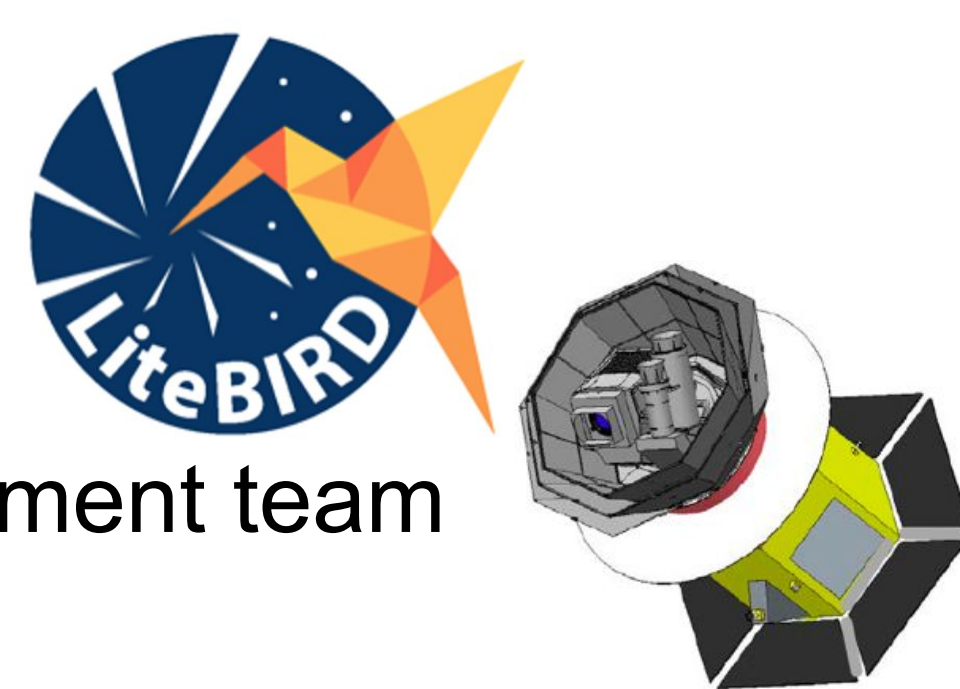


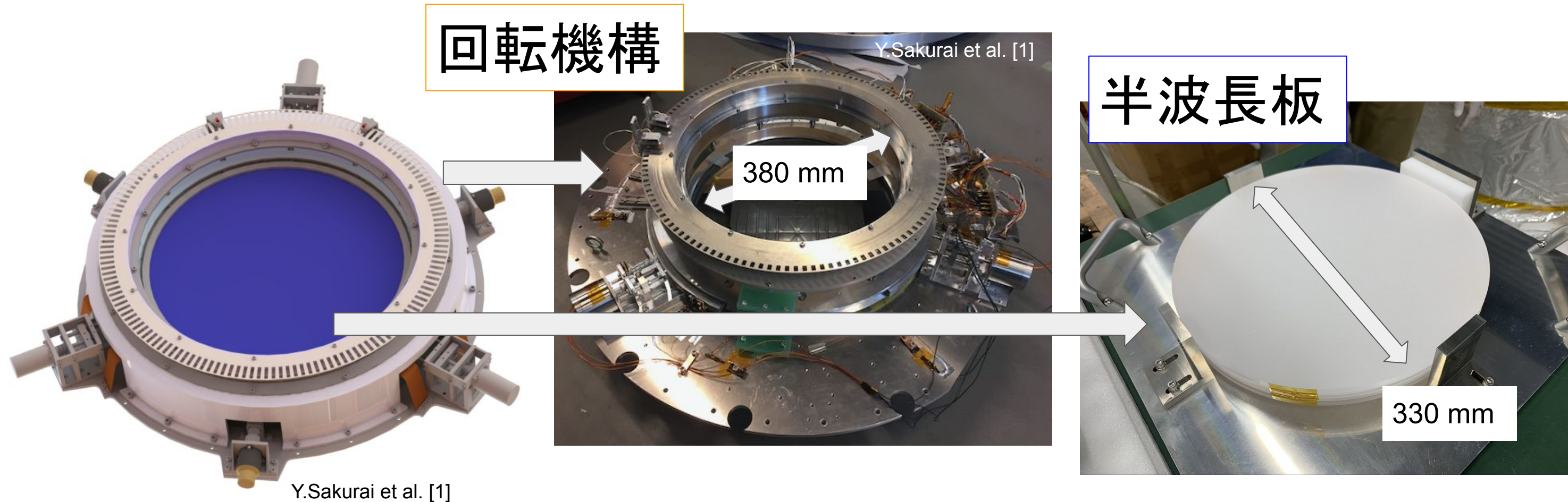
