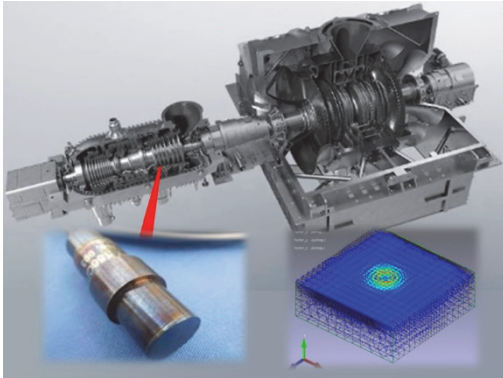


最高 600°C の高温環境下で微小隙間を高精度に計測可能な 渦電流式ギャップセンサの開発

Development of Eddy Current Gap Sensor for Accurately Measuring
Small Clearance in High Temperature Environments up to 600°C



山口 岳彦*¹
Takehiko Yamaguchi

近藤 誠*²
Makoto Kondo

川島 竜*³
Ryo Kawabata

尾崎 昂平*⁴
Kohei Ozaki

田中 皓太*⁵
Kota Tanaka

古庄 達郎*⁶
Tatsuro Furusho

電源の脱炭素化が進む一方で、出力調整を柔軟に行える火力発電設備は、今後も重要な電力供給源として位置づけられていることから、CO₂ 排出量抑制のための高効率化が必須である。火力発電設備の主要機器である蒸気タービンは、車室内における回転部/静止部間の微小隙間を適切に管理することで、蒸気流れを効率良く回転エネルギーに変換でき、発電効率の向上に繋がる。そこで運転中の蒸気タービン車室内における微小隙間を管理するための渦電流式ギャップセンサ開発に取り組み、0~3.5mm の微小隙間を 1000 時間以上にわたり計測精度±120 μm 以内で計測できることを確認した。

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーや原子力等の化石燃料を使わない発電の比率は今後も高まると考えられる。しかし、再生可能エネルギーの普及の過程において、出力調整を柔軟に行える火力発電は、重要な電力供給源として位置づけられる⁽¹⁾。電力の安定供給と電力システムの脱炭素化の両立を着実に進めていくためには、CO₂ 排出量抑制を目的とした火力発電の高効率化が必須である。そこで三菱重工業株式会社(以下、当社)では、主要発電設備である蒸気タービン(Steam Turbine, 以下 ST)に最新の高効率化技術を適用し、高効率化による燃料削減、すなわち CO₂ 削減という付加価値を生み出してきた⁽²⁾。

ST では、回転している翼やロータと、静止している車室との間に、作動流体である蒸気がリークしないためのシール機構が設けられている。このシール機構における微小隙間(以下、クリアランス)を狭く保つことができれば、蒸気のリーク量を低減させ、蒸気流れを効率良くタービン翼の回転エネルギーに変換できる。しかしクリアランスが過度に狭くなると、接触による ST 運転中の損傷を招くことになるため、ST 運転中にクリアランスを監視できる技術が求められていた。そこで、最高 600°C/10MPa の高温・高圧環境となる ST 車室内でも、運転中における長期間の監視が可能な渦電流式ギャップセンサ(以下、ギャップセンサ)の開発に取り組んだ。

本報では、ST 車室内で試運転期間に当たる 1000 時間以上の間、安定したクリアランス計測を実現するためのギャップセンサに対する計測精度/耐久性向上対策の概要について紹介する。また、これまでに本センサを当社高砂工場内の実証設備複合サイクル発電所(以下、第二T地点)および海外客先納入プラントに適用することで得られた成果について報告する。

