

(論文)

鉄粉コアと銅帯コイルで構成した低損失リアクトル

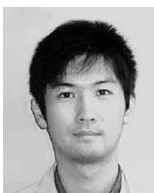
Low Loss Reactor Composed of Dust Core and a Copperbelt Coil



橋本裕志*1
Hiroshi HASHIMOTO



財津享司*1
Kyoji ZAITSU



林 俊平*1
Shumpei HAYASHI



三谷宏幸*2
Hiroyuki MITANI



井上憲一*3 (博士(工学))
Dr. Kenichi INOUE

The rise in environmental consciousness seen in recent years has led to a rapid increase in the number of hybrid cars and electric cars now in wide use. However, to attain further fuel efficiency, there is a need for smaller and lighter power units. The voltage boost reactive coil is heavy and takes up a large amount of space, so downsizing it and making it lighter is an issue for power units. We considered making a voltage boost reactive coil by winding a flat, thin copper coil about 0.1~0.3 mm in thickness around a pot-shaped structure made with a pure iron powder magnetic core. The result was that numerical analysis and experimentation with models indicated that it was possible to make a reactor with a coil whose high frequency loss had dropped from one-third to one-tenth and has excellent heat dissipating properties. This technology has made it possible to downsize the reactor.

まえがき = 近年の世界的な環境意識の高まりを背景に、CO₂排出量が少ないハイブリッド自動車（以下、HEVという）や電気自動車（以下、EVという）の普及が急速に進んでいる。また、駆動・発電用に複数の電動機を搭載するHEV/EVシステムでは、バッテリーやモータの小型化、エネルギー効率向上を図るため、バッテリー電圧（200~300V）に比べてモータ駆動電圧を400~800V程度まで高める昇圧回路を搭載したパワーユニットの採用（図1）が主流となっている^{1)~3)}。

昇圧回路に利用されるリアクトルは、スイッチ素子のON/OFFによって磁気エネルギーの蓄積/放出を交互に行うことによりインバータ入力電圧を昇圧するとともに、変換の際に発生するリップル電流を平滑化する役割を担う中核部品である。このリアクトルは、数百Aの大

電流でも所定以上のインダクタンス（一般的にL値200~300μH）を維持することが求められるため、磁心が磁気飽和しないようギャップ間隔は大きく設定される。ところが、ギャップ間隔が大きいとギャップ漏れ磁束のコイル導体への鎖交量が増えて渦電流が増加する。このため、ギャップを複数に分割して一つあたりのギャップ間隔を狭くする、あるいはギャップとコイルの距離を空けるなどの対策が採られ、部品点数の増加やコイルの大型化を招く。

一方で、車載用途の部品には小型軽量化が求められるため、昇圧回路の動作周波数を上げて（≧20kHz）必要インダクタンスを低減することが検討されている⁴⁾。しかし、周波数が高くなるとリアクトルに発生する損失が増えるという問題も生じる。

この問題に対して、純鉄圧粉磁心によるポット型リアクトルに銅帯フラットワイズコイルを組み合わせてコイル損失低減と放熱性向上を実現し、リアクトルを小型軽量化できることを数値解析およびモデル実験で実証した。本稿でその概要を報告する。

1. 設計コンセプトと数値解析

1.1 リアクトルの小型化と放熱性能の向上

旧来のリアクトルの基本構造を図2に示す。主要特性であるインダクタンスLは、式（1）で表される。

$$L = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot N^2}{\frac{l_c}{\mu_c} + l_g} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、S：磁路断面積、l_c：磁路長、l_g：ギャップ長、μ₀：真空透磁率、μ_c：磁心の比透磁率、N：コイルの巻

