

大口径パラボラアンテナ指向性測定の新たな代替手法の開発

Development of New Alternative Approach for Measuring Directivity of Large Aperture Parabolic Antenna

夏原 啓一 長谷川 真也 尚 尔 昊
Keiichi Natsuhara Shinya Hasegawa Erhao Shang

野呂 崇徳 田村 英樹
Takanori Noro Hideki Tamura

要 旨

大口径パラボラアンテナ指向性測定のための代替手法として、スケールモデル測定と製作誤差の影響を含める指向性解析を併用する手法を開発した。本手法は巨額の設備投資を必要とせず、従来用いられてきた「スケールモデル測定」に「製作誤差の影響を含める指向性解析」を併用するものであり、スケールモデルの実測指向性に、指向性解析で求めた供試アンテナの製作誤差の影響を補正值として加える方法である。今回、本手法を用いて実際のパラボラアンテナの指向性を予測し、実測指向性と比較検証した結果、本手法で得られる指向性は実測指向性の最悪値を予測できるものであり、指向性検査用として有効であることを確認した。

Abstract

As an alternative approach for measuring the directivity of large aperture parabolic antennas, JRC has developed a method that combines measurement using scale model and directivity analysis including the effects of manufacturing errors. This approach is to combine “measurement using the scale model” which was used in the past without requiring massive facility investment and “directivity analysis including the effects of manufacturing errors”. This is a method of adding the effects of the manufacturing errors of the test antenna obtained by the directivity analysis to the measured directivity of the scale model as a correction value. This time, JRC predicted the directivity of the actual parabolic antenna using this approach and compared and verified with the measured directivity. As a result, it has been confirmed that the directivity obtained by this approach predicts the worst value of the measured directivity and is effective for directivity inspection.

1. まえがき

海外向けSバンド気象レーダでは、直径8.5 mのパラボラアンテナを使用することが標準となっている⁽¹⁾が、このような大口径パラボラアンテナの指向性測定は、物理的に大規模な測定設備を必要とするため困難を伴う。このため、従来から大口径パラボラアンテナの指向性測定のための代替手法が用いられているが、一般的な代替手法である「近傍界測定法⁽²⁾」は巨額の設備費を要する点が実用化の妨げとなっていた。この問題を解決するため、当社の開口面アンテナに係る技術的ノウハウを生かし、小口径パラボラアンテナと同等の設備で大口径パラボラアンテナの指向性測定を可能とする代替手法を開発した。本稿では、この代替手法の開発について述べる。

2. 大口径パラボラアンテナ指向性測定における課題

2.1 大口径パラボラアンテナの指向性測定

大口径パラボラアンテナの指向性は、一般的に図1に示す構成により屋外で測定されるが、直径が5 mを超えるような大口径パラボラアンテナの指向性測定には、以下のような大規模な測定設備が必要である。

- ・巨大なアンテナ回転設備：巨大なアンテナ回転台およびそれを支える建造物が必要である。また周囲の大地や建物の影響を低減するため、十分な高さhを確保する必要がある⁽²⁾。
- ・長いアンテナ間距離R：高い精度で指向性を測定するためには、被測定アンテナと対向アンテナ間の距離Rが以下の式(2-1)を満足するように十分長くする必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2-1)$$

(D：供試アンテナ直径、 λ ：波長)

