

流動脈動下における限界熱流束の簡易整理*

梅川尚嗣^{*1}, 小澤 守^{*1}, 光永 有^{*2}
三島嘉一郎^{*3}, 日引 俊^{*3}, 斎藤泰司^{*3}

Scaling Parameter of CHF under Oscillatory Flow Condition

Hisashi UMEKAWA, Mamoru OZAWA, Tamotsu MITSUNAGA,
Kaichiro MISHIMA, Takashi HIBIKI and Yasushi SAITO

Critical heat flux (CHF) was reduced by flow oscillations, and the reduction of CHF was significantly influenced by the flow oscillation period, amplitude, heat capacity of test tube and mean inlet mass flux. A scaling parameter of temperature response of tube wall was derived based on a lumped-parameter model of tube wall heat capacity. Applying this scaling parameter to the CHF data under flow oscillation, the experimental data of CHF was successfully correlated.

Key Words: Critical Heat Flux, Boiling, Heat Transfer, Flow Oscillation, Premature-dryout, Scaling Parameter

1. 緒 言

限界熱流束の評価は沸騰関連機器において安全設計ならびに性能設計上非常に重要であり、従来より多くの研究が行われている^{(1)~(5)}。しかし、その研究の多くは流動状態として脈動などのない定常状態を対象としており、沸騰機器の遷移運転時や異常運転時に発生しやすい流動脈動条件下における限界熱流束に対して、これらの結果を適用するには議論を要する。むろんMishimaらのように不安定流動を考慮に入れた研究^{(6)~(14)}も存在するが、この現象が十分に理解されたとはまだいい難い。

沸騰二相流で自発的に発生する流動脈動による限界熱流束への影響を検討するうえでまず問題となる点は、その流動脈動がシステムの構成や運転状況に依存するため、広範囲にわたる系統だった実験が困難となる点あげられる。これに対し、著者らは任意の振幅・周波数での流動脈動を人為的に作成できる実験装置を用いることで、逆流域をも含む広範囲にわたる脈

動条件下で限界熱流束実験を行い、以下のような結果を報告してきた^{(15)~(19)}。

(1) 流動脈動下における限界熱流束の低減は、流量の変動に伴って発生する周期的なドライアウトとりウェットイングの関係で説明される。つまり周期的なドライアウトで壁温が上昇するが、その温度振幅の大きさにより限界熱流束の低下割合が決まる。

(2) 流動脈動下における限界熱流束は、脈動振幅ならびに脈動周期が増加するに従って低下する。しかし、限界熱流束の減少には脈動周期に依存する下限値が存在する。

(3) 限界熱流束の下限値は、管壁の熱容量効果を一次遅れ系で近似した簡単なモデルで説明できる。また、このモデルで算出される管のもつ熱容量に対する時定数は、流動脈動下での限界熱流束を考えるうえで重要な要素である。

(4) 脈動下の限界熱流束の挙動は単純な集中定数系を用いた熱流動モデルにより説明できる。

さらに、このように人為的に作成した流動脈動条件下で得られた結果が、実際の沸騰系で発生する流動脈動(密度波振動)下での現象に対しても適用できることを報告した⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。

本報では、既報^{(15)~(19)}で示したように流動脈動下の

* 原稿受付 1997年4月25日。

^{*1} 正員、関西大学工学部 (〒564 吹田市山手町3-3-35)。^{*2} (株)大林組 (〒131 東京都墨田区堤通り1-19-9)。^{*3} 正員、京都大学原子力実験所 (〒590-04 大阪府泉南郡熊取町野田)。

限界熱流束を考えるうえで重要な要素である管の熱容量、脈動振幅、および脈動周期を統一的に扱うパラメータの導出を行い、実験結果の整理を試みたのでここに報告する。

2. 実験装置および実験方法

本報で用いた実験装置を図1に示すが、詳細は既報^{(15)~(19)}で用いた装置と同等であり、ここではその概略のみを述べる。装置は基本的には強制流動沸騰系の実験装置であるが、テストセクション入口部にピストンとクランク機構からなる流動脈動発生装置を取付けることで機械的に流動脈動を付加できる構造としており、任意の流動脈動条件下での限界熱流束実験が可能となっている。実験に際しては十分に脱気したイオン交換水を作動流体として使用し、流動方向としては上昇流ならびに下降流の二とおりで行った。本研究ではテストセクションには表1に示す4種類の管径を有するSUS 304管を用い、直流もしくは交流を直接通電することにより加熱を行った。表1中に示している τ_w は各テストセクションのもつ熱容量に対する時定数⁽¹⁶⁾であり、式(6)により計算されたものであるが詳細については後述する。限界熱流束の決定は、管出口部付近での管外壁温度が表1中 T_{CHF} で示される判定温度を超えた時点での加熱熱流束と規定している。この T_{CHF} の決定は定常流動下で行った限界熱流束実験の結果をもとに決定したものであり、管内壁での壁面過熱度がおおよそ100 Kとなっている。管により

