

# EMC（電磁適合性）測定のための広帯域 TEMホーンアンテナ

国立研究開発法人情報通信研究機構  
電磁波研究所 電磁環境研究室  
張間 勝茂

2023年10月19日

**NICT**

## ■ EMC(電磁適合性)測定用アンテナ

- 放射イミュニティ試験(電界印加用): 無線電波(放送波、通信波)に対する電磁耐性試験
- 放射エミッション測定(電界測定用): 電子機器から放射される電磁ノイズの測定
- 一般には、国際的な技術基準・規格を定め試験により適合性を確認

ElectroMagnetic  
Compatibility (電磁適合性)

電磁ノイズを出さない

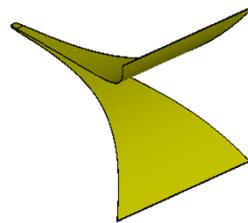


電磁ノイズに対する耐性

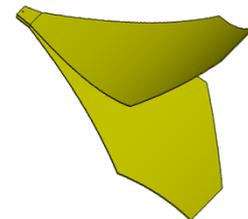
### EMC試験用アンテナ

TEMホーン

短縮指数関数  
テーパ型



ハイブリッド  
テーパ型



放射イミュニティ試験



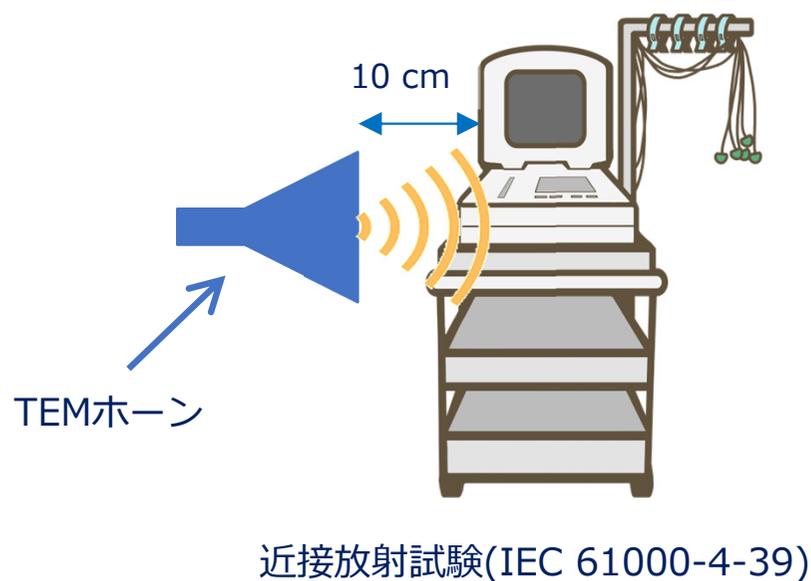
電気・電子機器



放射エミッション測定

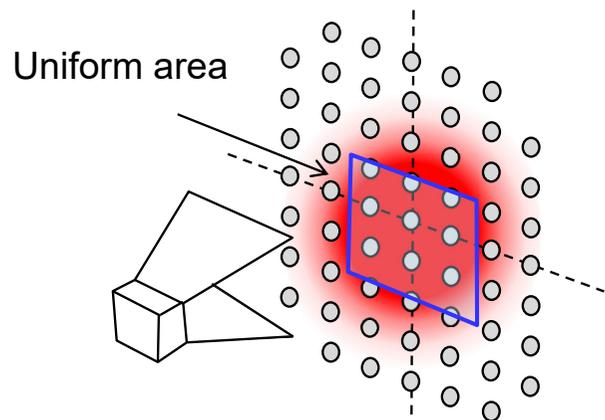


- 携帯無線端末の近接による電子機器の誤動作の懸念
- 近接放射による電子機器のイミュニティ(電磁耐性)基準が規格化 (IEC 61000-4-39)
- 近接放射試験の電界印加アンテナは, TEMホーンアンテナを規定



## ■ 国際規格 IEC 61000-4-39

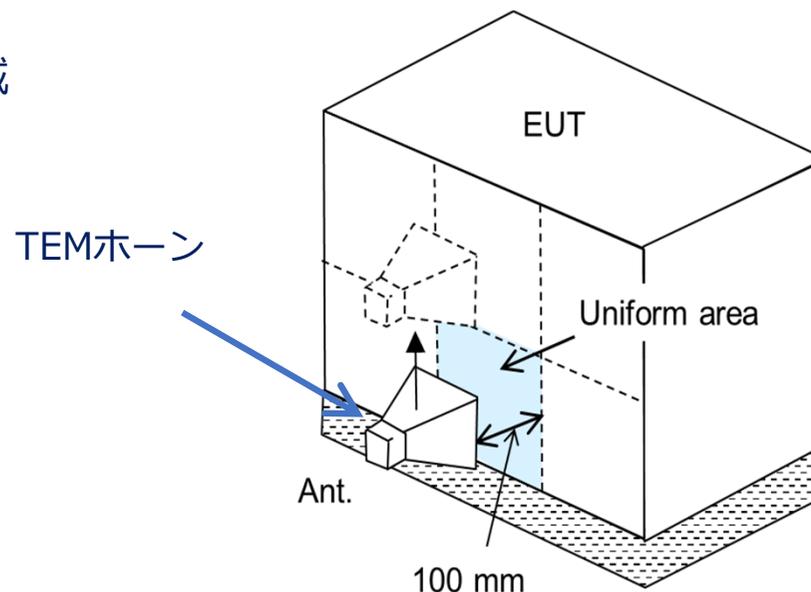
- EUTから 10 cm の距離で電界照射
- 電界印加アンテナ: TEMホーン
- アンテナ反射特性:  $VSWR \leq 3$
- 試験周波数: 380 MHz-6 GHz
- 電界均一領域は、0~-4dB となる矩形領域
- 均一領域ごとにアンテナを走査



電界均一領域 (矩形) : 4 dB

## ■ 求められるTEMホーンの特徴

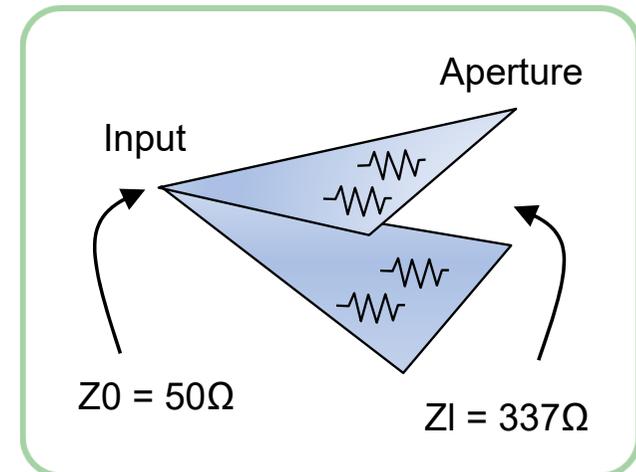
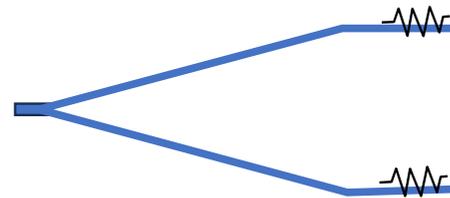
- 良好な反射特性
- 試験周波数帯をカバーする広帯域性
- アンテナ近傍で広い・良好な電界均一性の生成



近接放射試験(IEC 61000-4-39)

## ■ TEMホーン

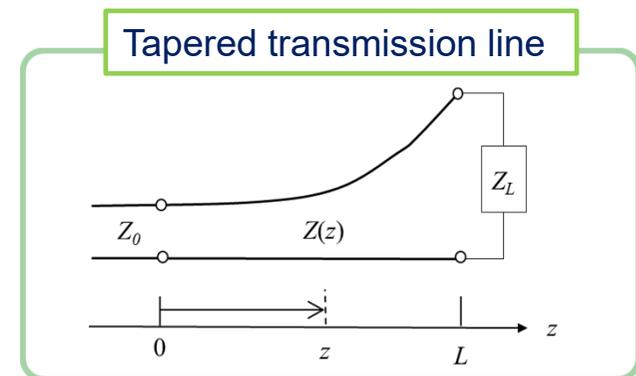
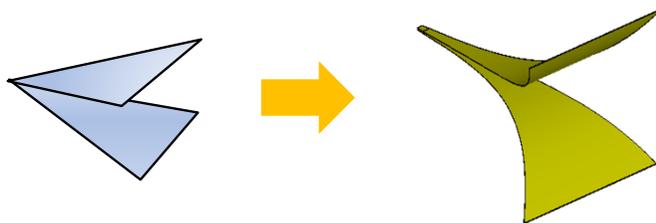
- 2枚の金属プレートの対向配置で構成（平行平板の拡張）
- 平行平板の伝搬モード: TEM (Transverse ElectroMagnetic) モード
- 直線テーパが最も構造が容易
- 給電部から開口面まで特性インピーダンス整合の考慮が必要
  - プレート上に抵抗装荷 [1][2]



## ■ テーパー伝送線路の適用

- テーパー伝送線路をアンテナ形状に適用
- 整合対策不要

TEMホーンの例 (IEC 61000-4-39)、NIST開発

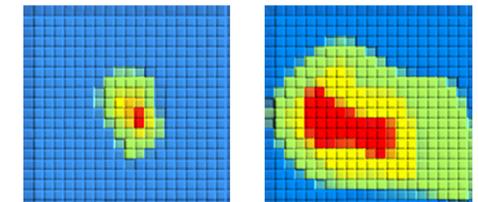
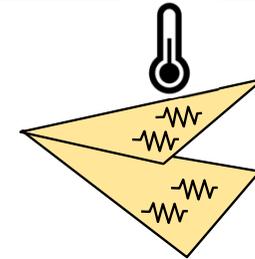


[1] C.A. Grosvenor, et al., NIST Technical Note 1544, Jan. 2007.

