沸騰伝熱面温度の先行制御に関する研究*

(第1報, 基礎検討)

中村 昭三**, 黒田 倫夫***, 松嶋 徳紀**

Feedforward Temperature Control of Heating Surfaces for Boiling Experiment (1st Report, Basic Study)

by Shozo NAKAMURA, Michio KURODA, and Tokunori MATSUSHIMA

The purpose of this investigation is to implement a feedforward control system for controlling the heating surface temperature of heater blocks in all three boiling regions, particularly in the transition boiling region. This technique features an electrical heater output which is determined in advance according to the estimated steady state heat flux at the heating surface and which corrects the temperature deviation by feedback control according to the temperature signal. Test results show that this control technique can control the heating surface temperature fairly well in the transition boiling region.

Key Words: Transition Boiling, Nucleate Boiling, Film Boiling, Feedforward Temperature Control

1. 緒 言

プール沸騰の3領域、核沸騰、遷移沸騰および膜沸騰のうち遷移沸騰領域では伝熱面温度と媒体飽和温度との温度差に対して熱流束が負こう配となるため単純な電気加熱のような熱流束制御形の熱源では伝熱面の表面温度を一定に保つことは不可能である。このため、遷移沸騰領域で伝熱面温度を一定に保つ方法として、従来より、(1)飽和蒸気により加熱する方法⁽¹⁾、や(2)伝熱面下部を空気などで冷却する方法⁽²⁾、がとられている。しかし、(1)においては蒸気圧が過大になることがある、(2)はエネルギー経済上好ましくない、などの理由で採用できない場合がある。なお、電気加熱の細線においてフィードバック制御により伝熱面温度を制御した報告⁽³⁾はあるが、熱容量の大きな伝熱面ブロックについて制御した例は見当たらない。

そこで、本研究は電気加熱の伝熱面ブロックを使用して、遷移沸騰を含む全ての沸騰領域において伝熱面温度を一定に制御できる制御方式を検討することを目的としたものである。すなわち、遷移沸騰領域におい

て伝熱面温度を一定に制御できない原因が伝熱面熱負荷と電気加熱による入熱量の不均衡によるものであると考え、伝熱面熱負荷を先行信号として電気加熱熱量を先行的に制御し、温度偏差に基づくフィードバック制御と併用して制御する伝熱面温度先行制御方式について検討するものである。

本報では、本制御方式による解析的検討結果と実験的検討結果について述べる。

2. 制 御 方 式

本研究にて提案する制御方式は、緒言で述べたとおり伝熱面熱負荷と電気加熱による入熱量の不均衡をなくするため伝熱面熱負荷を先行信号として電気加熱熱量を先行的に制御し、温度偏差に基づくフィードバック制御と併用して制御する伝熱面温度先行制御方式である。この制御方式の概念を図1に示す。すなわち、伝熱面温度 T に対応して伝熱面熱負荷を予測するための推定沸騰曲線を組み込み、この推定熱負荷 Q_F と電気加熱熱量 Q_E との差を不完全微分し、これを先行信号 Q_F として、伝熱面温度 T と設定温度 T_s との差を比例・積分(比例帯 P_a 、積分時間 T_i)した信号に先行的に加算する先行制御方式である。なお、推定沸騰曲線はまず最初にすでに発表されている種々の沸騰曲線よ

* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年10月7日。

** 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒317 日立市幸町3-1-1)。

*** 正員、(株)日立製作所日立工場。

り適切なものを選定し、その後、本研究で用いた実験装置により得られたデータをベースに修正する方法で決定する。ここで、この先行制御方式で特に考慮したことは電気加熱熱量 Q_E 自体の変化にはすぐに先行制御ループが追従しないようにするため、時定数の大きな1次遅れ特性（以下、この時定数を熱負荷偏差時定数 $T_{c,q}$ という）を介したことである。また、推定熱負荷 Q_F と電気加熱熱量との偏差を不完全微分（以下、この時定数を不完全微分時定数 $T_{c,d}$ という）することにより熱量の偏差が変化した時にのみ非常に早く先行信号 Q_F を働かし、安定状態に近づくにつれて先行信号 Q_F が零となるようにしたことである。

3. 理論的検討

2章に述べた伝熱面温度先行制御方式の有効性を確認するため、簡単な解析モデルにて検討した。

3.1 解析対象モデルと解析条件 解析対象とした伝熱面ブロックは後述の図7である。この図に示すとおり、伝熱面は $\phi 20$ mm である。この伝熱面ブロックの動特性解析を行うに当たり次の仮定を置く。(1) 集中定数系として取扱い、温度分布はないものとする。(2) 伝熱面の熱負荷は図2の推定沸騰曲線に従うものとする。(3) 放熱損失を考慮する。

