

# 低温焼入材の諸特性に及ぼす熱処理 条件と鋼中炭素量の影響

小笠原 淳・高橋 良治\*

The Effect of Heat Treatment Conditions and Carbon Content of Steels  
on properties of Sub-critical Quenching Materials

Jun OGASAWARA, Ryoji TAKAHASHI

This study was made to clarify the properties of sub-critical quenching materials, when former water jet cooling was changed for flooding agitation cooling and 0.15% steel was used for former 0.4% steel. On the flooding agitation cooling, it was found that surface residual stress and fatigue time strength decreased a little, but hardness distribution and  $\sigma_{w2}$  were approximately equal to those of former jet cooling process. Further, it was observed that quench aging was evolved in 0.15% steel more than 0.4% steel, surface residual stress and  $\sigma_{w2}$  decreased about 10% for 0.4% steel and final improving rate of  $\sigma_{w2}$  for normalized material resulted in 120%. Consequently, 0.15% steel was more ineffective than 0.4% steel on improving rate of  $\sigma_{w2}$ . But, it is considered that the results from observation on aging behavior of ferrite of 0.15% steel will be able to clarify the factors which improve fatigue strength on sub-critical quenching for the different experimental materials.

## 1. 緒言

低温焼入れは、鋼を  $Ac_1$  変態点直下付近に均一加熱後、その温度から急冷する熱処理法で、これによって、切欠部の回転曲げ疲れ強さを大幅に向上できることが、これまでに報告されている<sup>1)2)3)</sup>。

筆者の1人は、多年にわたって低温焼入材の疲れ強さについて基礎実験を続けてきたが、その結果次のようなことが知られている<sup>4)5)6)7)</sup>。すなわち、S40C材に対して低温焼入れを施すことにより、切欠部の疲れ破壊限度  $\sigma_{w2}$  は焼ならし材の2.2倍となり、また、疲れきず入り限度  $\sigma_{w1}$  も1.8倍と著しく増大することが分った。特に低温焼入材では、 $\sigma_{w2}$  直下付近の負荷応力で、繰返し数  $N \doteq 2.00 \times 10^7$  での停留き裂深さが、焼ならし材では0.2~0.3mmであるが低温焼入材では5~6mmとなり、負荷応力が焼ならし材の2倍以上の苛酷な条件にもかかわらず、焼ならし材の10倍以上の深さに耐えてき裂が停留することが認められた。これは実用上、き裂の検査の困難な圧入軸の安全性と信頼性を高めうる大きな特長である。

また、低温焼入れ温度が650℃付近のときに  $\sigma_{w2}$  が最大になること、および低温焼入材の疲れ破壊限度  $\sigma_{w2}$  は、表面に形成される圧縮残留応力値の大きさと直線的な相関をもち、したがって、低温焼入材の疲れ強度向上要因は、この表面圧縮残留応力が繰返し応力負荷時に平均応力として作用するものと考えた。なお、疲れきず入り限度  $\sigma_{w1}$  はフェライト地の焼入れ時効による硬さの上昇が関連するものと考えた。

本研究では、低温焼入時の熱処理条件および材料の変更による硬さ、顕微鏡組織および表面残留応力などの諸特性への影響について実験検討した。すなわち、低温焼入処理を、均一な急速冷却をするための水噴射冷却から、現場的に作業性の良い攪拌水冷方式とし、また、加熱炉も縦型吊下げ方式の電気炉から、汎用性の高い電気マッフル炉またはソルトバス電気炉に変更した。さらに供試材料として、従来までのS40C材および、よりフェライト地の多いS15C材を用い、低温焼入れを施したときの諸特性への影響について詳細な検討を行い、今後の低温焼入材の疲れ強度向上因子の解析に役立てる実験とした。

\* 秋田県工業技術センター 機械金属部

2. 供試材料

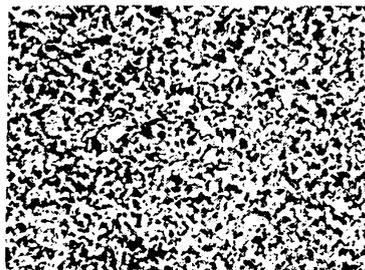
供試材料は、機械構造用炭素鋼S40CおよびS15C（両材とも黒皮直径22mm）を用いた。化学成分および機械的性質は表1、2に示し、また図1に前処理（焼ならし、および焼なまし）後の顕微鏡組織を示した。

