

タイ国立天文学研究所NARITが進める 電波天文学・測地学プロジェクト



杉山 孝一郎

〈NARIT: National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization) 260 Moo 4, T. Donkaew, A. Maerim, Chiangmai, 50180 Thailand〉
e-mail: koichiro.sugiyama.th@gmail.com

タイ国立天文学研究所NARITでは、電波望遠鏡の“自前”による建設・構築を通じた技術革新や人材育成／交流を目的として、2017年から“電波天文学・測地学プロジェクト”を開始しております。中でも、東南アジアで初となる天文観測専用の大型口径40 m電波望遠鏡TNRTは、2022年にファーストライトを迎え、2023年10月10日にCall for Proposalsを開始しました。本稿では、プロジェクトの概要と、TNRTや測地観測専用の13 m VGOS電波望遠鏡の建設状況を、タイ王国内や周辺の東（南）アジア諸国との連携を通じた将来計画と併せて紹介します。

1. タイ国立電波望遠鏡：40 m TNRT

NARITは、タイ王国政府および関連省庁の正式な承認を得て、2017年から公式に開始した“電波天文学・測地学プロジェクト”の拠点として、2018年にタイ北部のチェンマイ県にタイ国立電波天文観測所TNROの建設を開始しました。NARITについての概略は月報2023年7月号をご参照ください [1]。TNROは、NARIT本部から40 km離れた Huai Hong Khrai Royal Development Study Centerと呼ばれる王立の開発研究センター内の一角に位置しています。電波干渉 (RFI) 静穏地帯で、かつ水蒸気量も比較的少ないことから、非常に幅広い周波数をカバーした望遠鏡運用に適したサイトと言えます。本プロジェクトの一角を担う40 m TNRTは、ドイツのマックスプランク電波天文学研究所MPIfR、およびスペインのイエベス天文台との覚書き締結のもと、口径40 mのイエベス電波望遠鏡をベースとして建設が始まりました。なお、TNRTはPrime-Focus Tetrapod Head Unit (THU)

と呼ばれる主焦点部のフレキシブルな回転構造を搭載したアップグレード版として設計されています。このTHU構造により、2 GHzを下回る低周波帯は主焦点を用い、それ以外の中・高周波帯は複数鏡を介したナスミス焦点を用いて受信可能なナスミス-カセグレン光学系が実現されます。主鏡面精度150マイクロメートルrms、および（仰角52度における）無風のベストな状態でのポインティング精度として2秒角を達成することで、0.3 GHzから最高で115 GHzまでの高周波数帯における観測が可能となります（ビームサイズ：1.43度-13.4秒角）。なお、望遠鏡のスルーイング速度はAZ, EL方向それぞれ3, 1度/秒に相当します。このように、40 m TNRTは世界標準の観測感度で幅広い周波数帯をカバーし、“自前”の特権をフルに活かしたフレキシブルな観測運用体制と豊富な観測時間に基づき、ユニークな観測を実現可能な電波望遠鏡として期待されています。また、本望遠鏡に関連した先駆的な開発や必要不可欠な性能評価を通じ、若手育成の重要な拠点になるといえるでしょう。

実際に、本望遠鏡の建設開始当初から、NARITの若手エンジニアが中心となってMPIFRおよびイエベス天文台へ長期滞在し、各エキスパートとの議論を通じて技術継承を賜りながら自前望遠鏡の達成を一から実現していています。具体的には、本望遠鏡へ搭載する受信機や、鏡面精度の調整に用いるホログラフィシステムの開発[2]、さらには観測時のパケタイザーから各観測モードへの分配・デジタルサンプリング・記録までを一括で一手に担う高性能なUniversal Software Backendシステムや独自のオペレーションシステムの構築など、望遠鏡を支える全てのコンポーネントの設計・開発に、タイ王国のエンジニア自らが携わっています。このように、自前望遠鏡の建設を通じた若手エンジニア各位の経験と技術向上は、タイ王国における技術発展、および将来的なさらなる自前望遠鏡の増築や、タイ国内における超長基線電波干渉計VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 観測網の構築へ向けた重要な第一歩となっています。なお、第一弾として40 m TNRTへ搭載済みの低周波帯Lバンド受信機、中周波帯Kバンド受信機、および第二弾の搭載として目下製作中の中周波帯C/X/Kuバンド受信機のスペックを表1へ掲載しますので、ご参考になれば幸いです。

