

JAERI-M

7 3 9 6

流量低下過渡沸騰時の圧力および壁温変化

(常圧ループによる過渡沸騰実験(Ⅲ))

1977年11月

黒柳 利之・岩村 公道

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

流量低下過渡沸騰時の圧力および壁温変化
(常圧ループによる過渡沸騰実験(Ⅲ))

日本原子力研究所・東海研究所・安全工学部
黒柳 利之・岩村 公道

(1977年10月31日受理)

軽水炉の出力-冷却不整合(PCM)時の過渡沸騰に伴う諸現象の概要を知るため、常圧大気開放ループを用いて、流量低下時の過渡沸騰実験を行なった。

テスト部は内径8mm、外径10mm、長さ800mmのステンレス管で、直流直接通電により加熱した。

実験範囲は、入口温度：30～80℃、熱流束： $0.54 \sim 1.1 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ 、初期質量速度： $3.6 \sim 8.4 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$ 、流量減少過渡時間：0.05～62secである。

圧力や壁温挙動の測定結果より、本実験範囲では、流速減少率が約10cm/sec/sec以下の流量減少過渡沸騰現象は、定常沸騰としてあつかえることがわかった。

Transient Behavior of Pressure and Wall Temperature in Water Flow
in a Tube under Flow Reduction Conditions
(Transient flow boiling experiments at an atmospheric pressure (III))

Toshiyuki KUROYANAGI and Takamichi IWAMURA
Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received October 31, 1977)

Flow reduction transient boiling phenomena have been studied in vertical up-flow of water in a tube under an atmospheric pressure to provide information on the transient thermal-hydraulic behavior of a LWR core during Power Cooling Mismatch (PCM) conditions.

The electrically heated test section was stainless steel tube 8 mm in diameter and 800 mm long.

Experiment was conducted under the conditions:

inlet water temperature = $30 \sim 80^{\circ}\text{C}$

heat flux = $0.54 \sim 1.1 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$,

initial mass velocity = $3.6 \sim 8.4 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$, and

flow reduction time = $0.05 \sim 62 \text{ sec}$.

According to the observed behavior of the pressure and wall temperature, the flow reduction transient boiling phenomena are similar to those in the steady-state boiling at flow reduction rates below about 10cm/sec/sec under the ranges of experimental conditions.

Keywords: Two-phase Flow, Flow Boiling, Transient Flow,
Power Cooling Mismatch, Reactor Safety, Heat Transfer,
Flow Reduction.

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置および実験方法	2
2.1 実験装置	2
2.2 計 装	2
2.2.1 測定項目および記録方法	2
2.2.2 入口流量, 圧力, 壁温等の測定・較正方法	3
2.3 実験方法	3
3. 実験結果	9
4. 実験結果の検討	11
4.1 流量減少過渡時の一般的傾向	11
4.2 圧力変化に見られる非定常効果	12
4.2.1 流量減少時の入口圧力変化のおくれ	12
4.2.2 同じ沸騰長さに対する定常時圧力と過渡時圧力の比較	13
4.3 壁温変化に見られる非定常効果	16
4.3.1 壁温ピーク出現時刻と飽和点移動曲線との関係	16
4.3.2 壁温ピーク移動速度と流速減少率との関係	17
5. まとめ	36
謝 辞	36
参考文献	37
記号表	38
付録A. 実験データ一覧表および記録例	40
付録B. 過渡沸騰流動の特性曲線法による無次元解析	51

1. ま え が き

軽水炉の出力—冷却不整合 (Power Cooling Mismatch, PCM) 時の燃料棒挙動は、核的、熱的、流体力学的過渡変化、あるいは、物理的、化学的、機械的性質等とのからみ合いによって定まるはずである。流量低下あるいは出力上昇による過渡状態で、冷却材の相変化を伴う場合には、燃料棒の挙動、なかづく、被覆材の温度挙動は、冷却材の挙動と密接な関係がある。

過渡状態 (流量低下または出力上昇) では、流路に沿って、沸騰開始境界が移動し、沸騰流路内の流動状態が変化する。この結果、ある条件下では、ある時刻、場所でバーンアウトが発生し、そのバーンアウト部分が流路に沿って拡大して膜沸騰状態となり、壁温が急上昇すると考えられる。このことは、ある時刻、場所での現象は、その時刻以前の、その場所より上流で生じた現象の影響を受けることを意味する。したがって、PCM事故時の被覆材温度挙動を評価するには、個々の現象の過渡特性についての精細な知見が必要とされる。

従来、過渡沸騰流路内のボイド率の変化 (流動状態変化の指標の一つ) についての実験が試みられている。沸騰管壁からの加熱量を時間的に正弦状に変化させた場合のボイド率変化の模様^{(1)~(3)}、加熱量または流量をランプ状に変化させた場合のボイド率の変化の模様⁽⁴⁾、そして流量を正弦状に変化させた場合のボイド率や圧力変化の模様⁽⁵⁾についての報告がある。これらは、それぞれ、二相流部分の取扱について、いわゆる分離流モデル、あるいは、Drift Fluxモデルを用いて^{(1)~(4)}、実験結果の解析を行っている。加熱量を1~2ヘルツ以下の周波数範囲で正弦状に変化した場合のボイド率変化の実験値は、予測値にほぼ一致するが、これより大きな周波数範囲では、相当異なっていることが示されている^{(1)~(3)}。また、流量低下時のボイド率変化の実験値は、実験の精度内で予測値とよい一致を示すが⁽⁴⁾、加熱量低下の場合のボイド率変化の実験値と予測値との一致は良くないと報告されている。

以上のような研究成果にもかかわらず、流路内での過渡沸騰現象に関する実験的な知見は限られており、理論的解明もまだ十分とは言えない。過渡沸騰二相流の流動状態変化の様子を知ることが、PCM時の燃料棒温度挙動の解明のためにも重要な研究課題であり、さらに二相流に関する理解を進める上でも、寄与する点が多いと思われる。以上の観点から、過渡沸騰二相流研究の第一段階として、流量低下時の諸現象 (沸騰開始点の移動、流動状態の変化など) の概要を知るため、常圧大気開放ループを用いた流量低下過渡沸騰実験を行なった。

本実験は2つのシリーズからなり、以下本報ではそれぞれシリーズ1実験 (昭和51年6~12月実施) とシリーズ2実験 (昭和52年5~7月実施) と称する。これらは同一テスト部を使用しているが測定記録方式が異なるため区別したものである。それぞれのシリーズの実験データは既に文献(6)、(7)として報告した。

本報では、以上の実験データをもとに、流量低下過渡沸騰時における流動状態変化の指標と考えられる流路圧力変化や、沸騰開始点の移動を示す壁温変化などの挙動について報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

本過渡沸騰実験装置は常圧大気開放水ループで、貯水タンク、循環ポンプ、ローターメーター（浮子式流量計）、タービン流量計、流量制御用手動弁、圧縮空気作動流量制御弁（ボールバルブ）、入口温度制御ヒーター（PID制御）、テスト部、気水分離器よりなる。実験装置の概要は図 2.1 に示す。

テスト部は、内径 8 mm、外径 10 mm、長さ 800 mm の SUS304 ステンレス製パイプで、直流直接通電により加熱した。テスト部の入口と出口には圧力検出用タップを設置し、テスト部外壁には、直径 0.32 mm の C-A 熱電対をスポット溶接した（シリーズ 1 では 7 本、シリーズ 2 では 9 本）。また、バーンアウト発生によりテスト部が損傷するのを防ぐため、温度上昇による電気抵抗の変化を利用したブリッジ式バーンアウト検出器のリード線をテスト部上半分の 3 点に銀ろう付し、バーンアウトの検出と同時に供給電力を遮断した。

シリーズ 1 と 2 のテスト部は同一形状であるが、熱電対取り付け位置および本数が異なっている。図 2.2、2.3 にそれぞれシリーズ 1、2 のテスト部形状および計装取り付け位置を示す。

また、本実験装置の諸元を表 2.1 に示す。

2.2 計装

2.2.1 測定項目および記録方法

計装のうち、テスト部の熱電対、圧力計の取り付け位置は、シリーズ 1、2 についてそれぞれ図 2.2、2.3 に示してある。

シリーズ 1 では、テスト部壁温はすべてペンレコーダーで記録した。また、入口流量、入口・出口圧力の 3 チャンネルは直流増巾器を介してディジタルメモリー（岩通製 DM301 型）に記憶後、ペンレコーダーで記録した。ディジタルメモリーのトリガーには流量の変化自身を利用した。シリーズ 1 の測定・記録系のフローダイアグラムを図 2.4 に示す。

シリーズ 2 では、テスト部壁温のうち 5 点、入口流量、入口・出口圧力の信号は直流増巾器を介して電磁オシログラフで記録した。残り 4 点のテスト部壁温信号はペンレコーダーにて記録した。シリーズ 2 の測定・記録系のフローダイアグラムを図 2.5 に示す。なお同図のうち、テスト部入口・出口の差圧とバーンアウト検出器信号は、本実験に続くバーンアウト実験のためのもので、本実験では記録していない。

その他、シリーズ 1、2 に共通する測定項目としては、テスト部加熱電流、電圧、テスト部入口水温（シース径 1.6 mm の C-A 非接地型熱電対）があり、いずれもペンレコーダーで記録した。また、この熱電対信号は、入口水温を所定値に保持するための入口温度制御用ヒーターの PID 制御信号としても用いた。

2.2.2 入口流量，圧力，壁温等の測定・較正方法

入口流量はタービン流量計（トキコ製ポッターメーター5000シリーズ03型）で測定し，ローターメーターにより較正した。

入口，出口圧力検出器としては，シリーズ1では共和電業PS-5KBを，シリーズ2では新興通信PR/5Bを使用した。ストレインアンプはそれぞれ横河3126および新興通信DS-6021を用いた。なお圧力信号については，シリーズ1，2とも低域通過型フィルターを通して平滑化した信号を記録した。圧力計出力の較正は，空気圧を利用して超精密級圧力計（東京航空計器製）により行なった。

テスト部壁温は，直径0.32mmのC-A熱電対を外表面にスポット溶接して測定した。この熱電対の応答時定数は約0.05秒である。また，テスト部内面温度変化と外面温度変化との時間遅れは0.1秒以下と評価される（表4.2参照）。

なお，テスト部には実験中最大約1000A程度の加熱用直流電流が流れ，熱電対起電力にかなり大きな影響を与える。熱電対のスポット溶接に際してはこの影響がなるべく小さくなるよう注意したが，それでも影響を除去できない場合は，次のような補正法を用いた。

まず，テスト部に一定の電圧をかけてからそれを急速遮断し，この時の熱電対信号変化をデジタルメモリーに記憶させてシンクロスコープにて再現した。この時の記録例の写真を図2.6に示す。この例では，熱電対信号は電力遮断時点で瞬時に減少し，その後表面温度低下に従ってゆっくり減少しているが，熱電対接点の溶接方法によっては電力遮断時点で瞬時に上昇し，その後ゆっくり減少する場合も見られた。このような電力遮断時の急激な変化分は，熱電対の接点間を流れる加熱用電流による電圧降下に対応していると考えられる。そして，テスト部電圧をパラメータとして上記の実験を繰返すと，電力遮断時の熱電対信号の急激な変化量はテスト部電圧に比例することがわかった。従ってこの比例定数を用いて，ある加熱電圧の時の熱電対出力から加熱電流による寄与を除去することができる。

2.3 実験方法

実験方法はシリーズ1，2とも同じであり，以下に示す。

- (1) テスト部壁温測定用熱電対較正
- (2) 圧力計・タービン流量計較正
- (3) 圧縮空気作動流量制御弁を使用する場合は，作動速度，作動率を調節して，所定の流量減少過渡時間，流量減少範囲を設定する。
- (4) テスト部に電流を流し，所定の出力を得る。
- (5) PID制御により，入口水温を所定の値に $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内で保持する。
- (6) 手動式流調弁により初期流量を所定の値に設定し，十分定常状態になるのを待つ。
- (7) 圧縮空気作動弁又は手動式流調弁により流量を減少させ，入口・出口圧力，流量，壁温等の過渡変化を記録する。
- (8) 再び弁を開き，(3)又は(4)に戻り，次の実験条件を設定する。
- (9) 一連の実験終了後，再び圧力計とタービン流量計の較正を行なう。

ただし、シリーズ2の場合は、なるべく直線状の流量低下を実現するため、過渡変化時間が0.1秒以下の場合以外はすべて手動により流量を減少させた。

表 2.1 実験装置諸元

ループ諸元	
使用圧力	大気圧開放ループ
最高使用温度	150℃
最高加熱電力	100KW
循環水	水道水
ポンプヘッド	50m以上
使用流量範囲	10～1ℓ/min
テスト部諸元	
発熱部材質	SUS 304
内 径	8 mm
外 径	10 mm
加熱部長さ	800 mm