例えば、Sバンド気象レーダに用いる直径8.5 mのパラボラアンテナでは、 $R \geq 1.45 \text{ km}$ となり広大な敷地が必要となる。

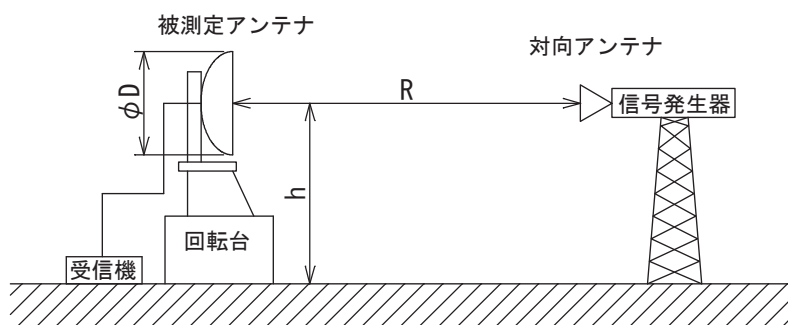


図1 屋外パラボラアンテナ指向性測定システムの構成

Fig.1 Configuration of outdoor parabolic antenna directivity measurement system

2.2 大口径パラボラアンテナにおける従来の指向性測定代替手法

従来困難とされていた大口径パラボラアンテナの指向性測定においては、表1に示す代替手法が採用されており、この中で、大口径アンテナへの対応のしやすさ、および測定精度の高さから「近傍界測定法」が最も一般的に用いられている。しかし、「近傍界測定法」は被測定アンテナの開口径が大きいと、電波吸収体で囲われた大型の電波暗室が必

要となるため設備費が巨額となり、実用化に際しコスト面の妨げとなる。また「スケールモデル測定」や「製作誤差の影響を含める指向性解析」は既存設備が使用可能でありコスト面のメリットは大きいですが、測定精度が低いため代替手法として妥当ではない。

表1 大口径パラボラアンテナ指向性測定についての従来の代替手法

Table 1 Conventional alternative approach for measuring directivity of large aperture parabolic antennas

指向性測定代替手法	概要	長所	短所
近傍界測定法 ⁽²⁾	アンテナ開口面上の電磁界分布を測定し指向性を計算する方法	・大口径にも対応可能 ・測定精度が高い	・巨額の設備費が必要
コンパクトレンジ測定法 ⁽²⁾	電波暗室内にオフセットパラボラ反射鏡を配置して平面波を作る擬似的な指向性測定法	・電波暗室内で測定可能 ・測定時間が短い	・巨額の設備費が必要 ・大口径への対応が難しい
スケールモデル測定 ⁽²⁾	供試アンテナの1/Nの大きさのスケールモデルを製作し、N倍の周波数で指向性を測定する方法	・大口径にも対応可能 ・既存設備で測定可能	・製作誤差の影響を含めることができない
製作誤差の影響を含める指向性解析 ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾	製作誤差が指向性に大きく影響するパラメータを測定し、PO法 ⁽⁶⁾ 等により指向性を解析する方法	・大口径にも対応可能 ・既存設備で測定可能	・測定精度が低い(指向性解析を用いるため)

3. 大口径パラボラアンテナにおける指向性測定の新たな代替手法

3.1 「スケールモデル測定」と「製作誤差の影響を含める指向性解析」の併用

表1に示す従来の指向性測定代替法の実態を受け、大口径パラボラアンテナの指向性測定において、コストおよび測定精度の要求を満たす新たな代替手法を開発した。

新たな代替手法は、製作誤差の影響を含めることができない「スケールモデル測定」の問題点を解決するため、「スケールモデル測定」と「製作誤差の影響を含める指向性解析」を併用する方法である⁽⁷⁾。具体的には式(3-1)、式(3-2)および図2に示すとおり、「スケールモデル測定」での指向性測定値(①)に、「製作誤差の影響を含める指向性解析」

