月面天文台TSUKUYOMIに向けた受信システムの設計

大阪公立大学　博士後期課程3年　松本健

月面からの天文学

地上ではできない天文観測は何か？

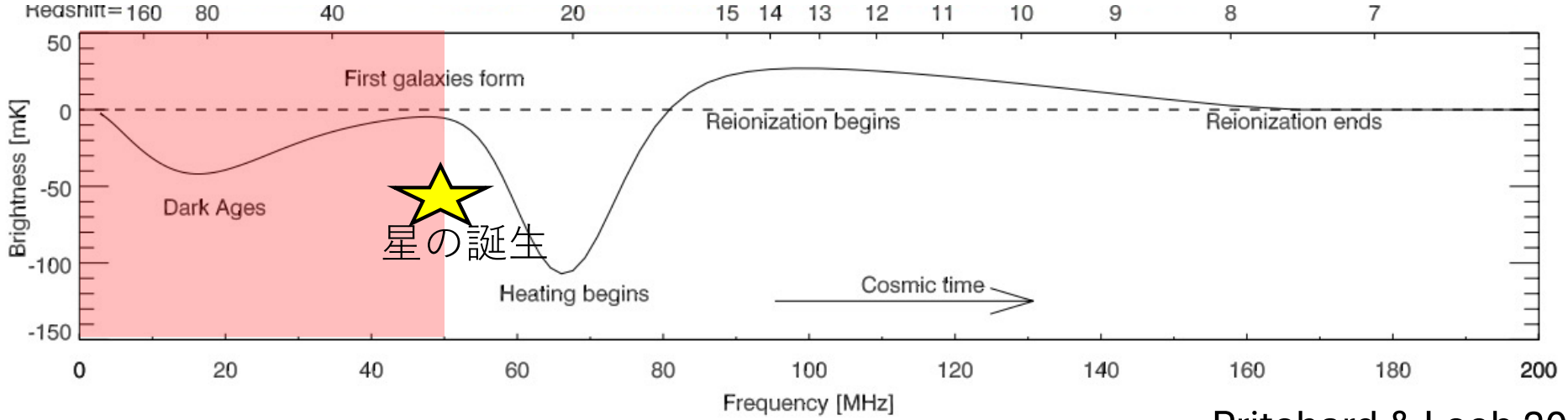
周波数 波長	3-30kHz 10-100km	30k-30MHz 10m-10km	30M-3GHz 0.1-10m	3-100GHz 0.3-10cm	100G-1THz 0.3-3mm	1-10THz 30-300um	10-100THz 3-30um	100T-1PHz 0.3-3um	1-3PHz 0.1-0.3um
名称	超長波	短/中/長波	メートル波	センチ波	ミリ波 サブミリ波	遠赤外線	中間赤外線	近赤外線 可視光	紫外線
月	月の電離層 ×	○	○	○	○	○ 月のダスト	○	○	○
地球周回 軌道	地球のオーロラ（AKR） ×	×	▲ 地球の人工電波源	○	○	○	○	○	高層大気吸収 ○
地球上 マウナケア アタカマ など	×	地球の電離層 ×	▲ 地球の人工電波源	○	○	大気吸収 大気の熱放射 ×	▲	巨大衛星通信網 大気の揺らぎ ○	大気吸収 ×

メートル波など低周波数帯が狙い目!!

月面天文台のサイエンス

z<30の中性水素21cm線のグローバルシグナル(全天の平均温度)は
標準宇宙論モデルから導き出すことができる

これらを決定する物理量はCMB観測による密度揺らぎから決定されている
➡誰も時間変化によるパラメータ決定はできていない(全て予測)



Pritchard & Loeb 2010

暗黒時代をターゲットにする利点

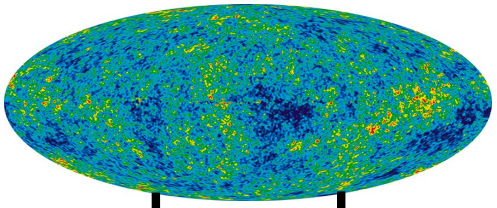
- 誰もみたことがないグローバルシグナル
- 星が誕生する前の宇宙論のみでの物理量の議論が可能

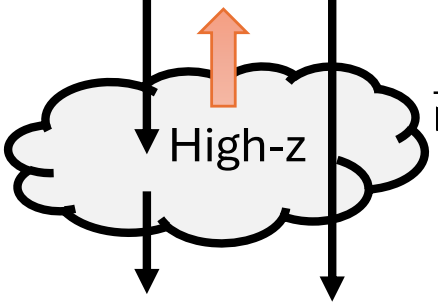
誰もみたことのない暗黒時代の中性水素21cm線を時代別に捉えて標準宇宙論モデルを実証する

➡もしモデルと違う結果だったら
標準宇宙論を見直す必要がある

観測される電波強度

宇宙マイクロ背景輻射

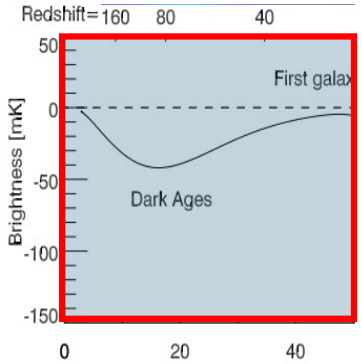




高赤方偏移の
中性水素ガス

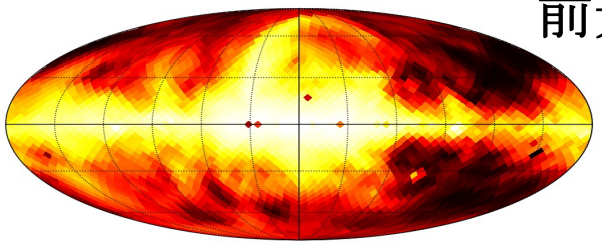
観測ターゲット（1-50MHz）

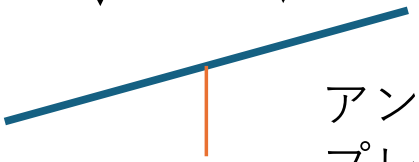
「宇宙マイクロ波背景輻射に対する
中性水素21cm線のスピン温度の差」



Pritchard & Loeb 2010

前景放射





アンテナ
プレアンプ

除去・抑制すべき物理量

✓ 前景放射（銀河系・系外銀河）

✓ アンテナビームパターン

✓ システム雑音
(プレアンプ、ケーブル、ADC等)