Table 1 Specification of test sections

I.D. mm	O.D. mm	Power Source	τ_w s	T_{CHF} °C
3.0	4.0	A.C.	1.2	250
	6.0	D.C.	4.5	
	9.0		12.0	300
4.0	4.5	A.C.	0.53	250

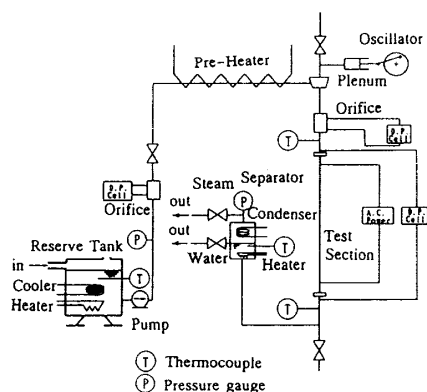


Fig. 1 Experimental apparatus

この判定温度が異なるのは管肉厚差に起因するものである。既報⁽¹⁷⁾でも述べたように T_{CHF} の設定値が異なると本研究で定義している限界熱流束は定量的には変化する可能性があるが、脈動に対する特性など定性的性質は変化せず、本研究の目的には影響しないと考えている。

本報で用いた実験条件は、入口平均質量流束 $G_0=60\sim 1800\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、脈動振幅 $\Delta G/G_0=0.0\sim 10.2$ 、系圧力 $P=0.3, 0.4\text{ MPa}$ である。作動流体の入口温度は 80°C 一定であり、入口サブクール度は各系圧力に対してそれぞれ54 K (0.3 MPa)、64 K (0.4 MPa)である。また、脈動周期は数 m から十数 m 程度の実機の蒸発管で発生する密度波振動を模擬して $\tau=2, 4, 6\text{ s}$ の三とおりで行った。

3. 実験結果

3.1 限界熱流束特性 本報では下降流と上昇流での実験結果に基づいて議論を行うが、流動方向の影響ならびに管の熱容量による影響などの詳細な議論については別途報告するものとし、ここではスケーリングパラメータを検討するうえで必要となる限界熱流束特性の概略について説明する。

図2は流動脈動条件下で得られた限界熱流束 q_{CHF} を、平均質量流束 G_0 で脈動振幅 ΔG を無次元化した無次元の脈動振幅 $\Delta G/G_0$ に対してプロットしたものであり、パラメータとして脈動周期 τ をとっている。図2中の曲線は、既報⁽¹⁷⁾で報告した集中定数系モデルによる数値計算結果を示す。また、一点鎖線(---)は、管の一次遅れ熱容量系モデルにより算出した限界熱流束の低下限界⁽¹⁶⁾であり、後述する式(7)により計算されたものである。

