

## 〔研究〕

# 低重力下におけるスプレー冷却 Spray Cooling under Reduced Gravity

吉田 顕一      阿部 宜之      岡 利春  
K. YOSHIDA      Y. ABE      T. OKA  
森 康彦      長島 昭  
Y. H. MORI      A. NAGASHIMA

The present paper reports on the results of a series of authors' parabolic flight experiments on spray cooling in addition to ground-based experiments in which the influence of heater orientation and the behavior of rebounded droplets were especially studied in detail. Water and FC-72 (perfluorocarbon) were employed alternatively as a test liquid sprayed from a single full-cone nozzle onto a Cr-plated surface of an electrically heated copper block for transient cooling experiments or onto a transparent ITO (indium tin oxide)-coated surface of a glass block for steady state experiments in a relatively low superheat region. Each experimental run was accomplished within some 15 seconds through which a stable reduced gravity condition (0.01 times the terrestrial gravity) was maintained in the aircraft. Cooling curves were obtained over a wide range of each of the following parameters: the wall superheat, the spray volume flux and the Weber number for the spray droplet. It is demonstrated that the gravity dependency of the spray cooling characteristics varies with the spray volume flux and the droplet Weber number. Qualitative interpretations of the observed gravity dependency are provided.

### §1 はじめに

液体を被冷却体に噴霧することによって冷却を行う、いわゆるスプレー冷却は、その制御性の高い冷却速度の特長により、多くの産業分野で応用されている技術である。このような特長は、当然宇宙での熱制御手法としても極めて重要であり、スペースシャトルでは、大気圏再突入時、冷却パネルが展開できないため、熱制御用熱媒体が循環するループに水スプレーを噴霧してこれを冷却する、フラッシュ蒸発器を搭載している<sup>1)</sup>。さらに宇宙環境における材料プロセスでの冷却手段、マイクロエレクトロニクスの冷却、大型宇宙構造物での緊急冷却等、様々な

宇宙での用途が予測される。

一方、スプレー冷却に関しては、既に多くの研究がなされてきているが、微小重力下で冷却特性が影響をうけるのか、といった知見は、筆者らの前報<sup>2,3)</sup>以外は全く得られていない。しかし、スプレー冷却における重力の効果を示唆する研究例はいくつかある。例えばChoiとYaoは、水平噴霧、鉛直噴霧の実験により、伝熱面の姿勢の影響に関する知見を得ている<sup>4)</sup>。彼らの結果によると、膜沸騰域では鉛直噴霧スプレーがより高い冷却特性を示しており、これを伝熱面で飛散した液滴の2次的効果の有無に依るとしている。また、遷移沸騰領域では水平噴霧スプレーがより高い冷却特性を示し、その原因は伝熱面上の蒸

気の除去が容易であるためであろうと推測している。また、QiaoとChandraはわずか15mmの落下距離（落下時間55msec）を利用し、単一液滴の高温伝熱面の衝突挙動を詳細に観察している<sup>5)</sup>。水の液滴については、低重力下ではライデンフロスト蒸発が維持できないことを報告し、また水とn-ヘプタンとの低重力下での沸騰挙動の差異も指摘している。同様な、水と有機液体の微小重力下におけるプール沸騰の差異に関しては、筆者らも既に報告している<sup>6)</sup>。また、過去の研究例で指摘されているように<sup>7,8)</sup>、ウェーバー数のしきい値によって、膜沸騰域での噴霧液滴の衝突挙動が著しく異なるのなら、微小重力下では膜沸騰域の衝突液滴がリバウンドする低We数領域で、重力の効果が大きく影響することが予想される。

一方、過去の大半のスプレー冷却の素過程に関する研究では、液滴の伝熱面衝突時、及び衝突後の挙動に着目しているが、衝突前の挙動もスプレー冷却特性に影響を及ぼす事実も指摘されている。GozálezとBlackは、スプレー液滴と伝熱面で蒸発した蒸気の浮力による流れとの相互作用の重要性について、実験的、理論的に考察し、液滴速度が対向する蒸気流により、顕著に減速されることを指摘している<sup>9)</sup>。これら重力効果を示唆する結果に加え、伝熱面に噴霧液がオーバーフローするような高スプレー流量密度では、伝熱面上の液膜厚さ<sup>10,11)</sup>も重力の影響を受ける可能性が考えられる。DebとYaoは、膜沸騰域でのスプレー伝熱メカニズムを、蒸気の流れと空気の流れを加味した液滴接触伝熱、マクロな対流、輻射、の3つのメカニズムに分けて解析しているが<sup>17)</sup>、前2者では重力が大きく影響している。これら一連の報告から、スプレー冷却において重力が重要な役割を果たしている可能性が高く、特に膜沸騰域において重力の影響が顕著になることが予想されるが、これまで重力の影響に関する研究は皆無であった。

こうした背景から、筆者らはスプレー冷却における重力の影響を実験的に明らかにするため、航空機（MU-300）の放物飛行で得られる約20秒間の低重力（ $\sim 10^{-2}g$ ）を利用した一連の航空機実験を実施し、その結果を既に報告した<sup>2,3)</sup>。初期の実験では、水およびCFC-113をスプレー媒体として用いて、ニッケルメッキを施した直径19mmの銅ブロックヒーターを伝熱面

としたが、その後CFC-113に替わりFC-72を、ニッケルメッキの代わりに硬質クロムメッキとし、伝熱面直径も50mmと大口径化し、さらに伝熱面上の液滴挙動の観察を図り、透明ガラスヒーターも併用した。スプレー冷却に関する過去の実験データは、CFC-113<sup>12)</sup>、FC-72<sup>13)</sup>共に得られており、またFC-72は、1998年に建設が開始された国際宇宙ステーション、アルファ、における日本の実験設備（JEM: Japanese Experiment Module）のひとつである暴露部（Exposed Facility）での熱制御媒体の候補であり、さらには日本で研究中の無人宇宙往還機の熱制御媒体の候補としても挙げられている。既報での結果を以下に要約する。

水： $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下の低スプレー流量密度では、膜沸騰域の伝熱が重力の減少と共に約30%程度低下する一方、 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上の高スプレー流量密度では、重力の減少はわずかながらCHF（限界熱流束）を増大させる。透明伝熱面を用いた観察結果では、低スプレー流量密度では液滴は相互に干渉し合うことなく伝熱面で完全蒸発し、CHFに至る。