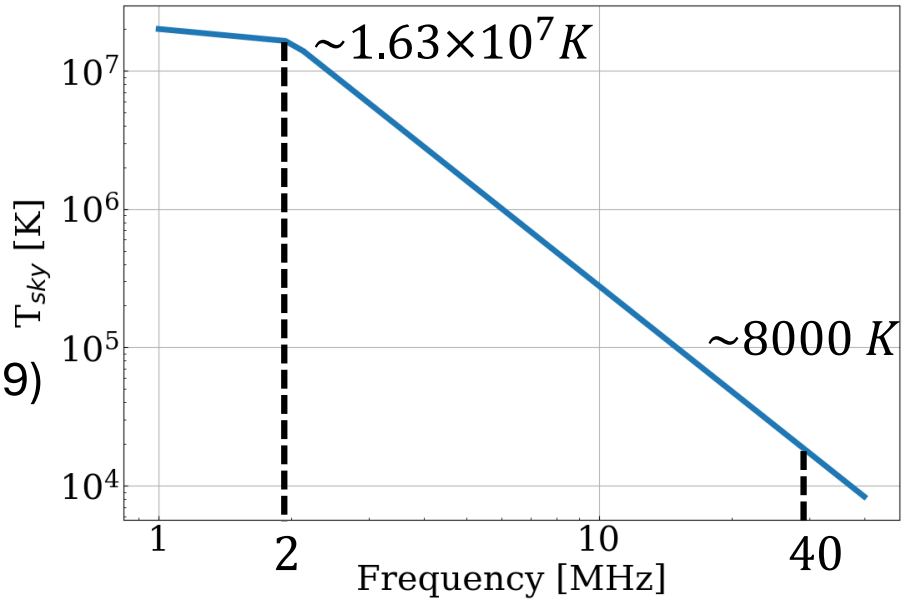
観測システムに求められるシステム要求

前景放射: 主要な雑音源

周波数が低いほど、温度が極めて高くなる

$$T_{sky}(\nu) = \begin{cases} 16.3\times10^6 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-2.53} & \nu > 2MHz \\ 16.3\times10^6 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-3} & \nu \leq 2MHz \end{cases}$$

(S Jester et al. 2009)



- ✓ 周波数に対して、冪乗則で変化する
- ✓ 1-50MHz帯では、$10^4 - 10^7 K$

➡ **受信システムの雑音が前景放射よりも十分小さければ、S/Nは変化しない**

観測システムへの要求

1. 周波数帯域が非常に広い：1-50MHz
2. 極めて高温の前景放射と比較して、受信システムの雑音が低ければ良い
3. 帯域全体を通して、出力電力の差を小さくする(ADCへの制限)
4. 帯域全体を通して、周波数特性がスムーズでモデル化できる必要あり
5. 月面上への設置を考慮したアンテナ設計

アンテナモデルの検討

月面上への設置を考慮したアンテナ設計

ダイポールアンテナによる広帯域観測を検討

ショートダイポールアンテナ

観測波長に対して長さの短いダイポールアンテナ
本研究では長さ5mを採用

✓ 周波数が低いほど、観測感度(∝放射抵抗)は低下する

→周波数が低いほど、実質的な雑音温度が増加

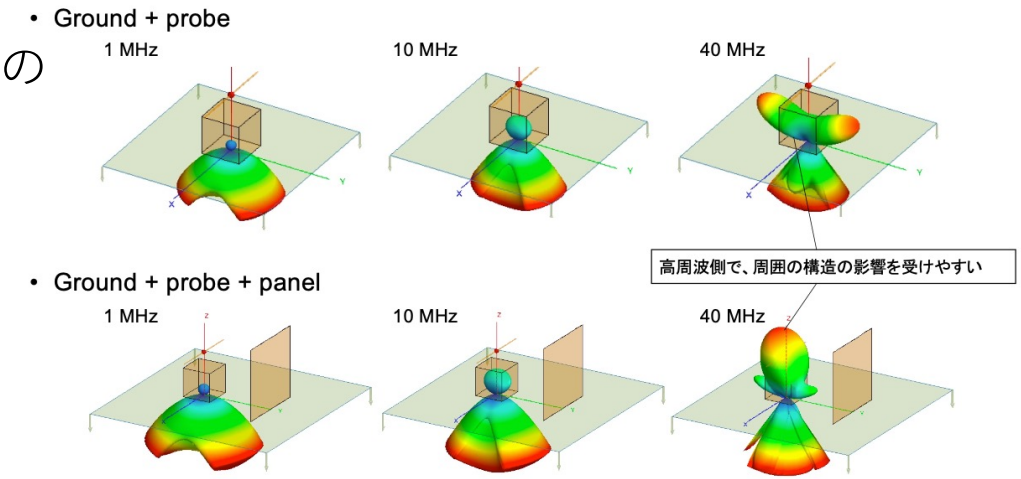
(周波数が低いほど、前景放射＝空の雑音が増加)

放射抵抗

$$R_A \approx 20\pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$$

ビームパターンと観測感度（∝放射抵抗）の重ね合わせがアンテナの感度(等価雑音)

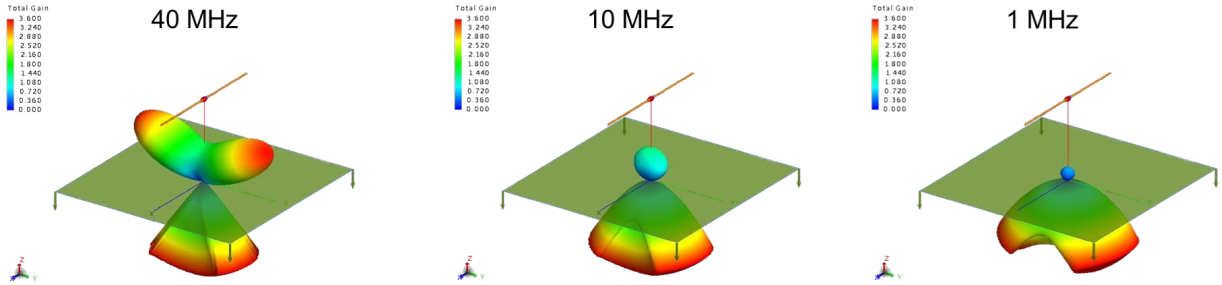
➡ 周辺環境に大きく依存！！
(入念なシミュレートが必須)
ユニット・太陽パネルも影響する



