

TAO/MIMIZUKUに向けた 冷却チョッパの開発

道藤 翼

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻修士2年

宮田隆志, 上塚貴史, 酒向重行, 大澤亮, 浅野健太郎, 橘健吾, 飯田熙一, 左近樹（東京大学）,

軸屋一郎, 近藤智也（金沢大学）, 本田充彦（岡山理科大学）

@第10回可視赤外線観測装置ワークショップ

2021.12.09 11:10-11:40 am

目次

- ・ 導入
 - 地上中間赤外線観測について
 - チョッピング
- ・ 装置について
 - 装置概要
 - 制御方法
 - 要求仕様
- ・ 実験概要
- ・ 実験結果とまとめ
- ・ 今後について

地上中間赤外線観測(3~30um)

地上中間赤外線観測では、大気の熱放射が支配的
この除去が天体観測には必須



チョッピング：望遠鏡の視野を交互に切り替える方法

Chop間の画像を差し引きすることで星の像が見える



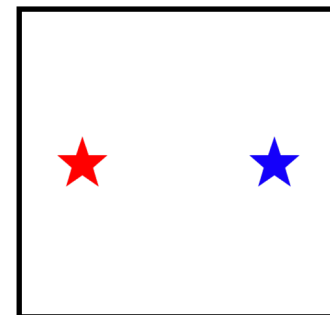
Chop Aの画像

—

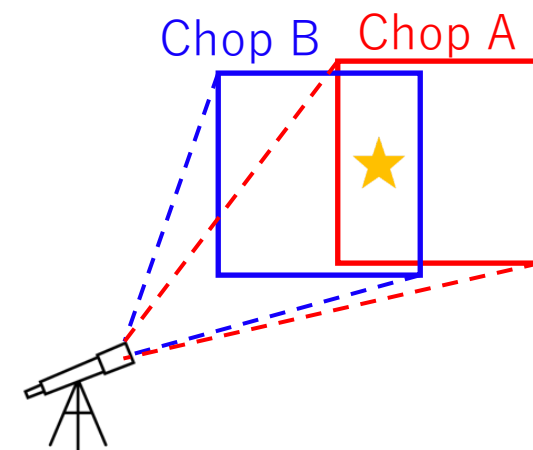


Chop Bの画像

=



Chop A - Chop B の画像



観測地の大気変動タイムスケールより速い周波数で振りたい

副鏡チョッピング（従来）

使用例：すばる望遠鏡/COMICS

望遠鏡の副鏡を振って視野を切り替える

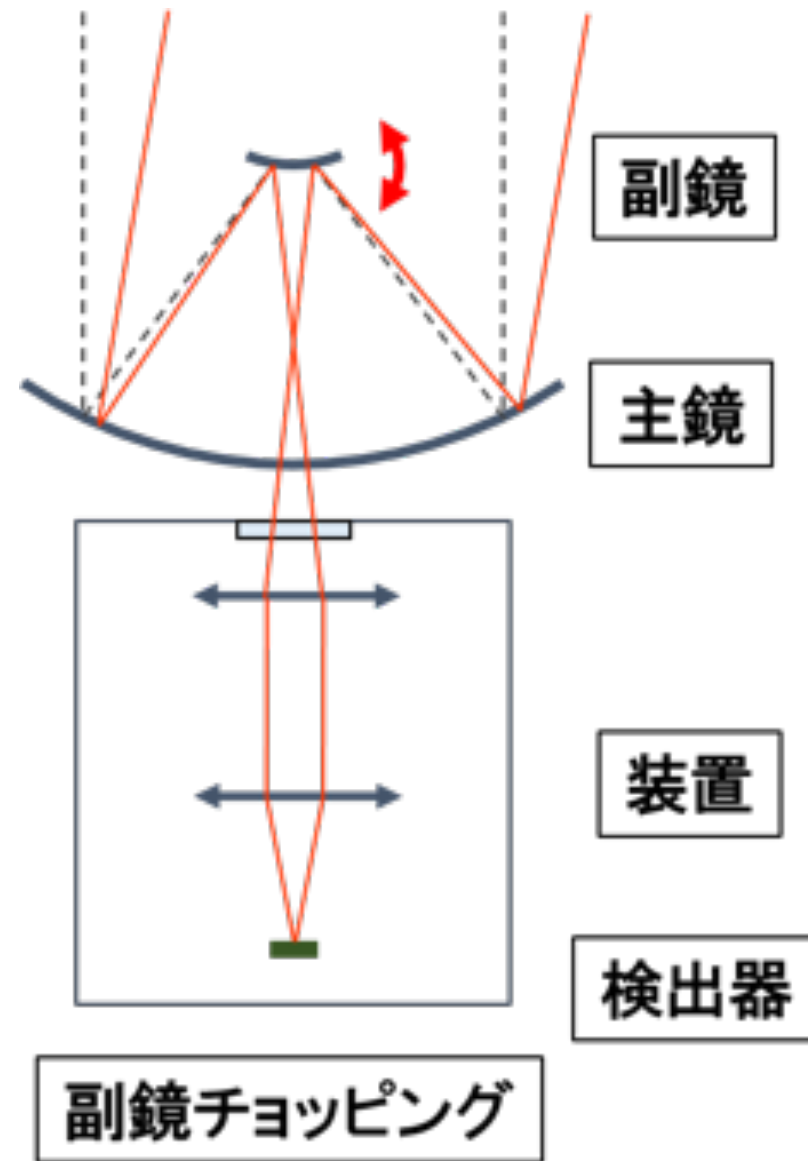
次世代の大型望遠鏡の大きな副鏡では高速な切り替えが困難

すばる望遠鏡/COMICS



※現在COMICSは運用停止

©NAOJ



冷却チョッピング（今回）

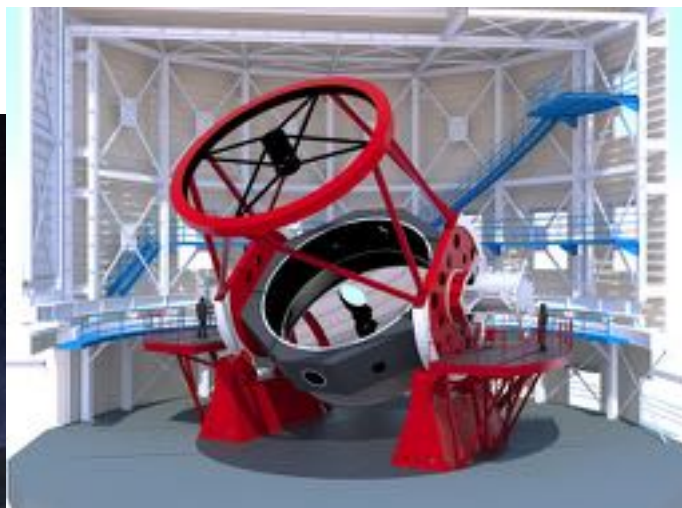
装置内に**冷却鏡**を置き、それを高速に振って視野を切り替える

**チリ/アタカマに建設中のTAO望遠鏡の
中間赤外線観測装置MIMIZUKU**に今回は開発
TMT/MICHIでも活躍も期待される

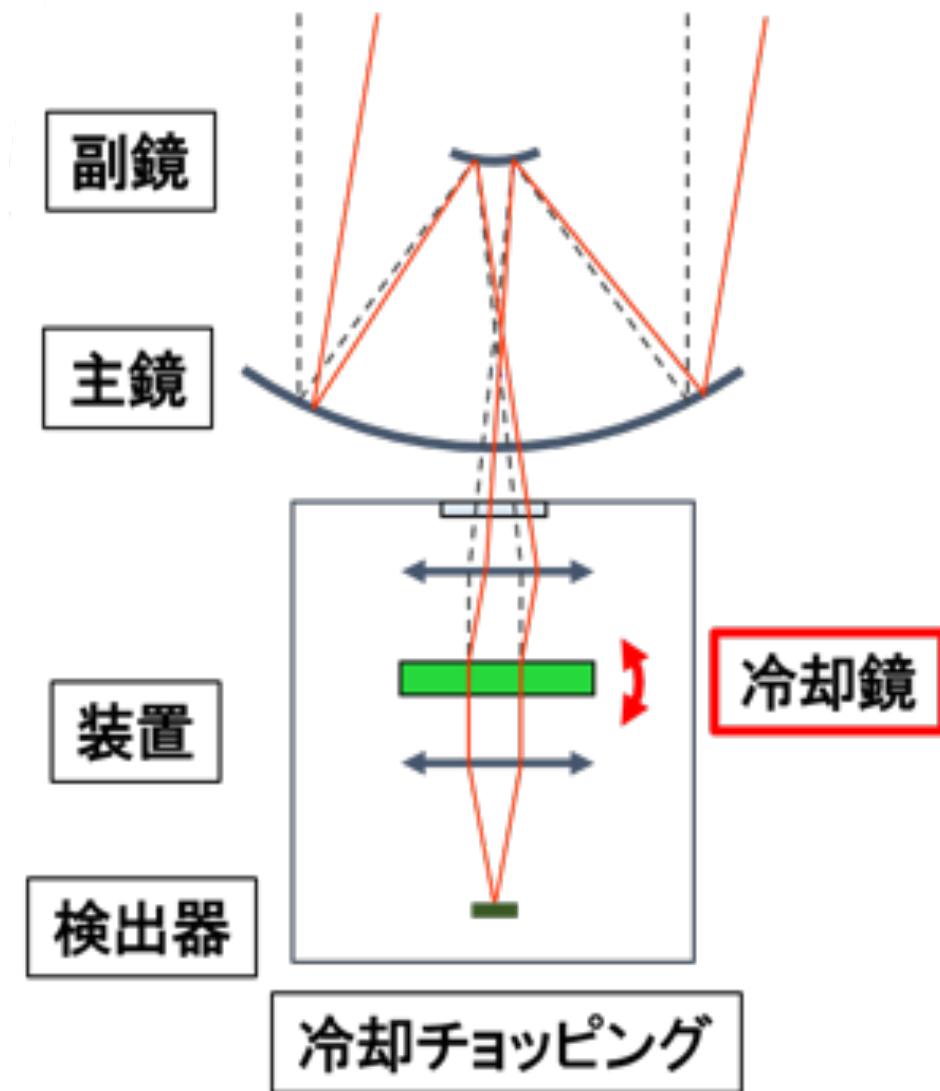
TMT/MICHI



©NAOJ



TAO/MIMIZUKU



目次

✓ 導入

地上中間赤外線観測について
チョッピング

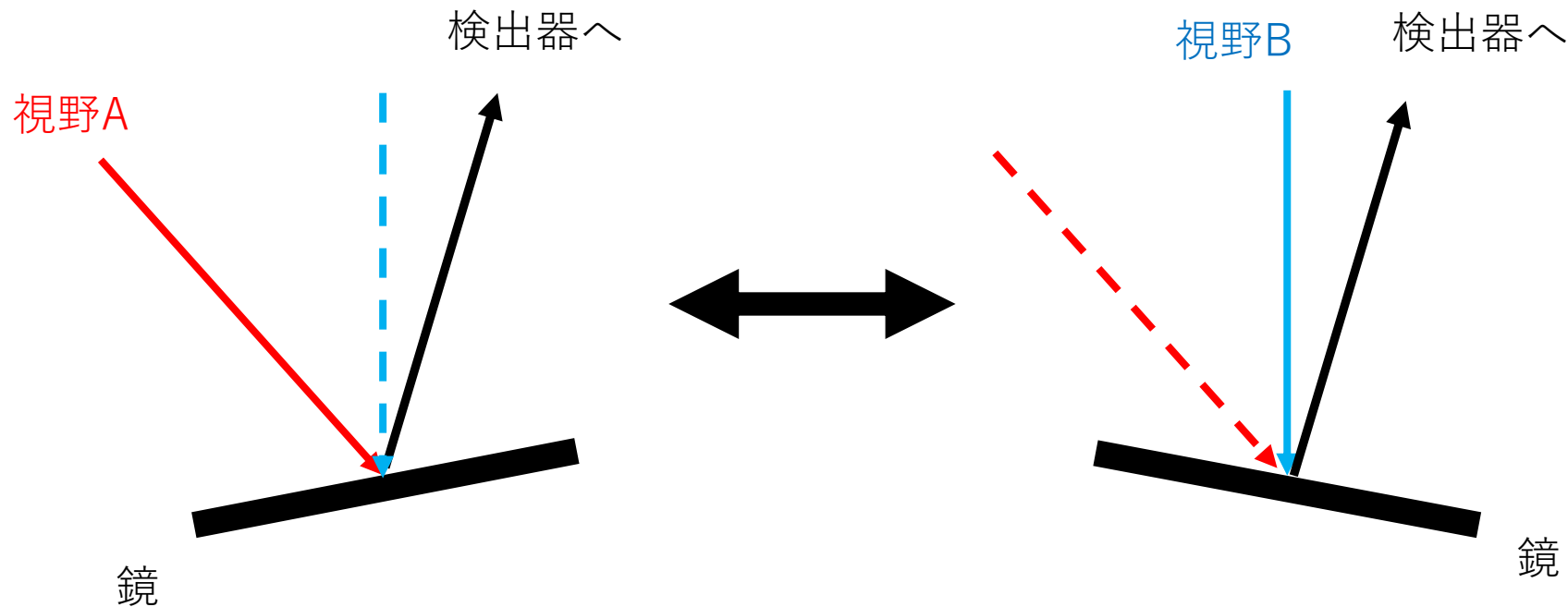
- 装置について
装置概要
制御方法
要求仕様

- 実験概要
- 実験結果とまとめ
- 今後について

装置概要

- MIMIZUKUは**反射光学系**（広い波長範囲に対応するため）
→ **可動反射鏡**を光路に入れ、それを傾けてチョッピング

MIMIZUKU光学系



装置概要

ギャップセンサー

コイル

反射光

入射光

ねじりばね

磁石

駆動部上面の鏡で光を反射する。この鏡を傾けてチョッピングを行う。
土台のコイルに流れる電流による磁場と駆動部の磁石の引力・斥力で駆動
回転軸のねじりばねとの釣り合いで静定
ギャップセンサーにより駆動部までの距離を電圧値として計測→角度に換算

