

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560305

研究課題名（和文）：磁界・振動・音場併用解析を用いたインバータ用リアクトルの低騒音化に関する研究

研究課題名（英文）：Noise Reduction of Reactor Driven by Inverter Power Supply Using Coupled Magnetic, Vibration and Acoustic Analysis

研究代表者

村松 和弘（MURAMATSU KAZUHIRO）

佐賀大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30263627

研究成果の概要（和文）：インバータ用リアクトルの低騒音化を検討するため、電磁力と磁気歪の両方を考慮できる三次元磁界・振動併用解析法を開発し、リアクトルの騒音発生メカニズムを明らかにするとともに、実測で検証した。さらに、電磁力による鉄芯全体の縮みと磁気歪による伸びをキャンセルする絶縁物の最適硬さの算出法を明らかにするとともに、ヨークにもギャップを設ける低騒音型三相リアクトルを提案し、解析により鉄芯の振動が1/25に低減できることを示した。

研究成果の概要（英文）：To investigate the noise reduction of reactors driven by inverter power supplies, the method of the coupled magnetic and vibration analyses taking account of both electromagnetism and magnetostriction was developed, and the mechanism of noise generation was analyzed and verified by the measurement. Moreover, the methods of determining the optimal hardness of gaps and adding gaps in the yokes without changing the balance and reluctance of a three-phase reactor were also proposed. It was shown that the displacements of the improved reactor can be reduced to be 1/25 of the ordinary reactor in the 3-D analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学，シミュレーション工学，リアクトル，騒音，磁界解析，構造解析，

積層鉄芯，磁気歪，電磁力

## 1. 研究開始当初の背景

モータなどの電動機を駆動する際、始動特性や力率の改善などのためリアクトルが用いられることが多い。近年、駆動用電源として、電流波形を自由に制御できるインバータ電源が盛んに用いられているが、この電源の

電流波形には高調波成分が含まれ、この高調波成分によるリアクトル鉄芯の振動に起因した騒音が問題となっている。

現在、電気機器から発生する騒音を低減する方法としては、機器全体を厚い鉄製の箱で囲む方法が多く用いられるが、これは重量・

経済的な面から適切な対処方法とは言えない。一方、機器自体の騒音を低減する方法として、巻線や鉄芯全体をエポキシ樹脂で固着する方法や鉄芯を複数のボルトで固定する方法などが用いられているが、何れも試行錯誤的に行なわれているのが現状である。そのため、数値解析などの手段を用いて機器の騒音発生メカニズムを明らかにし、抜本的な対策を検討する必要がある。電気機器の騒音解析の例としては、モータなどの回転機においてギャップ間に働く電磁力による振動を音源とした解析例が国際会議などで数件報告されているが、対策までは言及されていない。また、変圧器など鉄芯間にギャップが無い静止器では磁気歪による振動が騒音の主な要因とされているが、磁気歪のモデリング手法も未だ確立されていないのが現状であり、機器全体の解析例の報告は無い。また、リアクトルは鉄芯間にギャップを有する静止器であるため、電磁力と磁気歪のどちらが支配的であるかさえも明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、インバータ用リアクトルの低騒音化を目的とし、電磁力と磁気歪の両方を考慮した三次元磁界・振動併用解析法を開発するとともに、実器リアクトルに適用し、騒音発生メカニズムを明らかにするとともに、低騒音型インバータ用リアクトルを開発する。

## 3. 研究の方法

まず、鉄芯振動の要因の一つと考えられる鋼板の磁気歪のモデリング手法として、磁気歪を鋼板に働く力による変形と解釈し、磁気歪を等価的な力でモデル化することにより、鉄芯間のギャップに働く電磁力と磁気歪の両方を考慮した磁界・振動併用解析法を開発する。次に、開発した手法をインバータ電源用リアクトルに適用し、騒音の発生メカニズムを明らかにするとともに、実測で検証する。さらに、その騒音発生メカニズムから、低騒音型インバータ用リアクトルを提案する。