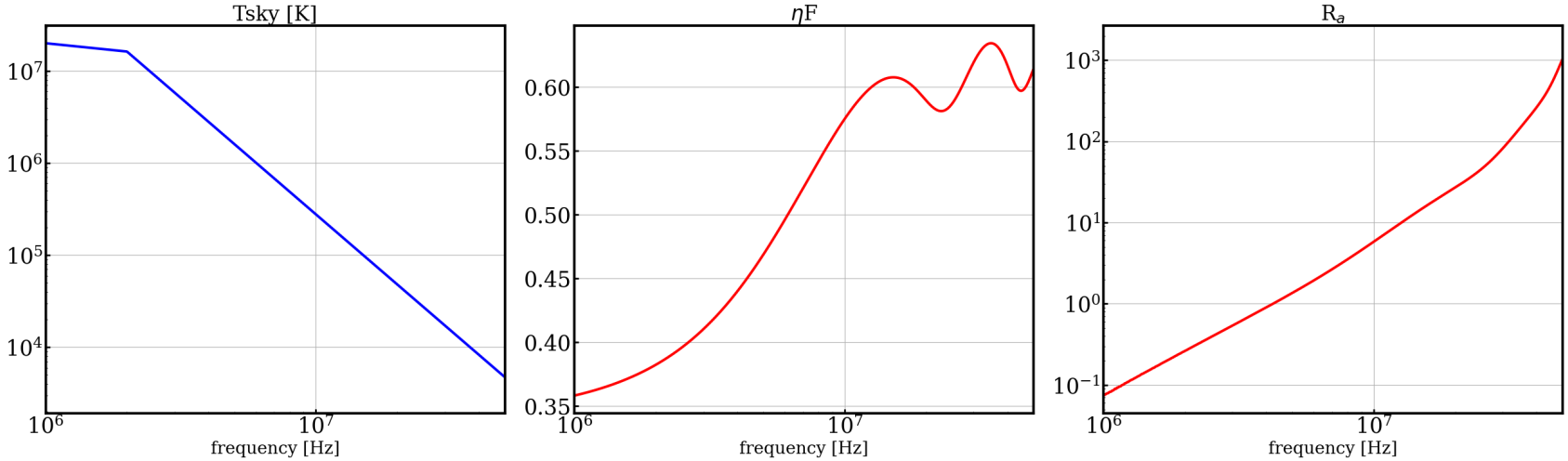
前景放射によるアンテナレスポンス

電磁解析ソフト：FEKO

アンテナの高さ：７m
月の地面の誘電率：$\varepsilon_r = 3$



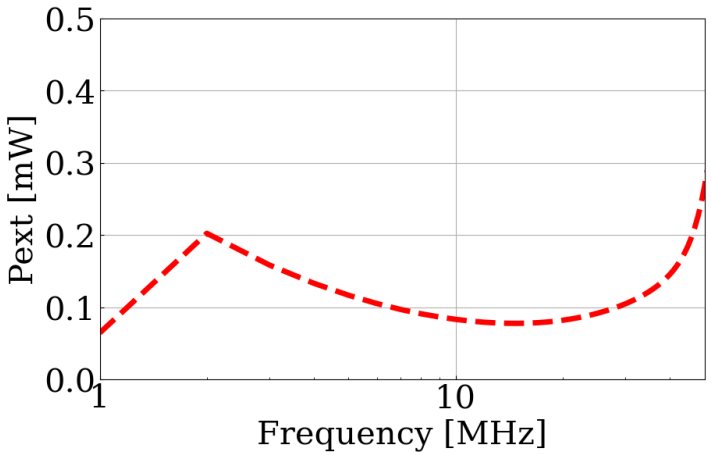
前景放射 × Forward Efficiency × 放射抵抗(=感度)



