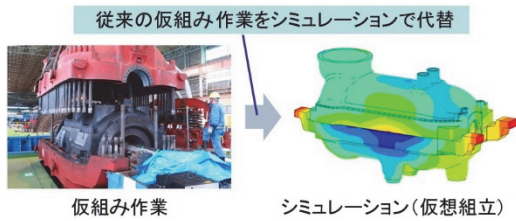


# 蒸気タービンの定検期間短縮に貢献する 3D レーザ計測/有限要素解析による仮想組立技術

Virtual Assembly Technology by 3D Laser Measurement and Finite Element Analysis  
Contributing to Shortening the Periodic Inspection Term of Steam Turbine



熊谷 理\*<sup>1</sup>  
Satoshi Kumagai

水見 俊介\*<sup>2</sup>  
Shunsuke Mizumi

石橋 光司\*<sup>3</sup>  
Koji Ishibashi

小寺 寿一\*<sup>3</sup>  
Juichi Kodera

蒸気タービンの定期検査(定検)工事では、タービンを一度組み上げる仮組みを実施しアライメントを調整することで、静止体と回転体との間隙を適正值に設定しタービン性能の維持と接触の防止を図っている。しかし、1車室の仮組み作業に4～7日間を要しているため、タービンの効率的な運用の観点から仮組みの廃止が求められている。本報では、仮組み作業を3Dレーザ計測と有限要素解析を組み合わせた仮想組立で代替することで定検期間の短縮を実現する技術を紹介する。

## 1. はじめに

蒸気タービンでは、静止体と回転体との間隙が広いとタービン性能が低下し、間隙が狭いと接触のリスクが高くなる。高い性能と安全性を両立させるためには、間隙を適切な値に調整することが重要となる。高温・高圧環境下で使用される車室等の構成部品ではクリープ変形が発生することがあり、歪んだ車室を再度組み立てると組立前後で翼環等の内容物が鉛直方向に移動し間隙が変化する。定検では、この組立時の間隙変化量を把握した上で、[図1](#)に示すように組立後のロータと翼環の中心が一致するよう組立前の翼環の位置を事前に調整する必要がある。

車室組立に伴う間隙変化量を把握する手法として、[図2](#)に示す車室の仮組みとマンドレル計測による間隙変化量の計測を実施している。この手法では、間隙変化量を計測するマンドレルと呼ばれる計測装置をロータの代わりに設置し、車室を仮組みする過程での間隙変化量を計測することができる。しかし、ボルトの焼き締め等を行うことから、1車室の仮組みに4～7日間の工程が必要となるため、タービンの効率的な運用の観点から仮組み作業の廃止が求められている。

本報では、タービンの実形状と組立作業を忠実に模擬した仮想組立シミュレーションにより、仮組み作業を実施することなく間隙変化量を予測する技術を紹介する。この技術を適用することで、[図3](#)に示すように定検工程を大幅に短縮し、発電プラントの稼働期間を延長することが可能となる。

