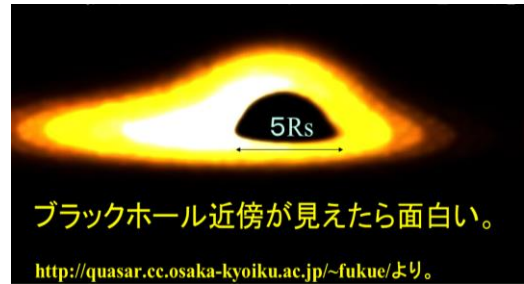
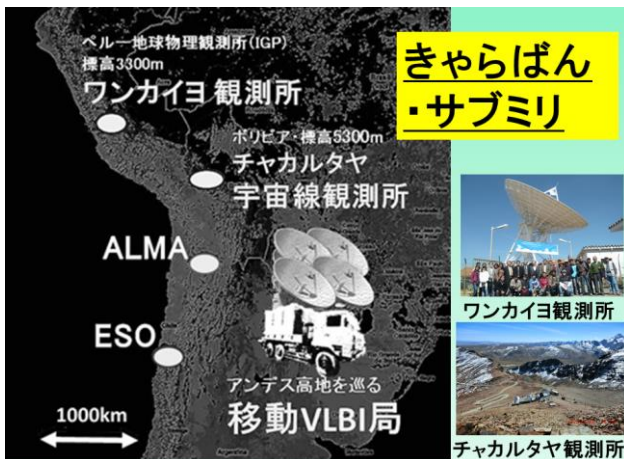


## へら絞りアンテナで ブラックホールをみる

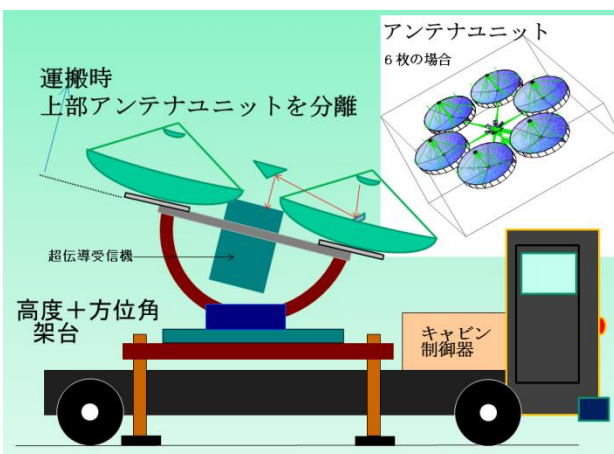
○三好真(国立天文台), 春日隆(法政大), 坪井昌人(宇宙研), 岡朋治(慶應大), 高橋真聡(愛知教育大), 他. 協力: 三ツ井健司・岡田則夫・松尾宏(国立天文台技術センタ)



概要: コストダウンしたブラックホール撮像装置「きゃらばん・サブミリ」を構想している。アンテナのコストダウンのため、へら絞り法の検討をしてきた。その結果、 $15\mu\text{m rms}$  の面精度を試験的に達成した。精度を決める要因には (1) 加工材の残留応力、(2) へら絞り加工自体の精度、(3) 金型の面精度の3つがある。これらについて検討、口径 2m の高精度アンテナ面 (テラヘルツまで対応) がへら絞り法で実現できる見通しがたった。



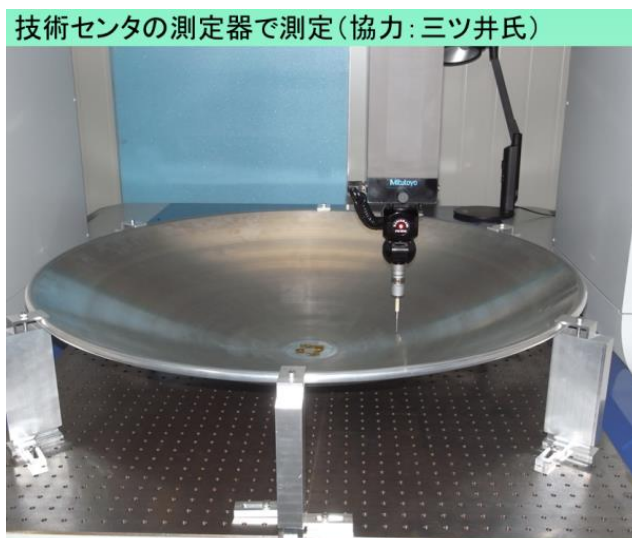
ブラックホール撮像装置「きゃらばんサブミリ」: サブミリ波の VLBI によって我々の銀河系中心ブラックホール SgrA\* などの降着円盤やブラックホール・ホライズンの撮像をめざす。南米ペルー・ボリビア・チリのアンデス高地に移動型局を含む VLBI 網を作り、1~2 千 km の短基線 VLBI (230GHz 帯) を実現し、ブラックホールの撮像を行う。移動局では数メートル口径でかつ小型軽量でなければならない。口径 2m 程度の小アンテナをユニット化し、それを複数合わせることで、数メートル口径相当にする複合鏡方式を想定している。各部をユニット化することで、現地での設置、観測後の分解を容易にする。望遠鏡自体のコストダウンを目指し、高精度アンテナ面を安価に製作できないかの検討を行ってきた。



