

鋼浴中へのスクラップ溶解の熱・物質移動解析

川上 正博*・高谷 浩一*²・リヴィウ・ブラビエ*³

Heat and Mass Transfer Analysis of Scrap Melting in Steel Bath

Masahiro KAWAKAMI, Kohichi TAKATANI and Liviu C. BRABIE

Synopsis : In order to examine the effect of several parameters on steel scrap melting in molten steel, the heat and mass transfer coefficients were evaluated. The change in radius of steel scrap with time was obtained by the experiment with 30 kg steel bath. The simultaneous heat and mass transfer equations were numerically solved with the proper parameters which were obtained by adjusting the computed radius change to the experimental one. The results are summarized as follows;

- (1) The heat transfer coefficient was evaluated as 27.7 to 77.2 kW/m² K, and the mass transfer coefficient, as 0.83 to 2.08×10⁻⁴ m/s.
- (2) The heat transfer coefficient decreases with an increase in radius.
- (3) Both coefficients are independent of carbon content in steel bath.
- (4) Both coefficients increase with an increase in temperature.
- (5) The dimensionless correlation for heat and mass transfer are given as

$$Nu=0.017Re^{0.8}Pr^{1/3}, \quad Sh=0.017Re^{0.8}Sc^{1/3}$$

Key words: steelmaking; scrap melting; heat transfer coefficient; mass transfer coefficient; mathematical model; steel bath experiment; dimensionless correlations.

1. 緒言

地球環境問題に世界的な関心が集まる中で、廃棄物などの資源再利用の観点からリサイクル社会の構築の必要性が高まっている。鉄は金属の中で大量に生産、使用されている金属であり、鉄スクラップの蓄積量が年々増加傾向にある。したがって、スクラップを用いた製鋼は今後の製鋼法の重要な一つであり、その際、スクラップの溶解速度は円滑な操業を左右する重要な因子となる。このため、スクラップの溶解速度に影響を及ぼす物理的、化学的要因の解明が必要となる。

従来、スクラップ溶解に関する報告は、転炉におけるスクラップ使用のニーズから1965年頃より見られる。転炉においては、時々刻々温度および炭素含有量が変化するので、そのことを組み入れたシミュレーション計算が報告されている¹⁻⁶⁾。その際必要な速度パラメータを求めるために小規模実験がなされている。一般に、スクラップの溶解は、鋼浴の炭素含有量と温度がスクラップと異なるため、熱と物質の同時移動現象としての取扱いが必要であるが、報告されたものは、①物質移動のみを扱ったもの⁷⁻¹²⁾、②熱移動のみを扱ったもの¹³⁻¹⁵⁾、③熱・物質の同時移動を扱ったもの^{4,6,13,16-18)}に分けられる。このうち、物質移動に

関しては比較的精度の良い測定がなされ、物質移動係数に関する無次元相関式が提案されている。しかし、熱移動の関与した実験は、初期に凝固殻が生成される等現象が複雑であり、十分解明されているとは言い難く、熱伝達率の系統的整理はされていない。

そこで本研究では、熱および物質の同時移動を考慮したスクラップ溶解の数式モデルを構築し、実験と合わせることで鋼浴-スクラップ間の熱伝達率および物質移動係数を求め、それらのスクラップの大きさや表面性状、鋼浴の炭素含有量、底吹きガス攪拌、浴温度による変化を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 溶解試料

溶解試料は材質S25C、直径30~50 mm、長さ180 mmの炭素鋼丸棒である。試料は機械加工後、付着した切削油をアセトンにより脱脂したものとししないものを用いた。また、鋼浴中への浸漬、引上げのためのサポートロッドとして、長さ500 mmの配管用鋼管にねじを切り、溶解試料に取り付けた。なお、黒皮の付いた試料については、直径30 mmの黒皮の付いた炭素鋼丸棒から切り出し、ねじを切りサ

平成10年12月7日受付 平成11年6月9日受理 (Received on Dec. 7, 1998; Accepted on June 9, 1999)

* 豊橋技術科学大学 (Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibiyaoka Tempaku-cho Toyohashi 441-8580)

*² 豊橋技術科学大学大学院生 (現: 福島印刷 (株)) (Graduate Student, Toyohashi University of Technology, now Fukushima Printing Ltd.)

*³ 豊橋技術科学大学大学院生 (Graduate Student, Toyohashi University of Technology)

ポートロッドに取り付けた。なお、機械加工時の切削油はアセトンにより脱脂し用いた。

2・2 実験装置

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。30 kg 高周波誘導炉に電融マグネシア粒をスタンプし、内径 150 mm、高さ 350 mm の坩堝を作製した。ここに材質 S25C の母鉄鋼を 20 kg 溶解し、鋼浴とした。底吹きガス攪拌を行うため、窒素ガスを坩堝底部中心に取り付けたノズルから供給した。ノズルは銅管で保護した内径 1.5 mm のムライト管を用いた。ガス流量は、ガスポンペとノズルの間に配置したバルブおよびフローメータにより制御した。