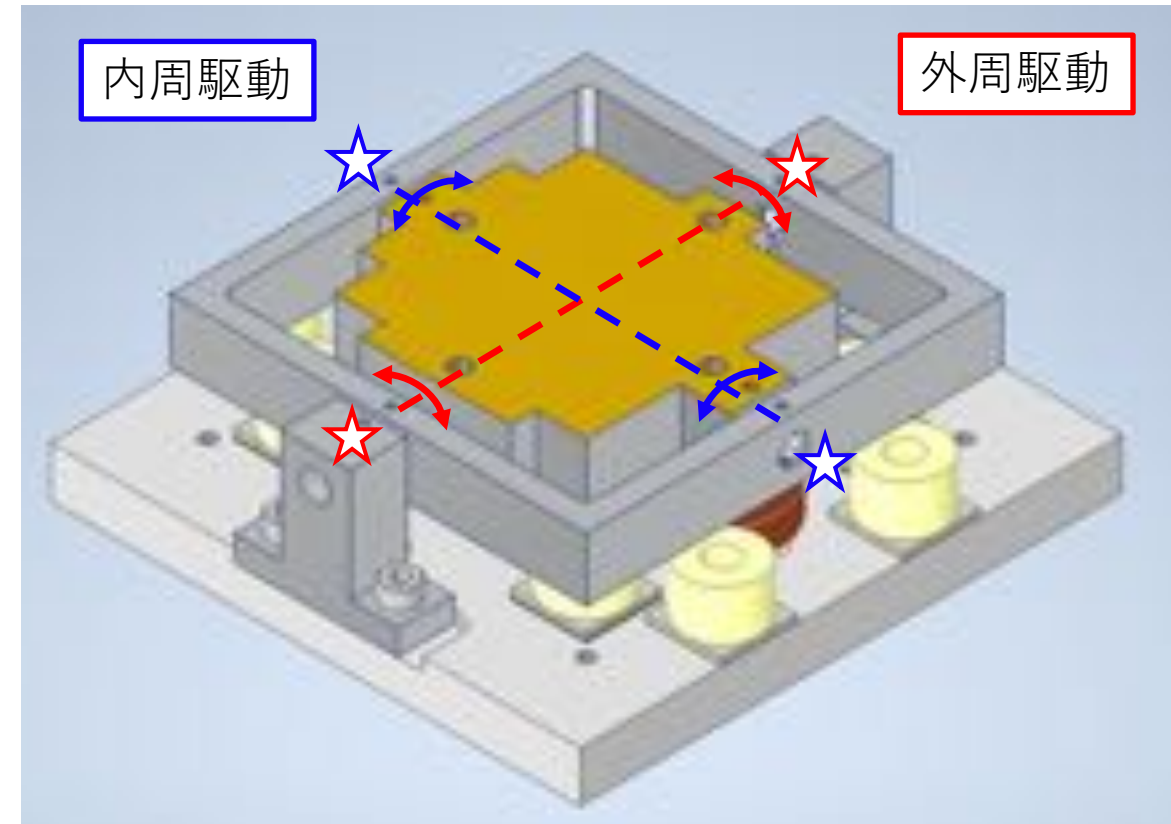
装置概要

1軸駆動

1組のコイルと磁石で駆動
外側の枠ごと鏡を動かす外周駆動と
内側の鏡のみ動かす内周駆動の2通り

2軸駆動

2組のコイルと磁石で駆動
= 内周と外周を同時に駆動

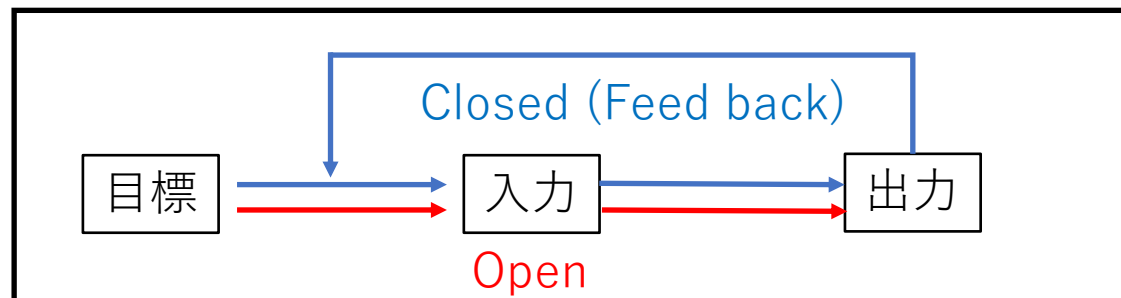


制御方法

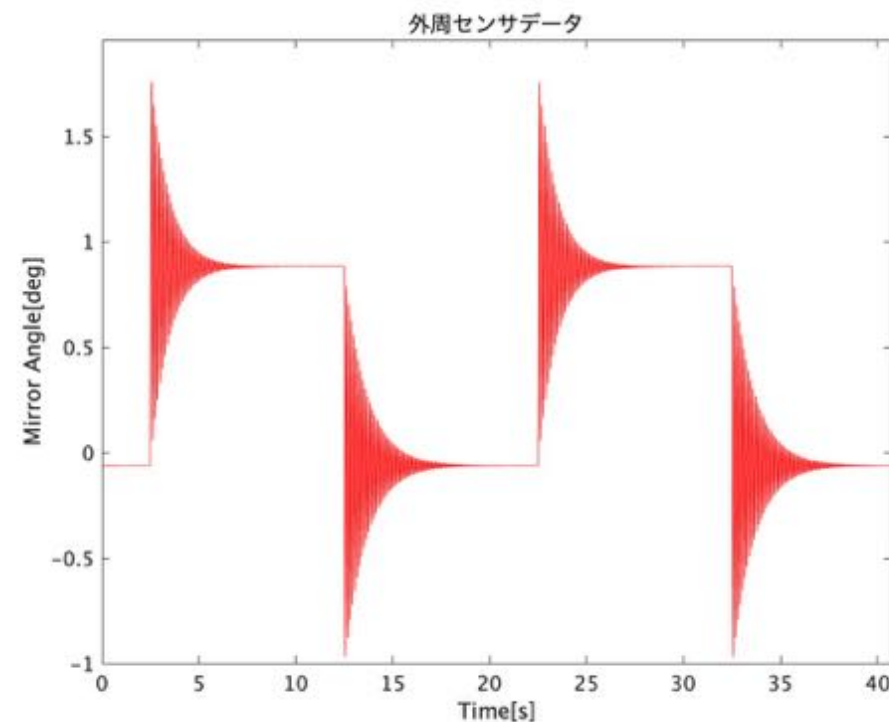
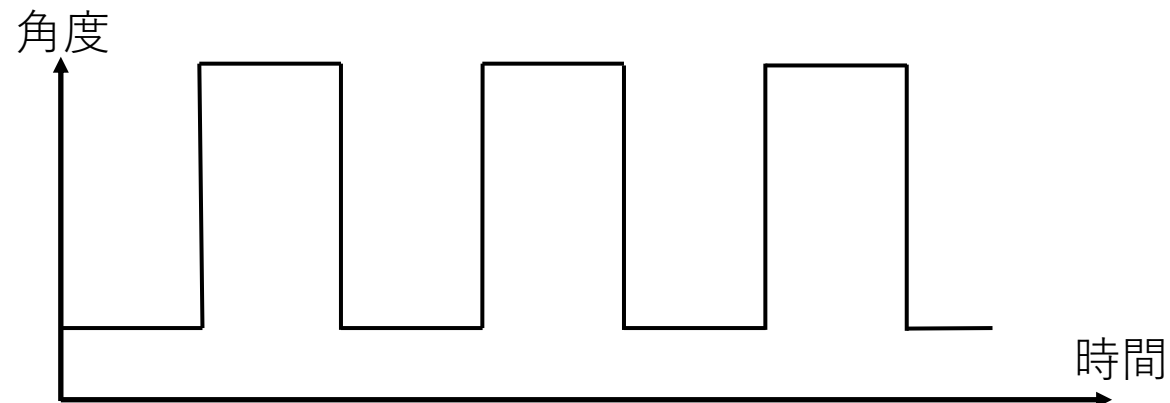
理想的なチョッピングの波形：右上図

この通りに電流を流しても、右下図のようにしばらく振動してから静定する

この振動からわかる 3つのパラメータ
①ゲイン ②固有周波数 ③減衰率
を用いて**フィードバック制御**を行い、
速い静定時間と高い安定性を目指す



※制御の簡易的なイメージ。（開発：金沢大軸屋研の方々）



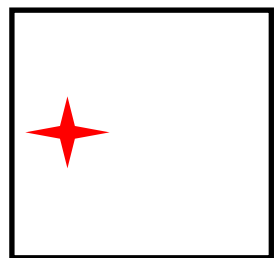
制御の目標

各項目の要求の理由

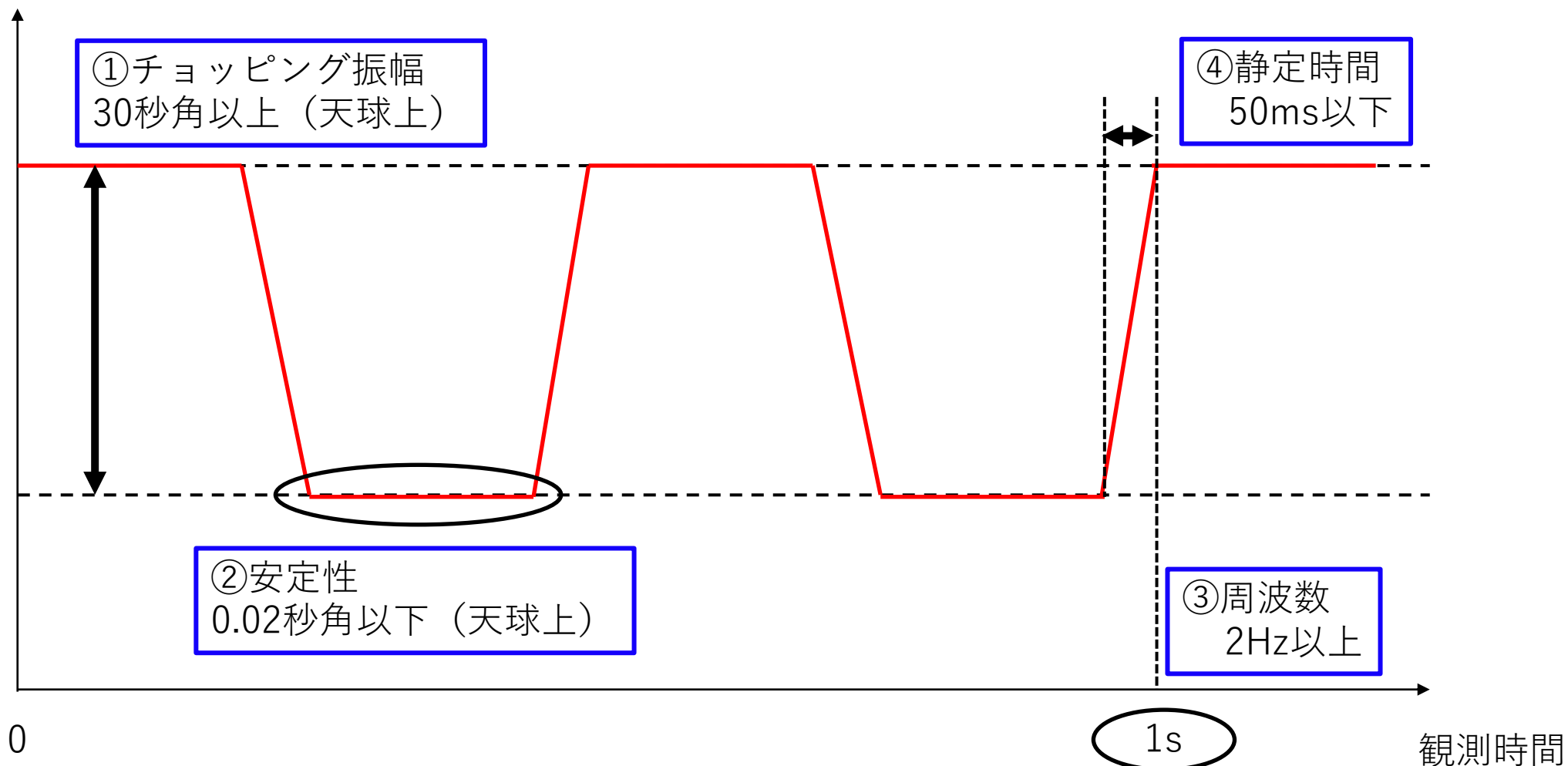
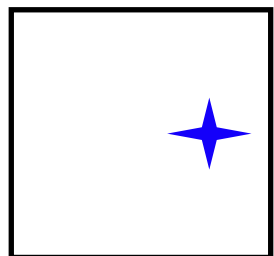
- ・ チョッピング振幅：観測経験に基づく十分量
- ・ 安定性：TAO/MIMIZUKUのPSFサイズより十分小さい値
- ・ 周波数：TAO siteの大気放射を精度良く減算できる周波数
- ・ 静定時間：2Hz 駆動時に全体の80%を観測に使える時間

撮像位置

位置A



位置B



要求仕様

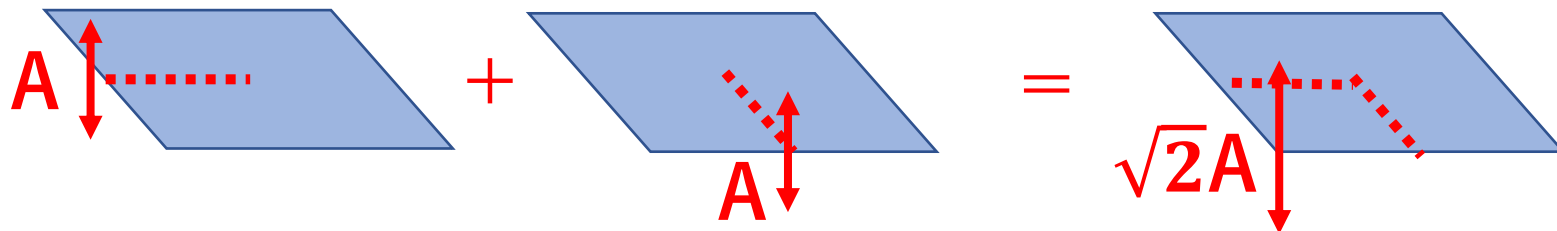
- 一軸駆動の場合の要求仕様

チョッピング振幅	静定精度 (rms)	チョッピング周波数	静定時間
$> \pm 0.42 \text{ deg}$	$< 6 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2 \text{ Hz}$	$< 50 \text{ ms}$