CFC-113及びFC-72： $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ を越える高スプレー流量密度では重力の低下はわずかなCHFの増大を引き起こす。透明伝熱面を用いた実験結果からは、伝熱面に衝突した液滴が相互に干渉し合い非常に薄い液膜が形成され、伝熱面から排除されていく様子が観察された

これらの一連の実験結果はスプレー冷却特性における重力の効果の存在を示すものであり、先のChoiとYaoが報告した伝熱面姿勢に関する実験結果とも、定性的に一致している。一方、重力の効果が顕著となる条件は、主としてスプレー流量密度及びWe数によって異なるため、

- 広範囲のスプレー流量密度での実験データ
- 広範囲のWe数での実験データ

の積み上げが必要である。

本報告は、このような視点から、筆者らが進めてきた一連のスプレー冷却研究の総括として実施した、広いスプレー流量密度、広いWe数の条件で実施した航空機実験結果の報告である。特に膜沸騰域でのリバウンド液滴の挙動を定量的に把握するため、周波数シフターを設置したLDV（レーザードップラー流速計）を搭載して実験を行った。

## § 2 実験装置

### 2.1 装置の構成

Fig.1 は実験装置の概略である。実験装置は航空機実験を念頭に設計されているので、基本的には液体が外部に出ることのない、完全にクローズドなシステムとなっている。液体スプレーの噴霧に際しては、窒素ガス (0.2~0.7 MPa) により加圧され移動するプランジャーによって、圧力容器内より液体がチャンバーに供給され、チャンバー上部のスプレーノズルから、圧力、ノズルの種類に応じた一定のスプレー特性 (流量密度、液滴径、液滴速度) のもとで噴霧される。液体温度は特定の温度に制御することはせず、実験室内、あるいは航空機キャビン内環境温度となっている。従って、今回の実験における水のサブクール度は 68~79K, FC-72 のサブクール度は 29~37K となった。噴霧された液体は、チャンバー内の伝熱面で蒸発し、蒸発しきれない液体は、チャンバー下部のドレインより、水頭圧差によりリザーバタンクへ流出する。なお、航空機実験時には、チャンバー内の液体を強制的にタンクへ排除すべく、ポンプを併用した。圧力容器内は、一度の充填により、1 シリーズの放物飛行 (約10回) 時に要する液量を賄うことができるよう、容積は 0.01m<sup>3</sup> となっている。

伝熱面は、前述したように非定常実験には銅ブロックヒーター、定常実験には透明ガラスヒーターをそれぞれ用いた。銅ブロックヒーターの伝熱面近

傍の構造を Fig.2 に示す。スプレーが噴霧される伝熱面は直径50mmであり、表面は硬質クロムメッキされており、酸化の影響を極力低減するようにしてある。伝熱特性を求める上で必要な、伝熱面表面温度、及び熱流束は、銅ブロックに挿入した12本のクロメル・アルメルシース熱電対 (直径0.25mm) によって計測した。各熱電対は、予め起電力を検定、補正してあり、その不確かさは±0.1Kである。各熱電対の位置は、挿入深さを変えた3方向から、伝熱面からの距離を変えて4本ずつ配置されている。熱電対挿入の穴は放電加工による直径0.35mmの穴で、熱電対

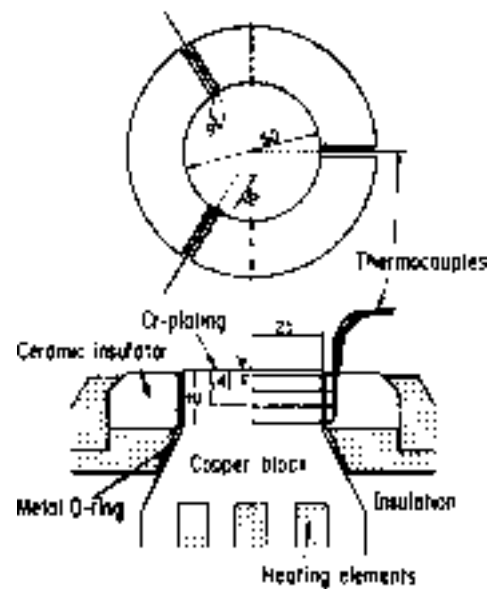


Fig.2 Structure of copper block heater

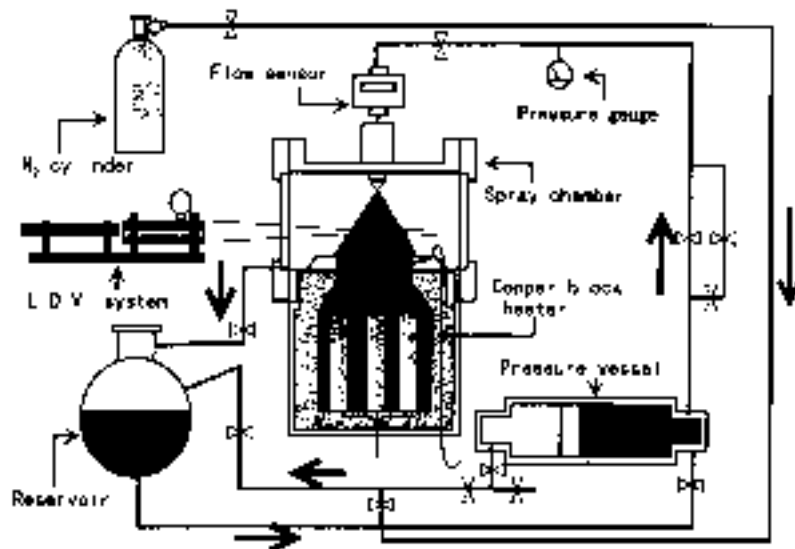


Fig.1 Spray cooling experimental apparatus

挿入部分にはシリカ・アルミナ系接着剤を充填して、熱電対の固定と共に熱抵抗の低減を図った。銅ブロックには1kWのカートリッジヒーターが7本埋め込まれており、銅ブロック全体を加熱する。銅ブロックヒーターを用いた実験手順は、まずヒーターを所定の温度（最高400 程度）まで加熱し、次にスプレーを伝熱面に噴霧してこれを急冷し、その時に各部の熱電対温度変化により、伝熱面表面温度分布、熱流束分布を算出する。従って、実験データは膜沸騰、遷移沸騰、MHF（極小熱流束）、CHF、核沸騰の全ての領域において取得できる。温度、熱流束を算出する上で、熱電対の位置の誤差は、伝熱面温度、熱流束の測定精度に大きく影響するが、実験終了後に銅ブロックを切断して調べた熱電対位置の誤差は最大で、軸方向には $\pm 0.05\text{mm}$ 、半径方向には $\pm 0.2\text{mm}$ であった。温度計測は冷却状況によって変わるが、1~10Hzでサンプリングを行った。

