

571
II

自由粒子層による沸騰伝熱の高性能化技術

(課題番号 09555072)

平成9年度—平成10年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成11年6月

横浜国立大学附属図書館



10734277

研究代表者 飯田 嘉宏
(横浜国立大学工学部教授)

は し が き

研 究 組 織

- 研究代表者 : 飯田嘉宏 (横浜国立大学工学部教授)
研究分担者 : 奥山法人 (横浜国立大学大学院工学研究科助教授)
研究分担者 : 高島武雄 (横浜国立大学工学部助手、
現在は小山工業高等専門学校助教授)
研究分担者 : 露木敏勝 (東京女子医科大学看護短期大学部助教授)

研 究 経 費

平成9年度	3,800	千円
平成10年度	1,700	千円
計	5,500	千円

研 究 発 表

(1) 学会誌等

現在投稿中および投稿準備中

(2) 口頭発表

- 1) (飯田嘉宏、高島武雄、露木敏勝、自由粒子層による沸騰伝熱の高性能化に関する研究、第34回日本伝熱シンポジウム、1997年5月)
- 2) (露木敏勝、高島武雄、奥山邦人、飯田嘉宏、流動可能な粒子層を用いた水平伝熱面からの沸騰伝熱促進、化学工学会沖縄大会、1998年11月)
- 3) (露木敏勝、高島武雄、奥山邦人、飯田嘉宏、自由粒子層による沸騰伝熱の高性能化に関する研究(第2報、平面伝熱面における実験)、第36回日本伝熱シンポジウム、1999年5月)

(3) 出版物

なし

研 究 成 果

本研究の成果は、学会誌に投稿中または投稿準備中である。一方それら成果は、前項「はしがき」中に示した如く学会講演会において3度にわたって講演発表しているので、それぞれの講演論文の写しを掲載して、研究成果の内容に代える。

自由粒子層による沸騰伝熱の高性能化に関する研究

Augmentation of Boiling Heat Transfer by Free Particles Bed

伝正 飯田 嘉宏 (横国大工) 伝正 *高島 武雄 (横国大工)
 化工正 露木 敏勝 (東女医大看護)

Yoshihiro IIDA¹, Takeo TAKASHIMA¹ and Toshikatsu TSUYUKI²

¹ Dept. of Mat. Science & Chem. Engng, Yokohama Natl. Univ., Hodogaya-ku, Yokohama, 240

² School of Nursing, Tokyo Women's Med. College, Kawadacho, Shinjuku, Tokyo, 162

A cylindrical heater of 0.88mm in diameter is set in particles bed, in which particles are freely movable in liquid, and the nucleate boiling heat transfer characteristics are measured. Materials used for particles are alumina, glass and porous alumina and the diameter ranges from 0.3mm to 2.5mm. The maximum augmentation ratio obtained reaches about 10times of heat transfer coefficient in liquid. The maximum heat flux is also measured versus the depth of heater under the surface of particles bed. The mechanism of augmentation is discussed. This is a passive technique, though particles movement caused by bubble formation augments heat transfer like an active one.

Key Words : Boiling Heat Transfer, Augmentation, Free Particles, Nucleate Boiling,

1. まえがき

沸騰伝熱はもともと高い性能を有するが、さらに高性能化して小温度差熱交換や高負荷冷却等に利用するために、種々の伝熱促進技術が提案され実用化されている。従来の受動的技術では、粗面、フィン付面、多孔質層やトンネル構造を有する微細加工面などが有力だが、特に諸工業装置では比較的低純度の液体を使用する場合などファウリング蓄積等で微細加工面の使用が困難な場合があるし、従来技術は液体の物性によっては効果が低下することもある。

そこで本研究では、伝熱面上(または周囲)の液体中に自由に動き回れる粒子層を設け、非沸騰時には堆積していた粒子層を沸騰によって流動化させる結果伝熱を大きく促進させる技術を開発する。本技術は特別のエネルギーを与えない受動法でありながら、自らの発泡現象を能動的に利用するために高い性能を与える。また粒子の自由流動によって伝熱面上のファウリング層を自動的に取り除けることや広い物性範囲の液体にも有効に使用できることも特徴であり、工業的な適用範囲があると考えられる。以上に近い着点に立った研究は著者らの知る限り、Chuah & Carey¹⁾による限られた実験条件範囲の研究が見られる程度である。なお、固定粒子層については、福迫ら²⁾のほか幾つかの研究があるが、基本的に異なる機構である。

