

令和 2 年 7 月 15 日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05080

研究課題名（和文）量子レーダーの研究にむけた高出力2モードスクイズド光源の開発と評価

研究課題名（英文）Development and evaluation of two-mode squeezed light source for quantum radar research

研究代表者

政田 元太（MASADA, Genta）

玉川大学・工学部・教授

研究者番号：80439538

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では量子光学実験の手法により、量子レーダーを研究するうえで欠かすことのできない、2モードスクイズド光源を開発した。その後、2モードスクイズド光における光波間の量子エンタングルメントを検証した。我々は様々な気象条件下における量子レーダーの使用を想定しており、視界を妨げる要因の一つとして、霧の影響を重視している。レーザー光を10メートル長の人工霧の中を伝搬させ、干渉計により光波の伝搬特性を調べた。その結果、均一な霧が光波伝搬へ及ぼす影響はエネルギーの減衰が主であり、光損失としてモデル化できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子レーダーは2モードスクイズド光の強い量子相関を利用することにより、光損失や光雑音といった擾乱が大きい環境においても、従来のレーダー技術よりも高い検知性能を発揮することが期待される。量子レーダーシステムが完成した場合、雨や霧などの悪天候条件下での使用に耐えうることを期待される。このような全天候型のレーダーを応用する候補としては、まず自動車に搭載するセンサが考えられる。量子レーダーは近年注目されている自動車の自動運転化を支える一つの技術になるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed a two-mode squeezed light source, which is indispensable for studying quantum radar, by using the method of quantum optics experiment. After that, quantum entanglement between light waves in two-mode squeezed light was verified. We assume the use of quantum radar under various weather conditions, and attach importance to the influence of fog as one of the factors that obstruct visibility. A laser beam was propagated in an artificial fog with a length of 10 meters, and the propagation characteristics of the light wave were investigated using an optical interferometer. As a result, it was found that the main effect of uniform fog on light wave propagation is attenuation of energy, which can be modeled as optical loss.

研究分野：量子光学

キーワード：量子レーダ 量子エンタングルメント スクイズド光

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スクイズド光は量子揺らぎが制御された非古典的な状態の光である。光波の直交する位相振幅成分のうち、一方の量子揺らぎは真空揺らぎよりも圧縮(スクイズ)され、同時にもう一方の量子揺らぎは増幅(アンチスクイズ)されている。その結果、光波の位相に依存して量子揺らぎが変化するという特徴を持つ。また2モードスクイズド光は2つのシングルモードスクイズド光を合波させることによって生成される。このようにして生成された2モードスクイズド光においては、2光波の直交位相振幅が強く相関する現象(量子エンタングルメント)が見られる。

近年、2モードスクイズド光を使った新たな応用への期待が世界的に高まりつつある。マサチューセッツ工科大学が開発した量子イルミネーションは、量子エンタングルメントを持つ2モードスクイズド光をレーダー技術に応用するための画期的な理論である。従来のレーダー技術では光損失や光雑音といった擾乱が大きい環境では検知能力が低下してしまい、十分な機能を発揮することが出来ないという問題がある。量子レーダーシステムが完成した場合、擾乱の影響下でもエンタングルメントの効果により高い検知能力が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は高出力な2モードスクイズド光源を開発し、その物理的な性能を評価し、量子イルミネーションタイプの量子レーダーへの応用可能性を探索することである。また我々は量子レーダーを悪天候下における使用を想定しており、特に視界を妨げる要因として、霧の影響に着目している。我々は均一な霧中における光波の伝搬特性についても評価を行う。

### 3. 研究の方法

2モードスクイズド光の生成は、図1に示す量子光学実験の手法により行った。連続発振のNd:YAGレーザー(波長946nm)と光パラメトリック発振器(OPO)2台を用いて、まず2つの独立したシングルモードスクイズド光(SQ<sub>1</sub>,SQ<sub>2</sub>)を生成した。続いて2つのシングルモードスクイズド光をハーフミラー(BS<sub>1</sub>)で合波することにより、2モードスクイズド光(Out<sub>1</sub>,Out<sub>2</sub>)の生成実験を行った。続いてバランス型ホモダイン測定(HD<sub>1</sub>,HD<sub>2</sub>)を用いた手法により、2光波の間の量子エンタングルメント現象の検証実験を行った。