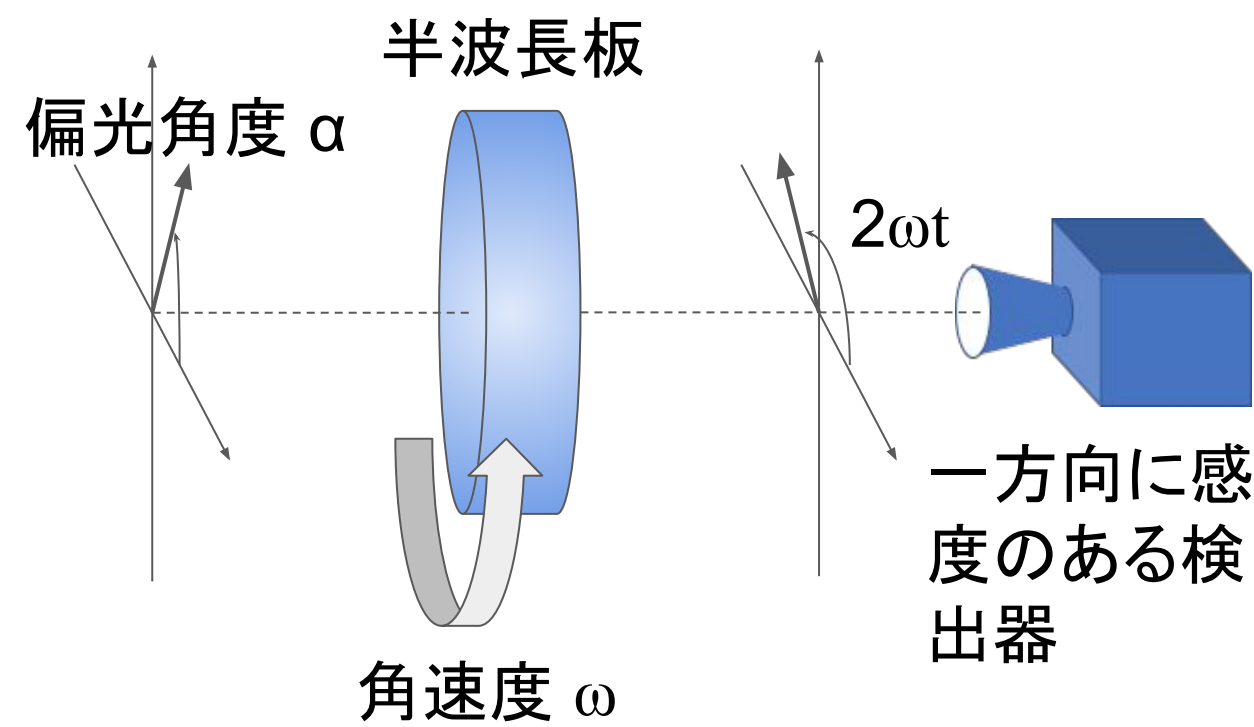
# LiteBIRD低周波望遠鏡のための偏光変調器の開発状況

