鋼焼入れの伝熱現象の研究*
(第4報, 硬さと焼入れ冷却曲線)田島 守^{*1}, 牧 忠^{*1}, 片山 功蔵^{*2}Study of Heat Transfer Phenomena in Quenching of Steel
(4th Report, Relation Between Hardness and Cooling Curves of Steel)

Mamoru TAJIMA, Tadasu MAKI, and Kozo KATAYAMA

The relation between the hardness of S45C carbon steel and the temperature of cooling water is examined experimentally. The cooling curves of S45C carbon steel ($\phi 6-80$ mm) cylinder during quenching are also measured. The cooling rate curves of steel are calculated using those results. The high cross-sectional and surface hardnesses are obtained below the temperature 40°C . The reason for the low hardness obtained above the temperature of 40°C is that A_1 phase transformation of steel occurs at temperatures around 660°C . The behavior of cross-sectional hardness can be well explained by the A_1 cooling rate.

Key Words: Hardness, Cooling Curve, Cooling Rate, Temperature of Water, Phase Transformation, Quenching

1. 緒 言

本研究は, 焼入れによって得られる硬さが冷却水温度の変化に対してどのように変わるかを, 鋼焼入れの代表的な材料 S45C 炭素鋼を用い, 円柱試験片の硬さおよび材料内の過渡温度(冷却曲線)を測定し, 硬さの変化の様子と相変態現象の関係を明らかにしようとするものである。

焼入れの目的は, 硬くすることおよび機械的性質(引張強さ, 疲れ強さ, 耐摩耗性, ばね性および衝撃強さなど)の改良にある。硬さと機械的性質との関係については, これまでに多くの研究がなされ良い相関のあることが明らかにされている^{(1)~(3)}。現在では硬さを測定することにより, おおよそその機械的性質を推定することは可能となった。

焼入れの冷却液として, 主に水や油類が使われているが, 安全, 管理, 汚染などを考慮すると水が有利であり一般に広く使われている。水焼入れにおいて冷却水の温度が高くなると, 得られる硬さが低くなること

は経験的に知られている。しかし, 鋼の硬さと冷却水温度の関係について, 系統的な検討がなされたのも少ない⁽⁴⁾。水のように沸点の低い流体へ焼入れした場合の伝熱は沸騰伝熱(核, 遷移, 膜沸騰)であり, A_1 変態温度 (727°C) 付近の高温域では膜沸騰熱伝達となる。膜沸騰熱伝達では, 熱は固体→気体(水蒸気)→液体と移動し, 水蒸気が間に介在するため, 熱伝達率の値は小さい^{(5)~(7)}。そのためサブクール度(液体の飽和温度と冷却水温度との差)が小さくなれば, 水を沸騰させるに要するエネルギーは少なくてすみ, 当然膜沸騰の継続時間は長くなる。水焼入れに適正な温度領域は, サブクール度の大きい場合の過渡沸騰熱伝達にあたり, 沸騰熱伝達の研究において特に定量化の難しい分野であるため, なされている研究^{(8)~(10)}も少なく利用するデータもいまだ不十分である。

著者らはこれまでに, 焼入れ冷却曲線の実測から相変態現象を伝熱学的見地より検討を加えてきた^{(11)~(13)}。まず, 鋼焼入れに広く用いられている S45C 炭素鋼について, 焼入れ冷却中における相変態温度, 相変態熱および硬さと A_1 冷却速度 (A_1 変態点 727°C をよぎる冷却速度)との相関を明らかにしてきた。ついで, 相変態熱を考慮に入れた熱伝導の数値解析方法を示し, 冷却曲線の計算と実験結果の比較から, 先に A_1

* 昭和63年9月30日 北陸信越支部信越地方講演会において講演, 原稿受付 昭和63年3月22日。

^{*1} 正員, 神奈川大学工学部 (〒221 横浜市神奈川区六角橋3-27)。

^{*2} 正員, 芝浦工業大学 (〒108 東京都港区芝浦3-9-14)。

冷却速度で整理した結果の有効性および本解析法の妥当性を確かめた。さらに過渡沸騰および相変態を伴う焼入れの熱伝導の数値解析を種々の直径に対して行い、実験の冷却曲線と比較して良い結果を得た。これらの結果から、相変態の諸量を A_1 冷却速度で整理し、相変態を伴う焼入れ冷却曲線を計算によって推定することが可能となった。本研究においても、円柱内の過渡温度の測定から A_1 冷却速度を求め、冷却水温度の変化に伴う硬さの変化の様子および相変態現象を A_1 冷却速度を使って整理し、その関係を明らかにしようとするものである。