図1 沸騰伝熱面温度先行制御方式

図2 推定沸騰曲線

前記仮定に基づく動特性計算式は以下のようになる。

熱量バランスは伝熱面ブロックの比熱 C 、質量 W および入熱量 Q_E 、伝熱面熱負荷 Q_o 、放熱損失 Q_L より次式となる。

$$C \cdot W \cdot \frac{dT(t)}{dt} = Q_E(t) - Q_o(t) - Q_L(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

伝熱面面積 S における熱負荷は図2の推定沸騰曲線より次式となる。

$$Q_o(t) = S \cdot q \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、放熱損失は放熱面積 A_L 、系外温度 T_A 、熱伝達率 α より次式となる。

$$Q_L(t) = \alpha \cdot A_L \cdot \{T(t) - T_A\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上の式(1)、(2)および(3)を用いた沸騰伝熱面ブロック動特性解析モデルに前記した制御方式を加味して、伝熱面温度先行制御特性を検討した。

3.2 解析結果 表1に示した解析制御パラメータ条件のもとで設定温度を核沸騰領域の 393 K から遷移沸騰領域の 423 K へとステップ変化させた時の解析結果を図3に示す。

この解析結果より、伝熱面温度はいったん約 443 K まで上昇した後、低下しつづけ数回の変動を経た後、約 170 分の時点で 423 K に整定していることがわかる。また、伝熱面温度が 398 K を越えた後は、伝熱面温度の上昇とともに伝熱面熱負荷は減少し、伝熱面温度の低下とともに伝熱面熱負荷が増加しており、この解析領域が遷移沸騰領域であることがわかる。なお、先行信号としては、伝熱面温度が遷移沸騰領域に入ったとたん、伝熱面熱負荷が急激に低下するため負側へ働く

図3 制御特性解析結果（核沸騰→遷移沸騰）

が、その後、電気加熱熱量の制御信号が低下するに従い、次第に負側から正側へと動き、伝熱面の温度変化率が小さくなっていくに従ってほとんど零に近い信号となっていることがわかる。

以上の結果より、本報で述べた先行制御方式を用いれば遷移沸騰領域においても伝熱面温度を一定に制御しうる見とおしが得られた。

4. 実験による検討

伝熱面温度先行制御方式の有効性を実験的に検討し

表 1 制御特性解析制御パラメータ条件

Parameter		Value
Feedback	Proportional Band(P_B)	20%
	Integral Time(T_I)	300 s
Feedforward	Time Constant($T_{c,q}$)	200 s
	Time Constant($T_{c,p}$)	100 s
Control Loop	Feedforward Gain(K_p)	2

- (1) Testing Equipment (2) Copper Block (3) Insulator
 (4) Heating Surface (5) Inner Heater (6) Outer Heater
 (7) Thermocouple (8) Boiling Vessel (Cylindrical Glass)
 (9) Boiling Liquid (10) Auxiliary Heater (11) Auxiliary Vessel
 (12) Heater (13) Temperature Transmitter
 (14) Fixed Resistance (15) Digital Controller (16) Auxiliary Digital Computer
 (17) Thyristor Regulator
 (18) Variable Resistance (19) Watt Meter (20) Voltage Regulator
 (21) Power Supply

図 4 沸騰伝熱面温度先行制御実験装置全体系統図

図 5 実験装置本体
外観

図 6 先行制御装置
外観

図 7 実験装置本体

た。

4.1 実験装置

実験装置の全体系統を図 4 に示し、実験装置外観を図 5、先行制御装置外観を図 6 に示す。本装置は大きく分けて、実験装置本体(①～⑦)、試験媒体沸騰容器(⑧～⑩)、試験媒体補給容器(⑪、⑫)および制御装置(⑬～⑳)から構成されている。すなわち、試験媒体⑨は伝熱面④の上部に設けられた試験媒体沸騰容器⑧内に入れられ、予熱ヒータ⑩により常に大気圧における飽和温度に保持されている。伝熱面下部の温度は熱電対⑦(正確には後述の図 7 に示した熱電対 T_3)により測定され、温度変換器⑬と固定抵抗⑭を介して 1～5 V の信号としてディジタル式のワンループコントローラ⑮と補助演算器⑯に入力されている。ワンループコントローラ⑮は伝熱面温度先行制御を実施するものであり、補助演算器⑯には推定沸騰曲線が組み込まれている。ワンループコントローラ⑮からの出力信号によりサイリスタレギュレータ⑰を働かせ、可変抵抗⑱を介して内部ヒータ⑤、外部ヒータ⑥の出力を制御している。なお、今回の実験では可変抵抗⑱をすべて零とし、サイリスタレギュレータ⑰からの電圧がそのまま各ヒータに同等に付加されている。

