Bi置換ガーネットのベルデ定数の温度安定化と 高感度光ファイバ磁界センサの開発

正 員 井 上 修 和 (三菱電線工業株式会社)

非 会 員 山 沢 和 人 (T D K 株 式 会 社)

Stabilizing Temperature Dependencies of Verdet Constant of Bi-doped Garnet
and Development of High Sensitive Optical Magnetic Field Sensor
Nobukazu Inoue, Member (Mitsubishi Cable Industries, LTD),
Kazuhito Yamasawa, Non-member (TDK Corporation)

Bi-doped garnet is a rare metal iron garnet made up of a ferrimagnetic substance of which some part of rare metal element is replaced with Bismuth. It illustrates a strong Faraday effect and has been applied to optical isolators. In magnetic field sensing applications, however, a shortcoming is apparent: Faraday rotation of Bi-doped garnet reveals temperature dependencies when the garnet is not magnetically saturated. Authors have paid close attention to the magnetization of each rare earth element's different temperature characteristics, and have been investigating compositions of garnets by calculations and experiments to find a garnet showing flat temperature characteristics between -10 and 80 °C. The LPE(Liquid Phase Epitaxy) method was established to get a single crystal of the garnet $\{Bi_{1.3}(Y,La)_{0.9}Ho_{0.8}Fe_{4.5}Ga_{0.5}O_{12}\}$. A magnetic field sensor of fiber optic based on the Faraday effect of this single crystal can detect conductor currents of power cables with high accuracy. The developed sensor is small and lightweight compared to conventional current transformers, and has the quality that optical fiber transmission of detected current signals is free from electric and magnetic noises.

キーワード：光磁界センサ、ファラデー効果、希土類鉄ガーネット、LPE法

1. まえがき

M. ファラデーがフリントガラスを通過した直線偏光の偏光面が光軸方向の磁界の大きさに比例した角度で回転する現象、すなわちファラデー効果を発見したのは1845年のことである。それから100年以上たって発光ダイオードの開発、レーザの発振、光ファイバの低損失化と実用化などの半導体、光技術の革新により、ファラデー効果の工学的応用研究が始まることとなった。そのひとつとして磁界の大きさを光学的に測定する光磁界センシングの研究がある。ファラデー効果を有する材料と平行光線をつくるためのコリメータ、偏光子などの光学部品、そして光ファイバを組み合わせることにより光ファイバ磁界センサを構成できる⁽¹⁾。これを用いれば磁界の大きさ、すなわち磁界を作る電流の大きさを光の強度変化として測定することができる。

電力分野、特に電力ケーブルの分野においては導体を流れる電流の測定は基本項目であるが、その測定には古くからの巻線型変流器がいまだに数多く使用されている。一方、電力ケーブルの高電圧化、導体断面積の大サイズ化により、測定対象となる電流の大きさは数アンペアから数万アンペアの範囲にわたり、従来の巻線型変流器では鉄芯の

大型化とそれに伴う重量の増大が避けられないのが現状である。そこで著者らはファラデー効果を利用した光ファイバ磁界センサを用いて導体電流を測定する方法につき検討を進めてきた⁽²⁻⁶⁾。光ファイバ磁界センサを用いれば、検出部の小型、軽量化を実現できると共に情報の伝送が光信号となるために電磁誘導の影響を受けないという特徴が生まれる。これは電磁ノイズが錯綜する電力ケーブルの布設環境下では特に大きなメリットとなる。

従来、実用的なファラデー素子としては反磁性体である重フリント(SF6)ガラス、BSO、BGOなどが使用されてきた。これらの材料では、ファラデー効果の大きさを表すベルデ定数は温度に対して安定しているが、ベルデ定数の絶対値が小さいのが欠点であった⁽⁷⁾。フェリ磁性体結晶である希土類鉄ガーネットに含まれる希土類元素の一部をビスマスで置換したガーネット(以下、Bi置換ガーネットと略す)はレーザを安定に発振させるためにレーザへの戻り光を遮断する光アイソレータ用材料として開発されてきた材料で、そのベルデ定数は上記材料に比較して約2桁大きい⁽¹⁾。光アイソレータではBi置換ガーネットの厚み調整により、その飽和ファラデー回転角を45°に設定して永久磁石によって与えられる飽和磁界のもとで使用。当初、

