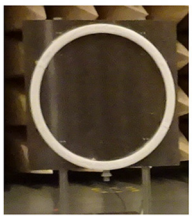
ワイヤレスセンシングを可能とする回転体への電力伝送技術

Wireless Power Transmission Technology for Wireless Sensing on the Rotor


円環型導波管スロットアンテナ

受電モジュール

飯塚 健二*1 Kenji Iizuka
安井 潤*2 Jun Yasui
岡本 拓*3 Hiromu Okamoto
大山 直樹*4 Naoki Oyama
森下 慶一*5 Keiichi Morishita
石坂 浩一*6 Kouichi Ishizaka

ガスタービン開発における動翼振動解析のための振動データ計測では，回転中の動翼に取り付けた振動センサを，同じく回転中のロータ等に設置したデータ送信機（無線テレメータ）に接続し，振動データを無線で送信している。現在無線テレメータの駆動電力は，配線による供給ができないため，電池を無線テレメータ近くに設置して供給している。そのため頻繁な電池交換作業が発生し，計測中断となることが課題である。現在，タービンを停止せずに連続的に給電可能な電力伝送技術の開発に取り組んでおり，本報で開発状況について述べる。

1. はじめに

ガスタービン開発において，動翼振動計測による周波数解析は，タービンの振動特性を評価し，共振回避や設計要素の検証に寄与する重要事項である。動翼振動計測は，タービン動翼に振動センサを貼り付け，無線テレメータで静止側にセンサデータを伝送している。しかし，無線テレメータは動翼と同じく回転しているロータ等に設置されるため，有線による電源配線ができず，電池を無線テレメータの近くに設置して電力を供給している。そのため電池切れによる電池交換作業が不可避で，振動計測中断や電池交換のための機器の分解，再組立，各種の調整作業等の膨大な工事が発生し，工期，費用の圧迫が問題となる。

この対策として，電池と同程度のサイズの受電モジュールに外部から非接触で電力を給電できる無線給電技術の開発に取り組んでいる。無線給電を行う方式はいくつかあるが，スマートフォンの充電などに用いられている電磁誘導方式は，伝送距離が短いことに加え，送電アンテナと受電アンテナの位置ずれによる送受電効率の低下が大きいという課題がある。

それに対し，今回採用したマイクロ波方式は，電磁誘導方式と比較して伝送距離が長く，また，アンテナ間の位置ずれの影響が少ないため，タービン周辺のレイアウトに対して制約が少なくなる。

当社は，無線給電の開発事例も多く，宇宙太陽光発電向け実証試験装置(1)や無線電力伝送技術の地上実証試験(2)のようにマイクロ波を用いた長距離電力伝送での実績があるため，マイクロ波方式を選定した。

2. システム概要

図1に回転体の振動計測系におけるマイクロ波方式無線給電システムの構成を示す。給電システムは，①大電力高周波発振装置，②円環型導波管スロットアンテナ，③受電モジュールの3

*1 総合研究所電気・応用物理研究部 技術士（電気電子部門）
*2 総合研究所電気・応用物理研究部
*3 総合研究所強度・構造研究部 技術士（建設部門）
*4 総合研究所電気・応用物理研究部 主席研究員 博士（工学）
*5 総合研究所電気・応用物理研究部 主席研究員
*6 総合研究所 主幹プロジェクト統括 博士（工学）

つのユニットから構成される。表 1 にマイクロ波方式無線給電システムの諸元を示す。

大電力高周波発振装置で生成されたマイクロ波は，②円環型導波管スロットアンテナから回転体に向けて放射される。回転体上には③受電モジュールが無線テレメータとともに搭載されており，受電した電力を電池の替わりに無線テレメータに供給する。無線テレメータは，受電モジュールからの電力で内部の無線回路を駆動し，動翼に取り付けた振動センサからの振動データを変調して近傍の受信アンテナに送信する。

① 大電力高周波発振装置は，マグネトロンによって高効率に高出力のマイクロ波を発生させることが可能である。しかし，マグネトロンを電子レンジのように自励発振で用いると周波数スペクトラムが広がってしまい，アンテナからの放射効率が低下する。このため，外部から小電力の高純度参照信号を入力して周波数同期させることで，安定した周波数スペクトラムの大電力発振を実現している。

② 円環型導波管スロットアンテナは，導波管技術を用いた低損失の面アンテナである。アンテナ形状が円環型のため，円周上から一様にマイクロ波が放射され，受電モジュールが円周上のどの場所にあっても給電が可能となる。また，導波管は金属のみで構成されるため，高速回転するロータ近傍の厳しい温度環境への耐性にも優れている。

