

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「電動アシスト自転車用高トルク、センサレス SR モータを用いた
ドライブユニットの開発」

研究開発成果等報告書

令和元年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 よこはまティールオー株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
2-1 3相SRモータの開発	8
2-2 4相SRモータの開発	12
2-3 軽量遊星ギヤの開発	18
2-4 電力回生制御技術の開発	21
2-5 低コスト化	23
2-6 安全性評価	23
2-7 実車評価	24
最終章 全体総括	26
3-1 成果の総括	26
3-2 事業化への課題	26
3-3 事業化展開	26

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

現在、電動自転車、電動アシスト自転車用のモータの主流は永久磁石を使用したモータであり、高価なレアメタルを使用しているが、レアメタルの産出国が限られており安定供給のリスクがある。現在は供給が安定しているが、今後また供給リスクが再燃する可能性もある。そのため、モータの安定生産、低コスト化への道筋をつけるために、永久磁石を使用せず、安価な鋼板で構成できるSRモータを開発することが重要である。

現状のSRモータは、工作機械、農業機械、トラクター、トラック等の大型機械、車両に使われているが電動自転車、電動バイクのスペースが限られた小型車両には実用化されていない。

そこで、電動アシスト自転車、電動自転車(中国では大きな市場がある)に特化したインホイール型の小型SRモータを用いた駆動装置の研究開発を行う。高回転域での特性の優れているSRモータの特長を活かし、高速回転と遊星ギヤを組み合わせた駆動方式を開発する。

電動アシスト自転車(図1-1-1 参照)は、日本50万台/年、ヨーロッパ200万台/年と普及拡大している。最近では価格が10万円を切るものも出てきているが、まだユーザにとっては負担が大きい。また、従来の永久磁石を使用したモータは電池が切れればモータの回転が重くなるため自転車のペダルが重くなり、ユーザーから使い勝手が悪いとの改善要求がある。そこで、電池が切れても走行が軽い電動アシスト自転車向けの小型SRモータの開発に対する要望が川下企業からある。またSRモータは永久磁石を使用しないため必然的に低価格になり、市場は拡大することが期待される。自転車の市場は8000万台/年/日本となっており、低コスト電動アシスト自転車を実現すれば、自転車市場の内800万台は電動アシスト自転車になると期待できる。この大きな有望市場向けに、本研究開発では、永久磁石を使用しない低コストSRモータとモータコントロールを開発して、市場に参入することを目指す。

一方、中国では、車輪に内蔵するインホイール・モータでダイレクトドライブ方式の電動自転車(図1-1-2 参照)が販売されており、4,000万台/年の巨大な市場を形成している。日本では電動バイクに分類され免許が必要だが、中国では自転車に分類され免許不要であり、巨大な市場を形成している。この中国市場は、価格が安いことが非常に重要である。そこで、低コストの小型SRモータを開発して、中国の巨大市場にも進出することを目指す。



図1-1-1. 電動アシスト自転車



図1-1-2. 電動自転車（中国）

(2) 研究目的及び目標

電動アシスト自転車、電動自転車(中国)用の永久磁石を使用しない

- 1) SRモータ
 - 2) 小型遊星ギヤ
 - 3) モータ制御技術
 - 4) 高効率電力回生制御技術
- を開発する。

SR モータは高速回転が特長であり、10,000rpm クラスの高速回転を遊星ギヤで電動アシスト自転車の速度まで減速する。SR モータのコントローラは、従来、ロータ位置検出に高価な位置検出装置を使用しているため、トータルとして高い SR モータとなっていた。そこで、低コスト化にするために、高価な位置検出器を使用しない、方式を開発して低コスト化を実現する。また、高効率モータコントロールと高効率回生技術を開発して、電池消費電力を削減して走行距離延伸を図る。

設定した研究開発テーマとその目標は以下の通りである。

- ① 3 相SRモータの開発
10,000rpm、500W クラスの小型SRモータの実用化
- ② 4 相SRモータの開発
10,000rpm、500W クラスの小型SRモータの実用化
- ③ 軽量遊星ギヤの開発
100 分の1に減速する軽量・高耐久性性 2 段遊星ギヤの開発
- ④ 電力回生制御技術の開発
回生効率10%を達成する
- ⑤ 実車試験
実車走行試験で回生効率を実測するとともに異常がないことを確かめる
- ⑥ 低コスト化
モータロータ位置検出のセンサレス化等によりドライブユニット全体のコストを従来の PM モータ方式のものと比べ 30%低減する
- ⑦ 安全性評価
IEC61508 の SIL(Safety Integrity Level)に基づく評価試験で問題がないことを明らかにする

1-2 研究体制

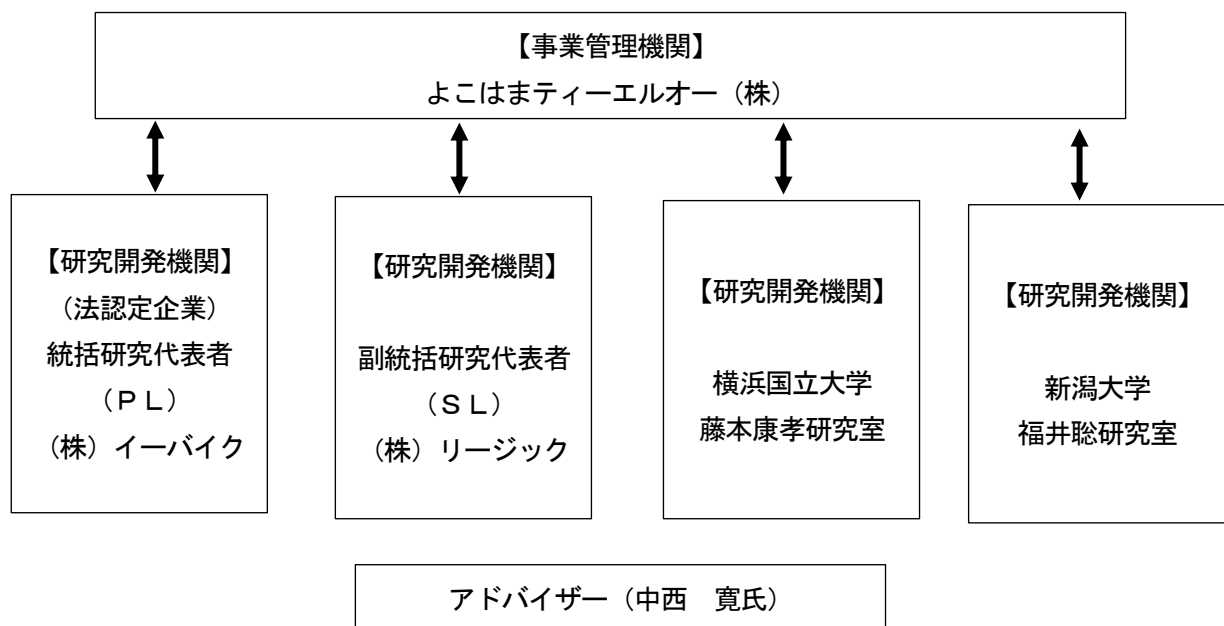


図 1-1-3 研究開発体制

研究開発を推進するために図 1-1-3 の体制を組織し、緊密な連携の下に推進した。

【事業管理機関兼研究機関】よこはまティーエルオー(株)

主に、3 相／4 相SRモータの開発(①②)、実車試験(⑤)を担当

【プロジェクトリーダー】(株)イーバイク

主に、3 相SRモータの開発(①)、遊星ギヤの開発(③)、低コスト化(⑥)、安全性評価(⑦)を担当

【サブリーダー】(株)リージック

主に、4 相SRモータの開発(②)、電力回生制御技術の開発(④)、実車試験(⑤)を担当

【研究機関】国立大学法人横浜国立大学、国立大学法人新潟大学

横浜国立大学は主に軽量遊星ギヤの開発(③)を、新潟大学は主に 3 相／4 相SRモータの開発(①②)を担当

1-3 成果概要

(1) 3相 SR モータの開発

12／8極、6／4極の2種類(各 2 台)の 3 相SRモータを試作し、SRモータ試験機を製作して評価した。

12／8極モータの効率は65%、出力558W／60A／Phase。6／4極モータの効率は60%、出力546W／60A／Phaseとなり、12／8極の方が特性が良かった。

効率や振動・騒音での課題に対してはベクトル制御による高効率駆動法の実現やトルク変動の低減により解決をはかった。

(2) 4 相 SR モータの開発

・3相SRモータと外形寸法を同じくした4相SRモータを開発した。3相SRモータの場合はロータ回転角度検出に外付けエンコーダを使用した。4相SRモータでは新規設計のセンサ基板をモータ本体内に組み込む構造とした。

・4相 SR モータは 3 相 SR モータに対して相数が多いことから、原理的にはトルク脈動・振動が少ないが、試作することによりトルク脈動及び振動の両面において 3 相モータよりも優れていることを確認できた。

・トルク脈動は、最大となる起動時中心トルクに対して±25%程度のトルク脈動があるが3相SRモータに比べ 1/3 程度のトルク脈動となった。

・ 起動時トルクは 1.5[N・m]_{max}、3000[rpm](10km/h 走行)時トルク 0.8[N・m]_{max}

・効率は電動アシスト自転車で使用頻度が高いと考えられる 10km/h 走行時の力行効率で 70%以上を達成した。

・ロータ位置検出法としては、4 相 SR モータは励磁切り替えの際、2 つの相を励磁するため高精度の切り替えタイミングが必要ない。この特長を活かすため高価な高精度位置センサに替え市販部品を使用したロータ位置検出器を開発して搭載し、低コスト化と必要な精度を得ることが出来た。