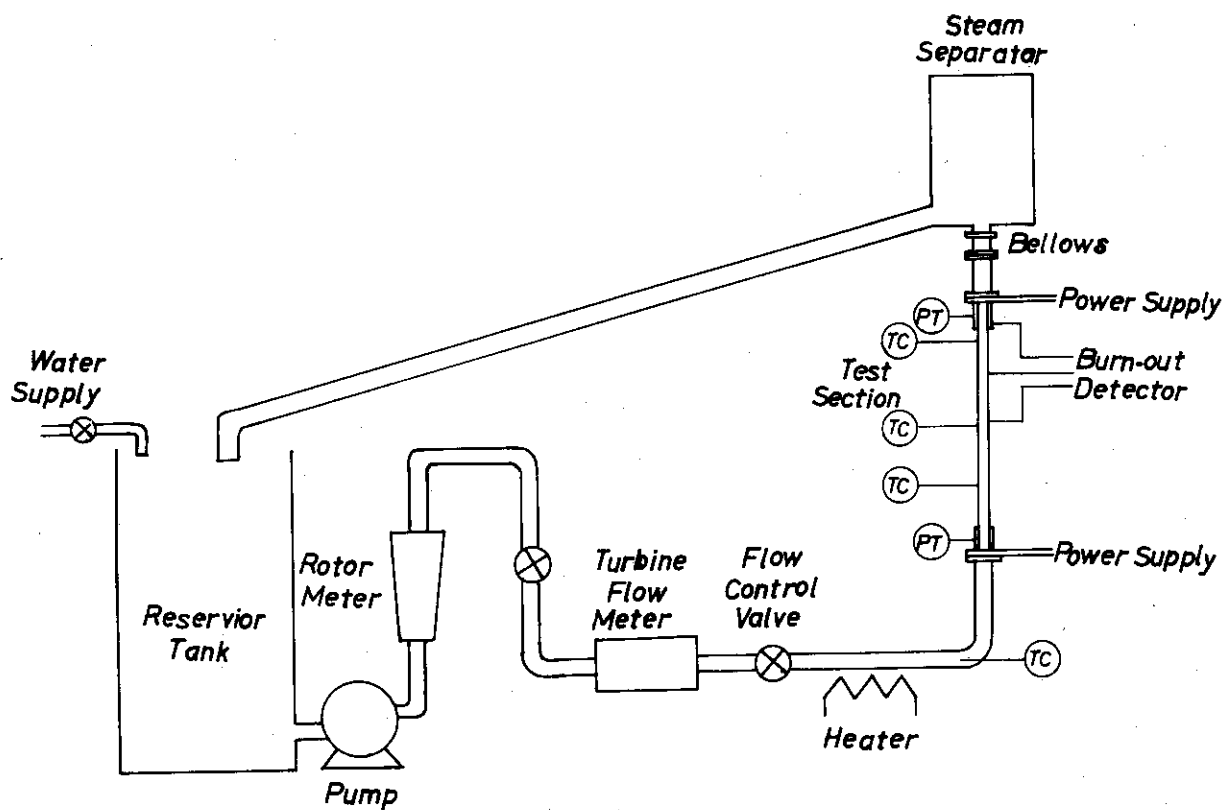


図 2.1 実験装置の概要

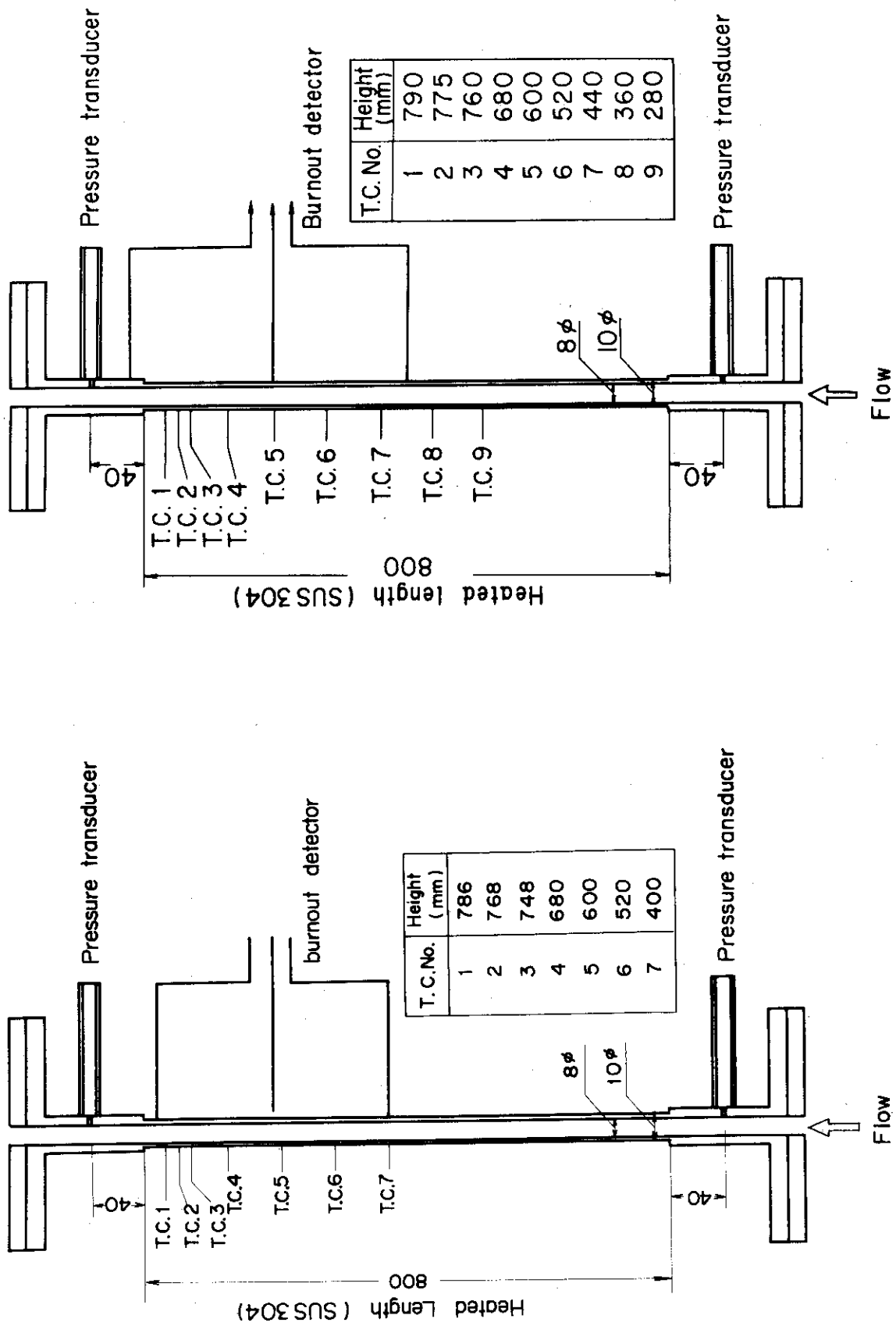


図 2.2 シリーズ 1 実験テスト部

図 2.3 シリーズ 2 実験テスト部

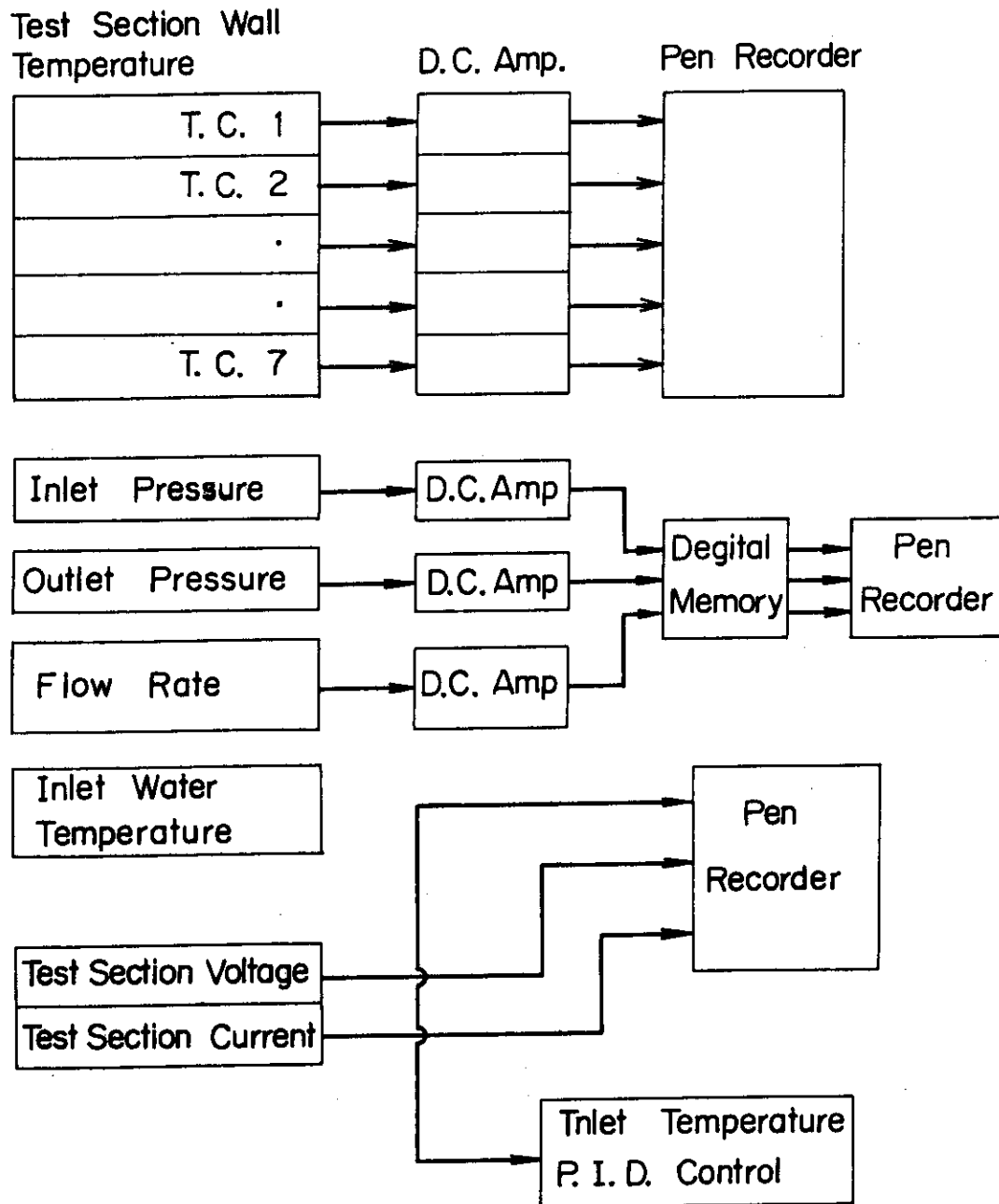


図 2.4 シリーズ 1 実験の測定・記録系

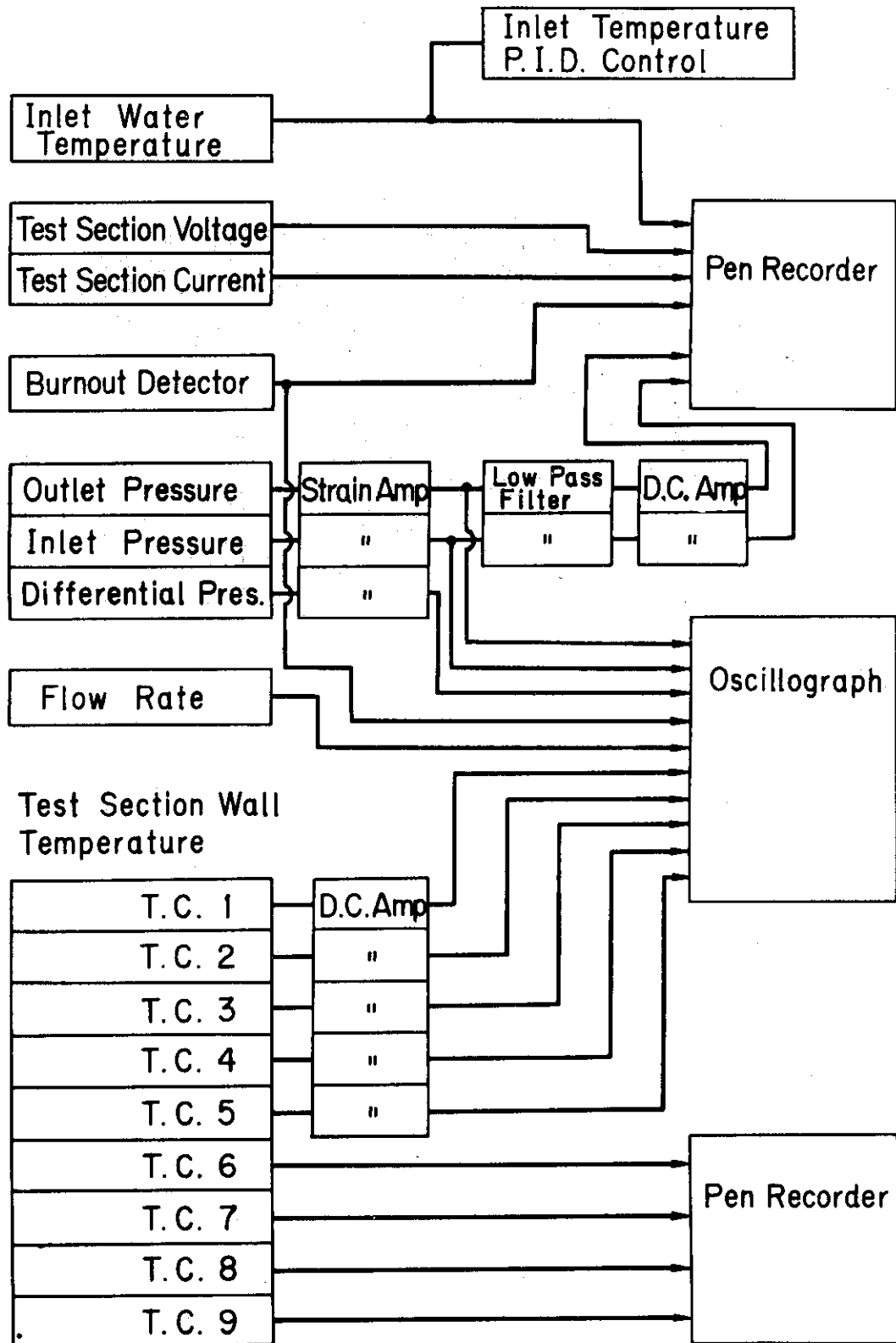


図 2.5 シリーズ 2 実験の測定・記録系

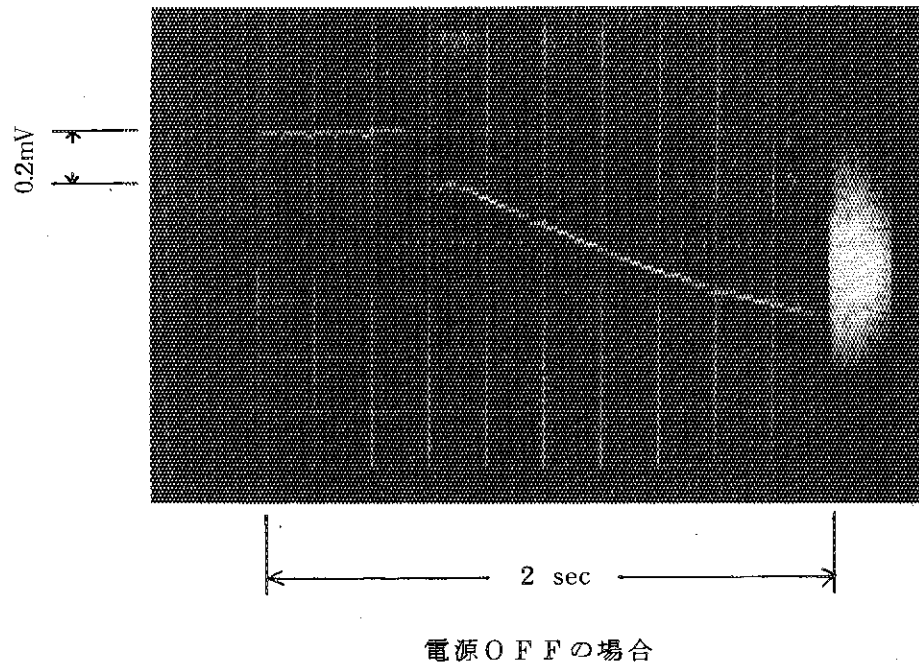


図 2.6 熱電対起電力に対するテスト部電流の影響

3. 実験結果

シリーズ1, 2の実験範囲をそれぞれ表3.1, 3.2に示す。

2.1で述べたように, シリーズ1と2ではデータ記録方式が異なる。それぞれの実験条件の一覧表および実験データ記録例を付録Aに示す。同表には, Run No., 熱流束 (kcal/hm^2), 入口温度 ($^{\circ}\text{C}$), 初期および最終流量 (ℓ/min), 流量減少過渡時間 (sec)などを示している。また, 流量減少の程度を示す量 (flow reduction rate) としてシリーズ1 (表A.1) では $\ell/\text{min}/\text{sec}$ 単位, シリーズ2 (表A.2) では $\text{cm}/\text{sec}/\text{sec}$ 単位を用いている。これらはいずれも初期流量から最終流量を引いた値を流量減少過渡時間で割ったもので, 今回使用したテスト部では, $1\text{cm}/\text{sec}/\text{sec} = 33.16\ell/\text{min}/\text{sec}$, $1\ell/\text{min}/\text{sec} = 0.03016\text{cm}/\text{sec}/\text{sec}$ となる。また, 表A.2に示した, 初期および最終のクォリティ (X_{ei}, X_{ef}) および沸騰長さ (L_{Bi}, L_{Bf}) などは以下のようにして計算した。

まず, 初期沸騰長さ L_{Bi} , および最終流量で定常状態に達した時の最終沸騰長さ L_{Bf} は次式より計算した。

$$L_{B(i)} = L \left[1 - 0.06 \frac{\rho_l W_{(i)} (h_{\text{sat}}(P) - h_{in})}{\pi D L q''} \right] \quad (3-1)$$

ここで(3-1)式における飽和エンタルピー h_{sat} は圧力 P の関数であり, 本実験範囲では次式を用いた。

$$h_{\text{sat}}(P) = 59.872 + 55.023P - 19.990P^2 + 4.9110P^3 - 0.65238P^4 + 0.035448P^5 \quad (3-2)$$

$$h_{\text{sat}} (\text{kcal}/\text{kg}), P (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

(3-2)式の適用範囲は $P=1 \sim 5\text{kg}/\text{cm}^2$ である。

L_{Bi} を求める時の圧力 P としては, 初期に沸騰していない場合には,

$$P = P_{\text{out}, i} \quad (3-3)$$

を用いた。一方, 初期において沸騰している場合は,

$$P = P_{\text{in}, i} - 0.1(L - L_{Bi}) \quad (3-4)$$

と(3-1)式を連立させて解いた圧力 P における L_{Bi} を求めた。

L_{Bf} としては同様に,

$$P = P_{\text{in}, f} - 0.1(L - L_{Bf}) \quad (3-5)$$

と(3-1)式を連立させて圧力 P を求めその時の L_{Bf} を計算した。(3-4), (3-5)式の第二項は水柱圧の補正である。

また, 初期出口クォリティ (X_{ei}), 最終流量で定常状態に達した時の最終出口クォリティ (X_{ef}) は熱バランスよりそれぞれ次式で計算した。

$$X_{ei} = \frac{\pi D L_{Bi} q''}{0.06 W_i \rho_l \lambda (P_{\text{out}, i})} \quad (3-6)$$

$$X_{ef} = \frac{\pi D L_{Bf} q''}{0.06 W_f \rho_e \lambda (P_{outf})} \quad (3-7)$$

ここで、(3-6)、(3-7)式における蒸発の潜熱 λ は次式により計算した。

$$\begin{aligned} \lambda(P) = & 563.77 - 33.180P + 11.480P^2 - 2.7945P^3 \\ & + 0.36930P^4 - 0.019995P^5 \end{aligned} \quad (3-8)$$

λ (kcal/kg), P (kg/cm²)

(3-8)式の適用範囲は $P = 1 \sim 5$ kg/cm² である。

なお、表A.1, A.2に示した実験データの記録はそれぞれ文献(6), (7)にまとめて示してある。
流量減少過渡時の圧力, 壁温等の挙動については次章で述べる。

表 3.1 シリーズ1 実験範囲

初期流量	3.0 ~ 7.0 ℓ/min
最終流量	0.9 ~ 2.5 ℓ/min
初期流速	1.0 ~ 2.3 m/sec
流量減少過渡時間	0.05 ~ 15.0 sec
流量減少率	20 ~ 60 %
入口水温	27 ~ 82 $^{\circ}C$
圧力損失	0.1 ~ 1.5 kg/cm ²
熱流束	0.7 ~ 1.1×10^6 kcal/hm ²

表 3.2 シリーズ2 実験範囲

熱流束	0.56, 0.71×10^6 kcal/hm ²
入口温度	30.5 $^{\circ}C$
初期流量 (初期質量速度)	3 ~ 6 ℓ/min ($3.6 \times 7.2 \times 10^6$ kg/hm ²)
最終流量 (最終質量速度)	1 ~ 1.4 ℓ/min ($1.2 \sim 1.7 \times 10^6$ kg/hm ²)
流量減少過渡時間	0.06 ~ 6.2 秒
流速減少率	2.4 ~ 2600 cm/sec/sec
初期出口クオリティ	-0.06 ~ 0.01
最終出口クオリティ	0.12 ~ 0.32
初期沸騰長さ	-8.0 ~ 5 cm
最終沸騰長さ	3.35 ~ 57.4 cm

4. 実験結果の検討

流量低下実験結果に示されるように、テスト部入口、および出口圧力や壁温は、熱流束、初期流量、最終流量、流量低下に要する時間等に応じて、様々に変化する。こゝでは、流量低下に関する指標として、流速減少率を次式で定義する。

$$\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \frac{v_i - v_f}{t_f - t_i} \quad (4-1)$$

この流速減少率と、初期流量から最終流量まで、流量低下に要した時間との関係が、図 4.1 に示されている。こゝで報告する実験の流速減少率の範囲は、 $1.3 \sim 2600 \text{ cm/sec/sec}$ にわたっている。

以下では、シリーズ1およびシリーズ2の実験結果より、どのような流速減少率において、圧力変化や壁温変化に、過渡変化の特徴が現われてくるかという観点から検討を行った。

4.1 流量低下過渡時の一般的傾向

流量低下過程におけるテスト部入口および出口圧力の変化、および壁温変化の一例を図 4.2、図 4.3 に示す。ともに流量低下開始前には非沸騰の状態であり、流量低下過程にテスト部出口より沸騰が始まって、流量低下終了後には、テスト部内の約 4.6 cm または、約 5.2 cm が沸騰状態になった場合の例である。図 4.2 は、熱流束 $0.56 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ で、初期流量 5 l/min より流量を低下した場合であり、図 4.3 は、熱流束 $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ で、初期流量 6 l/min より流量を低下した場合である。

図 4.2(a)、図 4.3(a) は、流量減少時間が、それぞれ、 3.47 秒 、 2.15 秒 ($\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 3.82, 7.71 \text{ cm/sec/sec}$) の場合であって、流量減少にほぼ追従して圧力や壁温が変化している。

図 4.2(d)、図 4.3(d) は、流量減少時間が、ともに 0.06 秒 ($\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 1990, 2490 \text{ cm/sec/sec}$) の場合であって、流量減少が全く終了してから、次第に圧力や壁温が変化している。このことは、時々刻々の流量と、圧力または壁温とを、単純に関係づけられないことを示している。

図 4.2(c)、図 4.3(b)、(c) は、それぞれ、流量減少時間が、 1.14 秒 、 3.6 秒 、 1.07 秒 ($\left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = 116, 49.7, 167 \text{ cm/sec/sec}$) で流量を 1 l/min まで低下した場合であるが、流量低下終了後、圧力とくに入口圧力は、顕著なピークに達してから一定値に落ち着いている。しかし、図 4.2(d)、図 4.3(d) の流量減少時間 0.06 秒 で、流量を 1.4 l/min まで低下した場合には、このような圧力ピークは認められない。このように、圧力変化は、単に流量減少時間のみならず、最終流量にも影響されることを示している。

図 4.2、図 4.3 に示されるように、テスト部の外壁温度は、流量低下に伴って上昇し、一旦ピークに達してから一定値に落ち着いている。これは、当初、单相流であった状態から、壁近傍

での水が過飽和となり、遂に発泡を開始して、定常的な沸騰状態に移行する過程を示しているものと思われる。また、図 4.2, 図 4.3 にみられる壁温ピーク出現時刻の「ずれ」より、壁温ピークが下流より上流へと管内を移動していることがわかる。

図 4-3(d)の TC-4 に見られるように、壁温には、一時的な振動が生じている。これは、出口より 1 cm の壁温 (TC-1) から、出口から 28 cm 離れた壁温 (TC-6) にまで、殆んど同時刻に、同形の振動が現われている。この振動の生ずる時刻は、出口クオリティがゼロになった時刻に対応している (4.3 参照)。同様な壁温の振動は、図 4.2, 図 4.3 の各図に見られる。

なお、流量低下過渡時には、熱伝達率低下による壁温上昇に発熱量の一部が使用されるので、流体に供給される熱量は、その分だけ減少する。この影響が最も大きいのは、ステップ状に流量を低下した場合であって、そのときの壁温上昇、それに要する時間、それによる流体に供給される熱量の減少割合等の例を表 4.1 に示す。同表より、本実験例では、最も流量変化の速い場合でも、熱量減少割合は、約 4~7% のオーダーであると言える。

以下の検討においては、この供給熱量の変化は、4.3 の一例を除いて無視した。流量変化の遅い場合には、このような供給熱量変化の影響は、ほとんどないと言えよう。

また、本実験での壁温測定は、管外壁に点溶接された熱電対によっているので、流体の状態変化の影響が、この管外壁の温度挙動に現われるまで、ある程度の時間遅れがあると考えられる。表 4.2 に、一次元スラブ形状において、各種条件下の過渡変化による温度応答時間のオーダーを示す。今の場合、内面における熱伝達メカニズムの変化が壁温度変化の原因となっているので、過渡変化の種類としては熱流束変化に相当し、その際の過渡変化による応答時間のオーダーは、表 4.2 に示すように、シリーズ 1 の場合には、約 0.07 秒程度と考えられる (シリーズ 2 の場合には、さらに小さいと思われる)。この程度の誤差は、以下で検討する流量低下時に現われる壁温ピークの出現時刻と飽和点移動曲線との関係や、壁温ピーク移動速度等の一般的傾向に、それ程、影響があるとは思われない。

4.2 圧力変化に見られる非定常効果

4.2.1 流量低下時の入口圧力変化の遅れ

4.1 で述べたように、流速減少率が小さい場合は、流量低下にほぼ追従して入口、出口圧力が上昇しているが、流速減少率が大きくなるにつれて、圧力の上昇はおくれてきて、ある程度以上大きい流速減少率の場合には、流量低下過渡変化が全く終了してから次第に圧力が増加している。このような圧力変化の遅れは、流量低下非定常効果の指標の一つとみなせるであろう。

入口圧力変化に見られる定常と非定常の境界を調べるため、本実験のうち $3 \sim 6 \text{ l/min}$ ($3.6 \sim 7.2 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$) から約 1 l/min ($1.2 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$) へと流量を低下した場合について、流量低下途中流量が 2 l/min ($2.4 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$, 6.7 cm/sec) の時の入口圧力と流速減少率との関係を、熱流束、入口温度、流量減少範囲をパラメータとして図 4.4 に示す。同図の左端は流速減少率が 0、すなわち流量が 2 l/min で定常状態の場合の入口圧力を示している。同図より、流速減少率が約 10 cm/sec/sec より小さい場合は、流量が 2 l/min の時の入口圧力はほぼ定

常時の値に一致しているが、流速減少率が 10 cm/sec/sec より大きくなるにつれ、入口圧力の上昇も遅れてきて、入口流量は $2 \ell/\text{min}$ に達しているにもかかわらず、定常時の圧力に達していない。さらに流速減少率が 100 cm/sec/sec 以上となると、入口圧力はまだほとんど変化していない。なお、同図において、熱流束が $1.01 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合、流速減少率が約 100 cm/sec/sec を超えると、入口圧力が初期流量により別々の値を示しているのは、この熱流束においては、初期流量 ($4 \sim 6 \ell/\text{min}$) での入口圧力がすでに異なっているためである。(図 4.6(a) 参照)

このように、流速減少率が大きくなると圧力上昇が遅れるのは次のような理由によると思われる。

いま、熱流束一定で、 $t < 0$ の時 $v = v_i$ (一定)、 $t \geq 0$ の時 $v = v(t)$ の場合を考えると、 $t > 0$ では、 dZ 間の未飽和部分の流体のエンタルピー上昇 dh は次式で与えられる。

$$dh = \frac{4 q dZ}{\rho D v(t)} \quad (4-2)$$

dZ 間を流体が移動するのに要する時間 dt は

$$dt = \frac{dZ}{v(t)} \quad (4-3)$$

で与えられる。これを (4-2) 式に代入すると次式が得られる。

$$dh = \frac{4 q}{\rho D} dt \quad (4-4)$$

ここで、 $t = 0$ で Z_i の位置において h_i のエンタルピーを有する流体が、 t 秒後に Z の位置で h のエンタルピーを有するに到るとすると、(4-4)、(4-3) 式の積分より次の二式を得る。

$$h = h_i + \frac{4 q}{\rho D} t \quad (4-5)$$

$$Z = Z_i + \int_0^t v(t) dt \quad (4-6)$$

流速変化がステップ状の場合には $v(t) = v$ (一定) とすると、(4-6) 式より次式を得る。

$$Z = Z_i + v t \quad (4-7)$$

すなわち、流量がステップ状に変化しても、 Z_i の位置において h_i のエンタルピーを有する未飽和流体が、飽和エンタルピー h_{sat} に達するまでには、(4-5) 式で $h = h_{\text{sat}}$ とおいた場合の t だけの時間が必要であり、その時の流体の位置は (4-7) 式で与えられる。

以上を示したように流量変化の最も速い極限であるステップ状変化の場合でも、飽和点の移動には必ず有限の時間を要する。従ってこの飽和点の移動、すなわち沸騰長さの変化に伴う水-蒸気系の二相流動状態により規定される圧力変化も、流量変化に比べてかなり遅れるものと考えられる。

4.2.2 同じ沸騰長さに対する定常時圧力と過渡時圧力の比較

前節では、流量低下途中入口流量が $2 \ell/\text{min}$ の時における入口圧力が流速減少率によりどう

変化するかを比較したが、流速減少率が異なると、過渡時の履歴効果のため、流量低下途中 2 l/min におけるテスト部内部の流動状態は、流速減少率の大小により同一ではない。従って、定常時圧力と過渡時圧力を同じ入口流量の時点において比較するよりも、沸騰長さが同じ時点において両者を比較する方が、過渡時の圧力変化の特徴をより適切に把握できると思われる。

まず定常状態においては、沸騰長さと圧力是一对一に対応している。図 4.5(a) は熱流束約 $0.7 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ 、入口温度 30°C の場合について、定常状態の入口および出口圧力と流量の関係を示したものである。定常状態における各流量での沸騰長さ (L_{Bs}) は次式で求められる。

$$L_{Bs} = L - \frac{DG}{4q} (h_{\text{sat}}(P) - h_{in}) \quad (4-8)$$

上式で求めた L_{Bs} と、それに対応する定常時入口圧力との関係を図 4.5(b) に示す。また、熱流束が $1.01 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合の圧力と流量の関係を図 4.6(a) に、 L_{Bs} と入口圧力の関係を図 4.6(b) にそれぞれ示す。なお、図 4.5(b)、4.6(b) において、入口圧力は L_{Bs} が約 -10 cm の所から増加し始めているのは、未飽和沸騰の開始を示している。また、これらの図より、圧力測定の実現性はかなり良好であることがわかる。

一方、過渡時においては、沸騰長さの変化は、以下に示す单相流の平均エンタルピー変化式を解いて求められる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial Z} = \frac{4q(Z, t)}{\rho D} \quad (4-9)$$

ただし、流速変化をランプ状で近似し、過渡状態においても熱流束は変化しないと仮定すると、次の条件が課せられる。

$$v = \begin{cases} v_i(1-bt) & 0 \leq t < t_f \\ v_i(1-bt_f) & t_f \leq t \end{cases} \quad b = \text{const} \quad (4-10)$$

$$q = \text{const} \quad (4-11)$$

(4-10)、(4-11) の条件のもとで (4-9) 式は特性曲線法により解かれ、その解法は付録 B に示す。なお付録 B には、上述の单相流過渡変化の他に沸騰二相流の過渡変化に関する特性曲線法による無次元解析結果を示してある。

(4-9) 式を解くことにより、等エンタルピー点の移動の様子がわかる。ところで、飽和エンタルピー (h_{sat}) は圧力の関数であるから、流量低下過渡変化時における各時刻の入口圧力に対応する h_{sat} の点 (飽和点) を結べば、沸騰境界 (クォリティ = 0) の移動の様子が求められる。この曲線を飽和点移動曲線と定義する。

図 4.7 ~ 4.9 の下の図に破線で示したのが、上述の方法により求めた等 h 線であり、太線が飽和点移動曲線 (クォリティ = 0 の線) を示している。この飽和点移動曲線が求まると、過渡変化過程での各時刻における沸騰長さ L_B は、その時刻における飽和点の位置を Z_{sat} とすると、

$$L_B = L - Z_{\text{sat}} \quad (4-12)$$

により求められる。

以上のようにして求めた過渡変化過程における沸騰長さ L_B に対応する定常時の入口圧力は、図 4.5(b) (熱流束 $0.7 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ 、入口温度 30°C の場合) または図 4.6(b) (熱流束 1.01

$\times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 入口温度 30°C の場合)により求められる。このようにして求めた定常時入口圧力を図 4.7~4.9 の上の図に破線で示す。これらはいずれも熱流束 $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 入口温度 30°C の場合である。

図 4.7 は, 流量減少過渡時間が 2.15 秒の場合で, 同図では破線は入口圧力実験値とほとんど重なっており, この程度の遅い過渡変化の場合は, 同じ沸騰長さでの定常時と過渡時の入口圧力挙動は極めて良く一致し, 圧力変化は流量変化に追随していると言える。

図 4.8 は, 流量減少過渡時間が 3.6 秒の場合で, この例では入口圧力は一度ピークに達してから一定値に落ち着く挙動を示している。この場合は, 過渡変化の初期においては定常時入口圧力が過渡時入口圧力より高くなっているが, 圧力ピーク付近では過渡時入口圧力の方が高くなっている。

図 4.9 は, 流量減少過渡時間が 0.06 秒と, 急激な過渡変化の場合で, 同図より, 同じ L_B に対する過渡時入口圧力は定常時入口圧力をかなり下まわることがわかる。

図 4.10~4.12 は, 熱流束が $1.01 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 入口温度 30°C の場合について, 以上の関係を示したものである。なお図 4.7~4.9 はシリーズ 2 実験データを使用し, 図 4.10~4.12 はシリーズ 1 実験データを使用している。

図 4.10~4.12 からも, 流量減少過渡時間が短い程 (流速減少率が大きい程), 同じ沸騰長さに対応する定常時入口圧力と過渡時入口圧力の差は大きくなり, 沸騰長さは同じでも管内の二相流動状態は同一でないことを示している。

一方, 図 4.10 (流量減少過渡時間: 10.1 秒)において, 過渡変化開始から約 4 秒ほど, 定常時と過渡時の入口圧力に小さい差があるのは, テスト部出口で最初に未飽和沸騰を開始した直後には, この程度のゆっくりした過渡変化においても一種の非定常効果があるためではないかと思われる。

なお, 以上述べたような, 同じ沸騰長さに対応する定常時と過渡時の入口圧力挙動の差に関して, 各種誤差を考慮した詳細な検討は既に文献(6)に述べている。

図 4.13(a), (b) は, 沸騰長さが $10, 20, 30, 40\text{cm}$ に達した時点における定常時と過渡時の入口圧力差が, 流速減少率によりいかに変化するかを, 熱流束, 流量減少範囲をパラメータとして示したものである。

