

熱応力解析への形状最適化手法の応用

高温エネルギー機器の形状を最適化するシミュレーション技術

エネルギー機器に代表される大型構造物の設計においては、高信頼性とコスト競争力の両立が必要となっています。そのために、近年発達したコンピュータ支援エンジニアリング (CAE) システムをベースとした構造最適化設計が進められています。特に、火力発電機器などの高温環境下で使用される機器については、温度分布や熱膨張差により熱応力が発生し、機器の信頼性が低下するという問題があります。そのため、この熱応力を最小化するための形状最適化が課題となっています。

東芝は、高温エネルギー機器を対象に形状最適化技術を開発し、高信頼性とコスト競争力を両立しました。

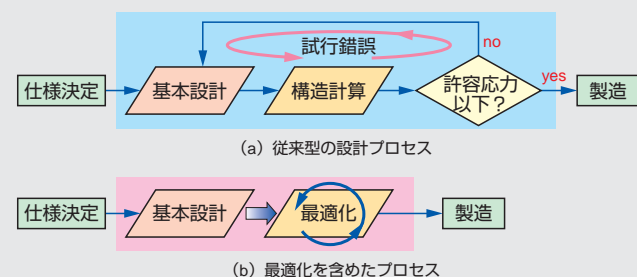


図1. 製品開発における強度設計プロセス — 従来設計プロセスは繰り返し試行錯誤が必要でしたが、最適化プロセスでは短時間に最適解を得られます。

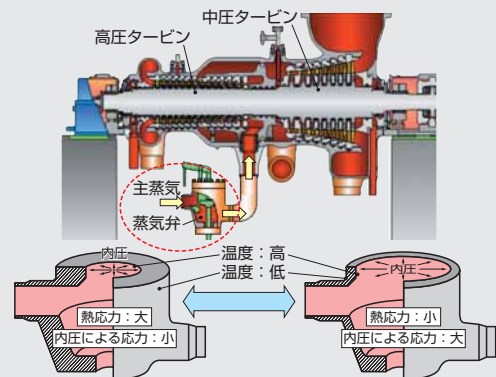


図2. 構造物形状と応力の関係 (蒸気弁の例) — 蒸気弁は、タービンの蒸気入口部に配置され、発電量に応じて高温蒸気の流量を制御します。この部品の肉厚が厚いと、内圧による応力は小さいが熱応力が大きくなり、肉厚が薄いとその逆になります。形状最適化手法により、これらの応力の和が最小となる構造を求めることができます。

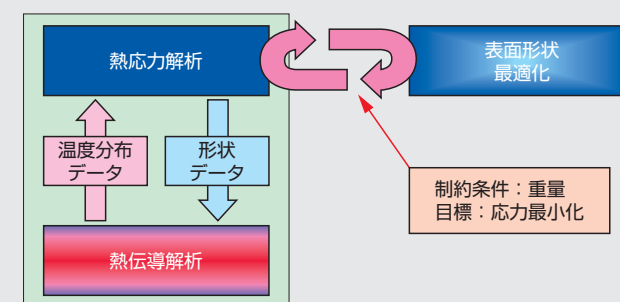


図3. 形状最適化手法を応用した熱応力解析 — まず、熱伝導解析により求めた温度分布を基に熱応力解析を行い、次に、熱応力と内圧による応力の合計が最小となるように表面形状を最適化します。

