

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31日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560073

研究課題名（和文） 金属テーパ構造における光ナノ超集束の数理解析

研究課題名（英文） Analysis of optical superfocusing in metallic tapered structures

研究代表者

栗原 一嘉（KURIHARA KAZUYOSHI）

福井大学・教育地域科学部・准教授

研究者番号：20270704

研究成果の概要（和文）：

準変数分離法を用いて、金属テーパ構造の超集束に関して、実用的な観点から数理解析を行った。曲率半径を有するテーパ型導波路の理論を確立するために、放物体と放物筒の2構造に関して調べた。テーパ型導波路の理論において、金属の誘電率が複素数の場合が扱える方法を確立するために、最も単純な構造の金属V溝構造でこれを調べた。

研究成果の概要（英文）：

Superfocusing of metallic tapered structures is mathematically analyzed from a practical point of view using quasi-separation of variables. Two structures of paraboloid and parabolic cylinder are investigated in order to establish a theory of tapered waveguides with a radius of curvature. A metallic V-groove structure is investigated as a simple sample to analyze superfocusing of metallic tapered structures with a metallic permittivity of complex number.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、工学基礎

キーワード：数理工学、プラズモニクス、超集束、テーパ導波路、表面プラズモン

1. 研究開始当初の背景

光をレンズで集光した場合、どこまでも小さな領域に集光できるわけではない。その限界は光波長の約半分の寸法であり、回折限界と呼ばれている。しかし、先端が尖ったテーパ構造を持つ金属を導波路として使うと、回折限界を超えて小さな領域に光を集めることができる。この現象は超集束(Superfocusing)と呼ばれ、1997年のNerkararyanの論文(Phys. Lett., **237** (1997) 103)のタイトルに由来している。この論文はたった3ページの簡単なレター

だが、テーパ型導波路では、表面プラズモンと呼ばれる金属表面を伝搬する光が、テーパ先端で無限に蓄積できることを簡単な理論で示したものである。

テーパ型導波路の先端で超集束が起きることを理論的に示したにも関わらず、どの程度のテーパ角の導波路であれば超集束が効率的に起きるかについて、当時、有効な数理解析法が全くなかった。テーパ角が非常に小さい場合に効率的に超集束が起きることが、断熱近似法で示されていたに過ぎなかった(Phys. Rev. Lett., **93** (2004) 137404)。

この問題を真正面から取り組んだのが、本研究者が書いた論文”Superfocusing modes of surface plasmon polaritons in conical geometry based on the quasi-separation of variables approach” (J. Phys. A, **40** (2007) 12479) である。この論文では、テーパー型導波路の波動方程式を解くのに、準変数分離法と言って、不完全な変数分離を仮定するという新規な方法を提案した。この方法で、初めて、大きなテーパー角でも超集束が効率的に起こることが理論的に示された。

2. 研究の目的

本研究は、本研究者が提案した準変数分離法により、テーパー型導波路における超集束の物理を確立することに挑戦したものである。テーパー型導波路における超集束は、プラズモニクスという新しい科学技術分野を今世紀になって形成する駆動力の一つとして位置付けられる程、実験的に注目されている。本研究では、工学的な面を重視し、テーパー型導波路の実験を説明できるような理論を構築することに専心した。具体的には、曲率半径を有するテーパー型導波路の理論を確立することや、金属の誘電率が複素数の場合にテーパー型導波路の理論でどのように計算して行けばよいかなどを検討した。

3. 研究の方法

ヘルムホルツ方程式 $\nabla^2 H + k^2 H = 0$ を解析的に解く場合、ほとんど全ての物理学では、変数分離した解を仮定する。具体的な例を挙げれば、極座標 (r, θ, φ) 表示において、関数の依存性が $H(r, \theta)$ で与えられるような場合には、変数分離した解 $H(r, \theta) = R(r)\Psi(\theta)$ を仮定するのが変数分離法である。本研究の方法は、準変数分離法という不完全に変数分離した解 $H(r, \theta) = R(r)\Psi(\theta, r)$ を仮定する。この方法を使うと、テーパー型導波路の解析解は厳密解でなく近似解となるが、テーパー角の大きさを考慮することや、曲率半径を有するテーパー形状を考慮すること等が可能になる。

