

第41回
天文学に関する技術シンポジウム2021
集録

Proceedings of
Symposium on Engineering in Astronomy 2021

2022年1月27日(木)～1月28日(金)

主催： 国立天文台
於　： オンライン開催

目次

開催のあいさつ Opening Remark -----	1
国立天文台 技術推進室 藤井 泰範	

基調講演 Keynote speech

1. 100年後に残すデータ -----	2
小杉 城治	
2. 技術によって切り拓かれるサイエンス -ハードウェア開発の経験から考えたこと-	
-----	17
鵜澤 佳徳	

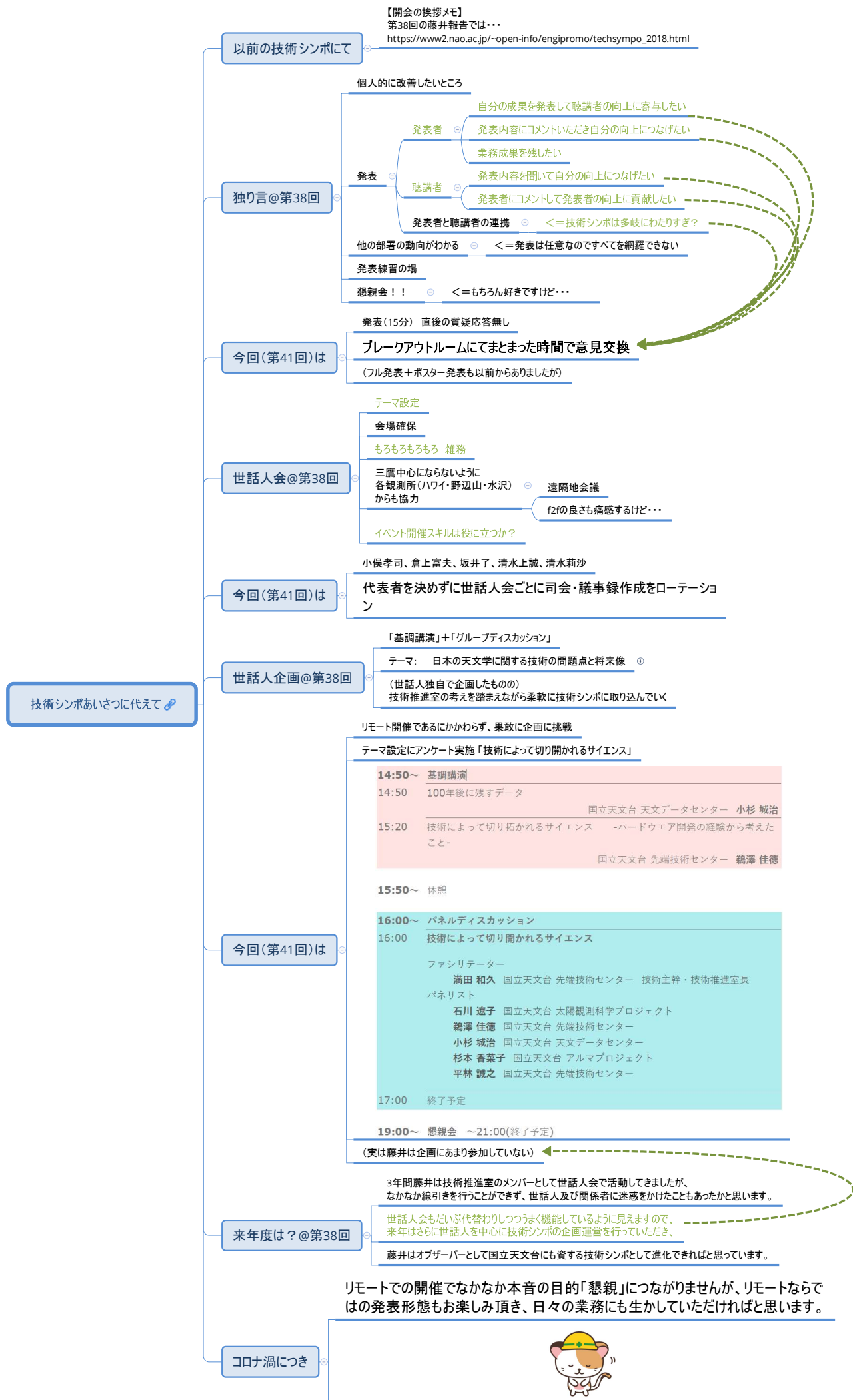
一般講演 Contributed Talks

1. ローコードプログラミング(Node-RED)によるIoTシステム開発 -----	31
高橋 賢	
2. Introduction to Subaru Telescope Summit Daycrew - Kaizen Process for	
Daily Operations and Maintenance -----	35
Bergin Ben	
3. ACA GPU分光計の開発 ソフトウェア品質向上の取り組み -----	40
清水上 誠	
4. 大型鏡材の表面欠陥 -----	44
林 左絵子	
5. アルマ望遠鏡・日本ノードの解析環境への構成管理ツール導入の試み -----	48
林 洋平	
6. アルマプロジェクトのCephストレージの利用 -----	51
池田 恵美	
7. ALMAカートリッジ受信機のリモートによる修理サポート -----	55
高橋 敏一	
8. 国立天文台先端技術センターにおける積層造形技術立ち上げ進捗報告 1. 造形熱	
ひずみについて -----	59
三ツ井 健司	
9. CASA、および、Vissageの開発 -----	63
川崎 渉	

10. IRIS撮像系の駆動機構のホール素子による原点出し・位置検出の検討	67
中本 崇志	
11. すばるの夜間観測山頂無人化計画に向けたトラブル解析	71
高木 悠平	
12. 紫外域でのコーティング性能向上	74
林 左絵子	
13. 望遠鏡保守情報交換会の現状と将来への展望	78
平野 賢	
14. TMT第一期観測装置IRISの振動解析	82
鈴木 竜二	
15. ミリ波帯誘電率測定システムの開発	86
坂井 了	
16. 木曾観測所105cmシュミット望遠鏡のポインティング性能改善	90
近藤 莊平	
17. 低温真空で使える機械要素の紹介	93
池之上 文吾	
18. SDRで宇宙の電波を受ける／Advent Calendarのススメ	97
島田 和彦	
19. 国友一貫斎グレゴリー望遠鏡の光学特性評価	100
萩野 正興	
20. OpenModelicaを用いた1次元シミュレーション	104
清水 莉沙	
21. 鏡の蒸着方法と性能維持について ～TAOと木曾シュミット望遠鏡の経験から～	108
高橋 英則	

アンケート結果 Summary of questionnaire results	112
--	-----

まとめ Summary	117
-------------	-----



100年後に残すデータ

国立天文台天文データセンター 小杉城治

自己紹介 小杉 城治

・天文学のデジタル化と共に歩んできました

- ・ 大学院時代
 - ・ 京都大学大宇陀観測所60cm RC望遠鏡+手作り分光器+冷却CCD
 - ・ 岡山天体物理観測所188cm望遠鏡+新カセグレン分光器+冷却CCD
- ・ すばるプロジェクト時代
- ・ アルマプロジェクト時代
- ・ 天文データセンター時代



Credit: 京都大学



Credit: 佐々木敏由紀



Credit: 国立天文台



Credit: NAOJ/ESO/NRAO

自己紹介（大学院時代）1988～

- ・望遠鏡や観測装置制御のデジタル化、検出器のデジタル化
- ・観測データ = デジタルデータ が始まった時代

Spectro-Nebulagraph: A Tridimensional-Spectroscopic System Based on a Local Area Network of Personal Computers

GEORGE KOSUGI¹ AND HIROSHI OHTANI

Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-01, Japan
Electronic mail: george@optik.mtk.nao.ac.jp, ohtani@kusastro.kyoto-u.ac.jp

TOSHIYUKI SASAKI,¹ HISASHI KOYANO, AND YASUHIRO SHIMIZU

Okayama Astrophysical Observatory, Kamogata-cho, Asakuchi-gun, Okayama 719-02, Japan
Electronic mail: sasaki@opal.mtk.nao.ac.jp, koyano@kibi.oao.nao.ac.jp, shimizu@kibi.oao.nao.ac.jp

MICHTOSHI YOSHIDA³

Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-01, Japan

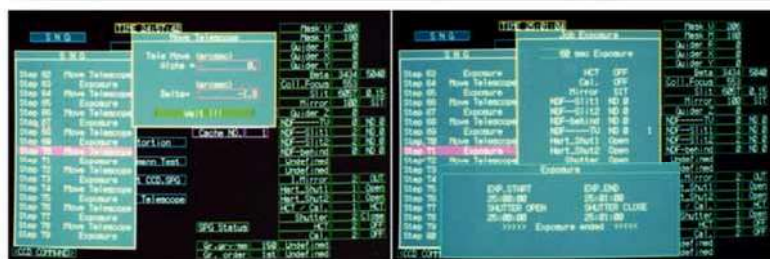
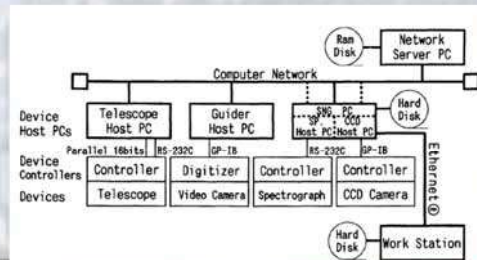
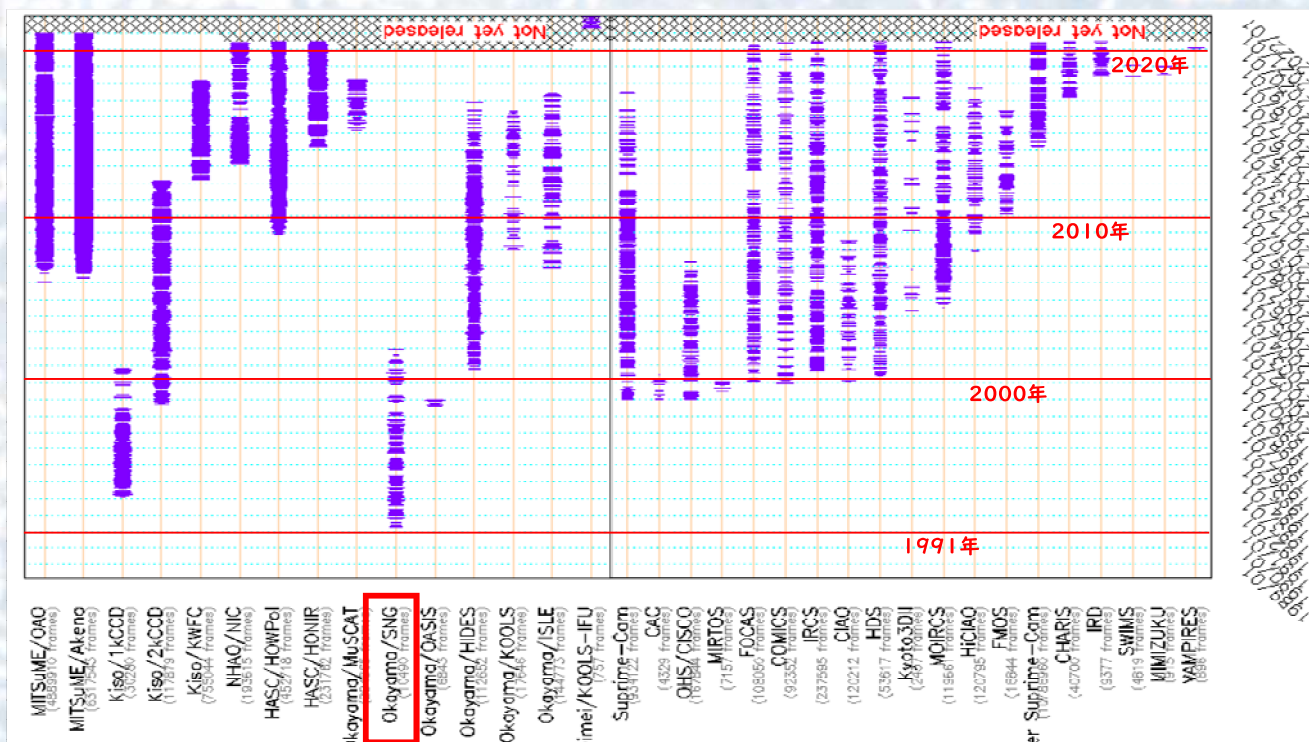


図3.12 SNGの観測制御画面：左図では望遠鏡を駆動するコマンドが実行中で、右図では分光器とCCDカメラを制御するコマンドが実行中

岡山天体物理観測所188cm望遠鏡でSNG観測システムを開発し共同利用

自己紹介（大学院時代）1988～

SNG観測データは、1991年よりアーカイブ



SMOKAホームページ(<https://smoka.nao.ac.jp/>)より

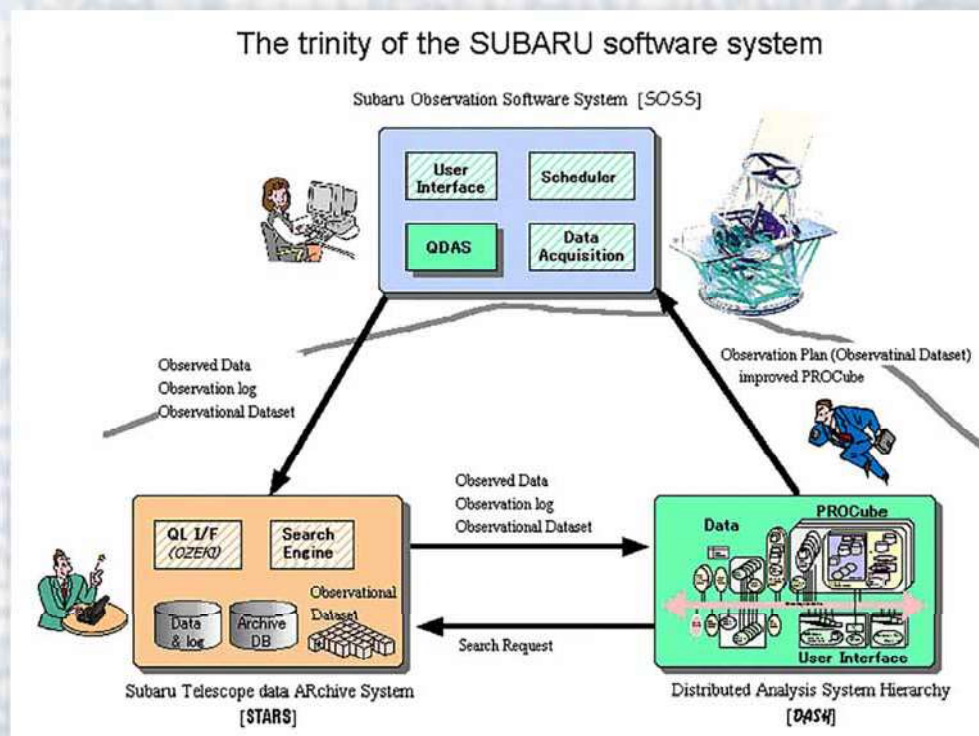
自己紹介（すばるプロジェクト時代）1996～

- ・すばる観測制御システムの要件定義、立ち上げ、運用
- ・第1期観測装置FOCASの制御ソフトウェア、解析ソフトウェア開発
- ・望遠鏡や観測装置の性能評価、科学観測



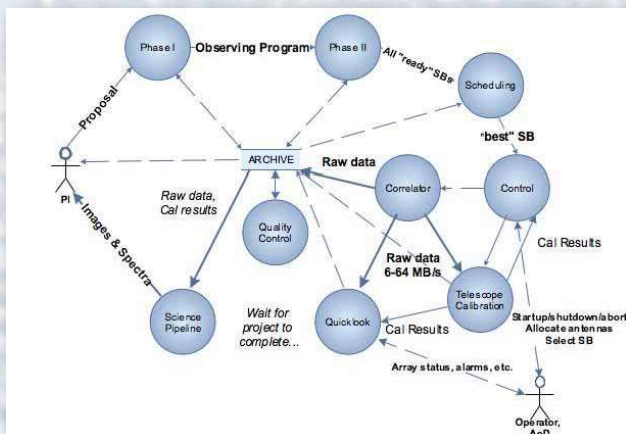
自己紹介（すばるプロジェクト時代）1996～

- ・すばる望遠鏡のソフトウェアシステムが目指したもの



自己紹介（アルマプロジェクト時代）2005～

- ・ 日米欧国際チームCIPT(Computing Integrated Product Team)活動
 - ・ データ解析パイプライン開発(単一鏡モード)
 - ・ ACAアンテナや関連器の立ち上げ、性能評価
- ・ CIPT-> ICT (Integrated Computing Team)
 - ・ マネージャー



ALMA Data Flow Model



自己紹介（天文データセンター時代）現在

- ・ 昨年度の特別公開日用インタビューで「現在、及び、未来の人類に観測データを届けるのが仕事」と話をした。

さて、本当にできるのだろうか？

増え続けるデータ

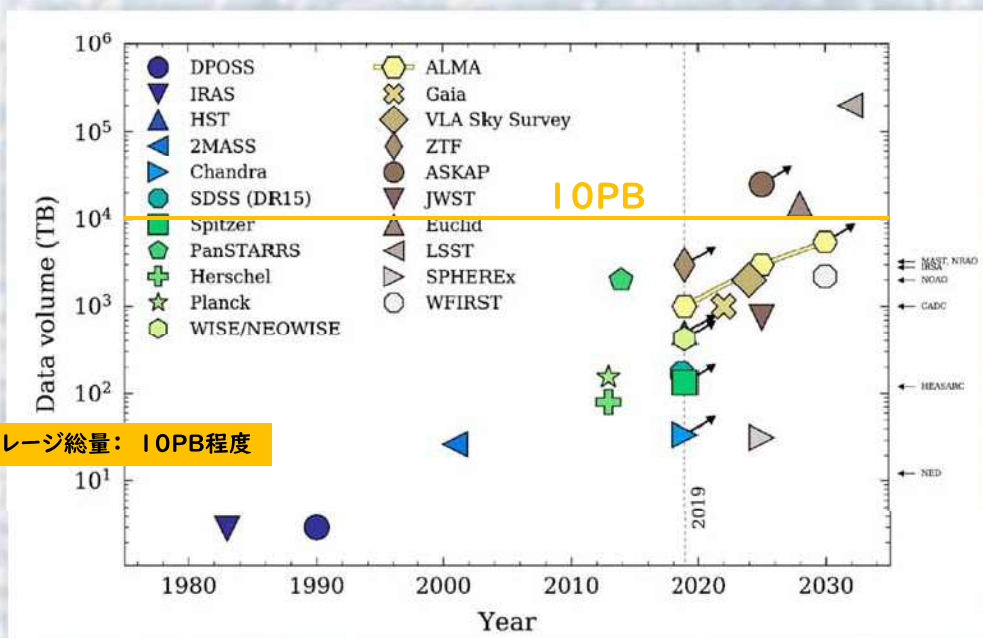
データ爆発の時代

- 2020年の世界データ総量は50 Zeta Bytes
 - Zeta-byte = 1,000 Exa-byte = 1,000,000 Peta-byte
 - 参考: ALMAの年間データ生成量は200TB = 0.2PB



天文データの動向

- LSST (平均15TB/夜, サーベイ完了時の解析済データは数百PB)
- ngVLA (平均7.6GB/s, 休みなく動けば **~240PB/yr**)
- SKA1 (**~600PB/yr**)

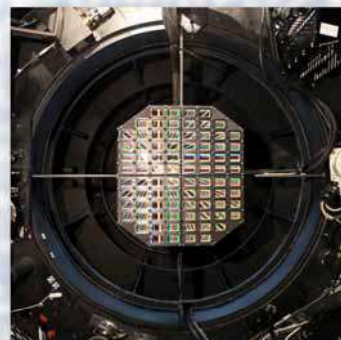


国立天文台アーカイブストレージ総量: 10PB程度

Desai V. et al., 2019

日本の中小望遠鏡データでもデータ爆発

- CMOSセンサー
 - トモエゴゼン: 木曾シュミット + モザイクCMOSカメラ
 - 84 CMOSセンサー (2K x 1.1K)
 - 2フレーム/秒で一晩観測すると30TB/夜 ~10PB/yr (但し晴天率や観測プログラムによる)



Credit: 東京大学

- TriCCS: せいめい望遠鏡 + 可視3色同時 CMOSカメラ
 - 3 CMOSセンサー (2.2K x 1.3K, 最大98fps)
 - 10fps 8時間観測で5.2TB/夜



Credit: 京都大学

生データを全ては残せない時代に

- ・トモエゴゼンのデータは国立天文台SMOKAアーカイブに保管されつつある

ただし、データ量の制約から、複数フレームを積分したデータのみ

技術的に可能でも、予算的に困難な場合もある

必要な情報をアーカイブするためには、**システムズエンジニアリング的なアプローチ**が必要

- ・例えばTriCCSは一晩5TB以上のデータを取れるが、1日かけても国立天文台三鷹のSMOKAアーカイブにネットワークで送りきれない
- ・データ転送、データ処理、データ保管、のボトルネックを除去
- ・全プロセスを含む**全体システムとしての最適化**を進める

国立天文台観測データポリシー

- ・ 観測データは宇宙の歴史的記録
- ・ 観測データには寿命がない
- ・ 観測データの完全な理解は、後世まで含めたあらゆる世代に委ねられるべき

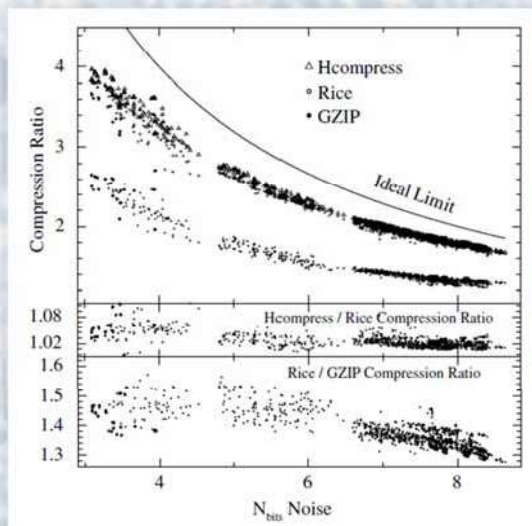
1. 国立天文台の観測データは国立天文台に帰属する
2. 国立天文台は、観測データを利用可能なデジタル形式で**永続的に保管**する
3. 国立天文台は、観測データを**利用しやすい形式で公開**する

何を残して何を捨てるか：データ圧縮

- 何も捨てない
- **lossless圧縮** (gzip, Rice等) で半分程度にまで圧縮可
 - 最近の天文データ解析ソフトは圧縮形式のデータにも対応
 - 圧縮率はノイズレベル次第

- より圧縮率を高めたければ
非可逆圧縮!

以前は非可逆圧縮への天文学者のイメージは良くなかった



W.D.Pence et al., 2009, PASP

何を残して何を捨てるか：データ圧縮

- 何かを捨てる = **非可逆圧縮**
- トモエゴゼン (CMOSカメラ)
- 画像の積算によるデータ圧縮 : 時間軸情報を捨てている
- CMOSカメラは時間軸天文学を切り拓く : 時間軸情報を残したい
 - Robust PCAによりLow-rank行列とスパース行列に分解し、transient天体情報を残したままmovieを高圧縮($\sim 1/10$)

残したい情報の素性がわかっていれば、その情報を残して高圧縮することは可能

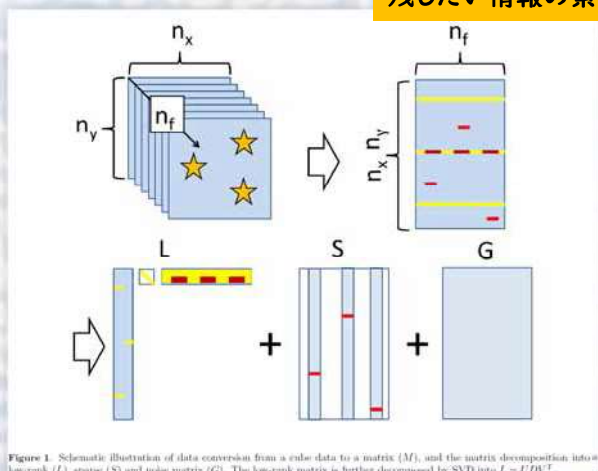


Figure 1. Schematic illustration of data conversion from a cube data to a matrix (M), and the matrix decomposition into low-rank (L), sparse (S) and noise matrix (G). The low-rank matrix is further decomposed by SVD into $L = UDV^T$.

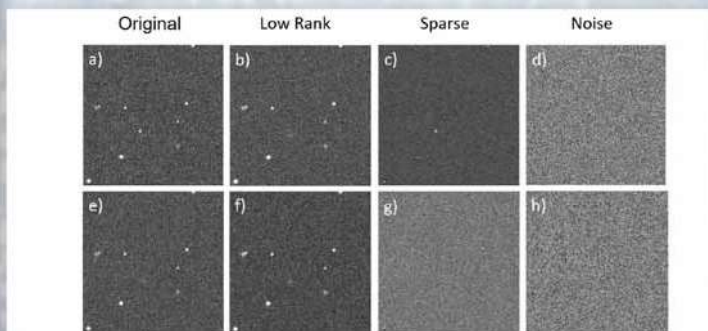


Figure 3. Example decomposition images for a movie data of the Tonno-r Cohen from two frames (top and bottom row).

Morii et al., 2017, ApJ

大量データを残すための技術

- データ圧縮には情報理論や統計数理のドメイン知識・技術が必要
- 長期データ保管にはITのドメイン知識・技術が必要
- 大量データを活用するには、AIのドメイン知識・技術も必要となろう

ドメイン知識・技術をどこまで（天文台側で）習得するかは、ドメインのサイズ感も判断材料となり得る（あくまで私見）

例えば、ドメインがとてつもなく大きい場合、或いは、専門性が極めて高い場合には、ドメイン知識を網羅するのは至難の業。

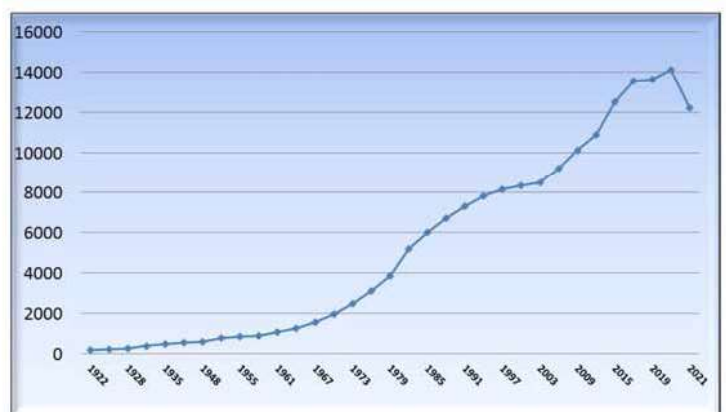
一方、ドメインが大きければ、協力者を見つけやすい。

天文ドメインの規模感

- 天文学者数
 - 世界でせいぜい 2～3万人？
- 天文業界の技術者数
 - 国立天文台では技術系職員
の数は研究者の半分程度か

- ICT技術者数2020年
 - 世界 2100万人
 - 日本 110万人
- ICT研究者数2018年
 - 日本 17.6万人 (R2情報通信白書より)

IAU Membership Growth (1922-2021)



IAUホームページ (<https://www.iau.org/>) より

天文業界

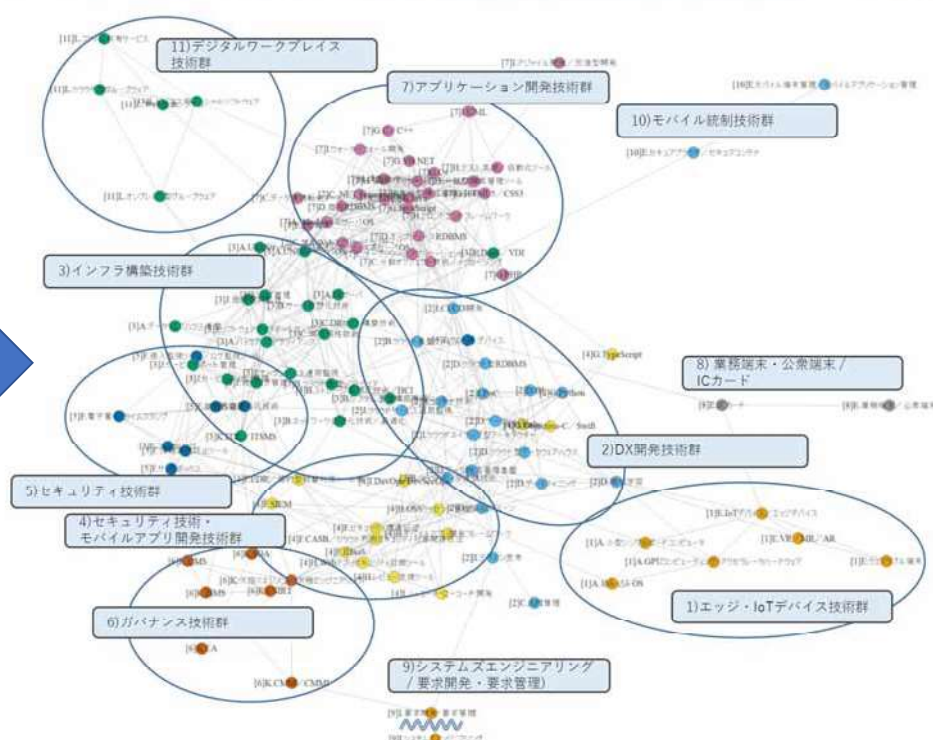
IT業界

巨大な境界領域を埋める工夫が必要

・IT技術分野

天文業界

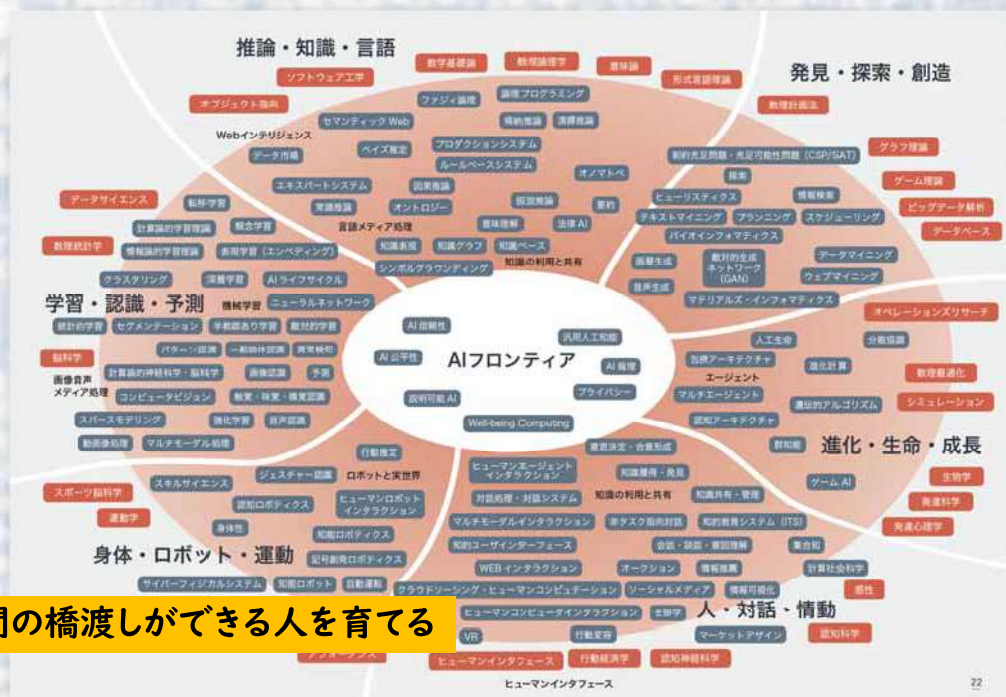
協力



一般社団法人 情報サービス産業協会ホームページより

AI技術分野も拡大中

国内AI人材数：2020年約4万人、2025年約8万人（経産省 AI人材育成の取り組み(2019年) より）



ドメイン間の橋渡しができる人を育てる

AIマップβ 2.0 人工知能学会: <https://www.ai-gakkai.or.jp/>

データ運用に関する技術分野

- ・専門化や新技術の開発が急速に進んでいる
- ・天文研究者・技術者から手が届きにくくなっている
- ・境界領域を埋める工夫やコラボが必要

ビッグデータ

データの収集、取捨選択、管理及び処理に関して、一般的なソフトウェアの能力を超えたサイズのデータ集合（ウィキペディア）

総務省Society5.0：Valueにつながる4V

Volume（容量の大きさ）

ビッグデータの第一の特徴は、その名前の通り容量が大きいことです。企業に限らず、情報技術の進化により、黙っていてもどんどんデータが集まるようになり、データ量はテラバイトからペタバイトオーダーにもなっています。データ量が大きいことだけがビッグデータの特徴だと思われるがちですが、他にも以下のようなポイントがあります。

Variety（多様性、種類）

ビッグデータは、通常表計算などで扱っているように、数値化され関連づけをされたデータ（構造化データ）であるとは限りません。テキスト、音声、画像、動画などのさまざまな構造化されていないデータ（非構造化データ）もあり、これらのデータをテキストマイニングや音声、画像解析などを行ない構造化し、ビジネスに活用する動きが広がっています。

Velocity（スピード、頻度）

サーバーのアクセスログや、東京ゲートブリッジ橋梁モニタリングシステムなど、ものすごい頻度、スピードでインターネット上やセンサーからデータが生成され、取得、蓄積されています。変化の著しい現代社会では、これらのデータをリアルタイムに処理し、対応することが求められています。

Veracity（正確さ）

従来は、サンプリングによって一部のデータで全体を推測する方法が主流でした。それに対し、ビッグデータは全てのデータを取得することも不可能ではないので、正確であり推測による曖昧さや不正確さを排除して、本当に信頼できるデータによる意思決定が可能になります。

Value（価値）

得られたデータを分析し有用な知識や知恵を導出し、モデル構築、検証し、課題解決をすることが本質的なビッグデータの価値です。

図表 2-1-2-1 データに価値をもたらす4V



総務省「Society5.0」資料

4Vと天文データアーカイブ

Volume（容量の大きさ）

あらゆる望遠鏡や観測装置のアーカイブデータを公開することで、利用できるデータ量を増やす。

★Variety（多様性、種類）

あらゆる観測モード（撮像、分光）や波長（光赤外、電波）のデータを公開することで、多様性を増やす。望遠鏡や観測装置の多様性も含まれる。

Velocity（スピード、頻度）

高フレームレートのCMOSデータはVelocityを充実させる。リアルタイム処理をおこなって、変動天体を検出し、フォローアップ観測に繋げることができる。

★Veracity（正確さ）

信頼できるデータをアーカイブ保管して、利用できるようにすることが必要。

Value（価値）

「未知の発見」へと繋げて行く。

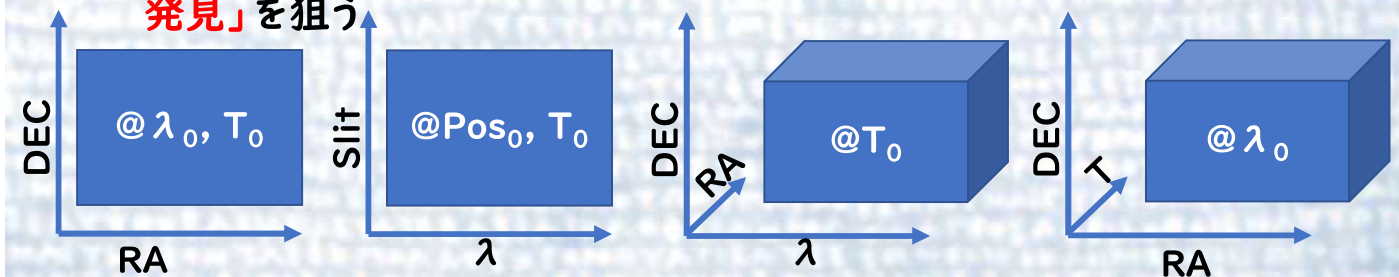
図表 2-1-2-1 データに価値をもたらす4V



総務省「Society5.0」資料

天文データ蓄積によるパラメータ空間の拡張

- **Variety**の充実(データを保管し続ければVarietyは広がり続ける、少なくとも時間軸方向には)
- 赤経、赤緯、波長、時間の4次元空間をアーカイブデータで埋める。それぞれの軸のスパンが大きいほど多様性が大きく、Valueを生み出す。
 - 撮像データ: 赤経(RA1~RA2, Δ RA)、赤緯(Dec1~Dec2, Δ Dec)の2次元データを時刻 T_0 、波長 λ_0 の場所へ
 - スリット分光データ: 赤経(RA1~RA2, Δ RA)、波長(λ_1 ~ λ_2 , $\Delta\lambda$)の2次元データを赤緯Dec $_0$ 、時刻 T_0 の場所へ
 - 3次元分光データ: 赤経(RA1~RA2, Δ RA)、赤緯(Dec1~Dec2, Δ Dec)、波長(λ_1 ~ λ_2 , $\Delta\lambda$)の3次元データを時刻 T_0 の場所へ
 - ムービーデータ: 赤経(RA1~RA2, Δ RA)、赤緯(Dec1~Dec2, Δ Dec)、時刻(T_1 ~ T_2 , ΔT)の3次元データを波長 λ_0 の場所へ
- 4次元空間にマッピングされた観測データ全体から「**未知の関係性の発見**」を狙う



Veracity (正確さ) を担保するために

- 国立天文台の観測データポリシー

第3項 国立天文台は、観測データを利用しやすい形式で公開する

国立天文台は、明記された期間を経た後に、原則として全ての観測データを「**研究者が利用しやすい形式**」で公開する。データは特定のソフトウェアを用いなくても解析できる水準まで**較正処理を進め、できる限りそのまま物理量として扱える**ようにした後に公開する。

観測データポリシーに沿ったデータ運用を観測所に求めることが重要。

その望遠鏡や観測装置の開発、運用に関わった人が現場を去って**装置固有キャリブレーション**など**ノウハウ**が失われてしまう前に。

観測設備は進化を続けてきたため、古いデータは情報量が少なく精度も低めであるが、時間軸方向の**Variety**を大幅に広げることができ、**Value**につながる。

各データには、**誤差や精度**に関する情報も必要。

ビッグデータの時代には、データをそのまま扱えることが重要。

キャリブレーションや**誤差解析**は、100年後にデータを残す上で必須の技術。

デジタルデータは劣化しない、が

- デジタルデータは理論的には劣化しないが、デジタルデータの記録媒体は劣化したり、規格が変わって読めなくなったりして、データ自身が失われることがある。
- データが失われないように、定期的にマイグレーションする
- 或いは、クラウド上で自動的にマイグレーションしてもらう
- そもそも、100年後に天文データの標準フォーマットであるFITSが残っているのか？データ自体も、何度かフォーマット変換が必要かもしれない

まとめ

100年後に意味のあるデータを残すために

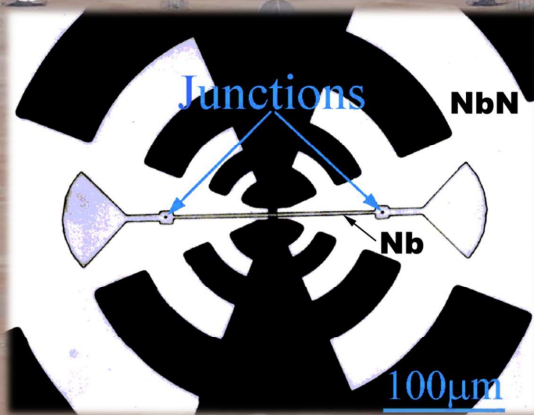
- 既存技術や予算などの制約下で、データ爆発時代にデータ(情報)を最大限残すためには、システムズエンジニアリング的なアプローチ(システムの全体最適化)が重要
- 必要な天文分野のドメイン知識・技術は、観測データのキャリブレーションや精度・誤差解析
- 天文分野外のデータ運用に関わるドメインは、規模が桁で大きい、或いは、専門性が高いため、全てを把握することは容易ではない。ドメインのガイドやドメイン人材と橋渡しができる人の育成が必要
- デジタルデータは劣化しないが、データ自身が失われることがある。定期的なマイグレーションやフォーマット変換が必要
- 上記を継続するための人材や予算が担保されることが必要

技術によって、100年後でも使えるデータを残し、
それを使った新しいサイエンスが切り拓かれることを期待して。。。



ご静聴、ありがとうございました。

技術によって切り拓かれるサイエンス —ハードウェア開発の経験から考えたこと—



国立天文台 先端技術センター
鵜澤佳徳

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

自己紹介

- 専門: 超伝導エレクトロニクス
- 1991 大学院修士課程修了後、郵政省通信総合研究所入所
 - サブミリ波帯窒化ニオブSISミキサの研究開発
- 2000 博士(工学)取得
- 2005 国立天文台准教授
 - ALMA電波望遠鏡用SIS受信機の研究開発
- 2014 情報通信研究機構テラヘルツ連携研究室室長
 - テラヘルツ帯通信技術、計測技術の研究開発
- 2018 国立天文台教授
 - 次世代受信機技術の研究開発
 - 先端技術センター長

先端技術センター(ATC)について



ADVANCED TECHNOLOGY CENTER
National Astronomical Observatory of Japan
National Institutes of Natural Sciences

先端技術センターは、国立天文台の天文学研究を、観測機器の研究・技術開発という面から支えています。国立天文台が運用している望遠鏡や観測機器だけでなく、将来の観測計画のための望遠鏡や観測機器の基礎技術、応用技術の開発研究を実施しています。また、天文研究のコミュニティのために、共同開発研究を進めたり、観測機器開発を支援しています。

電波から可視光・紫外線
まで、地上・宇宙を問わず、
先端的な天文学の
観測装置の開発拠点

<http://atc.mtk.nao.ac.jp/Brochure/2103J>

3

先進性(先端性)とは?

