

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月7日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246034

研究課題名（和文） 大型トレーラ用集積型インホイールSRモータに関する研究

研究課題名（英文） A Study about Drive Circuit Integrated type In-Wheel SR Motor for Large-Size Trailer Vehicles

研究代表者

一ノ倉 理 (ICHINOKURA OSAMU)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20134017

研究成果の概要（和文）：本研究は、大型牽引車の燃費と走行安定性の改善を目的として、トレーラのタイヤ内に装着するため、駆動回路を内蔵した集積型インホイールSRモータの開発を行った。まず、シミュレーションにより最適なモータ形状および制御方法を明らかにした。つぎに、モータおよび駆動回路の試作を行い、特性試験により性能を明らかにした。また、実際に走行試験を行い、提案した集積型インホイールSRモータの有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In the study, for the purpose of improvement of driving stability and fuel consumption of large trailer vehicles, we developed drive circuit integrated type in-wheel SR motors. First, an optimal design of the motor and control method are decided by simulations. Next, the designed motor and circuit are manufactured and tested. Finally, the running tests were succeeded. It was found usefulness of proposed drive circuit integrated type in-wheel SR motor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2011年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2012年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
年度			
年度			
総計	34,000,000	10,200,000	44,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：大型トレーラ，電気機器工学，電気自動車，SRモータ，インホイールモータ

1. 研究開始当初の背景

環境対策と脱石油資源から、ハイブリッド自動車や電気自動車の普及が急務になっているが、キーとなるのは二次電池，モータ，およびインバータなどの要素技術である。電気自動車の性能を左右する二次電池の性能向上は喫緊の課題であるが，資源的な制約から希土類磁石をなるべく使用しないモータの開発も重要課題の一つに挙げられている。

先に研究代表者らは，磁石を全く使わない

SRモータ（SR：スイッチトリラクタンスの略）の「堅牢で安価」という特長に着目し，1人乗り小型車のダイレクトドライブ用のインホイールSRモータの開発を行った。

トラクタでトレーラを牽引する大型牽引車は，排気量が大きく平均燃費も2～3km/lと悪いため，環境に与える影響も少なくない。また，積載時のトレーラの重量はトラクタの5倍にもなるため，走行安定性の問題も指摘される。40tの大型トレーラが時速60kmで

走行しているときの運動エネルギーは約5.56MJになる。これは、出力100kWのモータが55.6秒間稼働したときのエネルギーに相当する。このクラスのトレーラの牽引車（トラクタ）のエンジン出力は300kW程度なので、短時間であればその1/3を補えることになり、電動化による燃費改善が十分に期待できる。ここで、バッテリーからモータへの電力供給や搭載スペースを考えると、モータとバッテリーはトレーラ側に配置するのが現実的である。しかし、もともと原動機を持たないトレーラに通常の方式によるモータと動力伝達機構を導入することは合理的でない。タイヤにモータを分散配置するインホイールダイレクトドライブとすれば大きな構造転換は伴わず、ホイール内に駆動回路やセンサを組み込むことも可能と考えられる。また、モータの個別制御による走行安定性の向上も期待される。磁石を全く使わないSRモータは、構造単純で堅牢、かつ温度や湿気にも強いいため、このような用途に最適と考えられる。

国内外を問わず、大型トレーラの電動駆動化（以下電動化）は殆ど検討されておらず、バスやトラックを含めた大型車両におけるインホイールダイレクトドライブの試みも初めてといえる。

2. 研究の目的

本研究は、大型牽引車の燃費と走行安定性の改善を目的として、トレーラのタイヤ内に装着するためのインホイールSRモータの開発を行う。具体的には、発進・加速時にインホイールSRモータを補助的な動力源として利用し、減速時や下り坂ではインホイールSRモータを発電機として利用することによって燃費の改善を図る。また、インホイールSRモータを個別制御することによって走行安定性の向上を図る。さらに、ホイール内に駆動回路とセンサを組み込むための基礎技術も確立する。

