高炭素クロム軸受鋼の焼割れに関する研究*

(第 1 報, 焼割れに及ぼすオーステナイト化温度およびポリマー液特性の影響)

三木田 嘉 男^{*1}, 中 林 一 朗^{*2}Study of Quench Cracking of a High Carbon and Chromium Steel Bar
(1st Report, Effects of Austenitizing Temperature and Properties
of Polymer Quenchant on Quench Cracking)

Yoshio MIKITA and Ichiro NAKABAYASHI

Quench cracking is generally considered to occur under thermal and transformational stresses. In this paper, some of the quench effects on cracks (fin and/or vertical), hardness and residual stresses of a SUJ 2 bar were examined by using polyalkylene glycol (PAG) solutions. The fin crack by water quenching occurred in all specimens at the austenitizing temperatures higher than 800°C. Similarly, the vertical crack occurred in all specimens at higher than 900°C. The increase in PAG polymer concentration results in the decrease of a fin crack and increase of a vertical crack. The PAG quenchant temperature is closely related to the fin crack, because of the clouding points of PAG solutions. The residual stresses caused by quenching were measured by the X-ray diffraction method. A considerable tensile stress existed on the surface area of all specimens.

Key Words: SUJ 2, Polymer Quenchant, Quench Cracking, Hardness, Residual Stress

1. 緒 言

焼割れは丸棒などのような形状の場合には、通常のオーステナイト化温度からの焼入れでは発生し難いために、これを焼入れ冷却剤や鋼種と単純に関連づけて述べることは極めて難しい。Chapman らは焼割れの研究に関して特色ある実験を行った。すなわち、円板に偏心円をくり貫き、この薄肉部に V ノッチを設けることにより、この試験片の焼割れ感受性を高め種々の低、中炭素鋼および合金鋼について焼割れの発生条件について研究した⁽¹⁾。しかし、この試験片の製作は精度を要するため極めて高価なものとなる。

著者らは単純な形状を有し、かつ高い焼割れ感受性を有する試験片の製作について検討した結果、円柱端面に薄肉部を有する試験片が適当であると判断した⁽²⁾。この試験片を用いて実験した結果、焼入れ液の違いにより焼割れの傾向が異なる、すなわち、水焼入れの場合には試験片の薄肉部の隅部より焼割れが生ずるのに対し、水溶性ポリマー焼入れ液の場合には試験片の本体部に生ずる傾向が認められた。

この報告では上記に述べたような薄肉部を有する形状の試験片を用い、鋼材として SUJ 2 を、焼入れ液として水溶性ポリマー液を用い、その濃度、液温などの焼割れに及ぼす影響について検討した。また、硬さ、残留応力測定、破面観察なども併せて行った。

2. 実 験 方 法

供試材は市販の直径 31 mm の高炭素クロム軸受鋼 (SUJ 2) を使用した。表 1 にその化学組成を示した。

試験片は直径 25 mm、長さ 25 mm の円柱の軸方向に厚さ 1 mm、高さ 5 mm の薄肉部を有するものである。使用した試験片形状を図 1 に示した。

焼入れ加熱は箱型電気炉 (幅 600、高さ 400、奥行き 1200 mm、出力 60 kW) を使用した。試験片は直径 170 mm、高さ 40 mm のステンレス鋼線製のバスケット中に並べて加熱昇温した。試験片の焼入れは 10 個ずつ行い、このうち焼割れを発生した個数を 10 倍した値を焼割れの発生百分率とした。焼割れの有無は双眼顕微鏡を用いて判定した。

焼入れ液は市販の Polyalkylene glycol 系ポリマー (以下 PAG と略す) を使用した。焼入れ液としての液量は 7 L とした。なお使用した PAG は次のようにエチレンオキシドとプロピレンオキシドのランダム共重

* 昭和 62 年 3 月 13 日 関西支部第 62 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 8 月 23 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)。

