

高周波磁気特性と加工性を両立させた 高周波用薄電磁鋼板「HiFreqs」の材料特性と適用例*

川崎製鉄技報
35 (2003) 1, 7-10

Material Properties and Applications of High-Frequency Thin Electrical Steel Sheets “HiFreqs” with Superior Magnetic Properties and Workability



定廣 健一
Kenichi Sadahiro
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(主席掛長)



石田 昌義
Masayoshi Ishida
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(課長)・
理博



本田 厚人
Atsuto Honda
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(部長補)・
工博

要旨

Si 鋼に対する高純度化技術と Cr 添加技術とを複合的に利用することにより、高周波特性と加工性がともに良好な高周波用薄電磁鋼板「HiFreqs」を開発した。本開発材料は以下の特長を有する。(1) 代表的な高周波用薄電磁鋼板である 6.5%Si 鋼と同等の比抵抗を有し、5kHz 以上で良好な高周波低鉄損特性を示す。(2) 従来の Si 鋼レベルの伸び特性および硬度特性を有し、マイクロモータをはじめとするきめ細かい設計・加工を必要とするコア材としても使用可能である。本開発材料は、5kHz 以上の周波数で良好な鉄損特性を有しており、種々のパワーエレクトロニクス機器、高周波電源機器、高速電動機への適用が考えられる。本論文では、このような周波数領域での応用事例として、まず、25kHz のリップル電流と低周波電流とが重畳的に印加されるインバータ用高周波リアクトルコアへの適用例を紹介し、優れた特性を有することを明らかにした。次に、70kHz の高周波誘導加熱用インピーダに適用した例を取り上げる。本開発材を用いることにより、コア部材の寿命を延長することができた。さらに、高速アクチュエータへの応用を想定し、鉄心のパルス応答性評価を行い、その高比抵抗特性により優れた高速応答性を有するとの知見を得た。

Synopsis:

By combinedly utilizing high level steel purification technique and Cr addition to Si-steel, Kawasaki Steel has developed thin gauge high frequency use electrical steel called “HiFreqs” which shows both low high frequency iron loss and good workability. The characteristics of this material are as follows. (1) HiFreqs has resistivity as high as that of 6.5%Si steel and shows excellent high frequency iron loss properties at over 5 kHz. (2) HiFreqs has as good mechanical properties like elongation and hardness as conventional Si steel and can be used as core materials of complicated shapes, e.g. micro motor, which require good workability. HiFreqs have wide range of application to power electronics machines, high frequency power supplies and high speed motors. This paper first describes an application to a reactor core used in an inverter, which is magnetically excited by fundamental frequency component and high frequency ripple component of frequency such as 25 kHz. HiFreqs showed lower iron loss than those of amorphous cores. As another application, HiFreqs is applied to an impeder core used in induction heating for a pipe mill driven at 70 kHz. HiFreqs bestowed an elongated span of life on the impeder core. For the application to a high-speed actuator, pulse response properties were also investigated. Thanks to its high resistivity, this material showed shorter response time than conventional materials.

1 緒言

近年、インバータの電気機器への応用は、大型の産業機器からエアコン、ハイブリッド自動車といった家庭用機器まで、省エネルギー

* 平成14年10月21日原稿受付

ーと快適性の要求に応えるため、ますます広がりつつある。このようなインバータ回路においては、IGBT や MOS-FET といったパワー半導体スイッチング素子が、大容量の電力パワーを高精度かつ柔軟に制御するために用いられており、その駆動周波数は、数 kHz から 100 kHz 程度にまで及んでいる。それゆえに、高調波成分などのノイズ成分を除去するために用いられるインダクタンス成分となる鉄心材にも、この周波数領域での低鉄損特性が求められている。このような用途には、従来、高周波特性に優れたアモルファスや高ケイ素鋼板が用いられてきた。しかし、これらの材料は、高周波の磁気特性には優れたものの、硬度が高く、加工が困難であり、より加工性に優れた高周波用の材料が求められていた。

