

# 上下動揺時の二相流動特性の測定

——上下動揺実験装置による実験結果——

手 島 登\*・山 口 勝 治\*

## Measurements of Two-Phase Flow Behavior Induced by Heaving Motion (Results of the Experiment with the Heaving Facility)

By

Noboru TESHIMA and Katsuji YAMAGUCHI

### Summary

To evaluate the effects of two-phase flow behavior induced by ship motion, a thermal hydraulic test loop (natural circulation boiling water loop) was mounted on the Heaving Facility.

We report the results of some measurements on two-phase flow dynamics and discuss them in this paper.

Flow rate, critical heat flux, and vapor void fraction was measured. The range of acceleration amplitude tested was 0.15 to 0.3 g and the frequency of motion was 0.2 to 1.5 Hz. We investigated the frequency response (heaving acceleration to flow rate) of the Test Loop. Correlation techniques was used as a statistical method of the system identification. The resonance peaks appear with increasing heat flux. The greatest flow fluctuations occur when there is resonance between heaving motion frequency and natural hydraulic flow oscillation frequency.

### 1. ま え が き

水冷却型原子炉を船用炉として用いる時、波浪による船体動揺の影響を受け、その一次冷却系の除熱能力の低下をもたらすおそれがある。そこで、この問題に関して、当所では「船用水冷却原子炉の熱限界と流力特性に及ぼすヒービング、傾斜等の影響と対策に関する研究」で代表されるような一連の基礎研究<sup>1)~4)</sup>が、振動動揺台や小型ヒービング試験装置を用いて進められてきた。これらの研究の結果、多くの新たな知見が得られたが、特に低サイクルの上下動揺(ヒービング)が一次冷却系の流動特性に大きな影響をおよぼすことが明らかにされた。

そこで、上下動揺(ヒービング)の影響に注目して、

\* 機関性能部

原稿受付：昭和53年6月30日

より十分な現象解明を進める目的で専用の大型上下動揺実験装置を製作し、これに高温高圧の実験が可能な熱流力実験ループを載せ、実験研究を行った。本報告はこの装置を用いた一連の実験の結果について取りまとめたものである。なお、ここで扱う動揺時の熱流力特性に関する研究は、船用原子炉に限らず、二相流循環ループを備えた船用のプラント(自然循環ボイラなど)における問題解明にも寄与するものである。

現在用いられている船用炉は炉心内でバルク沸騰を極力抑えた加圧水型原子炉であるが、熱除去能力を改善する面からバルク沸騰を許容する沸騰水型炉の方向に進むことも考えられる。しかし、炉心内で沸騰を起こすと、炉の熱流力特性は船体の動揺の影響を受けやすくなる。それは沸騰を許容する度合が大きくなる程、炉心冷却水の流路内の蒸気-水混合物と降水管内

の水の比重量の差が大きくなり水の循環の駆動力として大きく寄与し、船の運動による垂直方向の加速度変動によってこの駆動力が変動し、冷却水の流量を変動させてしまうからである。そこで、船体運動のうち特に影響力の大きいヒービングが炉の熱水力特性に及ぼす影響についての実験的な研究が必要となってくる。

炉の冷却水の循環系の熱水力学的なモデルとして、沸騰二相流試験ループを用いた多くの実験的な研究がなされている。沸騰二相流ループは水力学的な振動系を形成しており、二相流抵抗の非線形性にもとづく不安定流動あるいは振動を起しやすい。船用炉の場合、この水力学的な振動系に加振外力として船体運動のヒービング（重力加速度変動）が加わる。二相流ループ固有の自然振動数に近い周波数の加振力が加わった場合、共振現象を起こし、流れの脈動が増大し、加振力の大きさによっては伝熱面の限界熱負荷の低下をまねく可能性がある。この現象は実際の船体動揺周期範囲の下でも起こる可能性があり、周期性を有する船体運動と冷却材の流動の関係の研究が重要となる。

過去において炉心の熱水力特性に及ぼす動揺の影響について世界各国でいくつかの実験的な研究<sup>5) 6) 7)</sup>が行なわれたが多くの場合は小規模なものが多い。特にヒービングにもとづく流れの脈動が限界熱負荷に及ぼす影響に関する実験例は少ない<sup>1) 7)</sup>。

本報告は次の4つの項目に分けて行った実験の手法と結果について総括的に述べる。

- (1) 静止時の二相流ループの安定性を雑音解析の手法で推測する。
- (2) 二相流ループの上下動揺加速度に対する流動の応答を相関技法を用いて周波数領域で調べる。
- (3) 動揺加速度にもとづく流動変動がループ加熱管の限界熱負荷（バーンアウト熱負荷）におよぼす影響、特に動揺周波数の依存性について調べる。
- (4) 動揺時のボイド率の変動の観察、および二相流スリップ比の挙動を推測する。

これらの実験は動揺時の二相流の熱流学的な特性を物理的に把握し、理論的解析モデルの確立やその妥当性の検討に資することを目標とした。理論的な解析による考察については別途報告する予定である。

## 2. 実験装置

### 2.1 上下動揺実験装置

以前に行った小型ヒービング試験装置による諸実験

<sup>1)~4)</sup>により炉の熱水力特性に低サイクルの船体動揺、特にヒービングの影響が大きかったことがわかった。実験規模を拡大するため大型の上下動揺実験装置を建設した。しかし船体の上下動揺（ヒービング）を模擬する装置として必要な長周期で、長行程の運動を行いしかも滑らかに動く動揺台の建設は困難を極めた。すなわち、初期の実験に用いた小型のヒービング装置においてはクランク機構を用い、電動機の回転運動を直線運動に変換し鋼索・滑車装置によりストロークを増幅（7倍）して試験ループを上下運動させる方法を探ったが、運動行程中の上昇速度と下降速度の差異や、運動方向が変わる際の衝撃が加わり加速度波形は正弦波形を理想とすると十分満足できるものでなかった。この装置は構造的に上下行程の振幅を変えることができないため周期と加速度の関係が一義的に定まり、加速度振幅を一定にしたまま周期を変えて周波数特性（共振点の追跡など）を調べるといった実験はできなかった。大型の上下動揺実験装置は上記の欠点のある程度カバーできるよう工夫したが、加速度波形の歪みは改善できなかった。

大型上下動揺実験装置の装置本体は鉄骨支柱とその間を上下動する試験台からなり、この試験台の駆動は油圧によって行われる。油圧ポンプ（定容量型）の吐出油圧を調圧弁で所定の圧力（最高140kg/cm<sup>2</sup>）に設定し、切換弁（案内弁）の切換により駆動部の油圧シリンダの上下に入れ、ピストンを上下運動させる。ピストンの運動を動滑車とワイヤロープで4倍のストロークに拡大し、ワイヤロープに固定した試験台を上下運動させる。試験台の上下動周期は切換弁の切換周期によって決まる。切換弁として電気—油圧サーボ弁が用いられている。この弁は信号電圧に比例した流量特性を持ったものである。低周波発振器からの正弦波信号がサーボ増幅器を経てこの切換弁に加えられる。試験台の塔載重量のカウンターバランス用に空気圧を用いたバランス圧シリンダ、および上下行程の上下端における緩衝用のバネ圧シリンダが油圧シリンダに並列に設けてある。サーボ増幅器に加えられる電気入力信号（振幅、周期、正弦波形）、バネ圧用空気圧力、および油圧を適当に設定することにより、必要とする上下動の行程と周期を一定範囲内で自由に得ることができる。試験台に積載するループ重量、油圧サーボ弁の性能、駆動系全体の機構的な原因等のため、この装置でも得られる加速度波形は目標とする正弦波にくらべかなり歪んでおり、しかも高調波を含んだ波形であ

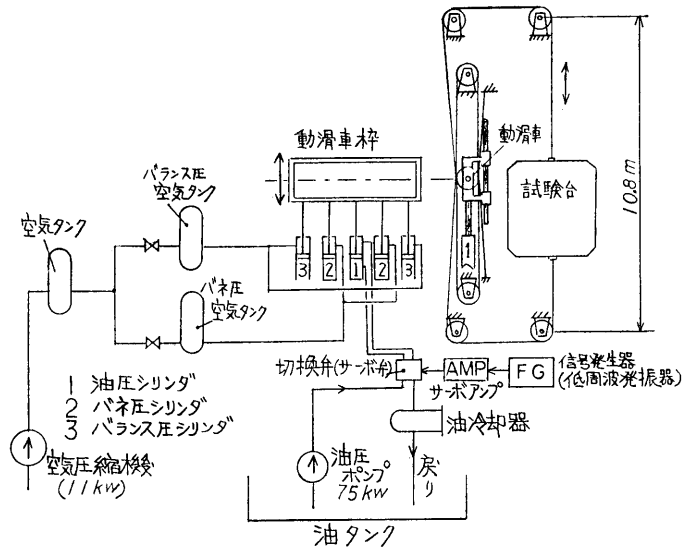


図-2-1 上下動揺実験装置概念図

る。図-2-1に本装置の概念図を示し、写真-2-1に装置全体写真を示す。表-2-1に装置の主要目を、また図-2-2に装置の使用加速度範囲を示す。図-2-3は加速度記録波形の例を示している。

表-2-1 上下動揺実験装置主要目

積 載 重 量	(試験ループ) 1,200kg
試 験 台 寸 法	高さ3.1m×幅4.2m×奥行2.0m
上 下 動 行 程	4.0m (以内可変)
最大加速度変動	±0.3g
上下動周波数	0.2~1.5Hz
駆 動 方 法	油圧シリンダー

上記のように加速度信号は周期振動であるが高調波成分を含んでいる。振動の各成分の振動数軸上における分布を求めるため 加速度波形原信号 ( $X(t)$  と表わす) のフーリエ解析を行いフーリエスペクトルを求めてみた。手法の詳細は付録-Aで述べる。図-2-4に分析例を示す。図の横軸は次式で示すフーリエ係数  $C_k$  に相当 (基本波に対する  $k$  調波のフーリエ係数の比を百分率で表わす) するものである。

$$X(t) = \sum_{k=0}^N C_k \sin(k\omega t + \theta_k) \quad \dots\dots (2.1-1)$$

$C_k$ ;  $k$  調波成分の振幅を表わすフーリエ係数 ( $k=1, 2, 3, \dots$ )

$\omega$ ; 基本波の角振動数 (図-2-3の  $f_H$ )

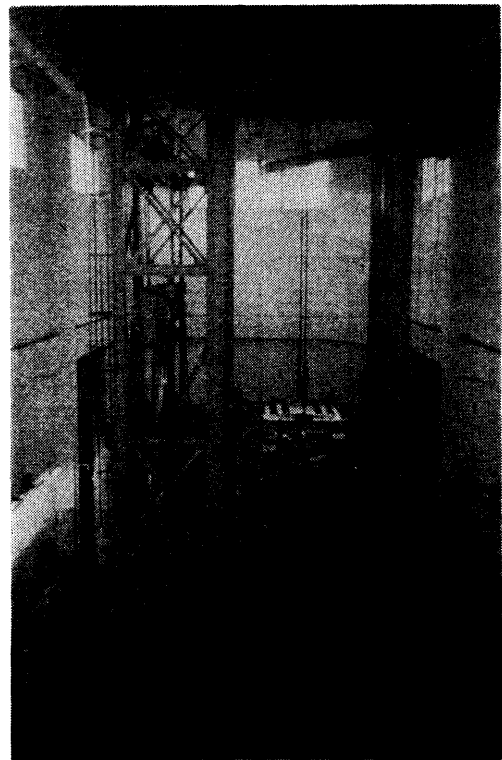


写真-2-1 上下動揺実験装置

に相当する。)  $\theta_k$ ;  $k$  調波の位相角

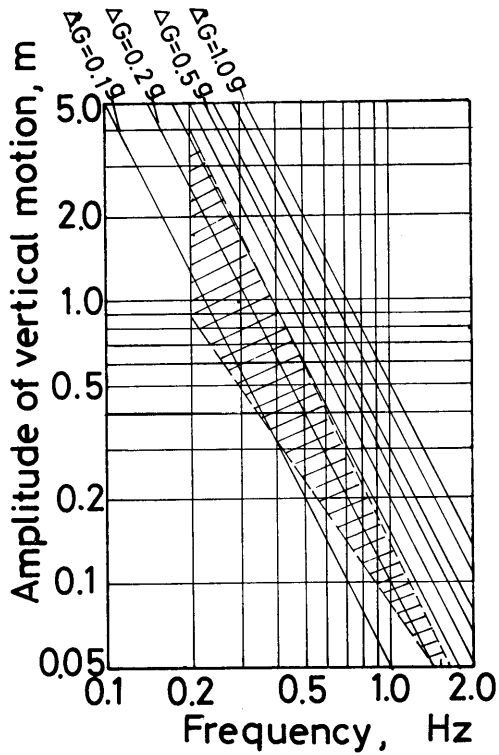


図-2-2 上下動揺実験装置・試験可能範囲 (斜線部), 正弦波仮定計算値

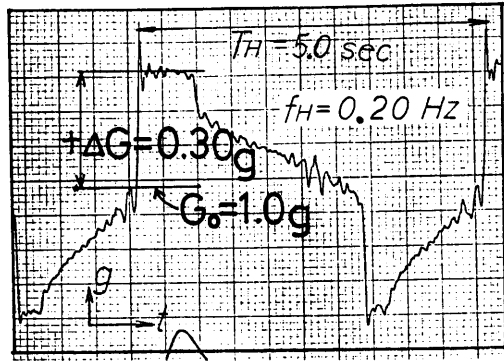


図-2-3 上下動揺実験装置による加速度変動波形

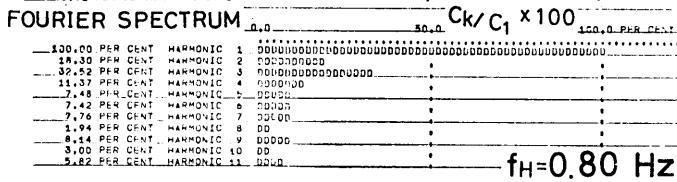
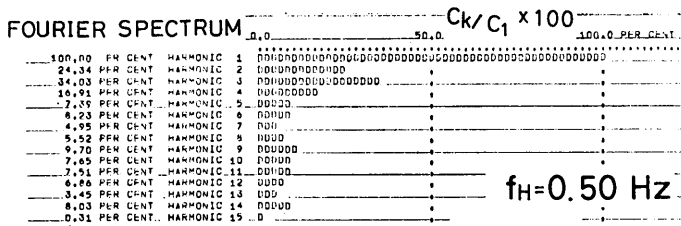
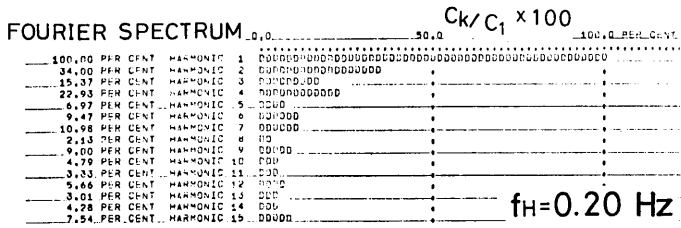
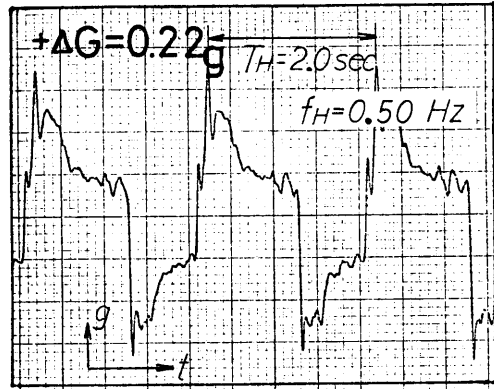


図-2-4 加速度変動波形のフーリエ解析結果 ( $f_H = 0.2\text{Hz}, 0.5\text{Hz}, 0.8\text{Hz}$ )

図中に示す  $f_H$  は上下動の1周期 ( $T_H$ ) の逆数であり分析される波形の基本周波数 (第1高調波周波数) に相当する。

なお分析は加速度波形1周期分をとる変域を2N個 (場合によって  $N=10\sim 20$ ) に等分し, 等分点における2N個の値 (離散データ) を用いて行った。

結果が示すように第3, 第4高調波においても10%以上の振幅成分を持っていて, 振動試験装置としては理想とかけ離れている。

### 2.2 試験ループ

上下動揺実験装置の試験台に搭載して実験に使用する試験ループ (沸騰二相流ループ) は水冷却型原子炉の1次系を熱水力特性に関して模擬する電気加熱循環水ループであり, 1次冷却水の循環流量や, 熱限界に対するヒービング加速度の影響を調べることを目標として製作したものである。ただしループは特定の炉形式を想定した実寸規模の供試体ではなく, 基礎実験用として現象を正確に理解し易いよう単純化した1次系構成である。すなわち単管加熱管 (管内流) タイプの自然循環ループである。熱的に高圧条件で実験する要求と, 上下動揺装置の载荷能力の制約からループ運転圧力は最高  $30\text{kg/cm}^2$  とした。加熱管は内径:  $8.5\text{mm}\phi$ ,  $10\text{mm}\phi$ ,  $15\text{mm}\phi$ , (3種) 長さ;  $750\text{mm}$ , 材質; ステンレス鋼 (SUS-27 相当) で管両端部に銅管を溶接し給電端子とする。加熱は実験室床面にあるサイリスタ整流器から直流 (最大  $25\text{V}$ ,  $2000\text{A}$ ) を上下動揺装置に組み込まれた給電装置 (剛体トロリー・集電子方式) を経て直接通電して行く。加熱管で加熱 (一様加熱) された水は管内で沸騰し, 二相流となって上昇管を上