次に、実験装置本体を図 7 に示す。伝熱面ブロックは JIS-C 1100 BD の銅で製作されている。その形状および寸法は図示したとおりであり、 $\phi 20$ mm の伝熱面を有す。この銅ブロックには A-A 断面図に示すように最大 214 W のシース形内部ヒータが 7 本ほど埋め込まれるとともに、銅ブロックの周囲を最大 500 W のシース形外部ヒータが巻き付けてある。このように構成された銅ブロックのまわりには保温材としてファイナフレックスが図示した寸法でまかれている。

また、図 7 の伝熱面近傍詳細図に示すように伝熱面

温度計測用としてシース形 CA 熱電対が伝熱面表面より下方 2 mm の位置 l_3 に 3 本 (T_3 , T_4 , T_5), 5 mm の位置 l_2 に 1 本 (T_2), 8 mm の位置 l_1 に 1 本 (T_1) ほど取付けられており, 各熱電対とも沸騰容器底板と保温材カバーとの間を通して外部に取り出されている。ここで, 沸騰伝熱面と沸騰容器底板との間のシール材にはアラルダイトを用い, その塗布厚さは図示したように伝熱面表面と同一水準になるようにした。また, 沸騰容器と沸騰容器底板との間はリング状シートゴムパッキンにてシールしている。

また, 計測点としては図 7 に示した伝熱面の温度計測点 ($T_1 \sim T_5$) のほかに, 容器内媒体温度 (T_L) と図 4 のワットメータ出力および図 1 のヒータ入力制御信号 (Q_E) と先行制御信号 (Q_F) とである。

号 (Q_E) と先行制御信号 (Q_F) とである。

4.2 実験方法および実験条件 伝熱面上をエメリペーパー (#1000) でみがいた後, 容器内に精製水を満たす。その後, 制御装置および各ヒータの電源を投入し, 媒体が飽和温度, 伝熱面温度が所定の温度に整定するまで待つ。その後, 設定温度を所定の値に設定し, 整定状態となった後データを採集する。ここで, 伝熱面上の温度は直接測定できないため, 制御用の温度信号としては図 7 の T_3 (T_4 と T_5 は T_3 と同じ値を示すことを確認済み) を使用している。このため, 設定温度もこの T_3 に対応している。

なお, 今回の実験条件は表 2 に示すとおりであり, 制御パラメータ条件は前記した表 1 と同じである。

4.3 制御特性 伝熱面温度先行制御方式による制御特性の一例を図 8 から図 10 に示す。なお, これらの図はいずれも記録ペンの位置ずれを有しているため必要に応じて明示する。また, 設定温度の変化位置はヒータ制御信号 Q_E を基準位置として示す。

図 8 は沸騰現象が核沸騰より遷移沸騰へ移った瞬間

Roughness of Heating Surface	#1000 Emery Paper
Boiling Liquid	Pure Water
Boiling Liquid Temperature	373.15 K (Saturated)
Boiling Liquid Pressure	Atmospheric Press.

図 8 制御特性実験結果 (核沸騰から遷移沸騰への設定温度ステップ変化)

図 9 制御特性実験結果 (遷移沸騰領域での設定温度ステップ変化)

設定温度を 396 K から 423 K へとステップ的に変更し、遷移沸騰領域において伝熱面温度 T_s を一定に制御した実験結果である。この図より次のことがわかる。設定温度を 423 K に変更した瞬間、ヒータ制御信号 Q_E はいったん急上昇するが直に沸騰伝熱面温度 T_s が設定温度を越えるため急低下して零となる。これに対して、先行信号 Q_F はヒータ制御信号の急上昇によりいったん急低下するが、ヒータ制御信号が零になるに伴い上昇を始める (①)。しかしその後、先行信号は伝熱面温度 T_s の低下とともに次第に低下し、伝熱面温度 T_s の低下率がほぼ一定になるに伴いほぼ零となり、この状態を維持し続ける (②)。その後、先行信号は温度低下率が大きくなるに従って正側へ上昇し、伝熱面温度 T_s が設定温度 423 K 以下になる前にヒータ制御信号を正側へもち上げ、伝熱面温度の下がりすぎを早めに防止している (③)。伝熱面温度 T_s が設定温度よりも低下するとヒータ制御信号 Q_E が急に上昇し、ヒータ出力が伝熱面熱負荷以上に上がりすぎたため先行信号は負側に低下し、ヒータ出力の上がりすぎを防止している (④)。またヒータ制御信号が低下するにつれて先行信号は上昇し、ヒータ制御信号が低下しすぎるのを防止している (⑤)。このような制御特性を繰返しながら最終的には伝熱面温度 T_s を遷移沸騰領域における設定温度 423 K へ安定に制御している (⑥)。