## 4. 研究成果

(1) 電磁力と磁気歪を考慮した鉄芯の磁界・振動併用解析法の開発

騒音の原因となる鉄芯振動の挙動を電磁力と磁気歪の両方を考慮して解析するため、鉄芯の電磁力と磁気歪を節点力でモデリングした磁界・振動併用解析法を開発した。

まず、磁界解析には、有限要素法による三次元非線形渦電流解析を用いた。その基礎方程式を次式に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_o - \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \quad (1)$$

$$\text{div} \left\{ -\sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \right\} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ 、 $\phi$ 、 $\mathbf{J}_o$ 、および $\nu$ は、それぞれ磁気ベクトルポテンシャル、電気スカラーポテンシャル、強制電流密度、磁気抵抗率である。なお、非線形反復にはニュートン・ラフソン法を用い、時間反復には過渡解析用のステップ・バイ・ステップ法を用いた。

次に、鉄芯に働く電磁力の算出には、節点力法を用いた。この方法では、磁性体の節点 $ip$ に働く電磁力 $f_{em}^{(ip)}$ を次式より求める。

$$\mathbf{f}_{em}^{(ip)} = -\int_{\Omega} T \cdot \text{grad} N^{(ip)} dV \quad (3)$$

ここで、 $T$ はマクスウェルの応力テンソル、 $N^{(ip)}$ は節点 $ip$ の補間関数である。

次に、鉄芯の磁気歪は以下の方法でモデリングした。まず、磁性体中の磁束密度の大きさが $B$ であるとき、 $B$ に平行および垂直な磁気歪 $\varepsilon_p$ および $\varepsilon_v$ を次式で仮定した。

$$\varepsilon_p = \alpha B^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = -\nu_{ms} \varepsilon_p \quad (5)$$

ここで、 $\alpha$ は材料定数、 $\nu_{ms}$ は材料力学のポアソン比に相当する。これら磁気歪を用いれば、要素 $ie$ の節点 $ip$ の変位 $\mathbf{u}^{(ip)}$ は次式で表される。

$$\mathbf{u}^{(ip)} = \varepsilon_p \mathbf{l}_p + \varepsilon_v \mathbf{r}_v \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{i}_p$ 、 $\mathbf{i}_v$ は、 $\mathbf{B}^{(ie)}$ に平行、垂直な単位ベクトルであり、 $l$ と $r$ は要素 $ie$ の中心と節点 $ip$ の線分の $\mathbf{i}_p$ 、 $\mathbf{i}_v$ 成分の長さである。要素 $ie$ の各節点 $ip$ に働く節点力 $\mathbf{f}_{ms}^{(ip)}$ は有限要素法で定義される剛性マトリックス $K$ を用いて次式で求めた。

$$\mathbf{f}_{ms}^{(ip)} = K \mathbf{u} \quad (7)$$

最後に、電磁力と磁気歪を考慮した振動解析は次式を基礎方程式とする有限要素法を用いて行った。

$$M \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + K \mathbf{u} = \mathbf{f}_{em} + \mathbf{f}_{ms} \quad (8)$$

ここで $M$ は質量マトリックスである。

(2) リアクトルの騒音の発生メカニズム

インバータ用リアクトルの電磁力と磁気歪を考慮した磁界・振動併用解析を行った。

図1に、従来の脚のみに絶縁物が挿入されたギャップを有する単相リアクトルとヨークにもギャップを設けた改良型モデルを示す。本リアクトルに、実際のインバータ電源で励磁した高調波成分を含む図2の電流を与えた場合の磁界・振動併用解析を行った。表1に、鉄芯の材料定数を示す。ここでは、ギャップに挿入された絶縁物の硬さとギャップの配置が振動に及ぼす影響を検討した。

図3に、従来型モデルで柔らかい絶縁物がギャップに挿入された場合の磁界解析と静的構造解析で得られた変位分布を示す。騒音の原因となる表面の変位はヨークで大きくなるのがわかる。またこのヨーク部に着目すると、ヨークは、電磁力により脚側に引き

