

画像データに基づくコークスの固体部分の熱拡散率の推定

西岡 浩樹*・村山 武昭*²・小野 陽一*²

Estimation of Thermal Diffusivity of Solid Part of Coke Based on Image Data

Kouki NISHIOKA, Takeaki MURAYAMA and Yoichi ONO

Synopsis : The ratio of thermal diffusivity of solid part to effective thermal diffusivity (α_s/α_e) was estimated by computer simulation of heat transfer using the image data of microstructure of a sample. Based on the fact that the value α_s/α_e is characteristic of structure of the sample, the thermal diffusivity of solid part of coke was estimated with the value α_s/α_e and the effective thermal diffusivity α_e measured by LASER flash method.

The temperature dependency of the estimated thermal diffusivity of solid part of coke was almost the same irrespective of the kind of coke. The estimated thermal diffusivity of solid part of coke was approximately 4.0×10^{-6} (m^2/s) at temperatures below 1000K, and it increased as temperature rises at temperatures higher than 1000K.

Effect of the accumulative thickness of carbon mesh plane L_c on the estimated thermal diffusivity of solid part of coke was found to be insignificant.

Key words : coke ; thermal diffusivity ; pore structure ; image processing ; heat transfer analysis.

1. 緒言

コークスの有効熱拡散率は高炉内の温度分布を解析する上で重要な基礎的物性値である。一般に有効熱拡散率は気孔率、気孔径分布などに大きな影響を受けるため、それらを考慮して有効熱拡散率を推定する必要がある。そのためにはまずコークスの固体部分の熱拡散率を得る必要がある。ところが緻密なコークスを得ることは非常に困難であり、現在までに緻密なコークスの熱拡散率の測定値は報告されていない。よってコークスの固体部分の熱拡散率を得るには何らかの推定を行う必要がある。

現在までにコークスの固体部分の熱拡散率の推定値として笠井らの報告¹⁾があるが、気孔の分布状態を考慮しておらず十分であるとは言い難い。

そこで本研究では、まずコークスの光学顕微鏡組織から画像データを作成した。次に画像データから計算格子を生成し、差分方程式を解き、コークスの細孔構造を考慮した伝熱シミュレーションを行った。輻射の影響が無い場合には固体部分の熱拡散率 α_s と有効熱拡散率 α_e の比が組織に固有な一定値となる²⁾ことを利用し、シミュレーションの結果とレーザーフラッシュ法による有効熱拡散率の測定値から、コークスの固体部分の熱拡散率の推定を行った。

2. 試料

2.1 試料の性質

試料として13種類のコークスを用いた。そのうち特徴を有する試料に関して、その性質をTable 1に示す。C1とC

Table 1. Coke used in this work.

Sample	$\rho \times 10^{-3}$ (kg/m^3)	ε (%)	d_p (μm)	L_c (nm)	Horizontal distance from tuyere (m)	Estimated career temp. (K)	kind
C1	1.95	50.1	109	1.88	—	—	CDQ
C2	1.88	48.7	242	1.60	—	—	CDQ
C3	1.94	54.2	142	1.79	—	—	Wet
C4	2.34	55.4	140	9.97	0.8	2093~2383	Core
C5	2.13	51.9	267	4.02	2.75	unknown	Core

CDQ: Dry Quenched coke
Wet: Water Quenched coke
Core: Core coke

平成8年6月19日受付 平成8年11月12日受理 (Received on June 19, 1996; Accepted on Nov. 12, 1996)

* 九州大学大学院生 (Graduate Student, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku Fukuoka 812)

* 2 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University)

2およびC3は装入前コークスで、C4とC5は炉芯内コークスである。C4とC5は羽口からの距離が異なる。炭素網目平面の積み重なり厚さ L_c は装入前コークスが小さく、炉芯内コークスはその2~5倍の値を示している。平均細孔径 d_p はC2とC5がC1, C3, C4のおおよそ2倍の値を示している。気孔率 ϵ は48.7%~55.4%の範囲の値を取る。