Fig.3は透明伝熱面ヒーターを示したものであるが、ピアレックスガラスをプリズム的な構造に加工し、その1面の18mm $\times$ 18mmの部分にITO（酸化錫をわずかに含む酸化インジウム）膜を100~500nmの厚さで蒸着してある。ITO膜は導電性に優れ、透明度も高いのが特長であるが、さらに抵抗の温度変化が一定で安定しているため、温度計測にも適用できる。Fig.4は2つの異なる透明伝熱面ヒーターの抵抗値の検定結果であるが、温度に対して非常に良好な直線性が得られていることがわかる。ITO膜の抵抗から算出した伝熱面温度の不確かさは $\pm 1\text{K}$ 程度と推定される。銅ブ

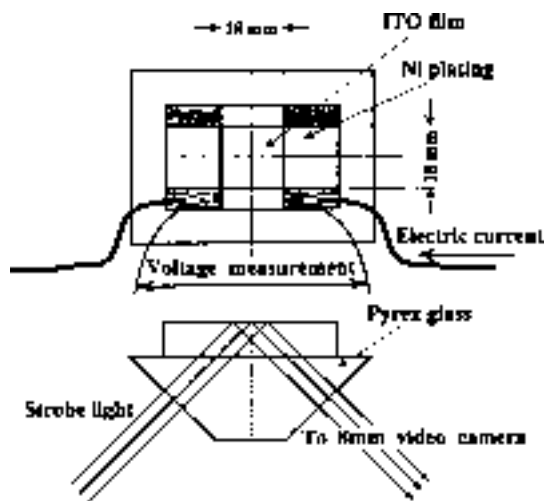


Fig.3 Structure of transparent glass heater

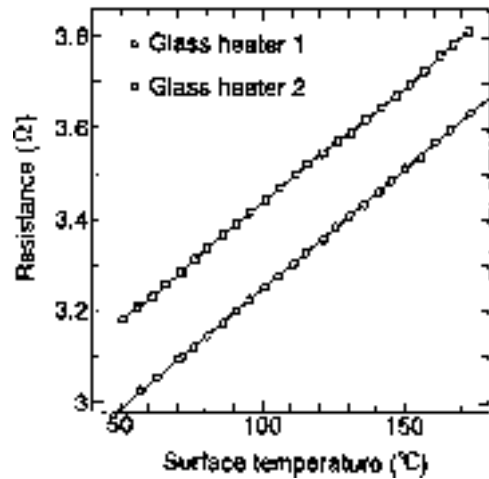


Fig.4 Calibration of ITO heater

ロックヒーターを用いた実験が非定常実験であったのに対して、透明伝熱面ヒーターを用いた実験は伝熱面温度を一定とした定常実験として用い、また蒸着膜保護の面から、実験は核沸騰域に限られる。透明伝熱面ヒーターは、伝熱面上の液滴挙動を観察するためプリズム状の形状で、ビデオカメラを設置した観察側の反対方向から照明をあて、伝熱面での反射の状況から、濡れ、非濡れの状況が把握できる。

## 2.2 スプレー特性

スプレーの発生は、チャンバー上部のノズルを介して行ったが、ノズルは3種類の異なったものを使用し、いずれもスプレーイング・システム社製の1流体フルコン・ノズル、TGシリーズである。ノズルを交換し、プランジャーを押し出す窒素ガスの圧力を変えることにより、所望のスプレー流量密度、ウェーバー数での実験を行った。また、ノズルの位置は伝熱面中心上100mmとし、伝熱面全面に極力均一な噴霧ができるように留意した。

スプレー特性は、スプレー流量密度、液滴速度、液滴径により特徴づけられ、これらを様々な実験条件で予め測定した。スプレー流量密度は、ヒーターの位置にハニカム形状のレシーバーを配置し、ハニカムの各セルに集積した液量を測定し、スプレー流量密度の分布を求めた。Fig.5に水を用いた、比較的低流量密度の分布を示す。水はFC-72に比べて径方向に顕著な分布が生じてしまうが、中心の直径30mm以内であれば、ほぼ均一なスプレー流量密度が維持で

き、本論文では中心部の直径 30mmの平均値を、実験時のスプレー流量密度とした。

液滴速度の測定に際しては LDV（レーザードップラー流速計）、また液滴径の測定については、PDPA（位相ドップラー粒子分析計）を用いて、それぞれスプレー中の液滴の速度、直径の分布を計測した。液滴速度分布は伝熱面中心を最大値としたガウス分布を示しているが、スプレー流量密度同様、伝熱面中心部の直径30mmの平均値を、実験時の液滴速度とした。液滴速度の最大値と平均値の差は± 3 %以内であり、液滴速度の不確かさは最大で± 0.5 m/sであった。液滴径の測定結果も、ややばらつきをみせたが、中心部の直径30mm以内では± 6 %であり、これも平均値をもって実験時の液滴径とした。Table 1 には測定したスプレー特性をまとめて示した。

### 2.3 航空機実験

航空機実験用の実験装置は、航空機MU-300の実験用標準ラック（700mm × 450mm × 900mm）を 3 台用

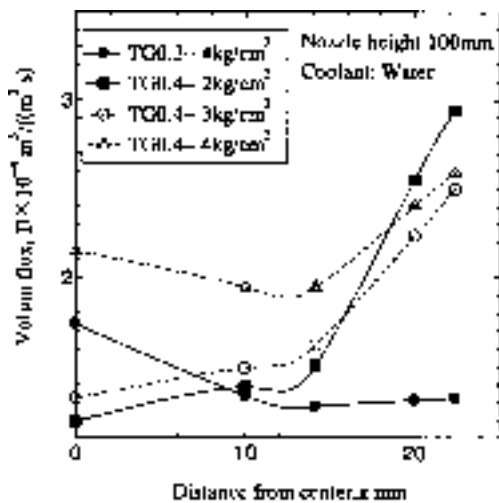


Fig.5 Spray volume flux distribution

Table 1 Spray Parameters

Coolant	Spray volume flux $D, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Droplet diameter $d, \mu\text{m}$	Droplet velocity $v, \text{m/s}$	Weber number $We$
Water	0.000142	68	5.6	30
Water	0.000136	92	5.1	33
Water	0.000197	60	5.8	28
Water	0.000370	386	10.8	622
FC-72	0.000225	60	5.8	283
FC-72	0.000217	54	2.8	59

