答料来早·27 E



高サイクル熱疲労の熱流動現象に関する研究 - T管及び平行三噴流体系の温度変動 -

上出 英樹 五十嵐 実 木村 暢之 林 謙二

大洗工学センター 要素技術開発部

Experimental Study on Thermal Hydraulics of High Cycle Thermal Fatigue - Temperature Fluctuation in Mixing Tee and Parallel Triple Jets along Wall -

Hideki KAMIDE Minoru IGARASHI Nobuyuki KIMURA Kenji HAYASHI

Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

高サイクル熱疲労は、流体の温度変動が構造物に繰り返し熱応力を負荷し疲労破壊に至るもので、サーマルストライピングとも呼ばれる。原子力分野でもこのような損傷事例が散見されることから重要な課題となっている。本報告では代表的な流体混合部であるT管体系と高速炉の炉心出口部を単純化した平行三噴流体系について水試験を行い、流体内の温度変動の空間分布、周波数特性の知見を得た。試験では移動式の熱電対ツリー並びに粒子画像流速計測法を用い、詳細な温度並びに速度分布を把握した。両試験の結果、温度変動の周波数特性は、フローパターンが同一であれば流速の絶対値によらずストローハル数(St)と無次元化したパワースペクトル密度により、一般化して表現できることなどを明らかにした。T管体系では、枝管からの噴流が主管の流れに対する障害物となって生じるカルマン渦的な流れが温度変動に大きな影響を与えることが分かった。

When temperature fluctuation in fluid is transferred to the structure, it induces thermal load via thermal expansion of the structure. If the fluid temperature fluctuation amplitude and then thermal stress are large, structural integrity might be lost due to high cycle thermal fatigue, i.e., thermal striping. Several incidents due to the thermal striping have occurred in nuclear power plants. Water experiments were carried out for thermal hydraulic aspects of the thermal striping. A mixing tee and a triple-parallel jet along wall were selected as the test geometry. Detailed temperature and velocity fields were measured by movable thermocouple trees and particle image velocimetry. The power spectrum density (PSD) of temperature fluctuation can be estimated by a representative curve, when the flow velocity ratio and then flow pattern was identical. Comparison of frequency characteristics between the temperature and velocity showed that the temperature fluctuation in the mixing tee was caused by flow structure like Karman vortex behind the jet exiting from the branch pipe in case of a wall jet condition.

キーワード

高サイクル熱疲労,サーマルストライピング,温度変動,周波数特性,T管,粒子画像流速計測法,カルマン渦

High Cycle Thermal Fatigue, Thermal Striping, Temperature Fluctuation, Frequency Characteristics, Mixing Tee, Particle Image Velocimetry (PIV), Karman Vortex

1.はじめに

高サイクル熱疲労は温度差のある流体の混合 や,温度成層界面の揺らぎなどで生じる温度変動 により引き起こされる。すなわち,温度変動が構造材に伝わり,構造物内に生じた温度勾配とその変動により応力が例えば100万回以上も繰り返し



上出 英樹 新技術開発試験グループ 研究主幹 FBR実用化戦略調査研究 を始めとしてナトリウム冷 却高速炉の熱流動に関する 実験研究に従事



五十嵐 実 新技術開発試験グループ 高速炉を含むプラントにお ける熱流動技術開発に従事



木村 暢之 新技術開発試験グループ 副主任研究員 FBR実用化戦略調査研究に おける炉内熟流動の適正化 サーマルストライビング現 象の評価研究に従事



新技術開発試験グループ 技術主幹 FBR実用化戦略調査研究 公募研究において,炉容器 内,機器の熱流動に関する 水試験,Na試験に従事

謙二

林

負荷されることで疲労破壊に至る。繰り返し回数 はプラントの運転時間とともに増加することか ら,高サイクル熱疲労は経年劣化の要因となる。 これまでの損傷事例を挙げると,国内の加圧水型 軽水炉 (PWR)では,敦賀2号炉の再生熱交換器 (1999年), 美浜2号炉の1次系にある閉止分岐配 管(余剰抽出系)エルボ部(1999年),泊2号炉の再 生熱交換器(2003年)がある。フランスでは ,PWR であるCIVAUX ,1 号炉の余熱除去設備(RHRS)T 管部(1998年)で漏洩が生じた。ナトリウム冷却 高速炉では,フランスPhenix炉2次系配管の水漏 洩検出系戻りT管部(1992年)での損傷例がある。 このように高サイクル熱疲労によって貫通き裂が 生じ冷却材漏洩に至る事象が少なからず発生して いることから、その評価はプラントの設計のみな らず維持の観点からも重要となっている。

一方,ナトリウム冷却高速炉では,冷却材であるナトリウムの熱伝導率が水に比べて約100倍であり,流体と構造材との熱伝達率が大きくなることから温度変動が壁に伝わりやすい。このため,高サイクル熱疲労については,軽水炉以上に設計で配慮がされている。例えば,炉心の出口では燃料集合体と制御棒チャンネルの間など温度差のある流体が噴流として流出し,構造材の近傍で混合する。このような場所では,健全性確認試験を通してインコネルなど熱膨張係数が小さく,熱疲労の生じにくい材料を用いるなどの対策が取られている。