表1 供試材料の化学成分

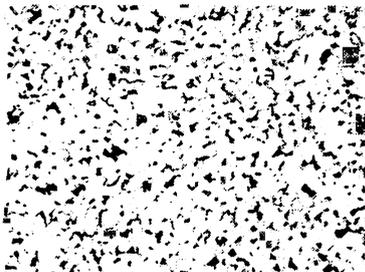
材料記号・外径	C	Si	Mn	P	S	Cu	N
S40C φ22黒皮	0.40	0.28	0.79	0.023	0.012	0.02	0.0036
S15C φ22黒皮	0.17	0.29	0.46	0.025	0.024	0.15	—

表2 供試材料の機械的性質

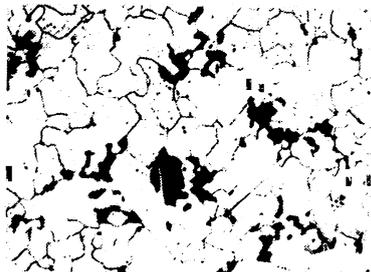
材料	熱処理	降伏点 σ <sub>y</sub> kgf/mm <sup>2</sup>	引張強さ σ <sub>B</sub> kgf/mm <sup>2</sup>	伸び δ (%)	絞り φ (%)
S40C	焼ならし(N)	41.7	59.8	60.1	35.5
S15C	焼ならし(N)	28.0	44.2	40.3	66.0
S15C	焼なまし(A)	23.1	39.8	40.5	60.4



S40C (N)



S15C (N)



S15C (A)

100μm

図1 供試材料の顕微鏡組織

3. 実験方法

3・1 熱処理

S40C、S15C材とも黒皮状態（φ22mm）で前処理を施した。S40C材に対しては850℃で1時間加熱保持後空冷の焼ならし処理（以下Nと記す）を行った。S15C材に対しては920℃で1時間加熱保持後空冷の焼ならし処理を行ったものと、920℃で1時間加熱保持後、920～600℃まで25℃/hrの徐冷却の焼なまし処理（以下Aと記す）を行った。焼なまし（A）処理は過飽和固溶体からの炭化物、窒化物等の化合物の十分な析出をはかるとともに、結晶粒粗大化により硬さ測定時のバラツキを少なくする目的で行った。

次に、供試材をφ16×220mmに機械加工後、低温焼入れ（S.C.Qと記す）を行った。低温焼入れは、S40C、S15C材とも550℃で15分予熱後、電気マッフル炉または中温ソルトバス電気炉で650℃で30分加熱保持し、800×800×1,000mmの水槽（水温13～18℃）中で攪拌冷却（完冷）を行った。なお、一部の試験片は低温ソルトバス200℃中に浸漬加熱し時効処理（以下200℃Aと記す）を行った。図2に熱処理線図を示す。

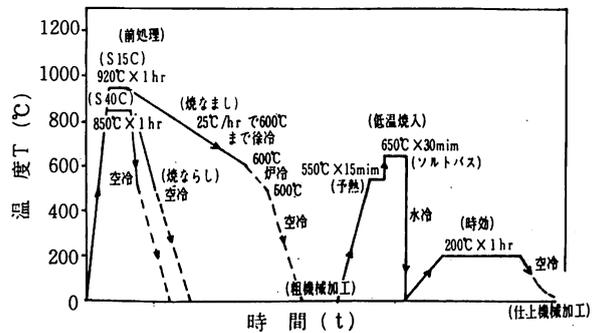


図2 供試材料の熱処理線図 (S40C、S15C)

3・2 硬さおよび顕微鏡組織

硬さの測定には微小硬さ試験機（荷重200g、50g）を用いた。また、顕微鏡組織はカルツアイス倒置型IM35金属顕微鏡写真装置を使用した。

3・3 表面残留応力測定

表面残留応力測定は理学電機製X線応力測定装置（PSF-2M）を用い、Sin φ・2θ法により入射角を0°、15°、30°、45°で測定した。また、電解研磨は約5～7mm角の範囲を直流電圧20～25V、電流0.5～1.0Aで行い、残留応力は試験片表面から250μm付近の深さまで、50～75μm毎に測定した。

低温焼入材の諸特性に及ぼす熱処理条件と鋼中炭素量の影響

3・4 回転曲げ疲れ試験

回転曲げ疲れ試験片はS40C、S15C材を用いφ16×220mmの丸棒材を前処理後、図3に示すφ12mm切欠付回転曲げ疲れ試験片を旋削加工した。試験片切欠部の切欠係数βは2.1、形状係数αは3以上となる。なお、疲れ試験機は自家製片持式回転曲げ疲れ試験機で、容量60kgm、回転数1,100rpm、電動機220V、0.4kw、試験機の大きさは1,000×600×900mmのものである。

