

第 40 回
天文学に関する技術シンポジウム 2020
集録

Proceedings of
Symposium on Engineering in Astronomy 2020

2021年1月28日（木）～1月29日（金）

主催：国立天文台
於：オンライン開催

目次

開会のあいさつ	1
---------------	---

国立天文台 技術主幹・先端技術センター 満田 和久

基調講演

1. パンデミックと TMT、新しいワークスタイル	2
---------------------------------	---

鈴木 竜二

2. Reflections on the impact on COVID-19 on ALMA Operations and NAOJ ALMA Project - A personal view	10
--	----

ALVARO GONZALEZ GARCIA

一般講演

1. 望遠鏡保守体制の連携強化の現状と将来構想	14
-------------------------------	----

上野 祐治

2. 望遠鏡保守の品質管理体制強化に向けた取り組み	19
---------------------------------	----

佐藤 立博

3. VERA20m 電波望遠鏡 駆動制御系 時刻同期制御部の内製化	22
--	----

平野 賢

4. Zabbix による統合監視システム構築	26
-------------------------------	----

高橋 賢

5. アレイアンテナの雑音校正について	30
---------------------------	----

川口 則幸

6. Docker を用いたアプリケーションの長期保存の試み： ALMA データの Calibrated MeasurementSet 生成サービスの開発を通じて	34
--	----

林 洋平, 他

7. 重力波望遠鏡における環境雑音対策	38
---------------------------	----

鷲見 貴生

8. 先端技術センターにおける光学設計開発Ⅲ -2020 年度のトピックス	41
---	----

都築 俊宏

9. ALMAACA Spectrometer - New GPU-based Spectrometer for Total Power Antennas	45
--	----

中本 崇志

10. ディアスポラ時代の検収をどうやって確実にしていくか	49
-------------------------------------	----

	林 左絵子	
11. コロナ禍における先端技術センターにおける対策と取り組み		53
	宮地 晃平	
12. プラネタリウムドームにおける換気状況について		57
	豊増 伸治	
13. 国立天文台三鷹太陽フレア望遠鏡近赤外偏光分光観測装置の SQL-DB と連携した自動 pipeline 処理		59
	森田 諭	
14. シーイング測定装置開発計画		63
	萩野 正興	
15. 流星群の多地点電波観測		67
	石村 周平	
16. 重力波望遠鏡 KAGRA の補助光学装置		71
	阿久津 智忠	
17. 金属 3Dprinter 立ち上げ進捗報告		75
	金子 慶子	
18. 国立天文台・天文データセンター 大規模観測データ解析システム III		79
	磯貝 瑞希	
19. 多色サブミリ波カメラ用多段型多孔質膜赤外線フィルターの開発		82
	長沼 桐葉	
20. 平面型直交モード変換器の帯域幅を制限する高次モード発生 of の解析		86
	宇野 慎介	
21. 広帯域ミリ波サブミリ波検出器のための平面 Magic T の開発		90
	井上 修平	
22. 「Band10 2SB ミクサの開発」 or 「電子回路基板作ってみた」 or 「PowerApps 使っ てみた」		94
	藤井 泰範	

Systems Engineering/Product Assurance 研修

システムズエンジニアリング初級研修番外編 あるいは私のシステムズエンジニアリング		100
	満田 和久	
アンケート結果		109
編集後記		116

開会の挨拶

第 40 回 天文学に関する技術シンポジウム の開会の挨拶をさせていただきます，国立天文台の技術主幹をしております，先端技術センターの満田です。

このシンポジウムは、天文学に関係する様々な技術についての情報交換・交流の場として、国立天文台の技術系職員の中から世話人を選んで、技術系職員が自律的に運営し、開催してきたものです。今年度は、COVID19 のパンデミックの影響でどうなるかと思っておりましたが、この状況を逆手にとって、「新しいワークスタイル」をテーマとする基調講演が企画され、一般講演も募集されました。「新しいワークスタイル」での経験が共有され、この状況を「新たなチャンス」に変えるようなアイディアの種を見つけていただくことを期待しております。また、リモート開催ということで、参加者が少ない可能性も心配していたのですが、テーマ以外の一般講演もたくさん申し込んでいただき、100 名を超える参加登録をしていただけたとのこと。これは大変ありがたいことだと思います。

研究会に参加する大きなメリットの一つに、会議の合間合間の参加者との立ち話で新しい話を耳にして、そこからアイディアを得たりすることがある、ということがあります。しかし、このパンデミック下でこれまでに私が参加したリモートのシンポジウムや国際会議ではそのような機会は全くありませんでした。今回は、新しいツールを使って、立ち話ができる機会が三部にわたって用意されているそうです。それがどうなるかも楽しみです。

ということで、参加された皆様が、この技術シンポジウムで何かの刺激を感じていただけたらと思います。ぜひ、お楽しみいただくようお願いいたします。

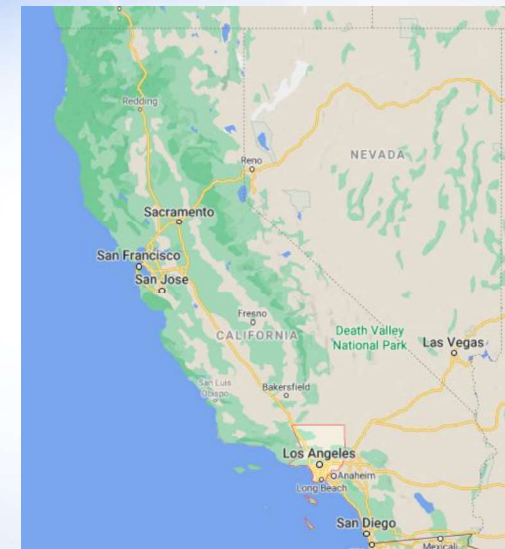
パンデミックとTMT、 新しいワークスタイル

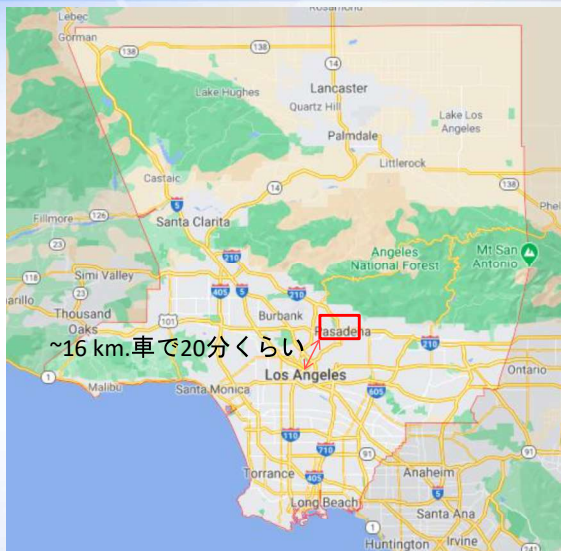
Ryuji Suzuki (TMTプロジェクト)
2021/1/28
天文学に関する技術シンポジウム

TMT Confidential

The Information herein contains Cost Estimates and Business Strategies which are proprietary to the TMT Project and may be used by the recipient only for the purpose of performing a confidential internal review of TMT. Disclosure outside of the TMT Project and its review panel is subject to the prior written approval of the TMT Project Manager.

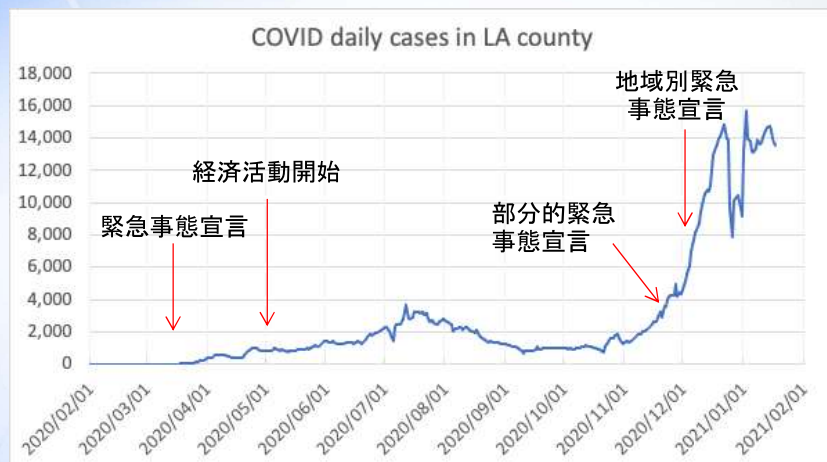
- パサデナにおけるCOVID-19の状況
- パンデミックがTMTに与えた影響
- 在宅勤務とパンデミック後の働き方に関するTMTの取り組み
- 新しい働き方(?)への対応
- “ざっくりとこんな感じ”、“こういう例もある”程度に聞いてください。
 - 状況は日々変化しているため、最新の情報ではない。
 - “正しいデータ”がなにかわからない状況。
 - 系統的に調査しているわけではないので。





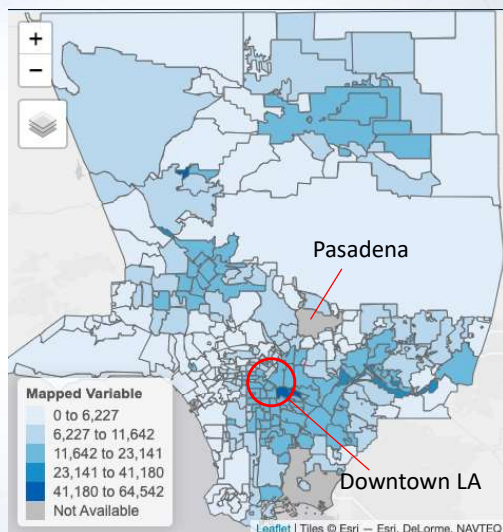
- カリフォルニア州＞南カリフォルニア（SoCal）＞ロサンゼルス郡＞パサデナ市
- LA郡の法令に従っている。

人口（万人）				
CA州	LA郡	Pasadena市	東京都	三鷹市
3,951	1,004	13.8	1,396	18.7
何人に一人が感染しているか？（人）				
	10	20	100	240

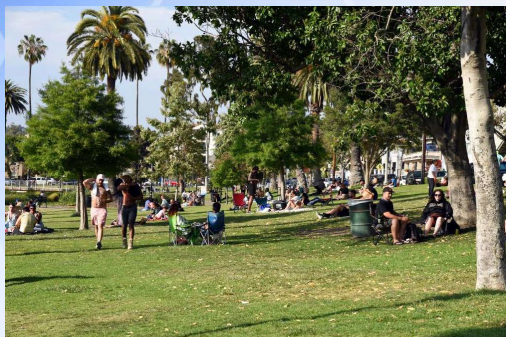


- 地域別緊急事態宣言（2021/1/19時点）
 - ICUの空室率が15%以下
 - レストラン、バー等はdining-in禁止
 - マスク着用義務
 - 生活に必要な理由以外は外出禁止
 - 22:00 – 5:00の外出禁止

- LA郡では10人に1人が感染しているが、地域差が大きい。
- 自分の周辺（TMT職員を含めると100人程度）で感染者はいない。



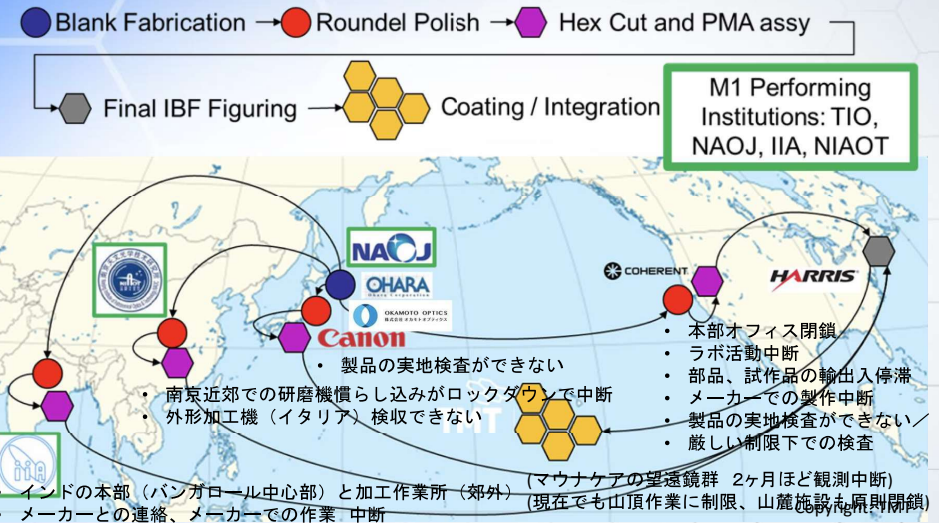
- 生活の視点で見ると、
 - ほとんど自宅で過ごす。
 - 外出は、週一の買い物（一人）、テイクアウトを取りに行く（一人）、散歩、週末のドライブ。パンデミック前とあまり変わらない。
 - 普段の生活をしている分には、ウイルスが蔓延していると認識することは少ない。
 - 病院が空いていない（救急車は8時間待ち！）なので、食物アレルギーを持つ娘の親としては、大きな不安。
- 恐怖を覚えたのは、
 - 公園に行くと、マスクをしていない人が密に。
 - レストランが外でのdine-inを許可されていた時は、市街地のメイン通りは食事している（マスクしてない）人が密に。



- PfizerとModernaのワクチンの開始。
- 保健局が定めた場所、個人のクリニックで接種可能。
- LA郡だとDodger stadium、遊園地等、ワクチンの大量接種場がオープンしている。
- 現状は予定通りには進んでいない。
 - ワクチンの数が足りない。
- 自分たちが接種できるのは2021年末？



- 2020年3月中旬に在宅勤務が開始。
- 2021年2月に現オフィスの契約を解約。
- TMTの各部門の方にアンケート。
 - どのパートナーにおいても、実地作業を伴う工程に影響大。
 - IRISでは実験室でのプロトタイプ試験が約半年遅れ。
 - スケジュールを調整することで全体の遅れを最小化。
 - 設計段階にある工程は比較的影響は少ないが、特に在宅開始期に効率の低下があった。

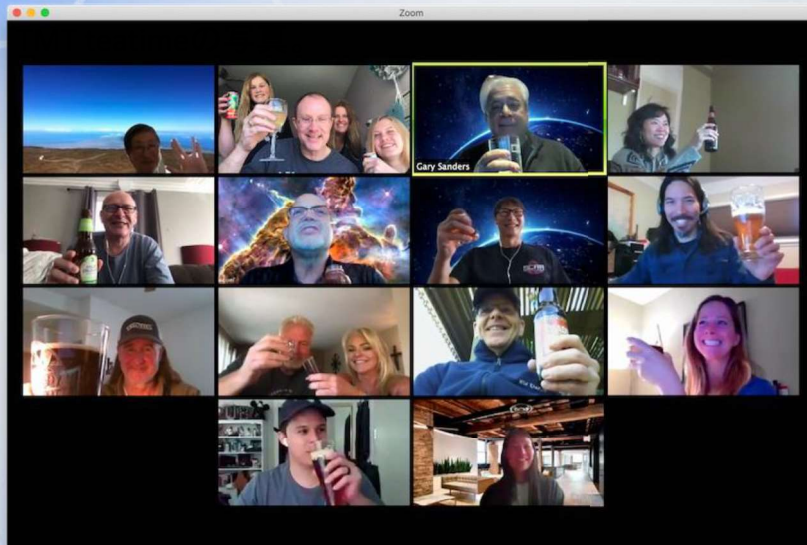


- レビューへの影響
 - レビューの遅れ。ただしパンデミックの影響かは謎。
 - オンラインのレビュー
 - タイムゾーンの違い
 - レビューワーを見つけるのが大変
 - レビューは半日x数日の形に。
 - オンラインのレビューは、オンサイトのレビューに比べて質疑が淡々としていて、深い議論が少ない印象。
 - コーヒープレーク時の議論
- コミュニケーション
 - Slack, zoom, Teams, mailでのコミュニケーション
 - 雑談が少なくなった。仕事の話も世間話も。
 - F2Fでの議論の機会がなくなったため、深い議論がしにくくなった。

- 2020年3月に在宅勤務を開始。
- 2021年2月に現オフィスの契約を解約。
 - 空調が新しい法令の基準を満たしていない。
 - モンロビア市（パサデナの16km東）にあるラボを改修して新しい縮小オフィススペース（～30人分）を設ける。
 - ハワイ州ヒロ市（CSOの空きスペース）に第2のHQ（～15人分）を設ける。
 - レビュー等はオンラインか、貸しスペース（パンデミック後）で実施。
- 州外からの勤務も認めている。
- パンデミック後も在宅（フレキシブルな働き方）の方向に向かっている。

- 在宅勤務に関するアンケートを実施。職員からの希望を調査。
 - 通勤に割く時間がなくなった。
 - 自宅にオフィススペースを設ける苦勞。
 - 仕事とプライベートの境界が曖昧。仕事時間の増加？
 - 職員間のコミュニケーションが疎になる懸念。
 - プロジェクト全体や他の部門の進捗が分かりづらい。

- 在宅勤務に関するアンケートを実施。職員からの希望を調査。
 - 在宅勤務に必要な机、椅子、モニター等インフラをサポート。
 - Slackの開設。
 - Google workspaceへの移行。
 - IT ticketing systemの開設。
 - Tea time（水曜日）、Happy hour（金曜日）を実施。
 - 毎週のPO meetingで各部門の中期的な進捗をスライドで報告。



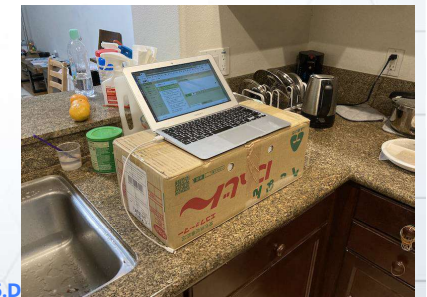
- 新しいオフィスに関するアンケートを実施。
 - 毎日使う：13% (6)
 - たまに使う：59% (27)
 - 要らない：28% (13)
 - 小さい子供がいる職員はオフィスに戻りたいと言っている。
- 新しいオフィススペースの規模を決定。
 - 2020年5月の時点での調査に基づいていて、在宅勤務が10ヶ月たち、ワクチン接種が始まった今、意見分布は異なるかもしれない。

- Caltechでは、3月のStay-at-home order時にキャンパスをクローズ。基本在宅勤務に。
- 止められない実験や、重要な開発があるため、夏頃から実験室での作業を再開。
 - 人数制限、PPE
- 2021年1月から、キャンパスで働く人達に無料でPCR検査を実施。
- 最近、Caltechが職員に提供するワクチン接種に関する希望アンケートが実施。
- キャンパスでは（怖いくらい）みんなマスクしている。



- 家族構成：自分、妻（天文台職員）、3歳娘
- 2020年3月より在宅勤務、自宅での保育
- 共働きで自宅保育は恐らく「新しいワークスタイル」ではない。
- 他の人がどうやって在宅してるか、問題点とか聞く機会がないので、一例として。

- IRISの仕事に関しては、今までと殆ど変わらない。
 - IRISは元々、カナダ、アメリカ、日本、中国と仕事をしていた
 - 現在最終設計段階にあるため、実地作業も限られている。
- Zoom, Teams, emailでのコミュニケーション
 - Chatを頻繁にする
 - レスポンスは早く
- オフィスはダイニングテーブルとキッチン
- オフィスでの雑談、AOグループとの会話がなくなったのはとても痛い。



- 自身の仕事、妻の仕事、保育士仕事を2人で行う。これはそもそも無理なのでは？
- 実際、在宅勤務開始から数ヶ月で、体力的、精神的に困憊。
 - 带状疱疹発症、心療内科受診。

- これまでと同じ生活をしていて、仕事、家事、育児をすることは無理。+自分の時間は夢の話。
- 生活を30分以下の単位で見直し効率化。
 - ルーチン化
 - 買えるものは買う
 - 3人での時間を集中
 - 目をつぶる
- こまめに休暇を取る。
 - 在宅勤務、自宅保育を始めてから病気をしなくなったので、安心して休暇が取れる。
- ストレスを溜めない。
- 何人かの方と話をしたのが参考になった。

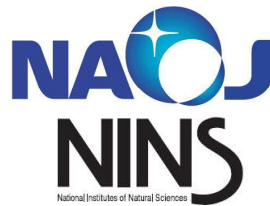
- 納得の行くの仕事時間を確保
- 1日30分、自分の時間を確保
- 2ヶ月に1回長めの休暇を取る。
- 不安
 - 娘の育児が本当に十分なのか？
 - 同僚にしわ寄せが行っていないか？

- 最後に
 - パンデミックは、仕事と育児の両立を通して仕事と生活に大きな影響を与えた。
 - 新しいワークスタイルを実践することはライフスタイルを見直すことだった。
 - 働きながらの育児は、本来あるべき姿ではない。ただ、働きながら2-3歳の子供と多くの時間を過ごせる稀有な機会。
 - この働き方を許容してくれている同僚に感謝。

The TMT Project gratefully acknowledges the support of the TMT collaborating institutions. They are the California Institute of Technology, the University of California, the National Astronomical Observatory of Japan, the National Astronomical Observatories of China and their consortium partners, the Department of Science and Technology of India and their supported institutes, and the National Research Council of Canada. This work was supported as well by the Gordon and Betty Moore Foundation, the Canada Foundation for Innovation, the Ontario Ministry of Research and Innovation, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, the British Columbia Knowledge Development Fund, the Association of Canadian Universities for Research in Astronomy (ACURA), the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), the U.S. National Science Foundation, the National Institutes of Natural Sciences of Japan, and the Department of Atomic Energy of India.

Backup slides

CONFIDENTIAL
INFORMATION
REMOVED



Reflections on the impact of COVID-19 on ALMA operations and NAOJ ALMA Project - A personal view -

Alvaro Gonzalez
NAOJ ALMA Project Manager

第40回天文学に関する技術シンポジウム, 28th Jan 2021

1

Outline

1. First stages of the pandemic and first response
2. Towards a plan to cope with COVID-19 in the ALMA Project and the timeline until now
3. ALMA Operations in Chile, and coordination internationally
4. Some reflections and ideas towards the “new normal”

Outline

1. First stages of the pandemic and first response
2. Towards a plan to cope with COVID-19 in the ALMA Project and the timeline until now
3. ALMA Operations in Chile, and coordination internationally
4. Some reflections and ideas towards the “new normal”

The start of the pandemic

- The first news about a new infectious disease spreading from China started from around January 2020.
- Travel continued as usual in January and February 2020, although with some concerns
 - EA ALMA Science workshop held in Taipei on Feb 19-21, was under careful preventive measures for the first time and the first concerns about traveling were considered
- All travel and meetings suspended from late February 2020
- From early March, the NAOJ ALMA Management team started assessing the impact on work of moving to remote work
- On March 22nd, ALMA went into observatory shutdown due to the degrading situation in Chile.

The start of the pandemic

- Due to the degrading situation in Japan and concerns over a possible declaration of a State of Emergency (SoE), the NAOJ ALMA Project asked all staff in Mitaka to move to telework from **March 30th** and initially for a 2-week period.
 - An All-hands meeting was held to address all questions and concerns by teammates
 - Work that needed to be done in Mitaka was approved on a case by case basis considering the need of the task, occupancy of building and rooms, etc.
- The State of Emergency was declared in Tokyo from April 7th until May 6th. We acted accordingly and extended the telework request period until at least May 6th as soon as the plans for SoE were public. These were further extended later as the situation evolved.
- Before the start of the telework period, the NAOJ ALMA MGT team started working on **protocols**, the **plan to comeback to the workplace** and **guidelines** to work in Mitaka, for travel, etc.

The Plan to Comeback to the Workplace

- From the start of the pandemic, several documents were prepared to summarize the administrative flexibility allowed to cope with the situation:
 - Telework to support family or personal situation
 - Off-peak commuting
 - Special holiday in the case of difficulty to work from home or showing some symptoms
- And guidelines for travel, to work in Mitaka, etc.
- Towards early April, we had too many of those!
- There was also the need to define the basic principles of planning and decision making, at the same time that the situation was evolving very dynamically, which was challenging.
- Protocols were also prepared to control and shared attendance in the building and different rooms among the different team managers so we could plan to avoid congestion to some extent

Outline

1. First stages of the pandemic and first response
2. Towards a plan to cope with COVID-19 in the ALMA Project and the timeline until now
3. ALMA Operations in Chile, and coordination internationally
4. Some reflections and ideas towards the “new normal”

The Plan to Comeback to the Workplace

- Principles:
 1. Priority will be put on staff's wellbeing and safety
 2. Health and safety take priority over any existing guidelines
 3. Available flexibility of NAOJ admin rules and procedures to be actively applied
 4. Guidelines for work in the workplace will follow principles recommended by experts and different bodies
 5. Travel will follow existing Japanese regulation and guidelines and take a conservative approach for individual cases
 6. In case of SoE, the Project moves to telework. Afterwards, we implement the Plan to Comeback to the Workplace in 2 phases

国立天文台
NAOJ
National Astronomical
Observatory of Japan

NAOJ ALMA Policies and Guidelines
for the 2020 COVID-19 Pandemic

NAOJ-ALMA-0039-C

Version C

Status: Released

2020-10-30

Prepared by:	Organization Role:	Date and Signature:
A. Gonzalez	Project Manager	Alvaro G. 電子署名: Alvaro Gonzalez 日時: 2020.10.30 11:54:32 +0900
Approved by:	Organization Role:	Date and Signature:
ALMA MGT team		K. K. 電子署名: Kenichi KAGUCHI 日時: 2020.10.30 11:58:56 +0900
Released by:	Organization Role:	Date and Signature:
A. Gonzalez	Project Manager	Alvaro G. 電子署名: Alvaro Gonzalez 日時: 2020.10.30 12:02:57 +0900

The Plan to Comeback to the Workplace

- Outline:
 - **State of Emergency**: all staff requested to work from home. Requests to work in Mitaka are considered when staff need to access local facilities (labs, computing, admin) or personal needs. **Target: <10 people**
 - **Phase 1**: staff are recommended to continue working remotely. Staff who need to work in Mitaka will be allowed to work in campus. **Target: 10-20 people**
 - **Phase 2**: staff numbers increase progressively following plans established by the team and in close coordination among staff and their managers. Staff who need to continue to work from home will continue to do so. **Target: 20-40 people**

Outline

1. First stages of the pandemic and first response
2. Towards a plan to cope with COVID-19 in the ALMA Project and the timeline until now
3. ALMA Operations in Chile, and coordination internationally
4. Some reflections and ideas towards the “new normal”

The Plan to Comeback to the Workplace

- Process:
 - The situation is monitored closely by the Project Manager and the Management team based on several indicators in official sites
 - The PM makes a recommendation to the MGT team during the regular MGT meeting held every Thursday morning for active discussion based on the situation and needs of the different teams
 - The MGT team makes a decision, and the PM communicates the decision to all staff shortly after the meeting
 - Decisions include:
 - Continue in the same phase or change back or forth
 - Period on which the decision applies
 - Time when the next decision will be made
 - If necessary, an All-Hands meeting or equivalent is held to communicate updates and receive questions/concerns from colleagues

Timeline of measures to cope with COVID-19

- Call for Proposals for ALMA Cycle 8 of observations was opened on **March 17th 2020**, with deadline on April 15th
- **March 19th**: it was decided to extend the deadline until at least May 19th as a response to the global pandemic
- **March 20th**: an announcement was done to inform about the suspension of science operations to protect the safety of staff
- **April 1st**: Proprietary Times to extended for 3 months for data going out of proprietary time from March 19th onwards.
- **April 17th**: Submission of Cycle 8 proposals suspended until further notice
- **April 24th**: after the ALMA Board Meeting in April 2020
 - The start of ALMA Cycle 8 was postponed until 2021 October. It is anticipated that the Cycle 8 Call for Proposals will open again in 2021 March.
 - ALMA Cycle 7 will continue through 2021 September, with currently non-completed projects ranked A, B and C remaining in the observing queue.

Timeline of measures to cope with COVID-19

Timely updates have been provided in the Science Portal since May:

- **May 27th:**
 - ALMA operations remain suspended
 - We have been working actively on plans to restart operations at a time that it is feasible.
 - Caretaker teams continue to maintain the safety of the ALMA equipment and infrastructure. The Regional ARCs continue to provide support to their communities.
- **July 10th:**
 - Although in some of the ALMA regions the situation is slowly improving, in other regions, including Chile, the evolution of the outbreak remains highly uncertain.
 - Because of the situation in Chile, ALMA operations unfortunately remain suspended.
- **August 27th:**
 - The situation in Chile has slightly improved in the Santiago area but not yet improved in the northern area where the ALMA telescope is located.
 - ALMA operations thus remain suspended and the timeline of resuming observations uncertain.
 - Detailed plans for the safe return to operations have been developed and regular reviews to consider starting the re-opening process of the Observatory have now started.
- **October 1st:**
 - “ALMA starts the process of recovering the telescope array”
- **November 23rd:**
 - “2020 November Status of the ALMA recovery process ”
- **January 25th :**
 - “Array Recovery Status Update ”

Some personal reflections

- Overall, the COVID-19 pandemic has affected our lives and work deeply
 - Even our daily vocabulary! Social distance, coughing etiquette, self-quarantine, personal protective equipment (PPE), PCR test...
- Fast decision making has been necessary
- Timely and frequent communication, with the possibility of discussion to correct plans on the go, has been key
 - Timely consensus building towards timely decisions
- On the other hand, the pandemic has accelerated the implementation of some measures which are positive in principle:
 - Telework
 - Off-peak commuting
 - Digital signatures and paperless procedures

Outline

1. First stages of the pandemic and first response
2. Towards a plan to cope with COVID-19 in the ALMA Project and the timeline until now
3. ALMA Operations in Chile, and coordination internationally
4. Some reflections and ideas towards the “new normal”

Some personal reflections - communication

- Communication is key to productivity and integration into the team dynamics
- New technologies such as Microsoft365, zoom, slack, cloud services... have made our lives easier during telework
- Frequent and timely communication at team level and from management are very important to keep team members engaged
 - From a management point of view:
 - Confirm that all managers are communicating with team members
 - Communicate frequently with all team members, if possible, through live meetings
- Frequent and open communication is also very important to detect any issues or potential isolation, mental health issues, fatigue, etc.
 - Team meetings
 - Often All-hands meetings
 - Informative talks about the project to all staff every Wednesday from Oct to Jan with initial communication of updates by Project Manager

Some personal reflections - telework

- Telework has been key to reduce the spread of COVID-19 and to allow us to cope with the current situation since March 2020
- Telework has proven positive overall:
 - Reduction of commute times and infection risks in crowded public transportation
 - Possibility to handle the personal and professional situation in this difficult and ever-changing circumstances
 - Increase of work efficiency for some tasks
 - Increase of Quality of Life (QoL) with possibility of better Work-Life balance
- But we have also discovered that we need to be careful too...

Some personal reflections – telework (III)

I believe that telework will be with us from now on:

- The changes in this year have been very drastic and we have made it part of our lives
- The COVID-19 pandemic will not disappear over night and it will take time to come back to “normal”

Telework provides great opportunities and a mix between it and work at the workplace will be the most productive and pleasant way to work:

- Tasks in the workplace done efficiently (i.e. lab work) with other tasks left for work from home, with higher focus
- Choice between communication with colleagues or time to focus alone at home
- Flexibility to plan work and support life
 - This will put higher responsibility on staff and managers but increase QoL

The success of telework is directly related on the sustainability of the implementation: appropriate tasks, good reporting, necessary breaks...

Some personal reflections – telework (II)

- Not all work can be done remotely: lab work, rebooting servers...
- Telework produces fatigue, especially with many online meetings in the same room and at any time of the day
- Personal life and work start to get entangled, and even to conflict
- Working hours can become long if we do not have the discipline to make appropriate breaks and control our working time
- Possibility of isolation or insufficient communication with colleagues
- Work environment may not be the best
 - Many of us have tried all rooms in our homes... or even balconies for a change!

Overall, telework is positive and can help to increase efficiency of certain tasks and improve QoL. However, if not done properly, telework can result in a decline of efficiency or more serious mental health issues

The new normal

The way I see the new normal is:

- Mix of telework and work in the workplace for increased QoL
- Acceleration of implementation of digital paperless procedures
- Work based on objectives instead of number of hours
- Less business travel, with more opportunities for online meetings
- Workshops and large events will be a mix of presential and remote connections

Properly implemented, this will lead to increased efficiency and better work-life balance in my opinion.

Thanks for your attention!

望遠鏡保守体制の連携強化の現状と将来構想

上野祐治

(国立天文台 水沢 VLBI 観測所)

概要(Abstract)

2016 年度の天文学に関する技術シンポジウムをきっかけに立ち上がった「望遠鏡保守情報交換会」により、現場レベルでの望遠鏡保守体制の連携強化の機運が高まった。また、2018 年度の天文学に関する技術シンポジウムにおける常田台長の講演にあるように、天文台執行部でも望遠鏡保守の重要性が強く認識されるようになった。これらを追い風に進みつつある、望遠鏡保守体制の連携強化について報告する。また、将来的な構想についても述べる。

1. 望遠鏡保守業務とその特徴

国立天文台における望遠鏡保守は、望遠鏡の性能を維持し続ける取り組みであり、目的は望遠鏡の長期安定運用である。望遠鏡保守の内容は、いわゆるメンテナンスと呼ばれる消耗品の交換やトラブル対応はもちろん、機能更新や廃版部品の置換といった開発要素が強い内容まで多岐に渡る。

国立天文台における望遠鏡保守業務に共通した特徴としては、

- ・多数の人員が複数の作業に関わるため、指揮命令系統が重要
- ・危険な作業が多くルール順守が求められる
- ・ダウンタイムを最小に抑える必要があるため、時間的制約がシビア

が挙げられる。また、外注業者とのやり取りが多く、交渉や調整、事務処理が多いことも特徴である。

2. 望遠鏡保守体制の連携強化の必要性

なぜ望遠鏡保守体制の連携強化が必要であるか説明する。1 項で述べたように、望遠鏡保守の目的は望遠鏡の長期安定運用であるが、全台的な人的・財的リソースの減少により、長期安定運用に必要な保守の実現が困難になりつつある。リソース減少への対応として、業務を効率化し生産性を高める必要がある。この生産性向上の手段として、従来は各プロジェクト独自に構築してきた仕事の仕組み、例えば文書様式や保守データの測定・評価方法を全台的に共通化することが有効である。また、仕事の仕組みを確実に運用し生産性向上を実現するための全台的な保守担当者の体制も構築する必要がある。この共通の仕事の仕組み及び体制の構築そのものが望遠鏡保守体制の連携強化である。連携強化により情報共有が活発化し技術力も向上する。望遠鏡保守体制の連携強化の必要性を整理すると、次のようになる。

- ・目的・・・・・・・・・・望遠鏡の長期安定運用の実現
- ・目的達成の障壁・・・・人的・財的リソース減による効果的な保守の実現困難
- ・障壁の解決方法・・・・業務を効率化し生産性を高め、リソース減に対応
- ・解決方法の実現手段・・全体最適な共通の仕事の仕組み及びそれを運用する体制の構築

3. 望遠鏡保守体制の将来構想（あるべき姿）

望遠鏡保守体制の連携強化の取り組みは、複数のプロジェクトの人的・財的リソース配分に関わるため全体最適を考慮して実現すべきである。もし、全台的な技術系職員の体制構築の考えがあるならば、方向性を一致させる必要があると考える。

全台的な技術系職員の体制構築について、技術推進室の年度計画（2020 年度）EP-TD-005 第 1 版^[1]に、以下の記述がある。

4. 技術推進室の 2020 年度目標と計画

4.1. 技術系職員の配置

ATC, ADC における技術系職員の配置について、その考え方の構築と実施を支援する。また、望遠鏡保守に関わる職員の配置と在り方について、ハワイ観測所をはじめとする観測所を支援し、今後の方向性をまとめる。

つまり、望遠鏡保守体制の連携強化の考え方は、ATC, ADC の技術系職員の配置の考え方と大きく乖離しないようにすべきであると考えている。

ATC の技術系職員の配置について、2020 年 2 月 28 日の技術系職員懇談会で示された文書「ATC の目標と組織について」^[2]の p7~p9 に組織の考え方が示されている。この考え方を要約すると次の 2 点である。

1) 体制の重要性

2) マトリックス制組織

1) は限られた人的・財的リソースでミッションゴールを達成するために、獲得した技術の共有と維持発展及び新技術の導入並びに所属するメンバーのスキルアップとそれを実現するために必要とある。

2) は技術領域ごとに大きくくりした「グループ」を設け、グループ内でさらに技術領域に一段掘り下げた「チーム」を設置し、グループからプロジェクトにはマトリックス制で参加する、とある。

これらの考え方は、望遠鏡保守体制の連携強化の方向性とも良く合致しており、ATC と保守が同じ方向に進むことで、例えば人材の流動性を高めるといった全体最適も実現できると考えられる。

この全台的な組織改革は、基本的にトップマネジメントの仕事である。その場合、望遠鏡保守の現場としては、改革のために現場でやるべきことを考え、少しずつ実現していくことが建設的な行動である。また、トップマネジメントが牽引する体制構築に対し、現実には則した提言をすることも現場の重要な役割である。

4. 進捗状況

望遠鏡保守体制の連携強化を実現するため、現場としてやるべきことを望遠鏡保守情報交換会や有志間で議論し、実行に移している。具体的には、共通の仕事の仕組みとして以下の 3 項目を構築中である。

1) 望遠鏡保守データの品質保証体制の構築（ハワイ観測所：佐藤立博氏が主導）

－望遠鏡保守データの取得方法、まとめ方、評価手法を共通化するための取り組み。

2) 望遠鏡保守の文書共有と管理方針の策定（ハワイ観測所：筒井寛典氏が主導）

－望遠鏡保守に共通した文書番号の付与規則や格納場所といった文書管理規則をまとめた。

3) 保守作業相互支援体制の構築（ハワイ観測所：岩下浩幸氏、著者が主導）

ー2021 年度から、ハワイ観測所と水沢 VLBI 観測所間で実現すべく準備している。両プロジェクト長の合意形成済み。

いずれも、2020 年度に立ち上げたばかりであるうえ、新型コロナウイルスの影響により移動制限があり、思うように進まないところもあるが、それぞれが抱える望遠鏡保守業務もこなしながら鋭意進行中である。

5. 望遠鏡保守体制の連携強化の問題点

望遠鏡保守体制の変革を進めるうえで、解決すべき課題、問題点を以下に列挙する。

1) 技術系職員の所属がプロジェクト（観測所）でなくなることへの抵抗感

現在、望遠鏡保守担当の技術系職員は、望遠鏡の運営責任を持つプロジェクトの所属であり、キャリアプランや年間目標の設定、指揮命令系統もプロジェクトの中で決められてきた。このことから、技術系職員は繁閑に合わせて他プロジェクトの業務を担うといった柔軟な対応がしにくかった。他プロジェクト業務を担当する場合は、手続きを伴う異動や併任が必要であった。

一方で、連携強化の先に見据えるマトリックス型組織では、技術系職員が所属する全台的な保守グループが様々な決定権を持つことになる。このことは、プロジェクトが柔軟に扱えるリソースが減少することになるため、反対意見が予想される。この解消には、プロジェクト運営側に全体最適の視点を持ってもらう必要がある。つまり、保守担当者が様々なプロジェクトの業務を経験することで技術力が向上すれば、全台的に保守が低コスト高品質で実現できるようになり、結果として自プロジェクトにも十分メリットがあると考えていただきたい、ということである。

ただし、プロジェクト所属の職員の重要性も理解している。現場に近いことはもちろん、経験値に基づいた迅速・確実な意思決定や障害対応が可能な点も、望遠鏡の安定運用の大きな安心材料である。そのため、全台的な人員バランスを設計し、観測所に所属する人数を最小限に抑えつつ、柔軟性も合わせ持った組織体制の構築が重要である。

2) ピラミッド型組織の考えを持つこと

国立天文台のプロジェクトは、プロジェクト長を中心に様々な部門が取り囲むレコード盤型構造（ナベブタ型とも言われている）が多いと感じる。この組織構造は、小人数であればリーダーの意思伝達に優れ、現場の意見を取り入れやすいというメリットもある反面、多人数になると責任者が不明瞭になり意思伝達及び実行力が弱く、1 項で述べた望遠鏡保守業務に必要な組織構造とマッチしない。安全・確実・迅速な保守業務を行うには、組織のトップやリーダーが決断した方針には最終的に従うというピラミッド型組織の意識を強く持つ必要があると考える。図 1 にピラミッド型組織及びレコード盤型組織のイメージと特徴を示す。

ピラミッド型組織は自由な意見が言えないという意見もあろうが、それは組織構造の問題ではなくリーダーの資質の問題である。皆が対等な意見を言えるレコード盤型組織で方針を定め、決まったことはピラミッド型組織で確実に実行する、という良いとこ取りで運営している組織もあり、このような運営に長けたリーダーを育成することがピラミッド型組織構築のカギと考える。

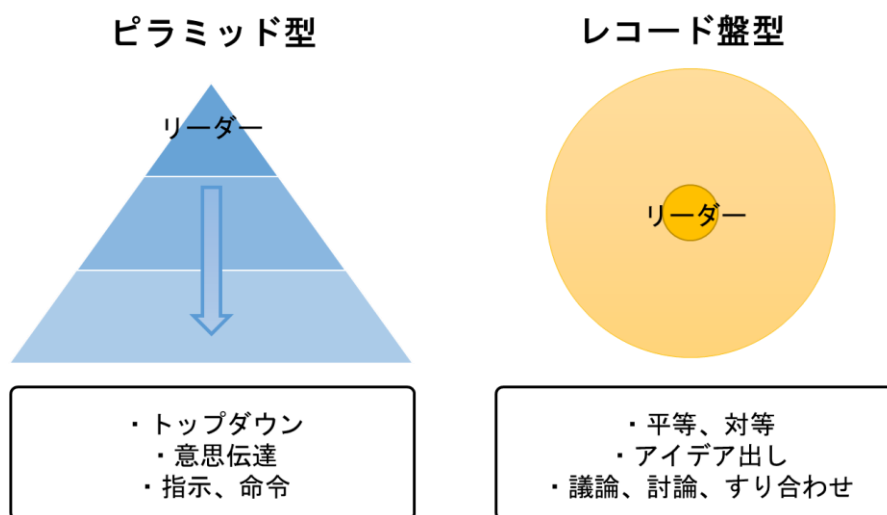


図1 ピラミッド型組織及びレコード盤型組織のイメージと特徴

3) 経験値のある技術系職員が管理職的立場になること

1 項や 5 項 2) で述べたように、保守の現場では、待ったなしの素早い意思決定が要求される状況が多い。指揮命令権者が素早い意思決定をするには、教育の他に経験値も極めて重要である。保守の意思決定する立場にある者は、職位ではなく与えられた職務を全うするために最適な経験を積んだ人材になるべきである。

以上の課題、問題点の解決には、個々の意見を最大限尊重するという国立天文台の良い文化・性質を残しつつ、目的達成型組織の色合いも濃くしていくことになる。そのため、時間を掛けた意識改革・啓蒙活動が重要であると考えている。

6. まとめ

望遠鏡保守体制の連携強化を推進している。これは、全台的に共通な仕事の仕組み及び仕組みを実行する組織体制を構築することで、望遠鏡保守に関わる人的・財的リソース不足を解消し、望遠鏡の長期安定運用の実現を目的としている。連携強化の実現には解決に時間を要する問題が複数あり、今後は全台的な意識改革・啓蒙活動が重要になると考えている。

参考資料

- [1] 技術推進室.『技術推進室の年度計画（2020 年度）EP-TD-005 第 1 版』.p4.2020 年 12 月
- [2] 満田和久, 鶴沢佳徳.『ATC の目標と組織について』.p7~p9.技術系職員懇談会資料.2020 年 2 月

望遠鏡保守の品質管理体制強化に向けた取り組み

佐藤立博

(国立天文台 ハワイ観測所)

概要(Abstract)

望遠鏡の安全・安定した運用には、日常の保守が極めて重要な課題である。また、コスト削減のなか長期に渡り安定した運用が求められている。しかし、望遠鏡の品質管理と品質保証の体制は国立天文台内で議論・整備されていない。こうした背景から、野辺山・水沢・ハワイの望遠鏡保守担当者と共同で、望遠鏡保守の品質管理と品質保証の体制整備に向けて活動を開始した。本発表では、本活動について報告する。

1. はじめに

近年、国立天文台の保有する望遠鏡の保守は、国内外の観測所縮小や予算削減に伴う内製化が求められている。一方で、長期に渡り安定した運用を実現することも同時に求められている。これまで望遠鏡本体の各性能評価などは、製造メーカーへ依頼し行っていた。いくつかの項目は、各観測所それぞれで測定を行っている。しかし、望遠鏡の品質管理と品質保証は、国立天文台内で議論や整備はされていない。こうした背景から、野辺山・水沢・ハワイの望遠鏡保守担当者と共同で、望遠鏡保守の品質管理と品質保証整備に向けて活動を開始した。まずは、電気系保守と呼んでいる望遠鏡やドームの電氣的な測定を評価する項目の一部内製化を足がかりにし、全台的な望遠鏡保守の品質管理と品質保証体制を整備する。

2. 目的

本計画の体制整備の目的は下記のとおりである。

- (1) 持続可能な望遠鏡システムの品質を「見える化※」し、よい品質をユーザへ提供する
- (2) サイエンスの要求から乖離がないように、方針の決定、経営資産を投入する

※「見える化」とは「見せる化」「意識化」その先の解決方法を含む

2. 電気系・機械系保守

本計画では、電気系保守や機械系保守の一部内製化とともに実施する。これらの保守は、望遠鏡や付帯設備における各駆動や制御部の電気および機械計測や点検などがある。AZ/EL や Dome では、動摩擦トルクや最大駆動速度・加速度等の特性確認や、レール平面度などの性能評価がある。表 1 に製造メーカーが実施していた各観測所の定期保守項目数を記載する。水沢は、この項目数に加えて入来・石垣・小笠原の各望遠鏡も行うため、この項目数の 4 倍となる。こうした各観測所の定期保守項目は、すでに多くの項目が、天文台職員で測定が可能となっている。また、こうした望遠鏡の性能や劣化の評価は、天文台内で実施し、現在の状況や問題の把握などをする上で重要である。こうした考え方

は、各観測所の保守担当者も認識が同じである。さらに、各項目の測定や評価方法は、各観測所で共通する部分がある。これまで、それぞれの観測所が別々に測定や評価を実施していた。そのため、台内での測定結果レビューや文書作成フォーマット、データの解析方法は統一されていない。これらの各作業を天文台内で標準化し、統一したレビューなどを実施することを通じて、品質保証の基礎を構築し、安定した運用を維持できる体制をつくる。

表 1 各観測所の定期保守項目数

	電気系保守項目	機械系保守項目
ハワイ	58	35
野辺山	35	29
水沢	20	26

3. 2020 年度の本グループの活動体制

2020 年度は、図 2 に示す。本年度の測定項目と測定人員を決定し、各観測所で測定を実施する。測定人員についてはハワイからスタッフを日本へ派遣し協力する予定であったが、COVID-19 の影響により出張が難しくなった。しかし、水沢から野辺山へ測定の協力が実現し、野辺山とハワイ観測所の一部の測定を実施することができた。その後、現場の保守スタッフで 1 次レビューを実施し、全体のレビューを実施する予定である。全体のレビューでは、技術スタッフだけではなくサイエンス側からの意見も得ることで、技術部門での偏った見方にならないようレビューを実施する。最終的には、望遠鏡の年度ごとの信頼性データとした報告書としてまとめる予定である。