- 新しい原理
- 新しい材料 (物性)
- 新しい組み合わせ
- 新しい測定性能
- 新しい測定対象
-

先進性（先端性）とは？

同時に……

- 未知の故障モード
- 新しい脆弱性（機械、電気、熱、……）
- システム条件との不整合

また、

- 高い流動性（短い有効期間）

実用性とは？

- 信頼性（壊れない、期待通りの機能性能）
- 合目的性（科学成果が出せるか）
- 現実性（時間、予算、組織の中での勝負）
- 総合性（システムの成立性）
- 発展性（次のステップへの展望）

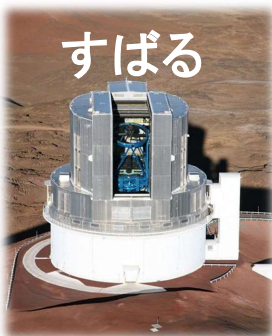
信頼性を支える技術

- **設計**： 信頼性解析、設計審査、・・・
故障解析（FMEA）、部品解析（寿命、MTBF）
- **製造**： 部品管理、工程管理、・・・
- **試験**： 設計検証、製品検査、・・・
- **運用保守**： マニュアル、故障統計、・・・

2013/1/10 ATC技術談話会

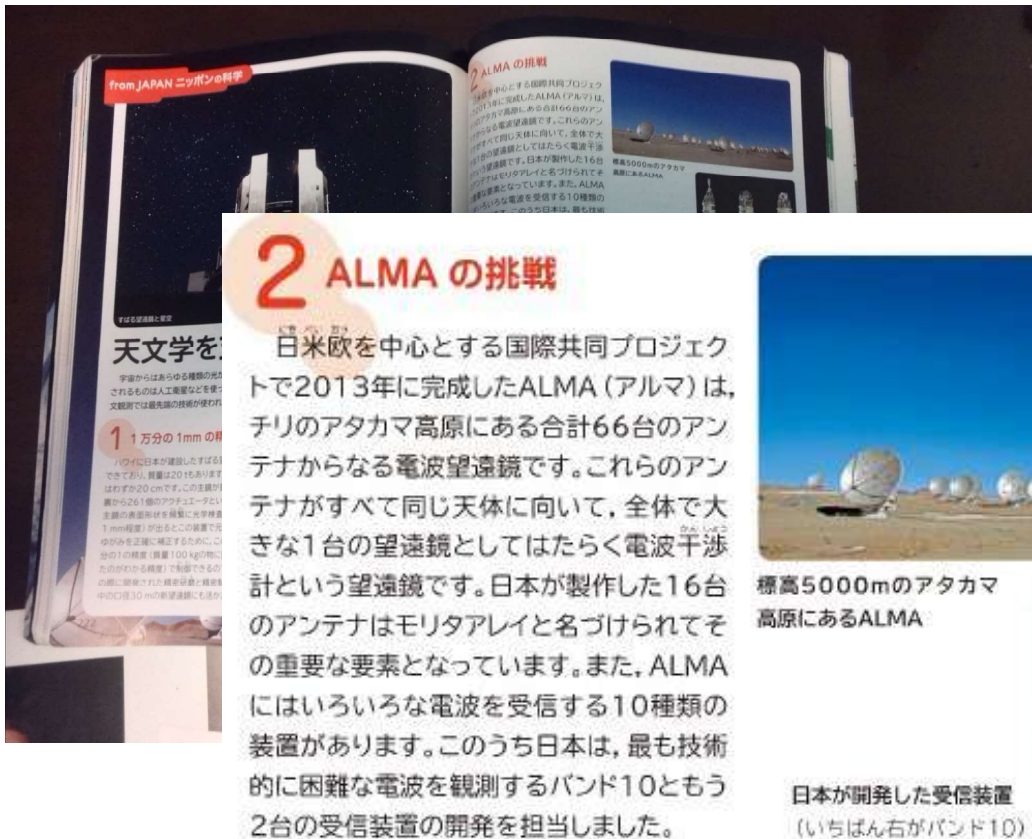
7

ATCが関わるプロジェクト



ALMA受信機開発

東京書籍
中学校理科教科書
「新編新しい科学3」



2 ALMA の挑戦

日米欧を中心とする国際共同プロジェクトで2013年に完成したALMA (アルマ) は、チリのアタカマ高原にある合計66台のアンテナからなる電波望遠鏡です。これらのアンテナがすべて同じ天体に向けて、全体で大きな1台の望遠鏡としてはたらく電波干渉計という望遠鏡です。日本が製作した16台のアンテナはモリタアレイと名づけられてその重要な要素となっています。また、ALMAにはいろいろな電波を受信する10種類の装置があります。このうち日本は、最も技術的に困難な電波を観測するバンド10ともう2台の受信装置の開発を担当しました。

標高5000mのアタカマ高原にあるALMA

日本が開発した受信装置 (いちばん右がバンド10)

9

疑問

○装置開発は、サイエンス要求によるものでは
(技術がサイエンスを切り拓いていない)?

○はたしてそうだろうか?

ALMAバンド10受信機仕様

Item	Specification
1. Observation frequency	787-950 GHz (above the gap freq. of Nb!!)
2. Cartridge IF output	4-12 GHz for DSB
3. Receiver noise performance	< 230 K (5 hf/k _B) (over 80% of 787-905 GHz) < 344 K (full band)
4. IF ripple	< 4.0 dB/2 GHz, <6.0 dB/8 GHz
5. Gain compression	< 5% between 77 and 373 K
6. Amplitude stability	0.05 and 100 sec < 4.0 x 10 ⁻⁷ 300 sec < 3.0 x 10 ⁻⁶
7. Signal path stability	< 3 degree/5 minutes
8. RF aperture efficiency	> 80% at the subreflector
9. Beam squint separation	< 10% FPBW on the sky
10. Polarization efficiency	> 99.5% (23 dB)

なぜ、サイエンスニーズが生まれ、要求仕様に至ったのか？



1991年の
CRL関西先端
研究センター



現在

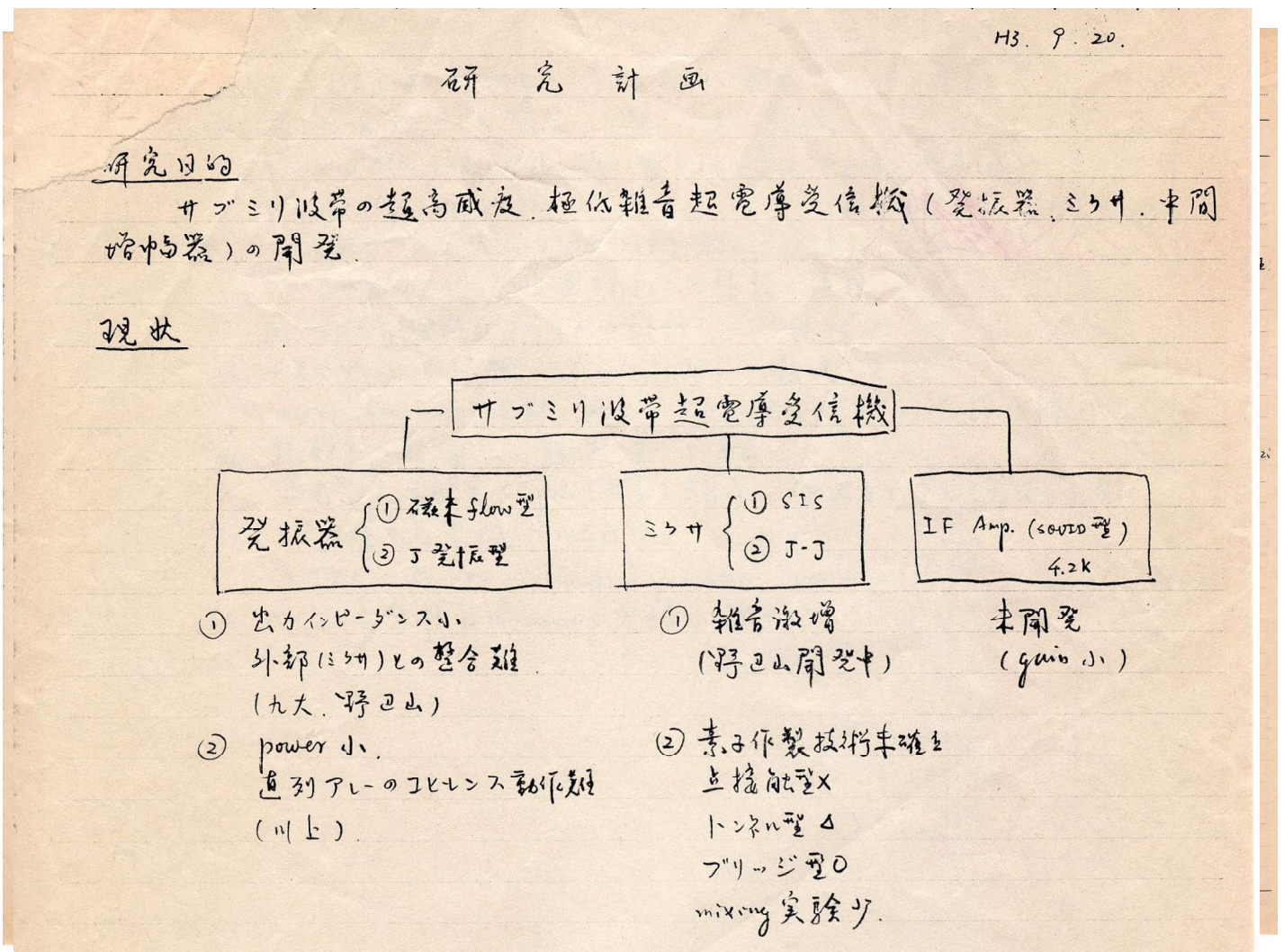


関西先端研究センター初仕事

- 1991年8月に小金井から関西へ移転
- 12月に自家配管工事完了



13



周波数の名称と利用状況

周波数 300 kHz 3 MHz 30 MHz 300 MHz 3 GHz 30 GHz 300 GHz 3 THz →								
超長波 ～長波	中波	短波	超短波	極超短波	マイクロ波	ミリ波	サブミリ波	光波
航行用 無線標識	中波放送 船舶通信	短波放送 船舶通信 航空無線	FM放送 TV放送 航空無線 ポケベル	TV放送 携帯電話 MCA	衛星通信 衛星放送 各種 レーダー	防災無線 簡易無線	未開拓電磁波	光通信
既に広く利用が進んでいる周波数帯						利用が進んでいない周波数帯		

周波数利用の現状 (平成10年通信白書より)

利用が進んでいない原因
電磁波の発生、検出技術が未開発

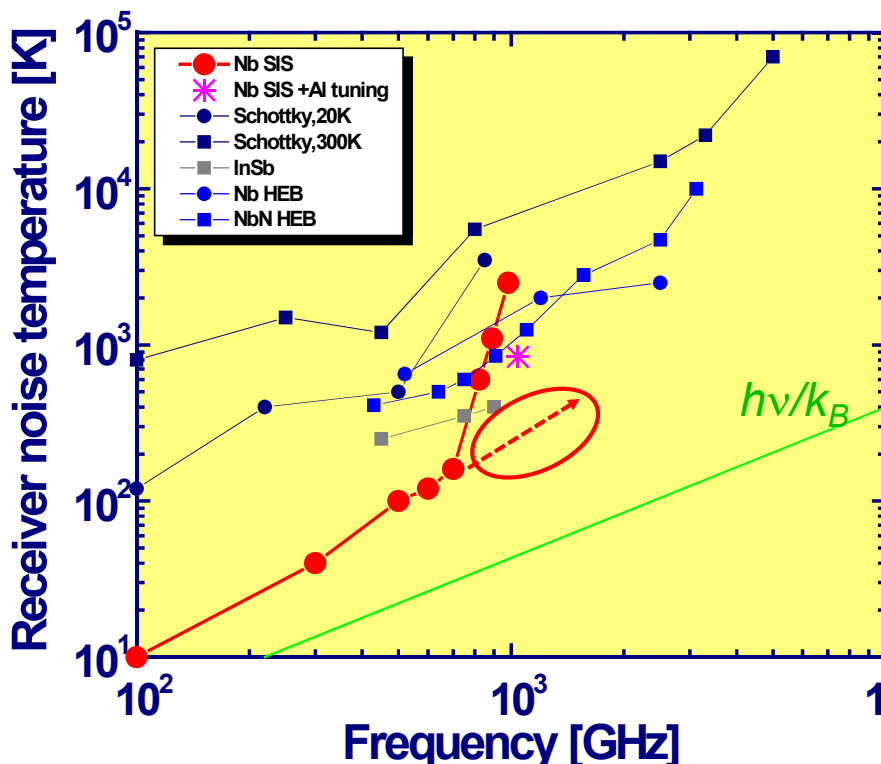


サブミリ波帯高感度受信機
の開発

Y. Uzawa 博士論文公聴会資料(1999年)

15

種々の受信機雑音温度の周波数依存性



特徴：

- ショットキーバリアダイオード
- ホットエレクトロニクス
- 高周波応答 ○
- 雑音温度 ×
- SISミキサ
- 高周波応答 △
- 雑音温度 ○

しかしTHz帯における
低雑音受信機はなし！

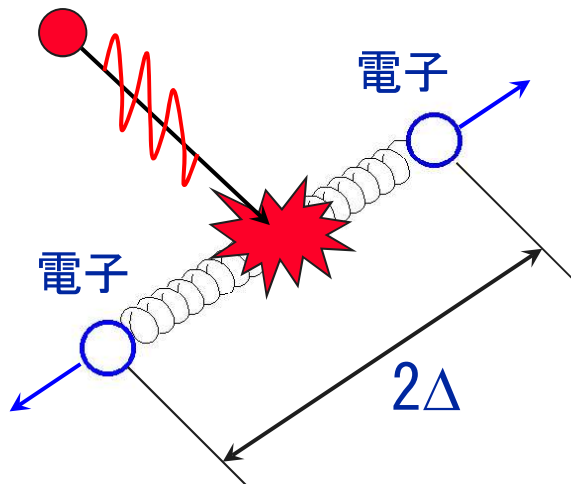
Y. Uzawa 博士論文公聴会
資料(1999年)

16

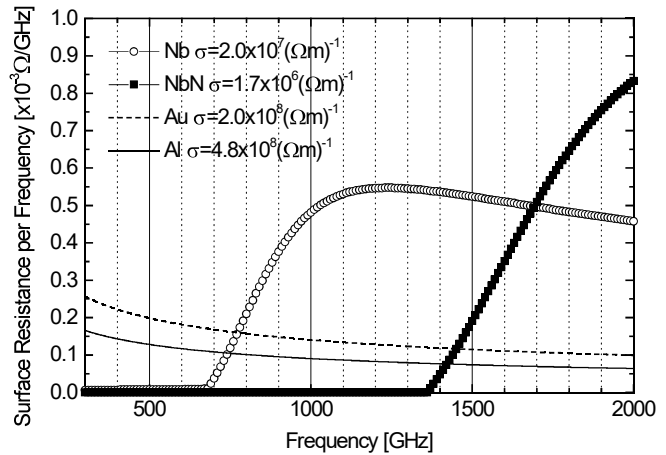
超伝導体におけるペアブレイキング現象

□ 超伝導薄膜伝送線路の周波数限界

光子 $\hbar\omega$



$$\omega = 2\Delta/\hbar$$



Nb薄膜: 700 GHz

NbN薄膜: 1.4 THz

17

世界初の窒化ニオブSIS低雑音動作

Quasi-optical submillimeter-wave mixers with NbN/AlN/NbN tunnel junctions

Yoshinori Uzawa, Zhen Wang, and Akira Kawakami
Kansai Advanced Research Center, Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, 588-2 Iwaoka, Iwaoka-cho, Nishi-Ku, Kobe 651-24, Japan
(Received 26 January 1996; accepted for publication 7 August 1996)

We demonstrate low-noise heterodyne mixing with NbN/AlN/NbN tunnel junctions in the submillimeter-wave region. The prepared junction size was $1 \mu\text{m}$ in diameter and the current density was about $20 \text{ kA}/\text{cm}^2$, supplying a small $\omega C_J R_N$ product ($\omega C_J R_N = 3$ at 300 GHz). The mixer used a lens-coupled log-period antenna and an integrated tuning circuit which incorporated a radial stub tuner for resonating at the junction capacitance. The junctions showed good dc I - V characteristics, excellent submillimeter-wave responses and sensitive heterodyne mixing responses. From 254 to 350 GHz the average receiver noise temperature measured using the standard T -factor method was about 250 K double sideband (DSB). The lowest receiver noise temperature, 200 K (DSB), was obtained around 303 GHz. © 1996 American Institute of Physics. [S0003-6951(96)04242-8]

Superconductor-insulator-superconductor (SIS) mixers with Nb/AlOx/Nb tunnel junctions are used for all applications in millimeter-wave and submillimeter-wave radio astronomy,¹ because their ultralow-noise performance approaches the quantum noise limit— $\hbar\nu/K_B$.²⁻⁵ In these widely used Nb SIS mixers, however, the noise performance deteriorates rapidly at frequencies higher than about 700 GHz, which is the superconducting gap frequency of Nb.⁶ All-NbN tunnel junctions with high gap frequency of about 1.4 THz, on the other hand are promising for the SIS mixers operating in the submillimeter-wave region. According to theoretical calculations by Feldman,⁷ SIS junctions should exhibit good mixing at frequencies up to twice the superconducting gap frequency, which is 2.8 THz for all-NbN tunnel junctions.

Another obstacle in the path to SIS mixers operating at high frequencies is that tunnel junctions must have small $\omega C_J R_N$ products. This requires the junctions to have a very small area and a very high current density. To obtain $\omega C_J R_N = 5$ at 500 GHz, for example, the Nb junctions usually need to have an area of $1 \mu\text{m}^2$ and a current density of $10 \text{ kA}/\text{cm}^2$, while the NbN junctions need to have a critical current density of about $20 \text{ kA}/\text{cm}^2$. Thus, even though the NbN junctions have a high gap frequency there have been no reports on their use in submillimeter-wave SIS mixers, because it is difficult to fabricate high-quality NbN tunnel junctions that have a high current density. There are some reports on SIS mixers with NbN/MgO/NbN tunnel junctions at the millimeter wavelengths. The receiver double sideband (DSB) noise temperature is 65–110 K at the 150 GHz band,⁸ 460 K at 205 GHz,¹⁰ and 320 K at 216 GHz.¹¹

We have recently developed high-current-density NbN/AlN/NbN tunnel junctions fabricated on MgO substrates. The junctions have excellent Josephson tunneling properties and submillimeter-wave responses with a large gap voltage, small gap voltage width, small subgap leakage currents, and sharp photon-assisted tunneling steps at frequencies up to 762 GHz.¹²⁻¹⁴ In this letter we present the first report on the fabrication and testing of a quasi-optical submillimeter-wave

SIS mixer with the high-current-density NbN/AlN/NbN tunnel junctions. The results of systematically investigating receiver noise performance, using the T -factor method, from 254 to 358 GHz demonstrate that our NbN/AlN/NbN tunnel junctions have great potential as submillimeter-wave SIS mixers.

In our experiments we used a quasi-optical structure employing a substrate lens to couple the rf radiation to the junctions. An optical micrograph of our mixer chip is shown in Fig. 1. On a 0.3-mm-thick single-crystal MgO substrate, two NbN/AlN/NbN junctions in series were integrated with a single-crystal NbN planar self-complementary log-periodic antenna and Nb tuning circuits. The procedures for fabricating the junctions are described in Ref. 12. The substrate was clamped on the back of a 3-mm-radius hyperhemispherical MgO lens in an oxygen-free high-conductivity (OFHC) copper block. To avoid the excessive insertion losses associated with dielectric lenses, an offset parabolic mirror was placed at the proper position in front of the MgO lens. The antenna had a frequency-independent impedance of about 80 Ω over several octaves. The tuning circuit incorporates a radial stub tuner and a $\lambda/4$ impedance transformer. The tuning circuit was designed for $\omega C_J R_N = 4$ at 300 GHz, using a specific capacitance value of $70 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ estimated by measuring

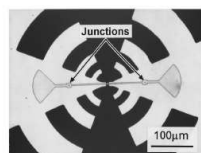


FIG. 1. Optical micrograph of NbN/AlN/NbN mixer. NbN junctions with integrated tuning circuits are fabricated with a self-complementary log-periodic antenna as their ground plane. Each junction is approximately $1 \mu\text{m}$ in diameter.

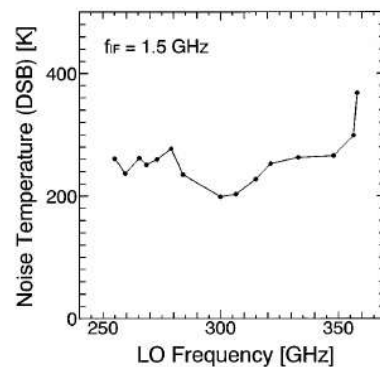
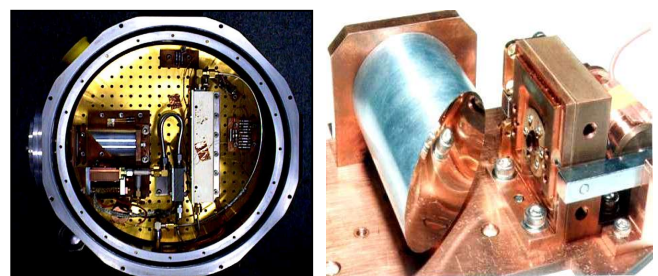


FIG. 3. DSB noise temperature of the receiver as a function of LO frequency. (No data were obtained below 254 GHz because no LO source was available.)

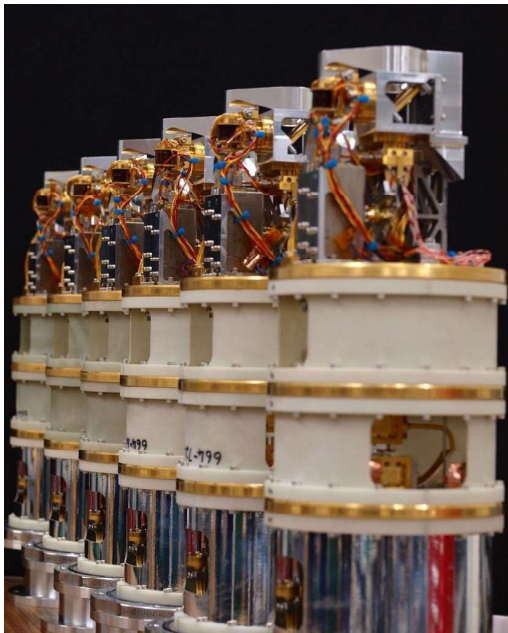


準光学ミキサー

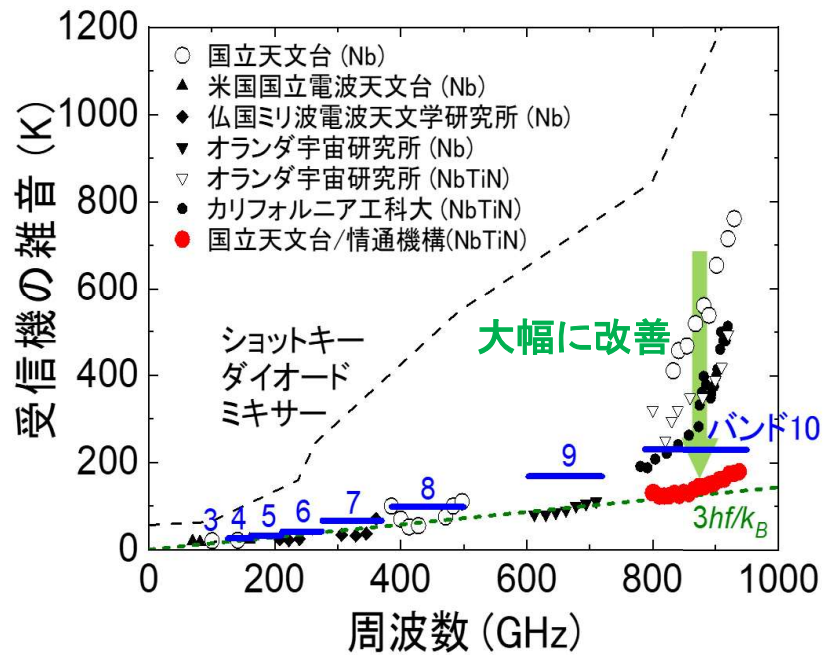
この後、JPL、SRONなどが本気でNbN系デバイスの開発を開始する

18

量産した受信機と雑音性能



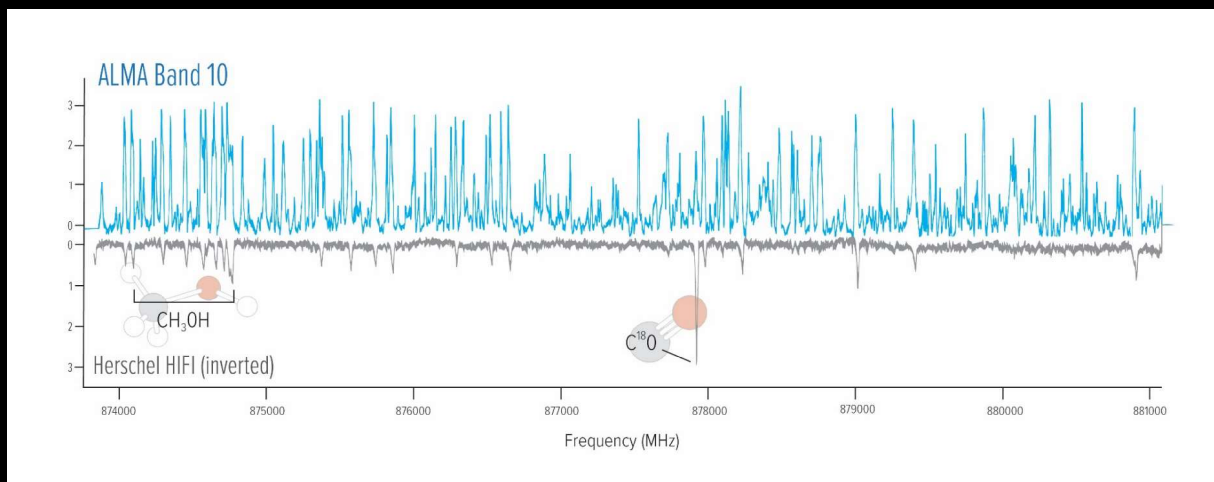
73台をチリに出荷
(2013年度に完了)



世界最高性能を達成

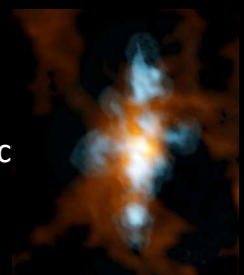
19

ALMA Band 10 Spectral Survey of NGC 6334 I



- Spectral survey of NGC 6334I
- North-south bipolar outflow seen in HDO and CS
- Rich chemical structure not readily seen in beam-diluted Herschel spec

McGuire et al. (2018)



Activities for high-speed wireless communications

- High frequency
- Wideband
- High S/N ratio
- Multi-channels

Use cases of terahertz wireless communications

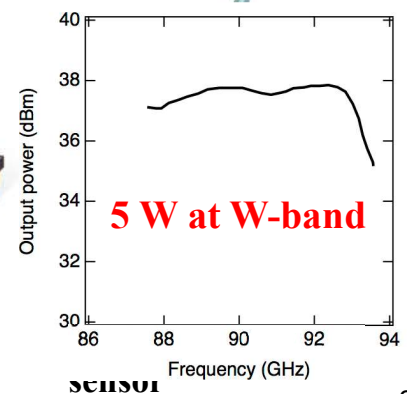
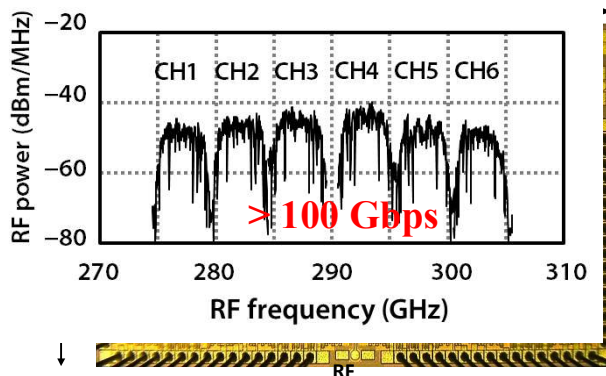
KIOSK downloading

In-door Wireless LAN

Short-range fixed wireless access

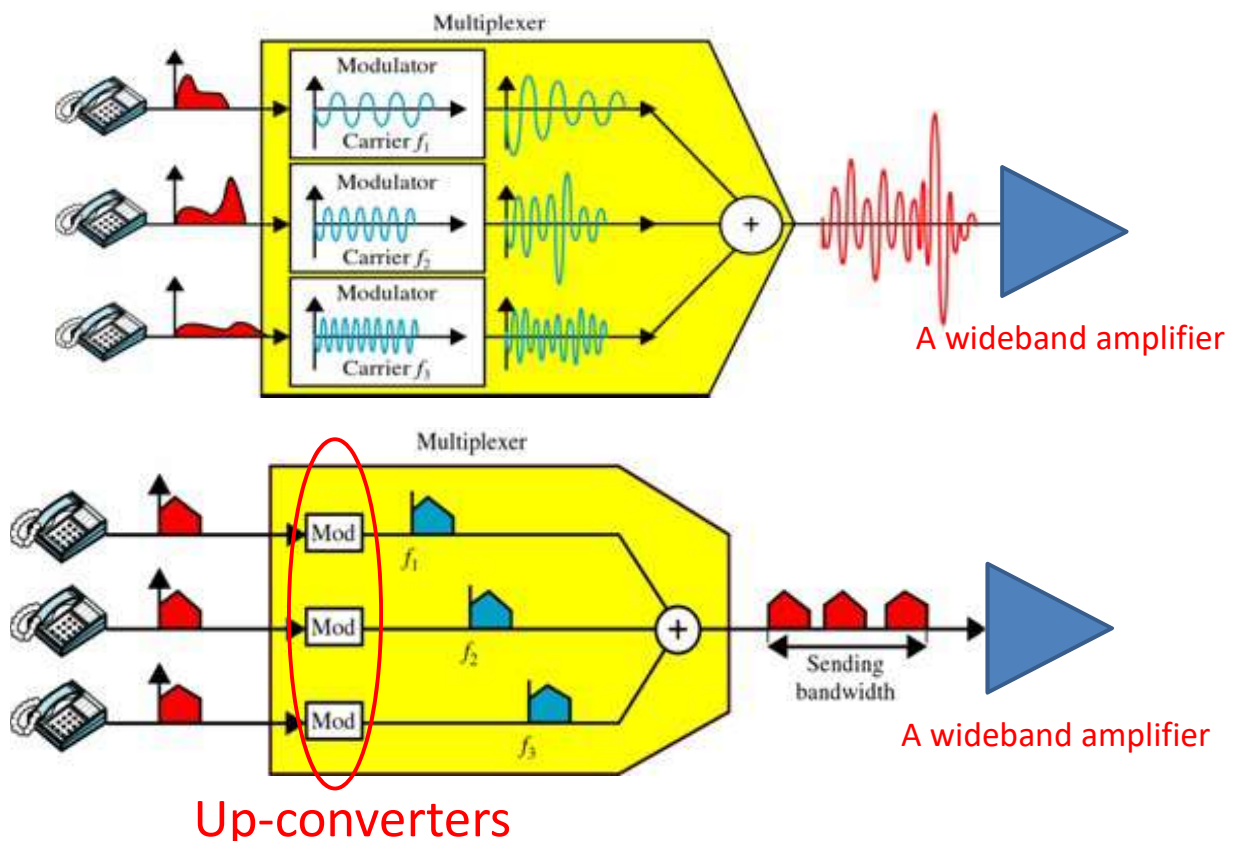


With Hiroshi Univ. a Panasonic



21

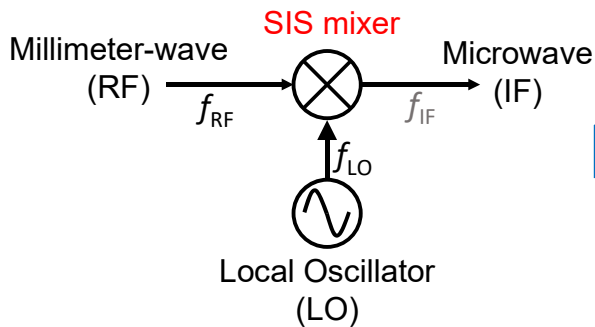
周波数分割多重化 (FDM)



アップコンバータにSISミキサを用いたら？

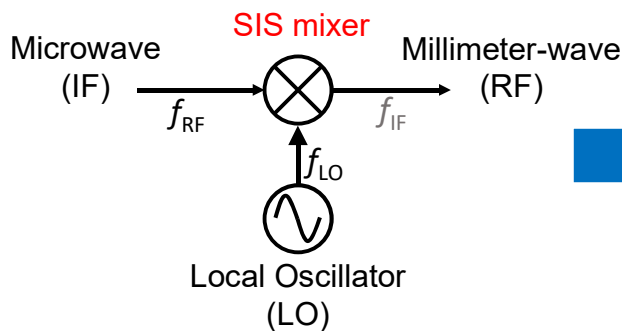
SIS down- and up-converters

- Frequency down-converter



Application:
Radio astronomy
Global environmental
monitoring, etc.

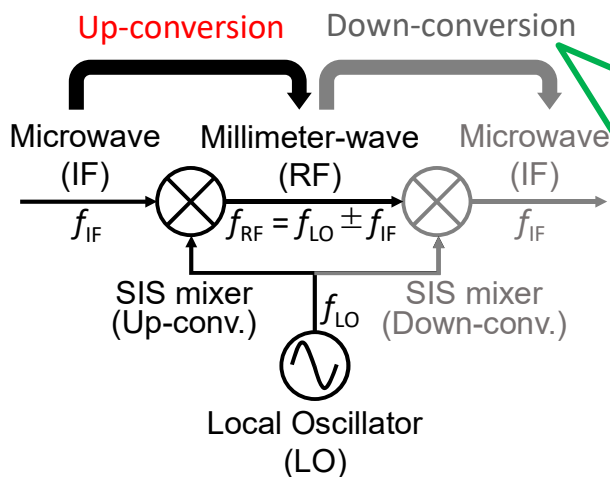
- Frequency up-converter



Application: ???

23

Combination of up/down converters



Appl. Phys. Lett. 36, 777 (1980)

Conversion gain in mm-wave quasiparticle heterodyne mixers

T.-M. Shen and P. L. Richards

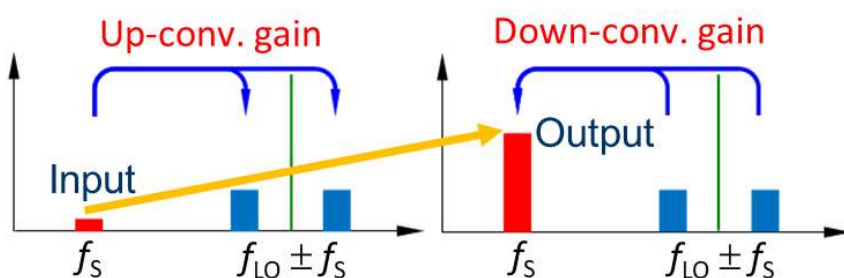
Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720

R. E. Harris and F. L. Lloyd

National Bureau of Standards, Boulder, Colorado 80303

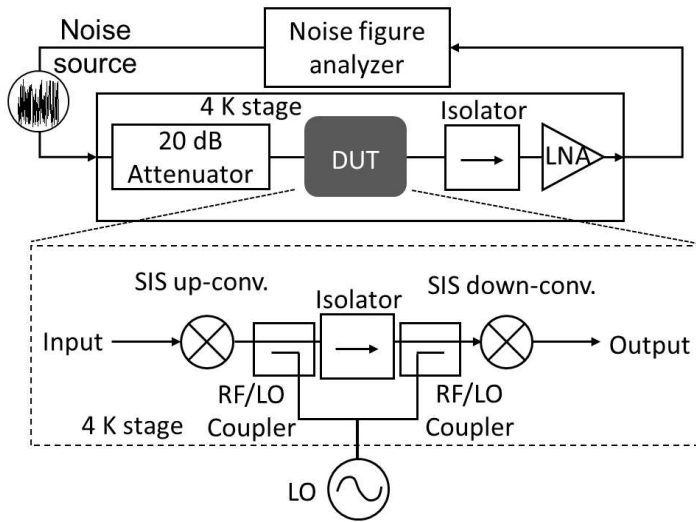
(Received 4 February 1980; accepted for publication 27 February 1980)

We report the observation of heterodyne mixing in superconductor-insulator-superconductor tunnel junctions with significant conversion gain and with a noise temperature comparable to the photon noise limit. (Double sideband $L^{-1} = 1.40 \pm 0.14$, $T_M \lesssim 1.5$ K at 36 GHz.) The mixing arises from the strong nonlinearity in the quasiparticle tunneling currents at voltages comparable to the full energy gap. Gain is observed when the onset of quasiparticle current is sufficiently sharp that quantum effects are important. The observed gain is in good quantitative agreement with calculations based on the work of Tucker. It should make possible the construction of photon-noise-limited microwave heterodyne receivers.

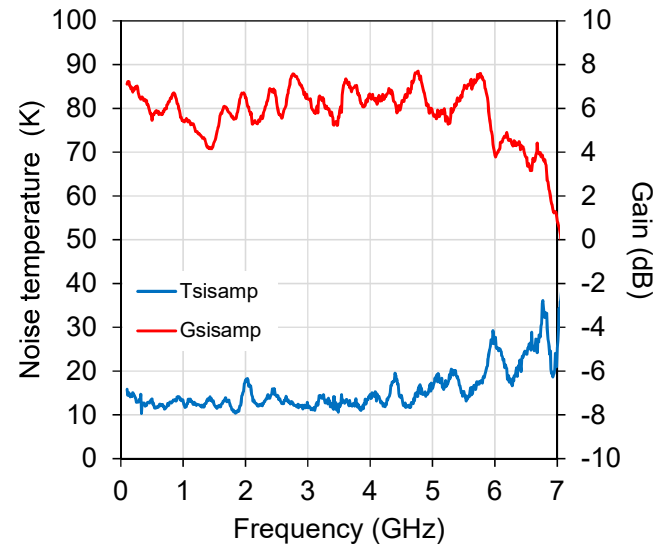


Microwave signal
could be amplified
with low power
consumption (< 1
 μW ?).