③ 受電モジュールは受電アンテナ，検波器，DC-DC 変換器を内蔵し，回転中の強い遠心力による部品や接続線の剥離を防ぐため，内部を樹脂でモールドした構造としている。また，現行電池との換装が可能となるよう，モジュール自体の小型化を図っている。

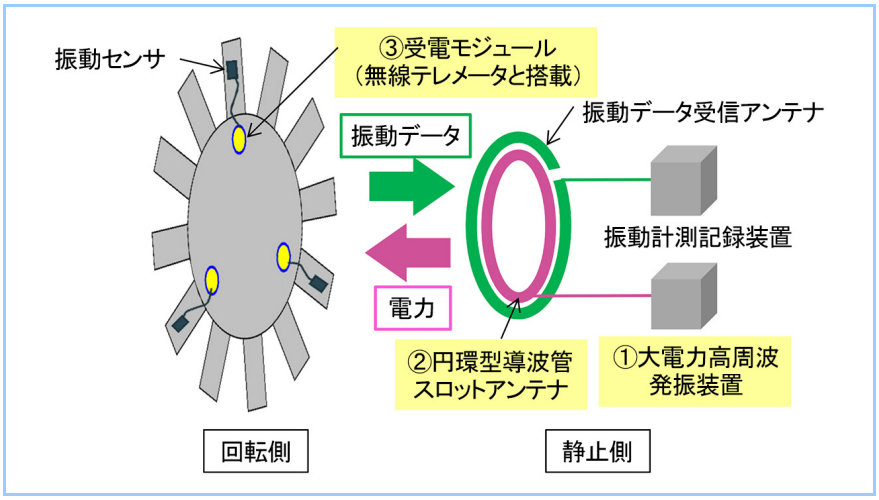


図1 回転体の振動計測系におけるマイクロ波方式無線給電システムの構成

表1 諸元表

項目	緒元
周波数	5.8GHz
出力電力	770W
アンテナ形状	円形導波管スロットアンテナ
発振器の方式	注入同期式マグネトロン

3. 各コンポーネントの構成

3.1 大電力高周波発振装置

ロータに設置された受電モジュールが，回転円周上のどの場所にあっても給電可能にするため，円周軌道に対して均一にマイクロ波を放射する必要がある。このような一様電界を形成するには，送電アンテナに比較的大電力のマイクロ波を入力する必要がある。今回の構成では所要発振電力が 770W となり，この電力を半導体素子で実現するにはコスト的に現実的ではない。そのため，宇宙太陽光発電向け実証試験装置や，無線伝送技術の地上実証試験などで実績のある高効率・大電力のマグネトロンを使用した。マグネトロンは電子レンジの加熱用途に広く利用さ

れており，概して低価格である。ただし通常の自励発振では出力スペクトラムが不安定で，本報のような用途では，アンテナでの放射効率の低下や電波法で規制される不要輻射が問題となる。そこで，外部からスペクトラム純度の高い比較的小さな電力を注入するとマグネトロン発振信号が注入信号の周波数に同期する性質[3]を利用して，大電力の安定した周波数出力を実現するシステムを構築した。図2に製作した大電力高周波発振装置を示す。

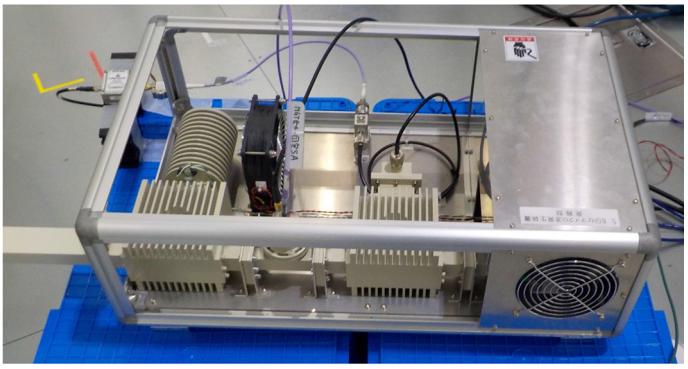


図2　大電力高周波発振装置

3.2　円環型導波管スロットアンテナ

送電アンテナには，金属部材で構成され高温耐性に優れている導波管スロットアンテナを適用した。導波管は同軸ケーブルと比較し，伝送損失が非常に小さく，効率良く大電力のマイクロ波を伝送できる。また，導波管を円環型とすることで円周上の任意の位置にある受電モジュールに給電が可能となり，かつ同時に円周上に存在する複数の受電モジュールに対しても給電可能である。