先に挙げた軽水炉での損傷事例を踏まえ,日本機械学会では水を内包する配管を対象に「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」うを2004年12月に発行した。指針は,軽水炉を対象に合流配管部の形状,運転条件をサーベイして試験条件を定め,最大で内径100mmの配管を用いた水試験2-4)のデータに基づいて策定された。

著者等はこれまでに流体側の温度変動周波数の 重要性を指摘してきた。また,笠原等は周波数に よって構造材の応力振幅が変化することを合理的に考慮する手法として構造応答関数を提案した。
うこの周波数応答特性は熱伝達係数と構造材の 物性値,板厚で決まるBiot数(Bi)に依存すると ともに,構造物の拘束条件によって変化する。周 波数応答特性を考慮することにより,繰り返し回 数が大きくなる高周波数成分の変動について応力 値が小さくなるなど疲労評価への合理性は大き い。機械学会の指針ではこの構造応答関数を一部 取り込み , 周波数によらず応答関数の最大値での 減衰幅のみを考慮している。この点でさらなる合 理化を図る余地があると考える。

T管内の混合現象については,先の指針のベースとなった水試験以外にも,フランスではシボー1号炉での冷却水漏洩事象を契機として実機の圧力/温度条件での温度変動測定試験が行われている。『この他に等温での流速分布測定のみを目のした試験が実施されている。しかし,これらの温度計測実験の多くが配管の壁あるいは壁近傍の流体温度のみを測定しているために,T管内の混合現象そのものを理解するには情報が十分ではない。また,測定には場所が固定され,限られた数の熱電対を用いていることから,比較的まばられた数の熱電対を用いていることから,比較的まばらない。すなわち,温度変動強度が最大となるに変動強度の分布形状から推定することとなる。

このような外部情勢の進展と並行し,著者等は 日本機械学会の動力エネルギーシステム部門に 「熱荷重損傷評価手法に関する研究会」の設立を提 案した。その結果,熱流動と構造,材料の専門家 からなる研究会が1998年から活動を開始した。研 究会では5年にわたって議論が重ねられ,サイク ル機構の笠原,村松とともに著者等は,代表的な 混合部であるT管の高サイクル熱疲労を対象とし た評価指針の枠組みと基本的な考え方を研究会に 提案した。そこでは,前述した周波数特性の考慮 の重要性並びに構造物の面内の温度分布の重要性 を指摘した。後者については,構造物の板厚方向 の温度分布による応力は,板の内部で減衰し,き 裂の進展が止まりやすくなる。一方,構造物の面 内に高温あるいは低温の島状の温度分布(ホット スポット / コールドスポット) ができてその範囲 が変動するときに周囲の構造物からの拘束を受け て生じる応力は , き裂の進展に大きな影響を及ぼ す可能性がある。これら議論の成果は先の指針を 策定するための委員会に引き継がれた。

この研究会での議論に資するため,著者等はT 管内の温度変動に関する水試験を実施した。「・・」試験では配管の内部の温度を移動可能な熱電対で詳細に測定するとともに,最新の画像計測による速度場測定により混合現象を多面的に捉えた。また,ナトリウム冷却高速炉の炉心出口における温度変 動の基本的な現象を把握するために,3本の平行なスリットから温度の異なる噴流が壁に沿って流れる平行3噴流体系での水試験を実施した。10-11)本報告では構造材における応力評価の観点で重要な周波数特性に着目して,これらの試験結果から混合現象と温度変動特性について得られた成果を示す。

2.試験装置

2.1 T管試験

T管の形状は主管の直径 主管と枝管の口径比 ,接続部の角度と面取り (R) などで決まる。流れ方向として ,主管に枝管の流れが合流する場合と主管の両側からの流れが合流して枝管に流出する場合がある。その他にT管の上流 / 下流にエルボやバルブが存在することで流れが乱れる , 2 次流れが生じるなどの外乱要因がある。

本試験では、上記の形状などのバリエーションの中で基礎的な検討を行うため、T管内の現象を単純な形で取り出すこととした。図1に試験装置の形状を示す。主管は内径150mmとし、前述のコールドスポットについて知見を得るために、局所的な低温部ができやすいよう枝管の内径を小さくする、すなわち口径比を主管に対して1/3とした。主管は水平に置き、枝管は鉛直下方から接続した。接続部の角度は90度でRはとらない形状とした。流れ方向としては主管に枝管の流れが合流する体系とした。上流側には10 D以上の助走距離を設けるとともに、偏流や2次流れを避けるため、各配管の入口部に縮流ノズルを有する整流用バッファーを設けた。枝管側の流路に冷却器をおき、

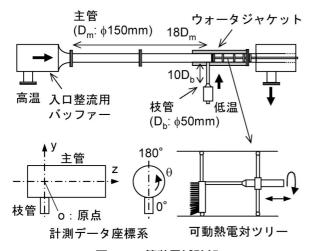


図1 T管装置試験部

主管に対して15 程度低い温度の水を供給できる 設備とした。主管の流量は最大で240 m³/h , 流速 にして3 5 m/s , Reynolds数としてはRe = 6 × 10° まで可能である。

実験では可視化による流況把握,熱電対による温度計測,粒子画像流速計測法(Particle Image Velocimetry, PIV)による速度場計測を行った。 T管部を含む試験部は透明アクリル製で,さらに四角形状のウォータジャケット内に納めることで屈折による歪みの影響を低減した。流体の温度は,非接地K型(クロメル・アルメル)外径025mmの熱電対を主管の径方向に櫛状に配した「熱電対ツリー」を用いて計測した(図1参照)。ツリーは主管の軸方向に移動できるとともに回転が可能で,T管内の温度分布を詳細に測定することができる。熱電対は相対校正により±02以内の精度を有する。