(3) 軽量遊星ギヤの開発

3K 遊星ギヤの動力伝達効率を最適化する技術を用いて、本課題に適した減速比1／34.97 と1／61.42 の 2 種類の 3K 遊星ギヤを開発した。従来の 3K 遊星ギヤと比較して、効率を 5～10%程度向上させ、減速機効率として 90%以上を実現した。

また、高回転用ベアリングを入手し 10,000rpm での長時間使用の耐性を試験し耐久性を検証した。

(4) 電力回生制御技術の開発

(株)リージックが所有する回生特許を使用した制御方式により実現した。

電動アシスト自転車で使用頻度が高いと考えられる 10km/h 走行時の回生効率 30%以上を達成した。

(5) 低コスト化

ドライブユニット(モータ、ギヤ、バッテリー、制御装置)の原価について、他社商品と構成部品及び組立性について量産化時点を想定した比較を行なった。

部品面では、SRモータの価格優位性や低価格センサーの採用、高効率化によるバッテリー容量の低減などにより優位性が確保できる見通しを得た。また、部品点数の削減による組立性の向上により、全体で30%程度のコスト低減が可能との見通しを得た。

(6) 安全性評価

IEC61508に準拠した機能安全性を机上検討し、設計上問題が無いことを確認した。

(7) 実車試験

試作した4相 SR モータと遊星ギヤをドライブユニットケースに格納して電動アシスト自転車に実装し、試験コースを周回して回生制御の有効性評価を行なった。

その結果 13~16%の回生効率を確認した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

① 研究開発機関（統括研究代表者（PL））

株式会社イーバイク

代表取締役 得丸 武治

TEL：045-511-0900 FAX：045-511-0900

E-mail：tokumaru-takeji@ebike-ev.co.jp

主な担当分野；3相SRモータ、軽量遊星ギヤ、低コスト化、安全性

② 研究開発機関（副統括研究代表者（SL））

株式会社リージック

代表取締役 松延 俊美

TEL：047-437-3901 FAX：047-437-4191

E-mail：matunobu@leagic.co.jp

主な担当分野；4相SRモータ、電力回生制御技術

③ 事業管理機関

よこはまティールオー株式会社

プロジェクト推進部門 部門長 岡林 光志

TEL：045-339-4441 FAX：045-340-3541

E-mail：okabayashi-terushi-tp@ynu.ac.jp

第2章 本論

2-1 3相SRモータの開発

(1) モータ仕様

下記2種類のSRモータを各2台試作し評価した。

表 2-1-1 試作した3相SRモータ諸元

	6/4SRモータ	12/8SRモータ
電流 [A]	20	20
巻数 [turn/コイル]	60	40
巻線断面積 [mm ²]	88	53.95
電流密度 [A/mm ²]	15	15
インダクタンス最大値 [H/相]	0.0028456	0.0021794
ステータ極数	6	12
ロータ極数	4	8
最大静止トルク [Nm]	1.685	2.094
ギャップ長 [mm]	0.3	0.3
鉄心材料	50A470	50A470
積厚 [mm]	21.7	21.7
効率	60%～70%	60%～70%



図 2-1-1 試作したSRモータの外観

(2) SRモータ試験装置

試作したSRモータを評価するためにSRモータ試験装置を製作した。

その外観を図 2-1-2 に示す。

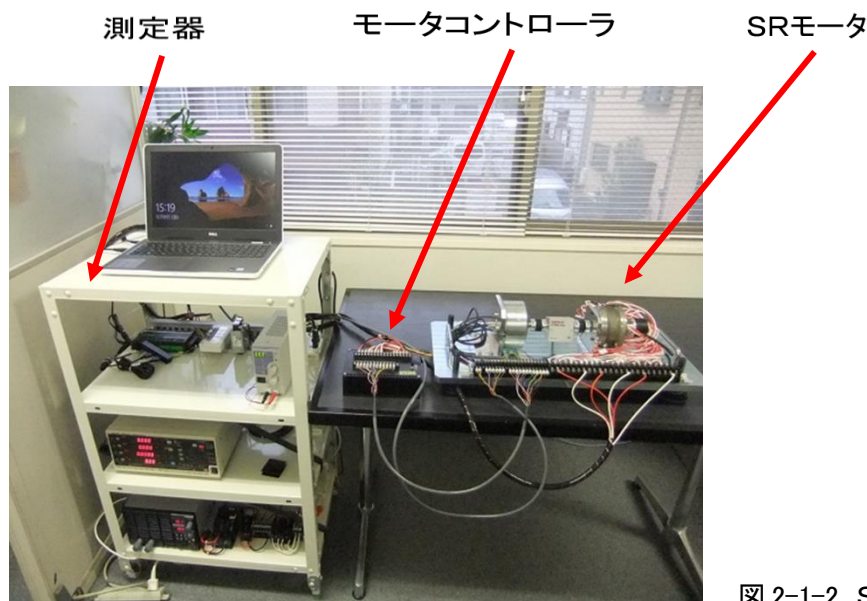


図 2-1-2 SRモータ試験装置

(3) 評価結果

3相SRモータ試作機の評価結果を図 2-1-3～図 2-1-6 に示す。

静トルクとインダクタンスの結果から、高速回転性では6/4SRモータが、高トルク性では12/8SRモータが優れていることが判明した。

実用化では、これらの特性に合わせた活用が可能であるが、電動アシスト自転車には起動トルクが優れている12/8SRモータが適しているという判断をした。

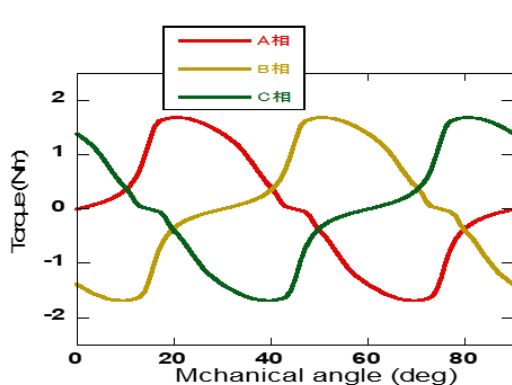


図 2-1-3 静トルク(6/4SRモータ)

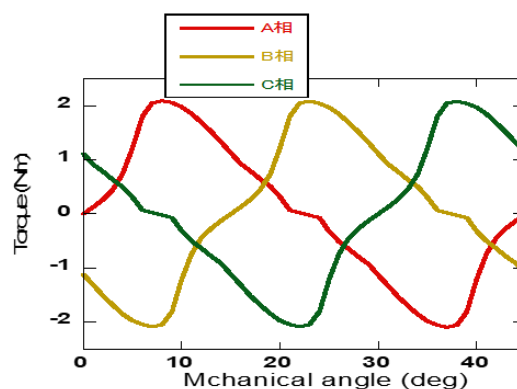


図 2-1-4 静トルク(12/8SRモータ)

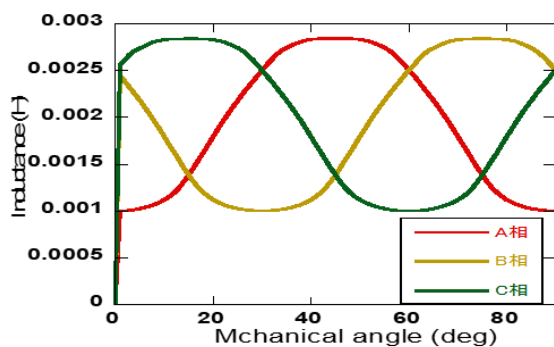


図 2-1-5 インダクタンス(6/4SRモータ)

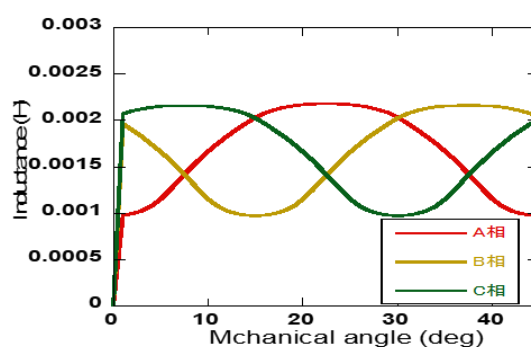


図 2-1-6 インダクタンス(12/8SRモータ)

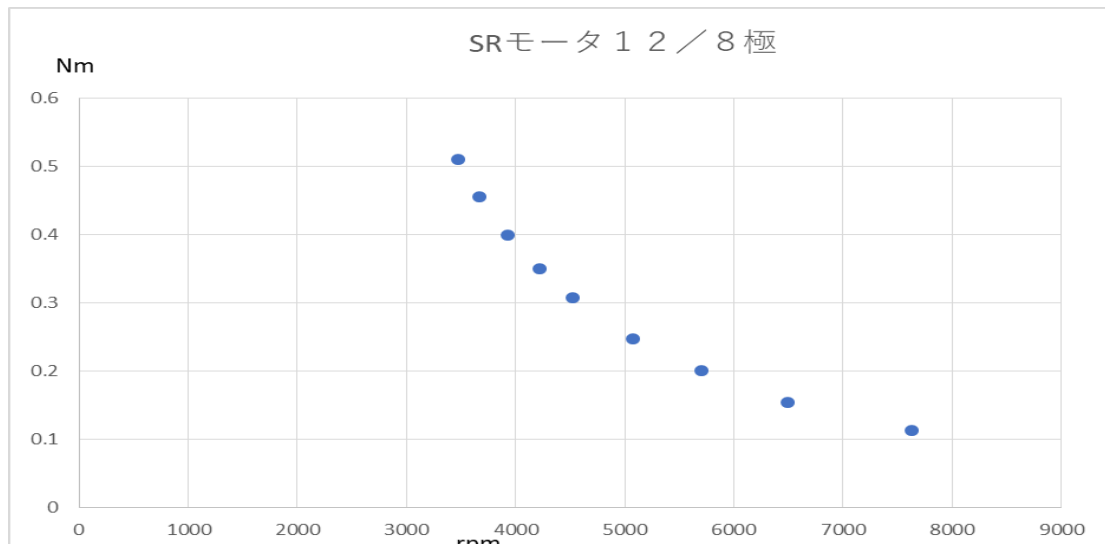


図 2-1-7 トルク特性(12/8 極モータ)

