

## 技術報告

## 表面硬化用鋼の焼入性コントロール

上原 紀興\*・田中 良昭\*<sup>2</sup>・太田 久司\*<sup>3</sup>

## Hardenability Control of Case Hardening Steels

Norioki UYEHARA, Yoshiaki TANAKA and Hisashi OHTA

## Synopsis:

As the increase of switchover from carburizing to induction hardening, hardenability control of shallow hardening steels for induction hardening has become to be important. This paper introduces newly developed control techniques for such steels comparing with conventional methods.

As for alloy steels, Jominy (end quenched) hardness at a particular distance has been required to be controlled within a small range in order to maintain the strength and to minimize the quench-distortion. The control methods for such a requirement is noted to have reached to a considerably high level. On the contrary, hardening depth is required to be controlled in the case of induction hardening. Therefore, the authors have established new technical methods for controlling Jominy distance specified at a particular hardness level. Basically two developments are included in this control system. The one is a computerized prediction of whole Jominy curves from chemical compositions of molten steel and the other is a new steel-making process consisted of EF (Electric Arc Furnace Melting)+LF (Ladle Furnace Refining)+RH (RH Vacuum Degassing)+CC (Continuous Casting).

## 1. はじめに

最近、浸炭から高周波焼入れに切り替える動きが出はじめている。これは高周波焼入れの方が浸炭などにくらべて熱処理のエネルギー・コストが低いからに他ならない。

このような傾向について、鋼材の焼入性を製造管理する立場から見ると次のような問題がある。すなわち、浸炭部品に使用される鋼材は一般的に合金鋼の範ちゆうに入り、Cr や Ni, Mo などの合金元素を含有するために焼入性が比較的高い。いつぱら、高周波焼入れに使用される鋼材は、主に C% が 0.4 (例えば JIS S40C) から 0.7 (例えば AISI 1070) 程度の炭素鋼であり、その焼入性は浸炭用鋼にくらべてかなり低い。

これまで浸炭用鋼の焼入性の製造管理については、製鋼メーカーの重要な技術テーマのひとつであり、各社が競争で開発を行つて来た。現在でもそれは続けられている。これに対して高周波焼入れに供される炭素鋼を、浸炭用の合金鋼と同じレベルで焼入性を製造管理するのはひじょうに難しい。それは前述のように、炭素鋼の焼入性が合金鋼にくらべて著しく低いからである。したがつて、このように焼入性の低い材料をどのように製造管理

していかかがひとつの重要な課題となつて来たわけである。

本稿で紹介するのはそれに対するひとつの解答である。それは浸炭と高周波焼入れとで鋼材の「焼入性」に要求される内容が異なることに注目して開発された。すなわち浸炭部品、とくに歯車の場合には「歯元硬さ」が重要視されるのに対して、高周波焼入れの場合は「硬化深さ」の管理が要求される。この「硬さ」と「深さ」の違いが、これから本稿で述べようとすることである。いかえれば、従来はジョミニ曲線を縦方向に見ていたのに対して、高周波焼入れ用鋼の場合はそれを横方向から見ようという提案であつて、技術的な新規性はあまりない。

そこで本稿では、まず従来の一般的な合金鋼に対する最近の焼入性管理技術について述べ、次にそれをベースとして高周波焼入れなどに使用される低焼入性鋼の焼入性管理技術について述べることにする。

## 2. 浸炭用鋼の焼入性管理

## 2-1 浸炭部品の強度と焼入性

現在浸炭用鋼として最も多量に生産されるのは Cr-Mo 鋼と Cr 鋼であり、他に Ni-Cr-Mo 鋼, Mo 鋼や

昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 12 月 19 日受付 (Received Dec. 19, 1983)

\* 大同特殊鋼(株)技術サービス第2部 工博 (Metallurgical Service Department, Daido Steel Co., Ltd., 1-7-13 Nishishinbashi Minato-ku 105)

\*<sup>2</sup> 大同特殊鋼(株)中央研究所 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd.)