2・3 実験操作

坩堝に浴となる鋼を溶解する際、ノズル閉塞を防ぐために約 $3.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (stp) の窒素ガスを流した。鋼が完全に溶解した後、炭素含有量、温度、ガス流量を所定の実験条件に設定した。炭素含有量は、母鉄鋼に必要な量の黒鉛片を投入して調整した。この場合、一部の実験では炭素が浴中に溶込んだ酸素と反応し CO ガスとして逃げってしまうのを

防ぐため、必要に応じてアルミ脱酸を行った。温度は石英管を保護管とした Pt-13%Rh-Pt 熱電対を用いて測定し、高周波誘導炉の出力を手動調整することにより所定温度に設定した。

試料は、常温から浴中へ迅速に所定の位置まで浸漬し、所定の時間保持した。浸漬中は坩堝上部からの放熱による浴温の低下を防ぐため、サポートロッドに耐火煉瓦を取付け、坩堝との隙間を塞ぐ蓋とした。試料は所定時間浸漬後、迅速に引上げ水中で急冷した。

試料半径変化は浸漬前に試料の半径、全長、重量を、また浸漬後に浸漬深さ、重量を測定することにより以下の計算式から求めた。

$$V = \frac{\pi d^2 L}{4w} \dots\dots\dots (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{(w' - w \cdot l' / L)V}{\pi}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで V は単位重量当たりの体積、 r は浸漬部半径、 d は浸漬前の直径、 L は全長、 w は浸漬前重量、 w' は浸漬後重量、 l は浸漬深さ、 l' は非浸漬深さである。

実験条件を Table 1 に示す。実験ではスクラップの溶解速度に及ぼす直径、表面性状、浴炭素含有量、ガス流量、初期浴温度の影響を調べた。直径変化の影響を調べる実験では、直径 30, 40, 50 mm の試料を用いた。表面性状の影響を調べる実験では、試料直径 30 mm の機械加工して脱脂した試料、油膜の付いた試料、黒皮の付いた試料を用いた。鋼浴中の炭素含有量の影響を調べる実験では、炭素含有量を 0.25, 2, 4 mass% とした。ガス流量の影響を調べる実験では、ガス流量を 0, 5.00, $8.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (stp) とした。初期浴温度の影響を調べる実験では初期浴温度を 1873, 1773, 1673K とした。

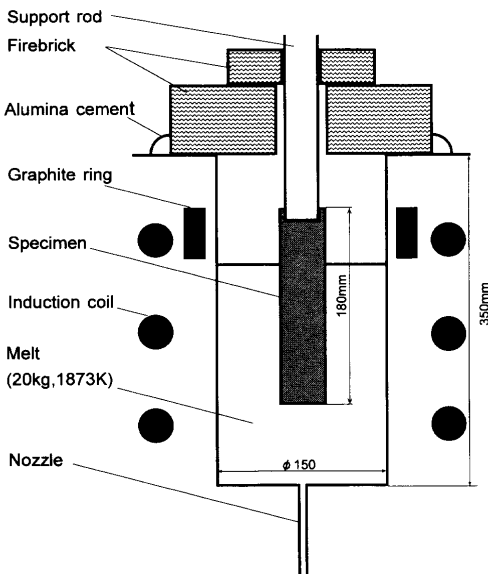


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions.

Diameter of specimen (mm)	Specimen surface	Carbon content of melt (mass%)	Gas flow rate ($\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (stp))	Melt	Temperature of melt (K)
30 40 50	degreased	0.25	8.33	no deoxidation	1873
30	degreased as machined dark scale	0.25	8.33	no deoxidation	1873
30	degreased	0.25 2 4	8.33	no deoxidation	1873
30	degreased	0.25	no gas injection 5.00 8.33	no deoxidation	1873
30	degreased	0.25	8.33	no deoxidation deoxidation	1873
50	degreased	4	no gas injection 8.33	deoxidation	1873 1773 1673

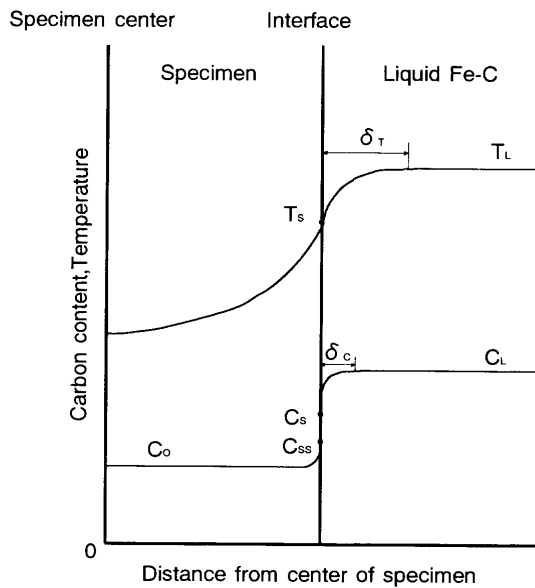


Fig. 2. Schematic profiles of temperature and carbon content near the interface.

