

## 銀河中心ブラックホール・キャラバン計画

2012.Dec.04<sup>th</sup>@Kashiwa

### A First Black Hole Imager at Andes

Makoto Miyoshi

(National Astronomical Observatory, Japan)

With

M. Sekido, Y. Koyama, H. Ujihara, Y. Irimajiri (NICT),  
H. Ishitsuka, S. Nemoto (IGP), Y. Asaki, M. Tsuboi (ISAS), T.  
Kasuga (Hosei Univ.), S. Nanbu, A. Tomimatsu (Nagoya  
Univ.), M. Takahashi (Aichi Univ. Edu.), H. Saida, S. Machiya  
(Daido Univ.) Y. Eriguchi, S. I. Yoshida (Tokyo Univ.), S. Koide  
(Kumamoto Univ.), R. Takahashi (Tomakomai), T. Oka, J.  
Firusawa (Keio Univ.), N. Kawaguchi, Y. Kato (NAOJ) K.  
Niinuma (Yamaguchi Univ.), T. Daishido (Waseda Univ), K.  
Wakamatsu (Gifu Univ.)

## Abstract:

The massive black hole in Sagittarius A\* (Sgr A\*) at the Galactic center has the largest apparent Schwarzschild radius of  $6 \sim 10 \mu\text{as}$ . Relativistic phenomena around the black hole should be observed in very near future (Falcke et al. 2000, Takahashi 2005, Miyoshi et al. 2004, 2007, Doeleman et al. 2008).

We plan to construct a sub-mm VLBI system at Andes dedicated to observe the black hole horizon of Sgr A\*. Using two of fixed large radio telescopes and a mobile small radio telescope, we sample sufficient u-v coverage, and aim to detect the horizon of Sgr A\* from visibility analysis (and to image with other world radio telescopes).

We now plan to locate the two fixed stations at the Huancayo observatory, IGP in Peru and the Chacaltaya Cosmic-ray Observatory in Bolivia. The NICT has been developed geodetic VLBI mobile stations for 20 years (Ichikawa et al. 2009). Using the technique we make a mobile VLBI station to sample various baseline vectors (u-v cover). The Caravan station moves in Andes, changes observing site position and repeats VLBI observations.

(Because we are in a big monetary crisis that only happens once a century, a cost down of the construction is strongly required.)

If we construct a sub-millimeter wave VLBI array around Andes, we can observe the black hole of SgrA\*.  
We are planning a three-stations array around Peruvian Andes, dedicated to the detection of the horizon of SgrA\*, around US\$ ten-million-level.

The existence of the black hole in the universe was confirmed in the last century.

There are many of black holes.

M87

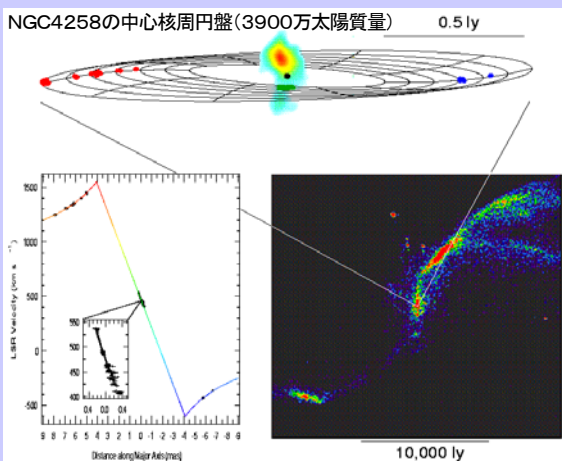
NGC4258 (M106)

SgrA\* (Our Galactic Center)

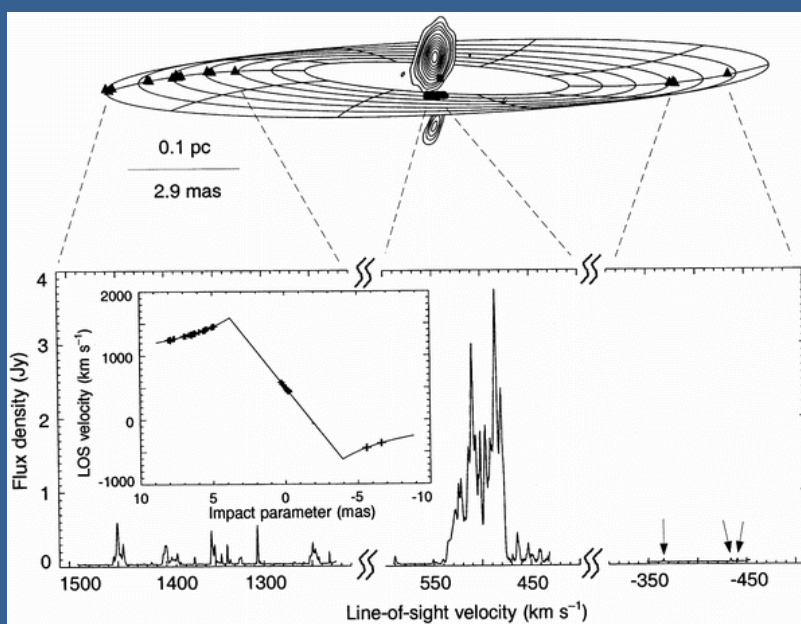
この観測で、ブラックホールと強く関わることに。

## NGC4258, VLBA, $M_{\text{BH}} = 3.9 \times 10^7 M_{\text{sun}}$

Using the VLBA, a high velocity Keplerian disk around the core was found. More than 1000 km/sec at the radius of 0.13 pc means that the central mass exceeds  $3.9 \times 10^7 M_{\text{sun}}$ . Only within the radius of 0.3 ly  $3.9 \times 10^7$  solar mass exists such a high density cannot be explained without black hole.