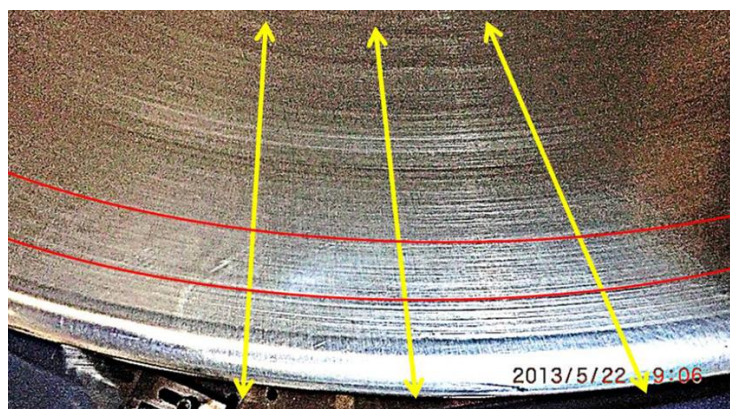
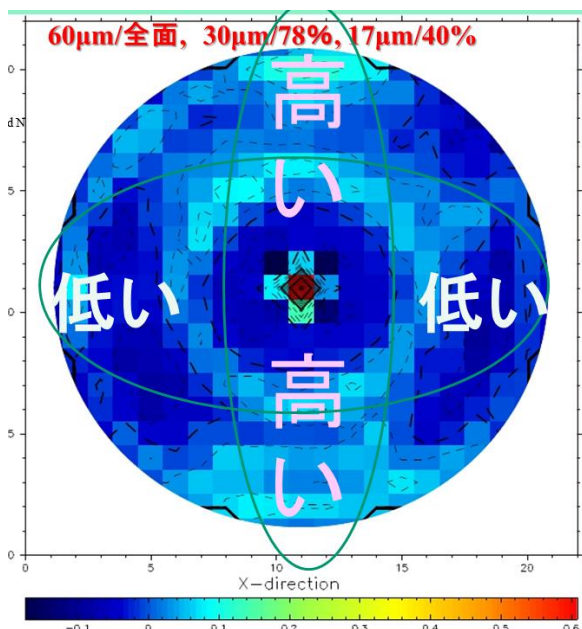
へら絞り加工とは: 金属は弾性と塑性という2つの性質をもつ。弾性は金属に力を加えたときに、反発して元にもどろうとする性質、塑性は変形したままになる性質である。金属の塑性を利用した加工技術を塑性加工技術という。へら絞り加工 (スピニング加工: Spinning と呼ぶ) は塑性加工技術の一つである。

金属材料を回転させ、専用工具 (へら押し棒) を使い、局所的な塑性変形を徐々に繰返し与え、全体の製品形状を形成していく (参考動画: <https://www.youtube.com/watch?v=Yv4pMVTwmZk>)。

アンテナとしては最大直径 3.8m の加工例がある。早稲田大師堂研では 2m 絞りアンテナ 64 枚を並べ電波干渉計を作った。我々は廉価製作できるという観点から、へら絞りに目を付け、その面精度を高精度化できるか調べてきた。



へら絞り面測定、面精度  $60 \mu\text{m rms}$  を確認: 口径 1m のへら絞りアンテナを既存の金型によって製作、その面測定を国立天文台先端技術センタの 3 次元測定機にて行った。その結果、パラボラ面に対して残差  $60 \mu\text{m rms}$  精度が達成されていることがわかった。面形状を詳しく見ると、角度に依存する大局的な高低が存在する。つまり、アンテナ面はある方向に反っている。反りの方向とアルミ板に見えるストリーク方向は一致する。素材アルミ板の形成時に発生した残留応力が、アンテナ面を反らしていると推測した。一般に残留応力は素材を熱加工(焼き鈍し)することで、軽減できる。

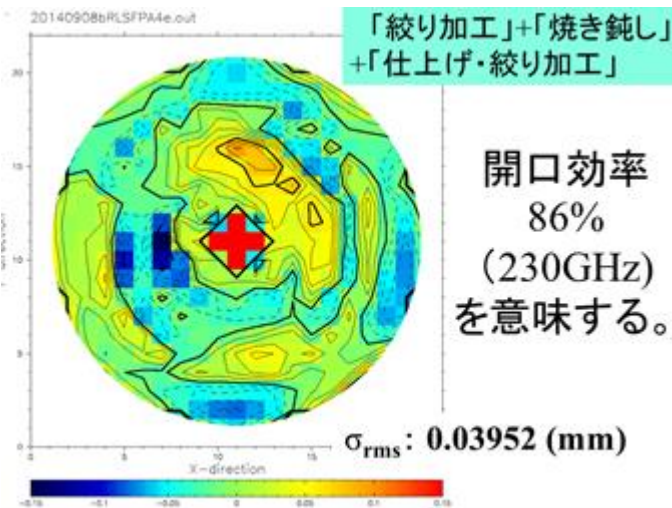
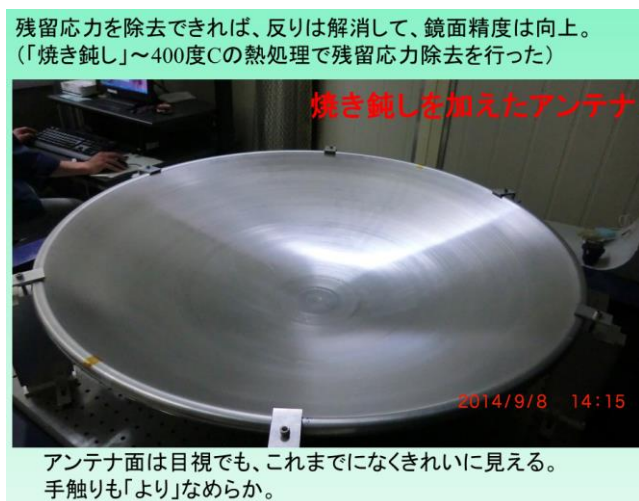


反りはアルミ板のストリーク  
(黄色矢印の方向)に沿っている

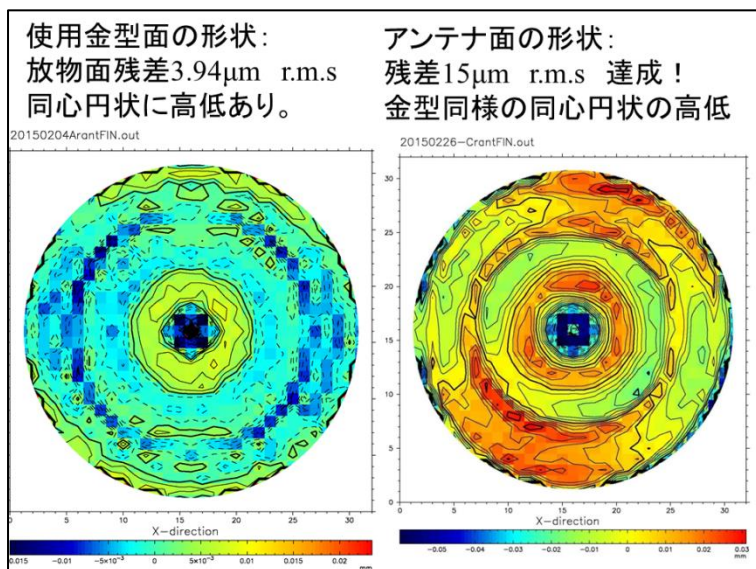
焼き鈍し加工: 焼き鈍しを実際に行い、検証を行った。へら絞りでパラボラ上に形成したあと、縁の加工はせずに金型から取り外し、約一日の焼き鈍しを行った。翌日、金型にアンテナ面をあて、再度のへら絞り加工を加えて、縁を丸めて加工、「へら絞り」+「焼き鈍し」によるアンテナを作成した。目視・



手触りにおいても、面は「絞り加工」だけの場合に比べて、なめらかにみえた。実際に 3 次元測定すると、角度依存の大局的な反りを解消し、パラボラ面に対して残差  $40\mu\text{m rms}$  となった。この数字は  $230\text{GHz}$  での開口効率  $86\%$  を意味する。我々の当初目標性能を遥かに超える値である。ただし、残差には半径に依存する高低が現れてきた。今度は金型の特性らしき半径依存の凹凸がみえてきた。これは以前の絞り加工だけのアンテナ面の残差にも存在している。おそらく、金型面自体がもつパラボラ面からのずれであると思われた。



**高精度金型実験：**そこで、金型面形状と加工アンテナ面の両方を測定して比較することにした。これまでの  $1\text{m}$  口径の金型は重量数百  $\text{kg}$  になるため、測定の実行は難しい。そこで、口径  $30\text{cm}$  の金型を高精度加工して利用することにした。金型は放物面に対して残差  $4\mu\text{m rms}$ 、一方、へら絞り+焼き鈍しを行ったアンテナ面は残差  $15\mu\text{m rms}$  となった。面形状を比較すると金型面・アンテナ面ともに同心円状の高低があり、対応し合っていることがわかる。



まとめ：  
 へら絞りで口径  $2\text{m}$  のテラヘルツ用アンテナ (面) が安く製作できる。ポイントは、

- (1) 素材アルミ板：残留応力による反りが発生。焼き鈍しで除去すればよい。
- (2) へら絞り加工における工作精度：問題なし。既に数  $\mu\text{m rms}$  より小さい。
- (3) 金型面の精度：金型をミクロン精度で作れば良い。へら絞りはその面形状を忠実に転写する。

**参考文献：**

へら絞り法によるコストダウン・短ミリ波帯アンテナの検討— 事象の地平線観測に向けて、三好 真，岡田則夫，三ツ井健司，イシツカホセ，春日 隆，国立天文台報 第 16 巻，21 - 42 (2014)

<http://www.nao.ac.jp/contents/about-naoj/reports/report-naoj/16-2.pdf>

(ただし本論文は焼き鈍し以前のまとめ。焼き鈍し・高精度金型実験についてはのべてありません)