表1 L, K, C/X/Kuバンド受信機スペック。

	L	K	C/X/Ku
周波数 [GHz]	1.0-1.8	18-26.5	4.55-13.65
ビームサイズ [arcmin]	14-26	1.0-1.4	1.9-5.7
偏波	Linear	Circular	Linear
サンプリングレート [Gsps]	3	4	4
ビット数	<12	<12	<12
バンド幅 [GHz]	0.8	2	1.3
主開口能率 [%]	50	50	60
ゲイン [K/Jy]	0.32	0.23	0.27
システム雑音温度 [K]	15	70	30
SEFD [Jy]	66	307	110

1.1 ファーストライトの達成

2022年は、40 m TNRTにとって大きな飛躍の年となりました。2022年初頭のLバンド受信機搭載を皮切りに、同年3月24日に天の川銀河からの中性水素原子放射を受信、6月15日にパルサー天体B0329+54からの信号受信、さらには10月25日に有名な大質量星形成領域W49Nからの水酸基(OH)メーザー受信と、さまざまな天体からのファーストライトに無事成功しました。本ファーストライト各種の報は、NARITの誇る広報・アウトリーチ部からの心強いサポートにより、様々な媒体を通じて迅速かつ幅広い聴衆へお届けすることができました。実際に、NARIT Facebookを通じてタイ語によりお届けした報に掲載された結果[3-5]を図1に紹介いたします。なお、Kバンド受信機でのファーストライトも近日中に公開できるよう準備を進めています。

1.2 科学観測

ファーストライト成功と、その後の性能評価を軸としたコミッションングを経て、2023年10月10日、タイ時間10時に40 m TNRTで初となるCall for Proposalsの開始に至りました[6]。それに先駆け、NARITおよびタイ国内におけるサイエンスワーキンググループの構築、ワールドワイドな研究者との密な連携、および共同研究者らとの度重なるワークショップやオンラインミーティングを通じ、40 m TNRTを用いた潜在的科学観測テーマに関する密な議論を進めてきました。テーマとしては、パルサー、高速電波バースト(FRB)、重力波、星形成、漸近巨星分枝(AGB)星、銀河、活動銀河核(AGN)、化学組成特異(CP)星、など様々な天体のみならず、東南アジアで初となる測地VLBI、およびNARITの大気科学チームと連携した効率的なダイナミックスケジューリング法の確立など、幅広い科学トピックを対象としています。その結果、2022年10月12日にいよいよホワイトペーパー(白書)として、40 m TNRTでの達成を目指すキーサイエンスを