い、スプレーチャンバー、圧力容器、リザーバー他実験の主要なハードウェアのラックが1台、LDV及びLDV関連計測器のラックが1台、実験データ収録用計測器類のラックが1台と、それぞれ構成されている。

航空機実験中の液滴速度、特に膜沸騰域でのリバウンド液滴速度の計測を行うため、15mW出力のHe-Neレーザーを光源とし、周波数シフターを併設したLDVを搭載した。航空機上での計測は、地上での計測に比べて測定値のばらつきが大きくなり、測定値の最大値、最小値の差は最大で± 10 %となった。また、リバウンド液滴速度に関しては、航空機上では観測窓での多量の蒸気の凝縮、チャンバー内残存液体による窓の濡れ、等により十分な解析に値するデータを取得することはできなかった。

航空機実験では、機体は約 20 秒間の低重力（ $10^{-2} \text{g}$  程度）の前後の急上昇時、水平飛行への復帰時にそれぞれ15 ~ 20秒間、約2 gの高重力状態となる。本実験では、低重力での測定と共に高重力時にも測定を行ったが、実際の伝熱の解析に用いたデータは、低重力期間、高重力期間のうちそれぞれ重力が安定した最後の6 秒間ほどのデータを採用した。測定値のサンプリング周期は、膜沸騰域では過渡的な温度変化が緩慢であるため1Hzとし、その他の温度変化が急峻な領域では10Hzとした。

## § 3 実験結果及び考察

### 3.1 地上実験

#### 3.1.1 水

航空実験に先立ち、通常重力場における一連の地上参照実験を実施したが、主として上向き伝熱面、及び下向き伝熱面による伝熱面の姿勢の影響について実験データを取得した。Fig.6は透明伝熱面ヒーター

を用いた、核沸騰域の伝熱特性について、上向きと下向きの比較を示したものであるが、下向きの伝熱特性が上向きに比べて促進されていることがわかる。伝熱面裏面からの観察結果より、低スプレー流量密度でのCHFに近い高過熱度において、伝熱面を液膜が覆う面積が、上向き系に対して下向き系では 20%程低下することがわかった。一方、逆に高スプレー流量密度では、液膜が覆う面積が下向き系が上向き系に対して20%程度増大することもわかった。Fig.7 には、低スプレー流量密度の伝熱面観察結果の比較を示した。

低スプレー流量密度では、伝熱面に衝突したスプレー液滴は、伝熱面を部分的に覆う島状の液膜を形成し、液膜に覆われていない部分に衝突した液滴は衝突と同時に蒸発する。低スプレー流量密度における下向き系では、液膜の被覆率が低いことにより、このように迅速に蒸発する液滴が多くなった結果、伝熱の向上につながったものと考えられる。これに対して高スプレー流量密度では、伝熱面に衝突した液滴により伝熱面に比較的厚さが厚い液膜が形成され、液膜内で激しい核沸騰が生じている様子が観察された。高スプレー流量密度で下向き系が液膜被覆率が高くなったことは、液膜内での核沸騰の寄与の増大となり、伝熱の促進を引き起こしたものと考えられる。しかし、いずれの場合も、伝熱面の姿勢がどのようなメカニズムで液膜被覆率の差異を招いたのかは、現段階では未解明である。

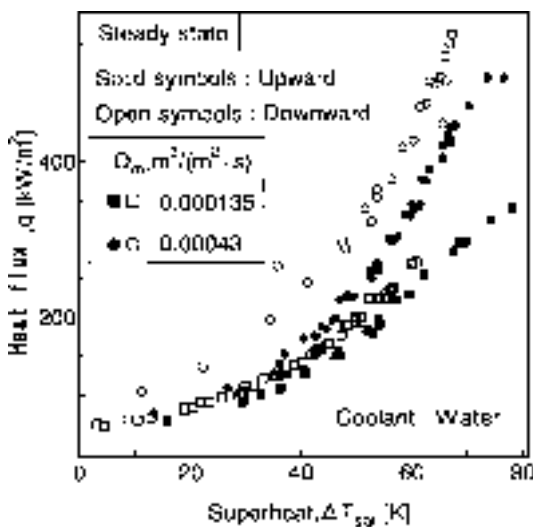


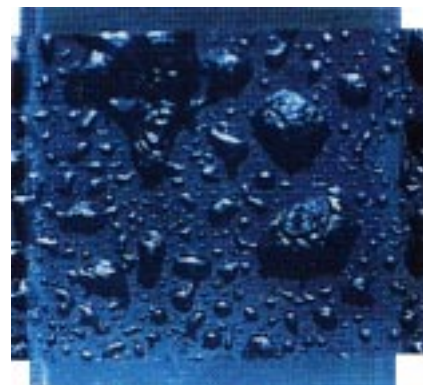
Fig.6 Comparison of spray cooling characteristics for water with different orientation of transparent heater

スプレー冷却の核沸騰域における伝熱特性は、熱流束を $q$ 、伝熱面過熱度を $\Delta T_{sat}$ として下式で整理できることが報告されているが<sup>14,15)</sup>,

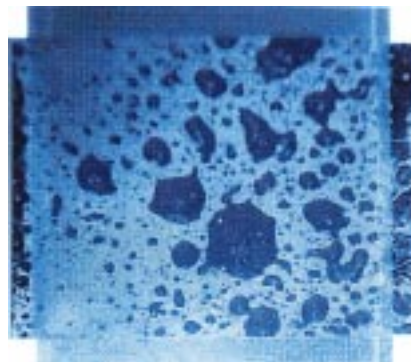
$$q \propto (\Delta T_{sat})^m, \quad (1)$$

本研究での透明伝熱面ヒーターを用いた定常実験の伝熱特性は、下向き系の実験結果は上式中の  $m=1.7$  で、上向き系の実験結果は $m=1.9 \pm 0.1$ で、よく整理することができた。

