

T 字合流配管部の熱疲労現象解明に向けた管壁温度分布の測定
— 熱電対を用いた温度測定方法の検討 —

Measuring of Wall Temperature to Investigate Thermal Fatigue
at a T-Junction Pipe
— A Study on the Temperature Measuring Method Using Thermocouples —

三好 弘二 (Koji Miyoshi) 中村 晶 (Akira Nakamura)



株式会社 **原子力安全システム研究所**

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

T字合流配管部の熱疲労現象解明に向けた管壁温度分布の測定 — 熱電対を用いた温度測定方法の検討 —

Measuring of Wall Temperature to Investigate Thermal Fatigue
at a T-Junction Pipe
— A Study on the Temperature Measuring Method Using Thermocouples —

三好 弘二 (Koji Miyoshi)*¹ 中村 晶 (Akira Nakamura)*¹

要約 原子力発電所の配管における合流部では温度差のある流体が混合する場合があります。このような部位に熱疲労が生じる可能性がある。熱疲労を考慮した設計を行うためには、構造材中の温度を適切に予測することが重要である。本研究では、熱電対を取り付けたT字配管を用いた高低温水合流部における管壁温度測定実験を計画し、その手法の妥当性について検討を行った。その結果、熱応力評価のためには熱電対による測定温度データから配管内壁温度を推定する必要があること明らかにし、その推定手法を示した。加えて、管壁に熱電対を埋め込み時はその背面の空隙を低減する必要があり、その施工方法として高真空環境でのロウ付け手法が効果的であることを明らかにした。

キーワード 熱疲労, T字配管, 温度変動, 数値解析, 熱電対, ロウ付け

Abstract Thermal fatigue may occur where the high and low temperature fluid is mixed at T-junction of pipe in nuclear power plants. In consideration of thermal fatigue for structural design, it is important to evaluate temperature in structures. In this study, an experimental method using a T-junction pipe with installed thermocouples was verified. It was cleared that wall temperatures should be calculated from measured data obtained by the thermocouples to evaluate thermal stress. Then the calculated method was developed. It was also determined thermocouples should be installed in pipes without voids. The best method was proposed in which thermocouples were soldered into wall in a high vacuum atmosphere.

Keywords thermal fatigue, T-junction pipe, temperature fluctuation, numerical simulation, thermocouple, solder

1. 序論

種々のプラントの配管合流部では、温度の異なる流体が混合することで発生する温度変動いわゆるサーマルストライピング現象により、配管材料内部に熱疲労が発生する可能性がある。1999年に生じた日本原子力発電(株)敦賀2号機の再生熱交換器連絡配管からの漏洩事象はこのサーマルストライピング現象による熱疲労が損傷の要因の一つであった⁽¹⁾。この事象を契機に日本機械学会は温度変動現象による構造物への影響評価手法を確立するため、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」⁽²⁾(以下、

指針)を策定した。指針は、水を内包する配管の高低温水の合流・混合により発生する温度ゆらぎや閉塞分岐管滞留部に発生する熱成層化現象に起因する熱疲労に対する構造健全性評価方法を定めている。指針評価フローにおいて、最終的な評価ステップとして、妥当性が示される場合は別途、詳細評価を実施することを認めているがその具体的な評価方法の記載はない。詳細評価には例えば数値解析を用いて、具体的な流動条件・配管形状に対して熱荷重を算出することが必要である。笠原らは指針⁽²⁾の中でサーマルストライピング現象を特徴付ける素過程として、以下の過程を提示している。

*1 (株)原子力安全システム研究所 社会システム研究所

- (1)主流における温度ゆらぎの生成
- (2)境界層内における温度ゆらぎの減衰
- (3)非定常熱伝達の影響による温度ゆらぎの減衰
- (4)熱伝導による構造材内部の温度差の緩和

上記、(4)に示す過程の結果もたらされる構造材中における温度ゆらぎに起因する応力分布の変動が、材料の疲労強度との関係により熱疲労をもたらすことから、熱疲労の詳細評価においては流体側の温度分布等の現象解明に加え、構造材内部の温度分布を適切に予測することが課題である。

熱疲労評価技術開発のため構造材内温度分布測定を含めた実験は国内外で進められており、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）⁽³⁾では、水を対象とした T 字合流配管部における配管内表面温度データを採取している。この実験では、熱電対を用い枝管からの噴流下流部の 25 点において温度を計測している。また、熱電対をツリー状にした計測装置を管内に挿入し壁近傍の流体温度を測定することにより局所的な非定常熱伝達率を明らかにしている。国外では、仏 Civaux 発電所の余熱除去系統で発見された熱疲労による配管のき裂発生原因を調査するため高低温水合流配管部における熱疲労研究が進められている。フランス電力公社 (EDF) でも、水を対象とした T 字合流配管部における配管内表面温度データ⁽⁴⁾を採取している。この実験では流体側と壁側の温度を同時に計測できるように熱電対を組み合わせた Coehf とよばれるセンサを配管に埋め込み、枝管からの噴流下流部の 52 点において計測している。この実験も原子力機構の実験同様、局所的な非定常熱伝達率を明らかにすることを目的としている。

筆者らはこれまで構造内における応力変動を予測するため実験または数値解析により得られた温度分布から応力分布を求める手法として IMAT-F (Integrated Methodology of Assessment for Thermal-Fatigue) を開発してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この評価システムの特徴として、図 1 に示すような熱疲労評価の流れにおいて労力を要する実験・数値解析の結果から温度時刻歴データを作成するデータ変換・時間空間補間のプロセス、また有限要素法 (FEM) を用いた解析で得られた応力分布から最大応力や疲れ累積係数を算出するプロセスを省力化した点があげられる。これにより図 1 で提案したフローによる熱疲労評価の自動化が図られている。熱疲労評価では、予測すべき熱応力の評価精度は構造材表面温度の評価

精度に依存し、その温度を適切に予測することが必要である。原子力機構や EDF にて進められている壁近傍の熱伝達率の解明による配管内表面温度の予測も期待されるが、図 1 に示したフローからわかるように、配管内壁面温度を適切に実験で測定することで応力評価は可能である。また、熱伝達率の評価が不要であるため、より真値に近い熱応力を算出することができる期待される。そこで、本研究では水を対象とした T 字合流配管部の温度ゆらぎを対象に配管内表面の温度データを採取する実験により応力評価を行うことを目的とした。本目的を達成するためには実験計画にあたり特に以下の点が重要となる。

- ①温度ゆらぎにより発生する応力変動が最大となるような箇所を捉えられる空間分布の温度を測定すること
- ②熱伝導解析の境界条件として用いるため、できる限り配管内表面に近い温度を測定すること

