

平成30年6月4日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287091

研究課題名(和文)「速い光」と情報速度

研究課題名(英文)Fast light and the information velocity

研究代表者

富田 誠 (Tomita, Makoto)

静岡大学・理学部・教授

研究者番号：70197929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：「速い光」とは、異常分散媒質の中で、光の伝播速度が、見かけ上、真空中の光速 $c$ よりも速く伝播する現象、さらには伝播速度が、“負”になる現象を意味する。本研究の目的は、「ピークを持たないガウスパルスによる出射パルスピークの観測」など、従来、思考実験としてしか議論されていなかった現象を光の領域で実現し、「速い光」における情報速度、因果律、あるいは相対論との関係を解明していく。

研究成果の概要(英文)：Fast light means phenomena that optical pulses propagate faster than  $c$  i.e. light velocity in vacuum, or even negative velocity in anomalous dispersion media. The purpose of the present research is to investigate the information velocity, causality in the fast light systems and elucidate the underlying physics in terms of relativity

研究分野：量子光学

キーワード：速い光 情報速度 因果律 相対論 異常分散 リング共振器 0 パルス

### 1. 研究開始当初の背景

光の速さは、真空中ではただ1つ  $c=299792458\text{m/s}$  である。一方、物質中を伝播する波動の速度には、位相速度、群速度の他、先端速度、信号速度、情報速度、エネルギー輸送速度、などのさまざまな速度が現れる。なかでも、波束の伝播速度 (= 群速度) は、さまざまな現象を理解する基本的な概念の1つであり、その制御は、応用にも重要な課題であろう。本研究でとりあげる「速い光」とは、異常分散媒質の中で、光の伝播速度が、見かけ上、真空中の光速  $c$  よりも速く伝播する現象 (超光速伝播) さらには、「負の速度」になる現象を意味する。ここで、負の速度とは、パルスのピークが媒質に入射するよりも“早く”、パルスのピークが媒質から出射するもので、一見、因果律、あるいは相対論に反するよう見える現象である。このため「速い光」は、古くは、Sommerfeld や Brillouin によっても議論されている。今日でも、情報の伝達速度などの観点から議論されるとともに、左手系メタマテリアル、白色光共振器などの進展が続いている。一方で、「遅い光」は例えば、 $17\text{m/s}$  という非常にゆっくりとした光の伝播をつくりだす。特に、ボーズ凝縮原子などを対象とした“電磁誘起”透明化現象 (EIT : Electromagnetically Induced Transparency) は、強いカップリング光で駆動された量子遷移に固有の分散構造により、非常に「遅い光」の伝播やさらには「光の凍結」を実現するものである。これらは、原子系の量子コヒーレンスやナノ構造によってシステムの分散を制御し、特殊な光の伝播状態を作り出すものといえる。

### 2. 研究の目的

本研究では、パルスの群速度をめぐる学術的な背景と、申請者のこれまでの研究を基盤に、微小球共振器、あるいは、リング共振器のもつ急峻な、かつ、制御性の高い分散構造を利用して、特に「速い光」の中で起こる基礎物理を解明する。例えば、(1) 波束、特に「速い光」にエンコードすることのできる情報とはどのようなものであるか、パルスのピークはどのような意味を持つのか、(2) 情報伝達速度はいくらか、(3) どのような機構で因果律や相対論が保持されているのか、などに“実証的”に答えていく。従来、理論的な思考実験としてしか議論されていなかった現象を、光の領域で実現する。

### 3. 研究の方法

微小球共振器、リング共振器をもちいた独自の手法で、大きな異常分散、正常分散を作り出した。共振器と外部光の結合力、共振器内の損失等を制御することで、分散を高い精度で制御することができる。このシステムで「速い光」、「遅い光」を観測した。また、科研費で購入した LN 変調器とパターンジェネ

レーターをもちいて、さまざまなタイプの光パルスを作り出した。(1) 屈曲型の非解析点を持つパルス、(2) 位相非解析点を持つパルス、(3) パルスのピークの先鋭さを連続的に変化させられるパルス、(4) ピークを持たないガウスパルスなどである。これらのパルスを分散系に入射させ、パルスピーク、非解析点の伝播の様子を系統的に調べた。これらの方法をとおして、パルスのピークのもつ物理的な意味、速い光の中での情報の伝播などを明らかにした。