昇し, 気水分離器に入る。気水分離器で分離した蒸気は復水器で復水し, 気水分離器で分離した水と共にサブクーラに入り, 下降管路を経て加熱管に循環して戻る。系の圧力は復水器の2次側冷却水の流量調節 (PIDコントローラによる自動調節) によって制御する。加熱管入口温度 (入口サブクール温度) はサブクーラ2次側冷却水の流量調節によって制御する。復水器, サブクーラに冷却水を供給する2次冷却水系統は1基の冷却水タンクおよび2台の冷却水ポンプ (歯車ポンプ), および配管系から成り, 更に地上からのフレキシブルホースで補給, 排水を行う。ループを構成する機器 (1次系, 2次系) は全て底面  $2\text{m}\times 1.8\text{m}$ , 高さ  $2.8\text{m}$  の架台フレームに組み込まれている。ループの系統略図 (フローシート) を図-2-5に, また流路

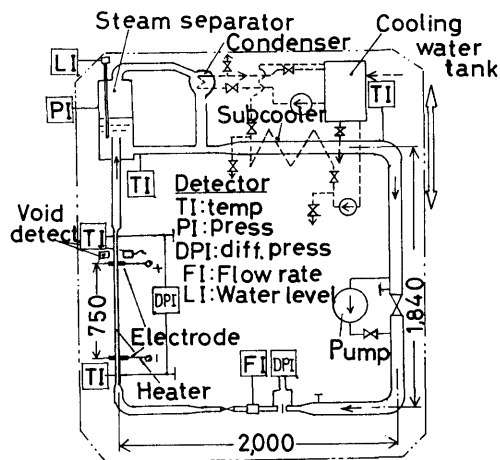


図-2-5 試験ループフローシート

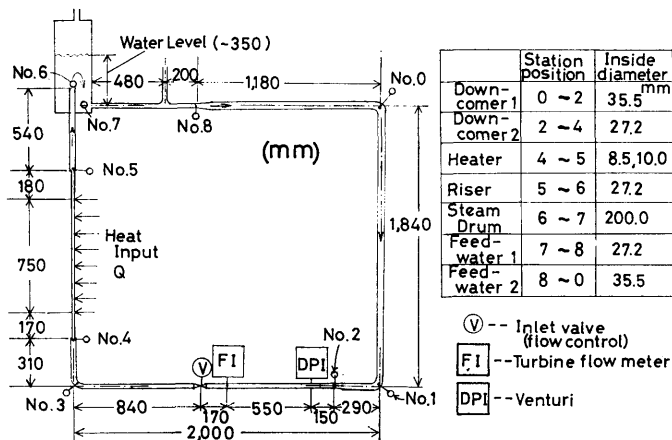


図-2-6 主循環系の流路寸法

表-2-2 試験ループ主要目

系統圧力(最高)P	30 kg/cm <sup>2</sup>	
(飽和温度)	(273°C)	
加熱管	熱出力 Q	50 kw
	材質	SUS 27相当
	内径	8.5, 10, 15mm
	長さ	750mm
サブクール温度 $\Delta T_{subc}$	5~40°C	
循環方式	自然循環	
循環水流量(最大)	0.45×10 <sup>3</sup> kg/h(15φHTR)	
加熱管入口流速(最大)	0.95m/sec(15φHTR)	
ループ全重量	1,200 kg	

寸法図を図-2-6に示す。表-2-2にループの主要目を示す。

ループの主な計装は図に示すように、温度(5点)、系圧力(1点)、流量(1点)、差圧(2点)であり、実験時連続記録する。その他ボイド率計(1点)、とバーンアウト検出器(1点)が場合によって使用される。

温度測定はシース型CA熱電対(ステンレス鋼シース、外径0.6φ)を用い、測定位置は加熱管入口(水温)、加熱管出口(水温)、加熱管(壁温、上端より80mm下)、気水分離器出口(水温)、およびサブクーラ出口(水温)である。

系圧力は気水分離器気相部で検出する。検出器はひずみゲージ式圧力ピックアップを用いた。

加熱管入口の循環流量を測定するため、ベンチュリー管式流量計と軸流型タービン流量計を備えている。ベンチュリー管式流量計はタービン流量計のバックアップとし、主として静特性測定時に用いる。なおベンチュリー管の差圧信号はひずみゲージ式差圧ピックアップを用いるため、加速度変動が直接差圧ピックアップのダイヤフラムのひずみとして影響するので動揺時の測定には利用できない。この欠点とタービン流量計の直線性の良さを生かして動揺時の流動変動の測定用にタービン流量計を用いた。留意すべき応答性についても測定の対象とする変動周波数の目標5.0Hz以下に対し、タービン流量計の時定数約7~10msec(メーカーカタログ仕様)であるので本実験の目的には十分適合している。タービン流量計はタービンロータの回転数を電磁的にピックアップし、電圧パルス数に変換し、さ

らに周波数-電圧変換器によってパルス周波数に比例した直流状の電圧信号に変えて流量信号を得る方式である。この流量計により加熱管入口におけるループ循環流量を求める。なお本文中、便宜的に、「流量」は加熱管流路内の「断面平均流速」に換算して示してある。

ループに加わる上下動揺加速度はループ架台に設置したひずみゲージ式加速度ピックアップで検出する。

各計装の検出器からの信号はローパスフィルター、直流増幅器を経由して記録計(電磁オシログラフ、自動平衡型記録計)およびアナログデータレコーダ(FM変調方式)に記録される。さらに後述するように、これらの信号は、必要に応じてオンラインもしくはデータレコーダ再生により波高分析器やデジタル相関計を用いて統計的データ処理される。

バーンアウトの検出は加熱管管壁の温度上昇に伴う電気抵抗変化を検出する抵抗ブリッジ方式の「バーンアウト検出器」によって行う。(詳細は付録・Dで述べる)

ボイド率測定装置は加熱管出口における二相流のボイド率を $\gamma$ 線透過法を用いて測定する。(詳細は付録・Cに述べる)

### 3. 実験の手順と結果

#### 3.1 静特性実験

動揺にもとづく加速度変動時の自然循環二相流ループの流動特性は、前述したようにループ固有の水力学的な安定性に依存する。実験の準備段階として、静特性実験により対象とするループの水力学的な特性を色々な運転条件(加熱管熱負荷、系圧力、加熱管入口サブクール温度)について求めた。なおここで言う静特性実験とは、ループに上下動揺加速度変動を加えない時のループ特性測定実験全般を指すことにする。

実験は基本的には加熱管熱負荷(熱流束)、系圧力、加熱管入口サブクール温度、を独立変数として、ループ循環流量、ボイド率、各部温度、バーンアウト信号を測定することによって進める。

##### 3.1.1 不安定現象の測定

系圧力、加熱部入口温度(サブクール温度)を一定に保ち熱負荷と循環流量の関係(熱負荷-流量特性)を求める。測定例を図-3-1に示す。自然循環の場合、Becker等<sup>9)</sup>が示したように、加熱量の低い所で破線部に不安定域が存在し、熱負荷の増加と共に流量は増加し、極大値に達したのち減少して行き限界値に

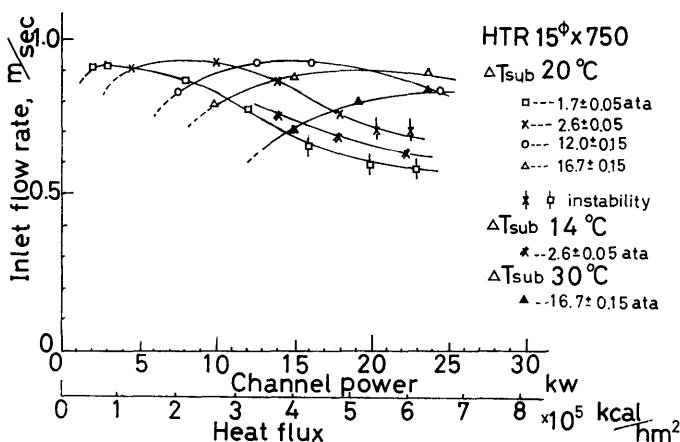


図-3-1 熱負荷—流量特性 (自然循環時), その1

至ると、熱負荷一定条件でも流れが振動的になり、いわゆる水力学的な自励振動 (不安定現象) を起こすようになる。この限界値より更に熱負荷を増加して行くと遂にはバーンアウトが発生する。このバーンアウトに至る経過については3.1.3で述べる。

自励振動を起こす発振条件 (水力不安定限界熱負荷) は同一のループでも、ループ運転条件 (系圧力、入口サブクール温度) によって大きく変わる。また自励振動数も、系圧力、サブクール温度に依存する。ループ系圧力、加熱管入口サブクール温度をパラメータとして自励振動数を測定した結果を図-3-2に示す。この場合、不安定限界熱負荷での値を示す。

この実験で観測された不安定現象は振動の周期からみて、流量—ボイド発生量—圧力降下間のフィード

バック効果に起因する密度波型不安定現象に分類<sup>9)</sup>されるものである。密度波型不安定振動は加熱流路の通過時間のオーダーの周期を持ち、二相流不安定の代表的なものである。自然循環の場合、ループの寸法にもよるが、ほぼ1.5Hz以下の低サイクル振動であり、本実験のループも図に示したような値 ( $f_n$ ) である。

ここで不安定性を検出した方法について述べる。静特性実験で測定される循環流量は、いわゆる定常状態の安定な流れにおいても、二相流固有の脈動的性質 (気相と液相の不均一分布に起因するもの) により平均値のまわりでゆらぎ (不規則振動) を生じている。このゆらぎの振幅は小さく、周期もランダムである。熱入力が増大と共に、ノイズ (ゆらぎ) の中からある一定の周期の変動がしだいに成長するが顕著でない。しかし熱負荷が不安定限界 (発振レベル) に達すると、ゆらぎの振幅は急に増大し、振幅と周期がかなり規則的な定常振幅の振動となる。この事はループのボイド率や流量の「分散」を測定し、不安定性が起こると分散が急激に大きくなる事を利用した不安定性の検出に利用されている<sup>10)</sup>。本実験においても水力不安定限界値は加熱管の熱負荷の関数としてループ循環流量のゆらぎの rms 値をプロットし、rms 値の急変する傾向から推定した。図-3-3に rms 値の測定例を示す。

定常状態の安定性をモニターする手段として古くから原子炉雑音解析で開発された手法のうち、「相関関数—フーリエ変換」によりパワースペクトルを求める手法がある。ループの定常時のパワースペクトルを色々な運転条件で測定し、そのパワースペクトルの傾向から、定性的な議論であるがループの安定度が推定で

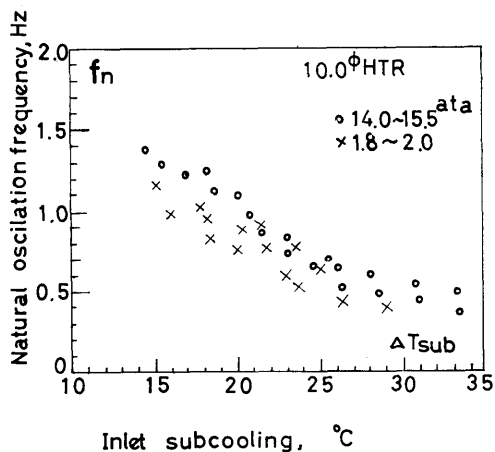


図-3-2 水力振動 (自励振動) 数

き、いわゆる外乱に対し共振しやすい周波数（固有振動数）を知ることが出来る。この手法を採用し、ループ循環流量の変動信号の自己相関関数( $\phi_{yy}$ )を相関計（実時間デジタル相関計；TEAC社、C-120）を用いて求め、更にフーリエ変換してパワースペクトルを求めた。（この手法の詳細は3.2.1及び付録Bで述べる）なお、前述したrms値も自己相関関数の測定時に、遅延時間0の場合の値 $\sqrt{\phi_{yy}(0)}$ より求めた。

静特性実験で観測された流量信号の記録波形例を

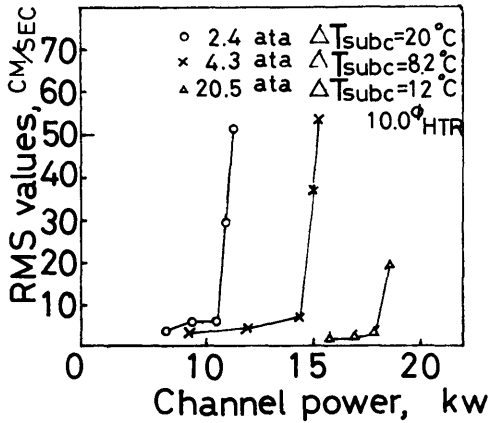


図-3-3 加熱管熱負荷とRMS値

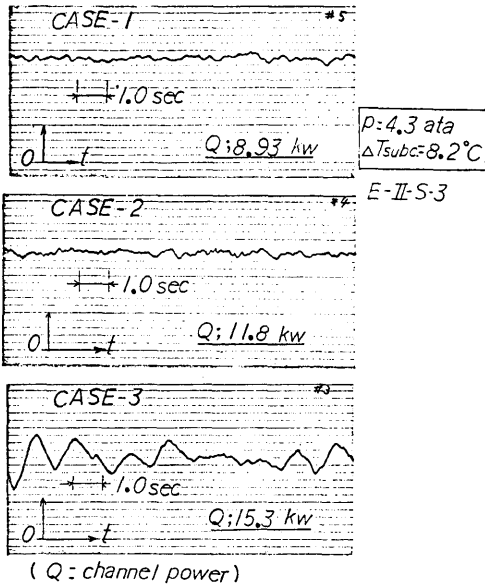


図-3-4 循環流量の記録波形  
(内径10.0φHTRの場合)

図-3-4に示す。原波形からはCASE-1、CASE-2ともに周期性をはっきり認め難いが、相関関数—フーリエ変換処理によりCASE-2における周期性を検出する事が出来た。CASE-2はCASE-3とほぼ同じ固有振動数であることがわかる。図-3-5は測定された自

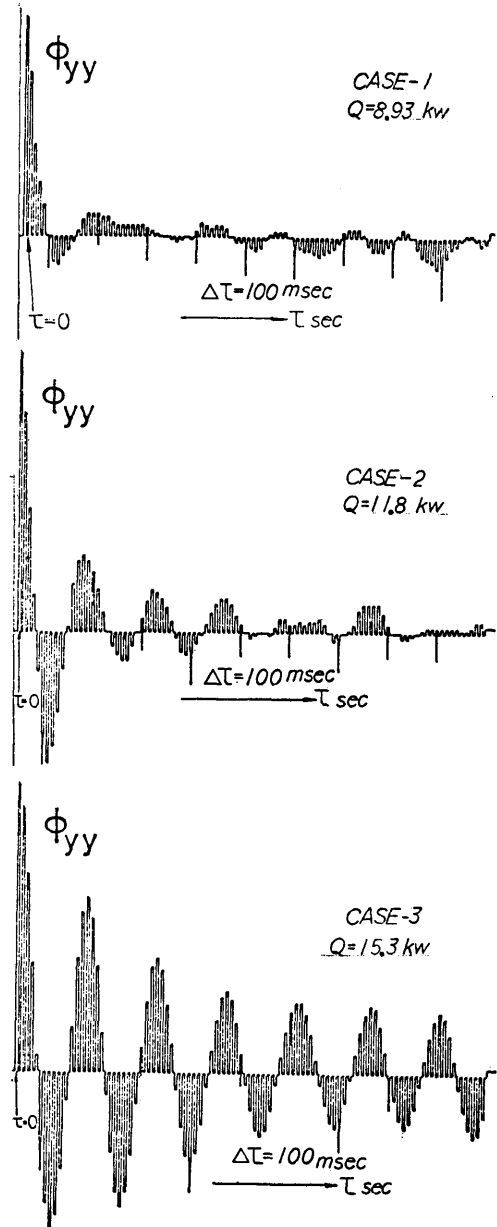


図-3-5 静止時における循環流量の自己相関関数測定値



POWER SPECTRUM  $\Phi(f)_{yy}$  CACE-1 Q=8.93 kw

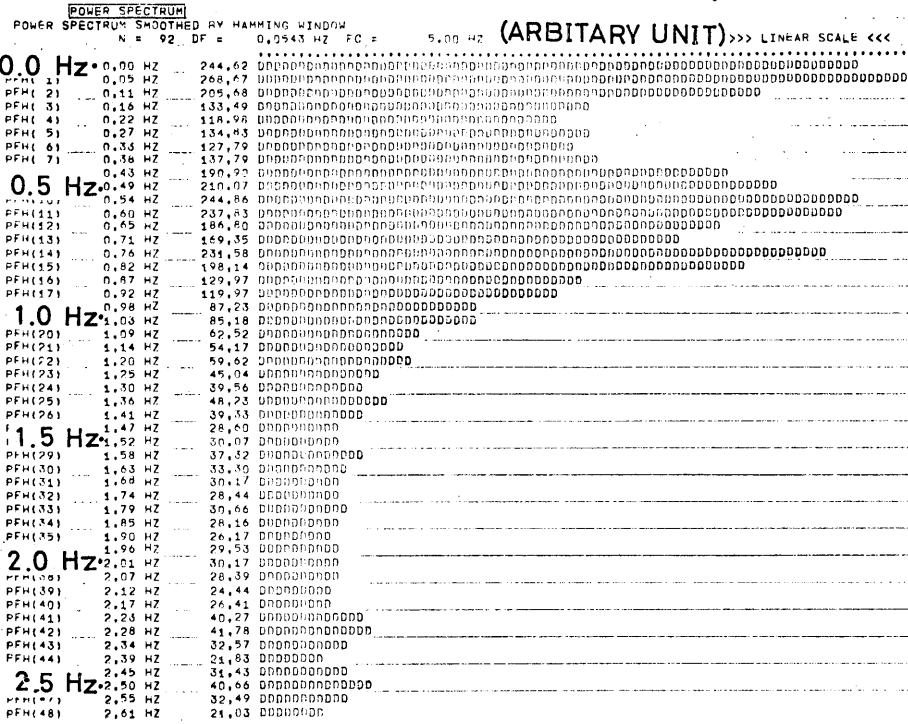


図-3-6(a) 静止時の循環流量のパワースペクトル計算値 (CASE-1)

