

LD 転炉の鋼浴の温度と炭素濃度におよぼす

70556

スクラップ融解の効果*

浅井 滋生**・鞭

巖***

Effect of Scrap Melting on Temperature and Concentration of Carbon of Molten Steel in LD Converter

Shigeo ASAI and Iwao MUCHI

Synopsis:

A mathematical model for determining the variations of a temperature of molten steel, t_m and a concentration of carbon in steel bath, C_m caused by the melting of scrap fed into LD converter is developed in this work.

Experimental data obtained by others in the blowing process of LD converter were plotted on the figure of C_m vs. t_m . It was noted from this figure that there were considerable differences between the data for the case where scrap had not been fed into converter and those with feed of scrap, and that the data obtained where all of scrap had not yet been molten indicated the variation of C_m with t_m along a liquidus line of the iron-carbon phase diagram in accordance with the progress of the blowing time.

Behaviors of C_m and t_m accompanied by the fluctuations of these process variables caused by the changes of operating conditions were analysed in terms of the model mentioned above. And, on the basis of these behaviors, a method of a end-point dynamic control with the aid of a topological phase diagram was proposed in this paper.

(Received July 14, 1969)

1. 緒 言

LD 転炉における吹錬時には、かなり多量のスクラップが投入されるので、スクラップの融解が炉内プロセス変数、特に鋼浴温度と鋼浴の炭素濃度に及ぼす影響を定量的に知ることが望まれるが、従来スクラップの融解プロセスについての理論的な研究は少数しか発表^{1)~3)}されていない。しかも、これら研究は、溶鋼の温度と炭素濃度を与えて、スクラップ内部の温度分布やスクラップの融解速度を解析したものである。

本研究では、転炉吹錬時に重要なプロセス変数となる鋼浴の温度と鋼浴の炭素濃度に着目して、これらの変数の推移に及ぼすスクラップ融解の効果を知るため数学的モデルを展開し、吹錬経過に伴って起こる溶鋼の温度と溶鋼の炭素濃度の変化について解析する。また、ここで得られた溶鋼の温度と炭素濃度の関係に基づいて、位相図を利用した終点制御法について考察する。

なお、数値計算には、大型電子計算機（京都大学大型計算機センター FACOM 230-60）を使用した。

2. 実測結果の検討

実操業の転炉および試験転炉における実測によつて得られたデータ^{4)~11)}を採用して、炭素濃度と鋼浴温度の関係をプロット（以下、これを T-C 線図と略称する）してみると Fig. 1 のようになる。Fig. 1 には、鉄-炭素系状態図も図示してみた。この図で、黒くぬりつぶされた点はスクラップが装入されていない場合のデータ⁴⁾であり、その他の点はスクラップが装入されている場合のデータ^{6)~11)}である。これら 2 種類の実測値の間には明りような相違があることがわかる。

すなわち、スクラップが装入されていない場合には、初期に、炭素濃度減少による温度上昇率がやや大きく、以後鋼浴温度と鋼浴炭素濃度の間に、ほぼ直線関係が存在していることが推定できる。一方、スクラップが装

* 昭和44年3月本会講演大会にて発表
昭和44年7月14日受付

** 名古屋大学工学部 大学院

*** 名古屋大学工学部 工博

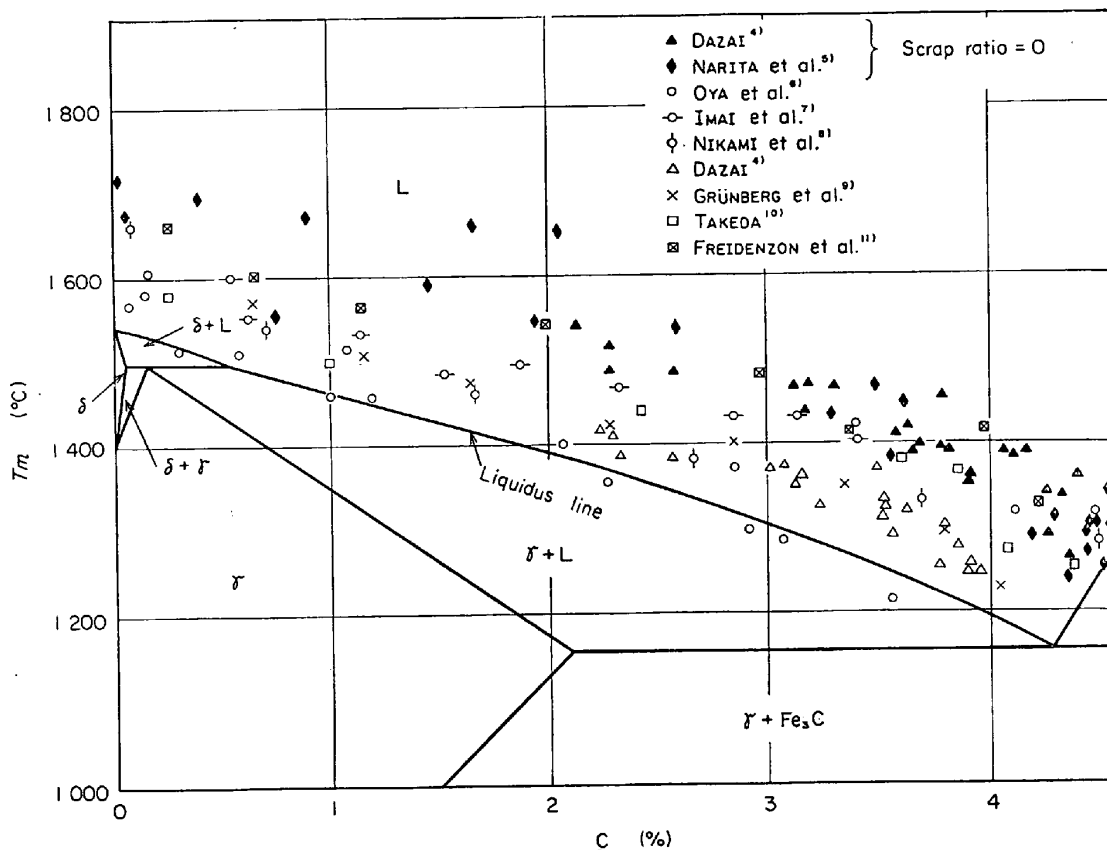


Fig. 1. Iron-carbon phase diagram and data of the bath temperature and the carbon concentration in molten steel obtained under the various operating conditions.

入されている場合には、スクラップの種類とその装入重量、あるいは、吹錬条件などにより、差異はあるが、鉄-炭素系状態図の液相線によつて束ばくされていることが推察される。

Fig. 1 のプロットには、スクラップの効果だけでなく、副原料投入の効果や吹錬条件変更の効果も含まれているが、以下スクラップを装入した場合と、装入しない場合とで見られる上記の差異に着目して、スクラップ溶融プロセスの解析を行なう。

3. 解 析

溶鋼中へのスクラップの融解は、非定常下での熱と物質の同時移動過程であり、その理論解析に当たつては、分布定数系として取扱うのが妥当であるが、投入されるスクラップの性状、あるいは副原料の投入条件の相違など多くの因子が融解過程に複雑な効果を示すことが推察され、また、ここでは、スクラップ外部の溶鋼の温度や濃度の変化に注目しているため、本報では、融解のモデルそのものは集中定数系に簡単化して扱い、吹錬経過に伴つて起こるプロセス変数の推移に及ぼすスクラップ融解の効果についての解析を行なう。

すなわち、本モデルでは、スクラップの伝熱抵抗がす

べてスクラップの表面にあると考えた集中定数系として取扱う。また、反応としては、LD転炉での主要な反応である脱炭反応だけを考慮して解析を行なう。

メタルとスクラップ間の温度分布および濃度分布を Fig. 2 に示すが、ここで、上述のように、スクラップの伝熱抵抗がスクラップ表面に集中しているとしたため、スクラップ内部での温度分布は均一となつている。そこで、本モデルで算出されるスクラップの温度は、スクラップ内部に実際に存在するはずの温度分布をスクラップの全厚さにわたつて平均して得られる温度に相当する。また、 α_1, α_2 [kcal/sec·°C] はそれぞれメタル側およびスクラップ側での各伝熱係数とスクラップの有効表面積との積、すなわち、単位温度差当たりの伝熱速度であり、 β [kg mol(C)/sec·kg mol(C)/kg(Fe)] は炭素の物質移動係数と有効表面積との積、すなわち、単位濃度差当たりの物質移動速度である。

