

きゃらばん・サブミリと  
日本・東アジア主体の  
mm/sub-mm VLBI

# A Proposal Constructing mm/sub-mm VLBI Network by East-Asian and Japanese Power

三好真(国立天文台)、春日隆(法政大)、  
坪井昌人(宇宙研)、岡朋治(慶應大)、  
高橋真聡(愛教大)、氏原秀樹(NICT)、  
ほかメンバ

内容: 秋の天文学会講演と同じ

- 2014年10月 VERA UM@NAOJ三鷹
  - 2014年10月 VLBIシンポジウム@GSI
  - 2014年12月 EA-受信機WS@志摩
  - 2015年 3月 日本天文学会@阪大
  - 2015年 6月 TDCシンポジウム@NICT鹿嶋
  - 2015年 7月 EA-VLBI WS@北大
  - 2015年 7月 NRO-ALMA Joint Science/Development  
Workshop 2015@野辺山
  - 2015年 9月 日本天文学会@甲南大
- で関連の話をしてきた。

(予稿)サブミリ波のVLBIによって我々の銀河系中心ブラックホールSgrA\*などのブラックホール・降着円盤やホライズンの撮像をめざす「きゃらばん・サブミリ計画」を進めている。南米アンデス高地に移動型電波望遠鏡を含むVLBI網を作り、1~2千kmの短基線VLBI(230GHz帯)を実現し、ブラックホールの撮像・メーザ観測を行う。技術として最も重要なことは230GHz帯での観測機器のコヒーレンスを確立してFRINGE検出することにあった。藤沢講演にあるように、国立天文台野辺山において2015年4月末に230GHz帯のVLBI実験に成功、高周波数VLBIの世界タイ記録を得た。同実験は急造での一時構成装置によるものであり、これにより、移動型VLBI「きゃらばん・サブミリ計画」における技術的妥当性はほぼ確認できたともいえる。きゃらばん電波望遠鏡では軽量化・コストダウンを目指しているがその進展もあった。安価なへら絞り法によって面精度 $15\mu\text{m}\sim\text{r.m.s.}$ の鏡面作成の成功、低損失導波管による複数鏡面受信電波の合成法の考案(春日講演)、NICT/NAOJ開発のVLBI高速記録系などを鑑みると、急速にその具体的実現性は高まった。

また東アジア天文台によるハワイJCMT15m鏡の運営、先行するASIAAのグリーンランド望遠鏡建設、低地であるが230GHzでのVLBI観測が可能と証明された野辺山など、アジアには230GHz帯VLBIに適した複数の装置がある。これらときゃらばん、さらに共同利用ALMAを用いると日本・アジア主体/先導のブラックホール解像探査が可能になる。この構想についても述べる。

# 話すこと:

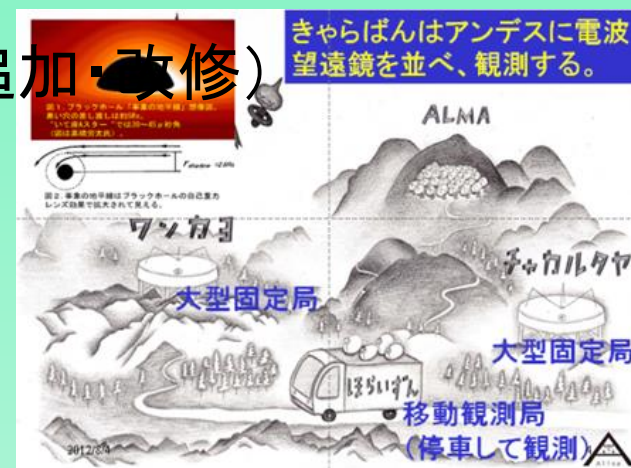
- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには?
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

# 話すこと:

- **きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。**
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- **日本/アジアでブラックホール撮像進めるには?**
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

2014年11月25日(4月小委員会提出後,修正・追加・改修)

# キャラバン・サブミリ (Caravan-Submm)



大型固定局2, 移動VLBI局1の3局の230GHz帯VLBIネットをアンデスに。**BH解像に不可欠な1~2千km程度の短基線を実現。**

日本の測地VLBIで実績ある移動VLBI法を応用して、移動局1局で数局分相当のuv面を埋める。

銀河系中心ブラックホールのホライズン、降着円盤の世界初の撮像検出を目指す。低コストでユニークな装置。

短基線によりサブミリ波帯メーザ観測も可能。多様な共同利用に展開できる。

三好 真(国立天文台)

2014年11月25日

\* 本計画は今年発表された、学術会議 天文分科会の「天文学・宇宙物理学の将来計画報告」にも記載されている。

# 装置概念図(ポンチ絵)

2012. 9. 23付け

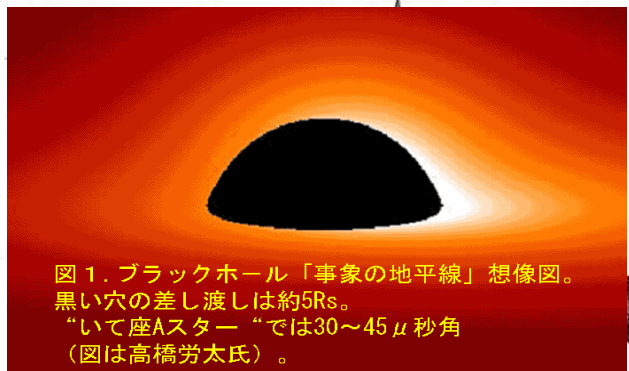


図1. ブラックホール「事象の地平線」想像図。  
黒い穴の差し渡しは約 $5R_s$ 。  
“いて座Aスター”では $30\sim 45\mu$ 秒角  
(図は高橋 勇太氏)。

