

受賞技術-25

# 永久磁石式小型軽量リターダの開発

## Development of Compact and Lightweight Permanent Magnet Retarder

日本製鉄(株) 技術開発本部  
フェロー 宮原光雄  
Mitsuo Miyahara

日本製鉄(株) 技術開発本部  
鉄鋼研究所 交通産機品研究部  
首席主幹研究員 野上 裕  
Hiroshi Nogami

日本製鉄(株) 技術開発本部  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
首席主幹研究員 野口泰隆  
Yasutaka Noguchi

### 1 緒言

トラックやバスなどの中大型商用車では車両重量が大きいため、例えば長い下り坂などではエンジンブレーキや排気ブレーキだけでは十分な速度抑制効果が得られず、フットブレーキを多用する必要がある。この場合、フェード現象によってフットブレーキの効きが低下し、事故につながる危険性がある。そこで、これらのブレーキを補助する第4のブレーキとしてリターダが使用されている。

欧州では流体式や電磁石式のリターダが実用化されている。しかし、流体式では油などの粘性抵抗によって制動力を得るため、車両に流体の冷却・循環装置が必要となる。また、電磁石式では大型コイルや大電流の供給装置が必要となる。すなわち、これらの方式のリターダは装置重量、車両への搭載性やメンテナンス性に課題があり、日本では普及していない。

これに対して日本製鉄では、小型軽量で搭載性やメンテナンス性に優れた永久磁石式リターダを開発し、1990年の実用化以降、世界で唯一の永久磁石式リターダのメーカーとして改良を重ねてきた<sup>1-5)</sup>。本装置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大幅削減によるドライバーの運転負荷軽減などを通じて交通安全に貢献しており、高い評価を頂いてきた。

近年、トラックの搭載重量の増加や燃費改善を目的と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制動能力はさらに不足する傾向にあり、これを補うために永久磁石式リターダの搭載車種を拡大したいとのニーズが高まっている。また、ドライバー不足の問題に対応するために、運転負荷の軽減は急務の課題である。

本報では、このような社会的ニーズに対応するために開発した高効率・軽量型の新機種を中心に、永久磁石式リターダの概要とその開発を支えた技術を解説する。

### 2 永久磁石式リターダの概要

#### 2.1 作動原理

永久磁石式リターダの作動原理を図1に示す。回転する金属の円盤に永久磁石による磁束を作用させると、起電力が生じ(フレミングの法則)、渦電流が発生する。さらに、渦電流と磁界の相互作用によって回転とは逆の方向の力(ローレンツ力)が発生する。永久磁石式リターダの車両における搭載位置を図2に、構造を図3に示す。リターダは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て内部に永久磁石列を配置したステータで構成される。永久磁石の磁界内をローターが回転すると、ローターに渦電流が発生し、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。

図4に示すように、制動オン/オフの切替えは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(炭素鋼)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