により得た「供試アンテナとスケールモデルとの間の指向性変動量 Δ 」を補正值として加えることにより、指向性を高い精度で測定するものである。

$$(\text{供試アンテナ指向性}) = \text{①} + \Delta \quad (3-1)$$

$$(\text{供試アンテナとスケールモデル間の指向性変動量})$$

$$\Delta = \text{②} - \text{③} \quad (3-2)$$

①スケールモデル指向性測定値

②供試アンテナ指向性解析値

③スケールモデル指向性解析値

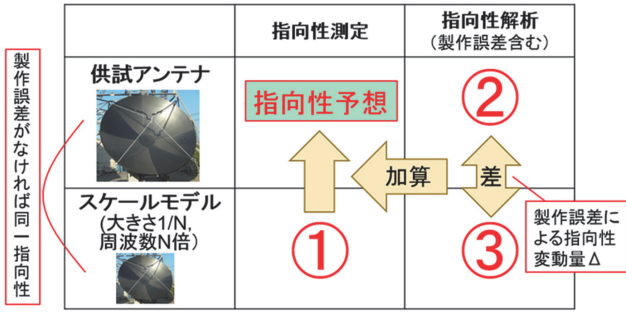


図2 指向性測定の新代替手法の概念

Fig.2 Concept of a new alternative approach for measuring directivity

ここで、「製作誤差の影響を含める指向性解析」により得られた指向性変動量 $\Delta = (2) - (3)$ は、供試アンテナとスケールモデルの各々の指向性振幅の単純な差分計算で導出することができないため、図3に示すようにアンテナの所望角度範囲における両者の差の最大値を求め、これを指向性変動量 Δ として「スケールモデル測定」により得た全ての角度における指向性測定値 (1) に加算する。

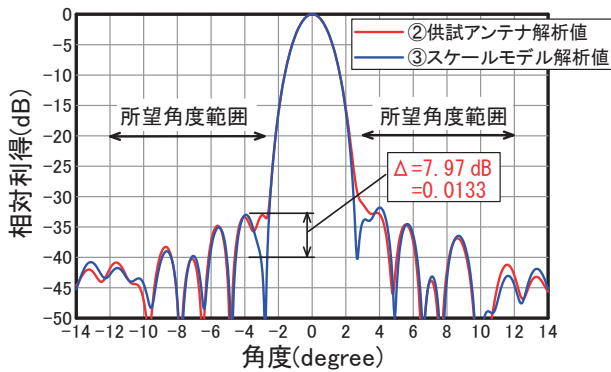


図3 供試アンテナとスケールモデルとの間の指向性変動量 Δ
Fig.3 Directivity fluctuation quantity Δ between the test antenna and the scale model

以上により得られる予測指向性のサイドローブレベルは、指向性変動量 (最大値) が全ての角度において加算されていることから、実測指向性のサイドローブレベルより高くなり、この結果「実測指向性の最悪値」が測定されることになる。アンテナの指向性検査の可否は、指向性のサイドローブレベルの測定値が規格値を上回っているか否かにより判定するため、本手法は指向性検査法として有効である。

本手法においては、まず、供試アンテナのスケールモデル測定を行い、次に、供試アンテナおよびスケールモデルの両者について、製作誤差の影響を含める指向性解析を行う。

3.2 スケールモデル測定

スケールモデル測定とは、供試アンテナの1/Nの寸法のスケールモデルを製作し、これを用いて、指向性測定を実際に使用するN倍の周波数の送信信号で行う方法である⁽²⁾。本

手法により、実物大のアンテナにおいて困難であった大口径アンテナの指向性測定が相似則により可能となるため、従来からしばしば用いられてきた方法である。

スケールモデルが供試アンテナに対し誤差なく1/Nの寸法で製作されていれば、スケールモデルの指向性は供試アンテナの指向性と完全に一致するが、実際には製作過程における寸法や形状の誤差が避けられないため、スケールモデル測定における製作誤差の影響を無視することができない。

3.3 製作誤差の影響を含める指向性解析

製作誤差の影響を含める指向性解析とは、アンテナの製作精度が指向性に大きく影響を及ぼすパラメータである「鏡面座標」「一次放射器取付位置」「一次放射器単体指向性」を実測し、これらの値を用いて指向性を解析する方法である⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。製作誤差の影響を含める指向性解析の様子を図4に示す。

指向性解析手法としては、一般的には鏡面座標や一次放射器指向性のデータ入力容易なPO法⁽⁶⁾やAI法⁽³⁾が用いられるが、当社では精度が高いPO法を採用している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

