高炭素クロム軸受鋼の焼割れに関する研究*

(第4報, 焼入れの繰返しによる焼割れ感受性の判定について)

三木田 嘉 男^{*1}, 中 林 一 朗^{*2}

Study of Quench Cracking of High Carbon and Chromium Steel Bar (4th Report, Repeated Quenching)

Yoshio MIKITA and Ichiro NAKABAYASHI

The preceding paper has reported on the numerical evaluation of quench crack susceptibility. The disadvantage of the experimental method has been the assumption of a great number of samples i. e., high cost. This paper deals with a modified method for evaluating quench crack susceptibility. Quenching was repeated n -th times until a crack was generated, using 4~5 test pieces. The results obtained are discussed and compared with the data presented in the preceding paper. In quench cracking of a high carbon and chromium steel bar, vertical crack value in $1/n$ crack generation is closely related to the crack percentage, while fin crack value slightly deviates. The residual stresses caused by repeated quench were measured by the X-ray diffraction method. The residual stress (tensile stress) on the surface increased with repeat time. It was clarified on the basis of observations using a metallurgical microscope that the repeat of quenching should be less than 3~4 times.

Key Words: SUJ2, Polymer Quenchant, Quench Cracking, Hardness, Residual Stress, Repeat Quenching

1. 緒 言

鋼の焼割れ感受性 (quench crack sensitivity⁽¹⁾, あるいは quench crack susceptibility⁽²⁾) を数量的に表し, 評価することは焼割れの防止を検討するうえに極めて重要であると考えられる。従来, 焼割れ感受性を調べる場合, 数個の試験片を用意して焼入れを行い試験片が割れるか割れないかによって, これを判定している。試験片が少ない場合には焼割れを生ずるか生じないか, いずれかの情報しか得られないために焼割れ感受性を数量的に評価することは困難である。

著者らは 10~20 個の試験片を用いて焼入れを行い, 焼割れの発生百分率により焼割れ感受性を数値的に評価する研究を行ってきた^{(3)~(5)}。しかし, この場合数多くの試験片を必要とするために試験片の製作に要する経費が極めて高価なものとなる。

そこで, 本報では 4~5 個の試験片を用いて焼入れを繰返し, 焼割れを生ずるまでの焼入れの回数によって焼割れ感受性を数値的に表示することを試み, この結果と前報の焼割れ発生百分率の実験結果との関連に

ついて比較検討した。前報と同様の鋼材と試験片を用い, 焼入れ冷却剤として同じく水と水溶性ポリマ焼入れ液の 2 種類を使用した。併せて, 焼入れの繰返しに伴う硬さ, 機械的性質, 焼入れ残留応力, および金属組織の変化について調べた。

2. 実 験 方 法

供試材は市販の直径 28 mm の高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2, 1.01 % C, 1.38 % Cr) を使用した。試験片は直径 25 mm, 長さ 20 mm の円柱外周の軸方向に厚さ 1 mm, 高さ 5 mm の薄肉部 (外径 25 mm) を有するものである。

焼入れ加熱はニクロム線加熱の環状炉 (出力 1.2 kW, 内径 58 mm, 長さ 340 mm) を使用した。焼入れは試験片を 1 個ずつ所定のオーステナイト化温度に 15 分間, 加熱保持した後, 焼入れして焼割れの有無を調べ, 割れを生じない場合は同様の加熱冷却条件のもとで焼入れを繰返した。焼割れの有無は双眼顕微鏡を用いて判定した。

焼割れ感受性は割れを生ずるまでの焼入れ回数を n とし, これの逆数を取り $1/n$ 焼割れ発生率として表示し評価した。

焼入れ液は前報と同様の Polyalkylene glycol 系^{*}

* 昭和 63 年 3 月 12 日 中国四国支部第 26 期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 62 年 8 月 24 日。