[2] IEC 61000-4-39, 2017.

近接放射試験用TEMホーンが、いくつか実用（商品）化されているが、

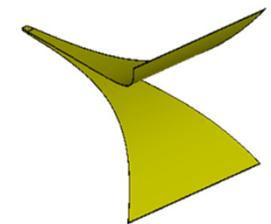
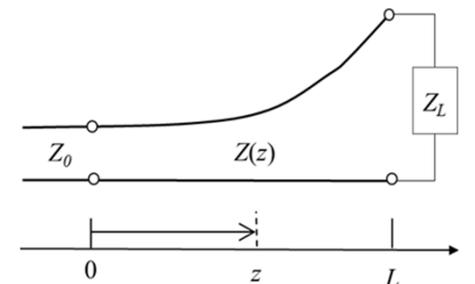
- 抵抗装荷を用いたマッチングのため効率低下
- 電界均一領域が小さい
- 最大放射方向がアンテナ正面にない、もしくは、非対称
- 複数のアンテナで試験周波数帯をカバー



等の問題があり、試験設備・測定効率上好ましくない。



- テーパー伝送線路型TEMホーンにより問題を改善



■ Exponential<sup>[1]</sup>

$$Z(z) = Z_0 e^{az} \quad (0 \leq z \leq L)$$

■ Triangular<sup>[1]</sup>

$$Z(z) = \begin{cases} Z_0 e^{2(z/L)^2 \ln Z_L / Z_0} & (0 \leq z \leq L/2) \\ Z_0 e^{(4z/L - 2z^2/L^2 - 1) \ln Z_L / Z_0} & (L/2 \leq z \leq L) \end{cases}$$

■ Klopfenstein<sup>[2]</sup>

$$\ln Z(z) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{\Gamma_0}{\cosh A} A^2 \phi\left(\frac{2z}{L} - 1, A\right) \quad (0 \leq z \leq L)$$

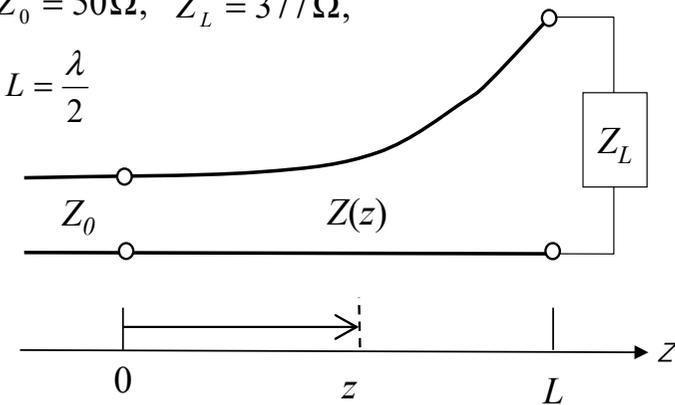
$$\phi(x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A\sqrt{1-y^2})}{A\sqrt{1-y^2}} dy \quad \Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

■ Hecken<sup>[3]</sup>

$$\ln Z(z) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right) \frac{B}{\sinh B} \phi\left(B, \frac{2z}{L} - 1\right) \quad (0 \leq z \leq L)$$

$$Z_0 = 50 \Omega, \quad Z_L = 377 \Omega,$$

$$L = \frac{\lambda}{2}$$



テーパー伝送線路

[1] D.M. Pozar, Microwave engineering, 4th Ed., New York: Wiley, 2011.

[2] R.W. Klopfenstein, Proc. IRE, vol.44, no.1, pp.31-35, Jan. 1956.

[3] R.P. Hecken, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.20, no.11, pp.734-739, Nov 1972.

$$\phi(B, x) = \int_0^x I_0(B\sqrt{1-y^2}) dy$$

## ■ Exponential

$$Z(z) = Z_0 e^{az} \quad (0 \leq z \leq L)$$

## ■ Triangular

$$Z(z) = \begin{cases} Z_0 e^{2(z/L)^2 \ln Z_L / Z_0} & (0 \leq z \leq L/2) \\ Z_0 e^{(4z/L - 2z^2/L^2 - 1) \ln Z_L / Z_0} & (L/2 \leq z \leq L) \end{cases}$$

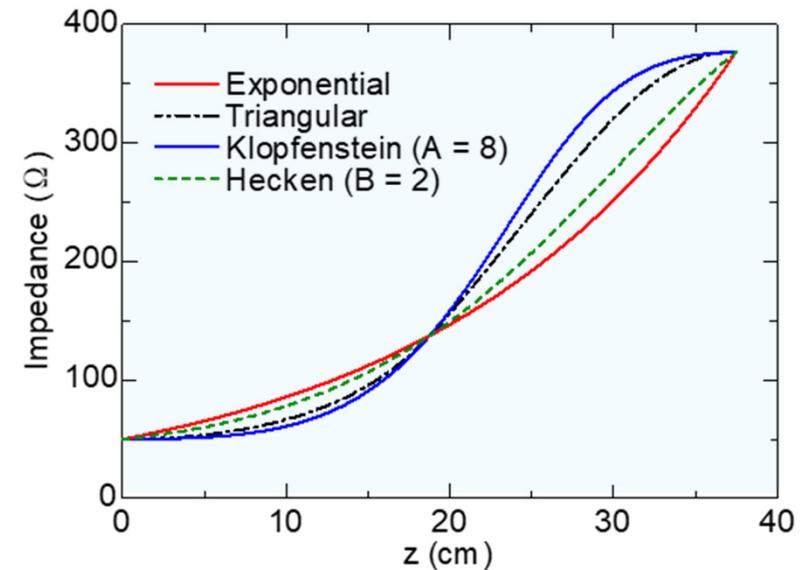
## ■ Klopfenstein

$$\ln Z(z) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{\Gamma_0}{\cosh A} A^2 \phi\left(\frac{2z}{L} - 1, A\right) \quad (0 \leq z \leq L)$$

$$\phi(x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A\sqrt{1-y^2})}{A\sqrt{1-y^2}} dy \quad \Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

## ■ Hecken

$$\ln Z(z) = \frac{1}{2} \ln(Z_0 Z_L) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{Z_L}{Z_0}\right) \frac{B}{\sinh B} \phi\left(B, \frac{2z}{L} - 1\right) \quad (0 \leq z \leq L)$$



テーパー伝送線路の特性インピーダンス

$$\phi(B, x) = \int_0^x I_0(B\sqrt{1-y^2}) dy$$



■ テーパー伝送線路のTEMホーンへの適用

- 4つのタイプをモデル化

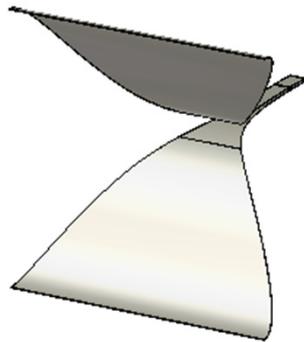
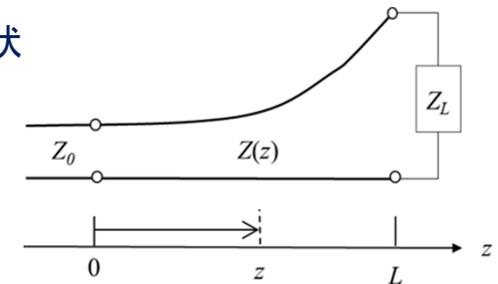
■ 特性を数値計算

