

# 大学VLBI 連携で 進める研究

新沼浩太郎（山口大学）

大学VLBI連携将来計画ワークショップ  
2016年7月9日-10日，茨城大学宇宙電波館

# 目標

- 大型装置ではできない（やりにくい）研究（オリジナルでユニークな研究・力技の研究・萌芽的研究）
- 既存の大型装置（ALMA, KaVA, VLBA, EVN, Subaru …）・将来の大型装置（EAVN, SKA, TMT, CTA）への展開・シナジー
- 自らの将来計画（10-15年後以降の自前の装置）を見据えた研究
- VLBIが苦手とする「時間領域」という新しい軸を開拓することによる他波長連携・マルチメッセンジャーを見据えた研究展開

# これから

- WSを通して5年後、10年後までの目標・計画を具体的に定めていく  
←WSの目的
  - 研究計画を踏まえて2030年代以降（新沼50歳↑、WS参加の最若手でも40代後半）
- 既存の装置の能力を使い切った上でのアップグレード（サイエンス・装置）
  - 時間領域、角度分解能、高感度、イメージング能力→どれだけの能力？
- 現スペック（瞬発力）はなかなか良い
  - システムティックに使えていない
  - システムティックに使う→各大学の”自由な研究”への制約？

# 考えるべきこと

- いずれはshut down → それまでに何をやるか
  - 電波天文に貢献できる成果 → 数編の論文を書くだけではない
  - 例えば、これまでに無いような情報をもたせたカタログ（VLBI版 NVSSカタログ、10masスケール・~mJyレベル・時間変動情報（時間領域））
    - 大規模装置による研究への足掛かりとなる
    - 多くの（電波に限らない）研究者が参照できる
- 大学望遠鏡は”十分頑張った”と言えるような成果、そして自分たちも次（研究成果、新しい観測装置）に繋がられる

# 大学VLBI連携の強み 1 - 大口径アレイ

	つくば	日立/高萩	鹿島	臼田	山口
C帯SEFD [Jy]		200	1000	153	230
X帯SEFD [Jy]	350	200	320	57	230

<参考: VLBAのSEFD値>

VLBA @Xband: SEFD=330 - 440 Jy

VLBA @Cband: SEFD=210 - 278 Jy

C/X帯連続波基線感度 [mJy]	つくば	日立/高萩	鹿島	臼田	山口
つくば		0.00	0.00	0.00	0.00
日立/高萩	0.46		0.78	0.30	0.37
鹿島	0.58	0.44		0.68	0.83
臼田	0.25	0.19	0.38		0.33
山口	0.49	0.37	0.47	0.20	

基線感度(連続波)

$\Delta B = 512 \text{ MHz}$ ,  $\tau = 10 \text{ min}$

※C帯は黄色, X帯は薄青

※20%の感度ロスを仮定

C/X帯連続波輝度温度感度 ( $10\sigma$ ) [K]	つくば	日立/高萩	鹿島	臼田	山口
つくば		0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
日立/高萩	1.1E+04		1.7E+04	4.6E+04	9.0E+05
鹿島	5.3E+03	9.4E+03		9.3E+04	1.9E+06
臼田	1.9E+04	2.8E+04	5.2E+04		4.4E+05
山口	1.0E+06	8.9E+05	1.1E+06	2.7E+05	

輝度温度感度( $10\sigma$ )

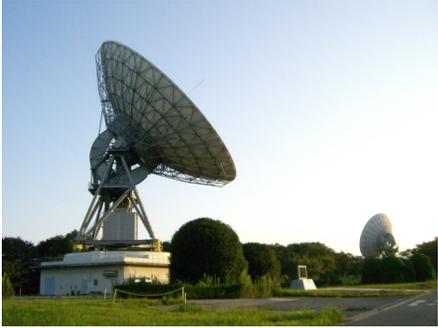
$\Delta B = 512 \text{ MHz}$ ,  $\tau = 10 \text{ min}$

