

放射および自然対流伝達条件下における鉄鋼スクラップ予熱過程の基礎的解析

汪 涛*・川上 正博*²・森 謙一郎*²

Fundamental Analysis of Heat Transfer in Steel Scrap Preheating under Radiative and Convective Conditions

Tao WANG, Masahiro KAWAKAMI and Kenichiro MORI

Synopsis : Heat transfer in a preheating process of steel scraps was analyzed by taking convection combined with radiation into consideration. The analysis of simultaneous heat transfer has been carried out by experimental and mathematical methods. To examine the accuracy of calculation, the experiment was carried out in He, N₂ and Ar atmosphere under reduced, ambient and high pressure. The commercial FEM software ANSYS was used for simulation. The simulated results agreed well to the experimental ones with the specimen surface emissivities of 0.4. The convective heat transfer coefficient was estimated. The coefficient increased with increase in pressure and with decrease in temperature. The ratio of heat quantity between overall and convective heat $-\psi$, is varied with the crucible temperature, and can be expressed by the following correlation: $\psi = \beta e^{\gamma T}$. The heat transfer coefficient can be summarized in the following dimensionless correlation:

$$Nu_{\xi} = 2.62 Re_{\xi}^{0.15}$$

Key words : heat transfer; radiation; natural convection; simulation; steel scrap; preheating.

1. 緒言

環境保全および資源の合理的利用の観点から材料のリサイクルの重要性がますます高くなっている。鉄は金属のなかで大量に生産され、かつ、使用される金属であり、鉄鋼スクラップの蓄積量が年々増加する傾向にある。鉄鋼スクラップリサイクル過程については、多くの研究が行われている¹⁻²²⁾。とくに溶鋼および溶鉄中へのスクラップの溶解に関しては数多くの研究があり¹⁻¹⁸⁾、その概要はIviu, 川上らがまとめた¹⁹⁾。一方、予熱過程に関する研究はコークス充填移動層内の熱移動を解析したもの^{19,20)}、および強制対流下における放射伝熱と対流熱伝達を解析したもの²¹⁾がある程度である。そこで、本研究ではスクラップの予熱過程解析の基礎として、自然対流下における予熱過程を解析することを目的とする。なお、自然対流と熱放射の連成解析についてはK. T. Yangをはじめ多くの研究者²²⁻²⁷⁾の方法を参考した。

予熱炉内の熱伝達は(1)熱放射、(2)雰囲気ガスによる熱対流、(3)スクラップ表面から内部への熱伝導に分けられる。熱放射および熱対流は炉内温度および雰囲気条件によって大きく変わる。そこで、本研究では異なる坩堝温度、雰囲気ガス種類およびガス圧力の条件下で、予熱炉内の自然対流および熱放射による総合的な熱移動を解析する。また、炉内対流熱伝達に対する無次元関係および炉内対流熱

移動、炉内放射熱移動と坩堝温度の関係を解明することを目的とした。

2. 実験方法

本実験に使用した試片は炭素鋼S25Cで、その形状をFig. 1に示す。鋼円柱の一端に深い穴を開けて、さらに長さの方向に沿って2つの半円柱に切り分け、片方の半円柱

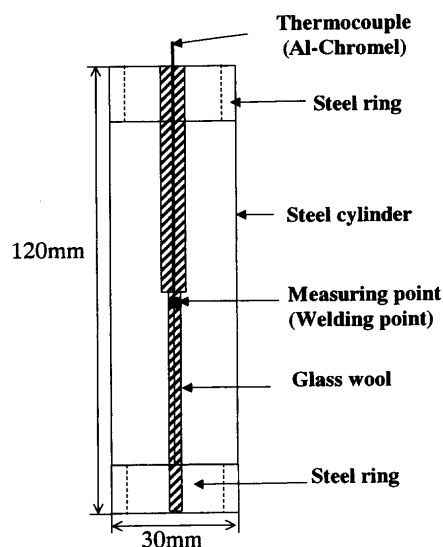


Fig. 1. Diagram of specimen.