- 帯域全体を通して、
  前景放射によるアンテナ電力の差を
  2倍程度に抑えることができる

- 前景放射由来の出力電力見積もり
  →プレアンプへの性能要求は？

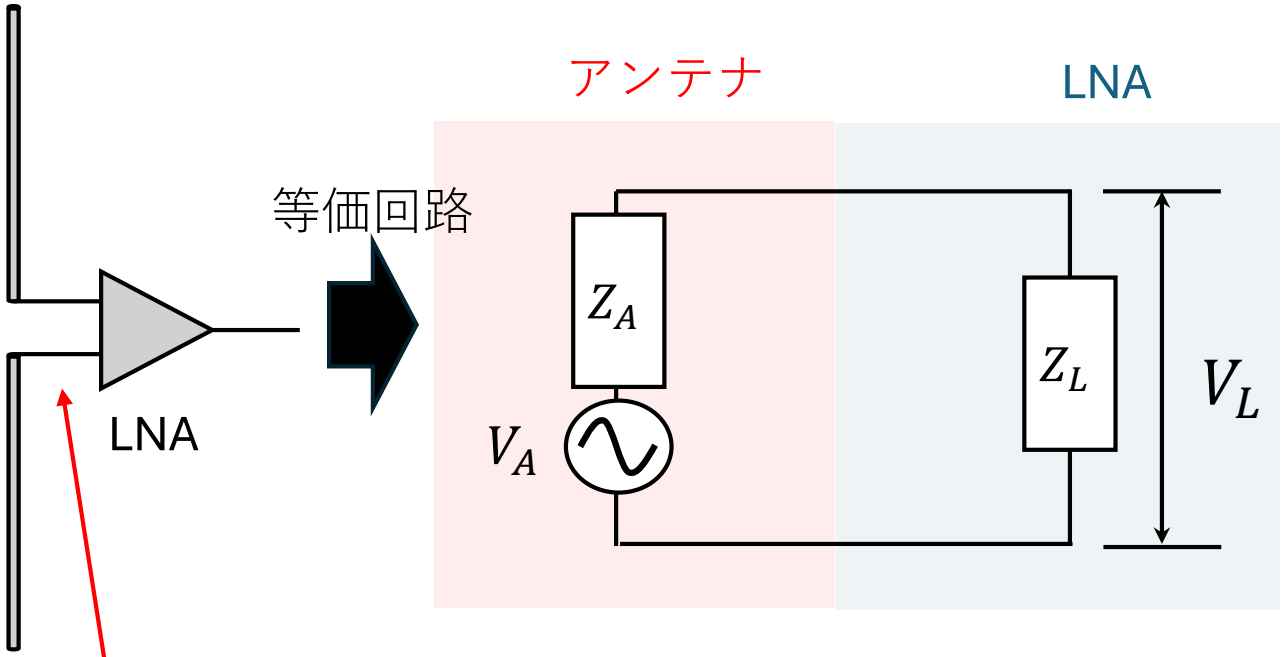
前景放射由来のアンテナ受信電力



アンテナ-プレアンプ間の回路設計

1-50MHzものブロードバンドで安定な周波数特性を実現したい
マイクロ波回路などの分布定数回路では周波数特性がインピーダンスに強く依存

観測帯域：1-50 MHz → **波長：300 – 6 m**



LNAにかかる電圧は

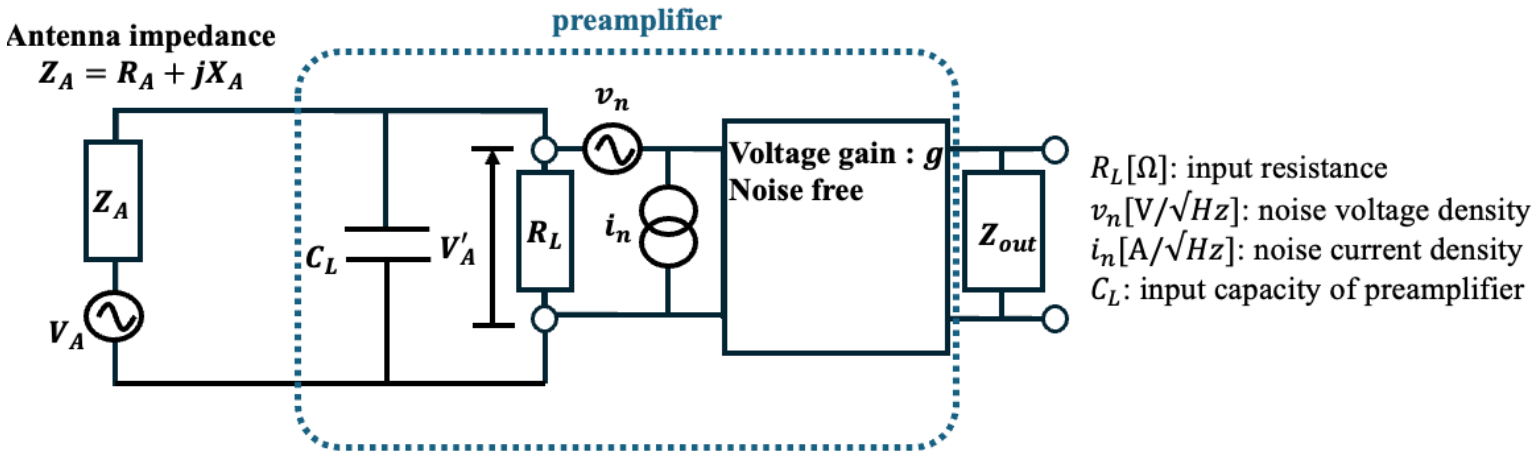
$$V_L = \frac{Z_L}{Z_A + Z_L} V_A$$

$Z_A \ll Z_L$のとき、
$V_L \fallingdotseq V_A$

Point
アンテナ-プレアンプ間の伝送経路を極力短くする

Point
入力インピーダンスを十分に大きくすることで、アンテナ端子の電圧を直接測定

アンテナ＋プレアンプ後の出力電力の導出



アンテナ励起電圧は

$$V_A = \sqrt{4k_B R_A T_A B}$$

アンテナインピーダンスと
プレアンプの入力容量のカップリングにより

$$\boldsymbol{V'_A{}^2 = \left|\frac{Z_L}{Z_A + Z_L}\right|^2 V_A^2 = |\alpha|^2 V_A^2}$$

$$\left(|a|^2 = \frac{1}{(1-\omega C_L X_A)^2 + (\omega C_L R_A)^2}\right)$$

プレアンプの入力容量によって、
観測感度が変化する

アンテナとプレアンプの
合成インピーダンスは

$$Z_s = \left(\frac{1}{R_A + jX_A} + j\omega C_L + \frac{1}{R_L}\right)^{-1}$$

プレアンプがもつ受信機雑音電圧は、

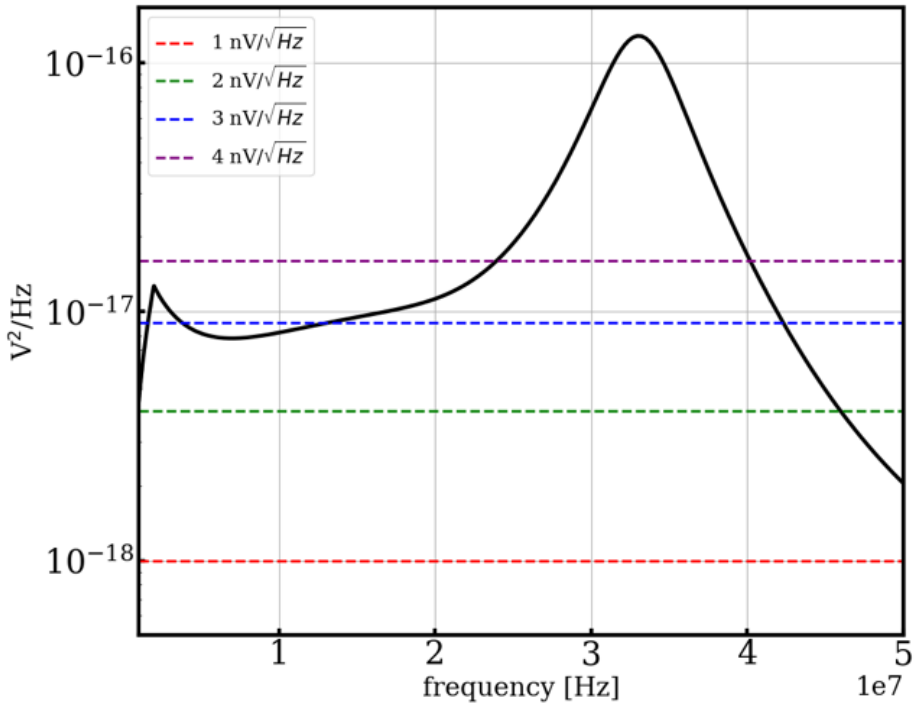
$$\boldsymbol{V_N^2 = \left(v_n^2 + i_n^2 |Z_s|^2\right) B}$$