※C帯は黄色, X帯は薄青

※20%の感度ロスを仮定



# 大学VLBI連携の強み 2 - 2組の2素子干渉計による高精度振幅較正

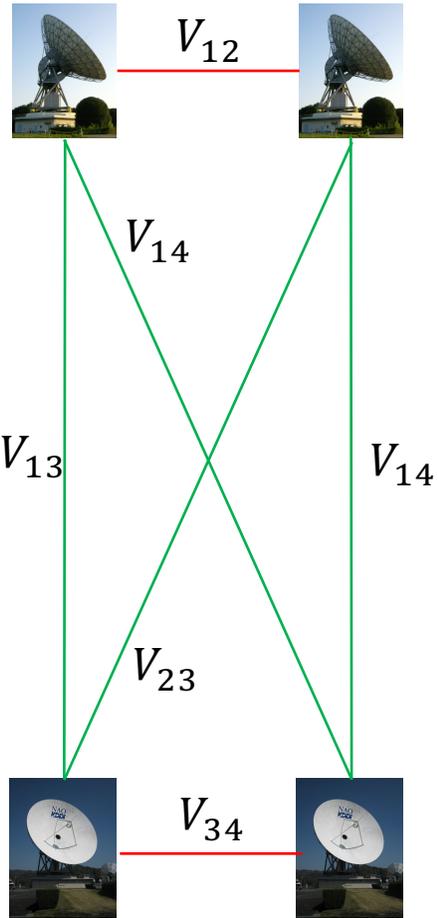


茨城干渉計



山口干渉計

アンテナ 1    アンテナ 2



アンテナ 3    アンテナ 4

- $A_1, A_2$ は巡回振幅 (closure amplitude)
- 各局の結合素子型干渉計はゼロ基線長のビジビリティを取得しているとする

$$\tilde{V}_{ij} = a_i(t)e^{i\phi_i(t)} a_j(t)e^{-i\phi_j(t)} V_{ij}$$

$$A_1 = \left| \frac{\tilde{V}_{13}\tilde{V}_{24}}{\tilde{V}_{14}\tilde{V}_{23}} \right| = \left| \frac{a_1 a_3 V_{13} a_2 a_4 V_{24}}{a_1 a_4 V_{14} a_2 a_3 V_{23}} \right| = \left| \frac{V_{13} V_{24}}{V_{14} V_{23}} \right| = 1$$

$$A_2 = \left| \frac{\tilde{V}_{13}\tilde{V}_{24}}{\tilde{V}_{12}\tilde{V}_{34}} \right| = \left| \frac{a_1 a_3 V_{13} a_2 a_4 V_{24}}{a_1 a_2 V_{12} a_3 a_4 V_{34}} \right| \cong \left| \frac{V_{13}}{V_{12}} \right|^2$$