• Experimental setup



• Results

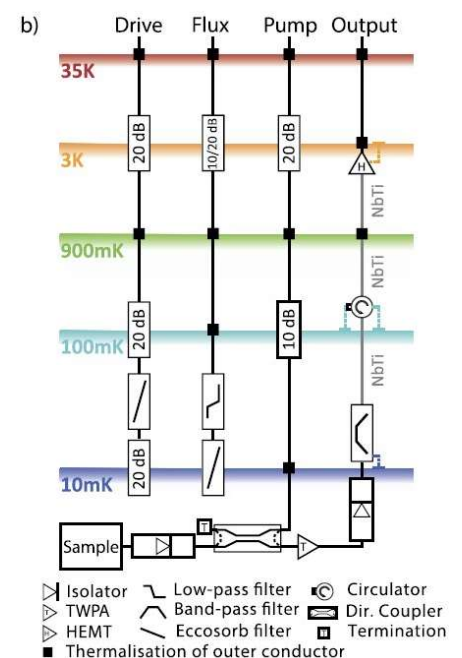
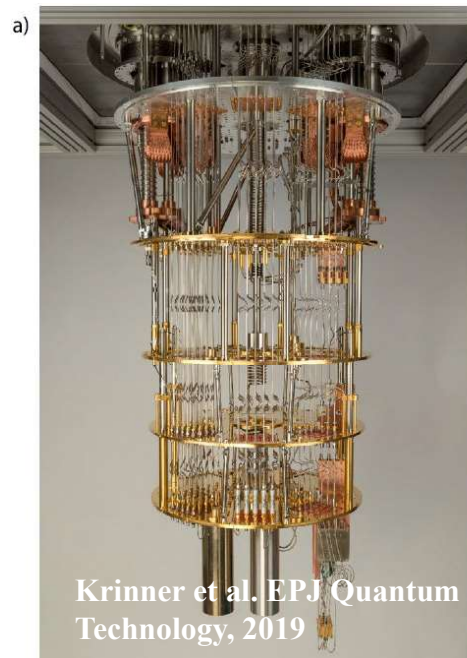
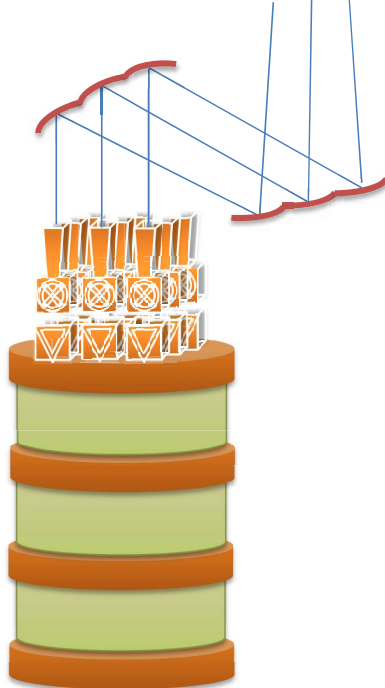


Gain ~ 6 dB and **Noise temperature ~ 12 K** (almost comparable to semiconductor-based CLNA)

25

低消費電力増幅器のニーズ

多くの増幅器を必要とするマルチビーム受信機や量子コンピュータなど



現在主流のHEMT増幅器の消費電力は約10mW:100個で1W

SIS型増幅器はその1/10,000の消費電力 ➡ **新たなサイエンスを拓く可能性**

新たな技術を生むには

- 世の中のニーズを知る
- 遊び心を持つ
- 他分野と交流を持つ
- 固定観念にとらわれない

新しい技術を科学のために装置化するのがATC(先端性＋実用性)



新たなサイエンスを拓く

27

科学の発展と技術の進歩

技術

相互作用

科学

ALMA建設期

- ・科学要求による技術進歩
- ・他分野技術との融合

- ・理論研究
- ・既存望遠鏡による観測

- ・技術シーズの育成
- ・技術のサーベイ

ALMA運用期

- ・観測による新たな宇宙観
- ・新たな科学要求(ALMA2)

ALMA2への技術開発

- ・独自技術の開発
- ・量子情報通信分野との融合

今、振り子は
技術開発に！

ローコードプログラミング(Node-RED)による IoT システム開発

高橋賢

(水沢 VLBI 観測所)

概要(Abstract)

Node-RED は高度なコーディングの知識や経験を必要とせず、最小限のコーディングで迅速にシステムを開発できるツールあり、産業界においてもプロセス制御や産業機器制御などへの応用が進んでいる。主な機能や特徴を紹介するとともに、現在取り組んでいる温度センサおよび MQTT を活用した IoT システムについて報告する。

1. はじめに

IoT (Internet of Things) という言葉はすでに定着しており身近なところに様々な IoT システムが稼働している。しかしながら、いざ IoT システムを構築するとなると色々なセンサやアクチュエータなどのハードウェアだけでなく、それらの制御ソフトやセンサのデータ収集などソフトウェアの知識も必要である。ハードとソフト両方のスキルが必要となるため、開発の敷居がやや高く躊躇することも多い。ローコードツールである Node-RED は、最小限のコーディングでセンサからのデータ取得やモータの制御が実現可能で、取得したデータのグラフ化、保存や GUI の作成も容易に実現できる。

Node-RED による温度センサシステムの構築と IoT で使われる MQTT (Message Queueing Telemetry Transport) を利用したセンサシステムの構築を試みた。

2. Node-RED について

2.1. 概要

Node-RED はノードと呼ばれるモジュールを複数つないだフローでソフトウェアを作ることができるビジュアルプログラミングツールであり、ノードを組み合わせることで複雑なコードを書かなくても比較的短時間で効率的にシステムを構築することができる。

歴史としては 2013 年にイギリスの IBM ハーズレイ研究所で IoT のデータの流れを可視化するツールとして開発され、2019 年から OpenJSFoundation に移管されてオープンソースになっている。プラットフォームは Windows, Mac, Linux, RaspberryPi など色々な環境で使用可能で、バックグラウンドでは JavaScript が動いている。

2.2. 特徴

Node-RED の特徴を以下に列挙する¹⁾。

- 非同期処理が得意
複数の電子部品をそれぞれ同時に独立して制御することが比較的簡単に実現できる。
- GUI (グラフ、ゲージなど) の構築が容易
dashboard というノードを利用するとブラウザ上で簡単にデータのグラフ化ができる。

- 他のプログラミング言語と連携できる
function や exec ノードを使うと JavaScript, Python, Ruby, C などのコードを実行でき、標準機能で足りない部分を補える。
- ネット上の色々なサービスと連携できる
IBM Watson、AWS (Amazon Web Services)、GCP (Google Cloud Platform) などと連携できるノードもある。
- カスタムノードを使える
目的に合わせてユーザ自身がノードをつくることもできる。Node-RED Library で公開されており無料で使用可能である。
- 人間の考え方に近い
基本的に人間は「これをして」「次にあれをして」のように順序に物事を考える。Node-RED はノードを連結して左から右へ順番に処理するので人間の思考に沿っており理解しやすい。テキストベースのプログラミングはループや分岐があり、人間の思考とは少し異なっている（コンピュータの動作に合わせている）。
- ハードとソフトの仲介役
IoT の場合、センサ（電子回路）などのハードの知識とデータ処理するサーバサイドではソフトの知識が必要とされる。Node-RED はハードの制御もデータ処理とかのソフト面もどちらにも容易に対応でき、IoT システム開発の敷居を下げてくれる。

3. Node-RED を用いた温度センサシステム

温湿度センサシステムを Node-RED を使用して構築することを試みた。システムの仕様としては温度・湿度センサ（DHT11, Aosong Guangzhou Electronics Co., Ltd.）により計測し、現在値を小型ディスプレイ（SSD1306, SUNHOKEY Electronics Co.,Ltd.）に表示するものとした。また、計測データは CSV 形式で保存し、温湿度の時系列データのグラフをブラウザでアクセスして参照できるものとした。プラットフォームは RaspberryPi を用いた。

図 1 に今回作成したシステムの外観、図 2 に Node-RED のフローを示す。センサからのデータ取得は DHT11 用に開発された rpi-dht22 ノード、CSV 形式での保存は function, csv ならびに file ノード、グラフ表示は dashboard ノード、ディスプレイ表示は template, function ならびに string ノードを組み合わせることでシステムを構築した。dashboard ノードは Web サーバ機能も内包しており、サーバの設定や HTML などの記述をせず、グラフをブラウザで表示させることが可能である。

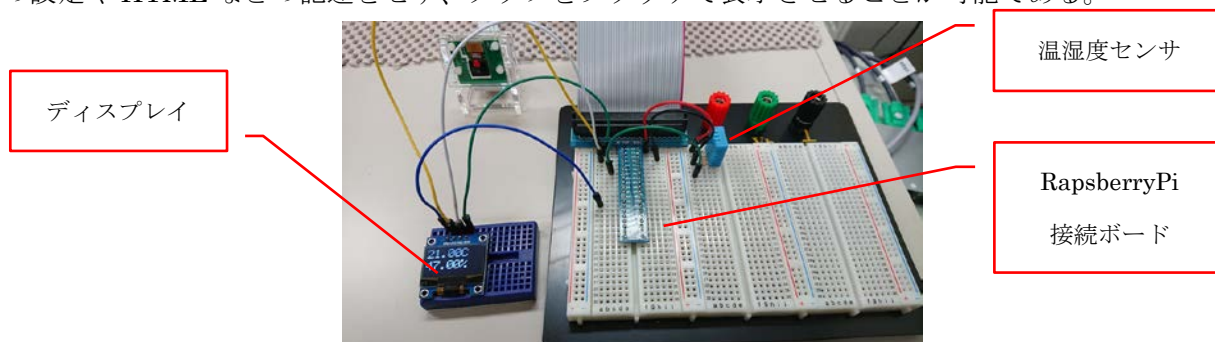


図 1. システムの外観

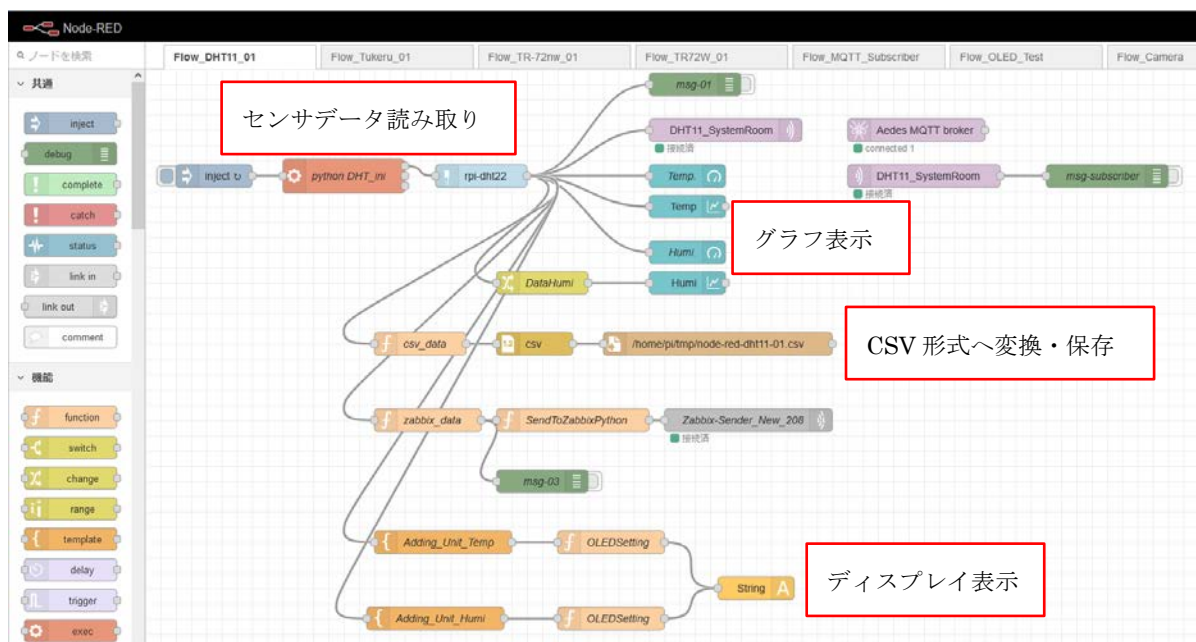


図 2. Node-RED のフロー

4. MQTT を用いたセンサシステム構築

IoT システムで使われる通信プロトコルの一つに MQTT がある。このプロトコルは IBM により開発された、IoT や M2M (Machine to Machine) に最適化させるための通信プロトコルである²⁾。

図 3 に MQTT のシステム概要を示す。Publisher と呼ばれるメッセージを発行する者、Subscriber と呼ばれるメッセージを購読する者、それらを仲介する Broker の三者から構成される。Publisher から送信されるデータには、Topic と呼ばれる区別文字列とデータが含まれている。個々の Subscriber はどの Topic を受信するかを Broker に登録し、常時 Broker と接続しておく。Broker は Publisher からデータを受信したら、その Topic を判定して、その Topic に登録されている Subscriber すべてに送信する。つまり、Subscriber は特定の Publisher からのデータのみ受信できることになる。

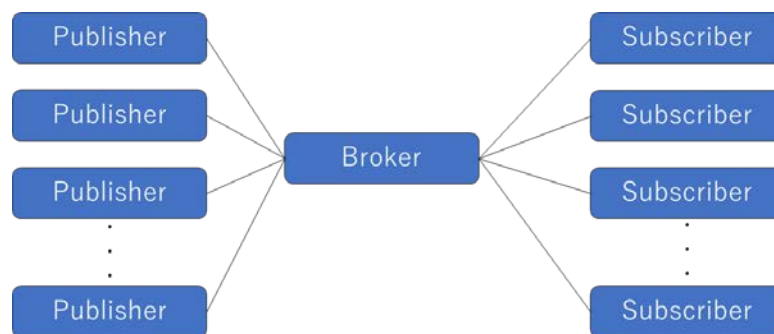


図 3. MQTT の概要

これに加えて以下のような特徴もある。

- トラフィックが軽量

HTTP と比較してトラフィックはおよそ十分の一で済む。電池の消費量も抑えられ、コイン電池で駆動するような小型センサなどには非常に有用である。

- 非同期かつ双方方向通信が可能

HTTP は相手がいないと通信できないが、Publisher と Subscriber は Broker を介して情報をやり取りするので、両者が必ずしもリアルタイムで通信する必要はない。従って、双方向でありながら非同期で通信できる。これは、工場などのノイズ源が多い環境における無線によるセンサの情報収集など、通信環境の悪い状況において非常に有用である。

現在は Publisher を水沢キャンパス内各施設に置かれた温度センサ、Subscriber は各施設管理者などとした、センサシステムの構築に取り組んでいる。

5. まとめ

今回はローコードツールである Node-RED について概要や特徴、実際に作成した温湿度センサシステムについて報告した。また、IoT システムで多く用いられている MQTT プロトコルを用いた温度センサシステムの構築の試みについても報告した。今後、実用化を目指して開発に取り組む予定である。

また、Node-RED はカメラ、赤外線、超音波、気圧や加速度センサモジュールなども容易に扱えるので、監視システムや人感センサシステムなども比較的簡単に作ることができると期待される。システム開発の敷居が高く、なかなか挑戦できなかった IoT システム開発にも意欲的に取り組むことを後押ししてくれるツールであると感じている。さらに、AWS などのクラウドサービスとも連携可能なノードもあることから、それらを活用したシステムなども非常に興味深い。今後も Node-RED の積極的な活用を検討していきたい。

6. 参考文献

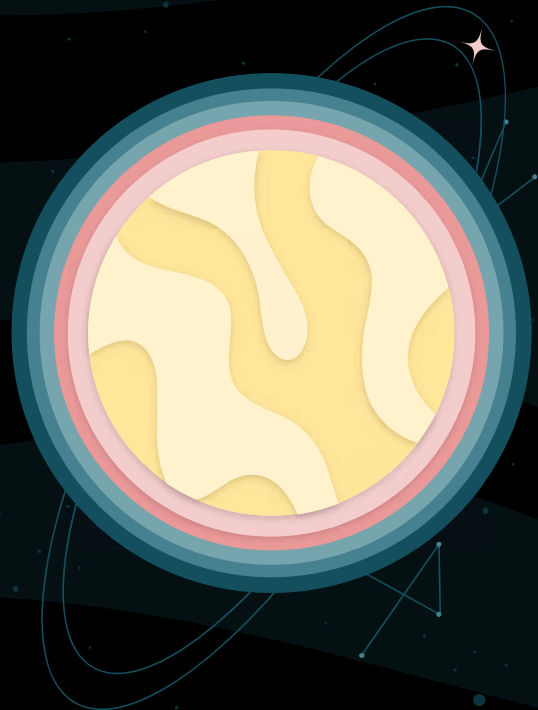
- 1) 小池星多 (2021) ラズパイの新常識！Node-RED でノーコード/ローコード電子工作，リックテレコム.
- 2) 後藤哲也 (2021) 電子工作のための Node-RED 活用ガイドブック，技術評論社.

Introduction to Subaru Telescope Summit Daycrew - Kaizen Process' for Daily Operations

Presented By:

Ben Bergin
Sr. Summit Technician / Work Sub-Coordinator

Subaru Telescope - National Astronomical
Observatory of Japan (NAOJ)



Professional Background

- Formal training in Toyota Production Systems (TPS), Six Sigma, and 6S Lean Manufacturing
- Design and Implementation of Complex Electro-Mechanical Manufacturing Facilities.
- 15 Years experience in Manufacturing (Aerospace/Defense, Electro-Mechanical Assembly)



- KAIZEN translates in English as "change for better" but is perhaps better stated as IMPROVEMENT.
- These can be small or large, from the bottom or the top of an organization
- Most importantly, building up to something better than before!

発表は英語のみで申し訳ございません。質問がある場合は、後でブレイクアウトルーム 2 番の 質疑応答 (Q&A) に参加することをお勧めします。

Presentation Outline

01

Safety Systems

- Equipment Updates
- Consistent Training
- New Technologies

02

Top Unit Exchange (TUE) Process Development

- TUE Crane Bridge Updates
- Lessons Learned in Training

03

Staffing / Scheduling

- Online Availability Log
- Adapting to COVID
- Training for the future

04

Facility Wide Improvements

- LED Lighting Retrofit
- UPS Replacement
- Scheduled Maintenance

Safety Systems

- Equipment Updates
 - Replacing old or outdated items
- Standardizing safety systems for ease of inspection
- Recognizing changes in procedure which effect equipment needs



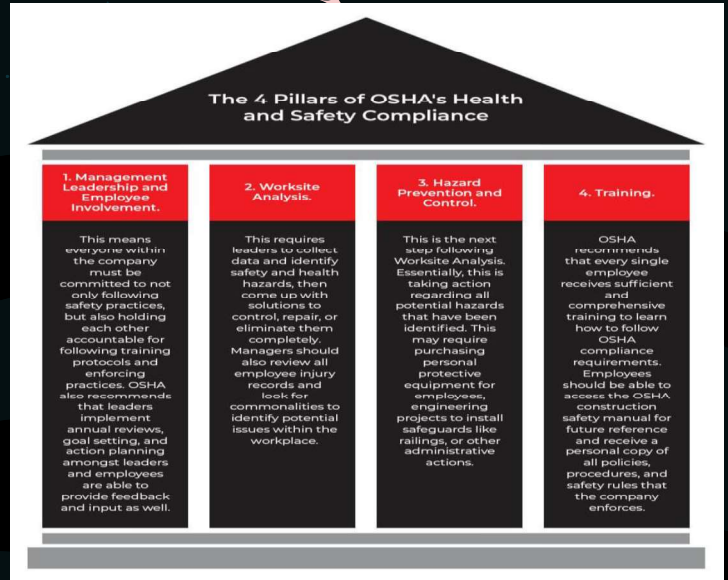
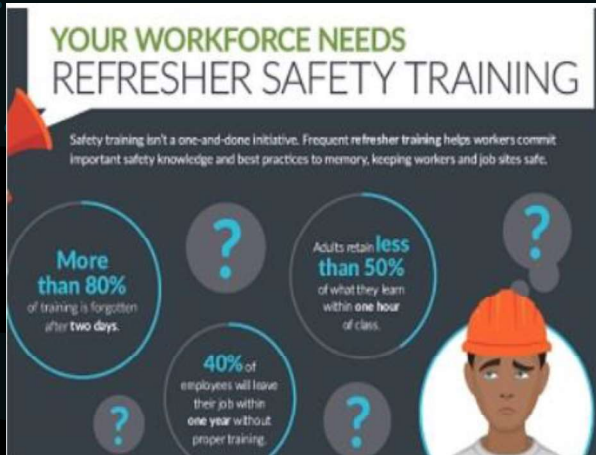
IMPORTANT — PLEASE NOTE

This is a mark-up copy and uses the following colour coding:

- Text example 1 — indicates added text (in green)
- ~~Text example 2~~ — indicates removed text (in red)
- indicates added graphic figure
- indicates removed graphic figure
- I.X. ... — Heading numbers containing modifications are highlighted in yellow in the Table of Contents

Safety Systems

- Consistent Training
 - Focus on training new skills as well as routine retraining of all staff.
 - Emergency Drills and knowledgeable communication
 - Real World, Role Based Cross-Training



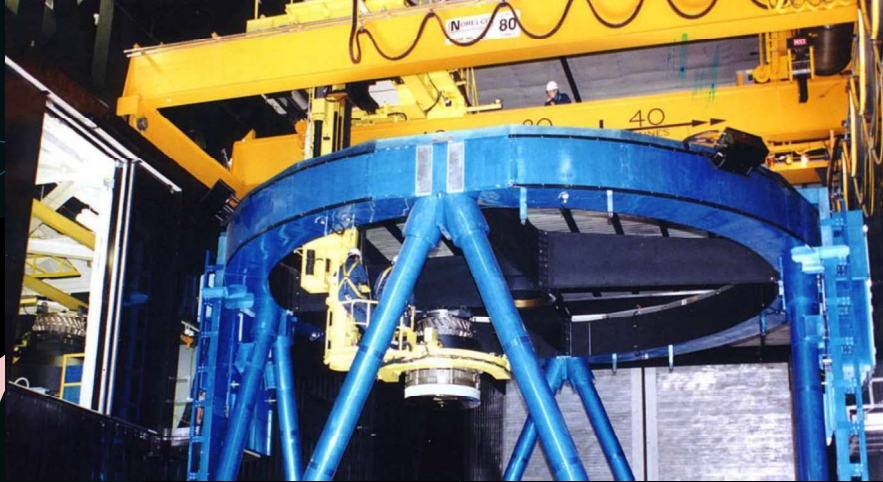
Safety Systems

- New Technologies
 - The need to update previous equipment based on changing technology
 - Recognizing changes in technology also effect written procedures
 - Building in the budget for these updates



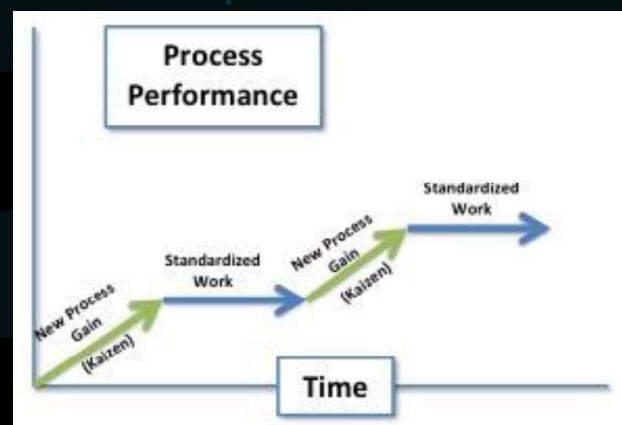
Top Unit Exchange Process Development

- TUE Crane Bridge Updates
- Lessons Learned in Training



Staffing/Scheduling Lessons

- Online Availability Log
- Adapting to COVID
- Training for the Future



Facility Wide Improvements

- LED Lighting Retrofit
- UPS Replacement
- Scheduled Maintenance

Lifespan	LEDLight 60,000hrs	40W FluorescentTube +light+2tubes+Ballast 10,000hrs
Power Consumption	15Wx2=30W No Ballast	80W+20W=100W Lights+Ballast
Initial Bulb Cost Investment	\$200.00	\$60.00
1 Year of Continuous Use	256,320Kw hrs	854,400Kw hrs
Cost of Electricity for 1 Year	\$43,574.40	\$145,248.00
Cost Maintenance/Labor 1 Year	0	\$580
Cost to Operate	\$43,774.40	\$145,828.00
Savings Per Light 40W Fixture	\$205.00	



A PICTURE IS WORTH A THOUSAND WORDS!

I hope the work we are doing to improve the Subaru Telescope will allow us to continue to capture pictures of our universe into the future!

ACA GPU分光計の開発 - ソフトウェア品質向上の取り組み

○清水上 誠、渡辺 学、臧 亮堅、中山 進、小杉 城治
(自然科学研究機構 国立天文台 アルマプロジェクト)

概要

Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) と国立天文台アルマプロジェクトでは、ALMA 望遠鏡アタカマコンパクトアレイで観測に供する分光計の開発を行っている。この分光計は GPGPU を用い、CUDA ライブラリと C++ 言語で実装されたソフトウェアによって、384Gbps の入力信号を、実時間で処理する。本発表では、この分光計のソフトウェア開発における、品質向上のための取り組みとそれを実現するツールについて紹介する。

1. 導入

1.1. ACAトータルパワーアレイ

ALMA 望遠鏡は、南米チリ共和国の北部、標高 5000m のアタカマ砂漠に位置する電波望遠鏡である。ALMA 望遠鏡を構成するアンテナ 66 台のうち、16 台が日本が開発したアンテナで、この 16 台によってアタカマコンパクトアレイ (ACA、別名モリタアレイ) を成す。ACA は 12 台の 7m アンテナと 4 台の 12m アンテナから構成され、4 台の 12m アンテナはトータルパワーアレイと呼ばれ、天体からやってくる電波の強度を精密に測定することを目的としている。

1.2. ACA分光計

ACA 分光計は、ACA トータルパワーアレイを構成している 4 台のアンテナからの信号を入力とし、同一アンテナにおける偏波ごとの自己相関スペクトルと偏波間の相互相関スペクトル、および、アンテナ基線毎のアンテナ間の相互相関スペクトルを、実時間で求めるシステムである。ACA 分光計は、4 ベースバンド $\times$ 4 アンテナ $\times$ 2 偏波 $\times$ 3bit (量子化ビット数) $\times$ 4GHz (サンプリングレート) = 計 384Gbps の時系列信号を入力とし、4 ベースバンド $\times$ {4 基線 $\times$ 3 偏波対 $\times$ 4-8Byte + 6 基線 $\times$ 4 偏波対 $\times$ 8Byte} $\times$ 64 スペクトルウィンドウ $\times$ 8192ch $\times$ 1KHz = 最大 136Mbps でパワースペクトルの出力を得る。なお、出力のパラメーターである偏波対・スペクトルウィンドウ・チャンネル数・出力周期は最大のビットレートを超えないよう、観測設定が行われる。

1.3. システム構成

ACA 分光計システムは、実質的な処理を担う、ACA Spectrometer Control (ASC) ・ ACA Spectrometer Module (ASM) と、付随する、Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) ・ 光スプリッター・ネットワークスイッチなどを、構成要素とする。

1.4. ASM

ASM は、ACA 分光計の計算処理を担う装置である。ASM には、計算機とその計算機上で動作するソフトウェアが含まれ、必要がある場合には ASM 計算機や ASM ソフトウェアとして呼び分ける。ASM は、1 台のコールドスペアを含む 5 台あり、それぞれの ASM は、5U ラックマウント型の汎用の計算機に、光信号を受信する 2 枚の DRXP ボードと、計算処理を行う 4 枚の GPGPU ボードを、搭載している。1 台の ASM が 4 つのアンテナの 1 つのベースバンドの処理を担い、4 台に分散して、4 ベースバンド × 4 アンテナの、分光処理を行う。

2. ASMソフトウェアの開発

2.1. 開発手法

ASM ソフトウェアにおいては、モジュール構成についても計算処理についても、初期には実現方法や実現性が確定的ではない部分が多くあり、プロトタイピングによって方針を確定していく必要があった。そのため、ASM ソフトウェアの開発は、長期のスケジュールの見積りには概算工数の積み上げを用いながらも、中短期には反復増加型で行うこととした。

ここでの反復増加型開発の特徴は、全ての機能を実現した製品を 1 度にリリースせず、機能を順次追加してリリースを繰り返すことである。ASM の場合は、数日から数週間をリリースサイクルとし、各リリースは、スケジュールや技術的難易度を考慮して、分割可能な機能単位で、期限と順番を動的に決めている。

リリースという形で進捗を共有することで、プロジェクト内部での中短期のスケジュールを組み立てることが可能となっている。また、実行可能な形で各リリースを行うことで、ASM ソフトウェアのコンポーネント試験および他コンポーネントとのインテグレーション試験を、開発者以外も行うことが可能である。

3. 設計と実装

ASM ソフトウェアにおいては、反復増加型開発により設計と実装それぞれの更新頻度が高く、プロトタイピングによって実装から設計へのフィードバックも頻繁に行われる。設計と実装の品質を向上させるためには、それらを相互に遅滞なく更新し、齟齬が無い状態を保つ必要がある。これを実現するために、ソースコードツリーからの文書生成、プレーンテキストによる文書と図の記述、バージョン管理による変更の追跡を、体系的に行うことに取り組むこととした。以下に利用したツールと実現される効果を紹介する。

3.1. Doxygen

Doxygen は、ソースコードツリーから文書を生成するツールである。生成する文書は、Javadoc の様な HTML 形式や PDF 形式などを選択することができる。Doxygen は、ASM ソフトウェアの実装で用いる C++ 言語に対応しており、C++ 言語のヘッダファイルやソースファイルを解析し、ネームスペース・クラス・構造体・共用体・関数・変数・定数などの要素について、関係を

考慮して、Application Programming Interface (API) 文書を自動生成する。また、ソースコード上に記載したコメントも収集され文書に組み込まれるため、設計意図などを加えることもできる。ASM ソフトウェアでは生成される文書を詳細設計文書として利用することとした。

3.2. HTML & Markdown

HTML と Markdown はどちらも書式付き文書を記述するためのマークアップ言語である。複数のクラスから構成されるモジュールの関係や静的に解析できない実行時のシーケンスなど、抽象度が高い設計は、自動生成を利用して文書化することはできず、個別の記述が必要になる。Doxygen は、ソースコード以外に HTML や Markdown を文書に組み込むことも可能であるため、抽象度が高い設計については、HTML や Markdown で記述し、ソースコードツリーに含めて管理することで、Doxygen によって集約することとした。HTML は CSS と JavaScript と組み合わせることで複雑な表現を実現することができる。

3.3. Graphviz & PlantUML

Graphviz は、DOT 言語で記述されたダイアグラムを描画するツールである。また、PlantUML は、PlantUML 専用言語で記載した Unified Modeling Language (UML) を描画するツールで、Graphviz のフロントエンドとして動作する。ASM ソフトウェアの設計においては、シーケンス図・クラス図・オブジェクト図などでの図示に PlantUML を用いることとし、PlantUML 専用言語で記述した。DOT 言語および PlantUML 専用言語は、ソースコード・Markdown などの一部として記述することができ、Doxygen によって自動的にレンダリングされ、文書に組み込まれる。また、Doxygen が解析した構造の図示にも利用され、ソースコードに紐づくクラス図やコールグラフなどの図は自動的に生成される。

3.4. Git

Git は、ソースコードなどの変更履歴を記録・追跡するための分散型バージョン管理システムである。ASM ソフトウェアの開発では、ソースコードはもとより、文書や図をプレーンテキストで記述することで、Git を使った変更の追跡とバージョン管理を可能とした。

4. 設計と試験

ASM ソフトウェアにおいては、試験を容易に行えることを、一つの設計指針のとして据えている。より具体的には、プログラミングパラダイムを背景とした、関数分離・クラス継承・副作用排除や、Linux 哲学を背景とした、単機能特化・フィルタープログラム・階層的思考などの考え方を取り入れている。これらの考え方を取り入れた設計を行うことで、単純な入力とそこから得られる出力の予測が容易になるため、試験の設計や実装も容易になる。容易な試験は自動試験につながる。ASM ソフトウェアの開発では、品質向上のため、開発者による単体試験の実装と実施、自動的な継続的インテグレーションによる早期の不具合発見に取り組むこととした。以下に利用したツールと実現される効果を紹介する。

4.1. Google C++ Testing Framework

Google C++ Testing Framework (Google Test) は C++ 言語を用いるプロジェクトで単体試験を行うフレームワークである。Google Test は、ライブラリとして提供され、Google Test のテストランナーを起動する main 関数を C++ 言語で実装し、コンパイルした後、実行ファイルを実行することで単体試験を行う。単体試験のテストケースは、Google Test が提供する Assertion マクロの中から適切な物を選択し、C++ 言語のソースコードとして記述し、プロジェクトのソースツリーに保存する。試験を実行すると、選択した Assertion マクロの種類に沿って、状態や変数が、想定される結果と比較され、試験の可否の出力が得られる。Google Test の可否の出力は、カラーコード付きの標準出力の他、JUnit 形式の xml ファイルでも取得できる。JUnit 形式の xml は結果の自動解析や試験文書の生成に用いることが可能である。

4.2. Jenkins

Jenkins は自動化サーバで、ソフトウェア開発においてビルド・試験・デプロイなどを自動的に行う継続的インテグレーションサービス (CI) を提供する。Jenkins は多くの場合はサーバーサイドで実行され、ユーザーは WEB インターフェースを介して操作する。Jenkins はリポジトリへのコミットのタイミングや定時にプロジェクトのビルドや試験などを行い、結果は WEB インターフェース・レポート文書・メールなどで確認することができる。自動的にビルドや試験が実行され結果が記録されることで、不具合が混入した場合には、結果の履歴を遡り、問題箇所を容易に特定することが可能になる。ASM ソフトウェアの場合は、Git リポジトリへのコミットをトリガーにして、eclipse によるヘッドレスビルド・Make によるビルド・単体試験を自動実行している。

5. まとめ

ASM ソフトウェアは、実行可能な形式で機能追加のリリースを頻繁に行う、反復増加型の開発手法を取っている。開発者以外のメンバーが早い段階でソフトウェアを使用し、客観的に評価や試験を行うことが可能となっており、ASM ソフトウェアの品質向上に寄与している。

また、ASM ソフトウェアの開発では、設計・実装・試験の一連の工程で、自動化のためのツールを導入することで、次のようなことを実現している。

1. ソースコードを元に文書を生成することによる、実装と矛盾の無い設計書や説明書の維持。
2. 文書や図をプレーンテキストで記述することによる、ソースコードと同様の管理。
3. バージョン管理ツールを使用することでの、ソースコード・文書・図の容易な変更の追跡。
4. 自動試験のための、容易な試験と単純な設計。
5. 継続的なビルドと試験の監視による、積極的に高頻度の設計や実装の更新。

ASM ソフトウェアの開発では、これらを実現することで、文書・図・ソースコードと最終的な製品の品質向上に取り組んでいる。

大型鏡材の表面欠陥 (Surface Defects on Large Optics)

林 左絵子 (国立天文台 TMT プロジェクト)

(Saeko S. Hayashi (TMT Project, National Astronomical Observatory of Japan))

概要

望遠鏡光学系や大型観測装置に必要な大型の光学材料について、ここでは反射光学系を念頭に、表面欠陥の問題を取り上げる。これは加工中に生ずるものと、運用中に生ずるものがあり、前者については仕様で規定しておくことができる。光学系および光学コーティングに関する仕様策定に参考となる標準の例を調べた。後者については、欠陥の記録および必要に応じた措置により、長期にわたる使用に耐えられるよう管理することが重要である。欠陥の顕著な増加が見られる場合には、使用環境の改善も必要になる。

Abstract

For the long years of telescope operation, it is very important to manage the defects of its optics, especially the damage to their surfaces. In this report, we discuss the defects of “interest” of the optics and optical coating, and list frequently referred standards. Detailed inspection and remedial procedure of the potentially damaging defects are important aspects during the life of the telescope.

1. ガラス系材料の表面欠陥

望遠鏡や観測装置に使われる反射光学系に、ガラス系の材料がよく使われる。これは長年にわたり安定した形状を保つことができるためである。しかし損傷が生じてしまうと、そこを埋めてもとの性能を復元するという方法をとることができないため、表面欠陥を生じさせない、あるいは広げないよう十分管理する必要がある。製品の仕様で損傷のサイズなどを制限することにより、加工終了後に製品として受け取る条件を明確にしておくことができる。つまり規格に合わないものは受け取らないということである。(実際には、性能に顕著な悪影響があるものでなければ、受け取るであろう。) 運用中については、十分な防止策を作るとともに、損傷時にそれが広がらないよう事後措置を講じる必要がある。

2. 光学系の表面欠陥に関する標準

内製であれ外注であれ反射光学系を作る際に、表面欠陥に関する仕様を策定するための基準をどうするか。サイズや加工工程の複雑さにもよるが、欠陥がゼロというのは現実的ではない。このため国際標準や米国で事実上使われている標準がある。光学系および光学コーティングに関する標準の例を下記に挙げる。ここで ANSI, ISO, OEOSC, JIS はそれぞれ American National Standards Institute, Inc., the International Organization for Standardization, Optics and Electro-Optics Standards Council, Japanese Industrial Standards 日本産業規格である。

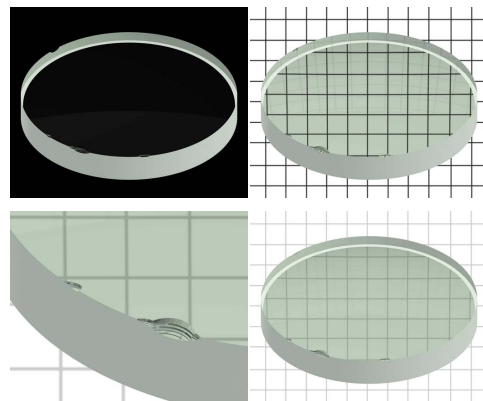
- ANSI/OEOSC OP1.002-2009 For Optics and Electro-Optical Instruments - Optical Elements and Assemblies - Appearance Imperfections

- ANSI/OEOSC OP3.001-2001 For Optics and Electro-Optical Instruments - Optical Glass
- ISO 9022: Optics and photonics - Environmental test methods
- ISO 9211: Optics and photonics - Optical coatings
- ISO 10110-7:2008; Optics and photonics - Preparation of drawings for optical elements and systems - Part 7: Surface Imperfection Tolerances
- MIL-C-48497A (1980) Military Specification Coating, Single or Multilayer, Interference: Durability Requirements for
- MIL-PRF-13830B (1997) Performance Specification Optical Components for Fire Control Instruments; General Specification Governing the Manufacture, Assembly, and Inspection of

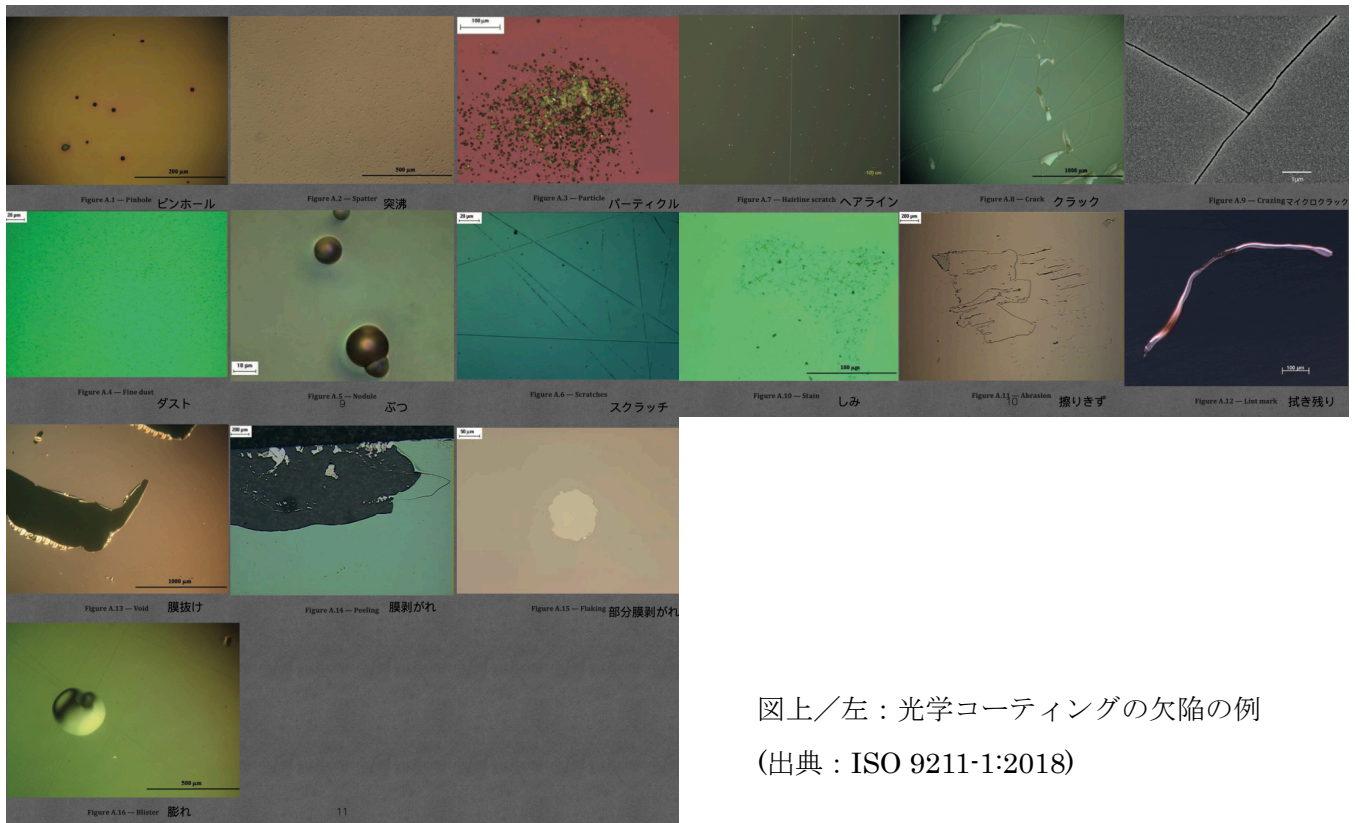
JIS は ISO に準拠しており、ISO 9211-1:2010 が JIS B 7080-1:2015、ISO 10110 が JIS B 0090 に相当する。ISO 9022 に相当する JIS 規格は見つけれなかった。

このうち次世代超大型光学赤外線望遠鏡 Thirty Meter Telescope (TMT) では、少なくとも主鏡セグメントを作る上で、主に MIL-C-48497A に依拠している。(注：コーティングについては耐久性仕様などで ISO を採用している。)

次に代表的な欠陥について上記の標準に示されている画像を挙げる。



図：光学系の欠陥 カン、カケの例 (出典：ANSI/OEOSC OP1.002-2009)



図上／左：光学コーティングの欠陥の例
(出典：ISO 9211-1:2018)

TMTの主鏡セグメントでは scratch と dig について、MIL-C-48497A に準拠した仕様を設けている。この scratch と dig の規格は scratch (μm で表した数字)·dig(0.01mm で表した数字)という組み合わせで示す。たとえば 80-50 あるいは 60-40 というのはキズ幅の上限が 80/60 μm 、ポツ傷を円形としたときの最大直径 0.50/0.40 mm ということである。

日本の産業標準規格 JIS は国際標準 ISO に基づいており、このような表面欠陥については

80-50 が 5/1x0.80, L1x0.05

60-40 が 5/1x0.60, L1x0.04

となる。MIL 規格は数を指定しないため、ここでは 1 個として ISO 標準に変換した。光学系のサイズにより、実際には許容できる数をそれなりに妥当なものにする必要がある。

3. 光学系の表面欠陥をどう扱うか

上記のような損傷は、加工に伴う何らかの物理的接触により生ずる。内包されていた泡や包含物が掘り出されて、損傷につながるケースもあるが、多くの場合、加工機や測定器その他の治具の衝突による縁の部分の損傷や、加工機、測定器などの接触による表面の損傷である。後者の場合、加工面に歯型や引きずり傷が残る。ひきずり傷は氷河の擦痕と同様、硬いものがガタガタと表面を移動する際に進行方向に開いた三日月型の特徴的な形を示す。

製品の最終検査で見つかる損傷や、望遠鏡光学系のコーティング時に古いコーティングを剥がしたさいの検査で見つかる損傷については、サイズにより措置が必要になる。検査方法としては、(ルーペを

併用した）目視検査やポータブル顕微鏡による局所的な検査が行われている。内部に亀裂が生じている場合、超音波や偏光を使う方法もあり得る。

目視検査は、可能であれば暗室で局所的な照明を当てる方法がとれると良い。割れ目が見えやすいからである。TMT 主鏡セグメントの場合、たとえば米国で研磨加工を担当している会社での検査の様子を次に示す。この写真は TMT ウェブサイトで公開されているものである。外周にリングをはめて、それを吊り具や床への固定治具に固定している。セグメントは 45mm の厚さで反対側を見通せる。



写真：TMT 主鏡セグメント 研磨終了後の外観検査の様子（TMT website）

さて、損傷部の措置として、残念ながらガラスは接着・溶接、穴埋め、継ぎ（接木とか継ぎはぎのような）などによる復元ができない。サイズが小さければモニターを継続することで良いが、大きい、あるいは進行が確認された場合、影響の及ぶ範囲を削り取ることになる。望遠鏡光学系のように仰角により鏡材に加わる力の方向が変化し、部分的にストレスが変化する場合、いっそう注意が必要である。傷を取り去り、鋭く尖った部分が無いように形を整えたのち、表面に生じた微小なクラックを研磨またはエッチングで処理する。微小クラックの深さが判明している、あるいは推定できている場合、エッチングの同じ材料のテストピースと鏡材に施し、その規定の深さに到達できるよう工夫することができる。

最後に運用中の事故防止についてコメントしておく。地上望遠鏡は夜間、ドームやエンクロージャを開けて観測するため、外部からの影響も受ける。望遠鏡や建物からの落下物、外からの飛来物、あるいは望遠鏡構造部および光学系支持機構自体の部品等の落下、調整不良による衝突なども起き得る。光学系の安全のために、十分な点検を続けることはきわめて重要である。主鏡より上にあるものの片付けや清掃といった日常的な作業が求められるので、点検者が安全に作業を行えるように考えておくことがもちろん前提である。

日本の正倉院御物で 8 世紀から 10 世紀あたりまでに作られた物が、もとの形状はもちろん、細かな細工の美しさが十分に保たれている例に見られるように、ガラス系材料は本来たいへん長持ちする。加工および運用時に損傷を生じさせないように努めることは、大きな意義のあることである。

アルマ望遠鏡・日本ノードの解析処理環境への構成管理ツール導入の試み

○林洋平、Miel, Renaud Jean Christophe、池田恵美、小杉城治
(国立天文台・アルマプロジェクト)

概要(Abstract)

アルマ望遠鏡では観測した Raw データをエンドユーザが利用できる形に解析する必要があり日米欧チリで分担して解析処理を実施している。アルマ望遠鏡の日本の拠点（日本ノード）ではこの目的のため数十台のサーバを運用している。本年度より日本ノードではサーバ群の運用コスト削減のため、構成管理ツールの導入を試みている。構成管理および構成管理ツールについて解説した後、取り組みの現状および将来構想について報告する。

1. 構成管理ツール導入の背景

アルマ望遠鏡は南米チリの標高 5 千メートルのアタカマ砂漠に設置された口径 12m アンテナ 54 台、口径 7m アンテナ 12 台から構成されたミリ波・サブミリ波を観測可能な大型干渉計である。観測データはそのままでは科学的用途で利用できない。そこで日本、アメリカ、ヨーロッパ、チリの 4 拠点が分担して解析処理を行っている。アルマ望遠鏡の日本の拠点（三鷹地区、以下「日本ノード」）では解析処理用途として数十台の Linux サーバを運用しており、台数が多いことによる管理上の課題を抱えている。例えば OS やライブラリのアップデートとして、日常的なセキュリティーアップデート、運用ソフトウェアの更新や追加インストールを随時実施している。同一環境になるよう注意を払うものの、サーバ間の違いが多少なりとも発生する。また、新たな解析サーバ追加も課題である。作業工程の文書化は実施しているが、担当者が交代した場合、正確に引き継ぎができない可能性が排除できない。さらに、今後大量のサーバのリプレースが予定されており、大量に同じ環境を構築していく場面に直面する。

2. 構成管理と構成管理ツール

構成管理とは、ソフトウェア、ハードウェア、ネットワークなど情報システムを最適な状態に保つことであり、構成管理ツールは構成管理をコードによって実現するツールである。個々のサーバを個別に構築、管理、運用する従来の方法に比べ、構成管理ツールを導入すると以下のような利点を得られる。

- ① 構築の効率化（複数サーバ構築が 1 度にできる）
- ② 運用の効率化（アップデートなどを自動化できる、新しい設定を 1 度に対応させることができる）
- ③ 管理の集約・効率化（システムの一元管理ができる）
- ④ 再現性の確立（デバックが容易になり、結果としてエラー発生を減らすことができる）

構成管理ツールを用いたサーバの環境構築の工程では、サーバの構成を記述し、この内容をサーバに適用させていくという手順をとる。設定の反映は複数のサーバに対しても適応可能であり、その結果、①②の利点を得ることができる。サーバへの構成管理ツールの適用を広げていけば③も実現可能である。

④の利点を得るためには Git などバージョン管理システムの導入が必須となるが、サーバの運用にデバックの観点を導入することが可能となる。これは既存のサーバ運用にはない大きな利点である。なお、構成管理ツールを用いずにサーバへの変更を伴う操作を行って

