

イットリウム鉄ガーネットを用いた 三端子スピン波位相干渉素子の開発

後藤太一, 金澤直輝, 高木宏幸, 中村雄一, ロス キャロライン*,
グラノフスキー アレクサンダー**, 岡嶋伸吾***, 長谷川隆***, 関口康爾****, 井上光輝
(豊橋技科大, *マサチューセッツ工科大, **モスクワ大, ***村田製作所, ****慶応大)

Development of spin-wave interference logic element using yttrium iron garnet

T. Goto, N. Kanazawa, H. Takagi, Y. Nakamura, C. A. Ross*,

A. B. Granovsky**, S. Okajima***, T. Hasegawa***, K. Sekiguchi****, M. Inoue

(Toyohashi Univ. of Tech., *MIT, **Moscow State Univ, ***Murata Mfg. Co., Ltd., ****Keio Univ.)

はじめに

スピン波は、原理的に膜厚を制御することで波長を数十ナノメートルにまで短縮可能で、微細な位相干渉ロジック回路が作製可能と考えられており、これまでの CMOS を用いた演算素子のデザインルールに縛られない素子の開発が期待されている。これまでに、パーマロイ ($\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$) 薄膜中を伝搬する静磁表面モードのスピン波を用いた、位相干渉実験が報告されており¹⁾、スピン波の波動性を用いた演算素子が提案されている。本稿では、これをデバイスに発展することを目的に、スピン波伝播媒体にダンピング定数の小さい単結晶イットリウム鉄ガーネット (YIG, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) 膜を用い、さらに、大規模集積回路に適した膜面内方向の磁化均一性が高く非相反性が無い、静磁前進体積モードのスピン波を用いて、位相干渉素子を作製した。

実験方法

GGG (gadolinium gallium garnet) 基板上に、形成された膜厚 $16\ \mu\text{m}$ の単結晶 YIG 膜を長方形に加工しスピン波導波路を形成した。これを $5\ \text{mm}$ 間隔で誘電体基板上に形成された三本の銅製のマイクロストリップライン上に装荷した。バイアス磁界 $3\ \text{kOe}$ を膜面に対して垂直に印加し、信号発生器により入力パワー $0\ \text{dBm}$ 、周波数 $4\ \text{GHz}$ の正弦波信号を Fig. 1 中の EX1 端子と EX2 端子に入力した。EX1 端子に入力する高周波信号の位相を、位相調整器を用いて連続的に変化した。EX2 端子の位相は固定した。オシロスコープに接続された DT 端子によって YIG 導波路中央におけるスピン波の振幅変化を測定した。同時に、当該素子を、有限要素法を用いて高周波電磁界解析を行った。

実験結果・まとめ

EX1 に入力する高周波信号の位相を 0 から 2π まで変化した結果、EX1 端子と EX2 端子の位相差が 0 のとき DT 端子部分のスピン波振幅が最大、位相差が π のときに最小になった。これら最大値と最小値から計算した位相干渉アイソレーション値は、 $25\ \text{dB}$ であり、文献 1) と比較し約 10% 向上した。高周波電磁界解析結果とよく一致し、端子間距離をより長くできること、スピン波の端面反射を抑制することで性能向上が見込めること、膜厚を薄くすることでデバイスサイズを小型化できることを示唆した。

講演会では、素子構造の詳細及び、スピン波無反射構造を導入することによる特性改善結果についても報告する。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 若手研究 (A) No. 26706009, 挑戦的萌芽研究 No. 26600043, 科研費基盤研究 (S) No. 26220902 の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) N. Sato, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, Appl. Phys. Express, **6**, 063001 (2013).

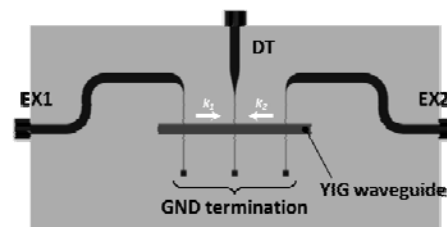


Fig. 1 Three-port spin-wave interference logic element. EX1 and EX2 ports excite spin waves, and DT port detects the spin-wave interference.

