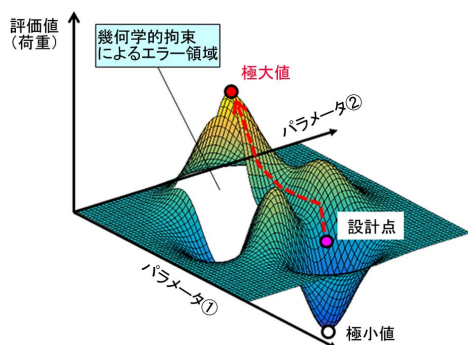


機構解析と非線形応答曲面による高速・高精度な最適化手法を適用した設計技術

Design Technique Applied the Multi-body Dynamics and the Optimization Technique by a High Speed and High Accurate Nonlinear Response Surface



アロウラ ロヒット*1
Rohit Arora

今岡 健悟*1
Kengo Imaoka

二橋 謙介*2
Kensuke Hutahashi

機構解析は複雑機構の成立性評価に有効であるが、かじり付き等を起こす最悪条件(特異解)の探索には、膨大な量のパラメータ組合せ解析を要し、計算コストと期間増を招いている。そこで、機構解析に非線形応答曲面手法(クリギング法)と EIF (Expected Improvement Function) を組み合わせた効率的な応答曲面アップデート手法を適用し、且つ機構解析-非線形応答曲面モデル連携ツールを構築することで、特異解の導出に要する時間を削減できた。本手法を蒸気タービン向けバルブに適用し、かじり付きリスクの少ない構造を案出することが出来た。

1. はじめに

機構解析は非線形性の強い機器・製品にも適用可能であるが、①1ケース当りの計算コストが大きい、②実機規模のモデルではパラメータが多い、等の問題からモンテカルロシミュレーションによる総当たり解析での特異解探索は非現実的である。一方、蒸気タービン向けバルブ等では駆動系のかじり付きが国内外プラントで発生しており、これらの発生条件を見極めるニーズは存在している。

そこで、従来用いられてきた総当たり解析の代わりに、非線形に対応した応答曲面を用いた近似解法(クリギング法)と、効率的な応答曲面作成のためのアップデート手法を用いた特異解自動探索ツールを構築し、少ない計算コストで特異解探索を実現可能とした。以下に構築ツールの詳細と製品への適用事例を紹介する。

2. 特異解探索ツール(WoCaFit: Worst Case Finding tool)の構築

2.1 従来手法と構築手法の比較

特異解探索においては従来から行われてきた最適設計と同様に、応答曲面を用いた最適化手法を利用することとし、非線形応答局面作成手法(クリギング法)と効率的な応答局面逐次アップデート関数(EIF: Expected Improvement Function)を組み合わせた最適化アルゴリズム(EGO: Efficient Global Optimization)を採用した。一般的に、応答局面を用いた最適化手法では初期サンプリング点から作成した応答局面で解を探索するが、EGO では最初に作成した応答局面を逐次アップデートしながら解を探索する。このため、初期サンプリング数に依存せず、最終的により少ない計算回数での解探索を可能であり、機構解析と組み合わせる際に計算コストの観点から有利であると判断した。この際、アップデートに用いる追加計算点の決定には EIF(Expected Improvement Function)という指標を用いる。これは追加計算点が最適値となり得る期待値を表す指標であり、作成した応答曲面における最適値近傍だけでなく、予測が不確実と考えられる領域

*1 総合研究所機械研究部

*2 総合研究所機械研究部 技術士(機械部門)

も期待値が大きくなるように定式化されている。このため、局所解に陥らずに大域的な解探索が可能となる。

EIF の計算には各点での予測値の不確かさが必要となるため、これらを算出可能なクリギング法を応答曲面作成手法として用いることとした。

さらに、解探索空間内における計算エラー領域を回避して特異解探索を行うルーチンを考案・導入した。これまでは幾何学的拘束などの理由で機構解析がエラー終了した場合、手動で計算の再投入を実施していたが、本ルーチンの導入により解探索の完全自動化が実現可能となった(エラー領域回避ルーチンについては 2.2 項で詳細を述べる)。従来手法との比較を図1, 2及び表1に示す。

