



# きゃらばん・サブミリを始めます！

国立天文台  
三好 真

## 1.はじめに

きゃらばん・サブミリ(Caravan-submm)はサブミリ波帯の大型固定局2、移動 VLBI 局1の3局を南米アンデスに展開、1~2 千 km の VLBI 短基線を実現、visibility 解析から銀河系中心ブラックホールのホライズンの世界初検出を目指す。さらに ALMA など世界のサブミリ波望遠鏡とブラックホール近傍の撮像(降着円盤、ジェット生成現場やホライズンの形状の観測)を行う。2012年度、サイトサーベイの実施、へら絞りアンテナの開発、小型移動局の検討、アレイ配列と像合成性能の simulation などを行った。また、宇宙電波懇談会から日本学術会議に電波天文分野の中規模計画の一つとして推薦を受けた。さらにブラックホール関連研究者を中心とした、サブミリ波帯 VLBI 観測研究の推進が始まりつつある。

## 2. アンデスにおけるサイトサーベイの実施

サイトサーベイは固定局の設置場所と移動局の観測地点の設定に重要である。IGP、すばる観測所・慶應大学の協力を得て、2012年6月に2週間にわたってボリビア、ペルーの大気水蒸気変動を2台の近赤外水蒸気メータで調べた。ワンカイヨで8日の連続測定を行いながら、もう一台を携行し、各地を測定した。今後ワンカヨ、チャカルタヤでの通年測定、ペルー北部のワスカラン国立公園、ボリボア国境付近の山岳地域の測定を考えたい。

## 3. 小型移動局の検討

### 3.1 へら絞り法によるコストダウン軽量アンテナ開発

へら絞り法で口径 2m、rms 60 μm の鏡面を安価(口径 2m 加工費~20 万円・金型~数百万円)に製作できるめどがたった。へら絞りアンテナの鏡面精度はその再現性から、金型自体の面精度による強く依存することが判った。一度作成した面は1、2年の後もその形状を維持していることも判った。厚みわずか 3mm なのでアンテナ素面は支持法次第で変形する。本来の高精度面を保持する支持機構の検討が今後の課題である。

図1：測定地点(ピン位置)

図2：測定作業は20分程度で完了する。

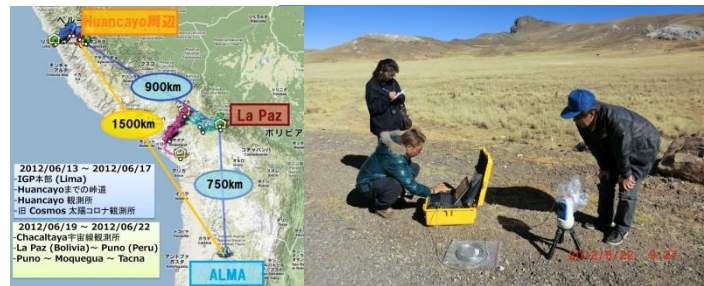


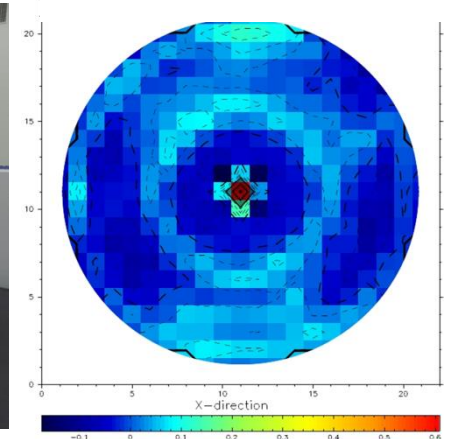
表1：測定結果 (参考：ALMAの観測基準可降水量 1~4mm)

測定地点	標高(m)	可降水量(mm)	測定時間
峠 (Peru)	4829	4-5	20min
Huancayo (Peru)	3318	10-14	8days
COSMOS太陽コロナ観測所 (Peru)	4600	5-6	3 hrs
Chacaltaya (Bolivia)	5253	1-1.5	2days
チリ隣接砂漠 (Peru) 複数点	4300~4600	0.8-2	3min