\*<sup>3</sup> 大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

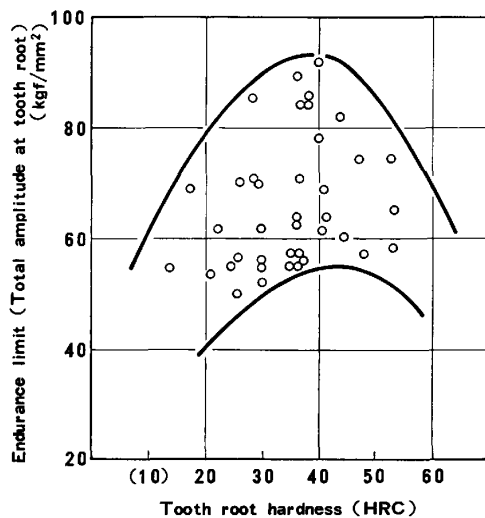


Fig. 1. Influence of tooth root hardness on the endurance limit of carburized gears<sup>1)</sup>.

Mn-Cr 鋼なども生産されている。これらが最も大量に使用されるのは、いうまでもなく自動車のトランスミッション、ステアリング、ディファレンシャルなどの歯車用である。

浸炭歯車の耐久性に影響する素材の要因は種々あるが、焼入性との関連でみると Fig. 1<sup>1)</sup> に例示する実験結果が良く知られている。すなわち浸炭歯車の疲れ強さは歯元硬さに依存し、歯元硬さがほぼ HRC 40 の時に最大になるというものである。

ここで歯元硬さは鋼材の焼入性と、浸炭後の焼入れの際の歯元位置での冷却速度によつて決まる。その冷却速度は歯車の形状と焼入条件に依存するが、実際にはそれらを調節することは難しい。したがつて歯元硬さは歯車の大きさや浸炭条件にあわせて適切な焼入性を有する鋼材を選択することで調節される。

歯車に使用される浸炭用鋼の鋼種選択の手順をもう少し詳しく述べよう。まず実測または計算によつて、浸炭後の焼入れの際の歯元の位置での冷却速度を求め、いっぽうジョミニ試験片のそれぞれの焼入れ端からの距離での冷却速度には公表された数値がある<sup>2)</sup>。したがつてこれによつて歯車とジョミニ試験片を結びつけて考えることができる。また JIS や日本自動車工業会 (JASO) 規格には、ジョミニ曲線のばらつきの範囲を規定した鋼材 (いわゆる「焼入性保証鋼」, H鋼とも呼ばれる) の規格が判定されている (ジョミニ曲線の規格幅を Hバンドと呼んでいる)。そこでこれらのジョミニ曲線群の中から、上記の歯元の冷却速度と同じ冷却速度のジョミニ距離での硬さが必要な硬さを満足する鋼種を選べば良い。

従来は、鋼材メーカーはジョミニ試験片のすべての位置において (焼入れ端から 50 mm までの間において)、

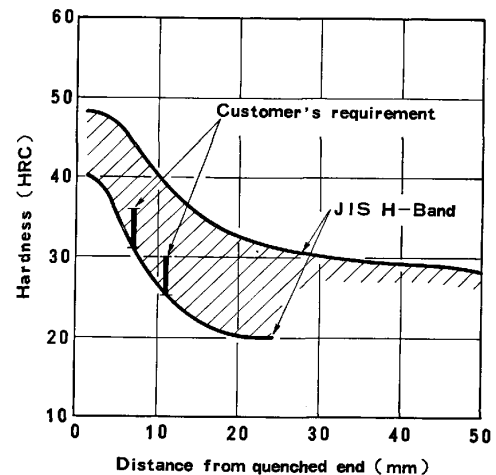


Fig. 2. H-Band of JIS SCM420H and an example of special requirement from a customer.

JIS や JASO に定める硬さの範囲を保証するやり方が一般的であつた。しかし最近では、例えば歯元に相当するような特別なジョミニ距離を選んで、その点での硬さを JIS や JASO よりもずっと狭い範囲内にコントロールすることを要求されるようになった。その理由や、そのような要求に対する鋼材メーカー側の対応については次項で述べる。

## 2.2 ジョミニ曲線の製造管理 (縦管理)

Fig. 2 は JIS SCM 420H の Hバンドの中に、最近のユーザーが要求する規格の一例を重複させて示したものである。図に示すように、このユーザー規格では焼入れ端からの距離をとくに 2 点選び、そこでの硬さを Hバンドよりも狭く、しかも低め側に管理することを要求している。これは歯車の必要強度は確保しつつ、焼入歪みを小さくする<sup>3)</sup> ことを意図したものである。このようなジョミニ曲線図における硬さ (縦軸方向) の管理を、筆者らは便宜的に「縦管理」と呼ぶことにした。

