

## 対向配置磁石型非接触エネルギー伝送装置の試作

## Development of Wireless Power Transfer Device with Antiparallel Magnets

田代 晋久<sup>\*1</sup>(正員), 脇若 弘之<sup>\*1</sup>(正員), 丸野 将太郎<sup>\*1</sup>

Kunihisa TASHIRO (Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA (Mem.), Shotaro MARUNO

The goal of this study is to develop a device which is used to both energy storage and wireless power transfer for ultra-low energy applications. It is a flywheel-like device with new concepts. This device consists of a rotating module and magnetic energy harvesting module. The rotating module is a rotating mechanical device that is used to store not only rotating energy but also magnetic energy. To make it simple and low costs, we use a geared-shape magnetic material between two antiparallel magnets. The magnetic energy harvesting module is an "on demand" power receiver device that is used to convert magnetic energy to electric energy. This paper focuses on this wireless power transmission performance. We consider the magnetic core shape for the magnetic energy harvesting module, and evaluate the harvesting power and its efficiency as a function of distance between two modules.

*Keywords:* rotating module, magnetic energy harvesting module, wireless power transfer device, energy storage device, ultra-low energy applications.

## 1 緒言

近年, ワイヤレスセンサネットワークとの連携を前提とした環境発電技術が注目されている [1]。IDTechEx[2]の調査結果によると, 環境発電に関する市場が, 2020 年には \$ 4.4 b (2010 年では \$ 605 m) に急成長すると予想されている。自然エネルギーは無尽蔵に存在する半面, 環境の変化で回収可能なエネルギーが大きく変動する。そのため, こうした変動に備えた電力貯蔵技術が重要である。キャパシタに電気エネルギーを蓄える方式は簡便であり一般的であるが, 自己放電の問題や体積当たりの電力密度は限られる。そのため, SMES 等で知られるように磁気エネルギーを蓄える方が高効率に電力を貯蔵できる。SMES は超電導を用いるための冷媒や交流損失等の問題はあがるが, 大規模システムには利点を見いだせる。運動エネルギーを貯蔵する方式の中でもフライホイールは回転エネルギーとしてエネルギーを貯蔵するため, 装置をコンパクトに構成できる。フライホイールは通常 kW 以上のエネルギー貯蔵をターゲットとして注目されており, 高回転・大重量が一般的である。

一方, 環境発電用の電力貯蔵技術としては, 電気エネルギーをキャパシタに蓄える手法以外例を知らない。著者らはその代替案として, 安価かつ必要に応じて微

なエネルギーを蓄電および非接触給電可能な装置の開発を提案する。今回は, その中でエネルギーを回転・磁気・電気エネルギーに変換するフライホイールに着目した。フライホイールでは, 発電機を直結しておき, 磁気を介して電気エネルギーを取り出すフライホイールバッテリーという手法が一般的である。電力貯蔵装置として利用するため, 無負荷時における発電機部分の磁気に起因した損失を極力低減した, 安価かつ構成が容易なフライホイールと回転子・固定子分離型発電機の開発である。本装置の特徴は, 振動発電など微弱な電力を対象とした環境発電から得られた電力を回転エネルギーとして貯蔵する。そして, 超低消費電力ワイヤレスセンサの駆動に必要な 1 mW の電力を磁気エネルギーにより非接触伝送するものである。

発電機の回転子として, 2 つの対向配置磁石間に歯車形状の磁性体 (以降, 歯車) を用いる [3]。こうした構造の装置は磁気歯車としてすでに報告されている [4]。著者らは, この回転子を回転させることで歯車周囲に発生可能な交流磁界と最適な歯車の歯数と歯の深さの関係について報告した [3]。以降この回転子を回転モジュールと呼ぶ。発電機の固定子として, 著者らが提唱する環境磁界発電で開発した磁界発電モジュールを用いる [5, 6]。

キャパシタの代替に向けた伝送エネルギーと貯蔵エネルギーの関係, 装置の構造, サイズについては今後 FEM 解析・実測などを通して検討していく余地が

連絡先: 田代 晋久, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部電気電子工学科,  
e-mail: tashiro@shinshu-u.ac.jp

