鋼焼入れの伝熱現象の研究*
(第2報, 相変態を伴う冷却曲線の一考察)田島 守^{*1}, 牧 忠^{*1}, 片山 功蔵^{*2}Study of Heat Transfer Phenomena in Quenching of Steel
(2nd Report, an Analysis of Cooling Curves Accompanied
with Phase Transformation)

Mamoru TAJIMA, Tadasu MAKI, and Kozo KATAYAMA

The numerical analysis of unsteady heat conduction during quenching using the apparent heat capacity is taken up in this study. The temperature and the latent heat of phase transformation depend on the instantaneous cooling rate at point A_1 (727°C). The cooling curves accompanying the phase transformation were calculated using an iterative technique of implicit finite difference. These were calculated for two boundary condition cases: (1) the measured temperature of any radius ($R_1 \sim R_3$), and (2) the boiling curve. Agreement between the experimental and calculated results of case (1) is obtained. It was verified that the latent heat obtained by the previous work is useful for the numerical analysis of the quenching. The calculated cooling curves for case (2) agreed well with the experimental results.

Key Words: Latent Heat of Phase Transformation, Thermal Conduction, Cooling Curve, Apparent Heat Capacity, Quenching, Boiling Curve

1. 結 言

焼入れは鋼の相変態を利用して, かたさや他の機械的性質の向上をはかるために行う工業的にも重要な熱処理法の一つである。それゆえ相変態の起こるようすを正しく把握することが重要である。相変態を組み入れた熱伝導の解析は, Davis⁽¹⁾, 井上⁽²⁾⁻⁽⁵⁾, 竹内⁽⁶⁾によってなされている。しかしながら, これらの報告では相変態熱について検討されていないので, 先に著者らは相変態熱に関して報告をした⁽⁷⁾。すなわち相変態の影響が顕著に現れる円柱中心に着目し, 種々の直径の冷却曲線を測定し, これを解析した。その結果, 焼入れ冷却中の A_1 変態点をよぎる冷却速度 (以後 A_1 冷却速度と記す) を用いて, 相変態温度, 相変態熱およびかたさの相関を明らかにした。

本研究では, これらの結果を用いて相変態熱を熱容量に含める見掛けの熱容量⁽⁸⁾を使って非定常熱伝導の数値計算を行い, S 45 C 炭素鋼の代表的冷却曲線の実験結果と比較検討し, 前報で得た結果を検証する。さ

らに境界条件としてサブクールプール沸騰曲線を用いて計算を行い, 実験結果と比較して検討する。実験に使用した試験片の直径は $\phi 30 \text{ mm}$, 長さは 120 mm であり, 静止水中へ電気式駆動装置を使って試験片を垂直投入した。試験片の酸化を防ぐため電気炉加熱雰囲気として窒素ガスを用いた。また, 沸騰に影響を及ぼす冷却液中の溶存ガスを減らすため, 一度沸騰させた水道水を 20°C に設定して冷却液として用いた。

2. 解 析

2.1 基礎式の差分表示 表 1 に代表的な記号を, 図 1 に円柱座標要素を示す。解析の対象は円柱半径方

表 1 主要記号

A 面積	m^2	Δt 時間分割	s
$A_{r'}$ $A_{r''}$ 変態		T 温度	$^{\circ}\text{C}$
$A_{r''}$ $A_{r''}$ 変態		ΔT_{sat} 過熱度	K
c 比熱	$\text{J}/(\text{kgK})$	ΔT_{sub} サブクール温度差	K
L 相変態熱	J/kg	V_1 A_1 冷却速度	$^{\circ}\text{C}/s$
q 熱流束	W/m^2	V 体積	m^3
Q 熱流量	W	λ 熱伝導率	$\text{W}/(\text{mK})$
r 任意の半径	m	ρ 密度	kg/m^3
R 半径	m	ρc 熱容量	$\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$
Δr 空間分割幅	m	ρc^* みかけの熱容量	$\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$
t 時間	s		

* 昭和 62 年 7 月 14 日 東海支部三重地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 9 月 16 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)。