合体 (random co-polymer) より成っている⁽³⁾。

ポリマー焼入れ液の冷却能は濃度、温度および攪拌によって大きく変化するといわれている⁽⁴⁾。そこで、本実験では上下揺動装置を製作し、これに焼入れ用のバスケットを取付け、0.5 m/s の速度で上下に往復揺動しつつ焼入れ冷却することとした。PAG 液の濃度は 0~30 % (水に対する容積パーセント) とした。

硬さの測定はロックウェル硬度計により行った。測定位置は試験片の軸方向の中央部、すなわち図 1 の試験片の下端面より 10 mm の位置とした。焼割れ破面の観察は SEM [(株) 明石製作所製 (ALPHA-30)] を用いて行った。

焼入れ残留応力の測定は X 線回折装置 (東芝製 ADX-102 形) を使用した。Cr-K α 線を用い、測定格子面は (211) とし、側傾法⁽⁵⁾により行った。測定用試験片は被検面をエメリー紙により研磨後、電解研磨を施したものを用いた。被検位置は図 1 の試験片の下端面の外周部より中心へ 6 mm の位置とし、切線方向に傾斜させて測定した。

3. 実験結果および考察

3・1 焼入れ液の銀棒冷却曲線 焼入れ冷却剤として一般に水、水溶性ポリマー液、油および熔融塩などが用いられている。これらはすべて蒸発性の液体であり、この中で焼入れ物を冷却する場合には、焼入れ

物は次に述べる三段階の冷却過程を経て冷却される。焼入れられた瞬間、すなわち蒸気膜段階において焼入れ物の表面は液の蒸気膜に包まれ、焼入れ物から液への熱伝達が阻害されて冷却速度が遅くなる。

次に焼入れ物の表面温度が低下し、焼入れ物を包んでいた液膜が壊れて次の沸騰段階に入る。この段階では焼入れ物の表面は液体と直接接触し強力な蒸発が起こる。すなわち、沸騰による激しい攪拌効果により冷却速度は最大となる。焼入れ物の温度が低下し表面に蒸気相が現れなくなった段階が対流段階である。以上の三段階を再現性よく比較する方法として銀棒冷却性能試験がある。

図 2 に銀棒冷却性能曲線に及ぼす PAG 濃度の影響について示した。810°C の銀棒を PAG 液に浸漬した場合、蒸気膜段階において銀棒表面の液体はヒートセパレーション⁽⁶⁾により PAG ポリマーが試験片表面を覆う。PAG 濃度の増加に伴い蒸気膜段階 (図 2 の直線部分) は長くなり、その冷却速度も小さくなることがわかる。また、特性温度 (蒸気膜段階から沸騰段階に変化する温度) は濃度の増加に伴い低温、長時間側に移行している。しかし、特性温度以下の沸騰、対流段階での冷却速度は濃度が変化しても蒸気膜段階での冷却速度ほどの差異が認められない。すなわち、PAG の濃度変化は冷却時の蒸気膜段階に最も影響を与える。これは PAG 濃度が高いほど析出するポリマーの量が多くなり、蒸気膜段階における試験片の保温時間が長くなるためと考えられる。

図 3 に銀棒冷却曲線に及ぼす PAG 液濃度の影響について示した。液温の上昇に伴い前図と同様に蒸気膜

表 1 供試材の化学組成 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
SUJ 2	1.01	0.24	0.38	0.011	0.003	1.38

図 1 試験片の形状

図 2 銀棒冷却性能曲線に及ぼす PAG 液濃度の影響

段階は長くなり、その冷却速度も小さくなる。また、特性温度も液温の上昇に伴い低温、長時間側に移行している。本液の曇点 (clouding point, 81°C) に近づくほど、ヒートセパレーションを起こしやすく前述したように PAG 濃度は高まり、蒸気膜段階の冷却速度は低下するものと考えられる。

次にスターラにより液攪拌を行った。回転速度が大きくなるに伴い蒸気膜段階において冷却速度が大きくなり、高速回転において1~2秒の短縮が観察された。しかし沸騰・対流段階に大きな差異は認められなかった。以上のことから銀棒曲線における冷却速度は PAG 液濃度、液温、攪拌の順に従って影響を受けると判断される。

