

《まえがき》

フォトニック結晶における非古典光の発生と局在

Generation of Non-classical Lights in Photonic Crystals and Their Localization

(応用物理学会推薦)

代表研究者 物質・材料研究機構 迫田和彰

National Institute for Materials Science Kazuaki Sakoda

協同研究者 米国デイトン大学 ジョセフ ハウス

University of Dayton Joseph W. Haus

《英文サマリー》

We established numerical methods to simulate quantum optical phenomena in photonic crystals whose refractive indices are modulated periodically to realize photonic bandgap frequencies where the presence of electromagnetic eigenmodes is forbidden. We applied those methods as well as an analytical method based on the Green function formalism to superfluorescence and quadrature-phase squeezing, and successfully evaluated their quantum aspects such as quantum localization of photons and enhancement of squeezing due to the presence of the photonic bandgap and anomalous photon group velocity. To confirm these quantum effects by experiments, two types of specimens, that is, photonic crystal slabs made of nonlinear optical materials and one-dimensional periodic structures containing rare earth ions were fabricated. Their dispersion relations, quasi phase matching, and light emission are now under investigation. On the other hand, we recently found strong localization of the electromagnetic field in certain three-dimensional fractal structures in the microwave frequency region. Its mechanism as well as application to microwave cavities and antennas are now studied.

《本文》

研究目的

屈折率が光の波長程度の周期で空間的に変動するフォトニック結晶中では、光の固有モードの存在しない周波数領域（フォトニックバンドギャップ）を生

み出すことができる。フォトニックバンドギャップ中では光の自然放出の抑制等、一様な物質中とは全く異なる光学特性の実現が期待される。また、真空中の光速と比べて格段に遅い群速度をもつ固有モードも生じる（光の群速度異常）。群速度の遅いモードは物質系と長時間に渡って相互作用するので、各種の光学過程に大きな増強効果をもたらすと期待される。

本研究では、まず、フォトニックバンド端のモード密度の異常に起因して物質系と光の強結合状態が実現すること、および、その結果として光の局在が生じて光は物質中を伝播できなくなることを、超放射光のスペクトルシフトを利用して実証する。また、光の群速度異常を利用することによって、従来は達成できなかった非古典光（スクイーズド光）の効率的な発生を可能にする。さらに、これらの実験観測を裏付けるために、フォトニック結晶等の微小構造体中の量子光学過程全般を解析するための第1原理数値計算法を開発する。

研究経過

(1) フォトニック結晶における超放射の量子局在

まず、物質系の電子状態の変化に固有な周波数（電子の遷移周波数）とフォトニックバンドギャップの周波数がほぼ一致する場合に、光の超放射過程において量子力学的な局在状態が生じる様子をコンピューターシミュレーションで詳しく調べた（誌上発表 3, 7, 12, 13, 16）。シミュレーションでは試料作製が比較的容易な1次元フォトニック結晶を想定し、励起レーザービームの照射によって電子のエネルギー準位に完全反転分布が生成することを仮定した。図1において横軸は規格化した時刻、縦軸はパルス強度である。フォトニック結晶に含まれる原子の密度（ J_{30} ）の増加に伴って協力的な発光現象である超放射が顕著となり、光パルスが先鋭化する様子がはっきりと見られる。図2は反転分布の時間変化である。フォトニックバンドギャップの周波数（ $\Delta\omega_g$ ）が電子の遷移周波数（ δ ）に近い場合、反転分布が部分的にしか消失しないことが明瞭に示された。これは、電子とフォトンの結合で生じた2つのラビ準位の一方がフォトニックバンドギャップ中に存在するので、光を放って基底状態に緩和することができないためである。その結果、ラビ準位を構成する電磁場は原子の周りに留まって電磁波の量子局在状態が実現する。