本第一報では、種々の自由粒子層中に置かれた水平円柱伝熱面からの主に飽和核沸騰伝熱の実験結果について述べ、本技術の可能性を示す。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略図および試験伝熱面の詳細図をそれぞれ Fig.1 および Fig.2 に示した。伝熱面は外径 0.88mm、長さ 67mm の SUS304 円管の外周で、内部にはバイレックス管で同円管と絶縁された 0.1mm 径アルメル・クロメル熱電対とその温接点がセットされ、伝熱面温度を測定する。試験伝熱面は、粒子層が試験容器内に充填された時の表面から 1 の深さに水平に設置されている。1 は種々変えて実験を行った。一方、試験液体としての水は粒子層を満たした上、液位を粒子層上面 60mm (= H-1) に保った。容器は二重で外側湯浴中の水は補助ヒーターで沸騰させ、

試験用の水温を飽和温度(大気圧、100℃)に保った。その他、電力供給系及びその測定系、熱電対による温度計測系および記録系が付属している。試験容器内部は奥行き 200mm、高さ 200mm、横幅 120mm の直方体であり、奥行き方向の壁は湯浴ともガラスで作成してあり、内部を観察出来る。

実験に用いた粒子は、Table 1 に掲げたようにアルミナ、ガラス、多孔質アルミナの各材質で、直径 d_p または代表直径としては試験伝熱面直径前後の値の数種を用いた。アルミナとガラスは主に熱伝導率による違いを、アルミナと多孔質アルミナは主に密度(ρ : 真密度、 ρ_a : 見かけ密度)による違いを試験するために選んだ。なお比較のために固定粒子層での実験も行った。

3. 実験結果と考察

3.1 固定粒子層中での沸騰伝熱 Fig.3 には、固定粒子層中での沸騰曲線例を示す。黒丸は粒子層のない場合のデータである。粒子径は 3 種に変えたアルミナ粒子の場合

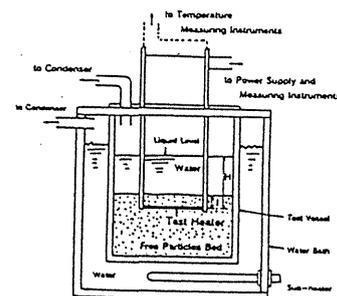


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

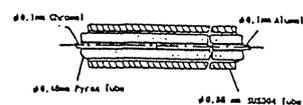


Fig.2 Schema of test heater

Table 1 Particles examined

	d_p mm	ρ kg/m ³	ρ_a kg/m ³	λ W/(mK)
Alumina	0.3, 1.0, 2.5	3550	3350	12.6
Glass	0.3, 1.0, 2.5	2450		1.08
Porous Alumina	0.79, 2.35		1470, 1130	

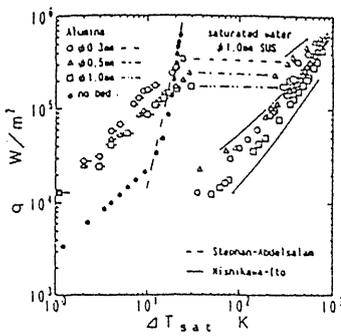


Fig. 3 Typical example of boiling curve in a fixed particles bed

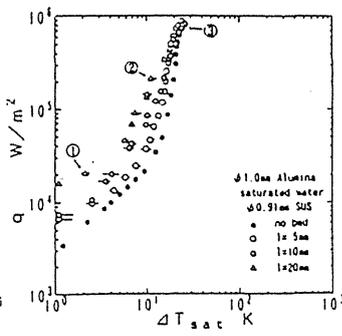


Fig. 4 Boiling curves for 1mm-dia alumina particles

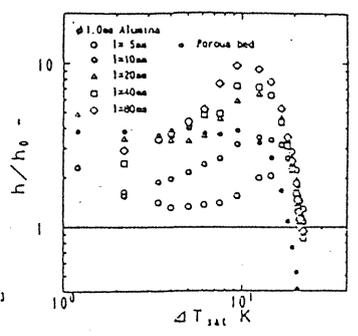
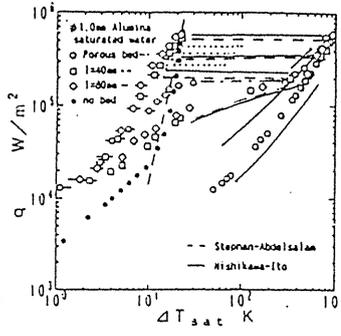


