるからといって、ただちに圧縮焼入における硬度増加のすべてが残留オーステナイトの減少に基づくものであると考えるのは早計である。前述のように、圧縮焼入における硬度増加の中には残留オーステナイトの減少による硬化因子と、オースフォーミング的硬化因子が共存しているのである。しかし、この両因子を分離して、それぞれの

硬度増加に対する寄与を定量的に論ずるには、データ不足でもあり、この点については未解決である。よって、本稿では両因子が共存していても、見かけ上は Δr と ΔH との間に比例関係が成立し得ることの可能性について論じることとする。

まず、圧縮焼入および普通焼入における硬化因子を次のようにあらわす。

H_o 圧縮焼入硬度 (σ は応力を意味する)

H_o 普通焼入硬度 ($\sigma = 0$ の場合 以下同様)

H_o^M 圧縮焼入後のマルテンサイトの硬度

H_o^A 圧縮焼入後の残留オーステナイトの硬度

$\Delta H = H_o - H_o$ 圧縮焼入による全体の硬度増加

$\Delta H^M = H_o^M - H_o^M$ 圧縮焼入によるマルテンサイトの硬度増加

$\Delta H^A = H_o^A - H_o^A$ 圧縮焼入による残留オーステナイトの硬度増加

r_o 圧縮焼入後の残留オーステナイト量

r_o 普通焼入後の残留オーステナイト量

$\Delta r = r_o - r_o$ 圧縮焼入による残留オーステナイトの減少量

以上によって圧縮焼入硬度 H_o を表現すれば

$$\begin{aligned} H_o &= H_o^M(1-r_o) + H_o^A r_o \\ &= \Delta H^M - (\Delta H^M - \Delta H^A) r_o + (H_o^M - H_o^A) \Delta r + (\Delta H^M - \Delta H^A) \Delta r - (H_o^M - H_o^A) r_o. \end{aligned} \quad (1)$$

ここでもしも、圧縮焼入後のマルテンサイトおよび残留オーステナイトの硬度が応力と無関係に一定なものであるとすれば

$$\begin{aligned} \Delta H^M &= 0 \quad \Delta H^A = 0 \quad \text{であるから} \\ \Delta H &= H_o - H_o \\ &= (H_o^M - H_o^A) (\Delta r - r_o) = H_o. \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式において Δr は応力の関数であるが、この場合 ΔH と Δr は比例関係を有する。

つぎに圧縮焼入後のマルテンサイトおよび残留オーステナイトの硬度が応力によって変化するならば、 ΔH^M , ΔH^A はともに応力の関数であることになる

ここで(1)式の $\Delta H^M + (\Delta H^M - \Delta H^A) (\Delta r - r_o)$ をひとつの応力の関数として $\varphi(\sigma)$ で表わし得るとすれば

$$\begin{aligned} H_o &= \varphi(\sigma) + (H_o^M - H_o^A) (\Delta r - r_o) \\ \Delta H &= \varphi(\sigma) + (H_o^M - H_o^A) (\Delta r - r_o) - H_o. \end{aligned}$$

ここで Δr は前述の如く応力の関数であつて、もしも、 Δr と $\varphi(\sigma)$ が相似であったとすれば ΔH は見か

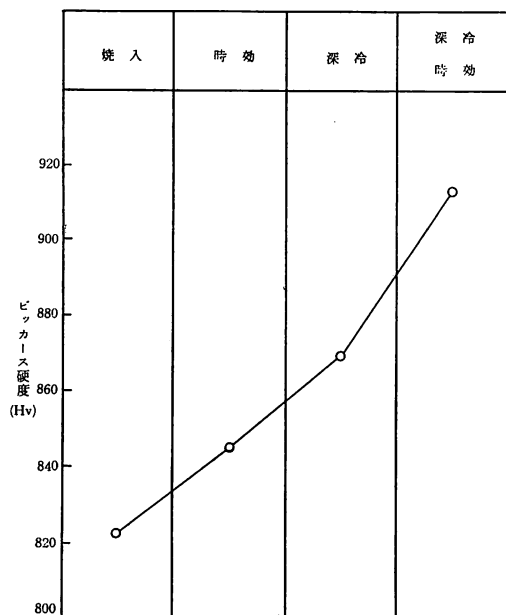
け上 Δr と比例関係を示す場合が生じ得ることになる。しかし、 $\varphi(\sigma)$ の中には、じつはオースフォージング的効果にもとづくところの ΔH_M , ΔH_A が同時に含まれているのであって、 ΔH と Δr が比例関係にあるからといって必ずしも硬度増加の原因を Δr の増加にのみ帰することはできないのである。

圧縮焼入において共存する前記両因子の分離および比較検討は今後の課題である。圧縮焼入とオースフォージングでは応力の正負によって、その効果の異なる点に注目すれば、引張と圧縮の両応力についての実験結果を比較検討することによって、解明のいとぐちをつかめるかも知れない。

V マルテンサイトおよび残留オーステナイトの時効硬化について

先の著者等の実験 (2) において、焼入後深冷処理した高炭素合金工具鋼を時効処理することによって、913 Hv という極めて高い硬度が得られた。本節では、この事実を中心として、高炭素鋼マルテンサイトおよび残留オーステナイトの時効硬化について述べる。

第 5 図に、焼入後の時効 ($100^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$) および深冷処理 ($-196^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$) による硬度増加の傾向を示す。これによれば、時効処理による硬度増加率が、焼入後と焼入深冷後とは大きく異り、後者では前者の殆ど 2 倍となっている。すなわち、焼入鋼の時



