

【公開版】

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

「実車環境を模擬する電動車両用台上モータ駆動システム評価装置の
開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

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
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目的及び目標	1
1-1-3 目的及び目標に対しての実施結果	3
1-2 研究体制	4
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第 2 章 本論	8
1. 実車モードを再現する負荷制御装置への対応	8
【1-1】実車機構モデルの構築	8
【1-2】高速電流制御インバータ開発	9
【1-3】高速負荷モータの開発	9
2. 実車チューニングが可能なインバータエミュレータの開発への対応	10
【2-1】ベクトル制御マップチューニング機能開発	10
【2-2】制振制御チューニング機能開発	13
【2-3】アシスト回生チューニング機能開発	14
3. 環境負荷再現と高精度計測・解析システムによる実証試験	14
【3-1】環境負荷ユニットの構築	14
【3-2】高精度計測、解析システム構築	15
【3-3】全体システム実証試験	16
最終章 全体統括	17
3-1 研究開発成果	17
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	17

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

1-1-1 研究開発の背景

電動車両のモータ駆動システムの開発においては、車種車格に応じた電氣的、機械的性能の確保や走行環境に適合するモータ特性を引き出すために、実車におけるモータ駆動制御のチューニングが欠かせない。具体的には、モータ効率を最大化するためのベクトル制御マップのチューニング、モータ固有のトルクリプルや、モータと車両ギア/トランスミッション機構との共振防止のための制振制御のチューニング、車両全体としてシステム効率を最大化するためのモータアシスト/回生ブレーキ量のチューニング等が必要となる。

そのために現在は、モータ、インバータの単体特性を台上評価し、その後、モータ、インバータおよびバッテリーを実車に搭載した状態で、シャーシダイナモ上で走行負荷、環境負荷を加え、モータ駆動システムの評価を行っているが、膨大な開発期間と工数を要してしまうことが大きな課題となっている。

一方、実車負荷を模擬するシミュレーション技術を用いた開発効率向上策も試みられているが、まだまだ実車モードを再現できないのが現状である。このような実情から自動車業界では「実車環境を模擬する電動車両用台上モータ駆動システム評価装置」が強く要望されている。

1-1-2 研究目的および目標

電動車両開発で用いられるシャーシダイナモなどの実車を用いた環境試験は、非常に大規模な試験室や設備が必要となるため、自動車メーカといえどもその数は限られている。一方で、政府主導の次世代電動車の普及計画が進む中、開発車種が増えてきた現在、モータ駆動システムのチューニング実験を全て実車環境に頼っていると、その開発、評価が追いつかず、車種展開に支障をきたすこととなる。

自動車業界からは、モータ駆動システムのチューニング期間（モータ、インバータ試作期間を含めて（例）約9ヶ月）を、大幅に短縮できる台上モータ駆動システム評価装置を望む声が寄せられている。

本事業では、当社独自の実車モード再現技術と、製品を代替して実験が進められるインバータエミュレータ技術を用いて、台上テストベンチ上で実車における動力負荷と環境負荷

【公開版】

を模擬し、インバータエミュレータ上で、ベクトル制御マップ等のチューニングなどができる評価装置を開発し、モータ駆動システムのチューニング期間を大幅に短縮（半減）することを目的として開発を進めた。

開発については、以下の3つのサブテーマ（要素）毎の目標を定めて実施し、最終的に全体システムを結合して評価、検証、改良を行う方法で進めた。

[サブテーマ1：実車モードを再現する負荷制御装置（動力負荷の再現）]

- 目標：
- ・実車機構モデルの構築 [振動系]
 - ・高速電流制御インバータ開発 [出力：250kVA 以上]
 - ・高速負荷モータ(ベンチ)の開発 [普及車、次世代車負荷に対応]

[サブテーマ2：実車チューニングが可能なインバータエミュレータの開発（チューニング ツール）]

- 目標：
- ・ベクトル制御マップチューニング機能開発 [±3%]
 - ・制振制御チューニング機能開発 [機能開発]
 - ・アシスト回生チューニング機能開発 [機能開発]

[サブテーマ3：環境負荷再現と高精度計測・解析システムによる実証試験

（環境負荷再現と計測、解析）]

- 目標：
- ・環境負荷ユニットの構築 [温度安定性：±0.3℃]
 - ・高精度計測、解析システム構築 [機能開発]
 - ・全体システム実証試験 [ユーザ要望を満足すること]