Fig. 1 の鉄-炭素系状態図で液相線を純鉄の融点(1536°C)と共晶点(4.26% C, 1153°C)を結ぶ直線で近似化して表わしたのが Fig. 3 であり、この直線を(1)式のように表わす。

$$T = 1536 - 90C = 1536 - 1.08 \times 10^5 C \\ \equiv a + bC \dots\dots\dots (1)$$

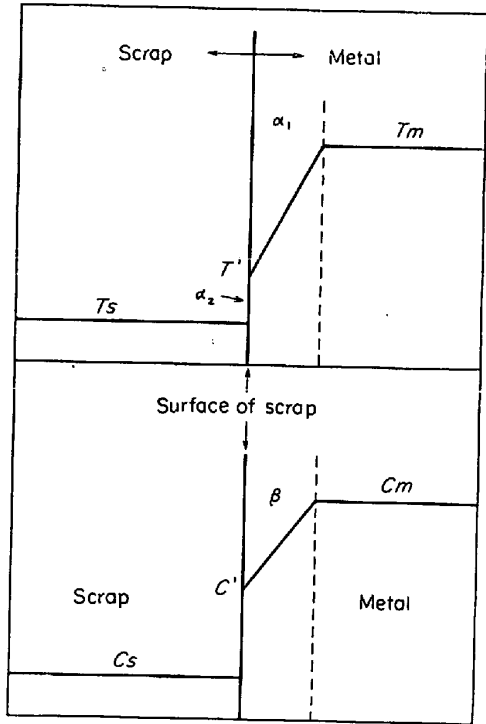


Fig. 2. Diagrammatic representation of gradients of temperature and carbon concentration.

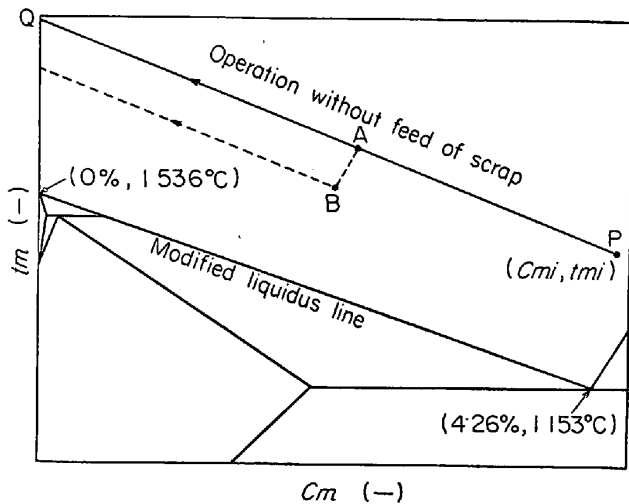


Fig. 3. Modified Fe-C phase diagram and behaviors of the temperature of molten steel and the carbon concentration in steel bath.

スクラップについての熱収支、溶鋼についての熱収支および、溶鋼炭素についての物質収支から、それぞれ、(2)、(3)、(4)式が得られる。

$$c_p d(W_s T_s) / d\theta = \alpha_2 (T' - T_s) + c_p T_s dW_s / d\theta \dots (2)$$

$$c_p d(W_m T_m) / d\theta = (-\Delta H_{Co}) \cdot \sigma_1 \cdot S - \alpha_1 (T_m - T') - c_p T_m dW_s / d\theta \dots (3)$$

$$d(W_m C_m) / d\theta = -\sigma_1 S - C_m dW_s / d\theta \dots (4)$$

スクラップの投入初期には、スクラップの表面に溶鉄が凝固する現象が起ると考えられるが、このような溶

鉄の凝固期とスクラップの融解期とは、スクラップの凝固と融解に伴う伝熱、および物質移動の方向が異なるが、凝固期には各収支式が融解期とは少し違ってきて、それぞれ(2')、(3')、(4')式がかける。

$$c_p d(W_s T_s) / d\theta = \alpha_2 (T' - T_s) + c_p T_m dW_s / d\theta \dots (2')$$

$$c_p d(W_m T_m) / d\theta = (-\Delta H_{Co}) \cdot \sigma_1 \cdot S - \alpha_1 (T_m - T') - c_p T_m dW_s / d\theta \dots (3')$$

$$d(W_m C_m) / d\theta = -\sigma_1 S - C_m dW_s / d\theta \dots (4')$$

(2)式の左辺はスクラップのエンタルピーの時間的な変化を表わしており、右辺第1項は溶鋼からスクラップへ移動した熱エネルギーのうち、スクラップの融解の潜熱に消費されるものを除いて、スクラップの顕熱の変化に寄与する伝熱速度であり、右辺第2項は、スクラップの融解によつて起こるスクラップのエンタルピーの減少速度を表わしている。集中定数系として取扱つているため、スクラップの固相内は均一温度であり、そのためこの項が融解期の(2)式と凝固期の(2')式で異なつている。

また、(3)式は溶鋼側についての熱収支で、左辺は、(2)式の左辺に相当するものである。右辺第1項は脱炭反応に伴う発熱項であり、(-ΔH_{Co})は脱炭反応の反応熱、σ₁は鋼浴に吸収された酸素のうち脱炭反応に消費される酸素の比率を示している¹²⁾。第2項は、後述の(6)式で示すように、スクラップの融解に伴う潜熱とスクラップの顕熱の変化に寄与するスクラップへの伝熱速度を表わしている。第3項は、(2)式右辺第2項と同じ項である。

また、(4)式は溶鋼側での炭素の物質収支である。左辺は溶鋼の炭素質量の変化速度、右辺第1項は、脱炭反応に伴う炭素の消失速度である。右辺第2項は、スクラップの融解に伴う炭素の移動速度を表わす。

さて、スクラップが融解すると、それだけ溶鋼量が増加するから、次の(5)式の関係が成立する。

$$dW_m / d\theta = -dW_s / d\theta \dots (5)$$

また、スクラップ表面での熱収支と物質収支から、それぞれ(6)、(7)式が得られる。

$$\alpha_1 (T_m - T') = \alpha_2 (T' - T_s) + (-\Delta H_{Fe}) \cdot dW_s / d\theta \dots (6)$$

$$\beta (C_m - C') = (C_m - C_s) \cdot (-dW_s / d\theta) \dots (7)$$

ここで、(2)~(7)式を次のように無次元化する。

$$d(t_s w_s) / d\theta = A_3 A_5 (t' - t_s) + t_s dw_s / d\theta \dots (8)$$

$$d(t_m w_m) / d\theta = A_1 - A_3 (t_m - t') - t_s dw_s / d\theta \dots (9)$$

$$d(c_m w_m) / d\theta = -A_2 - c_s \cdot dw_s / d\theta \dots (10)$$

$$dw_m / d\theta = -dw_s / d\theta \dots (11)$$

$$t_m - t' = A_5(t' - t_s) + 1/(A_3 \cdot A_6) \cdot dw_s/d\theta \dots\dots\dots (12)$$

$$-A_4(c_m - c') = (c_m - c_s) \cdot dw_s/d\theta \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $t \equiv T/T_{mi}$, $C \equiv C/C_{mi}$, $w \equiv W/W_{mi}$, $\theta \equiv \Theta/\Theta_1$,
 $A_1 \equiv (-\Delta H_{CO}) \cdot \sigma_1 \cdot S \cdot \Theta_1 / W_{mi} \cdot c_p \cdot T_{mi}$, $A_2 \equiv \sigma_1 \cdot S \cdot \Theta_1 /$
 $W_{mi} \cdot C_{mi}$, $A_3 \equiv \alpha_1 \cdot \Theta_1 / W_{mi} \cdot c_p$, $A_4 \equiv \beta \cdot \Theta_1 / W_{mi}$, $A_5 \equiv \alpha_2$
 $/\alpha_1$, $A_6 \equiv T_{mi} \cdot c_p / (-\Delta H_{Fe})$ である。