*1 総合研究所 電子・物理研究部 主席チーム統括

*2 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員

*3 総合研究所 強度・構造研究部

*4 総合研究所 機械研究部

*5 エナジードメイン GTCC 事業部 蒸気タービン技術部 主席技師

*6 エナジードメイン GTCC 事業部 蒸気タービン技術部

2. ギャップセンサの概要

図1にギャップセンサの外観を示す。ギャップセンサ本体は、英国 RDP 社のものを用いている。ギャップセンサの金属製ケーシング内部にはコイルが配置されている。ギャップセンサで得られた信号は、高温・高圧となる車室内ではステンレス被覆の MI (Mineral Insulated) ケーブルを用い、車室外ではポリウレタン被覆のソフトケーブルを用いて計測用アンプまで伝送される。

図2にギャップセンサによって計測対象に生じる渦電流の空間分布を電磁界解析により可視化した結果を示す。計測対象の近傍にギャップセンサを設置し、コイルに交流電圧を印加すると、電磁誘導現象により、計測対象の表面に渦電流が発生する。渦電流の強さは、ギャップセンサと計測対象の距離、すなわちクリアランスに依存しており、クリアランスが小さければ渦電流は強くなり、クリアランスが大きければ、渦電流は弱くなる。計測対象に生じた渦電流は磁場を形成し、これがギャップセンサ内部に配置されているコイルのインピーダンス変化を引き起こす。この変化を利用してクリアランスを測定する。

ギャップセンサにより得られた信号は、計測用アンプにより電圧振幅として出力される。ギャップセンサの出力であるコイルのインピーダンスは、上述したように、ギャップセンサと計測対象の距離に依存して変化するが、周囲温度の影響によっても変化する。ギャップセンサを ST に適用する際、周囲温度は常温から約 600℃まで変化するため、周囲温度の影響を踏まえた校正カーブを試験的に作成する必要がある。ギャップセンサを電気炉内に設置し、計測対象と同じ材料からなる校正用試験片とギャップセンサとの間の距離、及び炉内の温度を変化させながら、計測用アンプの出力電圧を計測することで校正カーブを作成する。

図3に、クリアランスを 0mm から 3.5mm まで変化させつつ、周囲温度を常温(20℃)から 600℃まで変化させながら取得した校正カーブを代表例として示す。ギャップセンサを ST に適用する際には、ギャップセンサ近傍に熱電対を配置し、ギャップセンサの出力電圧と周囲温度計測結果の2つのパラメータを参照し、校正カーブに当てはめることで、クリアランスを得る。