1-1-3 目的及び目標に対しての実施結果

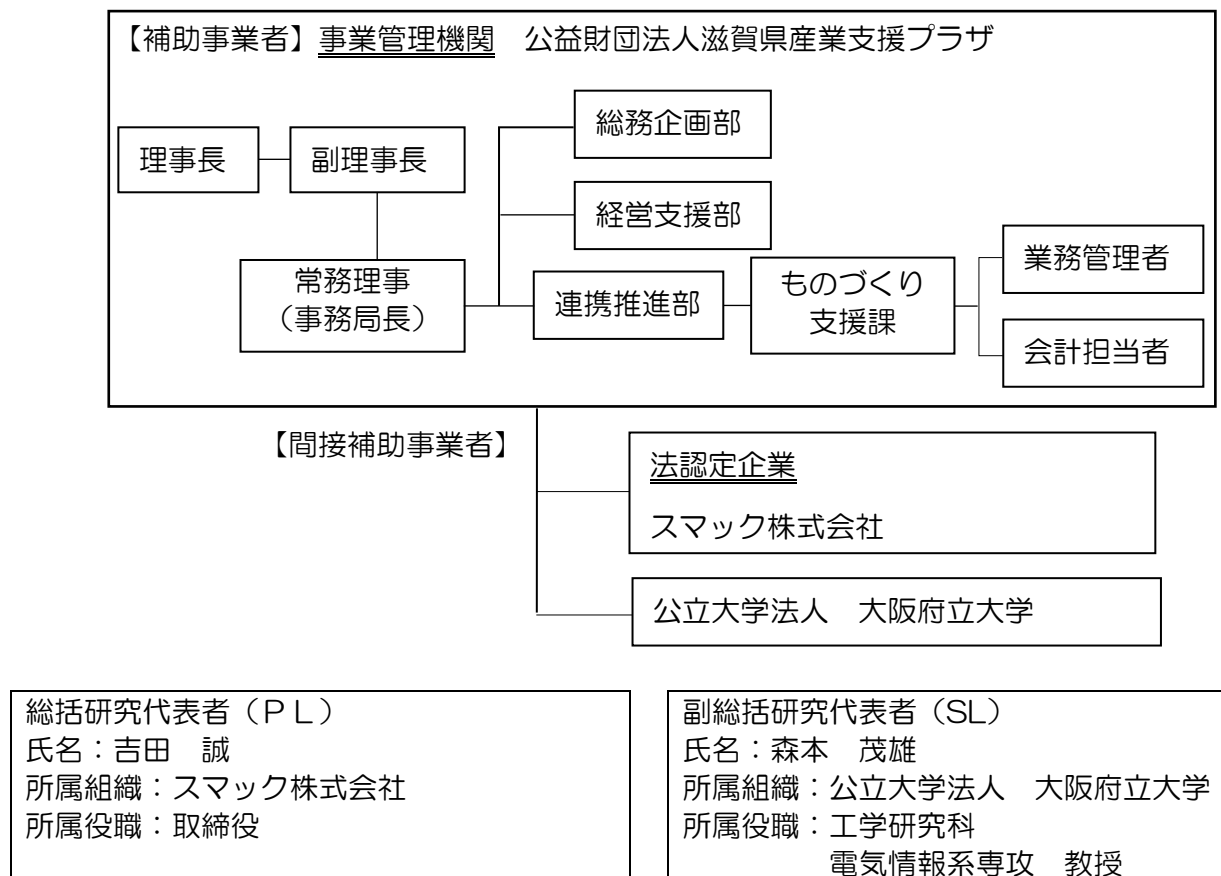
表 1

テーマ：実車環境を模擬する電動車両用台上モータ駆動システム評価装置の開発		
サブテーマ	目 標	実 績
[1] 実車モードを再現 する負荷制御装置	①実車機構モデルの構築 [振動系] ②高速電流制御インバータ開発 [出力：250kVA 以上] ③高速負荷モータ(ベンチ)の開発 [普及車、次世代車に対応]	共振系の再現 300kVA 回転数 30krpm 型と トルク 450Nm 型の 2種類を開発
[2] 実車チューニング が可能なインバー タエミュレータの 開発	①ベクトル制御マップ チューニング機能開発 [±3%] ②制振制御チューニング機能開発 [機能開発] ③アシスト回生チューニング機能開発 [機能開発]	±3%の目処を得る 共振系のチューニング トルク指令マップ機能
[3] 環境負荷再現と 高精度計測解析 システムによる 実証試験	①環境負荷ユニットの構築 [温度安定性：±0.3℃] ②高精度計測、解析システム構築 [機能開発] ③全体システム実証試験 [ユーザ要望を満足すること]	±0.3℃（5 点平均） 電力計測、機械計測 所望項目について実車評価 代替との評価得る
開発期間の短縮 効果	現行比 50%	今後の顧客評価に依るが、 チューニング過程を短縮で きるしくみを構築

1-2 研究体制

(研究目標・管理体制、研究者氏名、協力者)

1-2-1 研究組織・管理体制



1-2-2 研究者・協力者

① 研究者氏名

【間接補助事業者】スマック株式会社

氏 名	所属部署・役職	実施内容 (担当テーマ)
吉田 誠 (PL)	取締役	【1】 【2】 【3】
直木 吾郎	製品開発グループ	【1】 【3】
朝田 和樹	製品開発グループ	【1】 【3】
清水 徳也	製品開発グループ	【1】 【3】
松崎 信秋	製品開発グループ	【1】 【3】
森 世織	製品開発グループ	【1】 【3】
小迎 聡	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】
上神 友昭	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】

【公開版】

奥田 勇	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】
山田 敦	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】
森川 由久	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】
胡内 勝也	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】
久保 光司	製品開発グループ	【1】 【2】 【3】
奥山 美弘	技術開発グループ	【1】 【2】 【3】
志賀 紘輝	技術開発グループ	【1】 【2】 【3】
前田 志朗	技術開発グループ	【1】 【2】 【3】

【間接補助事業者】 公立大学法人 大阪府立大学

氏 名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
森本 茂雄（SL）	工学研究科 電気情報系専攻 教授	【2-1】
井上 征則	工学研究科 電気情報系専攻 准教授	【2-1】

② 事業管理機関

【間接補助事業者】 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

氏 名	所属部署・役職	実施内容
田中 勝晴	連携推進部 部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
篠原 弘美	連携推進部 副部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
福井 浩成	連携推進部部 ものづくり支援課 課長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
山本 博之	連携推進部部 ものづくり支援課 参与	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
加藤 芳一	連携推進部部 ものづくり支援課 コーディネートスタッフ	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務、間接補助事業先との連絡調整業務

