

第2章 実験

蒸気をサブクール水中で凝縮させる際に生ずる振動の典型的な様式であるチャギングと気泡凝縮振動を主な対象とした小型の実験装置をそれぞれ製作し、これらの現象の特性を明らかにする実験を行った。これらの装置は、振動時の蒸気-水界面の変動を肉眼ばかりでなく、16ミリフィルムや高速写真でも観察できるように透明なベント管と水槽を用い、実験はいずれも大気圧下で行った。

2.1 チャギング現象[51]

ベント管内を流れる蒸気流束が $30\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以下の低流束時に生ずる振動現象、中でもプール水のベント管内への逆流を伴うチャギング現象に焦点を当てた実験を行い、その特性を明らかにする。

2.1.1 実験装置と方法

図2-1(a)に実験装置の概略を示す。本装置はBWRのドライウェルに相当する蒸気ヘッダー、ウェットウェルに相当する水槽とこれらを結ぶベントチューブから成っている。振動現象の観察を容易にするため、ヘッダーと水槽の各2面は耐熱ガラス製とし、ベント管はポリカーボネイト製とした。ボイラからヘッダーへ流れる蒸気流量 G_{IN} はオリフィス径とオリフィス上流圧力によって調節される。オリフィス径は蒸気流量に応じて、オリフィスでの流れが臨界状態となるようなものを適宜選び、一つの実験ケースでは蒸気流量を一定に保った。水槽上部の空気部圧力 P_A は常に大気圧 ($P_A = 101.3\text{ KPa}$) である。

実験パラメータとして、ヘッダー容積、ベント管数、ベント管の長さおよび浸水深さ及び内径を選んだ。表2-1にこれらのパラメータの組合わせを示すが、実験は二つのシリーズに分けることができる。シリーズ1ではベント管径を一定に、またシリーズ2では浸水深さとヘッダー容積を一定にし、それぞれ7及び3種の組合わせからなっている。各組合わせに対して、チャギング現象の様相が蒸気流量とプール水温によってどのように依存するかを調べるため、蒸気流量一定の下にプール水温を変える実験ケースを幾通りか実施した。

シリーズ1の目的は、主としてチャギング現象の特徴を明らかにすることであり、ストレインゲージタイプの圧力変換器(固有振動数1.4KHz)によりヘッダー圧力の変動を測定するとともに、ベント管内へ逆流する水柱の運動を16ミリカメラにより観察した。

一方、シリーズ2では、シリーズ1のデータから存在が明らかとなったチャギング発生限界を求めるため、ベント管内とヘッダー内の圧力変動を詳細に測定した。図2-1(b)は中心ベント管内に設けられたベント管出口近傍の2本の熱電対(シース径0.25mmで水中での時定数は2ミリ秒)と半導体タイプの圧力変

上限と下限が存在すると言える。このような限界は有信ら[52]により間欠的凝縮領域として認められている。

圧力変動波形を除けば、シリーズ1のデータには各様式の細分化に直接利用できるものはないが、細分化された様式間には圧力変動波形に明らかな差異が見られる。例えば、様式3-3と3-4の波形は似ているものの、前者は、様式3-2に特徴的な2子状波形の面影が残っているため、周期が後者に比べて長くなっている。

(2) プール水温の影響

ヘッダー内の圧力変動は、上述の蒸気流束ばかりでなくプール水温 T_L の影響も受ける。図2-4は、圧力変動波形に及ぼすプール水温の影響を示す一例である。図2-4の場合、水温が24℃から46℃に変わると振動様式は2子タイプから単一タイプになる。このようなプール水温の影響を振動様式のマップとして表したものが図2-5である。図中の記号は振動様式の区別を示し、実線及び破線はそれぞれ様式間及び細分化された様式間の境界を示している。横軸は、ベント管断面積当たりの蒸気流量、即ち蒸気流束を選んだ。図から、蒸気流束が小さくプール水温が50~60℃付近に境界が集中しており、この領域でプール水温が振動様式へ及ぼす影響の大きいことが分かる。また様式ナンバーの小さい振動ほど低プール水温・低蒸気流束側へ移行する。この図にはチャギング発生の上限が示されていないが、蒸気流束が上限を越えても圧力振巾は完全には消えないので、不規則で小さな圧力振動の続く様式4-2の中にチャギング発生限界が存在するものと予想される。また、チャギング発生の下限は様式2-1と1の間にある。

プール水温は、図2-3の蒸気流束と同様、圧力変動振巾へ影響する。図2-6は、蒸気流束をパラメータにして圧力変動振巾とプール水のサブクール度 $100 - T_L$ (℃) の関係を示している。サブクール度を増加させていくと、あるサブクール度で圧力振巾が増加を始める。これが、後述するシリーズ2の実験より求められるチャギング発生のための蒸気流束の上限とほぼ一致する。しかし、圧力振巾の増加点は不鮮明であり、図2-6からチャギング発生限界を求めるのは困難である。蒸気流束が $2.3\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ では、高サブクール度(低水温)で圧力振巾が急減することから、低水温・低蒸気流束域にチャギング発生の下限が存在することが分かる。これは図2-5の非チャギング様式1の発生域に対応している。

