

主 論 文 の 要 旨

論文題目 チューブ-フィン構造体の均質化解析に関する研究

氏 名 岩堀 恵介

論 文 内 容 の 要 旨

扁平チューブと波状フィンからなるチューブ-フィン構造体は、産業用、船舶・車両用などの様々な分野の熱交換器における伝熱コアとして多用されている。本研究ではその代表例として、自動車用熱交換器の一つであるインタークーラを対象とする。伝熱機能を高めるため、チューブ内にはインナーフィンと呼ばれる波状フィンが挿入されることもある。これらの熱交換器では、流体がチューブ内を入口側高温タンクから出口側低温タンクに向かって流れ、伝熱コア部に温度分布が生じる。この温度分布と外部拘束により発生する熱応力が、エンジンや発電機の起動・停止に伴って繰返し誘起されるため、厳しい条件の耐久試験では、チューブとタンクの接合部に疲労き裂が生じることがある。

上に述べた疲労破損を有限要素解析で検討する場合、熱交換器全体を有限要素モデル化する必要があるが、構造が複雑な伝熱コア部を忠実に要素分割すれば、要素数が莫大となり計算負荷が大変高くなるという問題が生じる。このため、伝熱コア部への均質化材料モデルの適用が一般的に考えられる。しかし、本研究で考えるチューブ-フィン構造体の場合、チューブ端部の構造が非周期的であるから、伝熱コア部のチューブとフィンのすべてを一体的に均質化することは困難である。さらに、疲労き裂の発生位置はチューブとタンクの接合部である。これらのことを考慮すれば、チューブの形状はそのままとしフィン層のみを均質化する方法が有効であると判断される。

チューブ-フィン構造体は、ミクロ構造を有するマクロ物体の一例として考えられる。ミクロ構造が3次元的な周期性を有する場合の均質化弾性剛性の評価法は、すでに確立されている。しかし、チューブ-フィン構造体のフィン層のみを見ると、層面内ではいわゆるY-周期性が成り立つが、積層方向にはY-周期性がない。したがって、3次元周期構造体の均質化法をそのままフィン層に適用することはできない。なお、チューブ-フィン構造体のフィン層のみを均質化した有限要素解析がすでに報告されているが、このような均質化のための仮定と理論は述べられていない。したがって、本研究における課題の一つはY-周期性を有しないフィン層に適用可能な、均質化弾性剛性の評価方法を開発することである。

次に、本研究で検討する均質化法は1次理論に属する。1次均質化法では、周期単位セル

内の変位が一様マクロひずみによる変位と Y-周期性を満たす擾乱変位からなると仮定されるが、この仮定は、周期単位セル内でマクロひずみがこう配を有するような場合には成立しない。例えば、Y-周期構造を有するはりの曲げ問題で周期単位セルの大きさがはりの厚さに比べて十分に小さくない場合には、1次均質化法による均質化剛性を用いると解析結果に無視しえない誤差が生じる。最初に述べた熱交換器の伝熱コア部には非一様な温度分布によってチューブの曲げも生じ、しかもチューブ-フィンの積層間隔は十分に小さくはない。したがって、本研究で検討する1次均質化法によるフィン層の均質化弾性剛性は、チューブ-フィン積層体の曲げ問題に精度よく適用できない可能性がある。1次均質化法の上述の問題点を解決するため、周期単位セル内でのマクロひずみこう配を考慮した2次均質化法が研究されている。しかし、2次均質化法は節点変位こう配を考慮した高次の有限要素法を前提としているため、この手法により求めた均質化剛性は既存の汎用有限要素法プログラムでは使用できない。したがって、本研究におけるもう一つの課題は、1次均質化法により導出したフィン層の均質化弾性剛性を、チューブ-フィン構造の曲げ問題に適用した場合の、解析精度及び妥当性を検討することである。

さらに、本研究における最後の課題は、インタークーラのチューブ付根部に発生する応力及びひずみを解析的に予測する技術を開発することである。そのため、均質化法をインタークーラのチューブ-フィン構造に適用し、インタークーラ全体を有限要素モデル化し解析を行う。

まず、Y-周期性を有しないフィン層に適用可能な、均質化弾性剛性の評価方法を開発するため、チューブのプレートの厚さは、通常、フィンの板厚に比べて十分に大きいので、フィンとチューブの接合面では一様変形条件が成り立つと仮定した。この一様変形条件を考慮して応力の釣合い式を弱形式に変換した結果、3次元周期構造体の均質化法が境界条件だけを修正すればフィン層の均質化弾性剛性の評価に適用できることを示した。次に、開発した均質化法をインタークーラのアウターフィンとインナーフィンに適用し、フィン層の均質化弾性剛性を導出した。その結果、フィン層の均質化弾性剛性は、アウターフィンとインナーフィンのどちらの場合でも、異方性が大変著しく、図面形状と実形状を比べると、特に積層方向の垂直剛性と面外のせん断剛性が大きく異なることがわかった。したがって、フィン層の均質化弾性剛性を図面形状に基づくと極めて過大に評価することになり、フィンの実形状を考慮してフィン層の均質化を行う必要があること明らかになった。