3. 解析方法

3.1 複合スクラップ溶解モデル

Fig. 2に、スクラップの溶解中の定性的な温度と炭素含有量の概念図を示す。この図は、試料よりも浴の方が温度、炭素含有量ともに高い場合である。溶解時には、浴から試料界面に炭素が拡散して界面の融点を低下させると同時に、試料界面から浴中に鉄の拡散が起こる。また、浴から試料に供給された熱は、溶解熱とスクラップ内部の昇温に使われる。この時、界面の炭素含有量と温度は、熱移動と物質移動が均衡する点として求まる。

高温の浴中へ、常温の試料が浸漬されると、試料周辺の浴が急冷されるため、試料に凝固層が付着する。その凝固付着層の成長が終了した時点で、溶解が始まる。

溶解機構は、浴の炭素含有量や浴攪拌等に依存すると考えられる。界面における熱および物質移動は、熱伝達率と物質移動係数により評価される。

本モデルの解析では、試料内部の温度分布を示す非定常熱伝導方程式と、溶解・凝固を伴う場合の浴-試料界面でのヒートバランス式と、界面移動を伴う拡散過程の場合の物質移動の式を連立させた。また凝固相が試料界面に付着している場合、凝固付着層-試料界面での接触熱抵抗が生じ熱伝達が遅れる。この遅れはモデル試料内部の界面の隣に試料の熱伝導率よりも小さい熱伝導率の別の層を設けることで処理した。

溶解・凝固中の界面温度は界面炭素含有量の液相線上温度とし、浴温度の降下の式は実験値を一次関数により近似した。

3.1.1 非定常熱伝導方程式

本モデルでは、熱伝導現象を半径方向の一次元熱伝導と

考え、円柱座標系で取扱う。この場合、非定常熱伝導方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 C_p は比熱、 ρ は密度である。(3)式は境界面が移動しない場合の基本式であり、これに移動境界の補正を行い、さらに試料の熱伝導率、比熱が温度により変化すること^{19,20)}を考慮する。

3.1.2 界面におけるヒートバランス式

溶解・凝固を伴う場合の界面におけるヒートバランス式は、次のようになる。

$$h(T_L - T_s) = \frac{\lambda}{r_s} \left| \frac{\partial T}{\partial \eta} \right|_s - H\rho \frac{dr_s}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 T_L は浴温度、 T_s は界面の温度、 h は熱伝達率、 H は溶解・凝固潜熱、 r_s は時間により変化する試料半径、 η は r_s で無次元化した半径である。この式で、左辺は浴と試料間の単位面積当たりの熱伝達速度、右辺第一項は界面から試料内部への熱伝達速度、右辺第二項は界面での溶解・凝固の潜熱の項で、溶解時には正、凝固時には負の値をとる。

3.1.3 界面移動を伴う拡散過程の場合の物質移動式

固相中の拡散に比べ、溶鉄中への溶解過程は十分速いと考えられるので、浴と試料の密度比を1と仮定すると、界面の移動速度は次のように与えられる²¹⁾。

$$-\left(\frac{dr_s}{dt} \right) = u \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{(C_L - C_s)}{(C_s - C_0)} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$u = \frac{D}{\delta_c} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 C_0 、 C_s 、 C_L はそれぞれ試料、界面、浴の炭素含有量、 u は物質移動係数、 D は相互拡散係数、 δ_c は界面における濃度境界層厚さである。なお、凝固層の付着のある場合には、 $C_s = C_L$ と考え、(3)、(4)式のみを用いて解析し、凝固層が消えた時点で(5)、(6)式を適用した。

3.1.4 凝固付着層と試料界面間の伝熱抵抗

試料に凝固層が生成している場合、試料界面と凝固付着層との間にエアギャップができ、凝固層と試料界面で伝熱抵抗を生じる。

その場合、磯部ら⁶⁾は伝熱抵抗を以下の式で示した。

$$\lambda_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial r} \right)_{s'} = hc(T_{f,s'} - T_{s,s'}) \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial r} \right)_{s'} = hc(T_{f,s'} - T_{s,s'}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 h_c は接触熱伝達率、添字の s は試料、 f は凝固付着層、 s' は凝固付着層-試料界面である。

本解析モデルにおいて、凝固付着層-試料界面位置を算出し、(7)、(8)式の $hc(T_{f,s'}-T_{s,s'})$ 項を取入れることは複雑困難なため、試料内部に新たに熱伝導率 λ_c の別の層を設け、次のように表し、

$$\lambda_c \left(\frac{\partial T_s}{\partial r} \right)_{s'} = hc(T_{f,s'} - T_{s,s'}) \dots\dots\dots (9)$$

λ_c をパラメータとして用いる。 λ_c は、凝固付着層を考慮しない場合の熱伝導率 λ と任意定数 l を用いて次のように表した。

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{l} \dots\dots\dots (10)$$

本研究では、定数 l は実験結果と比較しながら試行錯誤し決定した。その結果、 $l=10$ とした時に解析値と実験値が良い一致を示した。そのため、全実験条件の解析で $l=10$ とした。