(3) ベント管本数の影響

図2-7は、圧力変動に及ぼすベント管本数の影響を示している。図(a)、(b)の比較から、等蒸気流束下では圧力振巾はベント管数の増加とともに大きくな

る。また、図(a)、(c)の比較から、等圧力振巾下の条件では 9 本管のチャギング周波数は 1 本管の約 2 倍になっていることが分かる。これらの事柄は、チャギング限界が単位ヘッダー容積当たりの蒸気凝縮面積と深い係りをもっていることを示唆している。

(4) ヘッダー容積の影響

逆にベント管数を一定にし、ヘッダー容積を変えてその影響を示しているのが図 2-8 である。ヘッダー容積が 1/4 になると、圧力変動振巾は 1.4 倍に、周波数は 1.6 倍になっている。図 2-7、-8 から、ベント管本数の増加とヘッダー容積の減少はよく似た効果をもたらすことが分かるが、これはともにベント管当たりのヘッダー容積が小さくなり、単位ヘッダー容積当たりの凝縮面積が大きくなることに起因している。

(5) 浸水深さの影響

図 2-9 及び図 2-10 が示すように、圧力変動波形や圧力振巾に及ぼす浸水深さの影響はほとんどない。ただ、これらの図から、ヘッダー内の平均圧力は浸水深さが増すとそれによる静圧増加分だけ高くなっていることが分かる。図 2-10 には、図 2-3 と同様、蒸气流束のごく小さいところと、 $20 \sim 30 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上で圧力振巾が小さくなっているが、これはチャギング発生のための蒸气流束に上限と下限が存在することと対応する。

(6) ベント管長さの影響

図 2-11 が示すように、ベント管長さが 0.5m と 1m とではヘッダー圧力振巾と圧力周波数にほとんど差が見られない。

2.1.3 チャギング発生限界

ベント管を通して蒸気をサブクール水中で凝縮させる際に生じるチャギング現象には、蒸气流束についての上限と下限の存在することがシリーズ 1 の実験結果から定性的に示された。ここでは、シリーズ 2 のデータを基にチャギング発生の上限を求めることにする。

シリーズ 2 では、中央ベント管出口付近の 2 点で応答性のよい熱電対(水中での時定数 2 ms)により温度を計測している(図 2-1(b))。熱電対 T_3 は出口より 1 cm 上方に、 T_4 は 0.5 cm 下方に設けられている。厳密に言えばベント管出口に設けられた熱電対が水温(蒸気温度より低温)を示すか否かでチャギング発生限界を決定すべきであるが、チャギングに伴うベント管内への逆流はほとんどの場合 10~30 cm 程度であるので、熱電対 T_3 のデータからチャギング発生限界を求めた場合の誤差は僅かである。図 2-12 は熱電対 T_3 が間欠的に水温を示す限界、即ちチャギング発生限界におけるプール水温と蒸气流束との関係を表している。これらの間にはほぼ直線の関係が成り立ち、その直線が点 ($j_s = 0 \text{ kg}/$

次に述べる気泡凝縮振動との中間にあるので、「遷移域」或いは「遷移振動」と呼ぶ。

第3番目の様式(c)は更に高い蒸気流束域で現れ、ベント管出口に形成される蒸気泡が高い周波数で膨張と収縮をくり返すのが観察される。その時のベント管内の圧力は蒸気泡の膨張・収縮と同周期で振動するが、第4章で明らかとなる振動メカニズムを考慮して「気泡凝縮振動」と名づける。最後の様式は高プール水温のとき現れるもので、「バブリング」と言われる。この様式では、蒸気泡の膨張とベント管からの離脱が見られるが、これまでの3様式とは異なり、ベント管内の圧力波形に高周波成分が含まれないという特性がある(図2-14参照)。

間欠的振動時には、低周波で間欠的な圧力変動がヘッダーに現れる。この低周波成分がチャギング周期であって、ベント管内のみにチャギング発生に一致した大きな圧力スパイクとそれに続く高周波リングアウト(圧縮波がベント管の両端間を往復することによる圧力振動)が見られる。遷移振動では、ヘッダー圧力は10Hz前後で変動しており、間欠的振動の周期より短い低周波成分と考えることができる。ベント管内の圧力変動は低周波および高周波成分から成っており、ヘッダー圧力変動の周期に一致したうなりのように見える。気泡凝縮振動においては、ヘッダー圧力はほとんど変動せず、ベント管内に高周波の成分のみが卓越している。

2.2.3 高速フィルムによる観察

高速フィルムによる界面形状の変化とアナログ記録計に収録したベント管内圧力変動 P_{V1} との比較を行った。図2-17は、上述の典型的な振動様式について、ベント管出口近傍の圧力と界面変動の対応を示している。間欠的振動では(図(a))、蒸気-水界面がプール水中へ達すると同時に急激な蒸気凝縮が始まりベント管出口の圧力も急減する。これに伴って、蒸気泡の周りの水やヘッダー内の蒸気が凝縮の生じているベント管出口へ殺到する。その結果、蒸気と水が衝突する格好となり、ベント管出口の圧力はスパイク状に上昇する。続いて、高周波なリングアウト振動が現れる。凝縮域の様相は非常に複雑で不鮮明なため、図では、点群或いは斜線で表してあるが、この領域がリングアウト振動と同周期で上昇と下降を繰り返しているのが見られる。高周波振動に同期した界面変動振巾は小さいので図で表すと分かりにくいですが、高速フィルムを動画として見るとその変動の様子がよく分かった。リングアウトが続いている間、このような小振巾界面変動を伴いながらプール水はベント管内を上昇する。やがてプール水の上昇は止まり、続いて下降が始まりチャギングが繰り返される。