過渡変化の初期, すなわち $L_B = 10, 20\text{cm}$ (図 4.13(a)) で比較すると, 定常時と過渡時の入口圧力に差が見られるのは, 流速減少率が約 40cm/sec/sec より大きい時で, 過渡変化の後期, すなわち $L_B = 30, 40\text{cm}$ (図 4.13(b)) で比較すれば, この境界は約 10cm/sec/sec 付近であることがわかる。そして, この定常と過渡の差が生じる境界の流速減少率は, 同図に示したような熱流束, 流量減少範囲の間で特に差は見られない。また, 同図において, 流速減少率が約 $10 \sim 200\text{cm/sec/sec}$ の範囲では, L_B が長い所で比較する程, 過渡時入口圧力の方が定常時の値より大きくなっているのは, 既に述べたように入口圧力にピークが生じるためである。

4.3 壁温変化に見られる非定常効果

4.1 節で述べたように、テスト部壁温は一般に流量低下に伴って上昇し、ピークに達してから一定値に近づく。このような壁温ピークが現れるのは、流量低下により流動状態が変化し、その時点において熱伝達メカニズムが急変したためと考えられる。定常沸騰流路の壁温挙動も、飽和点付点で複雑な変化を示すことが知られているが、本実験のような沸騰境界のかなり急激な移動を伴う過渡変化の場合、壁温ピークが流体側のどのようなメカニズム変化に対応するかは現在のところ不明である。

従って、以下においては、本実験により明らかとなった流量減少過渡時の壁温変化に見られる非定常効果の例として、各熱電対取付け位置が飽和点（クオリティ＝0の点）に達する時刻と壁温ピーク出現時刻との相対的な関係が流速減少率によりいかに変化するか、壁温ピーク移動速度と流速減少率との関係はどうかなどの点について調べる。

4.3.1 壁温ピーク出現時刻と飽和点移動曲線との関係

図 4.14～4.16 は、それぞれ上段に示した測定データに対応する飽和点移動曲線を下段に示し、さらに各熱電対位置（TC 1, 3～6）において壁温ピークが出現した時刻を下段の図に△印で示したものである。なお、以下の議論で TC 取付け位置はシリーズ 2 実験（図 2.3）に基づくが、シリーズ 1 でも定性的には同様の結果が得られている。⁽⁶⁾

図 4.14 のように流量減少過渡時間が 6.5 秒（流速減少率 20.4cm/sec/sec ）と遅い過渡変化の場合には、各 TC 位置での壁温ピーク（△印）は飽和点移動曲線の左側に位置し、その点の流体エンタルピーが飽和点に達する（平均クオリティが 0 となる）前に壁温ピークが出現したことを示している。

図 4.15 は流量減少過渡時間が 1.14 秒（流速減少率 116cm/sec/sec ）とかなり急激な過渡変化の場合で、TC 1, 3, 4（出口より 1, 4, 12cm）の位置での壁温ピークはほぼ飽和点移動曲線上にのっているが、TC 5, 6（出口より 20, 28cm）の位置での壁温ピークは同曲線の右側に位置し、その点の流体が飽和点に達した後で壁温ピークが出現したことを示している。

図 4.16 は流量減少過渡時間が 0.06 秒（流速減少率 2000cm/sec/sec ）と極めて急激な過渡変化の例で、前図と同様に TC 4, 5 位置における壁温ピークは飽和点移動曲線の右側に位置している。

ところで、図 4.14～4.16 の測定データ例を見てもわかるように、壁温ピークはそれほどシャープな形で出現しているわけではないので、その出現時刻決定には相当の誤差が含まれている。

また、テスト部外壁に溶接した熱電対の応答性には、熱電対自体の時定数（約 0.05 秒）や溶接後の時定数変化の他に、内面の熱伝達メカニズム変化の影響が外面の温度挙動に現われるまでの時間遅れ（4.1 参照）などの問題がある。

さらに、飽和点移動曲線を求める際に熱流束は一定と仮定したが、実際には壁温上昇に伴う熱流束の減少（4.1 参照）がある。図 4.16 には熱流束が過渡変化後 5% 減少したと仮定した場合の飽和点移動曲線を太い破線で示してある。同図に見られるように、過渡変化に伴う熱流

束減少が飽和点移動曲線に与える誤差はあまり大きくないので、以上で述べたような壁温ピーク出現時刻と飽和点移動曲線との関係の一般的な傾向には、それ程大きく影響しないと思われる。

なお、4.1に述べた壁温の振動は、テスト部出口の平均エンタルピーが飽和点（クオリティー＝0）に達した時刻に発生していることが図4.14～16からわかる。

4.3.2 壁温ピーク移動速度と流速減少率との関係

前節で述べた壁温ピークは、時間がたつにつれテスト部上流に移動してゆく。この壁温ピーク移動速度は、流量の過渡変化に対する熱伝達メカニズム変化の追従性を示す指標とみなせるであろう。

図4.17は熱流束 $0.54 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合について、壁温ピーク移動速度と流速減少率の関係を示す。なお、図4.15、4.16のように、流速減少率が大きい場合には、TC1～4（出口より1～12cm）の間の壁温ピーク移動速度と、TC5,6（出口より20～28cm）の間の壁温ピーク移動速度はかなり異なっているので、同図では両者を区別して示してある。

図4.17に見られるように、流速減少率が小さい場合には、TC1～4間の壁温ピーク移動速度は、流速減少率に比例して増加し、流速減少率が約 100 cm/sec/sec 程度より大きくなると、壁温ピーク移動速度は流速減少率によらずほぼ一定となっている。

ところで、本実験のように流速が直線上に低下した場合の、流体平均エンタルピーがある値を有する場所と時刻の関係（等エンタルピー点の移動）を求める方法は付録Bに述べてある。流速減少率が小さい場合には、付録Bの（B3-8）式より、等エンタルピー点移動速度は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta Z}{\Delta t} = \frac{h - h_i}{\frac{qP}{A\rho}} \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| \quad (4-13)$$

この式より、流速減少率が小さい場合には等エンタルピー点移動速度は流速減少率に比例し、熱流束に逆比例し、初期あるいは最終流速には無関係なことがわかる。

図4.17の破線は、ランプ状流量低下を仮定して（4-13）式により計算した等エンタルピー点移動速度を、 100 kcal/kg 、 80 kcal/kg の二つの場合について示したものである。同図より、流速減少率が約 100 cm/sec/sec 以下の場合のTC1～4間の壁温ピーク移動速度実測値は、両等エンタルピー点移動速度線の間であり、初期流速（ 4.8×10^6 、 $6.0 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$ ）にはほとんど依存していないことがわかる。これより、本実験において観察された壁温ピークは、单相流からサブクール沸騰への流動状態変化に対応するものと言えよう。

一方、流速減少率の大きい場合の等エンタルピー点移動速度は、付録Bの（B3-4）式より、次式で与えられる。

$$\frac{\Delta Z}{\Delta t} = - (v_i - v_f) \quad (4-14)$$

（4-14）式に従えば、流速減少率が十分大きくなると、等エンタルピー点移動速度は、流速減少率、熱流束、平均エンタルピーなどに無関係で、初期流速と最終流速の差のみで定まる一

定値となる。この一定値も図 4.17 に破線で示してある。同図より、流速減少率が約 100 cm/sec/sec 以上の場合の壁温ピーク移動速度実測値はほぼ一定となるが、(4-14) 式による計算値よりかなり小さくなっている。

また、同図より、TC 5, 6 (出口より 20, 28 cm) の間の壁温ピーク移動速度は流速減少率が約 10 cm/sec/sec 付近において TC 1 ~ 4 (出口より 1 ~ 12 cm) 間の壁温ピーク移動速度より小さくなり始め、流速減少率増大と共にこの差も大きくなる傾向にあり、約 50 cm/sec/sec 程度ではほぼ一定となっているが、その値は TC 1 ~ 4 間の壁温ピーク移動速度一定値よりかなり小さいことがわかる。

図 4.18 は、以上の関係を熱流束 $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$ の場合について示したものである。

図 4.17 と 4.18 を比較すると、熱流束の大きい後者の方が、流速減少率が小さい区間での壁温ピーク移動速度は小さくなり、(4-13) 式の傾向と一致している。また、壁温ピーク移動速度が一定となる流速減少率は、後者の場合の方が大きくなる傾向を示している。

以上の相異点はあるが、壁温ピーク移動速度と流速減少率との間の一般的関係は、図 4.17 の場合とほぼ同様と言える。

表 4.1 過渡時にテスト部の温度上昇に用いられる熱量

Run	Q		T.C. No	ΔT (mV)	ΔT (°C)	Δt^* (sec)	$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ (°C/sec)	ΔQ^{**} W/cm	$\frac{\Delta Q}{Q}$
	Heat Flux	Heat Generation							
	($\frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$)	(W/cm)							
12/15-6	$\times 10^6$	205	6	0.39	9.5	0.70	13.6	14.8	0.072
	0.706		7	0.49	12.0	0.90	13.0	14.5	0.071
12/23-12	1.01	295	6	0.34	8.3	0.70	11.8	12.9	0.044
			7	0.48	11.7	1.00	11.7	12.8	0.043

* ΔT の温度上昇に用する時間

** $\Delta Q = c \rho V_T \frac{\Delta T}{\Delta t}$, V_T はテスト部体積 / 単位長さ

表 4.2 一次元スラブ形状において、ある過渡変化が生じてから温度分布が定常状態の 90% 以上に接近するまでの時間⁽⁸⁾

過渡変化の種類	過渡変化時間 ^(*)	過渡変化時間のオーダー ^(**) (sec)
外面温度変化	$\frac{1.0 \delta^2}{a}$	0.23
熱流束変化	$\frac{0.3 \delta^2}{a}$	0.07
発生熱量変化	$\frac{0.25 \delta^2}{a}$	0.06

(*) δ = テスト部肉厚 = 1 mm

a = 温度伝達率

(**) シリーズ 1 実験のテスト部内面には、約 3.3 μ のオーダーのスケールが附着していると考えられるので⁽⁶⁾、その温度伝導率のオーダーを 0.0012 m^2/h 、テスト部の温度伝導率を 0.016 m^2/h として、過渡変化時間を計算し両者の和をとった。

シリーズ 2 の実験の場合には、スケールのオーダーはこれより小さいと思われるので、過渡変化時間のオーダーもさらに小さくなる。

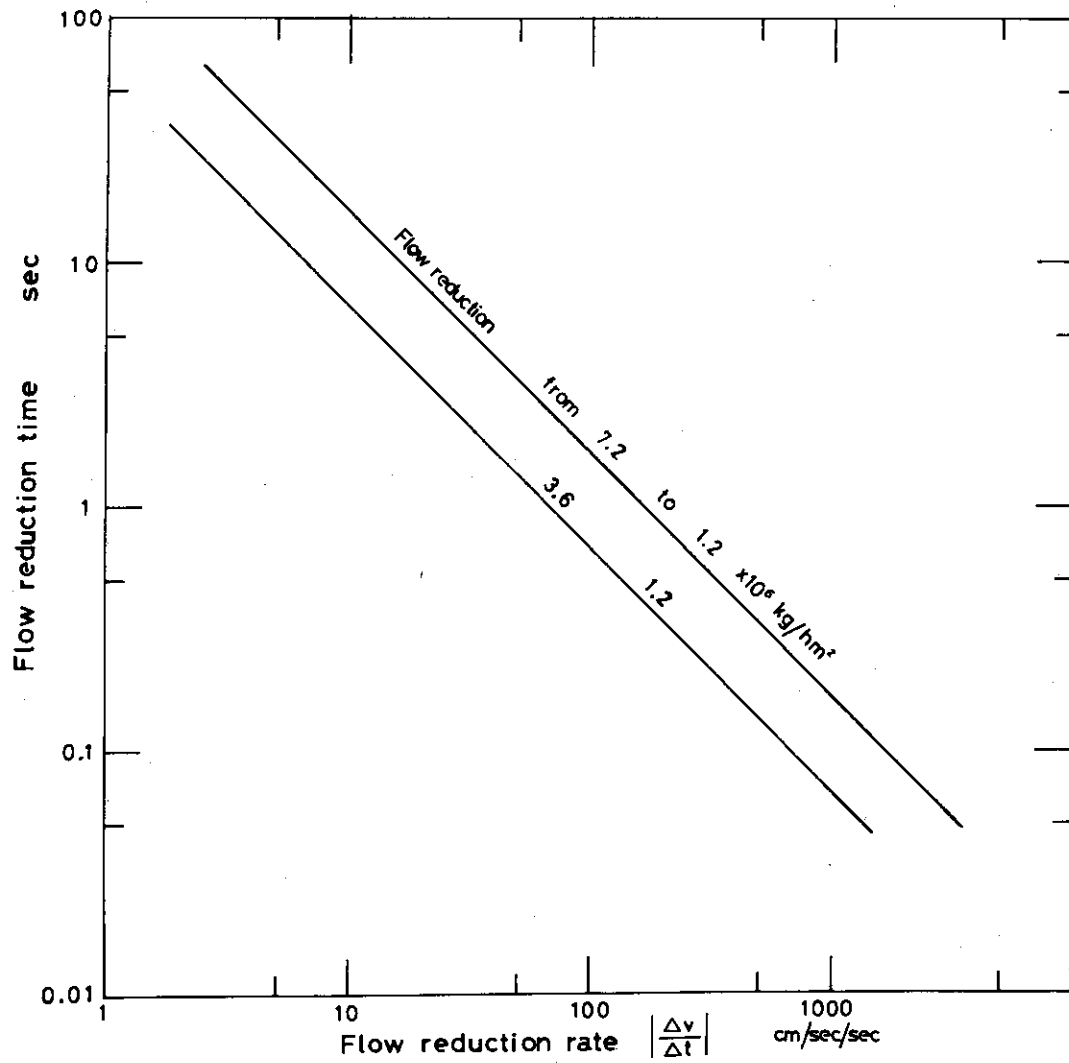
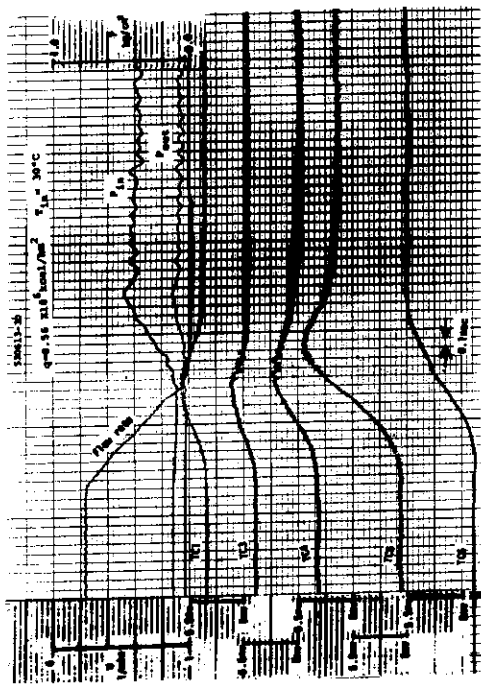
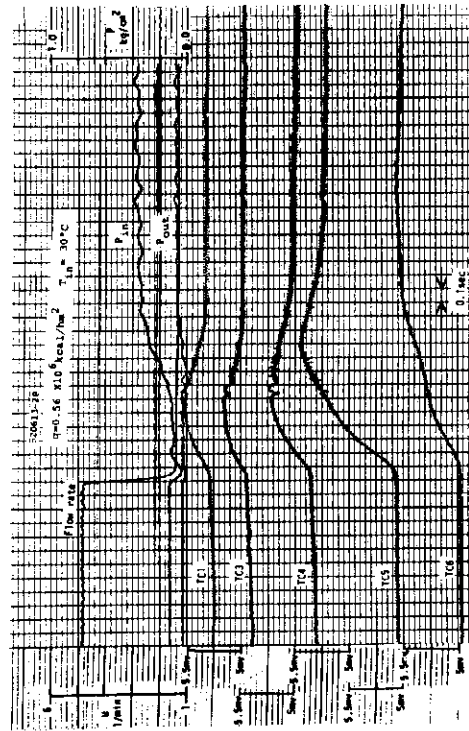


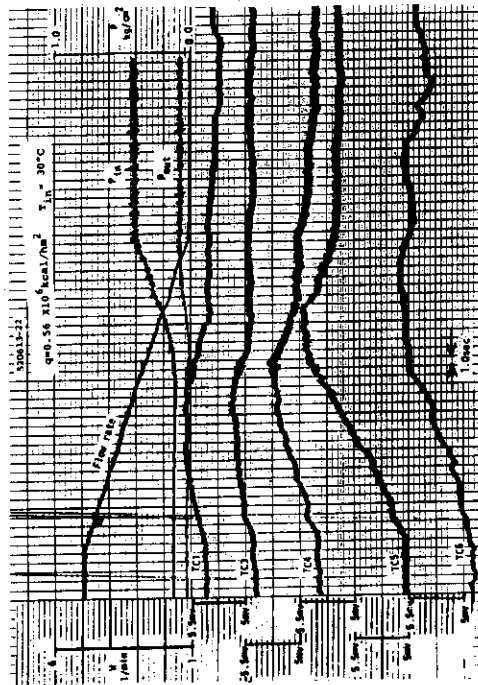
図 4.1 流速減少率と流量減少過渡時間の関係



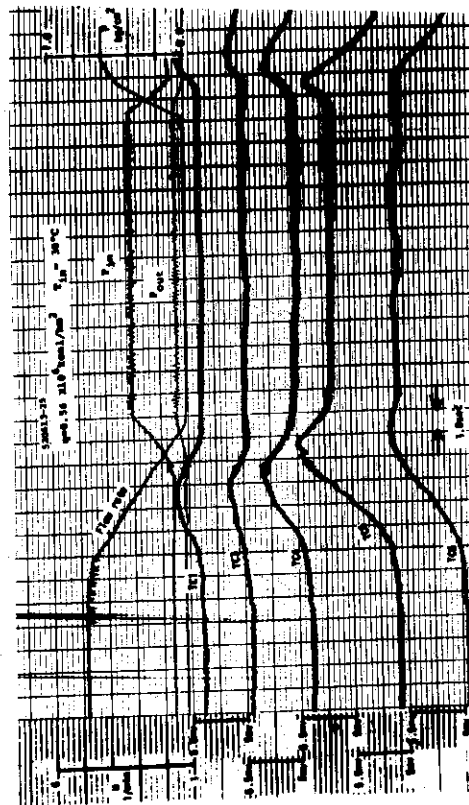
(c) 流量減少過渡時間 1.14 sec
流速減少率 1.16 cm/sec/sec



(d) 流量減少過渡時間 0.06 sec
流速減少率 1.990 cm/sec/sec

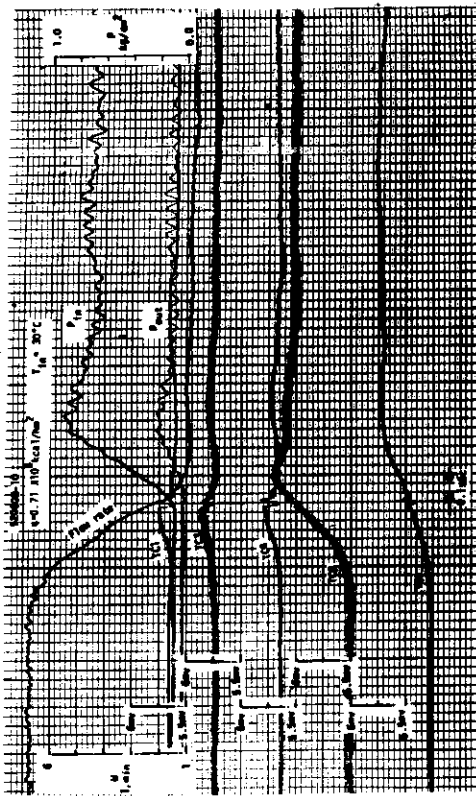


(a) 流量減少過渡時間 3.47 sec
流速減少率 3.82 cm/sec/sec

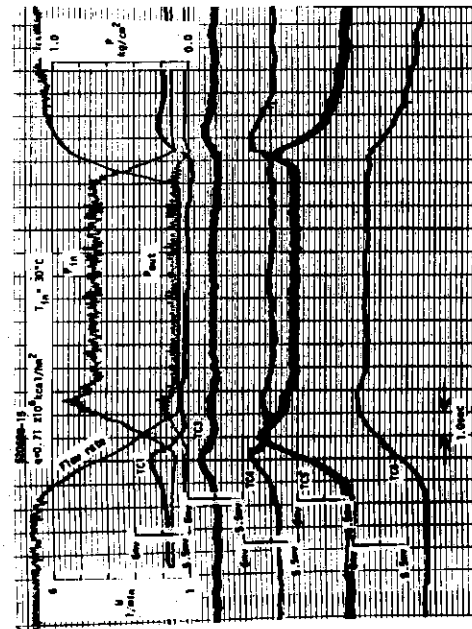


(b) 流量減少過渡時間 6.50 sec
流速減少率 2.04 cm/sec/sec

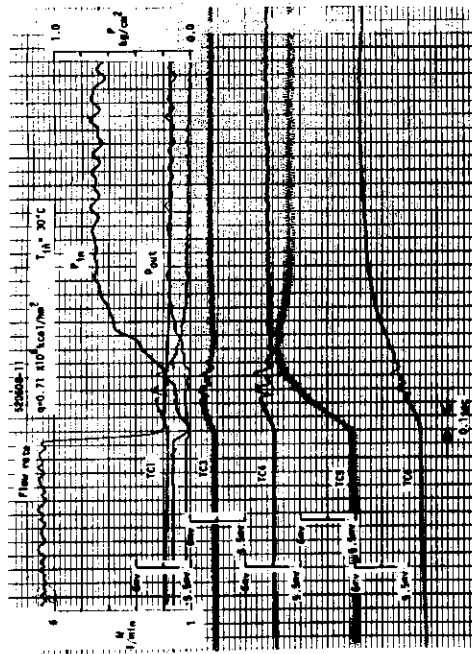
図 4.2 流量低下過渡沸騰時の一般的傾向 (その1) 熱流束 0.56×10^6 kcal/m² の場合