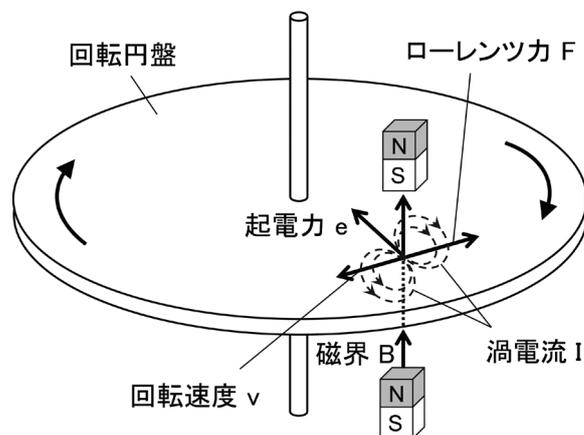


図1 永久磁石式リターダの作動原理

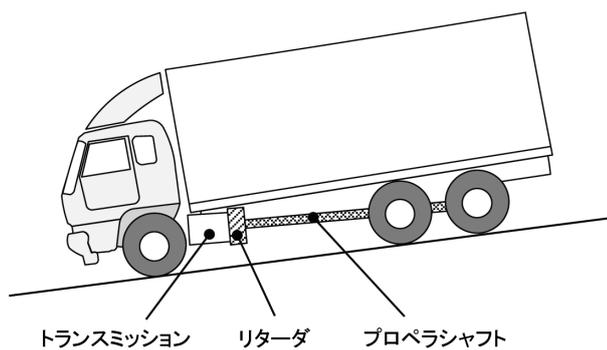


図2 永久磁石式リターダの搭載位置

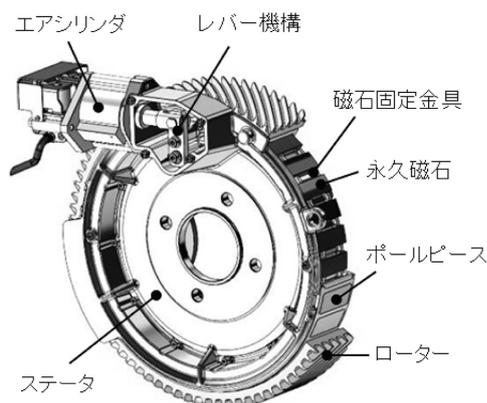


図3 永久磁石式リターダの構造(新機種)

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。制動オン/オフ切替え時の磁石移動量はポールピースのピッチの半分である。

## 2.2 制動性能と改善効果

本装置では強力なネオジウム系永久磁石を用いることで、小型軽量で大きな制動力を得ている。また、磁石の往復運動にはエア圧力を用いるため大電流は不要であり、エア配管などの簡易な改造で車両に搭載できる。また、ローターとステータは接触しないため、長期間使用しても摩耗は生じない。

永久磁石式リターダは運転席のレバー操作やアクセルペダルとの連動などで作動させることができる。本装置の効果は車両の大きさや走行条件によって異なるが、例えば車両総重量20トンの車両に制動トルク500Nm級のリターダを搭載した場合、80km/hからの制動停止距離は2/3倍に短縮され、起伏の多い高速道路を長距離走行した時のフットブレーキ回数は半分に減少するとの報告がある<sup>3)</sup>。さらにこの条件ではフットブレーキ用ライニングの寿命は6倍に増加しており<sup>3)</sup>、経済的な利点に加えてライニング摩耗粉の飛散量の低減による環境改善効果も得られる。

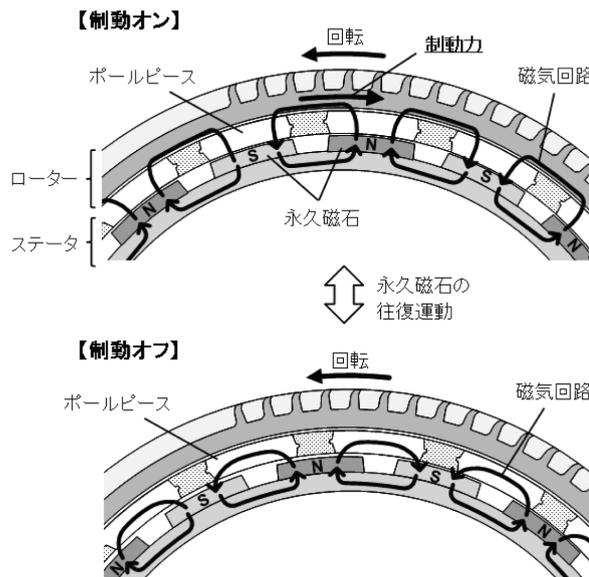


図4 永久磁石式リターダの磁気回路と制動オン/オフ切替え方法

以上のような利点を有する永久磁石式リターダの開発には多くの技術が活用されており、以下ではその例を紹介する。

## 3 制動力向上と耐久性確保

### 3.1 多極化による磁気回路の高効率化

本装置では希少原料であるネオジウムを含有する永久磁石を使用しているため、経済性や省資源化の観点から装置1台あたりの磁石重量を削減する必要がある。そこで、3次元電磁場解析<sup>1,4)</sup>を行い、オン時の制動力の最大化とオフ時の磁気漏れの抑制を両立できる磁気回路を検討した。

