

気球VLBIの検討報告

土居明広¹、河野裕介²、小山友明²、本間希樹²、秋山和徳³、木村公洋⁴、
 (気球VLBI検討協力者：鈴木駿策²、芝井広⁵、岡田望⁴、小川英夫⁴、石村康生⁶、坂東信尚⁷、福家英之⁸、莊司泰弘⁸、
 吉田哲也⁸、後藤健⁹、佐藤英一⁹、成田正直¹、紀基樹¹、坂井真一郎⁷、田中宏明¹⁰、坂本啓¹¹)
¹宇宙科学研究所宇宙物理、²国立天文台水沢VLBI観測所、³東京大学、⁴大阪府立大学、⁵大阪大学、⁶JAXA構造G、⁷JAXA制御G、
⁸JAXA大気球G、⁹JAXA材料G、¹⁰防衛大学校、¹¹東京工業大学



要旨

成層圏は、高周波数の電波帯の天文観測にとって、大気の影響をほぼ完全に避けることのできるサイトである。将来の高周波電波干渉計/VLBIにとって、地上の電波望遠鏡・スペースの人工衛星に次いで第三の観測プラットフォームとなりうる、気球搭載型の電波望遠鏡VLBI局の検討をおこなっている。成層圏におけるVLBI観測はこれまで実現されていない。本講演では、地上VLBI局との基線の間で22 GHz帯でのフリッジ検出を目指す気球ミッションの概要、概念検討、開発計画と開発状況をご報告する。北海道広尾郡大樹町のJAXA大樹航空宇宙実験場からの放球を想定し、選定したターゲット天体の観測に必要な、電波望遠鏡システム・VLBIシステム・ゴンドラシステムの構成と性能を検討した。周波数標準と高速データ記録系を含めた、VLBI局として必要なコンポーネントはすべて搭載するうえ、電源供給・局位置決定・姿勢決定・姿勢・指向制御などの飛行体に必要なシステムを500 kgのペイロードの中で実現する。気球VLBIを実現するための技術的課題は、(1)指向精度、(2)主鏡の鏡面精度、(3)VLBI高速データ処理系の排熱、(4)周波数標準系の搭載、(5)局位置精度などがあげられる。本講演では、これらの課題とそれに対する開発検証方法の一部についても議論する。今年度は、搭載性と技術的成熟度を考慮して選定したBVAタイプのOCXOについて、気球環境での加速度環境変化に対する周波数安定度の評価・制御の実験を臼田宇宙空間観測所でおこなう(JAXA搭載機器開発経費)。また、製作中の気球搭載用電波望遠鏡を用いてのホログラフィー地上実験を今年度おこなう準備を進めており(JAXA戦略的開発経費)、将来の衛星搭載を見据えて別途開発されている形状制御スマートリフレクタを評価する。また、システム全体を統括する搭載PCのリアルタイム制御性を確保するための技術検討もおこなっている。2013年11月14-15日におこなわれる大気球シンポジウムへ向けて、ミッション提案および再来年度の放球の申請をおこなった。本検討は、将来ミッションの種の1つとしてのフィージビリティスタディと、VLBIグループの人材・開発能力を培う土壌になるようにおこなっている。

ミッションの概要

活動の大目標	成層圏サブミリ波 VLBI・テラヘルツ干渉計・衛星ミッションの将来計画の検討
本ミッションの目的	次の段階「230 GHz 気球VLBI局」を見据えた、低周波版フライト実機(=初号機)によるフィージビリティスタディ
本ミッションの成功基準	22 GHz フリッジ検出(世界初の成層圏 VLBI)
放球場所	JAXA 大樹宇宙実験場(北海道帯広)
放球日時	2015年9月1日前後の明け方(正午頃 海上にて回収)
レベルフライト要求時間	3時間
高度	35 km 以上
重量(バラスト含まず)	500 kg
電力	500 W
総工費	2000 万円
目標天体	3C 84 (相関強度 ~ 10 Jy) 連続波
観測中の仰角	40 deg 前後
観測中の方位角	太陽方向に対しほぼ反対(北西)

課題と解決策

気球-ゴンドラ系の振り子環境(振幅 0.1° 、周期 ~ 20 秒間)	
(1) 周波数標準源の周波数ゆらぎ	高精度姿勢センサによる変動重力環境モニターを用いた、変動周波数を補償する技術の開発
(2) ポインティング(姿勢)ゆらぎ	(長空用)スタートラッカーの開発と衛星搭載用ファイバー光ジャイロの搭載
(3) 位置ゆらぎ	高精度姿勢センサ出力からの位置変動推定と、多次元空間フリッジセンサーアルゴリズムの開発
気球高度の物理環境(低真空 ~ 5 hPa、気温 -50°C)	
(1) 大電力機器の熱放散	与圧容器(1気圧)に入れ、(I) 内部では対流による高い熱伝達効率を得、(II) 放射冷却と対流冷却の低効率
(2) 放射冷却と対流冷却の低効率	(I) 外気温との大きな温度差を大きな表面積で接続する
高周波の搭載電波望遠鏡(初号機の搭載機器には該当しない)	
(1) 軽量鏡の鏡面精度	将来のスマートリフレクタによる形状制御(初号機では、衛星搭載を目指した形状可変鏡のホログラフィー「地上試験」をおこなう(2013年12月))の検討
(2) 冷却系の搭載	将来のSIS受信機搭載に必要な技術(He冷却、本ミッションでは搭載しない)をBSMILES、FITE等の実績に学ぶ

