

# 研究終了報告書

## 「共振器オプトメカニカルフルイディックスの開発」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：山崎 歴舟

### 1. 研究のねらい

90年代から大きな進展を見せたイオントラップや冷却原子の操作、いわゆる原子気体の量子操作に対し、この15年ほどの量子テクノロジーの活動は固体中の素励起における量子操作を大きな目標の1つとし共振器マグノニクス、共振器オプトメカニクス、回路電磁気学など共振器を用いた量子電磁気学を主軸とした固体量子系の操作が行われてきた。社会進出を目指す多くの量子デバイスの基礎回路は量子電磁気学に支えられ、昔では不可能であった多くの物理対象を量子レベルでコントロールできるようになってきている。特に共振器オプトメカニクスでは共振器構造を用いて光-フォノン間の結合を飛躍的に上げることで、かつて原子気体のみに許されていた量子操作がマクロな振動子で可能となってきた。それに対し、唯一量子分野ではほぼ未開拓なのが液体相である。形状が固定されておらず容器が必要な液体ではどうしても環境との結合が強くなり量子性の担保が難しい。しかし、近年超流動である液体ヘリウムを用いた共振器オプトメカニクスの研究が発表され、不可能と思われてきた液体の量子操作に向けた活動が報告されつつある。

一方、生物物理の分野ではオプトフルイディックスと呼ばれる、液体をマイクロ管内で輸送しながら光で分光するような手法が大きく発展してきている。この分野では大きく2つの操作要素があり、1つは光もう1つが液体にかかる圧力、つまり物理学の言葉を使うと、これは光とフォノンを用いた操作手法である。光では分光以外でも光トラップなどの技術が進んできている、また圧力(フォノン)による操作では、生体輸送や音波照射による歪みの導入をもたらすような技術がある。しかし、これらの光・音波技術は完全に個別に機能しており、これらの包括的な技術はまだほぼないと言えるであろう。この光とフォノンを固体量子技術、特にオプトメカニクスの発展に習い共振器を導入することで、飛躍的にその結合強度を上げ双方向な操作を行うことが可能ではないかと考えた。さらに、それらを常温液体に駆使することで、量子はもちろん生体応用可能な様々な新機能が創出するのでないだろうか、これが本研究の大きな狙いである。具体的には光共振器と液中フォノンの共振器を内包し、光とフォノンが強く結合した共振器オプトフルイディックスの開発を行う。

### 2. 研究成果

## (1) 概要

液中フォノンのブリラン散乱の量子操作に向けた研究を行ってきた。通常ブリラン散乱は Stoke, Anti-Stokes 散乱の両方が位相整合条件を満たすため、散乱過程の選択性は無い、つまり両方のプロセスが同時に起こる。オプトメカニクス的手法を用いると、光共振器を用いてこの散乱過程の選択を行うことができる。散乱過程の操作性を通してブリランレーザーやフォノンレーザー、また液体のレーザー冷却なども可能となる。そのためには、協働係数(Cooperativity Factor)と呼ばれるパラメータが 1 を超えると量子操作の領域に入ることが知られている。この協働係数をあげていくためには、光共振器と音波共振器の Q 値の向上と光-音波結合の増強が重要である。これらは共振器の設計など工学的側面を含むと同時に、低周波音波との散乱が許されるような新しい散乱過程を探求するような物理的側面が混在する。これらをバランス良く行うことで、実験可能な共振器オプトフルイディックスの実験系を立ち上げてきた。

1 つ目は液滴共振器を用いた実験系である(図 1a)。シリコンオイルの液滴は

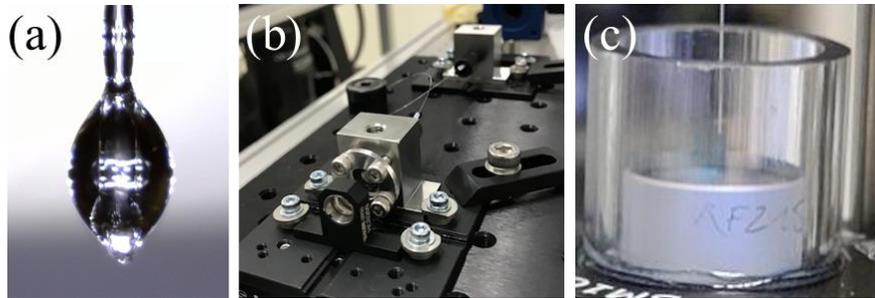


図 1

Gallery

Mode(WGM)