図3：北嶋絞り製作所での口径1.8mアンテナの加工。所用1時間程度。厚3ミリ全重量20kgのアルミ板。

図4：クリスタル光学(京都)で測定。曲面の測定ソフトがなく、セット含め一日。1.8m鏡1600点測定に6時間。

図5：面の良い金型(90cm)の鏡面。60 μm/全、30 μm/78%、17 μm/40%



### 3.2 小型移動局・架台に関する検討

測地 VLBI 用移動局 (SX 帯) では NICT の実績がある。230GHz 帯での移動を前提とした口径数 m クラスの電波望遠鏡はまだ存在しない。へら絞り法で軽量のアンテナ (支持構造含め、口径 2m で 50kg?) が実現した場合、4~5m 口径相当の複合鏡は 300kg 程度だろう。西村製作所 (京都) に移動局の架台について相談に伺い、そこで栗田架台 (ULT-1) の存在を知った。栗田架台は口径 2.5m の光学望遠鏡を目論んで設計され、設計段階より、移動観測を考慮したものである。トラス構造の採用により軽量化 (5 ton 以下、従来比 1/10)、コストダウン (3 千万円、従来比 1/10) を達成、追尾精度は 0.1 秒角が実証されている。きゃらばん移動局のミリ波電波望遠鏡の必要スペックを満たして余りある性能をもっている。我々の移動望遠鏡用としては、栗田架台よりさらに簡素にできる。今後、佐藤修二氏、笹子宏史氏らの協力のもと検討を深める。

### 3.3 複合鏡の光学系の検討

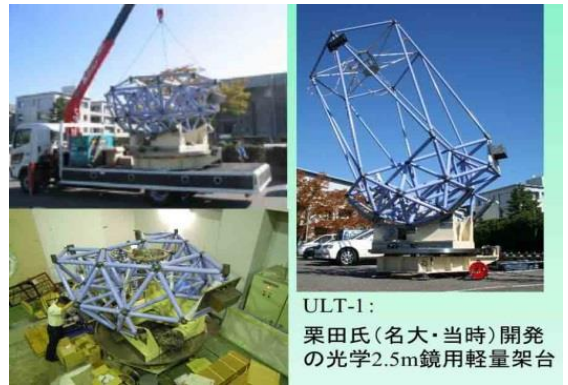
図 8 は複合鏡の光学系の一つの例である。各 2m 口径の素子アンテナのビームを光路長調整して一点に集め、一つの受信機で受信する。低雑音化・高効率化には課題がある。このほか、それぞれの信号を導波管でもってきて結合する方式も検討している。

きゃらばんの望遠鏡開発としては、まず移動局を優先し、試作ゼロ号機的设计・製作を開始、国内において 230GHz での VLBI フリンジ実験を行いたい。

## 4. アレイ配列と像合成性能の simulation

既に Miyoshi 他 (2004, 2007) で、一般論として、ブラックホールの撮像には短基線が必須であることを示している。今回“きゃらばん・サブ”の撮像性能に焦点をあて、撮像 simulation を行った。Phased-ALMA

図 6: 栗田架台 (ULT-1)。4 t トラックでの移動風景・ほか



ULT-1:  
栗田氏 (名大・当時) 開発の光学 2.5m 鏡用軽量架台

図 7: 車載電波望遠鏡の概念図 (春日案の一つ)

