

デバイスから電力系統まで考慮した
EV 用 MHz 帯域
ワイヤレス電力伝送方式の研究

平成 25 年度～平成 29 年度

「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」

研究成果報告書

平成 30 年 5 月

学校法人名 学校法人 芝浦工業大学

大学名 芝浦工業大学

研究組織名 芝浦工業大学 SIT 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究センター

研究代表者 赤津 観 (芝浦工業大学 工学部電気工学科)

まえがき

本報告書は平成 25 年度～平成 29 年度の 5 年間にわたって実施した「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」“ デバイスから電力システムまで考慮した EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送方式の研究” の研究成果を報告するものである。

CO₂排出に伴う地球温暖化の影響が顕著であり、日々高まる省エネルギー要求に応えるために、学内に分散する材料から応用までのパワーエレクトロニクス研究者が集合する垂直統合型の研究拠点を形成し、研究成果の社会還元と、研究者間の交流および設備共有による研究スピードの向上、ニーズからシーズまでを把握した T 定規型学生の輩出らを目的とした、大学内外のパワーエレクトロニクスの研究、教育を一手に担う研究組織による広範囲なパワーエレクトロニクス技術研究を行った。

具体的には電気自動車(EV)の省エネ、創エネ、蓄エネを目的とした大電力ワイヤレス電力伝送を実現し、スイッチングデバイス、低損失配線材料、高周波大電力インバータ、高周波磁気回路設計、高効率モータ回生駆動、回生電力システム連系までの研究を行うことで、EV の電力ネットワーク化を実現し、個々の分野での学術的貢献およびパワーエレクトロニクスの新しい学術領域の創造を目的に研究を実施、また複合領域研究の必要性を明確にし、実社会にて即戦力となる学生を創出し、私大ならではのフレキシブルな体制による成果創出の規範モデルとなることを目的とした教育・研究を実施した。

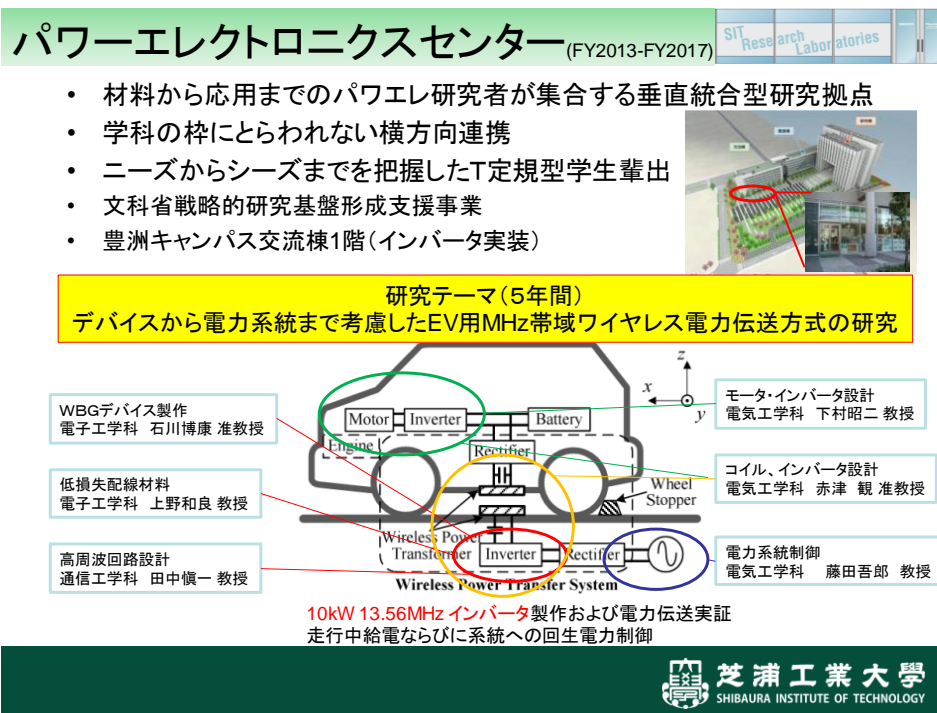


図 パワーエレクトロニクス研究センター概略図

目次

まえがき

1. 研究の概要

- 1.1 研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要 3
- 1.2 研究組織 3
- 1.3 研究施設・設備等 4
- 1.4 研究成果の概要と研究発表リスト 6

2. 研究の経過報告（H25年度～H27年度）

- 2.1 H25年度 23
- 2.2 H26年度 32
- 2.3 H27年度 66

おわりに

1. 研究の概要

1.1 研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

社会的な省エネ要求，CO₂削減要求から個々の機器の省エネだけでなく，自然エネルギーによる発電，電力輸送，電力貯蔵を含んだ電力ネットワークの形成が必要とされている。特に輸送分野では電気自動車（EV）の普及が省エネ，CO₂排出量削減の鍵となっており，停止時の充電のみならず家庭での電力ネットワーク結合

（V2H），ならびに走行中の充電および系統への電力回生についても研究が行われており，EVの普及を妨げているバッテリーエネルギー密度の問題を克服しようとしている。つまりEVが創エネ，省エネ，蓄エネの役割を果たせるようになれば，大きな社会革新が実現される。この電力ネットワークの一部としてのEVに必要なキー技術がワイヤレス電力伝送技術であり，すでに東大や埼玉大をはじめとした研究機関がEVへの応用を前提として研究を行っている。ワイヤレス電力伝送技術は，1m程度の距離でも非接触で電力を送れる技術であるが，まだ1kW程度の小電力伝送しか実現できず，EV走行中での電力授受や，急速充電および電力ネットワークの一部としてEVが役割を果たすためには送受信電力が不足している。大電力伝送が困難な理由は，電力の伝送周波数がMHz帯域と高いために，MHz帯域での大電力インバータが実現できていないためである。MHz帯域の大電力インバータの実現には，ワイドバンドギャップ半導体を用いた高速スイッチングデバイスの開発のみならず，インバータ主回路のインピーダンス低減や，分布定数での回路設計，高周波磁気回路設計が必要である。

以上の背景を鑑み，本研究プロジェクトでは同一大学ではあるが異なる学科に所属する，半導体，材料，通信，電力変換，電気機器，電力系統の一流研究者を一同に集め，上記MHz帯域の大電力（10kW）電力ワイヤレス伝送用インバータを研究開発し，実際に非接触で送信した電力によりモータを駆動，回生電力を系統に連携するまでの複合領域プロジェクトを実施することを目的とする。

1.2 研究組織

ワイヤレス電力伝送の研究を送受信コイルを境界にして①「高周波インバータの研究」と②「電力受信ならびに利用方法の研究」の2つに分類して行う。①では大電力用GaN素子を当該研究の第一人者である石川博康教授（電子工学科）が作成する。また，高周波回路においてはわずかなインピーダンスが電圧サージを発生しデバイスを破壊するため低抵抗，低誘電率な配線材料と低インピーダンスな回路パターン設計が必要となる。これらはナノテクノロジー材料研究の第一人者である上野和良教授（電子工学科）と高周波回路設計の第一人者である田中慎一教授（通信工学科）が担当する。②では高周波コイルの磁気設計をトランス設計の実績がある赤津観教授（電気工学科）が実施し，受信電力によるモータ駆動，および回生電力発生を回転機設計の権威である下村昭二教授（電気工学科）が行う。さらに受信電力を系統側に戻すための系統連系を電力系統連系技術で実績がある藤田吾郎教授（電気工学科）が実施する。プロジェクトでは学生を含めた月1回程度のミーティングを行い，学生発表を主体とした互いの進捗確認と，専門分野についての相互理解を深め，個別の成果のみならず全体の成果を実現する。

表 1 研究組織とプロジェクトでの研究課題・役割

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
赤津 観	工学部電気工 学科・教授	電力受信ならびに利用方法の研究	研究代表者 MHz 帯電力伝送コイルの実現と 10kW の電力伝送
下村 昭二	工学部電気工 学科・教授	電力受信ならびに利用方法の研究	伝送電力による高効率モータ駆動と力 率制御
藤田 吾郎	工学部電気工 学科・教授	電力受信ならびに利用方法の研究	回生された電力のスムーズな系統連系
石川 博康	工学部電子工 学科・教授	高周波インバータの研究	MHz 帯域で動作する大電力スイッチン グデバイスの実現
上野 和良	工学部電子工 学科・教授	高周波インバータの研究	低抵抗配線材料による低インピーダン スインバータの実現
田中 慎一	工学部通信工 学科・教授	高周波インバータの研究	MHz 帯での高周波インバータ回路のパ ターン実現

1.3 研究施設・設備等

研究施設は大宮キャンパス先端工学研究機構棟に 3 部屋 (50m²)、豊洲キャンパス交流棟に 50m² を実験室として使用しており、先端工学研究機構棟にはモータ、インバータの実験装置を設置、ワイヤレス電力伝送用のコイルとシールドルームを設置し大電力での電力伝送実験ができるようにした。豊洲キャンパス交流棟には金属膜スパッタ装置、電子ビーム真空蒸着器ならびにインバータ実装装置、評価装置を設置している。電子ビーム真空蒸着器では GaN デバイスの作成を行いダイオード試作に成功、金属膜スパッタ装置では GaN 基板上にグラフェンを蒸着させた低抵抗デバイスの作成、SBD の試作が可能である。



図 1 電子ビーム真空蒸着器 (左), ワイヤレス電力伝送コイルとシールドルーム (右)



図 2 金属膜スパッタ装置

1.4 研究成果の概要と研究発表の状況

次々世代 EV への走行中大電力給電の実現を目的として、5 年間の研究により以下の研究成果を得た。

- i) ワイヤレス給電システム要素技術の確立（電力受信ならびに利用方法の研究 および高周波インバータの研究）
走行中 EV へのワイヤレス給電において必要となる次々世代高周波大電力非接触給電システムの研究を送信、受信、アンテナの 3 点から検討した。
- ii) 走行中給電必要インフラの検討（電力受信ならびに利用方法の研究）
実際的高速道路データを用いて、走行中給電実施に必要な設備容量やインフラシステムの検討を実施した。
- iii) EV 用モータの検討（電力受信ならびに利用方法の研究）
EV に用いるインホイールモータとして、高トルクが実現可能な新型モータの検討を行った。
- iv) GaN デバイスの高性能化（高周波インバータの研究）
送信側、受信側に用いるパワーデバイスの性能向上を目的とした、特に GaN デバイスに焦点をあてて高効率化の検討を実施した。

以下、それぞれの成果について詳細を記載する。

- i) ワイヤレス給電システム要素技術の確立

- ① 13.56MHz インバータ 7kW 効率 96.8%(inv.)

2015 年度に第一世代高周波インバータ実験(1kW)を終了し、Si-MOS-FET を用いて 13.56MHz で効率 93.1%(1.2kW 出力)を達成(*1)、2016 年度は GaN デバイスを用いて 13.56MHz、3kW インバータの設計、実験を行い 3kW 出力時に 96.1%の電力変換効率（インバータ効率）を実現、2017 年に 10kW インバータの設計を完了し、7kW のインバータ出力を実現、インバータ効率 97%を得た(*3,*8)。13.56MHz でのインバータ出力、ならびに効率値ともに世界最高出力、最高効率の結果である。図 3~5 にインバータ装置と出力電圧波形を示す。

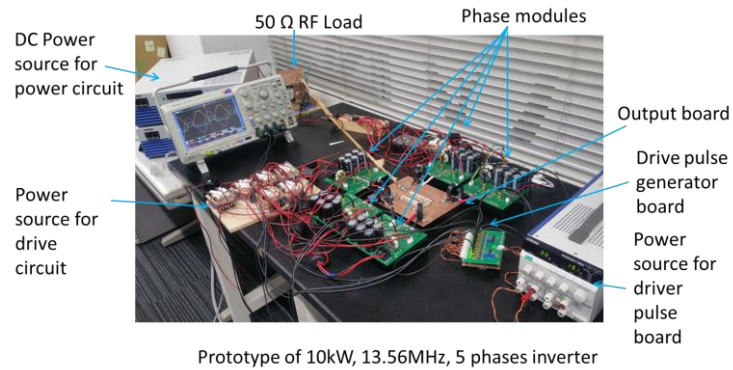


図 3 10kW 出力 (実出力 7kW) 13.56MHz インバータ

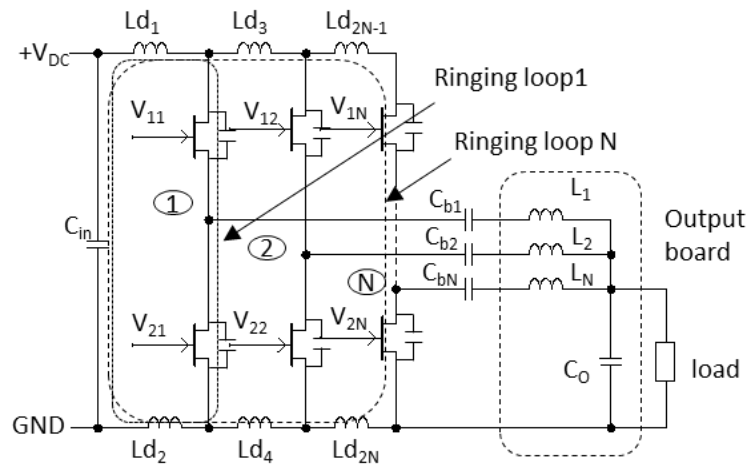
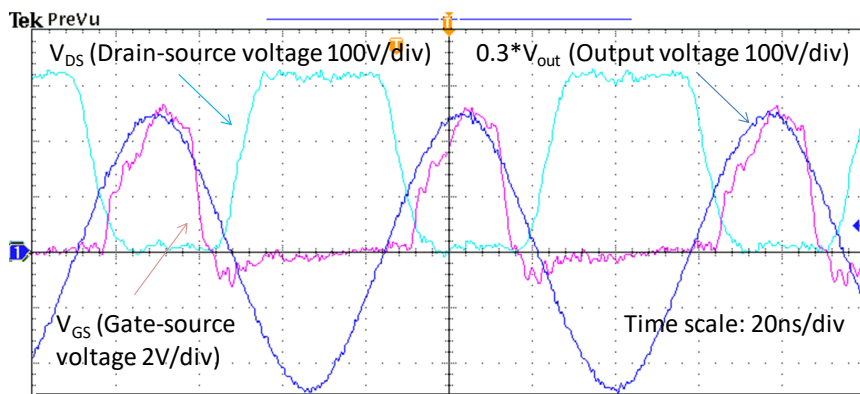


図 4 提案した Multi phase inverter



Input DC power: 6791.1 W; Output power: 6573.9 W; Efficiency: 96.8%

図 5 6.5kW 出力時 出力電圧波形

② アンテナ設計技術の確立と位置ずれ補償システムによる伝達効率改善

アンテナ設計においてはシミュレーションと実機との差異を一つずつつぶすことにより実機実験効率を予測できるシミュレーション技術を構築した(*2)。特に等価回路により算出した効率と、ベクトルネットワークアナライザによる効率、実際に電力伝送したときの効率が異なるという問題があった。この問題に対し、周囲環境（金属ボックス）の影響により効率低下する現象を明らかにし、電力伝送時の効率とネットワークアナライザにより測定した効率を一致させることができた。

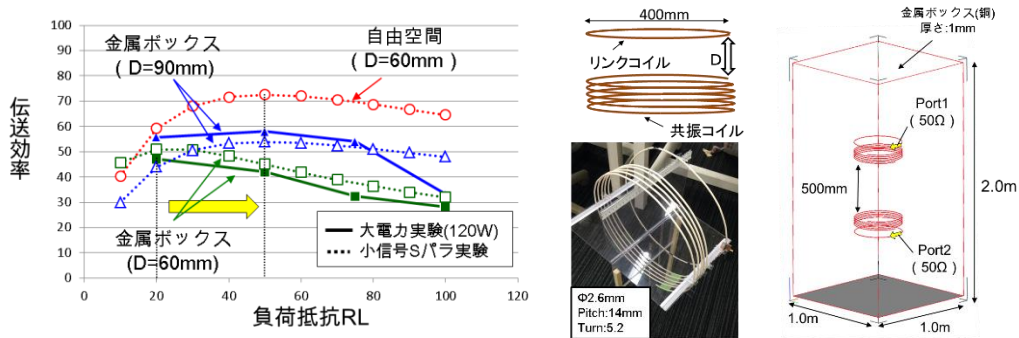


図6 実験環境による効率変化

上記環境変化による効率変化の結果より、走行中給電時に問題となる位置ずれに対して、リンクコイルと共振コイルとの距離を制御することで伝送効率を改善できることを提案、実機にて検証した(*11)。これは上記(*2)の検討からリンクコイルと共振コイルの距離の変化が伝達効率に与える影響を明らかにしたことから解決できた問題である。図7に位置ずれ補償有無の効率変化を示す。

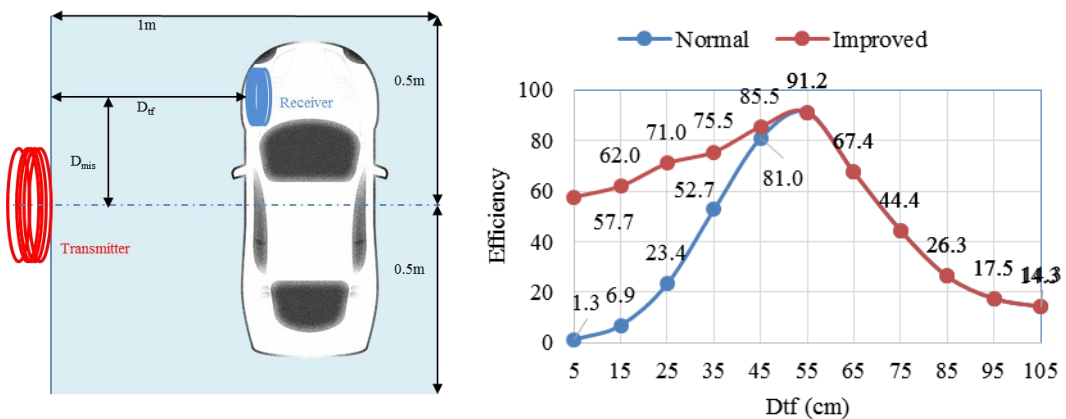


図7 位置ずれ時の状態と補償（リンクコイル制御）による効率改善

③ 85kHz 10kW 電力伝送 効率 86% (total)

13.56MHz の走行中給電のみならず 85kHz を用いた静止時非接触給電についても検討を行った。送信側インバータの出力に LC フィルタを入れることで入力インピーダンスを下げることによって送信側電圧を上げることなく出力を上げることが可能とし、かつアンテナの並列化で 10kW を効率 86% で送信することができた(*10)。

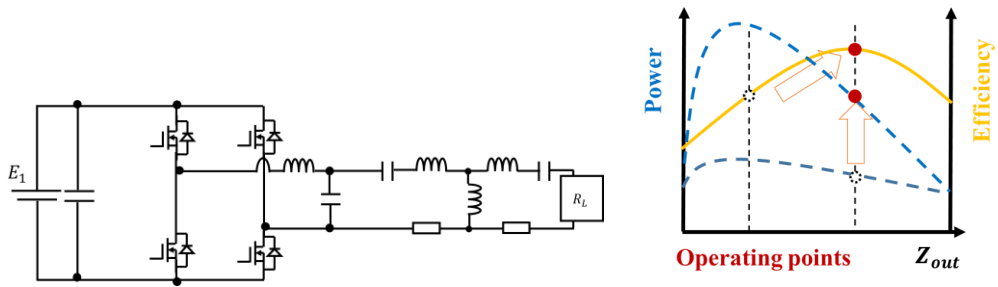


図 8 出力に LC フィルタを用いたインピーダンス制御による出力の向上

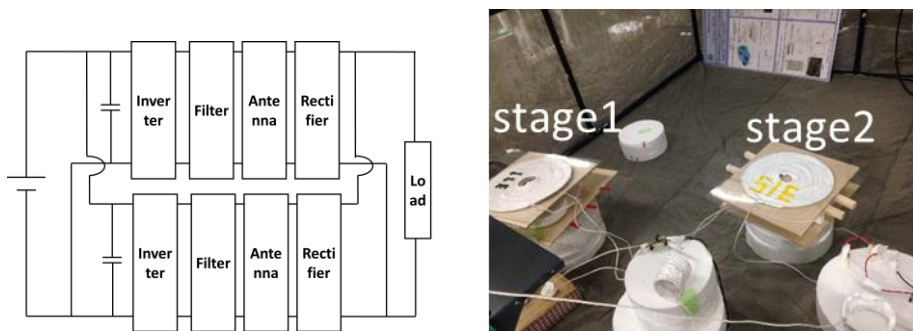


図 9 並列化による 10kW 出力の実現

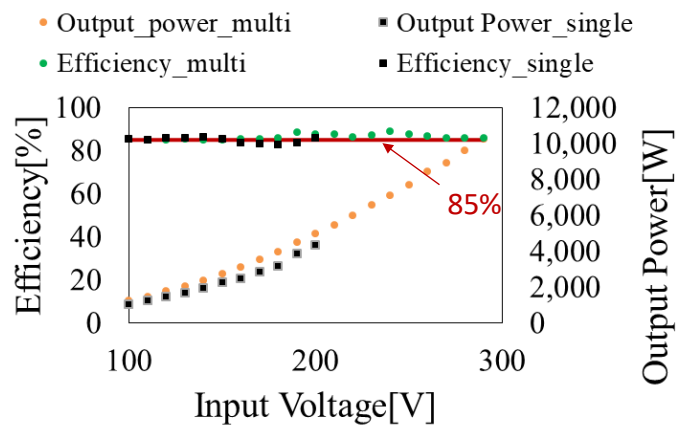


図 10 伝送パワーと伝送効率 (実験)

④ スパイラルアンテナ電力伝送 100W 87%

さらにヘリカルアンテナはアンテナの軸方向に大型化してしまう欠点があることから、アンテナの小型化のために平面型スパイラルコイルを用いたアンテナを提案し、13.56MHzでの駆動を確認、1kW送電を実現した。今後最適化を含めた再設計を行い、大電力伝送へ適用していく予定である。図11にスパイラルアンテナと測定結果を示す。

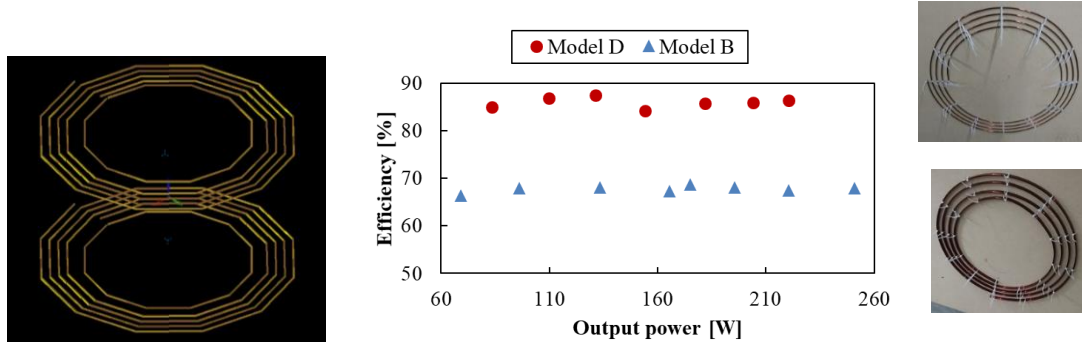


図11 提案するヘリカルアンテナと効率測定結果

一方、韓国 KIFE の学会にて現地に実験装置を持ち込みデモンストレーションを行った。図12に実験装置の写真を示す。

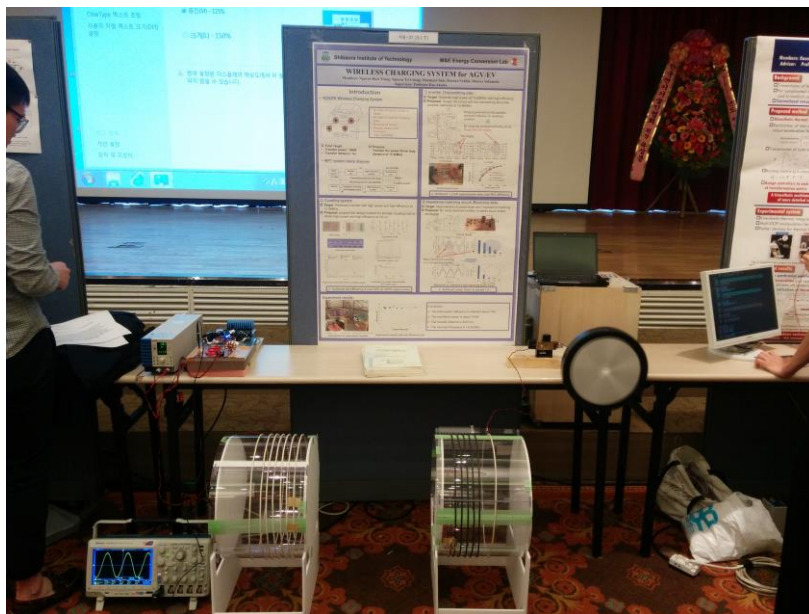


図12 韓国 KIFE 学会で実施したデモンストレーション (DC モータ駆動)

以上より次々世代給電システムの送電側、受電側の基礎検討が終了し、実車への電力伝送システム設計への準備が整った。

ii) 走行中給電必要インフラの検討

実際の高速道路データを用いて、走行中給電実施に必要な設備容量やインフラシステムの検討を実施した。高速道路に充電レーンを 10km 設置、同レーンを 80km/h で走行と仮定して東名高速道路での全走行車数（6145 台）がすべて EV であると仮定し、瞬時電力損失である 8.76kW を給電するとした場合、1 レーンあたり 1.12MW の電力が必要となる計算を行った。仮に充電レーンが 1/3 とすると 3 倍の設備容量が必要となり 3.5MW の給電設備容量が必要となることが分かった(*4)。図 13 に時間に対する必要設備容量を示す。

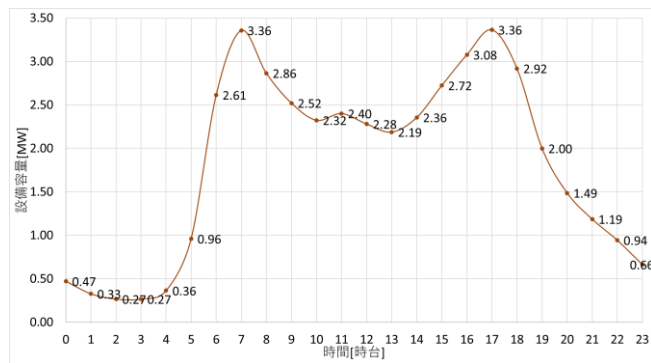


図 EV 給電時に必要な設備容量

この設備容量を満足する提案電力供給システムを図に示す。提案システムは電力平準化のために NAS 電池による蓄電設備を併設したものであり、最大設備容量を減少し、かつ契約電力量も削減できるシステムである。図に提案システムと NAS 電池を用いた場合の設備容量を示す。これらの検討から EV への走行中給電がインフラの観点から可能であることが示され、かつ瞬時に約 9kW の電力を給電することで少なくとも充電レーン走行時にはバッテリーからの電力を持ち出しせずに走行可能なことが明らかになった。

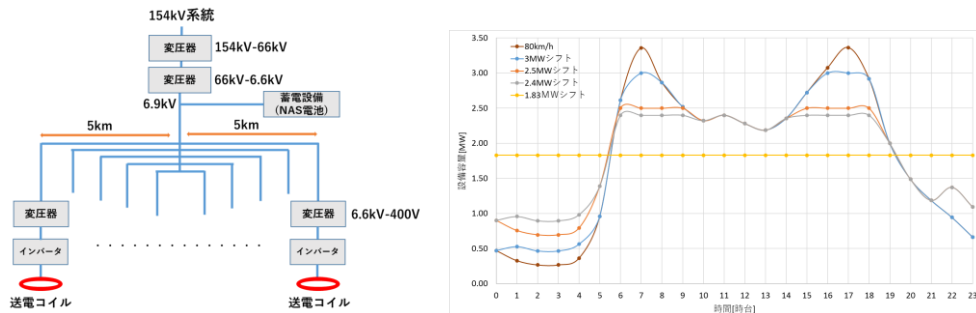


図 13 提案電力供給システム（154kV 系統受電）と NAS 電池併用による設備容量削減

iii) EV用モータの検討（レアアースレスアキシシャルバーニアモータによる低負荷効率改善）

EVに用いるインホイールモータとして、高トルクが実現可能な新型モータの検討を行った。EV用トラクションモータでは最高効率領域がモータ出力の中速中トルク領域に分布するため、市街地走行時の効率が悪く、一充電走行距離が向上しないという問題がある。そこで市街地走行運転領域での効率改善のためにDual Axial構造のPMバーニアモータを提案し、シミュレーションによって検討を続けてきた(*18)。体積が約10分の1のダウンサイズモデルを製作し、トルクおよび効率の特性を実験によって検証した。ダウンサイズモデルの定格は、回転数3000rpm、出力600W、電圧150V（線間電圧実効値）、電流5Aである。トルク特性はシミュレーション結果と良く一致し、また効率については、回転数が定格の3分の1、トルクが定格の5分の1の低速・低出力で95.6%の高い効率を得た。市販のEVに搭載されているトラクションモータには高特性の高価なネオジム焼結磁石が使用されているが、提案のモータでは重レアアース材料であるジスプロシウムやテルビウムを使用しない、より安価なネオジムボンド磁石を使用している。それでもなお、製作したダウンサイズモータは低速・低出力で高効率を示した。

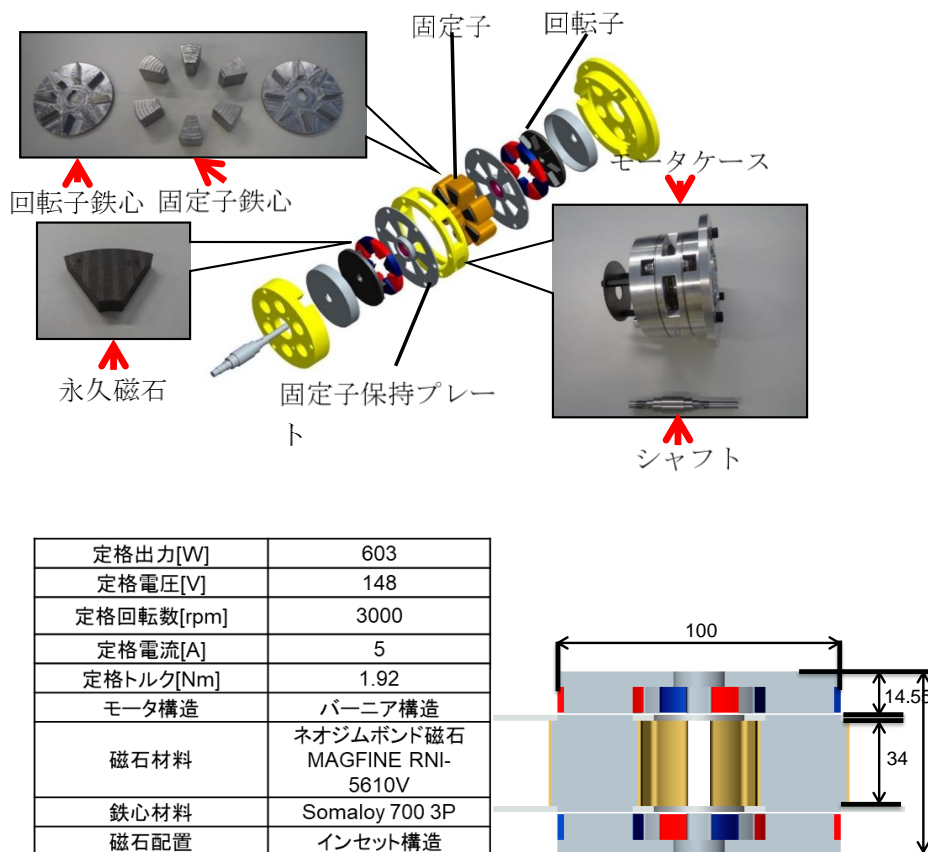


図 14 ボンド磁石を用いたバーニア（新構造）モータ

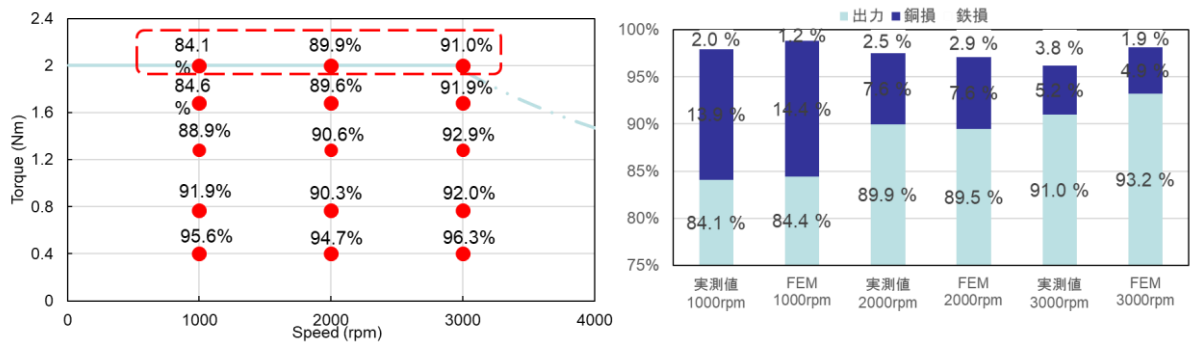


図 15 取得効率と損失の内訳

iv) GaN デバイスの高性能化 (高周波インバータの研究)

送信側、受信側に用いるパワーデバイスの性能向上を目的とした、特に GaN デバイスに焦点をあてて高効率化の検討を実施した。

① インバータ用 GaN デバイスの高性能化

i) で実施した高周波大電力インバータ用 GaN デバイスの基礎検討を実施し、芝浦工大内でデバイスが作成できるようになった。具体的には電子デバイスシミュレーションの確立、デバイス製作プロセスの策定および製作装置の整備、さらには測定方法の確立が実現できた。結果として Al/GaN/GaN HEMT 素子を作成し、良好な素子特性を得ることができた。

芝浦工大での電子デバイスシミュレーション、デバイスプロセス、測定方法の確立

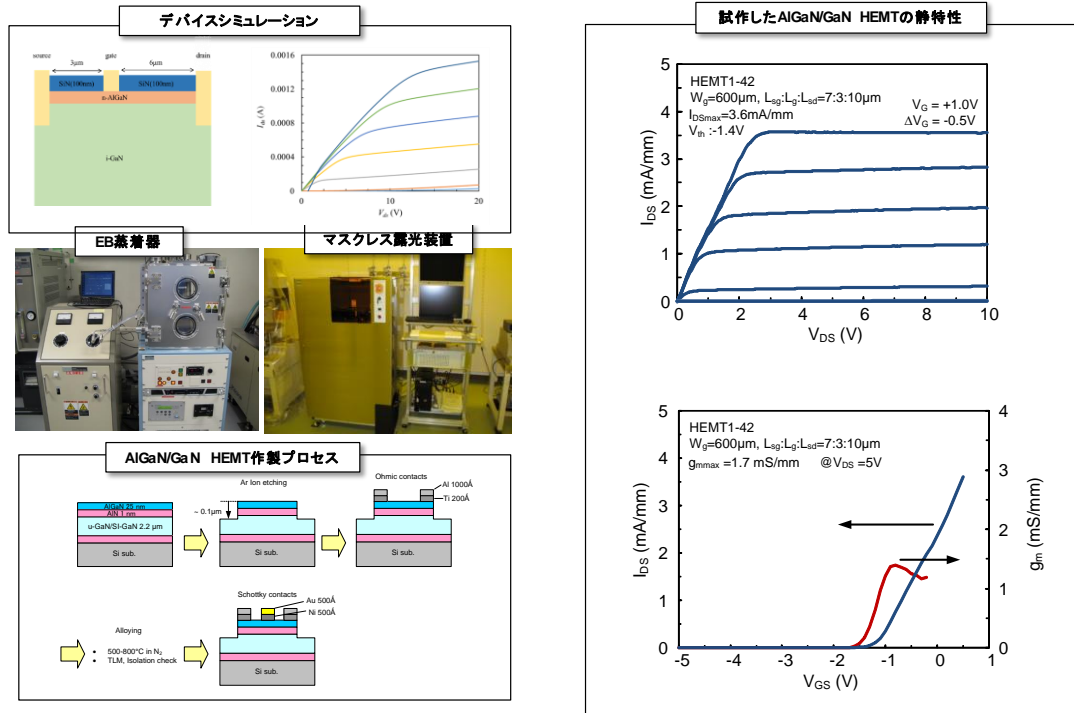


図 16 電子デバイスシミュレーションの確立と製作した AlGaIn/GaN HEMT のプロセスと特性

さらなる高特性化を目的に、サファイア基板上に成長した Ga 極性及び N 極性 GaN 薄膜のナノスケール表面形状と表面電位の相関について調べた。Ga 極性及び N 極性の平均表面電位はそれぞれ+531mV、+454mV であった。また、電位変化を伴わない結晶欠陥と 30mV 程度低く電位が検出される欠陥の 2 種類が存在することがわかった。表面電位の違いについて、自発分極・ piezo 分極の影響の他、結晶欠陥の影響も示唆された (*7)。

さらに GaN デバイスでは、TEOS/CF₄系ガスを用いた SiOF 膜/n-GaN MOS 構造を試作し、基礎的な電氣的評価を行った。容量-電圧特性より求めた SiOF 膜/n-GaN および比較用の SiO₂/n-GaN MOS 構造の界面準位密度は $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ および $6 \sim 9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ であり、5~8 倍大きな界面準位密度となった。一方、SiOF 膜/n-GaN MOS 構造の容量-電圧特性は SiO₂膜のものより 0.2~0.5V 正方向へのシフトが観察された。これにより、SiOF 中の F が負の固定電荷として有効に働くことがわかった。F の導入により界面準位密度が大きくなるものの、MOSHEMT のノーマリーオフ動作が期待できる。

新しいノーマリーオフ動作機構への期待

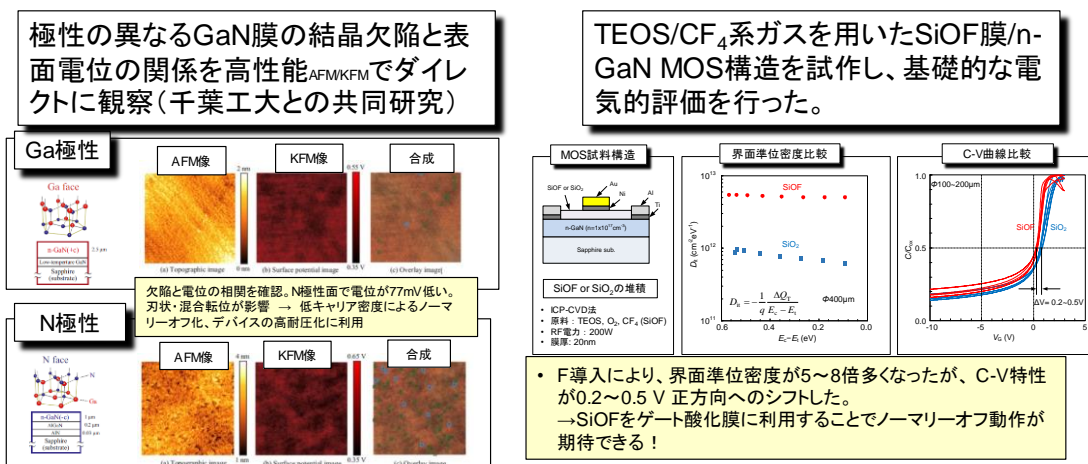


図 17 表面形状のナノスケール観察と表面電位の相関調査

このように本研究によりデバイス製作における基礎検討事項であるシミュレーション、特性測定、欠陥調査が可能となり、芝浦工大におけるデバイス作成設備ならびに技術を整備することができた。

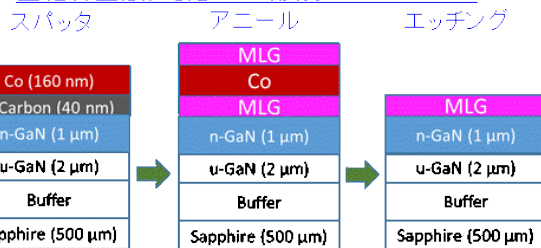
② 高周波インバータ用電極・配線

高効率な高周波パワーインバータに向けた電極・配線として、GaN デバイスにグラフェンを応用する研究を実施した。グラフェンは、熱的に安定で高い電子移動度を持ち、また原子間隔が狭く緻密な構造を持つことから、従来の銅 (Cu) や金 (Au) などの電極・配線に比較して、高信頼、低抵抗な配線材料あるいは銅配線のバリア膜として期待される。結果として GaN 基板上に直接グラフェン膜を堆積する方法を確立した(*5)。固相析出法と CVD 法を検討し、グラファイト構造を含む膜を GaN 基板上に比較的低温で直接堆積できる方法である。