と呼ばれる液滴の赤道を周回するような共振器モードを光・音波で共に有し、光・音波のブリラン散乱を WGM を用いて行う実験系である。本実験系では、光 WGM の分光結果が得られており、そこからモード解析を現在行っている。これらのモード間でのブリラン散乱の測定を近日行う予定である。2つ目は、中空コアファイバーを用いた1次元オプトフルイディックス系の開発である(図 1b)。固体のオプトメカニクス系では、近年低次元系における分散関係の変化に伴う新奇なブリラン散乱過程が注目を浴びている。特に液体のブリラン散乱ではこのような現象が報告されておらず、これを世界にさきがけて行うような実験系になっている。実験的には中空ファイバーに水と光の両方を通すような実験系の構築が終わり、中空ファイバーに水が導入されたときのフォトニック結晶ファイバーのシングルモード伝搬波長が 850nm 付近で確認されている。ブリラン散乱の測定も近々行えると考えている。3 つ目は、ファイバーミラーを用いた超微小共振器の開発である(図 1c)。こちらはファイバー端面に形状加工とミラーコーティングされたファイバーミラーを用いて、超微小共振器の作製を行った。共振器長  $100\mu\text{m}$  以下のきれいな分光スペクトルが観測されている。3 つの系どれも、ブリラン散乱の測定にもう少し時間がかかるが、他では報告がされていないような新奇な物理系の創出を行ってきたので、今後の測定結果に期待したい。

## (2) 詳細

### 研究テーマ1「テーパーファイバ作製技術の確立」

光共振器への光の導入のほか、ボトル共振器の作製など様々な用途への応用が考えられるテーパーファイバ作製技術の確立に挑戦した。水酸素発生器を用いたバーナーで光ファイバーを引っ張りながら加熱することで断熱的に形状が変化したテーパーファイバの作製に成功した(図 2)。図中のファイバーは SEM を用いたテーパーファイバ画像で、一番細いところでは 500nm と波長以下の領域まで細くしたテーパーファイバが作製可能となった。透過率は 70% とそこまで高くないが、本実験ではファイバー中での損失はあまり問題とはならないので、将来的にさらなる改善も考えられるが加工精度としては十分満足できるような状態で作製できている。液滴共振器への光の導入を確認しており分光結果が得られている。

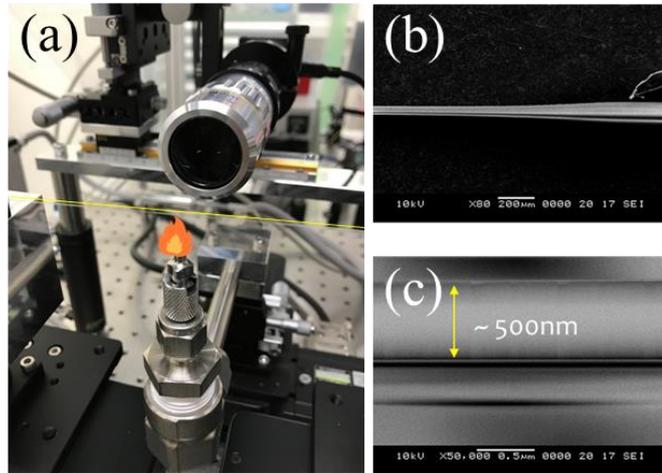


図 2

### 研究テーマ 2「液中フォノン測定技術の確立」

まだフォノン検出まで実験が進んでいないが、測定系自体の開発は概ね終わっている。ブリラン散乱光は基本的には音波による位相変調光なので、疑似的に電気光学変調器 (EOM) によって作ったサイドバンドと元のレーザー光 (入射光) を音響光学素子 (AOM) を用いて ~100MHz 程度ずらした Reference 光とのヘテロダイン検出ができるような測定系を構築した。実験で測定される音波の周波数帯はフォワード散乱で見られるような低温周波数では数 MHz 程度、またバックワード散乱で見られるような比較的一般的なブリラン散乱光は数 GHz 程度のレンジにあるが、これら広い音波周波数におけるブリラン散乱がショットノイズ限界で測定可能なことを EOM を用いた測定系で確認している。

### 研究テーマ 3 「オプトメカニカル共振器の作製」

本研究ではこのテーマに一番時間を費やした。それは、幾つか異なるブリラン散乱の位相整合条件や可能性を模索しながら進めていったからである。それに関してまず一つ重要な音波の性質として、低周波の音波の方が高い Q 値であるということが挙げられる。音波の内部損失は粘性と損失に関する損失に大まかに分けられるが、音波の損失レート ( $\Gamma$ ) は  $\Gamma \propto \Omega^2$  と音波周波数  $\Omega$  の二乗に比例している。つまり、通常見られるブリラン散乱が GHz なのに対し、その周波数をなんらかの工夫で MHz まで下げられれば周波数は 3 桁、Q 値は 6 桁向上するのである。つまり、低周波の音波での散乱を可能にする位相整合条件と言うのが重要な要素となる。