3・1・5 炭素含有量と液相線温度の関係式

炭素含有量が 4.34 mass% 以下の場合、炭素含有量と液相線温度の関係が、森ら²⁾により次のように示されている。

$$T = -8.13C^2 - 54.0C + 1809 \dots\dots\dots (11)$$

界面では、溶解・凝固が起こっているため、(11)式の炭素含有量に界面炭素含有量を用いることにより、液相線上の温度を求め、これを界面温度とした。

3・1・6 浴温度の降下

通常は、鋼浴温度は一定となるように実験を行う。しかし今回の実験では、鋼浴量が少なく、試料の装入により浴温度が低下した。そこで、浴温度の経時変化を一次関数で近似し、解析に取り入れた。

$$T_L = a + b \cdot t \dots\dots\dots (12)$$

ここで a, b は実測により決定した。

3・2 数値設定

(3)式の熱伝導方程式の境界条件は、次の式で示される。

$$\begin{aligned} r=0 \quad \partial T / \partial r &= 0 \\ r=r_s \quad T &= T_s \\ r=\infty \quad T &= T_{L,b} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

また、物性値は以下の値を用いた。

$$\begin{aligned} H &= 276,243 \text{ J/kg}^{21)} \\ \rho &= 7,600 \text{ kg/m}^3^{22)} \\ D &= 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}^{22)} \\ \alpha_L &= 1.135 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^{22)} \end{aligned}$$

$$\lambda_L = 34.7 \text{ W/mK}^{21)}$$

ここで、 α_L は浴の熱拡散率、 λ_L は浴の熱伝導率である。試料の熱伝導率 λ 、比熱 C_p については、熱伝導率 λ は常温から 973K にかけて大きく変化し、それ以上ではそれほど変化しないこと、比熱 C_p はキューリー変態点付近で急激に変化することを考慮して最小二乗法で数式化して用いた。

温度境界層と濃度境界層の厚さについて、平板上を熔融金属などの液体が流れる場合の熱移動、物質移動に関する無次元相関式から、森らが以下のような式を導いている²⁾。

$$\frac{\delta_T}{\delta_C} = \left(\frac{\alpha_L}{D} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (14)$$

$$h = \frac{k_L}{\delta_T} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 δ_T は温度境界層厚さである。

(6)、(14)、(15)式から溶鉄側の熱伝達率と物質移動係数の関係が、以下のように求まる。

$$\frac{\delta_T}{\delta_C} = 10.4 \dots\dots\dots (16)$$

$$h = \frac{34.7}{\delta_T} \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{h}{u} = 3.32 \times 10^8 \dots\dots\dots (18)$$

この関係から、濃度境界層厚さを決定すれば、総括熱伝達率、物質移動係数が設定できる。

野村ら⁹⁾が求めた濃度境界層厚さは、 $\delta_C = 5 \cdot 10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}$ である。この値の範囲で濃度境界層厚さをパラメータとして選び、 h と u を設定した。なお、凝固付着層がある場合は、この h のみを用い、熱移動計算のみを行った。また、浴炭素含有量が 0.25 mass% である場合、物質移動は起こらないので、熱伝達率 h をパラメータとした。また、凝固付着層のある場合も無い場合も h の値は変わらないと仮定した。

3・3 数値解析法

解析は、(3)、(4)、(5)式を基礎式とし、逐次過緩和法 (Successive Over Relaxation method, 以下略してSOR法) で行う。SOR法は陰解法であるが、連立方程式を解かずに反復計算で処理するので、アルゴリズムが比較的簡単であるという利点がある。

単位時間は、解析が十分に安定して続行されるような値でなければならない²³⁾。このことから、本モデルでは単位時間を 0.01s に設定した。試料内部は、半径方向を 25 に区切り、これら 1 区間の温度を計算した。それぞれの点における初期温度は室温 293K に設定した。温度収束の判別値は、1K とした。また、界面位置および界面炭素含有量の

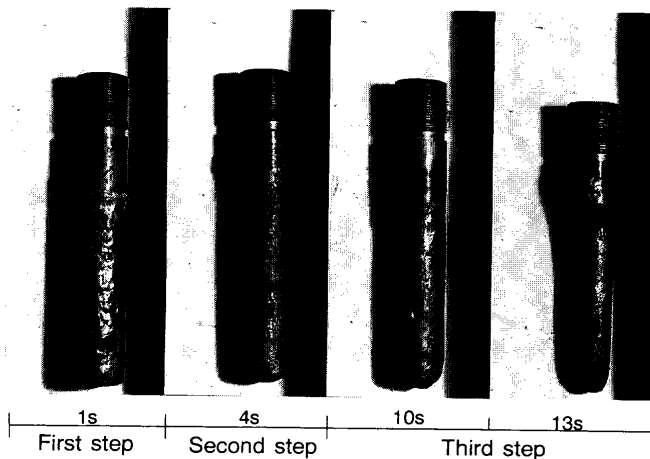


Fig. 3. Photograph of specimen after immersion into steel bath.

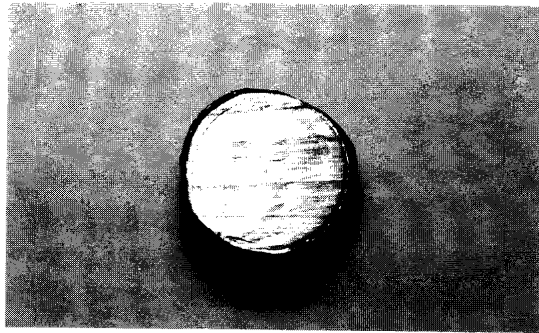


Fig. 4. Cross section of the specimen rod after one second immersion.