Fig. 5 Augmentation ratio for 1mm-dia alumina particles

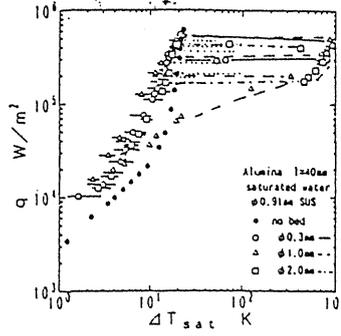


Fig. 6 Effect of alumina particles diameter on nucleate boiling

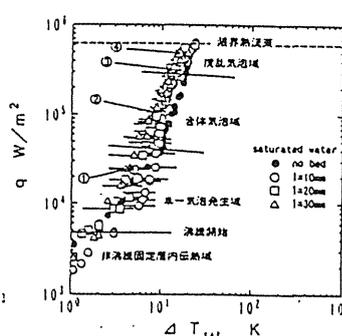


Fig. 7 Nucleate boiling curves for 1mm-dia glass particles



Fig. 8 Typical configuration of bubbles

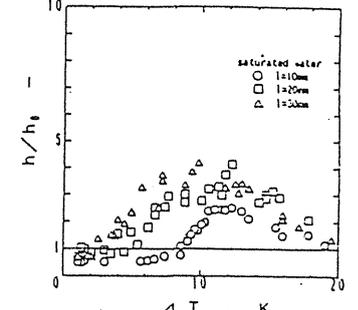


Fig. 9 Augmentation ratio for 1mm-dia glass particles

であるが、熱流束は高いが自然対流域とほぼ同じ勾配で核沸騰域が推移し、比較的低い極大熱流束で膜沸騰に移移する。膜沸騰域では、粒子層がない場合とほぼ同じ特性を示す。

3.2 自由粒子層中での沸騰伝熱 Fig.4(a)(b)には、1mm径アルミナ粒子中での沸騰曲線を示した。パラメータは1である。低熱流束域では、ほぼ1の増加と共に伝熱が促進される。しかし1が40mm以上では、1の増加と共に極大熱流束が小さくなり膜沸騰に移移する。Fig.5には、Fig.4の場合についての伝熱促進率 h/h_0 を過熱度に対してプロットした。高過熱度域では急激に減じるが、全体にわたって伝熱促進され最大約1.0倍の促進率を得ている。なお黒丸は固定粒子層での結果である。

Fig.6はアルミナ粒子の場合について粒子径の影響を比較した例で、最適な粒子径の存在が予想される。

Fig.7は、1.0mm径ガラス粒子についての実験結果例で、図中にはFig.8に示した写真例のように観察される沸騰様相を4種に分類し、それらの存在領域をも記した。Fig.9はFig.7の場合の伝熱促進率である。中熱流束域では約4倍の促進率を得ている。一方低熱流束域では対流阻害と低熱伝導性のため伝熱はむしろ劣化している。粒子径の影響については、0.3mmと特に小さい場合は促進率は低下した。

Fig.10は、多孔質アルミナ粒子の場合の伝熱促進率を、アルミナ粒子の場合と比較した。1=20mmの場合についてである。低熱伝導性のために1以下の促進率が現れるが、過熱度増加と共に次第に促進され、特に高過熱度域での落ち込みはアルミナの場合よりも小さい傾向がある。

3.3 自由粒子層中での極大熱流束 極大熱流束に関して今まで得られたデータを Fig.11 に示した。伝熱面の粒子

層内設置深さ1の増加と共に極大熱流束は減少する。アルミナ粒子とガラス粒子のそれぞれについては直径0.3mmと1.0mmの両場合についてほぼ同様の傾向を示すが、粒子材質と粒径によって傾向は可成り相違する。