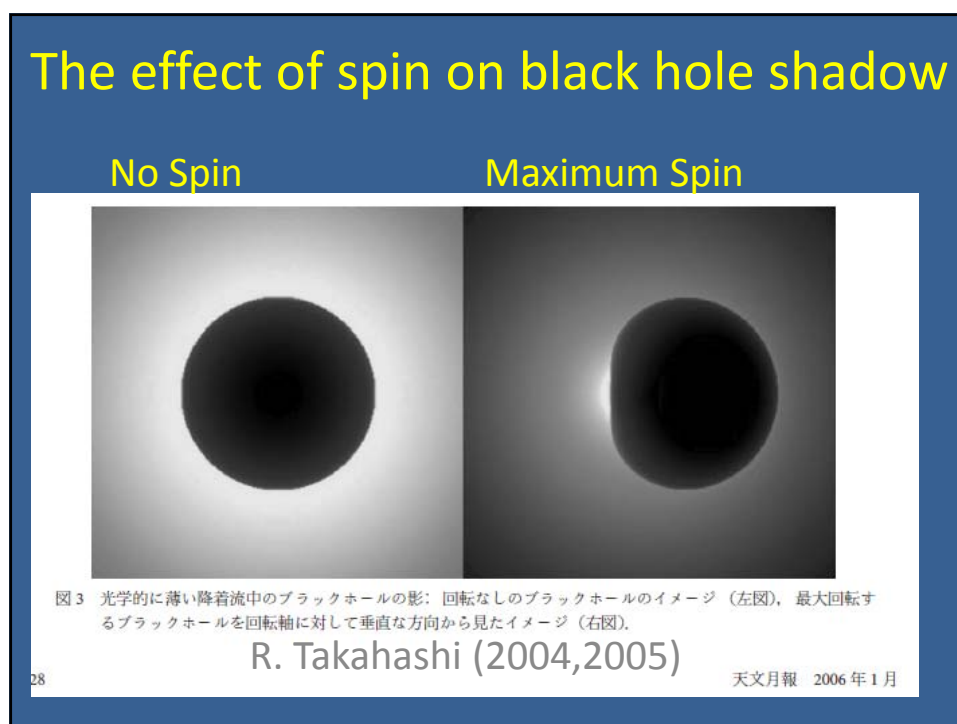
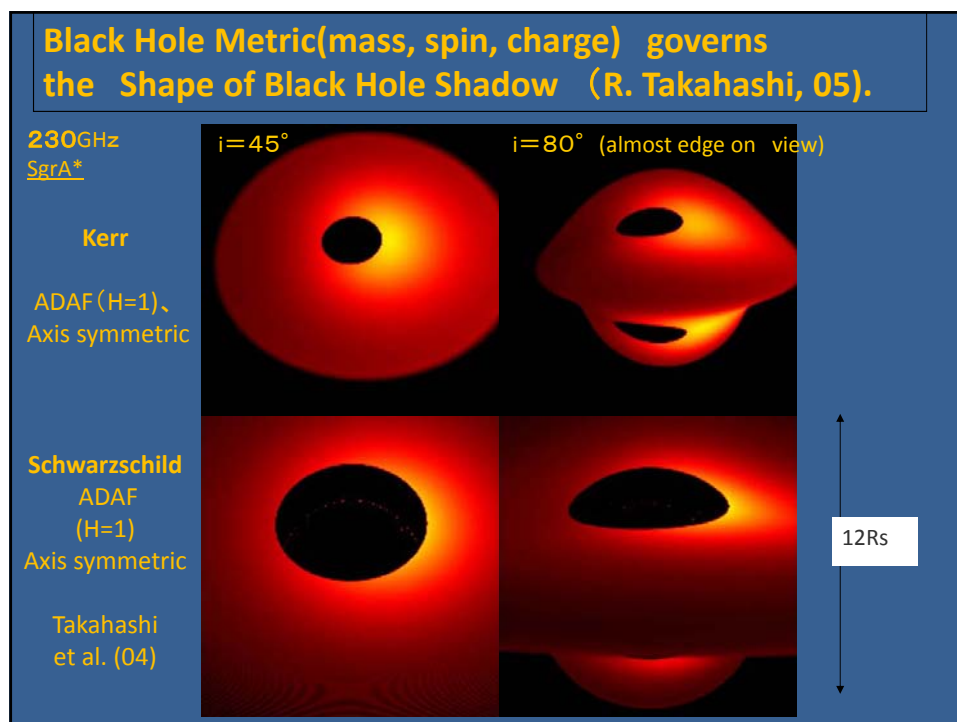


Herrnstein et al. 1999  
Miyoshi et al. 1995  
Nakai et al. 1993




From the dynamical measurements, all people believe the existence of black holes in the universe today, except relativists. But, no one has observed them.

Observing black hole shadow (black hole horizon) is the conclusive evidence of black hole even relativists can be persuaded and a new approach investigating strong field gravity.



Can we observe black hole?  
 Yes, we can  
 with VLBI observations of SgrA\*  
 at sub-millimeter wavelength!

Shadow Size of Black Holes						
	Mass	D		Rs		Shadow Size
	(Msun)	(kpc)	(m)	(au)	( $\mu as$ )	( $\mu as$ )
StellarBH@pc	1.00E+00	0.001	2.95E+03	1.97E-08	0.02	0.10
M82	1.00E+06	3700	2.95E+09	1.97E-02	0.01	0.03
SgrA*@GC	2.60E+06	8	7.67E+09	5.11E-02	6.39	31.96
SgrA*@GC	3.70E+06	8	1.09E+10	7.28E-02	9.10	45.48
M31	3.50E+07	800	1.03E+11	6.88E-01	0.86	4.30
NGC4258	3.90E+07	7200	1.15E+11	7.67E-01	0.11	0.53
M87	3.20E+09	16100	9.44E+12	6.29E+01	3.91	19.54

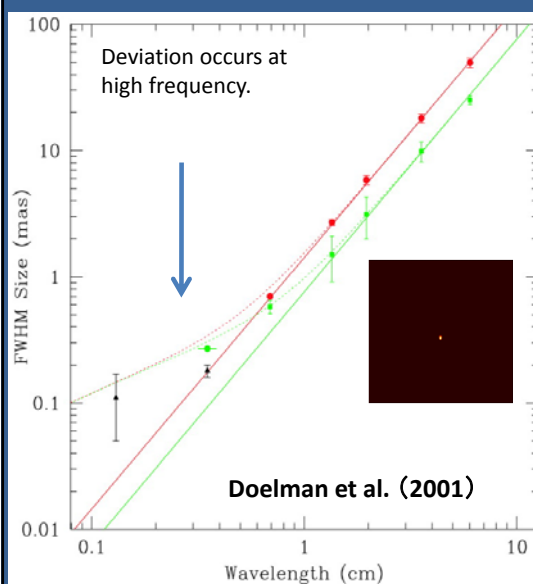
SgrA\*, central massive black hole at our galactic center has the biggest apparent size of  $Rs=6-10\mu as$ .  
 (Schwarzschild case)

SgrA\* has been investigated by VLBI again and again with cm to mm wave lengths, but all astronomers failed to get the black hole (shadow) image.

Because the frequency channels they observed were different channel for receiving Black-hole-broadcasting.

So we only have to select the correct broadcasting black-hole channel.

### Apparent Size Measurements of SgrA\*



At low frequency,  
SgrA\* image is  
scattered by plasma  
( $\propto \lambda^2$ ).