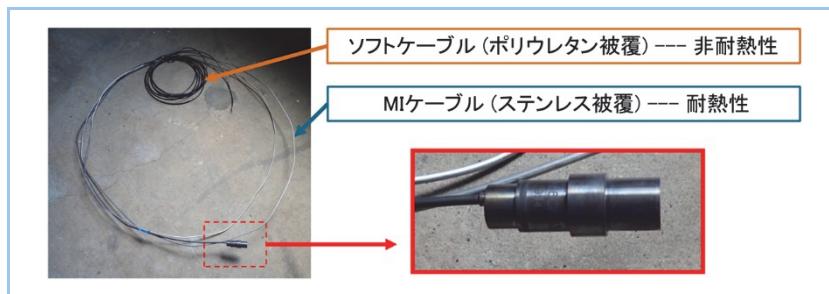


図1 ギャップセンサの外観図

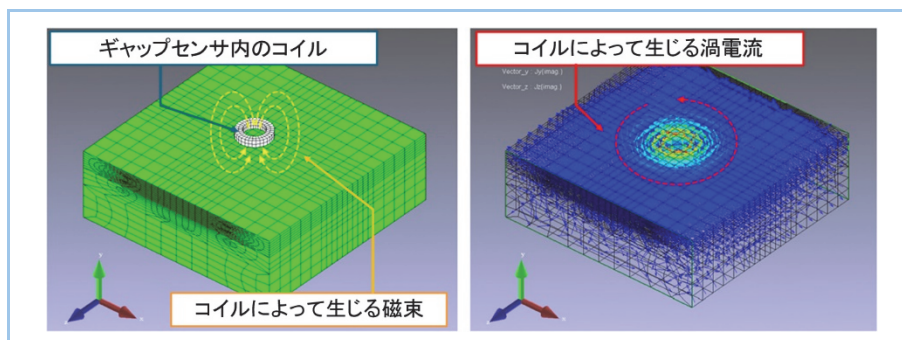


図2 解析によって可視化したギャップセンサによって計測対象に生じる渦電流

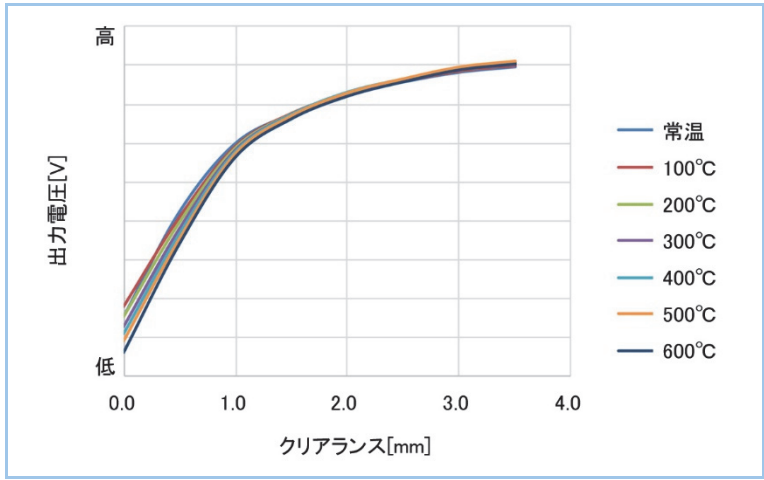


図3 ギャップセンサの校正カーブ代表例

3. ギャップセンサの計測精度向上/耐久性向上対策

3.1 計測精度の向上

ST のシール性能を評価するに当たり、ギャップセンサには高い計測精度が求められる。そこでギャップセンサで想定される誤差要因がもたらす計測誤差について検証した。図4に試験的に確認した結果を示す。この結果、すべての誤差要因が累積すると、大きな計測誤差が生じ、シール性能把握評価において精度が不足することが分かった。特に、計測機器と、MI ケーブルに起因する計測誤差が大きく、計測誤差全体の約 8 割を占める。そこで、これら計測誤差の大きい 2 つの誤差要因について、その計測誤差を低減し、計測精度を向上すべく対策を実施した。

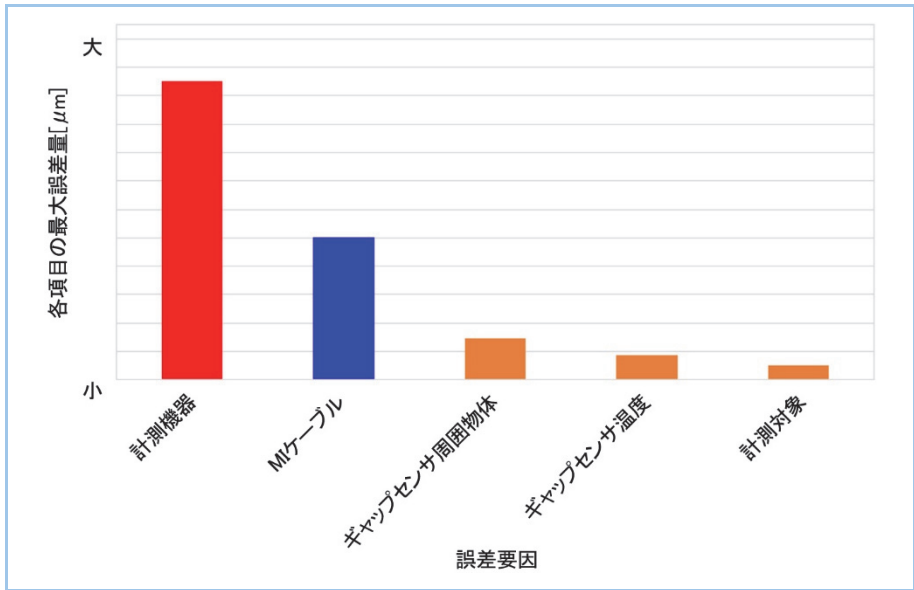


図4 ギャップセンサの誤差要因及びそれぞれの要因がもたらす誤差量 (誤差要因対策前)

