

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

「大容量非接触式マグネットクラッチを搭載した
ECOセーフティハイブリッド鉄道車両の開発」

研究開発成果等報告書

2019年 5月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

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
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、協力者）	2
1-3	成果概要	2
1-4	当該研究開発の連絡窓口	2

第 2 章 本論

2-1	円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機的设计・部品製作	3
2-2	円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機の組立方法の開発	6
2-3	円筒型マグネットクラッチの評価	6
2-4	エンドユーザ評価	10
2-5	マグネットクラッチ嵌合条件の確立	11
2-6	研究全体の統括、プロジェクトの運営管理	13

第 3 章 全体総括

3-1	補助事業の成果及びその効果	13
3-2	補助事業の成果に係る事業化展開について	14

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

特殊車両は、国民の足と称される旅客車両（客車）の運行に先立ち、線路の安全確保のために活動し、客車の安全運行を下支えしている。特殊車両が線路上で走行不能に陥ると客車の運行に差支えを生じ、国民の足を奪うという重大な影響を及ぼす事になる。そのため、エンジンにトラブルが発生しても自走して退避できるように駆動系を 2 系統にした安全性能の高い特殊車両のニーズは、各鉄道会社に存在する。

これらを開発動機として、平成 22（2010）年からハイブリッドシステムの研究開発に取り組んできた。また、特殊車両の不具合のほとんどが、クラッチ接触部の摩擦による摩耗に起因している事を把握した。様々な観点から検討した結果、永久磁石を使用した非接触型の大型クラッチの開発にも取り組んだ。

(2) 研究目標

1) 小型、軽量化の実現およびコスト安のボンドマグネットを使用した円筒型マグネットクラッチの設計を完了させる。また、マグネットクラッチを収納する減速機の設計を行い、減速機ケース及び走行試験用駆動装置の組立と走行試験を実施する。

2) マグネットクラッチのマグネットの配置は、相反する磁極を隣に配置するので容易に組み込むためマグネットの組立順序を決定する。

3) 導入した「マグネットクラッチ制御・評価装置」で、円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機の評価、測定を実施する。