概要で紹介した液滴共振器では、異なる WGM 間における位相整合が可能となる。水素原子のように動径・極・方位角方向に対して異なる量子数を取り得るモードが存在し、それらの実行屈折率は実効的な軌道の長さの違いにより異なってくる、つまり通常当方的で 1 つの屈折率しか持たない媒質におけるブリラン散乱はバックワード散乱しか許されないが、この系では低周波のフォワード散乱が可能となるのである。特に動径方向のモードを用いたブリラン散乱では  $\Omega/2\pi \cong 10$  MHz 程度で位相整合が取れることが計算からわかっている。図 3 は液滴共振器の WGM の分光スペクトラである、色の異なるデータはそれぞれ異なる光の偏光から得られたデータで TE と TM モードによって異なるピークが見えている。現在これらのモードを理論と比較してモードの同定を行っている。

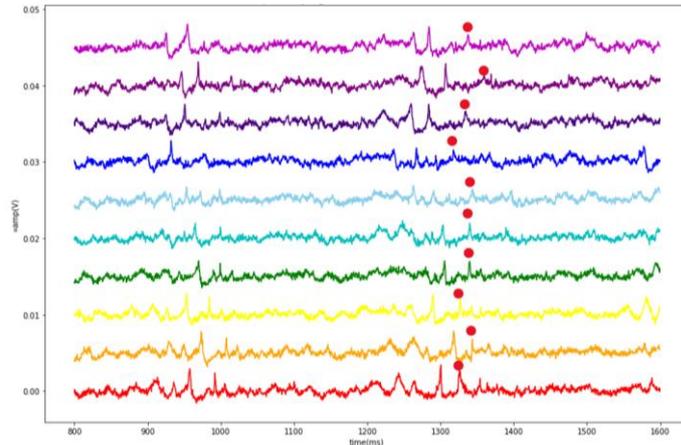


図 3

2 つ目の中空ファイバーを用いた系は、「1次元オプトメカニクス」という近年注目されている低次元系のブリラン散乱の系になっている。モードの閉じ込めが極端に狭く、さらに音波と光が同じ空間に強く閉じ込められていることで、強い相互作用が期待される。また、注目されている理由の一つが、低次元系における特異な分散関係である。通常、フォノンの分散は質量を持たない線形な分散関係として記述されるが、低次元系になることによる質量の獲得で光学フォノンのように  $k=0$  でも有限なエネルギーをもつようなギャップが現われる。実際にはモードの閉じ込め直径が半波長の音波、実験で用いられる中空ファイバーでは  $\Omega/2\pi \cong 300$  MHz の音波が位相整合出来るような系になっていることが COMSOL を用いた有限要素法のシミュレーションからわかっている。実際実験系では中空ファイバーに液体を注入する方法、また液体注入をした後にどのように光をファイバー内に導入するか、また液体を導入したときのフォトニック結晶ファイバーのシングルモード伝搬波長などが初めわからなかったので少し手間取ったが、これらが順調にクリアされ実験系が順調に立ち上がっている。

3 つ目の実験系がファイバーミラーを用いた微小共振器の開発である。こちらは実際にはファブリ・ペロー型の光共振器になるが、その共振器長が  $100 \mu\text{m}$  以下になるような微小共振器の開発に成功している。ファイバーミラーは端面の加工をレーザーアブレーションで行うことにより、原子レベルでスムーズな表面でさらに曲率が  $100 \mu\text{m} \sim 1\text{mm}$  と非常に小さい曲率のミラーが出来ることが知られている。これまで、このタイプの微小共振器はイオントラップ・量子ドット・オプトメカニクス・冷却原子などの量子物理系で非常に注目されている新しい技術であるが、これを新しく導入した。従来のミラー（最小曲率  $25\text{mm}$ ）を用いた場合に比べ、このミラー共振器だとモード体積の

微小化から結合が 10 倍，協働係数にすると 100 倍の向上が見積もられている．ファイバーミラー共振器の実際の分光データを図 4 に示す．これは実際に共振器長を  $100\ \mu\text{m}$  にしたときの透過スペクトルで非常にきれいな共振が得られている．フィネスも設計が 300 のところを実測値で 230 と妥当な結果が得られた．こちらも水を入れた実験まであと一押しのところまで来ているので，今後ブリラン散乱の測定を進めていく予定である．

#### 研究テーマ 4 「光によるフォノン操作」

残念ながら本研究期間内にはフォノン操作までは届かなかったが，それを間近に控えた 3 つの実験系の構築

を行うことができた．

特に 2 つ目に紹介した中空ファイバー，3 つ目の微小ファイバーミラー共振器は世界的にも新しく液体系の実験系として導

入した．本研究では

ブリラン散乱を主な目標としているが，ブリラン散乱以外でも生体系の実験に流用することは容易なので，今後の実験結果に非常に期待しているほか，共同研究などこれらのデバイスを新たな研究の基盤として使ってもらえるような交流も持ちたいと考えている．