川崎製鉄では、このようなニーズにこたえるため、高周波特性と加工性を両立させた新しい薄電磁鋼板 HiFreqs を開発した¹⁻⁵⁾。本報では HiFreqs の材料特性と応用例について報告する。

2 材料の高周波特性と加工性

電磁鋼板分野にとって高周波領域である 1 kHz 以上 100 kHz 以下といった領域の鉄損では、渦電流による損失が支配的である。素材の特性として、渦電流に影響する比抵抗を増加することにより、渦電流の発生ひいては鉄損の増大を抑制することができる。この比抵抗を増大させる方法は、従来、Si の添加が中心であった。この意味で電磁鋼板は、別名ケイ素鋼板とも呼ばれている。このほかの比抵抗増加元素としては、Al, Mn が主要な元素である。

これに対し、本研究で着目する新材料においては、Si 鋼に対する比抵抗増加元素である Cr の働きに着目した。Fig. 1 に示すように、Cr は、Fe 単独の成分系に添加しても、比抵抗を増大させる働きをもつが、Fe-3%Si 系に添加することにより、より大きな比抵抗増加効果を発揮している。これにより、少ない合金成分で、高い比抵抗を有する素材を得ることができる。本研究の新材料では、4.5% の Si と 4.0% の Cr を添加した鋼により、比抵抗 $82 \mu\Omega\text{cm}$ を達成している。この値は、代表的な高周波電磁鋼板である 6.5%Si 鋼と同等の値である。この新材料を、高周波の特性が良好であるという点から、以下 HiFreqs と呼ぶ。

Fig. 2 に、従来の 0.2 mm 厚みの 3%Si 鋼と HiFreqs の 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz (それぞれ磁束密度の最大値は、0.2 T, 0.1 T, 0.05 T である) における鉄損を示す。HiFreqs は従来鋼と比較して、周波数が高くなるほど、鉄損の面で有利な材料であることを示している。

次に、HiFreqs のもう一つの特長である加工性について述べる。通常、4% 以上の Si を鋼に添加すると、鋼が硬かつ脆くなる。そ

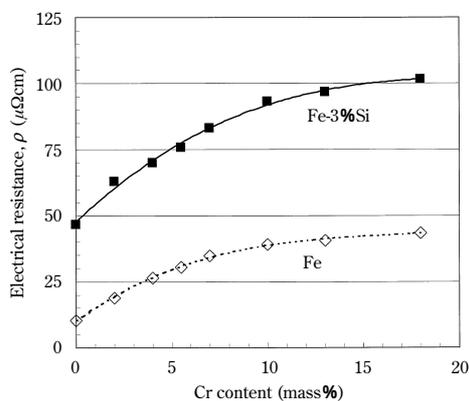


Fig. 1 Effects of Cr addition to 3%Si steel on electrical resistance

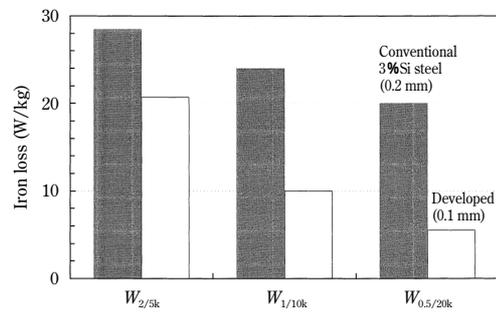


Fig. 2 Comparison of iron loss at various frequencies between developed (0.1 mm in thickness) and conventional 3%Si steel (0.2 mm in thickness)

