

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 25 年 5 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2011～2012

課題番号：23686012

研究課題名（和文）

ハーフサイクルテラヘルツ波電磁波パルスによる超高速スピン操作

研究課題名（英文）

Observation of ultrafast spin dynamics using by half-cycled THz pulses

研究代表者

中嶋 誠 (NAKAJIMA MAKOTO)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40361662

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ波パルスを用いて、磁性体におけるスピンの超高速ダイナミクスの解明やスピン操作を目的として研究を行った。高強度テラヘルツ波光源の開発を行うとともに、開発したテラヘルツ波を用いてスピン歳差運動の時間分解測定を行った。ErFeO₃におけるスピン再配列転移を THz 時間領域分光法にて観測し、スピン状態を超高速時間領域にて明らかにできる手法の開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：We studied the spin dynamics in ferromagnetic materials using THz time domain spectroscopy. We developed high intensity THz pulses using two-color excitation technique in air-plasma. The ultrafast response of the spin precession motions in ErFeO₃ were studied using the THz pulses. The observation of the spin reorientation transition is succeeded using this technique, which enables us to clarify the spin states in the ultrashort time scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2012 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
年度			
総計	21,600,000	6,480,000	28,080,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、 応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ波、超高速、フェムト秒パルスレーザー、磁性体、スピンドイナミクス、磁気光学

1. 研究開始当初の背景

近年、スピン歳差運動の時間分解測定が注目を集めている。これはスピントロニクスや量子情報において、超高速スピン制御が期待されるからである。

磁性体におけるテラヘルツ波分光は、近年に至るまでほとんど行われていなかった。しかしながら昨今、我々がテラヘルツ波での測定を報告して以来、その報告例は次第に増え

てきている。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの研究をさらに発展させ、テラヘルツパルスの磁場成分によってスピンを誘起・観測・操作することを試み、スピンの超高速ダイナミクスを明らかにすることを旨とする。

テラヘルツ波によるスピンを操作するた

めのテラヘルツ光源の開発を行う。開発したテラヘルツパルスを用いて、スピン再配列転移の観測を目指す。テラヘルツ帯で磁性体の磁気応答を調べ、テラヘルツ帯における磁気光学デバイスの可能性を探索することである。

3. 研究の方法

主として、フェムト秒パルスレーザー励起テラヘルツ波を用いて、時間領域分光測定を行う。偏光子を組み合わせることによって、テラヘルツ磁気光学時間領域測定も行う。

測定試料として計画している希土類オルソフェライトの成長をフローティングゾーン (FZ) 法を用いて行う。これは良質で大きな単結晶試料を得るためである。

4. 研究成果

本研究においては、テラヘルツ波パルスによるスピン制御を目指した光源開発や、テラヘルツ波パルスを用いた新規のスピン分光を進めてきた。

高強度なテラヘルツ波パルス開発は、スピン制御をおこなうために重要な要素である。我々は、本予算で導入したフェムト秒パルスレーザーを組み込んだレーザー増幅器を用いて、空気プラズマを用いる方法および非線形光学結晶 LiNbO_3 を用いる方法の2つの方法で開発を進めた。空気プラズマを用いる方法にて、入射させる 800nm と 400nm の偏光を真ゼロ次波長板を用いて制御することにより、最大で 1.4MV/cm という非常に高強度なテラヘルツ波光源の開発に成功した。また空気プラズマより、ラディアル偏光の THz パルスの生成にも成功した。