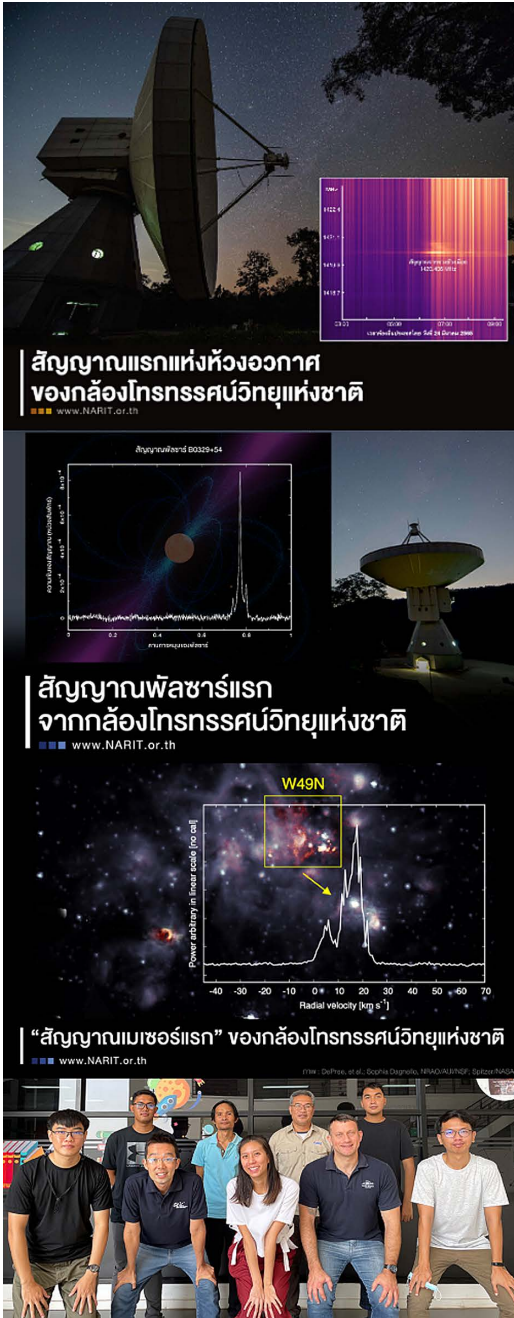


図1 ファーストライトの各報と一部のプロジェクトチームメンバー (Image credit: NARIT/TNRO).

arXiv (astro-ph) にて公開するに至りました [7]. 詳細は、本arXivに掲載されている白書をご覧ください. なお、私の主たる研究テーマである大質量星形成に関し、40 m TNRTでどのようなユニークな観測が実現可能か、ここで熱く述べたいところではございますが、他の研究テーマとの公平を期すため、ここではグッとこらえて割愛いたします (笑).

1.3 VLBI 観測網との連携

TNRTは東南アジアで初となる電波天文観測専用の望遠鏡であるため、その地理的にユニークな点を活かし、世界に点在する電波望遠鏡との連携によるVLBI観測網としての劇的な性能向上に大きく寄与します (図2). 世界には主に東アジア、アメリカ合衆国、ヨーロッパ、およびオセアニアにVLBI観測網EAVN, VLBA, EVN, LBAがそれぞれ構築されており、その多くはLバンド、およびKバンドでの運用周波数帯を有しています. 例えば東アジアのVLBI観測網EAVN (East Asia VLBI Network) に対しては、i) 最南西端に位置、ii) 約4,500 kmに相当する第二最長基線の生成、iii) 天馬65 m, 野辺山45 mに次ぐ大口径望遠鏡のひとつ、であることから、劇的な性能の向上が期待されます. VLBIでは、一番長いアンテナ間距離に相当する基線長が空間分解能の性能を決めることになり、長ければ長いほどその観測網の空間分解能が向上します. それと同等に重要な要素として、VLBI観測網を構成する各望遠鏡の配置が挙げられます. その際には、観測対象天体から見た基線ベクトルの分布と言える“UVカバレッジ”が良い指標となるでしょう. これは、天体の方位ベクトルに垂直な空間周波数平面 (UV平面) に各基線ベクトルを投影した、VLBIの複素観測量に相当します. 端的に言えば、UVカバレッジが密で、真円に近いほど、このUVカバレッジを二次元フーリエ変換することで得られる合成ビーム、およびそのビームを畳み込むことで得られる天体画像がより良質なものと向上します. 図3

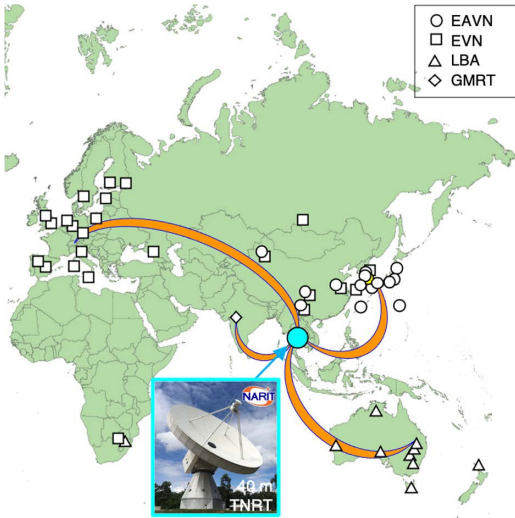


Image credit of background world-map: Illust AC

図2 世界の各VLBI観測網EAVN, EVN, LBA (アメリカ合衆国のVLBAはタイ王国とのコモンスカイが少ないことから割愛), およびインドの結合素子型干渉計GMRTと, 40 m TNRTとの地理的な位置関係.