本報告では、上記 2 点を踏まえ、管壁温度分布測定実験のための試験部の設計およびその妥当性の検証を行った結果を示す。

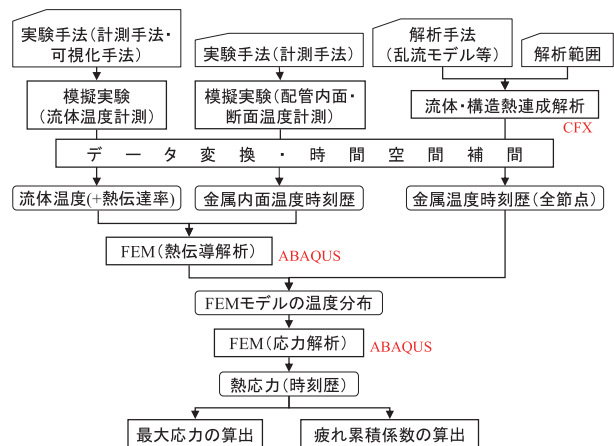


図 1 熱疲労評価フロー⁽⁵⁾

2. 熱電対設置位置の検討

2.1 数値解析による熱電対設置位置の検討手法

T 字合流配管部における温度ゆらぎを対象とし、配管内表面の温度データを熱電対により採取して、

温度ゆらぎにより発生する応力変動が最大となるような箇所を推定し得るかどうかを検討する。そのために、以下に示す数値実験を行った。

- ① CFX による流体・構造熱連成解析により配管内の温度分布を算出する。
- ② 得られた温度分布の時刻暦を用い、FEM の要素に対してマッピングした温度データから応力解析を行い、応力分布を算出する。これを数値実験上の真の応力と考える。
- ③ ①で得られた温度分布のうち表面温度データのみ選び、そのうち仮定した熱電対設置位置に相当するデータを抽出する。
- ④ ③のデータから IMAT-F⁽⁵⁾,⁽⁶⁾ を用い空間補間を行い FEM の要素にマッピングした表面温度データを作成する。
- ⑤ ④で得られた表面温度データから熱伝導解析および応力解析を行い、応力分布を算出する。
- ⑥ ⑤と②で得られた応力分布を比較し、仮定した熱電対設置位置が妥当かどうか評価する。

流体・構造熱連成解析の対象とする配管については、今後、本研究において、壁温を測定する実験として計画している原子力機構が行った試験装置⁽³⁾に近い体系とした。

2.2 流体・構造熱連成解析の実施

1) 解析条件

原子力機構で実施された実験⁽⁷⁾のうち、壁面噴流条件から 1 ケースを代表的な流れ場として選び、次の条件で数値解析を行った。この実験ではアクリル配管であるため壁温の測定を行っていないが、本研究では壁温が得られた後の応力計算における熱電対配置を検討するため、仮に管壁をモデル化した。管断面平均流速は、主配管 $V_m = 1.46$ m/s、枝配管 $V_b = 1.0$ m/s であり、温度条件は主配管 $T_m = 48^\circ\text{C}$ 、枝配管 $T_b = 33^\circ\text{C}$ である。境界条件としては、流入境界では管断面平均流速で一様な流速分布を与え、温度も一様分布を与えた。配管外表面では断熱条件、流体・構造境界では Non-Slip 条件とした。解析コードは ANSYS 社の CFX を、乱流モデルは DES モデルを用いた。流体・構造の物性値は本解析範囲ではあまり変化しないとみなし 40°C の値⁽⁸⁾ を一定として与えた。初期条件は、流体側は主流方向に流速 1.5 m/s、温度 40°C 、構造側は温度 40°C で解析範囲で一様とした。熱伝達率は、このモデルと壁関数に

よって決定されるが、今回は熱電対による壁温の計測位置の検討を目的としているため、熱伝達率の評価精度は以後の検討には大きく影響しないと考えた。また、筆者らは上記、境界条件乱流モデルにて流体の温度変動を対象に原子力機構が行った実験結果と比較し、精度よく予測可能なことを確認している⁽⁹⁾。

2) 解析範囲

解析範囲を図 2 に示す。解析範囲は、主管と枝管の合流ポイントから主管側は上流側に 150mm、下流側に 600mm、枝管側は上流側に 100mm とした。また、本解析に用いた解析格子を図 3 に示す。格子幅については、一般的に壁面近傍で目標とする無次元距離 y^+ を制御することが用いられる。ここで y^+ は無次元距離 ($y \times u^*/\nu$)、 y は壁面からの距離、 u^* は摩擦速度 ($(\tau_w/\rho)^{(1/2)}$)、 ν は流体の動粘度、 τ_w は壁面せん断応力、 ρ は流体の密度である。今回の解析で使用する最小格子幅としては y^+ は平均流速に対して 10 程度になるように設定した。以下、壁近傍の格子幅を示す。

