

高周波磁気応用および高周波スイッチング機器に関する研究

高周波デバイス研究チーム（課題番号：167003）

研究期間：平成28年7月27日～平成31年3月31日

研究代表者：眞砂卓史（平成29年7月31日まで），末次正（平成31年3月31日まで）

研究員：末次正（平成29年7月31日まで），眞砂卓史（平成31年3月31日まで）

研究背景

近年、情報通信・情報処理・電力伝送等、様々な分野で高周波応用技術の研究が進んでいる。本研究では、半導体と磁性体等のスピントロニクス材料を用いた高周波磁気現象解明や新規高周波素子の検討、また、高周波動作において電力効率が低いソフトスイッチング電源や無線電力伝送技術の高効率化等の高周波現象の応用を広げること目的とする。

スピントロニクス分野において、純スピン流は抵抗によるエネルギー損失がなく超低省電力情報伝達手段として期待されており、最近では高周波励起によるスピン流の発生やスピン流を用いた高周波発振の研究が急速に広がりつつある。スピン波発生技術は新しい演算素子への可能性をもっているため、スピン波素子へ向けた基本特性の解明に向けて研究を進め、高周波を利用した新規スピントロニクスデバイスの可能性を開拓する。

また高周波応用を進めるためには、高周波スイッチング増幅器による高効率な高周波電力の発生と無線電力伝送技術が不可欠である。このため、E級スイッチング増幅器およびD級スイッチング増幅器を改良して高効率に高周波電力を発生させる技術を研究する。また、それらの高効率スイッチング増幅器技術を用いて無線電力伝送を行い、直接電極を装着することができない環境においても高周波電力を供給する技術を開発し、スピントロニクスデバイスへの電力供給手段を高度化する技術を研究する。

研究成果

1. スピン波素子の新規材料開発

スピン波伝搬材料としてよく使われてきた高品質イットリウム・鉄・ガーネット（YIG）は、単結晶ガドリニ

ウム・ガリウム・ガーネット（GGG）基板上に作製する必要があり、Siプロセスとの整合が悪かった。しかし、Si上で利用可能なYIGが作製可能となれば、Siチップと融合可能なスピン波素子材料としての応用が拓ける。最近、金属酸化物薄膜を作製する手法として、有機金属分解（MOD）法が注目されている。この手法は、有機金属を溶かした溶液を基板に直接スピコートして成膜する。また、MOD法で用いられる前駆体膜の多くは電子線に対して感度を持ち、ネガ型レジストのように振る舞うことが明らかにされている。本研究では、電子線照射MOD法を用い、YIGの微細パターンの形成を試みた。

YとFeのオクテチル酸塩を溶解させたトルエン溶液（Y：Fe=3：5）を、化学洗浄したGGG（111）基板にスピコートし、ホットプレートで100℃、10分間、加熱した。電子線リソグラフィー装置を用いて、前駆体膜上に600×600 μm^2 サイズのパターンを49個、描画した（ドーズ量：1.13×10⁴ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ）。トルエンに1分間、浸漬し、パターンを現像した後、結晶化のために、大気雰囲気中で700℃、3時間の熱処理を行った。面内X線回折（In-plane XRD）法および振動試料型磁束計法により、YIG微細パターンの結晶構造および磁気特性を評価した。

図1-1に、In-plane XRD法による θ -2 θ 測定の結果を示す。基板由来であるGGG（422）のCu-K α_1 およびCu-K α_2 ピークに加え、結晶性YIGの形成を示唆するブロードなYIG（422）ピークが明瞭に観測されている。図1-2に示すように、磁化曲線は明瞭なヒステリシスを描くことが確認されており、作製したYIG微細パターンが強磁性を有していることも判明した。また、その磁化曲線から見積もられた飽和磁化の値は～100emu/ccというバルクYIGの値と近い値であり、良好なYIG微細パターンが形成されていることが予想される。