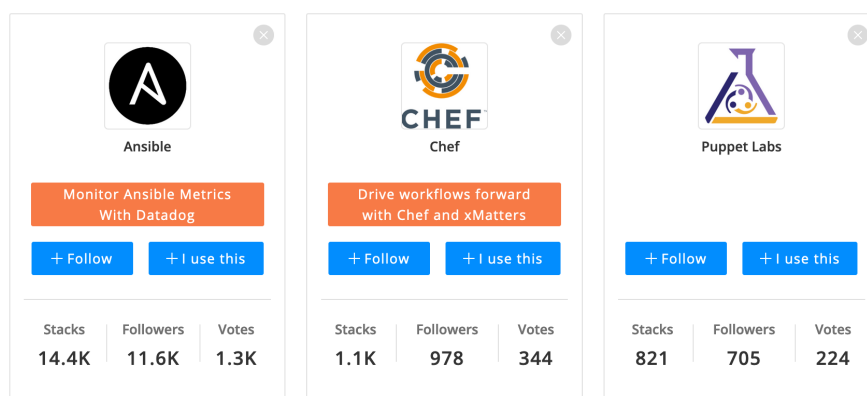


図1 stackshare での Ansible、CHEF、Puppet の比較

しまうと、サーバ間の環境の差異を生じさせる原因となり、③や特に④への利点が得にくくなってしまいう可能性があるため、注意が必要である。

構成管理ツールは一般的にはサーバに対して環境を自動構築するタイプのツール、例えば Puppet、CHEF、Ansible が認知されており、stackshare の直近の比較情報¹⁾(図1)によると Ansible が最も人気がある。Ansible の機能面の大きな特徴は、次の通りである。

- ① エージェントレス
- ② サーバ構成を YAML 形式で記述
- ③ 開発が継続されソースコードがメンテナンスされている

Ansible は構築対象のサーバに予めエージェントをインストールしておく必要がなく、構成管理ツールの運用コストはエージェントが必要なツールに比べて低い。さらに、YAML 形式は XML 形式や JSON 形式に比べ可読性、記述性が高いため、サーバ構成を記述する際に大きな利点となる。また、Ansible は Ansible, Inc.により 2012 年 2 月にリリースされ、RedHat に買収された後の現在も盛んに開発が継続されソースコードのメンテナンスがされている。継続的に利用する場合、保守が切れていないことは必須要件となる。これらの利点を総合的に判断し、本タスクでは Ansible を導入することとした。

3. 構成管理ツールを用いたサーバ構成、現状と将来構想

我々は「既存の解析処理環境を再現する」ことを目指して Ansible でサーバ環境を運用できるよう開発を進めており、システム構成は図2のとおりである。図2左の「alma-pl-proc」は Ansible によって構築されるサーバで、品質評価で用いる QA2 ソフトウェア、システム監視システムの Zabbix エージェント、ジョブスケジューラの Torque から構成される。図2右の「Ceph」は共有ストレージであり、頻繁に更新される解析処理ソフトウェアの Pipeline-driver (CASA が内包)、ビルドが必要なソフトウェアの Torque、解析済みデータなどが配置してある。共通するものは極力共有スペースに配置するという構成であり、システム運用の効率化のため Ansible の導入前から実施している。この方法は何か問題が発生したとき1箇所直せばすべてに反映できる大きい利点がある一方、以下のような課題もある。

- ① デバックの利点が得にくい
- ② クラウド化対応が困難

現時点では、共有ストレージは Ansible 適応の対象外としている。そのため共有ストレージの部分は

変更が重なってしまうと、以前の環境の再現が次第に困難になり、①の課題のとおりデバックも困難となる。仮に共有ストレージへ構成管理ツールを導入した場合、変更が共有ストレージに接続している全環境へ及んでしまうため、デバックを目的とした環境の巻き戻しは難しい。

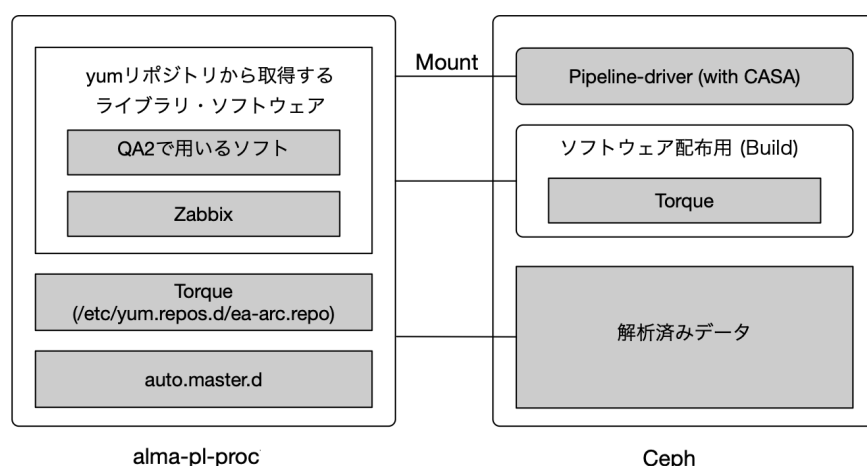


図2 既存マシン構成に準拠したシステム構成

また②のクラウド化は、解析処理環境の弾力的運用に関わる課題である。クラウドは必要に応じてリソースを確保することが可能であり、解析処理の増減に柔軟に対応が可能である。ところが現状のシステム構成は、Ceph に常時接続しておく必要があり、共有ストレージ

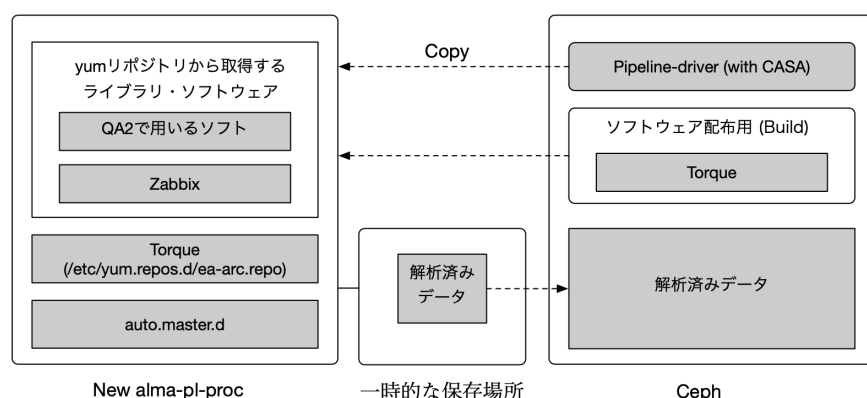


図3 移植性を考慮したシステム構成

に強い依存性がある。「Ceph」をオンプレミスに残したまま、「alma-pl-proc」サーバをクラウドで動作させることはネットワークのレイテンシや帯域、信頼性の観点から困難が伴う。特に解析ソフトウェア Pipeline-driver は解析処理中に常時大量の読み書きが発生する。

これら課題を取り除いたシステム構成が図3であり、将来構想として計画当中である。各サーバに配置が必要なファイルは、Ansible でコピーにより配布する構成である。また、解析処理に出力されるデータは「一時的な保管場所」に一旦出力し、解析処理の終了とともに「Ceph」に保存する構成である。

「New alma-pl-proc」および「一時的な保存場所」はネットワーク的に近接している想定である。このような構成により、デバックが容易で、解析処理環境のクラウド化が可能な環境を実現できるだろう。

4. まとめ

以上、解説してきたとおり、我々は日本ノードの解析処理環境への構成管理ツール導入の取り組みを報告した。解析処理サーバ群に Ansible を導入すれば多くの利点があるが、さらに既存環境にとどまらない発展的な環境を想定した導入により環境のデバックやクラウド化の実現の可能性も示した。

5. 参考文献

1) stackshare. “Ansible vs Chef vs Puppet Labs” <https://stackshare.io/stackups/ansible-vs-chef-vs-puppet>, (参照 2021-1-10)

アルマプロジェクトの Ceph ストレージの利用

○池田恵美¹、Renaud Jean Christophe Miel¹、中村光志²、芦田川京子¹、小杉城治¹

(1 国立天文台アルマプロジェクト、2 国立天文台情報セキュリティ室)

概要(Abstract)

アルマプロジェクトではアルマ望遠鏡の観測で得られたデータの解析処理を行っている。観測データ、解析済みデータは非常に大きく大容量のストレージが求められる。我々はオープンソースでエクサバイト規模にスケールアウト可能な分散オブジェクトストレージ Ceph を導入し、解析サーバのみならず他のサーバも利用可能な大容量ストレージとして利用している。本発表ではアルマプロジェクトの Ceph ストレージの構築、運用について報告する。

1. 背景

アルマ望遠鏡で得られる観測データは年間およそ 200TB あり、日米欧チリに構築された解析・パイプライン環境で解析処理を行い、品質保証された解析済みデータを観測後一定期間内に提供している。アルマプロジェクトは日本側の拠点としてこの解析処理を担っている。解析処理は多くの計算機リソースを必要とし、解析処理結果は数十 GB～数 TB にもなり、今後さらに増大する見込みである。並行して次々と観測データの解析を行う一方で、解析処理結果の削除も行われるため、解析環境には複数台の解析サーバと大容量のストレージが効率よく使える環境が求められる。これまで解析サーバは Lustre という分散ストレージを共有ストレージとして利用してきたが、Lustre サーバ/クライアントは同一の kernel であることなど運用面、利用面で制約が多かった。そのため、解析環境の OS のサポートの End Of Life を機に柔軟性、拡張性のある解析環境を構築することとなった。

2. Ceph とは

Ceph^[1]は、複数台のコンピュータ(ノード)からなるストレージ領域を1つのストレージクラスターとしてまとめ、切り出したストレージプールごとにブロック単位(RBD)、ファイル単位(CephFS)、オブジェクト単位(RASODGW)のインターフェースでアクセス可能なストレージを提供する、オープンソースの分散ストレージソフトウェアである。Ceph はデータを冗長化して Ceph クラスター内のノードに分散配置し、Ceph クライアントは CRUSH アルゴリズムにより自身で格納先を計算してノードに直接アクセスし、効率よくデータを取得する。また、Ceph クラスターは汎用的な計算機と OS で構築でき、容量をエクサバイト規模まで拡張可能であるため、安価に大容量ストレージを実現できる。我々は、Ceph の耐障害性、拡張性、高可用性という特長より解析環境の新たな大容量ストレージに Ceph を採用した。

3. アルマプロジェクトの Ceph ストレージ

3.1. 構成

現在運用しているアルマプロジェクトの Ceph ストレージのクラスター構成を図 1 に示す。Ceph クラスターは 7 台のノードで構成されている。このうち、ノード ceph01～ceph05 では Ceph の基本的なサ

ービスを提供する monitor デーモン(Ceph の構成管理)、manager デーモン(サービスの管理)、osd デーモン(データの格納)を稼働し、ノード ceph-mds, ceph-mds2 では cephFS を提供するための mds デーモン(メタデータの管理)を稼働している。

本発表を行った 2022 年 1 月時点では、Ubuntu20.04LTS 上で Ceph Octopus(ver.15.2.15)を運用している。本ストレージの運用を始めた 2019 年 9 月は、ceph01～ceph03、ceph-mds、ceph-mds2 の 5 台のノードで構成していたが、バージョンアップやノードの追加、ハードウェアの強化、リプレースを重ね、現在に至る(表 1)。また、接続する解析サーバの台数の増加に伴い、L2/L3 スイッチをポート数の多いものにリプレースし、さらにスイッチを多段化した。これらを耐震ラックに格納している。

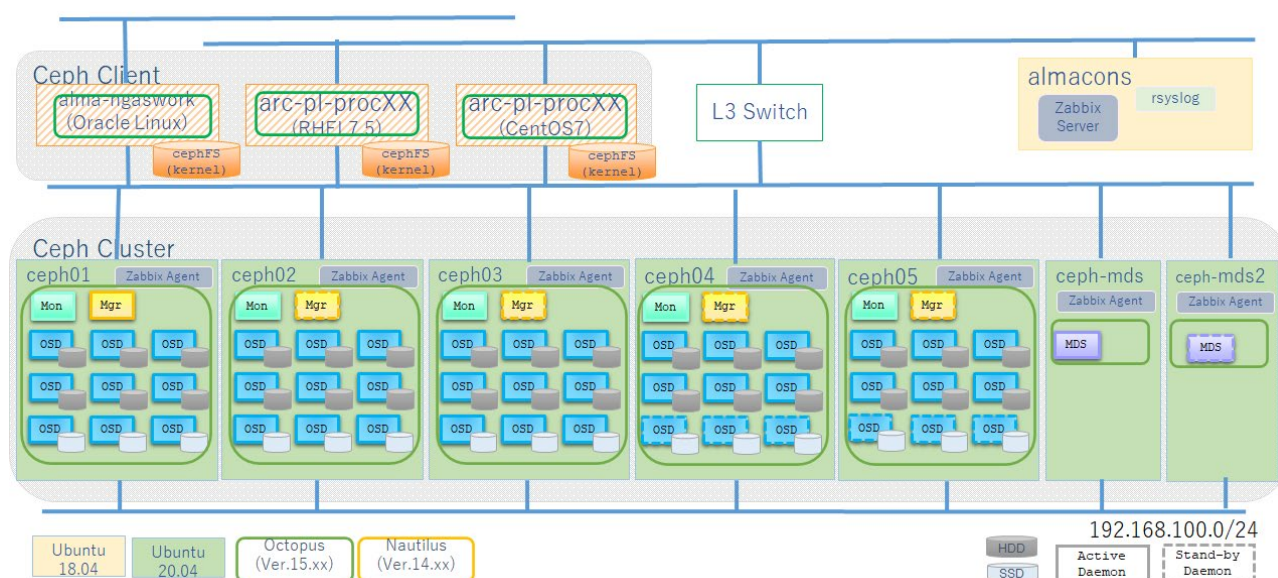


図 1: アルマプロジェクトの Ceph クラスターの構成

表 1: サーバ構成

Node	ceph01	ceph02	ceph03	ceph04	ceph05	ceph-mds	ceph-mds2 ^(*)
Memory	(32GB->)128GB			128GB		48GB	64GB
CPU	Xeon E5-2609 8C/8T x 2			Xeon Silver 4208 8C/16T x 2			
Disk	HDD 3.5"SAS 6TB x 30, SSD 240GB x 1, 500GB x 11			HDD 3.5"SAS 6TB x 30 SSD 240GB x 1, 500GB x 7			
Network	10GbE 2 ポート x 2 (2x2 ボンディング)					10GbE , 1GbE 各 1 ポート	
OS	(Ub18.04->)Ubuntu20.04LTS ^(*2)			Ubuntu20.04LTS ^(*3)		(*2)	(*3)
Ceph version	(14.2.xx->)15.2.15 ^(*4)			(15.2.xx->)15.2.15 ^(*5)		(*4)	(*5)
Ceph daemon	mon:1, mgr:1,osd:41			mon:1, mgr:1,osd:30		mds:1	mds:1

注：表のグレーの文字は構築当初の構成。(*)1 故障により 2021 年 12 月にハードウェアをリプレース

3.2. 解析サーバでの利用

アルマプロジェクトでは、約 25 台の解析サーバを保有し、アルマ望遠鏡から得られた観測データの解析処理を行っている。このうち、解析処理方法やソフトウェアにより、約 15 台が Ceph ストレージに接続し、ネットワークファイルシステムとして利用している(図 2 背景が薄い黄色の部分)。アルマ望遠

鏡の観測で得られたデータの解析処理結果は1件あたり数十GB程度で、これらのデータの解析処理のログも含めると大きいものでは数TBにもなる。解析サーバはCephFSで同じボリュームをread/write可能な権限でマウントして共有している。また、解析結果中継サーバ(alma-ngaswork)はCephFSで解析サーバと同じボリュームの一部をread権限でマウントし、解析処理結果をチリのサーバに転送している(図3)。その他、環境やデータのバックアップ、移行のために、CephストレージよりRBDで領域を切り出して利用、使用後に開放し、一時的なデータ保管場所として柔軟に使用している。

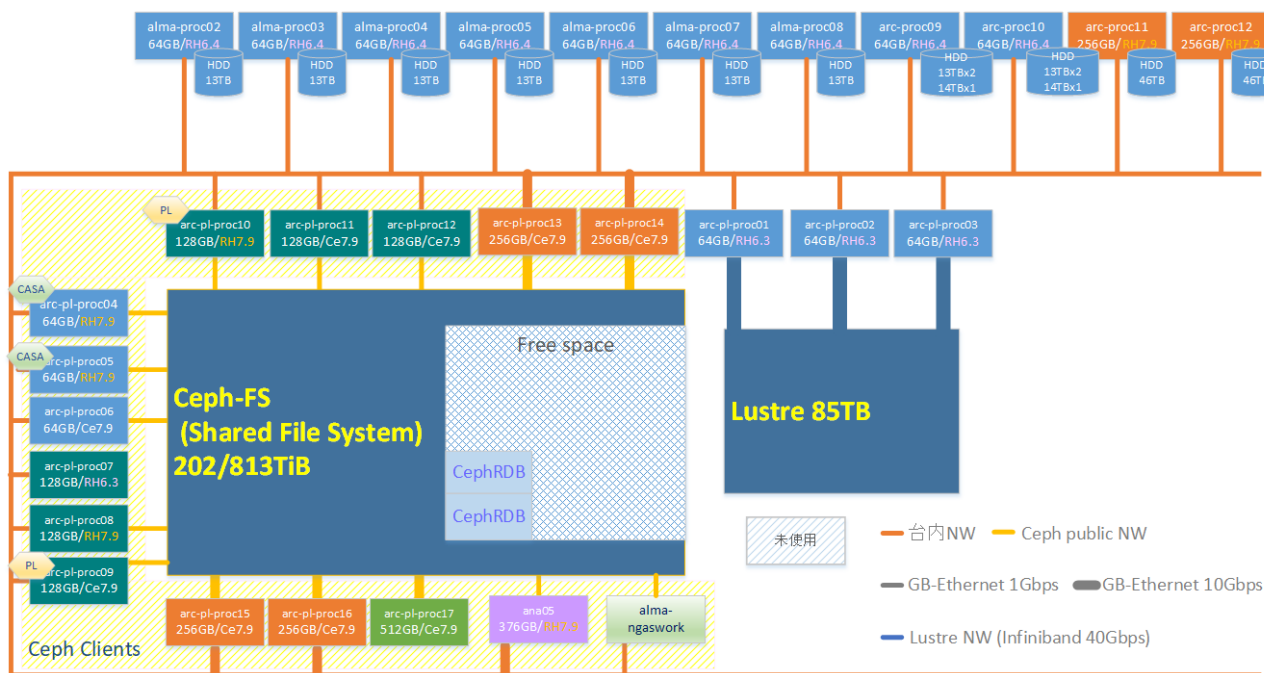


図2：解析サーバでのCephストレージの利用

```

/mnt/cephfs/alma/ # 解析サーバ(rw)
├── qa2/
│   ├── PL/
│   ├── clai/
│   ├── dared_mnt/
│   └── results/
└── products/ # 解析結果中継サーバ(r)

```

図3：CephFSでのマウント

表2：CASA 5.4.70 SingleDish 処理時間

OS	Storage	Network	Time(min)	Remarks
RHEL7	LocalSSD	10Gbps	106	Single run
RHEL6	Lustre	40Gbps	129	Single run
RHEL7	RBD	10Gbps	112	Single run
RHEL7	RBD	10Gbps	122	3 parallel run on 1host
RHEL7	CephFS	10Gbps	124	Single run
RHEL7	CephFS	10Gbps	132	4 parallel run on 1host

3.3. 検証

● I/O 性能および解析処理時間

解析サーバにおいて、10GiBのファイルの書き込みでRBDは666MB/s、CephFSで60MB/s、27GBのファイルの読み込みでCephFSで220MB/sであった。また、データの格納場所として、これまで使用していた解析環境のLocalSSD、Lustre、現解析環境のRBD、CephFSでそれぞれ解析処理を行った処理時間を表2に示す。処理時間の差は小さく、並列に処理を行った場合の速度の低下も少ない。

● 耐障害性

現在、データを冗長さ 3 で格納している。OSD デーモンを 1 つ停止しても、read/write に影響はなく、速度もほぼ変化しないことを確認した。また、Active/Stand-by で稼働している Ceph MDS デーモンにおいて、Active な MDS デーモンを停止すると、スムーズに Stand-by デーモンに切り替わり、ファイルのメタデータ取得に切り替わりを実感することはなかった。

3.4. 運用・保守

● 監視

我々は、Ceph の状況を把握するために、Zabbix^[2]と Ceph Dashboard を導入し、利用している。Zabbix では、Ceph クラスターの機器の運用状況をブラウザ上で把握している。あらかじめ設定した閾値をトリガーに障害を検知し、メールでその通知を受け取っている。また、Ceph のプラグインの Ceph Dashboard によりブラウザ上で Ceph の状況の把握や操作を行っている(図 4)。

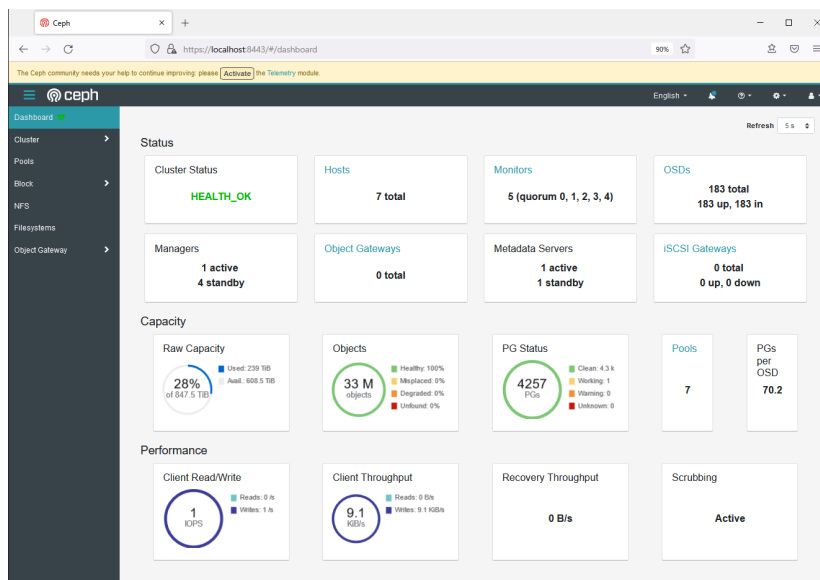


図 4: Ceph Dashboard による Ceph クラスターの監視

● 保守

「3.3 検証・耐障害性」で示したように、冗長構成でサービスの可用性が高いため、多くの場合、サービスを停止することなく、ノードやサービスの保守を行うことができる。事前に仮想環境で構築したテスト環境で行ってから本番環境に実施する。これまでに、OS や Ceph のアップグレード、ハードウェア保守などをローリングアップデートで行ってきた。

● これまでの苦労・失敗など

サービス運用開始当初はメモリ不足による動作不安定や SFP+モジュールの不具合による通信障害が度々あり、メモリの追加やモジュールの取り換えなどを行った。また OS をアップグレードした際、起動できなくなり grub の再構成を行った。この時、解決まで 1 週間くらいノードが 1 つ少ない縮退運用していたが、Ceph のシステムが壊れることはなかった。システムとして非常に堅牢である。

4. まとめ、今後の課題

Ceph は拡張性が高く、耐障害性も強い。ただ、柔軟性、拡張性が高い分、パラメータがたくさんあり理解しきれていない。最適化の余地が多分にあると思う。目下、廃止予定の古いストレージからのデータの移行が急がれ、CephFS のプールを利用効率の良い冗長構成に変更する検証を進めている。また複数の用途、ストレージ形式での利用が見込まれているため、ネットワークの拡張が必要となっている。

5. 参考文献

[1] Ceph, <https://ceph.io/>

[2] Zabbix, <https://www.zabbix.com/jp/>

ALMAカートリッジ受信機の リモートによる修理サポート

高橋敏一：国立天文台・野辺山宇宙電波観測所
(先端技術センター・ALMA受信機チーム併任)

1. はじめに

ALMA-BAND4カートリッジ(受信周波数：125-163 GHz = 以降「BAND4カートリッジ」または「カートリッジ」という)は全10バンドのALMAカートリッジ受信機の一つで、「ALMAフロントエンド」と呼ばれる受信機クライオスタットに組み込まれており、ALMA望遠鏡(以降「ALMA」と呼ぶ場合あり)を構成する66台のアンテナに搭載され、科学運用に供されている。

国立天文台・先端技術センター(ATC)-ALMA受信機チームは3バンド(BAND-4, 8, 10)のカートリッジの量産を行い、引き続き現在はカートリッジのメンテナンスを担当している。

ALMAの科学運用がコロナ禍の影響で約1年間程停止し、運用再開の起動後にBAND4カートリッジ複数台の故障が判明して修理が急務となった。カートリッジの修理(メンテナンス)拠点である国立天文台・先端技術センター(東京都・三鷹市)への出張が難しい状況の中、リモートでの修理サポートを行った。

2. ALMAフロントエンドのメンテナンスについて

BAND4カートリッジは「ALMAフロントエンド」と呼ばれる受信機クライオスタットに挿入され、ALMA望遠鏡を構成する66台のアンテナに搭載されている。

「ALMAフロントエンド」は冷凍機部に機械的動作部品を有するため、一定の運転時間毎(約15000時間)のメンテナンス(定期部品交換)が必要である。この「ALMAフロントエンド」メンテナンスは、アンテナ毎に搭載された66台が一年半で一周するサイクルで行われており、順次差し替え交換により降ろされてOSF(ALMA山麓施設)-ADE(:ALMA Department of Engineering)へ運ばれて行われる。

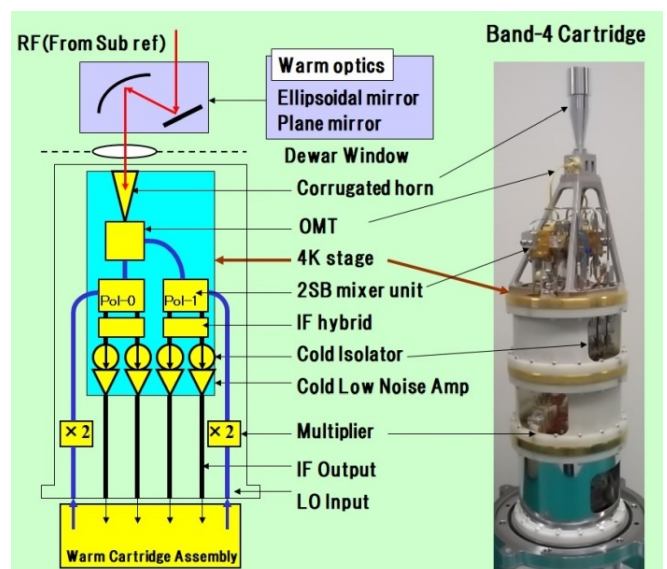
不具合カートリッジはこのメンテナンスのタイミングでALMAフロントエンド内より交換により取り出され、日本が担当するBand-4,8,10カートリッジは国立天文台・三鷹ATCに返送されて修理を行う。

3. BAND4カートリッジの主な故障箇所

【図1】にBAND4カートリッジ構造としてブロック図と部品位置対応図を示す。

受信した信号の通過順に ホーン > OMT (偏波分離器) > 2SBミキサー > アイソレーター > CLNA (冷却低雑音アンプ) を経て出力コネクタからIF信号を出力する。

これまでに故障頻度の高かった箇所は、2SBミキサーに内蔵されたSIS素子とCLNAのバイアスパスで使用しているケーブルのコネクタ部で起こる接触不良と、Lo通倍器の出力低下による不具合が多く、SIS素子の電氣的破壊による故障はほとんど無かった。



【図1】 BAND4カートリッジ構造

4. 修理の切迫状況

【図2】にカートリッジの量産期以降の修理状況をまとめた年表として示す。

ALMA望遠鏡が科学運用期に入った後、筆者が野辺山に移動となった2018年までの間に、BAND4カートリッジは2台の修理を行ったが、それ以降の修理は無かった。

2020年3月から2021年3月頃まで、コロナ禍のためALMA運用停止期間があり、その再起動後にBAND4カートリッジ2台の不具合が判明し、以前から確認されていた不具合品と合計3台を修理しなければならない状況となった。

「ALMAフロントエンド」はアンテナ搭載の66台と、メンテナンスの際に差し替える4台の計70台で運用されている。各BAND毎のカートリッジの所持台数は73台であるが、その内70台はALMAフロントエンドに搭載されており、カートリッジ単体のスペアとしては3台しかなく修理が急務となった。



【図2】BAND4カートリッジ修理年表

5. 修理作業内容

カートリッジ修理としての作業項目は次のとおりである。

1. 組立（不具合部品交換）
2. 評価（動作と性能試験）
3. テストレポート作成及び提出

項目2で問題がある場合は、1に戻り、問題解消まで繰り返す。

6. 修理の人員体制

かつての量産期には三鷹ALMA-ATC受信機チームには、3バンドそれぞれで7, 8名程度所属していたが、現在では退職や移動などで減少しており、2021年の故障発覚時点のBAND4カートリッジ修理経験者となると、2017-18年の修理を筆者と共に担当した1名のみであった。

今回の一連の修理においては、修理担当者を維持するばかりでなく増員するねらいもあり、新たな担当者にも細かなノウハウも伝授し、深く経験を積んでいただく必要があった。

そこで、今回予定している修理作業では、カートリッジ1台につき、下記のような3人を中心とするチーム体制で望む事とした。

- 1：主担当（修理の責任者となる）
- 2：副担当（補佐全般）
- 3：サポート（精通者として助言：1台目の修理では筆者）

1台目の副担当は2台目では主担当となり、1台目の修理から主担当、副担当の2人が深く取り組むような体制とした。

筆者は併任業務としてカートリッジ修理を担当する事になっているが、コロナ禍で出張が難しい為、リモートでのサポートを試みた。

7. BAND4カートリッジの評価系について

修理の際、最も重要なのが動作試験と性能評価である。これまで用いてきたBAND4カートリッジの評価系一覧表を【表1】に示す。

量産初期からは「ノイズ系」、「ビーム系」と呼んでいる2系統の評価系デューアを用いており、量産中期頃より（現在では）「メンテナンス評価系」と呼んでいるノイズ系とビーム系の全ての評価を行える3系目の整備を進めてきた。

「メンテナンス評価系」が旧来の「ノイズ系」、「ビーム系」と相違無く評価できるかの検証を2017～2018年にかけてのカートリッジ2台の修理において完了したため「メンテナンス評価系」のみ維持し、「ノイズ系」と「ビーム系」の2つの評価デューアは廃止した。

評価測定系 デューア	ノイズ系(旧)	ビーム系(旧)	メンテナンス 系
測定項目	・チューニングパラメタ(Tuning Parameter) ・ノイズ特性 (Noise Performance) ・サイドバンド分離比(Image Rejection Ratio) ・ゲイン直線性 (Gain Compression) ・IF出力レベル (IF output power) ・振幅安定度 (Amplitude stability)	・偏波直交度 (Polarization Alignment) ・ビーム能率 (BEAM efficiency) ・偏波分離度 (polarization efficiency) ・位相安定度 (Phase Stability) ・起動安定性 (Stabilization Time)	・全ての項目の 評価
所要日数 (最短)	2～3日	2～3日	1週間程度

【表1】BAND4カートリッジ評価系と測定項目

8. リモートでのサポート手法

リモートでのサポート手法を【表2】としてまとめた。サポートではMicrosoft office365の会議ツールの「Teams」を使用した。これは国立天文台で導入しており全職員が使用可能である。測定系のカメラ映像や共有PC画面を見ながら音声会話を行って進めた。チャット機能でのやり取りの内容やビデオ録画の記録も残せる。

またVNC (Virtual Network Computing) により、制御PCの画面を通してのサポートも試みた。VNCではプログラムのコーディング等も可能であるが、実際の操作は可能な限り現地担当者が行う事とした。

作業項目	組立(部品交換)	性能評価	テストレポート作成
サポート手法	・作業中はTeamsで接続 ・映像を見ながら作業指示	・作業中はTeamsで接続 ・PC共有画面を見ながら指示 ・装置の状態が知りたい場合はカメラを向けてもらう ・VNCで操作可能	・主担当者が作成

【表2】 リモートでのサポート手法

9. まとめ

結果として、1台目修理では（一度も出張する事なく）サポートはリモートのみで終了し、次の2台目の修理に移行している。

・メリット（どちらかと言えば良かった部分）

出張旅費（交通、宿泊）と移動時間がかからない。待機時間不要で必要時だけリモート接続すれば良い。実演しないと伝えるにくい事でも現地作業担当者にか伝え、実施してもらう事となる。それが返って工夫等に対応する事となり、より深く体得されるのではないかと考えている。

一台目の修理では一か月以上を費やした。これは修理（部品交換）が一度では済まず、複数回に及んだ作業もあった。これにより経験が深められたと思われる。

1台目修理の主担当（Aさん）は2017-18年の修理を筆者と共にに行ったので相当理解しており、細かなノウハウもリモートで伝え易かったと考えている。1台目の副担当で2台目の主担当となったBさんは旧BAND-8量産チームに所属していたため、BAND4カートリッジ修理に応用できる部分が多いと思われる。

・デメリット

装置の状態等をカメラを向けてもらって確認するなど現場作業よりも時間がかかる。

紙ファイルのマニュアル等の手書きメモを参照したり、周辺や別の部屋などの物品を探したりできない。細かいノウハウを言語化して伝えるのは難しい。お互いストレスとなった部分もあると思われる。

記憶が薄れた事は、状況がリアルでないため思い出せなかったり、数時間から数日後になって思い出すという事もあった。

・今後の課題について

Teams等のビデオ会議システムの録画機能は便利だが、素材が蓄積されるだけでは必要な部分を探すのに時間がかかってしまう。アーカイブ化するなど整理しておかないと使い物にならない。

本題とは逸れるが、故障頻度が少ないのは良い事のはずだが、それは反面として修理担当者の維持、増員（修理の実経験）するのが難しくなってしまう。以前から修理の予行演習を定期で行うという案があるが実施した事が無い（モチベーションと人的リソースの負担）のが課題である。

国立天文台先端技術センターにおける積層造形技術立ち上げ進捗報告①

造形熱ひずみについて

○三ツ井健司、金子慶子、神澤富雄（国立天文台先端技術センター）

概要(Abstract)

先端技術センターでは 2019 年度に金属 3D プリンターを導入し、現在は初期立ち上げ段階である。これは金属粉末の任意の部分をレーザー照射により溶解、固着させ、それを積層させることで目標の形状を作り出す装置であるが、一般的な工作機械とは製作工程が異なるため、製品にも違った特徴がある。今回はそのうちの一つの熱ひずみに着目した。積層造形では短時間で大きな温度変化のサイクルを繰り返すため、造形された製品内部に熱ひずみをため込んでしまうという特徴がある。今回はその熱ひずみを除去、軽減するためのアニールについて、いくつかの条件にて実験を行ったので報告する。

1. 造形装置の紹介

- ・ 3D printer 装置本体： EOS M290
- ・ メーカー/日本販売代理店： Electro Optical System (EOS), Germany / NTT data XAM technologies
- ・ 造形タイプ： Selective Laser Melting(SLM)/Powder Bed Fusion (PBF) type
- ・ 最大加工領域： 250×250×325 [mm]
- ・ 積層ピッチ： 20-60[um]（材料に依存）
- ・ レーザータイプ / 出力： Yb-fiber laser / 400[W]
- ・ 使用可能な材料： Al, SUS, CoCr, Ti, Ni, Maraging（赤字が導入済み）
- ・ 使用可能な雰囲気： Ar, N2（赤字が導入済み）

2. 実験

1) 実験の目的

金属積層造形では短時間の内に熔融と凝固を繰り返すため、出来上がった製品には大きな内部応力がたまりやすいという特徴がある。内部応力軽減のためにベースプレートを予め昇温してから造形工程に入るが、それでも造形後の除歪は必要である。

この除歪の条件を振ってそれぞれの効果がどの程度であるかを検証することが目的である。

2) 実験の内容

- ・ 初期実験：後述する造形サンプルを 1 セットまたは 2 セット造形し、造形後の処理として、アニール無し、200℃、300℃のそれぞれで比較した。
- ・ 追加実験：造形サンプルを 1 方向のみに変更し、一回の造形において 4 か所同時に造形した。その後、それぞれの造形場所でアニール無しと有りとで比較した。



図-1 3D printer 装置本体： EOS M290

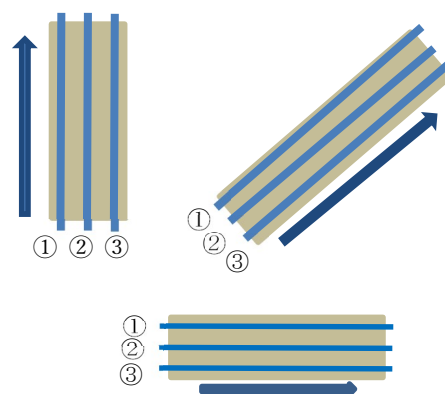


図-3 測定方向

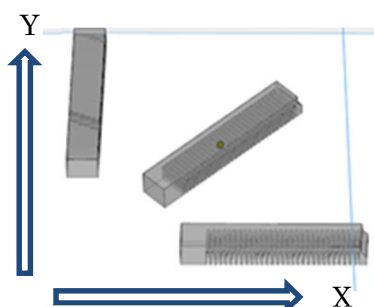


図-2.1 造形サンプル 1セット

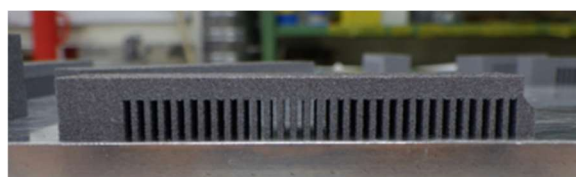


図-2.3 造形後そのまま

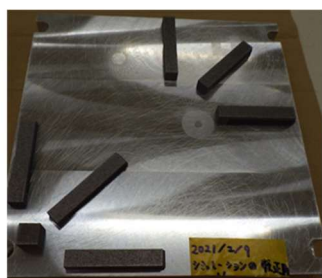


図-2.2 造形サンプル 2セット

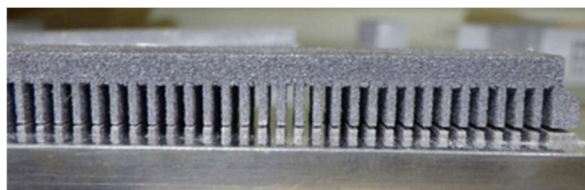


図-2.4 櫛歯の部分を切断

図-2 造形サンプル

3. 初期実験

1) 造形サンプル

測定用サンプルは平板の下に櫛歯状の足を持つ形状をしており、X 方向、Y 方向、45° の三方向で1セットである。造形終了時、上面はフラットであるが、櫛歯の部分を切断すると内部のひずみが解放され反る。この反り量にどのような変化があるかを調べた。(図-2 参照)

2) 造形条件

造形とアニールの条件を表-1 に示す。造形位置は 2 セット同時造形の場合は左下と右上、単体なら中央に配置し、アニールは 200℃または 300℃に昇温後、4 時間保持したのち炉冷した。

3) 反り測定

反り量は造形直後と櫛歯切断後(反った状態)それぞれにおいて測定し、それぞれの差分をとることと求めた。使用した測定器は三鷹光器 NH-3SP である。各サンプルについて図-3 のように 3 ライン測定し、平均を求め、セット全体での平均も求めた。図-4 に断面測定の抜粋を示す。

4) 測定結果①

測定結果を表-2 にまとめた。各セットにおけるそれぞれの向きでの平均値とセット全体での平均値である。

4) 初期実験のまとめ

造形場所によって反り量は異なり、左下（セット A,E,H）の方が右上（セット B,F,I）よりも反りが大きい傾向がある。

- ・造形方向では 45°、X、Y の順に反りが大きくなる。
- ・200℃アニールでは反り量が 45～65%程度まで減少する。
- ・300℃アニールでは反り量が 20 μ m 程度まで減少し、反りの方向が反転する。

表-1 造形条件

No	セット	位置	アニール
1	A	左下	なし
	B	右上	
2	C	中央	なし
3	D	中央	200℃ 4h
4	E	左下	なし
	F	右上	
5	G	中央	300℃ 4h
6	H	左下	200℃ 4h
	I	右上	
7	J	左下	300℃ 4h
	K	右上	

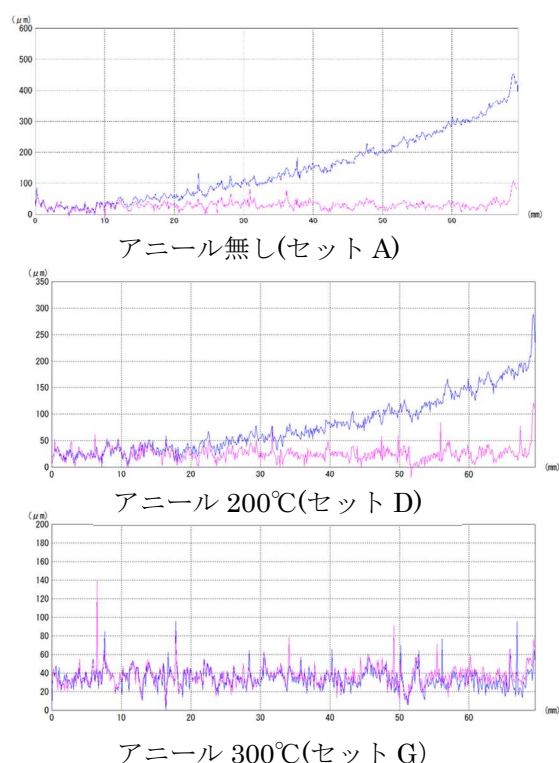


図-4 断面測定結果の抜粋

(歯槽切断前：ピンク、 歯槽切断後：青)

4. 追加実験

1) 目的

初期実験を受けて 200℃と 300℃で大きな違いがあることが分かった。200～300℃間の臨界を調査するため追加で実験を行った。

2) 変更点

- ・造形サンプルは初期実験で一番反りの大きかった Y 方向の一つのみ
- ・4つの位置で造形（図-5 参照）
- ・それぞれの位置でアニール無しと有りの 2 回造形し、両者を比較した。

3) 測定結果

反り測定の結果は図-5 に示す。

4) 追加実験のまとめ

アニール無しの状態では、装置に向かって右手前から左奥に向けて反り量が大きくなっており、

左手前と右奥は同程度だった。また、それぞれの位置でのばらつきは3%程度であるが、これは初期実験の結果と異なるため、造形場所による反り量の違いは必ずしも再現するわけではないと思われる。

今回の実験では熱処理の有無での比較は以下の通りである。

- ・ FL (220℃、1.5 時間) 206→236 μm 115%
- ・ FR (250℃、4.0 時間) 202→141 μm 70%
- ・ BL (270℃、1.5 時間) 214→131 μm 61%
- ・ BR (300℃、1.5 時間) 211→ -17 μm -8%

5. まとめ

三次元金属造形により作成したサンプルにいくつかの条件でのアニールを施し、その特性を確認することができた。詳細は前述のとおりである。

表-2 測定結果①

No	セット	X	45°	Y	平均	アニール
1	A	338	282	445	355	なし
	B	227	226	365	273	
2	C	272	226	368	289	なし
3	D	174	166	220	187	200℃
4	E	355	265	471	364	なし
	F	235	246	381	287	

No	セット	X	45°	Y	平均	アニール
5	G	-16	-9	-11	-12	300℃
6	H	157	139	214	170	200℃
	I	100	116	160	125	
7	J	-19	-15	-23	-19	300℃
	K	-21	-21	-22	-21	

