

# 大規模電磁界解析技術とタービン発電機への適用例

元吉研太\* 空 信之†  
米谷晴之\*\*  
前田 進\*\*\*

*Large-scale Electromagnetic Field Analysis Technique and Example of Application to Turbine Generator*

*Kenta Motoyoshi, Haruyuki Kometani, Susumu Maeda, Nobuyuki Sora*

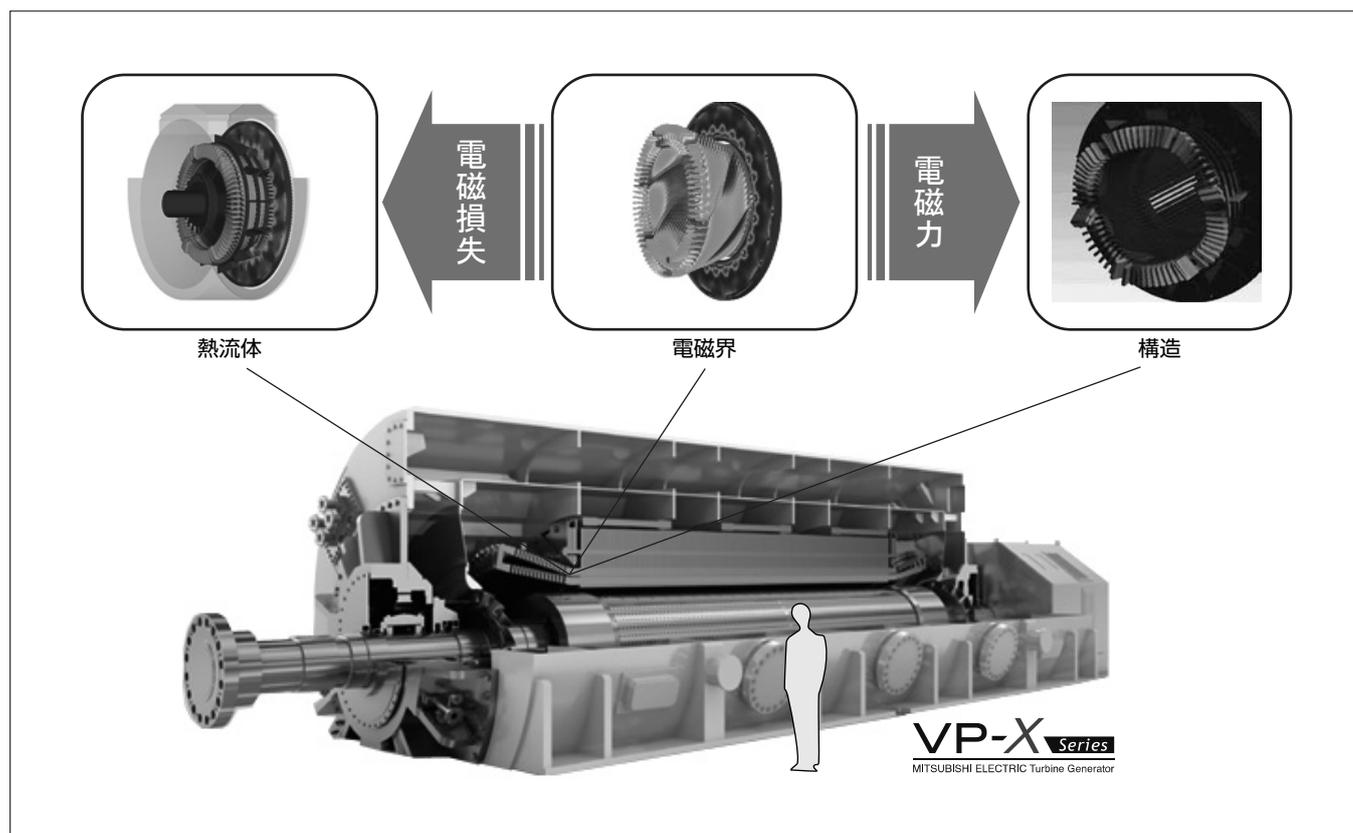
## 要 旨

地球温暖化や電力需給の増加を背景に省エネルギー要求が高まっており、電気機器の高効率化が求められている。特にタービン発電機の高効率化は重要な課題であり、プラントのライフサイクルを考慮すると、0.01%の効率改善が大幅な燃料費の削減に貢献する。発電機の損失を低減し、効率を改善するには、損失発生部位の特定と詳細な損失密度分布の把握が必要である。発電機の各構造体に発生する渦電流損失は構造体表面近傍に分布しており、この損失を詳細に計算するには、1 mm以下のメッシュで構造体表面を分割してモデル化する必要があるが、総メッシュ数は3,000万メッシュ規模となる。このような大規模モデルの計算は従来不可能であった。