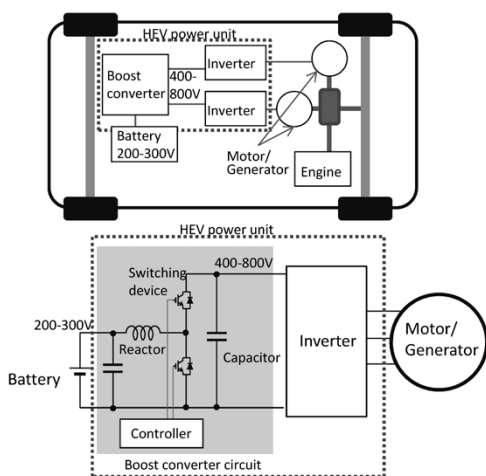


図1 昇圧回路を有するHEVシステム図
Fig. 1 HEV system with boost converter circuit

*1 技術開発本部 電子技術研究所 *2 技術開発本部 開発企画部 *3 (株)コベルコ科研 技術本部

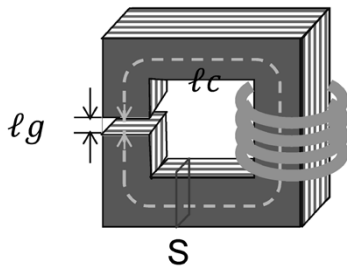


図2 リアクトルの基本構造図
Fig. 2 Basic structure of reactor

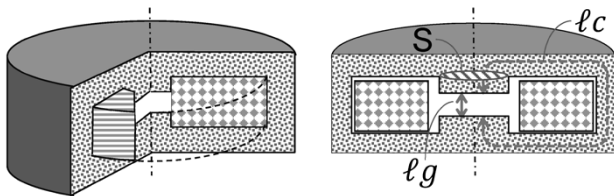


図3 ポット型リアクトルの基本構造図
Fig. 3 Structure of the pot type reactor

数である。

一方、小容量のノイズフィルタ用途で、図3のようにコイルを圧粉磁心で包み込んだ構造のポット型リアクトルが知られている。ポット型リアクトルは、図2の従来リアクトル構造に比べて磁路長 lc を短くできるとともに、磁路断面積 S も大きくとりやすいという特徴がある。このため、従来リアクトルに比べて、小さな体積で同等のインダクタンスを実現することが可能である。

しかしながら、ポット型リアクトルはコイルを磁心で包んでいるため、磁心を介してコイルを冷却することになり、コイル冷却の面では従来構造に比べて不利になる。大電流を流すHEV用やEV用リアクトルにとって、コイルの放熱性能は重要度が高いため、ポット型リアクトルの採用には制約があった。

リアクトルのコイルには従来、加工性に優れた安価な絶縁被覆つき丸線が用いられてきた。しかしながらHEV/EVリアクトルでは、コイル冷却の観点から断面積が大きく低抵抗な平角線のエッジワイズコイルを使用することによってコイル導体からパワーユニットへの伝熱性能を高めている。このエッジワイズコイルをポット型に適用した場合の伝熱構造を図4に示す。径方向の熱伝導率は高くなる一方で、軸方向は伝熱界面が多いため熱伝導率は低くなってしまいう欠点をもつ。そのため、エッジワイズコイルを採用したポット型リアクトルは、インダクタンスとしては不利な長い円柱形状となり、その円周面、または中心軸側から冷却する必要がある。

これに対して、銅帯を図5のようにフラットワイズに巻く構造を検討する。コイルの端面を磁心に接触させるような伝熱構造をとると、リアクトルの径方向の熱伝導率は低い軸方向の熱伝導率は高くなるため、リアクトルの底面や上面からの効果的な冷却が可能になる。したがって、インダクタンス確保に有利な扁平形状にできる。HEVやEVでは、リアクトルやスイッチング素子などの発熱する部品を平面構造の水冷ヒートシンクに接触させて冷却する方が全体を小型化できる。このため、フラットワイズコイルを採用した冷却構造の方が適している。

1.2 高周波動作におけるコイル損失の低減

リアクトルの損失は、磁心に発生するヒステリシス損失および渦電流損失と、コイル導線に発生するジュール損失および渦電流損失に大別される。前述のとおり、磁心の磁気飽和の回避に不可欠なギャップ間隔を広くとるHEV/EV向けリアクトルでは、ギャップからの漏れ磁束によって導線に発生する渦電流損失が無視できない。このため、とくに小型化・高周波化を進めていく上では、コイル渦電流損失の低減が重要となる。

コイルに流れる渦電流は、外部磁束がコイル銅線に鎖交する際に発生する。銅線の太さを渦電流の表皮深さよりも十分に小さくすれば渦電流を小さくすることができるが、一方で、導線の断面積が狭くなると直流抵抗が大きくなり、銅損（ジュール損）が増えるというトレードオフが存在する。

導体に流れる渦電流の表皮深さ δ は式(2)で表される。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ω は角周波数、 μ は導体の透磁率、 σ は導体の電気伝導率である。すなわち、周波数が高くなるほど表皮深さ δ は小さくなる。銅コイルにおける周波数 $f (= \omega / (2\pi))$ と表皮深さ δ の関係を図6に示す。