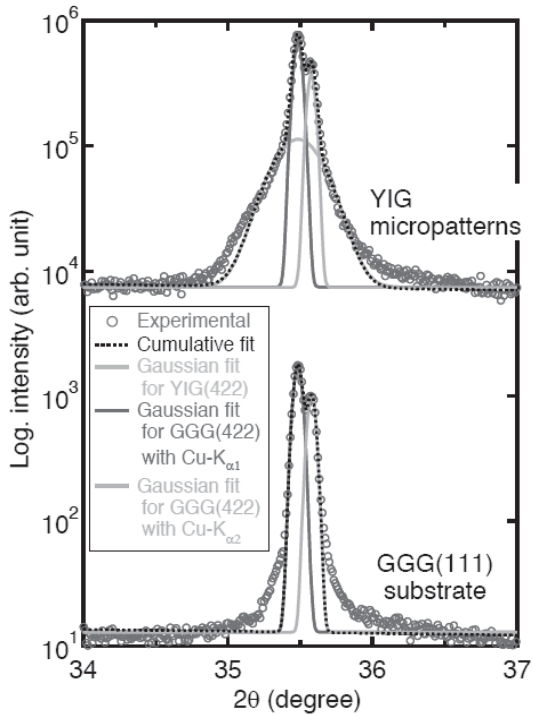


図 1-1 YIG 微細パターンおよび GGG 基板の面内 XRD スペクトル.

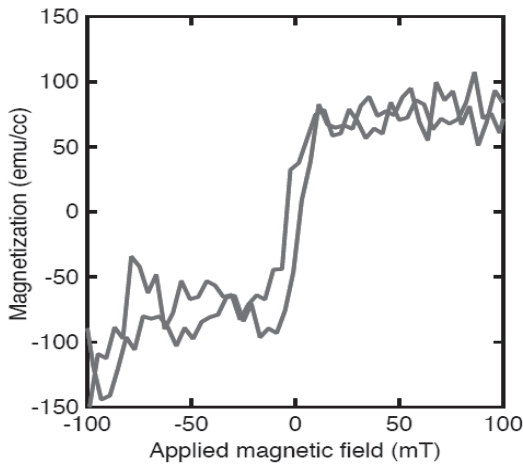


図 1-2 YIG 微細パターンの磁化曲線.

今後、本 YIG 薄膜および微細パターンの高周波特性を調べる予定である。

2. スピン波の特性解明

スピン波伝搬材料としては、これまで減衰長の非常に長い YIG が主に研究されてきた。しかし、YIG は結晶成長の点で Si プロセスには馴染まないこと、微細素子においては強磁性金属でもスピン波の伝搬距離が十分に長いと言えることから、パーマロイ (Py) 等の強磁性金属を用いる研究が注目されるようになった。これまで、Py のような強磁性金属ウエーブガイドにおいても、YIG と同様に絶縁体のスピン波理論で解析され、定量的にも問題なく説明されてきたが、我々のこれまでの研