杉山真也<sup>1</sup>, 松村知岳<sup>2</sup>, 桜井雄基<sup>2</sup>, 片山伸彦<sup>2</sup>, 小松国幹<sup>3</sup>, 高久諒太<sup>4</sup>, 戸田貴之<sup>3</sup>, 星野百合香<sup>1</sup>, 他 LiteBIRD LFT PMU development team  
埼玉大学<sup>1</sup>, 東京大学 Kavli IPMU<sup>2</sup>, 岡山大学<sup>3</sup>, 東京大学<sup>4</sup>



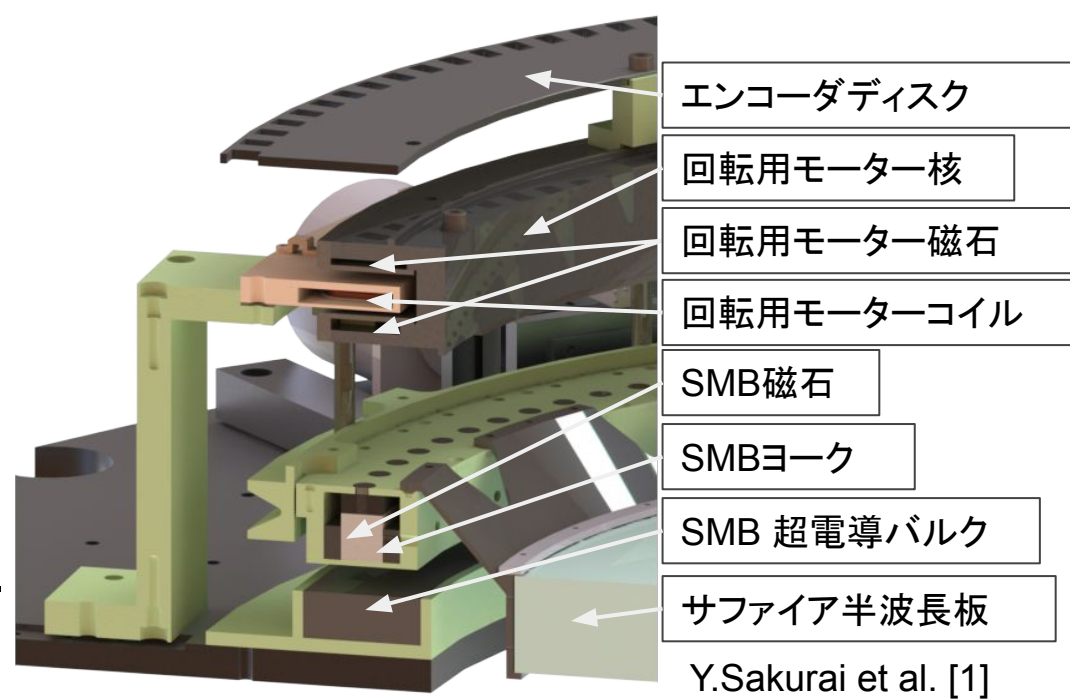
## イントロダクション

- LiteBIRDは原始重力波起源の宇宙マイクロ波背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) Bモード偏光を観測することにより、インフレーション理論の検証を行うことを目的とするJAXA戦略的中型計画2号機である。
- LiteBIRDは観測周波数帯の異なる低/中/高周波望遠鏡によって観測を行う。
- 低周波望遠鏡の観測機器に搭載される偏光変調器は、20K以下の極低温下で複屈折材であるサファイア半波長板を回転させることで入射直線偏光を変調する装置である。
- この装置による利点は、
  - 入射するCMB偏光の観測変調帯域を半波長板の回転周波数の4倍に変調し、観測システムに由来する1/fノイズを避ける。
  - 回転する半波長板により、入射線偏光が回転することで単一検出器で偏光状態を再構成可能であるため、検出器ペアの差分による系統誤差を削減する。
- 本発表では、低周波望遠鏡のためのφ=500mm サファイア半波長板連続回転式偏光変調器の要素技術の実証のため作成したφ=330mm準実機サイズのブレッドボードモデル (BBM)による開発状況を紹介します。