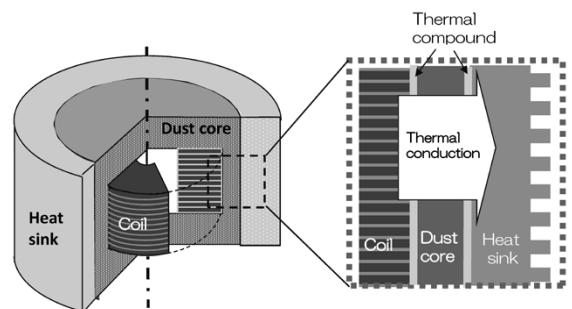


図4 エッジワイズコイルの伝熱構造
Fig. 4 Heat transfer structure of edge wise coil

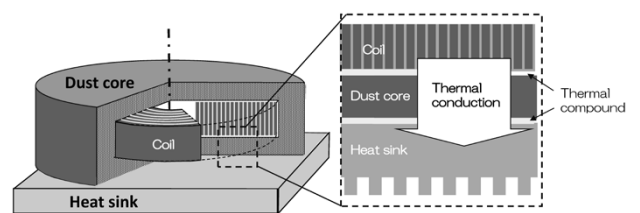


図5 フラットワイズコイルの伝熱構造
Fig. 5 Heat transfer structure of Flat wise coil

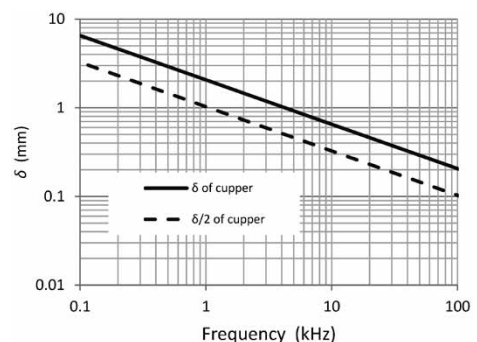


図6 銅コイルにおける表皮深さと周波数の関係
Fig. 6 Relationship between skin depth in copper coil and frequency

ここで、ギャップ間隔の広いポット型構造リアクトルに対して、旧来型と本提案構造との渦電流を比較してみる。厚さ0.3mm、幅20mmの銅帯をエッジワイズコイル（直流抵抗値は16mΩ）としてギャップ間隔10mmのポット型磁心に適用した場合、図7 (a) に示すようにコイルの幅広面に対して磁束が交差して、コイルに渦電流が発生する。

コイル渦電流による磁界は、リアクトルの磁束を打ち消す方向に働くため、結果としてリアクトルのインダクタンスを下げる。この場合の動作周波数とインダクタンスおよび交流抵抗との関係を電磁界解析ツール(ANSYS Maxwell)にて解析した結果を図8、図9(青線)に示す。

エッジワイズコイルの場合、インダクタンスは周波数が上がるにつれて低減し、動作周波数10kHzでは低周波

(100Hz) 時に比べて15%近く小さくなるのがわかる。また、動作周波数10kHzにおける交流抵抗は0.2Ωとなり、直流抵抗値16mΩに対して約12倍の値となる。

つぎに、コイルに発生する渦電流損失 P_e について検討する。 P_e は式(3)のようにリアクトル交流電流の2乗と交流抵抗から導出できる。

$$P_e = R_{ac} \cdot I_{ac}^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで R_{ac} は交流抵抗、 I_{ac} はリアクトル電流の交流成分実効値である。

リアクトル電流の交流成分実効値 I_{ac} は式(4)にて近似することができる。

$$I_{ac} \cong \frac{V_i \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)}{4Lf} \dots\dots\dots (4)$$

ここで V_i : 昇圧前電圧、 V_o : 昇圧後電圧、 L : インダクタンス、 f : 動作周波数である。

昇圧前200V、昇圧後600V、リアクトルインダクタンス300μH、動作周波数10kHzの場合、交流電流は式(4)に基づき $I_{ac} = 11A$ 、交流抵抗は0.2Ωであるため、コイル渦電流損失は式(3)に基づき24Wとなる。

これに対して、図5のようなフラットワイズコイルをポット型リアクトルに適用した場合、リアクトルのコイル空間に生じる磁束は図7 (b) のように銅帯方向に平行に貫通する。ここで、銅帯の厚さ t を表皮深さに対して半分以下に設定すると、銅帯に発生する渦電流は十分に小さくなり、先に述べたエッジワイズコイルで現れたようなインダクタンス低下や交流抵抗増大を抑えることが可能となる。この銅帯厚さの上限 $\delta/2$ は図6の破線で表される。例えば、現在のHEV/EVリアクトルの動作周波数である10kHz前後では銅帯厚さを0.35mm以下、今後のリアクトル小型化で想定される動作周波数40kHzの場合は銅帯厚さを0.15mm以下にすることにより、渦電流を効果的に抑制できる。

