

高効率・軽量型永久磁石式リターダの開発

Development of High Efficiency and Lightweight New Model of Permanent Magnetic Retarder

野上 裕*
Hiroshi NOGAMI

田坂 方宏
Masahiro TASAKA

楞川 祥太郎
Shotaro KADOKAWA

藤田 卓也
Takuya FUJITA

今西 憲治
Kenji IMANISHI

野口 泰隆
Yasutaka NOGUCHI

富士本 博紀
Hiroki FUJIMOTO

宮原 光雄
Mitsuo MIYAHARA

抄 録

トラックやバス用の補助ブレーキである永久磁石式リターダ (PMR) の新機種を開発した。この新機種では、磁気回路の高効率化によって高い制動力を最少の磁石重量で発揮するとともに、装置の徹底的な簡易構造化を図った。その結果、永久磁石に含まれる希少原料であるネオジムの使用量を大幅に削減し、省資源化による環境負荷低減を達成した。また、小型・軽量化と高制動力化を両立し、さらに部品のモジュール設計によって機種数と選択肢を拡大することで、車両への搭載性を大きく改善した。

Abstract

A new model has been developed for permanent magnetic retarder (PMR), which is the auxiliary brakes for trucks and buses. The new model has high braking torque in minimum magnet weight by optimization of magnetic circuit, such as increase in the number of poles of magnets. The structure has been thoroughly simplified by developing a new switching device. As a result, we succeeded in drastically reducing the magnet weight per unit. By reducing the amount of Neodymium, which is rare material contained in the permanent magnets, both of economic and environmental merits were obtained. The new model has many advantages, such as compact size, lightweight, and high braking force. Furthermore, number of models was expanded and model selection became easy by modular design of components. These improvements made it possible to install the PMR on various types of commercial vehicles.

1. 緒 言

トラックやバスなどの中大型商用車用の補助ブレーキとして、リターダが使用されている。リターダには、油の粘性抵抗を利用した流体式や電磁誘導を利用した電磁石式、永久磁石式があるが、流体式では作動油の、電磁石式では大電流の供給が必要であり、装置全体の重量、寸法が大きいという問題がある。これに対して、日本製鉄(株)は世界唯一のメーカーとして、1990年から図1に示す永久磁石式リターダを製造している。この装置は小型、軽量、メンテナンスフリー等の多くの利点を有しており、国内では圧倒的に多く使用されている。

永久磁石式リターダは下り坂での速度超過の抑制や車両の停止距離の短縮に加え、フットブレーキ回数の低減によるドライバーの運転負荷軽減を通じて交通安全に貢献している。また、ブレーキライニングの摩耗量や摩耗粉の飛散

も減少するため、経済性、環境の両面で改善効果が得られる。

近年、商用車の搭載重量の増加や燃費改善を目的にしたエンジンの小型化、電動化により排気ブレーキやエンジンブレーキの能力が不足する傾向にあり、制動力不足を補うために永久磁石式リターダの搭載車種をさらに拡大したいとのニーズが高まっている。日本製鉄の総合力や各種の最新技術を結集し、このニーズに応える高効率、軽量型で車両への搭載性に優れた新機種を開発した。

2. 永久磁石式リターダの作動原理と新機種の特徴

永久磁石式リターダの磁気回路を構成する主要部の構造を図2に示す。車両のプロペラシャフトに連結されて回転するローターと、車両の非回転部に固定され、内部に永久磁石が配置されたステータで構成される。永久磁石の磁界

* 鉄鋼研究所 交通産機品研究部 上席主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒660-0891

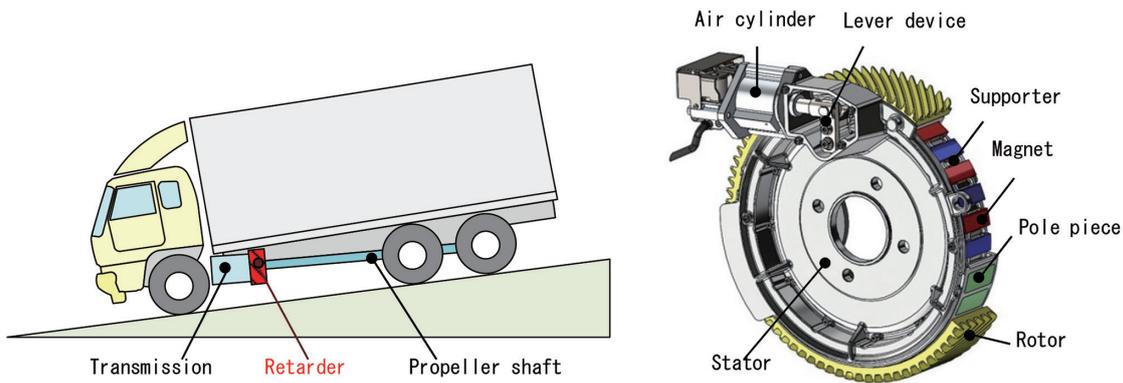


図1 永久磁石式リターダの搭載位置と構造の例
Permanent magnetic retarder (PMR)

