液体窒素蒸発器の不安定流動*

(第2報, 並列垂直管の核沸騰域と膜沸騰域)

赤川 浩爾^{*1}, 竹中 信幸^{*2}
藤井 照重^{*2}, 奥 康徳^{*3}Flow Instabilities in a Liquid Nitrogen Evaporator
(2nd Report, Nucleate Boiling and Film Boiling Regions
in a Parallel Vertical Tube)Koji AKAGAWA, Nobuyuki TAKENAKA,
Terushige FUJII, and Yasunori OKU

Flow instabilities in a liquid nitrogen evaporator consisting of parallel vertical channels are studied experimentally and analytically both with nucleate boiling in the inlet section, the flow pattern of which transfers from bubbly flow to annular flow and with film boiling, from inverted annular flow to dispersed flow. As the channels are heated by electrical current, i.e., the wall heat flux is constant, both flow pattern transitions are obtained depending on the initial wall temperature for the same experimental conditions of the heat flux, the mass flux and the exit pressure. Density wave oscillations out of phase in the parallel channels are observed in both flow patterns and compared. Experimental results indicate that the flow with film boiling at the inlet section is stable for higher exit quality and its periods of oscillation are shorter than those with nucleate boiling at the inlet section. Linear stability analysis for the density wave oscillation predicts well the experimental stability criteria with nucleate boiling at the inlet section by using the previous drift flux models and those with film boiling by using a drift flux model formulated by analytical results obtained with a turbulent boundary layer theory for the inverted annular flow.

Key Words: Liquid Nitrogen, Cryogenic Evaporator, Flow Instability, Density Wave Oscillation, Linear Stability Analysis, Drift Flux Model, Nucleate Boiling, Film Boiling

1. 緒 言

沸騰二相流の不安定流動は、従来から原子炉の蒸気発生器や各種ボイラの設計に関して多くの研究が行われ、種々の安定解析法が提案されている。低温流体機器の容器、配管内では、その大部分で沸騰が生じる可能性があり、機器全体の特性として不安定流動特性が重要であるが、十分な基礎研究が行われているとは言いがたい。前報⁽¹⁾では、並列らせん管の液体窒素蒸発器において、常温流体の蒸発管と同様にサブクール状態で流入し、核沸騰を生じ、気泡流から環状流に至る管内流(本研究では核沸騰域と呼ぶ)の流動不安定現象の実験と解析を行い、物性値の異なる低温流体への従来の解析法の適用を検討し従来の解析法で、液体窒素蒸発器の安定限界がほぼ予測できることを報告した。前報で指摘したように低温流体では膜沸騰を生じることが多く、高温の流路に流入する場合には、流路入口で膜沸騰を生じ、逆環状流から噴霧流に至る管内流(本

研究では膜沸騰域と呼ぶ)を形成することが多く、このような伝熱・流動状態における不安定現象については、実機での検討⁽²⁾は報告されているものの、基礎研究は少ない。

本報では、並列管の液体窒素蒸発器で、同一装置、同一実験条件で核沸騰域、膜沸騰域のおのの不安定流動の実験を行い、伝熱・流動形態の違いによる不安定流動の相違を明らかにし、前報と同様の線形安定性解析を核沸騰域、膜沸騰域のおののについて行い、実験結果と比較したので報告する。前報の解析では、ドリフトフラックスモデルを用いているが、逆環状流に対するモデルは著者らの知る限り報告されておらず、著者ら⁽³⁾がフロンを対象に行った乱流境界層理論による解析を液体窒素に適用し、解析結果を整理してドリフトフラックス式を得て、安定性解析を行った。

2. 実験装置・実験方法

実験装置は試験部以外は前報⁽¹⁾の図1と同様であるが、試験部外での沸騰の影響を避けるために、過冷器図1③手前の配管を短くし、かつ過冷器冷却用の液体窒素で配管を冷却することにより、前報で報告した試験部外部の沸騰による同位相の脈動を抑制した。

* 昭和63年6月3日 日本伝熱シンポジウムにおいて講演。
原稿受付 昭和63年7月18日。

^{*1} 正員、龍谷大学理工学部 (〒520-21 大津市瀬田大江町横谷)。

^{*2} 正員、神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

^{*3} 准員、(株)本田技術研究所 (〒351-01 和光市中央区)。

試験部は内径 6 mm, 肉厚 1 mm, 長さ 800 mm, の SUS 304 製垂直管であり, 交流で直接通電加熱する。膜沸騰域の実験では各管加熱部入口にホットパッチを設け, クエンチフロントを加熱部入口に固定する。直接通電加熱により, 壁面熱流束は一定であるので初期壁温の設定でプール沸騰と同様に同一実験条件で加熱部入口に核沸騰, 膜沸騰の両方を形成させることが可能である。

実験方法は核沸騰域では前報と同様であり, 膜沸騰域では, ホットパッチと試験部を加熱した後, 液体窒素を注入し, 安定な膜沸騰状態を形成して実験を行った。ホットパッチの熱入力試験部熱入力のたかだか数%であるので無視した。

