

# 熱放射の寄与を正確に考慮した 溶融連続铸造パウダーの熱拡散率測定

太田 弘道\*・増田 稔\*<sup>2</sup>・渡辺 啓二\*<sup>3</sup>・中島 敬治\*<sup>4</sup>・柴田 浩幸\*<sup>5</sup>・早稲田 嘉夫\*<sup>5</sup>

Determination of Thermal Diffusivities of Continuous Casting Powders for Steel  
by Precisely Excluding the Contribution of Radiative Component at High Temperature

Hiromichi OHTA, Minoru MASUDA, Keiji WATANABE, Keiji NAKAJIMA, Hiroyuki SHIBATA and Yoshio WASEDA

**Synopsis :** Thermal diffusivity measurements of continuous casting powders for steel have systematically been made at high temperature by applying the differential three layered laser flash method recently proposed by the present authors. The powder consists of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{CaF}_2$ . New data processing has also been developed in order to separate the contribution due to radiative component from measured values at high temperature by considering the variation of the absorption coefficients of these powders when adding  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  or iron oxide. Then, the thermal diffusivity values of continuous casting powders for steel were quantitatively estimated with sufficient reliability. Thermal diffusivity values of continuous casting powders are found to be  $4 \pm 0.5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  and insignificant with the variation of temperature and concentration presently investigated. It would be interesting to extend the present systematic results for discussing the heat transfer phenomena in the continuous casting process for steel.

**Key words :** thermal diffusivity ; oxide melts ; laser flash method ; continuous casting powder ; absorption coefficient ; radiative heat transfer ; conductive heat transfer ; continuous casting ; steelmaking.

## 1. 緒言

現在、特殊な場合は除いて鋼は連続铸造プロセスで大量に生産されているが、連铸速度の一層の向上が望まれ、かつ铸造と圧延の直結化に伴い、より欠陥発生のない安定した操業が必須である。このため、例えば铸片と铸型間の熱流束を小さくすることにより欠陥の発生を抑えることを目的として、 $\text{TiO}_2$  や  $\text{ZrO}_2$  を添加した連続铸造パウダーの開発などが試みられ、成果をあげつつある。しかし、铸片の表面欠陥の抑制、潤滑不足や焼き付きに起因する拘束性ブレークアウトの防止などについて、連続铸造パウダーの物性値あるいは熱移動解析などの結果を基礎に検討を実施するには、まだ未解決な点も多い。その主な要因の1つは、この分野の研究において出発点にも相当する連続铸造パウダー自身の熱移動現象について、高温の溶融状態における測定の困難さ、あるいは高温測定で不可避な熱放射の影響の分離法が十分確立していないことに起因して、正確で系統的な熱拡散率の値が得られておらず、詳細な検討が出来ないことにある。

このような観点から本研究では、比較的簡便で正確な高

温融体の熱拡散率測定手段として、著者らが最近開発したレーザーフラッシュ型示差3層試料法を用い、かつパウダーが組成に応じて示す半透明などの光学的性質を取り込むことによって熱放射の寄与が正確に分離できるデータ解析法の開発を試み、16種類の連続铸造パウダーの熱拡散率の精密測定を実施した結果を報告する。

## 2. 熱拡散率測定法の概要および測定結果

試料は、試薬粉末を混合後、黒鉛坩堝中で1723Kで溶製し、30分保持した後、空冷、粉碎した。鉄を含む試料については同一の条件で白金坩堝を用いて溶製した。なお、試料の均一化のためこの操作を3回繰返した。蛍光X線分析により算出した溶製試料の化学組成をTable 1に示す。試料の密度については、急冷してガラス化した試料の密度をアルキメデス法により測定し、利用した。なお、解析に必要な白金試料セルの熱物性値は文献値<sup>1)2)</sup>を用いた。

熱拡散率の測定は、著者らが最近開発したレーザーフラッシュ型示差3層試料法<sup>3)4)</sup>を採用した。この方法は、Fig. 1に示すように、試料融体を厚さ0.2mm、直径14mm、およ

平成5年11月16日受付 平成6年3月4日受理 (Received on Nov. 16, 1993; Accepted on Mar. 4, 1994)

\* 茨城大学工学部 (Faculty of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho Hitachi 316)

\* 2 東北大学大学院生 (現: リコー(株)) (Graduate Student, Tohoku University, now Ricoh Co., Ltd.)

\* 3 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University)

\* 4 住友金属工業(株)総合研究開発センター (Research and Development Center, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\* 5 東北大学素材工学研究所 (Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University)

Table 1. The chemical composition of synthetic powders prepared in this study (mass%).