4. 研究成果

本研究における主な研究成果は、3つある。1つ目は、放物体導波路の伝搬モードを明らかにしたこと。2つ目は、放物筒導波路の伝搬モードを明らかにしたこと。3つ目は、金属V溝導波路において、金属の誘電率を複素数として扱う方法を明らかにしたことである。それ以外の研究成果として、ガウスモードのレーザー光をエルミート・ラゲール・ガウスモードに変換する方法や、金属表面を使ってパルス炭酸ガス

レーザーでプラズマ発生することを利用して元素分析があるが、本研究の関連テーマなので、ここでは割愛する。

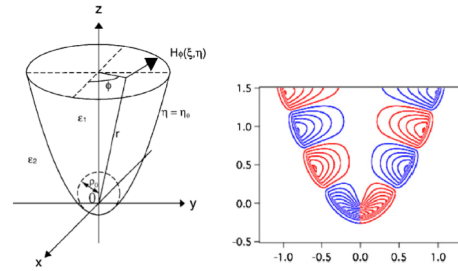


図1 放物体構造(左)と導波路伝搬モードの電気力線表示(右)

1番目の研究成果は、放物体導波路の伝搬モードについてである。図1左のように、放物体構造に座標系を導入し、金属放物体と空洞放物体の伝搬モードについて調べた。得られた知見で第一に重要な点は、空洞放物体には伝搬モードが存在するが、金属放物体に対しては伝搬モードが存在しないことである。第二に重要な点は、空洞放物体の伝搬モードは、超集束の振る舞いを示さないことである。第三に重要な点は、空洞放物体の伝搬モードは超集束を示さないものの、放物体の頂点付近内側で電場増強が起こることである。図1右に、空洞放物体に対する伝搬モードを電気力線表示で示す。詳細は、本研究者の発表論文 (J. Phys. A: Math. Theor. **42** (2009) 185401) を参照して頂きたい。

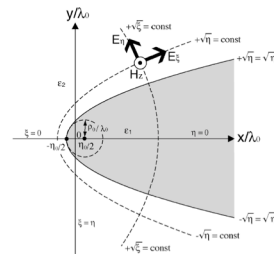


図2 放物筒構造の座標系表示

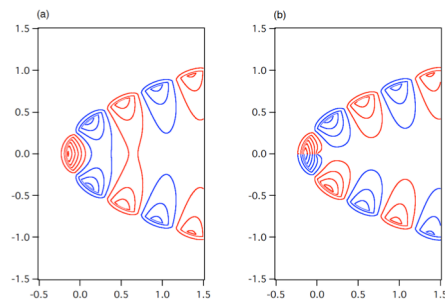


図3 空洞放物筒の導波路伝搬モードの電気力線表示. 偶モード (a) と奇モード (b)

2番目の研究成果は、放物筒導波路の伝搬

モードについてである。図2のように、放物柱構造に座標系を導入し、金属放物筒と空洞放物筒の伝搬モードについて調べた。得られた知見で第一に重要な点は、空洞放物筒には伝搬モードが2つ存在するが、金属放物筒に対しては伝搬モードが1つも存在しないことである。第二に重要な点は、空洞放物筒の伝搬モードは、超集束の振る舞いを示さないことである。第三に重要な点は、空洞放物筒の伝搬モードは超集束を示さないものの、放物筒の頂点付近内側で電場増強が起こることである。図3に、空洞放物筒に対する伝搬モードを電気力線表示で示す。偶と奇の2つのモードが存在する。