① 流体領域壁近傍

主管領域: 0.1mm 間隔 枝管領域: 0.1mm 間隔

② 構造領域壁近傍

主管領域: 0.1mm 間隔 枝管領域: 0.06mm 間隔
総ノード数は 1,734,158 (流体 1,310,234、構造 423,924) となった。

3) 時間刻み幅

計算の時間刻み幅を検討するために、式 (1) で表されるクーラン数を目安に Δt を算出した。

$$C = U\Delta t / \Delta x \quad (1)$$

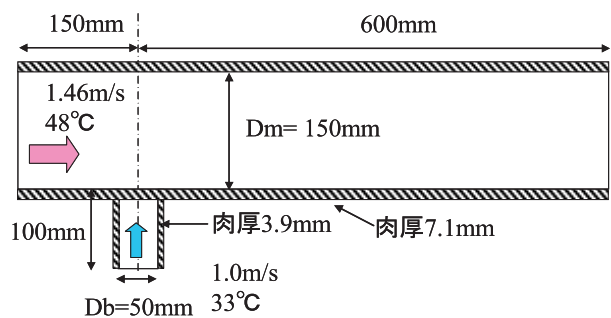


図 2 解析範囲

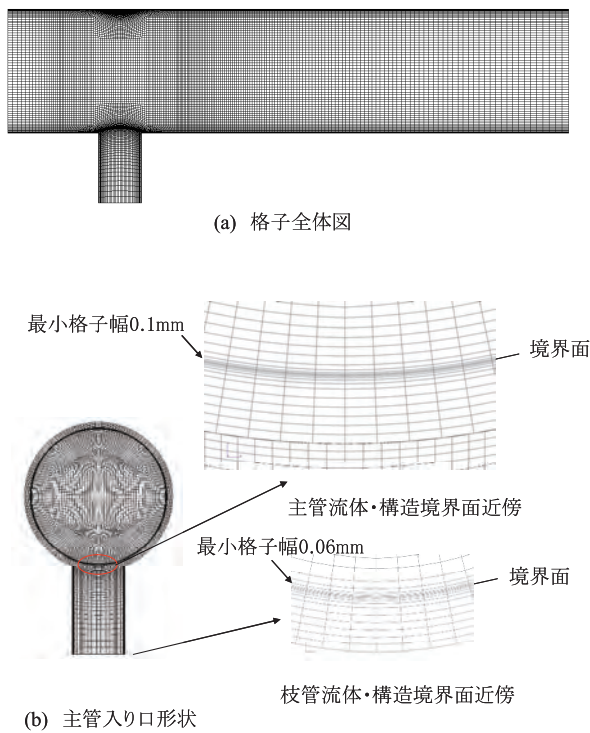
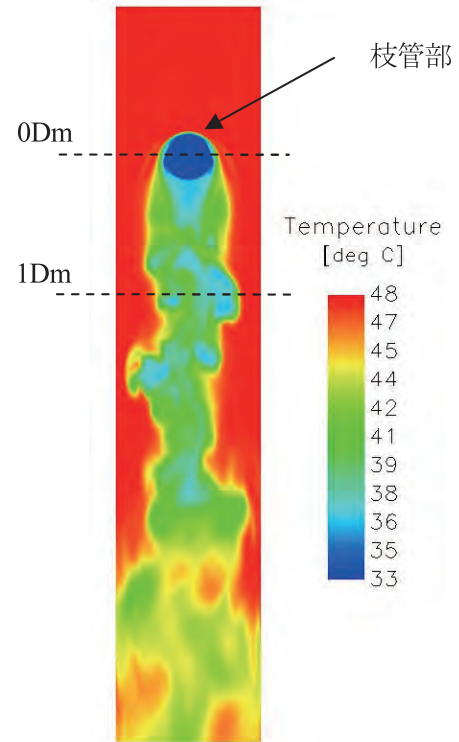


図3 解析格子

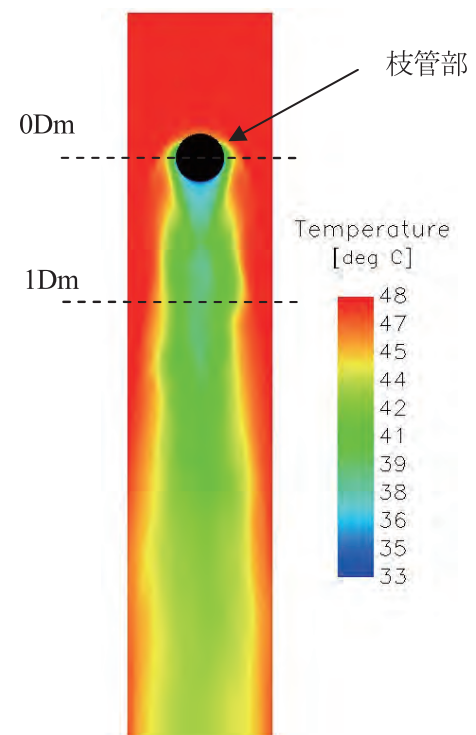
ここで、 C はクーラン数、 Δx は流れ方向のメッシュ幅、 Δt は時間刻み幅である。今回軸方向のメッシュ幅は0.5 mmなので、試験部平均流速 ($U = 1.57$ m/s)条件で $C \approx 1$ となる時間刻み幅は $\Delta t \approx 0.00079$ secとなる。本解析では構造材に熱が伝わるまでの時間を大きくとるため0～30secでは $\Delta t = 0.01$ sec、30～40secでは $C \approx 1$ に近い、 $\Delta t = 0.001$ secとして計算した。

4) 解析結果

$t = 40$ secにおける枝管下流の瞬時温度分布を図4に示す。ここで流体側は壁から1mmの温度を、構造側は壁面から0.1mmの温度を示す。枝管からの低温噴流が左右に蛇行して流れているのがわかる。また、構造側もこの低温噴流の影響により、温度変化があらわれているが、流体側に比べ空間分布がなまっている。



(a) 流体側 (主管内壁より 1mm)



(b) 構造側 (主管内壁より 0.1mm)

図4 主管壁近傍の瞬時温度 (枝管側)

2.3 連成解析結果を用いた応力解析の実施

1) 解析条件

配管内の応力分布を求めるため2.2で得られた構造材中における温度分布を用いて、FEMによる応力解析を実施した。解析には汎用解析コードであるABAQUSを用いた。解析に用いるメッシュは2.2で示した解析格子と同じもので構造内の要素だけ残したものを用いた。ただし解析範囲としては、今回の条件は温水が枝管側の壁面に沿って流れる壁面噴流条件であることから、主管側の下半分（枝管側）を対象とした。使用したオーステナイト系ステンレス鋼の物性値を表1に示す。境界条件として主管、枝管入口境界は管軸方向を固定し、主管出口境界は管軸方向を自由端として面外変形がない条件とした。また、温度分布は、2.2で算出した時刻歴温度分布のうち温度変動の過渡的挙動が安定したと思われる39～40secの値のうち10ステップ毎の値、すなわち $\Delta t = 0.001 \times 10 = 0.01\text{sec}$ 間隔の値を使用した。原子力機構が行った試験結果⁽³⁾によれば温度変動の卓越周波数は数Hz程度であることから1秒間の計算で妥当と判断した。

表1 応力解析で使用した管の物性値

密度 [kg/m ³]	7930
熱伝導率 [W/(mK)]	15.1
比熱 [J/(kgK)]	489.82
ヤング率 [MPa]	195000
ポアソン比	0.3
線膨張係数 [1/K]	15×10^{-6}

2) 応力解析結果

1)の解析条件で求められた応力分布の時刻歴データから筆者らが開発したIMAT-F^{(5),(6)}を用い最大応力箇所を調べた。これは図1に示す熱疲労評価フローのうち熱応力時刻歴から最大応力を求めるステップに相当する。熱疲労評価にあたり応力振幅分布の最大値となる箇所を捉えることが重要であるため1秒間の熱応力時刻歴データのうち最初の20ステップのデータ（0.2sec間）から管軸方向の応力値 σ_z の振幅 $\Delta\sigma_z$ の分布を算出した。その結果を図5に示す。分岐管中心位置から下流側に153mmの距離で分岐管中心位置を0°とした場合に主管内面に沿って周方向21°の位置に $\Delta\sigma_z$ の最大値7.13MPaが確認された。

