

論文

鋼材の冷却に伴う変態と熱移動

谷口尚司*・村上俊之*²・渡辺 敦*³・菊池 淳*

Phase Transformation and Heat Transfer during Cooling of Steel

Shoji TANIGUCHI, Toshiyuki MURAKAMI, Atsushi WATANABE and Atsushi KIKUCHI

Synopsis :

Studies on the cooling of a carbon-steel disk were made to discuss the heat transfer accompanied with phase transformation.

Hypereutectoid steel, eutectoid steel and hypoeutectoid steel were used as the disk. Its diameter and height are both 30 mm. The disk was cooled from the bottom by a jet of water or nitrogen gas, after it was heated inductively up to about 1 200 K. Heat-transfer coefficients which are necessary for the analysis of heat transfer in the system, were obtained by analysing the cooling curve of a copper disk, under the assumption of one dimensional heat conduction in the disk. These values of heat-transfer coefficients could be successfully used for the prediction of cooling curves of stainless steel disk.

In the case of carbon steels, the heat generation by phase transformation was accounted in the one-dimensional heat conduction equation. The fractions of various phases such as austenite, martensite, bainite, ferrite and pearlite were estimated by the use of the continuous cooling transformation diagram (CCT diagram). Calculated cooling curves in carbon steels by the present model were in good agreement with the observed ones.

Key words : cooling ; carbon steel ; heat transfer ; phase transformation ; CCT diagram.

1. 緒 言

流体による鋼材の冷却は連続鋳造工程や熱間圧延工程などで広く行われている重要な操作である。この冷却に関する研究は従来より固体-流体間の伝熱の観点から多く行われ、操業解析や設計に必要な伝熱係数のデータが蓄積されつつある¹⁾。著者らも対流伝熱域における固体-流体間伝熱現象を解析し²⁾³⁾、また伝熱係数の理論値も示した⁴⁾。

一方、鋼材の組織や材質などの金属学的側面においても冷却は重要な役割を果たしている。たとえば近年の制御冷却にみられるように、冷却を制御することによって圧延後の鋼材の組織を改善する試みが為されている。この場合には、冷却と鋼材内相変化の現象を同時に考慮して解析する必要がある。この種の研究はこれまで主に冷却後の変形や応力の予測を目的として井上ら^{5)~7)}、吉田ら^{8)~10)}、利岡¹¹⁾¹²⁾および HILDENWALL ら¹³⁾によって行われている。しかし、これらの研究の多くは実操業条件における鋼材の冷却現象の解析を目的とした応用的研究で

あり、基礎的立場からの実験的、理論的研究は少ない。また、冷却条件や鋼材の種類を積極的に変化させた研究も少ない。

本報では炭素鋼の冷却に伴う相変化の現象を実験的、理論的に検討することを目的とした。炭素鋼には炭素濃度 0.10~1.08%の広い濃度範囲の鋼種を選び、それぞれ噴流水および噴流ガスによる冷却を行つた場合の固相内伝熱と相変化の現象を考察した。

2. 実験および実験結果

2-1 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置の概要を示した。

試料①は直径 30 mm、長さ 30 mm の円柱で、表面にクロムめつき(硬質、厚さ約 20 μ m)を施した。試料には冷却面から軸方向にそれぞれ 3, 6, 9 および 20 mm の各位置に側面から二つの穴(直径 1.5 mm、深さ 12 mm)をあけ、それぞれの穴の先端にクロメル・アルメル熱電対(直径 0.3 mm)の各素線を点溶接した。試料には変態を伴わない場合として銅および 18-8 ステン

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 2 月 19 日受付 (Received Feb. 19, 1987)

* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)

*² 東北大学大学院 (現: トーア・スチール(株)) (Graduate School, Tohoku University, Now Toa Steel Co., Ltd.)

*³ 東北大学大学院 (現: 日本鋼管(株)) (Graduate School, Tohoku University, Now Nippon Kokan K. K.)

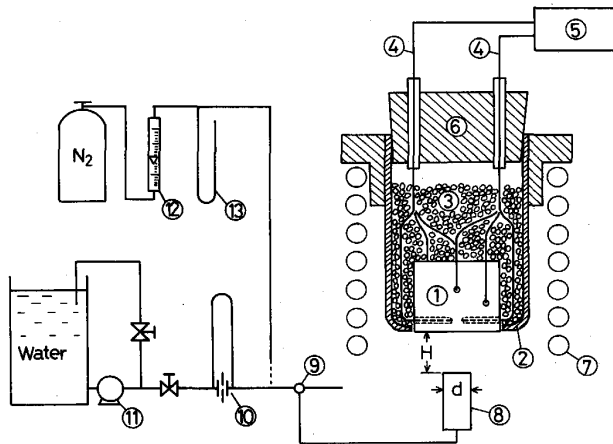
Table 1. Chemical compositions of specimens.

JIS code	C%	Si%	Mn%	P%	S%
S10C	0.10	0.22	0.41	0.014	0.006
S45C	0.45	0.25	0.75	0.03	0.035
SK5	0.82	0.25	0.38	0.013	0.025
SK3	1.08	0.23	0.39	0.009	0.023

Table 2. Experimental conditions.