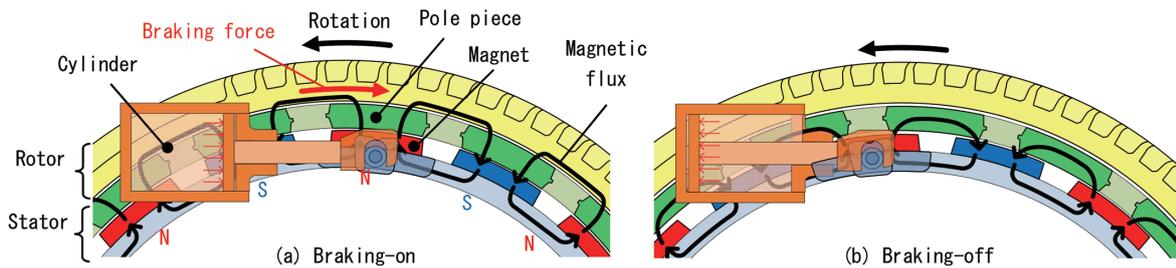


図2 永久磁石式リターダの磁気回路
Magnetic circuit of PMR

内をローターが回転すると、ローターに渦電流が発生し、電流と磁界の相互作用により回転と反対方向にローレンツ力が発生する。これがプロペラシャフトの回転を抑制する制動力となる。この時、ローターの温度は電流によるジュール熱により上昇する。

制動オン／オフの切替えは、エアシリンダを用いて永久磁石を円周方向へ往復運動させることによって行う。制動オン時には、永久磁石の磁束が強磁性体であるポールピースを通してローターに到達することで、ローターとステータは非接触でありながら制動力が発生する。また、制動オフ時には隣接する磁石とポールピースで閉回路を構成して磁束がローターに到達しないようにする。このように、円周方向に並ぶポールピースの間隔の半分だけ磁石を動かして、制動オン／オフを切り替える。

磁気回路の高効率化によって高い制動力を最少の磁石重量、装置重量で発揮するとともに、装置の徹底的な簡易構造化を図った。さらに、部品のモジュール設計によって機種数と選択肢を拡大することで、車両への搭載性を大きく改善した。次章以降で開発内容について詳細に説明する。

3. 磁気回路の最適化

3.1 多極化による磁気回路の高効率化

永久磁石式リターダでは希土類元素を含む焼結ネオジウム磁石 (Nd・Fe・B系) を使用していることから、製品の軽量化のみならず、省資源化ならびに製品の安定供給性の観

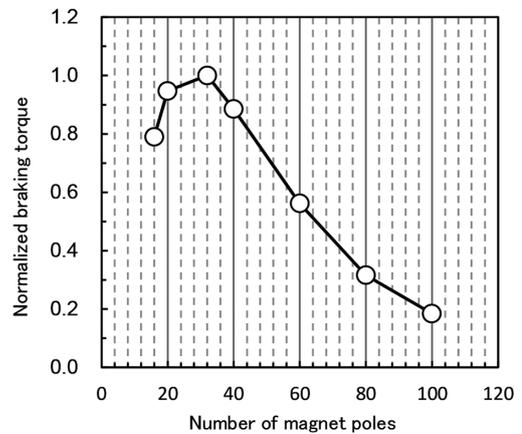


図3 磁石極数が制動トルクに及ぼす影響(磁石総重量一定)
Influence of number of magnet poles on braking torque
(under constant magnet weight)

点でも、その使用量を最少化する必要がある。そこで新機種では数値解析を用いて多極化による磁気回路の最適化を行った。本検討ではローター、ステータおよびその周辺空間を解析領域とした非線形過渡応答電磁場解析を実施し、ローターの回転運動を解析用メッシュの移動により考慮した²⁾。なお、解析ツールには商用ソフトウェア JMAG[®] を使用した。

