

低圧・低質量流束条件下における周方向非均一加熱管の限界熱流束*

梅川尚嗣^{*1}, 北島哲生^{*2}, 平山美緒^{*1}
小澤 守^{*1}, 三島嘉一郎^{*3}, 齋藤泰司^{*3}Critical Heat Flux in Non-uniformly Heated Tube under Low-Pressure
and Low-Mass-Flux ConditionHisashi UMEKAWA^{*4}, Tetsuo KITAJIMA, Mio HIRAYAMA,
Mamoru OZAWA, Kaichiro MISHIMA and Yasushi SAITO^{*4} Department of Mechanical Engineering, Kansai University,
3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka, 564-8680 Japan

In an actual boiling channel, e.g. boiler water-tubes, the circumferential heat flux is not uniform. Thus, critical heat flux (CHF) of non-uniformly heated tube becomes an important design factor of conventional boilers, especially for the compact water-tube boiler with tube-nested combustor. The small compact boiler is operated at low-pressure and low-mass flux condition compared with the large scale boiler, thus the redistribution of liquid film will strongly affect on the characteristics of CHF. In this investigation, non-uniformly heat flux distribution along the circumferential direction was generated by using the Joule heating of SUS304 tubes which had the wall thickness distribution. The heated length of test-section was 900 mm, inner diameter was 20 mm and outer diameter was 24 mm. The center of the inner tube surface was shifted by $\varepsilon=0, 0.5, 1.0, 1.5$ mm from the center of the outer tube surface. The heat flux ratio between maximum and minimum heat fluxes of these tubes correspond to 1.0, 1.7, 3.0 and 7.0, respectively. Experimental conditions were as follows; system pressures were 0.3 and 0.4 MPa, mass flux range were 10-100 kg/m²s, inlet temperatures were 30 and 80 deg. C. The experimental results showed an increase in the critical heat flux by the existence of the redistribution of the flow. These characteristics have been well explained by using the similar concept of Butterworth's spreading model.

Key Words: Critical Heat Flux, Non-uniformly Heated Tube, Boiling Two-phase Flow, Heat Transfer, Pressure Difference

1. 結 論

蒸発量換算で産業用ボイラの年間生産量の三分の二を占める小型ボイラでは、スケール則により燃焼室容積熱負荷が伝熱面熱負荷に比べて問題になることが多い¹⁾ため、限界熱流束よりもサーマル NO_x対策などが問題視される傾向にある。さらに、小型ボイラはその設置条件からより小型・高性能化が要求される宿命にあり、これらの課題に対する一つの答えとして管束燃焼方式が考案・実用化されている。この管束燃焼方式では燃焼室内部にまで水管群を配置することで火炎を水管により直接冷却してサーマル NO_xを低減するとともに、設置スペースの大幅削減を実現している。

この管束燃焼方式を伝熱機構から見た場合、通常ボイラで主機構となる放射熱伝達よりも対流熱伝達が大きな割合を占めており、炉内の流動特性が熱伝達率に大きく影響することとなる。このためバーナ噴流の影響で水管には管周方向にかなり大きな熱流束分布が発生する²⁾うえ、火炎との直接接触もあるため熱流束は容易に高い値を取りうることとなる。一方これら小型ボイラでは自然循環力は弱くまた循環ポンプも設置しないため管当たりの質量速度はかなり低い状態に抑えられ、中・大型の在来形式の燃焼室水壁における非均一加熱問題とは違って特に偏流や非均一加熱が限界熱流束を考える上で重要な因子となってくる。

限界熱流束は沸騰関連機器の性能限界を決める大きな要因でもあることから、多くの研究が報告されている周方向に均一な加熱熱流束場での研究³⁾他に、周方向非均一場での研究もいくつか報告されている⁴⁾。しかし、その多くはダイバータ冷却のような高熱流束

* 原稿受付 2004年4月26日。

^{*1} 正員, 関西大学工学部(☎564-8680 吹田市山手町3-3-35)。^{*2} パブコック日立(株)(☎105-6107 東京都港区浜松町2-4-1)。^{*3} 正員, 京都大学原子炉実験所(☎590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝第西2-1010)。

E-mail: umekawa@kansai-u.ac.jp

熱量を単純に管内面表面積で除して求めたものである。

実測した管外面温度から管内表面温度への換算においても該当位置での肉厚 t_p で構成される円管を近似し二次元円筒座標系での定常熱伝導方程式より求めた。この手法でも、熱伝達率の評価で問題となる飽和温度との差としては最大 5% 以内の誤差で求まることから、後述する熱伝達率の議論ではこの方法で求めた値を用いている。