BL

アニール無し : 214 μm

270℃、1.5 時間保持 : 131 μm

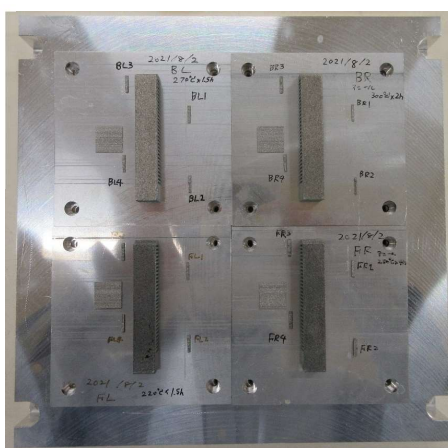
61%

FL

アニール無し : 206 μm

220℃、1.5 時間保持 : 236 μm

115%



BR

アニール無し : 211 μm

300℃、1.5 時間保持 : -17 μm

-8%

FR

アニール無し : 202 μm

250℃、4.0 時間保持 : 141 μm

70%

図-5 追加実験造形サンプル

アニール条件と反りの結果

CASA, Vissage の開発

川崎 渉 (国立天文台)

概要

国立天文台アルマプロジェクト・コンピューティンググループでソフトウェア開発に従事している。ここでは、CASA および Vissage という 2 つのソフトウェア、およびそれらの開発作業について紹介したい。

1. CASA (Common Astronomy Software Applications)

1-1. CASA とは

CASA (<https://casa.nrao.edu>) は電波望遠鏡データ解析ソフトウェアで、干渉計 (ALMA および VLA) および単一鏡 (ALMA および野辺山 45m 鏡) データの解析を行うものである。2005 年より、米国国立電波天文台 (NRAO) を中心に国立天文台、欧州南天天文台 (ESO) などが協力して開発が進められているが、その原形は 1990 年代に開発された AIPS++ であり、そういった意味では既に 30 年という長い歴史を持つソフトであるとも言える。

1-2. ソースコード

技術的な側面に興味を持つ方が多いと思うので、まず CASA のソースコードについて紹介する。CASA は合計 200 万行以上、約 800MB という巨大なプログラムである。プログラミング言語としては、大雑把には、機能の低レベルな部分に関しては C++ (一部は前身である AIPS++ から引き継いだもの)、それらを用いる高レベル機能に関しては Python で実装されている。ユーザーから見た CASA は、IPython ベースのインタプリタ形式でコマンド入力するものと、Python モジュールとして提供されるものがあるが、いずれにせよ、ユーザーは Python を通じて CASA を使用することになる。なお、C++ コードを Python 側から呼び出すためのバインディングとして SWIG、タスク (CASA の高レベルコマンド) のインタフェース定義などの記述には XML が用いられるなどしている。

1-3. 開発チーム

2022 年 2 月現在、総勢 30 名 (NRAO が 20 名、ESO と国立天文台が 5 名ずつ) のチームで開発を進めている。国立天文台は主に単一鏡データ解析機能の開発を担当しており、アルマプロジェクト・コンピューティンググループ所属の 5 名 (中里剛、川崎渉、ミエル・ルノー (Miel Renaud)、林洋平、島田和彦) が開発を、また科学的な見地に立った単一鏡データ機能の開発項目選定やユーザーテストについては、東アジアアルマ地域センターの宮本祐介さんに担当して頂いている。

1-4. 開発作業

基本的に、いわゆるソフトウェア開発の V 字モデルに沿う形で開発が進められている。国立天文台が担当する単一鏡データ機能の場合、要求分析・要件定義・受け入れテスト (CASA 開発においては Validation と称する) といった上流部分は宮本さん、設計・開発・単体/結合テスト (CASA では Verification と称する) は上記 5 名の開発者が分担して進めている。これが CASA のリリース毎に繰

り返される。リリース間隔は昨秋まではおよそ半年毎、最近は間隔を短縮して1か月毎のリリースを目標としている。

実際の開発においては、NRAOが運用する様々なツール（ソースコード管理：Git、課題管理：JIRA、バージョン管理：Bitbucket、ビルド/テスト管理：Bamboo）を利用している。さらにこれに加えて、国立天文台の開発チーム内ではRedmineを活用して相互にコードレビューを行い、コードの質の向上に努めている。開発が一段落するとSphinxを用いてドキュメントの作成を行う。

CASA開発チームは日米欧に分散していることもあって、コロナ禍以前からリモートで作業することには慣れている。開発者間の連絡・報告には電子メールやConfluenceを、またZoomを用いて週1回ミーティングを行う。さらに数年に一度程度、全ての開発者が一堂に会し、数日間議論を行う（昨年はやむなくZoom会議となった）。開発者間の共通言語は英語であるため、国立天文台の開発者だけで、別途、日本語による週例ミーティングを行い、さらなる意思の疎通を図っている。

1-5. ngCASA/CNGI：次世代のCASA

最後に、現在、準備段階を経て開発作業が始まっている次世代のCASAについてふれておく。データ解析機能（ngCASA = Next Generation CASA）とより基本的な機能（CNGI = CASA Next Generation Infrastructure）で異なる名前が付けられているが、要は、クロック周波数の増加以上に多コア化を進める最近のCPUの動向と、ngVLAなどがもたらすであろう将来的なさらなるデータサイズの増大に鑑み、従来のCASAにおいてほとんど行われてこなかった並列処理を本格的に導入するため大幅にコードを書き換えるという、野心的な計画である。既存のライブラリを最大限活用することによってソースコードの分量を減らし、維持管理を容易にしたいという狙いもある。現在C++で実装されているコードはPythonで書き直し、Daskを用いて並列処理を行う（Numpyなど、Pythonを用いた並列処理で処理速度を上げられるようなライブラリの活用が必須となる）。それに伴い、内部で用いるデータ形式MeasurementSetも、従来のCASA table ベースから xarray ベースのものに再実装される。ユーザーにとってはともかく、開発者にとっては、前身であるAIPS++以来30年にわたってC++で実装されてきたコードがPythonに置き換えられるという、極めて大きな変化になる。元々、現在バージョン6であるCASAの次のCASA7からngCASA/CNGIに移行する計画だったが、最近では、完成した部分から順次現在のCASA6に取り入れていく方針に変化している。

2. Vissage (VISualisation Software for Astronomical Gigantic data cubEs)

私は作業時間の90%をCASAの開発と関連業務に費やしているが、残りの10%を使ってFITS画像ビューワVissageの開発を行っている。CASAとはいろいろな点で対照的な開発になっており、こちらについても紹介したい。

2-1. JVOによるALMAデータ公開サービス

開発のきっかけは、国立天文台データセンターが運用するバーチャル天文台システムJVO (Japanese Virtual Observatory) において、PIによる専有期間終了後に一般公開されるALMAのFITSデータの閲覧・配布サービスの立ち上げだった。問題となったのはデータサイズが巨大（将来的にはTB以上を予想）、かつ多次元（空間方向2次元に加えて周波数方向や偏波の情報も含む3ないし4次元の

データキューブとなる)であることだった。我々は、巨大なデータをダウンロードさせるのではなく、(1) Web インタフェース上でユーザーが興味を持つ部分を迅速に見つけ、その部分だけを切り出してダウンロードし、その後、(2) ローカル環境においてより詳細に観察・解析する、という仕組みを提供することにした。前者については国立天文台データセンターの江口智士(当時)および Chris Zapart によりクイックルックシステム ALMAWebQL が開発され、既に JVO 上で稼働中である。後者の機能、即ち、ローカル環境にダウンロードした比較的小さな、しかし多次元のデータキューブを閲覧するためのソフトウェア Vissage を私が開発している。

2-2. 目的と機能

多次元の天文データを簡単に扱うことができ、しかも無料できちんとメンテナンスされているソフトウェアが現状ほぼ見当たらないという大きな問題を解消すべく開発を進めている。未完成の部分も多々あるが、既に以下のような機能を実装している。

(1) 多次元天文データの表示

空間 2 次元 + 周波数 1 次元の 3 次元データキューブの情報をディスプレイや紙といった 2 次元の面上で分かりやすく表現するにあたって、(電波)天文学者は以前より、周波数方向で積分やモーメント計算する(積分強度図・モーメント図)、周波数方向で分割して並べる(チャンネルマップ)、空間方向を 1 次元に限り周波数と合わせて 2 次元イメージとする(位置・速度図)など多彩な方法を駆使してきた。偏波や時間方向の情報も持つデータではさらに表示方法が多様化するの言うまでもない。今後、多波長データを用いた解析が盛んになるとともに、他波長の観測家や理論家といった、必ずしもデータキューブになじみがないユーザーが ALMA データキューブを扱う機会も増えるものと思われ、そのようなユーザーにとっても取扱いやすいものを提供することが必要だと考える。Vissage では、偏波を含む ALMA のデータキューブを簡単・直観的な操作で表示することができ、複数の異なる表示を同時に並べて閲覧することも可能である(図 1 参照)。また多波長に対応するべく、ALMA 以外のデータ表示のサポートを進めている。

(2) JVO をはじめとする天文データサービスとの連携

公開データを用いた研究スタイル(アーカイブ天文学)は理論・観測・数値シミュレーションに続く第 4 の天文学とも呼ばれ、今後さらに発展することが予想される。Vissage では、画面表示中の ALMA データを基にして JVO が提供する ALMA やすばるデータにアクセスする機能を実現した。

(3) 作図機能

FITS 画像を取り込んだ図(論文雑誌に掲載できる品質のもの)を簡単に作成できる機能を開発している。現在は単一の FITS 画像を eps 形式で出力するのみだが、複数画像の使用や文字・記号・図形などの書き込みなどにも対応し、より複雑な図を作成できるようにしたい。

(4) Python インタフェース

自作の Python スクリプトから Vissage を操作可能にするため、Vissage 用の Python モジュールを開発中である。用途としては、Python 上での他の解析ソフトやライブラリとの連携、Vissage を表示ツール・作図エンジンとして Python 側から制御することなどを想定している。GUI を画面表示することなく、バックグラウンド処理として Vissage に図を出力させることも可能である。

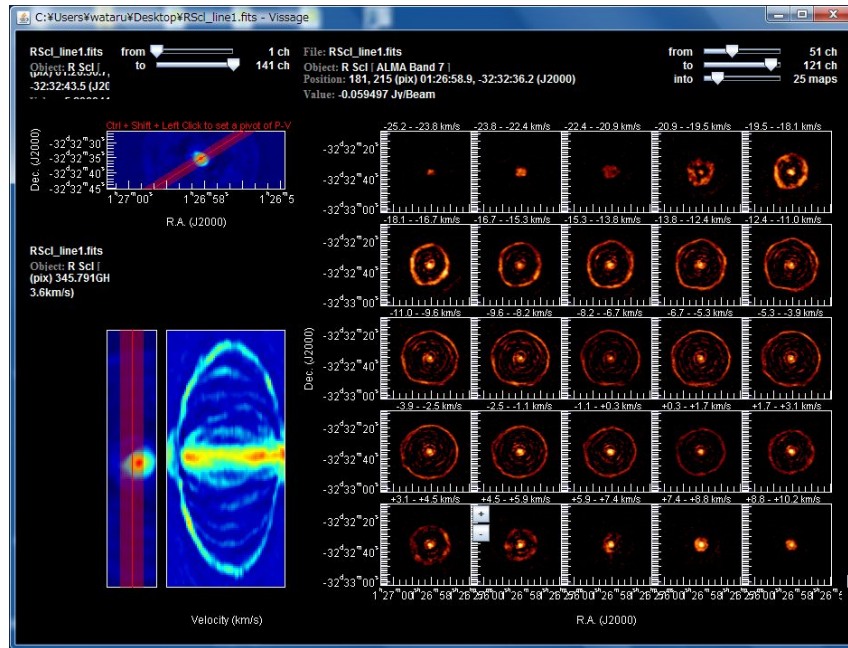


図 1 : Vissage の表示の一例。画面の左側 1/3 の領域に位置-速度図（左上は空間軸の選択を行うための積分強度図、左下がその空間軸を基にした位置-速度図）を、右側 2/3 の部分には同じデータキューブから作ったチャンネルマップを配置している。このような表示もマウスによる直観的な操作のみで実現可能である

この他、CASA など他の解析ソフトとの連携、多彩な形式での出力機能など、ALMA データキューブを用いた研究活動や多波長にまたがるアーカイブ天文学にとって痒い所に手が届くようなソフトウェアに育てていきたいと考えている。

2-3. 実装に関して

単一のパッケージで Linux, Mac, Windows な様々な環境で動作することを考え、Vissage 本体は Java で実装している (GUI は Swing)。なお、Vissage アイコンへの FITS ファイルのドラッグ&ドロップによる起動や使用メモリ量などのコントロールを実現するために用意した Windows 用のラッパー部分は C# で、Python 用のモジュールは (当然ながら) Python で実装している。並列処理に関しては未だ実現していないが、将来的には導入したい。

3. まとめ

以上、私が開発に従事している 2 つのソフトウェアの紹介をさせて頂いた。ソフトウェアとしては規模・開発形態・実装言語など全く異なるものであるが、これからの天文学研究に役立つソフトウェアにしたいという点は共通である。今後とも、機能の充実や品質の改善に努めていきたいと考えている。

IRIS 撮像系の駆動機構のホール素子による原点出し・位置検出の検討

○中本崇志、大淵喜之、浦口史寛、池之上文吾、斎藤栄、小俣孝司、
鈴木竜二、早野裕（国立天文台）

概要

TMT の第一期観測装置である近赤外線撮像分光装置 IRIS の撮像部はクライオスタットの中にあり、撮像部のいくつかの駆動機構では、液体窒素温度下で原点や現在位置を検出するのに永久磁石とホール素子を用いる。現在、磁場シミュレーションや温度サイクル試験などを通じて詳細な設計検討を行っており、その進捗を報告する。

1. 背景

IRIS 撮像部の駆動機構のうち、Cold Stop、ADC、フィルター交換機構、スライサーピックアップ鏡、シャッターでは、永久磁石とホール素子を用いて非接触の原点検出と現在位置検出を行う。磁石には低温での減磁が少ないサマリウムコバルト磁石を、ホール素子には GaAs 半導体を用いた旭化成エレクトロニクス の HG-106A を用いる。データシートによれば同ホール素子の最低動作温度は -40°C であるが、これまでのプロトタイプ試験^[1]などで液体窒素温度での動作実績がある。ホール電圧に乘るノイズが精密な原点検出に与える影響と、ホール素子が室温と液体窒素温度間の繰り返しの冷却・昇温に耐えられるかが懸念された^[2]ため、それぞれについて検討を進めている。

2. ホール素子の動作原理とゼロクロス点

図 1 のように半導体薄膜に電流 I を流し、電流に垂直な磁束密度 B をかけると、電流と磁束密度に垂直な向きにホール電圧 $V_H = BI/en_c t$ が発生する。ここで、 e は電気素量、 n_c は半導体のキャリア密度、 t は薄膜の厚さである。このうち、温度に依存するのは基本的にキャリア密度だけである。n 型 GaAs 半導体の場合、不純物濃度を高くしていき、不純物原子間平均距離が同原子の実効ボーア径と同じ桁かそれ以下になると、極低温にてキャリアが凍結せずにキャリア密度がほぼ一定に保ち続けられる^[3]。その結果、幅広い温度域でホール電圧の温度ドリフトが小さくなる。実際、温度以外の条件を同一にし、HG-106A のある一個体でサマリウムコバルト磁石の磁束密度を計測すると、77 K では室温と比べてホール電圧が 11% だけ増加した。仮にこの増加率が温度に非依存とすれば、ホール電圧の温度係数は $-0.05\%/^{\circ}\text{C}$ と非常に小さいことになる。

位置検出を行うには、様々なホール素子と磁石の配置方法がありうる。IRIS 撮像部では、磁石を駆動部に、ホール素子を固定部に取り付け、図 2 のように駆動方向、磁石の磁化方向、ホール素子の半導体薄膜面の三つを全て平行にする。すると、図 3 の赤線のようなホール電圧の波形が出力される。磁石がホール素子の真正面に来るとホール電圧が 0 になり、この位置をゼロクロス点と呼ぶ。図 3 の波形は様々な理由で形状や大きさが変動する可能性があるが、ゼロクロス点の位置はそれらに左右されにくいため、IRIS 撮像部ではこれを精度の良い原点として利用する。

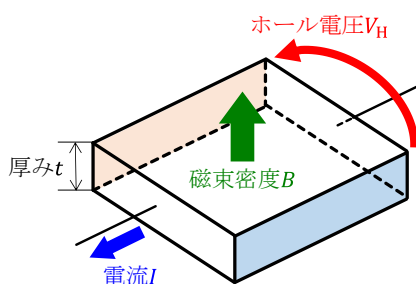


図 1. 半導体薄膜とホール電圧

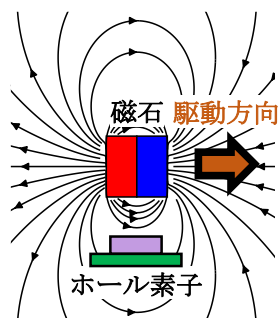


図 2. 永久磁石の磁力線

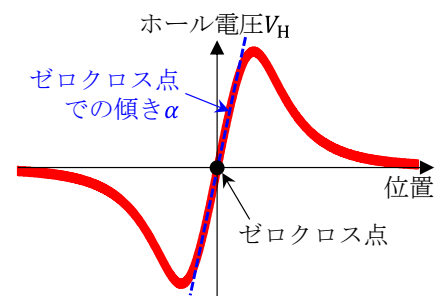


図 3. ゼロクロス波形

そのために、クライオスタットの外でホール電圧に各種信号処理を施す。まず、差動アンプによるコモンモードノイズ除去と信号増幅、AD変換、ローパスフィルターによるノイズ除去、オフセット電圧除去といった処理を行う。そして、ホール電圧の時間微分が閾値以上で、かつ、同電圧の符号が変化したら、原点パルス信号をモーションコントローラに出力する。これにより、機械的なスイッチと同じように扱うことができる。時間微分を判定条件に含めるのは、磁石がホール素子から離れてホール電圧が0になる場合と区別するためである。しかし、静止した物体では時間微分が常に0であるため、この方法では現在位置が検出できない。そのため、シャッターなどのように、位置検出精度が粗くても良いので現在位置を知りたい駆動機構向けには、ホール電圧が閾値以上ならON信号を出すようにもする。

3. 磁荷モデルによる磁場シミュレーション

ホール電圧に乗るノイズは完全には除去できないため、図3の波形のゼロクロス点での傾き α が緩いとノイズにより原点検出精度が悪くなる。そこで、どの程度の傾きになるかを簡単に見積もるため、磁荷モデルを用いた磁場シミュレーションを行うことにした。磁極面に仮想的な磁荷が残留磁束密度 B_r で等分布していると仮定し、クーロンの法則を用いれば、直交座標系での任意の位置 $\vec{p} = (x, y, z)$ における磁束密度は

$$\vec{B}(\vec{p}) = \frac{B_r}{4\pi} \left\{ \int_{A_N} \frac{\vec{p} - \vec{q}_N}{|\vec{p} - \vec{q}_N|^3} dA_N - \int_{A_S} \frac{\vec{p} - \vec{q}_S}{|\vec{p} - \vec{q}_S|^3} dA_S \right\} \quad (1)$$

と書ける。ここで、 A_N と A_S はそれぞれN極面とS極面であり、 $\vec{q}_N$ と $\vec{q}_S$ は各面上の1点を表す位置ベクトルである。式(1)を用いると、対称軸方向に磁化された半径 R 、長さ L の円筒型磁石の対称軸上の磁束密度は

$$B(l) = \frac{B_r}{2} \left\{ \frac{l+L}{\sqrt{(l+L)^2 + R^2}} - \frac{l}{\sqrt{l^2 + R^2}} \right\} \quad (2)$$

と求まる。ただし、 l は磁極面からの距離である。式(2)は便利で広く用いられているが、対称軸以外の位置での磁束密度を求めるには、式(1)の面積分を数値計算する必要がある。そこで、図4のように磁石の中央を直交座標系 (x, y, z) の原点 $(0, 0, 0)$ に置き、磁化方向を x 軸に一致させ、N極を x 軸正方向にする。また、図5に示す通り、 yz 面内の円形磁極面を径方向に n 個で等分割し、分割してできる中空円を内側から $i = 0 \sim (n-1)$ と番号を付ける。さらに、 y 軸を起点に中空円 i を周方向に $(8i+4)$ 個の扇型の面素に等分割し、 $j = 0 \sim (8i+3)$ と番号を付ける。すると、面素数は $4n^2$ 個、全ての面素の面積は $\pi R^2/4n^2$ となり、面素 (i, j) の中央の極座標 $(r_i, \theta_{i,j})$ は図5の通りとなる。各面素の中央に磁荷が集中していると考えれば、磁束密度は

$$\vec{B}(\vec{p}) = \frac{B_r R^2}{16n^2} \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{8i+3} \frac{\vec{p} - \vec{q}_{N,i,j}}{|\vec{p} - \vec{q}_{N,i,j}|^3} - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{8i+3} \frac{\vec{p} - \vec{q}_{S,i,j}}{|\vec{p} - \vec{q}_{S,i,j}|^3} \right\} \quad (3)$$

で求められる。ただし、 $\vec{q}_{N,i,j} = (L/2, r_i \sin \theta_{i,j}, r_i \cos \theta_{i,j})$ 、 $\vec{q}_{S,i,j} = (-L/2, r_i \sin \theta_{i,j}, r_i \cos \theta_{i,j})$ である。これをホール電圧に換算すると、図3のような波形とゼロクロス点での傾き α が求まる。IRIS撮像部では図6のように磁石とホール素子を配置する。ホール素子2個を1つの基板に実装し^[2]、一方はコールドスペアとする。この配置での一例として $R = 1.5 \text{ mm}$ 、 $L = 3 \text{ mm}$ 、 $B_r = 890 \text{ mT}$ 、 $V_H/B = 1.5 \text{ V/T}$ として、ゼロクロス点での傾き α を求めると、磁石・ホール素子間ギャップ g に応じて図7のようになる。

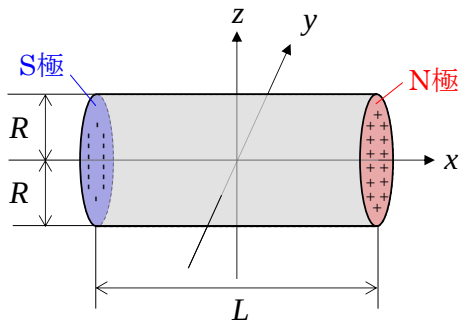


図4. 直交座標系上の円筒型磁石

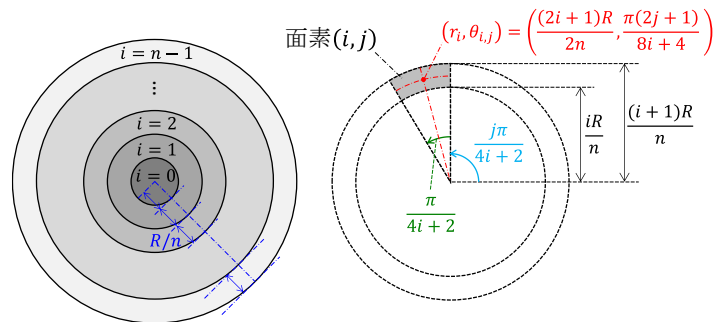


図5. 円形磁極面の扇型面素への分割

測定した波形から不平衡電圧を除去し、ゼロクロス点での傾き α を求めたところ、各サイクルの室温と液体窒素温度それぞれにおいて図 10 のようになった。原点位置精度に影響が出るほど傾きは変化しなかったため、IRIS 撮像部での用途に耐えられるだろうと今のところ判断している。

測定した波形から抽出したノイズ電圧を図 11 に示す。NI USB-6008 のシステムノイズ仕様は $0.5 \text{ mV}_{\text{rms}}$ で、a2 以外で観測されたノイズはどちらの温度でもほぼ同レベルで、有意な変化はなかった。しかし、a2 は室温で最初 $1.06 \text{ mV}_{\text{rms}}$ で、サイクル毎にノイズが漸減し、最後には $0.86 \text{ mV}_{\text{rms}}$ となった。これより、少なくともノイズの点で個体差があることが分かるため、駆動機構製作時にはホール素子だけの冷却試験を行い、特性の良いものだけ駆動機構に組み込むようにしたいと考えている。

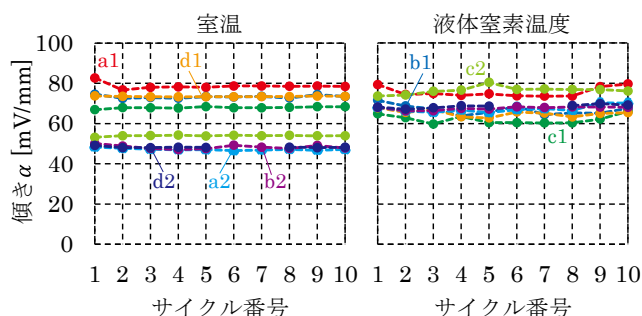


図 10. 温度サイクル試験で求めた傾き α

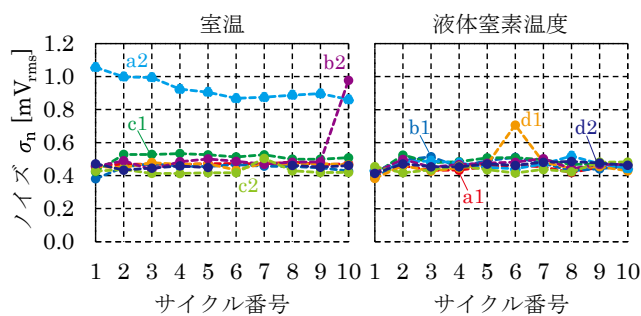


図 11. 温度サイクル試験で測定したノイズ

測定した波形から抽出した不平衡電圧(無磁場時のホール電圧)を図 12 に示す。室温ではほとんど変化がないが、液体窒素温度ではサイクル間で mV オーダーの変化があった。図 7 で傾き α が 55 mV/mm 以下であることと比べると、大きな変化である。このため、IRIS 運用時には毎冷却過程後に不平衡電圧を測定し、信号処理で除去する。不平衡電圧が液体窒素温度下でこれほど変化する理由は不明である。無磁場時のホール素子は図 13 のようなブリッジ回路とみなすことができ、製造時の意図しないばらつきにより 4 つの抵抗値のバランスが崩れて不平衡電圧が発生していると考えられる。一般に半導体の抵抗率はキャリア移動度とキャリア密度に依存した温度特性をもつが、冷却時に連続的に不平衡電圧を測定すると図 14 のように不規則に変化し、明確な温度特性は見られなかった。このことから、低温時に発生するホール素子内の応力により、半導体薄膜が機械的に不均一に歪んでいることなどが疑われる。温度サイクルとは無関係に何らかの理由で液体窒素温度下にて不平衡電圧の経時変化がある場合には、ある頻度で不平衡電圧を測定して補正する必要があることから、その必要性を確認する追加試験を行うことを検討中である。

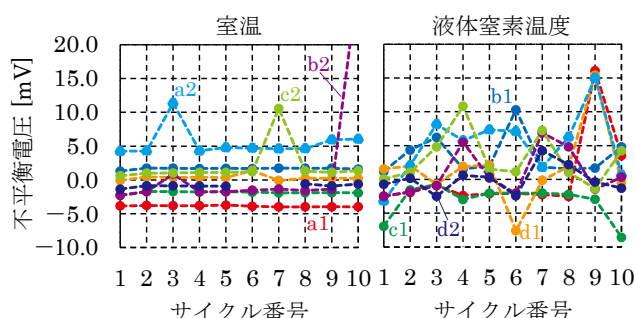


図 12. 温度サイクル試験での不平衡電圧

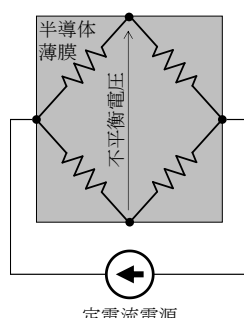


図 13.ブリッジ回路

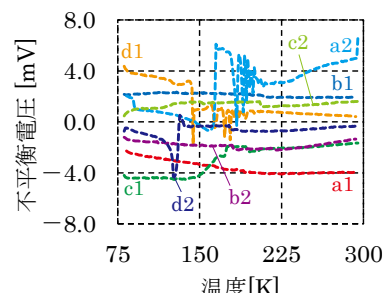


図 14.不平衡電圧の温度依存性

6. 参考文献

1. Fumihiro Uruguchi et al., The Infrared Imaging Spectrograph (IRIS) for TMT: prototyping of cryogenic compatible stage for the imager, Proc. SPIE 9908, 9908A8 (9 Aug 2016).
2. 小俣孝司「IRIS/MOIRCS のホールセンサの開発」、第 39 回天文学に関する技術シンポジウム 2019
3. 宮沢久雄「ディジタル・ガウス・メーター (II) 超伝導磁石用装置」、固体物理 Vol.8(1973) No. 12

すばるの夜間観測山頂無人化計画に向けたトラブル解析

○高木悠平、佐藤立博、青木賢太郎、藤吉拓哉
(国立天文台ハワイ観測所)

概要

すばる望遠鏡は、夜間観測時にスタッフが山頂に滞在せずに観測する「山頂無人化計画」を推進している。山頂スタッフがいない状態で安定的に夜間運用を実施するため、過去の望遠鏡トラブルを解析し、トラブルの内容と必要な改修を調査した。

1. 背景

すばる望遠鏡はこれまでさまざまな観測装置を用い、多種多様な観測結果をもたらしてきた。特に Hyper Suprime-Cam (HSC) による広視野撮像観測は、宇宙の構造形成や暗黒エネルギーの解明に大きく寄与している。2020 年代のすばる望遠鏡は、HSC を始めとした広視野・高解像度観測能力を向上し、サーベイ型の観測を推進する計画である。このような探査をより効果的・効率的にすすめるためには、観測体制の安定と強化が重要である。

観測体制の安定化の方法の一つとして、現在すばる望遠鏡では山頂無人観測を計画している。山麓施設（ハワイ州ヒロ市）にて観測が実行できれば、夜間にすばる望遠鏡があるマウナケア山の山頂に人を配置する必要がなくなり、サーベイ観測によって生成される大量の観測データからより効果的にサイエンス成果を導出することを優先した人的リソースの配置が可能になる。また、山頂と山麓の往復に係る経費や、山頂近くにある宿泊施設の使用料などを削減できる。

一方で、観測中に山頂施設が無人になることによる弊害も存在する。これは主に、夜間に生じた望遠鏡・観測装置のトラブル対応ができないことによる観測機会の損失である。山頂無人観測に移行した後も観測機会を現在と同等に維持するためには、望遠鏡及び観測装置の安定性をより高めることが必須となる。また、山頂施設に人がいなくとも、トラブルシュートができるような体勢を構築することも重要である。

2. トラブル解析

山頂無人観測を安定して実施するためには、近年のすばる望遠鏡の観測で起こったトラブルの内容と頻度を詳細に把握する必要がある。そこで、2019 年から 2021 年の 3 年間に発生したトラブルを調査した。調査には観測中に記録される Night log を使用し、記録されているトラブルのうち、山頂でスタッフが対処する必要があるものを抽出した。その結果、夜間に対処できない場合に観測データの品質の低下や観測機会の損失につながるなど、観測に影響を及ぼすトラブルは、合計で 273 件であった（図 1）。

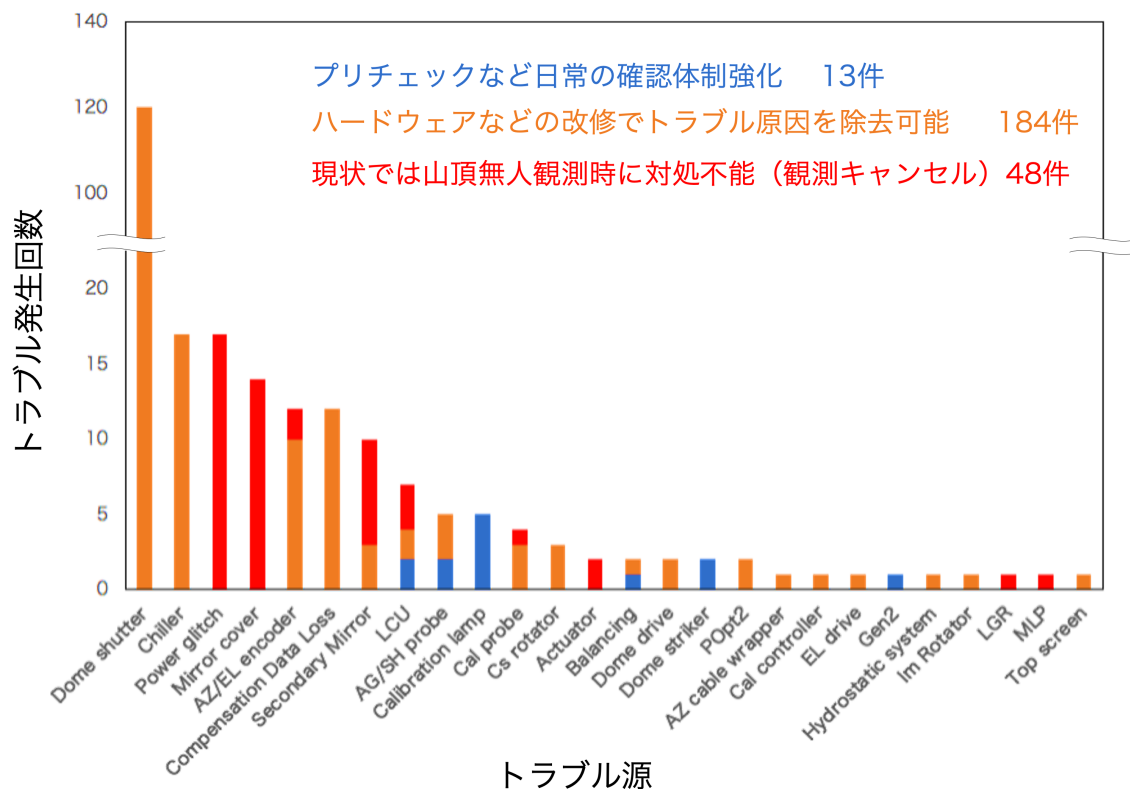


図1 2019年から2021年の3年間の間に生じた、山頂にて対応が必要なトラブルの箇所と頻度。

抽出したトラブルを以下のように分類した。

- ・プリチェックなど日常の確認体制強化で防ぐことができるトラブル

観測中のトラブルを未然に防ぐ目的で実施しているプリチェックを強化することで回避することができるトラブルが増えることがわかった。AGカメラ用のプローブの動作確認や、フラット光源・波長校正ランプの点灯確認などがこれに含まれる。現状のプリチェックは日中の山頂作業者のみで実施されているが、夜間観測に携わるスタッフも今後関わっていくような体制に切り替えるなど、観測の遂行をよりスムーズに行えるような体制づくりが重要になる。

- ・ハードウェアの改修等でトラブル原因を除去、または遠隔操作でトラブル対処できるようになるトラブル

トラブルが発生する箇所を特定して改修を施すことで、トラブルを防止したり、遠隔操作にてトラブルを解消できるようになるものが相当数あることがわかった。例としてドームシャッターが挙げられる。ドームシャッターは、開閉動作が完了しないなどトラブルが多発する箇所で、2019年は合計64回トラブルが生じていた。しかし駆動系や通信系の改修がなされたため、2021年には13回まで発生頻度が減少した。

この他にも、改修を実施することでトラブル頻度を減らすことができる箇所がある。今後はチラ

一の入れ替えなども検討されており、より安定した観測運用が可能となる見込みである。また、望遠鏡の制御系コンピュータ群も改修をすることを検討しており、山麓施設（ヒロ）からトラブル対処をできるケースが増加することが期待される。

- ・現状では山頂無人観測移行後は対応不能になると考えられるトラブル

一方で、現状では現実的な改修を可能な限り施しても遠隔操作では復旧することが難しいと想定されるトラブルも存在する。これには、各望遠鏡動作部に過負荷がかかり動作が停止してしまった場合などが含まれる。また、マウナケア山頂では瞬間停電が起こる頻度が多く、現状では手動で各種動作部のブレーカーをリセットしないと復旧できないケースもある。ブレーカの操作を遠隔で行うことは危険であり実施できないため、このようなトラブルを取り除くには駆動系統や電気系統を根本的に見直したり入れ替えたりする必要がある、改修コストが膨大になる恐れがある。今後はこのようなトラブルに対して、運用方法の見直しなどを徹底することで現実的かつリーズナブルな解決策を見出していきたいと考えている。

3. まとめと今後

すばる望遠鏡の観測効率向上を目的とした山頂無人観測を実施するため、現状の観測で生じているトラブルの発生箇所と頻度を調査した。トラブルは多岐に渡っており、より安定して運用するためには多くの改修が必要となる。トラブル発生頻度が高い箇所（ドームシャッター、チラー等）については既に改修が進行しており、運用が安定化した部分もある。また、望遠鏡監視体制の強化の一環で高感度なモニターカメラが複数導入されているが、その恩恵として、これまで発見されていなかった漏光の対処ができるようになっており、観測データの品質向上につながっている一面もある。ただし一方で、山頂無人観測時に観測機会を損失させる可能性があるトラブルはまだ多く存在する。これらのトラブルに対し、ハードウェア、ソフトウェア、運用体制など多方面から対処を施していき、より効率的・効果的な観測運用体制に移行できるよう検討を進めていきたいと考えている。

紫外域でのコーティング性能向上

UV-enhanced Coating for Telescope Optics

林 左絵子 (国立天文台)

Saeko S. Hayashi (National Astronomical Observatory of Japan)

概要

地球上のサイトであっても、大気の紫外光透過率が良く、紫外線観測を行うことが可能なサイトがある。望遠鏡の光学系について、可視光から赤外にかけての性能とともに、紫外域でのコーティング性能を向上させることにより、紫外線観測天文学を大きく発展させることができるのではないかと。そのようなコーティングについて各所で開発が進んでいる。地上望遠鏡用に実用化するためには、コーティングの耐久性と再コートのための剥離性をともに両立させることが課題である。また運用に当たっては、剥離に必要な薬品および廃液の管理が大きな課題である。離島での入手性および環境負荷からしても、できるだけ再利用できることが望ましい。

Abstract

This report discusses efforts in making telescope optics more reflective in the ultraviolet. Some ground-based telescope sites have decent transmission of UV light, and ability to observe that range will benefit the astronomy. Thanks to the UV-enhanced coatings developed for the space telescopes and astronomical instruments, it is becoming more feasible to have coating that has good reflectivity from UV to IR. The difficulty for the ground-based telescopes is that the environment contributes to the degradation of the coating, and re-coating is necessary. The requirements of durability versus strippability are somewhat contradictory. The waste control, and possible reuse, is another big issue for TMT, for 20 segments recoat per month will produce large amount of various waste.

1. 紫外域まで観測したい

マウナケアやラパルマのような地上望遠鏡適地では、波長 350nm でも 6 割を超える透過率がある。たとえばすばる望遠鏡では、300 nm に近い波長のスペクトル線観測が行われている。313 nm にあるベリリウム同位体の輝線は、このベリリウムがすみやかにリチウムになることから、リチウムの起源に関する貴重な知見を与える (参考: すばる望遠鏡ウェブサイトの観測成果記事 [2021 年 7 月 6 日](#) 付けの記事、[2015 年 2 月 18 日](#) 付けの記事)。標高が高く乾燥したサイトであれば紫外線の透過率が良いことから、このような重要なテーマの観測が可能になる。TMT では観測可能な波長域を 0.3–30 ミクロンとしており、メートルサイズのクラスの反射光学系に適用できるコーティングが求められる。

2. 広い波長域で高性能の均一・一様なコーティングを実現する

TMT の望遠鏡光学系のコーティングに求められる要素は次のようにまとめられる。

- 波長 0.3–30 ミクロンの範囲で反射率が高い。赤外域では放射率が低いとも言え換えられる。

- 反射率の波長依存性が連続的である、すなわち狭い波長域での急激な変化が無い。
- 反射率が光学系全面にわたり、一様である。
- 成膜の一様性、均一性。主鏡セグメント、副鏡、第3鏡いずれも中心穴がないので要注意。

TMT では主鏡、副鏡、第3鏡についてファーストライト時のコーティングとして、ジュミニ望遠鏡で実用化されている銀を主体とするコーティング (Boccas et al. 2004, SPIE 5494, 239) を施す。基盤材への付着性および保護のため、マグネトロンによるスパッタ方式により銀の上下に多層膜を作る。

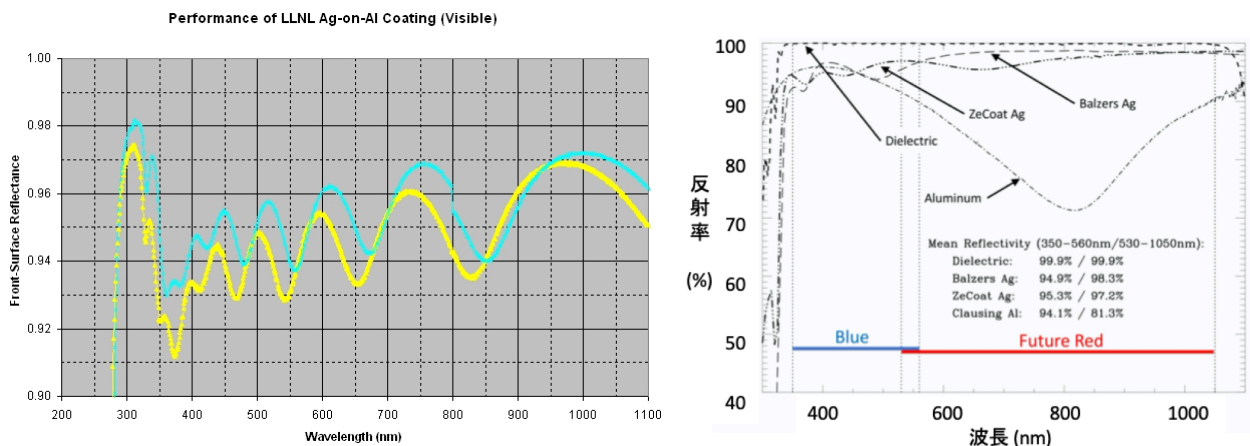
さらに将来、紫外光での性能強化のための拡張に備え、マグネトロン+ターゲットの組み合わせを増設できるようにしている。2021 年に行われた TMT の副鏡および第3鏡コーティング装置の[概念設計審査](#)において、その確実な増設が盛り込まれた。

次世代超大型光学赤外線望遠鏡3台 - TMT, GMT, ELT - のうち ELT の製作が先行している。主鏡セグメントのコーティング装置2台のうち1台が既に工場でのテストを終え、チリ現地に運ばれた。パンデミックの影響で予定が遅れているようであるが、組み立てが進んでいるはずである。

3. 望遠鏡光学系への適用 成膜の見通しあり

紫外性能も良いコーティングが、宇宙望遠鏡や観測装置内の光学系用に開発されてきた。

下にケック望遠鏡の観測装置に使われている光学コーティングの例を示す。



左: Low Resolution Imaging Spectrometer (LRIS) の直径 54 cm コリメータ鏡の反射率 (ケック望遠鏡のウェブサイト)。右: Keck Cosmic Web Imager (KCWI) 光学系の反射率 (Morrissey et al. 2019, ApJ, Vol 864, id 93)

次に望遠鏡光学系での使用例を示す。

Kepler 宇宙望遠鏡 主鏡直径 1.4 m

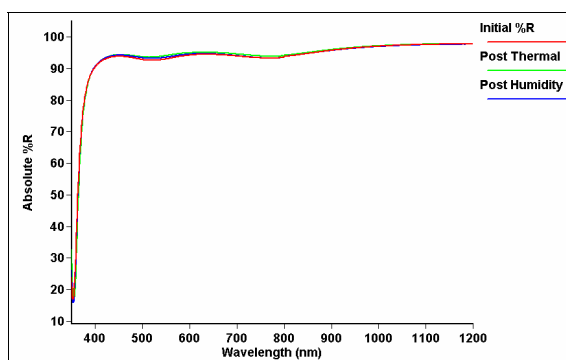


Figure 4: Protected Ag Coating with Five-Layer HL Interference Coating.

