

平成 22～24 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「高度位置決め技術によるレアアースフリーモータ  
EV 駆動装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成 25 年 3 月

委託者：九州経済産業局

委託先：財団法人福岡県産業・科学技術振興財団

# 目 次

第 1 章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-2	研究体制	
1-3	成果概要	
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	
第 2 章	高効率 SR モータの開発	11
2-1	位置決め予測を利用した励磁区間可変制御プログラムの開発	
2-2	励磁区間内回生電力の有効活用プログラムの開発	
2-3	三次元有限要素法とベクトル磁気理論を用いた磁界解析によるコア極数・形状の最適化設計	
第 3 章	高安全性を実現するセンサレス SR モータの開発	21
3-1	高精度位置予測を利用したセンサの不具合時のセンサレス駆動プログラムの開発	
第 4 章	SR モータ駆動小型 EV 装置用電源の開発	26
4-1	SR モータの高効率回生充電制御回路の開発	
4-2	走行距離向上のためのキャパシタシステムの開発	
第 5 章	高効率 EV 駆動装置の開発試作	31
5-1	CVT 利用又は多段自動切換減速機の開発試作	
5-2	EV システムとしてのモータ＋変換機＋電源の統合制御法の開発	
最終章	全体総括	39

# 第 1 章 研究開発の概要

株式会社明和製作所 代表取締役社長 生野 岳志  
福岡工業大学 教授 大山 和宏  
西日本工業大学 准教授 池田 英広

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1-1-1 研究開発の背景

位置決めに係る技術に関し、省エネルギー性の向上の課題が具体化してきている。

全電力消費量の半分を占める電気モータの高効率化は分野を越えた世界的な要請であるが、特に地球温暖化防止の切り札である小型 EV 普及を背景として、省エネルギー性（および省資源・低コスト・安全性）の向上のための、レアアースフリーで高効率な電気モータおよび EV 駆動装置の開発が求められてきている。

#### ○北部九州における自動車産業

北部九州は、日産自動車（株）九州工場、トヨタ自動車九州（株）、ダイハツ九州（株）及び日産車体（株）九州工場が立地し、生産能力は 154 万台に達している。基幹部品においても、トヨタ自動車九州のエンジン工場やハイブリッド部品工場、ダイハツ九州のエンジン工場などが立地し、世界有数の自動車生産拠点として着実に産業集積が進捗してきた。これに加えて、2010 年代前半にはダイハツ九州、2010 年代半ばにはトヨタ自動車九州の車両開発拠点が設置される予定であり、頭脳拠点化が進展してきた。このため、地場中小企業は、川下企業と一体となって、高付加価値製品等を開発することが重要となってきており、これらの開発によって、地域の技術力を高め、自動車関連産業の集積・拠点化をさらに推進していく。そこで、川下企業と一体となって、以下に述べる研究開発を推進する。

#### ○小型 EV の普及

小型 EV は次世代自動車普及の要で地球温暖化防止の切り札であるだけでなく、近距離の移動に適した 2 人乗り自動車は、高齢社会となった日本において高齢者が地域社会で活動する上で有用な移動手段となりうるものである。また、軽自動車よりも小型サイズの自動車規格を設ける動きがあるなど、今後需要が拡大すると予測されている。

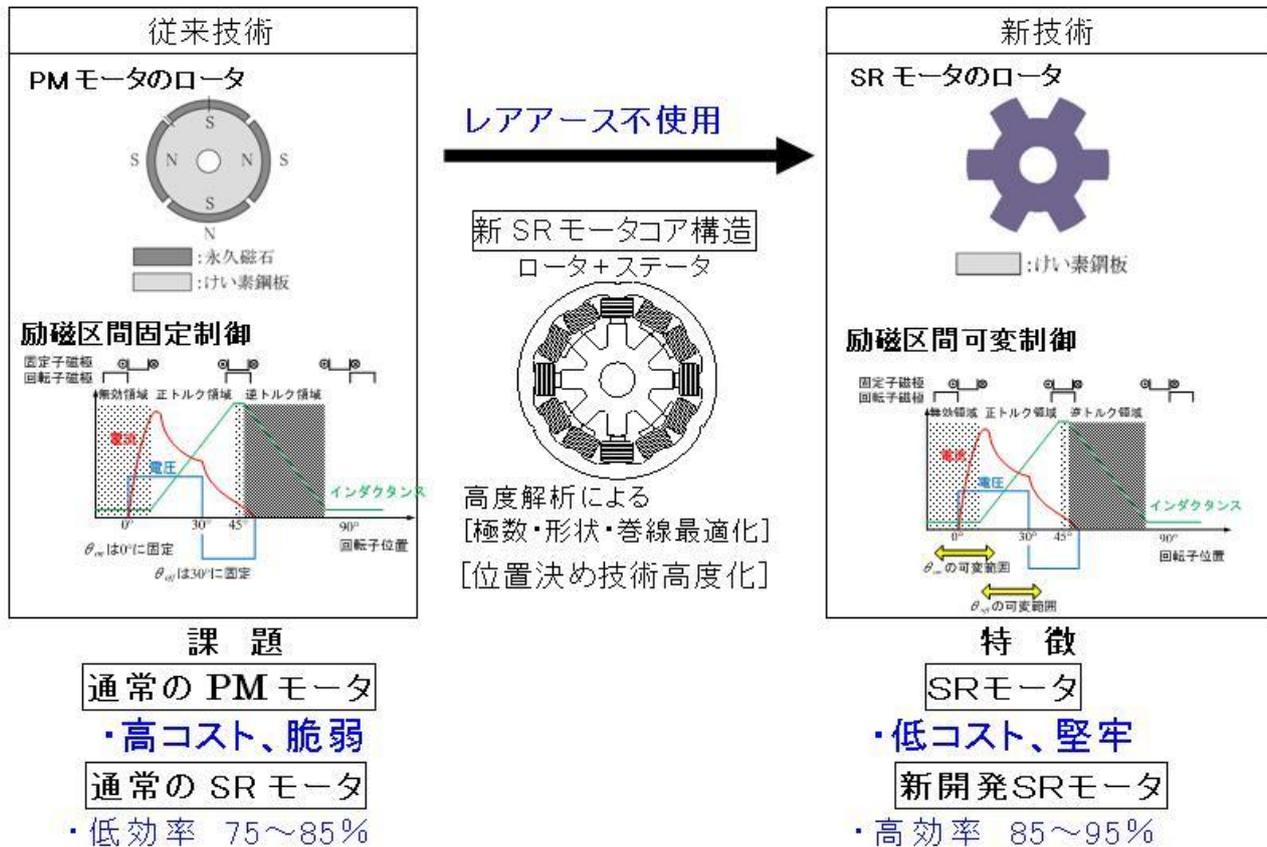
#### ○レアアース資源戦略

現在主流の小型 EV 駆動用モータには、ネオジムやディスプロシウムなどのレアアースを成分とする永久磁石を活用することで効率を高めた PM モータが使用されている。永久磁石を使用しないモータで置き換えることができれば、産出国が限られ価格が高騰して PM モータのコストの 70%を占める希土類磁石に依存する必要がなくなり、生産の安定化と大幅なコストダウンへの道が開けるため、レアアースフリー・モータの開発が急務（経産省 次世代自動車戦略 2010 の 6 つの主要戦略のひとつ）となっている。

#### ○SR モータの効率向上と EV 駆動装置の省エネルギー性向上

SR（スイッチト・リラクタンス）モータはレアアース（永久磁石）によるマグネットトルクを使用せず、ロータ鉄心のリラクタンス（磁気抵抗）トルクのみで回転するため、こ

の課題の解決には最適で、耐久性やコストの面でも PM モータよりも優れているが、従来の SR モータは効率が低く寸法が大きくなるという課題があった。SR モータの歴史は古く、過去においても SR モータの EV への適用は検討されている。しかし、その検討時期が古いため、最近の有限要素法による設計技術やパワーエレクトロニクス技術の発展の恩恵を受けているとは言い難い。



明和製作所は 2000 年より福岡工業大学と SR モータの共同研究開発を開始し、2001 年には「スイッチトリラクタンスモータの駆動方法」(特許出願番号:特願 2001-240742)を申請し、既に工具や特殊産業機械の分野においては、同モータを製品化している。しかしこれまでは主に高速回転性能や堅牢性、制御性を生かした用途での使用であり、バッテリー駆動での高効率が要求される用途での製品化はなかった。

現在東京理科大でも SR モータ効率向上の研究が行われているが、特殊な構造や加工が困難とされている低鉄損材料を使用するなど、コストや実用化の面で難点がある。また磁界解析や励磁開始角と励磁幅を決定する手法は、最高効率を得るための励磁制御とは言い難い。

本研究では、3次元有限要素法とベクトル磁気特性理論を用いた磁界解析により、汎用ケイ素鋼を用いてコア極数と形状を最適化し、得られた精度の高い数学モデルを使用することで、回転数や負荷条件に応じて瞬時に励磁開始角と励磁終了角を決定する励磁制御を開発する。

本研究による、低コストで PM モータと同等以上に効率を高めた SR モータを実現する技術の開発と、それを活用した省資源で省エネルギー性を向上させた小型 EV 駆動装置の実現が求められている。

### 1-1-2 研究目的及び目標

3年間を通して、レアアース(永久磁石)によるマグネットトルクを使用せず、ロータ鉄心のリラクタンス(磁気抵抗)トルクのみで回転するSRモータの効率を、コア形状の最適化と高度位置決め技術により10%向上させ、更に変速機・キャパシタとシステム化して充放電制御を行い、SRモータの最も効率の良い領域を生かし、回生電力のムダをなくすことで、同等の2次電池で省エネルギー性が従来比20%向上する小型EV駆動装置を開発する。また、安全性を高めるためにSRモータをセンサレス駆動するプログラムを開発する。

表 1.1 に本委託業務における研究項目(サブテーマ)と技術目標を示す。



表 1.1 本委託業務における研究項目(サブテーマ)と技術目標

研究項目(サブテーマ)	技術目標
①高効率SRモータの開発	(平成22~24年度)SRモータ(永久磁石不使用)の現状での最大効率約85%をPMモータ(永久磁石使用)並みの95%以上に向上させる。
①-1 位置決め予測を利用した励磁区間可変制御プログラムの開発	(平成22年度)制御プログラムを開発し、シミュレーションにて効率向上5%以上を確認。 (平成23年度)制御プログラムでモータ試験を実施し、効率向上5%以上を確認。 (平成24年度)開発した制御プログラム、更に①-2、3を合わせたモータ試験を実施し、トータルでの効率向上10%以上を確認。また、モータを車に実装して最終走行試験を実施。
①-2 励磁区間内回生電力の有効活用プログラムの開発	(平成23年度)回生電力活用プログラムを開発し、このプログラムでモータ試験を実施し、効率が向上することを確認。 (平成24年度)開発した制御プログラム、更に①-1、3を合わせたモータ試験を実施し、トータルでの効率向上10%以上を確認。また、モータを車に実装して最終走行試験を実施。

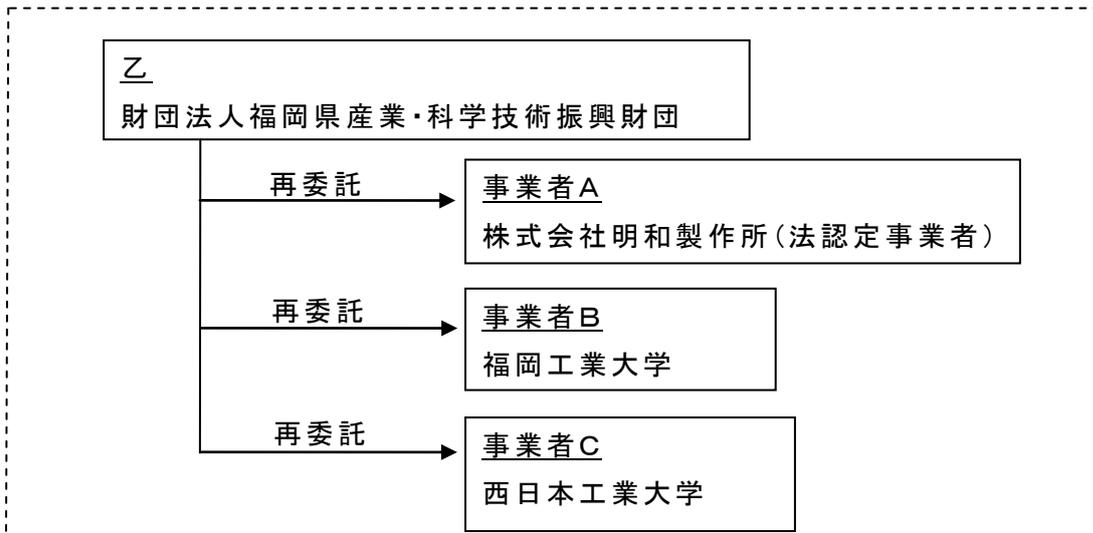
<p>①-3 三次元有限要素法とベクトル磁気理論を用いた磁界解析によるコア極数・形状の最適化設計</p>	<p>(平成22年度)三次元解析を実施してコア形状を変更することにより、モータ効率 5%向上することをシミュレーション上で確認。</p> <p>(平成23年度)解析により導き出したコアを、試作コア型を用いて製作し、このコアでモータを試作。モータの試験を実施して効率が 5%以上向上することを確認。</p> <p>(平成24年度)開発したコア、更に①-1、2を合わせたモータ試験を実施し、トータルでの効率向上 10%以上を確認。また、モータを車に実装して最終走行試験を実施。</p>
<p>②高安全性を実現するセンサレスSRモータの開発</p>	<p>(平成23~24年度)SRモータのセンサレス運転の実現。</p>
<p>②-1 高精度位置予測を利用したセンサの不具合時のセンサレス駆動プログラムの開発</p>	<p>(平成23年度)センサレス駆動回路、プログラムを開発しシミュレーション上で動作を確認。</p> <p>(平成24年度)実際にモータを動作させて、センサレス駆動を確認。</p>
<p>③SRモータ駆動小型EV装置用電源の開発</p>	<p>(平成22~24年度)バッテリー寿命を 20%向上</p>
<p>③-1 SRモータの高効率回生充電制御回路の開発</p>	<p>(平成22年度)電気自動車実機データの収集を行い、シミュレーションにより実機のシミュレータを構築する。このシミュレータを用いて新たに回生充電回路を開発し、バッテリー寿命が 5%向上することを確認するとともに、回路の試作を行う。</p> <p>(平成23年度)回路を実機適用し、バッテリー寿命を 5%向上。</p> <p>(平成24年度)2人乗りEVを想定して製作する車体「2人乗り電気自動車試作品」に回路を適用し、バッテリー寿命を 5%向上。</p>
<p>③-2 走行距離向上のためのキャパシタシステムの開発</p>	<p>(平成22年度)電気二重層キャパシタを適用した電気自動車の実証実験を行うとともにキャパシタ制御回路の試作回路を作成。またシミュレーションにより同様のシステムを構築し、バッテリー寿命の 15%向上を確認。</p> <p>(平成23年度)SRモータ駆動システムに対し、キャパシタ制御回路の効果をシミュレーションおよび実証にて確認。</p> <p>(平成24年度)最適なキャパシタシステムを構築し、実証にてバッテリー寿命を 15%向上(キャパシタにて 10%向上、キャパシタ制御回路にて 5%向上)。</p>
<p>④高効率EV駆動装置の開発試作</p>	<p>(平成22~24年度)二人乗、最高速度 60km/h、登坂能力 18°、バッテリー1 充電あたり走行距離 60km</p>

④-1 CVT利用又は多段自動切換減速機の開発試作	(平成22年度)駆動装置の開発方向性を決定。 (平成23年度)22年度に検討した内容により減速装置を開発。 (平成24年度)開発した減速装置を車に実装して走行試験を実施。
④-2 EVシステムとしてのモータ+変速機+電源の統合制御法の開発	(平成22年度)小型EV装置全体システムの開発方向性を決定。 (平成23年度)22年度に決定した内容によりモータ+変速機+電源の統合制御プログラムを開発。 (平成24年度)開発した統合制御法を使い実車での走行試験を実施。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織(全体)



