焼入れ冷却中に現れる相変態熱と鋼の炭素量*

田島 守^{*1}, 牧 忠^{*1}, 片山 功蔵^{*2}

Relation between Carbon Content and Generated Latent Heat of Phase Transformation of Steel during Quenching

Mamoru TAJIMA, Tadasu MAKI, and Kozo KATAYAMA

An experimental and numerical investigation of the generated latent heat of phase transformation to several carbon contents of steel during quenching was performed. The problem of unsteady heat conduction accompanying the phase transformation was solved by using the apparent heat capacity method. The experimental and calculated cooling curves to several carbon contents of steel when the initial temperature was 700°C and the values of thermophysical properties of S 45 C carbon steel agreed well. The thermophysical properties of S 45 C carbon steel applied widely to the carbon content of steel below 1 percent. Experimental results of the temperature and the latent heat of phase transformation of S 55 C and SK 5 carbon steels could be explained by using the cooling rate at the temperature of A_1 transformation. The phase transformation of several carbon contents of steel was expressed only the carbon percent. The cooling curves calculated using these expressions for the initial temperature of 850°C agreed well with the experimental results.

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

1. 緒 言

本研究は、鋼に含まれる炭素量が焼入れ冷却中の相変態現象にどのように影響しているかを検討したものである。

鋼には、加熱あるいは冷却の際、体心立方晶系から面心立方晶系への、またその逆の同素変態があり、このため収縮あるいは膨張が起こる。熱処理は、この相変態を巧みに利用して、使用目的にかなった性質を得る加工であり、古くから行われている。熱処理の中で、特に急冷却を必要とする鋼焼入れは、複雑な相変態挙動を示す興味ある加工の一つである。この相変態に関する研究は数多くなされているが^{(1)~(8)}、焼入れ冷却中のような過渡状態における鋼の相変態熱そのものについての研究は今までになされていない。そこで著者らは、相変態を伴う焼入れ冷却中の過渡温度(冷却曲線)を数値伝熱解析のみによって予測できるようにする目的で、焼入れの代表的材料 S 45 C 炭素鋼について相変態熱を測定し⁽⁹⁾、水焼入れ冷却曲線の実験および数

値解析結果とを比較検討し⁽¹⁰⁾、さらに冷却曲線を計算するための境界条件として沸騰曲線における円柱直径の影響を検討してきた⁽¹¹⁾。

鋼に含まれる炭素量の違いが、焼入れ冷却曲線のどのような過渡現象において、どのような相変態挙動を示すかを知ることが興味あることであり、今までに系統的に調べられた例は少なく⁽⁸⁾、相変態熱についての情報も少ない。そこで本研究では、鋼の炭素量の違う材料(S 45 C, S 55 C, SK 5)の冷却曲線を測定し、先に検討した S 45 C 炭素鋼の相変態温度、相変態熱および物性値の評価⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が、S 45 C 以外の鋼の焼入れ冷却曲線にどの程度適用できるかを検討する。さらに S 55 C および SK 5 の相変態温度および相変態熱を、先の方法⁽⁹⁾にならって測定し、焼入れの際の過渡温度の数値解析結果と実験結果とを比較検討し、相変態温度と相変態熱を C [%] のみで統一的に表すことを試みる。

主 要 記 号

A : 面積 m^2

Ar' : Ar' 変態

Ar'' : Ar'' 変態

c : 比熱 $J/(kg \cdot K)$

D : 直径 mm

* 昭和 63 年 11 月 11 日 北陸信越支部北陸地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 11 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)。

L : 相変態熱 J/kg
 r : 任意の半径 m
 Δr : 空間分割幅 m
 t : 時間 s
 Δt : 時間分割 s
 T : 温度 $^{\circ}\text{C}$
 V_1 : A_1 冷却速度 $^{\circ}\text{C/s}$
 V : 体積 m^3
 λ : 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 ρ : 密度 kg/m^3
 ρc : 熱容量 $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
 ρc^* : 見掛けの熱容量 $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