これより、管周方向で発生する最大熱流束 q_{MAX} と最小熱流束 q_{MIN} の比を求めると $\epsilon=0\text{mm}$ 管で 1.0 (均一加熱), $\epsilon=0.5\text{mm}$ 管で 1.7, $\epsilon=1.0\text{mm}$ 管で 3.0, $\epsilon=1.5\text{mm}$ 管で 7 となる。

実験は質量流束 $G=10\sim 100\text{kg/m}^2\text{s}$, 入口流体温度 $T_i=30, 80^\circ\text{C}$, 系圧力 $P=0.3, 0.4\text{MPa}$ で行った。なお、系圧力は気液分離器での圧力をもって定義している。

3. 実験結果および考察

3・1 差圧特性 図 3 に本実験で得られた差圧値を平均加熱熱流束 q_{AVE} に対してプロットしたものを示す。図中に示した実線はボイド率をドリフトフラックスモデル、摩擦項を Lockhart-Martinelli 法¹⁰⁾で求めて測定区間相当の差圧を算出したものであり、破線は加熱区間のみでの摩擦項、重力項、加速項を個別に求めた値を示している。なお、ドリフト速度、分布パラメータには Mishima-Ishii の流動様式判別にに基づき Ishii の式¹¹⁾を使用している。また、図 4 と 5 には本研究で得られた差圧を均質流モデルと図 3 の手法で求めた値と相関比較したものを示す。図中の破線は均一管ならびに非均一管それぞれのデータと各相関値との差を算術平均した値を示している。

図 3 よりここで対象としている範囲は、主として重力項が支配的な領域で実験を行っていることがわかる。このため、通常ボイド率を高めに評価する均質流モデルは図 4 に見られるように、若干差圧を低めに評価するものと思われる。しかし、差はそれほど大きなものではなく(平均で 9%), 図 4 の均一加熱管のデータ(平均で 25%)に見られるほど顕著な評価誤差とは認識できない。なお、図 4, 5 ならびに相関値から見ると図 3 の手法が均質流モデルよりも若干良い結果を示しているものの両モデルの評価誤差に大きな差は無く、むしろ図 5 を見ると図 3 の手法での評価法では低差圧条件でボイド率を低めに評価しているのではないかと感じられる。また、定性的に見た場合、図 4 の均質流モデルのほうがよい結果を示している。しかし、いずれのモデルでも差圧の上昇に伴い、実験値とよい

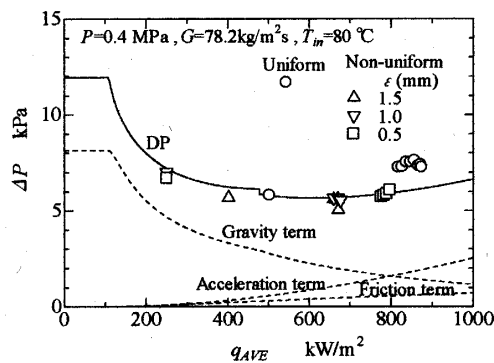


Fig3 Characteristics of pressure difference

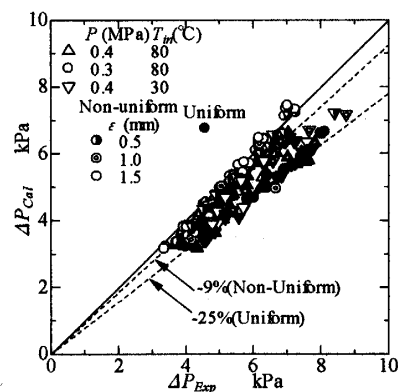


Fig4 Pressure difference (Homogeneous flow model)

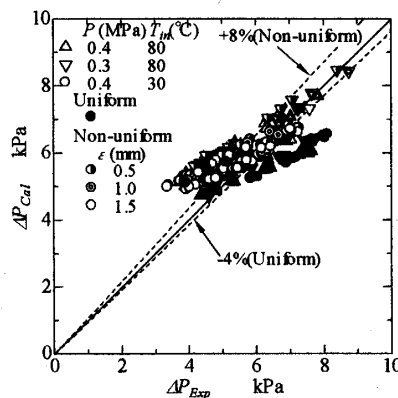


Fig5 Pressure difference (LM & Drift-flux model)