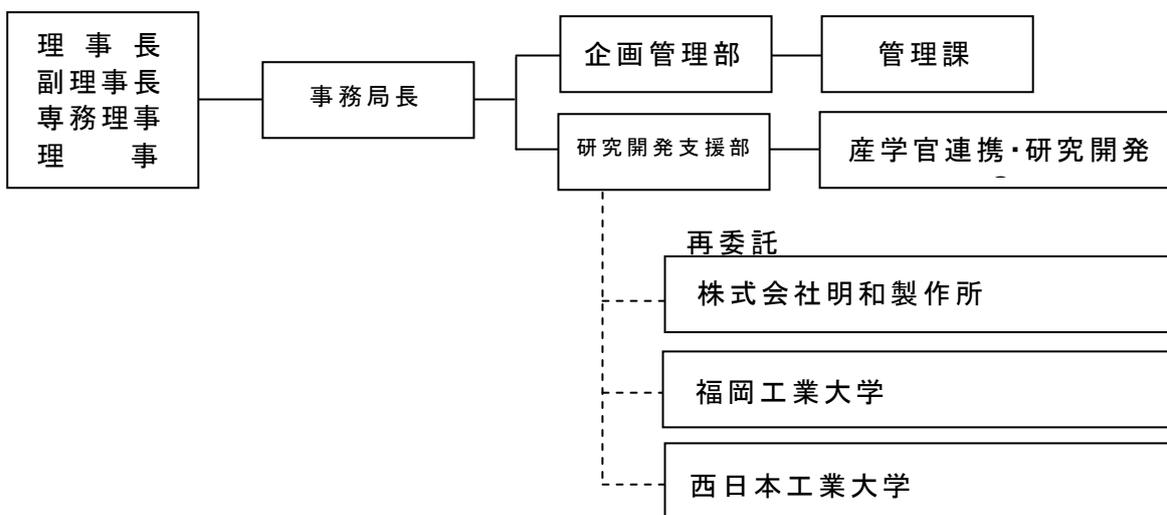
**総括研究代表者 (PL)**  
 所属：株式会社明和製作所  
 役職：代表取締役 社長  
 氏名：生野 岳志

**副総括研究代表者 (SL)**  
 所属：福岡工業大学工学部電気工学科  
 役職：教授  
 氏名：大山 和宏

2) 管理体制

① 事業管理者

[財団法人福岡県産業・科学技術振興財団]

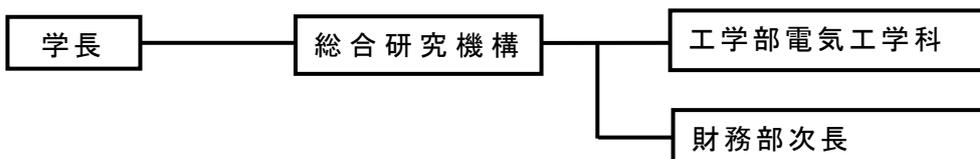


② (再委託先)

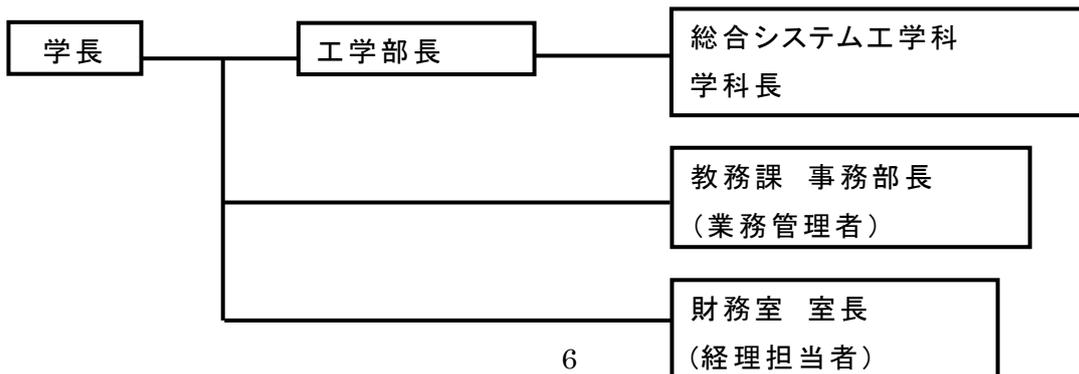
株式会社明和製作所



福岡工業大学



西日本工業大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】財団法人福岡県産業・科学技術振興財団

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
中村 裕章	研究開発支援部・部長	⑤
中村 憲和	研究開発支援部・主幹	⑤
石橋 正光	研究開発支援部・主幹	⑤
堂ノ脇 靖巳	研究開発支援部・副主幹	⑤
小金丸 正明	研究開発支援部・専門研究員	⑤
石川 正洋	研究開発支援部・事務主査	⑤
江田 智子	研究開発支援部・サブマネージャー	⑤
熊野 聡子	研究開発支援部・主事	⑤
小村 和彦	企画管理部・管理課長	⑤
平田 学	企画管理部・事務主査	⑤
舩添 史和	企画管理部・主任主事	⑤

【再委託先】※研究員のみ

株式会社明和製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
生野 岳志	代表取締役 社長	①, ②, ③, ④
藤井 裕昭	技術課・課長	①, ②, ③, ④
上原 一士	技術課・係長	①, ②, ③, ④
藤井 好三郎	技術顧問	①, ②, ③, ④
山本 作衛	技術顧問	① ②, ③, ④
百武 康	技術課	①, ②, ③, ④
嶋川 正義	技術課・係長	①, ②, ③, ④
田中 栄二	技術課・リーダー	①, ②, ④
青柳 健	技術課	①, ②, ④
中村 悠一郎	技術課	①, ②, ④
福井 健太	技術課	①, ②, ④
櫻本 浩樹	工作課・課長	①, ②, ④
島崎 日吉	工作課・班長	①, ②, ④
藤瀬 勝広	工作課・係長	① ②, ④

福岡工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
大山 和宏	工学部電気工学科・教授	①, ②, ④

西日本工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
池田 英広	工学部総合システム工学科・准教授	③, ④

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人福岡県産業・科学技術振興財団

(経理担当者) 企画管理部 管理課長 小村 和彦  
 (業務管理者) 研究開発支援部 部長 中村 裕章

(再委託先)

株式会社明和製作所

(経理担当者) 総務部 主任 松川 浩也  
 (業務管理者) 技術課 課長 藤井 裕昭

福岡工業大学

(経理担当者) 財務部 部長 川口 敏弘  
 (業務管理者) 総合研究機構 機構長 松尾 一壽

西日本工業大学

(経理担当者) 財務室 室長 山崎 倫明  
 (業務管理者) 工学部総合システム工学科 学科長 大木 正彦

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
川上 泰秀	元ダイハツ工業株式会社 小型車両開発本部・課長	アドバイザー
平田 博保	ダイハツ工業株式会社 プラット開発部 バリユトレーン開発室 車両企画 EV グループ・主査	アドバイザー
山下 浩二	EV 安全協会 研究所・所長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
生野 岳志	株式会社明和製作所・代表取締役 社長	

藤井 裕昭	株式会社明和製作所 技術課・課長	委
上原 一士	株式会社明和製作所 技術課・係長	
藤井 好三郎	株式会社明和製作所・技術顧問	委
山本 作衛	株式会社明和製作所・技術顧問	
百武 康	株式会社明和製作所 技術課	委
大山 和宏	福岡工業大学 工学部 電気工学科 教授	
池田 英広	西日本工業大学 工学部 総合システム工学 科・准教授	委
中村 裕章	財団法人福岡県産業・科学技術振興財団 研究開発支援部・部長	
椛島 武文	財団法人福岡県産業・科学技術振興財団 産学コーディネータ	

## 1-3 成果概要

### 1-3-1 サブテーマ①「高効率 SR モータの開発」

- ・励磁区間可変制御の300W、3.5kWモータでの実機試験で効果を確認し、特許を出願した。
- ・回生回路の提案と実機試験による有効性の確認を行い、特許を出願した。
- ・インダクタンス関数による高効率コア設計を行い、試作モータで効果を確認し、特許を出願した。

### 1-3-2 サブテーマ②「高安全性を実現するセンサレス SR モータの開発」

- ・センサレス方式の提案とシミュレーションでの動作確認を行った。実機検証は補完研究テーマとなる。

### 1-3-3 サブテーマ③「SR モータ駆動小型 EV 装置用電源の開発」

- ・机上及び実機回路で回生充電効果を確認した。①-2の補完研究と連動してSRモータへ適用する。
- ・キャパシタシステムをH23一人乗り車両、H24二人乗りに適用し、どちらも20%以上の効果を確認した。STOP&GO走行や登坂走行で特に大きな効果が見られた。
- ・キャパシタ制御回路の実機検証を行った。最終的な回生回路と組み合わせた補完研究を行う。

### 1-3-4 サブテーマ④「高効率 EV 駆動装置の開発試作」

- ・様々な駆動方法から2種類の組合せを選択し、H23年度は一人乗り車両での2モータ・各輪駆動2段変速タイプ、H24年度は二人乗り車両での2モータ・クラッチレス2段変速によるデフ駆動タイプの試作試験を行った。また並行して研究成果を応用したスクータ開発案件への対応を行い、2モータ・インホイールタイプの3輪業務用バイクの開発試作を行った。
- ・二人乗り車両による構内走行試験では2段変速切替、加重による総重量500kgでの30%登坂まで行えたが、より長い直線距離の走行が必要な最高速60kmや最終的な1充電走行距離、駆動装置による電費向上効果の検証は今後の課題。

## 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人 福岡県産業・科学技術振興財団 研究開発支援部

TEL: 092-725-2781 FAX: 092-725-2786

Mail: ken@ist.or.jp

## 第2章 高効率SRモータの開発

株式会社明和製作所 代表取締役社長 生野 岳志  
福岡工業大学 教授 大山 和宏

### 2-1 位置決め予測を利用した励磁区間可変制御プログラムの開発

#### 2-1-1 序論

従来技術では、SRモータの励磁開始角と励磁終了角を固定し、パルス幅変調を行うことで励磁電圧波形を制御し、トルク制御を行っている。その励磁方式は、運転効率の改善や発生トルクの増加を目的としたものではなく、主としてトルク脈動の減少を狙ったものである。別の従来技術では、運転効率に悪影響を及ぼす制動トルクが発生しないように励磁終了角のみを制御している。その励磁終了角の制御方法は、自己インダクタンスの変化、及び磁気飽和の影響を無視しているため、運転条件によっては十分な性能が得られないことが予想される。

従来技術によるSRモータ駆動システムは、運転条件に応じて励磁開始角と励磁終了角を適切に制御できていないので、SRモータの潜在能力を十分生かしていない。実用化されている永久磁石同期モータ駆動システムと比較して、運転効率とエネルギー密度が低いため、従来技術によるSRモータ駆動システムの実用例は極めて少ない。そこで励磁区間可変制御プログラムによりSRモータ駆動システムの運転効率とエネルギー密度を永久磁石同期モータ駆動システムと同程度になるように改善する。

#### 2-1-2 実施内容

励磁区間可変制御プログラムは、運転条件に応じてSRモータの励磁開始角と励磁終了角を最適に維持する制御理論を実現する制御ブロックで構成される。制御理論はSRモータのトルク発生原理に基づいて、静磁場解析で算出したインダクタンス曲線から運転効率を高める励磁開始角と励磁終了角を導き、運転条件に応じて最適に運用する方法を意味する。制御理論を実現するには、運転条件に応じて励磁開始角と励磁終了角の制御方法を変更する必要がある。制御ブロックは、各制御方法に対応するブロック、運転条件から制御方法を選択するためのブロック、各制御方法の中で使用する励磁開始角と励磁終了角をチューニングするブロックからなる。

励磁区間可変制御プログラムの特徴は、運転効率を改善しつつSRモータの潜在能力を最大限に引き出す点にある。SRモータの運転効率の改善に留まらず、高エネルギー密度化にも寄与する。励磁区間可変制御プログラムをSRモータ駆動システムに適用すると、運転条件で必要とされる回転数とトルクを維持するために最適な励磁開始角と励磁終了角に制御され、結果としてSRモータ駆動システムの運転効率が向上する。また励磁区間可変制御プログラムは、パルス幅変調により発生トルクを制御する従来技術と比較して、ワンプルスで発生トルクを制御できるので、パワー素子でのスイッチング損失が減少し、電力変換装置の効率も改善する。

図 2.1 に実機において実現した励磁区間可変制御プログラムの制御ブロックを示す。基本的に励磁幅の調整は、速度偏差を入力とした PI 制御で行う。始動時は  $\theta_{on}$  を  $10^\circ$  に固定して励磁を開始し、PI 制御器の出力  $\theta_{PI}$  と  $\theta_{45}$  の比較を行い、 $\theta_{PI}$  と  $\theta_{45}$  の大小関係に基づいて  $\theta_{off}$  の制御を行う。制御モード I は  $\theta_{PI} < \theta_{45}$  の場合に相当し、逆トルク発生区間に電流が流れて逆トルクが発生しないように  $\theta_{off} = \theta_{PI}$  とする。制御モード II は  $\theta_{PI} > \theta_{45}$  の場合に相当し、 $\theta_{off} = \theta_{PI}$  とすると逆トルク発生区間に電流が流れるため  $\theta_{off} = \theta_{45}$  とし、 $\theta_{on}$  を速度偏差に比例して  $10^\circ$  から  $0^\circ$  へ減少させる。制御モード III は  $\theta_{on} = 0^\circ$ 、 $\theta_{off} = \theta_{45}$  としてもトルクが不足する場合に相当する。制御モード III では、 $\theta_{on} = 0^\circ$  に固定し、 $\theta_{off} = \theta_{PI}$  としてトルクが増加する範囲まで速度偏差に比例して  $\theta_{PI}$  を調節する。全て VHDL で記述され、FPGA に実装される。またルックアップテーブルのデータをチューニングする制御ブロックも装備している。