<sup>\*1</sup>信州大学

ある。一方、本報告では、単一乾電池 2 本分程度のサイズを有する回転モジュールと磁界発電モジュールの間のエネルギー伝送に注目し、1 mW の電力を非接触伝送可能か検討する。磁界発電モジュールは磁界源が十分遠方と仮定できる一様磁界を対象としてきた。一方、本装置で利用する磁界は回転モジュールからの距離によって減衰する[3]。そこで、この磁界を磁界発電モジュールに鎖交させた場合に最大の磁束密度が得られる磁心長を検討する。また、本装置は環境発電をターゲットとするため超低消費電力ワイヤレスセンサの駆動電力 1 mW が非接触伝送できるのか検討する。回転数を乱すようなエネルギー伝送ではなく微弱なエネルギーを常時伝送したいため回転子の回転数について着目する。回転モジュールからの距離に対する回収可能電力、電力伝送効率について検討を行ったので報告する。

## 2 非接触エネルギー伝送装置の構成

### 2.1 非接触エネルギー伝送装置

Fig. 1 に著者らが開発の最終目標とする環境発電用蓄電・非接触給電装置の概念図を示す。本装置は 2 つのモジュールから構成される。1 つ目は各種エネルギーを回転エネルギーとして貯蔵する回転モジュールである。2 つ目は需要に合わせてエネルギーを非接触で給電する磁界発電モジュールである。Fig. 2 に今回検討した非接触エネルギー給電装置の概略図を示す。回転モジュールは、歯車を 2 つの対向配置円筒磁石で挟み込み、非磁性棒を中心軸としてベアリングで保持して製作した。今回は回転モジュールと磁界発電モジュールの非接触エネルギー伝送性能を調査するため、DC モータで回転モジュールを回転させた。これにより回転モジュールから発生している直流磁界を周期的に変化させることができ、環境発電モジュールを用いて、回転モジュール近傍の交流磁界を電力に変換する。

### 2.2 回転モジュール

円筒状の磁石の同極同士を対向配置させると、径方向に大きな磁界を発生できる[7]。その間に適切な長さの円筒状磁性体を挟むと、対向配置磁石間の反発力が吸引力に変わる[8]。円筒状の磁性体を歯車形状に加工すると、磁性体径方向で磁界の強弱が生まれる。この歯車を挟んだ対向配置磁石を回転させることで、歯車近傍のみで交流磁界を発生できる。前報では、発生可能な交流磁界と最適な歯車の歯数と歯の深さの関係に

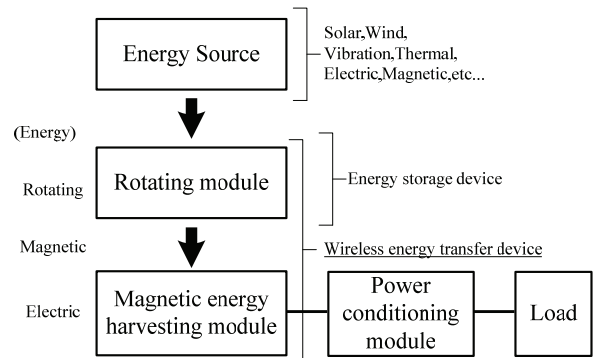


Fig. 1 Concept of energy storage and wireless energy transfer device for ultra-low energy applications.

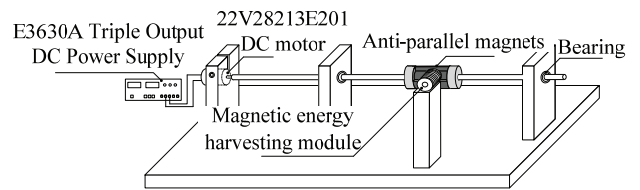


Fig. 2 Schematic design of the wireless energy transfer device.

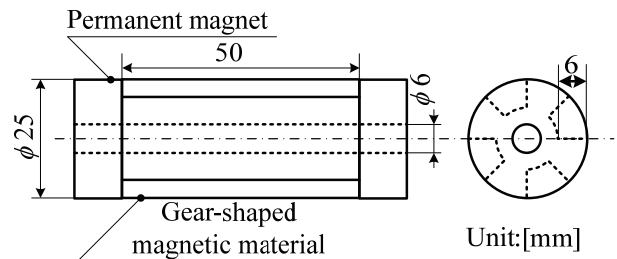


Fig. 3 Schematic design of the rotating module.