ギャップセンサの計測機器は、ギャップセンサの信号を伝送するケーブル長が制約となり、ST 車室と同じフロアに設置される。ST 車室近傍の気温は、停止時と運転時で最大 20°C 程度変化する。この ST 車室近傍の気温変化が計測機器に作用し、大きな計測誤差が生じることが分かった。そこで、使用する計測機器を恒温槽内に設置し、計測機器の周囲温度が変化しないようにする対策を施した結果、計測機器の周囲温度変化の影響による計測誤差を約 1/10 に低減できた。

また、ギャップセンサの信号を伝送する MI ケーブルに起因した計測誤差も大きいことが分かった。検証の結果から、MI ケーブルに起因した計測誤差を低減するためには、搬送周波数をメーカー純正アンプよりも低く設定することが有効であった。そこで、メーカー純正の計測アンプに代わり、

ロックインアンプを適用し、MI ケーブルに起因した計測誤差を約 1/3 に低減できた。

図 5 にこれらの誤差要因への対策を施した結果を示す。誤差要因対策の結果、累積の計測誤差を約 7 割低減でき、ギャップセンサの最大計測誤差を、 $\pm 120 \mu\text{m}$ まで向上させることができた。

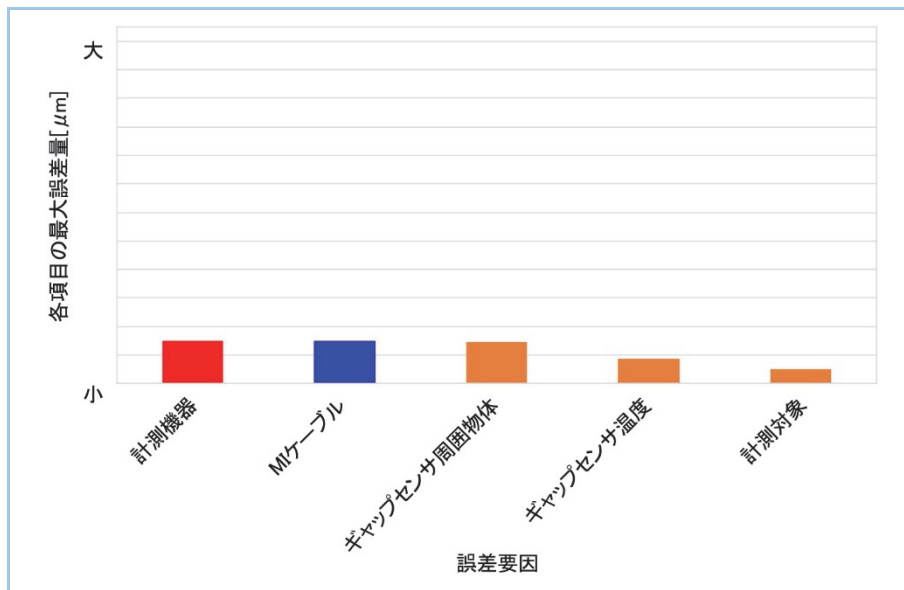


図5 ギャップセンサの誤差要因及びそれぞれの要因がもたらす誤差量 (誤差要因対策後)

3.2 耐久性の向上

ギャップセンサには、約 1000 時間にわたる試運転の間、クリアランス監視を継続できる耐久性が求められる。しかし、本報における開発以前に、ギャップセンサを ST へ適用を試みた際には、適用したギャップセンサのうち、約 7 割が ST 運転開始後に短時間で断線もしくは短絡を起こし、計測不能となっていた。そこで、ギャップセンサの耐久性向上に取り組んだ。