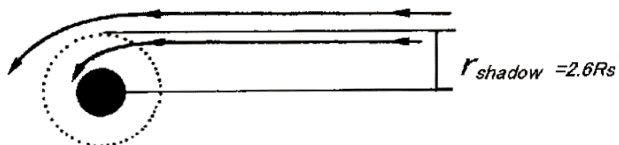
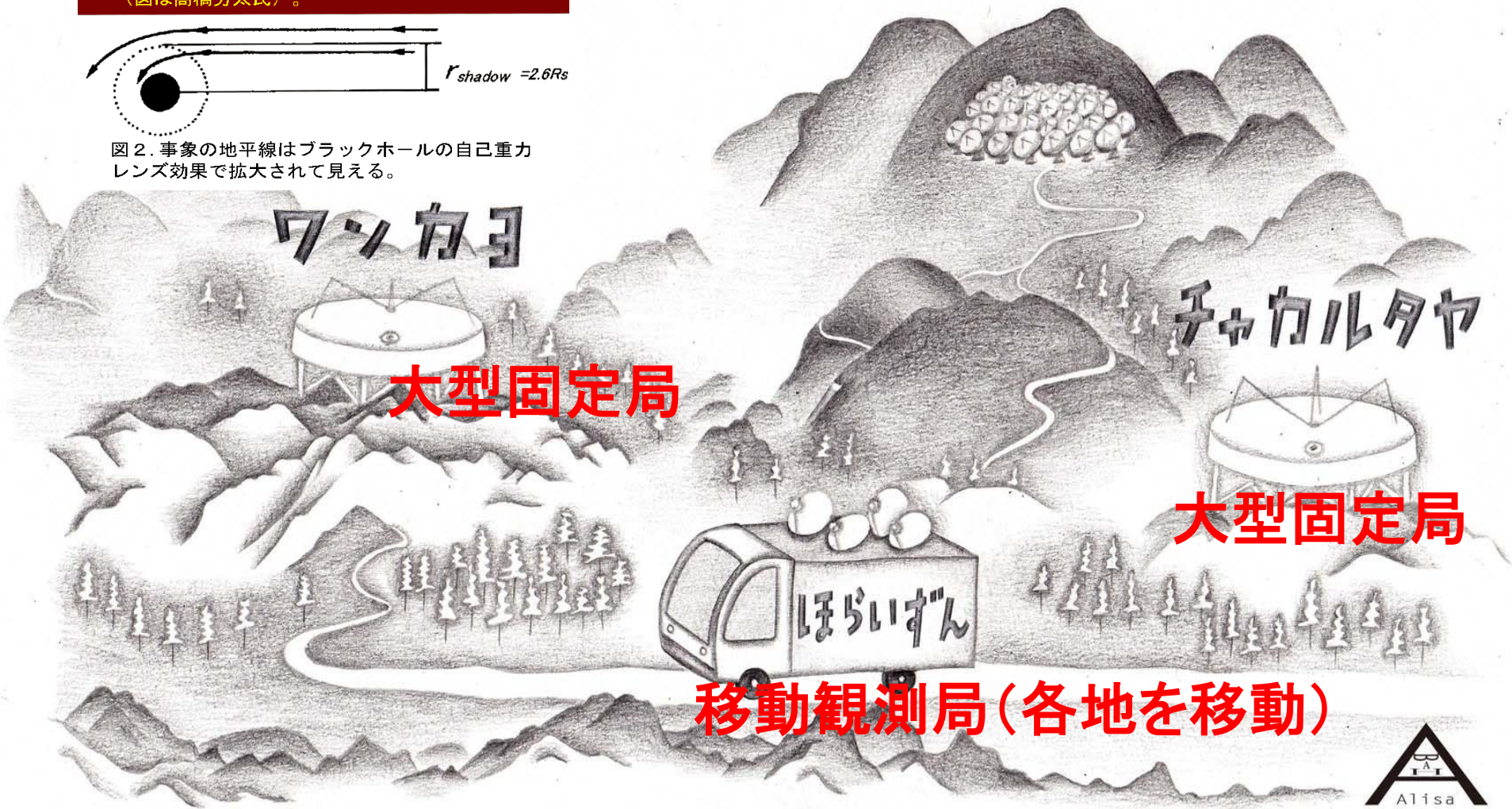


図2. 事象の地平線はブラックホールの自己重力  
レンズ効果で拡大されて見える。



# 話すこと:

- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) コストダウン研究: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に不適。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

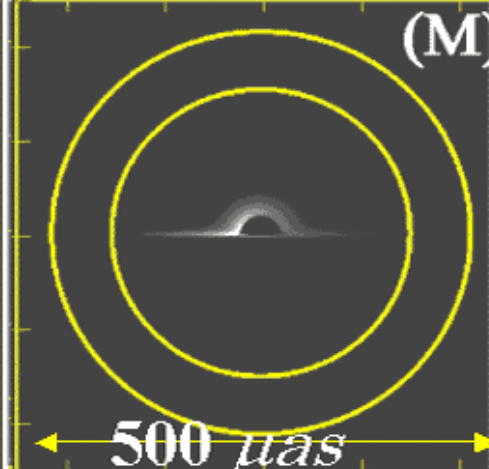
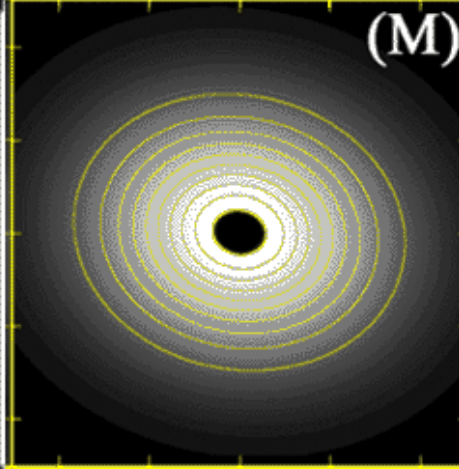
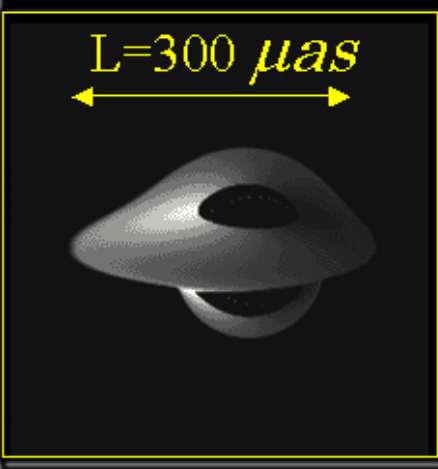
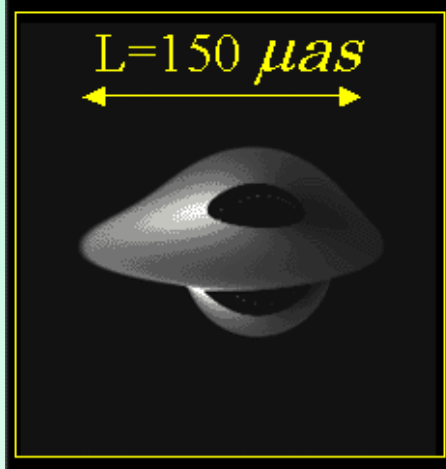
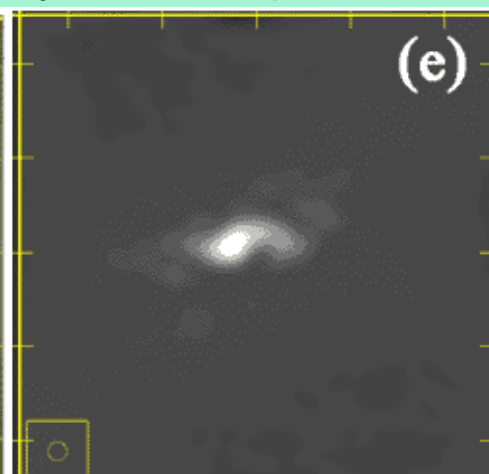
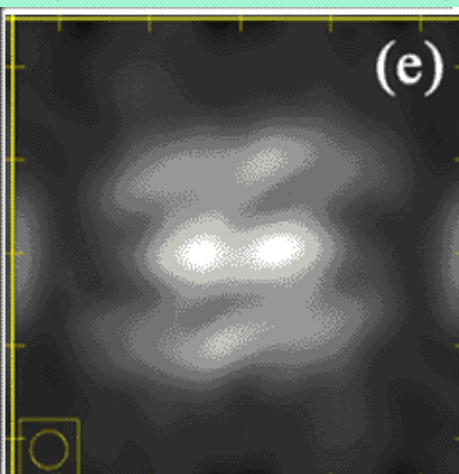
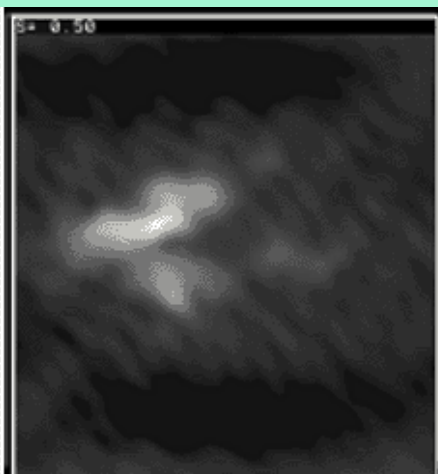
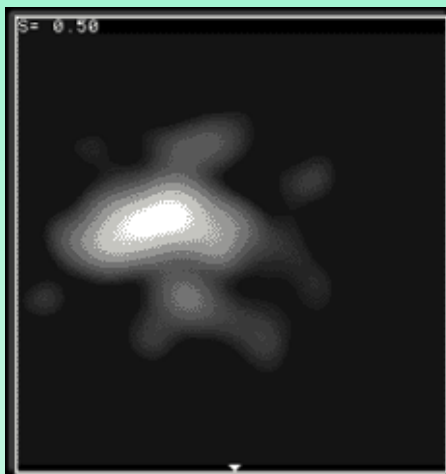