平成14年5月13日受付 平成14年9月16日受理 (Received on May 13, 2002; Accepted on Sep. 16, 2002)

* 豊橋技術科学大学大学院生 (Graduate Student, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibiogaoka Tempaku-cho Toyohashi 441-8580)

* 2 豊橋技術科学大学 (Toyohashi University of Technology)

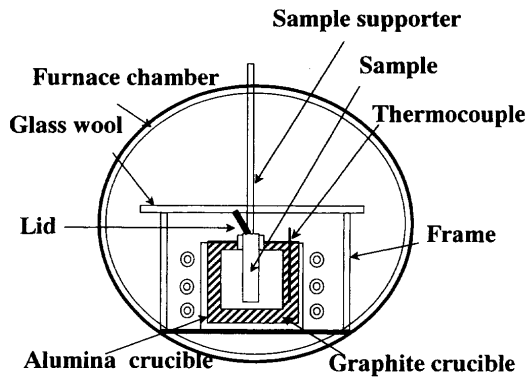


Fig. 2. Experimental apparatuses.

Table 1. Experimental conditions.

Crucible diameter (mm)	90
Crucible height (mm)	145
Specimen diameter (mm)	30
Specimen length (mm)	125
Pressure in the vacuum experiment (Pa)	< 40
Gas	N ₂ He Ar
Pressure (MPa)	0.1 ~ 0.6
Crucible temperature (K)	573 ~ 1423

の中央に熱電対（アルメル-クロメル熱電対）を溶接し、この溶接点の温度を測定した。2つの半円柱は両端で同じ材質の外径30mmのリンクを使って固定した。実験中試片内部の誘導電流の発生を防止するため、両半円柱の間に絶縁性のガラスウールを挟んだ。

Fig. 2に実験装置を示す。1123K以上の実験では高周波真空加圧誘導炉を用いた。誘導炉の中に黒鉛坩堝をセットし、坩堝の壁に熱電対を設置した。測定前に坩堝から試片への熱放射を防止するため、ステンレス鋼のフレームを設定し、さらにフレームの熱伝導を防止するため、その上にガラスウールを敷いて、その上に試片をセットした。この装置を用いた実験は減圧および加圧下で行った。また、973K以下の実験ではニクロム線抵抗炉を加熱炉として用い、上記と同じ黒鉛坩堝を使用した。この実験では、圧力は0.1MPaとした。

Table 1に実験条件を示す。実際操業条件を考えると、炉内ガスは酸素も含んでいると考えられる。しかし、酸素雰囲気では試片表面が酸化され、表面輻射条件が変化するため、実験結果を正確に分析することが困難であり、本研究では、雰囲気ガスは空気の物性と相似のN₂を使用した。さらに、参照用として熱物性値の異なるHeおよびArも雰囲気ガスとして選択した。ガス圧力は40Paから0.6MPaまで変化させた。実験手順としては、まず、炉タンク内の空気を排出してから雰囲気ガスをタンク内に入れ、雰囲気ガスの圧力を圧力制御弁によって自動的にコントロールした。圧力が設定圧力になった後に坩堝を加熱し始め、温度が設定

値で安定した後、試片を炉内に挿入した。その時点から温度測定を開始した。

3. 温度・流れ解析

3.1 有限要素解析

坩堝から試片表面への熱伝達を解析するため、汎用有限要素法ソフトウェアパッケージANSYSの温度解析ソフトTHERMALと流れ解析ソフトCFDを連成させた。試片を坩堝の中心軸上に設置したので、解析は軸対称円筒座標モデルで行った。試片の温度解析にはTHERMALを、雰囲気ガスの対流と温度解析にはCFDをそれぞれ用いた。

炉内の雰囲気ガスは坩堝と試片表面の間に自然対流を起こすことによって熱を伝達する。連続の式、Navier-Stokes式およびエネルギー保存式を有限要素法により解いて、炉内ガスの速度・温度を計算した。乱流を考慮してκ-εモデルおよび壁応力モデル^{27,30}を採用し、見掛けの粘性係数μ_{eff}は次のように表される：

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\epsilon} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、μ、μ_t、κ、εはそれぞれ分子粘性係数、乱流粘性係数、乱流運動エネルギー、乱流運動エネルギー散逸率である。流れの乱れが小さいμ_t≈0の場合、μ_{eff}=μとなり、κ-ε方程式が無視でき、乱流モデルは層流モデルと同じになる^{25,28}。

坩堝から試片表面への熱放射については、試片および坩堝での二次反射を省略し、ステファン・ボルツマン法則を用い、試片表面での放射熱流束を解いた。形態係数は陰線法によって計算した。雰囲気ガスは全部透明ガスであるため²²、ガスの放射は無視した。

3.2 境界条件および解析条件

試片の表面は、ガスの対流と坩堝からの熱放射による熱流束を同時に受けているため、時間ステップ*i*の場合、試片表面に吸収された全熱流束 $\dot{q}_{o,i}$ は以下ようになる：