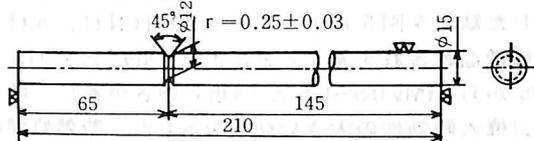


図3 φ12mm切欠付回転曲げ疲れ試験片形状寸法

4. 実験結果と考察

4・1 熱処理条件変更が低温焼入材の基礎特性に及ぼす影響

低温焼入時の熱処理条件は、これ迄表面部を急速な均一冷却を行うために一発噴射焼入装置によって行ってきたが、本実験では現場的に作業性の良い水中攪拌冷却を行うことによる低温焼入材の基礎特性について検討した。基礎特性として調べたものは断面硬さ分布、顕微鏡組織、表面残留応力および回転曲げ疲れ強さである。

本実験では、S40C φ22×220mm材を850℃で焼ならし処理後φ16×220mmに旋削加工し、試験片の一端にφ3mmの穴をあけて軟鋼線を通して焼入保持具とした。試験片を電気マuffle炉および中温ソルトバス中で650℃で30分均一加熱後、800×800×1,000mm水槽中に13~18℃の水道水を流入し、この中に軟鋼線の焼入保持具を介して8の字に水中で攪

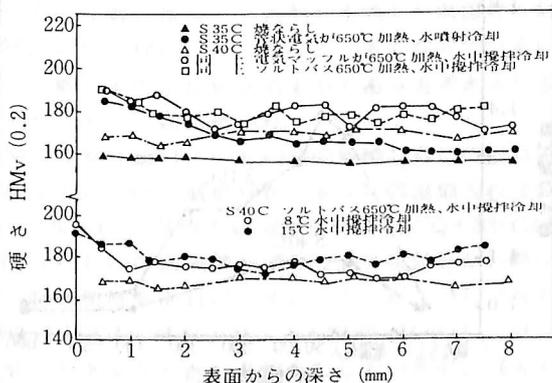
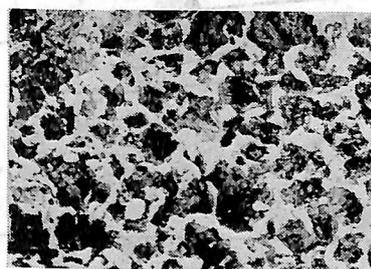


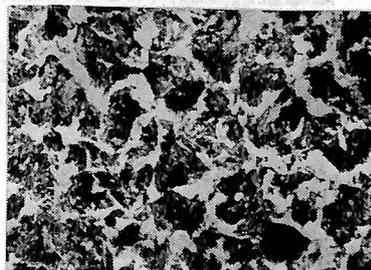
図4 低温焼入材の焼入加熱および冷却方法による断面硬さ分布 (注: S35C材は既報のデータを示す)

拌(8の字の大きさは約350×200mm、周期約2.5秒、完全水中冷却)を行った。

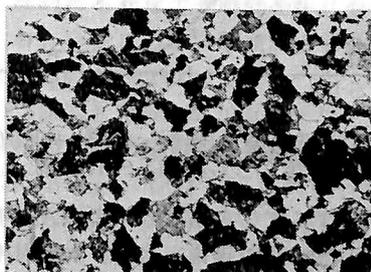
図4に各種の加熱、冷却法による低温焼入材の断面硬さ分布を示す。従来の加熱冷却条件(縦型電気炉吊下げ加熱、一発噴射冷却)と変更後の加熱、冷却条件(電気マuffle炉、ソルトバス加熱、水中攪拌冷却)との間に材質によると思われるわずかの差



N



N+650°C SCQ (噴射)+200°C A



N+650°C SCQ (攪拌)+200°C A

25μm

図5 噴射および攪拌冷却低温焼入材の顕微鏡組織(×500)

はあるが大きな差異はほとんど見られなかった。なお、冷却水温度を8℃に低下させた場合の水中攪拌冷却を行ったが、図4の下部に示すように特に硬さ分布に差異は見られなかった。次に顕微鏡組織についても図5に示すように光学顕微鏡的な観察範囲では特に差は認められなかった。

図6は残留応力測定結果を示すが、水噴射冷却低温焼入材では23kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮残留応力であるのに対し、水中攪拌冷却低温焼入材では20kgf/cm<sup>2</sup>の圧