(a) 流量減少過渡時間 2.15 sec
流速減少率 7.71 cm/sec/sec



(b) 流量減少過渡時間 3.6 sec
流速減少率 49.7 cm/sec/sec



(c) 流量減少過渡時間 1.07 sec
流速減少率 167 cm/sec/sec

(d) 流量減少過渡時間 0.06 sec
流速減少率 2490 cm/sec/sec

図 4.3 流量低下過渡沸騰時の一般的傾向 (その 2) 熱流束 0.71×10^6 kcal/hm² の場合

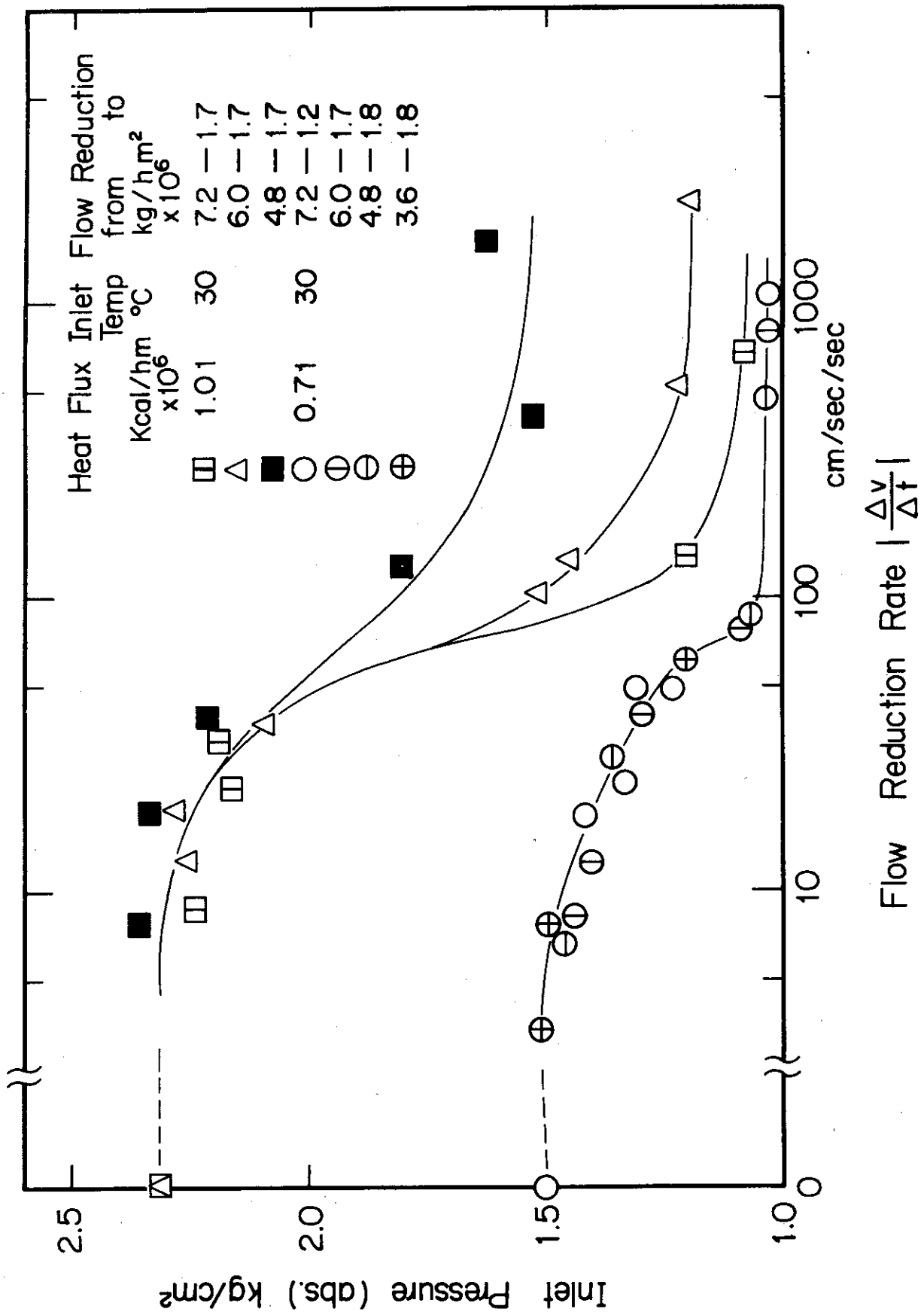


図 4.4 流量低下途中 2 ℓ/min における入口圧力と流速減少率の関係

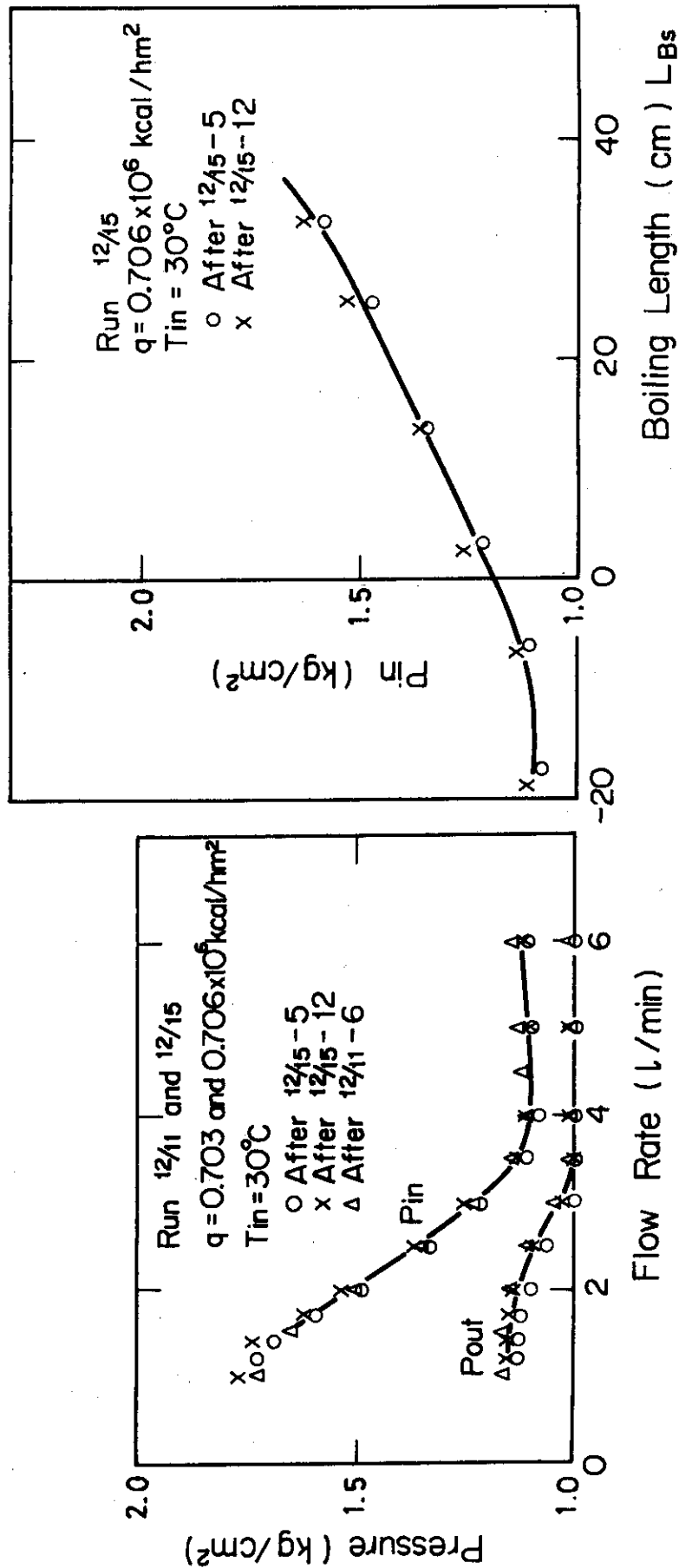


図 4.5 (a) 定常状態の入口、出口圧力と流量の関係
 (熱流束 $0.7 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$)

図 4.5 (b) 定常状態における沸騰長さと入口圧力の関係
 (熱流束 $0.7 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$)

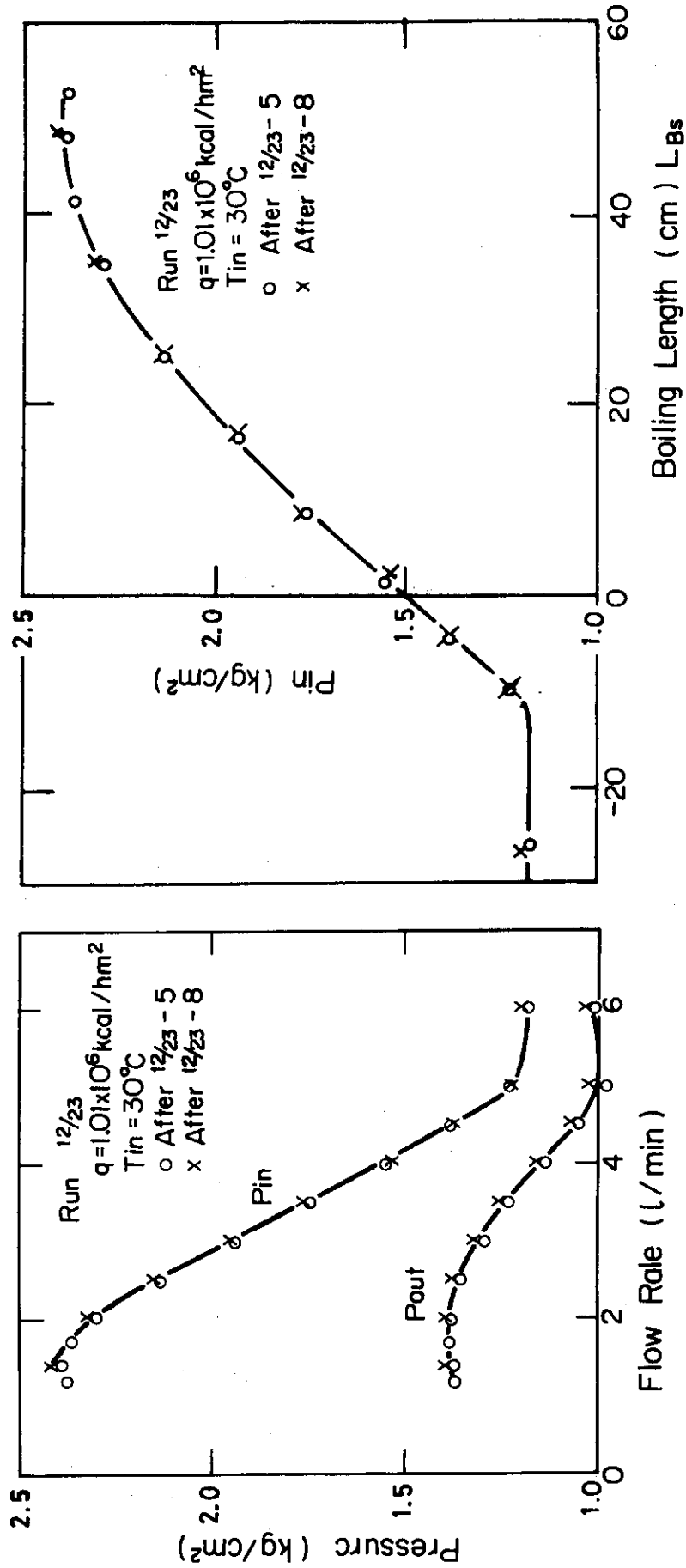


図 4.6(a) 定常状態の入口・出口圧力と流量の関係
(熱流束 1.01×10^6 kcal/hm²)

図 4.6(b) 定常状態における沸騰長さとの入口圧力の関係
(熱流束 1.01×10^6 kcal/hm²)

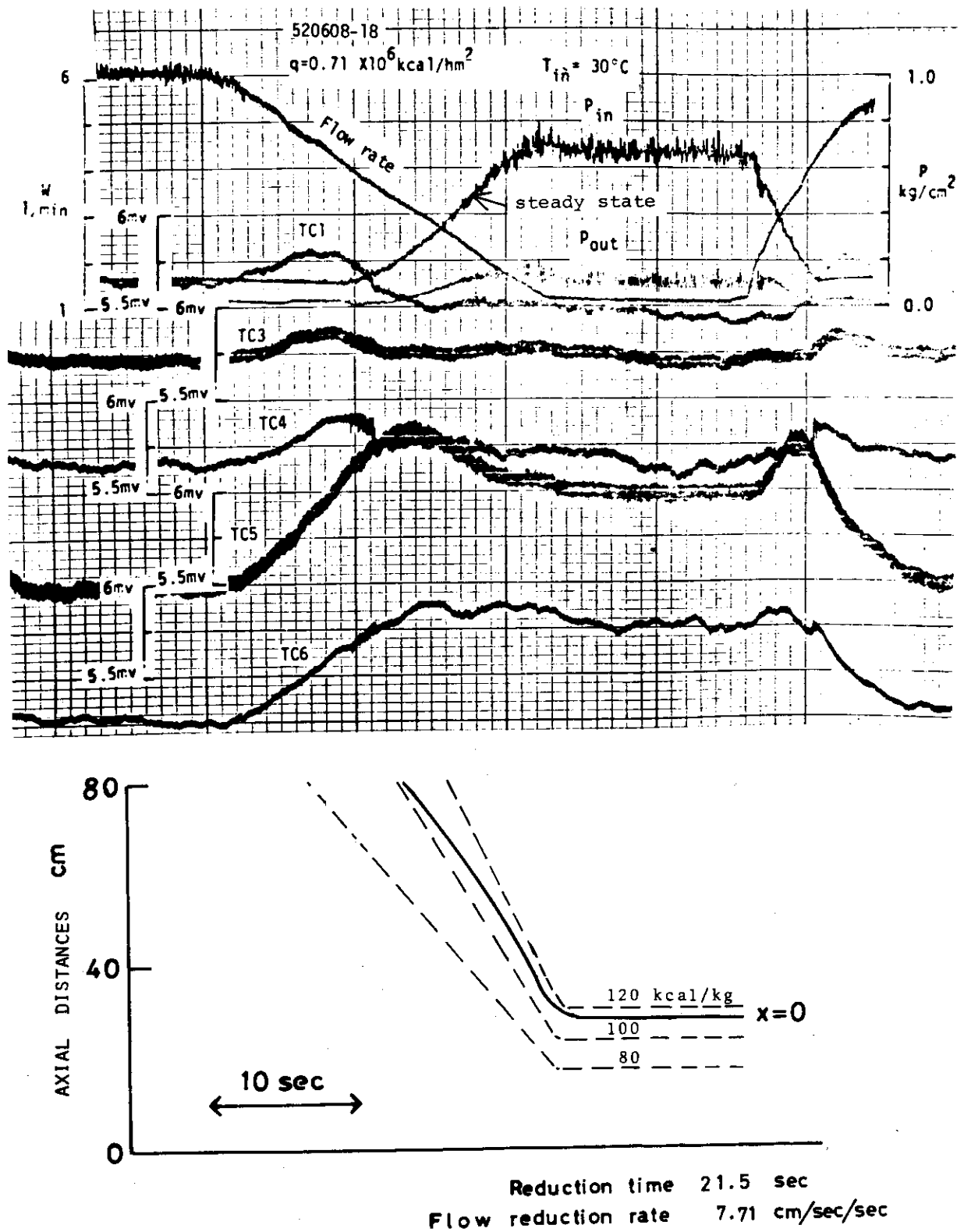


図 4.7 沸騰長さに対応する過渡時圧力と定常時圧力の比較
 (熱流束: $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 流量減少過渡時間: 21.5 sec)

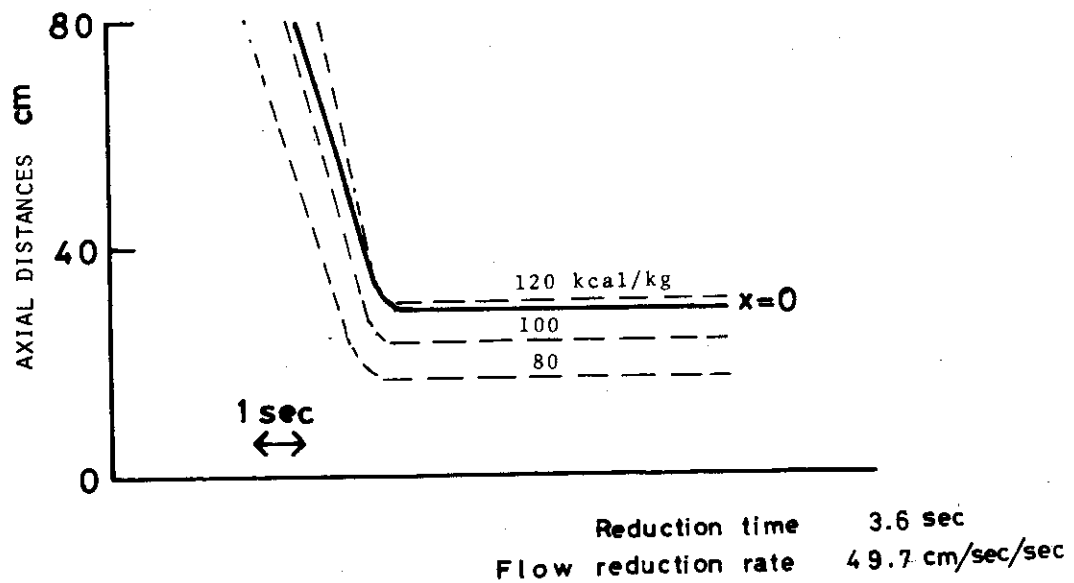
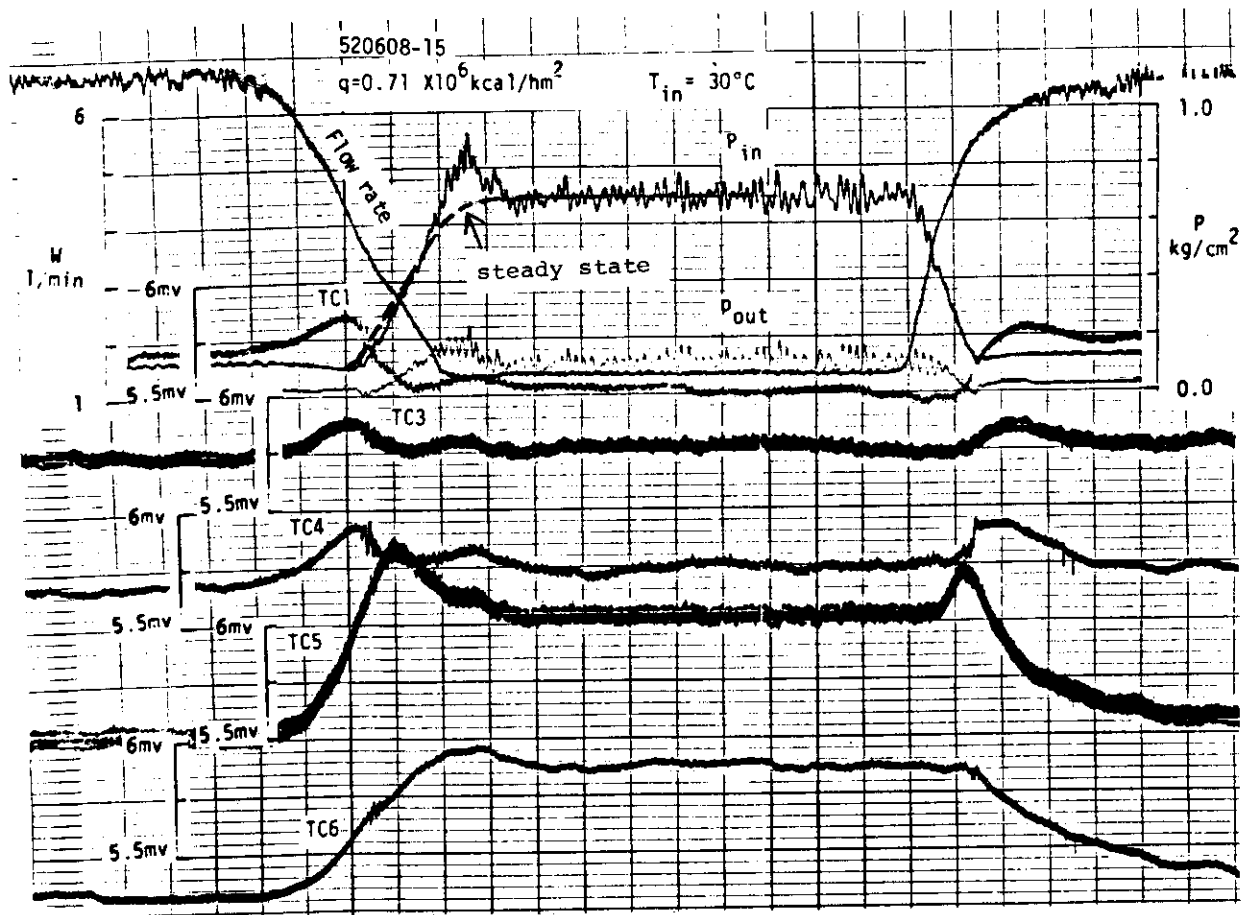


図 4.8 沸騰長さに対応する過渡時圧力と定常時圧力の比較
 (熱流束: $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 流量減少過渡時間: 3.6 sec)

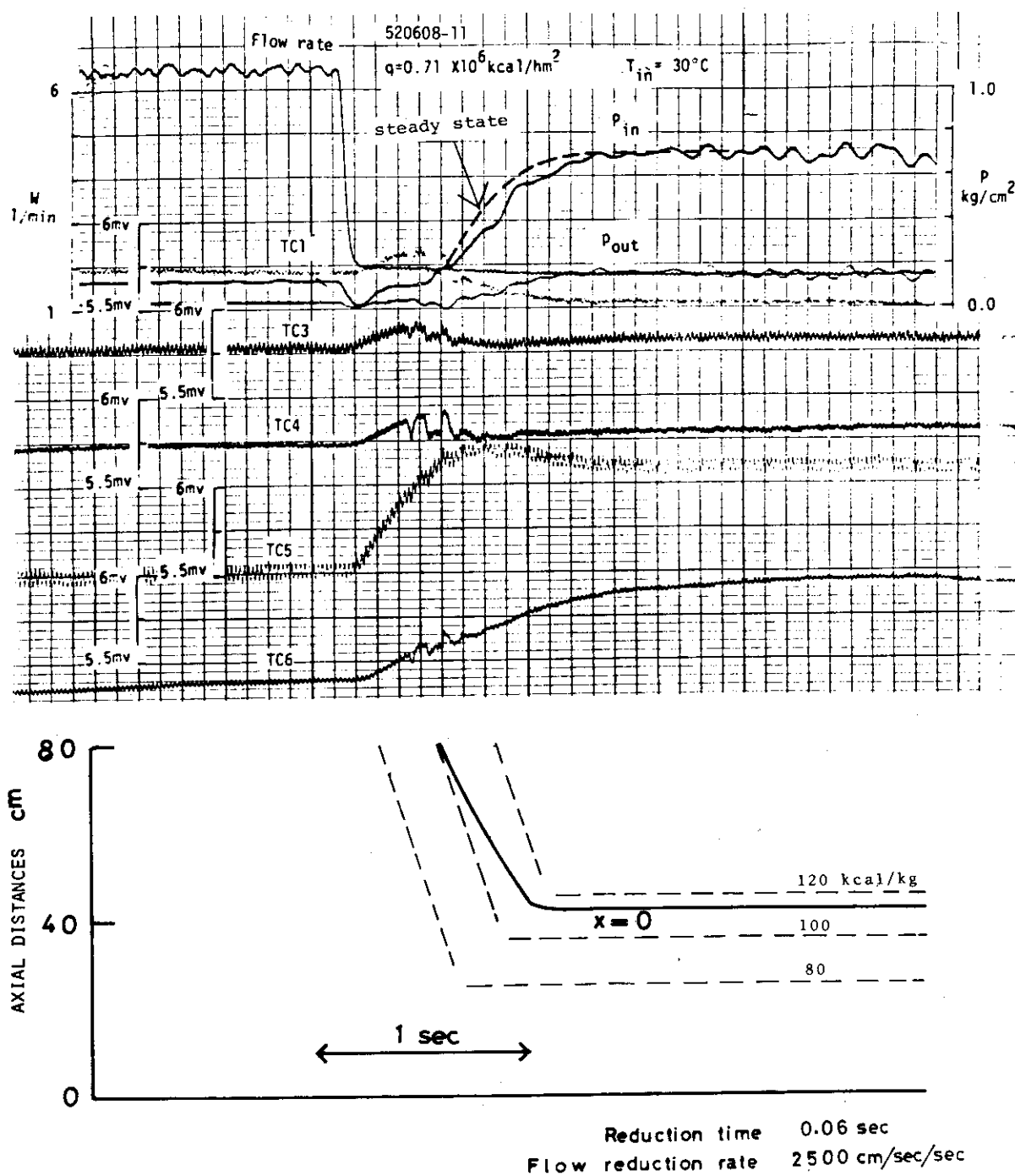
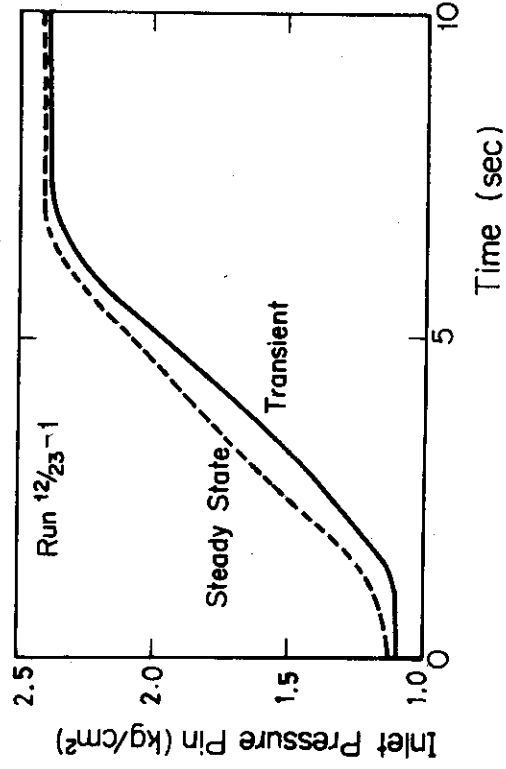
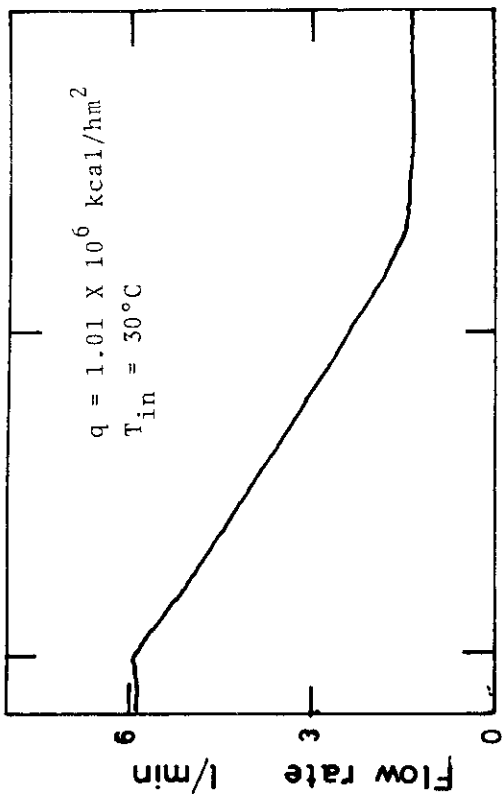
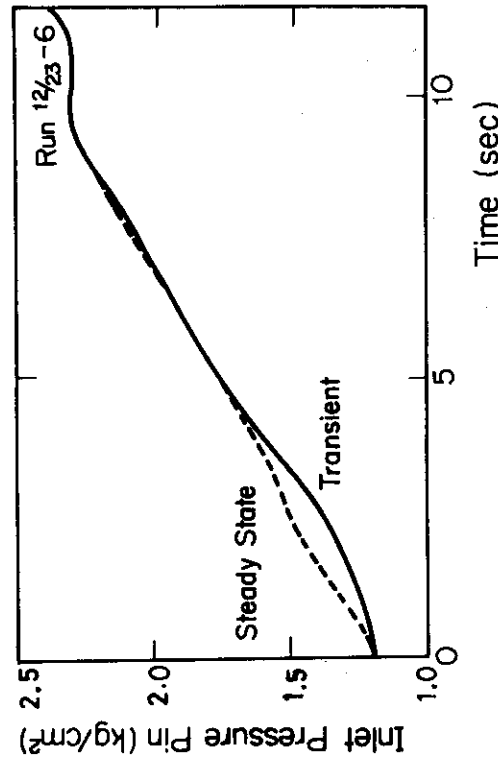
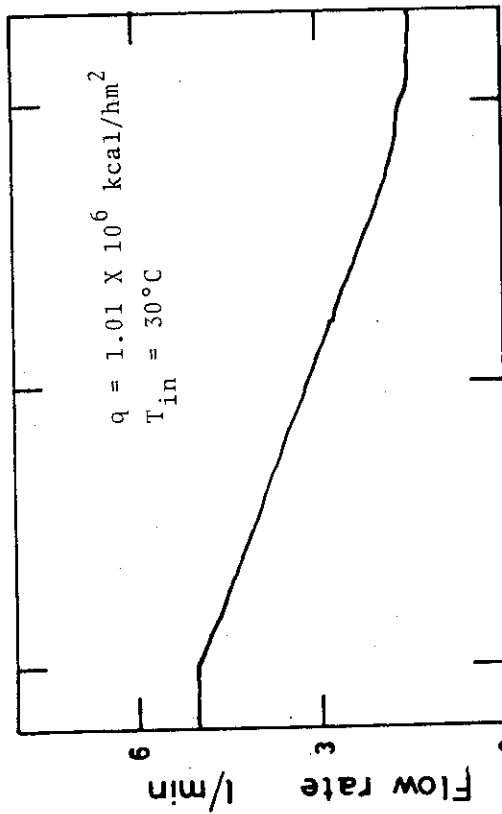