③ 協力者

氏 名	所属部署・役職	実施内容
尾崎 哲也	㈱ネクスティエレクトロニクス 第一技術部 A3 グループ グループリーダー	装置への顧客ニーズの汲み上げと販売 先顧客の開拓
深尾 典久	滋賀県工業技術総合センター 主任専門員兼係長	シミュレーション技術、環境模擬につ いてのアドバイス

1-3 成果概要

[1]実車モードを再現する負荷制御装置の開発

電動車両のモータに加わる、静的な負荷トルク、および動的な負荷トルクをシミュレーションと実機で再現することができ、回転数 30krpm 迄、トルク 450Nm 迄の広範囲な台上負荷制御装置を開発した。

[2]実車チューニングが可能なインバータエミュレータの開発

オンラインパラメータ同定によるモータパラメータの検出から、トルク制御マップを作成するベクトル制御マップ作成技術を構築し、トルク制御精度 $\pm 3\sim 5\%$ の目処を得ることができた。

[3]環境負荷再現と高精度計測解析システムによる実証試験

高精度な実車環境温度再現と、計測・解析機能を上記に組み合わせ、トライアルテストを行い、ユーザから所望部に対して、実車試験の代替性があるとの評価を得た。

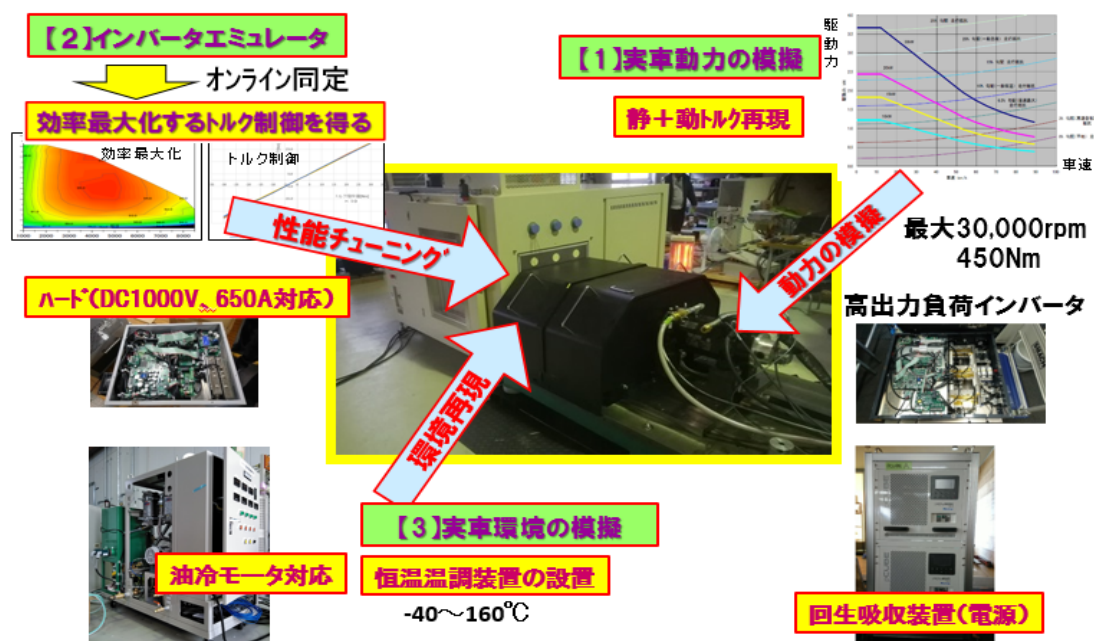


図1：開発装置の概要

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

連携推進部 ものづくり支援課 参与 山本 博之

〒 520-0806 滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21内

電 話 077-511-1414 FAX 077-511-1418

E-mail : h-yamamoto@shigaplaza.or.jp

【法認定管理機関】

スマック株式会社

取締役 吉田 誠

〒 520-0812 滋賀県大津市木下町18-8

電 話 077-526-8815 FAX 077-526-8816

E-mail : yoshida.m@smach.jp

第2章 本論

1. 実車モードを再現する負荷制御装置への対応

【1-1】実車機構モデルの構築

実車走行負荷をきめ細かく再現するには、静的な回転数と負荷トルクとして表される定常負荷と、モータからシャフト、ギア、トランスミッションに至る機構系の加減速時の共振系の振る舞いを再現する必要があり、このモデリングと再現を試みた。

図2に MATLAB/Simulink を用いて構築したシミュレーションモデルを示す。

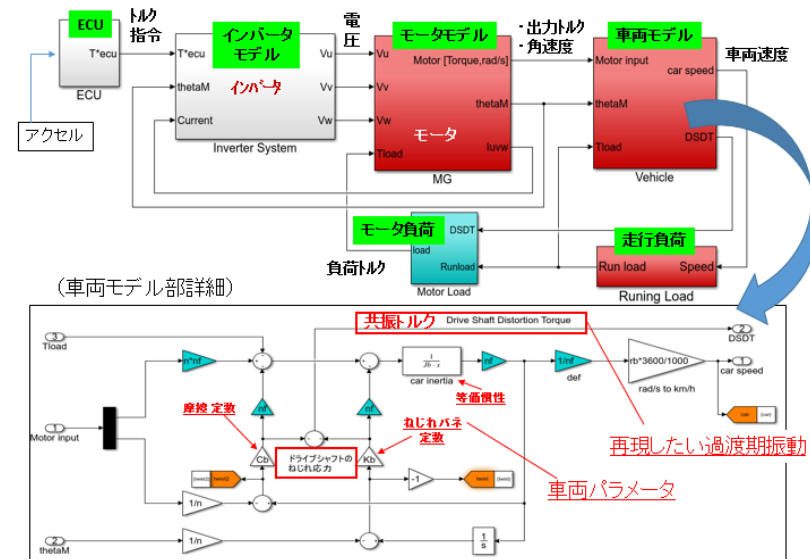


図2：シミュレーションモデル（過渡期(共振)の実車負荷）

車両モデル部は、2 慣性系のモデルで、モータから車両慣性の間に、ねじれバネ定数、摩擦定数を有するものとして、それらを車両パラメータとして設定できるようにして、過渡期の共振振動の再現をした結果を図3に示す。

