

	きむらげん		
氏名	木村 玄		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成16年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	ブラシレス DC モータの最適制御と電気自動車への応用に関する研究		
指導教官	東北大学教授 一ノ倉 理		
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理	東北大学教授 阿部 健一	
	東北大学教授 松木 英敏	東北大学助教授 郭 海蛟	

## 論文内容要旨

省エネルギーや地球温暖化、及び大気汚染の防止といった地球環境保全の解決策として、電気自動車の普及は有効な手段であり、自動車メーカーを中心として、その技術開発が強力に推進されている。しかしながら、電気自動車普及の最大の障害要因として、充電スタンドなどのインフラ整備が遅れていること、一回の充電で走行可能な航続距離が、既存の内燃機関自動車と比較して短いことが挙げられる。エンジンとモータを併用するハイブリッド車も注目されているが、エンジンとモータを搭載することによる車重の増加や、完全に無公害化出来ないという欠点が指摘されている。その改善策の一つとして、バッテリーのみをエネルギー源とする、いわゆる純電気自動車における電力回生ブレーキが注目される。電力回生ブレーキとは、車両制動時にモータを発電機として動作させ、車両が持っている運動エネルギー並びに位置エネルギーを電気エネルギーに変換して制動力を得る方法であり、これをバッテリーやコンデンサに返還して加速時に再利用することにより、内燃機関自動車と比較して劣る航続距離の拡大が期待される。しかしながら、制動時において回生電力を効率良く回収する装置（インバータ、バッテリー、コンデンサ）と、それを実現する制御法（ブレーキの掛け方、運転方法など）については、十分な研究がなされていない。

そこで本論文では、走行距離の改善を目的として電気自動車用ブラシレス DC モータの最適制御について種々検討を行い、精度の良いモータ解析手法を提案するとともに、効率の良い電力回生方式を明らかにした。すなわち、電力回生制御を定量的に評価可能なシミュレーションモデルを開発するとともに、実証用の電気自動車と回生エネルギー貯蔵回路、及びその制御回路を製作した。そ

して実走行試験により、理論と実際の比較検討を行った。本論文はこれらの研究結果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では電気自動車のシミュレーションモデルについて述べている。すなわち、汎用科学計算ツール“MATLAB/Simulink”を用いて、路面環境、自動車本体、駆動源となるモータ（ブラシレスDCモータ）及びインバータ、さらにそれらの制御回路を含めたシミュレーションモデルを構築した。

同モデルに基づいて、自動車の加速・駆動時並びに減速・制動時の自動車本体の走行特性、及びモータトルク、並びに電流のシミュレーションを行ったところ良好な結果を得た。従って、本章で提案したモデルが、制御系も含めて、ブラシレスDCモータを搭載した電気自動車の走行動作を精度良くシミュレーション可能であることが示され、回生制動の効率について定量的評価手段になることが明らかになった。

第3章では、磁気等価回路網による電気自動車用ブラシレスDCモータのシミュレーションモデルについて述べている。

省エネルギーの観点からも、ブラシレスDCモータのさらなる特性改善は重要であり、そのためには、より精度の高い解析設計手法が求められる。一般にモータの解析には、電氣的等価回路に基づく手法、あるいは有限要素法に基づく手法が適用されている。電氣的等価回路に基づく手法は、動特性の算定は容易であるが、等価回路定数を別途求める必要があること、鉄心の非線形性や鉄損分布を考慮した詳細な解析は困難であることなどの問題点が指摘される。有限要素法による解析は、モータの寸法、形状、および鉄心材料特性を考慮した詳細な解析が可能であるが、計算リソースと計算時間がかかり、動特性解析は一般に困難という問題がある。

そこで、本章ではブラシレスDCモータの動特性の定量的解析手法確立を目的として、モータ本体をいくつかの要素に分割し、それぞれを磁気抵抗で表現する、いわゆる磁気等価回路網によるブラシレスDCモータの解析を提案した（図1）。計算並びに実験により、本手法は、始動特性やトルク速度特性などの動特性の算定が容易であること、モータ形状や材料特性の評価も可能であることなどの特長を有し、第2章で提案したブラシレスDCモータモデルのパラメータの決定にも適用出来ることを明らかにした。