なお、(2')~(4')式は次のようになる。

$$d(t_s w_s)/d\theta = A_3 A_5 (t' - t_s) + t_m dw_s/d\theta \dots\dots\dots (8')$$

$$d(t_m w_m)/d\theta = A_1 - A_2 (t_m - t') - t_m dw_s/d\theta \dots\dots\dots (9')$$

$$d(c_m w_m)/d\theta = -A_2 - c_m dw_s/d\theta \dots\dots\dots (10')$$

ここで、森ら²⁾と同様にスクラップ表面の温度と濃度は液相線上に存在すると考えるが、本モデルでは集中定数系のモデルとして次のように取扱う。

スクラップ表面での物質収支と熱収支から得られる(12)、(13)式で、スクラップの融解や凝固が起こらない($dw_s/d\theta = 0$)と仮定して導出されるスクラップ表面の温度 t' と濃度 c' をそれぞれ t_f , c_f とおく。

$$t' = (t_m + A_5 t_s) / (1 + A_5) \equiv t_f \dots\dots\dots (14)$$

$$c' = c_m \equiv c_f \dots\dots\dots (15)$$

さて、スクラップ表面の温度 t' と濃度 c' は液相線 ($t = A_7 + A_8 c$) 上の点であるが、(14)、(15)式から計算された (c_f , t_f) の点が液相線より上方にあれば融解が起こり、融解時の t_f と c_f は液相線上の点となると考える。ただし、 $A_7 \equiv a/T_{mi}$, $A_8 \equiv b \cdot C_{mi}/T_{mi}$ である。また、(c_f , t_f) が液相線より下方にあるときには、スクラップ表面で溶鉄の凝固が起こることになる。したがって、吹錬過程におけるスクラップの状態は次の5種類の場合に分類される。

(Case 1) $c_m > c_s$, $t_f \geq A_7 + A_8 c_m$

この場合には、スクラップの融解が進行する。スクラップ表面の温度、濃度を示す点 (c' , t') は液相線上にあるから、(16)式の関係を満足する。

$$t' = A_7 + A_8 c' \quad (0 \leq c' \leq 1) \dots\dots\dots (16)$$

c' と t' は(12)、(13)、(16)式から次のように求められる。

$$c' = \frac{(A_4/A_3 A_6) c_m - (c_m - c_s) \cdot \{(1 + A_5) \cdot A_7 - A_5 t_s - t_m\}}{A_4/A_3 A_6 + (c_m - c_s) \cdot (1 + A_5) \cdot A_8} \dots\dots\dots (17)$$

$$t' = \frac{A_4 A_7 + A_4 A_8 c_m + A_3 A_6 A_8 \cdot (c_m - c_s) \cdot (A_5 t_s + t_m)}{A_4 + A_3 A_6 (c_m - c_s) \cdot (1 + A_5) \cdot A_5} \dots\dots\dots (18)$$

(Case 2) $c_m > c_s$, $t_f < A_7 + A_8 c_m$

この場合には、溶鉄がスクラップ表面へ凝固する。凝固した相は簡単化のために、スクラップ相とみなし、凝固相の温度とスクラップ相の温度は等しいとみなし、凝

固によつて、凝固界面近傍の溶鋼内で炭素濃度の濃化現象は起こらないものとする。すると、凝固表面の状態は液相線上で表わされるから、(19)式が書ける。

$$t' = A_7 + A_8 c_m, \quad c' = c_m \dots\dots\dots (19)$$

また、このような凝固の過程では、物質収支の(7)式または(13)式は成立しなくなり、凝固速度は熱収支の(6)式によつて規定されることとなる。

(Case 3) $c_m < c_s$, $t_f \geq A_7 + A_8 c_m$

この場合には、スクラップの融解が進行するが、冷鉄が最初に装入されたような場合、あるいは、吹錬末期で炭素濃度が十分に低下した場合にみられる。このとき、物質移動の抵抗は完全になくなり、スクラップ表面の温度と濃度は液相線上の

$$t' = A_7 + A_8 c_s, \quad c' = c_s \dots\dots\dots (20)$$

で表わされる点に固定される。

(Case 4) $c_m < c_s$, $t_f < A_7 + A_8 c_m$

この場合には、スクラップ(冷鉄)の表面で溶鉄の凝固が起こるが、最初に冷鉄が装入されていたような場合と考えられる。スクラップの表面温度と濃度は Case 2 の場合と同じで、(19)式で表わされる。

(Case 5) $w_s = 0$

この場合は、スクラップが浴内に存在しない場合である。すなわち、スクラップが融解を完了してから終点までの期間、あるいは全吹錬期間にわたつて、スクラップが装入されなかつたような場合である。

以上5種類の場合において、Case 1, Case 3 では(8)、(9)、(10)、(11)式を、Case 2, Case 4 では(8'), (9'), (10'), (11)式を、Case 5では(9')式(10')式を連立して解けば、スクラップ温度 t_s 、溶鋼の温度 t_m 、濃度 c_m およびスクラップ溶解速度(凝固速度) $dw_s/d\theta$ が操業時間 θ の関数として求められる。

4. 計算結果と考察

4.1 浴内にスクラップがない場合 (Case 5)

Case 5 では(9)、(10)式は(9'')、(10'')式のように非常に簡単になる。

$$w_m \cdot dt_m/d\theta = A_1 \dots\dots\dots (9'')$$

$$w_m \cdot dc_m/d\theta = -A_2 \dots\dots\dots (10'')$$

そのため、溶鋼の温度 t_m と濃度 c_m について解析解が得られる。すなわち

$$t_m = t_{mi} + (A_1/w_m) \theta \dots\dots\dots (21)$$

$$c_m = c_{mi} - (A_2/w_m) \theta \dots\dots\dots (22)$$

(21)、(22)式から θ を消去すると、

$$t_m = t_{mi} - (A_1/A_2)(c_m - c_{mi}) = t_{mi} - (-\Delta H_{CO} C_{mi}/c_p T_{mi}) \cdot (c_{mi} - c_m) \dots\dots\dots (23)$$

が得られるが、(23)式から以下に述べるような推論ができる。

スクラップの融解が終了した後、あるいは、最初にスクラップの装入が行なわれなかつた場合 (Case 5) には、 t_m と c_m の間には Fig. 3 に示したような直線関係 (\overline{PQ}) が成立する。さて、副原料の装入などによる外乱によつて Fig. 3 で (c_m, t_m) 点が A 点から B 点に移行したとすると、B 点になつてから以後、 (c_m, t_m) 点の T-C 線図上での推移も (23) 式によつて規定されると考えられる。したがつて、その軌跡は Fig. 3 の破線で示したように、外乱が加わらない場合の T-C 線図上での軌跡 (\overline{PQ}) に平行に推移するはずである。

すなわち、Case 5 では、副原料投入後の (c_m, t_m) の軌跡は、副原料を投入しない場合の軌跡と平行になる。ただし、平行になるということは、 t_m と c_m に及ぼす 2 次的因子、たとえば副原料の装入条件の相違によつて生じるスラグ質量の差異やスロッピングなどの有無が脱炭反応に影響しないと考えた場合についていえる。

転炉炉内では脱炭反応のほかに脱ケイ素反応、酸化鉄生成反応などが吹錬経過に伴つて起こるので、(3)式の反応熱の項である $(-\Delta H_{CO})$ は脱ケイ素反応、酸化鉄生成反応も加味した総括的な反応熱 $(-\Delta H_{all})$ を採用すべきである。そうすれば当然、吹錬初期では脱ケイ素反応が活発であるため、 $(-\Delta H_{all})$ は脱炭反応の反応熱 $(-\Delta H_{CO})$ よりも大きくなり、脱炭反応が定常的に起こる吹錬中期より、T-C 線図上での濃度 c_m の減少に対する温度の上昇割合 $|dt_m/dc_m|$ は大きくなる。Fig. 1 で、スクラップが装入されていない場合のデータ⁴⁾⁵⁾ について、吹錬中期よりも初期における傾きが大きくなっているのはこのためと考えられる。また、吹錬末期では、酸化鉄生成反応が活発になるので、 $|dt_m/dc_m|$ の値は大きくなる。