Type of slag	SiO <sub>2</sub>	CaO	CaF <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe
Reference	35.6	19.9	17.1	10.1	9.3	7.7			
ZrO <sub>2</sub>	0.8%	36.0	21.0	15.8	10.0	9.4	7.5	0.8	
ZrO <sub>2</sub>	2.5%	36.0	21.9	13.8	9.4	9.1	7.4	2.5	
ZrO <sub>2</sub>	4.9%	35.0	20.3	15.2	9.6	8.8	7.2	4.9	
ZrO <sub>2</sub>	7.6%	33.7	20.5	14.0	9.5	8.7	6.9	7.6	
ZrO <sub>2</sub>	10.0%	32.8	19.1	14.2	9.1	8.7	6.9	10.0	
TiO <sub>2</sub>	0.7%	36.3	21.1	16.4	9.8	7.9	7.5	0.7	
TiO <sub>2</sub>	2.6%	34.8	21.2	16.0	9.2	9.1	7.2	2.6	
TiO <sub>2</sub>	4.9%	33.9	21.6	15.0	8.5	8.8	7.7	4.9	
TiO <sub>2</sub>	7.4%	33.0	20.8	14.6	8.7	8.6	7.6	7.4	
TiO <sub>2</sub>	9.6%	32.5	19.6	15.0	8.7	8.5	7.5	9.6	
Fe	0.4%	36.1	21.0	15.6	9.3	8.9	8.4	0.4	
Fe	1.2%	35.7	21.7	15.0	9.1	8.7	8.3	1.2	
Fe	2.6%	34.9	20.9	15.0	9.3	8.7	8.1	2.6	
CaO/SiO <sub>2</sub>	0.637	42.1	15.7	15.4	9.4	9.1	8.3		
CaO/SiO <sub>2</sub>	1.245	30.6	26.3	16.4	9.4	9.5	8.5		

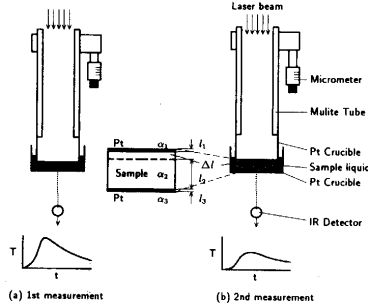


Fig. 1. Schematic diagram of differential three layered laser flash method for measuring thermal diffusivity of a molten powder.

び19mmの2つの白金坩堝の間に挟み込んで保持し、まずある試料厚さに(例： $l_2$ )設定した後レーザーパルスを上部の白金坩堝に照射、下部の白金坩堝底面の温度応答を赤外線検出器により検出する(Fig. 1 (a))。ついで、微動装置により上部の白金坩堝を一定距離(例： $\Delta l=0.2\text{mm}$ 程度)引き上げ、2回目の測定(Fig. 1 (b))を行なう。得られた2つの温度応答曲線の差を解析することにより試料の熱拡散率を導出する。この測定法およびデータ解析法の詳細はすでに報告したので省略する。なお、本研究で採用した熱拡散率測定法においては試料セル側壁への熱損失が常に問題となるが、本研究では有限要素法による検討結果<sup>4)</sup>を基に、熱拡散率の測定結果に試料セル側壁への熱損失が影響を与えないような条件下で実験を行なった。

測定結果の一例として1371~1575Kにおける鉄を含む溶融パウダーの測定結果をFig. 2に示す。温度の上昇にともなう熱拡散率の増加が認められる。しかし、このような熱拡散率の温度依存性は、他の試料についても認められたが溶融パウダー本来の物性値ではなく高温における熱放射の影響とも予想される。

一般にレーザーを照射した試料の裏面の温度応答を計測する手法では、測定時間が0.3秒以下と短いこともあり熱放

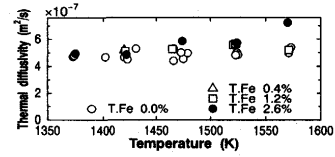


Fig. 2. Thermal diffusivity values of a molten continuous casting powders containing TiO<sub>2</sub> or iron, determined by the differential three layered laser flash method. These values more or less include the contribution of radiative component at high temperature.

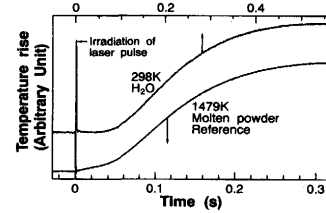


Fig. 3. Temperature response of molten powder (35.6mass%SiO<sub>2</sub>-19.9mass%CaO-17.1mass%-10.1mass%Na<sub>2</sub>O-9.3mass%MgO-7.7mass%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: reference sample) and distilled water.