3.4 伝熱促進の原因と結果に関する考察 本系の伝熱促進の要因としては、①粒子層によるフィン効果、②粒子・伝熱面接触による既存核活性化、③粒子流動による温度境界層の攪乱、④粒子による伝熱面への液体供給、⑤粒子による顕熱輸送、などが考えられる。一方伝熱劣化の要因としては、⑥自然対流の阻害、⑦気泡離脱の阻害、などが考えられる。紙面の都合で、これらによる実験結果の考察はここでは省略する。

4. あとがき 以上、自由に流動化できる粒子層を利用して特に沸騰伝熱を促進させる技術の基礎研究として、水平円柱伝熱面について主に核沸騰に関する実験結果を述べた。

【文献】1) Chuah, Y.K., et al., J of Heat Transfer, Vol.109, (1989), 196. 2) 福迫ほか、機論、51-466, 昭60-6, 1834.

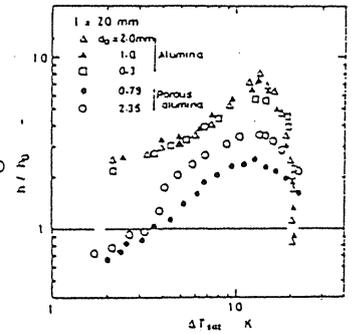


Fig. 10 Augmentation ratio for porous alumina particles

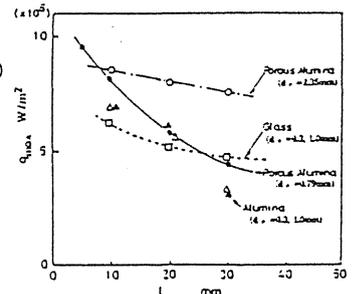


Fig. 11 Maximum heat flux versus immersed depth of heater

(東女医大看短)○(正)露木 敏勝* (横国大・工)(正)高島 武雄・(正)奥山 邦人・(正)飯田 嘉宏

1. 緒言 沸騰伝熱はそれ自体高性能であるが、更に高性能化することにより、装置の小型化や省エネに利用できるので多くの技術がある。著者らは、受動法の新技术として、沸騰液内に自由に流動化できる粒子層を設け、沸騰自体の流動によって流動化させて伝熱促進を図る方法を提案している。この方法はファウリングを除去できる長所もある。既に、著者らは、ステンレス細管を伝熱面として周囲に粒子層を堆積させることにより、この技術が有効であることを示した¹⁾。本報では、蒸発缶等に用いられる面状伝熱面を考え、円形水平伝熱面上に粒子層を設けた場合の実験を行い、新技术の有効性を示す。このような研究は著者らの知る限り、Chuahら²⁾の研究があるが、実験条件が限られているだけでなく大きな促進率は得られていない。

2. 実験装置および方法 Fig. 1に実験装置の概略を示した。伝熱面は、銅円柱の上端で直径30mmである。伝熱面からそれぞれ6.0mm, 12.0mmの銅円柱中心軸上に0.5φ K型シーす熱電対の温接点を設定し、伝熱面平均温度と熱流束を求めた。容器はガラス製で、様相が観察できる。内側の容器の内径は37mmである。粒子はTable1に示したようにアルミナ粒子、ガラス粒子を使用し、伝熱面上の粒子層高さ l は5~40mmに変化させた。実験は大気圧下で行い、試験液体は飽和水を用い、粒子層上の液位は60mm一定とした。

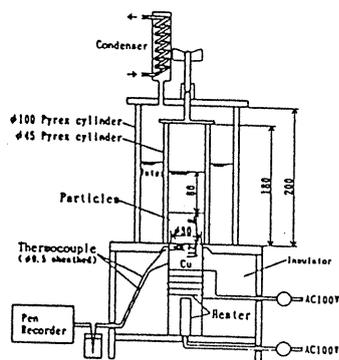


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

	d_p mm	ρ kg/m ³	λ W/(m·K)
Alumina	0.5, 1.0, 2.5	3550	12.6
Glass	0.5, 1.0, 2.5	2450	1.08