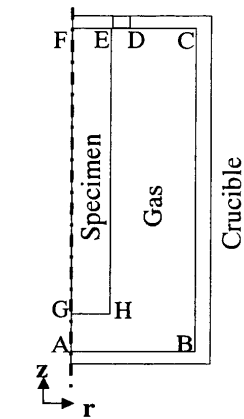
$$\dot{q}_{o,i} = \dot{q}_{r,i} + \dot{q}_{c,i} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\dot{q}_{r,i}$ と $\dot{q}_{c,i}$ は熱放射および対流熱伝達による熱流束であり、それぞれ温度解析によって計算される²⁸。 $\dot{q}_{o,i}$ を用いて表面での境界条件は以下のように与えられる：

$$q_{or,i} = -k_s \frac{\partial T_i}{\partial r}, \quad q_{oz,i} = -k_s \frac{\partial T_i}{\partial z} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、*k_s*は試片の熱伝導度で、下付きの*r*と*z*はそれぞれ半径および*z*軸方向を表す。

Fig. 3に解析領域と境界および初期条件を示す。図に示



Boundary conditions

	Velocity	Temperature	Pressure
D-E	-----	-----	$\partial P / \partial t = 0$
A-B-C-D	$V_r = V_z = 0$	$T = T_{\text{crucible}}$	-----
A-G	$V_r = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	-----
E-H-G	$V_r = V_z = 0$	-----	-----
Initial conditions			
Specimen (surrounded by F-E-H-G-F)			
$T_0 = T_{\text{Initial}}$			
Gas (surrounded by the A-G-H-D-C-B-A)			
$V_r = V_z = 0, T_0 = T_{\text{Crucible}}$			

Fig. 3. Analysis area with initial and boundary conditions.

したように、試片および坩堝の表面ではノンスリップ壁条件とした。実験中、坩堝の蓋と試片の間に約5mmの隙間があるため、そこでの圧力条件は $\partial P / \partial t = 0$ とした。解析中、坩堝温度は一定で、炉内ガスの初期温度は坩堝と同じにした。

解析においては、坩堝の熱放射率を0.6とした²²⁾。また雰囲気ガスの熱物性値は日本機械学会のデータ²⁹⁾を採用した。試片表面境界層内ガスの熱物性値の評価には膜温度 T_f を用いるが、これは次式によって求める：

$$T_f = (T_b + T_s) / 2 \quad (4)$$

ここで、 T_b はガスバルク温度で、 T_s は試片の表面温度である。

4. 実験および解析の結果と考察

4.1 放射率および熱物性値の決定

試片の表面は薄い酸化膜により被われているため、試片の表面熱放射率は0.3~0.8の範囲²²⁾であると考えられるが、減圧下における実験結果と解析結果の比較によって熱放射率の値を決定した。Fig. 4に種々の放射率によるシミュレーション結果と減圧(40 Pa)下の実験データを示す。放射率を0.4とすると、解析結果は実験データとよく一致した。

ここで、本研究での温度解析ソフトウェアにおける対流

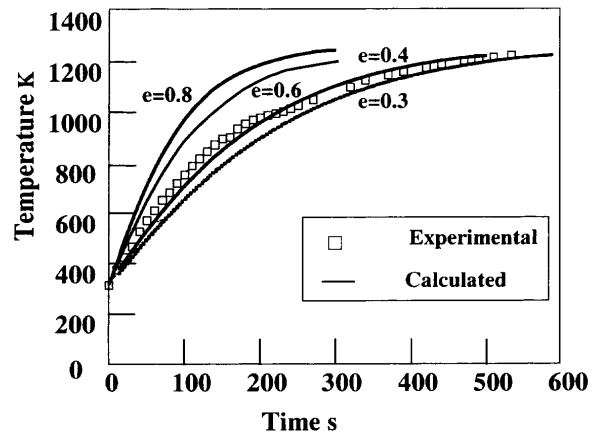
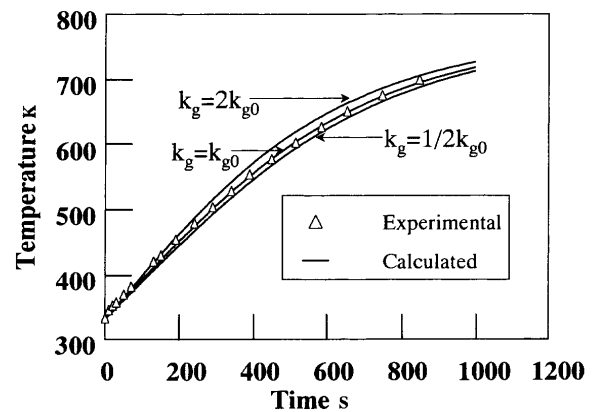


Fig. 4. Decision of specimen surface emissivity (crucible temperature 1273K).



k_g : Conductivity of gas
 k_{g0} : Reference value of conductivity

Fig. 5. Result calculated by the use of different thermal conductivity of N_2 gas (crucible temperature 773K).

