

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究B

研究期間：2007～2009

課題番号：19340111

研究課題名（和文） 微小球共振器に現れる「速い光」と「遅い光」

研究課題名（英文） Fast and slow light in microsphere resonators

研究代表者

富田 誠 (TOMITA MAKOTO)

静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：70197929

研究成果の概要（和文）：

微小球共振器は、球の表面近傍に存在する“ささやきの回廊”とよばれる軌道に光を閉じ込める。これらの共鳴モードは球と相互作用する光の位相を大きく変調し、分散による光の伝播制御や、さらには、光の凍結に大きな可能性を持っている。本研究では、外部光と微小球の結合の強さを制御することで、単一のシステムで速い光と遅い光の両者を観測することに成功した。また、結合共振器系では、電磁気学的誘起透明化現象の古典的なアナログ現象に対応する風変わりなスペクトル構造とそれに対応した分散構造が現れることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Microspheres trap light in orbits near the surface in the so-called whispering gallery (WG) mode. These strongly modify the phase of the interacting light and are potentially useful in dispersion engineering or even in the storage of light. Specifically, we observe both slow and fast light by controlling the coupling strength between the micro sphere and the external light. In a coupled resonator system, exotic spectral structures and relevant dispersions appear as a classical analogy of extremely slow light obtained with electromagnetically induced transparency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
20年度	3,100,000	930,000	4,030,000
21年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：物理学 物理学一般

キーワード：微小球microsphere、分散 dispersion、遅い光 slow light、速い光 fast light、共振器誘起透明化 Coupled Resonator Induced Transparency)

## 1. 研究開始当初の背景

光の速度は基礎物理学、そして応用上も非常に重要であろう。本研究でとりあげる「速い光」とは、見かけ上、光の伝播速度が真空中の光速度  $c$  よりも速く伝播する Superluminal な現象（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、）媒質から出射するという、一見、因果律、あるいは相対論にも反するように見える現象である。「速い光」は、古くは、Sommerfeld や Brillouin によっても議論され、今日でも、情報の伝達速度の観点から議論されて続けている問題でもある。パルスの先端速度が真空中（もしくは媒質中）の光速度を超えることがないことが初めて実証されるなど着実な進展が続いている。

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ものである。特に、ボーズ凝縮した冷却原子などを対象とした電磁誘起透明化現象（EIT: Electro-magnetic Induced Transparency）は、強いカップリング光で駆動された量子遷移に起因した分散構造により、非常に遅い光の伝播を実現するものである。非常に遅い群速度のために空間的に圧縮された光パルスは容易に原子容器のサイズにまで圧縮され、量子情報を持った光の凍結を実現することも可能である。これらは、原子系の量子コヒーレンスやナノ構造により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、微小な球形の共振器を研究対象とし、この系で現れる「速い光」、「遅い光」の基礎物理学を解明し、ナノ光学領域での新しい光学現象と光の伝播制御にかかわる研究を推進する。ここで、“微小球”とはガラスや酸化チタンでできた光の波長程度の大きさを持つ

た真球度の極めて高い誘電体の球を意味する。この球は球面境界での全反射により、ウイスパリング・ギャラリー・モード（Whispering Gallery Mode (WGM) = 囁きの回廊）として知られる極めてQ値の高い共鳴モードに光を強く閉じ込める。球内のモードは高いQ値に対応して非常に狭い共鳴周波数構造を呈する。本研究の基本となるアイデアは、このような急峻な共鳴構造は、光の位相も大きく変化させ、分散、従って光の伝播の様子も大きく制御することが可能であろう、という点にある。