核沸騰域では伝熱面の姿勢の影響が生じたが、CHF、遷移沸騰域では伝熱面の姿勢による伝熱特性への有意な差異は見られなかった。Fig.8 は低スプレー流量密度での銅ブロックヒーターによる実験結果である。この図では、膜沸騰域において下向き伝熱面の伝熱特性が上向き系に比べて約 30%低下しており、またMHFも低下している結果が示されている。伝熱



(a)Upward-facing orientation,  $D=1.97 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $q=430 \text{ kW/m}^2$



(b)Downward-facing orientation,  $D=1.97 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $q=450 \text{ kW/m}^2$

Fig.7 Observation of water sprayed heater surface from rear side

の低下の原因は、図に示した実験時のWe数が小さいため(We=30)、伝熱面に衝突した液滴がリバウンドし、リバウンド液滴の伝熱面への再衝突の有無によるものであろう。

庄司ら<sup>8)</sup>は、膜沸騰域の伝熱面に衝突する液滴挙動は、We数により2種の異なったカテゴリーに分類できるとしている。すなわち、We数が80よりも大きい領域では、液滴の表面張力よりも運動エネルギーが支配的となり、液滴は伝熱面に衝突後、飛散して微細な液滴と化す。またWe数が80よりも小さい領域では、液滴の表面張力が支配的となり、液滴は伝熱面に衝突後変形し、その復元力と局所的な蒸発による反発力により、伝熱面からリバウンドする。先に示したFig. 8の実験条件は、We数が80よりも小さい後者の領域となり、膜沸騰域で液滴はリバウンドし、上向き伝熱面ではリバウンド液滴の再衝突が繰り返さ

れるが、下向き伝熱面では、リバウンド液滴の再衝突が生じないため、上向き系に比べて伝熱が劣化したものと理解される。

この解釈を更に明確にするため、周波数シフターを付設したLDVによる、リバウンド液滴速度の計測を試みた。測定結果をTable 2に示すが、リバウンド液滴速度が1.3~2.7m/sの速度を有することがわかった。更に、伝熱面に衝突する液滴とは速度が逆転するリバウンド液滴の割合を計測した結果、We数が30では、55~60%の液滴がリバウンドするのに対して、We数が108となると、その割合が15%と激減している。更に著しくWe数が大きい1622となると、液滴は全て飛散し、リバウンド液滴は全く計測されなかった。同様な状況は、低重力下でも予想される。

Fig.9はCHFの値をスプレー流量密度に対してプロットしたものである。図中に示した直線は、液滴が完全蒸発したと仮定した際の、最大除熱量

$$q_{max} = \rho D (L + c_p \Delta T_{sub}) \quad (2)$$

であり、同様に図中には門出による経験式<sup>16)</sup>

$$q_{CHF} \approx 0.8q_{max} \quad (3)$$

も示してある。本研究におけるCHFの値は、スプレー流量密度が $7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 付近を越えたあたりから、線形関係からの逸脱を示しており、顕著に低い値となっている。透明伝熱面ヒーターを用いた観察結果より、低スプレー流量密度域 ( $< 7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) では、伝熱面に衝突した液滴は、伝熱面上で互いに干渉することなくその場で蒸発しており、高スプレー流量密度域 ( $> 7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) では、液滴が伝熱面上で干渉し合い、液膜を形成していることがわかった。

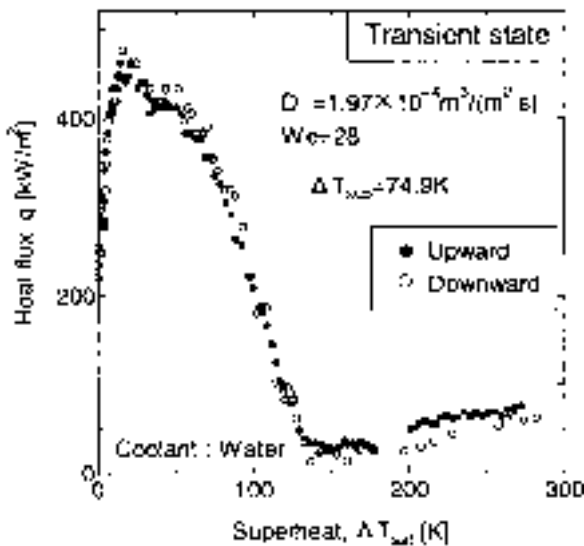


Fig.8 Comparison of spray cooling characteristics for water with different orientation of copper block heater

Table 2 Results of LDV measurements for rebounded droplets

Coolant	Spray volume flux $D, \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Droplet velocity at heater center $v, \text{ m/s}$		Ratio of rebounded droplets at heater center	Droplet velocity at 15mm from heater center $v, \text{ m/s}$		Ratio of rebounded droplets at 15mm from heater center
		Downward	Upward		Downward	Upward	
Water	0.00014	7.8	-2.1	0.54	6.2	-1.2	0.60
Water	0.00020	12.5	-2.7	0.56	10.0	-1.3	0.57
Water	0.00043	10.6	-1.9	0.15	9.5	-1.3	0.13
FC-72	0.00005	3.1	-1.2	0.16	3.3	-1.2	0.16
FC-72	0.00007	4.7	-0.8	0.15	4.4	-1.3	0.17
FC-72	0.00011	3.4	-1.1	0.15	2.7	-1.3	0.13
FC-72	0.00019	5.5	-1.3	0.23	5.3	-1.2	0.14

### 3.1.2 FC-72

水に比べ蒸発潜熱が低いFC-72は、スプレー冷却特性も水に比べて劣っており、概して実験結果にもばらつきが多く見られた。透明伝熱面ヒーターを用いた定常実験では、核沸騰域において下向き伝熱面において、上向き系よりもわずかな伝熱促進が見られたが、その程度は有意なものとは言い難い。伝熱面裏面からの観察では、伝熱面のほぼ全域が液膜に濡れており、表面よりフラッシングし、はっきりした液膜内の核沸騰は認められなかった。このような水と際だった差異は、FC-72の水に比べてはるかに低い表面張力、低い粘性率、高い濡れ性、低い蒸発潜熱によるものと考えられる。

