

Design and Evaluation by Simulation of Coreless Linear Generator
for Thermoacoustic Engine熱音響機関のためのコアレスリニア発電機の
設計およびシミュレーションによる評価Hideki KIMURA Kouhei SAGAWA Shinya HASEGAWA
木村 英樹^{*1} 佐川 耕平^{*2} 長谷川 真也^{*3}

Abstract

Thermoacoustic engines that can use heat input to generate acoustic power have received much attention in recent years. It is expected that the thermoacoustic engine can be used in electric generation applications. Thermoacoustic engines use waste heat more efficiently than Peltier devices. These engines are low cost and maintenance free. Solar thermal energy can also be used as the heat energy source for these engines. The present study was carried out to develop a highly efficient coreless linear generator for use in a thermoacoustic engine. In this study, moving-coil linear generators were designed using three-dimensional computer-aided design. The results of magnetic-field analysis simulations show that the armature weight and the cogging torque were minimized. Thus, the proposed coreless moving-coil linear generator is suitable for the thermoacoustic engine. Furthermore, the armature weight was reduced by applying copper-clad aluminum wire to the moving coil.

Keywords: thermoacoustic engine, linear-generator, moving-coil, coreless, magnetic circuit

キーワード: 熱音響機関, リニア発電機, ムービングコイル, コアレス, 磁気回路

1. はじめに

現在, 地球上では温暖化や大気汚染, エネルギー資源の枯渇などの様々な問題が生じている. これらの問題へ対応するために本研究では, 熱入力から音響パワーを得ることができる熱音響機関⁽¹⁾に着目した. 熱音響機関の熱源には, 自動車

や工場等の排熱を利用することができ, 放物面鏡による集光技術を応用すれば, 太陽光のエネルギーを熱源とすることも可能である. 熱音響機関は, スターリングエンジンにおけるピストンの役割を音波が果たすことで動作する外燃機関である^(2,3). ピストンのような可動部を持たず, シンプルな導波管, 蓄熱器, 熱交換機から構成されるため安価に製作でき, メンテナンスの必要がなく長寿命である. Fig. 1 に熱音響機関の概念図, Fig. 2 に本研究グループが開発した熱音響機関の実験機, Fig. 3 に蓄熱器, 熱交換器を示す. Fig. 2 の実機は Fig. 1 の熱音響機関を低温動作させるために多段化したもので Fig.

*1 東海大学工学部 教授(〒259-192 平塚市北金目 4-1-1) ‡ kimura@tokai-u.jp

*2 東海大学工学部 助教

*3 東海大学工学部 准教授

(原稿受付: 2017 年 6 月 12 日, 受理日: 2017 年 10 月 30 日)

3の右図は蓄熱器の拡大図である。Fig. 1に示した蓄熱器両端に設置された熱交換器に閾値を超える温度勾配を与えることで、自励振動が励起する。

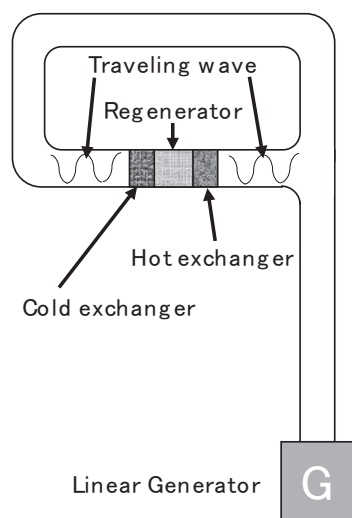


Fig. 1 Conceptual diagram of thermoacoustic engine.

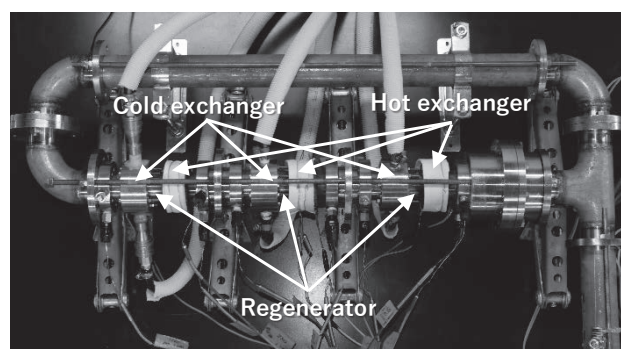


Fig. 2 Actual thermoacoustic engine.