例として、厚さ0.3mm、幅20mmの銅帯をフラットワイズコイル（直流抵抗16mΩ）としてギャップ間隔10mmのポット型磁心に適用した場合のインダクタンス、交流抵抗の磁場解析結果を図8、9(赤線)に示す。フラットワイズコイルのインダクタンスはエッジワイズコイルと異なり、低周波~10kHzまでほとんど変化することがない。また、10kHzにおける交流抵抗は60mΩで、前述の昇圧回路動作条件におけるコイル渦電流損失は7Wとなり、エッジワイズコイルに比べて1/3以下に抑制される。ただし、周波数が高くなるに従って表皮深さが浅くなるため、 $\delta/2$ が0.3mmを下回る高い周波数領域では交流抵抗が急激に増加する。

したがって、より高周波領域で動作させるには、動作周波数における表皮深さの半分($\delta/2$)以下の厚さの銅帯を使用する必要がある。図9(赤細線)に銅帯厚さ0.1mmの場合の交流抵抗を併記したが、この場合、 $\delta/2$ に相当する100kHzまでの交流抵抗は低く抑えることが可能となる。

このように、動作周波数に応じた厚さの銅帯をフラットワイズに巻くことにより、高周波でもコイル渦電流損失が

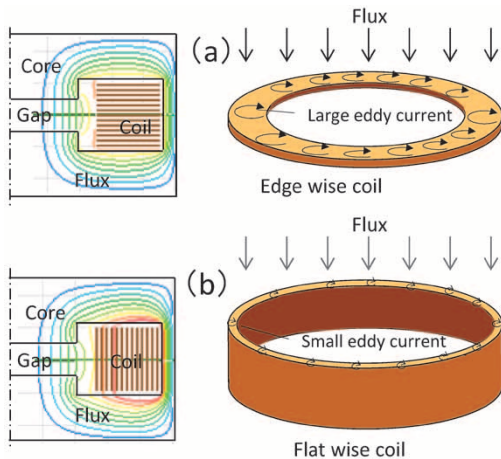


図7 (a) エッジワイズコイルの渦電流
(b) フラットワイズコイルの渦電流
Fig. 7 (a) Eddy current of an edge wise coil
(b) Eddy current of an flat wise coil

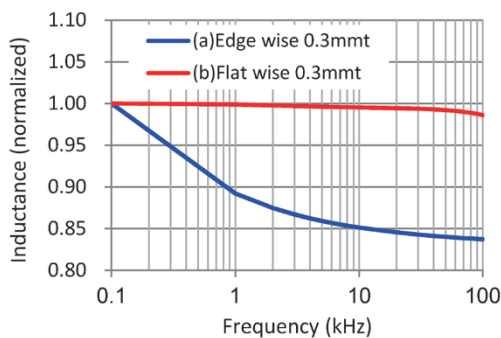


図8 インダクタンスの周波数特性(解析)
Fig. 8 Inductance frequency response (analysis)

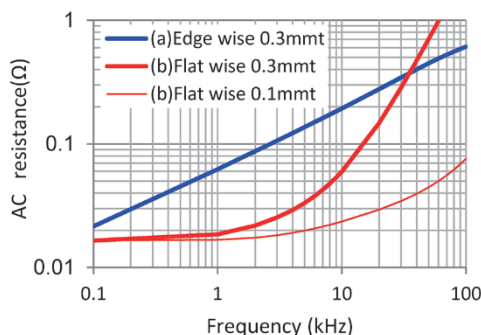


図9 交流抵抗の周波数特性(解析)
Fig. 9 AC resistance frequency response (analysis)

小さく、インダクタンス特性も優れたリアクトルを実現することが可能となる。

2. モデル実験

前章で述べたエッジワイズコイル (Coil a), およびフラットワイズコイル (Coil b) をそれぞれ、ギャップ間隔の広いポット型圧粉磁心に装着したモデルを試作し、インダクタンスおよび交流抵抗とコイルの伝熱性能を実測した。モデル実験に用いた圧粉磁心とコイルの構成を図10に示すとともに、各コイルの仕様およびリアクトルの設計パラメータを、それぞれ表1, 表2に示す。圧粉磁心は絶縁被膜を施した粒径約100 μ m以下の磁性鉄粉を用いており、磁心に生じる渦電流損は十分小さい。