永久磁石式リターダの初期型の開発以降、磁石やポールピースの形状・配列や制動オン/オフの切替え機構などについては様々な改良を行ってきたが、新機種では単純な形状の小型磁石を円周方向に多数配列することで、制動力を最大化した<sup>1)</sup>。電磁場解析により求めた磁石極数と制動力の関係を図5に示す。磁石の総重量を変えずに極数を増やすと、極数の増大に伴い制動力の発生領域の数が増加する。ただし、これと同時に1極が出力する磁束量は減少する。このため極数には最適値が存在し、極数を従来機種の16極から32極に増加することで制動力を大幅に向上できる。

また、実装置でこの多極回路を実現するため、図6に示す新たな磁石固定方法を開発した。従来は磁石をヨーク(炭素鋼のリング状部材)に固定する際、角部に段付加工を施しアルミ合金製金具を介してボルトで固定していた。これに対して新機種では非磁性のステンレス薄板で金具を作成し、これをヨークにスポット溶接している。ヨークには防錆Niめっきを施しており、厚肉ヨーク、Niめっき、薄肉ステンレス金

具の材質と厚さが大きく異なる3層をスポット溶接する技術を新たに開発した<sup>1)</sup>。これにより、小さなスペースに多数の磁石を固定することが可能となり、さらに従来は人手で実施していた磁石固定工程を自動化し、生産性も向上した。

多極化の効果に加え、段付加工を省略して磁束のロスを削減するなどの改善も加えた結果、同じ磁石重量での制動力を最大で従来機種の1.5倍に向上した。さらに、ポールピース形状の改善でオフ時の磁気漏れを抑制するとともに、オン/オフ切替え時の磁石移動に必要な駆動力を最小化した<sup>1)</sup>。

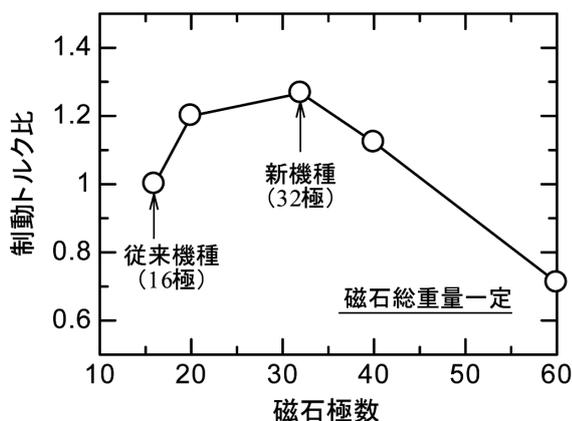


図5 磁石極数と制動トルクの関係(電磁場解析結果)