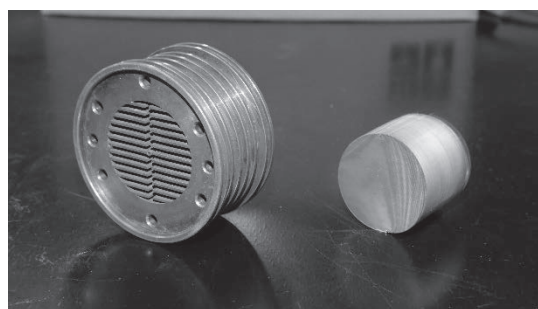


Fig. 3 Heat exchanger and heat regenerator.

この熱音響機関には定在波型と進行波型の2つがある。定在波型では作動気体が蓄熱器内で不可逆的な熱サイクルを

経ることに起因し、熱効率の上限は低い。しかし進行波型では蓄熱器内の作動流体は等温可逆的な熱サイクルを経験するため、理想的には熱効率はカルノー効率に漸近する。この進行波型熱音響機関は1979年Ceperleyによって進行波がピストンの代わりを担うピストンレスのスターリングエンジンとして提案されている⁽⁴⁾。この実証は1998年Yazakiらによって行われた⁽³⁾。Yazakiらの実証後、Backhausらによって高効率化が行われ30%の熱効率に達した⁽²⁾。一方、熱音響機関の応用例として熱サイクルが可逆であることを利用した熱音響冷凍機⁽⁵⁾や、音響パワーを利用して発電機を駆動させる熱音響発電機などがある⁽⁶⁾。Fig. 2に示す熱音響機関から延びている導波管(図の右上)の先にもう一組の熱音響機関を接続すれば、熱音響冷凍機となり、音波を利用した発電機を取り付ければ熱音響発電機となる。最初の進行波型熱音響発電機は2004年にBackhausらによって作製された⁽⁶⁾が、熱音響機関用の発電機に関する研究はまだ少ない状況にある。

そこで本研究では、熱音響機関用の高効率な発電機を開発することを目的とした。熱音響機関用発電機として求められる条件は、インピーダンスマッチングが取れること、コギングの影響が少ないこと、可動子の質量が軽いことがあげられる。インピーダンスマッチングについてYuaらは、熱音響機関は音響インピーダンスをもち、リニア発電機には可動子質量・バネ定数・減衰定数からなる機械的インピーダンスおよびインダクタンス・抵抗成分からなる電気的インピーダンスがあり、これらを整合させる必要があるとしている⁽⁷⁾。一方、コギングとは、鉄芯を持ったステータ(固定子)を持つ発電機やモータが、マグネットと近接した際に安定した位置に落ちつこうとする力が働き、その動きが脈動的になることである。このコギングの影響が小さければ可動子がスムーズに動けるようになる。また、可動子質量が軽い方が可動周波数域を高めることが可能となる。

普及している回転型発電機は熱音響機関用途への応用が容易ではない。これは熱音響機関が作る音波は往復運動であり、往復運動を回転運動へと変えるためにクランク機構などが必要となり、そこでエネルギーロスが生じるためである。以上の理由から、高効率な熱音響発電機には往復運動で動作するリニア発電機が適していると考えた。リニアモータ自体はコンプレッサなどに一般的に使われているが、熱音響機関に適したリニア発電機を設計する上で、先に述べたコギングの影

響が小さいことと、可動子が軽いことの 2 点を考慮し、本研究では主にムービングコイル型のリニア発電機について検討を行った。同様な先行研究としては、Saha らによって、ハルバツハ配列を利用したムービングコイル型リニア発電機の報告があり⁽⁸⁾、大変優れた性能を得ていた。しかしながら、ハルバツハ配列を実現するには大きな体積のマグネットが必要となり、その分コストが上昇しやすいなどの課題がある。本研究では、ハルバツハ配列を採用したモデルについても検討を行い、出力向上とマグネット使用量の関係について報告する。