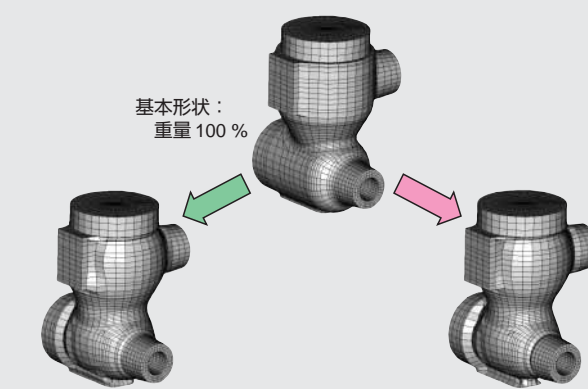


図4. 一体型蒸気弁の形状最適化の結果 — 基本形状に対し重量が90%及び85%となった場合について、応力が最小となる形状を求めました。

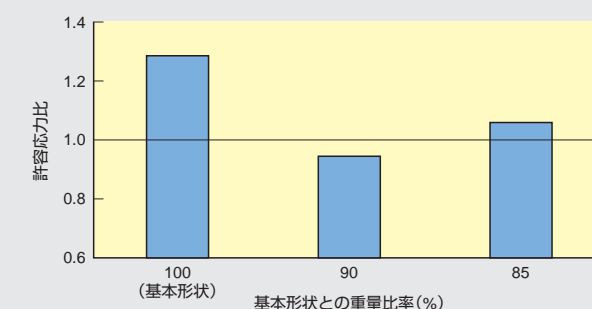


図5. 形状最適化後の応力値 — 発生する応力を許容応力以下に抑えるとともに、重量を10%低減できる形状を達成することができました。

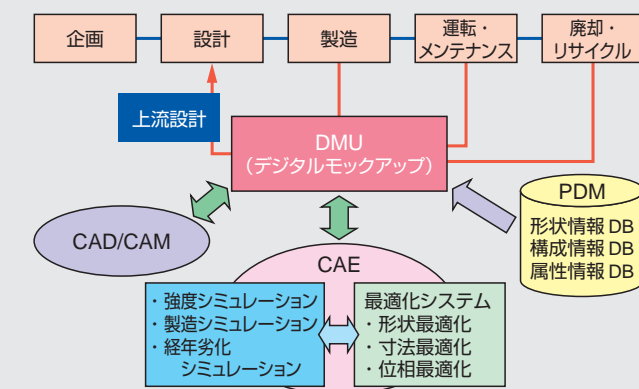


図6. DEシステムの概要 — 製品試験を仮想的にシミュレーションし、上流設計に反映させるシステムが実現しつつあります。

設計におけるシミュレーション技術

近年、設計の現場では、従来の経験に頼る設計手法に代わり、コンピュータ支援エンジニアリング (CAE) システムを活用した合理的な設計手法が取り入れられています。

CAE システムにおいては、強度評価シミュレーションや製造シミュレーションの開発が進められています。また、これらと最適化手法とを組み合わせることにより、最適設計形状を得る試みもなされています。図1には、強度設計における従来型の設計プロセスと最適化を含めたプロセスの比較を示します。最適化手法を取り入れることにより、従来の試行錯誤よりも時間とコストが節約でき、最適な解を得るこ

ともできます。火力発電システムを構成する高温機器においても、最適化手法が取り入れられています。これらの機器は、高温環境下で使用されることもあり、熱応力や経年劣化・損傷を考慮した最適化が必要となっています。

東芝は、熱応力を最小化するための形状最適化技術を開発し、火力発電機器の信頼性向上とコスト競争力強化を進めています。

形状最適化手法を応用した熱応力解析

火力発電機器の熱応力問題の多くは、熱応力と、蒸気などの圧力により発生する応力とが重なった問題となります。蒸気弁を例に、高温機器の形状と応力の関係を図2に示します。弁の内部には、高温・高圧の蒸気が流れているため

に、内外面の温度差による熱応力と蒸気による内圧に常にさらされています。機器の肉厚が厚い場合には、内圧により発生する応力は小さいのですが、内面と外面の温度差が大きくなるので熱応力が大きくなり、肉厚が薄い場合には、その逆の大小関係となります。

機器の形状が複雑になった場合、肉厚をどの程度にすれば熱応力と内圧による応力の合計が最小となるか、経験的に最適解を得るのが困難でした。そこで、新たに熱応力問題に対する最適化解析手法を開発しました。その手法を図3に示します。これは、コンピュータにより、与えられた制約条件の下で様々な表面形状を変化させて、所定の目標を達成するように表面形状の最適化を行うものです。ここでは、重量を制約条件とし、その重量において応力

を最小化する表面形状を求めています。

形状最適化例

火力発電機器の主蒸気止め弁・加減弁一体型蒸気弁の開発にこの形状最適化手法を適用した例を図4に示します。蒸気弁には蒸気を遮断するための止め弁と蒸気量を調整する加減弁があり、一体型蒸気弁はこれらを一体化したものです。この解析例では、従来の設計手法により求めた基本形状を重量100%としています。これに対し、重量制約を90%、85%とした場合のそれぞれについて、応力が最小となる形状を最適化解析により求めました。また、それぞれの形状において発生する応力の許容応力に対する比を、図5に示します。重量90%の場合は許容応力を満足し、一方、85%の場合は

肉厚が薄くなりすぎたために、許容応力を超えることが明らかとなりました。この結果から、応力を許容応力以下に抑えるとともに、重量を10%低減できる形状を達成することができました。このような熱応力問題を考慮した最適化解析は、火力発電機器の蒸気タービン高中圧ケーシングなどにも適用しています。

いっそうの高信頼性とコスト競争力強化を目指して

最近では図6に示すように、CAD/CAM (コンピュータ支援による設計・製造) システムや PDM (製品情報管理) システムとともに、仮想的な製品試験体 (DMU: デジタルモックアップ) システムが提案されています。DMU を使うことで、製品ライフサイクルの

各ステップで起こりうる現象や問題をあらかじめ評価するという、デジタルエンジニアリング (DE) が可能となります。今回、強度シミュレーションにより熱応力を計算し、最適化を行いました。製品ライフサイクルの各ステップを評価するためには、このほかに、製造シミュレーション技術や経年劣化のシミュレーション技術が不可欠です。そのために当社は、溶接などの熱加工や高温劣化のシミュレーション技術を開発しています。今後、このような技術と最適化手法を組み合わせることにより、エネルギー機器のいっそうの信頼性向上とコスト競争力強化を目指します。

中谷 祐二郎

電力・社会システム社
電力・社会システム技術開発センター
金属・セラミックス材料開発部主務