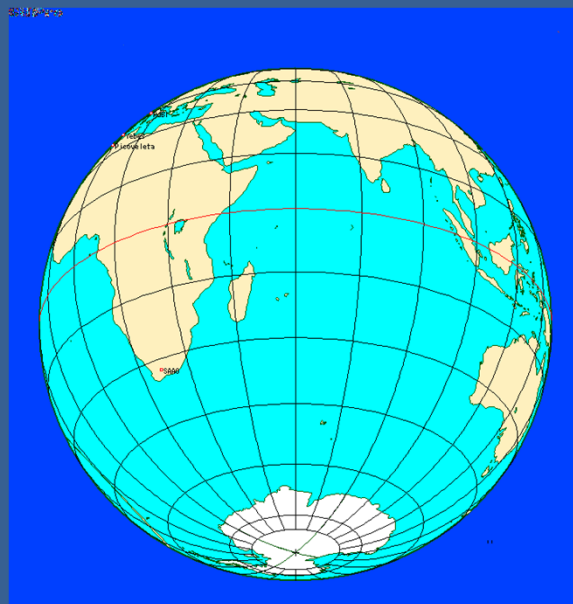
But  
free from scattering  
at sub-mm wave  
length !

So we can expect  
observe the intrinsic  
image.

## For Imaging a Black Hole:

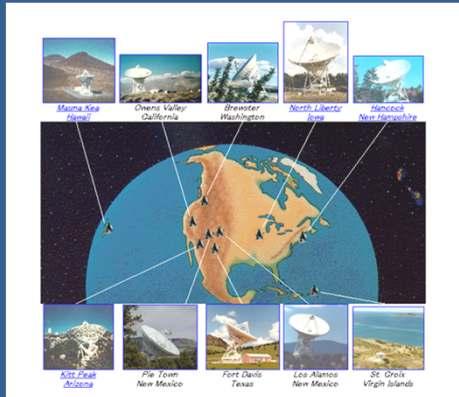
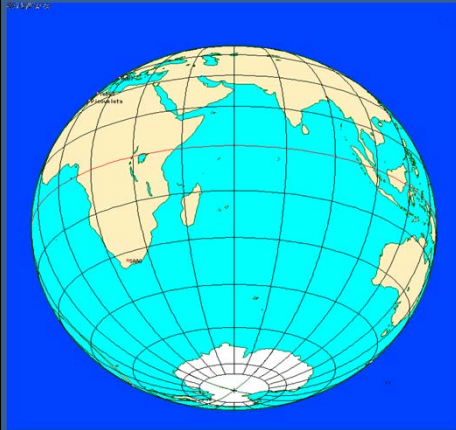
- The most promising source is SgrA\*.
- We need sub-millimeter VLBI observations (230~340GHz) because free from scattering effect.
- We need the southern hemisphere array for good uv coverage for SgrA\* (10 stations, 8000km extent @230GHz).
- The required sensitivity is already attainable from the viewpoint of present technology.
- We need good sites like that of ALMA for sub-millimeter VLBI array.

The Earth Rotation seen from SgrA\* ( $\delta = -30^\circ$ )





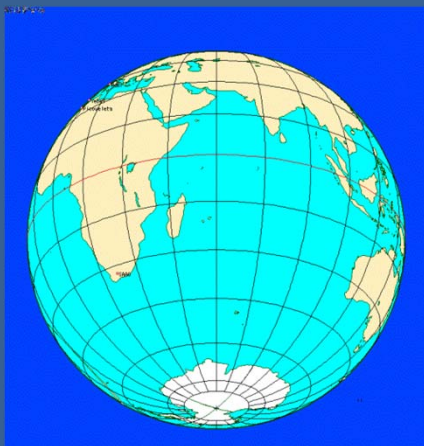
The Earth Rotation  
seen from SgrA\* ( $\delta = -30^\circ$ )



VLBA  
( US, North America)

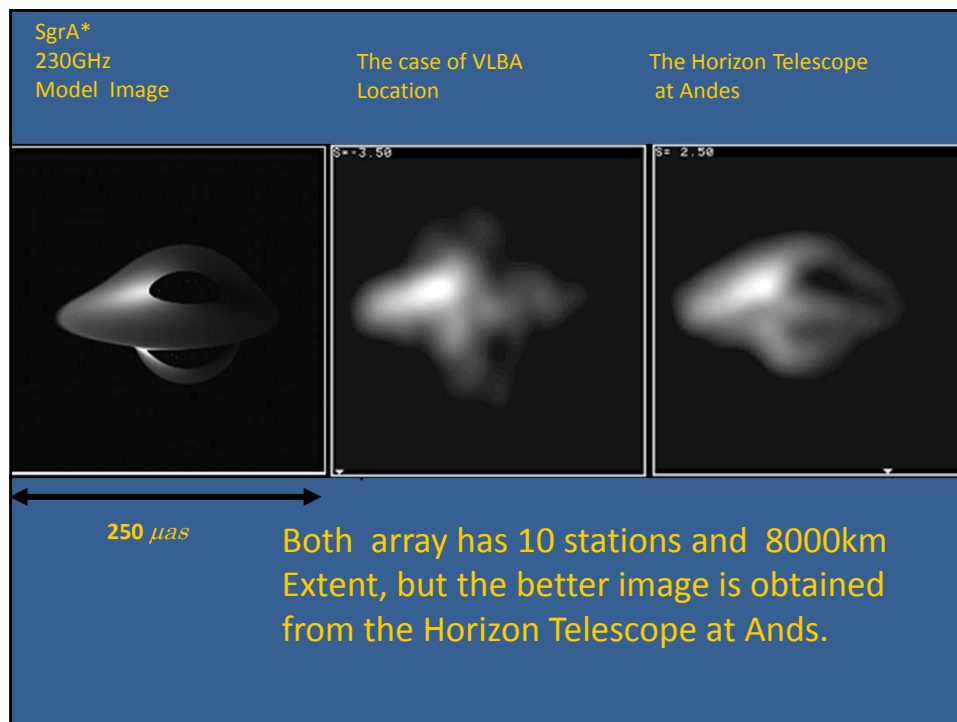
Short observing time, bad condition due to low elevation

Virtual southern array Horizon telescope (10 stations)  
The uv coverage seems enough for SgrA\* ?