次に、T-C 線図上での傾きを決定する係数は、(23)

式からわかるように $(-\Delta H_{CO} \cdot C_{mi} / c_p \cdot T_{mi})$ である。すなわち、この係数には S と溶鋼質量 W_m が含まれていないから、T-C 線図上の軌跡は吹錬条件と溶鋼量の相違によつては影響を受けないが、その軌跡上を推移する速度が異なつてくること (21), (22) 式からわかる。

4.2 浴内にスクラップが存在する場合

Case 1~Case 4 では解析解を得ることができないので、Table 1 に示すような条件で数値計算を行なつた。なお、 α_1 , α_2 および β を含む無次元数 A_3 , A_4 , A_5 は未知数となるが、Table 1 に示した他の無次元数については、 $\sigma_1 \cdot S$ を送酸流量に等しいと近似的に考えれば、操業条件と物性値から決定できる。Table 1 に示した A_3 ,

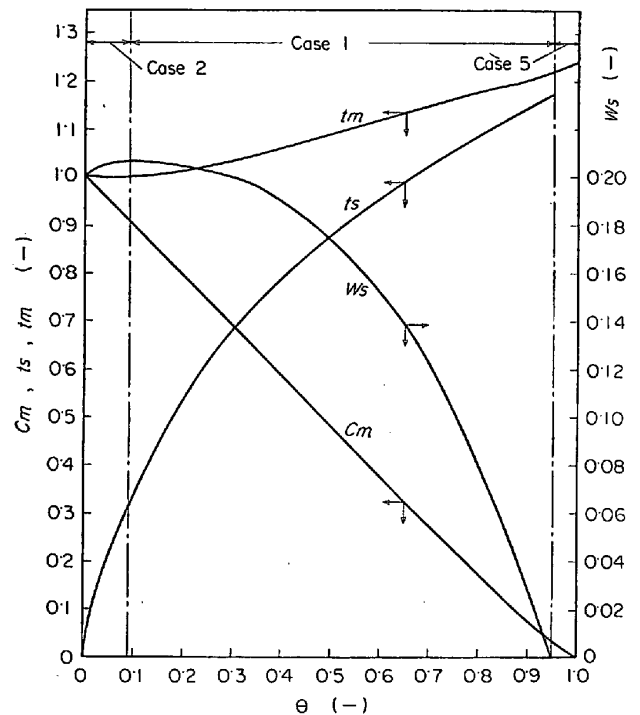


Fig. 4. Calculated results of process variables (scrap temperature: t_s , metal temperature: t_m , carbon concentration: c_m , mass of scrap: w_s).

Table 1. Data for numerical calculations.

$A_1 = (-\Delta H_{CO}) \cdot (\sigma_1 S / W_{mi}) \cdot (\theta_i / c_p T_{mi}) = (33 \times 10^3) \cdot (3.1 \times 10^{-6}) \cdot (1200) / (0.17) \cdot (1300) = 0.55$
$A_2 = (\sigma_1 S / W_{mi}) \cdot (\theta_i / C_{mi}) = (3.1 \times 10^{-6}) \cdot (1200) / (4.3 / 1200) = 1$
$A_3 = (\alpha_1 / W_{mi}) \cdot (\theta_i / c_p) = (0.781 \times 10^{-3}) \cdot (1200) / (0.17) = 5.5$
$A_4 = (\beta / W_{mi}) \cdot \theta_i = (1.25 \times 10^{-3}) \cdot (1200) = 1.5$
$A_5 = \alpha_2 / \alpha_1 = 0.15$
$A_6 = T_{mi} c_p / (-\Delta H_{Fe}) = (1300) \cdot (0.17) / (-66) = -3.35$
$A_7 = a / T_{mi} = (1536) / (1300) = 1.18$
$A_8 = b C_{mi} / T_{mi} = (-1.08 \times 10^{-5}) \cdot (4.3 / 1200) / (1300) = -0.298$
$w_{si} = W_{si} / W_{mi} = 0.2$
$t_{si} = T_{si} / T_{mi} = (30) / (1300) = 0.0231$
$c_{si} = C_{si} / C_{mi} = (0.01 / 1200) / (4.3 / 1200) = 0.0023$

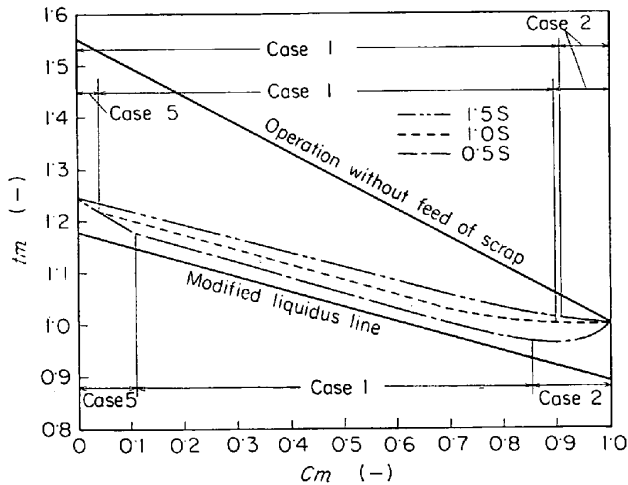


Fig. 5. Calculated results of the temperature of molten steel and the carbon concentration in steel bath under various operating conditions.

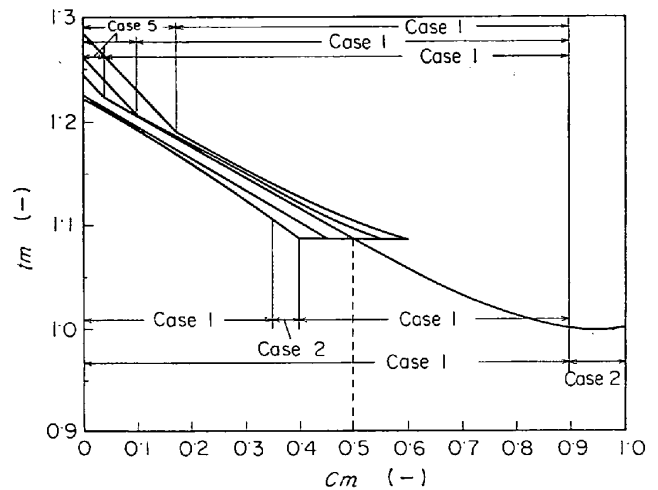


Fig. 6. Variations of c_m and t_m caused by the fluctuations of the carbon concentration which took place suddenly at $c_m=0.5$.

A_4 , A_5 の値は, Fig. 1 に示した多くの実操業データと (c_m, t_m) の計算値とがよく合致するような値に選んだが, これらの値は推定値である.

Table 1 の条件に基づいて計算した結果を Fig. 4 で横軸に吹錬時間 θ , 縦軸にスクラップの温度 t_s と質量 w_s , および溶鋼の濃度 c_m と温度 t_m をとつて示した.

まず Case 2 が起こり, スクラップ表面での凝固現象によつてスクラップの質量 w_s は増加している. この期間ではスクラップへの伝熱速度が大きいので, 溶鋼温度 t_m はほとんど上昇していないが, スクラップ温度 t_s は急激な上昇を示している.

次に, Case 1 に移り, スクラップの融解が始まる. この期間では t_m と t_s とは漸次接近するようになる. スクラップの融解が完了すると, Case 5 に移る.

次に, Fig. 4 の c_m と t_m の計算結果を T-C 線図上で示したのが Fig. 5 の破線である. Fig. 5 には, スクラップ以外の条件は Table 1 と同様であるが, スクラップを装入しなかつた場合を実線で示してある. また, S を 1.5 倍および 0.5 倍にした場合について, Table 1 と同様な条件下での計算結果を, それぞれ, 二点鎖線と一点鎖線で示した.

