

ターボ機械における熱・流動連成解析

Conjugate Heat Transfer Calculations for a Turbo-Machinery

石坂浩一*

*三菱重工業(株)高砂研究所

Kouichi Ishizaka*

*MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD., Takasago R&DCenter

E-mail kouichi_ishizaka@n.trdc.mhi.co.jp

1. はじめに

ガスタービンをはじめ産業用、航空用のターボ機械の開発において、CFDは非常に重要な位置をしめており、性能向上のためには必要不可欠なものとなっている。一方で近年のターボ機械の高温化高負荷化に伴い、信頼性向上のためには、精度良くメタル温度を予測する必要がある。こうした温度を精度良く予測するためには、流体との熱伝達と構造の熱伝導、輻射や自然対流等を模擬する必要がある。一般に conjugate heat transfer と呼ばれるこのような問題に対して、CFDをベースとして、構造部分の熱伝導を解析できるコードも汎用のものを中心にいくつか市販されている。ここでは、汎用コードのFluentを用いた conjugate heat transfer の解析例について紹介する。

2. 輻射のモデリング

CFDコードに組み込み可能な輻射モデルとして乱流モデル同様数多くのモデルが提案されている⁽¹⁻⁴⁾。これらのモデルには万能なものはまだ提案されてなく、光学的厚さで一般にはモデルを使い分けている。その中で、DTRM (Discrete Transfer Radiation Model)⁽¹⁾およびDO (Discrete Ordinate)⁽⁴⁾モデルは解析時間を要するが比較的良い精度での予測が可能である。

図1に示す検証モデルを用いて、平均放射熱流束に対するFluentによるDTRMモデルを用いた解析結果と一次元熱伝達モデルによる理論値⁽⁵⁾及び連成解析を行わない場合(従来法)の結果を比較認した。

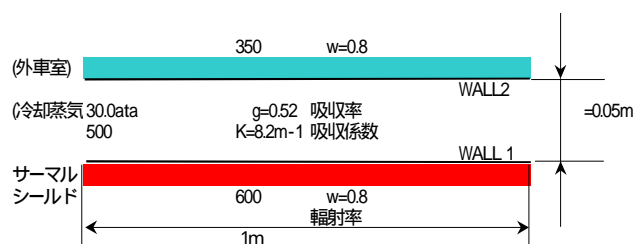


図1 輻射のテスト計算モデル

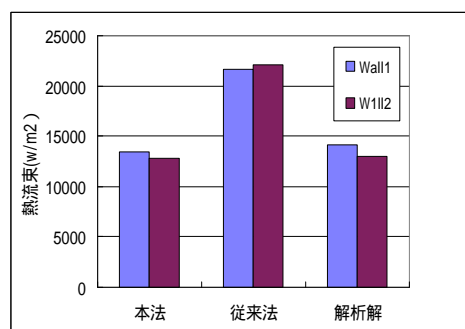


図2 一次元熱伝達モデルとの比較

図2に比較結果を示す。これより、ガス吸収を考慮せずに構造部分のみを解析する従来法に比べ、DTRMモデルによる解析はガス吸収・ガスふく射をより正確に評価できることがわかる。

3. 解析例

解析例として、蒸気タービンのケーシングと冷却蒸気の結果を示す。解析に用いた形状は、当社の代表的な高中圧一体型のケーシングで高圧排気の一部が内外車室を冷却しながら（冷却蒸気は温められながら）中圧側へ流れ、中圧のサーマルシールドの内面を流れる構造となっている。

図3に流体及びメタル温度分布を示す。また、図4に流線図を示す。このように局所的な流動の熱伝達率、自然対流、局所的な温度を反映できることで、十分精度が高まっている。図5にケーシング外面の温度の計測値とCFDによる予測値の比較を示す。両者はほぼ一致しており、本法の有用性が確かめられた。