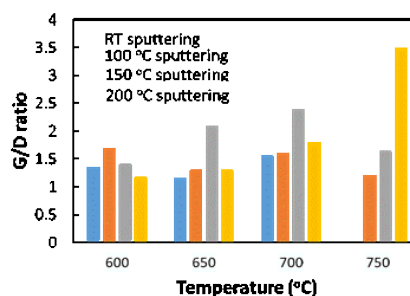
GaN基板への多層グラフェンの直接形成法の確立

- ・高周波特性に優れたワイドギャップ半導体 **GaN** の新しい電極材料として、高融点で優れた耐熱性や電流密度耐性が期待できる **多層グラフェン (MLG)** を検討。
- ・実用的な電極形成のためには、転写を用いずに **GaN 基板上への直接 MLG 形成** が課題。
- ・固相析出法において、**加熱スパッタ法を用いて均一な MLG 膜の形成** を実現。

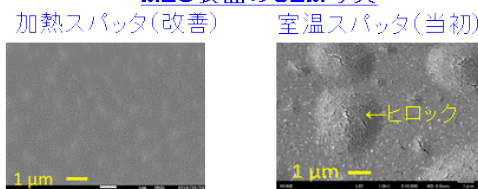
固相析出法による MLG 形成プロセスフロー



スパッタ温度・アニール温度による膜質比較



MLG 表面の SEM 写真



当初凹凸があった MLG 膜を、スパッタ温度とアニール温度の最適化により、平坦で結晶性 (G/D 比) の良い MLG 膜の形成に成功

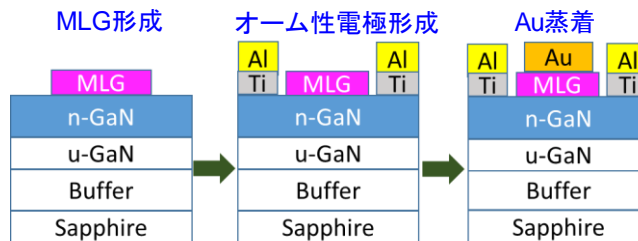
図 18 GaN 基板への多層グラフェン直接形成法の確立

また確立したグラフェンの堆積方法を用いて、GaN ショットキーダイオードを試作し、従来の Au/Ni より高い熱的な安定性が得られることがわかった(*6)。さらにダイオードの寄生抵抗の低減のために、固相析出法においては、MLG 膜の薄膜化や、MLG 膜上に堆積する金属材料の変更を検討した。その結果、Au を直接 MLG 上に堆積する代わりに Ni/Au を堆積することで、接触抵抗の低減により寄生抵抗が低減できることがわかった (*21)。また、CVD による電極堆積では、昨年までは良好なダイオード特性が得られない問題があったが、ダイオード作製プロセスフローを見直しと、オーミック電極のアニール条件の最適化による低減によって、良好なダイオード特性が得られるようになった。

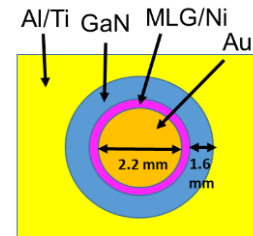
MLG/GaNショットキーダイオードの製作および特性改善

- ・最適化したMLG形成法を用いて、**MLG/GaNダイオード**を製作。
- ・Au/Ni/GaN(従来)の電極に比較して、MLG電極で**ダイオードの耐熱性を改善**

MLG/GaNダイオードの製作フロー

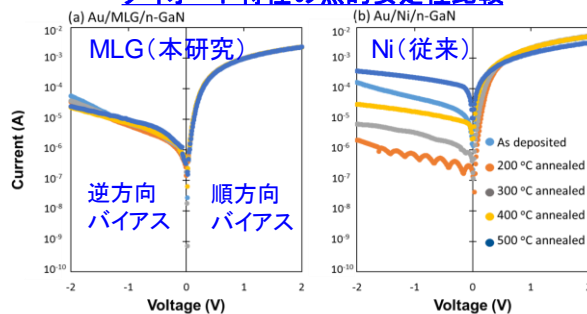


ダイオードの平面模式図



ショットキー障壁高さ: 0.72eV
理想係数(n): 1.56

ダイオード特性の熱的安定性比較



MLGを用いることで、
500°Cアニール後も
安定なダイオード特性を実現。
MLGがAuの拡散バリアとして
GaNとの反応を抑制。

図 19 グラフェンを用いたショットキーダイオード

<優れた成果が上がった点>

13.56MHzを用いた非接触給電方式は長距離電力伝送可能な方式として徐々に注目を浴びてきており、その中でも7kWインバータの実現は、競合(Oxford Univ. with DAIHEN Co.)と比較(周波数6.78MHz, 2.5kW)しても断トツの成果である。

またインフラ検討においても今後の給電システム確立の基礎検討結果として価値が高い。さらにモータは低コストでありながら課題であった低負荷効率の改善を実現しており、給電量を低減できる新しいモータの提案ができた。

GaNデバイスについては学内でデバイスが作成できるようになったことが最も優れた成果である。グラフェン応用も併せて今後画期的なデバイスが作成されることが期待できる。

<課題となった点>

個々の研究成果は十分な実績をあげることができた。しかしながらこれらの研究成果を一つにまとめる作業が5年間では実現できなかった。今後新たなプロジェクトを立ち上げて、これら研究成果をまとめたシステムを実現、実車での電力伝送を実現していきたい。

＜外部（第三者）評価の実施結果＞

本研究プロジェクトは、SIT 総合研究所の研究センター（パワーエレクトロニクス研究センター）として推進している事業であり、毎年の自己点検とともに、総合研究所としての外部評価委員会による評価を受けている。H26～29 年度と過去 4 回の外部評価を受けている。

最終評価委員会（H30 年 3 月 8 日実施）における評価コメントを抜粋すると、以下のとおりである。

● 評価者 1

現在最も注目を浴びている技術開発ターゲット・電気自動車のキーであるパワーエレクトロニクスの主要コンポーネントに着目し、それら各々について優れた業績を上げていることに敬意を表したい。この5年間の研究成果として満足すべきであることを申し述べたい。以下に、個別的な技術の詳細についての質問事項を述べるが、これらについては既に評価委員会において回答済の項目も含まれる。

- 1)開発された1356MHzのインバータは、EV全体の消費電力にどの程度の改善をもたらすか。
- 2)EV車の消費エネルギーを加速抵抗、空気抵抗、ころがり抵抗に分類し、時速80km/hにおける消費を評価しておられるが、実際の巡航速度である100~110km/hについてはどうか。また、車種の相違による評価値の分散はどの程度か。
- 3)EV化を目指した研究開発は、世界各国の様々な機関で精力的に実施されている。本研究の成果および今後の研究は、このような激しい国際競争の中でどのような特色・差別化を目指されているのか。
- 4)各要素技術の成熟度が必ずしもそろっていない印象を受ける。パワーエレクトロニクス全体をサブシステムとしてとらえた時に、成熟度に対する配慮が重要となろう。米国でしばしば適用されているTRL(Technology Readiness Level)などを参照されたい。

● 評価者 2

デバイスから電力の系統まで全体を考慮しながら各要素にブレイクダウンして、その各要素に対して研究計画をたて研究遂行をしています。各研究グループが高い成果を挙げている点は高く評価できます。

質問であったように、どのぐらいの研究グループの規模で行っているか(人数等)は記述があっても良いかと思いました。実際には数少ない学生が、大きなパフォーマンスがあげたことを見える形で評価することは重要と思われまます。

課題として挙げられたシステムとして構築する点で、今後、どのような展開を考えているのか、大変興味を持ちました。今後の発展を期待しています。

● 評価者 3

多様な研究を取りまとめたうえで、具体的な成果が出ていることを高く評価します。この分野は地道な技術力の底上げと社会実装が研究の両輪として不可欠であり、国プロへの参画はもとより企業との連携もさらに深めてくださることを期待します。またそれほど遠くない将来に実現、実用化されていく技術が多いと思われまますので、これらの技術を実際にユーザーとして使う立場になる学生さんたちを集めて、未来を共想し共創するワークショップのようなものを開

催し、進むべき道とともに考えていくと、より研究課題がはっきり見えてくるように思います。

● 評価者 4

EV用のワイヤレス給電システムの構築を具体的なゴールに据え、パワーデバイス、インバータ、アンテナなどの要素技術から走行車両への無線給電のためのインフラの検討まで、幅広く取り組んでいる。特に、他の研究機関ではあまり取り組まれていない高い周波数領域に注目し、優れた成果を上げている。

幅広い分野の教員・学生が参加した総合的なプロジェクトであり、芝浦工大の総合力が発揮されているものの、各要素技術の研究開発のフェーズが違いすぎるものもあるため、無線給電システム全体としては飛躍的な成果が得られていないのが惜まれる。この点は、このプロジェクトを通じた「T定規型」の人材育成の効果も、期待したほどには上がっていないのが残念である。

これらのコメントより、本研究プロジェクトの技術的な取り組みに対する評価は高く走行実験実施などの期待感が高い。現在のところ走行実験の実現は困難であるものの走行実験を模擬したデモンストレーション実施を検討するなど今後の課題として受け止めたい。また人材育成に関しても学生間連絡や研究情報共有を密にするなどの方策を今後の課題として検討していきたい。

発表文献リスト（番号は文中の番号と一致）

学術雑誌：

1. Nguyen Kien Trung, Takuya Ogata, Shinichi Tanaka and Kan Akatsu, "Analysis and PCB design of a class D inverter for wireless power transfer systems operating at 13.56MHz", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 6, pp. 703-713, 2015
2. *Nguyen Kien Trung, Takuya Ogata, Shinichi Tanaka and Kan Akatsu, "Attenuate influence of parasitic elements in 13.56MHz inverter for wireless power transfer systems", IEEE Trans. on Power Electronics, Volume: 33, Issue 4, Pages: 3218 - 3231
3. *Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Design high power and high efficiency inverter operating at 13.56MHz for wireless power transfer systems", IEEE Trans. on Power Electronics (under reviewing).
4. *Azreezal Zairee Bin Omar, Khai Phuc Nguyen, Yukimori Honda, Noriaki Matsumoto, Zur Ain Binti Hanafi, Akihiro Hoshikawa, Goro Fujita, 'Towards Japan's Future EV-Friendly Highway Concept With In-Motion Road-Embedded Wireless Chargers' Journal of Mechanics Engineering and Automation p.255-261 (Volume 7, Number 5, May 2017 (Serial Number 67))
5. *M. S. Uddin and K. Ueno, "Fabrication of a Schottky diode with transfer-free deposition of multilayer graphene on n-GaN by solid-phase reaction", Japanese Journal of Applied Physics, **56**, 04CP08 (2017).
6. *M. S. Uddin and K. Ueno, "Thermal stability of a Schottky diode fabricated with transfer-free deposition of multilayer graphene on n-GaN by solid-phase reactions", Japanese Journal of Applied Physics, **56**, 07KD05 (2017).
7. *潤間威史, 佐藤宣夫, 石川博康, "走査型プローブ顕微鏡によるサファイア基板上窒化ガリウム層の表面形状及び表面電位観測", 電気学会論文誌E, Vol. 136, No. 4, pp.96-101(2016).

学会発表（国際会議含む）

8. *Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Design 13.56MHz 10 kW resonant inverter using GaN HEMT for wireless power transfer systems", 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) Year: 2017, Pages: 955 - 960
9. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Driver design for 3kW 13.56 MHz multiphase resonant inverter", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia) Year: 2017, Pages: 170 - 174
10. *Kazuya Uchida and Kan Akatsu, "An examination of optimizing input impedance for wireless power transfer operating with high power condition", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)
11. *Cung Nguyen Tri・赤津 観, "13.56MHz 無線電力伝送結合システムにおける受信側マルチポジション効率の改善", 電気学会産業応用部門大会 1-30, 2017年8月
12. 内田 和也・赤津 観, "非接触給電における大電力送電時のインピーダンス設計に関する検討", 電気学会産業応用部門大会 1-97, 2017年8月
13. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Design high power and high efficiency inverter operating at 13.56MHz for wireless power transfer system", IEEE ECCE(Energy Conversion Congress & Expo) 2016, Sept. 2016 in Milwaukee.
14. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Design high power and high efficiency power source for

- dynamic wireless charging systems”, EVTeC and APE Japan, May 2016.
15. Nguyen Kien Trung・赤津 観, "13.56MHz 多相共振インバータの設計", 電気学会産業応用部門大会 1-101, 2016年8月9日
 16. 佐藤 雅一・赤津 観, "13.56MHz を用いた非接触給電の受電側の検討", 電気学会産業応用部門大会 1-93, 2016年8月9日
 17. 内田 和也・赤津 観, "非接触給電における入力インピーダンス最適化の検討", 電気学会産業応用部門大会 Y-56, 2016年8月9日
 18. *S. Shimomura, and T. Sunaga, "Design of Integrated Radial and Dual Axial-Flux Ferrite Magnet Synchronous Machine," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE),
 19. 本田幸盛, 藤田吾郎, 松本哲明, ニュエンフックカイ, 干川晶大, 「走行中非接触給電システムの検討」, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.380, pp.10-1-1~2, (2016-9, 福岡)
 20. Noriaki Matsumoto, Goro Fujita, 'Building the demonstration device of In-motion Wireless Power Transmission', The International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE), ID 90230, (2016-7, Okinawa, Japan)
 21. U3. Md. Sahab Uddin, Kazuyosi Ueno, "Improvement of multilayer graphene (MLG) / n-GaN Schottky diode properties fabricated with transfer-free deposition of MLG on n-GaN by solid-phase reaction" Symposium on Semiconductors and Integrated Circuits Technology (2017, Electrochemical Soc. Japan, 8/24, Tokyo)
 22. 松本哲明, 藤田吾郎, 「電気自動車の走行中非接触給電システムの検討」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.120, pp.1-6-15~16, (2017-9, 明治大学)
 23. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "PCB design for 13.56MHz half-bridge class D inverter for wireless power transfer system", ICPE –ECCE Asia- 2015, May 2015 (2nd Prize Award).
 24. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, " Ringing suppressing method in 13.56MHz resonant inverter for wireless power transfer systems", IEEE ECCE2015
 25. Nguyen Kien Trung, Takuya Ogata, Shinichi Tanaka and Kan Akatsu, "Attenuate influence of parasitic elements in 13.56MHz inverter for wireless power transfer systems", 電気学会 産業応用部門大会, 2015
 26. 佐藤雅一, 赤津 観, "13.56MHz 利用非接触給電における受電側インピーダンス整合の検討", 電気学会 産業応用部門大会, 2015
 27. Masakazu Sato, Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "An Examination of Impedance Matching in Receiving Side of Wireless Power Transfer system operating at 13.56MHz", IEEE IFEEC 2015
 28. 尾形卓也, ニュエン キエン トウルン, ニュエン トリ クオン, 赤津観, 田中慎一, 慎間接給電アンテナの周囲環境変動に対する制御方法の検討”接給電子情報通信学会総合大会 2016 (発表予定)
 29. 小久保陽平, 下村昭二: 「弱め磁束制御のためのデュアルロータアキシシャルフラックス PMVM」, 平成 27 年度電気学会産業応用部門大会, Vol.3, No.24, pp.163-166(2015)
 30. 小久保陽平, 下村昭二: 「デュアルロータアキシシャルフラックス PMVM の極数構成の比較」, 電気学会研究会資料(モータドライブ・回転機・自動車合同研究会), MD-15-85・RM-15-66・VT-15-13, pp.65-70(2015)
 31. BIN OMAR Azreezal Zairee, et al, 'Electric Vehicle Dynamic Charging and Safety Related Studies' ICEE2015, 15A-182 (2015-7, HongKong)
 32. HONDA Yukimori, et al, 'Preliminary Review of Electric Vehicle In-Motion Wireless Charging IECC2015, 15A-181 (2015-7, HongKong)
 33. Z. Omar, N. A. Jalalludin, T. Takeuchi, Y. Honda, G. Fujita, 'ELECTRIC VEHICLE IN-MOTION

- CHARGING-EMF EXPOSURE SAFETY REGULATION', SEATUC2015 (2015-7, Thailand)
34. BIN OMAR Azreezal Zairee, et al, 'Towards Japan's Future EV-Friendly Highway Concept With In-Motion Road-Embedded Wireless Chargers', SEATUC 2016 (2016-3, Tokyo)
 35. Nguyen Tri Cuong and Kan Akatsu, and Kan Akatsu, SEATUC 2016 (2016-3, Tokyo) EXPOSURE SAFETY REGULATION', SEATUC2015 (2015-7, Thailand)tem operatin2016 SEATUC Symposium (to be presented).
 36. 尾形卓也, ニュエン キエン トゥルン, 赤津観, 田中慎一, “平面回路電磁界シミュレータを用いた3次元構造インバータの解析”, 電子情報通信学会大会 2015年3月
 37. N. K. Trung 他, "Design of 1.5kW 13.56MHz class D resonant inverter for wireless power transfer systems", H26年電気学会産業応用部門大会 1-84
 38. Yohei Kokubo, Shoji Shimomura. "Design of Dual Rotor - Axial Gap PMVM for Hybrid Electric Vehicle," *International Conference of Electrical Machines and systems (ICEMS), 2014*.
 39. Daisuke Fukai, Shoji Shimomura. "Integrated Radial and Dual Axial-flux Variable-reluctance Vernier Machine," *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2014 International Conference. IEEE*
 40. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Analysis And Design Of A 13.56 MHz Resonant Inverter For Wireless Power Transfer Systems", 2013 SEATUC symposium, March, 2014
 41. Noor Hidayah Binti Mustafa Kamal and Kan Akatsu, "Antenna Design for 13.56MHz Magnetic Power Transfer Technology", 2013 SEATUC symposium, March, 2014
 42. M. Takano, S. Shimomura, "Study of variable reluctance vernier motor for hybrid electric vehicle", Conference record of *ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE* , pp.1341,1347, 3-6 June 2013
 43. M. Takano, S. Shimomura, "Improvement of torque density of variable reluctance vernier machine for hybrid electric vehicle," Conference record of *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE* , pp.1205,1212, 15-19 Sept. 2013
 44. R. Ishikawa, K. Sato, S. Shimomura, and R. Nishimura, “Design of In-Wheel Permanent Magnet Vernier Machine to reduce the armature current density”, Conference record of *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS Busan), 2013*, pp. 459-464, 26-29 Oct. 2013

2. 研究の経過報告（H25 年度～H27 年度）

本プロジェクトを実施した5年間のうち、当初3年度の成果報告を経過報告としてまとめる。H26 年度，H27 年度の主な成果は1. 研究の概要に記載している。

デバイスから電力システムまで考慮した EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送方式の研究

[研究代表者]

電気工学科 赤津 観

[研究分担者]（以下 芝浦工業大学工学部所属）

電子工学科	石川 博康	インバータ用 GaN パワートランジスタの作製と特性評価
電子工学科	上野 和良	高周波パワーインバータ用の低損失配線・電極の研究
通信工学科	田中 慎一	高周波インバータにおけるバスバー寄生インダクタンス低減の研究
電気工学科	赤津 観	ワイヤレス電力伝送インバータおよび送受信コイルの研究
電気工学科	下村 昭二	軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究
電気工学科	藤田 吾郎	複数台電力伝送および系統連系に関する研究

1. 序論

社会的な省エネ要求、CO₂削減要求から個々の機器の省エネだけでなく、自然エネルギーによる発電、電力輸送、電力貯蔵を含んだ電力ネットワークの形成が必要とされている。特に輸送分野では電気自動車（EV）の普及が省エネ、CO₂排出量削減の鍵となっており、停止時の充電のみならず家庭での電力ネットワーク結合（V2H）、ならびに走行中の充電および系統への電力回生についても研究が行われており、EV の普及を妨げているバッテリーエネルギー密度の問題を克服しようとしている。つまり EV が創エネ、省エネ、蓄エネの役割を果たせるようになれば、大きな社会革新が実現される。この電力ネットワークの一部としての EV に必要なキー技術がワイヤレス電力伝送技術であり、すでに東大や埼玉大をはじめとした研究機関が EV への応用を前提として研究を行っている。ワイヤレス電力伝送技術は、1m 程度の距離でも非接触で電力を送れる技術であるが、まだ 1kW 程度の小電力伝送しか実現できず、EV 走行中の電力授受や、急速充電および電力ネットワークの一部として EV が役割を果たすために

は送受信電力が不足している。大電力伝送が困難な理由は、電力の伝送周波数が MHz 帯域と高いために、MHz 帯域での大電力インバータが実現できていないためである。MHz 帯域の大電力インバータの実現には、ワイドバンドギャップ半導体を用いた高速スイッチングデバイスの開発のみならず、インバータ主回路のインピーダンス低減や、分布定数での回路設計、高周波磁気回路設計が必要である。以上の背景を鑑み、本研究では同一大学ではあるが異なる学科に所属する、半導体、材料、通信、電力変換、電気機器、電力系統の研究者を一同に集め、上記 MHz 帯域の大電力（10kW）電力ワイヤレス伝送用インバータを研究開発し、実際に非接触で送信した電力によりモータを駆動、回生電力を系統に連系するまでの複合領域プロジェクトを実施することを目的とする。

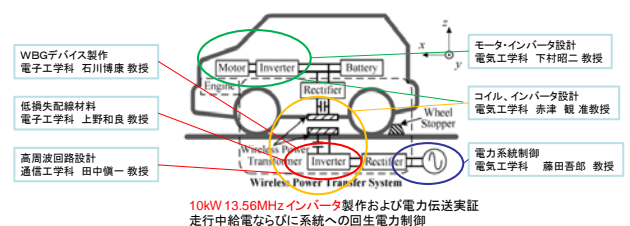


図1 EV用ワイヤレス電力伝送技術研究分担

2. 研究計画

i) 研究分担とその内容

本研究は図1に示した送受信コイルを境界にして①「高周波インバータの研究」と②「電力受信ならびに利用方法の研究」の2つに大別して行う。①では高周波インバータに用いるパワー半導体としてワイドバンドギャップ半導体である GaN を用いたパワートランジスタを石川博康教授(電子工学科)が作成する。また、MHz 帯域の高周波回路においてはわずかなインピーダンスが電圧サージを発生しデバイスを破壊するため低抵抗、低誘電率な配線材料と低インピーダンス回路パターン設計が必要となる。低抵抗配線については上野和良教授(電子工学科)が Cu ワイヤや NC (ナノカーボン)を用いた HEMT 用電極ならびにボンディングワイヤの検討を行い、田中慎一教授(通信工学科)が高周波インバータに用いるバスバー寄生インダクタンスを低減可能な配線パターンを設計する。これらの基盤技術を用いた 13.56MHz 10kW インバータを赤津観准教授(電気工学科)が回路設計を行い方形はインバータとしての動作を確認する。②では高周波コイルの磁気設計を①と同様に赤津観准教授が実施し、受信電力によるモータ駆動、および回生電力発生を特に EV で効率が悪いとされる低負荷領域での効率改善を実現する回転機に着目して下村昭二教授(電気工学科)が行う。さらに受信電力を系統側に戻すための系統連系を藤田吾郎教授(電気工学科)が実施し、ワイヤレス電力伝送で走行する EV が複数台あるときの電力系統マネジメント方法について検討する。

ii) 研究のマネジメント計画

本研究では月1回程度の全体ミーティングを行い、互いの進捗確認と、専門分野についての相互理解を深め、個別の成果のみならず全体の成果を実現するために相互補完を行う。具体的には研究代表者は研究の進捗とりまとめおよび予算管理、月例ミーティングの開

SIT 総合研究所研究成果報告書(研究代表者用) 催など各研究者での研究がスムーズに進むようマネジメントを行う。研究代表者を含めた各研究者6人は研究プロジェクトの一部となる前述した独立した研究テーマについて責任をもって研究を遂行し、それぞれの研究成果の集合体が本研究の成果となる課題設定とした。また各研究テーマにおいては研究者の研究室の学生が担当し RA(3名)がとりまとめを行う。またプロジェクトの予算管理や書類業務は本学研究支援課が支援する。

iii) 年度毎の研究計画

平成25年度では回路スペック決定のための条件だしを行う。具体的には 10kW 電力伝送を実現するためのインバータ素子定格を決定し、GaN 素子作成のための信頼性向上策の検討およびインバータ回路の最大インピーダンス計算など、主にシミュレーションを通して回路スペックを決定する。

平成26年度では決定した回路スペック実現のための素子設計、回路設計、磁気設計を行い 3kW インバータの試作品を設計、試作する。

平成27年度では試作した回路の実験を通して 10kW 用素子設計、回路設計、磁気設計を行う。また、10kW モータによる回生電力向上策の検討および回生電力の系統連系方法の検討を行う。

平成28年度では 10kW の電力送信実験を行い、10kW のモータを駆動する。また回生電力を発生させ、電力系統への安定な電力回生を行う。

平成29年度は主に研究プロジェクトのまとめと各論文発表を行う。

3. 計画の進行状況

2013年度は主にインバータ回路スペック決定のための条件だし、具体的には 10kW 電力伝送を実現するためのインバータ素子定格を決定し、GaN 素子作成のための信頼性向上策の検討およびインバータ回路の最大イ

SIT 総合研究所研究成果報告書（研究代表者用）
 4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

インピーダンス計算など、主にシミュレーションを通して回路スペックを決定した。現在までに小型の 1kW GaN 13.56MHz インバータの設計が完了し、そのシミュレーション結果から最大許容寄生素子の大きさを明らかにした。また送受信コイルの一次設計を行い、必要なアンテナ径、コイル太さを導出し、シミュレーションによりその効果を確認した。これらの結果はSEATUCシンポジウムにて発表(*1,*2)した。さらにインバータ試作を通して数種類の基板パターンを検討し、シミュレーションにおいてその寄生インダクタンス算定を行っている。

低損失配線の研究においてはグラフェンを Cu 上に化学的気相堆積 (CVD) 法を用いて成長させ、NC コートの Cu ワイヤを作製した。赤津研究室において、このワイヤを用いたコイルのインピーダンス特性を評価した結果、高周波において抵抗成分が低減される結果が得られた。

EV 用モータの研究においては EV 走行で頻繁に用いられる低速低トルク領域の効率改善を目的としたモータとしてバーニアモータに着目し、その設計および駆動特性取得が完了した。これらの成果を国際会議にて発表した(*3, *4, *5)。

複数台電力伝送の研究においては図 2 に示すような複数台電力伝送実証モデルの設計を開始し、走行時の伝送電力の変化などを簡易的に検証できるシステム検討を開始した。

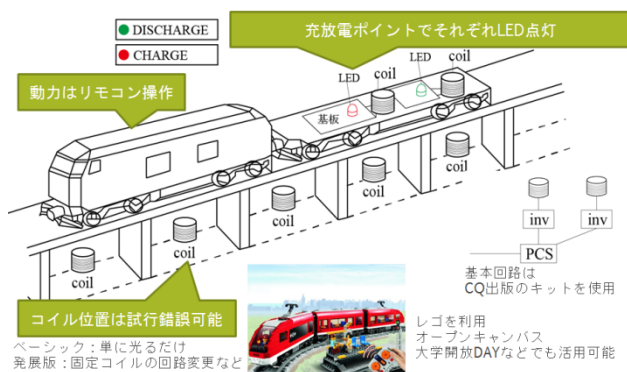


図 2 複数台電力伝送実証モデル

平成 26 年度では決定した回路スペック実現のための素子設計，回路設計，磁気設計を行い 3kW 程度の試作品を設計，試作する。

平成 27 年度では試作した回路の実験を通して 10kW 用素子設計，回路設計，磁気設計を行う。また，10kW モータによる回生電力向上策の検討および回生電力の系統連系方法の検討を行う。

平成 28 年度では 10kW の電力送信実験を行い，10kW のモータを駆動する。また回生電力を発生させ，電力系統への安定な電力回生を行う。

個別の研究成果はそれぞれ応用物理学会、電気学会および各学会主催の国際会議に投稿していき、研究毎に 2 本の論文誌投稿を目指している。

*1 Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Analysis And Design Of A 13.56 MHz Resonant Inverter For Wireless Power Transfer Systems", 2013 SEATUC symposium, March, 2014

*2 Noor Hidayah Binti Mustafa Kamal and Kan Akatsu, "Antenna Design for 13.56MHz Magnetic Power Transfer Technology", 2013 SEATUC symposium, March, 2014

*3 M. Takano, S. Shimomura, "Study of variable reluctance vernier motor for hybrid electric vehicle", Conference record of ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, pp.1341,1347, 3-6 June 2013

*4 M. Takano, S. Shimomura, "Improvement of torque density of variable reluctance vernier machine for hybrid electric vehicle," Conference record of Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, pp.1205,1212, 15-19 Sept. 2013

*5 R. Ishikawa, K. Sato, S. Shimomura, and R. Nishimura, "Design of In-Wheel Permanent Magnet Vernier Machine to reduce the armature current density", Conference record of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS Busan), 2013, pp. 459-464, 26-29 Oct. 2013

インバータ用 GaN パワートランジスタの作製と特性評価

電子工学科 石川 博康

1. 序論

III 族窒化物半導体 GaN は、①バンドギャップが 3.4 eV と大きく、②破壊電界が 2×10^6 V/cm と大きく、③電子の飽和ドリフト速度が 2.7×10^7 cm/s と比較的高い。さらに、AlGaIn/GaN ヘテロ構造を利用した高電子移動度トランジスタ(HEMT)では、ヘテロ界面に形成される 2DEG のシートキャリア密度が高く、高温・高周波パワー素子として大きな利点を有している。本研究では、これらの利点を活かした EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送のインバータ向けの GaN 系パワートランジスタ作製を行う。

2. 研究計画

(1) デバイス作製プロセスの確立

本研究予算で購入した電子ビーム真空蒸着器、本学で保有するマスクレス露光装置を用い、まず、オーミック電極のプロセス条件の確立を行う。Ti/Al を用い、蒸着条件および蒸着後のアニール温度の最適化を行い、固有接触抵抗率が低く、信頼性が高いオーミック電極を得る。次に、ショットキー電極のプロセス最適化を行う。Pd および Ni/Au ショットキーダイオードを作製し、高バリアハイトで信頼性が高いショットキー電極を得る。最終的に、AlGaIn/GaN 構造上にゲート長 1-2 μm の小電力 HEMT デバイスを作製する。

(2) シミュレーション手法の確立

高耐圧デバイスでは、フィールドプレート (FP) 構造を用いたゲートとし、耐圧を高める

工夫が必須である。また FP は電流コラプスの低減にも有効である。ゲートおよびソース部の FP 構造の最適化をシミュレーションにより行い、最適構造を得る。

(3) パワートランジスタ作製

段階として、1kW 級 (200V, 5A)、3kW 級 (200V, 15A) および 10kW 級 (200V, 50A) とし、本年度では 3kW 級までの試作を予定している。小電力デバイスのスケールアップから予測されるゲート幅は 1, 3, 及び 5kW 級でそれぞれ 10, 30, 及び 100mm である。上記で最適化した FP 構造、楕形のソース・ドレイン電極を用いた HEMT の作製を行い、動作確認する。

(4) ノーマリーオフ型 MIS デバイス作製

ゲート絶縁膜に正電荷を付加した絶縁膜を用い、しきい値を移動させる基礎実験を行う。MIS ダイオードを作製し、容量電圧特性により手法の有効性や電荷量の最適化を行う。

3. 計画の進行状況

現在、電子ビーム真空蒸着器およびシミュレータの立ち上げ、電極デザインを行っている。

4. 今後の計画及び学会論文等投稿・発表状況

研究計画に沿って、小電力から大電力パワーデバイスの作製を進めていく。

論文等投稿・発表状況：なし

高周波パワーインバータ用の低損失配線・電極の研究

電子工学科 上野 和良

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

パワーエレクトロニクス研究センターでは、窒化ガリウム (GaN) を用いた高周波パワーインバータの開発を目指している。高性能な高周波パワーインバータを実現するためには、高周波パワーデバイスの性能を生かすため、高周波特性に優れた低損失配線の開発が重要と考えられる。また、GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT) の性能を向上するためには、寄生抵抗となるオーミック電極の低抵抗化が重要と考えられる。さらに、GaN HEMT と対になってインバータ回路を構成する GaN ダイオードの性能向上が重要と考えられる。

我々の研究室では、大規模集積回路 (LSI) 用の低抵抗配線材料として銅 (Cu) やナノカーボン (NC) の研究を行っている。Cu は、従来、LSI 配線やパワーインバータのワイヤ線として用いられてきたアルミニウム (Al) に比較して、低抵抗で電流密度耐性が高いため、インバータに用いる配線ワイヤの低抵抗化と高信頼化につながることを期待される。また、NC は Cu に代わる低抵抗・高信頼配線材料として期待されており、特に高周波領域でのインピーダンスの改善が期待されている。

そこで本研究では、パワーインバータへの応用を目指して、Cu や NC を用いた低損失配線の開発を研究目的とする。また、GaN デバイスの性能を向上する電極の開発を研究目的とする。

2. 研究計画

本研究では、Cu や NC を用いた低損失ワイヤとして、NC/Cu ハイブリッド構造ワイヤを提案し、低損失ワイヤとしての可能性を検討する。

また、GaN デバイスの電極形成に関して、低コンタクト抵抗を目指した電極構造を検討する。さらに GaN ダイオード用の障壁高さ制御性や耐圧に優れた電極材料・構造の検討を行う。

3. 計画の進行状況

NC/Cu ハイブリッド構造ワイヤに関して、予備検討として、Cu 上に化学的気相堆積 (CVD) 法を用いてグラフェンを成長させ、NC コートの Cu ワイヤを作製した。赤津研究室において、このワイヤを用いたコイルのインピーダンス特性を評価した結果、高周波において抵抗成分が低減される結果が得られた。

また、GaN デバイスの電極形成に関して、真空連続で異なる金属薄膜を積層して、低抵抗化や、障壁高さ制御・耐圧改善を検討するための金属膜スパッタ装置を新たに導入した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後、NC/Cu ワイヤに関して、低抵抗の再現性および原因の解明を行い、さらに低抵抗化の可能性を検討する。また、GaN デバイス用電極では、金属膜スパッタ装置を用いて、種々の電極材料・構造を検討し、低抵抗化などの高性能化を検討する。成果が得られれば、学会、論文投稿を行っていく予定である。

高周波インバータにおける バスバー寄生インダクタンス低減の研究

通信工学科 田中 慎一

1. 序論

近い将来の電気自動車（EV）の本格的普及を見越して、無線電力伝送を用いた非接触充電システムの開発が活発化している。システムの実用化のためには、小型なインバータで kW クラスの電力を高効率で伝送する必要があり、我々はインバータの高周波化（13.56MHz）を目指している。本研究では、インバータの高周波化を阻害する可能性として、インバータにおけるバスバーの寄生インダクタンス（Lbar）に着目し、電磁界解析を用いて Lbar を低減するためのバスバーの最適レイアウト設計に取り組むことを目的としている。

2. 研究計画

上記目的を達成するためには、インバータの Lbar を電磁界解析により抽出する方法が必要がある。そこで、まず過去の比較的低い周波数（kHz オーダー）におけるバスバーの設計手法について文献調査し、動作周波数が向上したときに顕在化し得る課題を抽出する。また、MHz オーダーの高周波における Lbar の抽出方法を検討し、現状のインバータ設計における Lbar を見積もる。同時にインバータ設計グループと連携して、達成すべき Lbar の目標値を明確化し、目標達成のためのバスバーの構成の検討を進めて行く。

3. 計画の進行状況

2013 年度は、文献調査を行い次年度の研究に向けて基礎資料を整理した。また、新たに電磁界解析シミュレータ（Sonnet em）を導入し、基本的なシミュレーションを通じて立ち上げを完了した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

本年度の準備を踏まえて、来年度は実際に電磁界シミュレータを用いて実際にバスバーの解析を進め、解析結果と実験結果を比較することで解析の妥当性を検証していく予定である。検証作業を繰り返しながら、最終的にはバスバーの新しいレイアウト設計の提案に繋げて行きたい。

ワイヤレス電力伝送インバータ および送受信コイルの研究

電気工学科 赤津 観

1. 序論

本研究では全体計画（10kW ワイヤレス電力伝送による走行中 EV 給電）の主幹となる高周波高出力インバータの実現および送受信アンテナの実現を目的とする。現在他研究機関ならびに企業において 50kHz の高周波信号を用いて 3kW の電力伝送がギャップ 50cm 以下の状態で実現されている。しかしながら走行中 EV 給電を想定した場合、伝送距離が長いことが望ましく、かつアンテナの小型化が要求される。このことから本研究では 1m で 10kW のパワーを伝送することを目的に、10kW 13.56MHz のインバータならびに送受信コイルの実現を行う。

2. 研究計画

以下のように小容量インバータの設計から進め、大容量化を目指す。

2013 年度: 10kW 電力伝送のための要件策定、100W 高周波インバータ設計ならびに送受信コイル設計ロジックと解析手法の確立。

2014 年度: 1kW 13.56MHz インバータ実験と送受信コイル設計完了、1kW 送信実験。

2015 年度: 3kW 13.56MHz インバータ設計および実験、別途作成した GaN 素子によるインバータ動作検証。

2016 年度: 10kW インバータ設計および実現。同時に 10kW 回生電力授受実験。

2017 年度: 研究まとめ

3. 計画の進行状況

10kW 電力伝送を実現するためのインバータ素子定格を決定し、GaN 素子作成のための信頼性向上策の検討およびインバータ回路の最大インピーダンス計算など、主にシミュレーションを通して回路スペックを決定してきた。現在までに小型の 1kW GaN 13.56MHz インバータの設計が完了し、そのシミュレーション結果から最大許容寄生素子の大きさを明らかにした。また送受信コイルの一次設計を行い、必要なアンテナ径、コイル太さを導出し、シミュレーションによりその効果を確認した。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

1kW インバータの実験に伴い、インバータ配線パターン最適化（低インダクタンス化）が必要であり、センター員の田中教授と共同で解析、設計を行う。また GaN 素子はセンター員の石川教授、GaN 配線はセンター員の上野教授と共同で開発していく。

3. にて記載した結果は SEATUC シンポジウムにて発表した。インバータの実験結果および設計方法の確立ができ次第、IEEE 主催の国際会議に投稿予定である。各年度に国内は電気学会産業応用部門大会、国外は IEEE 主催の国際会議に投稿し、最終的には電気学会産業応用部門誌ならびに IEEE Transaction on Power Electronics に投稿する。

軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究

電気工学科 下村 昭二

1. 序論

電気自動車の駆動用モータは、ゼロ速度から 1 万数千 rpm (1 分間の回転数) までの広い速度範囲で運転される。その速度領域は、定トルク領域 (低速側) と定出力領域 (高速側) に分けられ、その比は約 1:4 である。駆動用モータの最高効率の実績は約 96% であるが、これは定出力領域における狭い運転領域に限られる。しかしながら、駆動用モータには、広い運転領域全体にわたり高効率が求められており、特に低速領域の軽負荷運転時における高効率化が課題になっている。この課題の克服が本研究の目的である。

2. 研究計画

軽負荷時における効率低下は、出力に対する銅損の割合が大きいことが原因である。これは周知の事実であるが、現在主流のモータトポロジーでは、モータを大型化する以外に解決策はない。そこで我々は、低速大トルク特性を持つバーニアモータ (VM) に着目した。VM は、従来モータより少ない電流で同一のトルクを発生する特徴を有しており、銅損の低減が期待できる。しかしながら、その用途は主に低速アプリケーションであり、最高速度 1 万数千 rpm の高速アプリケーションに適用された事例はない。その理由は、(1) 極数が多いためドライブ周波数が高くなり、鉄損増加の懸念があること、(2) ドライブ周波数が高いために、従来のインバータ制御法をそのまま適用するが困難であること、が挙げられる。

この二つの課題克服がポイントである。

現在はアウターロータ形インホイール VM の開発を進めているが、より適用範囲が広いインナーロータ形の研究も昨年からは開始した。研究計画の概要は下記の通りである。

2013 年度：アウターロータ VM の試作、インナーロータ VM のトポロジー検討

2014 年度：アウターロータ VM の実験評価、新トポロジー VM の鉄損評価*、インバータドライブ方式の検討* (*はコンピュータシミュレーション)

2015 年度：アウターロータ VM の成果発表、インナーロータ VM の試作と基本性能評価、ドライブシステムの構築とドライブ性能および効率評価

2016 年：成果発表

3. 計画の進行状況

進捗状況は下記の通りである。

- ・アウターロータ VM の試作完了
- ・インナーロータ VM トポロジー検討 (ほぼ完了)

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

計画はほぼ予定通り進行しており、今後も上記計画の通り進める。

これまでの成果は、2013 年度は電気学会産業応用部門大会 (2 件)、国際会議 (3 件) で発表。2014 年度は、国際会議 3 件 (うち 2 件はアブストラクト提出済)、国内大会 4 件の発表を予定。アウターロータ VM については、実験評価後、論文誌への投稿を予定している。

複数台電力伝送および系統連系に関する研究

工学部電気電子学群電気工学科 藤田吾郎

1. 序論

ワイヤレス電力伝送の実現にあつては、地上側の諸施設とシステム構成に加えて、系統連系条件などの法的条件の確認、最適なコイルの配置などを検討する必要がある。そこで、地上システム全体の提案を行うことが本研究の目的である。