向一次元非定常熱伝導である。各要素の熱平衡を考え、空間については中心差分を、時間については後退差分を用いて表した基礎式が次式である。

$$T_n^{p-1} = -a_{nm} T_{n-1}^p + (1 + a_{nm} + a_{np}) T_n^p - a_{np} T_{n+1}^p \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで上式中の係数は次式で与えられる。

$$a_{nm} = \frac{A_{n-1} + A_n}{2} \frac{\lambda_{n-1} + \lambda_n}{2} \frac{1}{(\rho c^*)_n V_n} \frac{\Delta t}{\Delta r} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$a_{np} = \frac{A_n + A_{n+1}}{2} \frac{\lambda_n + \lambda_{n+1}}{2} \frac{1}{(\rho c^*)_n V_n} \frac{\Delta t}{\Delta r} \quad \dots\dots\dots (3)$$

中心では温度分布が対象であることから式(1)は次式で表される。

$$T_n^{p-1} = -2a_{nm} T_{n-1}^p + (1 + 2a_{nm}) T_n^p \quad \dots\dots\dots (4)$$

境界条件としては測定温度および沸騰曲線の二つを用いる。沸騰曲線を境界条件として用いる場合の表面温度は、次式で表される。

$$T_1^{p-1} = \left(1 + 2a_{1m} + \frac{2\Delta t q}{(\rho c^*)_1 \Delta r} \frac{1}{T_1^p} \right) T_1^p - 2a_{1m} T_1^p \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで上式中の係数は次式で与えられる。

$$a_{1m} = \frac{\lambda_1}{(\rho c^*)_1} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

2.2 熱物性と相変態熱 熱物性値に関しては、測定法の進歩に伴い信頼性の高いデータが蓄積されてきている。試験片 S 45 C 炭素鋼の成分に近い物性値 λ ,

図 1 円柱座標要素

図 2 熱伝導率

c の文献値^{(9)~(13)}を図 2, 3 に示す。これによると物性値 λ, c は測定者によってまた温度によってかなりの開きがあり、どの値を用いるかを決めるのが難しい。そこで、これらの物性値の代表例を数種作成し、数値計算を行い、初期温度を A_1 変態温度の下 (700°C) と上 (850°C) に保った場合の冷却曲線の実験結果とを比較した。この結果、本研究において λ, c は温度の一次関数とし図中の実線の値を用いることにする。密度 ρ は、冷却中膨張に伴う体積変化が小さいと考えて一定値を用いる。

相変態に伴って発生する潜熱は、熱容量に含める見掛けの熱容量 ρc^* を用いて処理する。著者らの行った前報の結果から相変態は、 A_1 冷却速度と相変態温度 (図 4) および相変態熱 (図 5) の関係として表される。 A_1 冷却速度が異なる場合の見掛けの熱容量の変化の

図 3 比熱

図 4 相変態温度と A_1 冷却速度

ようすを図6に示す。図4~6の記号(A)~(D)はそれぞれ対応している。見掛けの熱容量のモデル図6のうち、(A)は、 A_1 冷却速度が45°C/s以下の例で、斜線で示した部分が潜熱であり、パーライト変態のみで相変態熱は一定値である。この領域は A_1 冷却速度の増加に対して相変態温度がわずかに下がる程度であって、具体的には太い直径の試験片の焼入れに当てはまる。 A_1 冷却速度が45°C/sを超えると(B)、(C)に示したように2箇所で相変態が生じる。(B)の場合はトルースタイト変態熱が多くマルテンサイト変態熱が少ない。(C)の場合はトルースタイト変態熱がマルテンサイト変態熱より少なくなり、さらに潜熱の総量も(B)の場合より少ない。これらの領域は非常に複雑であり、本実験で用いた試験片の大きさ程度が当てはまる。(D)の場合は A_1 冷却速度が120°C/s以上の領域の場合であり、ほぼマルテンサイト変態のみとなり相変態熱は一定値である。すなわち、この領域は焼入れによって内部まで十分かたくなる細い直径の試験片に

当てはまる。以上の理由から、見掛けの熱容量は A_1 冷却速度によって変わり次の各式で表される。

パーライト変態

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + f_p(T) \quad \text{..... (7)}$$