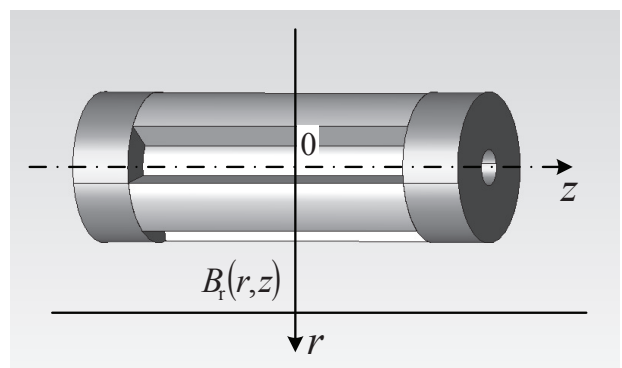


Fig. 4 Definition of the axes in gear-shaped magnetic material between antiparallel magnets.

ついて報告した[3]。

Fig. 3 に回転モジュールの形状を示す。材質は S45C であり、歯数が 4、歯の深さが 6 mm、長さが 50 mm のものを使用した。Fig. 4 に回転モジュールにおける

Table 1 Specifications of magnetic energy harvesting module.

Property	Length of magnetic energy harvesting module, $l$ (mm)				
	7	9	15	25	45
Inductance, $L$ (mH)	16.93	18.01	21.42	23.66	30.25
Resistance, $R$ ( $\Omega$ )	12.45	12.38	12.57	12.19	12.46
Cutoff frequency, $f_c = R/(2\pi L)$ (Hz)	117.0	109.4	93.4	82.0	65.6

軸の定義を示す。歯車を挟んだ対向配置磁石の中心軸を  $z$  軸，径方向を  $r$  軸とする。今回検討した磁石は，内径 6 mm，外径 25 mm，長さ 10 mm，表面磁束密度 460 mT のネオジウム磁石である。本報告において，回転モジュールは DC モータ (Portescap, 22V28213E201) を用いて回転させた。

### 2.3 磁界発電モジュール

Table 1 に今回製作した磁界発電モジュールの仕様を，Fig. 5 に本報告で用いた磁界発電モジュール用のコイル用ボビン (以降，巻心) を示す。巻心の材質は PC パーマロイであり，全長は  $l$  (mm) は 7~45 mm，中央部にコイルを巻くため幅 5 mm，深さ 5 mm の狭窄部をもつ。製作したコイルは幅が 5 mm，内径が 10 mm，外径が 20 mm，巻数は 450 turn の Brooks コイルとした。Fig. 6 に磁界発電モジュールの等価回路を示す。 $L$  (H) はコイルのインダクタンス， $R$  ( $\Omega$ ) はコイル抵抗， $C$  (F) は共振用コンデンサのキャパシタンス， $R_L$  ( $\Omega$ ) は疑似負荷抵抗を示す。ファラデーの電磁誘導の法則及びテブナンの定理より，コイルの等価電圧源  $V_m$  (V) は式(1)で定義される。

$$V_m = 2\pi^2 f n a^2 B \quad (V) \quad (1)$$

式(1)中の  $f$  (Hz) は周波数， $n$  (turn) はコイルの巻数， $a$  (m) はコイルの平均半径， $B$  (T) はコイルに鎖交する平均磁束密度 (以降，磁束密度) である。 $V_m$  はテブナンの定理より，十分入力インピーダンスが大きな測定装置を使ってコイル両端の電圧から測定できる。測定した  $V_m$  より式(1)から  $B$  が算出できる。

共振周波数において，コイルと共振用コンデンサにおける電圧降下は相殺される。そのため最大電力供給の定理より， $R$  と同じ  $R_L$  とすることで，疑似負荷抵抗にて最大の消費電力 (回収電力) が得られる。回収電力  $W$  (W) は次式で算出できる。

$$W = V_{out}^2 / R_L = V_m^2 / 4R \quad (W) \quad (2)$$

回収電力は  $V_m$  の 2 乗に比例するため， $B$  の 2 乗に比

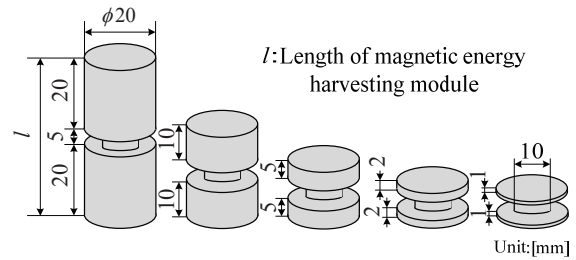


Fig. 5 Schematic design of magnetic cores for magnetic energy harvesting module.