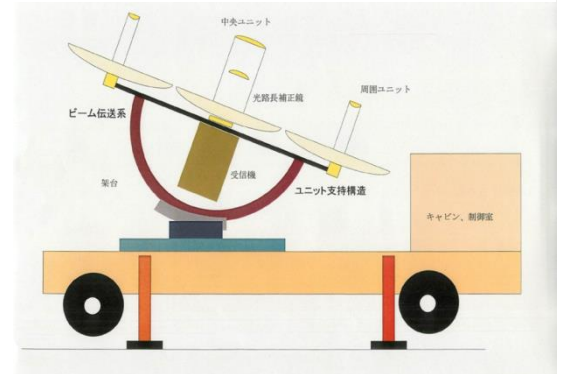


図 8: 複合鏡方式 (春日案の一つ)。2m 鏡複数枚で 4~5m 相当に。

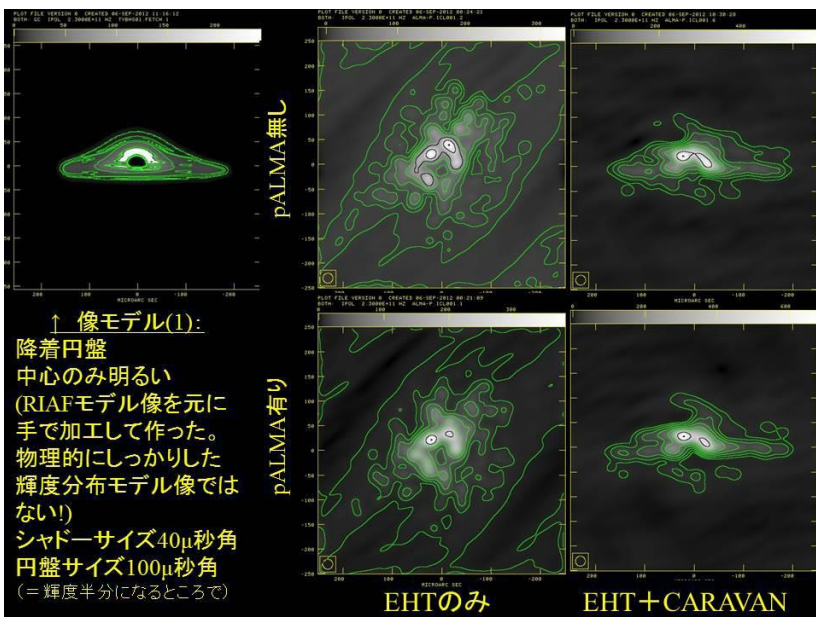
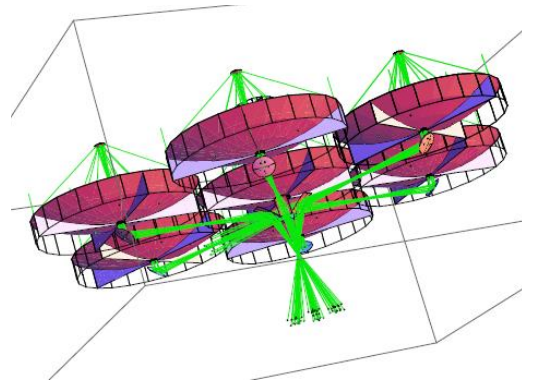


図 9 Edge-on 円盤ブラックホール像に対する結果 (観測周波数 230GHz、B=1GHz 仮定)

が VLBI に参加した場合の貢献は検出感度に対するものであり、観測可能天体数を増すことに役立つ。しかし、ブラックホールの解像性能の向上ではない。図 9 に Edge-on 円盤 BH の撮像結果示すが、EHT (ここでは 7 局仮定) の撮像では、シャドーらしき暗部が見える。が、これは本来像のそれとは異なる形となる (偽シャドーの検出?)。きゃらばん (13 回移動の移動観測) が加わると東西に延びた円盤構造がトレースできる。シャドー相当部分に本来像に近い暗がりができる (シャドーとして認識は難しい)。

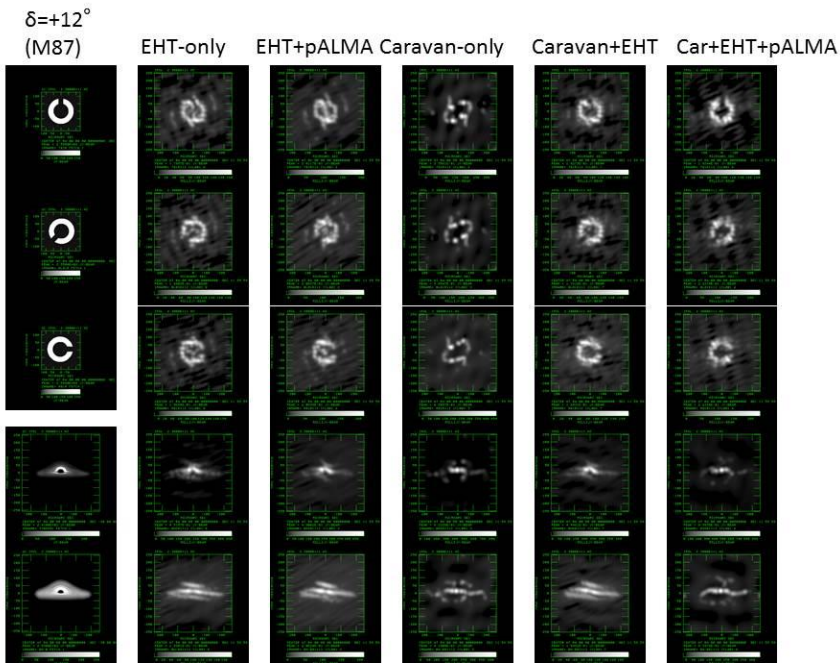


図 10: M87,赤緯+12° を想定した場合の結果。

その存在を確認できること、天体像の時間変動がある場合でも降着円盤の向き・サイズ等を把握することはできることも確認した。なお図 10 は M87 の赤緯を想定した場合の結果である。

以下、2012 年 12 月の VLBI 懇談会シンポジウム開催以降の動向を記す：

#### 4. 中規模計画としての推薦

VLBI 懇談会シンポジウムに連続し、開催された宇宙電波懇談会シンポジウムでの議論検討の結果、宇電懇から日本学術会議、天文学・宇宙物理学分科会へ「きゃらばん・submm」を含む幾つかの装置計画が中規模計画として推薦された。

#### 5. ブラックホール研究者 community からの働きかけ

ブラックホール・相対論研究者 community から、サブミリ波 VLBI によるブラックホール周辺像解像研究推進のアプローチを始めている。まずは、国立天文台台長と懇談を 2013 年 2 月にもった。

この懇談における要点は以下、

- NAOJ-EHT 間の MoU 締結推進によっては ALMA phase-up を進めるに余り有効ではないことが判りました。ALMA 側の考えについてドールマン(ヘイスタック EHT)に誤解があった。
- ASTE 利用の VLBI は進めると良い。台長からアイデアとして、ASTE と CSO 間の VLBI 実験がでた。サブミリ波 VLBI においても、欧米の追従ではなく、日本・東アジアで成果をあげるべき。

(正式メモ、<http://www2.nict.go.jp/aeri/sts/stmg/vcon/2013/NAOJPresident-BlackHoleComm201302.pdf>)

この懇談の後、ブラックホール近傍像撮像研究推進については、

- (1) 情勢を踏まえながら NAOJ-EHT 間の MoU 締結を後押しする。
- (2) 国立天文台所有の ASTE と CSO 等における VLBI 実験の働きかけをする。
- (3) 国立天文台において機関ベースでの研究推進 (プロジェクト室設置など) をブラックホール研究 community から引き続き進める予定である。

つまり Phased-ALMA の有無は像には影響しない。その理由としては、(1)この simulation の仮定では EHT に (ALMA に近い) LLAMA 局 (アルゼンチン) を含んでおり、そこに Phased-ALMA が入っても、その uv 増加の寄与が効かない、(2)天体強度 3 Jy と仮定しており、Phased-ALMA が無くとも SNR が十分なためかと考えられる。従って、SgrA\*のように明るい BH 天体の撮像には Phased-ALMA は不要であり、その 1 素子アンテナ (もしくは ASTE や APEX) で十分であることになる。きゃらばん単独の場合、像として、シャドーを検出するのは困難だが、図 9 でのサイズの降着円盤ならば、