

## 別 紙

### 開発項目

「S I P（戦略的イノベーション創造プログラム）／次世代パワーエレクトロニクス  
GaNに関する拠点型共通基盤技術開発 GaN 縦型パワーデバイスの基盤技術開発」

平成26年度～平成28年度のうち平成26年度分中間年報

### 委託先名

国立大学法人京都大学  
三菱化学株式会社  
住友電気工業株式会社  
株式会社豊田中央研究所  
富士電機株式会社  
パナソニック株式会社  
独立行政法人産業技術総合研究所  
国立大学法人大阪大学  
国立大学法人北海道大学  
国立大学法人名古屋大学  
国立大学法人福井大学  
国立大学法人京都工芸繊維大学  
国立大学法人筑波大学  
国立大学法人東北大学  
国立大学法人大阪大学

### 1. 研究開発の内容及び成果等

次世代パワーデバイスとして、SiC を用いたパワーデバイスは既に一部実用化が進みつつあるが、SiC よりも優れた物性を持つと期待される GaN に関しては GaN ウエハの品質がパワーデバイスに必要なレベルに達しておらず、パワーデバイスの開発に十分に取り組むことができていない。他方、米国等の海外では、GaN のパワーデバイス関連の研究に国家プロジェクトとして取り組み始めており、日本と比較して GaN への研究開発投資が先行している。

日本は、パワーエレクトロニクス関連の応用開発や光デバイス用途での GaN 技術に強みを持っており、GaN のパワーエレクトロニクスで世界を先導するポテンシャルを有している。そのポテンシャルを発揮し、世界を牽引するためには、GaN ウエハ及びデバイスの高品質化が鍵となっている。パワーデバイスには横型、縦型があり、特に、GaN 縦型パワーデバイスは、GaN の大きな絶縁破壊電界、高い電子移動度などの物性から、次世代パワーエレクトロニクスの一翼を担うデバイスとして大きなポテンシャルを秘めている。

本テーマでは、ウエハやデバイスプロセス技術も含めた GaN 縦型パワーデバイスの総合的なポテンシャルを明らかにし、今後の研究開発の方向性、展開可能なアプリケーションを明らかにする。大きく分けて以下の3項目に取り組む。

### ① ウェハ

縦型デバイスに不可欠な大面積・高品質 GaN ウェハを低価格で供給可能な革新的ウェハ製造技術の研究開発を行う。高品質化は貫通転位の低減が中心となるが、物性評価・デバイス作製と密接に連携することで、縦型デバイスの性能に直結するウェハ仕様を明確化し、その改善も進める。手法としてはアモノサーマル法と新概念 HVPE 法の2つのアプローチを進める。

### ② エピ・デバイスプロセス

縦型デバイス作製の中核をなす(a)エピタキシャル成長時のドーピング制御、(b)イオン注入、(c)MOS 作製プロセスの基盤技術の確立を進める。企業はデバイス製造の一般的な手法、大学はメカニズム解明に重点をおいた研究や新しい概念や独自の装置を用いる挑戦的な手法に取り組み、協力・分担する。開発したプロセス技術を用いて縦型パワーデバイスの試作、評価を行い、また、新規構造縦型デバイスの探索とそれに必要なプロセス技術の検討も行う。

### ③ 物性評価、解明

縦型デバイスの性能を決める GaN の諸物性の解明を行う。上記の技術を活用して物性評価用デバイスを作製、系統的に評価し、結果をモデル化、データベース化する。これにより、GaN の耐圧-オン抵抗の理論限界が明確となる。物性評価技術は、デバイスプロセスの研究開発にも最大限活用する。

平成26年度の成果としては、以下の通りである。

### ① ウェハ

アモノサーマル法による GaN ウェハ開発は、年度計画通りのサイズ・欠陥密度を達成するウェハの試作に成功し、順調に開発を進めている。新概念 HVPE 法による低転位化技術については、技術の絞り込み、方向性明確化のために小さな結晶での検討が進んでいる。

### ② エピ・デバイスプロセス

平成27年、28年度の目標達成のためのエピタキシャル成長装置の改造、ラインの増設、エピウェハの評価装置の導入が順調に進んでいる。GaN 基板上に n 型、p 型のホモエピタキシャル成長を行い、物性解明グループへの提供や、イオン注入、MOS 界面の研究用に提供している。