2・2 試料の有効熱拡散率の測定値

コークスの有効熱拡散率の測定値 $\alpha_{e,m}$ としては、笠井ら¹⁾が真空度 1×10^{-3} Pa以下の対流が無視できる条件下、室温から1473Kの温度範囲でレーザーフラッシュ法により測定した値を用いた。

3. シミュレーションの原理

3・1 原理²⁾

2次元の熱伝導を考える。位置 x^* , y^* , 時間 t^* における温度 $u^*(x^*, y^*, t^*)$ は、有効熱拡散率を α_e^* とすると、(1)式で与えられる。

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} = \alpha_e^* \left[\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $x^* = \frac{x}{L_{ref}}$, $y^* = \frac{y}{L_{ref}}$, $u^* = \frac{u - u_0}{u_1 - u_0}$, $\alpha_e^* = \frac{\alpha_e \cdot t_{ref}}{L_{ref}^2}$, $t^* = \frac{t}{t_{ref}}$ であり、 L_{ref} は参照長さ、 u_0 は初期温度、 u_1 は $x=0$ の位置における加熱温度、 t_{ref} は参照熱拡散時間である。

レーザーフラッシュ法による有効熱拡散率の測定の際の試料の温度上昇はわずかに数Kであるので、 α_e^* は定数として差し支えない。(1)式をADIスキーム(Alternative Direction Implicit Scheme)により差分化しシミュレーションを行った。画像データの画素を計算格子と1対1に対応させることにより、画像データをシミュレーションに組み込んだ。

3・2 境界条件

シミュレーションは全ての単位を無次元化して行った。シミュレーション時の境界条件および初期条件は次に示す通りである。

$$\left. \begin{array}{l} y^*=0, y^*=0.829 \text{ において;} \\ x^*=1 \text{ において;} \\ t^*=0, 0 < x^* \leq 1 \text{ において;} \\ t^* \geq 0, x^*=0 \text{ において;} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = 0 \\ \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = 0 \\ u^* = 0 \\ u^* = 1 \end{array} \dots \dots \dots (2)$$

この境界条件をFig.1に示す。すなわち、ある一様な初期温度に保持されていた試料の左端を、初期温度よりわずかに高いある温度に、常時加熱することに相当する。したがって、熱は紙面に対して左から右に流れることになる。C1コークスの画像データの一例をFig.2に示す。またFig.2を用いてシミュレーションを行い得られた温度分布をFig.3に示す。Fig.2のA, B, CおよびDがFig.3のA, B, CおよびDに対応している。

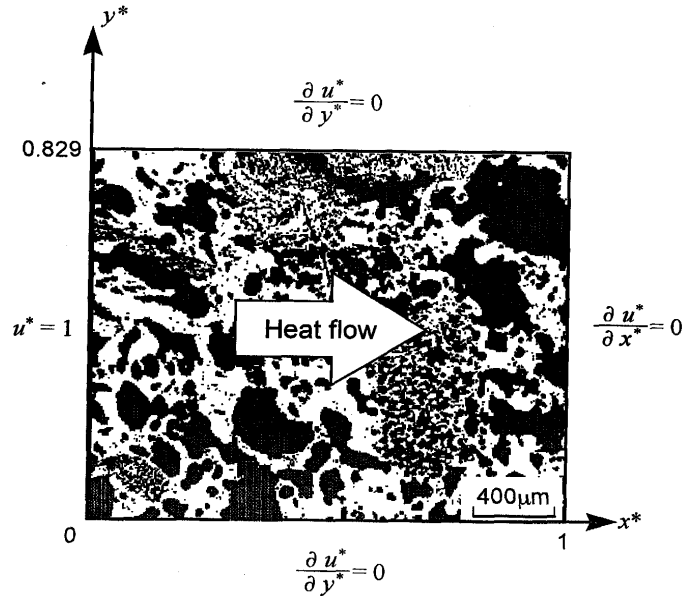


Fig. 1. Boundary conditions for the computation.