Fig. 2(a)は、直径1.0mmのアルミナ粒子層高さ l を変化させた場合の沸騰曲線で

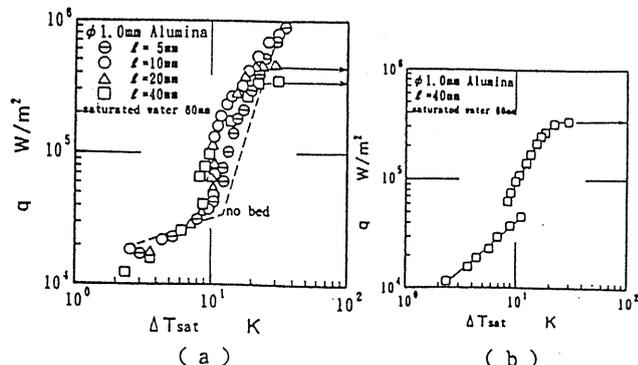


Fig.2 Boiling curves for 1mm-dia alumina particles

ある。 l が10mmおよび20mmのとき伝熱がよく促進されている。 l が20mm以上では、極大熱流束が小さくなり膜沸騰に遷移する。極大熱流束点近くでは、粒子はブロック状になり粒子層中に気泡の上昇経路が形成され伝熱面への液体供給が阻害されるため遷移したと考えられる。(b)は、 l が40mmでの沸騰曲線で、沸騰により粒子の流動が生じたためヒステリシスが見られた。ヒステリシスは、程度の差はあるがいずれの場合も見られた。

Fig. 3は、Fig. 2の場合についての伝熱促進率 h/h_0 である。沸騰開始により伝熱促進がみられ、広い範囲の過熱度で促進されており、最大約6倍の促進率を得ている。

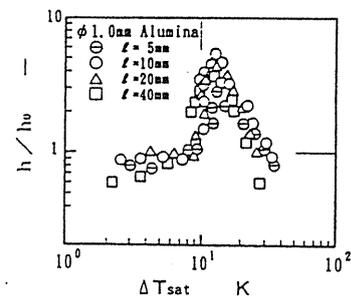


Fig.3 Augmentation ratio for 1mm-dia alumina particles

Fig. 4は、アルミナ粒子の粒子径を変えた場合の結果である。伝熱促進の効果は、広い過熱度範囲で直径1.0mmの粒子が優れている。

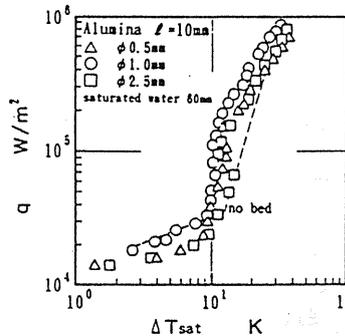


Fig.4 Effect of alumina particles diameter on nucleate boiling

Fig. 5は、アルミナ粒子とガラス粒子を用いた場合の伝熱促進率を示す。粒子物性に基づく差は広い範囲にわたって認められ、熱伝導率の大きい粒子の方が伝熱を促進する効果が大きい。なお、ガラス粒子は、自然対流域では粒子層による対流阻害と低熱伝導性のため伝熱はかなり低下している。

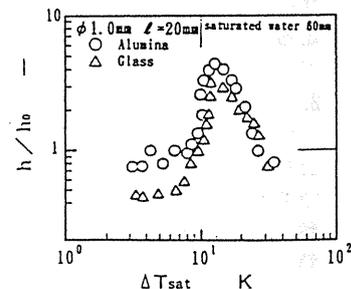


Fig.5 Augmentation ratio for 1mm-dia particles

4. 結言 流動化可能な粒子層を用いた沸騰伝熱は粒子のない場合の沸騰より最大6倍の伝熱促進率を示した。

[文献] 1)飯田ほか、第28回秋季大会講演要旨集、(1995) 2)Chuah, Y. K. and Carey, V. P., ASME journal of Heat Transfer, vol. 109(1987), 196

* Tel:03-3353-8111 Fax:03-3341-8832

自由粒子層による沸騰伝熱の高性能化に関する研究

(第2報、平面伝熱面における実験)

Augmentation of Boiling Heat Transfer by Free Particles Bed
(2nd. Rep., Experiments on a Flat Heating Surface)

