

# 音響光学素子を用いた精密測角による衛星間長距離相対測位

武者研 田尻 美佳

## 1. 背景

1916年にアルベルト・アインシュタインにより重力波の存在が予言された。重力波とは時空の歪みが波となり光速で伝わっていくものであり、極めて微小であるが、強い透過力を有している。この性質によりブラックホールの近傍や宇宙誕生の瞬間の観測などが期待されている。重力波は宇宙を観測するための重要な手段である。

1970年代の初めにマイケルソン干渉計を基本としたレーザー干渉計を用いた重力波望遠鏡が考案され、2016年にアメリカのレーザー干渉計型重力波望遠鏡 aLIGO(Advanced LIGO)によって初めて観測された。レーザー干渉計は基線長を伸ばすことで高感度を実現でき、また広い観測周波数帯を持つことができるという2つの利点がある。

現在地上観測では得られない低い周波数の重力波の観測を目的とした、宇宙重力波望遠鏡への取り組みが進められている。ヨーロッパの LISA や中国の天琴、日本では DECIGO と B-DECIGO が挙げられる。宇宙で観測を行うことで、地上では避けられない低周波数の雑音(重力勾配雑音)を排除することができる。

本システムは DECIGO/B-DECIGO への利用が検討されている。

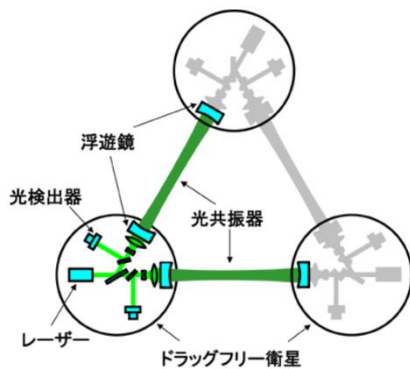


図1 DECIGOの構成(HPより引用)

DECIGOは3台の衛星で一辺(基線長)1000 kmの正三角形型レーザー干渉計を構成し、重力波検出を行う。宇宙誕生から $10^{-20}$  s後に宇宙に入ってきた0.1~1 Hzの周波数帯の重力波を観測対象にしており、この重力波を観測することができれば、インフレーション理論の証拠となる上、宇宙の進化についての情報を得ることもできる。

3台の衛星をFF(編隊飛行)させるため、ある1台の主衛星を決め、主衛星を基準に他衛星を捕捉する。本システムは主衛星が決めた基準線からのずれを相手衛星に伝え、初期投入時に数 km 程度あったずれを、数 m 程度とすることを目指している。

## 2. 原理

### 2-1. 音響光学素子

本システムにおいて最も重要な素子が音響光学素子である。これは音響光学効果を利用したもので、二酸化テルル( $\text{TeO}_2$ )やモリブデン酸鉛( $\text{PbMoO}_4$ )などの音響光学媒体に圧電素子(PZT)が接合されている。PZTにRF信号を印加すると結晶内に屈折率の周期的変動(疎密波)が生じ、光に対して回折格子のように作用する。回折角 $\theta$ は結晶の音速 $v$ 、印加するRF信号の周波数 $f_m$ 、入射させるビームの波長 $\lambda$ に依存し、1次回折光は $f_m$ だけ周波数シフトが起こる。

