

熱処理設備における解析技術の活用

Utilization of CAE Analysis in Heat Treatment Facilities

上田剛志 T. UEDA

Heat treatment equipment is based on fundamental manufacturing technology that maximizes utilization of material properties and ensures a stable and reliable supply of high-performance components. The principal challenges associated with heat treatment processes include quality enhancement, maintenance of structural integrity, and improvement of energy efficiency. From the perspective of quality control, it is essential to maintain a uniform distribution of temperature and gas flow and to precisely control atmospheric composition in the furnace. Structural integrity requires robust design strategies to mitigate thermal stress and creep deformation under high-temperature operating conditions. To address these challenges, our company utilizes advanced numerical analysis methodologies, such as the computational fluid dynamics (CFD) for coupled heat transfer and gas flow simulation and the finite element method (FEM) for thermo-mechanical and creep analysis, as an effective and systematic approach. This report presents several application examples of numerical simulations that contribute to the optimization of furnace design and operating conditions and lead to improved performance and reliability of heat treatment equipment.

Key Words: heat treatment, furnace, CAE, CFD, FEM

1. はじめに

熱処理は、材料の性能を発現させるとともに高品質な製品の安定供給に不可欠な基盤技術である。熱処理設備に求められる要件は多岐にわたるが、主に以下の3点である。

- ① 熱処理の品質および安定性を向上させるため、炉内の温度および流速を均一化し、雰囲気組成を適切に制御すること
- ② 構造強度を確保するため、熱応力およびクリープ変形を抑制し、高温環境下での長期使用に耐えること
- ③ 省エネルギー化のため、炉体からの放散熱を低減し、かつ、廃熱を再利用すること

これらの要件はいずれも炉内の温度・構造および気体の流動に関係しており、炉内状態を定量的に把握する必要性を示している。それには解析技術の活用が有効であるが、熱処理設備の解析は一般的な構造解析や定常流体解析とは異なり、高温環境下における複合的な物理現象を考慮する必要がある。すなわち、温度上昇に伴う部材の熱膨張、流体の密度変化、温度依存性を有する物性値の変化などが相互に作用する非線形現象となり、解析の

難易度が高い。

当社では、これらの複合的な物理現象を反映した数値解析技術を構築した。本技術により、炉内の温度分布、気体の流速分布および雰囲気濃度分布を三次元的かつ定量的に把握できる。くわえて、本解析技術は実機試験と比較して迅速かつ低コストで実施できるため、計算を繰り返すことで多数の熱処理条件を網羅的に評価できる。すなわち、熱処理設備の設計期間を短縮するとともに品質の向上にもつながる。

本報では、構築した数値解析技術を適用した二つの事例を紹介する。

2. かくはんファンへの適用事例

本章では、浸炭炉の加熱室に設置されたかくはんファンの寿命を改善した事例について述べる。

2.1 加熱室の構造

加熱室は、図1に示すとおり、外側を鋼板製の炉体で囲まれている。その内側には高温環境で使用可能な断熱材が配置されており、炉内の熱損失を低減しつつ安定し

た熱環境が維持できる。加熱室の内部には電気ヒーターまたはガスバーナーが設置され、熱処理の対象となる部品（以下、ワーク）を約 900℃ から 1 000℃ の間まで加熱する。炉内にはワークを搬送する機構があり、また、炉内の温度分布および雰囲気ガスの組成を均一化させるため、かくはんファンが設置されている。かくはんファンによって炉内ガスの循環が促進されるが、使用条件によっては短期間でかくはんファンに亀裂が発生する（図 2）。そのため、ファンの寿命向上が重要な課題であった。

2.2 かくはんファンの損傷要因

かくはんファンは、高温状態の炉内に常温のワークが投入されることで急冷され、その後再び加熱される。この熱サイクルの繰り返しに伴って熱応力が生じ、熱疲労亀裂が発生・進展して寿命が低下すると考えられている。

ワーク投入時におけるかくはんファンへの熱影響を図 3 に示す。ワークを投入すると低温のワークによって冷却された炉内雰囲気ガスがファンに流入し、表面温度が低下する。さらに、ワークとのふく射熱交換や炉内に配置された断熱材からの受熱などにより、複雑な熱移動が生じる。その結果、ファンの内部および表面に不均一

な温度分布が生じる。

この温度分布により各部位には熱膨張が生じるが、膨張量は部位によって異なるため、ファン内部には熱応力が発生する。特に、急冷や急加熱など温度勾配が大きい場合、部位間での膨張差が顕著となり、局所的に高い応力集中が生じる。さらに、回転による遠心力も加わるため、熱応力と機械的応力が重畳した状態となる。この熱サイクルの繰り返しにより、低サイクル疲労に類似した損傷が蓄積する。