図 9 は遷移沸騰領域において設定温度をステップ的に変化させた時の特性である。この図からわかるように、418 K の安定状態から設定温度を 416 K へステップ的に下げるとヒータ出力はいったん低下しようとするが、伝熱面熱負荷とのアンバランスが生ずるため先行信号は正側に働き、ヒータ出力が低下することを防止している。この結果、約 15 分後に新しい設定温度に安定し、その状態を安定に維持し続けていることがわかる。

しかしながら、設定温度が 410 K 以下のように熱流束の高い遷移沸騰領域になると負こう配が大きいため制御しづらくなり、伝熱面温度および制御信号が若干変動しながら伝熱面温度をほぼ一定に保っている。さ

図 10 先行制御有効性再確認実験結果

らに設定温度が 408 K 以下になると伝熱面温度の変動がますます大きくなり、ついには制御しきれずに核沸騰へと移行していることがわかる。この温度変動の原因は熱流束の高い遷移沸騰領域ほど負こう配が大きくなっているためと考える。

次に、この先行制御の有効性を別の観点より確認した試験結果を図 10 に示す。この図は遷移沸騰領域において伝熱面温度 T_s を先行制御により一定に制御していた状態と同じヒータ出力に保持して制御を解除した時の実験結果である。この図からわかるように、制御を解除してヒータ出力を一定にしておくと伝熱面温度は非常にゆっくりであるが、次第に低下し始め、最終的には遷移沸騰から核沸騰へ移行してしまっている。この結果は沸騰現象のゆらぎが外乱となり、これが次第に拡大して核沸騰や膜沸騰の領域へ移行してしまうことを示している。

以上述べてきた図 8 から図 10 の制御特性試験結果により、本報にて提案した伝熱面温度先行制御方式は遷移沸騰領域を含むすべての沸騰領域において伝熱面温度を一定に制御しうる見とおしを得た。

図 11 沸騰伝熱面温度先行制御実験結果による沸騰曲線

5. 伝 熱 特 性

前章で述べたように設定温度を段階的に変更し、各設定温度に対して伝熱面温度が安定した状態において採集した一連の実験データを下記のようにして整理した。

測定データより、沸騰伝熱面温度 T_1 , T_2 , T_3 がほぼ線形の関係にあることが確認できたため、沸騰伝熱面表面温度 T_M は次式により計算で求めた。

$$T_M = T_3 - \frac{l_3}{l_2 - l_3} \cdot (T_2 - T_3) \dots\dots\dots (4)$$

また、沸騰伝熱面熱流束は次式により算出した。

$$q = \lambda(T_2 - T_3) \cdot \frac{1}{l_2 - l_3} \dots\dots\dots (5)$$

これら式(4), (5)を用いて各実験データを整理するとプール沸騰における沸騰曲線は図11に示すようになる。縦軸は伝熱面熱流束 q であり、横軸は伝熱面表面温度と飽和温度との差、すなわち過熱度 ΔT である。

この図から、核沸騰領域、膜沸騰領域はもとより、過熱度 ΔT が 40 K 以上の遷移沸騰領域においてもデータを採集できていることがわかる。ただし、遷移沸騰領域のうち過熱度 ΔT が 20 K から 40 K の範囲においては伝熱面温度変化に対する熱流束変化 ($\Delta q / \Delta T$: 以下、沸騰ゲインと定義する) が大きいため、制御できなかった。この理由は、今回の実験に使用した伝熱面銅ブロックの熱容量が非常に大きいため、沸騰ゲインの大きな領域では伝熱面の温度変動に銅ブロックの応答が追従しきれていないためと考える。

