

## 配管系サーマルストライピングを引き起こす 流体振動現象の解明\*

### Elucidation of Fluid Vibration Phenomenon causing Thermal Striping of T-junction Piping System

檜原秀樹\*\*・岩本幸治\*\*・十河基介\*\*・越智順治\*\*

Hideki HIBARA\*\*, Yukiharu IWAMOTO\*\*, Motosuke SOGO\*\*  
and Junji OCHI\*\*

Recently, in T-junction piping systems of plants, fluid temperature fluctuations due to mixing of hot and cold fluids induces thermal fatigue of structure. This phenomenon is called thermal striping and its study is significant in term of the safety and design of a fast reactor.

In this study, in order to reduce fluid temperature fluctuations, the turbulence promoter is installed and the flows downstream of T-junction are investigated experimentally. From the experimental results, effects of turbulence promoter on flow characteristics are examined. It is clarified that secondary streams in pipe cross sections becomes stronger and diffusion of momentum is promoted.

*Keywords* : Flow Visualization, Vortex, Thermal Striping, Jet, Pipe Flow, Dye Injection Method

#### 1. 緒言

各種プラントの配管系では、分岐・合流部が数多く用いられており、そのタイプは多岐にわたる。一般に、分岐・合流部では、流れが複雑となるため、流体混合に起因した様々な問題が発生している。特に、主管に枝管が直角に接続するT字管配管合流部では、高温と低温の流体が混合する際に、合流部下流に低周波の温度ゆらぎが発生し、これにより機器や配管に高サイクルの熱疲労が生じることが報告されている<sup>(1)</sup>。この現象はサーマルストライピングと呼称され、管路の亀裂発生の要因となる可能性があることから高速炉プラントの設計では十分な留意が必要となる。最近、フランスの高速原型炉「フェニックス」等の海外炉において、サーマルストライピングに起因したナトリウム漏洩事象が主冷却系配管合流部において起こり、この原因が従来の知見のもでは十分に説明できない状況が生じている<sup>(2)</sup>。このような状況から、我々は、T字形配管合流部の流れに関する研究を開始し、合流部の流れは流動条件により大きく、付着流、偏向噴流、衝突噴流に分類できることや、偏向噴流の場合に

\* 可視化情報 vol.24- Suppl. No.2 (2004), 可視化情報学会, 全国講演会(愛媛 2004)講演論文集,  
pp.135-138 より引用

\*\* 松山市文京町3 愛媛大学工学部 機械工学科

\*\* Department of Mechanical Engineering, Ehime University .E-mail hibara@dpc.ehime-u.ac.jp

原稿受理 平成16年10月31日

はサーマルストライピングの原因と成り得る周期的な渦放出現象が起ることを見出した<sup>(3)</sup>。

そこで本研究では、熱疲労破損の原因となる流体温度ゆらぎの低周波数成分（渦放出現象により発生）と高振幅成分（衝突噴流により発生）を低減するために、くさび形状の乱流プロモータを設置し、合流部の流れの可視化および断面内の流速測定を行い、乱流プロモータの設置による配管系サーマルストライピングの緩和効果について評価・検討した。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置

使用した装置の概略および座標系を Fig.1,2 に示す。溶液タンクの水はポンプによりオーバーフロータンクに送られた後、そのヘッド差により主管内に供給される。一方、枝管内には、ポンプにより供給される。両管内に供給された水はT字形合流部で合流した後、主管の下流端に設けた背圧調節装置を通り、再び溶液タンクへと戻る。主管には 40×40mm、長さ 3000 mm の正方形管路を、枝管には管径 12mm [口径比(主管水力直径/枝管径)  $\alpha = 3.33$ ]、長さ 600mm の直円管を用いた。なお、枝管は主管入口から 2500 mm の位置でT字形合流部により主管路に接続されており、T字形合流部には高さの異なる3種類のくさび形状の乱流プロモータ（主管直径に対する乱流プロモータの高さの比： $\gamma (=D_m/H) = 4, 5, 3.33, 8$  : Fig.3 参照）が取り付け可能な構造になっている。

### 2.2 実験方法および条件

実験は、まず流れ場の概略を把握するために、作動流体に水を用いた流れの可視化を色素流脈法を用いて行った。その後、管路内の流動状態を明らかにするために、3次元レーザードップラー流速計を用いて断面内の流速測定を行った。