一致を示すようになる。

そもそも管周方向に熱流束分布のある非均一加熱管では、相変化量も周方向で異なり局所的には軸対象性が成り立つとは考えがたい。しかし、テストセクション全体での差圧で見るとこのような局所性はあまり大きく影響せず、管周方向にかなりの熱流束分布を発生させた本実験結果に対してでも平均熱流束で整理した値で実用上問題無く差圧を評価できる。

3・2 伝熱特性 本研究で得られた局所熱伝達率を式(2)の平均熱流束 q_{AVE} で求めた平均熱平衡クオリテ

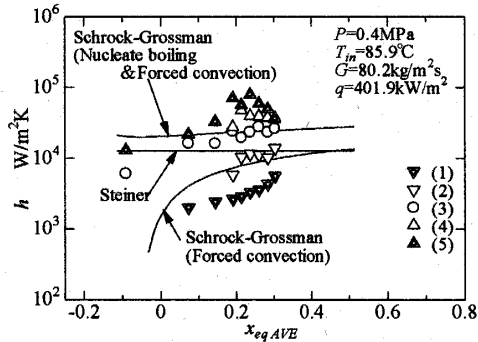


Fig.6 Heat transfer characteristics as a function of Thermodynamic equivalent quality

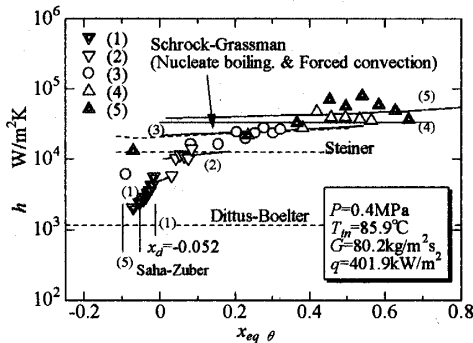


Fig.7 Heat transfer characteristics as a function of Pseudo-thermodynamic equivalent quality

イ $x_{eq,AVE}$ に対してプロットしたものを図6に示す。

$$x_{eq,AVE} = \frac{4q_{AVE}z - C_p \Delta T_{SUB}}{H_{LG}} \quad (2)$$

ここで、 z は入口からの距離、 ΔT_{SUB} は入口サブクール度、 C_p は比熱、 H_{LG} は蒸発潜熱、 D は管内径を示す。

なお、熱伝達率は局所加熱熱流束 q_θ に基づいて実クオリティを算出し⁽²⁾、加熱部入口から実クオリティが0となる地点までは混合平均温度に対して、それ以降は飽和温度に対して定義している。また、凡例の番号は図2の管断面図に記した熱電対位置に対応する。

図中には相関式として Schrock-Grossman の強制対流蒸発域ならびに核沸騰・強制対流蒸発領域の式⁽²⁾、Steiner の相関式⁽²⁾を併記している。しかし、図に見られるように平均熱平衡クオリティに対して整理した場合、管周方向の高熱流束側と低熱流束側でかなり熱伝達率に差があり整理は困難であることがわかる。そこでいささか強引ではあるが、式(2)の平均熱流束 q_{AVE} のかわりに壁温測定箇所での局所熱流束 q_θ を元に計算した熱平衡クオリティに対して熱伝達率を再整理したグラフを図7に示す。これは、各局所熱流束が叩加

された同サイズの均一管を想定した場合の見かけの熱平衡クオリティ $x_{eq,\theta}$ を計算することに相当する。図中には Dittus-Boelter の相関式で求めた液単相の熱伝達率、ならびに図6と同様に Steiner の相関式、Schrock-Grossmann の核沸騰・強制対流蒸発域に対する相関式、Saha-Zuber の沸騰開始点での熱平衡クオリティ ω_{x_d} の4種類の値を平均熱流束に対して求めたものを破線で示している。また、最大・最小の局所熱流束に対して求めたサブクール沸騰開始クオリティならびに、各部における局所熱流束に対して求めた Schrock-Grossmann の相関式を実線で示し、凡例同様に番号で区別している。

本条件では低熱流束側(図中(1))に液単相の強制対流熱伝達から核沸騰への移行に相当すると考えられる熱伝達率の増加が見られるが、そこから推定される沸騰開始点は Saha-Zuber のサブクール沸騰開始クオリティよりかなり低クオリティ側で発生している。しかし、熱伝達率に関しては先の見かけの熱平衡クオリティ、つまりは局所の熱流束による計算値が良い一致を示している。