12／8極モータでの回転数ごとの特性は表 2-1-2～表 2-1-4 の通りとなった。

表 2-1-2 4,000rpm での特性

トルク	0.17Nm	0.26Nm	0.31Nm
出力(W)	70	110	130
効率(%)	65	55	55

表 2-1-3 6,000rpm での特性

トルク	0.18Nm	0.21Nm	0.25Nm
出力(W)	115	135	160
効率(%)	62	62	59

表 2-1-4 8,000rpm での特性

トルク	0.14Nm	0.18Nm	0.20Nm
出力(W)	120	150	165
効率(%)	65	60	60

(4)ベクトル制御

3 相SRモータにおいて、騒音の原因となるのはトルク変動(トルク脈動や振動)である。
 また効率を向上するためには滑らかな回転を実現するトルク制御が必要である。
 これらの課題を解決する為にベクトル制御法を開発した。

ベクトル制御は、ロータ鎖交磁束に対して電流は、常に直交するように電流を制御することにより無駄なく効率よく制御でき、その時の駆動波形は正弦波になる。正弦波駆動することにより、振動・騒音は劇的に抑えられる。(「スイッチリラクタンスモータに特化したベクトル制御」 芝浦工大 赤津教授、中尾 2014 年 4 月 18 日)。しかしSRモータはロータに磁石がなく磁束は発生していない。運転中はステータ側の磁束により磁石は発生する。そこで、ステータ駆動する前に磁束が発生するように、直流オフセットを重畳した駆動を行い直流オフセットによりロータ側に磁石が発生する。この発生磁石に対して直交する電流を流すように電流制御を行う、という方式によって実現した。

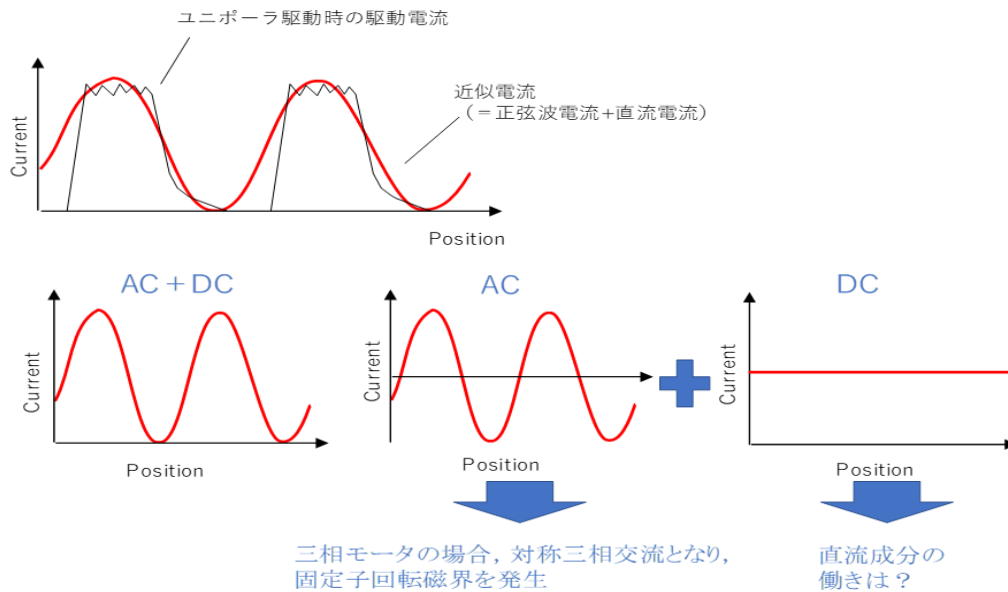


図 2-1-8 直流オフセット重畳方式

制御ブロック図を図 2-1-7 に示す。

一般的なベクトル制御をベースにし、ロータ位置を 0.1 度の精度で検出する角度センサーにより、0.1 度の分解精度でのベクトル制御を実現した。

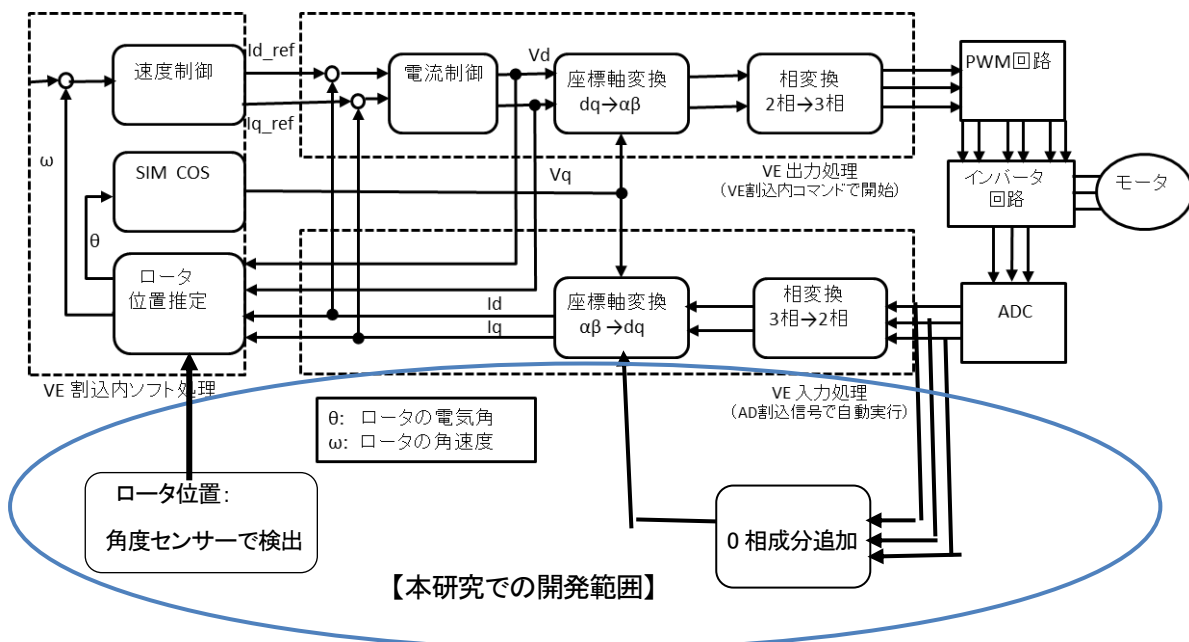


図 2-1-9 制御ブロック図

2-2 4相 SR モータの開発

(1) モータ仕様

・定格電圧	36	[V]	・相数	4	
・定格出力	260	[W]	6000[rpm]	・ステータ極数	8
・定格トルク	0.41	[Nm]	6000[rpm]	・ステータ幅	11.082[mm]
・定格回転数	6000	[rpm]	定格出力時	・ロータ極数	6
・最大回転数	11000	[rpm]	無負荷運転	・ロータ幅	10.78[mm]
・ステータ外形寸法	96	[mm]	3相SRモータに同じ	・励磁コイル	36[T]
・コア積厚	21.7[mm]	(3相SRモータに同じ)	・コイル線径	1.4[Φ]	
・ロータ角度検出: 新規開発したセンサ基板を内臓					
5.9 A/mm ²					



図 2-2-1 4相 SR モータの構造(左)と写真(右)

(2) トルク脈動・振動の抑制法

3 相と 4 相ではステータ、ロータの組合せが異なるためトルク脈動・振動の違いが発生する。

起動時トルク変動(設定励磁電流28A)

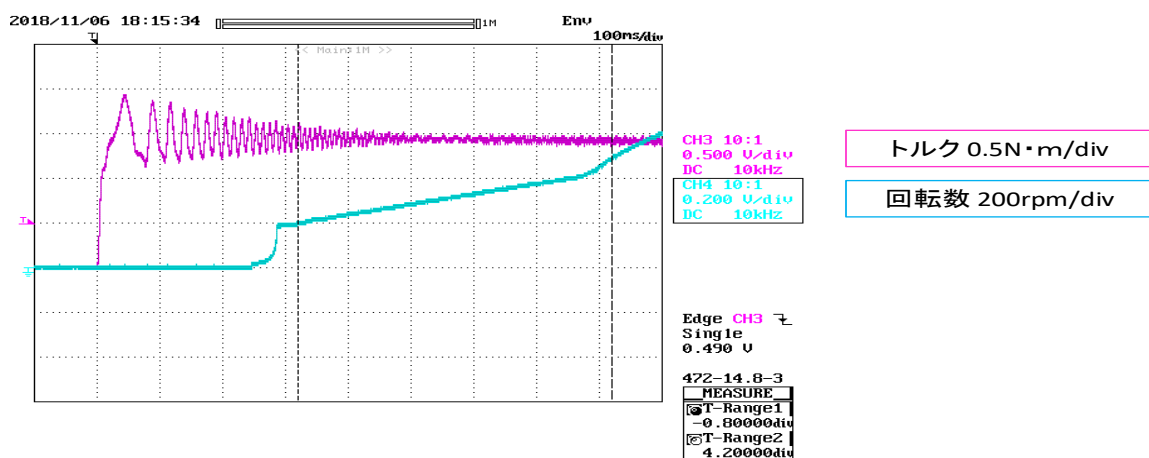
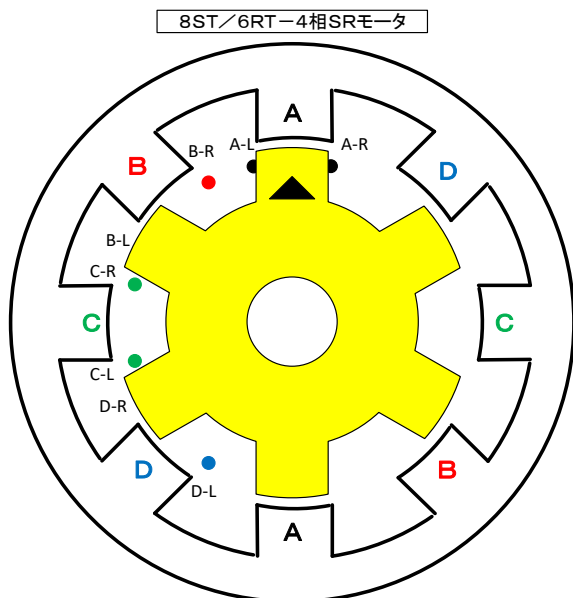