PIVでは,作動流体である水に粒径30ミクロン程度のナイロン粒子を混ぜ,シート状に広げたパルスレーザー光(パルス幅は数ns)で1ms程度の短い時間をおいて2枚の画像をCCDカメラで収録し,粒子による輝度パターンについて2枚の画像間で相関をとることにより粒子群が移動した距離を求めた。レーザーにはダブルパルスYAG,CCDカメラには1,000×1,000ピクセルをもつコダックES1,0を用いた。相関処理にはサブピクセル法²⁰を用いたことで,移動距離の推定精度は0,2ピクセル程度と評価される。150mm角の領域を撮影した場合の測定精度はパルス間隔1msのとき0,04m/s以内である。

22 平行三噴流試験

ナトリウム冷却高速炉の炉心出口における制御棒チャンネルとこれを囲む6体の燃料集合体からの噴流の混合現象について,その温度変動の特性を把握するために,単純な準2次元体系でモデル化した試験装置を製作した。図2に試験部の形状を示す。平行に切った3本のスリットから鉛直上方に,中央から低温,両側から高温の水が噴出し,その後スリット部を挟んで鉛直に立てた2枚の仕切り板(壁)に沿って流れ混合する体系とした。

スリットを横切る方向に水平に並べた熱電対を 上下並びに壁に向かって水平に移動し,流体内の 温度分布を計測した。熱電対はT管試験と同様な 仕様である。

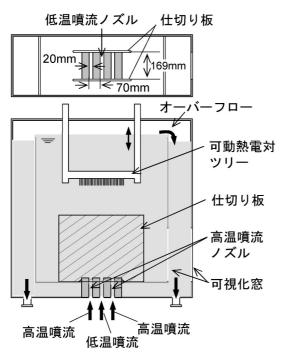


図 2 三噴流装置試験部

3 . T管体系での混合現象

3.1 入口境界条件

T管内の混合現象を議論する前に、その境界条件として本試験装置で得られたT管部上流側の速度場について示す。図1に示す座標系で、主管と枝管の中心軸の交点を原点とし主管の上流側z=037Dmの位置での軸方向速度成分(Vz)とその変動強度のy方向分布を、主管平均流速Vm=146m/s(Re=22×10°)の条件でPIVを用いて測定した。結果を図3に示す。流速値(Vz)と以下に示すVzの変動強度(Vrms)はVmで規格化した。

$$V_{rms}^* = \frac{1}{V_m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (V_i - \overline{V})^2}{N}}$$
 (1)

ここでNは計測データ個数 , ▽は時間平均値である。主管の下方 (y が負の値) で流速が小さくなっているが , 後述するように計測位置が枝管に近く , 枝管から出た流れを避けるように主管内の流れが変化しているためである。軸方向速度成分の変動強度は平均流速の約10%である。管内の発達した乱流場に比べて若干乱れ強度が大きいが , 試験装置に固有の特性はみられない。

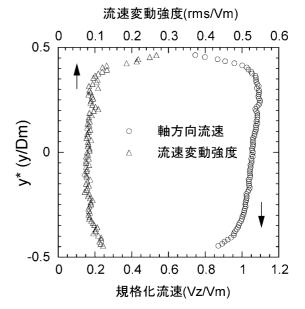
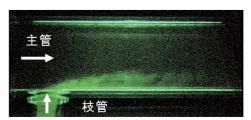


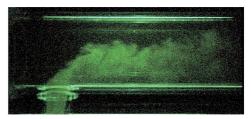
図3 T管体系主管内流速分布 (z= 0 37 Dm)

32 T管部のフローパターン

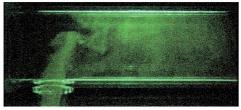
主管の流速と枝管の流速の比並びに温度差をパラメータにして,T管部の流れを可視化した。主管と枝管の流速範囲は,それぞれ0.1~2.9m/s,0.5~1.5m/sである。温度差はゼロ(等温)または15 とした。図4に得られた代表的なフローパ



壁面噴流



偏向噴流



衝突噴流

図4 T管内フローパターン(可視化)

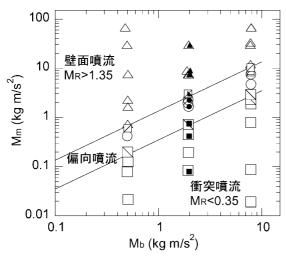
ターンを示す。 T管内の流れ場は,枝管からの噴流の向きにより特徴づけられ,次の3種類に分類した。 1)壁面噴流:枝管噴流は主管内の流れにより主管の壁面に押し付けられるように流れる。 2)偏向噴流:枝管噴流は主管の中央付近を通るように流れる。 3)衝突噴流:枝管噴流は対向する主管壁面に衝突するように流れる。これらのフローパターンにより,後述するように主管壁面近傍の温度変動強度分布は大きく異なる。したがって,T管内の熱疲労を評価する場合にフローパターンを推定することは重要である。