3. 研究の方法

図1は本研究で想定している大型トレーラの概略図である。トレーラのタイヤにインホイールモータを組み込み、発進時や加速時にトラクタの主エンジンを補助し、減速時や下り坂ではSRモータの発電動作により運動エネルギーを回生する。これによって平均燃費の改善を図る。図のバッテリーはトラクタのエンジン始動や補器類のためのものである。インホイールモータ装着時に追加するバッテリーもこれと同様に車体下部に配置する。本研究では40t級トレーラに実用可能なインホイールSRモータを開発した。研究期間は3年である。以下、順を追って研究方法について説明する。



カタログ値の一例

トラクタ重量: 8.16t, トレーラ重量: 4.77t, 積載連結時総重量: 約49t
 エンジン最大出力: 309kW@1800rpm, 最大トルク: 2256N・m@1300rpm
 減速機: 自動12速, 重量車モード燃費: 3.10km/ℓ

図1 本研究で想定している大型トレーラの概略図

図1 本研究で想定した大型トレーラの概略図

(1) インホイールSRモータの最適設計

まず、40t級のトレーラのタイヤサイズより、搭載可能なインホイールモータの外形寸法を決定し、これまでの研究で設計・製作された小型インホイールSRモータに基づいて、アウターロータ型インホイールSRモータを概略設計した。これをもとに、有限要素法を用いた解析により、極数や極幅、ヨーク厚み、ギャップ長など種々変えて最適形状を決定した。

(2) SRモータの駆動回路および制御方式の検討

SRモータの駆動回路は一般のインバータとは異なるため、通常のパワーモジュールが使えず、駆動回路の小型化の妨げになっていた。これを解消するために、申請者の1人は、コンデンサを1個追加するだけで、通常のインバータモジュールが使用可能な回路を考案しており、本研究では(1)の設計結果に基づき、回路シミュレータにより、新方式の駆動回路の最適設計を行い、制御シミュレータを構築して必要な制御方法の検討を行った。

(3) 磁気回路法に基づく走行シミュレータの構築

(1)の解析・設計には有限要素法による境界解析が基本になるが、さまざまな走行状況におけるモータ動特性の解析も重要なため、本研究では、図2に示すような研究代表者らが提唱している磁気回路法をベースに簡単な走行シミュレータを構築した。モータを磁気回路でモデル化し、駆動回路(コンバータ)モデルと結合させることによって、コンバータや制御系も含めたモータ解析、負荷変動に対する動特性解析が可能になった。また、ダイナミックなモータ損失(銅損、鉄損)やコンバータの回路損失も計算される。したがって、走行状況に応じたバッテリーの供給電力や、制動時の回生電力を精度良く求めることができる。このようなシミュレータを構築し、インホイールSRモータをトレーラに適用したときの走行特性や損失特性について詳細な検討を行った。シミュレーション結果はインホイールSRモータの最適設計にフィードバックした。

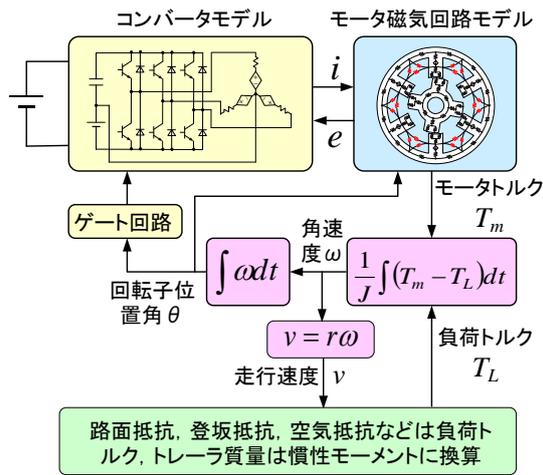


図2 走行シミュレータのブロック図

(4) インホイールSRモータの本体の製作

(1)の設計結果に基づいて評価用のSRモータを業者に外注して製作した。制御に必要な回転子位置検出にはレゾルバを使用することにし、(2)で設計した駆動回路が内蔵できるように内径寸法や軸受けなどの設計を行った。