第 5 図 焼入後の時効、深冷処理に伴う硬度増加

効硬化性は深冷処理によって大巾に増加するのである。 $100^\circ\sim 150^\circ\text{C}$ において通常認められているマルテンサイトの時効硬化では、深冷処理の有無によってこのような相違を生ずることは考えられない。これは一体何に起因するものであろうか。この原因としては次の二つが考えられる。第一は時効による残留オーステナイトのマルテンサイト化であり、第二はマルテンサイト中の格子欠陥への溶質原子の析出である。先ず第一の場合であるが、深冷処理後といえども少量の残留オーステナイトは存在している (2) から、これが時効によってすべて分解しマルテンサイト化することが考えられる。しかし、実際には -196°C の深冷処理においても未変態のまま残留したオーステナイトが、 100°C 程度の時効によって簡単に分解することは有り得ない。とくに高炭素で合金元素を固溶し安定性を強めていることを考慮するならば、上記のことは殆ど期待し得ないであろう。つぎに第二の場合であるが、深冷処理によって残留オーステナイトがマルテンサイト化する際に、 $\gamma\text{R} \rightarrow \alpha'$ 変態に伴ってすべり、双晶などによる変形が生じ、転位その他の格子欠陥が発生する。深冷温度では固溶原子の拡散は極く僅かであるが、その後の 100°C の時効によってこれら格子欠陥への溶質原子および炭化物の析出が生じ、雰囲気形成による転位の locking, coherent な析出物による微細な格子ひずみ等によって変形抵抗が増大することが考えられる。これに関連した実験例として、McEvelly (13) らは深冷状態のいわゆる virgin マルテンサイトを常温時効することによってすべり変形抵抗が 4 倍以上にも増加することを示し、また、Cohen (14) らは、マルテンサイトを焼戻した後、微量の加工変形を与え再び焼戻し (時効) することによって非常に強度が増加することを示している。これらはいずれも深冷処理あるいは変形によって発生したマルテンサイトの格子欠陥に対して時効による溶質原子や炭化物の析出が生じ、すべり変形抵抗を増加させたことに起因するものと考えられる。(15) これらのことを考慮すれば、著者らの実験結果は、焼入によって生じた普通のマルテンサイト内の格子欠陥への析出よりも、深冷処理によって残留オーステナイトから変態して発生した新たなマルテンサイト中の格子欠陥への析出の方が、変形抵抗の増大にはより大きく寄与することを示唆しているものと考えられる。

マルテンサイトおよび残留オーステナイトの時効現象は溶質原子や炭化物の析出、さらに析出相と母相の

coherency その他多数の因子が複雑に影響しあっているのでその解明には未だかなりの時日を要するであろう。しかし、鋼の硬度増加の方法として利用すれば、かなりの効果が期待できる。今後、深冷処理、加工、応力附加、等々さまざまな手法の組合わせによって更に高硬度の鋼を開発することも可能であろうと推察される。

Ⅵ 総 括

圧縮焼入の基本原理解からそれに附随する諸問題まで最近の情報をとり入れつつ論じてきた。強力鋼から更に超強力鋼へと鋼の強度は既に理論強度の数分の1というレベルにまで達しているが、ここにおいて加工熱処理法の果たした役割は非常に大きい。

強度増加の手段として最も有効なのは恐らく加工硬化であろう、そしてこれをマルテンサイト変態に結びつけたことがオースフォーミングにおける成功の鍵であったと考えられる。しかし、オーステナイトの加工安定化という伏兵のため、高炭素鋼のオースフォーミングは残留オーステナイトを減少させることが出来ない。ここにおいて圧縮焼入の存在は注目されるべきものである。

また、もうひとつの強化手段としての時効硬化は、高炭素合金鋼の深冷処理と組合わせることによって著しい効果を示した。深冷マルテンサイトの生成に伴う格子欠陥と、そこへの溶質原子の析出は母相との整合不整合の問題と関連して、今後の重要な研究課題であろう。マルテンサイト変態が一種の微視的塑性変形であることを考慮するならば、加工による格子欠陥の発生だけではなく、変態に伴うそれについても注目して

ゆくべきであると考えられる。

稿を終えるにあたり、日頃から御指導御教示いただいている、北大工学部萩原教授、高橋助教授に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) R. F. Harvery : Iron Age 163 (1951), 27, 70
- (2) 大島, 矢竹, 萩原; 日本金属学会誌 31 (1967), 420
- (3) E. Scheil : Z. Anorg. Chem. 207, (1932), 21
- (4) A. W. McRynolds : J. Appl. phys. 20, (1949), 896
- (5) J. C. Fisher, D. Turnbull : Acta Met. 1 (1953), 310
- (6) M. Cohen : Phase Transformation in Solid (1951), 648
- (7) 萩原, 金沢; 日本金属学会誌 25 (1961), 214
- (8) 永田; 日本金属学会講演予稿 Oct. (1967), 282
- (9) L. Raymond, W. W. Gerberich and C. F. Martin : High Strength Materials (1965), 297
- (10) 五弓, 木原, 岸; 日本金属学会誌 31 (1967), 1176
- (11) P. G. Winchell, M. Cohen : (U. K.) Trans. A. S. M 55 (1962), 347
- (12) 田村, 茨木, 野崎; 日本金属学会誌 29 (1965), 605
- (13) A. J. McEvily, R. C. Ku and T. L. Johnson : Trans. AIME (1966), 108
- (14) M. Cohen : J. Iron & Steel Inst (U. K.) 201 (1963), 833
- (15) P. G. Kelly, J. Nutting : Iron and Steel Inst. 1965 Special Report. No. 93, 166

昭和42年12月18日受理