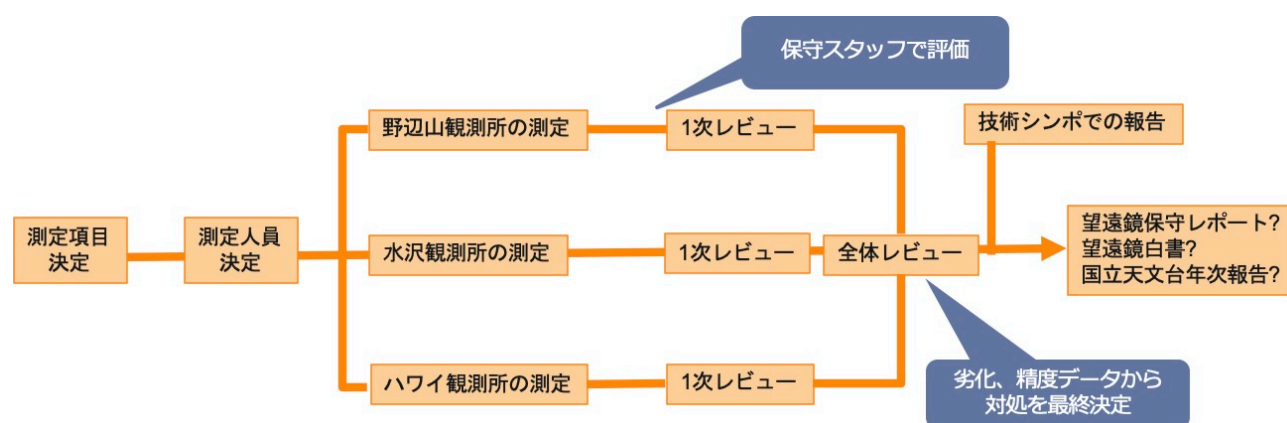


図 2 2020 年度の活動体制

4. 保守に求められる人材の強化を実現

本活動を通じて、台内の経営資産を有効利用し保守スタッフの技術力を向上させ、事象やデータから次のアクションを適切かつ迅速に対応する力を養うことができると考える。これらのプロセスを通じて図 3 に示す人材強化を目指せると考えている。また、こうした改善活動の PDCA サイクルを数多く回すことができれば、日々の業務を見直す着眼点や知識、スキルを養うことが可能となる。さらにチームで取り組むことで、組織学習ともなる。

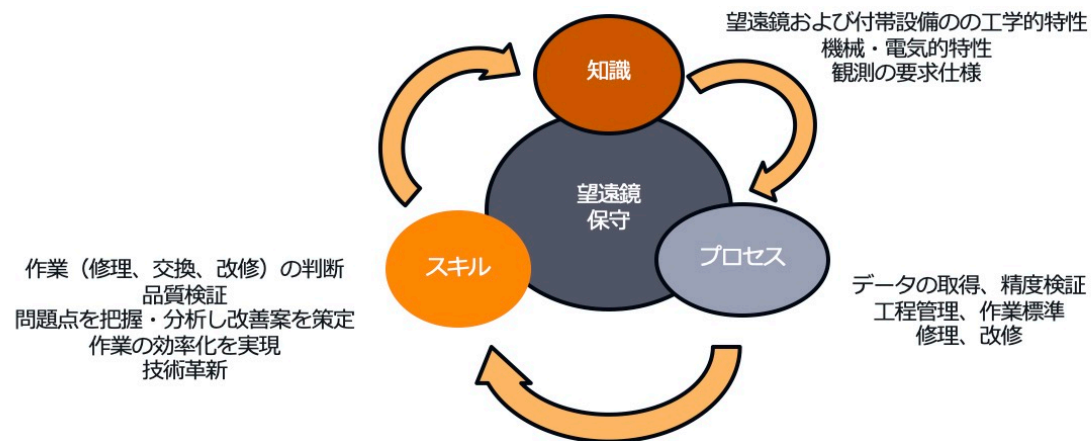


図3 保守に求められる人材の強化

5. まとめと今後

本報告では、野辺山・水沢・ハワイの3観測所が共同で望遠鏡の保守データを取りまとめ品質保証体制整備に向けて活動を始めた。こうした、活動を通じて国立天文台に品質管理と品質保証の基礎を構築したいと考えている。また、翌年以降も継続して実施し、順次項目を拡大していく予定である。また、こうした活動を通じて望遠鏡保守の人材強化につなげていきたい。

謝辞

本活動を進めるにあたって活動を理解し協力していただいた、満田技術主幹、立松観測所長、本間観測所長、吉田観測所長には多くのご支援をいただきました。感謝申し上げます。

VERA20m 電波望遠鏡 駆動制御系 時刻同期制御部の内製化

○平野賢、上野祐治、砂田和良
(国立天文台 水沢 VLBI 観測所)

概要

時刻同期制御部 (TSU: Time Synchronous Unit) は、アンテナ指向指令値を基準時刻信号に同期させ、下位の制御装置群へ指令を与える装置である。TSU の予備品枯渇が迫る中、入出力仕様を元に代替機の内製を進めた。2020 年 3 月に天体追尾機能を実装し、7 月に従来品と同等の VLBI 観測結果を得て、水沢局にて実運用を開始した。11 月には小笠原局にも搭載した。完成までの道のりを述べる。

1. 駆動制御系 時刻同期制御部の概要と構成

VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) 20m 電波望遠鏡の駆動機構は、方位角(AZ: Azimuth)、仰角(EL: Elevation)、視野回転角(FR: Field Rotation)と、2 ビーム機構(2B: 2 Beam)から成る。FR と 2B により同時に 2 天体を観測できることが特徴である。時刻同期制御部の改修前後の構成を図 1-1 に示す。水素メーザーからの正確な 5MHz 信号を基準に、時計装置が IRIG-B タイムコード信号をアンテナ内の TCG/T へ送り、同期クロック信号に変換して TSU へ送る構成である。TSU はこの信号と同期し、局運用計算機からのアンテナ駆動指定時刻と、実際に駆動する時刻を正確に合わせるといふ、天体追尾のための重要な機能を持つ。しかし、TSU は製造中止となり、近年は予備品枯渇も迫っていた。

そこで、予備品枯渇解消と技術力向上のため、旧 TSU の入出力仕様を元に、同仕様のプログラムを新規開発し、TSU を内製することとした。合わせて、従来問題となっていた IRIG-B タイムコード信号の電圧低下を解消するため、同期クロック信号系の構成を変更した。以降、図 1-1 左の TSU を旧 TSU、右の TSU 互換計算機を新 TSU と書き分ける。

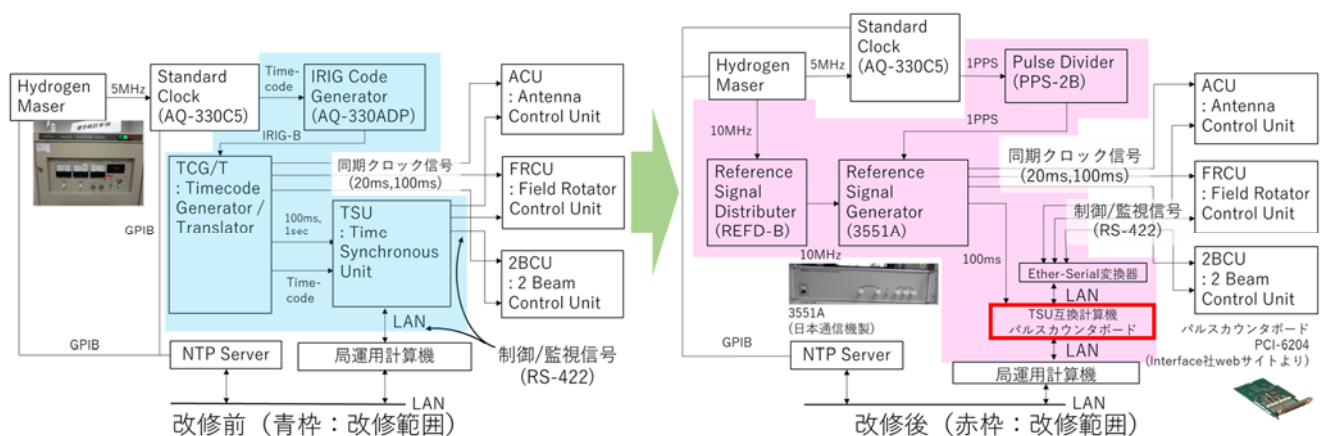


図 1-1 時刻同期制御部の改修前後の構成

2. 新 TSU プログラムの構成

新 TSU は、局運用計算機と、望遠鏡駆動機構を制御するローカル装置(ACU,FRCU,2BCU)との間で、

制御コマンド（DRIVE ON/OFF 等の指令コマンド+指令角度）及び監視ステータス（装置状態+実角度）を受け渡す機能を有する。各装置間で受け渡すデータの内容とタイミングのイメージを図 2-1 に示す。天体を追尾するためには、局運用計算機で作られる指令角度を 100ms ごとに分割し、細かく内容を変化させながらローカル装置へ送信する必要がある。2020 年 3 月にこの機能を実装し、天体追尾を可能とした。



図 2-1 新 TSU が送受信するデータとタイミングのイメージ

3. 天体追尾機能のデバッグ

機能実装後、新 TSU による初観測を実施したところ、局運用計算機から送られる指令角度と、受け取る実角度の差が、旧 TSU の場合（最大 0.8 秒角（0.0002°）程度）と比べて明らかに大きい（最大 14.4 秒角（0.004°））ことがわかった。局運用計算機側でこの差が見えることから、指令角度の送信タイミングが異なることで実際のアンテナの動きが変わったか、実角度情報に異常があるかという 2 つの仮説を立てた。調査の結果、指令角度については送信タイミングと内容に旧 TSU との差異が無く問題ないため、実角度の内容に起因すると推定した。さらに調査を進めた結果、新 TSU から局運用計算機に毎秒送る実角度配列の先頭から順に最新の角度を格納していたが、本来は先頭から時間順のデータが常に並ぶ必要があることがわかった。これを修正し、この差を最大 1.8 秒角（0.0005°）程度に抑えた。

4. 実運用試験

2020 年 6 月から 5 項目の実運用試験を実施した。以下に各試験の判定基準と結果を示す。

1) 単一鏡観測試験

判定基準：新 TSU 接続状態でもビームのずれ等がなく、旧 TSU と同等の結果を得ること。

結果：新 TSU で観測した場合でも、旧 TSU と同等の天体追尾を実現できた（図 4-1）。

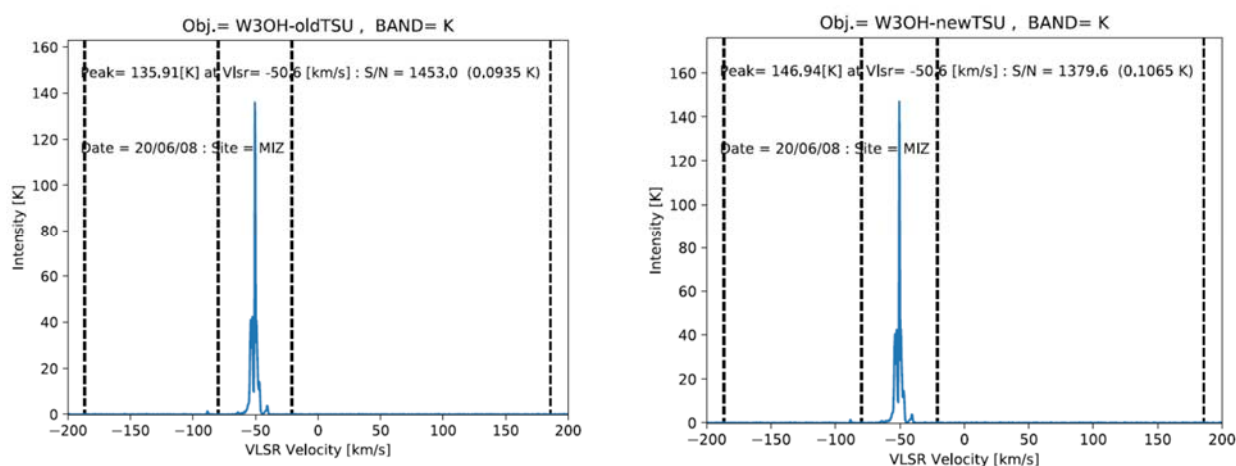


図 4-1 W3(OH)の観測結果（左：旧 TSU、右：新 TSU）

2) 全局 VLBI 観測試験

判定基準：水沢局に新 TSU を搭載して全局で同一天体を観測し、旧 TSU による観測と比較してフリンジのピークに明らかな差異がなく、全観測時間にわたってフリンジを検出できること。

結果：連続波源 OJ287 のフリンジの遅延時間のオフセット(Delay)、遅延変化率のオフセット(Rate)、信号対雑音比(SNR)を新旧 TSU で比較したところ、天候による SNR 低下以外の有意な差は見られなかった。図 4-2 に観測中の各値の時間変化(赤色：旧 TSU による観測名 r20181t、青色：新 TSU による観測名 r20182t)を示す。

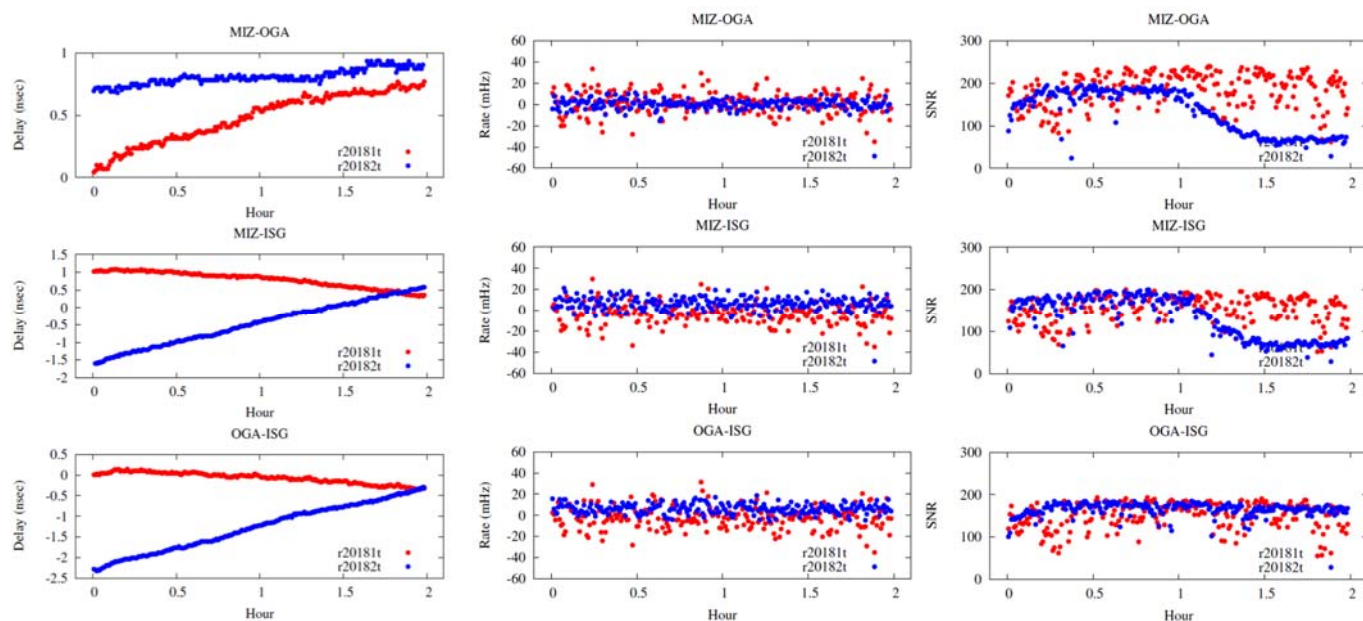


図 4-2 OJ287 フリンジの Delay (左) , Rate (中央) , SNR (右) の時間変化(2020/6/29-30)

(上段：水沢局-小笠原局、中段：水沢局-石垣島局、下段：小笠原局-石垣島局の各基線)

3) 5 日間連続運転試験

判定基準：新 TSU により、5 日間連続で 2B を変化させて観測し、予期せず停止しないこと。

結果：1 件の不具合(過去の制御コマンドが実行される)が発生し、修正した。この試験中、水沢局旧 TSU の CPU ボードが故障し、予備ボードが無いため旧 TSU によるアンテナ駆動が不可能となった。緊急に新 TSU の運用を開始せざるを得ない状況となった。

4) 単一鏡ポインティング観測

判定基準：新 TSU により、毎年実施しているポインティング観測を行い、ポインティングオフセットに異常な周期成分が見られないこと。

結果：3 項記すとおり、指令角度と実角度の差が旧 TSU と比較して 1 秒角程度大きい、ポインティング精度の劣化は検出されず、問題ない精度であるため、合格とした。

5) 長期運用試験(実運用開始)

判定基準：新 TSU を搭載したまま、支障なく運用可能であること。

結果：観測中に駆動停止する不具合が不定期に発生することがわかり、運用を続けながら対処中である。詳細は 6 項に記す。

5. 2号機製造と小笠原局への搭載

実運用試験中に水沢局にて緊急的に新 TSU の運用を開始したため、さらなる故障がいずれかの局で発生した場合、直ちにアンテナを駆動できなくなるおそれがあった。そこで、実運用試験と並行して 2 号機の製造に着手した。2020 年 11 月に 2 号機を完成させ、他の保守作業に合わせて小笠原局に搭載した。同月中に単一鏡観測およびポインティング観測を実施し、水沢局と同様に問題ないことを確認した後、運用を開始した。

6. 現在対処中の不具合

観測中に予期せず駆動停止した際の復旧に要する時間は、運用者がいる場合は、ソフト再立ち上げで復旧できる場合は十数分程度、アンテナへアクセスする必要がある場合は 30 分程度である。夜間無人運用中に発生すると、翌朝まで停止状態となる。

不具合が起きた際の、新 TSU からローカル装置への制御コマンドを調べたところ、本来格納されるべき配列にずれて格納されていることがわかった。このずれがどこで生じたかを調べるため、wireshark によって局運用計算機から新 TSU へ送られる制御コマンドの packets を確認したところ、その内容は正しいことがわかった (図 6-1)。新 TSU プログラム内部の問題と推定し、さらなる原因調査を進めている。



図 6-1 wireshark による制御コマンドパケットモニターの様子

7. まとめ

旧 TSU 故障により観測停止が危ぶまれたが、新 TSU の奇跡的な緊急登板によって観測停止期間を最小限に抑えた。実運用試験によって、新 TSU に置き換えても旧 TSU 使用時と比較して望遠鏡の追尾性能は同等であることがわかった。また、水沢局に加え、小笠原局でも 2020 年 11 月から 2 号機の運用を開始した。一方、観測中に不定期に停止する致命的な不具合が残る。これを早急に解消するとともに、今後のさらなる障害発生に備え、3 号機の製造や、保守改良のためのドキュメントを整備する計画である。

Zabbixによる統合監視システム構築

高橋賢

(水沢 VLBI 観測所)

概要(Abstract)

水沢 VLBI 観測所はリモートでの観測運用のために多くの計算機やネットワーク機器を有し、それらの運用保守管理には様々な課題がある。これまではそれらの機器を監視するシステムはなく、障害が発生しても検知が遅れ対応が後手に回っていた。この課題を解決すべく導入した Zabbix による監視システムについて報告する。

1. はじめに

研究プロジェクトを支える IT インフラは、観測運用計算機、データアーカイブサーバ、Web サーバ、ファイルサーバ、ネットワーク機器や IoT 機器など、数多く存在する。日々の観測運用にはこれらが正常に動作していることが重要であり、万が一障害が発生した際は迅速な対応が求められる。そのためには障害検知が重要であり、これが遅れると対応が後手に回ってしまう。当プロジェクトではこれまで IT インフラを監視するシステムは導入されておらず、障害発生時にも発生箇所の切り分け作業が難航するなど混乱することが多かった。この状況を改善するため、統合監視システムである Zabbix の導入を試みた。

2. 統合監視ソフトウェア Zabbix について

システム監視は大きく分けて、ping 等によりサーバやネットワーク機器が正常に動いているかを確認する「稼働監視」、CPU、メモリ、ディスクなどのリソース使用状況を確認する「リソース監視」、サーバ上で動いているアプリケーション内部のステータスやリソース状況を確認する「アプリケーション監視」の三つに大別される。これらの監視を個別に別々のソフトウェアや自作のスクリプトで行うことも可能ではあるが、システムが大規模化し監視対象が増加・複雑化してくると、監視システムの維持管理にコストがかかってくることになる。これを解決する目的として開発されたのが、監視を一元化して自動化する統合監視ソフトウェアである。

Zabbix は、ラトビアにある Zabbix 社が開発したオープンソースのソフトウェアであり、サーバ、ネットワーク機器やアプリケーションの監視ならび監視設定などを一元管理でき、障害発生時のメール等による通知機能も備えている。また、収集したデータのグラフ化やネットワークマップの作成も可能であり、視覚的にも状況を把握しやすい。そのため IT インフラの運用監視ツールとして、企業にとどまらず医療機関や自治体といった幅広い業種で使われている。

3. Zabbix の監視システム概要

図 1 に Zabbix の監視システムの概要を示す。大きく分けて、監視する側の監視サーバ (Zabbix)、監視される側の監視対象 (サーバやネットワーク機器) から構成される。

Zabbix サーバは監視マネージャの機能を有したサーバで、監視設定を一元的に管理し各監視対象からネットワーク経由で ping やポート監視を行ったり、情報機器の監視プロトコルである SNMP(Simple Network Management Protocol)や Zabbix 専用のツールである zabbix-agent によるステータスの情報収集を行い、結果をデータベースに保存する。また、監視設定やデータの閲覧は Web インタフェースから行う。

監視対象側ではネットワーク機器であれば、SNMP を有効化することで、ポート毎のトラフィックやリンクアップ・ダウンなどのトラップ情報を収集することができる。サーバの場合は zabbix-agent をインストールすることで CPU、メモリ、ディスクやネットワーク等のリソース情報を集めることができる。また、障害が発生した場合は、運用監視者や管理者へのメール送信や Webhook による MS365 などのオンラインツールへの通知も可能である。

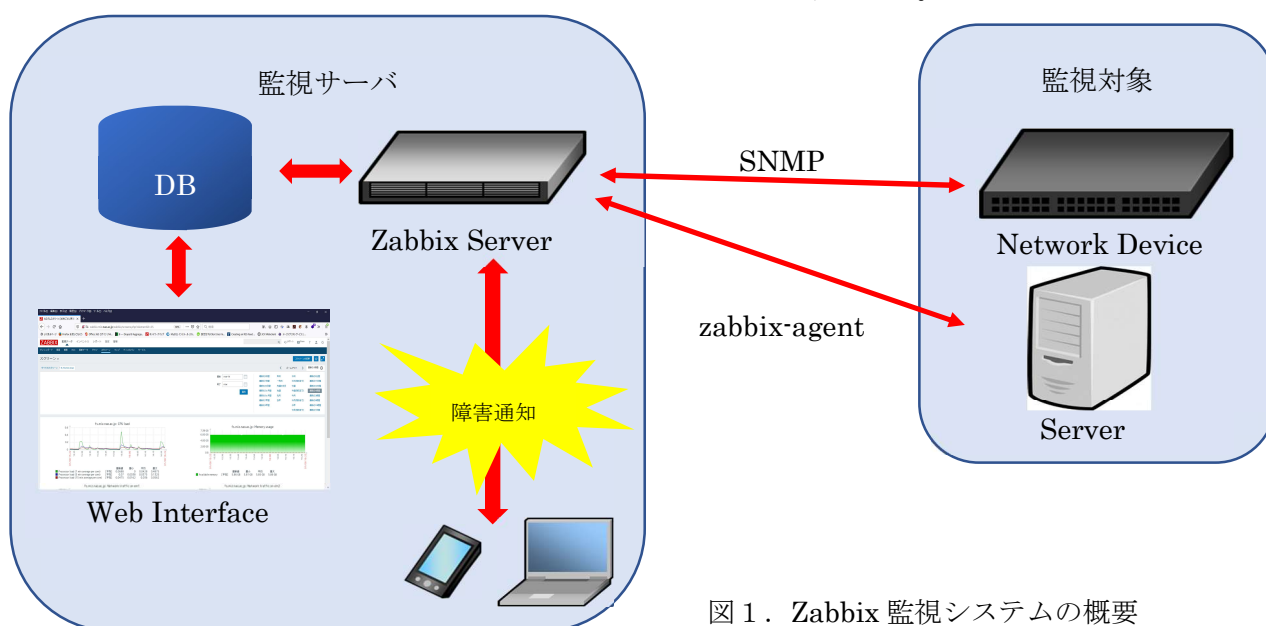


図1. Zabbix 監視システムの概要

4. VLBI 観測への展開事例

VLBI 観測は水沢、入来、小笠原、石垣島の遠隔地にある電波望遠鏡をネットワークを介した遠隔操作により運用している。そのシステムは主に観測運用計算機 37 台、ネットワーク機器 25 台で構成されている（天文台広域ネットワーク分は除く）。これらを監視するため、Zabbix サーバを水沢キャンパス内に設置し各観測局の情報を収集するようにした。監視対象側は前述したように、計算機には zabbix-agent をインストール、ネットワーク機器は SNMP を有効化した。また、各観測局内の機器はプライベートネットワークに接続しており、Zabbix サーバ（グローバルネットワークに接続）とは直接通信することができないので、監視データを直接収集することはできない。そのため、Zabbix proxy という機能を利用し、ゲートウェイとなる計算機を通じて Zabbix サーバと通信する手法を採用した。図2に Zabbix proxy の概要を示す。Zabbix proxy サーバがプライベートネットワーク内の計算機のデータを収集し定期的に Zabbix サーバへ転送する。

図3に示すようなネットワークマップも作成した。図で示すことでネットワーク構成が運用担当者にも分かりやすくなり、障害時の切り分けも容易になった。また、障害が生じた場合はアラーム音とともにその内容を表示するようにした。

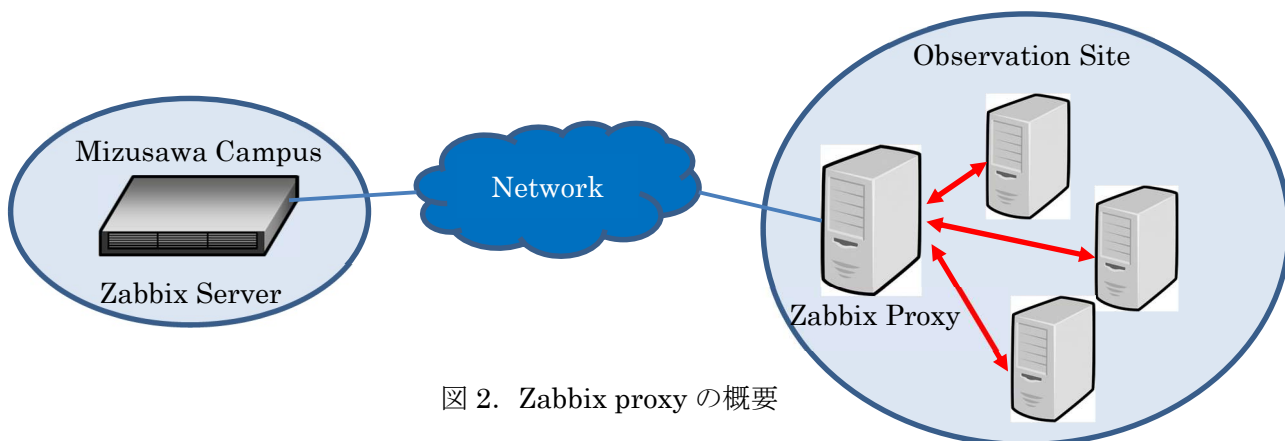


図 2. Zabbix proxy の概要

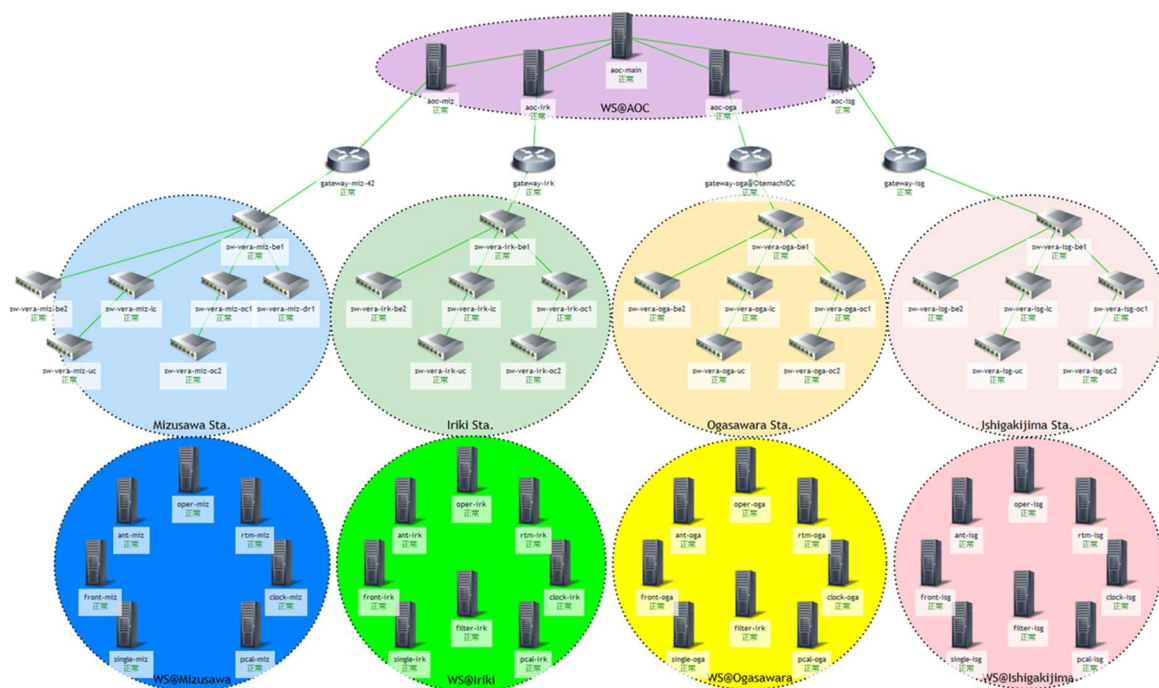


図 3. ネットワークマップ

5. Web サーバへの展開事例

Web サーバはサーバ自体が正常に動いており、プロセスやポートが正常に機能していても DB にエラーが発生していて正常にコンテンツが閲覧できない状況もある。Web 監視を確実に行うには監視項目を増やすことが好ましいが、その分複雑になってしまう。しかし、Zabbix には Web サーバに HTTP アクセスを行い正常にコンテンツが表示できるかを監視する「Web 監視」の機能がある。これは指定した URL から Web ページをダウンロードし、ダウンロード速度、レスポンスタイム、ステータスコード、さらには特定の文字列がページに含まれているかを監視できる。文字列が含まれているかを監視するのは非常に有用であり、過去に、ステータスコードが 200 の時でも正常にコンテンツが表示されていないケースがあり、そのような場合にも異常が検知できる。

6. 環境モニタへの展開事例

Zabbix はサーバやネットワーク機器の監視だけでなく、アイデア次第で活用の幅を広げることができる。サーバの運用には周囲の温湿度環境も重要であることから、水沢キャンパスのシステム管理室の環境モニタリングへの応用も試みた。これまではネットワーク型の温湿度センサ（おんどとり、T&D）によりモニタしていたが、データの取得は専用のソフトで行っていた。管理者以外の人々がデータにアクセスするには、そのソフトをインストールしたり、データを別途提供するなど、手間が多かった。そのため情報の共有もあまりなされていなかった。しかし、Zabbix でデータを収集しグラフ化すれば Web インタフェースにアクセスするだけでデータを閲覧できるので、容易に温湿度情報を共有することができると考えた。これを実現するため、メーカーから提供された通信仕様書を参考に、Python でデータを取得するコードを組み、さらにその内容を Zabbix サーバへ送信するスクリプトを cron で定期実行させた。

一方、近年はシングルボードコンピュータであるラズベリーパイを用いた IoT センサシステムの開発が安価かつ容易にできるようになっている。既製品のセンサを使うよりも自分の環境にあった柔軟なセンサシステムを構築でき、コストも抑えられる。今回は試験的に温湿度センサモジュール（DHT11, Aosong Guangzhou Electronics Co., Ltd.）とラズベリーパイシステムを構築した。収集した温湿度データはグラフ化はもちろんのこと、後述のトリガーの設定により、閾値を越えた場合は障害通知されるようにした。

7. 障害発生時の通知機能

Zabbix には障害検知の機能として主に「トリガー」と「アクション」という二つの機能がある。トリガーはアイテム（監視項目）に任意の閾値を設定することで、それを越えた場合に障害と判断する機能である。障害のレベルも 6 段階に設定でき、監視項目や運用方針に応じて柔軟に設定可能である。アクションは障害が発生した後にユーザに通知する機能であり、メール送信、任意のスクリプト実行など色々な方法で通知することができる。今回は Webhook により MS365 の Teams に通知する機能を利用した。その理由として、メールの場合一日に多くのメールを受信するため、障害通知のメールを見逃してしまう可能性が高いからである。Teams の場合は、アプリがインストールされていれば、スマートフォンでも通知を受け取ることができるという利点もある。

8. まとめ

Zabbix を用いた統合監視システムの導入について報告した。Zabbix の導入により IT インフラ全般の効率的な監視が実現できた。また、環境データのモニタリングにも応用することができた。一方で、監視対象が多かったこともあり設定には手間が掛かった。監視設定の簡素化のため、「ネットワークディスカバリ」機能の活用を検討したい。この機能は新たに接続された機器を自動で監視対象に加えることができる。その他にも役立つような機能が豊富にあるので積極的に取り込み、さらなる運用監視の効率化を目指したい。

アレイアンテナの雑音温度校正 Noise Calibration for an array antenna

○川口則幸（国立天文台名誉教授）（Noriyuki Kawaguchi(NAOJ)）

概要(Abstract)

アレイアンテナは多数のアレイ素子で構成され、各素子アンテナで受信した信号を合成して高感度（高利得）を得るものである。アレイアンテナの雑音温度校正を従来の液体窒素校正で行うことには大きな困難が生じる。そこで、液体窒素を用いない新しい校正法を提案する。この方法は大気中の水蒸気量を計測するラジオメータへの応用を目的に開発されたものだが、アレイアンテナの校正にも特に有効である。

1. 水蒸気ラジオメータの液体窒素校正

図 1 及び図 2 に水蒸気ラジオメータを運用している上海天文台とタイ天文台での液体窒素校正の様子を示す。液体窒素の校正作業は大変で、校正頻度も年に 1 回程度にとどまっている。



図 1 上海天文台での液体窒素校正

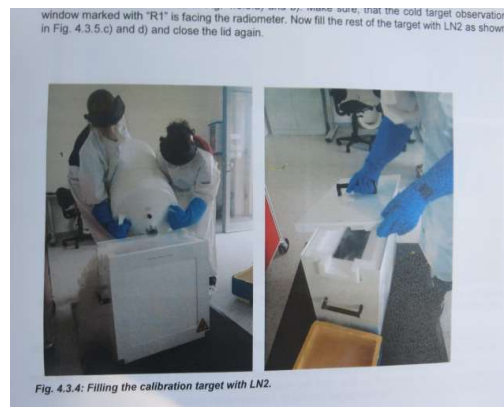


図 2 タイ天文台での液体窒素校正

2. 現状のアレイアンテナの校正



図 3 フェーズドアレイフィード



図 4 フェーズドアレイフィードの液体窒素校正

現在、世界の電波天文観測分野ではアレイアンテナの導入が積極的に進められている。特にオーストラリアでは SKA のパイロットプロジェクトとして「ASCAP」システムを整備し観測を開始している。このシステムでは、パラボラアンテナの一次焦点面にフェーズドアレイフィードを取り付け、マルチビームの受信を可能にしている（図 3）。このアレイフィードは直径が 1.2 m もあり、水蒸気ラジオメータの液体窒素校正のように簡単に行えない。クレーンを動員して行う必要がある（図 4）。

Roshi_2015

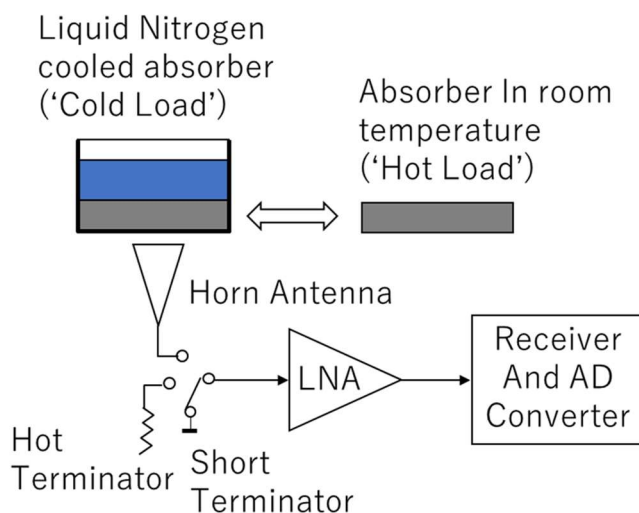


図 5 GB100mに搭載されるフェーズドアレイフィード

また、米国のグリーンバンク 100 m アンテナにもフェーズドアレイフィードが搭載された（図 5）。また、SKA の将来計画ではアパチャーアレイの建設案も検討されている。この計画では、250 のアレイ素子を直径 56 m に配置する。このような大型のアレイでは、もはや従来方式の液体窒素校正を行うことは不可能である。

3. 新しい校正法の提案

将来の大型アレイアンテナにも応用可能な新しい校正方法（特許申請済み）。従来の方法では、



ホーンアンテナの前面に液体窒素で 80 K に冷却された無反射吸収体（Cold）と常温の吸収体（Hot）を交互に置き、その電力比を計測することで受信機雑音温度の校正を行ってきた。その受信電力比は

$$Y = \frac{T_{cold} + T_{rx}}{T_{hot} + T_{rx}}$$

と書け、Y の計測から T_{cold} , T_{hot} を既知として受信機雑音温度 T_{rx} を求める。

この液体窒素法で T_{rx} が校正されると天空の雑音温度 T_{sky} が次式から求められる。

$$Y_{hs} = \frac{T_{hot} + T_r}{T_{sky} + T_r}$$

図 6 従来の校正法と新しい校正法

Y_{hs} は受信機雑音を含む常温吸収体とスカイの雑音電力比である。システム雑音温度はスカイ雑音温度と受信機雑音温度の合計で、電波望遠鏡の感度を決定する重要なパラメータである。システム雑音温度だけであれば、ノイズダイオードを用いた雑音注入法など簡便な方法があるが、この方法ではスカイ雑音と受信機雑音の分離が行えず、システム雑音の変化がスカイ雑音の変化か受信機雑音の変化かを区別することはできない。

新しい校正方法は、図 6 に示すように受信機の入力部にスイッチを設け、アンテナ、無反射終端器、完全反射終端を切り替えるものである。無反射終端器の雑音温度を T_{hot} 、スカイ雑音温度を T_{sky} 、受信機雑音温度を T_r 、完全反射体の雑音温度を T_s とすると Hot と完全反射体の受信電力比 Y_{hs} は

$$Y_{hs} = \frac{T_{hot} + T_r}{T_s + T_r}$$

と書け、 $T_s = kT_r$ とすると $T_r = \frac{T_{hot}}{(k+1)Y_{hs}-1}$ と Y_{hs} の計測結果から受信機雑音温度の計測が可能になる。ここで、 k は半導体素子のパラメータに依存する値（図 7）で、フォワード雑音とリバース雑音の比で、事前に校正しておく必要はあるがほぼ定数であるとみなせる（図 7）。

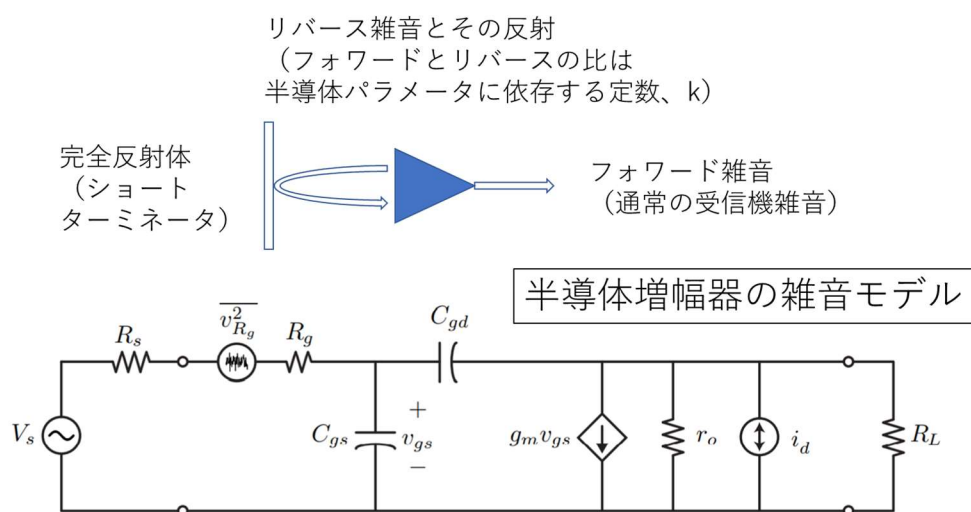


図 7 半導体の雑音パラメータとフォワード/リバース比 k

この方法の確からしさを検証するために、スカイ雑音として液体窒素で冷却した無反射吸収体と常温の吸収体の雑音温度の計測を行った。その結果を図 8、図 9 に示す。図に示す 10 回の試行結果では正しく吸収体の環境温度を反映しており、本新校正法が正しいことを示している。同様の計測を 10 日間連続で試験したところ、長時間安定度についても検証された。

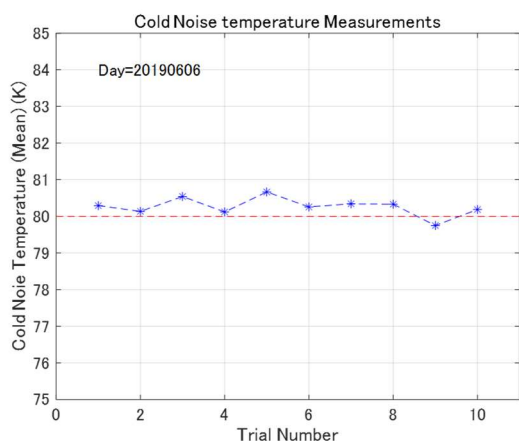


図 8 冷却アブソーバーの雑音温度計測結果

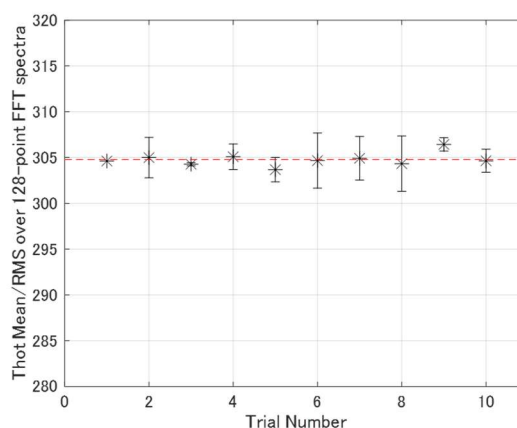


図 9 常温アブソーバーの雑音温度計測結果

4. 火山噴火予知とアレイ型ラジオメータ

2014 年 9 月に開催された第 34 回技術シンポジウム@上松において、近くの御岳山が爆発し 56 名が犠牲になった（図 10）。

Disaster in Ontake in 2014

第 34 回技術シンポジウム@上松(2014_9)



図 10 御嶽山の爆発

前兆現象はほとんどなく、水蒸気爆発を伴い突然噴火した。火山研究によると水蒸気量が噴火直前に急速に減少することが報告されている。また、2018 年 1 月 23 日 10 時 02 分頃に白根火山が爆発した。爆発個所は当初予定していない場所で噴火が起きた。気象庁報告では「有史以降初めて本白根山で噴火が発生した。近年の噴火活動はすべて水蒸気爆発である」としている。第 39 回技術シンポジウムにて報告した水蒸気ラジオメータをアレイ化することによって、目には見えない火山の水蒸気噴出状況を常時監視することが可能になれば（図 11）、「どこで」「いつ」水蒸気爆発が起きそうかの予知研究に役立てることができる。しかし、ラジオメータでは受信電力を輝度温度に換算する必要があり、ここで提案する新校正法は特に有効であると思われる。

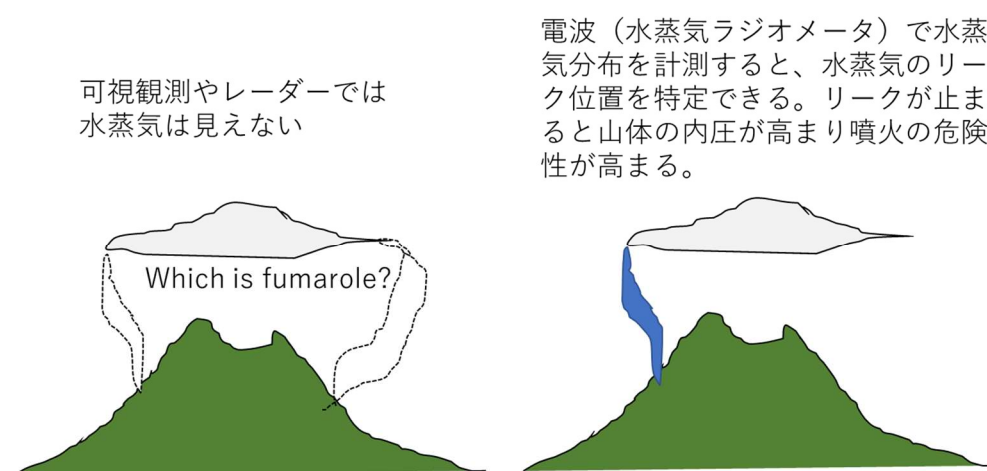


図 11 アレイ型水蒸気ラジオメータによる火山上空の水蒸気分布の計測

5. おわりに

本研究会の実行委員会の各位に感謝いたします。リモート開催でしたが、有意義な情報交換と研究交流が行えました。

Docker を用いたアプリケーション長期保存の試み ALMA データの Calibrated MeasurementSet 生成システムの開発を通じて

○林洋平、 中里剛、森田英輔、小杉城治
(国立天文台・アルマプロジェクト)

概要(Abstract)

開発から時間が経過したアプリケーションは依存するライブラリや OS を準備するのに手間や困難をきたすことがある。我々は ALMA データの Calibrated MeasurementSet 生成システムでこの課題に直面し、仮想化技術である Docker を用いて課題解決を行った。従来の仮想化技術との違いや将来の起きうる課題について述べる。

1. MS 生成システム開発の背景

アルマ望遠鏡はチリのアタカマ砂漠に設置された電波望遠鏡である¹。アルマプロジェクトでは、観測時のキャリブレーションで用いられた同一バージョンの CASA というソフトウェアを使用し Calibrated MeasurementSet (Calibrated MS) という形式のデータを生成しなければならないユースケースが存在する。電波望遠鏡の場合、ユーザの個別の科学目的に応じて Calibrated MS から FITS 形式のデータを生成するのが一般的である。Calibrated MS は ASA (Alma Science Archive)² では提供していない。ユーザは ASA から取得した Raw Data とキャリブレーションスクリプトを用い、みずからの計算機環境で CASA を用いて Calibrated MS を生成する必要がある。一方、一部のバージョンの CASA は RedHat6 上でのみ動作するが、RedHat6 は 2020 年 11 月にサポート終了 (EoL) を迎えた[1]。RedHat6 でのみ動作する CASA が必要な事例が存在し、課題となっている。

2. Calibrated MS 生成システム

この課題に対してアルマプロジェクトの日本ノードでは、昨年ユーザの代理で Calibrated MS を生成・提供するサービスを開始した。Calibrated MS 生成システム[2]は、アルマの担当者による Calibrated MS 生成を支援する目的で我々が開発を行った。

Calibrated MS 生成システムでは、RedHat の EoL に対処するため、仮想化技術の一種である Docker を用い解決を図った。Docker を用いれば、サポート期間内である RedHat7 上で RedHat6 のアプリケーションを動作させることが可能である。今回、我々は Docker Hub で提供されている RedHat と互換性がある CentOS 6 のイメージ (KVM など従来の仮想化技術の仮想マシン (VM) に相当) をベースに、CASA 動作に必要な Python、ImageMagick などのライブラリ、CASA をインストールすることにより CASA の実行環境であるイメージを構築した。

本システムを用い Calibrated MS を生成する場合、担当者は本システムの入ったサーバに ssh でログインし、引数としてデータ ID を本システムに与えるだけで、あとは自動で処理が進む。まず本システ

¹ <https://researchers.alma-telescope.jp/j/>

² <https://almascience.org/asax/>

表 1. 実行性・再現性、保守性、利活用性からみたソフトウェアの長期保存

長期保存の観点		物理マシン	Docker	ハイパーバイザ 一型仮想化	ホスト型仮想化
1. 実行性・ 再現性	アプリケーションの動作維持、解析結果の再現	△	◎	○	○
2. 保守性	実行環境の維持	困難	◎	○	○
	マイグレーション	面倒・困難	容易	容易	容易
3. 利活用性	アプリケーション実行までの時間	◎	◎	△	△
	アプリケーション実行のパフォーマンス	◎	◎	◎	△
	大量処理（拡張性）	ノード増加に 難あり	◎	◎	◎