今回、三菱電機では、3,000万メッシュ規模の大規模電磁界解析モデルを現実的な計算時間で解析できるシステムを開発した。さらに、機械的又は熱的な信頼性向上を目的として、大規模電磁界解析結果を構造解析及び熱流体解析に適用する大規模連携解析システムを構築した。

タービン発電機の固定子端部及びコイルエンド素線の電磁界解析を実施し、3,000万メッシュ規模の大規模電磁界解析が有効なツールとなることを確認した。

今後は、実際の開発設計にこの連携解析システムを導入して発電機の高効率化と信頼性向上を達成し、電力の安定供給に貢献していく。



## タービン発電機の大規模連携解析の概念図

タービン発電機の“熱流体”←“電磁界”→“構造”の連携解析概念図である。大規模電磁解析を用いて計算したタービン発電機の固定子端部構造での電磁損失(損失密度分布)を熱流体解析に、電磁力を構造解析に引き渡して連携解析を行っている。

### 1. ま え が き

多くの電気機器で、所要の性能・信頼性を確保するために、有限要素法を代表とする様々な数値解析技術が適用されている。主な数値解析として、構造解析、熱流体解析及び電磁界解析がある。これらの数値解析を用いることによって、小型の機器では、試作試験回数を削減し、開発期間を短縮することが可能である。この数値解析技術は、試作・試験が難しい大型の機器で重要性が更に増し、試作・試験をすることなく、機器の性能及び信頼性を確保するには、数値解析による十分な予備検討が必要となる。小型の機器では数値解析の確からしさを試作試験の結果を用いて検証することが可能であるが、大型の機器で、機器の信頼性を確保するためには数値解析の精度向上が求められている。さらに、大型の機器では実負荷運転試験を実施することが難しいケースもあり、無負荷試験などの比較的容易な試験から実負荷時の状態を推定する精度も要求される。これにも数値解析技術を駆使することで対応する必要がある。

本稿では大型機器として、タービン発電機を取り上げる。発電機では、世界的な省エネルギー要求の高まりと電力の安定供給が求められており、高効率化、信頼性向上が急務となっている。これを達成するための数値解析技術として、次の解析技術が必要となる。

#### (1) 電磁界解析技術

損失の発生部位を特定するとともに、電磁力(電磁加振力)分布を正確に把握し、高効率化、冷却設計、構造解析などの精度を高める。

#### (2) 熱流体解析技術

損失発生部位に対し、効果的な冷却設計を行うことで、熱的信頼性を確保する。

#### (3) 構造解析技術

振動抑制や高精度な強度評価によって、機械的信頼性を確保する。

当社では、これらの構造-熱流体-電磁界の連携解析システム(図1)を構築し、これを大型機器に適用する技術を開発した。

本稿ではこれら3種類の解析のうち、電磁界解析技術について述べる。

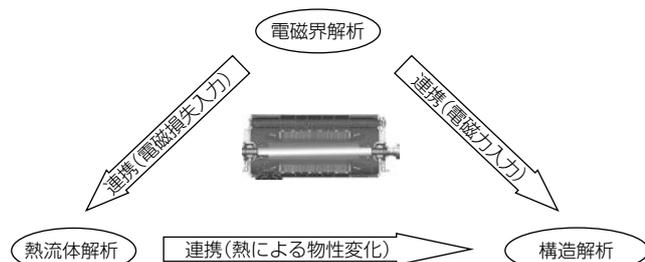


図1. 連携解析の概念図

### 2. 電磁界解析技術

航空機や自動車などの空力特性の詳細検討をする熱流体解析技術では、数千万メッシュ以上の規模の解析がされており、数億メッシュにいたる大規模解析をした例が存在する。これに対して、電磁界解析の解析規模は、従来100万メッシュ程度<sup>(1)</sup>が主であり、数年前でも数百万メッシュ<sup>(2)</sup>が上限であった。しかし、大型の電気機器の信頼性評価精度を高めるには、1,000万メッシュ規模を超える解析が必要と考えられる。