放物体と放物筒の構造に共通して言えることは、内側が金属の場合には伝搬モードが存在せず、外側が金属の場合にだけ伝搬モードが存在することである。そして、その伝搬モードは超集束の振る舞いを示さないということである。

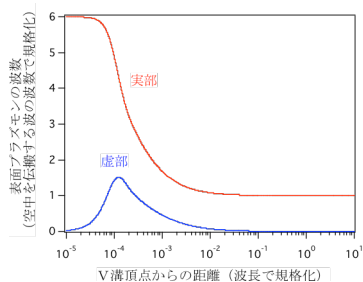


図4 金属V溝構造における表面プラズモンの波数の数値計算. 赤線は波数の実部を示し、青線は波数の虚部を示す. V溝の開き角は 10° とした.

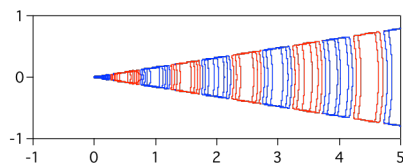


図5 金属V溝構造で起こるTHz波超集束の電気力線表示. V溝の開き角は 18° である.

3番目の研究成果は、金属の誘電率を複素数として扱う方法を金属V溝導波路で確立したことである。光領域では、金属の誘電率は、虚部を無視して実部だけで議論する近似が有効である。しかし、周波数 $0.1 \sim 10\text{THz}$ のテラヘルツ(THz)波領域では、金属の誘電率は、虚部と実部の大きさが同程度になり、誘電率を複素数として扱う必要がある。例えば、金属がアルミニウムの場合、周波数 1THz (波長: 0.3mm)では、金属の誘電率 ϵ_m は $\epsilon_m = -3.2 \times 10^4 + i6.7 \times 10^5$ である。この誘電率の値を使って

計算したのが、図4と図5である。図4は、金属V溝構造での表面プラズモンの波数を計算したものである。特徴的なことは、THz波の超集束では、光領域の場合と違って、表面プラズモンの波数実部(図4の赤線)がV溝構造の頂点に近づくにつれて、無限大に近づかず、有限な値(図4では、6.0)で一定になるプラトー特性を示すことである。また、表面プラズモンの伝搬の減衰を示す波数虚部(図4の青線)が、V溝構造の頂点に近づくにつれて、無限大に近づかず、再び零になることも、光領域の場合と大きく異なった特徴である。図5は、金属V溝構造での超集束の電気力線表示である。この電気力線表示では、 $0.01 \sim 10$ 波長のV溝先端付近に興味があるので、準分離不変量の数値計算結果より判断し、変形ホイットaker関数を動径変数の平方根で割ったもので、0次動径方程式の解を近似的に評価した。このような計算手法を使うことで、図5の電気力線表示が可能となった。図4と図5の詳しい計算に関しては、本研究者の国際会議論文(Proc. IW-FIRT2012, 138)を参照して頂きたい。なお、この計算結果を支持する実験データが最近得られていることを付記する。

以上のように、本研究では、準変数分離法という新しい解析手法により、従来では不可能なテーパー型導波路の数理解析を行った。

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8件)(全て査読有り)

- 1: Kazuyoshi Kurihara, Junichi Takahara, Kazuhiro Yamamoto, and Akira Otomo, "Identifying plasmonic modes in a circular paraboloidal geometry by quasi-separation of variables", J. Phys. A: Math. Theor. **42** (2009) 185401 (38pp).
- 2: Ali Khumaeni, Hideki Niki, Yoji Deguchi, Kazuyoshi Kurihara, Kiichiro Kagawa, and Yong Inn Lee, "Analysis of organic powder samples by using the metal-assisted subtarget effect in a transversely excited atmospheric (TEA) CO₂ laser-induced He gas plasma at 1 atm", J. Korean Phys. Soc. **55** (2009) 2441-2446.
- 3: Atsushi Syouji, Kazuyoshi Kurihara, Akira Otomo, and Shingo Saito, "Diffraction-grating-type phase converters for conversion of Hermite-Laguerre-Gaussian mode into Gaussian mode", Appl. Opt. **49** (2010) 1513-1517.
- 4: Ali Khumaeni, Zener Sukra Lie, Yong Inn Lee, Kazuyoshi Kurihara, Kiichiro Kagawa and Hideaki Niki, "Rapid Analyses of Tiny

