

フッ素系不活性液体を熱回収用媒体として用いた 液-液直接接触熱交換に関する研究*

(温水中を降下するフッ素系不活性液滴群についての伝熱特性)

稲葉 英 男^{*1}, 堀 部 明 彦^{*1}
尾 崎 公 一^{*1}, 横 山 直 樹^{*2}

Liquid-Liquid Direct Contact Heat Exchange Using a Perfluorocarbon Liquid for Waste Heat Recovery (Heat Transfer Characteristics obtained with Perfluorocarbon Droplets Descending in a Hot Water Medium)

Hideo INABA, Akihiko HORIBE,
Koichi OZAKI and Naoki YOKOYAMA

This paper deals with the heat transfer characteristics of a liquid-liquid direct contact operation in which a Perfluorocarbon (PFC) liquid is released in a hot water stream, a low-grade heat source such as urban sewage, for the purpose of heat recovery from it. The paper reports on a set of experiments in which a PFC liquid (1800 kg/m^3 at 20°C) was continuously injected from a single, downward-facing nozzle into a slow, upward flow of hot water to be disintegrated into droplets descending in, and thereby heated from the water flow. The results of the experiments show how the size distribution and the translational motions of the droplets affect the overall coefficient for the water-flow-to-droplets heat transfer and also the temperature effectiveness for the droplets.

Key Words: Direct Contact Heat Transfer, Natural Convection, Heat Transfer Coefficient, Perfluorocarbon Liquid Droplet, Temperature Effectiveness

1. 緒言

近年,未利用エネルギー活用の観点から,工場や家庭温排水などを熱源として利用する廃熱回収用熱交換器の開発が急務となっている。従来のシェルアンドチューブなどの隔壁型熱交換器では,伝熱面に排水中のごみやスケールが堆積し,その伝熱効率が著しく低下する等の問題点があった。この問題解決として,このような汚濁温排水中に,非水溶性熱媒体を噴射・注入し,直接接触熱交換により,熱抽出が可能となる。このような直接接触熱交換法は,固体壁伝熱面の汚れによる伝熱効率低下の問題がなくなり,廃熱回収用熱交換方式として極めて有効である。さらに,この熱交換法は,固体壁を介さないために高い熱通過率が得られ,小温度差での熱交換に有効である。また,液-液の直接接触する界面が,そのまま伝熱面に相当するため,単位体積当たりの伝熱面積が増加する利点を有する⁽¹⁾。本研究は,下水等の汚れた熱源水より効率的な熱回収する手段として液液直接接触熱交換法に注目したものであり,熱回収媒体としてフッ素系不活性液体を熱源水へ噴射し,形成したフッ素系不活性液滴群と熱源水の直接接触による,流動及び熱伝達特性を検討するものである。すなわち,円形単孔ノズルから高密度のフッ素系不活性液体を熱源である温水層へ上部より噴射し,その液滴群形成過程の観察及び液滴群の流れ特性の解明を通じて,熱源水からの直接熱交換法による熱抽出に関する基礎特性を明

らかにすることを目的とする。最終的に,この種の熱源水よりの熱回収媒体としてフッ素系不活性液体を用いた場合における実用に寄与する無次元熱伝達率等に関する実験整理式の検討をも行うものである。

記号表

A_s : 単位体積当たり伝熱面積 [m^2/m^3], Bo^* : 修正ボンド数, Ca : ノズルキャピラリー数, C_p : 比熱 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], d_n : ノズル径 [mm], d_p : 液滴群の算術平均径 [mm], d_{pj} : 液滴の直径 [mm], f : 液滴個数割合 [%], G : 体積流量 [m^3/s], g : 重力加速度 [m/s^2], K : 熱通過率 [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$], M : モートン数, N : 単位体積当たり液滴個数 [$\text{個}/\text{m}^3$], Nu : ヌセルト数, n_s : 試料数 [個], Pr : プラントル数, Re : レイノルズ数, T : 温度 [$^\circ\text{C}$], ΔT_{lm} : 対数平均温度差 [$^\circ\text{C}$], U : 代表速度 [m/s], U_j : 液滴の沈降速度 [m/s], V : 流速 [m/s], W_n : ウェーバ数

ギリシャ文字

λ : 熱伝導率 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$], μ : 粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$], ν : 動粘度 [m^2/s], ρ : 密度 [kg/m^3], σ : 界面張力 [N/m], ϕ_d : 温度効率

添字

c : 温水, d : フッ素系不活性液体, in : 試験部入口, j : 個々の液滴, n : ノズル, out : 試験部出口

2. 本実験で用いる熱抽出媒体フッ素系不活性液体の特徴と諸物性

2.1 フッ素系不活性液体の特徴

本研究で対象とする熱媒体はフッ素系不活性液体 (Perfluorocarbon :以下 PFC と略す) であり, 化学物質 C_8F_{18} (Octadecafluorooctane, 分子量 438) と $\text{C}_8\text{F}_{16}\text{O}$ (Butyltetrahydro-

* 原稿受付 1998年1月5日。

*1 正員, 岡山大学工学部 (〒700-0082 岡山市津島中3-1-1)。

*2 岡山大学大学院。

fulan, 分子量 377) を, 質量比 1:1 で混合したものである。密度は $\rho_d = 1800 \text{ kg/m}^3$ と水より重く, さらに無色, 透明, 不燃性, 無毒かつ無臭の安全性の高いそして化学的, 熱的に安定な非水溶性の液体である。また, 予備実験において, 汚濁水中に PFC を注入しても PFC 液はほとんど汚れないことを確認しており, 汚濁排水からの直接接触熱交換熱媒体として PFC 液が適したものであると思われる。著者らの測定した PFC 液の熱交換に必要な物性値の代表的なものを表に示す(2)。