4) マグネットクラッチの動力側と負荷側を完全嵌合させる制御技術確立する。

1－2 研究体制（研究組織・管理体制、協力者）

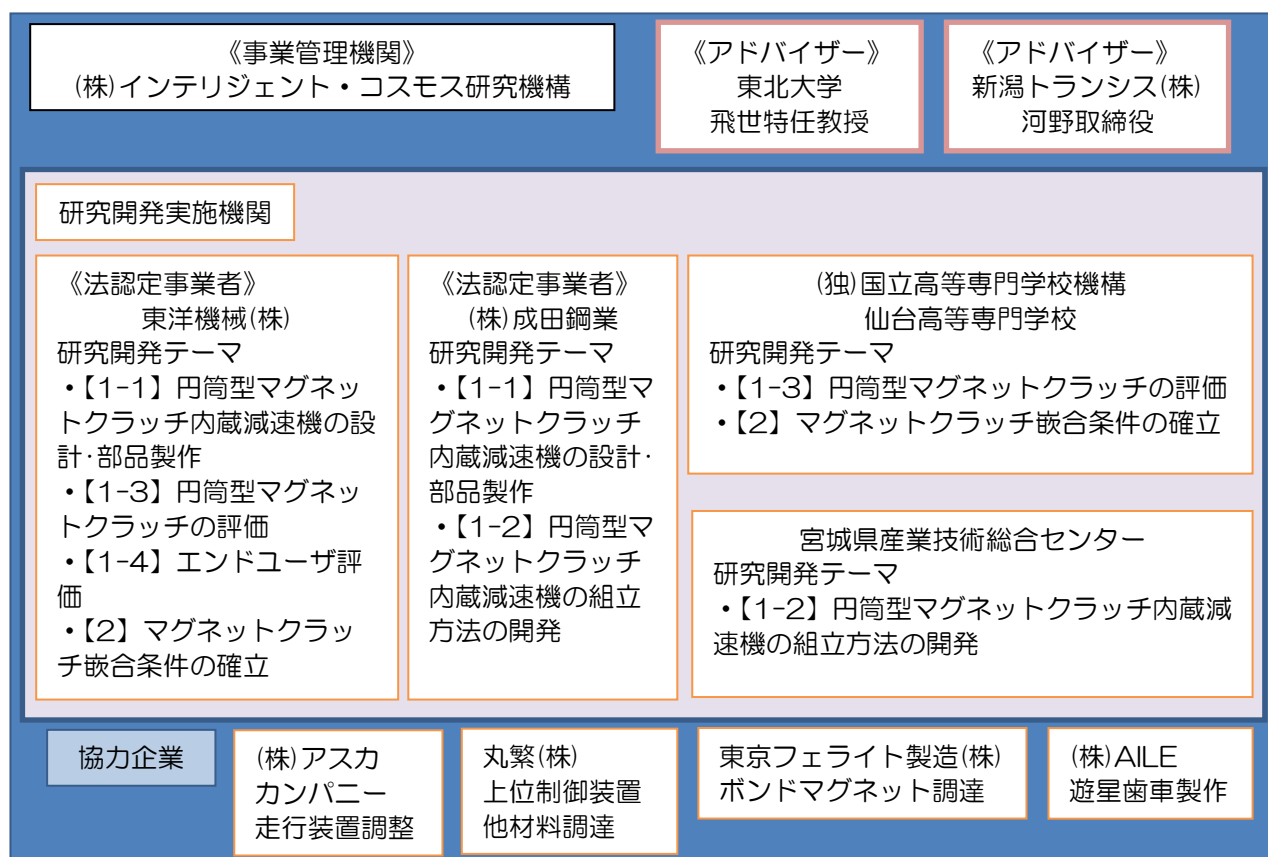


図 1-2-1. 研究体制

1－3 成果概要

円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機の耐久試験において、クラッチに使用しているマグネットが熱で溶解するというトラブルが発生したため、マグネット近傍に熱対策を行ったものを設計・製作し、車両に搭載して実際に走行させることに成功した。熱対策後も車両の走行に必要な伝達トルクを有していることが確認できた。しかしながら、クラッチの開閉操作を連続で行うとマグネットの温度上昇が発生することが確認され、クラッチ操作の頻度によってはボンドマグネットの耐熱温度をオーバーする可能性があることがわかった。さらなるマグネットの熱対策の要否についての検証が必要である。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

所属・氏名：東洋機械株式会社 代表取締役社長 佐々木拓

電話番号：022-222-9831 FAX 番号：022-222-9832

E-mail：sasaki_h@toyo-kikai.co.jp

第2章 本論

2-1 円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機的设计・部品製作

本事業で整備したハイブリッド車両の外観を図2-1-1に示す。グレー色は東洋機械保有設備、ホワイト色は本事業で整備した部分を表す。

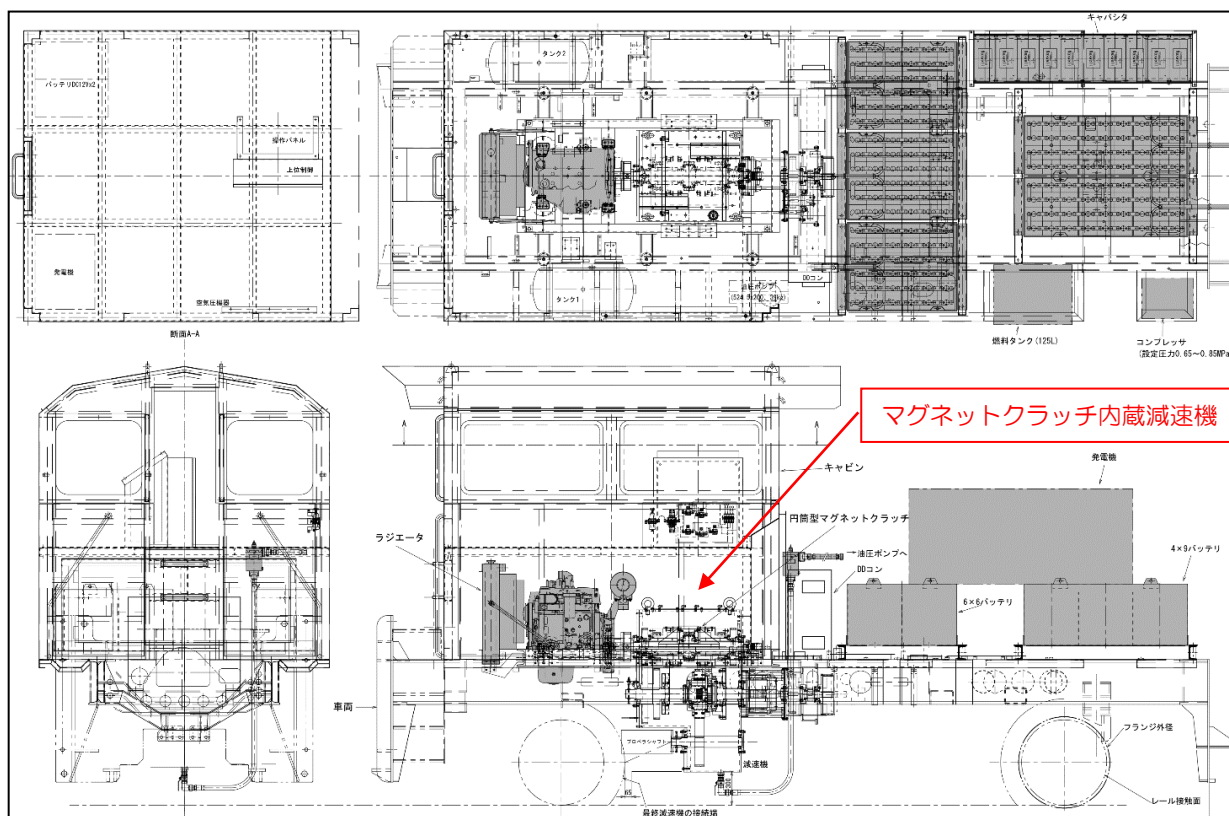


図 2-1-1. ハイブリッド車両外観

マグネットクラッチ内蔵減速機の耐久試験において、以下の問題が発生した。

①マグネットクラッチのボンドマグネットが溶解した。

マグネットクラッチは、渦電流により発生する引きずりトルクで半クラッチ状態を実現している。渦電流が発生すると発熱を伴う。クラッチ嵌合時にボンドマグネットが溶解した原因は、マグネットクラッチ嵌合時に発生する渦電流による発熱が大きく、ボンドマグネットが融点以上の温度になってしまったためと考えられる。