Coolant	Steel	T_a (K)	T_0 (K)	d (m)	H (m)	$V(10^{-3}m^3s^{-1})$
Water	S10C	1 193	1 193	0.012	0.02	0.187
	S45C	1 153	1 073			
	SK5	1 133	1 073			
	SK3	1 133	1 063			
Nitrogen	S10C	1 233	1 233	0.005	0.04	0.683
	S45C	1 153	1 083			
	SK5	1 133	1 113			
	SK3	1 133	1 073			

T_a =Austenitizing temperature
 T_0 =Initial temperature of cooling
 d =Inside diameter of nozzle, H =Distance from nozzle to the surface of steel, V =Flow rate of coolant



① Specimen ② Silica tube ③ Alumina bubble ④ Thermo-couple (CA) ⑤ Oscillograph ⑥ Rubber stopper ⑦ Induction-heating coil ⑧ Glass nozzle ⑨ Valve ⑩ Orifice-flow meter ⑪ Pump ⑫ Rotameter ⑬ Manometer

Fig. 1. Experimental apparatus.

レス鋼 (SUS 304) を、また変態を伴う場合として Table 1 に示す 4 種の炭素鋼を使用した。試料を石英管②内に装入し、周囲に中空アルミナ球③を充填し、それを高周波加熱コイル⑦内に設置した。高周波発振器は周波数 480 kHz, 出力 20 kW のものである。ガラス製ノズル⑧は試料の冷却面の直下に垂直に設置し、ノズルから噴射する冷媒が冷却面の中心に衝突するようにした。冷媒には水道水 (約 15°C) および窒素 (約 20°C) を用いた。

実験はつぎのように行つた。

試料を高周波加熱により所定温度 (T_a) まで昇温し、その温度で 30 min 保持する。その間、試料の冷却面をアルミナウールで保温する。また冷媒は切替弁⑨によりバイパスに流しておき、その流量をオリフィス流量計⑩またはロータメーター⑫で測定する。所定時間後高周波電源を切り、冷却面のアルミナウールを除去する。試料が冷却開始温度 (T_0) まで降温後、弁を切り替え、冷媒を冷却面に噴射して冷却を開始した。実験中、熱電対の起電力を電磁オシログラフ⑤で記録した。冷却後、炭素鋼試料を軸を含む平面で切断し、顕微鏡により組織を観察した。また一部の試料はピッカース硬度計により断面の硬さ試験を行つた。

実験条件を Table 2 に示した。冷却前の保持温度 T_a

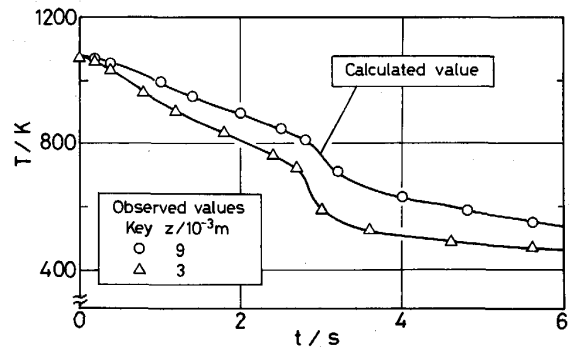


Fig. 2. Cooling curves of copper cooled by water.

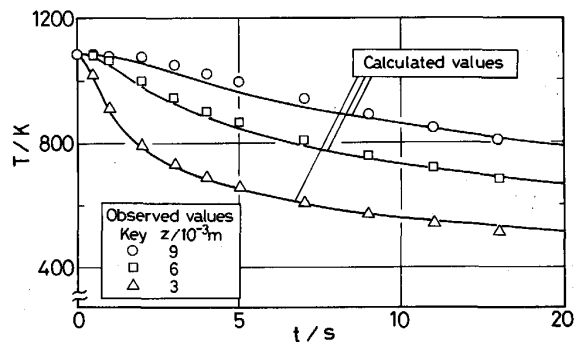


Fig. 3. Cooling curves of stainless steel cooled by water.

(炭素鋼の場合はオーステナイト化温度) および冷却開始温度 T_0 は後述の伝熱モデルで使用する CCT 図の条件とほぼ同一になるようにした。なお、銅およびステンレス鋼の場合は、水冷却では $T_a = T_0 = 1 073 K$ †, 窒素冷却では $T_a = T_0 = 1 093 \sim 1 173 K$ とし、他の条件は Table 2 と同様にした。

2.2 冷却曲線

Fig. 2 および 3 に銅およびステンレス鋼を水冷却した場合の冷却曲線の実測値を示した。銅の場合 (Fig. 2) には $t=3 s$ 付近で冷却速度が速くなっているが、ほぼその時間に冷却面上の蒸気膜が破れることによつて発生したと思われる音が聞かれた。ステンレス鋼の場合には