Physical properties of PFC (20 °C)

密度 ρ_d	比熱 C_{pd}	熱伝導率 λ_d	水との界面張力 σ
1830 kg/m ³	1.1 kJ/(kg·K)	0.066 W/m·K	0.042 N/m

2.2 実験装置及び方法

実験装置は, 主に PFC 液滴が循環温水層と直接接触熱交換を行う矩形試験部, 温水循環系と PFC 液循環系から構成されている。実験装置概略を図 1 に示す。熱源流体としての温水(水道水)は, 温調器⑦(温調精度: 設定値の $\pm 0.5\%$) により所定の温度に温調されており, 水ポンプ⑩出口側に設けられたバイパスバルブ⑫の開度調節によって流量制御後, 試験部下方から試験部内を低速で上昇し, 上方の排出口を通してタンク②へ戻る循環ループを形成している。

一方熱媒体である PFC 液は恒温槽⑤(温調精度: $\pm 0.1^\circ\text{C}$) 内で温度制御されており, 液ポンプ⑧から流量計(設定範囲: $1.7 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)⑪を経て, 試験部上部に取り付けられた内径 2mm の塩化ビニル製円形ノズル⑥へと送られる。ノズル先端から温水層中へ鉛直下方に噴射された PFC は, 液滴群となって温水層中に分散され, 密度差によって, 周囲温水と熱交換を行いながら沈降し, 試験部底部の排出口に到達して全ての液滴が合一した後, 再び恒温槽に回収される。温水, および PFC 液の試験部出入口には, T 型熱電対(素線径 0.1mm, 測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$) を 3 組組み合わせ合わせたサーモパイルを設けており, その温度差と PFC 液流量そして温水の外部への損失熱量から温水と PFC 液滴群の交換熱量を算定している。本実験では, 損失熱量は PFC 液滴の交換熱量の 2% 以下であった。

試験部は, 図 2 に示すように断面 $200 \times 200 \text{ mm}$, 高さ 715mm の透明アクリル製の矩形容器で, 試験部内の PFC 液滴群の流れ状態の観察を行うことが可能である。本実験では, 高速ビデオカメラ(シャッター速度: 1/500s) を用いて試験部内を沈降する PFC 液滴群を撮影し, そのビデオ映像から PFC 液滴群と水との伝熱面積の算定に必要な液滴の個数, ならびに液滴直径の測定を行った。また, 同じくビデオ映像を解析し, 液滴の沈降速度の測定も併せて行った。ノズル先端から試験部底部までの距離は

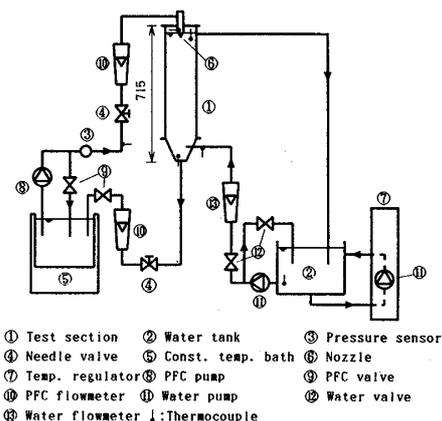


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

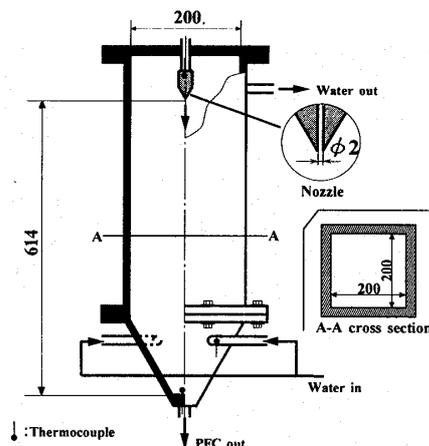


Fig.2 Cut view of test section

614mm となっている。なお, 液滴径の測定誤差は $\pm 2\%$ 以内, そして沈降速度は $\pm 3.5\%$ 以内と推定される。円形単孔ノズルの直径の選定に当たっては, 種々のノズル径を検討した結果, 本実験ではノズル直径 $d_n = 2 \text{ mm}$ とした。すなわち, ノズル直径 2mm 以下の場合には生成したフッ素系不活性液滴の直径が数十 μm 以下の割合が増え, 熱源水としての低流速で流れる温水に随伴して流れる液滴割合が多くなる。一方, ノズル直径 2mm 以上の場合には液滴直径が 5mm を越えるものが増えて, 総合的な交換熱量の低下となる結果となった。また, 本研究は, 熱源水からフッ素系不活性熱媒体を用いて熱抽出したことに限定したものであり, 本実験は以下の条件で行った。

PFC 噴射流量 G_d	$: 3.3 \times 10^{-7} \sim 5.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
PFC 噴射温度 T_{din}	$: 5 \sim 15^\circ\text{C}$
温水試験部入口温度 T_{cin}	$: 30 \sim 40^\circ\text{C}$
温水流量 G_c	$: 1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