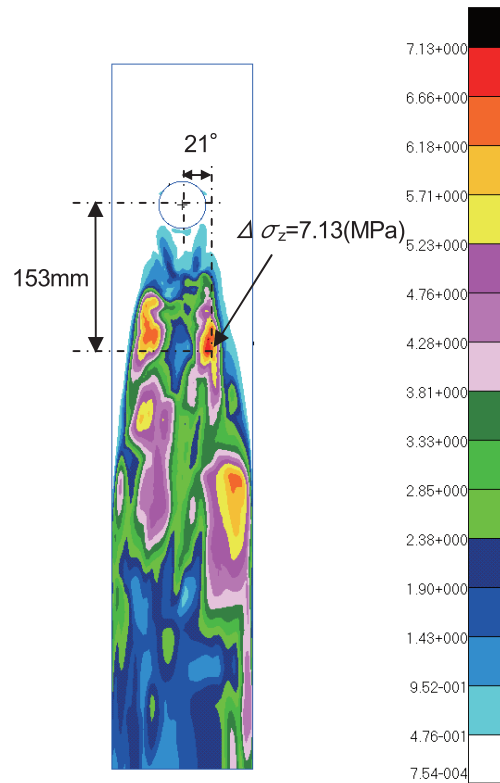


図5 管軸方向応力振幅

2.4 連成解析結果のうち仮定した熱電対設置位置の抽出データを用いた応力解析の実施

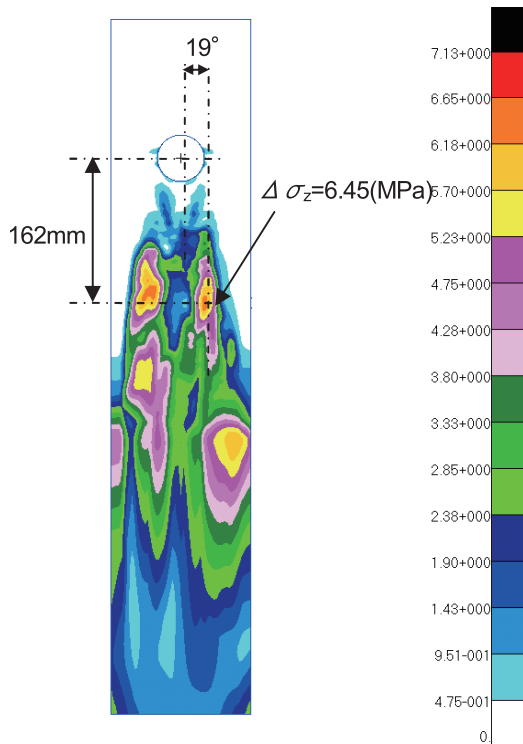
1) 解析条件

熱電対設置位置として表2に示す2ケースを仮定して温度データを抽出し、FEMの要素に補間して応力解析を実施した。応力解析実施の具体的手順は2.1の③～⑤のとおりである。

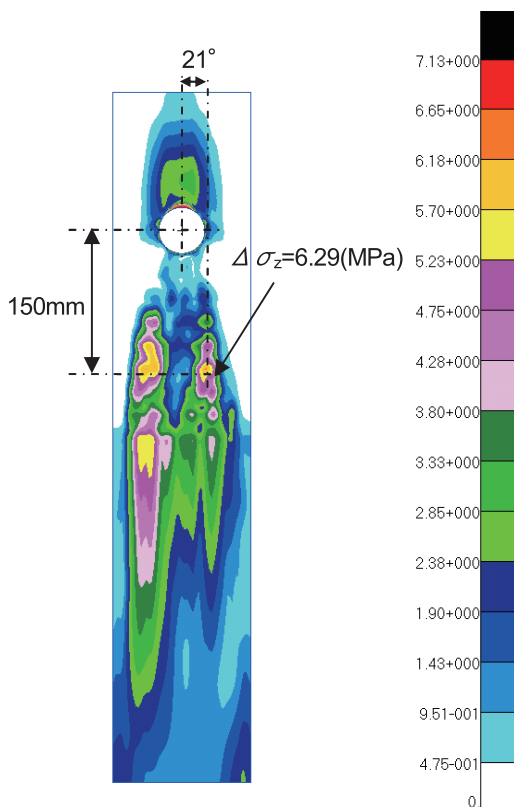
ここで、手順③で使用した構造材内表面温度は2.3の1)と同様39～40secの値のうち $\Delta t = 0.01\text{sec}$ 間隔の値を使用した。手順⑤の熱伝導解析の解析ステップは同じ $\Delta t = 0.01\text{sec}$ 間隔とし、初期条件として構造材温度分布は39sec時点の1ステップ前の熱流動・構造連成解析の結果を用いた。また、構造材外表面は断熱条件とした。応力解析は2.3の1)と同様に表1で示した物性値を用いて算出した。

表2 FEM解析ケース用熱電対配置位置

ケース	流れ方向		周方向	
	範囲[mm]	ピッチ[mm]	範囲[°]	ピッチ[°]
1	-50～300	10	-60～60	5
2	0～225	25	-60～60	5



(a) ケース1(流れ方向 10mm ピッチ)



(b) ケース2(流れ方向 25mm ピッチ)

図6 管軸方向応力振幅
(熱電対設置位置温度分布使用時)

2) 応力解析結果

前項の解析条件で求められた応力分布の時刻歴データから IMAT-F^{(5), (6)}を用い最大応力箇所を 2.3 の 2) と同様に調べた. 図 5 の結果と比較評価するためケース 1, 2 の管軸方向応力振幅 $\Delta\sigma_z$ の分布を図 6 に示す. 図中の値は応力振幅のうち最大の値を示した箇所とその値を示す. ここで, ケース 2 の上流側において応力振幅がやや大きいのは次の理由による. ケース 2 で上流に, 熱電対を配置していないため, IMAT-F^{(5), (6)}を用いた補間の性質上, 枝管周囲の低温部と主管入口境界温度の線形補間となる. そのため実際は存在しないと考えられる温度勾配が発生したためである. 図 5 で確認された最大応力振幅の位置はケース 1, 2 のいずれの場合も捉えられており, 周方向で 60° 以内, 流れ方向ではケース 2 で示す $0 \sim 225\text{mm}$ の範囲内で十分であることがわかる. 図 7 にケース 2 の $\Delta\sigma_z$ の最大値発生箇所である枝管下流 150mm の位置における周方向の応力振幅分布の比較結果を示す. 流れ方向のピッチは 10mm から 25mm に増加させた場合でもその分布に大きな相違はないことがわかる. 以上のことから, 熱電対の設置数削減が図れるケース 2 の配置を採用し, かつ合流より上流に熱電対を配置することで, 十分応力変動を捉えられると考えられる.