これまで YFeO_3 をはじめとしたオルソフェライトの THz 分光測定を行ってきた。 ErFeO_3 を FZ 法で単結晶化し、その試料を用いて低温測定を行い、再配列転移の観測をテラヘルツ分光にて成功した。スピン配列が変わることによって、観測されるスピン歳差運動の振動モードが変化したり、放出されるテラヘルツ波の偏光が直線偏光から円偏光に変化するなど、高感度で超高速応答に応用可能な測定結果を得られた。これらの成果については、Physical Review Letters 誌に掲載され、高く評価されていると考えている。図1は、室温における ErFeO_3 の透過波形であり、振動成分がスピン歳差運動に対応する。強磁性共鳴周波数 0.377THz の成分を抜き出して電場振幅の軌跡(図1(c))を示しており、楕円偏光になっている様子がよくわかる。図2は温度低下により再配列転移温度(96K)に近づくに連れて、スピン歳差運動の周期が長くなる、ソフトニングが観測された。

パイロクロア型伝導体 $\text{Pb}_2\text{Ir}_2\text{O}_{7-x}$ に照射することで GaAs と同程度の強い第2次高

調波 (SHG) を観測することに成功した。その機構を電子状態から説明し、計算と合わせて報告した。

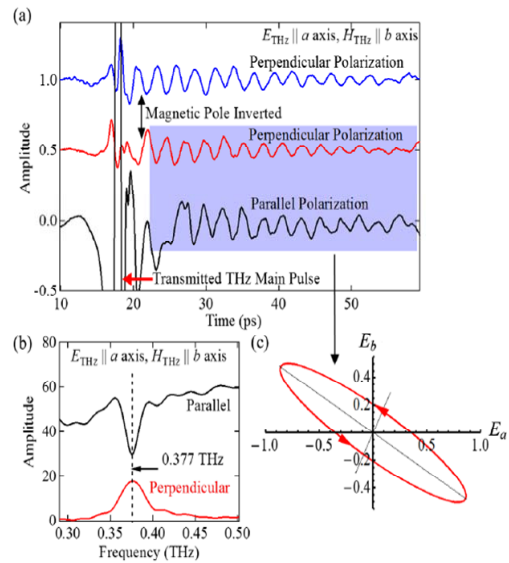


図1 (a) ErFeO_3 におけるテラヘルツ波透過波形 (b) 平行成分と垂直成分のフーリエ変換スペクトル (c) (a) における 0.377THz 成分の電場振幅の軌跡。

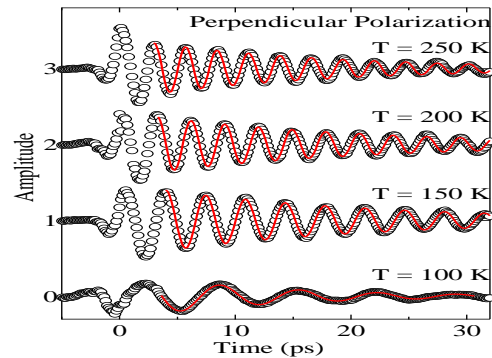


図2 テラヘルツ波透過波形の温度依存性。

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 19 件)

- “Terahertz Time-Domain Observation of Spin Reorientation in Orthoferrite ErFeO_3 through Magnetic Free Induction Decay”
K. Yamaguchi, T. Kurihara, Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, 査読有
Physical Review Letters 110, 137204 (2013).
[DOI:10.1103/PhysRevLett.110.137204]
- “Mechanism of enhanced optical second-harmonic generation in the conducting pyrochlore-type $\text{Pb}_2\text{Ir}_2\text{O}_{7-x}$ ”
Y. Hirata, M. Nakajima, Y. Nomura, H. Tajima, Y. Matsushita, K. Asoh, Y.