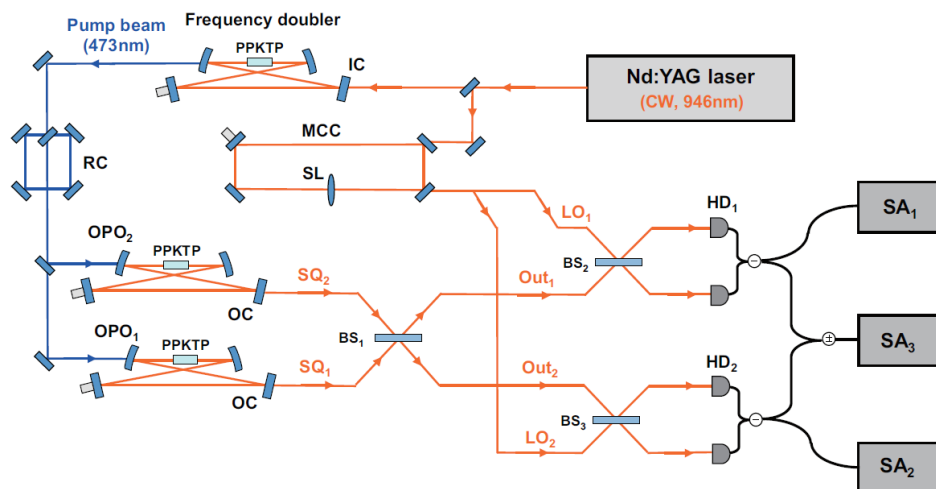


図1 2モードスクイズド光生成の光学実験レイアウト

2モードスクイズド光の量子エンタングルメントの検証は、Duan等の手法に基づいて行った。これは2光波の直交位相振幅をそれぞれ $(\hat{X}_1, \hat{Y}_1)$ 、 $(\hat{X}_2, \hat{Y}_2)$ としたときに、2光波間の相関分散 $\Delta_{1,2}^2$ を計測することにより、下記の古典的な限界を下回ることを実証する手法である。

$$\Delta_{1,2}^2 = \langle [\Delta(\hat{X}_1 - \hat{X}_2)]^2 \rangle + \langle [\Delta(\hat{Y}_1 + \hat{Y}_2)]^2 \rangle < 1$$

霧中における光波の伝搬特性の研究においては図2に示す干渉計を用いた。まずレーザー光(He-Ne Laser)をハーフミラー(BS<sub>1</sub>)で分割する。一方のレーザー光を霧が充満させた1.25メートルのチャンパー内を4往復させる。これによって10メートルの霧中を伝搬させることができる。もう一方のレーザー光は参照光として空气中をミラーで折り返しながら伝搬させる。最後に2光波をハーフミラー(BS<sub>2</sub>)で合波し、光干渉の可視度を計測した。

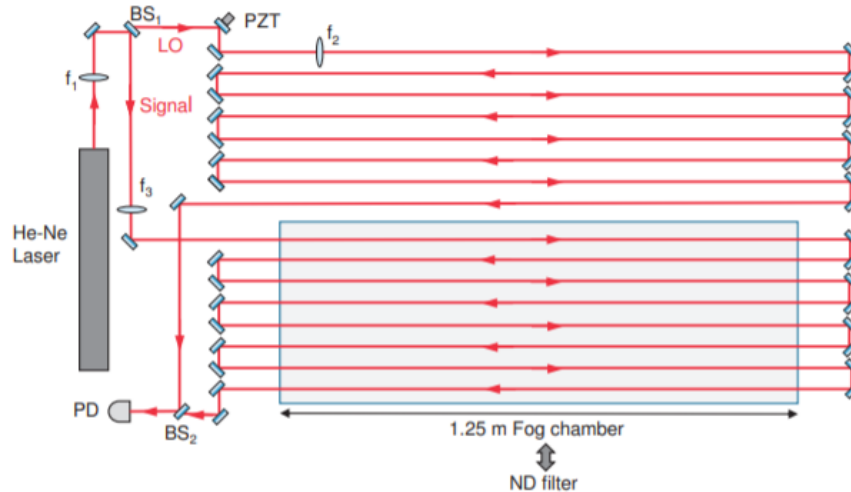


図2 霧を用いたレーザー干渉計の光学実験レイアウト

#### 4. 研究成果

量子光学実験の手法により、2モードスクイズド光の生成実験に成功した。まずシングルモードスクイズド光の生成においては、バランス型ホモダイン測定による量子雑音の測定により、真空状態と比較して-3dBのスクイズングを観測した。また2モードスクイズド光においては、図3のように2光波の直交位相振幅の相関分散を計測した結果、古典的な限界を下回ることを検証した。本実験により2モードスクイズド光源における量子エンタングルメントを検証することに成功した。