付けられ、磁気歪により  $x$  方向に伸びていることがわかる。

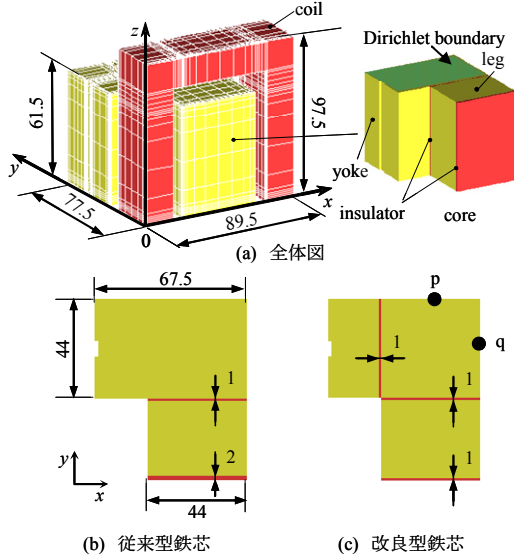


図1 単相リアクトルモデル

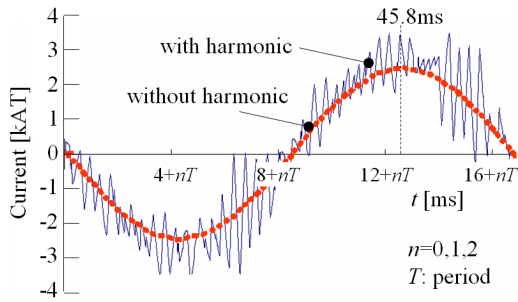


図2 電流波形

表1 鉄芯の材料定数

Parts	Young's modulus $E$ (GPa)	Poisson ratio $\nu$	Mass density $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Constant in (1) $\alpha$ ( $\text{m/T}^2$ )	Conductivity $\sigma$ (S/m)
Core	200	0.28	7,650	$7.8 \times 10^{-6}$	$1.96 \times 10^6$
Soft insulator	0.05	0.33	1,400	-	-
Hard insulator	3	0.33	1,400	-	-

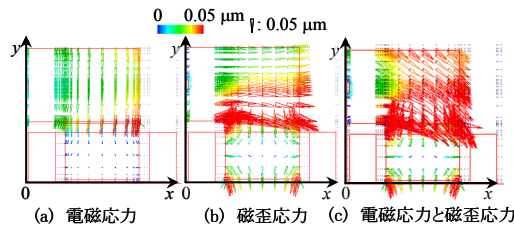


図3 従来型リアクトルの変位分布 (柔らかい絶縁物,  $z=0$ )

図4に、従来型モデルでギャップの絶縁物を硬くした場合の変位分布を示す。電磁力と磁気歪の両方を考慮した場合には、柔らかい絶縁物が挿入された場合に比べてヨーク上面の変位が小さくなっていることがわかる。これは、絶縁物を硬くすることにより、電磁

力によるヨークの $-y$ 方向の変位が小さくなり、逆に磁気歪による脚の伸びによってヨークの $+y$ 方向の変位が大きくなり、互いの変位がキャンセルされたためである。しかしながら、ヨーク側面の変位は大きいままである。

図5に、ヨークにもギャップを配置し、硬い絶縁物を挿入した改良型モデルの変位分布を示す。本モデルではヨーク側面の変位も小さくできている。

図6に、従来型でギャップに柔らかい絶縁物を挿入、および改良型でギャップに硬い絶縁物を挿入したモデルに、図2の高調波を含む電流を与えて磁界・振動併用解析をした場合の図1中に示すp点、q点の変位の周波数スペクトルを示す。この図より、改良型の方が振動も小さくなっていることがわかる。

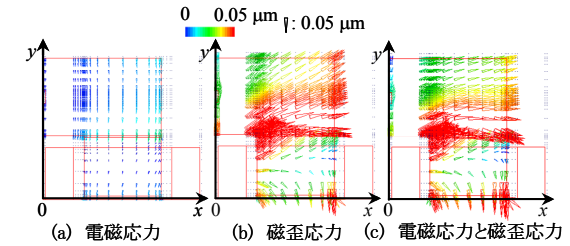


図4 従来型リアクトルの変位分布 (硬い絶縁物,  $z=0$ )

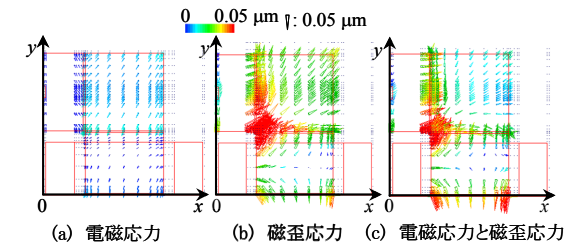
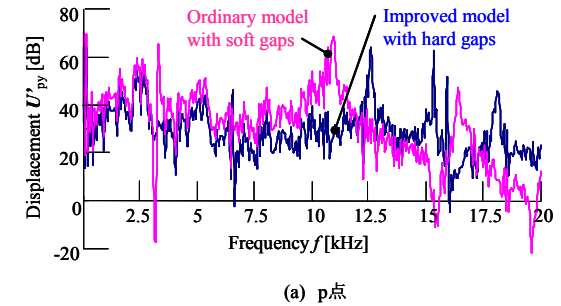
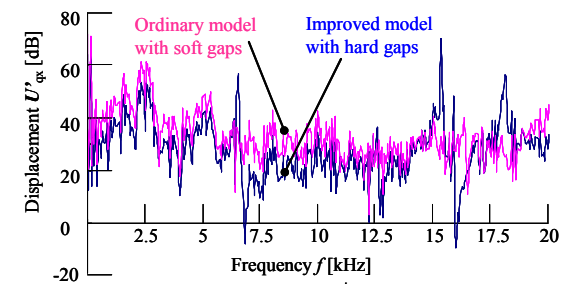