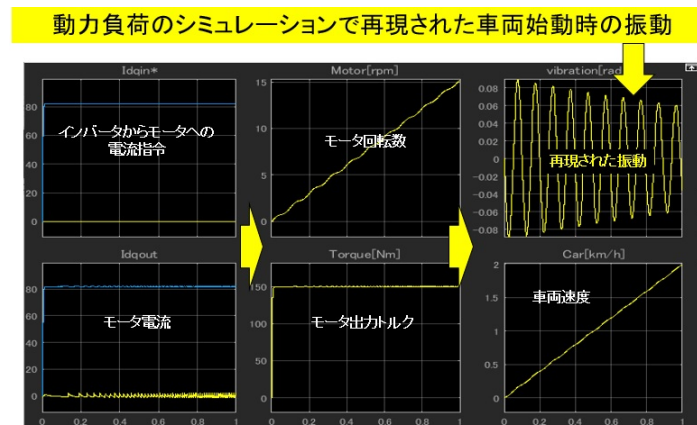


図3：過渡期の共振の再現結果（シミュレーション）

【1－2】高速電流制御インバータ開発

実車負荷を、実際の負荷モータの動きとして再現するには、その再現周波数の 20～50 倍程度の周波数分解能を持ち、十分に制御が追従する応答性の高い電流制御系と速度制御が必要であり、この電流制御を行う高速電流制御インバータの開発を行った。図 4 に開発した出力 300kVA の高速電流制御インバータの外観を示す。



図 4：高速電流インバータの外観（出力 300kVA）

この高速電流制御インバータを用いて、実車負荷を速度指令として再現し、また高速負荷モータを最高回転数の 30,000rpm 迄駆動した波形を図 5 に示す。

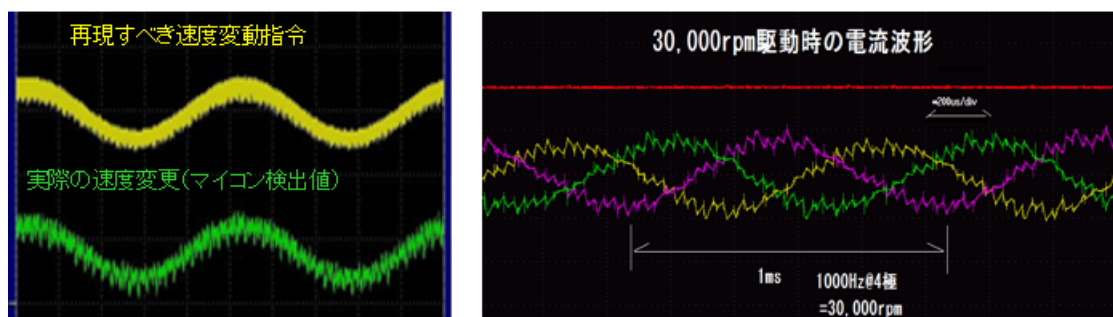


図 5：駆動波形

【1－3】高速負荷モータの開発

高速電流制御インバータで駆動され、実車負荷をモータの動きとして再現するのが高速負荷モータである。本開発では、普及車用の負荷モータとして、出力 185kW／最高回転数 15,000rpm、今後高速化が進む高速回転対応の負荷モータとして、出力 68kW／最高回転数 30,000rpm の 2 タイプを製作導入した。代表として最高回転数

30,000rpm の高速負荷モータの仕様と外観図を図6に示す。

Base volts (VAC)	400
Nominal Volts (VAC)	460
Synchronous base speed frequency (Hz)	373.3
Poles	4
Base speed (RPM)	11200
Base speed slip frequency (Hz)	3.67
FL amps (A)	141.5
Magnetizing amps (A)	74.93
Field weakening RPM	12915

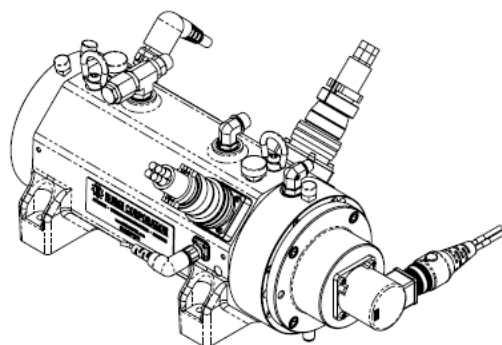


図 6：高速負荷モータ（30,000rpm）の仕様と外観図

回転数 30,000rpm に対応するためには、位置センサと、モータの軸受け信頼性がポイントであり、位置センサとして、上限 32,000rpm 対応の超高速回転対応のロータリーエンコーダを用い、またモータの軸受けとして、油潤滑式軸受けを用いた低慣性ロータを使用した。