枝管噴流の向きは主流と枝管内流れの運動量の 比で決まると考え,各軸に以下の定義に示す運動 量をとり,フローパターンのマップを図5に示す。 主管の運動量については,主管内の流れが枝管噴 流に影響を与える範囲として,枝管を主管内に延 長した領域の主管軸方向への投影面積(D_m×D_b) を考慮した。

$$M_{m} = \rho(D_{m} \cdot D_{b})V_{m}^{2}$$

$$M_{b} = \rho \frac{\pi D_{b}^{2}}{A}V_{b}^{2}$$
(2)

ここで, ρ は流体の密度(kg/m^3), D_m , D_b はそれぞれ主管と枝管の内径(m),Vm,Vbはそれぞれ主管と枝管内の合流前断面平均流速(m/s)である。図より,フローパターンは主管と枝管内流れの運動量比($M_R=M_m/M_b$)により以下のように分類/判定できることがわかる。



△:壁面噴流 ○:偏向噴流 □:衝突噴流 白抜きシンボル:等温条件,黒塗り:非等温条件

□ □ ►:各噴流形態の境界形態を示す

本試験結果からは口径比 (D_b/D_m) の影響は判断できないが,前述の機械学会指針では本知見に基づき,口径比が異なる体系の可視化試験結果から上記の「フローパターンの運動量比による分類」が適用できることを確認した上で,口径比の影響を含めT管内のフローパターンの判定手法として記載している。

33 温度並びに温度変動強度の空間分布

図6から8にそれぞれ壁面噴流,偏向噴流,衝突噴流の各代表ケースについて,主管と枝管の両中心軸を含む鉛直断面,主管の管内面から1mm流体内に入った円筒面内,並びに主管の輪切り断面内の温度分布と温度変動強度(rms)分布をコンター図として示す。試験条件を表1に示す。図中の温度と温度変動強度はサンプリングスピード100Hz /480s間の測定データの時間平均値であり,以下のように無次元化している。

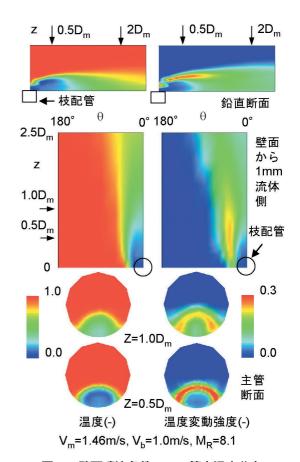


図6 壁面噴流条件でのT管内温度分布

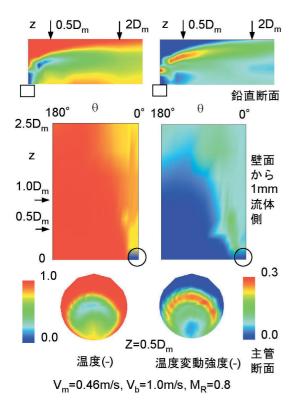


図7 偏向噴流条件でのT管内温度分布

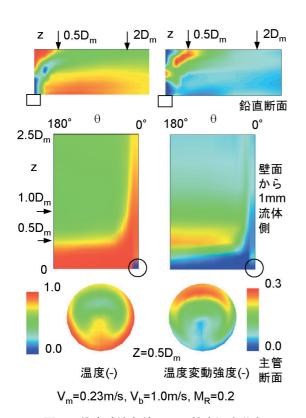


図8 衝突噴流条件でのT管内温度分布

表1 T管試験の実験条件

ケース				主管内流速 V _m (m/s)	枝管内流速 V _l (m/s)	運動量比 M _R
壁面	噴流	(代表	表)	1 46	1.0	8 .1
壁	面嘴	流	1	0 .73	0.5	8 .1
壁	面嘴	流	2	2 .18	1 5	0.8
壁	面嘴	流	3	2 9	1.0	32 .0
壁	面嘴	流	4	0 &1	1.0	2 5
偏向	噴流	(代	表)	0 46	1.0	0.8
衝突	ミ噴 流	(代	表)	0 23	1.0	0 2
衝	突 噴	蒼	1	0 .11	0.5	0 2
衝	突 噴	流	2	0 34	1 5	0 2

$$T^* = \frac{T - T_b}{T_m - T_b}$$

$$T_{rms}^* = \frac{1}{T_m - T_b} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (T_i - \overline{T})^2}{N}}$$
(4)

ここでTm, T。はそれぞれ主管と枝管の合流前温度, Nは測定データ個数 (48000), T は当該位置における480s間の時間平均温度である。図6の壁面噴流条件では,低温の枝管噴流が枝管側の主管内壁に沿って流れていることがわかる。主管内面近傍では枝管の下流に低温の島状の領域(コールドスポット)が形成されている。これに対応して温度変動強度は枝管の径よりわずかに広がった位置で高くなっている。偏向噴流条件では,枝管噴流は主管の中央部を流れ,主管内面近傍には温度変動強度の大きい領域は形成されない特徴がある。衝突噴流条件では,枝管噴流は相対する主管の内面に衝突した後に流下し,衝突した位置の主管内面近傍で温度変動強度が高くなっている。