POWER SPECTRUM  $\Phi(f)_{yy}$  CACE-2 Q=11.8 kw

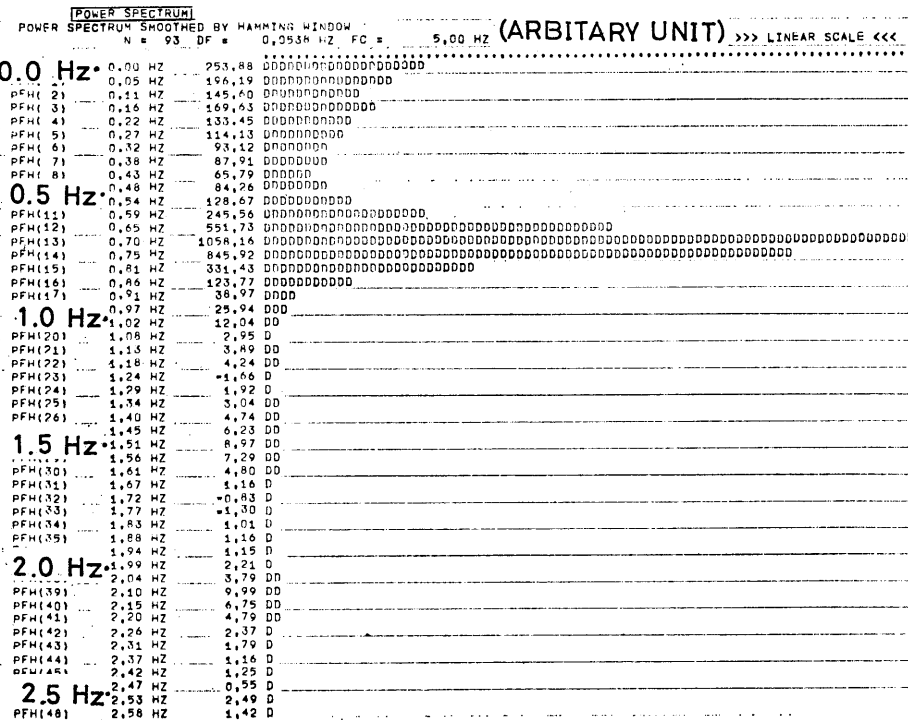


図-3-6(b) 静止時の循環流量のパワースペクトル計算値 (CASE-2)

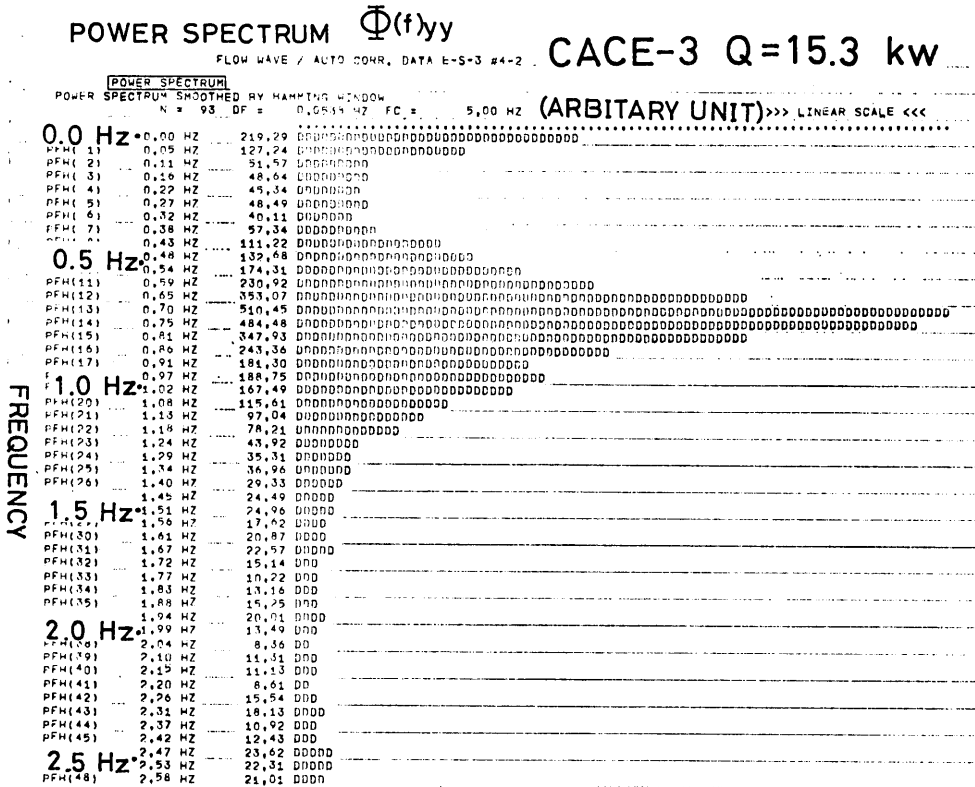


図-3-6(c) 静止時の循環流量のパワースペクトル計算値 (CASE-3)

表 3-1 ループ水力振動数  $f_n$  (固有振動数)

ループ 圧力範囲	運転条件の値 (水力不安定限界、負荷)	推定 PSDから推定 (水力不安定限界以下、負荷)
1.6 (at)	P 1.6at $\Delta T_{sb}$ 20.0℃ Q 10.2 kw	0.86 Hz
	P 2.0 $\Delta T_{sb}$ 18.0 Q 10.2	0.80 Hz
4.0 (at)	P 4.0 $\Delta T_{sb}$ 9.5 Q 15.5	0.72 Hz
	P 5.2 $\Delta T_{sb}$ 25.0 Q 13.8	0.66 Hz
14.0 (at)	P 14.0 $\Delta T_{sb}$ 22.6 Q 15.8	0.88 Hz
	P 14.6 $\Delta T_{sb}$ 28.0 Q 16.5	0.62 Hz

\* PSD : Power spectrum

己相関関数である。図-3-6 (a), (b), (c) は自己相関関数をフーリエ変換して求めたパワースペクトルである。パワースペクトルの測定結果から分かるように、

ごく低熱負荷領域ではループの気液二相流は沸騰雑音としてランダム信号の性格を持ち、パワースペクトルは鋭いピークのないわりと平坦な分布を示す。熱負荷の増大とともに流量一ボイド発生間のフィードバック効果をはっきり表われて特定の周波数でピークが見られるようになる。

これらのスペクトル分析によりループの安定な状態 (水力不安定限界以下) での固有振動数を推定することが出来た。表-3-1の各運転条件における固有振動数 ( $f_n$ ) はこの方法によって求めたものである。

### 3.1.2 ボイド率の測定

ボイド率 (気泡体積率) は二相流の基本的なパラメータであり動揺時の循環流量の変動と共に、加熱管、上昇管、におけるボイド率変動を把握する必要がある。ボイド率は水冷却炉の場合、炉の熱水力特性のみならず核特性を知る上でも重要な量である。まずループが動揺を受けない静止時の測定とて、ループ運転圧力 (p) とサブクール温度 ( $\Delta T_{subc}$ ) を一定に保ち熱入力 (熱負荷 q) をパラメータに加熱管出口の流路断面

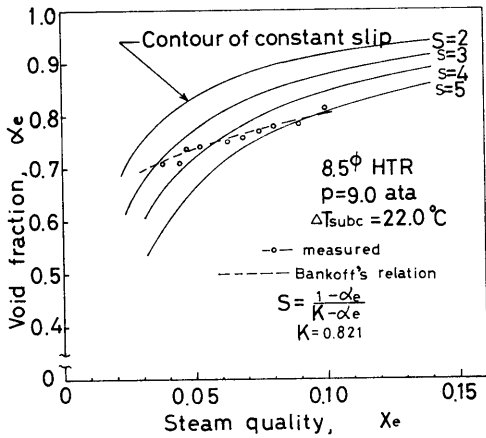


図-3-7 静止時のボイド率特性

平均ボイド率 ( $\alpha_e$ ) を求めた。測定手法は  $\gamma$  線透過法を採用した。詳細は付録Cに述べる。1 測定点の測定時間は計数値を高めるため 100sec とし、検出される計数値を約  $10^6$  カウントになるようにした。この場合、ボイド率50%で統計的変動による相対誤差を±1%以内(測定したボイド率範囲  $\alpha_e=0.6\sim 0.8$ , コリティ  $x_e=0.04\sim 0.09$  の場合)に納めることが出来る。

図-3-7は出口コリティ( $x_e$ )と出口ボイド率測定値( $\alpha_e$ )の関係を示すようプロットしたものである。 $x_e$ は測定された入口流量および加熱管の熱入力の値から熱平衡の仮定の下に算出したものである。この図により加熱管出口における蒸気-水のスリップ比(蒸気相と液相の流速の比,  $S=V_g/V_f$ )の傾向が分る。なお図中、等スリップ比線は次式より求めたものである。

$$\alpha_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x_e}{x_e}\right) \frac{v_f}{v_g} \cdot S} \quad v_f, v_g; \text{水 (液相),}$$

蒸気の比容積

定常時のスリップ相関式として一般に用いられているものの一つ、Bankoff<sup>11)</sup>の式を用いて、測定点をフィットするよう係数Kを選んで図中に破線で示した。

### 3.1.3 バーンアウト熱負荷の測定

ここで水力不安定限界以上に熱負荷を上げ、バーンアウトが発生するまでの経過について、実験結果に沿って述べる。

3.1.1でも述べたように水力不安定限界値より更に熱負荷を増加して行くと、循環流量と同周期で加熱管管壁の温度も振動を開始し、振動振幅の増大、発散的な振動、を経て立上りが急激な温度上昇、加熱管の焼

切れ、の経過をたどる。図-3-8は実例について示したもので、不安定限界の熱負荷( $q_{cr}$ )とバーンアウト熱負荷( $q_{BO}$ )の値の差はこの実験条件ではかなり大きい。強制循環の場合、安定な流れから不安定振動を経ないで(又は非常に短時間の振動を経て)急激な管壁温度上昇を生じるファーストバーンアウトの現象があるが、自然循環の場合、運転圧力の高圧化や加熱管入口の絞りによって流れの安定化をはからない限り、一般に一旦不安定振動を経てバーンアウトに至ることが知られている<sup>8)</sup>。

図-3-9は系圧力(p)と入口サブクール温度( $\Delta T_{subc}$ )を一定に保ち、加熱管入口絞り弁全開(特に断わらない限り実験は入口絞り弁は全開)の条件で熱負荷の増加に伴う加熱管壁の温度変化を流れの不安定限界からバーンアウトに至るまでプロットしたものである。熱電対で測定した温度( $T_{SHTR}$ )と管壁の温度変化によって生じるバーンアウト検出器の不均衡電圧( $e_x$ )を直接記録したものを対比して示してある。図中  $q_1$ の熱負荷はループが自励振動(不安定振動)を開始する値であり、 $q_1\sim q_2$ の範囲では流れの脈動により不平衡電

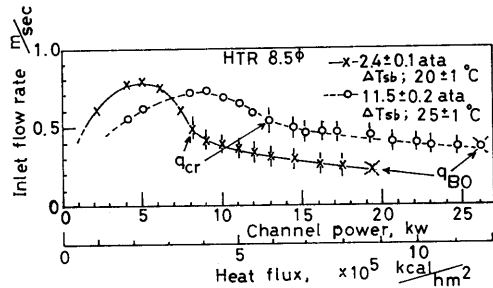


図-3-8 熱負荷流量特性(その2)

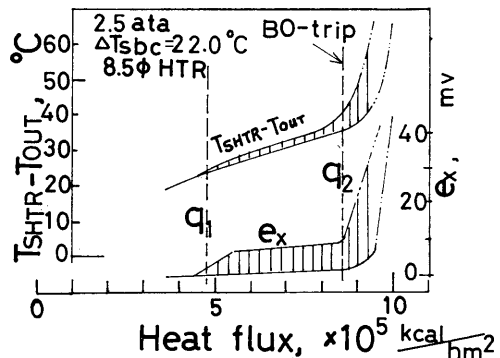


図-3-9 加熱管壁の温度変化 ( $T_{SHTR}$ : 加熱管壁温度,  $T_{out}$ : 沸騰水温度)

圧信号( $e_x$ )は小振幅の定常振幅振動をしており、波形も正弦波状で自励振動と同じ周期である。 $q_2$ 点になると温度振動( $e_x$  信号,  $T_{SHTR}$  信号)の傾向は急変する。熱負荷のわずかな増加に対して温度振動の振幅は著しく大きくなる。 $q_2$ 点から右の領域は加熱壁面で核沸騰から遷移沸騰域に移る範囲であると推定され、流れの振動により伝熱壁面にドライアウト(第2種バーンアウト)を生じるようになると考えられる。不平衡電圧信号( $e_x$ )は $q_2$ より右では立上り急なスパイク状の波形(ピーク値10mv以上)に変わり、脈動1サイクルに1回のドライアウトスパイクを生じるようになる。 $q_2$ の熱負荷レベルを保てば物理的バーンアウト(実際の焼切れ)には至らないが、バーンアウト検出器の性能上この点でバーンアウトトリップ(加熱電源遮断)するよう検出器のレベル調節を行った。従って管壁の温度が不連続的なドライアウトを生じ激しい温度振動を開始する点 $q_2$ を広義のバーンアウト熱負荷(限界熱負荷)とみなし、実験条件として(A)加熱管入口弁を絞り弁全開の場合<Type A と分類する>、と(B)加熱管入口弁を絞りバーンアウト点近傍の熱負荷まで自励振動を起さぬ場合<Type B>に分けて測定を行った。図-3-10はType A, Type Bについて代表的な例を示している。Type Bの場合、流れは安定化するが循環流量が少なくなりバーンアウト熱負荷 $q_{BO}$ は、絞りのない場合に比べて低い値になる。

水力不安定限界における自励振動数( $f_n$ )を3.1.1で求めたが、限界値を越えて熱負荷を増大した場合の $f_n$ の値を図-3-11に示す。サブクール一定の条件で熱負荷を増大すると $f_n$ の値も増加している。

図-3-12はループ圧力(p)と熱限界( $q_{BO}$ )の関係を示す例であり、圧力と共にほぼ直線的に増大している。

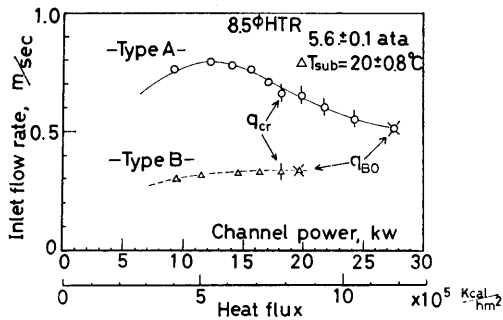


図-3-10 熱負荷-流量特性(その3)  
(Type : A 入口絞り弁全開  
Type : B 入口絞り弁(1%開))

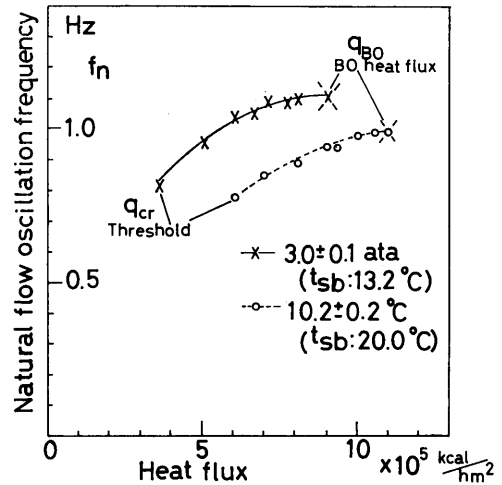


図-3-11 不安定限界以上における自励振動数

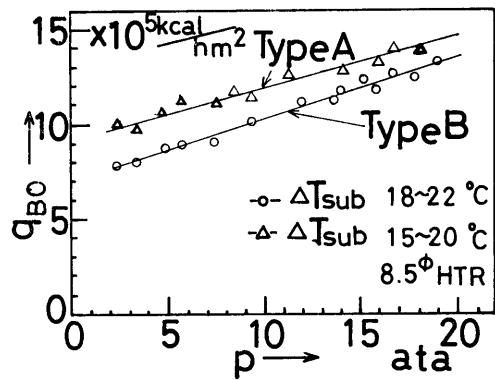


図-3-12 静止時のバーンアウト熱負荷

### 3.2 上下動揺時の実験

#### 3.2.1 流量応答の測定

上下動揺時の実験はループ固有の二相流特性と、加わる運動の加速度の大きさ(振幅, 周波数)との関連を調べるため行ったものである。上下動揺時の二相流ループの応答特性を周波数領域で求めるのが目標であるが、前述したように入力信号である加速度波形が上下動装置の構造的な原因のため正弦波波形と異なりかなりひずみ、高調波成分を含んでいるので、周波数応答法をそのまま適用できない。本実験では静特性実験に用いた相関技法(相関関数-フーリエ変換)によって測定値のデータ処理を行い、ループ循環流の周波数応答特性を求めることとした。周波数応答特性推定にさいし二相流ループの非線形性の影響が問題になる

