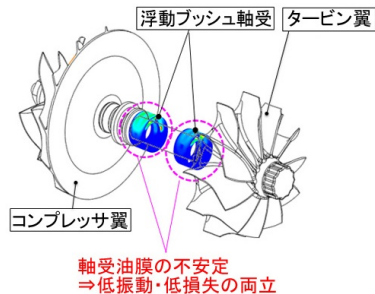


潤滑・機構・構造連成解析を用いた 流体機械の信頼性・性能向上設計技術

Reliability and Performance Gain Design Technique of the Fluid Machinery
Using Lubricous, a Mechanism, and Structure Coupled Analysis



二江 貴也*¹
Takaya Futae

林 利和*²
Toshigazu Hayashi

金澤 宏幸*²
Hiroyuki Kanazawa

釜田 恵太郎*¹
Keitaro Kamata

鈴木 徹*¹
Toru Suzuki

流体機械の信頼性、性能改善のためには、単一の解析技術のみでの評価は困難であり、流体力と構造の相互作用を考慮するマルチフィジックス解析の適用が求められてきている。当社では潤滑・機構・構造の連成解析技術を適用し、ターボチャージャの軸振動・騒音低減、斜板式油圧ピストンポンプの効率・信頼性向上の技術を開発してきている。今回紹介する技術は潤滑状態が時刻歴変化する流体機械(ターボチャージャの軸受自励振動、斜板式油圧ピストンポンプの往復動による位置・姿勢変化)を対象に、潤滑・機構・構造解析を連成させることで、時々刻々の状態変化を解析可能としており、さらに本解析と最適化計算を組み合わせる事で最適設計までを実施可能とした。

1. はじめに

流体機械は、信頼性、性能改善のため、しゅう動部の損失低減と信頼性、低振動・騒音を達成する製品が求められている。これらの要求に対して、単一の解析技術のみでの評価は困難であり、マルチフィジックス解析の適用などが求められている。

そこで当社では、潤滑と構造・機構の連成解析技術を適用し、高速回転機械であるターボチャージャの低振動・低損失化や、油圧機械の機械損失と漏れ損失のバランスによる高効率化を進めている。本稿では、こうした連成解析技術の概要及び今後の展望について述べる。

2. 流体機械の信頼性、性能改善のための連成解析技術

2.1 自動車用ターボチャージャ

図1に自動車用ターボチャージャの軸振動計測結果を示す。ターボチャージャは、小型高速回転体であるため、軸のアンバランスに起因したアンバランス振動だけでなく、軸受油膜に起因した自励振動が発生する場合がある。自励振動は軸と軸受の相対位置によって決まる油膜圧力分布によって発生するため、自励振動の低減には油膜圧力分布の時刻歴変化を精度良く予測する必要がある。またターボチャージャにおいては、エンジンの過渡応答性向上のため軸受損失の低減も必要であり、低振動で低損失な軸受設計が求められている。そこで、当社は軸の振動特性及び構造体の剛性を考慮した MBD(マルチボディダイナミクス)モデルと軸受潤滑モデルの連成解析技術を構築し、製品開発に活用している。こうした解析技術は、大学研究機関⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾や自動車メーカーでも研究されている。当社でも、予測精度の向上のため、要因のひとつと考えられる運転中の軸受の熱変形によるすき間変化を軸受/軸振動解析と連成させている。

