

# タービン発電機固定子コイルエンドの固有振動数計算ツール

田宮洋一\*

Natural Frequency Calculation Tool of Turbo-Generator Stator Coil End

Yoichi Tamiya

## 要旨

本稿では、タービン発電機固定子コイルエンドの共振回避設計に有用な設計支援ツールの開発内容を述べる。

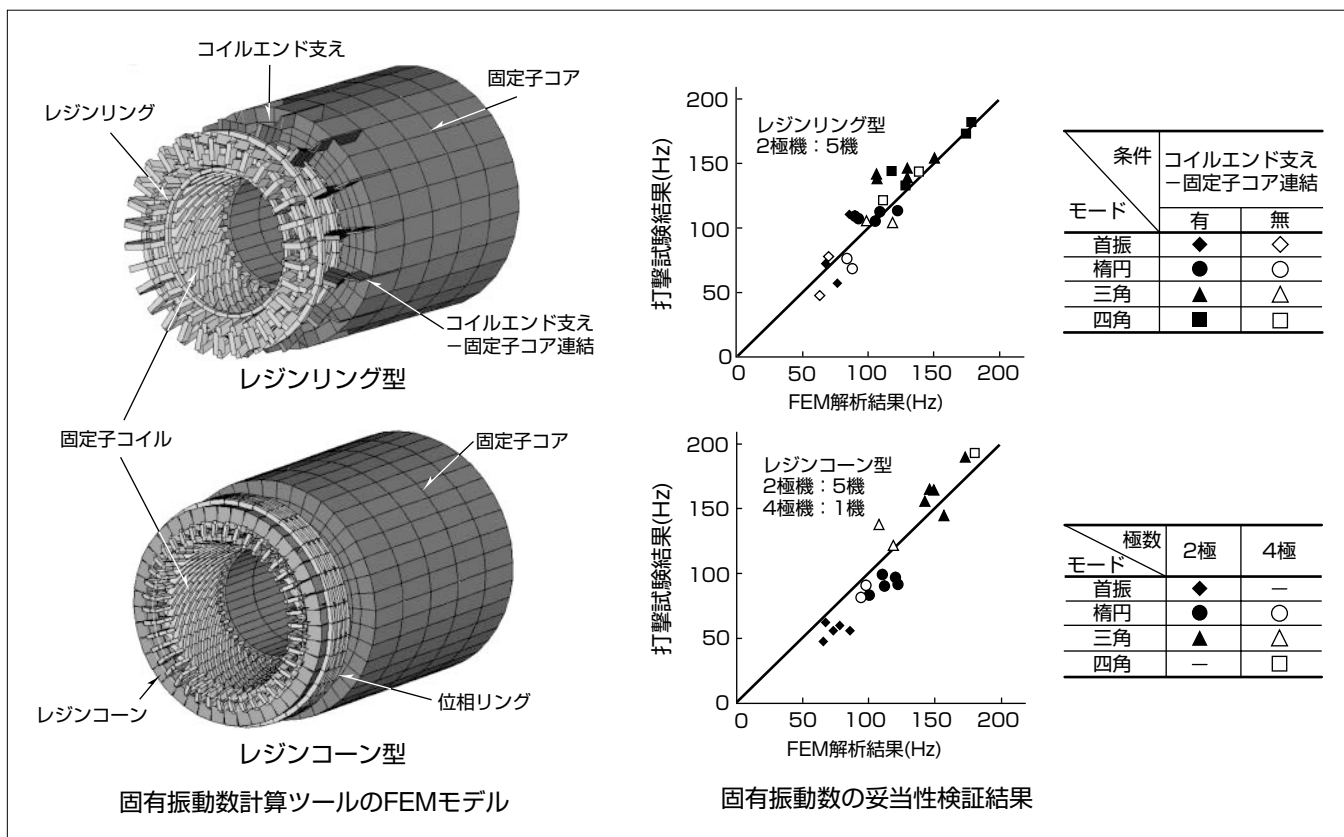
タービン発電機は、従来から大容量化・高効率化の市場要求が高く、常に高度な設計・製造技術が必要とされてきた三菱電機の基幹製品の一つである。特に、地球温暖化の原因と言われている二酸化炭素の削減が望まれている昨今、高効率化の市場要求はますます高まってきている。加えて、市場での競争力強化を目的とした低コスト化も同時に進めていかなければならない。