3. 液滴群の発生形態並びに温度効率

3.1 液滴群の発生形態と液滴径分布

ここでは, それぞれの PFC 液噴射流量における温水層内の PFC 液滴の形成状態や液滴径などの測定結果を述

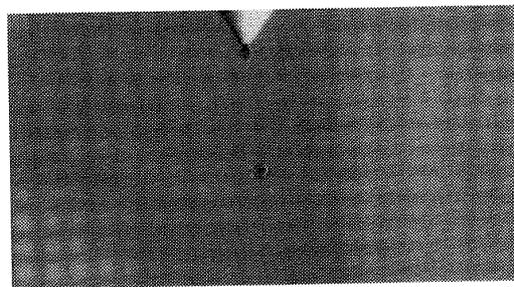
べる。まず各PFC液噴射流量におけるノズル先端での液滴の発生状況を観察した結果、ノズルから噴射されるPFC液噴射流量 G_d の増加に伴い、PFC液滴群の発生形態が変化する。図3にPFC液滴群の発生形態について示す。PFC液滴群の発生形態は、 G_d の変化によって、大きく分けて、ノズル先端で単一液滴が生成、離脱を繰り返す単一液滴領域($G_d < 5 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$, 図3(a)), ノズル先端に液柱が形成され、その先端から液滴が分離する液柱滴化領域($G_d = 5 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$, 図3(b)), 及び液柱先端が細かく分離し、多量の微小液滴が生成されるスプレー滴化領域($G_d > 2.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$, 図3(c)), の三つの領域に区分される⁽³⁾。

図4は、代表的な各PFC液噴射流量 G_d におけるPFC液滴群の液滴径分布を示す、なお、液滴径分布図中の f は液滴個数割合、 n_s は試料数、 d_{pj} は測定した個々の液滴の液滴直径を表す、

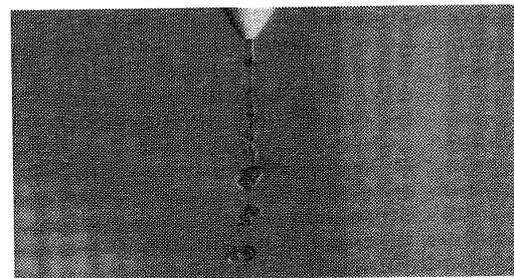
図4よりPFC液滴群の発生形態の違いによって、液滴径分布もまた変化することが分かる。 G_d が非常に小さい単一液滴領域($G_d \approx 3.3 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$)では、液滴の発生形態は一定であり、ノズル先端から離脱する液滴の直径は、液滴にはたらく重力、浮力、水との界面張力、およびノズル内流速による慣性力との釣り合いによって決まる。また、発生する液滴の液滴径分布も、4~5mm程度に集中しているのが分かる(図4(a))。

さらに G_d が増加($G_d \approx 5 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$)すると、徐々に液滴がノズル先端から離脱する周期が短くなり、やがてノズル先端に液柱が形成される液柱滴化領域へと移行する。このとき液滴は、液柱の先端から分裂することによって発生する。単一液滴の場合に比較して、液滴の発生形態は多少不規則となり、液滴径は全体的に小さくなり、ばらつきがみられるようになる。PFC液噴射流量が $G_d = 2.2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ に増大すると、液柱の先端が少しずつ振動し、やがて液柱の途中から不規則な蛇行運動を始め、蛇行する液柱の数カ所より液滴が分離する形で発生する。また、このとき液柱の流れの状態は層流から乱流へと移行する。液滴径分布の分散はさらに進んで、液滴直径が1mm以下の微小液滴から、5mm以上の比較的大きな液滴まで、広範囲のものとなる(図4(b))。

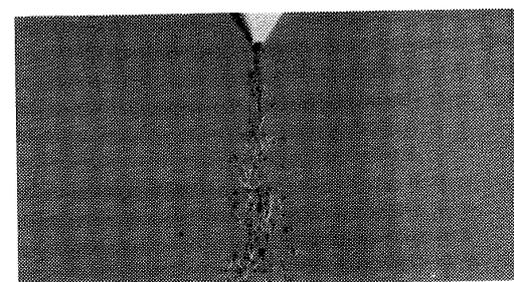
G_d が $3.3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ となると、多量の微小液滴が生成されるスプレー滴化領域となる。このとき液柱と周囲温水との界面に働く摩擦によるせん断力が大きくなり、液柱が界面でひきちぎられる形で多量の微小液滴が生成し、微小液滴の発生する割合が大幅に増加する。これより G_d の増加($G_d \approx 5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$)が進むと、液滴の微細化はさらに進み、液滴径分布は1mm以下に集中する形となる(図4(c))。



(a) Single droplet region ($G_d < 5 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$)



(b) Column droplet region ($G_d = 5 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$)



(c) Spray droplet region ($G_d > 2.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$)

Fig.3 Creation pattern of droplets

3.2 液滴群と周囲温水間の伝熱面積の算定

試験部内温水層を沈降するPFC液滴群の撮影結果より求めた各 G_d に対するPFC液滴群の算術平均径 d_p と単位体積当たりの液滴個数 N の関係を、図5および図6に示す。両図より、ノズル先端からの液滴群の3つの発生形態において、 G_d に対する d_p 及び N の変化に特徴があることが分かる。まず単一液滴領域では、 G_d の増加に伴い、ノズル内PFC液流速の上昇により液滴の離脱が速まるため、 d_p は減少し、 N が増加する。これに対し、液柱滴化領域では、 G_d の増加に伴い、直径1mm以下の微小液滴と4~5mm以上の比較的大きな液滴の発生が共に増加し、液滴径分布は、液柱滴化領域初期の d_p を中心に分布を広げることから、 G_d の増加に対して算術平均直径 d_p はほとんど変化しない。また、ノズルから噴射されるPFCの全体積のうち、4~5mm以上の大きな直径を有する液滴の占める体積割合が大きいため液柱滴化領域では、 G_d の増加分が新たな液滴の生成に費やされず、 N もほぼ一定となる。さらに、スプレー滴化領域になると、 G_d が増加するにつれ直径1mm以下の微小液滴の発生