図3　円環型導波管スロットアンテナ

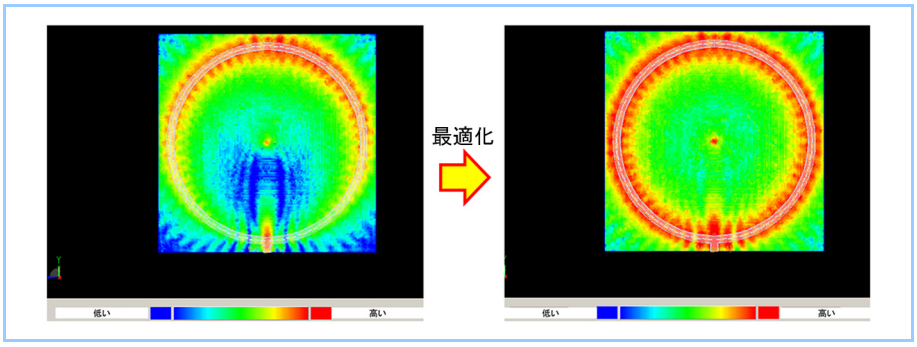


図4　円環型導波管スロットアンテナ解析結果

図3に円環型導波管スロットアンテナを示す。同図下部から入力されたマイクロ波は，左右に二分配された後，導波管表面の樹脂カバーの下にあるスロット（穴）から一部が空間に放射され，残りが管内部を伝搬しながら周前面の空間に電界を生成する。しかし，マイクロ波の入力端での不整合，スロット自体の周波数特性やスロット設置間隔による放射の不均一性により，アンテナ面からの放射は一様とはならない。このため，分配点の整合用スタブの調整，周波数に合わせたスロ

ット寸法，設置間隔の最適化を行い，一様な電力放射を実現した。図4は，円環型導波管スロットアンテナの最適化前後の放射電力の解析結果を比較したものである。

3.3 受電モジュール

無線テレメータに電力を供給する受電モジュールは，回転するロータ内の無線テレメータ付近に埋め込まれる。円環型導波管スロットアンテナから放射されたマイクロ波をアンテナで受信し，検波回路で直流にした後，DC-DC コンバータ(直流電圧－直流電圧変換器)で安定した直流電圧に変換して無線テレメータに電力供給する。図5に開発した受電モジュールの外観，図6に内部構造を示す。

受電アンテナは，小型化可能な高誘電率の基板を用いて指向性の広い単パッチアンテナとすることで送電アンテナと受電アンテナの位置ずれにロバストな構造とした。検波回路は高効率のショットキーバリアダイオードを用い，出力側のチャージアップコンデンサによる蓄電効果で伝搬に伴う受電電力の変動を吸収している。

また，回転体に設置されることによる高遠心力環境に対応するため，受電モジュール内部の電気的特性に影響しない部分に樹脂モールドを施すことで高遠心力環境下でも故障・性能劣化を軽減できる構造とした。

図5 受電モジュール

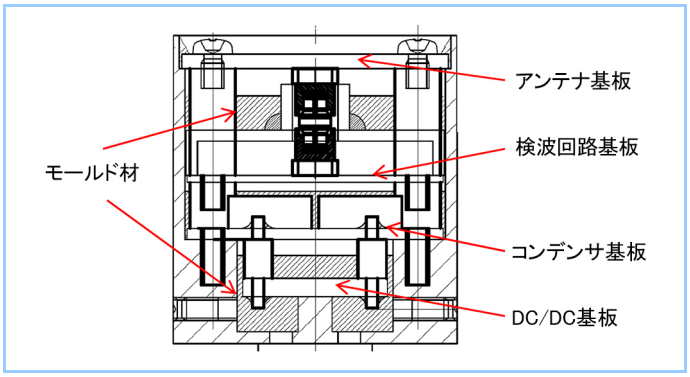


図6 受電モジュール内部構造

4. 無線給電試験

無線給電システム全体の試験に関わる詳細は別報で報告済みであるため[4]，本報では，受電モジュール試験に焦点をあてて記す。

4.1 試験方法

前章に記載の通り，受電モジュールは無線テレメータとともに高速回転するロータ内に埋め込まれるため，耐高温性，及び，耐遠心力性が要求される。図7に示す温度試験では，受電モジュールを80℃の恒温槽内に設置し，供給感度の変化を3日間モニターした。なお，温度に対して最も敏感なマイクロ波検波素子の出力状態をモニターするため，本試験は，受電モジュールを円筒カプセル内に実装せず，外部アクセスが可能な基板状態で実施した。