- 二軸駆動の場合の一軸に対する要求仕様

チョッピング振幅	静定精度 (rms)	チョッピング周波数	静定時間
$> \pm 0.30 \text{ deg}$	$< 4.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2 \text{ Hz}$	$< 50 \text{ ms}$

二軸駆動 = 内周と外周を同時に駆動



目次

✓ 導入

地上中間赤外線観測について
チョッピング

✓ 装置について

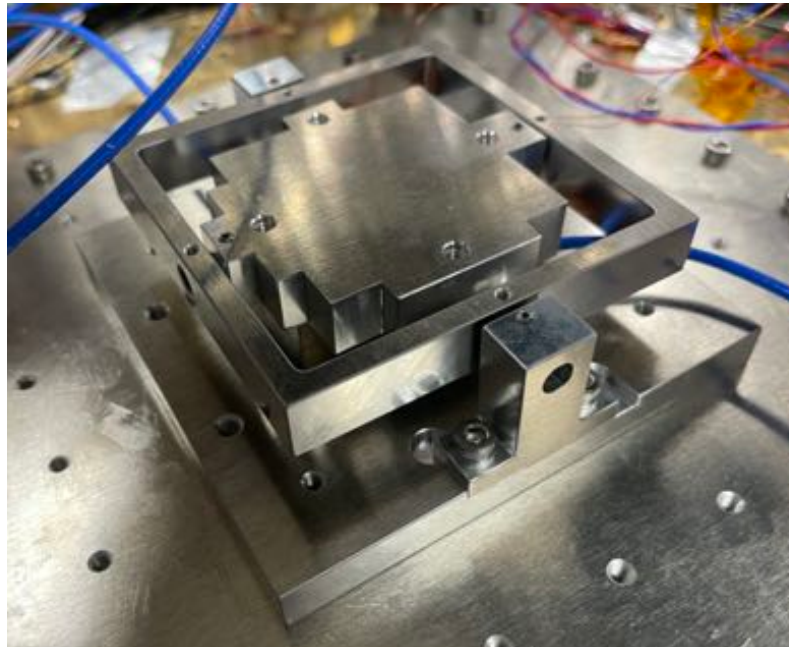
装置概要
制御方法
要求仕様

- 実験概要
- 実験結果とまとめ
- 今後について

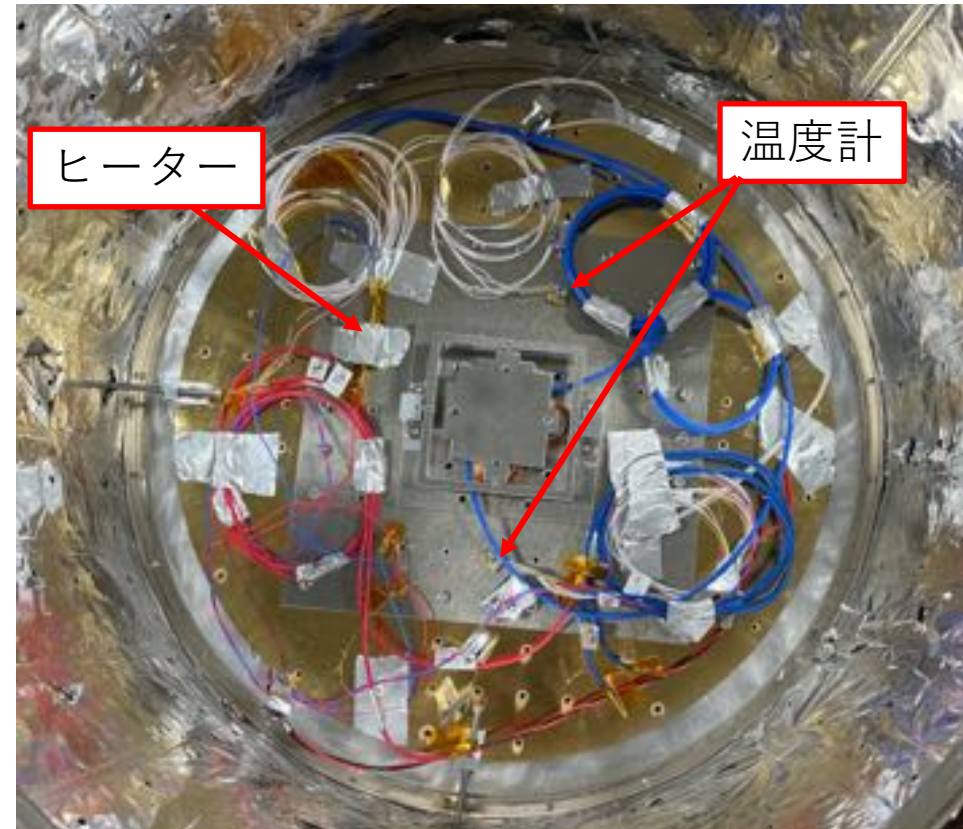
実験概要

まずは常温で実験をし、およそ20Kまで冷却して実験をする。

チョッパ本体組み立て後



インストール後中央部がチョッパ



実験概要

- 一軸駆動（内周、外周どちらかのみ駆動。常温/低温）
周波数：2 Hz
振幅：天球上でおよそ60秒角の設定
- 二軸駆動（内周、外周両方を上記と同様の設定で同時に駆動。常温/低温）
- 1時間耐久試験（二軸駆動、周波数 2 Hz、振幅は天球上60秒角。低温）
この際の発熱量も評価
- 昇温後再冷却した時の上記の同様の試験（低温）
- オートコリメータを用いたギャップセンサーの角度算出の正確性の調査
（常温/低温）

目次

✓導入

地上中間赤外線観測について
チョッピング

✓装置について

装置概要
制御方法
要求仕様

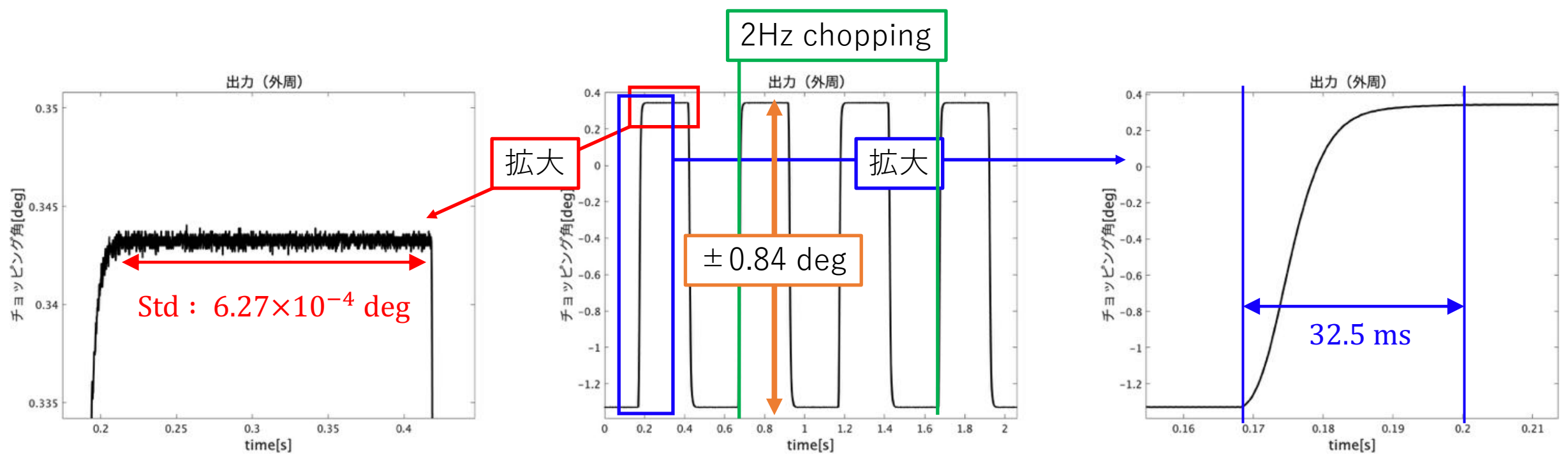
✓実験概要

- ・実験結果とまとめ
- ・今後について

実験結果

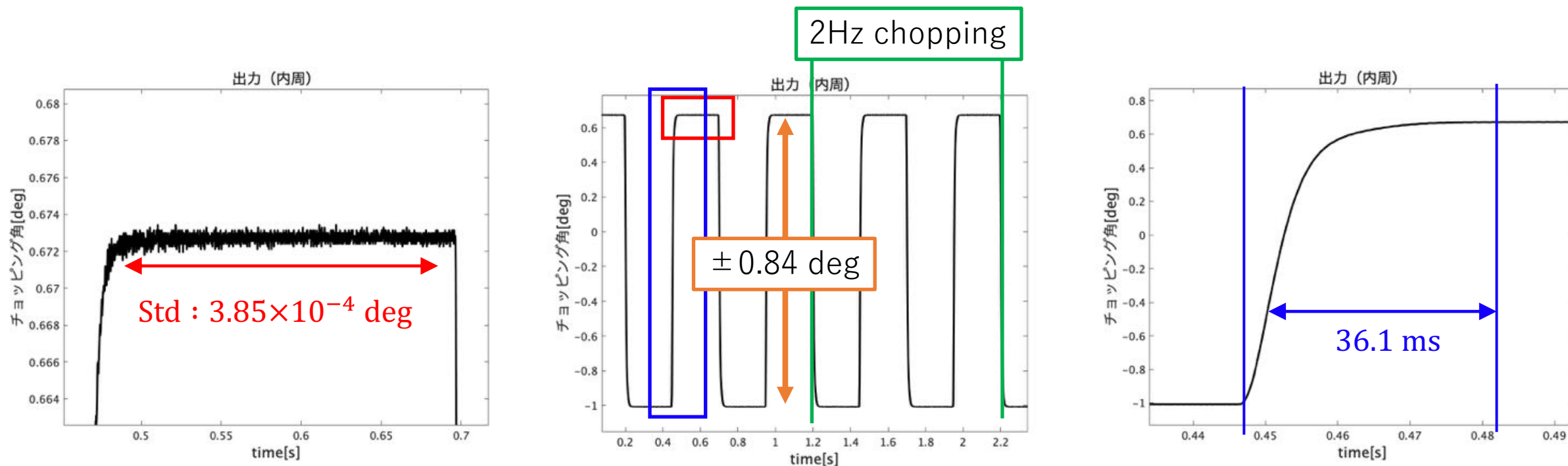
- 一軸駆動（内周、外周どちらかのみ駆動。常温/低温）
周波数：2 Hz
振幅：天球上およそ60秒角の設定
- 二軸駆動（内周、外周両方を上記と同様の設定で同時に駆動。常温/低温）
- 1時間耐久試験（二軸駆動、周波数2 Hz、振幅は天球上60秒角。低温）
この際の発熱量も評価
- 昇温後再冷却した時の上記の同様の試験（低温）
- オートコリメータを用いたギャップセンサーの角度算出の正確性の調査（常温/低温）

常温外周一軸駆動(2Hz/60")



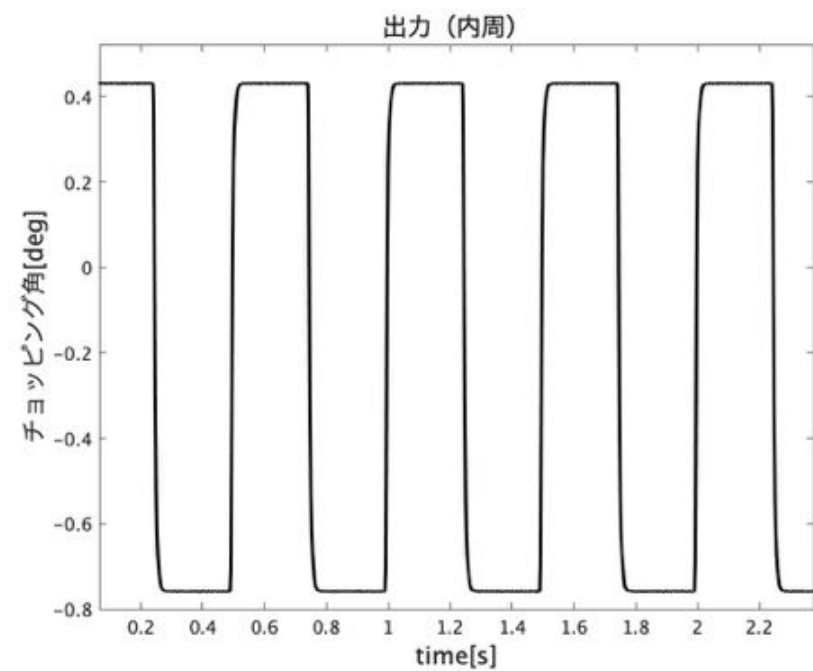
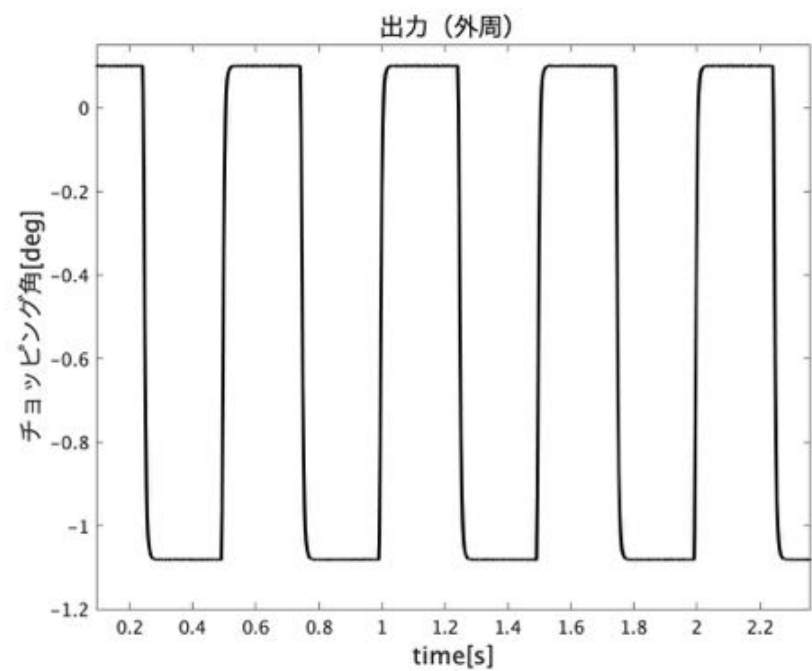
	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.42 \text{ deg}$	$< 6 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2 \text{ Hz}$	$< 50 \text{ ms}$
結果	$\pm 0.84 \text{ deg}$	$6.27 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	32.5 ms
解釈	◎ (～60"達成)	△	○	○