### 4. 研究成果

#### (1) 情報としての非解析点の伝播

超光速パルス伝播は、一見、因果律、あるいは相対論に反するよう見える。このため、超光速パルスによって搬送できる情報については、長い間、議論がなされてきた。今日、受け入れられている考え方は、なだらかなガウスパルスのピークは、ピークの到達時刻以前の波形から解析的に外挿されるもので新しい情報は含んでいない。情報はパルスの「ピーク」によって運ばれているのではなく、パルスにエンコードされた「非解析点 = (微分不可能な点)」によって運ばれているというアイデアである。

この非解析点についてこれまで報告されている実験は、パルスの強度が不連続に変化する非解析点 (“不連続型”) にかかわるもののみである。本研究では、新しい2つのタイプの非解析点、即ち、(1) “屈曲型” 非解析点、即ち、傾き (微分) が不連続になる非解析点、さらに、(2) 位相変調型の非解析点について、「速い光」、「遅い光」の中をどのように伝播するのか、実験的検証をおこなった。結果は、パルスのピークは超光速で伝播するが、非解析点は光速  $c$  で伝播することである。非解析点は、情報を搬送していると考えられるため、この効果は、超光速伝播の中で、因果律や相対論が保たれていることを意味している。

図1は、速い光における位相型非解析点の伝播を調べた実験結果である。位相型非解析点は振幅が連続的であるが、位相が非連続的である点で強度型非解析点とは異なる。2つの LN 変長器を用い、第一の LN 変調器でガウス型のパルスを作る。次に第二の LN 変調器でキャリア波の位相を急激に変化させ位相非解析点をエンコードする。結合条件を調整して異常分散、正常分散を作り出したリング共振器を通過する位相非解析点の様子を、(1) 位相のジャンプ幅、(2) 位相非解析点の書き込み時刻などを系統的に変化させながら調べた。図1にて、黒線が入射パルス、色線が出射パルスを示している。出射パルスに現れるスパイクは位相非解析点に付随したプリカーサーとポストカーサーに起因した過渡応答であり、位相非解析点の到着を表す。図2は、非解析点をエンコードする時刻を変

化させ調べたときの実験結果をまとめたものである。パルスピークは異常分散をもったリング共振器を超光速で伝播するが、位相非解析点は超光速 $c$ で伝播することはなく、情報としての意味を持ちうることを示される。原子系などローレンツ型吸収線での振舞いなども議論した。

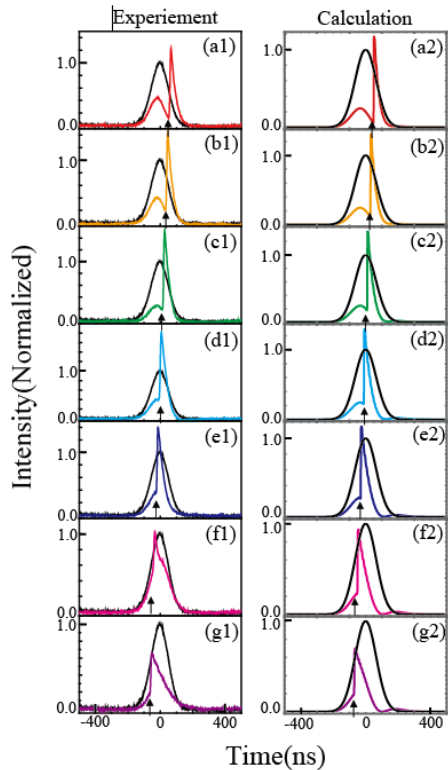


図1 位相非解析点がリング共振器の異常分散領域を伝播する様子。左は実験、右は理論。黒線は入射パルス。上向き矢印で示された異なった時刻に位相非解析点(位相のジャンプ)がエンコードされている。色線は、伝播後のパルス。パルスのピークは異常分散を反映して負の時刻に現れるが、位相非解析点は光速で伝播し、相対論的な因果律に反していない。