タービン発電機の固定子端部の断面模式図を図2に示す。この図の固定子鉄心端部やシールドコアは積層された電磁鋼板であり、この面内には固定子コイルエンド及び回転子コイルエンドからの磁束が鎖交することによって渦電流損失が発生する。また、クランパやコアボルトは塊状の鉄体であり、やはり渦電流損失が発生する。フィンガプレートやシールド押さえは非磁性の金属であるが、ここにも渦電流損失が発生する。

外部からの変動磁場によって発生する渦電流は、主に表皮深さ内に流れる。表皮深さ $\delta$ は、次式で表される。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $f$ :周波数、 $\mu$ :透磁率、 $\sigma$ :導電率であり、鉄体の表皮深さ $\delta$ は $f=60\text{Hz}$ としてもおよそ1mm以下となる。したがって、これらの固定子端部の渦電流損失を解析するためには少なくとも部材表面を表皮深さ $\delta$ 以下のメッシュに分割する必要がある。しかし、これらの部材は、数mの径及び数10mmの厚みを持っており、表皮深さ $\delta$ 以下のメッシュに分割すると、分割数は1,000万メッシュを

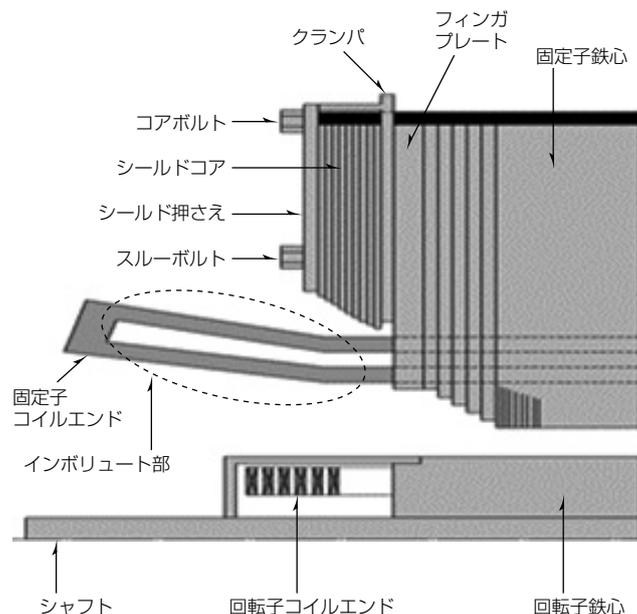


図2. タービン発電機の固定端子部の断面模式図

◇一般論文◇

超える。このため、従来の数百万メッシュの電磁界解析では、シールドコア部と固定子鉄心端部をそれぞれ別の解析として行うことで損失を評価していた。しかし、近年の研究でシールドコア部の損失は固定子鉄心端部に流れる磁束量に影響を受けることが分かってきており、固定子端部全体で解析を実施することによって精度が向上することが分かってきた。つまり、より詳細な損失把握と更なる効率改善には、1,000万メッシュを超える大規模解析が必要である。図3に今回作成した固定子端部全体モデルのメッシュ分割図を示す。なお、固定子コイルは表示していない。

また、図4に固定子コイルエンドの分割図を示す。発電機の固定子コイルは1導体に対して約100本の銅素線で構成されている。素線1本は厚み1～3mm程度で、幅5～10mm程度である。このため、素線1本に対しても渦電流

損失が発生する。この固定子コイル素線に発生する渦電流損失を解析するためには、素線1本ごとに渦電流損失密度分布を計算する十分なメッシュ分割を施す必要があり、全ての素線に対してメッシュ分割を行うと、3,000万メッシュ規模の解析となる。