磁石の総重量を一定とし、磁石の極数と制動トルクの関係について解析した結果を図3に示す。なお、図中の制動トルクは、最大トルク値によって規格化した無次元値である。本結果から32極で制動力は最大となり、最も制動効

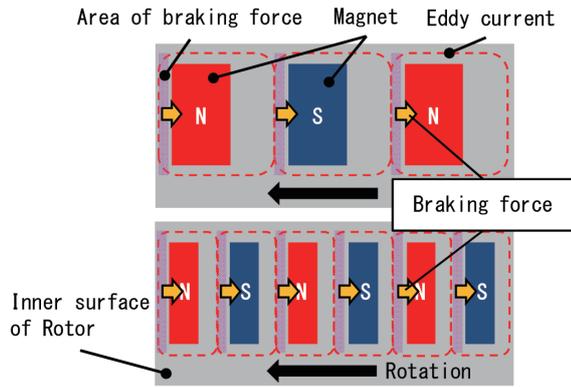


図4 極数増加による制動力増大メカニズム
Mechanism to enhance braking force by increase of number of poles

率が高いことが分かる。

磁石の極数により制動力が変化する機構を考察するため、図4にはローター内表面における渦電流と制動力発生領域を模式的に示す。極数の増大に伴い、ローター内面において渦電流が流れる閉ループの数が増加し、それに伴い制動力の発生領域の数が増加する。同時に1つの磁石が出力する磁束量は減少するため、渦電流による反磁界の影響により個々の発生領域での制動力は低下する。この2つの効果を考慮すると、32極以下では発生領域数増加の効果が大きいため極数と共に制動力が増大し、32極以上では制動力を低下させる後者の反磁界による効果が上回ったものと考えられる。

本知見を踏まえて、新機種では磁石を従来の16極から32極へと多極化し、さらに後述する新磁石固定方法の導入等により制動効率をさらに高めることで、磁石重量あたりの制動力を従来機種に対して最大で1.5倍に向上した。

3.2 制動切替え機構簡素化のための作動所要力の低減

作動所要力は制動オフからオンにあるいはその逆方向に切り替える際に、磁石を動かすために必要な力である。永久磁石式リターダではエアシリンダを用いて切替えを行うため、作動所要力を低減できれば、エアシリンダの本数を最少化し、付随するエア系統部品も不要になることから、より一層の軽量化と小型化が実現できる。

作動所要力には磁石、ポールピースの極数、形状などが影響を及ぼすため、前節で制動効率が最高となることを明らかにした32極をベースに電磁場解析による検討を行った。ここで、磁石に加工を施すと制動力が低下し加工費も必要となるため、磁石形状は単純な形状として作動所要力低減に有効なポールピース形状を開発した³⁾。

開発したポールピースの軸方向断面形状を図5に、作動所要力の解析結果を図6に示す。なおCASE-1は比較用の単純形状品であり、CASE-2が磁石対向面側の端部に切欠きを設けて磁石対向面積を削減した開発品である。また、

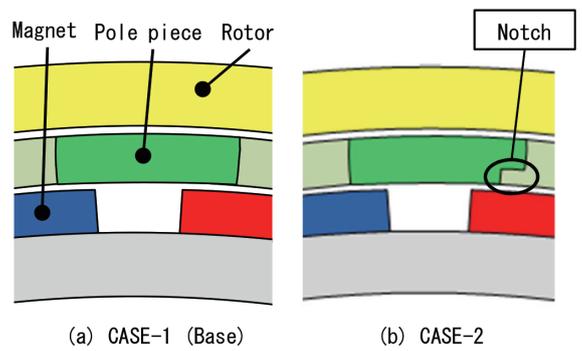


図5 ポールピース断面形状
Cross-section of pole piece

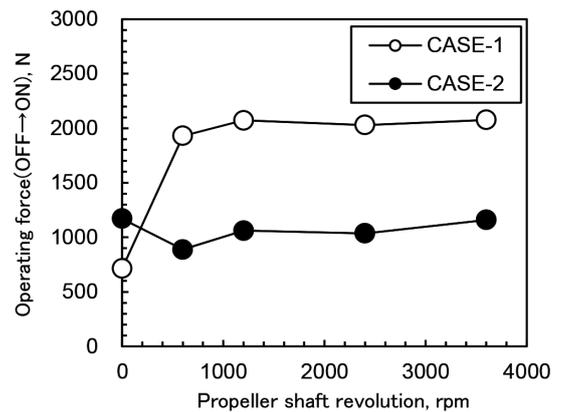


図6 制動切替え時の作動所要力
Operating force for switching

図6では制動オフからオンに切り替える際の作動所要力を示した。本結果から、開発品(CASE-2)では最大作動所要力を約50%低減できることが分かる。これは、切欠きを設けることで、磁石の外周側コーナー部がポールピースの内周側コーナー部に近づいた際の急激な磁束密度の増加を緩和し、このポールピースのコーナー部での磁気飽和による磁束の漏えいを低減できることによるものである。