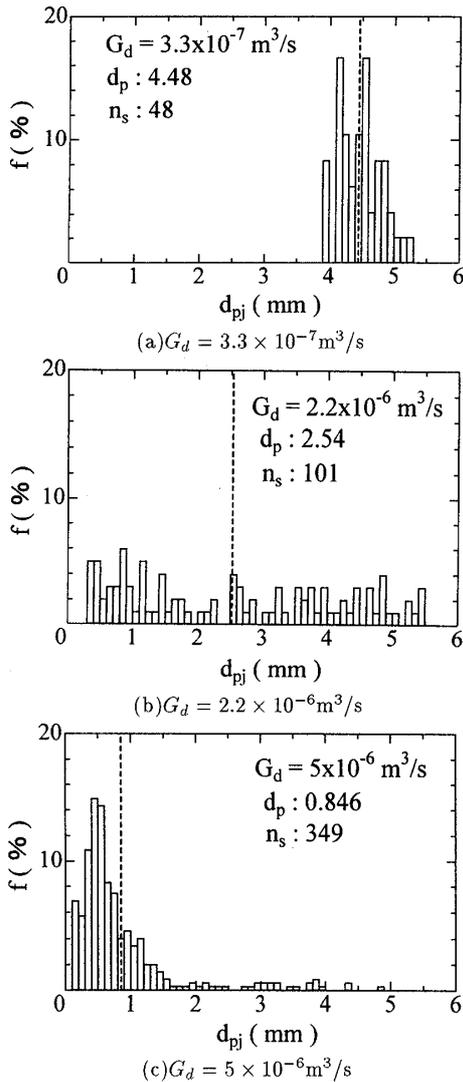


Fig.4 Diameter distribution of droplets
($T_{cin} = 30^\circ\text{C}, T_{din} = 15^\circ\text{C}$)

が極めて多くなる分布となるため、 G_d の増加に伴い再び算術平均直径 d_p は減少し、 N は増加する。

図5の N を用いることでPFC液滴群と周囲温水間の単位体積当たり伝熱面積 A_s を式(1)により求めることができる。

$$A_s = \frac{N}{n_s} \sum_j \pi d_{pj}^2 \dots \dots \dots (1)$$

図7はPFC噴射流量 G_d と A_s の関係を示したものである。図7より単一滴化領域においては、 G_d の増加に伴い、 d_p が減少しながら N が増えていくため、液滴群の総表面積は増加し、 G_d の増加に対し A_s は増加する。これに対し液柱滴化領域では、 G_d に対する A_s の増加割合が減少する。また、スプレー滴化領域になると、 G_d の増加に対し、 A_s が著しく増加することになる。

3.3 液滴群の温度効率

本実験においては、ノズルの一部が温水層内に存在するために、ノズル入口部で測定したPFC液の温度は、

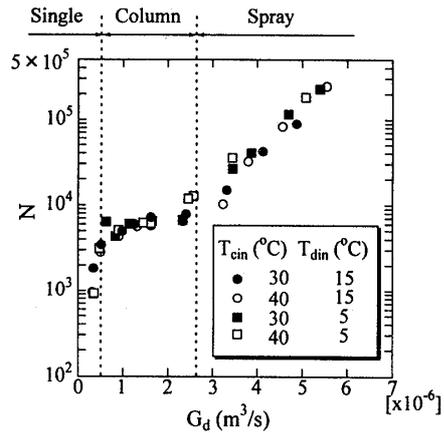


Fig.5 The relation of G_d to N

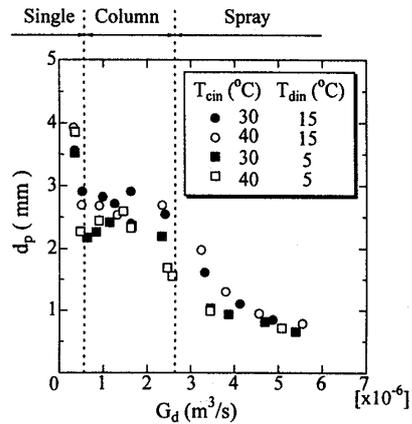


Fig.6 The relation of G_d to d_p

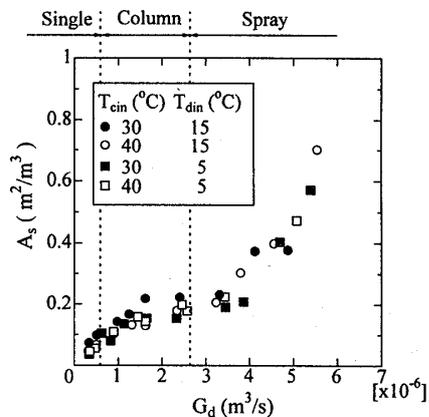


Fig.7 The relationship between G_d and A_s

ノズル壁等の影響を受け、そのノズル出口で温度降下する。従って、予備実験にて、実験と同じ条件でのPFC液のノズル出口温度とノズル入口温度の関係を予め求めておき、ノズル出口温度をPFC液の代表入口温度 T_{din} とした。また、温水層にて熱交換後のPFCの代表温度は、試験部下部に位置する排出口領域にてPFC液滴群が混合し、その混合平均温度であることを排出口領域の温度分布測定結果より確認したことより、出口のPFC温度 T_{dout} とした。