VLBI基線 —————  
結合素子基線 —————

# 第3期中期計画において進める研究

**少数基線による中高輝度電波源サーベイ**  
(時間領域情報を含むVLBI版NVSSカタログ作成)

**多様な時間スケールに及ぶ突発天体現象の高感度・  
高時間分解能VLBI観測 (体制の構築)**

# 少数基線による中高輝度電波源サーベイ

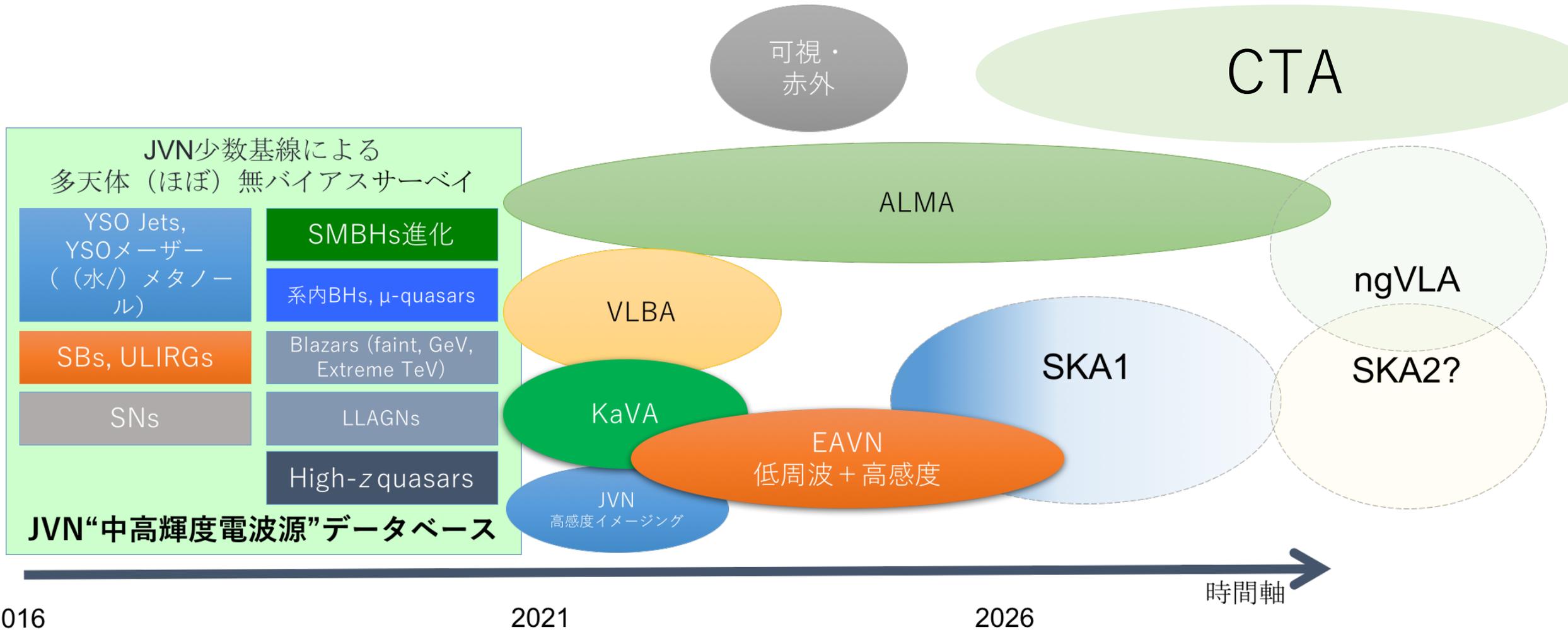
## ～2021年度（第3期中期計画）

- VLBIを用いる国内研究者の研究対象
  - 星形成過程、系内のコンパクト天体、活動銀河核及び活動銀河核ジェットと空間スケール・天体種族ともに多岐にわたる
- 狙い
  - 従来であればdedicated imagingが必要なa few mJy程度 (@ $10\sigma$ ,  $T_b=10^4-10^6$ ) までの天体の探査を行うとともに, 100日程度の時間変動に感度を持たせたモニターを実施する
  - イメージング観測への展開を考え、コヒーレンス時間以内でフリッジ検出可能な天体に集中
- **大質量星形成領域（メタノールメーザー・YSO電波ジェット）, 超光度赤外線銀河（核）, 銀河面コンパクト電波源, 系内コンパクト電波源, 低光度活動銀河核, ガンマ線/弱電波ブレーザー, パルサー・ジャイアントパルス** のサーベイ・モニター

# 少数基線による中高輝度電波源サーベイ

## 2022年度以降

- カタログ化した天体群を用いてEAVNなどのイメージング観測装置による“系統的な研究”
  - 高感度少数基線 + 時間領域 → 高感度イメージング + 時間領域へのシフト
- 大型鏡アレイのイメージング観測体制 → EAVN低周波の日本側基本アレイ
- 大型鏡が集まるEAVNには**a few mJy**の天体に対する**通常のイメージング観測**（位相補償無し、大型局を基準にした全基線においてフリンジ検出）可能な性能を持たせる → 大規模な開発項目



# 第3期中期計画とその後

	第3期中期計画 2016-2021	第4期中期計画 2022-2027	第5期中期計画 2028-2033	第6期中期計画 2034-2039	2040以降
大学VLBI連携	→	→	Shut Down or EAVNへマージ?		
VERA	→	→	EAVNへマージ?		
KaVA	→	→			
初期EAVN	→				
Full EAVN		→			
VLBA	→	→	Shut Down? or ...		
ALMA	→	→	→	→	→
SKA1		→	→		
SKA2				→	→
ngVLA				→	→
			高空間分解能観測装置が手薄になる時期?		
継続プロジェクト	→				
継続予定?	→				
開始予定プロジェクト	→				
大型将来計画	→				