判別値は、それぞれ、 10^{-7} m, 0.1 mass%とした。

このような計算より、試料半径の経時変化を求め、それが実測値と合うように、熱伝達率 h および物質移動係数 u を決めた。

4. 実験結果および考察

4.1 溶解試料の観察

Fig. 3に浴温1873K、浴炭素含有量2 mass%、底吹きガス流量 8.33×10^{-5} m³/s (stp)、試料直径30 mmにおける実験後の試料の写真を示す。この写真から凝固層付着・溶解過程は大きく三段階に区分できる。

第一段階は凝固付着層成長期である。ここでは凝固付着層は浸漬直後から付着し始め、試料浸漬部にわたりほぼ一様に付着している。

第二段階は凝固付着層溶解期である。やがて凝固付着層の成長が止まると、凝固付着層は溶解し始める。ここでは凝固付着層の厚さが第一段階に比べ薄くなっており、凝固付着層が溶解している。

第三段階は試料溶解期である。溶解した試料の形状は浸漬部中間では、ほぼ同じ直径であり末端でわずかに細くなっている。これはWrightの報告¹²⁾の結果と同じであっ

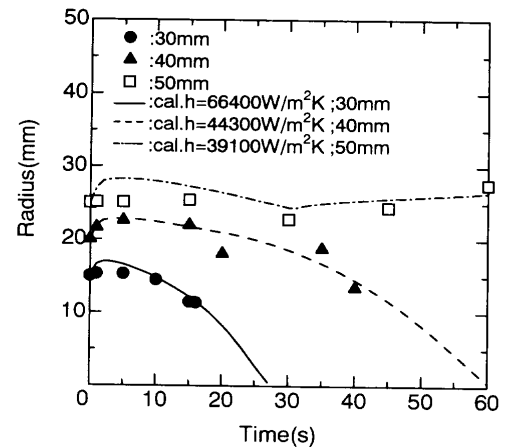


Fig. 5. Change in radius with time in 0.25 mass% bath: experimental and calculated.

た。

いずれの段階においても試料形状は円柱状であった。したがって、半径計算方法および解析における半径方向の一次元熱伝導の取扱いの妥当性が証明された。

Fig. 4に浴温1873K、浴炭素含有量0.25 mass%、底吹きガス流量 8.33×10^{-5} m³/s (stp)、試料直径30 mmにおける実験の溶解試料の半径方向断面写真を示す。この写真から凝固付着層と試料の間に隙間が確認でき、また凝固付着層が一部試料から剥離しているのが分かる。このことから、凝固付着層-試料界面に伝熱抵抗があると考えられ、解析に凝固付着層-試料界面での伝熱抵抗を取入れたことは妥当であると考えられる。

4.2 溶解速度に及ぼす試料直径の影響

Fig. 5に試料直径を変化させた場合の実験結果と解析結果を示す。この実験では浴の炭素含有量は試料と同じであり、熱移動のみを考える。プロットは実測値である。試料径が30, 40 mmの場合、試料半径が一度ピークに達し、その最大値を過ぎた所から溶解が確認された。しかし50 mmの場合では、浸漬時間15 sの時に一度ピークを迎え、30 sまで試料半径は小さくなるが、その後、再び凝固付着層が増す現象が確認された。

Fig. 6に示す浴温変化を数式化し、Fig. 5の半径の実測値に合うように熱伝達率 h を試行錯誤的に決定した。熱伝達率 h は、それぞれ、30 mm, 40 mm, 50 mmの場合に66,400, 44,300, 39,100 W/m²Kと見積もることにより、実験データを説明することができた。なお、50 mm試料の30 s以後における凝固付着層厚さの増大は、浴温低下を考慮することで、解析結果にも現れた。熱伝達率は、試料径の大きい方が小さかった。

4.3 溶解速度に及ぼす試料表面性状の影響

Fig. 7に、試料表面性状と総括熱伝達率の関係を示す。油膜の付いた場合の総括熱伝達率は脱脂した場合に比べ、わずかに減少するが、黒皮の付いた場合の総括熱伝達率は脱脂した試料の総括熱伝達率の約半分になることが分かっ

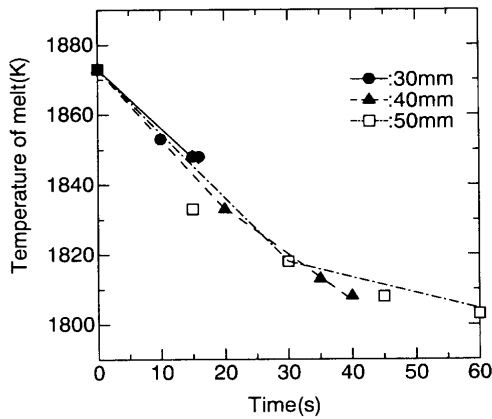


Fig. 6. Change in temperature of steel bath with time.