図8はPFC液滴群の温度効率 ϕ_d とPFC液流量 G_d の関係を示したものである。ここで、温度効率は次式により

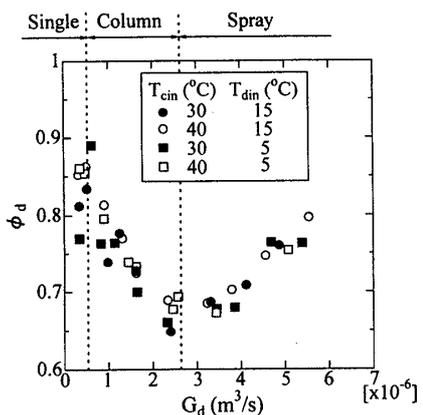


Fig. 8 The relationship between G_d and ϕ_d

定義してある。

$$\phi_d = \frac{T_{dout} - T_{din}}{T_{cin} - T_{din}} \dots \dots \dots (2)$$

図8より, 単一滴化領域とスプレー滴化領域では G_d の増加と共に ϕ_d の増加がみられる。この二つの領域の G_d と ϕ_d の関係は, G_d の増加に対して d_p が小さくなる, すなわち液滴群の微粒化が進むことより説明できる。しかしながら, 液柱滴化領域では G_d の増加に対して, 逆に ϕ_d が減少する。これは, 液柱滴化領域において単位体積当たりの熱交換量の少ない大きな直径を有する液滴の占める体積が多くなるためにこのような温度効率の低下をもたらしたものと考えられる。

3.4 代表直径推算に関する無次元整理

ここでは, 液滴群の液滴一つ一つに着目するよりも液滴群として熱交換量の算定を行う方がより実用的との判断から, 本研究では, 液滴群の代表直径として液滴群の算術平均径 d_p を採用し, 図6の G_d と d_p の関係より代表直径の推算に必要な実験整理式の導出を行った。

まず, 液滴の発生そして液滴直径の決定には, 密度差による力, 界面張力, PFCの粘性によるせん断力, およびPFCのノズル内流速による慣性力が係わっていることより, 以下の無次元量を導入して, 実測値の無次元整理を行った。

$$\left. \begin{aligned} Bo_n^* &= \frac{d_p^3 g (\rho_d - \rho_c)}{\sigma d_n} \\ Ca &= \frac{We_n}{Re_n} = \frac{V_n \mu_d}{\sigma} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで, 上式の修正ボンド数 Bo_n^* は液滴発生時に液滴にかかる密度差による力と界面張力との比を表す。また, ウェーバ数 $We_n (= V_n^2 \rho_d d_n / \sigma)$ をレイノルズ数 $Re_n (= V_n d_n / \nu_d)$ で除した $V_n \mu_d / \sigma$ はせん断力と界面張力の比を表しており, ノズルキャピラリー数 Ca と呼ばれるものである。図9は Ca に対する Bo_n^* の関係を表したものであり, 図中実線は次式で示される実験整理式である。

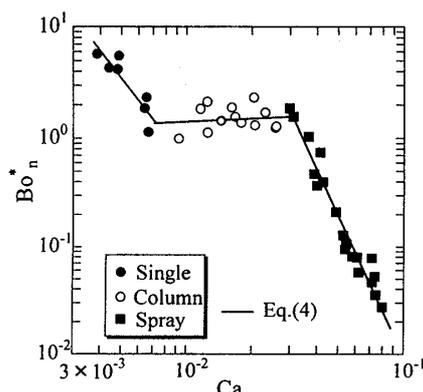


Fig. 9 Variation of Bo_n^* with Ca

$$\left. \begin{aligned} Bo_n^* &= 5.0 \times 10^{-6} \cdot Ca^{-2.5} && (3.60 \times 10^{-3} < Ca < 7.16 \times 10^{-3}) \\ Bo_n^* &= 2.1 Ca^{7.6 \times 10^{-2}} && (7.16 \times 10^{-3} \leq Ca < 0.03) \\ Bo_n^* &= 0.67 \times 10^{-6} Ca^{-4.2} && (0.03 \leq Ca < 0.08) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

図9より, 式(4)は上より順に単一滴化, 液柱滴化およびスプレー滴化領域に適用される。また, 実験値とはそれぞれ平均偏差 $\pm 21.2\%$, $\pm 21.7\%$, および $\pm 19.7\%$ で一致する結果を得たが, 特に周囲流体とのせん断力により液柱が引きちぎられ液滴が発生していると考えられるスプレー滴化領域では Ca の増加に対する Bo_n^* の減少という関係が明確に表れている。また, 液柱滴化領域では Ca の増加に対して Bo_n^* はほとんど変化せず, 界面張力と密度差とのつりあいにより液滴径が決定されているという結果を得た。

4. 液滴群の沈降挙動

4.1 液滴群の沈降挙動と試験部内水流速分布

ここでは試験部内を沈降する液滴群のビデオ撮影から, PFC液噴射流量に対する液滴群中の個々の液滴の沈降速度の測定結果について述べる。単一滴化領域は図10(a), そして液柱滴化ならびにスプレー滴化領域には図10(b)及び(c)に示す液滴径 d_{pj} と沈降速度 U_j の関係が得られた。ここで, 図中実線及び破線は従来より知られている単一液滴が流体中を沈降あるいは浮上する場合の液滴径と沈降速度の関係を示したもので, 修正ボンド数 Bo_j^* と修正レイノルズ数 Re_{dj}^* との関係で表された次式(4)より求めたものである。

$$Re_{dj}^* = 0.94 Bo_j^{*0.757} \quad (2 < Bo_j^* \leq 59.3) \dots \dots \dots (5a)$$

$$Re_{dj}^* = 3.42 Bo_j^{*0.441} \quad (59.3 < Bo_j^*) \dots \dots \dots (5b)$$

なお, 修正ボンド数 Bo_j^* および修正レイノルズ数 Re_{dj}^* は, 通常用いられるボンド数 Bo_j とレイノルズ数 Re_{dj} に

界面張力と密度差による力および粘性力との比を表す無次元数であるモートン数 M を考慮して、次式により与えられる。

$$\begin{cases} Bo_j^* = \frac{4}{3} Bo_j \dot{M}^{-0.149} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{-0.14} \\ Re_{dj}^* = Re_{dj} \dot{M}^{0.149} + 0.857 \end{cases}$$

$$Re_{dj} = \frac{U_j d_{pj}}{\nu_c}, Bo_j = \frac{(\rho_d - \rho_c) g d_{pj}^2}{\sigma}, M = \frac{g \mu_c^4 (\rho_d - \rho_c)}{\rho_c^2 \sigma^3}$$