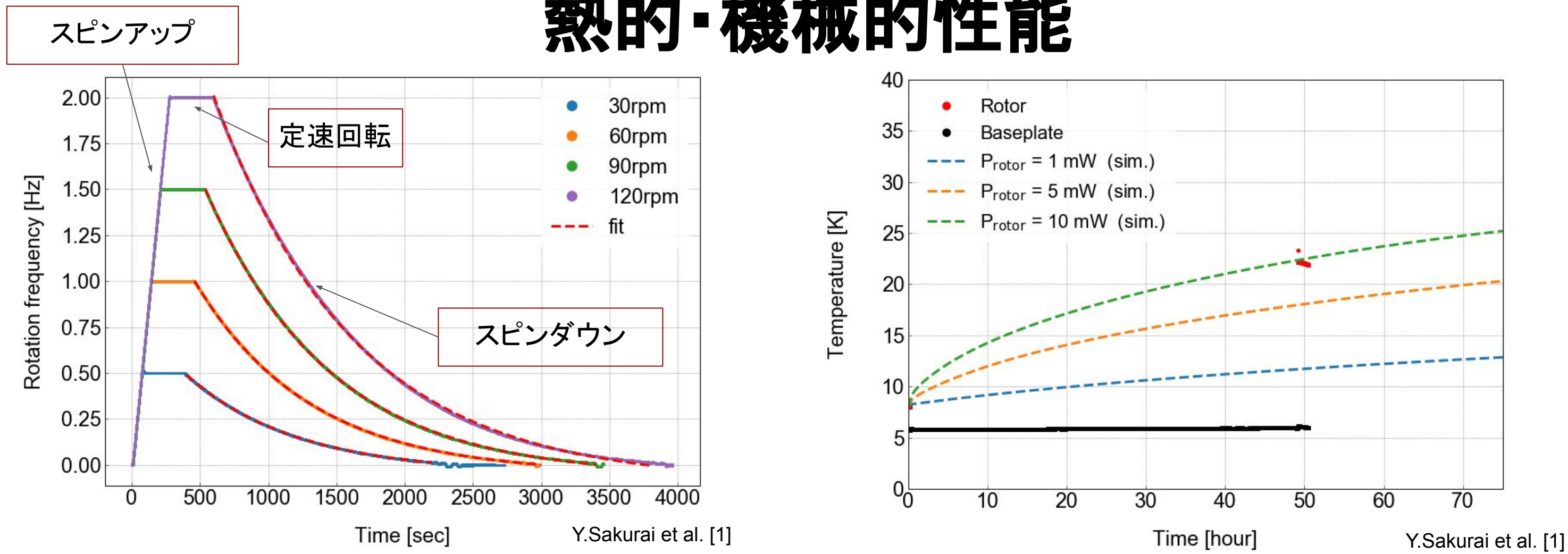


## 回転機構

- 偏光変調器の回転機構は、発熱最小化のため非接触駆動機構と超伝導磁気軸受 (Superconducting magnetic bearing, SMB) で構成される。
  - 【駆動機構】 回転子: サマリウムコバルト永久磁石、固定子: 高純度銅線コイル
  - 【超伝導磁気軸受】 回転子: サマリウムコバルト永久磁石 + 磁性ヨーク、固定子: 高温超伝導体 YBCO
- 入射偏光角度を再構築するために鍵となる半波長板の角度は光学エンコーダを用いて再構築される。