流れの可視化は、主管流のレイノルズ数  $Re (= Wm \cdot Dm / \nu) = 1000 \sim 5000$ 、流速比  $\beta (= Wm / Wb) = 0.2 \sim 5$  の下でプロモータの高さを変えて行った。流速測定はレイノルズ数  $Re (= Wm \cdot Dm / \nu) = 1000$ 、流速比  $\beta (= Wm / Wb) = 0.2 \sim 5$  の下でプロモータの高さを  $\gamma (= Dm / H) = 4, 5, 3.33, 8$  変えて行った。

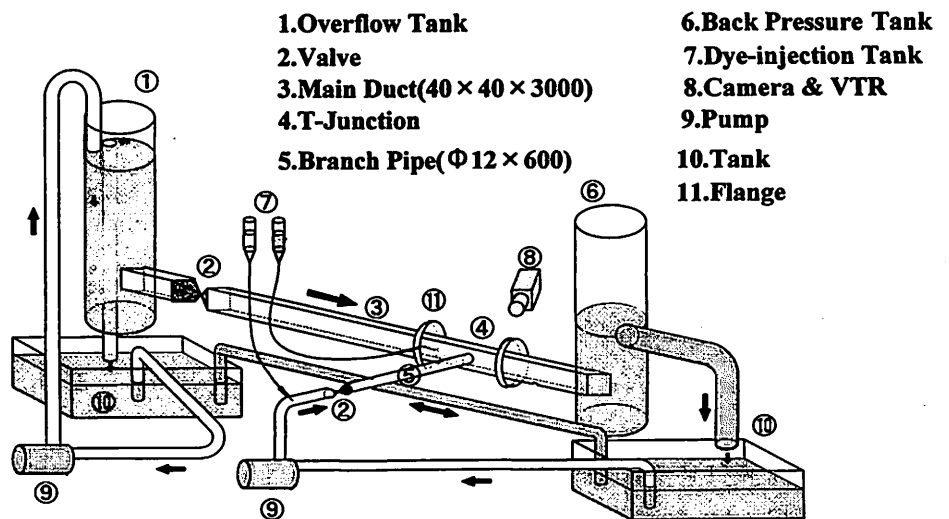


Fig.1 Experimental apparatus

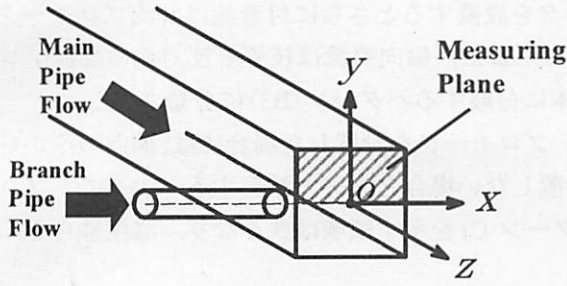


Fig.2 Coordinate system

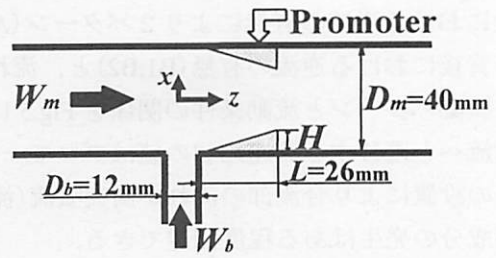


Fig.3 Outline of promoter

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 流れの概略

$Re=1000$  における代表的な流動パターンの可視化の写真を Fig.4 に示す. 合流部の流れは乱流プロモータの有無によらず3つの流動パターン, すなわち付着流(パターン A), 偏向噴流(パターン B),