2030年代、 $\leq$  masスケールで（フレキシブルに）観測可能な装置が手薄になる  
（不透明な）SKA2/ngVLAの誕生を待つ必要がある

高空間分解能・高感度・時間領域に対するフレキシビリティをどのように担保する？

# 研究計画

## • 第3期中期計画（2016-2021年度）：少数基線VLBI

- 2017-2019年度：10,000天体/年  $\times$  2 = 20,000コンパクト電波源サーベイを実施（2019年度終わりを目処に結果を整理）
  - 1天体10分  $\times$  10,000天体/年 =  $\sim$ 1,700 hr/年
- 2020-2021年度：2.5ヶ月（1.2ヶ月）おきに検出天体モニター
  - 10分  $\times$  2,000天体  $\times$  5回（10分  $\times$  1,000天体  $\times$  10回）/年

→ a few mJyの感度で時間情報も含んだVLBIカタログの作成  
微弱コンパクト天体の探査は位置参照源としても重要  
既存の位置天文観測だけでなく将来の大型計画（SKA時代：SKA1よりはSKA2か？）

# 多様な時間スケールに及ぶ突発天体現象 のVLBI観測 (体制の構築)

## 電磁波帯における突発天体現象

- 重力波天文学時代におけるマルチメッセンジャー観測の重要なターゲット (e.g., Lorimer+07, Naker+11)
- 幅広い時間領域に感度を持たせた観測が必要=観測装置の性能に依存 (単一鏡観測の独壇場)
- 母銀河の同定 (可能であれば発光位置の特定)、放射領域サイズへの制限が極めて重要

つまり、VLBIが必須

- (1) 他波長サーベイに基づくアラートへの対応
- (2) 高感度モニター観測

# 多様な時間スケールに及ぶ突発天体现象 のVLBI観測（体制の構築）

## （1）他波長サーベイに基づくアラートへの対応

- 立ち上げ期は受け付ける対象を絞り一日以内にアンテナを目的座標に向けることを目指す
  - 実時間でのデータ処理は行わない
  - アンテナを目的位置に向けデータを取得することに注力

## （2）高感度モニター観測

- コヒーレンス放射をするような短時間突発電波天体を対象
- 電波でモニターし、発生した場合にはVLBIモードで処理する体制
  - 位置同定（≡母銀河の同定）、発生位置の特定までもが可能

# 突発天体现象のVLBI観測（体制の構築）

- (1) 他波長サーベイに基づくアラートへの対応
- **第3期中期計画（2016-2021年度）**：（基本的には）茨城  
- 山口基線での対応を想定
    - 800km基線VLBI観測による輝度温度への制限 ( $< \text{or} > 9 \times 10^5 \text{ K}$ )
    - multi-phase center相関処理（NICTや水沢開発Gとの連携）による出現位置の推定（アラートの位置精度によってはモザイク観測も実施）
  - **2022年度以降**：時間領域にフレキシブルなイメージング観測体制
    - SNRsやGRBs, TDEsなどについても膨張速度への制限, ジェットの有無  
→  $\sim 100 \mu\text{Jy}$  (@ $\sim 10 \sigma$ , @3hr) を切る感度, かつミリ秒角の空間分解能でイメージングする能力が必須

# 突発天体现象のVLBI観測（体制の構築）

## （2）高感度モニター観測

- **第3期中期計画（2016-2021年度）**：臼田+30mクラス  
のアンテナにより同じ天域におけるモニター観測を開始（10-20 hr/  
月）
  - 本モニターでは全局同じ天域のドリフトスキャン/楕円銀河の個数密度の高い  
領域のモニター（e.g., FRBs: 1 event/sq. deg/day）
    - 全局C帯もしくはは臼田局-鹿島局@L/S帯, 山口-茨城局@C帯
  - 観測体制だけでなく, Crab ジャイアントパルスのVLBI観測結果など技術的  
なノウハウ（NICTとの協力）
  - 最終的な起源の同定には $\sim 100 \mu\text{Jy}$ （@ $\sim 10\sigma$ , @3hr）を切る感度, かつ  
ミリ秒角の空間分解能でイメージングする能力が必須