Amounts of Power Samples Using Transversely Excited Atmospheric CO₂ Laser-Induced Helium Gas Plasma with the Aid of High-Vacuum Silicon Grease as a Binder on a Metal Subtarget”, *Appl. Spectrosc.* **65** (2011) 236-241.

- 5: Ali Khumaeni, Hideaki Niki, Ken-ichi Fukumoto, Yoji Deguchi, Kazuyoshi Kurihara, Kiichiro Kagawa and Yong Inn Lee, “A Unique technique of laser-induced breakdown spectroscopy using transversely excited atmospheric CO₂ laser for the sensitive analysis of powder samples”, *Curr. Appl. Phys.* **11** (2011) 423-427.
- 6: Ali Khumaeni, Zener Sukra Lie, Hideaki Niki, Koo Hendrik Kurniawan, Yong Inn Lee, Kazuyoshi Kurihara, and Kiichiro Kagawa, “Direct analysis of powder sample using transversely excited atmospheric CO₂ laser-induced gas plasma at 1 atm”, *Anal. Bioanal. Chem.* **400** (2011) 3279-3287.
- 7: Zener Sukra Lie, Ali Khumaeni, Kazuyoshi Kurihara, Koo Hendrik Kurniawan, Yong Inn Lee, Ken-ichi Fukumoto, Kiichiro Kagawa, Hideki Niki, “Excitation Mechanism of H, He, C and F atoms in metal-assisted atmospheric helium gas plasma induced by transversely excited atmospheric-pressure CO₂ laser bombardment”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011) 122701(7pp).
- 8: Ali Khumaeni, Zener Sukra Lie, Hideaki Niki, Yong Inn Lee, Kazuyoshi Kurihara, Motoomi Wasasugi, Touru Takahashi, and Kiichiro Kagawa, “Comparative study of Nd:YAG laser-induced breakdown spectroscopy and transversely excited atmospheric CO₂ laser-induced gas plasma spectroscopy on chromated copper arsenate preservative-treated wood”, *Appl. Opt.* **51** (2012) B121-B129.

〔学会発表〕（計 48 件）（国際会議は査読有り）

国際会議：（19 件）

- 1: Kazuhiro Yamamoto, Kazuyoshi Kurihara, Junichi Takahara, Ryo Naraoka and Akira Otomo, “Effective excitation of superfocusing surface plasmons using phase controlled waveguide modes”, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1182**, San Francisco, CA, USA, April 14-17 (2009) 1182-EE13-05.
- 2: Ali Khumaeni, H. Niki, Y. Deguchi, K. Kurihara, and K. Kagawa “Applications of

TEA CO₂ Laser-Induced Metal-Assisted Gas Plasma for Elemental Analyses of Organic Powder Samples”, 2nd North American Symposium on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, New Orleans, LA, USA, July 13-15 (2009) 119.