図 2-2-2 起動時のトルク変動

- 上記トルクの実測波形が示すように中心トルクに対して±25%程度のトルク脈動があるが
3相SRモータに比べ 1/3 程度のトルク脈動となっている。
- 4 相SRモータは励磁相の切り替わり時に他相の励磁トルクがあるため脈動が少ない。
トルク脈動が少ないことは振動が抑制されることになる。

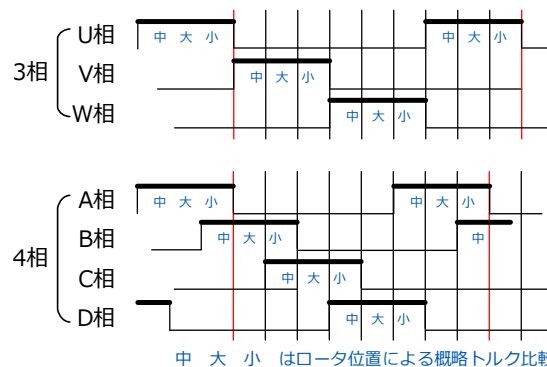
(3)トルク制御法

①励磁制御



4相と3相の違い

SRモータの励磁タイミングとトルク変化



中 大 小 はロータ位置による概略トルク比較

4相は励磁相が重なりトルクの変動を抑える
負荷は4相トルクを平均して受けるので滑らかに回転する

図 2-2-3 励磁タイミング

ステータの幅と同じ部分にセンサを配置している。

ロータが回転した場合のタイミングは図 2-2-3 のようになり 3 相と明らかに異なる。

大きな特徴は励磁切替タイミングの際、他の相が常に励磁状態にありトルクが発生していることである。

タイミング図中に描いた大中小のトルクの和がモータトルクとなるため 4 相 SR モータが安定したトルクを発生させられることは明確である。

力行トルク回生トルク共に同じ特性が現われるため力行、回生共に安定したトルク特性となる。

トルクの大小は電流に比例するため PWM 電流制御により必要トルクに応じた電流設定をすることにより制御する。

但し回転数が高くなると電流到達時間が無視できなくなるため励磁制御タイミングの回転数に応じて制御することにより所定のトルクを得るようにしている。

但し回転数が高くなるとコイルの誘導起電圧も高くなり電源電圧との電圧差が少なくなり高速回転に支障が出ることになる。

このため高速回転の場合は電源電圧を高めにする必要がある。

②制御ユニット

モータを励磁駆動する新規開発したパワーボードと、実車時のアシストトルク制御を行うメインボードを筐体に組み込んだ制御ユニットの内部及び上面の写真を示す。

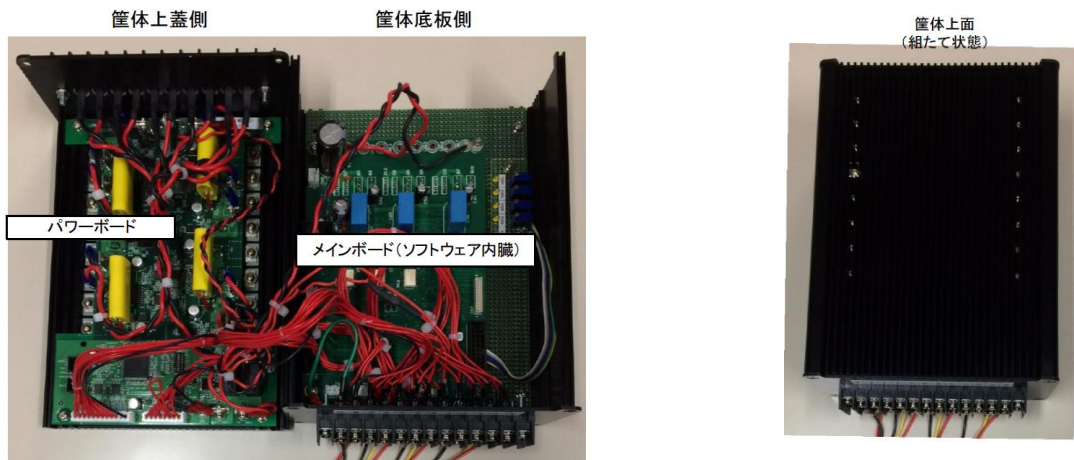


図 2-2-4 制御ユニット (左)内部 (右)上面

(4)高効率駆動法

①モータ単体の場合

■回生動作の効率

実測データからギヤモデル 1 (ギヤ比 34.97) を使用した場合の使用頻度の高い 10km/h 走行(モータ回転 3,000[rpm]) では図 2-2-4 において、

- ・図中①: 回生ブレーキトルク 0.6[N・m] の際の回生効率は 55[%]、実車時のギア効率 90[%] を含めると 49.5[%]
- ・図中②: 回生ブレーキトルク 1.4[N・m] の際の回生効率は 30[%]、実車時のギア効率 90[%] を含めると 27.0[%] を達成しており実用上問題ない効率である。

励磁タイミングの最適化を計ることにより効率は更に良くなる可能性を有している。

なお、図中②の場合の回生効率 30[%] に対して 40[%] を確認済みである。

■力行動作の効率

実測データから、ギヤモデル 1 (ギヤ比 34.97) を使用した場合、

- ・図中③: 力行において使用頻度の高い時速 10km/h (モータ回転数 3000rpm 付近) の力行効率が低い。

目標の 70[%] 以上に対して下図左は達成している。

なお、励磁タイミングの調整により力行効率 75[%] 以上を確認済みである。

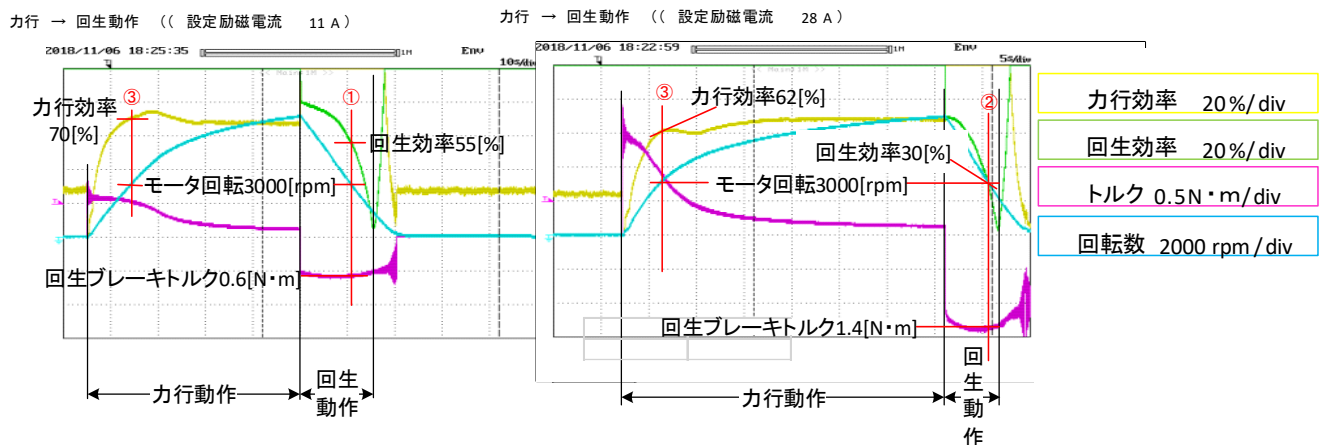


図 2-2-5 高効率駆動法

②実車の場合

■ギヤモデル 1(ギヤ比 34.97)を用いた電動アシスト自転車のアシスト制御において停止時の運転者(体重 50kg)のペダルを踏む力を 50kgfと仮定して下記①②③項目を図 2-2-6 に纏めた。