常温内周一軸駆動(2Hz/60")



	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.42$ deg	$< 6 \times 10^{-4}$ deg	> 2 Hz	< 50 ms
結果	± 0.84 deg	3.85×10^{-4} deg	2 Hz	36.1 ms
解釈	◎ ($\sim 60''$ 達成)	○	○	○

常温二軸駆動(2Hz/60")



	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.30 \text{ deg}$	$< 4.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2\text{Hz}$	$< 50\text{ms}$
外周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$3.74 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	34.9 ms
内周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$3.85 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	35.0 ms
解釈	◎ (～60"達成)	○	○	○

※二軸振幅 = $\sqrt{(\text{外周の振幅})^2 + (\text{内周の振幅})^2} = 0.84 \text{ deg}$ で計算。

常温試験結果まとめ

- 外周、内周、二軸全てにおいて
天球上60”の十分な振幅を得ることができた
安定性もおおよそ要求をクリア
最低限の周波数として2Hzでの駆動が可能
50msを切る静定時間を達成し、2Hz駆動時全体の80%の時間を観測にあてれるようになる

と**全ての要求精度を達成**

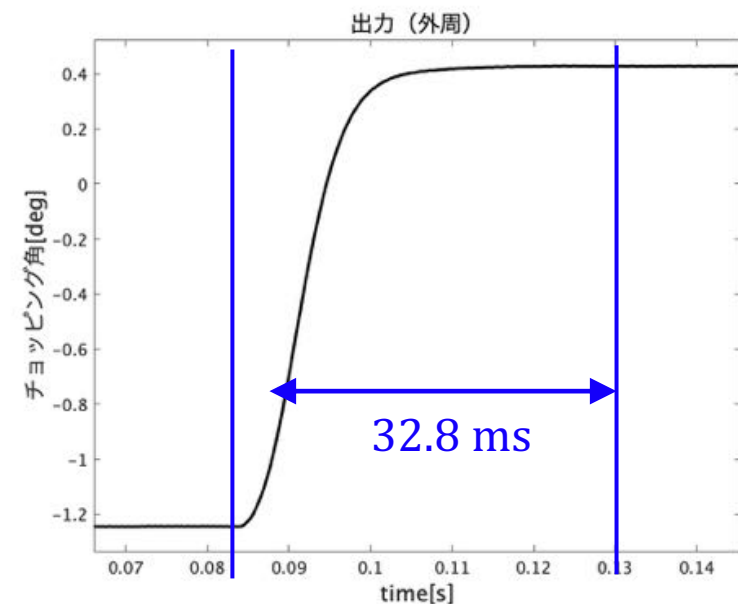
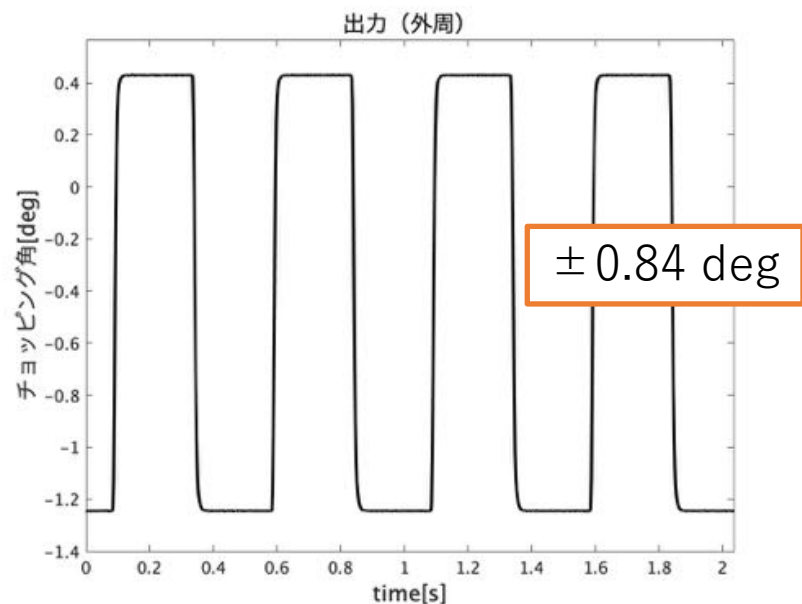
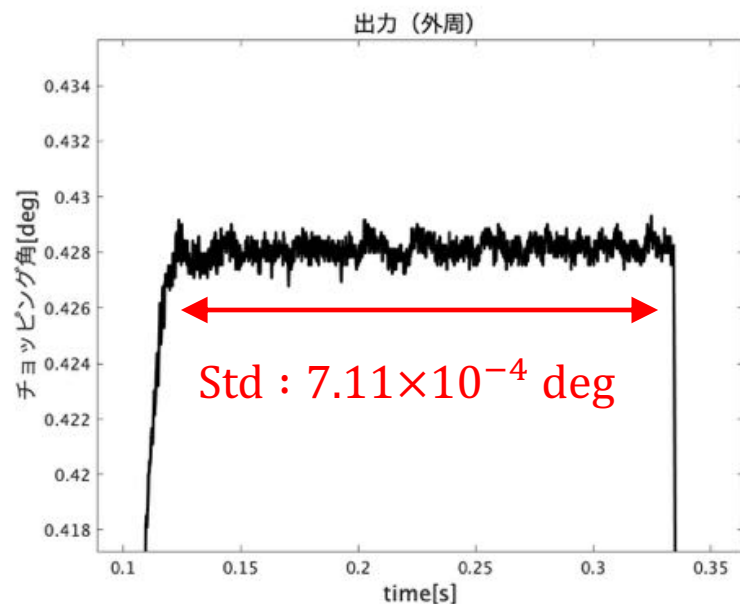
- 低温試験に進む

実験結果

- 一軸駆動（内周、外周どちらかのみ駆動。常温/低温）
周波数：2 Hz
振幅：天球上でおよそ60秒角の設定
- 二軸駆動（内周、外周両方を上記と同様の設定で同時に駆動。常温/低温）
- 1時間耐久試験（二軸駆動、周波数 2 Hz、振幅は天球上60秒角。低温）
この際の発熱量も評価
- 昇温後再冷却した時の上記の同様の試験（低温）
- オートコリメータを用いたギャップセンサーの角度算出の正確性の調査
（常温/低温）

低温外周一軸駆動(2Hz/60")

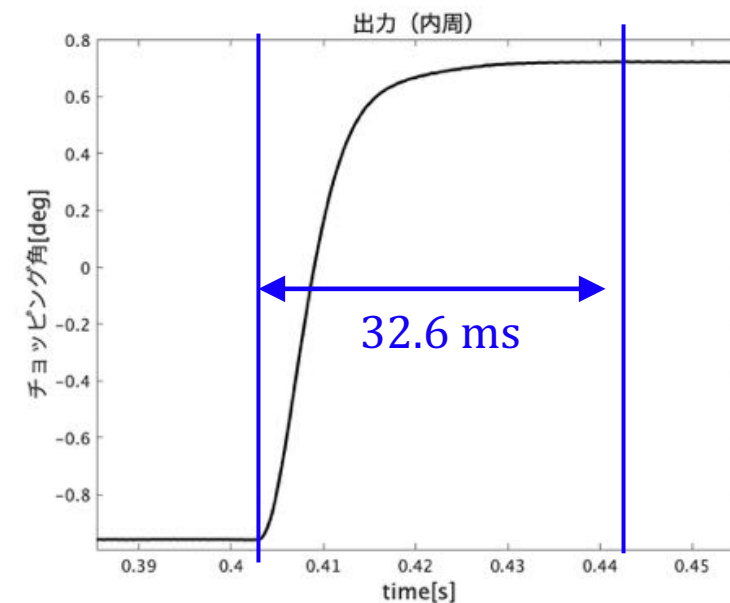
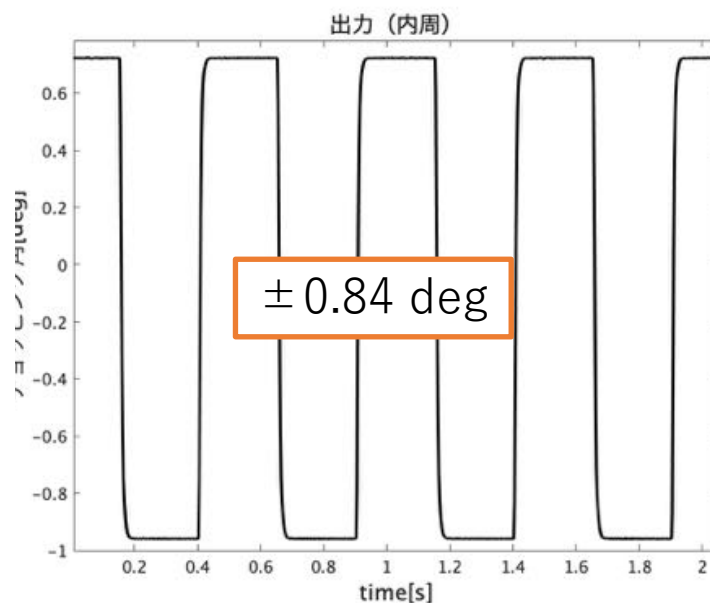
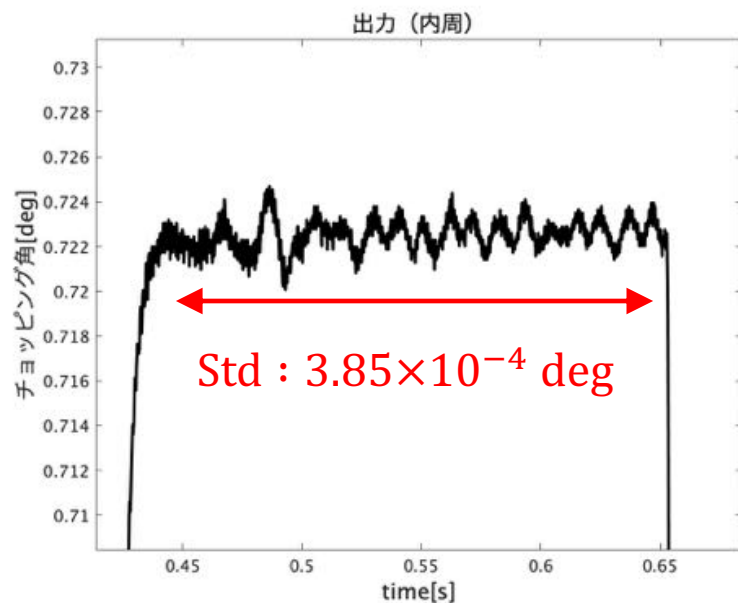
2Hz chopping



	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.42$ deg	$< 6 \times 10^{-4}$ deg	> 2 Hz	< 50 ms
結果	± 0.84 deg	7.11×10^{-4} deg	2 Hz	32.8 ms
解釈	◎ ($\sim 60''$ 達成)	×	○	○

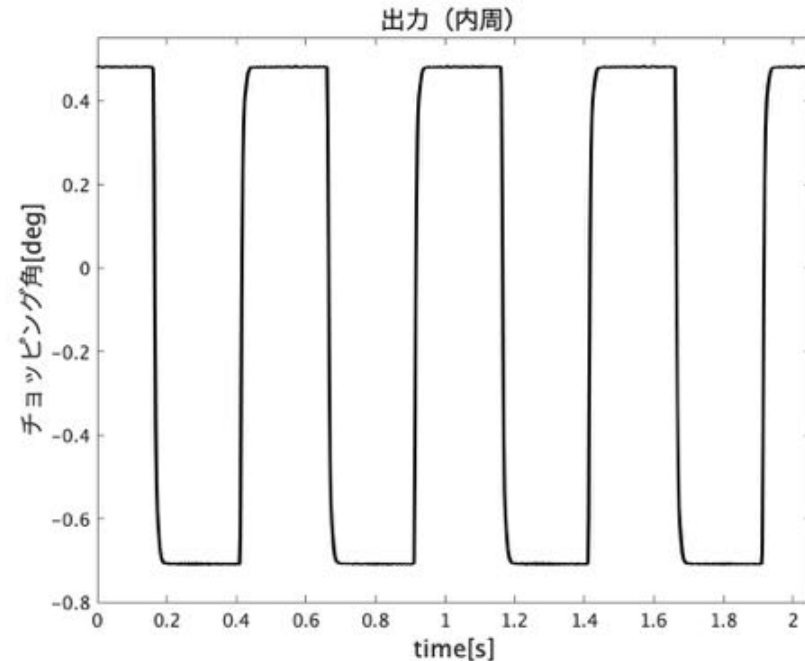
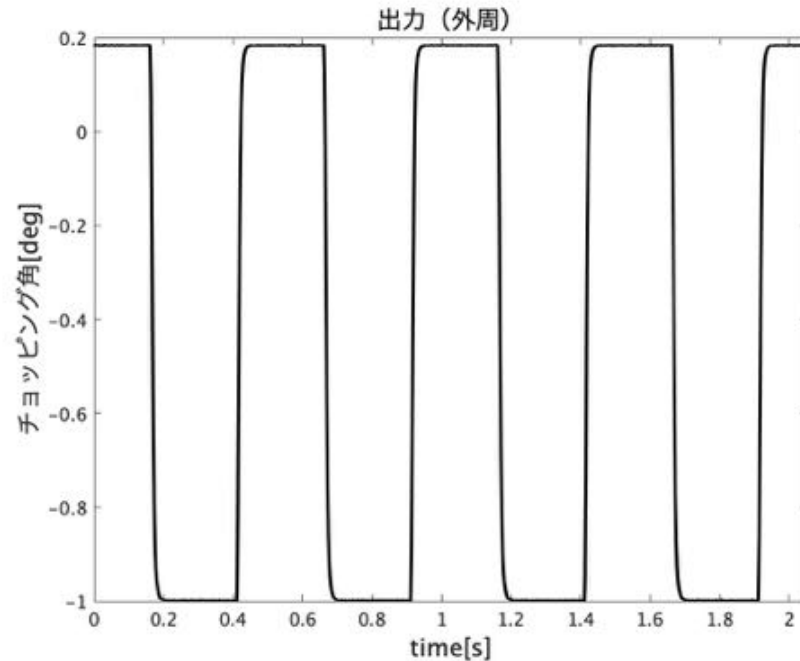
低温内周一軸駆動(2Hz/60")