遷移振動では、ベント管先端に付着した蒸気泡が1回のうなり状圧力変動の間に膨張と収縮を行う(図(b))。うなりの発達段階と気泡の膨張時期とはほぼ

一致している。間欠的振動のリングアウトと同様、遷移振動においても高周波圧力変動に対応した高周波な界面変動がうなりの周期に一致した低周波界面変動に重畳しているのであるが、振動振巾が小さく図では表示できなかった。低周波成分の現れない気泡凝縮振動では、図(c)によく示されるように、蒸気泡の膨張・収縮の周期が圧力変動周期に対応している。

ベント管出口近傍の温度 T_3 と T_4 の記録も界面変動と圧力変動の対応をよく示していたが、このデータは次章「振動現象のメカニズム」で詳しく検討する。

2.2.4 現象マップ

2.2.2 節で分類した4種類の現象の発生領域を蒸气流束 $5 < j_s < 70 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の範囲で調べた。図2-18は、間欠的振動、遷移振動、気泡凝縮振動とバブリングの発生範囲を示している。図2-1の装置についても現象マップ[51]を $2 < j_s < 35 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の範囲で求めたが、その範囲での両図の対応はきわめて良好である。また、従来の研究による現象マップとは、現象の分類法の違いなどがあり、必ずしもいい対応とは限らないが、Arinobuら[41]のマップとは比較的良く一致している(チャギング発生限界については、4.1節で他の研究者によるデータと比較検討する)。図中の1点鎖線は、プール水のベント管内への逆流が生じるか否かの限界、即ち、チャギング発生限界を示しており、図2-12の限界に対応している。従って、チャギング発生限界により2分される遷移領域の内、右上の領域では界面は常にプール水中にあって膨張と収縮を繰り返すことになる。

図2-18及び図2-16から、遷移振動は文字どおり間欠的振動と気泡凝縮振動との遷移域であり、この事が、低水温時の振動現象をチャギングと気泡凝縮振動のみに分けた際の境界は、線というより、蒸气流束に対してある巾を持たせた方が良いという考え方[27]と関連しているように思われる。これに対し、プール水温を上昇させていったときに高周波圧力成分が発生しなくなる限界(図2-14参照)、即ち、遷移振動とバブリングの境界は比較的鮮明である。

次に、蒸气流束を $70 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上 $265 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (大気圧飽和蒸気中の音速 473m/s に相当する蒸气流束は $283 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 以下の実験を若干追加し、高蒸气流束までを含んだ現象マップ図2-19を得た。高周波の圧力振動で特徴づけられる気泡凝縮振動も、蒸气流束が音速に近くなる高々蒸气流束では、ベント管出口での圧力振動振巾が小さくなり、かつベント管内(P_{V2} , P_{V3})において圧力振動がほとんど測定されなくなる。蒸气流束が大きいこともあり、気泡寸法は気泡凝縮振動時に比べてかなり大きくなっているため、一応バブリング領域と名付けるが、図2-18に出てくる高周波振動成分の含まれないバブリングとは異なるものである。気泡凝縮振動とこのバブリングの間はもう一つの遷移領

している。そして、高周波成分が勃発する瞬間の蒸気流束はプール水中に出ている気泡界面への凝縮速度に支配され、平均蒸気流束よりはるかに大きな値になっている(5.5節 参照)。

図 2-22の(b)、(c)には、ベント管長さ0.5mの場合のデータも含まれているが、それらのデータが長さ1.0 m のデータと同一の曲線で整理できる。これは、ベント管長さが高周波振動成分にはほとんど影響しないことを意味しており、福田による実験[42]と同じ結果となっている。

(2) 周波数への影響

実験条件が高周波振動成分へ及ぼす影響は、図 2-20~21 からも分かるように、圧力振巾への効果に比べて小さい。図 2-24は、ベント管内の圧力変動中に含まれる高周波成分とプール水サブクール度($100 - T_L$)(k)との関係を、蒸気流束とベント管長さをパラメータとして表したものである。各実験点は圧力振巾の場合と同様、約100個のデータの平均値を示している。周波数とサブクール度は、ある程度のバラツキがあるものの、各蒸気流束に対して、サブクール度の増加とともに単調に増大する曲線で示すことができる。パラメータ効果に注目すると、蒸気流束が増すにつれて周波数は多少増加の傾向にあるのに対し、少なくとも本実験で得られたデータにおいては、ベント管の長さの影響は見られないことが分かる。

(3) その他のパラメータの影響

高周波振動成分に影響をもたらす可能性のあるその他の実験パラメータとしては、ベント管径 d_V 、ヘッダー容積 V_D とベント管浸水深さ L_H が考えられる。

(i) ベント管径を変えることによる効果を調べるのに十分なデータは本実験では得られていない。しかし、横田[33]は気泡凝縮振動における卓越周波数がほぼ管径に逆比例することを見出だしている(例えば、図 4-19 参照)ことを述べるに留めておく。

(ii) ベント管による絞り効果が強くなければ、ヘッダー容積の減少はチャージング即ち低周波振動の周波数とヘッダー圧力振巾の増大をもたらすが、高周波成分の特性にはほとんど影響をもたらさないと考えられる。これは、2.1 節でも述べたように、高周波成分を支配している蒸気容積はベント管出口の蒸気泡であることと関連している。