以上の検討結果に基づき、新機種では開発したポールピース形状を採用し、作動所要力の大幅な低減と後述するエアシリンダ本数の最少化に成功した。

4. 多極磁気回路実現のための新磁石固定方法の開発

前章では磁石極数を16極から32極に増加することによって磁石重量あたりの制動力が最大となることを明らかにした。従来機種では図7(a)に示すように磁石の段部に金具を押し当てて支持部材であるヨークにボルトで固定していた。しかし、磁石数が倍増すると磁石間の間隔が小さくなり、ボルトのスペースを確保することが困難になった。そこで、多極磁気回路を実現するために図7(b)、写真1に示す新たな磁石固定方法を開発した。

磁石の拘束を強化しつつ軽量化を図るため、ヨークにサポータ金具をスポット溶接で接合し、その金具で磁石を固

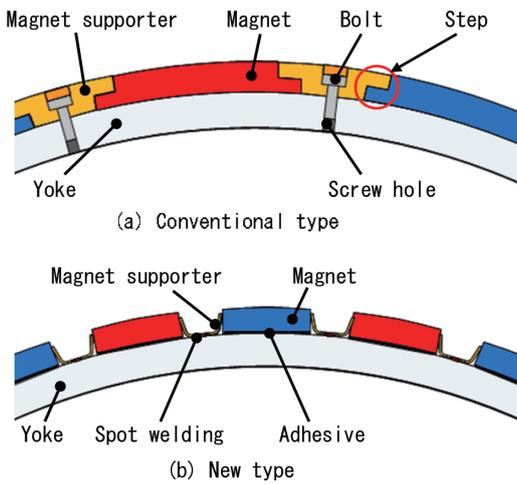


図7 磁石の固定構造
Structure to fix magnets

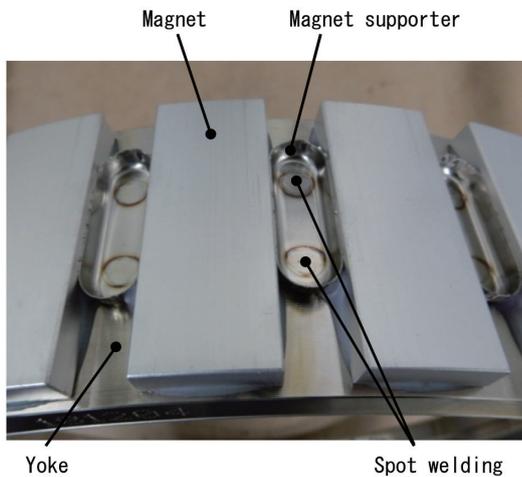


写真1 サポータ金具
Magnet supporter

定するとともに接着剤で磁石をヨークに接着している。この方式では磁石の段部加工を省略できるため、磁石とローターの距離が段部において局所的に大きくなることで生じる制動効率の低下を回避し、制動力をさらに高めることができた。さらに、この段部の省略で磁石加工費も削減できた。

接着剤については、 -30°C から 120°C まで変化する温度環境下で長期間安定した接着力を有することが必要なため、長時間の熱サイクル試験を実施して必要な接着力を維持しつつ劣化が最も小さい2液混合型アクリル系接着剤を選定した。

一方、磁石は温度変化により熱膨張、収縮するため、サポータ金具にはこの磁石の動きに弾性変形で追従し、周方向の押付力を保持する機能が必要である。そこで、磁石とサポータ金具の組立時および温度変化時における変形・応力状態を、ローターの強度評価での実績がある商用ソフトウェア ABAQUS® を用いた非線形熱応力 FEM 解析^{4,5)} によって評価し、写真1に示すサポータ金具を開発した⁶⁾。