2. 実験装置および試験片

実験装置 (図 1) は, 電気炉 (2 kW), 加熱雰囲気系, 水槽 (0.036 m^3), 温度測定系より構成されている。電気炉は, PID コントローラにより所定の温度に制御される。電気炉加熱雰囲気の窒素ガスは, 一定量連続的に注入されている。水槽の水は, 溶け込んでいるガスを一度沸騰させることにより取り除き, 沸騰に及ぼす溶存ガスの影響を極力減らしている。

試験片の化学成分を表 1 に示す。試験片の形状は, 焼入れ冷却中, 中央断面で半径方向一次元が比較的簡単に得られやすい円柱とする。試験片の寸法および温度測定位置を図 2 に示す。温度測定点は, 直径に応じて 3 点から 5 点とし, 中心から外に向かって R1, R2, …の記号を用いる。試験片の温度を測るため, また測

表 1 成分分析 (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S45C	0.44	0.22	0.70	0.014	0.015	0.16	0.08	0.08
S55C	0.55	0.23	0.70	0.012	0.016	0.12	0.05	0.08
SK5	0.96	0.23	0.66	0.020	0.048

図 1 実験装置

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 ($\phi 1.1$ mm) によって穴をあける。この穴に C-A シース熱電対 (シース外径 1.0 mm, 素線径 0.2 mm, 時定数 47 ms) を挿入し, 温接点を銀ろうで固定して温度を測定する。使用する熱電対は鈍金属の凝固点と比較して検定する。

実験手順は, まず窒素ガスを電気炉内に連続的に流して加熱雰囲気を造る。同時に水槽の液体の温度も 20°C に設定しておく。熱電対を取付けた円柱試験片は, 垂直状態のままこの電気炉内で一定時間加熱保持される。加熱された試験片は, S45C の場合静止水中へ, S55C および SK5 の場合かくはん水中へ垂直に急速投入される。この際円柱試験片の過渡温度は, C-A シース熱電対によって, A-D コンバータ (12 bit, 8 μs あるいは 14 bit, 20 μs) を介してパーソナルコンピュータに記録される。円柱中央断面の温度測定位置は, 測定終了後切断し, ダイヤル式ハイトゲージを用いて正確に測定する。この精度は非定常熱伝導のフーリエ数 ($F = at/R^2$) の形から要求されるためである。

3. 冷却曲線の数値解析

冷却曲線の解析の対象は, 円柱半径方向一次元非定常熱伝導である。水焼入れのような熱伝導の数値解析を行う場合, 鋼の物性 (ρ, c, λ), 相変態温度と相変態熱, 固体の過渡温度あるいは熱伝達率が熱流束 (固体表面の温度の関数として表現) などの情報が必要である。数値解析では, 半径 R を $(m-1)$ 等分し (図 3),

	$D\phi - L_e$ (mm)
S45C	30-120, 24-120, 20-120, 16-120
S55C	30-120, 25-100, 20-100, 16-100
SK5	30-120, 24-100, 20-100, 16-100

図 2 試験片の寸法

図 3 円柱座標要素

表面と中心要素は内部要素の半分とし、これらの要素の中心点は表面と中心にとる。基礎式は、空間について中心差分を、時間について後退差分を用いる。

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

ここで上式中の係数は次式で与えられる。伝熱面積および熱伝導率は隣り合う要素の平均値を用いる。

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

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

見掛けの熱容量 ρc^* は次式で与えられ、その変化の様子を図4に示す。

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + f_p(T) + f_m(T) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで $\rho c(T)$ は材料の熱容量、 $f_p(T)$ 、 $f_m(T)$ は A_r' 変態および A_r'' 変態に伴う潜熱部分の熱容量である。