タービン発電機の固定子コイルエンドには、発電時の電磁振動が作用する。よって、共振による固定子コイル及び相リードの絶縁破壊を防止するための共振回避設計が不可

欠である。しかしながら、固定子コイルエンドの構造は非常に複雑であるため、有限要素法(FEM)を用いた振動計算には多大な時間と高度なCAE(Computer Aided Engineering)技術が必要であった。

本稿で述べる設計支援ツールは、複雑な構造をしている固定子コイルエンドのFEMモデルの作成から固有振動数計算結果の出力までを自動で行うツールである。このツールを用いることによって、高度なCAE技術を持っていない設計者でも、構造変更などのパラメータスタディを容易かつ迅速に実施することができる。

なおこのツールは、実機固定子コイルエンドの共振回避設計に既に活用されている。



## 固有振動数計算ツールのFEMモデルと妥当性検証結果

このツールは、固定子コイルエンドの固有振動数を迅速に計算することができる設計支援ツールである。複雑な構造をしている固定子コイルエンドのFEMモデルを自動で作成し、レジンリング型及びレジンコーン型の支持構造の違いや2極機及び4極機の違いにも対応できる。このツールは、固定子コイルエンドの共振回避設計に十分有用なツールであり、既に実設計に活用されている。

### 1. ま え が き

本稿では、タービン発電機固定子コイルエンドの共振回避設計に有用な設計支援ツールの開発内容を述べる。

タービン発電機の固定子コイルエンドは、図1に示すような複雑な構造をしている。その構造は、上口と下口のコイルで編み合わされたバスケットのような形状である。上口と下口のコイルは、固定子コアの両端から軸方向へ伸び出しながら、交差するように螺旋(らせん)状に巡回して、それぞれの終端で結合されている。固定子コイルエンドは、発電時の電磁力によって回転数の2倍の周波数で加振される。この周波数で固定子コイルエンドが共振すると、固定子コイル及び相リードの絶縁が破壊する可能性が高くなる。よって、固定子コイルエンドの共振回避設計は重要である。

固定子コイルエンドの共振回避設計は、計算機能力が発達する以前では、実機の加振実験結果<sup>(1)(2)(3)(4)(5)</sup>と従来実績に基づいて実施されていたが、計算機能力が飛躍的に向上した近年では、有限要素法(FEM)による振動計算結果<sup>(6)(7)(8)(9)(10)</sup>に基づいて実施されている。このように今では、FEMは固定子コイルエンドの共振回避設計に不可欠なツールとなっている。しかしながら、固定子コイルエンドの構造は非常に複雑であるため、FEMモデルの作成及び解析に多大な時間を必要とし、かつ、高度なCAE技術を持つ技術者が必要であった。

本稿で述べる設計支援ツールは、高度なCAE技術を持っていない設計者でも、構造変更などのパラメータスタディを容易かつ迅速に実施することができるツールである。このツールでは、汎用構造解析ソフトウェアANSYS<sup>(注1)</sup>

のAPDL(ANSYS Parametric Design Language)機能<sup>(11)</sup>を採用している。APDL機能とは、ANSYSのコマンド(指令言語)のみでFEMモデルの作成から計算及び結果の表示・出力までを自動で実施するプログラム機能である。

(注1) ANSYSは、SAS IP, Inc. の登録商標である。

### 2. 固定子コイルエンドの支持構造

固定子コイルエンドの支持構造は、図2に示すレジコン型とレジリング型の2種類がある。レジコン型は大容量の水冷却機に主に採用されており、レジリング型は水冷却機よりも比較的小容量の空気冷却機や水素冷却機に主に採用されている。

レジコン型は、レジコンと押え板で固定子コイルを挟み込み、絶縁ボルトで締結することによって、強固な円筒剛性を保持した支持構造である。対して、レジリング型は、レジリングに上口と下口のコイルをFRP(Fiber Reinforced Plastics)製の紐(ひも)で緊縛し、さらに、上口-下口コイル同士、隣接コイル同士及びコイルエンド支えとレジリングもFRP製の紐で緊縛することによって、円筒剛性を保持した支持構造である。

このような支持構造によって、固定子コイルエンドの円筒剛性は確保されているので、固定子コイル一本一本がバラバラに振動することはない。固定子コイルエンドは、発電時の電磁力によって、2極機では楕円(だえん)形状のモードで、4極機では四角形状のモードで共振する。

### 3. 固定子コイルエンド固有振動数計算ツール

開発した固定子コイルエンド固有振動数計算ツールでは、まずMicrosoft Excel<sup>(注2)</sup>で作成された寸法表にタービン発電機の固定子コア及び固定子コイルエンドの主要寸法を入力し、Excelのマクロ機能を用いてAPDLファイルを作成する。APDLファイルはテキストファイル形式で出力される。ここで、固定子コア及び固定子コイルエンドの主要寸

(注2) Excelは、Microsoft Corp. の登録商標である。

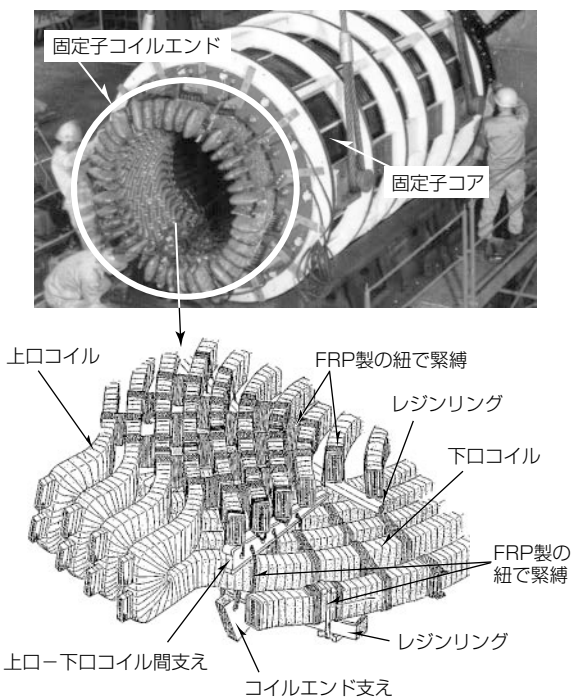


図1. 固定子コイルエンドの構造

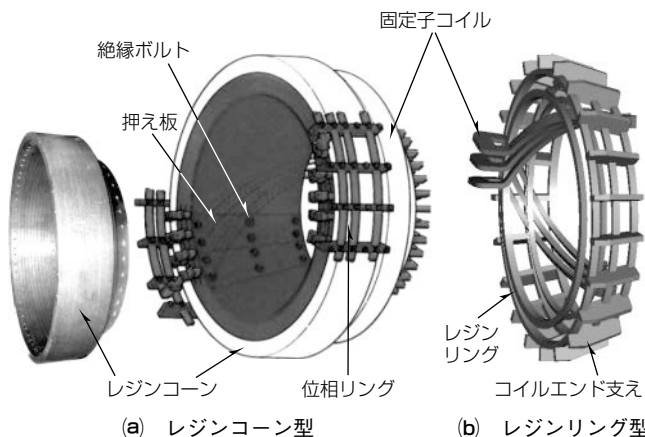


図2. 固定子コイルエンドの支持構造

法は、固定子コアの内・外直径、スロット数、固定子コイルの断面寸法、コイルエンド長、レジリング寸法、レジコン寸法等で構成される。一般に、これらは機能設計段階で決定される寸法情報である。設計者はこれらの寸法情報のみからFEMモデルを容易に作成することができる。

ANSYSを起動し、APDLファイルを読み込むと、自動でFEMモデルを作成し、固有振動計算が実行される。計算結果はAVI(Audio Video Interleave)ファイル形式で出力され、固有振動数ごとの変形モード図が簡単に閲覧できるようになっている。

図3はこのツールで作成された固定子コイルエンドのFEMモデルである。レジリング型とレジコン型の2種類が示されている。このツールは、スロット数が30~78まで3スロット刻みでFEMモデルを作成でき、2極機及び4極機のモデル化にも対応できる。また、図3のFEMモデルは軸方向1/2モデルであるが、タービン側及びエキサイタ側の構造の違いにも対応できる。

図3のFEMモデルにおいて、固定子コアはソリッド要素(節点数8)で、レジコン及びコイルエンド支えはシェル要素(節点数4)で、固定子コイル、レジリング及び位相リングはバー要素(節点数2)で、FRP紐緊縛部はバネ要素(節点数2)で構成されている。節点数の多いソリッド要素で全構造部位を構成することは、計算に多大な時間を要するので、このモデルでは、シェル、バー、バネの各要素を用いて、総節点数が最大8,000点以下となるように工夫した。これによって、パラメータスタディに迅速に対応できるモデル構成となっている。

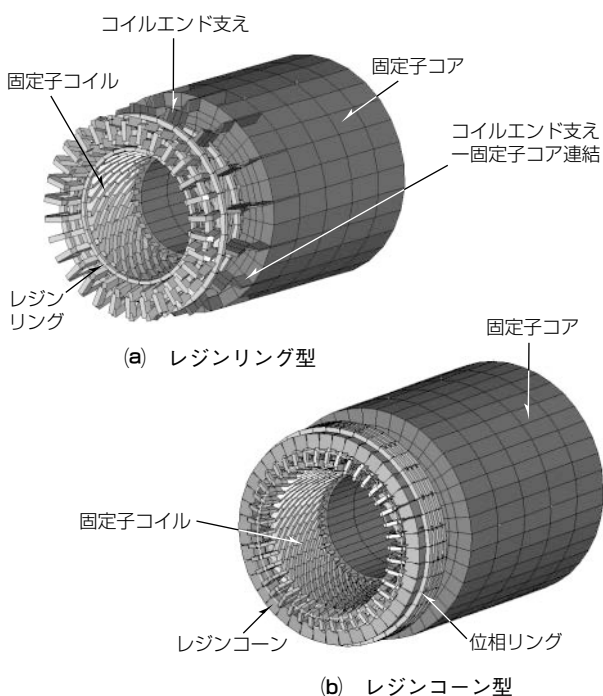


図3. 固定子コイルエンドのFEMモデル

4. 主要部品のFEMモデル妥当性確認

固定子コイル、レジリング、レジコン等は、固定子コイルエンドを構成している主要部品である。この章では、これら主要部品の単体に対して、バーやシェルでモデル化したFEMモデルの妥当性を確認する。

図4及び図5に固定子コイル単体及びレジコン単体の打撃試験とFEMモデルの妥当性確認結果を示す。FEMモデルの妥当性確認は打撃試験結果とFEM解析結果の固有振動数を比較することによって実施した。図4及び図5では、固定子コイル単体及びレジコン単体の打撃試験結果とFEM解析結果の固有振動数は低次から高次のモードまでよく一致している。これらの結果より、主要部品についてバーやシェルでモデル化したFEMモデルは妥当であると判断できる。