イオン注入に関する系統的な実験に着手しており、評価グループと連携して特に欠陥の挙動について基礎的知見を得るべく研究を進めている。

MOS に関しては複数の機関のサンプルを集約して同一の評価手法で評価・分析、比較することにより、現象をより深く、統一的に捉える試みをはじめており、また、新規 MOS 界面形成プロセスの予備実験も始まっている。MOS 界面の精密制御を可能にする新規プロセス装置の導入も計画通り進んでいる。MOS のノーマリオフ化についても着実に進展している。新規デバイス構造に関しては、新構造を評価するための素子構造の検討が進んでいる。

### ③ 物性評価・解明

ホモエピタキシャル成長 n 型および p 型 GaN エピ層の評価用素子構造や評価手法の検討が進み、n 型 GaN に関しては、検討した素子構造の活用によりこれまで明確に捉えられていなかった特性を精密に評価することに成功している。総合的な電気的特性評価を行うための評価装置の導入、立ち上げも順調に進んでいる。

イオン注入試料について詳細かつ系統的な欠陥の挙動に関する評価分析を開始しており、活性化プロセスのヒントとなる知見が得られつつある。

企業、産総研、大学が密に連絡を取り合い、協力・連携して研究を進めている。それぞれのトピックについて協力する 2, 3 グループでの密な研究打ち合わせ、議論は頻繁に行われている。それと同時に、グループ全体の方向性や情報共有、アイデア出しを目的として 2 回ほど全てのグループが集まって成果や進捗状況を議論する会合も行っている。

## 2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

### (1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2015/03/11	第62回応用物理学会 春季学術講演会 11p-A21-10	段差付き基板上に成長したAlGa N/GaN ヘテロ構造の電気的特性	樹神真太郎 他 福井大学、パナソ ニック
2015/03/12	第62回応用物理学会 春季学術講演会 12p-B4-6(招待講演)	物性から見たパワーデバイス用 半導体材料	須田淳 京都大学
2015/03/12	第62回応用物理学会 春季学術講演会 12a-B1-2	ホモエピタキシャル成長n型GaN のホール効果測定	澤田直暉 他 京都大学、豊田中 央研究所
2015/03/12	第62回応用物理学会 春季学術講演会 12a-A21-11	放射光光電子分光法によるn-Ga N上Al/Tiコンタクトの界面反応 分析	伊藤丈予 他 大阪大学、パナソ ニック、日本原子 力研究開発機構
2015/03/12	第62回応用物理学会 春季学術講演会 12p-A21-1	超格子キャップ層を用いたAlGa N/GaN MOSFET	按田義治他 パナソニック
2015/03/12	第62回応用物理学会 春季学術講演会 12p-A21-2	選択再成長を用いたノーマリオ フAlGa <sub>x</sub> N/GaN MOSFET	中澤敏志 他 パナソニック

### (2) 特許等

該当無し

(3) 受賞実績

該当無し

3. その他特記事項（当該年度分についてのみ記載）

(1) 成果普及の努力（プレス発表等）

- 2014/11/20 応用物理学会先進パワー半導体分科会の第1回講演会にて京都大学・須田淳准教授が「GaN 縦型パワーデバイスの基盤技術開発」（VII-2, 招待講演）と題して本プロジェクトの目標を紹介。
- 2014/11/28 第1回 NEDO パワーエレクトロニクスシンポジウムの特別講演にて名古屋大学・天野浩教授が「新世代パワーエレクトロニクス」と題して登壇。本プロジェクトの狙いや展望を紹介。

(2) その他

該当無し

契約管理番号	14101677-0
契約管理番号	14101678-0
契約管理番号	14101679-0
契約管理番号	14101680-0
契約管理番号	14101681-0
契約管理番号	14101682-0
契約管理番号	14101683-0
契約管理番号	14101684-0
契約管理番号	14101685-0
契約管理番号	14101686-0
契約管理番号	14101687-0
契約管理番号	14101688-0
契約管理番号	14101689-0
契約管理番号	14101690-0
契約管理番号	14101691-0

備考：様式の寸法は、日本工業規格 A 列 4 とし、左とじとすること。

開発項目「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）／次世代パワーエレクトロニクス／  
次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発／  
次世代パワーモジュールを使用したパワーエレクトロニクス機器と  
その統合システムの包括的研究開発」  
平成 26 年度～平成 28 年度のうち平成 26 年度分 中間年報