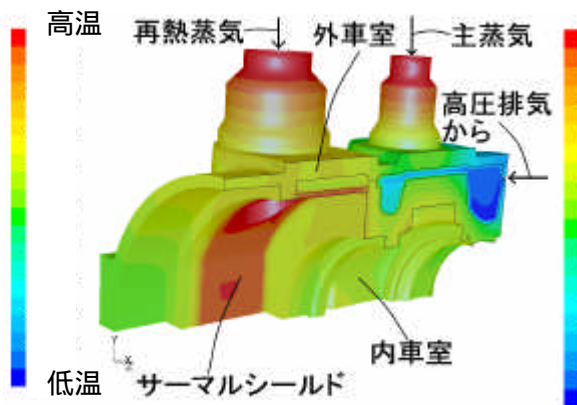


図3 流体及びメタル温度分布

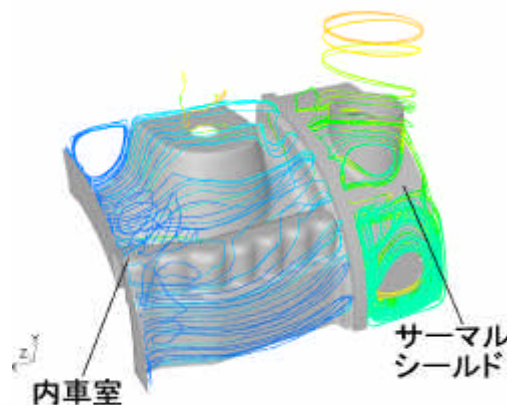


図4 流線図（流線の色は温度を示す）

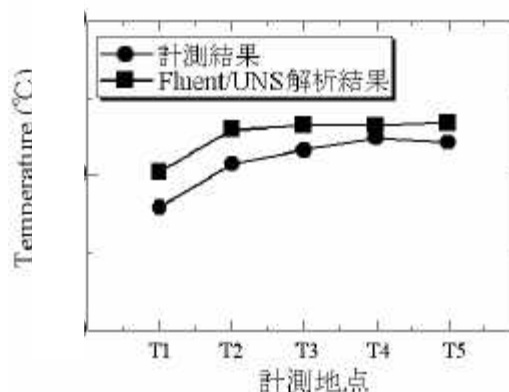
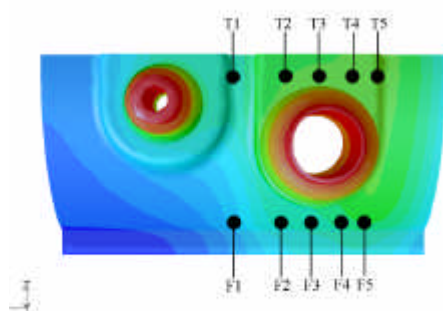


図5 実測とメタル温度分布の比較

図6にガスタービン圧縮機のローターのシール流れ、キャビティ及びローターの熱伝導の連成解析の結果を示す。また、図7に燃料ノズルの温度予測解析の結果を示す。これらの解析はともに流れのパターンにより流体及び構造の温度が異なり、また流体の温度差により生じる自然対流の影響等も無視できないことから、このような連成計算が必要な計算例である。