②歯車に使用している円筒ころ軸受が破損した。

歯車に使用している円筒ころ軸受が破損した。はすば歯車のため、回転により円筒ころ軸受にスラスト荷重がかかったのが破損原因と考えられる。

上記①、②の不具合対策も含め、車載用マグネットクラッチ内蔵減速機は以下の方針で設計・製作した。

(1) 渦電流で発熱するツースの冷却を強化する。

マグネットクラッチを投入する際、マグネットとツースに回転数差があるとツース側に渦電流が発生し、これにより半クラッチ状態となるが、同時に熱が発生する。熱が発生するのはツース側であるが、この熱が、対向するマグネットにも移動して温度を上昇させ、磁力を低下させたり溶解させたりする可能性がある。これを避けるために、ツースに圧縮空気を吹き付けて冷却する。

(2) 渦電流による熱が発生するツース表面に断熱材を塗布する。

マグネットとツースの回転数差によりツース表面に発生する渦電流による熱がマグネット側に移動して磁力を低下させたり溶解させたりするのを防ぐために、ツース表面に断熱材(塗料)を塗布する。

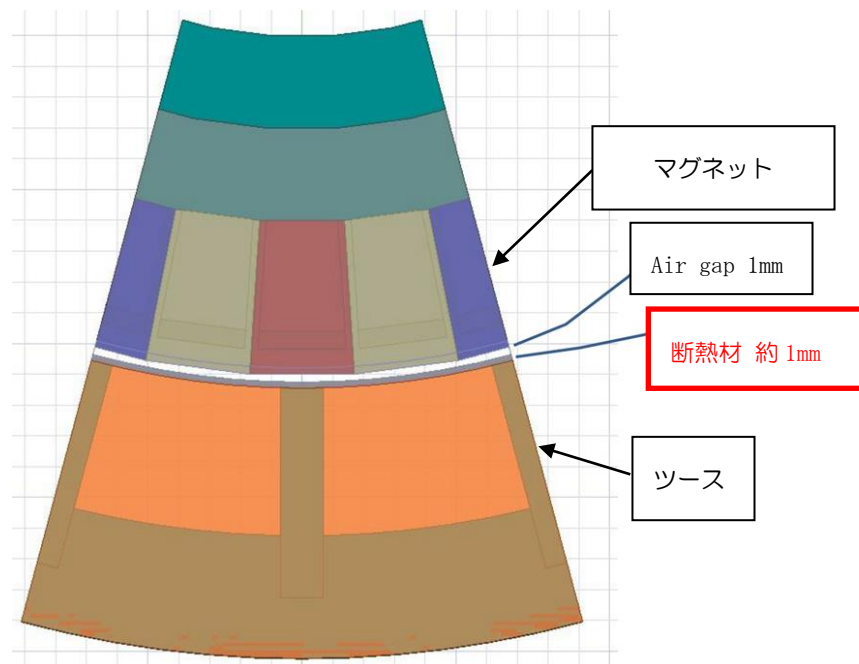


図 2-1-2. 断熱材塗布説明図

(3) 減速機ケース形状および取付位置変更

マグネットクラッチ内蔵減速機は、エンジンと直結して車両に搭載する。当初計画では前輪側に搭載する予定だったが、減速機ケースの形状を設計変更してもブレーキリンクが支障して、車輪とマグネットクラッチ内蔵減速機を接続するために必要なスペースを確保できなかった。そこで、スペースを確保できる後輪側に搭載することとした。