2.3 連成解析による改善

構造解析と熱流体解析の連成により、かくはんファンに発生する応力分布および応力集中部位を評価した。熱流体解析で求めた熱境界条件を構造解析に反映させ、実使用環境に近い応力状態を再現した。

解析で得られた応力分布を図 4 に示す。温度勾配に起因する熱応力と回転に伴う遠心力により、実機の破損箇所では応力が集中していた。この応力集中の緩和を目的に解析を繰り返し、ファン形状を改善した¹⁾。具体的には、ファンの底部に凹みを設けるとともに軸側面に孔を設けることで応力集中を 60% 低減した。改善した構造を社内の加速試験で検証した結果、ファンの寿命は従来

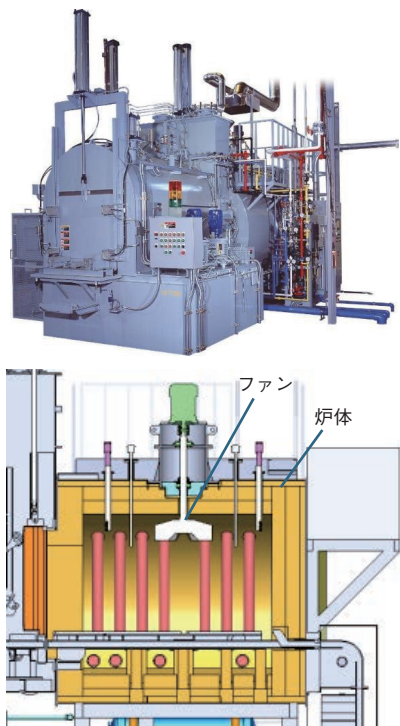


図 1 浸炭炉の加熱室構造

Structure of heating chamber in a carburizing furnace

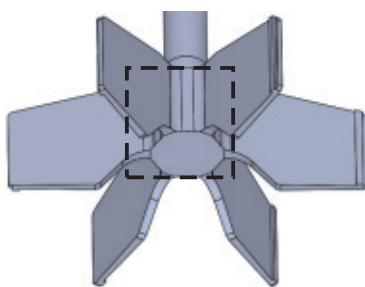


図 2 かくはんファンの破損

Damage to agitation fan

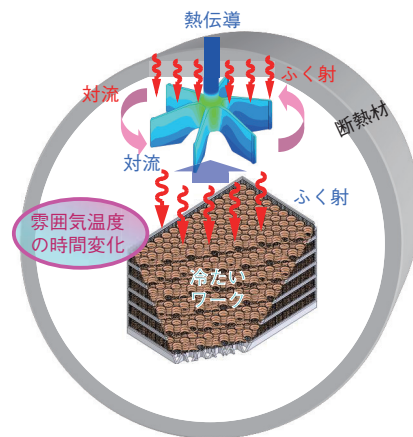


図 3 ワーク投入時のファンへの熱影響

Thermal impact on fan during workpiece loading

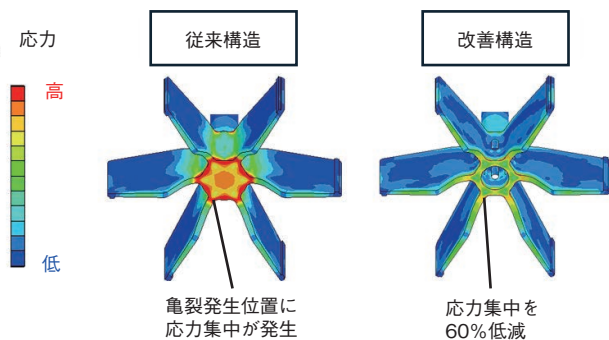


図4 ファンの応力分布
Distribution of stresses on fan

の2倍以上に延びた。

熱処理装置の炉内は高温のため、さまざまな部材に熱応力が発生する。本報で紹介したファン以外の部材についても強度確保のために解析技術を活用している。

3. 雰囲気分離への適用事例

当社は、脱脂工程で過熱水蒸気を使用する装置として、熱風循環式オープン、小型ボックス炉、連続炉を商品化した（AllFitシリーズ；図5）。過熱水蒸気は加水分解の効果で脱脂できるため、大気雰囲気と比べ脱脂の処理時間短縮が期待できる²⁾。本章では、流体解析技術によって連続炉での品質不良を抑制した事例を紹介する。



図5 AllFit シリーズ連続炉タイプ
AllFit Series: Continuous Furnace Type

3.1 連続炉の構造と技術課題

連続炉の構造概略を図6に示す。本装置では、トンネル状の金属筒内部にワークが搬送され、連続的に熱処理が施される。炉内は温度制御によって複数の領域に区分されており、高温部では過熱水蒸気を充満させることで