既存のサブミリ波望遠鏡でのVLBIでは、  
uvカバーに問題あり。「ブラックホール・  
ホライズン」の確認はかなり困難。

(上段) 像合成simulation結果 (下段) 像モデル



ハワイ,  
CARMA,  
ALMA,  
SEST,  
Huancayo  
でのuvカバー



# Phased ALMAの 有無で比較(1)

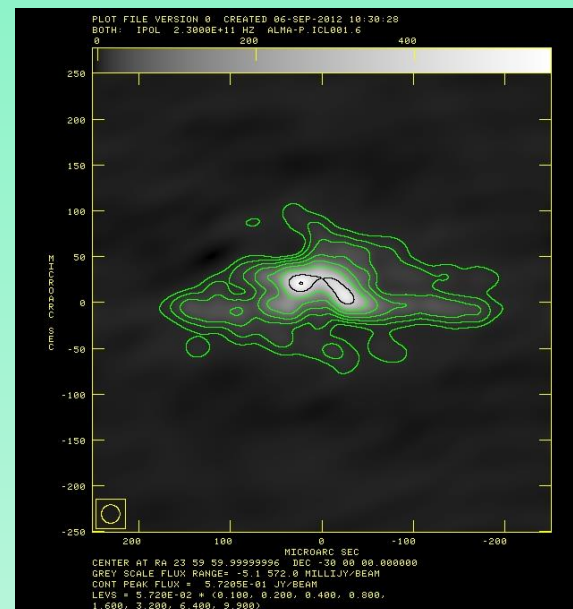
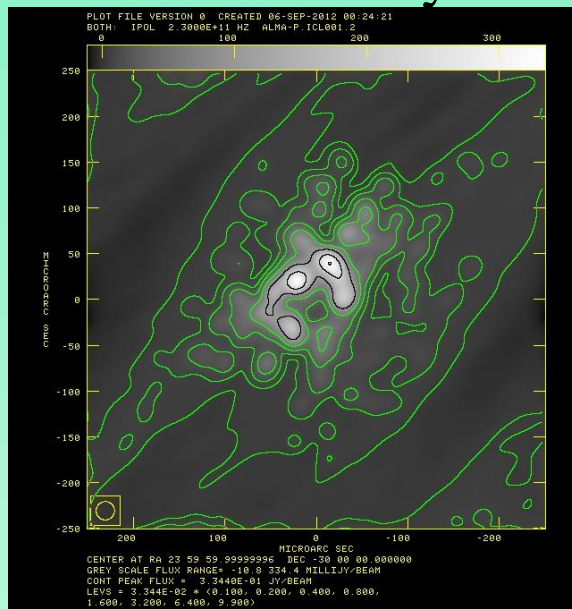
## EHT only

## EHT&CARAVAN

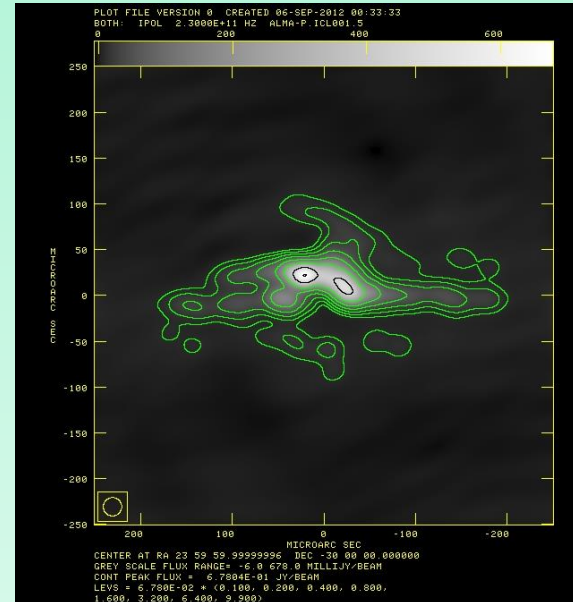
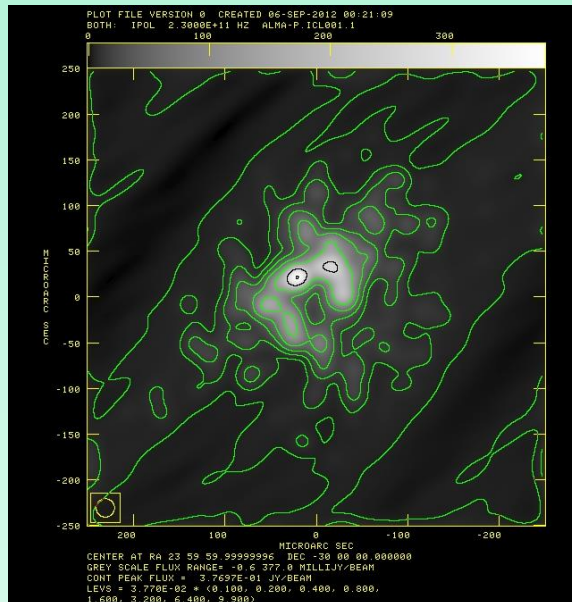
U-V面を埋めることが重要。

像モデル:  
降着円盤中心のみ明るい

Without pALMA



With pALMA



EHT(超長基線構成)では、あたかもシャドーが見えたかのような像になるが、間違った構造を示す。そこにCARVAVAN(短基線uv)が参加すれば、相当に改善される。

# 話すこと:

- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) コストダウン研究: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に不適。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