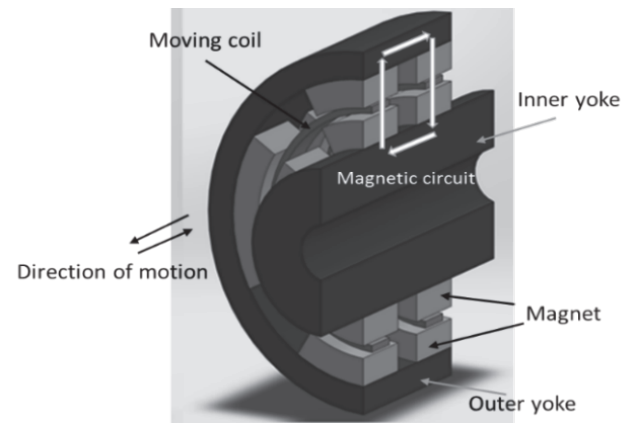
2. リニア発電機の設計と評価

2.1 提案するムービングコイル型リニア発電機の基本原理と構造

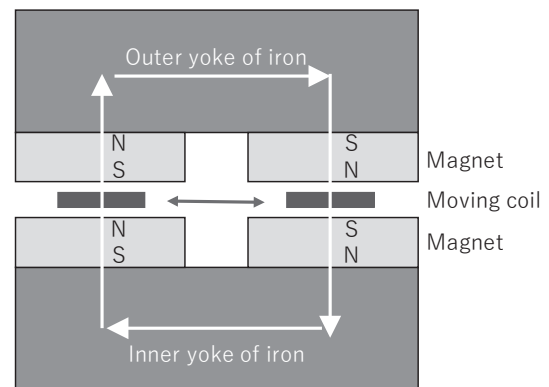
スピーカは、マグネットが作るエアギャップの磁界中にボイスコイル置き、これに電流を流すことでフレミング左手の法則にしたがった電磁力が発生し、この力によって振動板となるコーンを振動させて音を出す。これに対し、本研究で提案するモデルの基本はスピーカと逆の原理となっており、可動子であるコイルがマグネットの作る磁界中を往復運動することで、フレミング右手の法則にしたがった起電圧が生じさせるものである。当初、強い磁束が得られるネオジウム磁石を可動子に用いることで、その質量を軽量化することを図ったムービングマグネット型リニア発電機についても検討を行った。しかし、通常のマグネット:スロットが 2:3 の場合、これらの間の吸引力による強い安定点が発生し、カクカクとした動きを生むコギング力が表れ、スムーズな可動子の動きを得ることができなかった。このコギング力を減じるためにマグネット:スロットの割合を 2:3 から、最小公倍数が大きくなる 8:9 に変え、磁氣的な安定点を増やす検討を行ったが、得られる出力が低かった。さらに、コギングを無くすためにコアレスコイルを固定してマグネットを動かすモデルも検討したが、こちらも十分な出力を得ることができなかった。以上の経緯から、本研究ではコアレスモータとして一般的なムービングコイル型をリニア発電機に適用することにした。

強力なネオジウムマグネットを固定子側に設置すれば、鉄材によるバックヨークを設けることで、重量を気にすることなく強い磁界を得ることができる。そのため、ムービングコイル型はムービングマグネット型に比べ、可動子であるコイルの質量を軽

量化できると考えられる。さらにコイルに鉄芯を用いないコアレス構造とすることでコギングレス化が実現できる。Fig. 4 (a)と(b)に本研究で提案するコアレスムービングコイル型リニア発電機の 3D と 2D の断面図を示す。このモデルの特徴は、内側と外側のヨークに 1 つ 60° の扇形マグネットを円弧状に配置し、これを手前側と奥側の 2 列に並べたものである。図中の白矢印で示したようなループ状の磁気回路を設けるために、左側と右側のネオジウムマグネットの極性を反対にして設置した。



(a)



(b)

Fig. 4 Cross-sectional view of a coreless moving-coil type linear-generator (Model 0).