## 2.3 管理技術の進歩

### 2.3.1 焼入性予測技術の進歩

化学成分から鋼材の焼入性を予測する方法で最も一般的なのは理想臨界直径 ( $D_I$ ) 法であり、現在でも製造現場や、メーカーとユーザー間の品質保証対象項目として実際に利用されている。最近では鉄鋼協会材料研究委員会において、この  $D_I$  法による予測技術を高めるために、主に合金元素間の相互作用に焦点をあてた改良研究も行われた<sup>4)</sup>。

しかし  $D_I$  法の欠点のひとつは、これを用いたジョミニ曲線の予測精度が十分ではないことである。とくに前記したように、ジョミニ曲線における特定位置の硬さが規格に制定されるようになると、化学成分からジョミニ

曲線を直接に予測する方式の確立が望まれるようになった。

このため各鋼種のそれぞれの焼入れ端からの距離での硬さを回帰計算で求めたり<sup>6)</sup>、また特殊な関数を用いて一本のジョミニ曲線全体を予測する<sup>6)</sup>などの方法が発表されているが、この他にも各社がそれぞれ独自の方法で開発に取り組んでいる。

筆者らも回帰式を用いて化学成分からジョミニ曲線を精度良く予測する方式を開発した<sup>7)</sup>。筆者らの方法も特殊関数を用いたジョミニ曲線全体(焼入れ端から 50 mm まで)を予測する方法のひとつで、関数のパラメータは鋼種群ごとに回帰計算によつて設定されている。これによつて Fig. 3 に示すような焼入性管理システムを組み立てることができた。その概略は次のようである。すなわち溶解作業中に溶鋼からサンプルを採取し、3 min 程度で主要元素を分析する。その結果からジョミニ曲線を

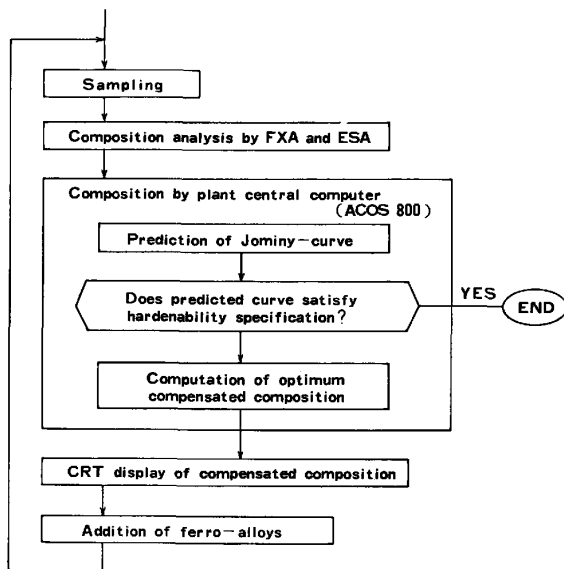


Fig. 3. A prediction and control system of hardenability (Jominy hardness) during melting.

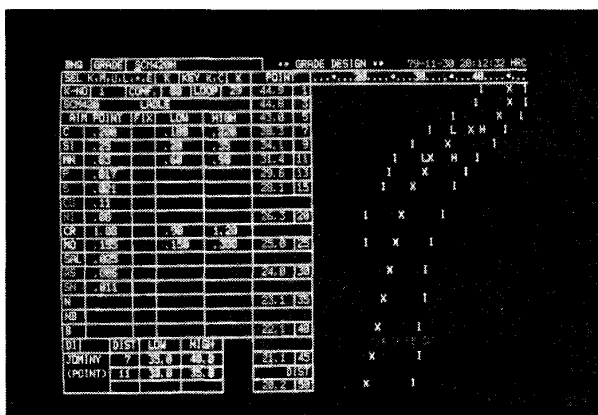


Fig. 4. An example of TV-display of the result of prediction of Jominy curve (JIS SCM420H).

予測し、規格を満足している場合には溶鋼は次工程に移される。規格を満足していない場合には、化学成分の補正量が計算されて現場に指示されるわけである。Fig. 4 は製鋼現場に連絡された TV 画像の一例である。

次節ではこのシステムを用いた製鋼プロセスについてももう少し詳しく紹介する。

### 2.3.2 製造技術の進歩

この一・二年、構造用鋼の溶製方法は著しく変化しつつある。それは取鍋精錬と連続铸造の導入である。そして電気炉溶解-取鍋精錬-真空脱ガス-連続铸造という連続プロセスが一般的になりつつある<sup>8)~10)</sup>。このプロセスには、焼入性を製造管理する立場からみると次のような特徴がある。