- [硝材 ULE](#), [研磨 Brasher LP](#)
これはすばる望遠鏡主鏡と同じ組み合わせ)
- コーティング 銀ベース
Surface Optics Corporation 社

図の出典: Sheikh et al. 2008, SPIE 7010

James Webb 宇宙望遠鏡は赤外観測用のため、金ベースで赤外域の高性能を達成している。

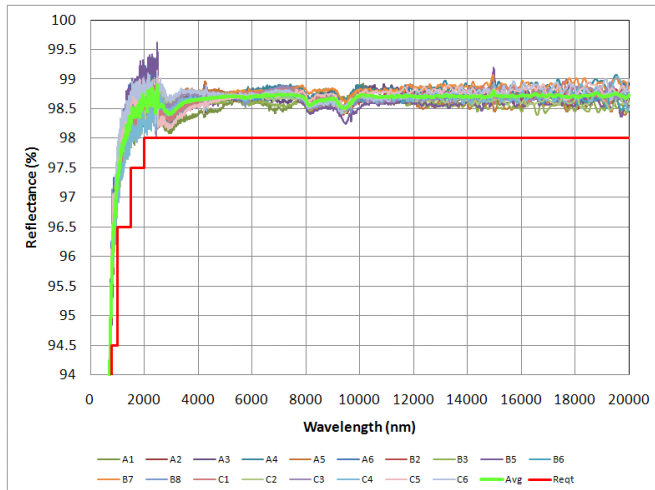
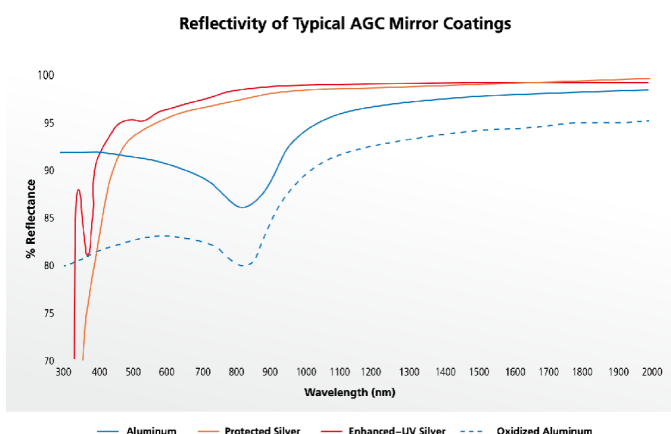


Figure 3. Spectral reflectivity for the 18 PM segments after coating

- 硝材 ベリリウム、研磨 Tinsley Laboratories (現在の Coherent TMT 主鏡の研磨の米国分担当)、6 角セグメントのさしわたし 1.3 m、18 枚のセグメントで主鏡を構成。
- コーティング 金ベース QCI (Quantum Coating Incorporated)

図の出典 : Lightsey et al. 2012, SPIE 8442-119

ELT は主鏡セグメント用のコーティング装置 2 台と副鏡／第 3 鏡コーティング装置をベルギーにベースのある AGC Plasma Technology Solutions が受注した。下の写真はドイツの工場で性能検証を終えた M1 コーティング装置。(出典 : Schotsaert et al. 2020, SPIE 11451, doi: 10.1117/12.2560685)



AGC も紫外性能を向上させる取り組みをしており、左の図は www.agc-plasma.com リーフレットより引用。グラフで紫外域に伸びているのが見てとれるが、分光特性的にはよろしくない。ピークやギャップの位置がずれると、セグメントごとに分光反射特性が異なることになり、観測への影響があると思われる。

4. 耐久性 vs.剥離性

観測装置光学系でデューワー内にあるものは、真空かつ温度コントロールありという環境にあり、宇宙望遠鏡は大気汚染の影響を心配する必要が無い。どちらの場合も再コートを考えなくとも良いため、それぞれの環境に応じて考えられる最良の方法で耐久性のあるコーティングを施すことができる。(地球外に送る望遠鏡や観測装置であっても、月や火星で使うものは地球での場合と似たような環境耐性が再び問題になるであろう。)

地上望遠鏡の場合は、観測のために外気にさらされることから、環境要因によるコーティングの劣化を避けることができない。また望遠鏡構造や建物などからの落下物、液体もれなども運用上は避けられないものである。劣化への対処としては、CO₂ などによる in-situ cleaning や水洗いによる延命をはかることと、古いコーティングをはがして再コートするといういずれも大掛かりな作業を伴うものになる。

運用上の環境に対するコーティングの耐久性と、再コートに際しての剥離性との見計らいは、重要な課題である。

別の講演で、望遠鏡を使わない日中にどの姿勢にしておくかで汚れ具合が異なる、従ってコーティングの劣化スピードが異なることが示された (→高橋英則さん講演)。これによると下向きがベストであることはもちろんだが、直立させておくだけでも効果がある。TMT の場合、昼間のレスト位置が仰角ゼロ度なので、望遠鏡光学系全てが直立した状態となる。主鏡はもちろん曲率があるので、下側のセグメントはやや上向きとなるものの、定期的に CO₂ クリーニングをすることでホコリの付着と定着を最低限にすることができよう。第3鏡はナスミス焦点を向いているため直立となるが、床側を向くことができれば、ホコリが落ちやすくなるだろう。

5. 剥離に伴う薬品の管理と再利用の可能性

すばる望遠鏡の赤外副鏡や第3鏡は金属のみのコーティングであって、剥離には1種類の薬品だけを使えば良い。しかしジェミニ望遠鏡用の多層膜付きコーティングになると、複数の毒劇物を使用しなければならない。紫外性能向上コーティングは、より複雑な多層膜構成になるであろうから、剥離に必要な薬品も種類が増える可能性がある。

望遠鏡サイトは離島や人里離れた場所にあることから、薬品類の手配、運搬、注意深い保管に加え、廃液をどう扱うかは大きな問題である。すばる望遠鏡主鏡の再コーティング時には500程度の塩酸を使用するが、何度も大量の水で洗うため、最終的には10トンの水にこの塩酸が溶けている状態になる。これほど薄まっていれば、生活雑排水としての処理が可能で、実際にそのように認定されて汲み取り車による回収を行ってきた。TMT 主鏡セグメントは1ヶ月に20枚も再コートするため、1枚分の廃液が多くなるとも全体では大変な量になってしまう。廃液を薬品ごとに回収し、一部でも再利用できることが望ましい。

望遠鏡保守情報交換会の現状と将来への展望

平野賢

(国立天文台 ハワイ観測所)

概要

各観測所の保守に関する課題解決のため、有志により発足した望遠鏡保守情報交換会には、今や国内外から 24 名が参加し、情報交換活動を行なっている。一方、国立天文台技術推進室により文書化された技術系職員の人材育成計画では、望遠鏡保守技術はシステム技術分野に含められ、他分野と同様に維持発展・新規技術開発・人材育成体制の構築を行うとされている。本会が人材育成計画の具体化に寄与することを期待し、現状と将来への展望を述べる。

1. 望遠鏡保守情報交換会の概要

望遠鏡保守情報交換会（以下、「本会」という）は、2016 年度に開催された第 36 回天文学に関する技術シンポジウムを機に発足した。各観測所の望遠鏡保守に関わる人材・技術・情報を共有し、人的リソースを活用することによる保守コストの削減及び、組織を横断し技術的なトレーニングを行なうことによる人材育成を図ることを目的に掲げ、2017 年から 4 名で活動を開始した。第 1 回会合時に、「将来の展望」として次に示す 5 点を挙げた。

- 1) 情報交換の結果、出張による技術伝承や人材交流に発展させる
- 2) 成果をまとめ、提言を出す
- 3) 1～2 年程度実施し、その成果を天文台内へ広く周知する
- 4) 最終的に組織を横断した保守部門の成立を目指す
- 5) 効率的な保守作業を実施できるようにする

その後の活動を通じ、望遠鏡保守担当者を中心に台内で賛同が広まり、2022 年 2 月現在 24 名（毎回の会合には出席しないが情報共有は希望する立場であるオブザーバを含む）が参加している。

メンバーが担当する望遠鏡は、ALMA、ASTE、TMT、野辺山 45m 鏡、すばる望遠鏡、VERA 20m 鏡と多岐に渡っており、さらに ATC からの参加もある。

2. 活動内容と方向性^[1]

本会は、主に次に示す 4 つの活動を柱としている。

- 1) 2 か月に 1 回、各観測所の保守作業、障害対応状況について情報交換、議事録共有
- 2) 保守データの品質保証体制の構築（天文台職員自身による保守データ取得、評価）

- 3) 保守に関する文書の共有と管理
- 4) 観測所間相互支援体制の構築による連携強化

本会が VERA20m アンテナ電気系保守をはじめ、ハワイ観測所、野辺山宇宙電波観測所における保守内製化の実績を積み重ねる中、国立天文台執行部においても望遠鏡保守の重要性が強く認識されるようになった。さらに近年、技術推進室文書や技術系職員会議においても、望遠鏡保守技術というキーワードが注目されている。

一方、トップマネジメントによる望遠鏡の長期安定運用を目標とした全台的な組織改革も検討されており、これと足並みを揃えて活動を展開し、必要に応じて提言を行なうことで、現場の声を届ける役割を果たしたいと考えている。

3. これまでの成果

過去に望遠鏡を製造したメーカーに依頼していた機械系、電気系保守に必要なデータの取得作業の一部を、観測所間連携によるデータ取得技術の共有によって、職員自身によって実施可能とした。具体的には、2018年にハワイ観測所から水沢キャンパスへ^[2]、2020年に水沢キャンパスから野辺山宇宙電波観測所へ保守担当者が出張した例が挙げられる。

また、本会独自の文書管理規則を制定し、これに沿って技術文書の作成・運用を実施している。これは、国立天文台技術推進室の藤井泰範氏のご協力により文書採番システムが立ち上がったため、これを利用し実現可能となったものである。これまで、本会として、規則等 2 本、技術資料 27 本、手順書 34 本を制定した。

4. 2021 年度活動報告

2021 年度に実施した活動を報告する。なお、個別の測定項目に関する詳細説明はここでは省略する。

1) ハワイ観測所、野辺山宇宙電波観測所 機械系・電気系保守報告会（2020 年度取得データ）

2020 年度に本会メンバーが測定した保守データについて報告会を実施した。データ取得・評価結果を技術主幹、野辺山宇宙電波観測所長、ハワイ観測所長ほか台内有識者に報告し、助言を得られた。

データ取得・評価の内製化が予防保守に結びつくことの理解を得た一方で、データの品質の定義や、何をどこまでやるかといった検討課題のリストアップが必要との指摘を受けた。測定項目は以下のとおりであった。いずれもメーカーが示す規格値内であることを確認した。

＜ハワイ観測所すばる望遠鏡＞

- ・ローテータ駆動トルク
- ・EL アブソリュートエンコーダ電圧信号
- ・主鏡カバー動摩擦トルク及び駆動速度
- ・ドーム、メインシャッター、トップスクリーン各駆動系

- ・MLP 回線モニタ

＜野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡＞

- ・AZ 鉛直度測定
- ・AZ/EL サーボループステップ応答
- ・AZ/EL 最大角速度・角加速度
- ・コリメータとの連動機能測定

2) VERA 20m 鏡（水沢局、小笠原局）における電気系保守データ取得

3 項でも触れたとおり、VERA20m 鏡の電気系保守データ取得については既に内製化を実現した。2021 年度は、以下の測定項目について、水沢局・小笠原局それぞれでデータ取得・評価を実施した。いずれもメーカーが示す規格値内であることを確認した。

- ・AZ/EL/FR 最小駆動速度
- ・AZ/EL/FR トルク変動誤差
- ・AZ/EL/FR 最大静止摩擦トルク
- ・EL アンバランストルク
- ・2B 駆動トルク電流特性

3) オンラインでの情報交換会

2021 年度は、2 か月に 1 回のペースを維持し、各観測所との情報交換を行なった。なお、情報交換会の議事録は、2017 年 1 月 5 日の第 1 回からメンバーによる閲覧が可能となっている。現在、COVID-19 の影響により Face-to-Face での情報交換や観測所間作業支援が実施できない、あるいは在宅勤務等を余儀なくされるという状況にこそ、このような機会を維持することは保守担当者の技術面でも精神面でも、良い取り組みと考える。

5. 今後の活動予定と将来への展望

望遠鏡は、科学目標を達成するために造られた装置であるが、当然ながら何もせずに動き続けることはできない。その保守担当者は、常に万全の状態で稼働できるよう機能・性能を維持することが任務である。これを果たすためには、望遠鏡の構成機器を始め、様々な技術分野の知識が必要となる。しかし、保守担当者とはいえ、経験の差や得手・不得手は様々である。本会が活動を始める前までは、望遠鏡ごとに多岐に渡る技術課題や解決事例が蓄積されていた。本会は今後も、保守担当者たちが所属プロジェクトの枠を超えた横のつながりという役割を果たし、それぞれの抱える技術課題や解決策等の保守技術及びノウハウを共有することによって、保守担当者全体の望遠鏡保守技術力の向上を目指す。

一方、望遠鏡の性能を維持する期限を見据え、どの機能・性能を維持すべきか、または限られた予算

を使って科学目標の達成のためにどの部分に重点的に予算を割り当て、必要な機能・性能の優先度付けを行なうかという計画は、現場の保守担当者だけでなく、執行部や観測所長等のトップマネジメントの視点が不可欠である。4項で触れたデータの品質の定義や、何をどこまでやるか等の検討課題のリストアップは、ひとつの観測所に留まらず、全台的な視野を持って、トップマネジメントがその方針を定め、保守担当者はその方針をふまえてノウハウを蓄積・共有・向上させることが必要である。また、特に近年は経年による劣化や部品の生産中止によって、そのままの構成品目を使うことができない等、複数の分野に渡る設計技術が求められる場面もある。設計の中で、新しい構成品目を使って仕様を満足しようとした時、何を測り、何を知るべきかについては、製造時の仕様に立ち返り、望遠鏡を製造したメーカーも交えた議論が必要になる。ここでメーカーに発注できる十分な予算があり、メーカーも対応が可能であればよいが、別のメーカー、あるいは天文台職員によって内作する事例もある。ここでよく見られるのが、その仕事を実際に行なった人しか技術情報を持っていないという、属人化である。これを防ぐためには、内作工程ごとに技術情報を文書化し、フェーズごとに責任者によるレビューを経て完成に至るという、プロセス標準に則った業務の進め方が有効である。一度文書化されれば、技術情報が変更された場合には文書を改訂することによって、変更管理が容易となる。このようなプロセス標準は、個々人の責任で作って運用することには限界があり、個人への負担が大きく、継続が困難である。将来計画されている全台的な組織改革を見据え、現場レベルで実務を通じてプロセス標準の形を模索し、本会でも議題として取り上げ、トップマネジメントへ提言できるよう議論を深めていきたい。

参考文献

- [1] 上野祐治「望遠鏡保守体制の連携強化の現状と将来構想」, 第40回天文学に関する技術シンポジウム, 2021
- [2] 谷口明充「望遠鏡保守情報交換会の活動報告 VERA の電気系保守内製化」, 第38回天文学に関する技術シンポジウム, 2019

TMT 第一期観測装置 IRIS の振動解析

○鈴木竜二、大淵喜之、浦口史寛、清水莉沙、早野 裕（国立天文台）、Glen Herriot, Brian Hoff, Joeleff Fitzsimmons (NRC-H), Robert Weber (Caltech)

概要

観測所の様々な機器に起因する振動は、望遠鏡、補償光学系、観測装置内の光学素子を揺らし、結像性能を劣化させる。振動による結像性能の劣化は、回折限界の性能を持つ観測装置では既に問題になっており、補償光学の性能が飛躍的に向上する TMT を含む次世代の望遠鏡では更に重要度が増す。本講演では TMT の第一期観測装置 IRIS と補償光学に関して、周波数空間における振動解析の手法と結果を紹介する。

1. イントロダクション

可視近赤外域の望遠鏡の大型化と補償光学の性能向上に伴って、光学素子の振動が結像性能に与える影響が重要さを増している。ここでいう振動は、観測所を構成する機器由来の振動、望遠鏡が動くことによる振動、風圧による振動、観測機器由来の振動、そして地面からの振動も含む。光学素子が振動すると、天体の像が振動し、補償光学が提供する点源分布関数（PSF）のピーク値が低減する。回折限界の PSF のピーク値に対する実際のピーク値の比をストレール比と呼ぶ。TMT では、同じ点源の天体を同じ S/N で観測するのに必要な観測時間の逆数を「点源感度」と呼んでいる。点源感度はストレール比の 2 乗に比例するため、振動によるストレール比の低減は観測感度に大きな影響を与える。振動の結像性能への影響は、補償光学が高いレベルで機能し始めた比較的最近から問題になっている。TMT では初期の段階から振動の重要性を認識しており、設計の段階から振動モデルを用いたバジェットの配分と設計検証を行っている[1]。

補償光学は地球大気による波面のゆらぎを補正すると同時に、観測装置に搭載された低次波面センサーで測定可能な範囲で振動もある程度補正する。ただし、補償光学による振動の補正は完璧ではなく、低次波面センサーと観測装置のカメラとの間の異なる振動や、低次波面センサーのコントロール速度よりも速い振動は補正できない。したがって、振動の影響を評価するには補償光学と観測装置を一つの系とみなして、光学、機械構造、制御を組み込んだ解析が必要となる。

本発表では、TMT の第一期観測装置である IRIS と第一期補償光学 NFIRAOS において、振動が結像性能に与える影響を評価し、装置設計に反映する取り組みを紹介する。

2. 解析手法

我々が扱う振動は、その統計的な性質が規定されたランダムな振動を扱う「ランダム応答解析」である。ランダム応答解析を行う手段として、時間領域での解析と周波数領域での解析があるが、我々は主に計算スピードと IRIS を構成するサブシステムごとでの評価のしやすさから、周波数領域での解析を選択した。

周波数領域における解析は以下の4つの概念で構成される：(1) 伝達関数、(2) 光学反応係数、(3) コントロールダイアグラム、(4) 入力振動。伝達関数はある点からある点にどう振動が伝わるかを記述した関数で、振幅倍率と位相差が周波数の関数として表される。光学反応係数は、個々の光学素子が（6自由度）動いた時に、結像位置が（3自由度）どう動くかを表した 6×3 の行列である。図1に今回の振動解析に用いたコントロールダイアグラムを示す。望遠鏡から入力された振動 d は、NFIRAOS、低次波面センサー（OIWFS）、IRIS 撮像系（Imager）の各光学素子に伝達関数 T で伝わる。それぞれの光学素子が動かす天体像の量は、光学反応係数 R を用いて TR と書ける。NFIRAOS, OIWFS, Imager の各サブシステムが動かす天体像の量は各サブシステム内の TR の代数和になる（図中の N , A , B ）。低次波面センサーと補償光学による tip/tilt 補正の open loop gain を H とすると、入力振動 d に対する、補償光学による補正後の天体像の振動 s の比は以下のように書ける。

$$\frac{s}{d} = N \left(\frac{1}{1+H} \right) + B - A \left(\frac{H}{1+H} \right) \quad (1)$$

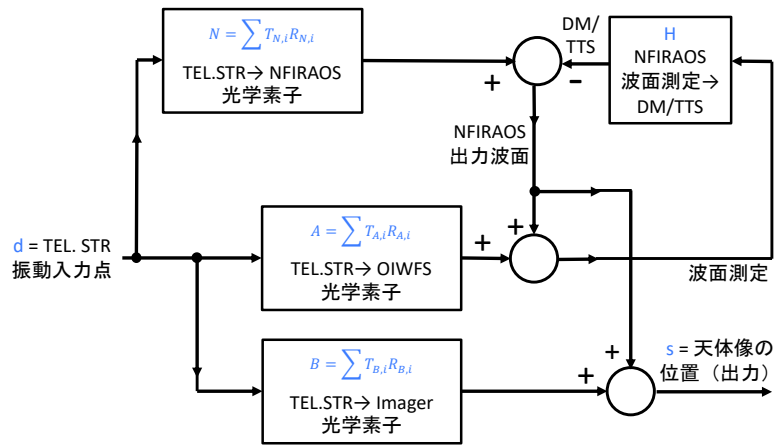


図1：振動解析に用いたコントロールダイアグラム。

今回の解析では結像性能の指標として波面誤差（WFE）を採用するため、最終的に以下の式で振動→波面誤差を行う。

$$WFE^2 = \int \left| \frac{s}{d} \times C \times p \right|^2 df \quad (2)$$

ここで f は振動数、 C は天体像の動きを波面に変換する係数、 p は望遠鏡から NFIRAOS に伝わる入力振動で、TMT 観測所のシステムレベルでの振動解析[1]から算出されている[2]。

3. モデル

図2に今回の振動解析で用いた FEA モデルを示す。IRIS は真空容器と、真空容器を支持し且つ NFIRAOS とインタフェースを取るためのサポート構造は詳細なモデルを使用している。低次波面センサーと撮像系は6自由度バネマスモデルと近軸レンズで単純化されており、この単純化モデルを使用してこれらサブシステムの固有振動数の要求を導出するのが、今回の振動解析の目的の一つである。

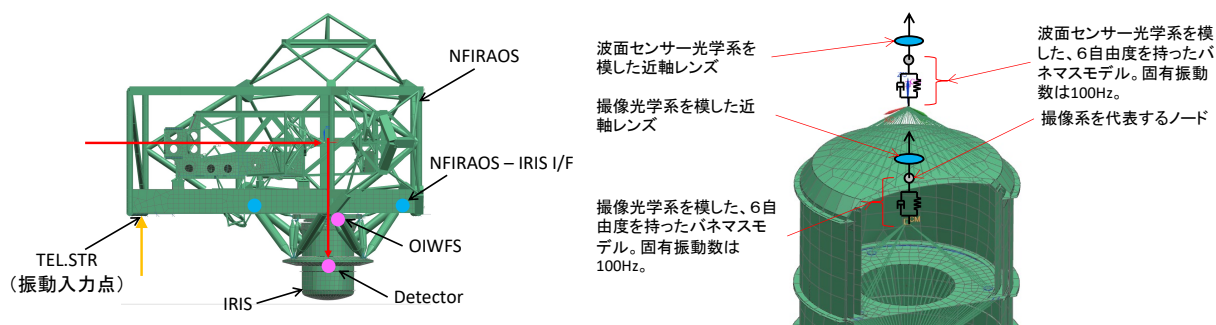


図2：振動解析に用いた FEA モデル。左：NFIRAOS と IRIS、右：IRIS の真空容器部分の拡大図と、6 自由度のバネマスと近軸レンズで簡略化した低次波面センサー、撮像系。

3. 結果

図3に振動解析の結果として波面誤差密度（式1の $\left|\frac{\varepsilon}{d} \times C \times p\right|$ ）を示す。式1より波面誤差（tip/tilt 成分）を求めると 7 nm rms を得る。低次波面誤差の要求仕様は 16 nm rms であるため、現段階では要求を十分満たす結果が得られている。また今回の結果から、サポート構造及び真空容器の設計の妥当性が確認されたとともに、低次波面センサー、撮像系の固有振動数に関して、100 Hz 以上を目標とすることの妥当性も確認された。

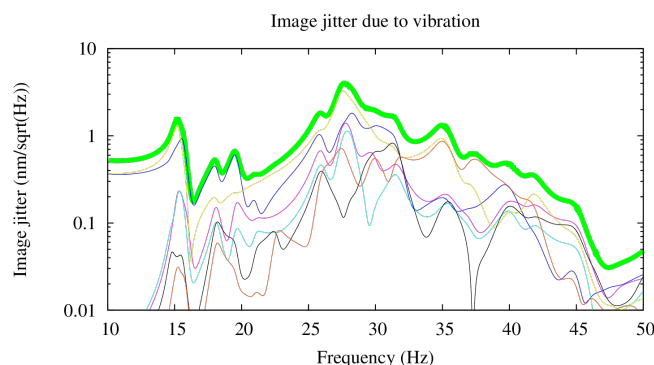


図3：IRIS 焦点面上での振動による波面誤差（tip/tilt 成分）。異なる細い実線は異なる自由度の振動を表し、太い緑の実線はそれらの自乗和の平方根である。

4. 考察

上記のように、簡略化したモデルでの解析では要求を満たす結果が得られているが、今後モデルを詳細化した際に要求を満たせなくなる可能性もあるため、現状のモデルで波面誤差を減らす可能性について考えておく。図3で最も波面誤差に寄与している振動数の上位2つ（15 Hz と 28 Hz）について、図4にモード形状を示す。2つのモードは共に IRIS の真空容器が振り子のように振れるモードだが、15 Hz のモードは回転中心が真空容器の上、28 Hz のモードは回転中心が真空容器の下にある。IRIS の入力側の焦点面（振動していないときに NFIRAOS の出力側の焦点面と一致）は真空容器の上部にあるため、15 Hz での振動では IRIS の焦点面が NFIRAOS の焦点面に対してあまり動かず、逆に 28 Hz では大きく動いてしまう。この振動モードによる波面誤差を抑える方法は以下が考えられる。

- （方法1）固有振動数を上げる。

- (方法2) 減衰率を上げる。もしくは **passive/active damper** を用いる。
- (方法3) 補償光学で補正する。

方法1は、入力振動が周波数に反比例して小さくなる[2]ため f^{-1} の効果があるが、 $f \propto \sqrt{k/I}$ であるため、例えば振動を半分にするにはサポート構造の剛性 (k) を 4 倍もしくは真空容器の慣性モーメント (I) を 1/4 倍にする必要があり現実的ではない。構造の減衰率は 2%を仮定しており、これを大きくすることは難しい一方で、**passive/active damper** の搭載は質量の制限から実現は難しいと思われる。方法3に関しては、(今回の結果とは別の理由で) 2つの手法が既に実装されている。一つはより速い読み出しが可能な低次波面センサーの導入、もう一つは **LQG** コントローラを用いた振動抑制機能の追加である。新しい低次波面センサーにより振動抑制の帯域が 30 Hz から 90 Hz に改善されるため、それに伴って振動も抑制されることが期待される。一方、**LQG** コントローラを用いた振動抑制は既存の望遠鏡の観測装置でも実装されており、振動の周波数が分かればその周波数のみピンポイントで振動を抑制することができる。この2つの手法で、必要であれば振動を更に抑制することができると考えている。

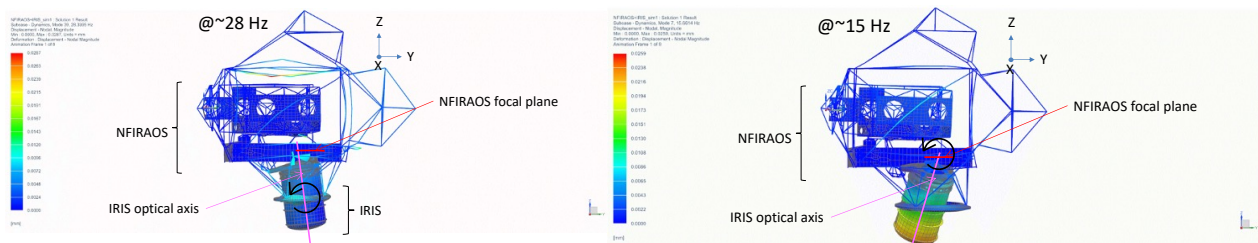


図4：波面誤差の悪化に最も寄与する上位2つの振動のモード形状。左：28 Hz、右：15 Hz。

5. まとめ

近年、補償光学の性能向上に伴って、振動による結像性能の悪化が観測性能／効率に与える影響が見えてきた。TMT では設計初期から振動を重要な課題と位置づけており、望遠鏡、補償光学、観測装置を含むシステムレベルで振動を扱い、各サブシステムへの要求作成と性能検証を行ってきた。本講演では、TMT 第一期観測装置の一つである IRIS について、我々が採用している周波数領域での振動解析の手法を紹介した。また、NFIRAOS と簡略化した低次波面センサー、撮像系の光学／構造モデルにこの手法に当てはめた結果を紹介し、現時点で設計が要求を満たすこと、またサブシステムの設計に向け、低次波面センサー、撮像系への固有振動数の要求仕様の妥当性を確認した。今回取り扱った振動モードについて、今後もし振動を抑制する必要がある場合は、**LQG** コントローラを用いた振動抑制を考えている。次のステップとして、低次波面センサー、撮像系を個々の光学素子／マウントまで分解した詳細モデルを用いて、最終的な要求仕様の検証を行う予定であり、現在モデルの構築が完了している。

参考文献

- [1] MacMartin, D. G. and Thompson, H. 2014, Proc. SPIE, 9145
- [2] MacMartin, D. G. 2020, TMT internal technical document (TMT.SEN.TEC.20.008.REL01)

ミリ波帯誘電率測定システムの開発

○坂井了、Alvaro Gonzalez、金子慶子、小嶋崇文、鵜澤佳徳（国立天文台）

概要(Abstract)

電波望遠鏡の受信機開発において、光学系の設計精度が受信機性能に大きな影響を及ぼす。誘電体レンズを用いた光学系の場合、設計帯域におけるレンズ材料の精確な誘電率が、レンズ形状や反射防止膜の設計において必要である。国立天文台では、受信機光学系の設計精度の向上を目的として、ミリ波帯における誘電率測定システムの開発を進めている。本稿では、開発した測定システムとそれを用いた評価例を紹介する。

1. 開発の背景

高感度な電波望遠鏡受信機の開発において、初段のサブシステムである光学系の高精度な設計が重要である。誘電体レンズを用いた光学系では、設計帯域のレンズ材料の精確な誘電特性を用いてレンズ形状・厚みや反射防止膜を設計することで、光学系で生じる損失を可能な限り低減する必要がある。例えば、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) 望遠鏡の Band 2 受信機（動作帯域 67-116 GHz）では誘電体レンズ材料の候補として超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)が挙げられている[1]。同じ UHMWPE でも分子量・密度や添加剤等により誘電率に違いが生じる可能性から、実測により使用する光学材料の誘電特性を調べる必要がある[2]。上述した理由から、我々は受信機光学系の設計精度向上を目的としてミリ波帯における誘電率の高精度な測定手法を開発している。

2. ミリ波帯における誘電率測定手法

ミリ波サブミリ波帯における誘電率測定手法は共振器法と透過・反射法の2つに大別される。透過・反射法は広帯域で連続的な測定が可能、伝送線路の形態によっては試料加工が比較的容易などの利点がある。しかしながら、UHMWPEのような低損失材料の測定においてはベクトルネットワークアナライザ(VNA)のポートマッチ特性の影響が大きく現れるため、誘電正接の高精度な測定が困難である。共振器法は高いQ値から低損失材料の測定に適している。一般的に共振器法は低損失材料を高確度に測定でき、様々な種類の共振器法が研究されている[3]。一方で、空洞共振器では試料を治具に応じた薄い、または小さい形状に高精度に加工する必要がある。測定手法によって測定条件や測定試験片に求められる形状・寸法誤差等が様々であり、一つの測定システムで全てをカバーすることは困難である。したがって、目的、用途や測定対象に応じて各測定手法の長短を考慮して使い分ける必要がある。本研究ではフリースペース法と共振器法の一つであるファブリペロー開放型共振器法(FPOR)の解析手法の開発を実施した。本稿ではフリースペース法について紹介する。最後に開発した測定システムの妥当性検証として、FPORと平衡型円板共振器法(BCDR)の測定結果との比較を示す。

3. フリースペース法測定システムの概要

図 1 に本測定システムの概略図を示す。本測定システムは VNA と光学系で構成される。ホーンアンテナを介して送信機より放射された電波は測定試料を透過（または反射）した後に受信される。ホーンアンテナから放射されたビームは対向する楕円面ミラーで 90 度の向きに反射され、試料位置に焦点面を持つ。また、試料への入射ビーム径は測定波長に対して十分に大きく設計されており、試料への入射波を平面波と近似できる。したがって、垂直入射の場合のフレネル係数と誘電体による光路長差の位相を用いて透過・反射特性を単純なモデル式で表せる。透過・反射特性モデル式に測定結果をフィッティングすることで誘電率を導出する。図 2 に開発したフリースペース法測定システムの写真を示す。測定周波数は 67-116 GHz である。測定項目は試料を設置しない場合 (Thru), 金属板を設置した場合 (Short) と試料を設置した場合 (MUT) の 3 項目である。MUT の透過・反射特性の測定値を各々, Thru と Short で除することで測定データを得る。誘電率の導出に用いたアルゴリズムの詳細は[4]を参照されたい。

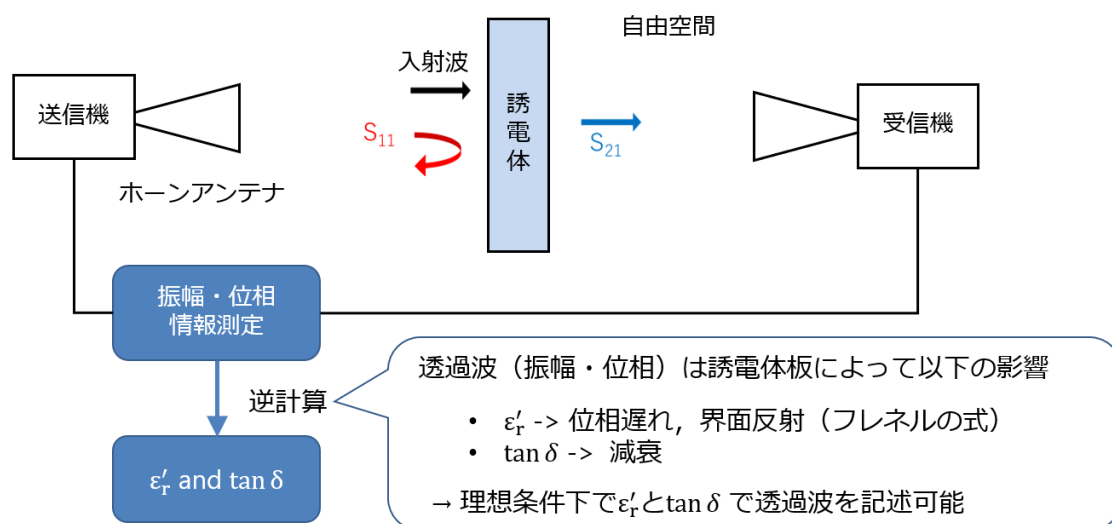


図 1. フリースペース法測定システムの概略図。簡単のため楕円面ミラーは省略してある。

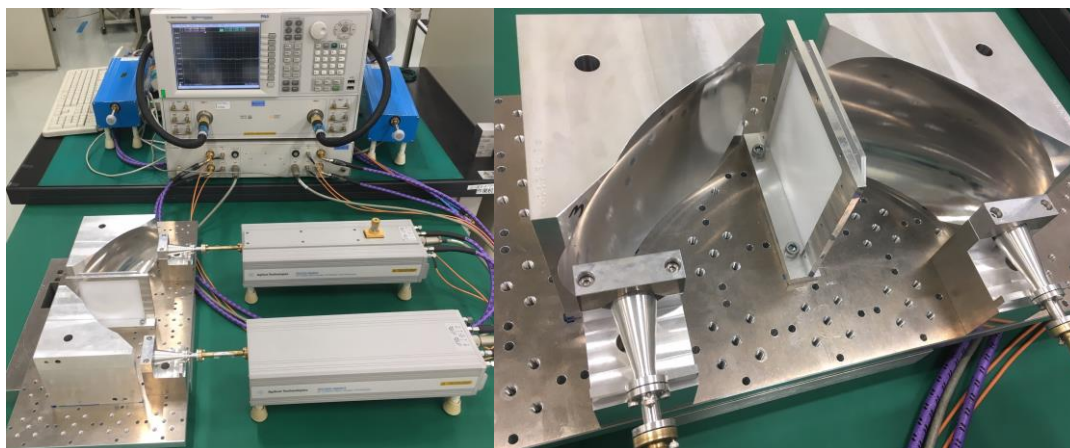


図 2. 開発したフリースペース法測定システムの全体（左）と光学系（右）の写真。

4. 測定例

測定対象は先述した UHMWPE である．測定試験片は 100mm 角，厚み 12mm の板材である．厚みはマイクロメーターで測定し，試験片周囲 8 点の平均値を誘電率の計算に用いた．図 3 にフリースペース法，FPOR と BCDR 法による測定結果を各々示す．誘電率は 91GHz における測定値で，フリースペース法が 2.307 ± 0.015 ，FPOR が 2.31，BCDR が 2.315 ± 0.012 であった．誘電正接はファブリペロー開放型共振器法が 1.1×10^{-4} (52 GHz)，BCDR が $1.6 \times 10^{-4} \pm 1.1 \times 10^{-4}$ (91 GHz) であった．各測定手法による測定結果は不確かさの範囲内で一致しており，開発した測定系の妥当性を実証した．

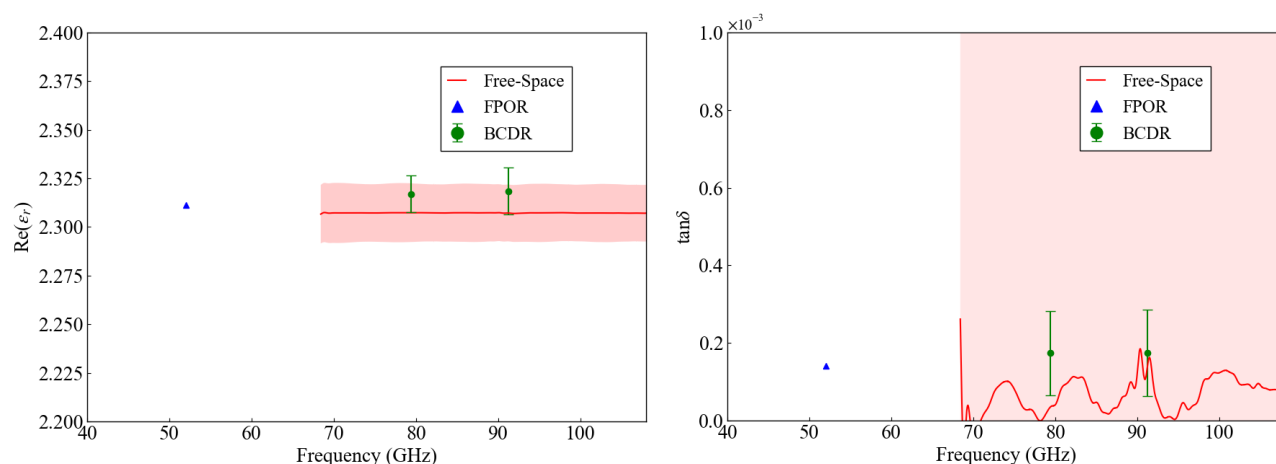


図 3. UHMWPE の誘電率（左）と誘電正接（右）の測定結果．赤線がフリースペース法，青と緑のプロットが各々，FPOR と BCDR による測定結果である．影部とエラーバーは拡張不確かさ($k=2$)を示す．

5. まとめ

本稿では，誘電率測定システムの概要と測定例について紹介した．3 つの測定手法により得られた測定結果は良好に一致しており，開発した測定システムの妥当性を実証した．ALMA Band2 では，本システムの測定結果を用いて設計性能を満たすレンズの開発に成功している．また国立天文台先端技術センターでは，本稿で述べた 67-116 GHz 帯に限らず，より高周波帯の測定システムの開発も実施している．本研究が今後の電波望遠鏡受信機，その他の応用先（無線通信やリモートセンシング等）の研究開発に貢献することを期待している．

参考文献

- [1] P. Yagoubov, et al., “Astrophysics Wideband 67 – 116 GHz receiver development for ALMA Band 2,” vol. 46, 2020.
- [2] C. Y. E. Tong, K. Carter, and J. Connors, “Quasi-optical characterization of low-loss polymers at 300 GHz for vacuum window applications,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 713–720, 2020, doi: 10.1109/TTHZ.2020.3021352.
- [3] Y. Kato and M. Horibe, “Broadband Permittivity Measurements up to 170-GHz Using Balanced-Type Circular-Disk Resonator Excited by 0.8-mm Coaxial Line,” *IEEE Trans.*

Instrum. Meas., vol. 68, no. 6, pp. 1796–1805, 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2886864.

- [4] J. Baker-Jarvis, E. J. Vanzura, and W. A. Kissick, “Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 8, pp. 1096–1103, 1990, doi: 10.1109/22.57336.