が、本実験では加速度変動振幅が 0.3 g 以下で比較的小さな入力条件であり応答との間に直線性が成立つものとして実験した。応答信号は雑音成分（沸騰雑音，流れのゆらぎ）をかなり含んでおり，測定データの統計的処理として相関法の利用が信号検出の面で必要であった。

実験の基本的な変数は静止時と同じで，これに上下加速度変動の振幅値，周波数が加わる。実験の手順は大略次の通りである。ループの運転条件を上下動装置の静止時に設定し，十分に熱的な平衡を得た後，上下動装置を駆動する。加熱管の熱負荷 (Q)，系の圧力 (P)，加熱管入口サブクール温度 ( $\Delta T_{subc}$ ) を一定に保ち，加速度振幅 ( $\Delta G$ ) を周波数範囲全域にわたりほぼ一様になるようにして各周波数毎にループ循環流動応答を測定した。低周波領域まで安定した周波数応答を得るため，各周波数毎に長い測定時間をとった。ただし，1 測定当りの時間は，時間の経過と共に上下動装置の作動油の温度上昇による制限（約20分）を考慮する必要があった。表-3-2 は上下動時の実験範囲を示す。

表-3-2 上下動揺時の実験条件

上下加速度変動振幅	$\Delta G: 0.2 \sim 0.3 \text{ g}$
上下動周波数	$f_H: 0.2 \sim 1.5 \text{ Hz}$
ループ運転圧力	$P: 2 \sim 20 \text{ ata}$
加熱管熱出力	$Q: 5 \sim 30 \text{ kw}$
加熱管寸法	$HTR: 8.5\phi, 10\phi, 750L$
循環方式	Natural circulation
加熱管入口サブクール温度	$\Delta T_{subc}: 5 \sim 30^\circ C$

ループに加わる入力信号の加速度信号と応答信号の流量変動信号は，アナログデータレコーダ (TEAC-R351) に送り集録した。その再生出力をデジタル形実時間相関計 (TEAC-C120) に入力し，加速度信号の自己相関関数  $\phi_{xx}(\tau)$ ，流量信号の自己相関関数  $\phi_{yy}(\tau)$ ，および加速度信号と流量信号間の相互相関関数  $\phi_{xy}(\tau)$  を求めた。これらの測定結果をデータカードにパンチにし，電算機 (船研計算センター/TOSBAC-5600) によってフーリエ変換計算を行い，パワースペクトル  $\Phi_{xx}(f)$ ， $\Phi_{yy}(f)$ ，クロススペクトル  $\Phi_{xy}(f)$  を推定した。なおスペクトル計算の際，hamming-window を用いて平滑化を行った。相関関

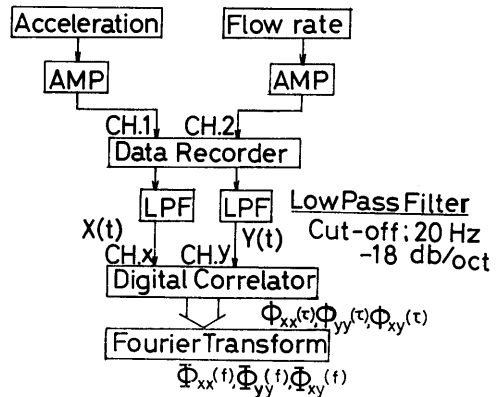


図-3-13 スペクトル推定のブロック線図

表-3-3 相関計の設定値およびスペクトル計算周波数分解能

$f_H$ の範囲	相関計設定値		スペクトル計算	
	$\Delta T$	データ長さ	$\Delta f$	$f_c$
0.2~0.6 Hz	125 msec	1000 sec	0.042 Hz	4.0 Hz
0.65~1.0 Hz	50 msec	500 sec	0.105 Hz	10.0 Hz

$\Delta f$ : 周波数分解能,  $f_c$ : 計算上限周波数,  $N=95$   
 $\Delta T$ : 遅延時間分解能 (サンプリングタイム)

数を一旦求めてから間接的方法によりスペクトルを推定したのは，直接スペクトルを求める装置（フーリエ変換器）が準備できなかったという理由による。図-3-13に上記手順を線図で示す。相関計の設定値およびスペクトル計算に用いられた数値を表-3-3に示す。（フーリエ変換に至る手順は付録Bに述べる）

線形な系に加わる入力信号  $X(t)$  のパワースペクトル  $\Phi_{xx}(f)$  とすると，出力信号  $Y(t)$  のパワースペクトル  $\Phi_{yy}(f)$  は次式で表わされる。

$$\Phi_{yy}(f) = |G(f)|^2 \Phi_{xx}(f) \quad \dots\dots(3.2-1)$$

ここで  $G(f)$  は系の周波数応答関数である。実験により  $\Phi_{xx}(f)$  と  $\Phi_{yy}(f)$  を推定し，この関係を用いて動揺時の二相流ループの周波数応答のゲイン特性を求めることとした。ただし加わる加速度のスペクトルは基本周波数およびその高調波のラインスペクトルになるので一つの加速度波形で広い周波数範囲のゲイン特性は求め得ない。実際の方法としては上下動揺装置の加振源入力信号周波数（低周波発信器の正弦波信号周波数） $f_H$  を 0.2~1.0 Hz の範囲について 0.05 Hz 刻みに変え，周波数  $f_H$  の時の加速度信号のパワースペクトル  $[\Phi_{xx}(f)]_{f_H}$ ，その応答（流量）信号のパワー

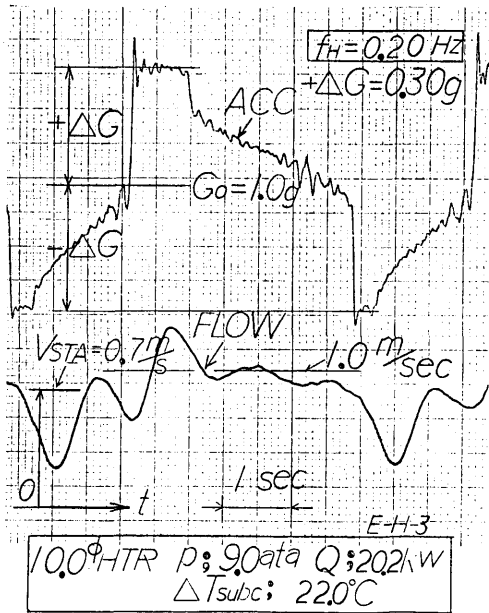


図-3-14(a) 加速度波形と流量応答波形 (その1)

スペクトル  $[\Phi_{yy}(f)]_{f_H}$  を求める。  $f=f_H$  を代入して周波数  $f_H$  におけるパワースペクトルの値の比を次式のように求める。

$$\frac{[\Phi_{yy}(f_H)]_{f_H}}{[\Phi_{xx}(f_H)]_{f_H}} = |G(f_H)|^2 \quad \dots\dots(3.2-2)$$

測定範囲における各周波数 ( $f_H$ ) について  $|G(f_H)|$  の値をプロットし、周波数応答のゲイン特性を求めた。図-3-14(a), (b) は加速度波形とそれに対応する流量変動の記録例である。図-3-15(a)~(f) は計算処理して求めた加速度波形のパワースペクトルと応答流量波形のパワースペクトルの典型例を示す。図-3-16(a)(b) は式(3.2-2)を用いて得られた上下動揺時の周波数応答 (振幅特性) である。

なおここで入力信号である加速度変動と出力信号であるループ流量応答との間の線形性を検討するため、コヒーレンス関数  $\gamma^2(f)$  を求めた。コヒーレンス関数は次のように定義されるものである。

$$\gamma^2(f) = \frac{|\Phi_{xy}(f)|^2}{\Phi_{xx}(f) \cdot \Phi_{yy}(f)} \quad 0 \leq \gamma^2(f) \leq 1 \quad \dots\dots(3.2-3)$$

ここで  $\Phi_{xy}(f)$ ; 入力信号  $x(t)$  と出力信号  $y(t)$  間のクロススペクトル  
 $\Phi_{xx}(f), \Phi_{yy}(f)$ ;  $x(t), y(t)$  のパワースペクトル

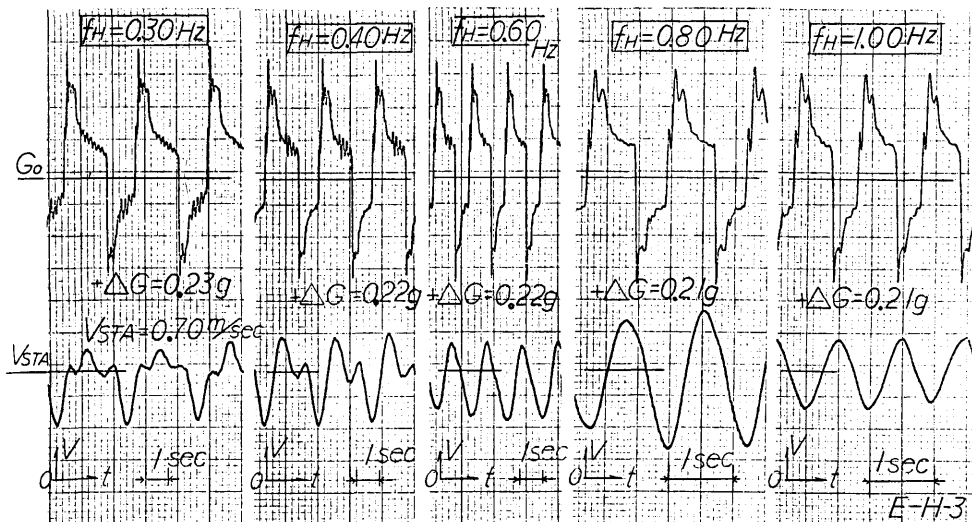
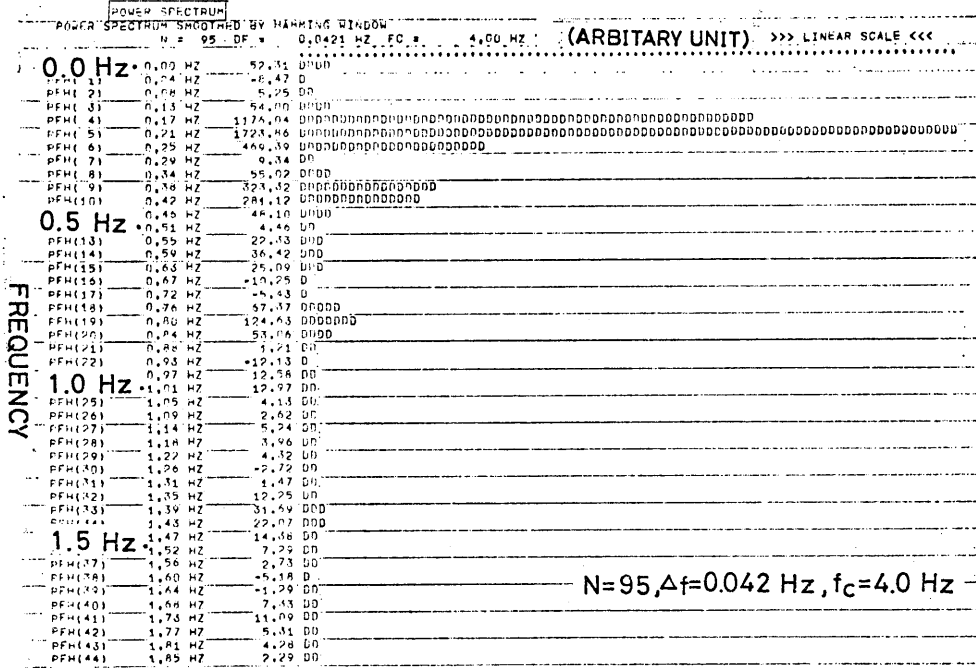


図-3-14(b) 加速度波形と流量応答波形 (その2)

POWER SPECTRUM  $\Phi(f)_{xx}$   $f_H=0.20$  Hz  
 Acceleration



POWER SPECTRUM  $\Phi(f)_{yy}$   $f_H=0.20$  Hz  
 Flow rate

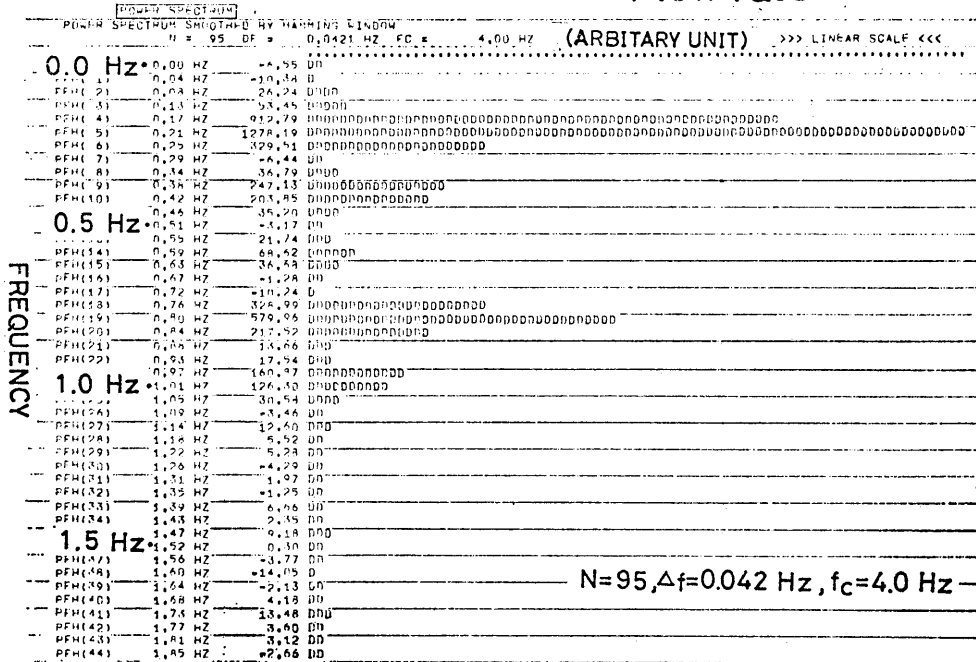
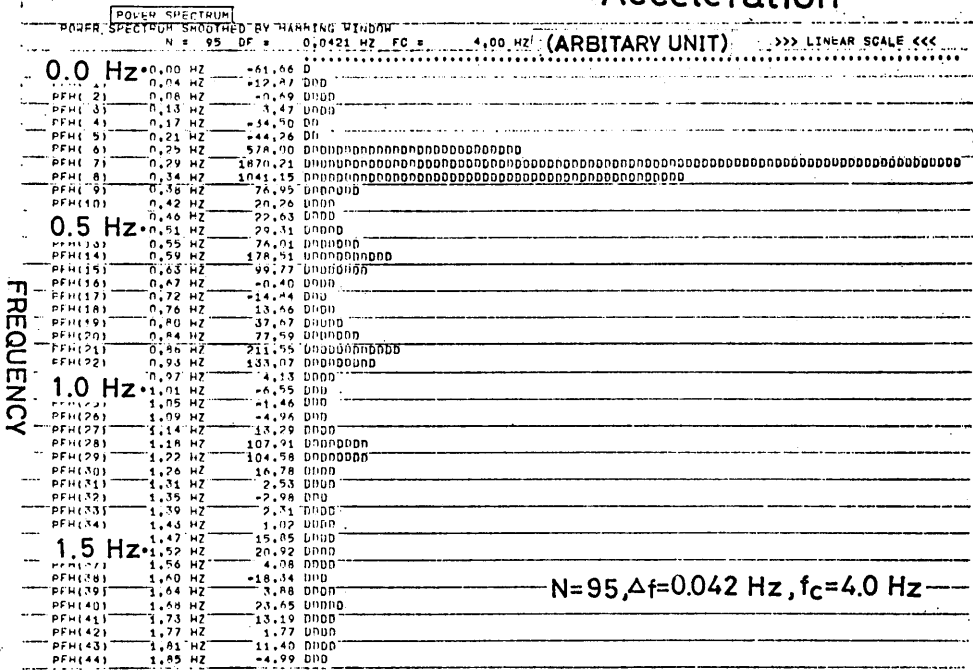


図-3-15(a) 加速度(入力)信号と流量(出力)信号のパワースペクトル (1)

POWER SPECTRUM  $\Phi(f)_{xx}$   $f_H=0.30$  Hz  
 ACC. WAVE / INPUT DATA  $F_H=0.300$  HZ  $E=H=3$  Acceleration



POWER SPECTRUM  $\Phi(f)_{yy}$   $f_H=0.30$  Hz  
 FLOW WAVE / OUTPUT DATA  $F_H=0.300$  HZ  $E=H=3$  Flow rate