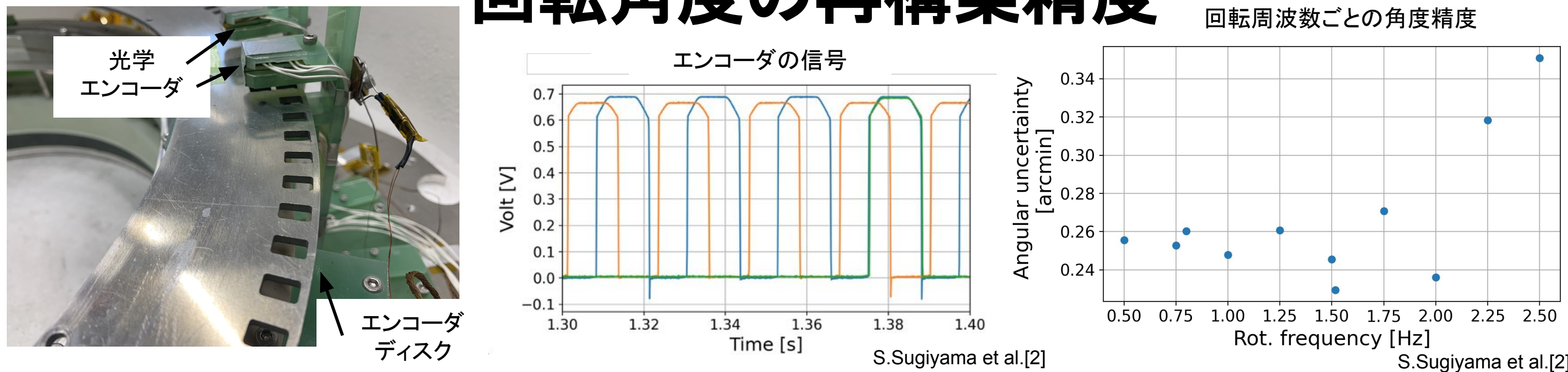


## 熱的・機械的性能



- 回転機構は、極低温環境下において48rpmでの安定連続回転と全体での発熱が4mW以下、ローターでの発熱が1mW以下が要求される。
- 低温環境における発熱は2つの方法を用いて評価した。磁気摩擦による発熱は、スピンドアウン時の速度をモニターすることで20.1mWと推定された。ローターへの発熱は、一定回転後にタッチプローブ式温度計によって温度をモニターすることにより、10mWと推定された。これによりBBMを用いて低温環境での発熱の推定方法を確立した。今後、BBMの設計の大幅な改良により要求の達成を目指す。

## 回転角度の再構築精度



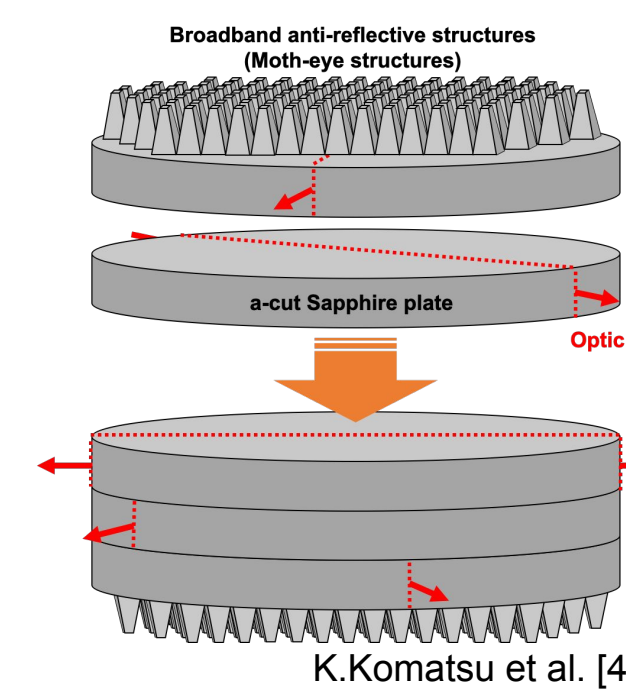
- 半波長板の回転角度の再構築精度は、信号以外の偏光モードの漏れ込みの影響から、1arcmin 以下の精度が求められる。
- 10K以下でのBBMを60rpmにて一定回転させた場合、エンコーダ信号から再構築された角度は10分間にて回転周波数が一定だと仮定した場合、そのばらつきは0.25 arcmin程であることを示した。