で青く示されている線が, UVカバレッジにおいて40 m TNRTの参加により新しく生成される基線です. 北・南半球の天体共にTNRTは他の望遠鏡では埋めることの出来ない北東-南西方向の基線を唯一強化出来る望遠鏡であることがわかります. その劇的な効果を, 最近ブラックホールシャドウを撮影出来たことでも有名な, おとめ座銀河団の中核に位置するAGN M87に対するシミュレーションにおいて視覚化することに成功しました. 図4上段パネルが2017年時点のEAVN Kバンドで観測されたM87の電波ジェット画像, 下段が同観測網に40 m TNRTが加わった場合の観測シミュレーション画像に相当します. 40 m TNRTが加わることでUVカバレッジがより密になることに伴い, 合成ビームにおいてボトルネックとなる波状のノイズ(サイドローブ)が軽減され, 画質が劇的に向上していることが一目瞭然かと思えます. 将来桁で高い観測性能を実現するSquare Kilometre Array (SKA) や next-genera-

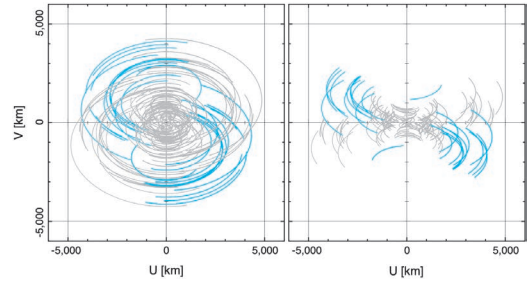


図3 40 m TNRTがKバンド周波数帯にてEAVNと連携した場合のUVカバレッジシミュレーション. それぞれ赤緯+40 (左), -29度 (右: 銀河中心) を観測する場合に相当. 青線が40 m TNRTが生成する基線に該当.

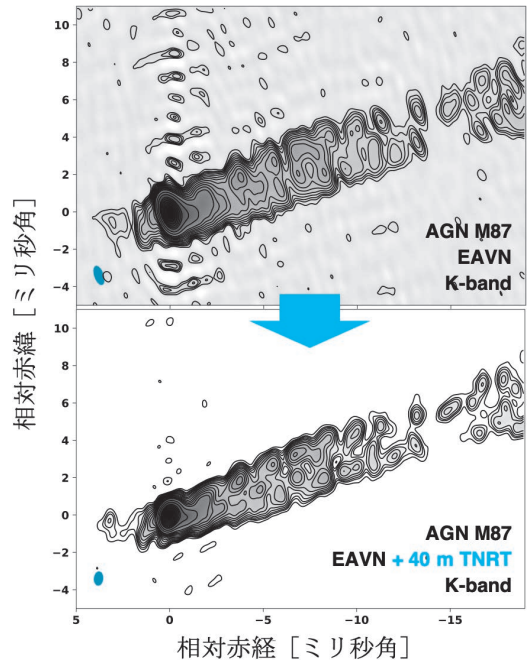


図4 国立天文台水沢VLBI観測所秦和弘助教との連携により実現したAGN M87ジェットに対するKバンドでのEAVNのみ (上), およびEAVNに40 m TNRTが加わった場合 (下) のVLBI観測シミュレーション (Image credit: [7]).

tion Very Large Array (ngVLA) といった次世代装置との連携・強化にはLバンドを搭載しているVLBI局の存在が欠かせません. Lバンド受信機を有する40 m TNRTはその重要な一局として寄与することが期待されます.