光アイソレータ用に開発したBi置換Yb-Gd鉄ガーネット(Bi_{1.0}Yb_{0.6}Gd_{1.4}Fe₃O₁₂)を磁界センサへ適用することを考えたが、回転角が磁界の大きさに比例する非飽和領域ではファラデー回転角の温度特性が、-1.3%/10℃と良くない⁽²⁾という欠点があったため、磁界センサ用のファラデー素子としては最適ではなかった。そこで著者らはBi置換ガーネットに配合する希土類元素の磁化がそれぞれ異なる温度特性を有することに着目し、その組合せを調整することでベルデ定数の温度特性を相殺すると共に、その単結晶成長法を確立した。さらにこの単結晶を用いて、電力ケーブルの導体電流を高感度に測定できる光ファイバ磁界センサを開発したのでここに報告する。

2. Bi置換ガーネットのファラデー効果

Bi置換ガーネットはガーネット構造をとる酸化物磁性体であり、(Bi, R)₃(Fe, M)₃O₁₂ (R: 希土類元素およびY, M: Ga, Al等)なる組成式で示される。(Bi, R)₃は酸素12面体、(Fe, M)₃は酸素4面体、(Fe, M)₂は酸素8面体で囲まれる副格子を形成し、各々cサイト、dサイト、aサイトと呼ばれている。飽和磁化M_sは温度Tの関数として、ガーネットを構成する各副格子の磁化特性から次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$M_s(T) = |M_d(T) - M_a(T) - M_c(T)| \cdots \cdots (1)$$

ここで、M_d(T)、M_a(T)、M_c(T)は各々dサイト、aサイト、cサイトの飽和磁化

品川はガーネットのファラデー効果をスピン軌道相互作用に着目して理論的に解明した⁽⁹⁾。YIG (イットリウム鉄ガーネット) の場合、O²⁻からaサイトのFe³⁺へのπ型遷移の寄与がファラデー回転出現に影響する。一方Bi置換ガーネットの場合、Bi近傍にあるO²⁻の2p電子はBiの6p軌道の影響を受け、O²⁻のスピン軌道相互作用係数が増加する。その結果YIGでは寄与の小さかったO²⁻からdサイトのFe³⁺へのπ型遷移が大きく寄与し、ファラデー回転が増加すると報告している⁽⁹⁾。cサイトがY以外の希土類元素の場合、cサイト元素もファラデー回転に寄与するためYIGのそれとは一致しないが、Biのファラデー回転への寄与という点ではYIGと同様と考えられる。Crossleyらはファラデー回転を下式で表した⁽¹⁰⁾。

$$\theta_F(T) = D \cdot M_d(T) - A \cdot M_a(T) - C \cdot M_c(T) \cdots \cdots (2)$$

ここでθ_F(T): 飽和ファラデー回転角(radian)、D、A、C: ガーネット組成および入射光の波長で決まる定数

Hansenらは、Bi置換ガーネットのこれらの定数を求めて

(a) 外部磁界零

(b) 外部磁界印加時

図1 Bi置換ガーネットの磁区構造
Fig. 1. Magnetic domain structure of Bi-doped garnet.

いる⁽¹¹⁾。表1から、Bi置換量の増加によりD (表1中の -De) が大きく増加していることがわかる。

ファラデー効果の周波数応答は原理的には光の周波数まで追従するが、Bi置換ガーネットは磁区構造を有するフェリ磁性結晶であるため、常磁性の材料とは様相が異なる。ミクロに見ると各磁区の中では、その自発磁化のために外部磁界零でも偏光面の回転が生じているが、各磁区が互いに反並行に配列しているため、正回転の磁区の量と逆回転の磁区の量が等しくなり、結果として透過光の偏光面の回転は波面ベクトルの合成により相殺されている。外部磁界により磁壁が移動し、正回転の磁区の量と逆回転の磁区の量に不平衡が生じると、透過光の偏波面は見かけ上その差分だけ回転することになる。赤外偏光顕微鏡にて観察した、光軸方向より見たBi置換ガーネットの磁区構造を図1

表1 Hansenら⁽¹¹⁾が求めた種々のガーネット組成の磁気光学定数
Table 1. Magneto-optic constants of some garnet crystals obtained by Hansen et al ⁽¹¹⁾

Composition	λ (nm)	θ _F (×10 ⁴ deg·m ⁻¹)	- Ae (×10 ² deg·m ⁻¹ μB ⁻¹)	- De (×10 ² deg·m ⁻¹ μB ⁻¹)	- Ce (×10 ² deg·m ⁻¹ μB ⁻¹)
Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	633	8.35	493.9	321.3	0
Y _{2.35} Bi _{0.65} Fe ₃ O ₁₂	633	126	419.5	799.5	0
Y _{1.97} Bi _{1.03} Fe ₃ O ₁₂	633	193	876.3	1394.1	0

に示す。磁区の方法は結晶の光軸方向（厚み方向）に並行である。白く見える部分と黒く見える部分が、それぞれ正回転と逆回転の磁区である。(a)は外部磁界零のときの様子で、白い部分と黒い部分の面積がほぼ等しい。ひとつの磁区の幅は約12 μ mである。(b)は外部磁界を加えたときの様子で、磁区の量が不平衡になっていることがわかる。光磁界センサとしての周波数特性は、磁壁の移動速度で決まることになるが、実測によって数MHzまでは追従することを確認している⁽¹²⁾。Bi置換ガーネットを磁界センサに使用する上で注意する点は、フェリ磁性体ゆえの磁気飽和特性である。飽和磁界以上の磁界ではそれ以上のファラデー回転は起きないため、結晶の組成によって決まる固有の飽和磁界以下で使用するようセンサを設計する必要がある。

3. 結晶組成と温度特性

光ファイバ磁界センサ感度の温度安定性および測定磁界範囲は、Bi置換ガーネット組成に大きく依存する。従って、前記特性に影響を与えるBi置換ガーネットの物性、即ちベルデ定数の温度特性、および飽和に要する磁界を最適にするよう組成を検討する必要がある。

<3.1> 結晶組成の設計 ベルデ定数 v (radian/m·(A/m))は、 $v = \theta / Hl$ (θ :ファラデー回転角(radian)、 H :磁界(A/m)、 l :素子の光路長(m))と定義される。外部磁界に対し、ファラデー回転は飽和するまで直線的に変化すると仮定し、 $M = \chi H$ (χ :磁化率、 M :磁化)なる関係式を代入すれば、上式は、次式にて表すことができる。

$$v = \theta_F / H_s = C \cdot \theta_F / M_s \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 θ_F :飽和ファラデー回転角、 H_s :飽和に要する磁界、 C :定数

(3)式を温度 T で微分すると(4)式の関係が成り立つ。

$$\frac{dv}{dT} = C \left(\frac{1}{M_s} \frac{d\theta_F}{dT} - \frac{\theta_F}{M_s^2} \frac{dM_s}{dT} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

次に Δv 、 $\Delta \theta_F$ 、 ΔM_s を以下のように定義し、各々ベルデ定数の温度変化率、飽和ファラデー回転角の温度変化率、飽和磁化の温度変化率と呼ぶことにする。

$$\Delta v = (1/v) \cdot (dv/dT) \times 100 \quad (\%/^{\circ}\text{C}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

表2 Bi置換ガーネットの飽和ファラデー回転角の温度変化率 ($\Delta \theta_F$)

Table 2. Temperature characteristics of saturated Faraday rotation angle of several Bi-doped garnets.

Composition	$\Delta \theta_F$ (%/°C)	引用文献 (温度範囲)
Bi _{1.0} Gd _{1.4} Yb _{0.6} Fe ₅ O ₁₂	-0.16	本研究 (0~70°C)
Bi _{1.2} Ho _{0.3} (Y,La) _{1.5} Fe ₅ O ₁₂	-0.15	本研究 (0~70°C)
Bi _{1.3} Ho _{1.0} (Y,La) _{0.7} Fe ₅ O ₁₂	-0.14	本研究 (0~70°C)
Bi _x Gd _{3-x} Fe ₅ O ₁₂ (x:0.85~1.2)	-0.15	T.Tamaki et al. ⁽¹³⁾ (25~75°C)
Bi _{1.2} Yb _{1.8} Fe ₅ O ₁₂	-0.16	Y.Honda et al. ⁽¹⁴⁾ (0~50°C)
Bi _{1.3} Yb _{0.7} Tb _{1.0} Fe ₅ O ₁₂	-0.16	K.Nakajima et al. ⁽¹⁵⁾ (0~50°C)

$$\Delta \theta_F = (1/\theta_F) \cdot (d\theta_F/dT) \times 100 \quad (\%/^{\circ}\text{C}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\Delta M_s = (1/M_s) \cdot (dM_s/dT) \times 100 \quad (\%/^{\circ}\text{C}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

(3)~(7)式から、

$$\begin{aligned} \Delta v &= (1/v) \cdot (dv/dT) \times 100 = (C/v) \cdot \{ (1/M_s) \cdot (d\theta_F/dT) \\ &\quad - (\theta_F/M_s^2) \cdot (dM_s/dT) \} \times 100 \\ &= \{ (1/\theta_F) \cdot (d\theta_F/dT) - (1/M_s) \cdot (dM_s/dT) \} \times 100 \\ &= \Delta \theta_F - \Delta M_s \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

なる関係式が導かれる。(8)式から、Bi置換ガーネットにおけるベルデ定数の温度安定化は、 $\Delta v=0$ 、即ちファラデー回転と飽和磁化の温度変化率を相殺することにより達成できることがわかる。そこで使用波長1.3 μ mにおける $\Delta \theta_F$ と ΔM_s を見積った。表2に種々のBi置換ガーネットの飽和ファラデー回転角の温度変化率($\Delta \theta_F$)の実測値、および文献記載値を示す。測定温度範囲を表中に示している。表より $\Delta \theta_F$ は、Bi_xR_{3-x}Fe₅O₁₂ (R:希土類元素およびY)なる組成式において、Bi量 $x \geq 1$ のとき-0.14から-0.16%/°Cとほぼ一定値を示すことがわかる。

M_s の温度に対する挙動は、(1)式を基に分子場近似およびBrandleらのパラメータ値⁽¹⁶⁾から計算で求められる。計算方法については文献(16)及び(17)を参照されたい。計算結果を基にして(7)式より ΔM_s を次式にて求めた。

$$\Delta M_s = \frac{1}{M_{s27^{\circ}\text{C}}} \cdot \frac{M_{s77^{\circ}\text{C}} - M_{s-23^{\circ}\text{C}}}{77 - (-23)} \times 100 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 $M_{s27^{\circ}\text{C}}$ 、 $M_{s77^{\circ}\text{C}}$ 、 $M_{s-23^{\circ}\text{C}}$ は各々27°C、77°C、-23°Cにおける飽和磁化

まず、cサイトがBi、Y等の非磁性元素の場合につき計算を行った。計算の結果、Y及び非磁性希土類元素の場合、 ΔM_s は-0.2%/°Cとなった。ここにBiを置換すると、例えばYにBiを置換していくと、 ΔM_s の絶対値は減少する結果となった。これはBi置換により、フェリ磁性の消失するキュリー温度が高くなるためである。Bi_xY_{3-x}Fe₅O₁₂なる組成において、実際に用いられる $x=1.0 \sim 1.5$ の範囲では $\Delta M_s=-0.19 \sim -0.18 \%/^{\circ}\text{C}$ が得られた。いずれの場合も(8)式より $\Delta v > 0$

図2 Ho量による飽和磁化の温度に対する変化率 (ΔM_s)の変化 (計算値)

Fig. 2. Variation of temperature dependencies of saturation magnetization (ΔM_s) with respect to quantity of Ho (calculated).