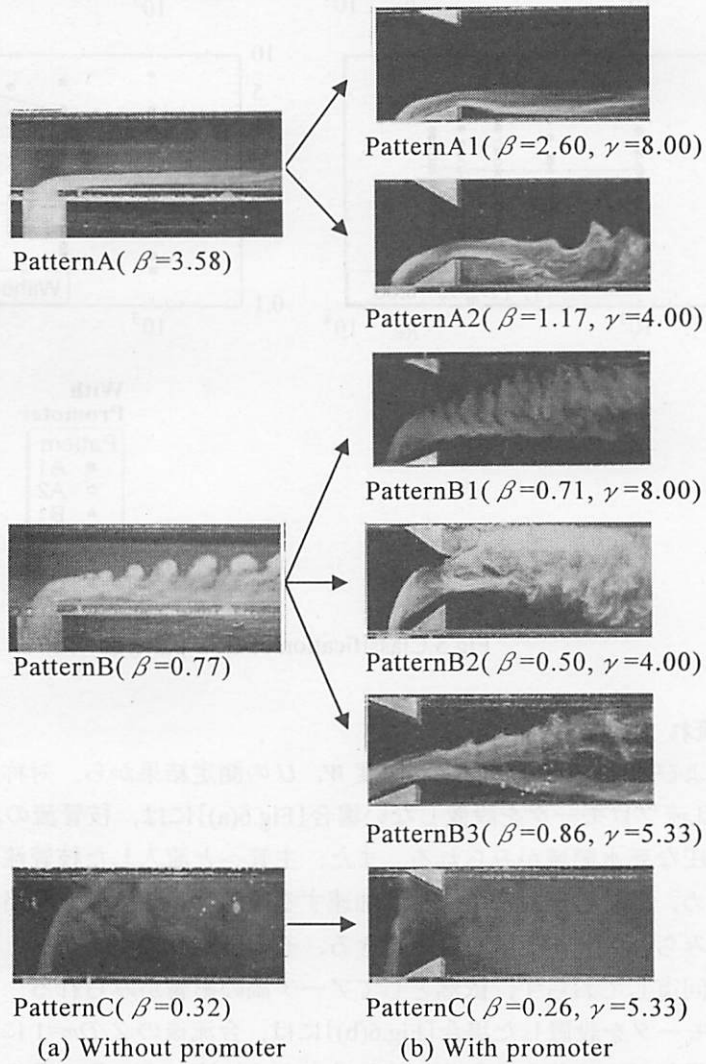


Fig.4 Photograph of flow patterns ( $Re=1000$ )

衝突噴流(パターン C)に分類できるが、プロモータを設置するとさらに付着流は乱流プロモータの背後における逆流の有無により2パターン(A1,A2)に、また、偏向噴流は枝管と反対側の乱流プロモータ背後における逆流の有無(B1,B2)と、流れが2本に分岐するパターン(B3)に分類される。

流動パターンと流動条件の関係を Fig.5 に示す。プロモータを設置した場合には、偏向噴流から衝突噴流へと遷移する流速比  $\beta$  の値はプロモータを設置しない場合と比べて減少する。よって、プロモータの設置により合流部の流れが衝突噴流(流動パターン C)を示す領域は狭くなり、温度ゆらぎの高振幅成分の発生はある程度回避できる。