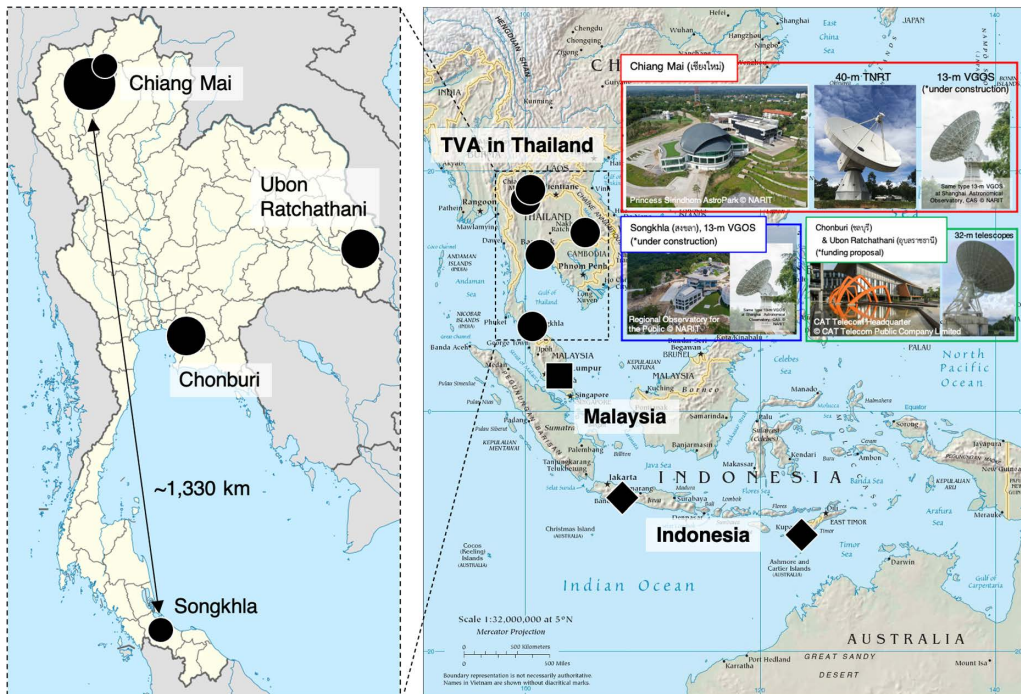


図5 (左) 想定している Thai National VLBI Array (TVA)。円の大きさは各電波望遠鏡の口径に比例。(右) 想定している東南アジア VLBI 観測網 SEAVN (円形: タイ王国, ひし形: インドネシア, 正方形: マレーシア)。

2. 将来計画

この章では、40 m TNRTを軸とした、今後5年を目処に計画している“タイ国内”および“東南アジア諸国との連携”による独自のVLBI観測網構築についても簡単に紹介いたします。

2.1 タイ国内におけるVLBI観測網の構築

NARITでは2026年を見据え、後続の受信機(Pバンド, C/X/Kuバンド, Q/Wバンド)の搭載によるTNRTのアップグレードを目指しています。一方で、TNROサイトには、中国科学院上海天文台との協力のもと、特に測地観測の促進に不可欠な13 m VGOS電波望遠鏡の建設も進められており、2024年中の稼働を目指しています。並行して、NARIT支部としての観測所もあるタイ南部のソンクラエ県へ、国内では2台目となる13 m VGOSの建設も予定されており、2025年中の稼働を目指しています。さらには、タイ王国の

中心部に位置するチョンブリー県、および東部のウボンラチャタニ県において、タイの国营通信会社 National Telecom Public Company Limitedにより約10年前まで衛星通信に活用されていた32 mアンテナを、電波天文観測用に改造するプロジェクトも検討されています。このような改造は、日本の大学VLBI連携JVNの一角を担う山口32 mや日立・高萩32 mを通じ確立されている手法です[8-10]。したがって、現在では改造のための予算獲得と並行して、前述した計5台の電波望遠鏡で構成されるタイ国内のVLBI観測網 Thai National VLBI Array (TVA)の実現を目指しています(図5左)[11-13]。共通のプラットフォームとなる観測周波数帯としてC/X/Ku/Kバンドが期待され、早ければ2026-2027年からの稼働が見込まれます。チェンマイ県の40 m TNRTとソンクラエ県の13 m VGOSにより生成される最長基線は約1,330 kmであるため、空間分解能や感度