$V'_A{}^2 > V_N^2$となる
プレアンプの雑音電圧,入力容量を求める

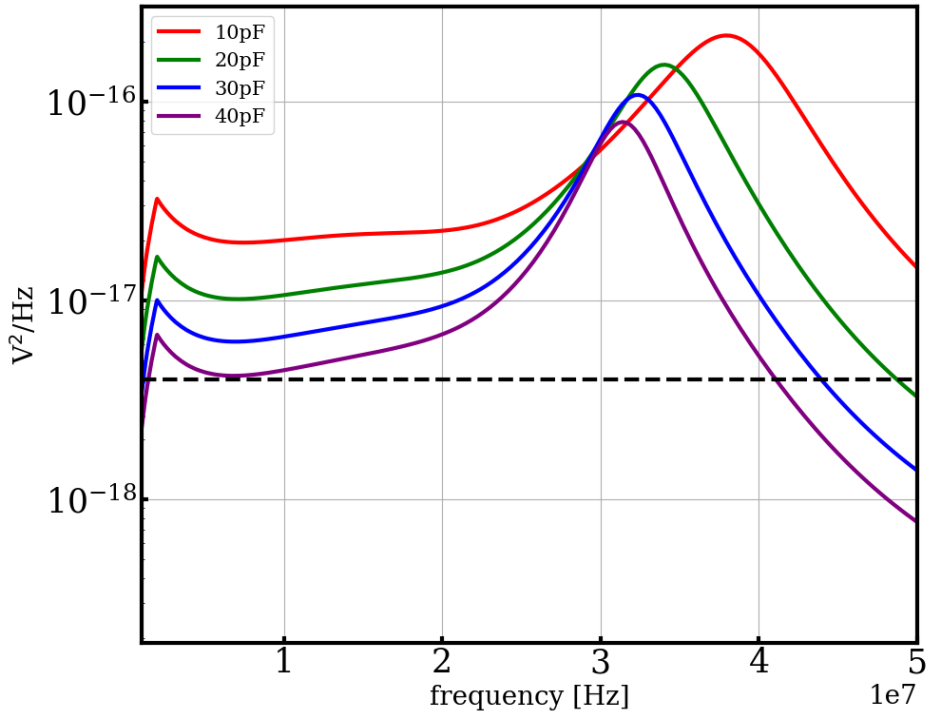
前景放射由来の受信電圧と受信機雑音電圧の比較

- ✓ 長さ5m,太さ2mmのダイポールアンテナを仮定
  設置する高さは7m,月の誘電率は$\varepsilon_r = 3$とした。

- ✓ 入力換算雑音密度を$\sim 2\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$以下
  入力容量を25pF以下に達成することで、
  受信機雑音が前景放射由来のアンテナ温度より十分に低い電波観測を可能にする



実線:入力容量25pFのときの受信電圧
波線：受信機雑音電圧



実線:入力容量ごとの受信電圧
波線：2nV/√Hz時の受信機雑音電圧

まとめ

- ショートダイポールアンテナにより
  前景放射による観測システムの周波数特性を抑制する
- 各素子間の伝送線路を波長の1/10程度以下まで短くする電圧増幅システムにより、広帯域にわたり安定した周波数特性を受信システムをもたせる。
- LNAの性能を$\sim 2\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$,25pF 以下にすることで、前景放射と比較して、プレアンプ雑音による観測量への影響は十分少ないと考えられる。
- ただし、周辺環境によるアンテナインピーダンスの変化を調査する必要がある

<u>今後の研究</u>

- ✓ アンテナインピーダンスの重要度を調査する
  →シミュレーションだけで十分か？較正回路は必要か？

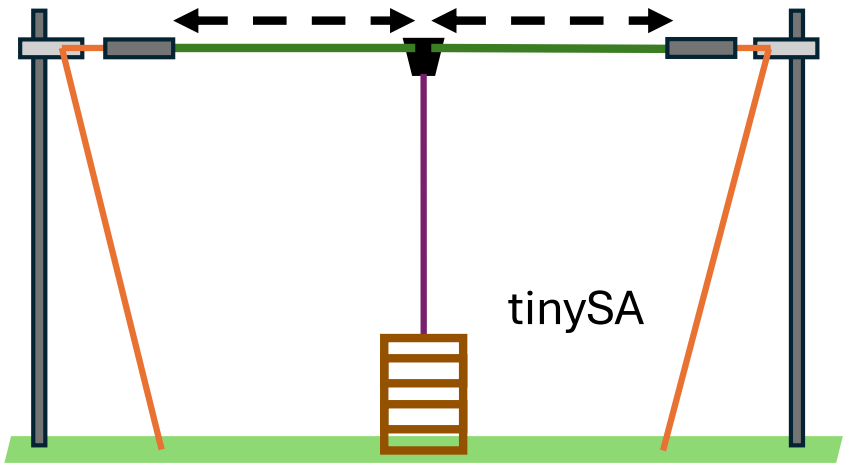
- ✓ 実機の5m ダイポールアンテナを用いた地上観測実験から
  受信システムの実証と解析シミュレートの再現性を確認する