† 銅について $T_a = T_0 = 573 K$ でも一部実験を行つている (Fig. 8)。

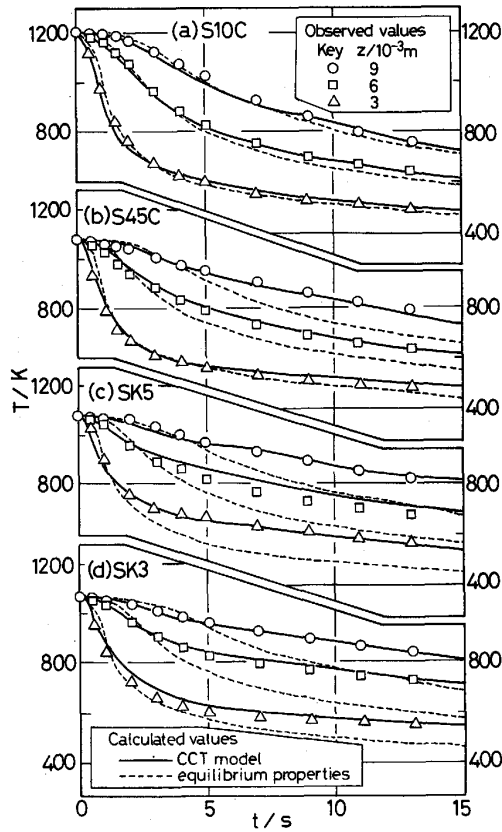


Fig. 4. Cooling curves of various carbon steels cooled by water.

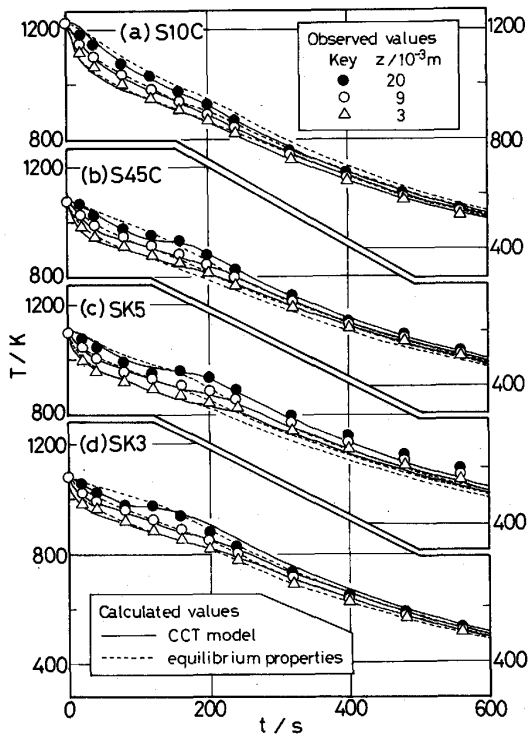


Fig. 5. Cooling curves of various carbon steels cooled by nitrogen.

その音は水冷却開始直後に聞かれた。

Fig. 4 および 5 には各種の炭素鋼について得た冷却曲線の実測値を示した。図より炭素濃度の低い鋼種ほど速く冷却する傾向がみとめられる。また窒素冷却の場合 (Fig. 5) の z (冷却面からの距離) = 20 mm の冷却曲線に変態熱発生に伴う冷却速度の停滞がみられる。

2.3 顕微鏡組織および硬さ試験

水冷却後の炭素鋼の顕微鏡組織写真を Photo. 1 に示した。またビッカース硬度計により得た硬さ分布を S10C と SK5 について Fig. 6 に示した。

写真より、冷却面からの距離 z によつて金属組織が変化していく様子がわかる。硬さ分布 (Fig. 6) と組織

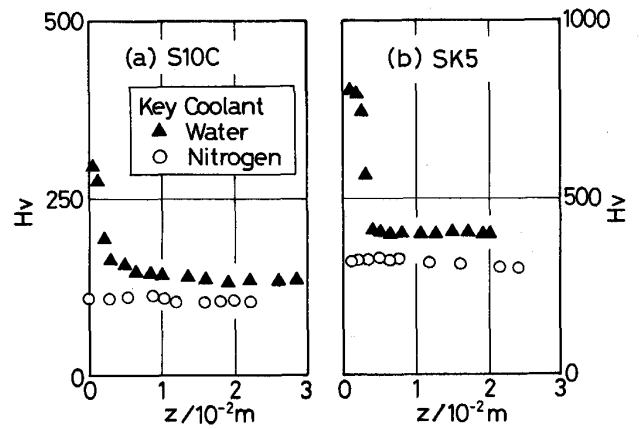


Fig. 6. Distributions of the Vicker's hardness after cooling.