既報⁽¹⁷⁾でも述べたように限界熱流束は流動脈動の影響を受けて定常流動下での値よりも低下する。ま

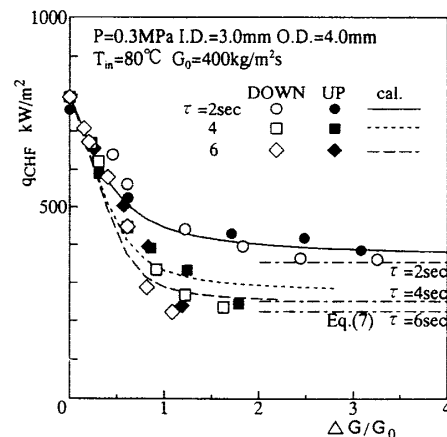


Fig. 2 CHF under oscillatory flow condition

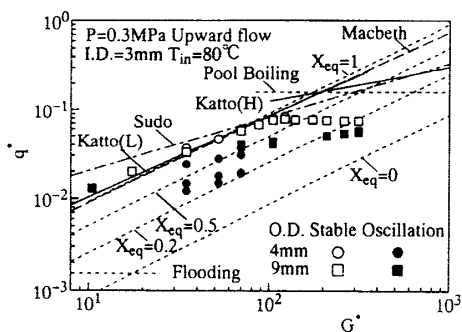


Fig. 3 CHF characteristics in upward flow

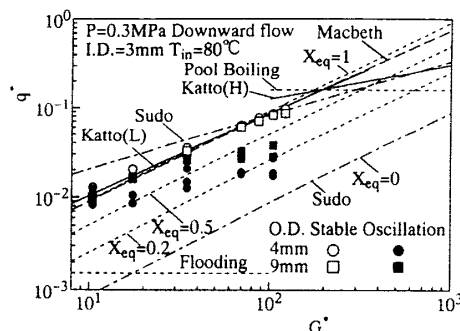


Fig. 4 CHF characteristics in downward flow

た、この低下率は流動脈動振幅が増加するにつれて増加するが、脈動周期に依存する低下限界が存在することがわかる。

図3、4は内径3mmで外径が4mmならびに9mmの2種類のテストセクションで得られた上昇流および下降流での実験結果をMishima⁽⁷⁾⁽⁸⁾による次式で示される無次元熱流束 q^* と無次元質量流束 G^* の関係で示したものである。

$$q^* = q_{CHF} / h_{LG} / (g \lambda c \rho_G \rho_{LG})^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$G^* = G_0 / (g \lambda c \rho_G \rho_{LG})^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\lambda c = [\sigma / (g \rho_{LG})]^{1/2}$ で h_{LG} は蒸発潜熱、 ρ_G は蒸気密度、 ρ_{LG} は気液密度差、 σ は表面張力、 g は重力加速度を表す。図3、4中には定常流に対する既存の限界熱流束の相関式⁽²⁾⁻⁽⁵⁾と、Mishimaに従って求めたプール沸騰とフラッシングによる限界熱流束、ならびに出口での熱平衡クオリティ一定の条件を併記している。

図3、4中の中空のプロット点(○、□)は脈動を付加していない定常流動下で得られた結果を示し、中実のプロット点(●、■)は流動脈動下で得られた結果を示している。なお、流動脈動下での結果は各脈動周期ごとに得られた限界熱流束の中での最低値、つまり図2で示した脈動周期ごとに決まる限界熱流束の低下限界に相当する値のみをプロットしたものである。

図2でも示したように流動脈動が付加されることで限界熱流束の値は定常流動下で得られた値よりも低下するが、その低下割合は短い τ_w を有する管つまりは管熱容量の小さい4mm管のほうが、長い τ_w を有する管つまりは管熱容量の大きい9mm管よりも大きくなっている。また、脈動周期による違いも管熱容量の小さい管のほうが顕著に認められる。さらに質量流束によっても限界熱流束の低下量は異なることがわかる。

以上簡単に示したように流動脈動下での限界熱流束は、脈動振幅、脈動周期、管の熱容量さらには平均質

量流束に強く依存した特性を示す。3・2節ではこれらの要素を含めて統一的に流動脈動下での限界熱流束を整理するパラメータについて検討する。

3・2 脈動時の限界熱流束の一般化表示 テストセクション部の管の熱容量について集中定数近似を適用し、熱バランスを考えることで次式が得られる。

$$q_{ext} - q_{in} = C_w \rho_w [D_o^2 - D_i^2] / 4 D_i \cdot dT_w / dt \dots\dots\dots (3)$$

ここで q_{ext} は管内基準の加熱熱流束、 q_{in} は管内壁での熱流束、 C_w および ρ_w は管材の比熱と密度、 D_o および D_i は管の外径および内径、 T_w は壁温を示す。本報で対象としている限界熱流束は既報⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾でも示したように基本的には流動脈動下で周期的に発生するドライアウトに起因する。ドライアウト期間中の管内の熱伝達率は蒸気単相の強制対流熱伝達により表せるものと仮定すれば、 q_{in} は次式で示される。

$$q_{in} = h(T_w - T_{SAT}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで h は管内壁における熱伝達率であり、Dittus-Boelterの相関式を時間平均の質量流束に対して適用することで算出する。また q_{in} の計算では蒸気側の温度として飽和温度を用いている。