委託先名：国立大学法人東京工業大学，公立大学法人首都大学東京，国立大学法人大阪大学，国立大学  
法人千葉大学，国立大学法人名古屋工業大学，国立大学法人横浜国立大学，国立大学法人筑波大学，国  
立大学法人北海道大学，国立大学法人山口大学，  
三菱電機株式会社，富士電機株式会社

## 1. 研究開発の内容及び成果等

### (1) SiC パワーデバイス活用のための基礎技術の確立

本年度は，高速なスイッチング特性を有する SiC パワーデバイスに対応した EMI 抑制を目的とし，  
インダクタとコンデンサの特性評価と伝導性ノイズ等価回路の導出を行った。

インダクタに使用する磁性体には，矩形波パルス電圧およびバイアス磁界が重畳した場合の鉄損の発  
生状況を正確に把握するための計測技術と計測装置を開発する必要がある。バイアス磁界を印加した場  
合の磁性体の鉄損計測と磁界バイアス重畳時の鉄損表記手法（ロスマップ）技術を SiC-MOSFET を適  
用した比較的大容量のインダクタ・変圧器の設計に適用するための基盤技術を開発し，その性能評価を  
行った。

また，積層セラミックコンデンサ(MLCC)の平滑コンデンサへの適用を目的として，並列接続した場  
合の $|Z|-f$ 特性のモデル化を行った。まず，誘電材料の異なるフィルムコンデンサおよびセラミックコ  
ンデンサの等価直列抵抗(ESR)および等価直列インダクタンス(ESL)を評価し，部分要素等価回路法を  
用いてモデル化を行った。本研究で導出したモデルでは，分割した導体抵抗や部分自己インダクタンス，  
部分相互インダクタンス等を用いることにより，100MHz 以下の $|Z|-f$ 特性および $R_s-f$ 特性を模擬する  
ことを可能とした。

さらに，インバータの伝導ノイズ等価回路を構築し，伝導ノイズの計算精度を実験により検証した。  
すなわち，パワーデバイスのスイッチング動作周波数の高調波成分，およびパワーエレクトロニクス回  
路内の構成要素（キャパシタやインダクタの浮遊容量，寄生インダクタンス成分，および配線の寄生イ  
ンダクタンス成分）に起因して発生する伝導性 EMI について，伝導ノイズ等価回路モデルの構成手法  
を明らかにし，その妥当性を実験的に検証した。

### (2) SiC パワーデバイスに適した電力変換回路技術の開発

電力変換回路技術として，マルチレベル変換器，A/D コンバータ，高効率チョップ回路，絶縁形 DC/DC  
コンバータの回路方式の検討を行った。

13 レベルフライングキャパシタインバータの試作とマルチレベル変換器制御用高速デジタル制御  
システムを開発した。マルチレベル変換器高速デジタル制御システムは，制御用 DSP システムに専  
用の FPGA ボードを組み合わせることにより，三相 13 レベルフライングキャパシタインバータに必要  
な 72 チャンネルの PWM 信号を発生できる。試作した 13 レベルフライングキャパシタインバータで

は、主回路のスイッチング素子として SiC-MOSFET を使用し、1 枚の基板に 1 相分の回路をまとめており、3 枚の基板で三相インバータを構成する。実験により、インバータおよび制御システムの動作確認を完了した。

双方向降圧形 AC/DC コンバータおよび高周波絶縁形 AC/DC コンバータの動作を実験により確認した。双方向降圧形 AC/DC コンバータには 6 組の双方向スイッチを使用し、交流側にフィルタリアクトルとフィルタコンデンサを、直流側に平滑リアクトルとコンデンサをそれぞれ接続して構成する。実験では、Si-IGBT を 2 素子もしくは SiC-MOSFET を 2 素子逆直列に接続して双方向スイッチを構成して比較を行った。出力電力 0.5 kW において最高効率が得られた。Si-IGBT を用いた場合の最高効率は 96.6%であったのに対して、SiC-MOSFET を用いた場合は 98.2%に改善できることを確認した。また、高周波絶縁形三相 AC/DC コンバータは、高周波トランスにより電氣的に絶縁された回路構成であり、一次側は 6 組の双方向スイッチを、二次側には 4 組の双方向スイッチを用いて構成する。開発した制御法により、指令値通りの出力直流電圧を得ることができ、電源電流を正弦波状に制御できることを実験により確認した。