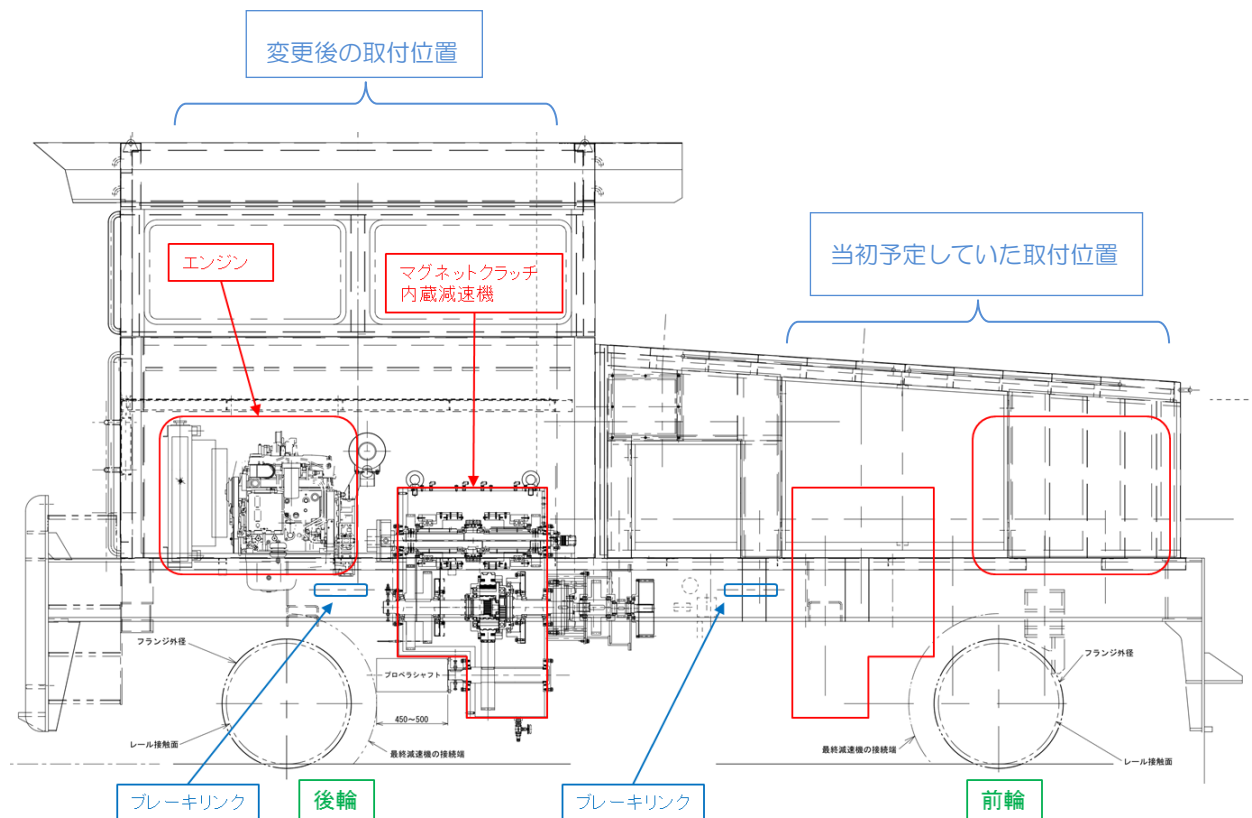


図 2-1-3. 減速機・エンジン取付位置

(4) 破損した軸受の再選定

歯車の複列円筒ころ軸受を、スラスト荷重を受けることができる調心ころ軸受に変更する。

(5) ツースユニットとエアシリンダの連結方法変更

ツースユニットは、エアシリンダを伸縮させてインボリュートスプライン上を移動させる。エアシリンダとツースユニットは、1 つ穴にピンを通して連結していたが、エアシリンダでツースユニットを動かすと、ツースユニットがピンを中心に回転して傾き、インボリュートスプラインが引っかかってツースユニットが中間位置で止まってしまうことがあった。

そこで、エアシリンダとツースユニットを、2 つ穴にピンを通して連結する構造に変更する。2 点で固定することによりツースユニットが傾きにくなり、インボリュートスプラインが引っかかりにくくなる。

なお、当初の設計変更方針にあった「マグネットとツースを完全嵌合させるときは、マグネットとツースの回転数差を小さくする制御を行う。」は、この制御を行わなくてもエンジンが停止することなく完全嵌合することが確認できたため、実施しないこととした。また、台湾製のモータは、採用検討に必要な仕様開示は購入手配後でないとできないとのことだっ

たため、採用を断念した。

2-2 円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機の組立方法の開発

(1) マグネット組立

電磁界シミュレーションに基づいて決定した組立手順に従って実施した耐久試験用マグネットの組立では、以下の問題点が発生した。

マグネットを取り付けるための48分割された中蓋は、1個ずつ2本のねじでバックヨークに取り付けていく。最後は隣の中蓋と干渉して取り付けることができなかったため、中蓋を加工して取り付けた。原因は、バックヨークと中蓋を異なる外注先で加工したためであり、これを同一の外注先で加工するようにしたところ、中蓋を加工することなく安全かつ効率的に取り付けることができ、組立期間を短縮できた。

(2) 減速機組立

耐久試験用減速機の組立時に、ツースをツース取付金具に加工されたスリットに圧入するが、スリットの幅にばらつきがあり、ツースがきつくて入れにくいところと、ツースがゆるくて自重で抜けてくるところがあったため、ツースに抜け止めのためのポンチを打たなければならないという問題が発生した。

スリット幅のばらつきの原因ははっきりしないが、ツース取付金具とツースを異なる外注先で加工していたため、こちらも同一の外注先での加工に変更したところ、ツースが極端にきついところやゆるくて抜けてくるところはなくなった。

耐久試験用減速機の組立は、試行錯誤で行った上に上記問題も発生したため時間を要したが、車載用減速機の組立は耐久試験用で得られたノウハウを活用するとともに、事前の準備を徹底したため、安全かつ効率的に組立作業を行うことができ、組立期間を短縮することができた。