- Kiuchi, A.G. Eguiluz, R. Arita, T. Suemoto, and K. Ohgushi, 査読有
Physical Review Letters 110, 187402 (2013). [DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.187402]
3. “Longitudinal THz wave generation from an air plasma filament induced by a femtosecond laser”
Y. Minami, T. Kurihara, K. Yamaguchi, M. Nakajima, and T. Suemoto, 査読有
Applied Physics Letters 102, 151106 (2013). [doi: 10.1063/1.4802482]
4. “High-power THz wave generation in plasma induced by polarization adjusted two-color laser pulses”
Y. Minami, T. Kurihara, K. Yamaguchi, M. Nakajima, and T. Suemoto, 査読有
Applied Physics Letters 102, 041105 (2013). [doi:10.1063/1.4789773]
5. “テラヘルツパルス磁場によるインパルス的なスピン励起とコヒーレント制御”
中嶋誠, 山口啓太, 末元徹, 査読有
応用物理 2012 年 4 月号 317-320 (in Japanese).
6. “Ultrafast Coherent Control of Spin Precession Motion by Terahertz Magnetic Pulses”
M. Nakajima, K. Yamaguchi and T. Suemoto, Acta Physica Polonica A 121, 343-346 (2012). 査読有
url:
<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/ABSTR/121/a121-2-12.html>
7. “Ultrafast dynamics of reversible photoinduced phase transitions in rubidium manganese hexacyanoferrate investigated by midinfrared CN vibration spectroscopy”
A. Asahara, M. Nakajima, R. Fukaya, H. Tokoro, S. Ohkoshi and T. Suemoto, Physical Review B 86, 195138 (2012). [doi:10.1103/PhysRevB.86.195138] 査読有
8. “Hard magnetic ferrite with a gigantic coercivity and high frequency millimetre wave rotation”
A. Namai, M. Yoshikiyo, K. Yamada, S. Sakurai, T. Goto, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, T. Suemoto, H. Tokoro, and S. Ohkoshi, 査読有
Nature Communications 3, 1035 (2012). [doi:10.1038/ncomms2038]
9. “Growth Dynamics of Photoinduced Phase Domain in Cyano-Complex Studied by Boundary Sensitive Raman Spectroscopy”
A. Asahara, M. Nakajima, R. Fukaya, H. Tokoro, S. Ohkoshi and T. Suemoto, Acta Physica Polonica A 121, 375-378 (2012). 査読有
- url:
<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/ABSTR/121/a121-2-19.html>
10. “Anomalous behavior of high-frequency zero-field ferromagnetic resonance in aluminum-substituted ϵ - Fe_2O_3 ”
M. Yoshikiyo, A. Namai, M. Nakajima, T. Suemoto, and S. Ohkoshi, 査読有
Journal of Applied Physics 111, 07A726 (2012). [doi:10.1063/1.3677763]
11. “Non-thermal hot electrons ultrafastly generating hot optical phonons in graphite”
Y. Ishida, T. Togashi, K. Yamamoto, M. Tanaka, T. Taniuchi, T. Kiss, M. Nakajima, T. Suemoto, and S. Shin, 査読有
Nature Scientific Reports 1, 64 (2011). [doi: 10.1038/srep00064]
12. “Time-resolved luminescence spectroscopy of self-trapped excitons in ladder type Br-bridged Pt complexes”
T. Suemoto, H. Nakao, M. Nakajima, and H. Kitagawa, 査読有
Journal of Chemical Physics, 134, 224503 (2011). [doi:10.1063/1.3595264]
13. “Terahertz Emission Enhancement in InAs Thin Films Using a Silicon Lens Coupler”
C. T. Que, T. Edamura, M. Nakajima, M. Tani, and M. Hangyo, 査読有
Japanese Journal of Applied Physics (Rapid Communication), 50, 080207 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.080207
14. “Effect of preformed plasma on terahertz-wave emission from the plasma generated by two-color laser pulses”
Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, Physical Review A 83, 023828 (2011). [DOI: 10.1103/PhysRevA.83.023828] 査読有
15. “Intense terahertz emission from undoped GaAs/n-type GaAs and InAs/AlSb structures grown on Si substrates in the transmission-geometry excitation”
Elmer Estacio, Satoru Takatori, Minh Hong Pham, Takashi Yoshioka, Tomoharu Nakazato, Marilou Cadatal-Raduban, Toshihiko Shimizu, Nobuhiko Sarukura, Masanori Hangyo, Christopher T. Que, Masahiko Tani, Tadataka Edamura, Makoto Nakajima, John Vincent Misa, Rafael Jaculbia, Armando Somintac, and Arnel Salvador 査読有
Applied Physics B 103, 825-829 (2011). [DOI: 10.1007/s00340-011-4371-0]
16. “Observation of ultrafast Q-band fluorescence in horse heart cytochrome c in reduced and oxidized forms”
T. Suemoto, H. Ebihara, H. Nakao and M.