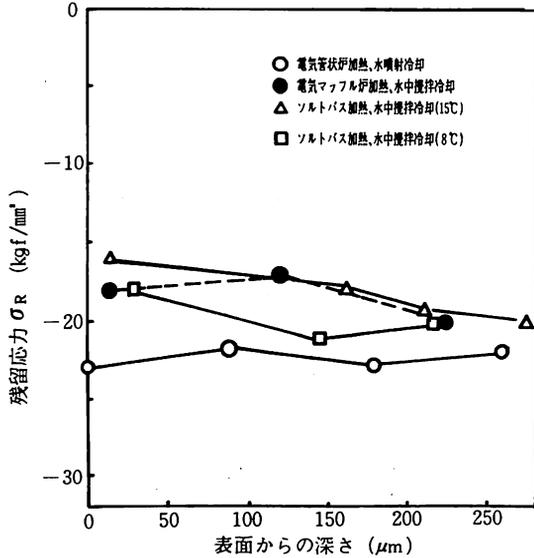


図6 低温焼入の加熱および冷却条件による残留応力 (X線法)

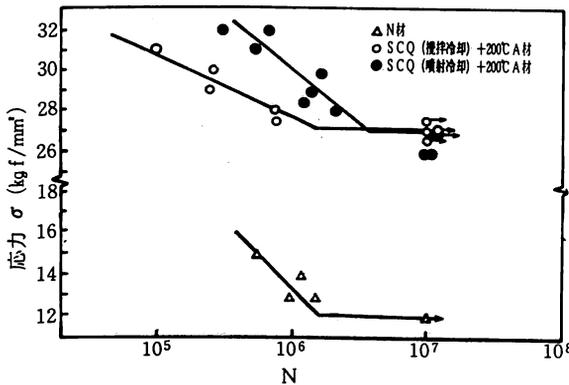


図7 650℃低温焼入(噴射・攪拌)+200℃ A材および焼ならし材のS-N線図

縮残留応力となって、前者より後の方がやや小さい傾向を示した。その理由として、水噴射冷却と水中攪拌冷却の表面冷却速度比が3:1である<sup>8)</sup>ことによると考えられる。

図7はφ12mm切欠試験片の回転曲げ疲れ試験結果を示すが、水噴射冷却および水中攪拌冷却低温焼入後200℃時効材の $\sigma_{w2}$ は27kgf/mm<sup>2</sup>で同一値を示したが、時間強度線図において水噴射冷却材の勾配が大きくなった。これは主として表面圧縮残留応力の影響によるものと考えられる。

#### 4・2 材質変更が低温焼入材の基礎特性に及ぼす影響

低温焼入の実験において、従来まで供試材は、S35C、S40C等の中炭素鋼材を使用してきた。本実験では、低温焼入時の焼入時効硬化の主要因とな

るフェライト地を多く有する低炭素鋼材S15Cを用い、これに低温焼入れを施したときの硬さ、顕微鏡組織、残留応力および回転曲げ疲れ強さについて求めた。なお、低温焼入れは水中攪拌冷却法にを行った。

#### 4・2・1 硬さ

S15C φ16×220mm焼ならし(N)および焼なまし(A)の前処理材に対し、650℃低温焼入後に50、100、150、200、300、400および600℃にそれぞれ1時間加熱保持後空冷の時効処理を行って表面硬さを測定した結果を図8に示す。S15C材はN材、A材ともに低温焼入れを施すことによりHMv(0.2)115~125からHMv165~175と1.4倍に硬さが著しく増大し、焼入時効性の大きい傾向を示した。時効処理温度と硬さとの関係では、時効温度50℃で硬さ値が最大となり素材の1.5倍となった。時効温度100℃以上では過時効となり200℃まで急激に低下し、低温焼入材の0.85倍となった。その後400℃まで漸減し、600℃まで横ばいの傾向を示しながら素材と同一硬

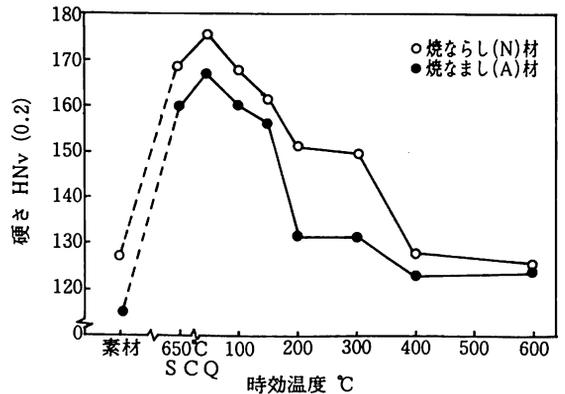


図8 S15C φ15mm低温焼入(N+650℃ SCQ)、(A+650℃ SCQ)材の時効温度と硬さの関係(時効時間各60分後空冷)