実験検証については、新任地である物質・材料研究機構において、①CWグリーンレーザーとチタン・サファイアレーザーから成るフェムト秒レーザーシステム、②ストリークカメラによる超高速分光システム、および、③CCDカメラによる定常光の分光システムを立ち上げた。また、物質・材料研究機構にすでに設置されていた3元スパッタリング装置を用いて SiO_2 と TiO_2 の交互蒸着膜などを作製し、発光体として希土類原子を導入して発光スペクトルの測定を始めたところである。

(2) フォトニックフラクタルにおける電磁波の局在現象

従来から大阪大学・信州大学と共同でマイクロ波領域のフォトニック結晶の性質と局在モードについて調べていた（誌上発表 6, 8, 10, 11, 14, 15）。試料作製は大阪大学が感光性エポキシ樹脂を原料として光造形法で行っていたが、この方法は大変適用範囲が広く、マイクロ波領域の3次元フラクタル構造の作

製にも世界で初めて成功した（図3，誌上発表17，マスコミ報道1-7）。マイクロ波の反射・透過特性を測定すると，試料の構造と屈折率で決まる特定の周波数において反射率・透過率ともに極端に小さくなることから，大きな共振のQ値をもつ局在モードの生成が推測された（図4）。これを確かめるために，超放射のシミュレーションでも用いたFDTD法（時間領域差分法）を利用して局在電磁モードの固有周波数，空間分布，および，Q値の解析を進めているところである。

(3) 異常群速度効果によるスクイーズド光の発生

まず，グリーン関数を利用した摂動計算を用いて，空間全体がフォトニック結晶で埋め尽くされている場合について直交位相成分スクイージングの解析表現を導出し，異常群速度によるスクイージングの増強効果を明らかにした（誌上発表4，5，13）。また，現実の試料に対応する有限の厚みをもつ試料を想定して，量子揺らぎに関する線形近似の範囲でスクイージングのコンピューターシミュレーションを行った（誌上発表18）。さらに，線形近似を用いないシミュレーション法を考案して，現実の試料への適用を試みているところである。

実験研究については，2次の非線形感受率を有する LiNbO_3 基板上にイオン交換法で非線形光導波路を作製した。さらに，光導波路上にフォトレジストの1次元，および，2次元周期パターンを形成することにより，スラブ型フォトニック結晶を作製した。導波モードの分散関係の測定，および，スクイージングと同じく2次の非線形光学過程である第2高調波発生について，周期構造による擬似位相整合を確認しているところである。

(4) 量子光学過程の第1原理数値計算法の開発

まず，超放射などの協力的な量子光学過程については，電子系と電磁場の双方を平均場近似で取り扱うことが許される。この場合には，従来は電磁場だけに適用されていたFDTD法を電子系にも拡張することにより，量子光学過程の第1原理計算が可能である。本研究では，最も単純な構造をもち，実験研究上も重要な1次元フォトニック結晶についてこのことを実証した。直交位相成分スクイージングのように電子系については古典的な取り扱いが許される場合には，電磁場を第2量子化して波動関数部分の時間・空間発展を数値計算することにより，量子揺らぎも含めた電磁場のコンピューターシミュレーションが可能である。本研究では，まず，量子揺らぎについて線形近似の範囲でこのことを実証した。また，線形近似を用いないシミュレーション方法を開発中である。

(5) 「フォトニック結晶入門」出版

以上の研究成果も含めて，学部学生レベルの入門書を出版した（著書2）。

考察

理論研究については本研究の目的は達成できた。実験研究については試料作製の目途が立ち，測定を始めた段階である。代表研究者が新任地へ移った後，研究室の立ち上げも本研究にとって満足できるレベルに達したので，今後試料評価を精力的に行いたい。他方，3次元フォトニックフラクタル中の電磁波の局

在現象については、新しいタイプのマイクロ波共振器やマイクロ波アンテナへの応用が早くも計画されている。また、波長が一桁短いテラヘルツ領域の素子応用も検討中である。この分野についても研究を継続する予定である。