Fig. 4 (b)に示した左側と右側のコイルは、エアギャップ内における磁束の向きが異なるため、それぞれの巻線方向を逆向きにして配置し、電氣的に直列接続することで起電圧を得る。一般的なスピーカに用いられるボイスコイルモータ⁽⁹⁾のような構造であると、後方にあるバックヨークが障壁となり、一方向からの音響エネルギー入力のみとなる。これに対し、本モデルは

開放された裏面側からも入力することも可能となっている。さらに、空気の流入も行いやすいことから放熱性能も高めることができるというメリットがある。また、直列に連結することで多段化できることから大出力化にも対応できる。可動子には巻線方向が反対向きのコイル 2 セットを用いたが、コイル 2 つの質量は本モデルにおいて合計 106g と極めて軽量なものとなった。実際には、さらに振動板、コイル支持体、共振スプリングが組み合わされることが多いが、これらの金属部品の合計が軽量であることから対応できる周波数範囲を高めることができる。ここで、Fig. 4 (a) で、円弧状に配置したマグネット同士の間に 30° の空隙を設けたのはコイルを支持する構造体を入れるためである。この構造体の材料としては、非磁性体かつ電気絶縁体であるアラミド繊維強化プラスチック、エンジニアリングプラスチック、あるいはセラミクスなどを想定した。

なお、本モデルでは扇形のマグネットは、Fig. 5 (a) のような着磁方向とした。(コストが上昇することから本研究ではラジアル方向着磁 (Fig. 5 (b)) のマグネットを採用しないこととした。)

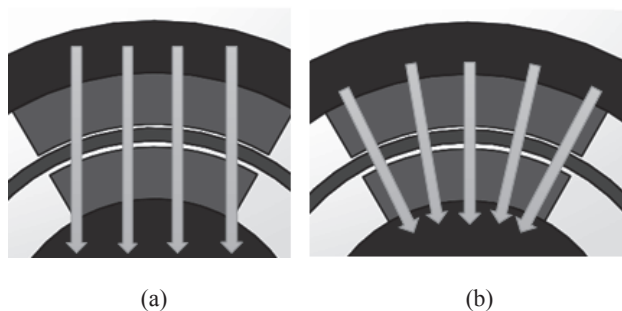


Fig. 5 Magnetization direction

2.2 ムービングコイル型リニア発電機のシミュレーション評価

リニア発電機の 3D モデルは、Dassault Systèmes SolidWorks Corporation 製の SolidWorks を用いた。今後、実機試作を行う計画があることから、実用化の目途を立てやすい 200W 以上の出力を確保し、外部負荷をコイルの直流抵抗値の 10 倍程度とすることで効率 90% 程度の運転条件となるように設計した。このモデルを JSOL 社製 JMAG-Designer を使用し、磁場解析による過渡応答解析をもとに評価を行った。解析条件は接続する本研究で開発している熱音響機関に合わせ、周波数 60Hz、ストローク量を片側振幅 12mm とし、マグネット (永久磁石) は信越化学工業社製の N36Z とした。シミュレーションに用いた主な条件を Table 1 に示す。

Table 1 Parameters for the simulation.

Simulator	JSOL JMAG-Designer
Magnet	Shin-etsu Chemical N36Z
Back York Iron	S10C
Coil outer radius	44.4mm
Coil length l_c	12mm
Coil thickness	2mm
Air gap	3.4mm
Gap between coil and magnet	0.7mm
Frequency	60Hz
Amplitude	12mm

Fig. 6 に本研究で提案するコアレスムービングコイル型 (Model 0) の静磁場解析結果を示す。エアギャップ中の磁束密度は 0.62T であり、ヨークの中には磁束飽和は見られなかった。また、動磁場解析の結果から、発電量は発電効率 90% のときに、当初目標であった 200W に近い平均 172.3W を得ることができた。

出力は目標とした 200W には若干届かなかったものの、可動子であるムービングコイルの質量が軽量であり、ムービングマグネット型やムービングアイロン型の問題であったコギングを原理的に無くし、かつ発電量も向上できたことから、熱音響機関用の発電機にはコアレスムービングコイル型が適していると判断した。

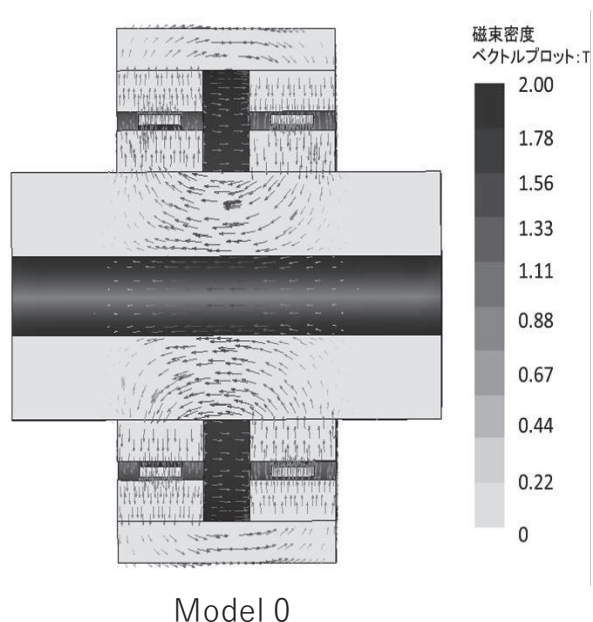


Fig. 6 Magnetic field analysis of a coreless moving-coil type linear generator (Model 0).