本実験系のような場で周方向に異なった状態が存在する場合、場が均一化する方向に周方向の流体移動が発生することが想像される。しかし、見かけの熱平衡クオリティによる整理が成り立つことは周方向の流体移動の影響が弱いことを意味する。蒸気相まで含めてこの取り扱いが成り立つとすることには無理があるが、この範囲では伝熱特性から推察して核沸騰支配になっており液膜は比較的厚い状態を保っているものと考えられる。つまり、液膜再配分の影響が顕著には現れない状態となっているために、本整理が適用できたものとする。

3・3 限界熱流束特性 図8に本系で得られた限界熱流束を質量流束に対してプロットしたものを示す。なお、本系ではすべて温度上昇は高熱流束側で発生したため高熱流束側の局所熱流束をプロットすれば十分であるが比較の意味もあり、低質量流束側ならびに平均熱流束の値も同時にプロットしている。図中には熱平衡クオリティ一定条件、甲藤のL領域の相関値⁽²⁾を併記している。

図に示すように、平均熱流束換算(q_{AVE})で評価した場合、偏心が大きくなると限界熱流束が低下する形となる。しかし、実際に温度逸走が発生する高熱流束側の熱流束(q_{MAX})で評価すると逆に偏心度の増加に伴い限界熱流束は増加することになる。つまり先の伝熱で主対象となった液膜厚さが十分に確保できている状態とは異なり、液膜が消失するドライアウト条件近傍で

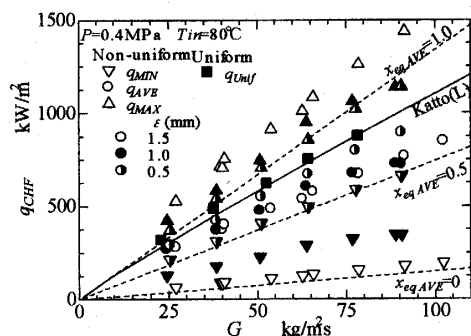


Fig.8 CHF characteristics

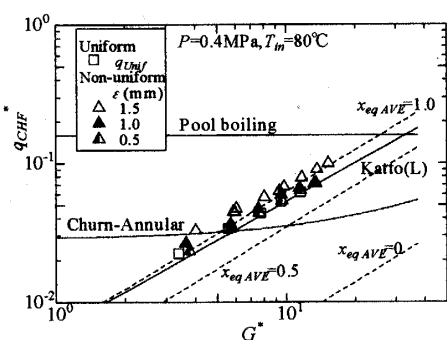


Fig.9 CHF characteristics (non-dimensional)

は液膜の再配分の影響が無視できないものとなっていると考えられる。この詳細については後述する。

次に、Mishima の手法に従い無次元化⁽⁹⁾したものを図9に示す。なお、ここでは最高熱流束(q_{MAX})のみをプロットして示す。図中には図8で示した条件のほか、プールの沸騰熱伝達の値ならびに、Churn-Annular遷移の条件を併記している。小林らは大気圧下の低質量流束条件で半周加熱を行った結果この様式遷移条件と限界熱流束が一致すると報告しているが⁽⁹⁾、本系では当てはまらず、均一加熱管での条件が平行移動したような形をとっている。また、成合らは限界熱流束発生位置よりも上流部で上昇したクオリティ条件をもとに高熱流束側条件で計算した値が DNB 条件を満足した時に非均一管での限界熱流束が発生するとしているが⁽⁶⁾、低流束条件であるうえ高クオリティ域で CHF に至っている本系に DNB を想定した相関式の適応はできない。本研究に対しては Butterworth が示した液膜のドライアウト的なアプローチ⁽¹⁰⁾がより自然であると考えられる。以下簡単に Butterworth の示した手法について述べる。

液膜の再配分を誘発する要素としてはさまざまな因子が考えられるが、Butterworth は周方向に非均一加熱がある場合に発生する周方向の液膜再配分量(M)を単純に軸方向の液膜流量(M_A)の周方向勾配に比例す

ると仮定し、液膜の再配分に関する係数 ζ (Spreading coefficient)を用いて次式で表している。

$$M_C = -\frac{\zeta}{R} \frac{dM_A}{d\theta} \quad (3)$$

ここで R は管内半径をしめす。

この液膜再配分量 M_C ならびに、蒸発、エントレイメントの発生と付着を考慮して求まる液膜の変化量をモデル化し、さらに均一加熱管の条件で無次元化ならびに単純化することで最終的に次式を得ている。

$$\frac{q_{AVE}}{q_{Unif}} = \frac{1}{1 + \frac{4R^2}{\zeta L} \alpha} \quad (4)$$