2-3 円筒型マグネットクラッチの評価

(株)成田鋼業で製作された円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機2台を使用して、下記の2つの方法で東洋機械株式会社が独立行政法人国立高等専門学校機構仙台高等専門学校と連携して評価を実施した。

(i) 円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機単体での耐久性能評価

マグネットクラッチ内蔵減速機を図 2-3-1 のように動力計（DM：ダイナモメータ）にセットし、マグネットクラッチを回転させる動力源として東洋機械が保有する 75kW IPM モータ（駆動モータ）を使用する。このモータはディーゼルエンジンと比較して低トルクであるため、本事業で購入する試験用減速機により減速し、必要なトルクを確保する。さらに、マグネットクラッチ ON-OFF 操作用の油圧回路も接続する。マグネットクラッチの ON-OFF 操作を 1,000 回実施することにより以下の項目について測定を行い、伝達トルクの推移を測定する。耐久試験構成を図 2-3-2 に示す。

- (1) 評価方法・測定方法の検討、測定機器調達
- (2) 静特性トルク：10,000 回 ON-OFF 後に初期トルクの 80%以上を有すること。
- (3) 動特性トルク：10,000 回 ON-OFF 後に初期トルクの 80%以上を有すること。
- (4) 冷却油温度：オイルシール材に影響を与えない 80℃以下であること。
- (5) 振動： JIS B 1754「歯車装置の受入検査- 第 2 部：歯車装置の機械振動の測定方法及び振動等級の決定」に沿って円筒型マグネットクラッチ操作時の振動データを採取し、変位振幅および速度振幅を求める。