3. コアレスムービングコイル型リニア発電機の最適化

3.1 マグネット配置の最適化

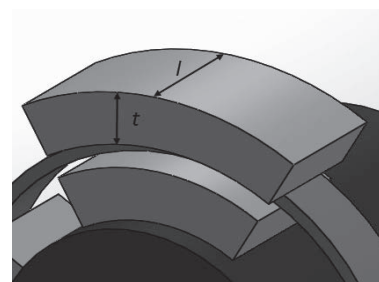
2.2 節で提案したコアレスムービングコイル型リニア発電機は、大変優れた性能を発揮できる可能性を有していることを確認した。本節では前節のモデルを基準(モデル 0)とし、ムービングコイルの形状を維持しながら、マグネット、ヨークおよびマグネットのレイアウトを変えることで、磁気回路の最適化を行い、出力の向上を試みた。今回の最適化では、コイルを横切るエアギャップ間の磁束密度を高めることが重要となる。そこで本研究では磁気回路の最適化について 4 つのモデルについて検討を行った。

まず、Fig. 5 (a)に示したモデル 0 における 60° の扇形マグネットを、モデル 1 では Fig. 7 に示したような 30° の扇形に分割し、それを 2 つ並べて配置することで 1 つのマグネットとした。これによりムービングコイルに多くの磁束を集中させることを期待した。これにより、エアギャップ中の磁束密度は 0.63T 、出力は 173.8W まで増加した。

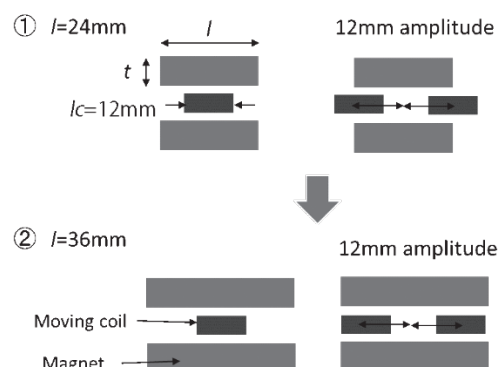


Fig. 7 Magnetization direction (30°) for Model 1.

次にモデル 2 では、ムービングコイルが常に磁界中を移動するように、Fig. 8 (a)に示すマグネット l の長さを変更した。長さ $l_c=12\text{mm}$ のムービングコイルが左右に 12mm 振幅することを考慮し、マグネットの l の長さを Fig. 8 (b)に示すように 24mm から 36mm へ延長した。この変更により、ムービングコイルは常に磁界中を移動することになる。Fig. 13 はモデル 2 の静磁場解析結果であり、マグネットの長さを延長したことにより磁束が増え、エアギャップ中の磁束密度は 0.72T となったが、内側ヨーク内に 2T を越える磁束飽和領域が発生した。一方、動磁場解析より、出力は 216.3W にまで増加し、目標値であった 200W を超えることができた。



(a)



(b)

Fig. 8 Resize points of magnets.

