多孔性固相における接触溶融現象の研究*

(多孔性固相を構成する粒子径の影響)

熊野 寛之^{*1}, 斎藤 彬夫^{*1}
大河 誠司^{*1}, 蟬谷 健一^{*2}

Study on Direct Contact Melting of Porous Material (Effects of the Particle Size Composing the Porous Material)

Hiroyuki KUMANO^{*3}, Akio SAITO,
Seiji OKAWA and Kenichi SEMITANI

^{*3} Department Mechanical Engineering and Science, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In this study, the direct contact melting of a porous material is investigated concerning the effects of the particle diameter, experimentally and analytically. The PCM is made of fine ice particles kept almost in a uniform diameter, which is changed as a parameter. The time dependency of the height of the PCM and the temperature of the heating surface are measured. In the analysis, two analytical models are proposed. One is calculated as the direct contact melting of the whole sample, and another is treated as the assembly of the direct contact melting of the individual particles. As the result, it was found that the amount of the melting increased with the increase in the particle diameter, due to the effects of the permeability in the case of small diameter. But, in the case of large diameter, amount of the melting decreased, as the particle diameter increased, because the direct contact melting occurred independently for the individual particles.

Key Words: Heat Transfer, Energy Storage, Phase Change, Direct Contact Melting, Porous Material

1. 緒言

ダイナミック型氷蓄熱システムでは、流動性のあるシャーベット状の氷を生成することが大きな特徴の一つであり、生成される氷は、流動性に富んだ細かい粒状の多孔性固相となる。その粒子から成る多孔性固相の融解挙動の把握は、ダイナミック型氷蓄熱システムのシステム設計時の指針として重要なものと考えられる。また、豪雪地域の融雪システムや、化学工業などにおいても、多孔性固相の溶融現象は重要な基礎現象の一つであり、それを把握する意義は大きいと思われる。

多孔性固相の溶融を扱うものとして、D.A.Kearns⁽¹⁾は、粒子からなる多孔性固相を伝熱面上で融解させ、多孔体内に浸透する液相の挙動を実験的に測定している。青木⁽²⁾は、氷の多孔体と考えられる雪層の融解挙動について、毛管力により雪層に浸透する融解水も考慮に入れ、一定の熱流束を与えるという条件下で、実験的、解析的に検討を行っている。

伝熱面に固相を押し付けながら溶融させる場合、伝熱板上で溶けた液体は固相と伝熱板との間に薄い液膜を形成しながら排出される。この際、伝熱板と固相との間の薄い液膜を介して熱交換が行われるために、高い熱流束を得ることができる。これを接触溶融現象という^{(3)~(7)}。著者らは、前報⁽⁸⁾において、比較的小さな粒子径から構成される多孔体固相を接触溶融させた場合の溶融挙動について検討を行った。その結果、比較的小さな粒子から構成される多孔体の溶融挙動は、毛管力を考慮に入れた試料全体の溶融として現象を把握できることを示し、試料全体での溶融とした解析モデルとの良好な一致が得られた。しかし、粒子径が大きな場合には、その解析モデルとの一致は見られず、その溶融挙動については十分に把握されていない。そこで本研究では、接触溶融現象という観点から、粒子から構成される多孔体の溶融挙動について、広範囲に粒子径を変化させて実験を行い、多孔体を構成する粒子径の大きさの違いが溶融挙動、溶融形態にどのような影響を及ぼすかを、実験的、解析的に把握することを目的としている。また、伝熱板表面温度と押し付け圧力からその溶融量を把握するための解析モデルを提示し、そのモデル化の妥当性を評価することを目的としている。

* 原稿受付 2000年6月20日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} 東京工業大学大学院理工学研究科。