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。

$$T_n^{p-1} = -2a_{nm}T_{n-1}^p + (1+2a_{nm})T_n^p \quad \dots\dots\dots(5)$$

数値解析の境界条件としては測定した R5 (あるいは R4, R3, R2) の過渡温度を用い、R1 なり R2 の温度を計算により求め、実測値と比べる。式(1)、(5)を分割数に応じた多元連立方程式に組み立て、マトリックス表示をし、逆変換して解を得ることができる。数値解析の方法および S45C の相変態温度、相変態熱と A_1 冷却速度との関係は、前報⁽¹⁰⁾に示してある。本解析では半径方向分割数は直径に応じて20から46、時間分割を0.01sから0.1sとして計算を行った。S45C 炭素鋼の物性値は、以下に示した式によって与えた。

密度: $\rho = 7830 \quad [\text{kg/m}^3]$

図4 見掛けの熱容量の変化の様子

熱伝導率: $\lambda = 41.5 - 0.017 \cdot T \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

比熱: $c = 450 + 0.367 \cdot T \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

4. 実験結果および考察

鋼に含まれる炭素量が異なる場合の冷却曲線を数値伝熱解析のみによって予測できるようにするため、まず、これまでに得られた S45C 炭素鋼の結果がどの程度拡張して利用できるかを検討する。円柱試験片内部の過渡温度の測定値を境界条件として、それより内部について数値解析を行えば精度良い結果が得られることを先に明らかにしているの、ここでもこの手法を用いる。

初期温度 700°C、冷却水温度 20°C の条件で得られた、炭素量が異なる場合における直径 30 mm の冷却曲線の実験結果(点線)と S45C 炭素鋼の物性値を用いて数値解析した結果(実線)との比較を図5に示す。S55C および SK5 の両者とも S45C と同様に、いずれの位置でも実験および計算結果との良い一致が得られていることがわかる。この結果から、鋼に含まれる炭素量約1%近くまで S45C の物性値(c, ρ, λ)を適用できることが明らかとなった。

次に、初期温度 850°C、冷却水温度 20°C の条件で得られた、炭素量が異なる場合の種々の直径に対する冷

図5 初期温度 700°C の冷却曲線 [S45C の物性値を使用、境界条件測定温度 (R5 あるいは R3)]

却曲線の実験結果と S 45 C 炭素鋼の物性値, 相変態温度および相変態熱を用いて数値解析した結果との比較を図 6 に示す。S 45 C の場合, 数値解析結果と実験結果との一致は当然のことであるが良好である。S 55 C の場合, 直径 30, 25 mm および 20 mm の Ar' 変態部分で計算結果のほうが少し冷却が早い。直径 16 mm の Ar' 変態温度領域は計算結果と比較して S 55 C の実験結果のほうが低い。SK 5 の実験の冷却曲線の場合, 直径 30 mm および 25 mm の Ar' 変態が時間の経過とともに相変態温度が上昇する部分がある。この現象は, 相変態に伴う発熱が熱伝導によって外部へ伝わる熱量より多い場合に起こる。実験と計算結果とを比較すると, S 55 C での比較とほぼ同じ結果であるが, 相変態部分の違いはさらに大きい。

これらの比較検討より, S 45 C の相変態温度と相変態熱を, 炭素量が異なる材料にそのまま適用するには無理があることがわかる。そこで前報⁽⁹⁾の相変態熱の測定方法に従い, S 55 C および SK 5 の種々の直径の中心部分の冷却曲線を多数測定し, 相変態温度および相変態熱を A_1 冷却速度で整理した結果を図 7 (相変態温度) および図 8 (相変態熱) に示す。

相変態温度についてみると, Ar' 変態領域は S 55 C も SK 5 も A_1 冷却速度が増加するとほぼ同じ程度で

図 6 初期温度 850°C の冷却曲線 (S 45 C の物性値, 相変態温度および相変態熱を使用, 境界条件測定温度)