## 偏光変調器の検証・開発項目

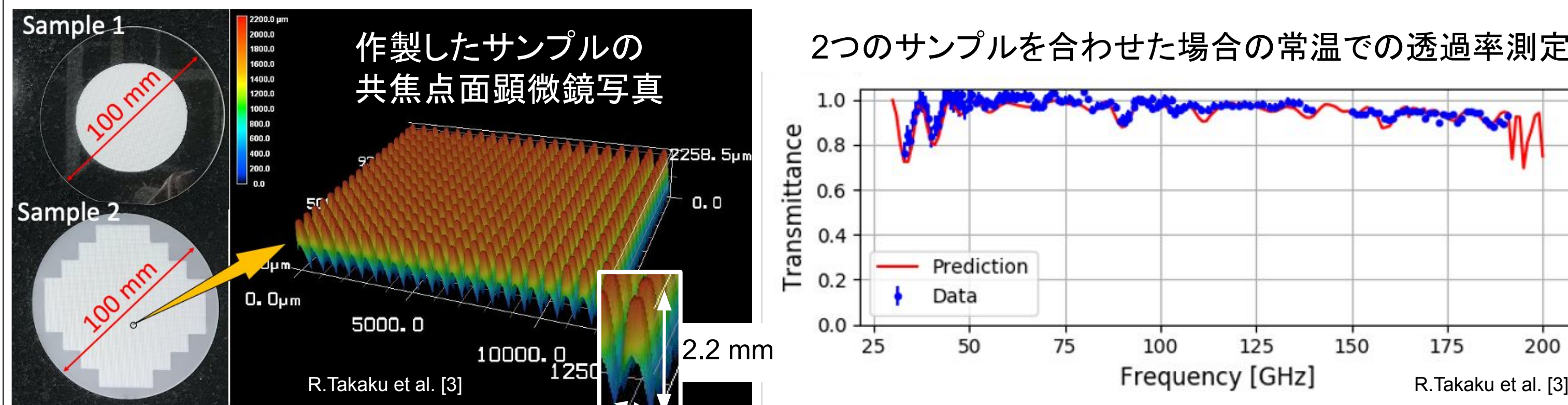
- BBMの最適化を進めることにより実現する
  - 打ち上げ耐性を実現した上での軽量化 (熱構造の最適化設計、振動試験等)
  - 発熱の軽減 (軽量化、磁場摩擦要因の軽減、高純度銅線の導入等)
- 偏光変調器システムとしての性能実証
  - 低温環境にて変調器動作時のミリ波偏光特性 (透過率、変調効率、角度再構築、時系列処理、系統誤差評価等)
- 要素宇宙線耐性試験
- BBM開発成果を踏まえて Demonstration Model 設計及びインターフェースの確立

## 半波長板

- 低周波望遠鏡の観測帯域は34-161GHzであり、この帯域を網羅した偏光特性が要求される。半波長板における広帯域光学性能 (透過率、変調効率、位相) の実現性をφ = 50~100mmの小型サンプルを用いて確認した。

