



# プラント配管の熱疲労現象に及ぼす流体温度ゆらぎのメカニズムに関する研究

三好, 弘二

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2016-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6446号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006446>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

## 論文内容の要旨

氏 名 三好 弘二

専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

### プラント配管の熱疲労現象に及ぼす流体温度ゆらぎのメカニズムに関する研究

指導教員 竹中 信幸

プラント配管における流体温度ゆらぎに起因する熱疲労は古くから認識されている課題であるが、近年においても破損例が報告され続けている。その理由として、熱疲労の発生原因は、配管内で生じる流体の温度変動であることから、プラント運転中に生じる様々な熱流動現象に応じて多くのモードがあること、また、破損に至るメカニズムは、流体の温度ゆらぎが構造物の熱応力の変動に変換され、熱応力の繰り返しが材料の疲労破損を引き起こすという過程から成ることから、その予測には、流体、構造、材料の各学術領域の知識が必要となることがあげられる。

本論文では、プラント配管における流体温度ゆらぎによる熱疲労による損傷が発生したもしくは懸念される現象として、以下の現象を対象に、熱流動実験および数値計算によりその温度変動メカニズムの検討を行った。

- (1) 高低温水合流部に生じる温度変動
- (2) 閉塞分岐配管に生じる温度変動
- (3) 加圧器スプレイ配管内蒸気・水界面下に生じる温度変動

また、最後に各現象のメカニズムの検討により得られた温度変動の周波数特性を踏まえ、流体温度ゆらぎと熱応力応答の関係について評価・考察を行った。

本論文は6章より構成される。

第1章では、プラント配管のうち特に原子力発電プラント配管を対象に流体温度ゆらぎによる熱疲労の破損事例や潜在事象の事例を紹介した。その結果、プラントの運転管理や弁等の保守管理では対応が難しい三つの現象について本研究の対象として選定した。また、平板を対象にした流体温度ゆらぎに対する熱応力応答特性を説明し、熱応力の大きさは温度変動の振幅のみならず周波数に大きく依存するため、その温度変動メカニズムを明らかにすることの重要性について述べた。

第2章では、高低温水合流部に生じる流動現象と温度変動メカニズムを検討するため、多数の熱電対を埋め込んだ試験体を用いて、壁温分布および熱応力分布特性を明らかにした。壁温測定結果およびその結果を用いた熱応力算出結果と流動現象について評価・検討を行った。以下得られた結論を示す。

- (1) 主管内面の温度変動強度の大きい箇所は分岐管近傍から下流  $1.0D_m$  までの範囲である。
- (2) 主管内面の温度変動は数 Hz 程度の渦列に起因するものだけでなく、約 0.1Hz の長周期の変動がある。長周期の変動は、高温の噴流により主管内面に形成されたホットスポットが約 10 秒の周期で周方向にゆらぐことで発生している。
- (3) ミーゼス応力およびトレスカ応力の変動幅の増加要因として、主管の周・軸方向成分の応力変動の寄与が大きく、最大応力変動幅が確認された位置における応力の時刻歴データは約 10 秒の周期で大きく変動する。応力変動幅は板厚方向に減衰するが深さ 1mm におい

ても約 10 秒の周期の応力変動が残る。

(4)主管内面の応力変動幅と管内面温度変動幅の分布は似ており、主管内面のホットスポットの時間変化にともない大きな応力変動が発生している。

第 3 章では、鉛直下向き閉塞分岐配管に生じる流動現象の検討を行った。可視化試験体を用いた実験により、分岐配管内径が侵入深さおよびその変動特性に及ぼす影響、主流の侵入深さの変動メカニズムについて明らかにした。また、主流の侵入深さの変動メカニズムを明らかにするため、数値解析を用いた評価も行った。以下得られた結論を示す。

(1)主流の侵入深さを、分岐配管内径および主流流速を用いたレイノルズ数で整理した。整理式から主流の最大侵入深さの推測が可能である。

(2)侵入深さの変動周期は、主流流速および分岐配管内径を増加させると増加する。

(3)侵入深さの変動幅は、分岐配管内径 30mm 以下で大きく、その変動幅は主流流速とともに増加し、30mm 以上では小さく主流流速の影響は小さい。

(4)分岐管断面の流動パターンは、キャビティーフローの一部と考えられる断面に平行な流れ、複数の小さな渦が形成される流れ、および管全体を支配する旋回流の 3 つが存在することを可視化実験および数値計算から示した。

(5)可視化実験および数値計算結果より、 $LD_b = 4$  付近で形成される管断面全体を支配する旋回流の発生周期と主流の侵入深さの変動周期はほぼ一致することがわかった。

(6)数値計算結果から、 $LD_b = 4$  付近で形成される管全体を支配する旋回流が、周期的に分岐管内を鉛直に下降することで、侵入が深くなり熱成層界面が変動することを明らかにした。