本報における開発以前の記録を確認した結果、MI ケーブルは ST 車室内でのワイヤリングにおいて、R5~10 程度の非常に小さな曲げ半径で設置しており、MI ケーブルに過度の曲げ負荷がかかって断線による信号途絶に至ったと推定された。そこで、図 6 に示すように MI ケーブルの曲げ半径を大きくとるように管理するワイヤリング要領を定めた結果、MI ケーブルの断線は解消された。

また、検証の結果、ギャップセンサの金属ケーシング内における信号線やコイルにおいても断線や短絡が生じていることを把握した。これらについては、センサメーカーと相談し、金属ケーシング内の構造に改良を施すことで、ほぼ解消することができた。

これらの対策を施した結果、第二T地点で用いた 41 センサのうち 95%以上となる 39 センサで 1000 時間以上の計測を達成し、耐久性を大幅に向上させることができた。



図6 MI ケーブルワイヤリング要領の改善

4. クリアランスコントロール技術への適用

ST の停止中/運転中を問わず、外部からクリアランスを制御することができれば、従来以上にクリアランスを狭くすることができ、ST の性能改善及び運用性改善につながる。そこで、タービン車室外部をヒータ加熱し、車室に熱伸びをおこすことでクリアランスを能動的にコントロールできる技術⁽³⁾が開発され、ギャップセンサはこのクリアランスコントロール状況の監視に用いられている。図 7 に、クリアランスコントロール技術の監視を目的としたギャップセンサ設置位置を示す⁽⁴⁾。この場合、ギャップセンサは、ST 車室外アウターグランド部において、ロータを挟み込むように設置される。

設置されたギャップセンサにより計測されたそれぞれのクリアランスを用いることで、内部クリアランスの予測値を得ることができる。この結果を踏まえてヒータ加熱量を制御しつつ、ST 起動時に ST 外車室を持ち上げることで、回転上昇時にタービン翼先端部と車室との接触を防止することや、定格運転時にクリアランスを適切な値に保つなどの運用が可能となる。