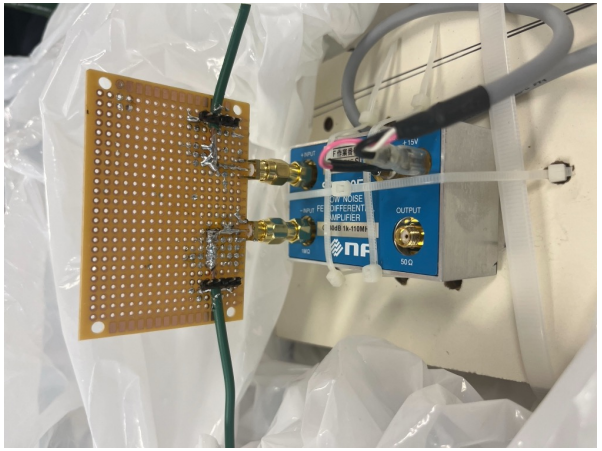
野辺山観測所での試験観測

アンテナ設置場所

- 3m = 150cm × 2
- 2m = 100cm × 2
- 1m = 50cm × 2

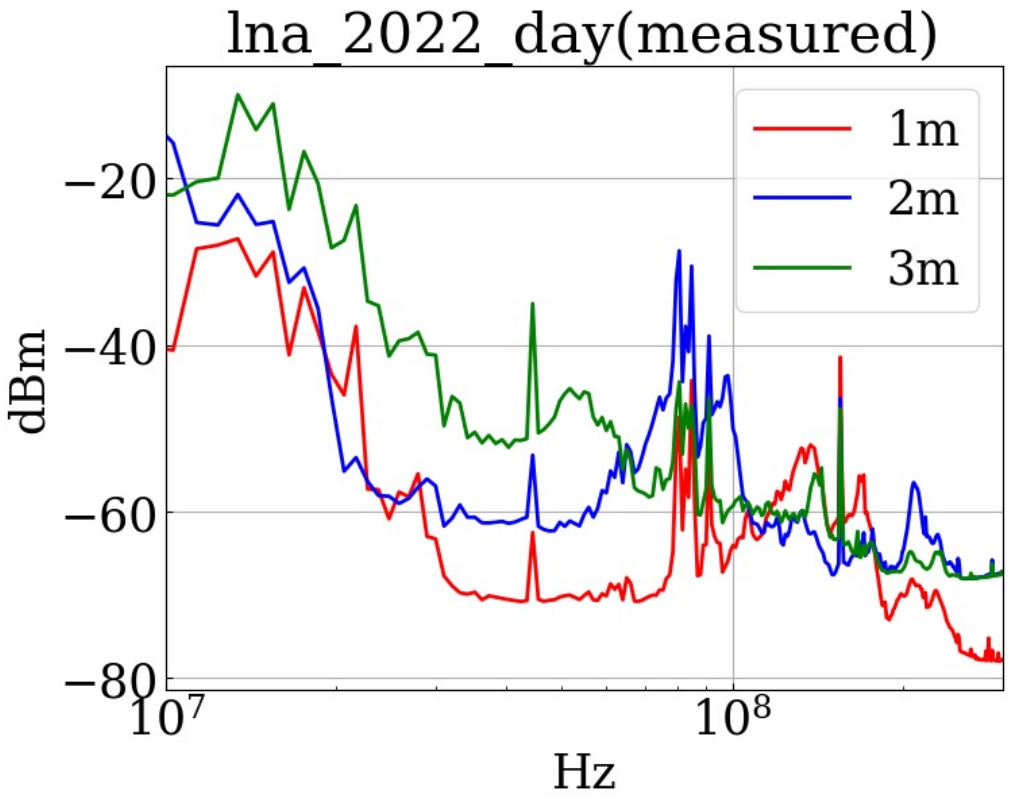
のワイヤーアンテナで測定

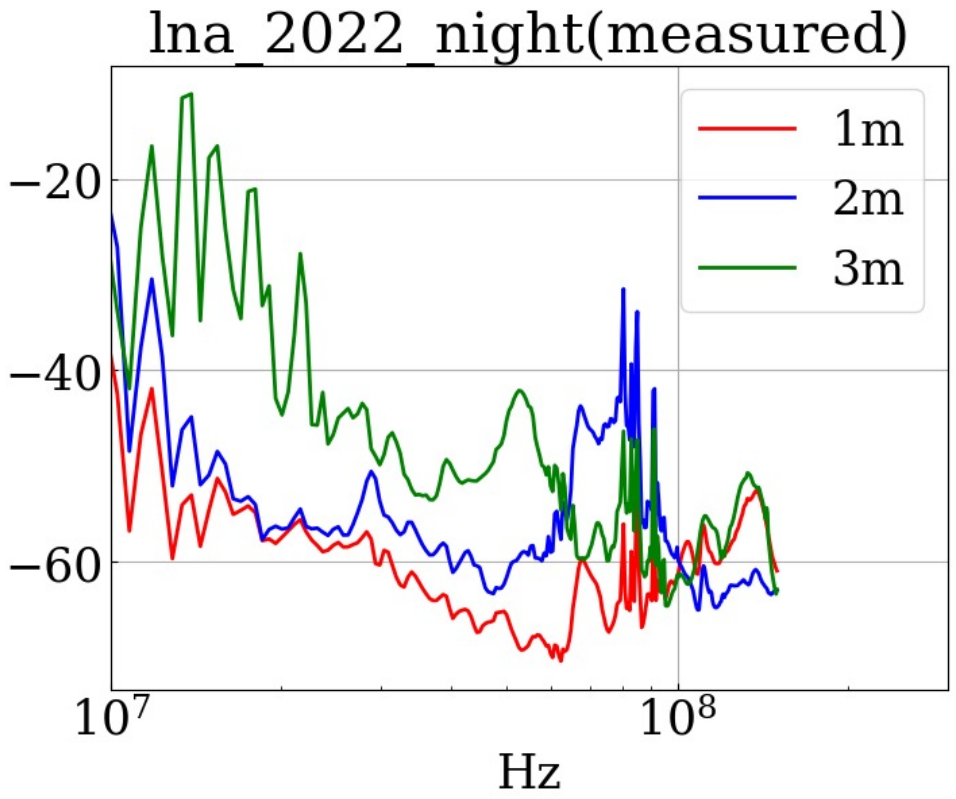




野辺山観測所での試験観測

注）横軸logスケール
10-300MHz