2. 実車チューニングが可能なインバータエミュレータの開発への対応

【2-1】ベクトル制御マップチューニング機能開発

従来、ベクトル制御マップを作成するには、モータの動作範囲から定めた回転数とトルクのメッシュ（格子）点上で、実験的に実車動作状況を全て再現をしてベクトル進角を手動で変えて最高効率となるポイントを手動で探索していた。このために膨大な時間を要していた。

今回のアプローチは、モータパラメータからの計算に依り、ベクトル制御マップを求めようとするものである。この方法で、より正確なベクトル制御マップを得るには、如何にモータパラメータを正確に知るかということである。しかもそのモータパラメータは、モータ運転状態によって変わる特性を持つことから、今回用いた方法は、大阪府立大学（森本研究室）で考案されている、逐次最小二乗法を用いたオンラインパラメータ同定である。この模式図を図7に示す。

オンラインパラメータ同定1

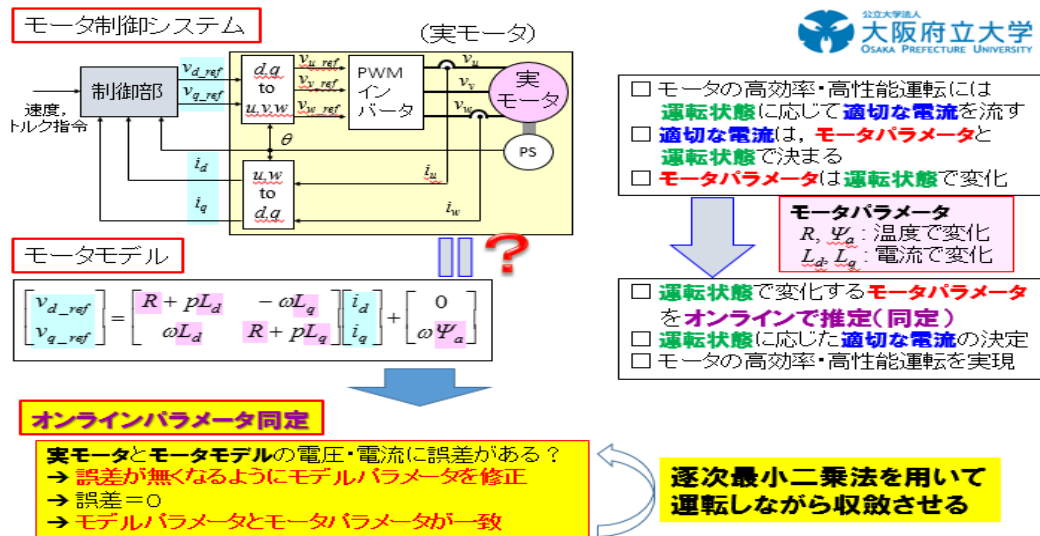


図7：逐次最小二乗法を用いたオンラインパラメータ同定1の模式図

図7の「モータ制御システム」は実機の制御器とモータであるが、ここで検出される電圧、電流などの所量を、図7の「モータモデル」に当てはめて比較し、その電流、電圧の誤算がゼロになるように、モータパラメータを修正して行くという考え方である。

この図7の方式と、さらに精度を確保するために、図7では制御器の検出値を用いていた所量を、計測器の検出値を用いてモータモデルから計算する（図8）という2つの方法を並行してモータパラメータの同定を行った。