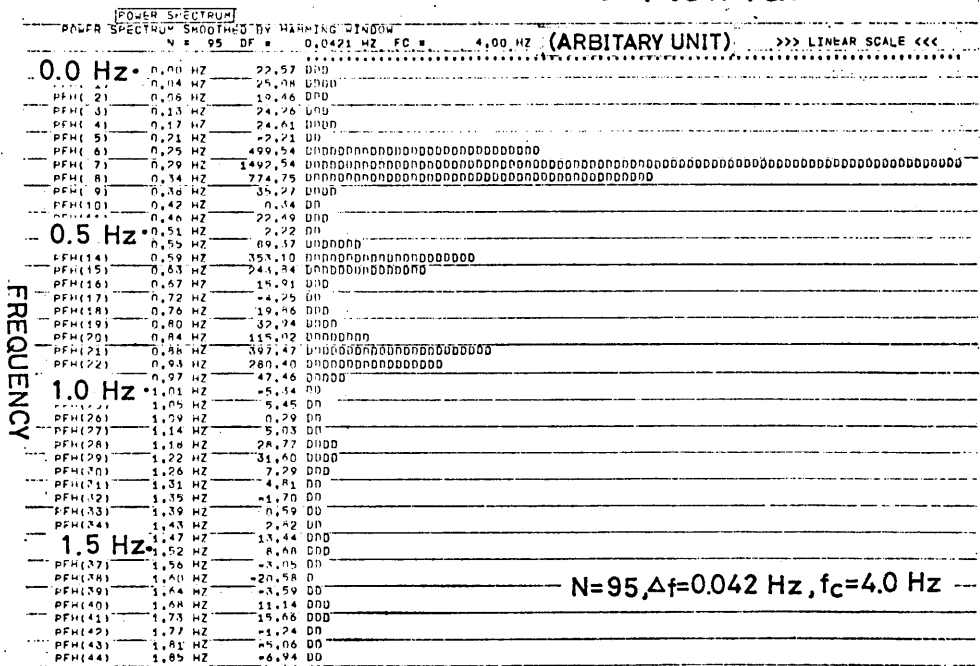


図-3-15(b) 加速度(入力)信号と流量(出力)信号のパワースペクトル (2)



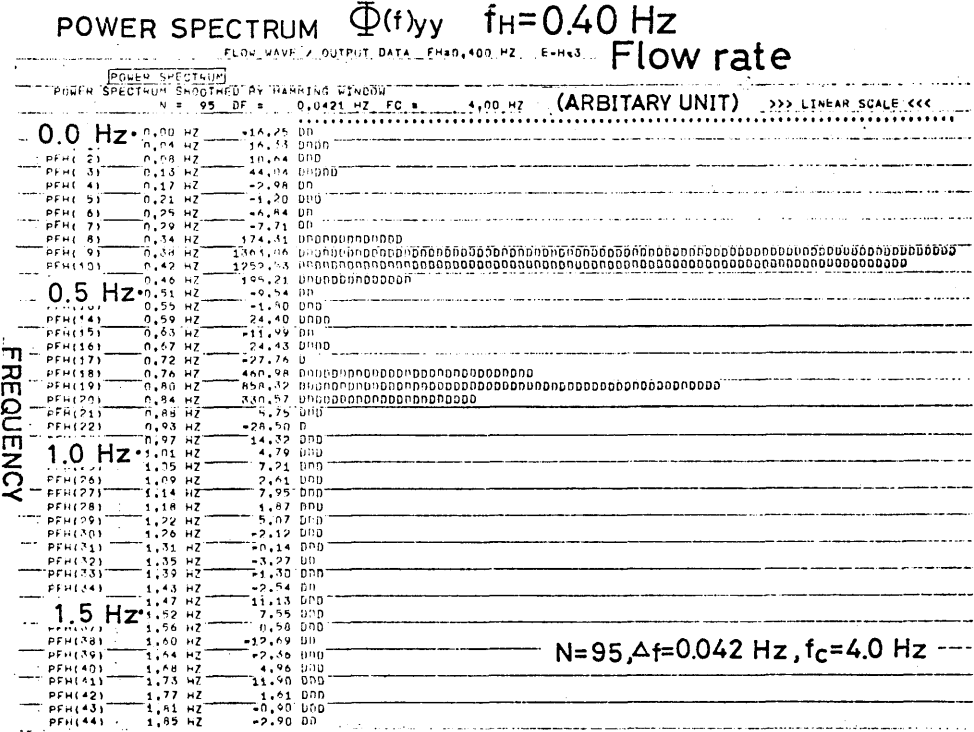
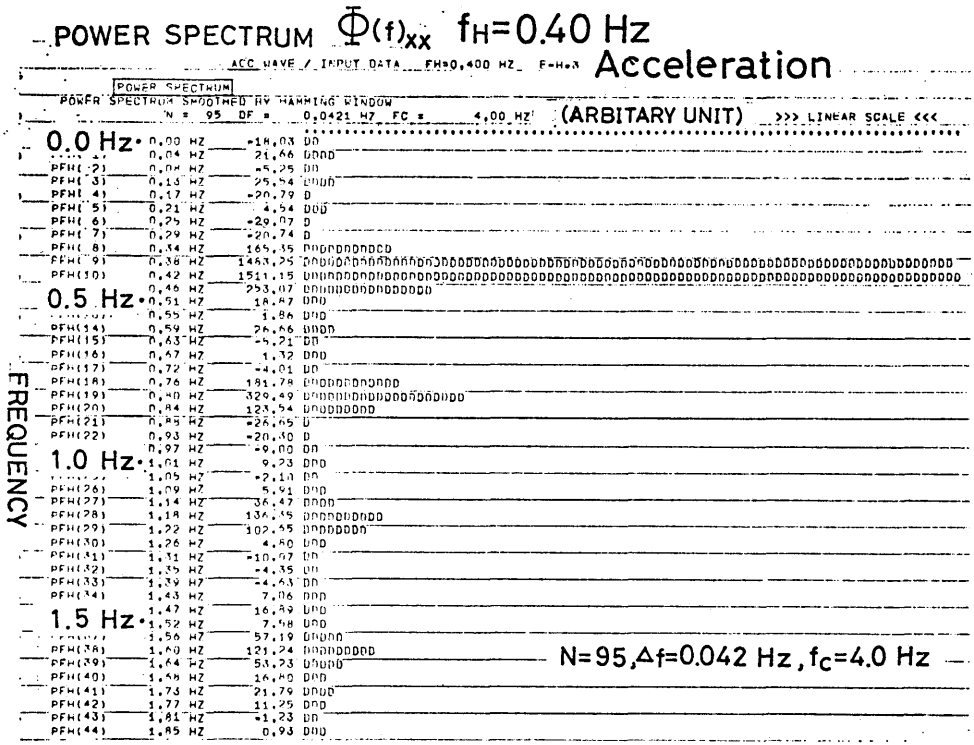


図-3-15(c) 加速度(入力)信号と流量(出力)信号のパワースペクトル (3)





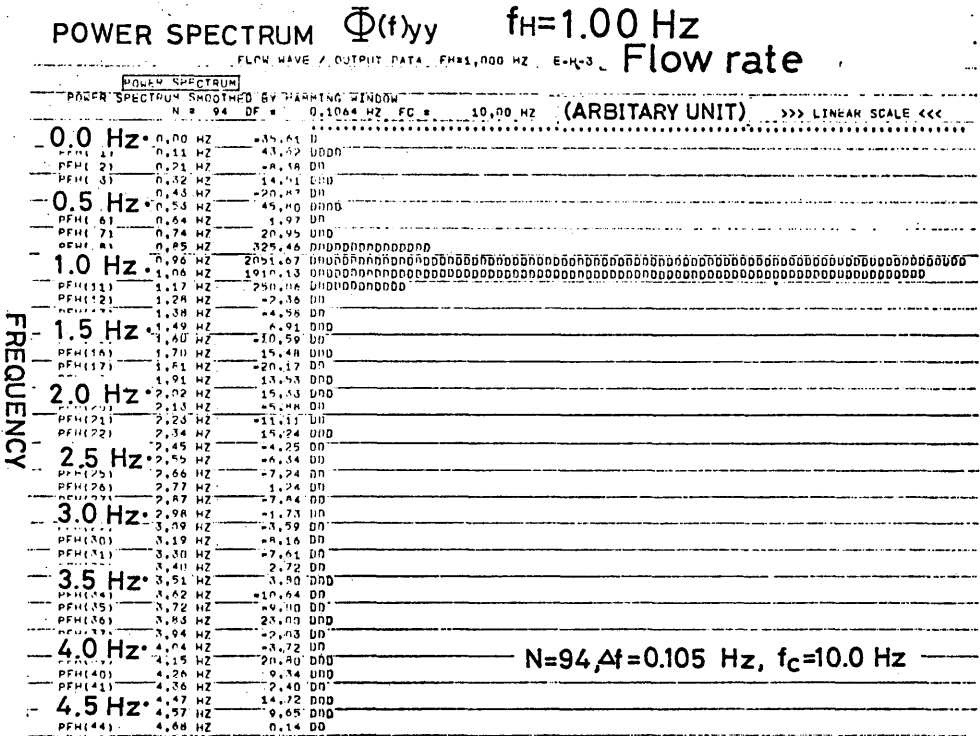
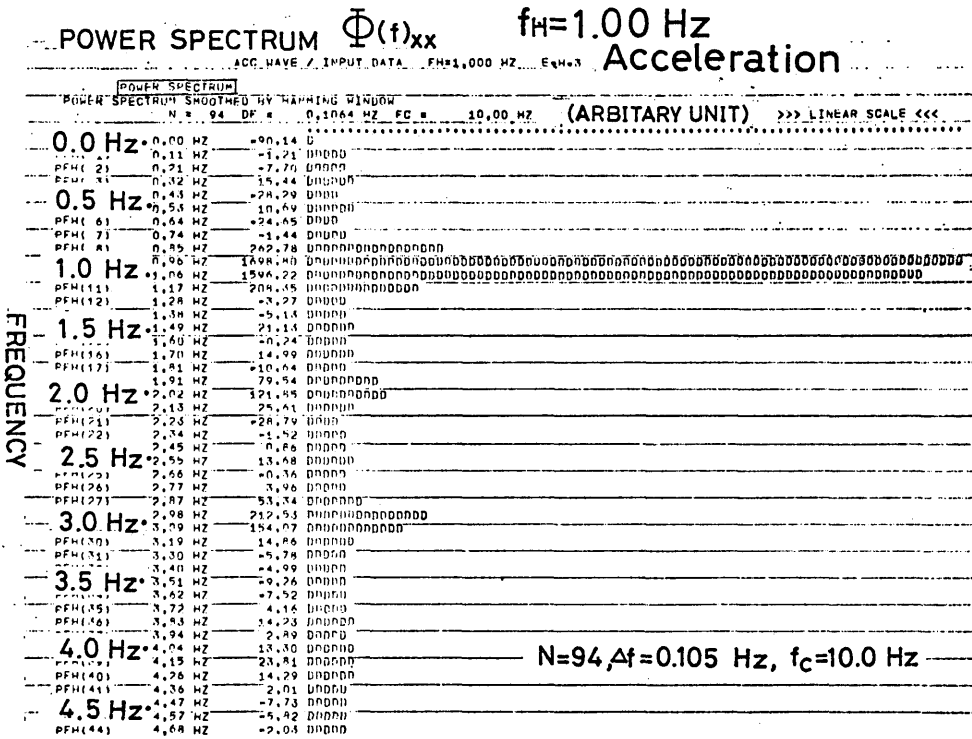


図-3-15(f) 加速度(入力)信号と流量(出力)信号のパワースペクトル (6)

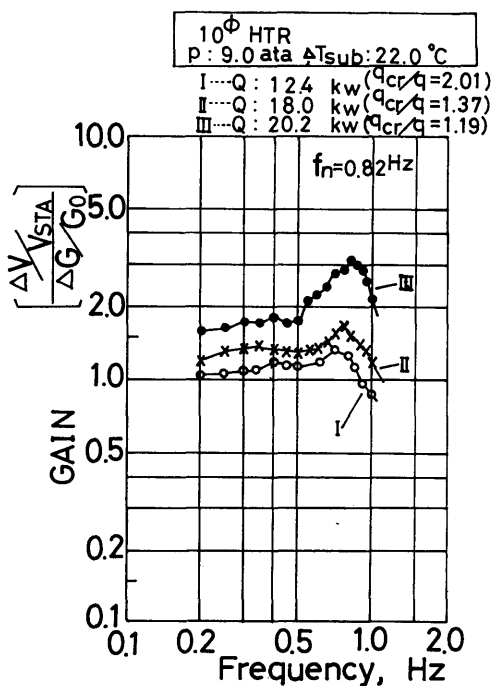


図-3-16(a) 上下動揺時、流量周波数応答ゲイン特性 (その1)

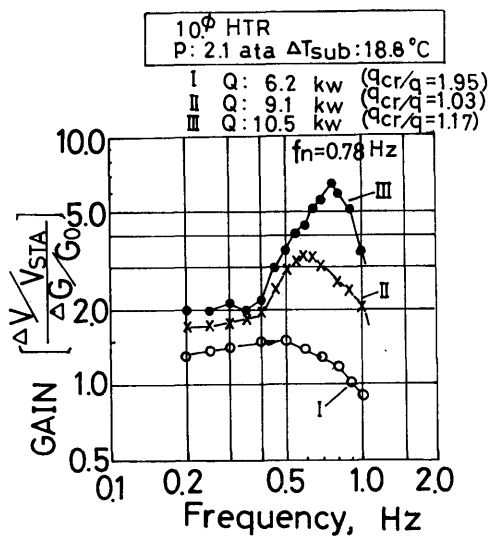


図-3-16(b) 上下動揺時、流量周波数応答ゲイン特性 (その2)

$|G(f)|$ と同じ方法(相関関数—フーリエ変換)で  $\gamma^2(f)$ の値を求め図-3-17にゲイン特性と併記する。 $f=0.2\sim 1.0\text{Hz}$ の範囲で  $\gamma^2(f)$ はほぼ0.8~0.6の値

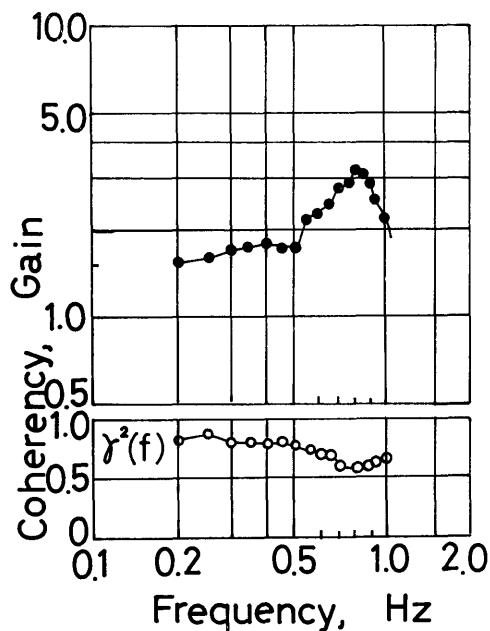


図-3-17 コヒーレンス関数計算例 (図3-16(a), IIIの運転条件)

を示している。 $f=0.8\text{Hz}$ 付近は加速度入力依存性が小さくなっているが、これは自励振動(非線形性)現象に起因するものと考えられる。この傾向は他の実験条件についてもほぼ同じであった。いずれも  $\gamma^2(f)$ の値が0.6以上あり周波数応答関数の推定値としては信頼できると考えた<sup>12)</sup>。

### 3.2.2 ボイド率応答の測定

上下動揺時のボイド率変動の測定方法は静止時と原理的に全く同じである。小線源を用いた  $\gamma$ 線透過法による測定は放射線の統計的な変動により動的(非定常)流れの場合に適さない。ボイド率測定の精度を高めるためには時間当りの計数値を増やす必要がある。線源強度を大きくする事も一つの方法であるが取扱いの安全性、コリメータ重量等の面で制約がある。そこで定常時(静止時)の測定法に若干の工夫を加え、いわゆる平均応答法<sup>13)</sup>により S/N 比の改善をはかり上下動揺時のボイド率測定を行った。

規則的な周期を持った上下動揺加速度に対し、流れの応答も同じ周期を持っている筈である。上下動1周期を1サイクルとし、この1サイクルにおけるボイド率変化を測るため、同一の上下動を多数回繰返し与え、その応答である平均的な1サイクルのボイド率変動を求める。図-3-18に示す如く、上下動装置を駆動

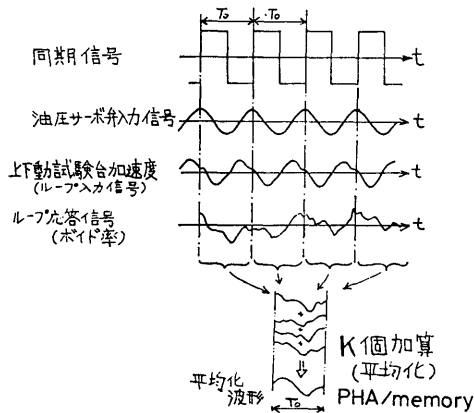


図-3-18 平均応答法処理 (ボイド率測定)

する正弦波入力信号源である低周波発振器付属の同期信号端子から出るパルス信号をパルス波高分析器(PHA)の計数率分析(MCS)の分析起点信号として用いると、上下動1サイクル毎にボイド率に相当する計数率分析が繰返され、PHAのメモリー上に、ボイド率変動の1周期毎に位相をそろえてデジタル量で積算される。上下動周波数変動に同期しない不規則成分は打ち消され同期した部分の応答波形(ボイド率変動波形)のみ取り出すことが出来る。分析を行う際のゲートペリオド(サンプリング周期)は可変であるが、本実験では全て  $t_a=0.2\text{sec}$  とした。

実験方法と装置の性能を調べるため予備実験として

静止時、ループの熱入力一定の定常状態に保ち、上記の方法でボイド率測定を行った。すなわち計数率分析を同期パルス周期5秒毎に繰返し、積算させた。加算平均して得たボイド率(計数率  $C_a$ )の標準偏差( $\sigma_n$ )

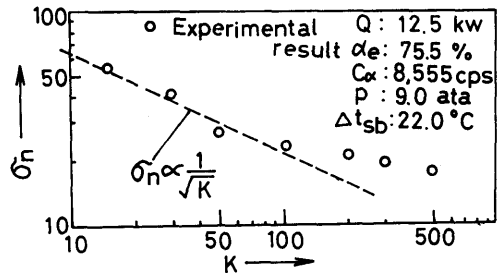


図-3-19 加算回数(K)と計数率の標準偏差( $\sigma_n$ )