FCEV 向け高効率チョップ回路に適用する電力変換器単体の仕様を決定した。燃料電池スタック、リチウムバッテリー、インバータモータ等の駆動系構成機器をもつ車載システムを考慮して、駆動電力 100 kW、直流電圧 600 VDC の条件の下で、力行および回生モードにおける電力フローの検討を行った。特に、目標システム効率を考慮してシステム冗長設計と回路定数の最適設計を行った。また、風力発電向け高効率電力変換システムについてもシステムの概略設計を行い、シミュレータを用いて解析を行い、詳細仕様決定の準備を進めた。

絶縁形 DC/DC コンバータについては、実験システムの基本設計とドライブ回路の開発を行った。単方向絶縁形 DC-DC コンバータについては、実験システムの基本設計を完了した。単方向絶縁形 DC-DC コンバータは、SiC-MOSFET/SBD モジュールを使用して構成する。理論とシミュレーションにより動作特性を解析し、実験装置の基本設計を完了した。双方向絶縁形 DC-DC コンバータについては、使用するデバイスの選定し、回路パラメータ等を決定した。また、SiC-MOSFET モジュール用高速ドライブ回路の開発を完了した。

### (3) SiC パワーデバイスのモータドライブへの適用技術の開発

モータドライブへの応用技術として、モータ駆動用 Z ソースインバータ、高速モータ駆動用高周波 PWM インバータ、モータ組み込み用電力変換器の開発を行った。

Z ソースインバータの開発では、シミュレーションにより動作特性を確認し、これに基づいて実験装置を試作して検証を行った。シミュレーションでは、スイッチング素子を流れる電流の特性を明らかにし、SiC-MOSFET に適することを明らかにした。また、スイッチング素子の動作モードによって、スイッチング周波数が増加しても、回路損失を低減できる場合があることを確認した。さらに、三相 Z ソースインバータを試作し、実験により損失低減効果を確認した。

超高速モータ駆動用高周波 PWM インバータについては、実験と理論からシステムの動作特性の検討を行った。実験により、フィードバック型デッドタイム補償法をスイッチング周波数 100kHz の PWM インバータに適用することにより、デッドタイムに起因する電流ひずみをほぼ完全に補償できることを確認した。また、キャリア周波数の高周波化により、スイッチングによる電流リップルを実用上無視できる程度にまで低減できることを確認した。さらに、スイッチング周波数の高周波化によるモータ損失の

低減効果をシミュレーションにより評価した。その結果、SiC-MOSFET の採用によりインバータ効率を改善し、スイッチング周波数の高周波化によりモータ損失を低減できるため、システム全体の効率改善を期待できることを明らかにした。

モータ組み込み用電力変換器については、SiC-MOSFET を用いた小容量 PWM インバータのスイッチング特性を評価し、これに基づいてモータ組み込み用電力変換器の設計を行った。Si-IGBT と SiC-MOSFET を用いた 400 V, 10 A の PWM インバータを試作し、高温環境でのスイッチング損失とターンオン・ターンオフ時間の測定を行った。その結果、SiC-MOSFET を用いた場合には、温度が上昇してもスイッチング損失はほとんど増加しないことを確認した。また、温度上昇に伴うターンオン・ターンオフ時間変化のデータに基づいて、モータ組み込み用電力変換器の仕様を決定した。

#### (4) SiC パワーデバイスの産業用機器への応用技術の開発

産業用機器への応用技術として、次世代ハイブリッド直流遮断器、高周波 SiC-MOSFET インバータの開発を行った。

次世代ハイブリッド直流遮断器では、機械接点とパワーデバイスを組み合わせたハイブリッド直流遮断の原理検証および SiC-MOSFET モジュールを組み入れた回路シミュレーション、380 V 級遮断評価用電源システムの構築を行った。原理検証では、機械接点の開極時のアーク電圧過渡特性を確認した。ハイブリッド直流遮断の原理検証では、再点弧を生じることなく、直流電流の遮断が可能であることを確認した。また、実測した回路定数を用いて回路シミュレーションを行い、実測結果を良好に模擬できることを確認した。また、回路シミュレーションにより、配線インダクタンスが回路動作に与える影響を検討し、遮断時のエネルギーを良好に吸収できる方式を開発した。さらに、定常損失の低減と高速な遮断が可能な新しいハイブリッド直流遮断器についても回路シミュレーションにより検討し、良好な遮断特性を確認した。