外部印加磁界によるパーマロイ細線中の定在スピンの波制御

今村謙汰, 牙暁瑞, 大藪周平, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学大学院システム情報科学府)

Controlling of synthesized standing spin wave configuration in a permalloy strip with external fields

K. Imamura, X. Ya, S. Oyabu, T. Tanaka, K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

はじめに

強磁性体中を伝搬するスピン波は、位相情報の利用による論理演算デバイスへの応用が提案されている^[1-3]。入力電力を効率的にスピン波励起に利用できる定在スピン波は、デバイスの小型化・省電力化が期待できる。本研究では、外部印加磁界の変化に対するパーマロイ細線中の定在スピン波の様態変化を、電気的出力として検出した。また、磁性体内部における磁化状態の解析をマイクロマグネティックシミュレーションにより行った。得られた実験結果より、スピン波論理演算デバイスにおける外部磁界制御機能の適用可能性を示す。

実験方法

作製素子と測定系の概略図を Fig. 1 (a) に、光学顕微鏡により撮影した素子を Fig. 1 (b) に示す。素子は一般的なリソグラフィ法により作製した。スピン波導波路には、蒸着法により製膜したパーマロイ(厚さ $d = 48$ nm, 幅 $w = 50$ μm)を使用した。Fig. 1 (a) に示すように、シグナルジェネレータより 2 本の非対称コプレーナ伝送線 (GE1, GE2) にマイクロ波電流を入力し、スピン波を励起させる。パーマロイ細線中に生じる定在スピン波は、静磁場表面波(MSSW)モードである。中央に配置したピックアップコイル (DE) により定在波からの漏れ磁束をスペクトラムアナライザにより電気的出力(P_{out})として検出した。GE1, GE2 により励起されるスピン波の位相差($\Delta\phi$)は、それぞれの伝送線に接続したフェーズシフタによって変化させる。

実験結果

Fig. 2 (a) に外部磁界スイープ測定により検出された出力強度を示す。GE1, GE2 に入力したマイクロ波電流の周波数は 5GHz である。測定は $\Delta\phi = 0$ (実線), π (破線) の場合で行った。それぞれの測定で、外部磁界の変化に対して P_{out} に明確な極大点と極小点が交互に現れる周期的な強度変化が観測された。ピーク値を示す H_b では、磁性体内部で特定次数の定在スピン波が形成されていることがシミュレーションによって確認された。Fig. 2 (b) に $\Delta\phi$ を $0 \sim \pi$ rad の範囲で変化させた場合の P_{out} を示す。 $H_b = 156$ Oe のとき、 $\Delta\phi$ が増加すると P_{out} は連続的に増加し、 $\Delta\phi = 0, \pi$ rad 間には約 7 dBm の出力差が存在する。一方、 $H_b = 180$ Oe のとき、 $\Delta\phi$ の増加に対し P_{out} は減少し、数十 Oe のオーダーで P_{out} の $\Delta\phi$ 依存性が反転していることが分かった。これは、位相を情報媒体とするスピン波デバイスに対し、外部磁界により動作制御する機能を付加できる可能性を示した結果である。

参考文献

- [1] M. P. Kostylev et al., Appl. Phys. Lett., 87, 153501 (2005).
- [2] A. Khitnum et al., Superlatt. Microstruct., 38, 184 (2005).
- [3] Y. Urazuka et al., J. Appl. Phys., 115, Art. No. 17D115 (2014).

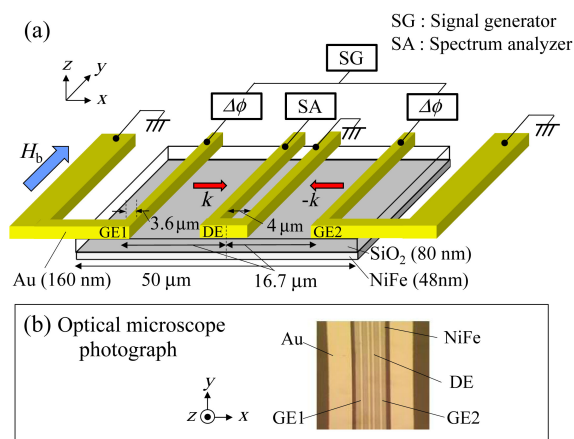


Fig. 1. (a) Schematic figure of a fabricated sample and experimental set up. The SWs are emitted from the generators and inductively picked up with an overlaid inductor. (b) Optical microscope photograph of the functional area.

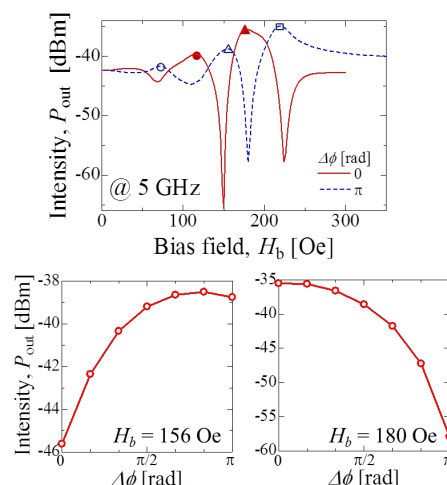


Fig. 2. (a) Measured output intensity modulation with external bias field H_b . (b) The output intensity P_{out} in varying the $\Delta\phi$.

交換結合膜細線における定在スピン波励起の計算機シミュレーション

牙暁瑞, 今村謙汰, 大藪周平, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学大学院 システム情報科学府)

Numerical simulation on standing spin wave excitation in exchange-coupled multilayer strips

X. Ya, K. Imamura, S. Oyabu, T. Tanaka, and K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

はじめに

近年, hard / soft 交換結合膜の exchange spring 効果を利用したマイクロ磁気デバイスの動作高周波化に関する報告がなされている¹⁾. 本研究では, 交換結合膜の層構造を変化させることにより, スピン波共鳴周波数が任意に設定できることをマイクロマグネティックシミュレーションによって示した. さらに, 数十 GHz の動作周波数域での信号処理機能への応用可能性についてシミュレーションにより検証した.

計算方法

2層構造の垂直磁化細線(上: soft 層, 下: hard 層)を想定したスピン波デバイスの計算モデルを Fig. 1 に示す. 磁性細線を構成する各磁性層の膜厚比および総膜厚を変えて, 定在スピン波(SSW)の共鳴周波数および出力電圧を LLG 方程式の数値計算により求めた. 2本の導体線(Generator 1, 2)によりスピン波を励起し, 中央に配置した誘導検出コイル(Detection area)により干渉波を検出する.

soft 層と hard 層の材料パラメータは, 飽和磁化 $M_s = 1000$ emu/cc (soft, hard), 垂直一軸異方性 $H_k = 13$ kOe (soft), 20 kOe (hard), soft-hard 層間の交換定数は $A = 1.0$ $\mu\text{erg}/\text{cm}$ とした.

計算結果

2本の導体線に逆位相($\Delta\phi = \pi$)のマイクロ波交流電流を印加した場合, 電流磁界の磁性細線幅方向の分布から, 定在スピン波の2次モードが最低次の共鳴モードとなる. 2次モード共鳴周波数 f_{res} の hard 層厚/総膜厚比(t_h / t_t)に対する依存性を Fig. 2 (a) に示す. 総膜厚は 15 nm から 35 nm まで変えている. t_h / t_t が増大するとともに, 細線の実効的な垂直磁気異方性が大きくなり f_{res} が高くなる. 総膜厚が薄いほど f_{res} は線形的に増大するが, 膜厚が厚い場合の増加傾向は非線形となるのが分かる. これは膜厚が交換長より厚くなると, 層間の交換結合を介した実効的な磁気異方性強度の増大効果が膜厚方向全体に及ばなくためと考えられる. 出力電圧 V_{out} と t_h / t_t との関係性を Fig. 2 (b) に示す. t_h / t_t が増加すると, V_{out} は低下する. これは実効的な異方性が大きくなることスピン波励起振幅が小さくなるためである.

Fig. 3 (a), (b) は $t_t = 15$ nm, $t_h / t_t = 0.2, 0.8$ の各場合について, 入力電流位相差 $\Delta\phi = 0, \pi$ に対する出力電圧の励起周波数依存性を示している. 励起周波数を 2 次モード共鳴周波数(5.2 GHz ($t_h / t_t = 0.2$), 16.5 GHz ($t_h / t_t = 0.8$))に設定することにより, いずれの層構成においても, 位相差に依存した 40 dB 以上の出力電圧比が得られている.

参考文献

1) S. Pal, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 17D105 (2014)

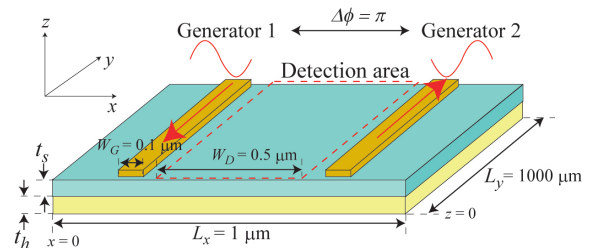


Fig. 1. Schematic of designed exchange-coupled bilayer strips, consisted of SW guide consists of magnetic strip with soft layer and hard layer, inductively coupled SW generators (width: W_G) and detector (width: W_D).

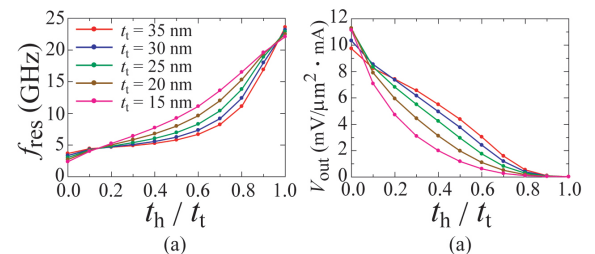


Fig. 2. The dependence of the resonance frequency f_{res} (a) and voltage value V_{out} (b) on the layer thickness ratio t_h / t_t .

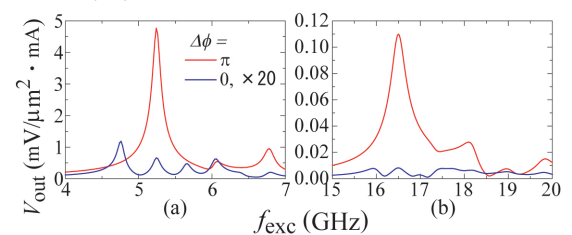


Fig. 3. The inductive output voltage comparing phase differences between two generators are 0 and π , when $t_h / t_t = 0.2$ (a) and $t_h / t_t = 0.8$ (b).

無電源回転センサに用いる磁気ワイヤにおける磁壁移動

竹渕哲聡¹ 山田 努¹ 小川雄一郎² 竹村泰司¹

(¹横浜国立大学 ²ニッコーン株式会社)

Magnetic domain wall movement in magnetic wires for battery-less rotation sensor

A. Takebuchi, T. Yamada, Y. Ogawa², Y. Takemura¹

¹Yokohama National University, ²Nikkoshi Co., Ltd

はじめに

磁気ワイヤ等における大バルクハウゼンジャンプを伴う急峻な磁化反転は、検出コイルにパルス電圧を誘起する。この電圧を出力とする磁気センサが広く研究されてきた⁽¹⁻³⁾。ひねり処理加工した FeCoV ワイヤ（以下、複合磁気ワイヤと記述する）においても印加磁場の時間変化に無依存のパルス出力が得られ、様々な実験結果が報告されてきた⁽⁴⁻⁵⁾。この現象を利用する磁気センサは、外部電源が不要であること、動作温度範囲が広いことなどの特徴を有する。我々は、これらの特徴を生かして、無電源センサや振動エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスティング素子への応用に注目している⁽⁶⁾。

実験方法・結果

本稿では、ローター等に装着した磁石による励磁条件下での、複合磁気ワイヤの出力特性及び磁壁移動を検討した結果を報告する。ひねり処理加工した FeCoV ワイヤ（線長 25 mm、線径 0.25 mm）の 2 箇所、ワイヤに直接巻きつけた幅 1 mm、巻き数 50 turn の検出コイルを設置した。その 2 つのコイルで検出した FeCoV ワイヤの磁化反転に伴うパルス出力を Fig. 1 に示す。両パルスの時間差から磁壁移動速度が求まるとともに⁽⁶⁾、コイル位置を変化させることにより磁化反転するワイヤの領域を特定することができる。さらに励磁用磁石として、3 mm×3 mm×5 mm の NeFeB 磁石を回転軸に磁石を取り付け、その回転に伴いワイヤ線長方向に双方向の磁場を印加するような配置（Fig. 2）での実験結果も当日報告する。

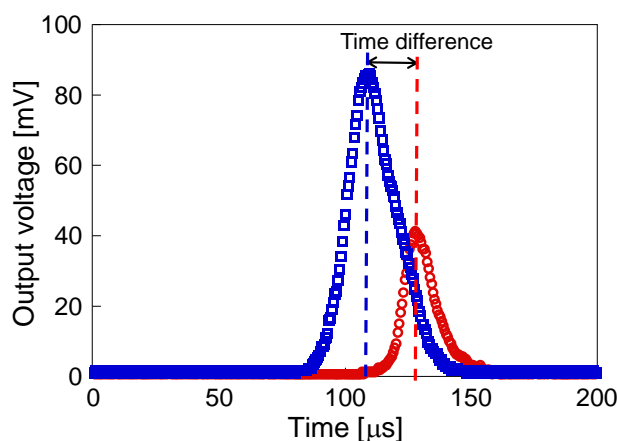


Fig.1 Waveforms of output voltages detected by two pickup coils.

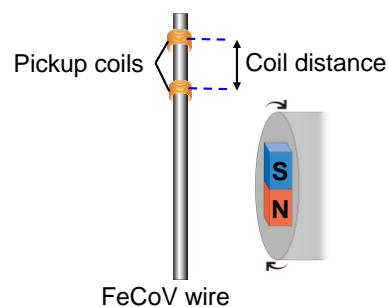


Fig. 2 Configuration for measurement of induced voltage from FeCoV wire.

参考文献

- 1) R. Malmhall, K. Mohri, F. B. Humphrey, T. Manabe, H. Kawamura, J. Yamasaki, I. Ogasawara, *IEEE Trans. Magn.* **23**, 3242 (1987).
- 2) M. Va'zquez, C. Go'mez-Polo, D.-X. Chen, A. Hernando, *IEEE Trans. Magn.* **30**, 907 (1994).
- 3) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 4) S. Abe, A. Matsushita, and M. Naoe, *IEEE Trans. Magn.* **33**, 3916 (1997).
- 5) T. Kohara, T. Yamada, S. Abe, S. Kohno, F. Kaneko, Y. Takemura, *J. Appl. Phys.* **109**, 07E531 (2011).
- 6) 溝口健人, 芹沢諒平, 山田努, 増田純夫, 小川雄一郎, 河野志郎, 金子文夫, 竹村泰司: 第 38 回日本磁気学会学術講演会、5aD-6、横浜、2014 年 9 月。

磁気ワイヤを用いた振動型発電素子における励磁方法の検討

竹渕哲聡、亀田直哉、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Examination of excitation in electric generating element of vibration type using magnetic wire
Akitoshi Takebuchi, Naoya Kameda, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