流動脈動により一時的に液膜がドライアウトしたのちの管壁の温度挙動は、管内部の伝熱機構が熱伝達の良好な飽和沸騰から熱伝達の悪い蒸気の強制対流熱伝達に変化する過程であり、壁面過熱度が0すなわち初期値 $\theta = 0$ の状態からのステップ応答として、式(3)、(4)より次式で示される。

$$\theta = (q_{ext} / h) [1 - \exp(-t / \tau_w)] \dots\dots\dots (5)$$

ここで θ は壁面過熱度で $\theta = T_w - T_{SAT}$ で定義される。また、 (q_{ext} / h) が温度応答の入力に対応し、ドライアウトに伴う h の低下が定常的に持続したときの壁面過熱度である。なお、 τ_w は次式で示される管の時定数であり温度応答の速さを示す。

$$\tau_w = C_w \rho_w [(D_o^2 - D_i^2) / 4 D_i] / h \dots\dots\dots (6)$$

前述の表1中には参考として $G_0 = 400 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ で

の蒸気単相の熱伝達率にほぼ相当する $h=2000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ を式(6)に代入して求めた τ_w の値を示している。

本研究での限界熱流束の判定を考えると壁面過熱度 θ が判定条件 θ_{CHF} を超えたときの熱流束が限界熱流束 q_{CHF} となる。流量が時間平均値よりも低くなるとドライアウトが発生し、多くなるときに再び液膜が形成されると仮定すると、ドライアウト時間の最長は脈動周期 τ の半分となり、流動脈動による限界熱流束の低下の下限値は式(5)より次式のように表される。

$$q_{CHF} = h\theta_{CHF}/[1 - \exp(-0.5 \tau/\tau_w)] \dots\dots\dots (7)$$

図5に流動脈動下の温度変動と流動変動との関係を単純化したモデルを示す。図5のモデルにおいては平均質量流束 G_0 の流れに脈動振幅 ΔG 、脈動周期 τ の正弦波の脈動が付加された条件を想定している。ここでドライアウト条件は脈動下においても準静的過程を仮定して定常流動状態と同じく出口部での熱平衡クオリティが1となったときに発生するものとする。つまりある加熱熱流束 q_{CHF} に対して出口クオリティが1となる質量流束 G_{CHF} よりも質量流束が少ない場合にドライアウトが発生するものとし、この期間をドライアウト時間 τ_D とする。ドライアウト時間 τ_D を用いることで式(7)は次式となる。

$$q_{CHF} = h\theta_{CHF}/[1 - \exp(-\tau_D/\tau_w)] \dots\dots\dots (8)$$

G_{CHF} は、加熱熱流束 q_{CHF} のもとで出口部での準静的過程の仮定のもとで熱平衡クオリティが1となるときの質量流束であるから、次式で示される。

$$G_{CHF} = q_{CHF} P_h z / (h_{LG} + C_{PL} \Delta T_{SUB}) A \dots\dots\dots (9)$$

ここで P_h は加熱ぬれぶち長さ、 z は加熱管長さ、 C_{PL} は液の比熱、 ΔT_{SUB} は入口サブクール度、 A は流路面積を示す。この G_{CHF} を用いれば式(8)のドライアウト周期 τ_D は次式で求まる。

$$\tau_D = 0.5 \tau \{1 + 2/\pi \sin^{-1}[(G_{CHF} - G_0)/\Delta G]\} \dots\dots\dots (10)$$

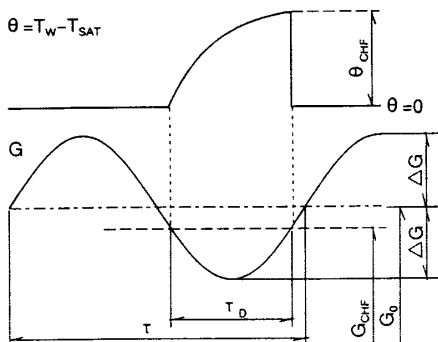


Fig. 5 Schematic diagram of simplified flow model

式(8)~(10)を用いて収束計算を行うことで q_{CHF} が求まり、管の熱容量、脈動振幅ならびに脈動周期の影響が含まれた形で式が表されたことになる。ただし本計算の適用にあたっては管熱容量の大きな管で質量流束の低い場合などには収束解を得られないこともあるので注意を要する。