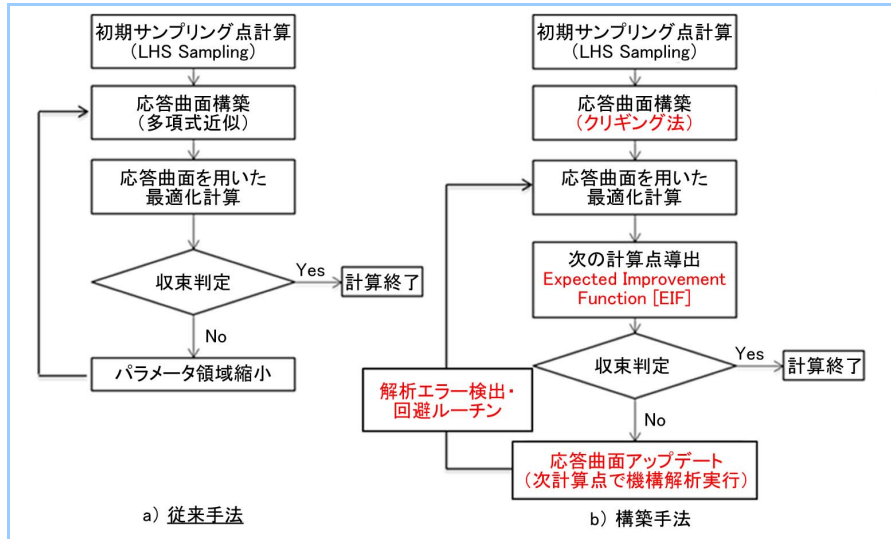


図1 従来手法との比較(計算フロー)

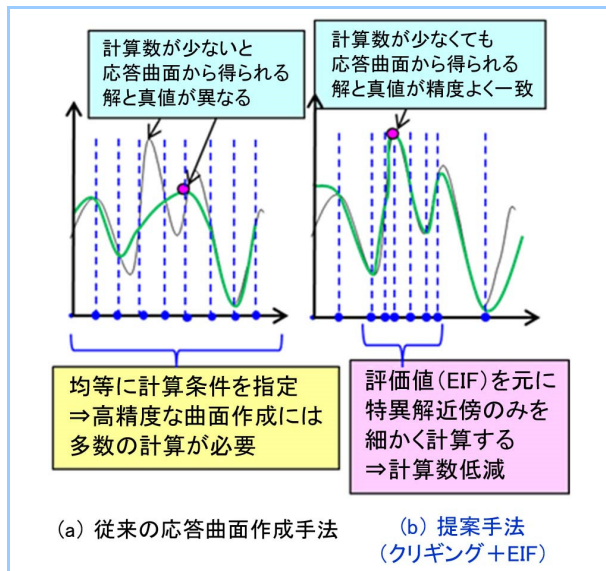


図2 従来手法との比較(必要計算数)

表1 構築手法の特徴

項目	従来手法	構築手法
1度の反復試行に要する計算回数(N)	N=10~50 - 回数が少ないと局所解に陥る - 回数が多いと収束までの計算回数が増加	N=1 (1度のイタレーションにつき1点のみ追加)
収束判定	1.0E-3~1.0E-5 - 粗くすれば局所解に陥る恐れあり - 細かくすれば解析傍で多くの繰り返し計算が必要	計算結果を元にした収束判定を行わない - 過去の解析傍は探索候補にならない
必要な初期サンプリング点数	高精度な応答曲面生成には非常に多くのサンプリング点が必要	応答曲面を逐次アップデートするため、最終的なサンプリング数は少ない
サンプリング点の選定手法	ランダムに選定	ある評価指標(Expected Improvement Function: EIF)を用いてサンプリング点を効率的に選定する

2.2 計算エラー領域回避ルーチン(Penalised Function の導入)