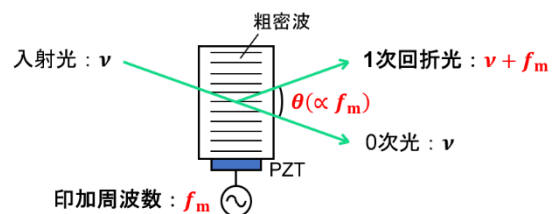


図2 音響光学素子による回折

$f_m$ を連続的に変化させることで光を掃引することができ、さらにその光を受光した相手衛星は周波数情報から角度情報を得ることができる。

## 2-2. 測角システム概要

光の周波数を直接測定することはできないため、ビート信号として $f_m$ の情報を伝達する。

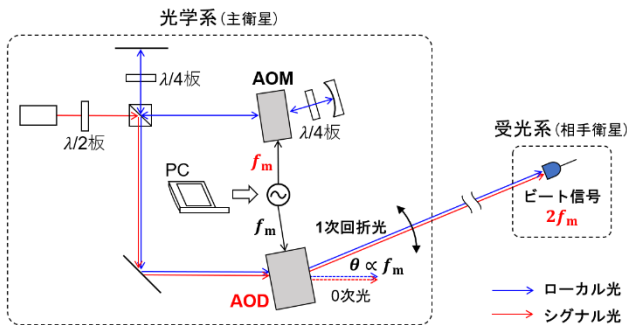


図3 測角システム概要図

始めに偏光を利用してローカル光とシグナル光の2本に分離し、ローカル光の経路(ローカルパス)中に音響光学変調子(AOM)を挿入する。この往復でローカル光は $2f_m$ の周波数シフトを受けた後、シグナル光と同軸に音響光学偏向子(AOD)へ入射する。AODは大きな回折角を有し、光を掃引するために用いる。AODとAOMへ印加するRF信号を同期することで、2つの光の周波数差は常に(測定可能な) $2f_m$ となり、相手衛星はビート信号から、主衛星に対する自分の位置を知ることができる。

## 2-3. 測定方法

ビームはある大きさを持つため、光を掃引していくと測定できるビート周波数に幅が生じる。どの値から位置を決定すべきか知るために、周波数と同時にPD(Photodetector)のDC電圧も測定する。

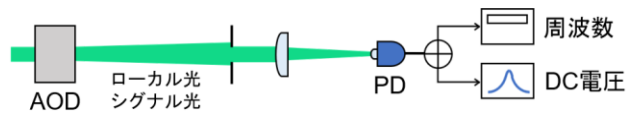


図4 測定方法

DC電圧は受光強度に比例するため、ビームの中心とPDの位置(相手衛星の位置)が一致した際に最大値を取る。中心位置決定精度は角度分解能に直結しており、DC電圧を用いた中心位置決定は、音響光学素子の光学的分解能を超えた精度での測角

を可能としている。

## 3. 実験と結果

### 3-1. 光学系、受光系の再設計

本システムは衛星搭載を想定しているため、小型化、軽量化が重要となる。先行研究において $450 \times 600$  mmのブレッドボード上に構成されていたが、さらに小型化するため光学系の再設計を行った。再設計した光学系をブレッドボード上に実装する場合、 $330 \times 240$  mmの大きさがあればよく、先行研究との面積比は30%となった。

本システムを使用する上で、相手衛星が光軸に対して傾いていても受光できるかが重要となる。長距離を伝搬するとビームは広がってしまうため、周波数カウントに十分なパワーを得るために集光する必要がある。しかしビームを絞り込みすぎると少し光軸から傾くだけでPDの受光面に当たらなくなるという問題があった。



図5 傾きがあり受光できなくなる様子

そこでPDの種類、レンズとPDの距離などを変更し許容角(NA)の改善を図った。これにより3.87 mradだった許容角は11.1 mradまで向上した。

### 3-2. 測角精度の再評価

本研究室の先行研究において測角精度は示されていたが、3-1.で再設計した光学系、受光系を用いて測角を行った。AOD出射後約10 m離れたところに受光系を設置し、ビームの垂直面でPDを移動させそれぞれの点での中心周波数を測定した。PDは0.5 mm間隔で4 mm移動させ、各点で4回ずつ測定を行った。ビート周波数変化量から2点間の角度差を算出するが、PDの移動量とAODからPDまでの距離からも角度を算出することができる。後者を真値とし、ビート周波数変化から算出した角度差を算出値とする。確度(真値と算出値

の差), 精度(算出値のばらつき)はそれぞれ次の様な結果となった.ただし()内は先行研究での結果である.

確度: 0.0035 mrad (0.04 mrad)

精度: 0.017 mrad (0.02 mrad)

確度, 精度ともに以前よりも向上した理由としては, 光学系を再設計したことによるビームクオリティの改善が考えられる. 精度は実験環境や測定距離を伸ばすことで向上が見込める.

### 3-3. 掃引角度の光学的調節

AOD 出射後に光学系を追加することで掃引可能角度を縮小する方法について考える. 印加する周波数範囲を変化させず, 光学系により掃引角度を縮小することで, 実効的な分解能の向上などが見込める.