伝正 *露木 敏勝 (東女医大看護) 伝正 高島 武雄 (横国大工)
伝正 奥山 邦人 (横国大工) 伝正 飯田 嘉宏 (横国大工)

Toshikatsu TSUYUKI¹, Takeo TAKASHIMA², Kunito OKUYAMA² and Yoshihiro IIDA²¹School of Nursing, Tokyo Women's Med. College, Kawadacho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666²Dept. of Mat. Science & Chem. Engng, Yokohama Natl. Univ., Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

An experimental study was made of saturated nucleate pool boiling with particle beds, in which particles are freely movable in liquid. The particle beds are set on a horizontal, flat 30mm diameter copper heating surface. The heat transfer characteristics are measured. Materials used for particles are alumina, aluminium and glass and the diameter ranges from 0.5mm to 2.5mm. The maximum augmentation ratio obtained reaches about 7 times of heat transfer coefficient in liquid. The mechanism of augmentation is discussed. This is a passive technique, though particles movement caused by bubble formation augments heat transfer like an active one.

Key Words: Boiling Heat Transfer, Augmentation, Free Particles, Nucleate Boiling

1. 緒言

沸騰伝熱はそれ自体高性能であるが、更に高性能化することにより装置を小型化したり、小温度差熱交換器などに利用できるので、多くの伝熱促進技術が研究、実用化されている。

著者らは、受動法の一技術として、沸騰液内を自由に動き回れる粒子層(自由粒子層)を設け、沸騰自体の流動によって流動化させて伝熱促進を図る方法を提案している。この方法はファウリング層を自動的に除去できる可能性もあり汎用性が高い。既に、著者らは、外径0.88mm、長さ67mmのステンレス円管の外表面を伝熱面として周囲に粒子層を堆積させ、沸騰伝熱促進効果について研究を行い、最高10倍の促進率を得てこの技術が有効であることを示した⁽¹⁾。本報では面状伝熱面を考え、円形水平伝熱面上に種々の自由粒子層を設けた場合の主に飽和核沸騰伝熱について実験を行い、本技術の有効性を示す。このような研究は著者らの知る限り、Chuahら⁽²⁾の研究があるが、実験条件が限られているだけでなく大きな促進率は得られていない。

2. 実験装置および方法

Fig. 1に実験装置の概略を示した。伝熱面は、銅円柱の上端で直径30mmであり#2000エメリー紙で研磨した後、清浄にした。伝熱面からそれぞれ6.0mm, 12.0mmの銅円柱中心軸上に直径0.5mm K型シース熱電対の温接点を設定し、伝熱面平均温度と熱流束を求めた。容器は二重で、内径37mmおよび87mmのガラス製であり、内部の様相が観察できる。伝熱面への熱入力、銅円柱に埋め込んだカートリッジヒーターと銅円柱に巻き付けたヒーターで供給した。

実験に用いた粒子はTable 1に示したように、アルミナ球、アルミニウム球、アルミニウム円柱およびガラス球でアルミニウムは熱伝導率が大きく、密度が金属としては小さいことから用いた。伝熱面上の初期設定粒子層厚さ l は5~40mmに変化させた。

実験は大気圧下で行い、試験液体は純水およびエタノールを用い、粒子層上の液位は60mm一定とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 自由粒子層での沸騰伝熱 Fig. 2に直径1.0mmのアルミナ球の粒子層厚さ l を変化させた場合の沸騰曲線を示す。 l が10mmおよび20mmのとき伝熱がよく促進されている。 l が10mm以上では、 l の増加とともに限界熱流束が小さくなり膜沸騰に移移する。 l が比較的大きい場合、限界熱流束点近くでは粒子の流動は粒子層上部のみとなり、ブロック様の粒子層中を合体泡が上昇するようになり伝熱面への液体供給が阻害されるため遷移したと考えられる。また、沸騰により粒子の流動が生じ、温度境界層が攪乱されたためヒステリシスが生じた。ヒステリシスは、実験範囲内では温度にして5 K以内であり、その程度は粒子の種類、粒子層厚さにより異なる。エタノールではほとんどヒステリシスが見られなかった。なお、図中には沸騰様相の存在領域をも記した。Fig. 3はFig. 2の $l=40$ mmのときの沸騰初期の様相である。中央からの合体泡に跳ね上げられた粒子が四方に散っており、②では跳ね上げられた粒子が粒子層内を中心部へと循環する粒子の流動が見られた。