図 2-3-1. マグネットクラッチ耐久試験（東洋機械(株)名取工場内 試作評価ベンチ）

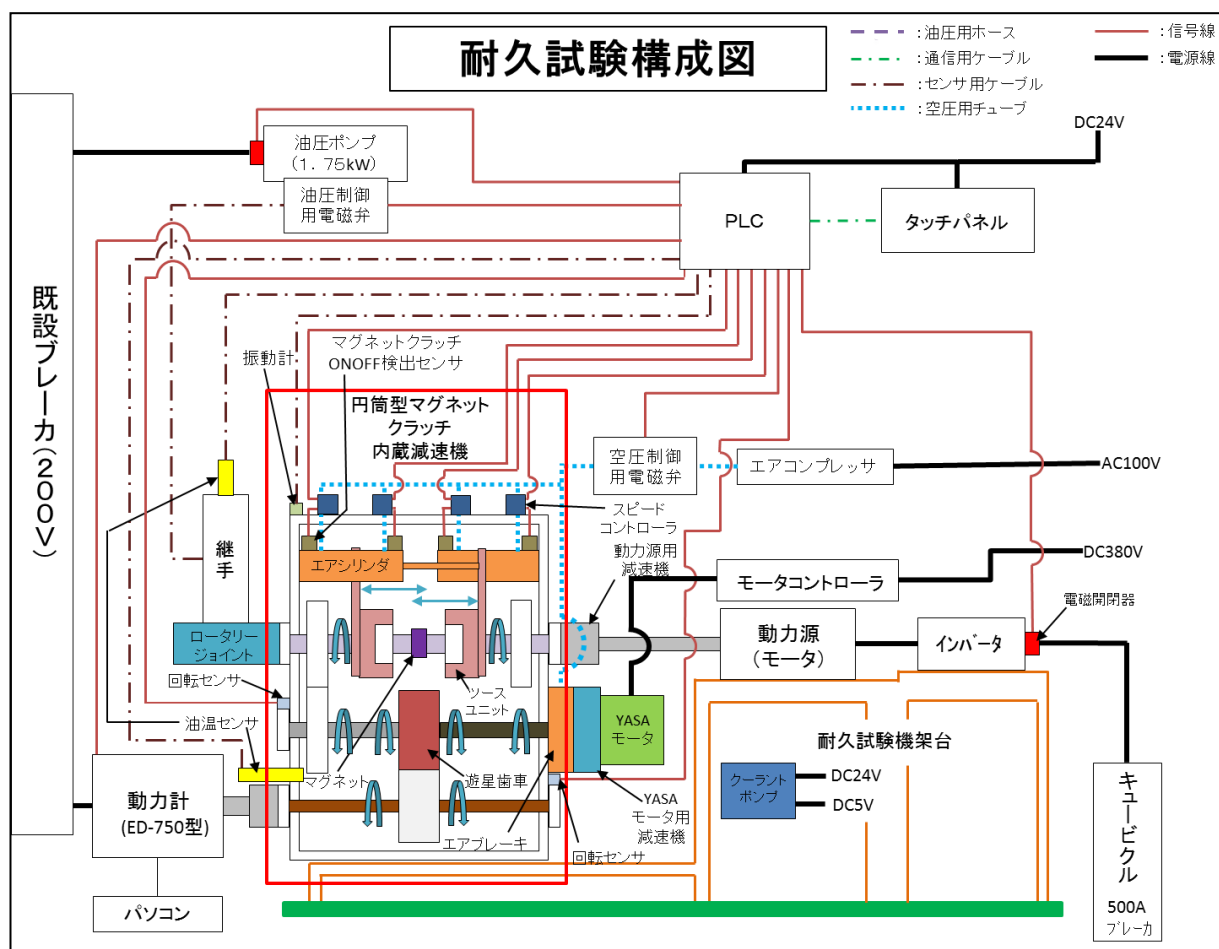


図 2-3-2. マグネットクラッチ耐久試験構成図

単体の初期性能データは次のとおり。

A. 静特性

マグネットクラッチ完全嵌合状態で駆動モータを各回転数で回転させる。徐々に動力計のトルク設定値を大きくしていくと嵌合が外れる。このときのトルクが伝達限界トルク、すなわち静特性トルクである。測定の結果、静特性トルクはおよそ 450 [Nm]であった。

B. 動特性

出力軸が回転しないように動力計のトルク設定値を 1,000[Nm]程度にセットしてマグネットクラッチを投入操作し、DM トルクを徐々に減少させてマグネットクラッチが完全嵌合するまでのトルクを測定する。このときの伝達トルクが動特性トルクである。測定の結果、動特性トルクの最大値は回転数差 800[rpm]でおよそ 400[Nm]であった。

C. 特性測定結果まとめ

試験結果から、マグネットクラッチの静特性トルク（噛み合い限界トルク）は 450[Nm] 程度、動特性トルク（引きずりトルク）は回転数差 800[rpm]で 400[Nm]程度であった。円筒型マグネットクラッチの設計は、電磁界シミュレーションを使って実施し、静特性 591[Nm]、動特性 521[Nm]の性能を有する構造および形状とした。

しかし、試作機での実測は静特性 450[Nm]、動特性 400[Nm]であり、いずれも設計に対して 20%強低い結果となった。実機の形状を検証したが問題は無かったため、差の主因は電磁界シミュレーションによる予測精度の問題であると思われる。

今後、この原因を探るとともに差を埋めていく検討が必要であるが、今回の結果（シミュレーションよりも実機が 20%低くなる）はそれだけで有用な知見であり、今後の設計精度向上に活用していく予定である。

また、動特性トルク測定時、回転数差 1,300 [rpm] で 30 秒程度の運転で、ボンドマグネットが溶けてしまう結果となった。電磁界シミュレーション結果によると、1,300 [rpm] 程度の回転数差のときのロスが 50[kW] 超、回転数差 800[rpm] でもロスが 50[kW] 弱であり、かなりの熱量である。以前に試作・試験を行った円盤型マグネットクラッチは、マグネットおよびツースが冷却オイルに浸してあったことと、ツース側のオイルが循環しやすい構造であったため、顕著な問題にならなかったと考えられる。今回の円筒型マグネットクラッチは、歯車が冷却オイルをはねあげてマグネットおよびツースにかけており、浸していないことに加え、ツース側が凹形状であるため熱がこもりやすい構成になっていることも悪い方向に働いた可能性がある。冷却を強化する必要があると考え、車載用のマグネットクラッチには以下の 2 つの熱対策を施す。

a. ツース部分に圧縮空気を吹付ける。

b. ツース表面に断熱塗料を塗布し、ツース側の熱がマグネット側に移動しないようにする。

（ii）円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機を車載しての社内での走行性能評価

円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機を車載し、車両走行時の ON-OFF 動作性能を確認した。

(1) 車両走行開始時のマグネットクラッチ ON 操作性能を確認し、異常は無かった。

(2) 車両走行中のマグネットクラッチ ON-OFF 操作性能確認し、異常は無かった。

(3) 車両走行中の冷却油温度測定：試走線を 70 分間連続走行(50 往復)後の冷却油温度は

41.0℃（気温 19.8℃）であり、オイルシール性能に影響を与えない 80℃以下であった。

しかし、さらに繰り返すことにより温度がどのように変化していくのかを確認する必要がある。ボンドマグネットが溶解した耐久試験のときの負荷条件は、走行試験の時の負荷よりも相当に大きかったと考えられる。上り勾配での走行や重量物を牽引しての走行に必要な条件を調査し、検証を行う。



図 2-3-3. 東洋機械株式会社名取工場内 試走線、走行試験用特殊車両

2-4 エンドユーザ評価

マグネットクラッチ内蔵減速機を車載しての走行性能評価時、エンドユーザである新潟トランス株式会社にて試験状況をご確認いただき、使い勝手等以下のご指摘およびアドバイスをいただいた。走行は、東洋機械株式会社名取工場内の試走線で実施した。



図 2-4-1. 走行性能評価試験状況

ご指摘およびアドバイス

- (1) マグネットクラッチの ON-OFF 切換音を騒音計で測定することはできなかった。
(エンジン音のほうが大きいため)
- (2) マグネットクラッチの ON-OFF はスムーズに動いている。
- (3) この車両は電気で動かす部分が多いため、制御が非常に重要になる。
- (4) 機械部品を少なくすることがメンテナンスフリーにつながっていると感じた。
- (5) モータやエンジン等、制御すべき装置が多いので、オペレータが運転しやすくするための制御の検討は今後の研究テーマになる。
- (6) お客様は、メンテナンス費用がどのくらいかかるのかを重視している。
- (7) 最高速度 50[km/h]で走行できるということで期待している。