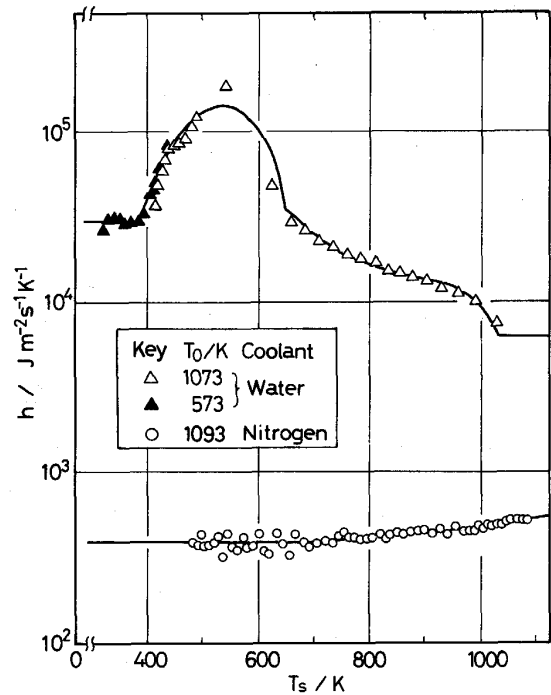
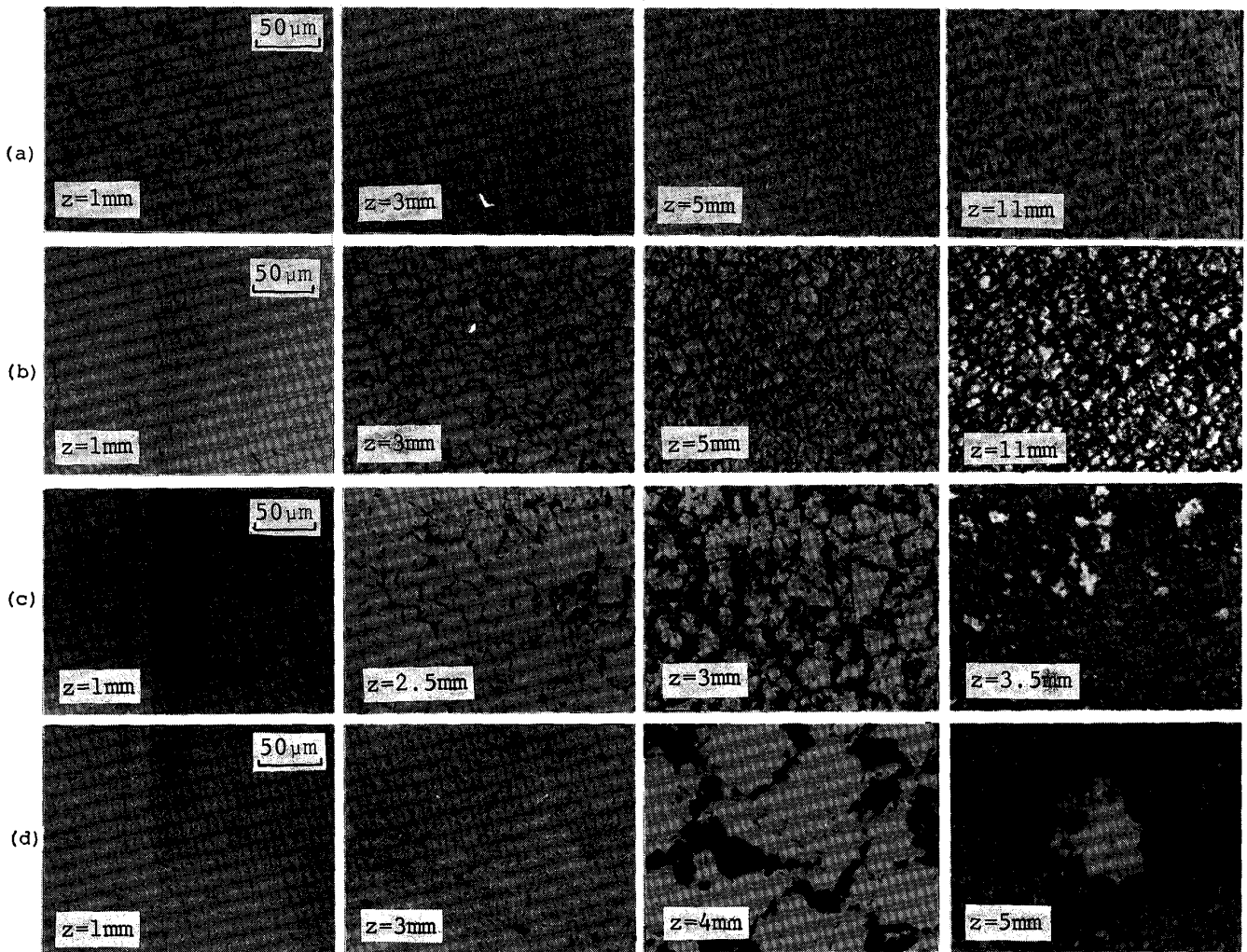


Fig. 7. Relation between heat-transfer coefficient and surface temperature.



(a) S10C (b) S45C (c) SK5 (d) SK3

Photo. 1. Optical micrographs of water-cooled carbon steels.

写真とを対比すると、水冷却の場合冷却面近傍には硬いマルテンサイトが生成しており、 z の増加につれてフェライトやパーライトの組織率が増加していることがわかる。

3. 伝熱係数の算出

鋼材の冷却現象を解析するためには、固体-流体間の伝熱係数 h を求める必要がある。本報では銅試料の冷却曲線から以下のようにして h を算出した。

試料内の熱移動を軸 (z) 方向に次元と仮定すると、変態による発熱がない場合の熱伝導の式は(1)式であらわされ、初期および境界条件は(2)式で与えられる。なお、式中の記号の意味は論文末尾に一括して示した。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (1)$$