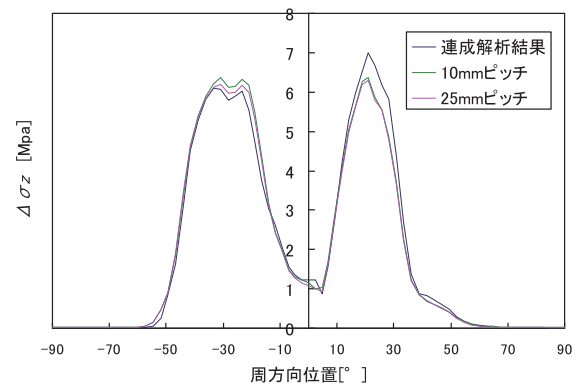


図7 周方向応力振幅(枝管下流 150mm の位置)

3. 配管内表面温度推定手法の検討

3.1 数値解析による測温点深さの影響評価

構造材内表面温度測定方法として, 熱電対を表面に埋め込む方法が考えられる. 熱電対はその構造上, 測温点はシースという鞘で覆われており, シース径 0.5mm のものであれば少なくともその半径分であ

る 0.25mm は配管表面から内部に入り込む構造となり、厳密には構造材内表面温度を測定することはできない。よって、内表面温度と熱電対による計測値の相違の程度について熱伝導数値解析による評価を行い、内表面温度の推定の必要性について検討した。

1) 解析条件

熱伝導解析では汎用解析コードである ABAQUS を用いた。熱電対は主管内面を管軸方向に沿って埋め込む設計を想定したため、解析格子は図 8 に示すような 2 次元で熱電対を含んだ周長 3.3mm (周方向ピッチ約 2.5° 相当) の管断面をモデル化した。また、管厚は 7.6mm, 熱電対埋め込み溝深さは 0.7mm, 溝の幅は 0.6mm である。

図中の赤色の範囲はステンレス材、緑色の範囲は絶縁材として熱電対のシース内に充填されている酸化マグネシウム、灰色の範囲はロウ材であるニッケルを示す。解析で用いた各材料の物性値を表 3 に示す。

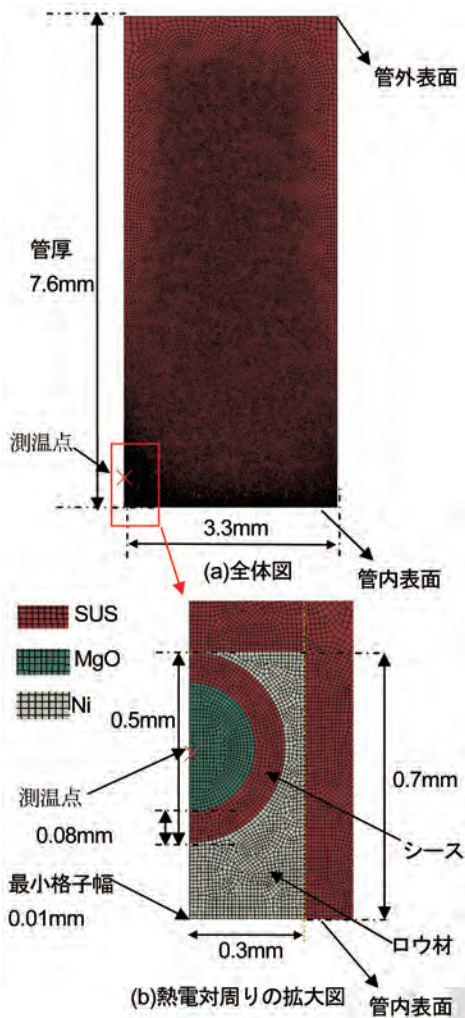


図 8 解析格子

ここでシース材に充填されている酸化マグネシウムの充填率は、後述の 3) に示す実験結果から 95% とした。また、解析はシース内に含まれる素線の接点先端付近の断面を対象としており、素線先端の测温箇所は点と考え、素線形状はモデル化していない。境界条件として、配管内表面の各節点は温度変動を模擬するため基準温度 40℃ で片振幅 10℃ の正弦波温度を与えた。管外表面は空気中におかれた物体の自然対流の放熱による熱伝達率⁽¹⁰⁾として 4.38 [W/(m²K)] を与え、雰囲気温度 20℃ とした。その他の境界は断熱とした。初期条件として構造材には一様に 40℃ を与えた。

表 3 熱伝導解析で使用した物性値

	SUS304	MgO(※)	Ni
密度 [kg/m ³]	7916	3332.7	8894
熱伝導率 [W/(mK)]	16.1	1.55	89.4
比熱 [J/(kgK)]	501	937	453

※充填率 95% の場合 (空気 5%, MgO 95% の割合)

2) 温度解析結果

図 9 に管内表面に基準温度 40℃, 片振幅 10℃, 周波数 5Hz の正弦波温度を与えた場合の熱電対测温点での温度変動解析結果を示す。解析は $\Delta t = 0.001\text{sec}$ で 3sec 行った。解析の結果、振幅比 0.535 の減衰、位相差 0.91rad の遅れがあることが明らかとなった。この差は無視できない値であり、原子力機構の試験結果⁽³⁾によれば温度変動の卓越周波数は数 Hz 程度であることから、T 字合流配管内表面における温度ゆらぎを捉えるためには実験で得られた熱電対温度から配管内表面温度を推定する必要があることがわかる。一方、3sec 間の時間平均温度は 0.06℃ だけ测温点側が高くなることがわかった。これは、测温点周辺の熱伝導率の違いによる影響と推定されるがその差は無視できるといえる。

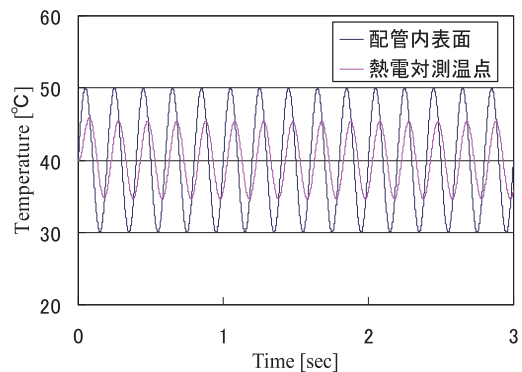


図 9 熱電対测温点における温度変動 (5Hz の場合)

3) 熱電対絶縁材 (MgO) 充填率の調査

今回実験で使用する予定の熱電対は、ノイズの影響をできるだけ低減するため図10(b)に示すような非接地型熱電対を使用する予定である。このタイプではシース内に絶縁材(酸化マグネシウム(MgO))を使用しているが、その製作上、粉末状の酸化マグネシウムを使用している。よって、その物性値、特に充填率を明らかにする必要がある。実験と熱伝導数値解析により充填率を求めることとした。実験は40, 50, 60, 70, 80℃のプールに各10回熱電対を投入し、その温度上昇率を測るものであるが、熱伝導解析を行うには熱電対表面とプール水間の熱伝達率を知る必要がある。そのため、MgOを介さずに温度を測定できる接地型熱電対と非接地型熱電対を同時にプールに落下投入し、接地型熱電対のデータから熱伝達率を得ることによりMgO充填率を算出した。図10に接地型熱電対と非接地型熱電対の違いを示す。ここで、赤、オレンジ色は素線、水色はMgOを示す。非接地型では测温接点が熱電対先端に接地せず、MgOを介して温度を検出することとなる。