記 号

HRC: ロックウェル C 硬さ

HmV: マイクロビッカース硬さ

T_w : 冷却水温度 $^{\circ}\text{C}$

T : 測定温度 $^{\circ}\text{C}$

t : 時間 s

V : 冷却速度 $= dT/ds \text{ } ^{\circ}\text{C/s}$

V_1 : A_1 冷却速度 $= dT/ds \text{ } ^{\circ}\text{C/s}$ (727°C)

2. 実験装置

2.1 実験装置 図1に実験装置の系統を示す。実験装置は、電気炉(2 kW)、加熱雰囲気系、水槽(0.036 m^3)、試験片駆動系、温度測定系より構成されている。

本研究で用いる試験片は直径6 mmと細いものであり、実験の再現性を得るために、試験片は手で操作するのでなく機械的駆動装置(ストローク600 mm、速度0.2 m/s)を使う。試験片の保持熱量がすべて水に

伝わったとして、わずか 0.01°C の液温上昇である。試験片の冷却中の沸騰状態を観察できるように、水槽の両側は耐熱ガラスで作ってある。沸騰に影響を及ぼす冷却水中の溶存ガスを減らすため、一度沸騰させた水道水を所定の温度に設定して用いる。電気炉は、前後に水平移動できるように作られており、PIDコントローラにより所定の温度に制御される。

2.2 試験片 硬さおよび過渡温度を測定する試験片は、熱処理材料として広く使われているS45C炭素鋼とし、直径6 mm、長さ80 mm($\phi 6-80$ mmと略記)の円柱を用いる。その理由は、細い直径の試験片であれば中央断面で半径方向に一樣な硬さを比較的簡単に得られやすいことによる。

図2に試験片の寸法、温度測定位置および硬さ試験片の切出し大きさを示す。試験片の温度を測るために、また測定誤差が少なくなるようにするため、試験片上端から中央まで等温面に沿うように、ロングドリル($\phi 1.1$)によって穴をあけ、この穴にC-A シース熱電対(シース外径 $\phi 1.0$ 、素線径 $\phi 0.2$ mm、時定数47 ms)を挿入し、銀ろうで固定して温度を測定する。使用する熱電対は純金属の凝固点と比較して検定する。

断面硬さ測定試験片は、切断加工に伴う熱の影響を極力避けるため、十分な冷却を行いながら図2の中央40 mmの部分微小研削によって切断する。断面硬さの検査面は中央断面部分とする。その断面は、流水で十分冷やししながらエメリーペーパー(#280, #500, #800, #1200)により研磨し仕上げる。表面硬さはロックウェル硬さ試験機(Cスケール、負荷時間15 s)で、断面硬さはマイクロビッカース硬さ試験機(負荷1 kg、負荷時間30 s)で測定する。

2.3 実験方法 試験片加熱用電気炉内には、試験片表面の酸化を防ぐために窒素が一定量連続的に流入している。試験片は、温度 850°C の電気炉内に一定時間(12 min)保持され、所定の温度に設定された静止水中へ急速に垂直投入され、液面下100 mmの位置に保持される。円柱試験片の過渡温度は、A-Dコンバータ(14 bit, 20 μs)を介してパーソナルコンピュータに記録され解析される。硬さ試験片を水中から取り出す時間は投入後5 minとする。

図1 実験装置

図2 試験片の寸法

3. 実験結果

3.1 冷却水温度が異なる場合の硬さ 種々の冷却水温度に焼入れを行った後、硬さを測定し、その表面および断面硬さの結果を図3、4に示す。丸印は硬さの平均値、縦の区分線はばらつきの範囲を示す。断面硬さのばらつきは比較的少なく、断面にわたって一様な硬さが得られているのがわかり、硬さ試験片としての寸法は適切であると言える。冷却水温度40°Cを境に、表面および断面硬さの両方とも大きく異なっているのが明らかである。冷却水温度40°C以下において、両者とも十分な硬さが得られている。冷却水温度40°C以上になると、両者ともに硬さの値が急激に低くなり、不十分な結果である。

3.2 冷却水温度が異なる場合の冷却曲線 焼入れ硬さと冷却曲線の関係がどのようになっているかを明らかにするため、硬さ測定に使用した同じ成分の材料を使って円柱中心の過渡温度を測定し、相変態に注目して検討する。冷却水温度が異なる場合のS45C炭素鋼の直径6mmの中心部過渡温度の測定結果を縦軸に温度、横軸に時間を対数で表して図5に示す。図5には試験片と同じ材料の連続冷却変態曲線(CCT)も併せて記入してある⁽¹⁴⁾。冷却曲線の特徴として、冷

却水温度40°C以下の曲線には相変態の影響がはっきりと見ることができないが、冷却水温度40°C以上の曲線にはAr'変態が660°C付近に顕著に起きているのがわかる。冷却水温度40°Cと45°Cの場合、たった5°Cの温度差であるが相変態に伴う潜熱の発生の有無により冷却曲線に大きな違いがでている。また冷却曲線は、3.1節の硬さの測定結果と合わせ考えるとCCT曲線とも良く対応していることがわかる。

4. 考 察

図5の冷却曲線をもとに冷却速度($V=dT/dt$)を計算し、焼入れにおける相変態の影響をわかりやすくするため縦軸に温度、横軸に冷却速度を対数で表した結果を図6に示す。冷却水温度45°C以上の曲線には、温度660°C付近に冷却速度の極端に遅い部分があり、

図3 表面硬さと冷却水温度の関係

図4 断面硬さと冷却水温度の関係

図5 冷却水温度が異なる場合の冷却曲線

図6 冷却水温度が異なる場合の冷却速度

図7 A₁冷却速度と冷却水温度

Ar' 変態が十分進んでいることが良くわかる。冷却水温度 40°C 以下では、冷却速度の最大値が冷却水温度 60°C の結果より小さい。冷却水温度 40°C の場合、冷却曲線には Ar' 変態の影響を見いだせなかったが、温度 630°C 付近に冷却速度の遅くなる場所があることから、Ar' 変態がほんのわずかに起きているのがわかる。このわずかな Ar' 変態の影響で、冷却水温度 40°C の硬さは 35°C 以下の硬さより若干低い結果になっているものと思われる。

S45C 炭素鋼の多数の実測冷却曲線を解析して、冷却水温度に対する A₁ 冷却速度 ($V_1 = dT/ds, 727^\circ\text{C}$) を求めた結果を図 7 に示す。冷却水温度 40°C 以上で A₁ 冷却速度が急激に落ちていて、特に温度 40°C と 50°C の間で顕著であり、温度 50°C 以上では冷却速度の変化は少ない。

断面硬さと A₁ 冷却速度の関係を表した結果を図 8 に示す。図 8 には先に求めた直径 30 mm の断面硬さと A₁ 冷却速度の関係⁽¹¹⁾も示してある。冷却水温度 50°C と 55°C の結果を除くと、本結果は先の結果と良く対応していると言える。冷却水温度 40°C と 45°C のわずか 5°C の差が、A₁ 冷却速度で約 70°C/s、断面硬さで 260 HmV の大きな差となり、冷却水温度 40°C が静止水中で十分な硬さを得る限界であることがわかる。実際に水中焼入れを行う場合、焼入れ部品を動かしたり水をかくはんしたりするので、静止水中より条件が良くなるので十分である。

5. 結 論

焼入れにおける冷却水温度の変化に着目し、種々の

図8 硬さと A₁冷却速度

温度に設定した静止水中に急速投入した場合の S45C 炭素鋼 (φ6-80 mm) の硬さおよび材料の過渡温度を測定し、硬さの変化の様子と相変態現象との関係について実験的に検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 表面および断面硬さとも冷却水温度 40°C 以下において十分な値を得た。
- (2) 冷却水温度が 40°C 以上になると不十分な硬さとなるのは、660°C 付近で Ar' 変態が十分に進んでしまうためである。
- (3) 本研究で得た冷却水温度が異なる場合の断面硬さは、先に求めた直径 30 mm の断面硬さと A₁ 冷却速度の関係と良く対応することがわかった。

文 献

- (1) 吉沢・黒木, 機誌, 64-513 (昭36), 1453.
- (2) 大内田・安藤, 機論, 34-258 (昭43), 199.
- (3) 佐々木, 機論, 34-266 (昭43), 1627.
- (4) 日本鉄鋼協会編, 鋼の熱処理, (昭49), 59, 丸善.
- (5) Bromley, L. A., *Chem. Eng. Prog.*, 46-5 (1950), 221.
- (6) 石谷・沖, 機論, 29-207 (昭38), 1801.
- (7) 西川・ほか3名, 機論, 38-308 (昭47), 848.
- (8) 西尾・上村, 熱処理, 23-5 (昭58), 260.
- (9) 蜂巣・ほか3名, 機論, 45-397, B (昭54), 1354.
- (10) 橘・塩谷, 機論, 38-309 (昭47), 1056.
- (11) 田島・ほか2名, 機論, 50-460, B (昭59), 3033.
- (12) 田島・ほか2名, 機論, 53-495, B (昭62), 3383.
- (13) 田島・ほか2名, 54-508, B (昭63), 3491.
- (14) 金属熱処理技術便覧編集委員会編, 金属熱処理技術便覧, (昭51), 1, 日刊工業.