射の影響を受けたとしても比較的小さいと予想される。しかし、高温測定における熱放射の影響は、試料の厚さや光学的性質などの種々の要因に依存するので慎重な扱いが必要と考えられる。Fig. 3に1479Kにおける標準組成融体試料の温度応答曲線を、室温の蒸留水の結果(熱放射の影響をまったく考慮しなくて良い)と共に示す。縦軸は任意単位であるがともにグラフの右端が最大温度上昇に相当する。なお時間ゼロにおけるスパイクはレーザーの発光に伴うノイズである。温度応答曲線の全体の形状は2つの結果ともほぼ同じであり、高温でも良好なデータが得られることを示唆している。しかし、室温における蒸留水の測定ではデータの初期部分に温度上昇がほとんど認められない領域があるのに対し、高温における融体試料に関する測定ではデータの初期部分にわずかではあるが明らかに温度上昇が認められる。伝導伝熱が支配的な場合は、表面層が加熱されてから熱が裏面に到達するまでに必ず一定の時間遅れが生ずるため、温度応答曲線に温度の上昇しない領域が生ずる。室温の蒸留水に関するデータはこの挙動と符合する。言い換えると高温の融体試料について認められるデータの初期部分の温度上昇は伝導伝熱に伴う現象ではなくレーザービームにより加熱された上部白金板からの熱放射が融体試料を透過し下部の白金板に吸収される過程に対応している。したがって、本研究において熱拡散率測定に及ぼす熱放射の影響は無視すべきでないと考えられる。このような観点から本研究では放射伝熱の寄与を融体試料の光学的性質を基に算出する新しい方法を開発し、レーザーフラッシュ型示差3層試料法による系統的な測定データから連続鑄造パウダーの正確な熱拡散率の導出を行なった。その結果を以下に示す。

### 3. 熱放射の寄与に関する考察

熱放射による伝熱を検討するため、急冷により作成したガラス試料について  $4 \times 10^{-7} \text{m}$  から  $1 \times 10^{-5} \text{m}$  の波長領域における可視光および赤外線吸収係数を、室温で測定した<sup>5)</sup>。なお測定例は必ずしも多くはないが<sup>3)</sup>、酸化物融体の吸収スペクトルはガラスの吸収スペクトルと大差がないこと、ならびに温度依存性も顕著でないことが報告されているので<sup>6)~8)</sup>本研究では、ガラス試料の値を近似的に融体の値として用いた。連铸パウダーの吸収スペクトルの詳細はデータ量が多いため別に報告したが<sup>5)</sup>、本研究で対象とした試料の吸収スペクトルの特徴は、以下のように要約できる。(1)すべての試料は  $5 \times 10^{-6} \text{m}$  以上の波長領域で強い吸収を示す。(2)鉄を含む試料は測定波長領域の全域に、Tiを含む試料は可視領域を含む  $2 \times 10^{-6} \text{m}$  以下の短波長側に、吸収帯を持ち含有量の増大とともに吸収係数は増大する。(3)それ以外の試料は  $4 \times 10^{-6} \text{m}$  以下の領域には顕著な吸収帯を持たない。

Fig. 4 に本研究で対象とした試料の代表的な吸収スペクトルと、計算により求めた1575Kおよび1375Kにおける黒体からの放射エネルギー強度  $e_{b,\lambda}$  を示す。試料に入射した黒体からのふく射の吸収による放射エネルギーの減衰は、入射した位置からの距離(浸透深さ)を  $x$  とすれば次式で表わすことができる。

$$Tr(x) = \frac{\int_0^\infty e_{b,\lambda} \exp(-x\kappa_\lambda) d\lambda}{e_b} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\kappa_\lambda$  は波長  $\lambda$  に対する吸収係数、 $Tr(x)$  は入射エネル

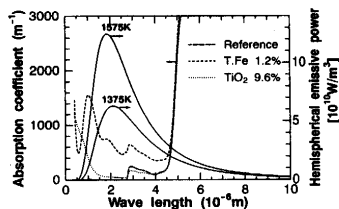


Fig. 4. Absorption coefficient of synthetic powders and hemispherical spectral emissive power or blackbody  $e_{b,\lambda}$  at 1375 and 1575K.