# 昨年：へら絞り、30 $\mu\text{m}$ 台達成

2014年8月、「焼き鈍し」を加えた結果、面精度30 $\mu\text{m}$  rmsを加工費11万円で達成。

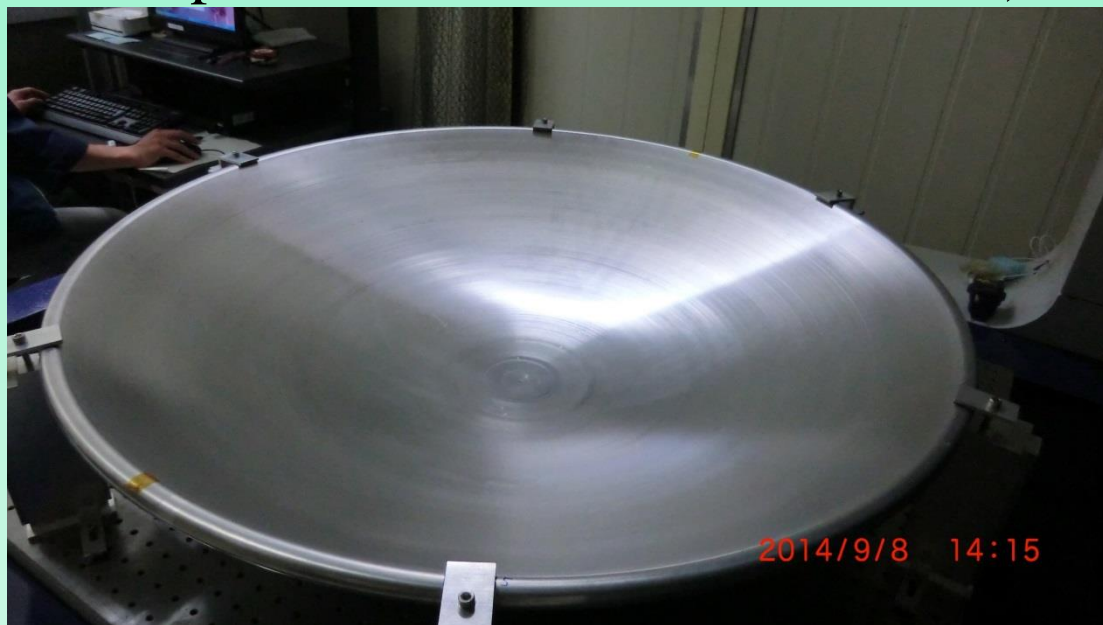
r.m.s. 40  $\mu\text{m}$  では 開口効率 (ルツの式のexp部分の値のみ) 86% (230GHz)を

Highest: 0.14102 (sig= 3.568)

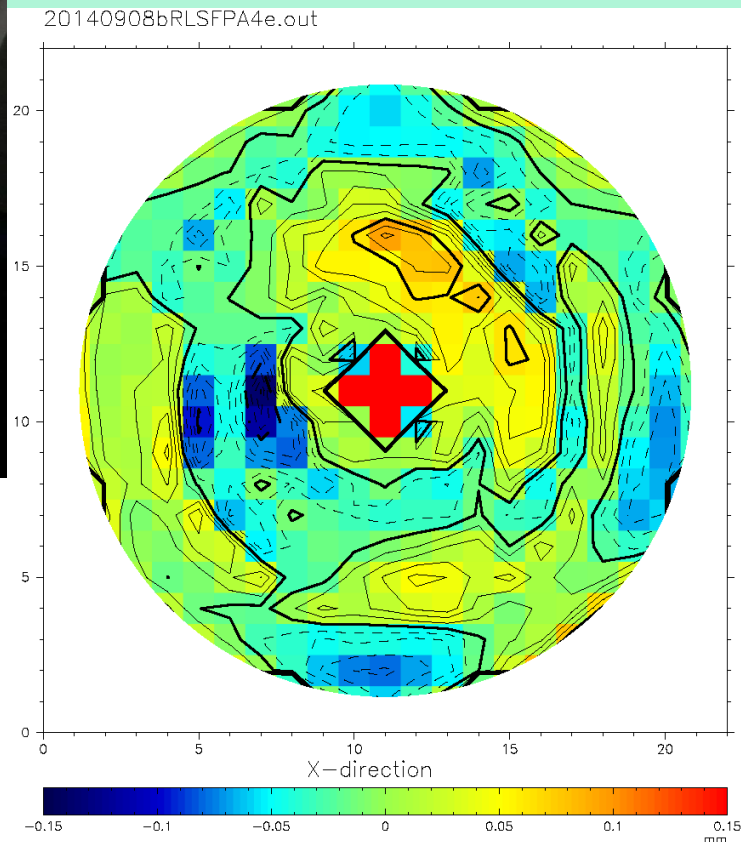
Lowest: -0.13716 (sig=-3.470)

Average: -0.500466E-02

$\sigma_{\text{rms}} = 0.03952$  (mm)



アンテナ面は目視でも、これまでになくきれいに見える。手触りも「より」なめらか。



## へら絞り加工アンテナの誤差要因 (昨年秋)

1) アルミ加工材自体がもつ残留応力によるゆがみ  
-- 焼きなまし加工で解消できる。

40 $\mu$ m rms 未満達成 (2014年9月) して実証.