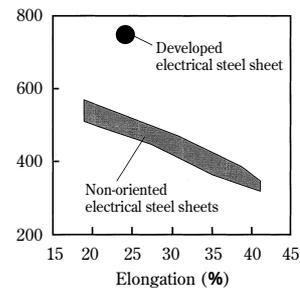


Fig. 3 Tensile strength and elongation of developed electrical steel sheet

のため、鉄鋼業において広く行われている圧延と焼鈍による製造が長らく困難とされてきた。これに対し、製品厚みまで圧延した後に、Si を CVD (化学気相法) により、鋼板に拡散させる技術が工業化された。しかし、この方法でもできあがった製品を、さらに、最終コア形状に加工するにあたっては、形状の制約があり、加工性と高比抵抗とを両立させることができる材料の開発が待たれていた。HiFreqs は、高純度化した Si 鋼に Cr を添加すると高比抵抗と良加工性の両方を同時に達成できるという新規な知見に立脚して開発された。Fig. 3 に HiFreqs と従来の無方向性電磁鋼板の伸びと引張強度との関係を示す。従来の鋼板では、Si の添加により引張強度を高めていくと伸びが 20% 程度となってしまい、加工しづらくなっていく。これに対し、HiFreqs は、従来材を超える強度を示すにもかかわらず、25% 程度の伸びを確保しており、従来鋼なみの加工性を有していると言える。また、HiFreqs の硬度は、ピッカース硬度で、230 であり、3%Si 鋼並みの値である。この値は、6.5%Si 鋼のピッカース硬度 350 やアモルファスの 900 に比べ格段に優れたものである。

Photo 1 は HiFreqs をマイクロモータコアに加工した様子を示している。従来材と同様に打抜きとカシメ加工が可能であった。

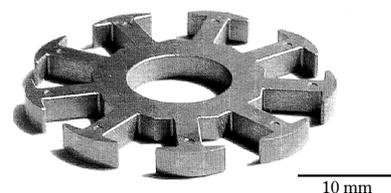


Photo 1 Appearance of a motor core produced by an interlocking lamination method

3 高周波駆動機器への応用例

3.1 インバータ電気機器用高周波リアクトルへの適用

インバータを用いる電気機器においては、いったん商用周波数の交流を直流に変換、すなわち整流した後、さらに周波数や電圧の異なる所望の交流に変換している。このような整流回路を含む回路では、平滑コンデンサへの突入電流により高調波成分を多く含む電流が流れる。この高調波成分は、電源回路を逆流し、同系統に接続されているコンデンサなどを焼損するなどの影響が出る。この高調波成分を除去するため、通常二種類の方法が採られている。一つは、高調波成分をフィルタリングするためのインピーダンス成分すなわちリアクトルを回路に直列に挿入する方法である。インピーダンスは周波数とともに増大し、高周波の電流成分を選択的に除去することができる（パッシブフィルタ）。もう一つは、Fig. 4 に示す方法であって、高周波のスイッチング素子により、入力電流の波形を強制的に、入力電圧と同じ正弦波に合わせ込む方法である（アクティブフィルタ）。後者の方法では、スイッチング周波数である数 kHz から数 10 kHz の速さでの、高周波リアクトルへの磁気エネルギーの蓄積と放出がきめ細かく行われることとなる。そのため、この高周波リアクトルの鉄心材料には、そのような高周波でのエネルギーの授受を高効率に行うため低鉄損が求められる。

リアクトル用素材の比較として市販のリアクトルコアであるアモルファスコアに加え、HiFreqs でも同等のインダクタンスを有するリアクトルコアを試作し、実際に、2.5 kW の電気機器の電源回路に組み込んで、鉄損を測定した。その結果の比較を Fig. 5 に示す。この機器のスイッチング周波数は 25 kHz であった。HiFreqs は、従来の材料と比べて損失が小さく、リアクトル用コア材料として遜色ない特性を有すると言える。