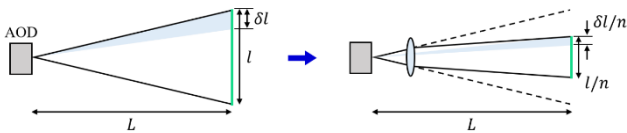


図6 縮小光学系による実効的な分解能の向上

ビームウエストの太さによりビームの拡がり角が変化することを利用して, エクスパンダーを用いた縮小システムを考案した. エクスパンダーに対して斜めにビームを入射させると, 拡がり角の変化の割合と同じだけ出射方向も変化する. AOD 出射後に掃引角度を半分にする縮小光学系(ビームウエストを2倍に拡大する)を挿入し, 測角を行った. 光学系を入れない場合の全掃引可能角度は 19.5 mrad であるのに対し, 光学系を入れた場合は 9.8 mrad となった. 変化率は 0.502 であり, 設計通り掃引角度が半分になっていることが確認できた.

### 3-4. 音速の温度依存性

AOD, AOM の回折角は, RF 信号が結晶内を伝わる音速に依存している. 音速に温度依存性があることは自明であり, その評価を行った. AOD の底面に熱電素子(ペルチェ)を接触させ, 温度を変化

させた際のある定点で受けるビート周波数変化を測定した.

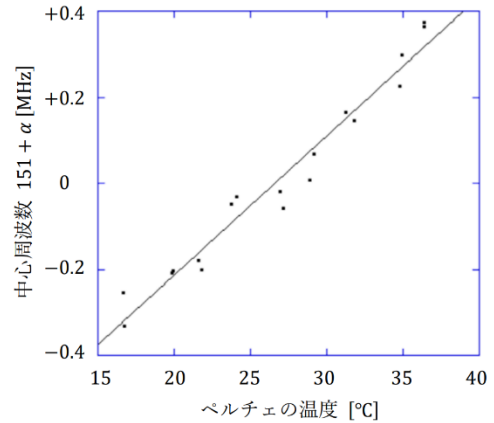


図7 温度変化によるビート周波数変化

近似直線から, ビート周波数変化は 32349 Hz/°C となり, 0.001 mrad の角度精度を実現するためには 0.08 °C の温度安定化が必要であることが分かった.

### 3-5. 2次元掃引

1次元の測角では, ある直線上に相手衛星がいなければ捕捉することができない. そこで AOM を 2台垂直に設置し, 2次元掃引を行った.

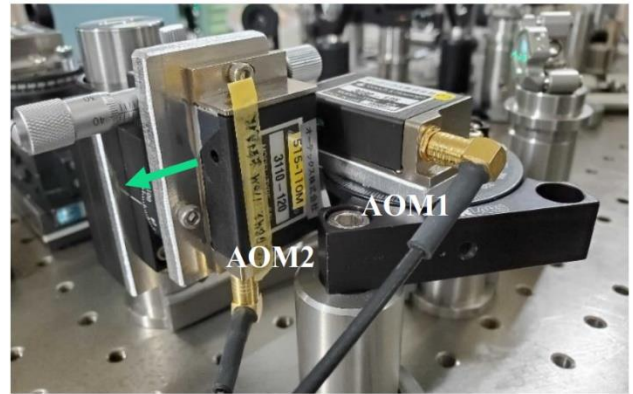


図8 2次元掃引のために設置した2台の AOM

AOM1 で水平(x)方向, AOM2 で垂直(y)方向にそれぞれビームを掃引することができる.

図3に示した測角システムのまま AOM を 1台追加しただけでは, 1方向の角度情報しか乗っていないため, 位置決定のためには2度の掃引が必要となってしまいます. そこでローカルパス中にもう1台 AOM を追加することで, 2方向の周波数情を

乗せられるようにした。

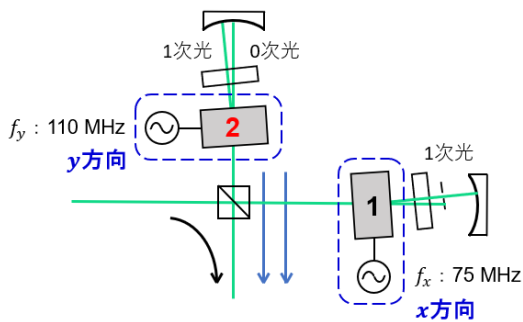


図9 2次元掃引でのローカルパス

これにより1度の掃引での位置決定が可能となった。

2次元掃引では印加するRF信号の周期やタイミングによって、任意の形にビームを掃引することができる。原理実証として、Step型とSpiral型を設定し、測定を行った。1次元掃引の場合と同じく、ビーム強度がPDとビームの距離を与え、最大となる点がPD(相手衛星)の位置である。2次元掃引では縦軸、横軸をそれぞれの方向のビート周波数とし、ビーム強度を色で表す。