E-mail: kumano@mech.titech.ac.jp

記号表

c : 液相の比熱	J/(kg·K)
d : 粒子直径	m
g : 重力加速度	m/s ²
h : 浸透層高さ	m
H : 試料高さ	m
H_{eq} : 浸透層平衡高さ	m
H_0 : 充填層下端からの水面高さ	m
k : 透過率	m ²
L : 融解潜熱	J/kg
M : 試料の質量	kg
N : 伝熱板に接触している粒子の数	
p_l : 液膜内圧力	Pa
p_p : 多孔体内圧力	Pa
P : 平均押し付け圧力	Pa
P_c : 吸い上げ圧力	Pa
q : 熱流束	W/m ²
r, z : 円柱座標系	m
R : 試料半径	m
Ste : 伝熱板表面温度を基準とした ステファン数	$c(T_s - T_m)/L$
Ste' : 循環水温度を基準とした ステファン数	$c(T_{br} - T_m)/L$
t : 時間	s
T_{br} : 循環水温度	°C
T_m : 固相の融点	°C
T_s : 伝熱板表面温度	°C
u : r 方向速度	m/s
v : z 方向速度	m/s
V_c : 浸透界面進行速度	m/s
V_{melt} : 溶融速度	m/s
W : おもりの質量	kg
α : 液相の温度伝導率	m ² /s
ε : 空隙率	
δ : 液膜厚さ	m
λ : 液相の熱伝導率	W/(m·K)
μ : 粘性係数	Pa·s
ρ : 密度	kg/m ³

2. 実験

2.1 実験装置および実験条件 図1に実験装置本体の概略図を示す。装置本体はアクリル製で、恒温槽からポンプによって装置に循環水を供給し、伝熱板下面に循環水を吹き付けることで伝熱板を加熱する。循環水は恒温槽において一定温度になるよう設定されてい

Fig.1 Experimental apparatus

る。伝熱板は直径 100mm、厚さ 16mm で、材質は銅である。伝熱板内には上下面からそれぞれ 2mm、中心からそれぞれ 25mm の位置に、周方向に 120° の角度間隔で合計 6 対の銅-コンスタンタン熱電対が埋め込まれており、A/D 変換装置を介してコンピュータに記録する。上下の熱電対の測定値を外挿することにより伝熱板表面温度を求めた。また、装置本体上方には、ガイドが設けており、試料と共に垂直に移動するような構造になっている。試料の高さは、ガイドと共に移動するノギスを設置し、15 秒間隔で測定する。各時刻における試料の高さから押し付け圧力を、また、高さの経時変化から溶融にあてられた熱量を求めた。

著者らの一部は先に、伝熱板表面温度と融点の差を基準としたステファン数 Ste および無次元押し付け圧力を用いて、実験結果を一般的に整理できることを示した^{(3)~(5)}。従来の研究におけるちゅう密な固相を用いた実験においては、その溶融過程が準定常に達した状態を取り扱っているのに対し、今回の実験では、後述するように、多孔体を構成する粒子の大きさによってその溶融過程は異なる。すなわち、粒子径が小さい場合には、毛管力による融解水の浸透によって溶融初期から準定常状態にかけて熱流束は大きく変化するのに対し、粒子径が大きい場合には溶融開始直後から準定常な溶融過程となる。本研究では、多孔体を構成する粒子の径の違いによる溶融過程の違いを把握するために、準定常に達するまでの過程も含めた測定、観察を行った。そのため、条件によっては伝熱板を通過する熱流束の経時変化が大きく、伝熱板表面温度を一定に保つ

ことが困難であるため、循環水温度を一定にし、循環水温度と融点の差を基準としたステファン数 Ste' を実験条件として与えた。

本研究では、粒子径の大きさによる溶融形態の違いについて検討することを目的としているため、ブライン温度と外部からの荷重を一定に設定し実験を行った。循環水温度は 16 °C に設定した。この際の Ste' は 0.2 であり、試料により異なるが、伝熱板表面温度を基準としたステファン数 Ste は 0.05~0.12 の範囲で変化する。また、平均押し付け圧力 P は試料の質量とおもりの質量の和で決まる値であり、本実験では、0.59kg のおもりをを用い実験を行った。おもりによる平均押し付け圧力は 7.67×10^2 Pa であり、試料自身の質量は溶融に伴い、0~0.3kg の範囲で変化するため、試料による押し付け圧力は、0~ 3.9×10^2 Pa の範囲で変化する。

2.2 試料の作成および試料のパラメータの測定 本実験では、6 種類の粒径の異なる試料で実験を行った。表 1 に多孔体を構成する粒子の粒径、空隙率、透過率および吸い上げ圧力を示す。試料の作成は、すべて -2 °C に保たれた恒温室内で行なった。試料は、粉碎、切削した氷をふるいで選り分けて粒子の径をそろえた後、その氷粒を直径 90mm の円筒形の容器に入れて振盪、圧縮を加えて、高さが約 100mm の円柱形の試料を作成した。粒子同士が固着するまで、0 °C 近傍に保たれた冷凍室内で保持する。粒子径により固着するまでの時間は異なるが、最大で 24 時間程度である。その後、容器から取り出し、試料の体積と質量から空隙率を求めた後に実験に用いた。