Nakajima, 査読有

Journal of Chemical Physics 134, 034502 (2011). [DOI: 10.1063/1.3518370]

17. “Dynamics of photoinduced phase transitions studied by infrared and raman spectroscopy”

T. Suemoto, R. Fukaya, A. Asahara, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi 査読有
Physica Status Solidi B 248, 477-481 (2011). [DOI 10.1002/pssb.201000671]

18. “Effect of lattice deformation on photoinduced phase transition process in $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ”

R. Fukaya, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and T. Suemoto 査読有
Physica Status Solidi B 248, 482-485 (2011). [DOI 10.1002/pssb.201000657]

19. “Photo-induced phase switching dynamics in $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ probed by accumulation free mid-infrared spectroscopy”

A. Asahara, M. Nakajima, R. Fukaya, H. Tokoro, S. Ohkoshi and T. Suemoto 査読有
Physica Status Solidi B 248, 491-494 (2011). [DOI: 10.1002/pssb.201000693]

[学会発表] (計 34 件)

1. “テラヘルツ時間領域分光による DyFeO_3 の磁気共鳴とスピン再配列転移の観測” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013. 3. 26-29), 28pPSB-71, 山口啓太, 栗原貴之, 中嶋誠, 末元徹.

2. “テラヘルツ近接場を用いた磁性体の高空間分解観察” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013. 3. 26-29), 28pPSB-38, 栗原貴之, 山口啓太, 中嶋誠, 渡邊浩, 末元徹.

3. “反転対称性の破れた導電性パイロクロア型酸化物 $\text{Pb}_2\text{Ru}_2\text{O}_6$ の電子物性” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013. 3. 26-29), 27pXH-13, 平田靖透, 中嶋誠, 末元徹, 大串研也.

4. “ロジウム置換型イプシロン酸化鉄における超高周波ミリ波吸収の観測” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013. 3. 26-29), 27pEJ-2, 生井飛鳥, 吉清まりえ, 後藤崇, 吉田貴行, 宮崎達郎, 中嶋誠, 末元徹, 大越慎一.

5. “ロジウム置換型イプシロン酸化鉄における巨大保磁力の観測” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013. 3. 26-29), 27pEJ-1, 吉清まりえ, 生井飛鳥, 後藤崇, 吉田貴行, 宮崎達郎, 中嶋誠, 末元徹, 大越慎一.

6. “Study of Spin Reorientation Phenomena in Erbium Orthoferrite Observed by Free Induction Decay Signals After Half Cycle

THz Pulse Excitation”, K. Yamaguchi, T. Kurihara, Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, International Symposium on Frontiers in Terahertz Technology (FTT 2012), Pos2.31 (Nov. 29), Nov. 27-29, 2012, Nara, Japan.

7. “Observation of Spontaneous Spin Reorientation in ErFeO_3 with Terahertz Time Domain Spectroscopy”, K. Yamaguchi, T. Kurihara, Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2012), Thu-B-4-3 (Sep. 27), September 23-28, 2012, Wollongong, Australia.

8. “テラヘルツ波パルスによるインパルススピニ励起とコヒーレント制御” 応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会 若手研究者サマースクール 2012 (浅間温泉, 松本市, 2012. 8. 6-8), 中嶋誠.

9. “Separation of electron and hole dynamics in graphite from ultrafast luminescence and photoelectron spectroscopy” T. Suemoto, S. Sakaki, M. Nakajima, Y. Ishida, S. Shin, International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2012), Post deadline paper (July 12), July 8-13, 2012, Lausanne, Switzerland.