第4章では、電気自動車の電力回生法を提案している。

電気自動車のさらなる高効率化を目指すに当たり、主要な構成要素である電源、インバータ、及び駆動モータの各要素間で授受されるエネルギーの流れを、詳細かつ定量的に把握することが必要となる。加速・駆動時はもちろんのこと、特に減速・制動時におけるエネルギーの流れ、いわゆる

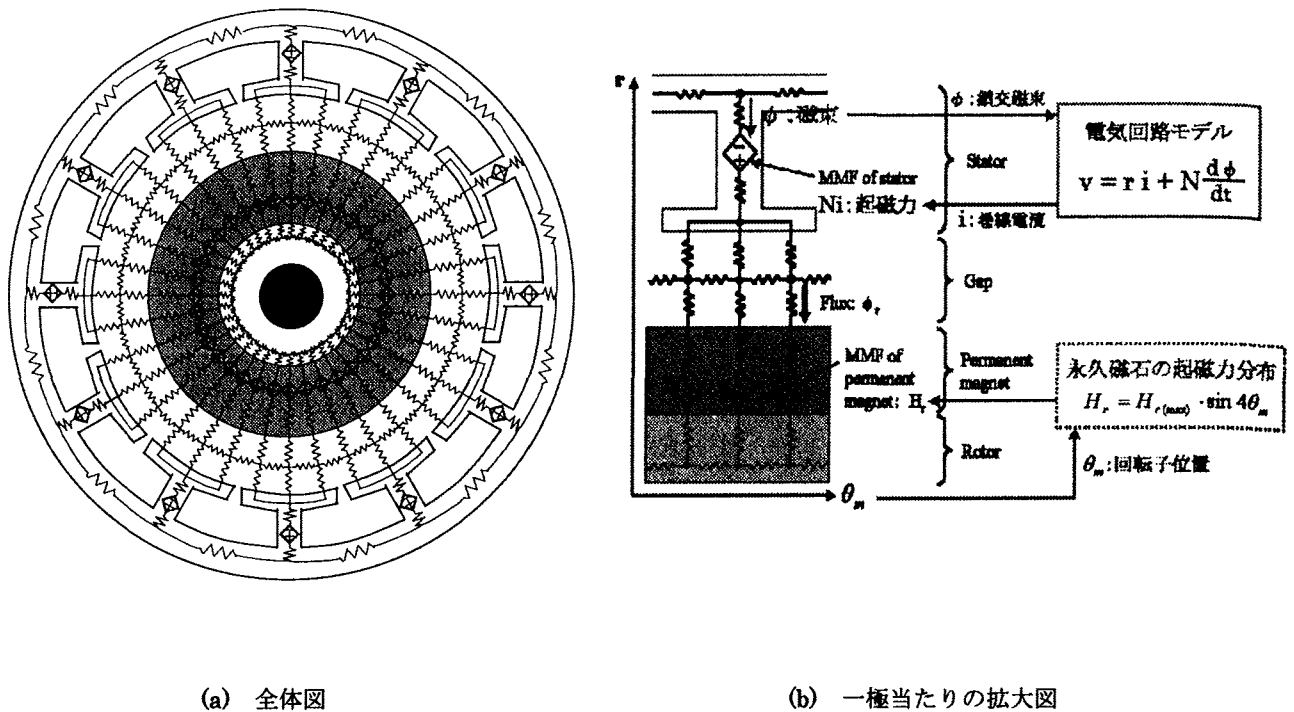


図1 解析対象としたブラシレス DC モータの磁気回路モデル

回生エネルギーの発生とその効率的な回収が重要である。

ここで、電気自動車最大の特長として、回生ブレーキシステムを第一に挙げることが出来る。これは、減速・制動時の際、駆動用モータを発電機として動作させ、自動車車体の持つ運動エネルギーあるいは位置エネルギーを電気エネルギーに変換して、バッテリーないしはコンデンサを充電するもので、バッテリー充電可能容量の制限のため、航続距離が内燃機関自動車と比較して短い電気自動車においては、その欠点を補うのに有効な解決手段である。