特異解探索を行う前に設定するパラメータ範囲内において、パラメータの組合せによっては幾何学的拘束等により機構解析でエラーとなる領域が存在することがある。製品レベルの複雑機構ではこの領域を事前に予測することは困難なため、従来の手法ではこのエラーにより応答局面の作成精度が落ちる、又は解探索が途中で止まってしまう事象が生じていた。

さらに、今回構築したツールで採用している EGO は、これまでに計算した結果から次の計算点候補を求めて逐次応答曲面をアップデートする手法のため、エラーが発生した近傍を計算点候補から除外するようなアルゴリズムが必要となる。

そこで構築ツールでは、EIF に Penalty Function という新たな関数を乗ずることで上記問題を解決した。Penalty Function とは、機構解析におけるエラー点で 0、それ以外の箇所では 1 となる関数である。これを EIF に乗ずることで、エラー点近傍は EIF 値が小さくなり次の計算点候補とならず、エラー近傍を避けて特異解探索が継続される。従来の解探索と構築ツールにおける解探索の違いを図3に示す。

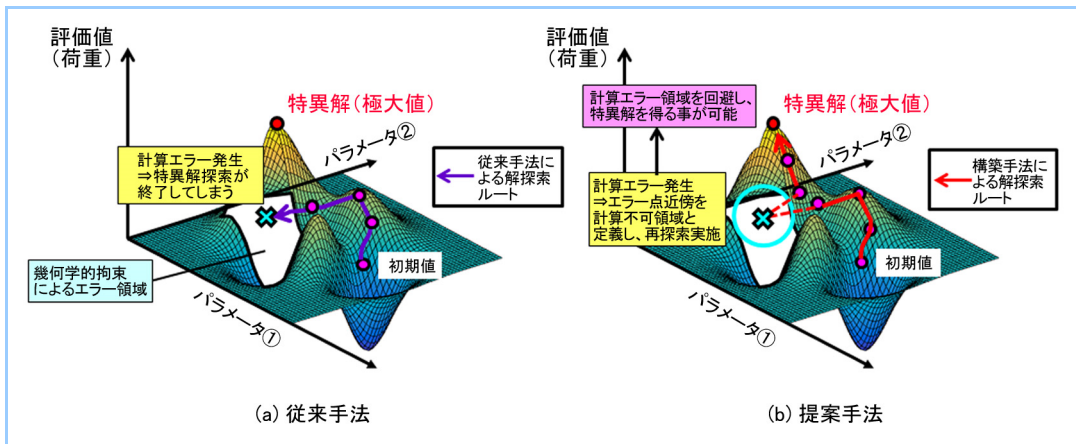


図3 エラー回避ルーチンの動作イメージ

3. 構築ツールの有効性検証

非線形性の強い理論式である Schwefel 式(2変数の関数)を用いて、構築ツールの解探索精度を検証した。なお、今回は理論式の値が最小(=0)となる点を探索し、理論的に得られる解と構築ツールによる解の誤差を比較した。計算条件及び解探索結果を図4に示す。