3・2 焼割れに及ぼすオーステナイト化温度の影響

焼割れは試験片の上端部に設定した薄肉部の隅部円周方向に生ずる割れと試験片本体部軸方向に生ずる割れに大別される。前者の割れをフィン割れと称し、後者の割れを縦割れと称する。

表2に焼割れに及ぼすオーステナイト化温度の影響について示し、併せて焼入れ硬さと焼入れ残留応力の測定結果について示した。PAG 濃度0%, すなわち水焼入れれの場合には750°C以下では焼割れは発生しない。800°C以上では100%フィン割れを生ずる。880°C以上ではフィン割れと縦割れを同時に生じ、900°C以上では100%発生率を示している。

PAG 濃度10%の場合には、いずれの温度域においてもフィン割れの発生は認められず、これが水焼入れれの場合との顕著な差異といえる。縦割れは800°Cま

では発生せず、表には記述していないが830°Cにおいて100%の発生率を示した。880°C以上になると焼割れは表2のように低下し始め950°Cにおいて発生しなくなる。これを水焼入れれの場合に比較すると、発生率は50~70°Cだけ水焼入れれの場合の発生率より低温側に移行していることがわかる。

焼入れ硬さ、および焼入れ残留応力について見ると、いずれの焼入れ液の場合においても800°C以上においてHRC 60前後の高硬度を示し、焼割れの発生率とほぼよい対応を示している。同時に焼入れ残留応力も同様の傾向を示し800°C以上において大きな引張応力が

図3 銀棒冷却性能曲線に及ぼすPAG液温度の影響

表2 焼割れに及ぼすオーステナイト化温度の影響、および焼入れ硬さと焼入れ残留応力 (液温20°C, 無攪拌)

Austenitizing temp.(°C)	Crack percentage(%)		Hardness (HRC)	Residual stress (MPa)	
	Fin	Vertical			
700	0	0	10	60	PAG 0 %
750	0	0	27	80	
780	30	0	50	200	
800	100	0	57	245	
850	100	0	61	305	
880	100	60	61	245	
900	100	100	63	180	
950	100	100	62	200	
700	0	0	10	50	PAG 10 %
750	0	0	30	90	
800	0	0	59	150	
850	0	100	61	220	
880	0	90	62	180	
900	0	80	63	150	
950	0	0	62	150	

残留している。ここで、PAG 濃度 10 %, 850°C 焼入れの場合には 100 % 縦割れを生ずるため、応力測定に供した試験片は割れに伴って残留応力がある程度、解放されているものとする。したがって、850°C 水焼入れと比較して硬度は同一でも PAG 液の場合の焼入れ残留応力は小さい値を示している。

3・3 焼割れに及ぼす PAG 液濃度の影響 表 3 に焼割れに及ぼす液濃度の影響について示し、併せて焼入れ硬さと焼入れ残留応力の測定結果について示した。供試材は各濃度において各々 20 個を使用した。また、ここで焼割れに及ぼす流速 (攪拌) の影響について検討した。

水焼入れの場合、静止液、攪拌いずれもフィン割れが 100 % となり、PAG 濃度が増加するに従って急激に低下する。一方、縦割れは 5~20 % 濃度域において高い発生率を示している。攪拌の効果は表 3 より顕著に認められる。すなわち、フィン割れについて見ると PAG 濃度 5 % の場合、発生率が 85 % から 10 % に低下し、縦割れの発生率が 70 % から 10 % に低減している。

焼入れ硬さ、および焼入れ残留応力について見ると、焼入れ硬さは濃度 0~20 % において静止液、攪拌液ともに顕著な差異は認められず 30 % において若干の硬度低下が認められる。焼入れ残留応力においては、いずれも表 2 と比べて全般に大きい値を示しているが、これと焼割れ発生率、特に縦割れとの顕著な相関は表 3 において見出すことができない。特に濃度 5 % (静