高い脱脂効果が得られる。

一方、炉内の低温部では過熱水蒸気が凝縮して液化するため、ワーク表面に結露が発生し、品質不良の原因となる。この問題を回避するには、高温部と低温部の間で雰囲気ガスを適切に分離し、低温領域へ過熱水蒸気の流入を抑制する必要がある。しかしながら、搬送性を確保するため、本連続炉はシャッターなどの機械的な仕切りを設けない連続空間構造を採用している。そのため、機械的な遮断構造を設けずに雰囲気分離を実現することが重要な技術課題であった。

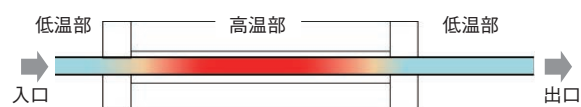


図6 連続炉の概略図
Schematic diagram of a continuous furnace

3.2 流体解析による改善

上記の課題を解決するため、三次元の数値流体解析（Computational Fluid Dynamics：CFD）によって連続炉内部における過熱水蒸気、窒素および酸素の流速を把握し、高温部と低温部の雰囲気分離特性を定量的に評価した。特に、過熱水蒸気の低温部への流入および逆流現象を抑制することを目的とした。本解析により、実機試験のみでは把握が困難な炉内の流速分布、温度分布および濃度分布を可視化し、雰囲気分離機構を明らかにするとともに設備の改良設計へ反映させた。

設計初期案と改良した製品の過熱水蒸気濃度分布を図7に示す。設計初期案では、高温部上部から低温部へ

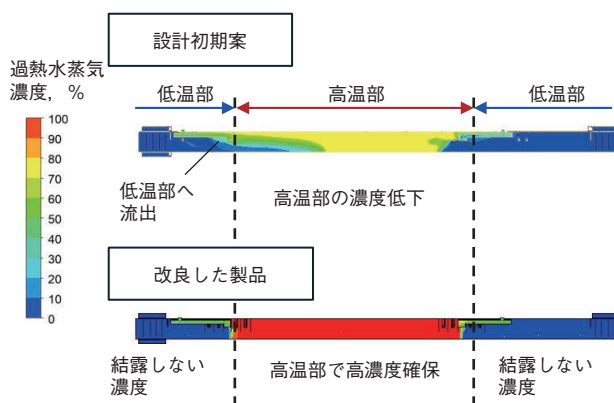


図7 過熱水蒸気濃度分布
Distribution of steam concentration

の過熱水蒸気の流出が確認された。そこで、ガス導入管の配置、数量、吹き出し方向および整流板の配置を最適化することで高温部と低温部の雰囲気分離を実現した。改良した製品の実機評価においても高濃度の過熱水蒸気による脱脂効果を確認し、低温部では結露の抑制を確認した。

4. おわりに

本報では、数値解析技術を熱処理炉へ適用した事例として、かくはんファンの寿命改善および連続炉における雰囲気分離について紹介した。

かくはんファンの事例では、熱流体解析と構造解析の連成により応力集中部位を特定し、形状の改善によって応力集中を約 60% 低減した。さらに社内での加速試験により、従来構造と比較して寿命を 2 倍以上延伸させた。また、雰囲気分離の事例では、CFD 解析によって炉内の流動および濃度分布を可視化し、ガス導入条件および内部構造を最適化した。それにより、高温部の機能を維持しつつ低温部へ過熱水蒸気の流入を抑制し、結露が抑えられることを確認した。

これらの事例にくわえ、炉内の温度分布や気体の滞留・偏流の可視化など、温度および気体流動に関するさまざまな課題解決に数値解析を活用している。

また、熱処理炉に対しても高温条件下の熱応力分布、変形挙動およびクリープ進展を事前に解析することで設備の弱点部位の特定と補強設計が可能となる。その結果、設備寿命の延伸および突発故障リスクを低減できる。さらに、炉体からの放熱量および内部エネルギーフローの定量評価により、断熱構造の最適化および排熱回収位置を明確化し、エネルギー損失を低減できる。

今後は解析技術のさらなる高度化と適用範囲の拡大を図る。本技術を適用した熱処理設備を提供することで熱処理業界の課題解決に貢献していきたい。

* AllFit は、株式会社ジェイテクトサーモシステムの登録商標です。

参考文献

- 1) 光洋サーモシステム株式会社：熱処理装置用の攪拌ファン、およびこれを備える熱処理装置，特開 2016-5918881 号(2016)。
- 2) 中谷淳司：過熱水蒸気を利用した熱処理装置の開発，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No1021(2024) 140-144。

筆者



上田剛志*
T. UEDA

* 株式会社ジェイテクトサーモシステム
先行技術開発部