エッジワイズコイルは、解析では0.3mm厚、20mm幅の導体モデルとしたが、巻線加工が困難なため、実測用モデルでは0.8mm厚、10mm幅とした。

2.1 電気的特性の実測結果

両コイルを圧粉磁心に挿入した場合の電気的特性として、インダクタンス/周波数特性の実測値を図11 (プロット点) に示す。また、実験モデルと同条件の数値解析結果 (曲線) も同図に併せて示した。

エッジワイズコイル (Coil a, 青曲線) は、周波数増大に伴ってインダクタンスが低下し、動作周波数10kHzでは低周波 (100Hz) 時に比べて約6%インダクタンスが小さくなる。これに対してフラットワイズコイル (Coil b, 赤曲線) は、周波数100kHzまでほぼ一定のインダクタンスを維持する。ここでフラットワイズでは、実験結果と数値解析予測はよく一致している。しかしエッジワ

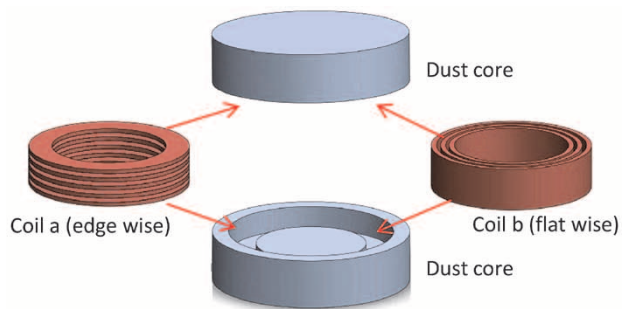


図10 実験モデルの構成
Fig.10 Construction of experimental model

表1 モデル実験コイルの仕様
Table 1 Specification of the Coil

	Inside diameter (mm)	Outside diameter (mm)	Wire diameter (mm)	Wire turns	weight (g)	DC resistance (m Ω)
Coil a (Edge wise)	60	80	0.8t \times 10	23	320	12.7
Coil b (Flat wise)	65	80	0.3t \times 20	23	260	16.5

表2 リアクトル設計パラメータ
Table 2 Design parameter of reactor

Design parameter of reactor	S (mm ²)	l_c (mm)	l_g (mm)	μ_c	Wire turns
	1,900	140	10	90 - 110	23

イズは、数kHz以下の領域では解析と実験結果は一致するが、高周波領域でのコイル渦電流の挙動を解析で再現しきれず、2%程度の差異が生じている。

図12に各コイルの交流抵抗/周波数特性の数値解析結果と実測値を示す。厚さ0.3mmの銅帯フラットワイズコイルは周波数10kHz以下の領域においてエッジワイズコイルに比べて交流抵抗を低く抑えることができている。このように、動作周波数に応じてフラットワイズ銅帯の厚さを選択することによってコイルに発生する渦損を大幅に低減可能となる。なお、フラットワイズコイルの実験結果と数値解析予測とは良い精度で一致しているが、エッジワイズコイルでは周波数10kHz以上の領域において周波数の増大に伴って解析結果と実験結果の乖離 (かいはり) が大きくなっており、高周波領域における解析精度に課題を残した。