分離変態

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + f_p(T) + f_m(T) \quad \text{..... (8)}$$

マルテンサイト変態

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + f_m(T) \quad \text{..... (9)}$$

ここで $\rho c(T)$ は熱容量のベースラインであり、 $f_p(T)$ [$f_m(T)$] は温度 $T_{p0}(T_{m0})$ を頂点とし、 $T_{p1}(T_{m1})$ と $T_{p2}(T_{m2})$ の各温度で囲まれた三角形で表される潜熱部分の温度 T における熱容量である。

2.3 水のサブクール過渡プールの沸騰曲線 鋼を静止水中へ焼入れすると、鋼表面と水の間では過渡沸騰熱伝達となる。沸騰熱伝達に関しては従来から数多くの研究がなされていて、文献(14)にその全般的特徴が詳しくまとめられている。焼入れの効果に最も重要である A_1 冷却速度は、727°Cの高い温度におけるものであり、この温度付近の伝熱は主に膜沸騰熱伝達であると考えられる。水についての定常膜沸騰熱伝達率は、伝熱面の材質、大きさ、姿勢およびサブクール(水の飽和温度と水温との差)などによってかなり影響を受けることが従来の研究によって明らかにされている^{(15)~(21)}。さらに定常と過渡プール沸騰との比較実験を行った Bergles⁽²²⁾らは両者に大きな差があることを報告している。通常鋼焼入れにおいて、冷却水はサブクール 60 K 以上 (40°C 以下の温度) で使われるため、サブクールの大きい値の沸騰曲線が必要であるが、これまでに得られている結果は少ない。サブクールの大きい過渡プール沸騰の水に関する研究は、蜂巢⁽²³⁾およ

図5 相変態熱と A_1 冷却速度

図6 見掛けの熱容量の変化

図7 水のサブクール過渡プール沸騰曲線

び西尾⁽²⁴⁾らによってなされていて、これらの沸騰曲線を図7に示す。核沸騰領域から最大熱流束点までの熱流束の値の差が特に大きく、また最大熱流束温度も違っている。両者の結果は試験片の大きさや姿勢などが異なるため直接比較はできないが、サブクールのみならず全体的にかなり異なっていて、この種の測定の難しさを示している。

2.4 計算方法 焼入れ冷却曲線を計算するためのフローチャートを図8に示す。初期条件は測定した温度分布を二次近似して用いる。境界条件は測定した温度変化をそのまま用いる場合と沸騰曲線を用いる場合の二とおりである。任意の時間ステップ $P-1$ の各要素の温度に対する物性値を計算し次の時間ステップ P の温度を後退差分式によって計算する。この求めた温度に対する物性値を再計算し、この値を用いて再び後退差分式によって温度を計算し直前の計算温度との差が $\varepsilon \geq |T_m^{P-1} - T_m^P|$ 以内に入るまで繰返し計算を行う。次に温度 T_m^P が 700°C を割ったとき、各要素の A_1 冷却速度を計算し、これをもとに相変態温度、相変態熱および各係数〔式(7)~(9)〕を求める。以後これらの結果を前に述べた方法に加えて繰返し計算を行い、収束したら次の時間ステップに進みこれを繰返す。予備計算によって計算結果が収束する分割数をチェックした結果、本解析では半径方向分割数を46、時間分割を0.1sとして計算を行った。

図8 計算のフローチャート

3. 結果および考察

3.1 測定温度を境界条件とする場合 鋼焼入れでは相変態に伴う発熱が必ず生じ、この発熱の仕方が冷却速度で変わるため、複雑な冷却曲線となる。図9(a)はS45C炭素鋼(φ30-120mm)を初期温度850°C冷却水温度20°Cの条件で焼入れした場合の5箇所の半径位置における冷却曲線の実験結果(点線)の一例である。図9(b)~(d)は、境界条件として図9(a)のR3~1の測定結果を用いた場合の計算結果(実線)と実験結果との比較を示したものである。図9(b)で計算と実験結果とが良好一致を示していることから、前報で提示した相変態熱についての考え方の正しいことおよび熱物性値の評価がほぼ妥当であることがわかる。図9(c)では約400~630°Cの温度範囲で計算結果が若干早い冷却となっている。図9(d)ではいずれの曲線とも実験結果と比較して計算結果のほうがかなり早く冷却している。このように境界条件として用いる測定値の場所が円柱内部から表面に近くなるほど実験と計算結果との差が大きくなってきている原因は、主に温度の測定方法によるものが大きいと考えられる。図9(a)の半径方向の温度分布の計算結果を図10に示す。当然のことながら表面に近いR1付近の