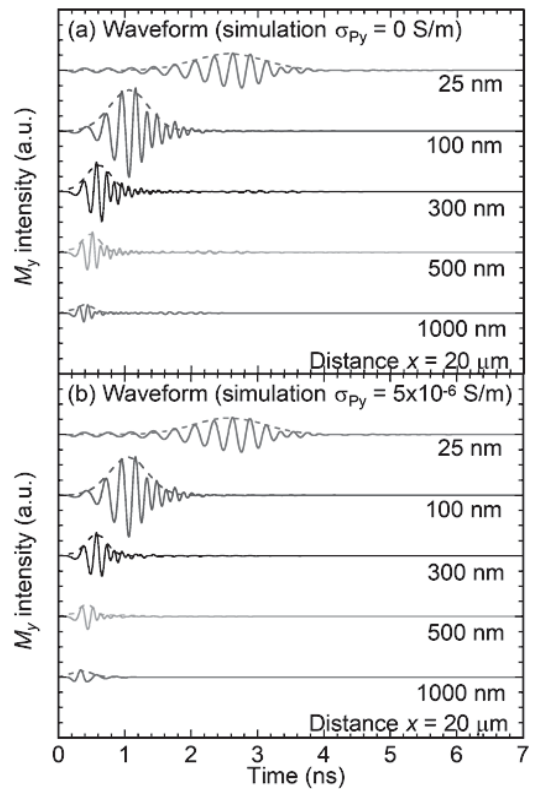


図 2-1 導電性が (a) $\sigma_{Py} = 0 \text{ S/m}$ and (b) $\sigma_{Py} = 5 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ の場合における、励起アンテナから $20 \mu\text{m}$ 離れた位置での各 Py 膜厚のスピン波波形。破線は Gaussian フィッティング結果を示す。

究からこれまでの理論では説明不可能な現象が観測されるようになり、これは金属ウエーブガイド特有の導電性の影響が現れているのではないかと考えるに至った。このため、マイクロマグネティックシミュレーションに、導電性を取り入れるため準静的電磁ポテンシャル方程式を組み合わせた有限要素法によるシミュレーションを用いて、ウエーブガイドの膜厚を変化させることによるスピン波伝搬に対する導電性の影響を調べた。

図 2-1 は、導電性の有無に応じて、励起アンテナから $20 \mu\text{m}$ 離れた位置におけるスピン波の波形である。導電性がある場合は、ない場合に比べて Py 厚の厚いときに波形がなまっており、導電性により減衰が促進されていることが分かる。点線は Gaussian フィッティング結果を示しており、この解析から求めた各検出位置での到達時間から群速度を、振幅の減少の様子から伝搬距離を見積もった。

図 2-2 は群速度 v_g の膜厚依存性をまとめたものである。実験結果の v_g 、波形フィッティングから得られた v_g 、分散関係における $k = 0.34 \mu\text{m}^{-1}$ における傾きから見積もった v_g を示す。波形フィッティングによる v_g は、膜厚 300 nm まででは導電性の有無による違いは小さく、いずれも実験結果とよく一致する。一方、 300 nm 以上の波形フィッティング結果では、導電性の有無で大きく異

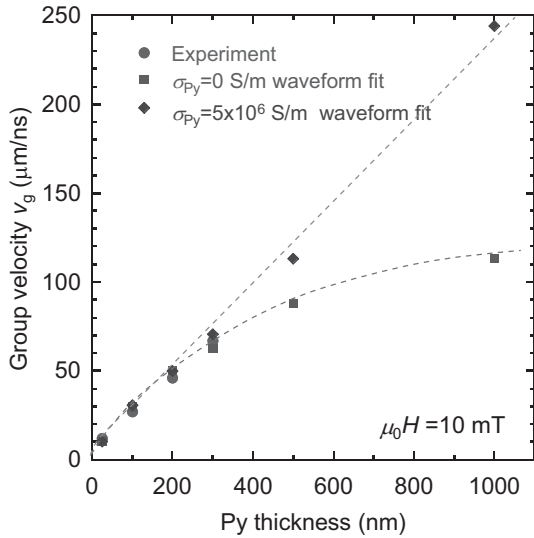


図 2-2 伝搬するスピン波の群速度の Py 膜厚依存性. 実験結果, およびシミュレーション結果 (導電性の有無, それぞれの場合について).

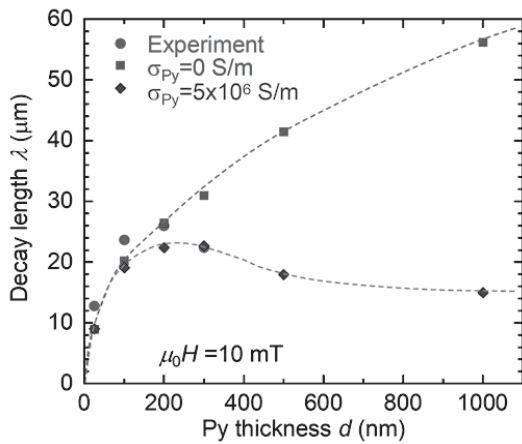


図 2-3 スピン波の減衰長の Py 膜厚依存性. 導電性の有無によるシミュレーション結果. 実験結果も示した.