グラフ内①は「運転者のペダルトルクをモータに換算した予想トルク」

グラフ内②は「最大アシスト(2倍)時の必要トルク」

グラフ内③は「試作モータによる最大アシストトルク」

を示す。

車輪円周:2.07m、ギヤ比:34.97 の場合の

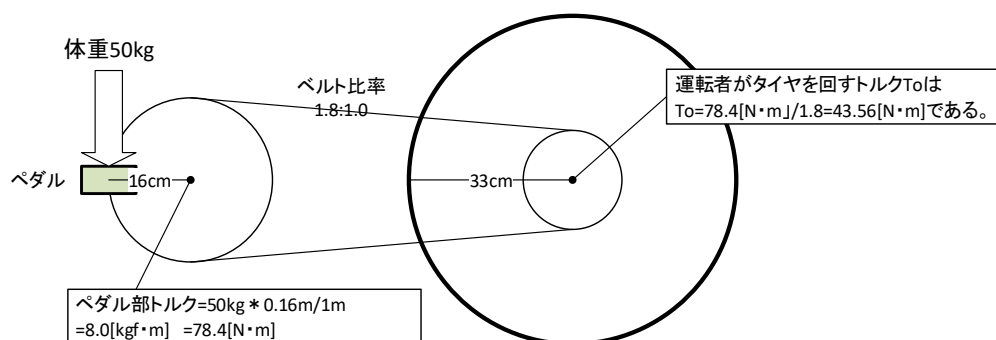
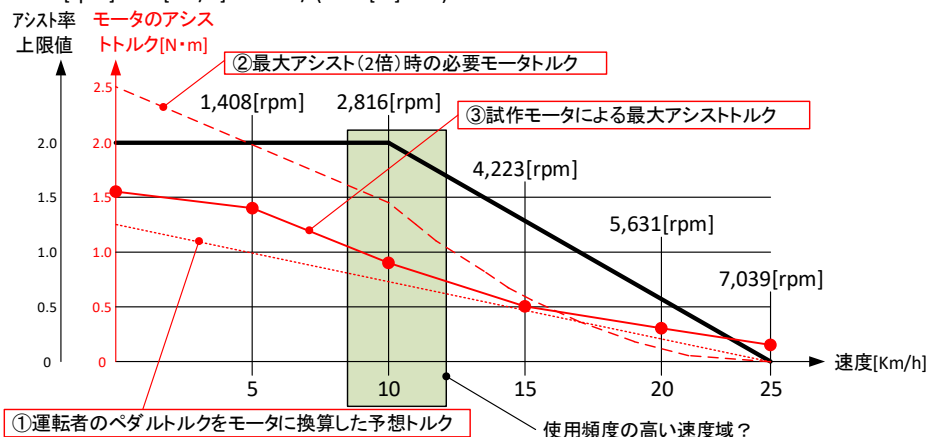
電動アシスト自転車の速度V とSRモータ回転速度Nの関係は

$$N[\text{rpm}] = V[\text{km/h}] * 1000 / (2.07[\text{m}] * 60) * 34.97$$

車輪円周:2.07m、ギヤ比:34.97 の場合の

電動アシスト自転車の速度V とSRモータ回転速度Nの関係は

$$N[\text{rpm}] = V[\text{km/h}] * 1000 / (2.07[\text{m}] * 60) * 34.97$$



ギヤ(比35.357)を組み合わせたモータでアシスト率2を得るためのモータトルクTmは
 $T_m = (43.56[\text{N}\cdot\text{m}] * 2) / 35.357 = 2.46[\text{N}\cdot\text{m}]$

図 2-2-6 実車でのトルク評価

評価結果

グラフ内③(最大アシストトルク)は速度全域において①<③、②<③が理想であるが現在は 15km/h 以下のスピード域においてトルク不足のため①<③<②となっている。

■解決方法の検討

1)ギヤモデル1(ギヤ比 34.97)を実車に使用した場合

励磁タイミングの最適化(図 2-2-7)と励磁電流の増加(トルク増)の条件を満たすことにより解決できる

- a) 力行効率: 常用 3000rpm で 70%(目標)→3000rpm 以上で 70%以上の効率達成
- b) 力行トルク: 0~7000rpm で 0.4[N・m]以上(目標)→0.45[N・m]以上のトルク達成
- c) 始動トルク: 1.5[N・m] →2.5[N・m]以上となりトルク不足解決

(トルクは励磁電流に比例するため 2.5/1.5=1.67 倍の電流を流せる半導体部品に交換)

2)ギヤモデル2(ギヤ比 61.42)を実車に使用した場合

励磁タイミングの最適化(図 2-2-7) により解決できる

- a) 力行効率: 80%以上の効率達成
- b) 力行トルク: ギヤ比増により目標が「0~11700rpm」0.22[N・m]達成
- c) 始動トルク: ギヤ比増により $1.5 \times (61.42/34.97) = 2.63$ [N・m]となり目標を達成できる

力行→回生動作特性(設定励磁電流28A)

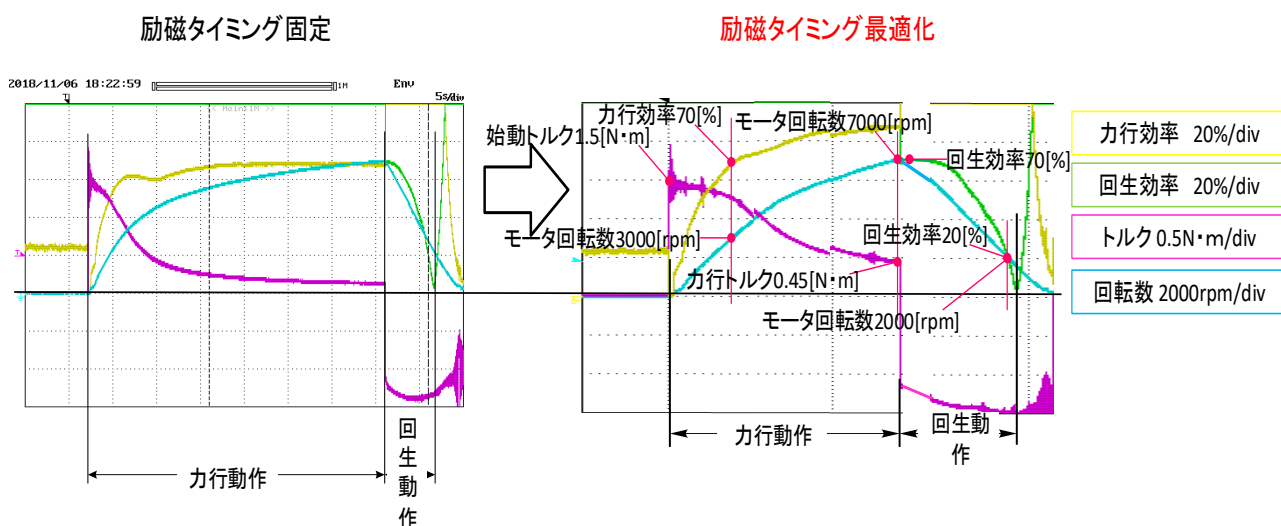


図 2-2-7 励磁タイミングの最適化

(5)ロータ位置検出法

- ・従来、ロータ位置検出として高価なエンコーダやレゾルバを使用していた。
- ・4 相SRモータでは、図 2-2-8 から明らかなように励磁が途切れることがないため励磁タイミングの精度は必要ない。
- ・そこで、センサレス化の代替として図 2-2-9 のような簡易センサを使用した「センサ基板」を開発した。
これにより、安価な市販のフォトセンサが使用でき低コスト化が可能となった。