一方，図8の耐遠心力試験では，スピンテスタの回転ディスク内に受電モジュールを取付け，受電モジュールを高速に回転させることで，実機の遠心力 15000G に相当する荷重負荷を加えた。

図9は，システム全体の給電試験の様子である。電波暗室内に受電モジュールを取付けた模擬ロータを回転台の上に設置し，床面に固定されている円環型導波管スロットアンテナから放射されたマイクロ波によって受電モジュールが駆動する無線テレメータの通信状態で給電性能を評価した。

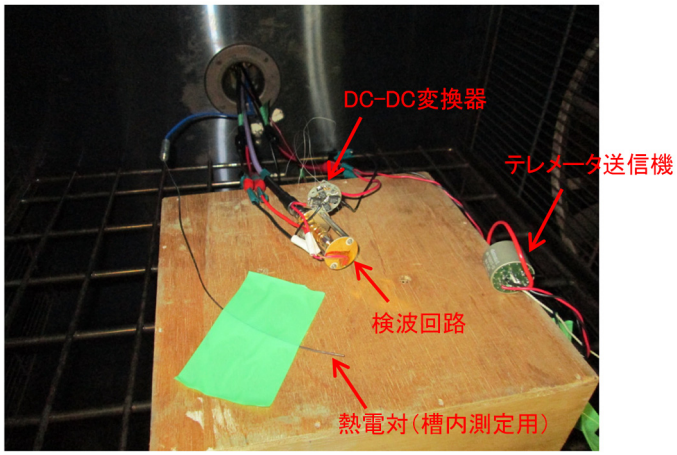


図7　受電モジュール温度試験（恒温槽内部）

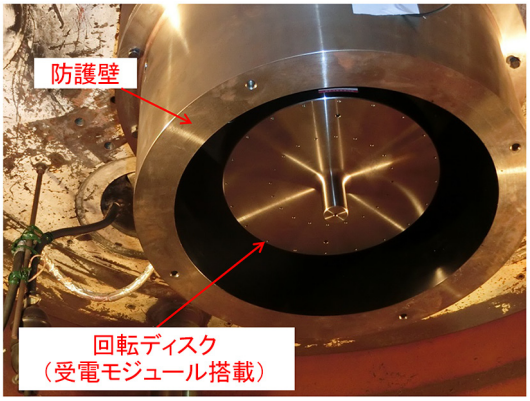


図8　耐遠心力試験

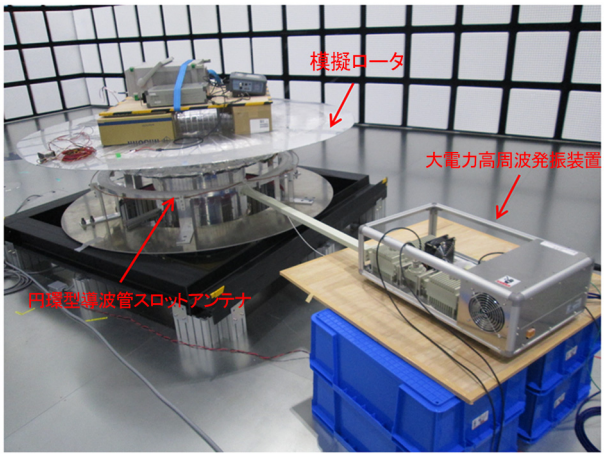


図9　無線給電試験

4.2　試験結果

受電モジュールを 80℃の恒温槽内に3日間放置することで，受信したマイクロ波を直流信号に変換するダイオードの検波効率が約 1dB 劣化した。しかし，高温環境下でも無線テレメータの電源となる DC-DC コンバータの出力は安定しており，室温に戻した後の給電感度は，温度試験前の状態に復帰した。従って，温度による劣化分だけ送電出力を増加させれば温度補償が可能となる。

耐遠心力試験時は，送電アンテナを設置するスペースが無いため，試験中の給電特性の変化を計測することが出来なかったが，試験後の受電モジュールの外観や試験前後の給電感度に変化は認められず，受電モジュール内のモールドが構成部材を良好に固定しているものと考えられる。このことより，現在のモールド方法でタービンの実運用時に発生する 15000G の遠心力への耐用性が確認できた。

図 10(a)は，受電モジュールが一定の低速で回転しながら計測した検波電圧，DC-DC コンバー

タ出力電圧，無線テレメータの通信状況を示すシステム試験の結果である。同図において横軸は回転角度，縦軸は電圧と通信成功率である。マイクロ波が周囲の構造物で反射することでフェージング現象が発生し，特定の回転角度で検波電圧の落ち込みと，通信の劣化が認められる。このため，受電モジュールが給電している無線テレメータの通信成功率は 74～79%程度であった。