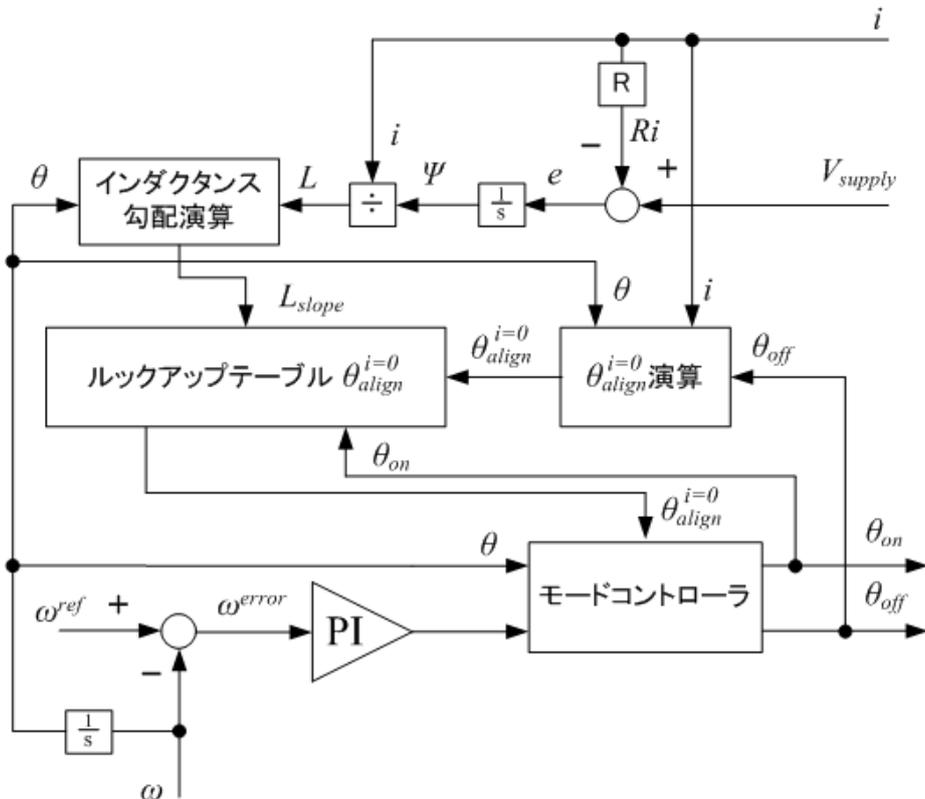
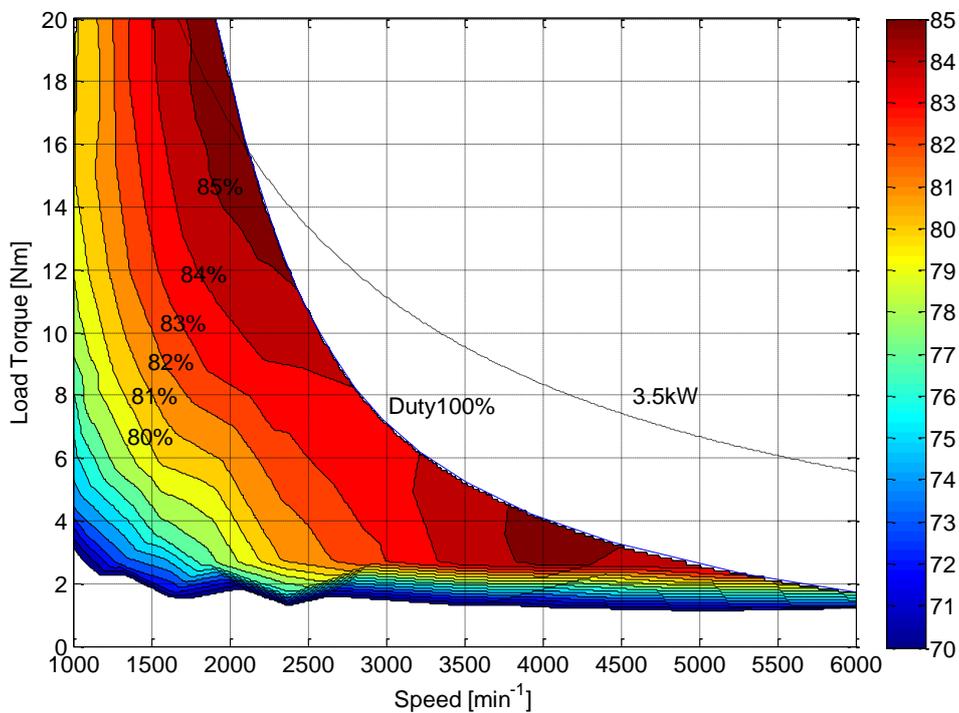


図 2.1 励磁区間可変制御プログラムの制御ブロック

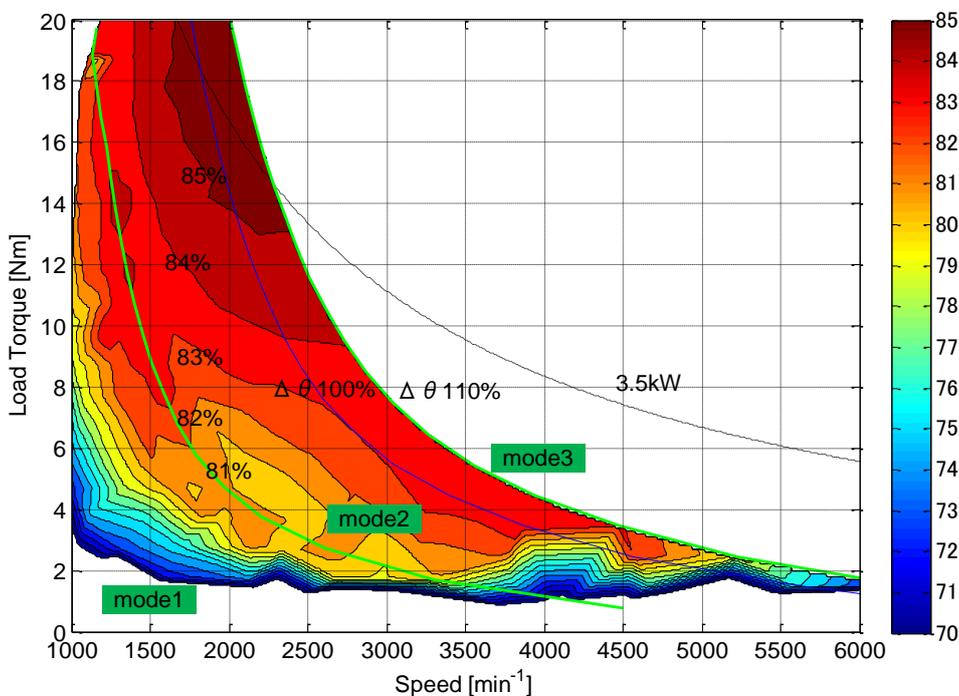
負荷機側において負荷トルクを調整し、従来方式である励磁区間固定制御と励磁区間可変制御で運転した場合の軸トルクを検出し、モータ効率を測定した。励磁区間固定制御の場合は PWM の Duty 比を変えながら、回転数とモータ効率を測定した。励磁区間可変制御の場合は速度 PI 制御器を用いずに手で励磁開始角と励磁終了角を変えながら、回転数とモータ効率を測定した。手で与えるのは速度 PI 制御器の出力に相当する量のみであり、制御モードの切り替えは自動的に行われる。

図 2.2 に固定子 12 極 / 回転子 8 極の 3.5kW 高効率 SR モータにおけるモータ効率マップを示す。電源電圧は 100V を用いている。励磁区間可変制御の場合はコイル電流のピーク値が大きくなり電源の制限値を超えるため、負荷トルクを 20Nm に制限してモータ効率を

測定した。300W 供試 SR モータの場合と同様に低速で高負荷の運転領域で励磁区間可変制御のモータ効率が改善されている。シングルパルス駆動が適用される励磁区間可変制御は、PWM により印加電圧を調整する励磁区間固定制御と比較して、スイッチング損失が小さくなるため、インバータ効率を含めたトータル効率は更に改善される。



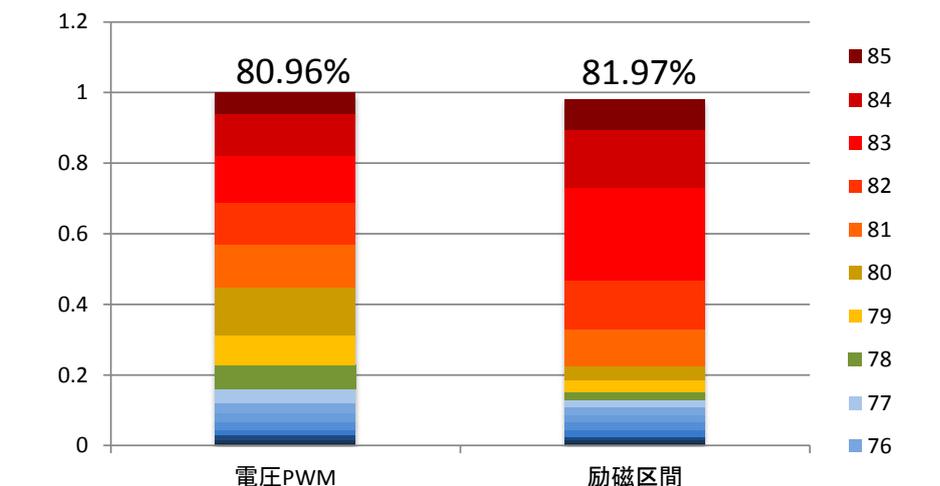
(a) 励磁区間固定制御



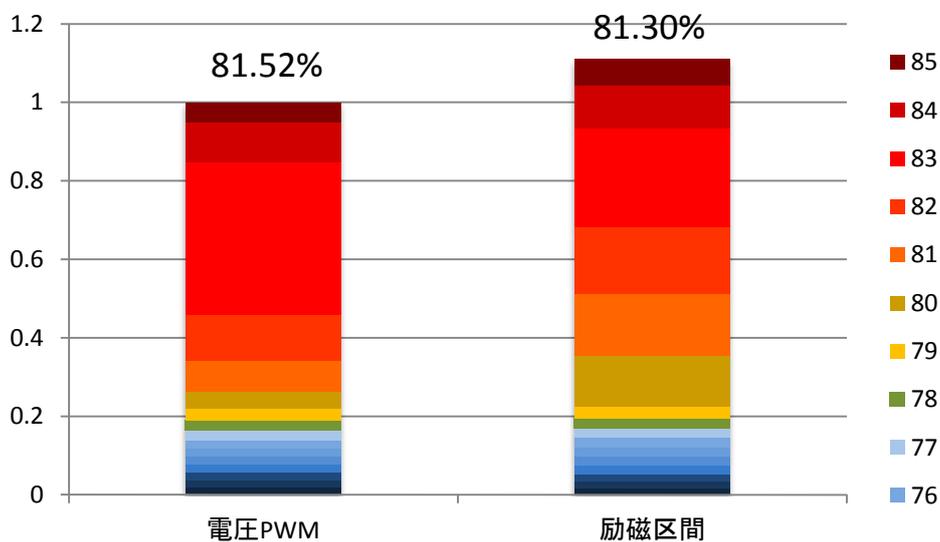
(b) 励磁区間可変制御

図 2.2 3.5kW 高効率 SR モータにおけるモータ効率マップ

モータ効率を運転領域ごとに定量的に評価するために各運転領域のモータ効率の平均値を算出した。図 2.3 にモータ効率の平均値を示す。2000rpm 未満となる低速で高負荷の運転領域は、励磁区間可変制御のモータ効率が 1.01% だけ固定励磁区間 PWM 制御よりも高い。2000rpm 以上となる高速で低負荷となる運転領域では、逆に固定励磁区間 PWM 制御の方が僅かに 0.32% だけ励磁区間可変制御よりも高い。低速で高負荷の運転領域のモータ効率を改善する点は、固定子 6 極 / 回転子 4 極の 300W 供試 SR モータと同じであるが、その改善効果は小さい。固定子 12 極 / 回転子 8 極の 3.5kW 高効率 SR モータでは、極数が増えるため励磁区間可変制御で調整する励磁開始角と励磁終了角の調整範囲が狭まるため、改善効果が圧縮されると考えられる。



(a) 2000rpm 未満



(b) 2000rpm 以上

図 2.3 モータ効率の平均値

### 2-1-3 課題と対策

励磁区間可変制御における制御モードⅡは、高速で低負荷の運転領域で励磁区間固定制御よりもモータ効率が低くなることが分かった。今後の課題として、まず励磁区間可変制

御における制御モードⅡにおけるモータ効率の改善が挙げられる。

シミュレーション結果と比較して実機試験におけるモータ効率改善の効果は小さいことが分かった。おそらくシミュレーションでは考慮していない鉄損の影響が大きいと予想される。励磁区間可変制御はシングルパルスを前提としているため、動作点によっては電流ピーク値が高くなり銅損と鉄損の影響が大きくなり、期待したほどのモータ効率の改善が得られないことが予想される。実機試験とシミュレーションにおいて銅損や鉄損の定量的な評価を行い、その定量的な評価結果に基づいて励磁区間可変制御の改良を行っていく必要がある。

過渡応答を安定かつ高速にするテーブルによる制御モードⅡの励磁終了角の制御が、実機試験で確認できていない。テーブルの精度とテーブルを参照する制御アルゴリズムの改良が必要である。

#### 2-1-4 まとめ

励磁区間可変制御により低速で高負荷となる運転領域でモータ効率を改善できることを実機試験において実証した。また極数の少ない SR モータの方が励磁区間可変制御によるモータ効率の改善効果が大きいことを明らかにした。

### 2-2 励磁区間内回生電力の有効活用プログラムの開発

#### 2-2-1 序論

一般に SR モータ駆動システムにおける電力変換装置では、非対称ハーフブリッジ回路（従来方式）が適用されている。非対称ハーフブリッジ回路の問題点として、SR モータ駆動時に発生する回生電力を励磁に使用するのか、バッテリーの充電に使用するのか、制御できない点が挙げられる。

SR モータの動作原理上、力行運転時にも回生電力が発生する。モータ効率を改善するためには、力行時の回生電力はバッテリーの充電に使用しないで、他相励磁に使用することが望ましい。また回生時の回生電力はバッテリーやキャパシタの充電に使用することが望ましい。そこで力行時の回生電力を励磁に使用できる主回路Ⅰを提案した。また主回路Ⅰに対して、回生時の回生電力をバッテリーに充電できる機能を追加した主回路Ⅱを提案した。更に主回路Ⅱに対して、回生時の回生電力をキャパシタにも充電し、力行時にブースト電圧として使用できる主回路Ⅲを提案する。

#### 2-2-2 実施内容

電気自動車用 SR モータ駆動システムへの適用を前提として、SR モータのモータ効率を向上できる主回路を提案する。提案する主回路Ⅰは、回生電力を他相の励磁に直接使用することにより、従来方式である非対称ハーフブリッジ回路において発生する電源回生時の電力損失を無くすことで、モータ効率を改善できる。また励磁相を切り替えるときに、昇圧回路を形成し高電圧を発生できるので電流応答が早くなる効果により、更にモータ効率を改善できる。

主回路Ⅰは従来方式とスイッチング素子とダイオードの数量が変わらないためコスト的には良いが、バッテリーへの電力回生が行えないという問題点がある。そこで回生電力を

バッテリーに還せる主回路Ⅱを提案する。主回路Ⅱは従来方式において還流ダイオードが接続されていた箇所にスイッチング素子を配置し、バッテリーに回生するときに導通させる。主回路Ⅱでは回生電力を他相励磁に使用するのか、またはバッテリー充電に使用するのかを選択できる。

主回路Ⅱにおいて、回生電力でバッテリーを充電する際に、バッテリーの充電電流の制限があるため、制限を超えた回生電力は機械ブレーキで消費しなくてはならない。そこでキャパシタンスを併用する主回路Ⅲを提案する。キャパシタンスはバッテリーと比較すると電流応答が早く、回生電力を素早く吸収できる。また主回路Ⅲはキャパシタンスに蓄えた電気エネルギーを力行時の供給電圧を上げるために使用したり、停車後のバッテリー充電に使用できたりする。

主回路Ⅲは、回生電力をバッテリーに充電するのかキャパシタに充電するのか区別できない。またキャパシタのみで運転することができない。そこでバッテリーとキャパシタを独立して運転できる主回路Ⅳを提案する。

提案する主回路Ⅰ～Ⅳは、電気自動車用 SR モータ駆動システムにおいて、SR モータ特有の力行運転時に発生する回生電力とブレーキングによる回生運転時の回生電力を分離でき、それぞれの回生電力を有効利用できる。要求される仕様に応じて、主回路Ⅰ～Ⅳが選択でき、かけたコストに応じてモータ効率の改善が望める。

図 2.4 に主回路Ⅰと従来方式により駆動した時のシミュレーションによるコイル電流を示す。主回路Ⅰでは次相励磁が行われ、コイル電流が流れ続けていることが確認できる。

