

# 風力発電用永久磁石式発電機の熱流体解析

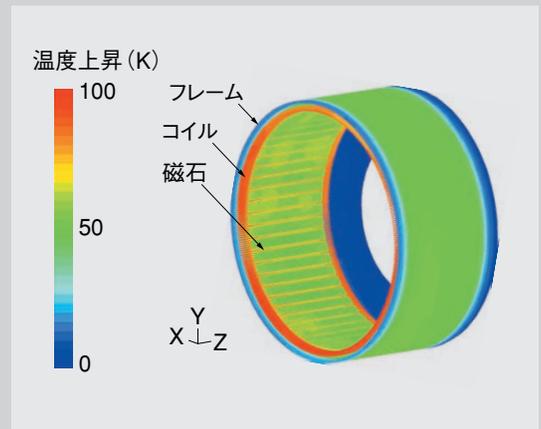
🔊 発電機, 解析, 流体, 冷却

\* 江尻光良 Mitsuyoshi Ejiri

## 概要

風力発電用永久磁石式発電機（PMG：Permanent Magnet Generator）の熱流体解析を行い、解析精度向上のために実機測定結果との比較を行った。本PMGは、フレーム表面フィン及び内部のエアダクトによる通風で冷却を行うが、モデルサイズを小さくするためフィンとは別々に解析を行い、フィン接触面の熱伝達率を用いる方法を検討した。また、解析計算時間低減のためコイルの内部構造やコイルエンドの形状を単純化した。

検討の結果は、実機の温度測定結果と比較して、コイルの温度上昇値はほぼ一致した。



フレーム及び固定子鉄心、磁石の温度

## 1. ま え が き

近年、回転機の開発において、低環境負荷・高性能化・高性能化と開発期間の短縮化に伴い、構造、流体及び電磁界解析により仮想的に検証を行い、試作回数を減らしながら最適化を推進する取り組みが進んでいる。

本稿では回転機の熱流体解析技術とその適用例について紹介する。

## 2. 解析技術の回転機適用

回転機の開発において、基本性能や電気回路の設計のためには電磁界解析が、強度や耐震構造のためには構造解析が行われる。また、材料の寿命確保や動作中の性能保証のためには、コイルの絶縁材料や磁石部の温度を一定以下にする必要がある。このため、冷却方法の検討を行うために熱流

体解析が重要となる。

一般的に、熱流体解析は電磁界解析や構造解析に比べ、メッシュの分割や要素の形状及び境界条件による結果精度と収束性への影響が大きい。

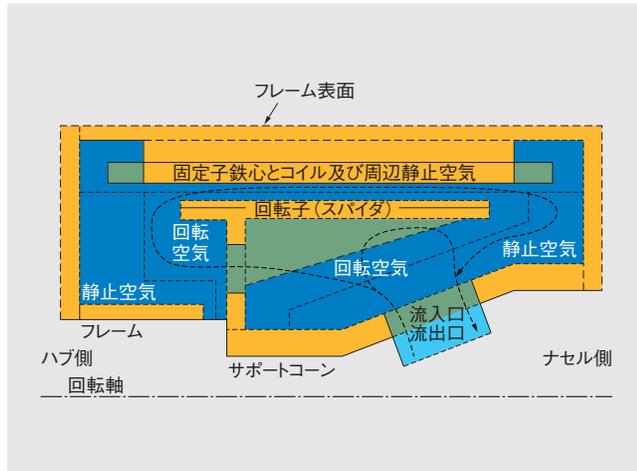
そこで、熱流体解析の精度向上及び計算時間の低減のために、実機の発電機に対して熱流体解析を行い、結果の比較を行った。

## 3. 風力発電機の熱流体解析

風力発電用永久磁石式発電機（PMG：Permanent Magnet Generator）を対象として熱流体解析の検証を行った。解析には汎用熱流体解析ソフトウェア（ANSYS社製FLUENT 6.3）を用いた。今回は、回転子と固定子及びフレーム間のふく射の影響は取り扱わず、伝導と対流のみを考慮した。