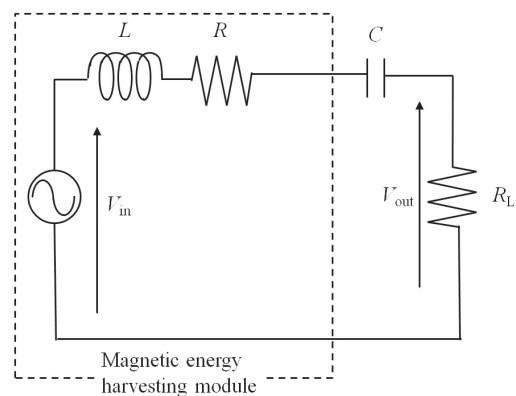


Fig. 6 Equivalent circuit of magnetic energy harvesting module.

例する。一方，共振周波数はずれる場合，コイルあるいは共振用コンデンサにおける電圧効果が無視できないため，実際の回収電力は  $V_m^2 / 4R$  (W) より小さくなる。

## 3 エネルギー伝送性能の評価項目

### 3.1 最適磁心形状

本報告では，回転モジュールが歯車近傍で発生する磁界の周波数  $f$  (以降，周波数) と磁界発電モジュールの距離  $r$  (以降，距離) をパラメータとして最適磁心形状の検討を行った。周波数依存性を調査するため，Fig. 4 における  $(r, z) = (20, 0)$  の位置に磁界発電モジュールを配置した。このとき，直流電圧源 (Agilent, E3630A) からの入力電圧を 3.0~11.0 V まで 1.0 V ずつ変化させ，回転モジュールの回転数を 1650~5800 rpm 程度まで

Table 2 Relationship between the number of resonant capacitors and estimated resonance frequency.

The number of resonant capacitors, $C$ ( $\mu\text{F}$ )	1	2	4	6	8	10
Estimated resonance frequency, $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ (Hz)	118.6	167.7	237.2	290.2	335.4	375.0

変化させた。磁界発電モジュールの両端の電圧を FFT アナライザ(小野測器, CF-930)で測定し, 式(1)から磁束密度を算出した。回転モジュールと発電モジュールの距離依存性を調査するため,  $r = 25, 35$  mm の条件で同様の実験を行った。

3.2 回収可能電力

磁界発電モジュール両端に疑似負荷抵抗(実測値 12.09  $\Omega$ )を接続し, その両端電圧  $V_{\text{out}}$  から式(2)より回収電力を算出した。前項の同様の実験条件から, 周波数と距離をパラメータとして回収電力を算出した。Table 2 に使用した共振用コンデンサの個数と推定された共振周波数の関係を示す。今回は公称値 100  $\mu\text{F}$  のコンデンサを複数接続することで, 6 つの共振周波数における回収電力を実測した。また, 共振用コンデンサの有無による回収電力の実測も行い, 比較を行った。

3.3 電力変換効率と周波数変動

本装置は環境発電をターゲットとしているため, 回転モジュールの回転数を乱さない程度のエネルギー伝送を目的とした。磁界発生モジュールによって疑似負荷で電力を消費(回収)すると, 周波数を決定する回転モジュールの回転数が変動する恐れがある。本報告では, モータに供給した電圧  $V_{\text{DC}}$  (V) をパラメータとして電力変換効率および周波数変動を調査した。電力変換効率  $\eta$  (%) は, 回転モジュールを駆動するために投入した電力  $W_{\text{DC}}$  (W) を基準とし, 次式で評価した。