なり, 導電性のある場合のほうが速い v_g を示す. これは, 厚膜では導電性による減衰が促進されることにより, ウェーブパケットの到達時間の大きい側の裾がより減衰し, パケット中心の時刻が, 時間の小さい側にシフトするためである. このため, 到達時間が速くなるように見え, その結果 v_g が大きくなったようにみえる.

図 2-3 に減衰長 λ の膜厚依存性をまとめた. ここで●は, 振幅の伝搬距離依存性から, 指数関数フィッティングにより求めた. 導電性のない場合は, v_g の増加を反映した●の増加が見られ, 予想通りの結果が得られた. しかし導電性のある場合は, 膜厚200nm 以上で λ の増加が抑制され, さらに厚いところでは減少することが分かった. これは実験結果とよく一致しており, 実験における減衰長のふるまいが, 導電性の影響であることを支持する結果である. これらの結果から, 膜厚が100nm 程度以下では, 導電性の影響をほとんど考える必要はな

いが, それ以上の膜厚では, 導電性による影響が顕著になってくることが分かる.

この減衰長から算出したダンピングファクターは, 膜厚の2乗に比例する依存性を示し, 渦電流による影響であることが支持された. これらの結果から, 導電性材料ではスピン波伝搬時に発生する渦電流の影響で, ダンピングが増大することが明らかとなった. これらの結果から, 強磁性金属を用いたスピン波デバイス作製には, 導電性によるダンピング増大の影響を受けないように, 100nm 以下が望ましいといえる.

3. スピン波応用技術

スピン波を利用した次世代の情報処理アプリケーションとして, マグノニック結晶 (MC) と呼ばれる周期的な構造を有した磁性材料に注目が集まっている. スピン波の波長と同程度の周期を持つ周期構造を磁性導波路中に導入することで, 単なる磁性導波路にはない特異な伝搬特性を実現することが可能であると言われている. これまでの MC の研究では光による検出手法が用いられており, 純粹にスピン波の特性調査に主眼が置かれていた. しかし電子機器への応用を考えた場合, 電気的な手法のみでスピン波を発生させ, それを検出する必要があった. 今回, 図 3-1 のように, 強磁性金属の薄い膜 (厚さ50nm) に深さが25nm の溝を等間隔で配置した Py MC について, 電気的な手法のみを用いてスピン波の伝搬特性を調べることに成功した. また, マイクロマグネティックシミュレーションにより, 今回得られた伝搬特性が周期構造を反映したマグノニックバンドギャップであること実証した.

図 3-2 は, Py 薄膜および周期構造の格子定数を $D =$

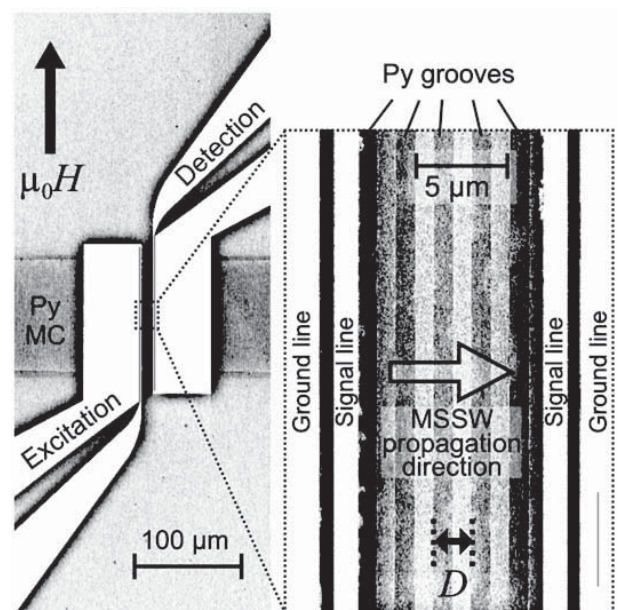


図 3-1 作製した Py マグノニック結晶の走査型電子顕微鏡写真.