ムが処理に必要な Raw Data やキャリブレーションスクリプトを ASA から取得する。その後システムは、キャリブレーションスクリプトの動作に必要な CASA の入ったイメージを起動し、キャリブレーションスクリプトを実行する。最終的に Calibrated MS が生成されるので、担当者はこれをユーザに提供することになる。

3. アプリケーションの長期保存

実行性・再現性、保守性、利活用性の3つの観点からアプリケーションの長期保存について表1にまとめた。アプリケーションの長期保存を実現する方法として物理マシン、Docker、ハイパーバイザー型仮想化、ホスト型仮想化の4環境の比較をおこなう。後者2つは Docker 以前の従来の仮想化技術である。4環境のアーキテクチャを図1に示す。今回の検証では、長期保存対象のアプリケーションは複数のバージョンが存在するという仮定に立つ。またアーキテクチャは、物理マシンの場合、直接、1物理マシンに OS やライブラリ、複数のバージョンのアプリケーションを同居させることとする。アプリケーションのバージョンごとに物理マシンを用意するのは非現実的なためである。一方の仮想化技術を用

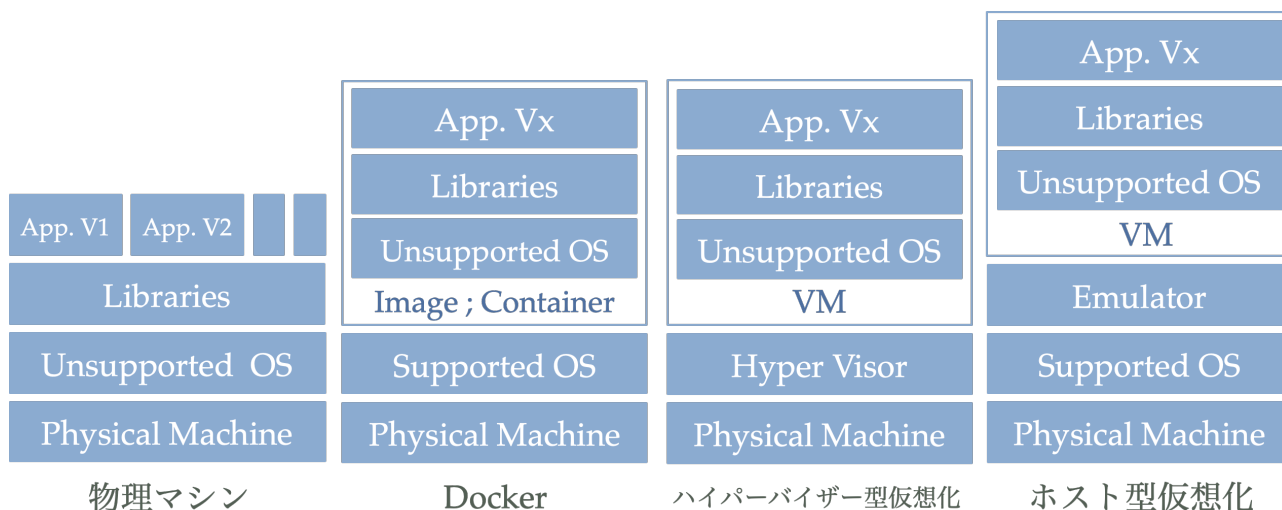


図 1. ソフトウェア長期保存を実現する環境のアーキテクチャ

いる場合、アプリケーションのバージョン単位でカプセル化することとする。

3.1 実行性・再現性：アプリケーションの動作維持・実行結果の再現

アプリケーションの動作維持は将来にわたりアプリケーションが実行できるという観点から必須条件である。また、結果の再現性も **CASA** のように計算目的のアプリケーションでは必須条件である。これの実現にはバージョン単位でアプリケーションおよび依存ライブラリを同一にする必要がある。

物理マシンの場合、複数バージョンのソフトウェアを同居させる構成であり、アプリケーションのバージョンごとに使用するライブラリの制御が必要なことがあり実行環境維持は困難を伴う。

一方、仮想化の場合、長期保存対象のソフトウェアのバージョンごとにライブラリがカプセル化されるため、実行環境の維持が容易である。特に **Docker** はイメージの実行により変更された内容は破棄されるというイミュータブルな性質があり、仮に環境を大幅に変更しても、次回にアプリケーションを実行するときには変更内容は破棄される。残り 2 つの従来の仮想化技術の **VM** は常に変化するため、ライブラリに変更を加えられる問題がある。**VM** の利用時に、**VM** のコピーで環境維持が可能だが、**Docker** に比べ注意を要する上、システムの作り込みが必要である。

3.2 保守性

保守性は環境維持の容易さやマイグレーションの容易さであり、将来に渡りアプリケーションの動作を担保するには必須条件である。

3.2.1 実行環境の維持

仮想化技術の各評価およびその理由は実行性・再現性と同じだが、物理マシンに大きな違いがある。物理マシン上に直接構築した環境は、何らかの操作でライブラリのリンクが変更されたり、実行に必要なファイルが壊れたりすることにより変化しやすい。実行環境維持には手間が多く、困難なことが多い。

3.2.2 マイグレーション

物理マシンの場合、新しいハードウェアでのライブラリやアプリケーションのインストール作業が必要であり、開発から時間の経過したライブラリは入手困難なこともあり困難も予想される。仮想化のマイグレーションは、非常に簡単である。**VM** やイメージはライブラリの入手が容易なときに一度作るだけで良い。**Docker** の場合、イメージはリポジトリで管理されているため、サーバに **Docker** をインストールするだけで移行作業は終わる。残り 2 つの仮想化技術の場合、**VM** を旧サーバから移行する必要がある、作業が生じる。

3.3 利活用

利活用性は直接的に長期保存に関係するわけではないが、利用されてこそ長期保存する意義が生まれるため重要な観点である。

3.3.1 アプリケーション実行までの時間

仮想化技術の場合、アプリケーションを利用するためにはアプリケーションの起動の前にイメージや **VM** を起動する必要がある。

従来の仮想化技術の場合、**VM** の起動には数分の時間が発生する。そのため予め起動しておきアプリケーション利用に備える方法も考えられるが、使っていないときに消費する全バージョンのソフトウェアの **VM** で使用するメモリや CPU の待機リソースは無視できない。保守性の観点から、イミュータブル

ルな環境実現は必須である。よって、リクエストの度に VM を起動する必要がある。

一方 Docker の場合、起動が数 mm 秒であり無視できるため従来の仮想化技術に比べて優位である。

3.3.2 アプリケーション実行のパフォーマンス

ホスト型仮想化は OS 上で OS を実行する性質上、オーバーヘッドが大きく、パフォーマンスへの影響は避けられない。

Docker の場合、一見 OS 上で OS が動いているように見えるが、イメージ内の OS は単なるライブラリに過ぎず、Kernel はホストのものを使用しているため物理マシンでの動作と同等である。

3.3.3 大量処理

様々な実装がありうるが、ここではジョブキューを用い、処理を捌いていく想定とする。スケーラビリティはノードを増やすことにより実現することとする。この実装の場合、すべての方式で大量処理が可能である。ただし、物理マシンの場合、環境構築が面倒なためノード追加が大変である。仮想化技術の場合、仮想化環境を用意するだけである。従来の仮想化技術の場合、キューを読み込み、VM を起動する必要から、コマンドラインで VM を操作する Vagrant (-exec) などを用いる必要がある。

3.4 アプリケーション長期保存の観点

アプリケーションの長期保存にとって実行性・再現性や保守性は必要不可欠である。一方、利活用性はユースケース次第では無意味、あるいは提示した観点以外の観点もありうる。例えばメモリや CPU のリソース消費が少ないアプリケーションの場合、従来の仮想化技術の採用でもよいかもしれない。

3.5 Docker をアプリケーション長期保存に用いる際の注意事項

セキュリティレベルはソフトウェアが開発された時点のものになるためインターネットに直接触れる環境での利用は控えるべきある。また、ハードウェアに依存したソフトウェア、特定のデバイスをコントロールするようなソフトウェアの場合、ハードウェアの保持も考慮する必要がある。最後に Linux Kernel の後方互換性の注意点を指摘する。Docker はホスト OS の Kernel を共用している。Linux Kernel は後方互換性を保持する方針で開発が進められているが、影響範囲が軽微ながら破られることもあった [3]。OS メジャーアップデート時にはイメージの動作確認、場合によっては改修が必要かもしれない。

4 まとめ

前章では Calibrated MS システムの事例を念頭におきつつ、アプリケーションの長期保存の検証を行った。全般的に Docker が良好であり、Docker を用いた実装は Calibrated MS 生成システムにとって最適な選択であったと考えている。

参考文献

- [1] Red Hat, Inc. “Red Hat Enterprise Linux Life Cycle” <https://access.redhat.com/support/policy/updates/errata>
- [2] Hayashi Y. et al. 2020, “Automated system to generate calibrated MeasurementSet in East Asian ALMA Regional Center” ADASS XXX.
- [3] Linux Foundation 2015. “LSB 5.0 Release Notes”. Wayback Machine, <https://web.archive.org/web/20170708050131/https://wiki.linuxfoundation.org/en/ReleaseNotes50>

重力波望遠鏡における環境雑音対策

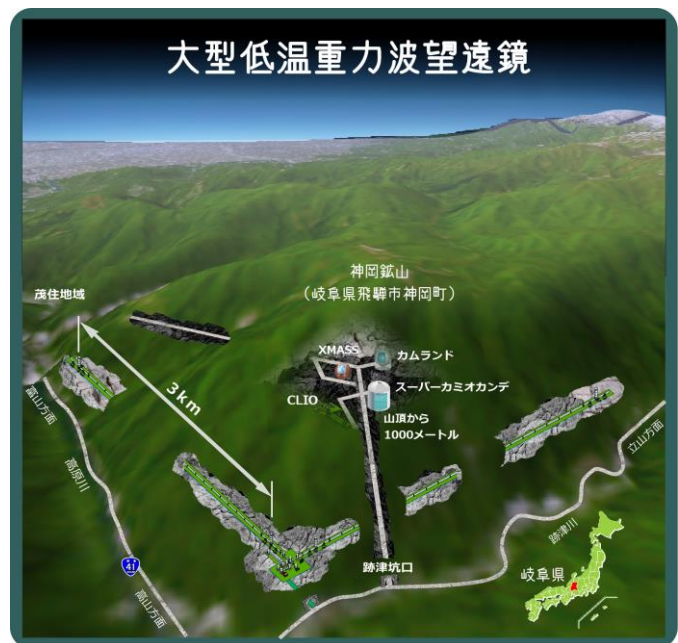
鷲見貴生（国立天文台重力波プロジェクト） on behalf of the KAGRA collation

概要(Abstract)

重力波とはアインシュタインの一般相対性理論によって記述される「時空のさざなみ」であり、ブラックホールや中性子星など非常に重い天体の連星合体や超新星爆発などによって発生する。日本では国立天文台も参加する KAGRA(岐阜県飛騨市)の建設が完了し、2020 年 4 月に 2 週間の国際共同観測を行った。本講演では、非常に微弱な重力波信号を捉える際の妨げとなる環境雑音への対策について紹介する。

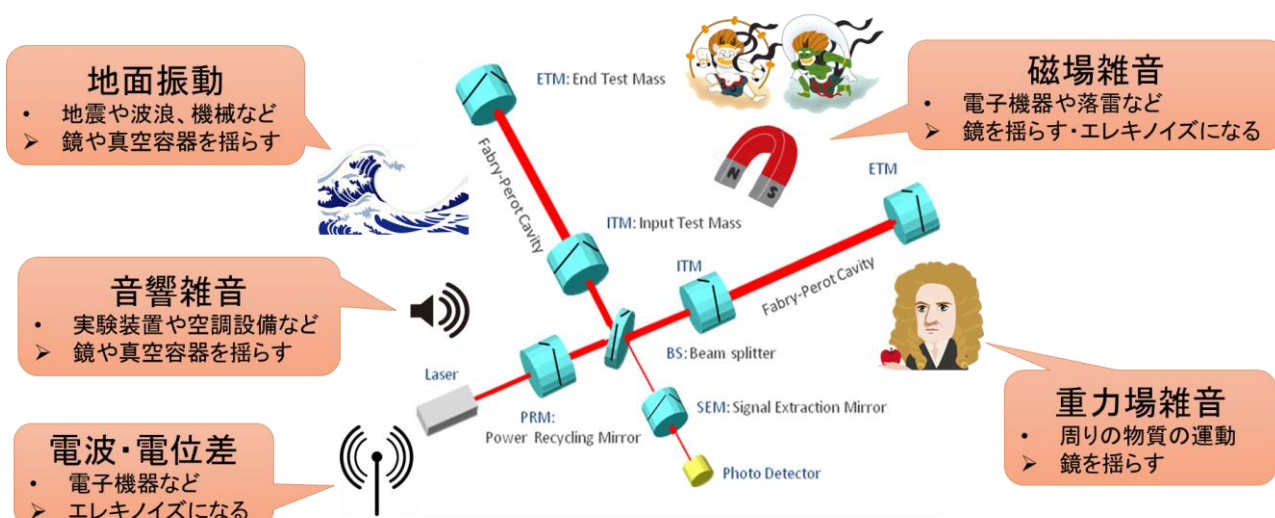
1. 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA は岐阜県飛騨市神岡鉱山にある重力波望遠鏡である [1]。基線長 3km のレーザー干渉計を用いて、10Hz から数 kHz における重力波信号を捉える。2020 年 4 月には、ドイツの重力波検出器 GEO600 との初の国際共同観測 (O3GK)を実施した。2021 年 2 月現在は、真空容器を大気開放し装置のアップグレード作業が進行中である。世界の他の重力波検出器が全て地上にあることに対し、KAGRA は地下施設で実験を行うことで地面振動雑音を地上の約 1/100 に低減し、さらに 13m の振子型防振装置によって重力波観測帯域の振動雑音を極限まで低減している。また、テストマスと呼ばれる鏡(約 20kg のサファイア、4 個)を 20K の極低温に冷却することで、熱雑音も低減する。



2. 重力波観測における環境雑音

重力波望遠鏡の感度は、主に地面振動雑音・熱雑音・量子雑音によって決まるという説明がなされる。これらは実験のデザイン段階で決定されるため「原理雑音」と呼ばれることもあり、比較的簡単に予想することができる。一方実際の実験系では、他にも様々な技術的理由による雑音が混入する。実際に O3GK の際の KAGRA では、最も感度の良い 200~400Hz 付近において実験室内の音に由来する雑音が支配的となった。この音響雑音のように、実験室内の装置や地質気象現象などの様々な環境に由来する雑音を環境雑音と呼び、これに対する取り組みは Physical Environmental Monitoring (PEM) と呼ばれる。



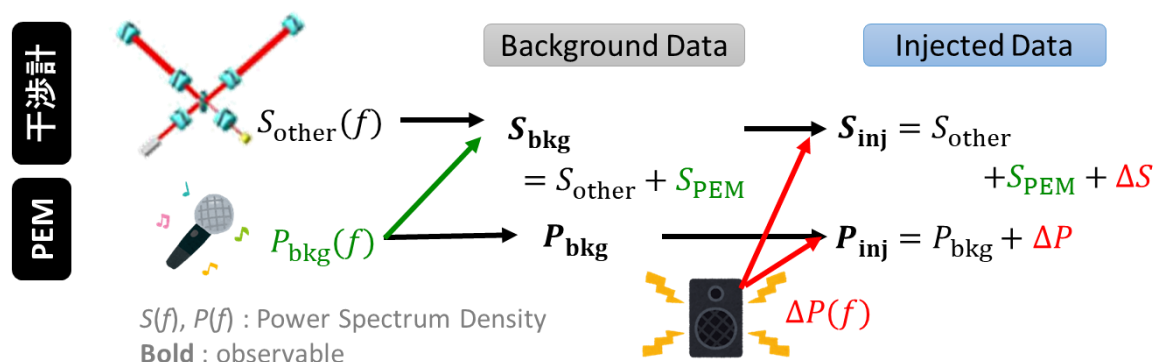
➡ Targets of Physical Environmental Monitoring (PEM)

3. KAGRA における環境雑音の評価・対策

これらの環境雑音を監視するため、KAGRA では地下実験施設内に地震計・加速度計・マイクロフォン・磁力計・電圧計・温湿度計・地物干渉計、地上に気象計や落雷検知器といった様々なセンサーを合計 100 個以上設置し、常時データ取得を行っている [2]。KAGRA の重力波信号に直接雑音となる周波数帯域だけでなく、干渉計制御に影響する基線長や室温などの長期変動も対象としている。また安価で軽量の Chromebook PC と USB センサーを組み合わせたポータブル PEM システムを開発し、電源やケーブルリングの制限を受けず広大な地下実験施設内で効率よく環境雑音の発生源を同定することが可能となった。2019 年 10 月にはこのシステムをイタリアの重力波望遠鏡 Virgo に持参して環境雑音源の探索を行い、感度向上に貢献した [3]。



環境雑音が干渉計信号の雑音成分として実際にどの程度寄与しているかは、人工的に環境雑音を増加させて干渉計応答を見る雑音注入試験(PEM injection)によって定量評価される。この手法は LIGO や Virgo など海外の重力波望遠鏡でも広く使われているが、我々は従来の周波数保存を仮定したモデルを



拡張し、環境雑音が異なる周波数の干渉計信号に影響を及ぼすモデルを新たに定式化した [4]。前章で述べた O3GK に現れる音響雑音成分は、この手法により評価されたものである。

4. KAGRA の信号に見られた環境雑音事象の例

ここでは KAGRA の試運転中および単独観測期間中に見られた環境雑音由来の事象を紹介する。

1) 実験設備由来の環境雑音の例：コンプレッサーの減圧

2020 年 2 月の KAGRA 単独観測の際、重力波観測レンジがおよそ 2.5 時間ごとに定期的に悪化する現象が見られた。このような挙動は間欠運転する装置に由来する場合が多く、実際に PEM のマイクによって、重力波信号検出ポート近くのコンプレッサーによる音・振動が原因と判明した。これは緊急時に真空容器を閉じるゲートバルブのためのものであり、観測中も電源を切ることができない装置であるが、防音と防振を施すことで即座に解決することができた。

2) 自然現象由来の環境雑音の例：落雷

2020 年 3 月 22 日昼頃、KAGRA の試運転中にすぐ付近で落雷があり、それと同時に干渉計にもパルス状の信号が観測された。落雷検知器や坑内の磁力計にも同時にパルスが見られた一方、加速度計など他のセンサーには反応がなかったことから、データ収集系のノイズではなく重力波望遠鏡自身が電磁波の影響を受けたものであると解釈できる。また、これは重力波信号にフェイクする突発性雑音を PEM によって同定した良い例となった。現在、地下施設における落雷の影響についての論文を準備中であり、近々投稿予定である。

5. まとめと展望

今回紹介したように、環境雑音は(干渉計や防振系などの”花形”と比べてあまり目立たないが)重力波観測において非常に重要である。その性質上系統的に取り組むことは難しく、どうしても対処療法的になってしまうといった困難がある一方、様々な種類のセンサーや分野の知識を活用し活動範囲も幅広いため、非常に面白い分野でもある。

現在 KAGRA は 2022 年度に開始予定の次の観測(O4)に向けてアップグレード作業が進行中であり、PEM でも水流計や微気圧振動計、高感度磁力計といった新たなセンサーの導入を進めている。また次の観測では、今回はかなり限定的な実施となった雑音注入試験をさまざまな場所・種類に対して実施したいと考えている。さらに、KAGRA の特徴である低温鏡・地下環境は将来計画の Einstein Telescope などでも採用される予定であるため、KAGRA の環境雑音評価はこれらにとっても非常に重要な情報に位置づけられている。

Reference

- [1] T. Akutsu *et.al.* (KAGRA collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. (2020) ptaa125
- [2] T. Akutsu *et.al.* (KAGRA collaboration), [arXiv:2009.09305]
- [3] I. Fiori, T. Washimi *et.al.*, Galaxies 2020, 8(4), 82
- [4] T. Washimi *et.al.*, [arXiv:2012.09294]

先端技術センターにおける光学設計開発Ⅲ –2020 年度のトピックス–

○都築俊宏（国立天文台 先端技術センター）

概要 (Abstract)

国立天文台先端技術センターでは、光学エンジニアがプロジェクト横断的に関与することにより、紫外線から電波までさまざまな波長のプロジェクトでの光学設計開発に貢献してきた。本発表では今年度の活動の概要を報告するとともに、先端技術センターで新規導入した装置（高精度 Fizeau 干渉計、高精度ヘキサポッド、高速高精度オートコリメータ、オープンクリーンベンチ）の概要説明と使用例について述べる。

1. ATC の光学設計開発の概要

国立天文台先端技術センター（Advanced Technology Center、以下 ATC）の光学設計開発は、主に(1) 国立天文台の各プロジェクトの依頼、(2) 大学・研究機関からの共同開発研究申請 に応じる形で、光学設計・解析・測定・調達などの天文光学装置開発を実施してきた。その結果として、対象は地上観測装置から宇宙用観測装置まで、波長は紫外光から電波までの幅広い天文観測装置での開発実績を持つに至った。図 1 に ATC の光学設計開発が現在までに関与したプロジェクトと依頼の流れを示す。

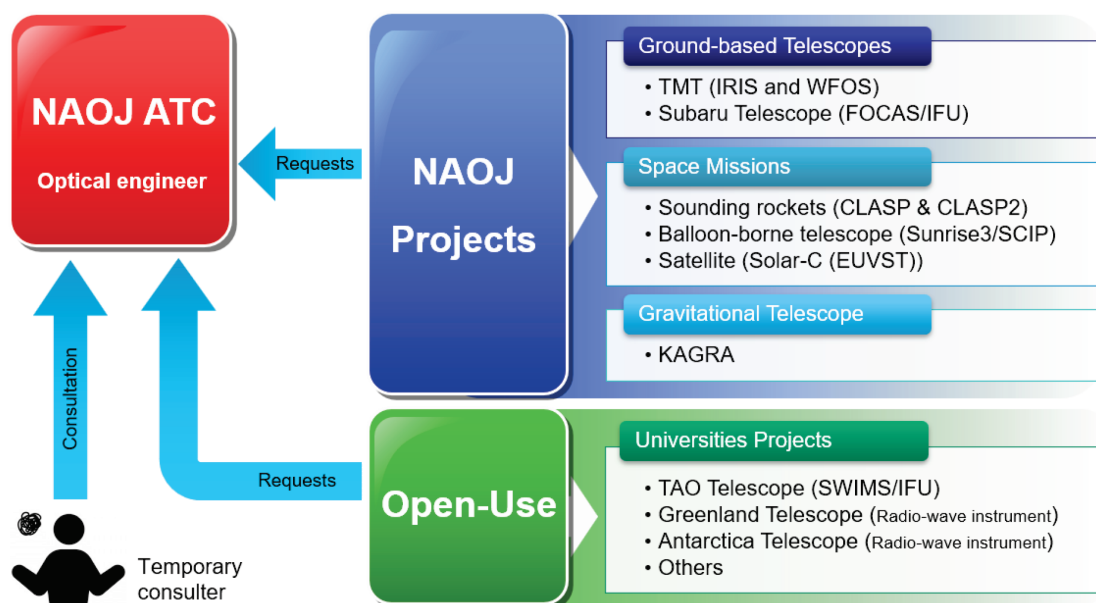


図 1 ATC の光学設計開発の開発実績

このようなプロジェクト横断的な開発はエンジニア、プロジェクトの双方に恩恵がある。エンジニア側の一番大きなメリットは、複数プロジェクトの開発に携わることで”生の”技術的知見を継続的に得られる点である。これにより、複数プロジェクトでの技術的知見を蓄積できるだけでなく、現在の開発に必要な知識・スキルを維持することができる。プロジェクト側の一番大きなメリットは、エンジニアが他のプロジェクトで得た知見を利用できる点である。それにより、開発リスク・開発コストの低減、

開発期間の短縮につながり、結果として開発の確実化、効率化につなげることができる。このような双方のメリットを最大化するため、ATC の光学設計開発は他のプロジェクトで役立つ可能性のある開発内容について技術シンポジウムの機会でも報告してきた。今年度は、台内競争資金にて導入した新規光学測定装置の活用促進につなげるため、新規導入装置の概要、想定使用例、および活用実績について報告する。

2. 新規導入した光学測定装置の紹介

2.1 導入の背景

ATC 内の共用光学測定装置の多くは、すばる望遠鏡や Solar-B の開発時代（20 年ほど前）に納入されたものであり、現在および将来開発に必要な高精度な光学測定に対応できないケースがあった。その現状に対し、2019 年度より早野准教授（ATC 副センター長、TMT/IRIS 日本側マネージャ）を代表とした台内競争的資金の申請による装置更新を検討してきた。新装置の仕様策定にあたっては、ATC が複数プロジェクトに関与していることを活かし、多種多様な国立天文台プロジェクト（地上：TMT、すばる、KAGRA upgrade、スペース：SUNRISE、Solar-C など）において可能な限り有効に使用できるように、ヒアリングなどで要望を収集して決定した。2 年にわたる台内競争的資金への申請の結果、現在では 4 つの光学測定装置が導入され、一部は既に活用され成果が出ている。以下に簡単に紹介する。

2.2 高精度 Fizeau 干渉計：AccuFiz E100S (4D Technology)

Fizeau 干渉計は面精度、透過波面誤差を測定できる光学装置である（外観は図 2 参照）。本機種は ATC がすでに所有している Fizeau 干渉計（Zygo 社 GPI XP）と同等の口径（4 inch）、波長（632.8 nm）の干渉計であるが、解像度が 1200×1200 pixels（12-bit）、RMS 再現性 0.03 nm（1 σ ）、RMS 測定精度 0.3 nm（1 σ ）と基本性能は改善している。大きな特徴は以下の 5 つである。

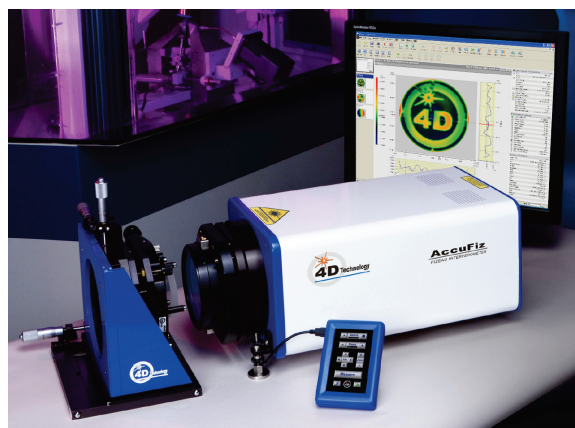


図 2 AccuFiz 外観（4D Technology Web より）

- 1) 小型・軽量：干渉計を移動させる用途に適する。
縦置き測定も可能
- 2) Spatial Carrier 方式の測定が可能：1 ショットで測定できるため振動や空気の流れがある悪条件でも測定可能
- 3) 偏光切り替えが可能：出射光を円偏光だけでなく互いに直交する直線偏光に変更可能
- 4) 参照平面の電動チップチルト&リモート制御：長距離測定時に便利
- 5) 低コヒーレンス長光源への切り替えが可能：平行平板測定、媒質屈折率分布の測定が可能

想定用途の一つは Solar-C (EUVST) などの望遠鏡主鏡の面精度測定である。望遠鏡の大口径主鏡の面精度を測定する場合、重量がある望遠鏡主鏡自体ではなく干渉計をアライメントした方がよい場合がある。

その際、軽量で可搬性のある本機種は有用といえる。また、望遠鏡主鏡は一般的に曲率をもつため、望遠鏡主鏡と干渉計の距離を大きくとる必要がある。その場合、同じ光学定盤に乗っていないことによる振動や、間隔が離れていることによる空気のゆらぎの影響が測定結果に影響を与える。そのような計測のでは、Spatial Carrier 方式による瞬時計測が有効になる。想定用途の 2 つ目は、重力波望遠鏡 KAGRA のサファイアミラーの透過波面の偏光測定である。KAGRA のミラーで使用されているサファイアは複屈折材料であるため、偏光依存性がある。KAGRA は直線偏光のレーザーを使用するため、このサファイアミラーの実際の透過波面を測定するためには、通常の間偏光での測定に加え、直線偏光での測定が必要となる。加えて、KAGRA ミラーは前面が緩やかな曲率、後面は若干のウェッジ角がついている平面であり、ほぼ平行平板に近い。そのため、平行平板測定ができる低コヒーレンス長光源による測定が必要となる。他にも様々な用途が考えられる。

2.3 高精度 6 軸ヘキサポッド : H850.H2 (PI)

PI 社の H850.H2 は高精度、広ダイナミックレンジ、高耐荷重の特徴を持つ 6 軸位置決め装置である (外観は図 3 参照)。基本性能を以下に示す。

- ・ 最小駆動量 (シフト) 0.3 μm (XY)、0.2 μm (Z)、
(チルト) 3 μrad (XY)、5 μrad (Z)、
- ・ 駆動レンジ (シフト) 50 mm (XY)、25 mm (Z)、
(チルト) 15 度 (XY)、30 度 (Z)、
- ・ 耐荷重 : 250 kg



図 3 H850.H2 外観 (PI JAPAN Web より)

想定用途の一つは 2.2 で記載した Solar-C (EUVST) などの望遠鏡主鏡の面精度測定である。ヘキサポッドと干渉計を接続することで、干渉測定時のアライメントにおける干渉計の位置、姿勢の微調整に使用できる。

2.4 高速高精度オートコリメータ : TA 300-57 UltraSpec (TRIOPTICS)

オートコリメータは非接触で角度を測定する光学機器である (外観は図 4 参照)。TRIOPTICS 社の TA 300-57 は超高精度 (分解能: 0.005 秒角、絶対精度: 0.05 秒角)、高速対応 (130 Hz) が特徴である。本機種はすでに導入され、すでに SUNRISE の高速駆動スキャンミラー機構の動作検証で活用された。SUNRISE のスキャンミラーの開発では、不規則に短時間 (~30 msec) のミラー角度変位現象が発生していたが、本機種による高速サンプリングにより当時難航していた不具合の原因解明につながった。



図 4 オートコリメータ外観

2.5 オープンクリーンベンチ：KOACH C900-F (興研)

興研株式会社のオープンクリーンベンチ KOACH は 2 つのプッシュフードを対向させて設置することで気流の流れを作り高い清浄度のクリーンゾーンを形成できる装置である。KOACH C900-F は ISO クラス 1 のクリーンゾーン化が可能である（外観は図 5 参照）。このクリーンベンチの大きな活用例は、クリーン環境でない既存測定器との組み合わせが可能であることである。既に活用された例としては、以下の 2 つがある。



図 5 オープンクリーンベンチ外観

- 1) 3次元測定器 (LEGEX) との組み合わせによるクリーン環境下 3次元測定：

SUNRISE プロジェクトでは、ATC が保有する高精度の既存 3次元測定器 (LEGEX) とオープンクリーンベンチ KOACH を組み合わせることで、飛翔体の光学初期アライメントを実施した（図 6 参照）。通常、飛翔体観測装置はクリーンルーム内で組み立てられるため、3次元測定装置もクリーンルーム内に持ち込む必要があるが、KOACH を活用することでクリーンルーム外の既存高精度測定器を使用することができた。

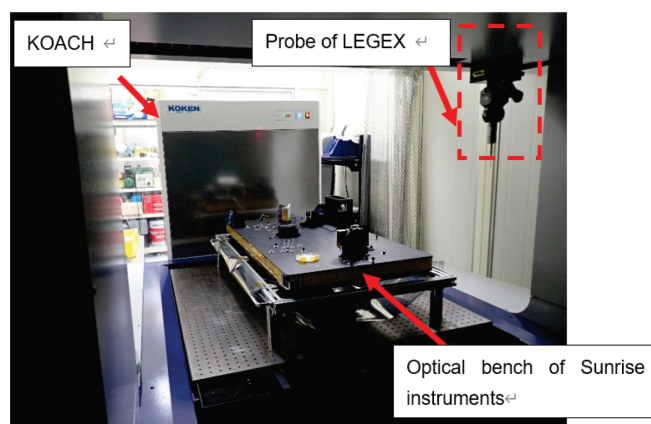


図 6 KOACH と 3次元測定器 (LEGEX) の組み合わせによる飛翔体初期アライメント

- 2) Fizeau 干渉計 (Zygo) との組み合わせによるフライト品の波面測定：

SUNRISE3 プロジェクトでは、ATC が保有する Fizeau 干渉計 (Zygo) と組み合わせることにより、フライト品であるレンズユニットの透過波面の測定を実施した。

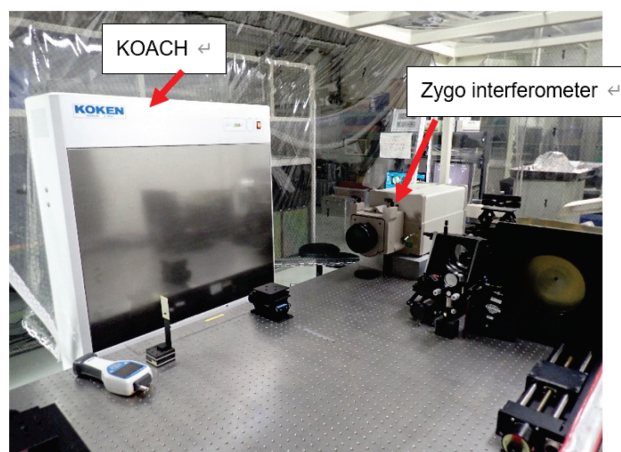


図 7 KOACH と Fizeau 干渉計 (Zygo) の組み合わせによるフライト品の波面測定

3. まとめ

ATC で新規導入した 4 つの光学測定装置 (Fizeau 干渉計、ヘキサポッド、オートコリメータ、オープンクリーンベンチ) について、概要と活用例を紹介した。これらの装置の利用は台内プロジェクトが優先であるが、外部の研究者も ATC の共同開発研究として承認されれば使用可能である。本集録に記載した実施例以外にも多くの使用例があると思われるので、使用したい場合は担当者にご相談ください。

ALMA ACA Spectrometer

New GPU-based Spectrometer for Total Power Array

○Takashi Nakamoto, Manabu Watanabe, Scott Zang, Makoto Shizugami,
Tetsuhiro Minamidani, George Kosugi (NAOJ), Jongsoo Kim (KASI)

Abstract

Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) and National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) are jointly developing the Atacama Compact Array (ACA) Spectrometer for the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). This is a new spectrometer that can process the signals from four total power (TP) antennas using graphical processing units (GPUs). The development team achieved a significant milestone, the Critical Design and Manufacturing Review, in December 2019. This report presents key design elements of the ACA Spectrometer.

1. Background

The Total Power (TP) Array comprises four 12 m antennas and is a subset of the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). While the other ALMA antennas are used for interferometric observations, the TP Array is responsible for single-dish observations. Auto-correlation outputs from the array enable observers to recover large-scale emissions from extended science targets that may have been spatially filtered out of interferometric observations.

The TP Array signals are currently processed by the ACA Correlator, an FX-type correlator, which also processes the signals from twelve 7 m antennas. The correlator is equipped with high-speed Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) for performing 16 bit fixed-point fast Fourier transforms (FFTs, the F part) and multiplications (the X part). A re-quantization step after the FFT converts the 16-bit output into 4 bits. It is necessary to bring the data rate and the number of multiplication calculations down to a reasonable range, but it adds 1.1% to the sensitivity loss ^[1]. Additionally, the limited depth of the fixed-point calculations can cause an overflow during FFT computations. More importantly, observations of the TP Array and the 7 m Array using one correlator have restricted science operations.

A new spectrometer for the TP Array, the ACA Spectrometer, is currently under development to mitigate those problems. It performs 32 bit floating-point calculations in both the F and X parts using GPUs to reduce the sensitivity loss and practically eliminate the risk of overflow. It also produces both auto- and cross-correlation outputs. Its cross-correlation capability enables calibration observations (e.g., pointing) of the TP Array independently of the 7 m Array.

2. Input Data Flow

For all ALMA antennas, including those of the TP Array, the radio frequency signal for each polarization is first downconverted to the intermediate frequency signal of 8 GHz bandwidth. It is then divided into four 2 GHz baseband signals, which are digitized by 4 Gsps analog-digital converters with 3 bit resolution (the B, C, and D bits). This results in a data rate of 96 Gbps (2 polarizations, 4 basebands, 4 Gsps, 3 bits) in total from each antenna. The digital signals of two polarizations in the same baseband are combined to make a baseband pair (BBpr) signal and transmitted over three optical fibers. Each fiber carries an 8 Gbps stream of B, C, or D bits using a dedicated protocol ^[2]. The digital signals over the optical fibers from the TP Array are split so that the ACA Spectrometer can simultaneously receive the same signals as the ACA Correlator.

The ACA Spectrometer system has four ACA Spectrometer Modules (ASMs), each receiving the BBpr signals of the same baseband from all four TP antennas. The ASM comprises dual CPUs (Intel Xeon Gold 6144 or 6244), twelve DDR4-2666 memory modules (six modules per CPU), four GPUs (Nvidia TITAN V) and two data transmission system receivers with PCI Express bus interface (DRXPs) on a Supermicro 4029GP-TRT server running Red Hat Enterprise Linux 7. The DRXP is a custom-made board with a Xilinx UltraScale+ FPGA that receives, decodes, and transfers signals from two antennas to the system memory via PCI Express 3.0 $\times 16$ lanes (PCIe3 $\times 16$) using direct memory access (DMA). The DRXP sends the data block by block to maximize the bandwidth. Each block is 4 MiB, which is the largest contiguous physical memory block that the Linux memory management system can allocate at once. Calculations are assigned to the GPUs in a round-robin manner. Contiguous 16 ms data (equivalent to 11.4 blocks of data) from all four antennas are sent to a GPU to complete the FX calculations within one GPU (Figure 1). With this data flow, each GPU processes 8 Gbps (3 GB/s) of data on average.

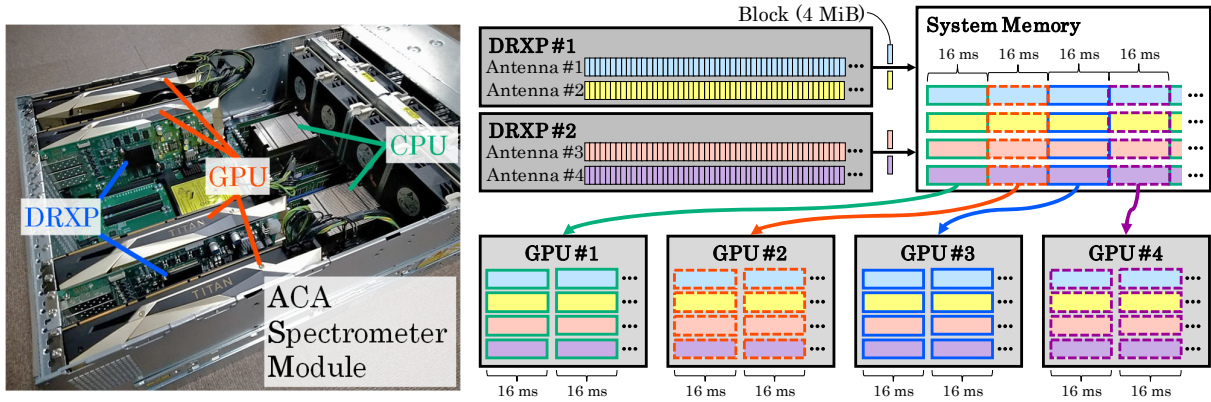


Figure 1. ASM with top cover removed (left) and a schematic of the data streams from four antennas split and sent to four GPUs (right).

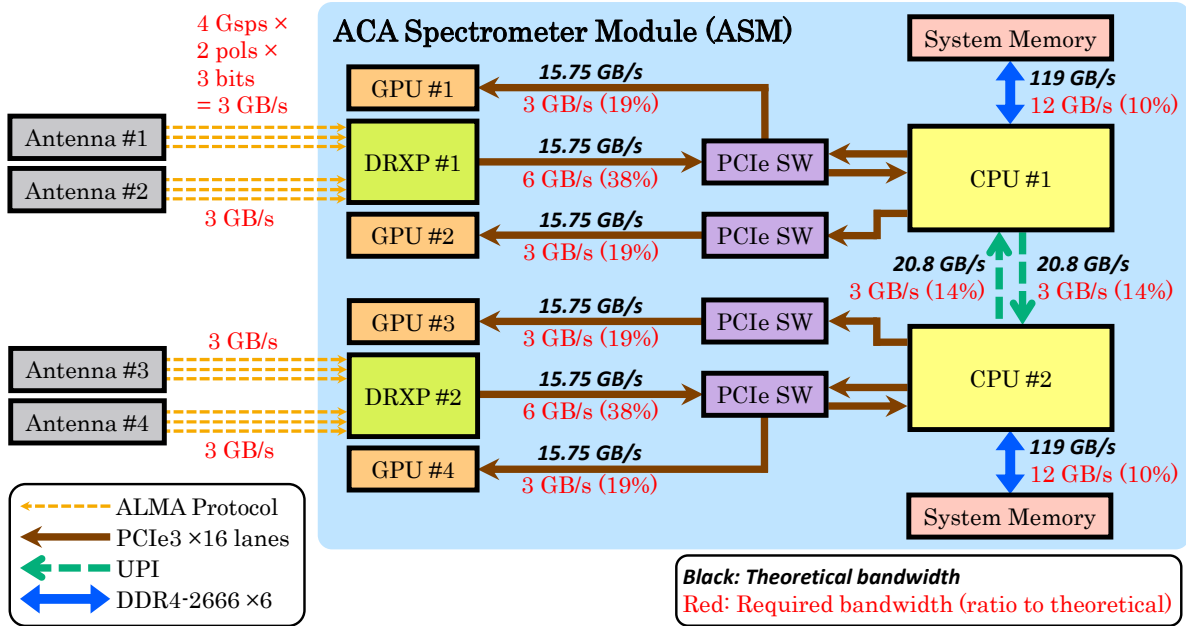


Figure 2. Theoretical and required bandwidths of communication paths from four antennas to four GPUs.

A Linux kernel module that was developed for the DRXP allocates DMA buffers in the system memory. Our application program written in C++ calls `cudaHostRegister()` with the `cudaHostRegisterIoMemory` flag for each block to share the DMA buffers between the DRXPs and the GPUs. GPU programs in Compute Unified Device Architecture (CUDA) see such memory areas as pinned memory. The theoretical maximum bandwidth of PCIe3 $\times 16$ is 15.75 GB/s. Our benchmark test shows that the data transfer from the system memory to a GPU using the pinned memory can achieve a bandwidth of approximately 12 GB/s, four times more than the required 3 GB/s. Another benchmark confirms that the same bandwidth can be achieved when sending data to all four GPUs simultaneously.

3. GPU Performance

The GPUs convert 3 bit integers into 32 bit floating-point values followed by FFT using `cufftExecR2C`. The ACA Spectrometer internally performs 2^{20} points FFTs for the finest spectral resolution of 3.815 kHz. This is the most expensive computation task in the ACA Spectrometer. Due to a mismatch between the ALMA integration time granularities ($1 \text{ ms} = 4 \times 10^6$ samples) and the number of FFT points, the GPU runs four 2^{20} -points FFTs with 4.6% overlap between FFT segments for every 1 ms of sampling. This maintains compatibility with the existing ACA Correlator [1]. Our benchmark results in Figure 3 show that the overlap significantly degrades the FFT performance, which is thought to be caused by non-sequential memory access. However, the benchmark result still proves that TITAN V can process incoming data streams of 8 Gbps. Another benchmark test demonstrated that TITAN V could perform all major calculations in real time, including the bit conversions and the FX calculations.

The existing ALMA archive system limits the output data rate from the ACA Spectrometer. The ACA Spectrometer will share the archive system with the two correlators currently in use. The maximum data rate of 17 MB/s will be allocated to the ACA Spectrometer. Based on the observation configuration imposed by the observatory control system, the GPUs perform spectral averaging and 1 ms time integration, and the CPUs perform longer time integration so that the average output rate does not exceed the allocation.

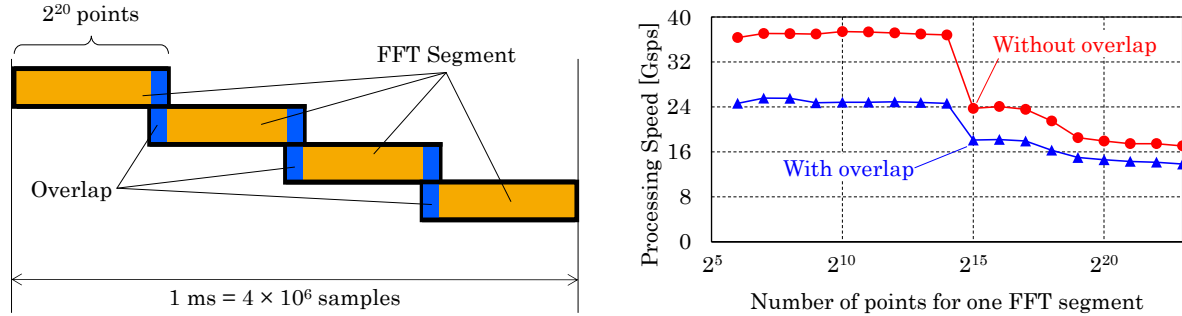


Figure 3. FFT segmentation with overlap for the shortest integration time, 1 ms (left), and `cufftExecR2C` benchmark result of one TITAN V for various FFT points with and without overlap (right).

4. GPU Cooling Efficiency at High Altitude

The ACA Spectrometer will be installed in the Array Operation Site Technical Building (AOS TB) at an altitude of about 5,000 m. Due to the thin air at this high altitude, there is a risk of GPU overheating even with cooling fans. Once the temperature goes over a threshold, the GPUs slow their clock frequency impairing calculation performance. The GPU temperature T follows Newton's law of cooling

$$Q = \bar{h}(T - T_{\infty}) \quad (1)$$

where Q is the GPU power consumption, T_{∞} is the inlet air temperature and $\bar{h}$ is the average heat transfer coefficient. The average Nusselt number $\overline{Nu}$ of a heating surface parallel to laminar airflow is

$$\overline{Nu} = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

where Re is the Reynolds number and Pr is the Prandtl number^[3]. In general, dynamic viscosity and thermal conductivity depend on pressure. However, the dependency on pressure is negligible from hundreds to hundreds of thousands of Pascals. Therefore, we obtain this practical relation

$$\bar{h} \propto \sqrt{\rho v}. \quad (3)$$

where ρ is the air density and v is the flow velocity.

The legacy experimental data of the ACA Correlator confirms this relation. One module of the correlator was placed in a depressurized chamber. The surface temperature of FPGAs, memory modules and other electrical components were measured under two conditions: (i) 28.7 °C, 760 mmHg (equivalent to sea level); and (ii) 30.1 °C, 409 mmHg (equivalent to an altitude of 5,000 m). The density of dry air in these conditions is 1.169 and 0.626 kg/m³, respectively. Therefore, the heat transfer coefficient ratio of condition (i) to condition (ii) must be 1.37 according to relation (3). The mean heat transfer coefficient ratio derived from the temperature data at 20 different measurement points was 1.39 with a standard deviation of 0.038. This is close to 1.37, which proves relation (3).

At an early design phase of the ACA Spectrometer, we conducted a similar experiment using two TITAN Xps and two GeForce TITAN Xs, which are old-generation GPUs with appearance like TITAN V. They were tested with three different GPU fan speeds (60, 80, and 100%) in the AOS TB and NAOJ Mitaka campus at almost sea level. A dummy benchmark program was used to control the power consumption Q , which was recorded with the GPU temperature T via Nvidia management library (NVML). The least square method for equation (1) was applied to estimate the heat transfer coefficient $\bar{h}$. This experiment showed that the heat transfer coefficient ratios ranged from 1.43 to 1.67 with a standard deviation of 0.077; which is significantly higher than 1.37, but the reason for this is not known. Once TITAN V became available, the sea level heat transfer coefficients of four TITAN Vs were measured at the NAOJ Mitaka campus. The relation between the GPU temperature and power consumption at the AOS TB was derived using the worst heat transfer coefficient ratio (1.67) to be safe. The power consumption was estimated using a separate benchmark program, and it was finally concluded that the GPU temperature at the AOS TB would not exceed the threshold.