おおむね良好な評価をいただいたと考える。今回の評価結果を今後の設計・製作・評価に反映させ、マグネットクラッチ内蔵減速機の完成度を高めていきたい。

2-5 マグネットクラッチ嵌合条件の確立

動力伝達系において、動力側回転、負荷側停止の状態でもマグネットクラッチ OFF 状態から ON 操作をして動力側と負荷側を近づけていき、距離が小さくなると負荷側が引きずられ、つれ回りを始める。両者の距離が小さくなるにつれて回転数差は小さくなるが、負荷側の負荷が大きいと、動力側と負荷側が完全嵌合位置となっても両者の回転数差がゼロにならない。つれ回り状態が続き、回転数差ゼロの完全嵌合状態にならない。回転数差がゼロにならない状態では、マグネットクラッチの動力側と負荷側が脱調を起こしており、これが振動源とな

るとともにエネルギーロスも発生している。この状態から完全嵌合状態とするには、いったん動力側の回転数を小さくして負荷側の回転数に同期させる必要がある。動力側と負荷側の回転数が同期した瞬間に完全嵌合状態となる。

これまでのシミュレーションデータから、動力側と負荷側の回転数差 0～800rpm 程度では、回転数に比例してつれ回りトルクとエネルギーロスが大きくなるが、これ以上の回転数差では、エネルギーロスは回転数に比例して大きくなるが、つれ回りトルクはほぼ一定の値となることがわかっている。(図 2-5-1、図 2-5-2)

したがって、車両停止状態から定常運転状態に至るまでに、エネルギーロスを小さく制御しつつ伝達トルクを大きくすることが、温度上昇の観点からもエネルギー有効利用の観点からも必要であり、そのためには、” [つれ回りトルク/エネルギーロス] の値が大きい領域を使うように回転数を制御する” ことが重要となる。具体的には、動力側と負荷側の回転数差を 800rpm 程度に制御してつれ回りをさせ、負荷側が目標の回転数になった時に動力側回転数を負荷側回転数に合わせて完全嵌合に至らせる。完全嵌合までの時間 60[s] 以内、温度上昇 10[K] 以下を目標とした。

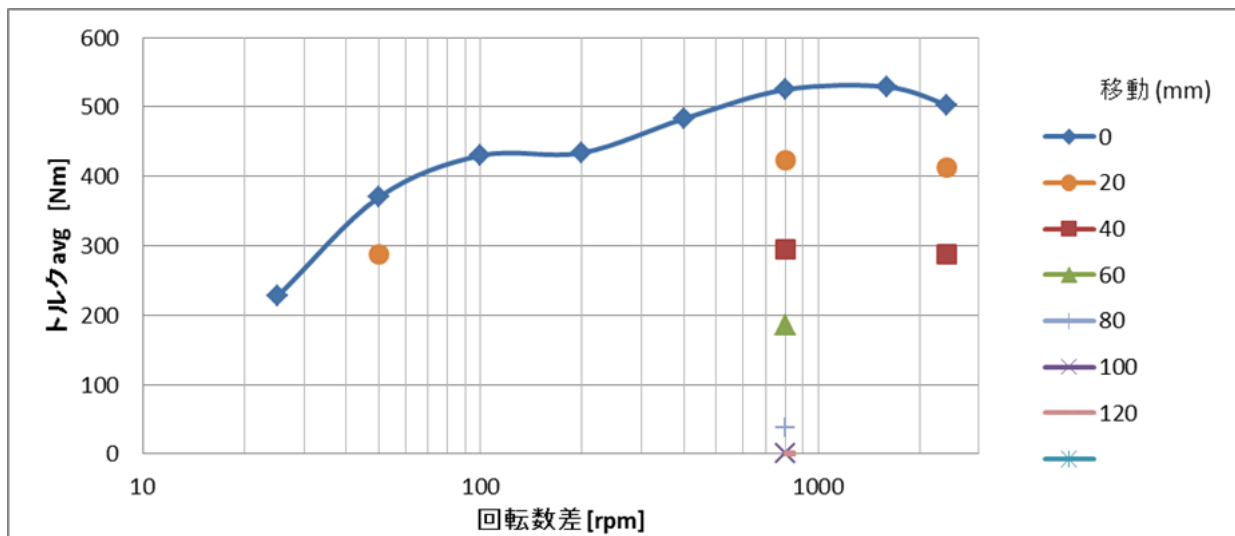


図 2-5-1. 円筒型マグネットクラッチシミュレーション結果 1 (回転数差とトルク)