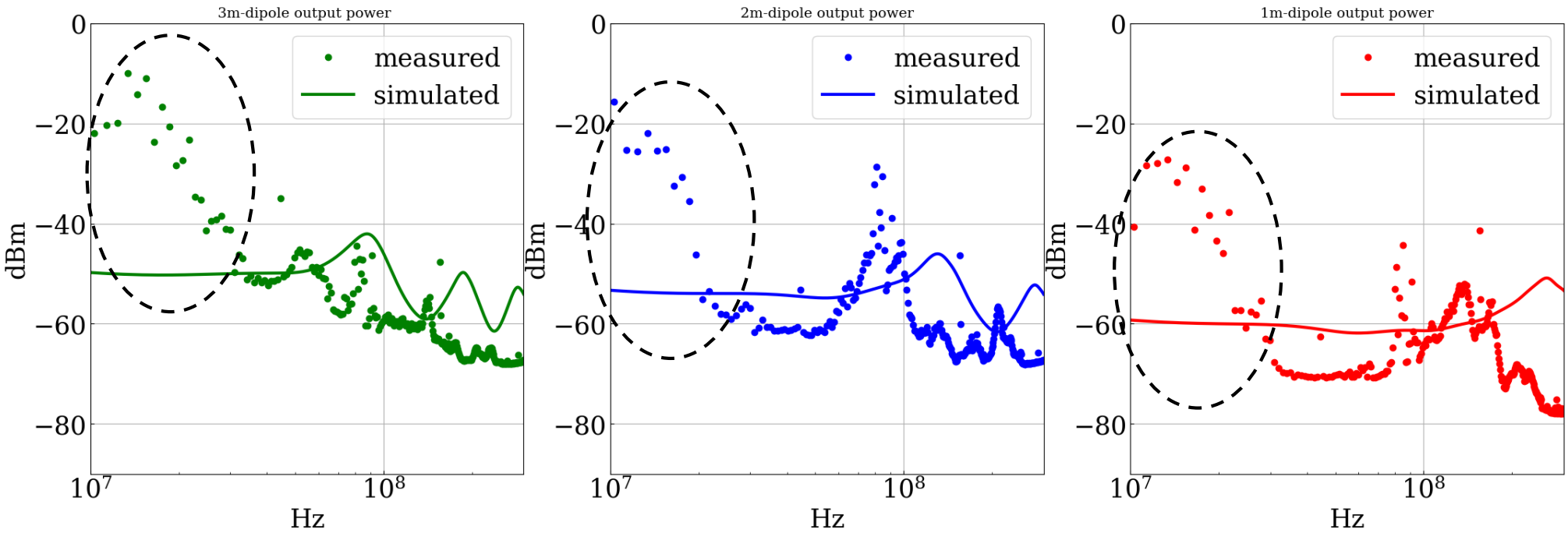




長さが短くなるにつれ、感度が低下
日時でRFIの状況も変化する

野辺山観測所での試験観測

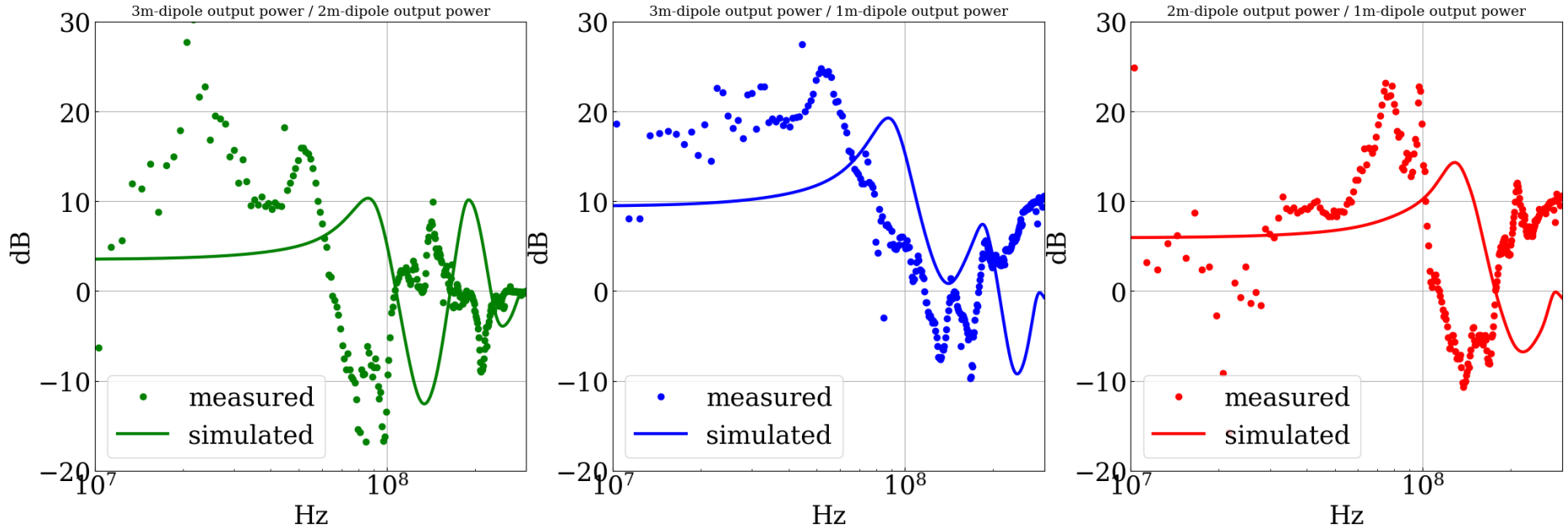
3m　　2m　　1m



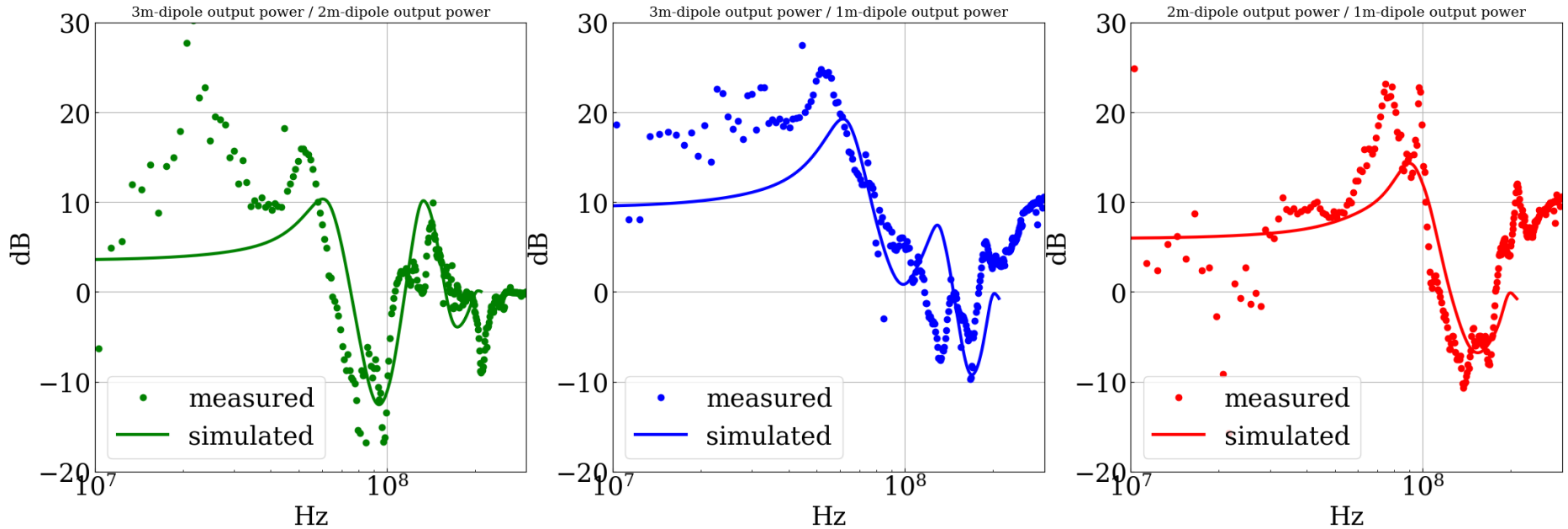
- ✓ 50MHz以下の周波数特性が予測よりはるかに高い
- ✓ 少し周波数がずれている→ダイポール長の誤差?
- ✓ 正確なインピーダンス測定が必要