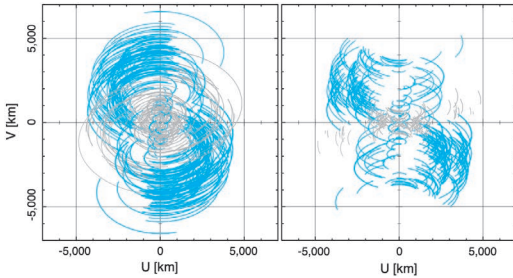


図6 SEAVNとEAVNがKバンド周波数帯にて連携した場合のUVカバレッジシミュレーション. それぞれ赤緯+40 (左), -29度 (右: 銀河中心) を観測する場合に相当. 青線がSEAVNが生成する基線に該当.

の面では世界のVLBI観測網に比べると、やや見劣りするミドルクラスなVLBI観測網といえるでしょう。しかし、その持ち前の機動力を活かした高頻度なVLBIモニター観測や、重力波やFRB、最近ホットなテーマである大質量星形成における降着バーストに代表されるような突発的フレア現象に対する迅速なVLBIフォローアップやリアルタイムVLBI観測など、ユニークかつ科学的に重要な観測への貢献が大いに期待されます。また、TVAは貴重なKuバンド（TVAでは12-14 GHzを想定）でのVLBIが実現可能な点で非常にユニークです。12 GHz付近は大気層・電離層の影響を最小に止めると期待されるため、レーザー放射をプローブとしたVLBIアストロメトリ観測においてベストなパフォーマンスを発揮することが見込まれます。

2.2 東南アジア諸国との連携による地域VLBI観測網の構築

TVAの構築は、バンドン工科大学ITBのTau-fiq Hidayat教授率いるインドネシアの電波天文グループ、マレーシア大学UMのZamri Zainal Abidin准教授とJuan Carlos Algaba博士率いるマレーシアの電波天文グループ、およびベトナム国家宇宙センターVNSCのPham Ngoc Diep博士率いるベトナムの宇宙天文グループとの密な連携を軸とした、東南アジアVLBI観測網SEAVNの現

現へ向けた確かな礎となることも期待されています。現状では、インドネシアの西部および東部へ一台ずつ [14]、マレーシアにタイ王国と同様な13 m VGOS望遠鏡の建設 [15] がそれぞれ予定されています。したがって、2026-2027年を目標に構築を目指すSEAVNは、TVA 5台とあわせて計8台からの稼働が見込まれます (図5右) [11-13]。SEAVNの完成は、将来のEAVNとの大連携により、最長基線約7,000 kmへの拡張、南天観測におけるイメージング性能の大幅な向上、観測可能周波数の拡充、など、様々な点で世界を凌駕する次世代EAVN (仮称: ngEAVN) の爆誕が大いに期待されています (図6)。さらに、本大規模拡張は、アジア太平洋望遠鏡APTのこれまでの最大の弱点でもあった“EAVNとオセアニアのVLBI観測網LBAとの間、特に赤道付近における電波望遠鏡の欠如に伴う巨大なUVホール (UVカバレッジ上の空白)”をコンプリートに補完し、高品質な科学観測を加速させる重要な役割を果たします。SEAVNを軸としたVLBI観測網の発展は、将来地球規模で観測網を繋ぎ合わせるGlobal VLBI Array (GVA) [16] へ向けた貴重な基盤となるでしょう。

最後に、40 m TNRTの一刻も早い科学観測運用の開始をはじめとし、将来のTVA, SEAVN, ngEAVNの実現、およびAPTの再起動とGVAの基盤構築を目指して、引き続き精進して参る旨を表明し、本稿の結びといたします。

謝辞

本稿で紹介した電波天文学・測地学プロジェクトを立ち上げ、40 m, 13 m電波望遠鏡をはじめとしたプロジェクトの成功へ向け、手厚く心強いサポートを頂いているNARIT現所長Saran Poshyachinda博士、NARIT創設者Boonrucksar Soonthornthum准教授、NARIT副所長Wiphu Rujopakarn博士、NARITにて本プロジェクトへ携わる機会を頂いたBusaba H. Kramer博士、本