多孔体の試料を溶融させる場合、特に粒子径が小さい試料の場合には、溶融した液体が毛管力により試料内部へ浸透して行くため、この溶融現象を把握するためには浸透量を決定付けるパラメータが必要となる。そこで、表 1 に示すように粒子径が比較的小さい試料については、透過率、吸い上げ圧力の測定を行った。図 2 に透過率、吸い上げ圧力を測定するための装置概略図を示す。直径 30mm の円筒形容器に実験用試料と同様な方法で水を充填し、0 °C に保たれた水槽に浸した直後からの試料に浸透した液面の高さの経時変化をビデオカメラで測定した。液相の吸い上げ速度と、毛管力および多孔体の透過率には次の関係がある⁹⁾。

$$V_c = \frac{dh}{dt} = -\frac{k}{\varepsilon \mu} \frac{\rho g (h - H_{eq})}{h} \quad (1)$$

$$H_{eq} = -\frac{P_c}{\rho g} + H_0 \quad (2)$$

Table 1 Properties of porous materials

	particle diameter (mm)	porosity ε	permeability k (m ²)	driving pressure P_c (Pa)
sample 1	~0.5	0.438	1.15×10^{-12}	-3.42×10^4
sample 2	0.5~1.0	0.464	1.05×10^{-10}	-1.02×10^3
sample 3	1.7~2.8	0.441	6.9×10^{-10}	-2.84×10^2
sample 4	2.8~4.0	0.449	1.35×10^{-9}	-1.76×10^2
sample 5	4.0~6.7	0.370		
sample 6	10~20	0.393

Fig.2 Experimental apparatus for measuring permeability

測定値が式(1)、(2)に一致するように二つのパラメータ、透過率 k および吸い上げ圧力 P_c を決定した。本測定において、浸透面の高さにその半径方向に分布はほとんど観察されなかったことから、試料高さ方向および半径方向に空隙率、透過率、吸い上げ圧力の分布はないものと思われる。

2.3 実験方法

実験は次の手順により行った。

(1) -2 °C に設定した恒温室内で試料となる氷を切削、粉碎した後、ふるいで粒径をそろえる。試料作成用の容器にいれ、圧縮して固めた後、融点近傍の一定温度に保たれた冷凍庫内で保持する。

(2) 循環水を恒温槽においてヒーターと冷却器により一定温度に保ちながら装置本体に循環させる。

(3) 実験は約 20 °C の室温環境下で行う。冷凍庫から試

料を取り出し、体積と質量を測定し、空隙率を算出した後に、試料を伝熱板上に設置すると同時に、試料上部にガイドを載せて、高さの経時変化を測定する。

(4) 伝熱板表面温度は試料の溶融とともに変化するが、恒温槽の循環水温度を一定に保持したまま実験を行い、試料が無くなるまでの間、15 秒間隔で試料の高さを、5 秒間隔で伝熱板表面温度の測定を行う。

3. 解析

本研究では、粒子径の違いがその多孔体試料の溶融形態にどのような影響を及ぼすかを実験的な検討を行うとともに、解析モデルを提示し、そのモデルの適応範囲について評価することを目的としている。前報において、多孔体全体で接触溶融としたモデルが、粒子径が小さい場合については、良好な一致が見られることを示した。本報告では、そのモデルに加え、個々の粒子が接触溶融しているとして解析モデルを示し、それら 2 種類の解析モデルの適応範囲について検討を行う。

3.1 試料全体での溶融モデル 試料全体での溶融とする場合には、溶融により生じた液体が試料内部に浸透しながら多孔体試料全体で接触溶融が進行しているとして計算を行った。計算モデルを図 3 に示す。詳細な解析モデルについては、前報⁽⁶⁾にて既に報告しているので、ここでは支配方程式と計算方法の概略のみを示すことにする。まず、次の仮定のもとに支配方程式を導いた。

- (1) 液膜内の溶融液体の運動方程式内において慣性項を省略する。
- (2) 液膜の圧力は z 方向に変化しない。
- (3) 試料は融点に保たれている。
- (4) 液膜内の熱移動は熱伝導のみとする。
- (5) 系は準定常で進行する。
- (6) 多孔性固相内の流れはダルシー則に従う。
- (7) 外界への熱損失は無視する。