実験条件は, 前報と同様に, 出口圧力に対し, 入口サブクール度が決まり, 出口圧力・入口サブクール度, 4 bar・15 K, 6 bar・20 K, 8 bar・25 K に対し, 最大熱流束 $q=85\text{ kW/m}^2$, 最大質量流速 $350\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ である。

3. 安定解析法と膜沸騰域のドリフトフラックス式

解析方法は前報と同様のドリフトフラックスモデルを用いた線形安定性解析である。核沸騰域については前報と同じく Zuber-Findly によるモデルを用いた。

膜沸騰域については, ドリフトフラックスモデルは著者らの知る限り報告されておらず, 著者ら⁽³⁾がフレオンを対象に行った逆環状流の乱流境界層モデルによる解析を液体窒素に適用し, 実験条件範囲内の解析結果を再整理して逆環状流のドリフトフラックス式を得た。解析結果を体積平均速度 J と気体速度 u_g で整理した結果を図 1 に示す。解析結果は出口圧力, 質量流速の影響を受けるが, 近似的に直線に回帰でき, ディストリビューションパラメータ $C=2.4$, ドリフト速度 $v=0.309$ と決定した。また摩擦損失については核・膜いずれの場合にも前報式(6)の Chisholm の式を用いた。

出入口絞り係数 K_{in} , K_{ex} は空気を用いた予備実験により $K_{in}=3.60$, $K_{ex}=2.19$ と決定した。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 不安定流動 ほぼ同一条件での核沸騰域, 膜沸騰域の軸方向壁温分布の例を図 2 に示す。膜沸騰の壁面過熱度は, 核沸騰の場合よりも非常に高く, 壁面全体が乾いていることを示しており, 両者の伝熱・流動形態が明らかに異なっていることを示している。以下に両者の不安定流動特性の比較を行う。

本実験条件で観察された熱線による各管の入口流

量, 出口ヘッダ圧力, ヘッダ間差圧およびオリフィス差圧による全流量の変動記録の例を, 核沸騰域について図 3(a), (b)に膜沸騰域について図 4(a), (b)に示す。実験条件は図中に示されている。図 3, 4(a)は安定流動の例であり流量, 圧力ともに変動は小さい。図 3, 4(b)は前報の密度波振動と同様な不安定流動が核・膜いずれの沸騰域でも生じ, 各管の入口流量変動波形は大小 2 山の規則的なもので逆位相であり, 並列管で流量は交互に変動していることが解る。核・膜いずれの沸騰域でも, 各管で同位相の不安定流動が限られた領域で観察されたが, これは前報と同様に試験部外の沸騰に起因する不安定現象であるので本報では議論しないことにする。

4.2 安定伴別図 図 3, 4(b)に示した並列管で逆位相の不安定流動を生じる条件を出口圧力 4, 6, 8 bar について, 熱流束 q と質量流速 G に対する安定判別図を核沸騰域について図 5(a)~(c)に, 膜沸騰域について図 6(a)~(c)に示す。図中の実線は出口熱力学的平衡クオリティ x_{ex} 一定を示している。安定限界はいずれの場合にもほぼ等出口クオリティ線上に

図 1 逆環状流のドリフトフラックスモデル

図 2 軸方向壁温分布

あり、出口圧力が高いほうが高クオリティ側にある。核沸騰域では $x_{ex}=0.1$ 前後、膜沸騰域では $x_{ex}=0.3-0.6$ 程度であり、膜沸騰域のほうが核沸騰域より、より高出口クオリティまで安定であることがわかる。

4.3 脈動周期と圧力損失 逆位相の脈動周期 T は、大小2山を一周期とした。周期は核・膜いずれの沸騰領域でも入口流速の影響は小さく、熱流束の増加に対して減少する傾向を示すので、比較のため、熱流束に対する図7の線図で示す。脈動周期は膜沸騰域のほうが核沸騰域よりも短く、いずれの場合も出口圧力が高いほど長くなっている。図8, 9に脈動周期 T と滞留時間の関係を示す。滞留時間は均質流モデルを仮定して計算し、膜沸騰域では著者ら⁽³⁾がフレオンを対象に行った解析と同様に熱的非平衡を考慮して実クオリ

ティを計算して算出した。両者はいずれの場合にもほぼ一致し、この不安定流動が圧力損失の正こう配域で生じることを確認している。核・膜両沸騰域での密度波振動であることがわかる。また膜沸騰域では、管入口に液単相部がなく、入口から熱的非平衡二相流となり、平均速度が速くなって滞留時間が短くなることがわかった。

核沸騰域で均質流モデル、膜沸騰域では前述のドリフトフラックスモデルと Chisholm の摩擦損失の式と出入口圧力損失をもとに計算したヘッド間差圧の解析結果と実験値の比較を核沸騰域については図10、膜沸騰域では図11に示す。核沸騰域では、均質流、スラグ流、チャン流の各モデルで計算を行い、均質流による結果が最もよく実験結果を予測したのでこれを用い