一方、銅ブロックヒーターを用いた非定常実験結果は、Fig.10に示すように、下向き伝熱面で、CHF、遷移沸騰域、MHF、膜沸騰域で顕著な伝熱劣化を示した。CHFについてはいずれも下向き系が約10%低下し、膜沸騰域での熱流束は、下向き系はWe数が283の実験条件でも25%、更にWe数が小さい59の実験条件では40%もの低下を示した。このような膜沸騰域での伝熱の劣化は、水の実験同様、リバウンド液滴の再衝突の有無による。LDVによる測定結果をTable 2に示すが、リバウンド液滴速度は0.8~1.3m/sであり、We数が140の実験条件でも全液滴の15~20%がリバウンドしていることがわかった。伝熱面姿勢の影響が最も顕著に現れたのはMHFの値で、We数59の実験では下向き伝熱面の場合MHFが70%程度低下した。

透明伝熱面を用いた核沸騰域での定常実験データ

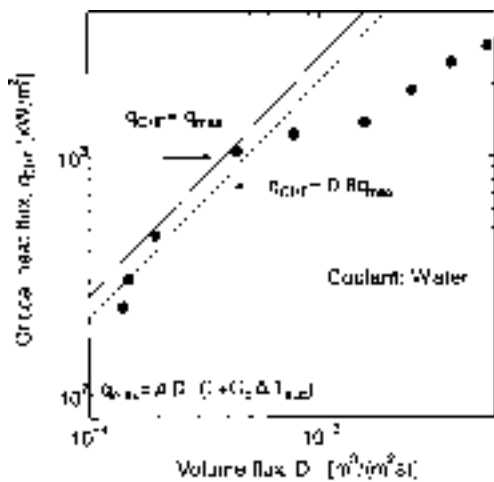


Fig.9 Relation of CHF and spray volume flux for water

は、水と同様、Eq.(1)の経験式でよく表示できたが、

$$q \propto (\Delta T_{sat})^{0.5} \quad (4)$$

のように指数は水よりもかなり小さく0.5となった。CHF値についても水と同様に $q_{max}$ を用いた経験式が当てはまるが (Fig.11) ,

$$q_{CHF} \approx 0.4 q_{max} \quad (5)$$

のように係数が水の0.8よりもかなり低いのが特徴であり、これはFC-72が水に比べてスプレー冷却の除熱効率が半分程度と低いことを示している。また上式

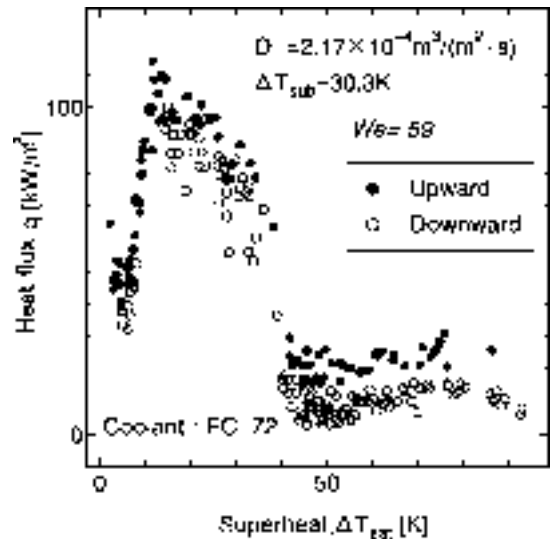


Fig.10 Comparison of spray cooling characteristics for FC-72 with different orientation of copper block heater

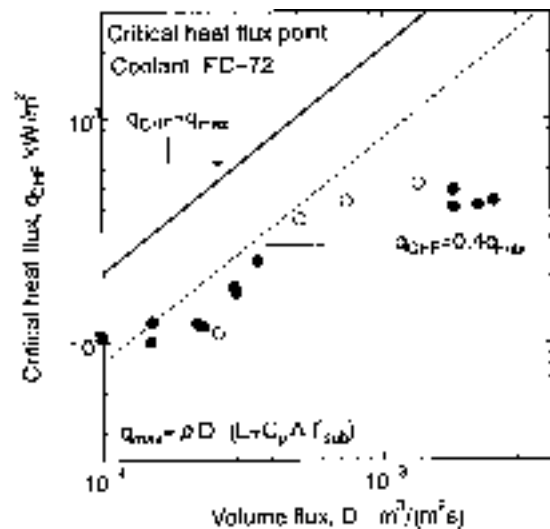


Fig.11 Relation of CHF and spray volume flux for FC-72

が当てはまるスプレー流量密度は $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下であった。

### 3.2 航空機実験

#### 3.2.1 水

透明伝熱面ヒーターを用いた核沸騰域における定常実験は、 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及び $3.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ と、伝熱面上での液滴同士の干渉の有無の基準となるスプレー流量密度である $7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ よりも低い条件、および高い条件の2つの異なるスプレー流量密度で実施した。しかし、いずれの流量密度においても、伝熱特性、及び伝熱面上の液滴挙動共に、重力による顕著な差異は認められなかった。最も高い熱流束における伝熱面の液膜被覆率は、低スプレー流量密度時には44～49%、高スプレー流量密度時には90%で、重力による有意な差異は観察されなかった。

Fig. 12は、銅ブロックヒーターを用いた非定常実験のうち、基準値よりも低いスプレー流量密度である $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の時の実験結果を示している。図より、膜沸騰域において重力による顕著な差異があることがわかるが、低重力では2gの時の熱流束の30%程度にまで低下した。MHFの値も同様に、低重力下では2gの時の値の約25%にまで低下した。この実験のWe数が33であったことから、これらの重力の影響は、伝熱面姿勢と同様に、リバウンド液滴の再衝突の有無による差と考えられる。

スプレー流量密度が基準値を越えた $3.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ における実験結果は、Fig.13 に示すようにCHF値が低重力下で約10%程増大した。低重力下におけるこのわずかな伝熱促進は、遷移沸騰域でも維持されているが、膜沸騰域では消失している。この傾向は、前述した伝熱面姿勢を変えた地上実験結果と整合性のあるものであり、筆者らの前報<sup>2)</sup>も同様な傾向を示している。スプレー流量密度が十分に高いと、伝熱面上に衝突する液滴が相互に合体し、CHF近傍の高熱流束域においても伝熱面の大半を覆うような液膜を形成するが、この液膜厚さ、挙動は重力の影響を受け、わずかではあるがCHF値にも重力の影響が生じたものと思われる。一方、この実験条件ではWe数が600を越えるような高い値であるため、伝熱面に衝突した液滴はリバウンドせず飛散し、よってリバウンド液滴の再衝突もなく、膜沸騰域での重力の影響は消失する。