コンター図として全体の温度場を把握したうえで、各フローパターンにおける主管内面近傍の z=0 5Dmの位置での周方向分布(内壁から 1 mm 流体側)並びに周方向にみた最大の温度変動強度 の主管軸方向分布をそれぞれ図9、10に示す。周方向分布をみると壁面噴流では、枝管の外側にあたる30°の位置に急峻なピークがあることがわかる。衝突噴流では、枝管の反対側(180°方向)の比較的広い範囲で変動強度が大きい。一方、偏向噴流の変動強度は3パターンの中で最も小さく最大値で比較して約半分である。軸方向分布をみる

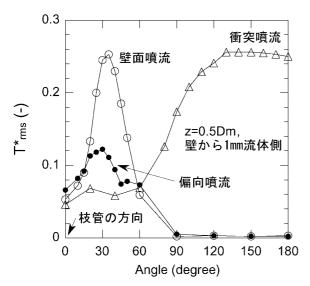


図9 温度変動強度の周方向分布

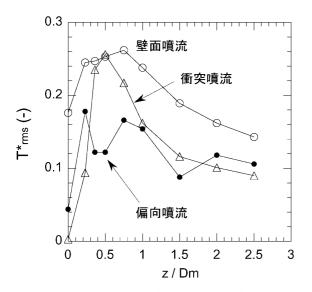


図10 温度変動強度の軸方向分布

と,壁面噴流では,z=02から~10Dmに亘って 広い範囲で変動強度が高い。衝突噴流ではz= 05Dmのごく狭い領域で変動強度が高くその下 流では急激に減衰している。偏向噴流では,軸方 向にみても変動強度の最大値は他の2パターンに 比べ7割程度と低くなっている。

3 *A* 運動量比と絶対流速の違いによる温度変動 強度分布の比較

前節では3種類のフローパターンにおいて,それぞれ温度分布と変動強度分布が特徴的な傾向を持つことを示した。ここでは壁面噴流を例にして,そのフローパターンに分類されたケースで運動量比や絶対流速の違いが温度変動強度分布に与える影響をみる。図11には,運動量比が $M_R=8.1$ と一定で絶対流速が異なる 3 ケースについて,壁面から 1 mm流体側の温度変動強度の周方向分布をz=0.5 Dm,1.0 Dmの 2 点で比較して示す。図より主管内流速にして0.73から2.18 m/sまでの範囲では,変動強度の空間分布はよく一致することがわかる。

図12には同様の空間分布を枝管の流速を 1 m/s に固定し主管の流速を $0.81 \sim 2.9 \text{ m/s}$ まで変化させ,運動量比にして $M_R = 2.5 \sim 32$ までの範囲で $3.5 \sim 32$ をは較した。壁面噴流となる運動量比の範囲は $M_R > 1.35 \sim 32$ であるが,このような広い M_R の範囲でやはり温度変動強度の空間分布がよく一致することがわかる。

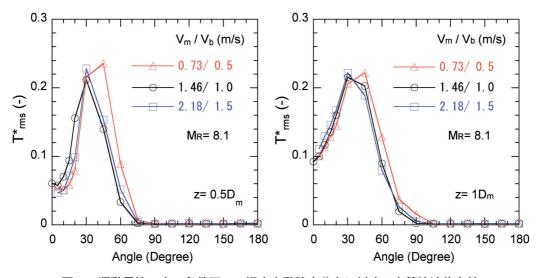


図11 運動量比一定の条件下での温度変動強度分布に対する主管流速依存性

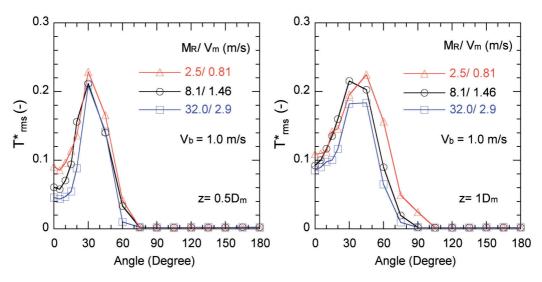


図12 壁面噴流の条件下での温度変動強度分布に対する運動量比依存性

35 温度変動の周波数特性

流体の温度変動が構造材の応力に変換されるう えで,周波数依存性があることが知られている。 先の構造応答関数によれば,応力の周波数応答は 構造物の拘束条件により変化するが,一般的には 高周波数では流体の温度変動に構造物の温度変化 が追従しなくなるために応力は小さく、低周波数 では構造物内の熱伝導により厚み方向の温度勾配 が緩和されることで小さくなる。すなわち、応力 の応答は流体温度の変動周波数について中間の周 波数で最も大きくなり、その値は熱伝達率に依存 する。このような特性を考慮することで,例えば 高周波数に大きなパワーを持つ変動の場合,温度 変動の振幅とサイクル数がたとえ大きくとも応力 が小さくなることで疲労損傷を起こさないため、 合理的な評価が可能となる。このような評価を行 うためには流体側の温度変動について、これまで 疲労評価で行われてきたような温度変動振幅の最 大値と繰り返し数の評価だけでなく,周波数特性 (Power Spectrum Density, PSD)を知ることが必 要である。ここで, PSDは周波数成分に分けた単 位周波数あたりの変動のパワー(振幅の2乗平均) とその周波数分布を意味する。

本試験で得られた構造物近傍の流体温度のPSDを,変動強度が大きい点で重要な壁面噴流と衝突噴流について図13と14に示す。測定位置は主管内面から 1 mm流体側で,変動強度の大きな位置,すなわち壁面噴流ではz=0 5Dm , $\theta=180$ °とした。また,各パターンにおいて運動量比が一定で,流速の絶対値が異