3. 大規模電磁界解析システム

先に述べた最大3,000万メッシュの大規模電磁界解析を現実的な時間内に計算するために、大規模電磁界解析システムを構築した。計算機としては128並列マシンを導入し、マシン間のデータ通信速度を向上させるために通常のギガビットイーサネット通信ではなくインフィニバンド通信を用いている。さらに、解析ソルバーには、解析領域を計算機のコア数に応じて分割する領域分割法<sup>③</sup>を採用した。領域分割法によって領域分割された固定子端部のメッシュ(鉄心端部のみ)を図5に示す。なお、図には表示されていないが、空間部も領域分割されている。この解析システムを用いることで、従来の数百万メッシュ規模の解析とほぼ同等の計算時間で3,000万メッシュ規模の解析が可能となった。

電磁界解析では、各要素の磁束密度や渦電流損失密度分布が結果として得られるが、大規模解析の場合、このデータ量が膨大となる。このため、解析結果を可視化するシステムも構築する必要がある。このシステムでは、既に大規模解析を実施している熱流体解析に用いられる表示ソフトウェアを電磁界解析にも適用することで対応した。

電磁界解析と構造解析又は熱流体解析では、メッシュを細かくする部分が異なるため、電磁界解析のメッシュを用いない。このため、解析結果をマッピングする技術が必要である。このため、共通のCADデータを用いて個別に解析モデルを構築し、電磁界解析から得られる電磁力や電磁加振力分布を構造解析に引き渡すためのマッピング、及び電磁界解析によって得られた損失密度分布を熱流体解析に引き渡すためのマッピングを行うソフトウェアを構築し、連携解析を行えるようにした。図6に今回構築した大規模連携解析システムの概念図を示す。