次に、導出した均質化弾性剛性の妥当性を検証するため、チューブ-フィン構造体の部分モデルを用いて、圧縮負荷による検証を行った。まず、インナーフィン付きチューブ2個とアウターフィン1ピッチを直列に並べた連結体を考え、その圧縮負荷解析を有限要素法により行った。この結果、フィン層を均質化したフィン均質化モデルはフィン形状をそのまま考慮したフルスケールモデルとほぼ同じ結果を与え、フィン均質化モデルの妥当性が示された。次に、実験検証として、インナーフィン付きチューブ5個とアウターフィン4層からなる直方体ブロックの積層方向圧縮試験を実施するとともに、対応する有限要素解析を、フィン層を均質化した有限要素モデルにより行った。この結果、フィンの実形状に基づく均質化弾性剛性を用いると有限要素解析の結果は実験結果とよく一致し、フィンの実形状を均質化で考慮することの重要性が示された。

さらに、1次均質化法により導出したフィン層の均質化弾性剛性を、チューブ-フィン構造

の曲げ問題に適用した場合の、解析精度及び妥当性を検討するため、チューブ-フィン構造体の部分モデルを用いて、曲げ負荷による検証を行った。まず、チューブ2本とアウターフィン1層からなる積層板を考え、その曲げ解析を有限要素法により行った。その結果、フィン均質化モデルはフルスケールモデルとほぼ同じ結果を与え、フィン均質化モデルの妥当性が示された。これは、曲げ問題で支配的となる長手方向垂直応力が主にチューブのプレート部分に発生し、フィン均質化モデルではこの部分を均質化せず、そのまま考慮したことによる。次に、3種類のチューブ-フィン試験体をインタークーラ伝熱コア部から切り出し、4点曲げ試験を実施するとともに、フィン均質化モデルによる有限要素解析を行った。その結果、試験体上面中央部と下面中央部で測定した長手方向ひずみと負荷曲げモーメントの関係が線形部分ではフィンの実形状を考慮した線形弾性解析により精度よく再現され、フィン均質化モデルの妥当性が実験的にも示された。また、フィンの実形状をその均質化において考慮することの重要性も示された。さらに、フィン均質化モデルによる4点曲げ解析の結果を検討したところ、アウターフィン層では面外均質化せん断剛性が大変小さいため、ベルヌーイ-オイラーの仮定が成立しないことがわかった。特にフィンが実形状の場合、ベルヌーイ-オイラーの仮定の不成立度は大変大きく、その結果として負荷曲げモーメントとチューブの本数はほぼ比例することが明らかとなった。この比例関係は実験結果でも確認された。

最後に、均質化法をチューブ-フィン構造に適用し、インタークーラ全体を有限要素モデル化した。このモデルに、熱応力試験時の実測温度分布を与えることで熱応力解析を行い、実験結果と比較した。その結果、付根部近傍の平坦部に発生したひずみは、実験と解析で定性的な傾向は一致したが、定量的には一致しなかった。これは、有限要素解析において、チューブとタンクの付根部における有限要素分割は、チューブ角部のR形状やろう付フィレットを考慮しておらず、非常に粗くモデル化したためであると考えられる。そこで、全体解析における最大ひずみ発生部位である7本目のチューブ付根部に着眼し、ズームング法による付根部近傍の詳細な解析を行った。そのため、チューブの付根部分の詳細な有限要素モデルを作製し、モデル端部の境界条件に、インタークーラ全体をモデル化した解析より得られた変位を与えると同時に、温度分布を与え解析を実施した。さらに、付根部の非弾性状態を考慮可能な材料構成則を検討するため、チューブ材の材料試験を行った。実験結果よりO-W則に基づいた材料パラメータを決定した。O-W則に基づく材料構成則を用いて、ズームング解析を行った結果、平坦部に発生するひずみ範囲を実験と比較すると、平均値で約17%の誤差となり、実用的には十分な精度で解析技術が開発できたと考える。本解析により得られたひずみ値を、実験結果より得られた材料強度と比較することで、熱応力に対する疲労強度の信頼性保証が可能である。

本研究で開発されたチューブ-フィン構造体に適用可能な均質化解析方法は、インタークーラ伝熱コアに適用され、インタークーラ全体をモデル化した熱応力解析に適用されている。また、チューブ-フィン構造体は、ラジエータ、ヒータコア、エバポレータなどの他自動車用熱交換器で多用されているため、本研究で開発した均質化解析方法が、今後も役立てられることが期待される。