ただし、図9のように T_3 が 408 K (T_M で 405 K, ΔT で 32 K) まで制御できたこともある。

なお、参考までにこれまで発表された大気条件下での水のプール沸騰実験による沸騰曲線のデータを図中に示す。参考文献(4)のデータは直径 80 mm の水平上向き伝熱面、参考文献(5)のデータは直径 8 mm の水平上向き伝熱面での試験結果である。これら三つの試験結果を比較すると遷移沸騰領域のデータが主として異なっている。この原因は伝熱面の仕様、状態およ

び伝熱面近傍の形状のちがいが、すなわち伝熱面あらさおよび伝熱面近傍の流れが異なっているのではないかと推定される。

これら各沸騰領域で伝熱面温度が安定した状態における沸騰現象の観察結果は次のとおりであった。核沸騰領域においては沸騰伝熱面全体より沸騰現象が起こり、遷移沸騰領域においては沸騰伝熱面外周部に蒸気膜が存在し、主として中央部より蒸気泡が離脱し、膜沸騰領域においては沸騰伝熱面全体を蒸気膜が覆い、間欠的に蒸気泡が離脱する。

6. 結 言

伝熱面熱負荷を先行信号として電気加熱熱量を先行的に制御し、温度偏差に基づくフィードバック制御と併用して制御する伝熱面温度先行制御方式について理論および実験により検討した。その結果、次の結論を得た。

(1) 本制御方式を用いることにより、電気加熱による伝熱面ブロックでも遷移沸騰領域を含むすべての沸騰領域において伝熱面温度を一定に制御しうる見とおしを得た。

(2) 遷移沸騰領域のうち、過熱度 ΔT が 20 K から 40 K の範囲は制御できなかった。この理由は、この領域における沸騰ゲインが大きいためである。今後、この領域についても制御可能とすべく検討を実施する。

終わりに本研究に関する課題提示ならびにご指導をいただいた九州大学工学部・伊藤猛宏教授に謝意を表す。

文 献

- (1) Berenson, P. J., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5 (1962), 985.
- (2) 一色・玉木, 第705回講演会, (昭37), 103.
- (3) Sakurai, A. and Shiotsu, M., *Heat Transfer* 1974, Vol. IV, B 3. 1, Scripta Book Co., Washington, D. C., (1974), 81-85.
- (4) 伊藤・ほか4名, 第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭60-5), 100.
- (5) 本田・西川, 機論, 38-305 (昭47-1), 177.

討 論

付図 1 推定沸騰曲線の設定値による制御性への影響

〔質問〕 西尾 茂 文〔東京大学生産技術研究所〕

(1) 推定沸騰曲線の設定の仕方および設定値による制御性への影響について御説明いただきたい。

(2) 本方法により安定化された遷移沸騰域において、「安定化」されたという程度は、表面温度および熱流束についてどの程度か。

〔回答〕 (1) 最初は既に発表されている種々の沸騰曲線より適切なものを選定し設定するが、その後、対象とする実験装置により得られたデータをベースとして修正する。

また、その設定値が正規の沸騰曲線と異なった場合の制御性への影響について代表的な例を付図 1 に示す。付図 1 は、 L_N を正規の沸騰曲線とし、 L_E を推定沸騰曲線とし、設定温度を T_0 から T_1 に変更した時の制御性を示したものである。すなわち、付図 1 の (a) は遷移沸騰領域の推定値が異なった場合であり、(b) は極大熱流束点が左に移動していた場合であるが、正規の沸騰曲線が設定されていた場合と比べて先

行信号の大きさが異なるのみであり、先行制御は有効に働く。しかし、付図 1 (c) のように極大熱流束点が右へ移動していた場合にはフィードバック制御のみとなる領域が存在し、制御性が悪化する。

このため、推定沸騰曲線としてはなるべく正規の沸騰曲線に合わせたほうがよいが、極大熱流束点を若干左へ移動させて設定する。

(2) 伝熱面の温度は熱電対の出力をペン書きオシログラフとデジタルボルトメータとにより計測している。本文中の図 9 からわかるように $T_s=416$ K の場合の温度変動はほとんどないが、デジタルボルトメータの値では設定温度 (整定温度) に対して約 ± 0.025 K 程度の変動であり、熱流束換算では約 ± 3100 W/m² 程度の変動である。また、図 9 に示した熱流束の高い $T_s=408.5$ K の場合には約 ± 0.35 K、約 ± 42000 W/m² 程度の変動を示すが、本文中で述べたようにこの領域ではまだ再現性良く制御しきれていないため図 11 には記載されていない。