図 4.9 沸騰長さに対応する過渡時圧力と定常時圧力の比較
(熱流束: $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 流量減少過渡時間: 0.06 sec)



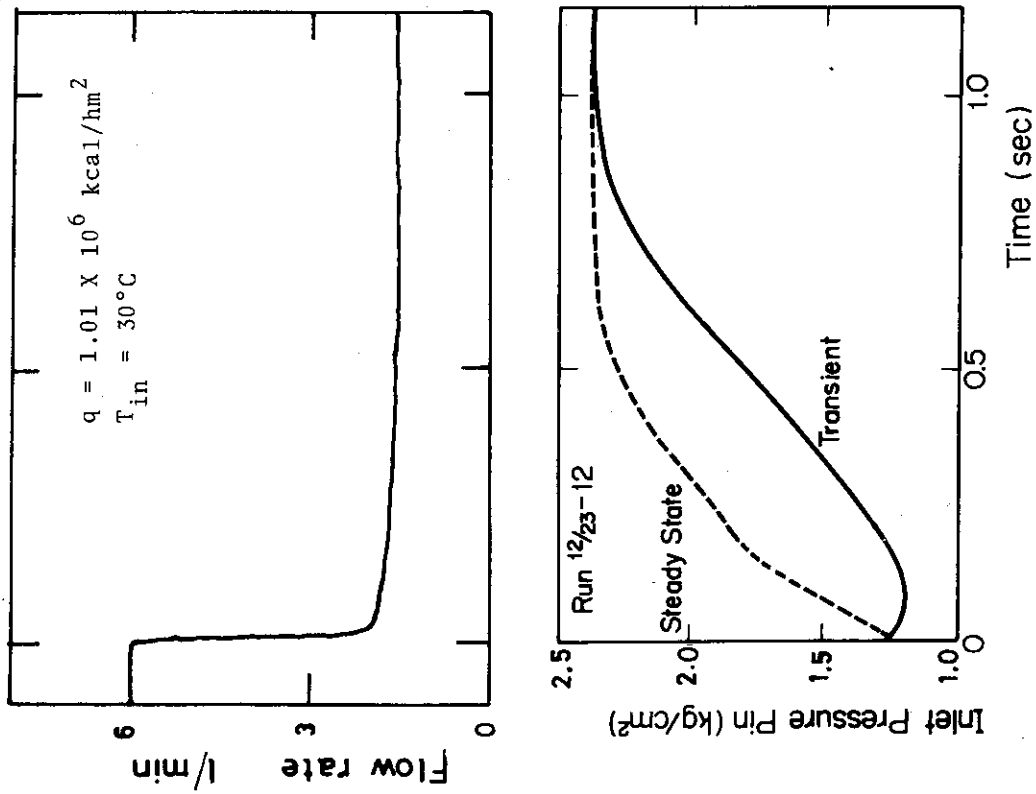
Reduction time 6.6 sec
Flow reduction rate 22.6 cm/sec/sec

図 4.1.1 沸騰長さに対応する過渡時圧力と定常時圧力の比較
(熱流束: $1.01 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 流量減少過渡時間: 6.6 sec)



Reduction time 10.1 sec
Flow reduction rate 11.3 cm/sec/sec

図 4.1.0 沸騰長さに対応する過渡時圧力と定常時圧力の比較
(熱流束: $1.01 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 流量減少過渡時間: 10.1 sec)



Reduction time 0.06 sec
Flow reduction rate 2000 cm/sec/sec

図 4.1.2 沸騰長さに対応する過渡時圧力と定常時圧力の比較
(熱流束: $1.01 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$, 流量減少過渡時間: 0.06 sec)

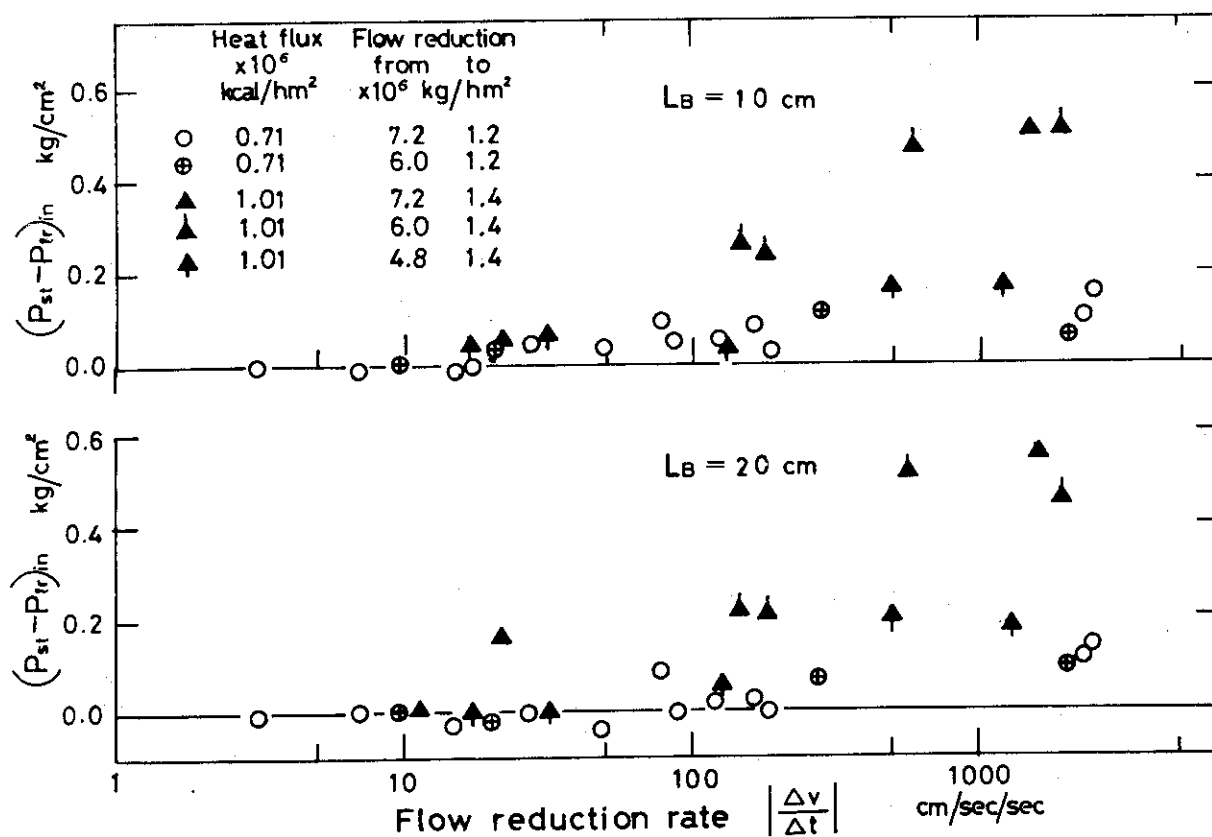


図 4.1.3 (a) 同じ沸騰長さにおける定常時と過渡時の入口圧力差と流速減少率との関係
($L_B = 10, 20$ cm)

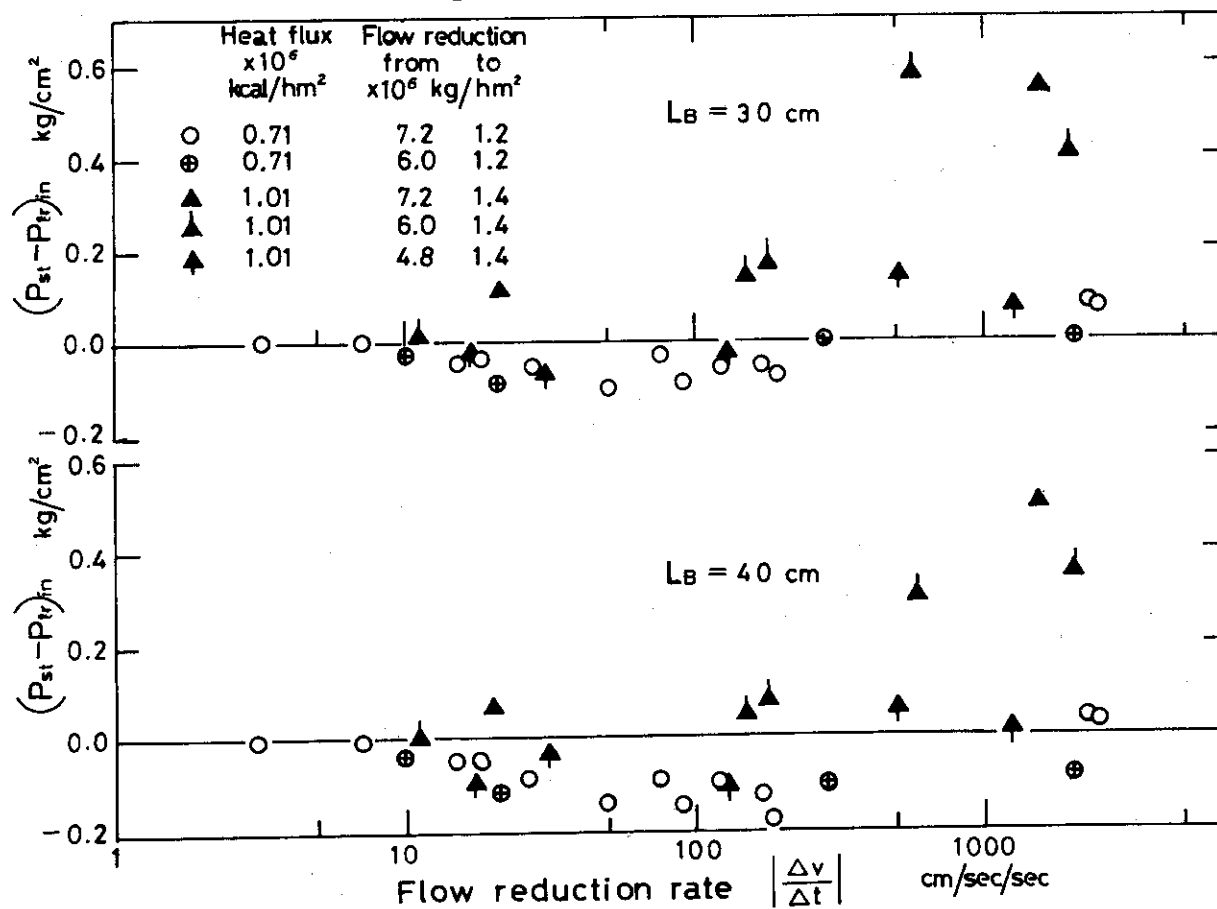


図 4.1.3 (b) 同じ沸騰長さにおける定常時と過渡時の入口圧力差と流速減少率との関係
($L_B = 30, 40$ cm)

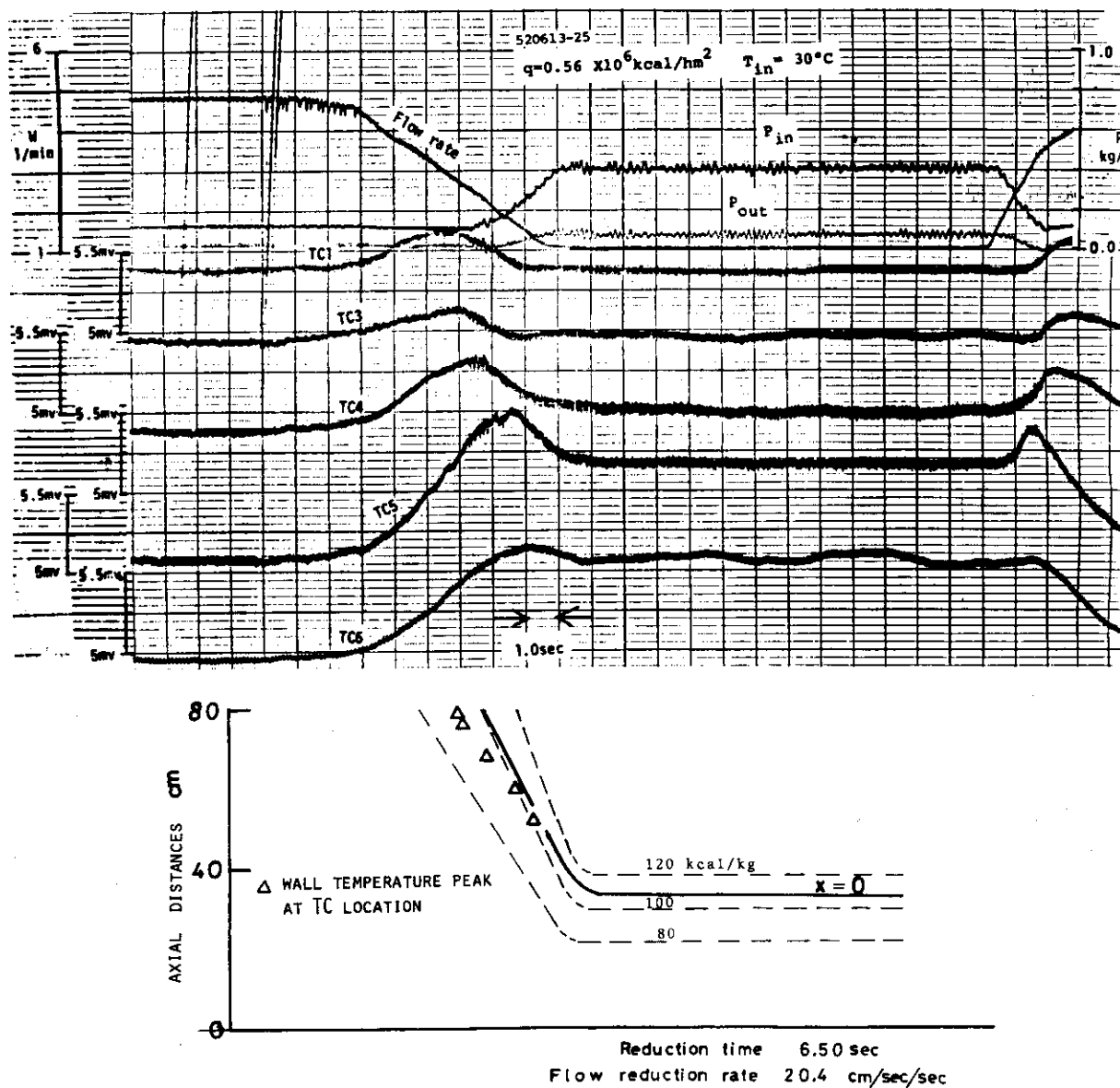


図 4.1.4 飽和点移動曲線と壁温ピーク出現時刻の関係
 (流量減少過渡時間: 6.50 sec , 流速減少率: 20.4 cm/sec/sec)

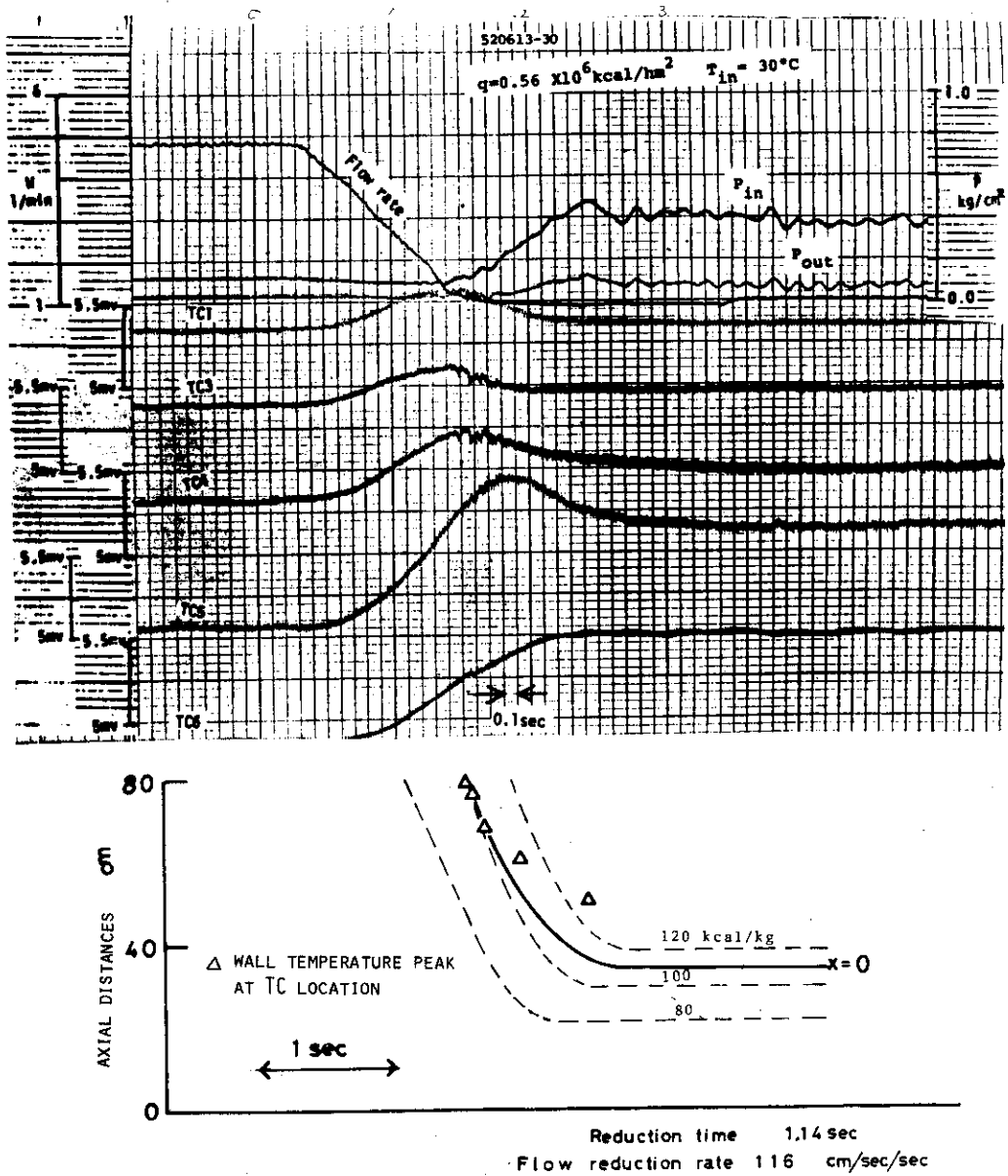


図 4.15 飽和点移動曲線と壁温ピーク出現時刻の関係
 (流量減少過渡時間: 1.14 sec, 流速減少率: 116 cm/sec/sec)

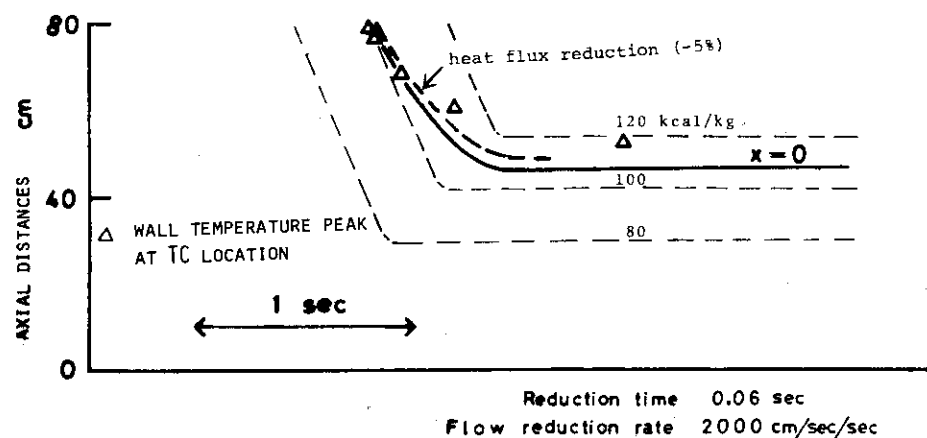
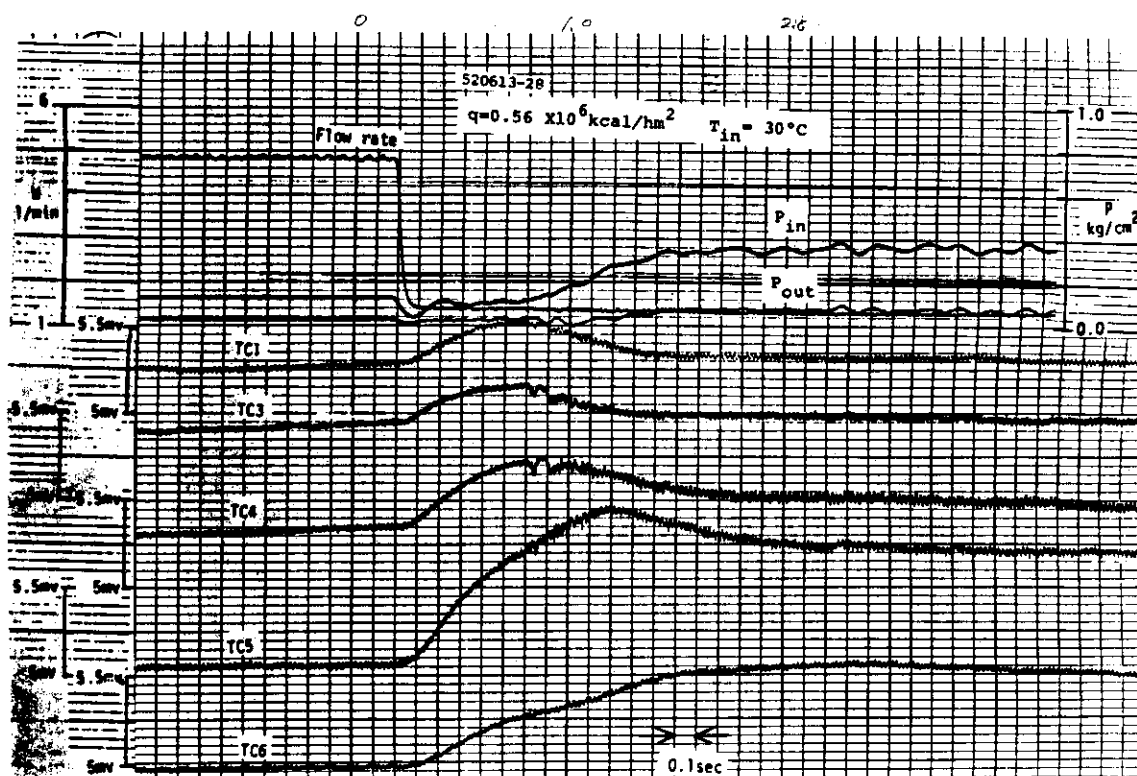