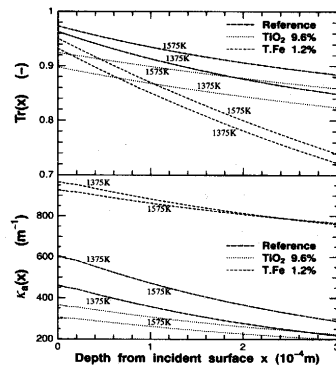


Fig. 5. Transmissivity by eq.(4) and apparent absorption coefficient of the synthetic powders calculated by eq.(5).

ギーと位置  $x$  におけるエネルギーの比、 $e_b$  は黒体から発散するエネルギーの全量でありステファン-ボルツマン定数を  $\sigma$  とすれば  $\sigma T^4$  で与えられる。Fig. 4 の吸収スペクトルに対する  $Tr(x)$  の計算結果を、次式(2)から導出した各浸透深さ  $x$  に対する見かけの吸収係数  $\kappa_a(x)$  とともにFig. 5 に示す。

$$\kappa_a(x) = -\frac{\partial(\log Tr(x))}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

単一の波長に対する  $Tr(x)$  は  $x$  に対し対数減衰するが<sup>3)</sup>、今回測定した試料では長波長側の強い吸収のため、試料のごく表層でエネルギーの一部が吸収される。また、試料内部でも吸収係数の高い波長成分が優先的に吸収されるため、 $\kappa_a$  は一定値とならず  $x$  の増大とともに減少する。

このような吸収係数の波長依存性が認められる場合でも、実際には平均吸収係数  $\kappa_m$  を持った系として近似する「灰色体近似」がよく用いられる。ここで利用する平均吸収係数  $\kappa_m$  の導出にはいくつかの方法が提案されているが<sup>9)</sup>、本研究では、次式のローゼランドの平均吸収係数  $\kappa_m$  を採用した。

$$\kappa_m = \frac{1}{\int_0^\infty \frac{1}{\kappa_\lambda} \frac{\partial e_{b,\lambda}}{\partial e_b} d\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

試料の吸収スペクトルから求めた  $\kappa_m$  の値を、式(2)から導いた見かけの吸収係数  $\kappa_a$  とともにTable 2 に示す。ただし基準組成、塩基度を变化させた場合、 $\text{ZrO}_2$  を含む試料では吸収係数の著しく小さな波長領域があり、測定誤差による僅かな  $\kappa_\lambda$  のばらつきにより  $\kappa_m$  の値が大きく変化するため式(3)を用いて  $\kappa_m$  の値を決定できなかった。

計算に必要な酸化物系融体の屈折率  $n$  は、類似組成をもつガラス試料の値をもとに1.5、金属板の熱放射率  $\epsilon$  は文献値<sup>12)</sup>を参考に0.2とした。なお、厳密には無機物質の屈折率は波長依存性が<sup>3)</sup>、また熱放射率は波長および射出方向依存性があることが知られているが<sup>3)</sup>、本研究では熱放射率に対

Table 2. Mean absorption coefficient  $\kappa_m$  and apparent absorption coefficient  $\kappa_a$  at 0.1mm and 0.3mm depth for the incident blackbody radiation of synthetic powders measured in this study.

Temperature (K)	1375	1475	1575	1375	1475	1575	1375	1475	1575
Type of powder	$\kappa_m$			$\kappa_a$ (0.1mm)			$\kappa_a$ (0.3mm)		
Reference	-	-	-	472	410	358	288	250	218
ZrO <sub>2</sub> 2.5%	-	-	-	485	420	366	290	251	219
ZrO <sub>2</sub> 4.9%	-	-	-	489	426	374	316	275	242
Fe 0.4%	546	572	596	765	737	717	626	617	612
Fe 1.2%	774	810	844	883	869	863	760	760	766
Fe 2.6%	2658	2851	3035	2142	2209	2279	1953	2013	2074
TiO <sub>2</sub> 2.6%	21	22	24	403	353	312	260	229	203
TiO <sub>2</sub> 4.9%	39	41	43	453	400	355	298	265	238
TiO <sub>2</sub> 9.6%	81	87	94	308	282	262	225	209	199
CaO/SiO <sub>2</sub> 0.637	-	-	-	263	230	203	183	161	142
CaO/SiO <sub>2</sub> 1.245	-	-	-	469	411	363	319	280	248

- : Infrared absorption data appear too small values for estimating  $\kappa_m$ .