図 2.5 に主回路Ⅰと従来方式により駆動した時のシミュレーションによるモータ効率の比較を示す。主回路Ⅰによりモータ効率が改善していることが分かる。

図 2.6 に主回路Ⅰと従来方式により駆動した時の実機試験によるモータ効率の比較を示す。主回路Ⅰによりモータ効率が改善していることが分かる。

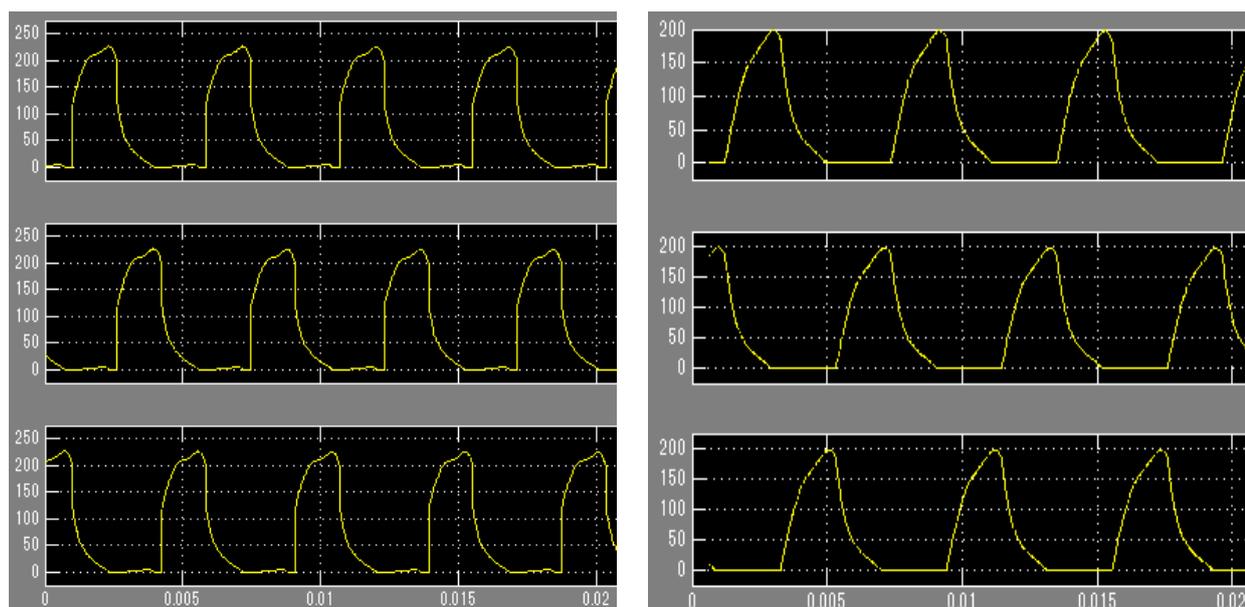


図 2.4 シミュレーションによるコイル電流 (左図：主回路Ⅰ、右図：従来方式)

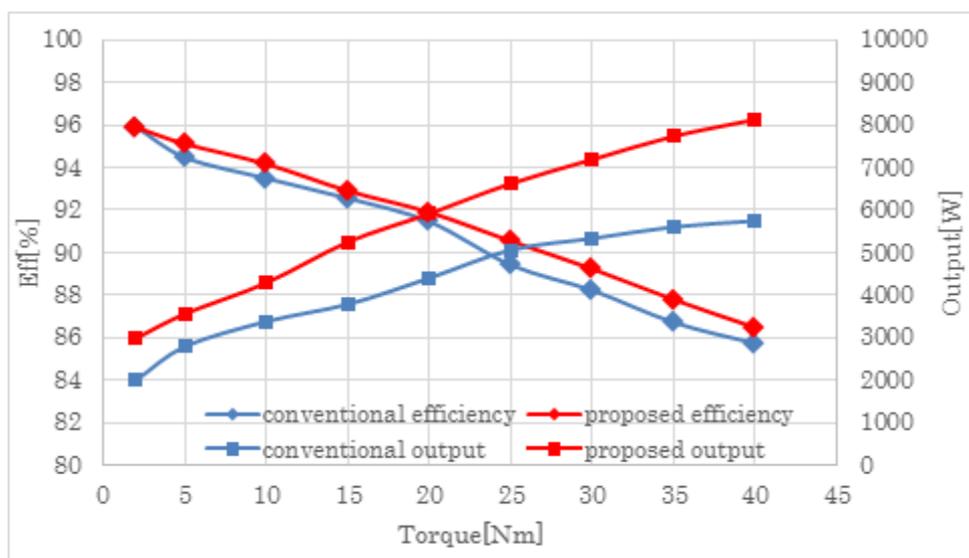


図 2.5 主回路 I と従来方式により駆動した時のシミュレーションによるモータ効率

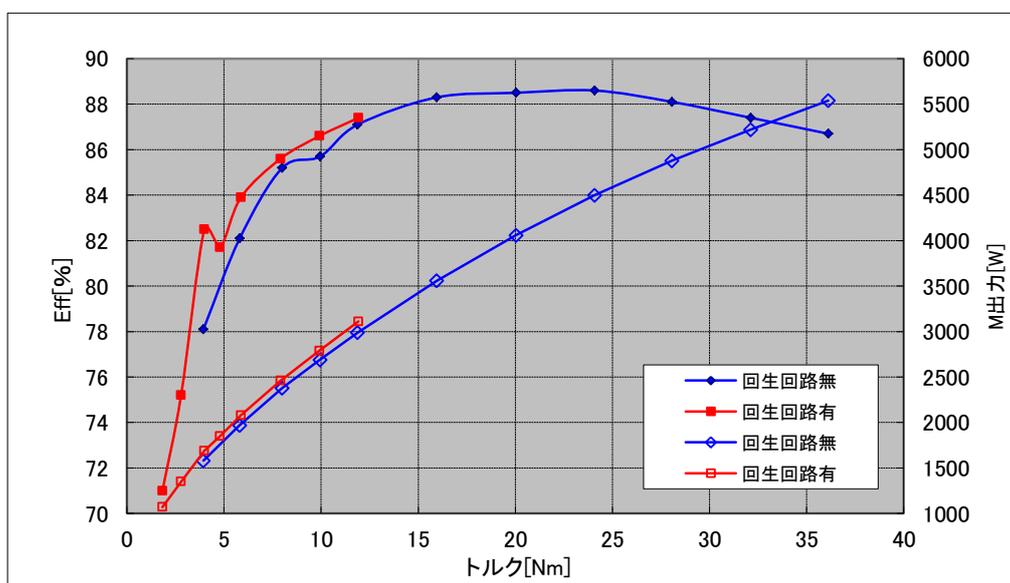


図 2.6 主回路 I と従来方式により駆動した時の実機試験によるモータ効率

### 2-2-3 課題と対策

次相励磁をする際に昇圧回路が形成されるため高電圧が発生し、励磁電流が早く立ち上がるのでモータ効率が改善するが、高電圧により IGBT が破損する問題が発生した。スナバ回路を追加したり、励磁方法を工夫したりするなど対策を行う必要がある。

### 2-2-4 まとめ

励磁区間内回生電力を次相励磁に使用するのか、キャパシタやバッテリーの充電に使用するのか区別できる各種回路方式を提案し、シミュレーション及び実機試験において、その有効性を確認した。

## 2-3 三次元有限要素法とベクトル磁気理論を用いた磁界解析によるコア極数・形状の最適化設計

### 2-3-1 序論

SR モータのモータ効率を改善した技術として、低鉄損材料を用いることを前提としたコア形状の設計が行われている。しかし、コア形状の設計で対象としている設計パラメータが基本的なものに限定されており、コア形状の軸方向変化は考慮していないので、SR モータの潜在能力が引き出せていると言い難い。圧粉鉄心を用いて固定子・回転子コアのティースに重なりを持たせる構造が検討されているが、圧粉鉄心を前提としているので、機械的強度不足や磁化特性の悪さなど圧粉鉄心固有の問題があり、実用化には至っていない。電気機器の一般材料であるけい素鋼板の使用し、軸方向にコア形状を変化させ、モータ効率を向上させる設計例は見当たらない。

固定子・回転子コアは、けい素鋼板を一つの金型で打ち抜くことで、同じ形状の鉄心を多数製造し、軸方向に積むことで完成する。このような従来の製造方法では、軸方向にコア形状を変更することが困難であったが、最近ティースを打ち抜く刃をスライドできる金型技術が開発された。そこで、この金型技術を応用することで、軸方向のティース形状を変化させることによりモータ効率を向上する SR モータの固定子・回転子のコア形状の設計を行った。

### 2-3-2 実施内容

コア形状の設計では、空間利用率を上げることを前提として、従来の設計で取り扱う固定子・回転子コアの断面形状に留まらず、固定子・回転子ティースが軸方向で交互に重なる形状や固定子ヨークのみを軸方向に延長する形状など、様々な設計を取り扱った。その設計に基づき 3.5kW 高効率 SR モータを試作し、動作確認と基礎特性を測定し、モータ効率の改善と運転領域の拡大を確認した。

図 2.7 に 3.5kW 高効率 SR モータのモータ効率マップを示す。SR モータ試験システムにおいて、励磁区間固定制御で運転し、電源電圧を測定条件として設定し、負荷機側で負荷トルクを変化させながらモータ効率を測定した。電源電圧を変化させることは PWM 制御を行い、コイルへの印加電圧を調整すること等価であるが、スイッチングを行わないため鉄損の影響が小さくなり、最も良い条件下でモータ効率を測定できる。SR モータ試験システムにおける電源容量を考慮して、電源電圧は 120V までを印加した。殆どの動作点において、モータ効率は 80%を超えている。最も良い動作点でモータ効率は 88.7%となっている。電源電圧を更に上げると、運転領域が広がり、中速域で高負荷に高効率な範囲が広がることが予想される。

図 2.8 に機械損を考慮した 3.5kW 高効率 SR モータのモータ効率マップを示す。機械損は中速域以上で、モータ効率への影響が顕著になる。機械損を考慮したモータ効率は、低負荷域では 90%を超えている。一般に SR モータは高速域で高効率と言われているが、その特徴が明確にモータ効率マップより読み取れる。このように機械損を軸出力として加えてモータ効率を計算する方法が一般的であるので、試作した 12/8 極 3.5kW 高効率

SR モータは 90%以上の効率を達成していると言える。機械損が支配的になる高速・低負荷域では、測定精度の問題はあるが、95%以上のモータ効率が得られており、開発目標としている電気自動車用のブラシレス DC モータと同等のモータ効率を達成している。

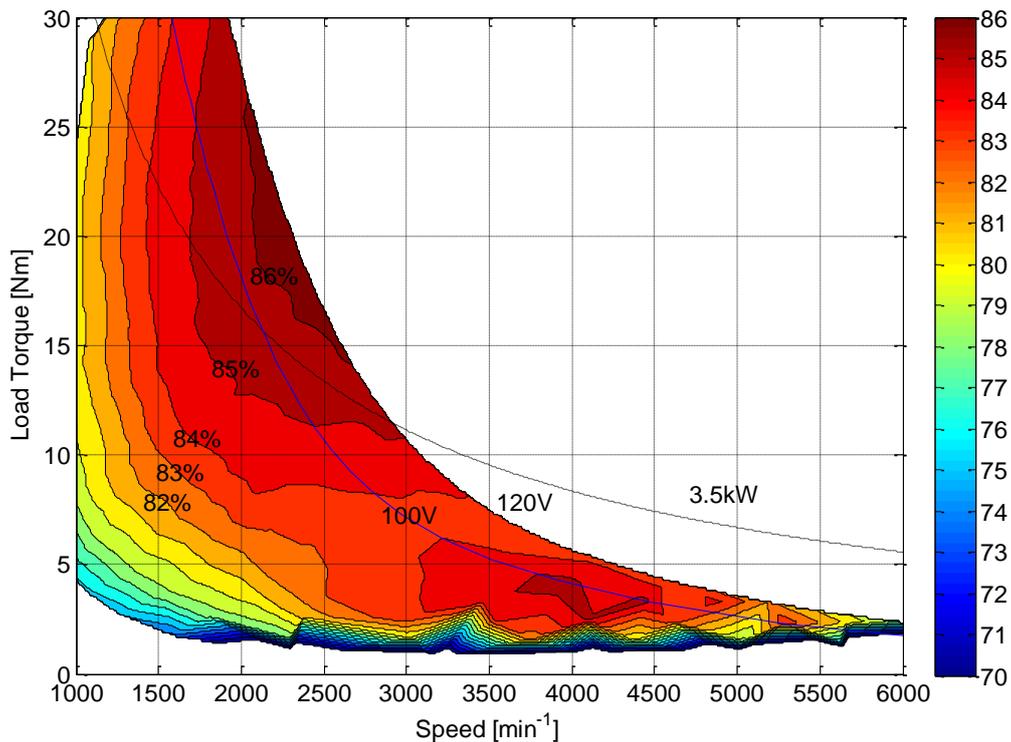


図 2.7 3.5kW 高効率 SR モータのモータ効率マップ

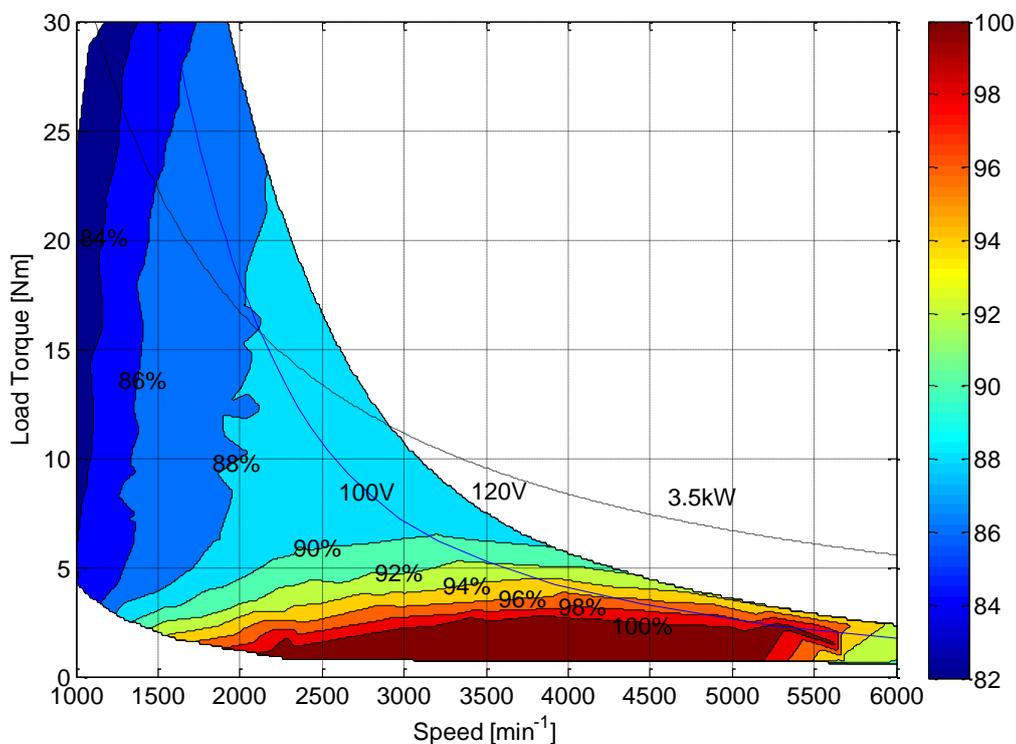


図 2.8 機械損を考慮した 3.5kW 高効率 SR モータのモータ効率マップ

### 2-3-3 課題と対策

固定子ティースと回転子ティースの軸方向での重なりについても検討していたが、コアの加工精度の問題でティース同士が接触する問題が生じ、モータ効率の測定まで至らなかったため、コアの加工精度を改善する必要がある。高電圧を印加すると、更なる運転領域と最大出力の増大が期待できるので、実験方法を工夫して、高電圧での実機試験を行う必要がある。機械損を考慮したモータ効率において、高速・低負荷域で測定精度に問題があるので、モータ効率の測定および算出方法を改善する必要がある。

### 2-3-4 まとめ

固定子・回転子のコア形状の設計において用いた設計指針の妥当性を定量的な評価方法により確認した。設計指針に従って設計した固定子・回転子コアを試作し、3.5kW 高効率 SR モータを完成させた。SR モータ試験システムを用いて、想定される運転領域における 3.5kW 高効率 SR モータのモータ効率を測定し、モータ効率マップを作成した。モータ効率マップにおいて開発目標であった 5%以上のモータ効率の改善を確認した。

## 第3章 高安全性を実現するセンサレスSRモータの開発

株式会社明和製作所 代表取締役社長 生野 岳志  
福岡工業大学 教授 大山 和宏

### 3-1 高精度位置予測を利用したセンサの不具合時のセンサレス駆動プログラムの開発

#### 3-1-1 序論

励磁区間可変制御は高精度な位置センサの使用を前提としているため、位置センサが故障した時に励磁を適切に行えない。位置センサが故障しても信頼性の高い電圧・電流センサからの相電圧と相電流の情報は使用できる。また励磁区間可変制御では、相電圧と相電流の検出値より電圧方程式を用いて磁束を演算している。そこで、磁束演算値と相電流から回転子位置を参照する回転子位置推定テーブルを作成し、回転子位置推定テーブルを用いて推定した回転子位置推定値を基準として各相の励磁制御を行う位置センサレス制御系を提案した。