熱伝達計算では次式のエネルギー保存式を用いている

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = k_g \nabla^2 T - V \cdot \nabla (\rho c_p T) \quad (5)$$

ここで、 ρ は密度、 c_p は比熱、 k_g はガスの熱伝導率である。したがって、これらの物性値のずれが解析結果に大きく影響する可能性がある。実験に使用されたガス種の物性値のなかでは、熱伝導率 k_g の違いがいちばん大きい(Heの k_g はArより約7倍であり、まだ N_2 より約5倍大きい)。そこで、文献値における k_g の違いの温度変化への影響を確かめるため、次に k_g を変えてシミュレーションを行った。窒素雰囲気中で坩堝温度が773Kの場合の解析結果をFig. 5に示す。熱伝導率が文献値の半分、2倍の値で計算した試片の昇温曲線と実測値の間に明らかな差を示し、文献値による N_2 の熱伝導率を用いた解析結果が実験結果とほぼ一致した。さらに、ガス種類およびガス圧力が変わっても、機械学会の熱物性値を用いた解析結果は実験結果とよく一致した。

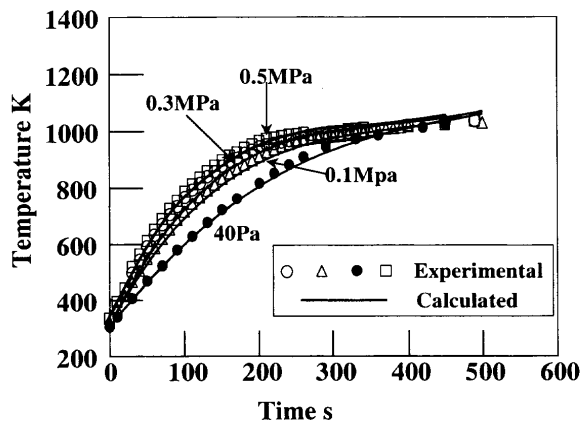


Fig. 6. Temperature variation of measuring point under different pressure at 1123K (He).

試片測定点の解析誤差は、計算による温度 T_c 実験による温度 T_e の差として次式により評価した。

$$\text{Error} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{T_{ei} - T_{ci}}{T_{ei}}}{n} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 n はデータの数である。本研究では、各実験条件での解析結果の誤差は3~5%の範囲であった。

4.2 雰囲気圧力による試片昇温速度の変化

Fig. 6に、Heガス雰囲気中で坩堝温度を1123Kとした場合の、種々圧力下での実験結果と解析結果を示す。縦軸が温度で、横軸は試片を炉内に挿入した時点からの時間である。プロットは実測データであり、実線が解析結果である。実験と解析結果はほぼ一致した。減圧(40Pa)の場合より雰囲気ガス圧力が0.1MPa場合の昇温速度の方が大きい。これは、対流熱伝達 q_c の効果が現れたためである。圧力を上げると0.3MPaの場合は0.1MPaの場合より昇温速度が若干大きくなったが、さらに、圧力を0.5MPaまで上げても、昇温速度の変化は小さかった。これは、対流熱伝達に及ぼす圧力の効果が圧力上昇とともに小さくなることを意味する。

各時間ステップにおいて試片表面上の各要素で対流による熱流束のベクトルの和を求め、平均値 q_c の経時変化をFig. 7に示す。 q_c はごく初期に急激に立ち上がり、以後時間とともに減少した。0.5MPaと0.1MPaの場合を比較すると、最高点では前者の方が約50%大きかった。

平均熱流束に要素表面積をかけて積分すると、炉内対流による、試片表面で吸収された伝熱量 Q_c が求まる。

$$Q_c = \int s_e q_c dt \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 s_e は試片表面各要素の表面積である。Table 2に0.5MPaでの Q_c と0.1MPaでの Q_c の比を示す。ArとN₂の場合は温度の増大によって、この比が大きくなった。Heの