- 3: Yong Inn Lee, Ali Khumaeni, Hideaki Niki, Yoji Deguchi, Kazuyoshi Kurihara, Kiichiro Kagawa, “Analysis of Organic Powder Samples Using Metal-Assisted Sub-Target Effect”, Annual fall conference of the Korean physical society, Changwon convention center, Changwon city, Korea, October 21-23 (2009).
- 4: Ali Khumaeni, H. Niki, Y. Deguchi, Y.I. Lie, K. Kurihara, and K. Kagawa, “*Spectro-chemical Analysis of Powder Samples Using TEA CO₂ Laser-Induced Metal -Assisted He Gas Plasma*”, 10th International Conference on Laser Ablation, Singapore, Nov 22-27 (2009).
- 5: Zener Sukra Lie, Ali Khumaeni, Hideaki Niki, Kazuyoshi Kurihara, Ken-ichi Fukumoto, and Kiichiro Kagawa, “Highly sensitive analysis of hydrogen in metal sample using selective detection method in TEA CO₂ laser-induced He gas plasma by utilizing effective techniques to suppress H emission from H₂O”, 6th International conference on laser-induced breakdown spectroscopy, Memphis, TN, USA, September 13-17 (2010).
- 6: Ali Khumaeni, Zener Sukra Lie, Hideaki Niki, Yong Inn Lee, Kazuyoshi Kurihara, and Kiichiro Kagawa, “Direct Analysis of Powder Sample Using Transversely Excited Atmospheric CO₂ Laser-Induced Metal-Assisted Gas Plasma at 1 atm by Introducing the Powder Particles into the Plasma”, 6th International conference on laser-induced breakdown spectroscopy, Memphis, TN, USA, September 13-17 (2010).
- 7: Zener Sukra Lie, Ali Khumaeni, Hideaki Niki, Ken-ichi Fukumoto, Kazuyoshi Kurihara, and Kiichiro Kagawa, “Highly Sensitive Hydrogen Analysis on Metal Samples Utilizing Photomultiplier Detection Method in LIBS Using TEA CO₂ Laser-Induced He Gas Plasma”, *Pachifichem 2010*, Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20 (2010).
- 8: Kiichiro Kagawa, Zener Sukra Lie, Ali Khumaeni, Kazuyoshi Kurihara, Hideaki Niki, and Kenichi Fukumoto, “Review on Hydrogen Analysis Using TEA CO₂ Laser-Induced He Gas Plasma at 1 atm”, *Pachifichem 2010*, Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20 (2010).
- 9: Ali Khumaeni, Zener Sukra Lie, Hideaki Niki,