2. 研究計画

下記の大きな2つのテーマを設定した。

①適切なシステム構成

運用方法，課金方法，回路構成，事業主体などを含めて提案する。

②最適なコイル配置とインバータ数

車両が複数台走行することを想定した際に適切なコイル配置とインバータ数を，回路構成や走行速度，充放電パターンなどをパラメータとして算出する。

また，サブテーマとして，法令調査と，デモ装置の製作を行うこととした。これらを数名の学生の分担テーマとして設定して課題解決に取り組む。

2014年度前期はこれらのテーマの精査を行い，後期は国際会議などのアウトプットスケジュールを勘案して，見直しを予定している。

3. 計画の進行状況

地上システムの構成に関する研究論文の調査，有効な走行距離の試算，数値解析に必要な標準的なモデルの設定を行っている。

また，研究対象のイメージを可視化すべく，

図1のデモンストレーションモデルの製作も進めている。このモデルは図2に示す市販の実験セットをベースとして，コイルの数や配置，走行時の伝送電力の変化などを簡易的に検証するために使用するとともに，研究成果を関連研究者に限らず，広く周知するためのツールとしても利用可能であることが特徴である。

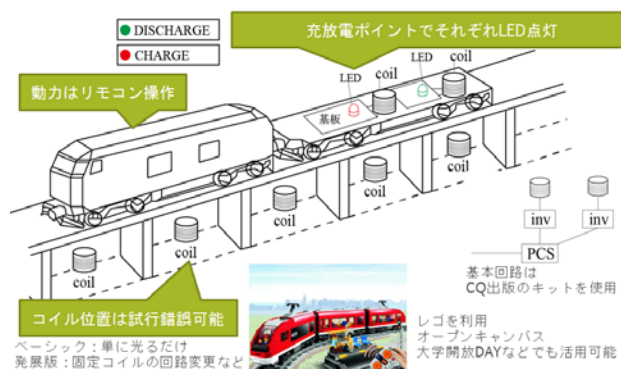


図1 デモンストレーションモデル



図2 ワイヤレス給電実験キット

4. 今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

2014年度は国際会議投稿2件を目標とする。

デバイスから電力システムまで考慮した EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送方式の研究

[研究代表者]

電気工学科 赤津 観

[研究分担者]（以下 芝浦工業大学工学部所属）

電子工学科	石川 博康	インバータ用 GaN パワートランジスタの作製と特性評価
電子工学科	上野 和良	パワーデバイス用電極・配線に関する研究
通信工学科	田中 慎一	2次元電磁界シミュレータによる 高出力・高周波インバータ基板回路設計の検討
電気工学科	赤津 観	ワイヤレス電力伝送インバータおよび送受信コイルの研究
電気工学科	下村 昭二	軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究
電気工学科	藤田 吾郎	走行中非接触給電の検討

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

社会的な省エネ要求，CO₂削減要求から個々の機器の省エネだけでなく，自然エネルギーによる発電，電力輸送，電力貯蔵を含んだ電力ネットワークの形成が必要とされている。特に輸送分野では電気自動車（EV）の普及が省エネ，CO₂排出量削減の鍵となっており，停止時の充電のみならず家庭での電力ネットワーク結合（V2H），ならびに走行中の充電および系統への電力回生についても研究が行われており，EV の普及を妨げているバッテリーエネルギー密度の問題を克服しようとしている。つまり EV が創エネ，省エネ，蓄エネの役割を果たせるようになれば，大きな社会革新が実現される。この電力ネットワークの一部としての EV に必要なキー技術がワイヤレス電力伝送技術であり，すでに東大や埼玉大をはじめとした研究機関が EV への応用を前提として研究を行っている。ワイヤレス電力伝送技術は，1m 程度の距離でも非接触で電力を送れる技術であるが，まだ 1kW 程

度の小電力伝送しか実現できず，EV 走行中の電力授受や，急速充電および電力ネットワークの一部として EV が役割を果たすためには送受信電力が不足している。大電力伝送が困難な理由は，電力の伝送周波数が MHz 帯域と高いために，MHz 帯域での大電力インバータが実現できていないためである。MHz 帯域の大電力インバータの実現には，ワイドバンドギャップ半導体を用いた高速スイッチングデバイスの開発のみならず，インバータ主回路のインピーダンス低減や，分布定数での回路設計，高周波磁気回路設計が必要である。以上の背景を鑑み，本研究では同一大学ではあるが異なる学科に所属する，半導体，材料，通信，電力変換，電気機器，電力系統の研究者を一同に集め，上記 MHz 帯域の大電力（10kW）電力ワイヤレス伝送用インバータを研究開発し，実際に非接触で送信した電力によりモータを駆動，回生電力を系統に連系するまでの複合領域プロジェクトを実施することを目的とする。

ii) 研究のマネージメント計画

本研究では月 1 回程度の全体ミーティングを行い、互いの進捗確認と、専門分野についての相互理解を深め、個別の成果のみならず全体の成果を実現するために相互補完を行う。具体的には研究代表者は研究の進捗とりまとめおよび予算管理、月例ミーティングの開催など各研究者での研究がスムーズに進むようマネージメントを行う。研究代表者を含めた各研究者 6 人は研究プロジェクトの一部となる前述した独立した研究テーマについて責任をもって研究を遂行し、それぞれの研究成果の集合体が本研究の成果となる課題設定とした。また各研究テーマにおいては研究者の研究室の学生が担当し RA (3 名) がとりまとめを行う。またプロジェクトの予算管理や書類業務は本学研究支援課が支援する。

また平成 27 年度より各プロジェクトに参画している学生の発表を合同で行うことにより、参画学生のプロジェクトの理解、複合領域に対応した知識の吸収ができるように進めている。

iii) 年度毎の研究計画

平成 25 年度では回路スペック決定のための条件だしを行う。具体的には 10kW 電力伝送を実現するためのインバータ素子定格を決定し、GaN 素子作成のための信頼性向上策の検討およびインバータ回路の最大インピーダンス計算など、主にシミュレーションを通して回路スペックを決定する。

平成 26 年度では決定した回路スペック実現のための素子設計、回路設計、磁気設計を行い 3kW インバータの試作品を設計、試作する。

平成 27 年度では試作した回路の実験を通して 10kW 用素子設計、回路設計、磁気設計を行う。また、10kW モータによる回生電力向上策の検討および回生電力の系統連系方法の検討を行う。

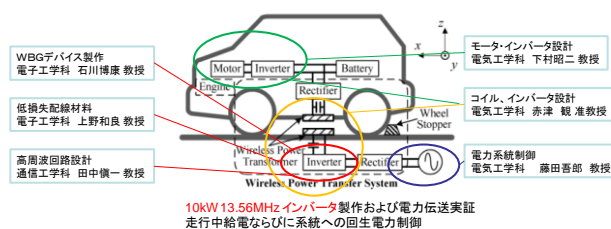


図 1 EV用ワイヤレス電力伝送技術研究分担

2. 研究計画

i) 研究分担とその内容

本研究は図 1 に示した送受信コイルを境界にして①「高周波インバータの研究」と②「電力受信ならびに利用方法の研究」の 2 つに大別して行う。①では高周波インバータに用いるパワー半導体としてワイドバンドギャップ半導体である GaN を用いたパワートランジスタを石川博康教授（電子工学科）が作成する。また、MHz 帯域の高周波回路においてはわずかなインピーダンスが電圧サージを発生しデバイスを破壊するため低抵抗、低誘電率な配線材料と低インピーダンス回路パターン設計が必要となる。低抵抗配線については上野和良教授（電子工学科）が Cu ワイヤや NC（ナノカーボン）を用いた HEMT 用電極ならびにボンディングワイヤの検討を行い、田中慎一教授（通信工学科）が高周波インバータに用いるバスバー寄生インダクタンスを低減可能な配線パターンを設計する。これらの基盤技術を用いた 13.56MHz 10kW インバータを赤津観教授（電気工学科）が回路設計を行い方形はインバータとしての動作を確認する。②では高周波コイルの磁気設計を①と同様に赤津観教授が実施し、受信電力によるモータ駆動、および回生電力発生を特に EV で効率が悪いとされる低負荷領域での効率改善を実現する回転機に着目して下村昭二教授（電気工学科）が行う。さらに受信電力を系統側に戻すための系統連系を藤田吾郎教授（電気工学科）が実施し、ワイヤレス電力伝送で走行する EV が複数台あるときの電力系統マネージメント方法について検討する。

平成 28 年度では 10kW の電力送信実験を行い、10kW のモータを駆動する。また回生電力を発生させ、電力系統への安定な電力回生を行う。

平成 29 年度は主に研究プロジェクトのまとめと各論文発表を行う。

3. 計画の進行状況

全体計画と進行状況を比較して半年程度の遅れがみられるものの順調に計画を進行している。平成 26 年度の特に大きな成果としては

- 学内での GaN デバイス製作が可能になりトランジスタとしての静特性を確認
- MHz 帯インバータの寄生インダクタンス評価手法の構築
- 13.56MHz 1kW インバータにより効率 93%を実現

の 3 点があげられる。

GaN デバイスは現在次世代パワー半導体として注目を浴びているワイドバンドギャップ半導体の一種であり、もともと研究者らが有しているインバータやモータの応用技術に GaN デバイスの作成技術が加わることで、出口（アプリケーション）を意識したデバイス作成が可能となり、研究大学としての大きな力になる。なお、研究タイトルに示したとおり、デバイス製作からアプリケーションまでを一気通貫で行っている研究機関は全世界でもほとんどない。

MHz 帯インバータの寄生インダクタンス評価手法に関しても、高周波化するパワーエレクトロニクスの分野に通信分野の知見を入れることで解決できた一例であり、複合領域分野になっているパワーエレクトロニクス分野に対応できる組織づくりができたと言える。

さらに 13.56MHz インバータの 1kW 出力は学会でも注目を浴びる結果であり、本結果を応用して 3kW(平成 27 年度)、10kW(平成 28 年度)と出力アップしていくことで目標を達成できると思われる。

SIT 総合研究所研究成果報告書（研究代表者用）

対して、13.56MHz 通信用アンテナの設計およびパワーデバイス用電極・配線の研究において若干計画に対して遅れがみられる。アンテナ設計に関しては設計および試作・評価は完了したものの、インピーダンスを 50Ω としていることからアンテナに用いるキャパシタの耐電圧が数 10kV を超える高電圧となり、耐えられるキャパシタが無いことから電力送信の実験が未完の状態である。本問題に対して平成 27 年度においては通信方式を外部キャパシタが不要な方式に変更し、また担当学生に通信工学科の田中教授の学生を追加することで高周波の専門知識を補強して対応する。またパワーデバイス用電極・配線の研究はデバイス作成後に実施する実装部分の研究であり、また実装に関する設備の稼働が遅れていることに原因がある。平成 27 年度にはワイヤーボンディングの設備を他分野の研究者が使用できるように整備して対応する予定である。

そのほか軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究および走行中非接触給電の検討においては順調に進んでいる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

平成 27 年度においては当初の計画どおり、10kW インバータの設計を進めていく。現在のところ 1kW インバータを 3 並列した 3kW インバータの実験を行っており、本成果を 10kW へ応用していく。また本研究は 13.56MHz を用いた長距離(1m)電力伝送により道路内に送電コイルを埋め込まずとも電力伝送が可能な方式の確立を目指しているが、一方で道路内（車下）にコイルを埋め込んで中距離(30cm 程度)の電力伝送が業界では普及しつつある。電力系統を考慮した実験を平成 28 年度に行うことから、中距離電力伝送の実験システムも構築必要であり、平成 27 年度にスイッチング周波数を数 10kHz と落とした 10kW インバータを製作する。

また平成 27 年度には 10kW のモータ駆動ベ

ンチを設備として導入し、設計を進めているEV用モータの評価を学内で実施できるようにする。本設備により、前述した10kWインバータにより送信した電力により10kWモータを駆動することが可能となる（実施は平成28年度）。

アンテナ設計では前述したように外部共振キャパシタを用いないリンクコイル方式の設計、試作を行い、実際に1mの距離で1kW～3kWの電力伝送を実現する。

GaNデバイスは作成した小容量デバイスの並列化（チップレベル）により大容量デバイスの作成、評価を実施する。またグラフェンを用いた低損失配線の一次試作を行い、GaNデバイスの電極やボンディングに用いてモジュールとして動作させる。

以上を遂行したのち平成28年度では10kWの電力送信実験を行い、10kWのモータを駆動する。また回生電力を発生させ、電力系統への安定な電力回生を行う。

平成29年度は主に研究プロジェクトのまとめと各論文発表を行う。

現在までに発表した論文は以下のとおり。

1. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "PCB design for 13.56MHz half-bridge class D inverter for wireless power transfer system", ICPE –ECCE Asia- 2015, May 2015
2. 尾形卓也, ニュエン キエン トゥルン, 赤津観, 田中慎一, "平面回路電磁界シミュレータを用いた3次元構造インバータの解析", 電子情報通信学会大会 2015年3月
3. N. K. Trung他, "Design of 1.5kW 13.56MHz class D resonant inverter for wireless power transfer systems", H26年電気学会産業応用部門大会 1-84
4. Daisuke Fukai, Shoji Shimomura. "Integrated Radial and Dual Axial-flux Variable-reluctance Vernier

SIT 総合研究所研究成果報告書（研究代表者用）

Machine," 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2014 International Conference. IEEE.

5. Yohei Kokubo, Shoji Shimomura. "Design of Dual Rotor - Axial Gap PMVM for Hybrid Electric Vehicle," International Conference of Electrical Machines and systems (ICEMS), 2014.
6. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Analysis And Design Of A 13.56 MHz Resonant Inverter For Wireless Power Transfer Systems", 2013 SEATUC symposium, March, 2014
7. Noor Hidayah Binti Mustafa Kamal and Kan Akatsu, "Antenna Design for 13.56MHz Magnetic Power Transfer Technology", 2013 SEATUC symposium, March, 2014
8. M. Takano, S. Shimomura, "Study of variable reluctance vernier motor for hybrid electric vehicle", Conference record of ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, pp.1341,1347, 3-6 June 2013
9. M. Takano, S. Shimomura, "Improvement of torque density of variable reluctance vernier machine for hybrid electric vehicle," Conference record of Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, pp.1205,1212, 15-19 Sept. 2013
10. R. Ishikawa, K. Sato, S. Shimomura, and R. Nishimura, "Design of In-Wheel Permanent Magnet Vernier Machine to reduce the armature current density", Conference record of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS Busan), 2013, pp. 459-464, 26-29 Oct. 2013
11. 本田幸盛, 竹内俊貴, 藤田吾郎, ピンティジャラルディンヌルアイシャ, ピンオマルアズリーザルザイリー, ニュエンフックカイ, 「走行中非接触給電の検討」, 4-212 pp.357-358, 平成27年電気学会全国大会（2015-3 東京都市大学）
12. Azreezal Zairee Bin Omar, Goro Fujita, Nur Aisyah Binti Jalalludin, Toshiki Takeuchi, Yukimori Honda, 'Concept of Wireless Dynamic Charging For Electric Vehicle and Safety Regulations', 4-213 pp.359-360, 平成27年電気学会全国大会（2015-3 東京都市大学）
13. Nur Aisyah Binti Jalalludin, Goro Fujita, Arwindra Rizqiawan, 'Small-scale Microgrid Experimental Simulation using Grid-connected Inverter Module', 6-213 pp.352-353, 平成27年電気学会全国大会（2015-3 東京都市大学）

以上

高周波インバータの研究

インバータ用 GaN パワートランジスタの作製と特性評価

電子工学科 石川 博康

1. 序論

現在、GaAs 系 FET を凌駕する半導体材料として、窒化ガリウム(GaN)系半導体を用いた大電力・高周波 FET の研究が盛んになっている。GaN 系半導体材料では、バンドギャップが 3.4 eV(GaN)と大きく、破壊電界が 2×10^6 V/cm と大きく、飽和速度が 2.7×10^7 cm/s と比較的高い。さらに、AlGaIn/GaN ヘテロ構造とすることで、二次元電子ガスが界面に形成されるため、マイクロ波帯高出力素子材料として活発な研究・開発が行なわれている。本研究では、これらの利点を活かした EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送のインバータ向けの GaN 系パワートランジスタ作製を行う。

電子親和力の異なる半導体を積層したタイプ I のシングルヘテロ構造では、三角形の井戸型ポテンシャルが電子親和力の大きな層側界面に形成される。電子親和力の小さな層から電子親和力の大きな層に電子が移動することにより極めて薄い電子層がヘテロ界面に閉じ込められる。この薄い電子層は二次元的に閉じ込められていることから二次元電子ガスと呼ばれる。電子親和力の小さな層は、一般的に電子親和力の大きな層よりバンドギャップの大きな半導体である。二次元電子ガスの特徴は、キャリア電子の形態が二次元的になることで、室温付近において有極性フォノン散乱が減少され移動度が向上する点である。室温付近の移動度向上は電子デバイス応用上極めて重要である。また、電子親和力の小さ

な層に n 形ドーピングを施し電子親和力の大きな層をアンドープとすれば（変調ドーブ構造）、電子親和力の小さな層中のドナーから供給された電子がヘテロ界面に移動し、二次元電子ガス濃度は大きくなる。この場合、三角形の井戸型ポテンシャルが電子親和力の小さな半導体層に形成されることから、二次元電子ガス層には不純物が存在しない。よって、二次元電子ガスはイオン化不純物散乱を受けず、低温においてもイオン化不純物散乱が減少され移動度が向上する。この二次元電子ガスを利用したトランジスタが高電子移動度トランジスタ（HEMT）である。HEMT は金属-半導体 FET (MESFET) と同様にソース・ドレイン電極間にゲート電極を配した構造であるが、変調機構が異なる。MESFET では n 形チャンネル層上にショットキー接触のゲート電極が形成されている。ゲート電圧を印加することで、ゲート電極下の空乏層の厚さを変化させることができる。電子が流れる実効的なチャンネル層の厚さは、空乏層の厚さにより変化する。このような機構により MESFET ではゲート電圧によりドレイン電流が変調される。一方、HEMT では n 形もしくは i 形のバンドギャップの大きな層（バリア層）上にゲート電極が形成される。ヘテロ界面には三角形の井戸型ポテンシャルが形成されているが、ポテンシャル底の三角井戸の角度（電界）はゲート電圧を印加すると角度が変化する（電界が変化する）。ヘテロ界面の電界を変化させ

ると二次元電子ガス濃度が変化するため、ゲート電圧の変化により二次元電子ガスの濃度が変化する。このような機構により HEMT ではゲート電圧によりドレイン電流が変調される。HEMT は MESFET のように変調動作時に空乏容量（ゲート容量）の変化がなく、入力容量の線形性に優れている。HEMT 構造では低電界および高電界時の移動度がバルクより高く、電流利得遮断周波数が高くなり、高周波用途に適している。

また、AlGaIn/GaN ヘテロ構造では、他の材料系ヘテロ構造より高いシートキャリア濃度 ($1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) が得られる。GaN 系半導体は、結晶の非対称性に起因して歪むと大きなピエゾ電界が内部に生ずる。数 10 nm の AlGaIn は GaN 上にコヒーレント成長するため、GaN 上に成長した AlGaIn に伸張歪が生じ、AlGaIn 内にピエゾ電界が生ずる。このピエゾ電界は AlGaIn/GaN ヘテロ界面の電界を強める方向で生じるため、極めて高いシートキャリア濃度が得られる。また、AlGaIn 層へのショットキー接触の高い障壁高さによる小さなゲートリークと優れたゲート逆方向特性等を有し、高温・高周波パワー素子として大きな利点がある。高温動作可能な各材料の絶縁破壊電界、飽和電子速度、熱伝導度、移動度及び誘電率などの物性値を用いて計算したジョンソン指数、キー指数、Baliga の高周波指数などの性能指数及び素子動作温度を表 1 に示す。表 1

表 1. 主な半導体の性能指数

性能指数 材料	ジョンソン 指数	キー指数	Baliga の 高周波指数	素子動作 温度 (°C)
Si	1	1	1	<200
GaAs	11	0.45	16	<200
4H-SiC	410	5.1	34	>500
GaN	790	1.8	100	>600

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）では、比較のために Si の性能指数で規格化してある。表 1 に示した性能指数、素子動作温度、基板サイズ及び価格などを考慮すると、GaN 系半導体材料は高温動作のマイクロ波帯高出力素子材料として優れていることが理解できる。

2. 研究計画

本研究ではデバイスシミュレーションによるデバイス設計とデバイス試作を行う。

デバイスシミュレーションの研究計画として、シミュレーションソフトウェアの使用法の習熟、HEMT の静特性シミュレーション方法の確立、大電流動作時の熱特性解析の順で行う。本年度はシミュレーションソフトウェアの使用法の習熟と、HEMT の静特性が正しく得られる条件の探索を行った。シミュレーションソフトウェアとして、シルバコ・ジャパンの 2D デバイスシミュレーター Atlas を使用した。Atlas では GaN 系二元、三元系化合物半導体の物理モデルおよび材料パラメータのライブラリが用意されており、本研究のデバイス特性検討に適している。特に自己発熱効果のシミュレーションも実行することができ、大電流動作の為の構造検討を行うことができる。

デバイス試作の研究計画として、デバイスプロセス装置の立ち上げ、デバイスプロセスの確立、デバイス試作、所望の性能までの最適化の順で行う。本年度は、デバイスプロセス装置の立ち上げからデバイス試作まで行った。デバイスプロセス装置として、本研究予算で購入した電子ビーム真空蒸着器、本学で保有するマスクレス露光装置、本研究室で保有する RF スパッタ装置を使用した。

3. 計画の進行状況

(1) デバイスシミュレーション

シミュレーションは、デバイス構造の指定、各種ステータスや電圧などデバイス解析条件

の指定、解析、グラフ表示という手順で行う。デバイス構造の指定では、厚さ、不純物濃度を含む層構造を決定し、ソース・ドレイン電極（オーミック電極）、ゲート電極（ショットキー電極）を配置する。実際のデバイスの通りにデバイス構造を指定しても、シミュレーション結果は実際のデバイスと同じにはならないことがわかっている。本年度は実際のデバイス特性に近いものが得られる条件を探索するために、種々のシミュレーションを行った。ここでは、代表的なシミュレーション結果について述べる。

シミュレーションに用いた基本的な

AlGaIn/GaN HEMT 構造を図 1 に示す。ゲート長、ゲートソース間距離、及びゲートドレイン間距離は、それぞれ $1\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 、及び $6\ \mu\text{m}$ である。2D シミュレーターであるので奥行き指定はないが、単位長さ $1\ \mu\text{m}$ となっている。よって、ゲート幅も $1\ \mu\text{m}$ と考えれば良いことになる。AlGaIn 層の AlN モル分率は 0.26 である。デバイス表面は SiN パッシベーションを行っている。

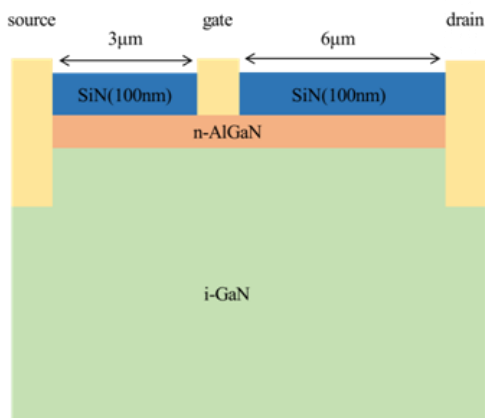


図 1. シミュレーションに用いた AlGaIn/GaN HEMT 構造の一例

まず、下地となる i-GaN 層のドナー濃度の最適化を行った。i-GaN のドナー濃度が高すぎると界面付近の 2DEG 層以外でチャンネルが形成され、少なすぎると 2DEG キャリア密度

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）の減少を招き、ドレインソース間電流が小さくなることが予想される。最適化に当たり、ドレインソース間電圧 (V_{DS}) -ドレインソース間電流 (I_{DS}) の特性、いわゆる静特性により評価を行った。 V_{DS} は 0-20V、ゲートソース間電圧 (V_{GS}) $-7.5\sim+1.5\text{V}$ ($\Delta V_{GS} = +0.5\text{V}$) の範囲で変化させてシミュレーションを行った。ドナー濃度 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ では変調動作が観察されなかった。 $1\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、 $1\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ と下げていくと変調動作が観察されるようになり、 $6\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ より下では電流量が減っていった。これより、i-GaN のドナー濃度を $6\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ と決定した。

次に、AlGaIn のドナー濃度の最適化を行った。AlGaIn のドナー濃度が少なすぎると、2DEG 濃度の減少を引き起こし、多すぎるとチャンネルが AlGaIn 中に形成されるものと予想される。 $1\times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ では変調動作が見られるものの、 V_{GS} が 0 V 時の I_{DS} が 10 μA オーダーと小さく、また V_{DS} が 10 V 以上でピンチオフしないパンチスルー効果のような現象が発生した。実際にパンチスルー効果が起きているかどうかは定かではないが、 V_{GS} に依存しない電流成分が大きく目立った。 $1\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 、 $1\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ と大きくすると、 V_{GS} が 0 V 時の I_{DS} が 0.5 mA オーダーと大きくなった。またパンチスルー状の現象が目立たなくなった。 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ の時に最大の I_{DS} 値 1.2 mA が得られた。 $1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ とするとさらに大きな I_{DS} 値が得られるが、ピンチオフしない現象が現れた。これより、AlGaIn のドナー濃度を $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ と決定した。

さらに、AlGaIn 膜厚の最適化を行った。AlGaIn 膜厚が薄すぎると 2DEG 濃度の減少やゲートリークを招き、厚すぎるとピンチオフ特性および相互コンダクタンス g_m が悪化することが予想される。図 2 に V_{GS} が 0 V 時の I_{DS} 値の AlGaIn 膜厚依存性を示す。5~10 nm では V_{GS} が 0 V 時の I_{DS} が 0.5 mA 以下と小さくなり、20~40 nm では 1.5~2.0 mA と大き

な値が得られた。静特性において、5 nm ではゲートリークが大きく目立ち、40 nm ではピンチオフしない現象が現れた。これより、AlGaIn 膜厚を 20 nm と決定した。

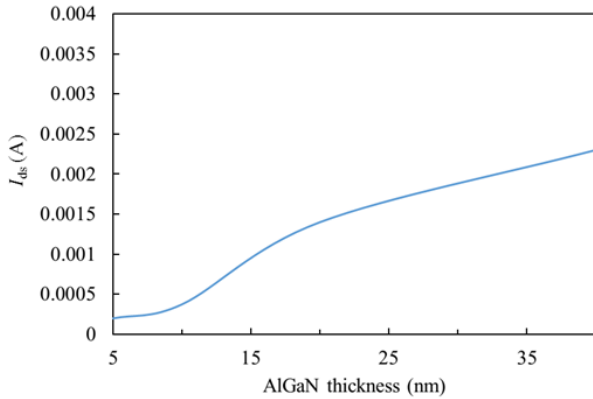


図 2. I_{DS} の AlGaIn 膜厚依存性

以上より、全層最適化した構造の静特性を図 3 に示す。 V_{GS} が 0 V 時の I_{DS} 値をゲート幅 15 μm の電流値に換算すると 18 mA である。実際のゲート幅 15 μm の AlGaIn/GaN HEMT の I_{DS} の最大値 I_{DSmax} は 5-10mA 程度であり、概ね近い値が得られたものと言える

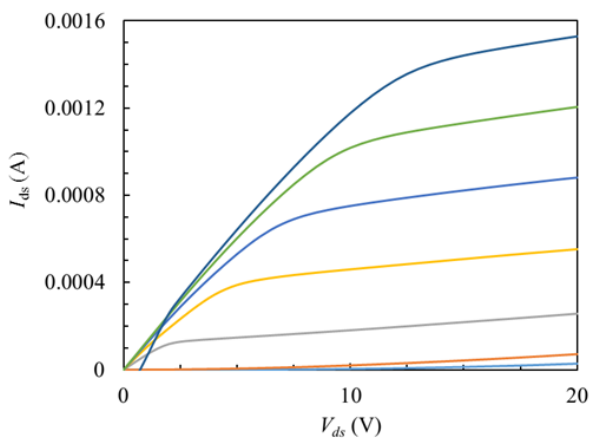


図 3. パラメータを最適化した AlGaIn/GaN HEMT の静特性シミュレーション結果

(2) デバイス試作

本研究予算で購入した電子ビーム真空蒸着器の立ち上げを行った。図 4 に外観写真を示

SIT 総合研究所研究成果報告書 (センター員用) す。本蒸着器は蒸着源として 3 連電子銃 (単発) と二つの抵抗線加熱式ヒーターを備える。共蒸着なしで、最大 5 種類の金属層を真空を破らず連続蒸着することができる。また、水晶振動子を使用した膜厚モニタにより蒸着中の膜厚がリアルタイムで観察できる。電子銃用の蒸着源としては高融点金属が適しており、Au, Ti, Ni, Pd などの蒸着に使用することにした。抵抗線加熱では Al などの低融点金属を使用することにした。導入当初、電子銃による蒸着、抵抗線加熱による蒸着共に、膜厚モニタに蒸着金属が付着せず、正しく膜厚が測定できない問題があったが、内部の構造変更と調整により解決することができた。電子銃により Au, Ti, Ni のテスト蒸着を行い、ほぼモニタと同じ膜厚が得られることを確認した。また、抵抗線加熱式ヒーターにより Al, Au のテスト蒸着を行い、ほぼモニタと同じ膜厚が得られること確認した。しかしながら、膜厚が 1000 Å 程度で限界となってしまいう問題が残った。抵抗線加熱ヒーターと基板間の距離が長く、そもそも基板への到達効率が悪いこともあるが、Au の場合は仕込み量を多くしても蒸着ヒーターの端に移動してしまうこと、Al の場合は W ヒーターと合金化してヒーターが変形したりヒーター裏にあふれ出たってしまう蒸発しない成分が増えることがわかった。今後の課題である。



図 4. 電子ビーム真空蒸着器

次に、マスクレス露光装置を用いたフォトレジストマスクの作製の条件出しを行った。図 5 にマスクレス露光装置の外観写真を示す。



図 5. マスクレス露光装置

マスクレス露光装置は汎用 CAD ソフトにより作成した DXF ファイル（線画情報）を読み込み、フォトレジスト上に直に露光を行うことができる。DXF ファイルで小電力用の HEMT のマスクパターンを作成し、カバーガラス上に形成したフォトレジスト膜を使用せいで露光・現像テストを行った。このパターンで最も小さな寸法を持つのはゲート長であり、最小 $1\ \mu\text{m}$ である。ゲート長 $1\ \mu\text{m}$ のゲートが正しく露光できるかテストを行ったところ、問題なくパターンを作製することができた。フォトレジストパターンを詳細に観察すると、角のエッジがはっきり出ていた。リフトオフプロセスを行う上で非常に好都合である。通常の石英／ガラスマスクを用いたマスクアライナーによる露光では、コンタクト露光であっても光のマスク下への回折現象が避けられず、現像後のフォトレジストの角が丸くなってしまふ。一方、マスクレス露光装置では細く絞った LED 光を走査してフォトレジスト上に直に露光するため回折現象が起こらず、良好なエッジ形状が得られたものと考えている。マスクレス露光装置の欠点として、円パターンが正確に再現できないという問題がある。これは、走査に使用する DMD 素子

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）のミラー形状が正方形であることから、滑らかな丸いパターンを作製できない。小さな円パターンは避ける必要があり、HEMT のパターンは基本矩形で作成することにした。

さらに、RF スパッタ装置によるドライエッチングの条件出しを行った。HEMT では、素子分離の為、素子以外の部分のチャンネル層エッチングにより除去する必要がある。AlGaIn/GaN HEMT の場合、AlGaIn バリア層は概ね数 10nm 程度であることから、最表面から 100 nm 程度エッチングすれば十分である。通常 GaN 系半導体のエッチングには Cl_2 、 BCl_3 を用いた反応性イオンエッチング（RIE）装置を使用する。しかしながら、塩素系ガスを利用するため、排ガス処理や取り扱いには注意が必要となる。そこで、安全な Ar ガスを使用する現有 RF マグネトロンスパッタ装置を使い、GaN のドライエッチングを試みた。スパッタ装置はターゲット材料を放電したスパッタガスのイオンで叩き出し、基板上に薄膜を堆積する。このターゲットの位置に半導体薄膜を置けば、原理的にはエッチングを行うことができる。ターゲットの位置に、カバーガラスでマスクをしたサファイア基板上 GaN 薄膜試料を置き、Ar ガス 5sccm、圧力 10Pa、出力電力を 5～20 W まで変化させて 30 min エッチングテストを行った。5 W では安定に放電させることができなかった。出力を 10, 15, 及び 20 W としたところ、それぞれ 29, 62.3, 及び 166.5 nm エッチングできた。この時のスパッタ装置のターゲット部のセルフバイアス電圧はそれぞれ -0.15, -0.22, 及び -0.26 kV であった。通常、RF スパッタ装置においてプラズマ中の Ar^+ イオンと電子の動き易さの違いからターゲットは電子によりセルフバイアスされ、 Ar^+ イオンの衝突を促す。今回の実験では出力電圧を大きくすることに伴い、セルフバイアスが大きくなり、 Ar^+ イオンによるエッチング作用が強くなったものと理解される。出力に対してリニアではないが、

RF プラズマ装置で GaN のドライエッチングが可能になったことがわかった。実際のデバイスプロセスでは微細加工のためにフォトリソをマスクにする必要があるが、膜に対するエッチング比が十分あるか確認する必要がある。また、プラズマによって変質してしまい、十分なエッチング比が稼げないことや有機溶剤で除去できない可能性もある。そこで、変質による除去不可能にならないようにするため、Ni/フォトリソの二重マスクとすることにした。これであればフォトリソが変質しても Ni を硝酸で溶解することにより Ni ごとフォトリソを除去できる。テストの結果、フォトリソ/GaN のエッチング比が 10 程度と非常に大きいことがわかった。また、フォトリソの変質が大きく、40W 以下では所定のエッチング深さになる前にフォトリソ膜に微細な穴が空いてしまうこともわかった。安全にエッチングを行うためには、複数回に分けて行うと共に、フォトリソのプラズマ耐性を高める必要がある。そこでハードベークにより耐性を高めることを試みた。アセトンで除去できる程度ということで 130°C でハードベークを行うことで、30W であれば 30 分程度耐えられるようになった。この時の GaN のエッチングレートはバラツキがあるが 16-40 nm/30min であり、3 回で 100

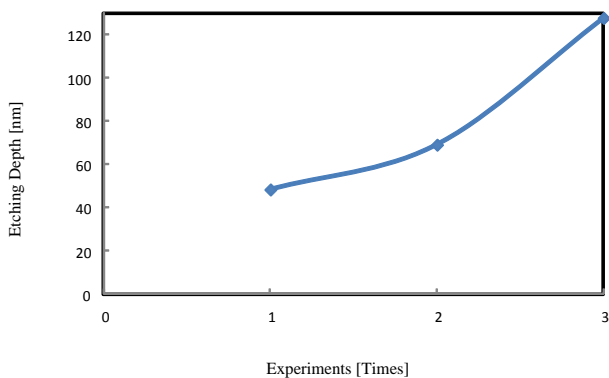


図 6. RF マグネトロンスパッタ装置を用いて GaN 薄膜をプラズマエッチングした時のエッチング深さの回数依存性

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）
nm 程度のエッチングできる。ハードベークを施した Ni+フォトリソで、Ar ガス 5sccm, 圧力 10Pa, 出力 30W で 30 min を 3 回行った時のエッチング深さ図 6 に示す。

以上、デバイスプロセスの要素技術を確認したところで、AlGaIn/GaN HEMT の作製を行った。プロセスフローを図 7 に示す。使用した AlGaIn/GaN HEMT は MOCVD 法により Si(111)基板上に結晶成長させたものである。Si 基板上に多層膜を介し、i-GaN/Sl-GaN 層 2.2 μm, i-AlN 層 1 nm, i-AlGaIn 層 25 nm を順次成長した。まず、Ni 膜 (1000Å) を基板全面に蒸着後、フォトリソで素子分離用エッチングパターンを露光・現像して作製した。その後、硝酸によりエッチングを行い、パターンの穴の部分の Ni を除去、130°C でハードベーク 10min 程度施し、Ni+フォトリソマスクとした。その後、RF マグネトロンスパッタ装置を用い、Ar ガス 5sccm, 圧力 10Pa, 出力 30W の条件で 30 min エッチングを行った。硝酸中で Ni ごとフォトリソを除去した。以上を 3 回繰り返す、エッチング深さが 100nm 以上となるようにした。次に、フォトリソグラフィーにより、オーミック電極 (ドレイン、ソース電極) として Ti/Al (200/1000Å) を蒸着した。蒸着後、電気炉にて窒素雰囲気中 600°C, 5 分でアニールを施し、良好なオー

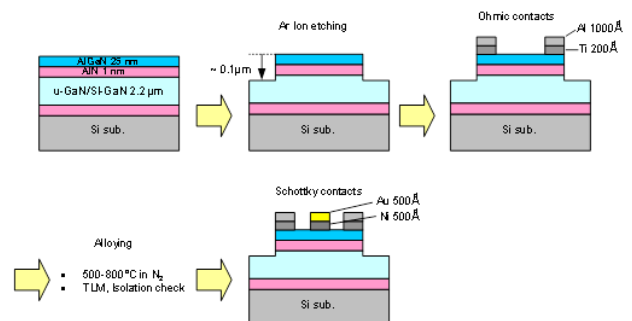


図 7. AlGaIn/GaN HEMT の作製プロセスフロー図

ミック特性を得た。最後に、フォトリソグラフィによりショットキー電極（ゲート電極）として Ni/Au（500/500Å）蒸着した。

HEMT のマスクパターンには様々なゲート長/ゲート幅の HEMT だけでなく、素子分離チェック用のパターン、ショットキーダイオード（SBD）パターンもあり、同時に作製した。

図 8 に素子分離パターンの I - V 測定結果を示す。AlGaIn 層が残る活性層上の電流値は、エッチング面上の電流値より 2 桁以上大きく、アイソレーションを行うことができた。しかしながら、エッチング面上 10 μm のギャップでは 10 μA 以上の電流が流れており、下地の GaN 層の抵抗率が低いことが推測される。

図 9 に同時に作製した SBD の I - V 特性を示す。逆方向電流が大きな値で飽和しており、AlGaIn/GaN 上 SBD の典型的な特性が得られた。図 10 に C - V 特性測定結果から導出したイオン化不純物 (N_d) のデプスプロファイルを示す。ピークが二次元電子ガスに対応しており、深さ 27 nm の位置で $4.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ という高い濃度であった。ピークの深さ位置について、設計構造と良く一致している。

図 11 に作製した AlGaIn/GaN HEMT（ゲート幅 $W_g \times$ ゲート長 $L_g = 600 \times 3 \mu\text{m}$ ）の静特性を示す。良好な変調特性およびピンチオフ特性が得られたが、これまで報告されている AlGaIn/GaN HEMT に比較して電流値が小さい。図 12 に伝達特性を示す。相互コンダクタンスの最大値 $g_{m\text{max}}$ は 1.7 mS/mm であった。典型的なゲート長/ゲート幅が数 μm /数 10 μm の AlGaIn/GaN HEMT の $g_{m\text{max}}$ 値は 200~400 mS/mm 程度である。この値と比較すると、今回得られた $g_{m\text{max}}$ 値は極端に低い。今回、動作したデバイスは広いゲート幅のものであり、ゲート幅数 10 μm のデバイスの測定ができていないが、ゲート幅が 400, 600 μm のデバイスで V_{GS} が 1.0 V 時の I_{DS} 値のゲート幅依存性を調べたところ、ゲート幅 600 μm のデバイ