図 4.1 6 飽和点移動曲線と壁温ピーク出現時刻の関係
(流量減少過渡時間: 0.06 sec, 流速減少率: 2000 cm/sec/sec)

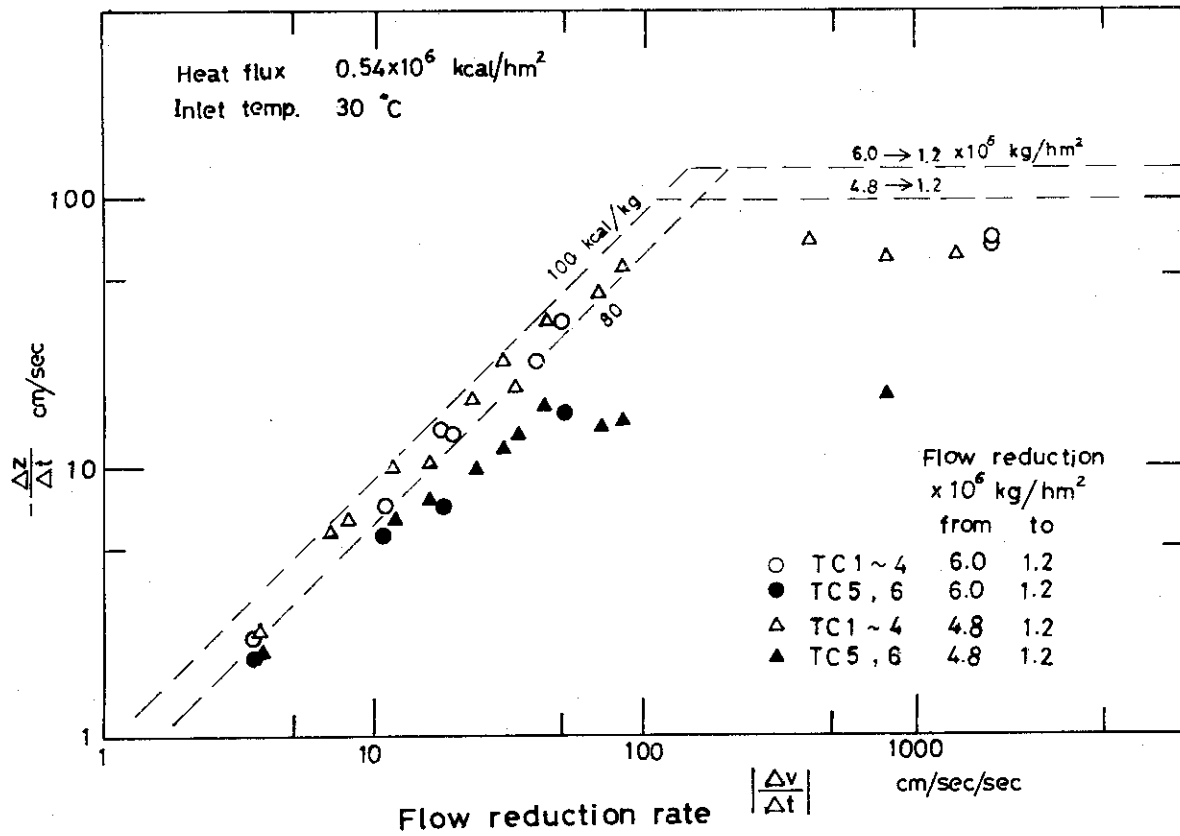


図 4.17 壁温ピーク移動速度と流速減少率の関係 (熱流束 $0.54 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$)

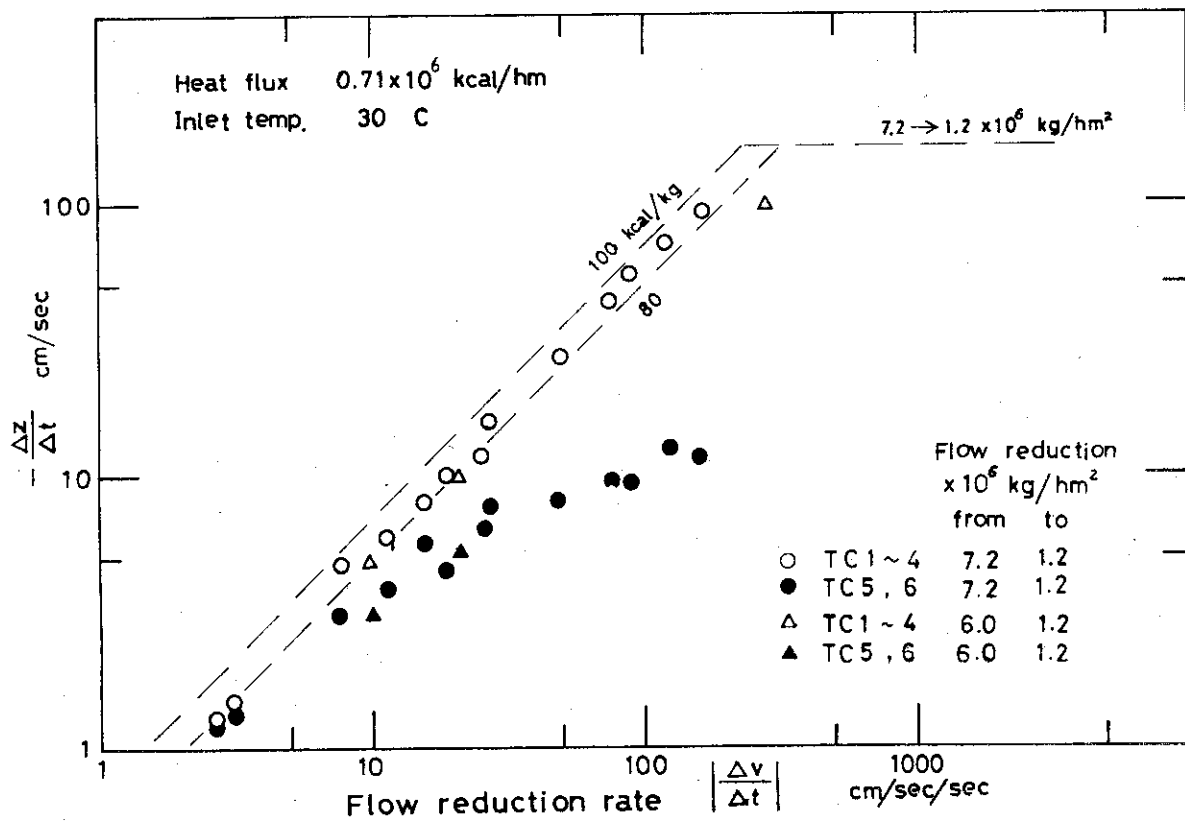


図 4.18 壁温ピーク移動速度と流速減少率の関係 (熱流束 $0.71 \times 10^6 \text{ kcal/hm}^2$)

5. ま と め

常圧大気開放ループを用いて、流量低下過渡沸騰実験を行ない、テスト部入口・出口圧力変化や壁温変化などの過渡挙動を、流速減少範囲をそれに要する時間で割った値である流速減少率により整理した所、以下の点が明らかとなった。

- (1) 流速減少率が大きくなるにつれ、流路圧力変化は流量減少に追従できなくなる。
- (2) 同じ沸騰長さに対応する定常時と過渡時の入口圧力を比較したところ、流速減少率が約 10cm/sec/sec 以下だと両者はほぼ一致し、流速減少率増大と共に後者の方がより小さくなった。
- (3) 流量低下過渡沸騰時には、壁温ピークが見られ、その出現時刻はおそい過渡変化時には、飽和点到達時刻に先行するが、流速減少率が増大すると、この関係が逆転する傾向を示した。
- (4) 流速減少率が約 100cm/sec/sec 程度以下では、出口付近の壁温ピーク移動速度は流速減少率に比例するが、それ以上の時は、この速度はほぼ一定値となった。

以上の圧力・壁温挙動から見て、本実験範囲では、流速減少率が約 10cm/sec/sec (流量減少過渡変化時間 $10\sim20$ 秒) 以下では定常としてあつかえると思われる。

また、 0.1 秒以下で流量を急減しても、定常状態に達するには約 2 秒程度かかることもわかった。

なお、本報告書で述べたような常圧下での過渡沸騰実験においては、水-蒸気間の比体積変化が大きいため、流量低下過程での流路圧力変動が相対的に大きくなり、解析が困難となるなどの問題がある。また、実炉におけるPCM条件下での燃料棒過渡挙動などの予測の可能性なども考慮して、高圧下での過渡沸騰実験が望まれる。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、終始、指導と激励をいただいた、安全工学第2研究室長平野見明氏に感謝の意を表わしたい。また、安全工学部次長山崎弥三郎氏に数々の討論をいただいたことに感謝する。実験装置の製作は、安全工学第2研究室の深谷好夫氏をわづらわした。また、測定法、測定技術に関して、新妻泰氏に負うところが大きかった。ここに記して、感謝申し上げたい。

5. ま と め

常圧大気開放ループを用いて、流量低下過渡沸騰実験を行ない、テスト部入口・出口圧力変化や壁温変化などの過渡挙動を、流速減少範囲をそれに要する時間で割った値である流速減少率により整理した所、以下の点が明らかとなった。

- (1) 流速減少率が大きくなるにつれ、流路圧力変化は流量減少に追従できなくなる。
- (2) 同じ沸騰長さに対応する定常時と過渡時の入口圧力を比較したところ、流速減少率が約 10cm/sec/sec 以下だと両者はほぼ一致し、流速減少率増大と共に後者の方がより小さくなった。
- (3) 流量低下過渡沸騰時には、壁温ピークが見られ、その出現時刻はおそい過渡変化時には、飽和点到達時刻に先行するが、流速減少率が増大すると、この関係が逆転する傾向を示した。
- (4) 流速減少率が約 100cm/sec/sec 程度以下では、出口付近の壁温ピーク移動速度は流速減少率に比例するが、それ以上の時は、この速度はほぼ一定値となった。

以上の圧力・壁温挙動から見て、本実験範囲では、流速減少率が約 10cm/sec/sec (流量減少過渡変化時間 $10 \sim 20$ 秒) 以下では定常としてあつかえると思われる。

また、 0.1 秒以下で流量を急減しても、定常状態に達するには約 2 秒程度かかることもわかった。

なお、本報告書で述べたような常圧下での過渡沸騰実験においては、水-蒸気間の比体積変化が大きいため、流量低下過程での流路圧力変動が相対的に大きくなり、解析が困難となるなどの問題がある。また、実炉における PCM 条件下での燃料棒過渡挙動などの予測の可能性なども考慮して、高圧下での過渡沸騰実験が望まれる。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、終始、指導と激励をいただいた、安全工学第2研究室長平野見明氏に感謝の意を表わしたい。また、安全工学部次長山崎弥三郎氏に数々の討論をいただいたことに感謝する。実験装置の製作は、安全工学第2研究室の深谷好夫氏をわづらわした。また、測定法、測定技術に関して、新妻泰氏に負うところが大きかった。ここに記して、感謝申し上げたい。

参 考 文 献

- (1) Pierre C.C.St., ANL-7041 (1965)
- (2) Zuber N. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 19 (1966) 871
- (3) Staub T.W. et al., Nucl. Sci. & Eng., 30 (1967) 279
- (4) Shiralkar B.S. et al., Nucl. Eng. Design, 25 (1973) 350
- (5) Paul F.W. et al., J. Heat Transfer, 96 (1974) 504
- (6) 黒柳利之, 岩村公道 “常圧ループによる過渡沸騰実験(I) (流量低下時の圧力および壁温変化)” 未公開資料
- (7) 黒柳利之, 岩村公道 “常圧ループによる過渡沸騰実験(III) (流量低下時の過渡沸騰および過渡バーンアウト実験)” 未公開資料
- (8) Carslaw H.S., and Jaeger J.C., "Conduction of heat in solid", Oxford Univ. (1959)
- (9) Hildebrand F.B., "Advanced calculus for applications", Prentice-Hall Inc. (1963)

記 号 表

NOMENCLATURE

A	= cross-section area (m^2)
a	= thermal diffusivity (m^2/h)
b	= dimensionless velocity change rate $\equiv \frac{L}{v_i^2} \left \frac{dv}{dt} \right $
C_p	= specific heat at constant pressure ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)
D	= diameter (m)
G	= mass velocity ($kg/sec \cdot m^2$ or kg/hm^2)
GL	= dimensionless mass velocity
H	= dimensionless enthalpy $\equiv (h - h_{in}) / \left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i} \right)$
h	= enthalpy ($kcal/kg$)
K	= constant, used in eq. (B5-7)
k	= thermal conductivity ($kcal/mh \cdot ^\circ C$)
L	= heated length (cm or m)
L_B	= boiling length (cm or m)
P	= pressure (kg/cm^2)
p	= perimeter (m)
Q	= heat generation rate (W/cm)
q''	= heat flux ($kcal/hm^2$)
S	= slip ratio
T	= temperature (mV or $^\circ C$)
t	= time (sec)
u	= normarized velocity $\equiv v(\tau)/v_i$
v	= velocity (cm/sec or m/sec)
$\left \frac{dv}{dt} \right $	= flow reduction rate (cm/sec/sec)
W	= flow rate (l/min)
x	= bulk quality
Z	= axial distance (cm)

Subscripts

B	= boiling boundary
c	= constant, used in eq. (B5-8)
d	= constant, used in Fig. B-3
f	= final
i	= initial
in	= inlet

ℓ = liquid
 out = outlet
 s = steady state
 sat = saturation
 v = vapor

Greek letters

α = void fraction
 β = constant, used in the function of $u(\tau)$
 δ = thickness (mm or μ)
 η = dimensionless height $\equiv Z/L$
 λ = latent heat of evaporation (kcal/kg)
 ν = density ratio $\equiv \rho_v/\rho_\ell$
 ρ = density (kg/m^3)
 τ = dimensionless time $\equiv tv_i/L$
 τ = constant, used in eq. (B1-3')
 ϕ = normalized flux $\equiv q(u, \tau)/q_i$
 ϕ_0 = constant, used in the function of $\phi(\tau)$

付録 A 実験データ一覧表および記録例

シリーズ 1 の実験条件一覧表を表 A・1 に，実験データ記録例を図 A・1(a)（流量低下），図 A・1(b)（流量振動）に示す。同様にシリーズ 2 の実験条件一覧表は表 A・2 に，実験データ記録例を図 A・2 に示す。

表A・1 シリーズ1実験条件一覧表

Flow Reduction Experiment

Run	Heat Flux (kcal/hm) $\times 10^6$	Inlet Temperature (°C)	Flow Change (l/min)	Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate (1/min/sec)
12/14- 3	0.717	30	6.0-1.8	0.05	84
12/14- 5	0.717	30	6.0-1.1	0.25	20
12/14- 9	0.717	30	6.0-1.6	0.5	8.8
12/14-11	0.727	30	6.0-1.6	1.0	4.4
12/14-12	0.727	30	6.0-1.4	3.0	1.5
12/14-17	0.727	30	6.0-1.3	4.0	1.2
12/14-16	0.727	30	6.0-1.4	7.0	0.66
12/14-19	0.727	30	6.0-1.5	12	0.38
12/14-20	0.727	30	6.0-1.5	15	0.30
12/14- 6	0.717	30	6.0-1.6	0.5	8.8
12/14-14	0.727	30	6.0-1.6	2.5	1.8
12/14-18	0.727	30	6.0-1.5	8.0	0.56
12/14- 1	0.717	30	6.0-1.4	12	0.38
12/11- 6	0.703	30	6.0-1.1	0.5	9.8
12/11- 4	0.703	30	6.0-1.8	5.0	0.84
12/11- 1	0.702	30	6.0-2.0	7.0	0.57
12/11- 9	0.703	30	6.0-1.1	9.0	0.54
12/23- 5	1.01	30	6.0-1.5	0.1	45
12/23- 4	1.01	30	6.0-1.5	1.0	4.5
12/23- 3	1.01	30	6.0-1.5	7.0	0.64
12/23- 1	1.01	30	5.9-1.4	9.5	0.48
12/23- 2	1.01	30	6.0-1.5	15	0.30
12/23-12	1.01	30	5.0-1.4	0.05	72
12/23-10	1.01	30	5.0-1.4	1.0	3.6
12/23- 8	1.01	30	5.0-1.5	3.5	1.0
12/23- 7	1.01	30	5.0-1.5	7.0	0.5
12/23- 6	1.01	30	5.0-1.5	12	0.29

表 A・1 続き 1

Run	Heat Flux (kcal/hm ²) ×10 ⁶	Inlet Temperature (°C)	Flow Change (l/min)	Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate (l/min/sec)
12/23-13	1.01	30	4.0-1.4	0.05	52
12-23-14	1.01	30	4.0-1.4	0.1	26
12/23-15	1.01	30	4.0-1.4	1.0	2.6
12/23-16	1.01	30	4.0-1.4	2.5	1.0
12/23-17	1.01	30	4.0-1.4	5.0	0.52
12/15-12	0.706	30	2.5-1.5	10	0.10
12/15-12	0.706	30	3.0-1.5	12	0.12
12/15- 9	0.706	30	4.0-1.6	10	0.24
12/15- 8	0.706	30	4.0-1.5	3.0	0.83
12/15- 3	0.706	30	5.0-1.3	3.0	1.2
12/13- 5	0.719	30	7.0-2.1	0.1	49
12/11-10	0.703	30	6.0-2.0	0.1	40
12/15- 5	0.706	30	5.0-1.6	0.1	34
12/15- 6	0.706	30	4.0-1.5	0.1	25
12/14-13	0.727	31	6.0-1.6	1.0	4.4
12/15- 4	0.706	30	5.0-1.6	1.0	3.4
12/15- 7	0.706	30	4.0-1.5	1.0	2.5
12/15-11	0.706	30	3.0-1.5	0.7	2.1
7/13-29	1.06	50	3.9-2.4	0.05	30
7/13-27	1.06	50	3.8-1.9	0.05	38
7/13-25	1.06	50	4.0-1.4	0.05	52
7/13-23	1.06	50	4.0-1.2	0.05	56
6/30-47	1.07	51	3.0-1.5	0.05	36
6/29-31	1.08	52	3.5-1.3	2.0	1.1
6/29-35	1.08	52	4.0-2.0	5.0	0.4
7/13-31	0.732	50	4.0-2.5	0.05	30
7/13-33	0.727	50	4.0-2.0	0.05	40
7/13-35	0.731	50	3.9-1.5	0.05	48
7/13-37	0.732	50	3.9-0.9	0.05	60
6/30-31	0.734	52	4.0-2.0	0.05	40
6/30-35	0.734	46	3.0-1.8	0.05	24
6/29-41	0.710	52	3.8-1.5	2.0	1.2
6/29-37	0.710	52	2.7-1.4	2.0	0.65

表 A・1 続 き 2

Run	Heat Flux (kcal/hm ²) ×10 ⁶	Inlet Temperature (°C)	Flow Change (l/min)	Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate (l/min/sec)
7/13-11	0.726	80	4.1-2.5	0.05	32
7/13- 9	0.726	80	4.1-2.0	0.05	42
7/13- 7	0.726	80	4.1-1.8	0.05	46
7/13- 5	0.728	80	4.1-1.4	0.05	54
7/13- 1	0.732	80	4.0-1.3	0.05	54
7/13- 3	0.728	80	4.0-1.1	0.05	58
6/29- 9	0.745	80	4.0-1.7	2.0	1.2
6/29-13	0.745	82	4.4-2.6	4.0	0.45
7/13-13	1.07	80	4.0-2.9	0.05	22
7/13-15	1.05	80	4.0-2.6	0.05	28
7/13-17	1.04	80	4.0-2.0	0.05	40
7/13-19	1.04	80	4.2-1.6	0.05	52
7/13-21	1.04	80	4.2-1.4	0.05	56
6/29-21	1.02	78	4.5-1.2	3.0	1.1
6/29-23	1.04	77	4.0-2.1	4.0	0.48
6/29-25	1.04	76	4.0-2.1	7.0	0.27

Flow Oscillation Experiment

Run	Heat Flux (kcal/hm ²) ×10 ⁶	Inlet Temperature (°C)	Flow Oscillation Range (l/min)	Period (sec)
6/24-15	0.750	28	4.8-0.6	0.6
6/24-23	0.750	27	3.5-0.5	1.4
6/24-11	0.750	27	4.7-1.1	2.5
6/24-13	0.750	28	4.0-1.0	3.3
6/24-35	1.09	27	4.4-0.5	0.63
6/24-33	1.09	25	3.3-0.9	2.5
6/29-17	0.753	81	4.7-1.0	1.0
6/29-15	0.753	81	4.4-1.7	2.5
6/29-27	1.04	79	4.0-0.9	1.0
6/29-29	1.04	82	3.7-1.0	5.0

表A・2 シリーズ2実験条件一覧表

Run No	q'' (kcal/hm ²) $\times 10^6$	T_{in} (°C)	Flow Reduction from to (l/min)	Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate cm/sec/sec	Steady State Exit Quality		Steady State Boiling Length (cm)	
						X_{ei}	X_{ef}	L_{Bi}	L_{Bf}
520608- 4	0.71	30	6.0 → 1.0	53.0	3.13	-0057	0.285	-623	515
5	"	"	" "	14.6	11.4	"	"	"	"
6	"	"	" "	8.85	18.7	"	"	"	"
7	"	"	" "	6.15	27.0	"	"	"	"
8	"	"	" "	2.15	77.1	"	"	"	"
9	"	"	" "	1.38	120	"	"	"	"
10	"	"	6.4 1.0	1.07	167	-0062	"	-718	"
11	"	"	6.0 1.5	0.06	2490	-0057	0.138	-623	374
12	"	"	5.6 1.4	0.06	2320	-0052	0.159	-528	402
13	"	"	6.8 1.0	1.03	187	-0066	0.285	-813	515
14	"	"	6.0 1.0	1.88	88.2	-0057	"	-623	"
15	"	"	6.4 1.0	3.6	49.7	-0062	"	-71.9	"
16	"	"	5.9 1.0	6.5	25.0	-0056	"	-600	"
17	"	"	5.8 1.0	10.2	15.6	-0055	"	-57.6	"
18	"	"	6.0 1.0	21.5	7.71	-0057	0.285	-62.3	"
19	"	"	5.8 1.0	62.4	2.55	-0054	"	-57.1	"
20	"	50	6.0 1.0	27.5	6.03	-0021	0.318	-23.0	57.4
21	"	"	" "	14.0	11.8	"	"	"	"
22	"	"	" "	8.0	20.7	"	"	"	"
23	"	"	" 1.0	5.15	32.2	"	"	"	"
24	"	"	" 1.0	1.82	91.1	-0024	"	"	"
25	"	"	" "	0.75	230	"	"	"	"
26	"	"	6.0 1.2	0.07	2270	-0021	0.245	"	53.1
27	"	"	" 1.3	0.06	2600	"	0.216	"	50.6
28	"	"	6.0 1.0	0.92	180	"	0.319	"	57.6