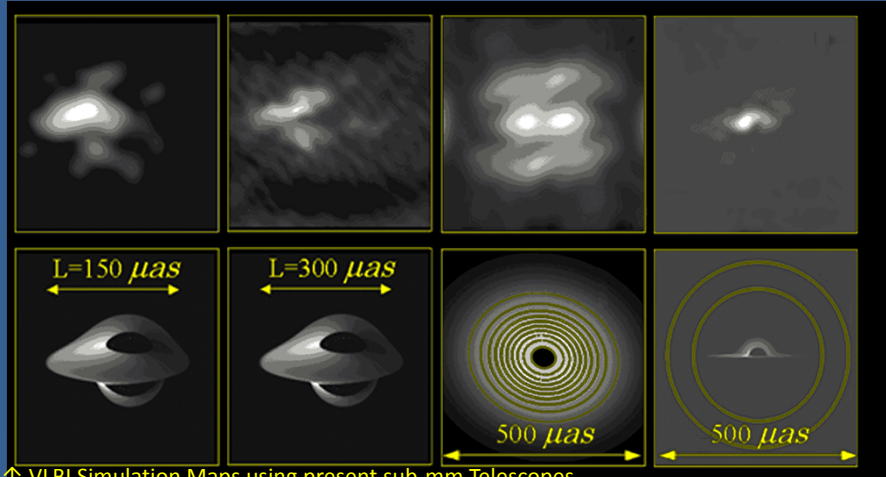
Horizon Telescope @ Andes

Longer observing time, good condition due to high elevation



**Here,  
we emphasize the importance of  
shorter baselines  
in VLBI SgrA\* observations.**

Even now, longest baseline s are available ( $\sim 8000\text{km}$ ), but still difficult to image SgrA\* black hole. We need SHORTER baselines!

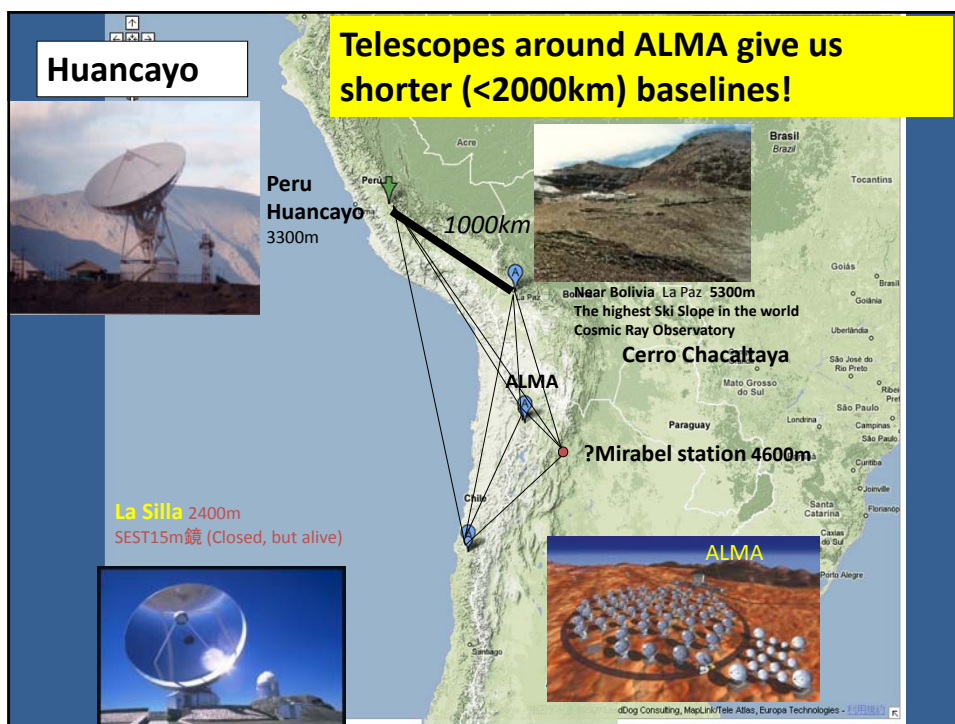


↑ VLBI Simulation Maps using present sub-mm Telescopes.

Lower Model Images, Upper Resultant maps. {Hawaii, West Coast, ALMA(1 element), + Virtual Peruvian + closed SEST }

=Not enough uv-coverage, Lack of shorter base lines =

**Andes around ALMA is  
suitable place of the sub-mm  
VLBI network  
with short baselines  
for SgrA\*.**



Model Fitting is another method for investigating the shape. Doeleman (2008) reported the fringe detection at 230GHz VLBI experiment from SgrA\* observation.

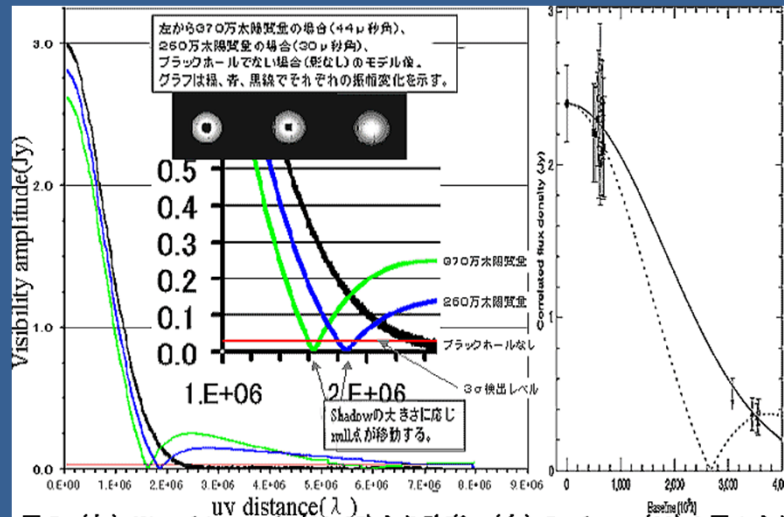


図3. (左) Miyoshi et al. (04, 07)より改変 (右) Doeleman (08)の図1より

So constructions of new sub-mm VLBI stations around ALMA are very important for SgrA\* Black Hole Imaging & investigation using visibility data.

Cost?!

We are planning 3-stations VLBI with very low cost around 10 million-level, because we are in the big monetary crisis occurred once a century.

「Japan is in a big monetary crisis occurred once a century.」  
(2008)



「People's livings are more important than concrete」(2009)  
presumably “concrete” includes science.



#### A First Black Hole Imager at Andes:

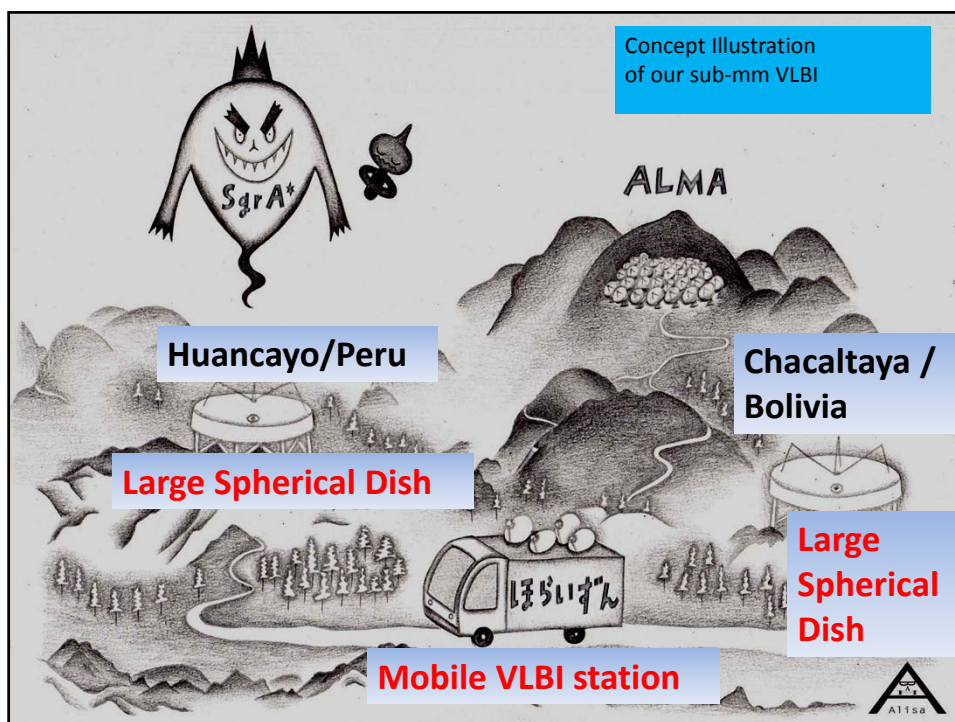
**(1) Larger Dish for Sensitivity at Chacaltaya & Huancayo.** Low cost. Ex, Daishido 30m dish

**(2) Usage of Mobile Small Dish for collecting uv-cover**

4-m class mobile station around Andes mountains.  
Experiences of NICT for geodetic mobile VLBI station with small antenna.

**(3) Dedicated to SgrA\*, aiming at the detection of the black hole shadow (black hole horizon).**





**Chacaltaya**  
**Cosmic ray Observatory**  
 At 5300 m (La Pas, Bolivia)  
 Here we wish to build a  
 new radio telescope.





## Observatorio de Huancayo, IGP

Instituto Geofísico del Perú  
Sector Educación

**Latitud:** -12.037875° N -1.80° N

**Longitud:** 284.681633° E -3.46° E

**Altitud:** **3336.0 m.s.n.m.**

The other site candidate,  
Huancayo in Peru



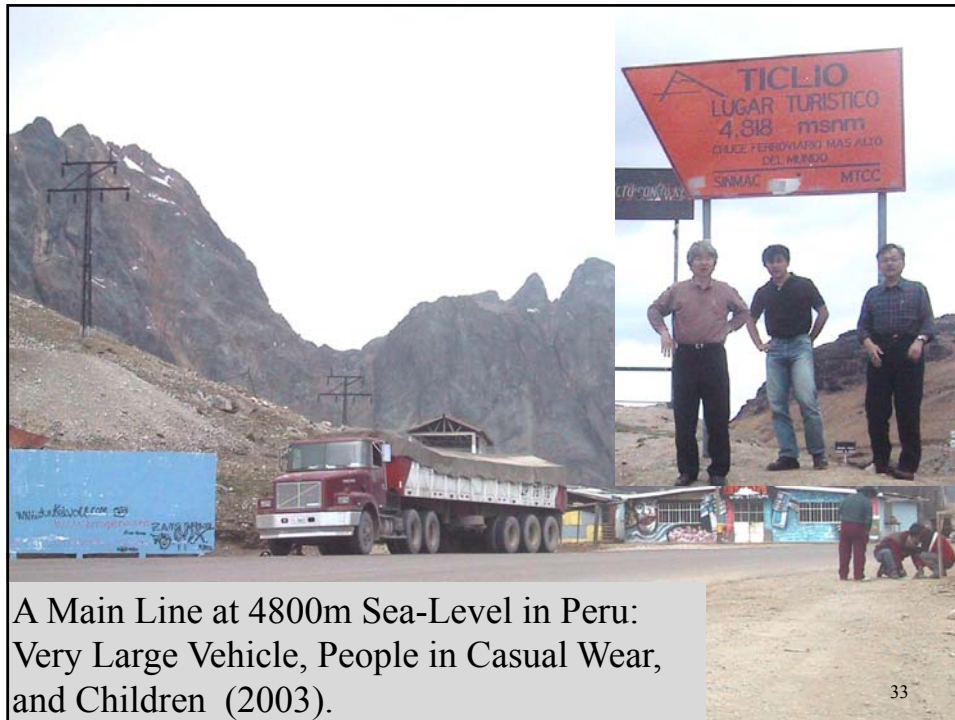

32-m telecommunication antenna  
-- Not for sub-mm observation --

# There are Convenient Ways in Peru-Bolivia Andes:

We need no special motor vehicle like a heavy tank or an armored car for transporting our mobile radio telescope.

望遠鏡移動にあたって戦車・装甲車などの  
特殊車両は必要ありません。





## We need drastic Cost down ! 固定局を安価に作る方法 (思いつきを含む)

現在の60億円規模の予算額は固定局にALMA12mアンテナと同等のものを購入して、建設する場合の額である。

本計画では、実現のため、装置のコストダウンは重要と認識している。「へら絞り法」アンテナの研究や複合鏡方式の検討はコストダウン検討の一環である。

固定局のコストダウンについては、全く、思いつきの段階ではあるが、以下の3つを紹介する。

### Idea 1 : Reuse of SEST15m

(1) main mirror seems good, NO-receiver, NO-drive control, Need of repair of controller of sub-reflector at our visit in 2009.

(2) Repair fee 2億円? ( $2 \times 10^8$ Yen)??

management fee at old days 年2億円( $2 \times 10^8$ Yen/year)  
(by Dr. R. Booth in 2004)

(3) The present site is not so good ( $h=2400$ m). Movement to higher site ( $h>4000$  m)

整備、移設で $2+2=4$ 億円 ( $4 \times 10^8$ Yen)??



SEST 15m telescope at Li Silla Chili is still alive though closed at 2003. (our visit 2009.11.09)

## Idea 2: sub-mm fixed spherical telescope

(original = Prof. Akabane at '70)

Waseda 30m 固定球面鏡

カンガルー望遠鏡: CFRP80cm

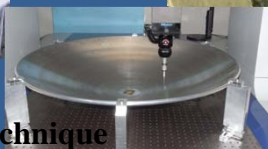
(Daishido・科研費A、10GHzまで) 球面鏡を並べて10m口径に。

鉄板を加工して鏡面に



へら絞りアンテナ

By lancet spinning technique



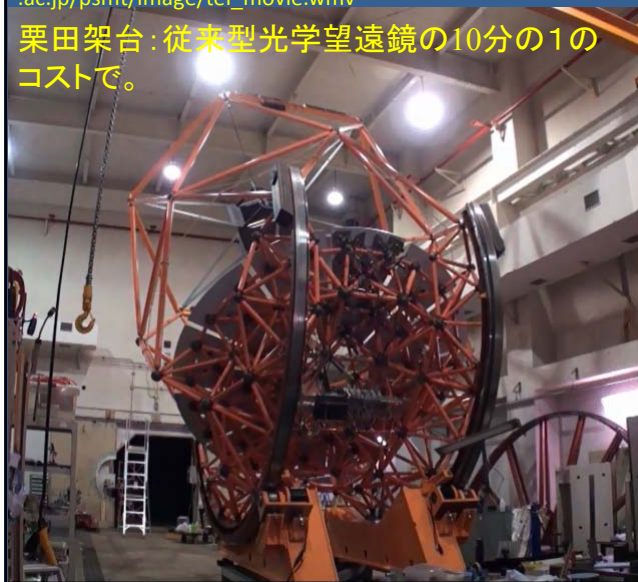
へら絞り小型球面鏡(60 $\mu$ m精度・1m・4万円)を敷き詰め、地面は見ないよう受信ホーンを工夫、熱変形対策に、日射防御シートを主鏡にかぶせる。30m開口面を埋める小球面鏡群1100万+調整機構2000万+全体構造5000万=8000万、ガラだけなら約1億円????

調整は現地で人海戦術で安くする (ex. オンサラ20mは人海戦術)。

## Idea 3 : Learn from Kyoto Univ. Project

[http://www.kusastro.kyoto-ac.jp/psmt/image/tel\\_movie.wmv](http://www.kusastro.kyoto-ac.jp/psmt/image/tel_movie.wmv)

栗田架台 : 従来型光学望遠鏡の10分の1のコストで。



その発展型、  
京大3.8m鏡  
(概算要求数億円)  
まねて、安く、作る。  
10億円以下になる?  
(根拠なし)

Reber's Radio telescope



Cost down of our large fixed VLBI station  
no concrete idea now.

固定局のコストダウン:  
今のところ、未解決

while it becomes  
clear how to construct our mobile VLBI  
station with low cost.

移動局をコストダウンして作ることが、固定局のコストダウン  
へのアイデアを生んでいくと期待。

## Geodetic VLBI mobile station was developed by NICT

←NICT Kashima

**CARAVANZ400のS/X化に成功！！**

図1 新フロントエンドを搭載したCARAVANZ400。かつてサブミリ波であった場所に広帯域のワイドレンジホーンアンテナ、高性能増幅LNA、ダイプレクサ等を収めている。

図2 2007年12月5日に実施したプリリシテットの様子。車載が新フロントエンドを搭載したCARAVANZ400。後方が9kmアンテナ。

図3 2007年12月5日のVLBI実験で検出されたワイドレンジホーンアンテナによる500MHzアンテナのビームパターン。右がメインビーム。

本VLBIニュース107号でも紹介しましたが、NICTは国土院と共同で、GPSは秒基準時間定形の超小型VLBIシステムの実現を進めています。このシステムは、大型アンテナと組み合わせたVLBI観測を行い、超小型アンテナとすることで結ばれる約10kmの基線長を100msで測定することを目指しています。この技術の成果として、観測の精度を大幅に向上させることが期待されています。観測の精度を大幅に向上させることが期待されています。観測の精度を大幅に向上させることが期待されています。

ミリ波サブミリ波電波の信号を受信するためには、高精度な鏡面をもつパラボラアンテナが必要である。我々はシミュレーション解析を行い、パラボラアンテナにおける重力、熱、風などによる変形の最適化構造を設計した。これをもとに、アルミ鋳造で本体の製作を行い、鏡面は切削により形成する方法を開発した。これにより従来より経費、時間差を大幅に削減した。

**高精度パラボラアンテナ**

- 高精度な鏡面を実現するための最適化構造を設計。
- 観測精度は400ms以内。
- 重量は、風、雨による変形を考慮して設計。

・パラボラアンテナのシミュレーションモデル (A) (B) (C)

モデルAは、観測精度を向上させるための最適化構造を設計。

モデルBは、観測精度を向上させるための最適化構造を設計。

モデルCは、観測精度を向上させるための最適化構造を設計。

シミュレーションをもとに、リブ等の構造を決定 (モデルCを採用)。

アルミ(AC4C)鋳造により作られたパラボラ鏡面。

切削により鏡面を切削加工。

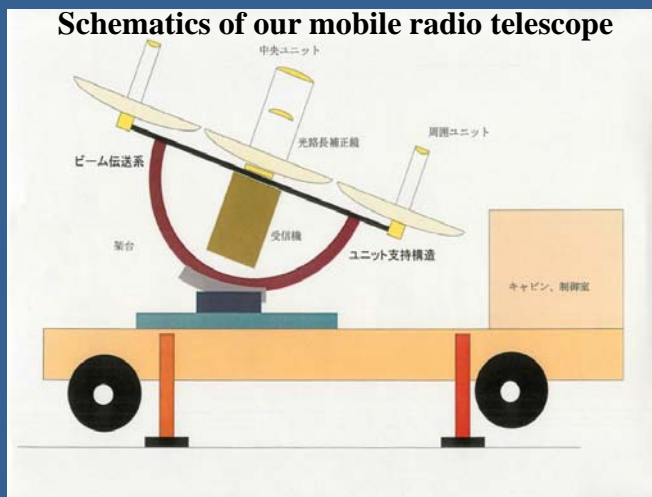
出来上がり 鏡面の精度30μm達成！

**An experience of making a small cheap sub-mm dish by Ogawa.**

## A mobile sub-mm radio telescope with low cost

- D: 4~5m

### Schematics of our mobile radio telescope

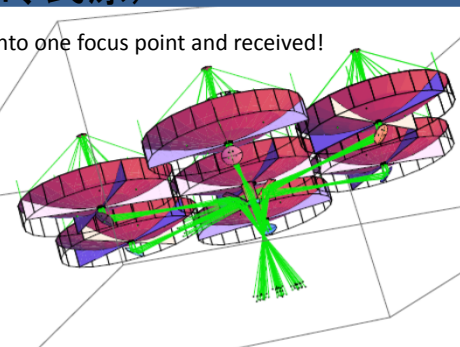
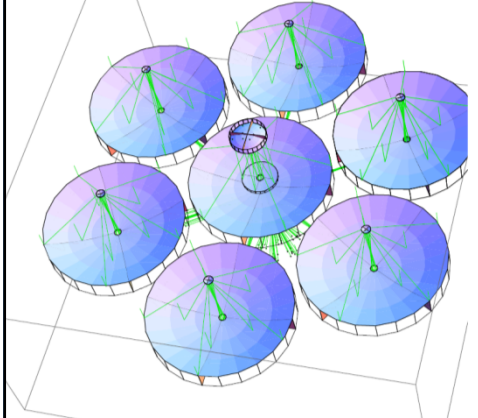


“車上観測”or“地面基礎設置”？ 要検討。

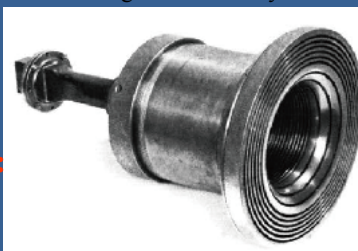


## 複合鏡：光学設計中(春日、氏原)

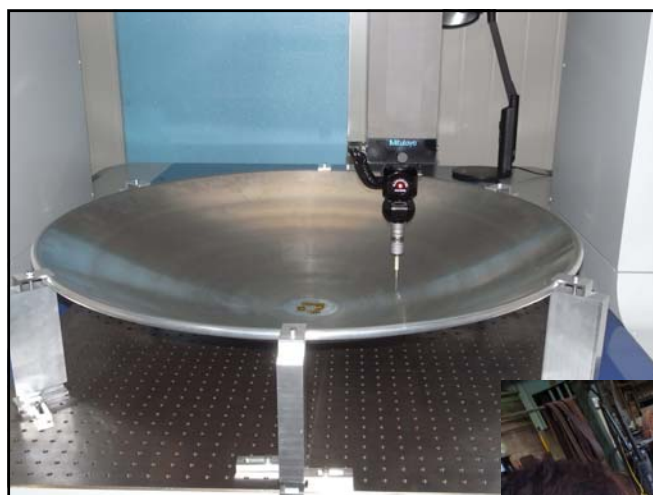
Beams of multi small telescopes are combined into one focus point and received!



Pioneering work by Parks observatory('70年代.  
-- horn with ring like directivity.



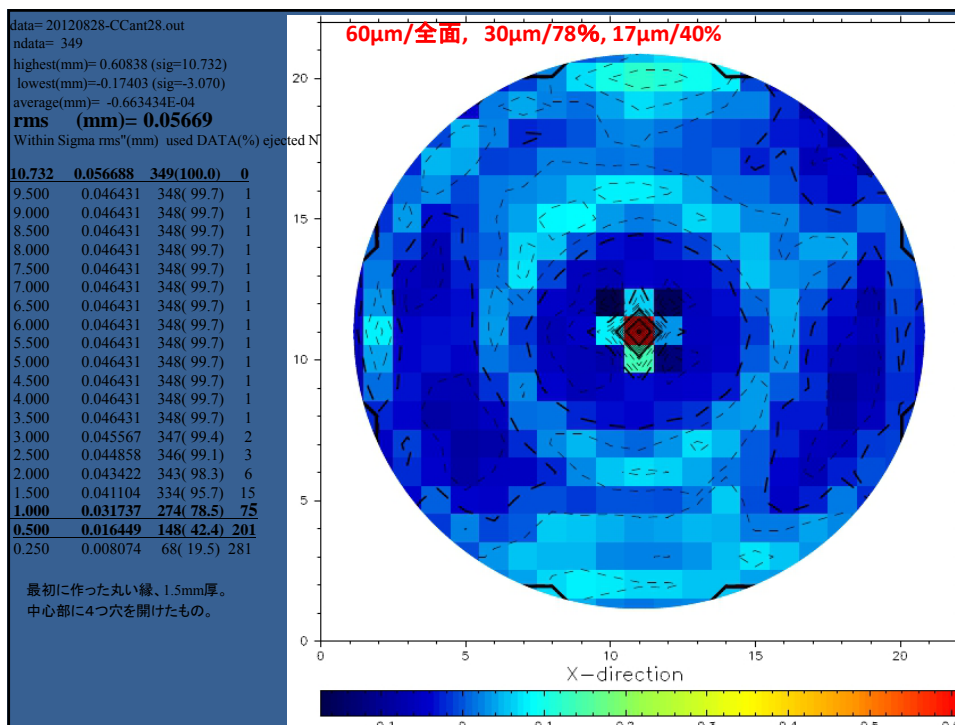
**A Dedicated Receiving Horn is Required:**



国立天文台  
技術センター三次元  
測定機による  
面精度測定  
3D measurements  
at Advanced Technical  
Center in NAOJ.

北嶋絞り製作所：既存金型による  
パラボラ面製作  
Drawing compound  
at Kitajima Shibori factory





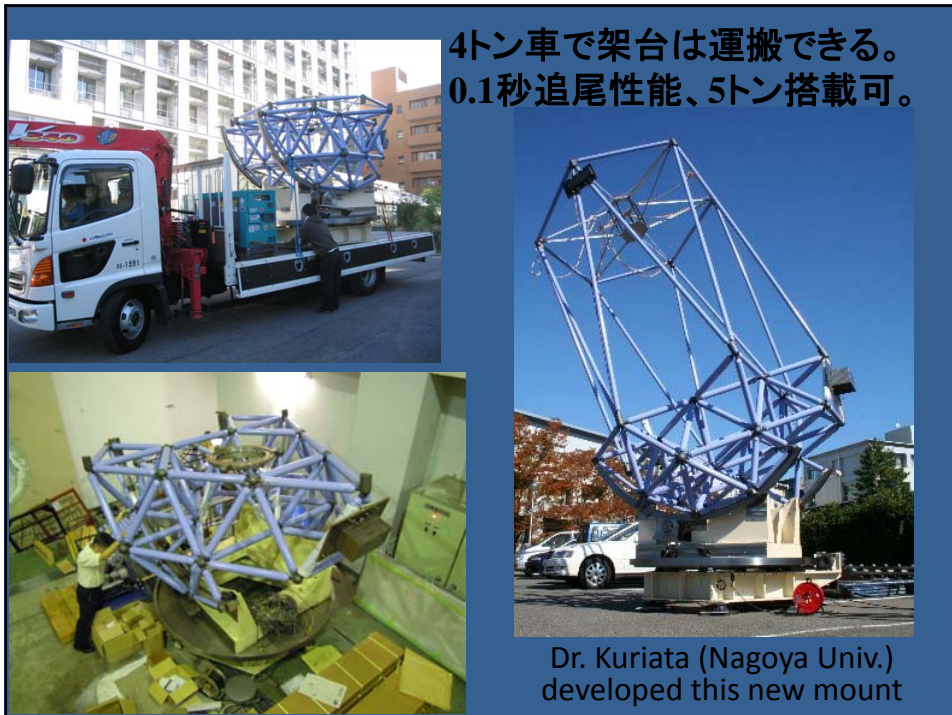
へら絞りアンテナ面の保管の状況：  
 2年以上、4枚を重ね置き。 “**粗略な扱い**”



それぞれの  
面精度は  
変わらず！

Surface accuracies of the antennas are still kept after long rough treatment like above.

Mount for suitable for our mobile use was already developed in Japan by an optical astronomer!





## 運搬

Photos from  
presentation  
by Dr. Kurita

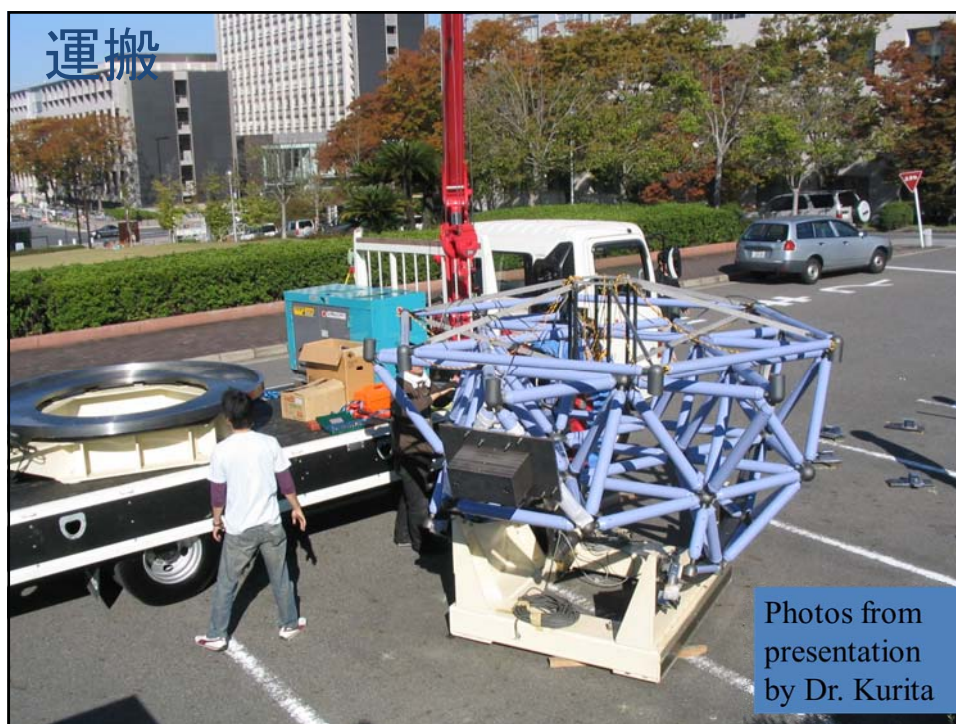


## 運搬

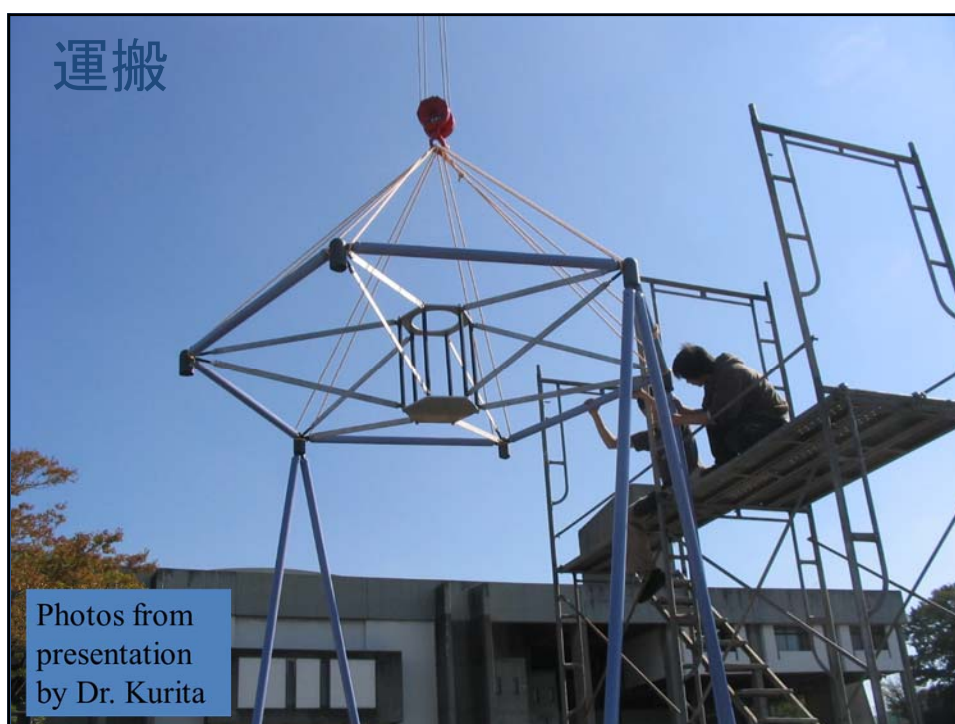
Photos from  
presentation  
by Dr. Kurita



栗田光樹氏プレゼンから







## 運搬

栗田光樹夫氏プレゼンから  
(開発当時の記録より)

Photos from  
presentation  
by Dr. Kurita



## 運搬

Photos from  
presentation  
by Dr. Kurita



## Kurita Mount (ULT-1)

- Designed for a D=2.5m optical telescope.
- Design with considering mobility.
- Ultra light weight with truss structure
  - <5 ton, about 10 % of that of conventional telescope mount --
- Cost Down
  - $3 \times 10^7$  Yen, about 10% of that of conventional mounts
- Tracking accuracy  $\sim 0.1$ asec level.
- Planned 3.8m Optical Telescope (Kyoto Univ.) is a successor of this mount.

Spec of Kurita Mount satisfies requirements of our mobile sub-mm radio telescope.  
We need no development for our telescope mount.

## まず、移動局（試作ゼロ号機）設計・製作を開始したい。

国内で230GHz帯のVLBI観測実験を行う。今後1~2年のうち。

- \* 世界初の移動型230GHz帯電波望遠鏡
- \* 世界初の230GHz帯VLBIを主目的にする電波望遠鏡
- \* 国内初の230GHz帯VLBIフリンジ検出を狙う。

時間で借りる“共同利用望遠鏡”でのVLBI実験では、  
実験の成功・失敗の要因分析がよくできない  
(先端VLBI実験でいつも起きる問題点)。  
=> 構造をよく知った、自前の望遠鏡があれば！

## Our First Step

小型移動局アンテナのコストダウン研究

- a.複合鏡方式等の検討。
- b.へら絞り法による鏡面作成
- c.架台部の検討

→Development of the proto type (No zero)  
mobile sub-mm radio telescope in Japan.

移動局ゼロ号機的设计・製作を  
重視して、計画を始めたい。