止液)、10 % (攪拌) における応力測定試験片は焼割れを生じていないものを測定に供したため、残留応力が解放されず、高応力値を示しているものと思われる。前述したように銀棒冷却曲線に及ぼす液攪拌の効果は認められなかったが、表 3 の実験結果から見ると焼割れを低減させるには PAG 5 % 液を使用し攪拌させて焼入れするのが効果的であると考えられる。

3・4 焼割れに及ぼす焼入れ液温度の影響 表 4 に焼割れに及ぼす液温度の影響について示し、併せて焼入れ硬さと焼入れ残留応力の測定結果について示した。フィン割れについては水焼入れの場合、液温 0~60°C の範囲において 100 % を示し、60°C を超えると発生率は急激に低下している。一方、PAG 液の場合は液温 0°C の場合のみ 100 % を示し、比較的低温域においても割れの発生率は少ない。縦割れは水焼入れの場合にはまったく発生しないことが注目される。一方、PAG 液の場合、20~40°C の範囲で縦割れが生じている。

焼入れ硬さ、および焼入れ残留応力について見ると、水焼入れの場合、水温 80°C までほぼ一定の高硬度を維持し残留応力もこれに従って同様の傾向を示している。PAG 液の場合には液温 60°C を超えると硬さは急激に低下し、これに従って残留応力も減少している。これは 3・1 節において述べたように、この PAG 液の融点が 81°C であるためにヒートセパレーションを起こして PAG ポリマーが析出して試験片表面を覆い、銀棒試験片と同様に極端に冷却速度を低下させている

表 3 焼割れに及ぼす PAG 濃度の影響、および焼入れ硬さと焼入れ残留応力
(オーステナイト化温度 830°C、液温 20°C)

PAG concentration (vol.%)	Crack percentage (%)			Hardness (HRC)	Residual stress (MPa)	
	Fin	Vertical	Fin + Ver.			
0	100	0	0	63	295	Stirring speed = 0 m/s
2.5	90	55	55	63	340	
5	85	70	65	62	460	
10	0	100	0	62	260	
15	0	100	0	60	265	
20	0	90	0	59	260	
30	0	0	0	55	205	
0	100	0	0	63	310	Stirring speed = 0.5 m/s
2.5	70	0	0	63	320	
5	10	10	10	62	370	
10	10	75	10	62	440	
15	0	100	0	61	290	
20	0	100	0	62	270	
30	0	0	0	56	215	

ものと推察される。

3・5 焼割れ発生 の考察 マクロ的に見ると焼割れの形状は直線的で、その破面は灰白色の微細な繊維状破面を呈した。図4に縦割れ(真二つに割れて、さらに垂直方向に割れが入った部分:いわゆるT字状の割れ)のSEM写真を示した。粒界破壊と擬へき開破壊の混在する典型的な脆性破面を呈している。

フィン割れは試験片薄肉部の付根部分の隅部より円周に沿って生ずる。水焼入れの場合には、この割れが円周全体に広がり薄肉部が試験片本体の隅部より、ほぼ完全に離脱する。PAG液の場合は薄肉部が完全に離脱するまでには至らず部分的に割れを生ずる。一般にフィン割れは焼入れの際の薄肉部と本体部との冷却の時間的な差異に伴い生ずると考えられる。すなわち、薄肉部は本体部よりいち早く冷却されマルテンサイト変態を起こし膨張する。一方、本体部はこの時点ではいまだマルテンサイト変態を起こしておらず、冷却に伴う収縮の段階にあると考えられる。それゆえに、薄肉部の膨張に伴う引張応力と本体部の収縮に伴う圧縮応力が重疊して、よりいっそう大きな引張応力が生成し、これが隅部に集中してフィン割れを発生するものと考えられる。水焼入れの場合にはPAG液に比べて蒸気膜段階での冷却速度が大きく、このために本体部と薄肉部の温度差を大きくし、フィン割れを多発せしめるものと考えられる。