しては射出される全エネルギーに対する値として定義される全半球放射率を用い、屈折率に関しては放射エネルギーの高い領域では、ほぼ一定値となっているため、定数として検討を実施した。

測定に用いた試料融体は厚さに比べ直径が大きく、解析モデルとして金属板/融体/金属板の3層無限平板を考えることができる。したがって、各体積および表面からの3次元的な熱放射を考える解析の場合も、無限平板モデルでは厚さ方向と直行する方向の温度は一樣であり、厚さ方向の1次元伝熱として熱移動を解析できる利点がある。伝熱方程式はコントロール・ボリューム法<sup>10)</sup>を用いて数値的に解析した。具体的には、白金板/融体/白金板の各部分について、それぞれを等分割するような位置に温度の代表点を配置し、代表温度点間を2等分するように境界を定め、単位体積を作成した。一方、 $\Delta t$  時間に単位体積  $V_i$  に流入する放射および伝熱による正味の熱量  $Q_i$  は、温度分布から次式により導出できる。

$$Q_i = -k_c \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \Delta t + F(x_i) \Delta t \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $x_i$ ,  $\theta_i$ ,  $k_c$ ,  $F(x_i)$  はそれぞれ体積  $V_i$  の代表点の座標、温度、熱伝導率、 $V_i$  に流入する正味の放射熱流束である。 $V_i$  の熱容量と  $Q_i$  から  $\Delta t$  時間後の  $V_i$  の温度が求められる。

3・1 透明体近似による解析

透光性の高く透明と見なせる試料における熱放射については、上下の金属板間の熱移動のみを考えれば良い。金属板の吸収係数が放射率  $\epsilon$  に、反射率が  $(1-\epsilon)$  に等しいことから、上部の金属板から射出し試料を通過して下部の金属板に吸収される放射エネルギー  $F_{in}$  は、金属板間の熱放射の多重反射を考慮し次式で表される。

$$F_{in} = \frac{\epsilon}{2-\epsilon} \cdot 4n^2\sigma T^3 [\theta(0) - \theta(l_2)] \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $T$  は系のレーザー照射前の平衡温度、 $\theta(0)$ ,  $\theta(l_2)$  はそれぞれ融体の上部および下部の金属板に接する面の  $T$  からの温度上昇である。一方、3層試料の上面および下面の白金表面から外部に向かう放射熱流束  $F$  は  $F = 4\epsilon\sigma T^3\theta$  の関係により容易に計算できる。試料の熱拡散率を溶融パウダーの代表的な値  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  として、融体の厚さ  $l_2$  を0.1から0.5mmまで0.05mmきざみで変化させ、コントロール・

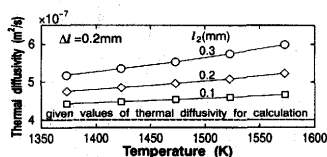


Fig. 6. Apparent thermal diffusivity including radiative heat flow theoretically calculated on the transparent body approximation for the sample of thermal diffusivity of  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ .

ボリューム法によりレーザーパルス照射後の温度応答を導出し、得られた温度曲線の中から2つを選び、示差法<sup>3)</sup>により解析を行えば、熱放射の寄与を含んだ見かけの熱拡散率が導出できる。すなわちこの結果から、透明な試料の実験結果に及ぼす熱放射の影響を見積もることができる。Fig. 6に示すように、温度の上昇および試料厚さの増大とともに見かけの熱拡散率は増大する。また透明な試料に対する測定値は、例えば初期厚さが0.1~0.2mmの場合、熱放射の影響により実際の熱拡散率より20%程度大きな値として得られることが判明した。

3・2 灰色体近似による解析

波長  $\lambda$  と  $\lambda + d\lambda$  の間の正味の放射による熱移動流束  $F(x)$  を算出する式はDarby<sup>11)</sup>により与えられているので、この結果をもとに、灰色体近似の場合を求めると以下の通りである。

$$F(x) = 2\{\Delta e_b(0)[R_1(x) - R_4(2l_2 - x)] + \Delta e_b(l_2)[R_{1x}(l_2 + x) - R_{4x}(l_2 - x)]\} + 2x \int_0^{l_2} \Delta e_b(x') [R_2(2l_2 + x - x') + R_{30}(x + x') - R_{2L}(2l_2 - x + x') - R_{3L}(2l_2 - x - x')] dx' + 2x \int_0^x \Delta e_b(x') E_2(x - x') dx' - 2x \int_x^{l_2} \Delta e_b(x') E_2(x' - x) dx' \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $\Delta e_b(x) = 4\sigma n^2 T^3 \theta(x)$ ,  $\theta(x)$  は位置  $x$  における温度上昇である。なお、定数  $R_1, R_{1x}, R_2, R_{2L}, R_{30}, R_{3L}, R_4, R_{4x}, E_2$  の詳細は報告<sup>11)</sup>があるため省略する。