対象とするPMGは、フレーム表面に冷却フィンが付き外部空気により冷却される。また、フレー

\*製品開発企画部



**第1図 PMG内部モデルの分割構造**  
PMG内部モデルの領域分割構造を回転軸を通る平面で切った断面で表した。固体と流体、静止部分と回転部分などに分割している。

ムの内部はエアダクトにより外部空気が導入され、回転上のリブ板が回転して内部の空気をかくはんすることで冷却を行う。

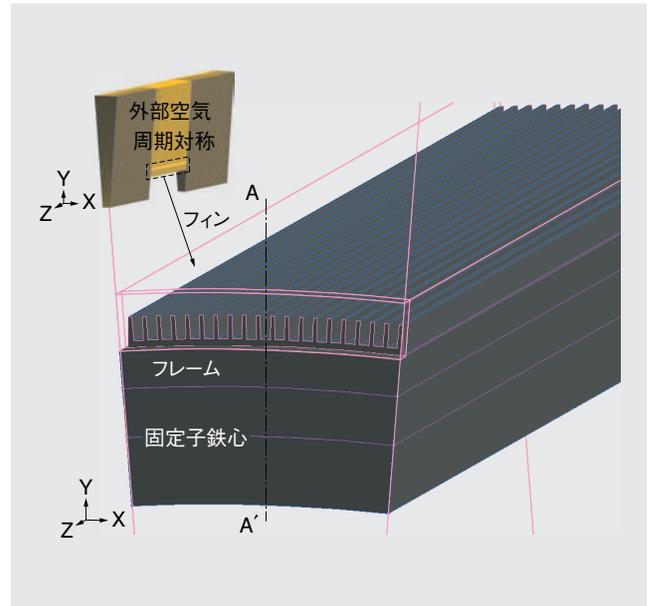
ここで、外部空気と内部通風を同時にモデル化すると、メッシュ数が膨大になり、計算時間が増大する。そこで、外部空気とフィンによるフレーム上の冷却効果を別途計算しておき、その結果をフレーム表面の熱伝達率として与える。一方、PMG内部に対しては、空気の流れを厳密に計算することで精度を保ちながら計算時間を低減させる。

PMG内部モデルは第1図のようにフレーム、固定子鉄心とコイル及び周辺静止空気、静止空気、回転空気、回転子（スパイダ）、サポートコーン、流入口、流出口の8領域に分割し、それぞれインタフェース境界を用いて結合させた。メッシュ数は248万メッシュとなった。

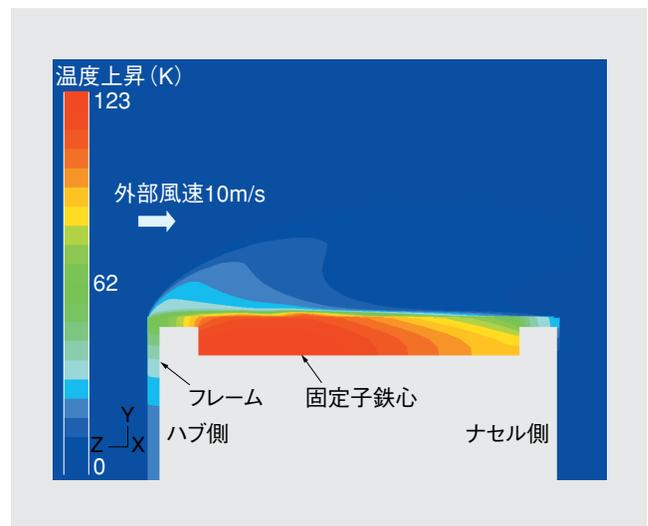
コイルは銅線と絶縁材を束ねた構造であり、更に固定子鉄心から外に出たコイル端部は折れ曲がりがあり複雑な形状をしているので、形状をそのままモデル化することは難しい。そこで、後に述べるように単純な構造としてモデル化するために事前にコイル周辺のみを解析を行い、その結果により単純構造としてモデル化を行った。