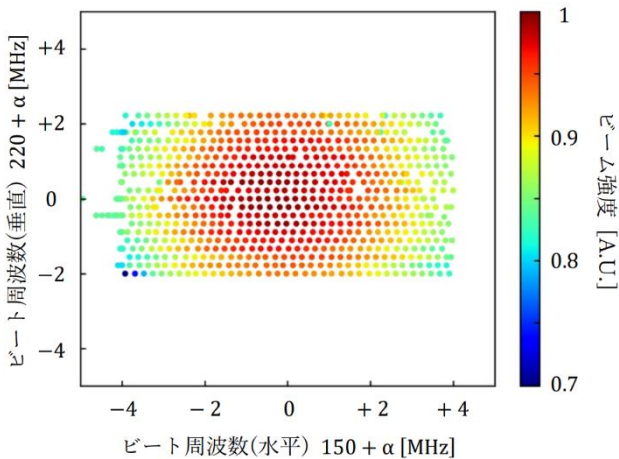


図10 Step型の測定結果

Step型は確実である反面、位置決定に時間がかかりすぎてしまった。Spiral型については、必ずしもビームがPDの中心位置を通るとは限らないため、位置決定方法を工夫し測定を行った。ビームが理想的に円形であれば、PDから等距離にある点ではビーム強度が等しくなる。そこでビーム強度の等しい3点の外心を求めることで位置決定を行った。

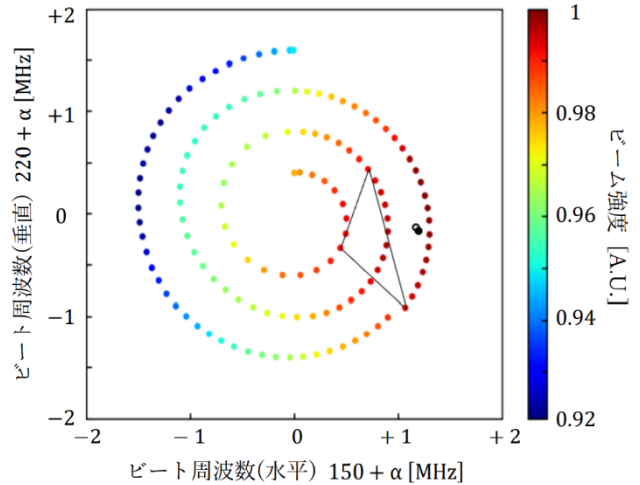


図11 Spiral型の測定結果

Step型, Spiral型の位置決定の誤差はそれぞれ0.02 mrad, 0.0021 mradとなった。

#### 4. まとめと展望

本研究室で考案された音響光学素子を用いた測角システムの小型化、受光系の再設計、測角精度の再評価を行った。確度:0.0035 mrad, 精度:0.017 mradとなり、ともに以前の値よりも向上した。今後TAMA300など外乱が少ない環境での測定を行いたい。またエキスパンダーを用いた掃引角度の調節システムを考案した。本研究では掃引角度を半分にした測定のみを行ったが、ズームレンズなどの組合せレンズを用いることで、掃引角度を自由に調節することを目指す。本研究で2次元掃引の考案、実測を行った。掃引方法、位置決定方法など改善点、考慮すべき点は多々あり、より効率よく早い位置決定に向けて取り組む予定である。

#### 参考文献

- [1] 安東正樹 “重力波とはなにか「時空のさざなみ」が拓く新たな宇宙論” 講談社, Sep. 14, 2016
- [2] DECIGO HP <https://decigo.jp/index.html>
- [3] AA OPTO-ELECTRONIC “Acousto-optic 音響光学”
- [4] 赤見恵 “音響光学偏向子を用いた人工衛星位置決定システム” 電気通信大学, Mar. 7, 2019