オンラインパラメータ同定2

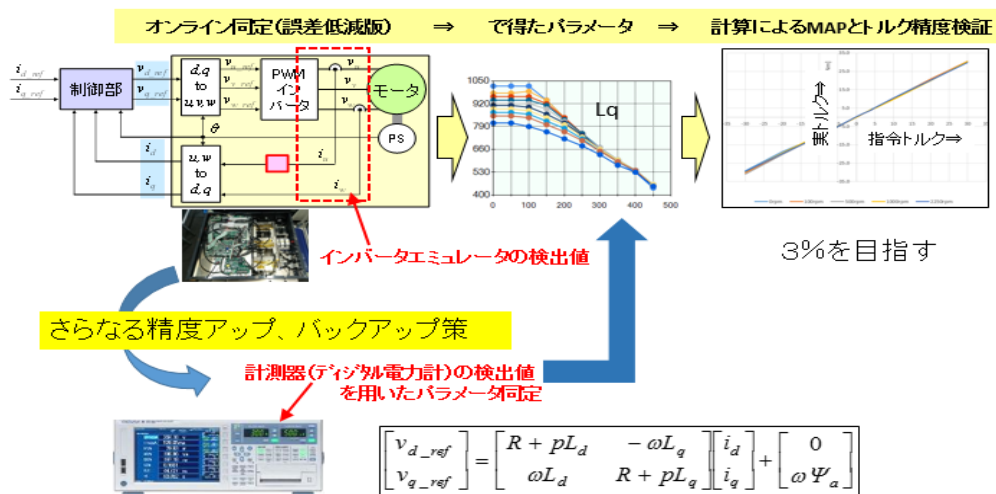


図8：計測器を用いたオンラインパラメータ同定2の模式図

次に、前述方法で得られたモータパラメータを、ベクトル制御マップ化する方法として当社が考案した「再帰計算によるトルクマップ計算法」を用いた図9にその模式図を示す。

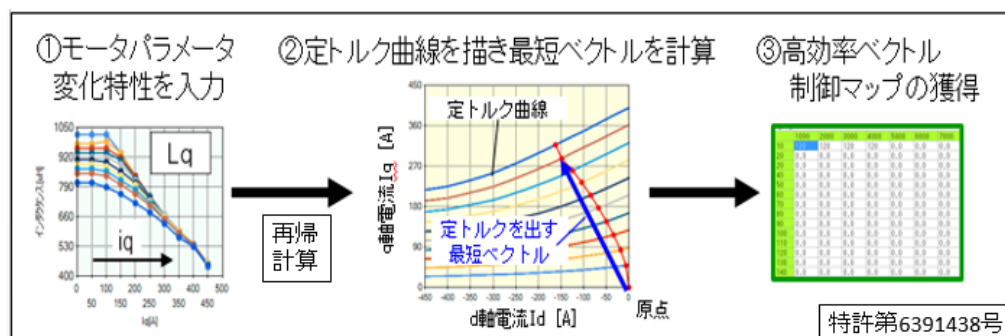


図9：再帰計算によるトルクマップ計算法

前述した方法により、トライアルモータで、モータパラメータからベクトル制御マップを作成し、トルク制御精度を検証した結果については、守秘の関係から紙面で示すことはできないが、以下の結果が得られた。

テストモータの回転数を、500～1500rpmの低速域と、2000～7000rpmの中高速側に分けたときに、中高速側ではトルク制御精度が3%以内に収まったが、低速域の低トルク時に、目標の±3%以内に収まらなかった。まずこの要因として以下が考えられた。

1. 今回用いたトルク計（500Nm）の精度が±0.1%のため最大±0.5Nmの誤差が重畳されている可能性がある。前期低トルク点においては最大±2%の誤算に相当する。
2. 今回用いたインバータエミュレータの電流容量が650A maxのため、前記低トルク点の電流約25Aに対して、電流容量比3.8%での動作点のため電流制御の精度が悪化している。

ここで、1については測定上の課題で、測定トルクに応じてトルク計の感度を上げることで誤差を低下することができる。また2については、インバータエミュレータの電流センサ感度を切り替えるか、ハードウェア容量を切り替えることで対応できる目処がたった。

【2-2】制振制御チューニング機能開発

制振制御チューニング機能の開発については、モータ自身が持つトルクリプル振動や、モータトルクと車両機構系の共振を防止するために、インバータ通電電流に高次高調波や、共振をキャンセルする電流を重畳させて、機械振動を制御的にキャンセルする機能の開発を行った。

モータトルクと車両機構との共振を低減する制振制御として、図10のブロック図に示す制御を検討の上、構築した。車両速度推定器内に、車両の物理系モデルを持ち、トルク指令 T^* とモータ軸の速度 ω_M から車両軸端の速度 ω_b とねじり角速度 ω_{VC} を推定し、それをキャンセルするような制振補正トルク T_{VC} を、元々のトルク指令に対して補正を行うものである。

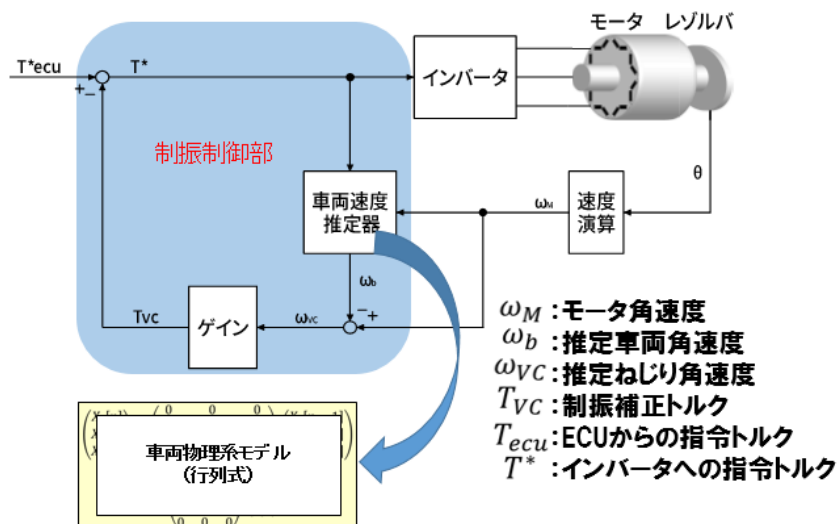
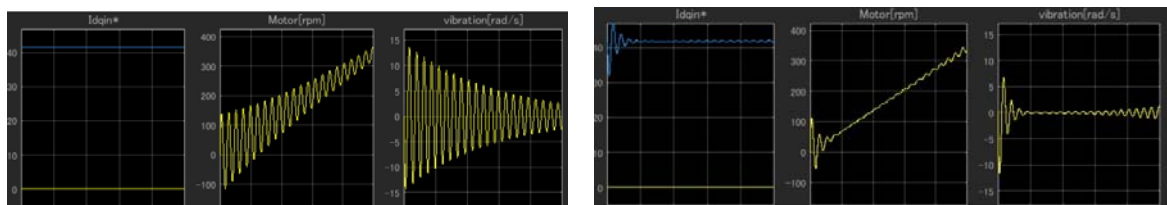


図10：制振制御のブロック図

図11にシミュレーションによる検証結果を示す。



(制振制御なし)

(制振制御あり)

図11：制振制御の実験結果

【2-3】アシスト回生チューニング機能開発

アシスト回生制御チューニング機能の開発については、電動車両におけるバッテリーの状態に応じて、アシスト量や回生量（最終的には車両側からインバータへ指令される正負のトルク指令になる）を制御するトルク指令マップを、インバータエミュレータ上でチューニングできる機能の開発を行った。

本機能については、インバータエミュレータを操作するGUIソフトを、車両ECUに見たて、車両のアクセル開度を入力できるようにし、バッテリー状態に応じて異なるマップが参照できるようなしくみを構築し、アクセル開度とバッテリー状態に応じて参照する I_d/I_q 指令マップを変えられるように設計をした。図 12 にその実験用 GUI ソフトの画面例を示す。