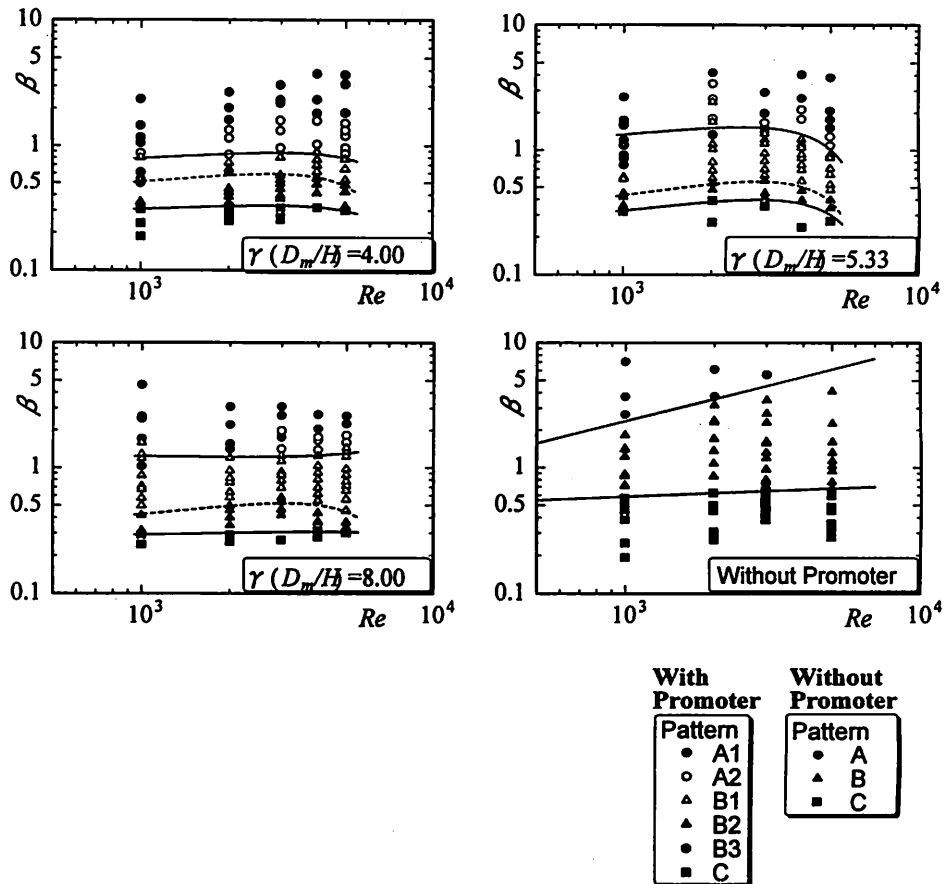
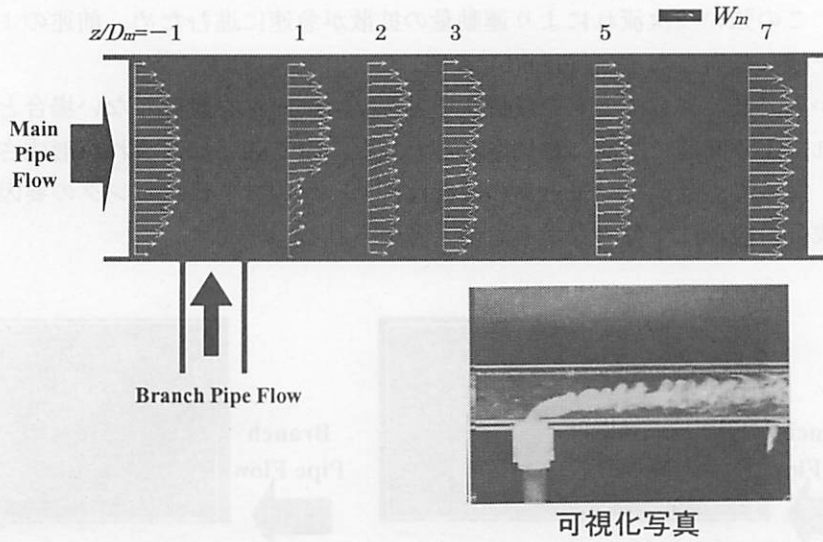