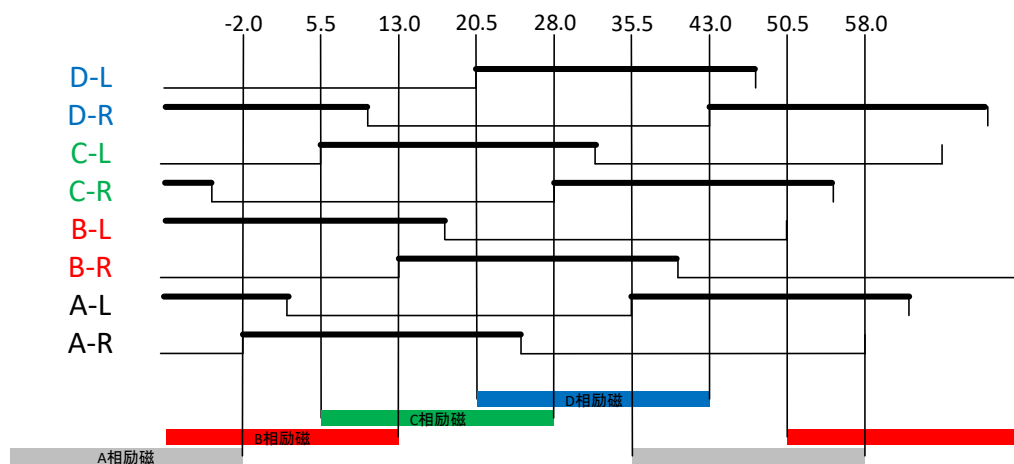


図 2-2-8 センサ信号と励磁の関係

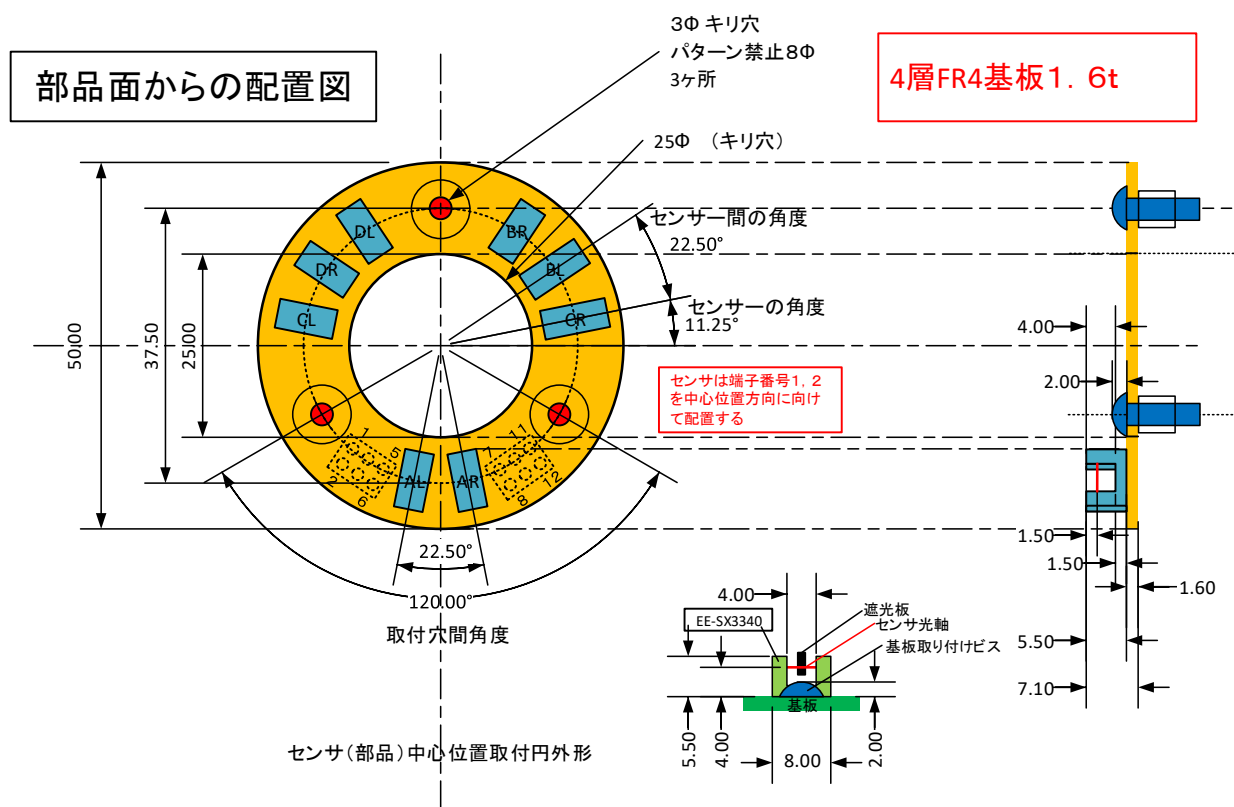


図 2-2-9 センサ基板

2-3 軽量遊星ギヤの開発

(1)仕様

最大回転数の異なる2種類のSRモータ試作するのに合わせ減速比の異なる2種類(モデル1とモデル2)の遊星ギヤを試作した。

<モデル1(中速用)>		<モデル2(高速用)>	
・モジュール;	m=1	m=1	
・圧力角;	20 deg	20 deg	
・遊星数;	N=3	N=3	
・減速比;	<u>1/34.97</u>	<u>1/61.42</u>	
・最大ピッチ円直径;	75mm	75mm	
・歯厚;	Zs1, Zp1, Zi1: 20mm、Zp2, Zi2: 24mm	Zs1, Zp1, Zi1: 20mm、Zp2, Zi2: 24mm	
・許容トルク;	56N.m	56N.m	
・動力伝達効率;	95%(設計値)	94%(設計値)	
・材質;	Zs1: S45C、Zp1, Zi1, Zp2, Zi2: ジュラコン	Zs1: S45C、Zp1, Zi1, Zp2, Zi2: ジュラコン	
・車体速度と入力回転数;	<u>20 km/h のとき入力回転数 5622 rpm</u>	<u>20 km/h のとき入力回転数 9874 rpm</u>	

(材質について)

プラスチックギヤの素材として、使用頻度、負荷トルクを考慮し、ポリアセタール(ジュラコン)を選定した。

このときのピッチ円上許容円周力はルイスの式より 533N、許容トルクは 56N.m となり、要求仕様を満足することが判明した。



図 2-3-1 試作した軽量遊星ギヤの外観(各写真 左:1/61、右:1/35)



図 2-3-2 試作した軽量遊星ギヤの内部構造(左:1/61、右:1/35)

(2) 動力伝達効率の評価

評価試験装置を図 2-3-4 に示す。

①計測条件

- ・モータ回転速度 : 500 [rpm]
- ・負荷トルク : 0, 2.5, 10, 20 [N.m]

②試験内容

- ・SR モータと遊星ギヤを接続して同心軸確認を行った
- ・3,000rpm の高速回転域まで確認した。

本接続試験では、取り合い追加部品(図 2-3-3)を使用して遊星ギヤと SR モータを接続し、また遊星ギヤ軸と負荷軸の同心円を保つようにした。

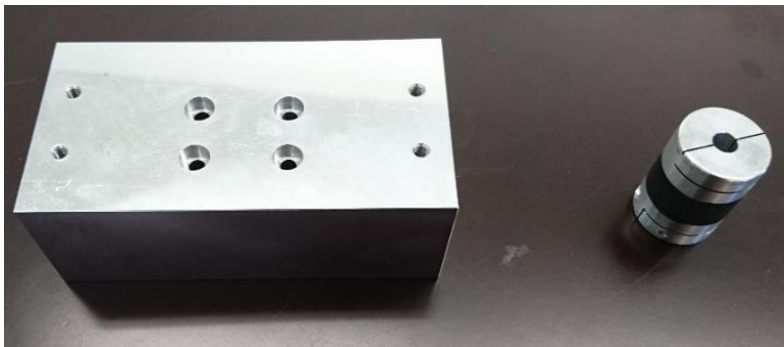


図 2-3-3 取り合い追加部品

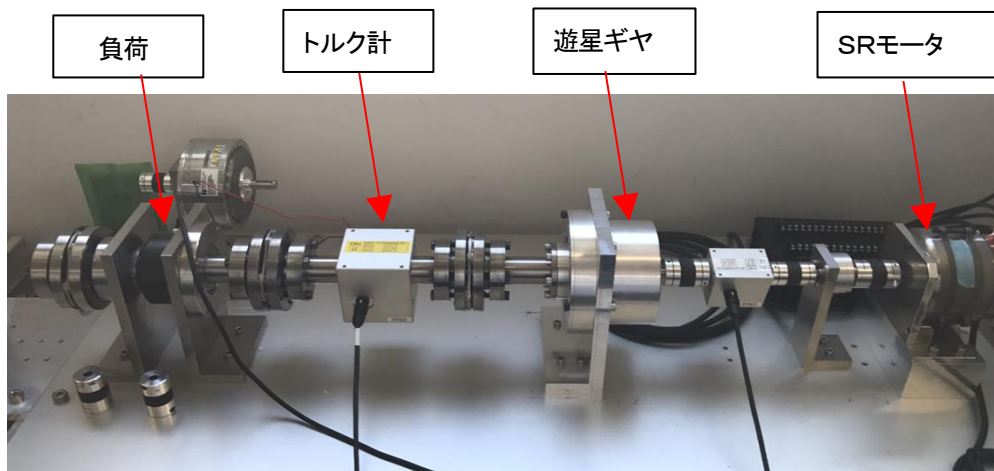


図 2-3-4 試験装置

(3) 評価結果

入出力角速度およびトルクを測定し、次式により順方向動力伝達効率 η を求めた。

結果を表 2-3-1 に示す。

設計値に対して 2%程度の誤差があるものの、非常に高い効率が実現できた

表 2-3-1 測定した順方向動力伝達効率

モデル	減速比	測定した順方向動力伝達効率			設計効率
		2.5Nm	10Nm	20Nm	
モデル1	1/34.97	89.12%	92.60%	93.09%	95.37%
モデル2	1/61.42	87.75%	91.45%	91.42%	93.83%

モデル1は 5,000rpm 用、モデル2は 10,000rpm 用で、回転数に応じて使い分けが可能な結果が得られた。
また、入力にサーボモータを用いた場合の詳細な効率マップを測定した(図 2-3-5)。