図 12：実験用GUIソフト

3. 環境負荷再現と高精度計測・解析システムによる実証試験

【3-1】環境負荷ユニットの構築

電動車両用モータの環境負荷再現として、恒温温調装置に依る空気側と、冷却システムによる液冷側を合わせたモータ温度環境の再現性の検証を行った。

ここで本恒温温調装置の設計上のポイントとして、第1に試験ベンチとの断熱性の確保がある。この対応として、テストモータを挿入する開口部の面に、不飽和ポリエステル樹脂板材（断熱材）を使用し、断熱性を確保した。

第2に回転部のシール構造があったが、これについては、構造上回転部で直接シールするのではなく、モータが取り付け面版でシールする構造とした。

第3に結露、防錆への対応である。これについては、上記した断熱性を極力上げることで急激な温度差が生じにくい構造上の対応を行った。ただし試験終了時に開口したときの温度変化時には、急峻な温度変化が発生し、結露せざるを得ないので、結露しても水滴が構造上下に逃げるようにドレン口を設けた。

図 13 に、これらの対策を行った恒温温調装置を試験ベッドに取り付けた状態の実機外観を示す。

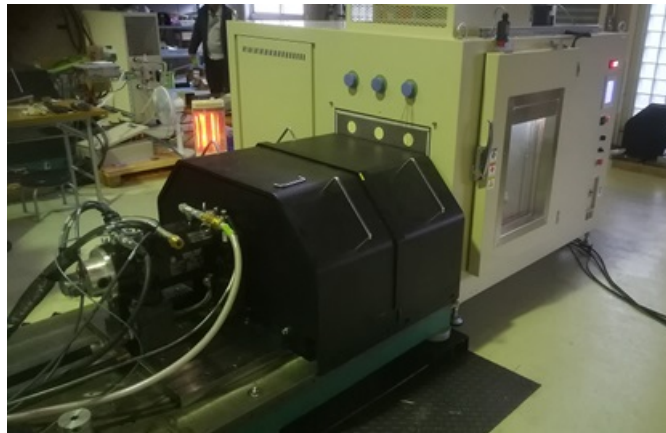


図 13：恒温温調装置

図 14 には、温度安定性の実験結果を示す。左表が温度安定性（槽内 5 点の平均温度）を示し、右表が温度分布の実験結果を示す。発熱体（モータ）からの放射熱と槽内の空調風によりどうしても温度バラツキは出るものの平均温度としては、 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 程度とであることを確認している。

温度保持		分布		
温度安定性		測定点5カ所の最高/最低温度		
設定温度／発熱負荷	測定温度	設定温度 $^{\circ}\text{C}$	最高温度 $^{\circ}\text{C}$	最低温度 $^{\circ}\text{C}$
+20 $^{\circ}\text{C}$ / 8.0kW	+20.0 $^{\circ}\text{C}$	+20.0	+20.2	+19.6
-40 $^{\circ}\text{C}$ / 2.5kW	-39.9 $^{\circ}\text{C}$	-40.0	-40.0	-39.8
		-10.0	-9.4	-10.0
		+60.0	+60.0	+59.3
		+100.0	+100.0	+99.6
		+160.0	+160.5	+159.6

※負荷 400kg

層内温度分布にバラツキはあるが5点平均で実力 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

図 14：温度安定性と温度分布

【3－2】高精度計測、解析システム構築

本サブテーマにおいては、一般的な電力計測以外に、モータの振動騒音計測ができる計測系の導入と実験検証、また解析として JMAG 解析で計算された性能特性と実機実験結果とを比較し、解析モデルの改善機能の検証を行った。JMAG 解析においては、トライアルモータで実際に性能試験を行い、その実機性能試験結果と、モデル解析シミュレーション結果を比較した。詳細は守秘の関係で割愛するが、実験結果から解析モデルの改良へと結び付

けられるという結果も得られた。

また機構解析においては、3DCAD によるモータと取り付け機構の構造解析を行い、共振点の解析、強度計算ができる環境も備えるようにした。(図 15)