*1 総合研究所機械研究部

*2 総合研究所機械研究部 主席研究員

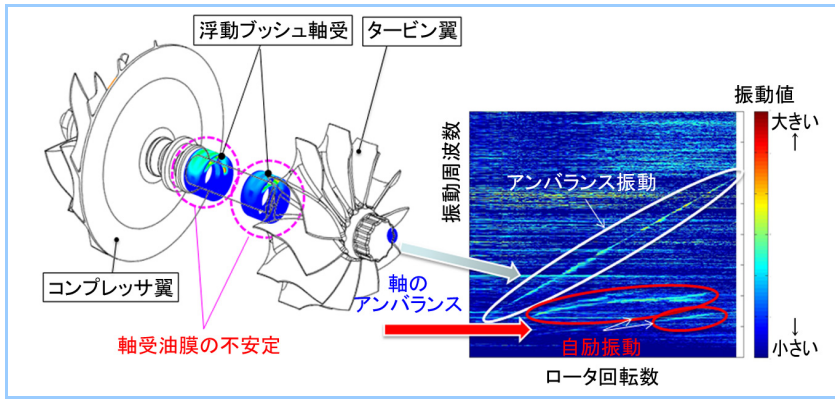


図1 自動車用ターボチャージャの軸振動計測結果

2.2 斜板式油圧ピストンポンプ

図2に斜板式油圧ピストンポンプの構造を示す。斜板式油圧ピストンポンプは、ピストンとシリンダ、シューとスワッシュプレート、バルブプレートとシリンダブロック等、複数のしゅう動部の相互影響があるため、構成部品は複雑な挙動を示す。そのため、設計と検証を繰り返し行いながら製品開発を進めており、開発期間の長期化を招いている。そこで、複数しゅう動部の同時評価が可能な潤滑・機構連成解析と当社で開発したクリギング応答曲面法による最適化アルゴリズム⁽⁴⁾を組合せて、信頼性と性能を同時に実現する最適設計手法を構築し、製品開発期間の短縮を進めている。

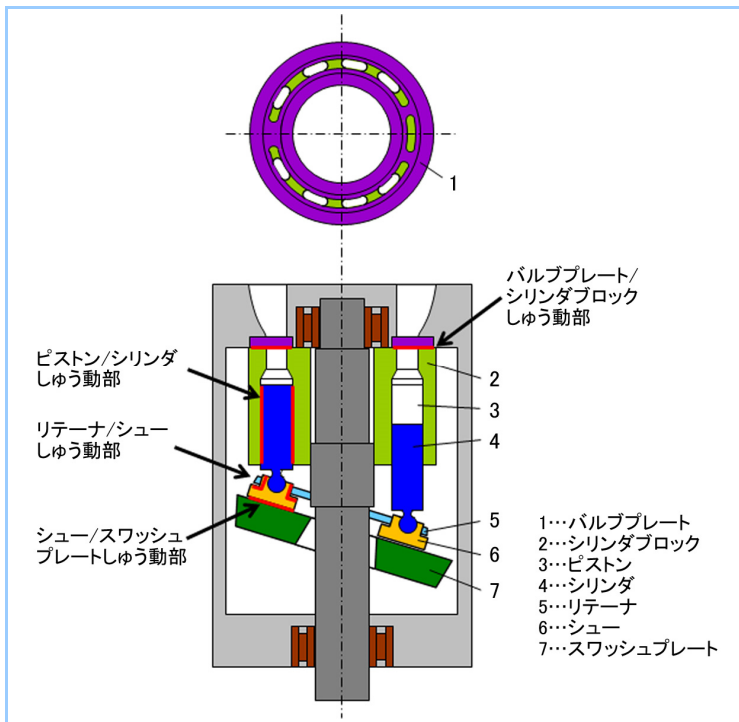


図2 斜板式油圧ピストンポンプ

次に、当社で開発している潤滑と構造・機構の連成解析の概要を述べる。

3. 連成解析を活用した設計技術の概要

3.1 ターボチャージャの低振動・低損失軸受設計技術

自励振動振幅を予測するため、時々刻々変化する軸の振動変位と油膜反力を連成解析している。図3に計算フローチャートを示す。本計算では、フローに示すように、軸振動解析と軸受解析を連成させることで自励振動の発生が再現できる。連成解析手法を用いることで、自励振動が発生する場合の軸と軸受の挙動を推定することができ、自励振動低減のための軸受形状案を創出することが可能となった。