VLBI を気球でおこなう意義

(1) スペースミッションとの類似性	大気の影響がまったくなくと言ってよく、ほぼスペース環境@電波帯。将来の高周波干渉計の究極のベストサイト。衛星システムとの類似(熱・真空環境、機器構成、運用形態)。ロケットの厳しい打上環境条件(振動・音響・全寸)は無し。最大2-4トンのペイロード。最大100日間の飛行時間。
(2) ミッションサイクルの短さ(<3年)	最新サイエンスに迅速に対応可能。地上の最新技術・COTSを迅速に利用可能。トライアンドエラーの開発手法(回収→改良→再打上)。大学院生・若手研究者の研究期間とマッチ
(3) トータルコストの低さ(2)+(3)→高いコストパフォーマンス	～1000万円～5億円/ミッション(打上経費込み)。気球ミッション:～5億円/100日=500万円/日。衛星ミッション:～300億円/3年=2700万円/日
(4) 波及効果	高精度位置決定・姿勢制御・大容量データ処理、屋外用スタートラッカー等、気球 VLBI は技術的に最も高度な気球ミッションの1つとなる → 全波長域の「気球天文台群」への基盤技術に。将来の衛星ミッションのテストベッド(e.g. BLAST → Herschel)

周波数標準

必要周波数安定度 アラン分散 $1\text{E}-13$ @ $t=1-20\text{sec}$ (コヒーレンスロス5%)



候補周波数標準
Oscilloquartz OCXO8607
SC Cut BVA 型

気球環境→加速度の影響の評価が重要
通常Tipover testで評価
OCXO8607 g-sensitivity 5E-10
周波数偏差df/f
=2E-3x5E-10 ~ 1E-12: 観測に影響
→評価試験、補正方法を計画

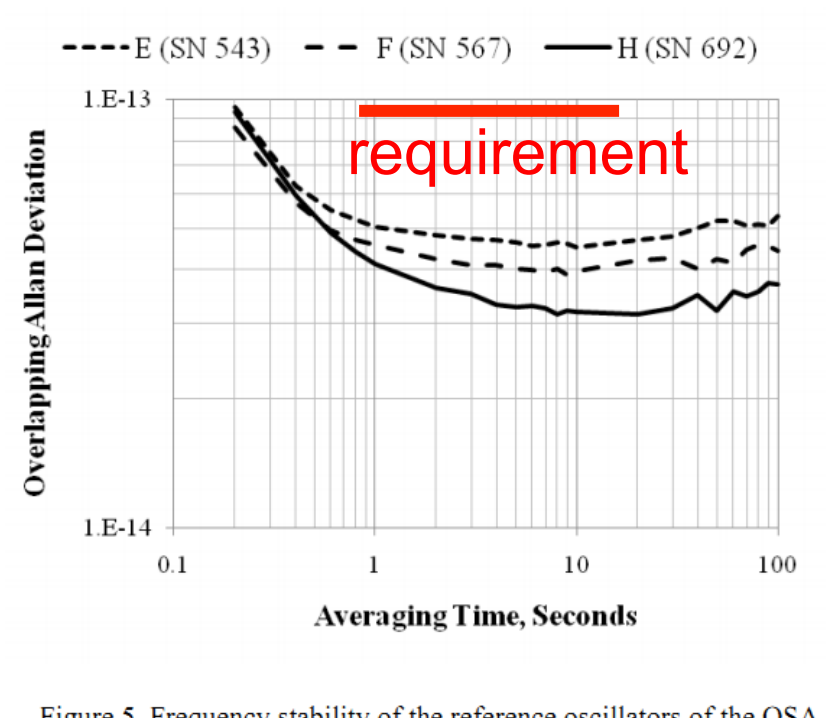
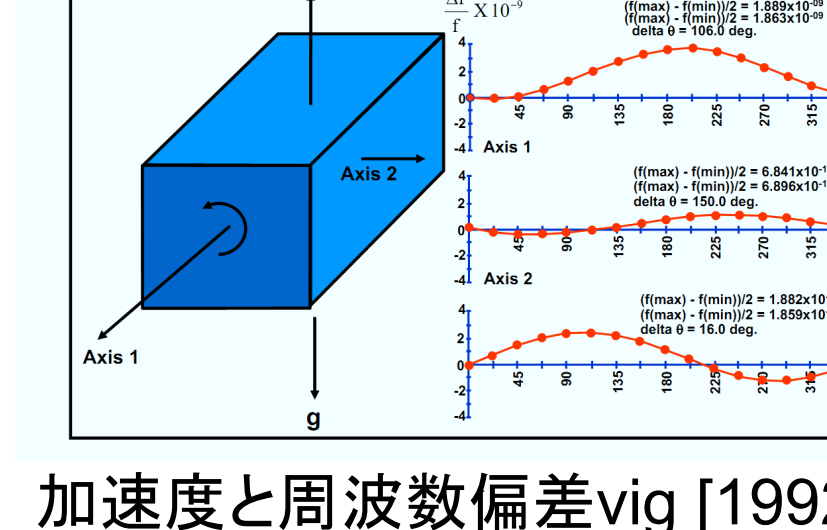