図9 冷却曲線(境界条件として測定温度を用いた場合)

図 10 半径方向温度分布

温度こう配が大きく、特に 400~600°C の範囲でそれが顕著であるのが明らかである。温度は、シース外径 $\phi 1.6$ の C-A 熱電対を等温面に沿うように挿入して測ったので、シース断面内でかなりの温度変化があり正確な測定ができていないものと考えられる。

3・2 沸騰曲線を境界条件とする場合 図 7 に示した西尾らによる沸騰曲線を境界条件として数値計算を行い、図 9 (a) の冷却曲線の実験結果と比較したのが図 11 である。これによると、いずれの位置の曲線とも初めの数 s 間はほぼ良いが、それ以後計算結果のほうがはやく冷却している。これは沸騰曲線のうち、遷移および核沸騰熱伝達の値が大きいためと考えられる。西尾らの沸騰曲線は、銀円柱 ($\phi 6-50$ mm) を水平に投入して得たものであり、本実験の冷却曲線は試験片 S 45 C 炭素鋼 ($\phi 30-120$ mm) を垂直投入して得たものであることから、試験片の姿勢および熱容量の大きさの違いから水側の熱的環境 (温度の影響する領域の広さ) が異なり、このような結果の差となったものと考えられる。さて図 9 (b) において固体内の熱伝導の計算と実験結果の比較により十分な精度の一致が得られているので、試行錯誤によって沸騰曲線を決定したのが図 7 の点線で示した曲線であり、これを境界条件として計算して求めた冷却曲線が図 12 である。位置 R 1 の 200~500°C の温度範囲で実験結果のほうが早く冷却しているのを除くと、位置 R 2~5 の結果はほぼ一致が得られ、また本論文に載せていない他の多数の結果も同じ傾向である。この結果から、本実験で扱った試験片ではサブクール 80 K (水温 20°C) の静止水へ垂直投入したが、実際はサブクール 70 K の沸騰曲線の値より小さい値をとることがわかる。今後水についてのサブクールの高い場合の沸騰曲線のデータの

図 11 冷却曲線 (境界条件として文献の沸騰曲線を用いた場合)

図 12 冷却曲線 (境界条件として沸騰曲線を用いた場合)

蓄積が強く望まれる。

4. 結 論

前報で求めた相変態熱を熱容量に含める見掛けの熱容量を使って非定常熱伝導の数値計算を行い、計算結果と S 45 C 炭素鋼の代表的冷却曲線の実験結果とを比較して以下の結果を得た。

(1) 測定温度を境界条件として計算を行い計算結果と実験結果とがほぼ良い一致をみたことから、前報で提示した相変態熱についての考え方の正しいことが明らかとなった。

(2) 沸騰曲線を境界条件として冷却曲線の計算を行い、実験結果と比較して満足のいく結果を得た。

(3) 鋼焼入れにおける A_1 冷却速度の幅広い領域にたいして、相変態熱を熱容量に含める本手法が良い精度で適用できることが明らかとなった。

文 献

- (1) Davis, W. B., *J. Iron Steel Inst.*, 210-6 (1972), 437.
- (2) 井上・ほか 2 名, 材料, 25-273 (昭 51), 521.