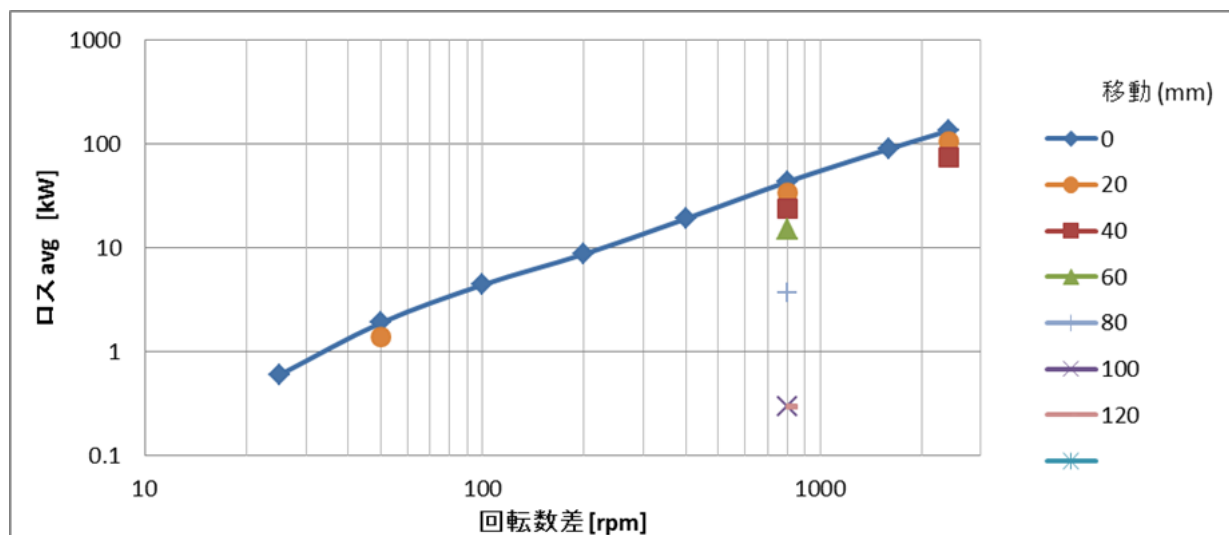


図 2-5-2. 円筒型マグネットクラッチシミュレーション結果 2（回転数差とロス）

走行試験において、クラッチの投入時間およびマグネットの温度上昇を測定した結果は以下の通り。

前進：投入時間は 3.8 秒、引き外し時間は 1.2 秒、マグネット表面の温度上昇は最大 2.7K。

後進：投入時間は 3.5 秒、引き外し時間は 1.0 秒、マグネット表面の温度上昇は最大 2.7K。

2-6 研究全体の統括、プロジェクトの運営管理

間接補助機関の研究テーマの管理運営を進めてきた。

研究推進会議を 3 回開催し、図 1-2-1 の研究体制の中のアドバイザーと研究開発実施機関による研究開発の進め方などについての議論、進捗状況の把握、計画見直し等の検討を実施した。PL 所属機関である東洋機械(株)からは適宜進捗状況などのヒアリングを実施した。

第3章 全体総括

3-1 補助事業の成果及びその効果

円筒型マグネットクラッチ内蔵減速機の耐久試験において、クラッチに使用しているマグネットが熱で溶解するというトラブルが発生したため、マグネット近傍に熱対策を行ったものを設計・製作し、車両に搭載して実際に走行させることに成功し、熱対策後も車両の走行に必要な伝達トルクを有していることが確認できた。しかしながら、クラッチの開閉操作を連続で行うとマグネットの温度上昇が発生することが確認され、クラッチ操作の頻度によってはボンドマグネットの耐熱温度をオーバーする可能性があることもわかった。今後、熱対

策の要否について検証を行い、必要な対策を立案する。

マグネットクラッチは、従来のクラッチの概念を一新する独創的な成果であり、これを内蔵した減速機を含むセーフティハイブリッドシステムは、大型産業重機及び船舶等大容量駆動伝達を必要とするあらゆる大型産業機械（数百トンクラス）に適用可能な技術となりうる。セーフティハイブリッド車両は、V2G（Vehicle to Grid）の機能も併せ持ち、有事の際には「線路上を移動する発電所」として、被災地における現地対策室等の電源供給が可能である。本開発は、特殊車両のハイブリッド化であるが、第三セクター方式の鉄道事業者等で使用されているディーゼル客車も架線の無い線路において運用されている車両であり、本開発の応用が可能である。

3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

摩擦による摩耗の無いマグネットクラッチ内蔵減速機を含めたセーフティハイブリッドシステムを特殊車両へ搭載する事により、運行停止トラブルが飛躍的に改善され、社会的使命である乗客の安全に寄与する効果が大きく、地域経済の活性化にも寄与できる。また、マグネットクラッチ内蔵減速機を含むセーフティハイブリッドシステムは、大型産業重機や船舶等大容量の動力伝達を必要とするあらゆる大型産業機械にも適用可能な技術であり、日本国内に限らず海外へも展開可能である。海外展開については、新輸出大国コンソーシアムを利用して専門家のアドバイスをいただいた。

今後は、2019年度にネオジムマグネットを使用したマグネットクラッチの設計・製作および性能確認、2020年度上期にコストダウンの検討および性能確認、2020年度下期で生産体制および品質管理体制の整備を行い、同時に事業化を目指す。