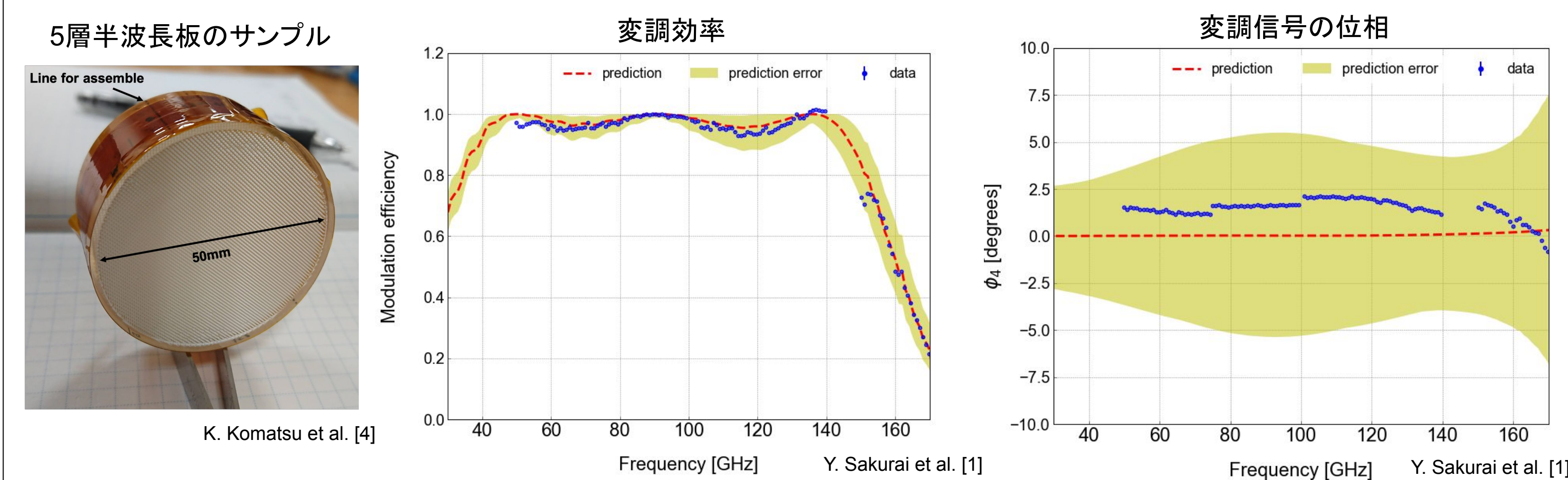


## 広帯域反射防止構造



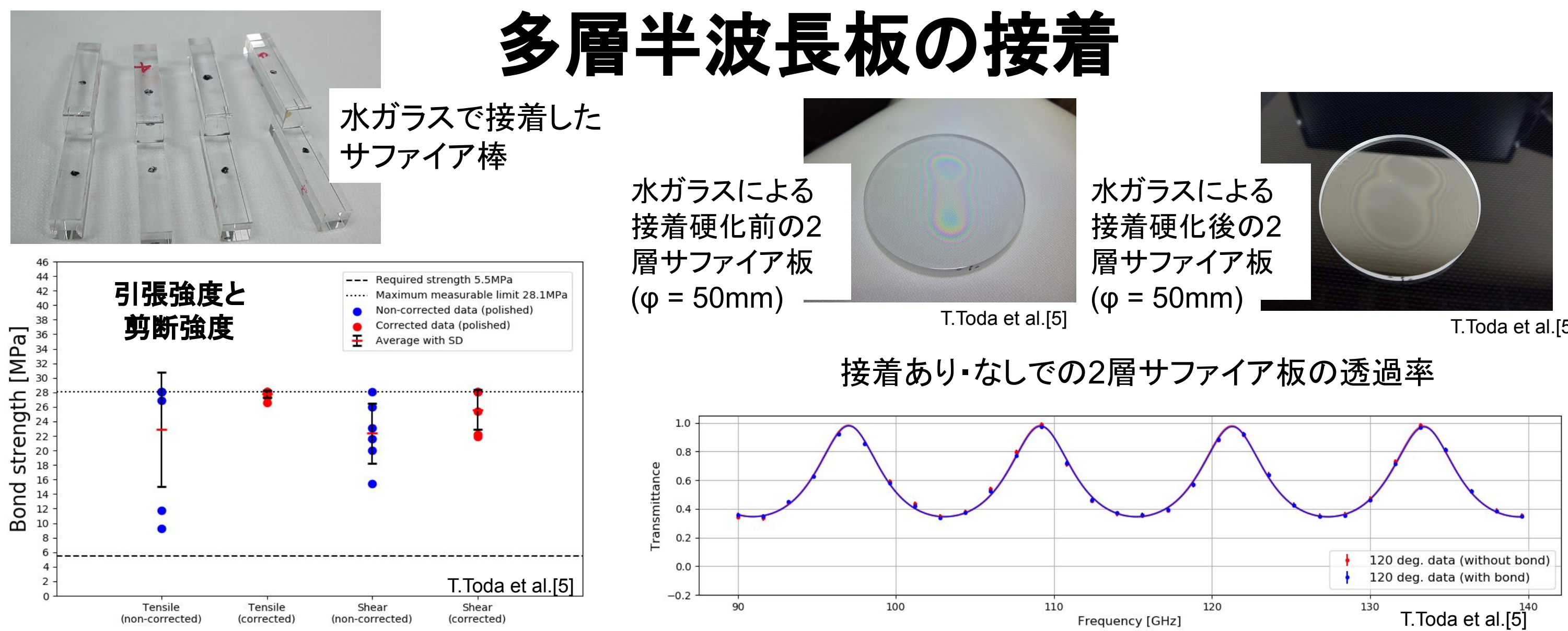
- 広帯域反射防止としてモスアイ構造を直接サファイア半波長板にレーザー加工する技術を開発した。
- 大型リニアステージの導入により、従来の加工範囲 (φ70 mm径内) よりも広い範囲 (φ ~ 90 mm径内, Sample 2) の加工に成功した。
- モスアイ構造を施したφ=100mmのサファイア板を2枚重ね、常温での光学測定を行った結果、34 - 161 GHzにおいて平均透過率97%を達成した。
- より深いモスアイ構造を開発することで、低周波側の透過率の低下の改善が期待される。
- 今後はφ=330mmのサファイア半波長板にモスアイ構造を加工し、性能評価を行う予定である。