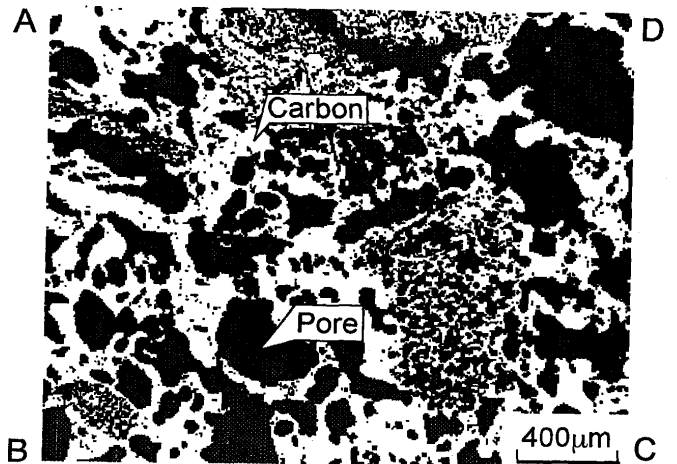


Fig. 2. Image data of C1 coke.

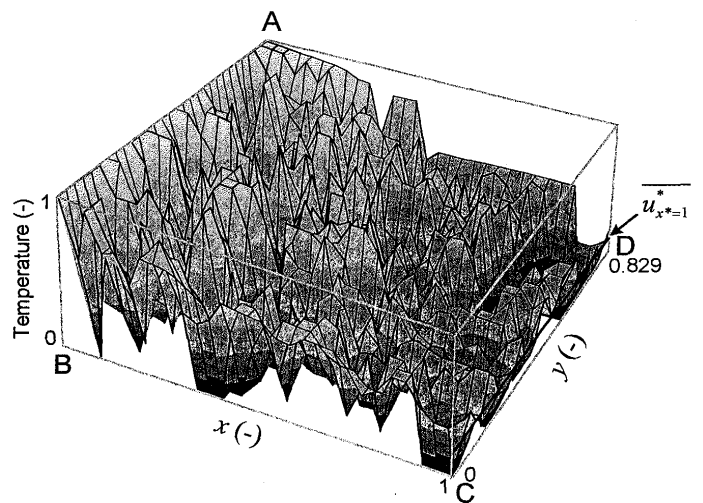


Fig. 3. Temperature distribution of C1 coke obtained with use of ADI scheme.
 $\alpha_s = 2.0 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ Time = 0.35 (s)
 $\alpha_p = 1.0 \times 10^{-12} \text{ (m}^2/\text{s)}$ Time step = $1.0 \times 10^{-5} \text{ (s)}$

全体的には x^* 方向への1次元の熱の流れであることから y^* のいかんにかかわらず $\frac{\partial u^*}{\partial y^*} = 0$ であると仮定し、(2)式の境界条件のもとで(1)式を解くと、(3)式が得られる。

$$u^* = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left\{-\frac{\alpha_s^2(2n+1)^2\pi^2 t^*}{4}\right\} \cos \frac{(2n+1)\pi(1-x^*)}{2} \dots (3)$$

ところがシミュレーションの結果得られた温度分布はFig. 3に示すように y^* 方向に分布を持っている。そこで $x^* = 1$ の位置における温度の平均値 $\overline{u_{x^*=1}^*}$ をシミュレーション結果から求め、これを(4)式に代入することにより、 y^* 方向の温度分布の影響も考慮に入れた有効熱拡散率 α_e^* を求めることができる。

$$\overline{u_{x^*=1}^*} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left\{-\frac{\alpha_s^2(2n+1)^2\pi^2 t^*}{4}\right\} \dots \dots \dots (4)$$

なお、 $\overline{u_{x^*=1}^*}$ を使用することによって $0 \leq x^* \leq 1$ の範囲の全ての細孔構造を評価することができる。

3.3 解析方法

まず光学顕微鏡組織から 368×304 画素の画像データを作成した。これは実寸法に換算すると 2.16×1.79 mmであり、レーザーフラッシュ法による測定に用いた試料の厚さ約2mmに相当する。1つの試料につき30視野を確保した。