コントロール・ボリューム法により求めたレーザーパルス照射  $1 \times 10^{-3} \text{s}$  後から、 $8 \times 10^{-3} \text{s}$  毎の、吸収係数  $\kappa_m$  が100, 5000および  $10^6 \text{m}^{-1}$  に対する融体中の正味の放射熱流束  $F(x)$ , ならびに吸収係数  $\kappa_m$  が  $100 \text{m}^{-1}$  の場合について、裏面の最大温度上昇で規格化した温度分布  $\theta(x)$  をFig. 7に示

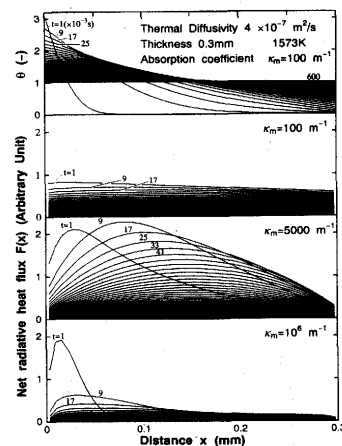


Fig. 7. Temperature distribution and net radiative heat flux theoretically calculated on the gray body approximation for the sample of thermal diffusivity of  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ .

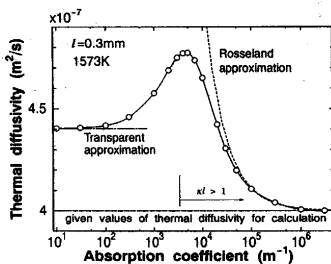


Fig. 8. Apparent thermal diffusivity derived by the initial time method theoretically calculated on the gray body approximation for the sample of thermal diffusivity of  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ . In this calculation, the outward heat leak of radiative component through two metallic plates is excluded.

す。ここで  $F(x)$  は任意単位であるが、すべての計算は同一の初期条件で行なっており絶対値を比較できる。吸収係数が  $100 \text{m}^{-1}$  の場合、 $F(x)$  は融体中でほぼ一定の値を取り、白金板から射出された熱放射が多重反射により融体内でほぼ均一に吸収されていること、吸収係数が  $5000 \text{m}^{-1}$  の場合、温度上昇部分とその周辺で融体からの放射により大きな放射熱移動を生ずることが認められる。吸収係数が  $10^6 \text{m}^{-1}$  の場合、白金板および融体から射出される放射は、射出された近傍で融体により強く吸収される。このためごく初期時間においては温度の上昇部分から放射熱移動が認められるが、全体に放射伝熱の寄与が小さいと判断できる。ついて、温度応答曲線に及ぼす融体相内の放射の影響を明確にするため、外部への放射熱損失  $F = 4\epsilon\sigma T^3\theta$  をゼロとして、同様の計算を行ない、得られた応答曲線に対し初期時間法<sup>12)13)</sup>により熱拡散率を吸収係数の関数として導出した結果をFig. 8に示す。

一方、試料の代表厚さを  $l$ 、吸収係数を  $\kappa$  とした場合、 $\kappa l$  が1より十分大きければ、放射伝熱は伝導伝熱と同様に温度勾配  $\partial T/\partial x$  に対して線型となり、熱流束  $q$  に対して次式のローゼランド近似<sup>9)</sup>が成立することが知られている。

$$q = -\left(\kappa_c + \frac{16n^2\sigma T^3}{3\kappa}\right) \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots (7)$$

非定常伝熱条件では厳密な代表厚さを定義することはできないが、融体層の厚さを代表厚さとした場合の  $\kappa l > 1$  の成立する領域、式(7)から求めた熱拡散率の値および式(5)を用いて透明体近似により導出した熱拡散率の値もFig. 8中に示す。Fig. 8の結果は、 $10^5 \text{m}^{-1}$ 以上の高吸収係数領域でローゼランド近似、 $10^2 \text{m}^{-1}$ 以下の低吸収係数領域で透明体近似が十分成立すること、吸収係数が  $10^6 \text{m}^{-1}$ 以上で不透明と考えられる融体に対しては放射による伝熱の影響は小さいことを示唆している。これらの結果は  $10^2 \sim 10^4 \text{m}^{-1}$ の値を示す試料については、少なくとも灰色体近似による熱放射の寄与の分離を行なわなければ、正確な値が得られないことを明瞭に示している。