5. Summary and Future Work

The design of the ACA Spectrometer and hardware selection has been completed. The required software is currently under development, and the ACA Spectrometer is expected to be installed in 2021.

Owing to recent advances in GPU technology, almost all functions will be implemented in application-level software using C++ and CUDA. This architecture allows us to implement software independent of hardware. In the future, it will also enable us to support more observation configurations, add new features, and extend the performance (e.g., more antennas, more frequency channels, and wider bandwidth) with less effort than FPGA-based correlators.

6. References

1. Takeshi Kamazaki et al., Digital Spectro-Correlator System for the Atacama Compact Array of the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 64, Issue 2, 25 April 2012, 29
2. Robert W. Freund, Digital Transmission System Signaling Protocol, ALMA Memo No. 420 (September 6, 2002)
3. Jingquan Cheng, Forced Air Cooling at High Altitude, MMA Memo 203 (March 24, 1998)

ディアスポラ時代の検収をどうやって確実にしていくか How to Conduct On-site Inspection in this Age of Diaspora

林 左絵子 (国立天文台 TMT プロジェクト カリフォルニア事務所)

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

概要 (Abstract)

TMT の光学チームは、パサデナを拠点に 4 カ国共同で主鏡の製作を推進している。もともと時差も含めてリモート状態で、主鏡を作り上げていく上で仕様書や図面の情報共有が重要であった。さらに現在はコアチームメンバーでさえ、同じオフィスにいたら肩越しに問題点を議論できたことができなくなり、また工場などでの現物検収がきわめて難しくなった。パサデナ近郊のラボでは、感染症防止対策のための改修工事が始まろうとしている。実際のモノを扱うグループとしての工夫と悩みを伝えたい。

Optics team of Thirty Meter Telescope (TMT) coordinates the fabrication of the primary mirror segments in four partner countries. To some extent members were used to deal with the time zone issues, like the meetings in the early morning or late evening. The technical information regarding the specification, the drawings and such are shared using on-line tools. When the travel restriction became inevitable due to the pandemic, we had to scramble to mitigate the situation or reschedule on-site inspection and hands-on activities. Lab work is also seriously affected. Even though the construction and renovation work of the lab is starting soon, the challenge continues.

1. 主鏡チームのラボ作業

TIO の本部オフィスがあるパサデナ市から東に 10km ほど離れたモンロビア市に、倉庫のような建物を借りたラボがある (電車 5 駅、徒歩 0.6 km + 1.6 km)。そこでは主鏡に関わる様々な基礎実験、部品検査、耐久試験などが展開されていた。

<https://www.tmt.org/multimedia/tmt-lab-monrovia-overview> (1'40")

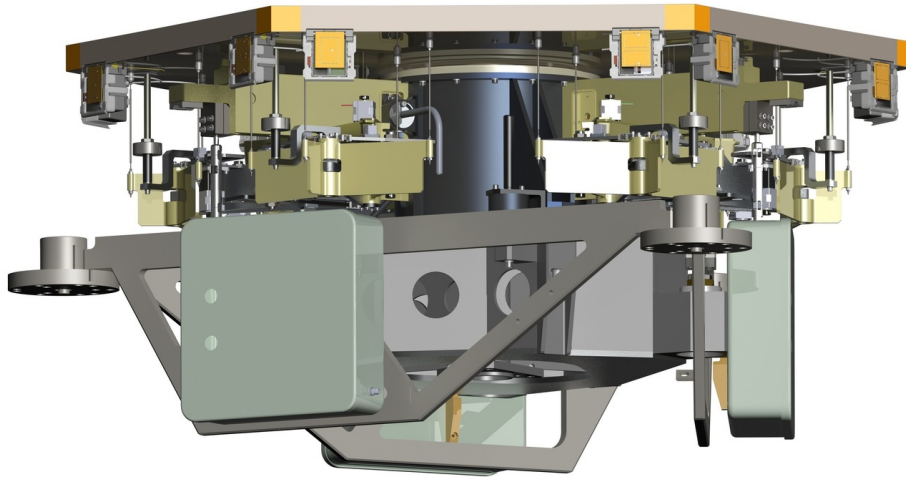
基礎実験としては、クリアセラム材 (鏡材) にインバーを接着する実験、クリーニング機構のノズル形状に関するものがある。主鏡支持機構制御部の電子回路部品の試作も行われていた。

バネやモーター部品について、動作を数万回 (数百万回?) 繰り返す、しかも常温および冷蔵庫内でそれぞれ連続して行なっていた。SSA 組立工程の確立、SSA を (ダミー) 鏡材と組合せる工程の確立、および出来上がったダミーセグメントをプロトタイプの主鏡セルに組込む手順が試行されていた。

ダミーセグメントをプロトタイプセルに搭載する練習 <https://www.tmt.org/multimedia/55> (2'31")

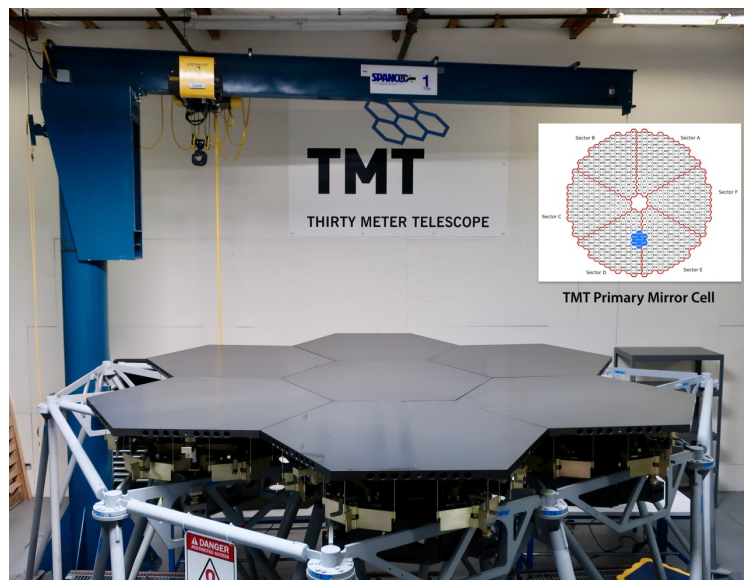
プロトタイプセルの搬入 <https://www.youtube.com/watch?v=Kueg6rH9fgw> (2'49")

セグメントを望遠鏡搭載後に計測するシステムの試行、エッジセンサーのプロトタイプや改良版のテストも始まりつつあった。SSA モジュールの量産タイプの組み立て開始が予定されていた。



図：TMT 主鏡セグメント単体を横からみたモデル。円形のクリアセラム材を研磨後、六角形にした鏡面の下に SSA と略称される主鏡支持機構および主鏡セル側に固定されているフレームがある。

Credit: TMT International Observatory, LLC



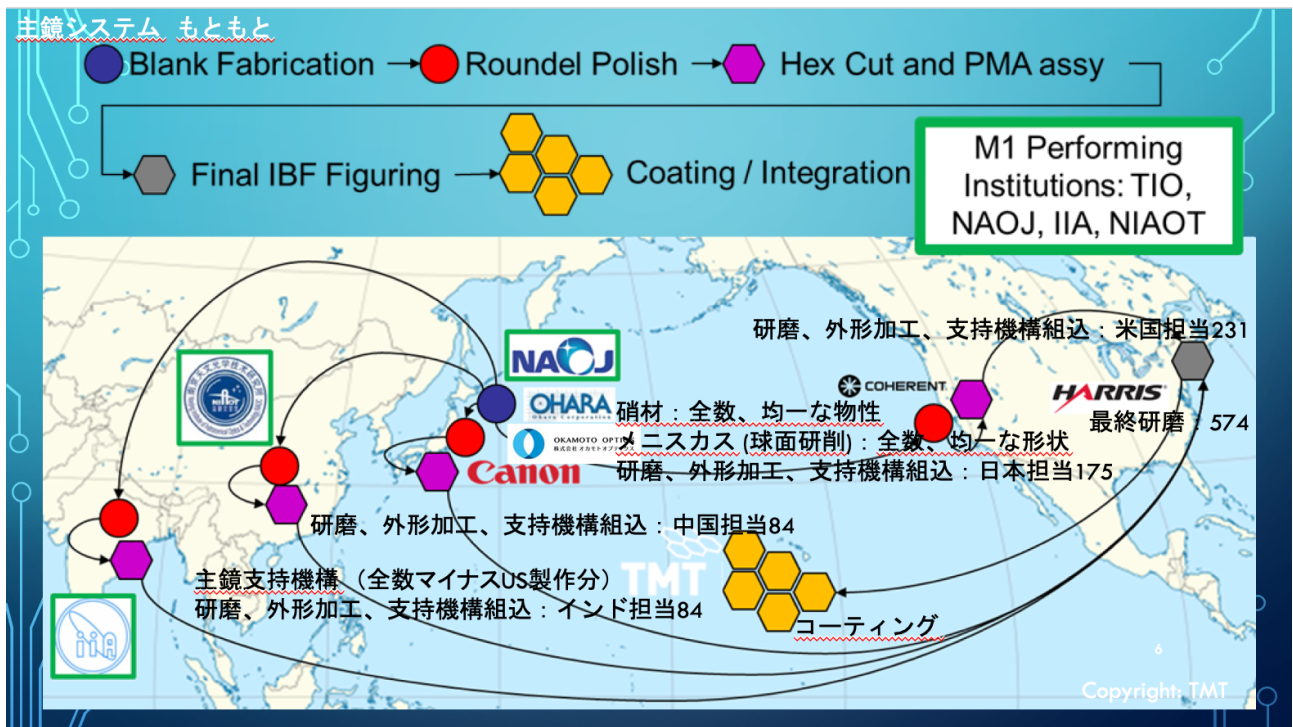
図：主鏡セルプロトタイプ（日立造船）に 7 枚のダミーセグメントを搭載したところ。鏡面はアルミ製。

Credit: TMT International Observatory, LLC

。。。といった様々な試験や計測の進捗状況を今年は報告したかったが。

2. 2020 年 3 月までは

主鏡セグメントの製作は日米印中 4 カ国で行われる。日本では既に研磨加工まで進んでおり、六角形にするなどの外形加工試も行われていた。また米国でも量産品の研磨開始に向けて準備が進められていた。仕様書や図面、さまざまな技術資料をオンラインで共有することはもとより、オンライン・ミーティングも自然なものとして定常的に進めていた。ただし試作品や量産品の実物検収は大事なものであり、担当者が出張して、現地スタッフとの綿密な打ち合わせとともに検査作業などを行なって来た。特に鏡材のヒビのようなものは、機械計測が難しく、目視でよく見極めなければならないためである。隠れたヒビが次工程に影響しかねず、また長期運用で欠陥が露呈するような事態を極力避けたい。



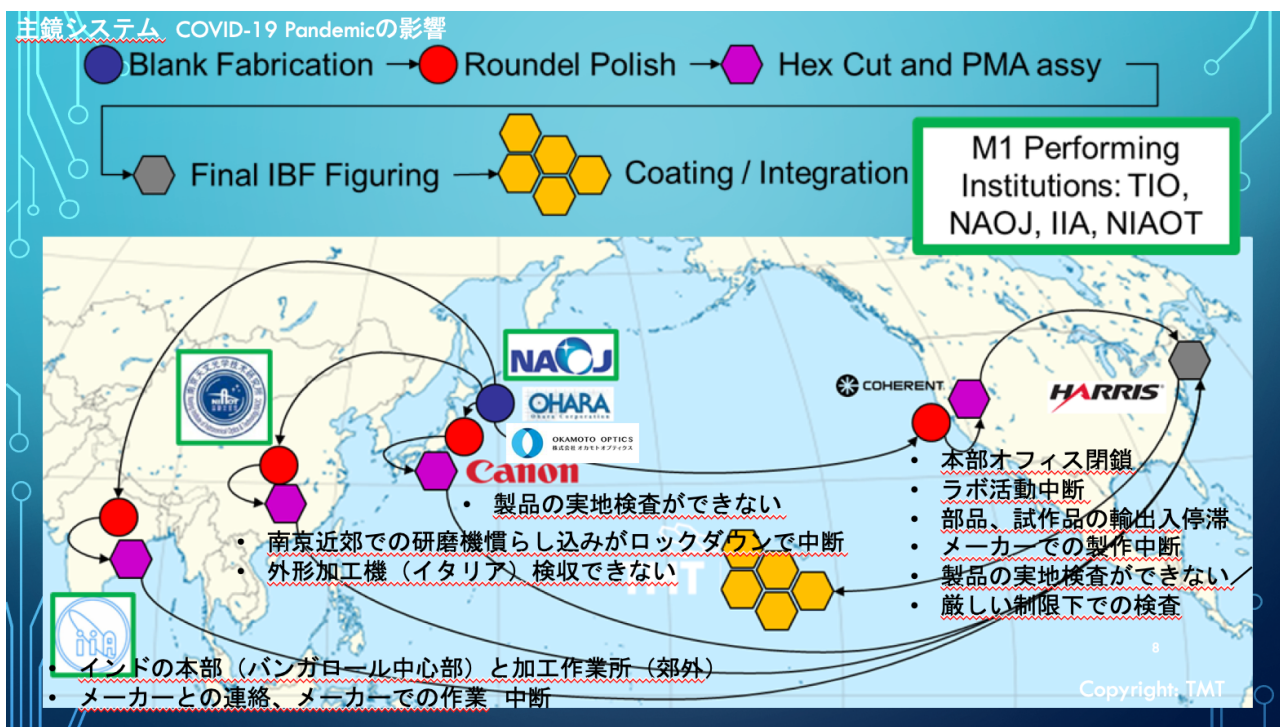
もとの図の Credit: TMT International Observatory, LLC

ところが、モンロビア・ラボでの SSA 組立の準備を進めていた矢先、カリフォルニア州で Stay Home Order が出てしまった。州北部で始まった SARS-CoV-2 ウイルスによる感染症、すなわち COVID-19 が州全体で急激に広がってしまったためである。3 月 16 日、TMT 本部オフィスおよびラボの閉鎖、職員の出張禁止が宣言された。州を越えての移動禁止に備えて、既に前の週から、他の州に自宅があるなどの事情があるスタッフに対して、移動を済ませてしまうようアドバイスが出ていた。

3. 2020 年 3 月以後は

オフィスやラボに立ち入ることが禁止されてしまったので、そこでの作業ができないのはどうしようもない。カリフォルニア州北部で研磨工程を担当する工場も停止した。既に移動／出社禁止になっていた中国のパートナーの様子を聞きながら、ある程度の心算はしていたものの、主鏡チームとしては現場作業全て緊急停止状態である。ただし大規模な自然災害や大停電と異なり、電子的な連絡手段は生きている。オフィスに入れないので国際電話は無し。ぼちぼち使い始めていた Zoom での会議が定着し、立ち話のかわりに Slack などの連絡手段を導入してきた。こういう手段は「うっかり」立ち上げ忘れるとタイミング逸することもあるが、集中してデータ確認などしているときは、外的要因による中断がないのは良い。気の利いたスタッフは Slack で、今はじゃましないでくれのフラッグを立てている。

次の図で、パンデミックによる主鏡チーム業務への主な影響を示す。



もとの図の Credit: TMT International Observatory, LLC

さて、2021 年 1 月になっても、当地ではいまだにパンデミックが猖獗をきわめている。レストランの屋外営業が「再び」可能になるなど規制が緩和されつつあるが、この後、感染状況やワクチン接種状況がどう推移するだろうか。米国内出張が解禁されても、米国から日本、インド、中国への出張が認められるようになるのはかなり先になるであろう。

4. 2021 年夏以後は

モンロビア・ラボでの実験に加え、SSA 量産の本格化に対応できるよう、スペースの拡張およびそれに伴うラボとしての床張りや新たなクレーンの設置なども含む改修工事が予定されていた。それに加え、本部オフィスとして借りていた建物のリースが更新されず、2 月をもってオフィスがなくなる。換気について感染症対策ができないことが大きな理由として挙げられている。このためラボ拡張時に、より広い面積を確保し、小会議室やオフィススペースも設けることになった。サーバーもそちらに移設する。数人規模の打合せやリモート会議ができる会議室も 2 つ設けられる。だが、70 人超が常駐していたのに対し、20 セット程度の机になり、もはや個人には割り当てず、机の使用申請・許可制度になる。

5. 困っていること

2 節でも言及したように、鏡材の目視検査が大問題。キズから内部にヒビが進行していないかどうか、といったことは強い光をあてて様々な角度から観察する必要がある。ヒビがある場合には、対処することでそのあとの加工を続けられる。隠れたヒビが次工程あるいは運用中に露呈し、大問題になることを極力避けたい。こうした検査をビデオカメラ越しにリモートで行うことは、有効とは言えない。現地に（たとえば研磨工場のように）それなりの専門スタッフがいればともかく、経験が不十分なスタッフのみの場合、どうするか。スケジュールもからみ、たいへん困った問題である。

コロナ禍における先端技術センターにおける対策と取り組み (Measures and efforts of the Advanced Technology Center in the Corona Disasters)

○宮地晃平、早野裕、杉本桂子、久保浩一、鵜澤佳徳
(国立天文台 先端技術センター) (Akihira Miyachi, Yutaka Hayano, Keiko Sugimoto, Koichi Kubo, Yoshinori Uzawa (Advanced Technology Center, National Astronomical Observatory of Japan))

概要(Abstract)

2020 年、新型コロナウイルス(COVID-19)が世界中で蔓延し、日本国内でも東京都は突出して罹患者が多く、国立天文台先端技術センターでもその対策の必要に迫られた。そこで、我々は、最大限の感染予防と業務維持のため、対策マニュアルの策定、消毒用アルコールの準備、建物入口に非接触型の体温計設置などの水際対策を実施し、これまでの業務を大幅に変更せず業務遂行してきている。これまでの取り組みの詳細について、を紹介する。

In 2020, a new type of coronavirus (COVID-19) spread all over the world, and the Tokyo metropolitan area have had the largest number of cases in Japan. Advanced Technology Center (ATC), National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) had to take countermeasures. Therefore, in order to prevent infection to the maximum extent possible and to maintain our work, we have implemented measures such as formulating a countermeasure manual, preparing disinfectant alcohol, and installing a non-contact thermometer at the entrance of the building. In this time, we introduce the details of our efforts for it.

1. はじめに

第 40 回 天文学のための技術シンポジウムの開催時期である 2021 年 1 月末、東京都は第 2 次の非常事態宣言下にあり、NEWS 番組や新聞等でも連日新型コロナウイルス関連の内容がトップニュースとして報道され、全国でも毎日数千人の新規感染者報告者がされていた(図 1)。国立天文台(以下、NAOJ とする。)としては、非常事態宣言中は、基本的に在宅勤務を推奨しており、本稿を執筆している現在も、その基本方針は継続されている。先端技術センター(以下、ATC とする。)は、ものづくりが主務であり、出勤しなければ出来ないことが多々ある。そこで、第 1 次の非常事態宣言(2020 年 4 月 7 日～5 月 25 日)中に、まずは非常事態宣言が解除後、最大限の感染予防と、業務ができる環境を整えることを目的として、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)に対する対策マニュアル(以下、対策マニュアル)を作成することを決定した。

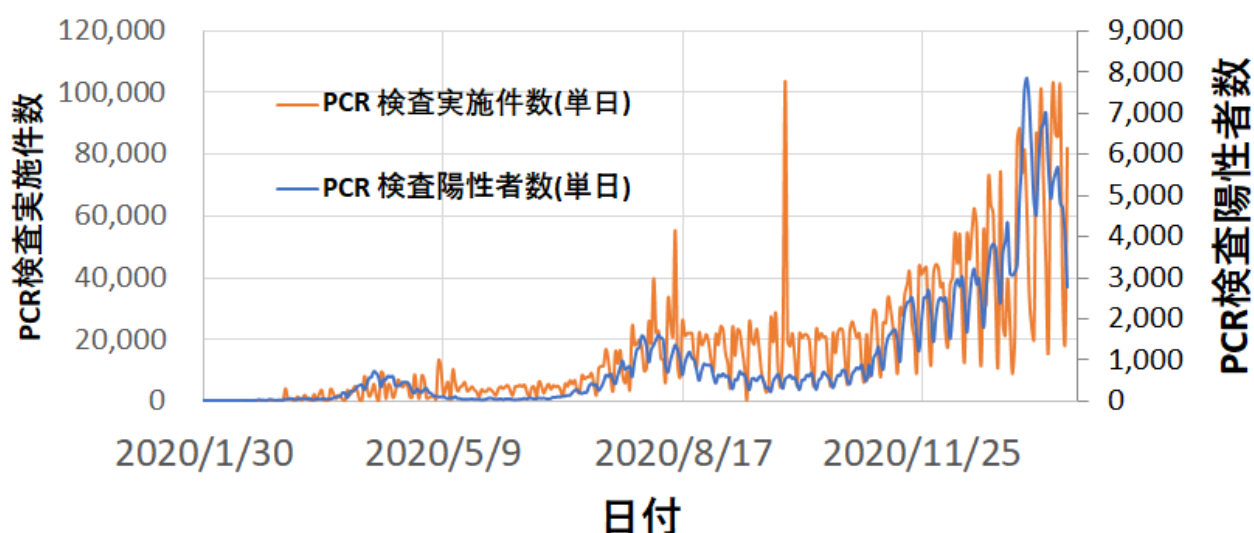


図.1 PCR 検査実施件数と陽性者数 [1]

2. ATC としてすべきこと

国立天文台の中でも ATC メンバーは、天文学以外を専門にしているメンバーが多くを占めているが、感染症の専門家は残念ながら在籍しておらず、政府、厚労省、東京都等の当局の対策方針に従い対策を実施することと、出勤した際に、当局で示される対策ができるように準備する事を念頭とした。その準備をする際に、対策マニュアルを読めば、どのようにすべきか判断ができるような内容が網羅された、対策マニュアルが必要という共通認識のもと、作成をおこなった。目指す内容は、①どのような対応・対策・方針とするか。②OK、NG を明確にする。③当局によって示された対策についての啓蒙（手洗いの励行、手指の消毒や窓開けの推進など）についてまとめるというものであり、現在も必要に応じて改訂を継続している。図 2. は完成した ATC 版の対策マニュアルである。

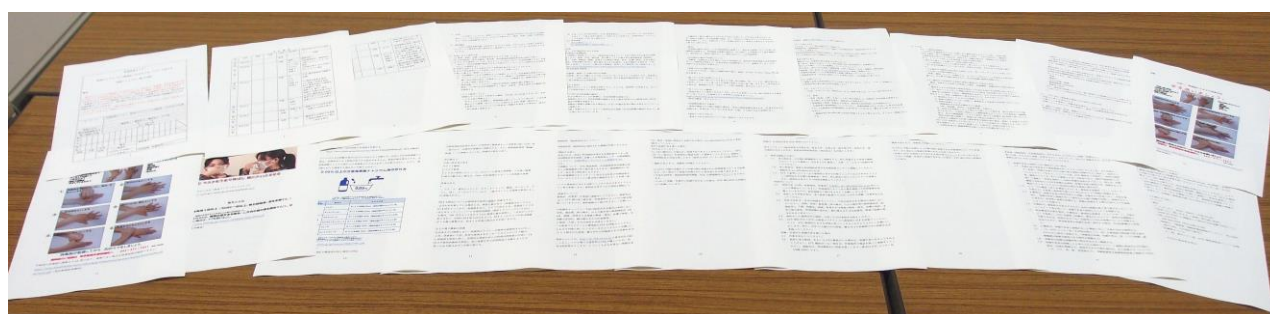


図.2 新型コロナウイルス感染症（COVID-19）に対する対策マニュアル

3. 対策マニュアルと実際の対策

対策マニュアルは、2020 年 5 月 20 日に初版を作成し、その後、実情に応じ改訂を続けている。対策マニュアルでの基本方針と具体的対策については表.1 にまとめた。また、ATC では、ものづくりを推進する一方、共同利用や施設利用として、先端技術センター以外に所属している方の利用がある。現在は、共同利用・施設利用に採択された方のみを受け入れている。受け入れる場合には、利用開始

前に、利用者に事前連絡をお願いしている。その後、ATC 職員である受入責任者が、来訪される方の所属組織のガイドラインと、ATC 側の対策マニュアル・ガイドラインとの整合性を確認し、問題がなければ、利用者に対して、対策マニュアルの周知のために、オンラインにて説明会を実施している。利用中には、利用予定の連絡や体調確認、海外からの帰国後 2 週間は来訪を遠慮頂くほか、ATC 滞在中に対策マニュアルに従った行動をお願いしている。

表.1 対策マニュアルにおける基本方針と具体的対策

基本方針	具体的対策
1. 職員、家族、近隣への感染を防止 2. 日本国政府、厚労省、東京都、東京都福祉保健局等の指示に従う 3. 社会的距離-Social distancing(2 メートル)の確保、難しい場合マスク・フェイスシールド使用 4. 集団作業をしない 5. 打合せ等は原則ウェブ 6. 新しい働き方（勤務）スタイル ① 在宅勤務原則（これまで問題なかった業務） ② ローテーション勤務 ③ 時差出勤・フレックスタイム制の有効利用 ④ 徒歩・自転車・車等を使用した勤務	1. 出勤前の体調チェックと出勤後の体温測定 2. 出勤後、建物へ入る際の各自の消毒 3. マスク着用の励行 4. 社会的距離の確保 5. パーテーションの設置 6. 正面での対面を避ける 7. 換気（常時開放。困難な場合は 30 分毎に、5 分程度ドアと窓を開放） 8. 共用場所の備品の消毒 9. 非対面での連絡の推奨（電話、E-mail、Teams、Skype 等の使用） 10. 汚染ゴミの密閉 11. 咳エチケットの徹底 12. 出退勤記録の保存 13. 業者との打ちは原則 Online 14. ビジター受け入れはセンター長判断 15. 出張は業務上必要な国内出張のみ、リモート会議推奨 16. ラボツアー原則中止 17. 食事の際の手洗い、うがい徹底、原則各自で食事

対策マニュアルで示した対策を実施するため、ATC メンバーや共同利用の方がおおよそ使用する玄関である、開発棟 1 号館 1 階に、非接触温度計を設置した。また、消毒用アルコールは、当初、入手性が非常に悪く苦労したが、現在は、各部屋・居室の入口や共用設備や実験室内に設置されている。

4. 窓の開放による空気循環の一考

最後に、窓の開放による空気循環についての一考について述べる。厚生労働省により、コロナ対策には、手洗い・うがいに加え、換気による空気の入替えが重要であることが示されている。感染者数が増加した、第 1 波や第 2 波の頃は、まだ気候も暖かく、窓開けについて後ろ向きの意見はなかった

が、国内感染者が急激に増えた第3波は、12月であり、寒さのため、なかなか窓開けが難しい状況であった。厚生労働省が示す換気量は、一人当たり $30 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、換気扇などの空調設備の有効利用が重要である。しかしながら、ATCは部屋によっては、換気扇がなく、自然換気のための居室では、窓開けが重要である。今回、空気循環について調べるため、非反応性流体、反応性流体（予混合・非予混合気）亜音速・超音速流体の2次元シミュレーションが可能な Flowsquare ver.4.0[2]を使用し、空気循環について調べてみた。本ソフトウェアの最大の利点は、計算領域は1枚または2枚のビットマップ画像と一つのテキストファイルで設定できることと、安価（無料）であることと言える。詳細は、ウェブの情報を参照いただきたい。このシミュレーションでは、実際の居室環境から、窓開けによる空気循環の重要性を訴えるため、窓とドアと廊下だけの空間を用いて、モデル化を行った。モデルでは、実際の居室と同様に、廊下側に4カ所の窓の開口があり、また廊下も解放されている。4カ所の窓からは 0.1 m/s の空気の流入がある。また、居室へは2カ所ドアがあり、このドアは解放されている。居室側には、計6カ所の窓があるが、通常は、閉鎖されているため、空気循環はドアの開放が主体となる。シミュレーション条件としては、空気の密度は、1気圧 20°C の値として、 1.2 kg/m^3 を採用した。計算グリッドは 384×128 とし、非反応性流体モードで実施した。図.3に結果を示す。図.3の結果によれば、ドアの開放に加えて、窓の開放により空気循環量が増える事が分かった。また、部屋の隅に近い窓の開放が、空気循環にはより効果的であった。本結果を元に窓開けを励行したい。

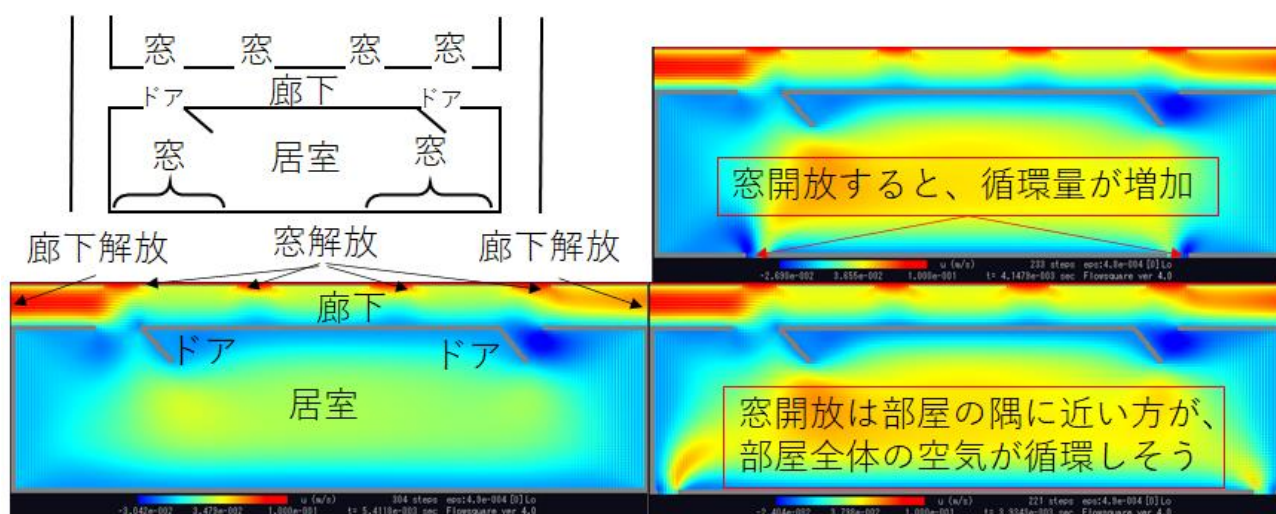


図.3 窓やドアの開放による空気循環に関するシミュレーション結果

5. 最後に

ATCの新型コロナ対策は、センター長以下、本共著者を含めてチームで行っております。これまでのご協力やご支援、ありがたい提案等この場をお借りしてお礼申し上げます。このコロナ禍が早く終息し、平穏な日常生活に一日でも早く戻れますように。

6. References

- [1] <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kokunainohasseijoukyou.html>
- [2] <http://flowsquare.com/jp/>

プラネタリウムドームにおける換気状況について

豊増伸治（株式会社東海ムービー）



概要

プラネタリウム施設は、初等教育における利用をはじめ年間入場者数からも天文普及において重要な役割を果たしているといわれている。しかし、ドーム空間は典型的な三密（密閉・密集・密接）環境であり、感染症対策として換気が重要視される状況では運用上の困難を抱えている。委託運用中の館にて、臨時で導入した二酸化炭素モニターと排気ファン等によって、感染リスクを下げる取り組みを行って来たので状況を報告する。

1. 感染症対策として基準は示されている、が

幼児・児童が団体として訪れ、また休日には賑わう地方プラネタリウム。感染症対策が切実に必要な現場であるにもかかわらず、一定の基準は示されているものの、実際にどれくらいの対策が必要なのか？は曖昧で、科学的なフィードバックがなされていない状況が多いと思われる。直接感染を減らすためには消毒が重要であると言われているが、これは別のテーマとして、今回は感染に影響しているとされるエアロゾルの状況を把握し、換気の効果を数値化して運用している現場の取り組みを報告する。

2. 二酸化炭素をエアロゾルのプローブに

新型コロナウイルスを大量に含むとされる人由来の微小な飛沫（エアロゾル）を精度よく測定することは非常に難しいと考えられる。そこで、建築業界等で環境の基準として一般的に用いられる二酸化炭素計が高い時間分解能（最高 2 秒程度）と精度（±50ppm 以下程度）を持ち、入手しやすいことから、人が放出した二酸化炭素の濃度が同時に放出したエアロゾルの濃度に対応していると仮定することにより、二酸化炭素濃度の変化を換気の目安にすることとした。

- PerfectPrime CO2390 二酸化炭素メーター（ロガー）

<https://jp.perfectprime.com/products/co2390?variant=34211716104325>



3. 換気方法の拡充

委託運用中のプラネタリウムドームは、直径 15m のため、容積は約 1,000 立方 m である。ドーム外周の回廊へは 3 ヶ所の出入り口があるが、外部への出入り口は 1 ヶ所にまとめられており、屋上に上がる梯子への扉が 1 ヶ所、排煙口が 1 ヶ所しかない（防火用の強制ファンはあるが騒音が非常に大きく、平常時の使用は禁止されている）。通常の換気については内気の循環分が相当量あると思われるエアコンに任されている状況である。当初は、扉と排煙口を全開にし、扇風機とサーキュレーターで対応するよう市管理者側から指示されていたが、投影に伴う二酸化炭素濃度が元に戻るまでには 3 時間程度かかることが明らかになったため、1 日に複数回の投影を行うためには、もっと強力な強制換気が必要であることが分かった。そのデータを基に大型ファンの導入を依頼していたところ、大中 2 台の送風ファン

(大：348 立方 m/分、中：138 立方 m/分) を導入してもらうことができ、投影終了後 30 分～1 時間程度で二酸化炭素濃度を元に戻せることが確認できた。

- ・ 株式会社ナカトミ 60cm ビッグファン BF-60J

<https://www.nakatomi-sangyo.com/fan/bf-60j.html>

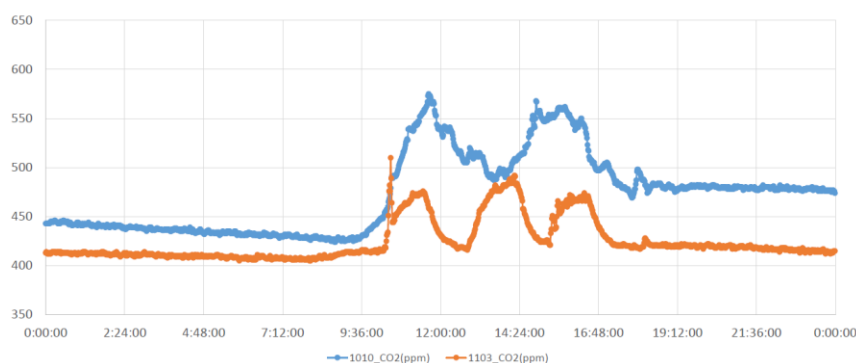


4. まとめと課題

換気状況を数値化することができ、闇雲に換気するのではなく、必要に応じて十分な換気を行うことができるようになった。地球大気中の二酸化炭素濃度の平均値が 400ppm 強であることを知れば、科学に詳しくない方でも、ドーム内の空気の状況が一目で分かる。時間の制約はあるものの、掃除（消毒）は二酸化炭素濃度が 450ppm 程度に下がるのを待って行うようにすることで、スタッフへの感染の危険性も抑えている。排煙口が開けられない雨の日については、今後の課題であり、換気以外の方法（電気集塵機による吸着等）が必要になると思われる。

「新しいワークスタイル」が提唱されているが、広範かつ高精度な天文学の知識や技術は生きる力そのものである。ツールが揃ってきた現代では個人ベースでの本質的な対応が可能となった（少しの基礎力さえあれば、二酸化炭素測定も 3 次元の流体計算もできる）。これは感染症のような複雑な社会問題に対しても応用可能であり、むしろ専門家ではない強みを活かして、半ば楽しみながら、リアルに実験し、その成果を日々の安全に活かすことができる。もちろん素人療法は危険なので、最大限科学的に謙虚に、十分注意して活用したい。

CO2濃度変化 ドーム内（中心南西部床高） 2020.10.10雨, 11.03晴
排気大型ファン導入前（2回投影21+11）と導入後（3回投影19+17+12）の比較



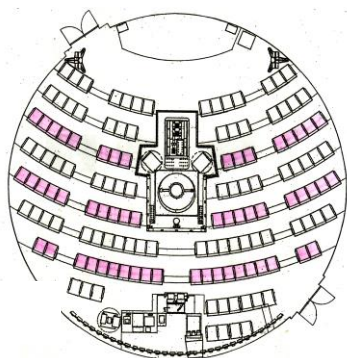
ドーム内二酸化炭素濃度の日変化

縦軸：CO2 濃度 (ppm)
横軸：時刻

青線：10月10日 大型ファン導入以前
2回投影、雨で換気も悪く、
CO2 濃度は下がり切っていない

橙線：11月3日 大型ファン導入後
3回投影、晴れていて換気良好、
CO2 濃度は1時間程で元に戻る

プラネタリウムドームは、遮光を優先しているため、窓や出入り口は少ない。また傾斜があったり、シートもリクライニングできたりするため、ソーシャルディスタンスのための座席配置は立体的に考える必要がある。



ドーム外周部：一方向にしか外部への窓が無い

国立天文台三鷹太陽フレア望遠鏡近赤外偏光分光観測装置の SQL-DB と連携した自動 pipeline 処理

○森田 諭、花岡庸一郎、桜井 隆、末松芳法
(国立天文台 太陽観測科学プロジェクト)

概要(Abstract)

国立天文台三鷹太陽フレア望遠鏡近赤外偏光分光観測装置は、近赤外域での複数の吸収線近傍での太陽全面フルストークススペクトルのモニター観測を 2010 年度より定期的に行っている。この装置は改修履歴も多く、各種情報がデータと共に分散保持されているため、pipeline 処理を統一的にかける際の弊害となっていた。観測ログ/装置改修履歴/観測データの統計処理情報を SQL-DB に吸い上げ pipeline と連携させたのでこれを報告する。取得データの品質管理にも使用する。

1. はじめに

国立天文台三鷹太陽フレア望遠鏡近赤外偏光分光観測装置(IR-Mag) [1] は、口径 15 cm 対物レンズ、高速偏光モジュレーター、エシエル型分光器、1 台ないし 2 台の高速読み出し近赤外カメラ(Xenics Xeva: InGaAs 素子, 640x512 pix, 90 fps, 14 bit ADC, ペルチェ冷却 250 K)からなる観測装置で、近赤外域での科学的に興味深い 2 つの波長域(He I 1.0830 μ m 及び Si I 1.0827 μ m 近傍、及び Fe I 1.5648 μ m 近傍)での太陽全面フルストークススペクトルのモニター観測を 2010 年度より定期的に行っている。現在、太陽全面偏光度マップを fits 形式にて公開しているが [2]、並行して 3 次元ベクトル磁場データを公開する準備を進めている。そのためには、適切に機器較正を行ったストークススペクトルデータを IR-Mag の全観測期間にわたり整備し、文献 [1] にて代表データに対し使用した Milne-Eddington Inversion Code 等に通すのだが、この装置は意外に改修履歴が多く、また、情報がデータディレクトリに分散保持されているため、pipeline 処理を均質にかける際の弊害となっていた。観測状況/装置状態/装置改修履歴を SQL データベース上に整備し、pipeline 処理と連携の上自動化したので、これを報告する。

2. 観測状況/装置状態/装置改修履歴 SQL データベース

観測状況/装置状態/装置改修履歴のデータベースは、MySQL 5.6 を用いたデータベース上の複数のテーブルとして構築した。表 1 にこれらテーブルの構成を示す。scan がメインのテーブルで、観測データに対する pipeline 処理実行時にはこのテーブルに query をかけ、処理に必要なパラメータを取得する。scan テーブルでは、太陽全面/部分スキャン観測各々に対しユニーク ID を割り当て、そのスキャンに含まれる各種データ、観測条件、使用光路、機器情報、データ格納相対パス等を紐つけている。各サブテーブルでは、各種ログを吸い上げ、取得データの一部に統計処理を行い、これらを基に更に scan テーブルを作り込む。上記作業は Linux OS 上で cronjob 化されており、日毎の観測の後自動実行される。2010 年の定常観測開始から現在までの全て (2021/1/29 時点で 7,304) のスキャンの情報を登録済。

テーブル名	データソース	カラム種 & 挿入単位	使用目的
scan	データディレクトリ, 装置改修履歴, 各種サブテーブル	ID, 時刻, 波長, 光路, 装置設定, 取得データ情報, 適用較正データ等 49 カラム, スキャン毎	IR-Mag 太陽面スキャン観測各種情報集約, pipeline からの参照, 処理内容記録
f0status	望遠鏡状態ログ	光量計, 各種温度等 14 カラム, 時系列	分散保持されたログの吸い上げ, 光量計情報提供
camtemp*	カメラ温度ログ	センサー温度, 冷却パラメータ等 14 カラム, 時系列	分散保持されたログの吸い上げ
dark*	ダークデータ、 camtemp テーブル	データ統計処理情報, センサー温度等 24 カラム, データ毎	scan テーブルサブテーブル, データ健全性管理等

表 1: 各種テーブルの構成。*: カメラ毎にカメラ ID をつけて作成。

一方、dark テーブルは、全ダークデータの統計処理情報やカメラ冷却情報をデータファイル毎で記録している。scan テーブルとはスキャンに対するユニーク ID で紐づいている。このテーブルは観測データの品質管理にも利用され、赤外カメラのセンサー温度とダークのメジアン値の間の単調増加カーブを、全観測期間に対し集積したデータから導出、カメラ温度ログがない期間のスキャン観測に対するセンサー温度を、ダークメジアン値から推定し、scan テーブルの完備性を担保するのに使用されている。同様に、外気温上昇等でカメラセンサー温度が安定していなかったスキャン観測に対しては、カメラ温度ログの値から各スリットポジションでのデータのバイアスレベルを推定することにも利用可能。

3. SQL-DB 連携 pipeline 処理

ここでは較正 pipeline 処理の一例として、使用の近赤外カメラ (Xeva) 2 台のピクセル毎非線形応答補正を紹介する。図 1.a は文献 [3] で提案された手法を、センサーのピクセル毎に適用して求めた典型的

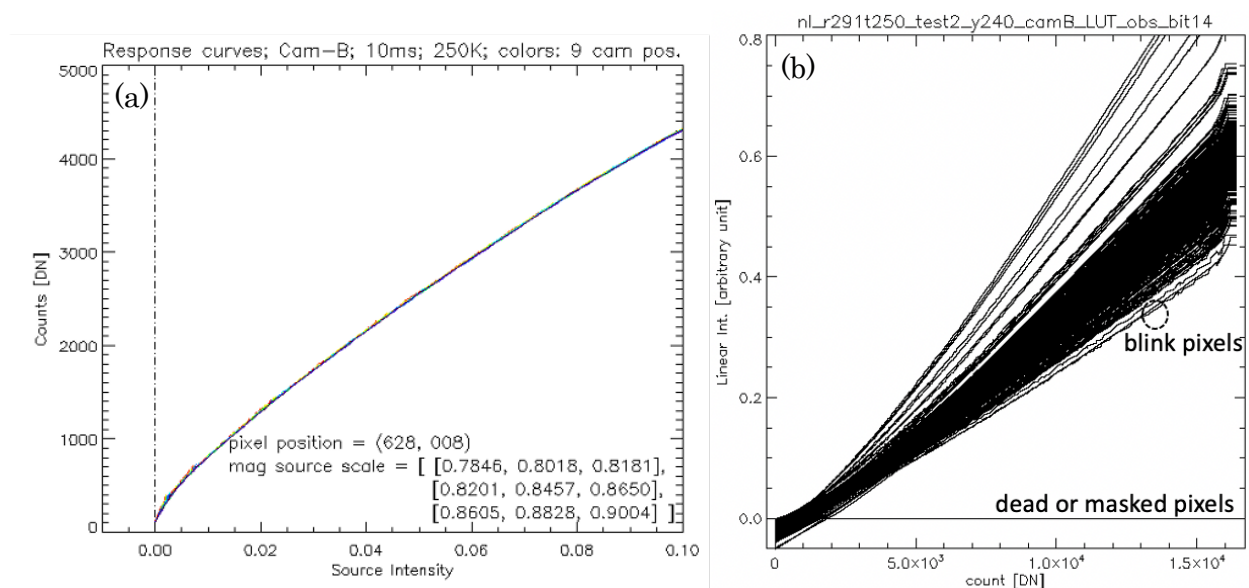


図 1: (a) 近赤外カメラ(Xeva)の典型的なピクセルの非線形応答曲線低カウント側拡大。縦軸がカウント数、横軸が線形化された入射光量, (b) 全てのピクセルに対し over plot したもの。横軸がカウント数。

なピクセルの非線形応答曲線の低カウント側を拡大表示したものである。低カウント側に強い非線形性があるが、我々は高速読み出しを行う為、このレンジでカメラを使用する。図 1.b は、ピクセル個数分の非線形応答曲線を求め **overplot** したものの。導出の際、光源に対するカメラの位置を複数変えながら同様の実験をし、得られた非線形応答曲線群の線形軸に対し、文献 [4] のフラットフィールドを合成するアルゴリズムを援用し、センサー固有のゲインマップ補正を織り込んである。図 1.a とは縦軸と横軸が入れ替わっている事に注意。カウント方向 14 bit 等間隔(つまりカウント毎)で作成されており、カウント数をポインタとして画像単位で高速に、線形化された光量値を返す **Look up table (LUT)**として使用する。実際の観測データは 24 枚/48 枚など積算して精度を上げているが、このデータを上記 LUT に通す際、カウント数を単純に積算枚数で除算して丸めると、稼いだ精度が無駄になってしまう。これを避けるには LUT の内挿が必要だが、ピクセル毎に異なる非線形応答曲線を用意した結果、処理時間に問題があった。だが、積算処理によるカウント数の増加は積算枚数に対して線形なので、元々カウント方向に等間隔メッシュである LUT に、画像単位での簡単な四則演算と剰余算を組み合わせる事により、高速に線形内挿を行うアルゴリズムを工夫し、現実的な処理時間で LUT 適用をかけられる様になった。

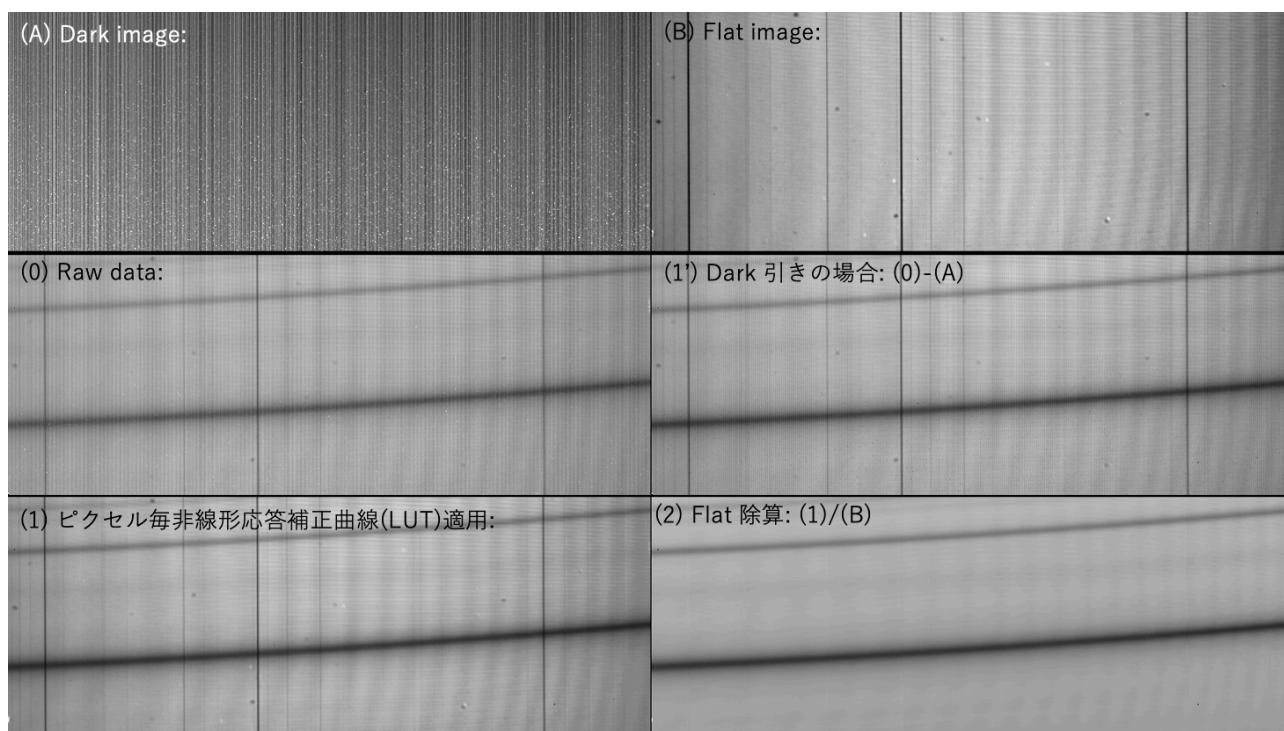


図 2：IR-Mag 較正レベル, (A)ダークイメージ, (B)機上で取得したフラットイメージ (ピクセル毎非線形感度補正 LUT 適用済), (0)Raw データ, (1')Raw データからダークイメージを減算, (1)Raw データにピクセル毎非線形感度補正 LUT を適用, (2) (1)をさらに(B)のフラットイメージで除算。

図 2 にピクセル毎非線形応答補正の効果を紹介する。図 2.0 及び図 2.A では、隣り合うカラム間で異なるレジスタ起因のパターンが強く目立つ。通常のダーク引きを行ったのが図 2.1' なのだが、カラム方向のパターンは非線形な応答にも含まれているので、この処理では除去しきれず、特に吸収線の底で顕著に残る。一方で、ピクセル毎非線形応答補正 LUT を適用した図 2.1 では、カラム方向のパターンは消えており、十分に効果があることがわかる。図 2.2 は、機上で取得したフラットイメージ(図 2.B)で更

に除算したもので、LUT 取得実験時と機上の光学系との差異を補正している。

観測データに対する較正 pipeline 処理実行時には、処理に必要なパラメーターを前述 scan テーブルに適宜 query をかけて取得する。ピクセル毎での非線形応答補正 LUT 適用の場合は、そのスキャン観測で使用する (1)カメラの ID、(2)センサー温度、(3)積算枚数、(4)適切なダークイメージの情報を query する。太陽全面をスキャンしたデータセットには、2252 スリット位置の偏光観測データ(偏光変調 8 種)と各種較正データが含まれるが、ネットワーク越しのデータ読み込み、ピクセル毎非線形応答補正適用、fits 形式でのデータ保存の処理を 7 分 30 秒程度の時間で実行することに成功している。正常に完了した較正処理に対しては処理に用いた各種較正ファイル名を、ハードウェア/データ/較正処理の不調があるデータセットにはそれぞれフラグを、scan テーブルに記録しており、必要なデータのみ後で処理をやり直すことも可能である。pipeline 処理は Linux OS 上で cronjob 化されており自動実行が可能。現在までに、カメラエレキ交換後の 2014 年から 2019 年までのデータに対し上記処理が完了している。

4. まとめと展望

国立天文台三鷹太陽フレア望遠鏡近赤外偏光分光観測装置(IR-Mag)は、3 次元ベクトル磁場データの公開準備を進めている。その一環として、過去に取得した全観測データの均質的な pipeline 処理によるストークススペクトルデータ作成の為、観測状況/装置状態/装置改修履歴のデータベースを整備し、これと連携する pipeline を作成した。データベースに関しては、全スキャン観測の関連情報(取得したデータの品質や実行した較正処理の情報を含む)を集約した scan テーブル(カラム数 49)と、これを作り込むためのサブテーブル(3 種 6 個)を作成した。2010 年の観測開始から現在までの全てのデータに対して情報吸い上げが完了しており、日毎の観測に対する情報追加も自動化されている。サブテーブルの情報はデータの品質管理にも利用されている。scan テーブルと連携して自動動作する較正 pipeline は、フラットホームとピクセル毎非線形応答補正モジュールが完成している。カメラエレキ交換後の 2014 年から 2019 年末までの約 4,900 スキャン観測のデータに適用済。今後、機上光学系フラットモジュール(含スペクトルの傾き補正)、偏光復調モジュールを、使用実績のあるコードから順次移植し、全観測期間にわたる較正済ストークススペクトルデータを、文献 [1] の Stokes inversion コードに提供していく。

参考文献

- [1] T. Sakurai, Y. Hanaoka, T. Arai, M. Hagino, T. Kawate, N. Kitagawa, T. Kobiki, M. Miyashita, S. Morita, K. Otsuji, K. Shinoda, I. Suzuki, K. Yaji, T. Yamasaki, T. Fukuda, M. Noguchi, N. Takeyama, Y. Kanai, T. Yamamuro: Infrared Spectro-Polarimeter on the Solar Flare Telescope at NAOJ/Mitaka, PASJ, 70, 58 (2018).
- [2] https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/db_cal.html#irmag
- [3] Y. Hanaoka, I. Suzuki, T. Sakurai: Practical Method to Derive Nonlinear Response Functions of Cameras for Scientific Imaging, ApOpt, 50, 2401-2407 (2011).
- [4] J. R. Kuhn, H. Lin, D. Lorz: Gain Calibrating Nonuniform Image-array Data Using Only the Image Data, PASP, 103, 1097 (1991).