高周波 SiC-MOSFET インバータについては、実験装置の試作および誘導加熱実験を行った。高周波 SiC-MOSFET インバータの主回路は、フルブリッジとした。DC バスラインの寄生インダクタンスを低減するため、主回路の大部分を両面基板により構成し、両面基板と入力側電源との配線にはラミネートブスバー構造を用いた。実験では、400 kHz, 2 kW 出力時の動作特性および SiC MOSFET の温度変化を計測した。その結果、ケース温度から算出したジャンクション温度は十分に低く、安定に連続動作が可能であることを確認した。また、誘導加熱実験では、高周波 SiC-MOSFET インバータに誘導加熱用コイルを接続し、金属球の高周波誘導加熱を行った。コイルに 400kHz, 15A の高周波電流を流し、金属球の加熱特性を確認した。

#### (5) SiC パワーデバイスの電力用機器への応用技術の開発

電力用機器への応用技術として、HVDC 向け SiC パワーデバイス適用マルチレベル電力変換システム、トランスレス連系用電力変換装置の開発を行った。

HVDC 向け SiC パワーデバイス適用マルチレベル電力変換システムの開発では、設計準備を目的とし、HVDC 設備、電力変換器、電力変換器に用いる変換器セルの回路構成、使用されているスイッチング素子の調査と制御方式の検討を実施した。自励式電力変換器を適用した代表的な HVDC システムの仕様は、送電電圧は±60kV から±320kV、送電容量は 84MW から 900MW であった。初期の電力変換器には 2~3 レベルの電力変換回路方式が用いられたが、2010 年以降は各社とも変換器セルを多段に直

列接続したマルチレベル電力変換回路方式を採用している。変換器セルは、スイッチング素子と直流コンデンサから構成され、ハーフブリッジ型とフルブリッジ型が用いられている。現状では、スイッチング素子として、モジュール型 IGBT や圧接型 IEGT が用いられる。これらのスイッチング素子には、高電圧で 1kA 程度の大電流が要求される。これらの調査結果を踏まえて、SiC パワーデバイスを適用した変換器セルの設計、製作、評価を行う。

トランスレス連系用電力変換装置の開発では、モジュラーマルチレベルカスケード (MMC) 電力変換器の回路方式の調査・比較および適用する SiC パワーデバイスのスイッチング評価、MMC 用制御装置の設計および制御方式の検討を行った。MMC 変換器の代表的な回路方式には、二重スターチョッパセル(DSCC)方式とスター結線ブリッジセル(SSBC)方式、デルタ結線ブリッジセル(SDBC)方式がある。3.3kV 耐圧の SiC パワーデバイスを適用して 6.6kV 系統にトランスレスで直接連系する場合、MMC 変換器の回路方式によって、変換器セルの直列数および総素子数が異なる。MMC 変換器に適用を検討している 3.3 kV SiC-MOSFET のスイッチング特性評価を行い、従来の Si パワーデバイスに比べて、スイッチングが非常に速いことを確認した。定格電流の 2 倍の電流を流した場合でも、問題なくスイッチングできることを確認した。MMC に適用する制御装置に要求される機能を検討し、制御装置に実装する LSI および制御基板の設計を行った。制御装置は、運転シーケンスや電圧・電流制御などの MMC 変換器全体の制御とゲートパルス生成や直流電圧検出等の変換器セルごとの制御が必要であり、これらの制御に適した方式を採用した。

## 2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

### (1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

- ・舟木 剛，パワーエレクトロニクスの EMC，EMC 環境フォーラム，平成 26 年 12 月 4 日
- ・舟木 剛，SiC パワーデバイスのパワーエレクトロニクス利用における課題，インターネプコン，平成 27 年 1 月 15 日
- ・早川達也・坪井祥紀・竹内希・安岡康一・赤木泰文，機械接点と IGBT を用いたハイブリッド直流遮断器の遮断実験，平成 27 年電気学会全国大会，平成 27 年 3 月 4 日
- ・鈴木一馬・磯崎順平・北川亘・竹下隆晴，SiC-MOSFET を用いた降圧形 AC/DC コンバータの損失解析，平成 27 年電気学会全国大会，平成 27 年 3 月 25 日