*¹ 正員, 徳島県工業試験場 (〒770 徳島市北前川町 2-6)。

*² 徳島大学工学部 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)。

リマ (以下, PAG と略す, 平均分子量 16 000) を使用した。液量は 7 L とし, 液の攪拌は行わなかった。

焼入れ硬さの測定はロックウェル硬度計により行った。測硬位置は試験片表面の中央部 (下端面より 10 mm の位置) とした。

引張試験は JIS Z 2201 4 号試験片により行った。

焼入れ残留応力の測定は前報と同様の X 線回折装置を使用し, Cr-K α 線を用い測定格子面は (211) とし側傾法⁽⁶⁾により行った。測定用の試験片は被検面 (試験片の下端面) をエメリー紙により研磨後, 電解研磨を施したものをを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 焼割れに及ぼすオーステナイト化温度, 水温の影響 試験片に生ずる焼割れの形態は既に報告したように薄肉部の隅部円周方向に生ずる割れと本体部分の軸方向に生ずる割れに大別される⁽³⁾。前者をフィン割れ (以下, 図中に○印により示す) と称し, 後者を縦割れ (●印) と称呼する。

図 1 に繰返し水焼入れを行った場合の $1/n$ 焼割れ発生率に及ぼすオーステナイト化温度の影響について示した。フィン割れはオーステナイト化温度が 780°C 以下の場合には $1/n$ 焼割れ発生率は 0.1 以下, すなわち 10 回以上焼入れを繰返しても焼割れを生じない。10 回以上焼入れを繰返しても焼割れを生じない場合は図中に ↓ を印した。790°C 以上の場合には 1, すなわち 1 回の焼入れにより焼割れを生ずる。これを前報⁽⁴⁾の水焼入れの場合のフィン割れの発生百分率の傾向と比較してみると, オーステナイト化温度が 750°C 以下の場合, 焼割れは発生せず 780°C において 30 %, 800°C 以上の場合には 100 % の焼割れ発生率となっている。一方, 縦割れはオーステナイト化温度が 850°C 以下の場合には $1/n$ 焼割れ発生率は 0.1 以下であるが, 850°C を越えるとオーステナイト化温度の上昇に伴い増加し 880°C において 0.5, すなわち 2 回の焼入れにより焼割れを生じ, 910°C 以上の場合には 1 となっている。これを前報⁽⁴⁾の水焼入れの場合の縦割れ発生百分率の傾向と比較してみると, オーステナイト化温度が 850°C 以下の場合には焼割れは発生せず, 880°C において 60 %, 900°C 以上の場合には 100 % の焼割れ発生率となっている。

図 2 に 830°C から水焼入れを行った場合のフィン割れの $1/n$ 焼割れ発生率に及ぼす水温の影響について示した。この場合, 縦割れは水温のいかにかわらず発生しない。すなわち, $1/n$ 焼割れ発生率は 0.1 以下を示し, 発生百分率は零を示す。フィン割れは水温

が 60°C までの範囲において $1/n$ 焼割れ発生率は 1 を示し, 60°C を越えると発生率は急減し 85°C 以上では 0.1 以下となっている。これを前報⁽⁴⁾の 830°C から水焼入れを行った場合のフィン割れの発生百分率の傾向と比較してみると, 水温が 60°C までの範囲において焼割れ発生百分率は 100 % を示し, 60°C を越えると発生率は急激に低下し 70~95°C において 20~10 % の発生率となっている。

以上より, 水焼入れの場合にはフィン割れ, および縦割れ, いずれも $1/n$ 焼割れ発生率は焼割れ発生百分率と極めて良く対応すると判断される。

3.2 焼割れに及ぼす PAG 液温度の影響 前報⁽⁴⁾において水焼入れの場合にはフィン割れが多発するのに対し, PAG 液焼入れの場合には縦割れが多発する傾向が強いことを示し, その原因について考察した。そこで, PAG 液を使用した場合の $1/n$ 焼割れ発生率の傾向について調べ, 前報の焼割れ発生百分率の傾向と比較検討した。

図 3, 4, 5 に PAG 濃度 10 %, 液温 0, 10, 20°C の場合の $1/n$ 焼割れ発生率に及ぼすオーステナイト化温

図 1 $1/n$ 焼割れ発生率に及ぼすオーステナイト化温度の影響 (水温 20°C)

図 2 $1/n$ 焼割れ発生率に及ぼす水温の影響 (オーステナイト化温度 830°C)

度の影響について示した。フィン割れについて見ると液温が0°Cの場合にはオーステナイト化温度の上昇に伴い1/n 焼割れ発生率は増加し850°C以上の範囲において1となっている。フィン割れの1/n 焼割れ発生率は液温の上昇に伴い段階的に減少し、液温20°Cにおいてオーステナイト化温度が830°C以上の範囲において0.33と減少し液温の効果が顕著に認められる。