#### (1) 成分適中率の向上

先に述べた焼入性予測式を用いた化学成分の微調整は取鍋精錬と RH 真空脱ガスの段階で行われる。ここであらかじめ取鍋精錬によつて脱酸を十分に行い、その後に真空脱ガス槽内の溶鋼に微調整のための合金添加を行うと、取鍋精錬を行わない場合にくらべて合金歩留りが安定化し、化学成分の適中率がさらに向上する。Table 1<sup>11)</sup> は取鍋精錬の有無による成分適中率の違いを示す調査結果の一例であり、上記の効果がよく示されている。このような成分適中率の向上は、すなわち焼入性の適中率の向上でもある。

#### (2) 連続铸造によるばらつき減少

良く知られているように、連続铸造材には鋼塊では避けることができない重力偏析がない。鋼塊の場合には、溶鋼成分が目標にびたりと適中しても、造塊時の頭部と底部の間の重力偏析による焼入性のばらつきをある程度避けることができなかった。連続铸造材ではそれがいないために、焼入性の安定化には大きな効果があることはいうまでもない。

## 3. 高周波焼入用鋼の焼入性管理

### 3.1 高周波焼入れ部品の強度と焼入性

高周波焼入れで表面硬化して使用される部品は、クラ

Table 1. The effects of double refining (LF+RH) on the accuracy of control of chemistry.

Process	Deviation (%)					
	C	Si	Mn	S	Cr	Mo
AF-RH	-0.005	0.010	0.019	0.0015	0.016	0.002
AF-LF-RH	-0.001	0.002	0.000	0.0008	0.005	0.001

Process : AF=Arc Furnace Melting  
 LF=Ladle Furnace Refining  
 RH=RH Vacuum Degassing  
 Deviation : (Ladle Analysis)-(Aiming)  
 Steel grade : Carburizing steels  
 Number of heat : 70 heats

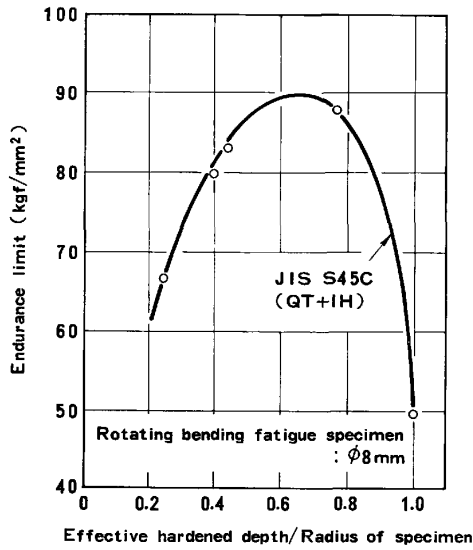


Fig. 5. Influence of induction hardened depth ( $D_h$ ) on fatigue endurance limit of a medium carbon steel (JIS S45C).

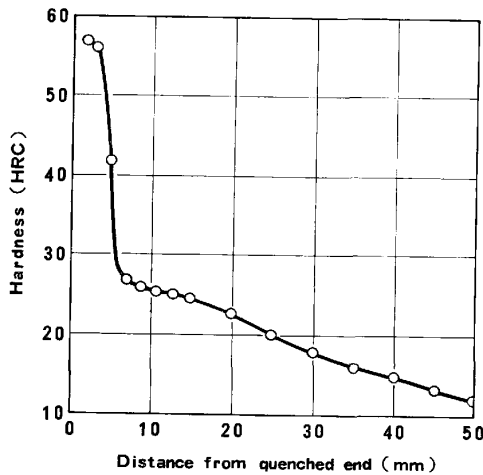


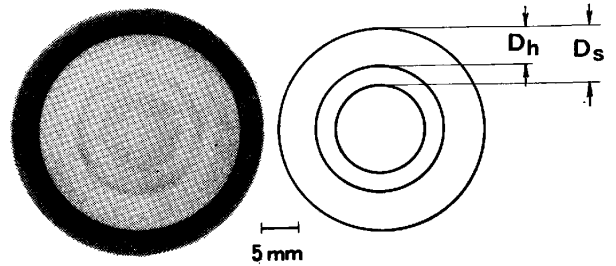
Fig. 6. An example of Jominy curve of a carbon steel (JIS S45C).