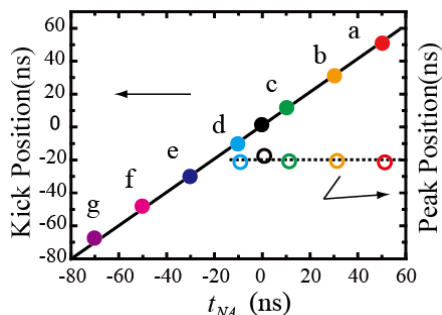


図2 はパルスピークの位置。異常分散を反映して負の群速度遅延が現れている。は非解析点の位置。

(2) 超光速伝播現象におけるパルス波形の効果  
 ならかな Gauss パルスに対して、先鋭な

パルスのピークはどのように振舞うであろうか? 入射パルスとして、

$$f(t) = \exp[-(t/t_p)^\alpha]$$

型の関数を考え、「速い光」のなかでのパルスのピークの意味を考察した。

初めに、 $\alpha=2$  の条件は、従来からよく実験されてきた Gauss パルスに相当する(図3(e))。このときは速い光と遅い光で、「負」と「正」の時間遅延を持ったパルスが、波形を変えることなく出射し、速い光と遅い光の振る舞いは時間に対して対称的なものになる。次に、図3(a)は、入射パルスとして $\alpha=1$ (両指数パルス)を用いた実験結果である。図3(a1)は入射パルス、図3(a2)と(a3)は、各々「速い光」と「遅い光」を作り出すリング共振器からの出射パルスである。図3(a2)「速い光」ではピークの位置がそのまま  $t=0$  に現れ、出射パルスはパルスの後半が削られた時間的に非対称的な形をしている。一方、図3(a3)「遅い光」では明瞭な遅延を持った滑らかなピークが現れ、また、 $t=0$  の位置に屈曲点が確認できる。これらの実験結果は、先鋭なパルスピークは非解析点として振舞うこと、それ故、パルスピークに情報を搬送させるなどより積極的な意味をもたせることができることを示している。

パラメータ  $\alpha$  を系統的に変化させた実験を報告し、また、 $\alpha=1$  で観測された時間に対する対称性の破綻は、因果律を満たした分散系に普遍的な性質であることなどを明らかにした。

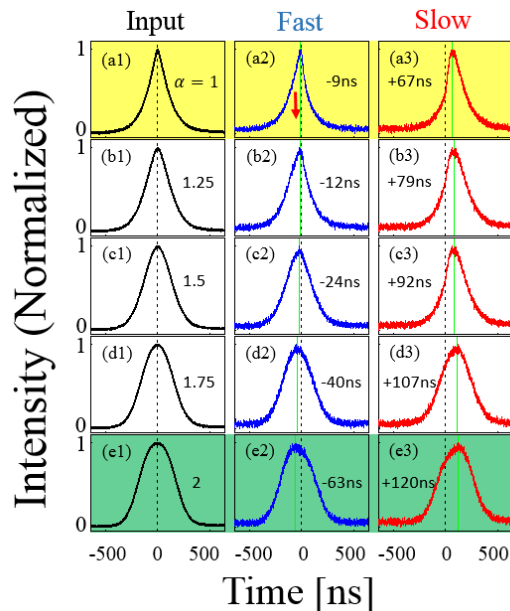


図3 パルスピークの先鋭化にともなった伝播波形の様子。(a)は先鋭化されたパルスで、ピークは $c$ で伝播する。(e)は Gauss パルスで「速い光」「遅い光」の振る舞いをする。

(3) ピークを持たない Gauss パルスによる出射パルスピークの観測

負の群速度を持った系では、光パルスのピークが媒質に入射するよりも早く、媒質から出射してくるという一見奇妙な現象を引き起こす。なだらかなガウスパルスのピークは、ピークの到達時刻以前の波形から解析的に外挿されるもので新しい情報は含んでいない。このため、上記の負の群速度の振る舞いは因果律に反するものではない、と考えられる。しかしながら、この特異な振る舞いから導かれる1つの疑問は、ガウス型パルスの先頭部分が媒質に入射した後、入射ピークが媒質に到達するよりも早く入射パルスが“遮断”された場合、出射パルスのピークは現れるか、という疑問である。このような波束の伝播は、相対論的因果律が問題となる光の領域での実験が実現されたことはない。

本研究では、リング共振器の制御性の高い異常分散をもちいて、ピークを持たないガウスパルスを入射させ、出射パルスピークを観測するという実験を試みた(図4)。具体的な実験方法は、リング構造のつくる異常分散系に、ガウスパルスを入射後、パルスのピークが出射すべき時刻の前後で、パルスを遮断する。観測された結果は、パルスのピークを切断された入射ガウスパルスでも、一定の条件下では、出射パルスにはピークが現れるというものである。このことは、出射パルスのピークと入射パルスとのピークは因果関係で結ばれたものではないことを示す(図5)。そして、出射パルスのピークは、既に入射しているパルスの中でピークよりも前半の部分のみから解析的に作り出されるものと結論される。このことは、パルスのピークが情報を運ばないことを明瞭に示している。そして、真空中の高速 $c$ よりも速く伝播するパルスのピークは特殊相対性理論に反することはなく、「速い光」の中での因果律の原理によくあった振る舞いをしていることになる。

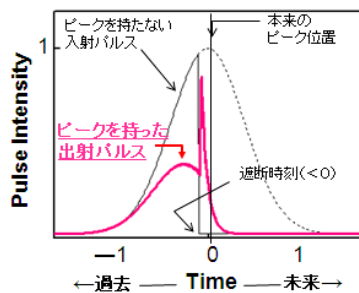


図4 負の群速度をもった媒質中でピークをもたない入射パルス(黒実線)によってピークを持った出射パルス(赤線)が現れる様子を表す概念図。

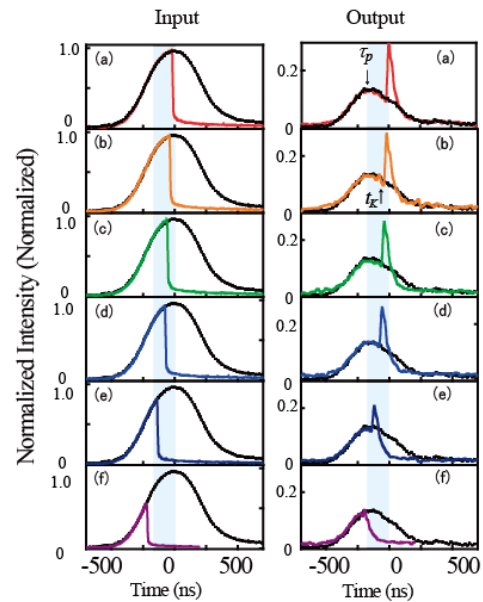


図5 図4に対応する実験結果。ピークが入射するよりも早く遮断された入射パルス(左コラム)が負の群速度をもった媒質を伝播するとき、出射パルス(右コラム)ではピークが現れている。

#### (4) 非解析点のバンド幅と未来の推定

数学的には、非解析点の意味は明確である。数学的非解析点はその点の前後の関数を分断し、因果関係を遮断する。一方、現実的な非解析点には、その意味をめぐって多くの議論がありえる。1. 量子的な揺らぎの問題、2. 数学的な解析関数は過去から未来永劫につながっているが現実的にはどこかに始まりが存在しているはずである、3. 有限のバンド幅などの問題である。

ここでは、3. 有限のバンド幅について考察した。数学的な非解析点は時間的な1点に局在している。このような非解析点は無限大のバンド幅、したがって無限大のエネルギーを持っていてはならない。あらゆる現実的な応答関数は有限の応答時間を必要とし、現実的な非解析点は有限のバンド幅をもち、時間的に非局在化している。現実的な非解析点はその点の前後の関数を完全に分断することはなく、また、因果関係を遮断することもない。

図6は、パルス時間幅 $t_p = 180$  nsのガウスパルスにおいて非解析点に対するバンド幅の影響を調べたものである。(a)は、時刻 $t_{NA} = 120$  nsに不連続な非解析点をもったガウスパルスを想定(赤線1)し、時刻 $t_0 = -120$  ns.から、解析的に将来のパルス波形を推定した様子(青細線2)である。解析的に推定される将来のパルス波形は、非解析点の存在を予言することは出来ず、非解析点を持たないなだらかなガウスパルスが推定されることとなる(青細線2)。(b)は、バンド幅を50MHz

に制限したパルス（オレンジ線 1）である。非解析点は、時間的に広がりを見せるが時刻  $t_0$  からは、非解析点の存在を予測することはやはり出来ず、解析的に将来のパルス波形を推定した様子（青細線 1）は、なだらかなガウスパルスとなる。一方、(c) はバンド幅を 33MHz に制限したパルス（緑線 1）である。この場合、非解析点は時間的に十分広がり、 $t_{NA}$  を中心に広がる非解析点の影響は、推定開始時刻  $t_0$  に影響をあたえ、結果として、将来のパルス波形に非解析点が存在していることを予測するようになる（青細線 2）。

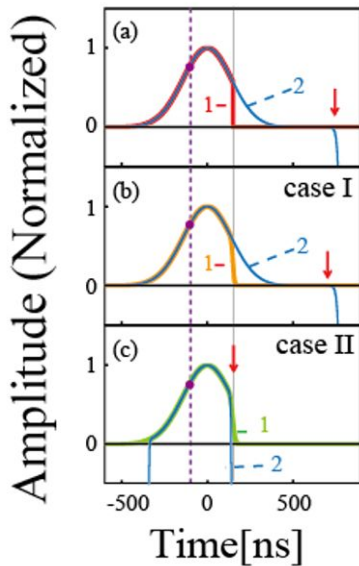


図6 非解析点にたいするバンド幅の影響

#### (5) 直列型リング共振器におけるプリカーサーと 0 パルス

共振器の共鳴は、原子の共鳴現象に似た多彩な現象を引き起こす。電磁誘起透明化に対応する結合共振器誘起透明化現象、「速い光」、「遅い光」などもその一例である。ここで単一の共振器は単一の原子に対応するため、光の伝搬効果を調べる際には、同一の共鳴周波数をもつ共振器を多数、配列させる必要がある。しかし、まったく同一の吸収を持つ共振器を多数用意することは実験的に困難である。

本研究では、高速光スイッチを利用することで、まったく同一の共鳴周波数をもった超狭帯域の直列配置のリング共振器列と等価な光回路を実現させ、「0 パルス」を観測した[1]。伝播効果についての具体的実験として、共振器の通過回数が増加するに従って、「共鳴プリカーサー」が「0 パルス」に発展する新しい現象を捉えた。0 パルスは、原子系でよく知られた面積定理 (= 電場を時間積分した面積が 2 の整数倍のパルスは減衰することなく共鳴媒質を透過する現象) の一種である。図 7 (a) (左コラム) は片指数関数型入射パルスがリング共振器を 7 回透

過したときの出射光パルス波形である。赤線は実験結果、青線は理論フィッティングである。高速光スイッチを採用したダイナミックな実験系を用いることで大きな周回回数まで観測が可能になった。図 7 (b) (右コラム) はフィッティングパラメータから推定した電場包絡線である。この図から計算できるパルス面積を図 8 に示す。パルス面積は、共振器の通過回数に伴って 0 パルスにむかって指数関数的に減少する。パルス面積の減少はパルスエネルギーが減少することを必ずしも意味しない。電場包絡線には正負を振動する構造が現れ、パルスはエネルギーを失うことなく面積を指数関数的に減少させる。(1)入射パルス時間幅依存性(2)入射パルス波形依存性(3)リング共振器のパラメータ依存性など、改良された実験系の特徴を生かした系統的な実験結果を報告する。

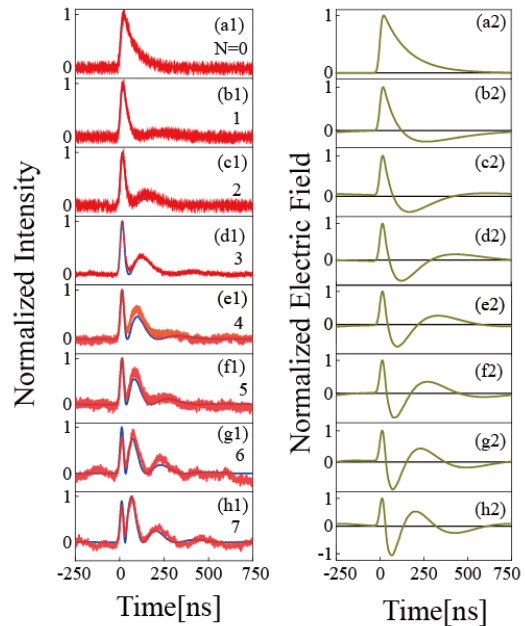


図7 共振器を通過したパルスの時間波形。 $N = 0$  (最上段) は入射パルス。通過する共振器数の増加にともなって振動する時間構造が現れる。左列、赤線は実験 (強度)、青線はフィッティング曲線。右列は、実験からえられた電場。電場から計算されるパルス面積は McCall の面積定理に厳密に従って指数関数的に減少する。一方、パルス面積は大きくは減少しない。

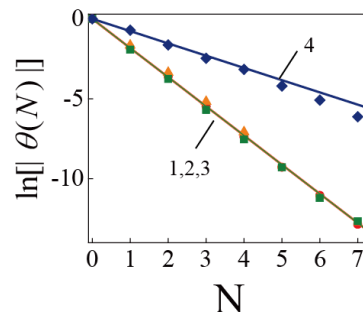


図8 共振器の通過回数  $N$  の関数としてのパルス面積。異なったパルス波形、パルス幅、異なったリング共振器の条件下での実験結果。パルス面積は、いずれも、面積定理にしたがって指数関数的に減少する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

(1) "Observation of Goos-Hänchen shift in plasmon-induced transparency", Yusuke Hirai, Kouki Matsunaga, Yoichiro Neo, Takahiro Matsumoto and Makoto Tomita, Applied Physics Letters 112, 051101 (2018). DOI; <https://doi.org/10.1063/1.5016481> 査読あり

(2) "Tailored plasmon-induced transparency in attenuated total reflection response in a metal-insulator-metal structure", Yusuke Hirai, Kouki Matsunaga, Yoichiro Neo, Takahiro Matsumoto and Makoto Tomita, Scientific Reports 7, 17824 (2017). DOI; [10.1038/s41598-017-17847-4](https://doi.org/10.1038/s41598-017-17847-4) 査読あり

(3) "Propagation of phase non-analytical points in fast and slow light media" Yuma Morita and Makoto Tomita, Physical Review A, 96, 023813 (2017). DOI; <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.023813> 査読あり

(4) "Comb spectra and coherent optical pulse propagation in a size-imbalanced coupled ring resonator", Ryuta Suzuki and Makoto Tomita, Opt Communications 396, 44-48 (2017). DOI; <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.03.024> 査読あり

(5) "Development of weak coherent  $0\pi$  optical pulses in a ring resonator with a dynamic recurrent loop", Yukari Suzuki and Makoto Tomita, Journal of Optical Society of America B. 34, 34, 489-496 (2017) DOI; <https://doi.org/10.1364/JOSAB.34.000489> 査読あり

(6) "Influence of finite bandwidth on the propagation of information in fast- and slow-light media" Heisuke Amano and Makoto Tomita, Physical Review A 93, 063854 (2016). DOI; <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.063854> 査読あり

(7) "Attenuated total reflection response to wavelength tuning of plasmon-induced transparency in a metal-insulator-metal structure", Kouki Matsunaga, Takeshi Watanabe, Yoichiro Neo, and Takahiro Matsumoto and Makoto Tomita, Optics Letters 22, 5274 (2016). <https://doi.org/10.1364/OL.41.005274> 査読あり

(8) "Transform from induced transparency to induced absorption through the control of coupling strength in

metal-insulator-metal structure" Y. Neo, T. Matsumoto, T. Watanabe, M. Tomita, and H. Mimura Opt. Express 24, 26201-26208 (2016) DOI; <https://doi.org/10.1364/OE.24.026201> 査読あり

(9) "Luminal pulse velocity in a superluminal medium" Heisuke Amano and Makoto Tomita Physical Review A 92, 063837 (2015). DOI; <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.063837> 査読あり

(10) 光速  $c$  は変化する? 富田 誠 パリティ 11 (2015) 査読あり: 解説

(11) "Direct observation of a pulse peak using a peak-removed Gaussian optical pulse in a superluminal medium", Makoto Tomita, Heisuke Amano, Seiji Masegi and Aminul I. Talukder, Physical Review Letters 112, 093903 (2014). DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.093903](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.093903) 査読あり

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田 誠 (TOMITA, Makoto)

静岡大学 理学部 教授

研究者番号 70197929