### 3.1 外周フィンのモデル化

はじめに外周フィンの簡略化について説明する。固定子鉄心とフレーム、フィン、外部空気は同心円形状のため、第2図に示すように周期対称形状でモデル化し、固定子鉄心に所定の発熱を与え、外部空気に実機に近い風速を与えて熱流体解析を



**第2図 フィンモデルの検討**  
外部空気及びフィンのモデルの全体メッシュとフィン周辺の形状（空気は透明）を表示した。フィン20枚分の周期対称モデルとした。



**第3図 フィン周辺の流体解析による温度分布**  
フィンの流体解析の結果を、中央断面（第2図におけるA-A'断面）における温度分布で表示した。フレーム外形による空気の流れの影響で、場所により冷却効果に差があるが、差は少ないので均一と簡略化した。

行った。第3図に温度分布を示す。

フレームからフィンへの温度と熱流束、周囲温度差から熱伝達率を求めた。なおフィン接触面には流れの前後に温度分布があるが、モデル簡略のため一様な熱伝達率とした。外部風速を10m/sとした時に熱伝達率は100W/m<sup>2</sup>Kとなった。解析では、この熱伝達率をフレーム表面に与えて内部通風による解析を行った。

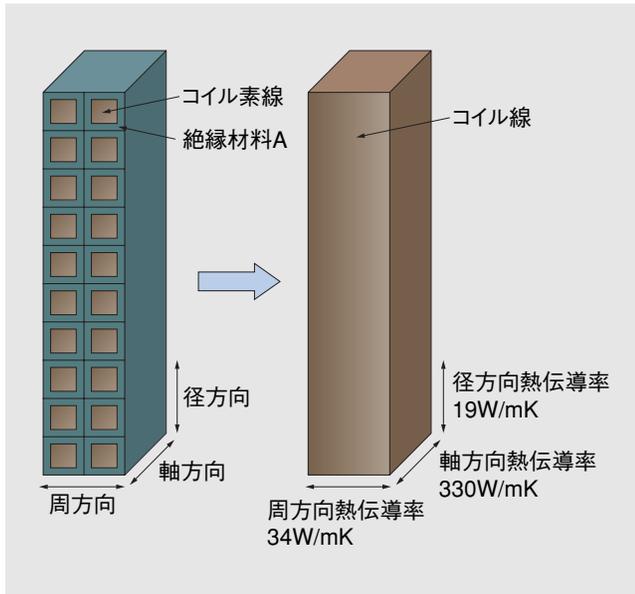
### 3.2 コイル周辺のモデル化

次にコイルのモデル化について説明する。

(1) コイル構造のモデル化 第4図、第5図に示すように、コイルは絶縁材料Aで覆われた銅線を束ねたコイル線を2段重ねた形状となっている。

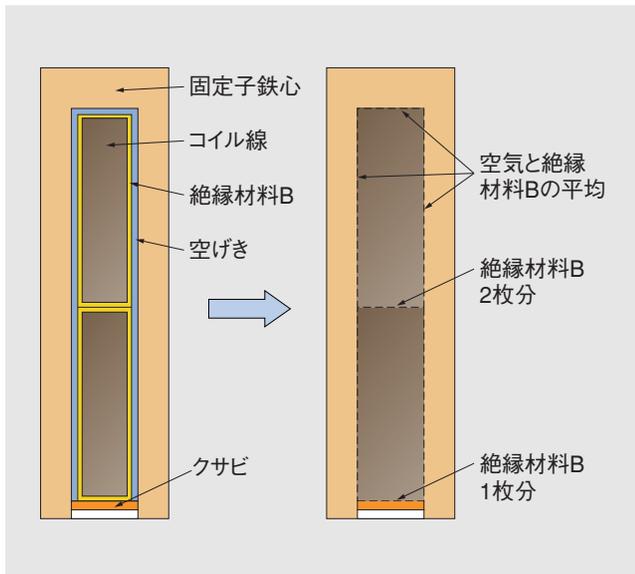
コイル線を軸方向に均一として断面を二次元モデル化し、径方向及び周方向の等価熱伝導率を伝熱解析で求めた。軸方向の等価熱伝導率は材料の体積構成比から求めた。