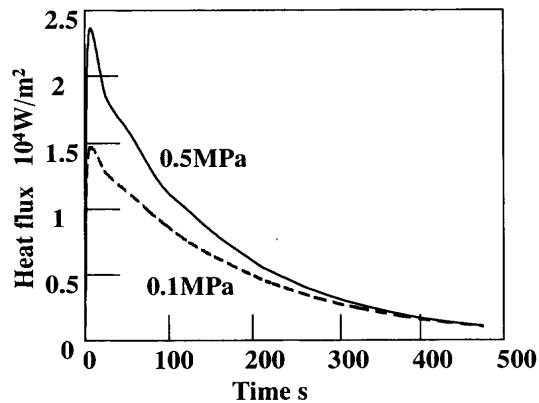


Fig. 7. Average heat flux of convection component at sample surface (He, 1123K).

Table 2. Ratio of convective heat transfer rate between the two pressures for each gas atmosphere.

$Q_{c(0.5MPa)}/Q_{c(0.1MPa)}$	1123K	1273K	1423K
He	1.31	1.26	1.22
Ar	1.19	1.22	1.23
N ₂	1.20	1.22	1.24

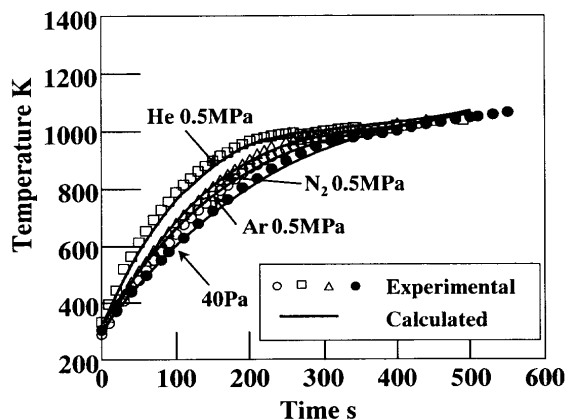


Fig. 8. Temperature variation at the measuring point under 0.5MPa for different kind of gas (crucible temperature 1123K).

場合はAr, N₂の場合より逆の傾向を示した。しかし、いずれのガスにおいても、0.5MPaの場合は0.1MPaより対流伝熱量が約2割以上大きいことがわかった。

4.3 ガスの種類による試片昇温速度の比較

Fig. 8に、雰囲気圧力0.5Mpa, 坩堝温度1123Kの場合の雰囲気条件での試片温度変化を示す。実線の計算値は実測値とよく一致した。いずれのガスを入れた場合も減圧下より試片の昇温速度が明らかに大きくなった。雰囲気ガスの種類でみれば、Heガスの場合にいちばん昇温速度が大きく、ついでN₂, Arの場合の順に小さくなった。これらのガスの熱物性値を調べると、比熱 C_p および熱伝導率 k_g の値が、同様にHe, N₂, Arの順で減少し、対流熱伝達が小さくなることと一致した。

Fig. 9にFig. 8と同じ条件下での試片表面の平均熱流束 q_c の経時変化を示す。Heガスの場合はN₂およびArガスの場

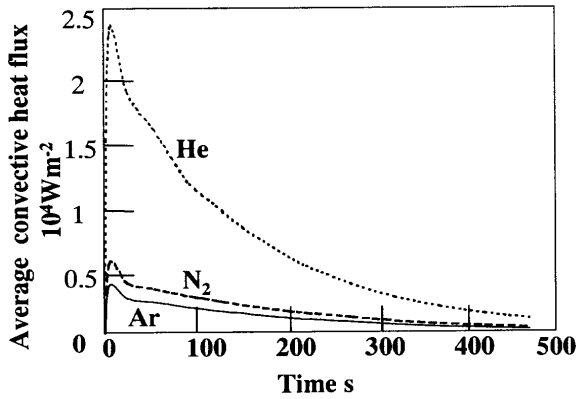


Fig. 9. Average heat flux at specimen surface under 0.5MPa for different kind of gas (crucible temperature 1123K).

Table 3. Ratio of convection heat between different kind of gas used.