- 有限積分法
- 周波数：400 MHz~6 GHz

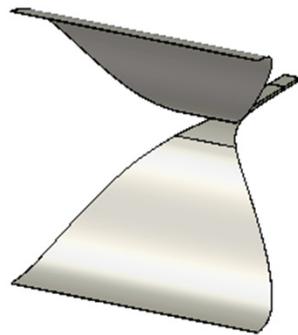
テーパー伝送線路の形状

$$Z(z) = \frac{h(z)}{w(z)} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

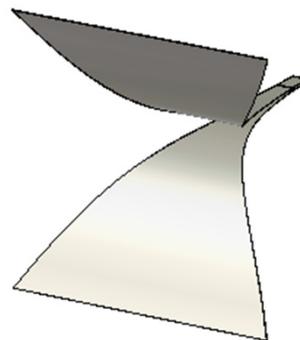
テーパー伝送線路の特性インピーダンス



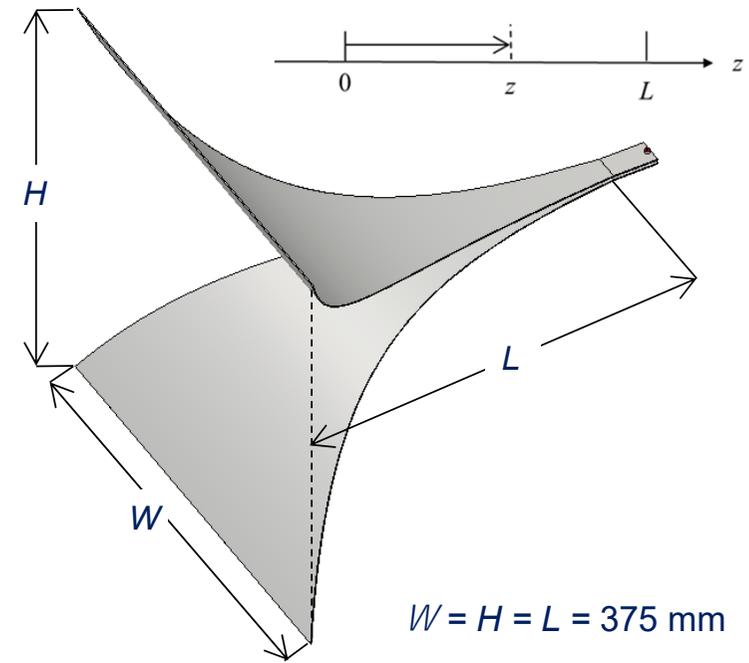
Triangular



Klopfenstein



Hecken

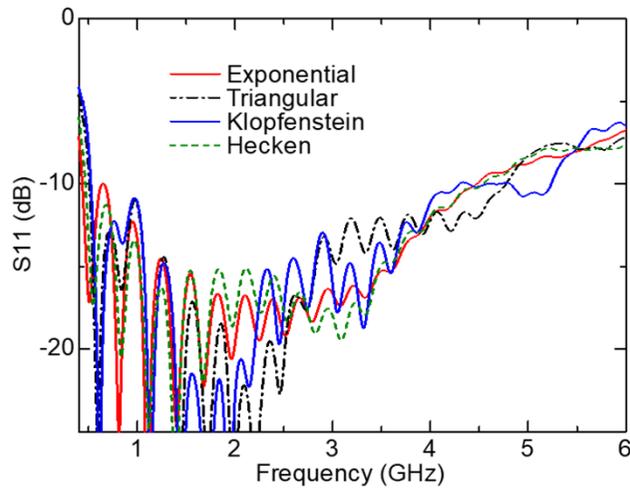


$W = H = L = 375 \text{ mm}$

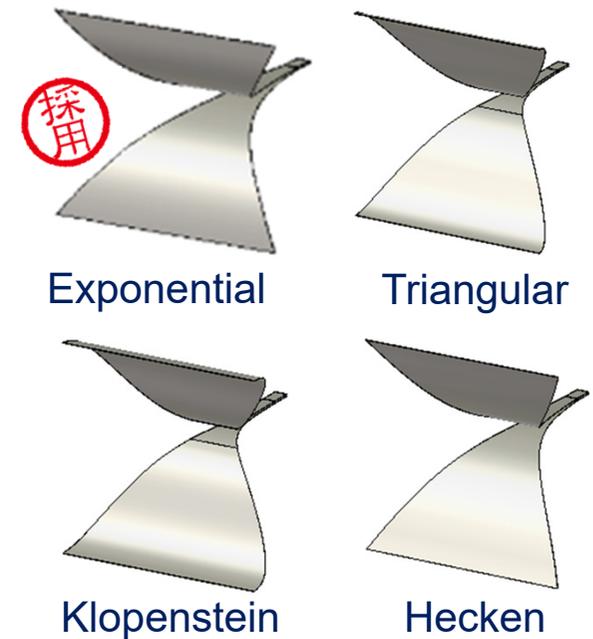
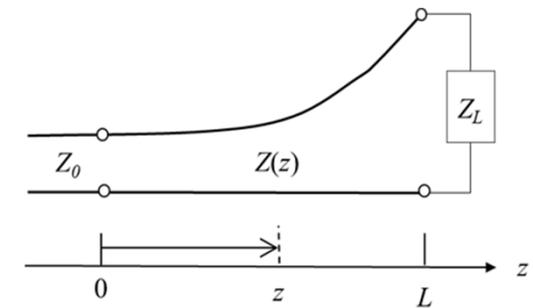
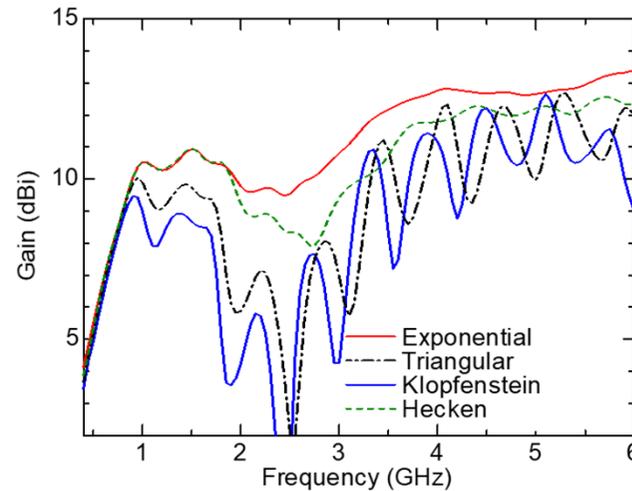
Exponential

# 各TEMホーンのアンテナ特性の比較

反射特性(S11)

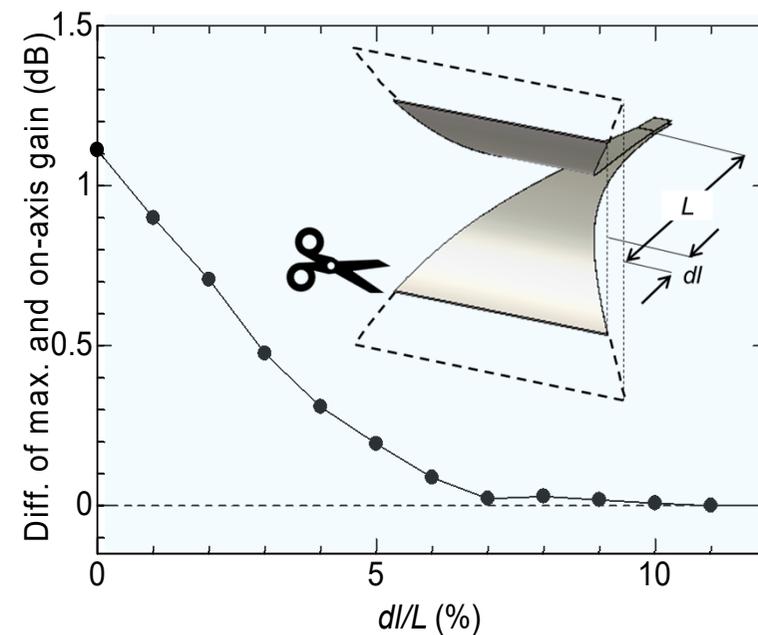
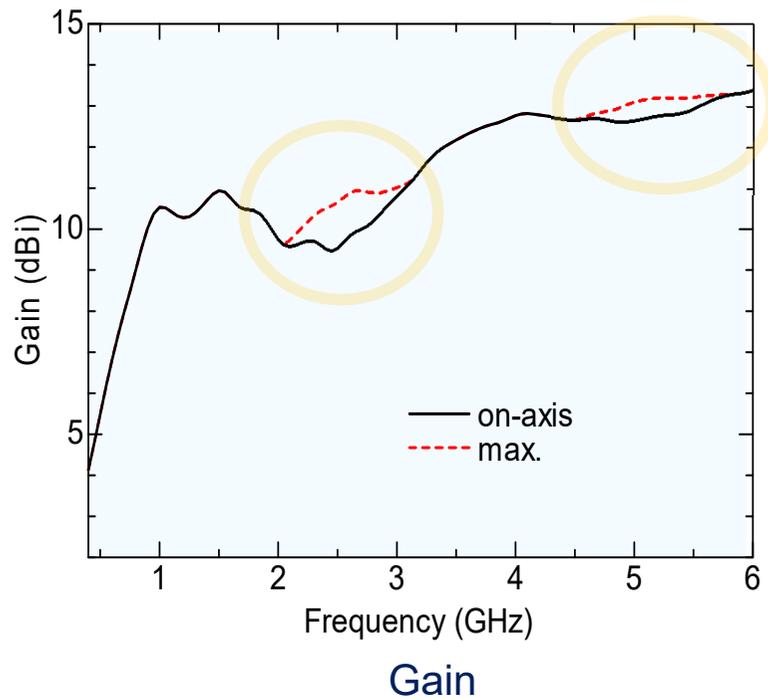


Gain



- 反射特性は、テーパー（マッチング）伝送線路の効果が反映して良好
- Triangular や Klopfenstein テーパーは、利得に大きなリップルが生じる
- アンテナとしては、指数関数型が最良