(5) インホイールSRモータの駆動回路および制御回路の製作

(2)で設計した駆動回路と制御回路の製作を行った。パワーモジュールとしては600V-300AのIPM(Intelligent Power Module)を用い、インホイールモータ内に内蔵可能な寸法となるように制御用回路を製作した。なお、回路小型化や信頼性野向上のため、回路はすべてプリント基板を設計・製作し、それを用いて実装を行なった。

(6) 特性試験

(4)(5)で試作したインホイールSRモータと駆動回路を用いて特性試験を行った。(1)~(3)のシミュレーション結果とこれらの実測結果より、インホイールSRモータをトレーラに適用するために必要な事項を明らかにした。また、パワーモジュールの冷却や配線方法など、ホイール内に駆動回路を組み込むために必要な事項を検討した。

(7) 集積型インホイールSRモータの製作

上記の試験結果に基づいて、パワーモジュールの冷却に必要なヒートシンクを選択した。モータおよび駆動回路の損失から検討したところ、ホイール内に組み込むためには強制冷却が必要になることが分ったため、ここでは水冷式ヒートシンクを利用した。水冷式ヒートシンクは専用設計として外注し、冷却用ポンプおよびラジエータはCPUの冷却などに使われるものを転用した。

(8) 集積型インホイールSRモータの追加製作

牽引走行試験を行うために、(4)で製作し

た集積型インホイールSRモータを追加製作する。このとき、タイヤや駆動回路のみならず、車体への支持方法などを考慮したケース・軸受け構造とした。(4)で製作した集積型インホイールSRモータに関しても、同様の追加加工を行った。

(9) 模擬トレーラの製作とモータ取り付け

簡単なアングル部材によりフレームを組み、製作した集積型インホイールSRモータとバッテリー、コンデンサ、および冷却水の循環装置などを取り付けた模擬トレーラを外注製作した。

(10) メインコントローラの製作

パワーモジュールのゲートコントロール用基板はそれぞれのモータのホイール内に組み込んだが、トレーラに実装した場合、走行状況に応じて2輪を適切に制御するメインコントローラが必要になるため、このメインコントローラを既存のDSPを用いて製作した。

(11) 牽引走行試験

模擬トレーラにメインコントローラを搭載して走行試験を行なった。走行試験の結果から、提案する集積型インホイールSRモータの有用性を検討した。

4. 研究成果

平成22年度の研究においては、40t級トレーラへの適用を想定して、アウターロータ型インホイールSRモータの設計、駆動回路・制御系の設計、および、走行シミュレータの構築を行い、以下のような成果を得た。

(1) 電磁界解析ソフトウェアおよび磁気回路法を用いた計算機シミュレーションにより、アウターロータ型インホイールSRモータの最適設計を行った。その結果、アウターロータ型SRモータにおいては、固定子極数より回転子極数が少ないほうが高トルクが得られ、固定子30極、回転子20極の場合において、トルク/重量比が最も優れていることを明らかにした。図3に設計したインホイールSRモータの概要を示す。

(2) 制御回路、および駆動回路の設計を行い、回路シミュレータおよび汎用制御シミュレータを活用した計算機シミュレーションを行った。その結果、大型トレーラ用SRモータの駆動においても、提案制御法・駆動回の有用性を明らかにした。

(3) 磁気回路法を活用した走行シミュレータを構築し、定められた走行パターンにより、走行特性や損失特性を算定し、提案するインホイールSRモータシステムにより40t級トレーラの燃費を2~3割向上できることを明らかにした。