液温が20°Cの場合の1/n 焼割れ発生率(図5)の傾向を前報⁽⁴⁾のPAG濃度10%, 液温20°Cの場合の焼割れ発生百分率の傾向と比較してみると, 1/n 焼割れ発生率は800°C以上の範囲において0.25~0.33を示しているが, 焼割れ発生百分率はいずれのオーステナイト化温度においても0%となっている。これは焼入れの繰返しによる熱応力, 変態応力の重畳した応力がフィン部に集中し1/n 焼割れ発生率が高まるものと考えられる。

次に, 縦割れについて見ると, オーステナイト化温度の上昇に伴い1/n 焼割れ発生率は増加し, 液温が0°Cの場合には890°Cにおいて最大(1回の焼入れにより割れを生ずる)となっている。液温の上昇に伴い1/n 焼割れ発生率が最大を示し始める温度が, 液温10°Cの場合870°C, 液温20°Cの場合850°Cと低オーステナイト化温度へ移行している。すなわち, 液温の上昇は縦割れを発生しやすくしていることがわかる。

液温が20°Cの場合の1/n 焼割れ発生率を前報⁽⁴⁾のPAG濃度10%, 液温20°Cの焼割れ発生百分率と比較してみると, 双方の発生率の増加し始める温度(800°C), および発生率が最大となる温度(850°C)とも一致しており双方の発生率は良い対応を示すことがわかる。

以上のようにPAG液焼入れの場合の1/n 焼割れ発生率と焼割れ発生百分率の関係は, フィン割れの場合は両者の発生率の傾向に若干の差異が認められたが, 縦割れの場合には両者の傾向には良い対応関係が認められた。

3・3 焼入れの繰返しに伴う硬さ, 機械的性質, 金属組織および焼入れ残留応力の変化 図6に焼入れの繰返し数と焼入れ硬さの関係について示した。オーステナイト化温度が780°Cの場合, 焼入れ硬さは1回の焼入れではHRC 50と低い値を示しているが, 焼入れの繰返しに伴い増加し5回の焼入れによりHRC 57と最大の値を示し, 以後ほぼ一定の値を示している。これはオーステナイト化温度が低いために基体組織へのカーバイドの固溶が不十分となり低い焼入れ硬さを示すが, 焼入れの繰返しに伴ってカーバイドの固溶が進み硬さが上昇するためと考えられる。オーステナイ

ト化温度が830°Cおよび880°Cの場合は, いずれも1回の焼入れにより高硬度を示し焼入れの繰返しにかかわらず一定の値を示している。オーステナイト化温度が880°Cの場合, 繰返し数が3回以上になると830°C

図3 1/n 焼割れ発生率に及ぼすオーステナイト化温度の影響 (PAG濃度10%, 液温0°C)

図4 1/n 焼割れ発生率に及ぼすオーステナイト化温度の影響 (PAG濃度10%, 液温10°C)

図5 1/n 焼割れ発生率に及ぼすオーステナイト化温度の影響 (PAG濃度10%, 液温20°C)

表 1 焼入れ回数と機械的性質との関係 (PAG 0%)

The number of times	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
1	984.9	18.2	46.7
3	1029.0	13.6	40.7
5	1080.0	13.2	39.6
7	1076.3	14.0	35.2
9	1072.1	14.8	32.6

の場合の硬さよりもやや低い値を示している。これは通常のオーステナイト化温度より高いことに加えて、焼入れの繰返しにより基体組織へのカーバイドの固溶が増加して焼入れにより残留オーステナイトが生成したためと考えられる。

表 1 に供試材を 830°C より水焼入れを行い 600°C に おいて焼もどしをした後、引張試験片 (JIS Z 2201, 4 号試験片) を旋削加工して試験を行った結果を示した。引張強さは焼入れの繰返しに伴い、わずかではあるが 増加し 5 回の焼入れにより最大の値を示し以後一定の 値を示している。伸びは 1 回の焼入れにより 18.2% と 最大の値を示すが 3 回の焼入れ以降はほぼ一定の値を 示している。絞り は焼入れの繰返しに伴いわずかに減 少する傾向を示している。