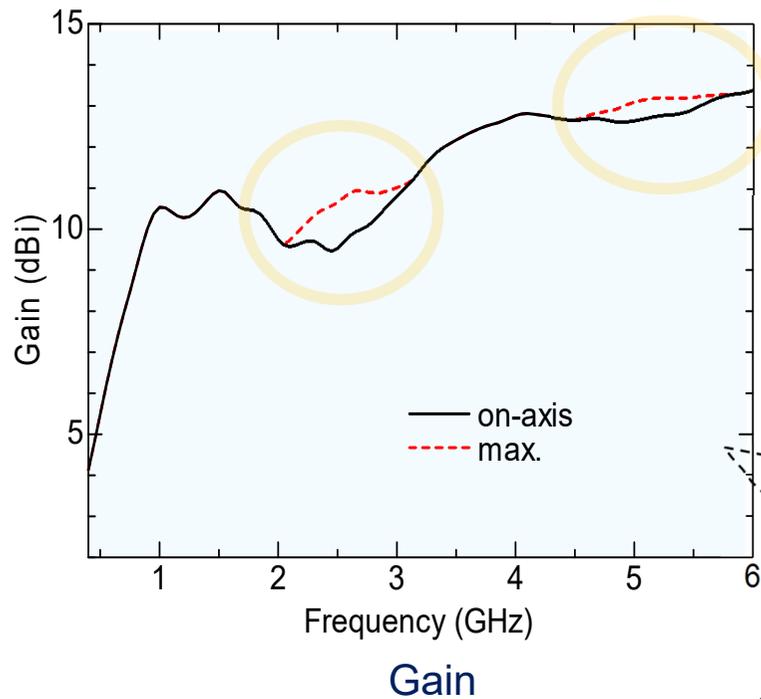
## 指数関数テーパー型



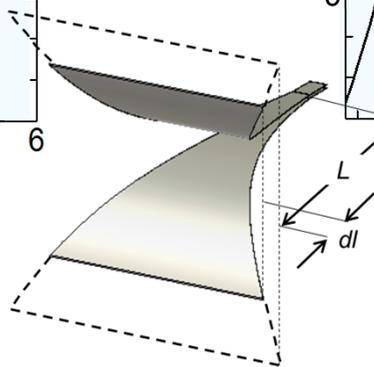
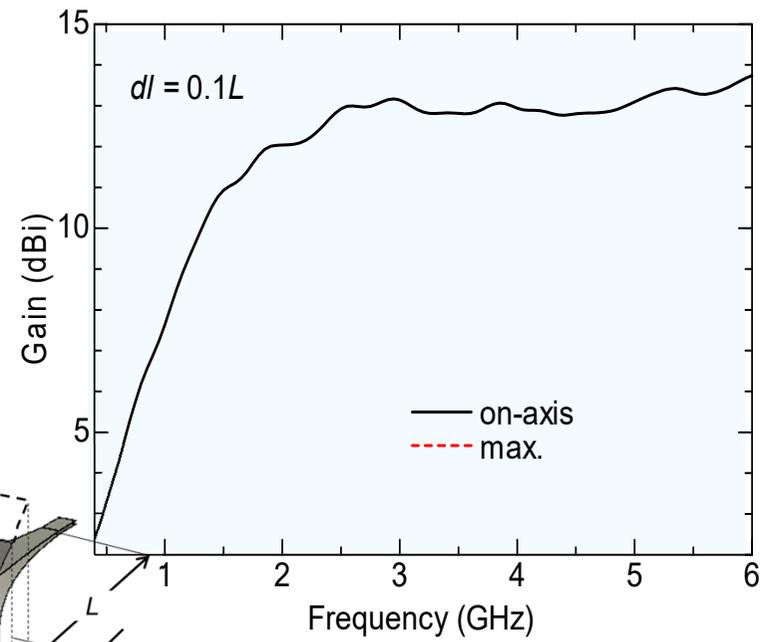
## 切り取り量による最大利得と正面方向利得の差

- ビームの落込む周波数帯
- 指向性の問題は、アンテナ長の10%程度(6-11%)を先端から切り取り短縮することで改善

指数関数テーパ型



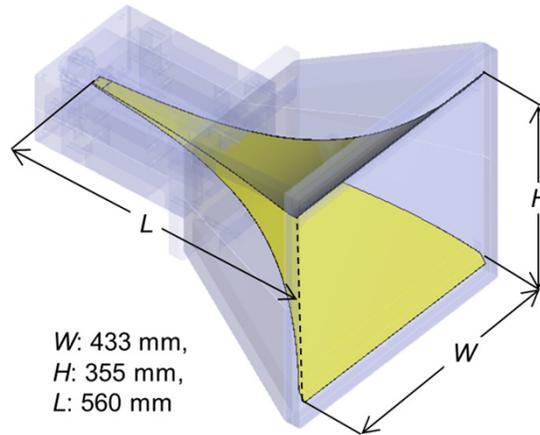
短縮指数関数テーパ型



- 10% 切り取り例
- アンテナ軸方向の利得と最大値が完全一致

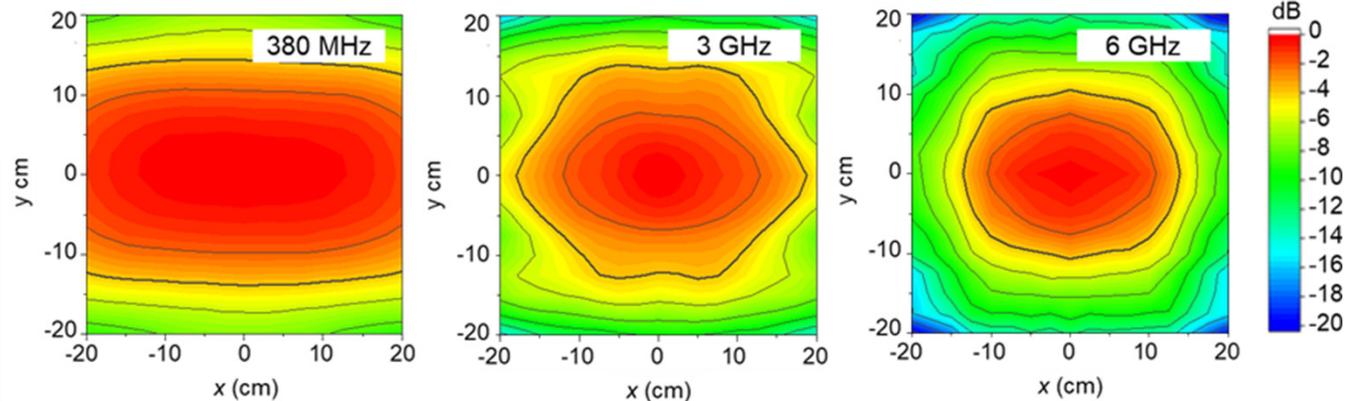
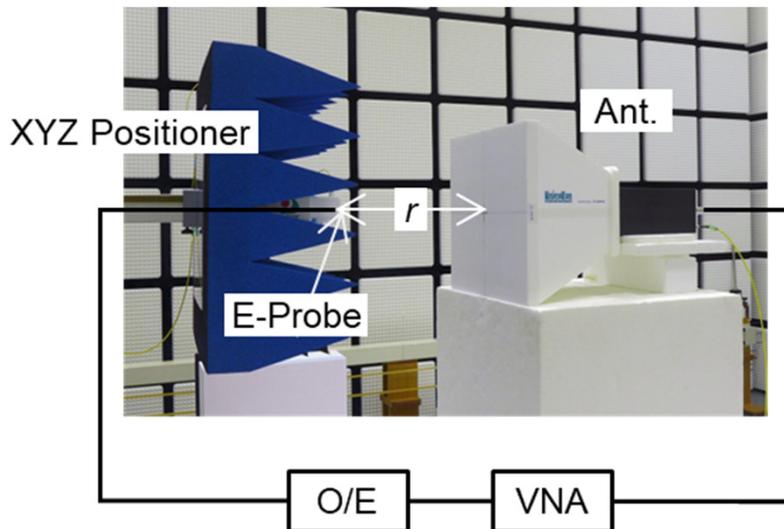
## ■ IEC 61000-4-39

- TEMホーン
- $VSWR \leq 3$
- 380 MHz-6 GHz
- 開口面から10 cm の電界分布
- 均一領域 (0~-4dB) と規定



## ■ 短縮指数関数テーパ型TEMホーン

- 試験帯域をカバーする広帯域
- アンテナ近傍に良好な電界分布を生成



電界分布測定値 (開口面から10 cm)