Fig. 4は、直径2.4mmのアルミニウム球の粒子層厚さ l を変化させた場合の沸騰曲線で、 l による大きな差は見られないが、 $l=20$ mmのとき最も促進されている。Fig. 5は、Fig. 4の場合についての伝熱促進率 h/h_0 である。沸騰開始により伝熱促進がみられ、広い範囲の

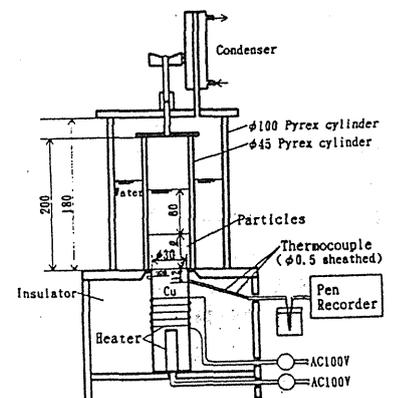


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Particles examined

	mm	ρ kg/m ³	λ W/(m·K)
Alumina	$\phi 0.5, \phi 1.0, \phi 2.5$	3550	12.6
Aluminium	$\phi 2.4, \phi 1.0 \times 1, \phi 1.0 \times 3$	2700	239
Glass	$\phi 0.5, \phi 1.0, \phi 2.5$	2450	1.08

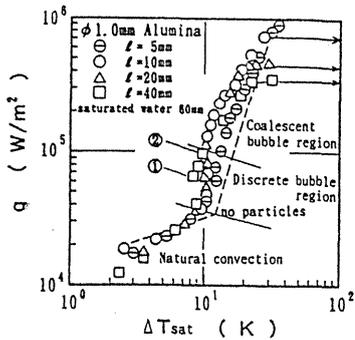


Fig. 2 Boiling curves for 1mm-dia alumina particles

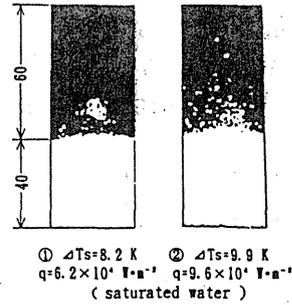


Fig. 3 Photographs of boiling configuration

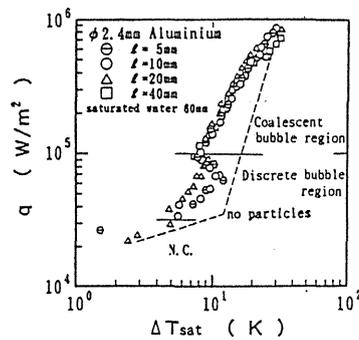


Fig. 4 Boiling curves for 2.4mm-dia aluminium particles

Fig. 5 Augmentation ratio for 2.4mm-dia aluminium particles

Fig. 5 Augmentation ratio for 2.4mm-dia aluminium particles

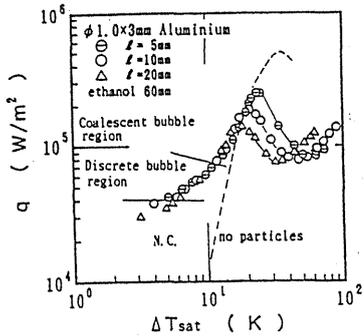


Fig. 6 Boiling curves for 1.0x3mm aluminium particles

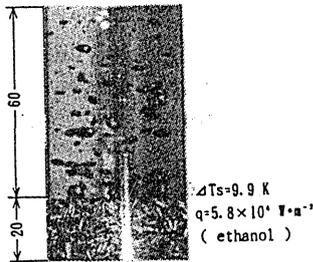
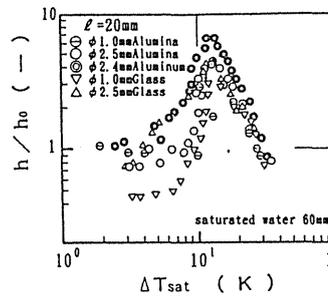
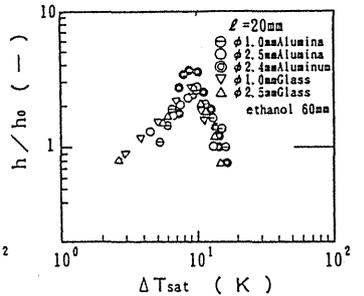