3.2 電縫管の誘導加熱溶接用インピーダへの適用例

電縫管の高周波誘導加熱溶接に用いられているインピーダへの適用結果について述べる。インピーダとは、Fig. 6 に示すとおり、加

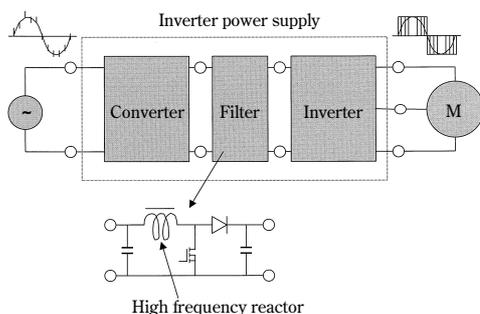


Fig. 4 Schematic diagram of a reactor used in an inverter circuit

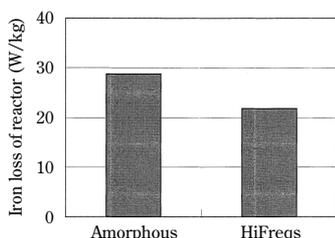


Fig. 5 Comparison of iron losses of reactors using different core materials

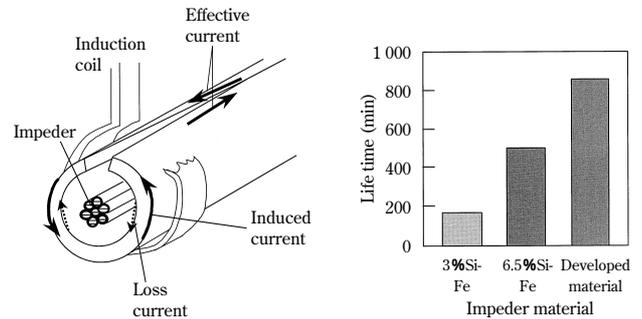


Fig. 6 Schematic diagram of induction welding and influence of core material on impeder lifetime

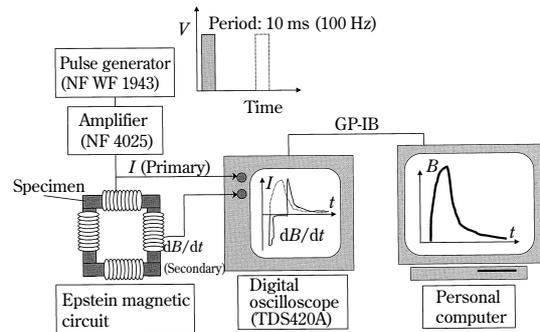


Fig. 7 Schematic diagram of the measuring apparatus for the pulse response property

熱用誘導コイル近傍の溶接対象物内に配置される棒状の軟磁性材料である。ここで、誘導コイル直下の鋼管表層部には、誘導電流が誘起されるが、この誘起電流は、溶接部位に流れ込む有効電流とコイル直下の鋼管内面を流れる損失電流とに分岐することが知られている⁶⁾。溶接のためには、この損失電流を鋼管内部に配置したインピーダンス成分すなわちインピーダにより抑制し、有効電流を増大させることが肝要となる。このとき誘導コイルには、通常数 10 kHz から数 100 kHz の高周波電流が投入されているため、インピーダにも同様の高周波励磁が加わる。通常、インピーダは水冷されているが、一定時間の作業により溶損などの破壊にいたり、その都度交換しているのが現状である。

70 kHz の周波数で誘導加熱溶接しているミルにおいて、現行材である 3%Si 鋼の方向性電磁鋼板を 0.1 mm に再圧したもの、および 0.1 mm の 6.5%Si 鋼、HiFreqs によりインピーダを試作し、実際に溶接実験を行った。インピーダの寿命を評価した結果を Fig. 7 に示す。HiFreqs では、3%Si 鋼の 4 倍程度の寿命を達成できることが明らかになった。

3.3 高速アクチュエータ向けパルス励磁特性の検討

高速アクチュエータ向けパルス励磁に対する評価結果を議論する。先のインバータ同様、近年、直流を任意の幅に分断した矩形波電圧をアクチュエータやモータの磁性体コアに印加することが広く行われている。ここでは、近年注目が集まりつつあるエンジンの吸排気バルブのカム駆動から電磁駆動への転換を想定し、磁性体コアがパルス幅 2.5 ms、印加周期 10 ms (100 Hz) で繰り返し励磁されたときの磁束変化の応答性を評価した。磁路は、JIS で規定されているエプスタイン枠を用いた。一次側に矩形波電圧を印加し、そのときの電流および磁束密度の時間変化をデジタルオシロスコープでデータ収集したのち、パーソナルコンピュータにて解析した。