表A・2 続き ①

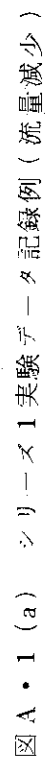
Run No	q'' (kcal/hm ²) $\times 10^6$	T_{in} (°C)	Flow Reduction from to (l/min)		Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate cm/sec/sec	Steady State Exit Quality		Steady State Boiling Length (cm)	
							X_{ei}	X_{ef}	L_{Bi}	L_{Bf}
520608-29	0.71	50	6.0	1.0	2.0	82.9	-0.021	0.318	-230	574
30	"	"	"	"	4.75	34.9	"	0.319	"	575
31	"	"	"	"	7.9	21.0	"	"	"	576
32	"	"	"	"	28.4	5.84	"	0.318	"	574
520613-1	0.71	30	5.0	1.0	13.6	9.75	-0.043	0.283	-386	512
2	"	"	"	"	6.3	21.1	"	"	"	"
3	"	"	"	"	0.47	28.2	"	"	"	"
4	"	"	"	1.3	0.06	2040	"	0.181	"	423
5	"	"	4.0	1.0	3.10	32.1	-0.020	0.284	-145	512
6	"	"	"	"	18.0	5.53	"	"	"	514
7	"	"	"	"	8.0	12.4	"	"	"	"
8	"	"	"	"	3.6	27.6	"	0.285	"	"
9	"	"	"	"	0.17	58.5	"	"	"	51.5
10	"	"	"	"	1.39	71.6	"	"	"	51.6
11	"	"	"	1.4	0.06	1440	"	0.159	-142	401
12	"	"	"	1.0	10.1	9.85	"	0.285	"	51.5
13	"	"	"	"	4.88	20.4	"	"	"	"
14	"	"	"	"	2.80	35.5	"	"	"	"
15	"	"	"	"	1.53	65.0	"	"	"	51.6
16	"	"	4.0	1.4	0.085	1010	-0.020	0.159	-142	402
17	"	"	3.0	1.0	10.4	6.38	0.009	0.287	49	51.8
18	"	"	"	"	4.2	15.8	"	"	"	"
19	"	"	"	"	2.15	30.8	"	"	"	"
20	"	"	"	"	0.87	76.2	"	"	"	"
21	"	"	"	"	0.04	1660	"	"	"	"
22	0.56	"	5.0	1.0	34.7	3.82	-0.062	0.202	-70.9	46.3
23	"	"	"	"	12.0	11.1	"	"	"	"

表A・2 続き ②

Run No	q'' (kcal/hm ²) $\times 10^6$	T_{in} (°C)	Flow Reduction from to (l/min)		Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate cm/sec/sec	Steady State Exit Quality		Steady State Boiling Length (cm)	
							X_{ei}	X_{ei}	L_{Bi}	L_{Bf}
520613-24	0.56	30	5.0	1.0	7.22	18.9	-0062	0202	-709	463
25	"	"	"	"	6.50	20.4	"	"	"	"
26	"	"	"	"	3.15	42.1	"	"	"	464
27	"	"	"	"	2.60	51.0	"	"	"	"
28	"	"	5.0	1.4	0.06	1990	"	0104	"	335
29	"	"	"	"	0.06	1990	"	0106	"	339
30	"	"	5.0	1.0	1.14	116	"	0203	"	466
31	"	"	4.0	"	13.9	7.16	-0043	0202	-398	461
32	"	"	"	"	25.5	3.90	-0044	"	-403	462
33	"	"	"	"	8.2	12.1	"	"	"	"
34	"	"	"	"	4.1	24.3	"	"	"	463
35	"	"	"	"	3.1	32.1	"	"	-398	"
36	"	"	"	"	1.42	70.1	"	"	-403	462
37	"	"	"	"	0.24	414	"	"	"	"
38	"	"	4.0	1.3	0.06	1490	"	0123	"	368
39	"	"	"	"	0.06	1490	"	"	"	"
40	"	"	4.0	1.0	0.12	829	"	0202	"	463
41	"	"	"	"	1.13	88.0	"	"	"	462
42	"	"	"	"	2.30	43.2	"	"	"	"
43	"	"	"	"	3.00	33.2	"	"	"	"
44	"	"	"	"	5.9	16.9	"	"	"	"
45	"	"	"	"	11.7	8.50	"	"	"	"
46	"	"	"	"	15.8	6.30	"	"	"	"
47	"	"	3.0	1.0	28.1	2.36	-0015	0201	-102	46.0
48	"	"	"	"	12.8	5.18	-0014	"	- 9.9	"
49	"	"	"	"	4.0	16.6	"	"	"	"
50	"	"	"	"	1.5	44.2	"	"	"	461

表A・2 続き ③

Run No	q'' (kcal/hm ²) $\times 10^6$	T_{in} (°C)	Flow Reduction from to (l/min)		Flow Transient Time (sec)	Flow Reduction Rate cm/sec/sec	Steady State Exit Quality		Steady State Boiling Length (cm)	
							X_{ei}	X_{ef}	L_{Bi}	L_{Bf}
520613-51	0.56	30	3.0	1.0	0.71	93.4	-0.015	0.202	-10.2	46.3
52	"	"	"	"	0.19	349	"	"	"	"
53	"	"	"	1.2	0.07	85.3	"	0.145	"	39.9



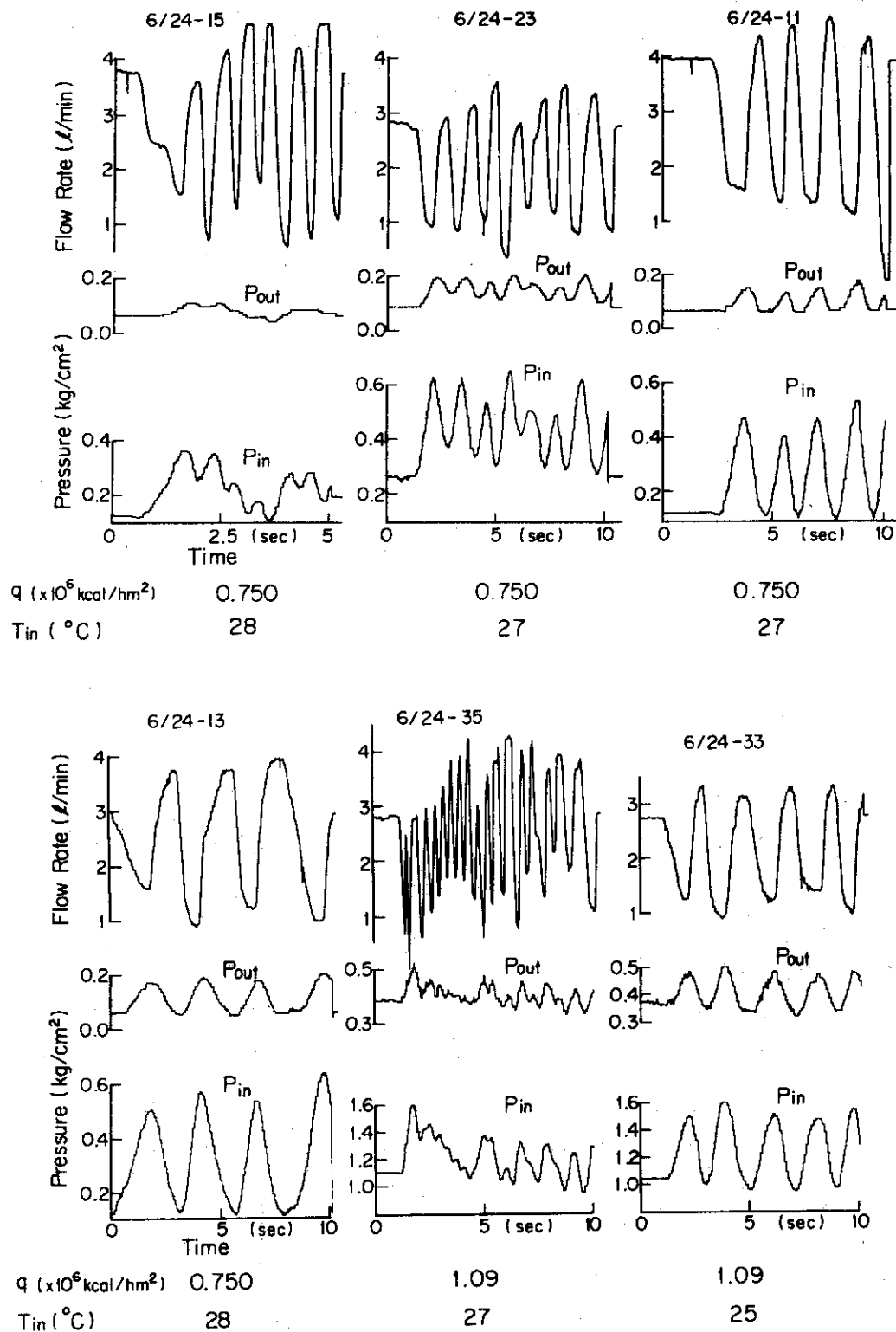
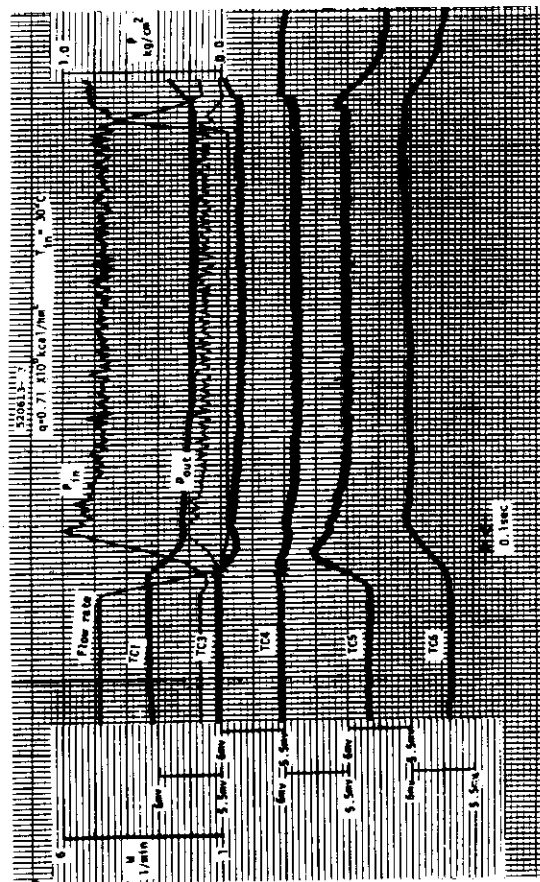
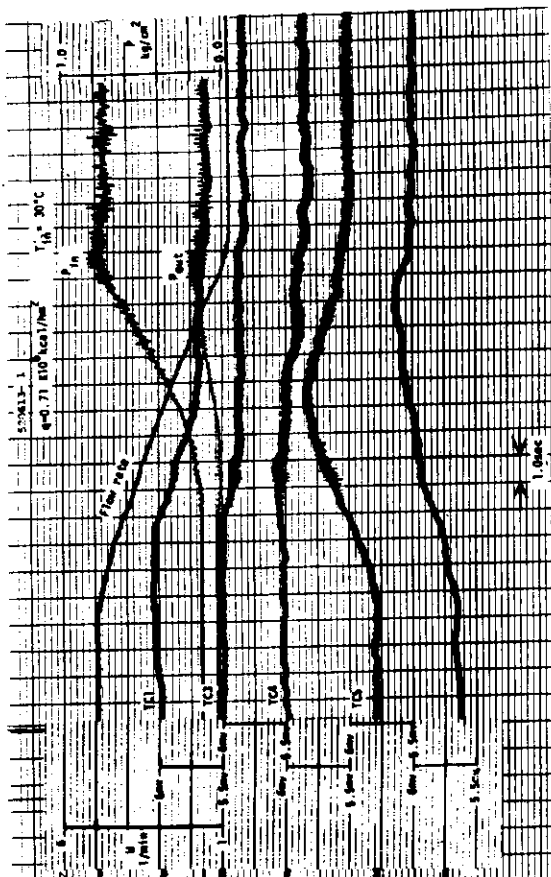
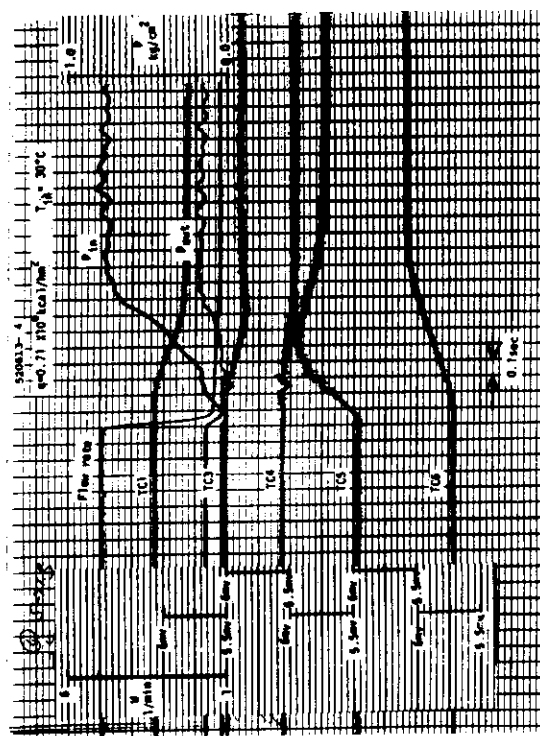
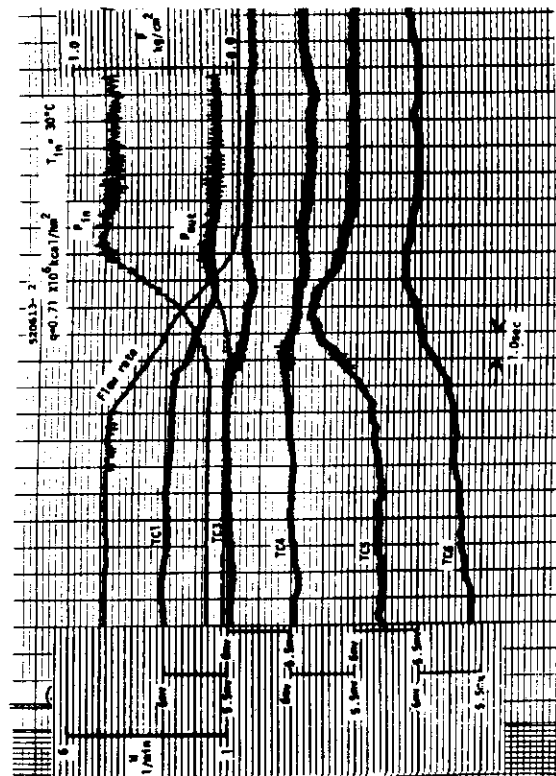


図 A・1 (b) シリーズ 1 実験データ記録例 (流量振動)



図A・2 シリーズ2実験データ記録例

付録 B. 過渡沸騰流動の特性曲線法による無次元解析

流量変化あるいは加熱量変化に伴う沸騰流路の過渡状態は、連続の式、エネルギーの式、運動の式、および、スリップの式と呼ばれる実験式により記述され、その多くは、分離流モデルを用いている。これらの式のうち、運動の式の中には、摩擦抵抗の項として、実験式が含まれる。この実験式およびスリップの式としては、定常状態で得られたものが用いられており、それが、過渡状態においても適用しうるものかどうか、その適用の限界などは明らかではない。ここで考察する範囲については、このような不確かな項を含む運動の式を用いなくとも（スリップの式で代表させて）、以下にみられるように、過渡状態における沸騰二相流の特性、そしてクオリティや質量速度（これらはバーンアウト相関式中の主要なパラメーター）についての概観を得ることが出来る。ここで、運動の式を用いないということは、圧力の変化を無視することに相当する。しかし、低圧の場合はともかく、高圧では流路内圧力の変化はほとんど無視しうると考えられるので、高圧での沸騰流路の過渡状態については、相当よく概観できるのではないと思われる。

沸騰流路は、通常、非沸騰部分、すなわち単相流の部分を含んでいる。B. 1 では単相流について、B. 4 では、沸騰二相流についての特性曲線法⁽⁹⁾による取扱を述べる。そして、熱流束分布一様、熱流束不変で、流量低下の場合の単相流の解の例を B. 2, B. 3 に示す。そして、沸騰二相流における一、二の考察を B. 5 に示す。

B. 1. 単相流部分の過渡変化

過渡沸騰流路では、沸騰部と単相流部の境界が移動する。本報告で検討しているこのような境界の移動は、単相流部分に成立するエネルギー式を、適当な境界条件を用い、特性曲線法によって解けば、容易に求めることが出来る。

ここでは、単相流部分のエネルギーとして、平均エンタルピーを用いることとし、その過渡変化を次式で現わす。

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial Z} = \frac{p q (Z, t)}{A} \quad (B 1-1)$$

ここで、時間、距離、平均速度、熱流束および平均エンタルピーを次式に従って無次元化する。

$$\left. \begin{aligned} \tau &\equiv t v_i / L \\ \eta &\equiv Z / L \\ u(\tau) &\equiv v(\tau) / v_i \\ \phi(\eta, \tau) &\equiv q(\eta, \tau) / q_i \\ H(\eta, \tau) &\equiv (h(\eta, \tau) - h_{in}) / \left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i} \right) \end{aligned} \right\} \quad (B 1-2)$$

これを用いると (B1-1) 式は

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + u(\tau) \frac{\partial H}{\partial \eta} = \varphi(\eta, \tau)$$

となる。この式から、特性曲線法により

$$\frac{d\eta}{d\tau} = u(\tau)$$

(B 1-3)

$$\frac{dH}{d\tau} = \varphi(\eta, \tau)$$

をうる。すなわち、与えられた無次元流速の過渡変化 $u(\tau)$ 、あるいは、与えられた無次元熱流束 $\varphi(\eta, \tau)$ を用いて、(B 1-3) 式を積分すれば、単相流部分の無次元エンタルピー変化を知ることが出来る。なお、(B 1-3) 式は、本文中の (4-2), (4-3) 式に対応するものである。

以下に初期熱流束が一樣に分布していて、入口エンタルピー一定の場合について、流速がステップ状に低下した場合、および、ランプ状に低下した場合の例を、それぞれ、B. 2, B. 3 に示す。初期熱流束が一樣に分布しているということは、 $\tau < 0$ では、 $u = 1$, $\varphi = 1$ であって、(B 1-3) 式の解は、

$$\eta = \tau - \tau_- \quad (B 1-3')$$

$$H = \tau - \tau_- \quad \text{ただし、} \tau_- = \text{定数} \quad \text{かつ} \tau_- < 0$$

であって、 $\eta = H$ である。すなわち、以下に取扱う場合の初期条件は、

$$\tau = 0 \text{ で、} H_i = \eta_i \quad (B 1-4)$$

である。

B. 2 流速がステップ状低下の場合の単相流の解

無次元流速および無次元熱流束について、

$$u(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau < 0 \\ \beta = \text{定数} & \tau > 0 \end{cases}$$

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau < 0 \\ \varphi_0 = \text{定数} & \tau > 0 \end{cases}$$

の場合を取扱う。

a) $\tau = 0$ で、 $\eta = \eta_i$, $H = H_i$ のとき。

$\tau = 0$, すなわち、過渡変化が開始した時点で、すでに加熱流路内に存在する流体の平均エンタルピーの変化に関するものである。(B 1-3) 式の積分は、

$$\eta = \eta_i + \beta \tau \quad (B 2-1)$$

$$H = H_i + \varphi_0 \tau \quad (B 2-2)$$

である。今の場合、(B 1-4) 式に示されたように、 $\eta_i = H_i$ であるから、(B 2-1), (B 2-2) 式より、

$$\eta = H - (\varphi_0 - \beta) \tau \quad (B 2-3)$$

をうる。この式の適用範囲は、 $H_i \geq 0$ についてであるから、(B 2-2) 式より

$$\tau \leq \frac{H}{\phi_0} \quad (\text{B 2-4})$$

である。このような η , τ について、(B 2-3) 式より H を求めることが出来る。あるいは、図 B-1 にみるように、流体の軌跡 (B 2-1) 式や H をパラメータとした等しい H の線 (B 2-3) 式を $(\eta - \tau)$ 面上に書くことが出来る。

b) $\tau = \tau_i$ で、 $\eta = 0$, $H = 0$ のとき。

$\tau = \tau_i$ に加熱管に流入する流体の平均エンタルピーに関するものである。(B 1-3) 式の積分は、

$$\eta = \beta (\tau - \tau_i) \quad (\text{B 2-5})$$

$$H = \phi_0 (\tau - \tau_i) \quad (\text{B 2-6})$$

である。両式より τ_i を消去して、

$$\eta = \frac{\beta}{\phi_0} H \quad (\text{B 2-7})$$

をうる。この式の適用範囲は、(B 2-6) より $\tau_i > 0$, すなわち

$$\tau \geq H / \phi_0 \quad (\text{B 2-8})$$

である。(B 2-7) 式は、時刻にかかわらず、ある η では、 H が一定であることを示している。a) の場合と同様に、 τ_i に流入した流体の軌跡式 (B 2-5), および、等 H 線式 (B 2-7) を $(\eta - \tau)$ 面上に記入することが出来る。

図 B-1 は、平均流速が $\tau = 0$ で、ステップ状に $1/4$ に減少した場合、すなわち、 $\beta = 0.25$ の場合について示してある。沸騰部分と单相流部分の境界の指標として、飽和水のエンタルピー h_{sat} を用いるとすると、このときの無次元エンタルピー H_B は、(B 1-2) 式より

$$\begin{aligned} H_B &= (h_{sat}(P) - h_{in}) / \left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i} \right) \\ &= (h_{sat}(P) - h_{in}) / (h_{out} - h_{in})_i \end{aligned} \quad (\text{B 2-9})$$

であり、圧力 P のパラメータになっている。図 B-1 には、 $\phi = 1$ のときの圧力 P_1 および P_2 の場合について実線で、また $\phi_0 = 0.95$ の場合が 1 点鎖線で記入してある。

B. 3. 流速がランプ状低下の場合の单相流の解

無次元流速および無次元熱流束が次の場合を取扱う。

$$u(\tau) = \begin{cases} 1 - b\tau & 0 < \tau < \tau_f \\ 1 - b\tau_f & \tau > \tau_f \end{cases}$$

$$\phi = 1$$

ただし、 τ_f は定数で、 $1 - b\tau_f > 0$ の場合である。

a) $\tau = 0$ で、 $\eta = \eta_i$, $H = H_i$ のとき。

(B 1-3) 式の積分は、次式である。

$$H = H_i + \tau$$

$$\eta = \begin{cases} \eta_i + \tau - \frac{b}{2} \tau^2, & \tau \leq \tau_f \end{cases} \quad (B 3-1)$$

$$\eta = \begin{cases} \eta_i + \tau_f - \frac{b}{2} \tau_f^2 + (1-b \tau_f) (\tau - \tau_f), & \tau \geq \tau_f \end{cases} \quad (B 3-2)$$

今、初期条件は、(B 1-4) 式に示したように、 $H_i = \eta_i$ であるから、 H_i, η_i を消去して、次式をうる。

$$\eta = H - \frac{b}{2} \tau^2, \quad 0 < \tau < \tau_f < H \quad (B 3-3)$$

$$\eta = H - \frac{b}{2} \tau_f^2 - b \tau_f (\tau - \tau_f), \quad \tau_f < \tau < H \quad (B 3-4)$$

b) $\tau = \tau_i$ で、 $\eta = 0, H = 0$ のとき、

この場合の (B 1-3) 式の積分は、次式となる。

$$H = \tau - \tau_i$$

$$\eta = (\tau - \tau_i) - \frac{b}{2} (\tau^2 - \tau_i^2), \quad 0 \leq \tau_i \leq \tau_f \text{ かつ } 0 \leq \tau \leq \tau_f \quad (B 3-5)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta &= (1-b \tau_f) (\tau - \tau_f) + (\tau_f - \tau_i) - \frac{b}{2} (\tau_f^2 - \tau_i^2), \\ 0 &\leq \tau_i \leq \tau_f \text{ かつ } \tau_f \leq \tau \end{aligned} \right\} \quad (B 3-6)$$

$$\eta = (1-b \tau_f) (\tau - \tau_f), \quad \tau_f \leq \tau_i \text{ かつ } \tau_f < \tau \quad (B 3-7)$$

今までと同様に、 τ_i を消去すると次式を得る。

$$\eta = H - \frac{b}{2} H (2 \tau - H), \quad H \leq \tau \leq \tau_f \quad (B 3-8)$$

$$\eta = \frac{b}{2} (\tau - \tau_f) (\tau - \tau_f - 2H) + \eta_f, \quad \tau_f \leq \tau \leq \tau_f + H \quad (B 3-9)$$

$$\eta = (1-b \tau_f) H, \quad \tau \geq \tau_f + H \quad (B 3-10)$$

ただし、

$$\eta_f = H - \frac{b}{2} H (2 \tau_f - H)$$

である。これらの式のうち、(B 3-1), (B 3-2), (B 3-5), (B 3-6), (B 3-7) 各式を用いて、流体の軌跡を $(\eta - \tau)$ 面上に現わすことが出来る。また、同図上に等しい H の曲線は、(B 3-3), (B 3-4), (B 3-8), (B 3-9), (B 3-10) の各式を用いて現わすことが出来る。