2) 金型自体の精度が影響する

-- 精度良い金型を作り、その面と比べ、実証しよう  
... 今回実行。

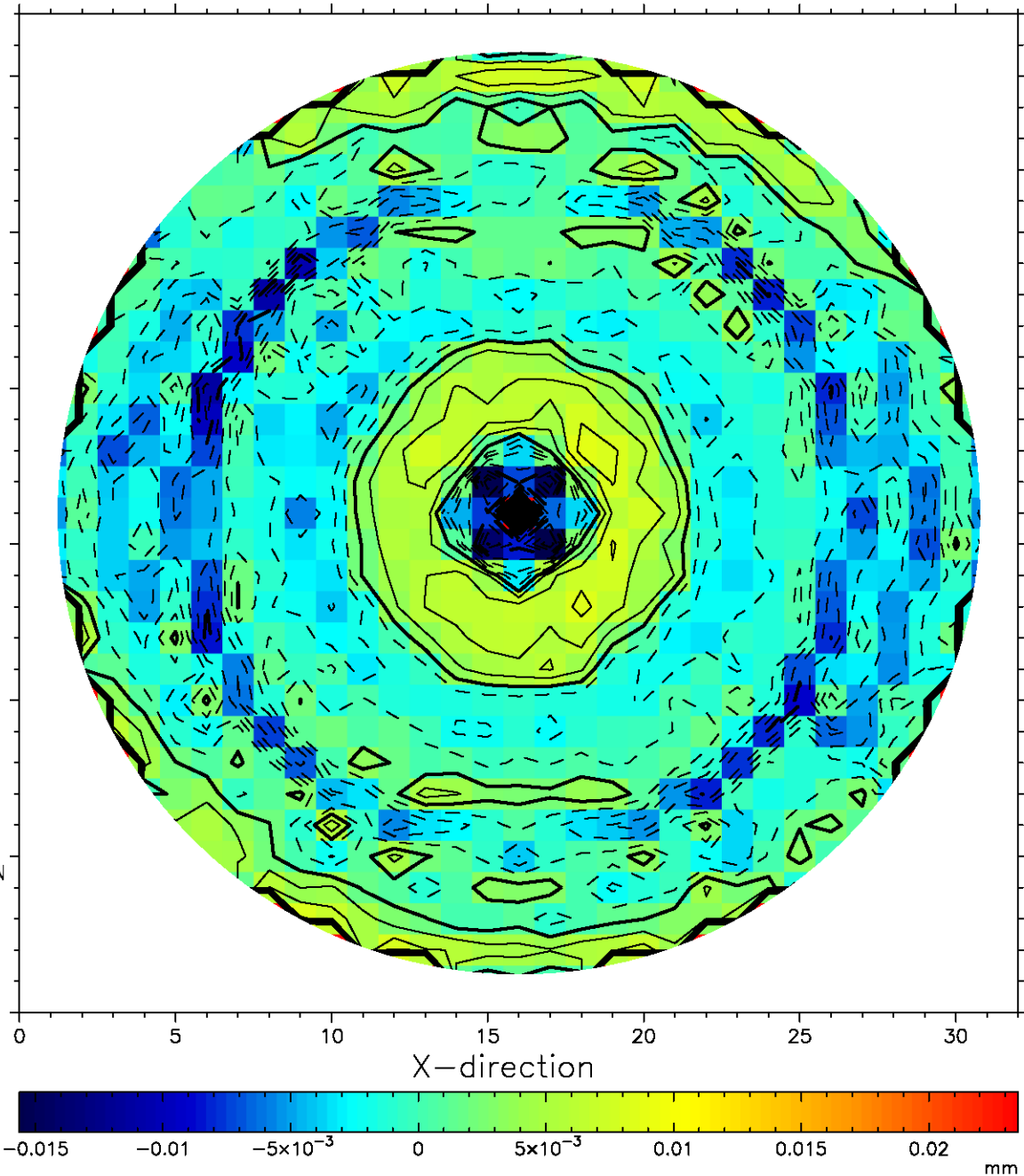
北嶋絞りの古い金型を再加工して  
高精度金型(30cm:安い)を作成。



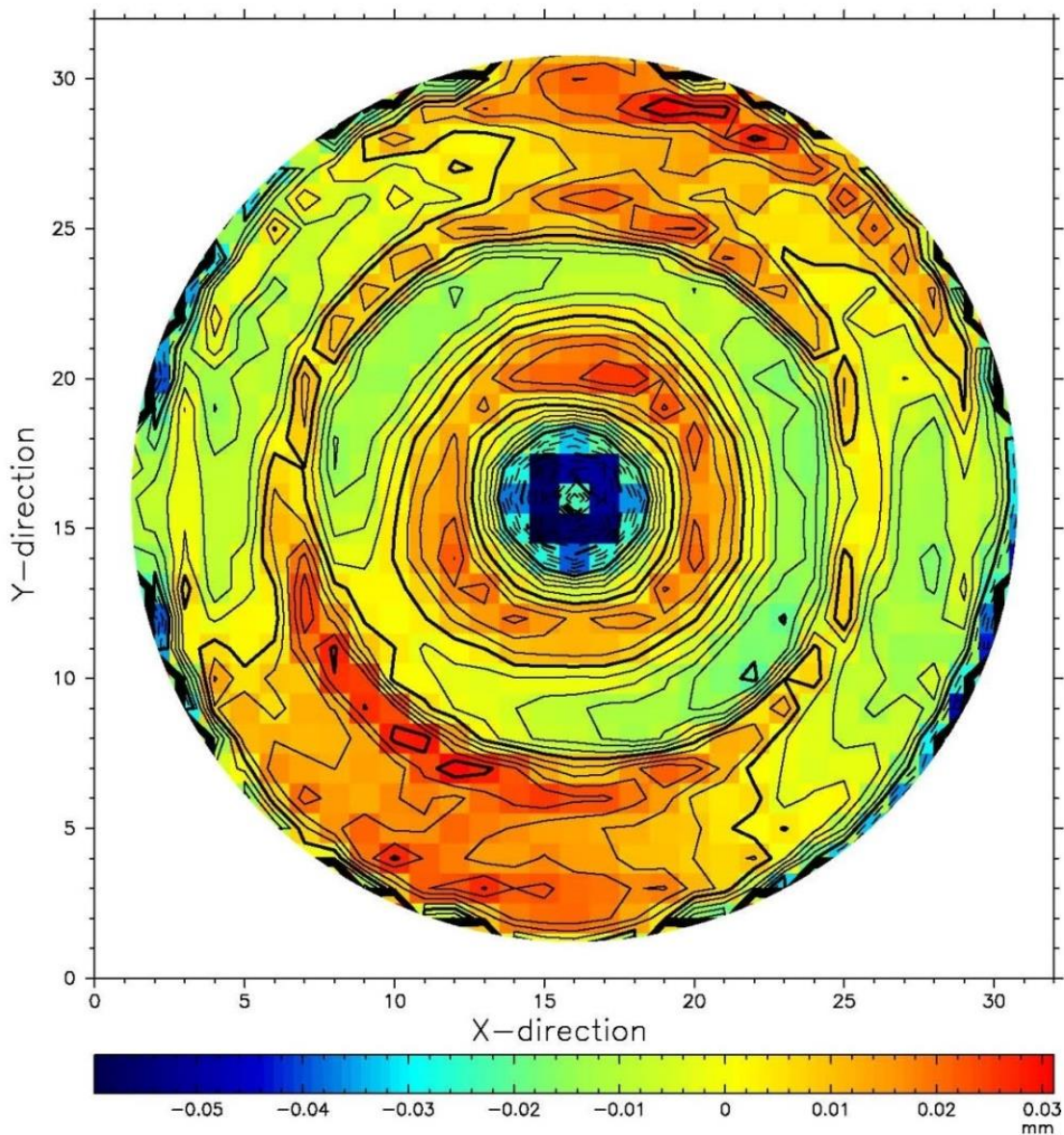
NAOJの3次元測定機  
で面測定(三ツ井氏)  
同心円状の高低はある。  
が、rms4ミクロン精度

この金型を用い、  
「へら絞り加工」  
+「焼き鈍し」  
を行った。

Sigma	rms(mm)	used DATA(%)	exIN
5.961	0.003942	725(100.0)	0
4.500	0.003847	724(99.9)	1
4.000	0.003847	724(99.9)	1
3.500	0.003690	720(99.3)	5
3.000	0.003690	720(99.3)	5
2.500	0.003630	717(98.9)	8
2.000	0.003416	699(96.4)	26
1.500	0.002818	631(87.0)	94
1.000	0.001996	508(70.1)	217



20150226-CrantFIN.out



2015年2月  
ついに  
15 $\mu$ m r.m.s.  
の鏡面達成!

へら絞り(口径2mまで)で  
十数ミクロン精度の  
アンテナが安価に作れる!



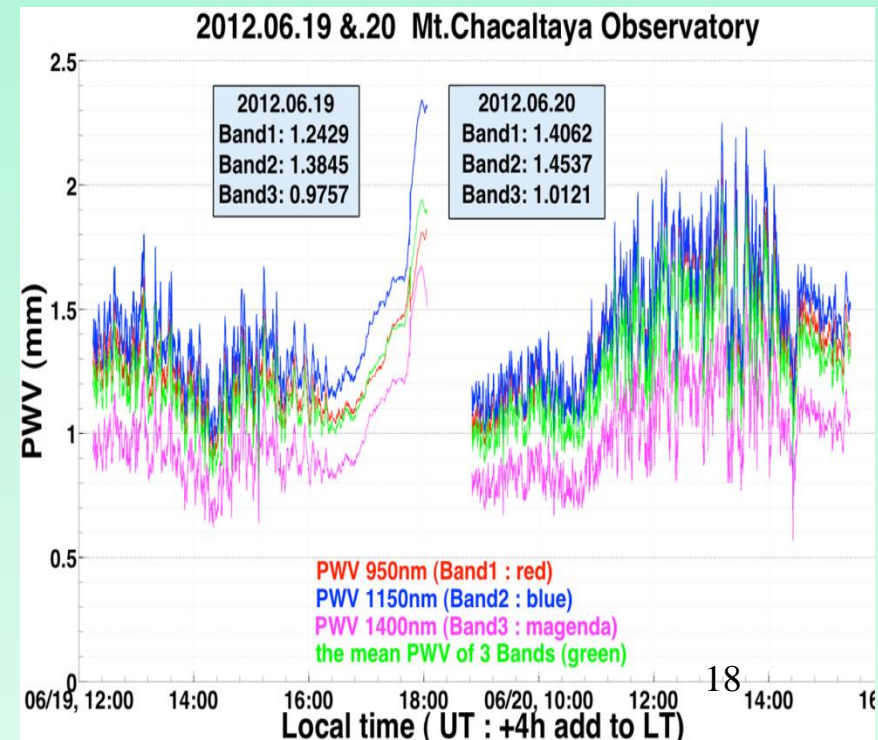
# 話すこと:

- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

# 2012年のサイトサーベイ

- 2012年6月に2週間サイトサーベイ実施。ワンカヨ、チャカルタヤ、その周辺で昼間の大気水蒸気量を測定。
- チャカルタヤ(5300m)はALMAサイトに匹敵。PWVは1.5mm。
- ワンカイヨ(3370m)で平均10mm。近郊のコスモス観測所で4mm。
- 大気位相変動は水素メーザの変動よりも大なので、原子時計の性能がネックになることはない。
- 夜間・通年のモニタは今後、必要。

チャカルタヤ山宇宙線観測所での測定。PWV~1.5mm





乾季：2012/06 このように晴天続きのサーベイ

# 2015年2-3月に雨季のサイト調査

- 夏のくせに冬より“雪”が多い。水蒸気ALMAサイトと同じ  
(チャカルタヤ)
- 水蒸気乾季の2倍くらい  
(ペルーサイト)

ペルー・ボリビア域夏季大気水蒸気量の測定(高遠・ビダル・竹川・三好、イシツカ、&岡)  
2015年2月25日---3月12日



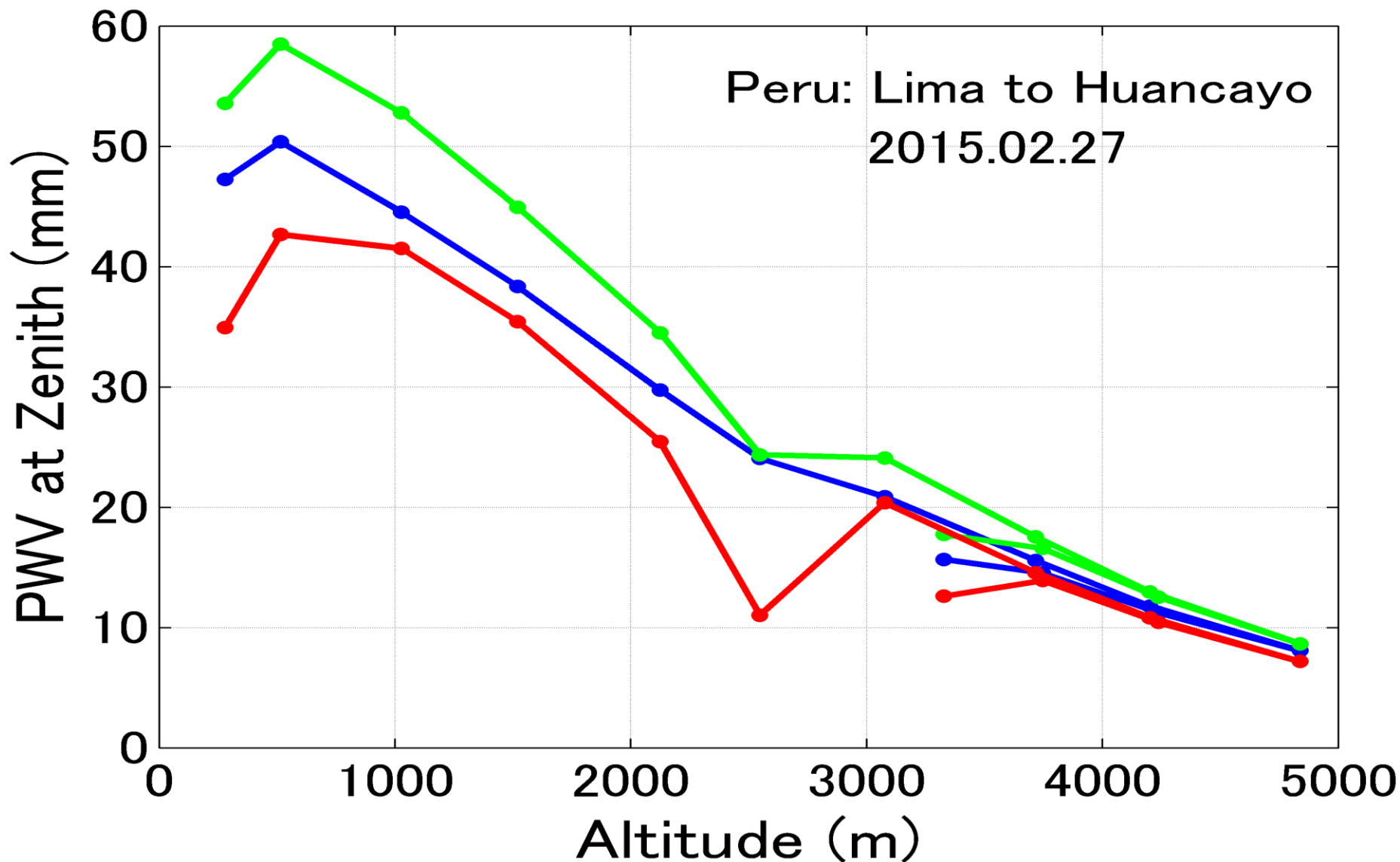
旧COSMOS観測所4600mにて

ALMAサイトも雨・雪あり。



Twから拾ってきた写真

ペルー(リマ-ワンカヨ)でPWVは乾季の2倍程度  
5300m(チャカルタヤ)でPWVは6mm程度(乾季6倍悪い！)  
---ALMAサイトもこの時期同じ位ですが。



# 話すこと:

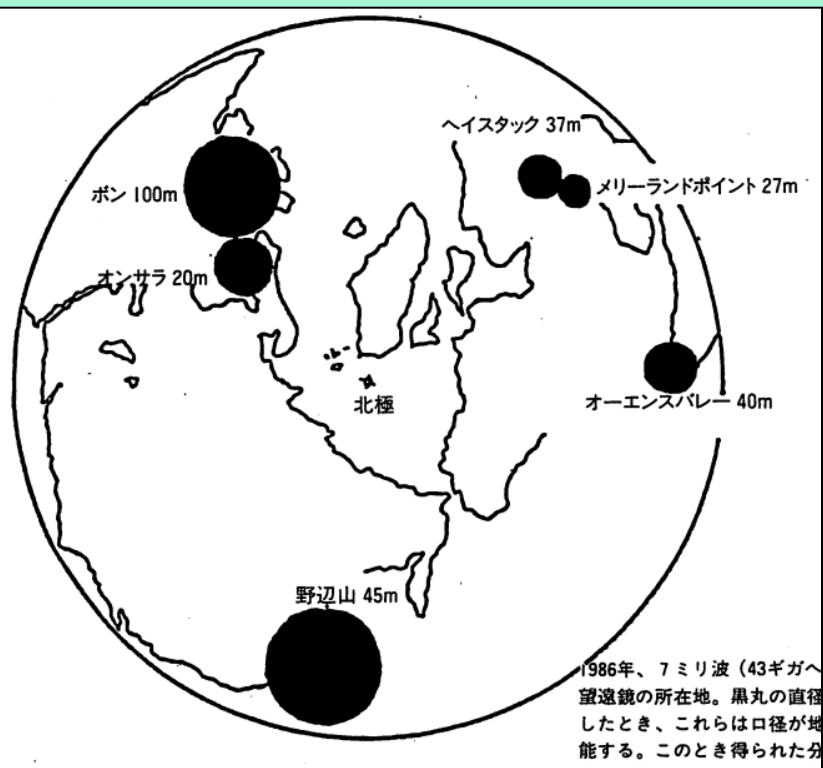
- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- **日本/アジアでブラックホール撮像進めるには?**
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