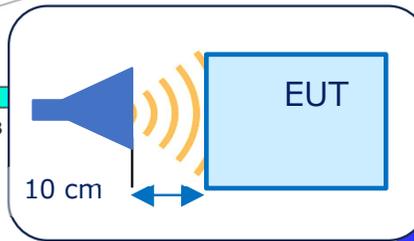
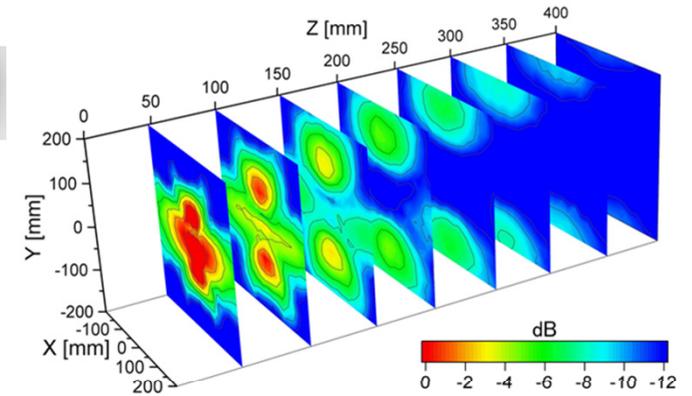
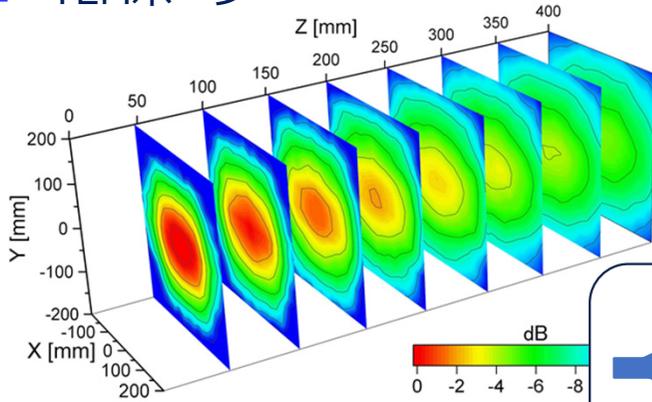
## ■ TEMホーン

5.8 GHz

## ■ フラットダイポール

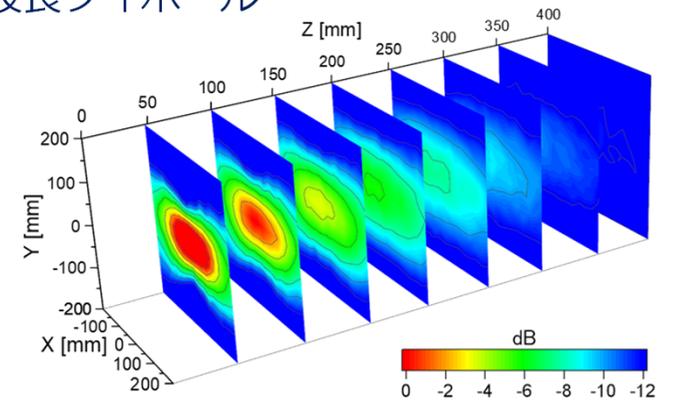
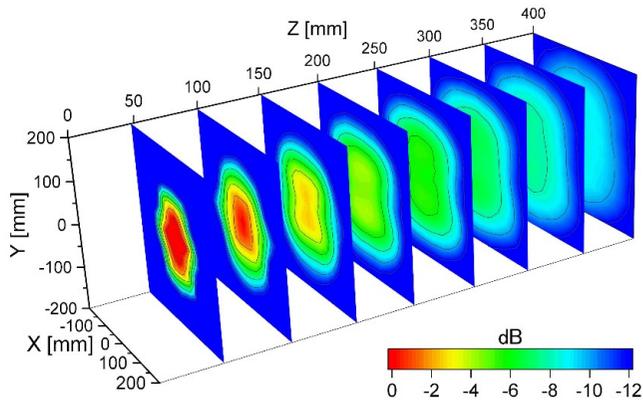
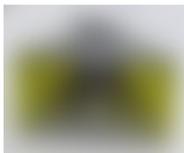


電界レベル維持、  
広帯域にわたり  
良好な均一電界  
領域を生成



## ■ DRGA

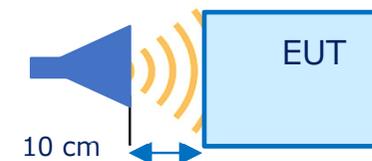
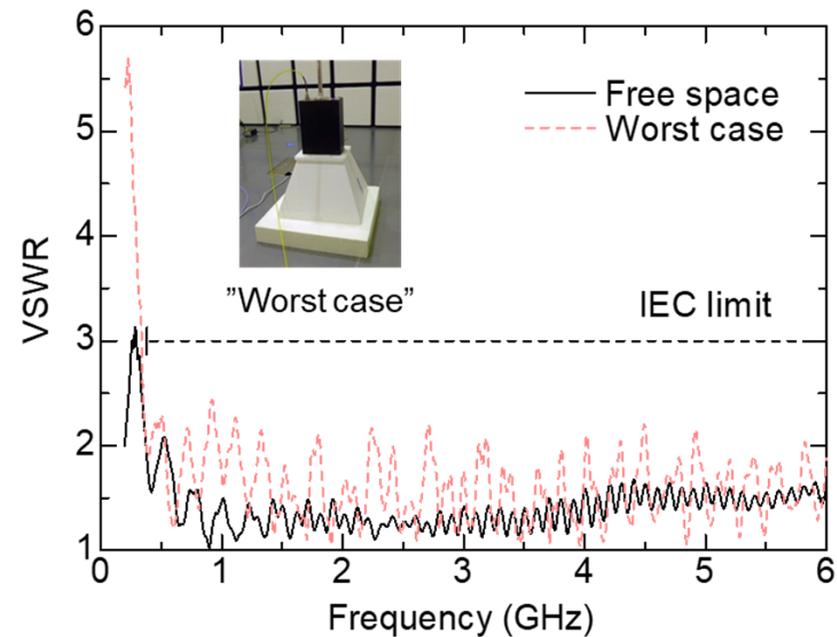
## 半波長ダイポール



## ■ IEC 61000-4-39

- TEMホーン
  - **VSWR  $\leq 3$**
  - 380 MHz-6 GHz
  - 開口面から10 cm の電界分布
  - 均一領域 (0~-4dB) と規定
- 
- VSWR < 2となる反射特性
  - IEC 61000-4-39のVSWR要件を満足
  - 試験周波数帯を1本のアンテナでカバー
  - ワーストケース (金属面から10 cm) においてもVSWR要件を満足