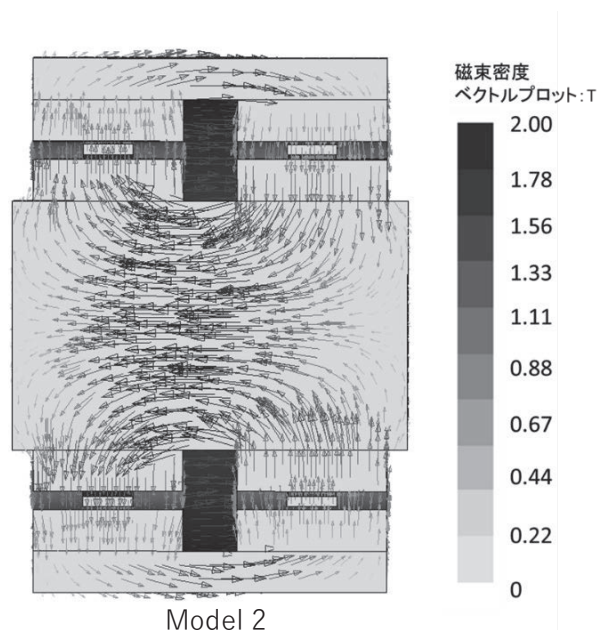


Fig. 9 Magnetic field analysis of model 2.

次に、モデル 2 においてマグネット長を延長したことで、内側ヨーク内に生じた 2T を越える高い磁束密度域を緩和させるために、モデル 3 では内側ヨークの直径を太くするといった形状に変更した。磁束飽和が強まっていたのは内側ヨーク内だけであったことから、10mm であった内側マグネットの厚み t を 5mm から 10mm まで 1mm ずつ変化させ、それに合わせ内側ヨークの径を太くした。この時の出力の変化を Fig. 10 に示す。動磁場解析結果より、外側マグネットの厚みを 10mm、内側マグネットの厚み 6mm としたとき、内側ヨークの磁束密度が 1.6T 程度まで軽減され、これとは反対にエアギャップ中の磁束密度は、0.72T であったものが 0.74T に高められ、出力電力は 224.6W を得た。

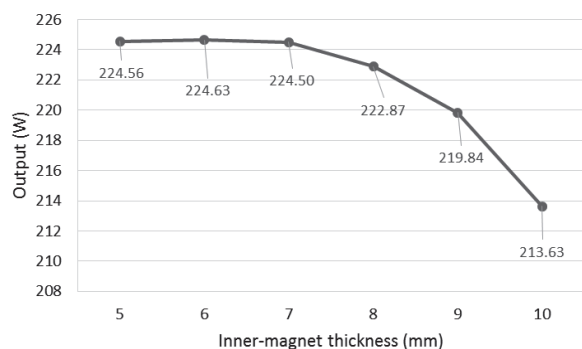


Fig. 10 Output comparison of Model 3 (Inner-magnet thickness 5~10mm).

モデル 2 までのモデルでは、ヨークに用いられる鉄の一部で磁束飽和した領域が現れたことから、エアギャップ中の磁束密度を高めることが困難であった。そこで、コイルを横切る磁束密度を根本的に高めるために、バックヨークとなる鉄材に依存せずに、高い密度の磁束を得ることができるハルバツハ配列のマグネット配置を採用したモデル 4 を設計した。ここで、ハルバツハ配列⁽¹⁰⁾とは、粒子加速器のために考えられた強磁界を得る方法であり、マグネットの特別な回転配置によって、磁石配列の反対側の磁界を打ち消しながら、片側に磁界を集中させ増強するものである。

Fig. 11 にモデル 4 の断面図を示す。

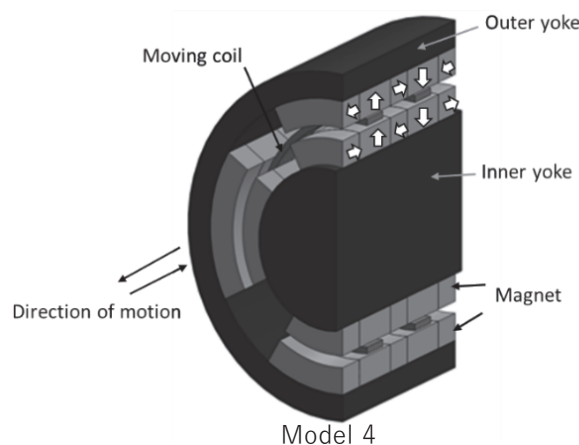


Fig. 11 Cross-sectional view of optimized coreless moving-coil type linear generator (Model 4).