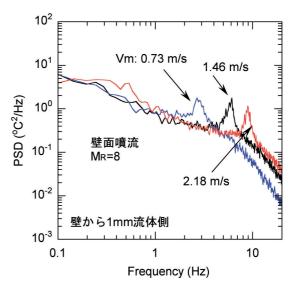


図13 壁面噴流での温度変動の周波数特性

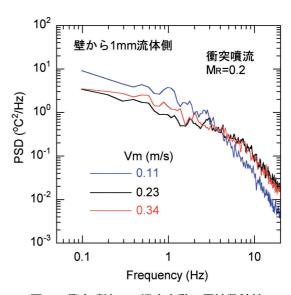


図14 衝突噴流での温度変動の周波数特性

なる3ケースの結果を示す。壁面噴流条件では PSDにピークすなわち卓越周波数成分が見られ, 流速の上昇とともに卓越周波数は高周波数側へ移動していることがわかる。衝突噴流条件では卓越 周波数成分は見られないものの,絶対流速の増加 に従ってPSDの分布が高周波数側へシフトすることがわかる。

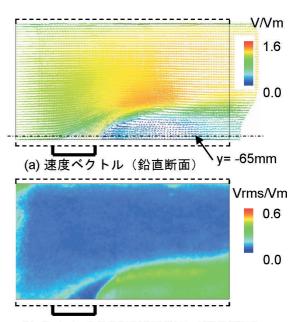
3.6 T管内の速度場

前節までT管内の温度場についてみてきた。こ こでは,温度変動の原因となる流体の混合現象を 把握するため、その速度場をPIVにより測定した。 計測は主管と枝管の中心軸を含む鉛直断面並びに 主管(半径75mm)の中心軸から65mm下方の水 平断面について実施した。水平断面の高さは、枝 管から主管内に噴流が流れ出た直後に相当する。 図15に壁面噴流での測定結果を示す。図中(a)か ら(c)は鉛直断面内の結果 (d)と(e)は水平断 面内の結果であり (a)と(d)は速度ベクトル, (b) は速度変動強度 (c)と(e)は流線である。 速度ベクトルは時間平均 (17s, 256個のデータ) で,その色は流速の計測断面内での絶対値を示す。 速度変動強度については,主管軸方向速度成分 (Vz)の変動のrms値をコンターで示した。試験条 件は温度が25 一様で,流速条件は表1の壁面噴 流代表ケースと同様である。

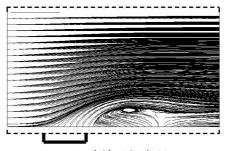
壁面噴流条件では、鉛直断面の速度ベクトル場をみると主管の流れは枝管噴流に遮られて縮流・加速されるとともに、枝管噴流の背後に逆流を含む流速の低い領域があることがわかる。(c)の流線より、主管のT部よりすぐ上流側下方では、主管の流れが枝管の噴流をさけるように主管中心軸側に傾いていることがわかる。図3でみられた流速分布の非対称性はこれを反映している。水平断面の速度ベクトル場並びに流線をみると枝管噴流の背後に1対の渦が形成され、枝管噴流は主管の流れに対する障害物的な役割を果たしていることがわかる。速度変動強度は、枝管噴流の境界領域並びに枝管噴流背後の後流領域で大きいことがわかる。

3.7 壁面噴流条件における変動の周波数特性

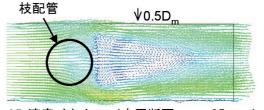
壁面噴流条件での温度変動には,図13に示したように流速に依存する卓越周波数成分が見られた。また,流速場の測定結果から,主管内の流れ



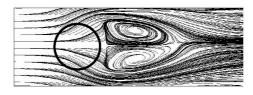
(b) 軸方向成分速度変動強度(鉛直断面)



(c) 流線(鉛直断面)



(d) 速度ベクトル(水平断面: y= -65mm)



(e) 流線(水平断面)

 $V_{\rm m}$ =1.46m/s, $V_{\rm b}$ =1.0 m/s, $M_{\rm R}$ =8.2

図15 壁面噴流での速度場

が枝管噴流を障害物として渦を形成していることがわかった。そこで、枝管噴流が枝管の径をもつ円柱であるとしたときの円柱背後のカルマン渦を考えた。すなわち、枝管の口径(D_b)と主管平均流速(Vm)を代表量とするStrouhal数(St)を無

次元周波数として用いることとした。

$$St = \frac{f D_b}{V_m} \tag{5}$$

ここで f は変動の周波数である。また,壁面噴流の速度場について温度計測点に近い位置での主管軸方向流速成分のPSDを求めた。ただし,速度場の計測データでは,用いたPIVシステムの限界からサンプリングスピードが15Hzであるため,PSDとしては75Hz以下のデータのみが得られる。

図16に、壁面噴流条件(MR=0 21)で主管流速が1 46,0 73m/sの2ケースについて、速度と温度のPSDを横軸にSt数をとって示す。各PSDはそれぞれ主管と枝管の温度差、主管流速の2乗で規格化した。図より、流速の絶対値によらず温度変動、速度変動ともにほぼ同じSt値(~0 2)で卓越周波数成分を有している。この周波数は円柱後流におけるカルマン渦の放出周波数13)とよく一致する。すなわち、自由な流れ場におかれ、円柱の直径を代表長さにとったRe数が1 000以上の場合に渦列の放出周波数はSt=0 21程度となる。平行平板の流路中では0 2程度と若干小さくなることが知られている。本試験は円筒流路中の流れに相当し、枝管の口径を代表長さにとったRe数は36 000と72 000である。