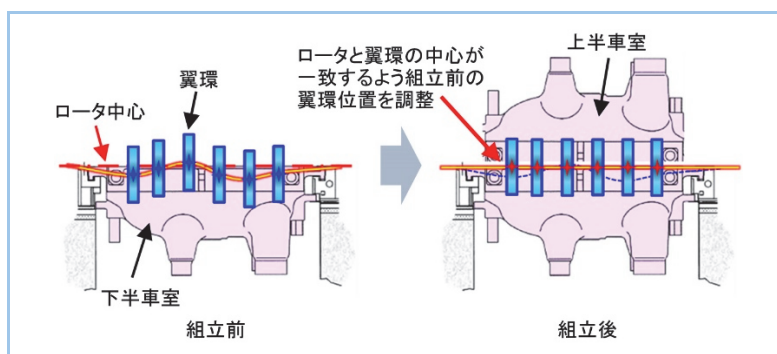


図1 車室組立に伴う翼環の移動

\*1 総合研究所 強度・構造研究部

\*2 総合研究所 ターボ機械研究部 主席研究員

\*3 エナジードメイン 蒸気タービン技術部

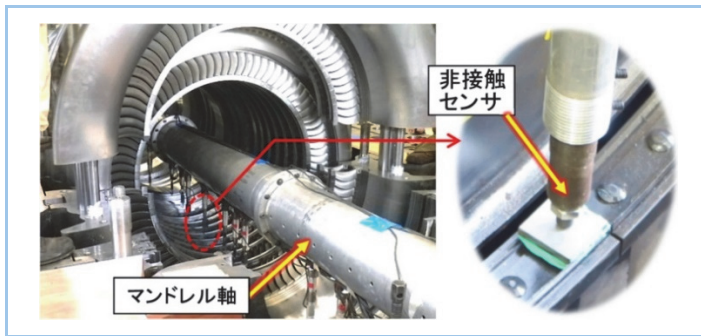


図2 車室の仮組みとマンドレル計測による間隙変化量の計測

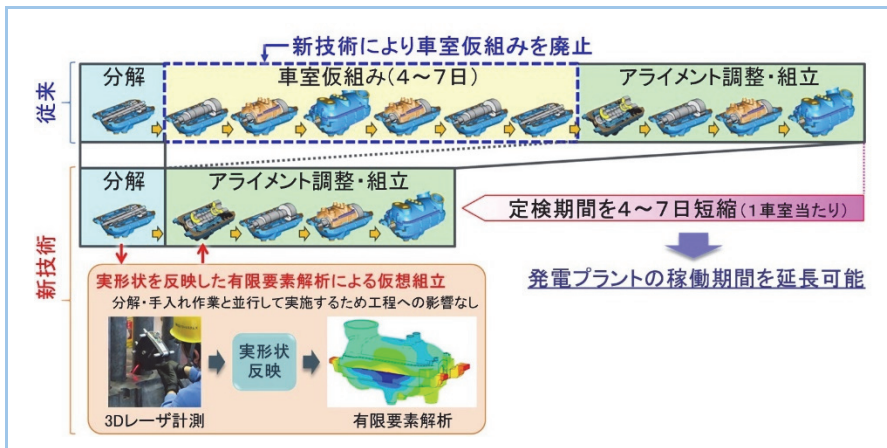


図3 仮想組立技術による定検工程の短縮

## 2. 仮想組立技術

仮想組立技術の概要を図4のフローチャートに沿って説明する。この技術は、(1) 3D レーザ計測による車室形状取得(図4の(a)~(b))、(2)データ処理による解析メッシュへの実形状反映(図4の(c)~(e))、(3)有限要素解析による組立時車室変形量の推定(図4の(f))の3種類の技術で構成される。各技術の概略を以下に記載する。

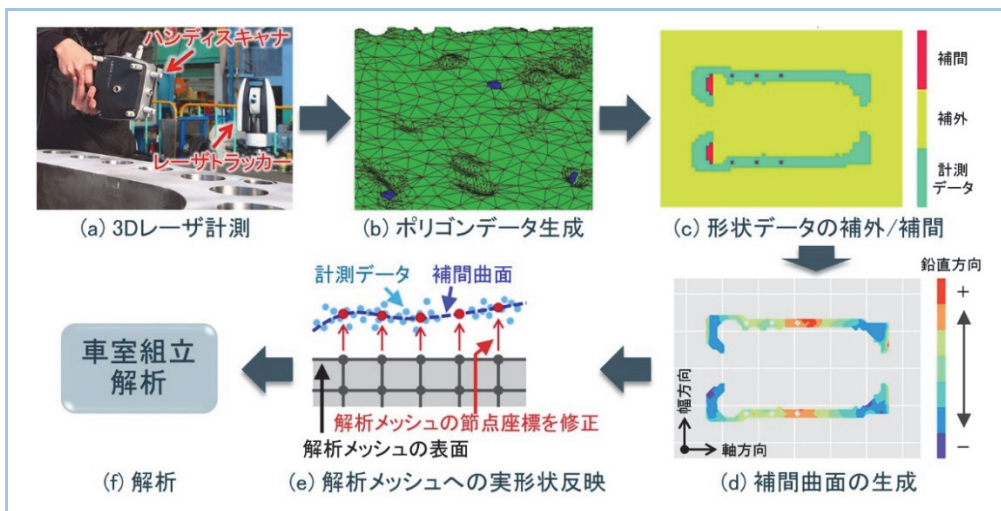


図4 仮想組立技術で間隙変化量を予測するフローチャート

### (1) 高精度 3D レーザ計測による車室形状取得

3D レーザ計測では、図4(a)に示すハンディスキャナとその位置を捕捉するレーザトラッカーを使用し、全長約5mの車室の水平フランジ面形状を約  $50 \mu\text{m}$  の高い精度で計測する。3D レーザ計測の様子を図5に示す。水平フランジ面をハンディスキャナでスキャンし、取得した形状データに問題がないことをモニターにより確認する。定検現場におけるレーザ計測では、建屋