下がり、S 45 C の結果ともほぼ同じである。Ar' 変態領域は S 55 C の場合 280°C 付近、SK 5 の場合 200°C 付近で A_1 冷却速度に無関係に一定であり、炭素量が増すと Ar' 変態温度は下がっている。Ar' 変態温度の冷却速度の上限は、S 55 C の場合 140°C/s、SK 5 の場合 130°C/s である。Ar' 変態温度の冷却速度の下限は、S 55 C の場合 60°C/s、SK 5 の場合 90°C/s である。

相変態熱は、データの収束が悪いが、鋼の炭素量の増加に比例して全体量も多くなっている。

これまでに得られた S 45 C、S 55 C および SK 5 の相変態温度と相変態熱の測定結果を使って、C [%] のみの関数として統一的に表すことを試みる。このため関数系には測定結果と若干異なる部分も一部生じる。

鋼の炭素量 (C [%])

$$C_{pct} \dots\dots\dots (6)$$

Ar' 変態下限 A_1 冷却速度

$$V_{\min} = 11.8 + 34.25 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right) \dots\dots\dots (7)$$

Ar' 変態上限 A_1 冷却速度

$$V_{\max} = 100.5 + 19.8 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Ar' 変態温度域

$$\left. \begin{aligned} T_{hh} &= 700 - 0.72 V_1 \\ T_{hc} &= 678 - 1.09 V_1 \\ T_{hl} &= 650 - 1.25 V_1 \end{aligned} \right\} (V_1 < V_{\max}) \dots\dots\dots (9)$$

Ar' 変態温度域

$$\left. \begin{aligned} T_{lh} &= 514 - 136.7 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right) \\ T_{lc} &= 402 - 100.8 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right) \end{aligned} \right\} (V_1 > V_{\min}) \dots\dots\dots (10)$$

$$T_u = 312 - 80.9 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right)$$

Ar' および Ar' 変態熱量

図 7 相変態温度と A_1 冷却速度
(S 55 C および SK 5)

図 8 相変態熱と A_1 冷却速度
(S 55 C および SK 5)

図 9 初期温度 850°C の冷却曲線 (S 45 C の物性値, 相変態温度および相変態熱を C [%] の関数, 境界条件測定温度)

$$L_{r'} = 68\,150 + 41\,100 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right) \quad (V_i < V_{min}) \cdots (11)$$

$$L_{r''} = 25\,910 + 5\,040 \left(\frac{C_{pct}}{0.45} \right) \quad (V_i > V_{max}) \cdots (12)$$

$Ar' + Ar''$, Ar' および Ar'' 変態熱量

$$\left. \begin{aligned} L_u &= \frac{L_{r'} V_{max} - L_{r''} V_{min}}{V_{max} - V_{min}} + \frac{L_{r''} - L_{r'}}{V_{max} - V_{min}} V_i \\ L_{r''} &= -\frac{L_{r''} V_{min}}{V_{max} - V_{min}} + \frac{L_{r''}}{V_{max} - V_{min}} V_i \\ L_{r'} &= L_u - L_{r''} \end{aligned} \right\}$$

$$(V_{min} < V_i < V_{max}) \cdots (13)$$

これらの式によって相変態熱を計算した結果は, 図 7 および図 8 の中に種々の線を使って書き込んである。

図 9 は, S 55 C および SK 5 の冷却曲線の実験結果と C [%] のみの関数として表した式を使って計算した結果とを比較したものである。S 55 C の場合, 先の図 6 の結果と比較すると, すべてにかなり良く改善されているのがわかる。また, SK 5 の場合, 実験結果には時間の経過とともに Ar' 変態温度が上昇する部分があるが, 本計算の手法上その部分の表現はできない。そのため Ar' 変態部分の計算結果は, 実験結果と比べると相変態時間が少し長くなっているが, 先の結果より十分良くなっていることは明らかである。この相変態温度が上昇する部分の計算手法の確立は今後の

課題でもある。炭素量の異なる鋼の相変態温度と相変態熱を, C [%] のみの関数として統一的に表すことを試み, 焼入れ冷却曲線の実験と計算結果との比較検討により良好な結果を得た。