まず、図10の結果から、液滴群中の個々の液滴の沈降速度は、式(5a)(5b)より求められる単一液滴で沈降する場合に比べて、同一液滴直径に対して沈降速度が増大しており、特に大きい直径を有している液滴ほど大幅に沈降速度が増大していることが分かる。さらにPFC液流量の増大と共にその沈降速度の差が大きくなることが図10(a),(b),(c)の比較より分かる。

PFC液滴群の沈降が周囲温水流動に及ぼす影響について調べるため、熱線流速計を用いて試験部内の水流速分布測定を行った。図11はPFC液を噴射しない上向き水流のみの場合(図11(a))と、 $1 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ (図11(b))、および $3.3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ (図11(c))のPFC噴射流量の場合における流速分布の測定結果を示したものである。ここで図11中小丸は同一位置で連続して測定した20回分の各流速値であり黒丸はその平均値を表している。また横軸の0mmおよび200mmは試験部内壁の位置であり、100mmは試験部中央すなわちノズル直下の位置、縦軸で正の流速は試験部上方への流れを表している。まず、図11(a)は温水のみを流動させた場合の水流速分布である。今回の実験条件である温水流量 $1.1 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ と、水流速分布から求めた積算流量はほぼ一致しており、今回の測定の妥当性が確認できる。次に、PFC液を噴射させて水流速分布測定を行った場合、水流速は試験部内で図11(b),(c)に示すような分布を持つようになり試験部中央付近で温水の試験部下方への流動が発生していることがわかる。このことから、試験部中央付の温水が液滴群の下方への沈降に巻き込まれていることが推測される。またPFC液噴射流量が増加すると、試験部中央付近での温水の下方への流速が増加することになる。これはPFC噴射流量の増加によって液滴群が試験部内を広く分散して沈降するため、液滴群よって周囲温水がより活発に巻き込まれることに起因する。

以上の試験部内水流速測定ならびに液滴群の沈降挙動の観察から、液滴群中の液滴の沈降速度の方が単一液滴の場合と比較して、大きくなることが理解できる。

4.2 液滴群の代表速度

前図10より、PFC液滴群の各液滴はその大きさに応じた沈降速度で沈降しており、それらの熱伝達率も異な

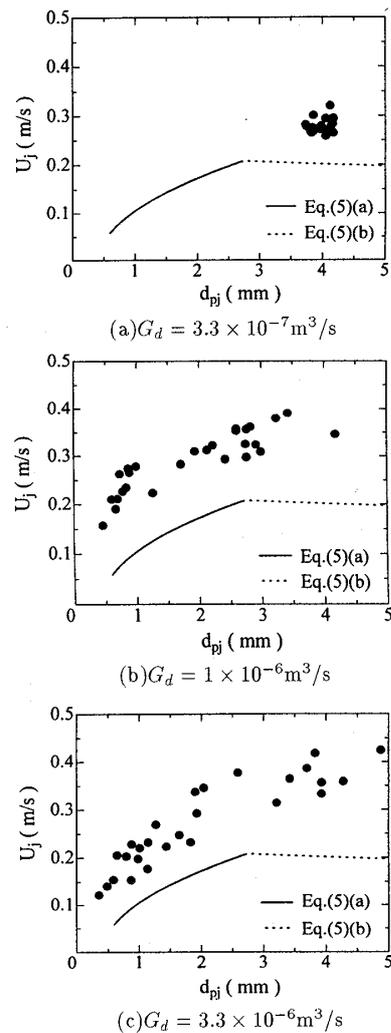
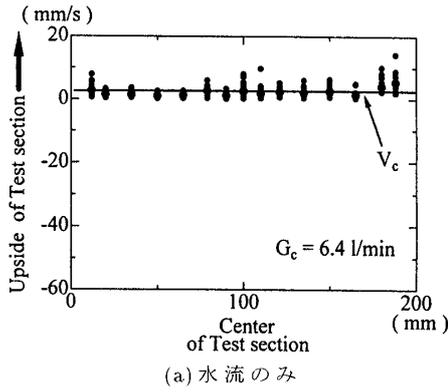


Fig.10 Variaton of U_j with d_{pj}
($T_{din} = 15^\circ\text{C}, T_{cin} = 40^\circ\text{C}$)

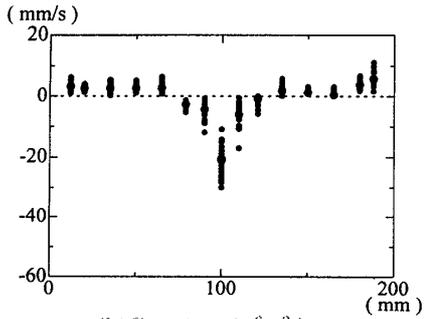
ることが予想されるが、實際上、各液滴の熱伝達率を測定することが困難である。本研究においては、算術平均直径 d_p を有する液滴の沈降速度を液滴群の代表速度 U と定め液滴群と周囲温水間の熱伝達に関する実験整理式の導出を行った。