2.2 放熱性について

エッジワイズおよびフラットワイズ各コイルの熱伝導性能を測定した結果を図13に示す。

この実験では、コイルの銅帯間および圧粉磁心との界

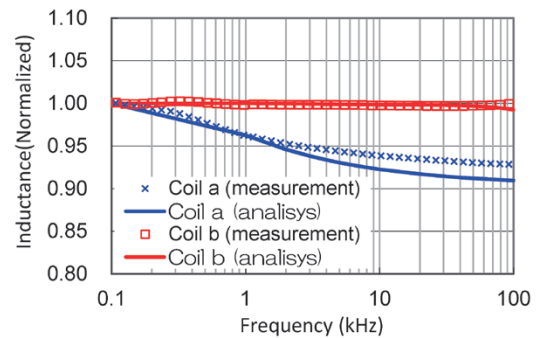


図11 インダクタンスの周波数特性
Fig.11 Inductance frequency response

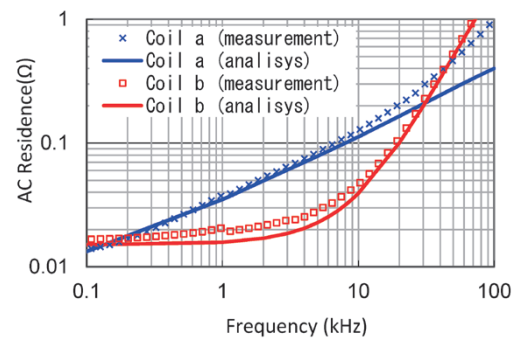


図12 交流抵抗の周波数特性
Fig.12 AC resistance frequency response

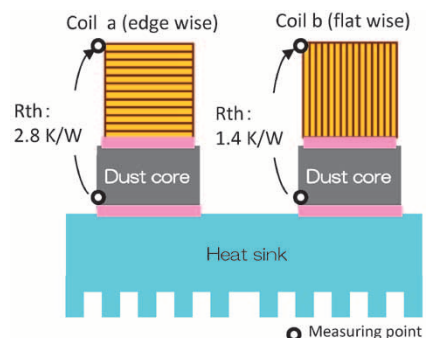


図13 コイルの熱抵抗
Fig.13 Thermal resistance of coil

面には熱伝導率1.1W/mKの樹脂を塗布し、コイルに30Wの損失が生じるように50A程度の直流電流を流した。その結果、エッジワイズコイルの最上部と圧粉磁心間の熱抵抗 R_{th} は2.8K/W、フラットワイズコイルの最上部と圧粉磁心間の熱抵抗は1.4K/Wとなった。エッジワイズに比べてフラットワイズコイルの熱抵抗は半分抑えられており、フラットワイズコイルの高い伝熱特性を確認した。

3. 考察

両モデルの実測における性能の比較表を表3にまとめる。ここで提案したフラットワイズモデルは、現在多用されているエッジワイズモデルに対して、現行HEV/EVの動作周波数帯域である10kHz前後における交流抵抗が小さく、かつヒートシンクへの伝熱に優れている。また1章で示したとおり、銅帯の厚さを動作周波数に対応する表皮深さの半分以下に設定することにより、さらに高周波動作でも交流抵抗すなわちコイルの渦電流損失を大幅に低減することができる。このことは、大電流対応かつ小型化が望まれるHEV/EV用パワーユニット

表3 実験結果のまとめ
Table 3 Summary of a experimental result

	Inductance reduction rate(%)	AC resistance (mΩ)	Thermal resistance (K/W)
Condition	10Hz to 10kHz	@10kHz	From coil to core
Coil a (Edge wise)	-6	130	2.8
Coil b (Flat wise)	0	50	1.4

ト向けのリアクトルに本提案構造を採用することにより、大電流時の磁気飽和を抑制するワイドギャップ化、および小型化のための動作周波数の高周波化が実現できることを示している。

エッジワイズコイルは、巻線工程において特殊な塑性加工を伴うため、高周波化を目的に板厚を薄くしようとすると成形加工が難しくなる。それに対してフラットワイズコイルは、素直なテープ巻工法であるため、加工コストの点においても有利である。

本稿にて提案した圧粉磁心と銅帯コイルで構成した低損失リアクトルは、HEV/EV用途に限らず、変動しやすい再生エネルギー用途のパワーコンディショナ向けの昇圧リアクトルやACフィルタなどにも応用可能である。

むすび=ポット型の圧粉磁心リアクトルに銅帯フラットワイズコイルを組み合わせる^{5), 6)} ことにより、HEV/EV用途に適した大電流・高放熱のリアクトルを実現できることを示した。さらに、銅帯を動作周波数ごとに適した厚さにすることで、コイルに生じる渦電流損失を大幅に低減できることを示した。今後、圧粉磁心の特徴を生かした本構造によって、HEV/EVリアクトルの小型化が期待される。

参考文献

- 1) 矢口英明ほか. TOYOTA Technical Review. 2010, Vol.57, No.1, p.12-19.
- 2) 黒木次郎ほか. Honda R&D Technical Review. 2013, Vol.25, No.2, p.41-47.
- 3) 山本信一郎ほか. SEI Technical Review. 2014, No.185, p.29-33.
- 4) 川原英樹ほか. 電気学会全国大会 講演集. 2015, Vol.4, p.153.
- 5) 特許第4654317号. 国際公開番号WO2011/007879.
- 6) 特許第5149976号. 国際公開番号WO2012/137494.