の振動による計測ノイズや植込みボルト等の障害物によるデータ欠損が生じ得るが、レーザトラックの設置方法の工夫や複数位置での計測により精度の高い計測を実現している。計測した3D形状データの一部を図6に示す。この例では、軸方向中央が鉛直上向きに変形した車室となっている。植込みボルトが存在する箇所ではレーザトラックのレーザが遮られてしまうため、フランジ面の内側もしくは外側にデータ欠損が生じやすくなる。対策として、レーザトラックの位置を移動しフランジ面の内側と外側の両方から計測することで植込みボルト周辺のデータ欠損を最小限に抑えている。このように、大きなデータ欠損がなく、ノイズの小さいデータを取得する計測技術により、間隙変化量の高精度予測を実現している。



図5 車室フランジ面の3Dレーザ計測の様子

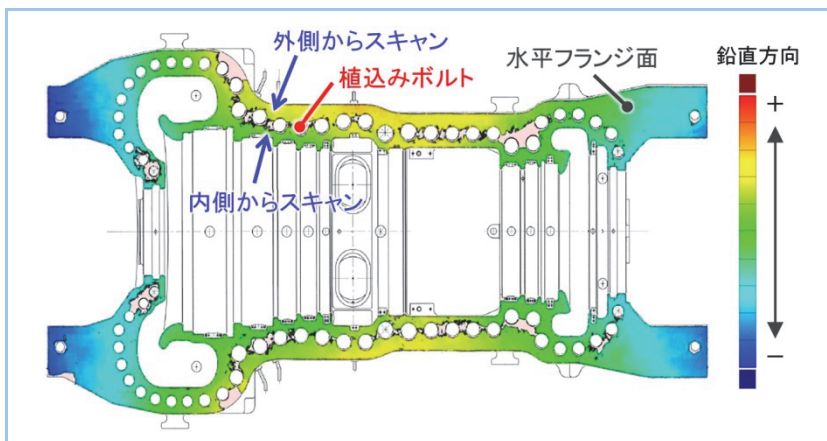


図6 車室フランジ面の3D形状データの例

## (2) データ処理による解析メッシュへの実形状反映

3Dレーザ計測で取得した水平フランジ面の形状データを用いて、事前に用意した解析メッシュの水平フランジ面に実形状を反映する。車室の変形挙動に大きく影響する水平フランジ面のみを実形状を反映し、それ以外の部位は設計図面の形状を使用することで、必要な予測精度を保ちつつ、計測とデータ処理の時間を短縮した。解析メッシュに実形状を反映するためには、データ欠損のない連続的な曲面を離散的な形状データから作成する必要がある。形状データに含まれるノイズを除去した後、データ欠損領域を補外や補間処理によって埋め(図4(c))、欠損のない完全なグリッド状の形状データを生成する。このデータから図4(d)に示す連続的な補間曲面を生成する。最後に、図4(e)に示すように解析メッシュの水平フランジ面上の節点を補間曲面に投影することで、実形状を反映した解析メッシュに変換する。これらの一連の処理はプログラムにより自動化されており、5分程度で処理を完了することができる。

## (3) 有限要素解析による組立時車室変形量の推定

実形状を反映した解析メッシュを用いて車室組立を模擬した有限要素解析を実施する。解

析では、**図7**に示すような実機を忠実に模擬した支持条件を車室に設定し、上下の水平フランジ面に対して接触条件を与える。ボルト締結力を負荷することで車室の組立に伴う変形挙動を計算する。解析結果に基づき、組立前後の翼環等の移動量を計算し、間隙変化量を推定する。そして、間隙変化量の推定値を用いて実際の翼環の位置を調整し、組立後の間隙が適正値となるようにする。