短縮指数関数テーパードームホーン



## ■ ハイブリッドテーパ型

- 指数関数テーパ伝送線路の特性インピーダンス

$$Z(z) = Z_0 e^{az} \quad (0 \leq z \leq L)$$

- 直線と曲線テーパのハイブリッド構造
- 小型化を実現

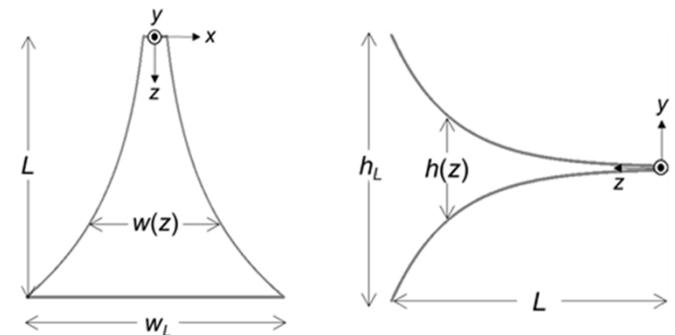
指数関数テーパ伝送線路の特性インピーダンス

$$Z(z) = \frac{h(z)}{w(z)} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

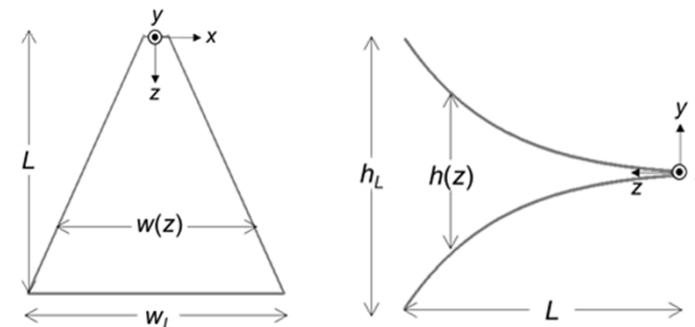
直線状

$$w(z) = az + w_0 \quad (0 \leq z \leq L)$$

## 指数関数テーパTEMホーン

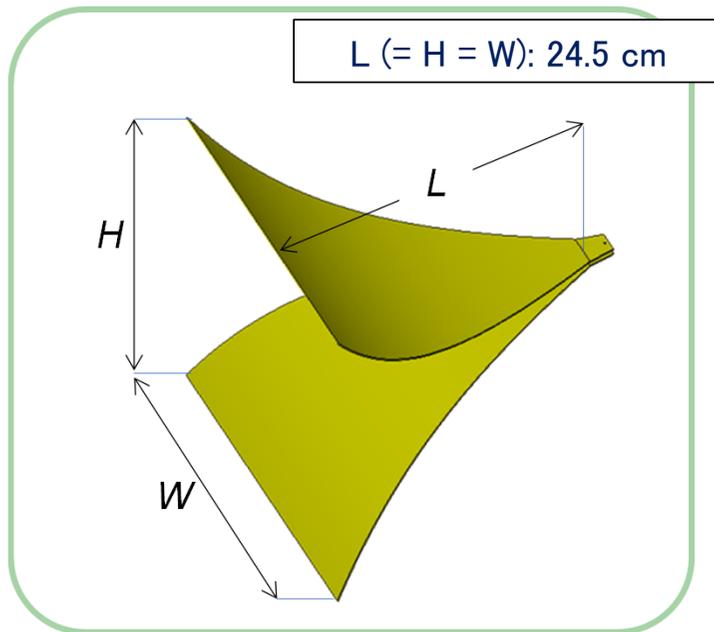


## ハイブリッドテーパTEMホーン

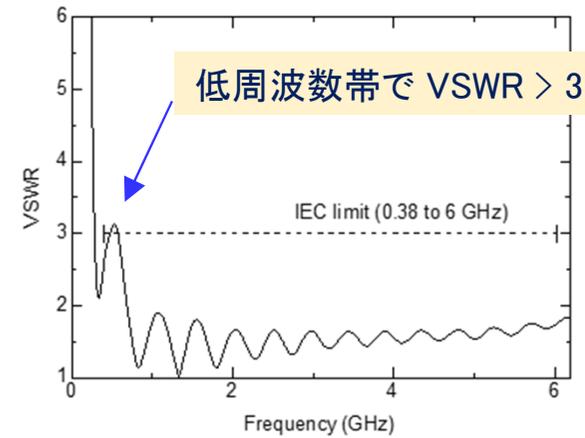


## ■ 近接試験用

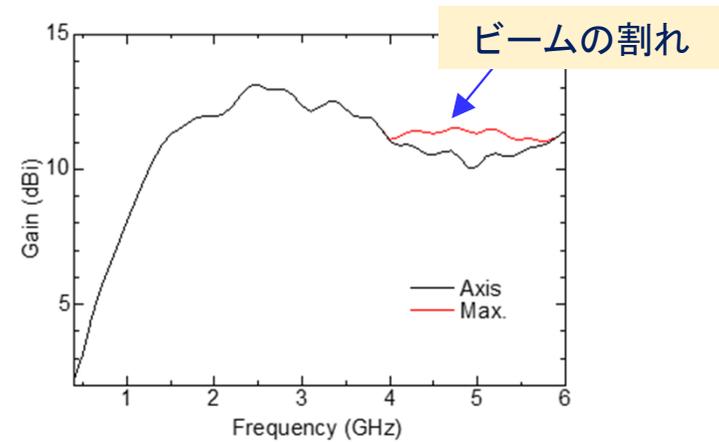
- 試験帯域(380MHz-6GHz)をカバー
- 反射特性(VSWR $\leq$ 3)の要件を満足



## 反射特性(VSWR)

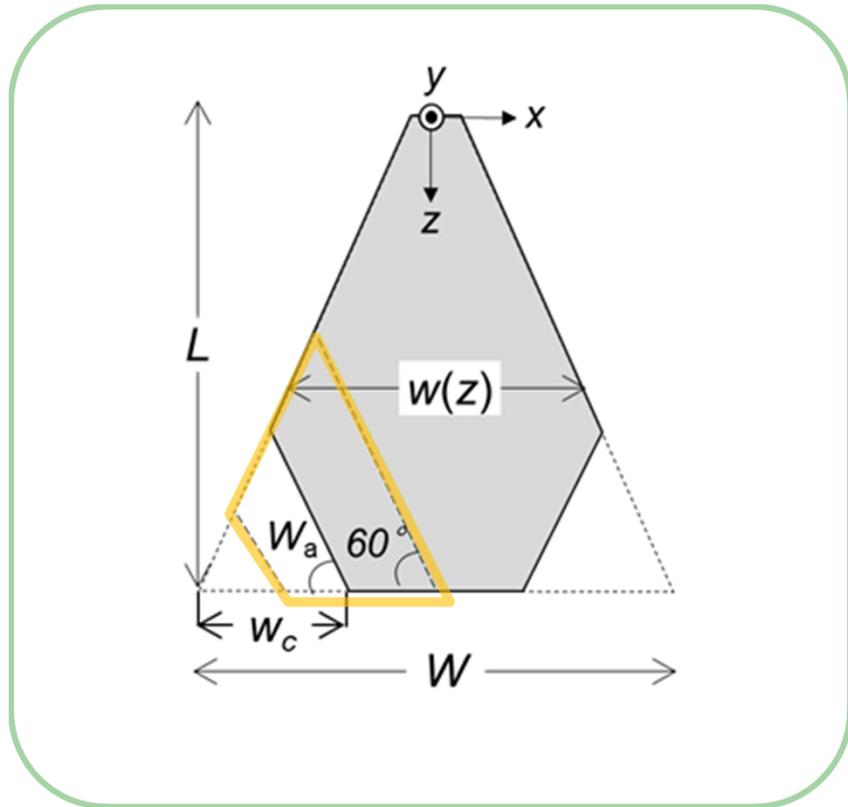
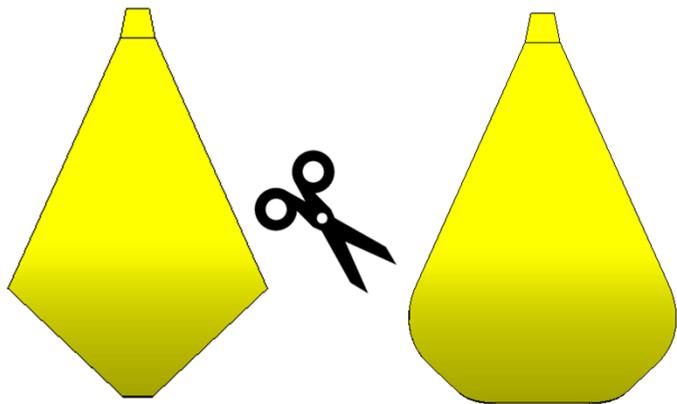


## 利得



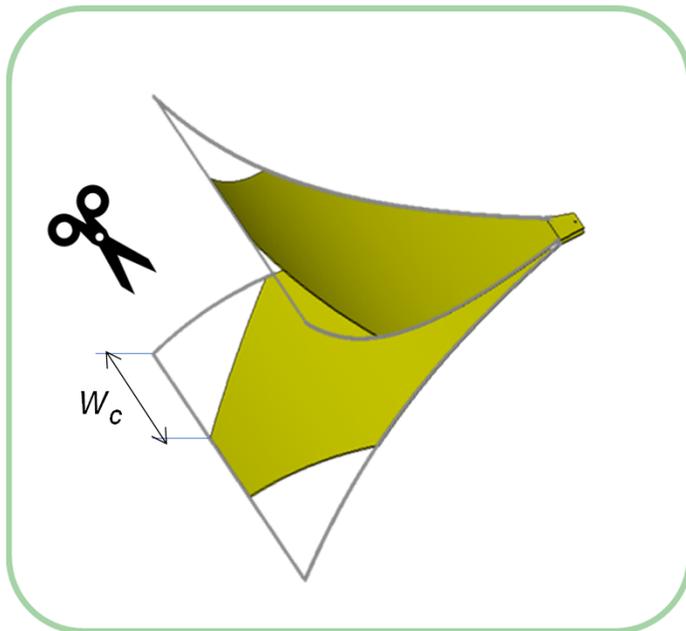
## ■ ハイブリッドテーパー型

- 反射特性の対策
- 指向性（ビームの割れ）の改善
- 切取り範囲： $0.2W \sim 0.5W$ ，角：60度

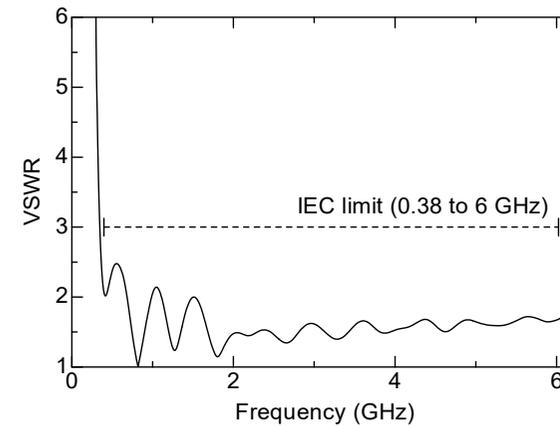


## ■ ハイブリッドテーパー型

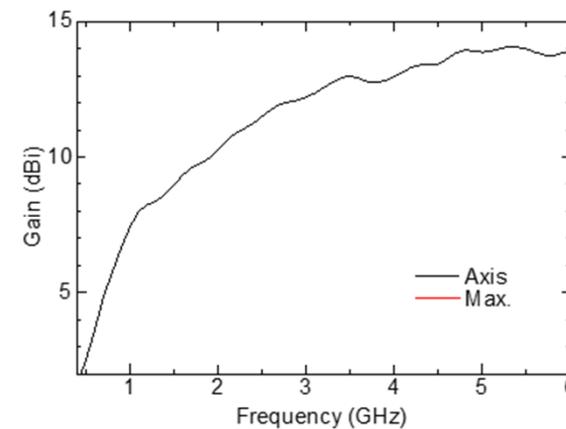
- 切取り量:  $0.37W$ , 角:  $50$ 度
- 全試験周波数帯で  $VSWR < 2.5$
- ビームの割れ無