シーイング測定装置開発計画

○萩野正興, 奥村真一郎(日本スペースガード協会/スペースガード研究センター)
大屋真, 都築俊宏(国立天文台), 木村剛一(京都大学), 宮良碧(茨城大学), 宮田ゆき乃(明星大学)

概要(Abstract)

我々日本スペースガード協会（スペースガード研究センター）では地球近傍の小惑星観測を行っている。小惑星は小さいため大型望遠鏡を必要とするが、周囲の環境が作り出す大気揺らぎ（シーイング）の影響を大きく受けてしまう。そこでシーイング測定装置 DIMM を作成し、観測精度向上の技術を獲得する。得られたデータにシーイング情報などを追加し、サイエンスのデータとして使用する判断基準とする。

1. はじめに

日本スペースガード協会では岡山県井原市美星にあるスペースガードセンターにおいて地球近傍に存在する衝突の可能性のある小惑星などの観測を行っている。地球に接近して発見される小惑星の多くは大きさが数mから数十m程度と小さく、月までの距離と同じ程度にまで近づいたとしても 17-18 等以下と暗いため、光学観測には口径が大きく集光力のある大型の望遠鏡が必要となる。口径 1 m を超える望遠鏡では回折限界が 0.1 秒角以下となり分解能が上がるが、大気揺らぎによる屈折率の時間変化（シーイング）による影響も大きくなる。このため、その性能を十分に発揮できていない可能性がある。我々はこのシーイングを定常的にモニタするための DIMM (DIMM : Differential Image Motion Monitor) を開発する。一般的に DIMM などを用いたシーイング測定は大型望遠鏡を建設するためのサイト調査に使われるが、既存の地上光学望遠鏡での安定した観測環境を維持するためにも必要不可欠である。また、シーイングの定常的な観測により取得データのデータ・クオリティを保証する意味もある。我々は DIMM によるシーイング測定の結果を用いて、小惑星観測の精度向上を目指すことが目的である。

サイト調査などに DIMM を用いた例は多く存在する。例えば、京都大学は DIMM を用いて岡山天文台のサイト調査を行い、広島大学では赤外シミュレータの設置サイトの決定に活用され、東北大学では赤外望遠鏡の設置サイトとして南極ドームふじでの調査が行われたという経緯がある。この東北大学の試験観測によると上述のサイトにおけるシーイングのサイズは、それぞれ岡山天体物理観測所で $1.2 \pm 0.2''$ 、東京大学木曾観測所で $2.3 \sim 3.2''$ 、ハワイすばる望遠鏡で $0.6''$ 、南極ドーム C で $0.5''$ と報告されている（上田 2003, 千代延 2005）。この中でも京都大学岡山天文台（ここでは京都大学岡山天文台と岡山天体物理観測所は同じサイトとして扱う）は我々が提案するシーイング調査のサイトから直線距離で約 12km の位置にあり良い比較対象となりうる。また、同時観測を行うことによりシーイングを変化させる原因となる気象や地形との関係の理解につながると考えられる。

2. DIMM 観測計画

まず、DIMM の仕組みについて説明する。DIMM とは Differential Image Motion Monitor の頭文字か

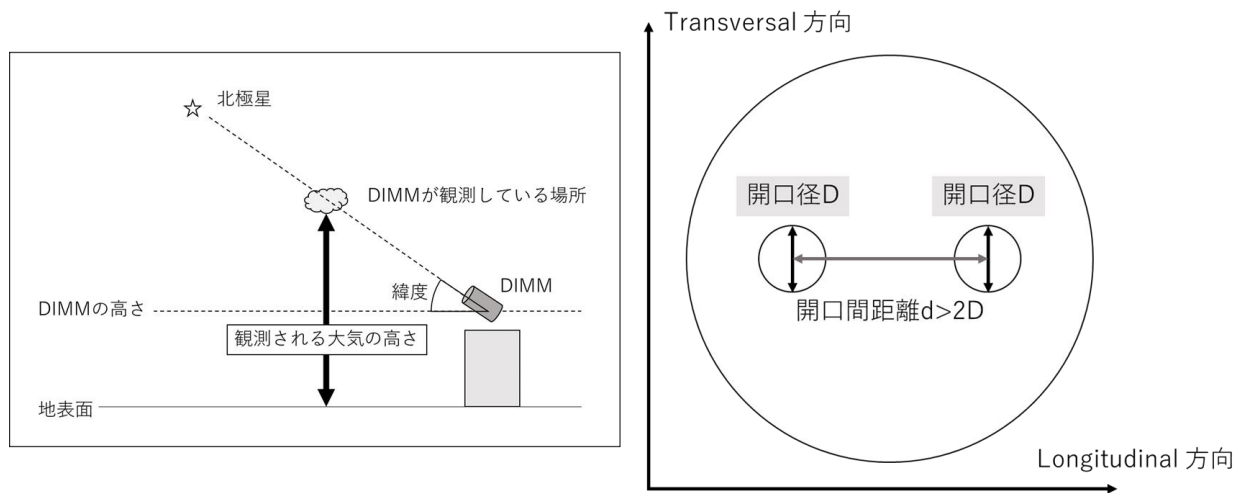


図 1 DIMM 原理の概念図 (左) と作成する DIMM 板の外観。

ら名付けられたシーイングモニタである。その構造はシンプルで複数の開口を持つ DIMM 板 (図 1 右図) を鏡筒の筒先に取り付けて観測を行う。この時、DIMM 板の開口部分にはウェッジプリズムを装着し、望遠鏡の光学系に入射した光路を曲げて同じ星から得られる 2 つの星像を同時観測する。この星像から揺らぎによる輝度分布の半値幅 (FWHM) を測定する。ここではこの FWHM をシーイングサイズと呼ぶ。慣例として開口の並んだ方向を Longitudinal 方向と言い、それに垂直な方向を Transversal 方向と言う。シーイングサイズはそれぞれの方向について測定される。また、開口の直径 D に対して開口間距離 d を $2D$ 以上に設定することにより、この 2 つの星像によるそれぞれの方向のシーイングサイズの共分散からシーイング揺らぎを表す Fried パラメータ r_0 (Fried 1965, Dierickx 1988, Tatarski 1971) を求めることができる。

$$r_0 = 0.98 \frac{\lambda}{\text{FWHM}}$$

$$r'_0 = (\cos \gamma)^{3/5} r_0$$

ここで、FWHM はシーイングサイズであり、 λ は観測波長である。また、天頂角 γ での補正を行うことにより、観測対象の位置補正を行うことができる。

次に我々が作成する DIMM について説明する。この DIMM では北極星をターゲットとしてその瞬間のシーイングを代表させる。北極星を用いる利点は望遠鏡をほとんど動かす必要がないため、追尾モータからのノイズやポインティングによる望遠鏡の揺れが少ない。北極星は 2 等級なので露出が短くできるため、高速撮像もできる。また周囲に明るい天体がなく星像の同定や解析の容易さも挙げられ、月などの影響も受けないため、季節に関係なく一年中、一晩中継続したデータの取得が行える。さらに観測地の北側の方角には中国山脈があり街がないため、空が暗いという点も利点である。

観測に使用する望遠鏡は美星スペースガードセンター既有で広島大学の DIMM でも使用された Meade 社製 LX200GPS-25 ($D=254\text{mm}$, $F=2500\text{mm}$ ($F/10$), $\text{plate scale}=82.5''/\text{mm}$) 準リッチークレチアン式 G P S 搭載自動導入天体望遠鏡の利用を予定している。光学系の収差を最小にするために DIMM 板に取り付けるウェッジプリズム以外の素子を挿入しない。すなわち、波長限定にはカメラの感度曲線を用いて行う。現時点では Imaging Source 社製の産業用 CMOS カメラ DMK23UX174 を使用している。このカメラ

はセンサとして Sony CMOS Pregius IMX174LL を採用し、100FPS 以上の高速撮像が可能である。カタログでの値は 520nm が最大感度なので、これを観測波長と考えることとする。DIMM 板はアルミ板や樹脂製 3D プリンターで治具を作成し、市販のウェッジプリズムを用いる。また、望遠鏡の格納庫としての観測室は気象条件（主に風）によるナチュラル・シーイングの観測を目指すよう室内で発生する擾乱を最小にするため南北に空気が抜けるような設計を予定している。

3. テスト観測

我々は実際に北極星を用いてテスト観測を行った。この観測は 2021 年 1 月 10 日 19:02 (JST) の 15 秒間の観測である。Meade 社製の ETX-125 (D=125mm, F=1900mm (F/15)) マクストフカセグレン光学系を用いて単開口にて、露出時間 10 ミリ秒、フレームレート 100FPS で観測した。図 2 の左図に観測された北極星の星像を示す。右図（下）には星像の重心位置でのカメラのダイナミックレンジ 12bit で規格化した明るさの時間変化を示す。右図（上）にはこの明るさの時間変化を用いたシンチレーションを示している。この観測時のフォーカス調整は手動で星像は広がっているのに、シーイングの効果もスミージングがかかっているものと考えられる。また、ランダムに変化するダークノイズが星像の背景に常に存在するため、パワースペクトル密度を計算すると 10Hz 程度のノイズが常に表れている。

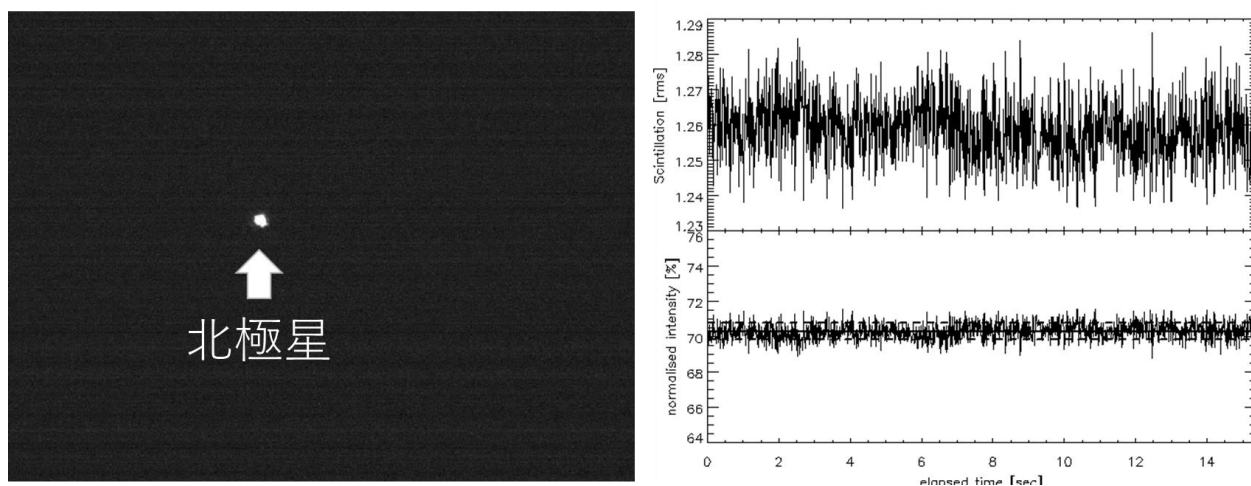


図 2 (左) テスト観測での北極星の星像、(右下) 星像の重心位置での明るさの時間変化、(右上) シンチレーション。

図 3 ではこの星像に対して 2 次元のガウスフィットを用いたその半値幅 (FWHM) の時間変化を示す。このテスト観測は単開口であるが DIMM による観測を想定した座標の表示で、青のプロットは DIMM の開口が並んでいる Longitudinal 方向 (実際は画像に対して横方向) の FWHM で、赤はそれに垂直な Transversal 方向 (実際は画像に対して縦方向) の FWHM である。像に対する横方向の広がりが常に大きくなっているが、これは光学系の収差によるものも含まれると考えられる。また、これらの FWHM は広がりをもつものの相関関係にあるので、方位に関係なく全体的にシーイングにより乱れた星像は十分に集光できずに広がっていると考えられる。また、図 2 に示した明るさとの相関はほとんど無相関ではあるものの、わずかに正の相関を示した。本来であれば、FWHM が小さくよく集光された星像は明るく、FWHM が大きい星像は十分に集光されずに暗くなるはずである。これらはフォーカスの不十分さの影響と考えられる。とにかく、現時点では岡山天文台での 1.2" とは大きくかけ離れているので、観測上の様々な条

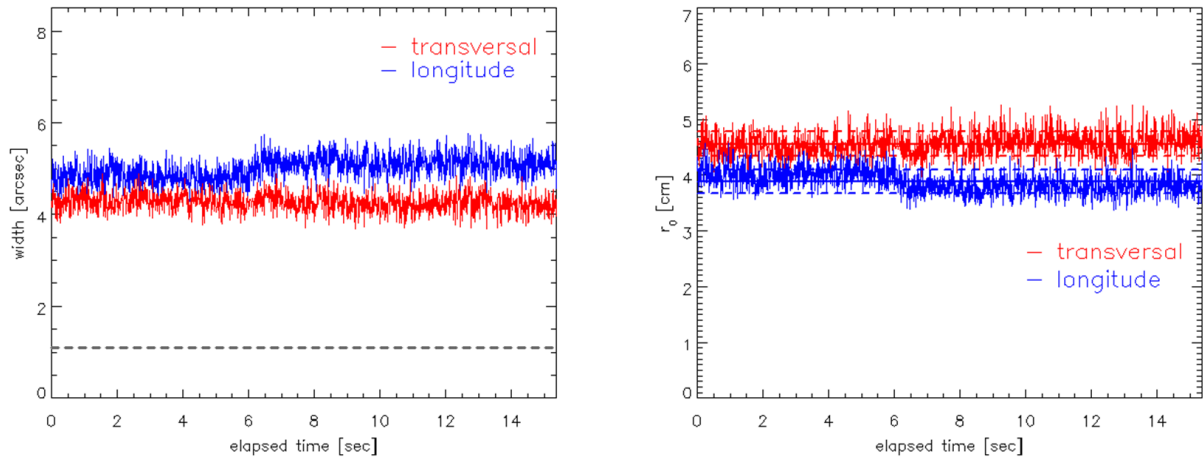


図 3 Longitude(青)と Transversal (赤) のそれぞれの方向に対応するシーイングサイズの推移。
(左) FWHM、(右) Fried パラメータ。

件を調べて観測精度の向上と観測の経験を積み重ねなければならない。図 3 の右図は左図の FWHM を上述の Fried パラメータの変換式で変換したものである。それぞれの色の違いは FWHM の取り方（横方向：青、縦方向：赤）の違いを示す。この Fried パラメータでは Longitudinal 方向は 4cm 程度で、Transversal 方向では 4.5cm 程度で推移している。このデータは天頂角による補正が行われていない。観測地の緯度から天頂角は $\gamma = 55.33[\text{deg}]$ なので、実際の値はここで表示される 70%程度になると考えられる。すなわち Fried パラメータは 3cm から 4cm で推移すると考えると悪いと言えないが、これはフォーカスなどの観測条件が大きく影響し過大に評価している可能性があると考えられる。

4. まとめ

我々の日本スペースガード協会では小惑星の観測精度向上及びデータ・クオリティや観測環境を維持するために、DIMM シーイング観測装置の開発を計画している。ここでは既存の望遠鏡などを利用してナチュラル・シーイングを測定するシステムの構築を行い、観測や解析の技術を獲得する。また、将来的には長期的で定常的なシーイングのモニタ観測を行うことを想定している。このようなデータは天文学としての利用は当然ながら、「揺らぎ場」の研究における基礎データとして、地形や気象などの観測環境条件と比較をおこない気象学や地理学などの地球物理的なサイエンスへの応用も考えたい。

参考文献

- Dierickx, P., 1988, *IMAQ 0.7, Diffraction Analysis Software Package*, ESO, Nov 1988
 Fried, D. L., 1965, *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, No.11, 1427
 Tatarski, V. I., 1971, *The effect of Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*, I.P.S.T., Jerusalem
 上田篤, 2003, 広島大学修士論文
 千代延真吾, 2005, 広島大学修士論文

流星群の多地点電波観測

○石村周平, 野澤恵(茨城大学), 渡部潤一(国立天文台),
寺澤敏夫, 吉田英人, 吉岡和夫, 吉川一朗(東京大学),
臼居隆志, 矢口徳之(日本流星研究会), 萩野正興, 浦川聖太郎(日本スペースガード協会)

概要(Abstract)

我々は流星の速度を導出するために多地点電波観測を行っている。ここでは電波観測の手法、解析方法を紹介する。流星電波観測とは、流星が発生する際に生じるプラズマ散乱による電波の反射を観測する手法である。この観測では光学による観測ができない条件においても流星の観測が可能である。この電波観測では3つの送信局と7つの受信局を設置し、多地点観測を行う。この受信された電波のタイムラグから流星の速度、方角、そして入射角を求めることができる。

1. はじめに

本研究の目的は、流星の電波観測を応用した多地点観測により流星の対地速度と軌道を求めることである。ここではアマチュア無線の周波数帯を流星観測に利用した HRO (HAM-band Radio Observation) というシステムを用いる。このシステムを用いると直接受信できない距離の電波を流星により生じるプラズマの反射を利用し観測することができる。一方で、従来の HRO のシステムでは流星の出現を捉えることはできるが、その軌道や速度を求めることはできなかった。本研究では、複数の観測地（電波の受信局）を設置した多地点観測により、流星群の速度と軌道を求め観測を行った。

2. 多地点電波観測について

ある流星を複数の離れた受信局を用いて観測した場合、送信局から発信された電波が流星痕に反射して受信される時間が受信局ごとに異なり、電波エコーの立ち上がりのタイミングにタイムラグが生ずる。図1はこの様子を模式的に表した概念図である。この図のように流星の進路に対して流星が大気を通過した際に電離して電離した地球大気が円柱状に発生する電離柱が生成されるのに伴い、流星痕で反射された電波が地上に到達する地点（受信できる地帯）が帯状に広がることわかる(これをフットプリントと呼ぶ)。電離柱内で流星痕 A-B 間のタイムラグは、流星痕に反射した電波が地上に届くフットプリントの幅と等しい。これにより実際に流星が飛んだ A-B のタイムラグを観測することができる。まずは各受信局の流星電波受信状況から電波の入射角と反射角が時のみ電波を強く反射している反射点と軌道の始点を求め、流星の飛んだ距離を導く。このように観測された各受信局でのタイムラグを用いて流星飛跡を求める。

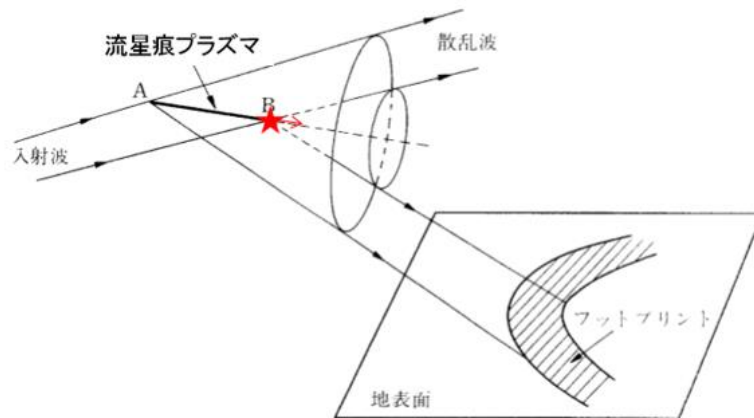


図 1 電波受信可能領域(フットプリント)の移動の図。

3. 観測装置

本研究での流星電波観測では電波の送信局と受信局が必要である。以下では送信局と受信局の観測装置について説明する。

まず、送信局については長野県のアマチュアの無線局の電波を利用した。無線装置についてはそれぞれであるが、大町市 53.90030 MHz、池田町 53.90015 MHz、安曇野市 53.90000MHz の 3 局から発信された電波を用いた。

図 2 は受信局の観測装置のブロック図である。受信用のアンテナは八木アンテナを用いるが市販されている 2 エレメント八木アンテナは観測周波数に最適化されていないため、50MHz 帯用の 2 エレメント八木アンテナを自作した。受信機はアイコム株式会社の IC-R75 と自作の受信機を使用している。本研究では時刻精度が重要であるため、GPS の受信機を用いて時刻合わせを行った。電波の受信機がアイコム株式会社の IC-R75 を用いている場合は株式会社インターフェース CSI-320312、自作の受信機の場合はディエステクノロジー社 FURY-10M を切り替えて用いる。受信した流星エコーの波形のログ

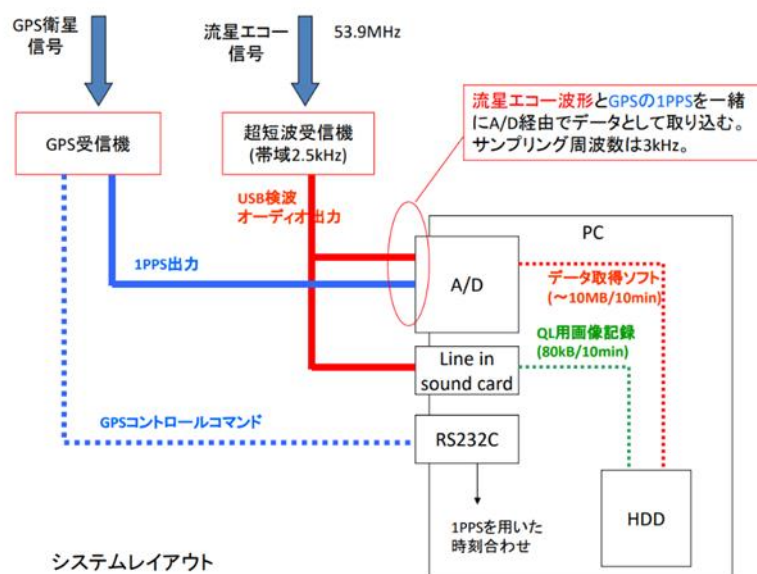


図 2 受信点でのシステムレイアウト。

ーには A/D コンバータ（株式会社インターフェース CSI-320312）を用いる。また、流星電波観測専用のソフトウェア HROFFT（大川， ）を用いて 24 時間自動で電波観測データを取得する。受信した電波はパワーとして表示される。このソフトウェアを用いると 600Hz でデータを出力し 10 分毎にファイルに保存する。1 日の連続観測では 144 のファイルを取得する。

4. 観測結果

流星群は母天体である彗星の軌道と地球の軌道が近づくときに発生する現象である。このため放射点方向を通過した彗星が残した流星となる物質が地球大気に突入してくる。同じような速度と方向の流星が多く発生し流星群として観測されるのはそのためである。流星群の検出は、1 つ 1 つの流星の速度と方位を解析し、近い速度や方向を持つ流星をまとめ、放射点を導出し、過去にカタログされた値と比較する。このような手法で 2019 年のふたご座流星群の解析を行った。

図 3 に多地点観測によって求めた速度と方位の結果を示す。図中の矢印は流星の飛翔方向を水平面に投影したものである。その根元の黒色は誤差自乗和 I が最小となる最初の反射点の位置で、高度は 90km であった。赤経の位置を高度一定のまま東西南北に変えると I は増大するが、その様子を青→薄い青→緑→赤の丸印と等高線で表している。

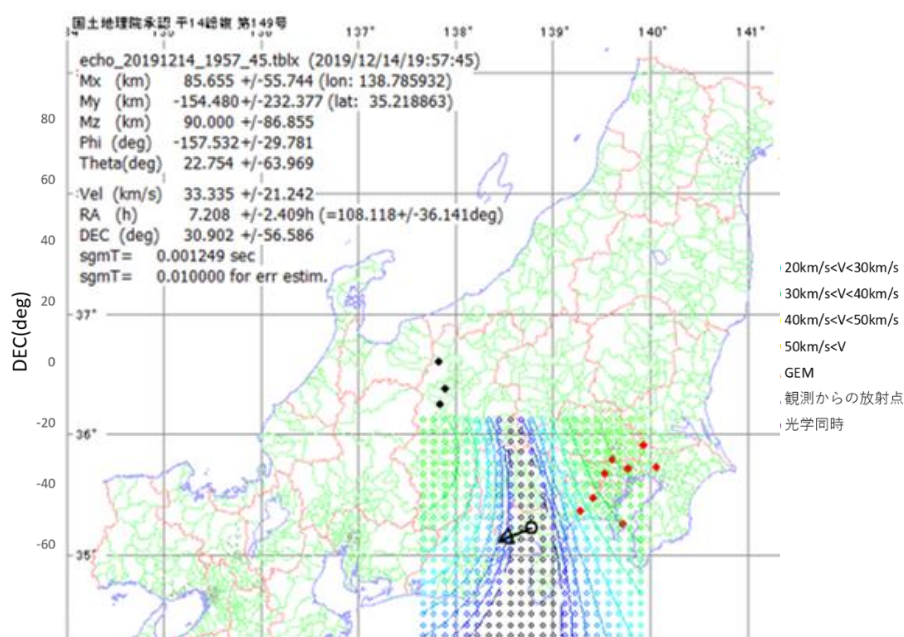


図 3 ふたご座流星群の多地点観測の結果。

図 4 は流星多地点観測により求められた放射点位置の分散を示している。赤円で囲まれた部分はふたご座流星群のカタログによる位置の中心付近を示している。本観測での半数以上がこの円内に分布している。本観測により求めた放射点位置は赤経 113.82(deg)、赤緯 27.34(deg)であり、流星の角距離の分散は $1\sigma=8.82(\text{deg})$ である。カタログによる放射点位置は赤経 112.32(deg)、赤緯 31.95(deg)である。本観測とカタログ値の放射点位置の残差は角距離で 4.79(deg)であった。この残差は分散の 1σ 以下となるため、多地点観測システムによりふたご座流星群を捉えられたと言える。

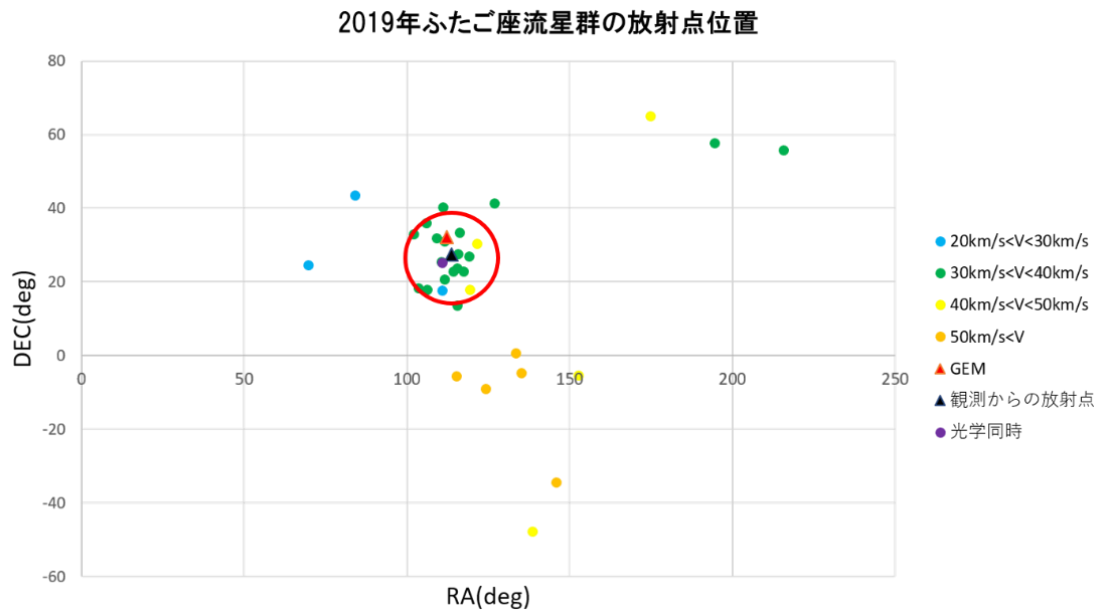


図 4 横軸は赤経、縦軸は赤緯。流星の到来方向の分布図

5. まとめ

本研究では送信局 3 地点及び受信局 7 地点による多地点における流星電波観測を行った。この解析結果はふたご座流星群の放射点を 1σ 以下でとらえることに成功した。このような観測が定常的に行われることにより、惑星形成論や太陽系形成論といったサイエンスに寄与できると考えている。本研究はその布石を打ったと考えている。

参考文献

- Hideto YOSHIDA, Toshio TERASAWA, Hideaki MIYAMOTO, Takashi USUI, Noriyuki YAGUCHI, Ichiro YOSHIKAWA., 2012, The Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations, Asteroids, Comets, Meteors (ACM) meeting 2012
- 臼居隆志(2010)JARL NEWS 2010 年夏号 pp55-62
- 寺沢敏夫, (2006), 「流星電波エコーの GPS 利用高時間精度多地点観測の現状」, 第 25 回生存圏シンポジウム, 第 10 回生存圏波動分科会「生存圏の波動の観測とその応用」
- 中村卓司 監修、RMG 編集委員会 編著、流星電波観測ガイドブック、CQ 出版社、2002
- 福田明、流星バースト通信、コロナ社、1997

重力波望遠鏡 KAGRA の補助光学装置

Auxiliary optical instruments for a gravitational-wave telescope KAGRA

○阿久津 智忠 (国立天文台) 、[Tomotada Akutsu (National Astronomical Observatory of Japan)]、ほか KAGRA collaboration

概要(Abstract)

日本の重力波望遠鏡 KAGRA は、世界的なコロナ禍にもめげず、昨春にひとまずの国際共同観測運転 (O3GK と呼称) を経て、現在さらなる性能向上のため様々なアップグレード作業に入った。本講演では、これまでの経緯を概説したのち、補助光学装置をはじめ干渉計のアップグレード作業全般の現状を紹介した。また、KAGRA のような大型装置をシステムとして成立させるために個人的にすべきと思ってきたこと、あるいはし始めた事項などを紹介した。

KAGRA, a gravitational-wave telescope in Japan, has been undergoing various upgrades to improve its performance after its first international joint observation run (called O3GK) last spring, despite the world's COVID-19 disaster. In this talk, after outlining the history of this project, I introduced the current status of the upgrade work of the interferometer in general, including the auxiliary optics. In addition, I introduced what I have personally thought we should do or what I have started to do to make a large instrument like KAGRA work as a viable system.

1. はじめに

KAGRA は日本初の本格的な大型重力波望遠鏡で、岐阜県飛騨市神岡町の池ノ山の地下に埋設されている [1]。KAGRA は 2010 年夏に建設予算の措置がされた後、まずは 2012 年 5 月から 2014 年 3 月にかけて新たなトンネルの掘削が行われた。その後、電気、排水、換気などのインフラを整え、各種のコンポーネントを敷設し、トンネル掘削完了から 2020 年春に本格的に運転するまでを約 6 年で成し遂げた。この間、必要最低限のセットアップにて 2016 年と 2018 年に試験運転をこなした。そこからさらなる性能だしのための調整 (commissioning) を続け、前述のように 2020 年春には第 3 期国際重力波観測網 (observation-3; O3) に途中参加して観測運転を行う予定であった。しかしながら、観測網参加条件の感度 (KAGRA の場合、中性子星連星の合体を観測できる距離に換算して約 1 Mpc 以上) に到達した頃には、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的な急拡大にともない、欧米の重力波望遠鏡 (米: LIGO、欧: Virgo) はシャットダウンの判断をしてしまっていた。KAGRA はこれであきらめず、当時まだ稼働していたドイツの GEO600 との同時共同観測の話を取りまとめ、2020 年 4 月 7 日から 21 日にかけて 2 週間という短い期間ではあるが、国際重力波観測網 O3GK として稼働する実績をつむことができた。

KAGRA は前述の LIGO や Virgo と同様に、レーザー干渉計測を手段として、時空の歪みの周期的変化 (すなわち重力波) を検出する装置である。現実的に発生する重力波は、最大のものでも 10^{-21} 程度

の歪み量（1 m の距離が 10^{-21} m 程度伸縮することに相当）と極めて微小であり、雑音に容易に埋もれてしまう。そのため、検出器への技術的要求は厳しい。例えば、端的に言って干渉計の基線長は長いほど重力波に対して感度が高く、現在の世代の検出器では基線長ほぼ数 km におよんでいる（KAGRA: 3 km、LIGO: 4 km）。基線方向は L 字に配置した 2 方向であり、いわゆるマイケルソン干渉計がベースとなっている。実際には、1 方向あたり 2 枚のメインミラーを対向させ、3 km 長の Fabry-Perot 光共振器を構成することで、検出感度を必要なレベルに高めている。このほか、高出力かつ高安定化された大出力のレーザー光源（目標 100W 程度）や、光学素子の防振装置、超高真空環境（目標 10^{-7} Pa）なども欠かせない。いっぽう、KAGRA に特有の、海外の干渉計と異なる点は 2 つある。1 つ目は、既に述べたが、地面振動が静かな地下環境に設置していることである。2 つ目は、メインミラー 4 つを 20 K 前後まで冷却し、熱雑音による悪影響を直截に低減させようという設計である。これらの設計思想は、世界的にも次世代の大型干渉計の概念設計に採用されており、その意味で KAGRA は最先端の重力波望遠鏡と言える。

国立天文台は、KAGRA を推進する主要 3 機関の一角として、多様かつ多数の装置類の設計から設置までを行うなど、建設の主翼を担ってきた。現在 KAGRA では、2022 年 6 月以降に開始予定の第 4 期国際重力波観測網（O4）に最初から十分な感度で参加することを目指し、さらなる性能向上作業を行なっているところである。今回は、この状況をふまえつつ、私が長らく牽引してきた補助光学装置のほか、この春から兼任している KAGRA の systems engineering office での活動を通じて得た大型装置組み立ての技術的課題などについて概説した。

2. 次の観測に向けて

KAGRA は、次回の観測 O4 においては、中性子星連星の合体を観測できる距離に換算して 25 Mpc 以上の感度を目指している。いっぽう、O3GK においては、平均的な感度は 0.5-0.6 Mpc 程度であった。したがって、ここから 50 倍以上感度を向上させる必要がある。

なぜ感度が悪いのか？本当に改善するのだろうか？それを突き詰めるため、O3GK 後からは、雑音化のプロセスを同定するための測定や、その解析、情報の整理が行われてきた。また、次のステップへのキーとなる resonant sideband extraction（RSE）というレーザー干渉計測モードの KAGRA 実機での実証を目指した作業をこの秋まで行ってきた。それ以降から今日にかけては、ここまでに得られた知見を元に、累積した不具合への対応や、追加の迷光対策用の光学バッフルやシールドなどの設置作業など、真空槽を開放して行う大規模な現場作業を進めているところである。

感度とともに重要なのが、中・長期的な安定性である。O3GK での振る舞いを例にとると、KAGRA の感度は一時的に 1 Mpc 近くをたたきだしたものの、前述のとおり平均的には 0.5 Mpc 前後に留まっていた。また、これまでの知見から、このような安定性のための制御を軽視すると、たとえば干渉計のモードを前述の RSE にして運用しようとしたときに、制御の切り替えがうまくいかないか、切り替えられても即座に破綻し、レーザー干渉条件を失ってしまうことがわかってきた。このため、次回の観測運転までには、このような中・長期的安定性 --- 具体的に言えば、ミラーを吊るすサスペンションの長周期振動の制振や、ミラーの角度制御、レーザー光軸のドリフトの制御など --- によりリソースを注ぐ方

向で動いているところである。

この中で絵私が主担当する補助光学装置は、前述の光学バッフルやシールドが相当する。バッフルたちの組み立てなどはすでに三鷹の先端技術センターのクリーンルームにて完了しており、脱湿材とともに密閉梱包して、神岡現地に運びこんである。あとはインストールするのみであるが、どの真空槽も直径は 1.2~1.5 m ほどで狭いことから、バッフルやシールドがメインの干渉計ビームを削ったりして重力波検出器としての性能を落とさないように注意しなければならない。このため、インストール作業は実は性能だし (commissioning) 作業と並行して行われることになる。KAGRA のような大規模な装置では、こういったインターフェース調整に細心の注意を払わないと、最終的な性能には届かない。いっぽうでまさに、インターフェース調整をはじめとするシステム・エンジニアリングこそが KAGRA 全体としての弱点であった。

3. KAGRA チャレンジ

KAGRA の最初期から 10 年経とうとしている今、前述のような弱点がなぜ残っているのか、あるいはなぜ弱点として（最初から）存在したのか、個人的に振り返ってみたい。立場により様々な回答がありうるが、その 1 つとしては、建設に係わるサイエンティストたちの間で、エンジニアリングという観点の理解度に幅があったことだと個人的に思っている。小さな個人実験室出身のサイエンティストのほとんどにとって、それぞれ己の考える最高の「部品」（作品？）をそれぞれ持ち寄って来たところで、一個の動作する大規模システムを構築できない --- 部分最適と全体最適には違いある --- ということ自体が想像の外にあったように思える。あるいは、「部品」と「部品」をつなぐインターフェース部分には、必ず“nameless”な仕事が発生するが、それは大抵、残念ながら科学的興味をかきたてるものとは限らないし、直接論文にもならないわりに時間だけは食うものである。こういった（サイエンティスト的には）「細かい」ことに気がまわらないか、あるいは指摘があってもそれを重要視せず対応を先延ばし（極論すれば永遠に！）したくなるが、しかし重要な「つなぎ」であることに変わりはない。たとえば、骨 1 本 1 本の頑丈さは重要だが、それらを集めても骨組みはできず、関節を導入してはじめて多様な構造や動きが可能になるわけである。KAGRA の例で言えば、1 つの真空槽に複数のサブコンポーネントが収められるのであるが、それにはそれぞれの取り合いの調整が十分なされ（続け）なければ、軋轢の元となる。早い者勝ちではシステムは組み上がらない。否、組み上がるのであるが、膨大な時間がかかって期限に間に合わない（今回は、O4 に間に合わせようという喫緊の目標がある）か、システム的に下流の工程を担当する者に負担が蓄積していく構図となる。これは改善すべき状況であろう。

しかし、現実問題としてはどうすればよいのだろうか？という問いにまだ明確な回答を持っていない。これは KAGRA に特有の問題だろうか？他の大規模プロジェクトでも多かれ少なかれ散見されるのだとすると、われわれの平均教養としてそういう観点がそもそも無いことが問題の根本なのかもしれない。小学校からなんらかのシステムエンジニアリングを学んでもらって、30 年後に期待するのであろうか。いずれにせよそういった教育が成果をだすには時間がかかるので、KAGRA としては、対処療法としてもなんらかの手当が必要になってきた。

そういうわけで、まずは見えている範囲で不足している部分を補っていかうと考えた。たとえば、品質

の確保を目的とした

- 図面管理のプロセス
- インターフェース管理のプロセス
- 新規設計 or 設計変更のレビュープロセス

といったあたりが、KAGRA 全体ではまだ公式に常設されていない。注意すべきは、書類上の常設はいくらでもできるかもしれないが、品質のかわりに関係者の負担が非現実的なほど増大してしまうようではまずいということである。負担の非現実的なあるいは不公平な増大は、ただちにプロセスの形骸化につながる。

ともかく、まずは図面管理のプロセスから手をつけ始めているところである。たとえば、各真空槽の中身も含めた正式な組み立て図面がないにもかかわらず、これまでまがりなりにも組み立てが進み、1 Mpc もの感度が出たこと自体が奇跡の産物と個人的は思っている。独立独歩の気質が強いサイエンティストの方々に協力していただけるような統一的なプロセス、という一見互いに矛盾する作業ではあるが、なんとか解をみつきたい。他のプロジェクトの方々などで、知見やアドバイス、お叱りなどがあれば是非ご教示願いたい。

4. まとめ

KAGRA は、COVID-19 にもめげず 2020 年春に国際共同観測をなしとげた。これで 1 つのマイルストーンを達成したといえる。感度は中性子星連星の合体の観測可能距離に換算して平均で 0.5 Mpc 程度であった。2022 年 6 月以降に予定されている次回の国際共同観測までに、感度をあと最低 50 倍は向上させる必要があり、現在そのためのさまざまな観点からの改善作業が行われている。本講演では、私が長らく主担当してきた補助光学装置のほか、現在進んでいる干渉計のアップグレード作業全般の紹介をするとともに、KAGRA がシステムとして抱える課題や、その対応策として考えていることなどを紹介した。

5. References

[1] KAGRA Collaboration, Prog. Theo. Exper. Phys. **2018**, ptaa125 (2020)

金属 3Dprinter 立ち上げ進捗報告

○金子慶子、神澤富雄、三ツ井健司、福嶋美津広（国立天文台 先端技術センター）

概要 (Abstract)

近年、付加製造(Additive Manufacturing、以下 AM) は世界各国で飛躍的に発展をしてきている。AM を実現する装置である 3D プリンタは、それまでの切削加工による、材料を削りだして形状を生成する「引き算型」に対し、3D データを素に材料を積層する「足し算型」方式であり、切削加工とは異なるアプローチで形状を実現することができる。3D プリンタの種類としては、用いられる材料(樹脂、石膏、紙、金属、食品、バイオ等)、溶融源(ヒータ、光、レーザ、電子ビーム等)、動作方法(フィラメント溶融、粉末溶融凝固、直接噴霧等)などにより様々な種類のものが存在する。天文学に関する装置開発においては、観測装置の大型化、構成部品の複雑化が進み、より高度な設計製造技術が求められている。またプロジェクトの大規模化が進み、人的リソースの制約から開発の効率化も求められている。国立天文台各プロジェクトの装置開発に関わる先端技術センター(Advanced Technology Center, 以下 ATC) は、新しい技術である AM に着目し、アルマプロジェクトと協力して AM および 3D プリンタに関する調査を 2015 年度より進め、複数装置による具体的な試作製造評価進めた結果、より踏み込んだ検討のためには実機を所有し、内製を試みる必要があるという結論に至った。これをもとに、2019 年 8 月に装置を導入し、現在装置立ち上げ作業と、並行して初期製品製造を進めているところである。口頭発表では、導入装置の概要および装置運用を担当する ATC メカニカルエンジニアリングショップ(Mechanical Engineering Shop, 以下 ME ショップ)での現在の状況を報告した。本投稿はそれらに加え、装置導入のために ATC 内でおこなわれた準備作業等についても一連作業の記録として触れることとする。

1. 導入装置および設置場所概要

今回 ATC へ導入した装置は独 EOS 社製 M290 である。装置外観を図 1 に、仕様を表 1 に示す。400W Yb ファ이버レーザを造形ステージ上に薄層状に敷いた粉末材料に照射し、溶融凝固しながら積層するタイプの装置である。造形可能な材料の種類は鉄系、コバルト系、ニッケル系などがある。今回我々は、地上観測装置開発で最も頻繁に使用されるアルミ材料と、衛星機器に使用されることの多いチタン材料を初期材料として導入した。造形中の庫内雰囲気はアルゴンガスを使用する。



図 1. EOS M290 外観

表 1. M290 仕様

Machine Spec	
Machine	EOS M290
Manufacturer/ Japanese Agency	Electro Optical System (EOS), Germany / NTT data XAM technologies
Type of Method	Selective Laser Melting(SLM)/ Powder Bed Fusion (PBF) type
Max. Processing Size	250x250x325 [mm]
Layer Pitch	20-60[um] (*depends on material)
Laser type / Power	Yb-fiber laser / 400[W]
Usable Material	Al, SUS, CoCr, Ti, Ni, Maraging
Usable Gas in Chamber	Ar, N2