車室の分解作業時に(1)の 3D レーザ計測を行い、(2)の実形状反映と(3)の有限要素解析は1～2日程度で実施可能である。したがって、車室の分解や手入れ作業中に車室変形量の推定を完了することができ、仮組みに要していた4～7日間の工程を短縮できる。

上記において、1つの車室を対象とした間隙変化量の推定手順を示したが、外部車室と内部車室で構成される場合は個々の変形による間隙変化量を加算することで同様に推定することができる。また、翼環等の比較的小さな部品については、分解時の変形量を別途計測することで、翼環の組立に伴う間隙変化量を推定することができる。

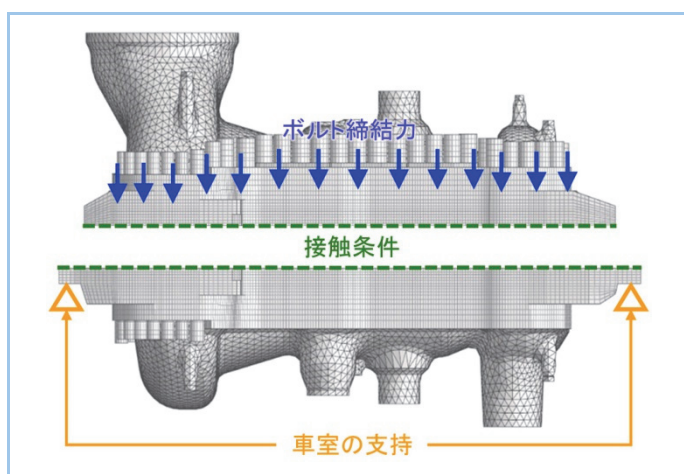


図7 車室組立を模擬した有限要素解析の条件(概略)

### 3. 実機における検証結果

開発した仮想組立技術を2箇所のサイトの実機タービンにおいて検証した。**図8**にサイトAとサイトBを対象とした間隙変化量の計測値と予測値の比較を示す。計測値は実際に車室の仮組みを実施した際の間隙変化量をマンドレル計測で取得したものである。両サイトとも仮想組立による予測値は仮組みによる計測値と概ね一致しており、その二乗平均平方根誤差(RMSE)は約0.1mm程度と小さいことを確認した。特に、サイトBは計測値を知らない状態でシミュレーションを実施したブラインド解析であり、実際の定検工事への適用に近い条件で高い精度を達成し、本技術の有効性が示された。

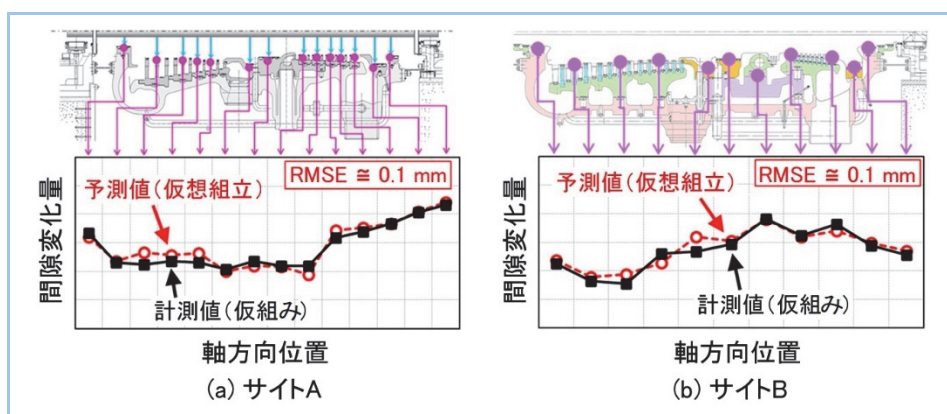


図8 実機における検証結果

## 4. まとめ

当社は、蒸気タービンの効率的な運用に貢献するため、定検期間の短縮を実現する仮想組立技術を開発した。3D レーザ計測と有限要素解析を組み合わせて、運転中に生じた車室のクリープ変形を考慮したシミュレーションを行うことで、車室組立に伴う間隙変化量を高い精度で予測可能であることを実機タービンにおいて確認した。今後、本技術の定検工事への適用を進め、従来の仮組み作業をシミュレーションにおける仮想組立で代替することで、1車室当たり4～7日間程度の工程短縮を実現できる見込みである。