図5 改良型リアクトルの変位分布 (硬い絶縁物,  $z=0$ )



(a) p点



(b) q点

図6 変位の周波数スペクトル

### (3) 検証実験

上記騒音発生メカニズムの妥当性を検証するため、図7に示す実験モデルを用いて、従来型と改良型リアクトルの騒音レベル（A特性）を騒音計により測定した。リアクトルの実験モデルは図1と同様であるが、電流はチョッパ回路によって2.5 kHz、15%の高調波成分を含む直流電流を与えた。表2に、図7に示す各位置での騒音レベルを示す。従来型でギャップの硬さが異なるモデルを比較すると、絶縁物が硬い場合には、リアクトルの上方S3の騒音が小さくなり、側方S2の騒音は変化しておらず、この結果は、解析と良く一致しており、騒音発生メカニズムと騒音低減法の妥当性と有用性がわかる。しかしながら、改良型で硬い絶縁物を挿入したモデルでは、解析結果ではヨーク側面の振動は小さくなるが、実験では側方S2の騒音は逆に大きくなっている。これは、リアクトル製作の都合上、ヨークに設けたギャップに十分な圧力を印加することができず、絶縁物と鉄芯の間に空隙が生じたためであると考えられ、今後、製作方法を改善し、効果を検討する必要がある。

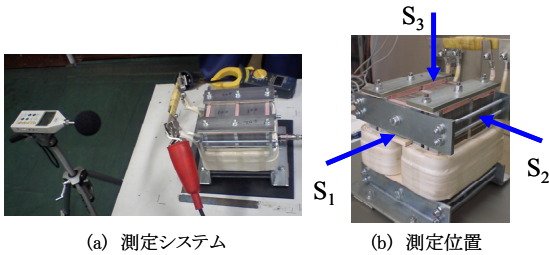


図7 騒音の実測

表2 各種モデルの騒音レベルの比較

Location of Sound level meter	Ordinary model with soft gaps	Ordinary model with hard gaps	Improved model with hard gaps
S <sub>1</sub>	72	74	66
S <sub>2</sub>	67	67	72
S <sub>3</sub>	83	72	67

### (4) インバータ用三相リアクトルの低騒音化

図8に、低騒音化設計を行った三相リアクトルの解析モデルを示す。対称性により1/4領域のみを示す。本研究では、U相電流が最大の瞬間の静的な線形磁界・構造併用解析を行った。鉄芯の透磁率 $\mu_t$ 、ヤング率 $E_t$ 、およびポアソン比 $\nu_t$ は、それぞれ $1000\mu_0$  ( $\mu_0$ :真空の透磁率)、200GPa、0.28とし、従来型リアクトルのギャップのそれら $\mu_g$ 、 $E_g$ 、および $\nu_g$ は、それぞれ、 $\mu_0$ 、50MPa、および0.33とした。

騒音を低減するには、鉄芯の磁気歪による鉄芯全体の伸びとギャップに働く電磁吸引力による鉄芯全体の縮みをキャンセルするように、ギャップに挿入する絶縁物の硬さ、すなわちヤング率 $E_g$ を決定すればよい。以下

に、この方法を用いた図9(a)に示す鉄芯形状の従来型リアクトルの騒音低減法について述べる。

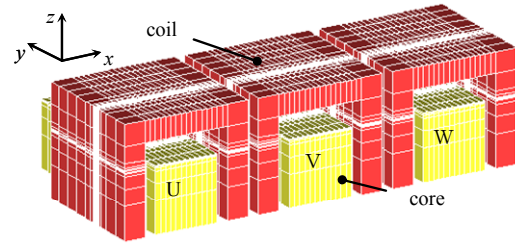


図8 三相リアクトル

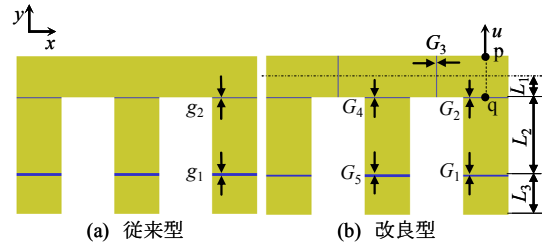


図9 鉄芯とギャップ (断面図)