装置は開発棟 1 号館 1 階、旧光学実験室に設置した。M290 自体のサイズは、付帯するガス再循環フィルタシステムを含め必要面積約 3 x 3m 程度であるが、今回、設置環境として図 2 にあるように 13.0 x 6.8m の部屋を準備した。これは、本体運用のために必要なコンプレッサ、チラーだけでなく、材料を安全に搬送する運搬機器、粉末材料を再利用するための処理システム、造形した製品の後処理をするためのワイヤーカッターやブラスト装置、材料を保管するデシケータ等、多くの関連機器を設置する必要があったからである。また作業のために人が移動できる空間も必要なため、結果、運用を開始した現在ではこの部屋でも少々手狭に感じている。

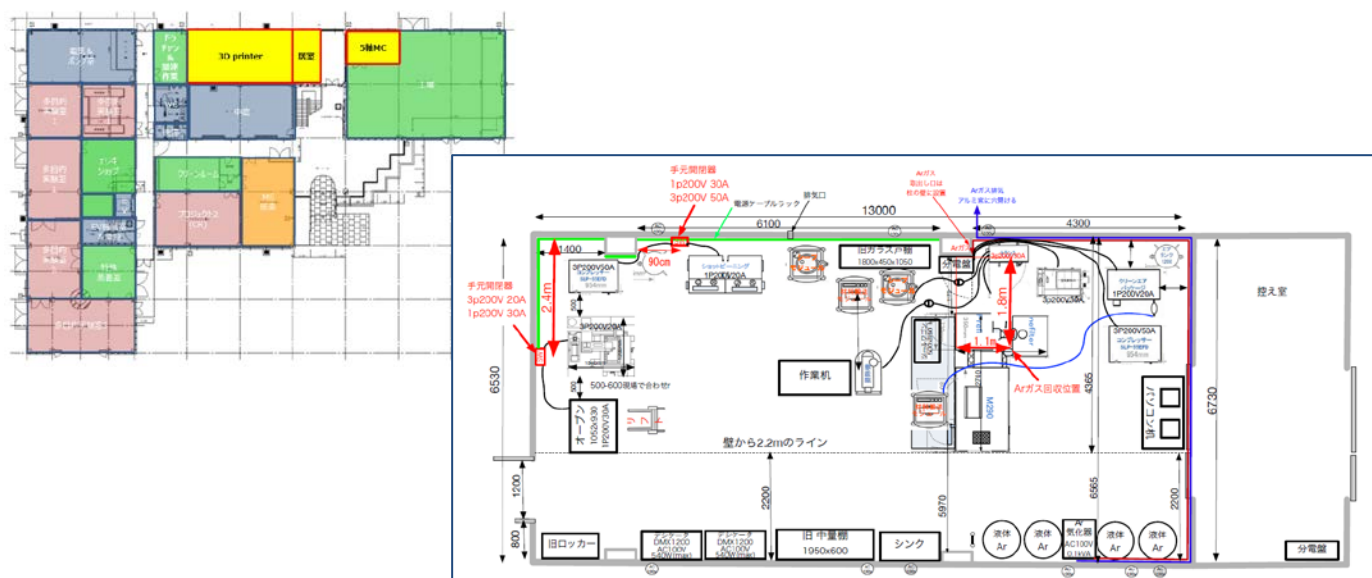


図 2. 開発棟 1 号館内装置設置場所(左上)と造形室内配置(右下)

2. 装置選択の背景 – 2016～2017 年度実施の基本調査–

3D プリンタが広く知れ渡るようになったのは 2010 年前後、欧州で所有されていた特許保護期間終了や米大統領一般教書演説の影響などにより、世界中でブームとなった。国立天文台でも、樹脂フィラメントを用いた装置が、広報用展示品造形や観測所での装置モックアップ造形用として取り入れられている。しかし観測機器への実用を目指すには金属造形装置が必要である。そして金属の装置は高額であり、本当に天文観測装置にとって有用かどうか未知数である。そこで、具体的に調査をするため、2016 年 1 月に ATC とアルマプロジェクトで協力してワーキンググループ形式のチームを発足し、調査することにした。調査方法としては、具体的な部品造形を複数社に依頼し、その依頼相談の中で装置と AM についての知識を深め、また製造したサンプルを評価して、この技術が天文観測機器開発に有用かどうか検討することとした。サンプルとしては、電波天文観測用部品の中から、あまり複雑すぎず、外形形状測定だけでなく部品としての性能評価までおこなうことを目指し、当時設計開発を進めていた 35-50GHz 帯コルゲートホーンを選択した。調査対象装置としては、レーザ照射粉末積層タイプ、電子ビーム照射粉末積層タイプ、バインダジェットタイプ、積層+切削ハイブリッドタイプのほか、シート積層の観点で拡散接合も含めた。本検討の詳細内容についてここで述べることは避けるが、結果として、以下に該当するものが天文観測機器開発へ有用な可能性があると判断された。

- ・造形はレーザ照射粉末積層タイプで実施し、必要に応じて 2 次加工として切削加工を別途行う

- ・レーザパラメータをユーザ側で操作できることで、造形条件を最適化できる可能性がある
- ・材料として、アルミ、チタン、ステンレス系の使用が可能である

これ以上の深い調査のためには、実際に装置を所有して自分たちで扱ってみなければわからない、というところで、この調査 WG は停止した。その後、実際に装置を導入する判断が天文台執行部より下されることとなった。

3. 導入準備

必要なことは、大きく 2 点あった。装置そのものの調達と設置場所の準備である。装置の調達に関しては、比較的大きな政府調達案件であるとはいえ、財務課調達係のハンドリングにより進められた。問題は設置場所準備である。なぜなら装置の調達が決定した時点で、装置の具体的な設置場所は未検討だったからである。設置環境条件として以下が挙げられた。

- ・装置の安定運用のため、建物 1 階であること
- ・床が外部振動を極力受けないこと
- ・温湿度管理が可能なこと
- ・造形雰囲気としてアルゴンを使用するため、アルゴンガス供給装置を室内に設置可能もしくは近くに設置可能なこと。それに伴う排気設備、安全配慮の空調設備を設けること
- ・必要電源供給が可能なこと
- ・粉末掃除機やワイヤーコンター設備に使用する水道水が供給されていること

1) 場所の確保

装置導入決定時点で、開発棟内で未使用な部屋がなかったため、ATC 運営委員会を中心に居室を含む 1,2 号館すべての部屋の利用状況の確認と、ちょうど利用開始され始めた 3 号館を含む可能性の検討をし、結果、光学実験室への設置が決定された。光学実験室利用者の実験環境を別に確保するため、最終的に開発棟 1,2 号館の大部分にわたる大幅配置換え、玉突き 4 段階となる大引越し大会が 2018 年 8-12 月の 4 か月にかけて実施された。ATC は天文台内外から共同利用を受け付けており、申込時の年度当初にはこのような話はまったくなく、突如決定されたこの居室と実験室移動は外部利用者だけでなく ATC 所属職員にとっても完全に青天の霹靂であった。にもかかわらずご協力いただいた皆様に深く感謝申し上げたい。

2) 設置準備工事

先に上げた条件を満たすために必要となった工事類は以下となる

- ・建築工事（壁、天井、床、扉）
- ・電源一次工事（変圧器増設、分電盤設置、照明、コンセント）
- ・電源二次工事（装置本体への電源接続および室内ケーブルとりまわし）
- ・空調工事（新設、既存空調移設）
- ・ガス工事（配管、ボンベステーション設置、初期駆動ガスボンベ設置）
- ・水道工事

装置設置場所に加え、同時進行していた工場への 5 軸マシニングセンター導入にともなう ME ショッ

ブ職員居室移動もあったため、工事は第 1 段階(居室側)と第 2 段階(造形室側)にわけられ、第 1 段階を 2019 年 1-3 月に、第 2 段階を 4-6 月に実施した。3 か月という短期間で計 6 社がひとつの部屋の工事をする事となったため、工事開始前には施設課主導での全社顔合わせの機会を設け、工事日程の取り合い、内容の相互確認をおこなった。設置環境整備においては、室内設計から工事完了まで、約 1 年間にわたり施設課の皆様の多大なるご支援をいただいた。

3) 装置導入

装置導入の様子は、情報センター主導による動画が公開されているので、そちらを参照されたい。
搬入風景、装置に関する説明がわかりやすくまとめられている。

Youtube; <https://www.youtube.com/watch?v=OpluK48-1tU>

ニコニコ動画: <https://www.nicovideo.jp/watch/1588322403>

4. 現在の活動状況と今後の予定

発足時より現在まで、ATC ME ショップ AM チームは 3 名の構成員で運用をしている。造形装置の操作には、専門のトレーニングによる技術習得が必須であり、装置導入時点でこの 3 名が受講した。運用にあたっては、造形装置そのものの扱いだけでなく、全体の作業手順、材料粉末の取り扱い方、廃棄物処理の方法、安全管理、モデル生成のための 3D-CAD およびサポート生成専用ソフトの操作方法、付帯する周辺装置の取り扱い方など、非常に多くのことを学習する必要がある。また、造形そのものも、造形時のちょっとした配置の工夫やパラメータ変更により最終製品の完成度が変わるため、各種条件を試すことにより、「何をしたらどうなるか」を、ひとつひとつ体験しながら習得する必要がある。現在は、これらの基本技術習得をおこないつつ、造形品の物性確認を進めている。金属積層造形にあたっては、材料粉末をレーザの照射熱で一旦熔融させ再凝固させるため、物性確認は最終的に製品ごとに行う必要があり、立ち上げ期間である現在は、代表値となる一般物性の確認をおこなっている。具体的な物性評価結果については、初期造形製品開発に関する報告とあわせて別の機会におこなうこととする。

5. まとめ

本発表では、ATC を中心に進めてきた AM および 3D プリンタに関する初期調査と装置導入について報告した。装置導入から約半年後の 2020 年春からの新型コロナ感染拡大により出勤制限がされる中で、実作業を伴わざるを得ない立ち上げ作業が多少なりとも遅れたことは否めないが、一方世間では、マスクやフェイスガードなどが医療従事者に短期間で大量に提供されるといった、デザイン→試作のサイクルの早さという AM の特長を生かす事例も見られた。今後は、AM の特長を実際の天文観測装置へいかに応用するかを検討を進めつつ、AM に関してより広く深い知見の蓄積を目指す。

謝辞

基本調査から装置導入および立ち上げにおいて多大なるご協力をいただいた NTT データザムテクノロジーズの皆様、装置導入にあたりご協力いただいた財務課調達係の皆様、施設課の皆様、ATC および ATC 利用の皆様、関係各方面の皆様に、あらためて深く感謝申し上げます。

国立天文台・天文データセンター 大規模観測データ解析システム III

○磯貝瑞希、古澤久徳、山根悟、田中伸広、巻内慎一郎、小澤武揚、亀谷和久(ADC)、大倉悠貴、岡本桜子(ハワイ観測所)、高田唯史、小杉城治(ADC)

概要(Abstract)

国立天文台天文データセンターでは、ハワイ観測所すばる望遠鏡の超広視野カメラ HSC など、解析処理に多くの計算資源を必要とする大規模観測データ用の解析システムを構築し、運用を開始している。本システムは大容量かつ高速 I/O を持つストレージと総コア数 1,976 の計算ノード他から構成されており、演算性能は今年度実施の増設で大幅に増強された。本講演ではシステムの概要、計算ノードの増設、増設後に実施した性能評価試験、現在の運用状況と今後について報告する。

1. システムの概要

大規模観測データ解析システム(以下本システム、図 1)とは、ハワイ観測所すばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) など、解析処理に多くの計算資源を必要とする大規模観測データ用の解析システムで、HSC を用いたハワイ観測所戦略枠観測プログラム(HSC-SSP)を含む HSC 共同利用観測者への解析環境提供が初期の主な目的である。このため、初期運用中はシステムを HSC 観測データの解析処理に最適化し、ユーザは HSC 共同利用観測者(PI/CoI)と HSC 観測データ(過去の観測やアーカイブを含む)解析者(以下一般ユーザ)に限定している。本システムの構築は天文データセンター(ADC)、運用は ADC とハワイ観測所(HSC 共同利用+SSP 分)が担当している。

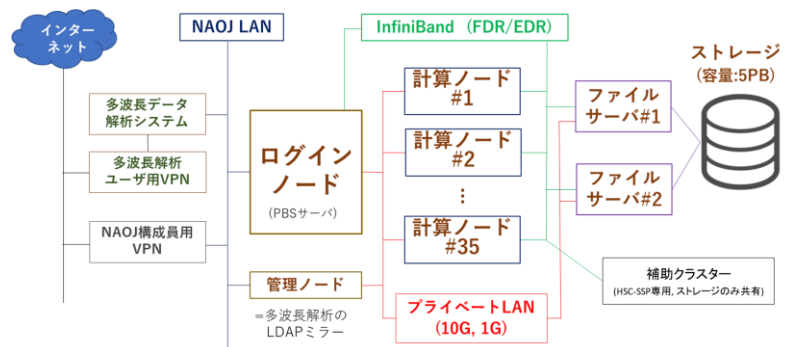
本システムは、ログインノード 1 台、計算ノード 35 台、ファイルサーバ 2 台、ストレージ、管理ノード 1 台で構成される。OS は Red Hat Enterprise Linux 7 またはその非商用版クロンの Cent OS 7 である。計算ノードは仕様の異なる 4 タイ

図 1 大規模解析システムラック列



プの計算機で構成されており、全 35 台の総コア数は 1,976、総メモリ量は 18.5TB である。ストレージは容量 5PB でファイルシステムは IBM 社の Spectrum Scale である。図 2 にシステム構成図を、表 1 に計算ノードの仕様一覧を示す。

図 2 システム構成図



本システムは、ADC が運用し国内外の研究者へ共同利用サービスとして解析環境を提供している「多波長データ解析システム(以下多波長解析)」とユーザ情報を共有しており、システムの利用には多波長解析のアカウントを必要とする。また、計算資源の効率的な利用のため、本システムでは計算ノードの対話的使用を禁止し、計算資源はジョブスケジューラで管理している。ユーザはログインノードからジョブを投入することで計算ノードを使用する。ユーザが利用可能な計算資源とその割り当ての優先度・期間は表 2 に示す通りユーザタイプによって異なり、HSC 共同利用観測者は優先度が中（または高）で、優先利用期間は利用宣言開始から 1 年間(インテンシブプログラムの場合はプログラム最終セメスター終了から 1 年間)、一般ユーザは優先度が低、利用期間は最大 1 年間(ただし更新可)である。ジョブ投入の際に使用するキューもユーザタイプに応じて用意しており、現在のキュー構成は表 3 に示す通りで、HSC 共同利用観測者は 1 ジョブ当たり最大で 112 コア、1,800GB のメモリを 15 日間利用可能な qm キューを、一般ユーザは 1 ジョブ当たり最大で 32 コア、450GB のメモリを 15 日間利用可能な ql キューを使用可能である。上記キュー以外にも、1 プロセスで 1TB 超のメモリを必要とする解析用の qhm キューやテスト用の qt キューを用意しており、これらのキューは全ユーザが使用可能である。

表 1 計算ノード仕様一覧

ノード名	台数	OS	CPU	メモリ	総コア数	総メモリ量
an[01-05]	5	RHEL7	Intel Xeon Gold 6132 2.6GHz 14core x4	1TB	280	5TB
an[06-07]	2	CentOS7	AMD EPYC 7601 2.2GHz 32core x2	512GB	128	1TB
an[08-31]	24	CentOS7	AMD EPYC 7742 2.25GHz 64core	512GB	1,536	12TB
an[91-94]	4	CentOS7	Intel Xeon W-2145 3.7GHz 8core	128GB +2TB swap	32	512GB +8TB swap
総数	35				1,976	18.5TB +8TB swap

表 2 利用可能な計算資源・利用期間

ユーザタイプ	アカウント取得方法	利用可能な計算資源	資源割当の優先順位	利用可能なキュー	利用可能期間
HSC-SSP	---	~ 2,000コア	高	qssp, qt, qhm	~2か月x2/年
HSC共同利用観測者 (インテンシブ含む)	ハワイ観測所 経由	112コア	中・高	qm/qh, qt, qhm	利用宣言後1年間 (プログラム終了+1年)
一般 (過去のHSC観測者、 アーカイブ利用者など)	ADCへ 利用申請 (随時)	32コア	低	ql, qt, qhm	最大1年間 (更新可)

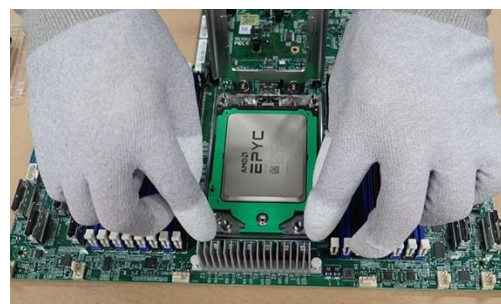
表 3 システムのキュー構成 (現状)

キュー名	優先順位	CPUコア数		メモリ量 [GiB]		同時実行可能ジョブ数		実行可能ノード
		最大	デフォルト	最大	デフォルト	ハード	ソフト	
qssp	最高	1,944	56	16,200	450	---	---	01-31
qh	高	280	56	4,500	450	---	---	
qm	中	112	56	1,800	450	---	1	
ql	低	32	28	450	225	---	1	
qt (テストキュー)	最高	4	4	64	64	1	1	91-94
qhm (最大1TB超メモリの解析専用)	中	32	8	7,960	1,990	---	1	

2. 計算ノードの増設

本システムは 2019 年 10 月に計算ノード 5 台構成で運用を開始し、その後 2020 年 4 月に計算ノード 30 台を増設、約 3 か月の HSC-SSP 専有利用またはユーザを限定した試験運用の後、同 7 月に HSC 共同利用観測者に増設分を開放している。この増設分 30 台のうち CPU に AMD EPYC を採用した 26 台はパーツを調達・自作(図 3)し、筐体なしで運用することで購入費用を圧縮している。この 26 台分の導入にあたり、2019 年度前半に試験用として 2 台分のパーツを調達し、組立・構築・動作試験で動作確認と経験を積んだ後、2019 年度後半に 24 台分の調達・組立・構築・動作試験を実施している。更に 2019 年度末には運用中および調達済みの計算ノードでは実行できない、1 プロセスで 1TB 超のメモリを必要とする解析

図 3 CPU 取付作業の様子



用に、2TB の NVMe SSD を搭載した計算機 4 台を調達・構築し、SSD を swap 領域とした上で動作試験を実施、ユーザを限定した試験運用の後に全ユーザへ開放している。

3. 性能評価試験

計算ノード増設後に、並列処理数増加による I/O 性能への影響確認を目的とした性能評価試験を実施した。試験は分散ファイルシステムのベンチマークソフト IOR を使用したファイル読書速度測定で、総コア数と同数のファイル(容量:100MiB)のシーケンシャル書込/読込を並列実行し、この実行を 10 回繰り返したものを 1 セットとし、それを 2 セット試行している。試験を実施するノードは、増設前から運用していた 5 台、増設した 30 台のうち AMD EPYC CCD を搭載した 26 台、全 35 台の 3 種類に分けている。図 4 がその結果である。

左側が Write の結果、右側が Read

の結果で、縦軸は GiB/s 単位の速度である。この図より、並列数を増加させると Write/Read とともに速度が低下するが、最も速度が低いのは最も並列数が多い全 35 台ではなく、全 EPYC ノード 26 台であることがわかる。

この速度低下の原因は、システム内で使用している 2 台のインフィニバンドスイッチ(図 5 に示す通り、一方に EPYC ノード 26 台が、もう一方にファイルサーバを含み管理ノードを除く残りの全ノードが接続されている)間の接続が EDR 規格のケーブル 1 本で、その帯域幅

(100Gbps、実効転送レートでは 11.3GiB/s)で制限を受けているためとほぼ特定できている。この改善は今後の課題であるが、実際の運用においては試験のように多数の I/O 処理のタイミングが一致し、実効転送レートの上限で制限を受ける状況がまだ起きていないことをシステム監視等で確認している。

4. これまでの運用状況と今後

2020 年 10 月より HSC データ解析に限定した一般ユーザの受け入れを開始しており、現在のアカウント保持者は 14 名である。2019 年 10 月の運用開始から 2020 年 12 月末までの 15 か月間で、17,459 ジョブが実行され、ジョブ実行の積算 CPU 時間は 18,749 日、12 月末時点でのストレージ使用量は総容量 5PB に対し 2.9PB の利用状況であった。

今後については今年度中に計算ノードを 5 台増設予定であり、また HSC に限定しないデータ解析希望者の受け入れを検討中である。

図 4 性能評価試験結果

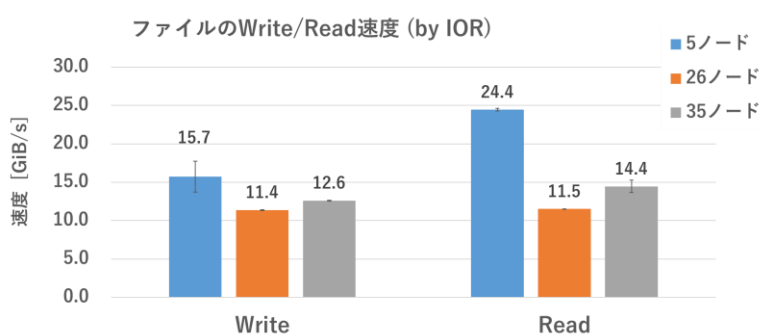
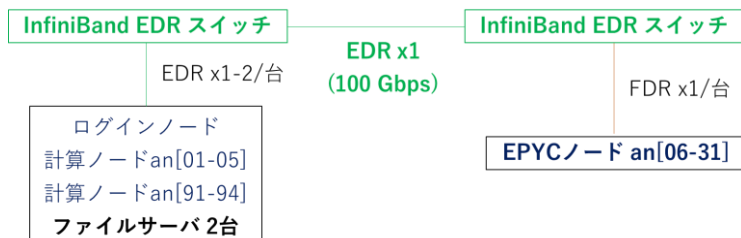


図 5 インフィニバンド接続図



多色サブミリ波カメラ用多段型多孔質膜赤外線フィルターの開発

○長沼桐葉、吉岡佳輔、酒井剛(電気通信大学)、大島泰(国立天文台)、
竹腰達哉(北見工業大学)、丹羽佑果(東京工業大学)、宇野慎介、陳家偉、井上修平(東京大学)

概要(Abstract)

我々は極低温検出器を用いた多色同時撮像型の超広視野ミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。本カメラの広視野光学系と極低温環境(<250 mK)の両立には、光学開口から侵入する 300 K の輻射を遮断する赤外線フィルターが不可欠である。我々は多孔質ふっ素樹脂(PTFE)膜を多段にし、かつ、膜間距離を観測波長以下にして干渉させることで高透過率を実現する最適化を行い、観測帯域 (120-720 GHz) で低損失と赤外線遮断を両立する多層フィルターを設計した。さらに、その設計を基にして組み立てられた多層フィルターは、10 層の積層においても 120-720 GHz で平均反射損 2%未満を達成した。

1. はじめに

赤外線は自身より大きな粒径の空孔によって散乱されることが知られている[1] [2]。また、PTFE はミリ波サブミリ波で高透過率を有するため、これらの要素を併せ持つ多孔質 PTFE がミリ波サブミリ波用の赤外線フィルターとして注目されている。この用途の代表例として、空孔径 $\sim 6\ \mu\text{m}$ の Zitex (SAINT-GOBAIN 製) という多孔質 PTFE で作られた濾過フィルターがこれまでよく用いられてきた。

2. 先行研究と問題点

Zitex の問題点として、その実効屈折率が 1.25 であるため、膜内での光の干渉によって透過率にフリッジが生じ、ミリ波サブミリ波での反射損が無視できない点と、赤外線の吸収によって膜が温まるが、薄いために熱伝導が悪く、1 枚では新たな赤外線放射の源になってしまう点が挙げられる。

この問題に対して、我々は過去に多段 Zitex フィルターを開発し、多色カメラに搭載してきた[3]。これは膜と膜の間に空隙を設けて多段にすることで膜による赤外線の吸収と再放射を段階的に減衰させる方法であり、原理的に極低温ステージへの熱負荷を下げるのが可能となる。また、そのような多層膜の場合は膜間で光の干渉によって透過率が大きく下がってしまう帯域が現れるため、シミュレーションによってこの膜間の空隙を最適化する必要がある。これらに基づき、我々は 3 つのバンドを通す 3 層 Zitex フィルターを開発した (図 1)。この方法はバンドに合わせた設計によって多色で高い透過率を達成できる利点があるが、我々が新たに考えている 120-720 GHz における 6 色のバンドでは透過率が大きく下がる部分が多く被ってきてしまうことが新たな問題となる。

一方で、低屈折率の材料をフィルターに用いればよいというアプローチから、Styrofoam を用いた RT-MLI が登場した[4]。Styrofoam の屈折率は 1.02 と非常に低いために反射損を無視できることと、上述の多段にすることで段階的に温度を下げられるという原理を用いていることから RT-MLI はミリ波領域で赤外線フィルターとして実用化されてきた。しかし、Styrofoam は空孔径と同程度のスケールであるサブミリ波まで散乱してしまうことが問題であり、我々には別の方法が必要となる。

以上から、赤外線フィルターとしては多孔質 PTFE の多段化が有効であり、その上で超広帯域化は屈折率や膜厚、膜間の空隙を選び最適化することによって達成できないかを検討していくことが開発方針となる。

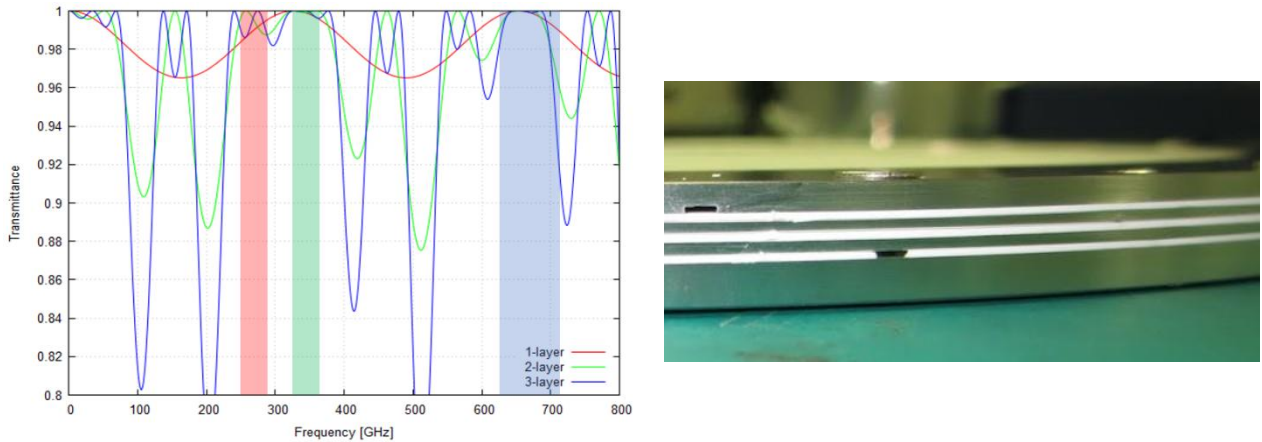


図 1. スペーサーによって膜間に 1 mm の空隙を設けた 3 層 Zitex フィルター（右）と、カラーバーで示した 3 色のバンドに対する透過率（左）

3. 方法

多層膜の場合は膜間での干渉を考える必要がある。ここで、屈折率を n 、膜厚を d 、空隙を gap としたとき、膜厚と空隙を Optical Path Length (OPL) として $nd + gap$ で近似できる。いま膜間での干渉によって透過光が大きく弱められてしまう場合の共振条件を求めると、光の波長を λ として、それは OPL が $\lambda/2$ の整数倍のときとなる。従って、超広帯域化においてはこの最初の共振周波数をバンドの外まで大きくして追い出せばよい。一方で、そのような最初の共振が起きるときは波長と OPL が同程度のときであるため、これとは別に波長が OPL より十分に大きいときについても考える必要がある。これらの点を考慮して屈折率 n 、膜厚 d 、 gap に求められる条件を評価すると、まず最初の共振周波数を大きくするという条件から、式

$$OPL \sim nd + gap = \lambda/2 \quad (1)$$

において波長 λ を小さくすればよいことになる。いま屈折率 n を固定して考えると、膜厚 d と gap を両方小さくすればこの条件を満たす。また、波長が OPL より十分に大きいときは膜厚 d と gap をひとかたまりとして見なせ、その実効屈折率 n_{eff} を

$$n_{eff} \sim \frac{nd + gap}{d + gap} = \left(1 + \frac{nd}{gap}\right) / \left(1 + \frac{d}{gap}\right) \quad (2)$$

と近似できる。同様に屈折率 n を固定して考えると、実効屈折率 n_{eff} を小さくする条件は膜厚 d を小さくするか、あるいは gap を大きくするかとなる。また、いずれの場合についても屈折率 n は小さい方がよい。以上より、屈折率 n 、膜厚 d はどちらも小さい方がよく、 gap は 2 つの場合についてトレードオフの関係になるため、結局、薄くて屈折率が小さい多孔質 PTFE を、適切な間隔で積層することが重要だと言える。この具体的な数値を得るために行った網羅的シミュレーションの結果を図 2 に示す。これより、屈折率が高くなるに従って全体的な平均透過率は下がるが、膜厚と空隙のバランスは変わらないことが分かり、我々の要求に必要な数値を見積もることができる。ここで、平均反射損を 1%未満に抑えようとすれば、屈折率 $n < 1.2$ 、膜厚 $d < 150 \mu\text{m}$ 、 $gap < 150 \mu\text{m}$ 程度がその目安として得られる。

我々はこのような条件を満たす多孔質 PTFE を、Zitex と同様に濾過フィルターとして市販されている Poreflon(住友電気工業 製)、ADVANTEC (アドバンテックグループ 製) の数種類についてテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いて屈折率、透過率を測定することで探査した。測定結果 (図 3、表 1) より、Poreflon からは WP-100-100 が、ADVANTEC からは T300A がそれぞれ我々の必要なバンド (120-720GHz) で高透過率かつ低屈折率であるため、積層に用いるフィルターの候補として選ばれた。

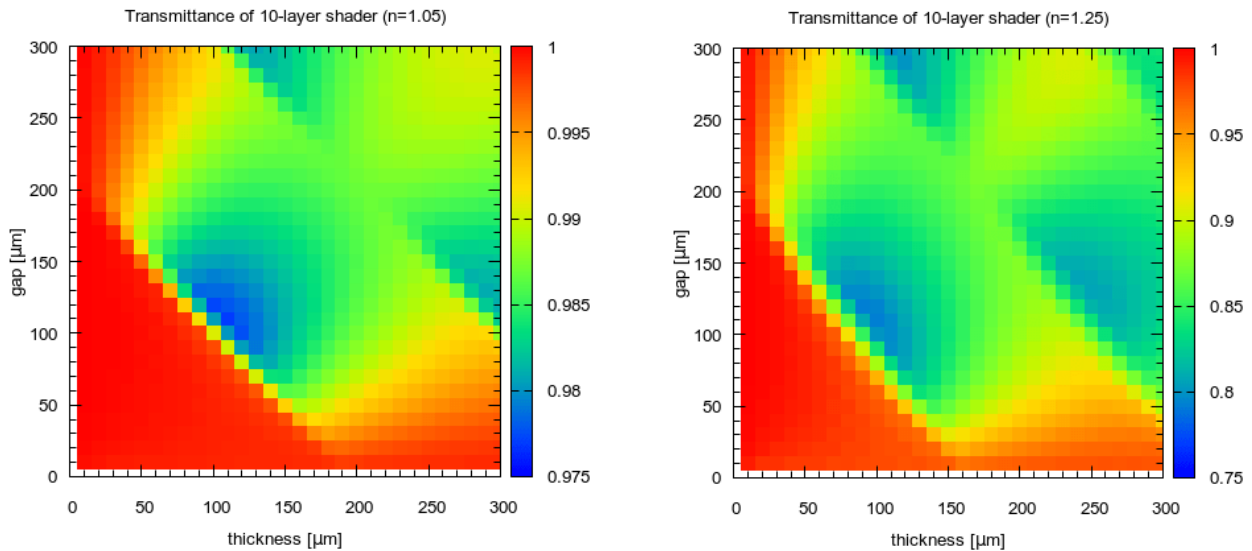


図 2. 縦軸を空隙、横軸を膜厚として 10 層積層した場合の 120-720 GHz における平均透過率のシミュレーション結果。屈折率 1.05 の場合 (左) と屈折率 1.25 の場合 (右) での比較。

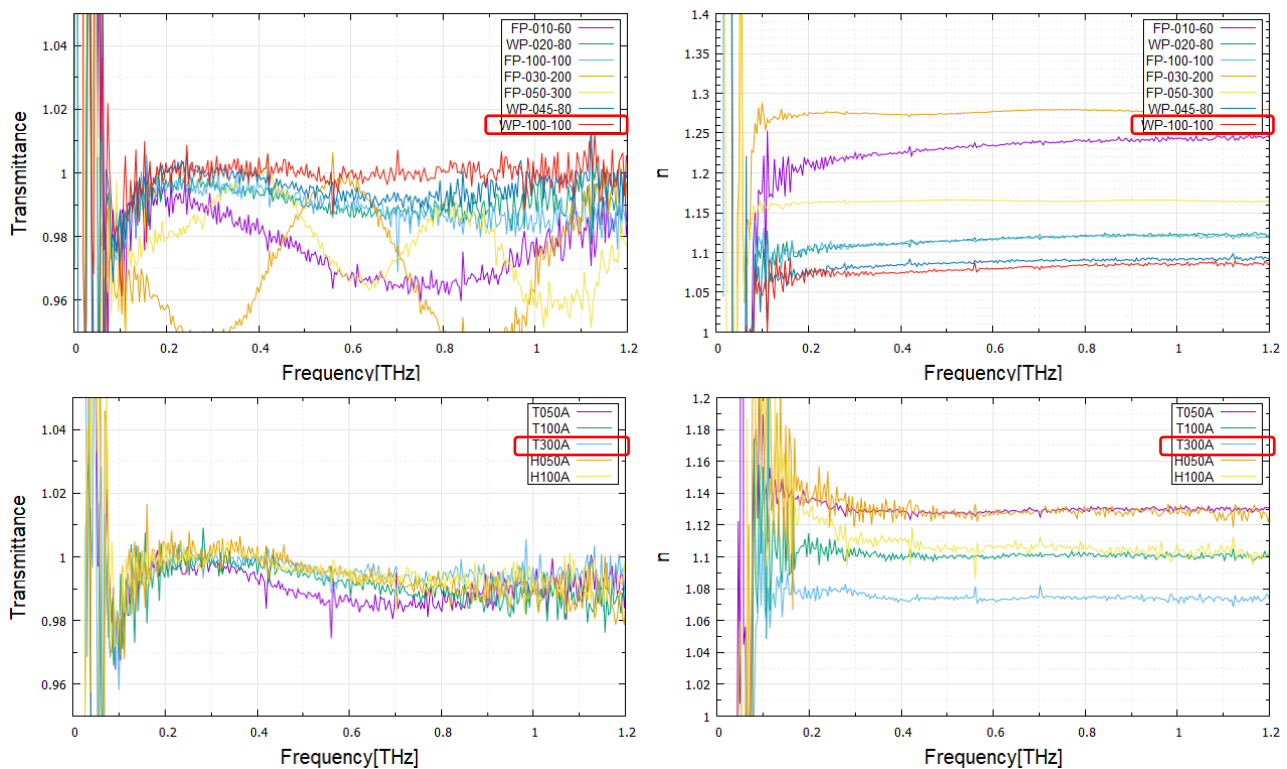


図 3. THz-TDS による Poreflon7 種 (上) と ADVANTEC5 種 (下) についての透過率 (左) と屈折率 (右) の測定結果

型番	空孔径(μm)	厚さ(μm)	n
FP-010-60	0.1	68	1.24
WP-020-80	0.2	74	1.12
FP-100-100	1	75	1.12
FP-030-200	0.3	206	1.27
FP-050-300	0.5	307	1.16
WP-045-80	0.45	65	1.10
WP-100-100	1	77	1.08

型番	空孔径(μm)	厚さ(μm)	n
T050A	0.5	91	1.14
T100A	1	70	1.11
T300A	3	74	1.09
H050A	0.5	39	1.15
H100A	1	34	1.12

表 1. 測定した Poreflon7 種 (左) と ADVANTEC5 種 (右) のリスト

4. 結果

これらの候補を 1-10 層で積層し、透過率を測定した結果を図 4 に示す。両者の測定結果において、シミュレーションと比較して最初の共振が高周波側にシフトしているように見える場合が多くあるが、これは重力によって膜がたわむことで空隙が小さくなった影響であり、また、T300A での 7 層 gap50 μm と 10 層 gap0 μm の場合は逆に共振が低周波側にシフトしているように見えるが、これは一部の膜が静電気を帯びていて、それによって空隙が広がってしまったことが原因として考えられる。この結果より、10 層まで積層したいずれの場合についても、120-720 GHz で平均反射損は 2%未満となった。

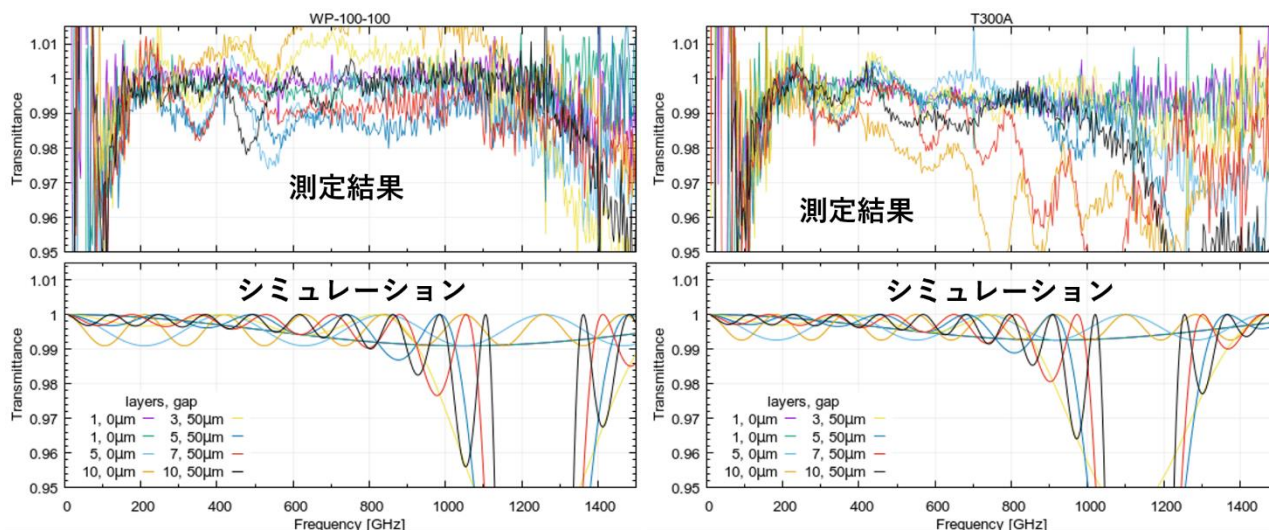


図 4. WP-100-100 (左) と T300A (右) について、gap を 50 μm 、あるいは 0 μm で 1-10 層まで積層した際の透過率の測定結果 (上) とシミュレーション (下) の比較。

5. まとめ

我々はミリ波サブミリ波用の超広帯域な赤外線フィルターの開発において、薄く低屈折率な多孔質 PTFE を、適切な空隙を設けて積層することが有効だと突き止めた。THz-TDS を用いた測定によって多種の多孔質 PTFE からこの要求を満たす屈折率の低い素材を開拓し、10 層の積層においても目標バンド (120-720 GHz) で平均反射損 2%未満の多層フィルターを開発した。今後は 6 色カメラ用クライオスタットに $\Phi 20\text{cm}$ の多層フィルターを取り付け、冷却試験を実施したい。

6. 参考文献

- [1] D.J. Benford et al., Appl. Opt. 42, 5118 (2003)
- [2] S. Sato et al., Appl. Opt. 28, 4478 (1989)
- [3] T. Takekoshi et al., IEEE TST 2, 584 (2012)
- [4] J. Choi et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 114502 (2013)

平面型直交モード変換器の帯域幅を制限する高次モード発生の解析

○宇野慎介（東京大学）、大島泰（国立天文台）、竹腰達哉（北見工業大学）、陳家偉、井上修平（東京大学）、長沼桐葉（電気通信大学）、丹羽佑果（東京工業大学）

概要

ミリ波サブミリ波帯受信機のマルチピクセル化を実現する技術として、平面型の直交モード変換器（OMT）を検出器とともに基板上に配列、集積化する手法が有力である。我々は広帯域多色カメラの実現に向けて、130-295GHz をカバーする平面 OMT の設計を行っている。電磁界シミュレーションを用いて広帯域設計を探索する過程で、高次の円形導波管モードの励起によって結合効率が低下することを示唆する結果を得た。この高次モードがバンドの上限周波数を規定しているとして、平面型 OMT で実現可能な比帯域が最大 2.28 倍程度であることを導いた。

1. Introduction

直交モード変換器（ortho-mode transducer; OMT）は、自由空間中の電磁波の直交二偏波を分離し、それぞれ回路基板上の電気信号へと変換する素子である。近年精力的に開発が進められているマルチピクセルの受信機においては、平面型の OMT がコンパクトであるため集積化するのに有利である。

我々が開発を進めているミリ波サブミリ波帯広帯域多色カメラでは、1 素子で 3 バンドを同時にカバーすることを目標としており、この平面型 OMT の広帯域化が重要な課題となっている。これまでの平面型 OMT (Shu et al. 2016 等) では、比帯域（バンドの上限周波数と下限周波数の比）にして 2.0-2.3 倍程度が典型的な帯域幅であることが経験的に知られている。一方、多色カメラでは低周波用の検出器アレイで 130-295GHz をカバーするため、比帯域 2.27 倍という広帯域特性が要求される。そこで本研究では、3 次元電磁界シミュレーションを用いて平面型 OMT の結合効率を計算し、従来設計に対してプローブ形状・バックショート長さを変更することで広帯域化を試みている。

平面型 OMT の帯域幅には、円形導波管モードとそのカットオフ周波数が密接に関わっている。なぜなら、平面型 OMT は上面でホーンと結合しており、このホーンから入射する電磁波の伝搬は近似的に円形導波管モードで表現されるからである。各モードはその電場分布の対称性に依存して、平面型 OMT の向かい合うプローブ同士の和信号もしくは差信号として取り出される。天体信号を含んでいる基本モードは TE₁₁ モードであり、これはプローブの差信号を取ることで検出できる。更に、高周波になるにつれて高次モードも含むようになる。TE₁₁ モード以外の高次モードがプローブの和信号に現れる周波数範囲に限っては、TE₁₁ モードの信号のみを分離することが可能であり、シングルモードとして扱うことができる。しかし、より高周波での差信号に現れる高次モードとは分けることができず、マルチモードとなってしまう。特に、我々の多色カメラでカバーする約 2.3 倍の周波数範囲内には、TE₁₁ モードの他に TM₁₁, TE₃₁ モードが差信号へ混入しうる。したがってシミュレーションでは、こうした高次モードの伝播も考慮する必要がある。

2. 電磁界シミュレーション

汎用物理シミュレーションソフト COMSOL Multiphysics および同 RF module を用いて平面型 OMT の結合効率の周波数依存性を解析した。このモデリングでは Shu et al. 2016 の設計をほぼ再現し、導波管開口の半径を 1.2mm としているため、TE11 モードのカットオフ周波数は 73GHz である。この 3D モデルの概観を図 1 に示す。開口部には導波管ポートを設置して TE11 モードを入力する。また、高周波で高次モードの反射が発生する可能性を考慮して、高次モードの受信ポートも設置してある。バンドの全体を捉えるために、TE11 カットオフ周波数の 2 倍以上に及ぶ広い周波数範囲にわたって計算を行った。

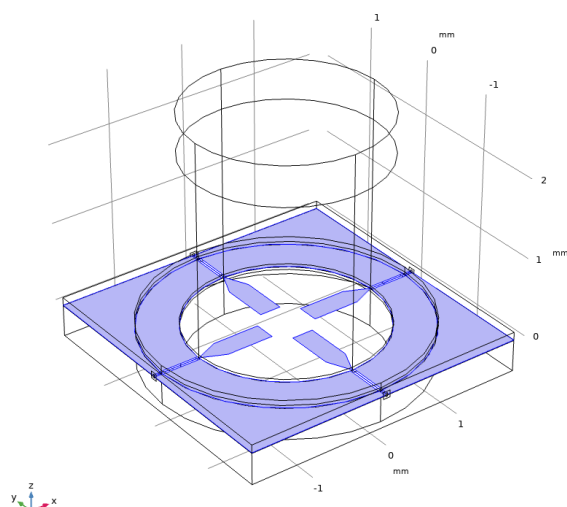


図 1：平面型 OMT のシミュレーションモデル

解析結果を図 2 に示す。70%以上の高い結合効率が得られているバンドの比帯域は 2 倍程度となり、Shu et al. 2016 の結果がおおよそ再現された。TE11 カットオフ周波数の 73GHz より高い周波数で結合効率が高くなり、その 2 倍程度の周波数で結合効率が低くなると同時に反射損失が大きくなっている。更に平面型 OMT の設計パラメータであるプローブ長さ、プローブ幅、バックショート長さを変化させて同様に解析したが、この傾向は大きく変わらなかった。特筆すべきは、共通して 167GHz 付近を境にして結合効率が低下するような特徴が見られたということである。この周波数はちょうど半径 1.2mm の円形導波管の高次モードである TE31 モードのカットオフ周波数に対応しており、それよりも高い周波数では TE31 モードの反射損失が顕著に現れている。この結果は、TE31 モードの発生と結合効率の低下との関連性を強く示唆するものである。

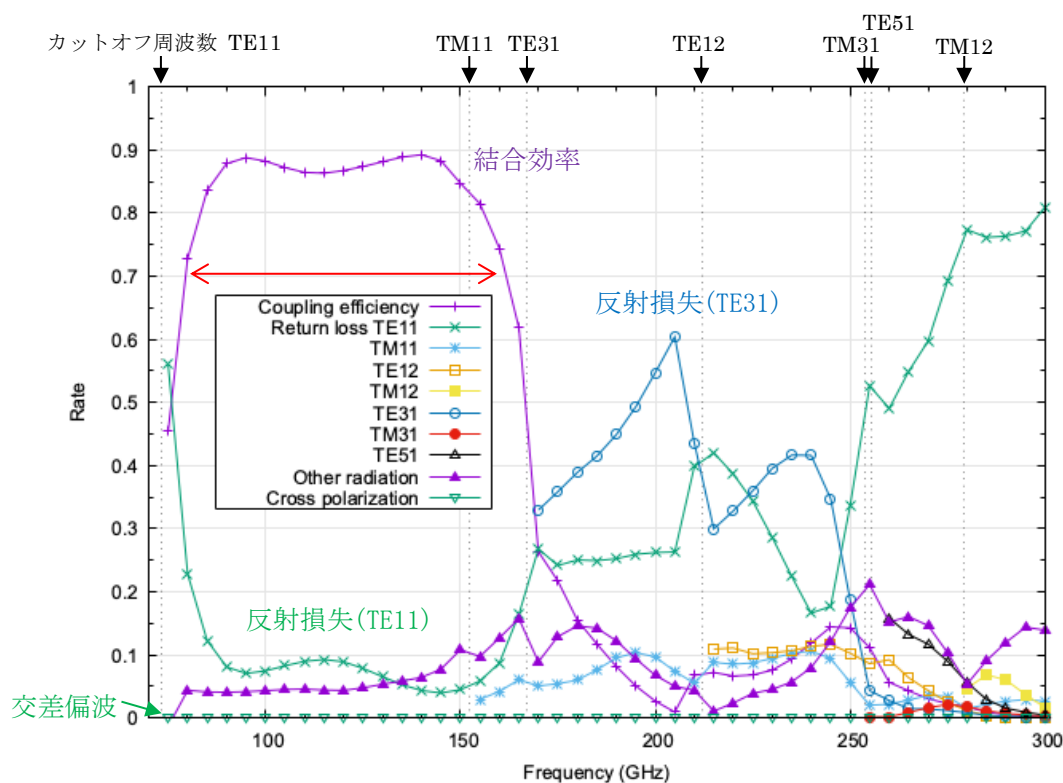


図 2：COMSOL で解析した平面型 OMT の結合効率、各モードの反射損失、放射漏れ、交差偏波の周波数依存性。縦方向の点線は各モードのカットオフ周波数を示している。