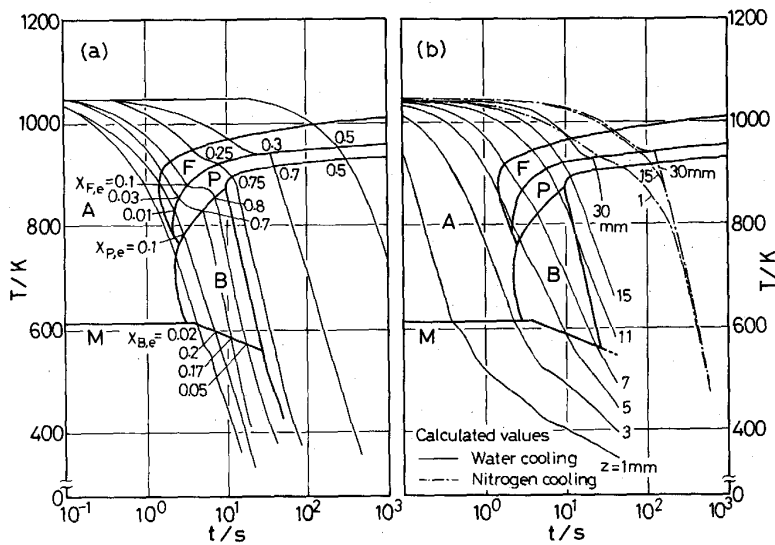
$$\left. \begin{aligned} t = 0, 0 < z < z_0 : T = T_0 \\ t > 0, z = 0 : \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$z = z_0 : \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \Bigg|$$

(1), (2)式を差分化し、適当な h を仮定して Explicit 法により解いた。その際、冷却面から 3 mm の位置の冷却曲線の実測値を 5~20 K の温度区間に区分し、各温度区間ごとに一定の h を仮定して温度の実測値と計算値とが一致するような h を試行錯誤法¹⁴⁾により決定した。銅の物性値 ρ , C_p および λ は文献¹⁵⁾を参照し、温度の関数として計算に使用した。

このようにして h を求めた時に同時に求められた冷却面より 9 mm 位置の冷却曲線の計算値を Fig. 2 に示したが、実測値とよく一致している。

Fig. 7 に伝熱係数 h と冷却面温度 T_s との関係を示した。水冷却の場合の h と T_s との関係には沸騰現象による極大値が存在する。また窒素冷却の場合の h は、 $T_s < 700$ K ではほぼ一定で、 $T_s > 700$ K になると T_s とともに除々に大きくなる傾向を示している。本報では図



(a) Published CCT diagram
(b) Calculated cooling curves

Fig. 8. Continuous cooling transformation diagram of a hypoeutectoid carbon steel (S45C).

中に示した実線の h を以後の計算に使用した。なお、水冷却の場合、冷却初期の高温領域 (T_s が約 1000 K 以上) で h の計算値に大きなばらつきを生じた。本報ではこの温度域の h を図のように一定と仮定した。

Fig. 7 の鋼の h を用い、前述の(1)および(2)式を Explicit 法で解いて求めたステンレス鋼の冷却曲線の計算値を Fig. 3 に実線で示した。計算値は実測値とはほぼ一致しており、本報で求めた h の妥当性が確かめられた。なお、ステンレス鋼の物性値は文献¹⁵⁾によった。

ところで、ステンレス鋼と銅との間には熱伝導度 λ に著しい差異がある。通常の炭素鋼の λ は銅とステンレス鋼の間にあり、その意味で Fig. 7 の h は炭素鋼に対しても十分に適用可能と考えられた。

4. CCT 図に基づくモデル

4.1 CCT 図

過冷下における鋼材の変態を記述するために、従来より恒温変態図 (TTT 図) および連続冷却変態図 (CCT 図) が広く用いられている。これらの図を用いて鋼材内の変態を考慮した伝熱計算がこれまで行われているが^{5)~13)}、CCT 図を用いた例は少ない¹¹⁾¹²⁾。これは CCT 図があらかじめ決められた冷却曲線に従って冷却した場合の変態挙動をあらわしており、その冷却曲線から大きく偏倚する場合の変態挙動をあらわし得ないためと考えられる。しかし一方、TTT 図に関してもオーステナイト化温度から保持温度までの冷却履歴が明確でないことや、C 曲線の鼻の部分のデータが得られていないことが多いこと、などの点で使用上問題が残されている。TTT 図のこのような問題点は C 曲線が短時間側に片寄っている普通炭素鋼の急冷の場合に特に大きな問題

となる。

以上の点を考慮して、本報では CCT 図に基づいたモデルを適用した。CCT 図は本報の鋼種と近い組成の炭素鋼について得られているものを金属データブック¹⁶⁾より選んだ¹²⁾。その 1 例を Fig. 8(a) に示した。CCT 図は図形入力装置を用いて計算機に読み込んだ。そして後述の伝熱計算において、鋼材内の温度が CCT 図上のいかなる位置に対応するかを判定しながら計算を行った。鋼材の温度が CCT 図における冷却開始温度より高い場合には CCT 図における冷却時間は 0 とし、冷却開始温度に達してから冷却時間を加算しはじめた。鋼材組織としては、オーステナイト、マルテンサイト、ベイナイト、フェライトおよびパーライトを考慮した。マルテンサイト以外の組織の最終組織率は CCT 図中に記されている変態終了時の組織率から求めた。マルテンサイトについては CCT 図中に変態終了温度および組織率のいずれも記されていない。そこで変態終了温度は TTT 図¹⁶⁾より読み取り、組織率は残留オーステナイト率を差し引いた残りの過冷オーステナイトがマルテンサイトに変態するものとして求めた。残留オーステナイト率は CCT 図中に示されている値を参考にした。すなわち、SK3 の場合に 0.4、SK5 の場合に 0.1 とした。なお、過共析鋼である SK3 鋼の初析セメンタイトは析出量が少ないので無視した。また本報で使用した SK3 鋼のオーステナイト粒は粗く (JIS 粒度番号 4.5)、CCT 図の文献値をそのまま用いることには問題があると考えられたので、SK3 鋼についてのみ、冷却曲線の計算値が実測値に最も近くなるようにパーライト変態開始線および終了線を