5. 結 論

炭素量の異なる鋼の相変態現象を明らかにする目的で, 試験片として S 45 C, S 55 C および SK 5 の円柱を垂直に冷却水に浸漬冷却した場合の冷却曲線を測定し, 先に求めた S 45 C の相変態熱の結果と比較しつつこれを解析して以下に示す結果を得た。

(1) 焼入れ冷却曲線を数値解析する際, 鋼に含まれる炭素量約 1 % 近くまで S 45 C の物性値 (c, ρ, λ) を適用できることが明らかとなった。

(2) S 55 C および SK 5 の相変態温度および相変態熱を測定し A_1 冷却速度で整理した。

(3) 炭素量の異なる鋼の相変態温度と相変態熱を, C [%] のみの関数として統一的に表すことを試み, これを用いた計算結果と焼入れ冷却曲線の実験結果との比較検討を行い良い一致を得た。

本研究を行うにあたり, 実験には昭和 62 年度神奈川大学工学部卒業研究として桜井良勝, 山名弘泰, 大沢晃一, 松本賢市の諸氏の協力があった。記して謝意

を表する。

なお、本報校閲に際し関係者より貴重なご助言をいただいた。記して謝意を表する次第である。

文 献

- (1) Davis, W. B., *J. Iron Steel Inst.*, **210**-6 (1972), 43.
- (2) 井上・ほか2名, 材料, **25**-273 (昭51), 521.

- (3) 利岡, 鉄と鋼, **62**-13 (昭51), 1756.
- (4) 上村・ほか2名, 材料, **27**-303 (昭53), 1152.
- (5) 岸野・ほか2名, 材料, **28**-312 (昭54), 861.
- (6) 門河・ほか2名, 材料, **29**-327 (昭55), 1173.
- (7) 大塚・ほか2名, 鉄と鋼, **73**-1 (昭62), 144.
- (8) 谷口・ほか3名, 鉄と鋼, **74**-2 (昭63), 318.
- (9) 田島・ほか2名, 機論, **50**-460, B (昭59), 3033.
- (10) 田島・ほか2名, 機論, **53**-495, B (昭62), 3383.
- (11) 田島・ほか2名, 機論, **54**-508, B (昭63), 3491.

討 論

〔質問〕 根本 栄 治

〔茨城工業高等専門学校〕

鋼焼入れの冷却中に出現する相変態熱の炭素量の相違による冷却曲線への影響を明快に解析されたことに敬意を表する。

(1) S 55 C, および SK 5 の実験結果に, S 45 C の炭素鋼の密度, 熱伝導率, 比熱の物性値を用いて解析され, 良い一致が得られるとの結論を示されているが, このことは, 炭素の含有量による物性値の温度依存性に同一の傾向があることを示しているものと思われるが, いかがか。また, この点について S 55 C, SK 5 の物性値との比較検討が必要と思われるが, いかがか。

(2) 式(7)~(12)で, 鋼の炭素量 (C [%]) で, 冷却速度, Ar' 変態温度域などを整理されているが, この式の導出の根拠と, 妥当性についてお伺いしたい。

〔回答〕 (1) 鋼焼入れ冷却曲線の実験結果と数値解析結果の比較より, この程度の炭素量の違いでは, 物性値の差が小さいと判断した。しかし, 厳密には, 鋼の炭素含有量によって物性値は変化する。鋼の炭素含有量によって, 物性値の温度依存性に同一傾向があるとのこと指摘については, 著者らも同じ考えである。これらの鋼の物性値の比較検討は重要であり, 今後物性値の集積を熱物性測定者に期待したい。

(2) 本文でも述べているように, 鋼の相変態を伴う焼入れ冷却曲線を数値解析のみによって予測できるようにするため, S 45 C, S 55 C, SK 5 の相変態温度および相変態熱と A_1 冷却速度とのそれぞれの測定結果をもとに, 炭素量のみの関数として簡単に表すことを試みた。その妥当性については, 図 6 および図 9 に示したとおりである。