### (2) 特許等

- ・平成 26 年 12 月 26 日，特願 2014-266566，回路遮断器，国立大学法人東京工業大学
- ・平成 27 年 1 月 19 日，特願 2015-007868，回路遮断器，国立大学法人東京工業大学
- ・平成 27 年 2 月 10 日，特願 2015-024510，回路遮断器，国立大学法人東京工業大学

### (3) 受賞実績

なし

## 3. その他特記事項（当該年度分についてのみ記載）

### (1) 成果普及の努力（プレス発表等）

- ・電気学会関西支部講習会 省エネルギー社会実現に向けた SiC パワー半導体の研究開発・適用の動向，

平成 26 年 12 月 8 日, SiC パワー半導体の基礎, 舟木 剛

・次世代電力ネットワーク研究会, 平成 27 年 1 月 23 日, パワエレ技術の動向, 舟木 剛

(2) その他

なし

契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 2 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 3 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 4 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 5 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 6 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 7 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 8 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 6 9 9 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 7 0 0 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 7 0 1 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 7 0 2 - 0

別 紙

開発項目 「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）／次世代パワーエレクトロニクス／次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発／EV モータ駆動用機電一体インバータの研究開発」 平成26年度～平成28年度のうち平成26年度分中間年報  
委託先名 学校法人芝浦工業大学

[記載項目]

## 1. 研究開発の内容及び成果等

### 実施項目1【モータ結線、ステータ構造を含めた新回路トポロジーの研究開発】

#### 1-1 新回路トポロジー

図1に本開発で使用するインバータトポロジーを示す。モータの多相化と合わせ、ハーフブリッジインバータを各相に使用することでデバイスの電流分担を減らし、かつモータの効率向上を目的としたトポロジーである。平成26年度では基礎検討としてハーフブリッジインバータのPWM位相をそれぞれ反転させて電流リップル削減と鉄損削減の効果を実験により確認した。

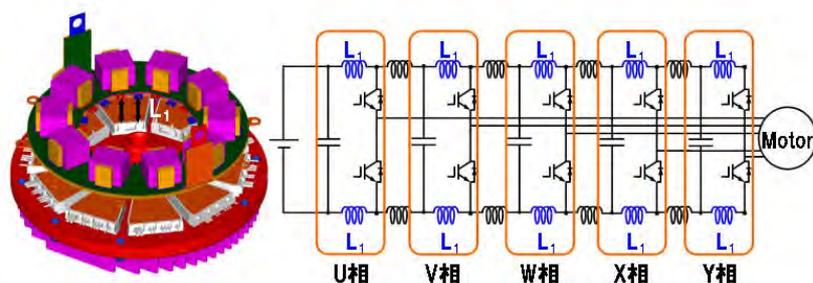


図1 多相モータと多相インバータ

図2に使用した回路とモータを示す。対象多相モータ（永久磁石モータ）は設計中のため、原理検証機として構造が簡単なSRモータを使用した。通常直列に接続するコイル（図2中 Top stator, Bottom stator と表示）を各ハーフブリッジインバータに分離接続し、SiCの高速応答を活かして各コイルを位相のずれたPWM方式により電流制御する。図3に使用するインターリーブPWM方式の原理図を示す。