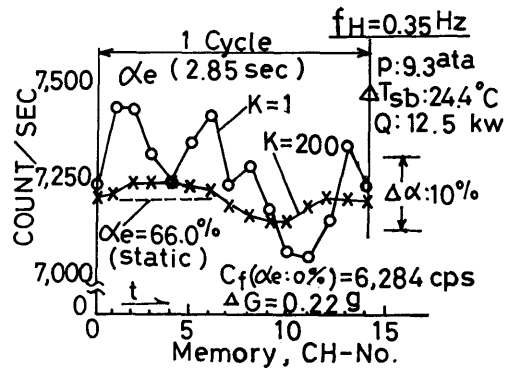


図-3-20 平均応答処理例(K=1, K=200の場合)

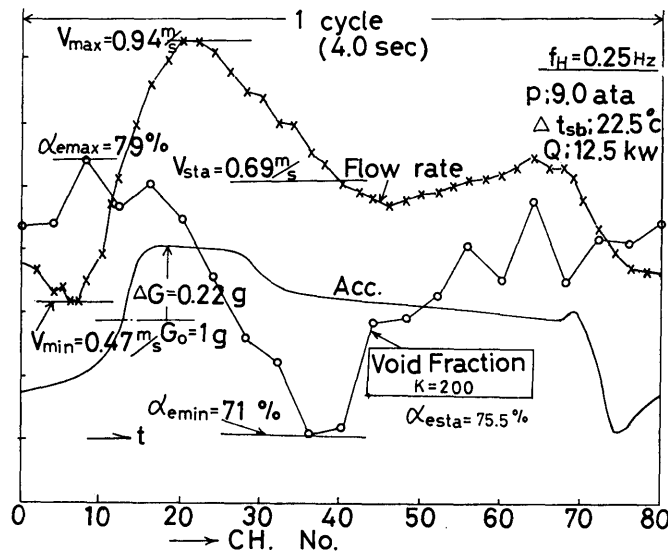


図-3-21(a) ボイド率応答測定例 (その1),  $f_H=0.25\text{ Hz}$

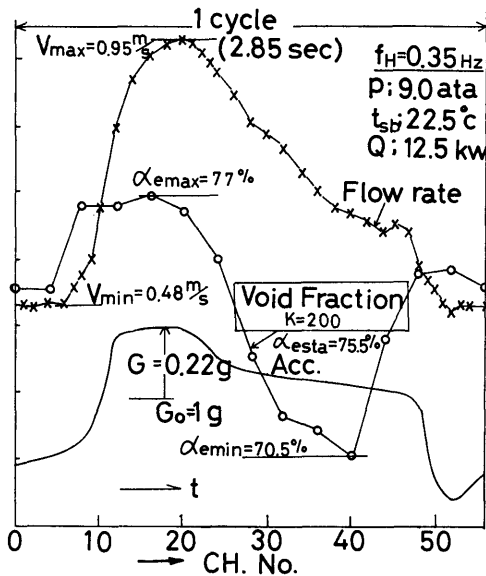


図-3-21(b) ボイド率応答測定例 (その2)  
 $f_H = 0.35 \text{ Hz}$

と加算回数( $K$ )との関係を求めると図-3-19のようになる。 $K$ が大きくなるに従ってS/N比が改善されるが $K=100$ 以上になるとほとんど向上しなくなる。熱的平衡の保持の難しさ、計器系のドリフト等の誤差によるものと思われる。上下動実験装置の連続運転が最大約20分間しか出来ないので、 $K$ の値を余り大きくとれない。従って本実験では $K=200$ とした。

上下動揺時のボイド率測定は流量応答の測定と同様に実施した。前述したように、加熱管出口(1点)における流路断面平均ボイド率の変動のみ測定した。

図-3-20は測定例として $K=1$ と $K=200$ の場合の比較を示す。 $K=1$ の場合、測定値のばらつきが大きくほとんどノイズと区別できない。 $K$ の増大と共にピーク値がなまり同時に雑音成分が除かれ、 $K=200$ 以上では波形に余り変化が無い。図-3-21(a),(b)は $K=200$ の場合の測定例で加速度波形、流量波形との対応を示す。

### 3.2.3 上下動揺時のバーンアウト熱負荷測定

静止時に得たバーンアウト・データをもとに、加熱管の熱負荷を $q_2$ 点(3.1.3参照)より低い一定値に保ち、所定の上下動を加えた。バーンアウト・トリップ(バーンアウト信号による主電源遮断)が起らなければトリップを生じる熱負荷まで同じ手順を繰返して上げ、上下動揺時のバーンアウト熱負荷( $q_{BO}H$ )を求

めた。

(3.1.3)で述べたように加熱管入口流路絞り条件によりType A, Type Bに分けて実験を行った。

まずType Aの実験について述べる。図-3-22は自励振動している系に上下動を加えた場合の記録を示す。バーンアウト・トリップ点よりやや低い熱的条件であるが $f_H=0.2\text{Hz}$ の場合、加速度( $G$ )の値が低下し加熱管出口ボイド率が最大となる位相付近で鋭いスパイク状のバーンアウト信号( $e_x$ )が出ている。 $f_H=0.8\text{Hz}$ の場合、バーンアウト信号は加速度波形の位相に余り関係なく、自励振動する流れの脈動に強く関連している。

上下動の周波数を変えてバーンアウト熱負荷を測定した結果を図-3-23に示す。加速度片振幅 $\Delta G$ は、波形上問題があるが便宜的に、加速度波形のピーク値

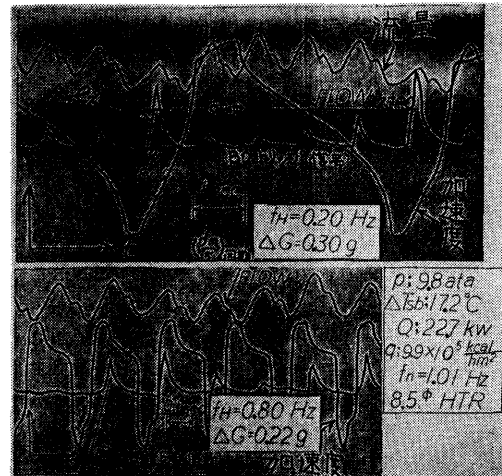


図-3-22 自励振動系 (Type A) のバーンアウト信号

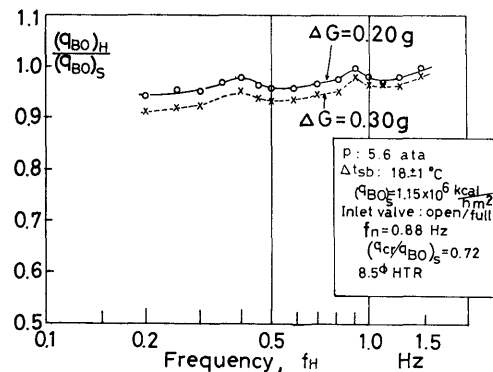


図-3-23 上下動揺時の $q_{BO}$ 値 (Type A)

$G_{max}$  と重力の加速度  $G_0$  の差, すなわち  $\Delta G = G_{max} - G_0$  の値を用いている。この図で固有振動数  $f_n (= 0.88\text{Hz})$  および  $\frac{f_n}{2}$  付近に  $(q_{BO})_H / (q_{BO})_S$  比の極大値が見られ, 他の周波数はほぼ一定である。なお図中  $(q_{BO})_H$  は上下動時,  $(q_{BO})_S$  は静止時, のそれぞれバーンアウト熱負荷を表わす。

図-3-23 に表われたバーンアウト熱負荷の値の傾向を分析するためには, 自励振動系に周期的な加振外力を加えた場合の応答として, 流れの脈動現象を観測する必要がありと考え, 次の実験を行った。

バーンアウト点よりやや低い熱負荷レベルで, ルー

プの自励振動系における自励振動数  $f_n$  と加振周波数  $f_H$  との関連を測定した。結果を図-3-24 に示す。 $f_H$  と  $f_n$  の値の大小関係により, 流れの応答はいくつかのタイプに分れる。(  $f_n = 0.98\text{Hz}$  の場合で説明する。)

(A)  $f_H$  が  $f_n$  よりかなり小さい場合 ( $f_H : 0.3\text{Hz}$  以下)

加振力の周期とほぼ同じ周期で自励振動振幅 (流動脈動振幅) が増減する。

(B)  $f_H$  が  $f_n$  に近い場合 ( $f_H : 0.7 \sim 0.9\text{Hz}$ )

加振力周期の整数倍の周期で自励振動振幅が増減し「うなり」に似た現象を示す。

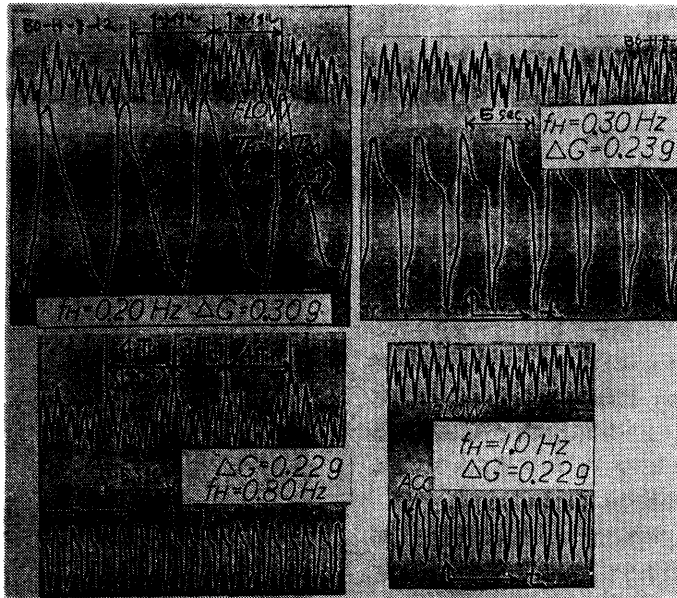


図-3-24 流量応答におけるループ自励振動数 ( $f_n$ ) と上下動周波数 ( $f_H$ ) の関連  $f_n = 0.98\text{Hz}$  の場合

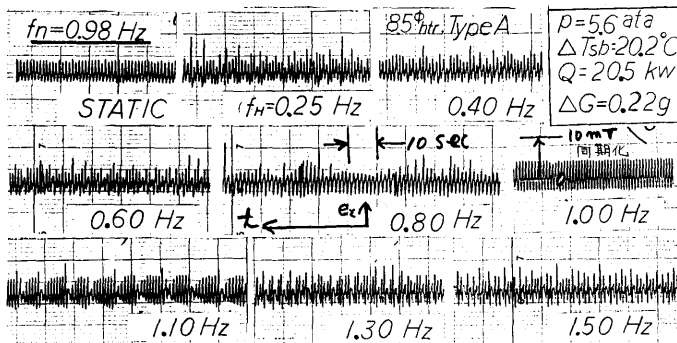


図-3-25  $e_x$  信号(バーンアウト信号)による  $f_n$  と  $f_H$  の値の関連観測 (その1)



(C)  $f_H$  が  $f_n$  に非常に近い場合

自励振動数  $f_n$  の振動が消滅し、加振外力の周波数にピタリ一致した振動数で流動が脈動し、いわゆる「同期化現象」を示す。振幅一定の安定化した持続振動である。同期化現象は  $f_H = f_n$  の条件のみならず、 $f_H = f_n/2, f_n/3$  の所でも起こる。

(D) 以上に属さない中間の  $f_H$  の場合、はっきりした規則性は無いがゆっくりとした周期で脈動振幅が増減する。

(A), (B), (D) の場合、ループの流れの脈動はループ固有の自励振動数をそのまま保存している。

図-3-25 はバーンアウト信号の記録波形であり、加熱管壁の温度の状況を明らかにしている。この図から見て同期化によって脈動振幅が、安定しており他の周

波数領域の場合とくらべバーンアウト信号( $e_x$ )のピークが小さいことがわかる。図-3-26 は同期化する周波数範囲の近傍の挙動を示す。同期がはずれると「うなり」に似た現象を示すが、線形の振動系と異り周期が必ずしも規則的でない。

次に Type B の場合の測定結果を図-3-27 に示す。Type A の場合とは対照的に傾向が変わり、ループ固有振動数  $f_n$  および  $f_n/2$  付近で  $(q_{BO})_H$  の低下が見られる。各周波数における流れの脈動のピーク値を測定した結果を図-3-28 に示す。周波数  $f_H$  が  $f_n$  の近傍で流れの共振が誘起されており、更に  $f_n/2$  のまわりでも流れの脈動が大きくなっている。図-3-29 は加振周波数と  $(q_{BO})_H / (q_{BO})_S$  の関係を示したものである。

図-3-27 の  $e_x$  信号の挙動が示すように、流れがサ

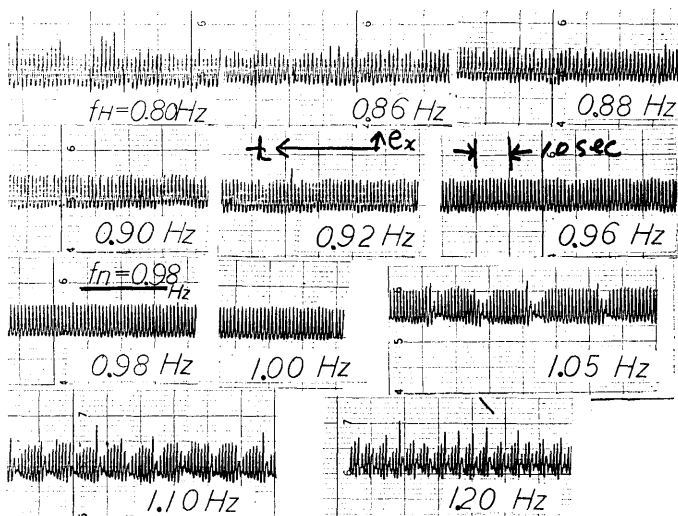


図-3-26  $e_x$  信号(バーンアウト信号)による  $f_n$  と  $f_H$  の値の関連観測 (その2)

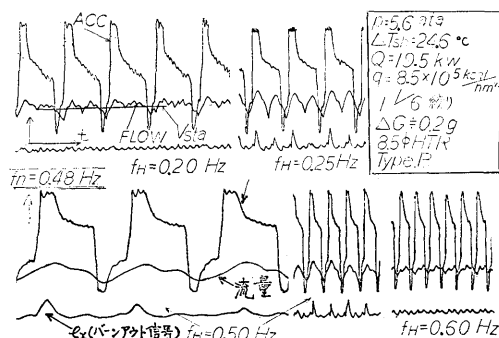


図-3-27 絞り安定化の場合 (Type B) のバーンアウト信号

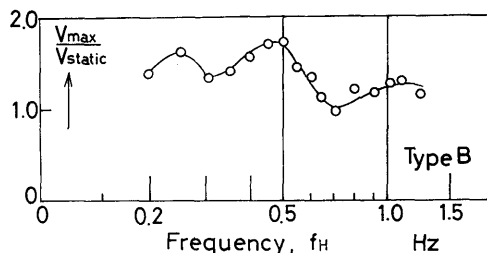


図-3-28 上下動一循環流量応答 (流量ピーク値) (図-3-29 と同一の実験条件)

ージする毎に加熱管出口付近で管壁が蒸気膜におおわれて温度ピークをもたらしバーンアウトスパイク信号として現われるものと思われる。スパイク信号の発生する位相は出口ボイド率が最大となる所である。

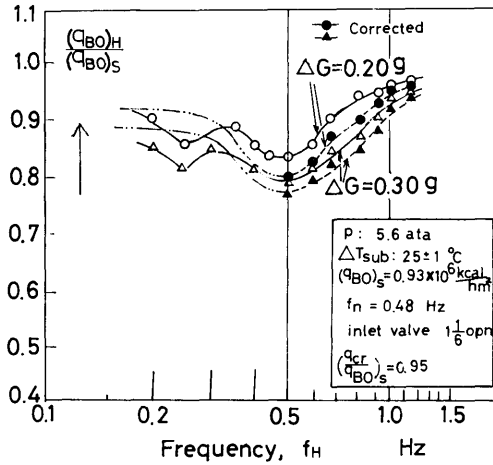


図-3-29 上下動揺時の  $q_{BO}$  値 (Type B)

#### 4. 実験結果の考察

##### 4.1 上下動揺時の流動の応答性について

図-3-14 に示したように上下動揺を受けたループ循環水の流れは、加速度波形およびその周波数に応じて複雑な応答波形を示す。図-3-14(a)の応答波には加速度波形の基本周期の1/4の波形が表われており、加速度波形の第4高調波(0.8Hz)の影響が大きく出ていることがわかる。上下動の周波数( $f_H$ )が増えるにつれ応答波形は単調な形に変わり、 $f_H$ が0.6Hz以上になるとほぼ正弦波状の応答波となる。その傾向は図-3-15のパワースペクトル計算結果を見ると明確である。このパワースペクトル分析結果からみて、加速度波形の高調波成分はループ固有振動数( $f_n \approx 0.8\text{Hz}$ )より高い領域で流れの脈動にほとんど影響していない。相関関数—フーリエ変換を経て求めた加速度波形と流動応答波形のパワースペクトルの比から周波数応答のゲイン特性を求める方法を探り、図-3-16に示すように限られた周波数範囲であるが、目標とする応答特性を得ることが出来た。

求めた周波数応答特性はパラメータとして静特性実験で求めたループの安定度( $q_{cr}/q$ 比)を選び整理したものである。ここで  $q$ ; 運転時のループ熱負荷(設定値),  $q_{cr}$ ; 同一の運転圧力, サブクール温度条件で水力学的振動を開始する不安定限界熱負荷, であり両