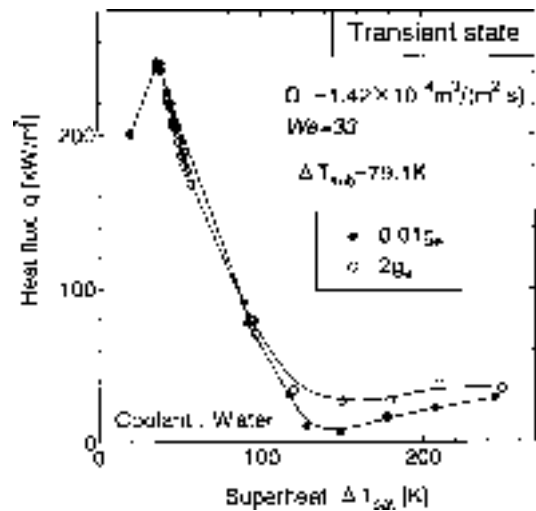


Fig.12 Spray cooling characteristics for water with copper block heater in parabolic flight experiments (Low We and D)

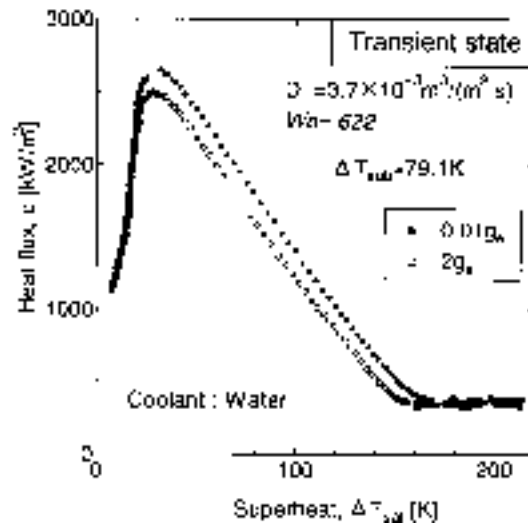


Fig.13 Spray cooling characteristics for water with copper block heater in parabolic flight experiments (High We and D)

#### 3.2.2 FC-72

FC-72の航空機実験は、水に比べて実験回数が少なかったため、スプレー冷却における重力の効果に関する情報はやや限られるが、以下に述べる結果が得られた。まず、透明伝熱面ヒーターを用いた定常実験結果であるが、3.1.2で述べた、限界熱流束の経験則の適用の可否の基準値となるスプレー流量密度 $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ よりも小さい、 $2.25 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の条件で実施した実験結果をFig.14に示す。図から、航空機の放

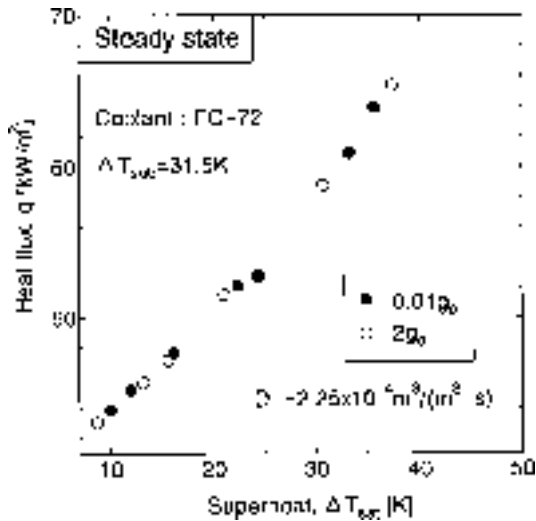


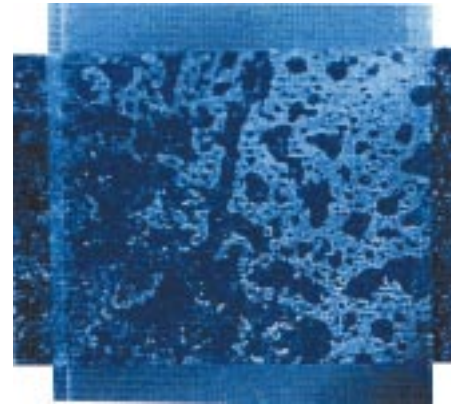
Fig.14 Spray cooling characteristics for FC-72 with transparent heater in parabolic flight experiments

物飛行時の2 g の高重力下と低重力下との差異は認められない。一方、この実験において熱流束がCHF近傍に達している時の、伝熱面裏面からの観察結果では、Fig.15からわかるように、わずかながら伝熱面上の液膜の状態に差異が見られた。すなわち、伝熱面上の液膜被覆率が低重力下では53%であるのに対して、1gの通常重力下では60%、2g下では64%と、わずかではあるが重力の低下に伴う被覆率の低下が観察された。

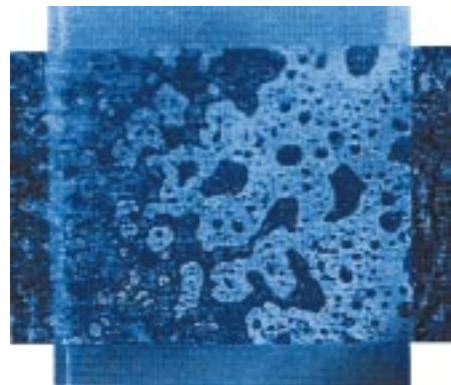
Fig.16は、銅ブロックヒーターを用いた非定常実験結果の比較であるが、ここではほぼ同じスプレー流量密度 $2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ における、We数が異なるデータを比較している。We数が59と低い実験条件では、膜沸騰域において重力の低下と共に、熱流束が顕著に低下しているが、同じスプレー流量密度でWe数が283の結果では、ほとんど差異が生じていないことがわかる。やや遷移沸騰域、核沸騰域に差異が生じているようにも見えるが、この領域での低重力下のデータ数が少ないため、重力の影響と断定することはできない。