研究発表

口頭発表

1. K. Sakoda and J.W. Haus; "Fractional decay of population inversion and spectral shift of superradiance in photonic crystals with pencil-like excitation", International Quantum Electronics Conference '02 (モスクワ, 2002)
2. K. Sakoda; "Quadrature-phase squeezing in photonic crystals", Laser Physics Workshop '02 (ブラチスラバ, 2002) (招待講演)
3. K. Sakoda; "Symmetry of crystal structure and symmetry of electromagnetic eigenmodes", Photonic Crystals Down Under (キャンベラ, 2002) (招待講演)
4. K. Sakoda and T. Ochiai; "Absence of diffraction for certain eigenmodes in photonic crystal slabs", IEEE-NANO-2002 (アーリントン, 2002) (招待講演)
5. 迫田和彰, 「フォトニック結晶の光波解析」, 電子情報通信学会 (宮崎, 2002) (招待講演)
6. K. Sakoda and J.W. Haus; "Fractional decay of population inversion and spectral shift of superradiance in photonic crystals with pencil-like excitation", International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (ロサンゼルス, 2002) (招待講演)
7. 迫田和彰; 「フォトニック結晶構造における電磁モードの基礎」, 光・電子デバイスプロジェクト研究会 (東京, 2003) (招待講演)
8. K. Sakoda; "Photonic Crystals and Particle Arrays", NIMS Conference (つくば, 2003) (招待講演)
9. K. Sakoda and J. W. Haus; "Superfluorescence in photonic crystals", Laser Physics Workshop 2003 (ハンブルク, 2003) (招待講演)
10. 迫田和彰; "輻射場制御と光学的量子計算", 文部科学省科学研究費補助金・企画調査シンポジウム「固体中の光学過程による量子計算の可能性」(つくば, 2003)
11. 迫田和彰; 「フォトニック結晶の非線形光学・量子光学」, 電子情報通信学会 (新潟, 2003) (招待講演)
12. K. Sakoda; "Multi-dimensional PBGs: nonlinear and quantum optics", 87th Annual Meeting of Optical Society of America (ツェンソン, 2003) (招待講演)
13. 迫田和彰; 「フォトニックフラクトンのFDTD解析」, 第10回3Dナノ・マイクロ構造研究会 (大阪, 2004) (招待講演)

誌上発表

1. F. Lopez-Tejiera, T. Ochiai, K. Sakoda, and J. Sanchez-Dehesa; "Symmetry characterization of eigenstates in opal-based photonic crystals", Physical Review B, Vol.65, No.9, 195110/1-8 (2002)
2. E. Miyai and K. Sakoda; "Localized defect modes with high quality factors in a photonic crystal slab on a low-index dielectric substrate", Japanese Journal of