者の比を便宜的に安定度と呼ぶことにする。周波数特性曲線が示すように、共振ピークはループの固有振動数  $f_n$  の近傍に現われており、そのピーク値は安定度に強く依存している。同じ安定度を持っていても高圧運転時の方がダンピングが効いている。これらの図の例で示すように、熱負荷はいずれも水力不安定限界以下の値であるが、熱負荷の値が限界に近いほどピークが鋭くなっている。これは加熱管内流路の気泡量の増加と共にループ二相流部分の流動の負性抵抗の値が増大しループの水力振動系の制振力が小さくなるためと考えられる。

いくつかの加速度変動周波数における加速度のピーク値の関数として、応答する流量のピーク値をフーリエ解析の結果からプロットすると図-4-1のようになる。実験した加速度変動振幅範囲は比較的狭いが、その範囲内で、加速度変動振幅と流量応答振幅の間の直線性はほぼ保たれていることがわかる。

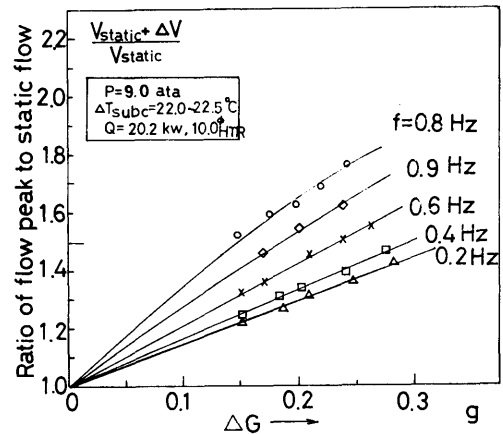


図-4-1 加速度振幅と流量ピーク値 (正弦波状加速度変動)

##### 4.2 上下動揺時のボイド率応答について

前節で加速度変動に対する応答として加熱管入口流量の変動について観測結果を論じた。二相流の熱水力特性を正確に理解するためには、さらに加熱管入口流量の他、加熱管内部、出口、および上昇管など二相流部分の流れの量的特性の知識が必要である。すなわち気相、液相の流速、スリップ比、蒸気乾き度、ボイド率などの挙動を知ることである。このうち実際に得やすい量はボイド率であるが精度よく測るのは極めて困難である。本実験において  $\gamma$ 線透過法を用い、加熱管出口におけるボイド率の測定を試みたが、測定値とし

てのバラツキも多く、誤差を多く含むものであった。しかし加熱管出口側の状況を知る一応の手掛りとして利用できた。

ボイド率変動の測定に際し、1測定点当りの計数値を増やし測定精度を高める必要から、サンプリング周期(1回のゲート時間)を0.2secとした。そのため高い周波数域( $f_H=0.5\text{Hz}$ 以上)の場合、1周期当りのサンプリング点が多くとれず( $f_H=0.5\text{Hz}$ の場合、1周期に10点しかサンプルとれない)ボイド率変

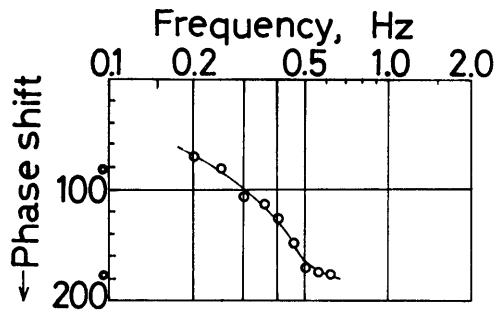


図-4-2 加熱管入口流量と出口ボイド率の位相差

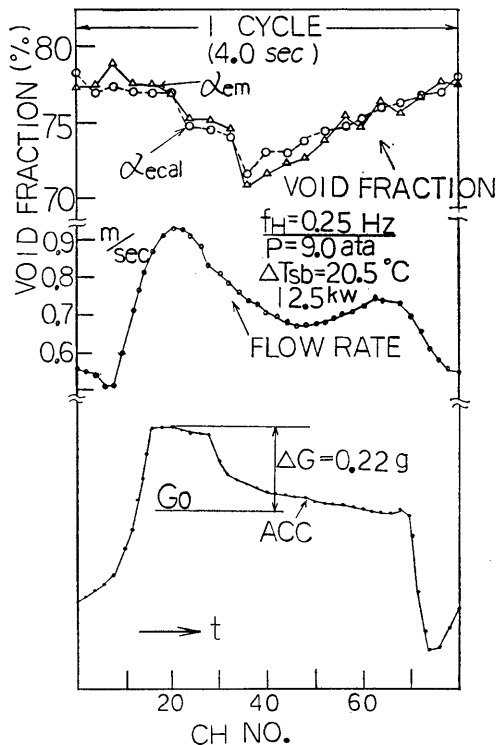


図-4-3 ボイド率の計算値と測定値の比較 (スリップ相関式の検討)

動の波形情報として不十分であった。本実験の場合、周波数範囲を0.2~0.7Hzに限った。

観測結果によると加熱管入口流量変動と出口ボイド率変動の位相差は、上下動周波数によって大きくづれるループの固有振動数付近になるとほぼ逆位相( $180^\circ$ )となっている。図-4-2はその1例を示している。

上下動揺時の二相流計算においてスリップ比の正確な見積りは難しく、多くの動的変化時の計算モデルでは定常状態のスリップ相関式が用いられている。実験的に動的なスリップ比を求めることは困難であるが、上下動時の出口ボイド率測定値から間接的にスリップ比の挙動を推測してみた。

上下動揺時の加熱管入口流量の測定値と加熱管熱入力値から出口クオリティの値を熱的平衡の仮定の下に求め、定常状態の $\alpha_{ecal}$ のデータ(図-3-7)から推定される $\alpha_{ecal}$ を求める。これを実際のボイド率測定値 $\alpha_{em}$ と比較した。図-4-3に示すよう両者の変動振幅はほぼ同じで、スリップ比の計算式として定常状態の相関式(Bankoffの式など)を用いた事による差異は余り見られない。

#### 4.3 上下動揺時のバーンアウト熱負荷特性

静特性の実験の項で記したように、自然循環時のバーンアウト熱負荷は水力学的振動発生限界熱負荷とくらべ1.5~2倍以上の差がある。加熱管入口絞りなし(弁全開)の安定した流れの条件で、上下動(振幅0.3g以下)を加えても実際上バーンアウト・トリップは起こり得ない。したがって、実験の実施に当ってはType A、またはType Bのような極端な実験条件での測定しかできなかった。

Type Aの実験条件で得られる流量応答は非線形振動系の強制振動の典型であり、非常に複雑な振舞いをするので、その理論的な分析は困難である。得られた結果について定性的な考察を述べる。

Type Aの実験結果(図-3-23)に示すよう同期化周波数近傍を除く低周波域で、動揺時のバーンアウト熱負荷( $q_{BO})_{II}$ はほぼ加速度振幅に依存しており、上下動揺周波数との関連性は少ない。同期化周波数域以外は負の加振外力( $-dG$ 側、重力と反対方向)と流量変動の谷の位相が合ったところで流れの振動1サイクル平均流量(正味流量)が最小になり、バーンアウト・トリップが生じるようになる。図-3-25に示すようループ固有の自励振動の振幅(STATICの場合)が同期化により加振力(加速度振幅)の大きさに依存して増大するが、流れの脈動振幅自体は安定化し、バーン

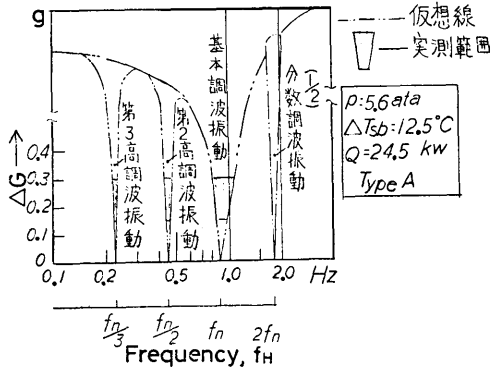


図-4-4 同期化（周波数引込）領域

アウト信号ピーク値は他の周波数の場合とくらべ低い値である。（図中  $f_H=1.00\text{Hz}$  の場合）このように同期化が  $(q_{B0})_H$  値の低下を抑制する効果があるものと考えられる。同期化は図-3-26 に示したようにごく限られた周波数帯域で起こっているが、その帯域の幅は強制外力（加振力）の振幅にかかわっている。図-4-4 は実験結果から同期化（周波数引込）現象領域を推定した仮想図である<sup>14)</sup>。強制外力の振幅および自励振動振幅の大きさの競合によって同期化範囲が決まるものと考えられる。

Type B の実験結果（図-3-29）に示すよう、ループ固有振動数  $f_n$  の近傍で  $(q_{B0})_H$  が低下する理由は、流動脈動の共振の誘発によるものといえるが、 $f_n/2$  の周波数域で低下する理由は実験装置の加速度波形（スペクトル）上にあると考えられる。すなわち図-3-27 の  $f_H=0.25\text{Hz}$  の場合、加速度変動波形の第2高調波（周波数  $0.5\text{Hz}$ ）がループ流動の固有振動数（ $f_n=0.48\text{Hz}$ ）に近く、流動変動振幅の増大に大きく寄与し、バーンアウト信号（スパイク信号）を発生させている。基本波（ $f_H$ ）以外第2高調波（ $2f_H$ ）の効果が大きいにあたかも基本波だけでデータを整理したため図-3-29 のような傾向が表われた。加速度波形に含まれる各高調波のバーンアウト熱負荷におよぼす影響を定量的に評価することが難しいので第1次近似的に  $\Delta G=G_{\max}-G_0$  の振幅で周波数  $f_H$  の単調波と仮定して整理したためである。前に述べたスペクトル分析の結果からみて加振周波数  $f_H$  が固有振動数  $f_n$  以下の場合、第2、第3高調波が流れの脈動におよぼす効果が大きいので、 $(q_{B0})_H$  の測定値に過少評価があり、逆に  $f_H$  が  $f_n$  以上の場合、高調波の寄与が殆んどないので過大評価していることになる。これらを考慮し

(376)

て図-3-29 のデータ補正を行ったものを図中に●▲印で示す。補正は  $f_H$  が  $f_n$  以上の場合についてのみ行い、加速度波形を構成する各高調波の内、基本波成分のみが流動脈動、バーンアウトに起因したとして  $(q_{B0})_H$  値を手直した。

## 5. まとめ

上下動揺実験装置により、限られた加速度条件（周波数範囲、加速度振幅、加速度波形）であるが、重力加速度変動場での二相流ループの熱水力特性を観測することができた。以下に主なものをまとめる。

(1) 本実験に用いた上下動装置のように正弦波入力を与え難い場合、ループに加わる入力（加速度）波形とそれに対する応答（流量）をそれぞれフーリエ変換してパワースペクトルを求め、その比より周波数特性を求める方法を検討した。この方法により目標とする二相流ループの周波数応答（ゲイン）特性を求めることができた。

(2) 加振外力の振幅と応答する流動の変動量の大きさ（振幅）の間にはほぼ直線関係が成立している。

(3) 二相流ループの固有振動数付近で起こる加振外力との共振現象により、ループの水力安定余裕が少ないと流れの脈動が著しく増大し、共振周波数近傍でのバーンアウト熱負荷の低下の原因となる。

(4) Type B の場合のバーンアウト熱負荷測定によると、ヒービングによるバーンアウト熱負荷の低下は、共振周波数付近で最も低くなり、それより低い上下動周波数になるにつれ低下の度合いがやや減少し、周波数依存性が少なくなり主に加速度変動振幅に依存するようになる。固有振動数より高い周波数では、バーンアウト熱負荷の低下の度合いは急激に減少し  $(q_{B0})_H$  の値が  $(q_{B0})_S$  値に近づく、加速度変動の影響は小さくなる。

(5) Type A の場合、自励振動（水力不安定振動）数付近のせまい上下動周波数範囲で、同期化によりバーンアウト熱負荷の低下の度合いが局部的に小さくなる特異な現象を示す。自励振動数より低い周波数範囲では、バーンアウト熱負荷の周波数依存性は減り、主に加速度変動振幅に依存するようになる。

(6) 自然循環時、上下動によってバーンアウトの発生が促進される。それは上下動によって誘起される流動脈動に伴う流速の低下、蒸気クオリティの増大によるドライアウトが原因である。

(7) 低線源を用いたγ線透過法による出口ボイド率

の測定は、平均応答法の採用により測定周波数範囲や精度の上で問題があるが、規則的な周期外力に対する二相流の挙動を観測する方法として十分利用できる。

次に主な問題点を記す。

(1) 上下動揺実験装置が試験装置として当初予定したものに比べ十分機能せず、片寄った実験範囲しか実験できなかった。すなわち、構造的な理由によるが低サイクル、大振幅の上下動 (0.2Hz 以下, 0.3g 以上) を得ることができず、実際の船体運動に近い加速度条件を再現することができなかった。さらに、加速度波形は高調波を多く含んでおり、周波数応答特性 (特にバーンアウト熱負荷の周波数依存性) の推定の上で大きな制約となった。

(2) 本報告では各測定項目について測定手法と、測定結果の典型例の考察に限っており、ループパラメータの効果について余り触れていない。現象を一般的に説明するバックデータとしては不十分であるので、広い範囲の実験データ収集と解析により不備を補強して行く予定である。

なお、本研究における計算は当研究所共用電子計算機 TOSBAC 5600/120 で行った。

#### 参 考 文 献

- 1) 一色尚次他, “船用水冷却原子炉の熱限界と流力特性に及ぼすヒービング、傾斜等の影響とその対策”, 船研報告, 第2巻, 第1号, 昭和40年
- 2) 一色尚次他, “船用水冷却原子炉の熱流力特性に及ぼす動揺の影響と対策”, 日本機械学会誌, 第68巻, 第553号, 昭和40年2月, pp. 178~188
- 3) 一色尚次, 山口勝治, “大気圧以上の水冷却ループに対するヒービングの影響実験”, 日本原子力学会年会予稿, C-16, 昭和41年
- 4) 一色尚次, 山口勝治, “並列加熱流路における上下動の影響”, 船研発表会 (秋季) 講演概要, 32, 昭和42年12月
- 5) Kjelland-Fosterud, E., Bencze, I., Kierulf, B., & Kolberg, O. R., “Two-Phase Flow Investigation for a Marine Boiling Water Reactor”, 3rd Genv. Conf. 28/P/801 (1964)
- 6) Christensen, H., Solberg, K. O., & Waagbø, A. O., “On the Dynamic Behaviour of Boiling-Water Ship Reactor”, 3rd Genv. Conf. 28/P/748 (1964)
- 7) Woodward, J. B., “Natural Circulation Experiments in an Oscillating Force Field”, Ph. D. Thesis, Univ. of Michigan, (1965)
- 8) Becker, K.M., et al., “Hydrodynamic Instability and Dynamic Burnout in Natural Circulation Two-Phase Flow”, AE-156, (Sept. 1964)
- 9) Boure, J. A., et al., “Review of Two-Phase Flow Instability”, ASME Paper 71-HT-42 (1971), 1
- 10) Dijkman, F. J. M., “An Analysis of the Steady State and Stability Characteristic of Natural Circulation Boiling Channel”, 3rd Int’nl H. T. Conf. Vol. 5 (1966)
- 11) Bankoff, S. G., “A Variable Density Single Fluid Model for Two-Phase Flow”, Trans. ASME, ser. C, 82-4 (1960-11), 265
- 12) 山川新二, “RANDAP-I プログラムによる解析例”, 日本機械学会, 第428回講習会教材, 昭和51年1月, pp. 47~61
- 13) 藤井克彦他, “平均応答計算装置の試作”, 制御工学, 第11巻, 第6号(1967), pp. 299~307
- 14) 林千博他, “電気回路における非線形振動”, 数理科学, 第5巻, 第11号(1967), pp. 49~56

付録 A フーリエ解析による上下動加速度波形分析手順

上下動揺実験装置によって得られる加速度波形信号は周期  $T_H$  (上下運動 1 行程の周期) の周期関数である。長さ  $T_H$  の連続した記録波形  $X(t)$  を等間隔にサンプリングした時の値を用い、フーリエ係数を決定することにする。

サンプリング点は  $T_H$  を  $2N$  等分するようにとり、関数  $X(t)$  の有限フーリエ級数展開が

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N-1} (a_k \cos \frac{\pi}{N} kt + b_k \sin \frac{\pi}{N} kt) + \frac{a_N}{2} \cos \pi t \quad \dots\dots(A-1)$$

で表わされると仮定する。この級数の和が  $2N$  個のデータ点で関数の値に一致するように  $a_k, b_k$  を決めると途中の式の誘導は省略して次のようになる<sup>A-1)</sup>。

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{2N-1} X(t) \cos \frac{\pi}{N} kt \quad k=0, 1, 2, \dots, N \quad \dots\dots(A-2)$$

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{2N-1} X(t) \sin \frac{\pi}{N} kt \quad k=0, 1, 2, \dots, N \quad \dots\dots(A-3)$$

この  $a_k, b_k$  の計算は電算機で処理するが、本実験の場合データ点が少ないのでこの計算式を直接プログラム化する方法をとった。

$a_k, b_k$  の組の計算が終わると高調波によって表わされる部分の基本波に対する百分率を計算し、各調波における割合を示すようにした。すなわち、本文の式(2・1-1)のフーリエ係数  $C_k$  は次式によって求め、