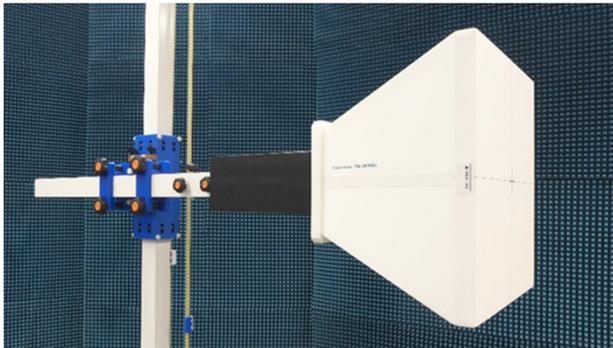
## 反射特性(VSWR)



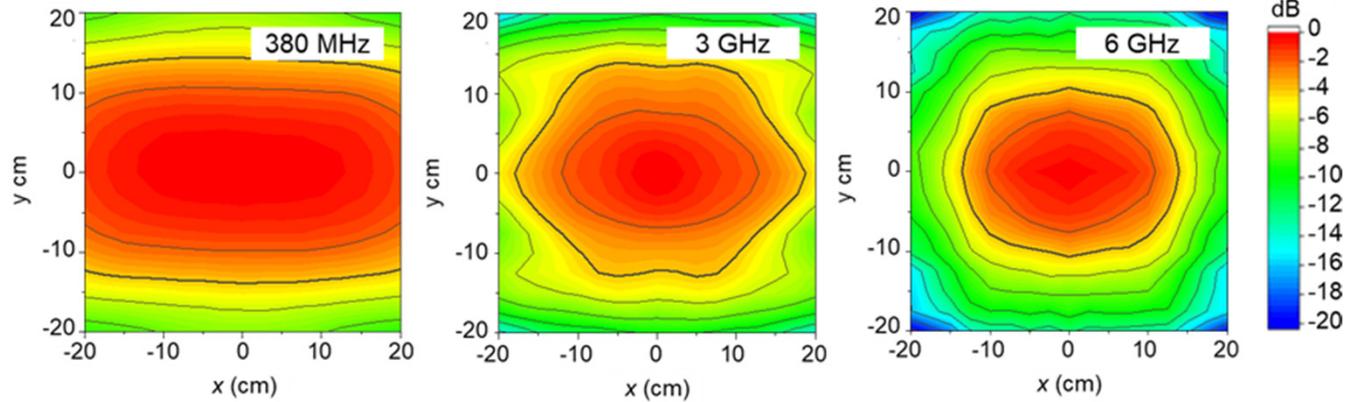
## 利得



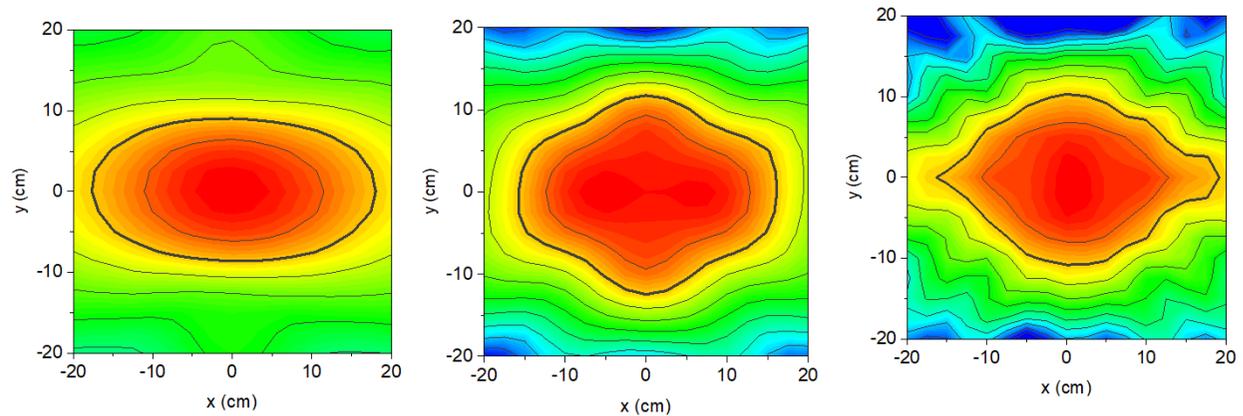
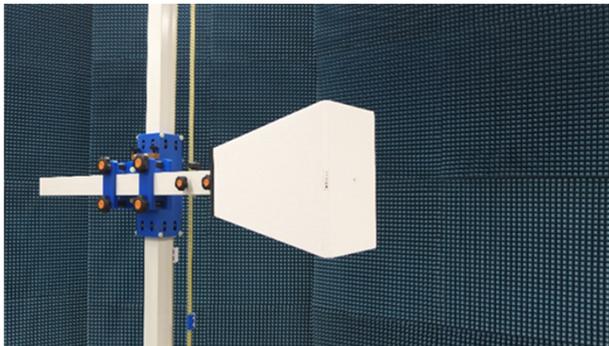
## 短縮指数関数テーパーTEMホーン



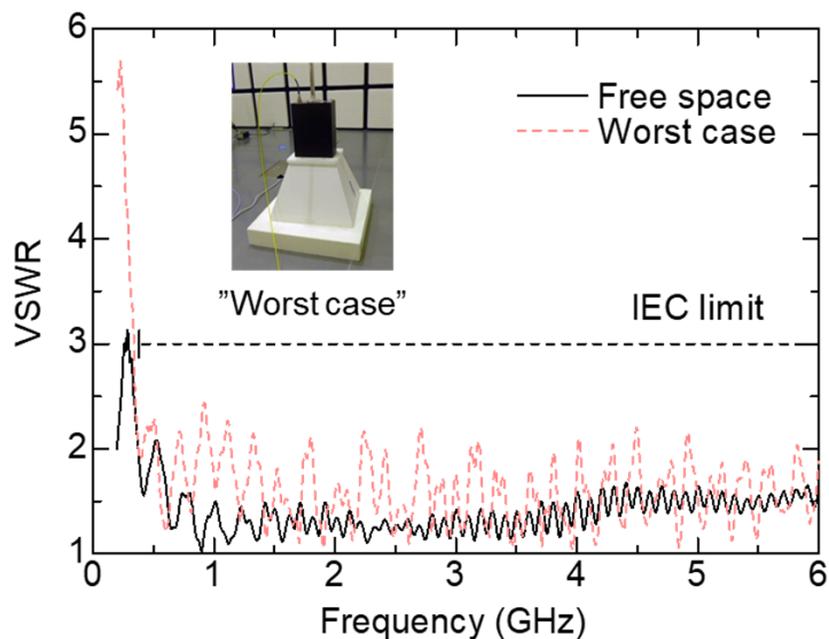
## 電界分布測定値 (開口面から100mm)