続いて、TE31 モードの発生に着目して結合効率低下の物理的機構を考察した。上述の電磁界シミュレーションにて、結合効率が大きく変化する TE31 カットオフ周波数 (167GHz) 前後のプロープ面での電場分布を調べた。150GHz、175GHz での電場分布を図 3 に示す。150GHz では電場の向きが TE11 モードと類似しているのに対して、175GHz では TE31 モードと類似している。

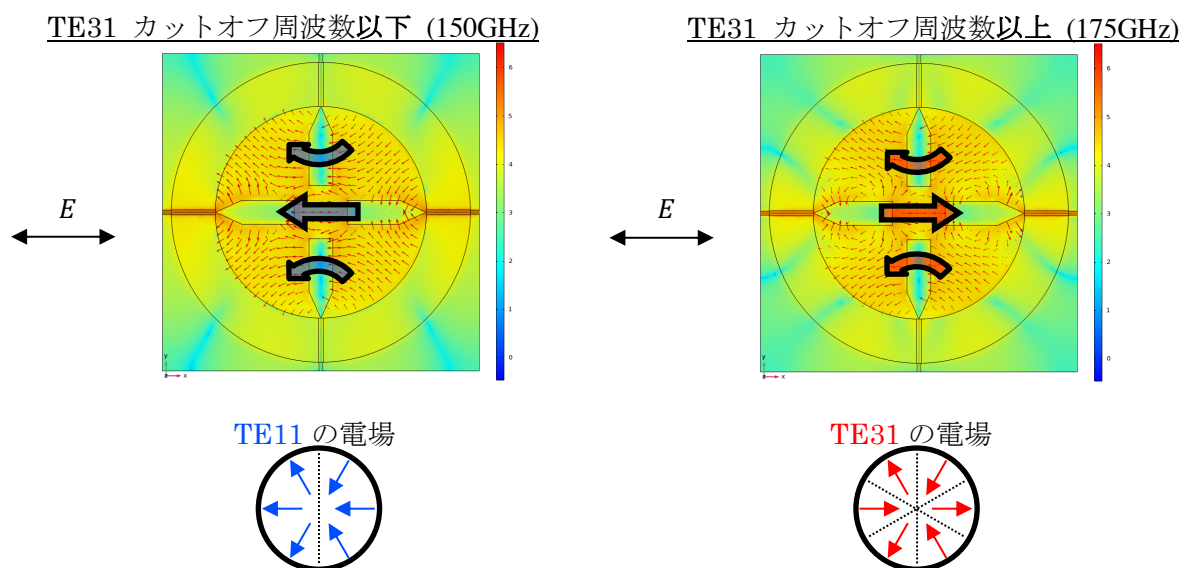


図 3：COMSOL で解析した TE31 カットオフ周波数 (167GHz) 前後でのプロープ面の電場分布。150GHz では TE11 モード、175GHz では TE31 モードの電場分布にそれぞれ類似している。

この状況と結合効率との関係は以下のように解釈できる。まず、TE31 カットオフ周波数以上では OMT のプローブが TE11 モードを受け、TE31 モードを励起（放射）する。TE31 モードを励起するのに TE11 モードの電力が消費されて、結合効率が低下する。励起された TE31 はプローブ面の上下方向に伝播できるので、ホーン入力側へ反射損失として出てゆく。一方で TE31 カットオフ周波数以下では、TE11 モードに対してはインピーダンス整合が取れて高い結合効率を得られている。TE31 モードはたとえ励起されたとしても、周波数がカットオフ周波数を下回っているために伝播しない。

この平面型 OMT のシミュレーションモデルを拡張してコニカルホーンを結合した場合も同様に、TE31 カットオフ周波数付近を境にして結合効率が大きく低下する様子が確認された。以上の解析および考察より、平面型 OMT においては、バンドの下限、上限がそれぞれ TE11, TE31 モードのカットオフ周波数で規定されており、その比から最大比帯域は 2.28 倍程度であると結論づけられる。これまでの平面型 OMT を開発してきた先行研究では TE31 モードに言及しておらず、このモードを特定して帯域幅の上限と関連付けたのは本研究が初めてである。

3. まとめ

電磁界シミュレーションを用いて、ホーンと結合した平面型 OMT の比帯域を調査した。その結果、高次の円形導波管モードのうち TE31 モードの発生する周波数付近がバンドの上限と対応しているような傾向が見られた。これはプローブ面での TE31 モードの励起によって結合効率が低下することを示唆している。この考察を踏まえて、平面型 OMT で実現可能な比帯域は最大 2.28 倍までであるという具体的な指標を導いた。今後は多色カメラの観測帯域に合わせた上で、比帯域 2.28 倍以内で高い結合効率を得られる設計解を探す。

4. 参考文献

- Shu, S., et al. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9914

広帯域ミリ波サブミリ波検出器のための平面 Magic-T の開発

○井上修平(東京大学)、大島泰(国立天文台)、陳家偉・宇野慎介(東京大学)、丹羽佑果(東京工業大学)、竹腰達哉(北見工業大学)、長沼桐葉(電気通信大学)

概要(Abstract)

我々は、ミリ波サブミリ波帯の広域探索による宇宙構造形成史の解明を目指して広視野かつ広帯域の多色カメラを開発している。本集録では、検出器の広帯域化(130-295 GHz)のために、検出器基板上の平面アンテナで受けた天体からの両偏波それぞれの差信号を合成する平面カプラー(Magic-T)の最適化について紹介する。電磁界・回路シミュレーションを組み合わせた効率的な設計手法によって、目的の比帯域で、位相・Amplitude ずれ、反射の要求を満たす構造を得ることができた。

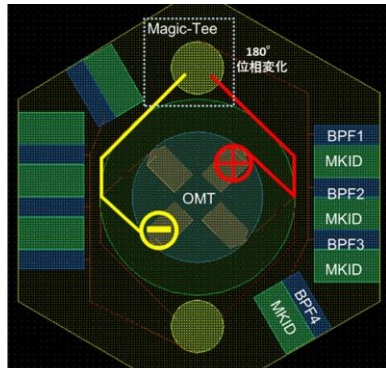


図 1. 検出器チップ上の Magic-T
赤と黄色で示した信号を合成する。

表 1. 平面 Magic-T の要求性能

性能指標	要求
位相ずれ(deg)	≤ 3
Amplitude ずれ(mag)	≤ 0.04
反射係数: S11, S41, S44(mag)	≤ 0.15
比帯域 (最高/最低周波数 比)	2.3

1. Introduction

平面 Magic-T は、図 1 のように、検出器チップ上の平面アンテナ Ortho mode Transducer (OMT) で受けた両偏波それぞれの差信号を 180°位相反転させて合成するための素子である。位相反転させる性質上、Magic-T の位相ずれ・Amplitude ずれ・反射は極力小さくする必要がある。本研究での Magic-T の要求性能は以下の表 1 のように設定した。

ただし比帯域は、要求性能を満たす最高・最低周波数をそれぞれ $f_{\max}$, $f_{\min}$ として、比帯域 = $f_{\max}/f_{\min}$ と定義する。

次に要求性能の実現方法を説明する。Magic-T の役割を果たす構造の 1 つとして、図 1(左)のように平面上で $\lambda/4$ の伝送線路 3 つ、 $3\lambda/4$ の伝送線路 1 つで構成された Ratrace Coupler が存在する。Ratrace Coupler では、Port1, Port4 からの入力信号に対し、電気長の差によって幾何的に 180°反転させる。しかしこの方式では、中心波長(周波数)付近のみで 180°位相反転するため、

帯域が不足する(比帯域 ≤ 1.4 , Walker(1997))。広帯域化の手法としては、Gruszczynski+2012 により、図 1(右)のように、 $\lambda/4$ 線路 + 周波数に依存せず 180°位相反転を行うことのできる Coupled Line, 位相補償を行う Short Stub, 外界とのインピーダンス調整を行

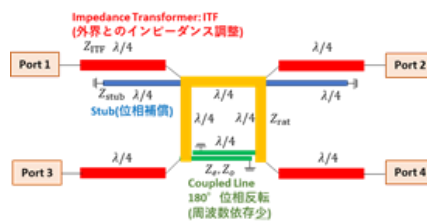
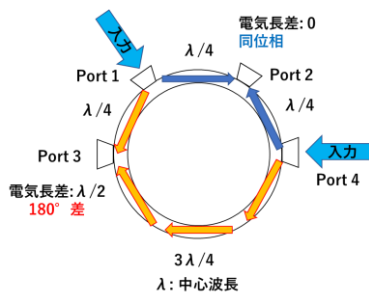


図 2. (左): 従来の Ratrace Coupler (右): Stub, ITF を用いて広帯域化した Ratrace Coupler (Gruszczynski+2012 の Figure.3 を参考に作成)

う Impedance Transformer (ITF)を導入する手法が提案されている。ITF の段数を増やすほど帯域が広がるが、理論上ITF 1段の構造(比帯域2.7)で目標比帯域2.3を満たせるので、ITF1段での設計を試みた。その際用いた電磁界シミュレーション方法を次節で説明する。

2. 回路・電磁界シミュレーションの併用による効率化

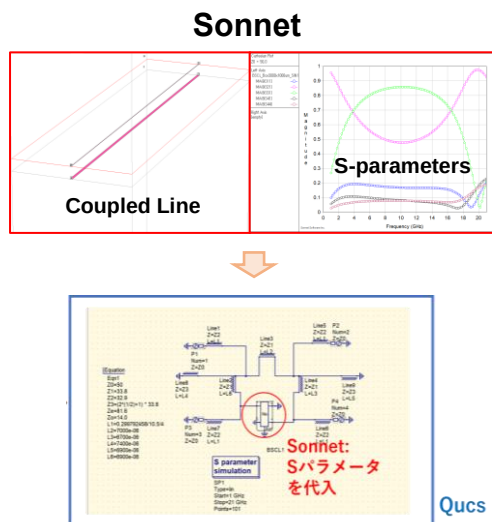


図 3. Qucs と Sonnet の併用方法

Quite Universal Circuit Simulator (Qucs) は、SPICE と同様の回路シミュレータ機能に加え、S パラメータ(反射・透過係数)を導入することができ、計算時間が早い特徴がある。一方、2.5 次元電磁界シミュレータ Sonnet は、回路シミュレータと比べると速度は劣るが、回路シミュレータで用意されていない構造の S パラメータを取得できる。本研究では図 3 のように、Sonnet にて Coupled Line の S パラメータを取得し、Qucs に素子として導入して回路シミュレーションを行うことで、計算時間の短縮を試みた。ただし、本来の中心周波数 ~210 GHz の高周波域では設計構造が波長の大きさに近づき、電磁界シミュレーションに由来する共振がネックとなる。そこで中心周波数 10.5 GHz のスケールドモデルで設計を行った。

3. Magic-T 各素子のインピーダンスの設計と製造条件

Magic-T 各素子のインピーダンスの設計は以下の表 2 の通り行った。

表 2. 要求性能を満たすための Magic-T 各部の Impedance と電気長
(理論上,位相・Amplitude ずれ 0, 反射係数(mag) ≤ 0.1 , 比帯域~2.7)

S. Gruszczynski and K. Wincza (2012)

素子	Impedance (Ω)	電気長 (μm)	表現方法
Ratrace (Z_{rat})	33.8	7138	Qucs の伝送線路
Stub (Z_{stub})	81.6	7138	Qucs の伝送線路
ITF (Z_{ITF})	32.9	7138	Qucs の伝送線路
Coupled Line	$Z_e = \frac{Z_{\text{rat}}Z_o}{Z_{\text{rat}} - 2Z_o}$	7138	Sonnet での S パラメータ

ただし、Port インピーダンスは一律に 50Ω である。また Z_e , Z_o はそれぞれ even, odd mode のインピーダンスである。電気長は、中心周波数 10.5 GHz における $1/4$ 波長と等しくなるように、7138 μm とした。なお、Coupled Line 以外の素子は Qucs 上の伝送線路素子で表現した。また表 2 に示

した Coupled Line で理論上必要なインピーダンスは、March(1968)の条件から、 $Z_{\text{rat}} = \sqrt{Z_e Z_o}$ の条件を除いた式である(Walker (1997))。この条件を満たす Coupled Line の探索を Sonnet にて行った。なお製造条件として、ステッパ露光装置などでも精度が出せるように、芯線幅を 2 μm 以上とした。電子ビーム描画を用いるとさらに精度は出せるものの、大きなアレイ面積を描くには時間がかかりすぎ、歩

留まりが悪くなるためである。

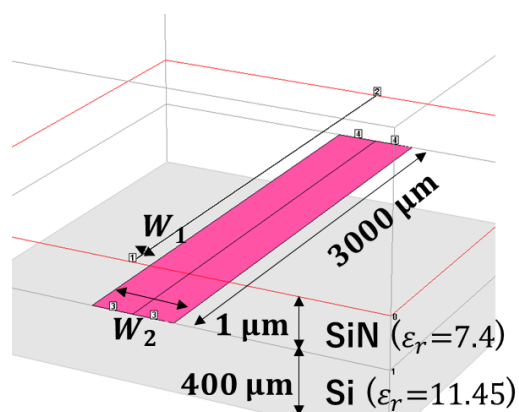


図 4. Broad Side Coupled Line の構造 (Sonnet の 3D 図)

表 3. 要求を満たす BSCL の設計値

素子	変数	設計値
上段芯線幅	W_1	$\sim 2.5 \mu\text{m}$
中段芯幅	W_2	$\sim 20 \mu\text{m}$
線路長	L	$3000 \mu\text{m}$
SiN比誘電率	$\epsilon_{r,\text{SiN}}$	7.4
SiN厚み	H	$1 \mu\text{m}$
Si比誘電率	$\epsilon_{r,\text{Si}}$	11.45
Si厚み	h	$400 \mu\text{m}$

Ratrace・Stub・ITF の電気長を $6000\text{--}8000 \mu\text{m}$ の範囲でスイープした。図 5 に、帯域端(15GHz)での位相ずれと Amplitude ずれの結果を表すコントアマップを示す。図 5 の結果から、Ratrace Coupler は振幅・位相ずれの両方に効き、Stub は位相ずれに効き、ITF は振幅・位相ずれの両方に効かないことがわかった。

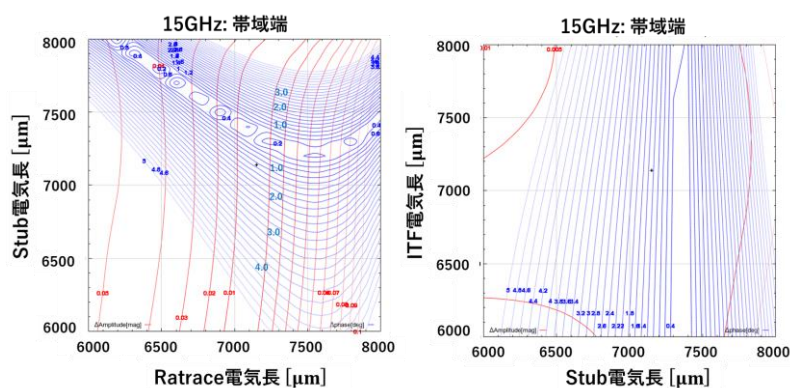


図 5. Ratrace Coupler, Stub, ITF の電気長が位相ずれ(青)・Amplitude ずれ(赤)に与える影響を示すコントアマップ

4. Coupled Line の探索・設計: Broad Side Coupled Line (BSCL)

Z_e , Z_o の差は芯線間の Couple が強いほど大きくなる。誘電体 1 層構造の Edge Side Coupled Line では、芯線間での Couple が弱く、 Z_e , Z_o の差が小さいため、目的のインピーダンスを実現できなかった。そこで、層方向に面で Couple させる構造で、強い結合定数を実現できる **Broad Side Coupled Line (BSCL)** を探索対象とした。

Sonnet での探索により、図 4、表 3 に示した構造で、目的のインピーダンス付近($Z_e \sim 250\Omega$, $Z_o \sim 16\Omega$)となり、かつ製造条件を満たすことがわかった(W_2 は比較的自由度がある)。しかし BSCL では、上下段の誘電体の比誘電率が異なるため、電気長に非対称性が生じる。この問題を緩和するため、Magic-T の素子全体(Ratrace, ITF, Stub)での電気長のパラメータスイープを行い、最適化を試みた。そこでまず各素子の電気長が、位相ずれと Amplitude ずれに及ぼす影響をそれぞれ調べた。

5. Ratrace・Stub・ITF の電気長が位相・Amplitude ずれに及ぼす影響

6. 網羅的パラメータスイープによる最適化

5.での結果をもとに、ITF の電気長を固定し、BSCL の上・中段芯線幅 W_1 , W_2 , Ratrace, Stub 個別の電気長に関する網羅的パラメータスイープに移行した。比

帯域の定義は、帯域内で $|S_{21} - S_{24}|$ と $|S_{31} - S_{34}|$ が Amplitude ずれ 0 かつ位相ずれ 3° 相当以下となり、かつ反射係数(mag)が 0.1 以下とな

る最高/最低周波数の比とした。この条件のもとで、解を探索したところ、以下の図 6 のような要求を満たす解が得られた。

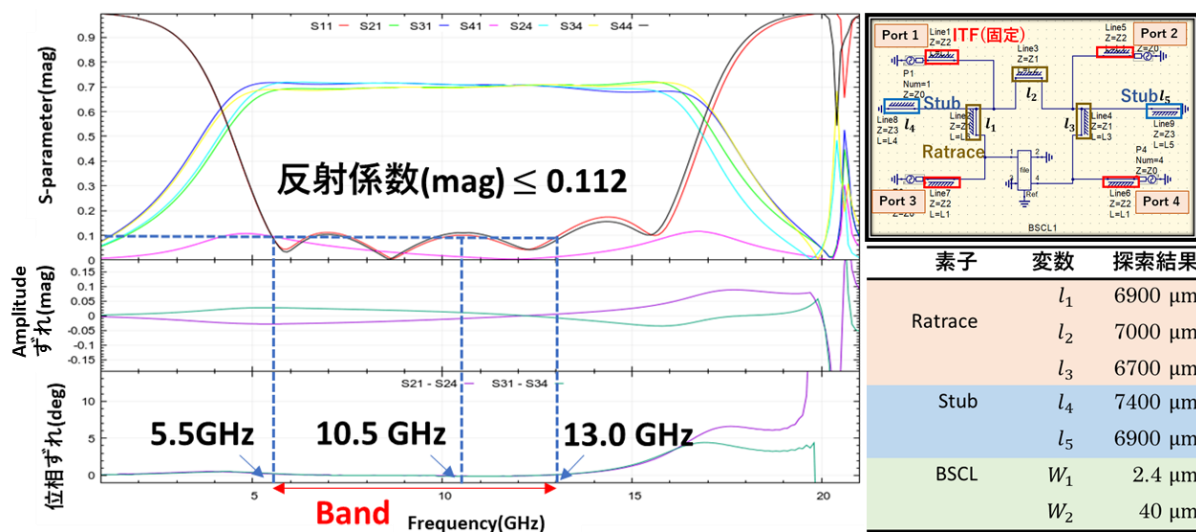


図 6. (左) 網羅的スイープで得られた解の位相ずれ, Amplitude ずれ, 反射係数 (右上) Qucs 上での Ratrace Coupler の回路図 (右下) 網羅的パラメータスイープで得られた寸法解

表 4. 網羅的パラメータスイープによる探索結果と要求性能

性能指標	探索結果	要求性能
位相ずれ(deg)	≤ 1	≤ 3
Amplitude ずれ(mag)	≤ 0.03	≤ 0.04
反射係数: S11, S41, S44 (mag)	≤ 0.12	≤ 0.15
比帯域	2.4	2.3

10.5 GHz 付近での性能は図 6(左), 表 4 に示した通りであり, 想定より低周波シフトしたが, 要求を満たす解が得られた。今回得られた解をもとに, 今後は BSCL の中段を Coplanar Wave-

guide に置き替えた構造についても検討を行い, さらに高周波で問題となる Radiation Loss や, 超伝導下での特性インピーダンスへの影響調査を行い, 製作・性能評価に移る予定である。

参考文献

- S. Gruszczynski and K. Wincza, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 22-24, Jan. 2012.
- J. L. B. Walker, *IEEE MTT-S Int. Dig.*, 1997, vol. 2, pp. 747-750.
- S. March, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-16, p.361, June 1968.

Band10 2SB ミクサの開発

○藤井泰範（国立天文台 先端技術センター）

概要(Abstract)

ALMA Band10 受信機は ALMA における最高周波数帯（780-950GHz）を観測する受信機であり、当時における世界最高性能の受信機であるが両偏波（double side band DSB）受信機であった。さらなる性能向上のために片偏波(single side band SSB)が期待されているため、新しいアイデアも入れながら開発を行っている。

1. DSB ミクサと 2SB 受信機

電波天文観測では観測信号（RF）に人工的に作られた局発振信号（LO）をミクサで低い中間周波数（IF）に周波数変換する観測方式がある。この時 DSB ミクサでは「LO+IF」（USB）、「LO-IF」（LSB）の二つの RF 信号を同時に IF 信号として受信することになる。2SB 受信機は DSB ミクサを図 1 のようにハイブリッドカプラ等を用いて USB、LSB を別々に取得することにより観測効率を上げる構成である。

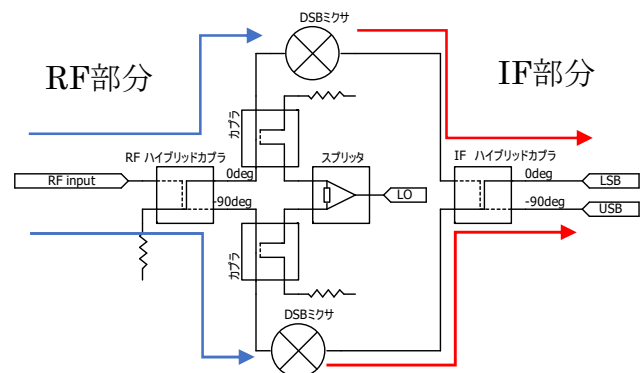


図 1 2SB 受信機構成

2. RF 部分

図 1 の RF 部分（RF ハイブリッドカプラ、カプラ、スプリッタ、DSB ミクサ）が導波管と呼ばれる方形管状の金属によって信号の伝送および回路素子が構成され、その加工をフライス等で行う時は、伝送方向に対して半分にして加工を行う事が多い。そのために他の周波数バンドのミキサブロックでは図 1 の様に RF ハイブリッドとスプリッタが対向し、カプラとミキサがその上下にある平面的な回路を構成することが多い。

ただし Band10 受信機ではこの導波管が観測信号の損失になり観測効率が落ちるため、極力短くする必要がある。そこで図 2 の様にミキサブロックを 3 つに分けて導波管加工面を 2 面用意することにより、RF ハイブリッドカプラの上部にスプリッタを配置した立体的な導波管回路を考案した。（図 3）

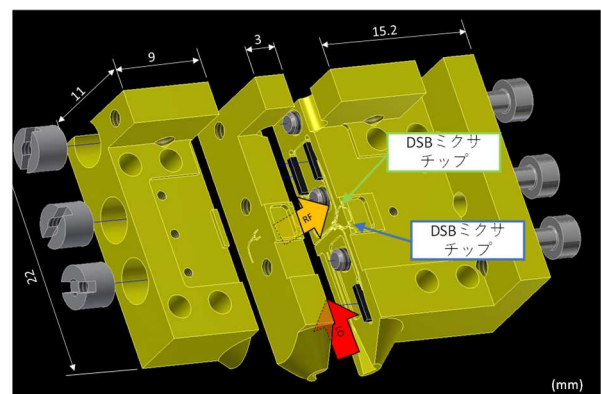


図 2 Band10 2SB ミキサブロック

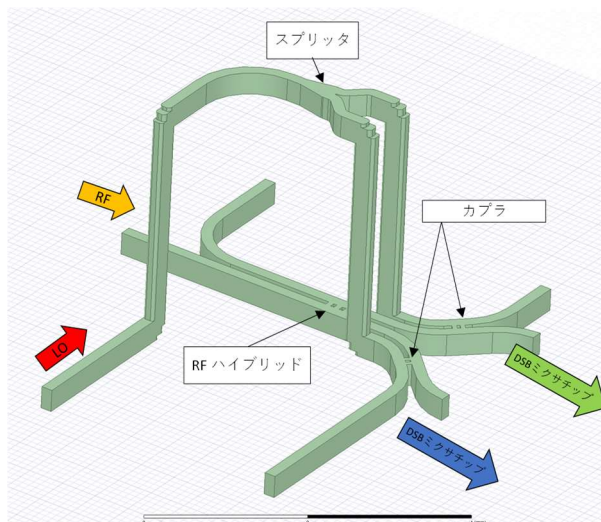


図3 RF回路構成

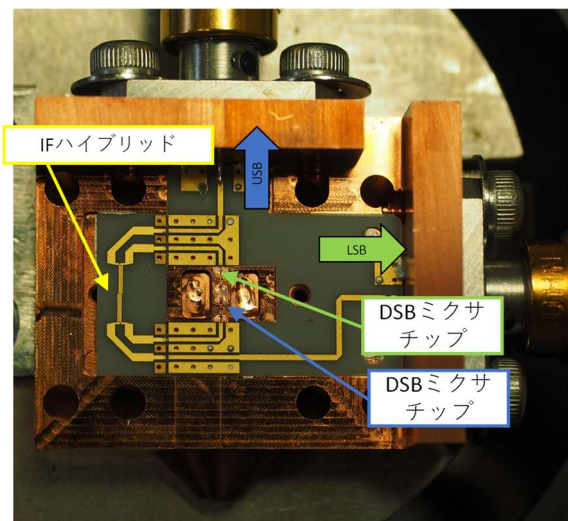


図4 IF回路構成

3. IF 部分

Band10 DSB ミキサでは導波管加工面に対して垂直に IF 回路が構成可能である。そこで図 2 の導波管加工面に垂直に IF 回路を構成した (図 4)。周波数 4-12GHz を満たすため、IF ハイブリッドは 3 段のカプラを誘電率 10 のアルミナ基板で構成されている。

4. 初期性能評価

IF ハイブリッドもミキサブロック内に組み込んだため、2SB ミキサのブロックの入出力インターフェースは従来の DSB ミキサブロックと同様にすることが出来た。このことにより、Band10 受信機の構成を大きく変更せずに 2SB ミキサを組み込み、評価を行う事が可能になった。図 5 に評価結果を示す。まだ初期段階のため DSB ミキサチップに ALMA 仕様を満たさないものを使用した。そのため雑音温度は周波数の高いところで大きくなっているが、SSB 特性は良好であることが確認できた。今後雑音性能の良い DSB ミキサチップを使用し RF・IF 回路素子の評価および性能向上を目指す。

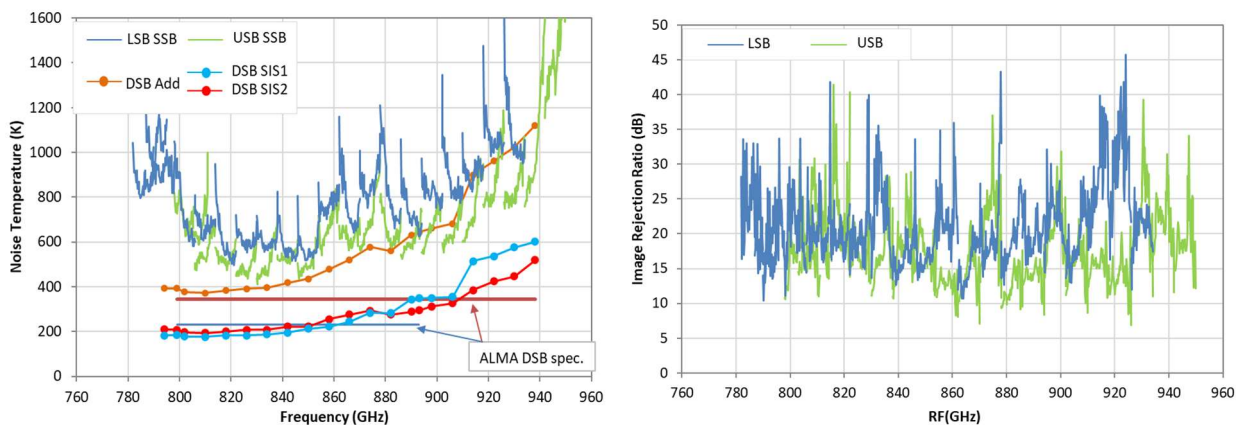


図5 Band10 2SB ミキサ 初期評価結果

電子回路基板作ってみた

○藤井泰範（国立天文台 先端技術センター）

概要(Abstract)

ASTE 望遠鏡の次期装置として開発しているダウンコンバータの制御基板を先端技術センターにある基板加工機で製作する物語。失敗談含む。

1. 基板加工機とのこれまで

前職および国立天文台において電波天文学装置用にマイクロ波部品の開発を行っているとしばしば基板を加工したくなります。理由はマイクロ波の回路は波長が長いために基板のパターン（幅と長さ）が回路素子となるため、基板加工機で試作して様子路見てから本作は基板メーカーに依頼するというのが有効だったからです。この場合の基板は片面のみ機械 CAD 等でお絵かきすることで設計することが出来ました。（必要なパターンの形状はマイクロ波 CAD や電磁解析シミュレータ等で設計します。）

2. 両面基板出来るかな？

ASTE 望遠鏡の次期装置として 4-18GHz 広 IF 受信機と新分光計(0.1-2.5GHz)を結ぶダウンコンバータを開発する事になりました。ダウンコンバータの信号処理部分は図 1 の様に少々複雑なのですが、既製品でなんとかかなりそうです。一方スイッチ・信号減衰器等を制御するコンポーネントがかなりあります。ASTE 望遠鏡では観測プログラムからイーサネット経由で装置を制御しているため、最近(?)流行の IoT 的なラズベリーパイで制御できるのではないかと思います。早速ユニバーサル基板で簡単な回路を試作してラズベリーパイからスイッチの制御確認を行いました。今やネットでいろいろ検索できます。回路はなんとか出来そうだけど、ちゃんとした回路基板は設計・評価したことがありません。さて、コンポーネントが納品されるまでに基板加工機で技術習得（遊んで）みますか。

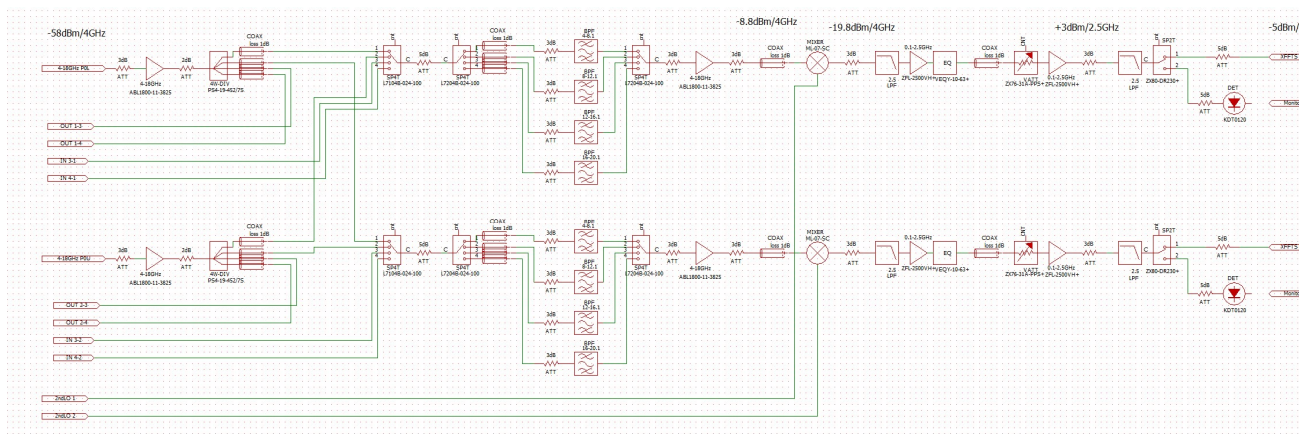


図 1 ASTE 新ダウンコンバータ ブロック図

3. 失敗・失敗・・・

プリント基板 CAD を導入して、見よう見まねで両面基板のパターンを設計し（図 2）、基板加工にデータを流し込み、加工開始！表面は順調です。裏面に移って加工上がりを見ると（図 3）穴が下方方向にずれている・・・

基板加工機は加工機左右のピンと基板に開けた穴で表裏の位置合わせを行います（裏表で上下反転して加工を行う）。基板に穴を開ける際にピンを取り外したのですが、そのピンを取り付ける際に左右を間違えてしまったために位置合わせがずれたと予想して、ピンを入れ替えたらずりました。

両面基板なので、裏表の導通をとるスルーホールが必要です。リベットになっているスルーホールを打ち込むのですが、最初は力加減がわからずスルーホールを潰しすぎてしまうことがありました。基板の表裏の導通をとるだけであれば修復は用意ですが、コネクタ等スルーホールにピンを差し込む電子部品部分の修復はちょっと大変。コネクタ等の配置を再検討してスルーホールの個数自体抑える方法も予定しています。

これ以外にも、基板 CAD でのアレコレとか、そもそも回路がアウトだったりとか、新しいことには失敗がつきものです。

4. 失敗は経験になるか？

今回はコロナの影響もあり時間に融通がついたため初めての基板設計・加工を行ってみました。（図 5）このような「ちょっとした基板制作」の件数がそれなりにあれば内製のメリットはあるけど、頻度が少ないのであれば、外注の方が品質・コスト的に良いかもですね。

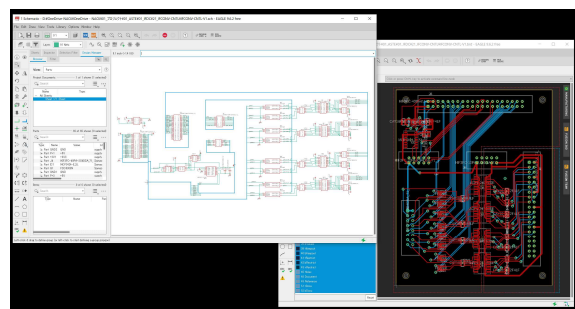


図 2 プリント基板 CAD で設計

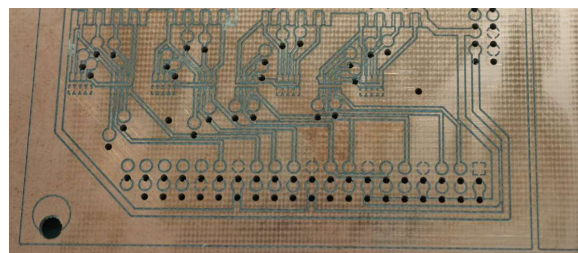


図 3 失敗その 1 穴の位置がずれている

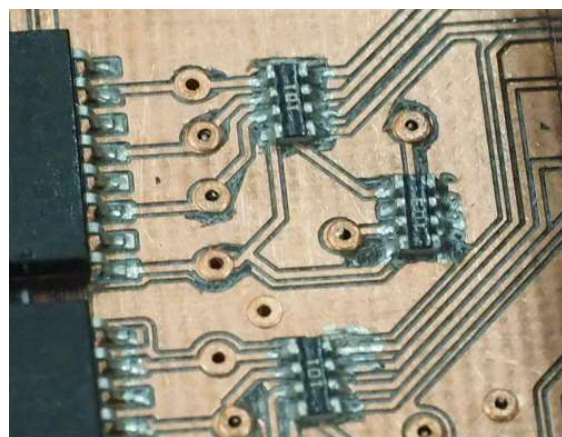


図 4 失敗その 2 スルーホール潰しすぎ

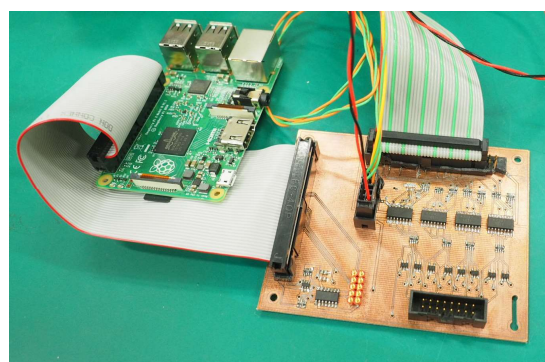


図 5 試作の動作確認

Power Apps 使ってみた

○藤井泰範（国立天文台 技術推進室）

概要(Abstract)

Microsoft 365 のサービスに Power Apps というのがあり、比較的容易に Web&スマートフォンアプリケーションの構築が可能です。本レポートは Power Apps といくつかの自作サイト&アプリを紹介します。

1. Power Apps

技術推進室が進めている Web システムの構築に Power Apps を利用しているということを知って、興味を持ちました。当初の Web システムはエクセルで作成されたテーブルを Web システムの入出力データに使えると言うことで、“どのようにプログラムされているか? ”、“自分のわかる範囲でセキュリティはどうなのか?”が興味の対象でした。その Web システムの複製版を頂いてつらつら見ていましたが、やっぱり「作ってみなければ」です。なお、自分のパソコン歴はウン十年、プログラム言語は BASIC (8 ビットパソコン) から Labview までいろいろ触っていますが、逐次処理中心の旧人類です。

2. データと PowerApps

図 1 はこの後紹介する「質問・意見サイト」のデータ部分であるエクセルと Web アプリの画面です。よくよく考えると、いくつかの Web アプリはユーザーにとってはデータベース操作していると言っても良いでしょう。SNS 等ではユーザーアカウントに結びついたデータの入出力。ショッピングサイトでは商品データと在庫、顧客の注文情報がブラウザを通してデータのやりとりが行われているはずです。Power Apps はそのデータを用いて Web 等の表示・入力画面を作成することが出来ます。

プログラムの雰囲気は図 2 を参照ください。

①,②の「文字入力」はいくつかのプロパティ③を持っていてその内容をエクセルの数式のように④に描き込みます。⑤はその数式の例ですが、if 文を使って条件分岐が可能です。逐次

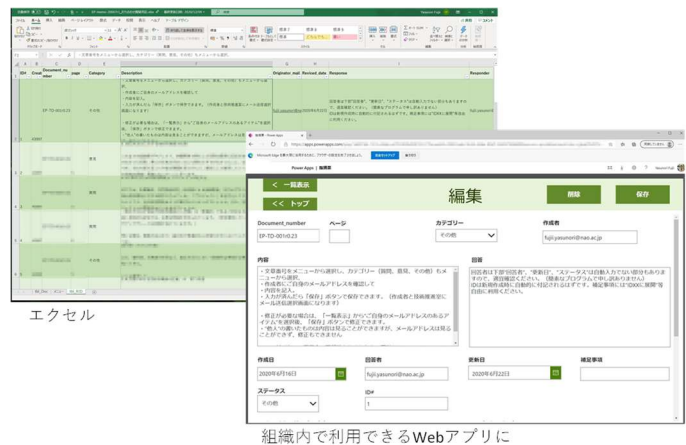


図 1 エクセルのテーブルから Web サイトに

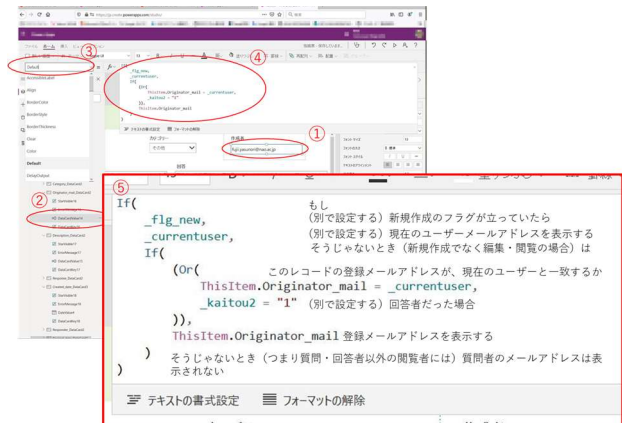


図 2 Power Apps プログラミング

な旧人類には繰り返しの **for～next** 文がなくて混乱しましたが、エクセルと同じと思えばなんとなく納得できます。参考図書は多くなく、Microsoft のサンプルも英語で記述してあるのに、日本語表記メニューではどれに対応するのだろう？とデゼニ○ンド的アドベンチャーゲーム感が・・・

3. 作例

PowerApps での作例を二つ紹介します。

図 3 は技術推進室が整備している文書に対して質問・意見・回答を行うサイトの例です。これまでは質問や意見をワードやメールで収集し、回答側がエクセル等に整理した上で回答することが多かったかと思いますが、入力部分を **Web** 化できたおかげでエクセルへの整理が簡略化されました。ただし、PowerApps の動作としては **Web** 入出力とエクセルへの接続であるために、エクセルへの共有設定は関係者に対して編集可能にする必要がありました（OneDrive の場所がわかれば関係者誰でも削除することも可能）。取り扱うことの出来るデータ数にも制限があると言うことで、SharePoint のリストを使った改良版を作成し、他の案件の質問・意見・回答等を行っています。



図 3 質問・意見 回答サイト

図 4 はスマートフォンを使った物品管理アプリになります。機能としては検索窓に入力した単語で検索して表示・編集・保存する事が出来ます。スマートフォンでは **QR** コード等バーコードの読み取りが可能のため、物品および、保管場所に **QR** コードを用意する事で、検索がスピーディーに出来るのではないかと期待しています。



図 4 物品管理アプリ

4. まとめ

Power Apps は比較的容易にデータから **Web&スマートフォンアプリケーション**の構築が可能です。興味のある人は是非チャレンジしてみてください。有益な情報は是非共有させてください！！

システムズエンジニアリング初級研修番外編 あるいは私のシステムズエンジニアリング

満田和久

(国立天文台技術主幹/ATC)

第40回 天文学に関する技術シンポジウム（2021年1月28日）

国立天文台で耳にした／目にした違和感

- 以下のような文脈でシステムズエンジニアリングが使われてると感じた。
 - システムズエンジニアリング (Systems engineering = SE)とシステム設計(system design) は同一である。
 - システムエンジニア (System/systems engineer) が行うことの全てがシステムズエンジニアリングであり、システムズエンジニアリングを行うのはシステムエンジニアである。
- この違和感は「システムズエンジニアリング」「システム設計」の定義に依存し、それは人によって異なるかもしれないが。。
- その意味で「私のシステムズエンジニアリング」による違和感かもしれない。。

2

技術系職員の人材育成に関する基本計画(EP-TD-002) セクション4.2脚注のSE定義

- システムズエンジニアリングとは、ステークホルダー要求からミッションの完結までを、確実かつ出来る限り効率的に実現することを目標に開発された手法・プロセスの集合体である。
- ミッションシステム設計とは、システムズエンジニアリングの手法も活用しつつ、熱・構造・電子回路・信号処理など多様な個別設計技術を集結し、具体的なミッション装置をシステムとして検証方法を含めて設計することを意味する。
- 上記のシステムズエンジニアリング定義は実は不十分
- しかしJAXAの定義は意味がわからない…
- 私の日本語力の問題かも。。
 - 英語の教科書を見てみよう！

参考：JAXA, BDB-06007B

システムズエンジニアリングは、システムの目的(ミッション要求)を実現するための工学的的方法論(及び、その一連の活動)である。

3

NASA's SE handbook

approachの一語で、考え方とプロセスの両方を表現している。

順序だった、規律ある、考え方・やり方

- Systems engineering is a methodical, disciplined approach for the design, realization, technical management, operations, and retirement of a system.
- A “system” is a construct or collection of different elements that together produce results not obtainable by the elements alone.
- The elements, or parts, can include people, hardware, software, facilities, policies, and documents; that is, all things required to produce system-level results.
- The results include system-level qualities, properties, characteristics, functions, behavior, and performance.

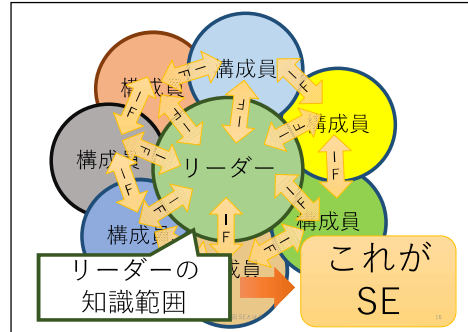
システムの
破棄

過去の文献⇒過去から集積された知識の意味

NASA SE handbook (SP20007-6105r1), section 2

4

野田さんSE研修でのシステムの定義

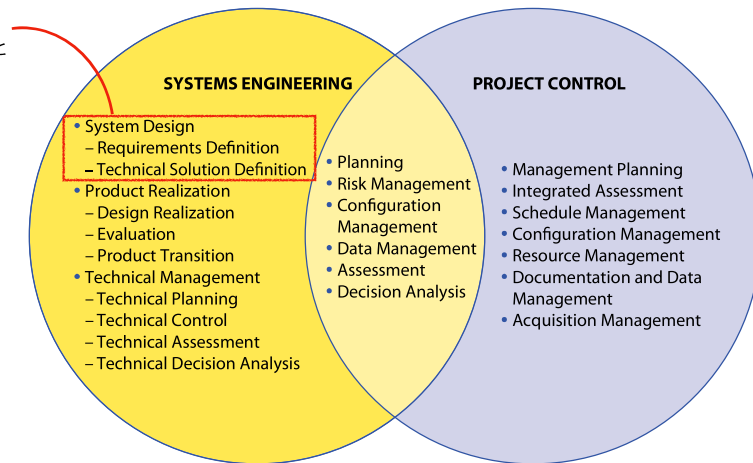


elementsとして"people"に焦点をあてた図

5

SE in overall PM (from NASA's SE handbook)

system designはSEと異なる軸に分厚い厚みを有している



6

SE engines (from NASA's SE handbook)

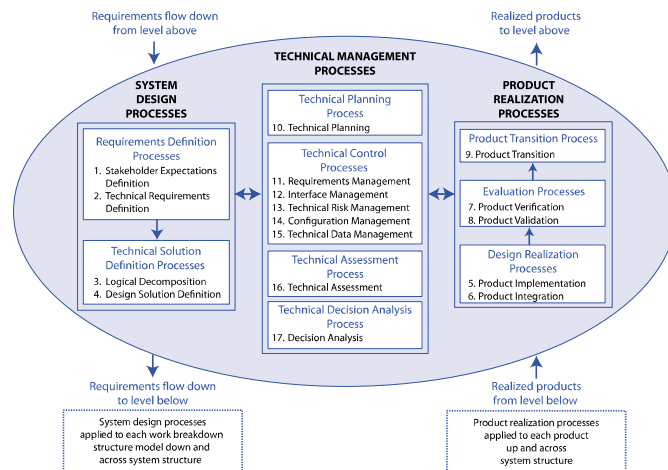


Figure 2.1-1 The systems engineering engine = プロセス群

7

ECSS: ESA's standard

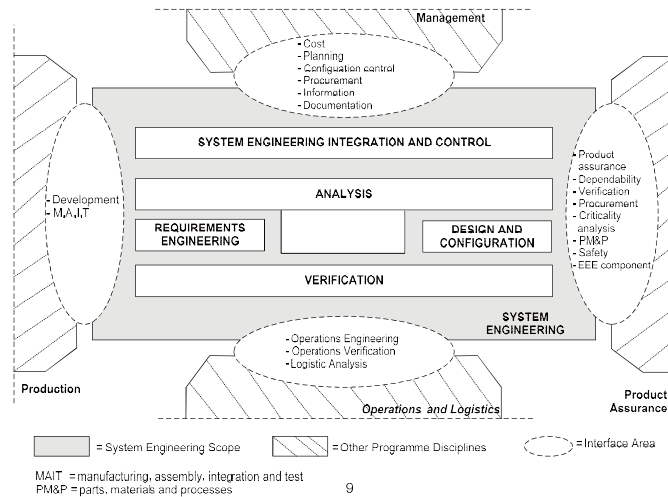
分野横断の、考え方・やり方

- System engineering is defined as an interdisciplinary approach governing the total technical effort to transform requirements into a system solution.
- A system is defined as an integrated set of elements to accomplish a defined objective. These elements include hardware, software, firmware, human resources, information, techniques, facilities services, and other support elements.
- In this standard the concept of "system" is used in a wide sense. The highest level, often called "mission level" or "space system", consists usually of one (or more) space segment(s), of a ground segment, and of a user segment. Elements of system decomposition are also considered a system. For the purpose of this standard the system can be any element at any level of decomposition as defined by the function tree or the product tree.