(2) スロット空げきのモデル化 固定子鉄心のティース間のスロットとそこに通されるコイル線の間には、空気が存在する。また、コイル線の周



第4図 コイル構造の単純化

集成コイルの銅線と絶縁皮膜からなる詳細構造を二次元モデル化し、伝熱解析により等価熱伝導率を求めた。軸方向は材料の構成比率から平均で求めた。



第5図 コイルスロット空げきの単純化

コイルスロット空げきの空気層と絶縁膜を集成コイル領域の壁(厚さと熱伝導率を与える)としてモデル化した。

りには、(1)の素線の絶縁材料Aとは別に素線をまとめて覆った絶縁材料Bがある。これらは薄いため領域としてモデル化するとメッシュ数が膨大となるので、第5図のようにコイル領域における境界壁の条件として空気と絶縁材料Bの平均物質とその厚さとして与える。

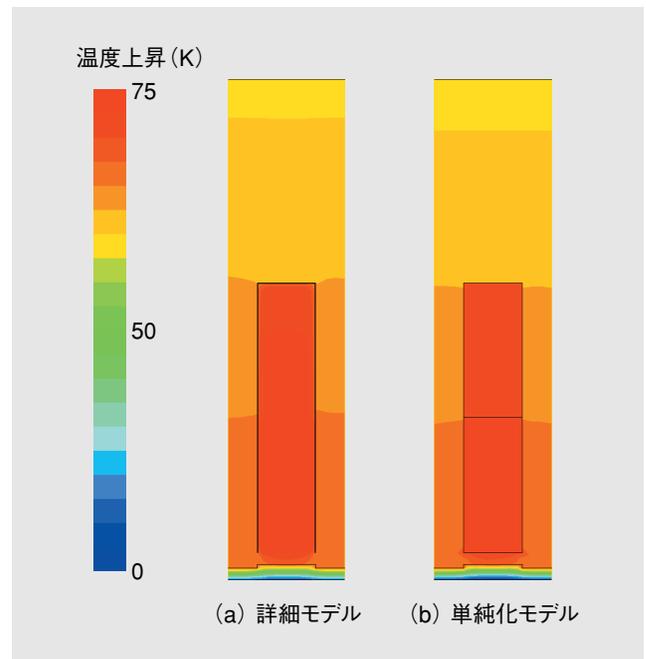
空気と絶縁材料Bの平均物質の熱伝導率は直列に並べた物質の等価熱伝導率で、構成比率(厚さ)により(1)式で求められる。空気の厚さを $t_a$ 、熱伝導率を $\lambda_a$  W/mK、絶縁材料Bの厚さを $t_b$ 、熱伝導率を $\lambda_b$  W/mK、平均物質の熱伝導率を $\lambda_s$  W/mKとすると

$$\lambda_s = \frac{t_a + t_b}{\frac{t_a}{\lambda_a} + \frac{t_b}{\lambda_b}} \dots\dots\dots(1)$$

となる。

コイル内部、絶縁材料及びスロット空げきをすべてモデル化した場合[第6図(a)]と単純化した場合[第6図(b)]を二次元モデル化し、伝熱解析による比較を行った。結果は単純化モデルでも詳細モデルとほぼ同じ温度分布と値となり、単純化しても問題が無いことを確認した。

(3) コイル端部のモデル化 コイル端部は折り返しがあるので形状が複雑になっており、そのま



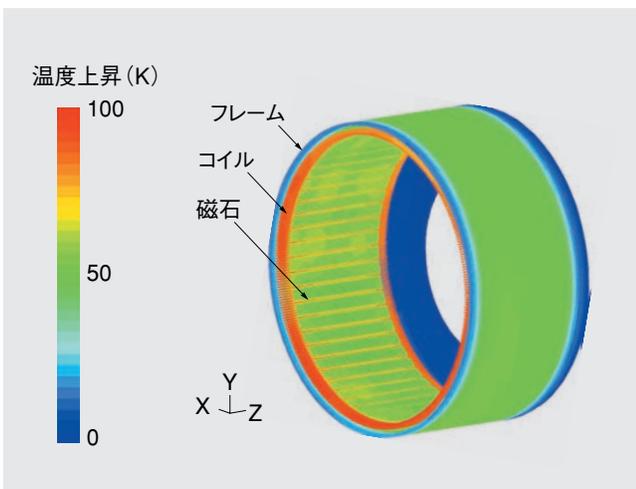
第6図 コイル周辺のモデル化検討

1スロット分のコイルとスロット空げき、絶縁、固定子鉄心を回転軸に垂直な面で切って二次元モデル化し、伝熱解析を行った。詳細モデルですべてモデル化し、単純化モデルではスロット空げきと絶縁膜を壁条件とした。温度分布にほとんど差は無かった。

**第1表 材料物性値**

解析で使用した各部の材料の物性値を示す。

材料物性 部位	熱伝導率 (W/mK)			密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (J/kgK)
	(軸方向)	(径方向)	(周方向)		
空気	0.03	←	←	1.3	1006
エポキシ (絶縁材料A)	5	←	←	1300	1360
マイカ (絶縁材料B)	0.2	←	←	3000	870
スロット内 空気絶縁	0.1	←	←	2600	870
銅(鉄心内部 コイル)	330	19	34.00	7000	420
銅(コイル 端部)	380	↑	↑	8000	↑
磁石	8.6	7.6	8.6	7600	460
鉄(コア)	84	←	←	7900	440
鉄(フレーム)	54	←	←	7900	440
鉄(そのほか)	16	←	←	8000	500
アルミ(フィン)	200	←	←	2700	870



**第7図 固体部分の温度**

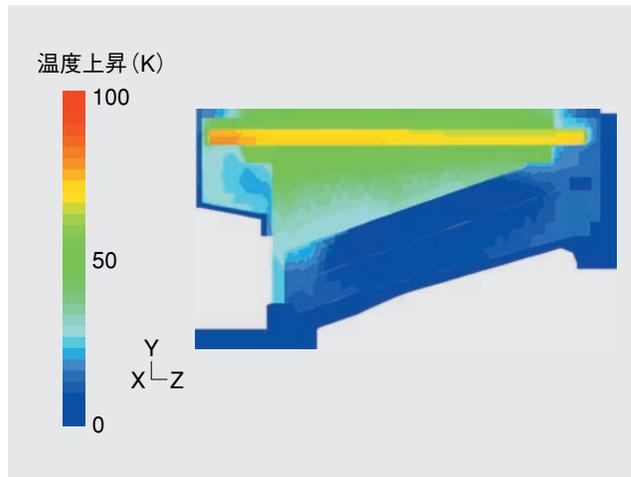
10秒間分の非定常時刻歴回転解析を行った後の固体部分（フレーム及び固定子鉄心、コイル、磁石）の温度を表示した。コイル端部の温度上昇が見られるが、内部通風により上部の温度が若干低い。

まモデル化するとモデル作成及び解析計算の時間が増大する。そこで単純化のため直方形のコイルがスロットから真っ直ぐに突き出た形状にした。この形状の変更に伴いコイル端部の銅の体積が変化するが、これが温度に大きく影響しないように発熱密度と物性値（密度、熱伝導率）を調整した。

第1表に解析で使用した各部の物性値を示す。

**3.3 定常停止解析及び非定常時刻歴回転解析**

PMG内部の流体解析では、回転数は19回/minとし、発熱はコイル銅損（100kW）の固定子鉄心に鉄損、磁石に磁石損、回転子に漂遊負荷損を与えた。



**第8図 流体部分の温度**

回転させた時の第1図と同じ断面の温度を表示した。

**第2表 温度上昇の解析結果と測定結果**

停止と回転の解析結果と実機測定結果での各部の温度上昇値を示す。

温度上昇(K) (外部風速10m/s)		停止		回転	測定
		停止	コイル端部 物性調整		
コイル	最大	87	84	86	84
	平均	73	71	73	75
ハブ側コイル端部	最大	92	89	92	64
	平均	84	81	84	59
ナセル側コイル端部	最大	85	81	85	70
	平均	76	74	77	55
磁石	最大	65	65	63	—
	平均	50	50	50	—