Fig. 5 から, スクラップが投入された場合には, c_m - t_m の曲線は液相線に拘束されていることが推察される. なお, S を 1.5 倍および 0.5 倍に大きく変化させてみたが, T-C 線図上での (c_m, t_m) の挙動はあまり変化していないことがわかる. すなわち, スクラップが炉内に存在するかぎり, 吹錬条件の変化が (c_m, t_m) の推移に及ぼす効果は少ないことが推察される. また, 二点鎖線のような迅速吹錬の場合には, Case 1 の領域が長

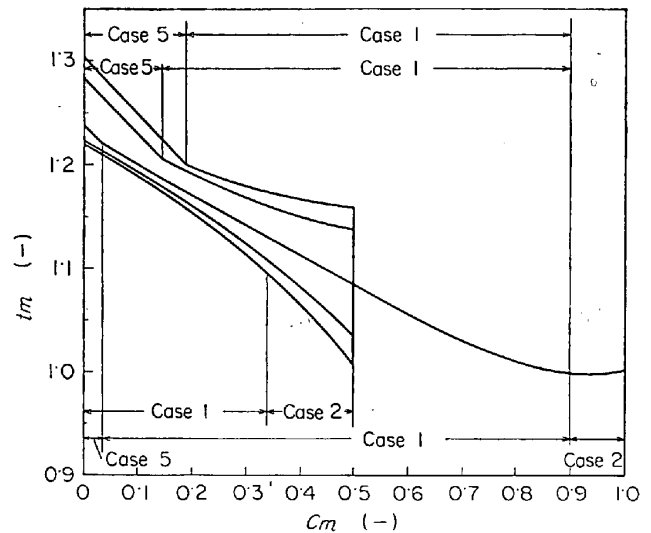


Fig. 7. Variations of c_m and t_m caused by the fluctuations of steel temperature which took place suddenly at $c_m=0.5$.

く続き, Case 5 の領域が現われなくなつている. これは吹錬を迅速にするほど, スクラップの融け落ちが困難になることを示しているように解釈できるが, 迅速吹錬の場合には, 浴の攪拌が大きくなり, 本モデルのパラメータである α_1 , α_2 , β が増加することも考えられるので, 迅速吹錬ほどスクラップの融解が困難になると結論づけることには問題があろう.

4.3 c_m, t_m の変動の効果

吹錬途中何らかの原因 (たとえば鉄鉱石や石灰石, あるいは加炭剤などの投入) により c_m および t_m に変動が起こつたとき, T-C 線図上での (c_m, t_m) の挙動がどのようになるかを調べたのが Fig. 6 および Fig. 7 である.

Fig. 6 は、無次元濃度 $c_m = 0.5$ (約 2% C) のときに、 c_m を 0.05 (約 0.2% C) 増減させた場合、および、さらに大きく 0.1 (約 0.4% C) 増減させた場合について、これら変動を加えて後の T-C 線図上での (c_m, t_m) の挙動を調べたものである。変動を加えた場合の (c_m, t_m) の軌跡は変動が加えられなかった場合の軌跡に次第に接近することがわかる。 c_m に減少の変動を加えた場合には、濃度変動の幅が大きいので吹錬終了まで Case 5 の状態は現われず、未融解スクラップが生じている。 c_m の増加の変動を加えた場合には、その変動が大きいほどより高い炭素濃度で Case 5 へ移行し、スクラップの融解が高い炭素領域で終了することを示している。スクラップ融解後はすでに Case 5 の解析で述べたように、どの場合にも平行に推移している。

Fig. 7 は、 $c_m = 0.5$ (約 2% C) のときに、無次元溶鋼温度 t_m に ± 0.075 と ± 0.05 (約 $\pm 100^\circ\text{C}$ および $\pm 65^\circ\text{C}$) の変動を加えた場合について、これら変動を加えて後の T-C 線図上での (c_m, t_m) の挙動を計算した結果である。Fig. 6 の場合と同様に、 (c_m, t_m) の軌跡は変動を加えなかった場合の軌跡に次第に接近することがわかる。そして、 t_m の増加の変動を加えた場合には、その変動が大きいほど、スクラップの融解が高い炭素領域で終了することを示している。

吹錬途中で加えられた変動は、スクラップが存在しない場合 (Case 5) には、変動がそのまま T-C 線図上で最後まで残存することをすでに述べたが、スクラップが浴内に存在する限り、スクラップがその変動を打ち消すように作用していることが Fig. 6, Fig. 7 からいえる。

したがって、浴内にスクラップが存在するような吹錬の途中で副原料が投入される場合には、その投入時期が多少変化しても、終点での t_m や c_m には大きな影響は生じないことが推察されるが、副原料の投入量の変化は Fig. 6, Fig. 7 に示したような変動幅に変化を与え、スクラップの融解完了時の (c_m, t_m) 点の位置に影響することになる。

以上述べたように、T-C 線図上でスクラップには、吹錬途中の変動を打ち消す効果 (以下、これをスクラップの補償効果と呼ぶ) があるが、これを定性的に説明すると次のようになる。

なんらかの原因により、 c_m や t_m が高くなつた場合には、溶鋼からスクラップへの物質移動や熱移動の推進力が增加するため、スクラップは融けやすくなる。スクラップの融解が起こると、スクラップの炭素濃度が低いために溶鋼の濃度を希釈する効果、および、融解の潜熱によつて溶鋼の温度が下げられる効果が生じ、結局、変

動を加えなかつた場合の状態に接近する傾向があることが推察される。逆に、濃度や温度が低くなつた場合にはスクラップの融解は起こりにくくなり、スクラップの融解速度が低下する。そのため、 c_m や t_m は吹錬進行とともに変動を与えなかつた場合の状態へ接近することになる。

4.4 装入するスクラップ条件の効果

4.4.1 スクラップの予熱効果

スクラップを予熱すれば、それだけスクラップの顕熱量が大きくなるので、スクラップ融解のために溶鋼から供給される顕熱量は少なくてすむことになり、スクラップが融解しやすくなると考えられる。そこで、スクラップ初期温度を 1300°C を基準にして無次元化した温度でそれぞれ、0.9, 0.5, 0.1 (1170°C , 650°C , 130°C に相当) に予熱した場合の計算結果を Fig. 8 に示した。

Table 1 に示した条件下で、予熱しない場合には、Fig. 5 の破線で示したように、吹錬初期に Case 2 の状態が現われていたが、このように予熱した場合には、Case 2 が現われず、最初から融解期の Case 1 の状態になつている。そして、予熱の程度が大きいほど、同じ炭素濃度の場合で比べると t_m が高くなり、しかも融解が完了して Case 5 の状態に移行する時期の c_m は高くなつている。すなわち、予熱されれば、それだけスクラップ比を上げることができ、しかも比較的高炭素域からスクラップが融解を完了するため、終点制御が行ないやすくなることが推察される。

4.4.2 スクラップ比の効果

スクラップと溶銑との装入質量比が c_m と t_m に及ぼ

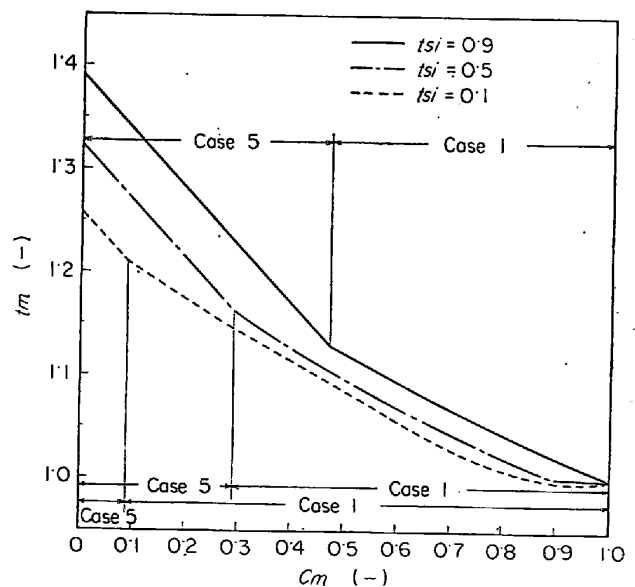


Fig. 8. Calculated results of c_m and t_m under the various initial temperature of scrap.