画像処理を利用した特徴抽出の技法³⁾を画像データに適用し、画像データの縮小を行った。画像データの各画素と1対1に対応した計算格子を生成した。

画像データの固体部分に相当する格子点に α_s 、気孔部分に相当する格子点に α_p という熱拡散率を設定し、2次元の

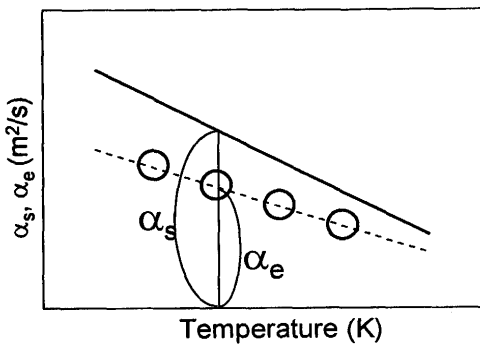


Fig. 4. Diagram illustrating relationship between thermal diffusivity and effective thermal diffusivity.

Table 2. Relationship between α_s and α_e of samples.

Sample	α_s/α_e (-)
C1	4.03
C2	3.88
C3	4.02
C4	4.95
C5	3.83

伝熱シミュレーションを行った。

得られた温度分布から、有効熱拡散率 α_e を(4)式により求めた。 α_e に含まれる誤差を小さくするため、試料全域にわたって温度上昇が認められる時間として熱拡散時間は0.35sとした。

ここで α_s/α_e という値は試料の細孔構造に固有な値であり、マトリックスの材質および性状には左右されない値である²⁾。前報でも示したとおり200K~1600Kの温度範囲では、気孔部分の対流および輻射の影響が無視できる²⁾。よって α_p が α_s に対して無視できるので、 α_s/α_e はFig. 4に示すように α_s の値とは無関係に一定値をとる。そこで計算時間を短縮するため、 α_s はコークスの有効熱拡散率の約10倍に相当する $2.0 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とした³⁾。 α_p は α_s に対して無視できる値として、計算の都合上 $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ に設定した。また α_s/α_e という値は α_s には無関係なので、シミュレーションは任意の1温度を想定して行えば良い。各試料に対する α_s/α_e の値をTable 2に示す。

レーザーフラッシュ法によるコークスの有効熱拡散率の各温度における測定値 $\alpha_{e,m}$ に、以上の方法で得られた α_s/α_e を掛け、固体部分の熱拡散率の推定値 $\alpha_{s,e}$ を求めた。

4. 結果および考察

C1~C5の固体部分の熱拡散率の推定値 $\alpha_{s,e}$ をFig. 5~Fig. 9に示す。本研究により推定した固体部分の熱拡散率を●で、笠井らによる推定値¹⁾を×で示す。本研究の推定値のエラーバーは95%信頼区間を示している。笠井らによる $\alpha_{s,e}$ の推定方法を以下に述べる。まず気孔率と有効熱伝導度の関係が(5)式に従うとし気孔率 ϵ を0%まで外挿すると、固体部分の熱伝導度 k_s が得られる。

$$k_e = k_s(1 - \epsilon^{2/3}) \dots \dots \dots (5)$$

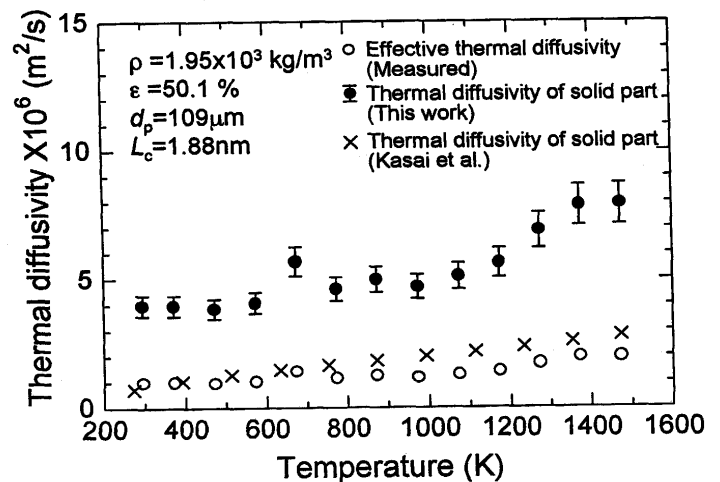


Fig. 5. Comparison of thermal diffusivity of solid part of C1 (CDQ) coke estimated in this work with one by Kasai *et al.*