通常の NS 配列は磁界がマグネット両側に広がる性質を有するが、ハルバツハ配列ではマグネット片側に磁束が集中するという特徴を持つ。モデル 3 では、エアギャップ間の磁束密度が 0.74T、出力は発電効率 90% で 224.9W となったが、モデル 4 ではハルバツハ配列を用いたことでエアギャップ間の磁束密度が 0.78T、出力や発電効率 90% で 248.3W とわずかながら向上した。

ここで、以上の結果を比較するために、初期に設計されたコアレスムービングコイル型リニア発電機のモデル 0 を基に、最適化を行ったモデル 1, 2, 3, 4 の出力とエアギャップ間の磁束密度を Fig. 12 に示す。

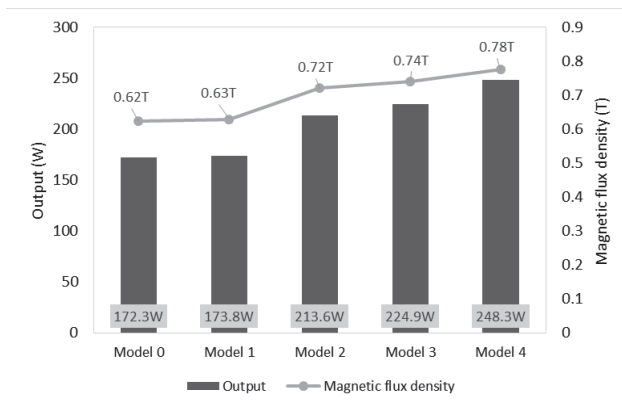


Fig. 12 Magnetic flux density and output power in the air gap of model 0-4.

4 種類のモデルとして最適化を行った中では、ハルバツハ配列を用いたモデル 4 が、エアギャップ中の磁束密度が最も高く、出力についても最も大きい値が得られた。Table 1 にモデル 3 と 4 の出力、磁束密度、マグネット質量、マグネット質量当たりの発電量を数値で示す。モデル 4 はハルバツハ配列を用いたことで、出力は 1.1 倍に増えたが、マグネットの使用量は 1.5 倍に増え、製作コストが高くなることがデメリットとなることが示唆された。また、マグネット質量当たりの発電量はモデル 3 が 158.2W/kg であるのに対し、モデル 4 では 115.5W/kg となり、前者の方が約 43W/kg (1.37 倍) 大きいという結果が得られた。Sahaらはハルバツハ配列を用いたムービングコイル型リニア発電機について検証を行った⁽⁸⁾が、コイルとマグネット間のギャップを 0.375mm と小さく設定することで、エアギャップ中の磁束密度が 1T を超えた。単純な比較は難しいが、本研究の結果からは、ハルバツハ配列を採用せずとも高い発電電力を得るリニア発電機が実現する可能性が示唆された。

以上の検討より、マグネットのサイズを変更して磁気回路の最適化を行ったモデル 3 は、マグネット質量当たりの発電量が最も高く、製作コストを比較的抑えることができる。このことから 4 種類の最適化を行ったモデルの中では、モデル 3 がコアレスムービングコイル型リニア発電機の性能向上に適した構造であると判断した。

Table 1 Simulation results of Model 3 and 4.

	Model 3	Model 4
Output power	224.6W	248.3W

Magnetic flux density	0.74T	0.78T
Total mass of magnets	1.42kg	2.15kg
Output power per magnet mass	158.2W/kg	115.5W/kg

3.2 ムービングコイルの軽量化

前節では、コアレスムービングコイル型を採用したことでコギング力の問題は根本的に解消され、磁気回路形状の最適化により発電出力を増加させることができた。本節では可動子であるムービングコイルのさらなる軽量化について検討を行った。設計したコアレスムービングコイル型のコイルは平角銅線を用いたが、大きさは内径 82.4mm、外径 87.4mm、長さ l が 12mm であった。本研究では銅線の代わりに銅クラッドアルミ (Copper Clad Aluminum: CCA) 線を用いることを検討した。CCA 線はアルミ線の周りに銅がコーティングされたもので、純粋なアルミ線よりも若干重くなるが、同じ抵抗値としたときには銅線より 4 割ほど軽くすることができ、またアルミ線よりも加工性に優れている⁽¹¹⁾。この CCA 線を用いればムービングコイルの軽量化が可能であると考えた。なお、設計および解析においては株式会社フジクラ製の CCA 線を使用することを想定した。単純に銅線の代わりに CCA 線を用いて同じ形状のコイルを製作した場合、銅に比べて抵抗率は約 1.5 倍高いため、ジュール損が増加する。そのため、CCA 線を用いたコイルで銅線コイルと同等の出力を得るためには、コイルの体積を 1.5 倍に増加させればよい。この際に、エアギャップ中の磁束密度を保つためにエアギャップ間距離は変えずに、コイル断面積を増やすことにした。コイルの巻き線長を変えずにコイルの断面積を増やした結果、コイル長さを 12mm から 1.5 倍の 18mm へ延長した。それに合わせてモデル 3 を基準として、ムービングコイルを常に磁界中に収めるためにマグネット長も延長した。モデル 3 を基に CCA 線を用いて設計されたモデルをモデル 5 とし、それぞれの出力を比較したところ、同等の電力を発電できることを確認した。また、コイルの 2 つ (=1 セット) の総質量は銅線コイルが 106g であったのに対して、CCA 線コイルは 64g と大幅に軽くすることができた。この結果より、ムービングコイルの軽量化について、CCA 線を用いることのメリットを確認した。