#### 3-1-2 実施内容

回転子位置推定テーブルの基になる相電流と磁束をパラメータとした回転子位置データが、磁場解析システムによる解析結果より自動的に生成されるプログラムを開発しており、12/8極 3.5kW 高効率 SR モータの回転子位置推定テーブルも容易に作成可能である。

図 3.1 に標準 SR モータの相電流と磁束をパラメータとした回転子位置の数値データを示す。この数値データは配列で定義されており、回転子位置推定テーブルとして使用できる。

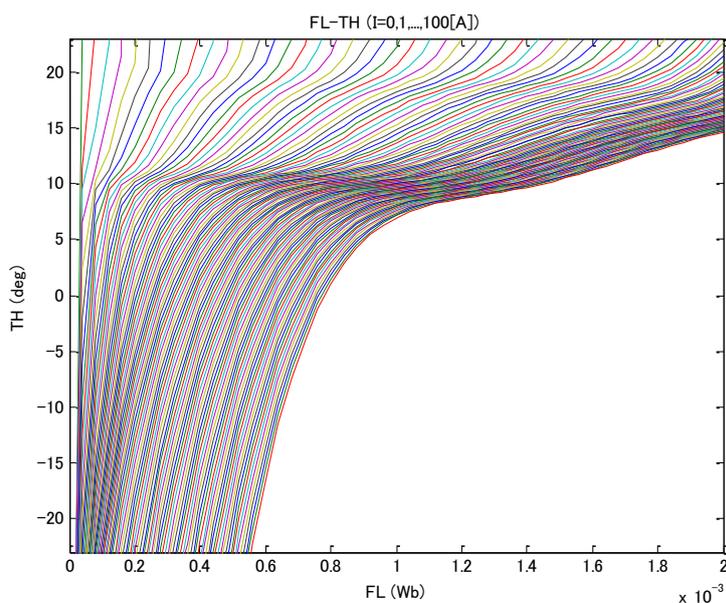


図 3.1 回転子位置推定テーブル

図 3.2 に回転子位置演算器を示す。各相の相電圧・電流の検出値を用いて各相の誘起電圧を計算し、積分することにより磁束鎖交数  $\Psi$  を求め、さらに巻数  $N$  で割り磁束  $\phi$  を求める。積分は演算周期ごとでゼロにリセットする。磁束  $\phi$  - 電流  $I$  - 回転子位置  $\theta$  テーブルより各相の磁束  $\phi$  及び電流  $I$  から回転位置  $\theta$  を参照する。各相から参照される回転子位置  $\theta$  は位相差 (+15deg or +30deg) を考慮して同じ角度にする。電流  $I$  の値を基準として、最も大きい相の回転子位置  $\theta$  を選択する。 $\phi - I - \theta$  テーブルで発生する演算誤差  $\Delta\theta$  を手動で調整する。最後に 45 度以上の角度とならないようにする。

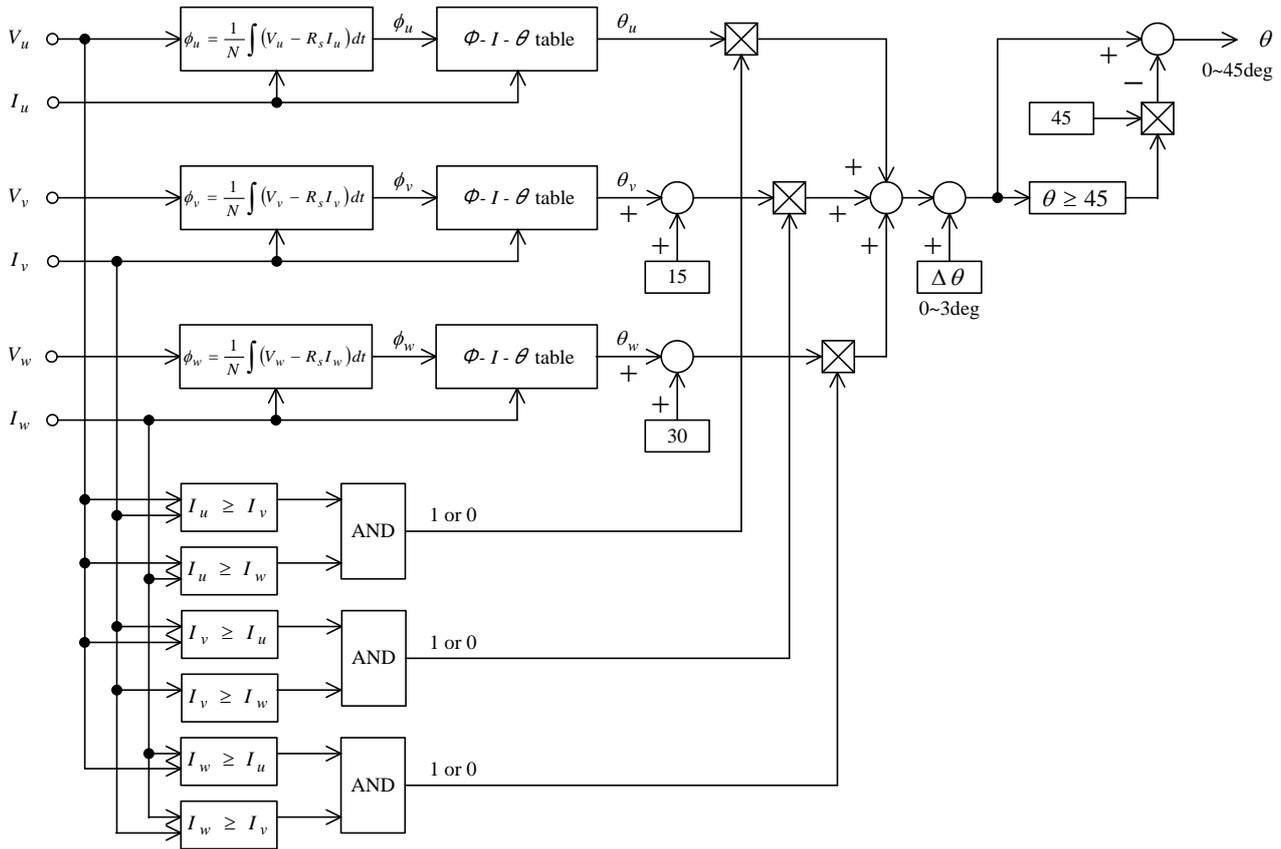


図 3.2 回転子位置演算器

$\phi - I - \theta$  テーブルを用いて回転子位置演算を行う方式では、コイルが励磁されていない場合は、回転子位置を演算できない。始動時は励磁されていないので回転子位置を演算できない。またコイルを励磁すると回転子が安定位置まで回転する問題もある。励磁を行っていない無負荷状態において回転子位置を演算し、演算した回転子位置に基づいて励磁を開始し、スムーズに始動することは難しい。そこで電気自動車の駆動システムへの応用を前提として、ブレーキによって回転子が拘束されている状態において、各相コイルに小電圧を印加して微小電流を流すことで初期位置を演算する。コイルが励磁されるため回転子にトルクが発生するが、回転子はブレーキによって拘束されているので回転することはない。

図 3.3 にセンサレス始動法を示す。*Duty* はアクセル信号から演算されるが、センサレス始動を行う場合は、ブレーキング状態つまり *Brake* 信号が 1 のとき、*Duty* を 5% 程度に固定して回転子位置を演算し、正しい励磁相を決定してからブレーキを解除する。

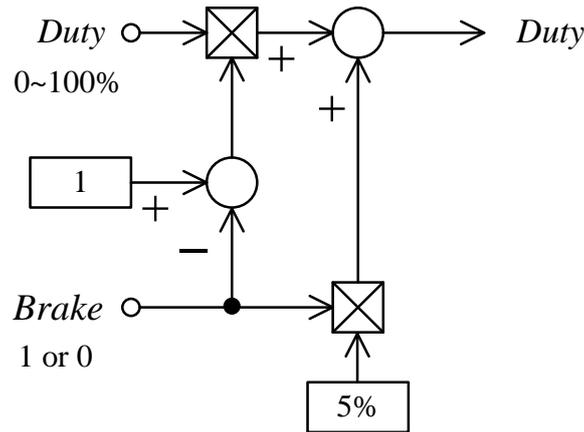


図 3.3 センサレス始動法

図 3.4 にセンサレス初期位置演算の様子を示す。MATLAB Simulink を用いてシミュレーションを行った。励磁方法は励磁区間が広い固定励磁区間制御を用いている。ブレーキによる拘束時間 0.001sec の間に各相に微小電流が流れ、回転子位置演算値が真値に収束している。励磁タイミングを決定する基準とする回転子位置演算値は相ごとに示しており、図 3.2 の回転子位置演算器による回転子位置演算値に対して相間の位相差を考慮して間接的に演算されたものである。U 相の回転子位置演算値は真値に収束していないように見えるが、回転子位置演算値 45 度と回転子位置 0 度は同じ角度を示している。

図 3.5 にセンサレス始動の様子を示す。0.001sec 以内に回転子位置演算が終了し、真値に収束するので、0.001sec 後のブレーキを解除する。ブレーキが解除されると、励磁区間固定制御原理に基づいて、各相の励磁が行われ、スムーズに始動している様子が確認できる。

### 3-1-3 課題と対策

FPGA を用いたコントローラに同システムを実装し、実機試験においても動作確認を試みたが、鎖交磁束の演算に問題があり、回転子位置演算値が真値と大きく異なるため、閉ループでの動作確認はできなかった。今後は閉ループでのセンサレス運転を実現するために、実装するプログラムの修正を行っていく必要がある。