また、回生ブレーキは、制動時における自動車本体の運動・位置エネルギーを、再利用可能な形態である電気エネルギーに変換するため、減速において機械的摩擦を伴わない非接触ブレーキであり、摩擦熱や摩擦粉塵が発生しないなど、省エネルギーで省保守なブレーキシステムでもある。

本章では、電気自動車用制動装置として、回生ブレーキの採用に際して、回生エネルギーを回収する蓄電回路及びその制御方法を確立するため、シミュレーションで動作確認を行い、回収効率について評価を行う。

先ず、安価で入手容易な電解コンデンサに関して詳細に検討する。そして、さらなる回生エネルギーの有効利用のため、二つのコンデンサの直・並列切換法を提案した。減速・制動時に二つのコンデンサを直列接続から並列接続へと切り換えて回生エネルギーの受容可能量を増大させ、より多くの回生エネルギーを貯蔵する。その一方で、加速・駆動時には二つのコンデンサを並列接続から

直列接続へと切り換え、その蓄電エネルギーをより多く放電することが可能となる。このような回路を実現するため、双方向性チョッパによる回生エネルギーの有効利用について、シミュレーションにより検討を行った。その結果、電気自動車の走行距離の改善に電力回生ブレーキが有効であることを定量的に示すとともに、電力回生効率を最大とする最適制御方式を明らかにしている。

第5章では、前章までに述べてきた回生エネルギー貯蔵回路（以下、回生回路と略記）の検証用の電気自動車を製作し、モータ、バッテリー及び回生回路を搭載して走行試験を行った。

まず、試験用電気自動車の本体を製作した（図2）。ここでは、回生制動、すなわち、進行方向と逆向きの制動トルクが利用可能なように、駆動用モータ軸と駆動車輪とを直結する、いわゆる軸直結型駆動方式を採用した。さらに回生回路とその制御回路を製作し、試験用電気自動車に搭載した（図3、図4）。以上の電気自動車の走行実験により、回生制動時における回生回路の動作を確認し、本論文で提案した電力回生回路の有用性を確認した。