2Hz chopping



	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.42$ deg	$< 6 \times 10^{-4}$ deg	> 2 Hz	< 50 ms
結果	± 0.84 deg	8.85×10^{-4} deg	2 Hz	32.6 ms
解釈	◎ ($\sim 60''$ 達成)	×	○	○

低温二軸駆動(2Hz/60")



	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.30 \text{ deg}$	$< 4.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2\text{Hz}$	$< 50\text{ms}$
外周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$4.83 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	35.3 ms
内周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$10.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	39.7 ms
解釈	◎ (～60"達成)	×	○	○

低温試験結果まとめ

- 外周、内周、二軸全てにおいて
天球上60”の十分な振幅を得ることができた
最低限の周波数として2Hzでの駆動が可能
50msを切る静定時間を達成し、2Hz駆動時80%の時間を観測にあてる
ことが可能に

と安定性以外の要求精度を達成

- 安定性に関して、特にInnerにおいてランダムとは思えないノイズ成分
→ 冷凍機による振動か？

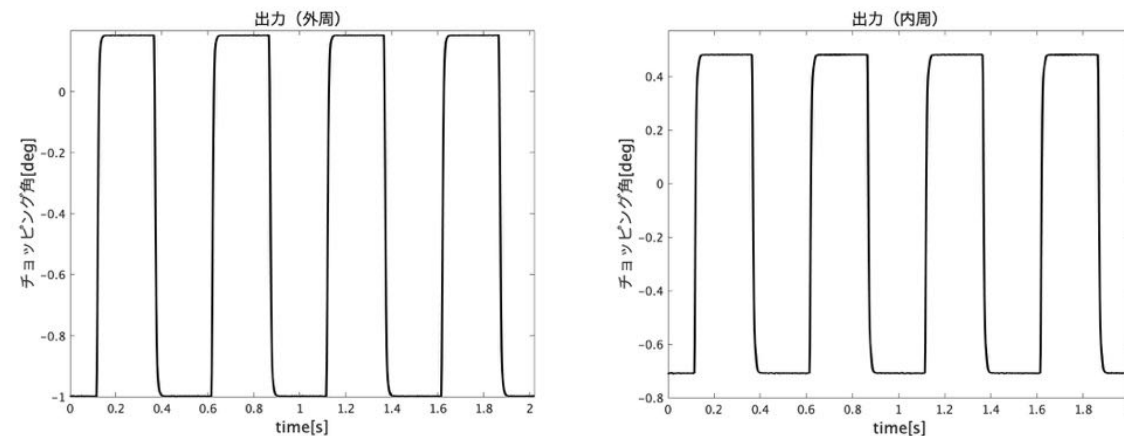
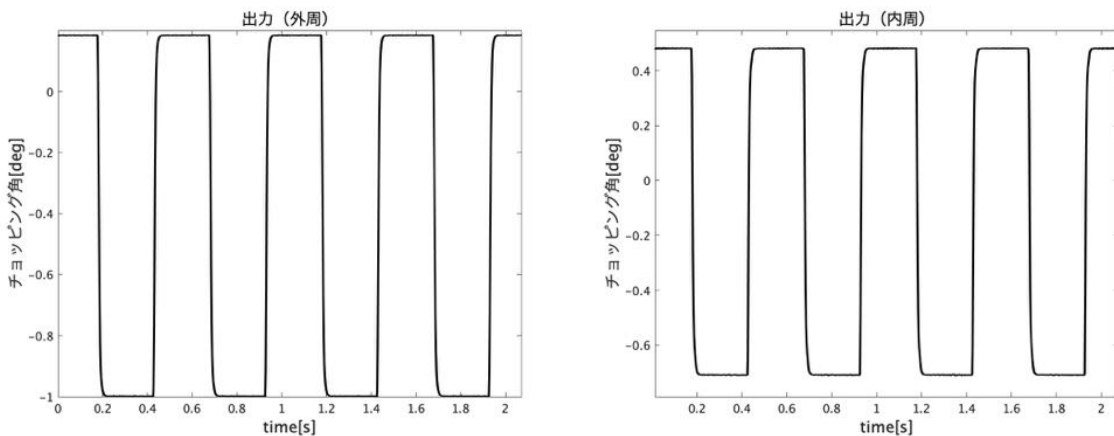
実験結果

- ✓ 一軸駆動（内周、外周どちらかのみ駆動。常温/低温）
周波数：2 Hz
振幅：天球上でおよそ60秒角の設定
- ✓ 二軸駆動（内周、外周両方を上記と同様の設定で同時に駆動。常温/低温）
- 1時間耐久試験（二軸駆動、周波数 2 Hz、振幅は天球上60秒角。低温）
この際の発熱量も評価
- 昇温後再冷却した時の上記の同様の試験（常温）
- オートコリメータを用いたギャップセンサーの角度算出の再現性の評価（常温/低温）

1時間耐久試験(2Hz/60"/低温)

開始直後

1時間後



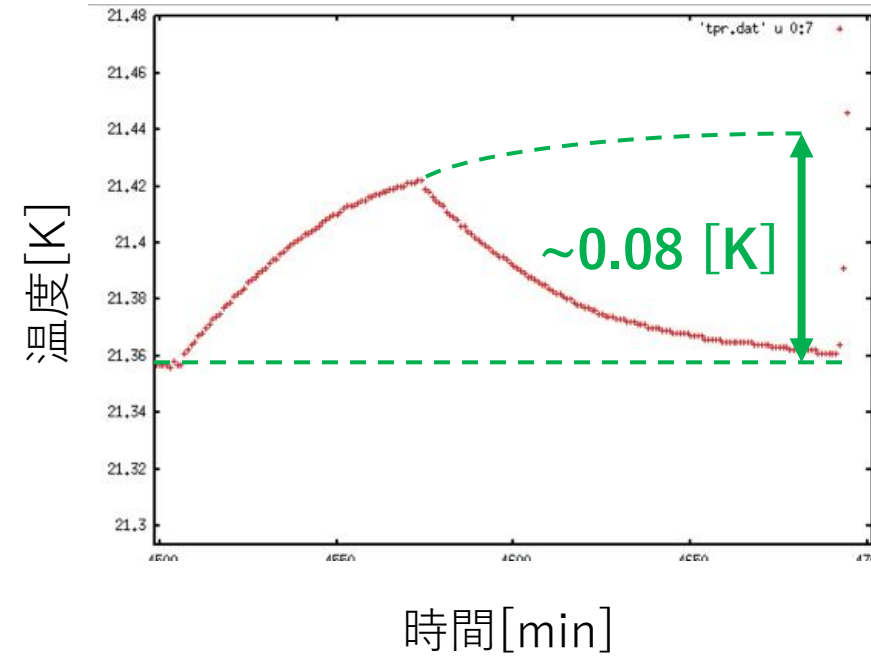
	チョッピング 振幅	静定精度 (STD)	チョッピング 周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.30 \text{ deg}$	$< 4.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2 \text{ Hz}$	$< 50 \text{ ms}$
外周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$4.89 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	33.7 ms
内周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$7.94 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	39.7 ms
解釈	◎ (~60"達成)	×	○	○

	チョッピング 振幅	静定精度 (STD)	チョッピング 周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.30 \text{ deg}$	$< 4.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2 \text{ Hz}$	$< 50 \text{ ms}$
外周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$5.13 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	35.1 ms
内周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$7.70 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	35.2 ms
解釈	◎ (~60"達成)	×	○	○

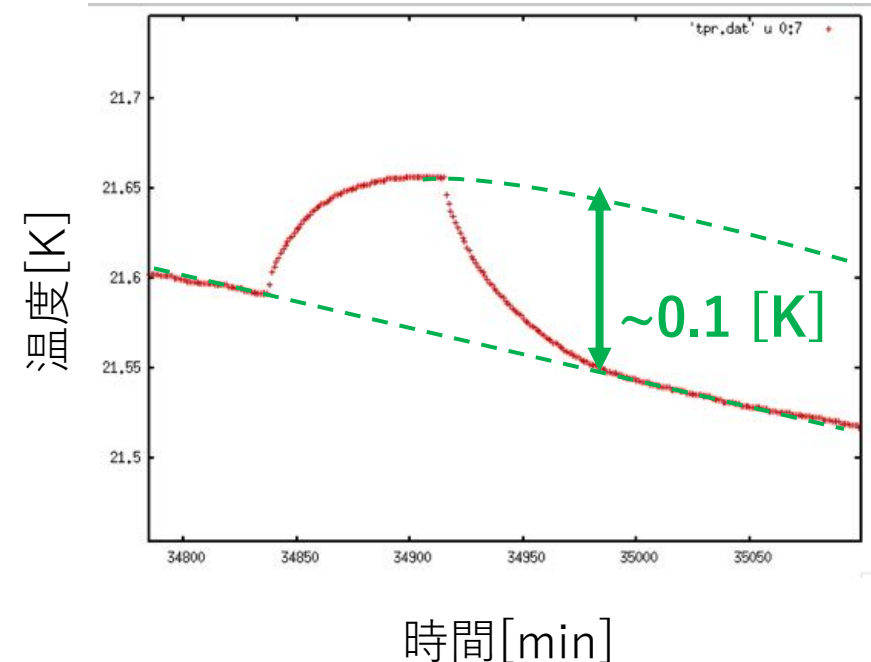
概ね性能は維持されており、長時間の駆動にも耐えられることを確認

1時間耐久試験発熱量評価

右上図：1時間耐久試験時のデュワー内温度変化
およそ**0.08 [K]**の**温度上昇**を確認



右下図：**5mW**の発熱をするヒーターを焚いた時の
温度変化を示したもの。
およそ**0.1 [K]**の**温度上昇**を確認



発熱と温度変化が線形だと仮定すると、
チョッパーの2Hz/60"二軸駆動時の発熱量は

$$\text{およそ } 0.08 \text{ K} \times \frac{5}{0.1} \text{ mW/K} \sim 4 \text{ mW}$$

1時間耐久試験まとめ

- 2軸駆動 2Hz/天球上60”振幅の設定で1時間耐久試験を行った
振幅：終始60”を維持
安定性：悪化は確認できなかった
周波数：2 Hzを維持
静定時間：30 ~ 40 ms を維持
1時間動かし続けても**同じ性能を維持し続ける**ことができる
- **発熱量**について、**およそ4mW**と推定
チョッパーが置かれる光学ベンチに流入する熱量~8Wより十分小さく、
これによる影響は無視できる

実験結果まとめ

- 常温/低温ともに**ほぼ全ての要求を達成**
- 低温時の安定性に関して、**冷凍機の振動が影響**し常温時より悪化している可能性（詳細は補足資料へ）
- 長時間駆動しても**性能を維持する耐久性**を実現
- **チョッピングによる発熱量**はMIMIZUKUの他のシステムによる発熱より十分小さく**大きな影響は出ない**と予想

（以下詳細は補足資料へ）

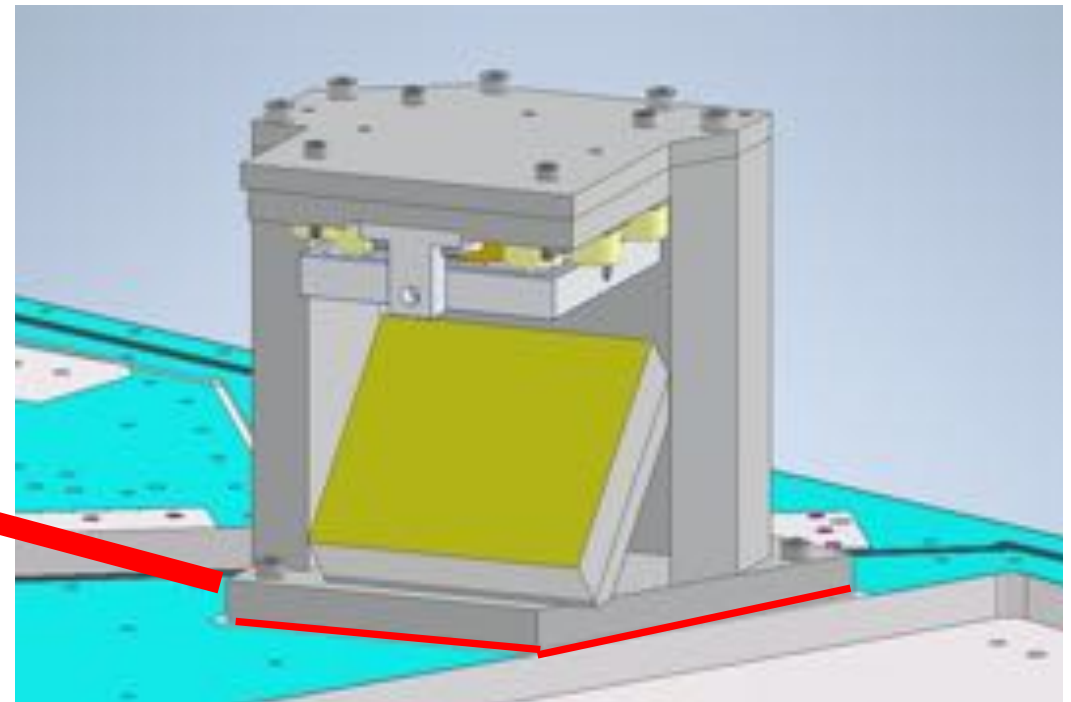
- 熱サイクルをかけてもチョッパーの動作の再現性は高い
- ギャップセンサーから算出した角度は概ね信じて良いが、細かな角度の値を議論する際は注意が必要

今後の展望

- チョッパーが概ね要求精度を満たしたことを確認
→MIMIZUKU搭載機の設計が現在大詰め、近々発注予定
- 本年度中に実際にMIMIZUKUに搭載し、試験を行うことを目標とする