木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡のポインティング性能改善

近藤 莊平（東京大学 木曾観測所）

概要

木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡には、84 個の CMOS センサをモザイク状に並べた 9 度 × 9 度の視野を一度に観測できる Tomo-e Gozen カメラが搭載され、大半の時間で全天サーベイをおこなっている。そのデータから現状のポインティング精度を調査、それを用いてポインティング補正パラメータの最適化をおこなった。その結果、天体導入の位置精度は、今までの 10 分角以上から 10-20 秒角となり、1 つの CMOS センサのサイズの約 1%まで向上した。

1. はじめに

木曾観測所は 1974 年に設立、非常に広い視野を持つ 105cm シュミット望遠鏡を有している。現在、Tomo-e Gozen カメラが取り付けられており、2k × 1k の画素数を持つ CMOS イメージセンサを 84 枚モザイク状に並べ、一度の露光で 9 度 × 9 度の視野をカバーできる。これにより、高度 30 度以上の全空を 2 時間で観測できる。また、CMOS センサの特徴を活かし、通常 2fsp、最大 68fsp の高速フレームレートで撮像を行う。観測運用として、通常は全天領域の動画サーベイ（2 fps × 18）と特定領域の高頻度動画サーベイ（2 fps × 12）を進め、即時の広域追観測（重力波、ニュートリノ、GRB など）、特定天体の観測（地球接近小惑星など）を割り込み的に実施している。

2. ポインティング精度の把握

木曾シュミット望遠鏡と Tomo-e Gozen カメラは視野が広いために、日常的に行なわれるサーベイ観測を行っている限り、ポインティング精度はそこまで気にされていなかった。一方で、Tomo-e Gozen の観測が進むにつれて、サーベイ観測で見つかった天体の追加観測や 1 つのセンサの特定のピクセル領域だけを用いた高いフレームレートの観測、空のある特定領域を他の望遠鏡や観測装置と同時観測などが増え、それらの観測者からポインティング精度がいまいちであるとの報告が上がっていた。

初めに、現状のポインティング精度を確認した。Tomo-e Gozen では観測データには解析パイプラインによってセンサ毎に wcs (world coordinate system) が求められ、データベースに登録されている。同時に望遠鏡が計算機上でポインティングしているはずの座標もデータベースに登録されている。よって、両者を比較することで、ポインティング精度を評価できる。そこで、1 晩中観測できたある日の観測データをすべて調べたところ、ポインティング精度は平均的に 10 arcmin 以上となり、現状のポインティングは非常に大きくずれていることが分かった。

3. 望遠鏡駆動ソフトウェアの確認

次に、望遠鏡駆動ソフトウェアの内部計算方法の確認を行った。望遠鏡駆動ソフトウェアで望遠鏡をある天球座標にポインティングする際、望遠鏡の機械座標から天球座標への変換やその逆変換が正しくなされなければならない。そこで制御ソフトの日周運動、分点変換、さらに章動、年周光行差といった微少補正量や微分大気差補正といった座標変換部分について調べた。文献に掲載されている式やそれを用いた計算結果、信頼できるコードによる計算結果と実際の望遠鏡駆動の該当部分のコード自体やそれを動かしたときの値と比較し、望遠鏡駆動ソフトの計算に間違いがないことを確認した。よって、ポインティング精度を運用側で改善する必要がある。

4. 最適な補正パラメータの推定とその改善結果

実際の望遠鏡の駆動に対して、望遠鏡の光学的なずれ(e. g., 極軸のずれ)や機械的なずれ(e. g., 鏡筒のたわみ)などによって理想的なポインティングから僅かにずれてしまう。それをソフトウェア的に補正できる多くのパラメータが用意されている。パラメータの最適値を見つける手続きを単純にするため、ソフトウェアの更新時にたまたま補正パラメータが入っていないときの観測データを用いた。望遠鏡のポインティング補正パラメータの最適値を推定するソフトウェアとして広く使われている「Tpoint」を用い、7 個のパラメータの値を求め、RMS として 15 arcsec のポインティング精度となるという結果を得た。しかし、そのパラメータの値を採用し、観測を実施、そのデータを調べたところ、ポインティング精度は RMS で 100 arcsec 程度となった。Tpoint 内で各々のパラメータの望遠鏡駆動に対する補正の仕方についての具体的なソースコードは公開されていないため、我々の望遠鏡の駆動の際のパラメータによる補正の仕方との相違点の確認は出来なかった。よって、我々の望遠鏡駆動ソフトのソースコードの該当部分をそのまま使い、再度最適なパラメータを求め直すことを試みた。計算方法としては、該当するソースコード部分を用い、望遠鏡の機械座標から天空座標を計算、それらが観測データの天空座標と一致するように補正パラメータの値を求めれば良い。主に赤経と赤緯軸の値に対する赤経、赤緯の値の残差のパターンを確認しながら、8 個の補正パラメータの値を求め、RMS で 20 arcsec 以下となるような結果を得た。そのパラメータを採用し、観測を実施したところ、計算結果と同じポインティング精度の RMS で 20 arcsec という結果が得られた。その後、望遠鏡の主鏡の再蒸着が行われ、その際に主鏡を動かすために、ポインティング精度が変わる可能性が生じた。その後の観測結果から、それまで少し残っていたシステムチックな残差が少なくなる方向に変化し、最終的にポインティング精度は RMS で 10-15 arcsec となっていることを確認、これは今までの約 50 倍の導入精度である。またこれは、1 つの CMOS センササイズで約 1%の位置に天体を導入できることに対応し、サイエンスで要求される値を十分満たす結果である。

5. 今後の取り組み

指向精度を確認するツールを作成し、毎朝、昨晚の観測結果を確認しているのだが、それを

tomoe のスケージュルシステムに組み込み予定である。また、現在は補正パラメータの追求は残差のパターンを目で確認しながら進めているが、将来的には、日々のデータから自動で最適値が求められるシステムの作成を考えている。

低温真空中で使える機械要素の紹介

○池之上文吾、大淵喜之、齊藤栄、中本崇志、清水莉沙、
浦口史寛、小俣孝司、鈴木竜二、早野裕（国立天文台）

概要 (Abstract)

TMT の第一期観測装置である近赤外線撮像分光装置 IRIS の撮像部には低温真空中で動作するメカニズムが複数ある。これらのプロトタイプ試験の結果と共に、低温真空中で利用できるベアリングやリニアガイド、またそれらに施した固体潤滑などの機械要素について紹介する。

1. IRIS の簡単な紹介と真空低温中で動作するメカニズム

IRIS は TMT 望遠鏡の第一期観測装置で現在最終設計段階にある。クライオスタット（液体窒素温度）内部の上段に撮像系、下段に面分光器という構成になっており、我々日本の IRIS チームは上段の撮像系を担当している。IRIS 撮像系にはいくつか低温真空中で動作するメカニズムがある。フィルター交換機構のフィルターホイールを支えるベアリングやその駆動に用いるギアードモーター、コールドストップの直動ステージに用いているリニアガイドやウォームギア、同じく回転部分のベアリング、位置検出用のホール素子などである。図 1 に IRIS 撮像系の 3D CAD モデル（機構が見やすいよう一部ハウジングを省略している）と駆動部分の機械要素を示す。

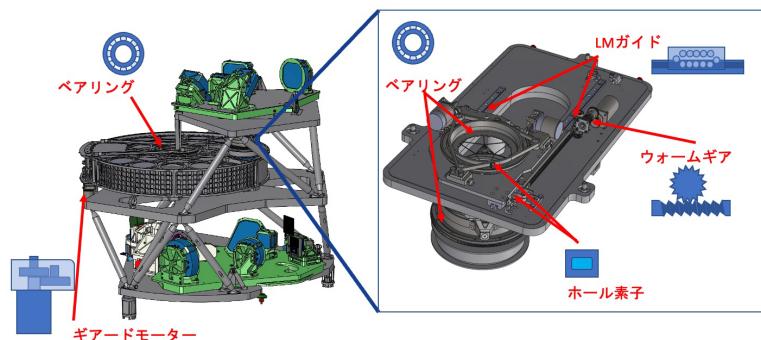


図 1 IRIS 撮像系 3D CAD モデルと駆動部分の機械要素。

右図上はコールドストップと呼ばれる機構。

2. 低温真空中で駆動する機械要素の耐久試験

IRIS 撮像系は低温真空中で運用され、組立調整の 3 年間及びその後初回メンテナンスまでの 10 年間、計 13 年間トラブルなく運用できることが要求されている。通常ベアリングなどメーカーが公表している寿命計算式はオイル等使用し良好な潤滑状態にある時のもので、オイル等使用できない低温真空中の寿命計算はできない。また、位置検出用のホール素子はメーカーが低温での動作を保証しているものではない。そこで実際に低温真空中で 13 年の運用に耐えるかプロトタイプ試験を行った。

1) ホール素子

Asahi Ksei Microdevises (AKM) 製の 4 種のホール素子について低温真空中で動作するか確認したところ HG-106A が動作した。HG-106A についての試験や位置検出の検討は[1]を参照。

2) ボール案内機構耐久試験

ベアリング、リニアモーションガイド、ボールネジなどボールが転動面を転がるボール案内機構についてプロトタイプ試験を行った。真空中にて、金属面を無潤滑で接触させるとコールドウェルドと呼ばれる現象が起こり、機構が動かなくなる。対策としてはボールと転動面を異素材にする、固体潤滑を施す、という 2 点が考えられる。そこで、ボールと転動面を同種金属 (SS440C) 無潤滑のもの、ボールを Si_3N_4 に変えたもの、ボールに MoSTTM コーティング^{*1}を施したものの、の 3 つの組み合わせでプロトタイプ試験を行った。試験は負荷相当のウェイトを取り付けた試験装置をクライオスタットの内部に設置し、クライオスタット外部よりトルクメーターを介して軸導入した軸を回転させ試験装置を駆動し、その際の負荷トルクをモニターする。ボール案内機構に異常が発生すればトルクの変化として検出できる。ボールネジ耐久試験の結果、同種金属 (SS440C) 無潤滑のものと Si_3N_4 ボールのものはトルク値が急激に変化しステッピングモーターが脱調し動かなくなった。ボールに MoSTTM コーティングを施したものはトラブルなく目標値である 4,500,000mm、6mm を 750,000 往復、を超えて駆動できた。ボールネジ耐久試験の試験装置概略図と試験結果を図 2 と図 3 にそれぞれ示す。

ボールに MoSTTM コーティングを施したリニアモーションガイドとベアリングもそれぞれ目標値 (リニアモーションガイドは 18,000,000mm、100mm を 180,000 往復。ベアリングは直径 4inch ベアリングで $\pm 360^\circ$ を 5755 回。) を超えて駆動でき、耐久試験をクリアした。

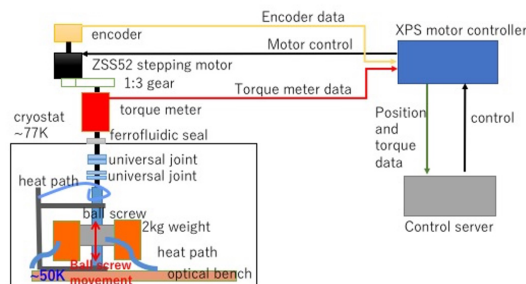


図 2 ボールネジ耐久試験装置概略図。

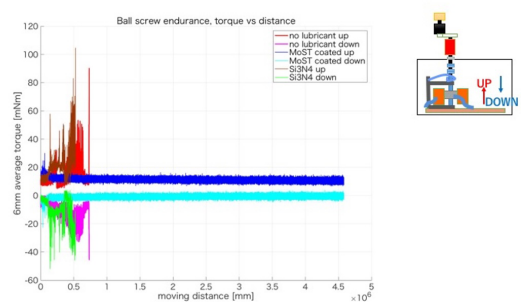


図 3 ボールネジ耐久試験結果。

3) 超高分子量ポリエチレン (UHMW-PE) ギア

コールドストップの直動ステージはモーターがウォームギアを介してラックアンドピニオンを駆動するメカニズムを採用している。ウォームギアは減速比が大きくとれることとセルフブロックできるというメリットがあるが、歯の接触面が大きいため摩擦熱や摩擦が発生しや

*1 MoSTTM コーティングとは英国TEER社が独自開発したMoS₂と金属のコンポジットコーティング。

すいというデメリットがある。今回、ステンレスウォームとリン青銅ウォームホイール無潤滑、それらに MoS_2 パウダーコーティング、同じく両者にダイクロナイトコーティング、UHMW-PE ウォームとリン青銅ウォームホイール、の4つの組み合わせで試験を行った。試験に用いたクライオスタットは上記2) で述べたボール案内機構の試験に用いたものと同じものである。無潤滑のものは、目標値の1/10未満でステッピングモーターが脱調し停止。ウォームを観察するとウォームホイールが磨耗していた。 MoS_2 パウダーコーティングのものは、目標値の1/5未満でステッピングモーターが脱調し停止、同じくウォームホイールが磨耗していた。ダイクロナイトコーティングのものは目標値をクリアしたが、試験終了時の負荷が試験開始直後の1.5倍程度に増加し、ウォームホイールのダイクロナイトコーティングが一部剥がれ、そこに磨耗が見られた。UHMW-PE ウォームとリン青銅ウォームホイールの組み合わせは負荷の変化は無く、ウォームに顕著な摩耗も見られず、目標値を超えて駆動できた。また、フィルターホイールの駆動に用いるギアードモーターのギアボックスはUHMW-PEを一部使用した平歯車の組み合わせを用いたものを製作し、このギアードモーターも目標値を超えて駆動できた。

4) 繰り返し屈曲ケーブル及びサーマルリンク

コールドストップを光路へ出し入れするための直動ステージのストロークは200mmである。このステージ上には回転ステージ及び微動直動ステージ用のモーターが搭載されており、これらの配線と発熱を構造へ逃すサーマルリンクを何らかの形で直動ステージに搭載する必要がある。搭載時の形状をいくつか検討した結果、ステージを上部から見てU字に搭載することとした。U字形状はコンパクトに設置でき曲げ半径が変化しないという利点がある。ケーブルはGORE社のGSC-06-27305-00を使用、サーマルリンクは $16\mu\text{m}$ の銅箔を180枚重ねたものを自作した。耐久試験前に試験装置のバックグラウンド負荷測定の結果、U字形状にケーブルとサーマルストラップを搭載した直動ステージを低温にした際の負荷の増加は主にケーブルによるもので、サーマルストラップによる負荷増加はとても小さいということがわかった。耐久試験はケーブル及びサーマルリンクとも破損することなく目標値である200mmを11500往復を超えて駆動できた。図4にケーブル及びサーマルリンク試験装置の写真を示す。

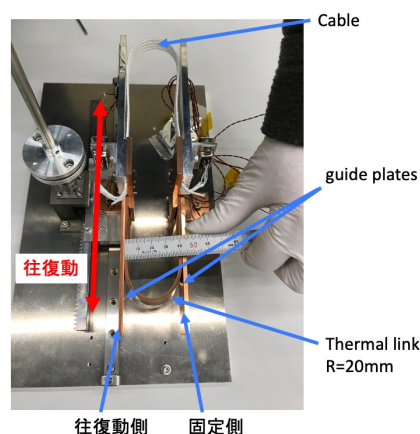


図4 ケーブル及びサーマルリンク試験装置。

5) ミニチュアハイブリッドベアリング

試験装置やプロトタイプに至る所に藤電子の各種ハイブリッドベアリングを使用している。これはボールはセラミック、転動面はステンレス、リテーナーはPTFEである。リテーナーが低温になった際に熱収縮で内輪に密着し、ベアリングが回転できなくなることを避けるため、一部切り込みを入れC字にカットして使用している。これまでの試験でこのベアリングが問題になったことはない。

3. 低温真空中使える機械要素とメーカー情報等まとめ。

上記2でいくつかのプロトタイプ試験と低温真空中で使える機械要素について述べた。表1に低温真空中で使える機械要素とメーカー情報等を示す。

表1 低温真空中で使える機械要素とメーカー情報等

機械要素	品番等	メーカー	メモ
ホール素子	HG-106A	Asahi Kasei Microdevices	数個であればサンプル提供してくれる。
ボール案内機構	ボールに MoST コーティン グ	国内では 安達新産業株式会社	2022/12 末でコーティング 事業終了。LO は 2022/9 末予 定。LM ガイドであれば、THK の個体潤滑 S 膜が同等品
ギア	UHMW-PE 製の の		
駆動部サーマルリンク	Stack of Cu foil	In-house	
駆動部ケーブル	GSC-06-27305-00	GORE 国内代理店は伯東	用途に合うサンプルあれば 提供してくれる。
ミニチュアハイブリッド ベアリング	各種	藤電子	

参考文献

- [1] 中本崇志他「IRIS撮像系の駆動機構のホール素子による原点出し・位置検出の検討」
第41回 天文学に関する技術シンポジウム

SDRで宇宙の電波を受ける/Advent Calendar のススメ

島田 和彦 (国立天文台 アルマプロジェクト)

概要 (Abstract)

以下2つのテーマについて発表した。(1) SDR(Software Defined Radio) を利用して水素 H+(1.4GHz) の電波の受信を試行した。通信販売で簡単に購入できる機器や部材を利用し、既存のソフトウェアを利用して天の川近辺の 1.4GHz 電波の受信を行ったところ、それと思われる電波の受信に成功した。(2) Advent Calendar は毎年 12 月にインターネット上で開催される主に情報技術に関する記事を中心とする記事投稿祭である。天文学と情報科学の親和性は高く、天文コミュニティからのアウトプットの機会として非常に有用であると考ええる。

1. SDR で宇宙の電波を受ける

1.1 はじめに

筆者は 2021 年よりアルマプロジェクトに参加し、観測データ解析プログラムの開発に従事しているが、電波天文学の基礎知識は全くないと言ってよく、まず宇宙から電波が来ているという事を感覚として掴めていなかった。そこで実際に宇宙電波を受信する事を検討した。実際に宇宙電波を受信する著名な例として前田 [5][6] が挙げられるが、これらは 30~50MHz の電波をターゲットとし、エレメント長 $\lambda/2$ (2.5m~) のダイポールアンテナを適切な反射面をもって設置しなければならず、自宅に設置する事が前提の発表者の環境では追試が難しい。調査検討を進める中で、アンテナが小規模で済む水素 21cm 線電波 (1.42GHz) の SDR(Software Defined Radio) での受信例を RTL-SDR.com[1] で発見した。SDR はソフトウェアにより通信方式を切り替えられる無線通信技術であり、広帯域の電波をパソコンでデータ処理する事ができる。自宅でかつローコストでの試行が実現できる見通しが立ち、これをターゲットとする事とした。

1.2 システム構成

1.42GHz 電波を SDR で受信するにあたり必要なものは、アンテナ、ローノイズアンプ (LNA)、バンドパスフィルタ (BPW)、そして SDR ドングルである。アンテナはパラボラアンテナ・ホーンアンテナ・ヘリカルアンテナの3種類を候補として検討し、設置面積が狭く構造上の強度が出し易い事から、ヘリカルアンテナを選択し製作した。ヘリカルアンテナの設計パラメータは設計サイト [2] を利用して決定し、素材はホームセンターや通販サイトで揃えて製作した。実際に制作したアンテナを図 1 に示す。LNA 兼 BPW は Nooelec 社 SAWBird+ H1 を、SDR ドングルは RTL-SDR を入手し利用する事とした。

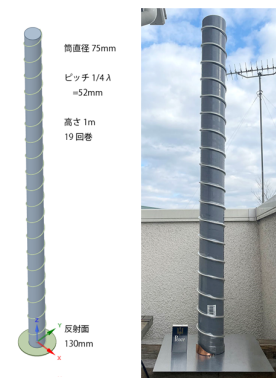


図 1 アンテナ概要図とアンテナ



図 2 RTL-SDR と SAWbird+H1

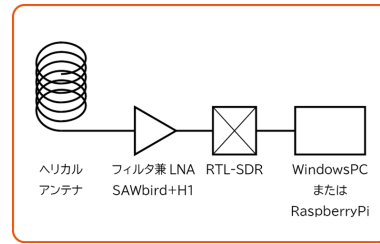


図 3 システム図

受信システムの全体図を図 3 に示す。データ処理を行うソフトウェアは既存のものあるいは GitHub で公開されているものをいくつか評価したところ、SDRSharp[3]、rtlombs[4] という 2 つのソフトウェアで受信データを適切に解析・積分しグラフ化する事ができた。

1.3 結果

図 3 のシステムで観測を行い、各ソフトウェアで取得したグラフを図 4、図 5、図 6 に示す。図 4 は天の川に向けて観測し SDRSharp で FFT 解析・積分した結果であるが、1.42GHz 近辺にピークを見られる。図 5 は天の川付近、図 6 は天の川を外して観測した Power Spectral Density のグラフであるが、1.42GHz に大きな差が見られる。ただし発表までの期間の都合上、観測はほぼ 1 日に限られたため、本来であれば日周運動による差を見るべきであり、正しい結果であるとはこの結果からは言う事ができない。今後の課題となる。

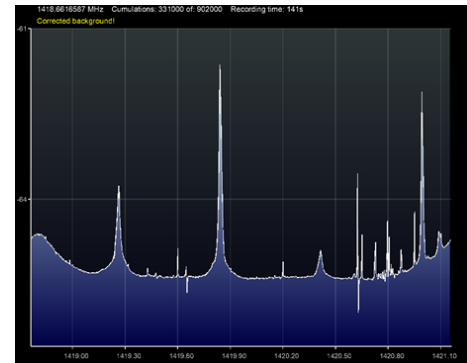


図 4 SDRSharp での観測結果

1.4 まとめ

本稿では 21cm 線電波の受信を比較的簡単にトライした。今後の課題として、まずは取得したデータの確からしさを検証すべきである。質疑では電波表を見て確認すべきというご意見を頂戴した。また、アンテナを変えて観測する事も検討すべきである。今回は取り回しのし易さからヘリカルアンテナを用いたが、パラボラアンテナを使った観測が最も電波を受信し易いのご意見も頂いた。

電波が水素 21cm 線由来であることを明らかにしたら、次にアンテナの向きを把握・制御し、複数本のアンテナを用いて干渉計を構築することも考えたい。

参考文献

- [1] <https://www.rtl-sdr.com/category/radio-astronomy-2/>.

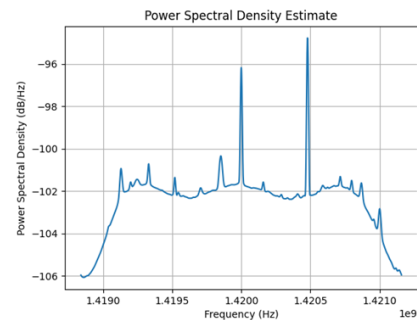


図 5 rtlombs での観測結果①

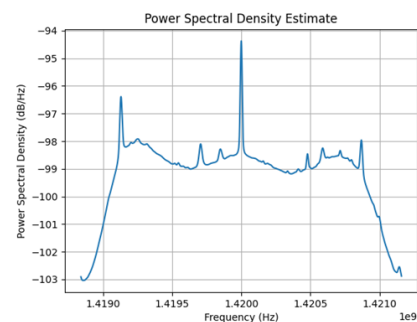


図 6 rtlombs での観測結果②

- [2] <http://jcoppens.com/ant/helix/calc.en.php>.
- [3] <https://airsipy.com/download/>.
- [4] <https://github.com/evanmayer/rtlobs>.
- [5] 前田耕一郎. 簡単な電波望遠鏡による低周波電波天文学. 天文月報, 1989-1990.
- [6] 前田耕一郎. 電波の宇宙. コロナ社, 2002.

2. Advent Calendar のススメ

Advent Calendar とはインターネット上で毎年クリスマス前に行われる記事投稿祭であり（本来の Advent Calendar とはキリスト教圏でのクリスマスを祝う風習の一つである）、日本語圏の情報技術コミュニティで特に近年盛り上がりを見せている。Advent Calendar は一つのテーマに対してコーディネーターが自発的にカレンダーを作成し、参加者が自発的に記事を書く事で成立する。カレンダーのテーマは様々であり、注目度の高い技術やプログラム言語の Tips、企業・大学・研究室単位、学問・経験・失敗談 Tips など様々なカレンダーが毎年立ち上がっている。詳細については実際に「Advent Calendar」で検索し確かめていただきたい。

日	月	火	水	木	金	土
28	29	30	1 @c60evaporator 日系大手企業のIT/ITエンジニア向けにPythonで無理やり改修する	2 @Supu マイクラソフト上に道路をPythonから自動生成して遊ぶ	3 @seigot とあるゲームにてバトルが始まる時のフェードアウト表現（黒い画面を切りながら暗転する）を再現実験してみた	4 @hoshi_kouki pythonでCSVレコードをモデルに実装
5 @crusk Python clickの至極知られていない機能	6 @simonritchie SVGベースのPythonフロントエンドライブラリを作っているという話	7 @simonritchie Python/デフォルト値を持つ引数の前にはアスタリスクを付けておくと型安全で良いかも...という話	8 @intel0tw5727 python 3.10からの新機能 match.case を使ったif文置き換えの紹介	9 @whitpdx ブラウザで動くリアルタイム画像音声処理アプリをStreamlitでサクッと作る	10 @okpingu109 pythonでcssにある媒体媒体から一気に媒体を抽出する(画像認識)	11 @nakagami Ch2 (と Apache Distro) の pure python トライバー
12 @Altaka4128 3次元の弾道性能解析をpythonで実装する(6面体真面目)	13 @ebenben Pythonでcompassメソッドを学習的実装する	14 @saka212 DockerのJupyterLabとDockerのJupyterLab	15 @kuro_take マンダの自明なネカボネ判定してみた(Python)	16 @bluepost59 Pythonだけでweb開発したい！～99%Pythonだけでwebアプリを作る～	17 @yukinarit 嵐ベースで気持ちよくいえるようなコマンドラインパーサopaseを作っています	18 @daiikatsuragawa 機械学習における反復学習器 (Counterfactual Explanations) を実装するライブラリ(DICE)を満員したサービス開発についての考察
19 @okateru ディープラーニングの際に個人的によく使うpythonコードまとめ	20 @kaizen_nagoya dockerでpython	21 @shinyorke 新しいばばオスミスしたいPython家.2022	22 @n_slender 進捗のシステムがgit対応してなくてやりくりする方法	23 @my7760 Pythonで季文文字コード	24 @tsukumijima Pyinstallerより圧倒的に使われているNuitkaの使い方とハマったポイント	25 @8rutus Pythonで季文サイズバーセキュリティプログラミン

図 7 Python Advent Calendar 2021 の例

Advent Calendar で公開されている記事の方向性として、技術的に面白い事をしているが発表の場は特になく、フォーマルな内容ではないがどこかの誰かの役には立つかもしれない、といった内容のものが多く。そういった記事を「クリスマスまで」という締め切りを設けて皆で書くという祭りである。

天文学は情報科学との結合度が高いのは天文コミュニティには自明だが、外から見ると決してそうではない。情報科学が解決できる問題が天文学には山ほどあり、それは IT エンジニアにとっても「面白い」はずである。そういった外部のエンジニアに対して、例えば「情報天文 Advent Calendar」で天文学関連技術の面白さを訴求するのはどうでしょう、という提案である。

国友一貫斎グレゴリー望遠鏡の光学特性評価

○萩野正興(国立天文台/日本スペースガード協会)、都築俊宏、石川直美(国立天文台)、
富田良雄(元京都大学)、岡本千秋(長浜城歴史博物館)、宮良碧(シグマ光機)、
渡部啓介、村山花(ドキュメンタリージャパン)、宇治田曜(NHK 大阪放送局)

概要(Abstract)

長浜城歴史博物館所蔵の国友一貫斎が天保七年に製作したグレゴリー式望遠鏡の性能調査を行った。2019 年度には主鏡の面精度と面粗さの測定を行ったが、今回は望遠鏡全体の光学特性評価を目的とする。国立天文台先端技術センターのフィゾー干渉計を用いて、全光学系の透過波面誤差、望遠鏡光学系の透過波面誤差、副鏡の面精度を測定した。この望遠鏡は回折限界指標には及ばないものの、月の表面を観測するのに十分な解像度であることが示された。

1. はじめに

調査の目的は長浜城歴史博物館の国友一貫斎が天保七年(1836)に製作したグレゴリー式天体望遠鏡(以下、国友望遠鏡)の光学性能を評価することである。2019 年度に行った調査では主鏡の面精度や面粗さを測定したが、今回(2021 年度)は望遠鏡全体の性能評価を目的とした。

国友一貫斎(1778-1840)は 6 台ほどの反射式望遠鏡を作成したとされるが、現存するものは上田市歴史博物館(1 号機、天保五年)、長浜城歴史博物館(2 号機、天保七年)、彦根城博物館(3 号機、天保十三年)、国友一貫斎家(4 号機)の 4 台である。いずれも放物面凹面鏡を主鏡とするグレゴリー式望遠鏡(口径 60mm)である。これら望遠鏡の調査については、最初に山本一清(1937)がシカゴにて国友望遠鏡の高い性能を報告した。富田良雄(1998)は国友望遠鏡 1 号機の調査を行い、主鏡は放物面、副鏡は球面、レンズ 2 枚からなる接眼鏡という構成であることを報告した。坂井義人(2018)は 4 号機のフーコーテストを行い、主鏡は $1/3\lambda$ の放物面であることを報告した。萩野正興(2019)は Zygo 社製フィゾー干渉計を用いて 2 号機の主鏡の面精度を測定し、PV0.67 λ の放物面という結果を報告した。またこの調査では Zygo 社製 NewView 8300 を用いた面粗さも測定され、Sq が 3.7nm であったことも報告された。

今回の調査では長浜城歴史博物館所蔵の 2 号機について、それぞれの光学素子の測定だけでなく望遠鏡全体の性能測定を行った。

2. 測定

調査は 2021 年 7 月 19 日から 2 日間にわたって国立天文台先端技術センターで行われた。測定装置はフィゾー干渉計 4D Technology AccuFiz 4 インチを使用した。測定対象は望遠鏡全体の透過波面誤差と副鏡面精度である。以下に測定セットアップについて記載する。

2.1 望遠鏡全体の透過波面誤差

平行に調整した透過平面原器と反射平面原器の間に国友望遠鏡を設置した。この際、測定精度に影響

を及ぼす室内の空気揺らぎを最小にするため、光学素子間の距離を可能な限り近づけて行った(図1左)。干渉測定方式は位相シフト方式とし、64回測定平均を評価値とした。

2.2 副鏡の面精度

鏡筒内に副鏡がある状態では測定に必要なF比光の入射が困難だったため、副鏡は取り外して単体で測定した(図1右)。干渉測定方式は前述と同様に位相シフト方式とし、64回測定平均を評価値とした。

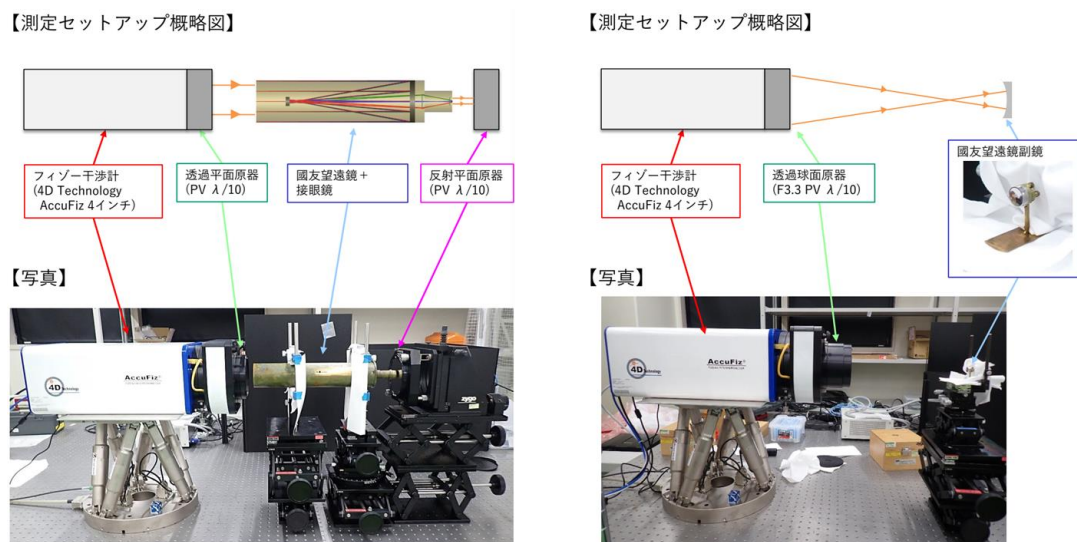


図1 測定セットアップ。(左) 望遠鏡全体の測定。(右) 副鏡のみの測定。

3. 結果

3.1 全体光学系の透過波面誤差

望遠鏡と接眼鏡の両方を合わせた状態で透過波面誤差を測定した結果を図2に示す。PVrの値は 1.76λ 、RMSは 0.30λ であり、回折限界指標(0.070λ RMS)には届かなかった。なお、接眼鏡内のレンズが傾いていたため、測定を行うためには反射原器を大きく傾ける必要があった。

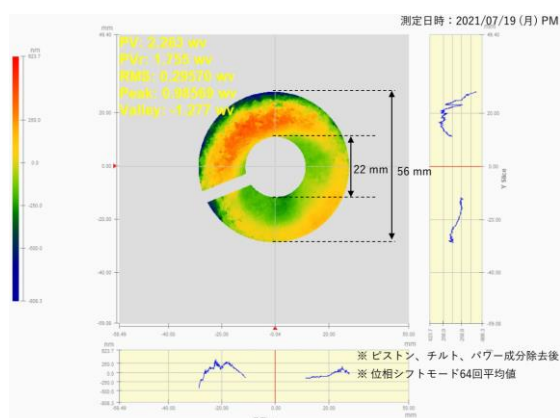


図2 全体光学系の透過波面測定結果。

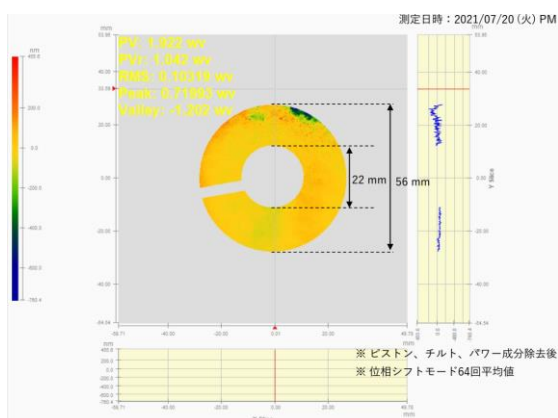


図3 望遠鏡光学系の透過波面測定結果。

3.2 望遠鏡光学系のみの透過波面誤差

接眼鏡を除いた主鏡と副鏡のみの透過波面誤差を測定した結果を図3に示す。PVrの値は 1.0λ 、RMSは 0.10λ であり、この値も国友望遠鏡の回折限界指標(0.070λ RMS)には届かなかった。この測定では、

適切な原器の不足によりキャッツアイ反射測定ため参考値という扱いとする。

3.3 副鏡の面精度

副鏡のみで測定した光線使用領域のみの結果を図4に示す。副鏡全体($\phi 9.3\text{mm}$)の透過波面誤差はPVrで 0.52λ 、RMSは 0.088λ となった。この結果は2019年に行った国友望遠鏡の主鏡の値、PVrが 0.69λ 、RMSが 0.13λ と同程度である。また、光線使用領域($\phi 5.0\text{mm}$)のみでの測定結果はPVrが 0.27λ 、RMSが 0.039λ となった。

3.4 シミュレーションと実際の観測

国友望遠鏡で実際に撮影した月面の観測像と今回の測定波面誤差の結果をもとにシミュレーションを行った結果を比較し、測定結果の正常性を確認する。

まず、シミュレーションの手法を説明する。まず、富田良雄の先行研究(1998)のデータより設計推測を行い、国友望遠鏡の光学パラメータを推測する。これにより得られた設計モデルと光学パラメータを図5に示す。次に今回の透過波面誤差結果に対して干渉計付属ソフトウェア4SIGHT ANALYSIS SOFTWAREを用いてゼルニケ35項でのフィッティングを行う。フィッティング後のPV値は 1.62λ 、RMSは 0.28λ となり、計測値とほぼ一致した。フィッティング結果を光学設計ソフトウェアOptic Studioを用いて国友望遠鏡と同じ光学パラメータを持つ理想望遠鏡に波面誤差として付与し、軸上の点像関数(PSF)を求める。このようにして求めたPSFを実際に国立天文台の望遠鏡にて撮影した月画像に付与し、国友望遠鏡で見える月面のシミュレーション像を作成した。なお、国友望遠鏡の軸上のストレーラ比は 0.138 であり、このシミュレーション像は色収差の影響は含まれていない。

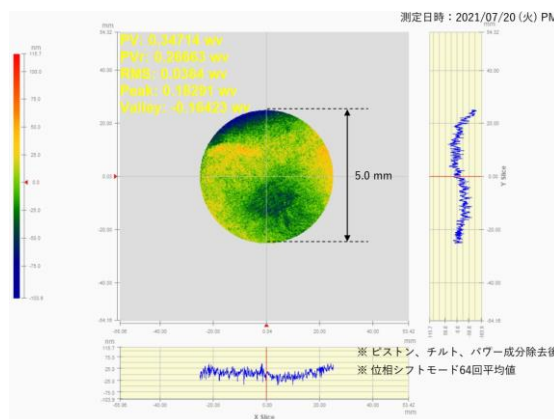


図4 副鏡のみの透過波面測定結果。

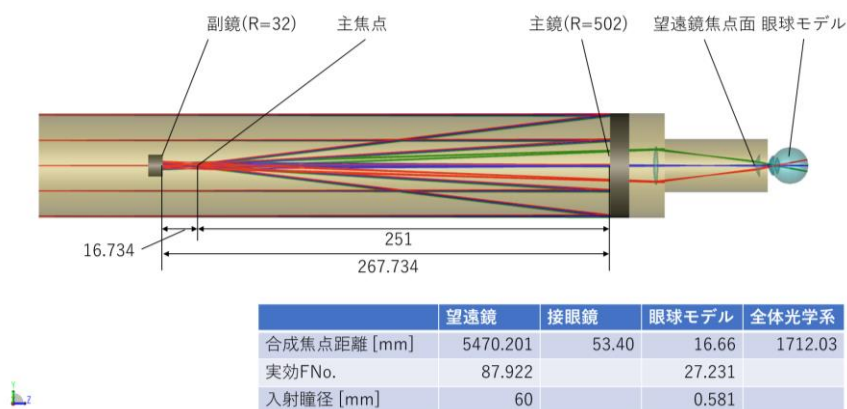


図5 国友望遠鏡光学パラメータ設計予測。

また、ほぼ同じ時間にドキュメンタリージャパンの撮影スタッフと協力して実際の国友望遠鏡を用いた月面の撮像に成功した。撮影時刻は2021年7月19日19:15(JST)であり、月齢9.4、視半径 $987.3''$ 、方位 179.4 度、高度 36.3 度であった。この月面像のリムに対して円をフィッティングして求めたピクセル分解能は約 $1.5''/\text{pixel}$ である。月面観測像とシミュレーション結果を図6に示す。月面観測像は接眼鏡による色収差による色にじみの影響が顕著に見られるが、シミュレーション結果に近い分解能である。月の表面を観測するのに十分な解像度であるといえる。



図 6 (左)国友望遠鏡で撮像された月面像。(右) シミュレーションで求めた点像関数を施した月面像。

4. まとめ

国立天文台先端技術センターのフィゾー干渉計を用いて、全光学系の透過波面誤差、望遠鏡光学系の透過波面誤差、副鏡の面精度を調査した。その結果全体光学系の透過波面誤差は $PVr\ 1.8\lambda$ 、 $RMS\ 0.30\lambda$ となった。これは回折限界指標 ($RMS\ 0.070\lambda$) には及ばないが、シミュレーションと実際の観測から、月の表面を観測するのに十分な解像度であることが示された。この研究で残された課題は、接眼鏡の色収差の測定、星をなどの点像を観測した際の像の形状や光学系が与える影響の測定、他の国友望遠鏡との比較が挙げられる。

本研究の測定の様子と結果はドキュメンタリージャパンが作成した NHK BS プレミアム/BS4K「コズミック フロント」(2021 年 11 月 18 日放送) と NHK 大阪放送局による「歴史探偵」(2021 年 11 月 24 日放送) にて紹介された。今回のようなメディアとの協力体制は、我々の研究が江戸時代の技術力の高さを評価するだけでなく、山本一清(1937)で言及されている天文学の啓発という大きな意味を持つと考える。

参考文献

- Yamamoto, I., “Kunitomo and His Astronomical Activities in the Pre-Meizi Era.”, *Isis* 26, 2 (1937)
- 坂井義人、中村和幸、廣瀬一實、第 5 回「歴史的記録と現代科学」研究会集録(2017)
- 富田良雄、久保田諄、坂井真人、坂井義人、鈴木美好、寺島隆史、富井洋一、中村和幸、中村 士、松田勝彦、横尾広光、渡辺文雄「國友藤兵衛製作グレゴリー式反射望遠鏡の学術調査」 国立天文台報, 4, 9-41(1998)
- 萩野正興、都築俊宏、篠田一也、石川直美、小野智子、太田浩司、岡本千秋、富田良雄、廣瀬一實、吉田一郎、国友武宏、野澤恵、宮良碧、宮崎将、石村周平、岩橋清美、木村剛一、大辻賢一、大山真満、島田佑香里「長浜城歴史博物館既有の国友一貫斎作反射望遠鏡の主鏡の性能評価」第 39 回天文学に関する技術シンポジウム 2019 集録 (2020)

謝辞：本研究は国立天文台・先端技術センター共同利用で設備を利用して行われました。

OpenModelica を用いた 1 次元シミュレーション

1D-CAE using OpenModelica

○清水莉沙、平林誠之、大渕喜之、浦口史寛（国立天文台 先端技術センター）
(National Astronomical Observatory of Japan, Advanced Technology Center)

概要(Abstract)

1 次元シミュレーション(1D-CAE)はシステム全体を理論式によってモデル化し、分野横断的にシステムを適正化する設計手法であり、設計プロセスの初期段階での適用が可能であることから開発のフロントローディングを推進する手段として注目されている。今回、1D-CAE に適したツールのひとつとして知られるフリーソフト OpenModelica を用い、赤外線位置天文観測衛星 JASMINE の検出器ボックス概念検討フェーズにおける設計検討のための物理モデリングを行った。分野複合的なモデルには至らなかったが、各パラメータの影響評価を行うことで次フェーズの設計への足掛かりをつかむことができた。

1. 1 次元シミュレーション

設計・開発のプロセスにおいては、機能・仕様を策定する概念設計フェーズからはじまり、構造・形状、寸法詳細など徐々に詳細を決定しながら進めていくことが一般的である。この設計プロセスの中で行った設計が要求を満たすか検証する手段として広く用いられているツールが、3D モデルをつくり解析ソフト上で設計を評価する 3D-CAE(3D-Computer Aided Engineering)である。3D-CAE は視覚的にわかりやすく、複雑な形状の計算も行うことができる。その一方で、モデルの修正や計算に時間がかかる、初期段階でモデルを作ってしまうと固定概念ができやすく設計の足枷になってしまうなどの理由から、設計情報が曖昧でイテレーションが多く生じる設計上流段階には適さないという問題があった。

近年、上流段階から適用できる設計支援ツールとして、1 次元シミュレーション (1D-Computer Aided Engineering) が広まっている。1D-CAE は設計対象の価値、機能、現象を分野に関わらず、物事の本質をとらえて見通しのいい形でシステム全体をモデル化し、最適化する手法である。制約の少ない上流段階での適用が可能であり早期の問題検出が可能、モデルがシンプルなので計算時間が早く作業効率が上がる、分野横断的にシステムが可視化され無駄を排除できる、モデルの作成のために物理現象を理解しなければならぬため作業者の理解が深まるなどの利点がある。

2. Simulink と OpenModelica

1D-CAE を実現するツールの代表として、物理モデルシミュレーションの MATLAB/Simulink と OpenModelica がある。Simulink はモデルベースデザインのためのブロック線図環境であり、モデルベース開発ツールのデファクトスタンダードとなっている。OpenModelica は、複雑な物理モデリングのために開発された数式ベースのオブジェクト指向言語 Modelica のグラフィカルユーザーインターフェースである。この 2 つのツールの大きな違いとして因果モデルか非因果モデルかという観点がある。

Simulink に代表される因果モデルは入力と出力が決まっているモデルである．因果関係が明確に定義されるような制御モデルに適しているが，物理モデルを作る際には作用反作用の演算フローを考える必要があり，ひと手間かかってしまう．他方，Modelica は非因果モデルが主である．入力と出力が定まっていない物理モデルに適している．順序を考える必要がないので直観的なモデルの作成が可能な一方，計算順序を制御することができない．

その他の違いとしては，Simulink はユーザー数が多く情報が豊富，OpenModelica はオープンソースであり導入のハードルが低いことが挙げられる．

3. OpenModelica でのモデル作成の手順

OpenModelica を用いて，図 1(a)に示したような 1 自由度系のばねマスモデルの変位 x ，速度 v ，加速度 a を調べる Modelica で記述された物理モデルを作成する手順を示す．

(1) 求める変数と運動方程式を整理する

- 変位 x
- 速度 $v = \frac{dx}{dt}$
- 加速度 $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$
- 運動方程式 $m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = ma + kx = 0$

(2) パラメータを設定する

今回のモデルでは質量 $m=1$ kg，ばね定数 $k=1$ N/m，初期条件 $x|_{t=0}=1$ m とした．

(3) スクリプトを記述する

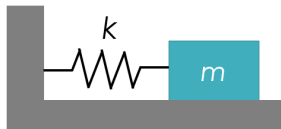
Modelica にはスクリプトは変数とパラメータを指定する領域と，方程式を記述する領域があり，連立方程式と同様に定義した変数の数だけ方程式を示す必要がある．スクリプトの例は図 1(b)に示す．

(4) 解析を行う

計算回数と計算時間を設定し，解析を実行する．

計算回数 500 回， $t=0 \sim 10$ s と設定した場合の変位，速度，加速度の計算結果を図 2 に示す．変位は青，速度は緑，加速度は赤線である．計算結果は X 軸には設定した経過時間として，変数として設定した値がグラフにプロットされる．図 1 (a)のマスの運動方程式を解くと変位 x は $\sin(t + \frac{\pi}{2})$ で示され， $x|_{t=0}=1$ m， $T=6.28$ s の正弦波となるが，図 2 の解析結果を参照すると変位のグラフである青線も同じ式で表される正弦波となっている．速度，加速度もそれぞれ $v = -\cos(t + \frac{\pi}{2})$ ， $a = -\sin(t + \frac{\pi}{2})$ であり，理論式と一致している．これより，正しくモデル化ができていることが確かめられた．解析結果は CSV ファイルとして出力することもできる．

また，OpenModelica のライブラリから参照したコンポーネントを線でつなぎ合わせることでモデルを作ることも可能である．図 3 に図 1 (a)と同じ 1 自由度系ばねマスモデルを作成した場合のダイアグラムビューを示す．ダイアグラムを作成すると，スクリプトの領域にプログラムが自動的に入力される．あとはパラメータと計算回数および計算時間を記入すれば，図 2 と同じ計算結果が得られる．ライブラリを使用することで短時間でのモデル生成かつシステムの可視化が可能となる．



(a) :ばねマスモデル

```

1 model TEST
2   Real x(start = 1.0); 変位x 初期値
3   Real v(start = 0.0); 速度v
4   Real a;               加速度a
5   parameter Real m (quantity = "Mass", unit = "kg")= 1.0;
6   parameter Real k (quantity = "Spring constant", unit = "N/m")= 1.0;
7   equation
8     v = der(x);          速度vに関する方程式
9     a = der(v);          加速度aに関する方程式
10    m*a+k*x=0;           運動方程式
11 end TEST;

```

変数(実数) パラメータ(実数) 方程式.