これより,壁面噴流条件における温度変動は枝

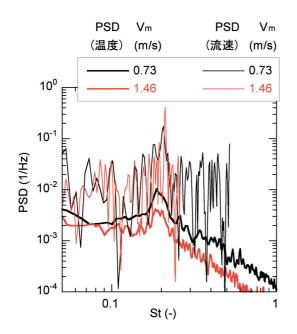


図16 流速変動と温度変動の周波数特性の比較(壁面 噴流)

管の噴流を障害物としたカルマン渦的な流れが大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

4. 平行三噴流体系の混合現象

4.1 温度並びに温度変動強度の空間分布

次に炉心出口部の流れを単純化した体系として 平行三噴流体系での試験結果について示す。本体 系では、水試験のほかに同一の形状/寸法でナト リウム試験(*)を実施しているが、ここでは温度変 動の周波数特性に着目し、水試験の結果のみにつ いて述べることとする。

試験は,3本の噴流が同じ流速で吐出する等速条件で吐出流速をパラメータとして実施した。試験条件を表2に示す。本体系での混合現象を把握する意味で,図17に吐出流速05m/sのケースについて,壁から20mm離れた鉛直断面における時間平均の温度分布,温度変動強度を示す。温度分布をみると,低温と高温の噴流が確認できるとともに,温度変動強度はそれら噴流の間の領域で高いことがわかる。

表 2 平行三噴流試験の実験条件

ケース	高温噴流(両側) Vh(m/s)	低温噴流 中央) Vơ(m/s)
ケース 1	0.3	0.3
ケース 2	0 4	0 4
ケース 3	0.5	0.5

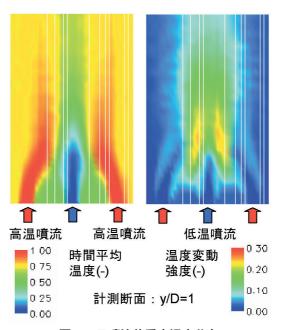


図17 三噴流体系内温度分布

4.2 温度変動の周波数特性

温度変動強度が高い位置について、温度変動の 周波数特性をPSDとして図18に示す。図より、流 速値に依存する卓越周波数成分が見られる。この 卓越成分は、可視化観察から噴流が左右に振動す ることに起因するものであると考えられる。流速 の絶対値の上昇とともに卓越周波数が高周波数側 にシフトしており、この傾向はT管でも見られた。

5. 温度変動の周波数特性に関する考察

T管内の温度変動では、流速依存性をSt数で整理することにより、壁面噴流条件で見られた卓越周波数成分の無次元周波数が一致することを示した。35節に示したように応力を評価するうえで温度変動の周波数特性を推定することには重要な意味がある。そこで温度変動のPSDを以下のように無次元化することを考える。

$$PSD^* = \frac{PSD}{\Lambda T^2} \cdot \frac{V}{D}$$
 (6)

ここでATは合流前あるいは混合前の温度差, V とDはそれぞれ代表流速と代表長さである。式(6)は、PSDが単位周波数あたりの変動のパワーであることから、周波数をStの考え方で無次元化したものである。VとDはT管体系では主管平均流速と枝管口径、平行三噴流体系では低温噴流の平均吐出流速と噴流が出るスリット幅とした。St数も同様のVとDで定義した。

図19と20にT管体系で得られた壁面噴流条件,

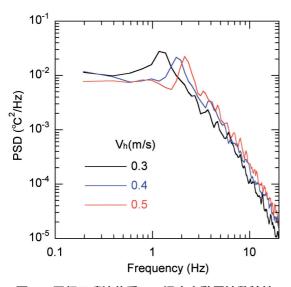


図18 平行三噴流体系での温度変動周波数特性

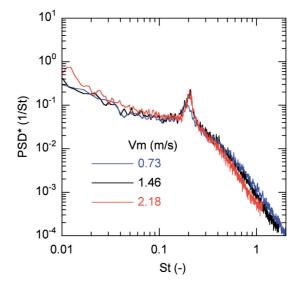


図19 T管体系壁面噴流での無次元化PSD

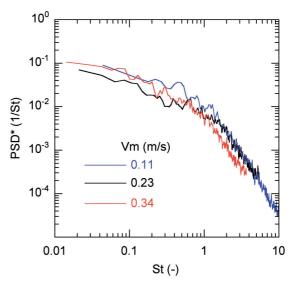


図20 T管体系衝突噴流での無次元化PSD

衝突噴流条件での無次元PSDを示す。また図21に 平行三噴流体系で得られた無次元PSDを示す。図 から体系が大きく異なり、卓越周波数成分を有す る場合もそうでない場合も、無次元PSDとSt数で 整理することにより、流速の絶対値によらずフ ローパターンが一致していれば、温度変動の周波 数特性を概略1本の曲線でまとめて表せることが わかる。