- (3) 上村・ほか2名, 材料, 27-303 (昭53), 1152.
- (4) 岸野・ほか2名, 材料, 28-312 (昭54), 861.
- (5) 門河・ほか2名, 材料, 29-327 (昭55), 1173.
- (6) 竹内・ほか2名, 機論, 48-429, A (昭57), 565.
- (7) 田島・ほか2名, 機論, 50-460, B (昭59), 3033.
- (8) 藤井, 伝熱工学の進展3, (昭49), 196, 養賢堂.
- (9) Touloukian, Y. S. ed., *Thermophysical Properties of Matter*, (1970-73), 1114, IFI/Plenum.
- (10) 日本金属学会編, 金属データブック, (昭49), 105, 丸善.
- (11) Kothandaraman, C. P. and Subramanyan, S., *Heat and Mass Transfer Data Book*, 3rd ed. (1977), 4, John Wiley & Sons.
- (12) 小林, 機誌, 81-714 (昭53), 452.
- (13) ASMed., *Metals Handbook*, 1, 9th ed. (1978), 147, ASM.
- (14) 沸騰熱伝達に関する調査研究分科会, 沸騰熱伝達, (昭40), 1, 日本機械学会.
- (15) Bromley, L. A., *Chem. Eng. Prog.*, 46-5 (1950), 221.
- (16) Tachibana, F. and Fukui, S., *Proc. 2nd IHTC*, (1961-8), 219.
- (17) 石谷・沖, 機論, 29-198 (昭38), 348.
- (18) 石谷・沖, 機論, 29-207 (昭38), 1801.
- (19) 西川・ほか3名, 機論, 32-237 (昭41), 762.
- (20) 西川・ほか3名, 機論, 38-308 (昭47), 848.
- (21) Jordan, D. P., *Adv. Heat Transf.*, 5, (1969), 55.
- (22) Bergles, A. E. and Thompson, W. G., Jr., *Int. J. Heat mass Transf.*, 13-1 (1970), 55.
- (23) 蜂巣・ほか3名, 機論, 45-397, B (昭54), 1354.
- (24) 西尾・上村, 熱処理, 23-5 (昭58), 260.

討 論

〔質問〕 井上達雄〔京都大学工学部〕

鋼の冷却とくに相変態を伴う焼入れ時の伝熱はむづかしい問題の一つであるが、有益な検討をされたことに敬伏する。

(1) 文献(1)~(6)においては相変態熱について検討されていないと諸言に述べておられるが、具体的にはどういうことを意味するのか。

(2) 図6および式(7)~(9)において、変態が始まる前と終了した後では ρc^* が単に温度のみの関数(すなわち、ベースライン)としておられるが、実際には図3からも明らかのように、組織変化が起こるためその値は変化すると考えられる。貴論文で採用されたこの仮定が具体的な計算結果にどのように影響するとお考えか。

(3) 図9(b)~(d)の実線は「それぞれ」R1, R2, R3の実験結果を用いたR5, R4...における計算結果と見受けられるが、例えば図9(b)でR3, R2に対する結果がないのはなぜか。

(4) 図9や図12のように実験結果を用いると精度良い解析結果が得られるのは明らかだが、実用的には大変な作業である。工学的な立場からこれをどのように考えたらいとお考えか。

(5) シース熱電対の先端と鋼の接合はどのように

されたか。

〔回答〕 (1) 相変態熱そのものについて測定検討されていないということである。

(2) ご指摘のように組織変化に伴い物性値も変わると考えられる。定常状態で測定された物性値が、急激な過渡現象にどの程度対応するのかも未知である。そこで本文でも述べているように、鋼の初期温度を A_1 変態前後の温度にした場合の冷却曲線を測定し、図9に示した手法を用いて計算し(この場合潜熱を含まないベースラインのみについて)、実験結果と比較して物性値を決定した。鋼焼入れ程度の初期温度では、組織変化に伴う熱物性変化による冷却曲線への影響は、小さい結果を得ているが、さらに詳しく調べて明らかにしたいと思っている。

(3) 図9(b)はR3, 図9(c)はR2, 図9(d)はR1の温度をそれぞれ境界条件とした計算結果である。このため図9(b)には、R3, R2に対する結果は入っていない。

(4) 非定常熱伝導のハイスラー線図のようなものを、鋼焼入れについて作成すれば、より实际的であり、実用的に便利であると考えている。

(5) C-A シース熱電対の先端と鋼の接合は、銀ろうで固定してある。