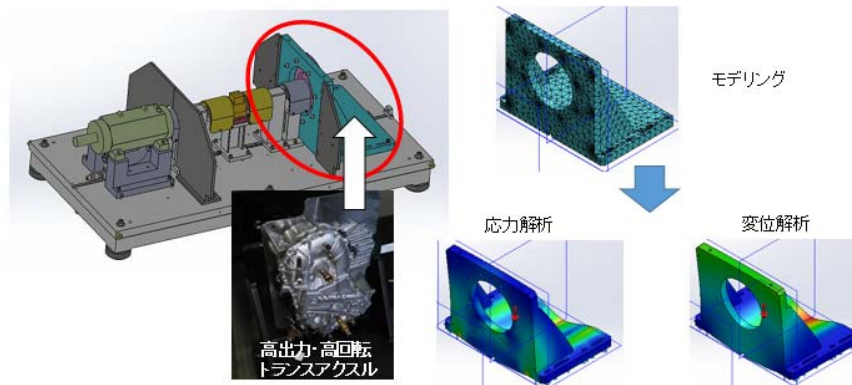


図 15：3DCAD による構造解析

【3-3】全体システム実証試験

全体システムの動作検証としてシステム実証試験を行った。図16に本装置の全体機能構成を示す。

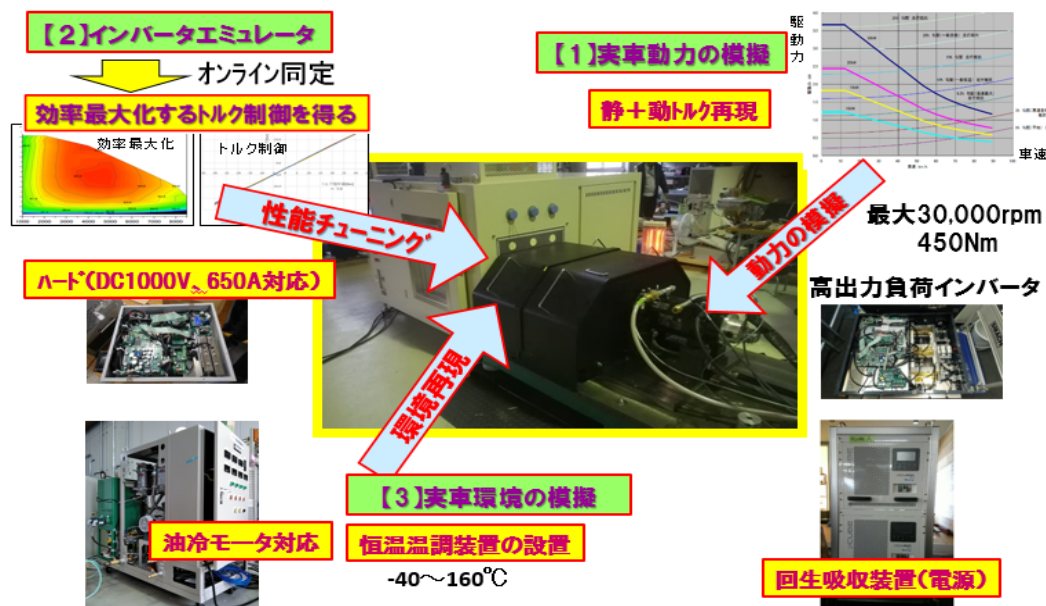


図 16：本装置の全体機能

システム実証実験は、1.項で再現されたモータに対する実車走行負荷と、3.項で再現されたモータの搭載環境負荷の中で、2.項のインバータエミュレータを用いたチューニ

【公開版】

ングにより、従来は、実機やシャーシダイナモで行われていたチューニング相当のパラメータが得られるかどうかを検証した。

ここで、本システム実証試験においては、当初設定した目標はもとより、川下ユーザを満足させられるかどうか重要であるため、できるだけユーザに関係するトライアルモータを準備して行ったため、試験結果の全てを示すことはできないが、一例として【2-1】ベクトル制御マップチューニング機能に示したトルク制御精度の内容を参照されたい。これについては、ユーザから所望の機能が得られるとの評価を得た。

また、1.実車モードを再現する負荷制御装置については、ユーザが求める負荷変動モードを、定量的に台上ベンチで再現することができ、従来の実機以上の挙動の分析ができるとの評価を得た。

最終章 全体統括

3-1 研究開発成果

今回、電動車両用モータ駆動システムの開発期間の短縮という目的のもと、本装置の研究開発に取り組み、必要な技術構成として、実車動力負荷の再現、モータ駆動チューニング技術、実車環境負荷の再現と計測という大きく3つの技術開発を行った。結果概要は1-1-3 表1に示しているが、各技術開発に対して、設定をした技術目標は概ね達成をすることができたが、現状はトライアル評価としてまだ評価例が少ないことから、さらなる評価検証と改善改良が必要であると考えている。また変化の激しい市場動向とユーザニーズに対して対応して行くことも重要である。

今回の取り組みとして、研究開発面では大阪府立大学の高いモータ制御技術を活かし、また、比較的初期の段階から(株)ネクスティーエレクトロニクスの協力のもと市場ニーズや顧客要望を汲み上げて研究開発へインプットすることで、研究と川下ニーズとの整合を取りながら進めたことは評価できる。また全体推進の中で、滋賀県工業技術総合センターからの適切なアドバイスも有効であった。今回のこの運営システムは、今後も継続して行きたいと考えている。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

(今後の研究開発)

【公開版】

本装置は、引き続き各機能と性能の検証と精度アップを進めて行く。特に、変化の激しい電動車両の開発動向やスペックの変化に対応をして行くことが重要であると考えている。具体的には、モータの大容量化、高速化、電源電圧の変化などである。

また今回の本装置は、製品設計ステージでの制御パラメータ、マップなどを実車と製品に代わりチューニングできる環境を提供するが、今後さらに、研究開発ステージでの制御アルゴリズム開発（モデルベース開発環境）との一体化が求められるという新たなニーズに対応して行く必要があると考えている。

（想定する顧客と機能）

今回開発した本装置は、まず国内の電動車両を開発する自動車メーカ、および自動車部品メーカへ向けて事業展開を行う。機能的には、全システムだけでなく、各要素の機能を切り出した形でもユーザニーズは高いと考えており、システムと機能パーツとしても事業展開を図る。さらに波及顧客としては、動力としてモータを使用する全てのアプリケーションを考えており、産業機器、重電・鉄道などの分野、また家電民生にまで将来的には広げたい。

（事業推進について）

具体的には、既存機能の開発ツールとして製品化しているユニバーサルインバータやモータ試験装置の販売実績がある自動車メーカ、部品メーカへの機能紹介とプロモーションを行う。これについては、当社の製品を扱っている商社も含めて取り組む。

さらに新規顧客への紹介として展示会、訪問説明会などを通じて、本装置の認知度を高め、事業化に結びつけて行きたいと考えている。