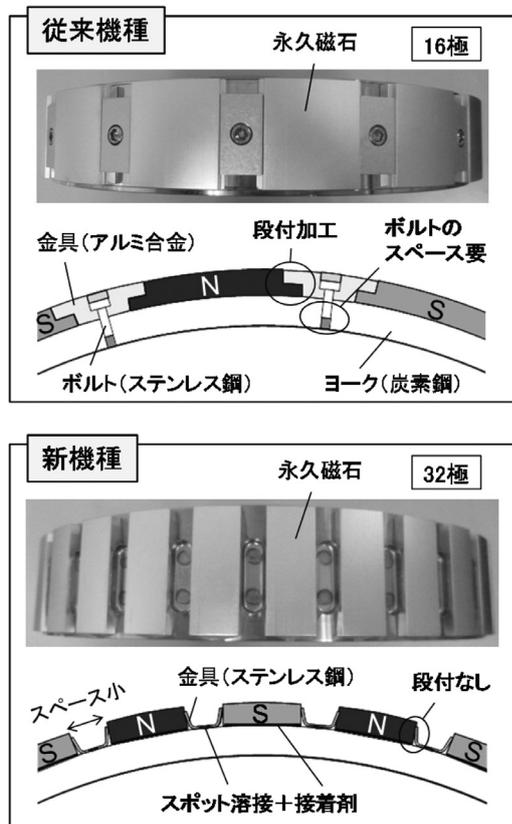


図6 従来機種と新機種の磁石形状と固定方法の比較

### 3.2 高性能冷却フィンの開発

制動時にローターには渦電流が発生し、ジュール熱によって温度が上昇する。この温度上昇を抑制するため、ローターの外周面には冷却フィンをつけている。近年、制動力をさらに向上することや長時間にわたり高い制動力を持続することが望まれており、ローターへの熱負荷は増加している。

この冷却フィンに関しては限られた空間内で冷却性能を高める必要があることに加えて、車両の燃費悪化の原因となる回転抵抗を抑制する必要がある。このため、図7に示すような3次元熱流体解析によりフィン周辺の空気流れを可視化するとともに、フィンの形状や配列と冷却性能や回転抵抗の関係を定量的に評価し、ローター温度の上昇を抑制しつつ、回転抵抗を最小化できる最適なフィン形状を決定した<sup>1)</sup>。

### 3.3 ローター用材料、表面処理技術の開発

冷却フィンをつけても、高制動力で長時間の制動を行うとローターの最高温度は600℃を超える場合がある。さらに、制動オフ時には冷却されるため、制動オン/オフの繰返しによってローターに熱ひずみの変動が生じ、長期間使用時に熱変形や熱疲労き裂が発生することが懸念される。

ここで、従来はローター材としてはクロムモリブデン鋼SCM415 (0.15C-1Cr-0.2Mo) などが用いられていたが、この耐熱性や高温強度を高めるために合金元素を添加した場合にはローター材の電気伝導度が低下し、渦電流の密度が減少するために制動力が低下する。そこで、従来鋼に比べて電気伝導度を高めつつ、高温強度、高温疲労強度を高めたローター専用鋼 (0.1C-0.5Mo-Nb、V、B) を開発した<sup>2,3)</sup>。

この開発鋼では従来鋼SCM415に比べ、電気伝導度に悪影響を及ぼすC、Cr量を減少させ、電気伝導度を約20%高めた。さらに、高温強度を向上するためにMo量を増加するとともに、Nb、V、Bを微量添加した。開発鋼では結晶粒内に

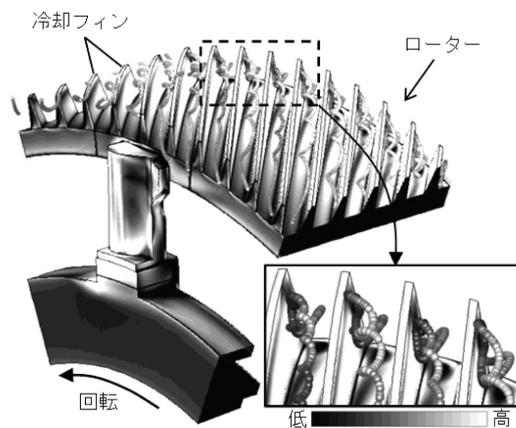


図7 冷却フィン近傍の気流の流線とローター表面の熱伝達係数(熱流体解析結果)

NbC、MoC、Mo<sub>2</sub>Cを微細析出させることで、高温引張強度、クリープ強度を高めている。この結果、制動力を向上しつつローターの耐熱性を向上することができた。

また、ローターの内面に電気銅めっきを施すと、制動時に発生する渦電流の密度が高まり、制動力が増加する。この方法によって装置の寸法や磁石重量を変えずに制動力を大幅に向上することができるが、前述のようにローターの温度は600℃を超える高温となるため、通常の銅めっきではめっき層の酸化やはく離が生じ、必要な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<sup>1)</sup>。