Fig. 8 に、磁束密度の時間変化波形における HiFreqs と従来の無

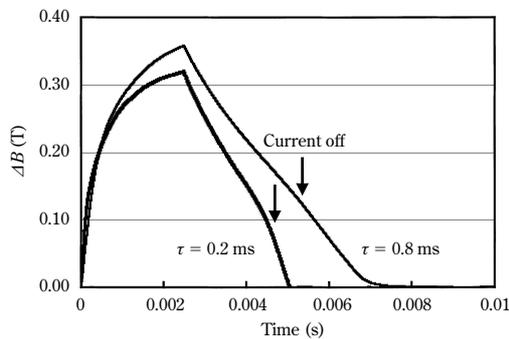


Fig. 8 Comparison of relaxation waveform of flux density in the pulse response behaviors

方向性電磁鋼板の比較を示す。図中の矢印は、電流がほぼゼロに減衰した瞬間を示している。電流が減衰した後も、磁束波形は、ゆるやかに減衰している。この領域を指数関数で近似し、緩和時間を求めた（図中、 τ ）。HiFreqs の緩和時間は、0.2 ms となり、従来材に比べ約 1/4 であった。実際のコアでは磁路にギャップがあるため反磁場を生じ、緩和時間は、さらに短くなる⁷⁾。

4 結 言

新たに開発した高周波用薄電磁鋼板の材料特性と高周波機器への適用を検討した結果、以下の点が明らかになった。

(1) HiFreqs は、従来の無方向性電磁鋼板に比べ、5 kHz 以上の

高周波域で、周波数が高くなるほど、低鉄損となる特性を示した。これは、代表的な高周波電磁鋼板である 6.5%Si 鋼 とほぼ同等の比抵抗を有するためである。

(2) HiFreqs は、高純度化技術と Cr の複合添加技術とにより、良好な伸び特性、低硬度特性という良好な加工性を有している。加工性の改善は、お客様でのコア加工においても、きめ細かい設計要求に対応したプレス加工を可能にする。

本報では、HiFreqs 材を、3 種類の高周波電気機器に適用した。

(1) 25 kHz の駆動周波数のスイッチング回路を有する家庭用インバータ電気機器のフィルタ回路に適用し、同一動作状態でのコアの損失を評価した。HiFreqs は、市販コアであるアモルファスよりも良好な損失特性を示した。

(2) 70 kHz の周波数で誘導加熱溶接される電線管製造装置に用いられているインピーダと呼ばれる軟磁性材コアに適用した。その結果、従来用いられていた 0.1 mm 厚みの方向性珪素鋼再圧材に対して、およそ 4 倍の寿命を得ることができた。

(3) 高速応答アクチュエータを想定したパルス励磁特性を検討した結果、従来の無方向性電磁鋼板に比して、約 1/4 の応答時間を達成できた。

以上のように HiFreqs は、パワーエレクトロニクス技術に象徴される数 kHz から数 10 kHz の領域で駆動される高周波機器で活用できる材料である。パワーエレクトロニクス機器、アクチュエータ、高速モータなどのさらなる高効率化に应用されることを期待して、今後も、いっそうの材料開発、応用技術開発を進めていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 近藤 修, 河野正樹, 本田厚人, 高城重彰, 小松原道郎: 電気学会基礎材料共通部門大会, (2000)146
- 2) M. Kawano, O. Kondo, S. Takajo, A. Honda, and M. Komatsubara: The 4th Pacific Rim Int. Conf. on Advanced Material and Proc. (PRICM4), The Jpn. Inst. of Metals, (2001)2825
- 3) 定廣健一, 近藤 修, 石田昌義, 小松原道郎: 電気学会全国大会, 2(2001)747
- 4) K. Sadahiro, M. Ishida, A. Honda, and M. Komatsubara: The New Automotive 42V Power Net, (2001)234
- 5) M. Komatsubara, K. Sadahiro, O. Kondo, T. Takamiya, and A. Honda: *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, (2002)212
- 6) 鉄鋼便覧 第3版, 1079, [日本鉄鋼協会]
- 7) 本蔵義信, 藤井秀樹: 鉄と鋼, 77(1991), 840