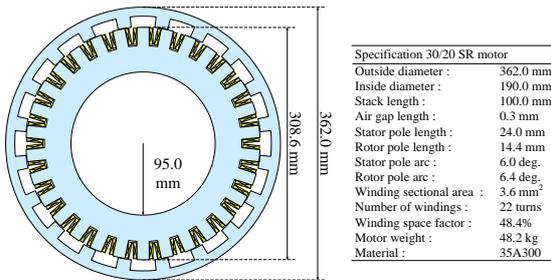


図3 設計したインホイール SR モータの概要

平成 23 年度の研究においては、前年度に検討・設計したアウターロータ型 SR モータの試作を行い、同じく前年度に導入した測定装置により、その基礎特性について測定・検証を行った。駆動回路と制御回路の製作を行った。さらに、駆動回路の積載性を向上しつつ出力を向上したモータを設計し、施策を行った。これらにより、次のような成果を得た。

- (1) 平成 22 年度の設計に基づいてインホイール SR モータを製作し、その特性を評価した。その結果、実測値ではシミュレーションに比較して特性が定性的には一致するものの、定量的にはトルクが3割以上小さいことが分かった。これは、試作機ではモータ重量が想定より重く、ベアリング荷重による機械損が大きいことが原因であることが明らかになった。そこで、モータ重量を軽量化するとともに、駆動回路の積載性を向上した設計を行い、試作を行った。図 4 に製作したインホイールモータを示す。
- (2) 平成 22 年度に設計した駆動回路と制御回路の製作を行い、基本的な動作を確認した。特に SR モータにおいても、従来の三相インバータモジュールで駆動可能であることを確認し、その妥当性を明らかにした。図 5 に製作した駆動回路を示す。



図4 試作 SR モータ

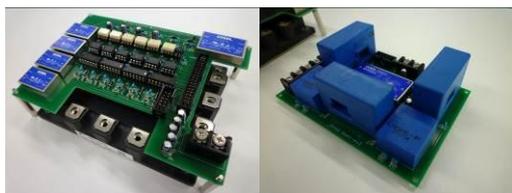


図5 製作した駆動回路およびセンサ回路

最終年度である平成 24 年度の研究においては、前年度までに設計・試作したインホイール SR モータに対し、実際にタイヤを履かせるためにエアバルブやタイヤ取り付け構造、車体への取り付けなどを考慮し、さらに駆動回路を集積・保持できるように追加加工を行なった。2 輪駆動を実現するため、同様の構造の SR モータを追加製作した。製作したインホイール SR モータを図 6 に示す。また、SR モータへの駆動回路の格納の様子を図 7 に示す。

さらに製作した集積型インホイール SR モータの試験を行なうための簡単な車両を製作し、製作したモータと鉛バッテリー、電気二重層キャパシタ、および冷却水の循環装置を取り付けた。