ンクシャフトに代表されるように軸類が多い（建設機械の大型歯車のように、歯車への適用もないことはないが絶対量は少ない）。このような軸状の高周波焼入れ部品の振り強さ<sup>12)</sup>、曲げ強さ<sup>13)</sup>、疲れ強さ<sup>14)</sup>、転がり疲れ強さ<sup>15)</sup>などについてはいずれも硬化層深さに依存するとの実験結果が得られている。Fig. 5 は筆者らの疲れ強さに関する実験結果の一例であり、ここでは硬化層深さ比（硬化層深さ/試験片断面半径）が約 0.6 ないし 0.7 の時に疲れ強さが最大となっている。

このように高周波焼入れに使用される鋼材の場合には、「硬化層深さ」が品質管理の対象となる。このように焼入性を「深さ」で管理することには次のような点からも好ましい。すなわち Fig. 6 に示すように、炭素鋼

Table 2. Conditions of the induction hardening test.

Sample	25 mm dia., 70 mm long
Heating	100 kHz, 14 kV, 9 A
Coil	Size : 35 mm dia., 10 mm long
	Travel : 6 mm/s - 18 mm/s
Quenching	Water jet



Transverse cross-section of an induction hardened round bar.

- $D_s$  : Solution depth  
Depth of austenitization at induction heating.  
Metallographically, 50% of prior microstructure + 50% of hardened microstructure
- $D_h$  : Hardened depth  
Depth of hardened region after quenching.  
Metallographically, 50% of martensite + 50% of hardened microstructure other than martensite.

Fig. 7. Definitions concerning induction-affected zones.

では焼入硬化した表層部と内部の間の中層での硬さの変化が急激であり、ばらつきも大きい。したがってこの領域の硬さを「縦管理」するのは実際には不可能であり、「深さ」の方がはるかに管理しやすいからである。

### 3.2 高周波焼入れ深さとジョミニ試験値の関係

高周波焼入れの際の鋼材の焼入性を試験する方法として、現在公的機関で承認された標準的な方法はない。筆者らは Table 2 に示すように、円柱状の試験片を一定の条件で加熱・焼入れする方法を採用している。

次に「硬化層深さ」についても標準的な定義はないので、筆者らは次のように定義した。Fig. 7 は Table 2 に示した試験片中央部の横断面の一例である（表層付近の結晶粒度が粗大化しているが、これは本稿のために硬化層を強調する目的で、極端な加熱条件を設定したためである）。同図に記入したように、誘導加熱によつて変態点以上に加熱された深さを「固溶化深さ」と称することにした。これは焼入れ後の顕微鏡組織によつて測定することができ、表面から「焼入組織 50% + 前組織 50%」の位置までの距離と定義する。また「硬化層深さ」は、同じ顕微鏡観察によつて、表面から「マルテンサイト 50% + その他の組織 50%」の位置までの距離と定義する。実際には測定の便宜を図るため、次のような「有効硬化層深さ」で代用する。それは JIS G 0559 に定め

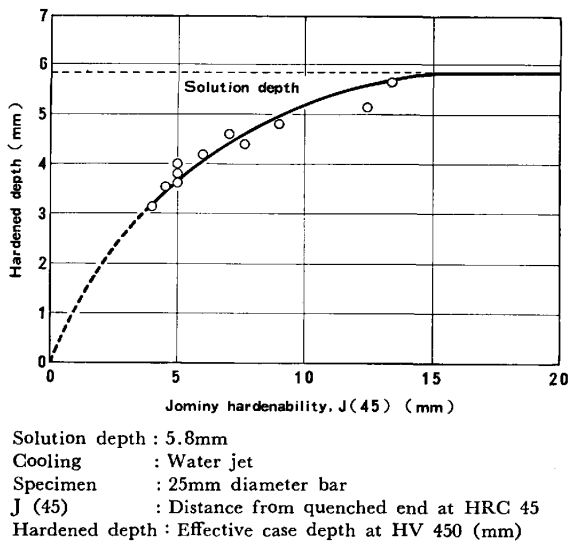


Fig. 8. Relationship between induction-hardened depth of round bar specimens and end-hardened distance of Jominy specimens.