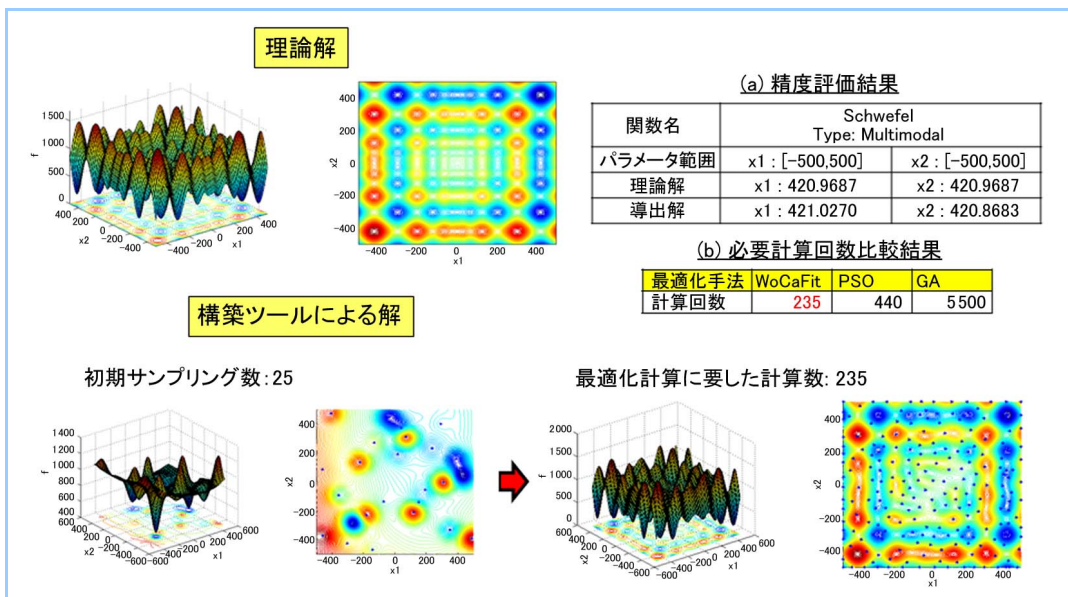


図4 有効性検証結果(理論式を用いた精度/計算回数検証)

初期サンプリング時点で得られた解曲面は理論解と大きく異なっているが、本ツールの特徴である曲面の逐次アップデートを行うことで、最終的に理論解とほぼ同じ応答曲面を得られており、構築手法の有効性を確認できた。探索解も理論解と誤差1%以内で一致しており、探索精度は十分であると考えられる(図4中の(a))。

また、同じ理論式に対して異なる最適化手法(PSO:粒子群最適化, GA:遺伝的アルゴリズム)を適用し、同等精度の解を得るために必要な計算回数を比較した。結果を図4中の(b)に示す。

本結果より、今回構築した手法はPSOの約1/2, GAの約1/26の計算回数で同等精度の解が得られることが確認できた。また、PSOやGAは設定パラメータにより収束に要する計算回数が大幅に変化するが、構築手法では常に同オーダーの計算回数で結果を得ることが出来る。

4. 実機モデル(蒸気タービン向けバルブ)への構築ツール適用

3章で精度検証した構築ツールを実製品レベルの複雑機構へ適用し、特異解探索結果を元に対策案検討を行った。

【対象製品】

今回の検討では蒸気タービン向けバルブ構造を対象とする(図5)。対象バルブはリンク機構によってロッドを上下方向に駆動させることで開閉を行うが、ロッドを支持するガイド部においてPV値*が大きくなり、かじり付きが発生するリスクがある。

今回はロッドを支持する複数のガイドにおけるクリアランス、位置ずれをパラメータとして与えた際の最大PV値を評価値として、PV値最大となるパラメータ組合せを探索した。