著者らの一部が先に、ちゅう密な固相を用いて行った研究においては⁽⁵⁾、(1)～(5)の仮定により導かれた基礎方程式から導出された解析解は、 Ste 数が 0.1 より小さい範囲において、実験、解析結果と良好な一致を示しており、また Ste 数が 0.1～0.23 の範囲では、液膜内の速度・温度場の詳細な 2 次元の解析結果に対して 5% 以内の精度で一致しており、上記の仮定は十分に妥当であると考えられる。また、実験は 200 秒程度で比較的短時間であるので、仮定(7)も十分に妥当であると考え

Fig.3 Melting model on the cross section of the sample

られる。

支配方程式および境界条件を示す。境界条件を考慮する際には、溶融した液体の浸透が、試料上面に達する前を状態 1、上面に達した後を状態 2 として考えることにする。

液膜内

$$r \text{ 方向運動方程式 } \frac{\partial p_l}{\partial r} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$z \text{ 方向運動方程式 } \frac{\partial p_l}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\text{液膜内を通過する熱流束 } q = \lambda \frac{T_s - T_m}{\delta} \quad (5)$$

境界条件：

$$r = 0 : \frac{\partial p_l}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

$$r = R : p_l = 0 \quad (7)$$

$$z = 0, \delta : u = 0 \quad (8)$$

多孔質内

$$\text{連続の式 } \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$r \text{ 方向速度 } u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p_p}{\partial r} \quad (10)$$

$$z \text{ 方向速度 } v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p_p}{\partial z} + \rho g \right) \quad (11)$$

境界条件：

状態 1

$$r = 0 : \frac{\partial p_p}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

$r = R$: 側面近傍($r < R$)で $p_p < 0$ の場合

$$\frac{\partial p_p}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

側面近傍($r < R$)で $p_p > 0$ の場合

$$p_p = 0 \quad (14)$$

$$z = \delta : p_p = p_l \quad (15)$$

$$z = h : p_p = P_c \quad (16)$$

状態 2

$$r = 0 : \frac{\partial p_p}{\partial r} = 0 \quad (17)$$

$$r = R : p_p = 0 \quad (18)$$

$$z = \delta : p_p = p_l \quad (19)$$

$$z = h : \frac{\partial p_p}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

力の釣り合い

$$2\pi \int_0^R p_l \cdot r dr = g(M + W) \quad (21)$$

状態 1 では、試料内部の浸透界面が試料上面に達していないため、浸透界面に対して吸い上げ圧力が生じ、試料上面に達した状態 2 では、試料上面の圧力勾配を 0 として計算を行った。多孔体側面の境界条件については、多孔質体内部の側面近傍の圧力が負の場合には毛管力が働くために勾配が 0 となり、正の場合には界面を 0 として、試料側面から浸透した液体が流出するような条件を与えた。また、溶けた液体の浸透した高さは、試料半径方向には分布を持たないものとした。

本解析モデルでは、多孔体内へ浸透する融解水の流量、液膜内の圧力、荷重との釣り合い、溶融量、のすべてが各時刻において矛盾なく満足しなければならないにもかかわらず、独立してこれらを決定することはできない。そこで、実験開始時の試料の高さと、実験から得られた伝熱板表面温度のみを与え、溶融量、液膜内の圧力などの値を変化させながら、すべての値が基礎式を満足するように繰り返し計算を行い、各時刻における溶融量を求めた。ただし、試料の質量の変化は考慮に入れる必要があるため、各時刻で得られた熱流束から微小時間における試料の質量の変化を求めて、次の時刻の試料の質量として計算を行った。また、この際の式(21)内の質量 M とは、多孔体に浸透した液体と多孔体の質量の総和として決定される。

3.2 個々の粒子における溶融モデル 本モデルにおいては、多孔体を構成する粒子一つ一つが接触溶融するとしてモデル化を行った。解析モデルを図 4 に示す。3.1 節の仮定(1)～(5)および(7)を導入して、基礎式を導出する。先にも述べたように、粒子一つ一つは、稠密な固相であるため、以上の仮定は本モデルに対しても十分に妥当である。また、本モデルでは、溶融液体の多孔体内部への浸透を考慮していないため、3.1 節の仮定(6)は必要としない。