熱ひねり加工を施した FeCoV 複合磁気ワイヤは、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる高速な磁壁移動によって急峻な磁化反転を生じ、検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる^{1),2)}。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、エネルギー・ハーベスティング素子への応用が着目されている。我々は振動型発電素子への応用を背景に、励磁用磁石の位置や往復動作（以下、ストローク）の量に対する出力の依存性について測定し、磁石のストロークについて検討した。

実験方法

ストローク位置と出力については、FeCoV 複合磁気ワイヤに二つの検出コイルを設置し、その上を励磁用磁石がワイヤと垂直方向にストロークするように配置した。磁石のストローク位置は、ワイヤの中央もしくは端の二箇所を検討した。また、幅の広い検出コイルを巻いたワイヤの端に磁石を配置し (Fig. 1)、磁石のストローク量の変化に対する出力の依存性を測定した。

実験結果

中央励磁の結果、同じ大きさで逆符号の出力が観測され、端部励磁では大きさの異なる同符号の出力が得られた。これは Fig. 2 のように磁石の左右で磁化の向きが逆であることを示す。よって、中央励磁では逆相のコイルを用い、端部励磁ではワイヤ長を調整することで最適化が望める。ストローク量については Fig. 3 に示すように、正方向への半ストロークが 2 mm から出力が観測され、6 mm 付近で飽和した。これは今回用いた磁石において、2 mm の位置で大バルクハウゼンジャンプに必要な 20 Oe の磁界が印加され、6 mm の位置で最大の磁界が印加されることを示している。よって、発電量を必要とするなら 6 mm、より小型化を目的とするならば 2 mm のストロークで発電が可能であり、以上より小型振動発電素子への有用性が示された。

謝辞：FeCoV 磁性線は、ニッコーシ株式会社様のご好意により、提供いただいたものです

参考文献

- 1) R. Malmhall, et al., IEEE Trans. Magn., 23(5), 3242, 1987.
- 2) M. Vazquez, et al., IEEE Trans Magn., 30(2), 907, 1994.

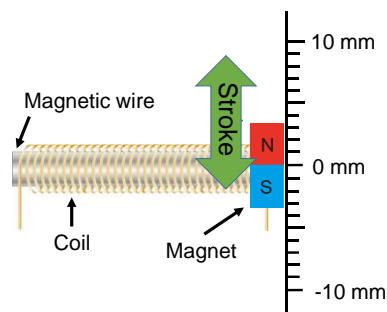


Fig. 1 Configuration of magnetic wire, magnet and detection coil

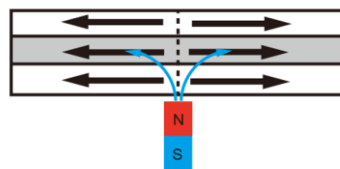


Fig. 2 State of magnetization in the magnetic wire from magnet vibration

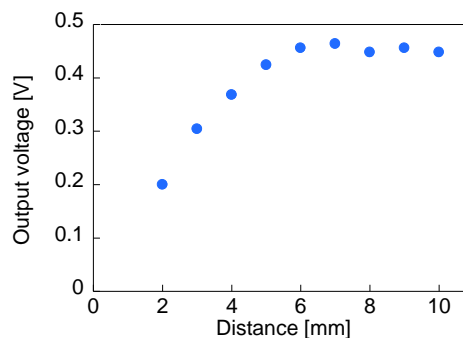


Fig. 3 The output voltage measured by detection coil

冷間圧延及び熱処理が変態誘起塑性鋼の磁気特性に与える影響

佐々木康至、小原遼、小林悟、北條智彦、村上武、鎌田康寛
(岩手大工)

Effect of cold rolling and heat treatment on magnetic properties for transformation-induced plasticity steels

K.Sasaki R.Obara S.Kobayashi T.Hojo T.Murakami Y.Kamada

(Iwate University)