10. “Ultrafast Faraday effect in a photoinduced magnetic phase transition of rubidiummanganese hexacyanoferrate”, A. Asahara, M. Nakajima, S. Ishige, H. Tokoro, S. Ohkoshi, T. Suemoto, The 10th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON'12) 018 (Jul. 4) July 2 to July 6, 2012, Groningen, The Netherlands.

11. “Zero-gap and nonzero-gap behaviours of recombination luminescence evidenced in graphite and InAs”, T. Suemoto, S. Sakaki, M. Nakajima, Y. Ishida, S. Shin, The 10th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON'12) P107 (Jul. 3) July 2 to July 6, 2012, Groningen, The Netherlands.

12. “グラファイト及び 2 層グラフェンの赤外超高速発光の観測” 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春(関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 26pSB-4, 榊茂之, 中嶋誠, 石田行章, 辛埴, 中辻寛, 小森文夫, 森田康平, 栗栖悠輔, 田中悟, 末元徹.

13. “THz 時間領域分光を用いた ErFeO_3 スピン再配列転移点近傍における歳差運動緩和時間の観測” 日本物理学会 第 67 回年次大

会 2012年春(関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 26pBL-5, 山口啓太, 栗原貴之, 南康夫, 中嶋誠, 末元徹.

14. 「シンポジウム講演」 「テラヘルツ波パルスによる磁性体の超高速スピン応答と制御」 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春 (関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 25pBL-7, 中嶋誠.

15. “遍歴性電気磁気効果物質としての BaMn₂As₂ の物性” 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春 (関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 24pYA-17, 大串研也, 平田靖透, 中嶋誠, 末元徹.

16. “シアン錯体における光誘起ドメイン成長過程の観測” 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春 (関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 24pPSB-9, 浅原彰文, 中嶋誠, 深谷亮, 石毛俊, 所裕子, 大越慎一, 末元徹.

17. “THz 時間領域分光を用いたバリウムフェライト強磁性共鳴の FID による観測” 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春(関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 24pPSB-7, 栗原貴之, 山口啓太, 南康夫, 中嶋誠, 末元徹.

18. “プラズマフィラメントからのラジアル偏光テラヘルツ波発生と Z 偏光検出” 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春(関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 24pPSA-26, 南康夫, 栗原貴之, 山口啓太, 中嶋誠, 末元徹.

19. “広帯域超高速発光分光による InAs および InSb における非熱化電子のダイナミクス” 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年春 (関西学院大学, 2012. 3. 24-27), 24pPSA-25, 末元徹, 榊茂之, 中嶋誠.

20. “ハーフサイクル磁場パルスによる超高速スピン励起とコヒーレント制御” テラヘルツテクノロジーフォーラム 平成 23 年度 第 2 回技術検討会 (東京大学, 2012. 3. 21) 中嶋誠.

21. “プラズマフィラメントからの Z 偏光テラヘルツ波の発生と検出” 日本応用物理学会 第 59 回応用物理学関係連合講演会 2012 年度春季大会 (早稲田大学, 2012. 3. 15-18), (18a-E8-8), 南康夫, 栗原貴之, 山口啓太, 中嶋誠, 末元徹.

22. “テラヘルツ磁場によるスピンのコヒーレント制御およびスピン-フォトン間のエネルギー移動の観測” 日本応用物理学会 第 59 回応用物理学関係連合講演会 2012 年度春季大会 (早稲田大学, 2012. 3. 15-18), (16a-E8-7), 山口啓太, 中嶋誠, 南康夫, 末元徹.

23. “Anomalous behavior of high-frequency ferromagnetic resonance caused by spin-reorientation phenomenon”, Asuka Namai, Makoto Nakajima, Tohru Suemoto, Shin-ichi Ohkoshi, HG-13(Nov.3), 56th

Annual Conference of Magnetism & Magnetic Materials Oct. 30- Nov. 3, Scottsdale, Arizona, USA, 2011.