となる。次にcサイトの非磁性元素を磁性元素で置換する場合を考える。Pauthnetによれば、室温近傍において飽和磁化の温度変化は、Hoの場合ほぼ一定値をとり、Tb、Gd、Dyの場合正となる⁽¹⁸⁾。いずれの場合も(8)式より $\Delta v < 0$ となるので、適宜上記非磁性元素と固溶すれば $\Delta v = 0$ 、即ちベルデ定数は温度に対し一定値を示すことが予想される。著者らは、組成変動の影響を小さくし温度特性の調整

図3 Ga置換量と飽和に要する磁界の関係
Fig. 3. Dependence of saturation magnetic field on replacing quantity of Ga.

図4 Bi置換ガーネットのベルデ定数の温度特性
Fig. 4. Temperature characteristics of Verdet constant of Bi-doped garnet.

表3 温度安定型Bi置換ガーネットの諸特性
Table 3. Characteristics of thermally stabilized Bi-doped Garnet ($\lambda = 1.3 \mu m$)

特性項目	特性値	条件等
ベルデ定数 (radian/m·(A/m))	0.054	形状: 3×3×0.1mm
ベルデ定数の温度変化率(%/°C)	-0.007	0~70°C
飽和磁界(A/m)	65000	形状: 3×3×0.1mm
吸収損失(dB)	<0.05	他に膜-基板間反射損失(約0.05dB)あり
消光比(dB)	>40	飽和磁界下ARコート付き

を容易にするため、最も飽和磁化の温度変化率の小さいHoを選択した。計算の結果、cサイトの非磁性元素をHoで置換することにより、 $Bi_xY_{3-x}Ho_yFe_5O_{12}$ の ΔM_s は図2に示すように変化することがわかった。従って、Bi量xが1.0から1.5の範囲では、Ho量yが0.3から0.5のとき、 $\Delta \theta_F - \Delta M_s = 0$ 、即ち $\Delta v = 0$ になると予想される。この予想値を基に実際にファラデー回転子を作製し温度特性を測定した後、最終的なHo量を決定した。実際のHo添加量yは0.8のときにベルデ定数の温度変化は最小となった。計算値との差異は、飽和磁界制御のためのGa添加による ΔM_s の計算からのずれ、及び $\Delta \theta_F$ の見積りからのずれが原因と考えられる。また非磁性元素としては、Bi量を $x = 1.3$ 、残りをYとした。更に膜-基板の格子定数を整合させるためLaを微量(Yに対し1/20程度)加えた。

飽和に要する磁界は、図3に示すようにGa等Feサイトに置換する非磁性元素の量によって制御できる。プロットは実測点である。組成式 $Bi_{1.3}(Y,La)_{0.9}Ho_{0.8}Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ において、Ga量 $z=0.5$ のときセンサとして適当な約65000A/mを得た。

< 3・2 > 結晶作製法 Bi置換ガーネットはLPE(Liquid Phase Epitaxy)法により作製した。ガーネット原料とフラックス原料($PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$)を飽和温度以上で融解後過冷却状態にし、(Ca、Mg、Zr)置換GGG基板上に片面水平ディッピング法にてBi置換ガーネット単結晶膜を育成した。育成温度は膜と基板の格子定数が整合する温度とした後、膜成長に伴い低下させた。通常この操作は膜成長による融液組成の変化に起因する格子定数整合を補償するために行う。しかしここでは膜の格子定数を徐々に増大させ安定な膜を得るために行っている。膜と基板間の熱膨張係数の差に起因する育成時の内部応力は格子定数を徐々に増大させた方が緩和されると考えているためである⁽¹⁹⁾。育成後所定の形状、膜厚に研磨・加工し、光ファイバ磁界センサ用ファラデー回転子を作製した。開発した温度安定型Bi置換ガーネットの温度特性の実測値を図4に、諸特性を表3に、各々示す。

4. 光ファイバ磁界センサの開発

光ファイバ磁界センサの動作原理を図5に示す。入射光ファイバからの出射光はレンズにて平行光線となり、偏光

図5 光ファイバ磁界センサの動作原理
Fig. 5. Principle of optical magnetic field sensor.