前述したように本モデルにおいて管の熱容量の影響は、式(6)で示される時定数の形で評価されていることになる。しかし、実際にはエネルギーバランスから考えると、この時定数が脈動周期に比べて長い場合には壁温は脈動の1周期ごとに初期状態に戻らず徐々に上昇するというような温度履歴の形でも影響する。また、管に保持された熱は管内の流動状態にも影響を与えられ、先に述べた収束解の得られなかった条件はこのような条件にあてはまり、本モデルの仮定から離れている範囲と判断される。本実験で実際に収束解が得られなかった範囲はおおよそ $0.5 \tau/\tau_w = 0.4$ 以下の条件となっており、内径3mm外径9mmの管で $G_0 = 600 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以下程度の実験条件がこれに該当する。このような条件での本現象を理解するには、管の熱容量に起因する熱流動場への動的なフィードバックのより詳細な検討が不可欠であるが、これについては別途報告する。

以上の結果と実験結果をもとに以下で流動脈動下の限界熱流束の整理を試みる。図6は先の図1と同様に限界熱流束を無次元脈動振幅に対してプロットしたものである。ただし限界熱流束は定常流動下で得られた限界熱流束の実験値 q_{CHF0} で無次元化しており、ある程度まではこの無次元化により平均質量流束による影響を考慮したことになる。なお、以後使用するデータは先に述べた式(8)~(10)の収束解が得られたデータ(おおよそ $0.5 \tau/\tau_w > 0.4$)のみを示している。図6からも明らかのように脈動振幅と限界熱流束値を無次元

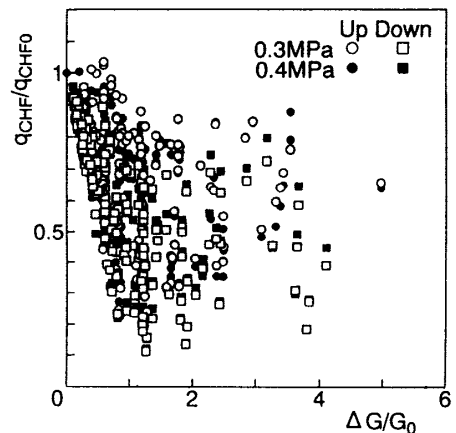


Fig. 6 Correlation between CHF and $\Delta G/G_0$

化するだけでは脈動周期や管の熱容量の影響が残るためにデータはかなりばらつきの多いものとなる。図7では管の熱容量と脈動周期を考慮するために、式(6)を各実験条件に適用して求めた管の時定数 τ_w でドライアウト周期の最大値と考えられる脈動周期の半分の値 0.5τ を除したものに対して実験値をプロットしている。しかし、式(7)のモデルは振幅のいかんにかかわらず周期だけでドライアウト時間が決まるとするもので、脈動振幅による影響は考慮されておらずデータのばらつきはかえって大きくなる。

図8は式(10)で定義されるドライアウト周期 τ_D を、図7と同じく各実験条件ごとに求めた管の時定数 τ_w で除したものに対して実験値をプロットしている。この座標系では、前述したように時定数 τ_w により管の熱容量が、ドライアウト周期 τ_D により脈動周期ならびに脈動振幅の影響が考慮され、さらに脈動時の限界熱流束を定常時の熱流束により無次元化することにより近似的に平均質量流束の影響も考慮した正規化がなされたことになる。この座標系をとることで実験結果