ここで、 q_{Unif} は均一加熱管の限界熱流束を、 L はテストセクション長さを示す。また、 α は次式で定義される熱流束の偏りを示すパラメータであり熱流束分布は平均熱流束 q_{AVE} に対し次式で表現されている。

$$q_\theta = q_{AVE} (1 + \alpha \cos\theta) \quad (5)$$

本実験での熱流束分布形状は式(5)とは厳密には異なる。先に触れた比較的实验条件に近い小林らの結果⁽⁹⁾との相違にも見られるように、極端に熱流束分布形状が異なる場合は限界熱流束の発生機構が変化することも考えられる。しかし Butterworth も実験データとの比較を行うに際して特に熱流束分布形状についての配慮を行っていないこと、ならびに本熱流束分布は式(5)にかなり近いことから、式(5)を最大熱流束と平均熱流束の関係に置き換えた次式を用いて α を計算した。

$$\alpha = \frac{q_{MAX}}{q_{AVE}} - 1 \quad (6)$$

Butterworth は $G=2000\text{kg/m}^2\text{s}$, $P=5\sim 10\text{MPa}$ の実験データをもとに $\zeta=0.9\text{mm}$ を推奨している。ただし比較データ数も少なく、高質量流束条件ですら Chojnowski が質量流束に対する依存性を示唆しているように必ずしも最適値とはなっていない⁽⁹⁾。

本研究で得られた結果を上記の手法に基づいて整理したものが図10である。図では、均一加熱管の限界熱流束として甲藤の L 領域の相関式を用いている。また、Butterworth の推奨する $\zeta=0.9\text{mm}$ の値を用いて計算した値を図中に併記している。 ζ の物理的な

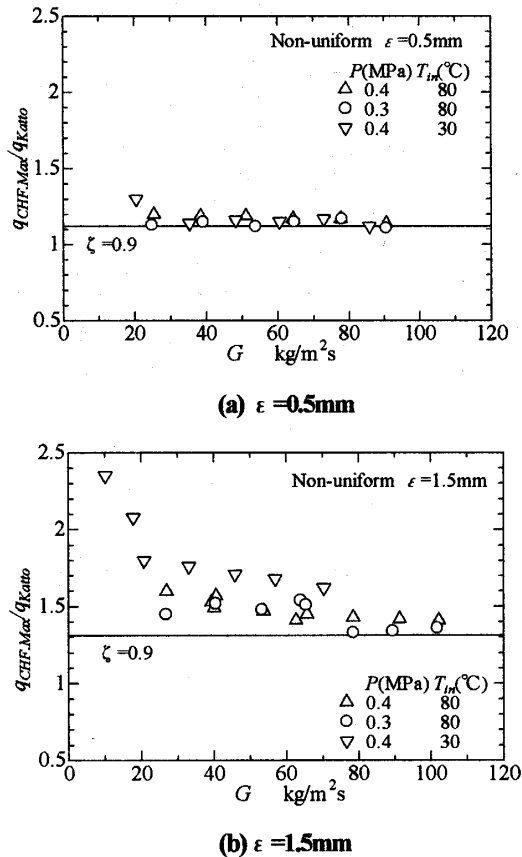


Fig.10 Comparison with Butterworth's model

意味は今後検討が必要となるものの、図に見られるように本実験範囲は Butterworth が想定した条件よりかなり低圧・低質量流束条件であるにもかかわらず、(a)では良く一致し、(b)でも質量流束の増加に伴い予測値に漸近していく傾向が見られる。しかしこれらの傾向を細かく見ると、特に $G=60\text{kg/m}^2\text{s}$ 以下と質量流束が低い場合、ならびに流入温度が低下すると液膜の再配分強度は Butterworth が推奨したものより強くなる。この傾向は(a)の $\varepsilon=0.5\text{mm}$ 管よりも加熱熱流束分布の偏りが大きい(b)の $\varepsilon=1.5\text{mm}$ 管で顕著に見られる。

モデル的には、液膜最配分係数 ζ が一定値であっても軸方向液膜流量の軸方向減少割合が変化することで質量流束が液膜再配分量に与える影響が陽的に一部表現できるものと考えられるが、式(4)の形ではこの特性は現わせない。ここでは、液膜最配分係数 ζ 一定の条件で限界熱流束に質量流束が与える影響をどの程度表現できるのかを確認するとともに、今後のより詳細なパラメータ検討の基盤を作るために Butterworth の手法を差分近似を用いて検討する。