子にて直線偏光のみが取り出される。Bi置換ガーネットに光軸と平行な磁界が加わると偏光面は磁界の強さに応じて回転する。偏光子に対して45°の方位角にて配置した検光子を通過した光は磁界の強さに比例して強度変調され、出射光ファイバへと導かれる。センサを通過した光は直流分 P_{DC} と磁界によって変調される交流分 P_{AC} の合成であり、センサの感度は変調度 α にて、次式で表される。

$$\alpha = P_{AC}/P_{DC} = \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\theta = \nu Hl \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 θ ：ファラデー回転角(radian)

2θ が小さい範囲では(10)式は次式にて近似できる。

$$\alpha \approx 2\nu Hl \quad \dots\dots\dots(12)$$

(12)式よりセンサの変調度は磁界の大きさに比例することがわかる。ただし、 2θ が大きくなりすぎると(10)式から(12)式への近似が成り立たなくなるため、測定する磁界の範囲に応じて適切にファラデー素子の光路長を選択する必要がある。ここでは膜厚 $l = 85\mu\text{m}$ のBi置換ガーネット(飽和回転角：約20°)を用いてセンサを組み立てた。入射及び出射用の光ファイバにはコア径 $50\mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\mu\text{m}$ のグレーデッドインデックス(GI)型石英ファイバを用

図6 光磁界センサの変調度—磁界特性
Fig. 6. Dependence of percentage modulation of optical magnetic field sensor on magnetic field strength.

図7 光磁界センサの変調度—温度特性
Fig. 7. Dependence of percentage modulation of optical magnetic field sensor on temperature.

図8 光ファイバ磁界センサの外観
Fig. 8. Appearance of optical magnetic field sensor.

いている。理論的にどちらのファイバから光を入れてもセンサは機能するが、方向によって測定する磁界の位相が反転するので注意が必要である。また、センサ用の光源の偏光が強いと、入射ファイバ中の偏光回転などの影響により正確な磁界測定ができないため、光出力が無偏光に近いLEDを光源として使用している。光学部品の固定用部材、ケースは全てセラミック製とし、内部シリコンモールドによって水密性を確保している。

光ファイバ磁界センサの感応方向に0~40000 A/mの磁界を加えたときのセンサの応答を図6に示す。横軸は磁界の大きさ、縦軸はセンサの変調度である。図中の実線は(12)式による計算値、プロットは実測値である。図より低磁界側で実測値は計算値と良く一致し、センサは磁界に対して良い直線性を示すことがわかる。高磁界側で実測値が計算値を下回るのは(10)式から(12)式への近似が成り立たなくなるためであり、測定する磁界の精度との兼ね合いで測定範囲を選定することとなる。

次にセンサの温度特性を調べるために、センサに一定磁界を加えた状態で、その周囲温度を変化させた。結果を図7に示す。横軸はセンサの周囲温度、縦軸はセンサの変調度である。図より-10~80℃の範囲でセンサの変調度の変化は±1%以内と、従来の光アイソレータ用に開発したガーネット(Bi_{1.0}Yb_{0.6}Gd_{1.4}Fe₃O₁₂)を用いたセンサの変調度の温度変化、-1.3%/10℃に比較して大きく改善されており、実用上温度特性はフラットとみなせることがわかる。

センサに対してはヒートサイクル試験、長期高温暴露試験、振動試験、水圧試験を実施し、実用に適する性能を確認している。光ファイバ磁界センサの外観を図8に示す。

5. 電流計測への応用

<5・1> リングコア方式電流測定 ケーブル導体電流の作る磁界より、導体電流を正確に測定するには、アンペアの法則により導体の作る磁界を導体のまわりで周回積分する必要がある。そこで、珪素鋼板を重ねたリングコアを導体の周囲に配置し、そのギャップ部(ギャップ長44 mm)にセンサを挿入することによって導体電流を検出す

る方式を開発した⁽²⁻⁶⁾。これにより、被測定ケーブル近傍の他相ケーブルや他回線ケーブルの電流の作る磁界の影響を

- ① 方向性硅素鋼板
- ② 保護カバー
- ③ Oリング
- ④ センサホルダ
- ⑤ 防水カバー
- ⑥ 光磁界センサ

図9 リングコア方式光電流センサの構造
Fig. 9. Structure of optical current sensor.