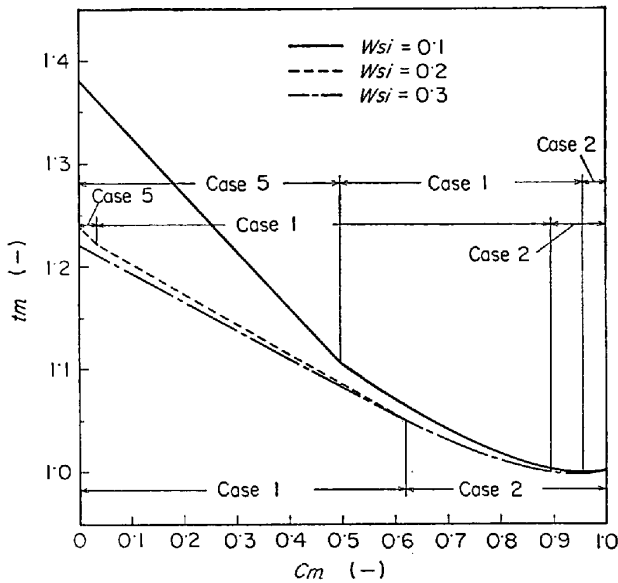


Fig. 9. Calculated results of c_m and t_m under the various scrap ratios.

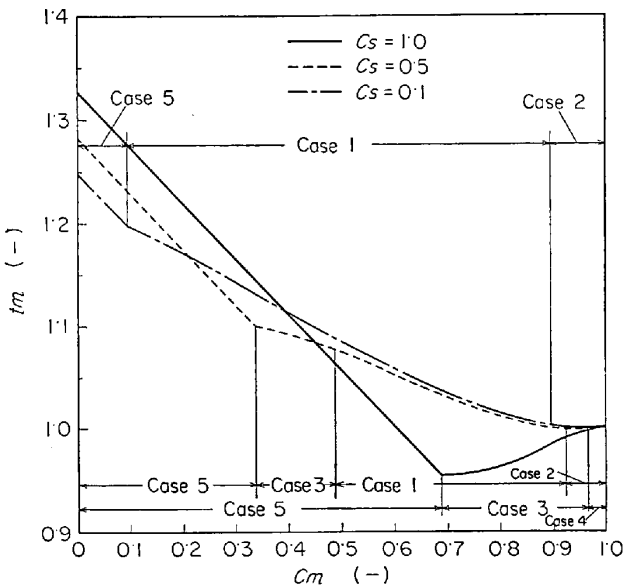


Fig. 10. Calculated results of c_m and t_m under the various carbon concentrations of scrap.

す効果を知るために、スクラップ比を 0.1, 0.2, 0.3 に変化した場合の計算結果を Fig. 9 に示した。

スクラップ比が大きくなるにつれて、Case 2 から Case 1 へ、また、Case 1 から Case 5 へ移る際の c_m は低くなる傾向があり、スクラップ比は c_m , t_m にかなり大きな影響を及ぼすことがわかる。

4.4.3 スクラップの炭素濃度の効果

スクラップの炭素濃度が c_m と t_m に及ぼす効果を知るために、スクラップの炭素濃度を装入溶鉄の炭素濃度で無次元化した値で、それぞれ $c_{si}=1, 0.5, 0.1$ と変化した場合の計算結果を Fig. 10 に示した。

$c_{si}=1$ はスクラップというより冷鉄を装入した場合に

相当するが、 $c_{si}=1$ の場合には初め Case 4 の過程が起こり、次に Case 3 に移る。その際、冷鉄融解過程は伝熱律速となり、急速な融解に伴って t_m は大きく低下する。 $c_{si}=0.5$ の場合には、Case 2 から始まり、Case 1 さらに Case 3 の状態に移行する。 $c_{si}=0.1$ の場合には Fig. 5 に破線で示した Table 1 の条件での基準計算の場合とほぼ同じで、Case 2, Case 1, Case 5 の順に移行する。

Fig. 10 からわかるように、スクラップの炭素濃度が高いほど、スクラップの融解完了点は高炭素側に移行している。また、スクラップと冷鉄では、 (c_m, t_m) の推移に及ぼす影響が非常に違っていることがわかる。すなわち、冷鉄を装入した場合には、スクラップの補償効果のうち、濃度の補償効果は生じないことになる。

4.5 吹錬途中で送酸量を変化させた場合の効果

吹錬途中で送酸量を変更させた場合に c_m や t_m が受ける影響を知るために、 $c_m=0.5$ の時点で S を 0.5 倍と 1.5 倍に変化した場合の T-C 線図上での挙動を Fig. 11 に実線で示した。両者とも、S を変更した時点以降の変化は、吹錬開始時から同じ S で吹錬した場合の一点鎖線 (0.5S) と二点鎖線 (1.5S) の (c_m, t_m) の軌跡に漸近する。

4.6 パラメータの効果

4.6.1 パラメータ α_1 の効果

メタル側での伝熱係数とスクラップ有効表面積との積すなわち、単位温度差当たりの伝熱速度 α_1 [kcal/°C·sec] を Table 1 の条件のそれぞれ 1.5 倍と 0.5 倍に変化した場合の計算結果を Fig. 12 に破線と一点鎖線で示した。また実線は Table 1 の条件で計算した結果である。

α_1 が小さいほど、スクラップへの伝熱速度は小さく

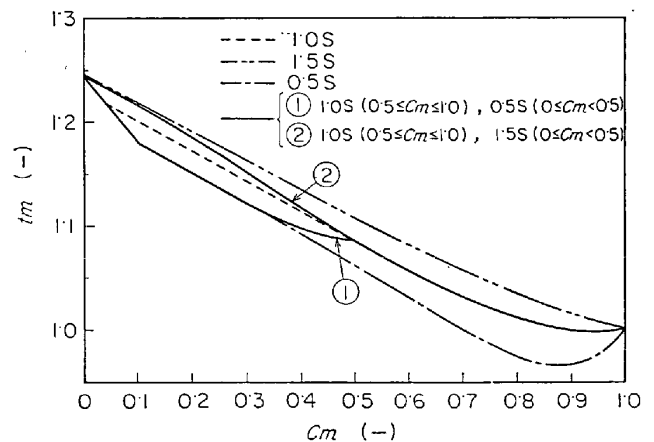


Fig. 11. Calculated results of c_m and t_m for the cases where flow rate of absorbed oxygen S was changed 0.5S and 1.5S, respectively, $c_m=0.5$.

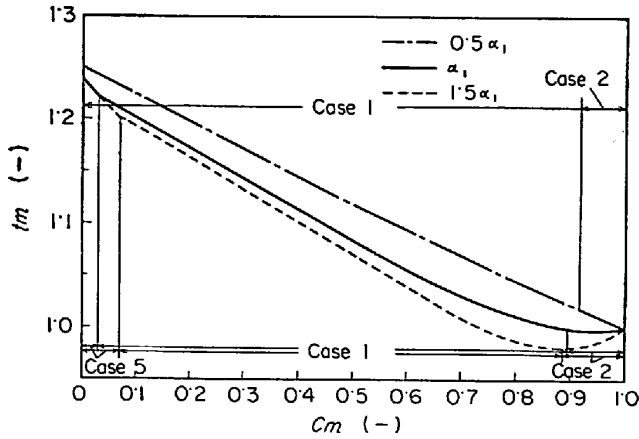


Fig. 12. Calculated results of c_m and t_m under the various values of α_1 .

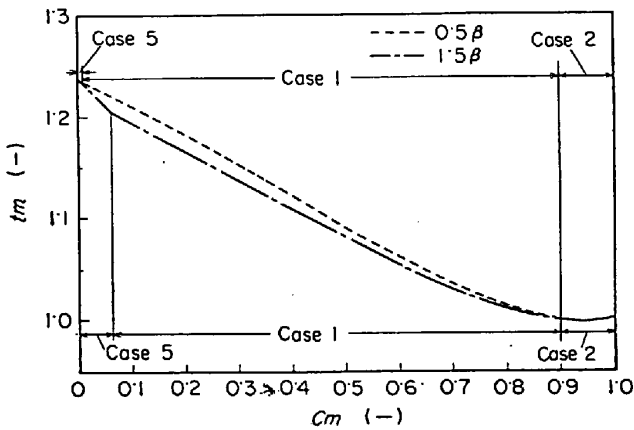


Fig. 13. Calculated results of c_m and t_m under the various values of β .