また、走行状況により二輪を適切に制御するメインコントローラを製作し、実際に車両に取り付けて走行試験を行った。図 8 に走行試験の様子を示す。

これらにより、本研究課題で提案した集積型インホイール SR モータの有用性を明らかにした。

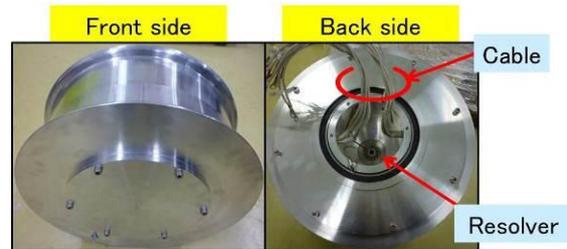


図6 タイヤおよび駆動回路の試作 SR モータ

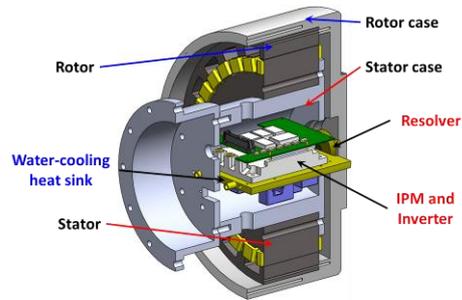


図7 モータへの駆動回路の格納



図8 走行試験の様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 佐藤宏樹, 後藤博樹, 一ノ倉理, トルク重量比を考慮した電気バス用インホイール SR モータの最適極数の決定と試作機の基礎特性, 日本磁気学会誌, 査読有, 36 巻, 2012 年, 258-262
- ② 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 実機試験によるパーメンダ応用 SR モータの特性評価, 電気学会論文誌 D, 査読有, 132 巻, 2012 年, 458-463
- ③ 河津雄太良, 佐藤宏樹, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 大型トレーラの燃費改善を目的としたインホイール SR モータ, 日本磁気学会誌, 査読有, 35 巻, 2011 年, 118-122
- ④ 小野友己, 中村健二, 一ノ倉理, アキシナルギャップ型 SR モータの構成に関する基礎的検討, 日本磁気学会誌, 査読有, 35 巻 2011 年, 106-111

[学会発表] (計 35 件)

- ① 小笠原隆泰, 後藤博樹, 一ノ倉理, 駆動回路集積型インホイール SR モータの検討, 電気学会全国大会, 2013 年 3 月 22 日, 名古屋大学
- ② 後藤博樹, 柴本亨, 中村健二, 一ノ倉理, アキシナルギャップ型 SR モータを用いたインホイールダイレクトドライブ EV の開発, 電気学会全国大会, 2013 年 3 月 22 日, 名古屋大学
- ③ Takayasu Ogasawara, Hiroki Goto, Osamu Ichinokura, A Study of Rotor pole shape in Outer Rotor Type SR Motor, International Conference on the Asian Union of Magnetic Societies, 2012 年 10 月 4 日, 奈良
- ④ Toru Shibamoto, Hiroki Goto, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura, A Prototype Design of Axial-gap Switched Reluctance Motor for In-Wheel Direct-Drive EV, International Conference on the Asian Union of Magnetic Societies, 2012 年 10 月 4 日, 奈良
- ⑤ 小林身早, 後藤博樹, 一ノ倉理, 巻線抵抗を考慮した磁束推定に基づく SR モータのモデル予測制御, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田大学
- ⑥ 梶沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, 相互インダクタンスを考慮した SR モータのリアルタイムシミュレーション, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田大学
- ⑦ 柴本亨, 後藤博樹, 中村健二, 一ノ倉理,

電気自動車用アキシナルギャップ SR モータの試作検討, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田大学

- ⑧ 小笠原隆泰, 後藤博樹, 一ノ倉理, アウターロータ型 SR モータの回転子形状に関する検討, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田大学
- ⑨ Toru Shibamoto, Hiroki Goto, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura, A Design of Axial-gap Switched Reluctance Motor for In-wheel Direct-Drive EV, The 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM2012), 2012 年 9 月 4 日, Marseille(フランス)
- ⑩ 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 永久磁石と補助巻線を有する SR モータに関する基礎的検討, 電気学会マグネティックス研究会, 2012 年 3 月 29 日, 仙台
- ⑪ 柴本亨, 後藤博樹, 中村健二, 一ノ倉理, インホイール型アキシナルギャップ SR モータの開発, 電気学会マグネティックス研究会, 2012 年 3 月 29 日, 仙台
- ⑫ 佐藤宏樹, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気バス用大型インホイール SR モータの開発, 電気学会回転機研究会, 2011 年 10 月 26 日, 長崎
- ⑬ 梶沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, SR モータ電気バスの制御を含めた走行シミュレーション, 電気学会マグネティックス研究会, 2011 年 10 月 25 日, 京都
- ⑭ 梶沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, 磁束推定に基づく SR モータのモデル予測制御, スピニクス特別研究会, 2011 年 10 月 17 日, 郡山
- ⑮ 柴本亨, 中村健二, 一ノ倉理, 小型 EV 用ダブルロータ型アキシナルギャップ SR モータの基礎特性, スピニクス特別研究会, 2011 年 10 月 17 日, 郡山
- ⑯ 梶沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, Realtime-Workshop を用いた SR モータ電気バスの長時間走行解析, 日本磁気学会, 2011 年 9 月 29 日, 新潟
- ⑰ 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 固定子ヨークに永久磁石と巻線を有する SR モータ, 日本磁気学会, 2011 年 9 月 29 日, 新潟
- ⑱ 佐藤宏樹, 河津雄太良, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気バス用インホイール SR モータの開発, 日本磁気学会, 2011 年 9 月 29 日, 新潟
- ⑲ Yu Hasegawa, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura, A Novel Switched Reluctance Machine with Windings and Permanent Magnets in the Stator Yoke, 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), 2011 年 9 月 1 日, バーミンガム