おわりに

水及びFC-72を用いたスプレー冷却に関する一連の実験を、航空機の放物飛行を利用して低重力下、高重力下で、さまざまなスプレー流量密度、We数の条



(a) 0.01 g<sub>e</sub>



(b) 2 g<sub>e</sub>

Fig.15 Observation of FC-72 sprayed heater surface from rear side

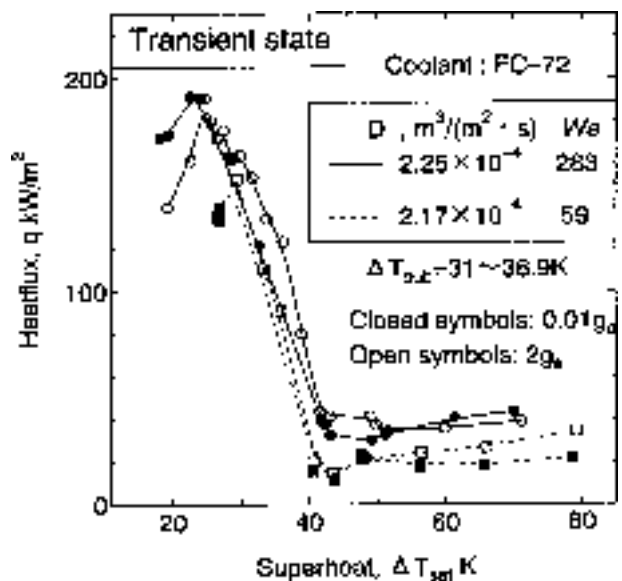


Fig.16 Spray cooling characteristics for FC-72 with copper block heater in parabolic flight experiments

件のもとで実施すると共に、通常重力場では伝熱面姿勢を変えた実験を実施した。また本実験では、伝熱面上での液滴挙動の観察を目的として透明導電膜をガラスにコーティングした透明伝熱面ヒーター、及び広い過熱度域でのデータ取得を目的とした銅ブロックヒーターの2種類の伝熱面を用いた。更に、周波数シフターを併設したLDVを用いて、特に膜沸騰域でのリバウンド液滴の計測も試みた。

核沸騰域におけるスプレー冷却特性では、水に関して通常重力下における姿勢の影響が生じていたが、重力の影響についてはいずれの流体にも顕著な影響は現れなかった。核沸騰域の熱流束は、過熱度との経験式  $q \propto (\Delta T_{sat})^m$  で整理でき、水では指数  $m=1.7 \sim 2.0$ 、FC-72では  $m=0.5$  であった。

CHFの挙動は、スプレー流量密度により差異が生じ、水では  $7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、FC-72では  $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  を基準値として、それよりも低いスプレー流量密度では伝熱面に衝突した液滴は相互に干渉することなく、伝熱面上で衝突と同時に蒸発し、したがって重力の影響は発現しない。これらの基準値よりも高いスプレー流量密度では、液滴が伝熱面上で干渉し合い液膜を形成し、液膜存在下ではCHFが伝熱面姿勢、重力の影響を受け、この影響は遷移沸騰域にも及ぶ。

重力、伝熱面姿勢の影響が最も顕著に現れるのは、We数が低い条件でのMHF及び膜沸騰域であった。We数が80よりも低いと、伝熱面に衝突する液滴は飛散することなく、多くがリバウンドし、リバウンド液滴の再衝突が無い低重力下、及び下向き伝熱面では熱伝達が著しく劣化する。

本研究より、スプレー冷却技術は宇宙での熱制御技術として十分に機能することが確認できたが、一方で、通常、スプレー冷却技術は膜沸騰域で適用されることが多く、宇宙では特にWe数が高い条件で応用しないと、除熱能力が著しく低下するため、十分に留意する必要がある。

## 謝 辞

本研究に関して、貴重なディスカッションをして頂いた東京大学生産技術研究所の西尾茂文教授、航空機実験に際して様々な支援を頂いた(株)ダイヤモンドエアサービスの方々に、深く感謝する。本研

究の主要な部分は、1992～1996年度の科学技術振興調整費総合研究「短時間微小重力場を利用した材料生成に関する基盤技術開発」による。

## 参考文献

- 1) Vought Corp.: NASA-CR-151222, 1976.
- 2) M. Kato, Y. Abe, Y.H. Mori & A. Nagashima: AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 19 No.2, (1995) p.378.
- 3) K. Sone, K. Yoshida, T. Oka, Y. Abe, Y.H. Mori & A. Nagashima: Proc. 31st IECEC Vol. 2, (1996) p.1500.
- 4) K.J. Choi & S.C. Yao: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.30 No.2, (1987) p.311.
- 5) Y.M. Qiao & S. Chandra: Int J. Heat Mass Transfer, Vol.39 No.7, (1996) p.1379.
- 6) T. Oka, Y. Abe, Y.H. Mori & A. Nagashima: Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol.117, (1995) p.408.
- 7) L.H.J. Wechters & N.A.J. Westerling: Chem. Eng. Sci., Vol.21, (1966) p.1047.
- 8) 庄司正弘, 湧永隆夫, 児玉健: 日本機械学会論文集 (B編), 50巻451号, (1984) p.716.
- 9) J.E. González and W.Z. Black: Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol.119, (1997) p.279.
- 10) W.M. Grissom and F.A. Wierum: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.24, (1981) p.261.
- 11) J. Yang, L.C. Chow and M.R. Pais: Trans ASME J. Heat Transfer, Vol.118, (1996) p.668.
- 12) M. Ghodbane and J.P. Holman: Int. J. Heat Transfer, Vol.34, (1991) p.1163.
- 13) I. Mudawar and K.A. Estes: Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol. 118, (1996) p.672.
- 14) 石谷清幹, 中西重康, 越智敏明: 第16回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1979), p.316.
- 15) 西尾茂文, 遠藤敏彦: 生産研究, 31巻10号, (1979) p.697.
- 16) 門出政則: 日本機械学会論文集 (B編), 45巻 394号, (1979), p.849.
- 17) S. Deb and S.C. Yao: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32(1989), p.2099

(2000.2.24受付)

## 記号表

$c_p$ :	比熱 (kJ/kg·K)
$d$ :	液滴直径 (m)
$D$ :	スプレー流量密度 ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )
$L$ :	蒸発潜熱 (kJ/kg)
$g_e$ :	地上での重力加速度 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )
$q$ :	熱流束 ( $\text{kW/m}^2$ )
$q_{CHF}$ :	限界熱流束 ( $\text{kW/m}^2$ )
$v$ :	液滴速度 (m/s)
$\Delta T_{sat}$ :	伝熱面過熱度 (K)
$\Delta T_{sub}$ :	サブクール度 (K)
$\rho$ :	液体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sigma$ :	液体表面張力 (N/m)
$We$ :	ウェーバー数 ( $=v^2 d\rho/\sigma$ )