まわ エンジン!

永久磁石式リターダ ～大型車両用補助ブレーキ装置～*

野口 泰隆^{**}，今西 憲治^{***}，野上 裕^{***}，齋藤 晃^{***}

野口 泰隆

今西 憲治

野上 裕

齋藤 晃

Permanent Magnet Type Retarder –Brake Equipment for Heavy Vehicles—*

by NOGUCHI Yasutaka^{**}，IMANISHI Kenji^{***}，NOGAMI Hiroshi^{***}
and SAITOH Akira^{***}

キーワード

リターダ，永久磁石，ブレーキ，電磁場解析，熱流体解析，疲労寿命評価

1. はじめに

みなさんはトラックやバスなどの大型車両に永久磁石を用いた非接触式の補助ブレーキが使われていることを知っていますか？ブレーキライニングの摩耗による粉塵の発生がなく，作動油や大電流の消費も必要としない，環境に優しい補助ブレーキの導入が進んでいるのです。そのブレーキは永久磁石式リターダといいます。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，永久磁石式などがありますが，国内では永久磁石式が圧倒的に多く使われています。

永久磁石式リターダは十数年前に開発され¹⁾，他方式に比べて小型・軽量の特長があることから着実に搭載車両が増加しています。近年は燃費向上のために大型車両の小排気量化が進んでいることからエンジンプレーキ力が低下する傾向にあり，そのブレーキ力低下を補う目的でもリターダの必要性が増しています。また，長距離夜行バスでは，エンジンプレーキや排気ブレーキによる騒音で乗客の眠りを妨げないように，静粛性に優れたリターダが好んで使われています。最近では最高制動トルク 1000Nm に達す

る高制動力型の永久磁石式リターダが開発されたことにより，従来流体式が搭載されてきた高制動力を必要とする車両にも永久磁石式が搭載されつつあります。本稿では近年再び脚光を浴びる永久磁石式リターダの機構を解説すると共に，世界唯一の永久磁石式リターダ製造メーカーである当社の開発を支える技術を紹介します。

2. 永久磁石式リターダの作動原理

図1に永久磁石式リターダの構造を示します。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ます。永久磁石の磁界内をロータが回転する

図1 永久磁石式リターダ

*原稿受付 平成21年1月15日

**正員 住友金属工業(株) Member, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

*** 住友金属工業(株) Sumitomo Metal Industries, Ltd.

と、ロータには誘導電流が発生すると同時に、電流と磁界の相互作用によりロータの回転と反対方向にローレンツ力が発生します。これがロータの回転を抑制する制動力となります。このとき、電流が発生するロータはジュール熱により温度が上昇します。このように、永久磁石式リターダは電磁誘導を利用して車両の運動エネルギーを熱エネルギーに変換することによって制動力を得るブレーキです。また、ロータに発生する電流は渦状に流れることから、永久磁石式や電磁石式のリターダを渦電流式リターダとも呼びます。

制動状態と非制動状態の切り替えは、図2に示すように円周方向への磁石の往復移動によって行います。制動時には永久磁石の磁界が強磁性体からなるポールピースを通してロータに作用することで、ロータとステータは非接触でありながら制動力が発生します。また、非制動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界がロータに作用しないようにします。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、制動状態と非制動状態を切り替えます。

図2 永久磁石式リターダの制動状態と非制動状態

図3 永久磁石式リターダの性能比較
(制動力 500Nm のリターダを総重量 20ton の車両に搭載した場合)

3. 永久磁石式リターダの制動性能

GVW (車両総重量) 20ton の車両に最高制動トルク 500Nm の永久磁石式リターダを搭載した場合の制動性能を図3に示します。永久磁石式リターダを搭載すると、車両の減速性能が向上するため、ブレーキをかけてから車両が停止するまでの距離が大幅に短くなります。このように、永久磁石式リターダを搭載すると車両の安全性が高まります。また、永久磁石式リターダを使うことでフットブレーキの使用回数が減り、ブレーキライニングの摩耗量が減ります。このため、運転手の疲労や車両のランニングコストを軽減できますし、ブレーキライニングの摩耗による粉塵の発生が少なくなることで環境負荷も軽減できます。このように、永久磁石式リターダを搭載することで数多くのメリットが生まれます。

4. 永久磁石式リターダの開発を支える技術

4.1 電磁場解析技術

永久磁石式リターダの小型・軽量化の特長を最大限に発揮するためには、磁気回路を構成する永久磁石やポールピースの形状を最適化する必要があります。その際、制動時にはできるだけ磁束を減衰させないでロータに作用させること、非制動時にはロータへの磁束の漏洩を無くすことなどが求められ、これらの要求を満たし、かつ、軽量、安価な構造を設計します。

永久磁石やポールピースの形状の組み合わせは無数にあるため、実験のみで最適値を見出すことは容易ではありません。そのため、当社ではFEM (有限要素法) による電磁場解析を用いてリターダの機種ごとに最適な磁気回路を設計しています。図4は電磁場解析でロータに発生する渦電流密度を評価した一例です。電磁場解析を用いて制動力に寄与する方向の渦電流密度成分が最大になるように磁石やポールピースの形状、ポールピースとロータの隙間量などを最適化します。図5は電磁場解析で求めた制動力を実測値と比較した結果ですが、電磁場解析で永久磁石式リターダの制動力を極めて高い精度で予測できます。このように、電磁場解析技術を用いることで、ユーザーの要求を満たすための磁気回路設計を短時間で行うことが可能です。