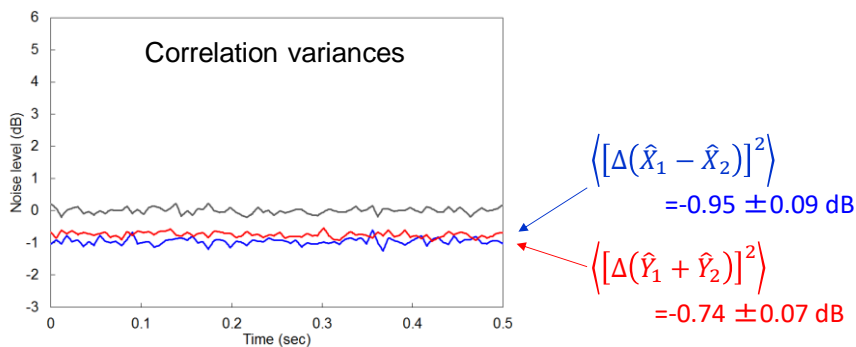


図3 2モードスクイズド光の量子エンタングルメントの検証

Genta Masada, “Verification of quantum entanglement of two-mode squeezed light source towards quantum radar and imaging”, Proc. SPIE, Quantum Communications and Quantum Imaging, XV104090P (2017)

干渉計を用いた霧中における光波の伝搬特性の実験においては、図4に示す通り霧の影響によって干渉計の可視度は低下することが明らかとなった。ここで縦軸は可視度(Visibility)、横軸は霧による光波のエネルギー損失(Loss L)を表している。プロットは実験結果を示す。実線は霧の影響をエネルギー減衰のみを仮定した理論線であり、実験結果とよく一致していることが分かる。この結果から均一な霧が光波伝搬へ及ぼす影響は、エネルギーの減衰が主であり、光損失としてモデル化できることを見出した。光波の空間モードの劣化などの影響は確認されなかった。

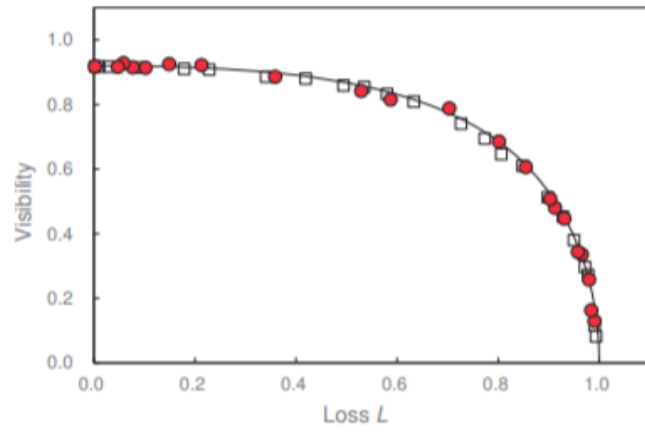


図4 レーザー光の干渉計可視度に及ぼす霧の影響

Genta Masada “A study of laser beam propagation through 10 meters length of a fog”, Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin, Vol.9, (2019), 41-43.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Genta Masada	4. 巻 8
2. 論文標題 Laser beam interference propagating through a foggy atmosphere	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin	6. 最初と最後の頁 31-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Genta Masada	4. 巻 10771
2. 論文標題 Non-classical correlation of two-mode squeezed light in asymmetric optical-loss conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE, Quantum Communications and Quantum Imaging XVI	6. 最初と最後の頁 1077101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2321044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Genta Masada	4. 巻 7
2. 論文標題 Non-Classical Correlation of Asymmetric Two-Mode Squeezed Vacuum states	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin	6. 最初と最後の頁 33-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Genta Masada	4. 巻 10409
2. 論文標題 Verification of quantum entanglement of two-mode squeezed light source towards quantum radar and imaging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. SPIE, Quantum Communications and Quantum Imaging XV	6. 最初と最後の頁 104090P
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2273585	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Genta Masada	4. 巻 9
2. 論文標題 A study of laser beam propagation through 10 meters length of a fog	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin	6. 最初と最後の頁 41-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Genta Masada
2. 発表標題 Non-classical correlation of two-mode squeezed light in asymmetric optical-loss conditions
3. 学会等名 SPIE, Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Genta Masada
2. 発表標題 Verification of quantum entanglement of two-mode squeezed light source towards quantum radar and imaging
3. 学会等名 SPIE Optics and Photonics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 政田元太
2. 発表標題 量子イルミネーションにむけた 2モードスクイズド光源の開発
3. 学会等名 第16回量子情報ミニワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 政田元太
2. 発表標題 霧中における光波の伝搬特性
3. 学会等名 第17回量子情報ミニワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 政田元太
2. 発表標題 霧を使ったレーザー光の干渉実験
3. 学会等名 第18回量子情報ミニワークショップ
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 政田元太	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本工業出版	5. 総ページ数 31-35
3. 書名 光アライアンス 2019年6月号 Vol.30 No.6	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----