縦割れは試験片本体部の下端面の中心を通りT字状に生じ、これが試験片上部へと伝ばしている。割れの開口の度合い、形状より判断して発生部位は試験片

下端面のほぼ中心であると推察される。試験片を焼入れられた場合、その外周部分がマルテンサイト変態を終了して弾性体となった時点で、中心部分は外周部に比べて、まだ温度が高くオーステナイト状態か、あるいはマルテンサイト変態に移行する段階であると考えられる。このような状態では中心部は比較的塑性に富み最も収縮した状態にあり、外周部は比較的弾性に富んでいると考えられる。一方、中心部が最も膨張した状態にある時には、外周部は比較的弾性に富み両者とも平衡を保っているものと考えられている⁽⁷⁾。以上のように、中心部のマルテンサイト変態が進行し膨張し始めると、外周部に引張応力が発生し中心部にはこれに対応して圧縮応力を生ずる。冷却に伴って引張応力がさらに大きくなると試験片は内部から押し割られるような形で縦割れを発生すると考えられる。PAG液の場合は蒸気膜段階での冷却速度が小さいために変態応力が支配的になり縦割れを多発せしめるものと考えられる。

以上より、試験片表面には引張応力が残留していると考えられるが、表2~4においても、これを裏付ける結果を示した。

4. ま と め

PAG液の銀棒冷却特性、とりわけ、蒸気膜段階における冷却速度は液濃度、液温、液攪拌の順に影響を受ける。

焼きの入る範囲において、焼入れ液の高温領域(蒸気膜段階)の冷却速度が大きい場合はフィン割れを生

表4 焼割れに及ぼす焼入れ液温度の影響、および焼入れ硬さと焼入れ残留応力
(オーステナイト化温度 830°C, 無攪拌)

Quenchant temp. (°C)	Crack percentage (%)		Hardness (HRC)	Residual stress (MPa)	
	Fin	Vertical			
					PAG 0 %
0	100	0	62	300	
20	100	0	62	310	
40	100	0	63	285	
60	100	0	63	285	
70	20	0	61	245	
80	20	0	60	255	
95	10	0	45	205	
					PAG 10 %
0	100	0	62	420	
20	20	70	62	440	
40	10	30	61	400	
60	0	0	58	360	
70	0	0	47	230	
80	0	0	31	150	
95	0	0	25	135

図 4 縦割れの破面 (オーステナイト化温度 850°C,
10 % PAG 液, 20°C無攪拌)

じ, 小さい場合は縦割れを生ずる傾向が強いことがわかった。オーステナイト化温度が高くなるにつれて水焼入れの場合, すべてフィン割れを生じ縦割れは発生しなかった。PAG 液の場合は濃度の増加に伴いフィン割れの発生率は低下し縦割れの発生率が増加する。

焼入れ液温度の影響は PAG 液の場合には曇点が存在するために, 高温域での割れ発生率が急激に低下する。

液攪拌の影響は PAG 液の場合に顕著に現れ, 攪拌

することにより低濃度域でのフィン割れは低減し, 縦割れの発生率を高濃度域に移行させることがわかった。

焼入れ残留応力は試験片下端面においてすべて引張応力を示し, 焼入れ硬さとほぼよい対応を示した。

PAG 液はフィン割れのような断面急変部に生ずる焼割れの防止には有効である反面, 縦割れの発生率が高い。このため本文において述べたように液温の上昇, 第2報⁽⁸⁾に述べる冷却方法の工夫などにより縦割れを防止する必要があると思われる。

文 献

- (1) Chapman, R.D. and Jominy, W.E., *Metal Progress*, (1953-9), 67.
- (2) 三木田・中林, 機論, 52-473, A (昭 61), 229.
- (3) ASM, *Metals Handbook*, Ninth Edition, 4 (1981), 55.
- (4) Blackwood, R. Ross. and Edward R. Muller, *Heat Treating*, (1981-10), 26.
- (5) 日本材料学会編, X線応力測定法, (昭 56), 54, 養賢堂.
- (6) 鳴海, 熱処理, 21-2(昭 56), 85.
- (7) 大和久, 熱処理 108 つのポイント, (昭 61), 78, 大河出版.
- (8) 三木田・中林, 機論, 53-490, A (昭 62), 掲載予定.