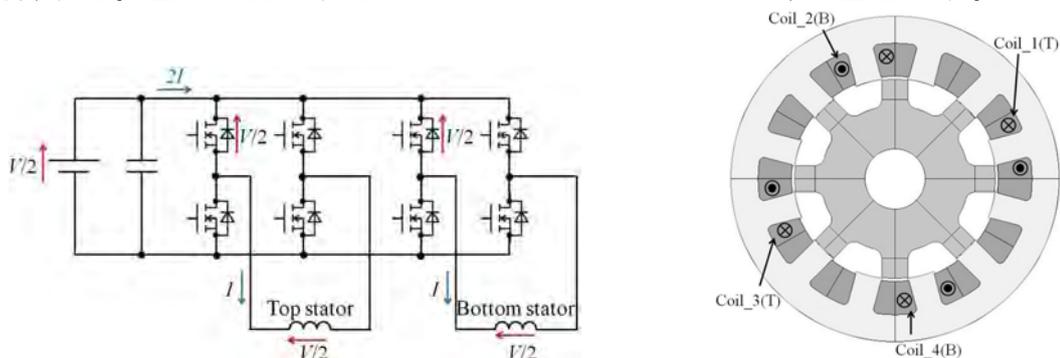


図2 モータ駆動回路（1相）および原理確認用SRモータ

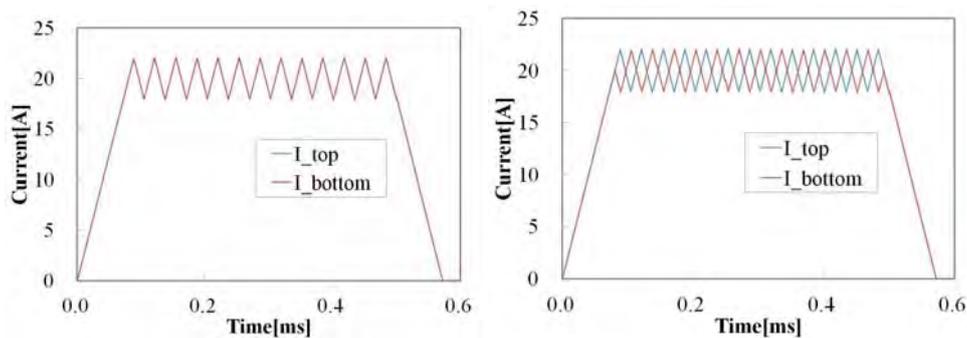


図 3 通常 PWM 電流波形（左）とインターリーブ PWM 方式電流波形（右）

図 3 右図に示すように、インターリーブ PWM 方式電流波形は PWM による電流リップルがそれぞれ位相が反転して通電されていることが分かる。このことから鎖交磁束のリップルが低減され、鉄損削減とともに DC 電流のリップル削減が可能となる。図 4 に有限要素解析による解析結果（鎖交磁束および出力トルク）を示す。図中 Case 4 は通常 PWM 方式, Case 5 はインターリーブ PWM 方式を示している。図より鎖交磁束のリップル低減と出力トルクリップル低減が確認できる。

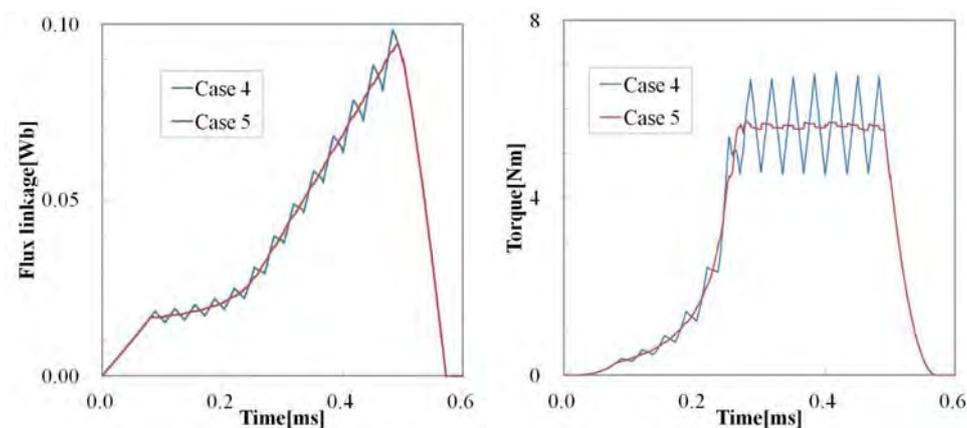


図 4 鎖交磁束波形（左）およびトルク波形（右）

表 1 に有限要素解析による出力および損失の解析結果を示す。約 15%の鉄損低減により 2%の効率向上が確認された。今後永久磁石モータでの確認を行う予定である。

表 1 通常 PWM 方式とインターリーブ PWM 方式による出力比較

Item	Case 4	Case 5
Torque [Nm]	1.14	1.13
Output power [W]	596	597
Copper loss [W]	30.0	29.8
Iron loss [W]	<b>144</b>	<b>126</b>
Motor efficiency [%]	<b>77.4</b>	<b>79.2</b>