熱伝導解析には汎用解析コードであるABAQUSを用いた。解析格子を図11に示す。軸対象モデルとして表面に熱伝達率を介してプール温度が伝わるモデルとした。上部境界は断熱とした。図12にプール温度50℃の場合の実験結果(10回分)と解析結果を示す。ここで縦軸は次式で無次元化した温度である。

$$T_n = \frac{(T - T_{in})}{(T_{end} - T_{in})} \quad (2)$$

ここで T は測定された温度、 T_{in} は初期温度、 T_{end} は静定した温度を示す。パラメータ解析の結果、熱伝達率 α は40℃では7500W/m²K、それ以外ではいずれの場合も10000W/m²Kとした場合が妥当であることがわかった。40℃の場合に熱伝達率が他と異なった理由としては、投入時の速度等の影響によるものと思われる。

次に、MgOの充填率を得るために実施した熱伝導解析の解析格子を図13に示す。ここで充填率とは空気とMgOが均一に混合した場合のMgOの体積比率を示すものである。軸対象モデルとして表面熱伝達率には、接地型熱電対の解析で得られた値を用いた。上部境界は断熱とした。

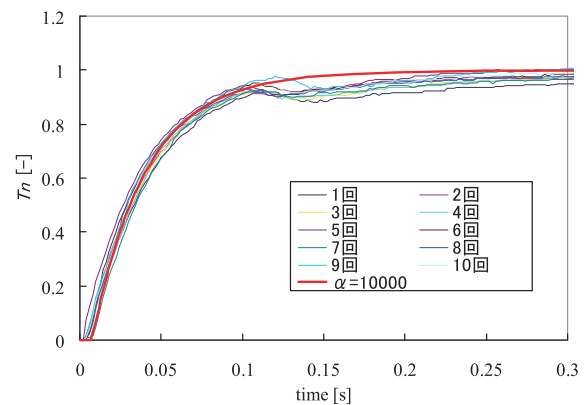


図12 接地型熱電対温度測定結果
(プール温度50℃の場合)

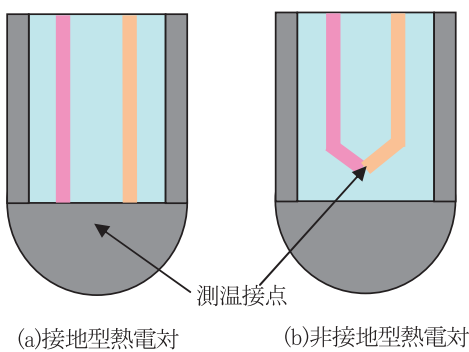


図10 熱電対構造の概略図

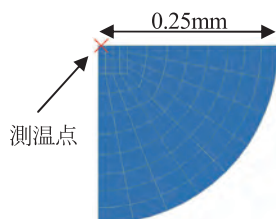


図11 解析格子(接地型熱電対)

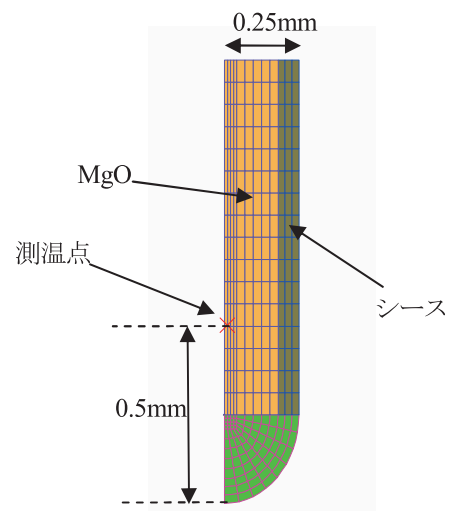


図13 解析格子(非接地型熱電対)

図14にプール温度50℃の場合の実験結果（10回分）と解析結果を示す。ここで縦軸は式(2)で無次元化した温度である。パラメータ解析の結果、充填率95%とすれば妥当であることがわかった。その他プール温度の場合も同じ充填率となった。

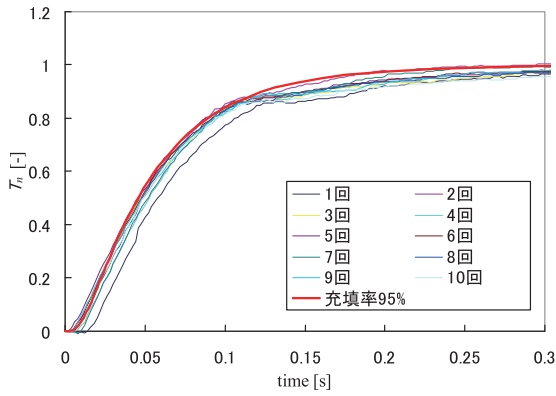


図14 非接地型熱電対温度測定結果
(プール温度50℃の場合)

4) 熱電対シース径の影響

1) から3) では熱電対シース径0.5mmとして検討を行った。検討結果が示すとおり配管内表面温度を算出するにはできるだけ測温点が表面に近いことが必要であり、シース径は小さい方が望ましいことがわかる。しかしながら、配管内表面に埋め込む際の断線等のリスクを考慮すると少なくとも0.5mm以上であることが望ましい。よって、施工時の断線等のリスクを低減するため、シース径をさらに増加可能かどうか、0.5mmと1mmのケースについて温度ゆらぎの減衰、位相遅れの程度を比較することにした。0.5mmの結果は2)で示したことから、1mmの場合について図15に示す解析格子を用い、同じ解析条件で熱伝導解析を行った。図16に管内表面に基準温度40℃、片振幅10℃、周波数5Hzの正弦波温度を与えた場合の熱電対測温点での温度変動解析結果を示す。図中には0.5mmの結果も比較のため示した。解析の結果、1mmの場合、振幅比0.223の減衰、位相差2.07radの遅れがあることが明らかとなった。これは、0.5mmに比べ振幅比は58%の減少、位相遅れで128%の増加となり、シース径の増加は温度ゆらぎの減衰、位相遅れに大きな影響を与えることがわかった。よって、本研究で計画する実験ではなるべく配管内表面温度算出時の誤差を減らす観点からシース径0.5mmを採用することとした。

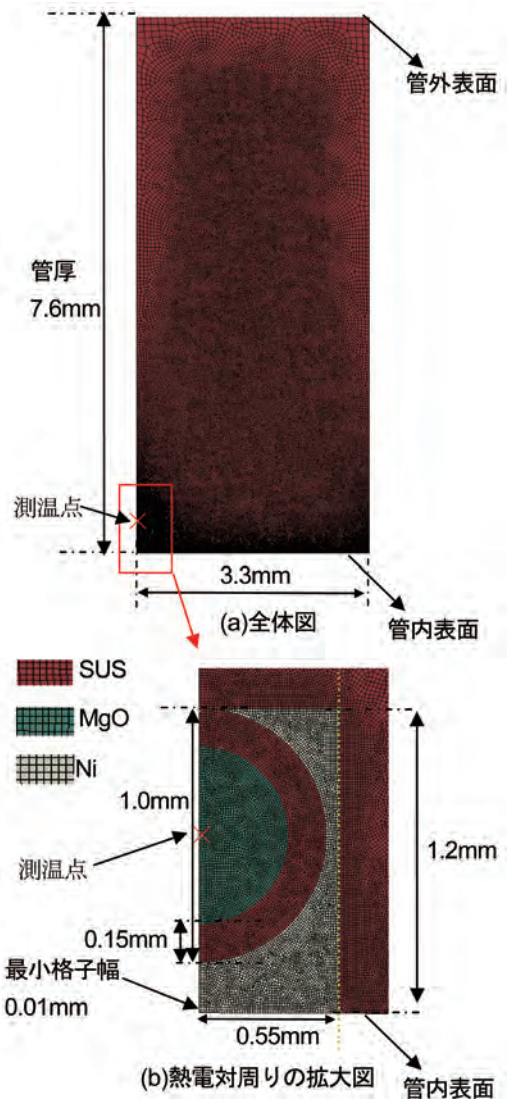


図15 解析格子

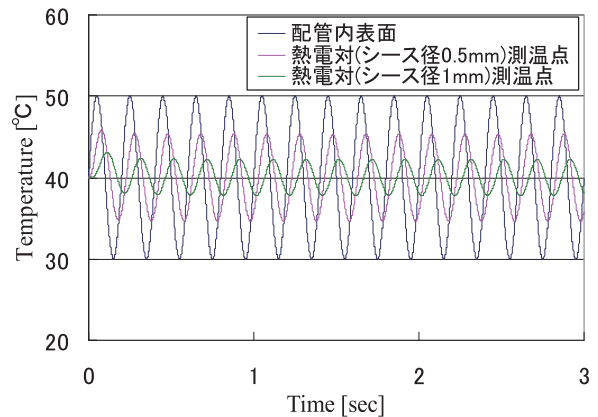


図16 熱電対測温点における温度変動（5Hzの場合）

3.2 配管内表面温度の推定応答関数の作成

3.1 で示したとおり，熱電対で得られた温度データから配管内表面温度を推定する必要があることから，その推定手法を作成した．以下，その手法を示す．

- ①熱電対で温度データを測定．
- ②①で得られたデータを FFT（高速フーリエ変換）解析し周波数領域に変換．
- ③あらかじめ用意した配管内表面温度と熱電対測温点位置の温度に関する伝達関数を熱伝導解析で作成．
- ④③で作成した伝達関数の逆関数を用い②の結果に対し振幅・位相を処理．
- ⑤④で処理した温度変動値を逆 FFT 解析し時間領域に変換．

上記手法では，熱電対温度と配管内表面温度の振幅比・位相差を伝達関数として求めておく必要がある．0.5mm シース径の熱電対を用いて図 8 に示す解析格子で温度変動周期を変えて，熱伝導解析を実施し，この伝達関数を作成した．正弦波の周波数を 0.01Hz から 50Hz の間で変化させることにより振幅比と位相差を求めた結果を，図 17 に示す．温度変動の周波数が高いほど減衰，位相遅れも大きくなることわかる．

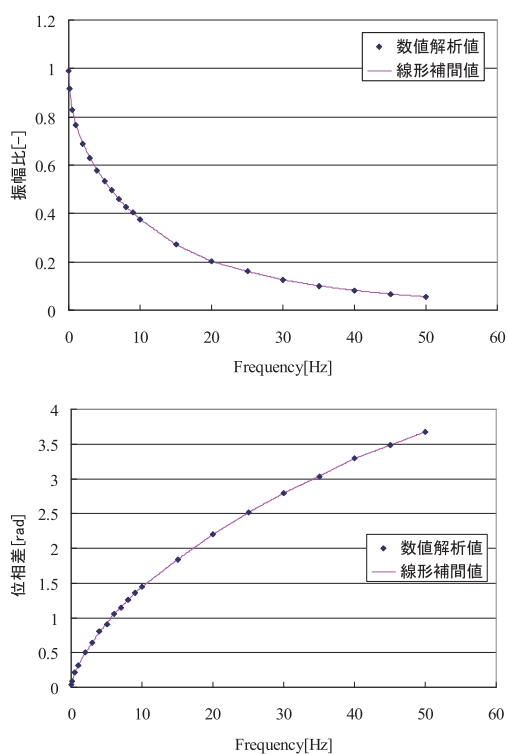


図 17 熱伝導解析で求めた伝達関数

4. 熱電対埋め込み施工法の検討

4.1 数値解析による空隙有無の影響評価

熱電対により配管内表面温度を測定するため，溝を作り熱電対を取り付けることが必要である．取り付け方法としては，ポンチかしめ法や金属ロウ付け法等がある．本研究の目的は構造材の温度を測定することであるため，熱電対と溝底部の密着性を向上させる必要があり，金属ロウ付けを採用することとした．

大気中における銀ロウ付けを行った場合の施工後の熱電対断面拡大写真を図 18 に示す．熱電対下の溝コーナー部に黒色の影があることからロウ材が十分浸透せず空隙が残ったことが推定される．空隙の有無について熱電対測温点における温度変動への影響を調査するため，3.1 と同様な解析条件で熱伝導解析を実施した．ただし，空隙を模擬するため，図 19 に示す解析格子を用い，空隙周囲の境界は断熱条件とした．

管内表面に基準温度 40℃，片振幅 10℃，周波数 5Hz の正弦波温度を与え解析した結果，空隙がない場合に比べ，配管内表面温度との振幅比は 0.535 から 0.565 に約 6% 増加，位相差は 0.911rad から 0.880rad に約 3% 減少することがわかった．これは空隙の存在により管外表面方向への熱伝導が妨げられることにより相違が生じたと考えられる．空隙の有無やその大きさは試験体を切断しないとわからないため，配管内表面の温度を適切に推定するためには，空隙を排除した取り付け施工法を検討する必要があることがわかる．