図8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。銅めっきを施すことにより制動力を1.3～1.9倍に向上することができる。制動力と回転数の関係や最大制動力は銅めっきの膜厚によって大きく変化する。このため、ステータを共通としてローターのめっき有無、膜厚を変えることで、制動性能の異なる機種を提供することができる。

### 3.4 熱疲労寿命評価

前節までで述べたように、永久磁石式リターダ、特にローターは過酷な負荷条件で使用されるため、その耐久性の確保が重要である。ローターの耐久性はベンチ試験を含めた長時間の実体耐久試験で評価するが、あわせて解析による熱疲労寿命評価も実施した。

熱流体解析、伝熱解析、実体測温結果を用いて、繰返し温度変動が生じた場合のローターの非弾性ひずみの変化を3次元弾塑性クリープ解析により求めた。さらに、その解析結果に基づいて、ひずみ範囲分割法<sup>6)</sup>により熱疲労寿命を予測した。ここで、ひずみ範囲分割法は疲労損傷とクリープ損傷の相互作用を考慮することのできる寿命評価法であり、多くの高温機器の寿命評価に適用されている<sup>7)</sup>。

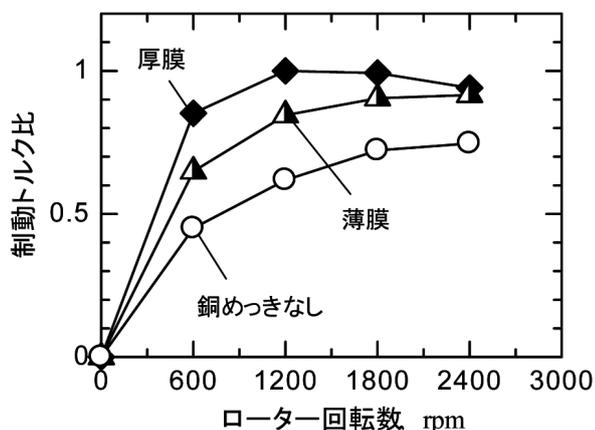


図8 銅層厚みが制動トルクに及ぼす影響(電磁場解析結果)

この寿命評価の精度を実体ベンチ試験で確認するとともに、前節で述べたローター専用鋼を用いることで従来鋼に比べて熱疲労裂発生寿命を大幅に延長できることを明らかにした<sup>2)</sup>。さらに、実車走行時の温度波形をレインフロー法を用いて分析することで実車条件下のき裂発生寿命を予測し、その寿命が車両寿命に比べて十分に長いことを確認した。

## 4 搭載性の向上

### 4.1 構造の簡易化による搭載スペース縮小

永久磁石式リターダの搭載車種を拡大するためには、車両への搭載に必要なスペースをできるだけ小さくする必要がある。図9に示すように、従来機種では磁石を往復運動させるためのエアシリンダをステータの背面に2本取り付けており、この間をエア配管や電磁弁で連結していた。新機種ではこの構造を大幅に簡易化し、搭載スペースを縮小した。

新機種では、多極化によってポールピースのピッチが小さくなったことでオン/オフ切替えのための磁石移動量が半減した。このことを利用しレバー機構で磁石を動かすことで必要なエア駆動力を大幅に低減し、エアシリンダを1本のみにした。この結果、配管などが不要となり、構造の簡易化、搭載スペースの縮小、装置の軽量化に成功した。磁気回路の高効率化で磁石重量を最小化した効果も合わせ、装置重量を最大で約30%削減することができた。

ここで、エアシリンダや配管の削減によってエア量を減少したことにより、制動の応答時間(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。さらに磁石をオン/オフの2位置ではなく、中間位置でも停止する機能を持つ新たなエアシリンダを開発した。この結果、制動力を最大能力の1段階だけではなく、中間制動力でも使用できるようにした。