ECSS Space engineering : System engineering general requirements (ECSS-E-ST-10C), section 4.1

8

Perimeters of SE (from ESA's standard)



結論

Systems engineering は, approach である。

Cambridge Dictionary

Approach = a way of considering or doing something.

辞書の例文

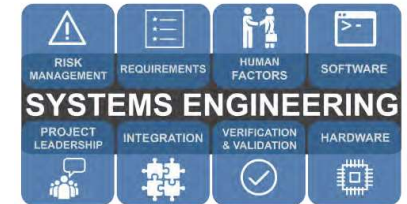
Since our research so far has not produced any answers to this problem, we need to adopt a different approach to it.

考え方, やり方

INCOSE's definition

分野を超えた, 統合的な, 考え方・やり方

- Systems Engineering is a transdisciplinary and integrative approach to enable the successful realization, use, and retirement of engineered systems, using systems principles and concepts, and scientific, technological, and management methods.
- We use the terms “engineering” and “engineered” in their widest sense: “the action of working artfully to bring something about”. “Engineered systems” may be composed of any or all of people, products, services, information, processes, and natural elements.



INCOSE - International Council on Systems Engineering
<https://www.incose.org/systems-engineering>

システムズエンジニアリング的な考え方

The motto of SE (<https://omegalphalpha.org/why-omega-alpha/>)

システムズエンジニアリングの基本的な考え方 (JAXA, BDB-06007B)



“Think about the End before the Beginning”

–The philosophy of Leonardo da Vinci

つまり, 「Systemのretirement まで考えなさい, 始める前に。」

In September of 1513, Pope Leo X said "This man will never accomplish anything! He thinks about the end before the beginning!" (http://www.bibliotecapleyades.net/davi/davincicode_fulcanelli03.htm)

システムズエンジニアリング的な考え方は実験屋の心得

JAXAの初代統括チーフエンジニアであった向井さんの考え 私もそう思います。



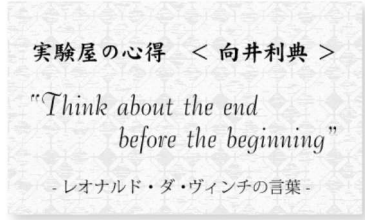
Think About the End Before the Beginning

東京支部支部長 向井利典 昭和41年

ここ数年、個人情報保護法の施行とも関連して、諸友会には大きな変革の過程にありますが、東京支部においては、特に若手会員の参画意識の向上策として諸議会の開催や勉強会の立上げなどに力を注いでまいりました。また、従来から卒業生毎に学年幹事を設けていた

ナルド・ダ・ヴィンチが言ったとされています。レオナルドは、本業の有名な画家としてだけでなく、科学技術の広範な分野に足跡を残した万端の天才でありましたが、この言葉は「システムズ・エンジニアリング」(Systems Engineering)以下、STEと称するの真髄を表すものと紹介されています。なお、STEを日本語に訳すと「システム工学」なるものですが、アメリカで使われる38万作余りに比べて、ハードソフトの両方にわたって、何か新しいものを開発しようとするとき、システムという捉え方によりエンジニアリング

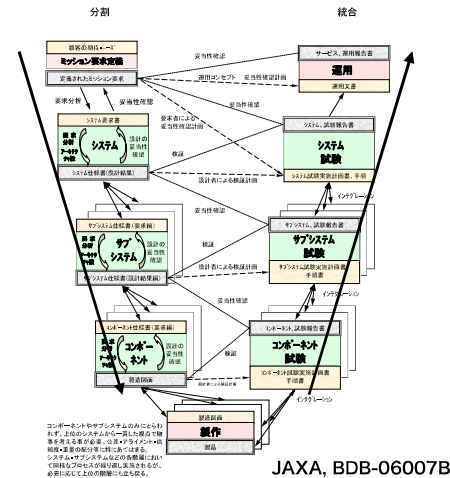
洛友会 会報 (京都大学電気系専攻の集まりらしい)



- 1) “Think about the end before the beginning.”
この言葉の意味するところを、実験の計画立案、準備、セットアップ、データ取得・処理・解析、全ての段階で肝に銘じること。
- 2) 物理的感性を磨く
データを素直に見て不思議を感じる物理的感性を磨け。それは、普段からどれほど考えているかによる。また、自分が明できないとき、その解決を後回しに
- 3) 「不思議」結果は人為的原因
「不思議」な結果は、往々にして、実験の方法や条件、データの取り方などの間

<https://sprg.isas.jaxa.jp/research/Team/spacePlasma/projects/kokoro2/kokoro2.html>

システム開発のVモデルとSE engines (1)



- ・システム開発のVモデル
- ・ミッション定義から出発して、システム、サブシステム、コンポーネントと分解し、コンポーネントを製作し、試験をし組み立て、試験する。
- ・開発は、左上から中央下に、そして右上に時間とともに流れ行く、と思うかもしれない。
- ・実はそうではない。

図 2-1 システム開発のVチャート

14

システム開発のVモデルとSE engines (2)

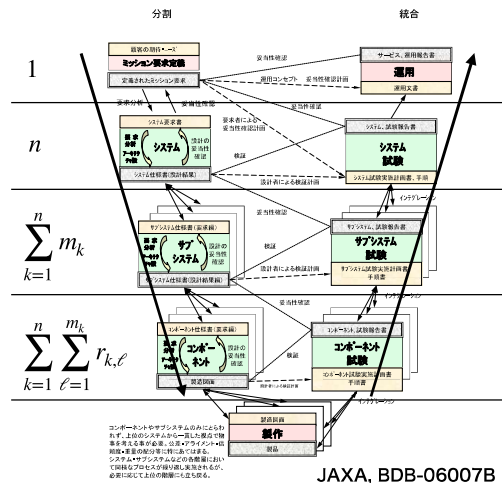
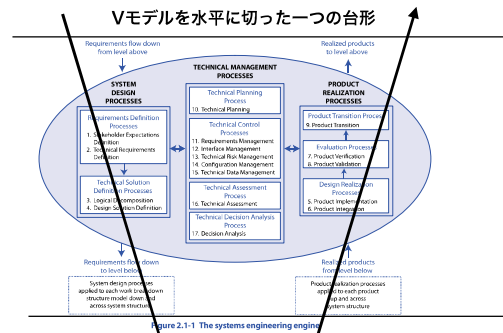


図 2-1 システム開発のVチャート

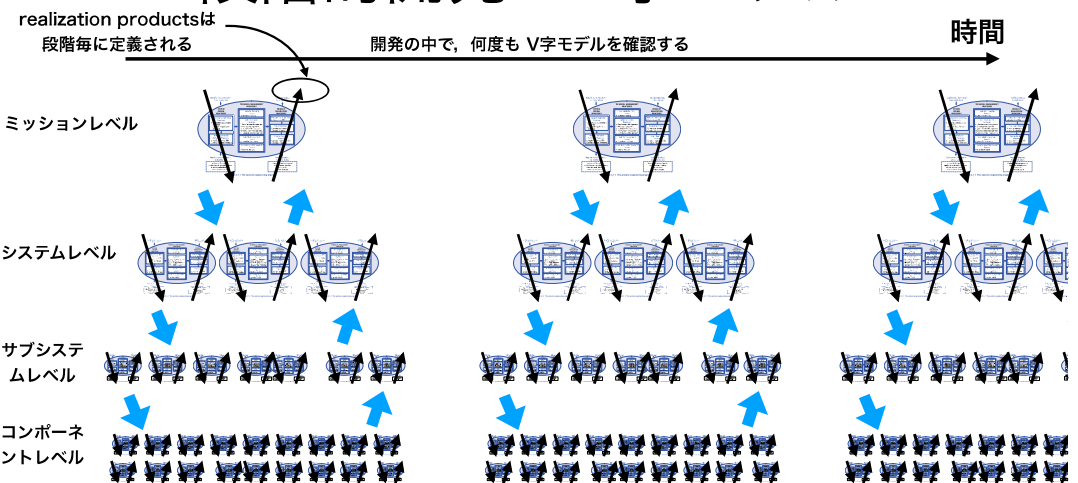


ミッション/システム/サブシステム/コンポーネントの階層と構成要素毎に $n = 3, \bar{m} = 10, \bar{r} = 10$ なら、333個

c.f. ESA' standardのsystemの定義

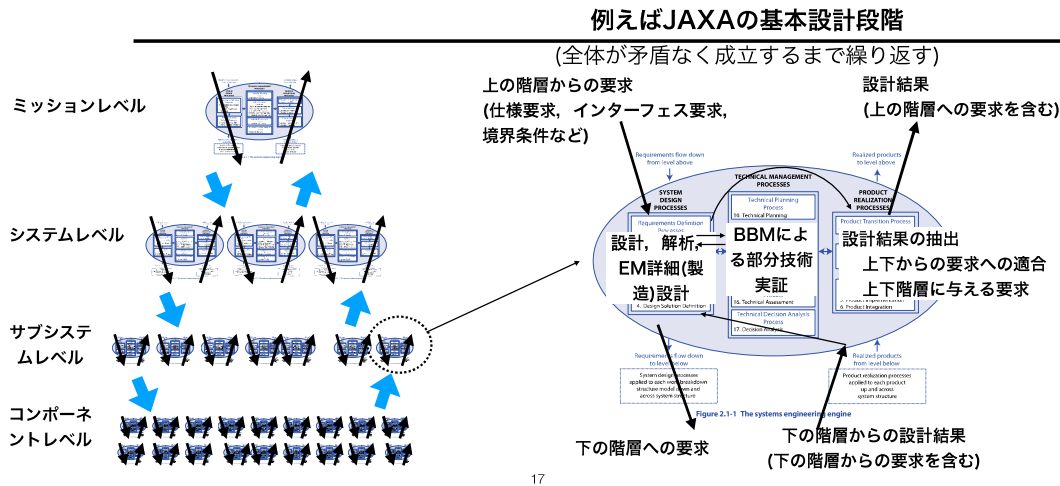
15

段階的开发とV字モデル



16

段階的開発とSE engines

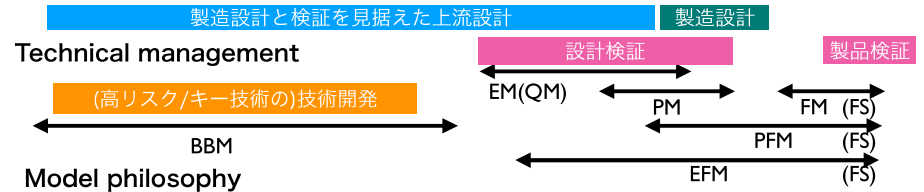


17

段階的開発

System design & Product realization

ミッション目的の trade off, 達成手段(検証方法を含む)の探索と trade off, 設計解を 1 以上見つける	ミッションコンセプト(ミッション目的と達成手段)の再検証, 選択と決定, 開発方針の決定	システムからコンポーネントまでの設計と設計検証	システムからコンポーネントまでの設計検証と製造設計	製造と製品検証	運用と保全	廃棄
--	--	-------------------------	---------------------------	---------	-------	----



18

段階的開発と開発フェーズ

NASA式の名前

Pre-Phase A	Phase A	Phase B	Phase C	Phase D	Phase E	Phase F
System design & Product realization						
ミッション目的の trade off, 達成手段(検証方法を含む)の探索と trade off, 設計解を 1 以上見つける	ミッションコンセプト(ミッション目的と達成手段)の再検証, 選択と決定, 開発方針の決定	システムからコンポーネントまでの設計と設計検証	システムからコンポーネントまでの設計検証と製造設計	製造と製品検証	運用と保全	廃棄
製造設計と検証を見据えた上流設計			製造設計			
Technical management		設計検証			製品検証	
(高リスク/キー技術)の技術開発		EM(QM) PM FM (FS)			PFM (FS)	
BBM		EFM (FS)				
Model philosophy						

19

Model philosophy

NASA式の名前

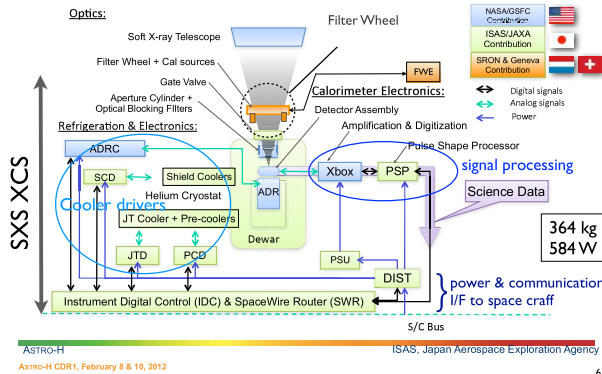
Pre-Phase A	Phase A	Phase B	Phase C	Phase D	Phase E	Phase F
System design & Product realization						
ミッション目的の trade off, 達成手段(検証方法を含む)の探索と trade off, 設計解を 1 以上見つける	必要な開発モデルを開発の初期 (Pre-Phase Aの早い段階)にModel philosophyを見極める事は極めて重要					廃棄
最近の典型的な衛星開発 (経験の蓄積を踏まえた開発時間と経費削減)						
新規開発要素の多いサブシステム／コンポーネント (多くはミッション系)						
部分BBM			EM/QM	PFM		
開発実績はあるが、変更が大きく全体設計に影響する衛星バス構成要素(衛星構体, 衛星全体の熱制御)						
			EFM			
開発実績のある機器 (多くは衛星バス搭載装置)			(変更部分EM)	PFM		
Technical management						
(高リスク/キー技術)の技術開発			EM(QM)	PM	FM (FS)	
BBM				PFM	(FS)	
Model philosophy						
			EFM		(FS)	

20

Model philosophyの具体例

ASTRO-H衛星搭載 X線マイクロカロリメータ分光器 (SXS XCS)の場合

SXS system



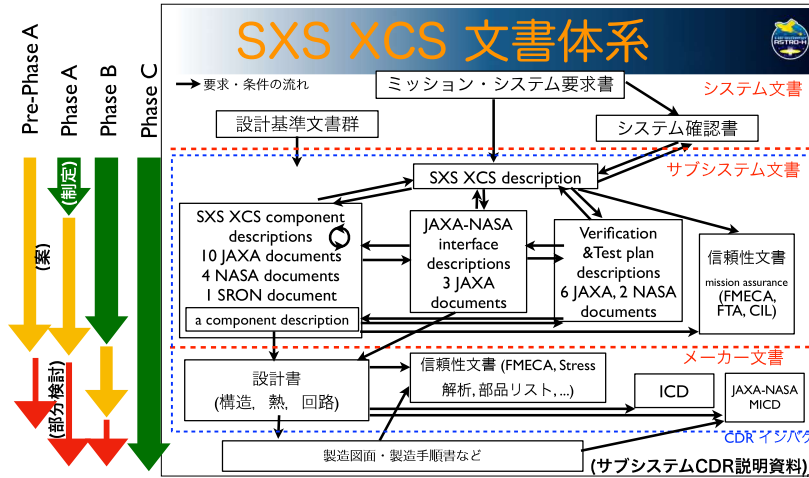
Development models

Component	Development models		担当
Dewar/CSI	EM	FM	JAXA/NASA
SCD	EM	PFM	JAXA
PCD	EM	PFM	JAXA
JTD	EM	PFM	JAXA
PSP	EM	PFM	JAXA
PSU	EM	FM	JAXA
DIST	-	PFM	JAXA
SWR	EM	PFM	JAXA
ADRC	EM	FM	NASA
XBOX	EM	FM	NASA
FWM	QM	FM	SRON/UNIGE
FWE	EM	PFM	SRON/UNIGE

(CDR説明資料)

21

文書からみる V modelと段階的開発 の例



SXS XCS description component descriptionには以下が記述される

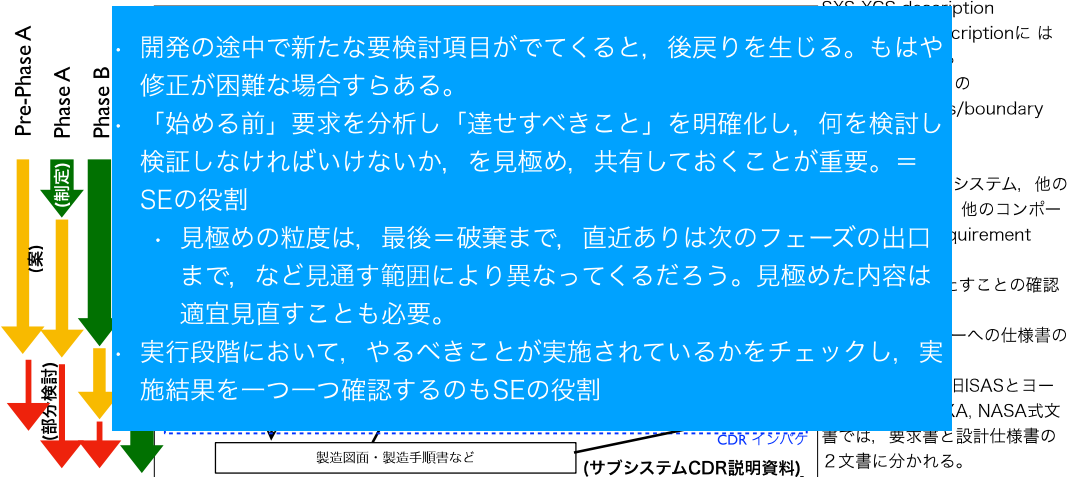
- (1) 上流/下流からの requirements/boundary conditions
- (2) 上流設計結果
- (3) (2)から生じるシステム、他のサブシステム、他のコンポーネントへのrequirement allocations
- (4) (2)が(1)を満たすことの確認

(2) は製造メーカーへの仕様書の位置づけ

descriptionは、旧ISASとヨーロッパ方式。JAXA, NASA式文書では、要求文書(IF要求を含む)と設計仕様書に分かれる。

22

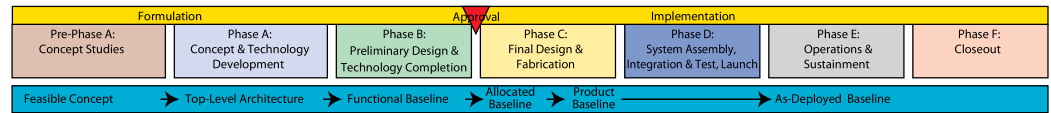
文書からみる V modelと段階的開発 の例



23

参考：フェーズの呼び方

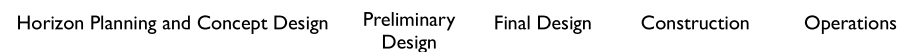
NASA



JAXA

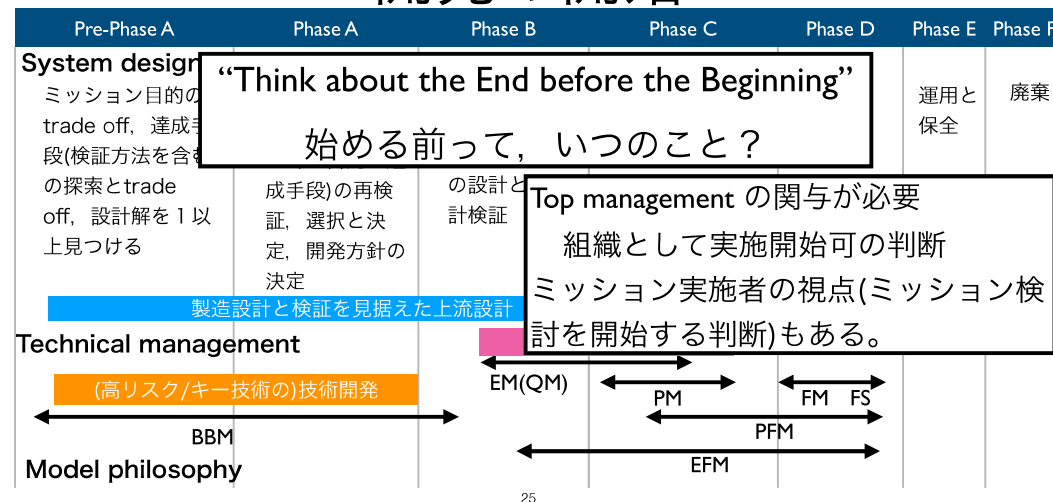


NSF

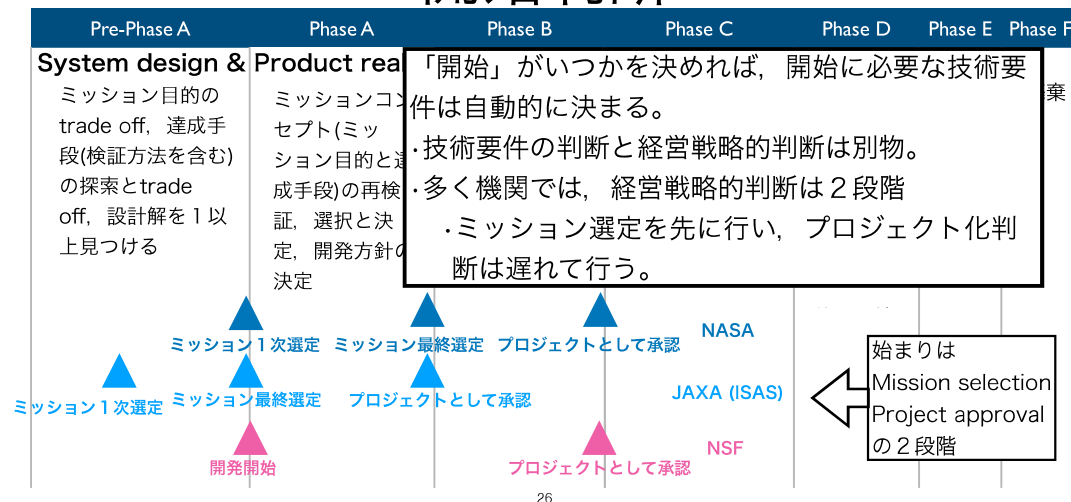


24

NASA式の名前

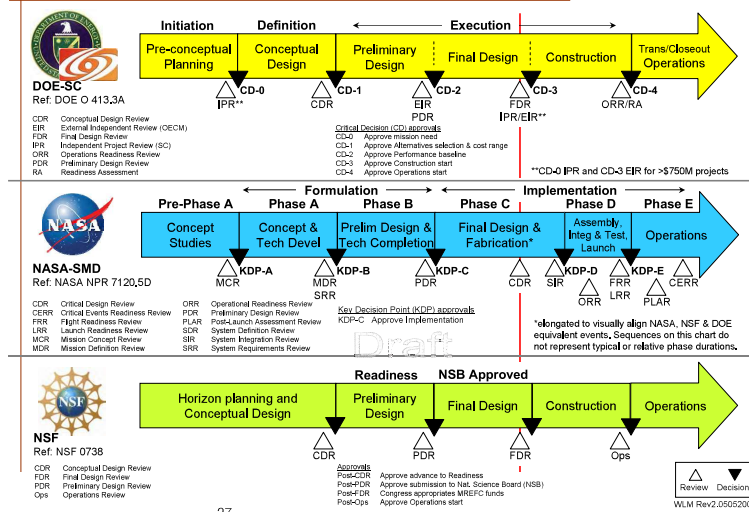


NASA式の名前



出典
 Preconstruction Planning
 for Large Science
 Infrastructure Projects
 by William L Miller, Ph.D.
 AAAS S&T Policy Fellow NSF
 Large Facilities Office
 25June2009

Objectives:
 #1 Compare processes and
 practices for preconstruction
 planning of large science
 infrastructure projects, at
 NSF, NASA and DOE.

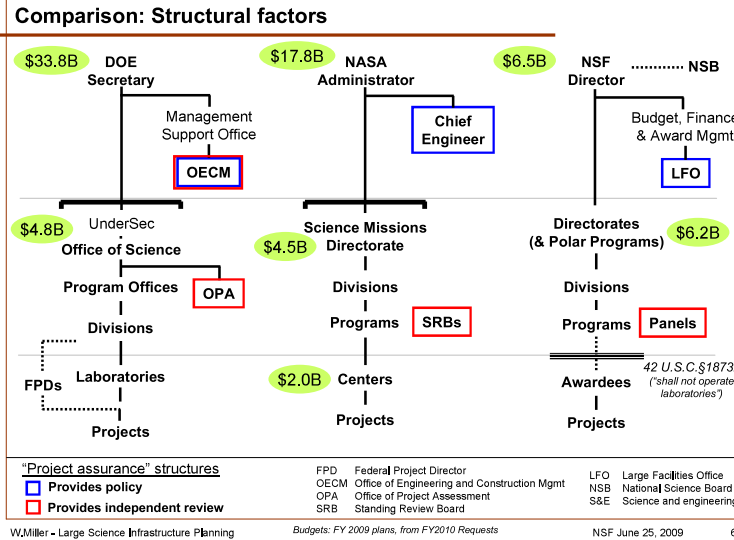


- Mission = 任務や使命
 - Missionは三つの要素を含む
 - (1)到達すべき目標
 - (2)目標に進んでいく行動
 - (3)それらが何かに求められている
(三省堂 World Wise Web)
 - 「**組織のミッション」と言う時は(1)に重点が置かれている。
 - 段階的開発の説明にあるミッションは(1)+(2)の意味。これは(3)も満たすはず。
- Project
 - A temporally endeavor undertaken to create a unique product, service, or result.
(PMI's PM BOK)
- Program
 - Related projects, subsidiary programs, and program activities managed in a coordinated manner to obtain benefits not available from managing them individually.
(PMI's PM BOK)

(Projectは、天文台におけるプロジェクトの定義と異なる)

機関の構造 の例

- Project の上位に program が設定されている。
- 技術審査を行う Review Panelは、プログラムレベルで設定されている。



29

Before the beginning の重要性: 源流主義

- ミッションコンセプトの検討段階では、課題解決の方法に様々な可能性があるが、後のフェーズになるほど選択肢が狭まる。(野田さんのSE研修)
- ミッションコンセプトが悪いと、後から修正は困難。
- ➡ 良いミッションコンセプトを作ることがミッション成功に最重要。
- Product Assurance における源流主義と同じ考え方。

鈴木さんPA/QA研修の「源流管理」の導入スライド

1.1 入力的重要性

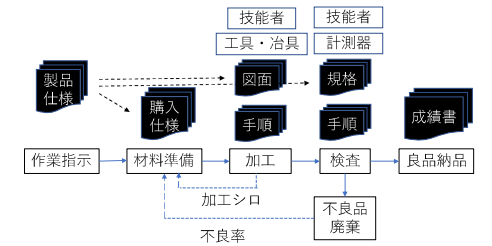


図1-1.2 ロッド加工工程と関連情報

【問】この作業の起点になっている製品仕様が不正確だと、どうなるでしょうか？

30

概念検討段階(Pre-PhaseA)とCML

- Pre-Phase Aではミッションの目的、達成手段（アーキテクチャー）に様々な可能性のある状態。次第に可能性を狭めてゆき、次のフェーズで一つに決定できるところまで、ミッションコンセプトを作りあげる。
- あらゆる可能性を考えて、よい目的、よい実施手段（技術開発の難易度・リスク、コスト、開発期間など観点）のよいミッションコンセプトを作る／選ぶ。
- コンセプトの完成度の評価基準として、また、よりよいミッションコンセプトの作るための処方箋として、Cocept Maturity Level (CML) と CML checklist が NASA JPLで考案された。(Wessen+2013)
- JAXAでは2016年にCMLを採用

31

JAXA (ISAS)におけるCML

CML 1	<i>Cocktail Napkin</i> - The science questions have been well articulated, the type of science observations needed for addressing these questions have been proposed, and a rudimentary sketch of the mission concept and high-level objectives have been created. The essence of what makes the idea unique and meaningful have been captured.
CML 2	<i>Initial Feasibility</i> - The idea is expanded and questioned on the basis of feasibility, from a science, technical, and programmatic viewpoint. Lower-level objectives have been specified, key performance parameters quantified and basic calculations have been performed. These calculations, to first-order, determine the viability of the concept
CML 3	<i>Trade Space</i> - Exploration has been done around the science objectives and architectural trades between the spacecraft system, ground system and mission design to explore impacts on and understand the relationship between science return, cost, and risk
CML 4	<i>Point Design</i> - A specific design and cost that returns the desired science has been selected within the trade space and defined down to the level of major subsystems with acceptable margins and reserves. Subsystems trades have been performed.
CML 5	<i>Baseline Concept</i> - Implementation approach has been defined including partners, contracting mode, integration and test approach, cost and schedule. This maturity level represents the level needed to write a NASA Step 1 proposal (for competed projects) or hold a Mission Concept Review (for assigned projects)
CML 6	<i>Integrated Concept</i> - Expanded details on the technical, management, cost and other elements of the mission concept have been defined and documented. A NASA Step 2 CSR is at this level of maturity. There is no corresponding milestone for assigned projects
CML 7	<i>Preliminary Implementation Baseline</i> - Preliminary system and subsystem level requirements & analyses, demonstrated (& acceptable) margins and reserves, prototyping & technology demonstrations, risk assessments and mitigation plans have been completed. This is the maturity level needed for competed missions to hold their Preliminary Mission System Review (PMSR) and for assigned projects to hold their Mission Definition Review (MDR) _{B2}

注：左はNASA JPLのオリジナルのCML定義。
JAXAの定義もあるが非公開なので、NASAオリジナルで代用した。

ミッション一次選定合格の要件の一つ
(ISASの規程)

Pre-Phase A完了の要件の一つ
(JAXAの規程)

注：NASA MCRは JAXAの MDR に近い。
NASAのPMSRとMDRは、それぞれ、JAXAのSRRとSDRに近い内容である。従って、どちらの場合も、CML5がPre-Phase A出口、CML7がPhase Aの出口に対応する。

JAXA (ISAS)のCML checklist

- ・ CMLを満たすために何をすればよいのか、何ができている必要があるのか？CMLの文言からだけでは、CMLの中身をよくわかっている人以外はわからない。
- ・ JPLはCMLを活用するためのchecklist を作成した。22のattributes 毎に、CML1-7で満たすべき内容を示している。
- ・ ISASでは、JPL CML checklistをISASのミッションの特性と開発方針にあわせて変更し、CML1-5に対して、21のattributes, 150のitems からなるchecklistを作成し、2017年から活用している。

(S.Ueno+2021, Proc. SPIE)

(1) 科学目的, (2) 科学データ, (3) ミッションアーキテクチャー, (4) システムアーキテクチャー, (5) ミッション機器アーキテクチャー, (6) ミッション運用アーキテクチャー, (7) 技術リスクマネジメント計画, (8) 技術マージン維持計画, (9) 技術要素開発, (10) 技術要素ヘリテージ, (11) 搭載機器リスト, (12) システムズエンジニアリング, (13) 打ち上げ手段, (14) planetary protection, (15) 検証計画, (16) 調達マネジメント, (17) 実施体制, (18) スケジュール, (19) WBS, (20) ミッション保証, (21) コスト
天文台ミッションの特性にあわせたchecklistも作成できるはず。

33

ISAS CML checklistのSE部分

Level (Attribute = システムズエンジニアリング) の内容

- | | |
|---|--|
| 2 | 比較対象として検討すべき、コスト・リスク・programaticな課題が異なるミッション実現方法を複数考え、比較対象の第一次案として設定する。 |
| 3 | 科学目的の達成度とコスト・リスク・programaticな課題の間のバランスにたって、複数のミッションアーキテクチャー、システムアーキテクチャー、ミッション機器アーキテクチャー、ミッション運用アーキテクチャーについて、優れている点、劣っている点を総合的に判断する。 |
| 3 | (checklist 5-3-2の)ベースラインアーキテクチャーを構成するサブシステムの間の要求の依存関係を分析し同定すること。 |
| 4 | 提案ミッションにおいて最低限実現しなければならない最重要な科学outputが明確されており、複数のミッションアーキテクチャー、システムアーキテクチャー、ミッション機器アーキテクチャー、ミッション運用アーキテクチャーの間のトレードスタディが完了していること。 |
| 5 | アーキテクチャーのトレードスタディにより採用するミッションアーキテクチャー、システムアーキテクチャー、ミッション機器アーキテクチャー、ミッション運用アーキテクチャーを決定する。 |
| 5 | Phase A以降のシステムズエンジニアリングの方針(Systems Engineering Management Plan) が文書化されている。 |

34

CML checklistと科研費の申請書

CML (Attribute = 科学目的) の内容

- 1 該当分野の科学（理学および工学）の大目的の中における提案ミッションの意義を1つの文で記述すること。
- 2 提案ミッションの意義を、過去のミッションや海外を含めた開発中あるいは検討中の関連するミッションと比較可能なレベルにフローダウンし、科学目的として記述すること。
- 3 提案ミッションで実施する実験・観測・分析などを、ミッションの科学目的との関係を明確にして記述すること。

科研費の応募書類

セクション1. 研究目的, 研究方法など

(1) 研究課題の核心をなす学術的問い

(2) 本研究の目的

(3) 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか

両者は同じ意味のことを言っている！
CML checklist は考え方も示している。

35

おわりに

- ・ Think about the end before the beginning と言われると、先のことはわかるはずはない、とか、end がわかっているならサイエンスではない、という反応が返って来こともあります。(後者は end をどう定義するかの問題、c.f. 科研費の申請書。)
- ・ しかし、後になって「あの時、どうして、こんなことに気づかなかったんだろう」と思うことはよくあります。SEはこれを避けるために有効なapproachの一つです。
- ・ SEが機能するためには、トップマネジメントから実施メンバーに至る全階層で、SEの approach が浸透していることが必要です。
- ・ SEの大枠は組織により異なります。天文台には天文台にあったSEが必要で、それを作ってゆければ、と考えています。

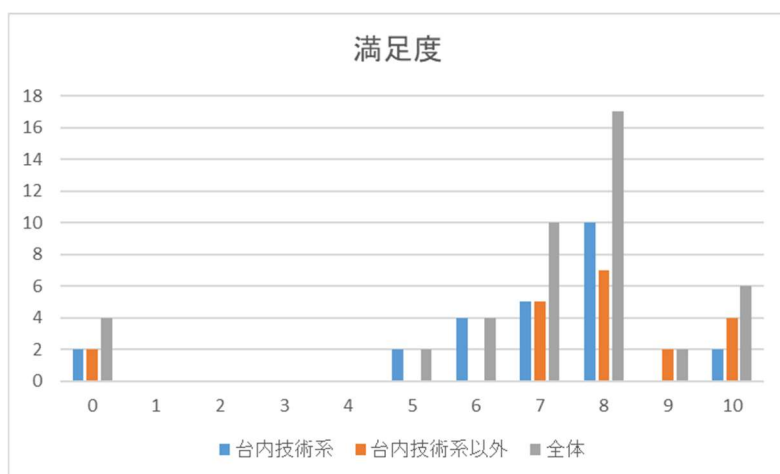
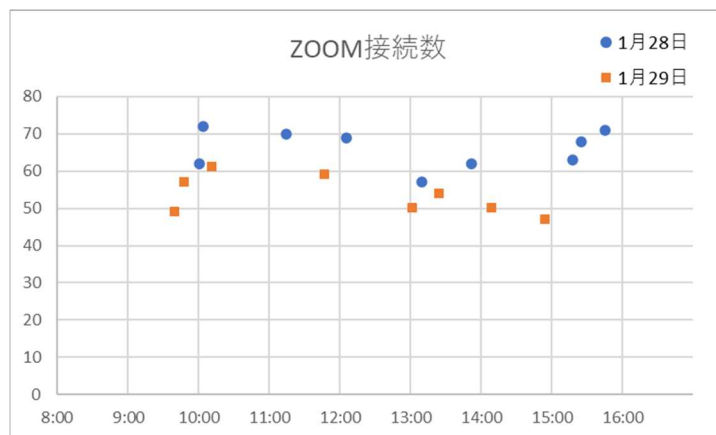
36

第40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会

WEBでの登録者数（括弧内数字は昨年度アンケート結果より）

- ・全体 111名（92名）
- ・台内参加 76名（71名）
- ・台内技術系職員 39名（24名）
- ・台外参加 35名（21名）
- ・アンケート回収 45（37）



全体の平均 7.06（80.2%）

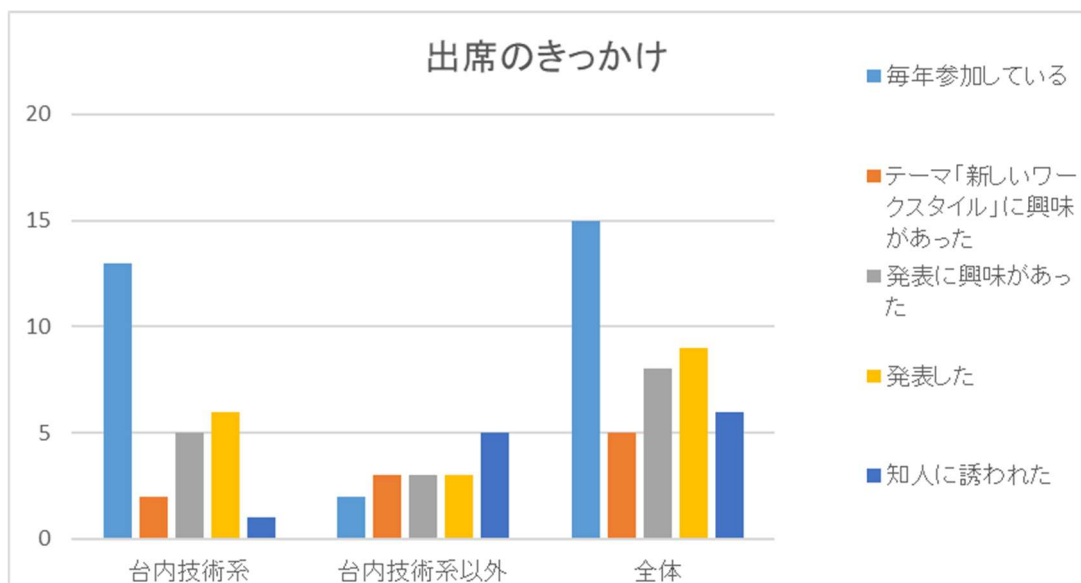
台内技術系職員 6.76（87.7%）

台内技術系以外 7.45（72.7%）

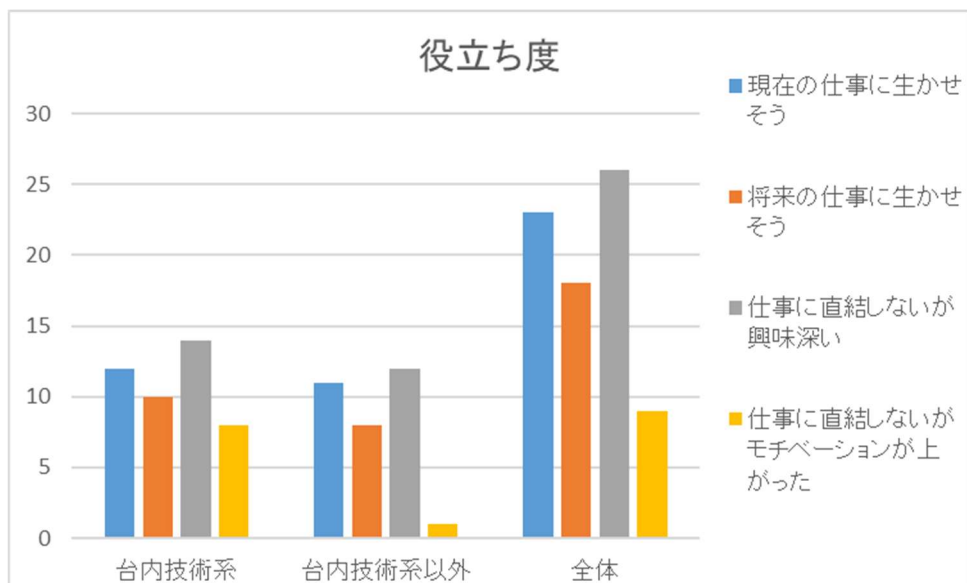
台内技術系職員アンケート平均 * 台内技術系職員参加者/台内技術系職員数

= $6.76 * 39 / 61 = 4.32$ （30.25%）

【0を含めない場合 平均が7.35 になって、4.70 になる】



Web で見つけて興味を持った；
 オンラインだったため(出張する必要がなかった)；
 去年から勤務だったので開催を初めて知った。；
 興味のある講演があったため；
 公開天文台の ML で知り、たまたまコロナ関係のデータがあった；
 指導学生の発表があった；
 所内メールで案内があった；
 世話人なので；
 JAPOS-ML から；
 締切と開催日がちょうど良かった。；
 プロジェクトメンバーから発表することを勧められた；
 発表の共同実施者であったため；



新しい人的交流ができそう；

発表時間以外、業者対応その他の業務で聴講できなかった。；

情報交換会について感想をお聞かせください。

Please tell us your impressions of the information exchange meeting.

エンジニアリングに特化した大変貴重な交換会に思いました。SKA-JP 内での活動や、ヨーロッパでの電波天文コミュニティに参加すると、このようなシンポジウムに実製造や実サービスを行う企業の参加や議論への加入が少ないことを残念に思います。

時差の関係で出席できなかった。

参加できませんでした。

別の用事があったため、参加できませんでした。

SpatialChat で、かなりリアルに雑談が再現できて面白かったです。1日目は ZOOM だけはつなげていましたが、仕事のためほとんど内容は把握できず、懇親会も断念しましたが、2日目もご用意いただけて良かったです。

チャットベースよりも迅速に会話できるので良い。

必要ならば手元に資料を表示しながら議論ができるので便利ははず。

アイコンが少し小さいのでお目当ての人を捕まえにくいかもしれない。もう少し狭いスペースで少し密になるぐらいの方が実際のワークショップ等に近い感覚になるのでは？

SpatialChat を初めて体験しましたが、いくつかの小グループで双方向通話ができる機能がとても良かったです。

リモートではあったが 3, 4 人での少人数意見交換が出来て、飲み会での意見交換のようであった。

飲食も自分で用意できるし、このような情報交換方法が主流になっても良いかと思う

special.chat というシステムとても良いです。あちこちでいろいろお気遣いありがとうございました。

一人調子に乗りすぎましてお騒がせしました。

Good.

自分の発表内容に興味を持ってくれた、同じ課題や問題に直面していた人と話げたのは良かった。

また、オンラインツール初めて使ったが大変有用なものだった。

実際に立ち話をしているような気軽さなうえ、一つの会話中に多くの通りすがりの方から研究の経験談やアドバイスを頂けて有意義だった。

業者対応その他の業務で出席できなかった。

SpatialChat を活用できており、いつものとおり気軽に発表者・聴講者、仕事・プライベート関わらずコミュニケーションできたことが大変よかった。普段人との接触を避けなければならない状況下において、新たなコミュニケーションツールとして今後も活用していただきたい。

他の会議の関係で参加できませんでした

Spatialchat を初めて利用しましたが、久々に F2F の懇親会に参加しているようで楽しませていただきました。思っていた議論もし尽くせて大変ためになる機会でした。

世話人の皆様、準備ありがとうございます。たいへん、有意義でした。同じような仕組みを、自分の所属するプロジェクトでも使ってみたいと思います。

世情を考慮して最大限の効果がある方法で実現されたと思います。世話人の皆様、本当にありがとうございました。と同時に、やっぱり対面の良さも再認識した次第です。海外拠点の皆さんが時差で参加できないのも少し残念でした。早くコロナが収束して、皆さんとお会いできるのを楽しみにしています。

いろいろな人と話せて楽しかったです。雑談大事ですね。

出ませんでした。御免なさい。

SpecialChat を使う事で仮想的な会場が再現され、話をしたい人を選んで会話をする事が出来た。カメラ off だと顔が見えないので話しのきっかけを作るのが難しく、回線が細く途中で落ちてしまう人もいたが、満足できた。

また、例年だと 1 日しか用意されない交換会が 2 日用意されたことで、全ての発表内容に対して質疑応答だけでは足りない部分を補うことが出来るように配慮され、大変よかった。

飲食は出来なかったが、一定の効果(懇親)はあった。発表の形式はむしろリモートの方がよい。急な仕事が入って 2 日目はほとんど参加できなかったが、1 日目に関してはいろいろ話せて良かったと思う。懇親会もコロナ下であまり飲み会がない中で色々話せてストレス発散にもなって良かった。私は SpatialChat はかなりいいと思ったが、SpatialChat は近づかなければならないため話しかけにくかったという意見を他の方からは聞いた。

出席者が思ったより少なかった印象がします。

spatial chat のシステムはよかったと思います。

ポスターセッションのようなことがオンラインで実現されていて、細かい質問でも発表者に聞くことができた。1 対多の仕組みでは長く質問することは憚られる。また、横道にそれた雑談にも花を咲かせることもできた。

初日 firefox で自宅から参加したら重すぎた。chrome 入れてみたのでどうなるか。

(全般)やはり、最初話しかけづらいというところがあったように思います。

(1 回目)途中参加したこともあり、ポスターがみえないので発表してた内容がわからず、相手が知っている人でないと話しかけづらかった。

情報交換会以外のコメントですが、このような大変な状況下で様々な試みをしながら開催、大変だったことと思います。世話人の皆様、ありがとうございました。

あまり使用経験がなかった機能として、zoom のスポットライトとタイムキーパー、アンケートにビックリしました。良かったです。

リモートですが、これほど会話が進められるとは想像していませんでした。リモートの中ではとても良い試みでした。もちろん実地で顔を見ながら会話して(議論というよりも)親交を深めて、その後に情報をやり取りできるような繋がりができることを期待したいです。

最後までやり方がよく分からなかった。

今後希望するテーマがありましたらご記入ください。

Please let us know your expected theme in future.

シンポジウムお疲れ様でした。屋外での立ち合い業務が入ったりしたので中々聴講出来るタイミングが無かったのですが少しでも聴講した内容は興味深かったです。システムズエンジニアリングの続きも聴講したかったのですが屋外だったので聴講出来ず録画等あれば拝見したいと思いました。専門分野によっては難しい内容もありましたが、火球の追尾等、個人的には一般にも分かりやすい研究テーマは初めてのシンポジウム参加でもとっかかり易く聞いていて面白かったです。

最新技術でも、身近な工夫でも、天文学会とは別の地道な雰囲気がとても良いと思います。

失敗学。また、各分野で失敗の典型例などを系統立てて紹介すると良さそう。

最後の藤井様の残り2つの発表も聞きたかったです。

文書化。

情報セキュリティ

特になし

分野横断的に必要とされる技術を、毎回1個ずつ取り上げるのはいかがでしょうか？

外注製作と内製のメリット・デメリット

注目の先端技術と影で支える人・技術・テクノロジー

スケジュール管理

台外からの参加者も集めるのは大変かもしれないが、今後もその努力は続けて欲しい。

また技術シンポはフォーマルな学会とは違い、カジュアルなスタイルで参加できることが魅力であり、懇親会で情報交換することで仕事に役立つ情報、物を交換、提供できる/される可能性が広がる。今後もこの方向性で是非続けて欲しい。

最新技術適用のアイデア(AI、ドローン、3Dプリンタ、IoT等)。

オンラインのほうがスライドの内容が読みやすく、集中して発表を聞くことができた。また、スクリーンショットを撮ってメモすることも容易で、今後もオンラインの利点を活かしてもらいたい。大きな会場での公演や会議へネットを通して参加することは音や画面が聞きづらい見えづらいことも多いので、逆に公演者がZOOMで発表し、その内容を大きな会場に流すような、逆の方法を取ると良いと考える。公演者が研究会会場へ足を運ぶ場合でも、大会場ではなく個室から公演を行うことなどもあり得る。

すぐに思いつきませんが期待しています。

若手技術者の教育や育成について。特に理系大学生や高専の学生などに対して必要な技術力や知識をつけさせるプログラムを考える。全体的に技術者は高齢化しており、学生は幼稚化していることを危惧しています。

編集後記

コロナ渦でのリモート開催にもかかわらず最大接続数 70 を超える大変盛況な技術シンポジウムを開催することが出来ました。参加者の皆様本当にありがとうございます。

リモート開催である故に直接対面でのコミュニケーションは出来なかったわけですが、代わりに遠方の方も参加が容易になっていることも判明し、アフターコロナにおいても有効な情報交換ツールになり得るのではないかと感触を得ることが出来ました。

今回は昨年オブザーバーとして関わってきた技術推進室の藤井が世話人代表を引き受けたのですが、今後は技術交流を促進したい方々に積極的に世話人に関わって頂き、広い意味での OJT のひとつとして技術推進室は支援する側に立ちたいと思います。

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 3 年 3 月 2 日 世話人会代表 藤井泰範

第 40 回 天文学に関する技術シンポジウム

世話人 先端技術センター 藤井 泰範

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