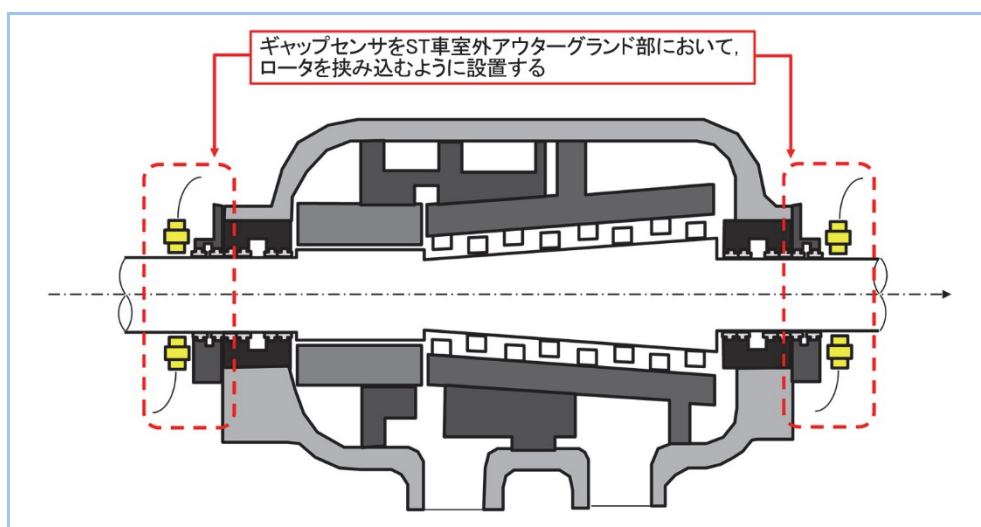


図7 クリアランスコントロール技術の監視を目的としたギャップセンサ設置位置

5. 第二T地点、並びに客先納入プラントへの適用結果

開発したギャップセンサは、これまでに第二T地点、及び海外の 2 プラントで合計 85 センサが適用され、実績を積んでいる。図 8 に、代表事例として、第二T地点で適用した際の様子と、中圧車室内でロータを挟み込むように設置されたギャップセンサにより運転時のクリアランス変化を計測した結果を示す。上側取付けセンサと下側取付けセンサが計測したクリアランスについて、上側のクリアランスが大きくなると下側のクリアランスがほぼ同じ量だけ小さくなり、逆に上側のクリアランスが小さくなると下側のクリアランスがほぼ同じ量だけ大きくなっており、上下取付けセンサの結果が整合していることから、2500 時間にわたり、クリアランスの変化を正しく計測できていることがわかる。このように取得したクリアランス計測結果を 4 章で述べたクリアランスコントロール技術と組み合わせることで、発電効率を従来と比べて約 0.1% 向上させることができている。

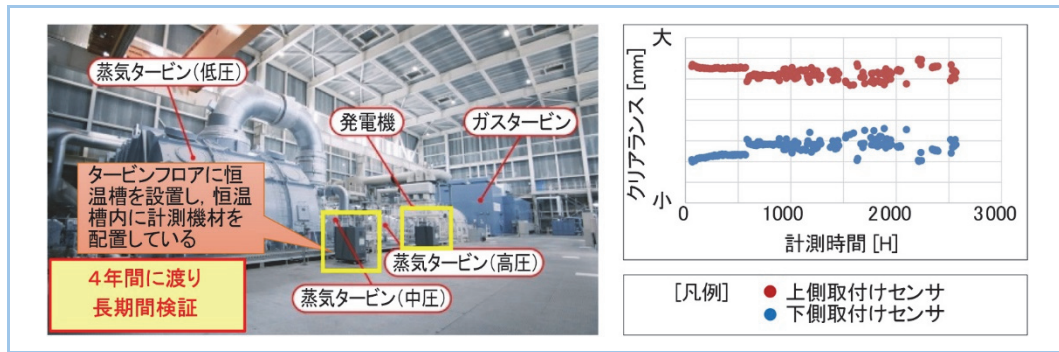


図8 第二T地点にてギャップセンサを適用した際の様子と取得データ

また、第二T地点では、車室内圧力変化に応じて機械的にクリアランスが変化する Active Clearance Control(以下、ACC)シールが適用されているが、この ACC シールの動作量が計画通りとなっているか否かの確認にもギャップセンサが用いられており、従来把握が困難であった ST 車室内の機構部品動作に対する妥当性評価にも活用可能である。

6. まとめ

火力発電設備の主要機器である蒸気タービンの運転中における、クリアランスを高精度に把握可能な渦電流式ギャップセンサの開発に取り組み、0～3.5mm のクリアランスを 1000 時間以上にわたり、計測精度 $\pm 120 \mu\text{m}$ 以下で計測できることを確認した。また、これまでに本センサを第二T地点及び海外客先納入プラントに適用し、クリアランスコントロール技術と組み合わせることで、従来と比べて発電効率を向上させることができている。当社では、今後も引き続き高効率発電と環境負荷低減を両立できる技術開発を継続してゆく。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁, 今後の火力政策について,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/074_10_00.pdf
- (2) 中野隆ほか, 高効率化技術を適用した蒸気タービン改造による CO₂ 排出量削減への取組, 三菱重工技報 Vol.60 No.3 (2023)
- (3) 中野隆ほか, 最新鋭サイド排気高性能蒸気タービンの開発, 三菱重工技報 Vol.58 No.3 (2021)
- (4) 近藤誠ほか, 回転機械の監視装置, 監視プログラム及び監視方法並びに回転機械設備, 特許第 7403684 号, 2023.12.14