4. まとめ

本研究では、熱音響機関に接続することを目的とし、コギングが原理的に発生せず、可動子を軽量にすることができる発電機として、主にムービングコイル型のリニア発電機について設計および評価を行った。2 方向からの入力および放熱性を確保するために、本研究では、2 か所のエアギャップを有するループ状磁気回路を有するコアレスムービングコイル型リニア発電機を提案した。設計および評価の結果から、コギングレスで可動子が軽くでき、十分な出力が得られることが確認できた。さらに、マグネットの形状、配列方法を最適化するなどで、オリジナルのモデル 0 に対して、モデル 3 では発電量を約 1.3 倍に増加させることができた。また、ムービングコイルの材料を、一般的な銅線の代わりに CCA 線を用いることで、ムービングコイルの質量を 4 割軽量化するとともに、同等の発電出力を得ることができることを確認した。今後の課題として、実際にリニア発電機を製作し、熱音響機関とマッチングについて検討することが挙げられる。また、発電機を大型化した際に、発電電力を維持しながらコストを削減するために、磁気回路形状の最適化をさらに工夫し、マグネットの使用量を最小化する必要があると考えている。

謝辞

本研究の一部は戦略的創造研究推進事業先端的低炭素化技術開発(ALCA, Grant no.13414425)の助成を受けたものである。また研究に協力して頂いた皆藤佑一氏、大西紘平氏、千賀麻利子氏に感謝します。

参考文献

- 1) Rayleigh, The explanation of certain acoustical phenomena, Nature, 18, 319-321 (1878).
- 2) S. Backhaus, G. W. Swift, A thermoacoustic-Stirling heat engine, Nature, 399, 335-338 (1999).
- 3) T. Yazaki, A. Iwata, T. Maekawa and A. Tominaga, Traveling Wave Thermoacoustic Engine in a Looped Tube, APS physics, Lett.81, 3128-3131 (1998).
- 4) P. H. Ceperley, A pistonless Stirling engine-The traveling wave heat engine, J. Acoust. Soc. Am. 66, 1508-1513 (1979).
- 5) S. Hasegawa, T. Yamaguchi and Y. Oshinoya, A thermoacoustic refrigerator driven by a low temperature

differential, high efficiency multistage thermoacoustic engine, Appl. Therm. Eng. 58, 394-399 (2013).

- 6) S. Backhaus, E. Tward and M. Petach, Traveling-wave thermoacoustic electric generator, APL Scitation, Lett. 85, 1085 (2004).
- 7) Z. Yua, A. J. Jaworski and S. Backhaus, Travelling-wave thermoacoustic electricity generator using an ultra-compliant alternator for utilization of low-grade thermal energy, Applied Energy, 99, pp. 135-145 (2012).
- 8) C. R. Saha, Paul H. Riley, J. Paul, Z. Yu, A. J. Jaworski and C. M. Johnson, Halbach array linear alternator for thermos-acoustic engine, Sensors and Actuators A, 178, 179-187 (2012).
- 9) 藤吉敏生, 山田一監修, リニアモータを使ってみると-誰でも利用できる開発ノート-, 20-26 (1994), 日刊工業新聞社, 東京
- 10) K. Halbach, Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material, Nuclear Instruments and Methods, 169, 1-10 (1980).
- 11) フジクラニュース, 自動車用銅クラッドアルミ線(CA 線), アルミ線の開発, No. 354 (2011).