Fig.5 Classification of flow patterns

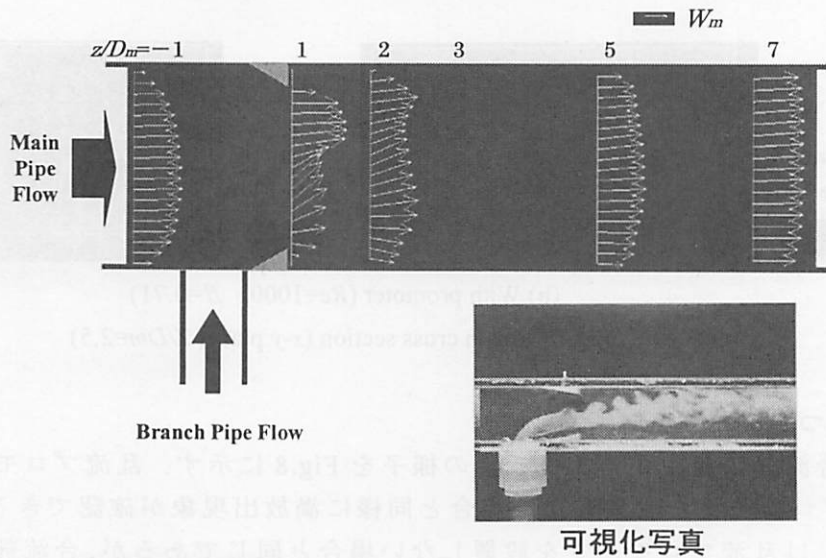
### 3.2 断面内の流れ

まず、軸方向および水平方向の時間平均速度  $W$ ,  $U$  の測定結果から、対称水平面内の流れ場の様子を Fig.6 に示す。乱流プロモータを設置しない場合[Fig.6(a)]には、枝管流の流入直後の  $Z/Dm=1$  において、枝管側に低圧な死水領域がみられる。また、主管へと流入した枝管流の影響により主管内の流路面積が狭まるため、枝管と反対側で流れは加速する。 $Z/Dm=2$  では、管路中央部に低速流体、その両側に高速流体がみられ、アーチ渦が確認できる。その後、 $Z/Dm=5\sim7$  へと流下しても、合流前の一様な速度分布には回復しておらず、依然としてアーチ渦の影響がみられる。

一方、乱流プロモータを設置した場合[Fig.6(b)]には、合流後の  $Z/Dm=1$  において、プロモータの設置により流路の断面積がより狭まるため、流れは大きく加速している。そのため、渦はより上流側で形成され、より高速で下流方向に移送される。また、プロモータ背後の流れは死水し、壁面から流れはく離している。その後、 $Z/Dm=2$  付近で流れは管壁に再付着し、さらに下流の  $Z/Dm=5\sim7$  へと流下するにつれて、速度分布はほぼ一様な分布へと移行する。



(a) Without promoter ( $Re=1000$ ,  $\beta=0.71$ )



(b) With promoter ( $Re=1000$ ,  $\beta=0.71$ )

Fig.6 Flow in horizontal plane ( $z$ - $y$  plane:  $y=0$ )

次に、水平方向および垂直方向の時間平均速度  $U$ ,  $V$  の測定結果から、断面内の二次流れの速度ベクトル図を Fig.7 に示す。

枝管からの流れは主管内に流入すると主管流と衝突し、枝管軸方向から主管軸方向へとその向きを大きく変える。この過程で、枝管からの流れには遠心力の作用により、ちょうど曲がり管の流れと同様に、対称水平面付近において左から右へ、上下壁付近に右から左へと向かう二次流れが誘起される。さらに主管の枝管側は枝管からの流れの背後となり、低圧な死水領域となり、この低圧領域に上流から主管流が流れ込む。このため、乱流プロモータを設置しない場合 [Fig.7(a)] には、断面内に反時計回りに回転する流れがみられるようになる。

一方、乱流プロモータを設置した場合 [Fig.7(b)] についても、枝管流が通過する付近に反時計回りに回転する大きな渦がみられるが、その渦より枝管側には、プロモータを設置しない場合には観察されない、時計回りの小さな渦もみられる。また、二次流れは乱流プロモータを設置しない場合と比べて

強い。よって、この強い二次流れにより運動量の拡散が急速に進むため、前述のように軸方向の流れは下流でほぼ一様な分布となる ([Fig.6(b)]参照)

以上のことから、乱流プロモータを設置すると、プロモータを設置しない場合と比べて、渦はより上流で形成され、より高速で下流に移送される。また、より強い二次流れが形成され、運動量の拡散が急速に進む。従って、乱流プロモータの設置は、サーマルストライピングの要因である、温度ゆらぎの低周波数成分の緩和に十分つながるものと考えられる。