図10 リングコア方式センサの変調度—電流特性
Fig. 10. Dependence of percentage modulation of optical current sensor with ring-core on conductor current.

通電電流: ac50Hz, 800, 700, 600, 500A
縦軸: 500 A/div, 横軸: 5 ms/div.

図11 リングコア方式光電流センサによる交流電流測定波形例
Fig. 11. Waveforms measured by optical current sensor.

防ぐことができる。リングコア方式光電流センサの構造を図9に示す。リングコアは磁界をギャップ部に集中させるだけで電流を取り出す必要がないため、鉄芯の断面積は巻線型変流器に比べて小さくできる。また、リングコアはセンサ挿入部以外に磁路の切れ目が無いため磁界の積分効率が良く、リングコアの中心と導体の中心のずれによる測定誤差が小さい。ギャップ部の磁界計算の詳細については文献(3)を参照されたい。リングコアに単相交流0~2000Aを通電したときのセンサの応答を図10に示す。横軸は通電電流、縦軸はセンサの変調度である。図よりセンサは通電電流に対して±2%以下と良い直線性を示すことがわかる。また測定分解能は専用に開発したO/E変換器との組み合わせで1Aを実現している。通電電流500~800Aのときの測定波形を図11に示す。

< 5・2 > 大電流の測定 超高压ケーブルの地絡事故時のように、1万アンペアを超えるような大電流の測定に対してはリングコア方式は珪素鋼板の磁気飽和のため使用できない。よって、センサを単体でケーブルまたは接続部や端末の近傍に配置し、導体電流の作る磁界を直接測定することになる。導体電流を I_c (A)とし、図12に示すように導体中心、センサ間距離を r (m)とするとセンサの変調度は(12)式より次式で与えられる。

$$\alpha \approx 2\pi \cdot I_c / (2\pi r) \quad \dots\dots\dots (13)$$

図12 光磁界センサ単体での導体電流測定

Fig. 12. Measurement of conductor current by magnetic field sensor without ring-core.

図13 光磁界センサ単体での大電流測定結果

Fig. 13. Results of large current measurement by optical magnetic field sensor.

$r = 150\text{mm}$ としたときの導体電流に対するセンサの変調度の実測結果を図13に示す。図中の白丸のプロットは実験室内にて測定した1000Aと2000A通電のデータであり、黒丸のプロットは電力中央研究所、武山試験場の短絡発電機を使用した16000Aと32000A通電の実測データである。図中の直線は(13)式による計算値であるが、実測値は計算値と良く一致している。この方式を用いるときの注意点は他相、他回線電流の作る磁界の影響をセンサが受けないように、センサと被測定ケーブルとの距離を他相、他回線ケーブルとの距離に比べて充分小さくすることである。この条件を満たすことが困難な場合は他相、他回線ケーブルの作る磁界とセンサの感応方向をできるだけ直交するようにセンサを配置してその影響を軽減するなどの対策が必要である。

6. まとめ

ベルデ定数の大きいBi置換ガーネットの温度特性を改善するための結晶組成につき検討し、 $-10\sim 80^\circ\text{C}$ の範囲ではフラットな特性を持つ単結晶の成長法を確立した。本結晶を使用した光ファイバ磁界センサは電力ケーブルの導体電流測定用として十分な特性を有し、従来の巻線型変流器と比較して大幅な小型化、軽量化を実現するものである。また、測定情報の伝送媒体が光ファイバであるために電磁誘導の影響を受けないという特徴を有する。今後はBi置換ガーネットの飽和磁界を制御するための組成検討を行い、小磁界から大磁界（小電流から大電流）まで幅広く使用できるセンサの開発を行う予定である。