なり、溶鋼側に熱が蓄積されるため、同じ c_m で比べると、 t_m は高くなっている。また α_1 が小さくなるほど、Case 2 から Case 1 へ移る位置は高炭素側に Case 1 から Case 5 へ移る位置は低炭素側に移行する。

light scrap になるほどスクラップの有効表面積は増加すること、また、浴内流動が激しくなるほど伝熱係数が増大することから、light scrap で浴内流動が激しい場合には α_1 は大きくなる。そして、このような場合には T-C 線図上の挙動は液相線に漸近することとなる。このことは、すでに Fig. 5 で S が小さい場合に示した挙動と類似するものであり、heavy scrap で浴内流動が少なくても、小さい S で長時間吹錬を行なった場合には、light scrap で浴内流動が激しい場合と同様に取扱うことができることを意味している。

4.6.2 パラメータ β の効果

炭素の物質移動係数とスクラップの有効表面積との積すなわち、単位濃度差当たりの物質移動速度 β [kg(Fe)/sec] を Table 1 の条件のそれぞれ 1.5 倍と 0.5 倍に変化させた場合の計算結果を Fig. 13 に一点鎖線と破線

で示した。

β が小さいほど、スクラップ融解速度は遅くなり、融解の潜熱に消費される熱エネルギーが小さいために、同じ c_m で比べると t_m が高くなる。そのほか、T-C 線図上に現われた (c_m, t_m) の変化の傾向は、Fig. 12 と Fig. 13 で同様であり α_1 と β が c_m と t_m に及ぼす効果は類似しているものと考えられる。

なお、パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ の中にはスクラップ有効表面積が含まれているが、ここでは、吹錬経過に伴って、それが変化しないとして取り扱った。そのため吹錬末期でのスクラップ融解速度は、実測値より大きくなっているようである。この点をよく正確に表現するには、スクラップ有効表面積に適切な関数形を与えて計算する方法が考えられる。

5. 終点判定の考察

ここでは、LD 転炉における鋼浴の温度と炭素濃度の終点制御を T-C 線図に基づいて行なう場合について述べる。終点制御は T-C 線図上で装入溶銑の一点 (c_{mi}, t_{mi}) から目的とする最終製品の一点 (c_m, t_m) への軌跡を制御する問題となる。

前述のように、スクラップが存在する間はスクラップによる補償効果のため、操業中に採用した操作により生じた温度、濃度の変動幅を的確に把握することは困難な問題であると推察されるが、前述のように、スロッピングなどの 2 次的因子による効果を無視した場合には、スクラップ融解以後は、どのような吹錬条件の場合でも、T-C 線図上にえがいた軌跡はすべて平行になる。すなわち、融解終了点以後に加えられた操作によつて生じた温度や濃度の変動幅はそのまま吹き止めまで継続することになるので、T-C 線図に基づいた終点制御においては、スクラップの融解終了点を予知、あるいは確認することが必要になる。

次に、スクラップの融解終了点の判定については、非線形制御でよく使用されているような位相面図を導入する。すなわち、Fig. 14 に示したように、位相面図には縦軸に状態変数の一次導関数 $dt_m/d\theta$ を、横軸にその状態変数 t_m をとつて、鋼浴温度の推移を図示する。Fig. 14 には、本報の理論解析で取扱つたような理想化した場合 (A) と、酸化鉄生成反応やスラグ-メタル間の反応なども考慮して計算した場合に得られると推察されるような実操業に近い場合 (B) とに分けて、位相面図を示した。これらの図には第 1 と第 4 象限だけを示したが、第 1, 第 2 象限上の点は、温度増加率 $(dt_m/d\theta) > 0$ であるから、必ず横軸の正の方向に移行するし、第 3, 第

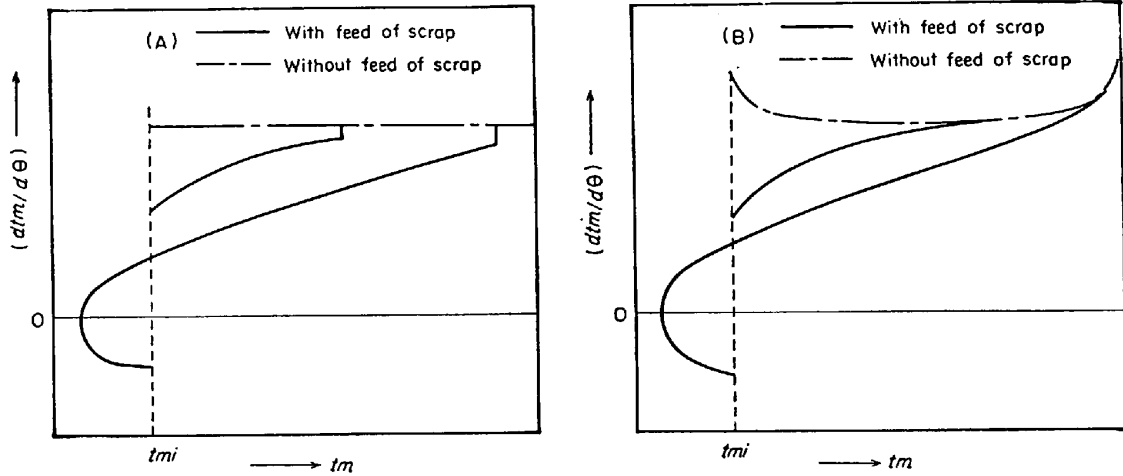


Fig. 14. Modified topological phase diagram of the bath temperature. (A) : ideal case, (B) : real case.

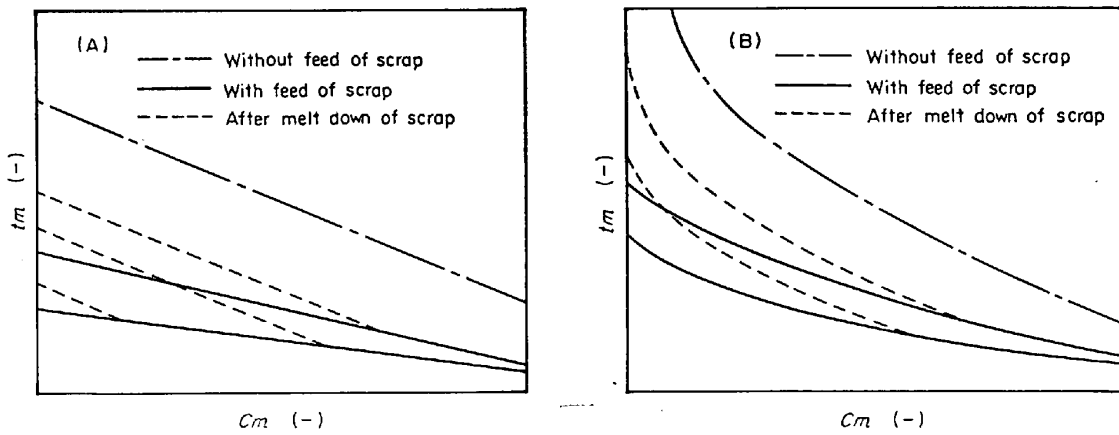


Fig. 15. Modified relation between c_m and t_m . (A) : ideal case, (B) : real case.