3.3 バンド近似による解析

熱放射の各波長について熱収支計算を行なう場合と比較して、灰色体近似は計算時間を著しく短縮できるため頻用される。しかし吸収係数の波長依存性の大きな試料に対して、平均吸収係数で代表させる灰色体近似は不十分と予想される。そこで、いくつかの代表的な試料について吸収係数の波長依存性を考慮したバンド近似による検討を行なうことにより、灰色体近似の妥当性について検討した。バンド近似では波長  $\lambda_a$  から  $\lambda_b$  までの間で得られた吸収スペクトルを  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}$  で  $n$  分割する。 $\lambda_a$  から  $\lambda_1$  のバンドを  $B_1$ 、 $\lambda_1$  から  $\lambda_2$  を  $B_2$ 、 $\dots$ 、 $\lambda_{n-1}$  から  $\lambda_b$  を  $B_n$  とすると位置  $x$  における全放射熱流束  $F(x)$  は、次式で与えられる。

$$F(x) = \sum_{m=1}^n F_m(x) \dots\dots\dots (8)$$

$$F_m(x) = 2\{\Delta E_m(0)[R_1(x) - R_4(2l_2 - x)] + \Delta E_m(l_2)[R_{1x}(l_2 + x) - R_{4x}(l_2 - x)] + 2\chi_m \int_0^{l_2} \Delta E_m(x') [R_2(2l_2 + x - x') + R_{30}(x + x') - R_{2L}(2l_2 - x + x') - R_{3L}(2l_2 - x - x')] dx' + 2\chi_m \left\{ \int_0^x \Delta E_m(x') E_2(x - x') dx' - \int_x^{l_2} \Delta E(x') {}_m E_2(x' - x) dx' \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta E_m(x) = \int_{\lambda_{m-1}}^{\lambda_m} n^2 \frac{\partial e_{b,\lambda}}{\partial T} d\lambda \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\chi_m$  は  $B_m$  に対するローゼランドの平均吸収係数である。具体的には吸収係数の波長依存性に関する実測データ (Fig. 4) を参考に、その特徴を十分に反映するように6から3分割して計算を行ない、得られた  $F(x)$  を用いて灰色体近似の場合と同一の手法により、熱拡散率  $= 4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  の試料に対するみかけの熱拡散率を導出した。8つの試料について得た見かけの熱拡散率の値を、透明体近似、灰色体近似で得られた値とともにTable 3にまとめて示す。得られた結果は、鉄を含まない試料では、透明体近似でも

Table 3. Apparent thermal diffusivity derived from theoretical temperature response by the three layered differential laser flash method. Temperature: 1575K, given thermal diffusivity:  $4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ , thickness: 0.2mm and 0.4mm. The numerical values in the parenthesis corresponds to the ratio of deviation from the band approximation case.

Type of powder	Approximation				
	Transparent		Gray		Band
Reference	4.90	(0.030)			
ZrO <sub>2</sub> 2.5%	4.90	(0.028)			5.05
ZrO <sub>2</sub> 4.9%	4.90	(0.039)			5.10
Fe 0.4%	4.90	(0.091)	5.29	(0.019)	5.39
Fe 1.2%	4.90	(0.110)	5.44	(0.011)	5.50
TiO <sub>2</sub> 2.6%	4.90	(0.039)	4.91	(0.037)	5.10
TiO <sub>2</sub> 4.9%	4.90	(0.041)	4.93	(0.033)	5.11
TiO <sub>2</sub> 9.6%	4.90	(0.045)	4.97	(0.031)	5.13

4%内の誤差で熱放射の影響を評価可能であること、灰色体近似さえ行なえば鉄を含む試料でも十分に高い精度で熱放射の影響を考慮可能であることを示唆している。

#### 4. 熱放射の寄与を分離した熔融連続铸造パウダーの熱拡散率

以上の検討結果をもとに、鉄を含む試料については灰色体近似、それ以外の試料については透明体近似を用いて熱放射の寄与を見積り、レーザーフラッシュ型示差3層試料法による測定結果を検討した。なお、熱放射の影響は試料厚さに依存するので、あらかじめ試料の初期厚さと真の熱拡散率を変えた数値計算により見かけの熱拡散率、試料の初期厚さ、真の熱拡散率の関係表を求め、この関係表を用いて、熱拡散率の寄与を分離した熔融パウダーの熱拡散率の値を算出した。得られた結果はFig. 9に示す通り、熱放射の寄与を分離していないFig. 2の結果と比較して、絶対値がやや小さくなり温度依存性も小さくなる。また熱放射の影響を除去した熔融パウダーの熱拡散率の値は、本研究で対象とした組成および温度において、すべて  $4 \pm 0.5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  の範囲に入っている。なお熱放射の寄与を分離した結果は、データのばらつきも減少している。これは融体厚さによって異なる熱放射の影響の差が、ばらつきとして現れていたためと考えられる。