測定した個々の液滴の沈降速度 U_j と液滴直径 d_{pj} との関係をべき乗近似式として求め、そのべき乗近似式を用いて算術平均径 d_p に対する沈降速度を計算し、液滴群の代表流速 U を算出した。また、本実験で使用したノズルとその配置条件は、前報^{(3),(7)}とほぼ同じであり、得られた単一液滴の静止層への実測値と計算結果とがほぼ一致していたことより、本研究においては、従来の静止流体層における単一液滴の結果と本実測結果の比較を試みている。

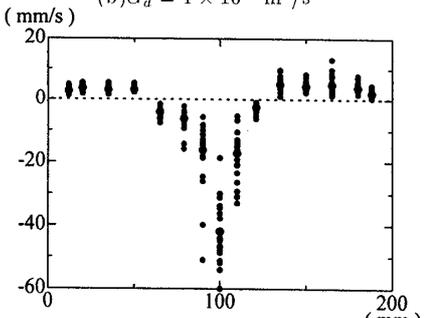
このようにして求めた U と d_p との関係を示したものが図12である。図12から液柱滴化領域およびスプレー滴化領域では単一液滴の沈降に伴う液滴直径と沈降



(a) 水流のみ



(b) $G_d = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$



(c) $G_d = 3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Fig.11 Water flow velocity distribution ($T_{din} = 15^\circ\text{C}, T_{cin} = 40^\circ\text{C}$)

速度の結果⁽⁴⁾と同じように、 d_p の増大と共に U の増加傾向が見られる。液滴径が大きな単一滴化領域では、 d_p の増大に対して沈降速度はほとんど変化していないことが分かる。これらの結果から、前述の式(5a)(5b)に基づき、液滴群の代表速度 U を求めるための実験整理式として次式を導出した。

$$Re_d^* = 2.05Bo^{*0.680} \quad (3 < Bo^* \leq 50.8) \dots\dots\dots(6a)$$

$$Re_d^* = 7.46Bo^{*0.351} \quad (50.8 < Bo^* < 140) \dots\dots\dots(6b)$$

$$\begin{cases} Bo^* = \frac{4}{3}BoM^{-0.149} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^{-0.140} \\ Re_d^* = Re_dM^{0.149} + 0.857 \end{cases}$$

$$Re_d = \frac{Ud_p}{\nu_c}, \quad Bo = \frac{(\rho_d - \rho_c)gd_p^2}{\sigma}$$

図13中の実線で示すように、式(6b)が主に単一滴化領域、式(6a)が液柱滴化とスプレー滴化領域に適用されることになり、実測値とはそれぞれ平均偏差 $\pm 7.1\%$ 、 $\pm 6.3\%$ で一致する結果を得た。

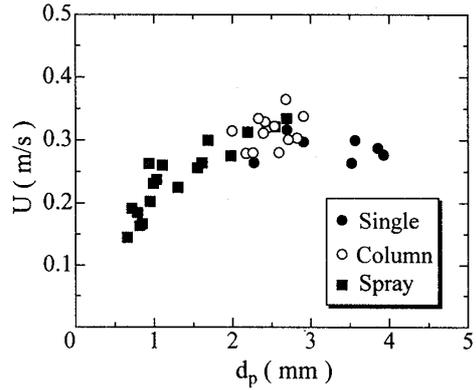


Fig.12 The relationship between U and d_p

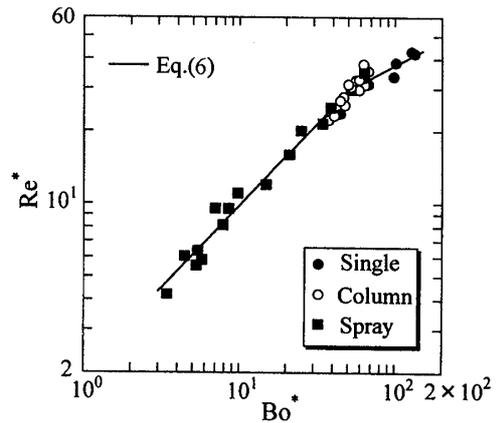


Fig.13 Variation of Re_d^* with Bo^*

5. 液滴群の熱伝達特性

前述のPFC液滴群と周囲温水間との伝熱面積およびPFC液滴群の温度差($T_{dout} - T_{din}$)の測定から、PFC噴射流量 G_d におけるPFC液滴群と周囲温水間の熱通過率 K を次式により求めることができる。

$$K = \frac{G_d \rho_d C_p d (T_{dout} - T_{din})}{A_s F L \Delta T_{lm}} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 F は試験部断面積(=0.04 m²)であり、 L はノズル先端から試験部底部までの距離(=0.614m)である。また、 ΔT_{lm} は次式で求められる対数平均温度差である。

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{cout} - T_{din}) - (T_{cin} - T_{dout})}{\ln \left(\frac{T_{cout} - T_{din}}{T_{cin} - T_{dout}} \right)} \dots\dots\dots(8)$$

PFC液噴射流量 G_d について式(4)の Bo により求められるPFC液滴群の代表径 d_p と式(6a)(6b)の Re_d^* により求められる代表速度 U を用いて、次式により示されるレイノルズ数 Re とヌセルト数 Nu の関係より、PFC液滴群の熱通過率を推算するための無次元整理を行った。

$$Nu = \frac{Kd_p}{\lambda_d}, \quad Re = \frac{d_p(U - V_c)}{\nu_c} \dots\dots\dots(9)$$