まず定常解析により、回転子が停止した状態の熱流体解析を行った。次に、回転子を回転させ、実際の稼働状態に近い非定常時刻歴回転解析を行った。

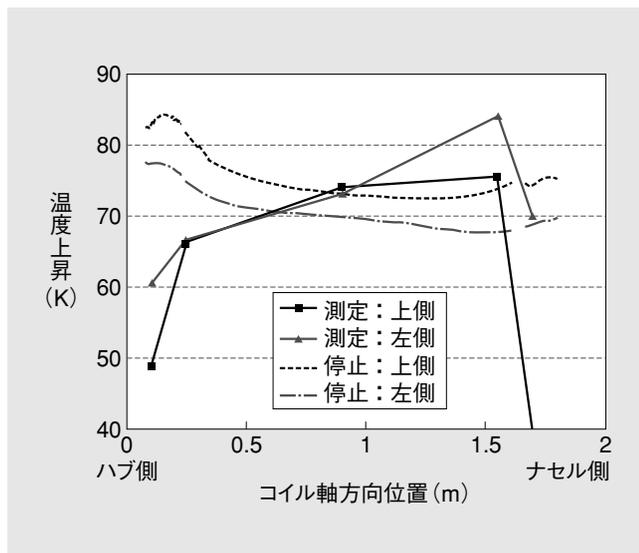
第7図に固体部分の温度分布を、第8図に空気部分も含めた断面の温度分布を示す。

**4. 解析結果と実機測定との比較**

解析結果と実機の測定結果との比較を行った。第2表に各部の温度上昇を、第9図にコイルの表面温度の軸方向分布を示す。

測定値の傾向と異なりハブ側のコイル温度が高い。これは、フィン接触面を一律な熱伝達率としたため、フィン周辺流れにより風上が冷却されやすい効果がないためと考えられる。

また、ハブ側ナセル側共にコイル端部の温度上昇が測定に比べ高くなっている。コイル端部周辺は実際の形状（コイル端部の外形や配線）とモデ



**第9図 コイルの軸方向温度分布**  
 回転解析の結果及び実機測定結果における、コイル表面付近の温度の軸方向の分布を示す。コイル位置は上側及びハブから見て左側のものを表示した。分布傾向とコイル端部の温度が異なるが、コイル中央の温度はほぼ合っている。

ル形状が異なるため通風の流れる状態も若干異なること、更に温度センサ周囲の流れる影響などにより測定値と解析値が若干異なると考えられる。

今回の構造では、回転によりかくはんしても回転子と固定子のギャップに通風させる効果はほとんどないため回転による温度の差は小さいことが分かった。

コイル端部周辺の通風状態については、コイル端部の構造を粘性抵抗などに異方性を持った多孔質体として表わすことにより、コイル端部を透過する流れを模擬することが考えられる。空げき率

の指定により固体体積を合わせることができるとため、発熱密度などの修正も必要無くなる。これらは今後の検討課題である。

## 5. む す び

風力発電用PMGの冷却フィンと内部通風による冷却効果の解析を行い、実機測定との比較により解析を検証した。若干温度分布が異なるが、温度上昇値はよく一致しており、熱流体解析の有効性が確認された。

なお、冷却フィン及びコイル端部のモデル化はまだ検討の余地があり、実験などによる比較検証を積み重ねる必要がある。ふく射についても温度差が大きくなると無視できないため検討していく予定である。

今後も解析精度の向上を図り、次期開発のPMGの設計に熱流体解析を活用し、試作削減と設計最適化を進めていく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《執筆者紹介》



江尻光良 Mitsuyoshi Ejiri  
 ソフトウェア技術及び解析技術の開発に従事