*PV値:ガイドに作用する荷重圧力 $P \times$ すべり速度 V の値。ガイドの負荷容量の限界を表わす数値として使われる。

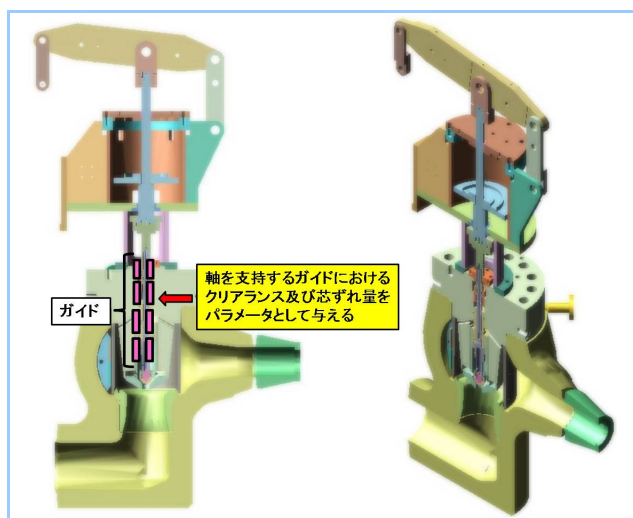


図5 蒸気タービン向けバルブモデル

【特異解探索結果, 対策構成評価】

初期検討形状(図5)に対する特異解探索結果を図6左に示す。なお、今回の特異解探索では計8個のパラメータを用いたが、2パラメータ以上の解曲面を可視化することは困難なため、図6には2か所の位置ずれ量に対する曲面を示している(その他パラメータは固定した曲面)。探索結果より初期検討形状ではPV値が大きくなる位置ずれ組合せが存在することが分かった。

そこで、この結果から抽出した位置ずれを小さくするようガイドを追設した構造を新たに案出し、再度特異解探索を実施することで対策効果を検証した。

その結果、公差で既定できる位置ずれ範囲内では常にPV値に大きな変動がない設計とすることが確認できた(図6右)。これにより、従来構造と比べるとかじり付きリスクの小さい(=信頼性の高い)バルブ設計が可能となる。

なお、従来構造での特異解探索に要した計算時間は約15Hであり、実用的な時間で解を得ることが出来た。

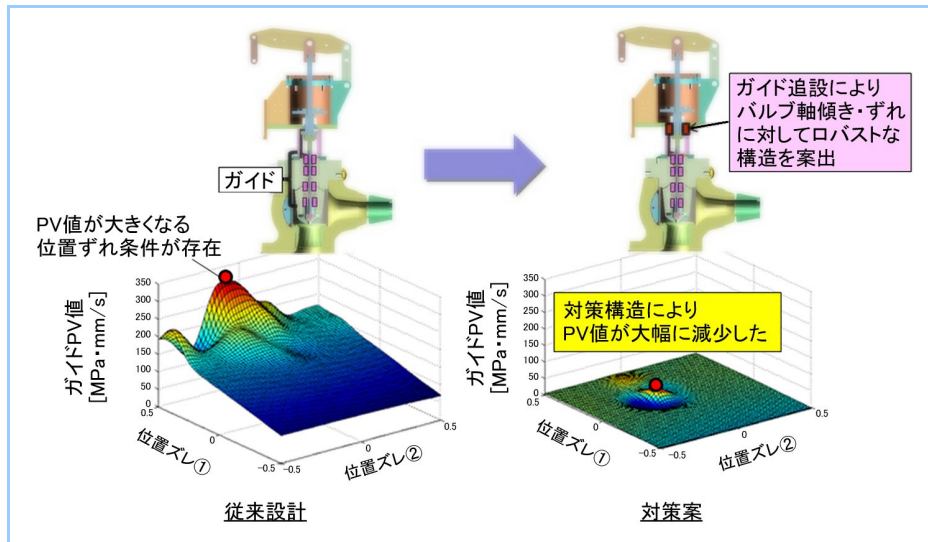


図6 蒸気タービン向けバルブ実機モデルにおける特異解探索結果

5. まとめ

非線形応答曲面生成手法と応答曲面自動アップデート手法 (EIF), 及び機構解析を組み合わせたツールを構築し, かつ機構解析における計算エラー領域を回避するルーチンを組み込んだ特異解探索ツールを構築した。

理論式を用いた精度評価を行った結果, 理論解と誤差1%以内で探索解と一致することを確認できた。また, 従来の最適化手法 (PSO 及び GA) で同等精度の解を得るために必要な計算回数を比較すると, PSO の 1/2, GA の 1/20 以下に削減できた。

本ツールを, 多くのパラメータ組合せが存在する蒸気タービン向けバルブのかじり付き評価に適用することで, 従来はパラメータが多く (今回の検討では計 8 パラメータを使用), 困難だった特異解導出が可能となり, PV 値が小さく信頼性の高い対策構造を案出することが出来た。

今後, 当該技術を当社製品の機構問題に適用するだけでなく構造解析や流動解析による最適化問題に展開し, 製品の信頼性向上に貢献していく。