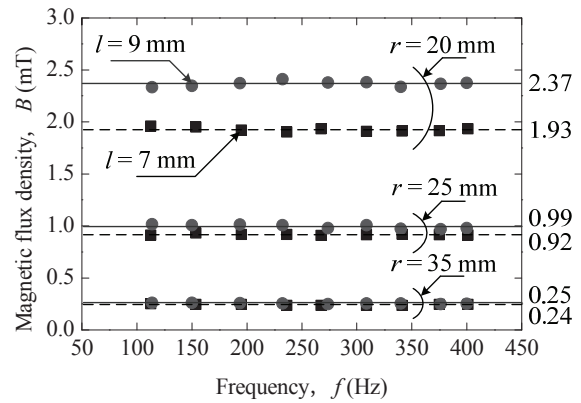
$$\eta = W / W_{\text{DC}} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

周波数変動は, タコメータ(HIOKI, FT3405)を用いて回転モジュールの回転数を測定し, 周波数を算出した。磁界発電モジュールの有無による, モータに供給した電圧と周波数の違いを実測した。

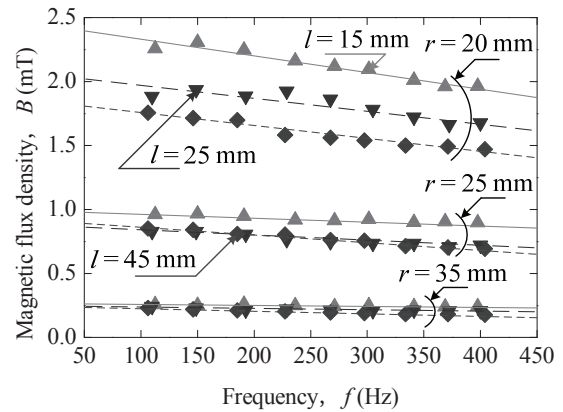
4 エネルギー伝送性能の評価結果

4.1 最適磁心形状

Fig. 7 に磁界発電モジュールにおける磁束密度の実測結果を示す。Fig. 7(a)は磁心の長さが  $l = 7, 9$  mm の結果をまとめた。この2つの磁心において, 磁束密度



(a)  $l = 7, 9$  mm



(b)  $l = 15, 25, 45$  mm

Fig. 7 Magnetic flux density as a function of the frequency, as parameters of the length of the magnetic energy harvesting module and the distance between two modules.

は周波数によらず距離で決定された。Fig. 7(b)は磁心の長さが  $l = 15, 25, 45$  mm の結果をまとめた。これらの磁心においては, 周波数が増加すると磁束密度が減少するという知見が得られた。なお, 両モジュール間の軸方向の位置ずれ  $z$  についても測定した。その結果, 歯車と磁心が対向していれば ( $|z| < 15$  mm),  $z = 0$  mm における 80 % 以上の磁束密度が得られることを確認した。

Fig. 8 に磁束密度と磁心の長さの関係をまとめた。バーの長さは今回評価した周波数での磁束密度の最大値と最小値を示している。前報までは, 磁界発電モジュールは磁界源が十分遠方と仮定できる一様磁界を対象としてきた。そのため, 磁心の長さが長いほど鎖交



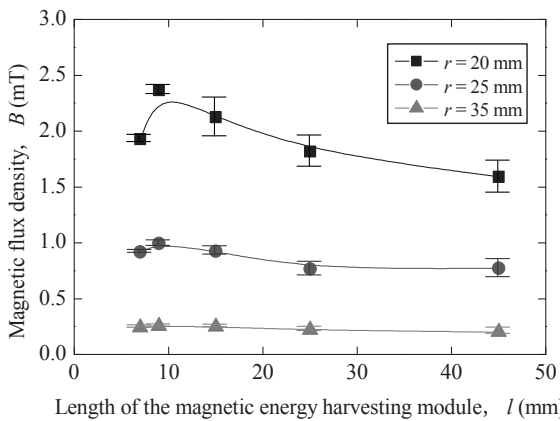


Fig. 8 Magnetic flux density as a function of length of the magnetic energy harvesting module, as a parameter of the distance between two modules.