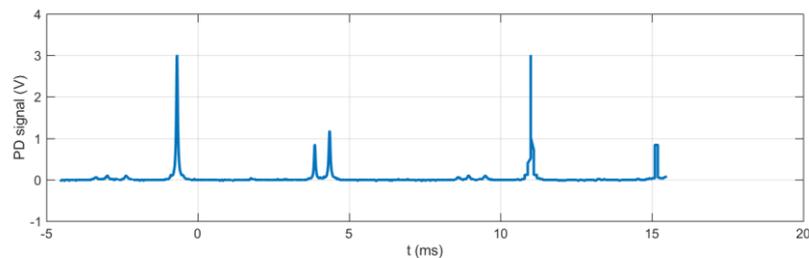


図 4

### 3. 今後の展開

3 つの実験系はほぼほぼ完成しており，これから実際のブリラン散乱の実験に突入できる段階まで来ている．各々が異なる特色をもっておりブリラン散乱実験の成果が待ち遠しく思っている．共振器の  $Q$  値なども想定通りに仕上がってきているので，液中フォノンモードのレーザー冷却を目指した研究を進めていきたい．また，ブリランレーザーやフォノンレーザーといった応用も協働係数が 1 を超えた時点で可能になるので，これらの可能性も見据えて実験を進めていく．中空ファイバーやファイバーミラー共振器は他の生体実験でも用いれるのではないかと何人かの方からコメントをいただいた．共振器を微小にすることで結合は大きくなる一方，量子エレクトロニクス実験で使う共振器は非常に高い  $Q$  値でそれらのマッチングが良い生体実験があるかをもう少し考える必要があるが，それらも含めて検討していきたい．

本研究中に理論的な解析や考察も進めて行ったが，初め考えていなかった困難や改善が必要などころなどが幾つかわかってきた．まず，多くの液体には近赤外の吸収が無視できないほど大きい，レーザー自体は近赤外線レーザーが扱いやすいが少し考える必要がある．光共振器や低次元系を用いた分散関係の操作はオプトメカニクスでは急速に発展しているが，それらを液体の操作にも応用できることが示せると本研究の意義がさらに伝わるのではと考えている．

本研究は基礎物理としての側面が大きい．液体の量子操作は未だに液体ヘリウム以外では報告が少なく未開拓な分野と言えるであろう．操作性の向上や技術の蓄積により様々な応用をもつ新たなツールになるのではと考えている．特に液体の操作は生体研究に新たな礎を創出するの

ではと考えている。それまでにはあと5-10年間の技術の蓄積が必要かもしれない。

#### 4. 自己評価

研究は未だ半ばであるが、幾つかの問題や新しいアイデアから3つの実験系を構築できたのは良かったと思っている。また各々に特色があり、世界的にも新奇な物理系となっており、これからの実験が楽しみである。特に共振器や低次元系でのアイデアをオプトメカニクスから流用したのは新奇性が高いと考えている。一方、ブリラン散乱のシグナルがまだ見えていないのが、少し残念ではある。期間内にシグナルをきちんと見えるようにしたかったが、東大からの引っ越し、またその後建物工事における事故に巻き込まれ研究室を一度解体し、セットアップを作り直さなくてはならなかった、また最終年度も2月に新館への引っ越しなどがありそのために実験中止を余儀なくされているなど災難に見舞われた。

全体的には有限要素法を用いたシミュレーション、理論解析、実験系の構築とバランスよく研究を進められたと考えている。特にシミュレーションは過去にあまり経験が無かったので、今後の研究につながる大きな礎を本さきがけ研究で築けたように思う。

初めに述べたが、実験はまだこれからである。筋の良い実験系が出来たように思うので、これからブリラン散乱の測定に力を入れて、研究期間後も引き続きこのトピックで研究成果が出るように続けていければと考えている。

研究実施体制や研究費は全く問題なく研究を遂行できた。この点に関しては本学の研究推進センターならびにJSTのサポートに非常に感謝している。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果には多少時間がかかるかもしれない。先述のように、本研究はかなり基礎物理よりである。これらが研究として用いられ注目されるのに数年、これらの技術が浸透し応用に向けた研究に使われるのにはまだ時間がかかるであろう。しかし、液体の量子操作はこれまでほとんど行われてきていない。これらが室温で行われるようになれば、様々な分野への波及効果が考えられたため期待したい。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

なし

##### (2) 特許出願

なし

##### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表: 招待講演

1. “量子生体応用に向けた共振器オプトフレイディックス”, 山崎 歴舟  
量子生命科学会 第2回大会, 2020/12/24
2. “量子エレクトロ・オプトメカニクスの進展”, 山崎 歴舟  
第46回量子情報技術研究会 (QIT46), 2022/5/31