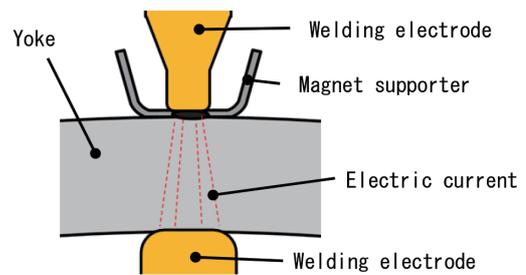


図8 サポータ金具のスポット溶接
Spot welding for magnet supporter

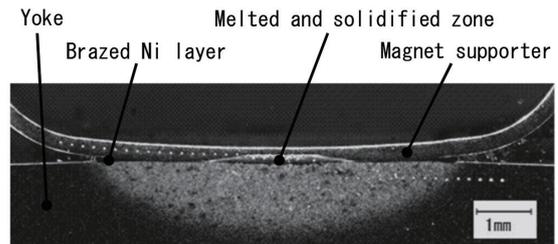


写真2 サポータ金具のスポット溶接部の断面
Cross-section of the spot welding for magnet supporter

この金具は、オーステナイト系ステンレス鋼の薄板をバスタブ状にプレス成型することで製作され、幅広い弾性変形範囲と磁石の保持に十分な剛性を有する。

サポータ金具はスポット溶接を用いてヨークに接合される。ここで、ヨークは板厚が約10mmの炭素鋼に防錆Niめっきを施したものであり、サポータ金具は板厚が約0.3mmのステンレス鋼である。すなわち、板厚比が約30倍と非常に大きい3層の異なる材質をスポット溶接する独自技術を新たに開発した。

図8に示すように、電極先端径をサポータ金具側で小さく、ヨーク側で大きくすることでサポータ金具側での電流集中を促進する専用の電極を設計し、さらに、加圧力、電流、通電時間等の溶接条件を最適化することで、本固定構造の溶接技術を確立した。接合部の断面例を写真2に示す。中央に正常な熔融・凝固部が形成されている。またその周囲には、Niめっき層のみが熔融、凝固したろう付層が観察されており、接着強度の向上に寄与している。また溶接部の強度については、溶接後のサポータ金具を供試体とした破断試験および疲労試験（はく離方向、せん断方向負荷）を行い、十分な耐久性を有していることを確認した。

さらに、このスポット溶接技術を確立することで、従来は人手で実施していた磁石固定工程を完全自動化し、生産性の向上にも成功した。

5. 新たな制動切替え機構の開発と簡易構造化

図9(a)に示すように、従来機種では2本のエアシリンダで磁石を動かすことにより制動オン/オフを切り替えており、シリンダ間をエア配管や電磁弁で連結していた。エ

アシリンドはリターダ本体から突出する形で配置されるため、搭載スペース削減の妨げとなっていた。

新機種では、3章で示したようにポールピース形状の改善により、磁石移動のための所要力を大幅に低減し、さらに多極化により制動切替え時の磁石移動量が半減したことを利用して、図9(b)に示すように、レバー機構で磁石を動かすことでシリンダの推力を倍増させ、シリンダを1本のみにした。

新機種では電磁弁と一体化した新たなシリンダを採用した。この結果、シリンダ間やシリンダ／電磁弁間の配管が不要となり、図9(b)に示すように構造の簡易化と部品数の削減に成功し、磁石を含む装置重量を従来機種に比べて最大で29%削減した。また、この配管やシリンダ数の削減によってエア量が減り、制動応答時間（発信から制動力発揮までの時間）が大幅に短縮し制御性も向上した。

さらに、新しいシリンダでは、以下に述べる新たな機能も選択できるようにした。制動力が高い機種で長時間の連続制動を行う場合、ローターの過熱対策が必要となる場合がある。そこで、制動中におけるローター発熱量を制御するため、制動オン（HIGH）と制動オフ（OFF）に加え、中間状態（LOW）でも磁石位置を停止できる3位置制御シリンダを開発した。