まず、従来型リアクトルのヨークには、ギャップが無く上記の方法が適用できないため、改良型リアクトルでは、図9(b)に示すように、ヨークにもギャップを挿入する。その際、従来型のギャップ幅を $g_1$ 、 $g_2$ とすると、改良型のギャップ幅 $G_1 \sim G_5$ は、インダクタンスが変化しないように、次の関係を満足するように決定する必要がある。

$$g_1 + g_2 = G_1 + G_2 + G_3 = G_4 + G_5 \quad (9)$$

次に、ギャップの最適な硬さを決定する方法について、W相の脚の平均磁束密度を $B$ とした場合の図に示すp点のy方向の変位 $u$ を例に説明する。まず、磁気歪 $\epsilon_{ms}$ によるp点のy方向の変位 $u_{ms}$ は、鉄芯全体の長さを $L_t (=L_1 + L_2 + L_3)$ 、 $\epsilon_{ms}$ は磁束密度の二乗に比例、磁気歪による絶縁物の変形は無いと仮定すれば、 $u_{ms}$ は次式で与えられる。ただし、ヨークの幅方向の長さ $L_1$ は、q-p線上で磁束密度のy成分が $B$ から零まで変化するため、平均長さとしてヨーク幅の半分を選んだ。

$$u_{ms} = \epsilon_{ms} L_t = \alpha B^2 L_t \quad (10)$$

ここで、 $\alpha$ は $7.8 \times 10^{-6}$ とした。次に、ギャップに働く電磁力によるp点のy方向の変位 $u_{em}$ は、ギャップ全体の長さを $G_t = (G_1 + G_2)$ 、鉄芯は絶縁物よりも非常に硬く鉄芯全体の変形は絶縁物のみで決定されると仮定すれば、次式で与えられる。

$$u_{em} = -\frac{\sigma_{em}}{E_g} G_t = -\frac{B^2}{2\mu_0} \frac{G_t}{E_g} \quad (11)$$

ここで、 $\sigma_{em}$ は電磁応力である。変位 $u (=u_{ms} + u_{em})$ を零にするギャップのヤング率 $E_g$

の最適値は、(10), (11)式より次式となる。

$$E_g = \frac{G_t}{2\alpha L_t \mu_0} \quad (12)$$

上記の方法を用いて、改良型リアクトルの左右、中央の脚、ヨークのギャップの最適な  $E_g$  を求めた結果、それぞれ 0.87GPa, 1.19GPa, 0.39GPa となった。

図 10 に、従来型と改良型リアクトルの  $z$  軸に垂直な対称面の変位分布を示す。ただし、改良型リアクトルのギャップのポアソン比  $\nu_g$  は従来型と同じ 0.33 を用いた。この図より改良型リアクトルの変位は従来型に比べて、約 1/25 以下に小さくできていることがわかる。

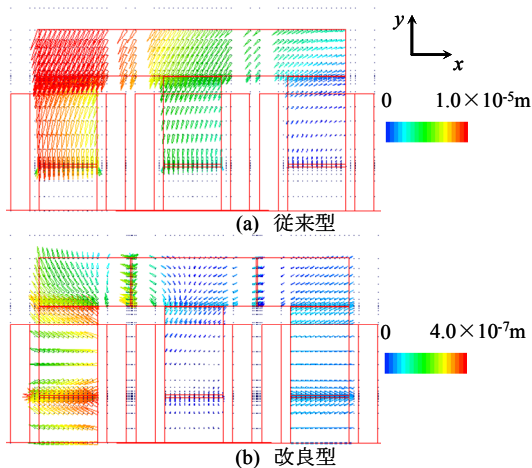


図 10 変位分布の比較

#### (5) むすび

磁気歪と電磁力を考慮した磁界・振動併用解析法を開発するとともに、インバータ用リアクトルに適用し、騒音の発生メカニズムが明らかとなり、実測でも確認できた。さらに、三相リアクトルのヨークにもギャップを設け、各ギャップに挿入される絶縁物の硬さをそれぞれ最適化する低騒音化の方法も提案し、その効果を解析で確認できた。

一方、時間領域の磁界・振動併用解析では共振現象が再現できず、またヨークにもギャップを設ける改善策の検証実験では製作上の問題から効果が確認できなかった。これらについては今後詳細に検討するとともに、音場解析も導入する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Yanhui Gao, M. Nagata, K. Muramatsu, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, “Noise

Reduction of a Three-Phase Reactor by Optimization of Gaps Between Cores Considering Electromagnetism and Magnetostriction,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, pp. 2772–2775, 2011, 査読有.