られるC量と焼入硬さ(同規格に明記されていないが、50% マルテンサイト硬さを示すものである)の関係表を用いるものである。同表より被測定材のC量に相当する焼入硬さを読みとり、高周波焼入れ後の表面からその硬さとなる位置までの距離を測定するものである。

このように定義した高周波焼入れによる硬化層深さとジョミニ試験結果とは、次に述べるように密接な関係がある。Fig. 8 は両者の関係を示す実験結果の一例であるが、ここでは高周波による加熱条件と焼入条件とを一定とし、鋼材の種類を変化させて硬化層深さを測定し、同じ鋼材のジョミニ試験片での硬化層深さを対照させたものである。図に明らかなように、一定の高周波加熱・焼入条件のもとでは硬化層深さとジョミニ試験値は良く対応することが明らかになった。このような試験結果から、高周波焼入れによる硬化層深さとジョミニ試験結果との関係を表す一般式として次式を得られた。

$$D_h = 10\{1.57 \log(D_s) - 1.77\} \times J(45) + 2.0$$

$D_h$ : 硬化層深さ (mm)

$D_s$ : 固溶化深さ (mm)

$J(45)$ : HRC 45 が得られるジョミニ距離

適用範囲: 試験片  $\phi 25$  mm

噴射水冷

$J(45) \geq 4.0$  mm

$D_s \geq 2.0$  mm

$D_s > D_h$

Fig. 9 は上式をグラフに表したものである。

このように高周波焼入れによる硬化層深さをジョミニ

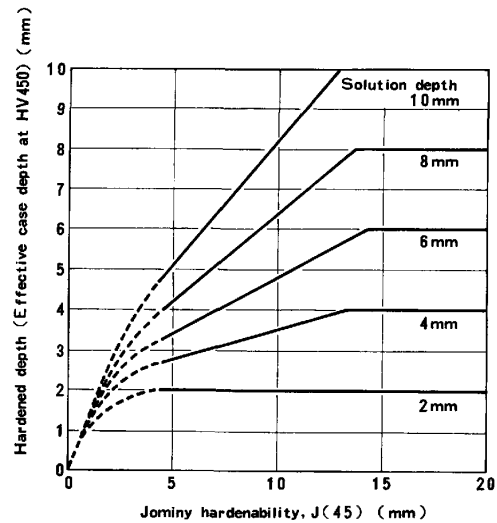


Fig. 9. Relationships between induction-hardened depth and Jominy-hardened depth.

曲線の硬化層深さに置き換えて管理することができることが証明された。いいかえれば高周波焼入れ部品の硬化層深さの許容幅についての規格がはじめに判定される。それに用いられる鋼材の焼入性は、その規格をジョミニ曲線の硬化層深さの許容幅に読み換えられて管理されるわけである。

このようにジョミニ曲線の横軸方向(焼入れ端からの距離)を管理するやり方を、従来法を「縦管理」と呼んだのに対して「横管理」と称したわけである。

ところで上に述べた高周波焼入れの硬化層深さとジョミニ距離との関係式を「一般式」と称したが、正確にはそうではない。正しくは「筆者らが用いた高周波焼入れ試験装置で得られたデータに限られた実験式」といべきである。したがって、今後鋼材メーカーとユーザーとが規格を協定する場合は、個々に Fig. 8 あるいは Fig. 9 のような高周波焼入れの硬化層深さとジョミニ距離との関係図を作成し、それに基づいて規格を制定していかなければならない。

### 3.3 高周波焼入れの硬化層深さに及ぼす金属学的因子の影響

ここでは高周波焼入れが急速加熱と焼入温度での短時間保持であることに関連した二、三の実験結果を紹介する。

Fig. 10 は高周波焼入れの硬化層深さならびにジョミニ曲線の硬化層深さに及ぼす合金元素の影響を示した図である。各元素の影響の大きさの順序という点では両図の傾向は良く一致しており、高周波焼入れに限った特徴的な現象は見られない。

Fig. 11 は硬化層深さに及ぼす前組織の影響を調査した結果である。S45C の前組織を焼入れ焼もどし(焼も

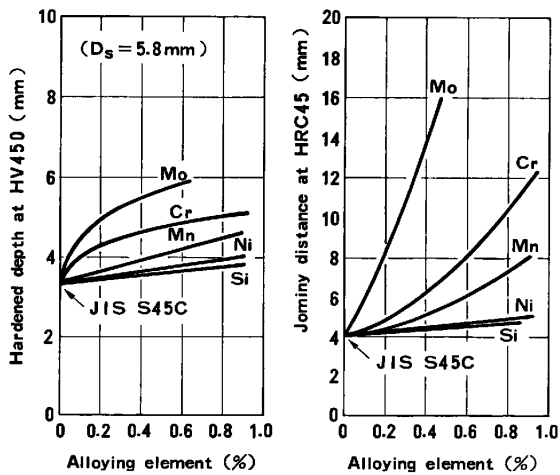
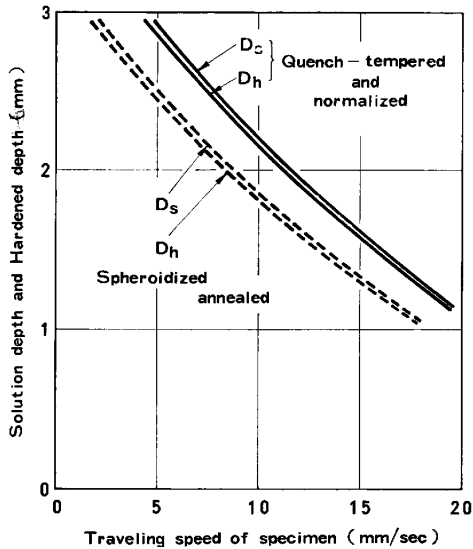