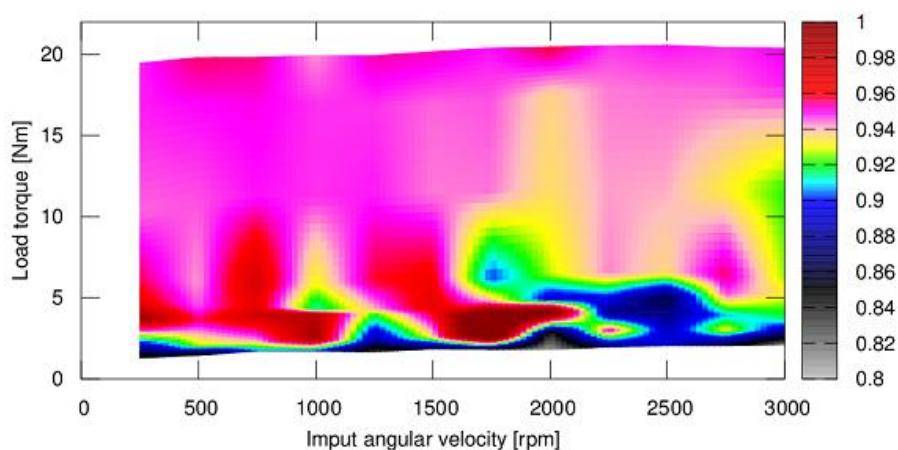
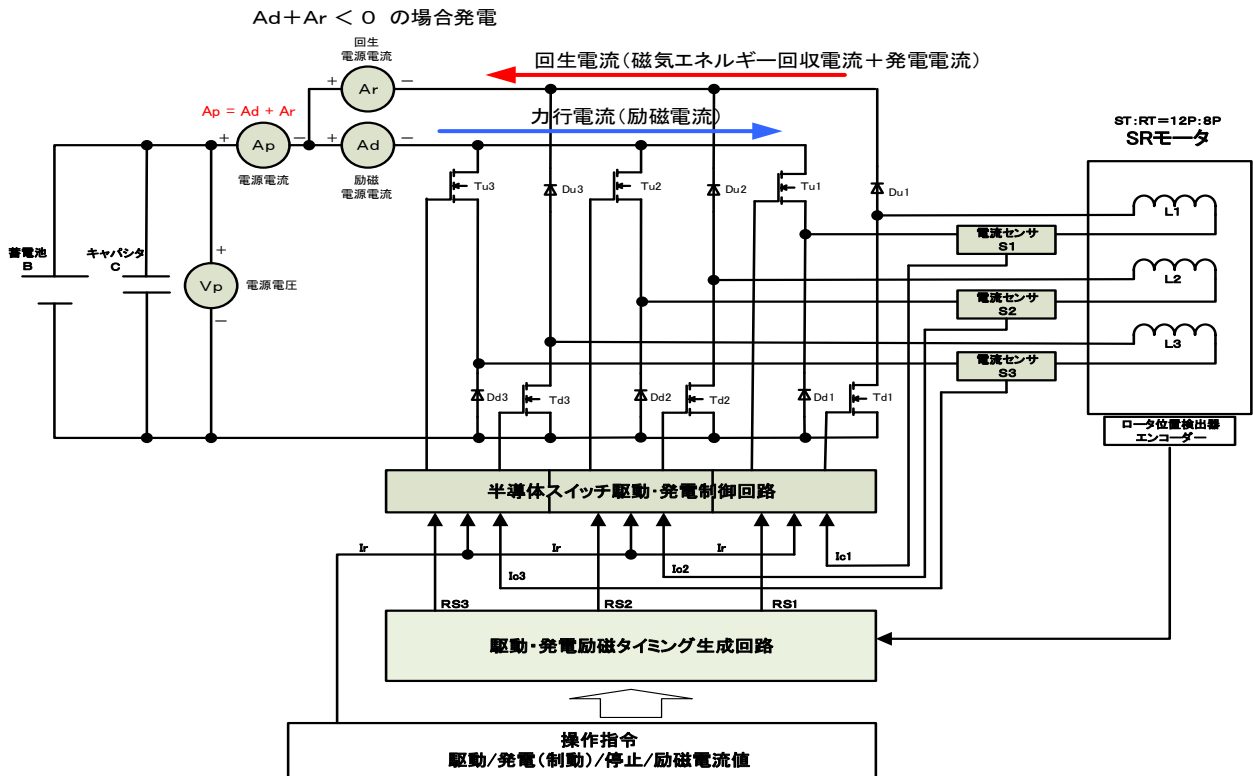


図 2-3-5 効率マップ

2-4 電力回生制御技術の開発

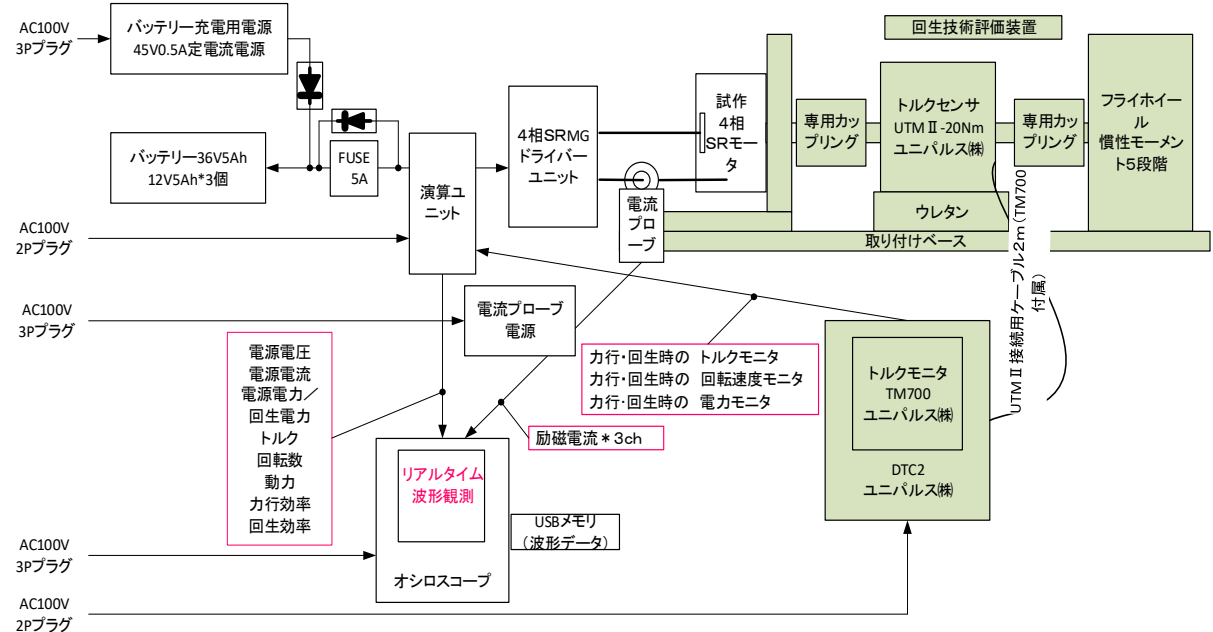
(1) 回生制御方式

図 2-4-1 は(株)リージックが所有する回生制御特許の構成図であり、この方式を SR モータ用に応用した。



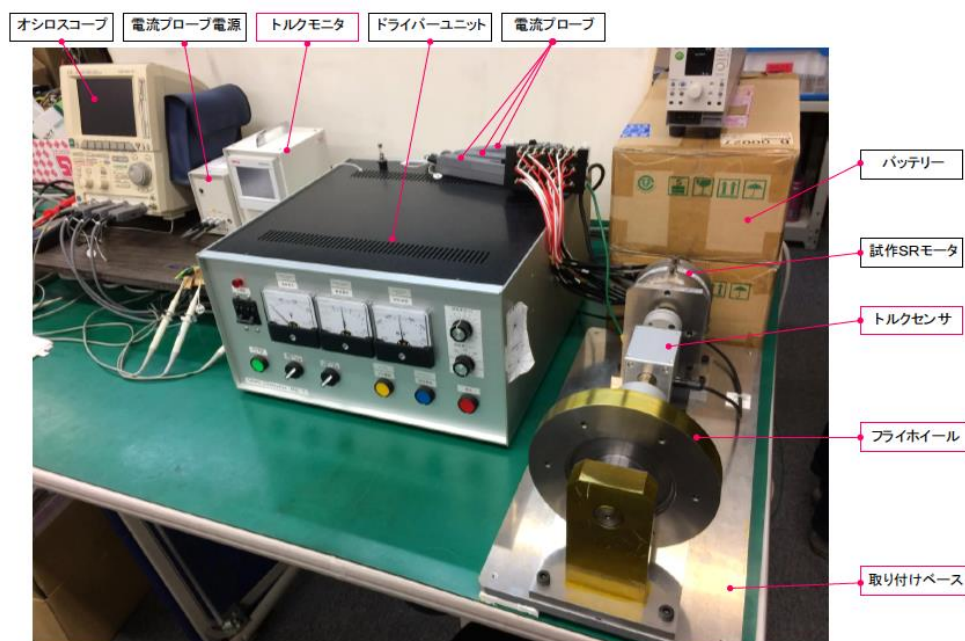
(2) 回生電力の評価

モータ単体での回生及び力行試験は下図の回生技術評価装置を使用して4相SRモータの力行動作でフライホイールを回転させた後、フライホイールの運動エネルギーで回生させる方法で試験を行なった。



センサ出力値を演算ユニットでリアルタイム計算してオシロスコープにて波形観測した。

図 2-4-3 は、回生制御技術評価装置と評価状況の写真である。



回生技術評価装置＝トルクモニタ＋トルクセンサ＋フライホイール＋取り付けベース

図 2-4-3 回生技術評価装置と評価状況(4 相 SR モータを使用)

(3)成果

力行→回生動作((設定励磁電流11A)

力行→回生動作((設定励磁電流28A)

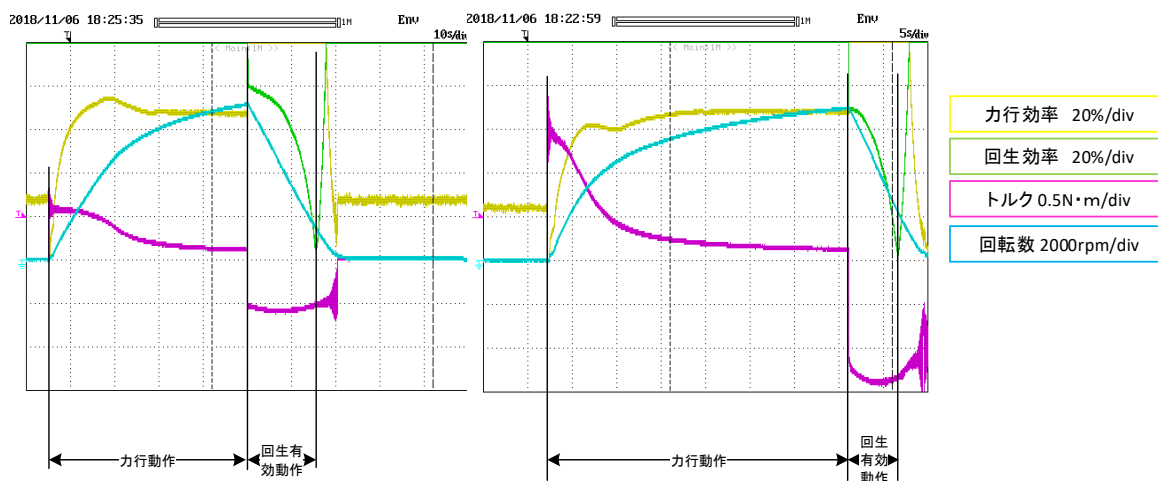


図 2-4-4 回生効率

(効率計算はドライバーユニット＋モータ 合算の効率である)

$$\text{力行効率}[\%] = \frac{\text{トルクと回転数から算出した電力}}{\text{蓄電池電流} \times \text{蓄電池電圧}} \times 100 = \frac{\text{動力}}{\text{消費電力}} \times 100$$

$$\text{回生効率}[\%] = \frac{\text{蓄電池充電電流} \times \text{蓄電池電圧}}{\text{トルクと回転数から算出した電力}} \times 100 = \frac{\text{回生電力}}{\text{動力}} \times 100$$