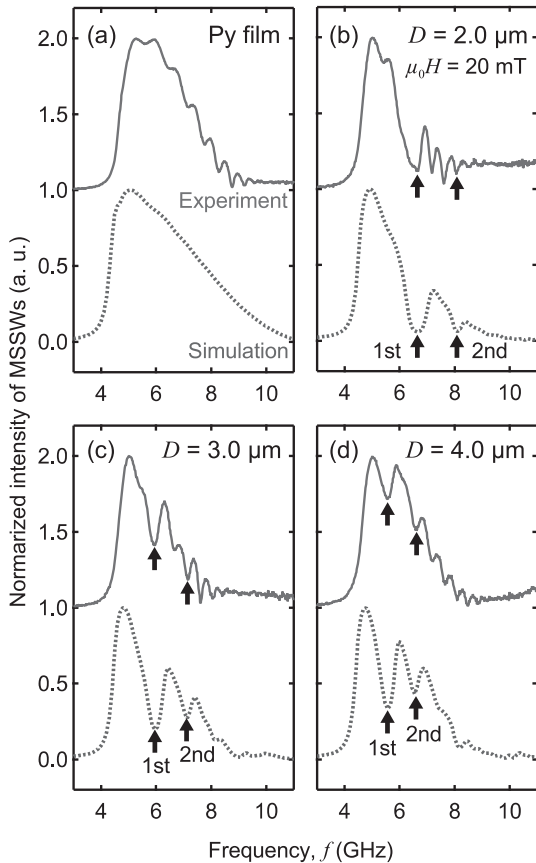


図3-2 (a)Py 薄膜と格子定数D=(b)2.0, (c)3.0, および(d)4.0 μm のスピนว波スペクトル. 実線は実験結果, 破線は計算結果である.

2.0~4.0 μm としたときの実験結果およびシミュレーション結果である. Py 薄膜のスペクトルと比べて, 明らかに形状が異なっており, 特定の周波数(矢印で表示)で大きな減衰(ディップ)を示すことがわかった. この周波数はシミュレーションで得られたものと一致している. また, このディップを示す周波数は格子定数によって変化していることが分かり, 周期構造を反映していることを指名している.

この減衰の起源を調べるために, シミュレーション結果から伝搬しているスピนว波の分散関係を求めた(図3-3). Py 薄膜の分散曲線は, 典型的なスピนว波の分散曲線を示していることがわかる. 一方, MCの分散関係のグラフでは, 特定の周波数に伝搬状態のない, バンドギャップが存在している. スペクトルで得られたディップは, このバンドギャップ位置の周波数であり, スペクトルの変化は周期構造導入によるバンドギャップの発現が起源であることが分かった.

このように, 金属 MC 中におけるスピนว波の伝搬特性を電気的な手法を用いた観測に初めて成功した. さらに, 周期構造の格子定数を変調することにより, バンドギャップの周波数を系統的に変調できることも実証した.