## 広帯域偏光特性



- サファイア半波長板は、単層では厚みに応じた特定周波数においてのみ変調効率が最大となる。そこで、サファイア板を積層することによって広帯域半波長板を実現する。
- 光学シミュレーションによって、34 - 161GHzにおける変調効率が最大化となる各層での光学軸角度と厚みの最適化を3、5、7、9層に対して行った。
- 変調効率と質量のトレードオフから5層の半波長板を用いることを検討している。
- φ=50mmのサファイア板を用い、上記のデザインを採用した広帯域半波長板を作成した。
- 両端面にはモスアイ構造による広帯域反射防止構造を実装している。常温試験により測定された小型試作による偏光特性結果はシミュレーション結果とよく一致することを確認した。
- 今後はφ=330mmにおける5層半波長板のアセンブリを実施し、光学測定による偏光特性の評価を行う予定である。

## 多層半波長板の接着



- 多層サファイア半波長板の打ち上げ耐性を担保するため、層間を水ガラスで接着する方法が検討されている。2本のサファイア棒を水ガラスで接着し、引張・剪断強度を測定した結果、研磨されたサンプルの強度は共に > 20MPaとなった。これは、剪断の接着強度の要求目安である 6MPa以上である。今後 φ=100mmサンプルでの振動試験を検討している。
- φ=50mmサンプルでの接着前後の透過率の変化は2%未満であることを確認した。
- 液体窒素温度において、熱収縮による破損やひび割れは見られなかった。

## 参考文献

- [1] Y. Sakurai et al., "Breadboard model of the polarization modulator unit based on a continuous rotating half-wave plate for the low-frequency telescope of the LiteBIRD space mission", SPIE (2020)
- [2] S. Sugiyama et al., "Evaluation of reconstructed angular error of a continuous rotating HWP for LiteBIRD", SPIE (2020)
- [3] R. Takaku et al., "Demonstration of anti-reflective structures over a large area for CMB polarization experiments", SPIE (2020)
- [4] K. Komatsu et al., "Demonstration of five-layer phase-flat achromatic half-wave plate with anti-reflective structures and superconducting magnetic bearing for CMB polarization experiments", SPIE (2020)
- [5] T. Toda et al., "Mechanical strength and millimeter-wave transmission spectrum of stacked sapphire plates bonded by sodium silicate solution", SPIE (2020)