（平成6年8月25日受付、同7年5月19日再受付）

文 献

- (1) 例えば、芳野俊彦監修：光ファイバセンサ技術資料集、第8節、P.393（昭61）第一インターナショナル
- (2) G.Katsuta, K.Muraoka, N.Inoue, S.Sakai, T.Tsunekage, K.Ando : "Fault Section Detection System for 66-kV Branch Transmission Lines Using Optical Magnetic Field Sensors", *IEEE Trans. PWRD*, **7**, 1, p.1 (1992)
- (3) 戸谷・村岡・井上・安藤：「光ZCTの開発と66kV地中分岐送電線路事故区間判別への応用」、電学論B, **112**, 10, p.881 (平4)
- (4) 戸谷・村岡・内藤・近藤・井上・酒井・常陰：「Y分岐線路事故区間判別システムの開発」、三菱電線工業時報, **85**, p.23 (平5)
- (5) 戸谷・村岡・常陰・酒井・井上：「66kV地中分岐線路用光式事故区間判別システムの開発」、電気学会全国大会、1561、(平5)
- (6) 戸谷・村岡・酒井・常陰・井上：「66kV光式事故区間判別システム用光ZCTの開発」、電気学会全国大会、1562、(平5)
- (7) 林・井上・坂本：「SF6ガラスのファラデー効果を利用した光ファイバ磁界センサの温度特性」、電気学会全国大会、1319、(昭63)
- (8) G.F.Dionne : "Molecular Field Coefficients of Substituted Yttrium Iron Garnets", *J. Appl. Phys.*, **41**, 12, p.4874 (1970)
- (9) 品川公成：「磁性ガーネットのファラデー効果」、日本応用磁気学会誌、**6**, 5, p.247 (昭57)
- (10) W.A.Crossley, R.W.Cooper, J.L.Page : "Faraday Rotation in Rare-Earth Iron Garnets", *Phys. Rev.*, **181**, 2, p.896 (1969)
- (11) P.Hansen, J.-P.Krumme : "Magnetic and Magneto-Optical Properties of Garnet Films", *Thin Solid Films*, **114**, p.69 (1984)
- (12) N.Inoue, T.Tsunekage, S.Sakai : "On-Line Fault Location System for 66-kV Underground Cables with Fast O/E and Fast A/D Technique", *IEEE Trans. PWRD*, **9**, 1, p.579 (1994)
- (13) 玉城・金田・対馬：「 $(\text{GdBi})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$ バルク単結晶の磁気光学特性と $1.3\mu\text{m}$ 用光アイソレータへの応用」、日本応用磁気学会誌、**10**, 2, p.137 (昭61)
- (14) 本田・日比谷・白木：「DyによるBi置換ガーネット膜のファラデー回転角温度特性の改良」、日本応用磁気学会誌、**10**, 2, p.151 (昭61)
- (15) 中島・石川・能見・町田・谷井：「改良型 $(\text{YbTbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 厚膜を用いた光アイソレータ」、第12回日本応用磁気学会学術講演概要集、p.367 (昭63)
- (16) C.D.Brande, S.L.Blank : "Magnetic Moments for Mixed Substituted Rare Earth Iron Garnets", *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-12**(1), 1, p.14 (1976)
- (17) 例えば近藤聰信著：「強磁性体の物理（上）」、p.143、裳華房
- (18) R.Pauthenet : "Spontaneous Magnetization of Some Garnet Ferrites and the Aluminum Substituted Garnet Ferrites", *J. Appl. Phys.*, **29**, 3, p.253 (1958)
- (19) N.Uchida, K.Yamasawa, A.Oido, S.Maruyama, A.Nakata : "Effects of Growth Conditions on Surface Morphologies in LPE Garnet Films", *Proc. The Sixth Intern. Conf. on Ferrites*, p.493 (1992)

井上 修和 （正員）昭和30年5月27日生。56年3月武蔵工業大学電気工学科大学院修士課程終了。57年三菱電線工業（株）入社、現在に至る。その間、主として光技術の高電圧工学への応用に関する研究に従事。現在の所属は電力情報システム部開発課。平成5年度オーム技術賞受賞。応用物理学会会員。

山沢 和人 （非会員）昭和33年1月25日生。58年3月東京工業大学材料科学科修士課程修了。同年TDK（株）入社、現在に至る。その間、主としてYIG、Bi置換ガーネット単結晶（及び単結晶膜）に関する研究・開発に従事。現在開発研究所第5グループ。