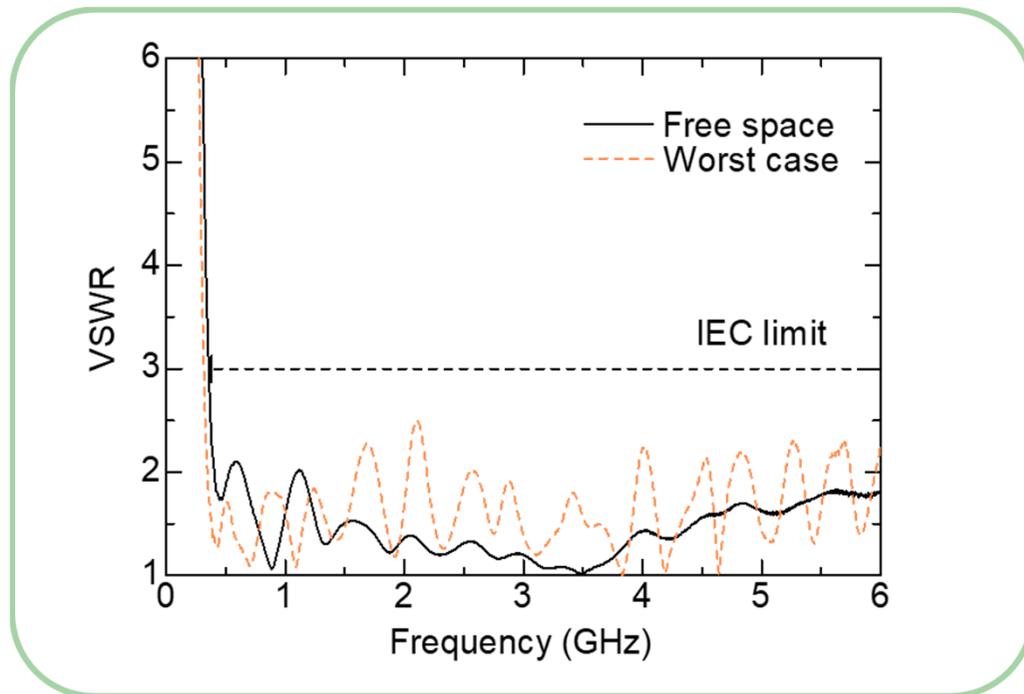
## ハイブリッドテーパーTEMホーン



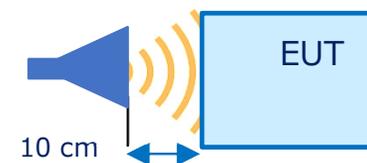
## 短縮指数関数テーパードTEMホーン



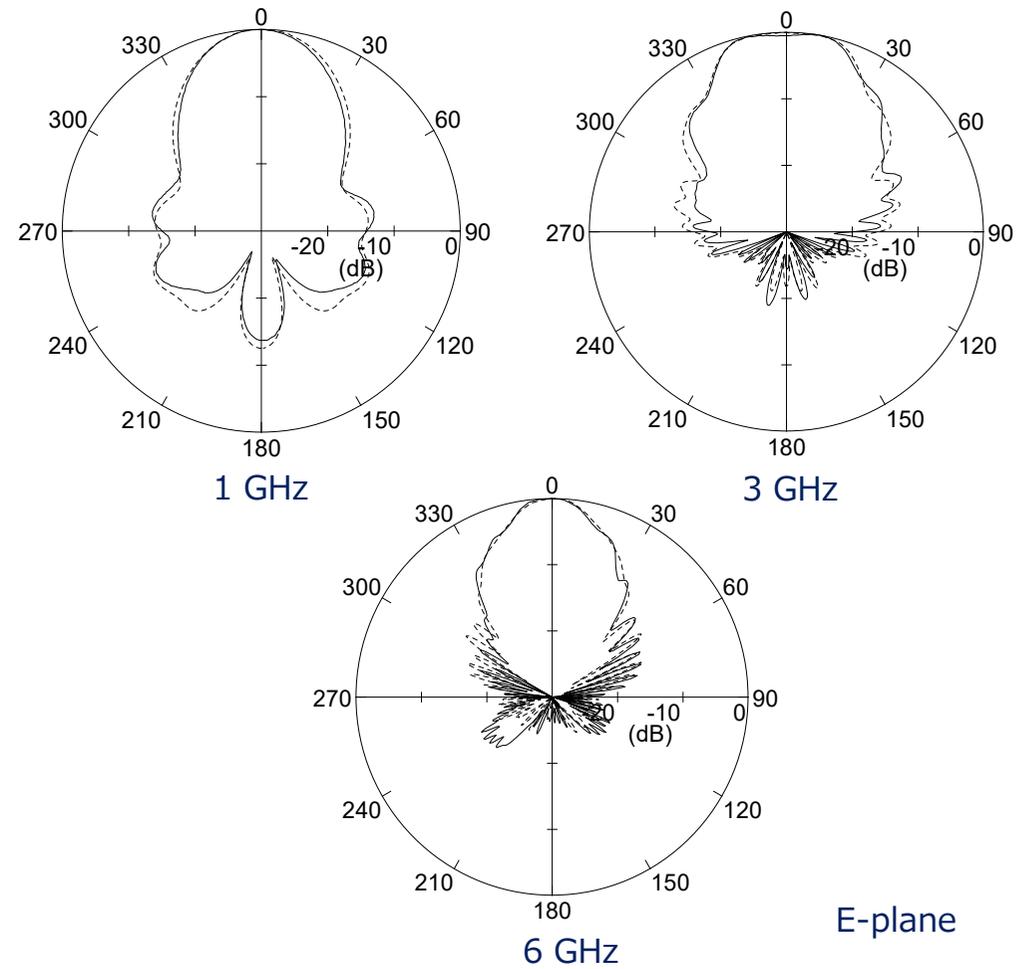
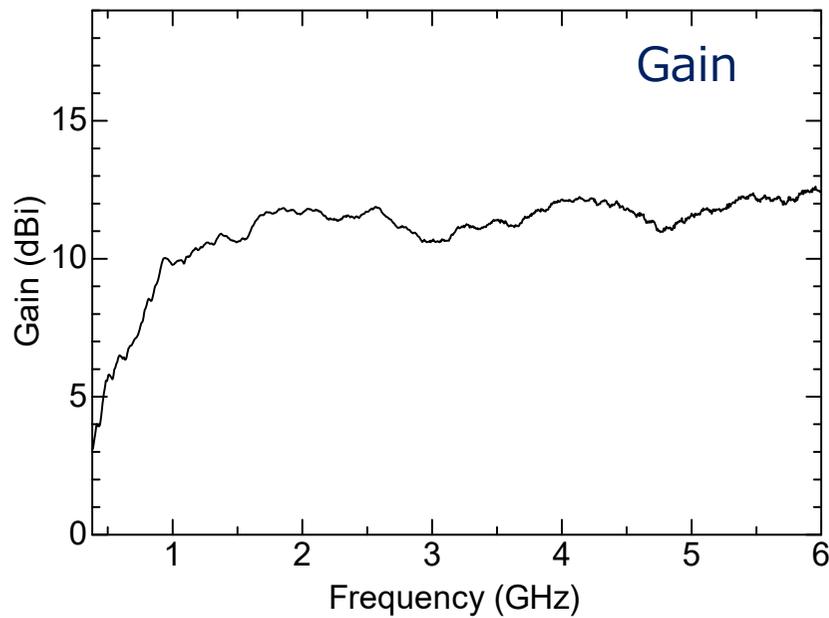
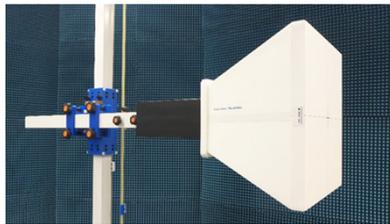
## ハイブリッドテーパードTEMホーン



- VSWR < 2.5となる反射特性
- IEC 61000-4-39のVSWR要件を満足
- 試験周波数帯を1本のアンテナでカバー
- ワーストケース（金属面から10 cm）においてもVSWR要件を満足



## 短縮指数関数テーパードTEMホーン

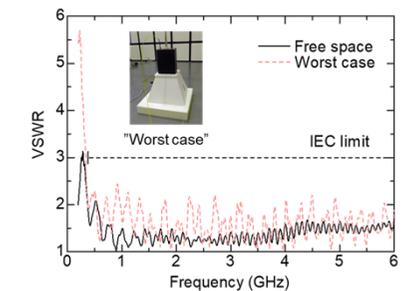
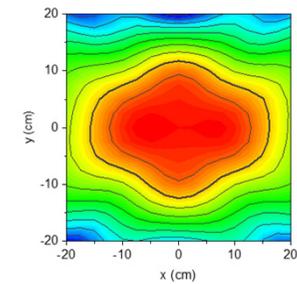
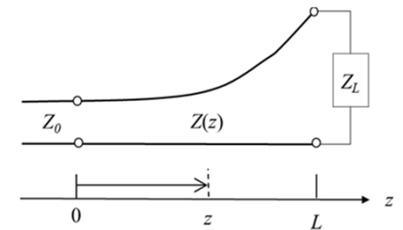




短縮指数関数型及びハイブリッド型TEMホーンにより、以下の問題点を改良した。

- 抵抗装荷を用いたマッチングのため効率低下
  - **テーパー伝送線路の適用により抵抗装荷不要**
- 電界均一領域が小さい、もしくは、非対称
  - **対称性のある広い電界均一領域を生成**
- 最大放射方向がアンテナ正面にない
  - **アンテナの正面が最大放射方向**
- 複数のアンテナで試験周波数帯をカバー
  - **1本のアンテナで全周波数帯をカバーできる広帯域性**

等、試験効率の改善が期待できる。



- 本技術の開発目的である近接放射試験(IEC規格)用アンテナへの適用は、試験効率上のメリットが大きい。



- 広帯域性から放射エミッション測定用アンテナへの展開を期待
- 本アンテナ構造に着目すると、パルス信号に対する波形歪が少ないため、無線通信分野における開発・研究用途に展開することも可能

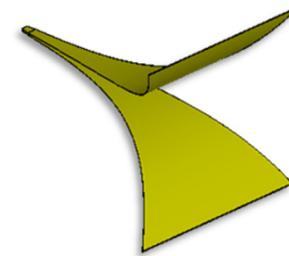
放射エミッション測定用に展開するため、以下の改善点があります。

- 軽量化・低コスト化を実現するアンテナ構造及び組立技術
- 給電部及びバラン(平衡不平衡)回路の実装技術

これらの技術を有する企業様を期待します。

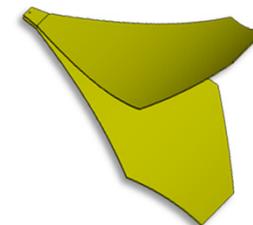
## ● 短縮指数関数テーパードTEMホーン

- 発明の名称 : テーパーTEMホーンアンテナ
- 出願番号 : 特願2016-171431
- 出願人 : 情報通信研究機構
- 発明者 : 張間 勝茂



## ● ハイブリッドテーパードTEMホーン

- 発明の名称 : テーパーTEMホーンアンテナ
- 出願番号 : 特願2020-55420
- 出願人 : 情報通信研究機構
- 発明者 : 張間 勝茂



- 2017年- 株式会社ノイズ研究所と共同研究実施中

国立研究開発法人情報通信研究機構  
イノベーション推進部門  
知財活用推進室

T E L    042-327-6950

e-mail    [ippo@ml.nict.go.jp](mailto:ippo@ml.nict.go.jp)