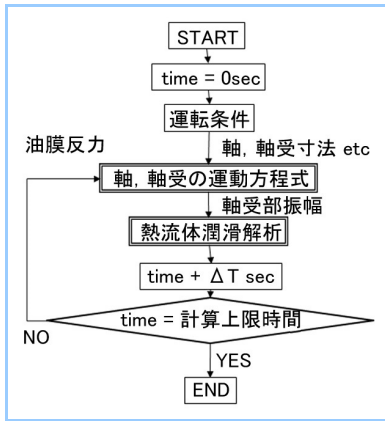


図3 ターボチャージャ振動特性計算フロー

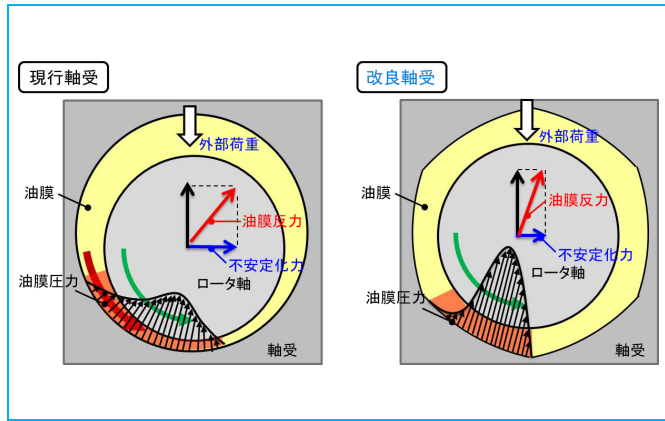


図4 現行軸受と改良軸受の油膜圧力分布概念図

図4に、現行軸受と改良軸受の油膜圧力分布概念図を示す。現行軸受では、例えば上下方向に外部荷重が作用すると油膜圧力分布によって、外部荷重に対して傾いた方向へ油膜反力が発生し、自励振動の要因となる不安定化力が発生する。一方、軸受面を多円弧化すると油膜圧力分布を変化させることができ、油膜反力の向きを変化させて、不安定化力を低減できることが知られている。この考えに基づき、ターボチャージャの軸受内周面を多円弧化した改良軸受を考案した。図5に改良軸受の振動特性計算結果を示す。本図に示すように、改良軸受は自励振動振幅が低減することがわかる。また図6に改良軸受の軸受損失計測結果を示す。改良軸受は、現行軸受と同等の軸受損失であり、実機においても軸受損失が同等で自励振動が抑制できることを確認したので、現在製品適用中である。