### 3-1-4 まとめ

回転子位置テーブルを用いたセンサレス駆動システムを提案し、シミュレーションにおいてセンサレス始動を含む基本的な動作確認を行った。

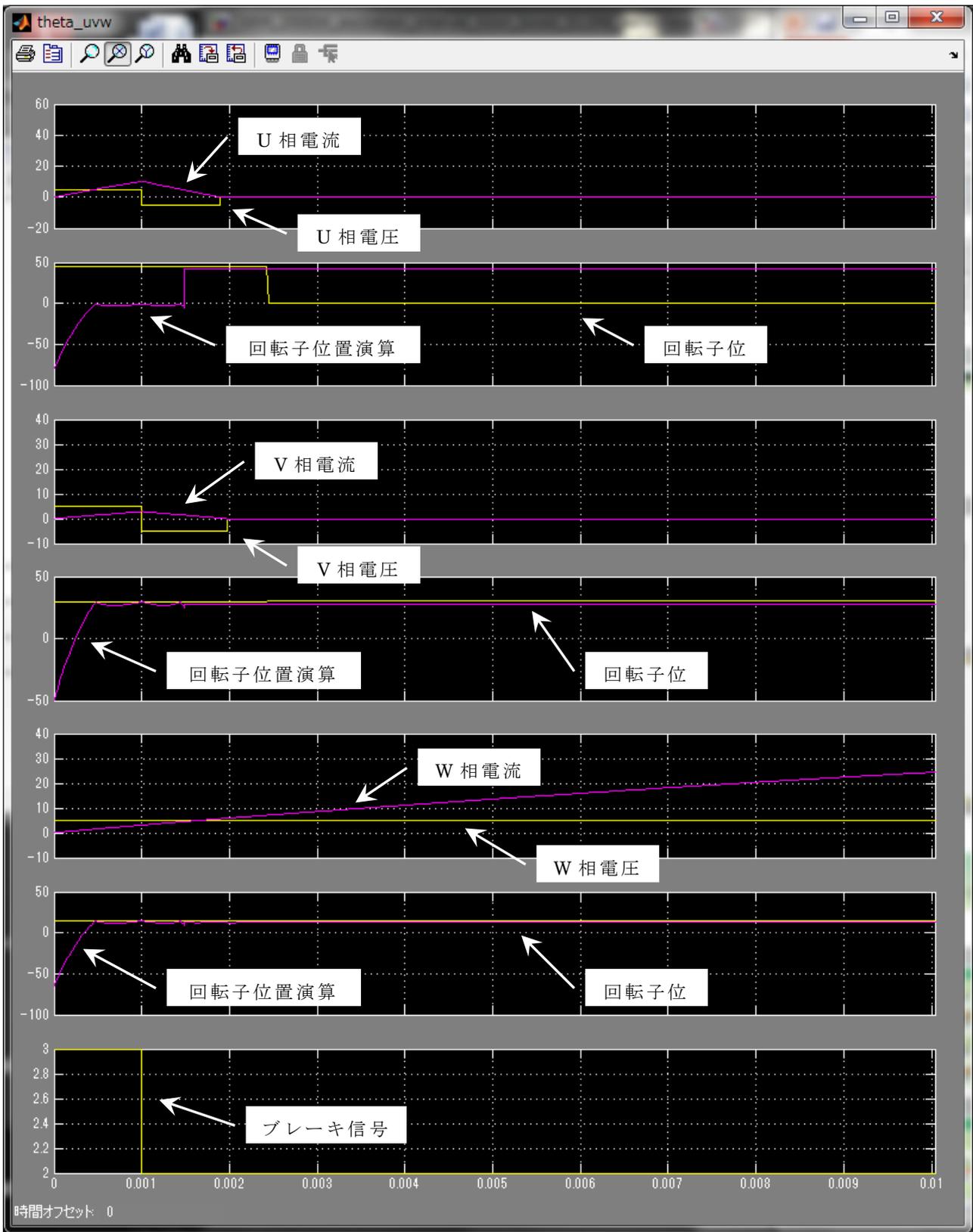


図 3.4 センサレス初期位置演算

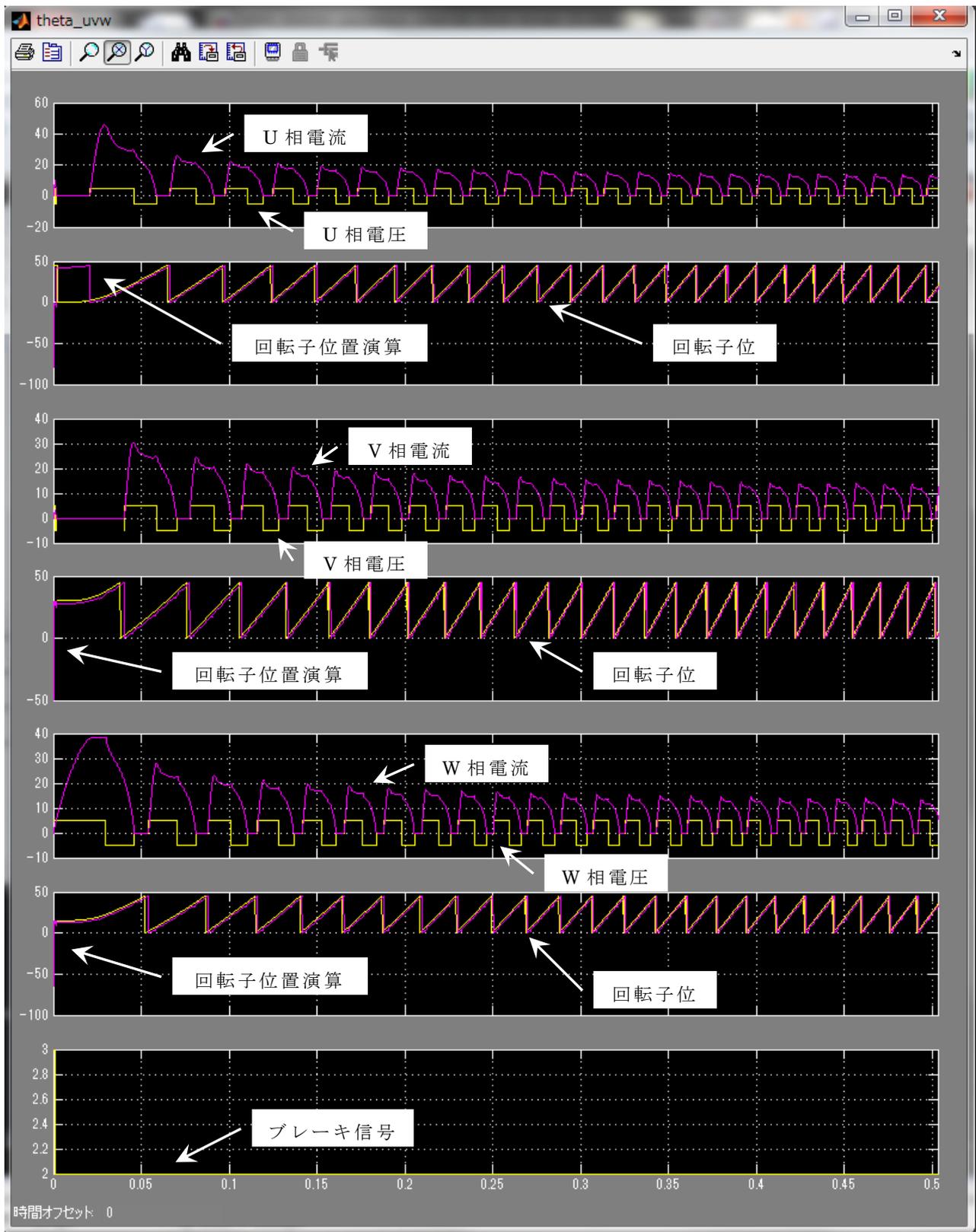


図 3.5 センサレス始動

## 第4章 SRモータ駆動小型EV装置用電源の開発

株式会社明和製作所 代表取締役社長 生野 岳志  
西日本工業大学 准教授 池田 英広

### 4-1 SRモータの高効率回生充電制御回路の開発

#### 4-1-1 序論

本研究では、小型電気自動車（EV）に対してレアアースフリーモータであるSRモータの適用を考え、モータの回生電力を効率良くバッテリーに回生する回生充電回路を開発する。SRモータは永久磁石を使用しないため、ステータコイルの磁界によって発生するリラクタンストルクを用いてロータを回転させている。そのため、減速トルクを発生するタイミングでステータコイルに電圧を印加することで、励磁回路に発生する負の電磁エネルギーを、バッテリー側へ回生することができる。しかし、回生電流制御を施す場合や、少ない回生電力を昇圧して回収する技術は確立していない。そこで、本研究テーマでは、本事業で開発するSRモータを駆動する電源システムに対する回生量を把握し、提案する回生充電回路により、既存の小型EVに比べてバッテリー寿命（一充電走行距離）を5%向上させることを目的とする。

#### 4-1-2 実施内容

まずSRモータの回生量の把握を行った。本研究で対象とするSRモータは永久磁石を使用しないため、電気自動車へ適用した場合、減速時や下り坂走行時に、モータの運動エネルギーを逆起電力として取り出すことが出来ない。そのため、他のモータに比べてバッテリーの回生電力を増やすことができないため、電気自動車が一回の充電で走行できる距離（一充電走行距離）は短くなる。そこで通常のSRモータ駆動回路においてステータコイルに発生している電磁エネルギーをバッテリーに回生することを考える。つまりSRモータを発電機として動作させることを考える。ここで、図4.1はSRモータのロータ・ステータ間のインダクタンス分布と、回生用の回生パルス供給電圧、また回生電流の関係を示したものである。

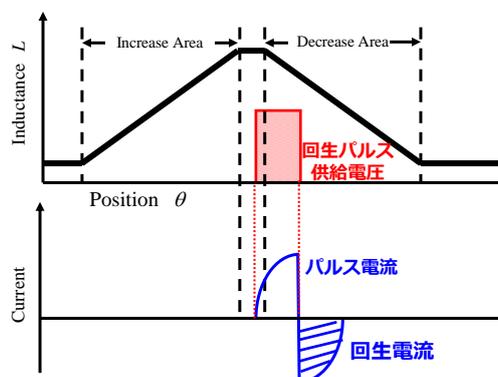


図 4.1 加速・減速時のロータとステータの関係

このように、適切なタイミングでステータ巻線を励磁することにより、機械エネルギーを電気エネルギーに変換できる。また磁化曲線で考えると、「印可した励磁エネルギー」より、ロータの運動エネルギーでロータが回転して、それにより減少したインダクタンスによる「SR モータから取り出せるエネルギー」が大きければ、回生により電源側の消費電力を抑制することが可能となる。従って、電源の利用率や出力／体積比の観点から SR モータの駆動のみならず、発電利用を行う場合は積極的に磁気飽和領域で利用することが望ましい。また回生用の励磁パルス電圧の幅や、励磁開始角をどのように決定するかが重要となる。

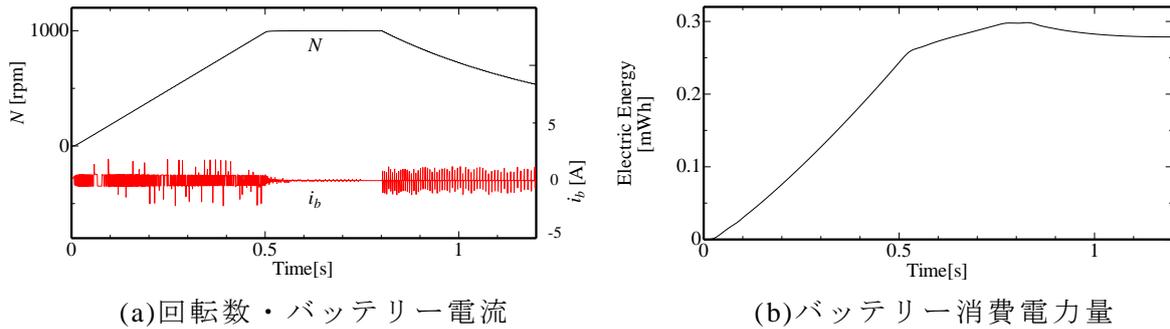


図 4.2 SR モータによる回生効果

表 4.1 回生パルス幅による回生電力量

パルス幅[mm]	回生電力量[ $\mu$ Wh]
1	19.0
2	8.3
3	10.6
4	13.0
5	2.3

SR モータの回生効果について説明する。図 4.2 は SR モータによる回生例である。なお動作はまず速度制御によりランプ状に回転数を駆動制御した後、0.8[sec]から回生動作を行わせている。なお回生パルス電圧の幅は 5[mm]としている。この結果より、回生開始時から回転数が減少して逆トルクによる減速が確認でき、消費電力量も減少していることからバッテリーへの回生も確認できる。なお回生パルス幅を変更した際の回生電力量の推移を表 4.1 に示す。

次に SR モータの回生時に対して、提案する回生充電回路を適用した際の結果を示す。図 4.3 は提案する回生充電回路であり、双方向チョッパ（2 象限チョッパ）の形となっており、バッテリー側へ SR モータ側から昇圧する方向に設置する。図 4.4 はシミュレーションによる回生充電回路の昇圧動作の duty 比を変化させたときの SR モータの回生効果率（バッテリーの入出力電荷量から算出）を示しており、パルス幅毎に比較している。これにより、最大 50[%]の回生効果が確認できる。なお実際には回生充電回路を使

用すると通常より回路素子数が増加するため、バッテリー消費電力の抑制は5～10[%]程度であると想定される。

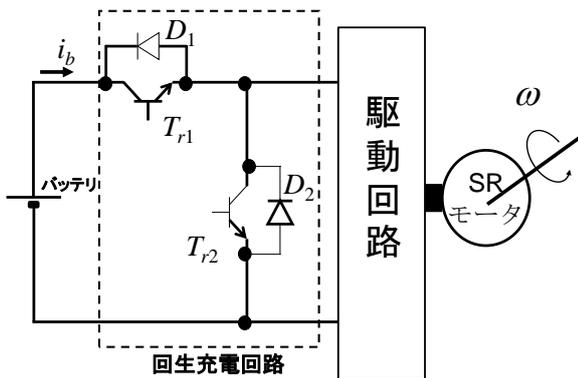


図 4.3 回生充電回路

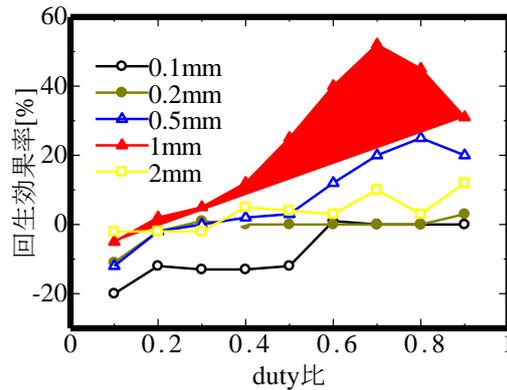


図 4.4 回生効果率

#### 4-1-3 課題と対策

今後の課題としては、まずSRモータの最適な回生状態の把握と逆起電力を最大限に回生する回生電流制御の設計手法を確立することである。また回生充電回路においては、回生に利用する電力が永久磁石モータと本質的に異なる状態エネルギーであるため、回生を発生させる励磁回路の電源と、回生量を回収する電源を分けてシステムを構築する必要があると考え、テーマ①-2で提案する回路を利用して最適な回路設計と回生制御手法を検証する予定である。

#### 4-1-4 まとめ

本研究では、SRモータ駆動システムの余った運動エネルギーを電力としてバッテリーに回生することで、バッテリーの消費電力を5[%]抑制することを目的とした。まずSRモータの回生電力量と供給する回生用励磁パルス電圧の幅や励磁タイミングについて検証を行い、その後、双方向チョッパで構成した回生充電回路を用いて、50[%]程度の回生電荷量の向上を確認した。回生時の回路構成の検討と、回生量を最大限利用する最大回生電力制御に関する検証を実機にて行う予定である。

### 4-2 走行距離向上のためのキャパシタシステムの開発

#### 4-2-1 序論

電気自動車の駆動電源である二次電池に、電気二重層キャパシタ (EDLC) とキャパシタ制御装置 (CCC) で構成するキャパシタシステムを併用し、バッテリーの劣化を抑えると共に、バッテリーの寿命を約15%向上することを開発目的とする。

検証車両は「1人乗り小型電気自動車」と「2人乗り電気自動車試作品」の2種類であり、複数条件に対し走行検証にて提案手法の有効性を確認する。

#### 4-2-2 実施内容

図 4.5 に提案するキャパシタシステムのシステム構成を示す。キャパシタシステムはバッテリーとモータ駆動回路の間に設置しており、駆動回路側に EDLC を、バッテリー側に CCC を設置している。EDLC が急峻な変化に対応してバッテリーの消費を抑えると共に、CCC によりバッテリーの稼働率をさらに抑制する仕組みになっている。ここで図 4.6 に 2 種類の検証車両を示す。本項では、「2 人乗り電気自動車試作品」に対する走行検証結果のみ抜粋して述べる。

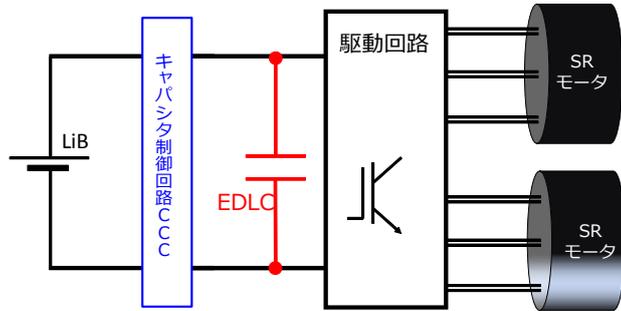


図 4.5 キャパシタシステム

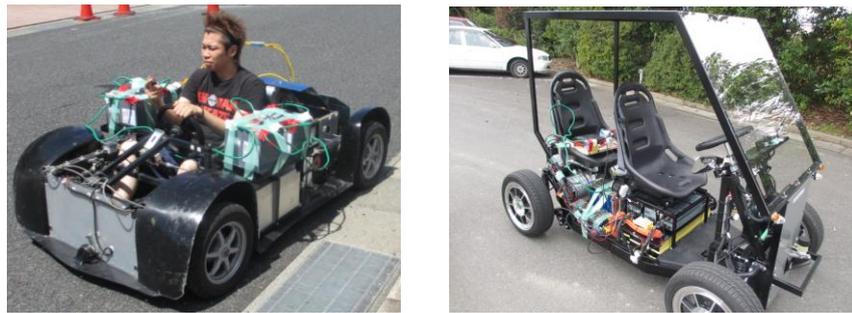


図 4.6 検証車両外観

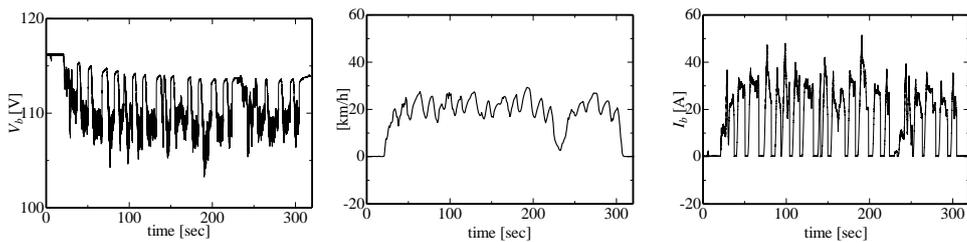


図 4.7 走行結果（バッテリーのみ、1.6[km]走行）

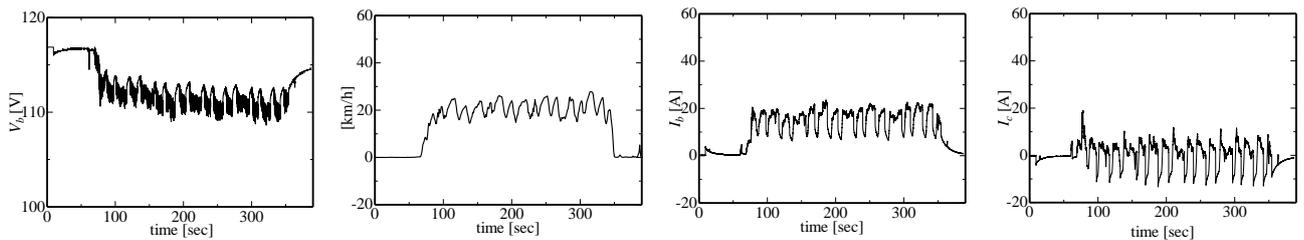


図 4.8 走行結果（バッテリーのみ、1.6[km]走行）

図 4.7 および図 4.8 は約 1.6[km] 走行した時の各波形である。両図より EDLC を併用した方が、バッテリー電圧の脈動を抑制でき、また 25[A] 以上のバッテリー電流のピークカット効果を確認できる。また、バッテリーの消費電力量は 149.4[Wh] から 117.2[Wh] へ約 21.6[%] 抑制された。なお EDLC を併用した際のバッテリー電流は、走行時に負の値となっておらず、バッテリー側から EDLC へ充電電流が流れていることが分かる。

次に 30[%] 登坂走行の結果を示す。図 4.9 および図 4.10 は登坂走行の結果である。両図より、前述の走行結果と同様にバッテリー電流の約 30[A] 以上のピークカットが見られる。またバッテリー消費電力量は 13.82[Wh] から 10.57[Wh] へ約 23.5[%] 減少し、登坂走行においても EDLC の高い効果が確認できる。