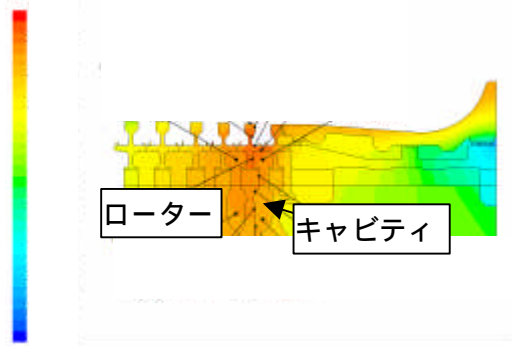


図6 圧縮機ローター温度予測

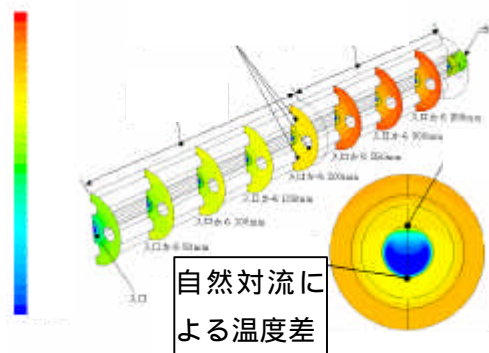


図7 ノズル温度予測

4. 構造強度評価への適用

従来法では、構造（伝熱，応力）解析と流動解析を別々に評価することが多い．これに対し本手法では、構造解析と熱・流動連成解析の間でメタル温度データを共有とするシステム化により、解析に要する時間短縮と精度向上を図っている．すなわち図8に示すように、図面情報である三次元CADデータから構造及び熱・流動連成解析それぞれのメッシュが作成される．そして、熱・流動連成解析により求めたメタル温度分布を、データ変換プログラムを介して構造解析メッシュへデータ転送し、応力解析を行うものである（本システムでは、熱・流動連成解析メッシュと構造解析メッシュが異なるメッシュ形状、サイズでも対応可能である）．従来法との比較を合わせて、本手法の具体的内容と流れは以下のとおりである。

図8 構造強度評価への適用

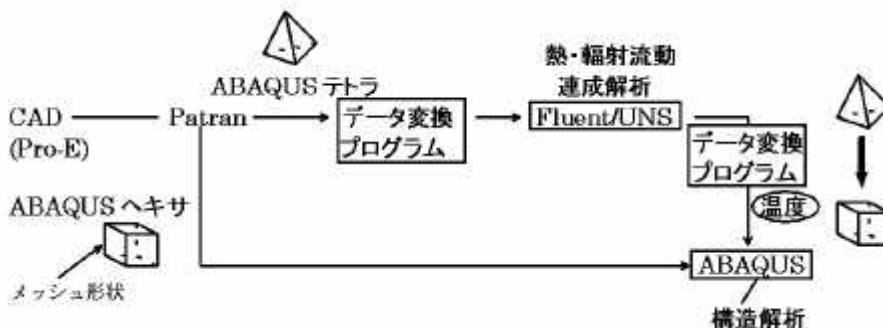


図8 構造強度評価を含めたフローチャート

従来法：

流動部分のモデル化，メッシュ作成．

流体部分のみの CFD 解析 熱伝達率を算出．

構造解析メッシュを作成．

構造解析メッシュの要素表面に流動解析結果によるエリアごとの平均熱伝達率，雰囲気温度を境界条件として与える．

伝熱及び構造解析により，メタル温度分布，熱応力等を算出．この場合，流体の局所的な温度分布，熱伝達率分布は構造解析に反映されない．また，伝熱解析結果は流動解析に反映されない．

本手法：

三次元 CAD データを基に，非構造格子(4 面体)を作成（構造部分及び流体部分）．

Fluent でふく射を含めた流動・伝熱の連成解析．

構造解析メッシュ（6 面体あるいは 4 面体）を作成．

構造解析メッシュの節点に連成解析により求めた温度をデータ転送する（位置の関数として補間プログラムで定義する）．

転送された温度場で構造解析を行い，熱応力等を算出．連成解析では，流動の局所的な温度分布，熱伝達率分布及び構造側の温度分布が相互に反映される（解析精度の向上）．

5．おわりに

構造と流体の連成解析の例として、輻射等を含んだ連成熱解析の結果を示した。

連成手法により、温度の予測精度、特に不均一な流れ場や自然対流を伴う流れなど、局所的に温度分布、熱伝達率分布を持つ流れに有効であることが確認できた。

一方で、起動、停止等の非定常の予測に対しては、流動の時間スケールと熱伝導の時間スケールに大きな開きがあり、解析時間の短縮等の問題、乱流遷移や衝突噴流に対する CFD の熱伝達率の予測精度向上等が課題である。

引用文献

[1] M. G. Carvalho, et al., Fundamentals of radiation heat transfer, Vol.160, pp.17-26, ASME HTD, 1991.

[2] P. Cheng, AIAA Journal, Vol.2, pp.1662-1664, 1964.

[3] R. Siegel and J.R. Howel, Thermal Radiation Heat Transfer., Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C., 1992.

[4] E.H. Chui and G.D. Raithby, Numerical Heat Transfer, Part B, 23:269-288, 1993.