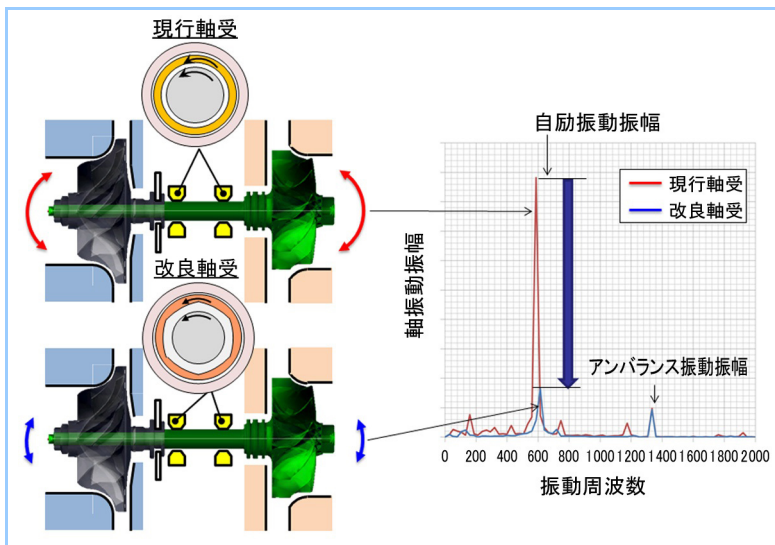


図5 改良軸受の振動特性計算結果

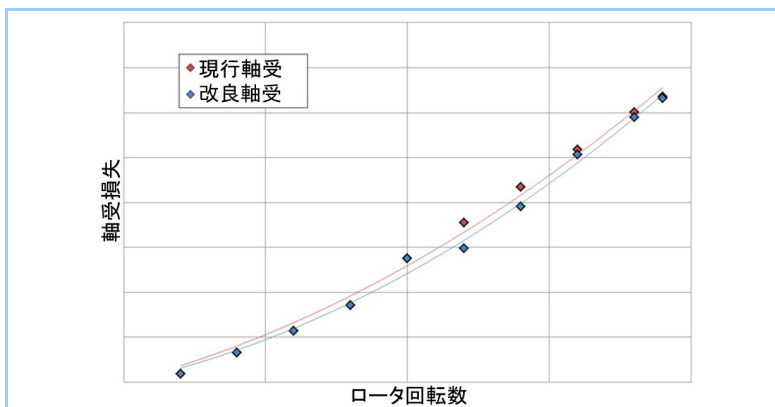


図6 改良軸受の軸受損失計測結果

更なる解析技術の精度向上として、軸受すきまの熱変形解析の連成を図っている。図7に軸受/軸振動、熱変形連成解析のフローチャートを示す。本図に示すとおり、軸振動・軸受連成解析から得られる軸受損失(発熱)を使って、軸受面の温度上昇を予測し、軸受周辺の熱変形を推定する。図8に計算対象とした要素試験装置を示す。本装置は、実機ターボチャージャよりも外部からの熱影響など外乱が少なく、モータ駆動によってロータを高速回転させ、軸振動および軸受周辺温度が計測可能である。

この軸受周辺の境界条件が妥当な計算モデルにて、自励振動振幅を計算した。計算結果より、非同期振動振幅および周波数の計算精度が、熱変形の考慮によって約 10%向上することを確認した。