MIMIZUKU光学系



搭載機予想図

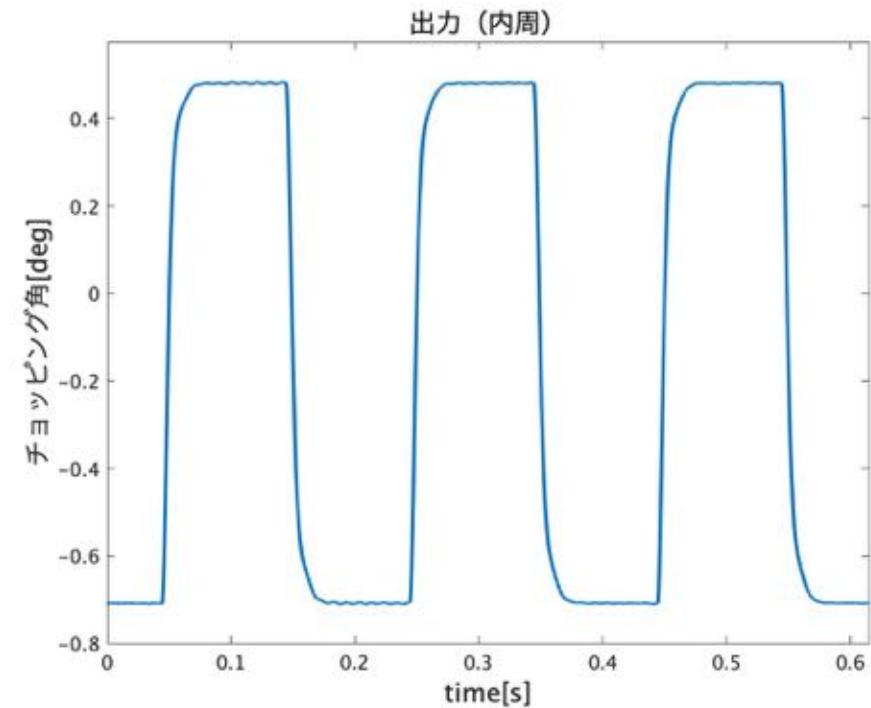
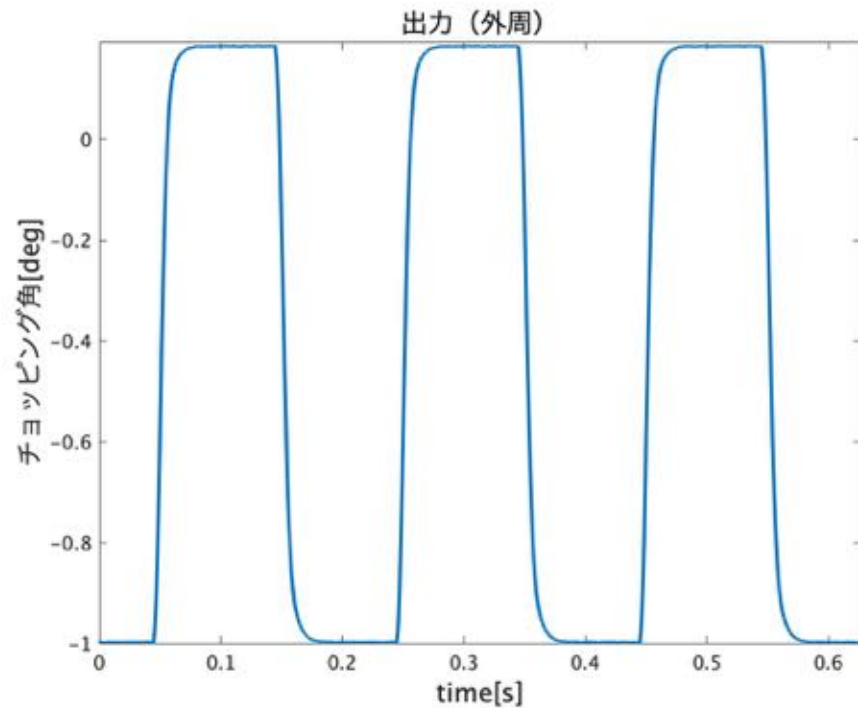
補足資料

- 要求仕様について
- 5Hz 駆動結果（2軸駆動のみ）
- 冷却駆動時の振動に関して
- 昇温後再冷却時の二軸駆動結果（2Hz/60”）
- ギャップセンサーを用いた角度算出方法
- オートコリメータを用いた角度算出とギャップセンサーとの比較
- 昨年の試作機との違い

要求仕様について

- チョッピング角の30秒角：過去の観測経験から。
(60秒角については木星のような大型天体の観測を想定)
- 安定性：PSF FWHMはシーイングと回折を加味し、最小0.5秒角
→ チョッピング起因の残存振動をガウシアンと仮定
→ 残存振動に起因するFWHMがPSFの一桁下になることを要求
→ $\sigma = \pm 0.02 \text{ arcsec}$
- 周波数：TAO siteの大気放射変動周波数スペクトルから。
- 静定時間：周波数2Hz → 往復0.5s → 1ステップ 0.25 s
80%観測に使いたいとすると、静定時間に使える時間は
 $0.25 \times 0.2 = 0.05 \text{ s} = 50 \text{ ms}$

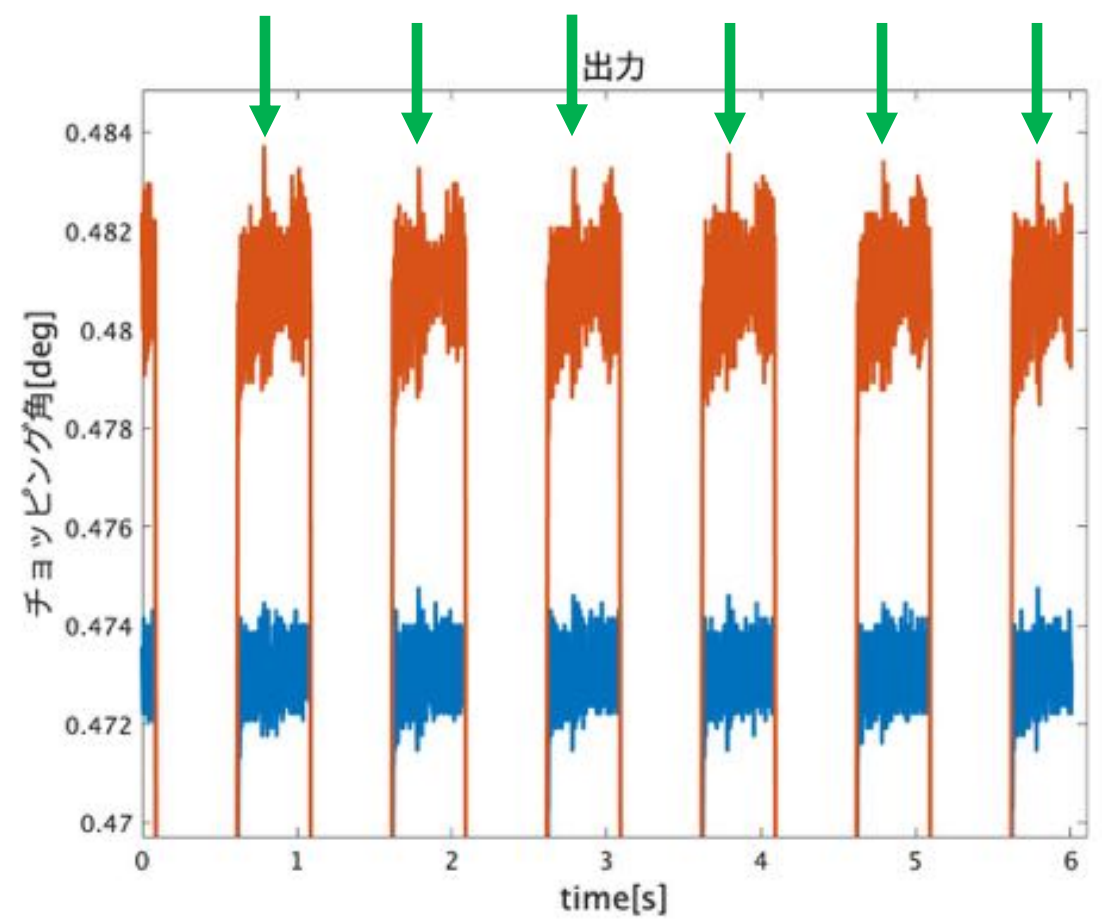
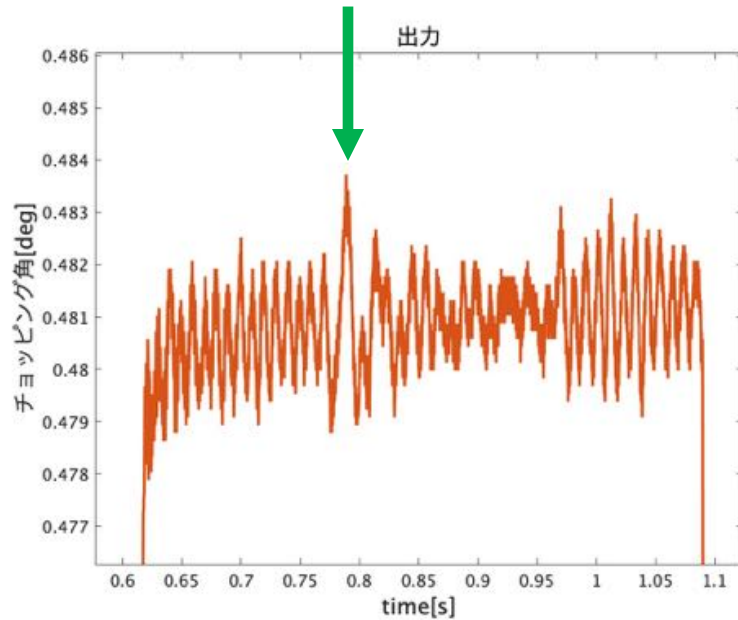
二軸駆動結果 (5Hz/60")



	チョッピング 振幅[deg]	安定性 (STD)[deg]	静定時間 [ms]
外周	± 0.59	6.2×10^{-4}	34.2
内周	± 0.59	13×10^{-4}	39.8

- 天球上で60秒角のチョッピング角達成
- 50ms以内の静定時間達成
- 5Hzチョッピング達成
(5Hzの場合静定時間50msだと50% duty cycle)
- 安定性は内周外周共にわずかに要求を満たさない

冷却駆動時の振動



- 画像は1Hzの時のデータ（青：外周、オレンジ：内周）
外周内周どちらも**1Hzの冷凍機の振動らしきもの**が確認できる

冷却駆動時の振動

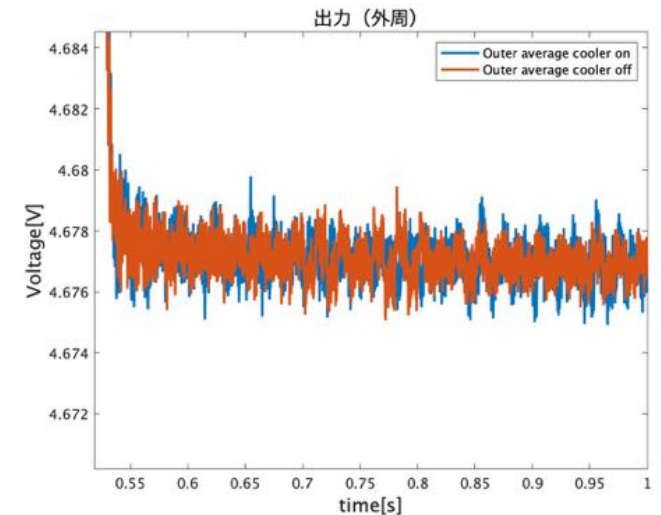
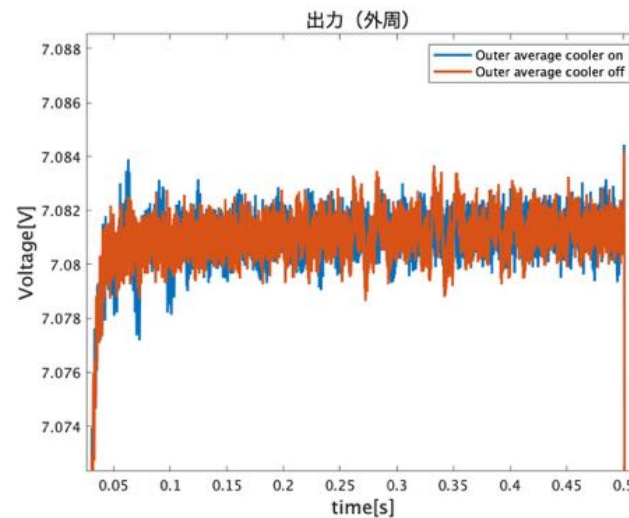
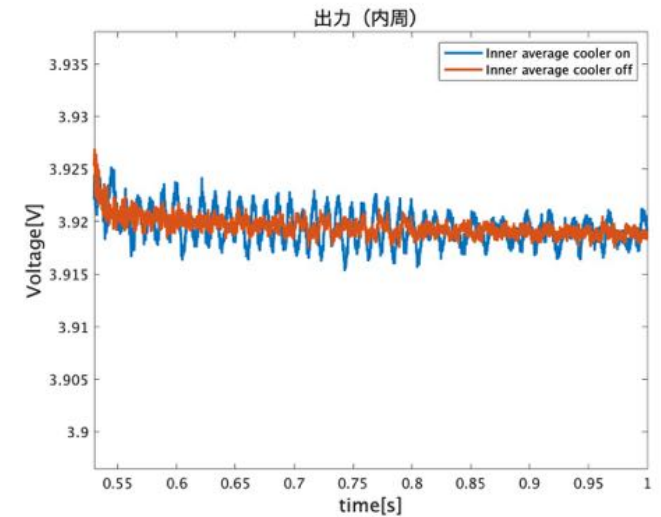
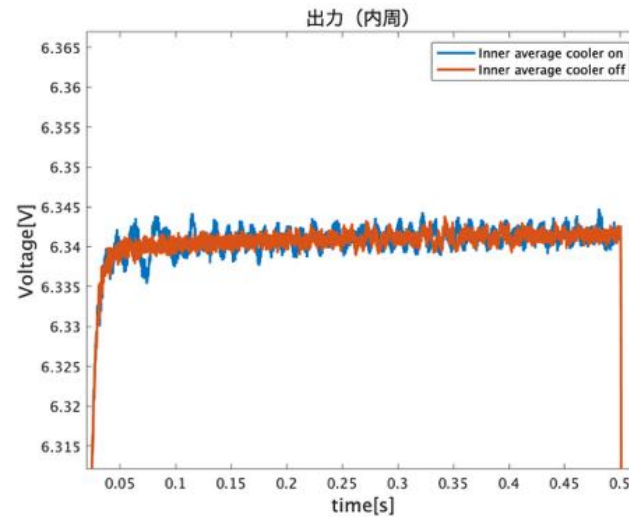
青：冷凍機オン時 (20K)

橙：冷凍機オフ時 (20K)