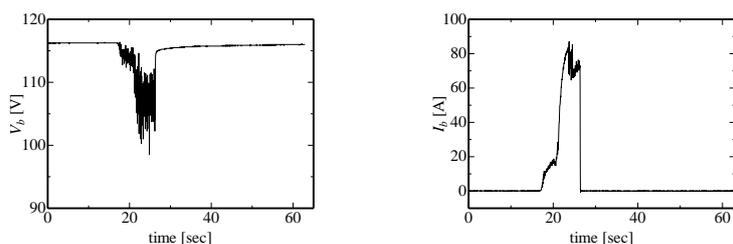


図 4.9 走行結果（バッテリーのみ、30[%]登坂走行）

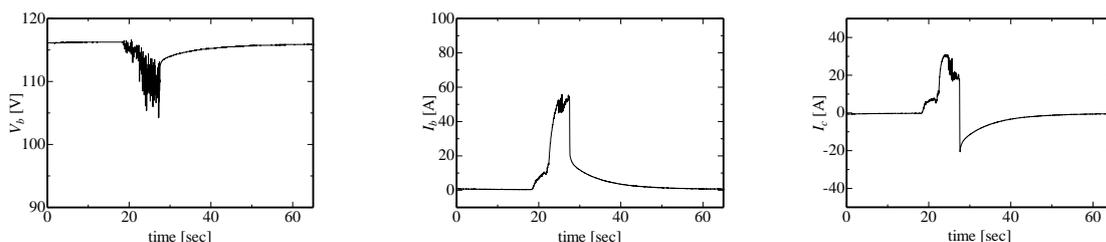


図 4.10 走行結果（EDLC 併用、30[%]登坂走行）

#### 4-2-3 課題と対策

提案手法により理論上はバッテリーの消費電力量を 30[%] 以上抑制することも可能であるが、本研究で使用するリチウムイオン二次電池の内部抵抗が比較的低いため、EDLC の効果が表れにくくなっている。そこで今後回生電力を考慮できれば、停止時のバッテリーから EDLC への充電電流をキャンセルすることが可能で、バッテリーの消費電力をさらに抑制することができると考える。

#### 4-2-4 まとめ

本研究においては、SR モーター駆動電気自動車に対し、キャパシタシステムを用いることにより 20[%] 以上のバッテリー消費電力量の抑制が達成できた。今後は様々な条件下で走行検証を行うと共に、より内部抵抗が低い EDLC を用いて同様の検証を行う予定である。またバッテリー電圧値の増圧に伴う CCC の改良についても今後実施する予定である。

## 第5章 高効率EV駆動装置の開発試作

株式会社明和製作所 代表取締役社長 生野 岳志  
福岡工業大学 教授 大山 和宏  
西日本工業大学 准教授 池田 英広

### 5-1 CVT利用又は多段自動切換減速機の開発試作

#### 5-1-1 序論

現在EV用駆動装置はモータと減速装置を組合せた構成が主流であるが、減速装置は変速できるものが少なく、モータに広い範囲の駆動性能を求める場合が多い。減速装置を効果的に変速させることによってモータへの負担を軽減することが出来ればEVとしての性能の向上だけではなく、電費等の向上に期待が持てる。

ここでは小型EV用自動切替減速機について3年間開発、試作を行ったので、その内容について記す。

#### 5-1-2 実施内容

##### 小型EV用駆動装置の選定

小型EV駆動装置を開発するに当たり、考えられる駆動方法を図5.1に示す。どの方式を選定して開発するか、アドバイザーの助言を元に性能、独自性、コスト、明和製作所での生産性等の項目に重み付けをして、選定のための評価表を表5.1の様に作成した。

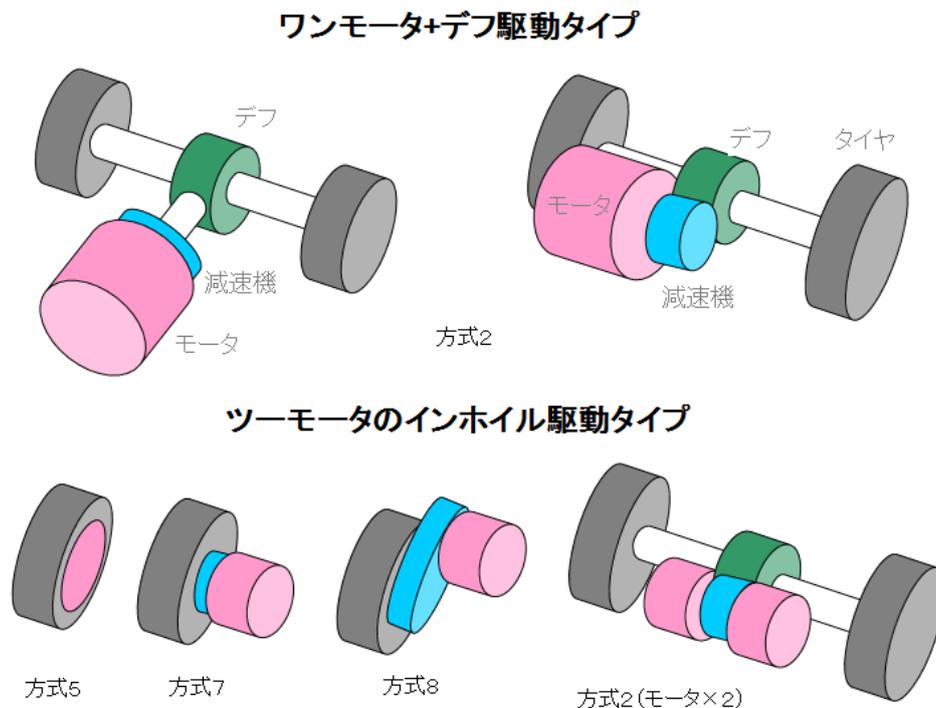


図 5.1 小型 EV 駆動装置の種類 (駆動方式)

表 5.1 小型 EV 駆動装置評価表

モータ数量	タイプ	減速種類	その他	方式	評価
セントラル モータ  7kw x 1	インナー ロータ	CVT		1	3.20
		ギア変速	ミッション	2	7.30
			ベルト	3	2.60
			チェーン	4	3.60
		ギア減速	ミッション	2'	5.60
インホイール  3.5kw x 2	アウター ロータ	ダイレクト		5	1.85
		デュアルコア		6	2.55
	インナー ロータ	遊星ギア		7	6.70
		外部ギア		8	6.70

表 5.1 を元に、H23 年度の開発は 3.5KW のモータに変速機能付き減速装置を付けた方式 8 の駆動装置を選定した。また、H24 年度は方式 2 (モータ×2) を選定して、それぞれ駆動装置の試作を車両に搭載して評価を行った。

H23 年度に試作した駆動装置を図 5.2 に示す。

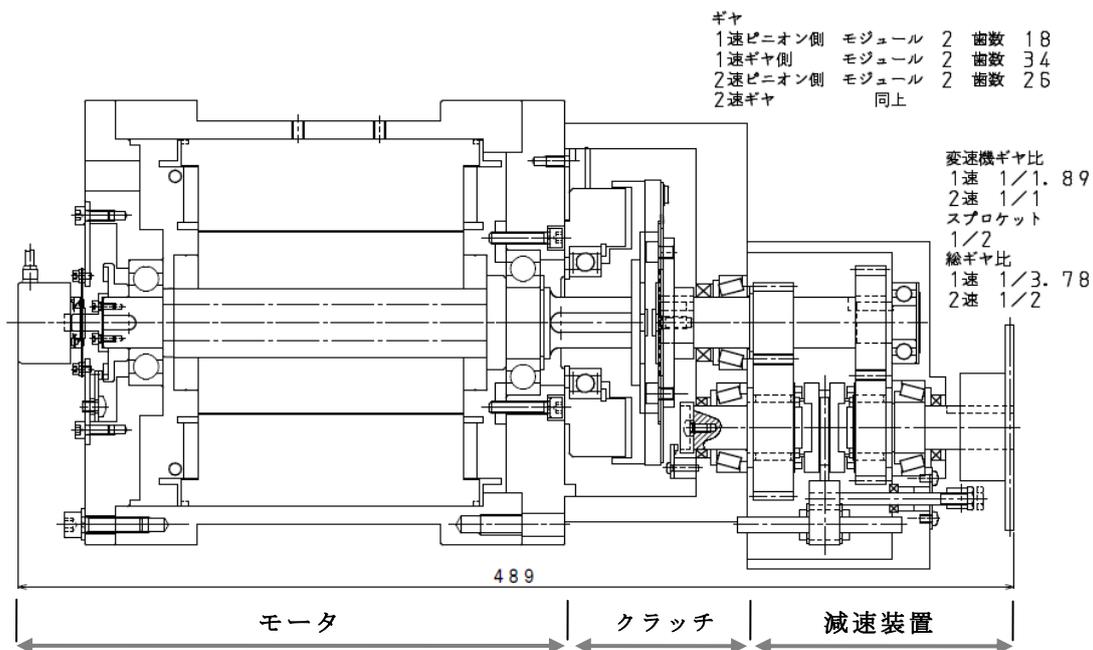


図 5.2 H23 年度試作駆動装置

本装置は減速装置部に変速機構を有し、これは 2 種の噛合い率の異なるギヤの組合せを、スライドレバーで切替えることにより動作させることが出来る構造である。試作した駆動装置を車体に搭載して駆動装置の走行性能、変速装置の動作確認等を実施した。

本装置はクラッチが含まれるため、全長が長くなり、小型 EV 車両には搭載が難しく改良が必要であることが判明した。そこで H24 年度にはクラッチをなくし、更に減速装置部を 2 台のモータで共有にすることで、全長を約 70% 短縮した、図 5.53

に示す駆動装置を開発した。ただ本減速装置のクラッチを省いたことにより、このままでは変速の時に切替による衝撃が発生することが考えられる。そこで対策として、切替ギヤの噛合い比率による回転数差を、モータとタイヤ側の回転を同期させ少なくすることにより、衝撃を減少させることを考案した。

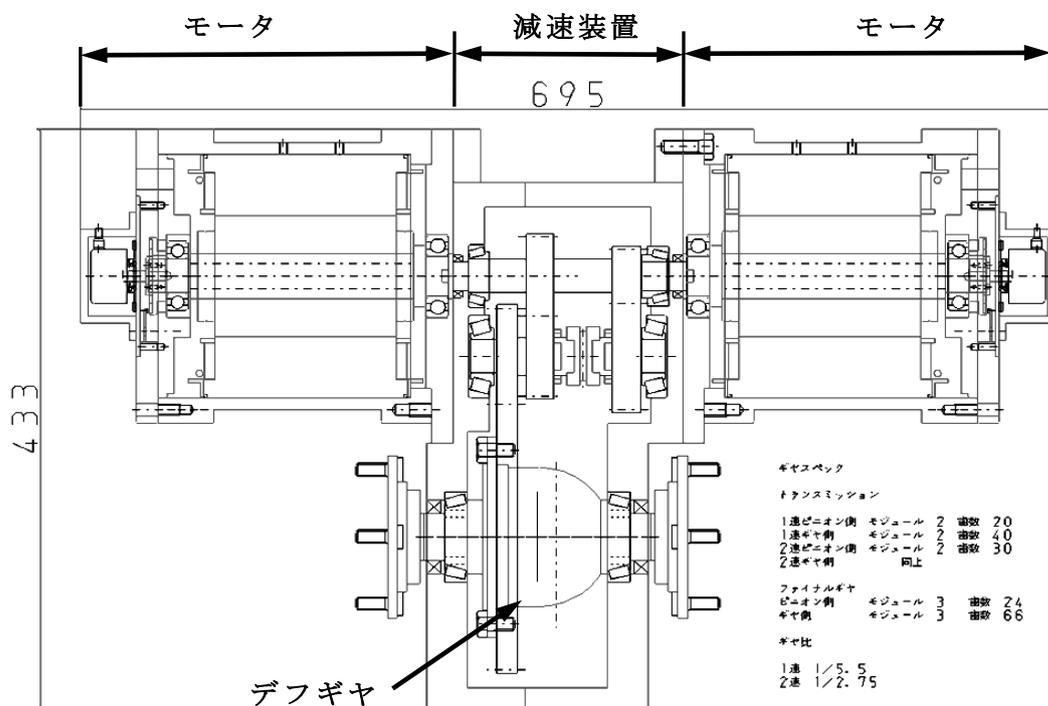


図 5.3 H24 年度試作駆動装置

本駆動装置を車体に搭載した様子を図 5.4 に、減速装置の組込の様子を図 5.5 に、また図 5.6 に組込が完成した小型 2 人乗り EV の写真を示す。

完成した試作車両を使い、駆動装置の走行性能試験を実施した。走行試験結果を表 5.2 に示す。

最高速度については広い走行環境がないため計測出来ていない。また登坂性能は目標の斜度 18° の坂を総重量 530kg の条件で、15~20km/h の速度で登坂出来ることが確認出来た。変速装置については、切替時に多少切替音の発生がみられるが、特に違和感なく切替が出来ることを確認出来た。電費（一充電あたりの走行距離）については 40Ah バッテリーの試験では 30km/h 一定速の条件で走行距離は 38km であり、予定の 52Ah のバッテリーに換算しても 49km の走行しかできず目標の約 82% の結果であった。

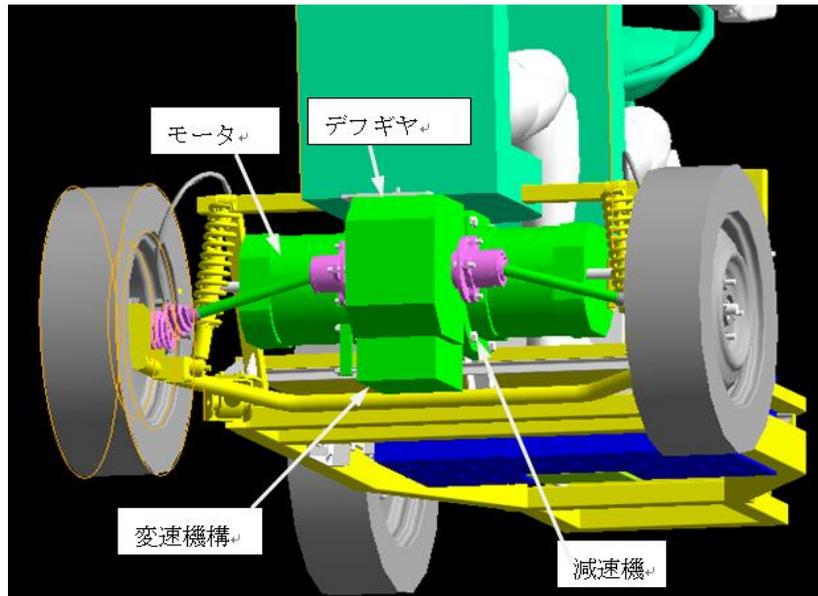


図 5.4 車両に搭載された試作駆動装置

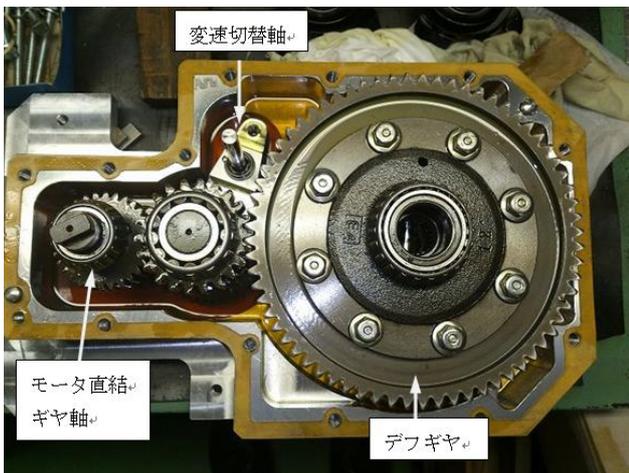


図 5.5 試作駆動装置の減速装置

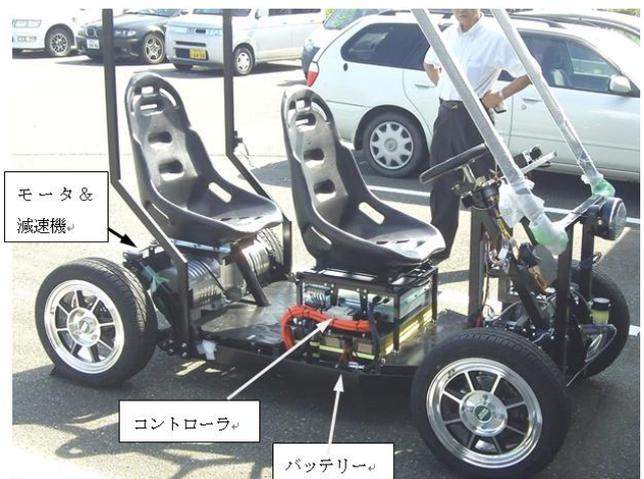


図 5.6 2人乗り試作車完成の写真

表 5.2 試作駆動装置の走行性能

項目	目標	結果
車体重量(Kg)	350 以下	330
電池仕様	DC100V 52Ah	DC112V 40Ah
減速比	2 速以上	1/6.18 1/3.09
Max 速度(km/h)	60 以上	未計測
Maxトルク(Nm)	220 以上	275
斜度18° 登坂	10km/h 以上	15~20km/h で登坂可能
電費(30km/h 一定) 1 回充電走行距離	60km以上	38km/Lo (49km/52Ah)