#### 5. 結言

35.6% SiO<sub>2</sub>-19.9% CaO-17.1% CaF<sub>2</sub>-10.1% Na<sub>2</sub>O-9.3% MgO-7.7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mass%) を基本組成に、ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe, および塩基度を変化させた16種類の連続铸造パ

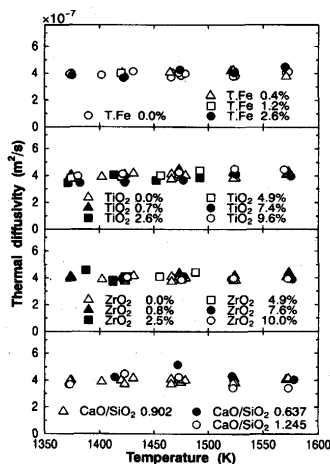


Fig. 9. Thermal diffusivity values of molten continuous casting powders. These values precisely exclude the contribution of radiative component at high temperature.

ウダーを溶製し、1373~1573Kにおいて著者らが開発したレーザーフラッシュ型示差3層試料法により融体の熱拡散率を系統的に測定した。同時に測定値に及ぼす熱放射の影響について、コントロール・ボリューム法に基づく数値計算により検討し、試料の吸収係数の関数として熱放射の寄与を具体的に算出する方法を開発した。

これらの検討結果を基に、レーザーフラッシュ型示差3層試料法を用いた熱拡散率の実測データについて、試料の光学的物性値を用いて熱放射の影響を分離し16種類の、熔融連続パウダーの正確な熱拡散率の値を求め、以下の結論を得た。

1) 実測の熱拡散率に認められたばらつきは、主として熱放射の寄与が試料厚さにより異なることに起因するものであり、熱放射の寄与を正確に分離すれば、ばらつきは著しく減少する。

2) 鉄を含む試料の熱拡散率の実測値に認められる温度依存性は熱拡散率そのものの特徴を反映しているのではなく、融体中の熱放射(体放射)による伝熱の促進によるものであることが判明した。すなわち鉄を含む連続铸造パウダーについても熱放射の寄与を正確に分離し求めた熱拡散率は温度依存性を示さない。

3) 本研究で対象とした16種類の試料の熱拡散率の値は熱放射の寄与を正確に分離する系統的な検討の結果、測定した温度範囲および組成範囲において、 $4 \pm 0.5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  の値を有することが定量的に結論できる。

著者の一人(太田)は日本鉄鋼協会「連铸パウダーの熱拡散率に関する研究助成金」を受けたことを付記し感謝の意を表する。

#### 文 献

- 1) Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho and M. C. Nicolaou: Thermophysical Properties of Matter., Thermal Diffusivity, TPRC Data Services, 19 (1973), p.135 [Plenum Press]
- 2) 熱物性ハンドブック(日本熱物性学会編), (1990) [養賢堂]
- 3) H. Ohta, K. Nakajima, M. Masuda and Y. Waseda: Proceedings of the 4th International Conference on Molten Slags and Fluxes, Sendai, (1992), p.421 [Iron and Steel Inst. Japan]
- 4) 早稲田嘉夫, 太田弘道, 柴田浩幸, 渡辺啓二, 中島敬治: 高温学会誌, 20 (1994), 印刷中
- 5) H. Ohta, K. Watanabe, K. Nakajima and Y. Waseda: High Temp. Materials and Processes, 12 (1993), p.139
- 6) 草開清志, 白石 裕: 日本金属学会誌, 45 (1981), p.250
- 7) 草開清志, 白石 裕: 日本金属学会誌, 45 (1981), p.259
- 8) 草開清志, 白石 裕: 日本金属学会誌, 45 (1981), p.888
- 9) たとえば, R. Siegel and J.R. Howell: Thermal Radiative Heat Transfer, (1992), p.754 [Hemisphere]
- 10) たとえば, S. V. Patankar著, 水谷幸夫, 香月正司共訳: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, (1985) [森北出版]
- 11) M. I. Darby: High Temp. High Press., 15 (1983), p.629
- 12) H. M. James: J. Appl. Phys., 51 (1980), p.4666
- 13) 小倉 岳, 徐仁国, 太田弘道, 早稲田嘉夫: 日本セラミックス協会学術論文誌, 98 (1990), p.305