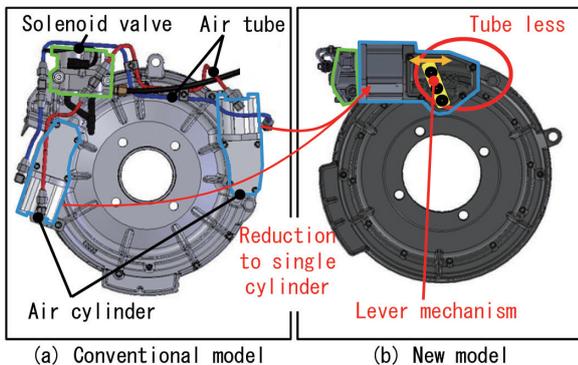


図9 永久磁石式リターダのエアシリンダとエア配管
（従来機種と新機種の比較）
Air cylinder and air tube of PMR

図10に開発したシリンダの構造を示す。シリンダ内部はロッドの中間部にストッパを設けた通常の複動シリンダ機構に、2つの浮動ピストンA、BおよびLOWのストローク位置を規定するLOW位置決め板とセパレータを追加した構成である。LOWに切り替える場合、図10(b)に示すように全ての気室に圧縮空気が注入される。その際、各ピストンの受圧面積の差分により、ピストンA、BがLOW位置決め板を挟み込むことで、シリンダロッドがLOW位置に停止する。なお、LOW切替え時にピストンA、Bにより挟み込まれる部分の空気はボディ側面のブリーザーホースから排気される。以上の構造とすることで、新機種では制動力を最大能力（HIGH）とそれよりも低い制動力（LOW）の2段階で動的に制御することが可能となった。例えば、HIGHで制動中にローター温度に応じて一時的にLOWに切り替えることにより、ローターの過熱を抑制しより長時間の連続制動を行うことが可能となった。

6. モジュール設計によるラインアップ拡充

従来は搭載車両の仕様に合わせ、機種毎に設計していた。これに対し、新機種ではモジュール設計を採用した。図11に示すように、磁石を内蔵するステータは共通とし、2種類のエアシリンダ（制動力1、2段階制御）、2種類のローター（標準型、高熱容量型）、3種類の銅めっき（なし、薄膜、厚膜）を組み合わせることで、全12種類の性能、機能を持った機種をラインアップした。この中から搭載車両に応じた機種を選定することが可能となり、部品共通化率も大幅に向上した。以下では、このモジュール化のために開発した銅めっきローターと高熱容量型ローターについて記述する。

ローター内表面に電気伝導度の高い銅めっきを施すと、制動時に発生する渦電流密度が高まり、制動力が増加する。しかし、制動時にローターの温度は高温となるため、通常の銅めっきではめっき層の酸化や剥離が生じ耐久性を確保することができない。これに対して日本製鉄では、高温での使用や制動の繰返しに耐える独自の複層銅合金めっき技術を開発しており、その専用めっき装置も保有している。

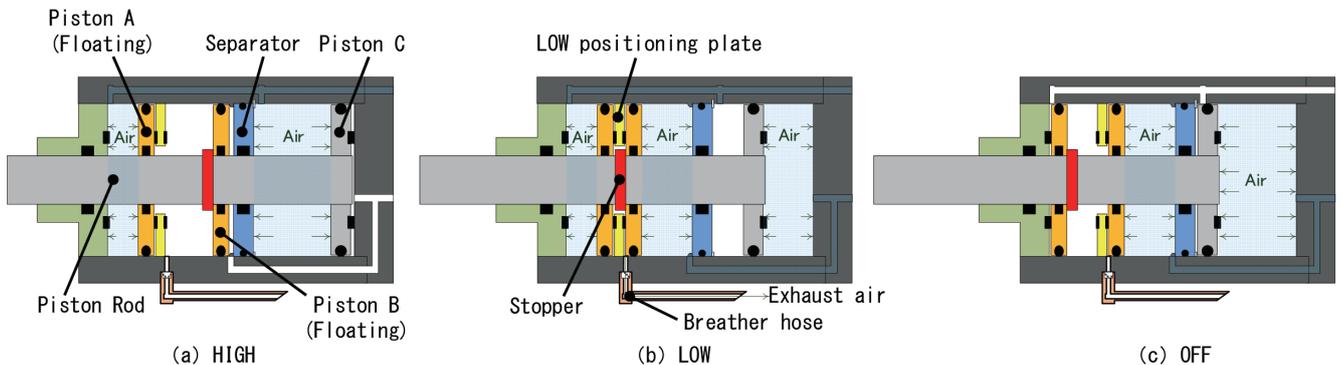


図10 高トルク用新機種における3位置制御シリンダ機構
Mechanism of three-positional cylinder for new high-torque retarder

Model	Module				Feature				
	Stator		Rotor		Braking torque [Nm]	Torque control	Continuous braking time	Weight [kg]	
	Main part	Cylinder	Ring	Cu plate					
NT60F					MAX. 650	1step	Short	38	
- I								43	
- II								40	
- III		45							
NT75G						MAX. 730	1step	Short	38
- I									43
- II									40
- III			45						
NT90G							MAX. 850	1step	Short
- I	43								
- II	40								
- III	45								