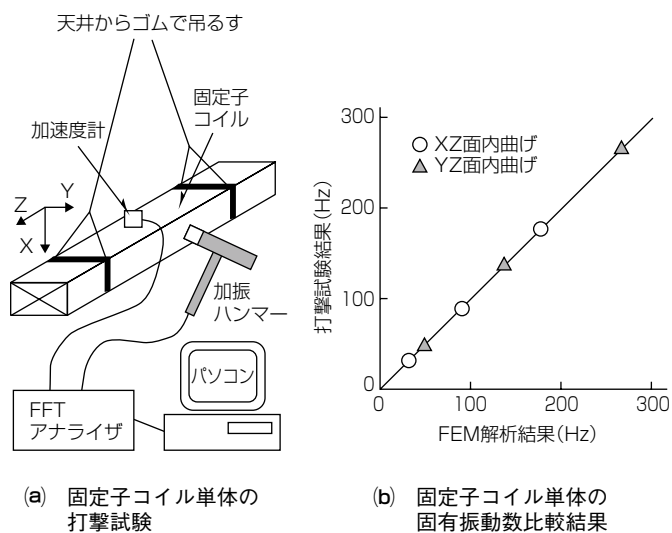


図4. 固定子コイル単体の打撃試験とFEMモデルの妥当性確認結果

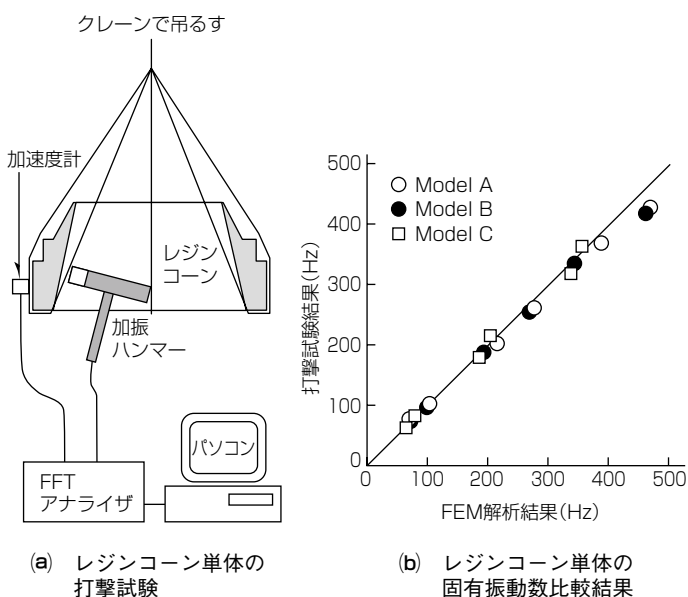
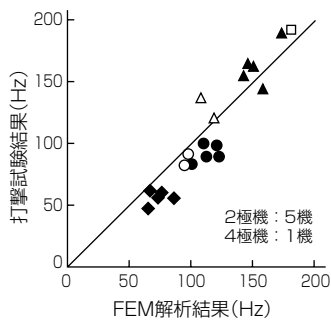
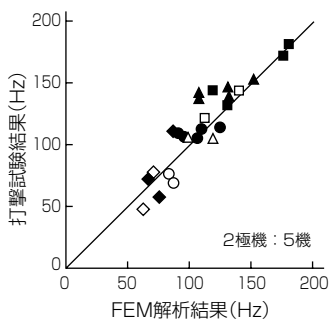


図5. レジコン単体の打撃試験とFEMモデルの妥当性確認結果

モード	条件	
	コイルエンド支え —固定子コア連結	有
首振	●	◇
楕円	●	○
三角	▲	△
四角	■	□

モード	極数	
	2極	4極
首振	●	—
楕円	●	○
三角	▲	△
四角	—	□



(a) レジンリング型

(b) レジンコーン型

図6. 実機固定子コイルエンドの打撃試験結果とFEM解析結果の固有振動数比較

### 5. 実機固定子コイルエンドの固有振動数計算結果

図6は、タービン発電機の実機における固定子コイルエンドの打撃試験結果と、このツールを用いて得られたFEM解析結果の固有振動数を比較した図である。図6(a)はレジンリング型5機種についての比較結果であり、図6(b)はレジンコーン型6機種についての比較結果である。レジンリング型の5機種はすべて2極機である。これら5機種のうち、2機種はコイルエンド支えと固定子コア間の連結(図3)がある構造であり、3機種はその連結がない構造である。また、レジンコーン型の6機種のうち、5機種が2極機であり、1機種が4極機である。