長さの違いごとに出力電力の比を取ってみる

3m / 2m　　3m / 1m　　2m / 1m



周波数をずらしてみる



野辺山観測所での試験観測でわかったこと

低周波数帯(10-300MHz)では、

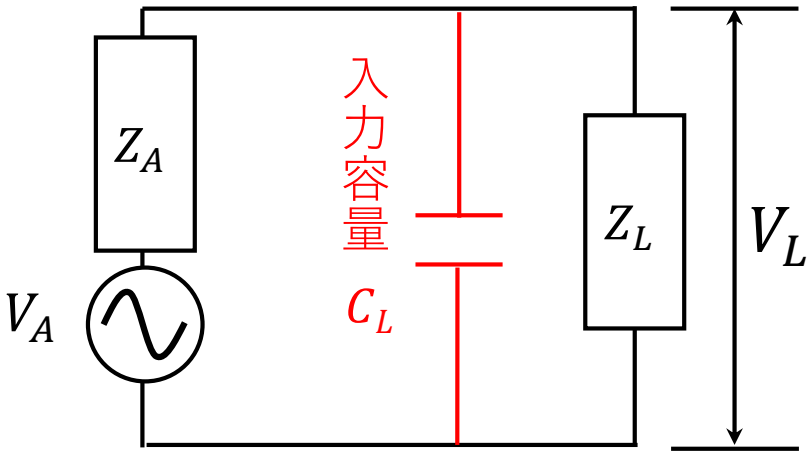
- ✓ RFIが多く存在し、日時によって大きく変動している
- ✓ 50MHz以下では、空よりもはるかに高い電波成分が存在する
  (電離層によるRFIの多重反射？)

<u>野辺山観測所で、月面天文台の地上実証試験を行う場合</u>

- ✓ スケールダウンモデルでのシミュレーションの再現実験(周波数帯:50MHz以上)
- ✓ RFIの事前調査だけでなく、長時間の観測によるRFIの変動も補正する必要がある。実験アンテナとは別に、RFI校正用の受信アンテナがなおよい

また、結露や強風対策を入念にする必要がある

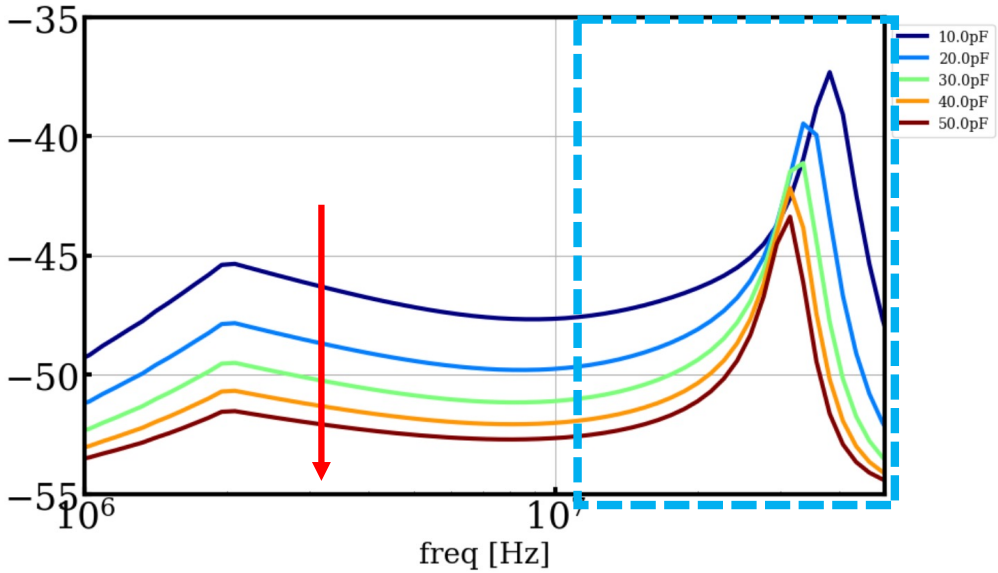
現在の課題：周波数特性の変動を考える

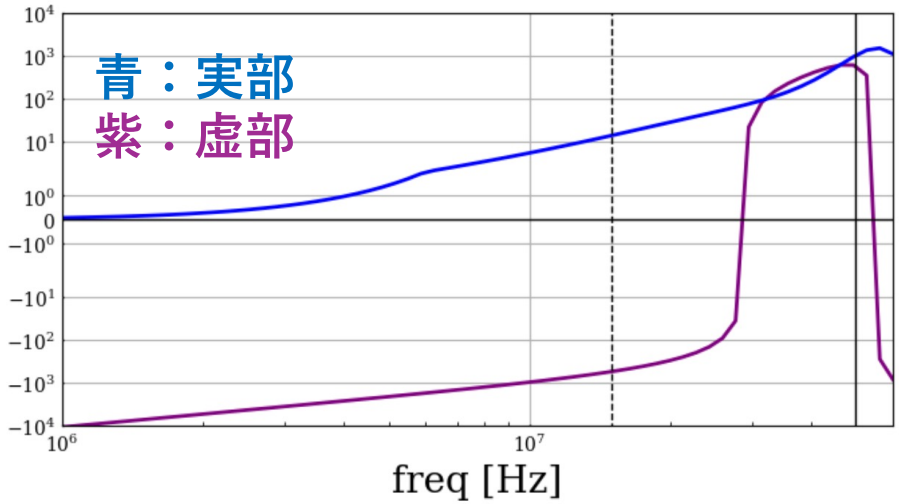


$$\left(\frac{V_L}{V_A}\right)^2 = \frac{1}{(1-\omega C_L X_A)^2 + (\omega C_L R_A)^2}$$

C_L の値に増加に伴い、減少する

極大をもつ周波数が異なり
C_Lの値に増加に伴い、
減少しているわけではない



アンテナインピーダンス(特にリアクタンス)
の値を正確に捉えることが
モデル解析では重要？

リアクタンスが周辺環境にどれくらい
依存するかを解析