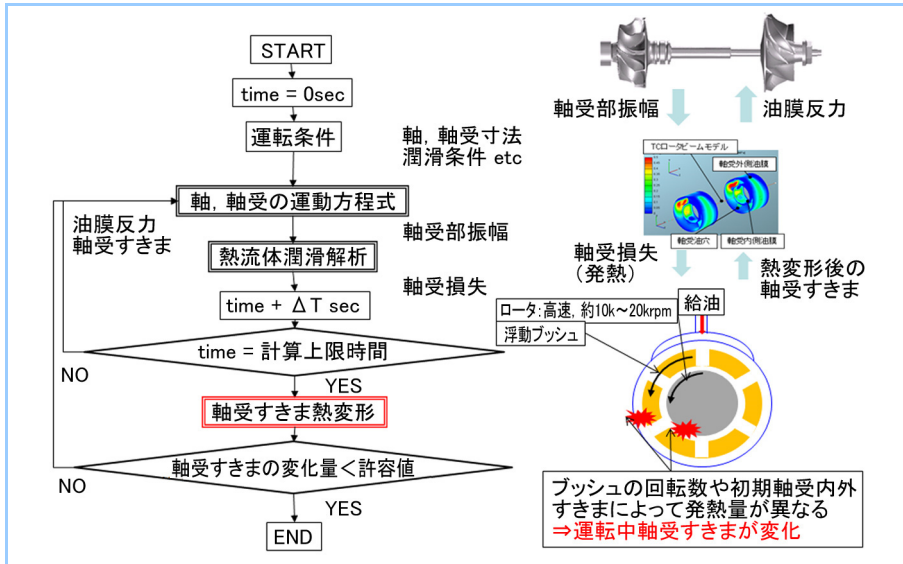


図7 軸受/軸振動、熱変形連成解析のフローチャート

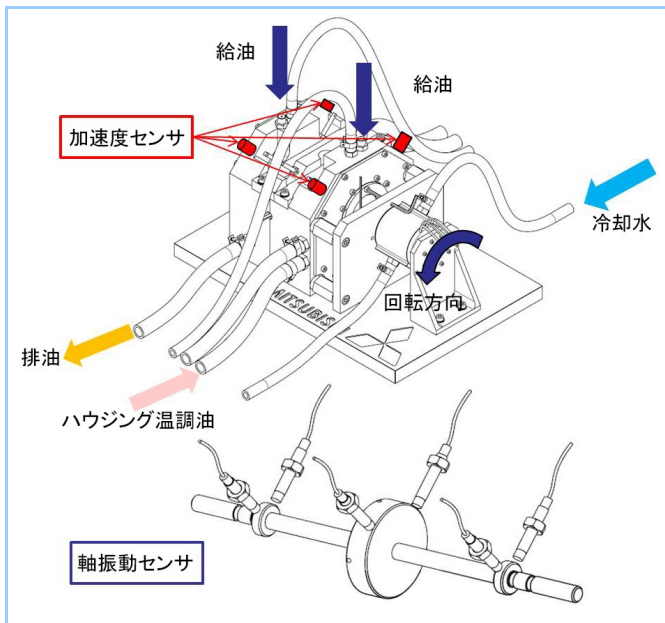


図8 要素試験装置

3.2 斜板式油圧ピストンポンプの性能・信頼性最適設計技術

図9に性能・信頼性最適設計フロー、図10に潤滑・機構・構造を連成して、複数のしゅう動部を同時に考慮した解析例(油膜圧力分布)を示す。本設計手法では、漏れ損失、摩擦損失、PV 値(接触面圧とすべり速度の積)を評価指標として最適化計算を実施する。各評価指標は、潤滑・機構・構造連成解析で得た漏れ流量、軸動力、接触力、傾斜角、しゅう動速度から算出した。なお、計算コストの観点から連成解析では局所的な接触を表現するには密度が粗い計算メッシュを

使用したため、接触面圧は連成解析で得た接触力や傾斜角を用いて 3 次元弾性接触解析 (接触領域の詳細解析) で別途算出した。最適化計算に関して、応答曲面作成はクリギング法、次計算条件の算出は、応答曲面を逐次アップデートする関数 (EIF: Expected Improvement Function) を組み合わせた最適化アルゴリズム (EGO: Efficient Global Optimization) を使用して、EIF が収束するまで繰り返し応答曲面を更新して最適解を導出した。