# 運用（検討事項 - 2016-2021）

- 第3期中期計画中及びその後5年程度にわたる長期間/単年の観測プランと併せて検討する必要

- サイエンスの視点も併せ持ったWGを立ち上げる（運用についても負担を分散）

## 【少数基線】

- 記録系：2,000 hrs/年 → 160 hr/月（200時間記録分のディスクを用意/局）
- 相関処理
  - 山口局に導入済みのソフトウェア相関器を利用（ただし、FITS化するなどの場合には要調整）
  - 処理速度によっては相関器増設（茨城局設置予定のファイルサーバーに相関処理機能を持たせるなど）
  - 定常的な運用及び機能強化について、NICTや水沢VLBI観測所との協力を実施
- 運用人員の補強（支援員/ポスドク）

# 運用（検討事項 - 2016-2021）

- 第3期中期計画中及びその後5年程度にわたる長期間/単年の観測プランと併せて検討する必要
  - サイエンスの視点も併せ持ったWGを立ち上げる（運用についても負担を分散）

## 【イメージング】

- イメージング観測枠（大型鏡+VERA, プロポーザル研究含む）は全運用時間の10%を仮定（～20 hr/月）
- 記録・相関処理ともに従来のリソースを利用
  - OCTADISKを用いて水沢相関局にて相関処理

# 開発 (検討事項-2016-2021)

2016-2021年度の研究計画の実施及び2022年度以降への研究展開を考える上で2段階の開発が必要

開発項目	第3期中期計画												人員
	2016年度 H28度	2017年度 H29度	2018年度 H30度	2019年度 H31度	2020年度 H32度	2021年度 H33度	2022年度 H34度	2023年度 H35度	2024年度 H36度	2025年度 H37度	2026年度 H38度		
WG立ち上げ	←→					フェーズ2							
帯域通過特性の改善	←→												
アプリアリ校正機構の開発 (山口局について、鹿島は?)	←→		→										
臼田C帯システム雑音温度の改善	←→												
connected array及びVLBIの 相関処理機構, 解析手法の確立	←→												
広帯域システムの開発 (8Gbps /2GHz帯域: 6.6 - 8.6 MHz)	←→					←→							
VERAのC/X高感度化 (Trec改善)	←→					←→							
第1期サーベイ&モニター	←→												
イメージング観測研究						← - - - →							