計算では管を周方向に 36 セル、軸方向を 500 セルに分割し差分近似をおこなって Butterworth の液膜再配分を組み込んだ。なお、液滴のエントレイメント、デポジット等の評価も必要であると考えられ、たとえ

ば Okawa²⁴⁾が環状流の液膜ドライアウト評価に用いているのと同様の手法を適用することも考えられるが、同手法で用いられているエントレイメントの発生条件をそのまま本実験条件に当てはめた場合、質量流束が低いために液滴飛散条件を満足できない。このため、結果としてクオリティが1の条件でドライアウトが発生することになってしまうが、実際には図8で示したように均一加熱管でもクオリティ1より低い条件で限界熱流束へと至っている。つまり、発生条件もしくは他の要因を検討する必要があることになる。しかし、ここでは単純化のために均一加熱管で限界熱流束特性をよく表現している甲藤の相関式が非均一管でも限界熱流束発生判定条件として使用できるものと仮定することで、エントレイメントそのものに関する議論は避ける。なお、限界熱流束の計算は、先の見かけの熱平衡クオリティの算出と同様に、判定対象セルを流れる流量を全周分に換算(ここでは36倍)することで対象セルの条件で構成される均一管を仮想し、そこで求まる質量流束にたいして甲藤の相関式を用いて限界熱流束を求めた。なお、判定で使用する質量流束は次式のように、入口で等分割した質量速度(M_0)に軸方向に流動する間に流入出した液膜再配分量(M_{C_i})を加えて求めた質量速度(M_{CAL})を用いて計算した(ここでは $n=36$)。

$$M_{CAL,n} = M_0 + \sum_{i=0}^n (M_{C_i}) \quad (7)$$

つまり、ドライアウト発生位置までに流入出した液膜再配分量が当初より該当セルにあったとして均一加熱管を想定し限界熱流束を求めたことになる。なお、ここでは単純に質量速度の和を求めたため、流入出てくる液膜の条件が同じであることを仮定していることになる。しかし、沸騰開始後液膜はほぼ飽和状態となりエンタルピー的には等しいと考えられることから、