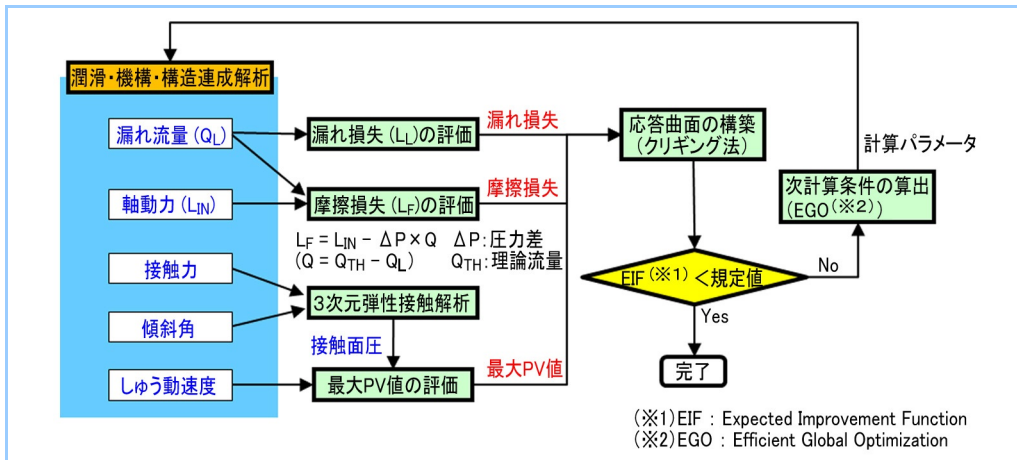


図9 性能・信頼性最適設計フロー

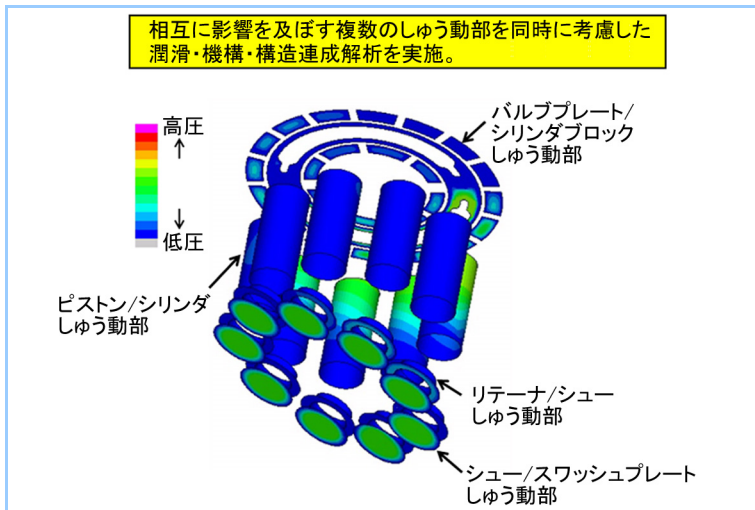


図 10 潤滑・機構・構造を連成して、複数のしゅう動部を同時に考慮した解析例 (油膜圧力分布)

図 11 に最適化計算で最終的に得られた応答曲面の例を示す。構成部材の焼付限界 PV 値以下を制約条件として、各しゅう動部のクリアランスをパラメータとした最適化計算を行い、これまでの設計範囲外に損失最小点が存在することを確認した。また、従来設計に対して効率が 4% 改善, 出力密度は約 30% 向上する見通しが得られた。

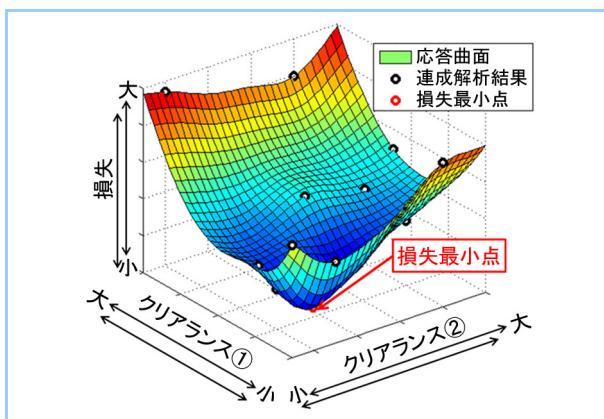


図 11 最適化計算で最終的に得られた応答曲面の例

4. まとめ

当社では、潤滑・機構・構造の連成解析技術を適用し、流体機械の信頼性、性能改善の向上を図っている。本稿では、ターボチャージャの軸受自励振動、複数しゅう動部を考慮した斜板式油圧ピストンポンプの効率最適設計を例に、連成解析技術を紹介した。本手法により効率と信頼性を両立できる製品の開発が可能となったので、今後も信頼性を維持した高効率製品の開発を進めていく。

参考文献

- (1) Smolik,L. et al., Investigation of bearing clearance effects in dynamics of turbochargers, International journal of Mechanical Sciences, Vol. 127, (2017), Pages 62-72
- (2) Bernhauser,L.et al., The Effect of Non-Circular Bearing Shapes in. Hydrodynamic Journal Bearings on the Vibration. Behavior of Turbocharger Structures, Lubricants 2017, 5(1), 6
- (3) Ioannis,C. et al., Experimental and Numerical Investigations of Turbocharger Rotors on Full-floating Ring Bearings with Circumferential Oil-Groove,Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2017-64628
- (4) アロウラほか, 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, 三菱重工技報 Vol.53 No.4 (2016) p.110~114