(iii) ベント管浸水深さが高周波振動成分に何らかの影響を及ぼすことは考えにくい。浸水深さは $P_V - P_0$ や $P_D - P_0$ の平均値に比例する[51](図 2-9~10参照)が、プール水中の界面運動の慣性力に対してほとんど影響をもたらさないためである。

2.3 第2章のまとめ

ポリカーボネイト製透明模擬装置を2種類製作し、蒸気凝縮に起因する圧力振動実験を大気圧下で行った。第1の実験は、ベント管内の蒸気流束が $0\sim 30\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ と比較的低蒸気流束で生じるチャギング現象に焦点を合わせたもので、ドライウェルに相当するヘッダー内の圧力変動の様相がプール水温及び蒸気流束にどのように依存するかを調べるるとともに、プール水が間欠的にベント管内へ逆流するチャギングの発生限界を求めた。また、ベント管の本数、長さ、浸水深さ及びヘッダー容積といった実験パラメータの圧力変動へ及ぼす影響についても明らかにした。第2の実験は、チャギングより高蒸気流束で生じる気泡凝縮振動の特性を明らかにするため蒸気流束 $30\sim 120\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の範囲で行い、これまでの圧力変動に高速フームによる観察を加え、ベント管内の圧力変動と界面変動の係り、および上述の実験パラメータが圧力変動の振幅と周期に及ぼす影響を詳しく調べた。更に、第1の実験データと合わせ、広い蒸気流束に亘る現象マップを得、 $70\sim 80^\circ\text{C}$ 以上の高プール水温領域には別の振動様式であるバブリング振動が、また、これら3様式に囲まれた部分には典型的なチャギングである間欠的振動と気泡凝縮振動との遷移域が現れることを明らかにした。

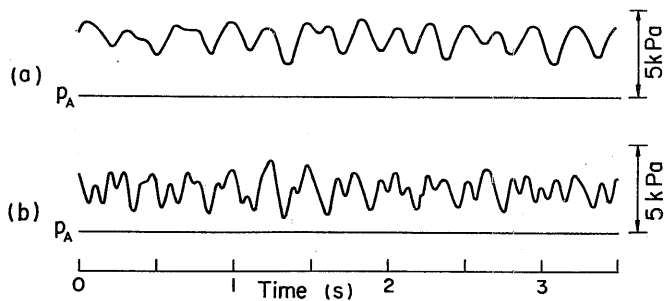


図2-4 ヘッダー圧力変動波形へ及ぼすプール水温の影響

(a) $T_L = 46^\circ\text{C}$, (b) $T_L = 24^\circ\text{C}$
 $(V_D = 0.04\text{ m}^3, d_V = 0.018\text{ m}, l_V = 0.5\text{ m}, l_H = 0.06\text{ m},$
 $n = 9, G_{IN} = 3 \times 10^{-3}\text{ kg/s})$

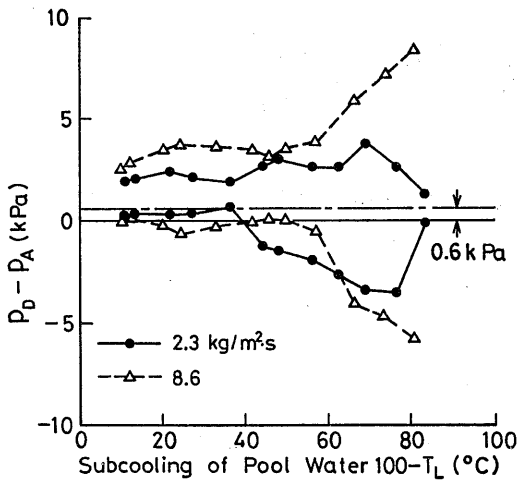


図2-6 ヘッダー圧力の変動振幅とプール水サブクール度との関係

$(V_D = 0.04\text{ m}^3, d_V = 0.018\text{ m}, l_V = 0.5\text{ m}, l_H = 0.06\text{ m}, n = 5)$

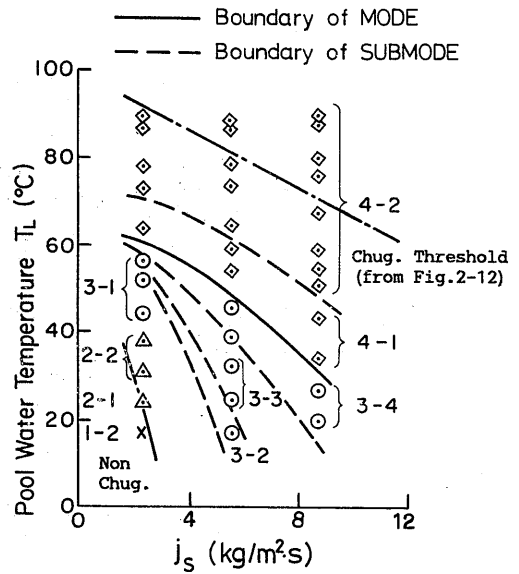


図2-5 プール水温と蒸気流束で示したチャギング様式マップ

$(V_D = 0.04\text{ m}^3, d_V = 0.018\text{ m}, l_V = 0.5\text{ m}, l_H = 0.06\text{ m}, n = 5)$