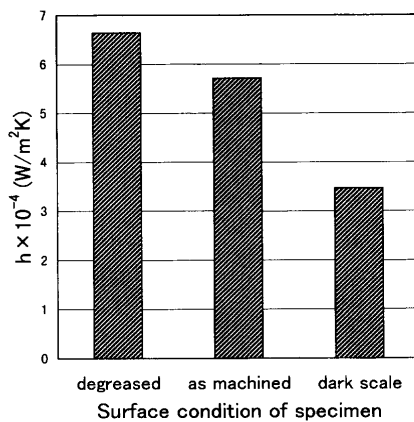


Fig. 7. Heat transfer coefficient in different surface condition.

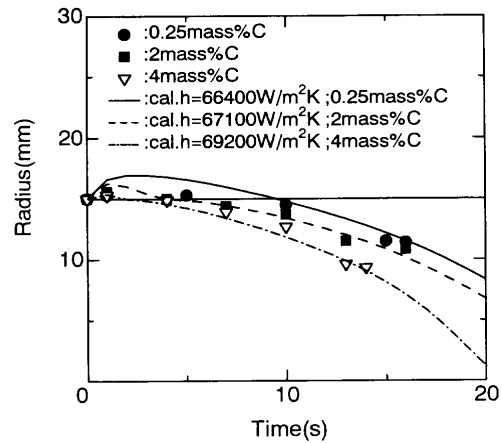


Fig. 8. Change in radius with time at different carbon content: experimental and calculated.

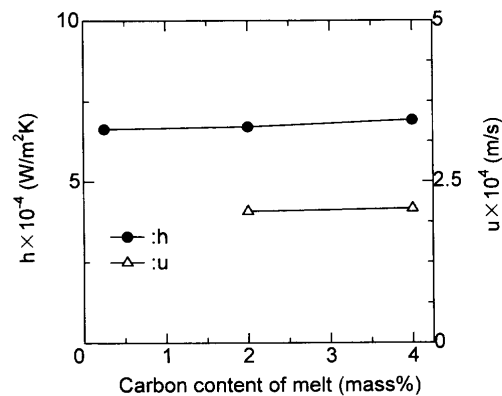


Fig. 9. Heat transfer coefficient and mass transfer coefficient at different carbon content.

た。黒皮は酸化鉄であり、その還元で熱が余分に消費されたためと考えられる。

4.4 溶解速度に及ぼす浴炭素含有量の影響

この実験では、試料と浴の炭素含有量が異なるので、試料溶解期には(3)、(4)式に加え(5)式を用いる必要がある。そこで、前述の方法により、熱伝達率 h および物質移動係数 u を算出した。Fig. 8にその解析結果を示す。

熱伝達率 h は、0.25, 2.0, 4.0 mass%の場合で、それぞれ、66,400, 67,100, 69,200 W/m²Kと見積もることにより、実験データとうまく合わせることができた。

また、物質移動係数は、2.0, 4.0 mass%の場合に、それぞれ、 2.04×10^{-4} , 2.08×10^{-4} m/sとなった。

Fig. 9に浴の炭素含有量と物質移動係数および熱伝達率の関係を示す。2.0, 4.0 mass%と変えても、物質移動係数はほとんど同じであった。熱伝達率を比較すると、0.25, 2.0, 4.0 mass%と異なる場合でもほとんど同じであった。このことより溶解速度の差異は浴と試料の炭素含有量の違いのみにより生じることになり、含有量の差が大きいほど溶解速度は大きくなる。

4.5 溶解速度に及ぼす底吹きガス攪拌の影響

Fig.10にガス流量と熱伝達率の関係を示す。底吹きガス

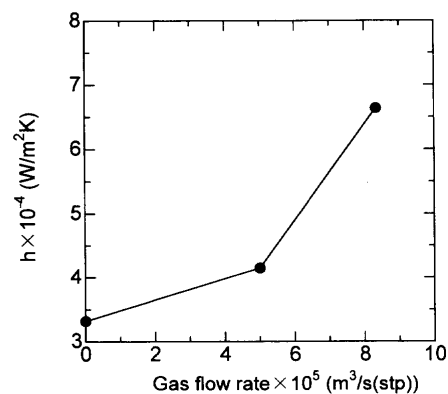


Fig. 10. Effect of gas injection rate on heat transfer coefficient.

流量 8.33×10^{-5} m³/s (stp)までは、ガス流量が増加するにつれて熱伝達率が大きくなった。ただし、ガス流量を2水準しか変化させていないので、Wright¹²⁾のような定量的な関係は求めなかった。

4.6 溶解速度に及ぼす初期浴温度の影響

Fig.11に、初期炭素含有量4.0 mass%、試料径50 mm、各初期浴温度で得られた熱伝達率と物質移動係数のアレニウス型プロットを示す。初期浴温度が高いほど熱伝達率、物質

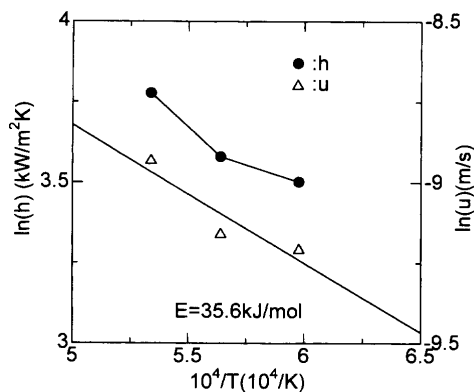


Fig. 11. Effect of temperature on heat transfer coefficient and mass transfer coefficient.