図6では、首振、楕円形状、三角形状及び四角形状の4つのモードで、打撃試験結果とFEM解析結果はおおむね一致した。この結果から、実機固定子コイルエンドのFEMモデルの妥当性が確認でき、このツールが固定子コイルエンドの共振回避設計に十分有用であると判断できる。なお、図7に首振、楕円形状、三角形状及び四角形状の4つの変形モードを示す。これらは、タービン発電機を軸方向から見たときの固定子コイルエンド円筒端面の変形モードを示している。

### 6. むすび

このツールは、複雑な構造をしている固定子コイルエンドのFEMモデルの作成から固有振動数計算結果の出力までを自動で行うツールである。高度なCAE技術を持っていない設計者でも、容易にFEMモデルを作成し、固有振動数の計算が可能である。設計者は、機能設計段階で決まる主要数の寸法をExcelに入力することで、構造変更等のパラメータスタディに迅速に対応できる。また、実機コ

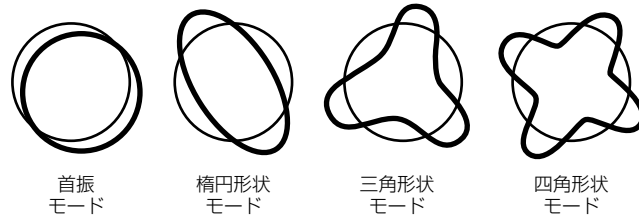
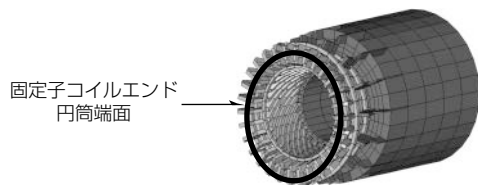


図7. 固定子コイルエンドの固有振動変形モード

イルエンドの打撃試験結果との比較によって、このツールが共振回避設計に十分有用であることも確認できた。

なお、このツールは、実機固定子コイルエンドの共振回避設計に、既に活用されている。

### 参考文献

- (1) 田里 誠, ほか: 大容量水冷却タービン発電機固定子コイルエンド支持法の強度, 東芝レビュー, **30**, No.10, 758~762 (1975)
- (2) Patel, M. R., et al.: End-Winding Vibrations in Large Synchronous Generators, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, **PAS-102**, No.5, 1371~1377 (1983)
- (3) 免田 亨, ほか: 関西電力(株)南港発電所向け1号600MW水冷却タービン発電機, 三菱電機技報, **64**, No.6, 495~500 (1990)
- (4) 河瀬千春, ほか: 大容量タービン発電機における最新技術, 三菱電機技報, **73**, No.6, 436~438 (1999)
- (5) 前田 進, ほか: 原子力用大容量タービン発電機, 三菱電機技報, **74**, No.8, 509~512 (2000)
- (6) Stephan, C. E., et al.: New air-cooled turbogenerator in the 300-MVA class, ABB Review, No.1, 20~28 (1996)
- (7) Senske, K., et al.: Vibrational Behaviour of the Turbo-generator Stator End Winding in Case of Electrical Failures, CIGRE SC11 IEE Japan (1997)
- (8) 阿久津信雄, ほか: 新系列2極空気冷却タービン発電機の構造設計, 富士時報, **72**, No.5, 275~278 (1999)
- (9) 佐藤 理, ほか: 世界最大容量水素間接冷却タービン発電機, 東芝レビュー, **59**, No.2, 62~65 (2004)
- (10) 篠原主勲, ほか: タービン発電機ステータコイルエンドの固有振動特性, 日本機械学会論文集 (C編), **70**, No.692, 941~948 (2004)
- (11) サイバーネット: ANSYS APDLガイド (2007)