Fig. 7 Photograph of boiling configuration



(a) water



(b) ethanol

Fig. 8 Augmentation ratio for particles

過熱度で促進されており、最高約7倍の促進率を得ている。これは、アルミニウムの熱伝導率が大きく、密度が小さいため金属粒子としては小重量で流動しやすいため、①粒子層によるフィン効果、②粒子流動による温度境界層の攪乱、③粒子流動による顕熱輸送、④粒子による伝熱面への液体輸送が大となるためと考えられる。

Fig. 6にエタノールでの直径1.0mm、長さ3mmのアルミニウム円柱の粒子層厚さ l を変化させた場合の沸騰曲線を示す。Fig. 7にはこの場合の $l=20\text{mm}$ での沸騰初期の様相を示す。粒子層がない場合気泡は微細であるが、粒子層の存在により気泡が合体しているのが分かる。

Fig. 8はアルミナ球、アルミニウム球およびガラス球を用いた場合の $l=20\text{mm}$ での伝熱促進率を示す。(a)は水の場合、(b)はエタノールの場合である。いずれの試験液体の場合も、伝熱促進効果の大きさの傾向は同様であり、粒子の流動の開始により促進効果が增大している。粒子の流動による温度境界層の攪乱、粒子による伝熱面への液体供給、粒子による顕熱輸送が、粒子層による伝熱促進の主な原因と考えられる。粒子種類については、粒子物性に基づく差が広い範囲にわたって認められ、熱伝導率の大きいアルミニウム球が伝熱を促進する効果大きい。

Fig. 9は、伝熱促進効果が大きいアルミニウム粒子の形状を、球と円柱に変化させたときの伝熱促進率を示したものである。中～高過熱度域においては、球の方がやや伝熱に優れているが、低過熱度域では、円柱の方が高い促進率である。これは、低過熱度域では粒子の流動があってもわずかで、円柱の粒子層は密に堆積しているため、伝熱面との接触面積が大きく拡大伝熱面として作用していると考えられる。

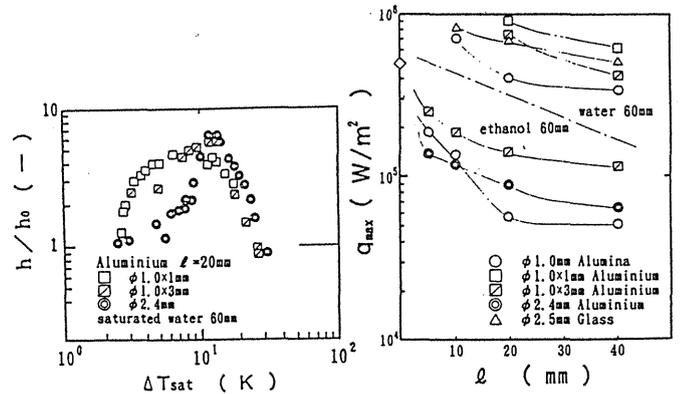


Fig. 9 Augmentation ratio for aluminium particles

Fig. 10 Maximum heat flux versus height of particles

3.2 自由粒子層での限界熱流束 水およびエタノールの両液体について限界熱流束に関して得られたデータをFig. 10に示す。いずれの場合も粒子層厚さ l の増加と共に限界熱流束は減少し、傾向も似ている。また、液体が異なってもほぼ同様な傾向を示す。

4. 結言

水平伝熱面上に自由に流動化できる粒子層を設けた沸騰伝熱について、主に核沸騰に関する実験結果を述べるとともに、粒子のない場合の沸騰より最高7倍の伝熱促進率を得たことを示した。

[文献]

- (1)飯田・他2名、第34回伝熱シンポジウム講演論文集、(1997)、295
- (2)Chuah, Y. K. and Carey, V. P., ASME journal of Heat Transfer, vol. 109(1987), 196