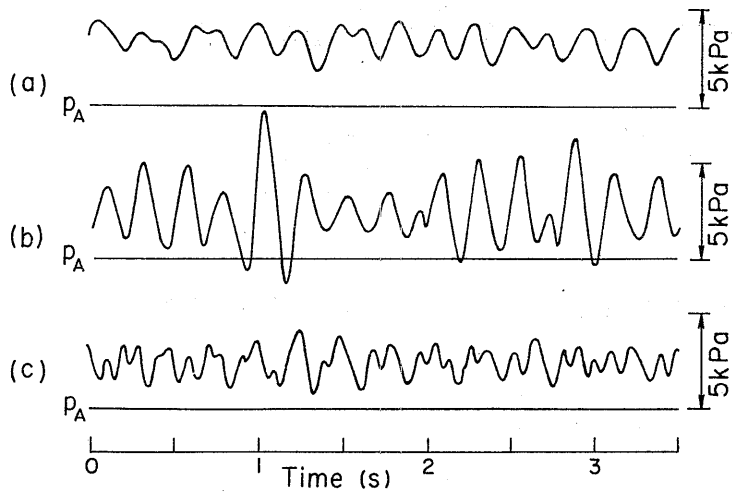


図2-7 ヘッダー圧力の変動周波数に及ぼすベント管本数の影響

(a) $n=1$, $j_s=8.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

(b) $n=9$, $j_s=8.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

(c) $n=9$, $j_s=5.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

($V_D=0.04 \text{ m}^3$, $d_v=0.018 \text{ m}$, $l_v=0.5 \text{ m}$, $T_L=17 \text{ }^\circ\text{C}$)

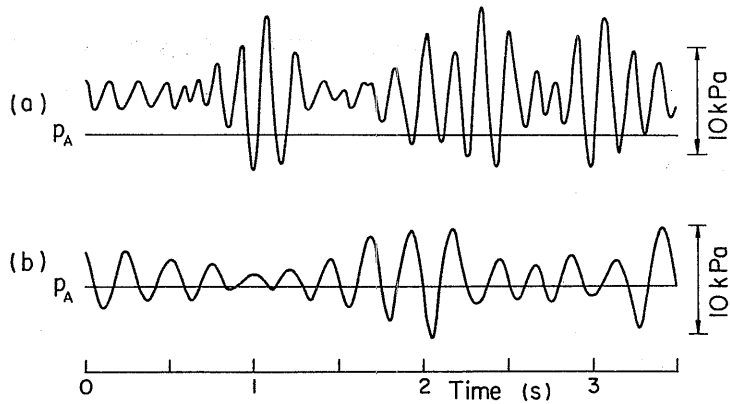


図2-8 ヘッダー圧力の変動周波数と振幅に及ぼすヘッダー容積の影響

(a) $V_D=0.01 \text{ m}^3$, (b) $V_D=0.04 \text{ m}^3$

($d_v=0.018 \text{ m}$, $l_v=0.5 \text{ m}$, $l_H=0.06 \text{ m}$, $n=5$,
 $T_L=33 \text{ }^\circ\text{C}$, $j_s=5.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

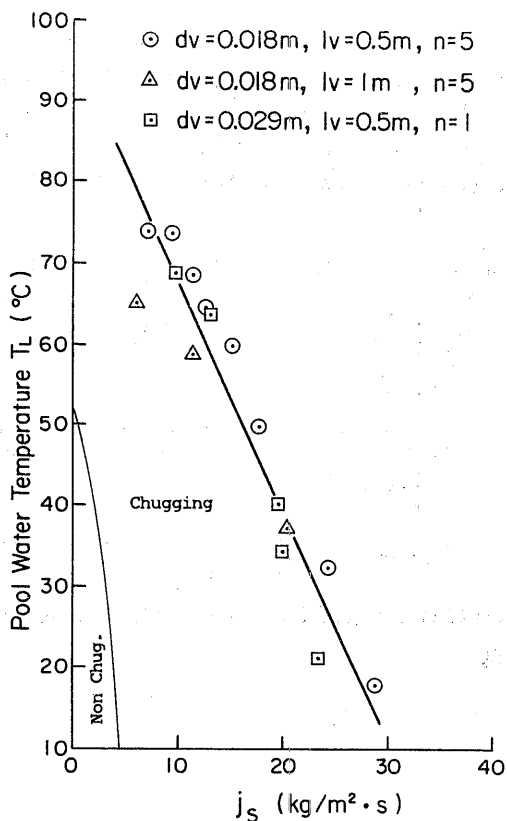


図2-12 チャギング発生限界におけるプール水温と蒸気流束の関係

($v_D = 0.02 \text{ m}^3$, $l_H = 0.25 \text{ m}$)

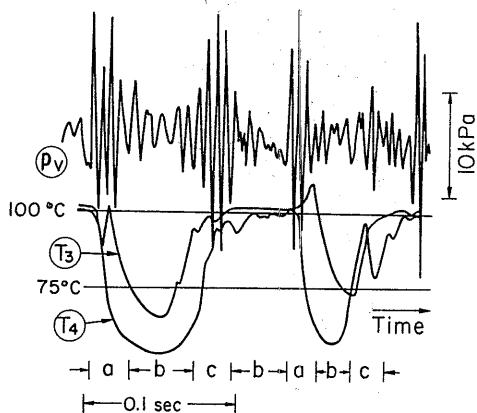


図2-13 チャギング時におけるベント管内圧力 P_V 及びベント管出口近傍温度 T_3 , T_4 の変動例

- (a) 界面上昇期間
- (b) 界面ほぼ静止期間
- (c) 界面下降期間

($v_D = 0.02 \text{ m}^3$, $d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 0.5 \text{ m}$, $l_H = 0.25 \text{ m}$,
 $n = 5$, $T_L = 48 \text{ }^\circ\text{C}$, $j_S = 11.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