4.2 ロウ付け施工法の検討

熱電対背面の空隙を排除するため，大気中におけるロウ付け施工法から高真空環境における施工法に変更することで効果があるか確認した．高真空環境におけるロウ付けでは，構造材にロウ材を塗布後，高真空環境の炉に入れ温度を上げるため，コテを用いたロウ付けと比べロウ材の量を制御しながらの施工は不可能である．よって，ロウ材が溶解する間の流出を防止するため，銀に比べ，流動性の低いニッケルロウ材を使用することとした．オーステナイト系ステンレス鋼に幅 0.6mm 深さ 0.7mm の溝加工を行い，溝にシース外径 0.5mm の熱電対をはめ込み，

真空度は、 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ [Pa] の環境で施工した。施工後の熱電対断面写真を図 20 に示す。図 18 と比較してわかるように熱電対背面の空隙は排除されていることが確認できた。また、同じ施工法で 13 のケースについて断面を観察した結果、いずれも空隙は排除されており、この施工方法により 3.2 で検討した逆関数による構造内表面温度の推定が可能になった。

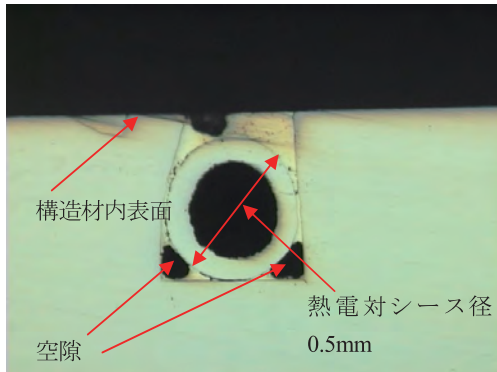


図 18 銀ロウ付け熱電対断面写真（大気中で施工）

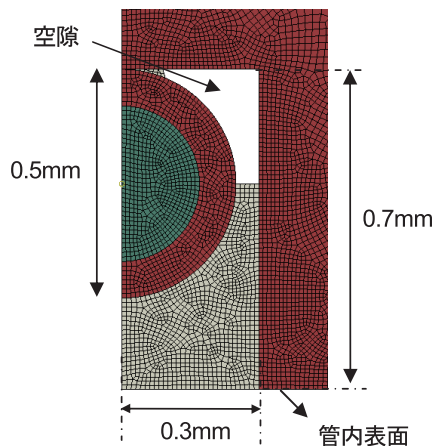


図 19 解析格子（熱電対周りの拡大図，空隙あり）

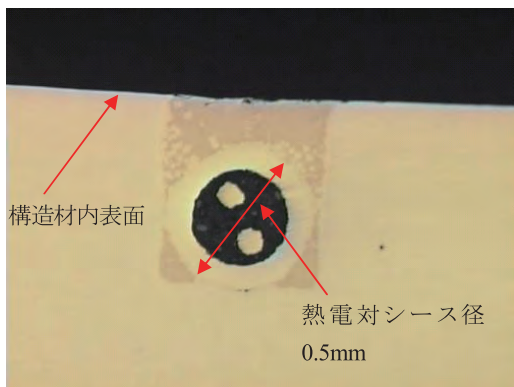


図 20 ニッケルロウ付け熱電対断面写真（高真空環境中で施工）

5. 結論

本研究では、原子力プラント配管を対象として T 字合流配管部の熱疲労現象解明に向けた管壁温度分布測定実験に先立ち、熱電対を用いた温度測定方法の検討およびその妥当性の検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 管壁温度測定位置が応力変動値の算出結果に与える影響を評価するため、壁面を含めた流体・構造解析を行い、測定位置の最適化を行った。その結果、熱電対の配置箇所は分岐部の上流側 50mm から下流側 225mm まで、周方向は分岐部から片側 60° 範囲とし、ピッチは流れ方向 25mm、周方向 5° とすれば十分であることがわかった。

(2) 熱伝導数値解析により配管内表面に埋め込んだ熱電対の温度を算出した結果、5Hz の正弦波状の温度変動が内表面に存在したと仮定した場合、振幅比で 54% の減衰、位相差で 0.91rad の遅れがあることがわかった。伝達関数として、振幅比および位相遅れを計算し、実験で得られた熱電対の温度から配管内表面の温度を推定する手法を明らかにした。

(3) 熱電対背面に空隙がある場合とない場合について配管内表面温度推定結果に与える影響を評価した結果、5Hz の正弦波状の温度変動が内表面に存在したと仮定した場合、振幅比で約 5%、位相差で約 3% の違いがあることがわかった。

(4) ステンレス鋼配管内壁への熱電対埋め込み方法を検討した結果、空気中における銀ロウ付け埋め込みでは熱電対背面に空隙が発生する可能性があるが、高真空環境でのニッケルロウ付けによってその空隙を排除できることがわかった。

以上の結果を踏まえ、T 字合流配管部の配管内表面の温度データを採取する実験を行う見通しが得られた。今後、図 1 に示すフローのうち金属内面温度時刻歴のデータが得られれば、フローに従い FEM による熱伝導解析、応力解析を行い、熱応力の評価を実施していく予定である。

謝辞

高真空環境における配管内表面への熱電対ロウ付け技術の開発にあたり、助川電気工業(株)および金属技研(株)の関係者の方々のご協力を頂いたことをここに記し、謝意を表す。

文献

- (1) 通商産業省資源エネルギー庁編, 平成12年度版原子力発電所運転管理年報, 火力原子力発電技術協会, p. 233, (2000).
- (2) 日本機械学会, JSME S 017 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針 (2003).
- (3) N. Kimura, A. Ono, H. Miyakoshi, H. Kamide, Experimental Study on High Cycle Thermal Fatigue in T-Junction, The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), N13P1169, (2009).
- (4) J. Fomtes, O. Brailard, O. Cartier, S. Dupraz, Evaluation of an Unsteady Heat Transfer Coefficient in a Mixing Area: the FATHER Experiment Associated to the Specific "Coefh" Sensor, The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), N13P1136, (2009).
- (5) 大厩徹, 中村晶, 竹中信幸, 熱疲労評価手法のシステム化 I - 閉塞分岐配管の熱成層問題への適用 -, INSS JOURNAL, Vol. 13, p. 90, (2006).
- (6) 中村晶, 大厩徹, 熱疲労評価手法のシステム化 II - 数値シミュレーションを用いた評価手法の検証 -, INSS JOURNAL, Vol. 13, p. 102, (2006).
- (7) H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura and K. Hayashi, Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping, Nuclear Engineering and Design, 239, pp. 58-67, (2009).
- (8) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第4版, p. 318, (1986).
- (9) 中村晶, T字合流配管の温度ゆらぎ現象の数値解析 - 乱流モデルと解析格子の影響 -, INSS JOURNAL, Vol. 14, p. 99, (2007).
- (10) 谷下市松, 伝熱工学, 裳華房, p. 168, (1993).