次に各温度における k_s を求め、(6)式に示す温度依存式を得た。

$$k_s = -0.758 + 6.34 \times 10^{-3} T \quad 373\text{K} \leq T < 1673\text{K} \quad \dots (6)$$

試料の比熱を C_p 、真密度を ρ とすると、固体部分の熱拡散率 $\alpha_{s,e}$ は

$$\alpha_{s,e} = \frac{k_s}{\rho C_p} \quad \dots (7)$$

として求めることができる。またレーザーフラッシュ法による有効熱拡散率の測定値を○で示している。対流および輻射の影響が無視できる場合、固体部分の熱拡散率と有効熱拡散率は比例関係にある。ところが笠井らによる固体部分の熱拡散率の推定値 $\alpha_{s,e}$ は、(5)式を適用する段階では有効熱拡散率の測定値 $\alpha_{e,m}$ と比例関係にあるが、最小2乗法により(6)式を得た段階で $\alpha_{e,m}$ との比例関係が崩れている。これは k_s と k_e の関係が(5)式に従わないためである。また気孔率が50%程度ある試料の有効熱拡散率と固体部分の熱拡散率の値がほぼ一致するという奇異な結果を示している。これは前報で報告した多孔質鉄試料の測定結果と大きく異なる²⁾。これに対して本研究の推定値は、有効熱拡散率の測定値に一定値 α_s/α_e を掛けたものである。したがって有効熱拡散率の測定値と固体部分の熱拡散率の推定値が比例関係にあることは明白である。

C1, C2 両者の真密度、気孔率、 L_c に明確な違いは無い。平均細孔径は、C2がC1の倍程度である。Fig. 5とFig. 6を比較すると、両者とも1000Kより低温側では、固体部分の熱拡散率 α_s は一定値 $4 \sim 5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ を示し、高温側では温度の上昇に伴い固体部分の熱拡散率も大きくなる傾向にある。

C1とC3の真密度 ρ および L_c は、ほぼ同じ値である。気孔率と平均細孔径はともにWet処理されたコークスの方が多

少大きい。しかし α_s の推定値であるので、気孔率および、平均細孔径の影響は無い。ところがFig. 5とFig. 7を比較すると、1000K以下の温度域において、両者とも一定値を示すという点では同じ傾向を示しているが、Wet処理されたC3の固体部分の熱拡散率は、C1の約半分の値をとる。1000K以上の温度域において、温度の上昇に伴い熱拡散率が上昇するという傾向は両者に共通して認められるが、 α_s の推定値は大きく異なる。したがって、CDQ処理されたコークスとWet処理されたコークスでは、細孔構造だけではなく固体部分の組織も異なることが予想される。

C1は装入前コークスであり、C4は炉芯内コークスである。Fig. 5とFig. 8を比較しても、明確な違いは認められない。固体部分の熱拡散率 α_s であるから、気孔率と平均細孔径の影響は無い。炉芯内コークスC4の L_c は、装入前コークスC1の約5倍である。しかしながら、両者の熱拡散率には明確な違いが認められない。従ってこの程度の L_c の違いに

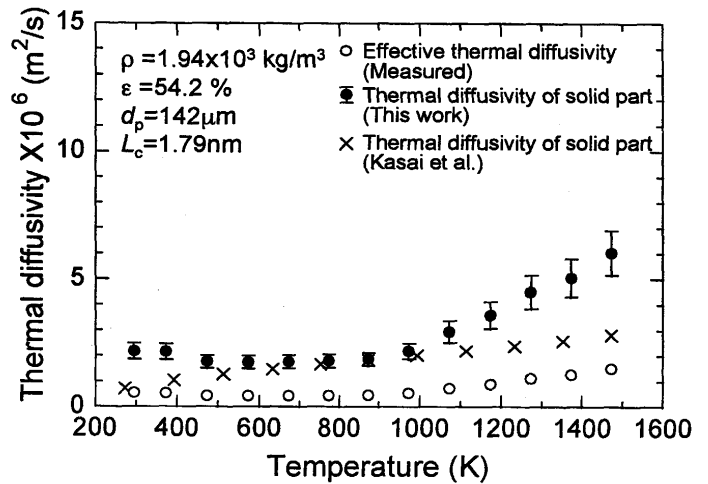


Fig. 7. Comparison of thermal diffusivity of solid part of C3 (Wet) coke estimated in this work with one by Kasai *et al.*