磁束密度は増加した[6]。一方、回転モジュールが歯車周囲に発生する磁界は近傍磁界である。実験結果より、一定の距離に対して最大の磁束密度が得られる最適な磁心の長さ的存在することが判明した。また、最適な磁心の長さを超えると周波数の増加とともに磁束密度が低下する結果が得られた。この結果は周波数の増加に伴い環境発電モジュール内における渦電流による損失が起因している可能性があると考えた。以上の結果より、磁心の長さ  $l=9\text{ mm}$  を最適磁心形状として採用した。

#### 4.2 回収可能電力

Fig. 9 に  $l=9\text{ mm}$  の磁心を用いた磁界発電モジュールの回収電力の実測結果を示す。共振用コンデンサを用いることで回収電力が最大 2.0 倍程度、最小 1.3 倍程度増加した。距離が  $r=20\text{ mm}$  の場合、1 mW オーダの電力回収が行えることを確認した。この電力があれば、超低消費電力ワイヤレスセンサを駆動できるため[1]、環境発電の応用上重要な結果である。興味深い点として、 $r=25\text{ mm}$  の場合は  $100\text{ }\mu\text{W}$  オーダ、 $r=35\text{ mm}$  の場合は  $10\text{ }\mu\text{W}$  オーダの回収電力が得られた。この結果より、距離によって回収可能電力を対数的に制御できるという知見が得られた。また、DC モータ用の直流電圧源が供給した電力は最大でも 2 W 以下であり、磁界発電モジュールの有無で供給電力量の変化は確認できなかった。

#### 4.3 電力変換効率と周波数変動

Fig. 10 に電力変換効率の算出結果を示す。回収電力が最も大きかった  $r=20\text{ mm}$  でも効率が 1% 以下であ

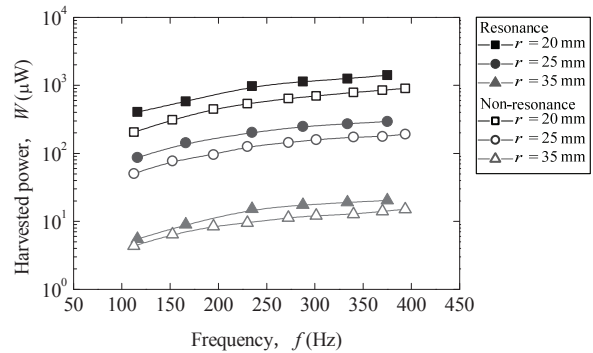


Fig. 9 Measured harvested power as a function of the frequency, as a parameter of the distance between two modules. ( $l=9\text{ mm}$ )

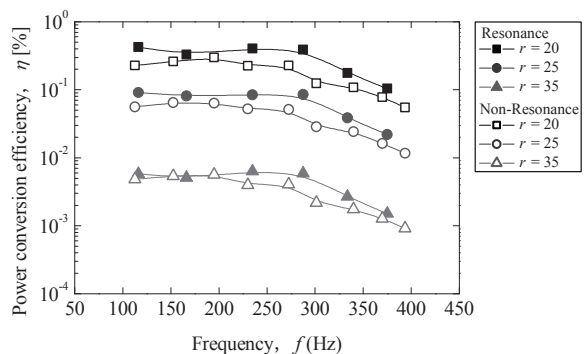


Fig. 10 Measured power conversion efficiency, as a function of the frequency, as a parameter of the distance between two modules. ( $l=9\text{ mm}$ )

ることを確認した。本結果より、今回検討した条件においては、モータに一定の電力を投入している場合、非接触給電により回転モジュールの回転数を乱すようなエネルギー伝送を行っていないことが示唆された。一方、 $V_{DC} > 8\text{ V}$  となると、電力変換効率は減少した。本結果は、磁界発電モジュールあるいは DC モータを含む回転モジュールのどちらかでの損失に起因していると考えた。

Fig. 11 に磁界発電モジュールの有無による周波数変動の実測値を示す。 $l=9\text{ mm}$  の磁心を用いた磁界発電モジュールを用い、回収電力が最も得られた  $r=20\text{ mm}$  の条件とした。実測された周波数は  $V_{DC}$  に対し直線的に変化する関係となった。また、磁界発電モジュールの有無によらず周波数およびそのばらつきに差異が見られなかった。Fig. 10 の結果より、回転モジュールの回転数が 4600 rpm 程度を超えると、電力変換効率の減少が確認された。つまり、周波数が 300 Hz を超えると、磁界発電モジュール内における損失が顕著になるという重要な知見が得られた。