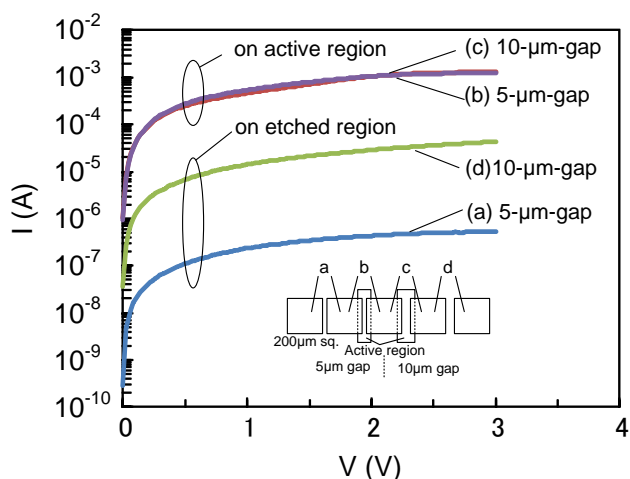


図 8. 素子分離パターンの I - V 特性測定結果

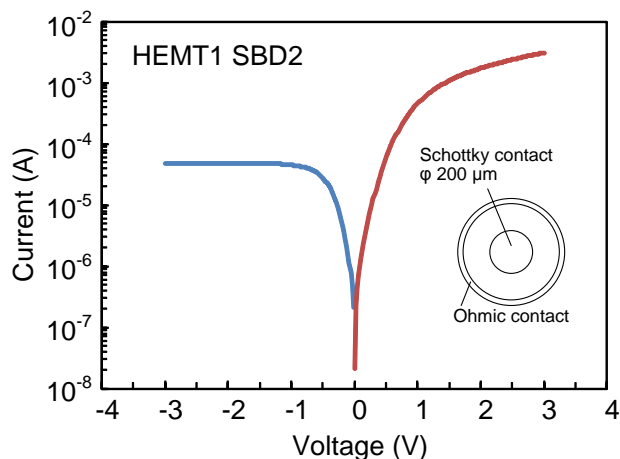


図 9. SBD の I - V 特性測定結果

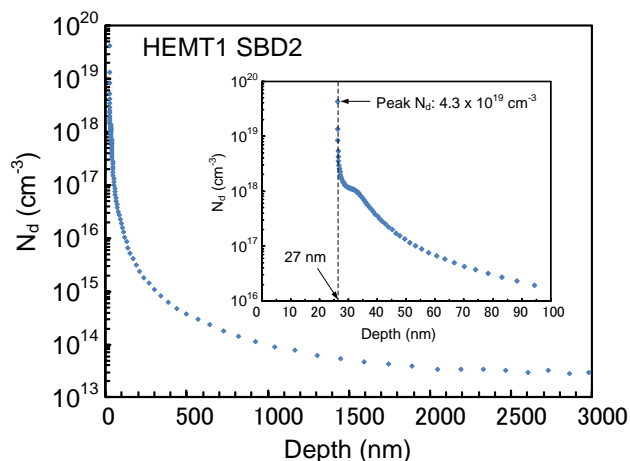


図 10. C - V 特性から計算して求めた N_d のデプスプロファイル

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）
 造では、ノンドーピング AlGaIn 層を用いており、障壁層として作用した可能性がある。対策として、AlGaIn 層へのドーピングや AlGaIn/GaN 側面からの電流注入を行うようなプロセスの工夫が有効である。今後、これらの対策を図りつつ、高性能化と大電流化を行う。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

(1) デバイスシミュレーション

本年度、基本的な静特性を再現できる構造パラメータを得ることができた。今後は大電流化へ向けて、寸法の最適化、フィールドプレート (FP) 構造を用いた耐圧ゲート構造についてシミュレーションを行い、最適なデバイス構造の設計する。さらに熱解析を行い、性能の限界や熱対策の指針を得る。また、今回のデバイス試作での問題点となったゲート幅依存性が観察されない点について再現できないか検討する。

(2) デバイス試作

本年度、デバイスプロセスに必要な装置の立ち上げおよび要素技術開発を行い、小電力の AlGaIn/GaN HEMT を試作、良好なピンチオフ特性を得ることができた。今後は、さらにプロセスの改善を行い、動作デバイスの歩留まりを向上させる。さらに、SiO₂ や SiN で表面パッシベーションを行い、FP を作製する。これらを総合し、大電力デバイスとして 1kW 級 (200V, 5A)、3kW 級 (200V, 15A) および 10kW 級 (200V, 50A) HEMT の試作を行う。

(学会発表) : なし

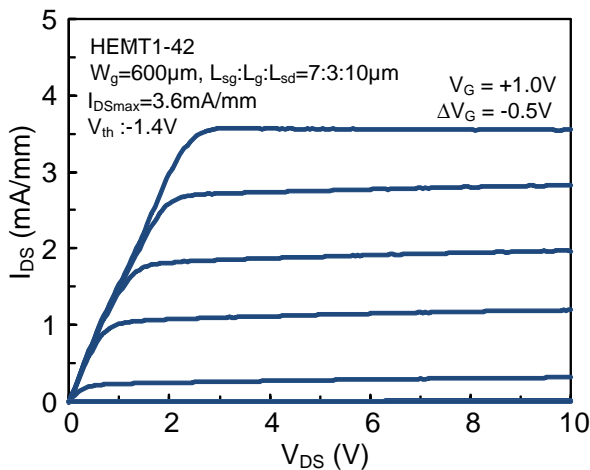


図 11. AlGaIn/GaN HEMT の静特性

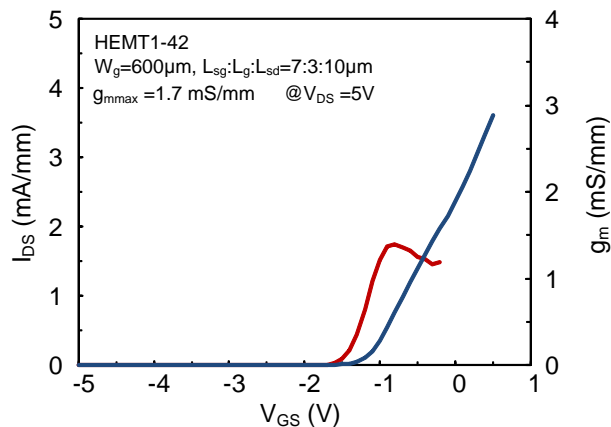


図 12. AlGaIn/GaN HEMT の伝達特性

スの I_{DS} 値のバラツキが大きく、依存性が観察されなかった。ゲート幅は ON 時の動作電流に直接関係しており、通常の明確な依存性が見られる。今回、依存性が観察されなかったのは、ゲート幅に対して I_{DS} が単調に増えないことと関係があるものと考えている。具体的には、良好なピンチオフ特性が得られていることから、デバイスから遠い部分では電流が流れていないものと推測している。ソース及びドレイン電極下には下地 GaN 層へのリークを防ぎ、電極との接触面を増やすことで接触抵抗を低くする目的で AlGaIn 層を残している。一方で、基板に対して垂直方向に 2DEG 層へ電流注入する際、AlGaIn 層は障壁となる。今回使用した AlGaIn/GaN HEMT 構

パワーデバイス用電極・配線に関する研究

電気工学科 上野 和良

1. はじめに

パワーエレクトロニクス研究センターでは、窒化ガリウム (GaN) を用いた高周波インバータの検討を行っており、我々は、インバータに用いる低損失配線の検討を行っている。一方、グラフェンなどのナノカーボン、従来の配線に用いられる銅やアルミニウムに比較して、電流密度耐性が高く、また電気的特性にも優れる可能性が報告されている。

本研究では、GaN デバイス用の低損失インバータ実装方法を検討するとともに、さらなる高性能化につながる技術として、ナノカーボンのパワーデバイス応用について検討している。昨年度までに、NC/Cu 積層構造を形成するプロセスを開発し、赤津研究室と共同で NC/Cu ハイブリッド構造のワイヤで作製したコイルの高周波インピーダンス特性から、配線抵抗を低減できる可能性を示した。

また、一般に電極に用いられる金属の仕事関数は、材料固有の値であり、金属/GaN 接触のショットキーバリアハイト (SBH) は金属に依存する [1] が、グラフェンの場合は、ドーピングによってフェルミレベルが変化するため、SBH を連続的に変化できる可能性がある。このような特徴を持つグラフェンを GaN の接触電極に用いることによって、SBH を連続的に変化させて、オーミック接触の抵抗低減や、システムの要求する耐圧に応じて、オン抵抗低減と耐圧のトレードオフを最適化できる可能性が期待できる。

2. 研究計画

GaN デバイスの低損失実装に関しては、技術動向の調査を行い、構造とプロセス設計を行う計画である。

また、グラフェンなど NC のパワーデバイスへの応用として、NC/Cu ハイブリッド配線と、GaN への NC コンタクトを検討する。

具体的には NC/Cu 構造については、NC/Cu 構造を形成するプロセスを開発し、NC/Cu 配線の作製と電気的特性評価を行う計画である。

また NC/GaN コンタクトについては、GaN への直接グラフェン成長の可能性検証、グラフェンの膜質改善、ショットキーダイオードの作製と電気的特性評価を順次実施する。

3. 計画の進行状況

GaN の低損失実装について、文献や学会等を通じて技術動向を調査した。GaN-HEMT の製品が市場に開始、ワイヤボンディングが用いられている。また、ワイヤボンディングではなく Cu ピンを用いては配線長を短くしてインダクタンスを低減するなどの工夫も報告されている [2]。また高温化に対応できるように、はんだや封入樹脂の材料選択も課題で、ナノ銀ペーストなどが注目されていることがわかった。

NC/Cu 積層構造に関しては、図 1、2 に示すように、Cu ワイヤ上に熱 CVD によりナノカーボン膜を堆積し、赤津研究室と共同で、そのワイヤを用いたインダクタのインピーダンスを測定し、抵抗を低減できる可能性を示した。(図 3) NC/Cu 配線による抵抗低減は、他の研究期間からも報告された [3]。

NC/GaN コンタクトに関しては、エタノールを原料とする常圧熱 CVD 法で、直接 GaN 基板上に成長を行い、図 4 に示すように、600°C 以上の基板温度で、グラファイト構造を含む NC 膜が堆積できることがわかった。また高温になるほど、欠陥構造の割合が増

えた。今後、膜質の改善が課題である。

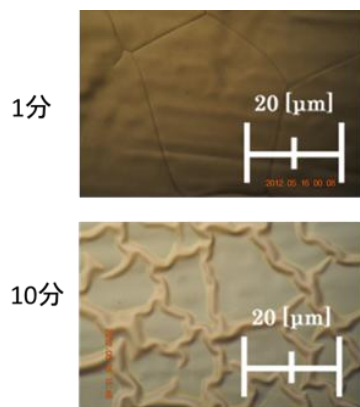


図1. CVD後のCu板表面

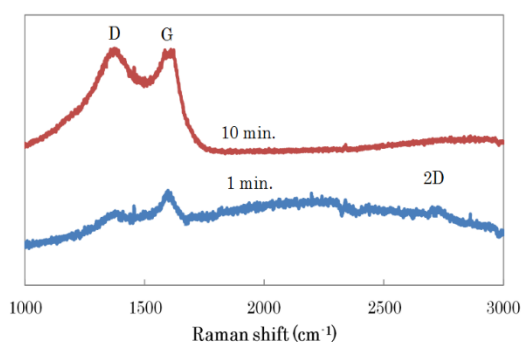


図2. ラマンスペクトル

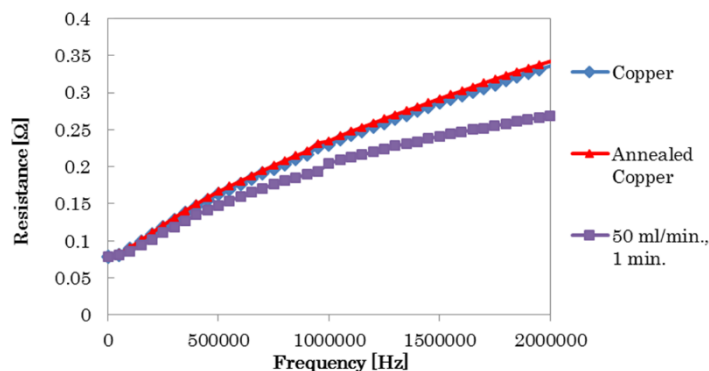


図3. 0.55mm径のワイヤで作製したコイルの抵抗成分（評価：赤津研）.

4. 今後の計画

GaN デバイスの実装については、まず、ワイヤボンディングによるプロセスを立ち上げる予定である。実装のモデルデバイスとして、GaN ショットキーダイオードを試作し、それを基板に実装する計画である。さらに低損失化のためには、Cu ピンを使うなどの先端の実装技術の導入が必要と考えられ、共同研究の可能性を含め試作依頼先を検討する必要がある。

NC/Cu 配線については、ワイヤではなく基板上への配線形成を目標にプロセスを開発し、配線を試作し、電気的特性の評価を行う。

NC/GaN コンタクトに関しては、グラフェン膜質の改善を目指した成長条件の最適化と、ショットキーダイオードを作製し、SBH や逆方向耐圧等の電気的特性の評価、熱的安定性の評価を行う。

また今後、得られた成果を応用物理学会等で発表予定である。

【謝辞】

GaN 基板の提供や研究上の貴重なご助言をいただいた電子工学科の石川博康教授に感謝いたします。また、センター長の赤津観教授はじめ、ご議論いただきました関係各位に感謝いたします。

【参考文献】

- [1] B. P. Downey et al., Solid-State Elec. **86** (2013) 17.
- [2] 松本 壮太他、第 62 回応用物理学会春季学術講演会予稿集(2015)13p-P17-9.
- [3] R. Mehta et. al., Nano Lett. **15** (2015) 2024.

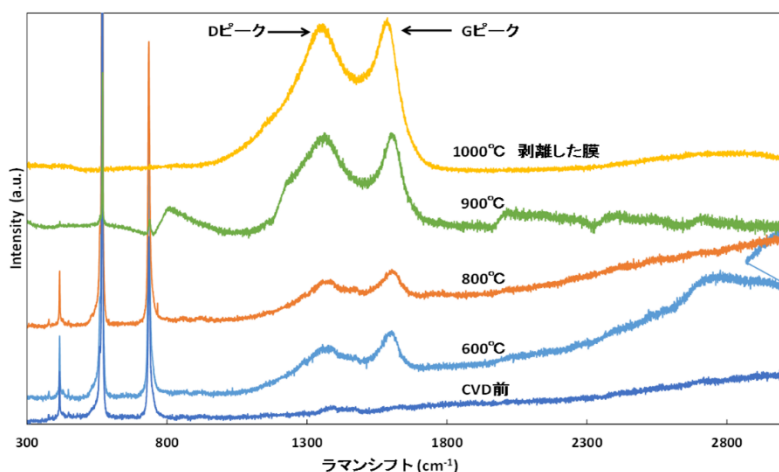


図4. GaN基板上に成長したグラフェンのラマンスペクトル. 45

ワイヤレス電力伝送インバータ および送受信コイルの研究

電気工学科 赤津 観

1. 序論

本研究では全体計画（10kW ワイヤレス電力伝送による走行中 EV 給電）の主幹となる高周波高出力インバータの実現および送受信アンテナの実現を目的とする。現在他研究機関ならびに企業において 50kHz の高周波信号を用いて 3kW の電力伝送がギャップ 50cm 以下の状態で実現されている。しかしながら走行中 EV 給電を想定した場合、必ずしも道路内に送信設備を設置できるとは限らず、例えば高速道路の側壁に送信設備を設置するなどの応用例を考えた場合伝送距離が長いことが望ましく、かつアンテナの小型化が要求される。このことから本研究では 1m で 10kW のパワーを伝送することを目的に、10kW 13.56MHz のインバータならびに送受信コイルの実現を行う。

2. 研究計画

以下のように小容量インバータの設計から進め、大容量化を目指す。

2013 年度: 10kW 電力伝送のための要件策定、100W 高周波インバータ設計ならびに送受信コイル設計ロジックと解析手法の確立。(済)

2014 年度: 1kW 13.56MHz インバータ実験と送受信コイル設計完了、1kW 送信実験。(済)

2015 年度: 3kW 13.56MHz インバータ設計および実験、別途作成した GaN 素子によるインバータ動作検証。

2016 年度: 10kW インバータ設計および実現。

同時に 10kW 回生電力授受実験。

2017 年度: 研究まとめ

3. 計画の進行状況

2015 年度に以下の 2 項目を実施し、顕著な成果を挙げた。

- a) 13.56MHz 1kW インバータの実現により効率 93%での電力発生を確認
- b) 13.56MHz 送信用アンテナの設計、試作を行い伝送効率 83.7%を実機確認

以下詳細を述べる。

a) 13.56MHz 1kW インバータ

10MHz を超える周波数で kW 以上の出力を得ることは、インバータ回路の寄生インダクタンスおよびスイッチングデバイスの寄生容量からなる共振周波数が出力周波数に近くなるため難しいとされており、回路の寄生インダクタンスを 10nH 以下に抑える技術が必要とされていた (図 1)。本研究では、スイッチングデバイス (MOS-FET) の寄生容量を考慮した等価回路 (図 2) から回路のループインダクタンスを導出し、ループインダクタンスを低減するインバータ基盤 (PCB) レイアウト (図 3) の導出と、スイッチングデバイス内寄生インダクタンスをキャンセルできるバイパスボードの設計、設置 (図 4) により

ループインダクタンスを 7nH まで抑えることができた(図 5)。さらには寄生インダクタンスを用いたダンピング回路(図 6)を提案し、電圧サージを吸収することで1kW出力で効率率93%を得ることができた(図 7)。

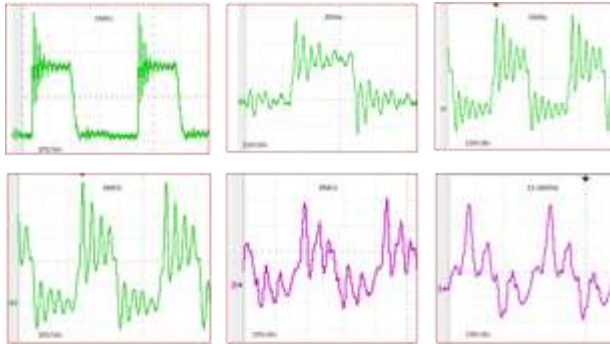


図 1 駆動周波数による出力電圧波形の相違 (左上より右に向かって 1MHz, 3MHz, 5MHz。左下より右に向かって 6MHz, 8MHz, 13.56MHz)。13.56MHz では出力電圧がほとんど確認できないことが分かる。

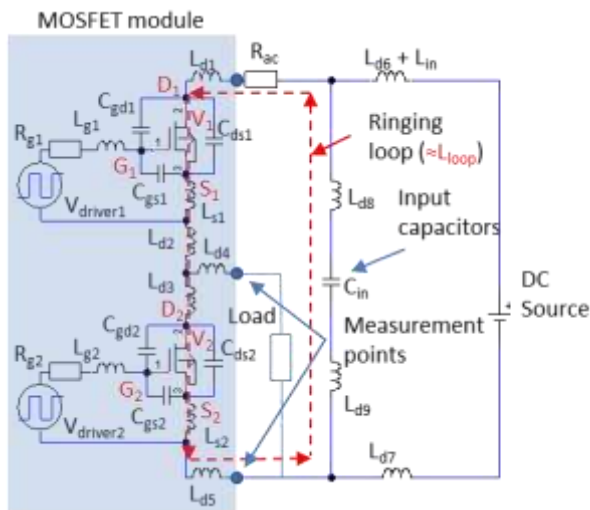


図 2 MOS-FET モジュール内等価回路と回路基板の等価回路。本等価回路をベースにループインダクタンスを測定し低減する。

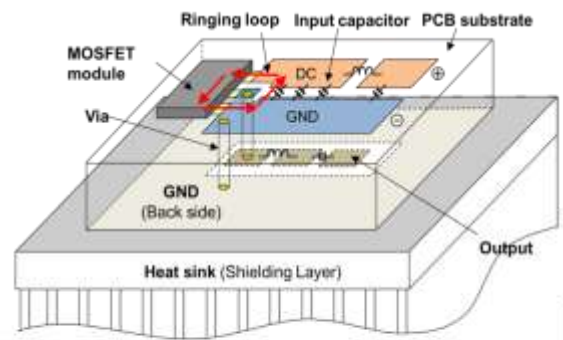


図 3 提案する PCB レイアウト。出力端子を基盤下面に配置し、VIA によるループを遮断することでループインダクタンスを低減。

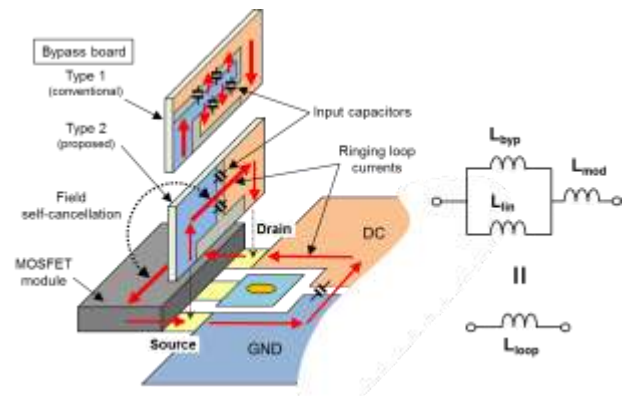


図 4 提案するバイパスボード。バイパスボード内に流れる電流によりデバイスモジュール内の寄生インダクタンスをキャンセルする。

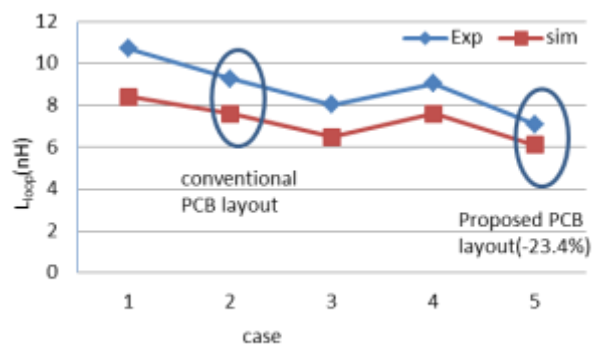


図 5 実験およびシミュレーション結果。PCB レイアウトの変更とバイパスボードにより 23%のループインダクタンス低減が実現できた。

ではアンテナの配線間に存在する寄生容量を考慮した等価回路（図 8）からコイル設計の最適化（図 9）を行い、設計どおりの周波数で共振するアンテナ設計手法を確立した。当該設計手法によりシミュレーション上で伝達効率 98% を達成（図 10）し、実機を作成（図 11）してネットワークアナライザを用いた伝送実験を行った結果、効率 83.7% で 160W を伝送可能なアンテナが実現できた（図 12）。

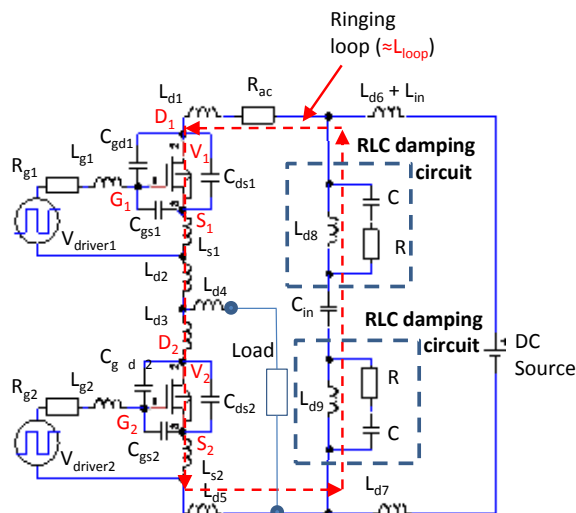


図 6 寄生インダクタンスを用いたダンピング回路。抵抗を並列に挿入することによりダンピング回路による損失を低減できる。

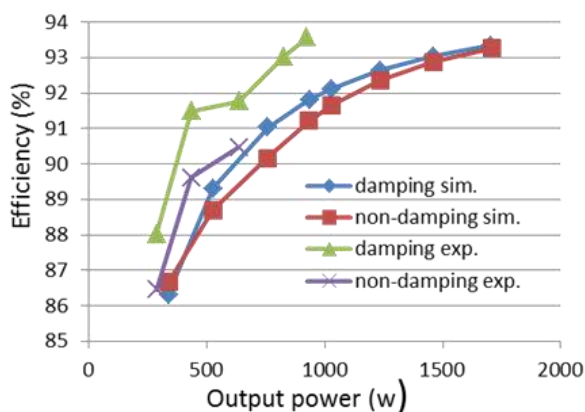


図 7 13.56MHz での出力-効率グラフ。1kW 出力時に効率 93%以上を実現できた。本結果は国際会議 ECCE(IEEE Energy Conversion Congress and Expo) 2015 に採択され発表予定 (2015 年 9 月)。

b) 13.56MHz 送受信コイルの設計

ワイヤレス電力伝送用の送受信コイル設計についてはさまざまな方法が提案されているが、実際に設計、実験を行うと設計どおりの周波数で共振されないことが多い。これはアンテナそのものに存在する寄生容量が設計に考慮されていないからである。そこで本研究

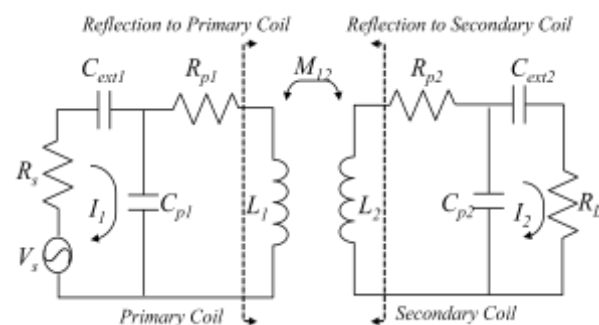


図 8 コイル間の寄生容量 C_{p1} を考慮した等価回路。寄生容量の影響で共振周波数が変化してしまう。

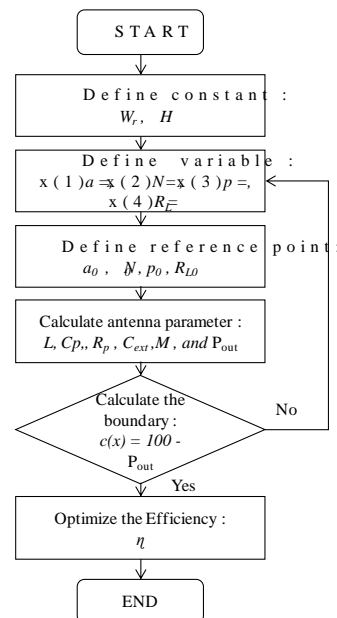


図 9 寄生容量をモデル化し、出力を得られるようにコイル設計を最適化する。繰り返し演算を用いて最適化。

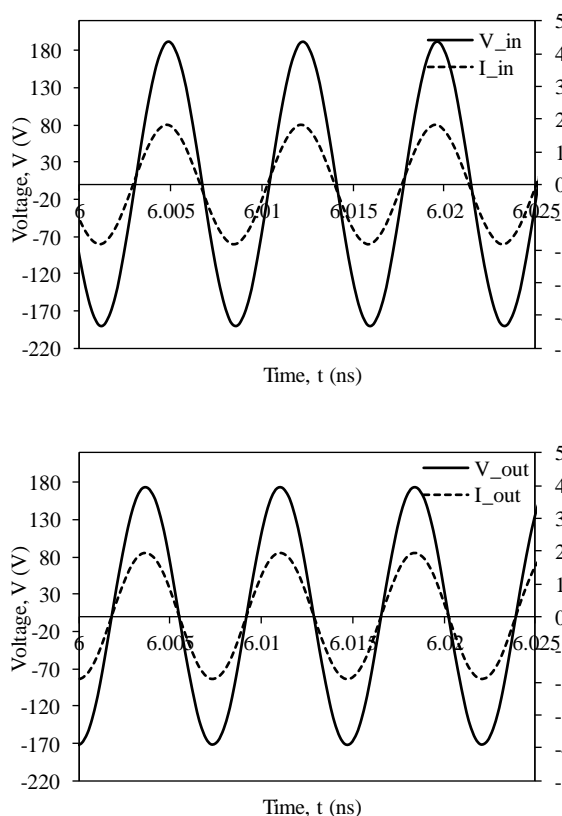


図 10 回路シミュレーション結果（上段：入力電圧，電流波形。下段：出力電圧，電流波形。伝達効率 98.4%で出力 168W を達成）。

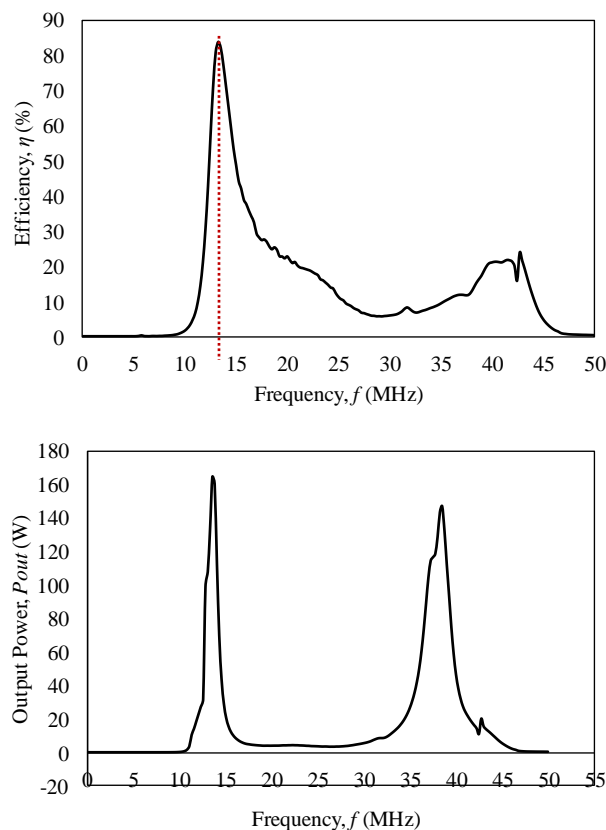


図 12 実験結果（上段：伝送効率，下段：出力電力）。13.56MHz にて効率 83.7%，出力 165W を実現した。

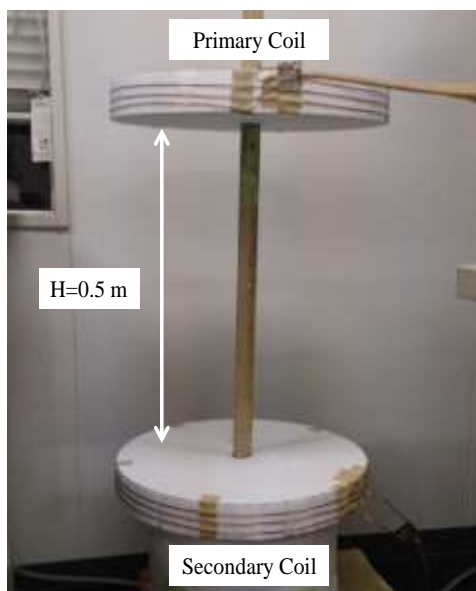


図 11 製作した送受信コイル。送信距離は 50cm とした。

4. 今後の計画及び学会，論文等投稿・発表状況

インバータについては作成した 1kW インバータを並列化した 3kW インバータを作成し効率 90%以上での動作を実現する。3kW が実現できた後に 10kW の出力を実現する（平成 28 年度）。送受信コイルについては現在共振に用いる外部キャパシタの電圧が過大（数 10kV）になるため外部キャパシタの耐電圧を超えてしまう問題がある。本問題に対して外部キャパシタを用いずコイルの寄生容量だけで共振させることができるリンクコイル方式でコイルを再設計する。設計したコイルにより 1kW の電力伝送を実現し（平成 27 年度），3kW，10kW と大容量化していく（平成 28 年度）。

現在までの発表文献は以下のとおり。

1. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "PCB design for 13.56MHz half-bridge class D inverter for wireless power transfer system", ICPE –ECCE Asia- 2015, May 2015
2. 尾形卓也, ニュエン キエン トウルン, 赤津観, 田中慎一, "平面回路電磁界シミュレータを用いた 3次元構造インバータの解析", 電子情報通信学会大会 2015 年 3 月
3. N. K. Trung他, "Design of 1.5kW 13.56MHz class D resonant inverter for wireless power transfer systems", H26年電気学会産業応用部門大会 1-84
4. Nguyen Kien Trung and Kan Akatsu, "Analysis And Design Of A 13.56 MHz Resonant Inverter For Wireless Power Transfer Systems", 2013 SEATUC symposium, March, 2014
5. Noor Hidayah Binti Mustafa Kamal and Kan Akatsu, "Antenna Design for 13.56MHz Magnetic Power Transfer Technology", 2013 SEATUC symposium, March, 2014

以上

2次元電磁界シミュレータによる 高出力・高周波インバータ基板回路設計の検討

通信工学科 田中 慎一

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

非接触給電用 MHz 帯インバータ (INV) の高出力化の為に INV 主回路におけるリングングを抑制する必要がある。対策としては INV の MOSFET 近傍に垂直バイパスボードを設け、寄生インダクタンス (L) の低減を図ることが有効であることを報告してきた。

2. 研究計画

一般に2次元電磁界シミュレータは、波長が回路の厚みより十分に長ければ少ない計算負荷で実質的に3次元構造を解析できる利点があるが、縦構造の解析に向かない。今年度は、垂直バイパスボードを用いる場合のような3次元構造のインバータ PCB 基板を2次元電磁界解析で設計する方法について検討を行った。

3. 計画の進行状況

図1に検討した 13.56MHz 動作のインバータの構成を示す。リングングの原因となるループに沿う寄生Lを見積もるため、垂直バイパスボードによる電流相殺効果を考慮に入れて解析を行った。垂直バイパスボードは水平 Metal として、FET (MOD) の真上に配置し、上下 Metal 層間の air 層厚 $d (=4\text{mm})$ を BB-MOD 間の距離とみなした。MOD はダミー Metal として扱い、バイパスボードと MOD の電流が逆方向になるようポートを設けた。

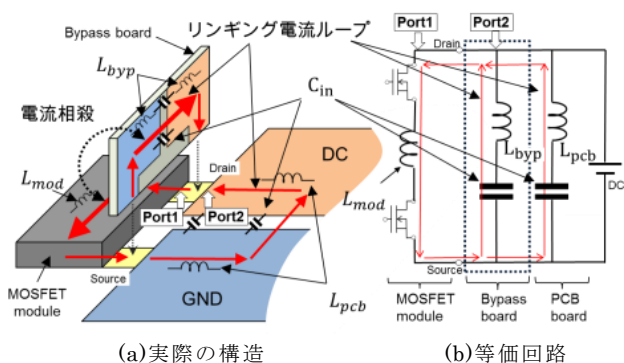


図1 垂直バイパスボード付きインバータ

図2に $L(\omega)$ の解析結果を示す。L の抽出には容量 C_{in} の影響が無視できる高い周波数での収束値を用いた。この方法でバイパスボードが無い場合の解析から各 L 成分を見積もれることを確認することができた。

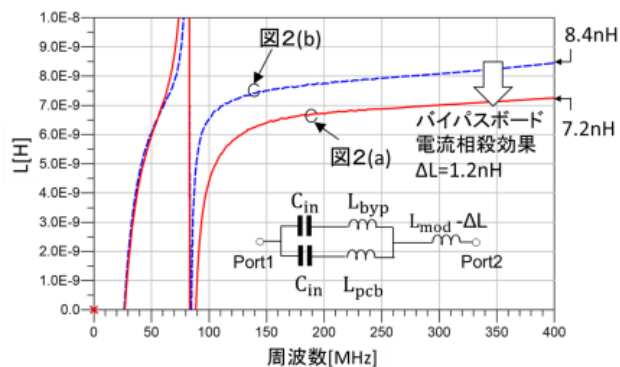


図3 解析結果

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今年度は、関連の発表を国内学会1件行った。来年度は、非接触給電用のアンテナ（コイル）に取り組む予定である。

軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究

工学部電気電子学群電気工学科 教授 下村 昭二
電気電子情報工学専攻修士 2 年生 小久保 陽平

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

電気自動車の駆動用モータは、ゼロ速度から 1 万数千 rpm (1 分間の回転数) までの広い速度範囲で運転される。その速度領域は、定トルク領域 (低速側) と定出力領域 (高速側) に分けられ、その比は約 1:4 である。駆動用モータの最高効率の実績は約 96% であるが、これは定出力領域における狭い運転領域に限られる。しかしながら、駆動用モータには、広い運転領域全体にわたり高効率が求められており、特に低速領域の軽負荷運転時における高効率化が課題になっている。従来モータの低速領域における低効率の主要因は銅損であり、これを低減できれば効率の向上が期待できる。

2. 研究計画

上述の課題を克服するために、低速大トルク特性を持つ永久磁石形バーニアモータ (PMVM) に着目した。このモータは、電流あたりのトルクが大きく、銅損が小さいという特長を持っている。その反面、高速運転域での効率特性は未知である。しかしながら、高速域では鉄損が効率低下の主要因になると考えられるため、次の二つのアプローチを取ることとした。第一は、メカニカルギアを用いないダイレクトドライブ方式を採用し、モータの回転数を低く抑える。これにより、モータ内の磁束密度変化の周波数が過大になることを避けることができ、鉄損の増大を抑制することができるかと推測できる。第二は、高周

波の磁束密度変化に対して鉄損が小さい圧粉 (SMC) コアの採用である。第一のアプローチとして、ホイール内にモータを納めるインホイール PMVM の検討を行っている。第 2 のアプローチとしては、アキシアルフラックス形 PMVM を検討している。

3. 計画の進行状況

3.1 インホイール PMVM

<3.1.1>モータ仕様 図 1 はインホイール PMVM の断面図である。永久磁石はネオジウムボ

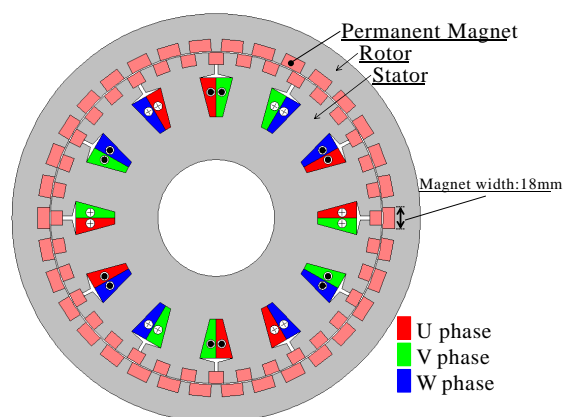


図 1 インホイール PMVM の断面図

表 1 永久磁石の特性

	ネオジウムボンド磁石 ハイデンス -1000	ネオジウム焼結磁石 NMX-S45SH
最大エネルギー積 (BH) _{max} [kJ/m ³]	87~97	326~366
残留磁束密度 <i>B_r</i> [T]	0.72~0.79	1.30~1.37
固有保持力 <i>H_{cj}</i> [kA/m]	950~1050	≥ 1710
電気抵抗率 [μΩ·m]	50	1.3~1.6

ンド磁石を用いた。ネオジムボンド磁石は、主流のネオジム焼結磁石に比べ磁気特性で劣るが、重レアアース材料のジスプロシウムが添加がない永久磁石である。表1にネオジムボンド磁石とネオジム焼結磁石の特性の比較を示す。ネオジムボンド磁石はジスプロシウムを含まないだけでなく、焼結磁石に比べて電気抵抗が30倍以上高いため、磁石内のうず電流発生を抑えジュール熱による永久磁石の温度上昇を抑制することができる。モータの主な仕様は表2に示す通りである。

このモータは外側が回転するアウターロータ形であり、図2に示したようにホイールの内部に組み込まれる。ホイールサイズは16

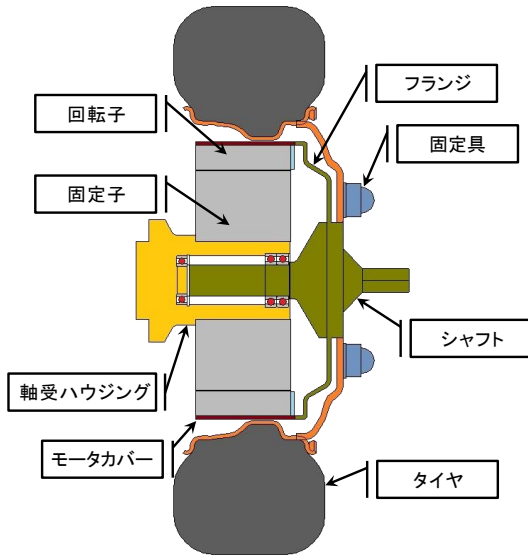


図2 モータを組み込んだホイール断面



図3 ホイールとタイヤ外観

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）インチである。ホイールのその他の寸法を表3に示す。

<3.1.2>シミュレーションによる評価 図4は、有限要素解析を用いて求めた電機子電流の電流密度とトルクの関係である。目標のトルクは600Nmであるが、電流密度9.9A/mm²(実効値)で到達していることがわかる。

図5には効率特性を示す。これもシミュレーション結果である。同図では、速度ートルク

表2 モータの主要仕様

固定子	小スロット数	36
	シャフト直径[mm]	98
	外周直径[mm]	278
回転子	小スロット数	20
	内周直径[mm]	280
	外周直径[mm]	343
電機子巻線	電機子極数	8
	スロット数	24
	巻線方式	集中巻
	導体占有率[%]	45
	一相当たりの巻数	32
	一相当たりの巻線抵抗[Ω]	0.0113
	エア・ギャップ長[mm]	1
	積厚[mm]	120
	電磁鋼板	35H360
	磁石材料	ハイデンス-1000
	最大電圧[Vrms]	300
	目標トルク[Nm]	600
	最大駆動周波数[Hz]	428.4
	最大車速[km/h]	100

表3 タイヤとホイール仕様

タイヤサイズ	205/70R16
偏平率*[%]	70
リム径[mm]	406.4
断面幅[mm]	205
断面高さ[mm]	143.5
タイヤ外径[mm]	693.4
ホイールサイズ	16×5.5J

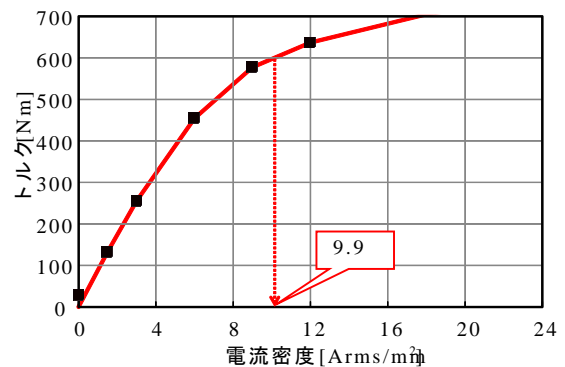
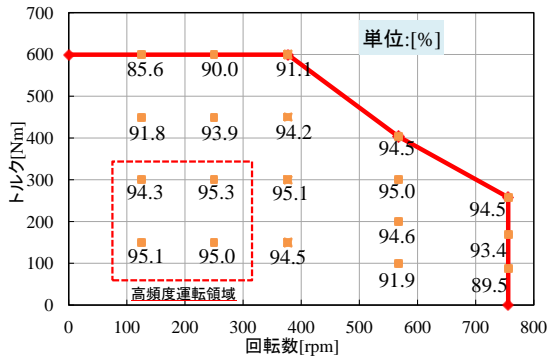
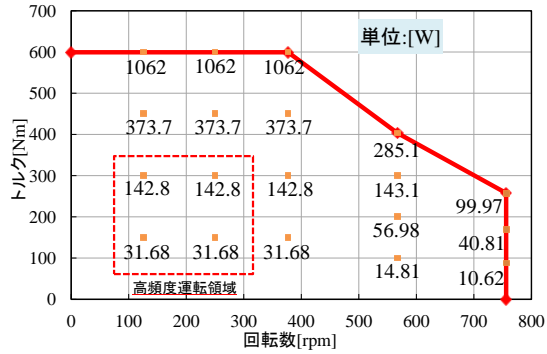


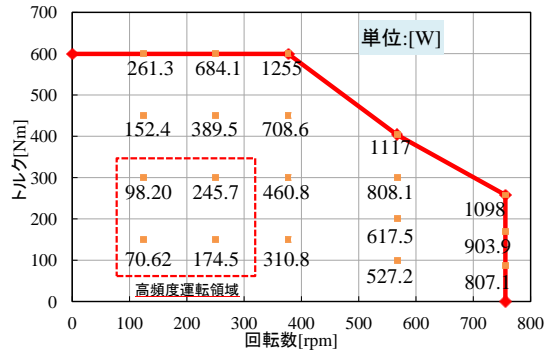
図4 電流密度ートルク特性



(a) 効率

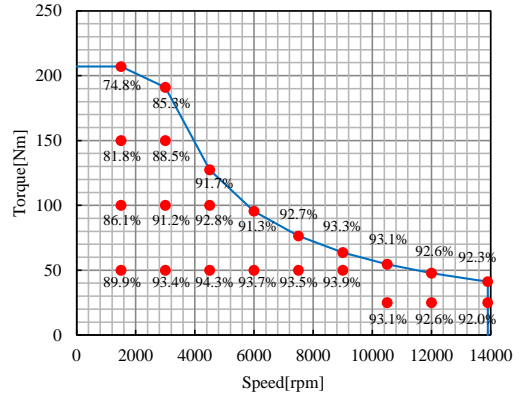


(b) 銅損

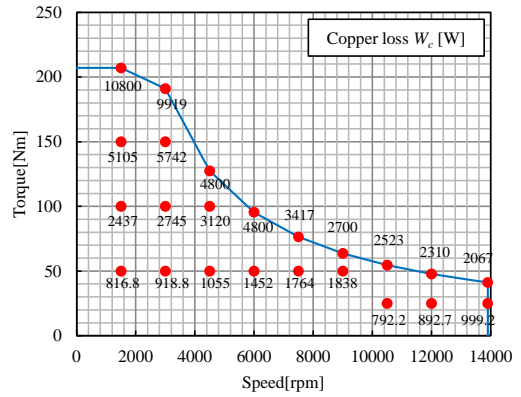


(c) 鉄損

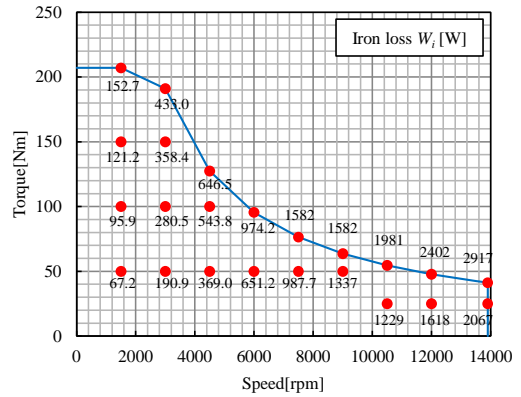
図5 インホイール PMVM の効率特性



(a) 効率



(b) 銅損



(c) 鉄損

図7 比較対象モータの効率特性

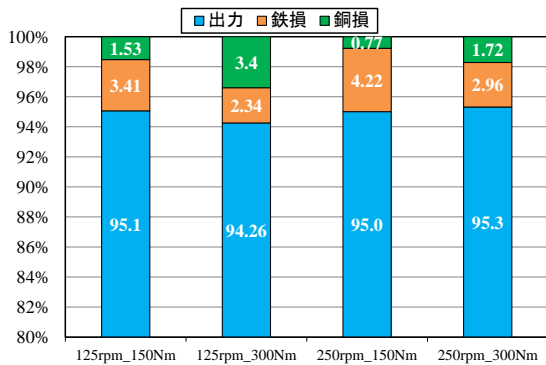


図6 高頻度運転領域における損失分析

ク特性の上に、計算された効率，銅損，鉄損をマッピングして示している。破線で囲った

高頻度運転領域は、市街地での一般走行時に最も頻りに運転される範囲を示している。この運転領域の効率が他の運転領域に比べて高いことがわかる。

図6は、図5の高頻度運転領域にプロットされた4点の運転ポイントにおける損失の内訳を示したものである。同じ回転数では、トルクが大きくなると銅損の割合が増加し、トルクが同じ場合は、回転数が上昇すると鉄損が増加することがわかる。

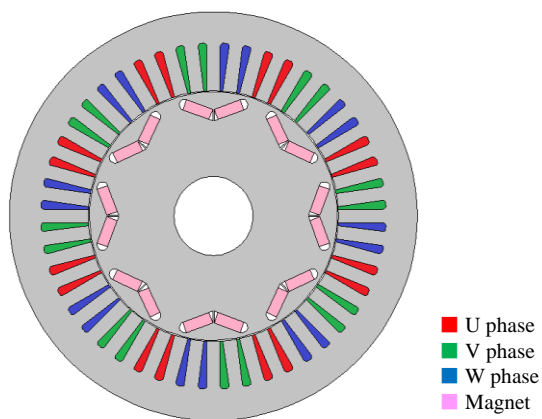
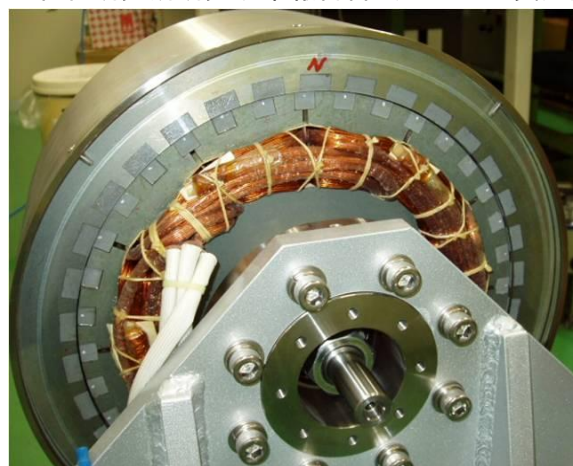


図 8 比較対象モータ

図 7 は比較対象モータの効率特性である。この特性もシミュレーション結果である。モータの断面図を図 8 に示す。比較対象モータは、Oak Ridge National Laboratory の 3rd-generation Prius に関するレポートを基に我々が設計した埋め込み磁石形モータ (IPMSM) である。永久磁石はネオジウム焼結が使用されている。図 5 (a) と図 7 (a) の比較からわかるように、検討のインホイール PMVM は、比較対象モータに比べ運転領域の全体に亘ってより高い効率を持っている。この理由は、インホイール PMVM の銅損が比較対象モータに比べ非常に小さいためであることが図 5 (b) と図 7 (b) の比較からわかる。ただし、インホイール PMVM の出力は、比較対象モータの約 2 分の



(a) モータ単体写真



(b) タイヤ装着写真

図 9 試作機の写真

1 であるため 1 台の車にインホイール PMVM を 2 機搭載する必要がある。車載時の実用的な効率は、インバータ効率を含めた総合的な評価が必要である。

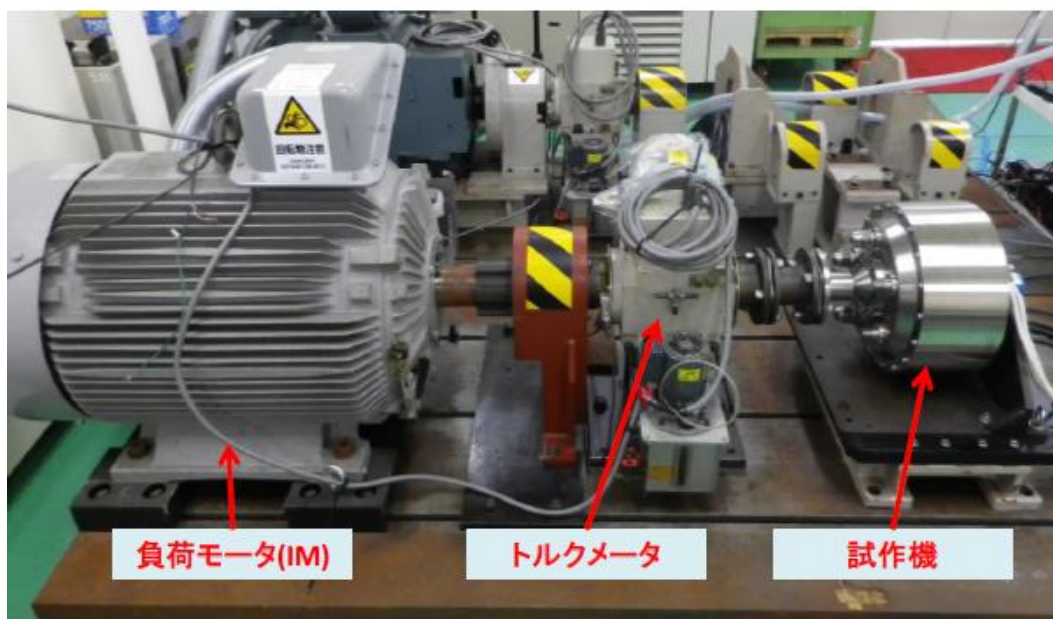
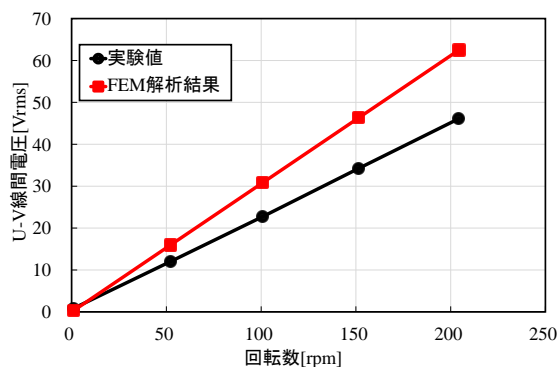
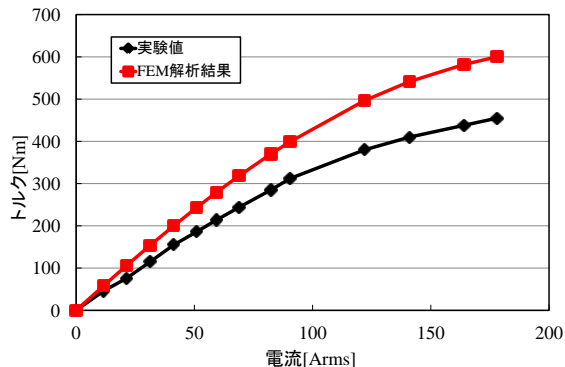


図 10 実験装置外観



(a) 無負荷誘導起電力



(b) 電流－トルク特性

図 11 シミュレーション（FEM）と実測の比較

<3.1.2>試作機の評価 図 9 は試作機の写真，図 10 は実験装置の外観写真である。図 11 は無負荷誘導起電力と電流－トルク特性のシミュレーション結果と試作機実測結果の比較である。誘導起電力およびトルクはともに実測値がシミュレーション値に対して約 25% 小さいという結果となった。この原因については今後究明する予定である。

3.2 アキシャルフラックス形 PMVM

<3.2.1>モータ仕様 図 12 はアキシャルフラックス形 PMVM の外観図である。2 章で述べたように鉄心には SMC コアを用いる。永久磁石はネオジムボンド磁石である。体格は図 13 に示したように前述の比較対象モータに一致するよう設計した。図 4 で示したように，PMVM では電流の増加に伴い鉄心の磁気飽和が顕著となりトルクが飽和する。これを解決する手段として，2 つのアキシャルフラックスロータを持つデュアルロータ構造を採用した。主要な仕様は表 4 の通りである。

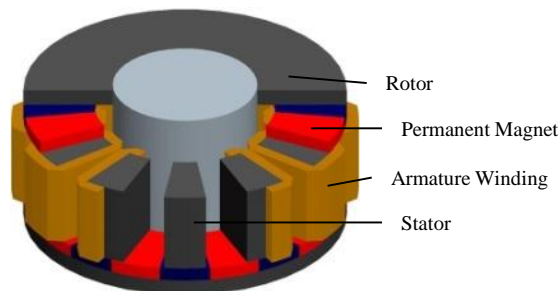


図 12 アキシャルフラックス形 PMVM の外観図

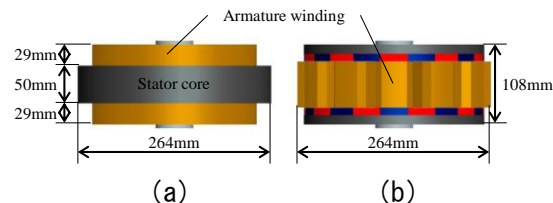


図 13 比較対象モータとの体格比較 ((a) 比較対象モータ, (b)アキシャルフラックス形 PMVM)

Item	Value
Pole number of armature	4
Slots number of armature	12
Number of magnet pair on rotor	10
Air gap [mm]	0.5
Axial length [mm]	108
Outer diameter of stator [mm]	246
Outer diameter of rotor [mm]	246
Arrangement of winding	Concentrated winding
Magnet material	NdFeB Bonded magnet
Maximum power [kW]	60
Maximum torque [Nm]	207

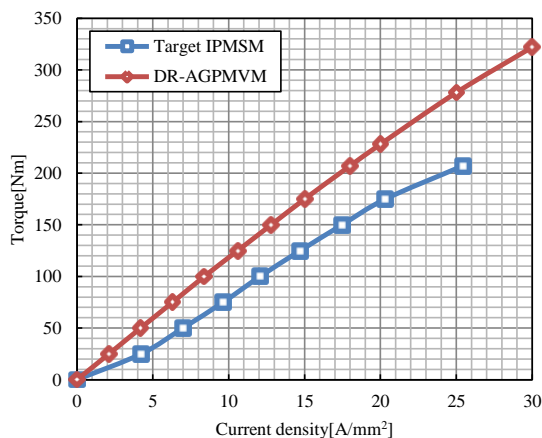
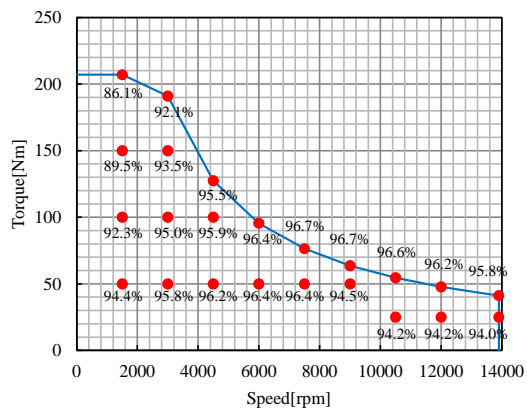
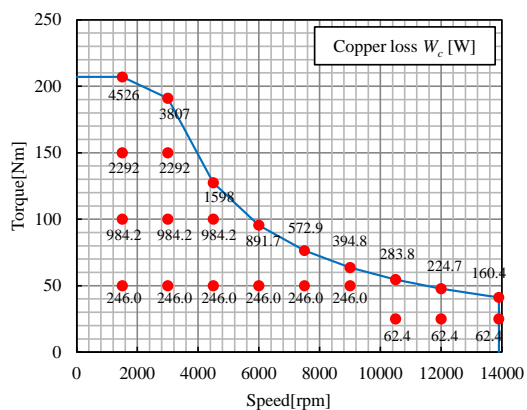


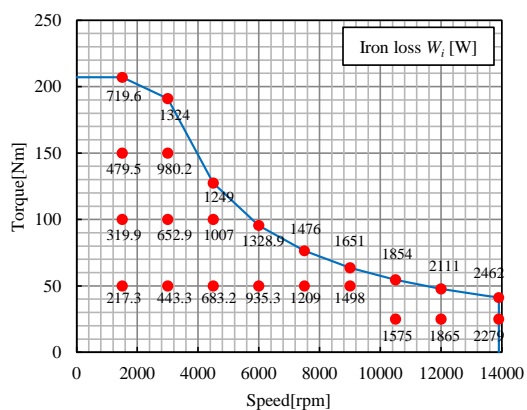
図 14 電流密度－トルク特性の比較 (DR-AGPMVM: アキシャルフラックス形 PMVM, Target IPMSM: 比較対象モータ)



(a) 効率



(b) 銅損

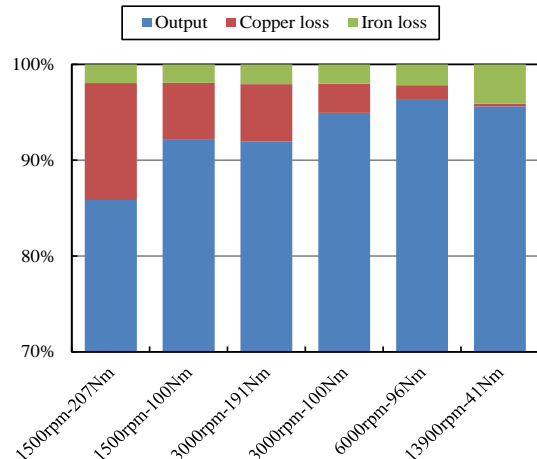


(c) 鉄損

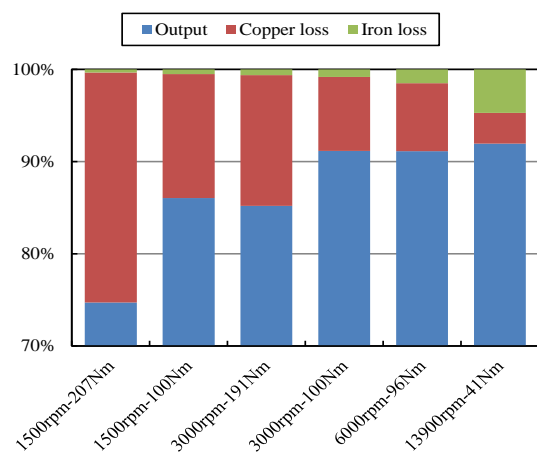
図 15 比較対象モータの効率特性

図 14 にはシミュレーションによって計算された電流密度-トルク特性が示されている。同図には比較のために比較対象モータの特性も示した。これもシミュレーションによる計算値である。アキシャルフラックス形 PMVM は、比較対象モータを超えるトルクを発生し、電流に対してほぼ線形な増加を示していることがわかる。

図 15 は効率特性である。同図 (a) と図 7(a) の比較から、アキシャルフラックス形 PMVM



(a) アキシャルフラックス形 PMVM



(b) 比較対象モータ

図 16 損失分析の比較

も比較対象モータより高い効率を示していることがわかる。また銅損の比較から、より高い効率を持つ理由は銅損が小さいためであることがわかる。図 16 は、6 つの運転ポイントにおける損失分析の比較である。アキシャルフラックス形 PMVM は、比較対象モータに比べ、全損失に占める銅損の割合が小さいことがわかる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後は、インホイール PMVM の問題点究明、アキシャルフラックス形 PMVM の永久磁石減磁対策の検討と試作の準備を行う予定である。

本報告内容は、国際会議 ICEMS2013 と ICEMS2014 で発表済みである。減磁対策の検討結果は、本年度の電気学会産業応用部門大会で発表の予定であり、国際会議での発表も計画している。

走行中非接触給電の検討

工学部電気電子学群電気工学科 教授 藤田 吾郎
 地域環境システム専攻博士1年生 Nguyen Phuc Khai
 電気電子情報工学専攻修士2年生 アズリーザルザイリービンオマル
 電気電子情報工学専攻修士1年生 本田幸盛
 電気工学科4年生 松本哲明

1. 序論

ワイヤレス電力伝送の実現にあつては、地上側の諸施設とシステム構成に加えて、系統連系条件などの法的条件の確認、最適なコイルの配置などを検討する必要がある。そこで、地上システム全体の提案を行うことが本研究の目的である。

2. 研究計画

下記の大きな2つのテーマを設定した。

①適切なシステム構成

運用方法、課金方法、回路構成、事業主体などを含めて提案する。

②最適なコイル配置とインバータ数

車両が複数台走行することを想定した際に適切なコイル配置とインバータ数を、回路構成や走行速度、充放電パターンなどをパラメータとして算出する。

また、サブテーマとして、法令調査と、デモ装置の製作を行うこととした。これらを数名の学生の分担テーマとして設定して課題解決に取り組む。

2014年度前期はこれらのテーマの精査を行い、後期はアウトプットスケジュールを勘案して、見直しを行った。

3. 計画の進行状況

非接触給電を、

- ・デモンストレーション装置の製作
 - ・システム全体の構築・運用及びその安全性
 - ・電気自動車の走行中非接触給電の最適化
- と3に分担し、研究を進める。研究の進行状況を以下に述べる。

3. 1 走行中非接触給電

走行中非接触給電とは、給電装置（コイル）を地面に敷き詰め、走行している電気自動車などに充電をするシステムである。定置式とは違い、位置ずれが大きくなるので磁界共鳴方式に注目し、研究を行

っている。本研究は現段階では航続距離を気にかけ

る運転者を考慮し、高速道路に給電装置を設置することを想定している。既存の高速道路に給電装置を設置する場合は1kmあたり2000万円と予想される。

3. 2 設置場所の検討

充電量すなわち電力量は電力と時間の積であるため、これらを増やすためには時間をなるべく多く取る必要がある。したがって、道路上でも基本的に自動車の速度を落とす場所に給電装置を設置するのが好ましい。今回は、長距離運転者を想定し、高速道路への設置を考えている。そこで、相応しい場所として検討した例を、表1と図1に記載する。

表1 検討例のデータ

場所	岡山県：中国自動車道 北房ICから新見IC
長さ	28km
速度	60km/h
通過時間	約0.467h(28分)
送電電力量 (10kW 想定)	4.67kWh
増加走行距離	41.5km (JC08 モード 電費=8.89km/kWh で算出)



図1 検討例の場所

10kW の伝送が可能なことを想定して計算をすると伝送電力量は 4.67kWh となり、走行距離を 41.5km 伸ばすことが可能である。この結果から、走行中非接触給電システムが導入されれば、給電装置がある区間はバッテリーの電力を使わずに走行出来ることになり、大容量のバッテリーを必要としなくなる。よって、電気自動車の価格を抑えられる。さらに、航続距離を気にかける必要がなくなり、停車して充電する時間を削減出来るため、3つの課題を克服出来る。しかしこの計算は見通しであるため、今後コイルの大きさ・配置などの最適化を行ってから再計算を行う予定であるが、走行中非接触給電システムの導入は価値があるものと言える。



図2 ワイヤレス電力給電実験キット

3. 3 デモンストレーション装置の製作

本研究では、デモンストレーション装置(以下デモ装置)を製作することで、実際の走行中ワイヤレス給電システムの想定を行う。既存の実験キットを用いて実験を行い、走行しながらワイヤレスで電力伝送ができていることを確認できるデモ装置を製作する。

次に磁界共鳴方式を理解することや、デモ装置に利用することを目的に購入したワイヤレス電力給電実験キットについて説明する。

このキットは図2のようになっており、仕様は表2のようになっている。

表2 仕様

給電方式	電磁誘導方式
	磁界共鳴方式
最大送電電力	2W
使用周波数	2MHz
ポリバリコン	15pF~260pF
コイル(共鳴用)の直径	80mm, 55mm
コイルのインダクタンス	1mH~4mH(電磁誘導) 25μH~200μH(磁界共鳴)
ACアダプタ	DC12V, 0.6A

磁界共鳴方式実験の一つを記載する。その実験のイメージを図3に示し、その実験結果を図4に示す。実験方法は、送電コイルの位置を固定し、その中心を水平方向位置の0とし、受電コイルを水平方向に動かし、各地点で測定するものである。数種類の実験を通して、

- ・電磁誘導方式より遥かに送電距離が長い
- ・コイル送電距離は近すぎるより、少し離れている方が水平方向の横ズレに強い
- ・コイルが楕円型の方が水平方向の横ズレに強い

などの磁界共鳴方式の特徴が明らかになった。しかし、この実験キットでは送れる電力が小さく、モータを動かすには電力が足りないため、別のキットを購入することになった。

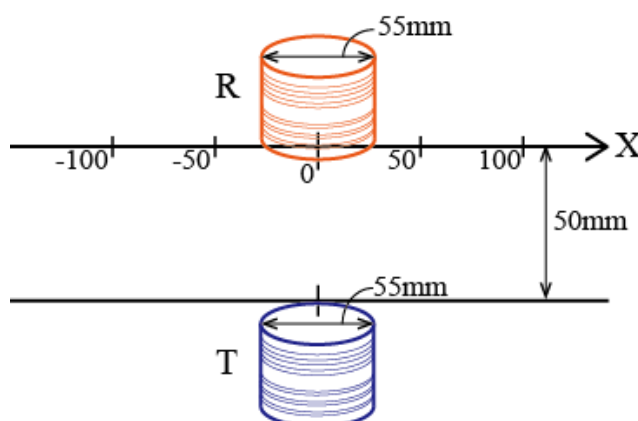


図3 実験のイメージ

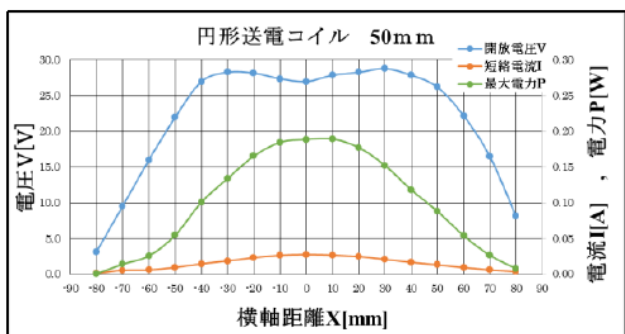


図4 実験結果

次に、新しく CQ 出版社から発売されている「オプシオン扁平コイルセット」を購入して、このキットでは電磁誘導方式のみ実験が行えるため、まず電磁誘導方式の実験を行った。図5に実際の給電キット、表3にその仕様を示す。

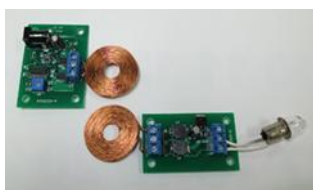


図5 給電キット

表3 キットの仕様

仕様	
給電方式	電磁誘導方式
使用周波数	130kHz~200kHz
付属コイル	12.1μH
付属コンデンサ	0.047μF
負荷用ランプ	7.2V 0.55A
価格	¥8,023(税込)

このキットの受電回路には、出力を5Vに調節する端子と、調節をしないUNREG端子がある。それぞれの端子での出力を測定した。本稿では、付属していた力率改善のための0.047μFのコンデンサを、直列接続した場合と並列接続した場合の実験結果を表4にまとめて示す。

表4 0.047μFのコンデンサ接続時の実験結果

0.047μF	端子	電圧 [V]	電流 [A]	電力 [W]
直列共振	5V	4.83	0.462	2.23
	UNREG	7.38	0.569	4.20
並列共振	5V	4.90	0.465	2.28
	UNREG	7.30	0.560	4.09

0.047μFのコンデンサを接続した際の送受電コイル間の距離は、ほぼ0で実験を行った。少しでも離れると電圧・電流の値が減少した。コンデンサの容量を大きくして実験を行ったところ、1cmほど送電距離が伸びることが分かった。そして、今回の実験

により、UNREG端子の場合は電力が大きく、モータを動かせることがわかったのでこのキットをデモ機に使用する。

デモ機の車両にはLEGO製の電車を使用していて、乾電池4本でモータが駆動しているのだが、乾電池では駆動時間が長すぎるため、動力源を乾電池からEDLCに変更し実験を行った。実験回路を図6に、測定結果を表5に示す。電気二重層キャパシタ(EDLC)は容量10F・耐圧2.7Vで、これを4つ直列接続し、容量2.5F・耐圧10.8Vで実験を行う。5Vと7Vで充電を行ったがどちらでも十分にデモ装置を駆動できることがわかった。今後は、走行中に充電することで駆動時間を延長できるようにデモ機の製作を進めていく。

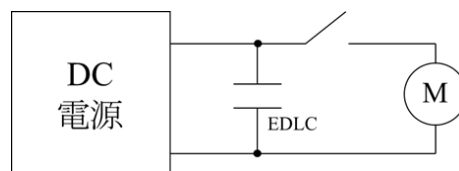


図6 実験回路(受電回路側)

表5 実験結果

EDLCを用いた走行試験	
充電電圧 [V]	駆動時間 [s]
5	43
7	60

図7には送電側のスイッチング回路を示す。LabVIEWというシステム開発ソフトウェアを用いて、送電コイルのスイッチング制御を行う。フォトリフレクタで車両の位置を検知し、リレースイッチをオンにすることで、走行中の車両の近辺のコイルに電流が流れるよう制御する。

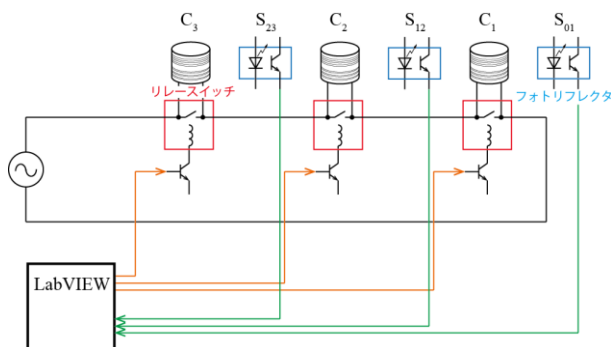


図7 スwitchング回路

以上、走行中非接触給電の「コイルの設置場所の検討、デモ装置の製作」の研究を行ったことにより、走行中非接触給電システムが実用化できれば、電気自動車の普及拡大につながると考えられることがわかった。

今後は、デモンストレーション装置を改造して、LabVIEW を用いて制御や伝送電力の見える化を行い、インフラを想定できるものにする。

3. 4. 先行研究および関連技術などの調査

すでに実現されるワイヤレス充電システムの技術のみならず研究・開発中のシステムの論文の調査を行った。非接触充電のメカニズムについての理解を深めるとともに、本研究の独創性を示す材料として整理した。

3. 4. 1 電気自動車用ワイヤレス充電技術の現状・現在の研究開発の検討

①On-Line Electric Vehicle (OLEV) [4]

韓国科学技術院（KAIST：Korea Advanced Institute of Science and Technology）のバス応用走行中ワイヤレス充電についての論文調査を行った。現在、グミ駅と東区（ドン区）の往復 24[km]のルートで Shaped Magnetic Field in Resonance (SMFIR)技術により電力を 20 [cm]のエアギャップで供給され最高出力電力 52[kW]、効率 74% を得たことができた。バッテリーが常に充電されることにより、小型化・軽量化が可能となる。

大事な特徴としては、バスの走行パターン（始動、停止）が事前に決められており、そして走行速度も比較的到低いことから各トランスミッタ上を通過する時間を延長でき、結果的に給電量も増やせることである。これらの条件を加えて、最適化が簡単になる。以下の図 8 は OLEV のトランスミッタの埋め込む作業の写真である。



図 8 KAIST OLEV プロジェクト[5]
（道路に埋め込む作業）

②Qualcomm HALO WEVC [6]

定置型ワイヤレス充電の開発を盛んに行われるアメリカの会社であり、HALO という製品化予定の 1 次側（給電側）のベースパッドの安全機能について検討した。Foreign Object Detection（異物検出機能）や Live Object Detection（生体検出機能）という機能があることによりワイヤレス充電の安全性が高まる。

異物検出機能により、金属製の物体がベースパッド上に検出されると発熱作用の可能性があるため自動的に給電停止モードに切り替えられるというメカニズムである。Qualcomm 社の将来計画ではこれらのベースパッドを道路に埋め込みそしてダイナミック（走行中）充電やセミダイナミック充電を実現する予定である。以下の図 9 は Halo の異物検出機能を示す。



図 9 HALO Foreign Object Detection [7]
（異物検出機能）

このようにすでに実現されたシステムや研究・開発中のシステムなどを参考にし、本研究のシステムをどのようにデザインすればよいか、そして効率向上の技術をどのように適用すればよいか、また実現に向けた考えられる課題などを知ることができる。

3. 4. 2 動作周波数に基づく国際専門組織の電磁界暴露制限の規制・基準による人体への暴露の調査について

①放射制限（電磁界暴露）[8][9]

電力を電磁界により送電することにより人体への物理的悪影響や周辺物体への影響について心配が高まる。特に広いエアギャップの間における給電側からの漏れ磁束の放射である。給電側の放射量を人体への影響をなくす、あるいは最小限にするため

の安全範囲に抑えるために、国際的ガイドラインが決定されそれに従うことが義務付けられる。本研究で、二つの主な組織のガイドラインを取り入れた。

国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) とアイ・トリプル・イー (IEEE : Institute of Electrical Engineers) の二つのガイドラインを参考し、現在各国の技術・研究が人体への電磁界暴露制限が満たしているかどうか検討する。そして本研究の仕様における安全面につながる。

ICNIRP のガイドラインにおいては、Basic restrictions (基本的制限値) と Reference Level (基準レベル値) の二つの限界値が存在することを分かった。また、それぞれの限界地には職業的暴露 (Occupational exposure) と公衆暴露 (General public exposure) の参考レベルがある。これらの限界値は動作周波数により決められており、例えば 20[kHz] と 13.56[MHz] でのワイヤレス充電の電磁界放射限界値が異なるという。ICNIRP は「ICNIRP の限界値以下の暴露した人たちにガンなども含めた健康への悪影響が及び得るといった実質的証拠はない」と述べている。

② 電磁界 [10]

低周波数帯域 (1Hz~100kHz) の範囲での人体暴露の場合は、神経細胞や心筋・呼吸筋などの筋を刺激する刺激作用が起こり得るのに対し、高周波帯域 (1MHz~100GHz) の場合は、人体組織の発熱で起こる熱作用が発される可能性があるという。これにより、ICNIRP と IEEE のガイドラインでは大きく分けると低周波数向けのガイドラインと高周波数向けのガイドラインがある。

本研究では、比較的高周波数である ISM 周波数帯域の 13.56MHz を使用される予定であるため主に発熱作用に関する人体暴露の制限値についてのガイドラインを参考にした。このような高周波数の場合、人体が電波にさらされることによって単位質量に単位時間に吸収されるエネルギー量である比吸収率、Specific Absorption Rate (SAR) で制限値が適用される。ICNIRP のガイドラインにより 10MHz から 10GHz の範囲での SAR 値を以下の表 6 に示す。

表 6 公衆暴露の SAR リミット値 (10MHz~10GHz)

人体部位	SAR リミット値 [W/kg]
体全体	0.08
頭部と胴体	2
肢 (手足)	4

また、この SAR リミット値は各国により異なる。例としては、各国の頭部と胴体のリミット値を表 7 に示す。

表 7 地域による SAR リミット値の基準[11]

地域	頭部と胴体の SAR リミット値 [W/kg]
ヨーロッパ	2.0
日本	2.0
アメリカ	1.6
オーストラリア	1.6
カナダ	1.6
韓国	2.0

③ 漏れ磁束のシールド方法 [12]

上記で述べたリミット値を満たすには漏れ磁束の遮蔽方法の検討が必要となる。基本的には二つの遮蔽方法があり、アクティブシールドとパッシブシールドという。

アクティブシールドでは同じ周波数、逆位相の電流線を漏れ磁束の最大境界領域に設置することにより意図的に逆相の磁束を発生させることで過剰の磁束をキャンセルさせる。そしてパッシブシールドとは遮蔽物体を設置し物理的に漏れ磁束を遮断するという。

3.4.3 電気自動車の走行中非接触給電の最適化

走行中非接触給電に適した送電コイル・受電コイルとコイルの配置の最適化の検討について、以下の3つに分けて説明する。

- ・走行中非接触給電の文献調査報告
- ・送電コイルによる送電電力の計算例
- ・今後の研究計画

① 近年の非接触給電自動車のプロジェクト

プラグイン式の電気自動車は低排気や高効率を目指し急成長してきた。しかし、大容量の電力貯蔵や長い充電時間の改善の進歩には限界がある。そこでプラグイン式の電気自動車の課題を克服する新しい構想として、走行中に路面などから電力供給をする走行中非接触給電システムが考案された。表 8 に走行中非接触給電の例を示す[13]。

表 8 走行中非接触誘電の例の比較

	University of Auckland	KAIST	ORNL
出力	2~5kW	~60kW	2.5kW

効率	85%	80%	-
最低地上高	100~300mm	100~200mm	~350mm
許容横ブレ	40~100mm	100~200mm	~250mm
ICNIRP	満たす	満たす	-
大きさと重さ	普通	普通	小さい

表 8 を見ると、Korean Advanced Institute of Science and Technology(KAIST)が最も出力が大きいのがわかる。加えて、これらの研究によると「インバータ・送電コイル・バッテリー・受電コイル」の4つが非接触給電の主な構成要素であると言える[14]。60Hz から 20kHz に周波数を変えられるインバータを用い、電流は 200A に上昇させることで 60kW の電力を伝送している。図 10 に KAIST プロジェクトのイメージを示し、図 11 に全体のブロック図を示す。図 12 には使用している送電コイルを示す。

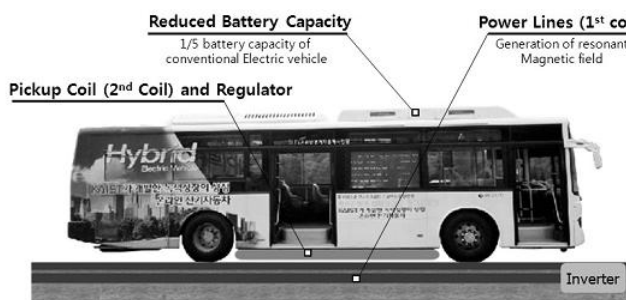


図 10 KAIST プロジェクトのイメージ

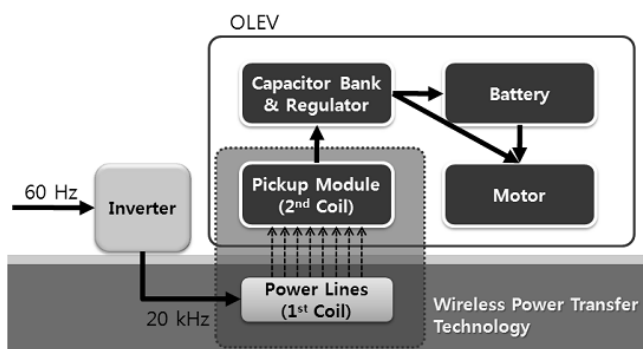


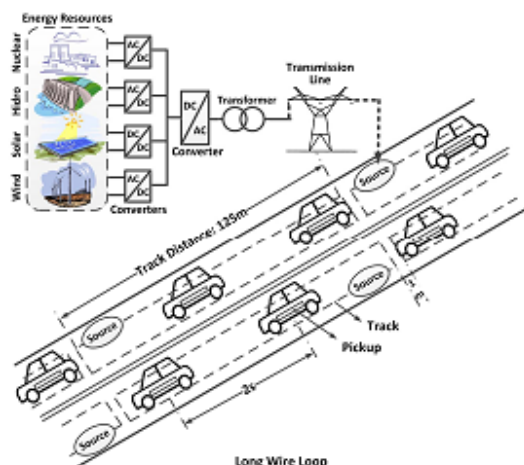
図 11 ブロック図



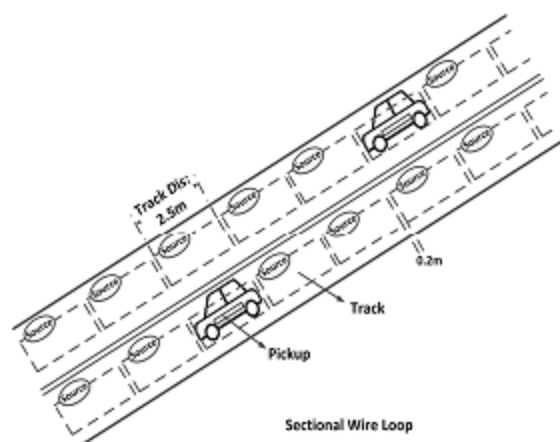
図 12 送電コイル

図 12 を見ると KAIST プロジェクトの送電コイルは長い楕円の形になっているが、M.Yilmaz 氏の測量により、楕円を用いると効率が低下することが明らかになっている[15]。そこで、20kHz で電力伝送するために、3つの誘導結合型の送電コイルを比較し検討する。その3つのコイル図 13 に示すような、「長い楕円形、楕円形、丸形」である。5種類の研究による検討の結果、丸形の送電コイルと受電コイルの場合は、結合を強くできることが明らかになった。加えて、丸形の場合は銅の重さを減らせるため、他の2つよりもコストを削減できる。

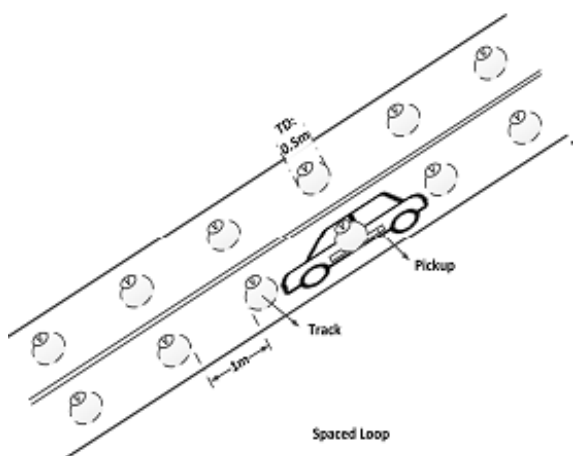
走行中非接触給電はとても興味深いものであり、実際に車に採用し、インフラとして導入して成功している例もいくつかある。しかし、3つのプロジェクトの送電効率はまだ低い水準にある。だが、今回行った文献調査の結果より、丸形のコイルを採用して研究を行うことにする。



(a) 長い楕円形



(b) 楕円形



(c) 丸形

図 13 コイルの形状と配置のイメージ

② 送電コイルによる伝送電力の概算

この章では伝送電力を計算した例を示す。最初に、実際に販売されている電気自動車 (EV) から基準になる EV を選択し、伝送電力の概算を行う。

EV の選択は以下に基づいた。2015 年 1 月、アメリカ合衆国環境保護庁はアメリカ市場での EV の燃料消費 (電力量消費) について報告した。この報告から、トヨタの RAV4EV が市街地試験と高速道路テストにおいて、最も燃料を消費することが明らかになった。それがわかる 2015 年の 1 月にアメリカ市場で近年の EV について比較したものを表 9 に示す [4]。今後は、このトヨタの EV を満足させることを目標に、伝送電力の推定を行っていく。高速道路において必要なエネルギーは 46kWh/mi ≒ 28.6 kWh/100km となっている。

③ コイルの形状を考慮した伝送電力の概算

M.Yilmaz 氏らが道路の設計も考慮しつつ、送電コイルの直径を 0.5m、コイル同士の距離を 1m と定めた。よって、1km の高速道路の区間の間に 667 個のコイルを配置することになり、コイルが供給するエネルギーは下記ようになる。

$$\text{電力量 } W = \frac{28.6\text{kWh}}{100\text{km}} = 0.287[\text{kWh/km}]$$

W

上記の式より、結合している送電コイルと受電コイルの結合距離が簡単にわかる。図 14 に結合距離の概念図を示す。また、もし自動車が 40km/h の速度で走行している場合、コイルを通過する時間は下記ようになる。

表 9 EV の比較表

車種	年	合算の消費燃料 (KWh /100mi)	市街地の消費燃料 (KWh /100mi)	高速道路の消費燃料 (KWh /100mi)
BMW i3 ^[84]	2014	27	25	30
Scion iQ EV ^[87]	2013	28	24	32
Chevrolet Spark EV ^[88]	2014	28	26	31
Honda Fit EV ^[89]	2013	29	26	32
Fiat 500e ^[90]	2013 /14	29	28	31
Nissan Leaf ^[91]	2013	29	26	33
Volkswagen e-Golf ^[92]	2015	29	27	32
Nissan Leaf ^[91]	2014 /15	30	27	33
Mitsubishi i ^[93]	2012 /13	30	27	34
Smart electric drive ^[94]	2013	32	28	36
Kia Soul EV ^[95]	2015	32	29	37
Ford Focus Electric ^[96]	2012 /13	32	31	34
Tesla Model S AWD - 85D ^[83]	2015	34	36	32
Tesla Model S AWD - P85D ^[83]	2015	36	39	35
Tesla Model S ^[100]	2012 /15	38	38	37
Mercedes-Benz B-Class Electric Drive ^[101]	2014	40	40	41
Toyota RAV4 EV ^[102]	2012 /13	44	43	46

よって、1つのコイルが送る伝送電力は下記の式より 17.148kW になる。

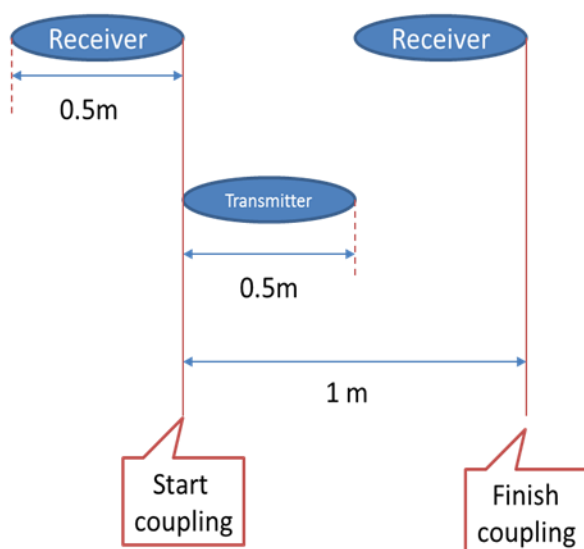


図 14 結合距離の概念図

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

、最終課題であるインフラの設計について議論していく予定である。走行中非接触給電に最適なインフラデザインを提案できることを目標にしている。

2014 年度は下記 3 件の国内大会での研究発表を行った。2015 年度は国際会議発表 2 件を計画している。

発表論文

- [1]本田幸盛, 竹内俊貴, 藤田吾郎, ビンティジャラルディン ヌルアイシャ, ビンオマル アズリーザルザイリー, ニュエンフック カイ, 「走行中非接触給電の検討」, 4-212 pp.357-358, 平成 27 年電気学会全国大会 (2015-3 東京都市大学)
- [2]Azreezal Zairee Bin Omar, Goro Fujita, Nur Aisyah Binti Jalalludin, Toshiki Takeuchi, Yukimori Honda, 'Concept of Wireless Dynamic Charging For Electric Vehicle and Safety Regulations', 4-213 pp.359-360, 平成 27 年電気学会全国大会 (2015-3 東京都市大学)
- [3]Nur Aisyah Binti Jalalludin, Goro Fujita, Arwindra Rizqiawan, 'Small-scale Microgrid Experimental Simulation using Grid-connected Inverter Module', 6-213 pp.352-353, 平成 27 年電気学会全国大会 (2015-3 東京都市大学)

参考文献

- [1] 相原電気株式会社「非接触給電の主な特徴」, <http://web.ydu.edu.tw/~uchiyama/ron/ron_04.html#web_b>発行年不明
- [2] 大久保聡編「ワイヤレス給電のすべて」, 日系 BP 社, P51, 2012
- [3]トヨタ自動車「トヨタ自動車, 電気利用車両向け非接触充電システムの実証実験を開始」, 2014, <http://www2.toyota.co.jp/news/14/02/nt14_004.html>
- [4]S. Ahn *et. al*, "Charging up the road", in Spectrum IEEE, Vol. 50, Issue 4, pp. 48-54
- [5]"Wireless charged electric vehicle runs in Seoul", TheDetroitBureau.com, March 18, 2010
- [6]"No fuss, just wireless (Wireless charging for electric vehicles)", Qualcomm HALO Brochure, in qualcommhalo.com
- [7]"CES 2014-Connected Future", Terracode.com, 2014
- [8]ICNIRP 1998, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (Up to 300 GHz)", Health Physics, 74(4) : 494-522, 1998
- [9]IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz, IEEE Std. C95.1, 1999 Edition
- [10]"EMSAFETY" in www.sintef.no/Projectweb/EM-Safety/Potential-health-effects/
- [11]3rd Generation Partnership Project : Technical Specification Group Terminals (TSG-IT), "Specific Absorption Rate (SAR) requirements and regulations in different regions (3G TR 34.925 version 3.0.0)", ARIB Technical Report, 1999-07
- [12]S. Ahn *et. al*, "Magnetic Field Design for Low EMF and High Efficiency Wireless Power System in On-Line Electric Vehicles", CIRP Design Conference, 2011, pp. 233-239
- [13]Wu, H. H., Gilchrist, A., Sealy, K., Israelsen, P., & Muhs, J. (2011, May). A review on inductive charging for electric vehicles. In Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International (pp. 143-147). IEEE.
- [14]Ahn, S., & Kim, J. (2011, April). Magnetic field design for high efficient and low EMF wireless power transfer in on-line electric vehicle. In Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on (pp. 3979-3982). IEEE.
- [15]Yilmaz, M., Buyukdegirmenci, V. T., & Krein, P. T. (2012, June). General design requirements and analysis of roadbed inductive power transfer system for dynamic electric vehicle charging. In Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012 IEEE (pp. 1-6). IEEE.
- [16]http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car access on May 24th, 2015.

デバイスから電力システムまで考慮した EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送方式の研究

〔研究代表者〕

電気工学科 赤津 観

〔研究分担者〕（以下 芝浦工業大学工学部所属）

電子工学科	石川 博康	インバータ用 GaN パワートランジスタの作製と特性評価
電子工学科	上野 和良	パワーデバイス用電極・配線に関する研究
通信工学科	田中 慎一	2次元電磁界シミュレータによる 高出力・高周波インバータ基板回路設計の検討
電気工学科	赤津 観	ワイヤレス電力伝送インバータおよび送受信コイルの研究
電気工学科	下村 昭二	軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究
電気工学科	藤田 吾郎	走行中非接触給電の検討

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

社会的な省エネ要求，CO₂削減要求から個々の機器の省エネだけでなく，自然エネルギーによる発電，電力輸送，電力貯蔵を含んだ電力ネットワークの形成が必要とされている。特に輸送分野では電気自動車（EV）の普及が省エネ，CO₂排出量削減の鍵となっており，停止時の充電のみならず家庭での電力ネットワーク結合（V2H），ならびに走行中の充電および系統への電力回生についても研究が行われており，EV の普及を妨げているバッテリーエネルギー密度の問題を克服しようとしている。つまり EV が創エネ，省エネ，蓄エネの役割を果たせるようになれば，大きな社会革新が実現される。この電力ネットワークの一部としての EV に必要なキー技術がワイヤレス電力伝送技術であり，すでに東大や埼玉大をはじめとした研究機関が EV への応用を前提として研究を行っている。ワイヤレス電力伝送技術は，1m 程度の距離でも非接触で電力を送れる技術であるが，まだ 1kW 程

度の小電力伝送しか実現できず，EV 走行中での電力授受や，急速充電および電力ネットワークの一部として EV が役割を果たすためには送受信電力が不足している。大電力伝送が困難な理由は，電力の伝送周波数が MHz 帯域と高いために，MHz 帯域での大電力インバータが実現できていないためである。MHz 帯域の大電力インバータの実現には，ワイドバンドギャップ半導体を用いた高速スイッチングデバイスの開発のみならず，インバータ主回路のインピーダンス低減や，分布定数での回路設計，高周波磁気回路設計が必要である。以上の背景を鑑み，本研究では同一大学ではあるが異なる学科に所属する，半導体，材料，通信，電力変換，電気機器，電力系統の研究者を一同に集め，上記 MHz 帯域の大電力（10kW）電力ワイヤレス伝送用インバータを研究開発し，実際に非接触で送信した電力によりモータを駆動，回生電力を系統に連系するまでの複合領域プロジェクトを実施することを目的とする。

ii) 研究のマネージメント計画

本研究では月 1 回程度の全体ミーティングを行い、互いの進捗確認と、専門分野についての相互理解を深め、個別の成果のみならず全体の成果を実現するために相互補完を行う。具体的には研究代表者は研究の進捗とりまとめおよび予算管理、月例ミーティングの開催など各研究者での研究がスムーズに進むようマネージメントを行う。研究代表者を含めた各研究者 6 人は研究プロジェクトの一部となる前述した独立した研究テーマについて責任をもって研究を遂行し、それぞれの研究成果の集合体が本研究の成果となる課題設定とした。また各研究テーマにおいては研究者の研究室の学生が担当し RA (3 名) がとりまとめを行う。またプロジェクトの予算管理や書類業務は本学研究支援課が支援する。

また平成 27 年度より各プロジェクトに参画している学生の発表を合同で行うことにより、参画学生のプロジェクトの理解、複合領域に対応した知識の吸収ができるように進めている。

iii) 年度毎の研究計画

平成 25 年度では回路スペック決定のための条件だしを行う。具体的には 10kW 電力伝送を実現するためのインバータ素子定格を決定し、GaN 素子作成のための信頼性向上策の検討およびインバータ回路の最大インピーダンス計算など、主にシミュレーションを通して回路スペックを決定する。

平成 26 年度では決定した回路スペック実現のための素子設計、回路設計、磁気設計を行い 3kW インバータの試作品を設計、試作する。

平成 27 年度では試作した回路の実験を通して 10kW 用素子設計、回路設計、磁気設計を行う。また、10kW モータによる回生電力向上策の検討および回生電力の系統連系方法の検討を行う。

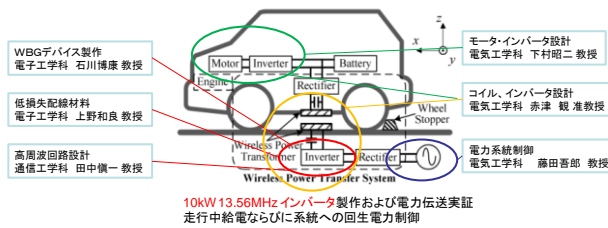


図1 EV用ワイヤレス電力伝送技術研究分担

2. 研究計画

i) 研究分担とその内容

本研究は図1に示した送受信コイルを境界にして①「高周波インバータの研究」と②「電力受信ならびに利用方法の研究」の2つに大別して行う。①では高周波インバータに用いるパワー半導体としてワイドバンドギャップ半導体である GaN を用いたパワートランジスタを石川博康教授（電子工学科）が作成する。また、MHz 帯域の高周波回路においてはわずかなインピーダンスが電圧サージを発生しデバイスを破壊するため低抵抗、低誘電率な配線材料と低インピーダンス回路パターン設計が必要となる。低抵抗配線については上野和良教授（電子工学科）が Cu ワイヤや NC（ナノカーボン）を用いた HEMT 用電極ならびにボンディングワイヤの検討を行い、田中慎一教授（通信工学科）が高周波インバータに用いるバスバー寄生インダクタンスを低減可能な配線パターンを設計する。これらの基盤技術を用いた 13.56MHz 10kW インバータを赤津観教授（電気工学科）が回路設計を行い方形はインバータとしての動作を確認する。②では高周波コイルの磁気設計を①と同様に赤津観教授が実施し、受信電力によるモータ駆動、および回生電力発生を特に EV で効率が悪いとされる低負荷領域での効率改善を実現する回転機に着目して下村昭二教授（電気工学科）が行う。さらに受信電力を系統側に戻すための系統連系を藤田吾郎教授（電気工学科）が実施し、ワイヤレス電力伝送で走行する EV が複数台あるときの電力系統マネージメント方法について検討する。

平成 28 年度では 10kW の電力送信実験を行い、10kW のモータを駆動する。また回生電力を発生させ、電力系統への安定な電力回生を行う。

平成 29 年度は主に研究プロジェクトのまとめと各論文発表を行う。

3. 計画の進行状況

全体計画と進行状況を比較して半年程度の遅れがみられるものの順調に計画を進行している。平成 27 年度の特に大きな成果としては

- GaN を用いた 3kW インバータ・効率 96% の達成
- アンテナ最適化による 300W 入力・効率 80%の電力伝送達成
- ワイヤレス電力伝送による DC モータ駆動成功

の 3 点があげられる。

GaN デバイスは現在次世代パワー半導体として注目を浴びているワイドバンドギャップ半導体の一種であり、もともと研究者らが有しているインバータやモータの応用技術に GaN デバイスの作成技術が加わることで、出口（アプリケーション）を意識したデバイス作成が可能となり、研究大学としての大きな力になる。なお、研究タイトルに示したとおり、デバイス製作からアプリケーションまでを一気通貫で行っている研究機関は全世界でもほとんどない。今回はまだ GaN デバイス作成までは至っていないことから購入デバイスを用いたが、作成したインバータに作成 GaN デバイスを用いれば高効率が得られることが実証できた。

アンテナ最適化による高効率化の成功は今年度通信工学科田中先生による協力が大きい。担当学生がシミュレーション駆使して、理論と実験の差異について検討したところ、電波を遮蔽する電磁シールドにて損失が発生していることが明らかになった。そこで電磁シールドを 3m x 3m の大型のものに変更して実験

SIT 総合研究所研究成果報告書（研究代表者用）したところ理論どおりの伝送効率を得ることに成功した。また、今までキャパシタを用いていた共振方式を寄生キャパシタを用いたリンクコイル方式に変更することにより大電力を送信できることが分かり、300W 入力でも耐えられるシステムが完成した。さらに、リンクコイルと共振コイルの距離をアクティブに制御することで負荷のインピーダンス変動にも対応可能なことが分かり、今後はアンテナの大電力化（リッツワイヤの設計）とともに制御技術に重点を置いて進めていく。

デバイス用電極・配線の研究は GaN 基板上にグラフェンを CVD にて直接形成させる技術を確立しており、CVD 条件の最適化による良好なグラフェン膜特性が得られた。今年度に具体的なデバイス応用を探索し実現する予定。

そのほか軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究および走行中非接触給電の検討においては順調に進んでいる。

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

平成 28 年度においては当初の計画どおり、10kW 電力伝送の実験を進めていく。現在のところ 3kW インバータが実現しておりこれを並列化して 10kW 電力入力を実現する。さらにアンテナをリッツ線を用いて大電力化し、さらなる効率向上を目指す。負荷としては数 kW の AC モータ駆動を予定している。

移動体電力用ではなく停車中の充電を実現するシステムも試作中であり、SiC MOS-FET を用いて 85kHz の周波数で電力伝送実験を行い、主にインピーダンスマッチングの基礎検討を行い、結果を移動体電力用のマッチング回路に応用する。

平成 27 年度に導入した 10kW のモータ駆動ベンチにて設計した EV 用モータの評価を学内で実施する。本設備により、前述した 10kW インバータにより送信した電力により 10kW モータを駆動することが可能となる。

GaN デバイスはエッチング条件を導出した

後小容量デバイスの作成を進め、当該デバイスの並列化（チップレベル）により大容量デバイスの作成、評価を実施する。またグラフェンを用いた低損失配線の一次試作を行い、Ga_N デバイスの電極やボンディングに用いてモジュールとして動作させる。

平成 29 年度は主に研究プロジェクトのまとめと各論文発表を行う。

平成 27 年度に発表した論文は以下のとおり。

- [1] Azreezal Zairee Bin Omar, Goro Fujita, 'Towards Japan's Future EV-Friendly Highway Concept With In-Motion Road-Embedded Wireless Chargers', 10th SEATUC Symposium, (2016-2, Tokyo, Japan)
- [2] Yukimori Honda, Goro Fujita, 'Preliminary Review of Electric Vehicle In-Motion Wireless Charging', in Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, (2015-7, Hong Kong)
- [3] Azreezal Zairee Bin Omar, Goro Fujita, 'Electric Vehicle Dynamic Charging and Safety Related Studies', in Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, (2015-7, Hong Kong)
- [4] 尾形拓也、ニューエン キエン トウルン、ニューエン トリクオン、赤津観、田中慎一、「間接給電アンテナの周囲環境変動に対する制御方法の検討」電子情報通信学会総合大会 B-21-20 2016年3月16日（九州大学）
- [5] 榎本学祥、松島佑将、上野和良「熱 CVD による GaN 表面への直接グラフェン成長」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会（2015 年 9 月 10 日 1 名古屋）
- [6] Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, "Improvement of multilayer graphene crystallinity by solid phase precipitation applying current stress during annealing", ADMETA-Plus 2015 (2015 年 9 月 18 日 Seoul)
- [7] Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, "Fabrication of multilayer graphene by solid phase precipitation with current stress", 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会研究会（2016 年 1 月 27 日）.
- [8] Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, "Effect of current stress on formation and crystallinity of multilayer graphene by solid phase precipitation", 10th South Asian Technical University Consortium (SEATUC) 2016 (2016 年 2 月 22-24, Tokyo).
- [9] Md. Sahab Uddin, Kazuyoshi Ueno, "Catalyst free direct deposition of multilayer graphene on GaN by solid phase precipitation", 63rd JSAP Spring Meeting 2016 (2016 年 3 月 16-22, Tokyo).
- [10] N. K. Trung, T. Ogata, S. Tanaka and K. Akatsu, "PCB design for 13.56MHz half-bridge class D inverter for wireless power transfer system", 9th International conference on power electronic-ECCE Asia (ICPE- 2015 ECCE Asia), June 1-5, 2015, Seoul, Korea, pp. 1692-1699.
- [11] N. K. Trung and K. Akatsu, "Ringing suppressing method in 13.56MHz resonant inverter for wireless power transfer systems", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2015, September 20-24, 2015, Montreal, Canada, pp. 2275 – 2281.
- [12] N. K. Trung and Kan Akatsu, "13.56MHz high efficiency

SIT 総合研究所研究成果報告書（研究代表者用）

- inverter for wireless power transfer systems using cascode GaN HEMT", *inproc. 3rd green innovation symposium*, poster section, 2016.
- [13] N. K. Trung, T. Ogata, S. Tanaka and K. Akatsu, "Attenuate influence of parasitic elements in 13.56MHz inverter for wireless power transfer systems", *inproc. IEE-Japan Industry applications Society Conference (JIASC2015)*, 2015, pp.131-134.
 - [14] N. K. Trung and Kan Akatsu, "Analysis and ringing suppressing method in 13.56MHz resonant inverter for wireless power transfer systems", *inproc. 2nd green innovation symposium*, poster section, 2015
 - [15] 小久保陽平, 下村昭二:「弱め磁束制御のためのデュアルロータアキシアルフラックス PMVM」, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 163-166 (2015-09-02), 3-24
 - [16] Shoji Shimomura, "Numerical Consideration of Integrated Radial and Dual Axial-Flux Ferrite Magnet Synchronous Machine," 8th Annual IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2016), Accepted.

[論文]

- [1] N. K. Trung, T. Ogata, S. Tanaka, K. Akatsu, "Analysis and PCB Design of Class D Inverter for Wireless Power Transfer Systems Operating at 13.56 MHz", *IEEJ Journal of Industry Application*, Vol. 4, No. 6, 2015, pp. 703-713.
- [2] Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, "Improvement of multilayer graphene crystallinity by solid-phase precipitation with current stress application during annealing", *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**(2016) 06JH02.

以上

高周波インバータの研究

GaN パワートランジスタのエッチングプロセス改善

電子工学科 石川 博康

1. 序論

化合物半導性物質、中でも IIIb 族元素（アルミニウム、ガリウム、インジウム）と Vb 族元素（窒素、リン、砒素、アンチモン）から成る共有結合性 AB 型化合物は半導性を示し、この化合物半導性物質を III-V 族化合物半導体と呼んでいる。本研究で使用する GaN 系化合物半導体(GaN, AlN, InN 等)はこの III-V 族化合物半導体に属している。主に集積回路などに使用されている半導体シリコンと比べ、一般的に III-V 族化合物半導体は①光を発したり受けたりすることに適している、②電子の動きが速い、という特徴を持っている。この特徴を利用して発光ダイオード（LED）やレーザーダイオード（LD）等の発光デバイス、および③電波送受信トランジスタに 응용されている。

近年、ワイドバンドギャップの GaN 系化合物半導体材料が注目されているが、その大きな理由は三点ある。III 族窒化物半導体 GaN の特徴としては(1)バンドギャップが 3.4 eV と大きく、(2)破壊電界が 2×10^6 V/cm と大きく、(3)電子の飽和ドリフト速度が 2.7×10^7 cm/s と比較的高い。さらに、AlGaIn/GaN ヘテロ構造を利用した高電子移動度トランジスタ(HEMT)では、ヘテロ界面に形成される 2DEG のシートキャリア密度が高く、AlGaIn 層へのショットキー接触の高い障壁高さによる小さなゲートリークと優れたゲート逆方向特性等の高温・高周波パワー素子として大き

な利点を有している。

本研究では、これらの利点を活かした EV 用 MHz 帯域ワイヤレス電力伝送のインバータ向けの GaN 系パワートランジスタ作製を行う。

さて、高性能、高特性を目指す一方、昨今、材料の優位性、デバイスのわずかな高性能さだけでは、従来の Si デバイスから置き換えが進まない事情を十分考慮する必要がある。これについて、結晶成長用基板を取り上げ、以下に説明する。通常の化合物半導体デバイスは、その構造を同材料もしくは同系材料の化合物半導体基板上に結晶成長した後、所定の加工を施して作製される。結晶成長する膜材料と基板材料が同一もしくは同系の場合、ホモエピタキシー（ホモエピ）と呼ぶ。ホモエピにおいては結晶基板上に同一の結晶が成長することが当然である。As 系、P 系、Sb 系 III-V 族化合物半導体デバイスは同一もしくは同系化合物半導体が存在し、特に GaAs 基板では 6"φ の大口径基板まで入手可能である。一方、GaN 系半導体では、ホモエピ基板として GaN 基板が存在するが 2"φ までの小口径であり、高価である。GaN 基板の用途は主に Blu-ray Disc 用 LD である。チップサイズが小さいこともあり、大口径基板の必要性がない。その他の用途として照明用 LED チップもあるが、使用量としては極めて少ない。高コストの原因は GaN 基板の製造方法にある。他の化合物半導体基板がインゴットから

切り出して作製するのに対し、GaN 基板は異種基板上に HVPE 法により厚膜結晶成長したものを基板から切り離す（エッチングで取り除く）手法で作製されている。GaN インゴットはアモノサーマル法をはじめ様々な手法で作製され、一部φ2 インチの小口径基板の入手は可能である。しかしながら、まだ一般的に購入できるものではない。2003 年に GaN 基板がリリースされて以来、欠陥数減少等の品質向上については進展があったものの、チップ面積の大きな電子デバイス用途として期待されるφ6 インチ以上の大口径 GaN 基板のリーズナブルな作製方法は 2016 年現在でも存在しない。このため、デバイスコスト上重要となる大口径基板は未だ異種基板であり、GaN 系半導体デバイスの結晶成長はヘテロエピタキシー（ヘテロエピ）である。大口径の異種基板として、サファイア、Si があるが、φ6 インチ以上となると Si 基板が有利となっている。このような経緯により、Si 基板上 GaN は”GaN on Si”として、電子デバイス基板の切り札として多くの企業で研究開発が進んできた。ところが、研究発表の多さに対し、製品までに結びついた例が極端に少ない。同じワイドバンドギャップパワー半導体として GaN より先行する SiC デバイスについても、Si デバイスから全面的に置き換えが進む状態とはなっていない。ワイドバンドギャップ材料の魅力は低オン抵抗、高耐圧を両立できる“低損失化”、付随するシステムの小型化にあるが、そのメリットが代替にまで至らないということである。既に Si で製品ラインナップがあり、わずかな効率向上を求め、信頼性が不十分でコスト高になるものを無理に採用する必要がない。Si デバイスの低損失化が着実に進んでいることも一因である。

以上より、材料の優位性頼みの僅かな性能向上だけでは置き換えの理由として不十分であり、コスト的なメリットを出す必要がある。この研究でも低コストプロセスを目指し、デ

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）
バイスプロセスの簡易化、特に素子分離のエッチングプロセスについて検討している。通常 GaN 系半導体のエッチングには Cl_2 、 BCl_3 を用いた反応性イオンエッチング（RIE）装置を使用する。Ar ガスのみを使用する場合、プラズマ発生に伴い、イオンが発生する。このイオンの大きな運動エネルギーを利用すると、非エッチング物質を構成する原子間のボンドに対して乖離エネルギーを与え、物理的エッチングを進行させる。一方、 Cl_2 ガスを使用すると、ラジカルや励起分子の反応活性を利用して Ga と Cl が反応し、昇華性の高い GaCl_3 が形成され、化学的エッチングが促進される。Ar と Cl_2 を同時に使用すると、上記作用が同時に起きる。また、エネルギーを持った Ar イオンが化学活性種との反応をアシストするイオンアシストエッチングも起こる。これらの作用により、Ar だけの場合に比較して、 Cl_2 や BCl_3 を使用するとエッチングレートが大きくなる。これらの作用には放電電力依存性がある。化学的エッチング作用には敷居値的なものがあり、ある程度の電力が必要である。物理的エッチングは小電力でも起こる。一般的に、エッチングレートを高めるには放電電力を高め、化学的エッチング、イオンアシストエッチングの作用を高める。この副作用として、エッチングマスクとして使用するフォトレジストのエッチングや変質が引き起こされる。エッチングマスクとしては金属や酸化物を代替材料として使うことができるが、これらの形成プロセス（フォトリソグラフィのため、当然フォトレジストでパターンを形成し、その後取り除く工程も含まれる）が追加されることから、できる限りフォトレジストを活かすシンプルな手法が望ましい。フォトレジストが変質した場合、変形・クラック等が発生したり、有機溶剤に溶解しなくなるため、できる限り変質は避けたい。耐プラズマ特性を向上させるには、耐プラズマ性の高いフォトレジストを使うこと、冷却

器でステージ温度（試料温度）を下げることを挙げることができる。ところが、私自身の経験では、化学的エッチング、イオンアシストエッチングの作用する条件下では、耐プラズマ特性の高いフォトレジストでも変質が起こり、ステージ温度を下げても変わらなかった。最も有効だったのは、放電電力を 10 W 程度に下げることであった。この領域では、 BCl_3 ガスの有無でエッチングレートは大きく変化しないことから、物理的エッチングの作用が大きい領域であることが言える。よって、フォトレジストをエッチングマスクとして使用する範囲では、 Cl_2 や BCl_3 は不要ということになる。RIE 装置がなくとも、放電機構を備えるその他の装置、たとえばスパッタ装置やプラズマ CVD 装置等でも、GaN のエッチングが可能である。

2. 研究計画

低コストプロセスを目指し、素子分離のプラズマエッチングプロセスについて詳細に検討・実験を行った。プラズマエッチングには、本研究室で保有する RF マグネトロンスパッタ装置を使用した。スパッタ装置はターゲット材料を放電したスパッタガスのイオンで叩き出し、基板上に薄膜を堆積する。このターゲットの位置に半導体薄膜を置けば、エッチングを行うことができる。

3. 計画の進行状況

AlGaIn GaN HEMT の素子分離工程の概要を述べる。AlGaIn/GaN HEMT は、チャネル層としてヘテロ界面の 2DEG 層を利用している。素子分離としては、2DEG 層が形成しない程度に彫り込む程度で十分である。AlGaIn バリア層は概ね数 10nm 程度であることから、最表面から 100 nm 程度エッチングすれば十分である。

本研究室の標準プロセスでは、エッチングマスクとして、Ni/フォトレジストの二重マス

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）を使用している。低電力であってもプラズマによるダメージがあり、フォトレジストの変質が完全には避けられない。Ni 膜をフォトレジスト下に形成することで、フォトレジストが変質しても Ni を硝酸で溶解することにより Ni ごとフォトレジストを除去できる。しかしながら、フォトレジストの変質により、40W 以下では所定のエッチング深さになる前にフォトレジスト膜に微細な穴が空いてしまった。このため、フォトレジストをハードベークにより耐性を高めたところ、30W で 30 分であれば十分耐えられることがわかった。そこで、エッチング工程を 3 回繰り返すことでエッチング深さ 100 nm を達成することができた。しかし、Ni/フォトレジストマスクの形成、エッチング、マスクの除去を 3 回も繰り返すことは時間が掛かり、また、マスク合わせもいつも完全にできるわけではなく、これらの点が再現性の問題と考えた。そこで、フォトレジストの厚みを増すことを考えた。フォトレジストの厚みを増すには、スピナーの回転速度を落としたり、塗布回数を増す手法がある。スピナーの回転速度を落とす手法では、厚くするにも限界があり、膜の中心部が乾燥しないことがある。そこで、今回、塗布回数を増すことで厚みを増やすことを試みた。スピコートは 1 段階目としてスピナー回転数を 600 rpm で 5 秒間、2 段階目として 4000 rpm で 30 秒間として回転数を上げた。スピコート毎に、ベーク炉内 90°C にて 10 分間乾燥させた。スピコート回数は 1~4 回とした。形成後、分光光度計により反射率を測定、多重反射による干渉ピークより膜厚を導出した。図 1 にフォトレジスト膜厚のスピコート数依存性を示す。1 回目では 1.2 μm の膜厚が得られた。この値は、使用しているフォトレジスト、およびスピナー回転数から予測される値とほぼ一致しており、標準的な膜厚である。この上にさらにコーティングした 2 回目では 1.6 μm の膜厚が得られた。

3 回目に膜厚の増加が鈍化し、4 回目ではほぼ飽和した。コーティング回数を増やすことで膜厚は増加するが、3 回目以降は飽和傾向を示すことがわかった。乾燥後のフォトレジスト膜上にさらにフォトレジストを塗布する際に、含まれる溶剤により乾燥したフォトレジスト表面が溶解される。このため、スピンのコーティング回数を増しても、単純に1回目の膜厚の倍数とはならないことが理解できる。スピンのコーティング回数が増えるに従い、膜厚の増加が鈍化することは、溶解の度合いが高まっていることを意味している。それでも3回コーティングすれば、1回目の1.4倍の膜厚が得られる。

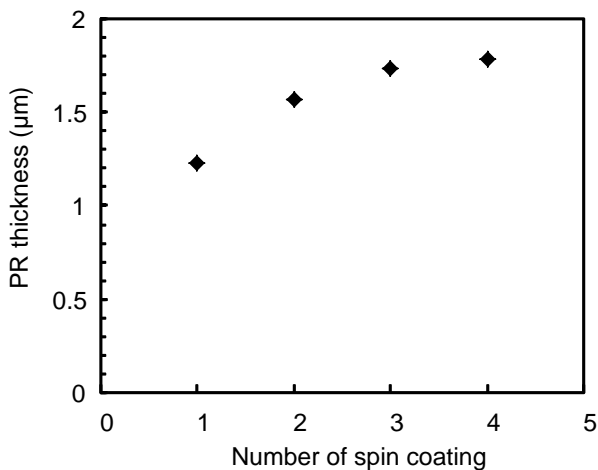


図 1. フォトレジスト膜厚のスピンの回数依存性

次に、実際にプラズマエッチングマスクに利用できるか試みた。使用した AlGaIn/GaN HEMT 構造は MOCVD 法により Si(111) 基板上に結晶成長させたものである。EB 蒸着により、AlGaIn/GaN HEMT 試料上に Ni 膜 (1000Å) を形成した。その後、フォトレジストのコーティングと乾燥を3回繰り返して厚膜フォトレジスト層とした。マスクレス露光装置を用い、この厚膜フォトレジストに素子分離パターンを露光後、現像した。露光時間は厚くなった膜厚を考慮して伸ばした。現像後、ホットプレート上で段階的に 130°C 程度まで加熱してハードベーク処理を施し、エッチングマ

SIT 総合研究所研究成果報告書 (センター員用) スクとして用いた。試料をスパッタ装置にロードし、Ar ガス 5sccm、圧力 10Pa、出力電力を 30 W とし、時間を 45 分、50 分、60 分、75 分としてエッチングを行った。図 2, 3, 4, 及び 5 に、エッチング時間 45, 50, 60 及び 75 分のエッチング直後の試料表面を示す。45 分の試料では表面のフォトレジスト層が残っていたが、粒状化していた。フォトレジスト膜厚は 1.4 倍となっていることから、単純には $1.4 \times 30 \text{ 分} = 42 \text{ 分}$ 耐えられると予測したが、形状が変化してしまっていた。エッチング時間 50 分と 60 分の試料では、Ni 層が露出していた。フォトレジストの塗布膜厚からは、妥当な結果である。エッチング時間 75 分の試料では Ni 層まで消失し、試料表面が露出した。Ni 層がエッチング時間 50 分から 75 分程度まで残ったとすると、Ni のエッチングレートは $120 \text{ nm}/30\text{min}$ ($4 \text{ nm}/\text{min}$) となる。同条件下でのエッチングレートとして、フォトレジストのエッチングレートが $840 \text{ nm}/30\text{min}$ ($28 \text{ nm}/\text{min}$) である。スピンのコーティング回数を増してフォトレジスト膜厚を増加させた Ni/フォトレジストマスクを使用した AlGaIn/GaN HEMT を 1 回で 100 nm エッチングするにはまだプラズマ耐性が不足していたように見える。しかしながら、下記に述べるよう、実質的に放電電力が高くなったことが原因であった可能性が高い。

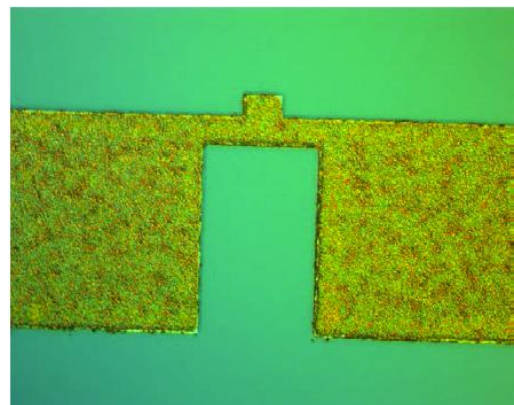


図 2. エッチング後の表面 (エッチング時間 45 分) パッドの 1 辺の長さ : 100 μm

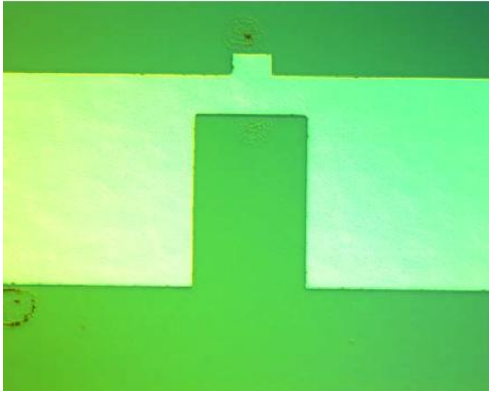


図 3. エッチング後の表面（エッチング時間 50 分）パッドの 1 辺の長さ：100 μm

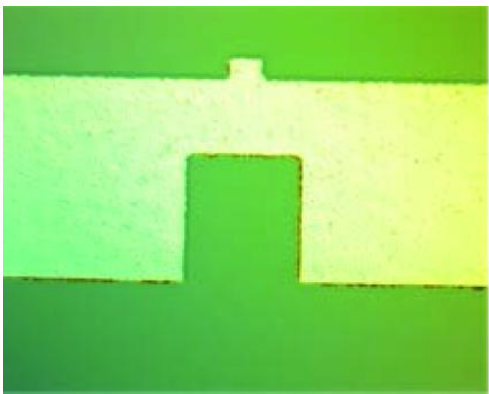


図 4. エッチング後の表面（エッチング時間 60 分）パッドの 1 辺の長さ：100 μm

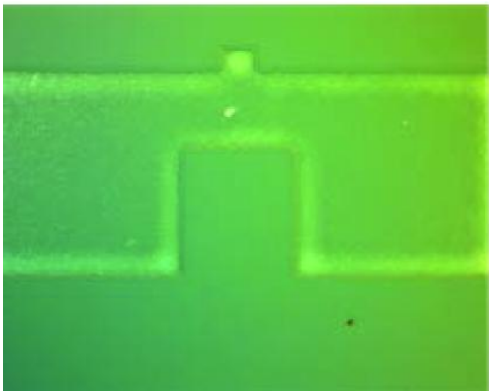


図 5. エッチング後の表面（エッチング時間 75 分）パッドの 1 辺の長さ：100 μm

図 6 にエッチング深さのエッチング時間依存性を示す。硝酸で Ni/フォトリソマスクを除去した後に、原子間力顕微鏡を用いて段差を測定した。エッチング時間 45 分の試料でエッチング深さが 110 nm であった。60 分までエッチング深さは深くなり、75 分では若

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）
干浅くなった。60 分までエッチング深さはほぼ比例して深くなっており、測定ミスではない。エッチングレートは平均 75 nm/30min (2.5 nm/min) であり、これまでの同条件下でのエッチングレート約 40 nm/30min (1.3 nm/min) の 2 倍弱であった。この原因は不明であるが、実質的に放電電力が高い環境下でエッチングされたと見なせる。図 2 で示すように、エッチング時間 45 分の試料のフォトリソの粒状化が観察されたが、この実質的に高くなった放電電力が原因と見ている。今回の結果は長期的な再現性の点では問題があるが、短期的には再現性がある。実質的放電電力を下げ、フォトリソのプラズマダメージを減らしてエッチングができる見通しが得られた。

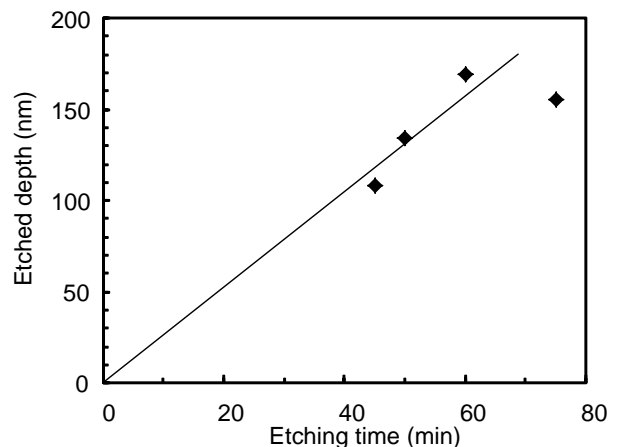


図 6. エッチング深さのエッチング時間依存性（30 W, 10Pa, Ar ガス 5sccm）

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

低コストプロセスを目指し、素子分離のプラズマエッチングプロセスについて検討・実験を行った。検討の結果、Ar ガスのみのプラズマエッチングでも、1 回のプロセスで素子分離できる見通しを得た。今後、デバイス試作実験に向けて詳細を調整し、大電力デバイスとして 1kW 級 (200V, 5A)、3kW 級 (200V, 15A) および 10kW 級 (200V, 50A) HEMT の試作を行う。

(学会発表)：なし

高周波パワーインバータ用の低損失配線・電極の研究

電子工学科 上野 和良

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

パワーエレクトロニクス研究センターでは、窒化ガリウム (GaN) を用いた高周波パワーインバータの開発を目指している。高性能な高周波パワーインバータを実現するためには、高周波パワーデバイスの性能を生かすため、高周波特性に優れた低損失配線の開発が重要と考えられる。また、GaN パワー電界効果トランジスタ (FET) の性能を向上するためには、寄生抵抗となるオーミック電極の低抵抗化が重要と考えられる。さらに、GaN パワーFET と対になってインバータ回路を構成する GaN ダイオードの性能向上が重要と考えられる。

我々の研究室では、大規模集積回路 (LSI) 用の低抵抗配線材料として銅 (Cu) やナノカーボン (NC) の研究を行っている。Cu は、従来、LSI 配線やパワーインバータのワイヤ線として用いられてきたアルミニウム (Al) に比較して、低抵抗で電流密度耐性が高いため、インバータに用いる配線ワイヤの低抵抗化と高信頼化につながることを期待される。また、NC は Cu に代わる低抵抗・高信頼配線材料として期待されており、特に高周波領域でのインピーダンスの改善が期待されている。

そこで本研究では、パワーインバータへの応用を目指して、Cu や NC を用いた低損失配線の開発を研究目的とする。また、GaN デバイスの性能を向上する電極の開発を研究目的とする。

2. 研究計画

本研究では、Cu や NC を用いた低損失ワイヤとして、NC/Cu ハイブリッド構造ワイヤを提案し、低損失ワイヤとしての可能性を検討する。

また、GaN デバイスの電極形成に関して、低抵抗を目指した電極・配線構造を検討する。さらに GaN ダイオード用の障壁高さ制御性や耐圧に優れた電極材料・構造の検討を行う。

3. 計画の進行状況

GaN デバイスの電極形成に関して、熱的安定性の向上、低抵抗化、障壁高さ制御等の効果が期待されるグラフェンの可能性検討を行っており、今年度は、GaN 上にグラフェン電極を形成する方法として、以下に述べるように、熱 CVD 法と固相析出法を検討した。

3. 1. 熱 CVD

グラフェンの GaN デバイスへの応用では、剥離したグラフェンを GaN 基板上に転写する検討が報告されている。安定な特性を得るためには GaN 基板に直接グラフェンを形成することが望ましい。そこで、我々は熱 CVD 法を用いて、GaN 基板上に直接グラフェンを形成する方法を検討した。

図 1 に示すように、サファイア上にアンドープ GaN ($2\mu\text{m}$)、 $0.6\sim 1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、Si をドープした n-GaN をエピタキシャル成長した基板 (パウデック製) を用いた。CVD 前に、TMAH (0.01mol/L) で 5 分間洗浄し、続いて、IPA

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）
 度が若干上がっており、結晶性の改善効果を示している。

5分、HCl 浸漬を行った。その基板を図 2 に示す常圧熱 CVD 装置に導入し、CVD 温度 600～1000℃、CVD 時間 5～30 分の間で変化させて CVD を行った。原料は、エタノールを Ar でバブリングして供給した。また、冷却速度を遅くする徐冷(200℃設定でその温度になるまで待つ)も検討した。

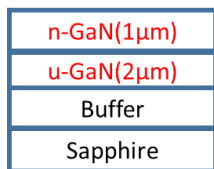


図 1. エピ GaN 基板の構造。

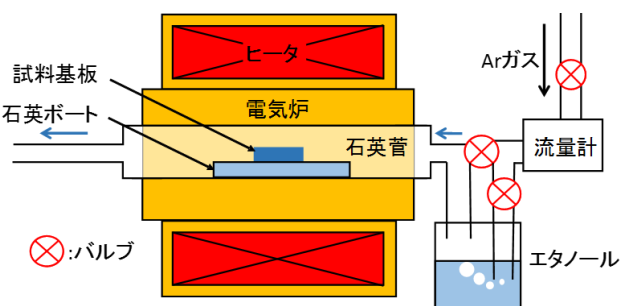


図 2. 常圧 CVD 装置の構成。

図 3 に GaN 基板上に異なる温度で直接 CVD した膜のラマンスペクトルを示す。800℃以下ではほとんどピークが見られず、堆積できていないと考えられる。900℃では、グラファイト構造を示す G バンド、欠陥構造を示す D バンドが観察され、グラファイト構造を含むナノカーボン膜が堆積したことを示している。

図 4 徐冷の効果を示しており、徐冷によって、G/D 強度比が増加し、堆積した膜のグラファイト結晶性が向上していることを示している。

図 5 は 900℃、徐冷の条件で、CVD 時間を変化させたときのラマンスペクトルである。時間が短い 10 分の時に高い G/D 比が得られた。この時の表面 SEM 写真を図 6 に示す。図 6 より平坦な表面が得られていることがわかる。

また図 7 は、CVD 前の加熱時間を変化させた結果で、CVD 前加熱によって G バンドの強

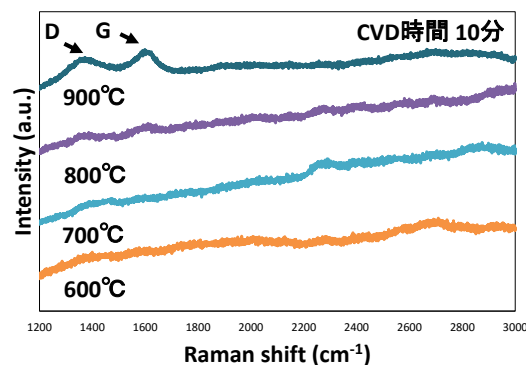


図 3. ラマンスペクトルの CVD 温度比較。

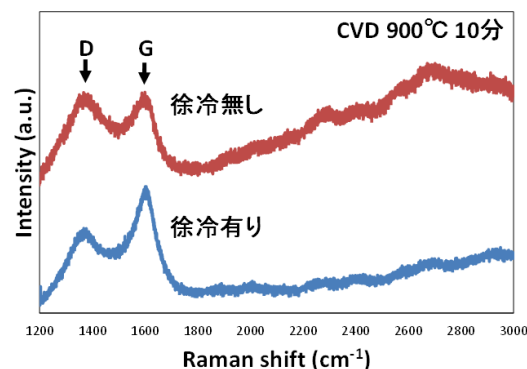


図 4. 徐冷の有無によるラマンスペクトル比較。

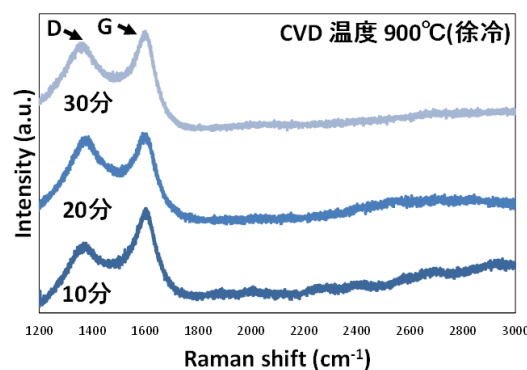


図 5. ラマンスペクトル CVD 時間依存性。

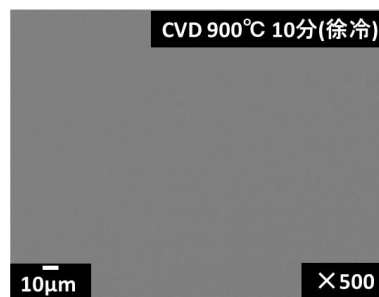


図 6. GaN 上に形成した膜の表面 SEM 像。

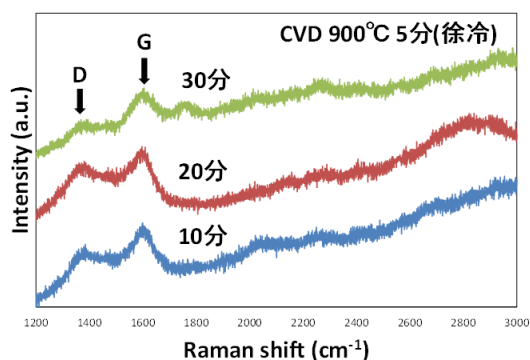


図 7. CVD 前加熱時間によるラマンスペクトル変化

以上のように熱 CVD によって、直接 NC 膜が形成できることがわかったので、今後は、ダイオードを作製して電気的特性を評価することが課題である。また、CVD 温度の低温化、結晶性の改善も課題である。

3. 2. 固相析出によるグラフェン形成

CVD 以外の方法として、アニールによる固相析出法がある。我々は CVD 中の電流印加によってグラフェン膜質の向上が得られる結果を得ている。CVD では、触媒の Co 膜上に MLG が形成されるため、GaN 表面に直接 MLG を形成できない。そこで GaN 上への直接グラフェン形成が期待できる固相析出法において、電流印加によって MLG 膜質の向上やプロセス温度の低温化ができるかどうかを検討した。

図 8(a) に電流印加アニール法の概念図を示している。サンプルは図 8(b) に断面図を示すようにグラフェンを形成したい基板上にカーボンドープ Co (Co-C) 膜を堆積し、その膜に電流を流しながら、真空中で電気炉で加熱する。これにより Co から C が析出し多層グラフェンが形成できる。Co-C の膜厚は、100nm で一定とし、アニール温度と電流を変化させた。基板として、GaN 基板の代わりに SiO₂/Si 基板を用いた。

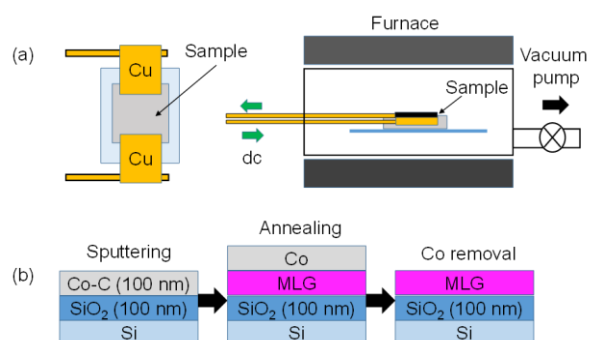


図 8. 電流印加アニールの説明図とサンプル構造断面図.

図 9 に基板温度 600°C 一定として、印加する電流を変化させたときのラマンスペクトルを示す。電流印加によって、サンプルの温度がジュール加熱で上昇する。MLG の膜質は温度が高くなると向上することが知られているため、MLG 膜質への温度以外の電流の作用を調べるため、同じ温度で電流の有無を比較した。図 9 や図 10 に示すように同じ温度で比較して電流を印加したほうが G/D 比が高く、MLG の膜質が向上していることを示している。図 11 は、温度を 680°C で一定とした場合の、電流依存性を示した図で、電流が増えるほうが G/D 比が高くなることを示している。

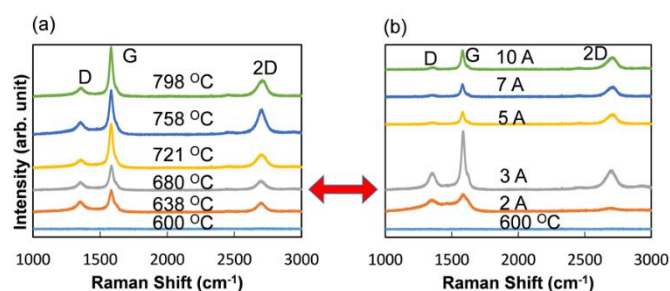


図 9. 電流の有無によるラマンスペクトル比較.

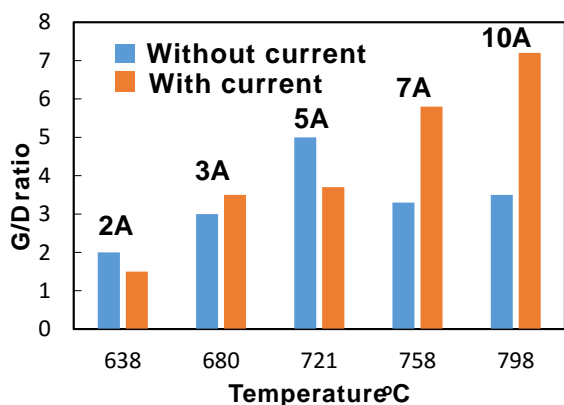


図 10. 電流の有無による MLG 結晶性 (G/D 比) の比較.

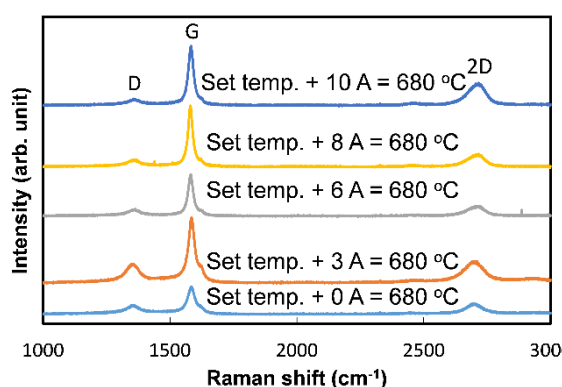


図 11. 温度一定の場合の電流依存性.

電流によって G/D 比が向上する理由を検討した。図 12 は、電流の有無によるアニール後の表面 SEM 写真を示している。いずれの場合も白いコントラストの Co と黒いコントラストの MLG が混ざっており、膜は均一ではない。電流印加ありの場合（図 12(b)）は、電流印加なしの場合（図 12(a)）に比較してグレインが大きくなっており、G/D 比の向上と対応していると考えられる。

図 13 は、電流印加した場合の断面 TEM 写真であり、MLG が Co 触媒の下に析出しているが、MLG の形成されていない部分があり、均一な膜が形成できなかった。

この対策として図 14 に示すように Cu でキャップをする構造によって、均一な酸化膜上への析出ができた。一方で、結晶性は Cu キャップにより劣化したため、今後、膜質の向上が課題である。

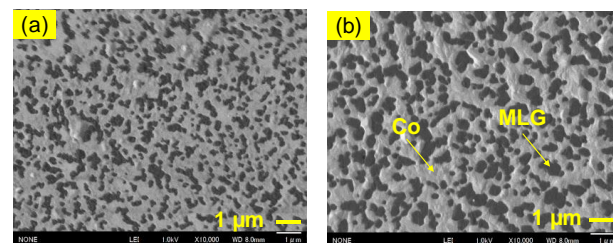


図 12. (a) 電流なしと (b) 電流ありのアニール後の表面 SEM 写真.

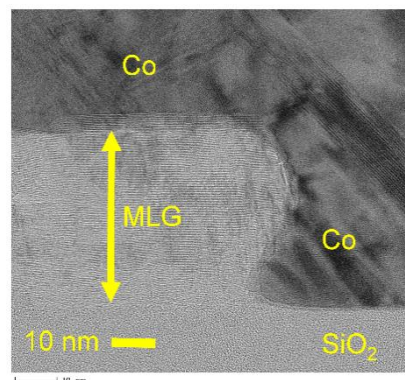


図 13. 電流ありの場合に断面 TEM 写真.

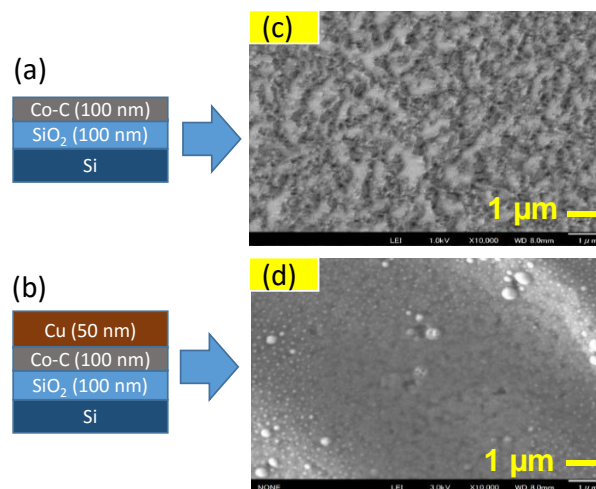


図 14. Cu キャップによる MLG 析出の均一化効果.

4. 今後の計画及び学会, 論文等投稿・発表状況

GaN 上へのグラフェン膜の直接形成方法として、CVD 法と固相析出法を検討し、いずれの方法でも形成可能なことがわかった。膜質の向上が課題であるが、今後、検討した形成方法を用いて、ダイオードを作成し、電気的特性やその熱的安定性の評価を行う予定である。

る。また、グラフェン/Cu ハイブリッド配線についても、新たな形成方法を検討し、低損失化の可能性を検討する。

[学会発表]

- 1) 榎本学祥, 松島佑将, 上野和良「熱 CVD による GaN 表面への直接グラフェン成長」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 (2015 年 9 月 10 日 1 名古屋)
- 2) Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, “Improvement of multilayer graphene crystallinity by solid phase precipitation applying current stress during annealing”, ADMETA-Plus 2015 (2015 年 9 月 18 日 Seoul)
- 3) Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, “Fabrication of multilayer graphene by solid phase precipitation with current stress”, 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会研究会 (2016 年 1 月 27 日) .
- 4) Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, “Effect of current stress on formation and crystallinity of multilayer graphene by solid phase precipitation”, 10th South Asian Technical University Consortium (SEATUC) 2016 (2016 年 2 月 22-24, Tokyo) .
- 5) Md. Sahab Uddin, Kazuyoshi Ueno, “Catalyst free direct deposition of multilayer graphene on GaN by solid phase precipitation”, 63rd JSAP Spring Meeting 2016 (2016 年 3 月 16-22, Tokyo) .

[論文]

- 1) Md. Sahab Uddin, Hiroyasu Ichikawa, Shota Sano, Kazuyoshi Ueno, “Improvement of multilayer graphene crystallinity by solid-phase precipitation with current stress application during annealing”, Jpn. J. Appl. Phys. **55**(2016) 06JH02.

ワイヤレス電力伝送インバータ および送受信コイルの研究

電気工学科 赤津 観

1. 序論

本研究では全体計画（10kW ワイヤレス電力伝送による走行中 EV 給電）の主幹となる高周波高出力インバータの実現および送受信アンテナの実現を目的とする。現在他研究機関ならびに企業において 50kHz の高周波信号を用いて 3kW の電力伝送がギャップ 50cm 以下の状態で実現されている。しかしながら走行中 EV 給電を想定した場合、必ずしも道路内に送信設備を設置できるとは限らず、例えば高速道路の側壁に送信設備を設置するなどの応用例を考えた場合伝送距離が長いことが望ましく、かつアンテナの小型化が要求される。このことから本研究では 1m で 10kW のパワーを伝送することを目的に、10kW 13.56MHz のインバータならびに送受信コイルの実現を行う。

2. 研究計画

以下のように小容量インバータの設計から進め、大容量化を目指す。

2013 年度:10kW 電力伝送のための要件策定、100W 高周波インバータ設計ならびに送受信コイル設計ロジックと解析手法の確立。(済)

2014 年度:1kW 13.56MHz インバータ実験と送受信コイル設計完了、1kW 送信実験。(済)

2015 年度:3kW 13.56MHz インバータ設計および実験、別途作成した GaN 素子によるインバータ動作検証。

2016 年度:10kW インバータ設計および実現。

同時に 10kW 回生電力授受実験。

2017 年度:研究まとめ

3. 計画の進行状況

2016 年度に以下の 3 項目を実施し、顕著な成果を挙げた。

- a) 13.56MHz 3kW インバータの実現により効率 96%での電力発生を確認
- b) 13.56MHz 送信用アンテナの設計、試作を行い電力伝送実験において総合効率 80%(300W 入力)を確認
- c) 電力伝送実験において直流モータの駆動を確認

以下詳細を述べる。

a) 13.56MHz 3kW インバータ

2015 年度までに 1kW 13.56MHz のインバータを Si MOS-FET を用いて実現した。今年度は 10kW の実現に向けて 3kW インバータの設計・製作を行った。1kW 設計のノウハウを活かし、かつさらなる高効率化を目指すために低オン抵抗デバイスである GaN HEMT MOS-FET(図 1)を使用し、かつ大容量化を実現するためにハーフブリッジモジュールの並列化(5 並列)による 3kW 出力を実現した(図 2)。並列化にあたってはそれぞれのハーフブリッジモジュールに 1kW 設計で得られた成果であるダンピング回路を挿入し、寄生インダクタンスを抑制した同一特性のモジュールを用いた。

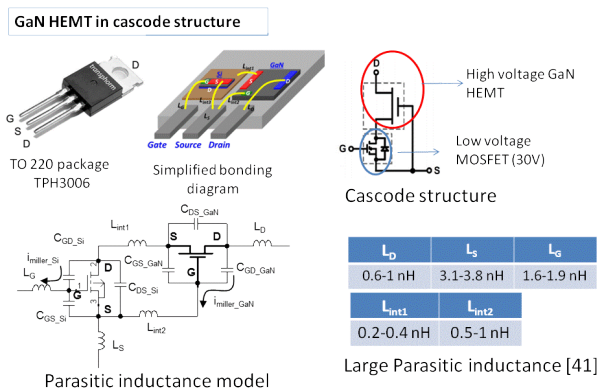


図 1 GaN HEMT cascode 構造 MOS-FET

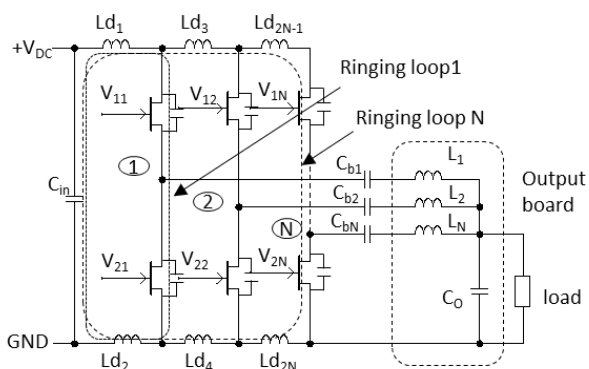


図 2 ハーフブリッジモジュールの並列化

図 3 に試作した 3kW インバータの写真を、図 4 に効率測定結果（シミュレーションと実験）を示す。3kW 出力時に 96.1%の効率を達成した。波形を図 5 に示す。

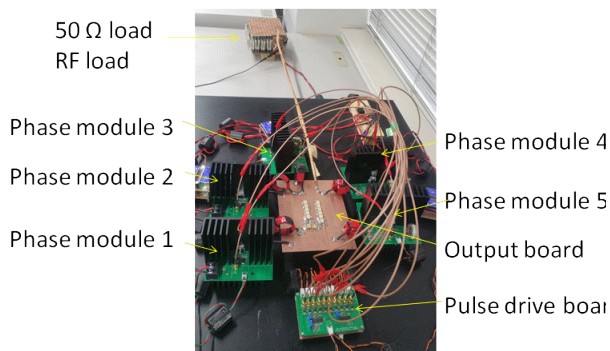


図 3 3kW 5 相インバータ写真

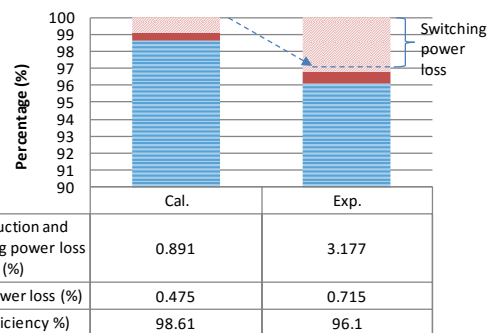


図 4 効率測定結果

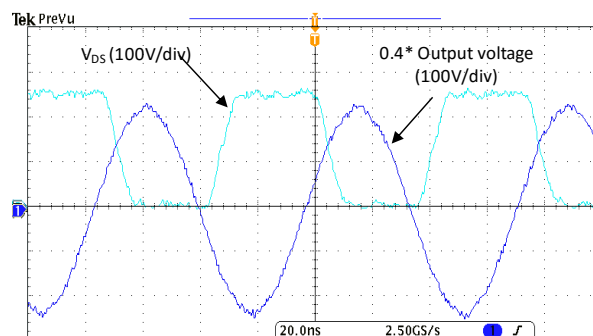


図 5 出力電圧波形

b) 13.56MHz 送受信コイルの設計

2015 年度に設計したコイルは共振方式に外部キャパシタを用いた方式であったため、大電力伝送時にはキャパシタの電圧が数 kV になりキャパシタが破壊するという問題があった。そのため 2016 年度は外部キャパシタを用いないリンクコイル方式（図 6）を採用し、アンテナの最適化をおこなった。図 7 に設計パラメータを示す。

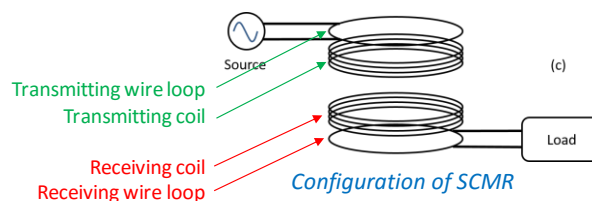
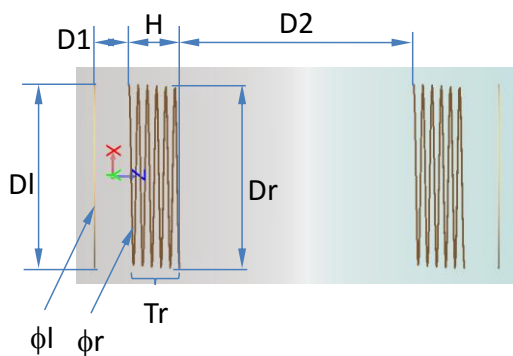


図 6 リンクコイル方式



ϕ_l (mm)	ϕ_r (mm)	Dl (mm)	Tr	H (m m)	$D1$ (mm)	$D2$ (mm)
2.6	2.6	400	5.5	110	70	500

図 7 設計パラメータ

図 7 のパラメータを用いてアンテナを設計し、かつ外部への漏えい磁界による損失を低減するために 3m x 3m x 2m のシールド BOX 内で実験を行った。その結果ほぼ理論効率どおりのアンテナ効率を得ることができた（図 8）。

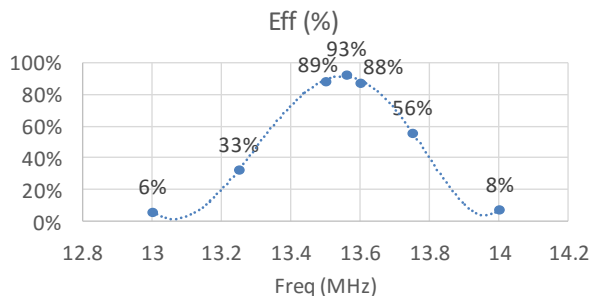


図 8 アンテナ効率（実験）

さらに、入力を 500W まで増加してシステム効率を測定結果、500W 入力時に伝送効率（入力→負荷）80%を得ることができた。したがって 400W 負荷まで駆動できることが確認できた（図 9）。

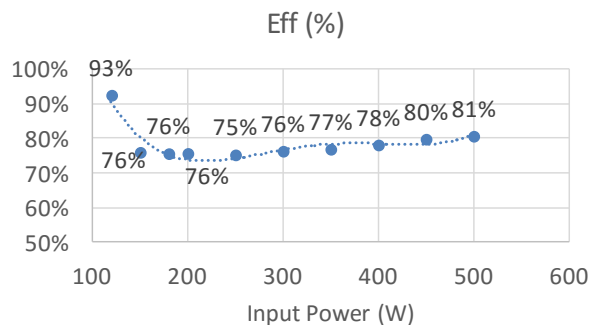


図 9 システム効率（実験）

今後はアンテナの電力損失を低減するためにリッツ線によるアンテナ製作を実施し、かつ負荷インピーダンスの変動に対処するためにリンクコイルをアクティブに動かしてインピーダンスマッチングを行う予定である。

c) 電力伝送実験において直流モータの駆動を確認

b)にてシステム効率の向上が実現できたため、負荷を電球ならびに直流モータにして実験を行った。電球の点灯状態を図 10 に示す。今後は負荷を交流モータに変更し、10kW モータの駆動を実現する。

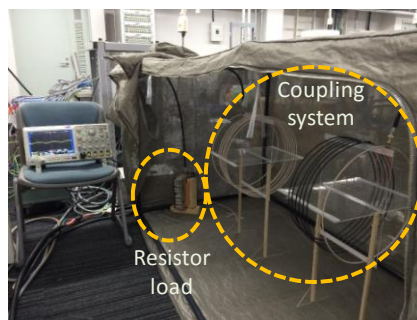
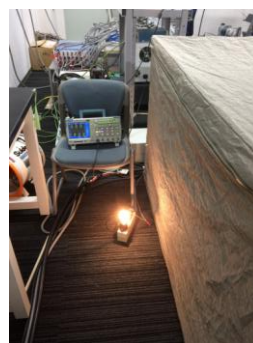


図 10 電球点灯時の写真

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

インバータについては作成した 3kW インバータを並列化した 10kW インバータを作成し効率 90%以上での動作を実現する。送受信コイルについてはリッツ線によるアンテナ設計および試作を行い 1kW 入力, 3kW 入力の実験を得た後 10kW 入力まで実現する（平成 28 年度）。またインピーダンスマッチングをリンクコイルのアクティブ制御を実施して、アンテナの位置ずれに対応した検討を行う。

別途 85kHz の伝送周波数を用いた大電力送電システムを完成させ、主にインピーダンスマッチングの実験を行い 13.56MHz への応用を目指す。

2015 年度の発表文献は以下のとおり。

-]
- [1] N. K. Trung, T. Ogata, S. Tanaka, K. Akatsu, "Analysis and PCB Design of Class D Inverter for Wireless Power Transfer Systems Operating at 13.56 MHz", *IEEJ Journal of Industry Application*, Vol. 4, No. 6, 2015, pp. 703-713.
 - [2] N. K. Trung, T. Ogata, S. Tanaka and K. Akatsu, "PCB design for 13.56MHz half-bridge class D inverter for wireless power transfer system", *9th International conference on power electronic-ECCE Asia (ICPE- 2015 ECCE Asia)*, June 1-5, 2015, Seoul, Korea, pp. 1692-1699.
 - [3] N. K. Trung and K. Akatsu, "Ringing suppressing method in 13.56MHz resonant inverter for wireless power transfer systems", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2015*, September 20-24, 2015, Montreal, Canada, pp. 2275 – 2281.
 - [4] N. K. Trung and Kan Akatsu, "13.56MHz high efficiency inverter for wireless power transfer systems using cascode GaN HEMT", *inproc. 3rd green innovation symposium*, poster section, 2016.
 - [5] N. K. Trung, T. Ogata, S. Tanaka and K. Akatsu, "Attenuate influence of parasitic elements in 13.56MHz inverter for wireless power transfer systems", *inproc. IEE-Japan Industry applications Society Conference (JIASC2015)*, 2015, pp.131-134.
 - [6] N. K. Trung and Kan Akatsu, "Analysis and ringing suppressing method in 13.56MHz resonant inverter for wireless power transfer systems", *inproc. 2nd green innovation symposium*, poster section, 2015
 - [7] N.T. Cuong and Kan Akatsu, "The Dependence of Efficiency, Power Transfer on Structure of Antenna in Wireless Power Transfer for Moving Electric Vehicle Charging with Magnetic Resonance Coupling", *SEATUC symposium 2015*.

以上

13. 56MHz 帯電磁界共鳴型アンテナの設計と伝送実験

通信工学科 田中 慎一

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

中距離・大電力の無線電力伝送として電磁界共鳴方式が注目されている。この方式の課題の一つは周囲環境によるアンテナ特性の変動であり、直接給電型のアンテナでは構成部品の可変容量による伝送効率の制御方法が報告されている。2015年度は、大電力に適した間接給電型のアンテナにつき、周囲環境による特性変動を解析し、それに対する制御方法を100W級の伝送実験も交えて検討した。

2. 研究計画

2014年度は13.5MHz帯無線電力伝送システムに向けたインバータの実現に向けて、インバータの安定動作を阻害する寄生インダクタンスを低減するための電磁界解析による基板設計を行った。2015年度は、13.56MHz帯において1kW級電力の伝送を可能にする電磁界共鳴型アンテナの実現を目指してアンテナの基本構成を検討し、また変動する外部環境に対してアンテナ特性を安定化させる方法について検討を行った。

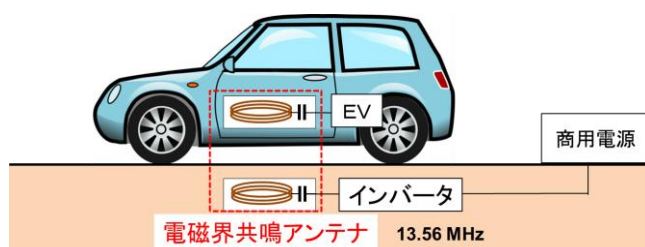


図1 EV充電システムのイメージ

3. 計画の進行状況

図2に無線電力伝送システム用の電磁界共鳴型のアンテナコイルを示す。直接給電型のアンテナは、コイルに外付けのコンデンサを繋ぐだけの簡易な構成でアンテナを実現できる利点がある。しかし、外付けコンデンサの耐圧は有限なため、大電力の伝送には適さない。一方、間接給電型のアンテナは、給電コイル（リンクコイル）と共鳴用コイルとから成る。この場合、電磁界共鳴に必要な容量は共鳴用コイルの線間浮遊容量を用いる。

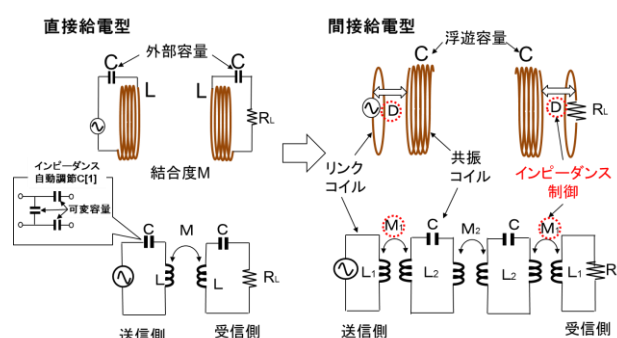


図2 電磁界共鳴型アンテナコイル

図3に共振コイルおよび距離D隔てて配置したリンクコイルから成る送受一体のアンテナの解析モデルを示す。周波数は13.56MHz、コイル径は400mm、伝送距離は500mmとした。電磁界解析シミュレータ(EMPro)においてはアンテナから $\lambda/2$ 離して吸収境界条件を設けた。伝送効率はSパラメータを用いて $|S_{21}|^2$ を計算して求めた。

この原因を解明するために、再び電磁界シミュレーションにより解析を行った。まず、疑われたのは、実験の際にアンテナからの電磁界の漏れを防止するための電磁シールド（導体のメッシュ）での損失である。実際にシミュレーションによりアンテナ周囲の電磁界の分布を調べたところ、図 6 に示すように電磁シールドの位置まで電磁界の分布が広がっていることが確認された。しかし、実験においては電磁シールド自身の温度上昇は観測されておらず、電磁シールドにおいて一定の損失が発生していたにせよ、伝送効率低下の支配的要因とは考えにくいと判断した。

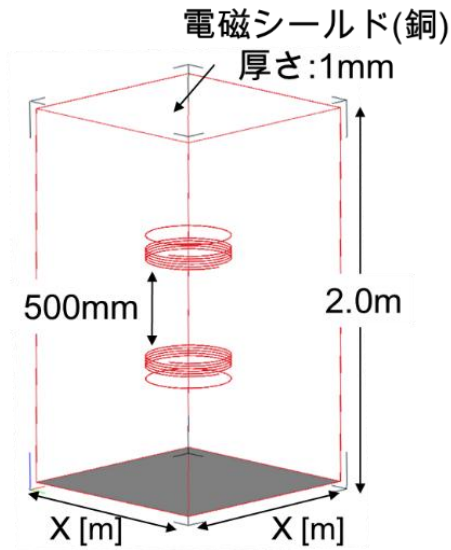


図 3 アンテナの解析モデル

図 4 にアンテナの伝送効率の周波数依存性を示す。電磁界解析でアンテナの構造パラメータを最適化し、実際にアンテナを試作した（図 5）。まず、ネットワークアナライザを用いて微小信号における試作アンテナの伝送特性を測定したところ、電磁界解析とほぼ同じ特性を確認することができた。次に 120W の電力伝送実験を行ったところ、伝送効率が電磁界解析より大幅に低下することが判明した。このとき共振周波数も設計より高周波数側にずれた。

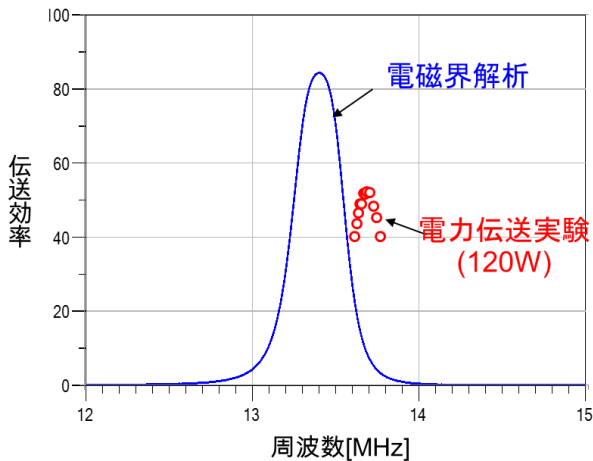


図 4 伝送効率の周波数依存性

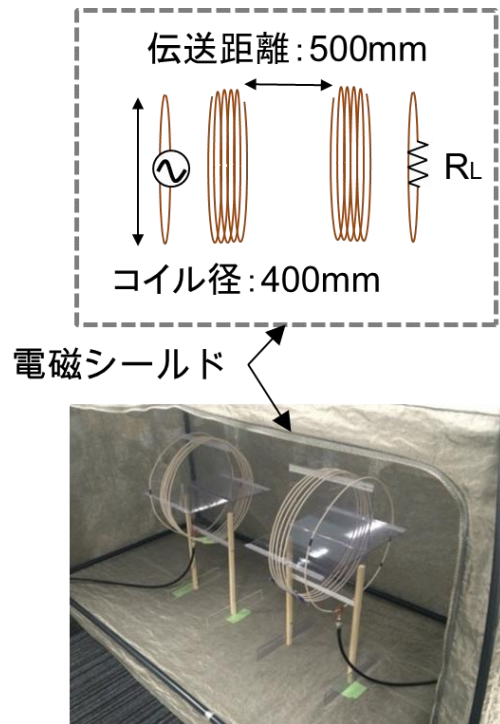


図 5 試作した間接給電型アンテナ

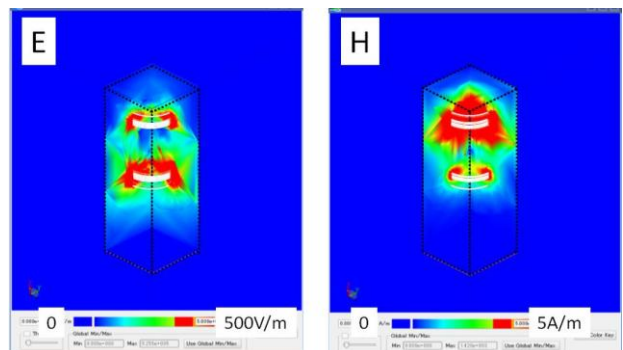


図 6 アンテナ周囲の電磁界分布（解析）

次に、電磁界シールドの存在により、電磁シールドを含めたアンテナのインピーダンスが変動した可能性について検討を行った。図7に電磁シールドの寸法X（図3）を無限にした場合と実験と同様に1mとした場合の伝送効率とインピーダンスの周波数依存性を示す。この結果から、電磁シールドがアンテナ近傍に存在することでインピーダンスのずれが生じ、ピーク伝送効率並びに共鳴周波数に対して顕著に影響が及ぶことが明らかになった。

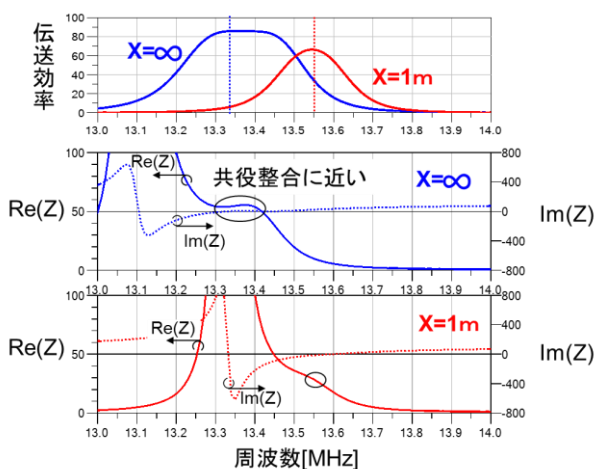


図7 アンテナの解析モデル

電磁シールドのような外部導体がアンテナのインピーダンスに影響を与えるならば、実用場面では外部導体に対してインピーダンスを適応させる仕組みが必要になると考えられる。図8は、送信側の信号源のインピーダンスを 50Ω と仮定して、受信側の負荷抵抗 R_L を変えたときのアンテナ伝送効率の動きを計算した結果である。

アンテナの初期の構成では外部導体がないときは $R_L=50\Omega$ でピーク効率が得られるが、そこに外部導体加わると最適な負荷抵抗 R_L は 20Ω になる。これはアンテナのインピーダンスが 50Ω から 20Ω に変化したことを意味する。そこで、アンテナのリンクコイルと共鳴コイルとの間隔Dを初期の80mmから100mmに調整すると再び最適負荷抵抗が 50Ω

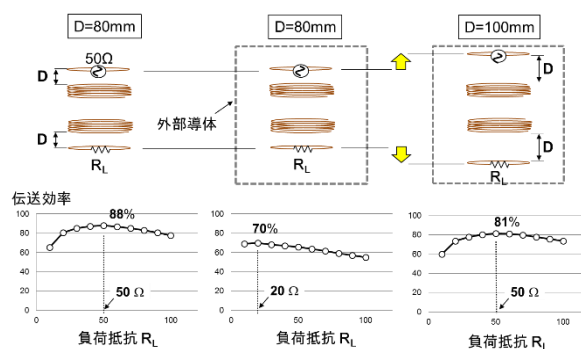


図8 伝送効率の負荷抵抗依存性（計算）

図9はD値を変えたとき伝送効率に変化する様子を計算した結果である。外部導体がないときの最適D値は80mmであるが、外部導体を置いたとき最適D値が100mmに変わっていることがわかる。この結果は、たとえばメカニカルな機構によりD値を制御することで、アンテナに外部導体が接近するなどの環境変動に対しても常に最適な電力伝送を維持できる可能性を示唆している。

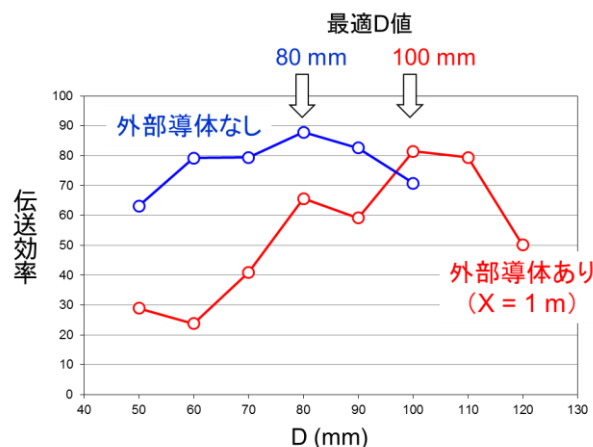


図9 伝送効率のD値依存性（計算）

以上の解析と考察が正しいことを確認するため、再実験を行った。図10にアンテナの周囲に外部導体（電磁シールド）を配置する前と後で、D値を変えながら伝送効率を測定した結果を示す。まず、ネットワークアナライザを用いた小信号伝送の実験では、図9の解析と同じ傾向を確認することができ、外部導

体を置くことで一旦低下した伝送効率を D 値の増加により回復できることを確認した。次に、同様のことを 120W の電力伝送実験で確認した。D 値を一定に保った状態で電磁シールドを設置すると伝送効率が大幅に低下することのやはり D 値を増やすことで伝送効率が回復することを確認できた。このときの伝送効率の値は小信号での実験と変わらず、その意味で、今後さらに電力を向上させる上で期待が持てる結果ともいえる。

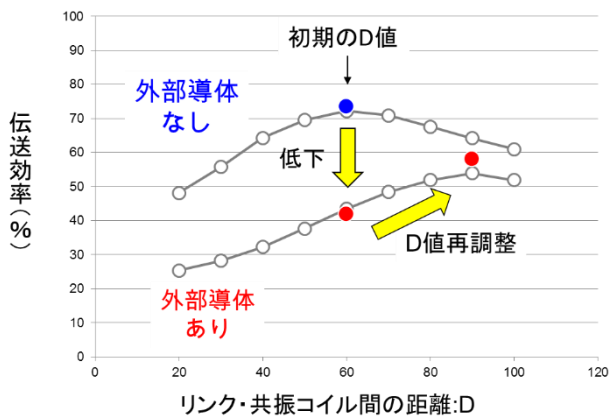


図 10 伝送効率の D 値依存性（実験）

(○：小信号 ●●：120W 伝送)

4. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今年度は 13.56MHz において 120W の電力伝送が可能なアンテナを設計することができたが、今後 1kW 級の電力伝送を目指して、アンテナの低損失化の検討を進めていく。関連の発表として国内学会で 1 件の口頭発表を行った。

- [1] 尾形拓也、ニューエン キエン トウルン、ニューエン トリ クオン、赤津観、田中慎一、「間接給電アンテナの周囲環境変動に対する制御方法の検討」電子情報通信学会総合大会 B-21-20 2016 年 3 月 16 日（九州大学）

軽負荷運転域における高効率 EV 用モータに関する研究

工学部電気電子学群電気工学科 教授 下村 昭二

1. 序論（はじめに、まえがき、目的）

電気自動車の駆動用モータは、ゼロ速度から 1 万数千 prm（1 分間の回転数）までの広い速度範囲で運転される。その速度領域は、定トルク領域（低速側）と定出力領域（高速側）に分けられ、その比は約 1:4 である。駆動用モータの最高効率の実績は約 96% であるが、これは定出力領域における狭い運転領域に限られる。しかしながら、駆動用モータには、広い運転領域全体にわたり高効率が求められており、特に低速領域の軽負荷運転時における高効率化が課題になっている。従来モータの低速領域における低効率の主要因は銅損であり、これを低減できれば効率の向上が期待できる。

2. 研究計画

上述の課題を克服するために、低速大トルク特性を持つ永久磁石形バーニアモータ（PMVM）に着目した。このモータは、電流あたりのトルクが大きく、銅損が小さいという特長を持っている。

本件研究では、ホイール内に設けるアウトロータ形 PMVM と二つのロータを持つ Dual Rotor Axial Flux PMVM（DR-AFPMVM）について検討を行ってきた。DR-AFPMVM については、2015 年度前半までに理論とシミュレーションによる特性検討をほぼ終了し、後半は試作機であるダウンサイズモデルの仕様決定、詳細設計、実験システムの構築を進めた。2016 年度には試作機および実験システム

の組み立てを行い、実験による評価を実施する予定である。

3. 計画の進行状況

<3.1> DR-AFPMVM の基本構成

図 1 に DR-AFPMVM の断面図を示す。固定子を挟むように 2 枚の回転子があり、固定子ヨークは存在せず、各ティースは独立している。この構造は、電機子起磁力により発生する磁束を減らすことにより、磁気飽和を低減することができる。アキシアル形では、磁束が 3 次元的に流れるため、一般的に電磁鋼板の代わりに圧粉磁心(SMC: Soft Magnetic Composite)が用いられる。本検討においても、鉄心材料は SMC コアを用いることを想定した。

次に PMVM について説明する。PMVM は磁気ギア効果により低速で大トルクを発生する⁸⁾。固定子スロット Z_1 と回転子磁石またはスロット Z_2 、電機子極対数 p には以下の関係がある。

$$Z_1 = 6apq \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_2 = Z_1 \pm p \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a : 正の整数、 p : 電機子極対数、 q : 毎極毎相スロットである。

以前検討した DR-AFPMVM は $p=2$, $Z_1=12$, $Z_2=10$ であった。このモデルでは回転子極数が 20 極となり、高回転域まで使用する HEV 駆動用モータの場合、駆動周波数が高くなるため、鉄損の増加やインバータ効率の悪化が考えられる。そこで、電機子極数とスロット構成を見直し、 $p=2$, $Z_1=6$, $Z_2=4$ とした。この構成は、以前のモデルより巻線係数が 1.7 倍大きい。検討したモデルの回転子極数は 8

極となり、比較対象の駆動用モータと同じ極数である。

<3.2>インセット構造による不可逆減磁対策の検討

図 2 に DR-AFPMVM の外観図、表 1 に仕様を示す。モータ体格は比較対象である第三代トヨタプリウスを参考にした。回転子バックヨークの厚さは 12.6mm、磁石の厚さは 10mm、ギャップ長は 0.5mm とした。また、本検討では、初期モデルに対して回転子のみを変更し、固定子や電機子巻線は変更しない。図 3 に SPM モデル(初期モデル)とインセット形 SPM(Inset SPM)モデルの回転子表面図を示す。図 3(b)のインセット形では、磁石幅は電気角で 120 度である。磁石間は SMC コアが埋め込まれている。

図 4 に 2 つのモデルのトルク波形の FEM 解析結果を示す。この図における時刻 t_a から t_b の間には回転子は機械角で 90 度回転している。表 2 に電流位相角、平均トルク、トルク脈動率およびトルク減少率を示す。今回の検討モデルは、前回の検討モデル機⁽²⁾に比べトルク脈動が大きいが、インセット形モデルではさらにトルク脈動が大きくなっていることが図 4 からわかる。また、トルクのピーク値が時間の経過とともに徐々に減少していることがわかる。これは永久磁石の不可逆減磁によるものである。表 2 に示したトルク減少率は、図 4 で示したトルクピーク値の減少の程度をパーセントで示している。その減少率は、SPM モデルで 2.0%、インセットモデルで 0.6%であり、不可逆減磁の程度がインセットモデルで改善

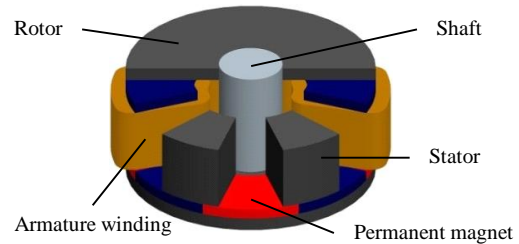


Fig. 2. External view of the DR-AFPMVM.

Table 1. Specification of DR-AFPMVM.

Outer diameter	264 mm
Axial length	108 mm
Rotor back yoke	12.6 mm
Magnet thickness	10 mm
Air gap length	0.5 mm
Maximum power	60 kW
Maximum torque	207 Nm
Magnet material	NdFeB bonded magnet
Core material	SMC

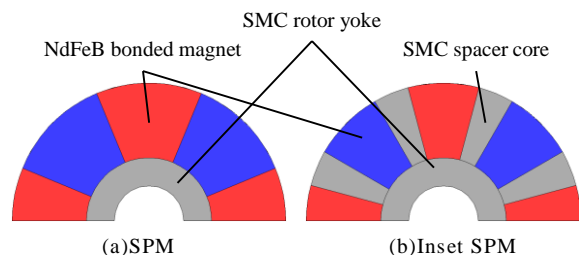


Fig. 3. Surface view of SPM and Inset SPM rotor.

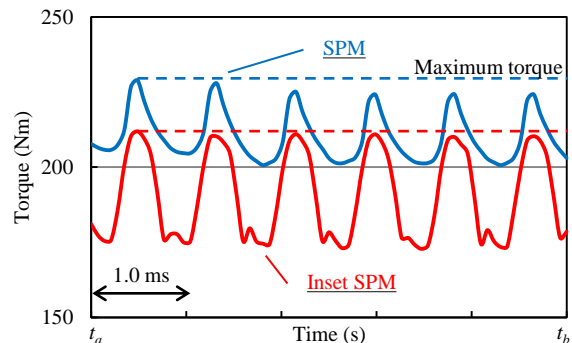


Fig. 4. Torque waveform of SPM and Inset SPM.

Table 2. Simulation result of SPM and Inset SPM.

	SPM	Inset SPM
Current phase angle β	0 deg.	25 deg.
Average torque	210 Nm	190 Nm
Torque ripple	13.4 %	20.6 %
Torque decreasing rate	2.0 %	0.6 %

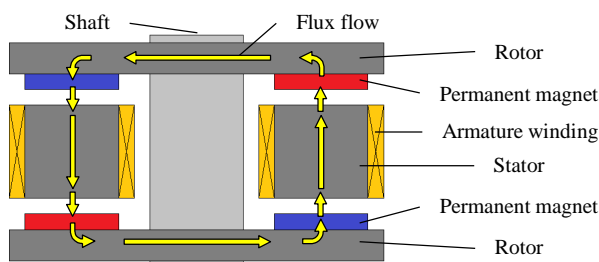


Fig. 1. Flux flow of dual rotor structure.

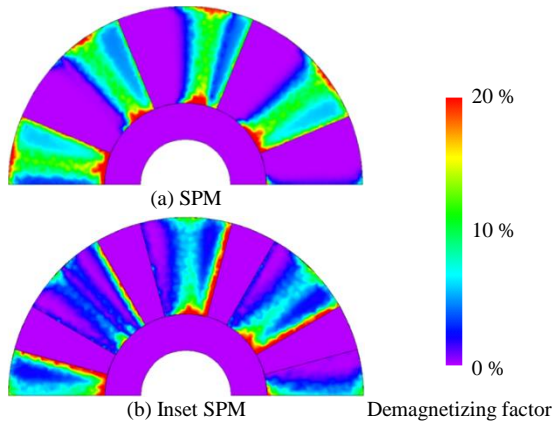


Fig. 5. Demagnetizing contour of SPM and Inset SPM.

次に示す図5は、図4で示した時刻 t_b における減磁率コンター図である。減磁率コンター図とは、永久磁石の残留磁束密度の減少率を表している。図5においても、インセット形モデルでは、不可逆減磁に対する改善効果があることがわかる。しかしながら、平均トルクが 210 Nm から 190 Nm に約 10% 減少する結果となった。そこで、平均トルクの減少を極力抑え、かつ不可逆減磁も抑制できる永久磁石形状について検討した。その詳細を次章に示す。

<3.3>V字インセット形 SPM

前章の Inset SPM では、不可逆減磁の対策としての効果は見込まれたが、平均トルクは約 10% 減少した。図5より、アキシアルフラックス形の円盤状回転子は、内側が減磁しやすい傾向であることがわかる。そこで、永久磁石を V 字形状にカットした回転子について検討した。磁石をカットした部分には、SMC コアが埋め込まれている。この構造を V 字インセット形 SPM (V-shape Inset SPM) と呼ぶ。図6に検討した V 字インセット形の回転子表面図を示す。また、V 字インセット形では、永久磁石を回転子表面から 0.25 mm 低くし、磁石厚さを 10 mm から 11 mm に厚くしたモデルについても検討した。ただし、回転子の厚さは 1 ロータに対して 1.25 mm 厚くした。このモデルをアンイーブンギャップ V 字インセット形 SPM (Uneven Gap V-shape Inset SPM) と呼ぶ。

図7にフラットギャップ V 字インセット形(永久磁石のエアギャップ側面の高さが、回転子鉄心と同一)モデルとアンイーブンギャップ V 字イン

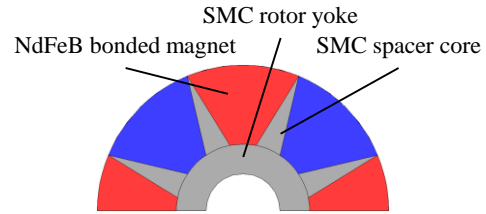


Fig. 6. Surface view of V-shape Inset SPM rotor.

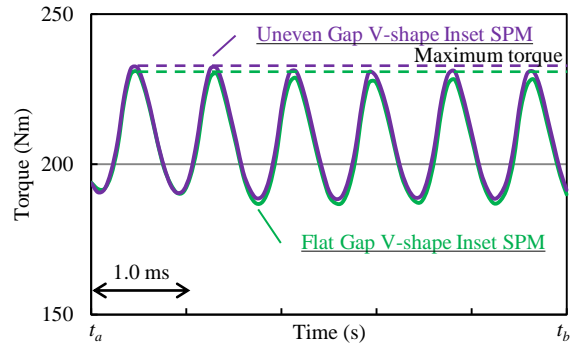


Fig. 7. Torque waveform of V-shape Inset SPM.

Table 3. Simulation result of V-shape Inset SPM.

	Flat Gap V-shape Inset SPM	Uneven Gap V-shape Inset SPM
Current phase angle β	15deg.	
Average torque	206 Nm	208 Nm
Torque ripple	21.2 %	20.9 %
Torque decreasing rate	1.7 %	0.8 %

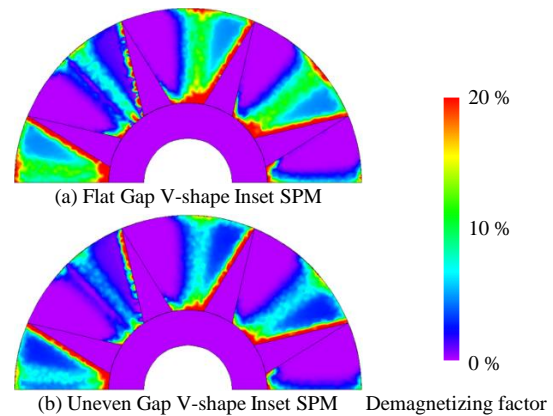


Fig. 8. Demagnetizing contour of V-shape Inset SPM.

セット形モデルのトルク波形を示す。また、表3には、2つの V 字インセット形モデルについて計算した、表2と同じ評価値が示されている。図8に減磁率コンター図も示す。

フラットギャップ形とアンイーブンギャップ形のどちらも、平均トルクは SPM に対してわずかに小さいだけであるが、減磁によるトルクの減少率は、フラットギャップ形が 1.7%、アンイー

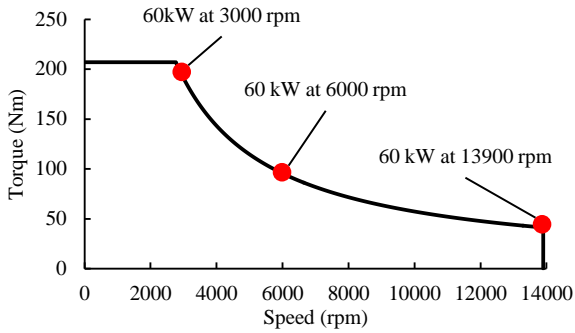


Fig. 9. N-T curve of target machine.

Table 4. Specification of Uneven Gap V-shape Inset DR-AFPMVM.

Armature resistance R (Ω)	0.033
Magnet flux-linkage Ψ_a (Wb)	0.11
d -axis inductance L_d (mH)	0.58
q -axis inductance L_q (mH)	0.72

ブンギャップ形が 0.8%と大きく改善されていることがわかる。

<3.4>弱め磁束制御の諸特性

前章の Uneven Gap V-shape Inset SPM の弱め磁束制御性を確認するため、電流ベクトル選択可能範囲について検討した。まず、モータ端子解放時の永久磁石による電機子鎖交磁束と三相駆動時の電機子鎖交磁束を FEM 解析により求め、 d 、 q 軸インダクタンス L_d 、 L_q を以下の式より算出する。

$$I_a = \sqrt{3}I_e \dots\dots\dots (3)$$

$$i_d = -I_a \sin \beta \dots\dots\dots (4)$$

$$i_q = I_a \cos \beta \dots\dots\dots (5)$$

$$\Psi_a = \sqrt{3}\Psi_{ua} \dots\dots\dots (6)$$

$$\Psi_o = \sqrt{3}\Psi_{uo} \dots\dots\dots (7)$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos \alpha - \Psi_a}{i_d} \dots\dots\dots (8)$$

$$L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 I_e : 相電流実効値、 i_d, i_q : d, q 軸電流、 β : 電流位相角、 Ψ_{ua} : 永久磁石による電機子鎖交磁束の基本波実効値、 Ψ_{uo} : 三相駆動時の電機子鎖交磁束の基本波実効値、 α : Ψ_{ua} と Ψ_{uo} の位相差である。

次に電流ベクトル選択可能範囲を求めるため、(10)式より電流制限円、(11)式より電圧制限円を求め。

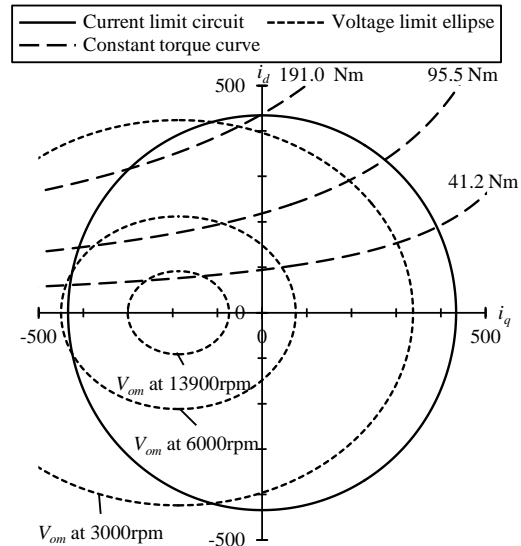


Fig. 10. Current limit circle, voltage limit ellipse, constant torque curve.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \dots\dots\dots (10)$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 I_{am} : 電流制限値、 V_{am} : 電圧制限値、 v_d, v_q : d, q 軸電圧である。

ここで、簡単化のため(12)式により電圧制限値を誘起電圧制限値に置き換え、(13)式で表される電圧制限楕円とする。

$$V_{om} = V_{am} - RI_{am} \dots\dots\dots (12)$$

$$V_o = \omega \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \leq V_{om} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 V_{om} : 誘起電圧制限値、 R : 電機子巻線抵抗、 ω : 電気角速度である。

また、(14)式より定トルク曲線を求める。

$$T = P_n \{ \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 P_n : 極対数である。

図 9 は、Oak Ridge National Laboratory を参考に描いた比較対象モータの N-T 曲線である。図 9 より、2768rpm~13900rpm の高回転域では 60kW 定出力運転が求められる。つまり、13900rpm までの各回転数で、60kW を満たす電流ベクトルが(13)式で表される誘起電圧制限楕円内であれば、定出力運転が可能である。表 4 に 3000rpm 時の各パラメータを示す。本検討では、表 4 の各パラメータを用いて図 9 における 3000rpm、6000rpm、13900rpm 時の各電圧制限楕円を求め、60kW 出力を満たす電流ベクトルを確認した。

図 10 に(10)式より求めた電流制限円, (13)式より求めた 3000rpm, 6000rpm, 13900rpm 時の電圧制限楕円, (14)式より求めた各回転数における 60kW 出力時の定トルク曲線を示す。図 10 より, 各回転数において, 60kW 出力満たす電流ベクトルが電圧制限楕円内で選択可能であることがわかる。よって, 比較対象モータと同様に最高回転数 13900rpm まで定出力運転が可能であることが確認できた。

4. 今後の計画及び学会論文等投稿・発表状況

今後は、2016 年度中に試作機 (Fig. 11) および実験システムの組み立てを完了し, 実験によって提案機の原理検証を完了する予定である。これまでの成果は, ICEMS2014, 2015 年電気学会産業応用部門大会で発表済みであるが, 実験による検証終了後に論文投稿を予定している。

●関連する学会発表

- (1) 小久保陽平, 下村昭二:「弱め磁束制御のためのデュアルロータアキシアルフラックス PMVM」, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 163-166 (2015-09-02), 3-24
- (2) Shoji Shimomura, “Numerical Consideration of Integrated Radial and Dual Axial-Flux Ferrite Magnet Synchronous Machine,” 8th Annual IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2016), Accepted.

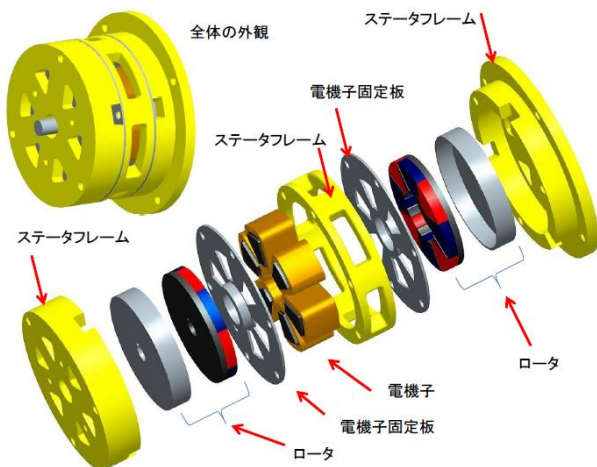


Fig. 11 Illustrated prototype PMVM.

電力受信および利用方法の研究

工学部電気電子学群電気工学科 藤田吾郎

1. 序論

ワイヤレス電力伝送の実現にあつては、走行中非接触給電のデモンストレーション装置の製作を行うことで、非接触給電を誰にでも理解できるものとし、模擬装置を製作することで実際に起こりうる問題を想定し、走行中非接触給電装置をインフラとして導入する際の課題抽出を行うことが本研究の目的である。

2. 研究計画

下記の大きな2つのテーマを設定した。

①デモンストレーション装置の製作

運用方法、課金方法、回路構成、事業主体などを含めて提案する。製作したデモ機を利用して試験を行い、コイルの形状や配置などを検討してインフラの検討を行う。

②インフラとしての課題抽出

国土交通省データ道路状況データを元に、導入シナリオを設定して、課題抽出と課金の方式などの検討を行う。

3. 走行中非接触給電の導入検討

3.1 先行研究

2つの先行研究を紹介する。

3.1.1 On-Line Electric Vehicle (OLEV)^[1]

このプロジェクトは2010年の50個の優秀な発明品の一つとしてタイムズマガジンが取り上げ、2013年のTOP10のテクノロジーの一つとして世界経済フォーラムが取り上げたものである。これを手掛けた韓国高度科学技術研究所(KAIST)とドンゴンのOLEV社の協力関係は2009年から続いている。道路に埋め込

まれた給電装置と電気バスの非接触給電のメカニズムと電力効率改善装置を検討している。磁界共鳴方式を採用し、いくつかの電力効率改善装置を電気バスに搭載することで100[kW]の電力伝送ができる。伝送距離は20[cm]で効率は74%である。

3.1.2 Qualcomm HALO WEVC^[2]

Qualcomm HALO Wireless Electric Vehicle (WEVC)は、Qualcomm社がライセンスを取得したものである。Qualcomm HALOにおいても磁界共鳴方式を採用している。



図1 HALOの非接触給電装置^[3]

3.2 非接触給電^[3]

金属接点を持たない電力伝送はメンテナンス問題など様々な課題を削減できるものである。そこで、自動車メーカーなどは非接触給電の技術を用いて充電装置を開発し始めていた。現在、日産やトヨタでは駐車時に非接触給電でリーフやプリウスに充電できる実用試験を行っている。基本的な充電方式は電磁誘導方式・磁界共鳴方式・マイクロ波電力伝送方式の3種類があり、各社はこのいずれかの方式を用いている。

SIT 総合研究所研究成果報告書（センター員用）
ける設置場所の検討を行った^[5]。表 1 は検討場所である。

表 1 交通渋滞ランキング

1	東名高速道路 横浜町田 IC～海老名 JCT(上り) 海老名 JCT～横浜町田 IC(下り)
2	東名高速道路 秦野中井 IC～厚木 IC(上り)
3	中国高速道路 西宮山口 JCT～宝塚 IC ※朝渋滞ピーク
4	中央高速道路 稲城 IC～調布 IC(上り) ※夕方渋滞ピーク
5	関越高速道路 大泉 JCT～練馬 IC(上り)

3. 3 安全規制

非接触給電は電力伝送の間に導体が存在しないため、電磁界が送電装置と受電装置の間の空気間を通して電力が送られる。そのため、漏れた分の電磁界が人体へ影響を与えてしまう課題がある。しかし、この人体に影響を与える電磁界を制限する安全規制を定めている組織が現状ではほとんど存在していない。本研究では、国際委員会である ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation) と IEEE のガイドラインを参考にした。非接触給電における電磁界の漏れ限界は、基本的に周波数によって決まる。なお周波数は ISM バンドの 1 つである 13.56[MHz], または標準化を考慮してトヨタなどが使用している 85[kHz] が有力であると考えている。

3. 4 高速道路の走行中非接触給電

走行中非接触給電は、電気自動車の課題の 1 つである航続距離に対して懸念を抱いている長距離運転者向けへの検討を行う必要がある。この新しいインフラは、現在のプラグイン式充電ステーションを補い、継ぎ足し充電をする事で航続距離を延長することが出来る。走行中非接触給電を実現するために提案されたインフラ形態を図 2 に示す。

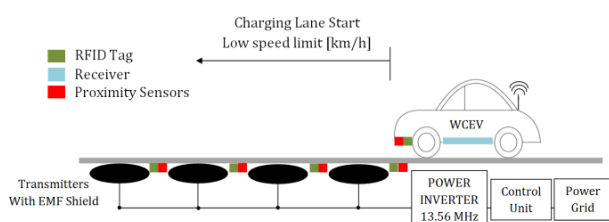


図 2 走行中非接触給電システムの構成

図 2 の赤色の部分が近接センサーになっており、接近した車を検出し車の速度に従ってトランスミッターコイルを作動させる。緑色の RFID タグは乗り物の識別に向いている機器であり、登録されている電気自動車だけが充電をする事が出来ると期待できる。我々は国土交通省(MLIA)とネクスコ中日本から提供されたデータを使って、日本の高速道路にお

加えて、走行中非接触給電には東京電力などの電力会社やネクスコ中日本などの道路会社の 2 つ企業のインフラのオペレーションを考慮する必要がある。例えば電力会社の電気料金制度を、渋滞のピーク時間を減らすための走行中非接触給電の電気料金と ETC システムの課金料金にどう適用していくかである。

3. 5 走行中非接触給電の料金換算

走行中非接触給電によって充電ができる電気自動車の充電価格(円/kWh)とガソリン車の走行距離当たりの燃料消費(km/l)を相対的に比較を行った。計算結果を表 2 に示す。ここでの走行中非接触給電での充電価格は、渋滞ピークの時間帯を 50 円/kWh、ピークとピークでない間の時間帯を 25 円/kWh に設定した。ガソリン価格は国土交通省の 2014 年 4 月から 2015 年 12 月までのレギュラーガソリンの平均価格データである 130 円/l を採用した。

表 2 日産リーフにおける換算値

充電場所	住宅	公共
ガソリン車への換算値[km/l] (昼間の充電: 30 円/kWh)	33.8	36
ガソリン車への換算値[km/l] (夜間の充電: 13 円/kWh)	78	
走行中非接触給電有り(Example: 場所-上り) 予想伝送電力(効率 90%): 0.702[kWh] 延長航続距離: 5.2[km]		
ガソリン車への換算値[km/l] (ピーク時の充電: 50 円/kWh)	19.5	
ガソリン車への換算値[km/l] (ピーク以外の充電: 25 円/kWh)	39	

表 1 より、住宅や公共の換算値(33.8 または 36)よりもピーク以外で充電する場合の換算値(39)の方が良いことがわかる。このことにより渋滞がピーク以外の時に走行中非接触給電で充電することに期待できるといえる。

3. 6 まとめ

高速道路における走行中非接触給電システム・安全性・デザインの検討を行った。下記に実現にあたって、今後解決する必要がある課題について記載する。

- (1) 走行中非接触給電の研究開発・導入費用
- (2) 非接触給電システムの標準化

国際自動車技術協会(SAE)は 85[kHz]が、kWクラスの非接触給電に対して最適と提案した。

- (3) 電力会社との協調

現在の電力系統へ走行中非接触給電システムを接続すると、急速な切り替えにより電圧や周波数に変動を与える可能性が大きい。

4. デモンストレーション装置の製作^[6]

インフラとしての導入を想定するため、走行中非接触給電が出来るデモンストレーション装置(以下、デモ装置)を製作した。改造が容易であり、速度変化ができレール上を走ってシステムを構築しやすいことから車体には LEGO トレインを使用している。また、デモ装置に組み込んだ非接触給電キットの詳細を表 3 に示す。将来的に磁界共鳴方式に注目しているが、現段階では電磁誘導方式を採用している。デモ装置に採用した LEGO トレインの動力源が乾電池であり充電ができないため EDLC に変更した。その EDLC を含めた非接触給電受電回路の概略図を図 3 に示す。

表 3 実験キットの詳細

給電方式	電磁誘導方式
最大伝送電力	4.4W
周波数	130~200kHz
インダクタンス	12.1 , 9.0 , 8.7μH
ACアダプタ	DC12V , 0.6A

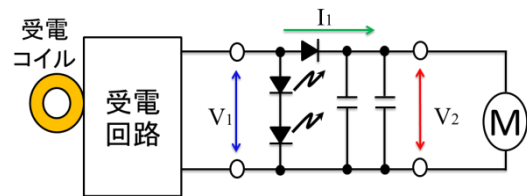


図 3 受電回路

4. 1 スwitchング回路の製作

現在のデモ装置は送電コイルが 8 つ設置されており、電力損失の低減のために車体がコイルの上を通った時だけリレーが動作するようにスイッチング回路を作成した。また、そのリレーを動作させるために LabVIEW というシステム開発ソフトウェアを使用し、フォトリフレクタから出てきた信号を取り込み、しきい値電圧を超えるとリレーが動作するプログラムを作成した。その概要図を図 4 に示す。

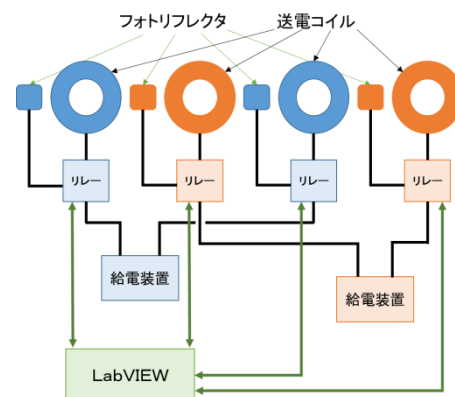


図 4 スwitchング回路のイメージ

4. 2 実験

インフラ導入の検討をするために 2 種類の実験を行った。

- (1) 車体の速度の違いによる実験

走行中の充電状態を確認するため

- ・デモ装置の車体の速度の違い
- ・デモ装置の車体の充電量の違い

を条件として実験を行った。その例を図 4 に示す。約 9V あるとほぼ満充電となっており、図 5 は約 4V で充電量は少なめであるため、約 3W 受電が出来ている状態である。ほぼ満

充電の時は充電ができない結果となった。

(2)コイルの形状の違いによる実験

丸型のコイルのほかに中楕円と長楕円の2種類のコイルを製作し、3種類の形状の違う送電コイルでの伝送実験を行った。コイルのサイズを表4に示し、中型の楕円型コイルの場合の結果を図6に示す。図6を見ると楕円型のコイルを使っていることから、受電電力のグラフが少し水平な面が出来た。丸型の場合はグラフが尖ったような形になり、形状によって変化が見られた。

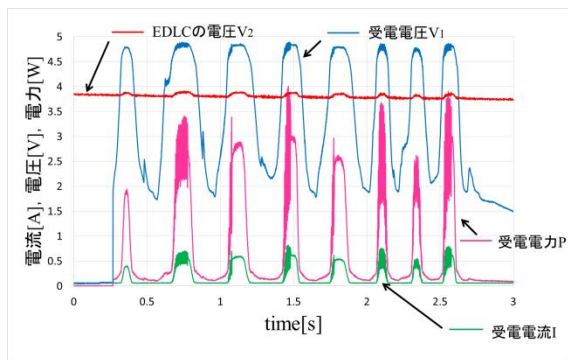


図5 実験結果 (充電量:少ない, 速度:遅い)

表4 コイルの大きさ

	丸型	中楕円	長楕円
縦	28mm	30mm	25mm
横	28mm	61mm	92mm

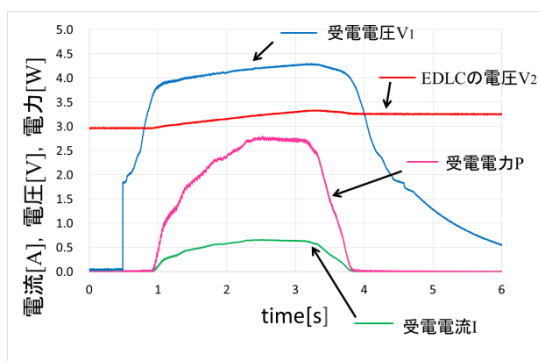


図6 実験結果(楕円コイル&楕円コイル)

4. 3 モニタリング

デモンストレーション装置の製作では、研究対象のイメージを可視化すべく、図1のPCのLabVIEWを利用し、そのデータから電流、送電量を演算・グラフ化によって、充電状況をモニタリングでき、コイル配置の最適化、コイルの形状を検討した。研究成果を関連研

SIT 総合研究所研究成果報告書(センター員用) 究者に限らず、広く周知するためのツールとしても利用可能にした。

5. まとめ

デモ装置の製作では「リレー回路の設計・製作とリレーを動作させるプログラムの作成・モニタリングのプログラムの作成」が完了した。今後は他に数種類の条件の実験を行い、実験結果からインフラとして導入する検討を行う。インバータなどの設備容量の推定などする予定であるが、実験結果をどのように関連付けて行くかが今後の課題である。

6. 今後の計画及び学会、論文等投稿・発表状況

今後はインフラとしての条件を確定させて提案ベースに持っていくとともに、デモ装置の耐久性を高めてデモへの活用を予定する。発表に関しては国際会議発表3件となった。

- [1] Azreezal Zairee Bin Omar, Goro Fujita, 'Towards Japan's Future EV-Friendly Highway Concept With In-Motion Road-Embedded Wireless Chargers', 10th SEATUC Symposium, (2016-2, Tokyo, Japan)
- [2] Yukimori Honda, Goro Fujita, 'Preliminary Review of Electric Vehicle In-Motion Wireless Charging', in Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, (2015-7, Hong Kong)
- [3] Azreezal Zairee Bin Omar, Goro Fujita, 'Electric Vehicle Dynamic Charging and Safety Related Studies', in Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, (2015-7, Hong Kong)

参考文献

- [1] Seungyoung Ahn *et. al*, "Charging up the road", Spectrum IEEE, Vol. 50, Issue 4, pp. 48-54, April 2013
- [2] Thomas Nindl, "Qualcomm Halo™ WEVC Interoperability: Multi-coil resonant magnetic induction", eMonday, July 21st 2014
- [3] "Qualcomm BMW i8 Formula E safety car receives upgrade", by Tim Biesbrouck, www.electriconsport.com/2015/08/qualcomm-bmw-i8-formula-e-safety-car-receives-upgrade/
- [4] Ke Wu *et. al*, "Wireless Power Transmission, Technology, and Applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 6, June 2013
- [5] "Highway's Traffic Jam Situation (Newsletter)", Heisei 26, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (in Japanese)
- [6] Yukimori Honda, Goro Fujita, 'Preliminary Review of Electric Vehicle In-Motion Wireless Charging', in Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, (2015-7, Hong Kong)

おわりに

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業として5年間の研究成果をまとめた。

目的であるパワーエレクトロニクス研究者が集合する垂直統合型研究拠点の形成と、研究拠点による研究成果の社会還元は十分に実施できた。しかしながらニーズからシーズまでを把握したT定規型学生の輩出については、課題が残った。当研究拠点ではおよそ月1回の頻度で研究担当学生または教員による研究発表を実施していたが、各研究室における大学院生の確保が十分でなく、かつ他分野学生の異分野への興味、関心、理解が十分得られるような研究発表会が実施できなかった。これは分野横断研究実施に伴う組織的な問題であった。2018年5月13日の新聞報道(日経)“工学部の組織編成を柔軟に AI・データ人材育成 文科省が「課程」設置促す”にあるような、各学科に分かれた組織ではなく、当初から関連分野を横断的に配置した“課程”設置が、分野横断研究実施には必須の形態であると思われ、“課程”での研究をプレイヤー(研究者)以外の強力な研究推進マネージャーによるトップダウン型の研究・教育を実施することが必要であると思われる。T定規型人材の育成には、入学当初の早い時期から、専門分野にこだわらない教育を施す必要があり、“課程”設置こそが研究者間のより一層の交流および設備共有による研究スピードの向上が実現できると思われる。

パワーエレクトロニクスは分野横断的な学問であり、日本におけるイニシアティブを継続・維持・発展させるためにはシーズ技術からニーズ技術までを広く深く理解した学生輩出が必要であること強く思い、本報告の結びとする。