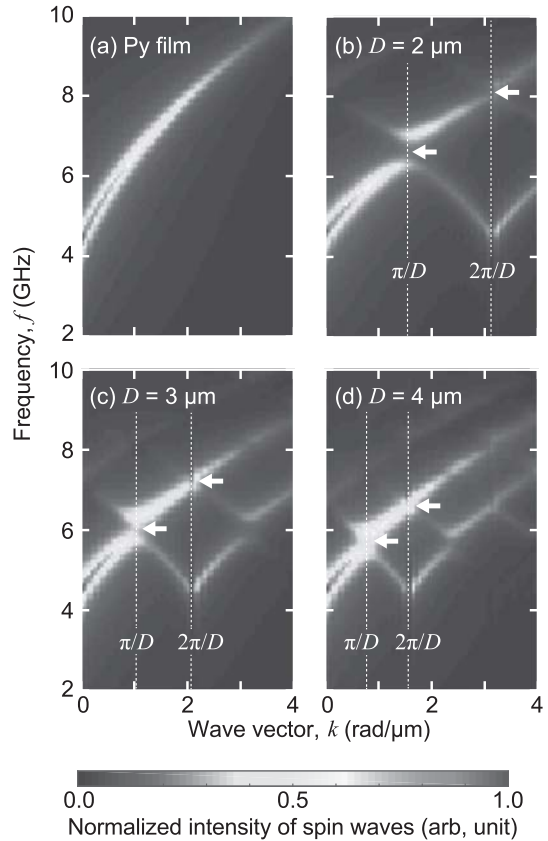


図3-3 マイクロマグネティックシミュレーションにより得られた, (a)無構造Py膜およびD=(b)2.0, (c)3.0, および(d)4.0 μm のPy MCにおけるスピนว波信号の分散関係のグラフ.

4. 高周波スイッチング電源のピークスイッチ電圧低減

スイッチング損失を低減させることにより高周波動作において電力損失を低減させる共振型スイッチング電源であるE級スイッチング電源において, 共振を用いることによりスイッチ電圧波形が曲線状になりその結果スイッチにかかる電圧のピーク値が直流供給電圧の3倍から4倍になるということが問題となっていた. スイッチにかかる電圧のピーク値が高いとその高い電圧に耐えられる高耐圧のスイッチ素子を用いるの必要があり, そのような高耐圧のスイッチ素子は, トランジスタの構造上寄生容量が高くなったり, 導通抵抗が高かったり, また高価であるという問題がある.

研究者らが考案した電圧分割型E級スイッチング電源を用いることにより抜本的にスイッチ電圧のピーク値を数分の1(トランジスタの個数分の1)に低くすることができることが示されている. 本研究ではこの電圧分割型E級スイッチング電源技術を実際の回路に応用するために入力電圧変動時に動作モードを変更させる方式を提案して理論通りの動作をすることを確認した.