図 7 にオーステナイト化温度 830°C から繰返し焼入 れした場合の金属顕微鏡写真を示した。無処理の金属 組織はフェライト地に球状カーバイドが均一に分布し 標準的な組織を呈している。焼入れによってカーバイド はある程度、基体組織に固溶しマルテンサイトと未 固溶のカーバイドが残留した組織となる。この場合、 機械的性質は未固溶のカーバイドの量、大きさ、なら びに分布の均一度に依るところが大きいと考えられ る。焼入れの繰返しに伴うカーバイドの量は 1 回の焼 入れ組織におけるカーバイドの量と 3~4 回の焼入れ によるカーバイドの量とを比較すると両者の間にはほ とんど差異が認められなかった。5 回の焼入れにより 写真に示すようにカーバイドは部分的に減少する傾向 が認められ、9 回の焼入れではカーバイドは一部分残 留しているにすぎない。焼入れの繰返しに伴い前述の 硬さと機械的性質のいずれも大きな変化は認められな いと判断されるが、金属組織は 5 回以降の焼入れ組織 は 1~3 回の焼入れ組織と比較してかなりの差異があ ると判断される。JIS G 0303 鋼材の検査通則によれ ば、熱処理を行った場合の試験成績が規定に適合しな

図 6 焼入れの繰返し数と焼入れ硬さの関係

かった場合は改めて熱処理を行って試験することがで きるとしている。この場合、熱処理のやり直しは 2 回 までを限度としている。このことは 3 回の焼入れの繰 返しまでは機械的性質に影響を及ぼさないとの JIS の判断と考えられる。したがって、本実験の結果およ び JIS 規格よりみて焼入れの繰返し数は 3~4 回に止 めるのが妥当であると考えられる。

表 2 にオーステナイト化温度 810°C から水および PAG 10% 液に焼入れした場合の試験片下端面におけ る残留応力の測定結果を示した。PAG 10% 液の場合 に 830°C 以上から焼入れを行うと縦割れを生じ焼入れ 残留応力が解放されることが考えられるため、やや低 い温度から焼入れして高硬度を示し、かつ割れを生じ ない状態で水焼入れによる残留応力と比較したもので ある。水焼入れ、および PAG 10% 液焼入れのいずれ も残留応力は引張応力を示し、焼入れの繰返しととも に残留応力はやや増加する傾向を示している。焼入れ 回数が 1~2 回の場合は水焼入れによる残留応力は

表 2 焼入れ回数と残留応力

The number of times		1	2	3	4	5	7	9
Residual Stress (MPa)	PAG 0% Quenchant	180	200	170	190	210	230	210
	PAG 10%	100	130	200	210	220	240	300

(a) 無処理

(b) 3回焼入れ

(c) 5回焼入れ

(d) 9回焼入れ

図 7 焼入れの繰返しと金属顕微鏡組織

PAG 10%液焼入れのそれより大きく、3回以降は PAG 10%液焼入れの残留応力が水焼入れのそれよりも大きい値を示している。しかし、いずれの焼入れの場合も繰返しに伴う残留応力の変化の絶対量は少ないものであるとみなされる。

4. ま と め

水焼入れの場合、フィン割れと縦割れの発生百分率と $1/n$ 焼割れ発生率は極めて良い対応関係を示した。

PAG 10%液焼入れの場合、フィン割れの $1/n$ 焼割れ発生率 0.25~0.33 の値は発生百分率においては焼割れを生じない値であると判断すべきである。縦割れについては双方の発生率は良い対応関係を示した。

焼入れの繰返しに伴う硬さ、機械的性質、および焼入れ残留応力の著しい変化は認められなかった。金属

組織は 3~4 回の繰返し焼入れ組織までは 1 回の焼入れ組織とほとんど差異が認められなかった。したがって、焼入れの繰返しは 3~4 回に止めておくのが妥当であると考えられる。

以上より、 $1/n$ 焼割れ発生率による焼割れ感受性の評価法は焼割れ防止の実験手法として有用であると判断される。

文 献

- (1) Chapman, R. D. and Jominy, W. E., *Metal Progress*, (1953-9), 67.
- (2) 大和久, 金属熱処理用語辞典, (昭 60), 198, 日刊工業新聞社.
- (3) 三木田・中林, 機論, 52-473, A (昭 61), 231.
- (4) 三木田・中林, 機論, 53-489, A (昭 62), 884.
- (5) 三木田・中林, 機論, 53-490, A (昭 62), 1007.
- (6) 日本材料学会編, X 線応力測定法, (昭 56), 54, 養賢堂.