移動係数は大きかった。物質移動係数については活性化エネルギーを算出したところ、35.6 kJ/molであった。一般に物質移動の活性化エネルギーは約40 kJ/molと知られており、本結果とほぼ同様の値である。

4・7 無次元相関式

本研究では、種々の条件で行った実験より、濃度境界層厚さ δ_c は $4.3 \sim 15 \times 10^{-5}$ m で、熱伝達率 h は $27.7 \sim 77.2$ kW/m²K で、物質移動係数 u は $0.83 \sim 2.08 \times 10^{-4}$ m/s と見積もられた。これらの結果を整理するために無次元相関式の導出を試みた。

平板上を液体金属などの流体が流れる場合の強制対流条件下における熱移動、物質移動に対して、次のような無次元相関式が与えられている^{9,24-26}。

$$Nu=0.036Re^{0.8}Pr^{1/3} \dots \dots \dots (19)$$

$$Sh=0.036Re^{0.8}Sc^{1/3} \dots \dots \dots (20)$$

ここに、無次元パラメータのヌッセルト数 Nu, シャーウッド数 Sh, レイノルズ数 Re, プラントル数 Pr, シュミット数 Sc は通常定義に従うものである。これらのパラメータを決める物性値は前出のものを用いた。また、代表長さは試料直径とした。代表速度は以下の方法で推定した。

浴の流動速度はガス攪拌を行った場合とガス攪拌を行わない実験の2種類に分けられる。しかし、後者の場合には推定法が見あたらなかったが、前者の場合は気泡上昇速度から見積もる方法をとった。すなわち、浴の流動速度を気泡上昇速度 u_b と単一気泡上昇速度 u_i の差とし、次式のように求めた。

$$u_\infty = u_b - u_i \dots \dots \dots (21)$$

気泡上昇速度 u_b は以前に本研究室で求められた浴温 1523K での溶銅浴中心軸上の気泡上昇速度²⁷が本実験のガス攪拌システムに利用できると仮定し、 $u_b=1.6$ (m/s) で一定とした。一方、単一気泡上昇速度 u_i は Davies と Taylor ら^{28,29}によって次式で与えられる。

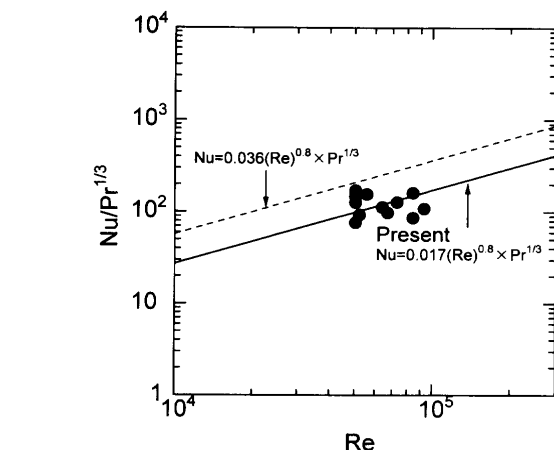


Fig. 12. Dimensionless correlation for heat transfer under gas injection condition.

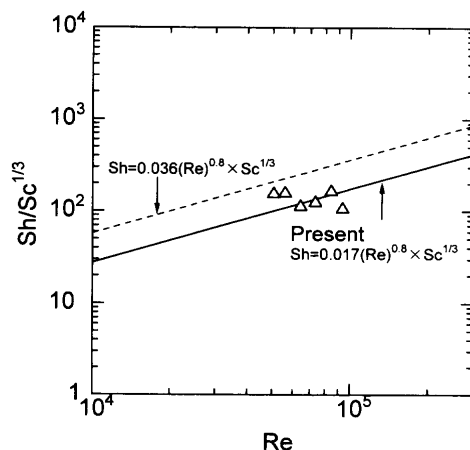


Fig. 13. Dimensionless correlation for mass transfer under gas injection condition.

$$u_i = 0.79g^{1/2}V_B^{1/6} \dots \dots \dots (22)$$

ここで g は重力加速度、 V_B は気泡体積で、Irons and Guthrie の文献³⁰の Fig.16 を用いて推定した。

得られた浴の流動速度および物性値を用い、縦軸に $Nu/Pr^{1/3}$ 、横軸に Re 数を取り、プロットしたのが Fig.12 である。 $Nu/Pr^{1/3}$ の Re 数に対する依存性を上記文献と同じと仮定して直線回帰を行い、熱伝達率に対し次のような相関が得られた。

$$Nu=0.017Re^{0.8}Pr^{1/3} \dots \dots \dots (23)$$

同様に、縦軸に $Sh/Sc^{1/3}$ 、横軸に Re 数を取り、Fig.13 にプロットし、物質移動係数に対し次のような相関が得られた。

$$Sh=0.017Re^{0.8}Sc^{1/3} \dots \dots \dots (24)$$

(23), (24) 式は、装置の規模などが異なった場合のガス攪拌下における円筒形試料の熱伝達率、物質移動係数を見積もるために有効であると思われる。

5. 結言

溶鋼中への円筒スクラップ溶解時の熱・物質移動を検討するために、浴温降下、スクラップ界面と凝固付着層との接触熱抵抗を考慮した熱・物質移動のスクラップ溶解の数式モデルを構築し、解析を行った。また、高周波誘導炉において、スクラップ溶解実験を行い、解析結果の比較、検討を行った。さらに諸要因の変化にともなう溶解速度の変化を調査した。