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \dots\dots(A-4)$$

基本波に対する百分率、 $C_k/C_1 \times 100$  を求める。

実際上の手順について述べる。使用した加速度計(ひずみゲージ式)の周波数特性は 13Hz (メーカー仕様) であるが、この加速度計からのアナログ信号を A-D 変換する前処理としてローパスフィルタにより極端に高い高調波成分を除去(遮断周波数: 5 Hz)する。A-D 変換は分析波形の周期にもよるが、ほぼ 0.05sec のサンプリングタイムによって行った。得られたデジタルデータは電算機用のデータカードにパンチし電算機処理する。

付録 B 「相関関数—フーリエ変換法」の手順

静止時、および上下動揺時に観測される沸騰二相流ループの流量信号は多くの雑音成分(二相流のゆらぎ)

を含んでいる。この原信号から規則性のある信号を抽出するため相関技術を利用した。以下、具体的な方法について述べる。

流量信号  $y(t)$  や加速度信号  $x(t)$  のそれぞれの自己相関関数は、図-3-13 に示すブロック線図の流れに沿って求められる。各信号は相関計に入る前処理としてローパスフィルタにより不要の高調波成分を除去する。使用した相関計は市販のいわゆる実時間型のデジタル相関計である。表B-1 にその主な仕様を示す。

信号  $y(t)$  の自己相関関数  $\phi_{yy}$  は、時間差  $\tau$  の関数として、次のように定義される。

表-B-1 相関計の主たる仕様

型名	TEAC / C-120
サンプリングタイム(遅延時間分解能)	$\Delta T: 0.5 \mu\text{sec} \sim 50 \text{sec}$
同時計算表示数	95 点
垂直軸分解能	256 / フルスケール
平均化処理	加重平均, 単純平均(加重平均)

$$\phi_{yy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot y(t+\tau) dt$$

実際の相関計では有限のデータ長さで離散的データの場合として求められる。

求められた自己相関関数のうち遅延時間  $\tau=0$  の時の自己相関関数の値  $\phi_{yy}(0)$  は原信号の二乗平均値、すなわち分散を表わす。 $\sqrt{\phi_{yy}(0)}$  は信号のゆらぎの rms 値を表わしており、静止時のループ流量のゆらぎの rms 値を求めて水力不安定性の検出に用いた。

相関関数をデジタル相関計によって測定する場合に生じる誤差として、主に次の三つの誤差、(1)統計的誤差、(2)離散的データによる誤差、(3)量子化誤差、が考えられる。実際の測定では統計的誤差が他の誤差にくらべて圧倒的に大きい。本節で実験に用いた相関計の設定条件における統計的誤差を示す。

相関関数は本来無限に長いデータの平均をとって定義されるものであるが、実際の測定の場合は有限のデータから計算するため誤差が生じる。これらが統計的誤差である。誤差の見積りにさいし、一般的には測定される信号がガウス性不規則信号と想定し、見当がつけられる。信号の平均値は零にして、データ長さを適当にとり、誤差の標準偏差を  $\sigma_m$  とする。結果的に、統計的誤差はデータ長さ  $T$  の平方根に反比例して減少することが判る<sup>B-1)</sup>。使用した相関計のハードウェア

ア的な構造（平均化フィルターの帯域幅）から加算化方式の場合の  $\tau=0$  における相関値  $A$  に対する誤差の標準偏差  $\sigma_m$  の比は次の式で求められる<sup>B-2)</sup>。

$$\frac{\sigma_m(0, T)}{A} = \sqrt{\frac{2 \cdot 94 \Delta\tau}{T}} = \sqrt{\frac{188 \Delta\tau}{T}}$$

$\Delta\tau$ ; サンプリングタイム (sec)

$T$ ; データ長さ (sec)

図-B-1 に  $\Delta\tau$  をパラメータにガウス性不規則信号の自己相関関数の誤差の標準偏差 (%) とデータ長さ ( $T$ ) との関係を示す。上下動装置の機械的な制約から実験に用いた 1 計測あたりの測定時間 ( $T$ ) は 500 sec ( $\Delta\tau=125$  msec の場合) 又は 1000 sec ( $\Delta\tau=50$  msec の場合) であり、求めた相関関数には 14~15% 程度の統計的誤差が含まれることになる。

相関関数を求めることにより信号の周期性を検出できるが、さらにその周期性を明確にするため相関関数のフーリエ変換により周波数領域の取扱いが行われる。本実験においても上下動加速度波形や流量応答波形の周波数領域の観測のため、各々求めた自己相関関数をフーリエ変換してパワースペクトルを求めた。

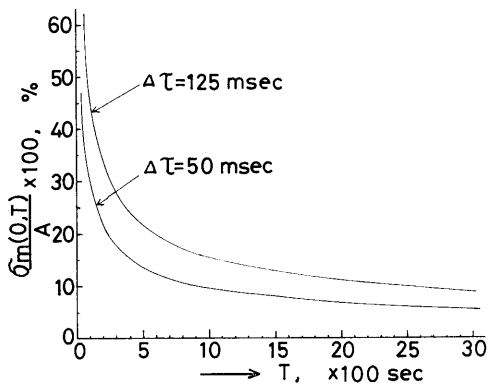


図-B-1 データ長さ ( $T$ ) と自己相関関数の統計的誤差

パワースペクトル  $\Phi_{yy}(f)$  は自己相関関数  $\phi_{yy}(\tau)$  のフーリエ変換として次のように定義される。

$$\Phi_{yy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{yy}(\tau) \cdot e^{-2\pi j f \tau} d\tau \quad \dots\dots(B-1)$$

$\phi_{yy}(\tau)$ ; 自己相関関数

$f$ ; 周波数

相関計によって得られた離散的なデータ（相関関数の値）を用いてフーリエ変換するには次の式を計算することになる。

$$\Phi_{yy}(f) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=-N}^N \phi_{yy}(i \cdot \Delta\tau) e^{-2\pi j f i \cdot \Delta\tau} \quad \dots\dots(B-2)$$

$\Delta\tau$ ; 相関関数を求めるさいのサンプリングタイム

$\Delta\tau$  の値より計算できる上限周波数  $f_c$  が次のように決まる。

$$f_c = \frac{1}{2 \Delta\tau}$$

相関関数のデータが  $N$  個、本実験の場合  $N=95$ 、であれば計算される周波数の増分(周波数の分解能)は

$$\Delta f = \frac{f_c}{N-1} = \frac{f_c}{94}$$

また、 $r$  番目の周波数は添字  $r$  を用いて

$$f_r = r \cdot \Delta f = r \cdot \frac{1}{94} \cdot \frac{1}{2 \Delta\tau} \quad (r=0, 1, 2, \dots, 94) \quad \dots\dots(B-3)$$

(B-3) 式 (B-2) を式に代入し、しかも自己相関関数は偶関数であることから (B-2) 式は次のようになる。

$$\Phi_{yy}(f_r) = \frac{\phi_{yy0}}{2} + \sum_{i=1}^{94} \phi_{yyi} \cdot \cos\left(r \cdot \frac{\pi}{94} \cdot i\right) \quad \dots\dots(B-4)$$

$\phi_{yyi}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, 94$ ); 遅延時間

$\tau=i \cdot \Delta\tau$  における自己相関関数の値

相関関数の計算は有限な長さの信号データについて有限な遅延時間  $\tau$  の範囲で行われているので、フーリエ変換の数値と理論計算値との間に生ずるずれを補正するためウィンドウ処理(平滑化)が必要である<sup>B-3)</sup>。本計算では Hamming-window を用いた。 $\Phi_{yy}(f_r)$  をこのウィンドウによって修正したものを  $\Phi_{yyH}(f_r)$  で表わすと、(B-4) 式に対して次式を計算することになる。

$$\Phi_{yyH}(f_r) = 0.23 \cdot \Phi_{yy}(f_{r-1}) + 0.54 \cdot \Phi_{yy}(f_r) + 0.23 \cdot \Phi_{yy}(f_{r+1}) \quad \dots\dots(B-5)$$

実際的な手順としては、相関計によって得られた 95 個の自己相関関数の値を電算機用データカードにパンチし、上式を用いて共用電子計算機によりフーリエ変換を行いパワースペクトルを求めた。

### 付録 C ポイド率の測定装置について

鋼管内のポイド率を測定する方法として、 $\gamma$  線透過法が二相流に触れず、外部から測定できるので広く用いられている。測定原理等、基本的な手法は文献<sup>C-1)</sup>から学んだものであり、その詳細は省略し装置・手法の概要のみ述べる。

加熱管出口部における管内二相流のボイド率を測定するため図-C-1に示すような幾何学的位置にボイド率の検出部を配置する。線源 ( $Cs-137$ , 90 mci) を収納するコリメータ (絞り照射口径: 3mmφ を備える) および  $\gamma$  線を検出するシンチレーション検出器 (NaI, 1"×1") はループ架台に組込んで設置してある。 $\gamma$  線の検出パルスは専用ケーブルによって床まで導き, 比例増幅器を経て波高分析器 (東芝 EDS-34208 A) で計数率分析される。

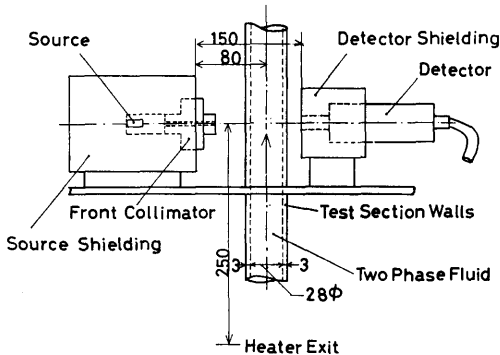


図-C-1 ボイド率計配置図

測定部に入射する  $\gamma$  線が単一エネルギーで十分絞られた Narrow Beam が仮定され, 二相流中の気泡分布が均一であればボイド率  $\alpha$  は次式で求められる。

$$\alpha = \frac{\log_e C_\alpha / C_f}{\log_e C_g / C_f}$$

- ここで  $C_f$ ; ボイド率 0% (管中液相のみ) の時の計数率
- $C_g$ ; ボイド率 100% (管中蒸気のみ) の時の計数率
- $C_\alpha$ ; ボイド率  $\alpha$  % の時の計数率

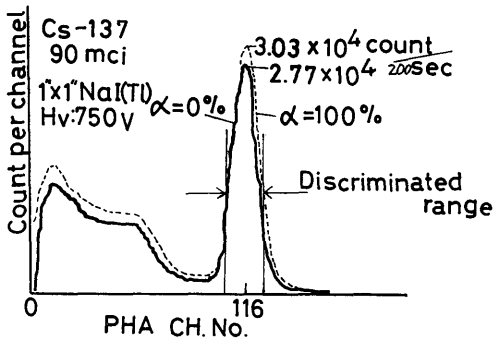


図-C-2  $\gamma$  線スペクトル ( $Cs-137$ , 200CH 波高分析器使用)

実際に使用する線源 ( $Cs-137$ ) の  $\gamma$  線スペクトルは図C-2に示すよう, 0.662 Mev に Photo Peak を持っている。測定にさいし図示する範囲のエネルギー幅 (チャンネル幅相当) に絞って測定した。管断面平均ボイド率とその時間的変動 (上下動揺時) を求めたいので, One-Shot 法を採用し円管の中心部を通る固定された  $\gamma$  線ビームの減衰を測定し, 流路断面の代表値を得る。管内流路断面のボイド率分布が均一でないことを考慮して, この局所値 (中心部測定値) と管断面平均値との関係を別に校正 (Scanning 法) して補正係数を求め, One-Shot 法による値を修正した<sup>C-2)</sup>。

ボイド率測定にさいし予想される主な誤差原因として, (1)放射線の統計的変動, (2)光電増倍管用高圧電源のドリフト, (3)シンチレーション検出器の温度変化による特性変化, (4)被測定部流体の密度変化 (ループの熱的平衡状態のドリフト) 等がある。いずれも正確な予測は難しい。この中で(1),(2)からの寄与が大きい。計数率測定の時間を長くとると(4)の影響も大きい。(2)と(3)は十分なウォームアップと予備チェックで影響を小さくできる。(1)の統計的変動による誤差は不可避で理論的に誤差範囲を推定できる。本節で実験条件における統計的誤差を示す。

放射線源から放出される光子の時間的分布はアトラランダムであり, 一定時間に検出される計数は測定毎に多少のばらつきがある。このばらつきは正規分布に近いので測定精度の評価は標準偏差で表わされる。1回の計数の標準偏差  $\sigma$  は計数値を  $N$  とすると

$$\sigma = \sqrt{N}$$

であたえられる。 $t$  時間の計数が  $N$  であった場合の計数率  $n = N/t$  の標準偏差  $\sigma_1$  は

$$\sigma_1 = \sqrt{N} / t = \sqrt{n/t}$$

であり, 相対的標準偏差  $\sigma_1/n$  は次のようになる。

$$\sigma_1/n = 1/\sqrt{nt} = 1/\sqrt{N}$$

従って測定精度をあげるには1測定当りの計数を増やす必要があり, 線源強度, 計数時間が多い方がよい。図C-3は計数値をパラメータに本実験に使用する条件で, 管中のボイド率  $\alpha$  に対する統計的誤差を求めたものである。計算の手法の詳細は文献<sup>C-1)</sup>による。この図から, 低ボイド率では原理的に本方法が適さないことがわかる。実際の測定に当っては上下動揺装置の機械的制約などから, 1測定点あたり約  $10^6$  カウントになるようにした。



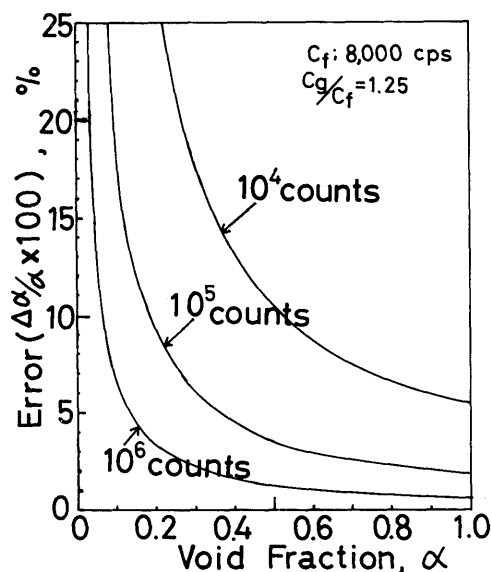


図-C-3 統計的変動によるボイド率測定誤差

付録 D パーンアウトの検出について

パーンアウトの検出はいわゆる“抵抗ブリッジ方式”を用いた「試作 パーンアウト 検出器（応用電気研究所）」によって行った。図-D-1 に検出器概念図を示

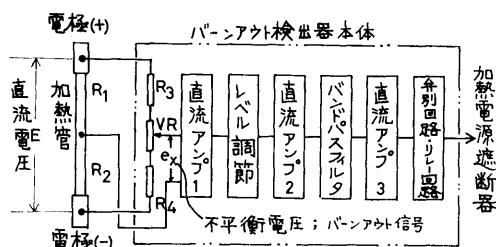


図-D-1 パーンアウト検出器概念図

す。加熱管電極および管中央部外壁の計3ヶ所に設けた電圧タップからの電圧をリード線により検出器本体に導く。通常運転時、加熱管および検出器本体に内蔵する電気抵抗によって形成されるブリッジ（直流ブリッジ）のバランスの調整（手動）をしておき、管壁温度急上昇によって生じる電気抵抗変化による不平衡電圧を検出器本体の直流増幅器、フィルター回路（バンドパスフィルター設定値：0.2~30Hz）を経てリレー回路に導き、リレー動作によってサイリスタ整流装置の主電源遮断器の開放を行う。パーンアウトを予告する管壁温度急上昇に伴う信号とは別に低い熱流束でも高サイクルのノイズ（電源ノイズ、沸騰ノイズ）や、

低サイクルのノイズ（ループ循環水の流れのゆらぎ、脈動）として不平衡電圧信号を生じる。本来のパーンアウト信号とこのノイズ信号を区別するため入力信号のレベル調節（不感帯特性2~10mv, 可変）およびバンドパスフィルターが設けてある。

図-3-9に示したように、実験時観測された結果によると、上記ノイズが比較的低レベル（小振幅）の正弦波状に近い信号に対し、パーンアウトを予告する信号は先のとがったスパイク状の振動信号から、さらにランプ状に発散する信号となる。

加熱管保護のためまえからランプ状信号が生じてから加熱管に赤熱点が発生する以前に電源遮断が望ましい。予備実験によると外径12mmφ、厚さ1mmの加熱管が面積約10mm×10mmの赤熱するには $q=1 \times 10^6$  kcal/m<sup>2</sup>hの場合、0.5~1.5秒程度の時間を要した。これに対して $e_w$ 信号が10mv（パーンアウトトリップ設定値）に至る立上り時間は40~100msec、さらにフィルター部の遅れ時間やリレー動作時間を含めて主電源遮断までの時間は70~130msec、合計110~270msecであった。

参考文献（付録関係）

- A-1) Richard W. Hamming, "Numerical Methods for Scientists and Engineers", McGraw-Hill, New York, 1962, pp. 67~71
- B-1) 寺尾満, "測定論", 岩波講座(基礎工学), 岩波書店, 1970, pp. 242~245
- B-2) TEAC 社資料, "相関関数とは何か(中級編)" 1974, pp. 205~225
- B-3) 石井泰, "パワースペクトル測定におけるウィンドウの働き", 計測と制御, 第5巻, 第9号, 昭和41年, pp. 667~674
- C-1) Hooker, H.H., Popper, G.F., "A Gamma-Ray Attenuation Method for Void Fraction Determinations in Experimental Boiling Heat Transfer Test Facilities", ANL-5766 (Nov., 1958)
- C-2) Smith, W., Atkinson, G.L., & Hammit, F. G., "Void Fraction Measurements in a Cavitating Venturi", Trans. ASME, J. of Basic Engineering, (June, 1964)