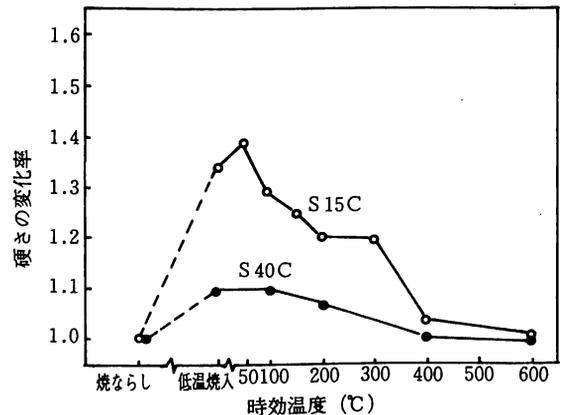


図9 S15C、S40C材の焼ならし材の低温焼入・時効による硬さの変化率

低温焼入材の諸特性に及ぼす熱処理条件と鋼中炭素量の影響

さとなった。図9はS40C材とS15C材の時効温度による硬さの変化率の比較を示すが、低温焼入後の実質硬さはほぼ同一値であるが、最大硬さにおける増加率はS15C材ではS40C材の約1.3倍を示し、焼入時効性がかなり大きいことがわかった。

図10はS15C φ15mm材の650℃低温焼入れ(SCQ), および650℃低温焼入れ後200℃時効(SCQ+200℃A)材の断面硬さ分布を示す。SCQ材では焼ならし(N), 焼なまし(A)の前処理材ともに表面、内部とも等分布をなして前処理の影響を余りうけないが、SCQ+200℃A材では前処理の影響を受け、A材がN材より低い硬さ値の分布となった。焼入時効はC, N<sub>2</sub>等のフェライト中への過飽和状態からの析出硬化現象であるが、析出物の種類, 量, 大きさ, 分散度合が温度, 時間の関数として生ずる<sup>9)</sup>。析出物としてFe-C系ではFe<sub>2</sub>C (150℃以下), Fe<sub>3</sub>C (200℃以上), Fe-N系ではFe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> (250℃以下), Fe<sub>4</sub>N (250℃以上)等の存在が考えられる<sup>10)</sup>。時効処理温度50~600℃の実験温度範囲では上述の化合物の析出と凝集により硬さの変化を起したものと考

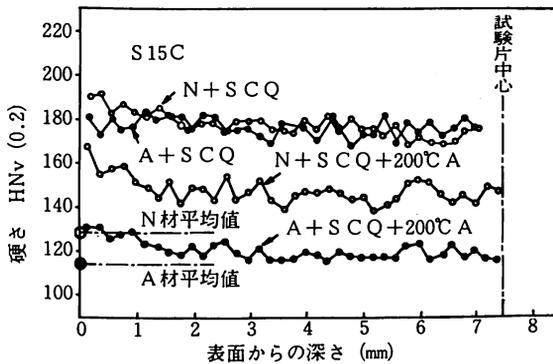
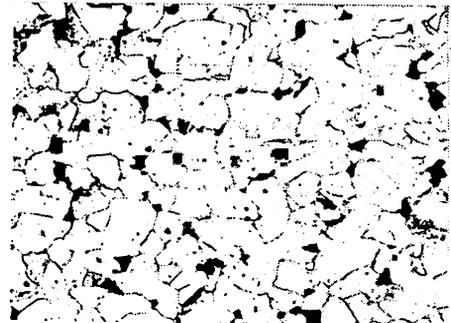


図10 S15C φ15mm 650℃低温焼入材および200℃時効材の断面硬さ分布

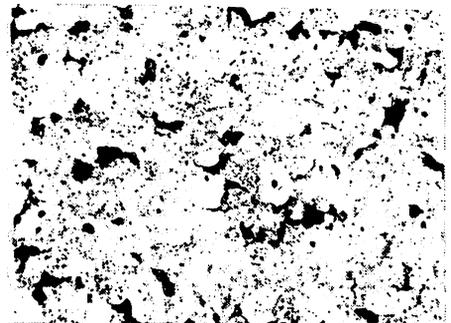
られる。なお、焼なまし前処理を施した低温焼入材の硬さの低い理由は結晶粒度が大きくなっている以外に、熱的不安定性によるものであると考えられる。