- Yong Inn Lee, Kazuyoshi Kurihara, and Kiichiro Kagawa, "A Unique Technique for Rapid Analysis of Tiny Amount of Powder Sample Using Transversely Excited Atmospheric CO₂ Laser-induced He Gas Plasma at 1 atm", Pachifichem 2010, Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20 (2010). (Winners of the Student Poster Competition)
- 10: Satoshi Tsuzuki, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, Takashi Furuya, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, "Superfocusing Effect of V-Groove Metallic Structure for Terahertz wave", IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, Sydney, Australia, August 28 - September 1 (2011).
- 11: Fumiyoshi Kuwashima, Kazuma Takei, Takahiro Fujii, Kazuyoshi Kurihara, Masanori Hangyo, Takeshi Nagashima, and Hiroshi Iwasawa, "Generation of a stable THz wave by using a laser chaos", 2011 Internal Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2011), Kobe, Japan, September 4 -7 (2011) 37-39.
- 12: Satoshi Tsuzuki, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, Takashi Furuya, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, "Superfocusing of Terahertz Waves in V-Groove Metallic Structure", 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston, USA, October 2-7 (2011).
- 13: Fumiyoshi Kuwashima, Kazuma Takei, Takahiro Fujii, Kazuyoshi Kurihara, Masanori Hangyo, Takeshi Nagashima, and Hiroshi Iwasawa, "Generation of a wide range THz wave by using a laser chaos", 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston, USA, October 2-7 (2011).
- 14: Satoshi Tsuzuki, Daiki Takeshima, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, Christopher Que, Elmer Estacio, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, "Superfocusing effect of V-groove Metallic structure for terahertz wave", International Photonics Conference (IPC2011), Taiwan, December 8-10 (2011).
- 15: (Invited) Kazuyoshi Kurihara, "Theoretical understanding of superfocusing of terahertz waves in V-grooves metallic structures based on quasi-separation of variables", The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRST 2012), Fukui, Japan, March 7-9 (2012).
- 16: Masahiko Tani, Kohji Yamamoto, Elmer S Estacio, Christopher T. Que, Kazutoshi Fukui, and Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, "Development of devices and techniques for high-performance THz time-domain spectroscopy for material analyses", The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRST 2012), Fukui, Japan, March 7-9 (2012).
- 17: Fumiyoshi Kuwashima, Takuya Shiraou, Masahiko Tani, Kazuyoshi Kurihara, Kohji Yamamoto, Masanori Hangyo, Takeshi Nagashima, and Hiroshi Iwasawa, "Generation of a wide range and stable THz wave by using a laser chaos", The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRST2012), Fukui, Japan, March 7-9 (2012).
- 18: Shinsei Tsuji, Hironori Iwasaki, Ryouhei Yasuda, Kohji Yamamoto, Kazutoshi Fukui, Masahiko Tani, Kazuyoshi Kurihara, and Fumiyoshi Kuwashima, "Terahertz time-domain spectroscopy of liquid samples using parallel plate waveguides coupled with metallic V-groove", The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRST2012), Fukui, Japan, March 7-9 (2012).
- 19: Hironori Iwasaki, Shinsei Tsuji, Ryouhei Yasuda, Kohji Yamamoto, Kazutoshi Fukui, Masahiko Tani, Kazuyoshi Kurihara, and Fumiyoshi Kuwashima, "Terahertz response of hollow plastic tube in parallel plate waveguide coupled with metallic V-groove", The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRST 2012), Fukui, Japan, March 7-9 (2012).
- 国内学会等 : (29 件中 22 件表示)
- 20: 栗原一嘉、山本和広、高原淳一、大友明 「準変数分離法による放物筒構造における表面プラズモンモード」、2009年3月30日-4月2日、第56回応用物理学会関係連合講演会、1077.
- 21: 山本和広、栗原一嘉、高原淳一、大友明 「金属コート誘電体コーンにおける近赤外表面プラズモンの超集束」、2009年3月30日-4月2日、第56回応用物理学会関係連合講演会、1077.
- 22: 栗原一嘉、「金属テーパー構造における表面プラズモンモードを求める新しい解析法」、2009年5月11日、福井大学遠赤外センター公開セミナー、H21-FIR-2.
- 23: 栗原一嘉、香川喜一郎、「テラヘルツ領域での金属テーパー構造における超集束モード導出の理論的アプローチ」、2009年