# 話すこと:

- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

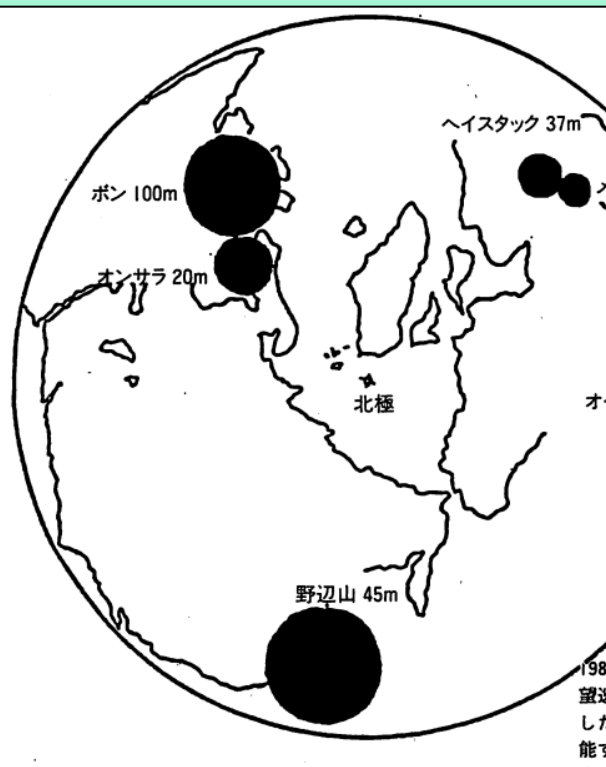


# 写真: 1991年、グローバルミリ波 VLBI参加の野辺山45m(歯抜け)



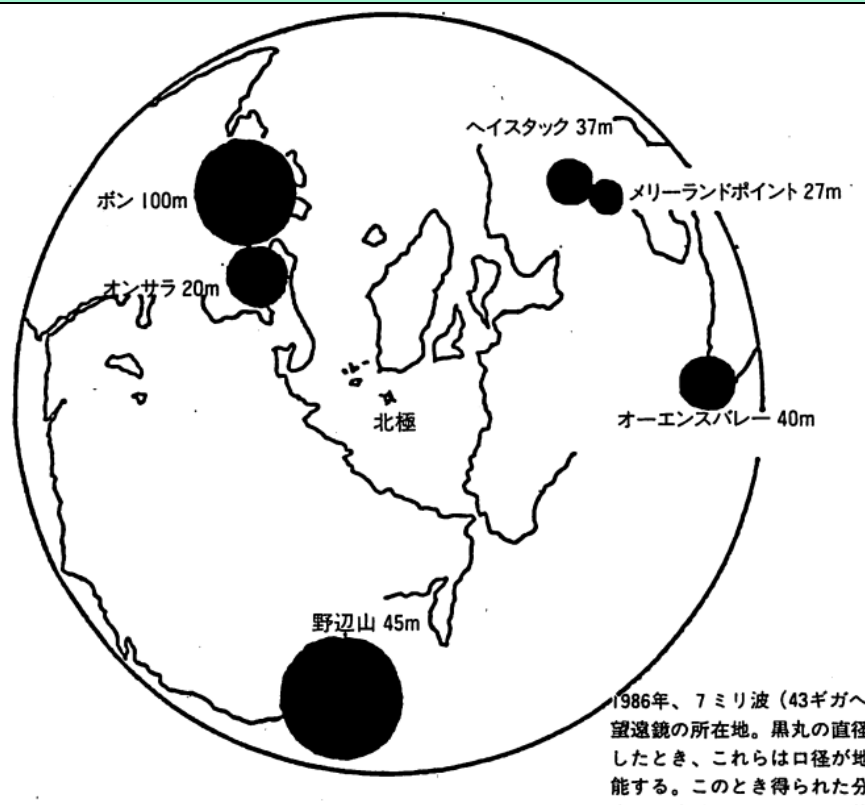
Global mm-VLBI  
Network in 1980's

# 写真: 1991年、グローバルミリ波 VLBI参加の野辺山45m(歯抜け)



Global mm-VLBI Network in 1980's

# グローバルミリ波VLBI: 共同利用 ができないので廃れていった。



VSOPで忙しくなった、という理由も。  
国内VLBIネットワークを  
野辺山共同利用として  
開始(1994年頃)。

共同利用できる/できない  
はNAOJにとって重要な  
「推進する」判断基準。

Global mm-VLBI  
Network in 1980's

## 話したこと:

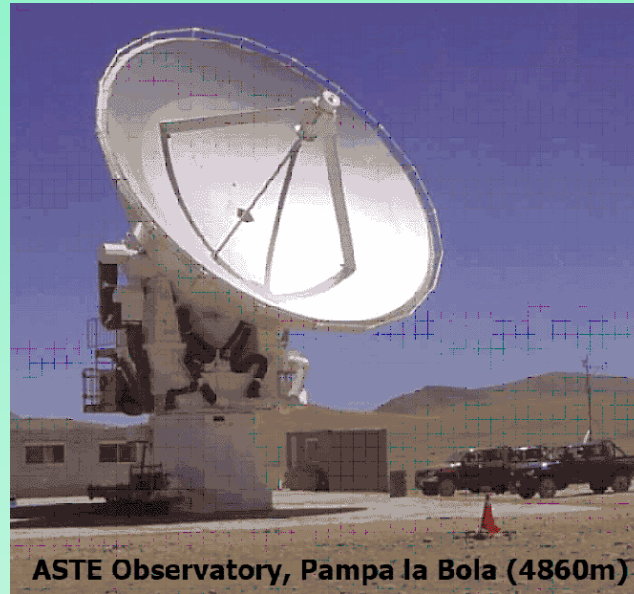
- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

日本・東アジアのサブミリ波望遠鏡、ALMA以外にも既に4つある。

JCMT15m



ASTE10m



ASTE Observatory, Pampa la Bola (4860m)

SPART望遠鏡(府立大・前澤研)