- Applied Physics, Vol.41, Part2, No.6B, L694-L696 (2002)
3. K. Sakoda and J.W. Haus; "Fractional decay of population inversion and spectral shift of superradiance in photonic crystals with pencil-like excitation", Technical Digest of 2002 International Quantum Electronics Conference, 287 (2002)
 4. K. Sakoda; "Quadrature-phase squeezing in photonic crystals", Book of Abstracts of 2002 Laser Physics Workshop, 180 (2002)
 5. K. Sakoda; "Enhancement of quadrature-phase squeezing in photonic crystals", Journal of Optical Society of America B, Vol.19, No.9, 2060-2065 (2002)
 6. S. Kirihaara, M. Takeda, K. Sakoda, and Y. Miyamoto; "Control of microwave emission from electromagnetic crystals by lattice modification", Solid State Communications, Vol.124, No.4, 135-139 (2002)
 7. K. Sakoda and J.W. Haus; "Fractional decay of population inversion and spectral shift of superradiance in photonic crystals with pencil-like excitation", Abstracts of International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, 178 (2002)
 8. 桐原聡秀, 宮本欽生, 武田三男, 迫田和彰; "傾斜格子構造を有するダイヤモンド格子型および反転型フォトニック結晶による電磁波制御", 粉体および粉末冶金, Vol.49, No.12, 1139-1144 (2002)
 9. K. Aoki, H. Miyazaki, H. Hirayama, K. Inoshita, T. Baba, K. Sakoda, N. Shinya, and Y. Aoyagi; "Microassembly of semiconductor three-dimensional photonic crystals", Nature Materials, Vol. 2, 117-121 (2003)
 10. S. Kirihaara, M. Takeda, K. Sakoda, and Y. Miyamoto, "Emission control of electromagnetic wave by using diamond photonic crystals with graded lattice spacing", Materials Science Forum, Vol. 423, 785-790 (2003)
 11. 桐原聡秀, 宮本欽生, 武田三男, 迫田和彰, "三次元ダイヤモンド構造を有するセラミック／高分子系フォトニック結晶の電磁波回折挙動" Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 111, No. 7, 471-478 (2003)
 12. K. Sakoda and J. W. Haus, "Superfluorescence in photonic crystals", Book of Abstracts of 2003 Laser Physics Workshop, 275 (2003)
 13. K. Sakoda, "Multi-dimensional PBGs: nonlinear and quantum optics", Technical Digest of Frontiers in Optics, MF3 (2003)
 14. S. Kanehira, S. Kirihaara, Y. Miyamoto, K. Sakoda, and M. Takeda, "Electromagnetic properties of photonic crystals with diamond structure containing defects", Journal of Materials Research, Vol. 18, No. 9, 2214-2220 (2003)
 15. S. Kanehira, S. Kirihaara, Y. Miyamoto, K. Sakoda, and M. W. Takeda, "Bandgap modification of diamond photonic crystals by changing the volume fraction of the dielectric lattice", Journal of American Ceramic Society, Vol. 86, No. 10 1691-1694 (2003)
 16. K. Sakoda and J.W. Haus, "Superfluorescence in photonic crystals with pencil-like excitation", Physical Review A, Vol.68, No.5, 053809/1-5 (2003)
 17. M. Wada-Takeda, S. Kirihaara, Y. Miyamoto, K. Sakoda, and K. Honda, "Localization of electromagnetic waves in three-dimensional photonic fractal cavities", Physical Review Letters, Vol.92, No.9, 093902/1-4 (2004)

18. D. Tricca, C. Sibilia, S. Severini, G. D'Aguanno, M. Bertolotti, M. Scalora, C. M. Bowden, and K. Sakoda, "Photonic band gap structures in planar nonlinear waveguides: application to squeezing light generation", Journal of Optical Society of America B, Vol.21, No.3, 671-680 (2004)

著書

1. 迫田和彰; “フォトニックバンドギャップの概念と応用への可能性”, 「ナノマテリアル最前線」(平尾一之編, 化学同人), 31-37 (2002)
2. 迫田和彰; 「フォトニック結晶入門」(森北出版, 2004), 全 221 ページ

マスコミ報道

1. “電磁波蓄える宝箱”, 朝日新聞 1 面 (2004 年 1 月 7 日)
2. “電磁波「箱」に閉じ込め”, 日刊工業新聞 29 面 (2004 年 1 月 8 日)
3. “絶縁体の穴あき立方体に電磁波を閉じ込め”, 日本工業新聞 2 面 (2004 年 1 月 8 日)
4. “絶縁体で作った穴あき立方体・電磁波を「箱」に閉じ込め”, 常陽新聞 8 面 (2004 年 1 月 8 日)
5. “電磁波を蓄える小箱”, 茨城新聞 21 面 (2004 年 1 月 8 日)
6. “電磁波蓄積する立方体を開発”, 日本経済新聞 15 面 (2004 年 1 月 21 日)
7. “フラクタルは「魔法の箱」”, 産経新聞 23 面 (2004 年 2 月 1 日)

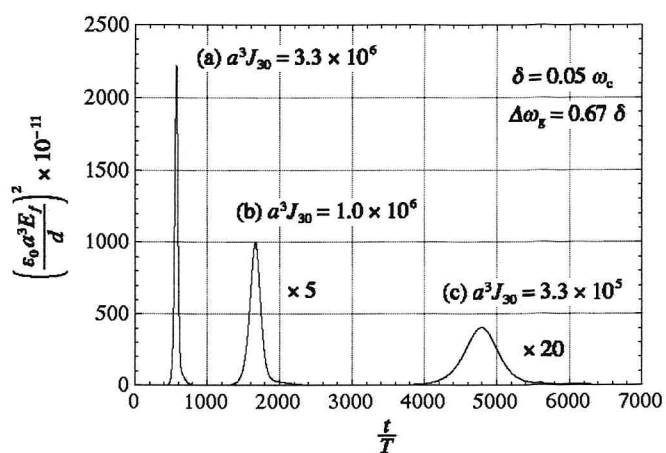


Fig.1 Temporal profile of superfluorescence light pulses.

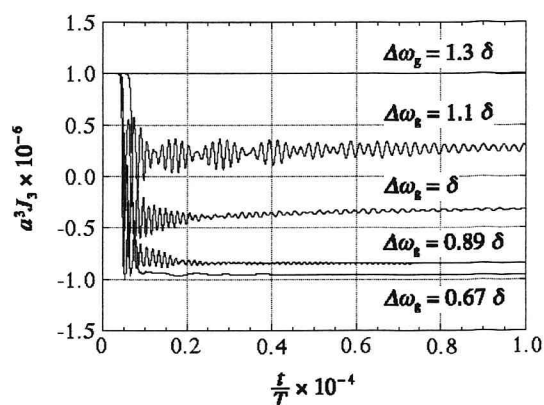


Fig.2 Temporal profile of population inversion in superfluorescence.

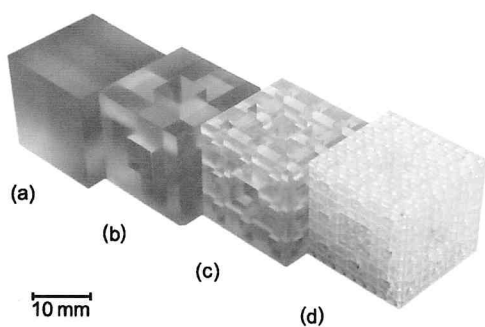


Fig.3 Structures of photonic fractals.

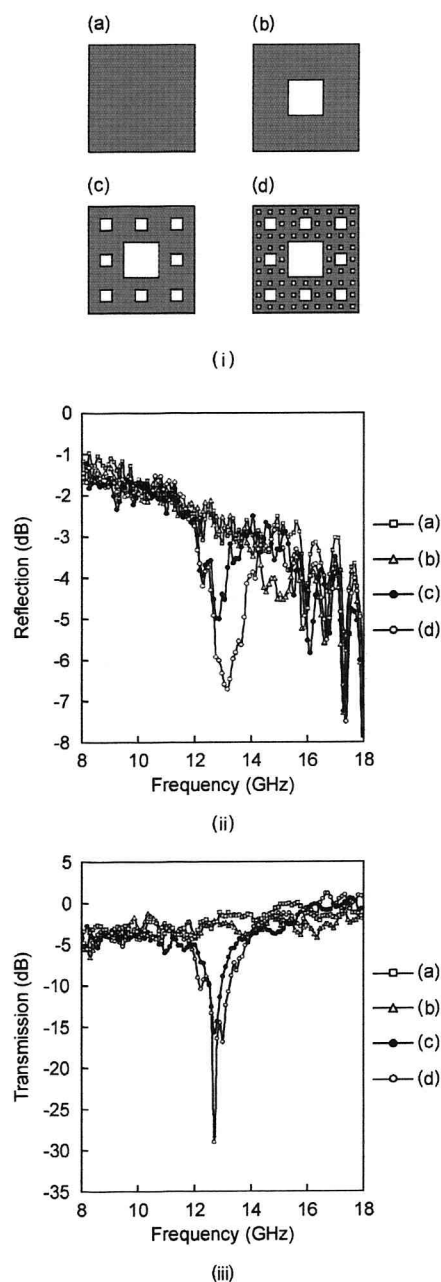


Fig.4 Reflectance and transmittance of photonic fractals.