

511 非定常熱流れと非線形熱応力解析の連成解析に関する研究

Research on Coupled Analysis of Transient Thermal Flow and Nonlinear Thermal Stress

安東裕也、○范秦寅^{*1}、ソフトウェアクレイドル

Yuya Ando, Qinyin Fan, Software Cradle Co. Ltd.

Key Words: coupled analysis, CFD, transient thermal flow, nonlinear thermal stress, mapping

1. 緒言

CAEはシミュレーション技術とコンピュータ・ハードウェアにおける急速な進歩に従って工学の共通ツールになった。又、高性能のGUIにより、構造解析と数値流体力学（CFD）解析の手順が分かり易くなった。しかしながら、問題が構造解析とCFDの両方にかかっている場合、解析手順はそれほど確立されていない。著者らが開発した有限体積法をベースにした熱流体解析プログラムSC/Tetra⁽¹⁾にはテトラ、ヘキサ、プリズム、およびピラミッド要素から成るハイブリッドメッシュが使用され、すべての変数が要素の節点で定義されている。そのため、有限要素法をベースにした構造解析プログラムとの間でデータの定義に互換性が高く、転送が容易である。本報告では、熱流体と熱応力の連成解析における温度荷重の転送方法に関して3つのアプローチを調査・比較し、最後に、Tパイプを用いて非定常熱流体と非線形熱応力の連成解析例として紹介した。

2. データの転送方法

熱流体解析と熱応力解析の連成問題で重要なのは熱流れ解析で得られた温度分布を熱応力解析のための入力データにどのように変換するかということである。また、両方の解析で同じメッシュが使用されるかどうかも重要となる。

熱流体解析で固体と流体の温度を同時に計算し、そして固体部の温度分布を用いて、熱応力解析を行う。同じメッシュが使用されているならば、熱応力解析に節点温度を直接入力し荷重として使用することができる。流体解析・構造解析ともに同じ節点の温度自由度を持っているので、温度データの補間が不要となる。又、熱応力による変形がその後の流れ解析に反映し易い。著者らはこの方法を直接変換法として名づけた。この直接変換法を使用するには、要素形状の制限がある。即ち、CFD解析で使用されている固体部メッシュが熱応力解析のための固体部メッシュ形状と同じにならなければならない。又、固体部メッシュは高次要素に変換し、熱応力解析で再利用することが多い。

一方、固体部で要素形状或いは節点分布が異なった場合でも、流れ解析で得られた結果を熱応力解析メッシュのノードに補間して使用する、補間方法がある。補間過程で誤差が導入されるが、CFDと構造解析において、異なるメッシュの使用が可能になるので、それぞれの解析に最も適当なメッシュを選ぶことができ、又、大規模問題を分割して解析することも可能になる。補間方法の一つ目は流れ領域の表面節点にある乱流熱伝達係数とそれに対応する管内流体雰囲気温度を固体表面の関連節点にマッピングする方法である。乱流熱伝達係数は温度の壁関数から予測し⁽²⁾、流れ側の一層目要素にある節点温度を雰囲気温度とみなすことができる。そして、固体領域の他の表面の境界条件と共に、固体部の温度を「再計算」でき、固体の温度分布を荷重として熱応力解析に適用できる。一方、流体部分のみの計算は管内側の表面温度を境界条件として使用する。そのために上記の計算を数回繰り返して収束させることにより、結果を得るべきと考えられる。しかしながら、もし、管内雰囲気温度を定数とすることができるなら、以上の計算を繰

り返す必要がなくなり、速度場と流れの物性値のみにより熱伝達係数を計算できる⁽²⁾。著者らはこの方法を表面補間法と名づける。表面補間法を用いる場合、流れ解析の際に固体部分を省くことができる。

二つ目の補間方法を下記に説明する。この方法は流れ解析で得られた固体温度分布を構造解析のための異なるメッシュに補完する。著者らはこの方法を体積補間法と名づける。固体温度の「再計算」が必要ないので、この方法は表面補間法と比べてより簡単な方法である。しかし、CFD段階で、パイプの固体部分の温度分布も同時に計算する必要がある。以上の3つの方法の何れも精度よくできるが、解析内容により、3つの方法の中から最適の方法を選択できる。データ転送方法の詳細および精度に関して著者らの論文を参照されたい⁽³⁾⁽⁴⁾。本文の計算は直接変換法を採用した。

3. モデルと計算条件

図1に計算用のT型パイプモデルを示す。熱応力を求める場合、パイプの内、外表面に均一な熱伝達係数を定義して温度分布を求めてから熱応力を予測することが良く行われる。しかしこの場合、流れの影響を考慮していないため、温度分布の誤差が大きく熱応力を正確に求めるのは困難である。特に管内乱流の場合、パイプ中の乱流熱伝達がより正確に評価するためには、パイプ中の流れ温度も共に計算しなければならない。

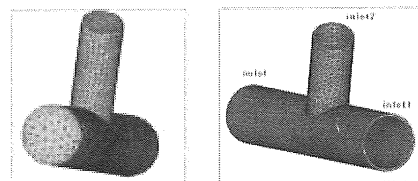


Fig. 1 Fluid (left) and solid (right) domain of calculations

この例のモデルの管外径は0.4m、長さは2.0m、45度分岐管の長さは1.0m、パイプの厚さは0.02mである。熱流れの計算では、流体は非圧縮性空気、密度は1.2060kg/m³、粘性係数は1.83×10⁻⁵kg/m・s、熱伝導率は0.0256W/m・K、そして、比熱は1007.0J/kg・Kで、すべて定数である。パイプの材料は鉄で、密度は7871.40kg/m³、熱伝導率は81.168W/m・K、比熱は439.2J/kg・Kである。流速は図1にあるInlet1では3.0m/s、そして、inlet2では10.0m/sに設定した。又、outletでの圧力は0Paである。パイプの外側表面の熱伝達係数は0.5W/m²・K、雰囲気温度は293Kであり、パイプ端で断熱とした。又、乱流モデルとして標準k-ε乱流モデルを用いた。熱応力解析では、inlet1平面上の節点が面の垂直方向（x方向）に拘束される。その以外の任意の一点がy方向に拘束、もう一点がz方向に拘束される。そして、流体からパイプ内表面に加えられる圧力は無視する。入口の温度は非定常条件として図2（左）のように設定し、表1の各ケースの温度値を用いた。

熱応力の計算では、固体のヤング率は2.10×10⁵MPa、ポアソン比は0.3である。図2（右）に計算に使用した2直線近似の移動硬化則を示す。2直線近似の移動硬化則の降伏応力は400MPa、塑性

*原稿受付 2006年9月。

^{*1}正員、株式会社ソフトウェアクレイドル（〒532-0011 大阪市淀川区西中島6-1-1 新大阪プライムタワー）

勾配は 4500MPa である。又、表 1 に各ケースの線膨張係数の値を示す。熱流体解析の時間ステップは 0.01 秒である。又、20 秒後、20°C の均一温度荷重を全ての節点に加えて残留応力を求める。

熱流体解析の離散化した運動方程式は BiCGStab 法で、連続方程式は AMG 法で解いて、圧力補正式は SIMPLEX 法を用いて 20.0s まで解いた。モデル全体のメッシュ数は 125224 で、節点数は 32433 であり、固体部メッシュ数は 35766 で、節点数は 26003 である。

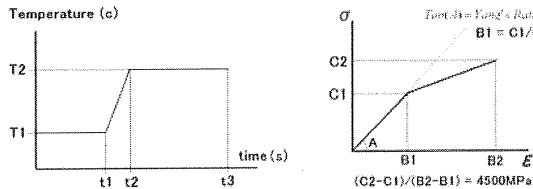


Fig. 2 Temperature history at inlets ($t_1 = 3s$ and $t_2 = 3.0001s$ and $t_3 = 20s$) (Left) and Bilinear Kinematic Hardening (Rate-independent plasticity) nonlinear stress-strain materials property (Right)

TEST	coefficient of linear thermal expansion ($1/^\circ\text{C}$)	Minimum /Maximum temperature at inlet ($^\circ\text{C}$)
1	8.05×10^{-5}	20/100
2	8.05×10^{-3}	20/100
3	8.05×10^{-3}	20/800

Table 1 Calculation conditions of cases (After 20s, 20°C uniform temperature load is added to all node of the model and residual stress is estimated)

4. 計算結果

結果を比較するために評価点を設ける。図 3 には二つの評価点の位置を示している。

図 4 には 3 ケースのモデルのトータル相当ひずみのコンターを示す。表 1 に示したように、ケース 1 から 3 まで、入口温度最大値と最小値の差、あるいは、線膨張係数の増大により結果のひずみが大きくなるがよくわかる。ここでは、相当応力、弾性相当ひずみ、塑性相当ひずみ、熱相当ひずみの結果の表示を省く。

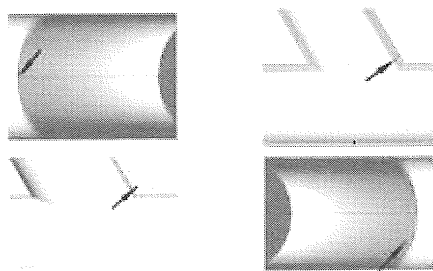


Fig. 3 Monitor points in the model (Left: node 1, $x=1.1155$, $y=0.19999$, $z=0.0022447$, and Right: node 2, $x=1.0831$, $y=0.21123$, $z=0.091755$)

調査したい項目により、図 3 のように評価点を複数設けることができるが、スペースを節約するために、ここでは、典型的な一点の関連結果のみを示す。図 5 は点 1 の温度荷重を示し、図 6 は点 1 の相当熱応力を示す。図 5 の温度荷重はスムーズに変化しているにもかかわらず、図 6 の相当熱応力が大きく振動している。この現象は下記のように解釈できる。評価点付近の熱ひずみ量が異なるため、ひずみ量の違いにより弾性ひずみ成分が発生する。又、弾性ひずみ成分が応力と同様の変化をしていることも結果で確認できる。

5. 結 言

直接変換法では非定常熱流れの計算結果を容易に熱応力解析のための非定常温度荷重ステップに変換できる。固体物性

値が定数で 2 直線近似の移動硬化則を考慮する場合、評価点の熱応力が降伏応力を超えない場合でも周辺節点の弾性ひずみの影響で塑性変形が生じることがある。図 6 の結果により、最大応力および残留応力を予測するために、温度荷重のロードステップ数を大幅に減らしても誤差の小さい結果を得られるとわかる。

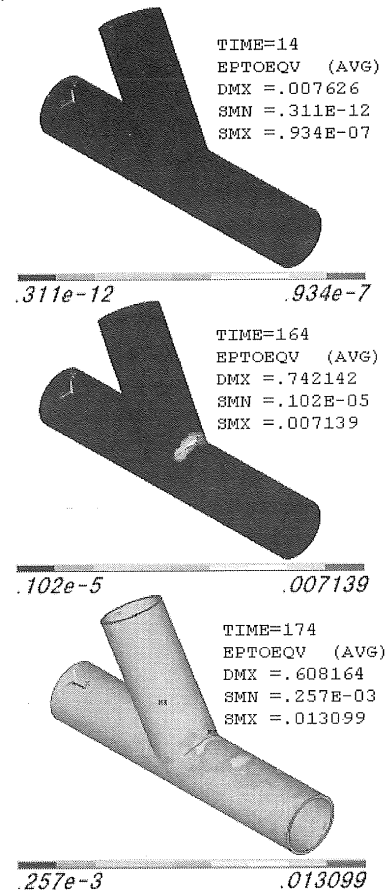


Fig.4 Total equivalent strain of case 1 (top), case 2 (middle) and case 3 (bottom) in Table 1

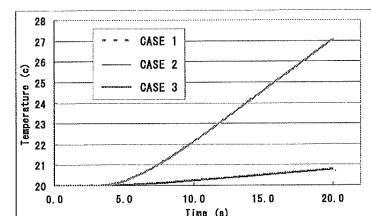


Fig.5 Temperature load at node 1

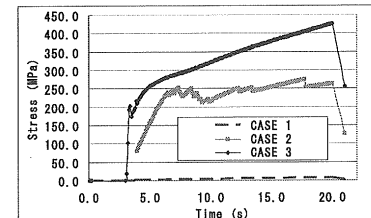


Fig.6 Equivalent thermal stress at node 1 of case 2 in Table 1

6. 参考文献

1. T. Matsushima, "An automatic mesh generator based CFD system to be used as a design tool", SAE technical paper 2001-01-0037.
2. H. Tennekes and J. L. Lumley, *A first course in turbulence*, MIT Press, Massachusetts, 1972.
3. 范 秦寅ら、エンジンエグゾーストマニホールドの熱流体と熱応力の連成解析、第 16 回計算力学講演会、2003. 11. 22-24
4. Qinyin Fan, etc., Coupled Analysis of Thermal Flow and Thermal Stress of an Engine Exhaust Manifold, SAE technical paper 2004-01-1345.