†2 金属データブック¹⁶⁾図 2.91~2.94 を用いた。

長時間側に移動した CCT 図^{†3}を計算に使用した。

4.2 計算方法

試料内の熱移動を軸方向1次元と仮定すると、変態による発熱を伴う場合の熱移動の式は(3)式で、初期および境界条件は(2)式で与えられる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho \Delta H_i(T) \frac{\partial X_i}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、温度 T における i 相の変態熱 $\Delta H_i(T)$ はパーライト、ベイナイトおよびフェライト変態の場合には(4)式で算出した^{†4}。

$$\Delta H_i(T) = \Delta H_i(T_e) + \int_{T_e}^T (C_{p,i} - C_{p,A}) dT \dots\dots\dots (4)$$

i =Pearlite, Bainite :

$$T_e = 1000 \text{ K}, \Delta H_i(T_e) = -77.0 \text{ kJ/kg}^{17)}$$

i =Ferrite :

$$T_e = 1184 \text{ K}, \Delta H_i(T_e) = -16.3 \text{ kJ/kg}^{18)}$$

また、マルテンサイト変態の場合には $\Delta H_i(T)$ は温度によらず一定とし、H. ESSER ら¹⁹⁾の実測値を参照して次のように定めた。

$$\Delta H_M(T) = \left. \begin{aligned} &-62.8 \text{ kJ/kg (S10C, S45C)} \\ &-49.8 \text{ kJ/kg (SK5, SK3)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

なお、冷却曲線の計算値に対するマルテンサイト変態熱の影響は小さく、 $\Delta H_M(T)=0$ としても計算値の変化はわずかであった。

i 相の組織率 X_i は温度 T より(6)式^{†1)}で算出した。

$$X_i = X_{i,e} \left[1 - \left(\frac{T - T_{i,f}}{T_{i,s} - T_{i,f}} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここに $X_{i,e}$ は $T=T_{i,f}$ における i 相の最終変態率、 $T_{i,s}$ および $T_{i,f}$ は CCT 図における i 相の変態開始および終了温度である。 $T_{i,f}$ は CCT 図上で冷却曲線の計算値が i 相の変態開始線と交わったとき、その勾配 ($\partial T / \partial \log t$) のまま長時間側に外挿した曲線と変態終了線との交点より求めた。なお、変態熱の発生に伴い試料温度が上昇する場合には、再びもとの温度に降温するまで X_i を固定した。

i 相の熱物性値 ρ_i , $C_{p,i}$ および λ_i は一部^{†5}を除いて HILDENWALL と ERICSSON¹³⁾の提案した温度式を用いて算

出した。また混合組織の物性値 ρ , C_p および λ は加成性を仮定して(7)式¹³⁾で算出した。

$$K = \sum_i X_i K_i \dots\dots\dots (7)$$

ここに $K = \rho, C_p, \lambda$

(3)式と(6)式より(8)式を導くことができる。

$$\rho \left[C_p - 2 \frac{X_{i,e} \Delta H_i(T) (T - T_{i,f})}{(T_{i,s} - T_{i,f})^2} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (8)$$

本報では(8)式を差分法し、Explicit 法によつて数值的に解いた。本報の数値計算は軸方向格子点間隔 $\Delta z = 0.5 \text{ mm}$, 時間間隔 $\Delta t = 0.001 \text{ s}$ (水冷却), $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ (窒素冷却)の条件で行つた。計算には東北大学大型計算機センター ACOS シリーズ 77 NEAC システム 1000 を用いた。

4.3 計算値と実測値との比較

Fig. 4 および 5 に CCT 図に基づくモデルによる冷却曲線の計算値を実線で示した。また比較のため炭素鋼の平衡物性値²⁰⁾を用いて(1), (2)式より算出した冷却曲線を図中に破線で示した。Fig. 4 より CCT 図に基づくモデルによる計算値は実測値とよく一致している。平衡物性値を用いた計算値は、S10C の場合に実測値と近い値を示しているが、他の場合には実測値よりかなり速く冷却している。また Fig. 5 より窒素冷却の場合には二つの計算値の間の差異は小さいが、変態熱の発生に伴う冷却の停滞現象は CCT 図に基づくモデルの方がよくあらわし得ている。

つぎに S45C の場合について CCT 図上に冷却曲線の計算値を重ねたものを Fig. 8 (b)に示した。Fig. 8 (a)と(b)とを比較すると、冷却曲線の計算値は CCT 図を求めたときの冷却曲線と細部でことなっている。すなわち、計算値にはパーライト変態熱による冷却の停滞があまりみられず、またパーライト変態後のベイナイト変態域で冷却速度が緩やかになつている。しかしこれらの相違にもかかわらず、冷却曲線の計算値は Fig. 4 および 5 のように実測値と一致している。

Fig. 9 (a)~(d)に炭素鋼の水冷却後の組織率分布の計算値を示した。いずれの鋼種の場合も冷却面に近づくとともにマルテンサイトの割合が急激に高まつている。このマルテンサイトは炭素濃度の低い S10C や S45C の場合により深い z の位置まで生成している。これは同一の水冷却の条件下でも炭素濃度が低い方が大きな冷却速度が得られるためと思われる。Fig. 9 (a)より、S10C の $z = (0.9 \sim 1.5) \times 10^{-2} \text{ m}$ の領域に少量のオーステ