- 10月22日-23日、日本分光学会テラヘルツ分光部会・国際シンポジウム・テラヘルツ分光法の最先端 III 講演予稿集、68.
- 24: 栗原一嘉、「表面プラズモンの基礎知識」、2010年8月18日、福井セミナー。
- 25: 都築聡、栗原一嘉、桑島史欣、古屋岳、山本晃司、谷正彦、「金属V溝構造におけるテラヘルツ波の集束効果」、2011年3月24日-27日、2011年春季第58回応用物理学関係連合講演会、27p-BX-5.
- 26: 桑島史欣、武井一真、藤井貴宏、谷正彦、栗原一嘉、萩行正憲、長島健、岩澤宏、「レーザーカオス光を用いたテラヘルツ波の安定発生」、2011年3月24日-27日、2011年春季第58回応用物理学関係連合講演会、25a-KF-1.
- 27: 都築聡、栗原一嘉、桑島史欣、古屋岳、山本晃司、谷正彦、「金属V溝構造におけるテラヘルツ波の超集束効果」、2011年5月20日、信学技報、vol. 111、no. 56、LQE2011-10、pp. 41-42.
- 28: (招待講演) 栗原一嘉、「テラヘルツプラズモニクスの最先端基礎講座」、2011年8月、電気学会北陸支部フロンティアセミナー。
- 29: 桑島史欣、白尾拓也、谷正彦、栗原一嘉、萩行正憲、長島健、岩澤宏「レーザーカオスを用いたテラヘルツ波発生」、2011年8月19日、電気学会北陸支部フロンティアセミナー。
- 30: 栗原一嘉、都築聡、桑島史欣、古屋岳、山本晃司、谷正彦、「金属V溝構造におけるテラヘルツ波の集束効果：理論的検討」、2011年8月29日-9月2日、第72回応用物理学学会学術講演会、31p-F-6.
- 31: 桑島史欣、白尾拓也、谷正彦、栗原一嘉、萩行正憲、長島健、岩澤宏、「レーザーカオス光を用いたテラヘルツ波の広帯域化」、2011年8月29日-9月2日、第72回応用物理学学会学術講演会、2p-F-1.
- 32: 都築聡、竹嶋大貴、栗原一嘉、桑島史欣、古屋岳、山本晃司、谷正彦、「金属V溝構造におけるTHz波の超集束とその分光応用」、2011年9月28日-29日、日本分光学会テラヘルツ分光部会シンポジウム、P-10.
- 33: 桑島史欣、白尾拓也、谷正彦、栗原一嘉、萩行正憲、長島健、岩澤宏、「レーザーカオス光を用いたTHz波の広帯域化」、2011年9月28日-29日、日本分光学会テラヘルツ分光部会シンポジウム、P-17.
- 34: 竹嶋大貴、都築聡、谷正彦、山本晃司、
- 古屋岳、栗原一嘉、桑島史欣、「金属V溝構造におけるテラヘルツ波の超集束効果」、2011年11月26日、日本物理学会北陸支部、D-a.3.
- 35: 桑島史欣、白尾拓也、谷正彦、栗原一嘉、萩行正憲、長島健、岩澤宏、「レーザーカオス光を用いたTHz波の広帯域化」、2011年12月26日、レーザー学会第423回研究報告、RTM-11-29、pp.13-18.
- 36: 桑島史欣、白尾拓也、谷正彦、栗原一嘉、萩行正憲、長島健、岩澤宏、「レーザーカオス光を用いたTHz波の広帯域化と安定化」、2012年1月30日-2月1日、レーザー学会学術講演会第32回年次大会、30pV-2.
- 37: 桑島史欣、白尾拓也、谷正彦、栗原一嘉、山本晃司、萩行正憲、長島健、岩澤宏、「ファイバーとレーザーカオスを用いたTHz波の安定化と広帯域化」、2012年3月15日-18日、第59回応用物理学学会関係連合講演会、16p-E8-15.
- 38: 栗原一嘉、都築聡、桑島史欣、古屋岳、山本晃司、谷正彦、「金属V溝構造におけるテラヘルツ波の超集束：電気力線表示」、2012年3月15日-18日、第59回応用物理学学会関係連合講演会、17p-E8-2.
- 39: 山本晃司、辻新生、岩崎宏紀、安田良平、福井一俊、栗原一嘉、桑島史欣、谷正彦、「金属V溝結合平行平板導波路のテラヘルツ透過特性」、2012年3月15日-18日、第59回応用物理学学会関係連合講演会、17p-E8-3.
- 40: 岩崎宏紀、辻新生、安田良平、山本晃司、福井一俊、栗原一嘉、桑島史欣、谷正彦、「金属V溝結合平行平板導波路に挿入した中空プラスチックチューブのテラヘルツ応答」、2012年3月15日-18日、第59回応用物理学学会関係連合講演会、17p-E8-4.
- 41: 辻新生、岩崎宏紀、安田良平、山本晃司、福井一俊、栗原一嘉、桑島史欣、谷正彦、「金属V溝結合平行平板導波路を用いた液体のテラヘルツ時間領域分光測定」、2012年3月15日-18日、第59回応用物理学学会関係連合講演会、17p-E8-5.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 一嘉 (KURIHARA KAZUYOSHI)

福井大学・教育地域科学部・准教授

研究者番号：20270704