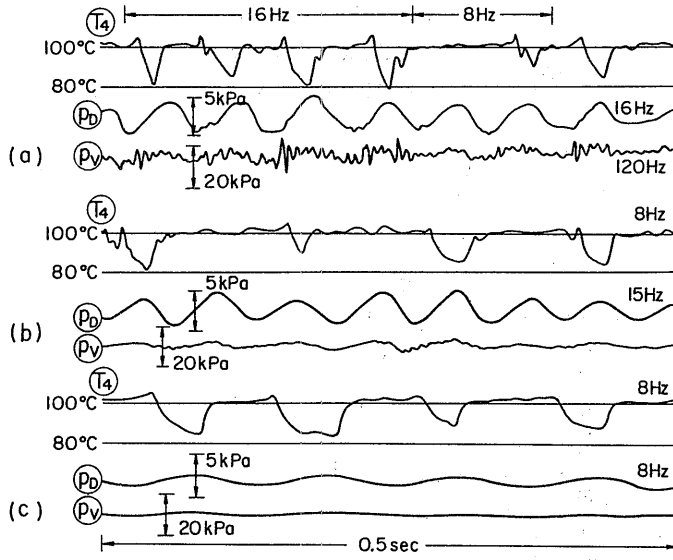


図2-14 高ブール水温時における温度 T_4 、ヘッダー圧力 P_D 及びベント管内圧 P_V 力の変動例

(a) $T_L = 73.2^\circ\text{C}$, $j_s = 14.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 (b) $T_L = 78.0^\circ\text{C}$, $j_s = 12.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 (c) $T_L = 83.5^\circ\text{C}$, $j_s = 6.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 ($V_D = 0.02 \text{ m}^3$, $d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 0.5 \text{ m}$, $l_H = 0.25 \text{ m}$, $n = 5$)

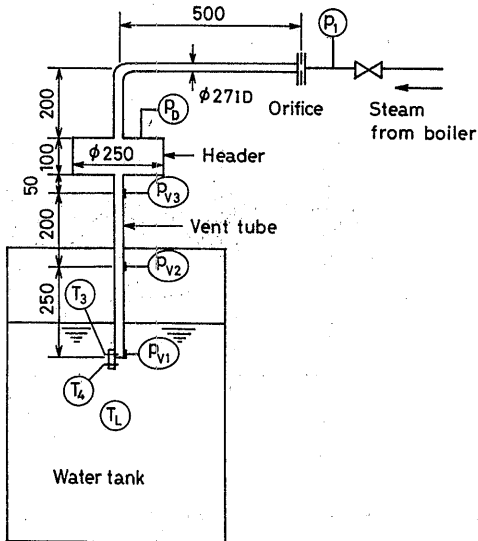


図2-15 気泡凝縮振動実験装置

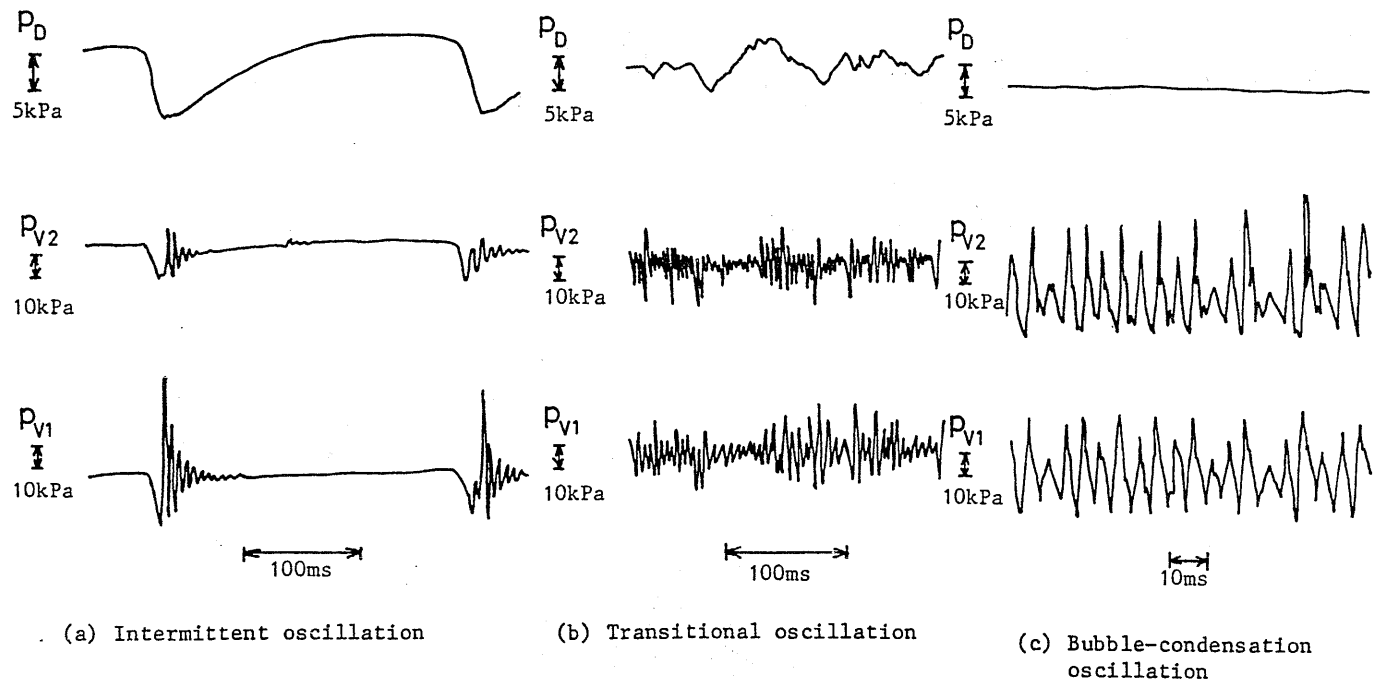


図2-16 各振動様式における典型的な圧力振動波形

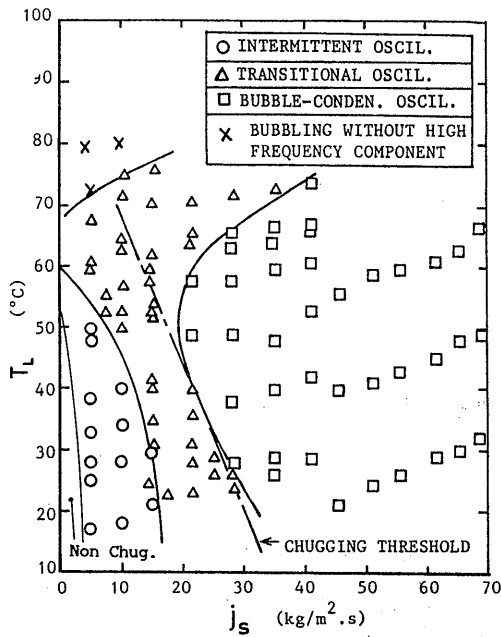


図2-18 振動様式マップ ($0 < j_s < 70 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

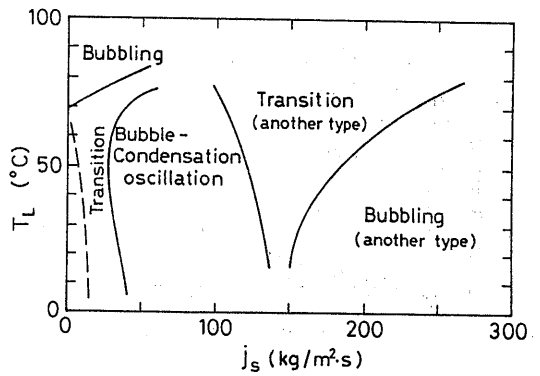


図2-19 高蒸気流束域の様式マップ* ($j_s < 283 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

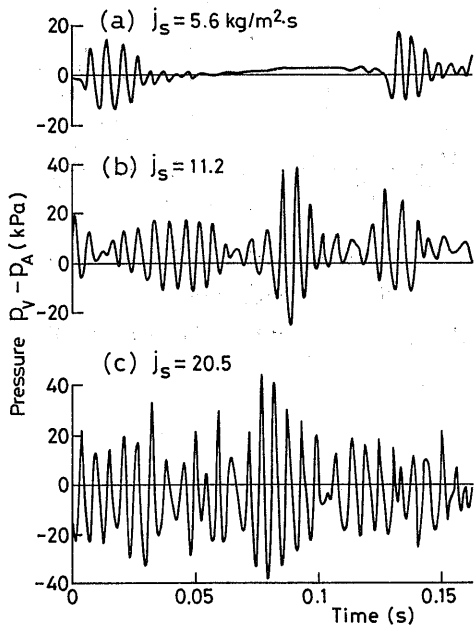


図2-20 ベント管内の高周波圧力変動波形に及ぼす蒸気流束の影響

($d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 1.0 \text{ m}$, $n = 5$, $T_L = 43 \text{ }^\circ\text{C}$)

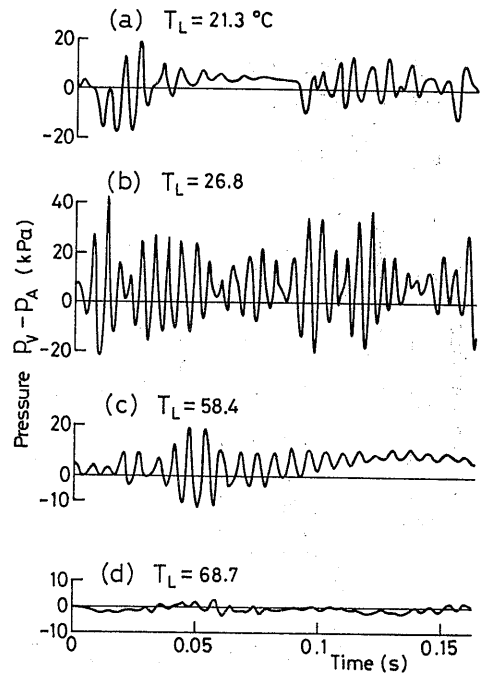


図2-21 プール水温の影響

($d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 1.0 \text{ m}$, $n = 5$, $j_s = 11.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

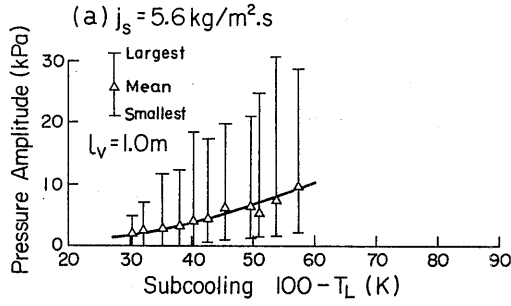


図2-22(a)高周波圧力変動振幅のプール水サブクール度依存性
(平均値の回りに広く分布しているのが特徴)
($d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 0.5 \text{ m}$, 1.0 m)

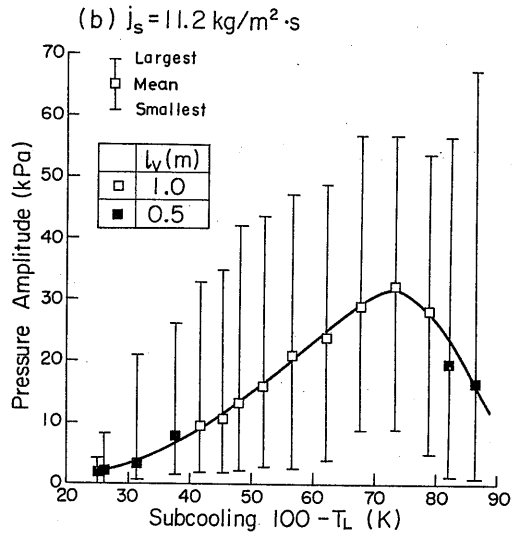


図2-22(b)高周波圧力変動振幅のプール水サブクール度依存性
(平均値の回りに広く分布しているのが特徴)
($d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 0.5 \text{ m}$, 1.0 m)

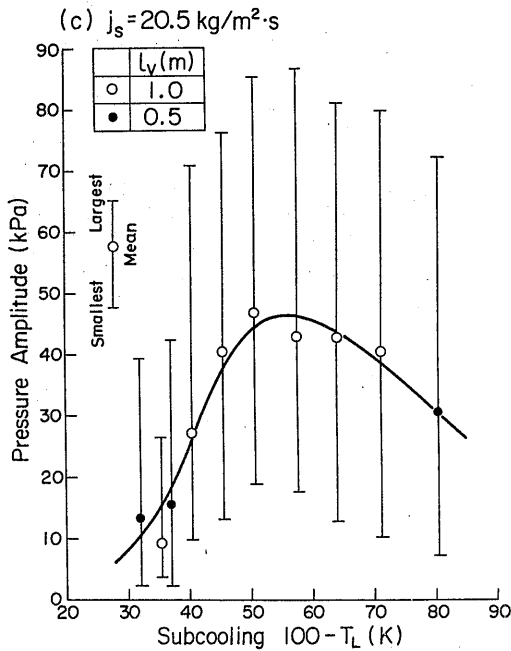


図2-22(c)高周波圧力変動振幅のプール水サブクール度依存性
(平均値の回りに広く分布しているのが特徴)
($d_v = 0.018 \text{ m}$, $l_v = 0.5 \text{ m}$, 1.0 m)

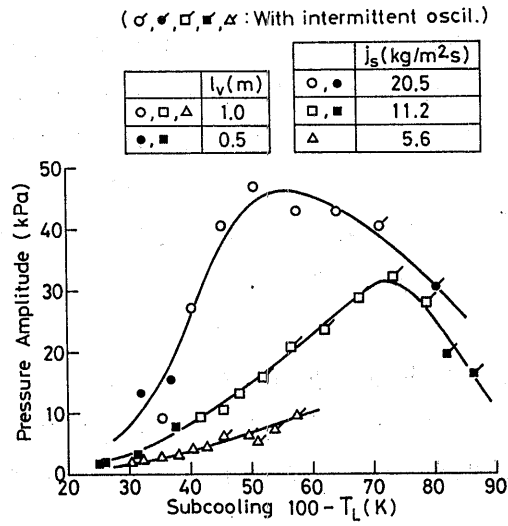


図2-23 平均圧力変動振幅の蒸気流束依存性

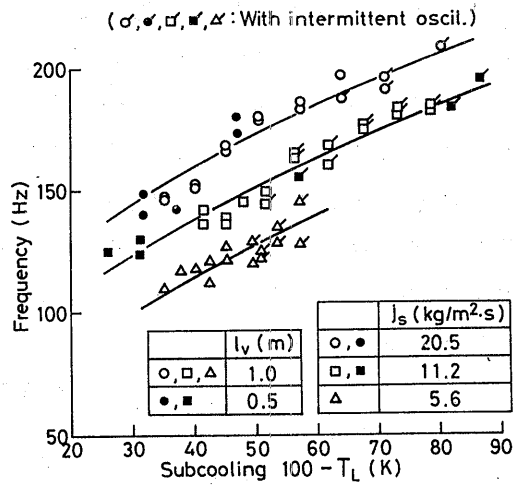


図2-24 高周波圧力変動周波数とプール水サブクール度及び蒸気流束の関係