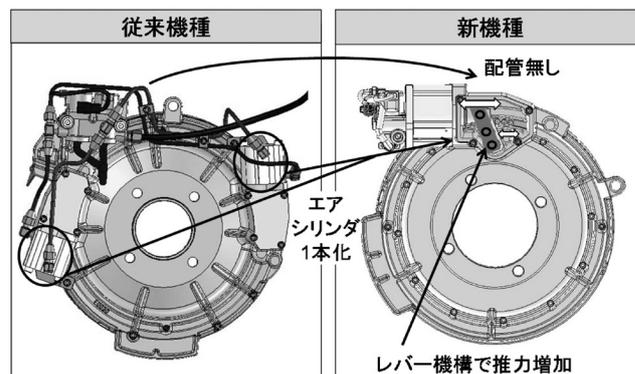


図9 磁石駆動用エアシリンダとエア配管の削減によるステータ構造の簡易化

名称	モジュール				特徴					
	ステータ		ローター		トルク (Nm)	トルク制御	持続時間	重量 (kg)		
	本体	エアシリンダ	リング	銅めっき						
NT60F					Max. 650	1段	短	38		
↓						↓	43			
2段						長	45			
NT75G							Max. 730	1段	短	38
								↓	↓	43
								2段	長	45
NT90G					Max. 850	1段		短	38	
						↓		↓	43	
						2段		長	45	
	↓					↓	40			
	↓					↓	40			
	↓					↓	45			

補足説明

- エアシリンダ：2段  
→制動トルク制御：2段階
- ローターリング：高熱容量  
→温度上昇が遅く、制動力の持続時間が長い
- ローター銅めっき：  
→制動力は、  
めっきなし < 薄膜 < 厚膜

図10 モジュール設計による多品種展開

### 4.2 モジュール設計によるラインアップの拡充

これまで本装置は、搭載する車両の仕様に合わせ機種毎に設計していた。これに対して新機種ではモジュール設計を採用した。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 (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、図10に示す全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頂くことが可能となり、部品の共通化率も向上した。

## 5 結言

永久磁石式リターダは、日本製鉄の解析 (電磁場解析、熱流体解析、応力解析など)、強度評価、接合、表面処理、機械設計など各種の技術を結集して開発してきたものであり、さらに近年の社会的ニーズの高まりに応える新機種を開発した。新機種では軽量・小型・高制動力化を実現し、モジュール設計により機種選択肢も拡大したため、新たな車両への搭載性が大幅に向上した。さらに、磁石重量の削減による省資源化や装置の軽量化による車両の燃費向上などを通じて環境改善にも貢献している。

新機種の開発によって本装置の生産台数は増加しており、累積生産台数は30万台に近づいている。さらに、トラック、バスの他にクレーン車などにも搭載されている。今後、国内外での本装置の普及が加速され、交通安全性の向上やドライバーの運転負荷軽減という本装置による社会への貢献度がさ

らに増加することが期待できる。

以上で述べた開発成果に対し、2017年度文部科学大臣表彰科学技術賞 (開発部門)、第53回 (2018年度) 機械振興賞機械振興協会会長賞などを頂くことができた。推薦を頂いた日本鉄鋼協会を始めとする関係者の皆様に心から御礼を申し上げたい。

### 参考文献

- 1) 野上裕, 田坂方宏, 楞川祥太郎, 藤田卓也, 今西憲治, 野口泰隆, 富士本博紀, 宮原光雄: 日本製鉄技報, (2019) 412, 143.
- 2) 野口泰隆, 宮原光雄, 今西憲治, 齋藤晃, 岸根申尚: 材料, 53 (2004) 7, 795.
- 3) 野口泰隆, 今西憲治, 野上裕, 齋藤晃: 溶接学会誌, 78 (2009) 3, 182.
- 4) 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), 145.
- 5) 桑原徹, 新谷廣二, 坂本東男, 荒木健詞, 鈴敏夫, 齋藤晃, 住友金属, 43 (1991) 5, 24.
- 6) 例えば, S.S.Manson, G.R.Halford and M.H.Hirschberg: Proc. of Symposium on Design for Elevated Temperature Environment, (1971), 12.
- 7) 例えば, 早川弘之, 宮原光雄, 岡村一男, 金谷章宏: 材料, 48 (1999) 6, 604.

(2019年4月26日受付)