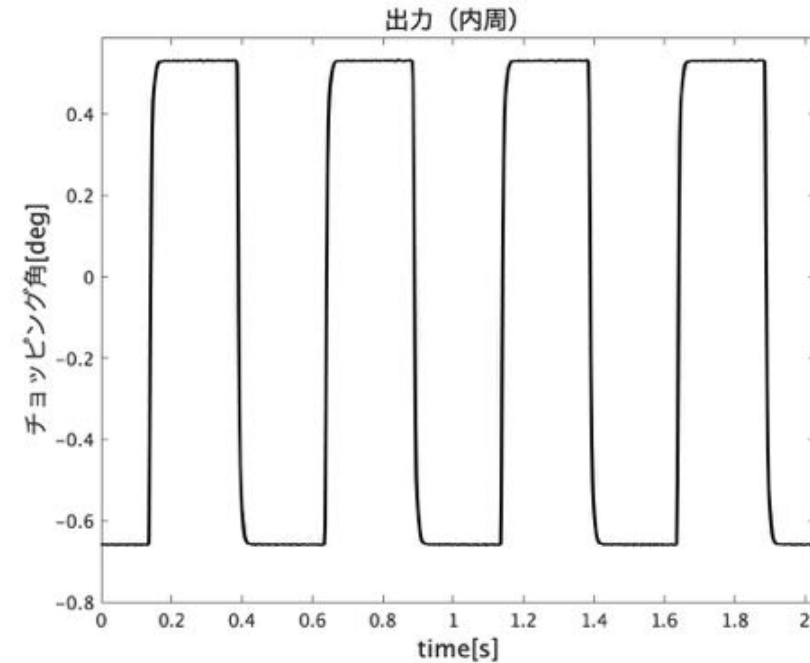
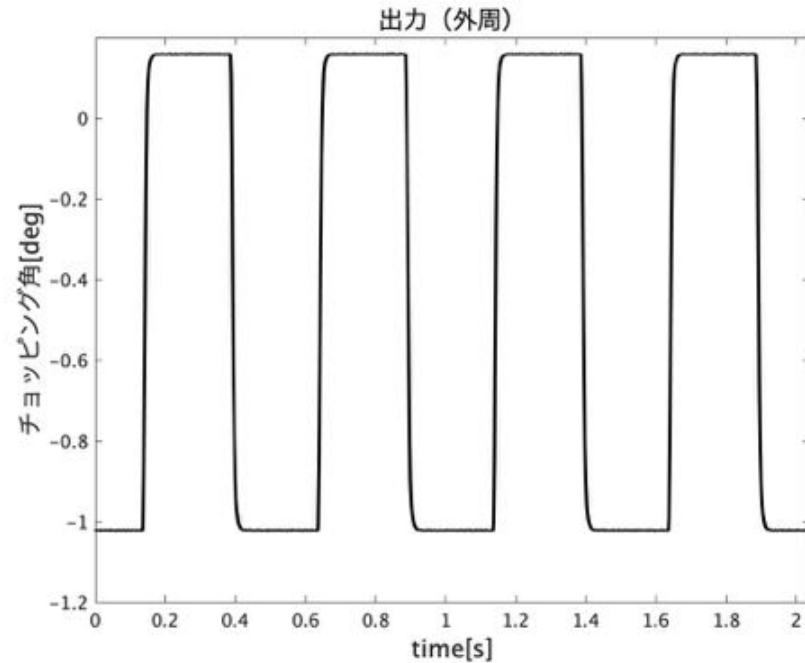
上がInner、下がOuter。

冷凍機オンオフ時の特性をみるため、平均波形を算出

Outerの方は違いはほとんどないが、Innerの方はかなり差が出ている。冷凍機オンオフ時のstdの差は2倍程度
→今回のデータの安定性の差をおおよそ説明できるか



再冷却後低温二軸駆動(2Hz/60")

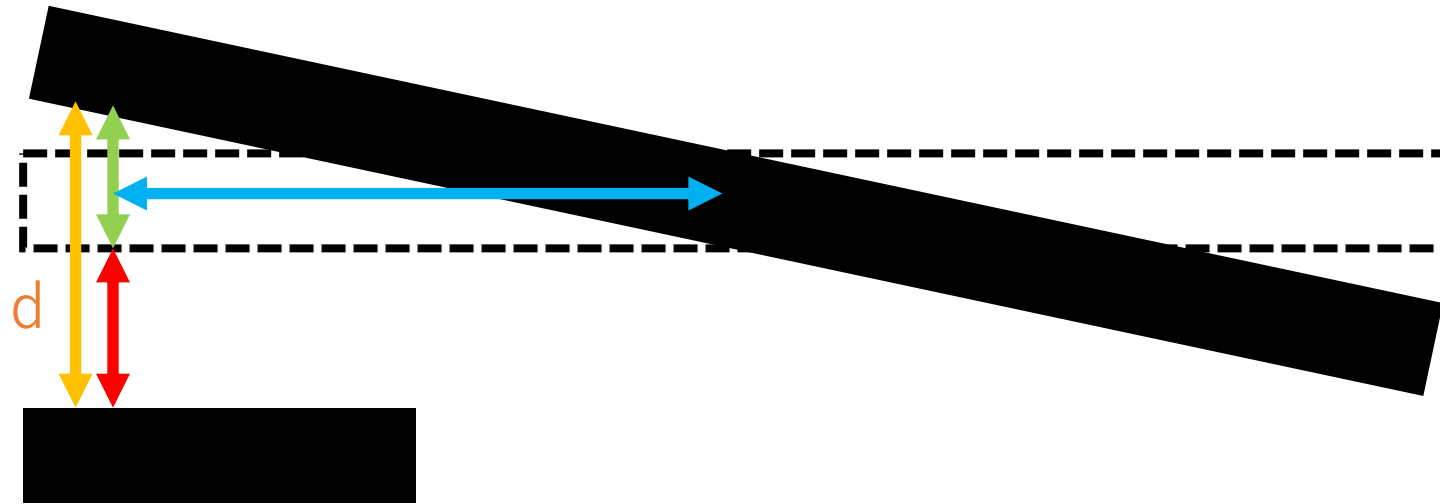


	チョッピング振幅	静定精度 (STD)	チョッピング周波数	静定時間
要求	$> \pm 0.30 \text{ deg}$	$< 4.2 \times 10^{-4} \text{ deg}$	$> 2 \text{ Hz}$	$< 50 \text{ ms}$
外周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$5.06 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	35.1 ms
内周	$\pm 0.59 \text{ deg}$	$7.87 \times 10^{-4} \text{ deg}$	2Hz	34.9 ms
解釈	◎ (～60"達成)	×	○	○

ギャップセンサー角度測定

<問題点>

平行板コンデンサー式のセンサー
なので、平行が保たれていない場合に
どの場所を測っているのかが不明

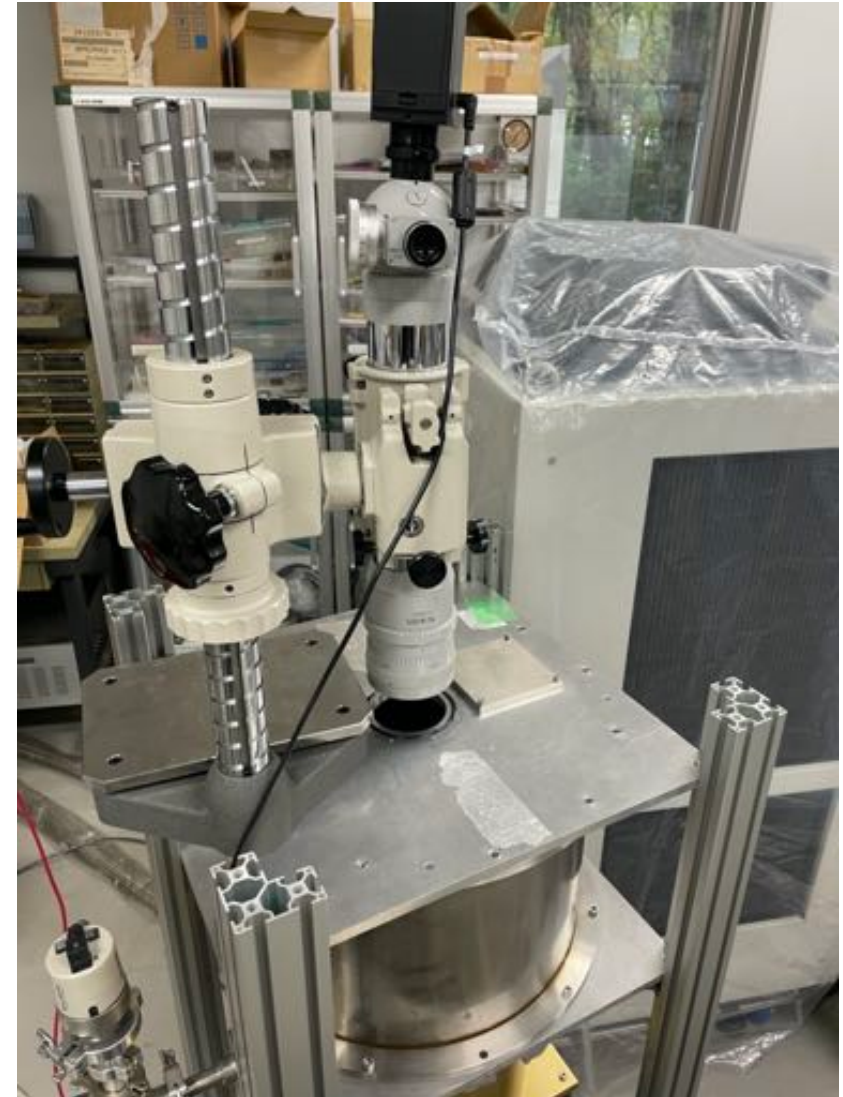


ギャップセンサーはオレンジの距離を電圧として計測：**d=0.12V [mm]**で距離に直せる
鏡とギャップセンサーの距離は並行値**0.6mm**なので、
変位距離は **0.12V - 0.6 [mm]**
鏡の中心部からギャップセンサーの円盤の中心部分は**14mm**の距離なので、変位角は

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{0.12V - 0.6}{14} \right) \times \frac{180}{\pi} [^{\circ}]$$

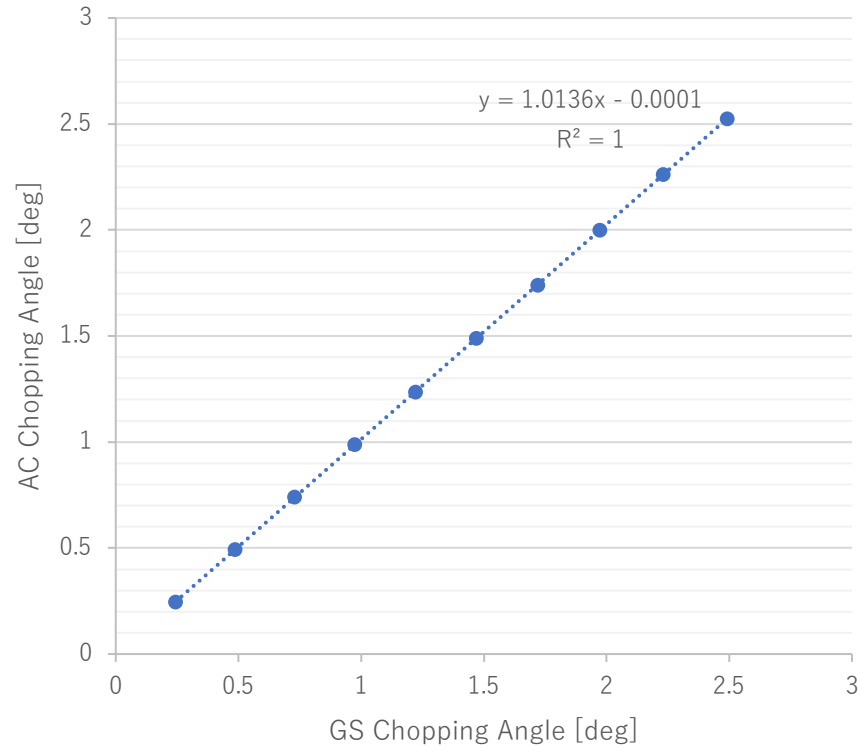
オートコリメータ試験概要

- ギャップセンサーは平行板静電容量式のセンサー
→ 平行が保たれない今回は正確な鏡の傾きを測定
できているか怪しい
- オートコリメータで光源からチョッパーの鏡に照射した十字架像が反射され結像位置を測定
この位置がチョッピングによりどれだけずれるかを測定することでチョッピング角を算出
- オートコリメータから算出した角度を本当の角度だと思って、これまでの実験データと比較する

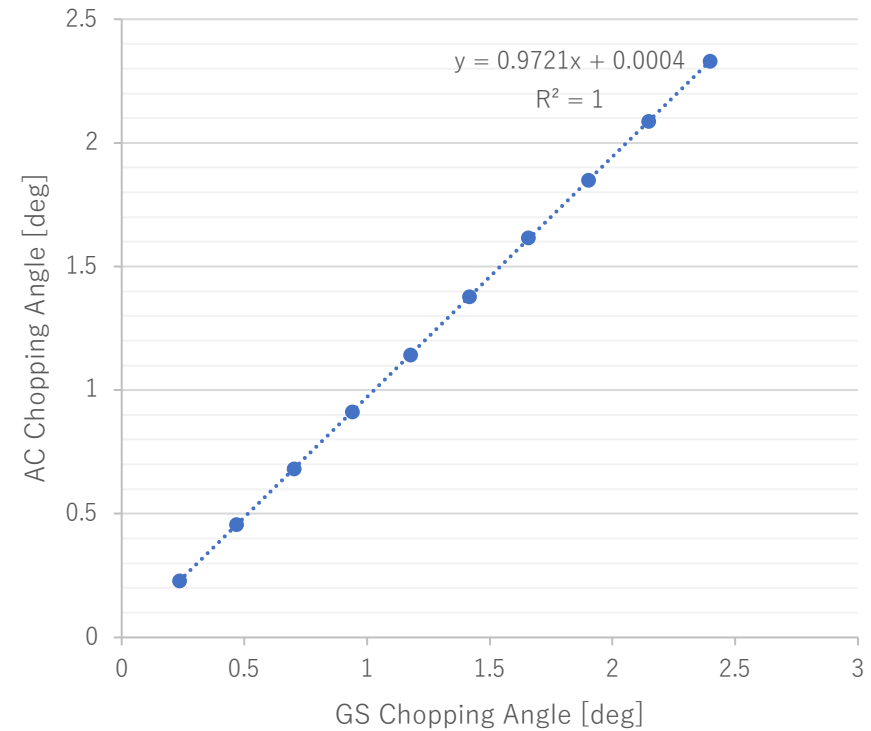


オートコリメータ試験 (常温1軸)