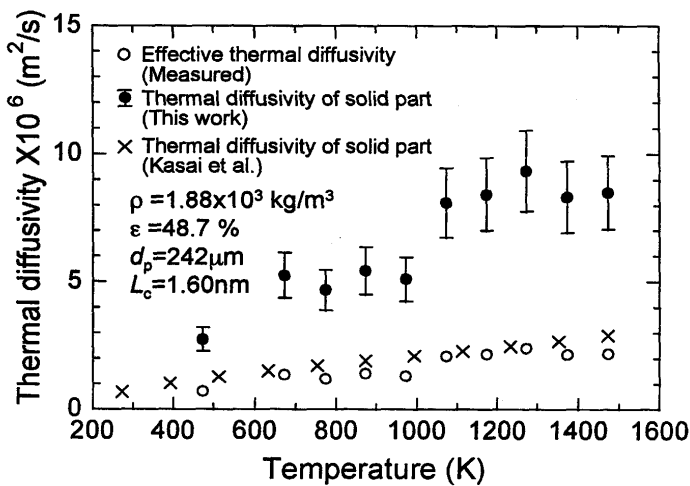


Fig. 6. Comparison of thermal diffusivity of solid part of C2 (CDQ) coke estimated in this work with one by Kasai *et al.*

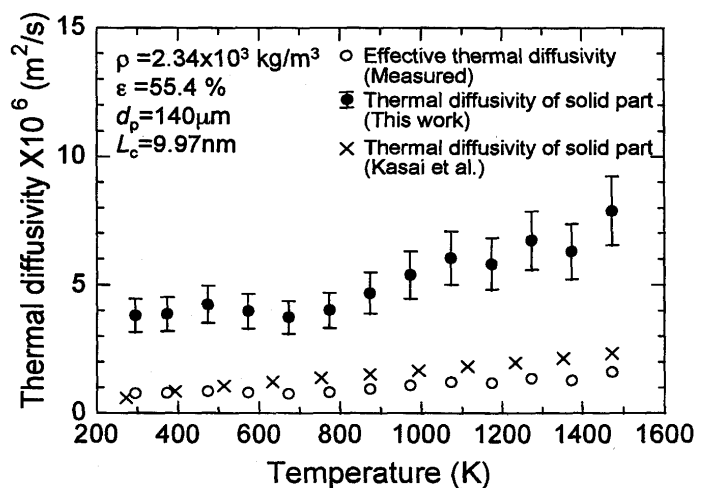


Fig. 8. Comparison of thermal diffusivity of solid part of C4 (Core) coke estimated in this work with one by Kasai *et al.*

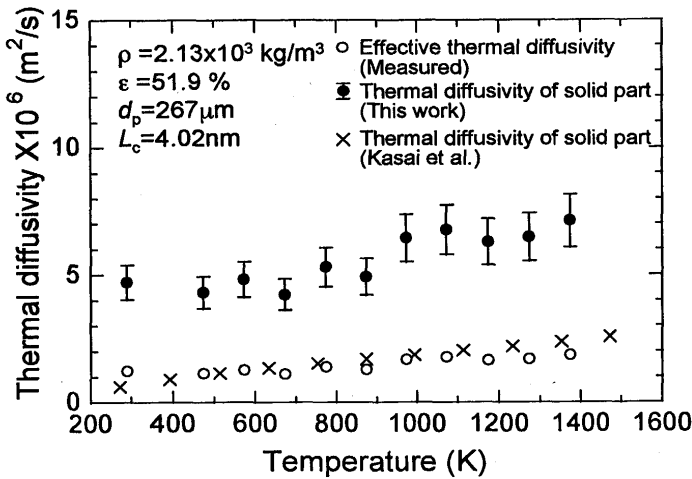


Fig. 9. Comparison of thermal diffusivity of solid part of C5 (Core) coke estimated in this work with one by Kasai *et al.*.

よる固体部分の熱拡散率への影響はほとんどないと考えられる。C1, C4のいずれにおいても低温側ではほぼ一定値 $4 \sim 5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ を示し、高温側では温度依存性を示しているという点はC2と同じである。

C4とC5は共に炉芯内コークスである。両者の真密度と気孔率は、ほぼ同じで、C5の平均細孔径はC4の約2倍である。LcもC4がC5の約2倍である。ところが、推定された固体部分の熱拡散率は、先程のC1, C2 (CDQコークス)の場合と同様に、低温側ではほぼ一定値を示し、高温側で温度依存性を示す傾向にあり、両者に明確な相違は認められなかった。

5. 結言

本研究では、コークスの細孔構造の画像データを利用した伝熱シミュレーションを行い、コークスの固体部分の熱拡散率の推定を行った。その結果以下のような知見を得た。

(1) コークスの有効熱拡散率は、気孔率のみでなく細孔構造にも大きな影響を受ける。コークスの固体部分の熱拡散率の推定には、画像データを利用し細孔構造を考慮する本研究で開発した手法が有効である。

(2) 装入前コークス (CDQコークス) と炉芯内コークスの固体部分の熱拡散率の温度依存性に、明確な違いは見られない。熱拡散率の値は、低温側で $4.0 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ 程度の一定値を示し、高温側では温度の上昇に伴い増加する傾向にあることがわかった。

(3) Wet処理されたコークスと他のコークスでは熱拡散率の温度依存性が異なるため、Wet処理されたコークスの固体部分の組織は、CDQ処理されたコークスおよび炉芯内コークスの組織と何らかの相違があると予想される。

(4) 本研究で用いた程度のLcの違いによる固体部分の熱拡散率への影響はほとんど無い。

最後に本研究を遂行するにあたり、試料を提供して頂いた新日本製鐵(株)、住友金属工業(株)に深く感謝いたします。

記号

- C_p : 定圧比熱[J/Kg · K]
- d_p : 平均細孔径[μm]
- k_s : 固体部分の熱伝導度[W/mK]
- k_e : 有効熱伝導度[W/mK]
- L_{ref} : 参照長さ(x方向の長さ)[μm]
- L_c : 炭素網目平面の積み重なり厚さ[nm]
- t : 熱拡散時間[s]
- t^* : 無次元化熱拡散時間[-]
- t_{ref} : 参照熱拡散時間[s]
- u : 温度[K]
- u^* : 無次元化温度[-]
- u_0 : 初期温度[K]
- u^*_0 : 無次元化初期温度[-]
- u_1 : 加熱温度[K]
- u^*_1 : 無次元化加熱温度[-]
- $\overline{u^*_x}$: x^* における無次元温度の平均値[-]
- x, y : 座標[μm]
- x^*, y^* : 無次元化座標[-]
- α_e : 有効熱拡散率[m^2/s]
- α_e^* : 無次元化有効熱拡散率[-]
- $\alpha_{e,m}$: 有効熱拡散率の測定値[m^2/s]
- α_p : 気孔部分の熱拡散率[m^2/s]
- α_s : 固体部分の熱拡散率[m^2/s]
- $\alpha_{s,e}$: 固体部分の熱拡散率の推定値[m^2/s]
- ϵ : 気孔率[%]
- ρ : 真密度[Kg/ m^3]

文献

- 1) 笠井昭人, 村山武昭, 小野陽一: 鉄と鋼, **79** (1993), 20.
- 2) K.Nishioka, T.Murayama and Y.Ono: ISIJ Int., **36** (1996), 150.
- 3) 西岡浩樹, 村山武昭, 小野陽一: 鉄と鋼, **82** (1996), 475.