Figure 5. Frequency stability of the reference oscillators of the OSA

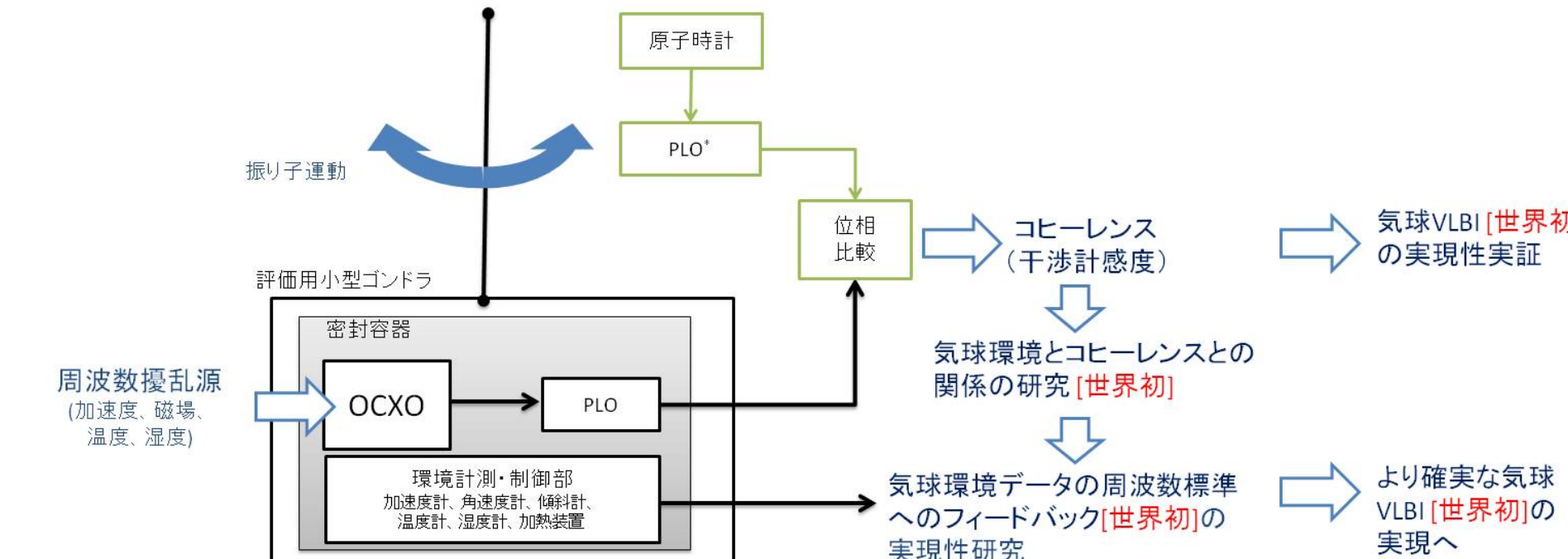
2-g Tipover Test (Af vs. attitude about three axes)



加速度と周波数偏差vig [1992]

OCXO周波数安定度評価試験

目的
気球搭載予定の周波数標準を小型ゴンドラに搭載し、振り子運動による加速度変動を与え、周波数の変動を計測する。またコヒーレンスを得るための補正方法の実証を行う。



搭載機器(TBD)
 ・周波数標準 OCXO8607
 ・加速度計 Jewell社LMSサーボ型
 ・2軸傾斜計 Jewell社LCF 2000
 ・角速度計 JAE社JG-35FD/JG34
 ・STT 検討中
 ・PLDRO NEYXN microwave社

位相比較装置
 ・参照周波数標準 JAXA臼田観測所水素メーザ
 ・参照SYNTH Agilent8257D
 ・OCTAD (OCTAVEADC)
 ・計測ソフトウェア FFT位相計測型、豊田(2013)

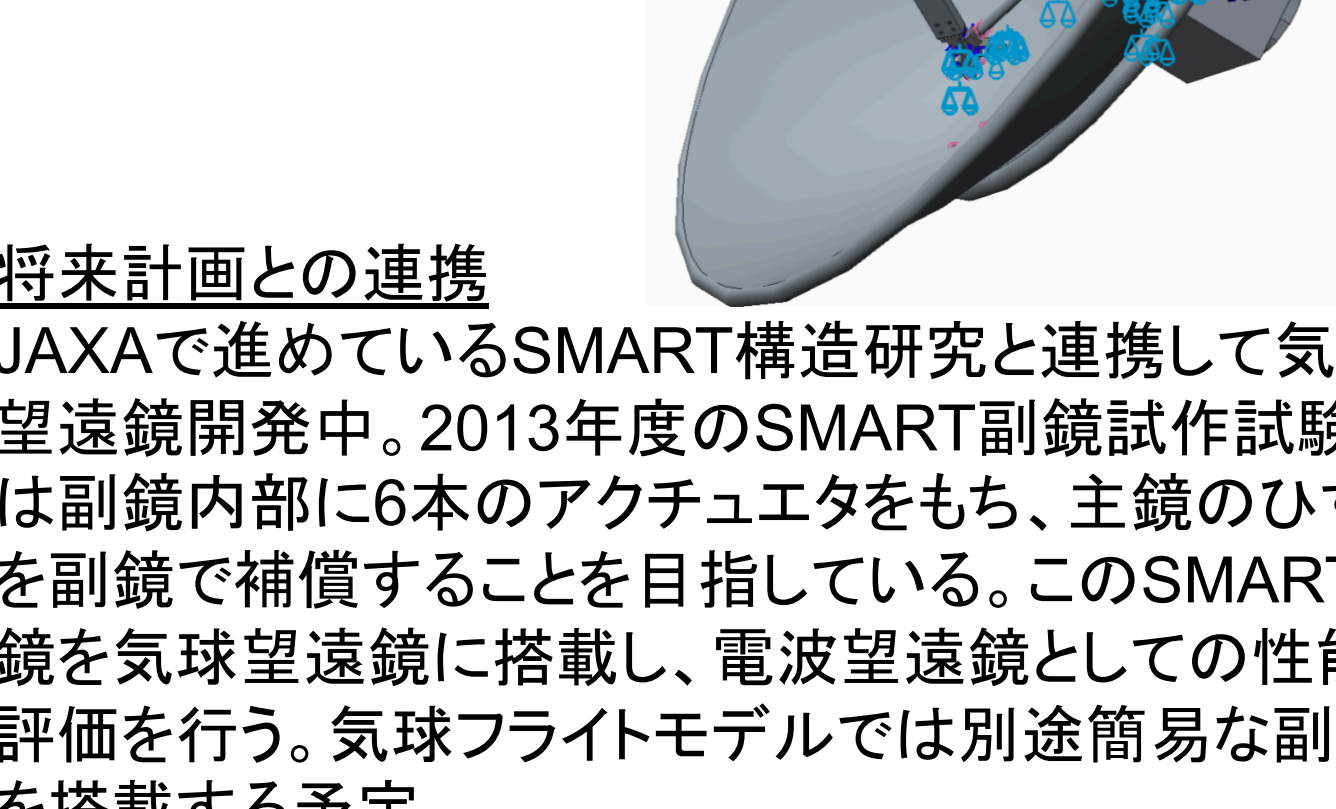
VLBI 局としての性能

※ 赤枠は入力値
白枠は計算値

項目1	性能	単位	項目2	性能	単位
周波数	22.1	GHz	波長	0.0136	m
口径	1.5	m	HPBW	31.1	arcmin
鏡面精度	0.25	mmRMS	鏡面能率	0.948	
光学系開口能率	0.693		ブロッキング能率	0.952	付加雑音
鏡面能率	0.948		スピルオーバー能率	0.938	付加雑音
ブロッキング能率	0.952		有効開口能率	0.587	
スピルオーバー能率	0.938		ポインティングエラー(振り子)	6.0	arcmin
有効開口能率	0.587		ポインティングエラー(姿勢決定)	0.08	arcmin
ポインティングエラー(振り子)	6.0	arcmin	ポインティングエラー(姿勢制御)	1.5	arcmin
ポインティングエラー(姿勢決定)	0.08	arcmin	ポインティングエラー(5点法校正誤差)	5.2	arcmin
ポインティングエラー(姿勢制御)	1.5	arcmin	ポインティングエラー	12.8	arcmin
ポインティングエラー(5点法校正誤差)	5.2	arcmin	ポインティングゲインロス	0.372	
ポインティングエラー	12.8	arcmin	雰囲気温度 Tamb	223	K
ポインティングゲインロス	0.372		LNA 物理温度 T_LNA	223	K
雰囲気温度 Tamb	223	K	宇宙背景放射 (CMB)	2.7	K
LNA 物理温度 T_LNA	223	K	主鏡反射損	0.009	dB
宇宙背景放射 (CMB)	2.7	K	副鏡反射損	0.009	dB
主鏡反射損	0.009	dB	ホーン窓材透過損	0.009	dB
副鏡反射損	0.009	dB	ホーン損失	0.067	dB
ホーン窓材透過損	0.009	dB	POL損失	0.045	dB
ホーン損失	0.067	dB	同軸導波管変換損失	0.067	dB
POL損失	0.045	dB	LNA 等価損失	0.5	dB
同軸導波管変換損失	0.067	dB	受信機雑音温度 Trx	187.5	K
LNA 等価損失	0.5	dB	Tsys	214.8	K
受信機雑音温度 Trx	187.5	K	SEFD	571783	Jy
Tsys	214.8	K	記録速度	8.192	Gbps
SEFD	571783	Jy	量子化レベル	1	bit
記録速度	8.192	Gbps	連続波ch数	1	ch
量子化レベル	1	bit	帯域幅	4096	MHz
連続波ch数	1	ch	相関能率	0.64	
帯域幅	4096	MHz	量子化効率	0.96	
相関能率	0.64		積分時間	1	sec
量子化効率	0.96		連続波基線感度(気球-VERA) 1σ	1.61	Jy
積分時間	1	sec	連続波基線感度(気球-苫小牧) 1σ	2.39	Jy
連続波基線感度(気球-VERA) 1σ	1.61	Jy	連続波基線感度(気球-茨城) 1σ	1.06	Jy
連続波基線感度(気球-苫小牧) 1σ	2.39	Jy	メーザ分光ch数	32768	ch
連続波基線感度(気球-茨城) 1σ	1.06	Jy	速度幅	1.697	km/s/ch
メーザ分光ch数	32768	ch	メーザ-基線感度(気球-VERA) 1σ	291	Jy
速度幅	1.697	km/s/ch	メーザ-基線感度(気球-茨城) 1σ	191	Jy
メーザ-基線感度(気球-VERA) 1σ	291	Jy			
メーザ-基線感度(気球-茨城) 1σ	191	Jy			

電波望遠鏡部

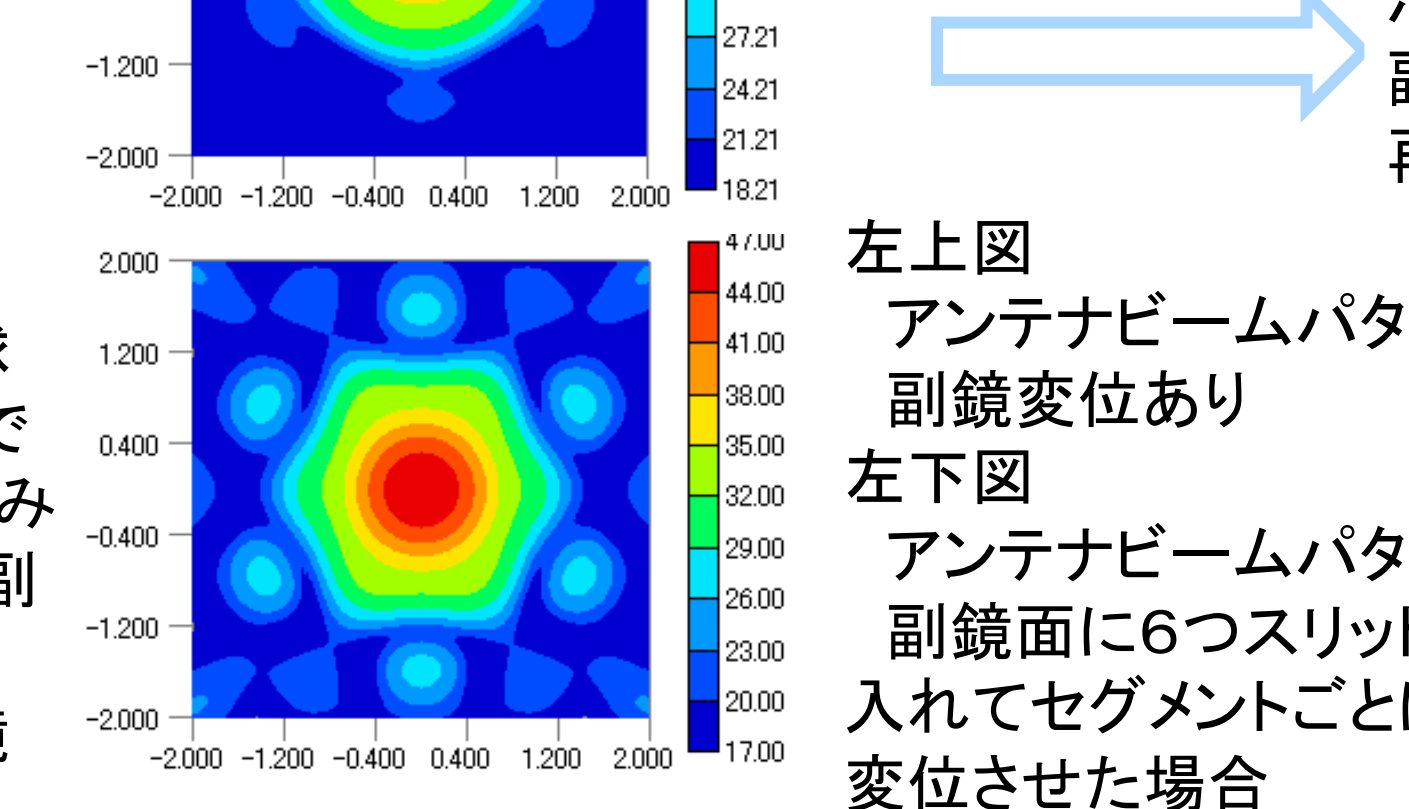
概要
 口径 1500m
 焦点距離 488mm
 材質 アルミニウム
 Az/EI マウント方式



将来計画との連携
 JAXAが進めているSMART構造研究と連携して気球望遠鏡開発中。2013年度のSMART副鏡試作試験では副鏡内部に6本のアクチュエータをもち、主鏡のひずみを副鏡で補償することを目指している。このSMART副鏡を気球望遠鏡に搭載し、電波望遠鏡としての性能評価を行う。気球フライトモデルでは別途簡易な副鏡を搭載する予定。

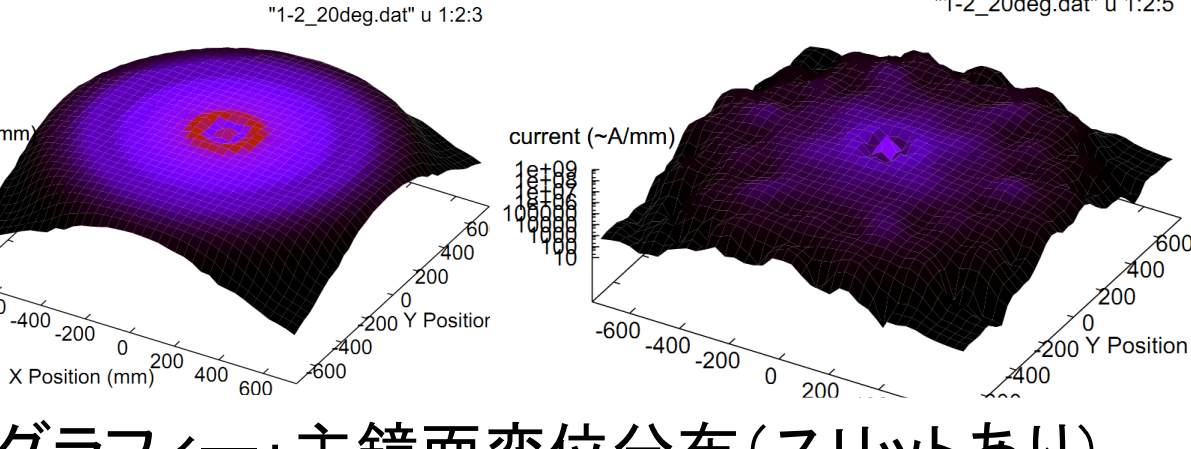
ホログラフィーシミュレーション

GRASP(電磁界解析ソフトウェア)でSMART副鏡の変位を模擬

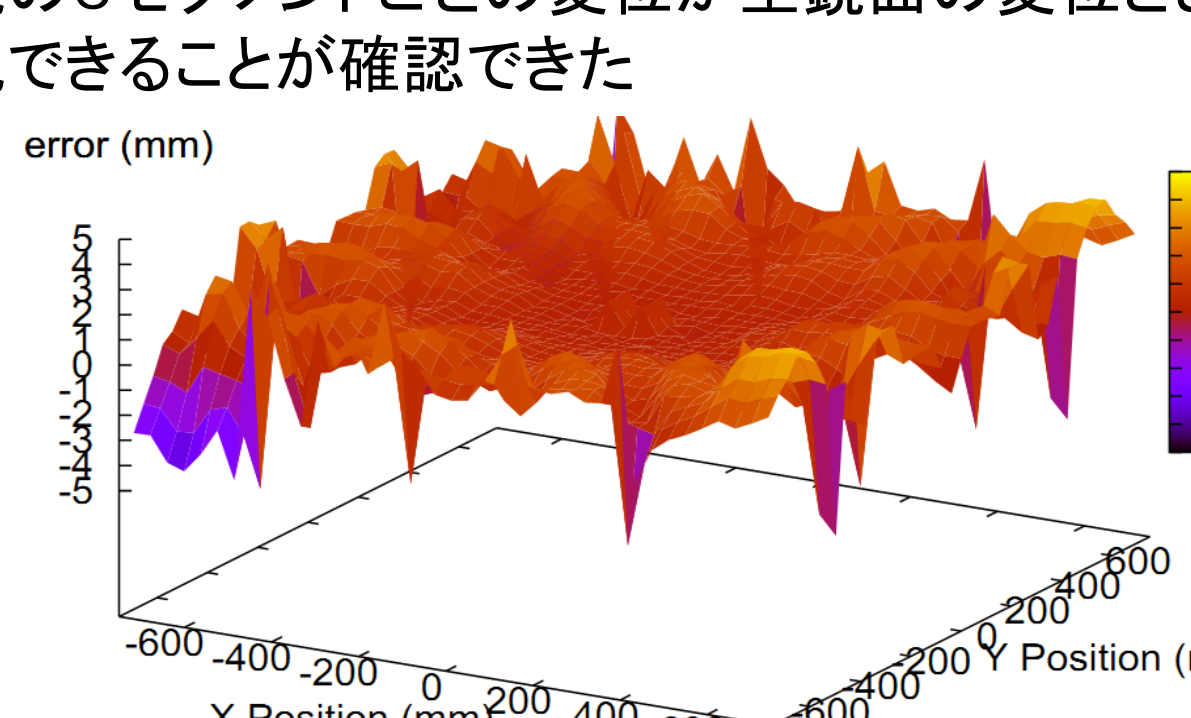


ホログラフィー処理
 主鏡の変形に変換して評価

ホログラフィー: 主鏡面電流振幅分布

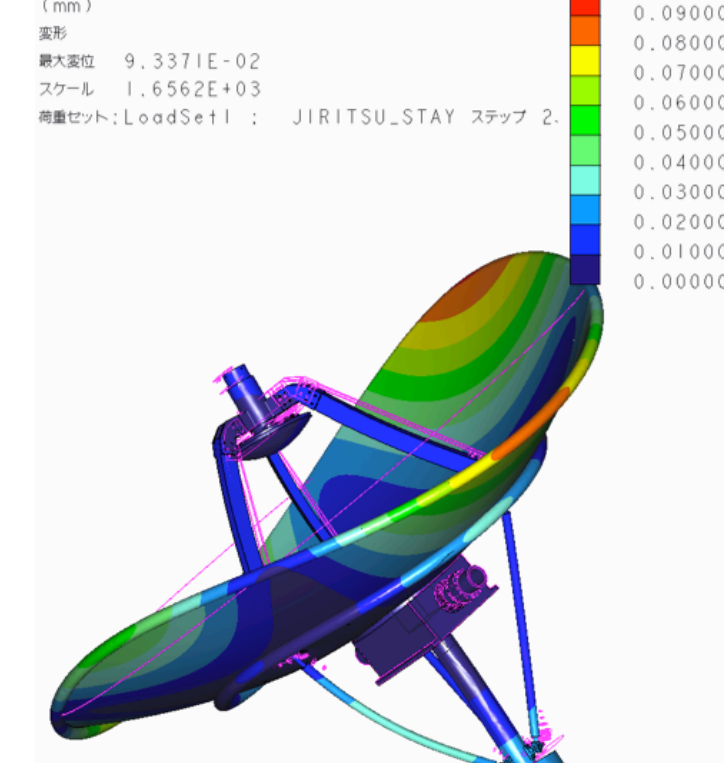


ホログラフィー: 主鏡面変位分布(スリットあり)
 副鏡の6セグメントごとの変位が主鏡面の変位として再現できることが確認できた

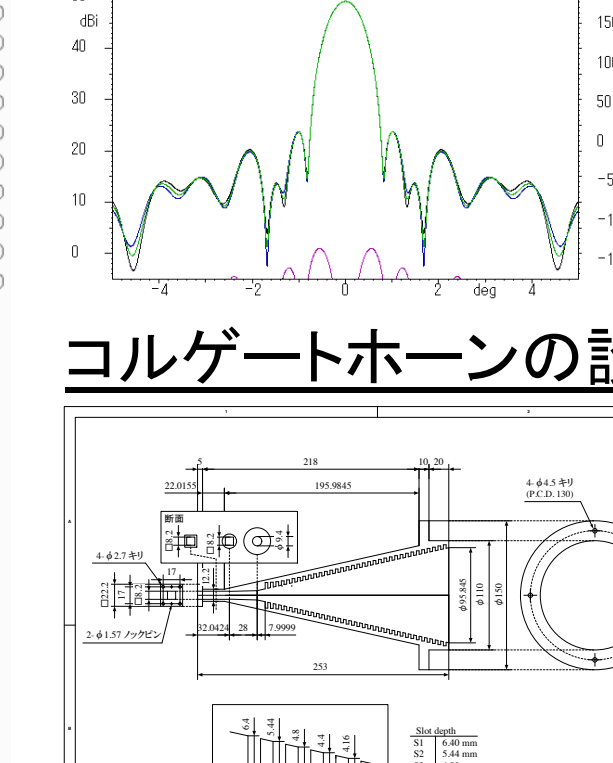


左上図 アンテナビームパターン
 副鏡変位あり
 左下図 アンテナビームパターン
 副鏡面に6つスリットを入れてセグメントごとに変位させた場合

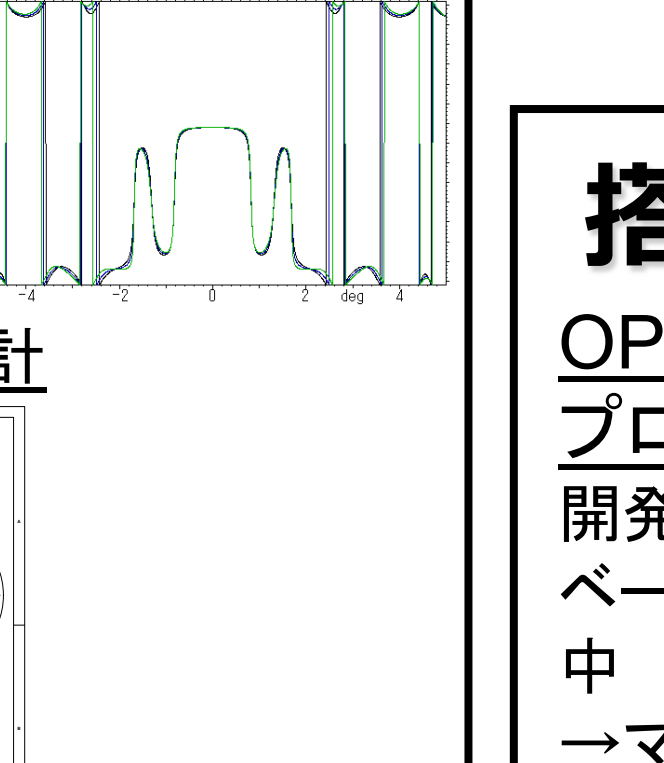
構造解析(静荷重)



光学系設計

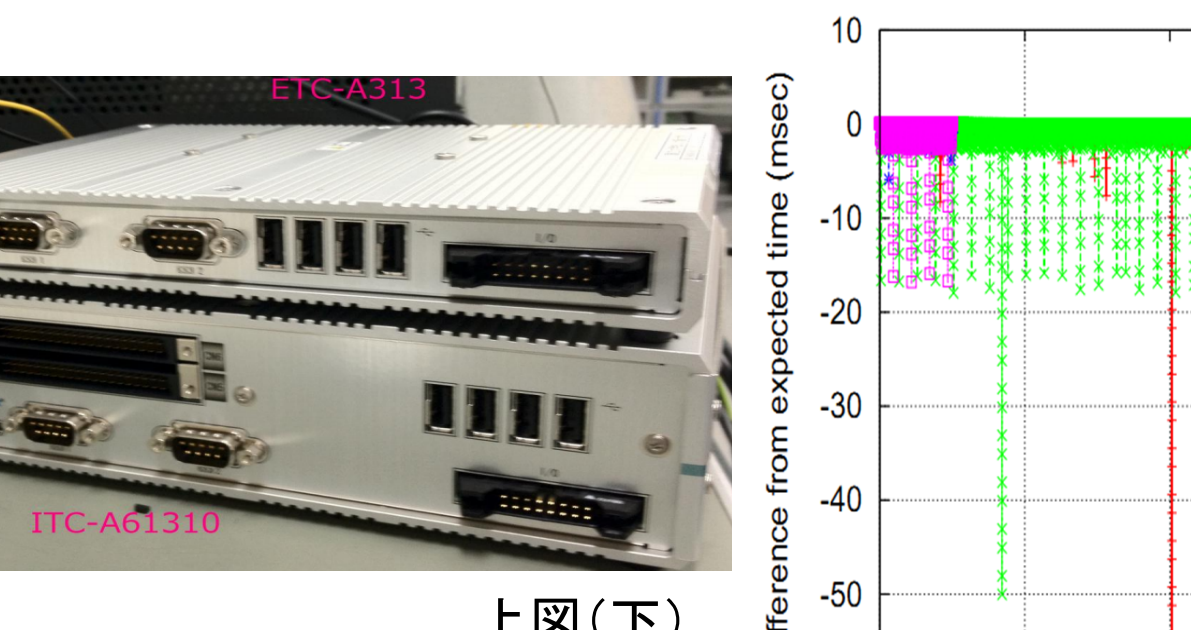


コルゲートホーン設計



搭載PC

OPC(Operation PC)
 プロセス遅延試験
 開発の簡素化を目指しLinuxベースPCの気球搭載を検討中
 →マルチタスクOSによるプロセス遅延が問題となるか?



上図(下) 気球搭載検討中車載用PC Interface社製Atom Z520PT Debian 5.0 (大阪大自2011)

左図: パケット遅延試験結果

DUTのPCからLinuxシステムコールをもちいて2.5msec周期でUDPパケットを他のPCに送信し、受信タイミングのずれをより高精度なCPUtimeで計測(1000秒の計測を3回試行)。その結果、数10msec程度の遅延がたびたび発生し、70msec近い遅延もまれに発生することが明らかとなった。姿勢制御等の気球運用でこれらの遅延が発生することを想定してシステム設計を行うことが重要であることが分かった。