- (イギリス)
- ⑳ 梶沢涼太, 後藤博樹, 一ノ倉理, インホイール SR モータを搭載した電気バスの走行特性に関する検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 多賀城
 - ㉑ 佐藤宏樹, 後藤博樹, 一ノ倉理, 大型車両用インホイール SR モータの特性, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 多賀城
 - ㉒ 柴本亨, 中村健二, 一ノ倉理, ダブルロータ型アキシヤルギャップ SR モータの基礎特性, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 多賀城
 - ㉓ 柴本亨, 中村健二, 一ノ倉理, ダブルロータ型アキシヤルギャップ SR モータの基礎特性, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 多賀城
 - ㉔ 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 固定子ヨークに永久磁石と巻線を有する SR モータの特性, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 多賀城
 - ㉕ 小林身早, 後藤博樹, 一ノ倉理, SR モータの予測制御に関する検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 多賀城
 - ㉖ Yu Hasegawa, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura, A Novel Switched Reluctance Machine with Stator Yoke Windings and Permanent Magnets, Intermag 2011, 2011年4月26日, 台北(台湾)
 - ㉗ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, アウターロータ型 SR モータの固定子極長に関する検討, 電気学会マグネティックス研究会, 2010年11月25日, 秋田
 - ㉘ 小野友己, 中村健二, 一ノ倉理, 電気自動車用アキシヤルギャップ型 SR モータの構成に関する検討, 日本磁気学会スピニクス特別研究会, 2010年10月29日, 日立
 - ㉙ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気バス用 SR モータの制御システムの検討, 電気学会回転機研究会, 2010年10月20日, 北見
 - ㉚ 中村健二, 山内崇弘, 後藤博樹, 一ノ倉理, 磁気回路法に基づく 4/2SR モータの解析, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2010年9月14日, 沖縄
 - ㉛ Fuat Kucuk, Hiroki Goto, Hai Jiao Guo, Osamu Ichinokura, Fourier Series based Characterization of Switched Reluctance Motor using Runtime Data, The 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM2010), 2010年9月7日, ローマ(イタリア)
 - ㉜ 河津雄太良, 佐藤宏樹, 矢倉洋史, 後藤

博樹, 一ノ倉理, 大型トレーラの燃費改善を目的としたインホイール SR モータの検討, 日本磁気学会, 2010年9月5日, 筑波

- ㉝ 小野友己, 中村健二, 一ノ倉理, アキシヤルギャップ型 SR モータの構成に関する検討, 日本磁気学会, 2010年9月5日, 筑波
- ㉞ 河津雄太良, 後藤博樹, 一ノ倉理, 相互インダクタンスを考慮した多極 SR モータのシミュレーションモデル, 電気関係学会東北支部連合大会, 2010年8月26日, 八戸
- ㉟ 佐藤宏樹, 河津雄太良, 矢倉洋史, 後藤博樹, 一ノ倉理, インホイール SR モータを用いた大型トレーラの燃費改善の検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2010年8月26日, 八戸
- ㊱ 小野友己, 中村健二, 一ノ倉理, ラジアルおよびアキシヤルギャップ型 SR モータの特性比較, 電気関係学会東北支部連合大会, 2010年8月26日, 八戸

6. 研究組織

(1) 研究代表者

一ノ倉 理 (ICHINOKURA OSAMU)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20134017

(2) 研究分担者

中村 健二 (NAKAMURA KENJI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70323061

後藤 博樹 (GOTO HIROKI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 90374959