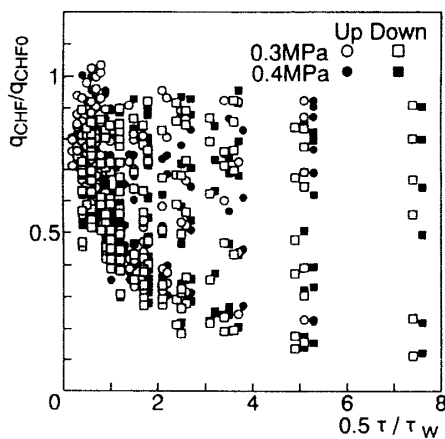


Fig. 7 Correlation between CHF and $0.5\tau/\tau_w$

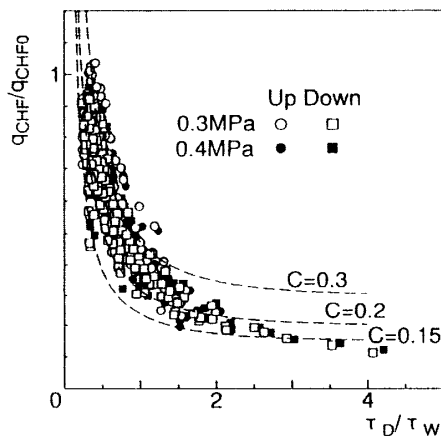


Fig. 8 Scaling of CHF under flow oscillation

もかなりまとまったものとなる。

次にこの結果に基づいて式(8)を再度検討してみる。図8では流動脈動下での限界熱流束を定常流動下での限界熱流束で除することで無次元化を行ったが、これと同様に式(8)の両辺を q_{CHF0} で割ると、次式が得られる。

$$q_{CHF}/q_{CHF0} = C/[1 - \exp(-\tau_D/\tau_w)] \quad \dots\dots(11)$$

ここで $C = h\theta/q_{CHF0}$ である。実験結果でこの C が定数として表現できるのなら、条件によらず流動脈動下における限界熱流束値は同一の式で整理できることとなる。図9はこの C の特性を調べるために平均質量流束に Dittus-Boelter の相関式を適用することで求めた飽和蒸気单相の熱伝達率 h と $\theta = 100\text{ K}$ とした仮定から計算で求めた $h\theta$ に対して q_{CHF0} の実験値をプロットしたものである。一方、本実験範囲の多くは定常流動下ではいわゆる甲藤の L 領域に相当しており、出口での熱平衡クオリティがほぼ1の条件で整理されている。このことより q_{CHF0} を熱平衡クオリティが管出口で1となる条件より求め、前記の $h\theta$ を用いて C を計算により求めるとおおよそ0.15~0.3程度の値をとる。図9には $C=0.15$ および0.3とした場合について $h\theta = Cq_{CHF0}$ の関係を併記しているが、実験結果とほぼ一致することがわかる。この C は質量流束の増加に伴い若干の低下傾向を示すため、質量流束が低く限界熱流束も低い条件では $C=0.3$ に近く質量流束が増加して限界熱流束が増えるに従い $C=0.15$ へと推移していく。なお、これらの値から大きく離れた6点の結果は質量流束が大きい条件下のものである。これらの条件は図3, 4でもわかるように、いわゆる甲藤の H 領域に相当するもので、定常流動下でかなり低い出口クオリティのもとで限界熱流束状態となっている。

これらの結果より式(11)の C に0.15, 0.2および0.3を代入して求めた曲線を図8中に併記する。また、質量流束の影響が明確になるように図10に図8と同

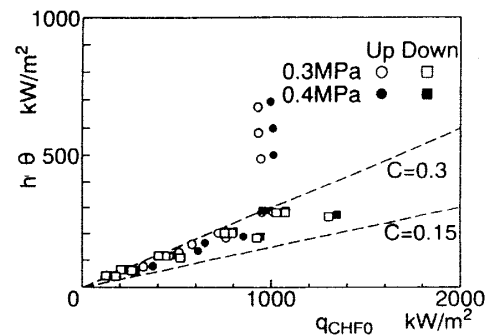


Fig. 9 Estimation of C in Eq. (11)

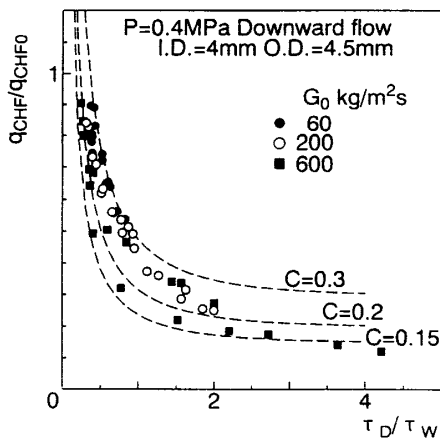


Fig. 10 Influence of mass flux

じデータのうち I.D.=4 mm 管の一部の結果のみのプロットを行った。図 8 ではデータが τ_D/τ_w の増加に伴い $C=0.3$ から 0.15 へと近づく傾向を示すが、これは先にも述べたように C が緩やかではあるものの質量流束に影響されるためであり、図 10 から明らかである。