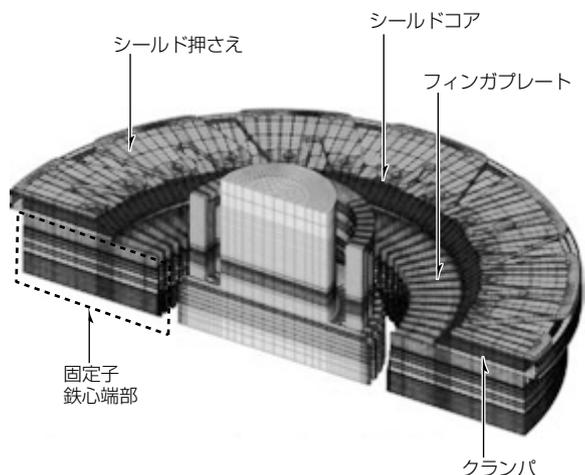


図3. 固定子端部全体モデルのメッシュ分割図

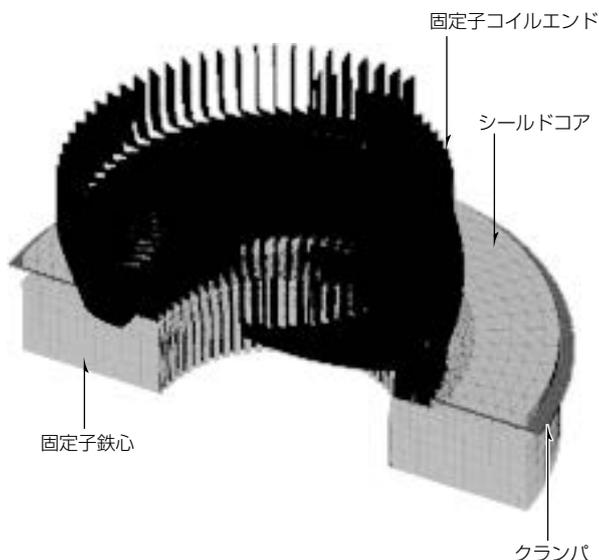


図4. 固定子コイルエンド素線モデルのメッシュ分割図

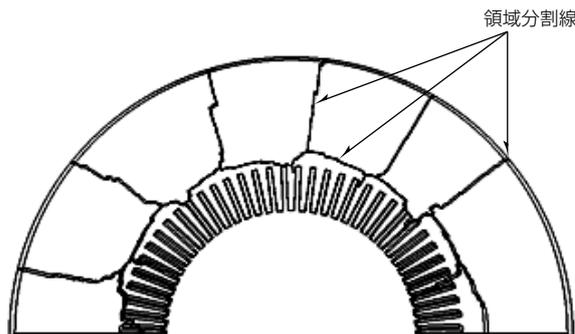


図5. 固定子鉄心端部メッシュの領域分割図

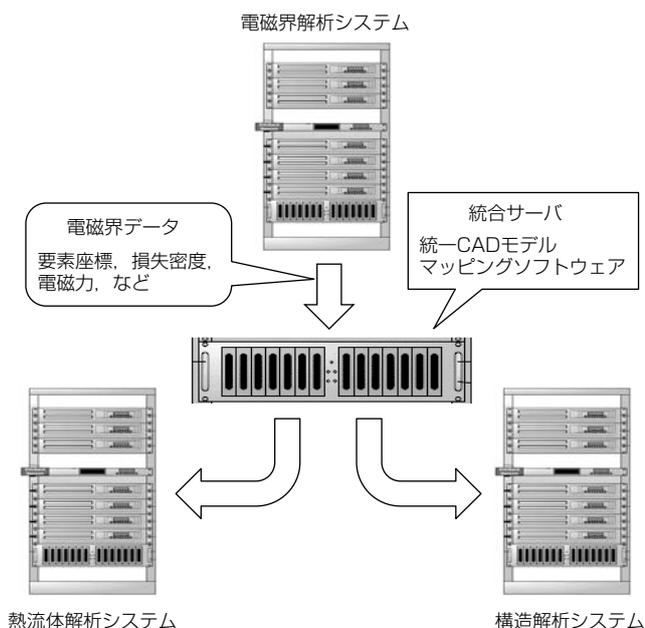


図6. 大規模連携解析システムの概念図

#### 4. 大規模電磁界解析例

図7に銅損時(電機子巻線を三相短絡し、界磁電流を与え定格回転数で回転子を回転させた場合で、電機子電流が定格電流となる場合)の固定子端部の大規模電磁界解析結果(損失密度分布)を示す。この図から、シールドコアの機外側内周面やフィンガプレートの内周側角部に損失が集中していることが分かる。なお、この図は電磁界解析結果から得られる渦電流損失密度分布を示しており、熱流体解析に引き渡す損失密度分布は、電磁界解析結果から得られた各要素の磁束密度履歴を用いて計算した鉄損を、各要素の渦電流損失密度に合計した値である。

この発電機の銅損試験を実施し、固定子端部各部の温度を測定して解析値と比較した。図8に熱流体解析から得られた温度分布と測定値との比較結果を示す。図8に示す解析値と測定値を比較した結果、図8(b)に示すように解析結果は誤差5%以内で測定値と一致しており、固定子端部解析の妥当性が分かる<sup>(4)</sup>。

図9はコイルエンド素線に発生する渦電流損失密度分布の解析結果である。この図から、コイルエンドのインボリュート部に差し掛かったあたりで、発熱が最も大きくなる現象が再現できている。

これらの解析は3,000万メッシュ規模の大規模解析をして初めて得られるものである。すなわち、この大規模解析システムは大型機器の詳細な発熱分布を求めることによる熱的信頼性向上や、本稿では述べなかったが、構造解析との連携<sup>(5)</sup>による機械的信頼性向上に貢献できるものと考えられる。さらに、損失密度分布を定量的に把握することで、高効率設計、最適な冷却設計への指針を得ることができ、高性能で信頼性の高い機器の設計に貢献できると考えられる。