た。膜沸騰域では解析結果は、実験結果をやや大きく予測するが、これは逆環状流が出口付近では逆スラグ、噴霧流に遷移し、位置損失を過大に予測しているためと考えられる。

4.4 安定解析結果と実験結果の比較 前述の線形安定性解析による安定限界の予測と実験による安定判別図との比較の例を出口圧力8 bar に対して、核沸騰域、膜沸騰域をおのおの図12, 13に示す。核沸騰域では均質流モデルと前報で比較した Zuber-Findly によるドリフトフラックスモデルのスラグ流、チャン流についての解析結果を示している。いずれの場合も解析

(a) 安定

(b) 逆位相脈動

図3 流動変動の記録例 核沸騰域

(a) 安定

(b) 逆位相脈動

図4 流動変動の記録例 膜沸騰域

図7 脈動周期の比較

結果は図中でほぼ直線であり、前報と同様に安定限界は、ほぼ等出口コリティ線上にあり、実験結果を定性的によく予測している。膜沸騰域では、乱流境界層

モデルにより得られた逆環状流のドリフトフラックスモデルを用いた安定限界の予測は実験結果をよく予測している。また核沸騰域では均質流モデルが実験結果

(a) 出口圧力 4 bar

(a) 出口圧力 4 bar

(b) 出口圧力 6 bar

(b) 出口圧力 6 bar

(c) 出口圧力 8 bar

(c) 出口圧力 8 bar

図 5 安定判別図 核沸騰域

図 6 安定判別図 膜沸騰域

図 8 脈動周期と滞留時間 核沸騰域

図 9 脈動周期と滞留時間 膜沸騰域

図 10 ヘッド間差圧の実験結果と解析結果 核沸騰域

図 11 ヘッド間差圧の実験結果と解析結果 膜沸騰域

図 12 安定判別図と解析による安定限界の予測
核沸騰域 図 13 安定判別図と解析による安定限界の予測
膜沸騰域

をよく予測している。本解析結果では、前報の解析結果を含め、均質流、スラグ流、チャーン流、逆環状流の順に、安定限界が高出口クオリティ側に移動しており、このことはスリップの大きな流れほど安定であることを示しており、膜沸騰域のほうが核沸騰域よりもより高出口クオリティまで安定であることは、逆環状流がスリップの大きな流れであることに対応している。

5. 結 論

並列二本垂直管からなる液体窒素蒸発器の不安定流動の実験と解析を、気泡流から環状流に遷移する管入口で核沸騰域、逆環状流から噴霧流に遷移する管入口で膜沸騰域で行い、以下の結論を得た。

- (1) いずれの沸騰域でも並列管で逆位相の不安定流動を観察し、密度波振動であることを確認した。
- (2) 不安定周期は膜沸騰域のほうが核沸騰域より短く、このことは逆環状流が熱的非平衡な二相流であることに起因する。

(3) 密度波振動の安定限界は、いずれの沸騰域に対しても、ほぼ等出口クオリティ線上にあり、膜沸騰域のほうが核沸騰域よりも高クオリティ側である。

(4) 均質流モデルおよびドリフトフラックスモデルによる線形安定性解析は、いずれの沸騰域の安定限界をよく予測し、膜沸騰域のほうが安定であることは、逆環状流がスリップの大きな流れであることにより説明される。

本研究を行うに当たり、多大な助言をいただいた神戸大学工学部 小沢助教授と、多大な援助をいただいた日本酸素株式会社に感謝する。本研究は文部省科学研究費昭和 58 年度一般研究(B)の補助を受けており、ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 赤川・ほか 4 名 本論文集 2465 ページ,
- (2) 森, 第 18 回日本機械学会関西支部気液二相流懇話会資料, No.18-2(1983).
- (3) 赤川・ほか 6 名, 機講論, No.874-2, 723(1987), 242.

討 論

〔質問〕 福田 研二〔九州大学工学部〕

巧妙な実験により核沸騰、膜沸騰の違いによる不安定流動への影響について知見を得られたことに敬意を表す。以下の件についてお聞きしたい。

- (1) 不安定の原因となる主圧力損失項は何か。
- (2) 圧力 4, 6 bar の安定現界の結果について実験と解析との比較をされたか。
- (3) 図 11 では圧力損失の予測が実際よりも 30 % 高めにしているが、それが安定限界の予測(図 13)にどの程度影響していると考えられるか。

〔回答〕 (1) 位置損失項が支配的である。

(2) 出口圧力 4, 6 bar についても同様の解析を行い、8 bar の場合と同様に実験結果をよく予測することを確認している。

(3) 圧力損失は位置損失項が支配的であり、その予測はドリフトフラックスモデルで行っている。本解析では乱流境界層の解析結果から得られた C , ν の値を用いているが、試みにこれらの値を変化させると、圧力損失の予測はあまり改善されず、安定限界の予測も、実験結果に一致しなくなることを確認している。