ここで示したモデルは非常に単純なモデルであるにもかかわらず図 10 中に示した計算結果は全体的にはよく実験結果を表しており、本簡易整理法が有効であるといえる。また、この方法で $C=0.2$ として計算を行えば $\pm 25\%$ 程度の範囲で本実験結果と一致する。なお、先の図 9 で他のデータから大きく外れたデータに関しては τ_D/τ_w が小さな値をとるため特に違和感なく整理されている。しかし、逆にこのような差が定量的な差として現れないことがこの簡易整理の限界を示しているともいえる。

4. 結 論

流動脈動下での限界熱流束現象に対し非常に単純なモデルを考えることで、脈動周期、脈動振幅さらに管の熱容量を統一的に扱ったパラメータを導出した。また実験結果の整理を通して定性的には本現象がこのモデルで説明できることを示した。

最後に、本研究の一部は平成 5-6 年度文部省科学研究費補助費 (No. 05450271)、および京都大学原子炉実験所共同利用研究 (No. 5007, 6004, 7005, 8013) によ

るものであることを記すとともに、本研究の遂行に多大な協力をいただいた佐波剛氏、時田一雄氏、宇野泰幸氏に感謝する。

文 献

- (1) Collier, J. G., *Convective Boiling and Condensation*, 3rd ed., (1994), 325-429, Oxford Science Pub.
- (2) Katto, Y., *Advances in Heat Transfer*, **17** (1985), 2-64, Academic Press.
- (3) Katto, Y., *Int. J. Multiphase Flow*, **20**, Suppl. (1994), 53-90.
- (4) 植田辰洋, 気液二相流, (1981), 285-321, 養賢堂.
- (5) Sudo, Y., Miyata, K., Ikawa, H., Kaminaga, M. and Ohkawara, M., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **22-8** (1985), 604-618.
- (6) Bergles, A. E., Lopina, R. F. and Fiori, M. P., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **89** (1967), 69-74.
- (7) Mishima, K., Ph. D Thesis, Kyoto Univ, (1984).
- (8) Mishima, K., Nishihara, H. and Michiyoshi, I., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **28-6** (1985), 1115-1129.
- (9) Ishigai, S., Nakanishi, S., Yamauchi, S. and Masuda, T., *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, **4** (1974), 300-304.
- (10) Smith, R. A., Price, F. A. and Griffith, P., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **98** (1976), 153-158.
- (11) Domashev, Ye. D., Portnoy, SYA., Struchenko, G. YE. and Gur'yeva, T. A., *Heat Transf. Res.* **24** 8 (1992), 1143-1146.
- (12) Kasai, S., Toba, A., Takigawa, Y., Ebata, S., Morooka, S. and Utsuno, H., *Proc. 2nd Int. Topic. Meet. Nucl. Power Plant Thermal Hydraul. Oper.*, (1986), 1-27-33.
- (13) Ruggles, A. E., Vasil'ev, A. D., Brown, N. W. and Wendel, M. W., *Proc. 7th Int. Meet. Nucl. React. Thermal-Hydraul.*, **4** (1995), 2470-2479.
- (14) Celata, G. P., Cumo, M. and Setaro, T., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **37-7** (1994), 1073-1080.
- (15) Ozawa, M., Umekawa, H., Yoshioka, Y. and Tomiyama, A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **36-16** (1993), 4076-4078.
- (16) Ozawa, M. and Umekawa, H., *Proc. Ger. Jpn. Symp. Multiphase Flow*, KfK5389 (1994), 227-236.
- (17) 梅川尚嗣・小澤守・宮崎明・三島嘉一郎・日引俊, 機論, **61** 583, B(1995), 264-270.
- (18) Umekawa, H., Ozawa, M. and Miyazaki, A., Serizawa, A., Fukano, T. and Bataille, J., eds., *Advances in Multiphase Flow*, (1995), 497-506, Elsevier.
- (19) Umekawa, H., Ozawa, M. and Mitsunaga, T., *Proc. Jpn. U. S. Seminar Two-Phase Flow Dyn.* (1996), 265-271.
- (20) Umekawa, H., Ozawa, M. and Ishida, N., *Proc. 3rd KSME-JSME Thermal Eng. Conf.*, **III** (1996), 411-414.
- (21) 梅川尚嗣・小澤守・石田直樹, 混相流, **11-1**(1997), 56-65.