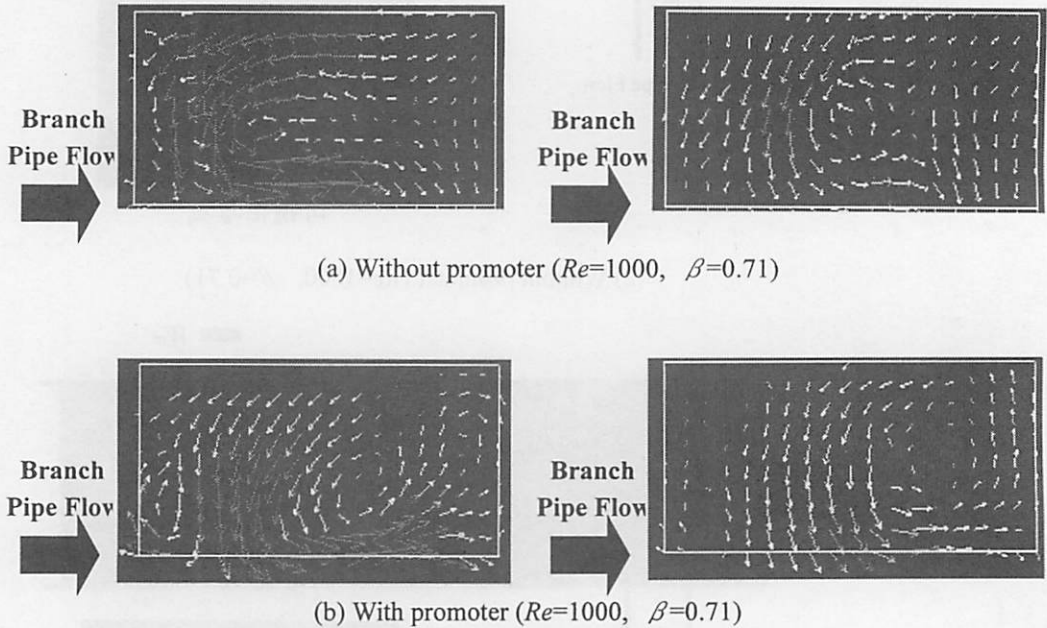
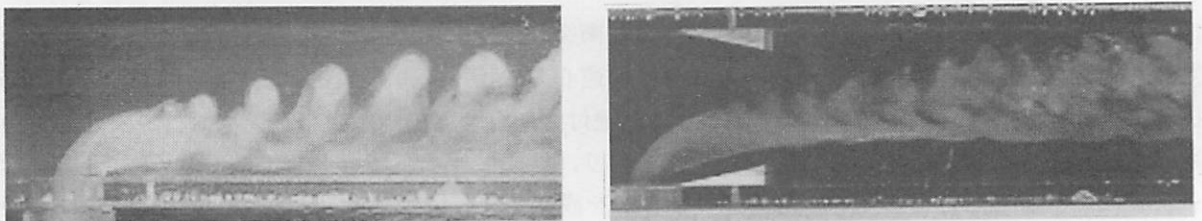


Fig.7 Flow in cross section ( $x$ - $y$  plane,  $Z/D_m=2,5$ )

### 3.3 渦について

最後に、合流部に発生するアーチ渦の様子を Fig.8 に示す。乱流プロモータを設置した場合にも、プロモータを設置しない場合と同様に渦放出現象を確認できる。渦生成の仕組みも基本的には乱流プロモータを設置しない場合と同じであるが、合流部に観察される渦は、プロモータを設置しない場合にみられるようなきれいなアーチ渦ではなく、アーチの一部がとぎれた状態の渦であった。また、乱流プロモータを設置した場合には、プロモータを設置しない場合に比べて、渦はより上流で形成されるとともに、下流方向への移送速度もより高速となる。



(a) Without promoter ( $Re=1000$ ,  $\beta=0.71$ )      (b) With promoter ( $Re=1000$ ,  $\beta=0.71$ )

Fig.8 Behavior of vortex

#### 4. 結 論

乱流プロモータを設置した T 字形配管合流領域の流れについて、流れの可視化および流速測定を行った結果、以下のような知見を得た。

- (1)乱流プロモータを設置すると、偏向噴流から衝突噴流へと遷移する流速比  $\beta$  の値は乱流プロモータを設置しない場合と比べて減少し、合流部の流れが衝突噴流(流動パターン C)を示す領域は狭くなる。
- (2)乱流プロモータを設置すると、渦はより上流側で形成され、より高速で下流方向に移送される。
- (3)乱流プロモータを設置すると、より強い二次流れが形成され、運動量の拡散が急速に進む。

#### 5. 謝 辞

本研究は、核燃料サイクル開発機構の「先行基礎工学研究」ならびに愛媛大学工学部学部長裁量経費により実施された。ここに謝意を表する。

#### 文 献

- (1)通産省・資源エネルギー庁編 高サイクル熱疲労に関する技術基準運用ガイドライン (1999).
- (2)Muramatsu, T., Proc. The 15th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Vol.IV, 217-224(1999).
- (3)檜原秀樹・村松壽晴・平田直樹・須藤浩三, 機論, 70-693、B(2004),1192-1200.