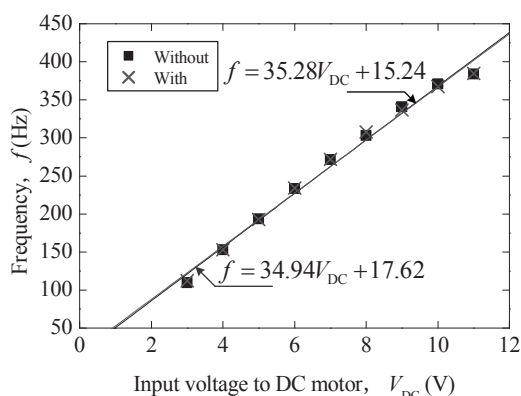


Fig. 11 Measured frequency as a function of input voltage to the DC motor. This result was measured without or with magnetic energy harvesting module. ( $l = 9$  mm,  $r = 20$  mm)

磁界発電モジュール内の損失は鉄損および銅損の可能性が考えられるが、両者とも有効活用されない損失である。前報では、歯車の歯数を減らすことで発生可能な磁界を増加できることを確認している[3]。回収電力は磁束密度の2乗に比例し、周波数に比例する。今後は、歯数を減らした回転モジュール製作を検討するとともに、損失の分別を行う予定である。

## 5 結言

本報告では、安価かつ必要に応じて微弱なエネルギーを蓄電・非接触エネルギー伝送可能な装置のコンセプトを提案した。その構成要素となる回転モジュールと磁界発電モジュールを製作し、非接触エネルギー伝送装置としての性能を今回検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 発電モジュール用の最適磁心形状を検討した。磁界の周波数によらず最大の磁束密度を達成する磁心の長さの最適値が存在することが判明した。
- (2) 回収可能電力を調査した。環境発電の応用で必要となる 1 mW オーダの電力伝送が行えることを確認した。また、距離によって回収可能電力が対数的に減少した。
- (3) 電力変換効率と回転数変動を調査した。今回検討した条件において電力変換効率は 1% 以下であり、回転モジュールの回転数を乱さない程度のエネルギー伝送が行えることを確認した。
- (4) 磁界発電モジュールに鎖交する磁界の周波数が 300 Hz 以上となると、磁界発電モジュール内で損失が顕著に発生しているという重要な所見が得られた。

## 謝辞

本研究の一部は一般社団法人信州大学工学部若里会の補助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

(2012 年 9 月 29 日受付, 2013 年 2 月 1 日再受付,  
2013 年 3 月 1 日再々受付)

## 参考文献

- [1] 田代晋久, 脇若弘之, 超低消費電力ワイヤレスセンサ用 エナジーハーベスティング技術の動向, 平成 24 年電気学会全国大会, 2-S2-8, S2(29)-S2(32), 2012.
- [2] Energy harvesting journal, IDTechEx, <http://www.energyharvestingjournal.com/>.
- [3] 丸野将太郎, 田代晋久, 脇若弘之, 対向配置磁石を用いた交流磁界発生装置用磁性材料形状の最適化, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-12-84, pp. 17-20, 2012.
- [4] 村上岩範, 河野晃弘, 安藤嘉則, 長屋幸助, 磁束収束型磁気歯車の開発, 第 23 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp. 237-240, 2011.
- [5] K. Tashiro, H. Wakiwaka, S. Inoue and Y. Uchiyama, Energy harvesting of magnetic power-line noise, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.47, pp. 4441-4444, 2011.
- [6] 服部玄也, 田代晋久, 脇若弘之, 環境磁界発電用磁性巻心寸法比の検討, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, Y-5, 2012.
- [7] 丸野将太郎, 田代晋久, 脇若弘之, 円筒状磁石の対向配置による一様磁界発生条件の検討, 平成 24 年電気学会全国大会, 2-133, 159, 2012.
- [8] S. Nakajima, M. Hirashima, K. Tashiro and H. Wakiwaka, Influence of soft magnetic material on the force of attraction and repulsion between magnets, *Proceedings of The 7th Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, pp. 324-327, 2012.
- [9] 田代晋久, 脇若弘之, 内山悠, 商用周波数磁界を用いた体内へのエネルギー伝送に関する考察, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-11-069, pp. 13-16, 2011.