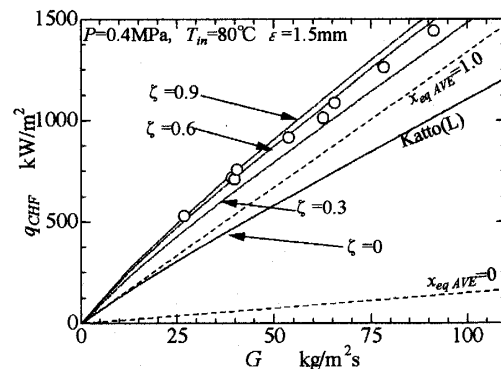


Fig.11 Comparison with calculation results

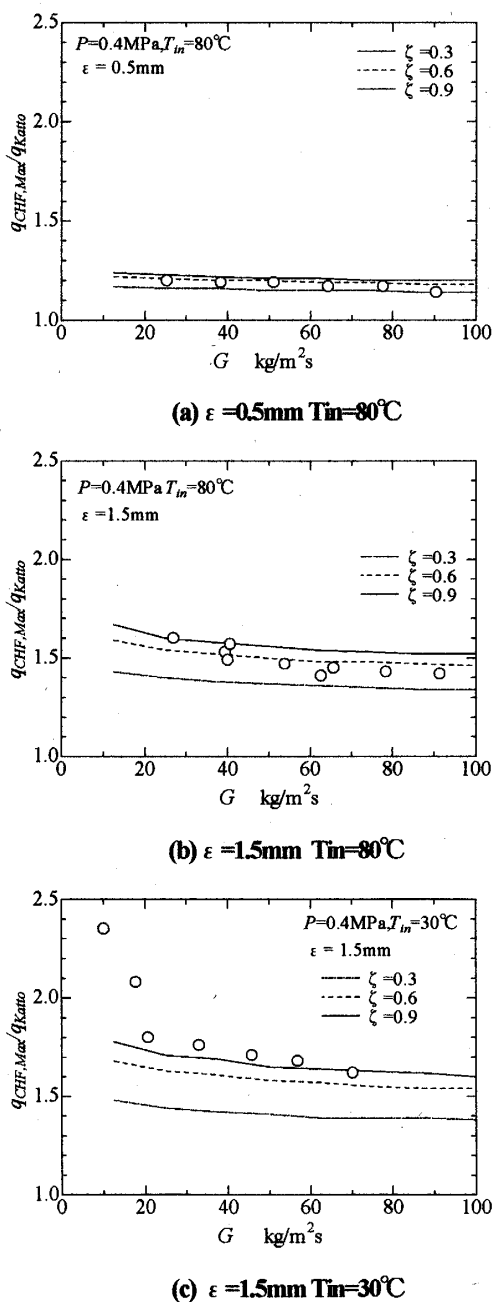


Fig.12 Influence of mass-flux on re-distribution

この取り扱いの影響は小さいものと考えている。また、この仮定では蒸気としての再配分は一切考慮されないことになるが、液膜が大きく移動しない限りは特に問題にならないものと考え議論を進める。

以上の単純化したモデルを用いて計算した値を示したのが図 11 であり、計算では液膜再配分係数 ζ を 0 ~ 0.9mm の範囲で変化させている。なお、ここでは実際に限界熱流束が発生する最大熱流束側のデータのみを示している。計算結果で $\zeta = 0mm$ の結果が甲藤の L 領域の相関式と一致するのは再配分が全く発生しないと仮定したことになるからであり、 ζ を大きく

設定するに従って限界熱流束は増加する。これを先の図 10 と同様に均一加熱条件として甲藤の L 領域の相関値を用いてその計算値との比で示したものが図 12 である。Butterworth のモデルを差分近似で表現することで質量流束の影響が現れ、実験結果の傾向に近い結果が得られていることがわかる。しかし、質量流束の影響をより精度よく予測するには、液膜再配分機構そのものに関する検討がさらに必要であると思われる。また、図 12(c) の $G=20kg/m^2s$ 以下の結果を式(1)で換算すると最大熱流束側 q_{MAX} のみではなく平均熱流束 q_{AVE} で求めた限界熱流束も均一管の限界熱流束の値を上回ることになり、このような極端に質量流束が低い条件については先の液膜の再配分機構に加えて、ドライアウト構造も含めた検討が必要と考えられる。

4. 結 論

偏心流路を有する通電加熱管を作成することで周方向非均一加熱条件を再現し、低圧・低質量流束条件下での実験を行い次の結論を得た。

1. 周方向非均一加熱管においても、平均熱流束を基に推算することで、均一加熱管と同様の手法で差圧特性は、実用上問題なく予測が可能である。
2. 周方向非均一加熱管に対して、平均熱平衡クオリティで熱伝達率を整理することは困難であるが、見かけの熱平衡クオリティを導入することで、均一加熱管と同様の手法による予測が可能となる。
3. 本系で発生する限界熱流束は Butterworth のモデルで説明が可能である。また、Butterworth が高圧・高質量流束下で求めた液膜再配分係数 ζ は本系の条件でも実用上適用可能であると考えられる。しかし、質量流束、ならびに入口温度が低下するに従い液膜の再配分強度は Butterworth の奨励した値より強くなる傾向にある。
4. Butterworth のモデルを差分近似で表現することで液膜再配分係数 ζ が一定でも、再配分の影響が質量流束により変化することを示した。しかし、本手法での表現は特に極端な低質量流束条件では十分といえず、より詳細な検討が必要であると考ええる。

謝 辞 本研究は平成 14 年度関西大学学術助成基金(共同研究)ならびに平成 14 年度京都大学原子炉実験所共同利用研究(14007)によるものであることを記し感謝の意を表す。実験に際しては当時関西大学大学院学生の田中秀和氏ならびに関西大学学生の中尾茂樹氏に多大な協力をいただいたことを記し心より感謝する。