第6章は結言である。

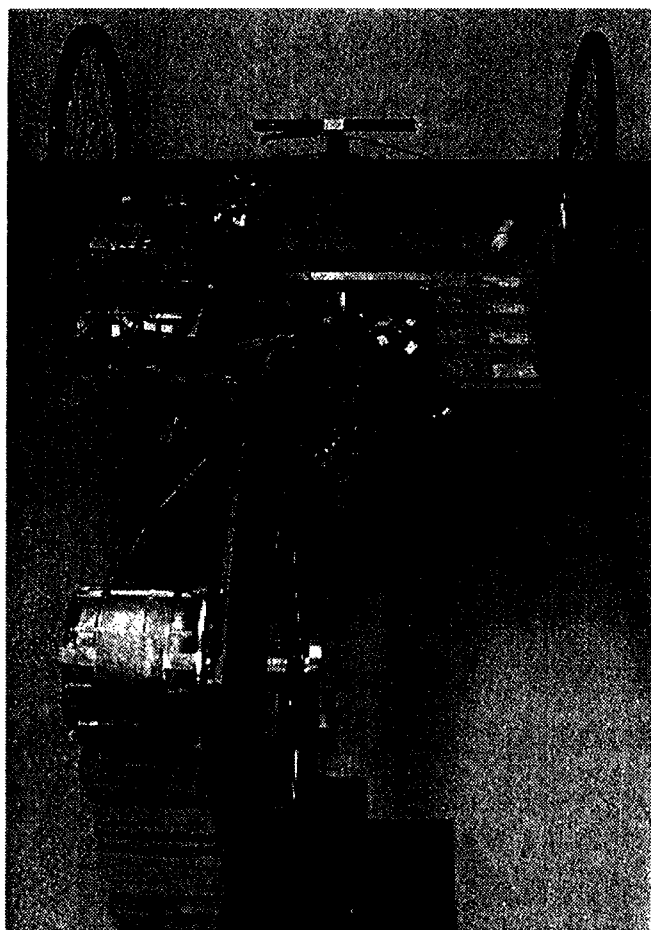


図2 回生ブレーキ装置搭載型電気自動車の外観図

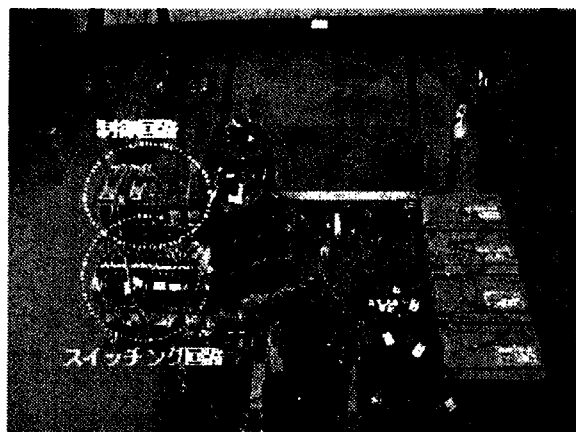


図3 回生エネルギー蓄電・制御部

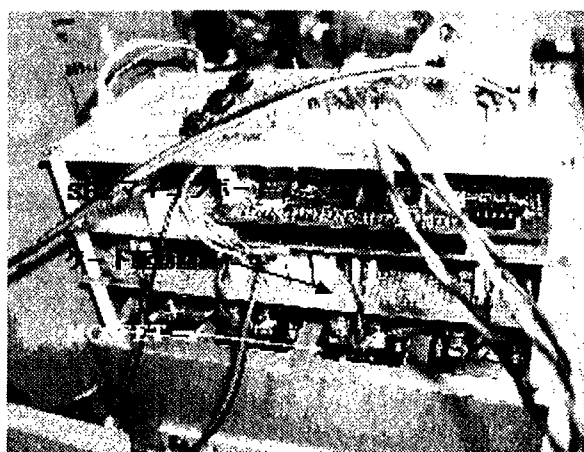


図4 制御回路の拡大図

# 論文審査結果の要旨

近年、省エネルギーと環境保全から電気自動車への期待が高まっている。しかしながら、電気自動車は高価格であること、1 充電あたりの走行距離が短いこと、充電スタンド等のインフラの整備が遅れていることなどの理由で広く普及するに至っていない。エンジンとモータを併用するハイブリッド車も注目されているが、エンジンとモータを搭載することによる車重の増加や、完全に無公害化はできないという欠点が指摘されている。著者は、バッテリーのみをエネルギー源とする、いわゆる純電気自動車における電力回生ブレーキに着目し、走行距離の改善を目的として電気自動車用ブラシレスDCモータの最適制御について種々検討を行い、精度の良いモータ解析手法を提案するとともに、効率の良い電力回生方式を明らかにした。本論文はこれらの研究成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、電圧方程式とトルク式に基づいたブラシレスDCモータのベクトル制御モデルを導出し、運動方程式と組み合わせることにより電気自動車のシミュレーションモデルを構築している。

第3章では、ブラシレスDCモータの解析手法の確立を目的として、モータ本体をいくつかの要素に分割し、それぞれを磁気抵抗で表現する、いわゆる磁気回路網によるブラシレスDCモータの解析を提案している。計算ならびに実験により、本手法は、始動特性やトルク速度特性などの動特性の算定が容易であること、モータ形状や材料特性の評価も可能であることなどの特長を有し、第2章で提案したブラシレスDCモータモデルのパラメータの決定にも適用できることを明らかにしている。これは有用な成果である。

第4章では、可逆チョップとコンデンサで構成される電力回生回路を考案し、第2章で構築したシミュレーションに基づき、電力回生回路を搭載した電気自動車の加速・減速・制動時の電気エネルギーの流れについて詳細な検討を行っている。その結果から、電気自動車の走行距離の改善に電力回生ブレーキが有効であることを定量的に示すとともに、電力回生効率を最大とする最適制御方式を明らかにしている。

第5章では、以上の検討結果に基づき、小型1人乗り電気自動車を試作して走行試験を行い、提案した電力回生回路の有用性を確認している。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、電気自動車における電力回生ブレーキに着目し、効率の良い電力回生方式を明らかにするとともに、電気自動車用ブラシレスDCモータの解析手法を提案したもので、電気機器工学およびパワーエレクトロニクス発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。