# 開発（検討事項 - 2016-2021）

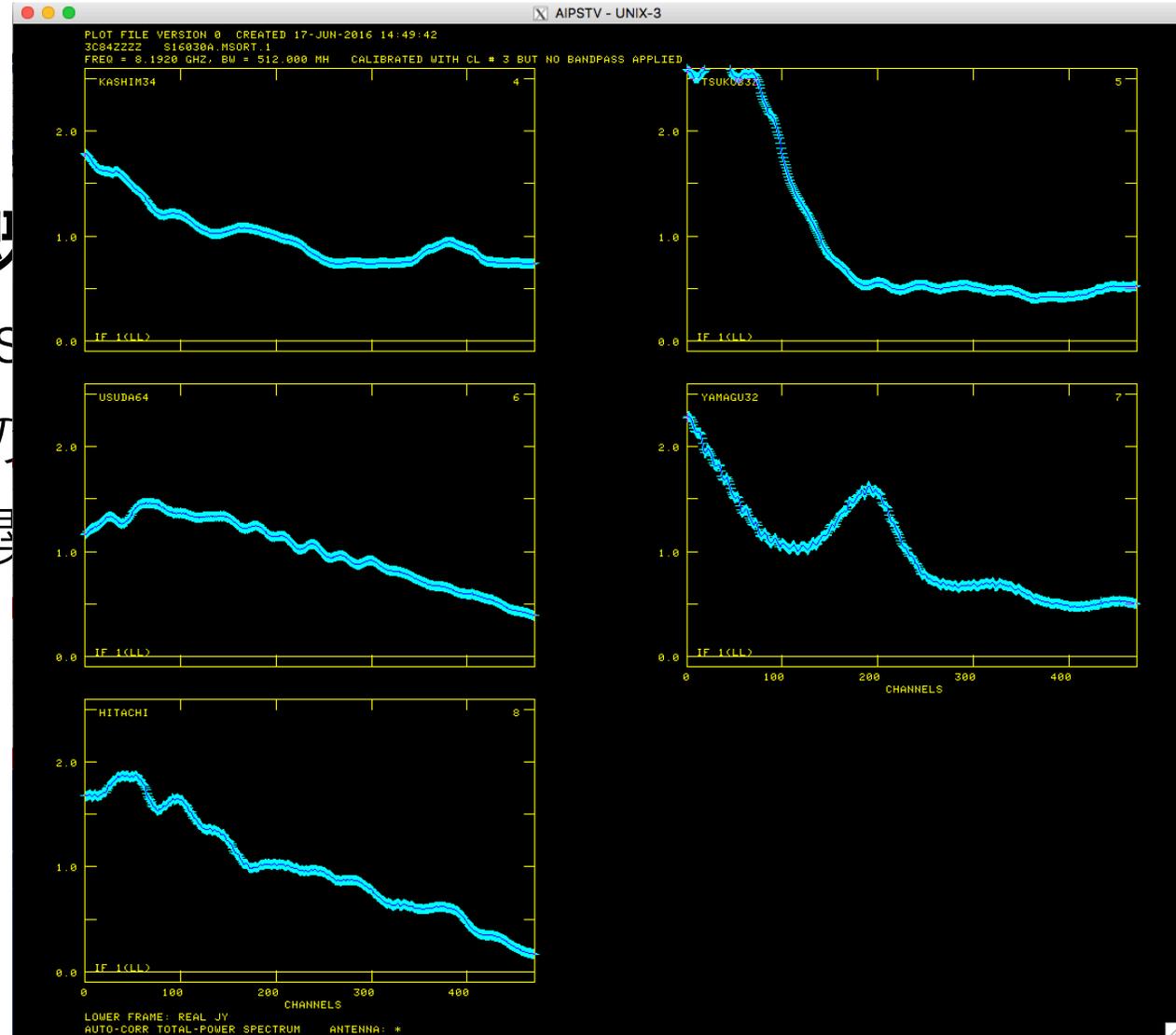
## フェーズ1

- **帯域通過特性の改善：既存システムの最適化**
- （臼田C帯における $T_{\text{sys}}$ の改善（80K→30K）？）
- （アプリアリ較正機構の開発（山口局/鹿島？）？）
- 結合素子及びVLBIの相関処理・解析手法の確立

# 開発 (検討事項 - 2016-2021)

## フェーズ1

- 帯域通過特性の改善：既
- (臼田C帯におけるTsys
- (アプリアリ較正機構の
- 結合素子及びVLBIの相厚



各局における規格化後の自己相関スペクトル(2016年1月30日のJVN広帯域イメージング試験観測より)

# 開発（検討事項 - 2016-2021）

## フェーズ2

- **イメージング観測・EAVNモードへの拡張**
- **大型鏡（臼田/上海）を基準に連続波でa few mJyをFRINGE検出（ $10\sigma$ ） → 8Gbps化, VERA C帯高感度化**
  - 更なる広帯域システムの開発（8Gbps/2GHz帯域@C/X帯）
  - **VERAのC帯高感度受信機開発**
    - 臼田局感度が現状のまま：T<sub>sys</sub>~30Kを要求（臼田-VERA基線：<0.5mJy@ $1\sigma$ , 日立-VERA基線：~0.6mJy@ $1\sigma$ ）
    - 臼田局C帯がX帯並（30K） → T<sub>sys</sub>~60K程度を要求

**時間領域**に踏み出すため、そして**2030年前後を見据えた上で2022年度以降への展開**を考えるとa few mJyを直接イメージングできる観測装置が必須（位相補償を使って100 $\mu$ Jyを有意に検出可能な装置）