図 11 モジュラー設計による新機種ラインアップ
Line-up of new models using modular design

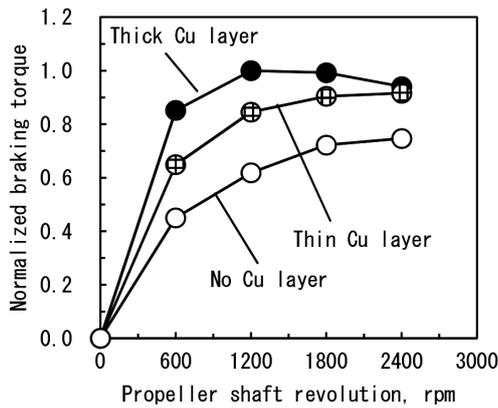


図 12 銅層厚みが制動トルクに及ぼす影響
Influence of Cu layer thickness on braking torque

図 12 に、電磁場解析により求めたローター回転数と制動トルクの関係を示す。この図に示すように、銅めっきを施すことによって、制動力を大幅に向上することができる。また、制動力と回転数の関係や最大制動力は銅めっきの膜厚を変えることで大きく変化する。そこで、ローターのモジュール化においては、銅めっきなし、薄膜銅めっき、厚膜銅めっきの 3 種とし、必要な制動力に応じて、この中から選定できるようにした。この中でどのローターを選択しても装置寸法は同じであり、装置重量もほぼ等しい。

この銅めっきを用いて制動力を高めた場合、5 章で述べた制動力の動的制御（制動力 2 段階制御機能付シリンダの採用）によりローターの過熱を抑制することが可能であるが、搭載車両や使用条件によっては、制動持続時間をさらに延長するために追加対策が必要となる場合がある。ローターの昇温を抑制するには、そのリング部分を厚肉にして熱容量を増加することが効果的であるが、過度に厚みを増

加すると重量の増加に加えて制動終了後の冷却速度が低下するため、短時間で制動を繰り返した場合にローター温度が過度に上昇することが懸念される。

そこで、高い制動力で長時間の制動が必要な車両に搭載が可能な高熱容量型のローターを開発するにあたり、制動条件とローター温度の関係を数値解析により求め、リング厚みの適正化を行った。ローターの温度は外周に設けた冷却フィンの周りの空気の流れによって大きく変化するため、本報では回転するローター周辺空気の定常熱流動解析によりローター表面熱伝達率を推定し、さらにその結果を用いて固体内の非定常熱伝導解析により温度推定を行う解析方法⁸⁾を用いた。なお解析ツールには、汎用ソフトウェア FLUENT[®]を使用した。解析で得られた気流の流線(カラーは流速を示す)とローター表面熱伝達率を図 13 に、開発したローターの制動時温度履歴を図 14 に示す。なお図 14 中の温度は使用限界温度で規格化した無次元値である。本結果から高熱容量型のローター B では、標準型のローター A に比べて制動終了後の冷却速度の低下を回避しつつ制動持続時間を拡大できることが分かる。

以上で述べた高熱容量型ローターと銅めっき施工に加え、前章で述べた 2 段階制御機能付シリンダを組み合わせることで、制動力および制動持続時間等の観点で適切な機種が選択できるようになった。

7. 結 言

日本製鉄における解析（電磁場解析，熱流体解析，応力解析等），強度評価，接合，表面処理，機械装置設計など各種の技術を統合することにより，従来機種に比べて性能や車両への搭載性を大幅に改善した高効率，軽量型の永久

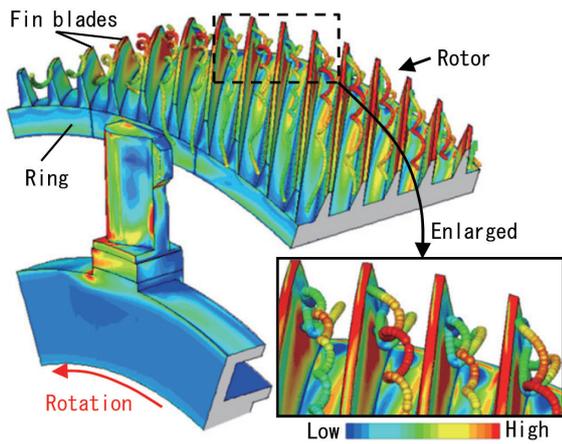


図 13 気流の流線とローター表面熱伝達率
Stream line of air flow and heat transfer coefficients of rotor surface