Fig. 10. Effects of alloying elements on induction-hardened depth and Jominy hardenability.

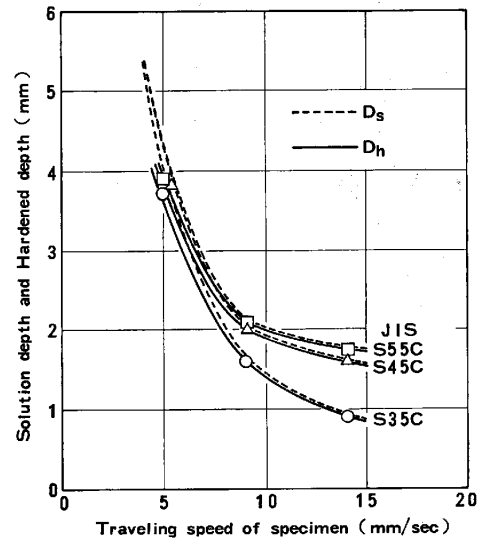


Frequency : 100 kHz  
 Voltage : 14 kV  
 Current : 9A  
 Coil :  $\phi 35\text{mm} \times 10\text{mmL}$ .  
 Cooling : Water jet  
 Specimen :  $\phi 25\text{mm}$   
 Quench-Temper :  $860^\circ\text{C}$  O.Q. +  $600^\circ\text{C} \times 1\text{h}$  (HB 235)  
 Normalizing :  $850^\circ\text{C}$  A.C. (HB 201)  
 Spheroidizing :  $770^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ ,  $10^\circ\text{C/h}$  to  $660^\circ\text{C}$  (HB 192)

Fig. 11. Influence of prior heat treatment on solution depth and hardened depth of JIS S45C.

どしマルテンサイト), 焼ならし(フェライト+パーライト)および球状化焼なまし(フェライト+球状化セメント)によって変化させた. その結果球状化焼なまし材の硬化層深さは前二者にくらべて小さく, それはもともと固溶化深さが小さいためであることがわかった.

Fig. 12 は固溶化深さと硬化層深さに及ぼすC量の影響を示した図である. C量が低いほど両者は小さく, その傾向はコイルの移動速度(加熱速度)が大きいくほど著しい. C量が低いほど固溶化深さが小さいのは, A<sub>3</sub> 変



Frequency : 100 kHz  
 Voltage : 14 kV  
 Current : 9A  
 Coil :  $\phi 35\text{mm} \times 10\text{mmL}$ .  
 Cooling : Water jet  
 Specimen :  $\phi 25\text{mm}$

Fig. 12. Influence of carbon content on solution depth and hardened depth of carbon steels.

態点がより高いことに加えて, パーライト量が減少し, 初析フェライト量が増加する結果, この  $\gamma$  化に時間を要するためである.

Fig. 11 および 12 は, 高周波焼入れの硬化層深さに及ぼす金属学的因子の影響を考える時に, 同じ比重で固溶化深さに及ぼす影響をも見なければならぬことを示している.

### 3.4 管理技術について

2.3 項で述べたものと同じ考え方と方法によつて, 高周波焼入れ用に使用される, 主として炭素鋼と低 Mn 鋼のジョミニ曲線の回帰式を作成した. この作業にあつては, これらの鋼種の焼入性が著しく低いことへの対策として, 焼入れ端側は 1 mm 間隔で HRC を測定できるように(合金鋼は一般的に 2 mm 間隔. 1 mm 間隔では圧子による圧痕間の干渉が発生する), 測定装置の改造も必要であつた.