■4相SRモータ単体試験結果の考察

1) 使用頻度の高い 10km/h 走行(モータ回転 3,000[rpm])において

- ・回生ブレーキトルク 0.6[N・m]の際の回生効率 55[%]、実車時のギア効率 90[%]を含めると 49.5[%]
- ・回生ブレーキトルク 1.4[N・m]の際の回生効率 30[%]、実車時のギア効率 90[%]を含めると 27.0[%]を達成しており実用上問題ない効率である。

励磁タイミングの最適化を計ることにより効率は更に良くなる可能性を有している。

2) 力行トルクに対し回生トルクは高速回転域から停止直前までの広範囲においてトルクが安定している。

理由として回生の場合は励磁コイル内の発電エネルギーを励磁コイル内に還流するため励磁電流到達時間が早くなり励磁電流の維持が容易となる。

このため回転数に関係なくトルクが安定することになる。

2-5 低コスト化

市販されている各社の電動アシスト自転車のドライブユニット(モータ、ギヤ、バッテリー、制御装置)の構成部品を比較調査した。また、組立性について比較調査を行なった。(何れも量産化時点を想定した評価)

- ・部品面では、SRモータの価格優位性、低価格センサーの採用(高価なロータリーエンコーダやレゾルバに替えてアナログ型角度センサーを採用)、高効率化によるバッテリー容量の低減などにより優位性が確保できる見通しを得た。
- ・組立性の面では、部品点数の削減やロータリーエンコーダ取付けが不要になるなどで優位性が確保できる見通しを得た。
- ・全体では30%程度のコスト低減が可能との見通しを得た。

2-6 安全性評価

IEC61508(機能安全規格)をベースとした派生規格ISO26262(自動車安全規格)に準拠して機能安全性を机上検討し、設計上問題が無いことを確認した。

内容は、表 2-6-1 の通りである。

2-6-1 安全性評価内容

システム	想定されるハザード
(1) 電気機械式ぶれーキ	意図しない急減速
(2) モータ	・突然の意図しない回転上昇、急発進 ・突然の意図しない回転ゼロ ・異常な温度上昇
(3) バッテリー	・過放電 ・過充電 ・異常な温度上昇
(4) 表示、メータ	・ブレーキランプが表示されない ・方向指示器が表示されない

2-7 実車評価

(1)SR モータ、遊星ギヤ一体化ケース(ドライブユニットケース)の開発

SRモータと遊星ギヤを一体化して収納するドライブユニットケースを設計した。(図 2-7-1～図 2-7-3)

ケースの外形は外径 $\phi 137\text{mm}$ 、全長 133mm となった。

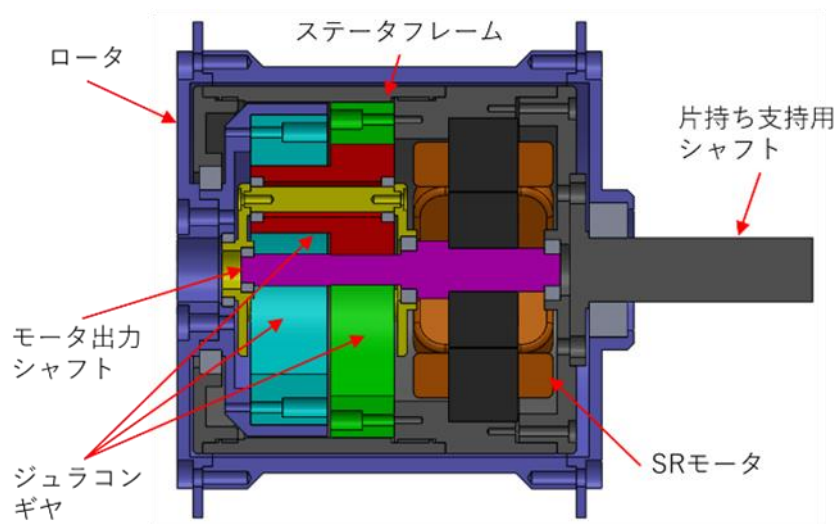


図 2-7-1 SRモータ、遊星ギヤを収納した一体化ケースの構成図



図 2-7-2 収納ケース(ドライブユニットケース)の構成部品



図 2-7-3 SRモータ、遊星ギヤ収納後のドライブユニットケース

(2)実車評価方法

試作した4相 SR モータと遊星ギヤをドライブユニットケースに格納して電動アシスト自転車に実装して走行し、回生制御の有効性評価を行なった。

■方法

①回生機能を無効にした際の積算電力計の電力量 $P1[Wh]$ を測定する。

②回生機能を有効にした際の積算電力形の電力量 $P2[Wh]$ を測定する。

■周回コースの距離($L0$) :3.0 [km]

■回生無効時最大走行距離 $L1$ を算出

$$L1 = (P0 \div P1) \times L0 \quad [km]$$

■回生有効時最大走行距離 $L2$ を算出

$$L2 = (P0 \div P2) \times L0 \quad [km]$$

■回生動作による延伸距離 $L3$

$$L3 = L2 - L1 \quad [km]$$

■回生効率

$$\text{回生効率} = (L3/L1) \times 100 \quad [\%]$$

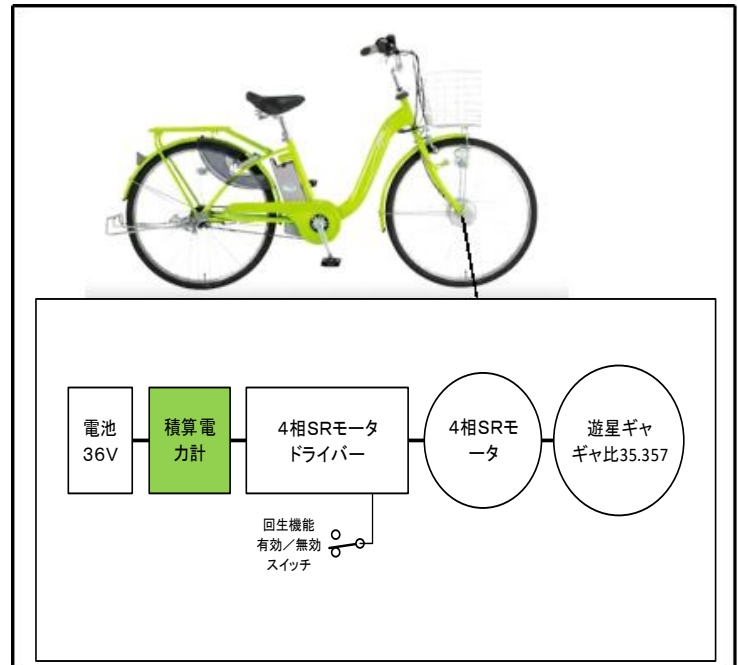


図 2-7-4 実車試験の構成

(2) 結果($P1$ 、 $P2$ の数値は割愛した)

周回コースを 5 回走行した結果は、表 2-7-1 の通りとなった。

表 2-7-1 走行結果

試験番号	L1 [Km]	L2 [Km]	L3 [Km]	回生効率 [%]
1	21.43	24.55	3.12	14.55
2	21.77	25.38	3.60	16.54
3	22.50	25.47	2.97	13.21
4	23.68	27.27	3.59	15.15
5	22.13	25.09	2.96	13.38
平均値	22.30	25.55	3.25	14.57

【考察】

実車で回生効率の目標値10%以上を達成できた。

しかし、モータ単体における回生効率 55～30[%]、と比較して低い結果となった。

原因としては、ドライブユニットケースでの損失が考えられ、製品化にあたっての課題である。

3章 全体総括

3-1 成果の総括

- (1) 小型SRモータとして、3相SRモータ(2種)と4相SRモータ(1種)を開発した。
併せて、SRモータ試験装置を製作した。
- (2) モータと連動する小型軽量遊星ギヤを開発した
- (3) SRモータの効率向上、トルク制御のためのベクトル制御を開発した
- (4) 走行効率向上の為に回生制御技術を開発した。
併せて、回生技術評価装置を製作した。

3-2 事業化への課題

3-1の成果を活用して事業化するためには以下の課題があると考えている。

- (1) SRモータ
更なる小型・軽量化を行い高速回転を活かせることが課題
- (2) 遊星ギヤ
試作品では、作り直しができないことに加え、力学的耐力を持たせるために十分な小型化ができなかった。
事業化のためには、極限まで小型化するための材料、構造、製造方法を検討する必要がある。
- (3) モータ制御方法
ベクトル制御を含め、最適制御を実現するために、ソフトウェアやセンサーのブラッシュアップが必要である。
- (4) 回生制御
実用化の見通しのある技術であるが、回生効率向上のための更なる改善が課題である。

3-3 事業化展開

- ・まず、電動アシスト自転車、電動車椅子用のSRモータ或いはドライブユニットを製品として、2年後を目途に商品化し販売開始予定。販売先は中国マーケット(電動バイク)を優先する。
- ・その他、SRモータの小型・高速回転を活かせる汎用品(掃除機、エアコン、電動草刈り機など)への展開を検討する。