## 3. 研究の方法

本研究では、高品質の微小球作製が実験成功の鍵になる。微小球は熔融法とゾル・ゲル法の2つの方法で作製する。このうち、熔融法は $\text{CO}_2$ レーザーによる局所的な加熱でファイバー状のガラスの先端を熔融し、表面張力によって極めて真球度の高い球を作製する方法である。微小球と伝播光を結合させるために、通常の光学ファイバーの一部を $1\ \mu\text{m}$ 以下に細線化したテーパファイバーを利用する。特に、結合パラメータと損失パラメータを系統的に変化させ、さまざまな条件下でのパルス透過の様子をマッピングする。また、2つの微小球を組み合わせた構造分散をも研究対象とし、単一球では達成できない分散構造を創り出す。

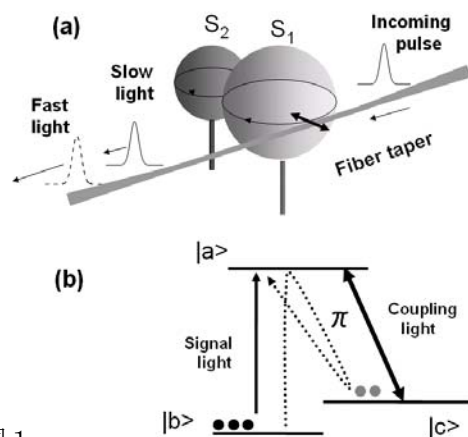


図 1

#### 4. 研究成果

結合した微小球共振器の例を図1(a)に示す。直列に連結された第1球( $S_1$ )と第2球( $S_2$ )がファイバーに接続されている。光の波長程度の大きさをもった粒子からのMie散乱による位相シフトは古くから研究されている。しかしながら、光の伝播制御に微小球を利用するためには、Ideality $\sim 1$ 、すなわち、外部光を微小球内の特定のモードに選択的にほぼ100%の効率で結合させることが不可欠である。この結合はテーパファイバーによって近接場光を介しておこなわれる。微小球-ファイバー系の入出力特性は方向性結合理論、あるいは伝送行列によって記述できる。系の特徴を決める重要なパラメータは、 $S_1$ と $S_2$ の内部損失パラメータ $x_1$ 、 $x_2$ 、 $S_1$ とファイバー、ならびに $S_1$ と $S_2$ の間の結合パラメータ $y_1$ 、 $y_2$ である。透過電場 $E(\nu)$ は、結合損失を無視すると

$$E(\nu) = \left[ \frac{y_1 - x_1 R_{S_2}(\nu) \exp(-i\phi_1)}{1 - x_1 y_1 R_{S_2}(\nu) \exp(-i\phi_1)} \right] = \sqrt{T(\nu)} \exp[i\theta(\nu)] \quad (1)$$

ここで、

$$R_{S_2}(\nu) = \left[ \frac{y_2 - x_2 \exp(-i\phi_2)}{1 - x_2 y_2 \exp(-i\phi_2)} \right] \quad (2)$$

となる。 $T(\nu)$ と $\theta(\nu)$ は、透過強度スペクトルと透過位相シフトを表す。パラメータは、 $\phi_i(\nu) = \omega L_i n$ 、 $x_i = \exp(-L_i \rho_i / 2)$ 、 $i=1,2$ と表せる。ここで、 $L_i$ は実効的な周回軌道長、 $n$ は屈折率、 $\rho_i$ はリング共振器が吸収を伴っている場合には $\rho_i > 0$ 、( $1 > x_i > 0$ )、利得の場合には $\rho_i < 0$ 、( $1 < x_i$ )となる。利得はしばしば、分散制御に利用される。結合パラメータ( $1 > y_i > 0$ )は値が小さくなるほど結合が強くなることに注意が必要である。 $y_i = 1$ は結合が無い状態に対応する。

##### (1) 単一微小球に現れる速い光と遅い光

初めに、 $S_2$ を取り除いて、単一の微小球のみによる光学応答を考えよう。この場合、 $S_2$ による変調はなく、 $y_2 = 1$ したがって $R_{S_2}(\nu) = 1$ とすればよい。図2は、単一微小球-ファイバー系で遅い光と、速い光を観測した実験例である[15]。通信用のファイバー

をCO<sub>2</sub>レーザーによって溶融し、数10 $\mu$ m程度の直径をもった微小球を表面張力によって自己形成的に作製する。非共鳴状態に対して、under coupling条件下では、パルスの到達は8ns進み、異常分散にともなった速い光が現れる。一方、Over coupling条件下では、21nsの遅延をともない、正常分散による遅い光が現れる。

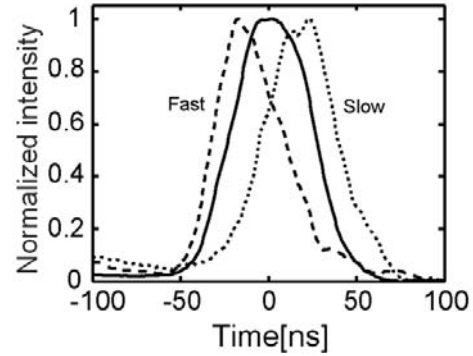


図2

##### (2) 結合微小球に現れる遅い光

単一の超高Q値微小球でもさまざまな光学現象の観測、応用が可能であるが、2つあるいはそれ以上の高Q値共振器を連結した系は共振モード間の干渉効果の点から興味深い。例えば、量子ドットをドープしたサイズの揃った2つの微小球を2次的に結合した系でフォトリソグラフィの形成が観測されている。また、応用的観点からは、結合した共振器は、光導波路、周波数選択フィルター、波長可変フィルター、光スイッチなどとしての可能性が議論されている。ここでは、原子系で観測されるEITと類似した現象を、結合した共振器の干渉効果によって実現し、それに伴ったいわゆる遅い光の観測した実験を紹介する。この現象は結合共振器誘起透明化(CRIT = Coupled Resonator Induced Transparency)と称されることもある。

図3は、実験的に観測した結合微小球系におけるCRIT型の透過スペクトルである。 $S_2$ を $S_1$ に近づけていくと、 $S_1$ によって作られるディップの中に透過率の増加する領域が現れる。EITと同様な見方をするならば、この透明窓は $S_1$ と $S_2$ の両球を通過する光路と、 $S_2$ をバイパスして $S_1$ のみを通過する光路が、消滅的な干渉をすることによって作られる。結合を強くするにしたがって透過ピークは

増大していく。透過ピークのバンド幅は ( $S_2$  の  $Q$  値が十分に高い場合に)、 $\Delta\nu \propto \sqrt{1-y_2}$  となり、 $S_1$  と  $S_2$  の結合によって制御可能である。 $S_1$  結合がさらに強くなるとスペクトル構造は 2 つのディップに分裂する。このとき、透明窓の低周波側と高周波側の光の空間分布は、対称、反対称のモードとなっており 2 つの WG モードが配位混交していることを意味している。これは、化学結合の bonding と anti-bonding にも対応している。なお、2 つの WG モードの共鳴周波数が離調している場合には透明窓のスペクトル形状は Fano 型の著しく非対称性を持った形状になる。また、結合が強くなった極限 ( $y_2 = 0$ ) では、結合共振器は共振器長が足し合わさった 1 つの共振器として働く。

図 3 の右側コラムは実験から得られた透過スペクトルから期待される分散である。CRIT のピーク波長では遅い光が現れる。特に、透明化した窓では、入射波形がほとんど減衰することなく、波形を変えることなく 8.5nsec 遅延していることが観測された。これは、原子系での EIT に現れる遅い光を、全光学系で実現したものといえる。原子系では利用可能な周波数は原子の固有遷移に制限されるが、微小球系では球径の調整で自由に設定できる。

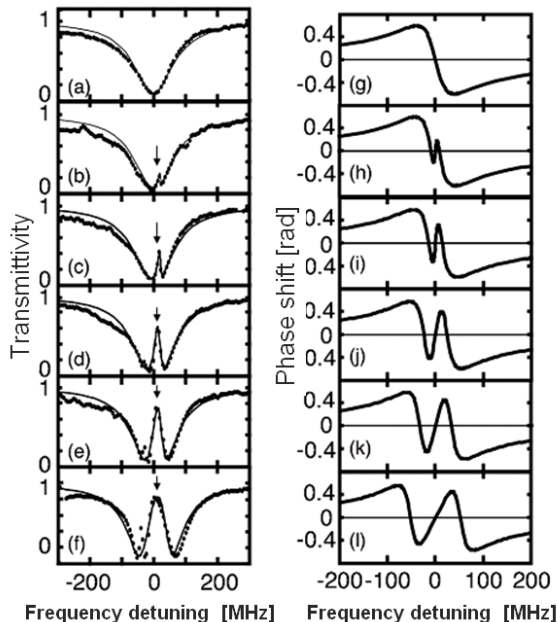


図 3

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- (1) "Tunable Fano interference effect in coupled-microspheres resonator-induced transparency" Makoto Tomita, Kouki Totsuka, Ryosuke Hanamura and Takahiro Matsumoto **Journal of Optical Society of America**, B 26 (2009) 813-818. (2009). (査読有)
- (2) "Observation of normal and anomalous dispersions in a microsphere taper fiber system" Makoto Tomita, Masayuki Okishio, Takahiro Matsumoto, and Kouki Totsuka **Journal of Physical Society of Japan** 78, 035001-1 035001-2 (2009). (査読有)
- (3) "Determining the physisorption energies of molecules on graphene nanostructures by measuring the stochastic emission-current fluctuation", Takahiro Matsumoto, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Makoto Tomita, **Physical Review E** 77, 031611 (2008). (査読有)
- (4) "Depth profiling the whispering gallery modes in TiO<sub>2</sub>:Eu<sup>3+</sup> microspheres using cathode Luminescence" Makoto Tomita, Hiroshi Ikari, Hidenori Mimura and Takahiro Matsumoto, **Optics Letters**, 33, 336-338, (2008). (査読有)
- (5) "Fluorescence MDR features of Eu-doped TiO<sub>2</sub> microspheres", H. Ikari, K. Okanishi, M. Tomita and T. Ishidate, **Optical Materials** 30 1323-1326 (2008). (査読有)
- (6) "Optical microsphere amplification system", Kouki Totsuka and Makoto Tomita, **Optics Letters** 21, 3197-3199 (2007). (査読有)
- (7) "Slow light in coupled-resonator induced transparency" Kouki Totsuka, Norihiko Kobayashi and Makoto Tomita **Physical Review Letters** 98, 213904 (2007). (査読有)
- (8) "Dynamic pulse splitting in microsphere-optical fiber system on the critical coupling condition", Kouki Totsuka and Makoto Tomita,

**Physical Review E** 75, 016610 (2007) .  
(査読有)

- (9) "Stabilization of electron emission from nanoneedles with two dimensional graphene sheet s tructure in a high residual pressure region", Takahiro Matsumoto, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, Makoto Tomita, and Nariyuki Minami **Applied. Physics. Letters** 90, 103516 (2007) . (査読有)
- (10) "Propagation of the centroid of arbitrary pulses through angularly dispersive systems" Aminul Talukder, Shugo Kawakita, Makoto Tomita **Journal of Optical Society of America B** 24 1406-1409 (2007) . (査読有)
- (11) 富田 誠: "結合微小球共振器にあらわれる遅い光と速い光"特集ースローライトと光バッファメモリ,レーザー研究, 37 (2009) 585-590.. (査読有)
- (12) J.Millar, 富田誠訳: "不透明な物質をくぐり抜ける整形された光", パリティ 24(2009)18-20. (依頼原稿、査読なし)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

富田 誠 (TOMITA MAKOTO)  
静岡大学・創造科学技術大学院 教授

研究者番号：70197929

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし