

# 変位雑音フリー干渉計を用いた量子非破壊測定

白澤, 光純 / SHIRASAWA, Koya

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014344>

# 変位雑音フリー干渉計を用いた量子非破壊測定技術の研究

## STUDY OF A QUANTUM-NON-DEMOLITION MEASUREMENT SYSTEM USING DISPLACEMENT-NOISE-FREE INTERFEROMETER

白澤光純

Koya SHIRASAWA

指導教員 佐藤修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻（創生科学系）修士課程

Displacement-noise-free interferometer (DFI) has developed for gravitational-wave (GW) detection free from any kind of displacement noise, which limits sensitivity of conventional laser interferometer GW detectors. The DFI mechanism can be also applied to quantum radiation pressure noise (RPN) in principle, and thus DFI allows ultrasensitive sensing beyond the so-called standard quantum limit. Namely, DFI can be a quantum-non-demolition (QND) measurement device for GW detection. The goal of this study is to examine the QND characteristics by cancelling RPN after observing it. Since not only obtaining the two signals which have same displacement information on the mirrors for the DFI system but amplifying the incident laser power to observe RPN are required for the experiment, I contrived a new optical design, a bidirectional triangular ring cavity DFI (RC-DFI). In this thesis, I introduced superiority of the optical system as compared to Mach-Zehnder type, and furthermore I demonstrated length control experiment of the cavity for verifying whether the noise cancellation ability on the above optical system will be still confirmed.

**Key Words:** Gravitational-wave, Displacement-noise-free interferometry, Quantum-non-demolition measurement

### 1. 研究背景

1916年、A. Einsteinは自身が発表した一般相対性理論をもとに、時空間を光速で伝搬する重力波の存在を予言した。それからちょうど100年が経過した2016年、アメリカのLIGOチームが世界初の重力波直接検出を成し遂げた。これにより重力波天文学が創成されることとなり、得られるサイエンスの豊富さから検出器感度の向上がより強く求められるようになった。

現在、重力波検出の主流となっているレーザー干渉計型の検出器において、その感度は鏡の変位を生じさせる雑音（変位雑音）や変位計測能力を阻害するセンシング雑音によって制限されている。そこで考案されたのが、変位雑音を抑圧するのではなく差し引くという手法で雑音除去を図る変位雑音フリー干渉計 Displacement-noise-Free Interferometer, 以下DFI)である<sup>[1]</sup>。この概念はレーザー干渉計の原理的な雑音である光の量子雑音にも適用することができ、ハイゼンベルグの不確定性原理によって課される測定精度の絶対的なリミットである標準量子限界（SQL）を突破する能力を有している。このような計測技術は量子非破壊（QND）測定と呼ばれ、重力波信号と変位雑音とを区別して除去するDFIの雑音相殺機構は量子雑音を含めたあらゆる変位雑音を排除できることから次世代型重力波検出器への応用が期待されている。

### 2. 目的

先述の通り、DFIは重力波検出においてQND特性を有していることが示唆されている。本研究では、その検証実験を目指してSQLへのアクセスを可能にするDFIデザインを考案した。それが三角共振器をDFIシステムに組み込むリング共振器型DFI (RC-DFI)である。更に今回、RC-DFIにおける雑音相殺能力の確認とRC-DFI特有の雑音を評価することを目的として共振器長制御実験を行った。

### 3. DFIの原理

D次元空間にN個の自由質点がある系（図1）を仮定する。これらの自由質点群間距離を光の到達時間によって測定するとき、変位雑音はN×D個時計雑音はN個で合計N(D+1)個の自由度を雑音は持つ。それに対して、信号チャンネル数は自分以外とのペアを考えてN(N-1)個ある。雑音を消去する条件はチャンネル数>雑音数、つまり、

$$N(N-1) \geq N(D+1) \\ N \geq D+2$$

を満たすことである。これは自由質点の数と配置の次元を適当にアレンジすることで、変位雑音の消去が可能であるということを意味する<sup>[2]</sup>。

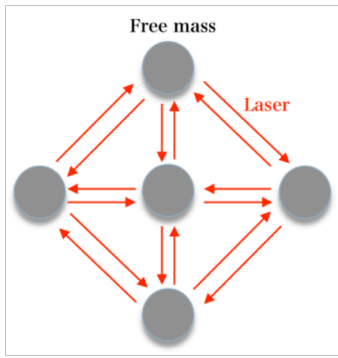


図1 自由質点ネットワーク

#### 4. リング共振器型 DFI

DFI を実現する最もシンプルな光学系は双方向 Mach-Zehnder 干渉計 (MZI) と呼ばれる 2 入力 4 出力の 2 干渉計構成である (図 2) . 変位雑音フリー信号は同じ条件にある 2 つの信号 (各 MZI 信号) から, 共有する鏡の変位雑音情報を引き算することで得ることができる [3].

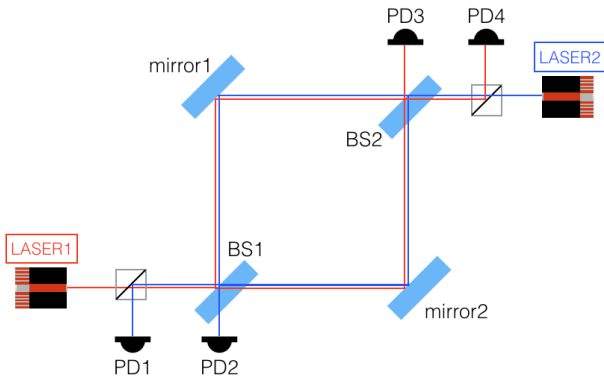


図2 双方向 Mach-Zehnder 干渉計

しかし, この干渉計デザインではレーザー光のパワーは完全に入射レーザーによって決定され, 光の輻射圧雑音を効率的に増幅できないことから, 信号対雑音比 (S/N 比) が低くなってしまうことが問題視されていた. 図 3 は表 1 のパラメータを元に MZI 型 DFI の変位感度を見積もったものであり, 5-10Hz 程度における DFI 感度と SQL の S/N 比は約 1.6 であった.

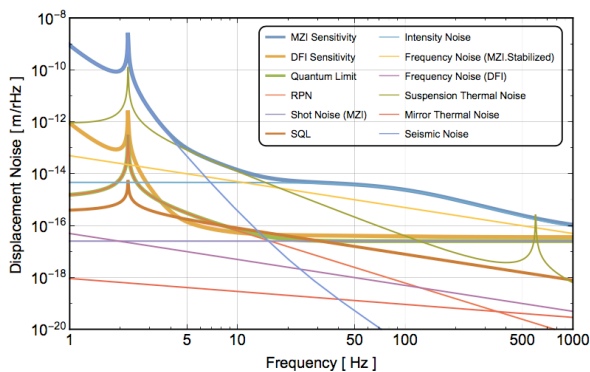


図3 MZI 型 DFI の変位感度

表 1 雑音計算に用いたパラメータ

レーザー	
波長 $\lambda = 1064$ [nm]	入射光強度 $P_0 = 10$ [W]
共振器	
一周長 $L_{rc} = 126$ [mm]	フィネス $\mathcal{F} = 1000$
共振器内光強度 $P_c = 6400$ [W]	制御手法: Hänisch Couillaud 法
懸架系	
ワイヤ長 $L = 5.0$ [cm]	ワイヤ直径 $r_t = 1.5 \times 10^{-6}$ [m]
共振周波数 $\omega_t = 2.2$ [Hz]	ワイヤ密度 $\rho_t = 19.3 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]
懸架系 Q 値 $Q_t = 5.0 \times 10^5$	室内温度 $T = 300$ [K]
懸架鏡	
質量 $M = 50$ [mg] (実効質量 $\mu = \frac{M}{2}$ )	損失角 $\phi_s = 5.0 \times 10^{-5}$
円柱とした時の高さ $H = 0.2$ [mm]	密度 $\rho_s = 2.31 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]
ヤング率 $Y_s = 60 \times 10^9$ [N/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比 $\nu_s = 0.17$ [N/m <sup>2</sup> ]
反射面のビーム半径 $w_r = 0.2$ [mm]	基本モード角周波数 $\omega_1 = \sqrt{\frac{Y_s \pi}{\rho H}}$

そこで今回この問題を解決する光学系としてリング共振器型 DFI (図 4) を提案する. この光学系の最大の特徴は共振器内をレーザー光が何度も周回することで実効的にパワーが増幅され, 輻射圧雑音の観測に要求される数 kW 以上の大きなレーザーパワーが得られる点である. このリング共振器に双方向からレーザーを入射し, 同様に減算処理を施すことでリング共振器型 DFI (RC-DFI) を実現する.

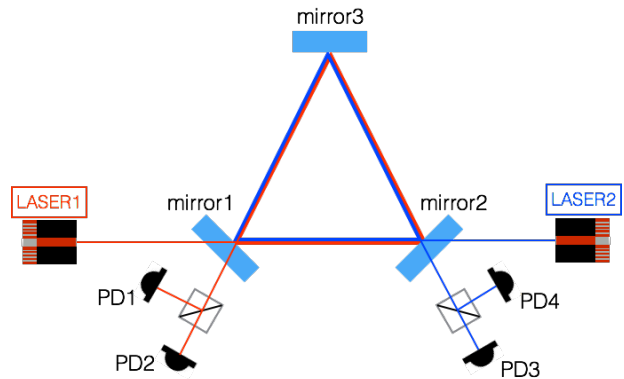


図4 リング共振器型 DFI

図 5 は同様に表 1 のパラメータを元に RC-DFI の変位感度を計算したものである. 図 5 より, 約 10-500Hz 帯域において SQL を超える感度 (赤塗り領域) の実現が示唆され, 更に S/N 比は最大約 4.0 と MZI 型と比較して 2 倍

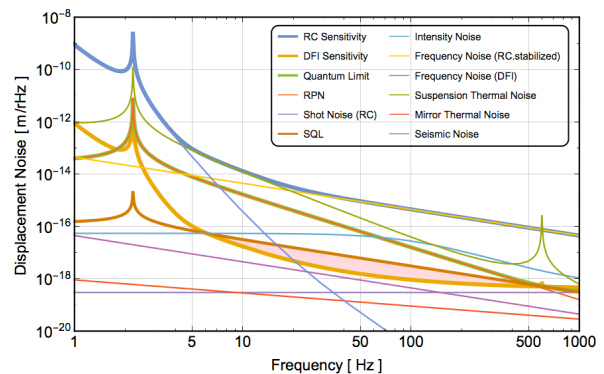


図5 RC-DFI の変位感度

以上大きくSQL感度を更新できることがわかった。また、RC-DFIは、三角共振器という幾何学的性質から光の輻射圧により角度の自動補正が掛かる為、このような超精密測定実験には不可欠な煩雑な鏡の角度制御を行う必要が無いという、大きな利点をも有している。

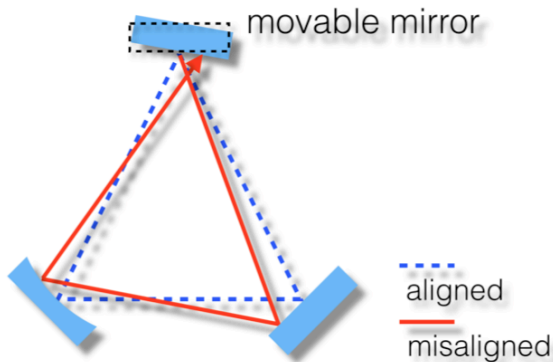


図6 リング共振器における角度の自動補正

本論文内では、そのプロトタイプ実験としてRC-DFI感度測定のための共振器長制御実験を行った。

### 5. RC-DFI 共振器長制御実験

本実験では強度雑音低減機能を有しかつ簡便であることからリング共振器の偏光選択性を利用して偏光状態を操作することで誤差信号を取得するHänsch-Couillaud法を用いて共振器長制御実験を行った。本実験の全体の構成と共振器長制御のブロックダイアグラムがそれぞれ図7, 8である。

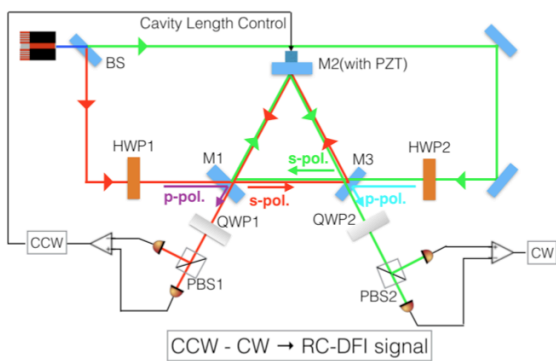


図7 本実験の全体構成

共振器長のフィードバック制御では、変動を抑える為の制御信号 ( $v_{fb}$ ) から外乱 (変位情報  $x_0$ ) を逆算することができる。図8より、 $v_{fb}$  から  $x_0$  を求める為には、

$$G_{OL} = AFH$$

$$x_0 = \left| \frac{1+G_{OL}}{G_{OL}} A \right| v_{fb}$$

と各伝達関数を測定した後、逆算すればよい。

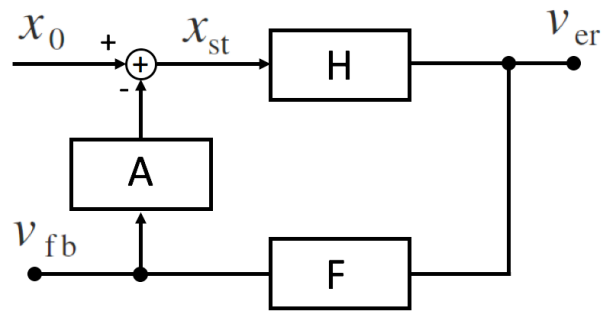


図8 共振器長制御のブロックダイアグラム (H:RCによる鏡の変位センサ, F:ローパスフィルタ, A:ピエゾ素子を用いた変位アクチュエータ)

共振器を組み込んだ光学系の設計にはアライメントだけではなく、ビームの空間モードも共振器に合わせなければならない。このことをモードマッチングと言い、本実験では光学定盤のサイズや共振器に使用する鏡の曲率、レンズの焦点距離といった様々な制約のもと、図9のように設計した。また、図10は実際の写真である。

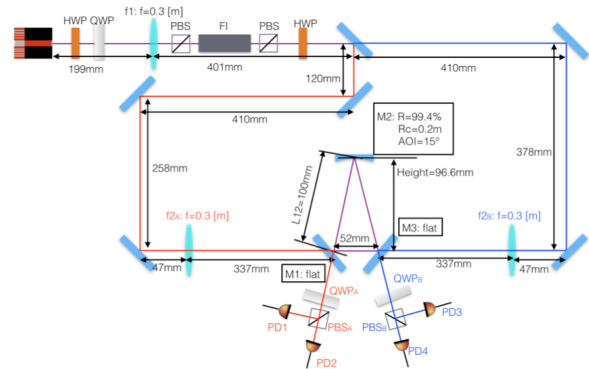


図9 本実験の光学系

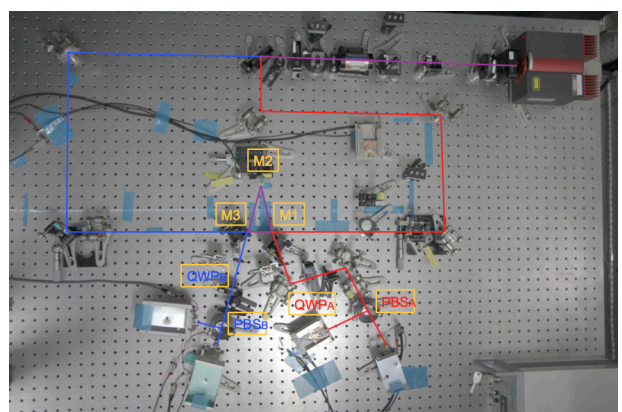


図10 光学系 (実際の写真)

図10では双方向からレーザーを入射しているが、まずは時計方向 (赤線の光路) にレーザーを入射して共振器長制御を行なった。図11は共振器長制御信号としてRamp波をアクチュエータに加えることで生成した誤差信号と透過光強度である。透過光が最大となる共振点

で 0V かつ共振器長変動に線型な誤差信号が得られていることが確認できた。

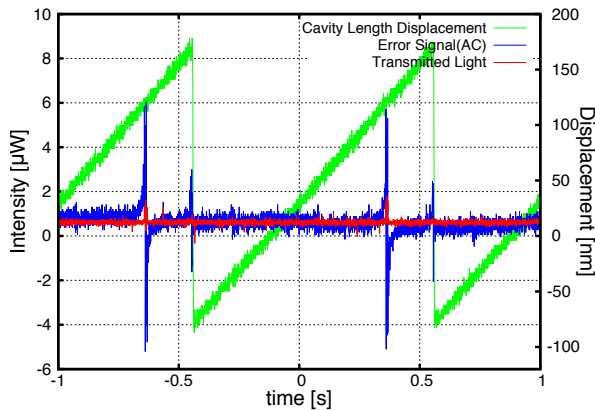


図 1 1 誤差信号と透過光強度

共振器長制御を実施した際の誤差信号と透過光強度をプロットした図が図 1 2 である。

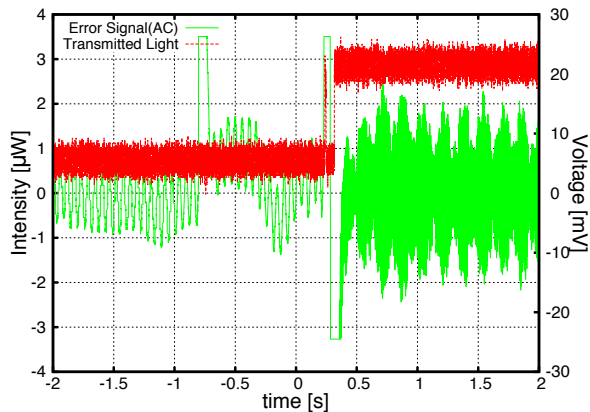


図 1 2 制御実施前後の誤差信号と透過光強度

図 1 2 より、約 0.3 秒以降は共振器から出てくる透過光の強度が一定に維持されていることから、共振器長制御に成功したと言える。

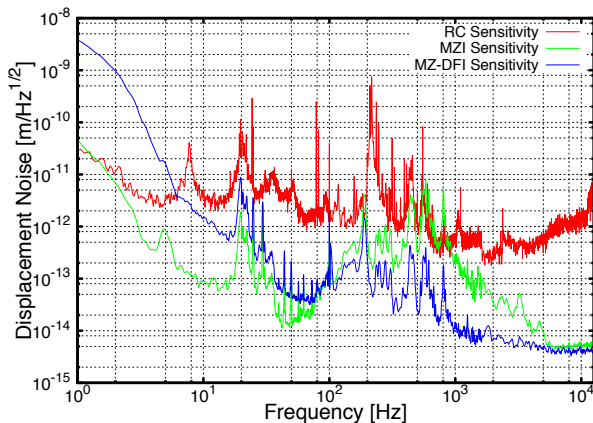


図 1 3 リング共振器と MZI, MZ 型 DFI の変位感度

前述の通り、制御信号からリング共振器の変位感度を

逆算し、更に以前測定した MZI と Mach-Zehnder 型 DFI (MZ-DFI) の感度と共に重ね書きしたものが図 1 3 である。

## 6. 結果と考察

共振器長制御実験を行い、リング共振器に生じる雑音 (図 1 3, 赤線) が確認された。MZI 感度 (図 1 3, 緑線) と比較すると、ほぼ全観測周波数帯域で感度が悪いことがわかる。これは最適点からの鏡の傾き等が要因となり、余剰雑音が生じてしまっていると予想される。しかし、MZ-DFI で雑音が相殺されている 500Hz 付近では RC 感度が MZI 感度に到達していることから、双方向を実現することで検証したい RC-DFI の変位雑音相殺能力を確認するには十分な感度を有していると言える。

一方で、本実験の最大の目的である変位雑音フリー信号の取得には至らなかった。これはリング共振器に反時計方向 (図 1 0 での青線) にレーザーを入射した際、設計した光路からビームが逸脱してしまったことが要因である。しかし、これを補正する為に共振器を構成する鏡のアラインメントを調整してしまうと次は時計方向の光路 (図 1 0 での赤線) のビームが逸れてしまい、双方向は実現されない。この問題を解決するには、入射レーザーを殆ど理想的に水平かつ鉛直方向に調整する機構と、その光学機構を平行移動かつ回転可能なステージが要求される。もしこれが実現できれば、図 1 3 にあるように、MZI から変位雑音が一定程度除去された MZ-DFI 感度のような感度曲線が得られるはずである。

## 7. 今後の展望

まずは上述のような光学的調整機構を構築し、双方向入射可能なリング共振器を用いて同相雑音が除去された変位感度を得る。そして、双方向型リング共振器が変位雑音相殺機能を有していると判明した際には、目標となるレベルまで感度改善を図り、対象の周波数帯域において変位雑音フリー信号を取得する。

その後、図 5 に示した SQL を超える感度の実現、すなわち DFI の量子非破壊特性検証実験へと移行する。

### 謝辞

指導教員である佐藤修一教授を始め、本研究にご支援・ご協力頂いた全ての方々から感謝いたします。

### 参考文献

- [1] Yanbei Chen and Seiji Kawamura, Phys. Rev. Lett.93,211102, (2004)
- [2] Yanbei Chen and Seiji Kawamura, Phys. Rev. Lett.96,231102, (2006)
- [3] Shuichi Sato et al., Phys. Rev. Lett. 98, 141101 (2007)
- [4] Yuta Michimura et al., arXiv:1307.5266, (2013)