4・2・2 顕微鏡組織

S15C φ15mm材に対し前項同様焼ならし(N)および焼なまし(A)の前処理後、650℃低温焼入れ(SCQ)と650℃低温焼入れ後200℃時効(SCQ+200℃A)を行ったものの顕微鏡組織について検討した。焼なまし前処理材を図11に示す。(N+SCQ)材、(N+SCQ+200℃A)材および(A+SCQ)材では、パーライトとフェライトの2相をなしているが、(A+SCQ+200℃A)材では2相以外にフェライト地にうすく析出物が見られた。これは(SCQ+200℃A)材



650℃ SCQ



650℃ SCQ+200℃A

100μm

図11 S15C 焼なまし前処理材の低温焼入および低温焼入・時効材の顕微鏡組織

では前処理が焼ならしの場合より焼なましを行った場合に、熱的に不安定で過時効を生じやすいためと思われるが、今後さらに実験検討する必要がある。

4・2・3 残留応力

前項の(SCQ)材および(SCQ+200℃A)材について軸方向表面残留応力をX線法により測定した結果を図12に示す。(SCQ)材では焼ならし(N)前処理材で20kgf/mm<sup>2</sup>, 焼なまし(A)前処理材で16kgf/mm<sup>2</sup>, (SCQ+200℃A)材ではN材で17kgf/mm<sup>2</sup>, A材で14kgf/mm<sup>2</sup>の圧縮残留応力となった。これよりS15C材においても、S40C材と同様に低温焼入れにより表面軸方向に圧縮残留応力が形成されることが分った。なお、S15C材では表面残留応力値は前処理の影響を受け、N材はA材の1.2倍となった。図13は、従来までの実験において得られたS40C材, SNCM435材の低温焼入材, および本実験でのS15C材の表面残留応力値と表面硬さとの関係を示すが、直線的な関係にあることが分る。低温焼入材における表面圧縮残留応力の発生機構は、冷却時に表面部が内部より早く冷えるため、表面部が先に弾性域に入って殻状となり、その後内部が冷却されて収縮が始まるが、その時の内部引張残留応力に対応して生ず

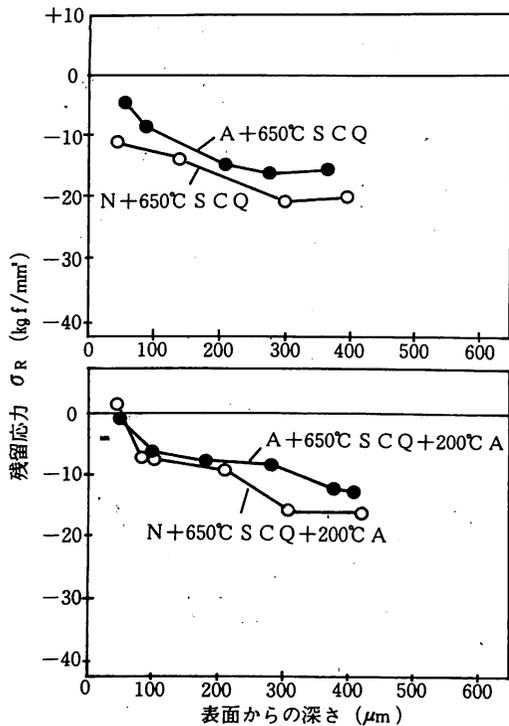


図12 S15C低温焼入、低温焼入・200°C時効材の残留応力(X線法)

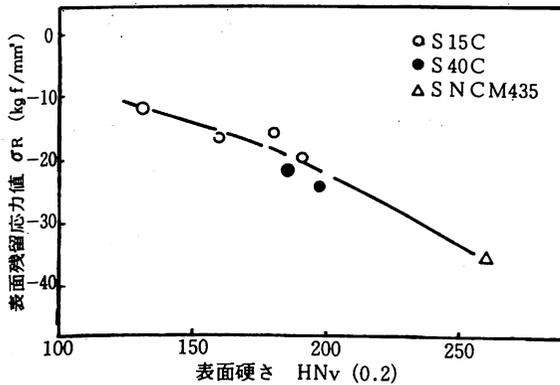


図13 低温焼入および時効材の表面残留応力値と表面硬さとの関係

るとされる<sup>11)</sup>。したがって内部引張残留応力に対応して表面圧縮残留応力が形成されるとすれば、その大きさはその材料の降伏点に依存するものと考えられる。その故に、低温焼入処理の特長が表面圧縮残留応力によるものと仮定すれば、本熱処理の活用において材料の選択は重要な条件となることが推定される。

#### 4・2・4 回転曲げ疲れ試験

S15C材においてもS40C材と同様、低温焼入れにより表面圧縮残留応力層が形成されることから、疲れ強度の向上が期待される。本実験では、S15C

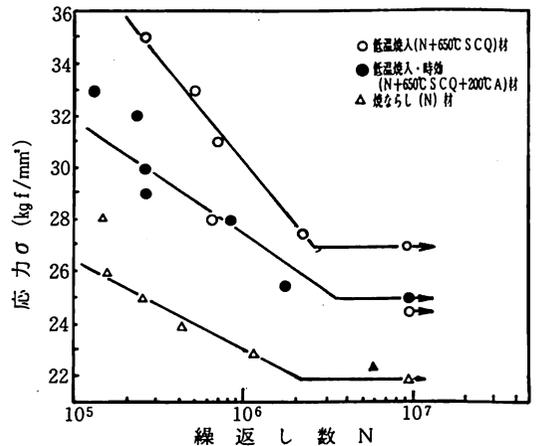


図14 S15C φ15 切欠付回転曲げ疲れ試験片のS-N線図(焼入れ、低温焼入、低温焼入・時効材)

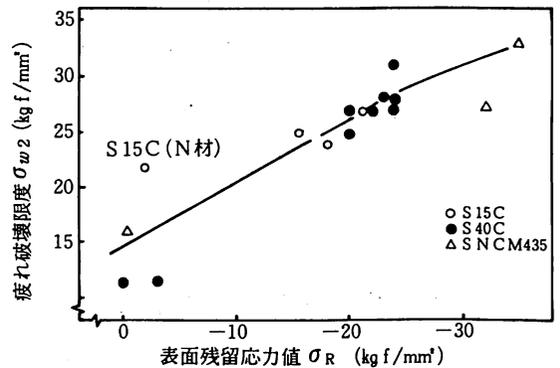


図15 切欠材回転曲げ疲れ試験における表面残留応力値と疲れ破壊限度σw2との関係

材のφ12mm切欠付回転曲げ疲れ試験片により、焼入れ(N)材、低温焼入れ(N+SCQ)材、低温焼入れ後200°C時効(N+SCQ+200°C A)材について疲れ試験を行い図14のS-N線図を得た。

これより回転曲げ疲れ破壊限度σw2はN材で22kgf/mm<sup>2</sup>、(N+SCQ)材で27kgf/mm<sup>2</sup>、(N+SCQ+200°C A)材では25kgf/mm<sup>2</sup>となり、疲れ強さの増加率が(SCQ)材で1.2倍、(SCQ+200°C A)材で1.1倍となることが分った。図15は、低温焼入れ材の表面残留応力値とσw2の関係を、前報までの実験データと本実験のS15C材のデータを併せてプロットしたものである。これよりσw2は表面圧縮残留応力と直線的な関係があり、炭素量の少ないS15C低温焼入れ材のσw2は、炭素量の多いS40C低温焼入れ材の約90%となることが分った。

一般に材料の引張強さと疲れ破壊限度σw2との間には、かなりのバラツキはあるが比例的関係をなすとされている<sup>12)</sup>。そこで、引張強さに相関のある焼な

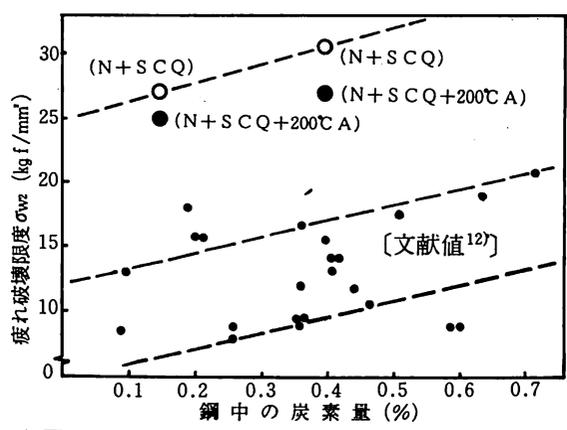


図16 切欠材の鋼中炭素量と疲れ破壊限度 $\sigma_{w2}$ の関係 ( $d/D \approx 0.8$   $D=10\sim 15$   $\beta \approx 2$ )

らし処理材の鋼中炭素量ならびに硬さと疲れ破壊限度 $\sigma_{w2}$ の相関について検討した。図16は文献<sup>12)</sup>より得られた鋼中炭素量と $\phi 12\text{mm}$ 切欠材の $\sigma_{w2}$ の関係をプロットしたものである。通常の焼ならし状態ではある幅を有するが、両者の間に直線的な関係を示した。これにS15C、S40C材の低温焼入材の実験平均値を併記すると、低温焼入材は焼ならし材と全くかけはなれた位置にプロットされるが、その相関関係の勾配は、文献値の焼ならし材の勾配とほぼ一致する傾向を示した。 $\sigma_{w2}$ の差は約 $10\text{kgf/mm}^2$ となるが、この差が低温焼入れの効果であると考えられ、また低温焼入材の炭素量は $\sigma_{w2}$ に対して影響を与えていることが分かった。

### 5. 結論

低温焼入処理における熱処理条件の変更，ならびに材質の変更が，低温焼入材の基礎的諸特性に及ぼす影響について実験検討し，得られた結果は次のとおりである。

(1) 低温焼入れに際し，従来の用いてきた水噴射冷却装置にかえて，現場的に汎用性の高い水中攪拌冷却法を用いた場合の低温焼入材の基礎的諸特性について実験検討を加えた。その結果，急冷度の低い水中攪拌冷却法では，急冷度の高い水噴射冷却法に比べて表面圧縮残留応力値が10%程度減少し，S-N線図の時間強度曲線の勾配がややゆるくなるが，疲れ破壊限度 $\sigma_{w2}$ は両者とも $27\text{kgf/mm}^2$ と等しく，硬さ分布，顕微鏡組織においても差異はきわめて少ないことが分かった。

(2) 従来の実験での供試材料S35C，S40C材にかわり，焼入時効現象を多く生起するフェライト地

質の多い低炭素鋼材のS15C材を用いて，材質の変更による低温焼入材の基礎的特性について実験検討を加えた。その結果，焼入時効の程度を硬さ値で検討すると，S15C材はS40C材の1.3倍と時効硬化性が大きい反面，人工時効処理による硬さの減少度合も大きくなる特徴を示した。この傾向は前処理の影響を受け，焼なまし前処理材が低温焼入れ後の人工時効処理時に熱的不安定性を示した。

なお，S15C材においても低温焼入れにより表面圧縮残留応力が形成され，その大きさはS40C材の約80%となった。表面圧縮残留応力値と硬さとの関係について検討した結果，直線的相関を示した。これは低温焼入材の特徴とする表面圧縮残留応力は，内部の引張残留応力の対応にもとづくことを裏づける現象であり，低温焼入れの特徴活用には使用材料の選択も重要な因子となることを示すものと考えられる。

次に，S15C材の疲れ破壊限度 $\sigma_{w2}$ は低温焼入れにより向上するが，S40C材の約90%であり，表面圧縮残留応力と $\sigma_{w2}$ との関係において，材質を変更しても直線的相関が見られた。したがって $\sigma_{w2}$ の向上要因として，表層部の圧縮残留応力層がかかっていることを示すものと考えられる。

終りに，本実験を行うにあたり協力をいただいた本校の杉沢久雄技官，卒業研究学生の加藤修，佐藤禎資，佐藤伸および柴田康久の諸君，また実験にご援助をいただいた秋田県工業技術センターの関係各位に深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) O. J. Horger, Proc. Int. Conf. Fatigue of Metals, 352 (1956)
- 2) 桜井忠一，川崎正，北幸純，日本機械学会論文集，23，489 (1957)
- 3) 西岡邦夫，西川富雄，小松英雄，日本機械学会論文集，38，933 (1972)
- 4) 高橋良治，佐藤初吉，吉村照男，飯島一昭，鉄と鋼，63，84 (1977)
- 5) 高橋良治，佐藤初吉，吉村照男，飯島一昭，鉄と鋼，64，94 (1978)
- 6) 高橋良治，佐藤初吉，吉村照男，飯島一昭，鉄と鋼，65，87 (1979)
- 7) 高橋良治，吉村照男，佐藤初吉，鉄道技術研究所速報，82，43 (1982)
- 8) 金属熱処理技術便覧編集委員会，金属熱処理便

- 覧，日刊工業新聞社（1956）6
- 9) 日本鉄鋼協会編，鋼材の性質と試験，地人書館（1957）227
- 10) 西沢泰三，佐久間健人，金属組織写真集鉄鋼材料編，日本金属学会（1979）54
- 11) 日本鉄鋼協会編，処理品質，丸善（1972）63
- 12) 日本機械学会編，金属材料疲れ強さ設計資料(I)，日本機械学会（1974）2