背景

近年、燃料費の高騰及び環境負荷の軽減のため自動車業界では軽量かつ安全性の高い材料が求められており、高い加工性と安全性をもつ変態誘起塑性 (TRIP) 鋼が注目されている。変態誘起塑性鋼はベイナイト中の残留オーステナイト (γ 相) が外部からの応力を受けるとマルテンサイトに変態するが、特に、 γ 相の体積分率やその形態が TRIP 鋼の機械的特性に大きな影響を与えることが知られている。本研究では、冷間圧延および熱処理により γ 相の体積分率や微細組織を制御した TRIP 鋼の磁気特性を詳しく調べ、TRIP 鋼の磁気的破壊評価の可能性について検討した。

実験方法

組成が異なる 2 つの試料 A, B (γ 相の体積分率 $f_{\gamma_0}=21\sim 24\%$) を用いた (表 1) [1, 2]。熱処理 (450°C 1h) もしくは 50%冷間圧延を行った円盤型試料について、X 線回折による構造評価及び集合組織評価、磁気ヨークもしくは試料振動型磁力計 (VSM) を用いた BH ループ測定を実施した。微細組織の異相性が磁気特性に与える影響を調べるため、特に、磁気特性の励磁方向依存性に着目した。

実験結果

試料 A, B ともに、熱処理もしくは冷間圧延後、飽和磁化の顕著な増大を示した。炭素量を考慮した飽和磁化計算から、大部分の残留 γ 相が強磁性相に変態したことを確認した。これは X 線回折解析結果と一致する。一方、BH 曲線から求めた保磁力は、熱処理後は減少し冷間圧延後は増加を示すが、磁気ヨークを用いた測定では、いずれの場合も保磁力の顕著な励磁方向依存性は観測されなかった。VSM を用いた詳細測定により、冷間圧延試料 (特に試料 A) で僅かに観測されたのみ (圧延方向に励磁した場合に 10%程度保磁力が増大) である。この結果は、強磁性 α 相の集合組織 (冷間圧延により $\{110\}\langle 111\rangle$ から $\{111\}\langle 110\rangle$ へ変化) に対して転位密度の増大とともに強磁性 α 相の集合組織の変化が磁気特性変化に影響を与えていることを示唆している。

Steel	C	Si	Mn	Al	Nb	Mo	N	T _A	f _{γ0}
A	0.40	1.47	1.50	0.04	-	-	-	400°C	21.4%
B	0.40	0.49	1.48	0.96	0.024	0.10	-	400°C	23.5%

Table1: The composition of measuring samples

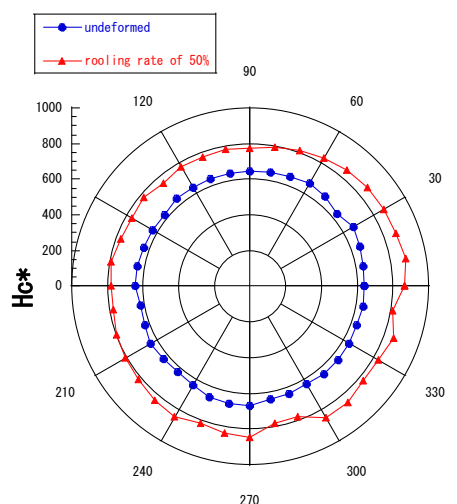


Fig1 Dependence of coercivity on excitation direction for steel A before and after cold rolling

参考文献

- [1] Effects of Alloying Elements on Impact Properties of Ultra High-Strength TRIP-Aided Bainitic Ferrite Steels, T. Hojo, J. Kobayashi, T. Kajiyama and K. Sugimoto, 津山工業高等専門学校紀要 第 52 号(2011) pp.9-16.
- [2] Fatigue Properties of Nitrogen Added Ultra High-Strength Low Alloy TRIP-Aided Steels, T. Hojo, J. Kobayashi, and K. Sugimoto, Materials Science & Technology 2013 Conference (MS&T'2013) Proceedings.