6.まとめ

高サイクル熱疲労現象は熱流動と構造/材料の 境界分野となる。本報告では荷重条件を与える流 体側の温度変動特性について,T字合流管並びに

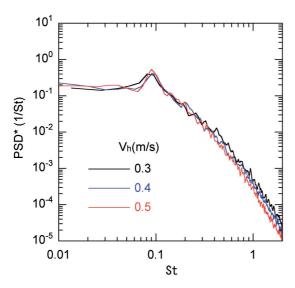


図21 平行三噴流体系での無次元化PSD

炉心出口の混合部を単純化した平行三噴流体系で 水試験を行い,温度変動強度の空間分布と周波数 特性について評価した。

温度変動強度は当然ながら低温の流れと高温の流れの境界部で大きくなる。 T管の壁面噴流条件など流動条件によっては、壁近傍で、ある空間領域だけ低温の領域が島のようにできるコールドスポットが形成され得ることを明らかにした。このようなスポット状の温度分布はその領域が時間的に変化することで応力のサイクルが生じ、板厚方向の温度勾配による応力とは異なる特性を有する点で注意が必要である。

温度変動の周波数特性について各体系で流速値をパラメータとしてPower Spectrum Density (PSD)を求めた。その結果,流速の比などにより混合部のフローパターンが同一であれば,流速の絶対値によらずSt数と無次元PSDにより卓越周波数成分を含めて周波数特性を一般化して評価できることがわかった。

このような周波数特性は応力を評価するために 重要であり,フローパターンを見極めたうえで一般化して評価できる知見を得た意味は大きい。流 体温度変動の周波数特性から構造物の応力と疲労 損傷を評価する手法についても著者等により別途 検討が進んでいる。

謝辞

本研究を実施するうえで慶応義塾大学の菱田公 一教授に多くのご助言を頂いた。T管試験装置を 設計し計測手法を開発する際には,川崎重工(株)の西村元彦博士に多大な貢献を頂いた。また,試験の実施,データの評価において常陽産業(株)の伊藤真美氏をはじめ試験運転員の方々に協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) "配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針(JSME S017-2003)", 日本機械学会基準 (2003)
- **2**) M. Wakamatsu, H. Hirayama, S. Moriya, et al.: "Study on high-cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (1), "Proc. of 11th Int. Conf. on Nucl. Eng., Tokyo, Japan, ICONE11-36208 (2003).
- 3) T. Kawamura, K. Shiina, S. Moriya, et al.: "Study on high-cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (2), "Proc. of 11th Int. Conf. on Nucl. Eng., Tokyo, Japan, ICONE11 36182 (2003).
- 4) S. Moriya, T. Fukuda, T. Matsunaga, et al.: "Establishment of a JSME code for the evaluation of high-cycle thermal fatigue in mixing tees, "Proc. of 6th Int. Top. Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS6), Nara, Japan, N6P065 (2004).
- 5) N. Kasahara, H. Takasho and A. Yacumpai: Structural response function approach for evaluation of thermal striping phenomena, "Nuc. Eng. Des., Vol. 212, pp281-292 (2002).
- 6) A. Fissolo, A. Forestier, S. Chapuliot, et al.: Advances in thermal fatigue investigations performed in CEA for French PWR piping, "Proc. of 3rd Int. Conf. on Fatigue of Reactor Component, Seville, Spain (2004).
- 7) M. Igarashi, M. Tanaka, S. Kawashima, and H. Kamide: Experimental Study on Fluid Mixing for Evaluation of Thermal Striping in T-Pipe Junction, Proc. of 10th Int. Conf. on Nucl. Eng., Arlington, USA, ICONE10-2225 (2002).
- 8) M. Igarashi, M. Tanaka, N. Kimura, and H. Kamide: "Study on Fluid Temperature Fluctuation and Transfer to Wall in a Mixing Tee, "Proc. of 11th Int. Conf. on Nucl. Eng., Tokyo, Japan, ICONE11-36299 (2003).
- 9)五十嵐 実 止出 英樹 田中 正暁 木村 暢之: "高サイクル熱疲労に関するT字合流管内温度変動 特性の研究",日本機械学会論文集(B編),70巻700 号 pp.126 133(2004)
- **10)** N. Kimura, M. Nishimura, H. Kamide et al.: "Study on Convective Mixing for Thermal Striping Phenomena, "JSME Int. Journal, Series B, Vol. 45, No. 3, pp.592-599 (2002).
- 11) N. Kimura, M. Igarashi, and H. Kamide: Investigation of convective mixing of triple jet Evaluation of

- turbulent quantities using particle image velocimetry and direct numerical simulation, 'Proc. of the 8th Int. Symposium on flow modeling and turbulence measurements, Tokyo, Japan, pp. 651-658 (2001).
- 12) J. Sakakibara, K. Hishida, and M. Maeda: "Simultaneous Measurements of Two Dimensional Velocity and Temperature Field Using Correlation Technique and LIF, "Flow Visualization VI Spring-Verlag. Proc. of the 6th Int. Symp. on Flow Visualization, pp.677-681

(1992).

- **13)** H. Schlichting: Boundary-Layer Theory, 'New York: McGraw-Hill, 32 (1968).
- 14) N. Kimura, H. Miyakoshi, and H. Kamide: Experimental study on thermal striping phenomena for a fast reactor, Transfer characteristics of temperature fluctuation from fluid to structure, 'Proc. of 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, TED-AJ03-159 (2003).