図4 渦電流密度分布の評価例

図5 電磁場解析による制動トルクの評価例

図6 フィン周辺部空気流れの可視化例

図7 ロータ温度の予測例

4.2 熱流体解析技術

運動エネルギーを熱エネルギーに変換して車両を減速させる永久磁石式リターダではロータに発生した熱を効率よく放出することが必要になります。このため、ロータの外表面には冷却用のフィンが設けられます。フィンは限られた空間内で冷却性能を高める必要があるのに加えて、ロータと連結されたプロペラシャフトの回転抵抗を抑えて非制動時の車両の燃費悪化を抑制するため、空気抵抗を低くする必要もあります。このため、熱流体解析を用いてフィンの冷却性能と空気抵抗の最適バランスをとっています。

図6は熱流体解析によりフィン周辺の空気流れを評価した一例です。空気流れを可視化することによって、フィン各部位の働きを明確にし、最適形状の設計が容易になります。また、評価した空気流れからフィンの放熱性能を求めれば、ロータの温度を予測することが可能です。図7は熱流体解析で求めたロータ温度を実測値と比較した結果です。制動時、非制動時ともにロータ温度を高精度に予測できることが分かります。永久磁石やポールピースの形状と同じように、フィンの枚数や形状の組み合わせも無数にありますが、熱流体解析を活用することによって、最適な

表1 ロータ専用鋼の化学組成 (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	B
従来鋼 (SCM415)	0.16	0.27	0.67	0.98	0.16	-	-	-
開発鋼 (ロータ専用)	0.10	0.16	0.78	-	0.52	0.020	0.042	0.001

図8 ロータの疲労寿命評価手順

形状を短時間で見出すことが可能です。

4.3 高温疲労寿命評価技術

永久磁石式リターダはメンテナンスフリーであることが特長の一つです。これは、車両の寿命よりリターダの寿命のほうが長いことを意味します。このため、リターダ各部の耐久性は車両より十分長くなるように設計されます。その中でも、制動時に発熱するロータは制動と非制動の切り替えに伴って熱ひずみが繰返し与えられるため負荷が大きい部材であり、疲労寿命の確保が必要になります。当社ではロータの耐久性を高めるために永久磁石式リターダのロータ専用鋼を開発し、適用しています²⁾。表1に開発したロータ専用鋼と従来鋼 (JIS SCM415) の化学組成を示します。開発鋼では電気抵抗を低くするためにC、Crの添加量を従来鋼より少なくしました。また、高温強度を高めるためにMoの添加量を増やし、Nb、V、Bを微量添加しました。この結果、開発鋼からなるロータは電磁気特性に優れるため高制動力を発揮し、さらに、高温強度に優れるため熱ひずみが繰返し与えられた場合でも疲労損傷し難い特性を持ちます。

ロータの耐久性が要求値を満たすかどうかは実体試験で確認しますが、耐久試験は長時間を必要とするため、ロータ形状を決定するまでに実施する耐久試験の回数を減らすことが求められます。このため、当社ではFEM解析を用いた高温疲労寿命評価技術³⁾を確立し、これを適用することでロータ形状設計の所要時間を大幅に短縮しています。

図8はロータの寿命評価手順を示したものです。ロータ形状や使用条件を入力条件としてFEM解析を実施し、ロータに繰返し負荷される非弾性ひずみを求めます。この結果とロータ材のクリープ疲労特性をもとに、高精度クリープ疲労寿命評価法の一つであるひずみ範囲分割法³⁾を用いてロータの疲労寿命を評価します。この手法で予測したロータの寿命は実機の寿命と良く一致することを確認しています²⁾。

5. おわりに

非接触式の大型車両補助ブレーキ装置である永久磁石式リターダの作動原理、および、永久磁石式リターダの開発を支える技術を紹介しましたが、これら以外にも表面処理、制御など多岐にわたる技術を使って永久磁石式リターダを開発しています。もちろん、永久磁石式リターダを製造するうえで溶接は不可欠です。例えば、ロータとそれを支持するアームは溶接していますが、この部位には回転や振動による大きな負荷がかかるため溶接施工、管理、品質評価、強度評価などに関する溶接技術が必要になります。これら全ての技術について継続してレベル向上に取り組んでおり、常に最先端の技術を導入して永久磁石式リターダを開発しています。

最近では高制動力型の永久磁石式リターダが開発され、ラフテレーンクレーン（自走式のクレーン車）に搭載されるなど、永久磁石式リターダの適用範囲が拡大しています。また、燃費向上のために小型・軽量の特長がある永久

磁石式リターダのニーズが高まっています。今回紹介した技術を用いて今後開発される永久磁石式リターダが車両の安全走行や環境負荷軽減に貢献できることを期待しています。

参考文献

- 1) T. Kuwahara, K. Shintani, H. Sakamoto, K. Araki, T. Suzu and A. Saitoh: Development of Permanent Magnet Type Compact ECB Retarder, Sumitomo metals, 43-5 (1991), 24-30.
- 2) Y. Noguchi, M. Miyahara, K. Imanishi, A. Saitoh and N. Kishine: Creep-fatigue Life Prediction for Permanent Magnet Type Eddy Current Retarder, Journal of the Society of Material Science Japan, 53-7 (2004), 795-800.
- 3) S. S. Manson, G. R. Halford and M.H.Hirschberg: Creep-Fatigue Analysis by Strain-Range Partitioning, Proceedings of Symposium on Design for Elevated Temperature Environment, (1971), 12-28.