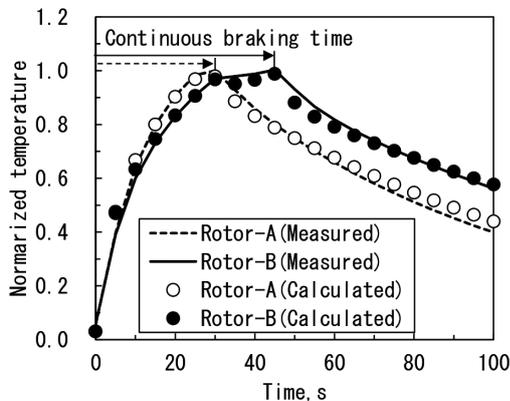


図 14 開発ローターの制動時温度履歴
(Rotor-A: 標準型, Rotor-B: 高熱容量型)
Temperature history on braking of developed rotor
(Rotor-A: Normal type, Rotor-B: High-heat capacity type)

磁石式リターダ新機種を開発した。新機種の主な特徴を以下に示す。

- (1) 高効率の多極磁気回路を採用することで、従来機種に比べて磁石重量あたりの制動力が最大で 1.5 倍に向上した。この結果、装置 1 台あたりのネオジム系磁石の

使用量を大幅に削減できるため、省資源化による環境負荷軽減にも貢献できる。

- (2) 新たな制動力の切替え機構を採用し、磁石移動に必要なエアシリンダ数の最少化、エア配管の省略などにより装置構造を大幅に簡素化した。この結果、部品点数の削減、装置のコンパクト化、軽量化を行うことができ、従来機種に比べて装置重量を最大で 29% 削減した。
- (3) さらに、制動力を 2 段階（最大制動力、中間制動力）に切り替える機能を有する新しいシリンダを開発するとともに、制動応答時間を短縮し、装置の制御性を向上した。
- (4) モジュール設計を行い、共通のステータに対し、ローター、シリンダ等の部品を選択するだけで、制動力やその持続時間が異なる 12 機種を容易に選択できるようにした。

以上のように、永久磁石式リターダ新機種では装置の小型化、軽量化と高制動力化を両立し、さらに製品のラインアップを拡充したことで車両への搭載性を大きく改善し、ユーザーの多様なニーズに柔軟に対応することができた。今後も本装置を普及させることで、交通安全性の向上やドライバーの運転負荷軽減という社会貢献をさらに増加させて行きたい。

参考文献

- 1) 日本特許公報 特許第 4604857 号. 2010 年 10 月 15 日
- 2) 今西憲治, 石田昭佳: 第 19 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集. 1998, p.145
- 3) 日本特許公報 特許第 5825428 号. 2015 年 10 月 23 日
- 4) 野口泰隆, 宮原光雄, 今西憲治, 斎藤晃, 岸根申尚: 材料. 53 (7), 795 (2004)
- 5) 野口泰隆, 今西憲治, 野上裕, 斎藤晃: 溶接学会誌. 78 (3), 182 (2009)
- 6) 日本特許公報 特許第 6446938 号. 2018 年 12 月 14 日
- 7) 日本特許公報 特許第 5655875 号. 2014 年 12 月 5 日
- 8) Nogami, H., Okamura, K., Sugimoto, T., Watanabe, Y., Narazaki, M.: J. Jpn. Soc. Heat Treatment. 49-Special Issue, 713 (2009)



野上 裕 Hiroshi NOGAMI
鉄鋼研究所 交通産機品研究部
上席主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



今西憲治 Kenji IMANISHI
製鋼所 産機品製造部 産機品技術室長



田坂方宏 Masahiro TAsAKA
製鋼所 産機品製造部 産機品技術室
主幹



野口泰隆 Yasutaka NOGUCHI
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
上席主幹研究員 博士(工学)



楞川祥太郎 Shotaro KADOKAWA
製鋼所 産機品製造部 産機品技術室
主査



富士本博紀 Hiroki FUJIMOTO
鉄鋼研究所 接合研究部
主幹研究員 博士(工学)



藤田卓也 Takuya FUJITA
製鋼所 産機品製造部 産機品技術室



宮原光雄 Mitsuo MIYAHARA
フェロー 博士(エネルギー科学)