また、(株)ヒラカワガイダムには多大な援助をいただいたことを記し謝意を表す。

参考文献

- (1) Nishikawa, E., *Steam Power Engineering*, Ishigai, S.(ed), (1999), 120, Cambridge University Press, New York.
- (2) 松本亮介, 新谷喜知, 岡田真紀, 今堀敬三, 大西崇之, 石原勲, 小澤守, ボイラ火炉内の管群周りのフローパターン, 可視化情報学会論文集, 22-2(2002), 15-22.
- (3) Schipkov, YU.N., Effect of Nonuniform Heat Transfer, Heat Transfer Crisis and Tube Deposits on Boiler Tube Performance, *Heat Transfer Soviet Research*, 22-4(1990), 474-489.
- (4) 小林利行, 三島嘉一郎, 低圧下における半周加熱円管内強制流動沸騰熱伝達と限界熱流束, 機論 B, 66-648(2000), 2150-2156.
- (5) Araki, M., Ogawa, M., Kumugi, T., Satoh, H. and Suzuki, S., Experiments on Heat Transfer of Smooth and Swirl Tubes under One-Sided Heating Conditions, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 39-14(1996), 3045-3055.
- (6) 成合英樹, 稲坂富士夫, 石川厚史, 木下秀孝, 非均一加熱条件下のサブクール沸騰限界熱流束に対するねじりテープの影響, 機論 B, 60-580(1994), 4215-4221.
- (7) Inasaka, F. and Nariai, H., Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Swirl Tubes Relevant to High Heat Flux Components, *Fusion Technology*, 29(1996), 487-498.
- (8) Celata, C.P., Curno, M., Mariani, A., and Zummo, G., The Prediction of the Critical Heat Flux in Water Subcooled Flow Boiling, *Int. Heat Mass Transf.*, 38-6(1995), 1111-1119.
- (9) Gaspari G.P. and Cattadori, G., Subcooled Flow Boiling Burnout in Tubes with and without Turbulence Promoters, *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 8(1994), 28-34.
- (10) Chan, A.L., Baughn, J.W. and Hoffman, M.A., Nonuniform Circumferential Heat Flux Experiments in a Circular Tube, 75-WA/HT-52, ASME(1975).
- (11) Omatskii, A.P. and Vinyarskii, L.S., Heat Transfer Crisis in a Force Flow of Underheated Water in Small-Bore Tubes, *High Temperature*, 3-3(1965), 400-406.
- (12) Komendantov, A.S., Kuzma-Kichta, Y.A., Vasileva, L.T., and Ovodkov, A.A., Experimental Investigation of Heat Transfer and Burnout in Condition of Nonuniform Megawatt Heat Fluxes, *Experimental Heat Transf.*, 4-3(1991), 281-288.
- (13) Boscary, J., Araki, M., Schlosser, J., Akiba, M. and Escoubiac, F., Dimensional Analysis of Critical Heat Flux in Subcooled Water Flow under One-Side Heating Condition for Fusion Application, *Fusion Eng. Des.*, 43(1998), 147-171.
- (14) Divavin, B., Tanchuk, V., Shrubok, A., Watson, R. and Gonzalez, J., An Experimental and Numerical Investigation of Post-CHF Heat Transfer for One-Side Heat Load with Highly Sub-Cooled Flow Boiling, *Fusion Eng. Des.*, 31(1996), 189-200.
- (15) Leontiev A.I., Mostinsky, I.L., Polonsky, V.S., Stynkovich, M.A. and Chemika, I.M., Experimental Investigation of the Critical Heat Flux in Horizontal Channels with Circumferentially Variable Heating, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 24-5(1981), 821-828.
- (16) Chojnowski, B. and Wilson, P.W., Critical Heat Flux for Large Diameter Steam Generating Tubes with Circumferentially Variable and Uniform Heating, *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, IV, 260-264(1974).
- (17) Butterworth, D., A Model for Predicting Dryout in a Tube with a Circumferential Variation in Heat Flux, *AERE-M2436*(1971).
- (18) 浅尾芳久, 小澤守, LN₂ 沸騰二相流の流動様式と熱伝達, 機論 B, 57-537(1991), 1813-1818.
- (19) Mishima K, Boiling Burnout at Low Flow Rate and Low Pressure Condition, Ph.D. Thesis, Kyoto Univ. (1984).
- (20) Saha, P. and Zuber, N., Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in Subcooled Boiling, *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, 4, 175-179(1974).
- (21) Schrock, V.E. and Grossman, L.M., Forced-Convection Boiling in Tubes, *Nuc. Sci. Eng.*, 12(1962)474-481.
- (22) 高松・荻野監修, 熱計算ハンドブック(1988), 日本能率協会または VDI-Wärmeatlas, Gc1-Gc5, VDI-Verlag.
- (23) Katto, Y., Critical Heat Flux, *Advances in Heat Transfer*, 17(1985), 2-64, Academic Press.
- (24) Okawa, T., Kitahara, T., Yoshida, K., Matsumoto, T. and Kataoka, I., New Entrainment Correlation in Annular Two-Phase Flow Applicable to Wide Range of Flow Condition, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45(2002), 87-98.