著者らの一部が、ちゅう密な固相を用いて行った研

Fig.4 Melting model for the individual particles

究においては⁽⁵⁾、(1)～(5)の仮定により導かれた基礎方程式から導出された解析解による溶融速度は

$$V_{\text{melt}} = \left[\frac{2\alpha^3 Ste^3}{3\mu R^2} \right]^{0.25} P^{0.25} \quad (22)$$

であり、式(22)が個々の粒子に成り立つと考え、その粒子から成る多孔体固相は円柱形の固相の束が一つの試料を構成していると考え。伝熱面に接触している粒子の数を N とすると、空隙率 ε は

$$\varepsilon = \frac{4H\pi R^2 - N\pi d^2}{4H\pi R^2} \quad (23)$$

であり、式(23)を変形させ、試料半径、空隙率、粒子直径より伝熱面に接触している粒子の数を算出する。

$$N = \frac{4R^2(1-\varepsilon)}{d^2} \quad (24)$$

この値を式(22)に代入することにより、個々の粒子における溶融速度、伝熱板表面温度、押し付け圧力の関係が得られる。

$$V_{\text{melt}} = \left[\frac{8\alpha^3 Ste^3}{3\mu d^2} \right]^{0.25} \left(\frac{P}{N} \right)^{0.25} \quad (25)$$

さらに、式(25)から、熱流束 q が得られる。

$$q = L\rho(1-\varepsilon) \cdot V_{\text{melt}} \quad (26)$$

なお試料全体の溶融速度は粒子の中で最も溶融速度の遅いものに影響を受けるため、粒子の直径 d は仕分けた範囲での最大値を用いた。伝熱板表面温度から Ste 数、高さの測定から平均押し付け圧力 P を求め、各時

刻における熱流束を算出した。この際、粒子径が大きい場合には毛管力による吸い上げ圧力は小さく、実験による観察から溶融液体の浸透高さは 10mm 程度であったため、浸透した液体の質量は考慮せずに、押し付け圧力を算出した。

4. 結果および考察

4.1 粒子径の違いによる影響 粒子径 0.5mm 以下から 1.7~2.8mm の試料における熱流束と伝熱板表面温度の実験結果を図 5 に示す。ここでの熱流束は、固相がほぼ融点に保たれているため、すべて溶融に当てられていると考えられる。粒子径が小さいほど溶融開始直後に熱流束が大きな値を示し、その後減少していくことがわかる。これは、溶融開始直後では毛管力により溶けた液体が多孔体内部に浸透するため、固相粒子と伝熱板の液膜厚さが薄い状態に保たれ、高い熱流束が得られているものと思われる。また、溶融開始からしばらくした準定常状態では、粒子径が小さいほど伝熱板表面温度が高いにもかかわらず、熱流束が小さくなっていることがわかる。これは、多孔体内部に溶融液体が十分に浸透した後は、粒子径が小さくなるほど多孔体内部の透過率が小さくなるため、溶融液体が排出されにくく、液膜厚さを厚くする効果により、熱流束が小さくなっているものと思われる。

粒子径 2.8~4.0mm から 10~20mm の試料における熱流束と伝熱板表面温度の実験結果を図 6 に示す。粒子径が大きい場合には、図 5 で示した粒子径 0.5mm 以下および 0.5~1.0mm の試料に見られるような溶融開始直後の熱流束の急激な上昇は見られず、溶融は準定常状態で進行していることがわかる。これは、毛管力による非定常の効果が小さくなるため熱流束の変化が小さくなっているためと考えられる。また、粒子径が大き

くなるほど伝熱板表面温度が高いにもかかわらず、熱流束が小さくなっていることがわかる。

4.2 実験結果と解析結果の比較 粒子径が 0.5mm 以下の試料に対して、試料全体での溶融モデルとの熱流束の実験結果と解析結果の比較を図 7 に示す。解析結果において、50 秒前後で熱流束が急激に落ち込んでいるのは、融解水の多孔体への浸透が、3.1 節で述べた状態 1 から状態 2 に移行した際の解析の不連続性のためである。実験結果と解析結果は良い一致を示しており、本論文 3.1 節で提案したモデル化が妥当なものであり、粒子径が 0.5mm 以下の粒子から構成される多孔体には、毛管力による融解水の浸透を考慮に入れた試料全体としての接触溶融のモデルが適用できることがわかる。