図 B-2 には、 $b = 0.08, \tau_f = 1.0$ の場合について、上記各式の例を示してある。

ここで、 b が大きいとき、すなわち、流速が急速に低下する場合に、これをステップ状変化と近似

した場合、どれ程異なるかを、 H が1よりやや大きい場合について検討してみる。このとき等 H 線の差は、(B 3-4)式と(B 2-3)との差、 $\Delta\eta$ で現わされて、次式で示される。

$$\Delta\eta = (\phi_0 - \beta) \tau - \frac{b}{2} \tau_f^2 - b \tau_f (\tau - \tau_f)$$

ここで、 $\phi_0 = 1$, $1 - b \tau_f = \beta = 0.4$, $b = 3.6$ とすると、 $\tau_f = 1/6$ であり、 $\tau = 1$ では、

$$\Delta\eta = 0.05$$

である。

B. 4. 沸騰二相流部分の過渡変化

沸騰部分の連続の式として次式を用いる。なお、以下で $\rho_v, \rho_\ell, h_v, h_\ell$ は飽和状態における値である。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha + \rho_\ell (1 - \alpha)) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho_v \alpha v_v + \rho_\ell (1 - \alpha) v_\ell) = 0 \quad (\text{B 4-1})$$

エネルギー式は、すでに述べたように、圧力変化の項を無視し、かつ、粘性によるエネルギー消散の項も無視して、次式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha h_v + \rho_\ell (1 - \alpha) h_\ell) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho_v \alpha h_v v_v + \rho_\ell (1 - \alpha) h_\ell v_\ell) \\ = \frac{q p}{A} \end{aligned} \quad (\text{B 4-2})$$

また、スリップ比に関しては次式とする。

$$S(\alpha) = v_v / v_\ell \quad (\text{B 4-3})$$

(B 4-1) ~ (B 4-3) 式より、未知量、 α, v_v, v_ℓ が求められれば、クオリティや質量速度は次式により求められる。

$$x(Z, t) = \frac{\rho_v \alpha v_v}{\rho_v \alpha v_v + \rho_\ell (1 - \alpha) v_\ell} \quad (\text{B 4-4})$$

$$G(Z, t) = \rho_v \alpha v_v + \rho_\ell (1 - \alpha) v_\ell \quad (\text{B 4-5})$$

(B 4-1) 式に h_ℓ をかけ(B 4-2) 式をひく、また、(B 4-1) 式に h_v をかけ (B 4-2) 式をひくとそれぞれ、次式をうる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial Z} (\alpha v_v) = \frac{q p}{\lambda A \rho_v} \quad (\text{B 4-6})$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial ((1 - \alpha) v_\ell)}{\partial Z} = \frac{q p}{\lambda A \rho_\ell} \quad (\text{B 4-7})$$

ただし、 $\lambda = h_v - h_\ell$ である。

ここで、蒸気および液の流速を次のように無次元化し、パラメーターも次のように定める。

$$\left. \begin{aligned} u_v &\equiv v_v / v_i \\ u_\ell &\equiv v_\ell / v_i \\ \nu &\equiv \rho_v / \rho_\ell \\ H_B &\equiv \frac{(h_\ell - h_{in})}{\left(\frac{q_i p L}{A \rho v_i} \right)} = \frac{h_\ell - h_{in}}{h_{out, i} - h_{in}} \\ x_{in} &= \frac{h_{in} - h_\ell}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (B4-8)$$

この(B4-8)式と(B1-2)式を用いると、(B4-3)、(B4-6)、(B4-7)各式は、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \eta} (\alpha u_v) = \frac{(-x_{in})}{\nu H_B} \phi \quad (B4-9)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta} ((1-\alpha) u_\ell) = \frac{(-x_{in})}{H_B} \phi \quad (B4-10)$$

$$u_v / u_\ell = S(\alpha) \quad (B4-11)$$

となる。

これらの式は、沸騰境界についての初期条件、 $(\tau_B, \eta_B) = \text{Function}(H_B)$ ((B1-3)式の解のうち、 $H = H_B$ なる曲線)で解かれる。したがって、沸騰領域の未知諸量は、パラメーターとして、 H_B と x_{in} および ν を与えれば、すべて求まることになる。なお、 H_B と初期($\tau=0$)沸騰開始点 $\eta_B(0)$ とは関係がある(熱流束一様分布のときは、(B1-4)式より、 $H_B = \eta_i$)。また、 $\tau=0$ では、 x_{in} と $(x_{out})_i$ とは関係がある(熱流束分布一様のときは、

$$x_{in} = - \frac{(x_{out})_i H_B}{1 - H_B}$$

である)。したがって、パラメーターとしては、 H_B 、 x_{in} の代りに、 $\eta_B(0)$ 、 $(x_{out})_i$ 等と選ぶことが出来る。なお、クオリティ、無次元質量速度 $GL = G / \rho_\ell v_i$ は、(B4-4)、(B4-5)式より次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x &= \nu S \alpha / (1 - \alpha + \nu S \alpha) \\ GL &= (1 - \alpha + \nu S \alpha) u_\ell \end{aligned} \right\} \quad (B4-12)$$

さて、(B4-9)、(B4-10)式より、(B4-11)式を用いて、

$$\frac{\partial}{\partial \eta} [u_\ell (1 - \alpha + \alpha S)] = \frac{(-x_{in})}{H_B} \frac{1 - \nu}{\nu} \phi$$

を得る。これを積分すると

$$u_L(1-\alpha+\alpha S) - u(\tau) = \frac{(-x_{in})}{H_B} \frac{1-\nu}{\nu} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta \quad (B4-13)$$

を得る。ここで $\eta_B(\tau)$ は、(B4-13)式を考えている時刻 τ における沸騰開始点である。これより u_L を(B4-10)式に代入して、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + \frac{\{S + \alpha(1-\alpha) \frac{\partial S}{\partial \alpha}\}}{\{1-\alpha+\alpha S\}^2} \left[\frac{(-x_{in})(1-\nu)}{\nu H_B} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u(\tau) \right] \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \\ = \frac{(-x_{in})}{H_B} \left[1 + \frac{(1-\alpha) \frac{(1-\nu)}{\nu}}{1-\alpha+\alpha S} \right] \phi \end{aligned}$$

これは、特性曲線法によって、次式のように現わされる。

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{(-x_{in})}{H_B} \left[1 + \frac{(1-\nu) \frac{(1-\alpha)}{\nu}}{1-\alpha+\alpha S} \right] \phi \quad (B4-14)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{\{S + \alpha(1-\alpha) \frac{\partial S}{\partial \alpha}\}}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[\frac{(-x_{in})(1-\nu)}{\nu H_B} \int_{\eta_B(\tau)}^{\eta} \phi d\eta + u(\tau) \right] \quad (B4-15)$$

沸騰二相流の諸未知量を求める問題は、(B4-14)、(B4-15)の両式の積分を行うことに帰着する。すなわち、パラメーター、 ν 、 x_{in} 、 H_B および、スリップ比 S についての実験式が与えられたとき、過渡速度変化 $u(\tau)$ あるいは過渡熱流束変化 $\phi(\eta, \tau)$ に対応する α を(B4-14)、(B4-15)を用いて求める。すると、液流速は(B4-13)から、クオリティ、質量速度は(B4-12)より求められる。

B.5. 均質流モデル沸騰二相流で指数関数状流量低下の場合の解

熱流束不変($\phi=1$)、熱流束分布一様((B1-4)式より $H_i = \eta_i$)で、流速が次式に従って変化する場合について考える。

$$u(\tau) = \beta_1 + (1-\beta_1) e^{-\beta_2 \tau} \quad (B5-1)$$

B.5.1 沸騰境界

本章での沸騰境界の指標は(B2-9)式 H_B であり、このような沸騰境界は、流速変化(B5-1)式を用いた(B1-3)式の解で、 $H = H_B$ のときの (η, τ) で与えられ、次式である。

$$\eta_B = H_B - (1-\beta_1) \left\{ \tau - \frac{1}{\beta_2} (1 - e^{-\beta_2 \tau}) \right\}, \quad \tau \leq H_B \quad (B5-2)$$

$$\eta_B = \beta_1 H_B + \frac{(1-\beta_1)}{\beta_2} (1 - e^{-\beta_2 H_B}) e^{-\beta_2 (\tau - H_B)}, \quad \tau \geq H_B \quad (B5-3)$$

B. 5.2 沸騰二相流動の解

B. 5.2.1 スリップ比, $S = \text{定数}$ (≈ 1) の場合

この節の始めに述べた本節の仮定のうち, 熱流束不変 ($\phi = 1$) および $S = \text{定数}$ という仮定だけで, (B 4-14), (B 4-15) について得られる一二の事柄を検討する。

(B 4-15) 式は, この場合, 次式のようになる。

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \frac{S}{(1-\alpha+\alpha S)^2} \left[\frac{(1-\nu)(-x_{in})}{\nu H_B} (\eta - \eta_B(\tau)) + u(\tau) \right] \quad (\text{B 5-4})$$

ここで, $\eta_B(\tau)$ は τ における沸騰境界の座標である。(B 5-4) 式を, 初期条件 (η_i, τ_i) で積分して得られる (η, τ) の曲線上での α の変化は (B 4-14) 式で与えられる。そこで

a) $\tau_i = 0$ で, $1 > \eta_i > \eta_B(0)$ の $\alpha = \alpha_i$ に着目する場合には, (B 4-14) 式の積分より

$$\tau = \frac{-\nu H_B}{(1-\nu S)(-x_{in})} \left[(S-1)(\alpha - \alpha_i) + \frac{S(1-\nu)}{(1-\nu S)} \ln \frac{1-(1-\nu S)\alpha}{1-(1-\nu S)\alpha_i} \right] \quad (\text{B 5-5})$$

である。

b) $\tau_i > 0$ では, 沸騰境界上の $\eta_B(\tau_i)$ では $\alpha = 0$ として, (B 4-14) 式の積分は次式で与えられる。

$$\tau = \tau_i - \frac{\nu H_B}{(1-\nu S)(-x_{in})} \left[(S-1)\alpha + \frac{S(1-\nu)}{(1-\nu S)} \ln \{ 1 - (1-\nu S)\alpha \} \right] \quad (\text{B 5-6})$$

ここで, 流量変化 $u(\tau)$ を与え, そしてそれに伴った沸騰境界 $\eta_B(\tau)$ を知ることが出来ても, (B 5-4) の解析解はえられず数値解を求めることになる。

しかし, (B 5-5), (B 5-6) 式で与えられる τ は, $u(\tau)$ のいかにかわらず成り立つものである。すなわち, これらの式は, 流量変化のいかにかわらず, ボイド率の変化に必要な時間を示すものである。とくに, (B 5-6) 式からえられる $\tau - \tau_i$ は, 沸騰境界上 $\eta_B(\tau_i)$ で τ_i に零であるボイド率が, ボイド率 α となるに必要な時間を意味し, また, パラメーター, ν, S, x_{in}, H_B に支配される過渡特性の指標としての時間を示している。比較の為に $\alpha = 1$ になるのに必要な時間 $(\tau - \tau_i)_{\alpha=1}$ を用いると, それは, ν , すなわち圧力に大いに影響されて, $\sim 10^{-2}$ (2.5 kg/cm^2) から $\sim 10^0$ (150 kg/cm^2) の値を示す。

B. 5.2.2 均質流モデル ($S = 1$) の場合

流速変化が (B 5-1) の場合, (B 5-4) の解は次のように与えられる。

a) $\tau_i < H_B$ かつ $\tau \leq H_B$ のとき,

(B 5-1), (B 5-2) 式を用いて (B 5-4) 式を, 初期条件 (η_i, τ_i) で解くと次式となる。

$$\begin{aligned}
\eta = & \eta_i e^{K(\tau - \tau_i)} + (H_B + \frac{1 - \beta_1}{\beta_2} - \frac{1}{K}) (1 - e^{K(\tau - \tau_i)}) \\
& + (1 - \beta_1) \left[\tau_i e^{K(\tau - \tau_i)} - \tau \right] \\
& + \frac{1 - \beta_1}{\beta_2} \left[e^{K(\tau - \tau_i)} - e^{-\beta_2(\tau - \tau_i)} \right] e^{-\beta_2 \tau_i} \quad (B5-7)
\end{aligned}$$

ただし,

$$K = \frac{(1 - \nu)(-x_{in})}{\nu H_B}$$

である。

b) $\tau_i < H_B$ かつ $\tau \geq H_B$ のとき,

$\tau = H_B$ のときの (B5-7) 式の値を η_d とする。 $\tau = H_B$, $\eta = \eta_d$ を初期条件として, (B5-1), (B5-3) 式を用いて (B5-4) 式を解けばよい。解は次式で $\eta_c = \eta_d$, $\tau_c = H_B$ としたもので与えられる。

$$\begin{aligned}
\eta = & \eta_c e^{K(\tau - \tau_c)} - \frac{\beta_1(1 - KH_B)}{K} (1 - e^{K(\tau - \tau_c)}) \\
& + \frac{(1 - \beta_1)}{(\beta_2 + K)} \left[e^{-\beta_2 \tau_c} - \frac{K}{\beta_2} (1 - e^{-\beta_2 H_B}) e^{-\beta_2(\tau_c - H_B)} \right] \\
& \times \left[e^{K(\tau - \tau_c)} - e^{-\beta_2(\tau - \tau_c)} \right] \quad (B5-8)
\end{aligned}$$

c) $\tau_i \geq H_B$ (いうまでもなく $\tau \geq H_B$)

(B5-1), (B5-3) 式を用いて (B5-4) 式を初期条件 (η_i, τ_i) で解けばよい。解は, (B5-8) 式で $\eta_c = \eta_i$, $\tau_c = \tau_i$ としたものである。なお, a), c) で, 初期条件 (τ_i, η_i) を沸騰境界上にとる場合には, τ_i と η_i の関係は, (B5-2) 式または (B5-3) 式を満たすものである。

$S = 1$ の場合, α についての (B5-5) 式, (B5-6) 式は, 以下のように簡単に表示できる。 $\tau = 0$ で $\alpha = \alpha_i$ のとき

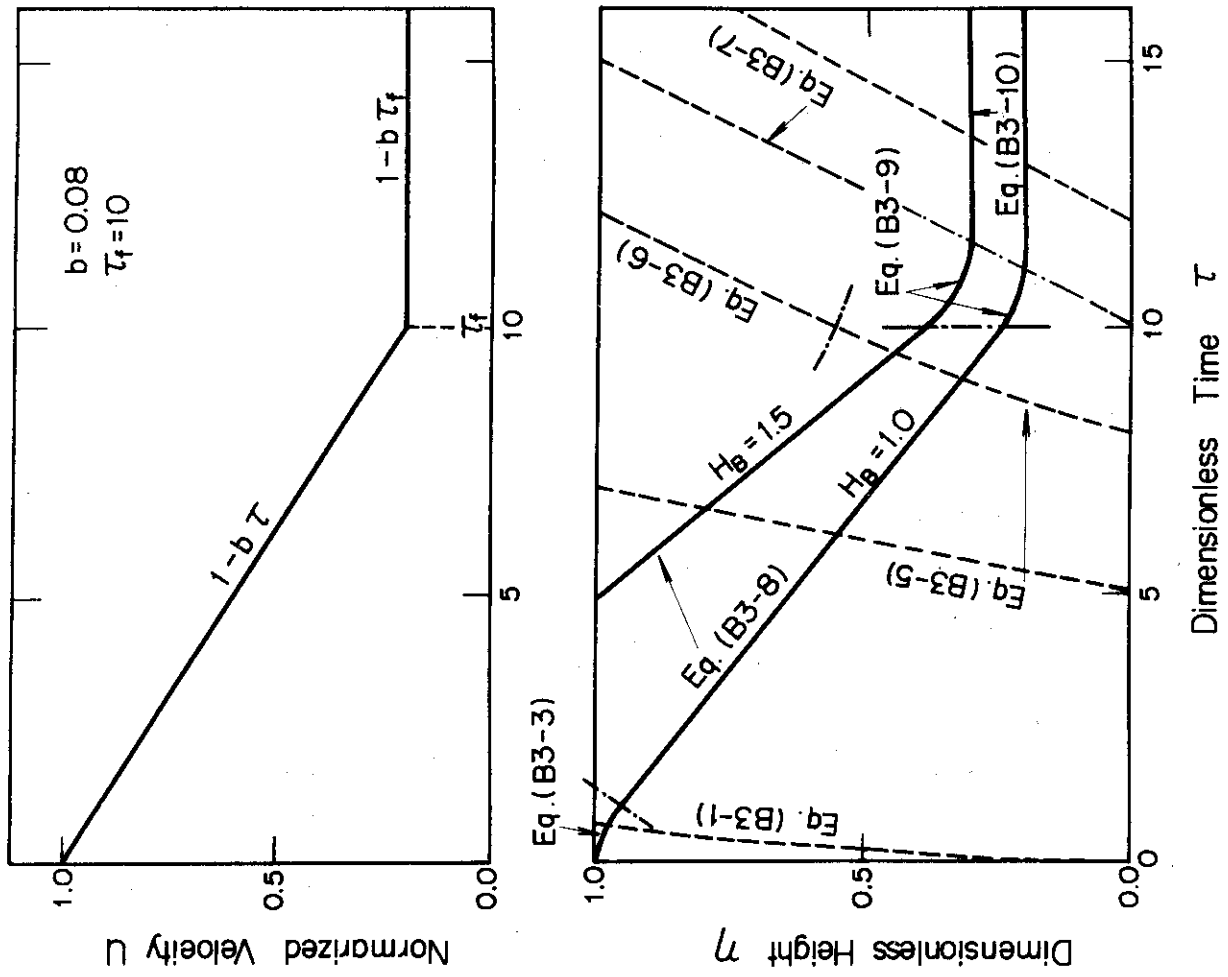
$$\alpha = \frac{1}{1 - \nu} \left[1 - \{ 1 - (1 - \nu) \alpha_i \} e^{-K\tau} \right] \quad (B5-9)$$

であり, $\tau = \tau_i$ で $\alpha = 0$ のとき

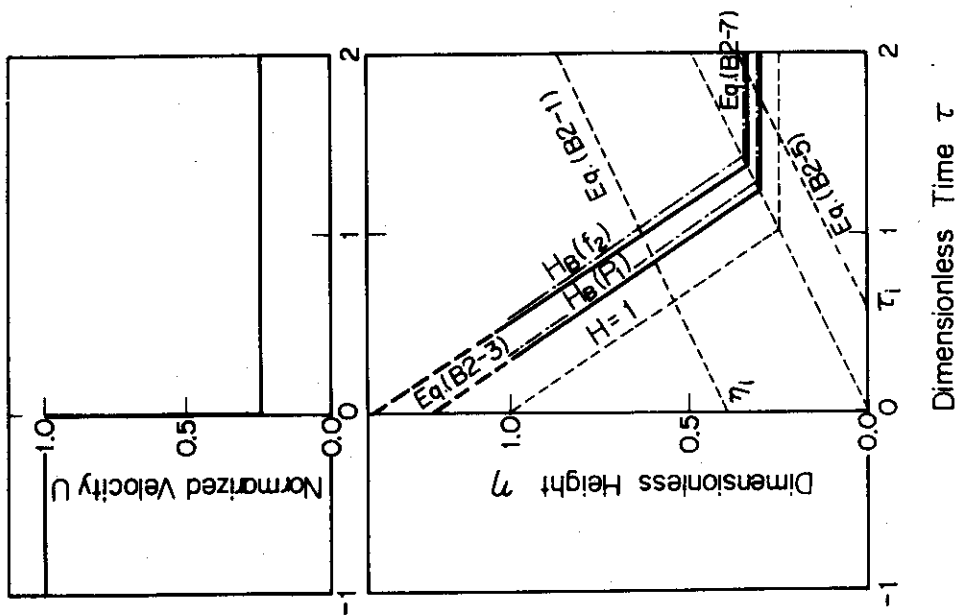
$$\alpha = \frac{1}{1 - \nu} \left[1 - e^{-K(\tau - \tau_i)} \right] \quad (B5-10)$$

である。

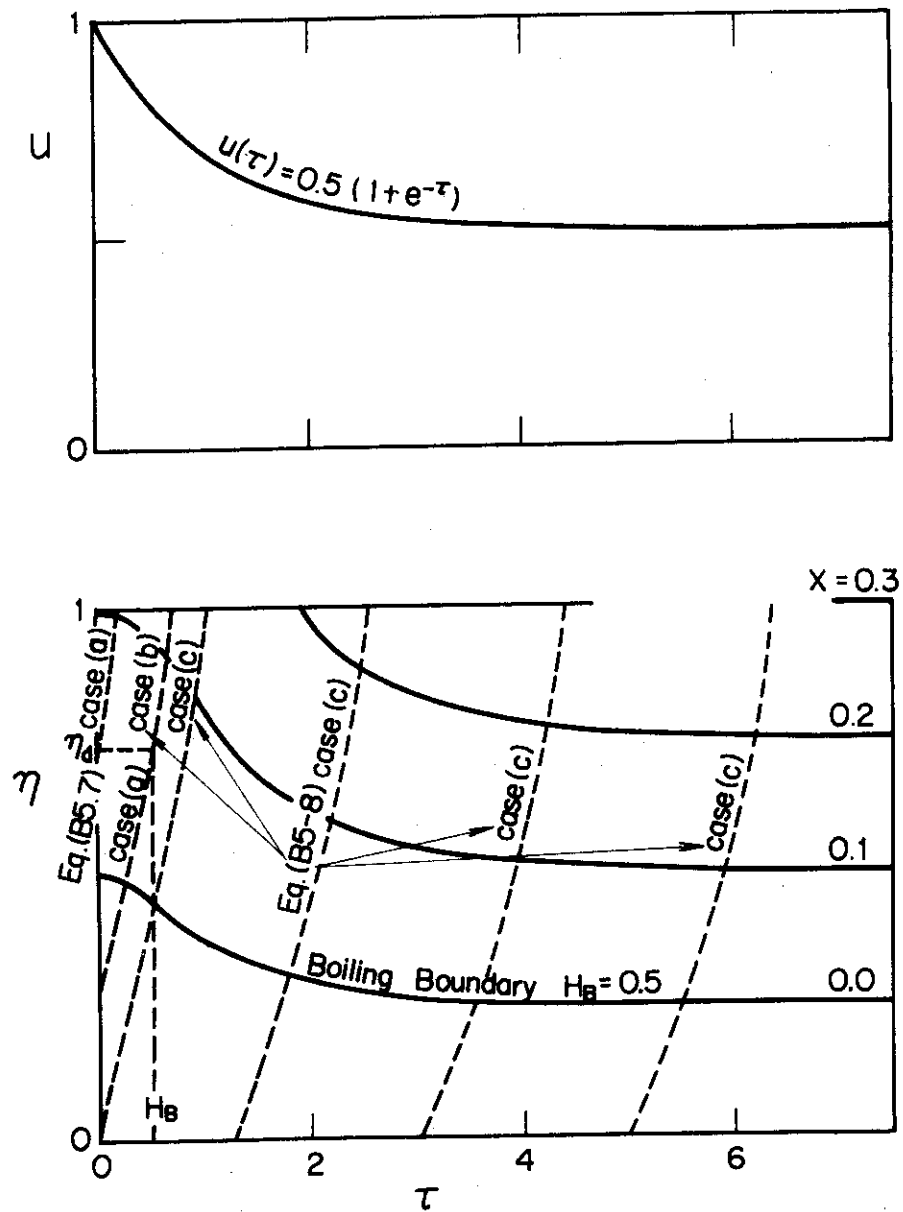
図 B-3 には, 上記 a) ~ c) での各式の計算例が太点線で示してある。この図は, 圧力 150 kg/cm^2 , 初期に沸騰境界が $\eta = 0.5$ にあり, 出口クオリティが 0.1 の場合であって, 流量低下過渡時の沸騰境界と, 本節で得られた $\alpha(\eta, \tau)$ を用いて (B4-12) 式から得られたクオリティを実線で示してある。



図B・2 単相流過渡変化 (流速がランプ状に変化したとき)



図B・1 単相流過渡変化
(流速がステップ状に変化したとき)



図B・3 沸騰二相流過渡変化（流速が指数関数状に変化したとき）