24. “反転対称性の破れた導電性イリジウム酸化物 Pb₂Ir₂O₇ の電子物性” 日本物理学会 秋季大会 2011 年秋 (富山大学, 2011. 9. 21-24), 24pGD-2, 平田靖透, 中嶋誠, 末元徹, 田島裕之, 麻生佳子, 木内陽子, 松下能孝, 大串研也.

25. “高保磁力を示す ε-Rh_xFe_{2-x}O₃ ナノ磁性体の合成” 日本物理学会 秋季大会 2011 年秋 (富山大学, 2011. 9. 21-24), 23aTN-10, 生井飛鳥, 梅田小矢佳, 桜井俊介, 中嶋誠, 末元徹, 後藤崇, 吉田貴行, 宮崎達郎, 大越慎一.

26. “シアン錯体の光誘起相転移におけるフェムト秒相境界ダイナミクス” 日本物理学会 秋季大会 2011 年秋 (富山大学, 2011. 9. 21-24), 21aTC-14, 浅原彰文, 中嶋誠, 深谷亮, 所裕子, 大越慎一, 末元徹.

27. “ErFeO₃ におけるスピン再配列転移のテラヘルツ時間領域分光による観察” 日本物理学会 秋季大会 2011 年秋 (富山大学, 2011. 9. 21-24), 21pRB-5, 山口啓太, 中嶋誠, 南康夫, 末元徹.

28. “テラヘルツ波ダブルパルスによる弱強磁性体における超高速スピン制御” 日本応用物理学会 第 72 回応用物理学学会学術講演会 2011 年秋 (山形大学, 2011. 8. 29-9. 2), 1a-F-4, 山口啓太, 中嶋誠, 南康夫, 末元徹.

29. “2 色超短パルス光励起プラズマからの高強度 THz 波発生におけるプレパルス光照射の効果とプレパルス光励起プラズマの性質” 日本応用物理学会 第 72 回応用物理学学会学術講演会 2011 年秋 (山形大学, 2011. 8. 29-9. 2), 1p-F-8, 南康夫, 中嶋誠, 山口啓太, 末元徹.

30. “Electronic Properties of Polar-Metallic Iridium Oxides”, Y. Hirata, M. Nakajima, T. Suemoto, H. Tajima, Y. Kiuchi, Y. Matsushita, K. Ohgushi, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) 16P-D030 (8/16) Beijing, China, 2011.

31. “Ultrafast Coherent Control of Spin Precession Motion by Terahertz Magnetic Pulses”, Makoto Nakajima, Keita Yamaguchi, and Tohru Suemoto, (2011. 6. 30) International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT' 04) June 28- July 2, Wroclaw, Poland, 2011.

32. “Growth dynamics of photoinduced phase domain in cyano-complex studied by boundary sensitive Raman spectroscopy”, A. Asahara, M. Nakajima, R. Fukaya, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and T. Suemoto,

((2011.6.29)) International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT' 04) June 28- July 2, Wroclaw, Poland, 2011.

33. "Determination of Q-band Fluorescence Lifetime in Horse Heart Cytochrome-c by Up-conversion Technique", T. Suemoto, H. Ebihara, H. Nakao and M. Nakajima, (2011.6.28) The International Conference on Luminescence & Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL' 11) June 26- July 1, Ann Arbor, Michigan, USA, 2011.

34. " Noncentrosymmetric Conductive Iridium Oxides" 「重い電子系の形成と秩序化」第3回研究会 2011/6/23-25, Y. Hirata, M. Nakajima, T. Suemoto, H. Tajima, K. Asoh, Y. Kiuchi, Y. Matsushita, K. Ohgushi, (柏市).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ <http://nak.matrix.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 誠 (NAKAJIMA MAKOTO)
千葉大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：40361662

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし