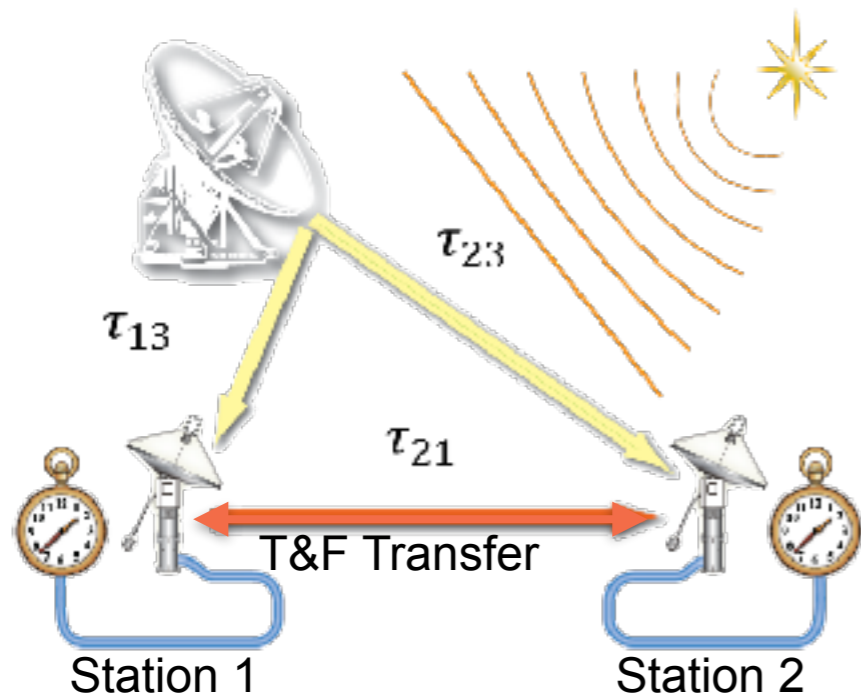


広帯域フィードの開発(XIX:終句)

氏原秀樹、関戸衛、市川隆一(NICT・時空標準)



	光学系	フィード位置	複数フィードの同時使用
VGOS	リングフォーカス	2次焦点	不可
SKA	オフセットカセグレン	2次焦点	不可
Gala-V	カセグレン	2次焦点	可
BRAND	カセグレン	1次焦点 (2次焦点)	考慮せず

カセグレン焦点での広帯域化は世界唯一

Gala-V(ガラパゴスVLBI)：遠隔地間で光格子時計をVLBIで比較(T&F Transfer)

→周波数比較精度の向上のためにフィードの広帯域化で感度向上を図る

ただし鹿島34mアンテナと小型可搬局(MARBLE)を「感度/コスト」で最適化

目標開口能率50%程度、常温受信機、小型局は1.5m/1.6mパラボラから2.4mカセグレンに改修

$$SNR = \frac{\pi S}{8k} D_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2 B_w \tau}{T_{sys1} T_{sys2}}}$$

S: 電波源のフラックス, k: ボルツマン定数, B: バンド幅, τ: 積分時間

D1, D2 : 局1, 局2のアンテナの直径, η1, η2 : 局1, 局2のアンテナ開口効率

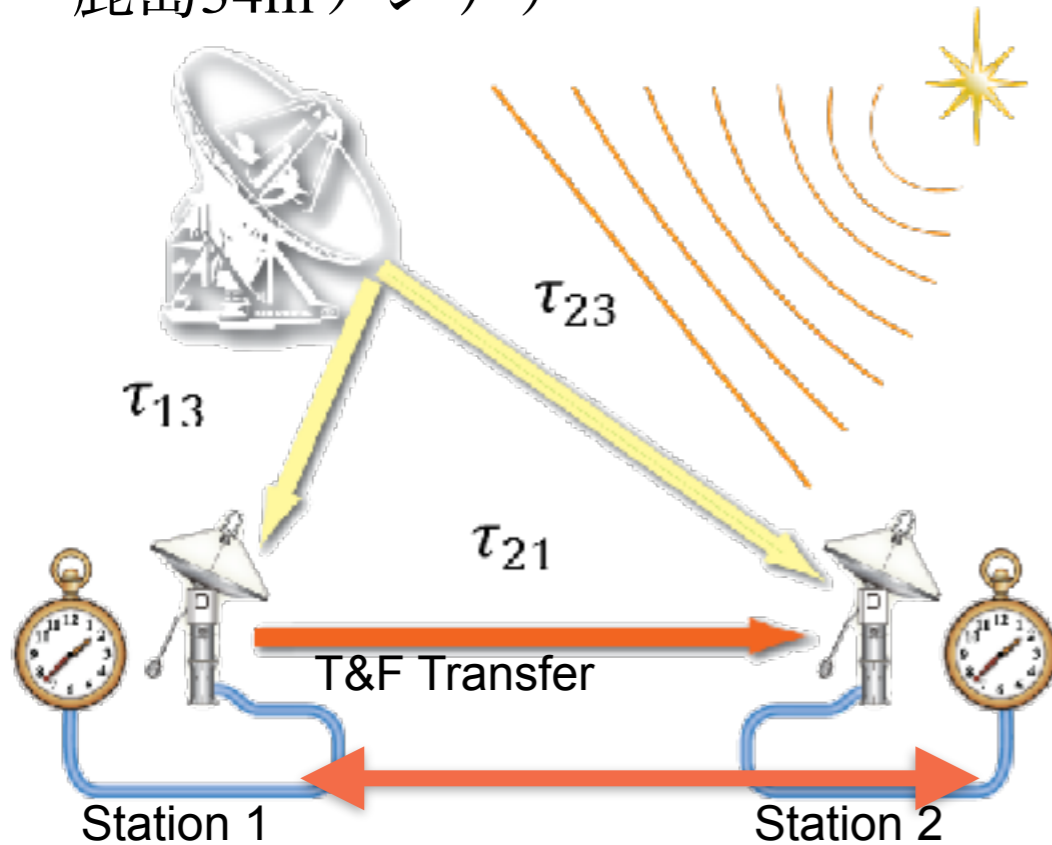
・小型局のD：1.5倍、フィードの交換でη：2倍以上かつ雑音低下→SNR：=約3倍向上

・帯域幅が1桁増えると約3倍向上

システム全体で1桁近く感度が向上、同じSNRなら積分時間τの短縮により多く天体が観測できる

1. 国際基線でのVLBI T&F Transfer 実験

鹿島34mアンテナ



MARBLE1(2.4m)
@Medicina電波観測所(伊)

MARBLE(2.4m)
@NICT小金井本部

遠隔地間での光格子時計(10^{-18})の比較技術

- ・ 光ファイバ：時計と同程度に高精度だが長距離ではアンプが必要
- ・ 衛星双方向：回線使用料と免許が必要
- ・ GPS：簡便だが軌道情報が途切れる
- ・ VLBI：感度を底上げする大型アンテナの維持費が問題
→主局をVGOSアンテナを流用可能

鹿島34m最後の成果

「広帯域VLBI システムの開発と測地・周波数比較実験の報告」

関戸衛ほか26名,測地学会誌(2018/1/29受理)

→遅延計測制度：1秒積分で0.4ps(=4e-13)程度、10秒積分で0.1ps

10万秒(約1日)の長期では1e-15で長期的にはGPSより安定

Kognaei-Medicina基線での実験：Nature Physics論文掲載(2020/10)

- ・ 基線長再現性：8870kmに対し2.4mアンテナペアで15mm
- ・ 周波数比較精度： 2.8×10^{-16} へ到達

機器仕様	偏波	サンプラ	フィルタ	RFoF
34m	2	GALAS (2A/D)	ノッチ	Optolab (2-26GHz WDM)
MARBLE1	1	GALAS	ノッチ	Emcore(2-15GHz)
MARBLE2	1	GALAS	バンク+ノッチ	E18000(1-18GHz)

鹿島34m損傷後は国土地理院の協力で主局を代替

- ・ 感度：常温受信機でも口径の大きな34mが良い
 - ・ 駆動速度：VGOSアンテナの方が速い
 - ・ 維持費：VGOSアンテナの方が安い
- 鹿島34mは自由に使えたが保守の負担大

今後の他機関への期待

- ・ 天体構造、電離層補正など誤差要因の低減が課題
- ・ 小型局への冷却受信機搭載

24時間観測、60TBのデータを5Gbps程度で転送 (1日半)
 相関処理に1週間かかるのがボトルネックだった

2. 広帯域フィードの開発

IGUANA : VSOP2の多モードホーンを始祖にした入れ子構造

- ・ IGUANA-H搭載(2013年末~) : 6.5-15GHzで使用開始

NINJA : レンズ付き多モードコルゲートホーン

- ・ 試作機(2015/7-2017/8) : S帯(2.2GHz)も狙ったらRFIに苦慮
- ・ 初号機(2017/8-) : OMTで3GHz以下のRFIを遮断・小型化

他プロジェクトへの発展

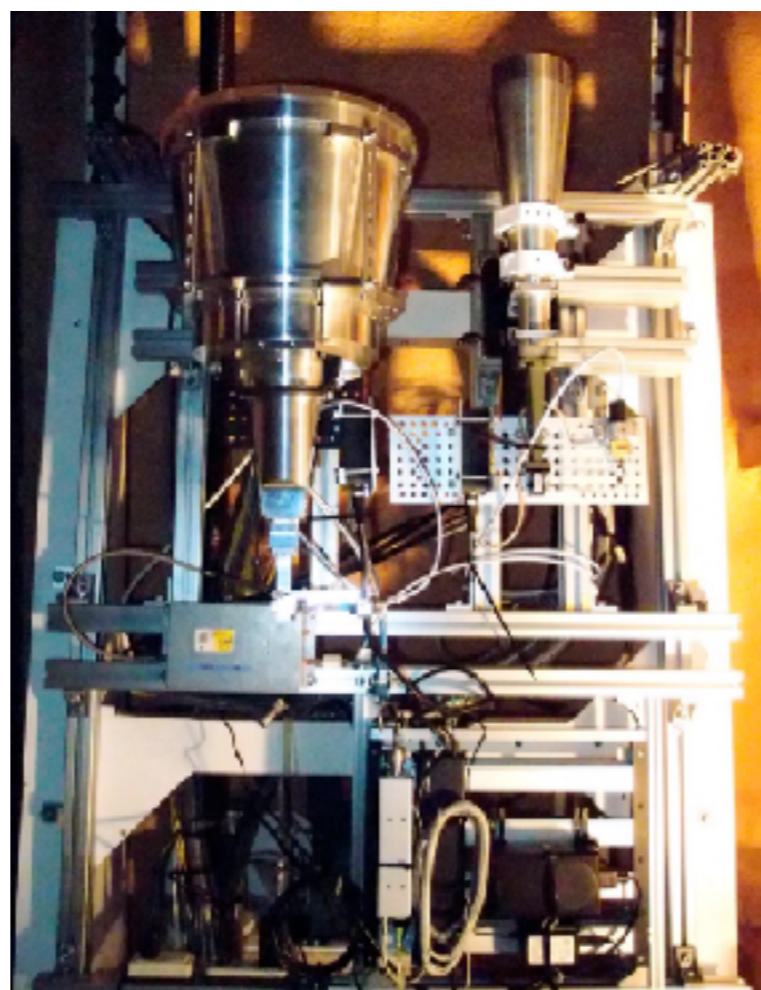
→ BRANDへの検討(1.5-15.5GHz)

→ 次世代ラジオメータの開発(15-60GHz)



NINJAフィードの基部

- ・ 34mと小型局で共通
- ・ ビーム幅を変えても開発時間が短い
- ・ OMTとともにNICT試作室でも作れる



2015.7-2017.8



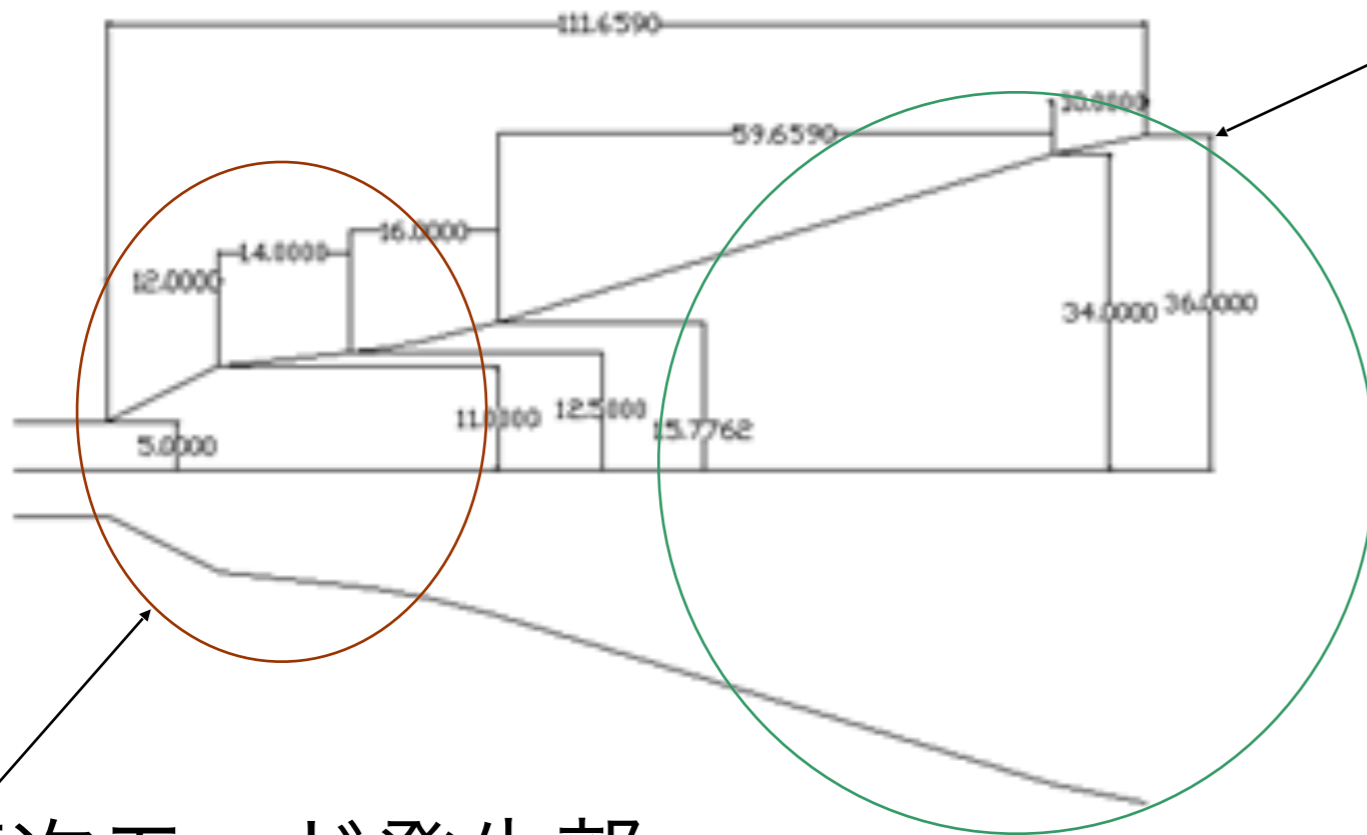
2017.8 : Sバンドを諦めて小型化

VSOP2/ASTRO-G, VERA20m, Shanghai25m用多モードホーン

- 壁に溝が不要なので薄肉、軽量
- メタノールメーザ6.7/12.2GHz同時受信などの広帯域化
- 鹿島34mの広帯域フィードへ発展

VSOP2 22GHz horn

ビーム幅の調整



高次モード発生部

OMTは別途設計

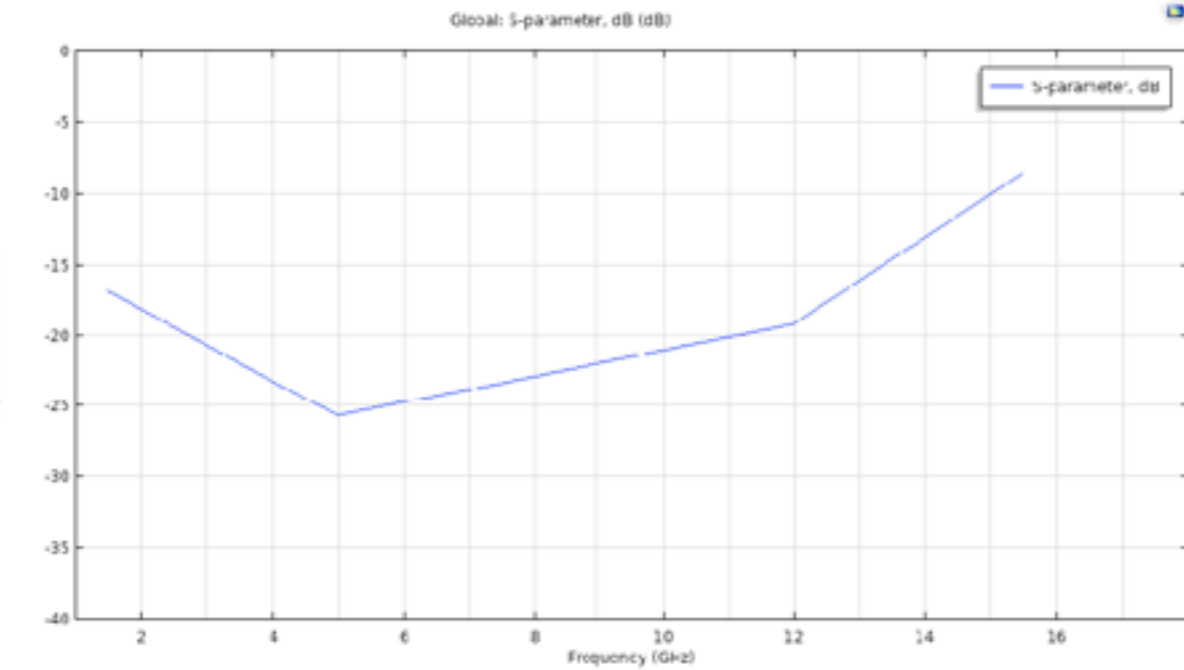


次世代ラジオメータに活用(18-33GHz)

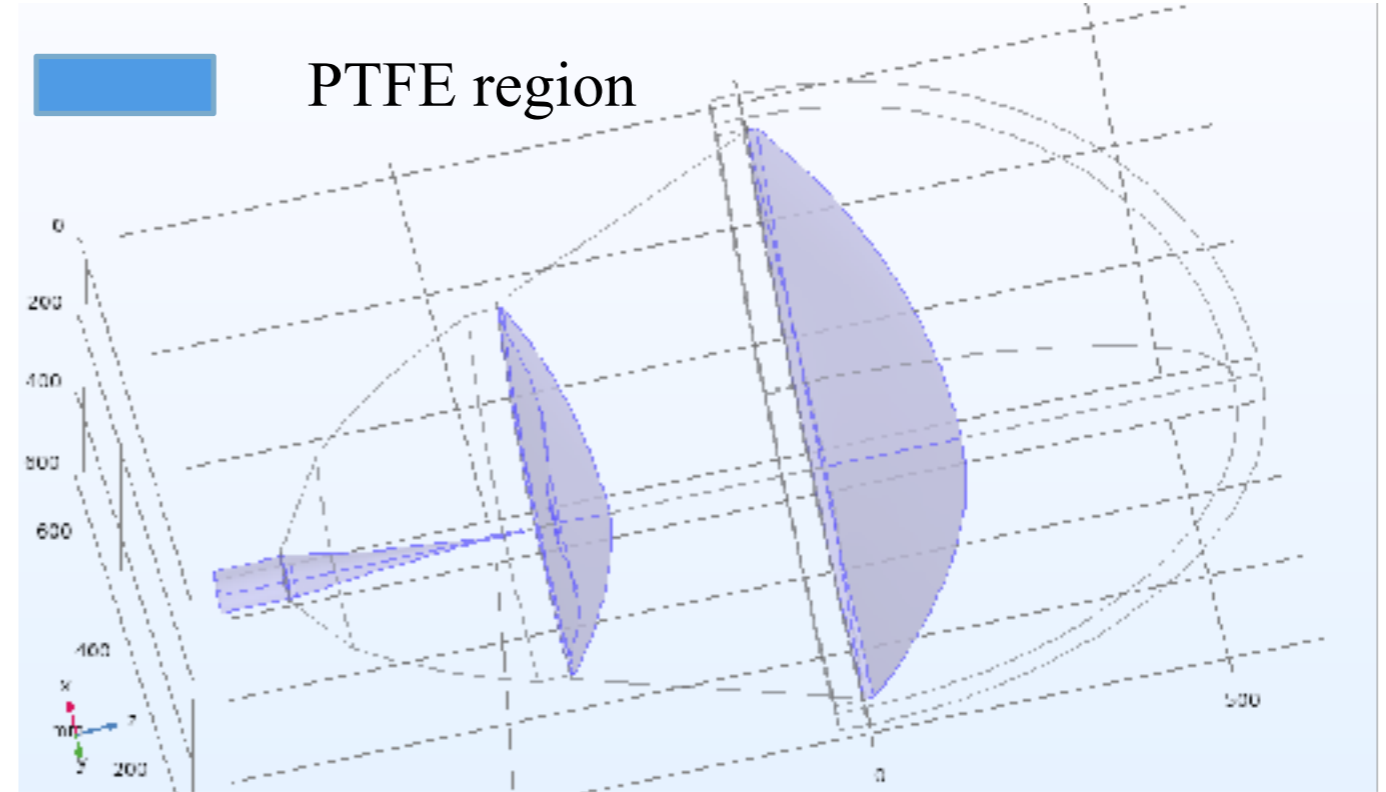
BRANDでのカセグレンアンテナ用フィードの検討

(the BRoad bAND European VLBI Network (**BRAND** EVN))

Test model of the symmetric boundary conditions, D=580mm, L=800mm, 2 lenses, no corrugation.



反射損



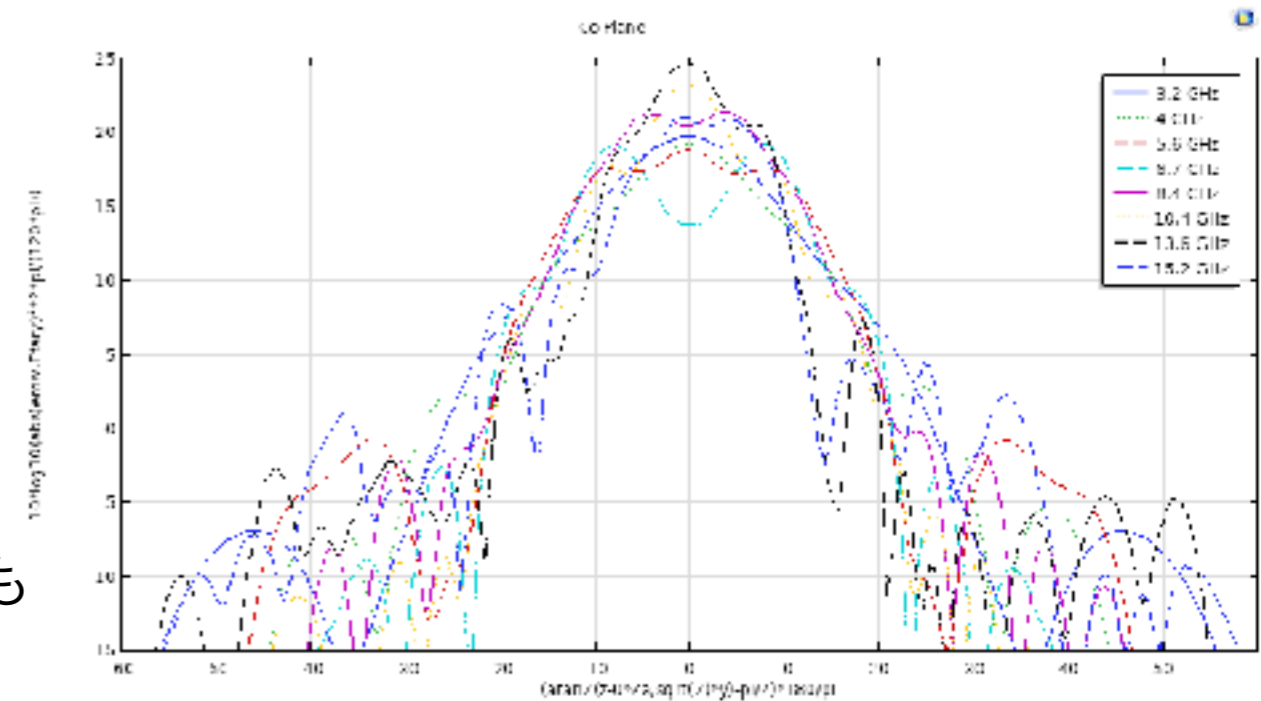
数値モデル

SKA用フィードよりバンド幅が広い

1レンズモデルと2レンズモデルを比較してみると

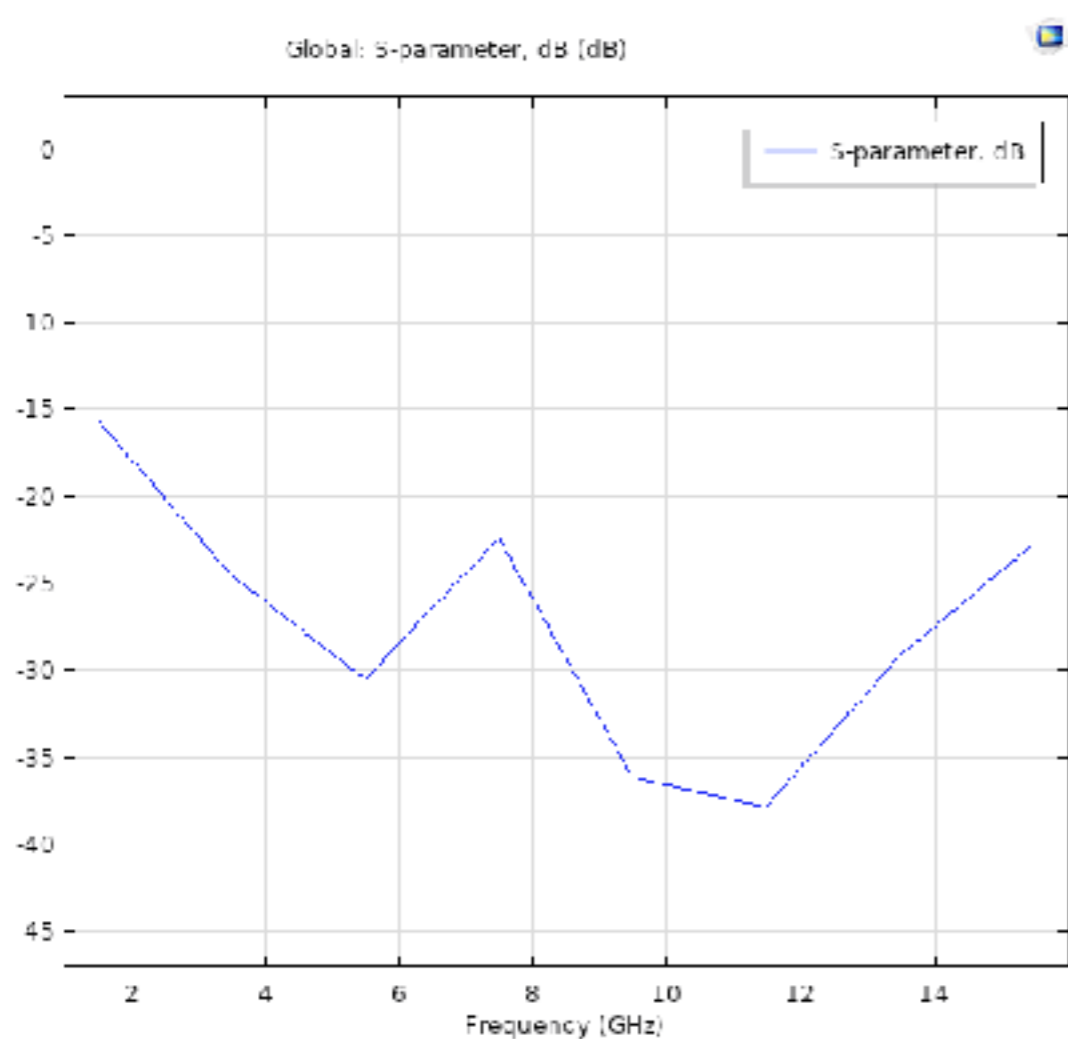
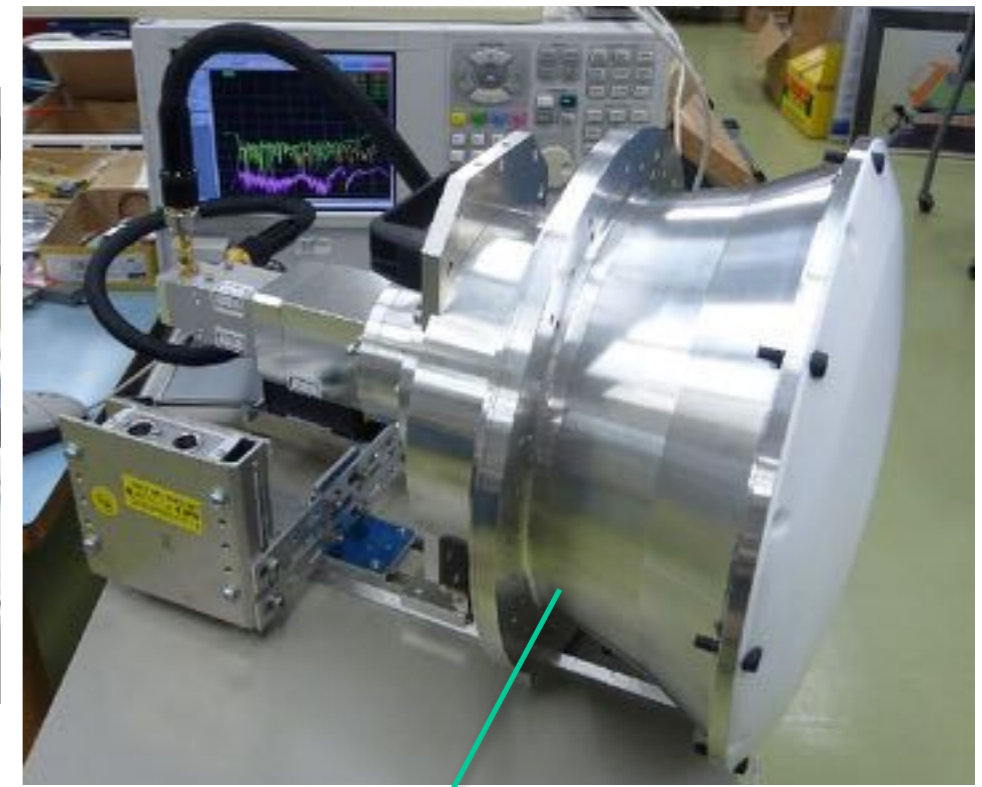
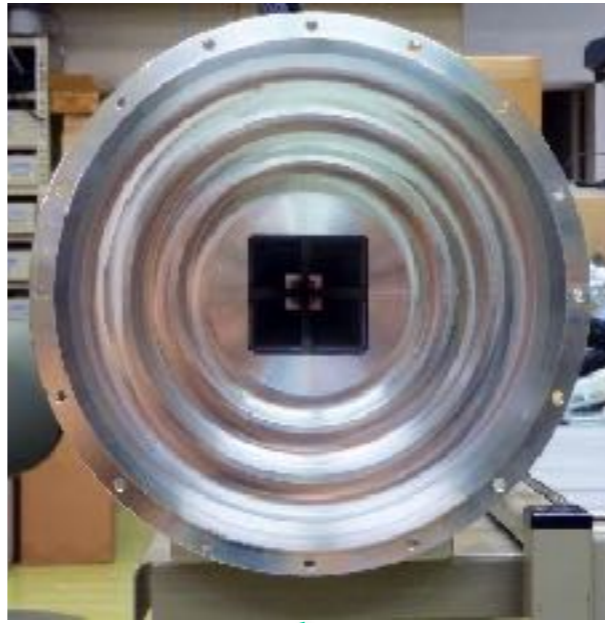
- 高周波側はメモリ不足でビーム不形成
- 2レンズでビームを絞ることはできる
- 1.5-15.5GHzの帯域はかなり大変

鹿島34mより細いビームが必要だがなんとかなるかも



1/4モデルでの計算

- メモリを節約
- OMTは省略
- 34m用NINJAフィーを母体同軸フィードにするかも



反射損



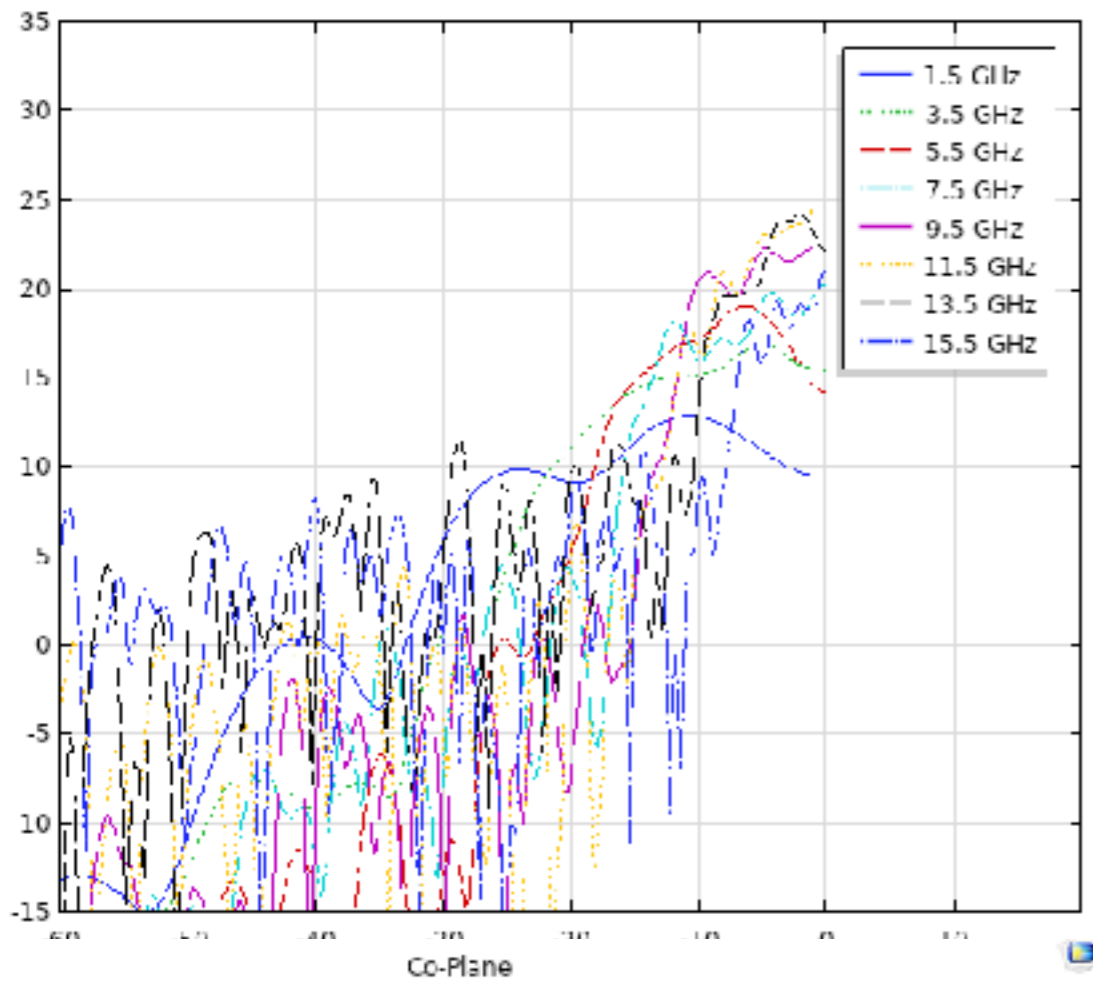
数値モデル

PTFE Lens

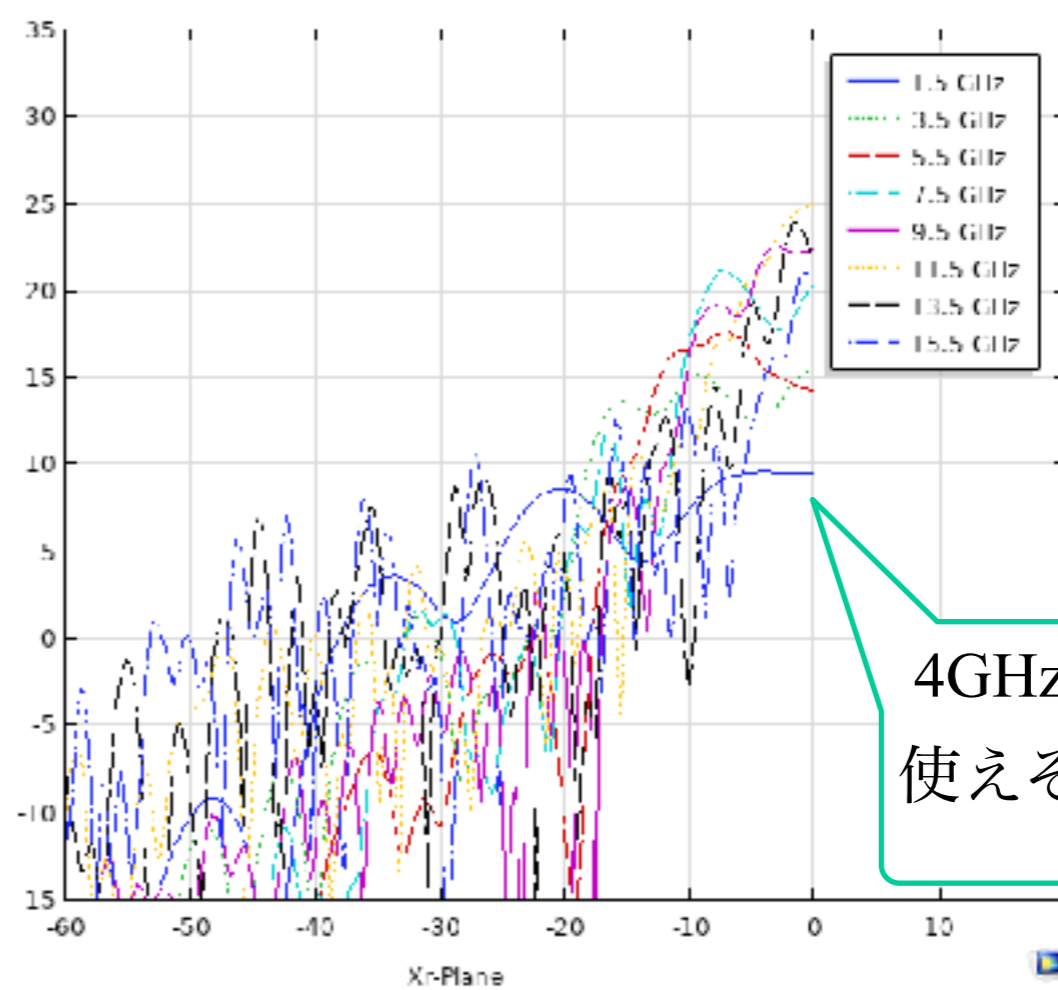
PTFE Lens

L=800mm, D=1200mm

H-Plane

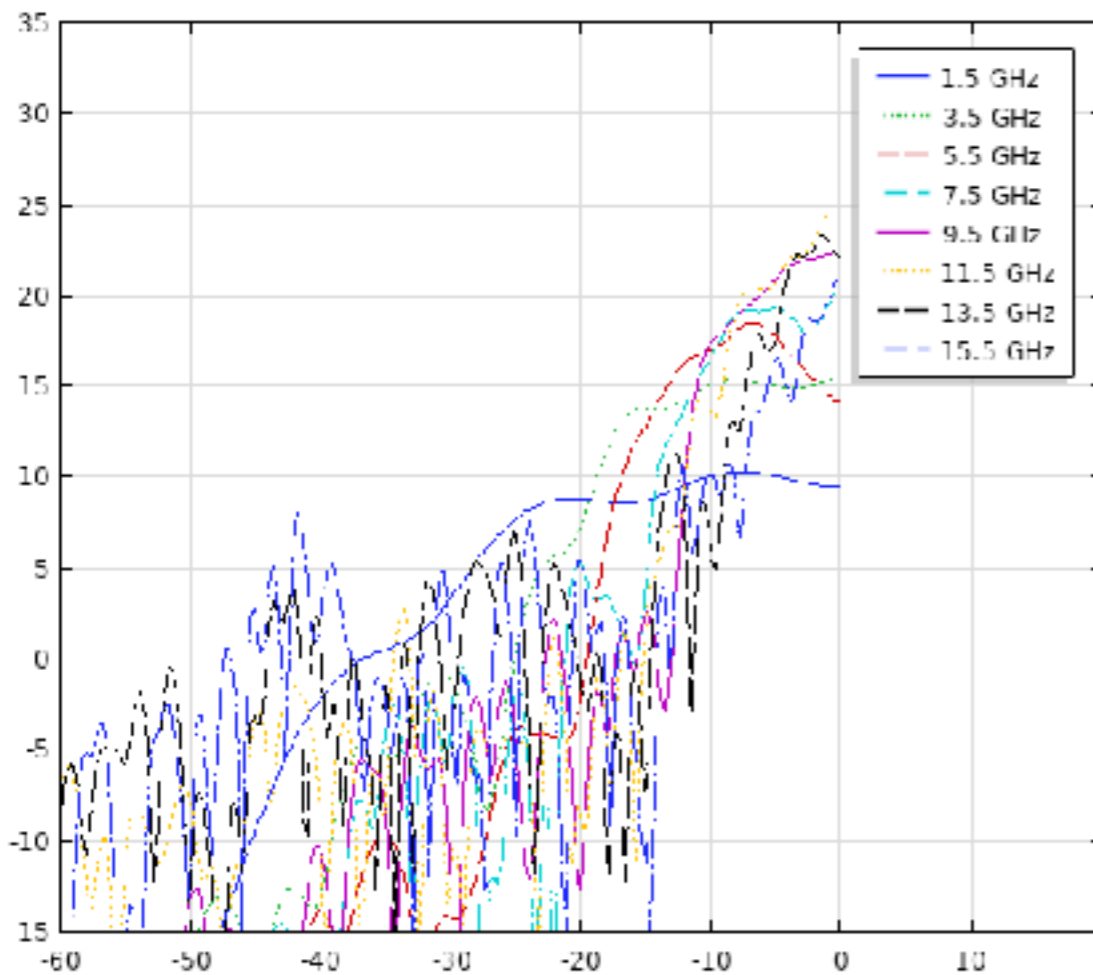


E-Plane

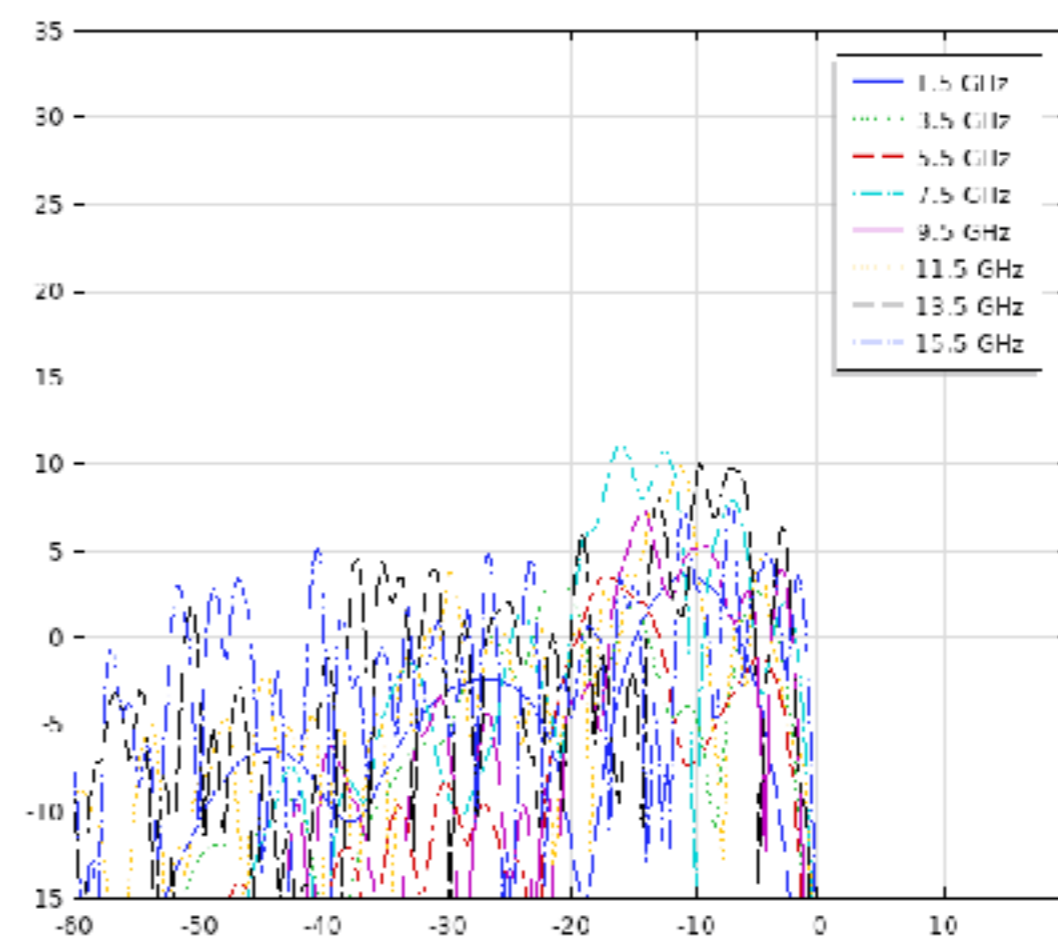


4GHz以上なら
使えそうなビーム

Co-Plane



Xz-Plane



3. 次世代ラジオメータの開発

幅広いユーザー(気象、火山、測地etc)が気軽にフィールドで使えるべく1千万円以下で！

- ・ KUMODeSの発展・改良：高感度/高時空間分解能/低価格
- ・ トモグラフィとスペアナ(orパワーメータ)で低価格化

2019年度

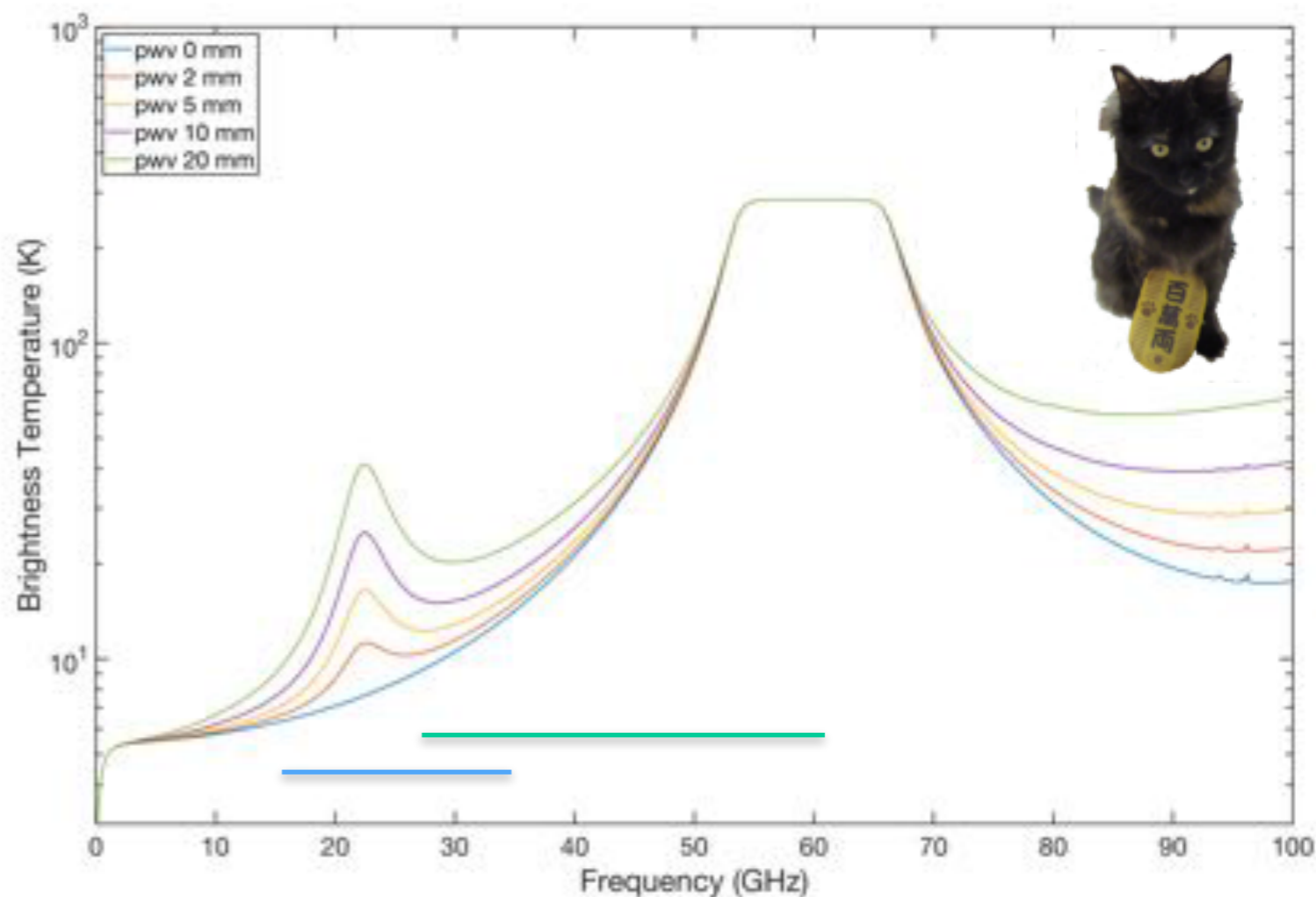
- ・ 常温受信機を試作、低周波数部を沖縄3.7mで試験

2020年度

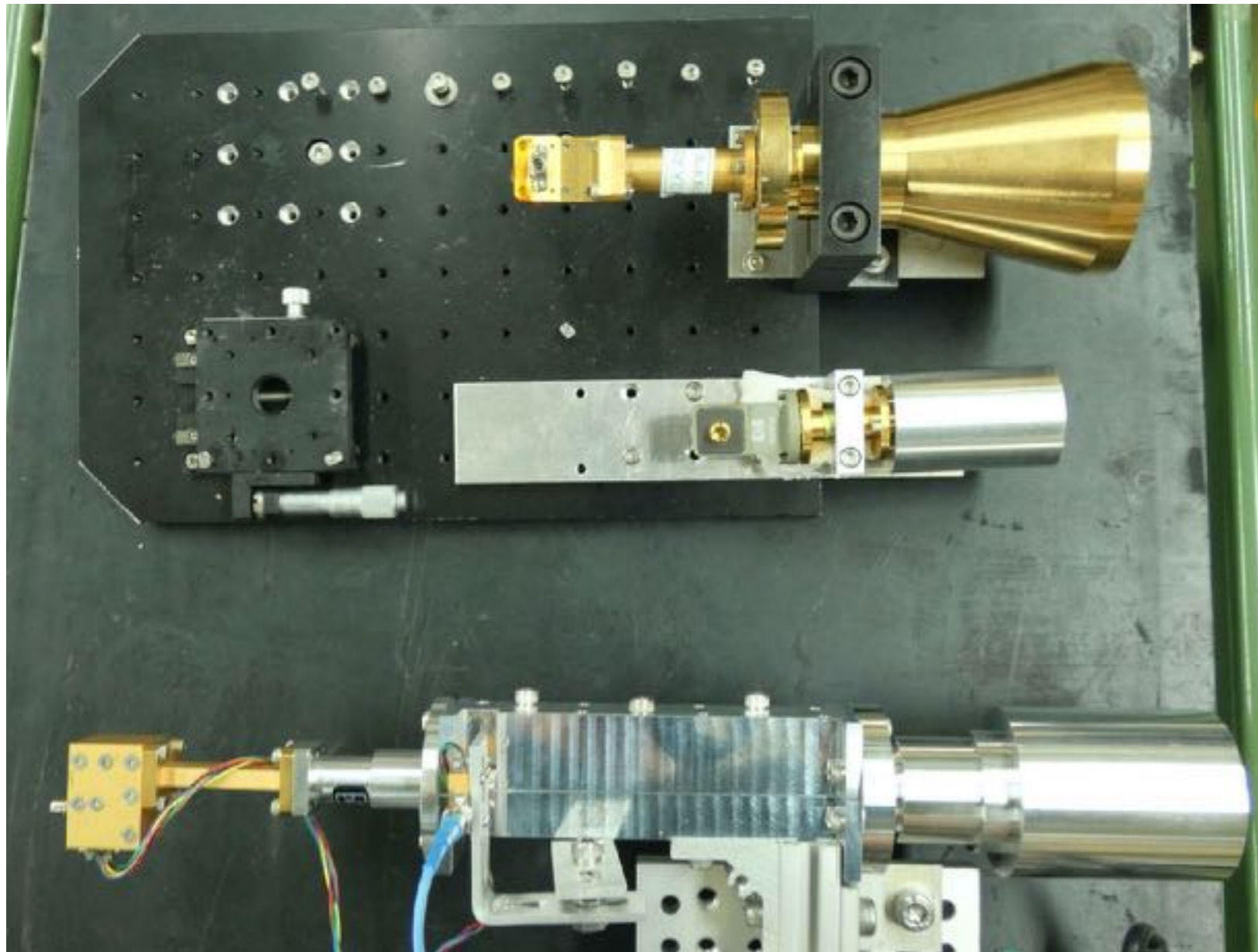
- ・ 広帯域OMTとフィードを設計、試験
- ・ 校正用チョッパと冷却容器の設計→出張禁止で不可能に
- ・ ヘラ絞り90cmパラボラでの可搬局を製作中

2021年度

- ・ 夏までに鹿島で可搬局実験予定



広帯域フィードでアンテナ1本化



←22GHz帯
(18-33GHz)
VSOP-2用BBM

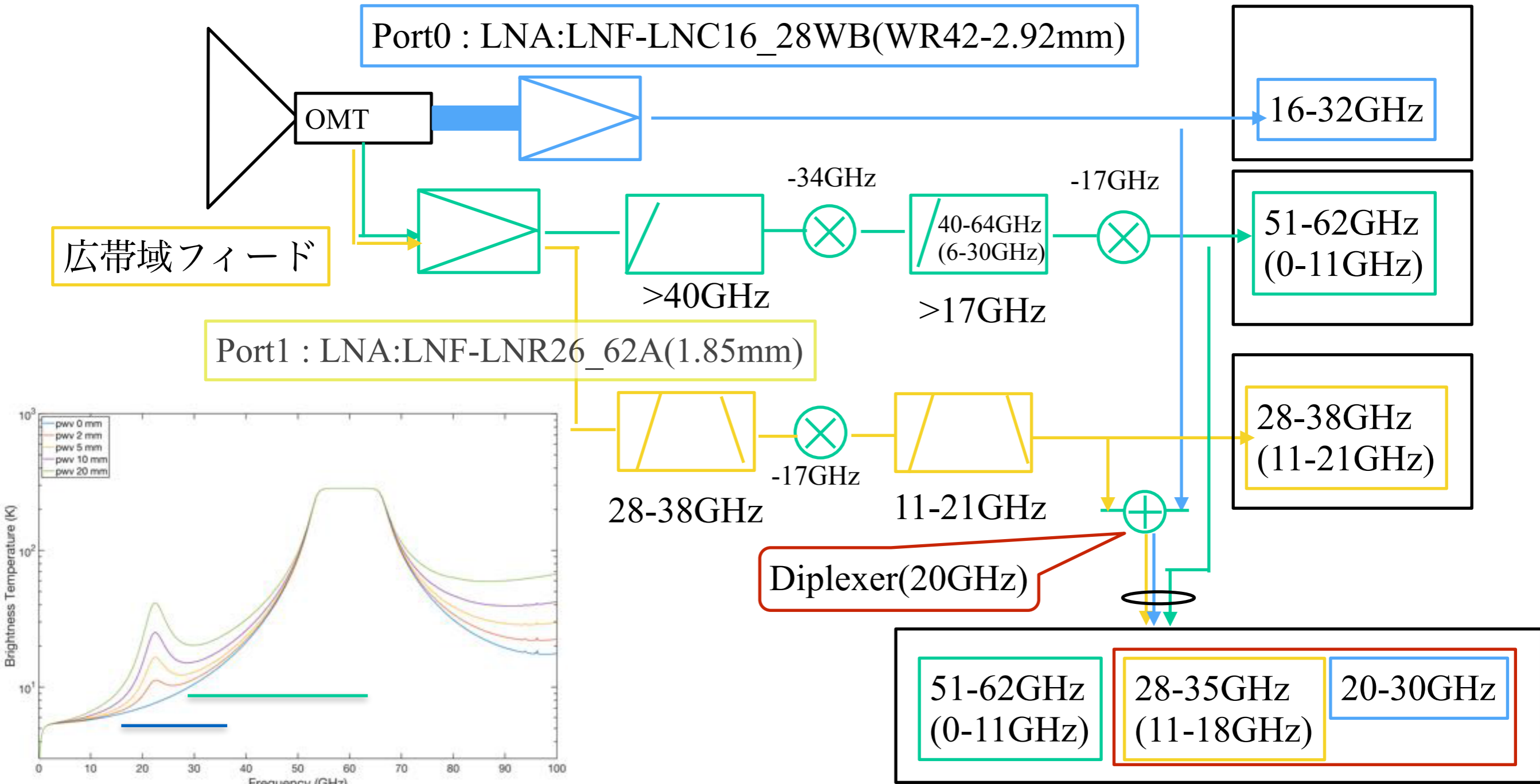
←43GHz
(36-66GHz?)
VSOP-2用BBM

←18-58GHz
狭ビーム用



←18-58GHz
広ビーム用

受信機回路ブロック図



- ・ 常温で動作確認(FY2020)・試験後に冷却(FY2021予定)
- ・ 複数のスペアナで3バンドを広帯域受信 (その反面、必要な機材が増える)
- ・ 30GHzまでのスペアナで全バンドを同時に取得 (その反面、個々の帯域は狭くなる)

高指向性&広帯域→低仰角まで精度良く水蒸気を測定

ミリ波放射計の22GHzビーム半値幅から計算した空間分解能 [m]

目標とする受信帯域

1.水蒸気：16-32GHz

2.雲水：28-38GHz

3.酸素：51-62GHz

これをOMTで分離して

- 導波管ポート：1&2

- 同軸ポート：2&3

それぞれのLNA(*)に入力

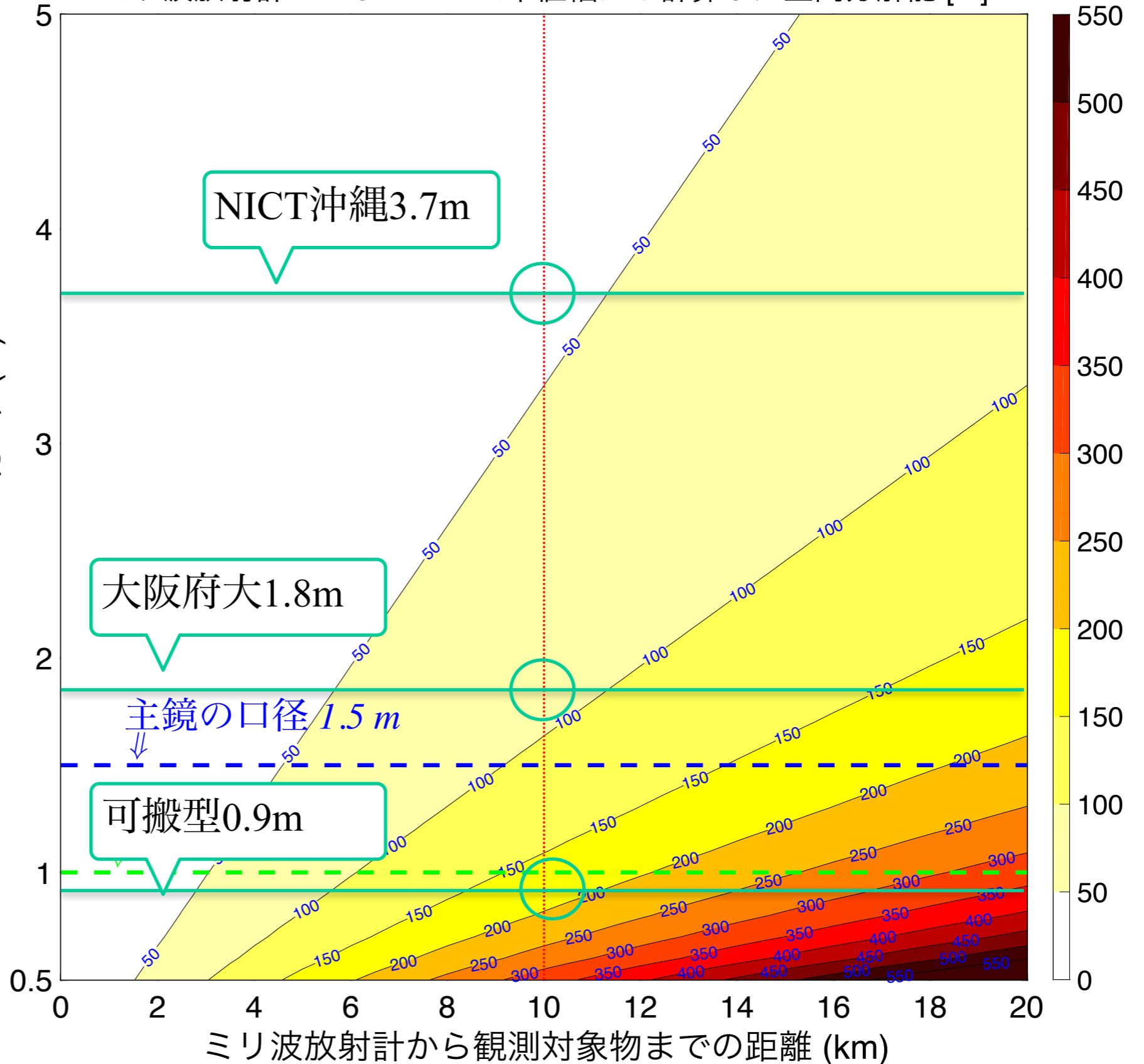
※LNA: Low Noise Amplifier

(低雑音アンプ)

全帯域をカバーするLNAがない

(*雑音が大きな製品はある)

アンテナ主鏡口径(m)



ラジオメータ用OMT

受信周波数

1.水蒸気：16-32GHz 

2.雲水：28-36GHz 

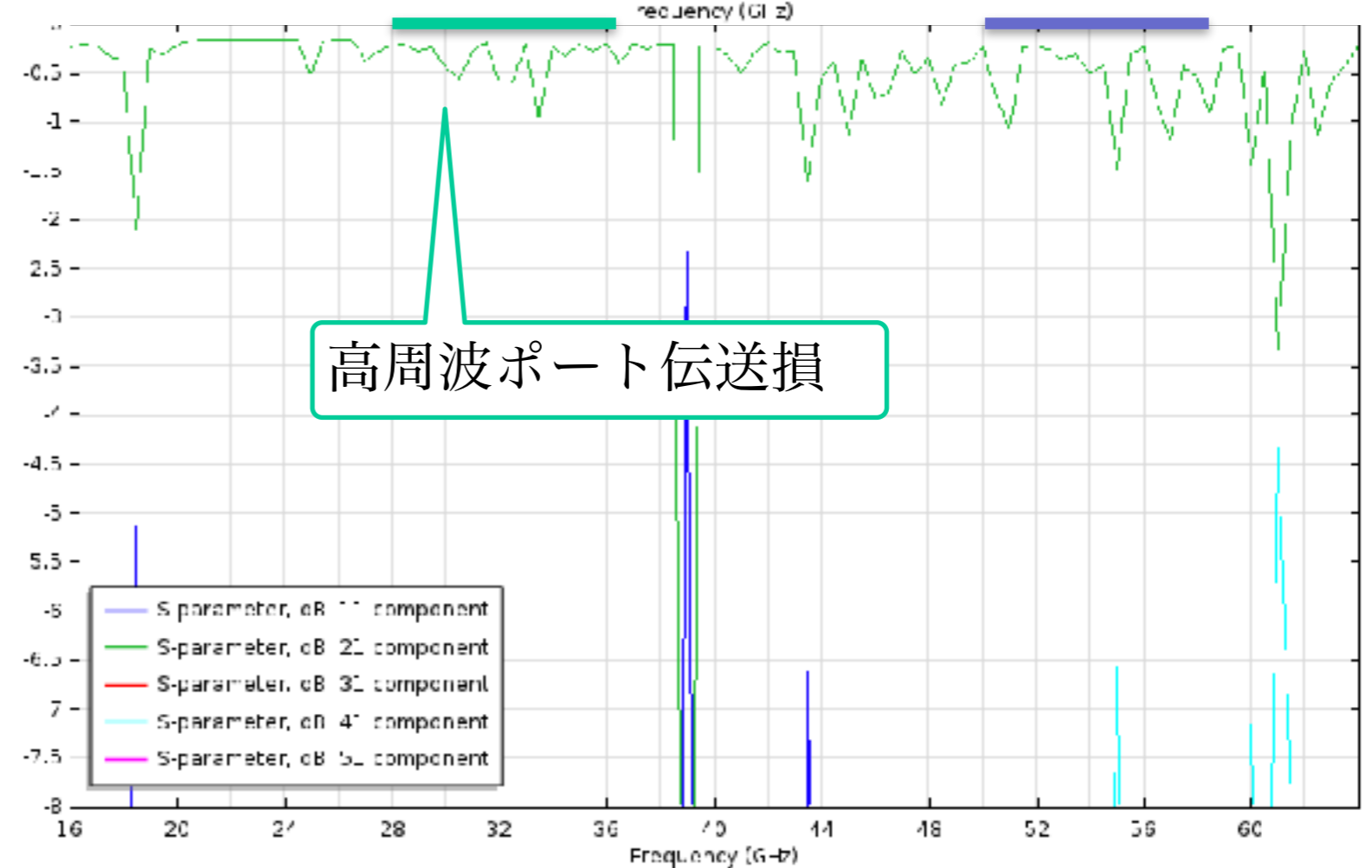
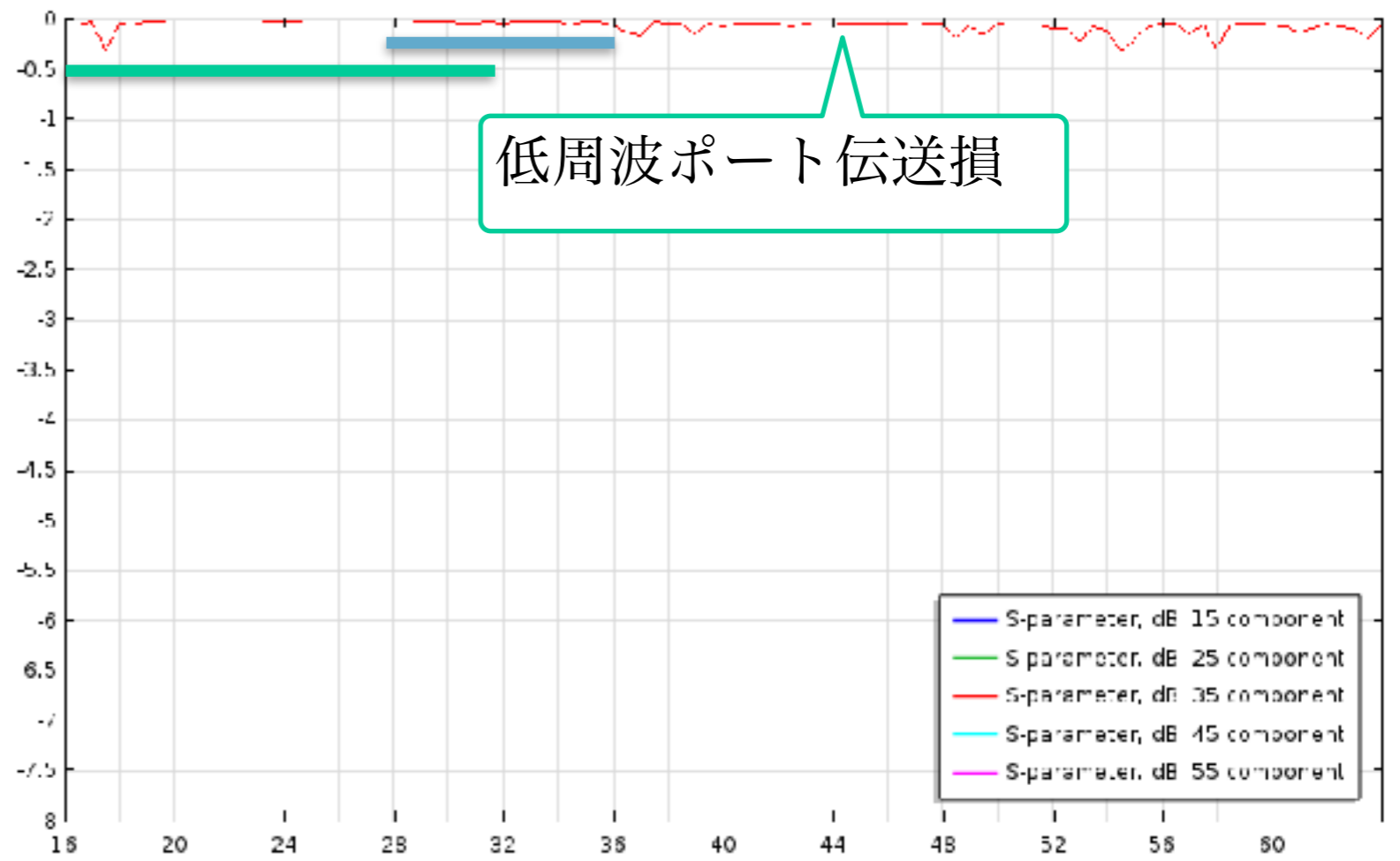
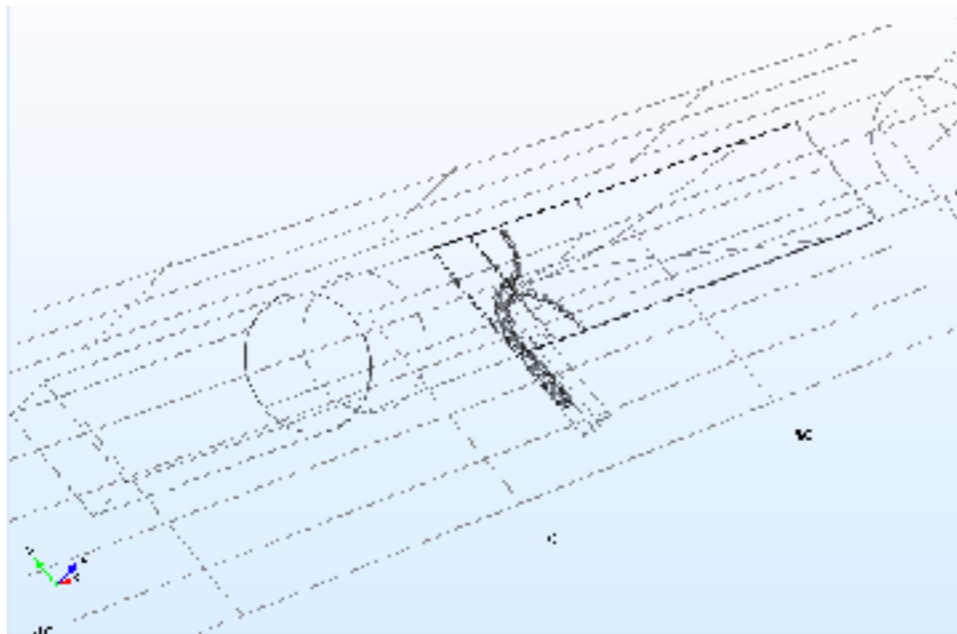
3.酸素：50-58GHz 

OMT output

・ WR42 : 1&2 低周波LNA

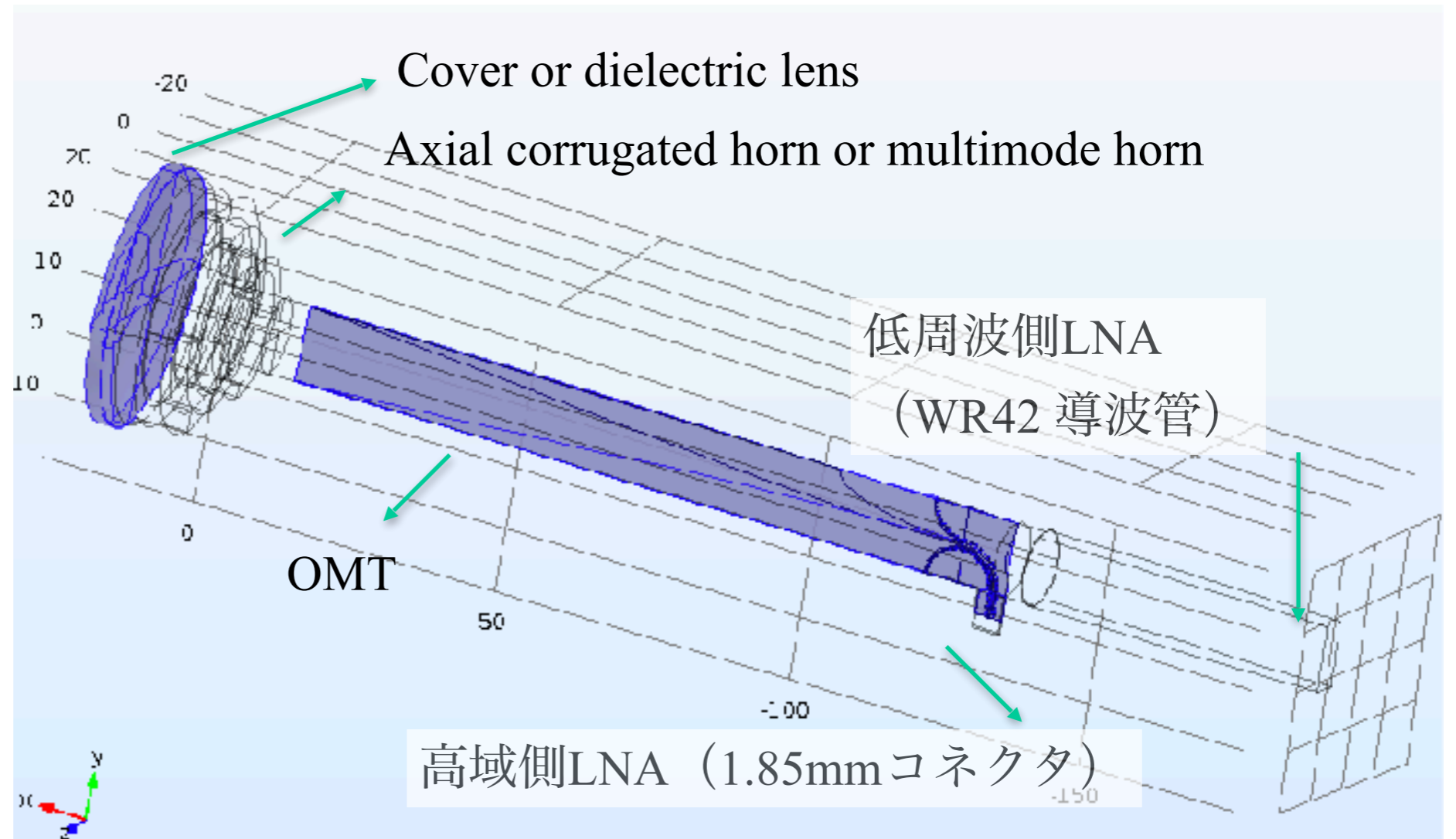
・ 1.85mm : 2&3 高周波 LNA

全部受かるアンプはないので帯域分割

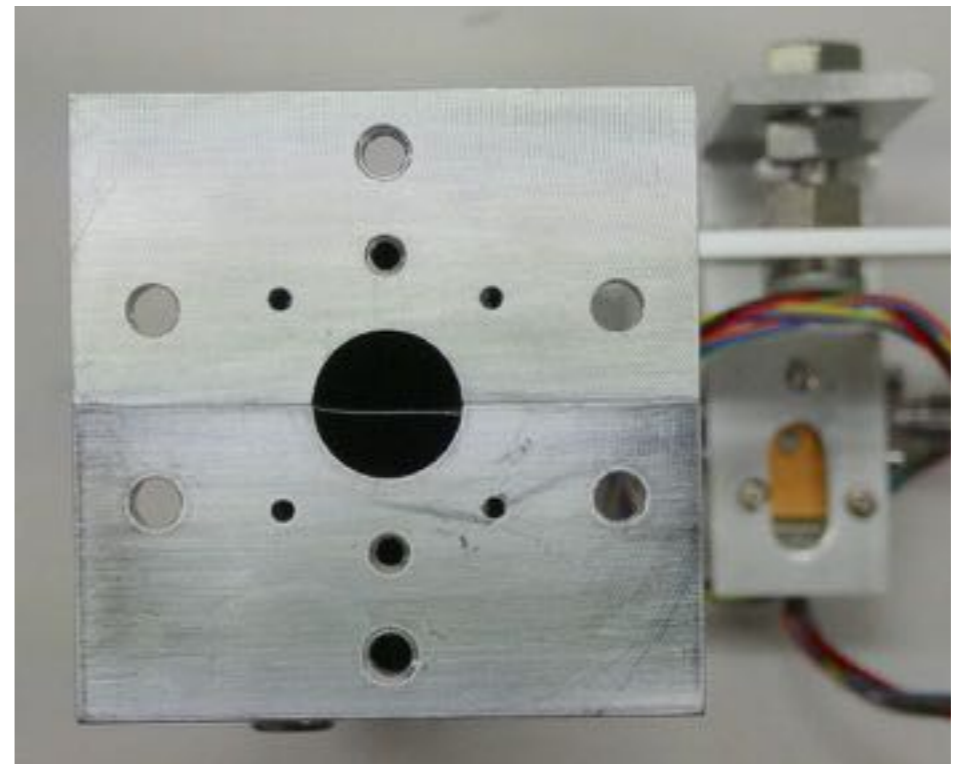
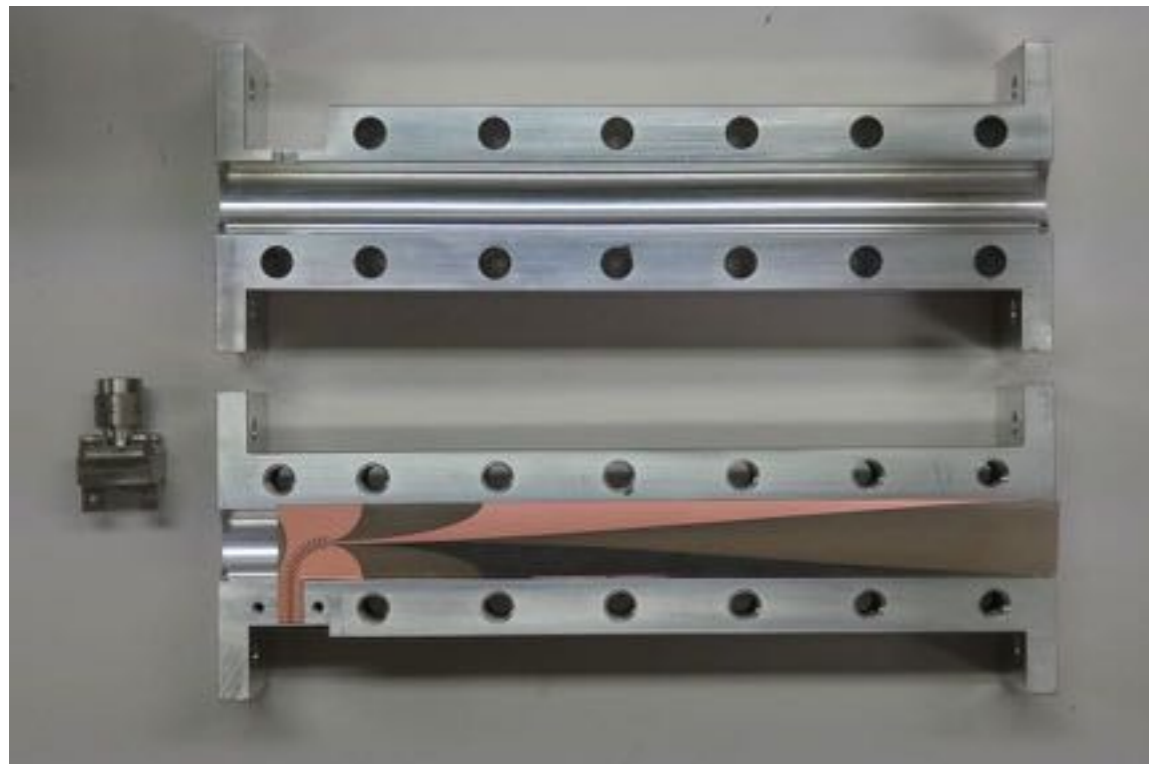


フィードとOMT

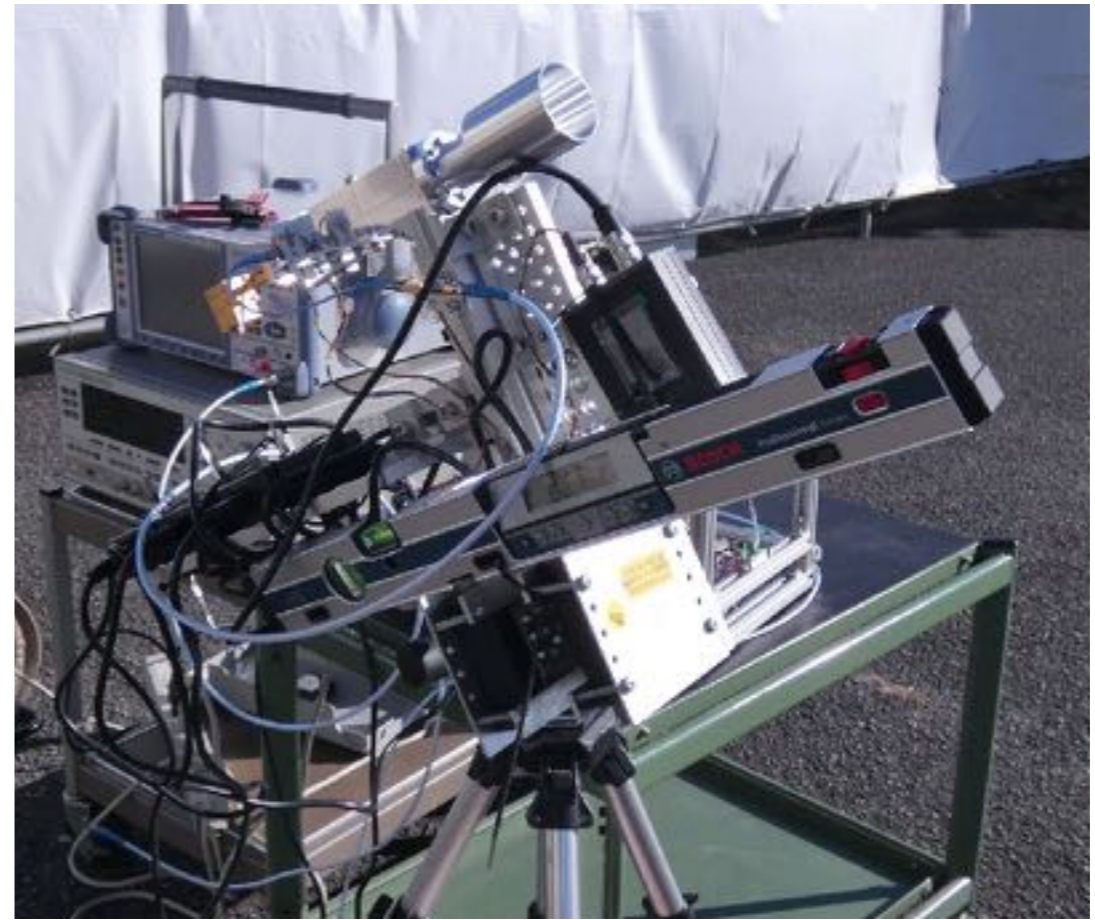
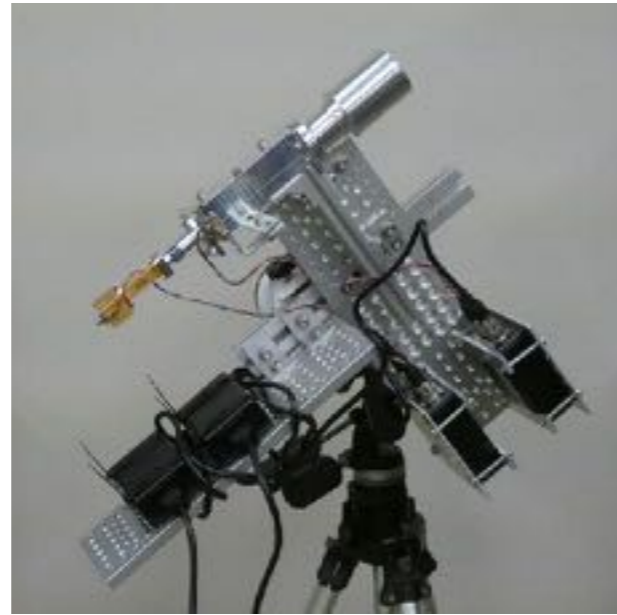
レンズとフィードのみの交換で様々なアンテナに搭載可能



OMTの構造



出張できないので
単体試験中

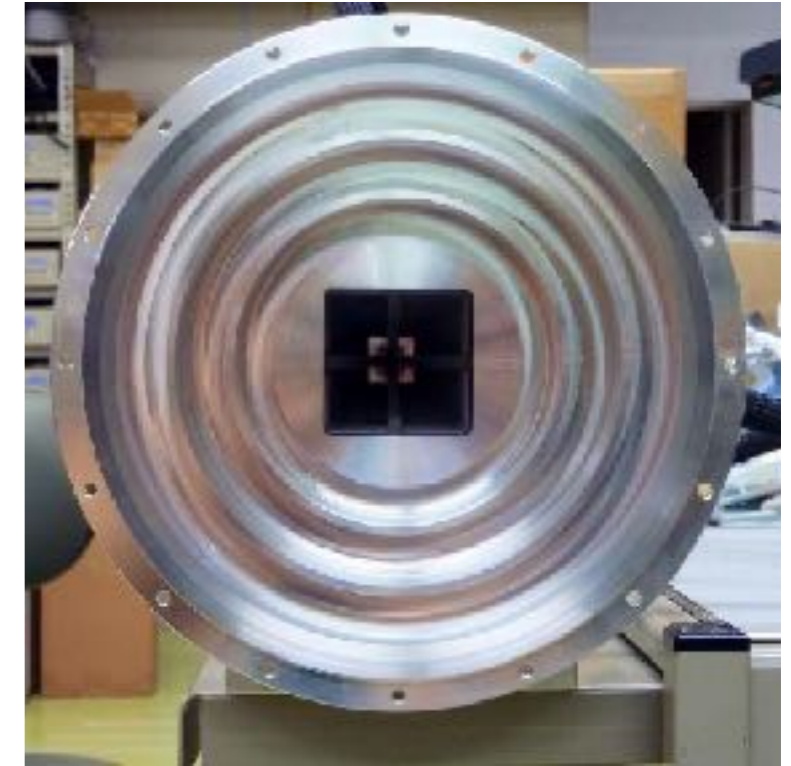


低周波側は動いてるが、
高周波側はコネクタが接触不良っぽい→違うコネクタで再設計

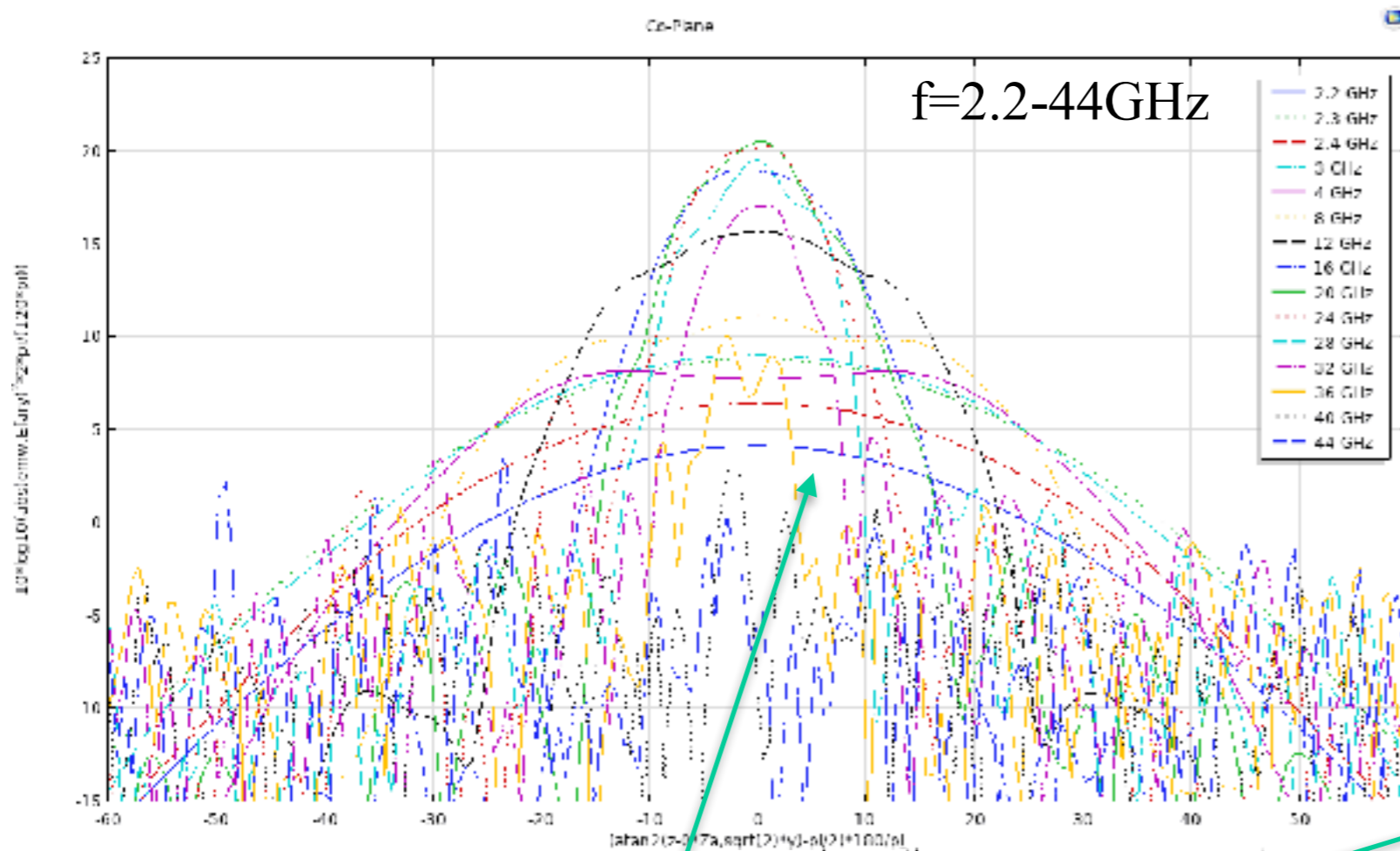
4.広帯域アンテナの課題：慢性的にメモリ不足

- ・フィードのサイズ：最大波長
- ・メッシュのサイズ：最小波長

→3次元なので波長比の3乗で必要メモリが増える

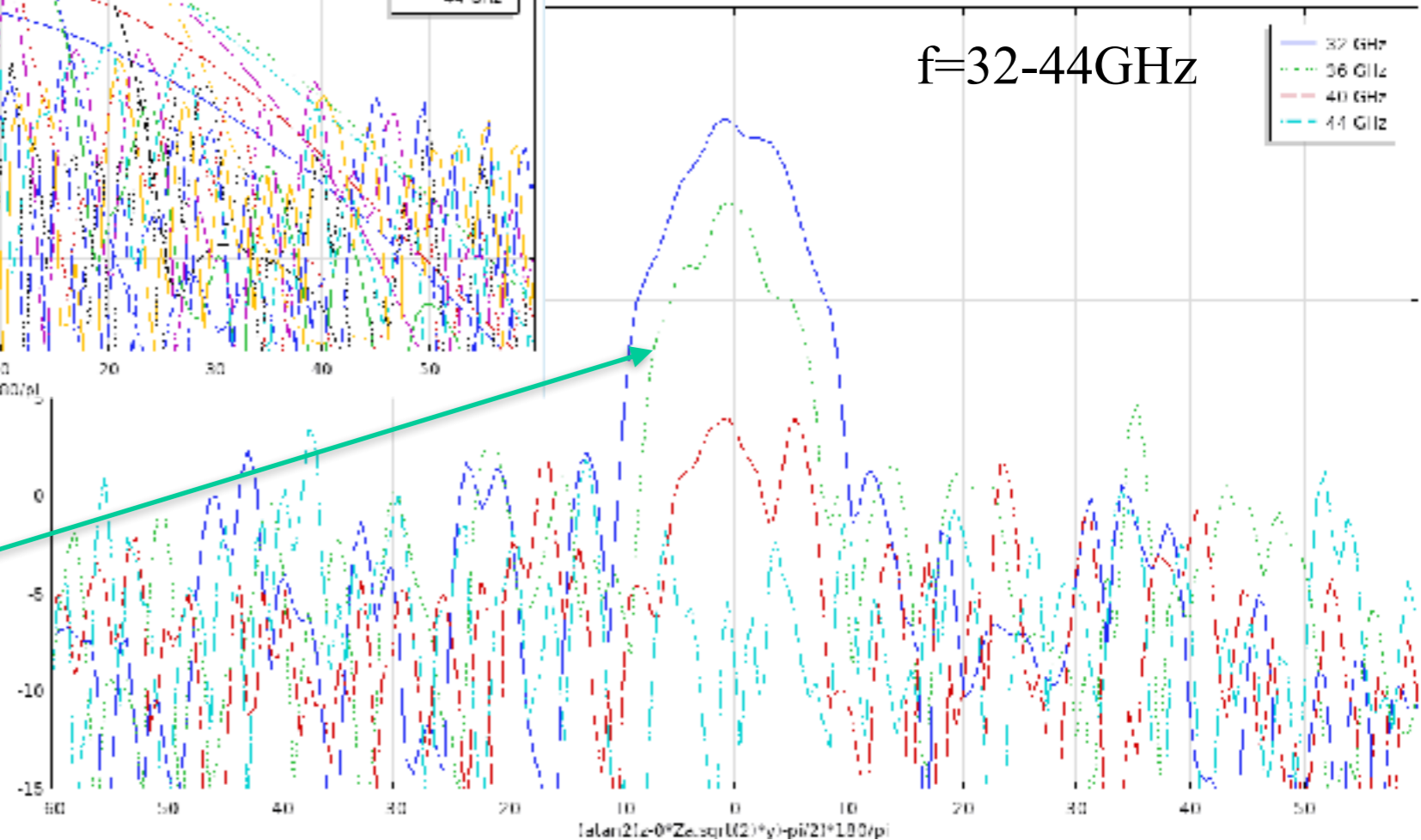


Φ240mm : λ=140-7mm

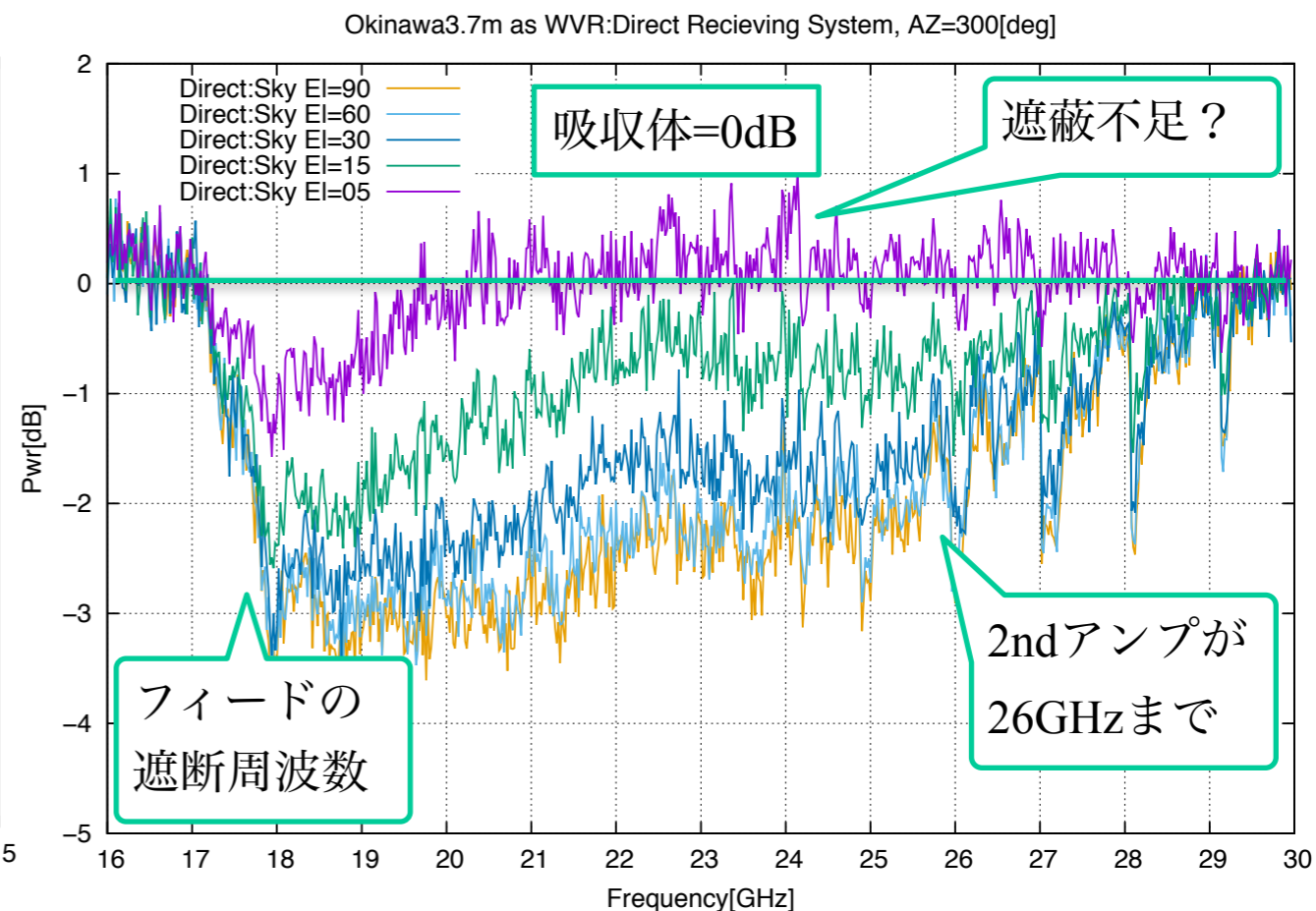
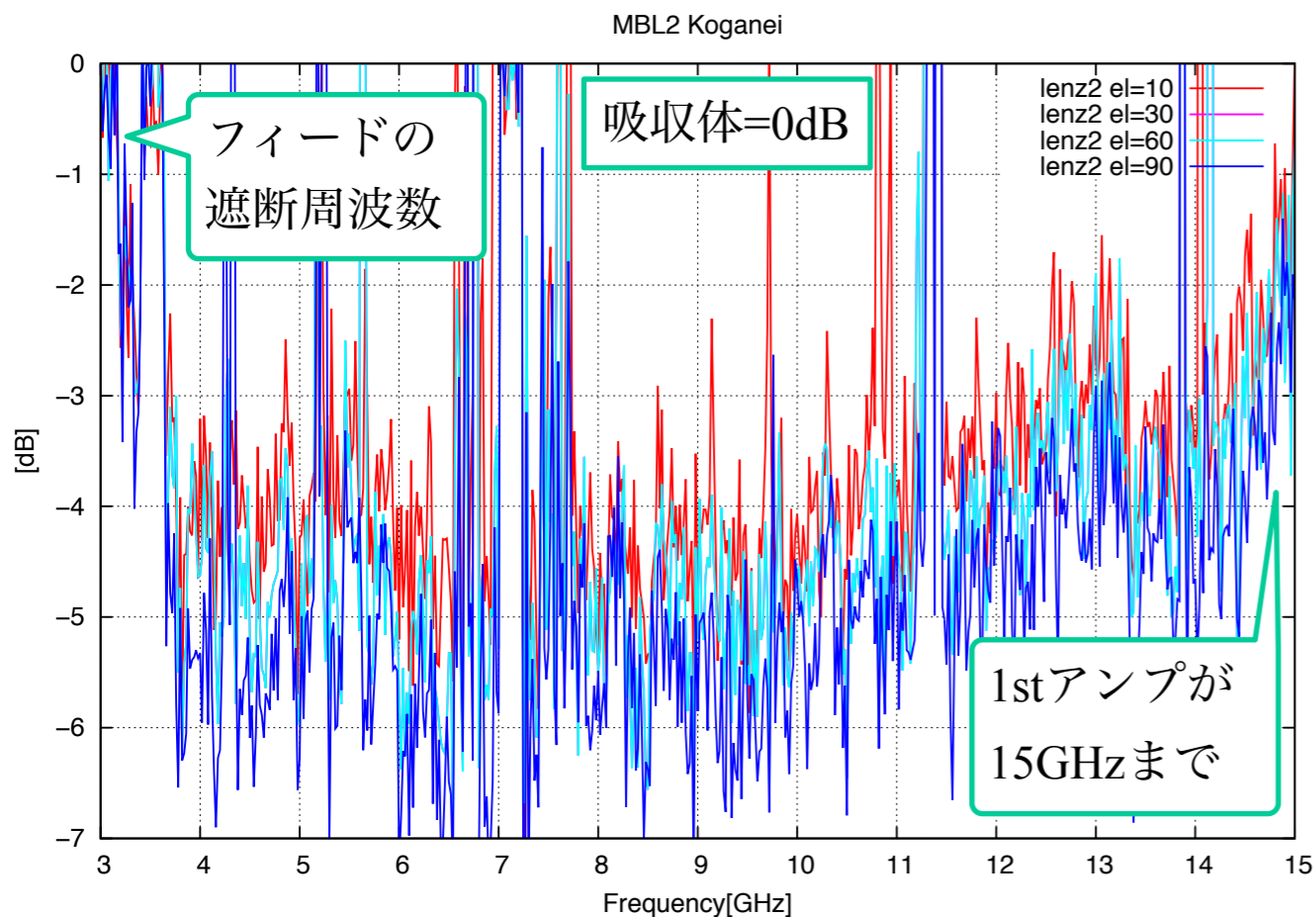


300GB→400GB

- ・ 2.2-28GHz : 正常
- ・ 32GHz : ゲイン上昇
- ・ 36GHz : ビームが出てくる



4.広帯域アンテナの課題：RFI対策



MARBLE : 3-16GHz

次世代放射計 : 15-60GHz

受信機コスト

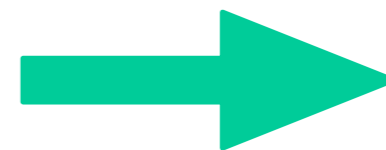
フィード+OMT : 約20万円

LNA : 約150万円x2

受信機だけなら比較的安く作れるが
低コストなフィルタが課題



下限周波数
→4GHz



4-60GHz?



MARBLEの広帯域化

4.広帯域アンテナの課題：部品

手ごろで値ごろなLNAがない

帯域はフィード>LNAになってしまった

- Gala-V：フィード(3.2-16)>LNA(4-14)
- とりあえずラジオメータは帯域を分割

SGの品質

- 高調波が出ることがある→フィルタ必須
- コンパクトなフィルタも開発したい



2 Port USB SG
Lo_A=17GHz, 13dB
Lo_B=24GHz, 8dB



5.まとめ

- ・カセグレン光学系用広帯域フィードを世界で初めて実用化
→光格子時計の周波数比較を経て次世代ラジオメータなどへ展開中
- ・LNAが広帯域化のボトルネックになってしまった
- ・NICTでのVLBIの技術開発は終了...MARBLE1は帰国できず

謝辞

- ・メタノール受信対応：国立天文台共同研究開発経費(山口大 藤沢教授代表)
- ・NINJAフィード：原案はNICTインセンティブ経費(FY2013)
- ・フィードや付帯部品はNICT試作室が製作、測定は京大METLAB
- ・ラジオメータの開発はJSPS科研費JP18H03828の助成を受けている

関連論文

Development of wideband feed for Kashima 34 m Antenna

RADIO SCIENCE

Hideki Ujihara

Version of Record online : 18 APR 2017, DOI: 10.1002/2016RS006071

An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI

RADIO SCIENCE

Volume 51, Issue 10, October 2016, Pages: 1686–1702,

Tetsuro Kondo and Kazuhiro Takefuji

Version of Record online : 26 OCT 2016, DOI: 10.1002/2016RS006070

「広帯域VLBI システムの開発と測地・周波数比較実験の報告」

測地学会誌(2018/1/29受理), 関戸衛ほか26名,

Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry

Nature Physics, October 2020, Pages:, Pizzocaro, M., Sekido, M., Takefuji, K. Ujihara, H. *et al.*

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-01038-6>