		1123K	1273K	1423K
$Q_{c(He)} / Q_{c(N_2)}$	0.1MPa	3.60	3.75	3.39
	0.5MPa	3.92	3.89	3.89
$Q_{c(He)} / Q_{c(Ar)}$	0.1MPa	5.14	5.38	5.63
	0.5MPa	5.62	5.57	5.59

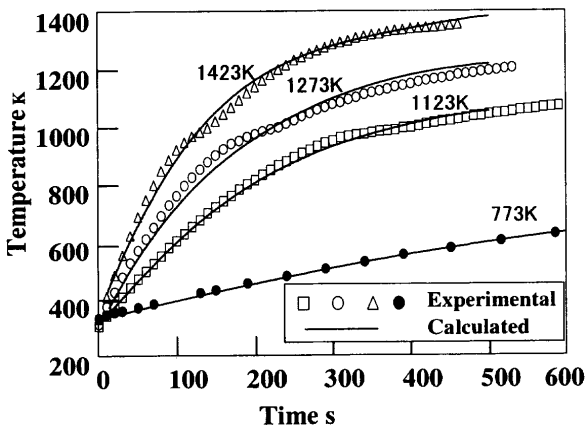


Fig. 10. Temperature variation at the measuring point under 0.1 MPa for different crucible temperature (N_2).

合より q_c ははるかに高いことが確かめられた。熱流束を積分し、異なる雰囲気ガス条件での対流による総伝熱量を比較した。この比を Table 3 に示す。圧力にかかわらず、He ガス雰囲気の場合は窒素より 3~4 倍、Ar ガスより 5~6 倍大きいことがわかった。

4.4 坩堝温度による試片対流伝熱の比較

Fig.10 に、0.1 MPa の窒素ガス条件で、異なる坩堝温度での試片温度変化を示す。実線が解析結果であり、明らかに実験データとよく一致した。坩堝温度の変化によって炉内対流熱伝達も大きく変わると考えられる。この変化を客観的に表すため、各実験条件下での対流による伝熱量と総伝熱量の比 ψ を計算した。

Table 4. Ratio of convection component in overall heat flux under different experimental conditions (ψ).

		1423K	1273K	1123K	973K	773K	673K	573K
He	0.1MPa	7.50%	10.46%	15.23%	----	38.47%	----	61.15%
	0.5MPa	8.51%	12.56%	18.67%	----	----	----	----
N_2	0.1MPa	1.79%	2.71%	4.15%	10.20%	14.61%	21.54%	30.04%
	0.5MPa	2.21%	3.31%	4.95%	----	----	----	----
Ar	0.1MPa	1.25%	1.89%	2.92%	----	10.31%	----	22.09%
	0.5MPa	1.54%	2.30%	3.48%	----	----	----	----

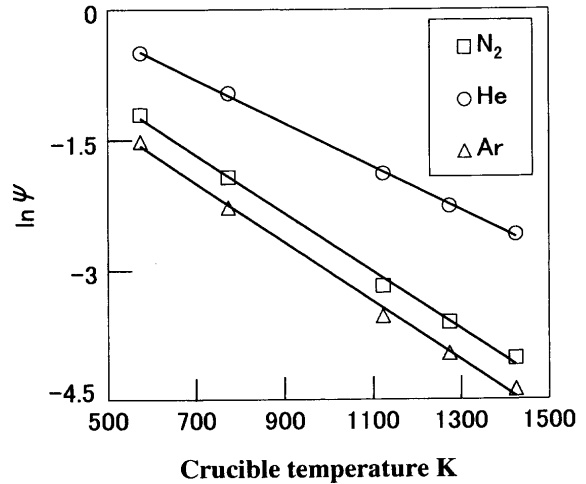


Fig. 11. Relation between ψ and crucible temperature for N_2 atmosphere.

Table 5. The value of constant β and γ ($\psi = \beta e^{\gamma T}$).

	β	γ
N_2	1.99	-0.034
Ar	1.47	-0.034
He	2.63	-0.025

$$\psi = \frac{\int s_e q_c dt}{\int s_e q_o dt} = \frac{Q_c}{Q_o} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 q_o 、 Q_o はそれぞれ試片表面における平均熱流束および総伝熱量である。 ψ の値が坩堝内のガスによる対流熱伝達の割合を表している。 ψ が大きいほど、対流熱伝達の割合が高いと考えられる。Table 4 に ψ の値を示す。 ψ は坩堝温度によって大きく変わっている。いずれのガスの場合でも、坩堝温度が低くなると ψ は大きくなり、対流熱伝達の割合が増えている。例えば He の場合、573K では 62% が対流熱伝達によっている。ガスの間で比較すると、He がいちばん大きく、ついで N_2 であり、Ar はいちばん小さく、22% であった。 ψ の値もまた前述のように、雰囲気ガスの熱物性値、とくに熱伝導度の大きさの順序と一致している。さらに、 ψ を $\ln T$ に対してプロットして Fig.11 に示す。いずれのガスについても直線的な関係が得られ、 ψ と温度 T は指数関係で表される：