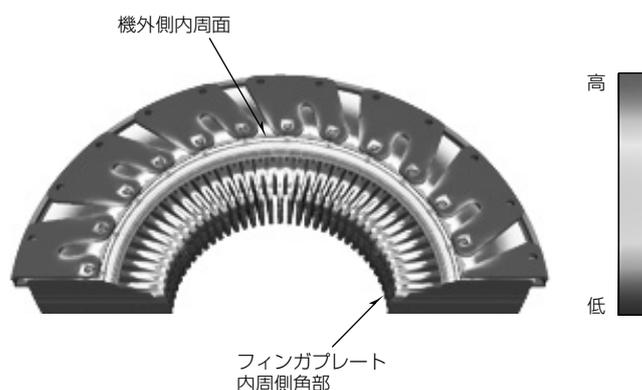
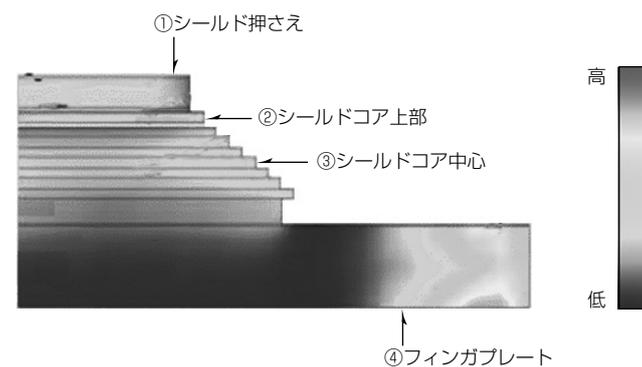
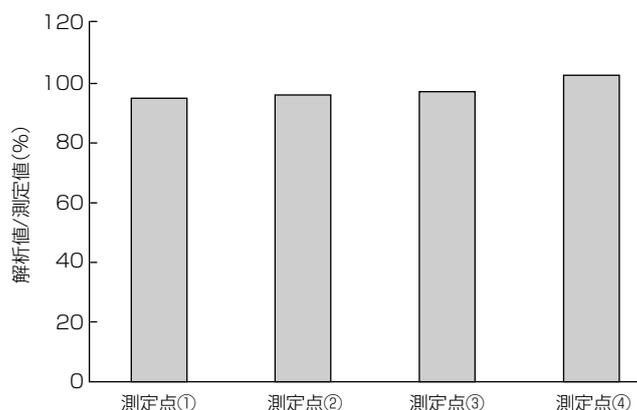


図7. 固定子端部の過電流損失密度分布



(a) 温度分布



(b) 測定値との比較

図8. 固定子端部の温度分布及び測定値との比較

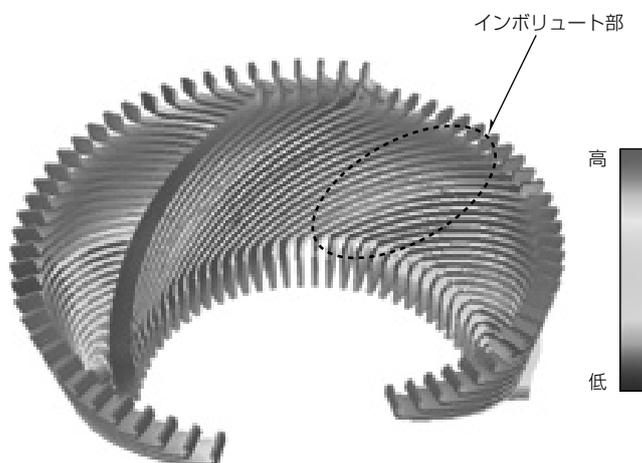


図9. コイルエンド素線の渦電流損失密度分布

## 5. む す び

大型電気機器の性能・信頼性向上を目的として、詳細な電磁力(電磁加振力)分布や、発熱分布を、試作・試験なしに推定できる大規模連携解析システムを構築した。このシステム内で用いられる大規模電磁界解析は、これまでに製品設計への適用例がない3,000万メッシュ規模の大規模解析であり、本稿では精度確保には1,000万メッシュ以上の解析規模が必要となることを示した。また、タービン発電機の固定子端部全体モデルやコイルエンド素線モデルの解析例を示し、固定子端部モデルでは実測温度と解析結果の比較を行い、精度の高さを証明した。

今後は、実際の開発設計にこの連携解析システムを導入して発電機の高効率化と信頼性向上を達成し、電力の安定供給に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) Kometani, H., et al.: Application of Electromagnetic Numerical Analysis for Large Indirectly Hydrogen Cooled Turbine Generator, CIGRE 2008 SC A1-109
- (2) Motoyoshi, K., et al.: Large-Scale 3D Electromagnetic Field Analysis for Estimation of Stator End Region Loss in Turbine Generators, ICEMS2016, LS4C4 (2016)
- (3) Nakano, T., et al.: Parallel Computing of Magnetic Field for Rotating Machines on the Earth Simulator, IEEE Trans.Magn., **46**, No.8, 3273~3276(2010)
- (4) 空 信之, ほか: 870MVA水素間接冷却方式タービン発電機固定子鉄心端部損失解析, 平成27年電気学会全国大会論文集, 5-043 (2015)
- (5) 長嶋孝明, ほか: タービン発電機の大規模構造解析, 第30回計算力学講演会講演論文集, F02-3 (2017)