この回帰式を, 合金鋼用として従来から使用されている焼入性管理システム (Fig. 3) に導入することによつて, 製鋼現場におけるジョミニ曲線の硬化層深さの管理ができるようになった. Fig. 13 は HRC 45 でのジョミニ距離が 4.5 mm から 5.5 mm という規格に対して, 溶鋼の目標成分を計算して製鋼現場へ指示を与えている TV 画像である. このようなシステムによつて, 高周波焼入れ用鋼の焼入性が的確に管理されるようになったばかりでなく, 現場の作業者にまで高周波焼入れの焼入性管理の意識が徹底したことが, 品質管理上目に見えない

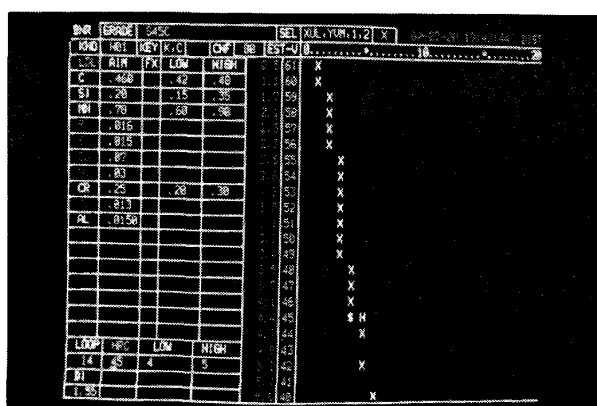


Fig. 13. An example of the prediction of proper chemistry meeting  $D_s=4.5$  to  $5.5$  mm at HRC45.

効果となつている。

#### 4. おわりに

冒頭に述べたように、高周波焼入れは省エネルギー熱処理技術として今後ますます適用が拡大されるであろう。現在ではまだ自動車の歯車への適用例はわずかである。しかし近い将来、そのような小型の重負荷の歯車についても、歯形に沿った表面硬化を高周波焼入れでできるようにになると、それはますます拡大するであろう。

このような高周波焼入れの将来性を考えた時、それに使用される鋼材の姿としては次のように予想される。すなわち本稿でたびたび述べたように、低焼入性鋼を従来の合金鋼と同じレベルで焼入性の製造管理をする必要がある。そしてそれは始まった。引き続きOやSなどの不純物管理や、さらにはVなどの析出硬化元素や少量のCrなどを添加した専用鋼も開発されるであろう。すなわち化学成分的には従来の炭素鋼あるいはそれに近い鋼と同じでも、それらより格段に厳しく品質管理された鋼

が機械構造用鋼のひとつのジャンルとして育ちつつあるといえよう。われわれはこのような、いわば「特殊炭素鋼」とでもいべき鋼種の将来性を、高周波焼入れにふれたのを機会に強調しておきたい。

なお本稿は大同特殊鋼(株)中央研究所齊藤誠副主席研究員、同磯川憲二第三研究室長、星崎工場線材加工課葛西靖正副主査、知多工場製鋼課中山傑副主査の協力によるものであることを記し、謝意を表す。

#### 文 献

- 1) 久松定興: 機械の研究, 27 (1975), p. 21
- 2) D. J. CARNEY: Trans. ASM, 46 (1954), p. 882
- 3) 上原紀興, 磯川憲二, 田中良昭: 電気製鋼, 53 (1982), p. 19
- 4) 日本鉄鋼協会材料研究委員会: 鋼の焼入性予測に関する研究 (1980)
- 5) E. JUST: Harterei-Tech Mitt., 23 (1968), p. 85
- 6) J. K. KIRKALDY: Metall. Trans., 4 (1973), p. 2327
- 7) 葛西靖正, 齊藤 誠: 電気製鋼, 52 (1981), p. 58
- 8) 平田 宏: 特殊鋼, 32 (1983) 2, p. 58
- 9) M. OZAWA and N. UYEHARA: SAE Paper 830657 (1983)
- 10) H. USHIYAMA, G. YUASA and T. YAJIMA: Ironmaking Steelmaking, 3 (1978) 3, p. 121
- 11) M. OZAWA, D. OTSUGA, N. UYEHARA and K. SUZUKI: The 4th Czechoslovakia-Japan Joint Symposium, Plague (1983) Sep.
- 12) 久松定興, 金沢 孝: いすゞ技報 (1981) 67, p. 9
- 13) 夏目喜孝: 材料, 26 (1977), p. 361
- 14) 丹下 彰, 小山 博: 特殊鋼, 30 (1981) 3, p. 26
- 15) 藤田公明: 日本機械学会論文集 (C編), 48 (1982), p. 876