第 4 章では、加圧器スプレィ配管内の蒸気-水界面下に生じる温度変動メカニズムの検討を行った。可視化試験体を用いた熱流動実験により、蒸気-水界面下の液中で生じる温度変動および速度分布測定を行い、液温変動のメカニズムを明らかにした。以下得られた結論を示す。

(1)管壁温度変動は気液界面の変動ではなく、界面下の液相内の温度変動によって発生していた。

(2)可視化実験より、蒸気・水の気液界面下において密度変化によるシャドウグラフ効果で黒い縞模様の層が確認できた。また、その層は非凝縮性ガスの蒸気層への注入により消失した。

(3)蒸気・水の気液界面下の黒い縞模様が観察された付近では液温変動が発生しており、そのパワースペクトル密度は 1Hz 付近にピークが存在した。

(4)測定した温度・速度勾配から算出したリチャードソン数は 0.25 より大きく、密度安定成

層が形成されており、液温変動の周波数はプラント・バイサラ周波数に近い値であることから、液温変動は密度安定成層内に発生した浮力を復元力とする流体の振動現象によるものと考えられる。

第 5 章では、2 章から 4 章で述べた三つの現象を対象に、各現象で明らかとなった温度変動の周波数特性を元に、その温度変動と熱応力応答の関係について考察・評価した。以下得られた結論を示す。

(1)高低温水合流部に生じる温度変動

高温噴流背後に発生する渦列に起因する周波数に比べ、ホットスポットの周方向へのゆらぎの周波数のほうが温度変動による熱応力への変換率が高い。また、後者の周波数は流体温度ゆらぎに対する熱応力応答ゲインのピーク付近にあることから、熱応力が大きくなる。高低温水合流部においては流体温度入口温度差を管理する等、適切な設計評価が必要である。

(2)閉塞分岐配管に生じる温度変動

閉塞分岐配管における熱成層界面の変動要因となっている侵入深さの変動周波数は、流体温度ゆらぎに対する熱応力応答ゲインのピーク付近にあることがわかった。閉塞分岐配管部においては主流の侵入深さを鉛直管部にとどめる等、熱成層界面の変動を回避するための適切な設計が必要である。

(3)加圧器スプレィ配管内蒸気・水界面下に生じる温度変動

界面下の液温変動の支配周波数であるプラント・バイサラ周波数は 1Hz 程度と高く、流体温度ゆらぎの熱応力への変換率は低いことがわかった。

第 6 章では、本論文の結論を記述した。

以上、本研究においては、プラント配管における流体温度ゆらぎによる熱疲労による損傷が発生したもしくは懸念される現象として三つの現象を抽出し、熱流動実験および数値計算によりその温度変動メカニズムの検討を行った。その結果、温度変動を誘発するメカニズムとその特徴的な周波数を明らかにすることができた。加えて、その温度変動の周波数特性を踏まえ、流体温度ゆらぎと熱応力応答の関係について評価・考察を行い、高低温水合流配管および閉塞分岐配管に生じる温度変動現象では、流体温度ゆらぎに対する熱応力変換率は高く、適切な設計が必要であることを示した。

氏名	三好 弘二		
論文 題目	プラント配管の熱疲労現象に及ぼす流体温度ゆらぎのメカニズムに関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	竹中 信幸
	副 査	教 授	中井 善一
	副 査	教 授	富山 明男
	副 査	准教授	片岡 武

要 旨

プラント配管における流体温度ゆらぎに起因する熱疲労は古くから認識されている課題であるが、近年においても原子炉配管で破損例が報告されている。その理由として、熱疲労の発生原因は、配管内で生じる流体の温度変動であることから、プラント運転中に生じる様々な流動現象に応じて多くの要因があること、破損に至るメカニズムは、流体の温度ゆらぎが構造物の熱応力の変動に変換され、熱応力の繰り返しが材料の疲労破損を引き起こすという過程から成ることから、その予測には、流体、構造、材料の各領域の知識が必要となる。

本論文では、プラント配管における流体温度ゆらぎによる熱疲労による損傷が発生した、もしくは懸念される以下の現象を対象に、熱流動実験および数値計算によりその温度変動メカニズムの解明を行った。

- (1) 高低温水合流部に生じる温度変動
- (2) 閉塞分岐配管に生じる温度変動
- (3) 加圧器スプレイ配管内蒸気・水界面下に生じる温度変動

また、各現象のメカニズム解明により得られた温度変動の周波数特性を踏まえ、流体温度ゆらぎと熱応力応答の関係について評価・考察を行った。

第1章では、プラント配管のうち特に原子力発電プラント配管を対象に流体温度ゆらぎによる熱疲労の破損事例や潜在事象の事例を紹介し、プラントの運転管理や弁等の保守管理では対応が難しい三つの現象について本研究の対象として選定している。平板を対象にした流体温度ゆらぎに対する熱応力応答特性を説明し、熱応力の大きさは温度変動の振幅のみならず周波数に大きく依存するため、その温度変動メカニズムを明らかにすることの重要性について述べている。

第2章では、高低温水合流部に生じる流動現象と温度変動メカニズムを解明するため、多数の熱電対を埋め込んだ試験体を用いて、壁温分布および熱応力分布特性を明らかにした。熱電対を用いた試験体製作のための数値解析による事前検討内容、実験装置および流速・壁温測定方法、壁温測定結果およびその結果を用いた熱応力算出結果について評価・検討を行い、以下の結論を得ている。

- (1) 主管内面の温度変動強度の大きい箇所は分岐管近傍から下流1.0Dまでの範囲である。
- (2) 主管内面の温度変動は数Hz程度の満列に起因するものだけでなく、約0.1Hzの長周期の変動がある。長周期の変動は、高温の噴流により主管内面に形成されたホットスポットが約10秒の周期で周方向にゆらぐことで発生している。
- (3) 応力成分の変動幅は、主管の半径方向に比べて、周方向および軸方向の応力が大きく、最大応力変動幅が確認された位置における応力の時刻歴データは約10秒の周期で大きく変動する。応力変動幅は板厚方向に減衰するが深さ1mmにおいても約10秒の周期の応力変動が残る。
- (4) 主管内面の応力変動幅と管内面温度変動幅の分布は似ており、主管内面のホットスポットの時間変化にともない大きな応力変動が発生している。

第3章では、鉛直下向きの閉塞分岐配管に生じる流動現象と温度変動メカニズムの解明を行った。可視化試験体を用いた実験により、分岐配管内径が侵入深さおよびその変動特性に及ぼす影響、主流の侵入深さの変動メカニズムについて明らかにし、主流の侵入深さの変動メカニズム解明のため、数値解析を用いた評価を行い、以下の結論を得ている。

氏名	三好 弘二
<p>(1) 主流の侵入深さを、分岐配管内径および主流流速を用いたレイノルズ数での整理式を提案した。</p> <p>(2) 侵入深さの変動周期は、主流流速および分岐配管内径を増加させると増加する。</p> <p>(3) 分岐管断面の流動パターンは、キャビティーフローの一部と考えられる断面上に平行な流れ、複数の小さな渦が形成される流れ、および管全体を支配する旋回流の3つが存在することを可視化実験および数値計算から示した。</p> <p>(4) 可視化実験および数値計算結果より、<math>LD = 4</math>付近で形成される管全体を支配する旋回流が、周期的に分岐管内を鉛直に下降することで、侵入が深くなり熱成層界面が変動することを明らかにした。</p> <p>第4章では、加圧器スプレイ配管内の蒸気-水界面下に生じる温度変動メカニズムの解明を行った。可視化試験体を用いた熱流動実験により、蒸気-水界面下の液中で生じる温度変動および速度分布測定を行い、液温変動のメカニズムを明らかにした。以下の結論を得ている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 管壁温度変動は気液界面の変動ではなく、界面下の液相内の温度変動によって発生していた。</li> <li>(2) 蒸気・水の気液界面下の液温変動が発生しており、その変動周期は1Hz付近にピークがある。</li> <li>(3) 測定した温度・速度勾配から算出したリチャードソン数は0.25より大きく、密度安定成層が形成されており、液温変動の周波数はプラント・バイサラ周波数に近い値であることから、液温変動は密度安定成層内に発生した内部重力波によるものと考えられる。</li> </ul> <p>第5章では、第2章から第4章で検討した現象を対象に、各現象で明らかとなった温度変動の周波数特性を元に、温度変動と熱応力応答の関係について考察・評価を行い、以下の結論を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 高低温水合流配管に生じる温度変動では、高温噴流背後に発生する渦列に起因する周波数に比べ、ホットスポットの周方向へのゆらぎの周波数のほうが温度変動による熱応力への変換率が高い。また、後者の周波数は流体温度ゆらぎに対する熱応力応答ゲインのピーク付近にあることから、熱応力が大きくなる。高低温水合流部においては流体温度入口温度差を管理する等、適切な設計評価が必要である。</li> <li>(2) 閉塞分岐配管に生じる温度変動では、閉塞分岐配管における熱成層界面の変動要因となっている侵入深さの変動周波数は、流体温度ゆらぎに対する熱応力応答ゲインのピーク付近にあることがわかった。閉塞分岐配管部においては主流の侵入深さを鉛直管部にとどめる等、熱成層界面の変動を回避するための適切な設計が必要である。</li> <li>(3) 加圧器スプレイ配管内蒸気・水界面下に生じる温度変動では、界面下の液温変動要因となっている内部重力波の支配周波数であるプラント・バイサラ周波数は1Hz程度と高く、流体温度ゆらぎの熱応力変換率は低いことがわかった。</li> </ul> <p>第6章では、以上の研究結果のまとめと得られた研究成果をもとに、安全な配管設計のための応用が展望されている。</p> <p>本研究は、原子炉で発生した、または発生の可能性のある流体温度ゆらぎ現象について、そのメカニズムを研究したものであり、原子炉の安全性について重要な知見を得たものとして価値があると認める。提出された博士論文は、工学研究科が定める学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の三好弘二は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	