†6 Fig. 9 (c), (d)中にみられるオーステナイトは残留オーステナイトである。

†3 Appendix, Fig. A1 参照

†4 ベイナイトの変態熱はパーライトのそれと同じと仮定した。またフェライト変態の場合には純鉄のオーステナイト-フェライト変態熱を基準として、任意の温度の変態熱を炭素濃度に無関係として推算した。

†5 HILDENWALL と ERICSSON の式にはフェライトの比熱に磁気変態の影響が含まれていないので、フェライトの $C_{p,i}$ には文献値¹⁸⁾を用いた。また彼らの式ではマルテンサイトの λ_i として共析炭素鋼の場合のみが示されている。本報では共析炭素鋼のマルテンサイトの λ_i とフェライトの λ_i 間で固溶炭素濃度に応じた比例配分を行い、各鋼種のマルテンサイトの λ_i 値とした。

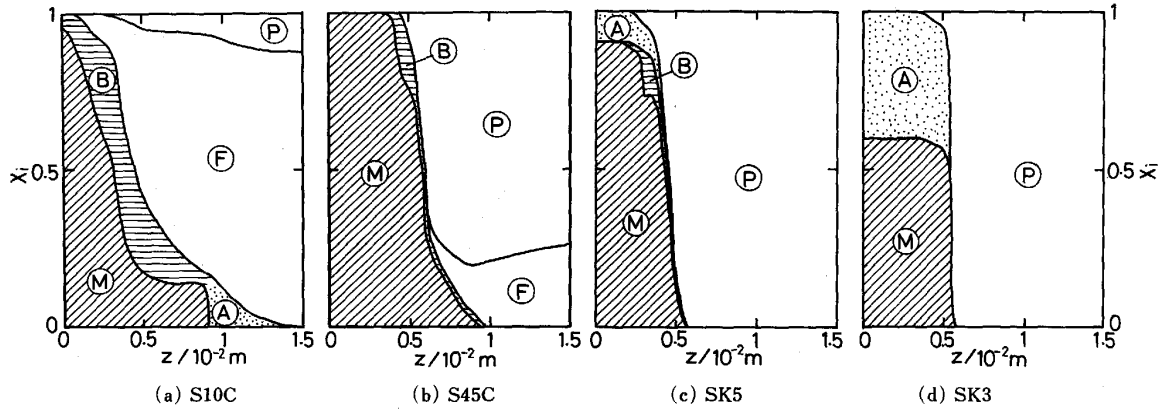


Fig. 9. Calculated constructions of steels after water cooling.

ナイトが残存しているのがみとめられる¹⁶。これは冷却曲線の計算値が CCT 図のそれと完全には一致せず、CCT 図から決定した最終組織率の総和が1にならない場合があるためである。本計算ではその不足分をオーステナイトとして処理しているため、S10C の場合に最大約 10% のオーステナイトが残存した¹⁷。

Photo. 1 (a)~(d) と Fig. 9 (a)~(d) とを比較すると、特に SK5 の場合に計算値の方がマルテンサイトの生成域が広がっている。このような相違は CCT 図作成時の試料と本報の試料との組成の差や冷却曲線の差によるものと考えている。

以上、CCT 図に基づくモデルは炭素鋼の水および窒素による冷却曲線をよくあらわしており、また最終組織率も大略推定しうることが示された。しかし冷却中に冷却条件が大きく変化するような場合に本モデルを適用することは困難であり、今後更に一般的な冷却に適用しうるモデルを考案する必要があると考える。

5. 結 言

流体による鋼材の冷却現象を鋼材内の変態を考慮して実験的、理論的に考察し、以下の結果を得た。

(1) 水および窒素の噴流により鋼、ステンレス鋼および種々の炭素濃度の炭素鋼を冷却し、冷却曲線を求めた。また、水冷却後の炭素鋼の顕微鏡組織写真より、冷却に伴う組織変化を観察した。

(2) 固体内 1 次元熱伝導を仮定して、鋼の冷却曲線より固体-流体間の伝熱係数を算出した。この伝熱係数を用いて算出したステンレス鋼の冷却曲線は実測値と一致した。

(3) CCT 図に基づくモデルを展開した。このモデルによる炭素鋼の冷却曲線の計算値は実測値と一致した。

(4) 上記モデルにより水冷却後の組織率分布を推定した。

おわりに本研究を遂行するにあたり有益な御教示をいただきました新日本製鉄(株)、三塚正志氏ならびに日本鋼管(株)、手塚勝人氏に深謝します。また数々の有益な討論と実験上の御援助をいただきましたトーア・スチール(株)、玉井豊氏に感謝いたしますとともに、本研究の遂行に御協力いただいた宇井隆工学士(現(株)テクノメタル)、先崎斎工学士(現クリナップ(株))および近藤裕計助手(現東北大学大学院)に感謝いたします。

本研究の一部は豊田理化学研究費(昭和 59, 60 年度)によって行われました。関係各位に謝意を表します。

Appendix

Fig. A1 に SK3 鋼の CCT 図を噴流水による冷却曲線の計算値とあわせて示した。図中の破線は金属データブックの CCT 図¹⁶⁾をそのまま用いた場合で、実線が修