研究業績

【学術論文】

- 1) T. Manago, M. M. Aziz, F. Ogrin, K. Kasahara, "Influ-

- ence of the conductivity on spin wave propagation in a Permalloy waveguide”, *J. Appl. Phys.*, 126, 043904 (8 pages) (2019).
- 2) K. Kasahara, S. Wang, T. Ishibashi, T. Manago, “Magneto-optical images of submicron-size Bi-substituted YIG patterns prepared by electron-beam irradiated metal-organic decomposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 58, 060906 (4 pages, Rapid communication) (2019).
 - 3) K. Shibata, K. Kasahara, T. Manago, “Electrical detection of magnonic band gaps for metallic one-dimensional magnetic crystals”, *Appl. Phys. Express*, 12, 053002 (4 pages) (2019).
 - 4) K. Shibata, K. Kasahara, K. Nakayama, V. V. Kruglyak, M. M. Aziz, T. Manago, “Dependence of non-reciprocity in spin wave excitation on antenna configuration”, *J. Appl. Phys.*, 124, 243901 (6 pages) (2018)
 - 5) 眞砂卓史, 笠原健司, 西村和浩, 柴崎一郎, “ホール素子による微小磁場計測の検討とノイズスペクトル測定”, *電気学会論文誌 E センサ・マイクロマシン部門誌*, 138(3), 117-122 (2018).
 - 6) K. Kasahara, T. Manago, “Preparation of epitaxial yttrium-iron garnet micropatterns using metal-organic decomposition with electron-beam irradiation”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 110303 (4 pages; Rapid communication) (2017).
 - 7) K. Kasahara, M. Nakayama, X. Ya, K. Matsuyama, T. Manago, “Effect of distance between a magnet layer and an excitation antenna on the nonreciprocity of magnetostatic surface wave”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 010309 (4 pages; Rapid communication) (2017).
 - 8) A. Lotfi, A. Medi, A. Katsuki, F. Kurokawa, H. Sekiya, M. Kazimierczuk, T. Suetsugu, “Sub-nominal Operation of Class-E Nonlinear Shunt Capacitance PA at Any Duty Ratio and Grading Coefficient,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10), 7878-7887, (2018)
- 【その他業績：国際会議発表】
- 1) K. Nakayama, S. Tomita, R. Kawasaki, K. Kasahara, N. Hosoito, H. Yanagi, and T. Manago, “Spin-wave Localization with Quasi-periodic Magnonic Metamaterials”, 12th International Congress Metamaterials, Espoo, Finland, 2018/8/27, 26 (8/27~9/1)
 - 2) F. Y. Ogrin, and T. Manago, “3D FDTD-LLG modeling of magnetisation dynamics in thin film ferromagnetic structures”, *IEEE International Conference on Microwave Magnetics 2018*, Exeter, UK, 2018/6/25, 26 (24~27)
 - 3) K. Shibata, K. Kasahara, K. Nakayama, V. V. Kruglyak, M. M. Aziz, and T. Manago, “Antenna configuration dependence of nonreciprocity of spin waves”, *IEEE International Conference on Microwave Magnetics 2018*, Exeter, UK, 2018/6/25, 26 (24~27)
 - 4) K. Shibata, K. Kasahara, K. Nakayama and T. Manago, “Antenna Configuration Dependence of the Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Wave”, *SPINTECH 9*, Fukuoka, Japan, 2017/6/7 (4~8)
 - 5) W. Luo, X. Wei, H. Sekiya, and T. Suetsugu, “Design of load-independent class-E inverter with MOSFET parasitic capacitances,” *IEEE Midwest Symposium on Circuit and Systems*, Dallas TX, 2019/8
 - 6) Y. Furukawa, Y. Shibata, T. Suetsugu, H. Eto, F. Kurokawa, “Peak Current Detected Digital Control Switching Power Supply for HVDC System”, *IEEE International Conference on Telecommunication Energy*, Torino, Italy, 2018/10
 - 7) K. Hirayama, T. Suetsugu, Y. Furukawa, F. Kurokawa, “On Study of Voltage Dividing Class Phi Amplifier,” *International Power Electronics Conference Niigata*, Japan, 2018/5
 - 8) F. Ebihara, X. Wei, H. Sekiya, T. Suetsugu, “A Novel Analysis Procedure for Class E Oscillator,” *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Florence, Italy, 2018/5
 - 9) K. Hirayama, T. Suetsugu, F. Kurokawa, “A Control Method of Class E2 DC-DC Converter with Adjustable Peak Switch Voltage under Input Voltage Fluctuation,” *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, San Diego CA, 2017/11
 - 10) D. Saini, A. Ayachit, M. Kazimierczuk, T. Suetsugu, “High Switching Frequency Performance of E-GaN FETs and Silicon MOSFETs,” *IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati OH, 2017/10
 - 11) Y. Nagata, Y. Yamada, Y. Fukumoto, T. Ikenari, X. Wei, T. Suetsugu and H. Sekiya, “The Phase-Controlled Class-D ZVS Inverter with Current Protection,” *IEEE Annual Energy Conversion Congress and Exposition*, Cincinnati OH, 2017.
 - 12) K. Hirayama, T. Suetsugu, F. Kurokawa, “DC-DC Converter Based on Voltage Dividing Class E Amplifier,” *IEEE International Conference on Telecommunication Energy*, Gold Coast, Australia, 2017/10
 - 13) K. Hirayama, T. Suetsugu, H. Maruta, F. Kurokawa

“Effect on Voltage Dividing Class E Amplifier by Parasitic Capacitances of Drive Circuit,” International Future IEEE. IEEE International Future Energy Electronics Conference, Kaohsiung, Taiwan, 2017/7