- ② Yanhui Gao, K. Muramatsu, M. J. Hatim, M. Nagata, “The Effect of Laminated Structure on Coupled Magnetic Field and Mechanical Analyses of Iron Core and Its Homogenization Technique,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1358–1361, 2011, 査読有.
- ③ Yanhui Gao, K. Muramatsu, M. J. Hatim, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, T. Takahata, “Design of a Reactor Driven by Inverter Power Supply to Reduce the Noise Considering Electromagnetism and Magnetostriction,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, No. 6, pp. 2179–2182, 2010, 査読有.
- ④ Yanhui Gao, K. Muramatsu, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, T. Takahata, “Vibration Analysis of a Reactor Driven by an Inverter Power Supply Considering Electromagnetism and Magnetostriction,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, pp. 4789–4792, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 9 件)

- ① Yanhui Gao, M. Nagata, K. Muramatsu, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, T. Takahata, “Noise reduction of a three-phase reactor by optimization of gaps between cores considering electromagnetism and magnetostriction,” INTERMAG 2011 Conference, no. BQ-09, Taipei, 2011.5.
- ② 長田将秀, 高 炎輝, 村松和弘, 「積層鉄芯間に挿入する絶縁物の硬さ最適化によるリアクトルの騒音低減法における積層構造の影響」, 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集, no. 5-184, 2011.3.
- ③ 高 炎輝, 村松和弘, 藤原耕二, 石原好之, 福内重政, 「均質化手法を用いた積層鉄芯の磁界・構造解析」日本応用数学会環瀬戸内応用数理研究部会第 14 回シンポジウム, no. B5-2, 岡山理科大, 2011.1.
- ④ 高 炎輝, 村松和弘, 長田将秀, 「磁界・構造併用解析における積層鉄芯のモデリング」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, nos. SA-10-102, RM-10-111, 鹿児島, 2010.9.
- ⑤ 長田将秀, 高 炎輝, 村松和弘, 福内重政, 「騒音低減のためのリアクトルのギャップに挿入する絶縁物の硬さの最適化」, 第 63 回電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, no. 07-2P-01, 九州産業大, 2010.9.
- ⑥ Yanhui Gao, K. Muramatsu, M. J. Hatim, “The

Effect of laminated structure on coupled magnetic field and mechanical analyses of iron core and its homogenization technique ; IEEE CEFC 2010 Conference, no. 30P7, Chicago, USA, 2010.5.

- ⑦ Yanhui Gao, K. Muramatsu, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, T. Takahata, “Design of a reactor driven by inverter power supply to reduce the noise considering electromagnetism and magnetostriction,” The 11th Joint MMM/Intermag Conference, no. HD-05, Washington DC, USA, 2010.1.
- ⑧ Yanhui Gao, M. J. Hatim, K. Muramatsu, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, T. Takahata, “Investigation on vibration analysis of a reactor driven by an inverter power supply considering electromagnetism and magnetostriction,” Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEEJ, nos. SA-09-55, RM-09-61, Kitami, Hokkaido, 2009.9.
- ⑨ Yanhui Gao, K. Muramatsu, K. Fujiwara, Y. Ishihara, S. Fukuchi, T. Takahata, “Vibration analysis of reactor driven by inverter power supply taking account of magnetostriction and electromagnetic force,” IEEE INTERMAG 2009 Conference, no. EH-08, Sacramento, USA, 2009.5.

[産業財産権]

○出願状況（計1件）

名称：電気機器

発明者：村松和弘，高炎輝，福内重政

権利者：佐賀大学，左尾電機工業所

種類：特許

番号：特願2010-007486

出願年月日：2010.1.15

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

村松 和弘 (MURAMATSU KAZUHIRO)

佐賀大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30263627

### (2)研究分担者

高 炎輝 (GAO YANHUI)

佐賀大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：40586286