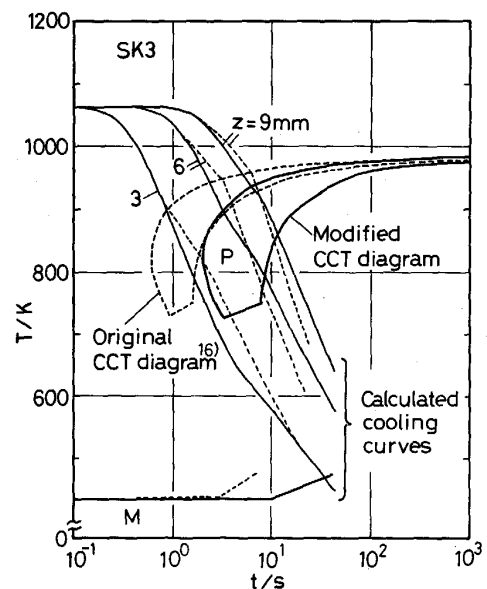


Fig. A1. Calculated cooling curves based on the original and modified CCT diagram.

¹⁷ 逆にオーステナイト率が負になるような場合には、その時点ですべての組織率を固定した。

正した場合である。図より未修正の CCT 図を用いた場合には、冷却面より 3 mm の位置でもすべての組織がパーライトになり、顕微鏡組織 (Photo. 1 (d)) と一致しない。

記号

C_p : 固体の定圧比熱 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
 $C_{p,i}$: i 相の定圧比熱 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
 d : ノズル内径 (m)
 H : ノズルと冷却面間の距離 (m)
 h : 固体-流体間の伝熱係数 ($\text{J/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K}$)
 T : 固体の温度 (K)
 T_a : オーステナイト化温度 (K)
 T_e : 平衡変態温度 (K)
 T_s : 冷却面温度 (K)
 T_0 : 冷却開始時の固体の温度 (K)
 $T_{i,s}$: CCT 図における i 相の変態開始温度 (K)
 $T_{i,f}$: CCT 図における i 相の変態終了温度 (K)
 T_∞ : 冷媒の温度 (K)
 t : 時間 (s)
 V : 冷媒の流量 (m^3/s)
 X_i : i 相の体積率 (—)
 $X_{i,e}$: i 相の変態終了時の体積率 (—)
 z : 冷却面から固体側への軸方向距離 (m)
 z_0 : 固体試料の長さ (m)
 ギリシャ文字
 λ : 固体の熱伝導度 ($\text{J/m}\cdot\text{K}\cdot\text{s}$)
 λ_i : i 相の熱伝導度 ($\text{J/m}\cdot\text{K}\cdot\text{s}$)
 ρ : 固体の密度 (kg/m^3)
 ρ_i : i 相の密度 (kg/m^3)
 添え字
 A : オーステナイト B : ベイナイト
 F : フェライト M : マルテンサイト
 P : パーライト

文 献

- 1) 鋼材の強制冷却 (日本鉄鋼協会編) (1978)
- 2) 菊池 淳, 玉井 豊, 谷口尚司, 只木楨力, 前田四郎: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1932
- 3) 谷口尚司, 菊池 淳, 只木楨力: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 254
- 4) 谷口尚司, 沢田勝実, 菊池 淳, 只木楨力: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1938
- 5) B. RANIECKI, 井上達雄: 材料, **26** (1977), p. 935
- 6) 上村啓二, 長岐 滋, 井上達雄: 材料, **27** (1978), p. 1152
- 7) 岸野孝信, 長岐 滋, 井上達雄: 材料, **28** (1979), p. 861
- 8) 吉田 博, 佐々木徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 965
- 9) 吉田 博, 佐々木徹, 近藤信行, 田中智夫, 橋本隆文: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 412
- 10) 吉田 博, 片岡健二, 佐々木徹, 田中智夫: 塑性と加工, **24** (1983), p. 715
- 11) 利岡靖継: 第 35 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1975), p. 67
- 12) 利岡靖継: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 1756
- 13) B. HILDENWALL and T. ERICSSON: Hardnability Concepts with Applications to Steel, ed. by D. V. DOANE and J. S. KIRKALDY (1978), p. 579 [AIME]
- 14) R. F. PRICE and A. J. FLETCHER: Metals Technol., **7** (1980), p. 203
- 15) Y. S. TOULOUKIAN, R. W. POWELL, C. Y. HO and P. G. KLEMENS: Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, **1** (1970), **4** (1970), **12** (1975) [IFI/Plenum, N. Y.]
- 16) 金属データブック (日本金属学会編) (1974), p. 352 [丸善]
- 17) J. J. KRAMER, G. M. POUND and R. F. MEHL: Acta Metall., **6** (1958), p. 763
- 18) R. HULTGREN, P. D. DESAI, D. T. HAWKINS, M. GLEISER, K. K. KELLEY and D. D. WAGMAN: Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements (1973), p. 180 [ASM]
- 19) H. ESSER and W. BUNGARDT: Arch. Eisenhüttenwes., **9** (1934), p. 533
- 20) 日本学術振興会, 鉄鋼熱計算用数値 (日本鉄鋼協会編), (1966) [日刊工業新聞社]