$$\psi = \beta e^{\gamma T} \dots \dots \dots (9)$$

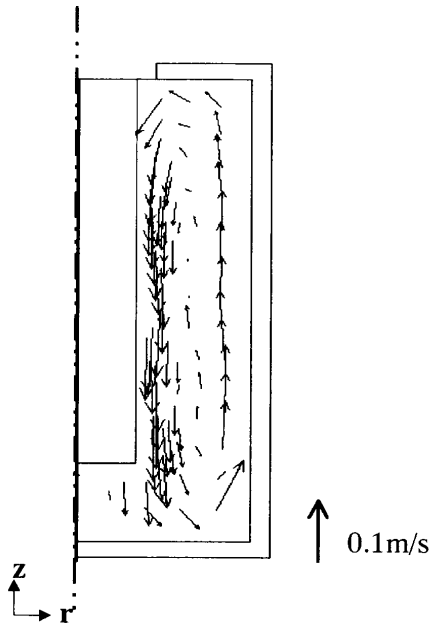


Fig. 12. Distribution of gas velocity in the crucible (N₂, 0.1 MPa, 5 s).

ここで、 β, γ は定数であり、雰囲気ガスの種類によって変わる。Table 5には本実験条件で（試片表面放射率が0.4である場合）雰囲気ガスの類別による β と γ 値を示す。Heガスの場合とArおよびN₂場合の β, γ 値が明確に異なった。式(9)によって、特定ガス雰囲気条件下での炉内対流伝熱が坩堝温度のみによって見積もることが可能になると考えられる。

4.5 無次元関係式

本実験に用いた装置には、坩堝の蓋中心に試片を通すための穴が開いている。試片を坩堝に挿入した場合でも、試片周りと蓋の間は完全には密閉することができなく、約5mmの間隙が残った。Fig.12に、雰囲気ガスN₂、坩堝温度1123Kにおいて、試片を入れてから5秒後の解析によって得た、炉内ガスの速度の分布を示す。矢印の方向と長さがそれぞれ炉内ガスの流れ方向と速度を表している。間隙の近くではガスの流動が小さく、炉内ガスの対流に影響が極めて小さいことがわかった。したがって、本実験における流動条件は密閉容器内の自然対流と考えられ、試片表面の対流熱伝達係数に対して、次式のような無次元関係が成り立つ²⁶⁾

$$Nu_{\xi} = b(Ra_{\xi})^n \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 b と n は実験によって決められる定数である。Nu_ξとRa_ξは見掛けのヌッセルト数とレイリー数で、以下の式で与えられる：

$$Nu_{\xi} = \frac{h_{\xi}}{k_g} \dots \dots \dots (11)$$

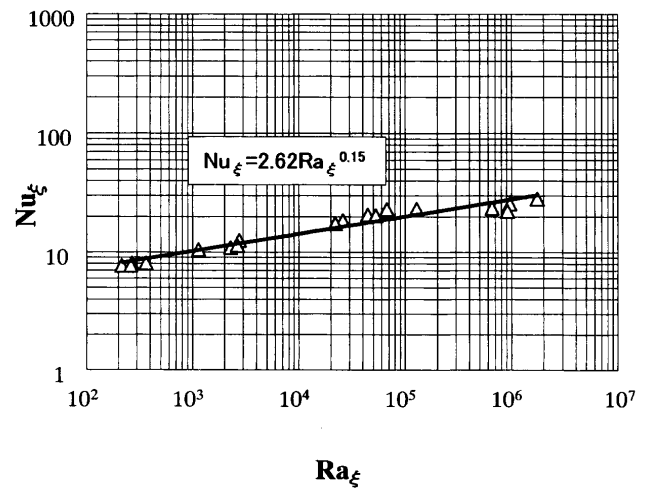


Fig. 13. Relation between Nu and Ra number.