プロジェクトの前リーダー Phrudth Jaroenjittichai 博士, 現リーダー Apichat Leckngam 氏, および本プロジェクトの全メンバーに, 心より感謝申し上げます. また, TNRT の建設へ数々の実りの多い助言を頂いた International Technical/Scientific Advisory Committee (ITAC/ISAC) の皆様, および 40 m TNRT のキーサイエンスをまとめたホワイトペーパーの執筆へご協力をいただいた世界中の共同研究者の皆様へも, 心からの謝意を表明いたします. 併せて, 本稿に掲載している各種シミュレーションに必要な不可欠な情報のご提供と, シミュレーション実現へのご協力をいただいた, 国立天文台水沢 VLBI 観測所の秦和弘助教, ITB の Taufiq Hidayat 教授, UM の Zamri Zainal Abidin 准教授, および VNSC の Pham Ngoc Diep 博士へも, 大変感謝しております. 水沢 VLBI 観測所時代に手厚いサポートをいただき, NARIT へ快く送り出してくださった本間希樹所長, 廣田朋也准教授, 小林秀行教授, そして学生時代から現在まで自前望遠鏡の重要さと理解を深める数々の貴重な機会をご提供・ご指導いただいた藤澤健太教授, 米倉覚則教授をはじめとする皆様へも, この場を借りて心より感謝を申し上げます. なお, 余白の都合上, 上記 ITAC/ISAC, および本プロジェクト全メンバーと共同研究者の全員を記載するのは難しいので, 全員への謝意は文献 [7] の Acknowledgements をご覧ください.

参考文献

[1] 杉山孝一郎, 2023, 天文月報, 116, 389
 [2] Lopez-Perez, J. A., et al., 2014, IEEE Trans. Antennas. Propag., 62, 2624
 [3] NARIT Facebook, article on 24 Mar 2022
 [4] NARIT Facebook, article on 23 Jul 2022
 [5] NARIT Facebook, article on 18 Nov 2022
 [6] <https://indico.narit.or.th/event/197/> (2024.3.31)
 [7] Jaroenjittichai, P., et al., 2022, arXiv:2210.04926
 [8] Fujisawa, K., et al., 2002, 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume II, 3

[9] Fujisawa, K., et al., 2022, PASJ, 74, 1415
 [10] Yonekura, Y., et al., 2016, PASJ, 68, 74
 [11] 杉山孝一郎, 他 2022, 「タイ王国電波天文・測地プロジェクトと東(南)アジア VLBI」, VLBI 懇談会シンポジウム 2022
 [12] Sugiyama, K., et al., 2022, “Key Sciences with 40-m Thai National Radio Telescope and a forthcoming Thai VLBI Array,” 2nd Malaysian VLBI Workshop
 [13] Sugiyama, K., et al., 2024, IAU Symposium, 380, 461
 [14] Hidayat, T., et al., 2021, “Developing the future VLBI Network in South-East Asia,” 13th East Asian VLBI Workshop 2021
 [15] Abidin, Z. Z., 2022, “VLBI in Malaysia,” 2nd Malaysian VLBI Workshop
 [16] <https://www.jive.eu/jivewiki/doku.php?id=gva:gva> (2024.3.31)

National Project “Radio Astronomy Network and Geodesy for Development” Driven by NARIT in Kingdom of Thailand Koichiro SUGIYAMA

NARIT: National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization), 260 Moo 4, T. Donkaew, A. Maerim, Chiangmai, 50180 Thailand

Abstract: NARIT has initiated a national flagship project entitled “Radio Astronomy Network and Geodesy for Development” in Kingdom of Thailand since 2017. This is for achieving the empirical goal of capacity building, innovation, and the sustainable development through constructing a 40 m Thai National Radio Telescope (TNRT) to be operated in 0.3–115 GHz and a 13 m VGOS radio telescope. On behalf of this project members at NARIT, in this article I would like to introduce an outline and the current status of the project with the first lights in 2022 and the first Call for Proposals of TNRT in 2023, as well as our vision for establishment of regional very-long-baseline interferometry (VLBI) networks based on TNRT: Thai National VLBI Array and South-East Asia VLBI Network in collaboration with Indonesia, Malaysia, and Vietnam.