Outer (AC/GS)



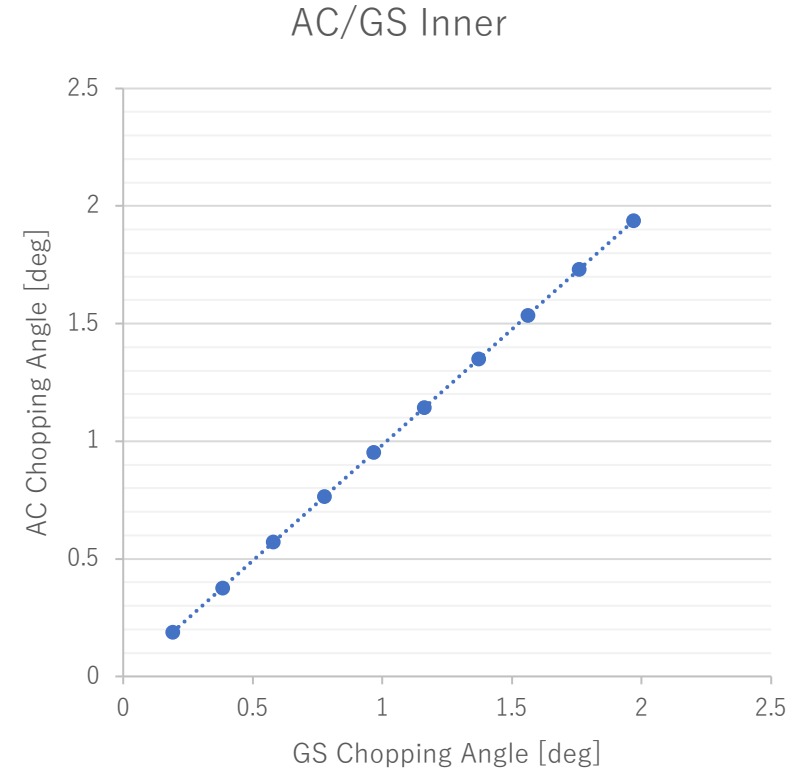
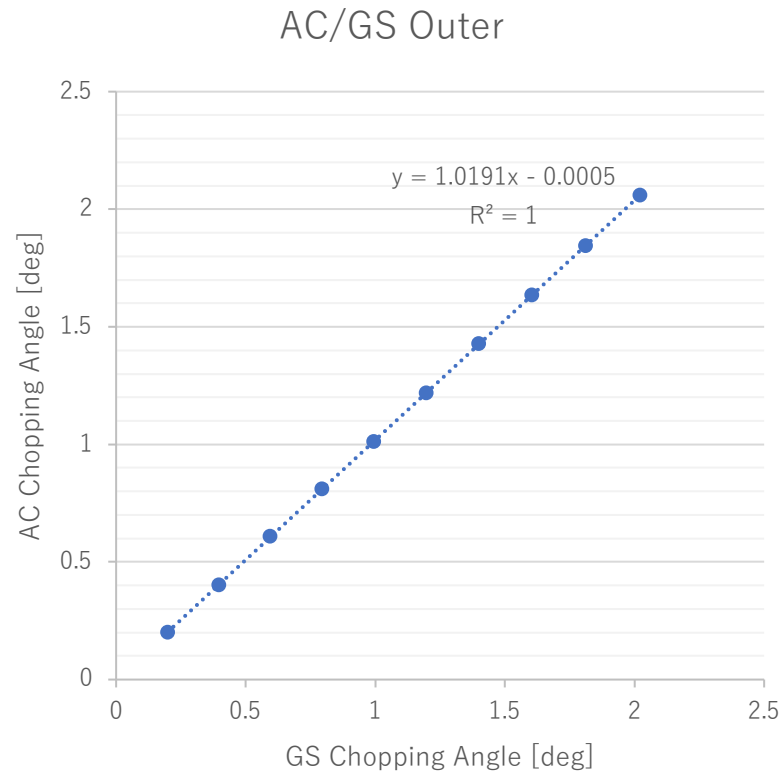
Inner (AC/GS)



$$\text{AC(Outer) [deg]} = (1.0136 \pm 0.001) * \text{GS(Outer)[deg]} - 0.0011$$

$$\text{AC(Inner) [deg]} = (0.9721 \pm 0.0009) * \text{GS(Inner)[deg]} + 0.0004$$

オートコリメータ試験 (低温1軸)

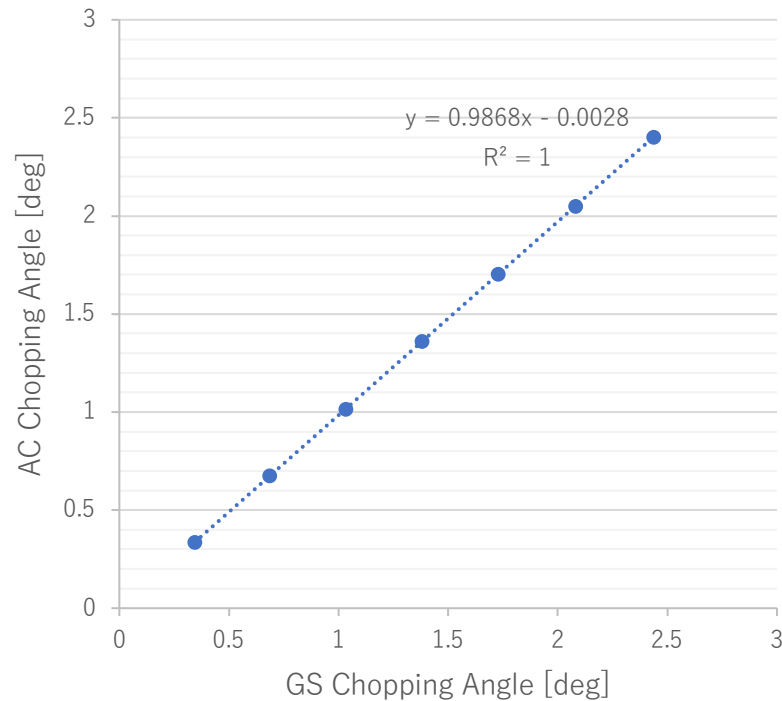


$$\text{AC(Outer) [deg]} = (1.0191 \pm 0.0009) * \text{GS(Outer)[deg]} - 0.0005$$

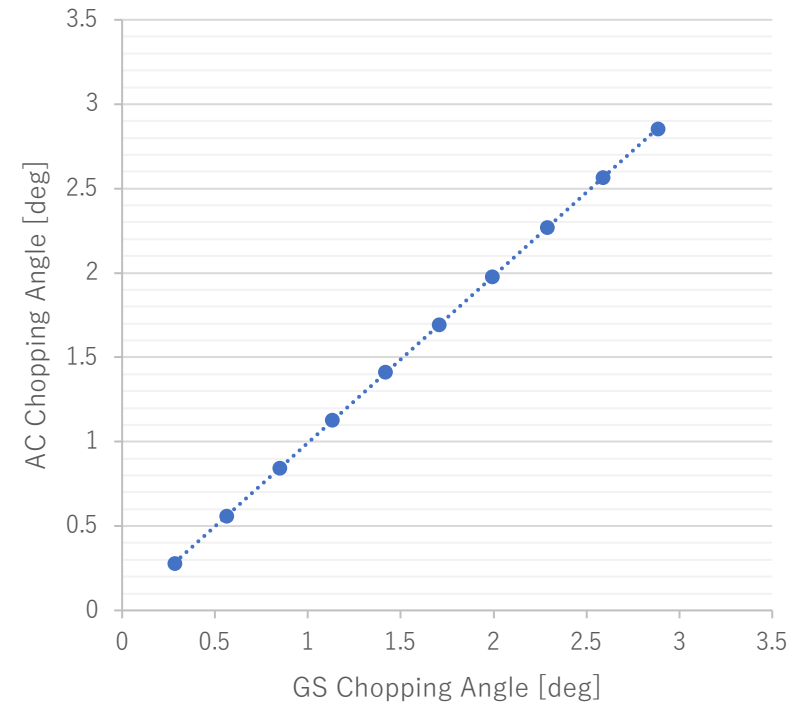
$$\text{AC(Inner) [deg]} = (0.9837 \pm 0.0009) * \text{GS(Outer)[deg]} + 0.0005$$

オートコリメータ試験（常温/低温2軸）

AC/GS（常温）



AC/GS（低温）



常温：AC [deg] = $(0.9868 \pm 0.0007) \cdot \text{GS}[\text{deg}] - 0.0028$

低温：AC [deg] = $(0.9897 \pm 0.0012) \cdot \text{GS}[\text{deg}] + 0.0032$

オートコリメータ試験まとめ

- 常温と低温それぞれで、ギャップセンサーは

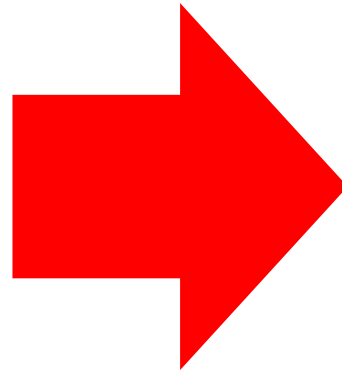
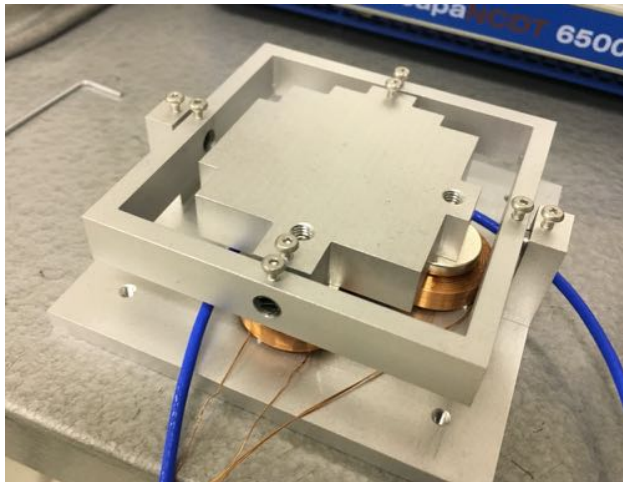
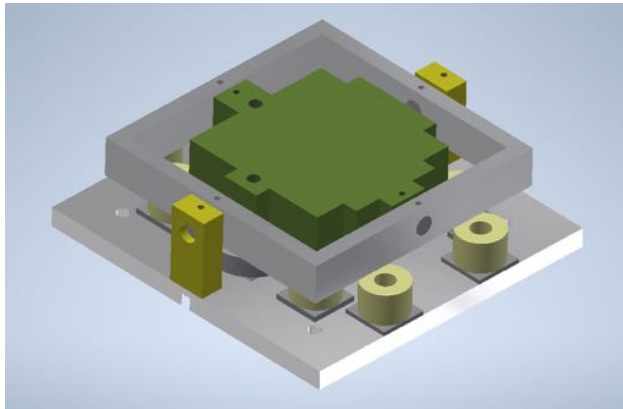
	Outer	Inner	二軸
常温	-1.6%	+3.8%	+1.3%
低温	-1.9%	+1.7%	+1.0%

だけ角度を測り間違える（青：過小評価、赤：過大評価）

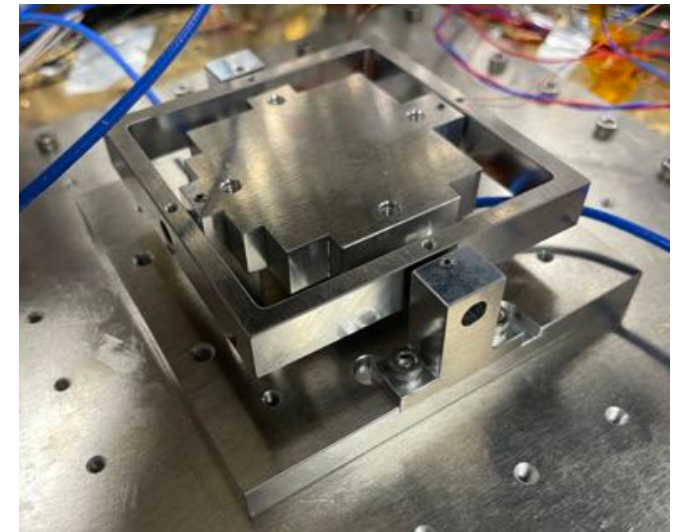
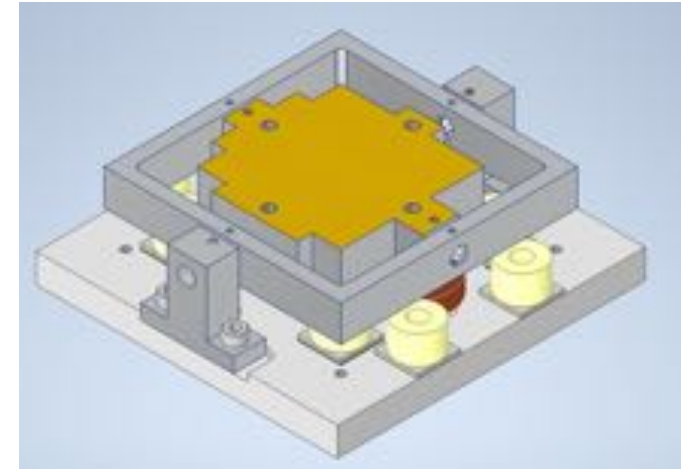
- そこまで大きな測り間違いはしないが、有意な差であると考えられるため、細かな議論をしたい場合は上記の考慮が必要（先述の線形近似の式から角度変換を行うなど）

試験機の違い

去年の試験機



今回の試験機



去年の試験機が低温で
うまく動かなかった結果を受け、
向かい合うねじりばねの
回転軸の一致に拘ったのが
今回の試験機

先行研究との比較

- TAO/MIMIZUKUのプロトタイプminiTAO/MAX38の低温チョッピングでは、駆動幅が小さいこと、長期安定性などに問題あり
- E-ELT/METISの冷却チョッパーについては詳しい情報なし
- TAO/MIMIZUKUに向けたチョッパーとしては、
低温環境下で大きなチョッピング角を達成
発熱量も十分小さい
ことが新しく達成されたところで、今回の試験機の特徴