### 5-1-3 課題と対策

本研究では試作した駆動装置を車両に取り付け、想定される条件で実走行試験を行い、駆動装置、変速装置の動作確認、傾斜角 18° の坂道の登坂性能を確認出来た。

上記した様に、最高速度については現在の環境では計測が出来なかったため、今後大学の敷地等で確認を実施する。また、走行試験の負荷電流データから、2台のモータの負荷にアバランスが発生していることが判明した。更に高負荷時に駆動装置の駆動音が大きくなり、これらについては今後の課題である。この2つの問題に関しては今回2台のモータを直軸結合したことが原因である可能性があり、これは2台のモータの結合位置を変化させ適正な位置とすることで問題解決する可能性がある。原因究明と対策を早急に検討していくことが必要である。電費の向上についても今回の試作車両では目標を達成することが出来ていないが、車両の場合使っているタイヤのサイズ、空気圧等で大きく変化するため、今後は駆動装置の状態で評価出来るように評価方法も含め検討する。

### 5-1-4 まとめ

レアアースフリーのモータを使い更に自動変速装を付けることを特徴とした小型EV用減速機について開発を行なった。これにより車両の運転領域が広がり、車両の最高速度、登坂性能向上、更に電費の向上を目指した。

現状ではまだ、全てのサブプログラムを含めた装置ではないため最終評価には至らないが、担当する減速装置については変速機能を付けることでモータの運動性能を広げ魅力ある駆動装置が出来た。

今後、量産に向けてコストの要因が大きくなることも事実であり、上記課題と共に更に検討を深める必要がある。

## 5-2 EVシステムとしてのモータ+変速機+電源の統合制御法の開発

### 5-2-1 序論

EV駆動装置にはバッテリーから、キャパシタ、コントローラ、モータ、変速装置が含まれ駆動装置としてそれぞれの状況に応じた統括制御が必要である。ここでは駆動装置の試作に合わせ必要な統括制御を開発したので、その内容について記す。

### 5-2-2 実施内容

#### 5-2-2-1 小型EV駆動装置試作の統合制御開発

開発した小型EV駆動装置の全体の制御システムの概要を表す系統図を図5.7に示す。

本基本構成で回路設計を行い、コントローラを試作した。H23年度には手動切替変速装置付き駆動装置を一人乗り車両に搭載して動作させ、駆動装置としての検証を実施した。また、H24年度は自動切替変速装置付き駆動装置を車両に搭載して動作試験を実施した。

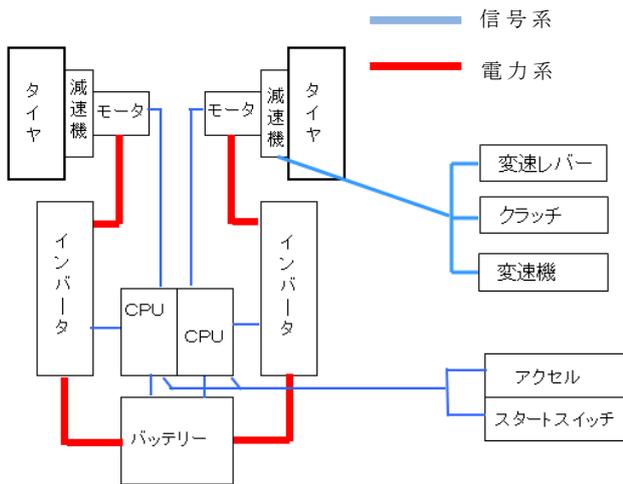


図 5.7 駆動装置の制御系統図

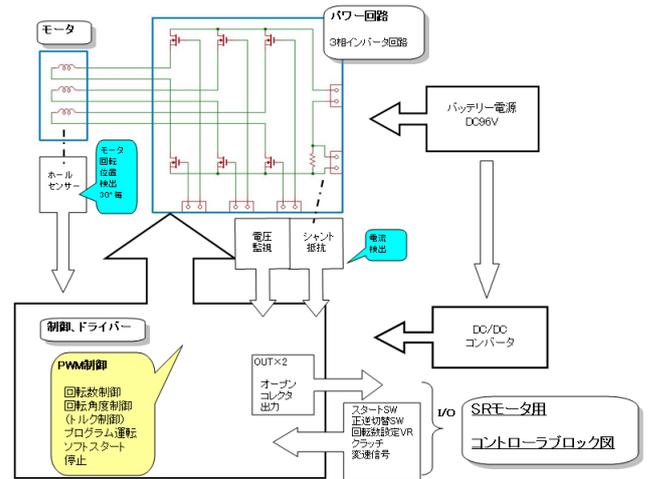


図 5.8 コントローラ構成図

### 5-2-2-3 自動切替変速装置の制御について

H24年度の自動切替変速装置では変速装置の開発項でも述べた様に、切替のわずかな時間に切替ギヤの噛合い比率による回転数差をモータとタイヤ側の回転を同期させることで解消させる必要がある。

このため切替え装置の各信号を受け図 5.9 の様なシーケンスで制御を実施した。

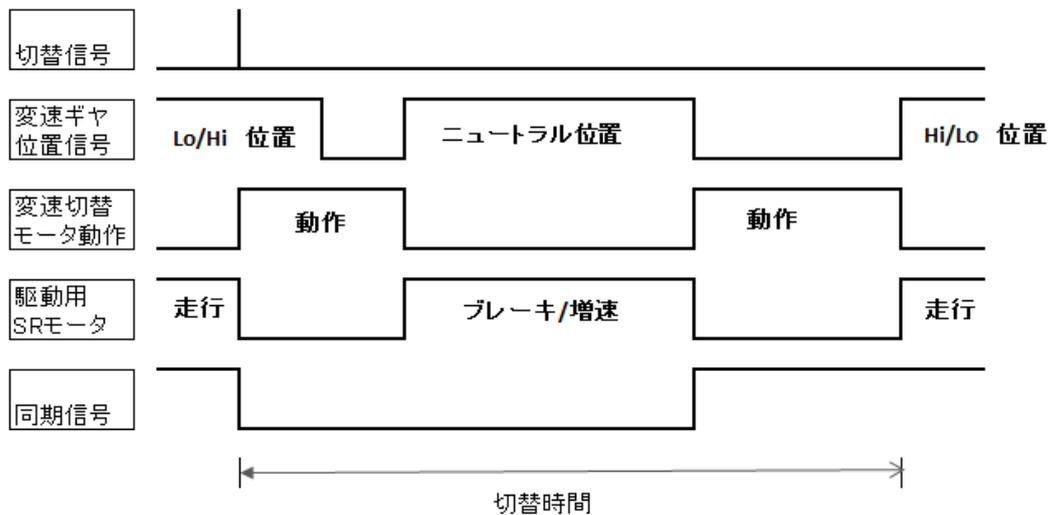


図 5.9 ギヤ変速シーケンス

また、試作駆動装置で実際に車両を走行させながら L0 ギヤ（低速走行）から HI ギヤ（高速走行）へ切替を行った時のデータを図 5.10 に、HI ギヤ（高速走行）から L0 ギヤ（低速走行）へ切替を行った時のデータを図 5.11 に示す。

切替の目標時間は 0.5 秒以内であったが、どちらも現状では目標には到達できていない。ただ切替の動作に問題がないこと、更に改良により目標時間内の動作が可能であることを確認することが出来た。

### 5-2-3 課題と対策

本研究では試作駆動装置を車両に取り付け、実走行をしながら変速装置の切替が設計通り動作していることを確認出来た。

今後の補完研究では、回路を完成させ、変速時の切替時間が目標の0.5秒以内であることを確認し、更に高速に切替が出来る様改良を進める。また、切替時の衝撃は、現状のレベルの数値把握と必要とされる目標レベルの設定と検証、更に改良を進める。最終的には、他の未完成プロジェクトを統合して駆動装置としての性能を十分発揮できる制御系を構築する。

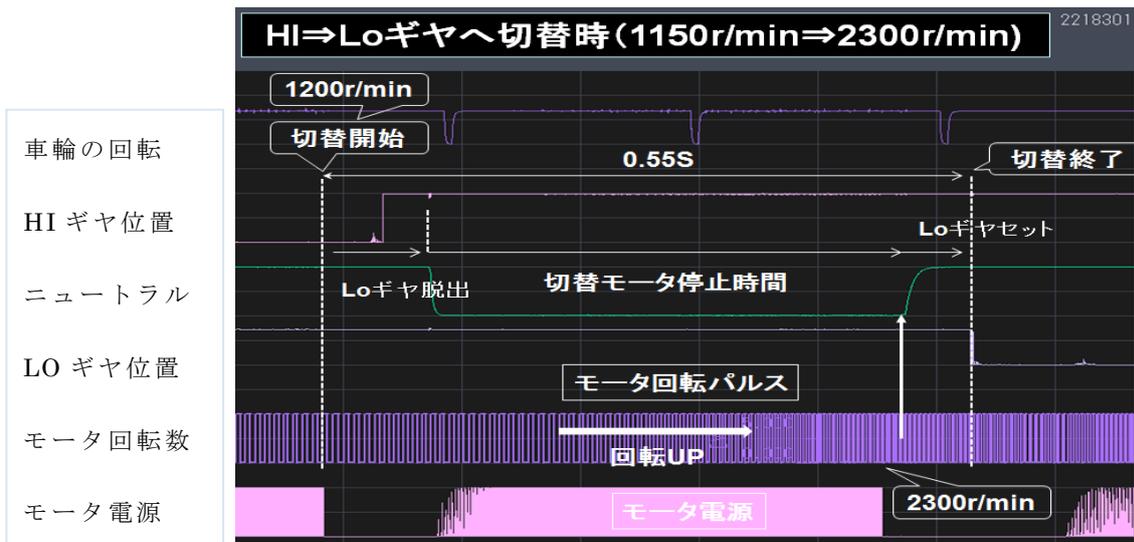


図 5.10 LO ギヤから HI ギヤへの切替信号測定

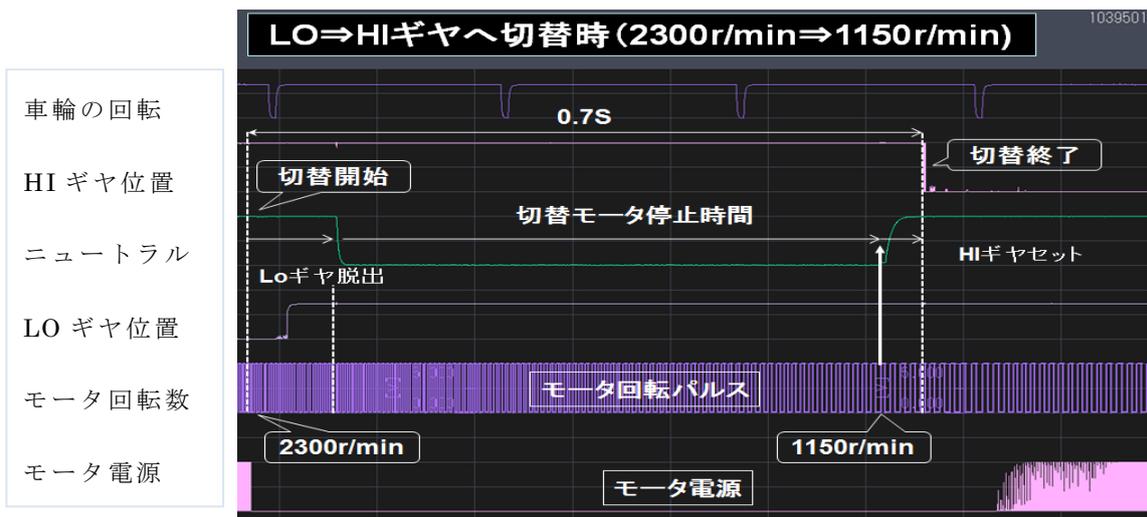


図 5.11 HI ギヤから LO ギヤへの切替信号測定

### 5-2-4 まとめ

小型EV駆動装置の統括制御については、3年の研究を通じて一通りの基本的な制御を

構築出来た。

今後、含まれていないサブプロジェクト成果の追加、更には2台のモータ間の微妙な制御について研究を深め、レアアースフリーのSRモータでの小型EV駆動装置の開発を完成させる。

## 最終章 全体総括

### 研究項目(サブテーマ)と技術目標値研究開発成果(最終年度)

テーマ	開発成果と最終目標達成度	
① 高効率SRモータの開発	H22-24	SRモータ(永久磁石不使用)の現状での最大効率をPMモータ(永久磁石使用)並みの85~95%に向上させる。⇒ <b>10%向上達成</b>
①-1 位置決め予測を利用した励磁区間可変制御プログラムの開発 <span style="float: right;">特許出願済</span>	H24	制開発した制御プログラム、更に①-2、3を合わせたモータ試験を実施し、トータルでの効率向上10%以上を確認。また、モータを車に実装して最終走行試験を実施。⇒ <b>今年度中に実車へ適用する</b>
①-2 励磁区間内再生電力の有効活用プログラムの開発 <span style="float: right;">特許出願済</span>	H24	開発した制御プログラム、更に①-1、3を合わせたモータ試験を実施し、トータルでの効率向上10%以上を確認。また、モータを車に実装して最終走行試験を実施。⇒ <b>回路試験実施。実車への適用は補完研究でフォローアップ。</b>
①-3 三次元有限要素法とベクトル磁気理論を用いた磁界解析によるコア極数・形状の最適化設計 <span style="float: right;">特許出願済</span>	H24	コアは完成済み、開発したコア、更に①-1、2を合わせたモータ試験を実施し、トータルでの効率向上10%以上を確認。また、モータを車に実装して最終走行試験を実施。⇒ <b>開発テーマは完了</b>
② 高安全性を実現するセンサレスSRモータの開発	H22-24	SRモータのセンサレス運転の実現 ⇒ <b>小型モータでの確認まで実施</b>
②-1 高精度位置予測を利用したセンサの不具合時のセンサレス駆動プログラムの開発	H24	実際にモータを動作させて、センサレス駆動を確認。⇒ <b>補完研究にて実施</b>
③ SRモータ駆動小型EV装置用電源の開発	H22-24	バッテリー寿命を20%向上 ⇒ <b>20%向上は達成</b>
③-1 SRモータの高効率回生充電制御回路の開発	H24	2人乗りEVを想定して製作する車体「2人乗り電気自動車試作品」に回路を適用し、バッテリー寿命を5%向上。⇒ <b>①-2と連動して実施</b>
③-2 走行距離向上のためのキャパシタシステムの開発	H24	最適なキャパシタシステムを構築し、実証にてバッテリー寿命を15%向上(キャパシタにて10%向上、キャパシタ制御回路にて5%向上) <b>補完研究で回路改造</b>
④ 高効率EV駆動装置の開発試作	H22-24	二人乗、最高速度60km/h、登坂能力18°、バッテリー1充電あたり走行距離60km ⇒ <b>速度、登坂は達成、電費は今後検証</b>
④-1 CVT利用又は多段自動切換減速機の開発試作	H24	開発した減速装置を車に実装して走行試験を実施。⇒ <b>今年度中に実施</b>
④-2 EVシステムとしてのモータ+変速機+電源の統合制御法の開発	H24	開発した統合制御法を使い実車での走行試験を実施。⇒ <b>補完研究にて継続</b>

平成 25 年 2 月 20 日 現在