$$Ra_{\xi} = \frac{\xi^3 g \Delta \rho}{\rho v^2} Pr, \quad \Delta \rho = \rho_b - \rho \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 ρ は試料表面ガス境界層の密度、 ρ_b はバルクのガス密度である。 h は試片表面の熱伝達係数、 k_g はガスの熱伝導度、 ν は動粘性係数で、Prはプラントル数である。なお、見掛けの代表長さ ξ は次式によって定義した。

$$\xi = \frac{S_g}{l_s} \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 S_g はガス対流領域の面積、 l_s 試片の対流面周長である。Fig.13には本研究でのヌッセルト数とレイリー数の関係を示す。実験データの対数回帰によって定数 b と n を求めたところ、それぞれ2.62と0.15が得られた。

$$Nu_{\xi} = 2.62 Ra_{\xi}^{0.15} \dots \dots \dots (14)$$

本実験のレイリー数は10²~10⁶の範囲である。この式は本実験のような幾何学的条件下での自然対流による熱伝達係数を与えると考えられる。

5. 結言

異なる雰囲気ガス、圧力および坩堝温度条件で自然対流と熱放射による鉄鋼スクラップの加熱実験および有限要素解析を行った。減圧実験において試片の表面熱放射率を0.4とすると、実測結果と解析結果がよく一致した。雰囲気ガスの圧力が上がると試片の昇温速度が大きくなる。いずれのガスでも対流熱伝達が0.5 MPaの場合は0.1 MPaの場合より約2割大きい。また、対流熱伝達は、同じ坩堝温度でHeにおける方がArより約5.5倍、N₂より約4倍近く高い。

炉内全体の熱伝達量に対する対流熱伝達の割合 ψ をまとめた。 ψ の値は坩堝温度および雰囲気ガス種類によって

大きく変わる。この ψ と坩堝温度の関係は指数関係 $\psi = \beta e^{\gamma T}$ を満足した。試片表面の対流熱伝達係数に対して、 $Nu_{\xi} = 2.62 Ra_{\xi}^{0.15}$ の無次元関係が得られた。これらの式は、実際工程操業における熱移動の見積もりへの応用が可能と考えられる。

文 献

- 1) R.D.Pehlke, P.D.Goodwell and R.W.Dunlap: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **233** (1965), 1420.
- 2) R.G.Olsson, V.Koump and T.F.Perzak: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **233** (1965), 1654.
- 3) M.Kosaka and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **53** (1967), 983.
- 4) H.Nomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), 1134.
- 5) Y.U.Kim and R.D.Pehlke: *Metall. Trans.*, **5** (1974), 2527.
- 6) K.Mori and T.Sakuraya: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **22** (1982), 984.
- 7) J.K.Wright: *Metall. Trans. B*, **20B** (1989), 363.
- 8) R.I.L.Guthrie and L.Gourtsoyannis: *Can. Metall. Q.*, **10** (1971), 37.
- 9) O.Ehrich, Y.K.Chuang and K.Schwerdtfeger: *Arch. Eisenhüttenwes.*, **50** (1979), 329.
- 10) E.Specht and R.Jescher: *Steel Res.*, **64** (1993), 28.
- 11) R.I.L.Guthrie and P.Stubbs: *Can. Metall. Q.*, **12** (1973), 465.
- 12) J.Szekely, Y.K.Chuang and J.W.Hlinka: *Metall. Trans.*, **3** (1972), 2825.
- 13) C.E.Seaton, A.A.Rodriguez and M.Manrique: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23** (1983), 14.
- 14) K.Isobe, H.Maede, K.Ozawa, K.Umezawa and C.Saito: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 2033.
- 15) K.Mori and H.Nomura: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), 347.
- 16) S.Asai and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **56** (1970), 546.
- 17) H.Gaye, M.Wanin and P.Gugliermi: *Steelmaking Conf. Proc.*, **68** (1985), 91.
- 18) L.C.Brabie and M.Kawakami: *High Temp. Mater. Process.*, **19** (2000), 241.
- 19) M.Kawakami and K.Takadani: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 658.
- 20) L.Zhang and F.Eters: *Steel Res.*, **70** (1999), 296.
- 21) X.Zhang, R.Takahashi, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **42** (2002), S23.
- 22) L.C.Brabie, K.Mori, T.Wang and M.Kawakami: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 115.
- 23) K.T.Yang: Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 1, Hemisphere Publishing Co., New York, (1986), 131.
- 24) Z.H.Zhong, K.T.Yang, and J.R.Lloyd: *J. Heat Transfer* **105** (1983), 89.
- 25) T.Fusegi and B.Farouk: *Numer. Heat Transfer, A*, **15** (1989), 303.
- 26) A.Bejan: *Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons Inc., New York, (1984), 160.
- 27) X.Chen and U.Muller: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **41** (1998), 1682.
- 28) Ansys Theory Manual Vol. 5.6, ANSYS, Inc., USA, (1999).
- 29) 流体の熱特性集, 日本機械学会, 東京, (1983), 30.
- 30) B.E.Lauder and D.B.Spalding: *Computer Methods in Applied Mech. Eng.*, **3** (1974), 269.