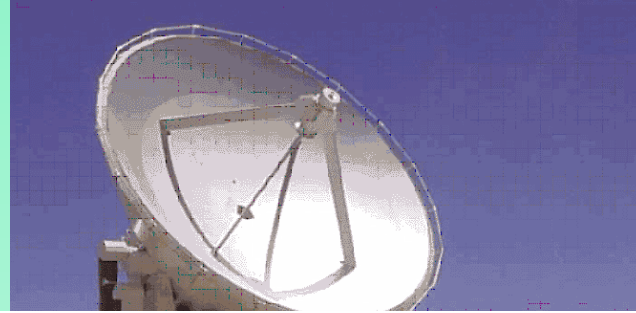


GLT12m  
(ASIAA)

日本・東アジアのサブミリ波望遠鏡、ALMA以外にも既に4つある。

JCMT15m

ASTE10m



アジアで協力して、共同利用装置をつくる。NAOJもサブミリVLBIによるブラックホール撮像を推進するはず



## 話したこと:

- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。

- 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。

- 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。

- 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。

- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？

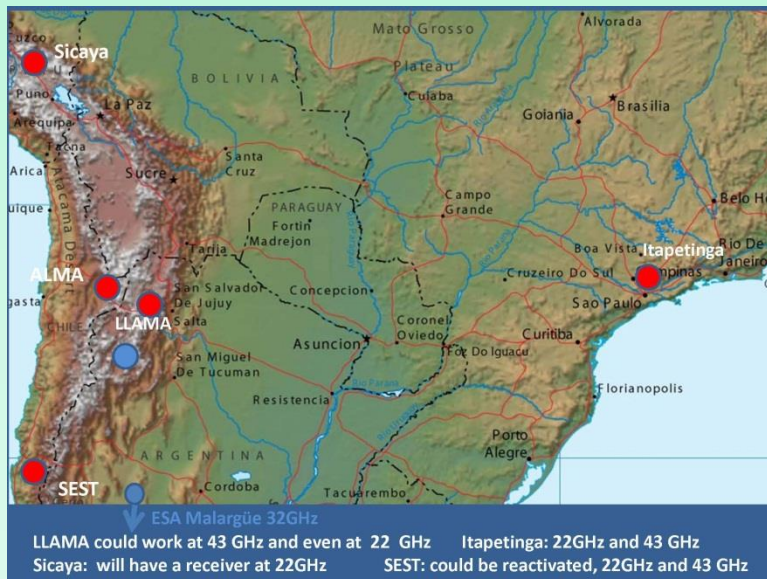
- 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。

- 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。

- 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。

# (案) LLAMA (Long Latin American Milimetric Array) ときゃらばん移動局で短基線成分を担当する

- すでにペルーIGP (Dr. Ishitsuka) とは深く連携。
- きゃらばん・サブはアンデス、ブラジル高地へと移動観測する。地元とのつながりが成功の鍵。





きゃらばん含めると超短基線～地球サイズのサブミリVLBI網ができてしまう

JCMT15m

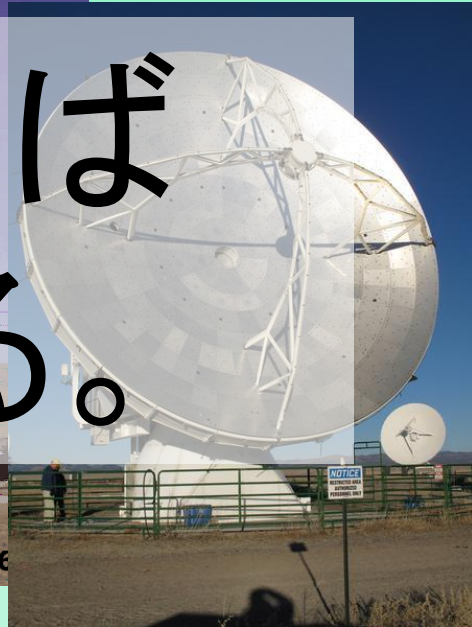
ASTE10m

GLT12mも

# アジアで協力すれば 世界をリードできる。



SPART望



アルジェンチン12m、RXを送る

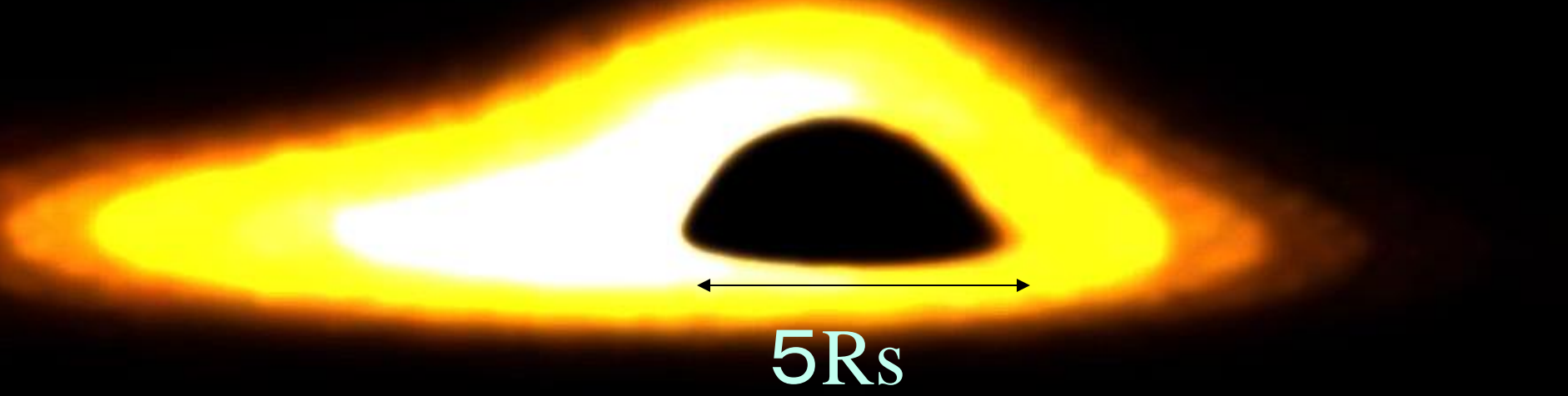


180kmの  
短基線が  
できる！

LLAMA could work at 43 GHz and even at 22 GHz Itapetinga: 22GHz and 43 GHz  
Sicaya: will have a receiver at 22GHz SEST: could be reactivated, 22GHz and 43 GHz



ブラックホールを計算機で初めて見たのは日本人(福江さん)。



ブラックホールは見えないが、その重力による光の屈折によって、中心部分に暗がりができる。またブラックホールの周囲(円盤)はブラックホールに落ちてきた物質が作る)はドーナツ型で、結果で左の明るさが変わる上、光の屈折(重力レンズ効果)のため、向こう側の円盤部分がせり上がって、見えてしまう。重力による屈折で向こう側が浮き上がって見える!

**観測も日本・アジア主導で!**

## 話したこと:

- きゃらばん・サブミリはブラックホール像を撮像。
  - 1) uvカバーとして必要な短基線1~2千kmを得る。
  - 2) そのコストダウン: へら絞りでrms15 $\mu$ m達成。
  - 3) アンデス・サーベイ: 雨季は観測に向かない。
- 日本/アジアでブラックホール撮像進めるには？
  - 1) 共同利用を実現すれば、NAOJでも推進できる。
  - 2) アジアで協力すれば世界をリードできる。
  - 3) 必要な短基線成分はきゃらばん・サブミリが担当すれば、良い。



# - 解析結果 (2012.6) -

2012.06 all PWV data