しかし，上記の結果は 10.5rpm と低速回転時の結果であり，受電モジュールに搭載した検波電圧静定用のチャージアップコンデンサの時定数よりはるかに長くなっている。このため，高速回転の模擬が可能な任意信号発生器を用い，回路の応答性を評価する試験を実施した。回転数が 80rpm，200rpm に相当する場合の結果を同図(b)，(c)に示す。80rpm では検波電圧の低下に伴う DC-DC コンバータの出力低下が認められるが，無線テレメータの通信は全て成功している。さらに回転速度を上げた 200rpm の場合，検波電圧の低下も認められず，全ての通信が正常となる結果が得られた。これにより，チャージアップコンデンサが設計通りに動作していることが確認でき，実計測時の最低回転速度 400rpm 以上（定格回転数：3600rpm）では開発した無線給電システムによって無線テレメータに安定な電力が供給可能となる見通しが得られた。

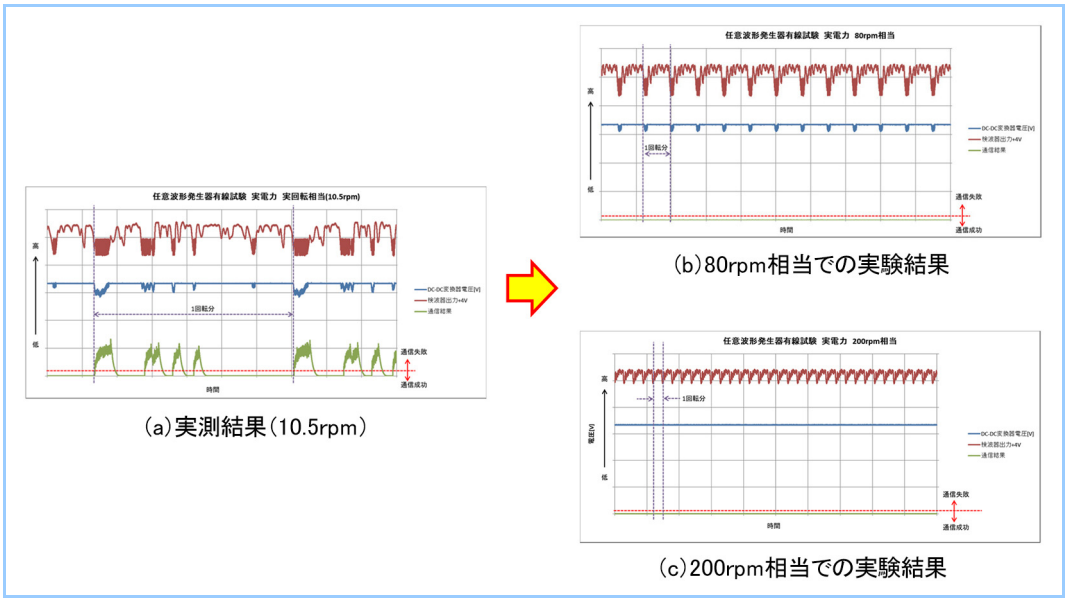


図 10 無線給電試験

5. まとめ

本報に記載した内容は，（国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業として実施中の高効率ガスタービン技術実証事業（1700℃級ガスタービンの超高効率化）の一部で，動翼振動計測時に電池の不要化を実現する無線給電システムの開発について述べたものである。システムは，大電力高周波発振装置，円環型導波管スロットアンテナ，受電モジュールからなり，高速回転を模擬したシステム試験の結果，200rpm 以上の回転速度では受電モジュールから無線テレメータに安定した電力が供給でき，連続的な動翼振動計測が可能となる見通しが得られた。今後，受電モジュールの小型化・安定化を目指したアンテナ，検波器の一体化を推進し，最新技術の適用を通じて，火力発電所の安全で安心な稼働に貢献する所存である。

参考文献

(1) 飯塚健二ほか，マイクロ波送電技術の開発，三菱重工技報 Vol.40 No.6 (2003-11)
(2) 三菱重工プレス発表 2015-03-12 発行 第 5626 号
https://www.mhi.com/jp/news/story/1503125626.html
(3) Adler R., A Study of Locking Phenomena in Oscillators, Proc IRE, Vol 34, 1946
(4) Naoki Oyama, et al., Power Transmission Technology for Wireless Sensing under Harsh Environment, Proceedings for International Gas Turbine Congress (IGTC) 2019 Tokyo. IGTC-2019-223.