4象限上の点は $(dt_m/d\theta) < 0$ であるから横軸の負の方向へ移行する。

Fig. 14 (A) では、スクラップが装入されていない場合には、(21)式から容易にわかるように、位相面図上での軌跡は水平な直線となる。一方、スクラップが装入されている場合には、スクラップの冷却効果が働くため、スクラップが装入されていない場合の水平線よりも $dt_m/d\theta$ の値が大きくなる。なお、(21)式から水平線の高さは (A_1/W_m) となる。スクラップ装入量が多い場合には、吹錬初期に鋼浴温度の減少が起こり、 $(dt_m/d\theta) < 0$ となり、鋼浴温度 t_m はいつたん減少し、横軸に垂直に交差し、その後右上りの単調増加の曲線を描きスクラップの融解終了点に至つて、スクラップの装入がない場合の軌跡の水平線まで飛躍して、その水平線上を推移する。これは Fig. 15 で述べるように、スクラップの融解点で折点が現われるため、その点で温度上昇率 $(dt_m/d\theta)$ の値が不連続となるためである。

実操作の場合には Fig. 14 (B) に示したように、スクラップが装入されていない場合は、初期の脱ケイ素、末期の酸化鉄生成反応のために吹錬初期と末期で水平線からずれる。スクラップが装入されている場合には、その融解に伴つて漸近的にスクラップが装入されていない場合の軌跡に近づくことが考えられる。

スクラップの融解終了点の判定法として、まず位相面図の軌跡の傾き $d(dt_m/d\theta)/dt_m$ を次のように差分して、離散的な測定値からその値を算出する。すなわち、3点 $(\theta_1, t_1), (\theta_2, t_2), (\theta_3, t_3)$ の測定値から求めるには次のように差分すればよい。ただし、測定時刻の間隔は等しいものとする。 $(\theta_1 - \theta_2 = \theta_2 - \theta_3)$

$$\frac{d(dt_m/d\theta)/dt_m}{(\theta_1 - \theta_2) - (t_2 - t_3)/(t_2 - \theta_3)} \approx \frac{2/(t_1 - t_3) \cdot \{t_1 - t_2\}}{\dots} \equiv \gamma \quad \dots \dots \dots (24)$$

いま、スクラップの融解終了点での位相面図上の軌跡の傾きを γ_{md} とすれば、 γ_{md} はスクラップが装入されていない場合の γ の値に一致する点としてスクラップの

融解終了点を知ることができるものとする。

Fig. 15 に、理想化された場合の T-C 線図 (A) と実操業に近い場合の T-C 線図 (B) を図示した。前述の解析では、(A) 図のようにスクラップの融解終了点でその軌跡に折点が現われる。これは、 α_1 , α_2 , β を吹錬期間を通じて一定としたためであり、実際には、スクラップの融解に伴って、 α_1 , α_2 , β の中に含まれている有効表面積は小さくなり、融解終了点の近傍では α_1 , α_2 , β は零に漸近するため (B) 図のように折点は現われない。

また、吹錬末期では主反応が脱炭反応から酸化鉄生成反応に移行するため、反応熱の相違から (B) 図にみられるように $|dt_m/dc_m|$ は大きくなると考えられる。実操業では T-C 線図上の軌跡が 2 次的因子によつて影響を受けるはずであり、その理論的解析は困難であるが、実操業データを、たとえば、ランス高さや送酸量などをパラメータにして c_m と t_m の関係を統計的に処理すれば (B) 図のような軌跡を描くことが可能になるものと推察される。

融解終了点があつた場合には、T-C 線図を使用して、スクラップの融解終了後の c_m と t_m の挙動は、鋼浴の炭素濃度分析をしないで測温だけで予知することができよう。上述のように、T-C 線図上でスクラップの融解終了点と現時点での鉄浴温度を知ることができれば、現在進行している T-C 線図上の軌跡を知ることができる。この軌跡の延長上に目的とす設定値があればそのまま吹錬を続行すればよいし、この点と異なる場合には、軌道修正を適当な操作条件の変更によつて行なえばよい。また、この時点での操作変更は、スクラップの補償効果がないため非常に効果的に行なえるものと考えられるが、スクラップの融解後から目標の終点に至るまでの時間がかかり短い場合には、操作変更を迅速にしなければならなくなる。

6. 結 言

実際の吹錬において他の研究者によつて得られた実測データを T-C 線図上にプロットした結果、スクラップを装入しない場合と装入した場合とで大きな差異があることを見出した。なお、T-C 線図上で見るかぎり、スクラップが炉内で果たす役割は非常に大きく、吹錬経過に伴う溶鉄の温度と炭素濃度の変化は鉄-炭素系状態図の液相線に強く拘束されることがわかつた。

スクラップ温度、溶鋼の温度と炭素濃度、スクラップ融解速度に関する集中定数系のスクラップ融解モデルを展開した。このモデルを用いて、吹錬途中に溶鋼の温度

や炭素濃度に変動を与えた場合に起こる T-C 線図上での挙動を計算した結果、スクラップには補償効果があることを知り、その定性的な説明を行なつた。

次に、本モデルから得られた知見に基づいて、位相面図を用いた終点制御の一方法を提案した。

記 号

a : (1) 式で示される定数 ($^{\circ}\text{C}$)

b : (1) 式で示される定数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}(\text{Fe}) / \text{kg mol}(\text{C})$)

C, \underline{C} : 炭素濃度 ($\text{kg mol}(\text{C}) / \text{kg}(\text{Fe})$), (%)

c : 無次元濃度 $= c / C_{mi}$ (-)

c_p : 溶鋼, スクラップの比熱 ($\text{kcal} / \text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

ΔH_{CO} : 脱炭反応に伴うエンタルピー変化 ($-\text{kcal} / \text{kg mol}(\text{C})$)

ΔH_{Fe} : スクラップ融解の潜熱 ($\text{kcal} / \text{kg}(\text{Fe})$)

ΔH_{all} : 脱炭, 脱ケイ素, 酸化鉄生成反応に伴うエンタルピー変化 ($\text{kcal} / \text{kg}(\text{O})$)

S : 単位時間当たり溶鋼に吸収される酸素と反応する炭素量 ($\text{kg mol}(\text{C}) / \text{sec}$)

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t : 無次元温度 $= T / T_{mi}$ (-)

W : 質量 (kg)

w : 無次元質量 $= W / W_{mi}$ (-)

α_1 : 溶鋼側の伝熱係数とスクラップ有効表面積との積 ($\text{kcal} / \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

α_2 : スクラップ側の伝熱係数とスクラップ有効表面積との積 ($\text{kcal} / \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

β : 溶鋼側での炭素の物質移動係数とスクラップ有効表面積との積 ($\text{kg}(\text{Fe}) / \text{sec}$)

r : (24) 式で定義される値 (-)

θ, θ_i : 吹錬の経過時間, 全吹錬時間 (sec)

θ : 無次元吹錬時間 $= \theta / \theta_i$ (-)

σ_1 : 溶鋼に吸収された酸素のうち、脱炭反応に消費される割合 (-)

添 字

i : 吹錬開始時, m : 溶鋼, $[md]$: スクラップの融解完了, s : スクラップを表わす。

文 献

- 1) R. JESCHAR and E. MILLIES: Arch. Eisenhüttenw., 37 (1966), p. 283
- 2) 森, 野村: 鉄と鋼, 55 (1969) 5, p. 347
- 3) 有吉: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, p. S118
- 4) 太宰: 学術振興会製鋼第19委員会第3分科会資料 1967年10月
- 5) 成田, 富田, 小山, 伊藤, 広岡: 鉄と鋼, 55 (1969) 1, p. 59

-
- 6) 大矢, 古垣, 南: 鉄と鋼, 51(1965) 4, p. 748
7) 今井, 川上, 三好, 神保: 日本鋼管技報, 39 (1967), p. 19
8) 二上, 松田, 小谷野, 安居: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1491
9) K. GRÜNBERG, W. SCHLEICHER, and R. KUNZ: Stahl u. Eisen, 80 (1960) 5, p. 277
10) 武田: 鉄と鋼, 48 (1962) 9, p. 1085
11) E. Z. FREIDENZON, V. G. UDOVENKO, Yu. V. TORSHILOV, G. M. KOMPANIETS, M. A. TRETYAKOV, V. M. BARANOV, D. F. NAGOVITSIN, S. A. DONSKOI, and A. I. PASTUKHOV: Stal in English, June (1965), p. 469
12) 浅井, 鞭: 鉄と鋼, 55 (1969) 2, p. 122
-