これらのことから、以下のことが分かった。

(1) 本実験の条件下では、熱伝達率 h は 27.7~77.2 kW/m²K、物質移動係数 u は $0.83\sim 2.08\times 10^{-4}$ m/s と求まった。

(2) スクラップ径が大きいほど、熱伝達率は小さく、溶解速度も小さい。

(3) スクラップ表面の油膜は熱伝達係数にあまり影響せず、溶解速度にも影響しない。しかし、表面の黒皮は見かけ上、熱伝達率を大幅に減少させ、大幅に溶解速度を減少させる。

(4) 熱伝達率、物質移動係数は浴炭素含有量によらず一定であった。溶解速度は浴とスクラップの炭素含有量の差により生じ、炭素含有量の差が大きいほど、溶解速度は大きい。

(5) 底吹きガス流量 8.33×10^{-5} m³/s (stp) までは、ガス流量が増加するにつれて、熱伝達率は大きくなり、溶解速度も大きくなる。

(6) 浴温度が高いほど、熱伝達率、物質移動係数は大きく、溶解速度も大きい。

(7) ガス攪拌下の熱移動、物質移動に関し、以下の無次元相関を得た。

$$Nu=0.017Re^{0.8}Pr^{1/3}$$

$$Sh=0.017Re^{0.8}Sc^{1/3}$$

本研究の一部は平成6年度鉄鋼研究振興資金による助成を受けて行われた。ここに、記して謝意を表します。また、

実験遂行の補助を受けた学部学生の太田仁一君、助言を受けた竹中俊英助教授、横山誠二講師にも謝意を表します。

文 献

- 1) T.Hasegawa, K.Nikami, K.Matsuda, K.Koyano and T.Yasui: *Tetsu-to-Hagané*, **53** (1967), 304.
- 2) K.Mori and H.Nomura: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), 347.
- 3) S.Asai and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1970), 546.
- 4) J.Szekely, Y.K. Chuang and J.W.Hlinka: *Metall. Trans.*, **3** (1974), 2825.
- 5) H.Gaye, M.Wanin, P.Gugliemina and Ph.Schittly: Proc. 68th Steel-making Conf., AIME, Warrendale, (1985), 91.
- 6) K.Isobe, H.Maede, K.Ozawa, K.Umezawa and C.Saito: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 2033.
- 7) R.G.Olsson, V.Koump and T.F.Perzak: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **233** (1965), 1654.
- 8) M.Kosaka and S.Minowa: *Tetsu-to-Hagané*, **53**(1967), 983.
- 9) H.Nomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), 1134.
- 10) Y.U.Kim and R.D.Pehlke: *Metall. Trans.*, **5** (1974), 2527.
- 11) K.Mori and T.Sakuraya: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **22** (1982), 984.
- 12) J.K.Wright: *Metall. Trans. B*, **20B** (1989), 363.
- 13) R.I.L.Guthrie and L.Gourtsoyannis: *Can. Metall. Q.*, **10** (1971), 37.
- 14) O.Ehrich, Y.K.Chuang and K.Schwerdtfeger: *Arch. Eisenhüttenwes.*, **50** (1979), 329.
- 15) E.Specht and R.Jeschar: *Steel Res.*, **64** (1993), 28.
- 16) R.D.Pehlke, P.D.Goodeel and R.W.Dunlop: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **233** (1965), 1420.
- 17) R.I.Guthrie and P.Stubbs: *Can. Metall. Q.*, **12** (1973), 465.
- 18) C.E.Seaton, A.A.Rodriguez, M.Gonzalez and M.Manrique: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23** (1983), 14.
- 19) 溶鉄・溶滓の物性便覧, 日本鉄鋼協会, 東京, (1979), 235.
- 20) The Physics Division of the National Physical Laboratory: *J. Iron Steel Inst.*, Symp., **154** (1946), 83.
- 21) J.M.Lommel and B.Chalmers: *Trans. TSM-AIME*, **215** (1959), 499.
- 22) J.H.Ludley and J.Szekely: *J. Iron Steel Inst.*, **204** (1966), 12.
- 23) L.Lapidus: *Digital Computation for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, New York, (1962).
- 24) 藤本武助, 佐藤 俊: 伝熱工学, 共立出版, 東京, (1967), 34.
- 25) W.N.Gill, R.P.Vanek, R.V.Jelinek and C.S.Grove, Jr.: *AIChE J.*, **6** (1960), 139.
- 26) A.P.Colburn: *Trans. AIChE*, **29** (1933), 174.
- 27) M.Kawakami, S.Hosono, K.Takahashi and K.Ito: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 267.
- 28) J.Szekely: *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, Academic Press, New York, (1979), 324.
- 29) R.M.Davies and G.I.Taylor: *Proc. R. Soc. (London) A*, **200A**, (1950), 375.
- 30) G.A.Irons and R.I.L.Guthrie: *Metall. Trans. B*, **9B** (1978), 101.