(b) :スクリプト

図 1 : OpenModelica を用いた 1 自由度系ばねマスモデル

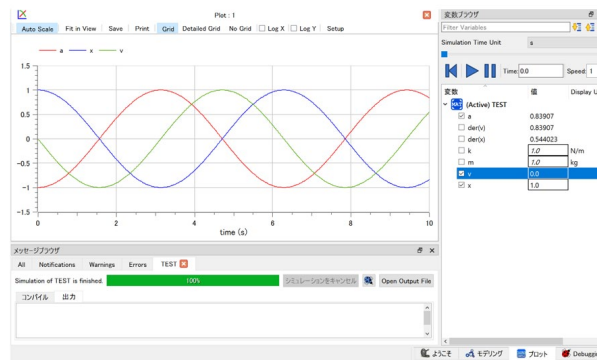


図 2 : 1 自由度系ばねマスモデルを表現した Modelica の解析結果

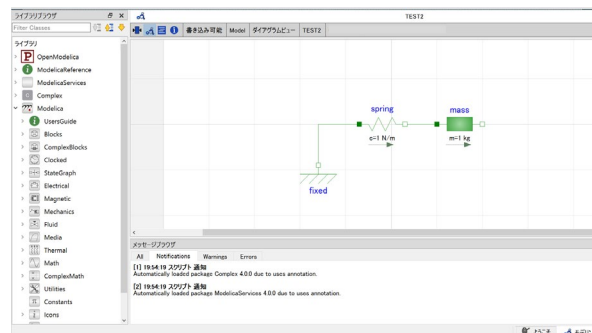


図 3 : OpenModelica のライブラリを用いたモデルの作成

4. 業務における OpenModelica を用いたモデルの作成

赤外線位置天文観測衛星 JASMINE ミッション部検出器ボックスの概念検討フェーズにおいて、熱や構造に関する制約がある中で設計解が存在するかどうかを検証する必要があったため、OpenModelica を用いて熱モデルおよび構造モデルの作成を行い、解析を行った。

(1) 熱モデルの作成

JASMINE 検出器ボックスの概略図を図 4(a)に示す。検出器が置かれるコールドプレートの温度が 173 K 以下、サーマルアンカーへの熱流量が 12 W 以下の制約を満たす寸法を調べるためのモデルを作成する。最初のステップとして、温度を調べたい箇所にノードを定め、輻射熱、伝導熱、発熱による熱の流れを可視化したサーマルフローを作成した。次に、サーマルフローに基づき OpenModelica のライブラリを用いてノードおよび輻射と熱伝導、発熱のコンポーネントを配置・接続し、それぞれパラメータを入力することで熱モデルを作成した。図 4(b)に OpenModelica を用いて作成した熱モデルのダイアグラムを示す。

(2) 構造モデルの作成

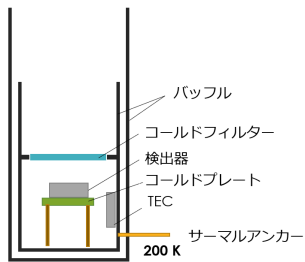
検出器ボックスにおいては熱に関する要求と同時に一次固有振動数が 150 Hz 以上であるという制約をクリアする必要がある。これを調べるため、ばねマスモデル化を行い運動方程式および質量・剛性マトリクスを作成した。しかしながら、OpenModelica で固有周波数を求めることができる良い手段が検討できず、Python と Numpy を用いて固有値計算を行い、バッフルや断熱材などの構造の寸法の制約を確認した。

5. 計算結果

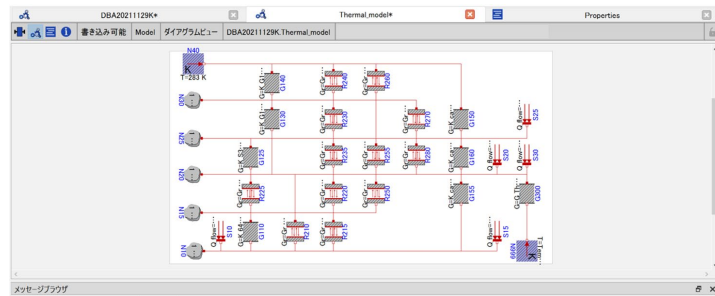
OpenModelica で作成した熱モデルを用い、コールドフィルターの面を基準に外側のバッフルの長さを 150 mm, 300 mm, 450 mm とした場合において、内側のバッフルの長さを変えた場合の各構造の温度と熱の流れの変化を調べた。解析結果として、コールドプレートの温度を図 5(a), コールドフィルターの温度を図 5(b), サーマルアンカーの熱流量を図 5(c)に示す。内側のバッフルが長いと輻射が遮られコールドプレートやフィルターの温度が低く保たれる一方、面積の増加によりバッフルが望遠鏡から受ける輻射の熱が増えてしまいサーマルアンカーへの熱流量への制約にかかってしまうことが分かった。この結果より、各部寸法が断熱・冷却性能に及ぼす影響を定性的に把握し、次のフェーズの設計に向けた検討ができた。

6. おわりに

本稿では、設計プロセスの上流段階で用いることができる設計手段である 1D-CAE と、1D-CAE を実現するツールのひとつとして OpenModelica を紹介した。OpenModelica を用いて作成した JASMINE 検出器ボックスの設計検討モデルでは 1D-CAE らしい分野複合的なモデルには至らなかったが、物理モデリングが簡易に行えることを確認した。今後も設計の一助として活用していきたい。

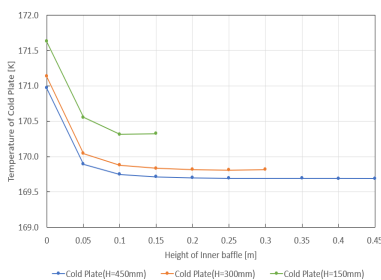


(a) :概略図

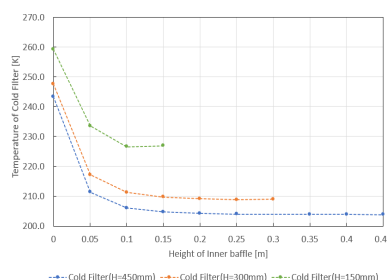


(b) : 熱モデルのダイアグラム

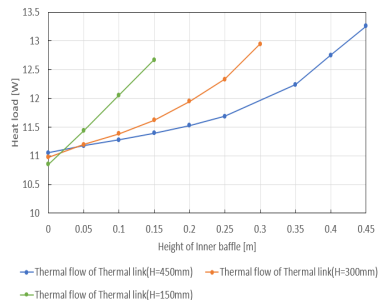
図 4 : JASMINE 検出器ボックスのモデル作成



(a) コールドプレートの温度



(b) コールドフィルターの温度



(c) サーマルアンカーの熱流量

図 5 : OpenModelica を用いて作成した JASMINE 熱モデルのバッフル感度解析結果

鏡の蒸着方法と性能維持について ～TAOと木曽シュミット望遠鏡の経験から～

高橋 英則（東京大学天文学教育研究センター木曽観測所）

概 要

望遠鏡は光学性能ひいては観測性能維持のために、定期的な鏡の反射膜の再生が必要である。その一つの方法として、一般的には毎年～数年毎に鏡面膜の剥離・洗浄・蒸着の工程が行われる。TAO望遠鏡は標高5,640mという高地にあり、その特殊性・作業性から蒸着は現場で行われる。蒸着装置に付帯する真空ポンプや電源、制御装置等すべての噛み合わせ後、輸出前に蒸着試験が行われ、光学的仕様を満たす成膜ができることを確認した。2021年11月には木曽シュミット望遠鏡主鏡の蒸着が9年振りに行われた。過去の何回かの蒸着の結果や国内外の大型望遠鏡の反射率データも含め、反射率の経年変化を考察したところ、サイトや鏡の保管方法、鏡の向きの違いなどによって、反射率の低下率が異なり、特に木曽シュミット望遠鏡の反射率低下率は、他の望遠鏡に比べて低いことがわかった。これらの結果から、最適な蒸着工程や鏡の光学性能維持のための方法を探ることができる。

1. 東京大学アタカマ天文台の蒸着装置

1-1. 東京大学アタカマ天文台の蒸着装置の概要

東京大学アタカマ天文台（The University of Tokyo Atacama Observatory：TAO）は、チリ共和国アタカマ高原チャナントール山頂（標高5,640m）に設置される口径6.5mの光赤外望遠鏡である。世界的にも抜群の赤外線透明度を活かして、広範な分野のサイエンスの展開を計画している。TAO望遠鏡は高山というサイトの特殊性から、蒸着装置は山頂に設置される。さらに、主鏡は主鏡セルから取り出されることなく、蒸着チャンバーにサンドイッチされる、つまり主鏡セルが真空チャンバーの一部として用いられるという特徴がある [1]。

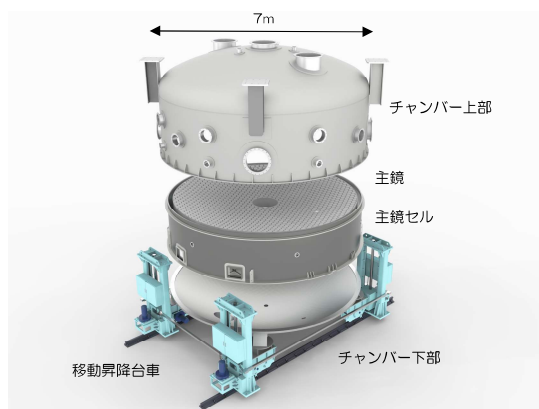


図1：TAO6.5m用チャンバー

1-2. TAO 蒸着装置の成膜試験

蒸着チャンバー、電源、蒸着制御装置、真空ポンプおよびその冷却用のチラー等の付帯機器が2019年までに完成・納品された。2020年前半には、これらコンポーネントの設置、設計案を基にした配管・配線接続が行い、各装置の起動・基本動作試験および、蒸着システムとしての総合試験が進められた。試験内容としては、(1) 真空チャンバーとしての到達真空度、到達時間の測定、(2) 鏡洗浄後蒸着直前に行われる鏡面上の酸化膜の除去、分子レベルの洗浄のためのイオンボンバードに必要な封入ガスの選定、電流・電圧の最適パラメータ導出、(3) 金属蒸発時の印加電流・電圧値、印加のタイミング、継続時間などの最適値の導出、(4) フィラメントへのアルミのプレウエット量の最適化、などである。

蒸着においては真空度が高ければ高いほど膜の密着度が上がり、反射率も高くなることが知られている。可能な限りまた短時間で高真空を実現するために、4台のロータリーポンプ、4台のターボ分子ポンプ、4台のクライオポンプをハイブリッドに使用することで、ボンバードが可能な真空度は1時間以内、蒸着可能な真空までは半日程度で達することが確認された。

蒸着試験は、主鏡の曲率を模したサンプル台が設置され、計27枚のサンプルガラス（対称性を考慮し、直交する直径に渡る2軸と、90度の範囲のみにサンプルガラスを配置）で108箇所の成膜モニタリングを行なった。蒸着後はテープテストによる膜の密着強度、サンプル鏡の膜厚・反射率の測定などが実施された。イオンボンバードでは、最終的にすべてのサンプリング箇所テープテストをクリアするボンバードパラメータを得ることができた。使用するガスは最終的には酸素を選択した。TAOの蒸着装置では147本のフィラメントを4系統の電源で制御する。フィラメントに含浸しているアルミニウムを効

率よく、均一に蒸発させるために、プレヒータリング、第一発火、第二発火の3回に分けて電流（電圧）を印加して、蒸着が実行される。複数回の蒸着試験の結果、膜厚はやや厚めの箇所があるものの最低でも 100nm 以上あり、赤外線波長での観測には問題ない値となった。また、アルミ含浸量を内周と外周で異なる値のフィラメントを配置することで、膜の一様性も調整できる。

今回の蒸着試験では主鏡セルがない状態で行われたが、蒸発源（フィラメント）が主鏡セルにインストールされた主鏡までの距離と同じになるように調整して行われた。実際の現場での再蒸着は主鏡だけでなく、副鏡、第3鏡の蒸着も行われる。その場合も主鏡セルがない状態で行われるが、今回の試験がそのモニターとなっている。試験の結果、このシステムで同条件での成膜が可能であることが示された [2]。

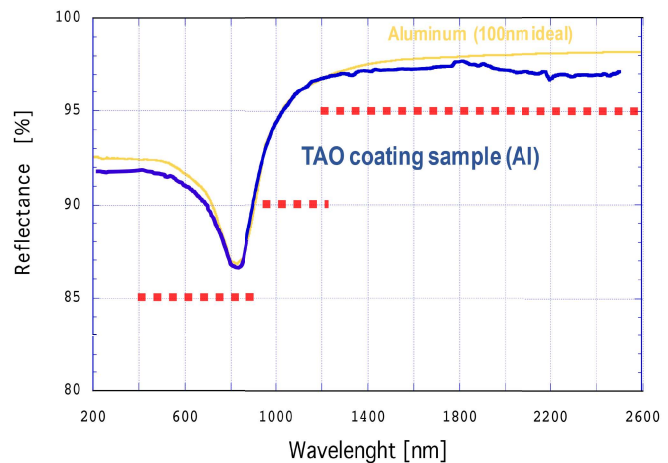


図2：サンプルミラーの反射率測定結果（青線）。ベアアルミの理想的な曲線と比較しても遜色ない値となっている。TAOの仕様値（赤点線）を十分に満たしている。

2. 木曽観測所シュミット望遠鏡

2-1. 木曽観測所シュミット望遠鏡の概要

木曽観測所は 1974 年に設置された観測所で、開口口径 105cm のシュミット望遠鏡を主力望遠鏡として現在まで運用が続けられている。焦点面にはこれまでに写真乾板、1KCCD、2KCCD、KWFC などが科学観測機器として搭載され、現在は 84 個の CMOS センサーを並べたトモエゴゼンカメラが、超広視野（9 度 φ）の動画観測を行っている。



図3：木曽シュミット 105cm 望遠鏡

2-2. シュミット望遠鏡主鏡の再蒸着

シュミット望遠鏡の主鏡は、1974 年の運用開始以降、最初の納品時を含め 7 回蒸着が行われている。他に反射率の向上のために不定期の水洗も行っている（表 1）。これは国内外中口径・大型望遠鏡よりも少ない回数となっている。2021 年 11 月には 9 年振りの再蒸着が国立天文台岡山天体物理観測所にて行われた。プロセスは、水洗・アルコール洗浄、蒸着チャンバーへの窯入れ、真空引き、ファイアリング（蒸着）、窯出し後のチェックという通常プロセスである。なお成膜金属はアルミニウムで、タングステンフィラメントにアルミニウムを予め含浸させるプレウエットを事前に行っている。

年月	蒸着 or 水洗	場所	コメント
1974年	蒸着	Nikon	木曽観測所開所
1982年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	
1990年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	
1991年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	所々に腐食あり。再蒸着。
2001年 7月	蒸着	岡山天体物理観測所	
2004年 11月	水洗	木曽観測所	
2008年 8月	水洗	木曽観測所	汚れが目立つため。
2010年 6月	水洗	木曽観測所	
2012年 6月	蒸着	岡山天体物理観測所	プレウエットも実施。
2019年 6月	水洗	木曽観測所	技術継承
2021年 11月	蒸着	岡山天体物理観測所	9年振り7回目

2-3. 反射率変化の評価と要因

今回、洗浄および蒸着の前後に反射率を測定した（KONICA-MINOLTA CM-2500c）。その結果、洗浄前後では大きな変化は見られなかったが、蒸着後は 2～3 %の反射率の向上が見られ（400～700nm）、誤差の範囲でベアアルミの（理想的な）反射率に近い値になっている。短波長側で反射率が低下してい

るが、これは膜厚が予想よりも薄い可能性やフィラメント由来のタングステンのコンタミなどが考えられるが、この原因については今後究明調査を続ける。実際問題として、トモエゴゼンのCMOSの感度が急激に低下する波長域なので観測感度などには影響がないと考えられる。

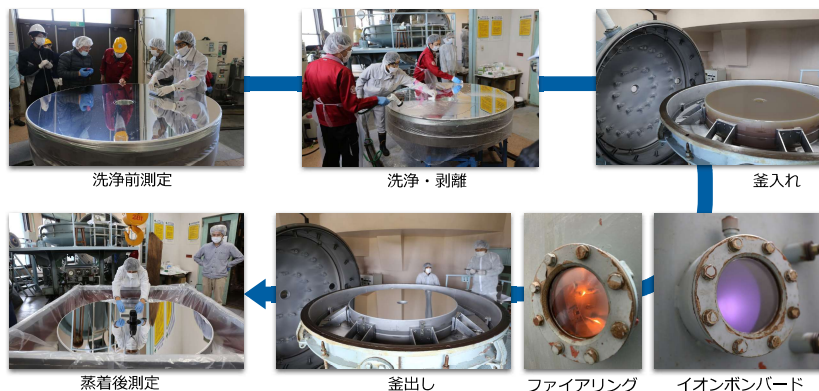


図4：蒸着の一連のプロセス。蒸着前測定から蒸着後測定まで約1日。

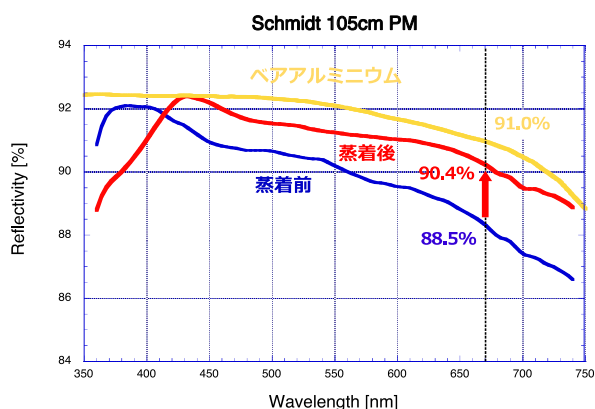


図5：蒸着前後の反射率

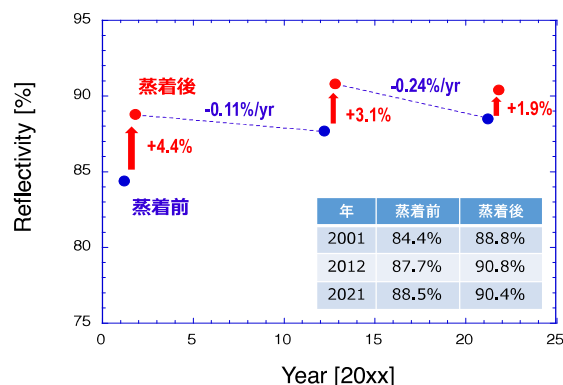


図6：反射率の経年変化

図6は直近3回の蒸着からの反射率の変化を表したものである。これを見ると低下率が $-0.11\%/yr$ (2001~2012年)、 $-0.24\%/yr$ (2012~2021年)となり、これを他の望遠鏡 (すばる、CFHT、GMT) のデータと比較してみると (図7)、低下率が小さいことがわかる。これは、シュミット望遠鏡は補正板がある鏡筒構造やミラーカバーがあり、常に鏡が密閉された空間にあることで外部の汚れがつきにくい構造になっていることが大きな要因であると考えられる。さらに、すばる望遠鏡の主鏡、副鏡、第3鏡の反射率 (効率) の経年変化と比較したものを図8に示す。すばる望遠鏡では通常運用時の多くの時間では、主鏡は反射面が上向き、第3鏡は45度、副鏡は下向きになっており、一方シュミット望遠鏡は横向きで保持されている。この図から反射率の低下率は鏡の保管の向き (角度) に依存していることがわかる。これも埃や塵の主鏡へのつきやすさ (つきにくさ) に関係し、延いては反射率に直結すると考察できる。ところで図9を見ると、いくつかの望遠鏡の反射率の経年変化にトレンドが見られる。このトレンドは設置環境や運用方法にも依存するが、各望遠鏡が設置されている標高に相関があるように見える。これは標高が高いほど湿度が低く、鏡の劣化の原因となる埃や塵につく水分が減少することが要因の一つであることが推測される。シュミット望遠鏡は標高1130mに設置されており、国内の他の望遠鏡よりやや高いところにあること、また夏期の湿度が低いことも、反射率の低下を抑えられている要因の一つかもしれない。

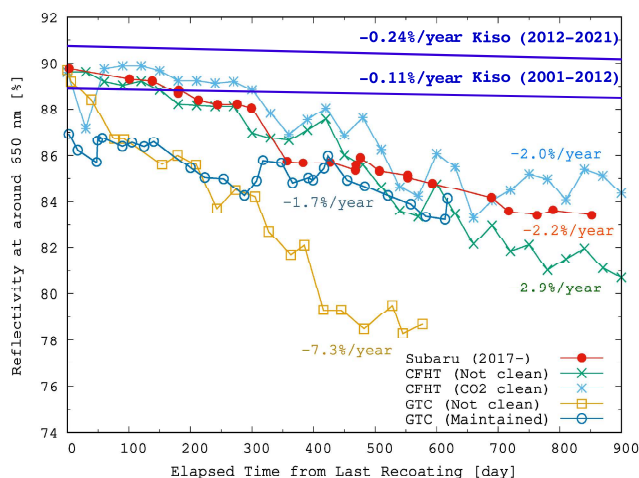


図7：反射率の他の望遠鏡との比較

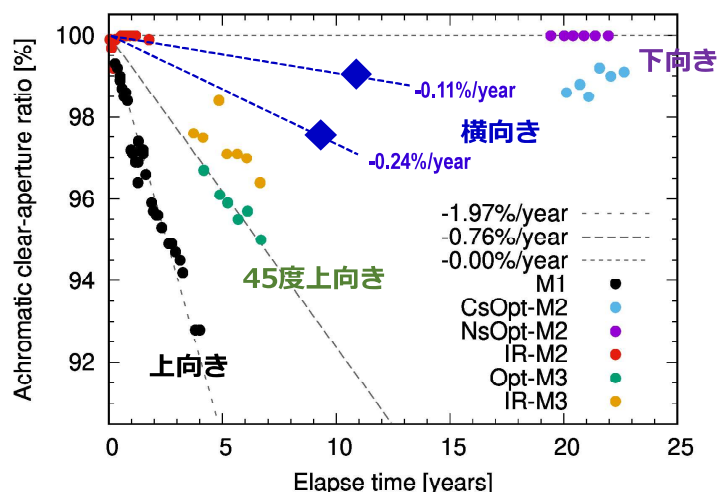


図 8：鏡の向きの違いによる反射率の経年変化

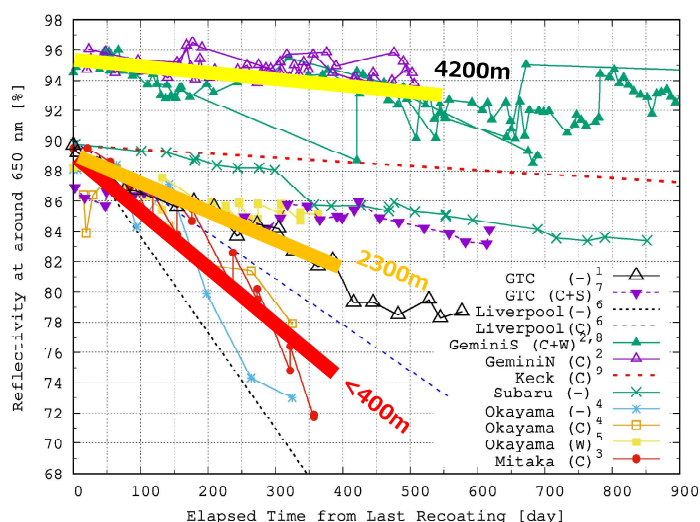


図 9：国内外の望遠鏡主鏡の反射率経年変化。設置標高によってトレンドが見られる。

赤線：400m 以下、橙線：2300m、黄色線：4200m。

3. 高反射率の実現（低下を抑える）のためには

まず反射率の初期値をできるだけ高い状態にすることが必要である。そのためには蒸着前の洗浄を丁寧に行う、また適切なイオンボンバードによって水酸化膜や微小付着物を除去しておくことが必要である。また蒸着はできるだけ高真空中で行う、コンタミを避けるためにクリーンなフィラメントを用いる、さらにはファイアリング時の適切なパラメータ設定が必要である。成膜後の反射率低下のためには、日頃の埃落としが最重要で、その他に可能な限りミラーカバーを閉じておく、鏡が結露しないようにする、観測時以外は鏡の向きに注意する、長時間、埃や塵がついている状態で放置しないようにするなど、普段のメンテナンスが重要である。

本研究の今後の展開として、極端環境である TAO 望遠鏡をはじめ、様々な環境（クリーン度、標高、運用形態、望遠鏡形態等）での測定サンプルを増やし、長期的な測定を継続してデータを増やすことが重要である。また反射率・効率の波長依存性の測定、埃やダストのサンプルの取得・成分分析、その金属膜への影響の評価なども、反射率低下を防ぐための策を講じる情報として有効になると考えている。

4. 参考文献

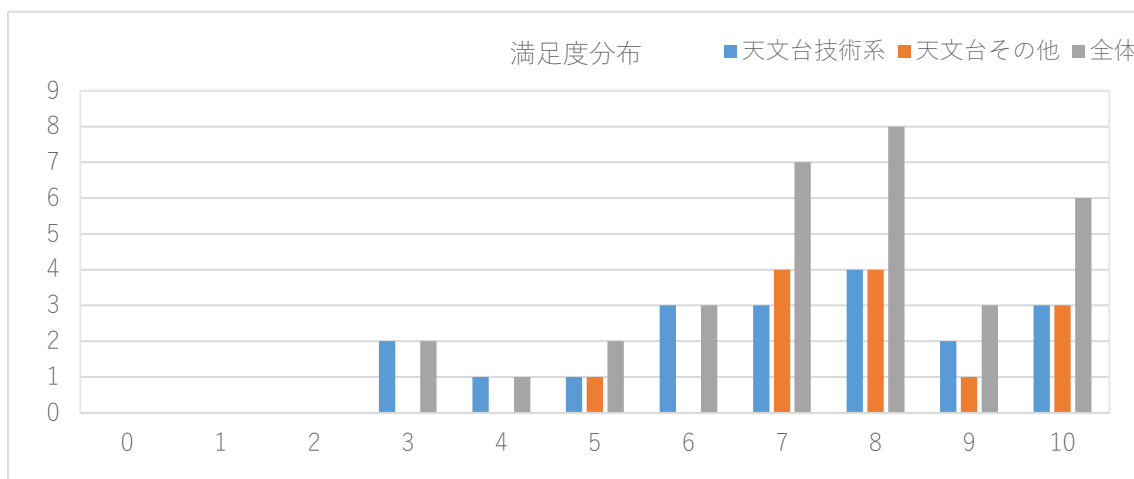
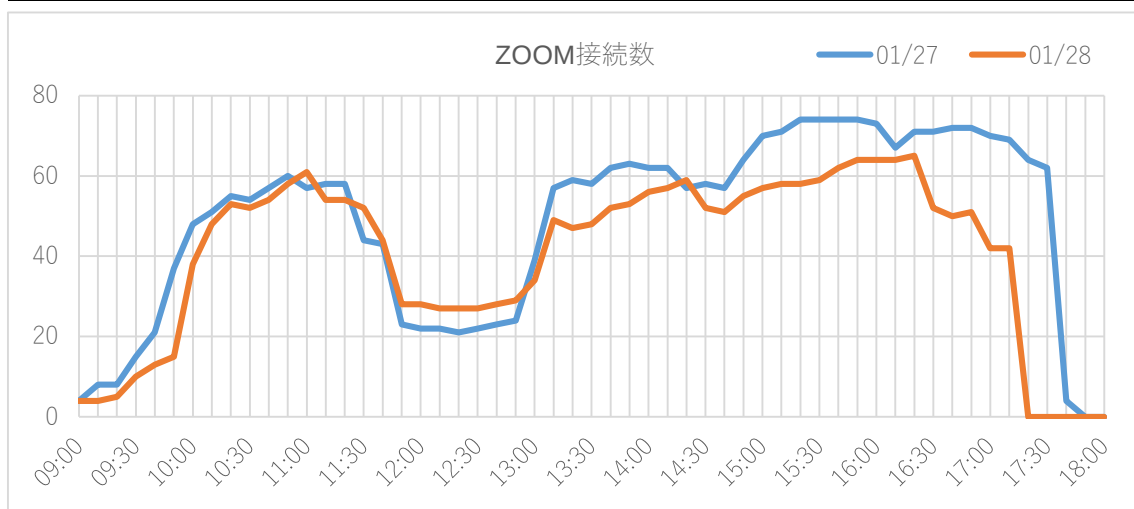
- [1] Takahashi et al., 2016, SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 99064Q
- [2] Takahashi et al., 2020, SPIE 11445, Ground-based and Airborne Telescopes VIII, 1144564

第 41 回 天文学に関する技術シンポジウム アンケート結果

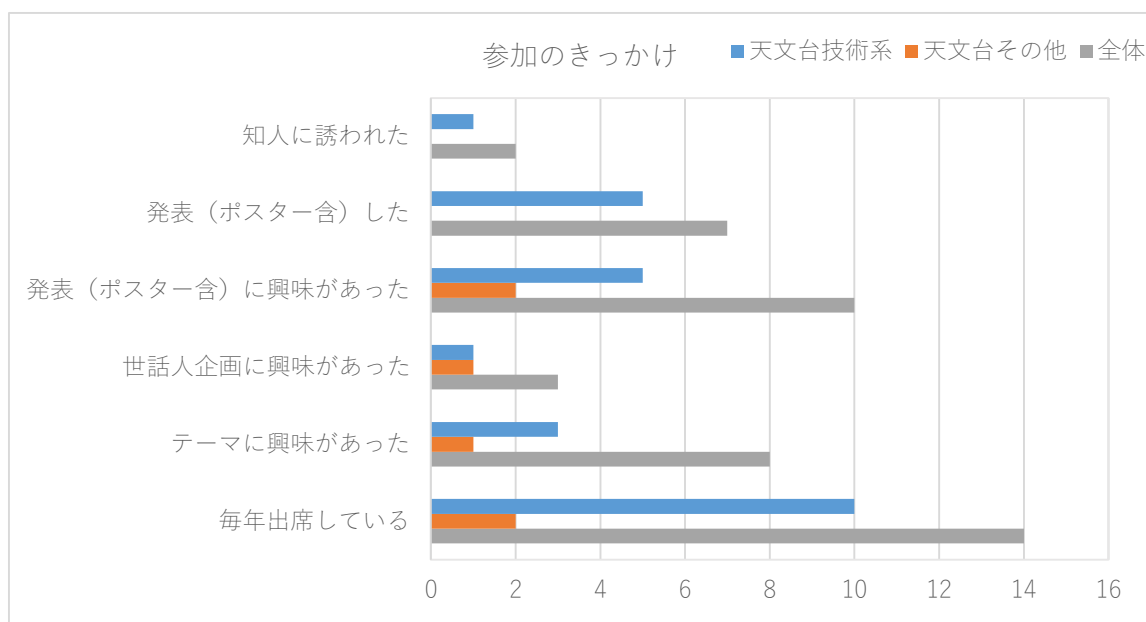
天文学に関する技術シンポジウム世話人

1. 概要

項目	参加者[人]		アンケート[人]		満足度[点:0-10]	
年度	2021	2020	2021	2020	2021	2020
全体	98	111	32	45	7.44	7.76
天文台	74	76	23	32	7.09	7.54
技術系	45	39	19	25	7.05	7.35
その他	29	37	4	7	7.25	8.40
その他	24	35	9	13	8.33	8.23



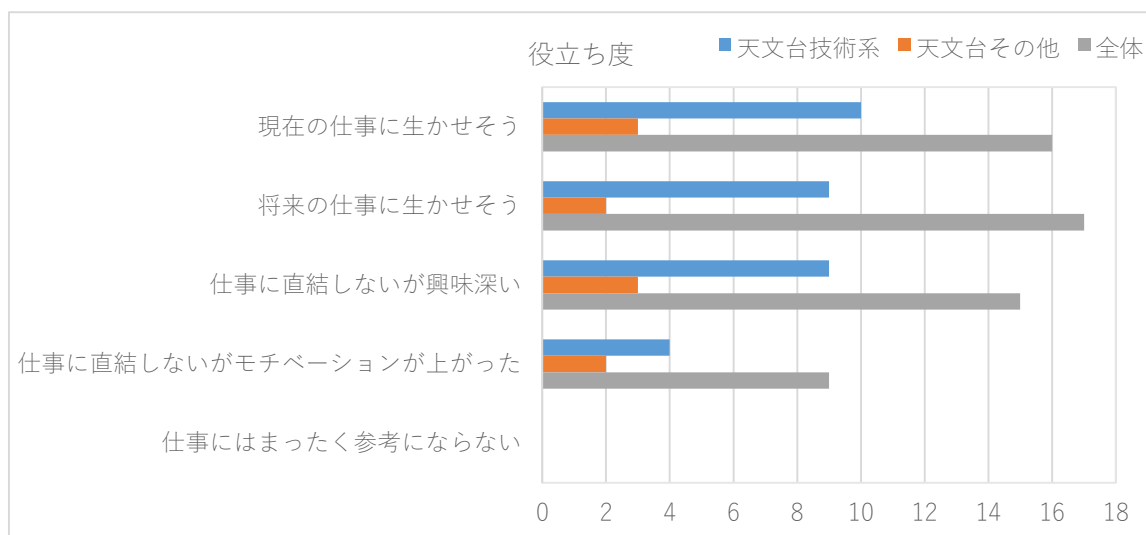
2. 今回のシンポジウム出席のきっかけを教えてください。（複数選択可）



自由記述

- ・ 参加できるとき。

3. このシンポジウムがあなたの仕事にどのように役立ちそうかをお答えください。（複数選択可）



自由記述

- ・ 将来に向け共に活動する仲間を増やすことができた

4. パネルディスカッションについてご感想をお聞かせください。

- ・ シーズ対ニーズという視点は面白いと思った。ただショートプレゼンテーションの集まりになっていてディスカッションがほとんど無く、パネルディスカッションとしてはあまり成立していなかったように思える。基調講演を 20～25 分にする（あるいは質疑応答時間を少し短くする）など、もう少し時間に余裕があってもよかったのかもしれない。
- ・ 質疑応答をファシリテートしてくれる人がいるとよかった。発表に対する質問ではなく、特定の方と発表者が意見交換や議論を始めてしまうことがあり、話をさえぎって質問することもできず、困った状況になった。
- ・ タイムキーパーの画面が発表者に見えていないため、発表を遮ってでも、タイムキーパーの発言による通知が必要と感じた。でなければなかなか気づかない。実際そうなのかもしれないが、延長を許容している印象を受けた。それならそれで情報共有してほしい。
- ・ 今年のテーマは興味がありました。
- ・ 外部から天文台に来られた方もいて、内輪話でなくて面白かったです。
- ・ 自己紹介が長すぎました（反省）。
- ・ テーマも内容も良かったと思うのですが、各自のプレゼン・自己紹介が多かったのが少し期待外れでした。自己紹介や背景は事前資料にして、バチバチの議論をするところが見たかったです。
- ・ さまざまな挑戦のお話について、そのアプローチが参考になるとともに、話し手の熱意にも圧倒されました。
- ・ 基調講演含めシーズとニーズの関係性について理解が深まった。
- ・ 研究者の方の意見が聞けて有意義でした。
- ・ 時間が足りない感じでした。
- ・ 非常に面白かったです。
- ・ 学生の立場で、講演者のような方々の経験や考えなどを得る機会が多くないので、貴重な経験になりました。
- ・ needs と seeds、天秤の両端にあるイメージ。science oriented と technology oriented もそう
で、一見すると相反するもののようで、結局繋がっている。どっちか過多だと成り立たない。
面白いテーマで今回のパネラーのお話も興味深く聴くことができた。各々のご意見、お考え
もふむふむと納得できた。メンバー選出も素晴らしかったと思う。
- ・ パネルディスカッションのテーマを絞ったほうが議論が活発にできると思った。時間が短
かった。
- ・ もっとテーマを絞ったほうがよいかもと思いました。
- ・ 自己紹介も良かったが、時間が短いのでディスカッションを優先しても良かったと思う。論
点となるポイントをいくつか挙げて、プロジェクトによる違いなどが見えたら面白かった。
- ・ パネラーからそれぞれの視点でお話を頂き、色々な考え方があるのだなと改めて勉強にな

った。

- ・ ディスカッションになっていなかったのが、盛り上がりませんでした
- ・ 最終的に何か結論に導かれるのかと思っていたがそうではなくぼんやりした終わりがただだったのでいまいち。
- ・ リモートのためか、議論の方向性が発散気味だった印象です。ファシリテーターがある程度方向性を導いた方が良かったかも。
- ・ 基調講演からの流れで大変興味深い内容でした。パネラーの方々の仕事を通じた体験からの学びや技術と科学がお互いに螺旋を描いて上がっていくイメージは分かり易かったです。また、体験からのミッションに対する取り組みの意識と行動はどの仕事にも共通して活かせるのではないかと感じました。貴重なお話をありがとうございました。
- ・ テーマが難しかったが、面白い話が聞けた。
- ・ 教員、研究者とのコミュニケーションの重要性を改めて感じました。
- ・ 教員や研究者と同等に議論することは難しいかもしれませんが、少なくとも求められているまたは求められていること以上の技術力を提供できるよう、その道での能力を常に高めていく努力が必要あり、常に手を動かし続ける必要があると強く感じました。

5. 情報交換会について感想をお聞かせください。

- ・ 過去のプロジェクトでの知人や、普段話をしない人と話ができて、有意義でした。
- ・ 楽しかったです。
- ・ すみません、欠席です。ブレイクアウトルームで質疑／議論の時間を十分に確保いただけたことがとてもありがたかったです。
- ・ 技術者や研究者との意見交換ができる良い機会だと思う。技術情報交換だけでなく、愚痴や状況の共有などで有用である。
- ・ 楽しかったです。
- ・ 情報交換会はほとんど出られなかったが、懇親会は研究会の最中ではできない話も出来て面白かった。やはり懇親会のような場は必要だなーと思った。
- ・ 時間の都合もありあまりお話ができなかったが中身の濃い議論できたので良かったと思う。
- ・ リモートワークが増えて雑談する機会が減ったなか、久しぶりに色々な方と雑談できて、改めてその良さを再認識できた。雑多な会話の中から得られるものは大きいな、と。
- ・ もうちょっと参加者が多いと良い。
- ・ 普段は技術系職員一人の仕事のため、多くの技術系の方々のお話を聞くことができてとても良い刺激になりました。
- ・ リアル情報交換会を模擬できるものの、周囲の音が聞こえずがて会話がしづらかった。

今後希望するテーマがありましたらご記入ください。

- ・ 技術主幹がしっかり出席されるようになり、嬉しく思っている。技術組織の在り方や、プロセス標準という発表もあったがものづくりの進め方なども面白い議論ができると思った。
- ・ 一般公演とは別に、毎回 1 つくらいテーマを決めて（AI 技術、真空・極低温技術、システム設計とか）、3～4 本関連する発表を募ってはどうか。
- ・ 未来の天文学と技術
- ・ ポストコロナの働き方
- ・ 天文台外の人のお話もたくさん聞きたいです。
- ・ 次世代に求めるものなどを聞きたいと思いました。
- ・ メインテーマではないですが、天文学のために開発・研究した技術が、他の分野で有効的に使われたとか儲かったとかの話など。
- ・ 知らないことを知ることは楽しいので、どんなテーマでも聞きたいです。
- ・ 技術系職員に要求されているものは何か、今後どのような役割を担うべきか、という観点で将来像を語り合う、というのは面白いかもしれません。若手の研究系職員からも、どんなことを期待しているのか、という意見も入ってくると盛り上がると思います。
- ・ 技術系職員は engineer か technician か、またはどちらを目指すべきかという話が時々出てきますが、日々目の前の業務を黙々とこなしているだけでなくそんな議論を行い、新しい方向性や発見ができたらと思います。

編集後記

コロナ禍がなかなか収まらない中、今年度もリモート開催となりましたが、多数の参加者に接続いただき大盛況の中終えることが出来ました。参加者の皆様のご協力に心より御礼申し上げます。

今年度の新しい試みとして、各セッションの後質問時間を設ける代わりに、時間の区切りごとに個別に部屋を用意して議論いただくという方式を取りました。今までは質問の時間が限られて十分な議論が行えなかったこともありますが、今回これはうまく行ったと感じております。

しかしながら、同じ分野の発表が重なっていると、興味のある発表の質問部屋が重なってしまい、すべての質問部屋に参加できないなどの弊害もあり、今後の課題として検討する必要があります。

昨年に引き続き遠方の方もリモートで気軽に参加できる会となっているので、この形式でのシンポジウムは続けたいと思います。しかしその半面、懇親会では直接顔を合わせることがなかったのも、一部での盛り上がりで終始してしまった感があります。いずれコロナ禍が過ぎ去り、皆で顔を合わせて懇親会ができるようになることを願っております。

今後とも参加および協力のほどよろしくお願いします。

令和4年4月11日 世話人会懇親会担当 小俣孝司

第41回 天文学に関する技術シンポジウム 世話人

野辺山観測所	倉上 富夫
アルマプロジェクト	清水上 誠
先端技術センター	坂井 了
先端技術センター	清水 莉沙
先端技術センター	小俣 孝司

オブザーバー

先端技術センター	藤井 泰範
----------	-------