2.8~4.0mm, 10~20mm の粒子径における、個々の粒子の接触溶融とした溶融モデルとの熱流束の実験結果と解析結果の比較を図 8 に示す。どちらの試料についても解析結果と実験結果は良好な一致を示していることがわかり、粒子径が比較的大きい場合には、粒子が個々に接触溶融していることがわかる。本実験条件の範囲では、約 4mm 以上の粒子から構成される多孔体は、粒子一つ一つの接触溶融の集合として扱えることがわかる。また、0.5~2.8mm の径の粒子で構成された多孔体の溶融は 2 つのモデルの複合的な溶融現象であり、どちらのモデルとも良好な一致は見られなかった。

以上、4.1 節の結果も含め、粒子径が変化することによる溶融形態の違いを次のように考えることができる。図 9 に空隙率、伝熱板表面温度が同一条件であった場合、粒子径の違いによる準定常状態における粒子径と熱流束の関係の概念図を示す。粒子径が小さい領域では、粒子径が小さいことに起因する低い透過率のために、溶けた液体は固相内部を透過しにくく、溶けた液体のほとんどが試料と伝熱板との間を通過して排出し、

Fig.5 Time dependencies of the heat flux and the surface temperature

Fig.6 Time dependencies of the heat flux and the surface temperature

Fig.7 Comparison of heat flux
between experiment and calculation (for sample 1)

試料全体での溶融になると考えられる。粒子径が大きくなると、試料全体での溶融形態は保ちつつも透過率が上昇し、溶けた液体が試料内部を通過しやすくなるため、液膜厚さを薄くするために熱流束は大きくなる。つまり、この溶融形態では、熱流束に対して透過率が支配的となり、粒子径の増加に伴う透過率の増加により、熱流束も増加する。しかし、粒子径が大きくなり、ある程度以上の透過率となると、透過率は支配的とならず、個々の粒子の溶融と考えることができる。従来の研究から、接触溶融では固相の直径が大きくなるほど液膜内の圧力損失が大きくなるため、液膜厚さが大きくなり、熱流束は小さくなることから、その粒子径の効果により、粒子径の増加とともに熱流束は減少することになるものと思われる。つまり、この領域では、透過率ではなく、粒子径がその熱流束を決定付けることとなり、粒子径の増加に伴って、熱流束は減少することになる。

これらの傾向は試料半径、空隙率、伝熱板表面温度等によって、その適用領域は変化してくると思われるが、本実験の範囲では、0.5mm 以下の場合には試料全体での溶融、約 4mm 以上では個々の粒子の接触溶融として現象を把握することができると考えられる。また、両者の複合的な状態も存在し、本実験の範囲では、0.5mm～4mm がその領域であったと思われる。

5. 結論

多孔性固相を試料とする接触溶融において、粒子径の違いによる溶融形態の違いについて実験的、解析的に検討を行った。その結果、準定常状態の熱流束は、粒子径が小さい領域では、多孔体内の透過率が支配的な溶融となり、粒子径が大きくなるにつれて熱流束は

Fig.8 Comparison of heat flux between
experiment and calculation (for sample 4 and 6)

Fig.9 Heat flux and the controlling phenomena in the
quasi-steady state due to the particle diameter variation

大きくなる。また粒子径がある程度大きくなると、各粒子が個々に接触溶融を行う系に移行し、粒子径とともに熱流束は小さくなることがわかった。また、粒子径が小さい場合および粒子径が比較的大きい場合の解析モデルをそれぞれ示し、それぞれの適用範囲において実験結果と解析結果はともに良好な一致を示すことがわかった。

最後に、本研究は文部省科学研究費奨励研究(A) No. 11750160 の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

文献

- (1) D. A. Kearns, O. A. Plumb, Trans. ASME., J. Heat Transfer, 117(1995), 452
- (2) 青木和夫,他 2 名, 機械学会論文集, 53-495(1987), 3352

- (3) 斎藤彬夫,他 3 名, 機械学会論文集,50-458(1984),2393
 - (4) 斎藤彬夫,他 3 名, 機械学会論文集,50-460(1984),2977
 - (5) 斎藤彬夫,他 3 名, 機械学会論文集,52-473(1986),110
 - (6) 斎藤彬夫,他 2 名, 機械学会論文集,53-491(1987),2130
 - (7) 斎藤彬夫,他 2 名, 機械学会論文集,57-541(1991),3141
 - (8) 熊野寛之,他 3 名, 機械学会論文集,56-644(2000),1154
 - (9) T. Delker, 他 2 名, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 76-16(1996), 2902
-