なお、式(9)の V_c は試験部内平均水流速であり、本実験では $V_c = -2.67 \times 10^{-3}(\text{m/s})$ である。

図14に各温度条件におけるPFC液滴群のレイノルズ数 Re とヌセルト数 Nu の関係を示す。図中の点線は単一

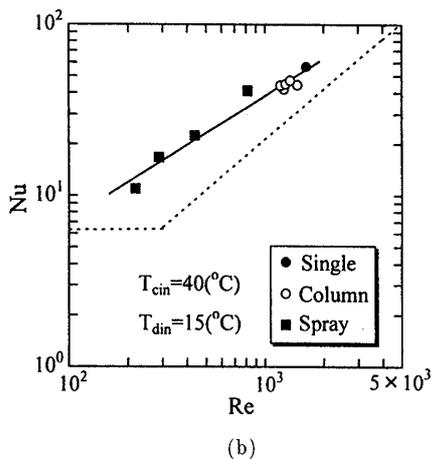
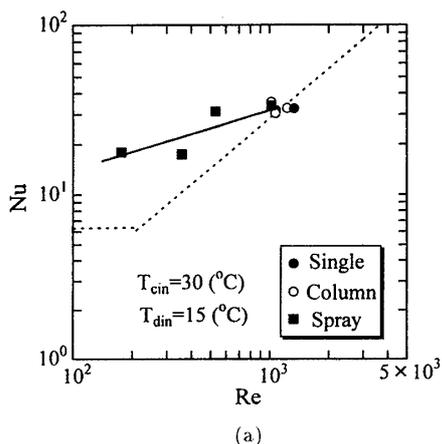


Fig.14 Variation of Nu with Re

液滴に関する熱伝達の実験式⁽⁵⁾⁽⁶⁾であり、実線は後述の式(10)に示す液滴群のヌセルト数に関する実験整理式である。図14より、単一滴化、液柱滴化、スプレー滴化と液滴の状態が変化するに伴って、従来の単一液滴の実験式より Nu の値に大きな差が見られる。この Nu の挙動は、多数の液滴群の沈降によって液滴群による周囲温水の巻き込みやそれに伴う攪拌といった効果が液滴群の熱伝達の促進に寄与しているためであると考えられる。

さらに温度条件の違いを考慮し、水のプラントル数を加え次式に示す実験整理式を最小自乗法により求めた。

$$Nu = 0.30 Re^{0.64} Pr_c^{1/3} \dots\dots\dots (10)$$

($Pr_c = 4.4 \sim 5.4, Re = 100 \sim 2000$)

図15に Re と $Nu/Pr_c^{1/3}$ の実測値および式(10)の実験整理式を示す。図15より、式(10)は単一滴化、液柱滴化およびスプレー滴化の三領域にわたって適用されることが可能であり、実験値とは平均偏差±13%で一致する結果を得た。

6. 結言

非水溶性熱媒体であるPFC液滴と温水との液液直接接触熱交換に関する実験を行い、PFC液滴群の発生形態

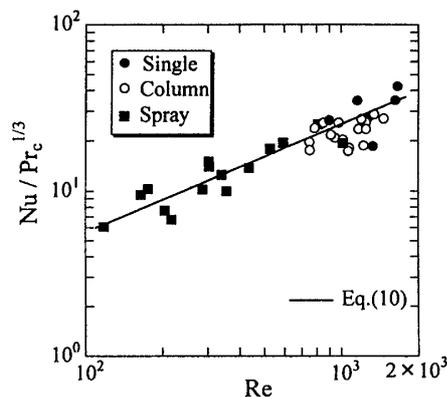


Fig.15 Variation of $Nu/Pr_c^{1/3}$ with Re

と沈降挙動ならびに熱伝達のそれぞれについて、以下に示すような結論を得た。

(1) 本実験に用いたPFC液滴群の温水層での発生形態は、その噴射量により、従来より報告されている、単一滴化、液柱滴化及びスプレー滴化領域に区分されることを確認し、それらの領域における、液滴群の総伝熱面積や温度効率とPFC噴射量の関係の特徴を定量的に明らかにした。

(2) PFC液滴群が温水層を沈降する場合の沈降速度は、単一滴で沈降する場合よりも加速されることを、液滴群の速度測定ばかりでなく、温水側の速度分布の測定結果からも定量的に解明するとともに、この種の随伴流れを伴う場合の液滴群流れの特徴を明らかにした。

(3) PFC液滴群の代表直径を算術平均径 d_p 、さらに代表流速 U を d_p の径を有する液滴の沈降速度と定め、 d_p 、および U を推算するための実験整理式の導出を行った。また、その d_p と U を用いてPFC液滴群の熱通過率 K に関して単一滴化、液柱滴化およびスプレー滴化の三領域に渡って適用される実験整理式の導出を行った。

参考文献

- (1) 尾花英朗, 熱交換器設計ハンドブック,(1973),1182, 工学図書(株).
- (2) 稲葉,堀部,尾崎,横山,熱物性,11-4,(1997),123
- (3) 稲葉,佐藤,機論,B編,60-580,(1994),4236
- (4) Grace,J.R.,T.Wairegi and T.H.Nguyen : Trans.Instn. Chem. Engrs.,54,(1976),167.
- (5) Conkie,W.R.and U.P.Savic,"Calculation of the influence of internal Circulation in a liquid drop on heat transfer and drag" Ottawa,National Research Council of Canada,Div. Mech. Engng.,Report MT-23 (1953).
- (6) Handlos A.E. and T.Baron,AIChE Journal,3-1,(1957) 127-136.
- (7) 稲葉,佐藤,機論,B編,62-593,(1996),325