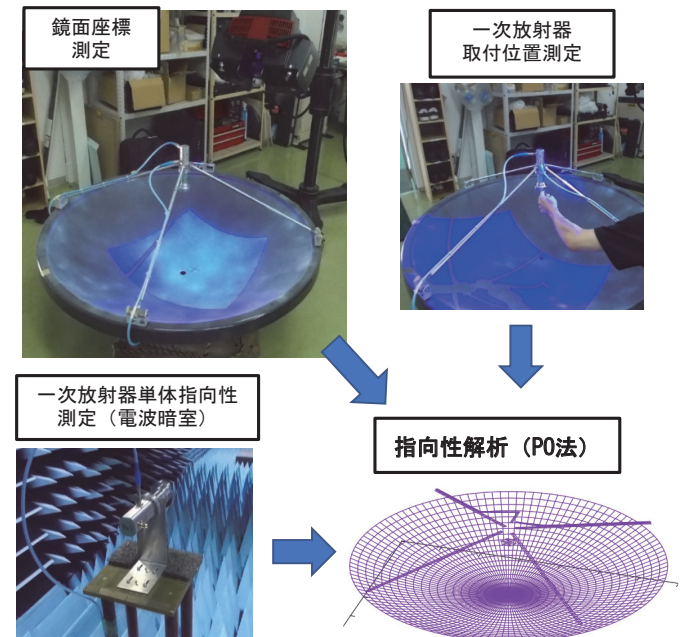


図4 製作誤差の影響を含める指向性解析

Fig.4 Directivity analysis including the effects of manufacturing errors

4. 新たな代替手法の測定精度検証

4.1 測定精度検証用アンテナ

新たな代替手法による測定精度を検証するため、図5に示す同型のXバンド直径1.2 mパラボラアンテナ2式 (No.1アンテナ, No.2アンテナ) を用意した。一方のアンテナを1/1スケールモデル,他方を供試アンテナとして、3項の新たな代替手法により供試アンテナの指向性を予測した。また予測した指向性を、供試アンテナの実際の指向性測定結果と比較することにより測定精度を検証した。

ここで、スケールモデルと供試アンテナの製作誤差の大

小関係を入れ替えた場合においても測定精度が満足できることを、表2に示す2通りの組み合わせの各々に新たな代替手法を適用して検証した。

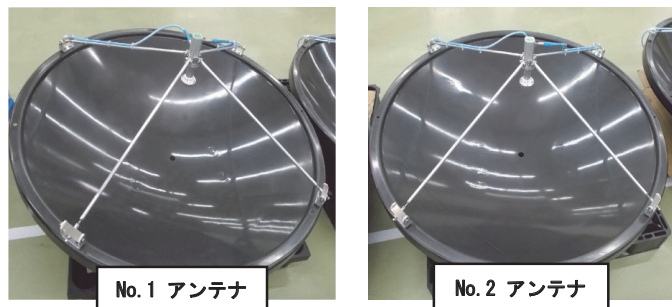


図5 2式の同型Xバンド直径1.2 mパラボラアンテナ
Fig.5 Two sets of the same type X-band 1.2 m diameter parabolic antenna

表2 スケールモデルと供試アンテナの組み合わせ
Table 2 Combination of the scale model and test antenna

組み合わせ	1/1スケールモデル	供試アンテナ
[1]	No.1アンテナ	No.2アンテナ
[2]	No.2アンテナ	No.1アンテナ

4.2 スケールモデル指向性測定

新たな代替手法により供試アンテナの指向性を予想するうえで必要となるスケールモデルの実測指向性データを取得するため、屋外において2式のスケールモデルの指向性を測定した。スケールモデルの指向性測定の様子を図6に示す。測定の結果、図7に示すとおり、製作誤差によるサイドローブレベルの差異が認められる。No.1のサイドローブレベルがNo.2に比べ高いが、これはNo.1の鏡面精度がNo.2と比べて低いことによるものと推測される。なお、本スケールモデル実測指向性データは、精度検証に必要とされる供試アンテナの実測指向性データとしても使用できる。

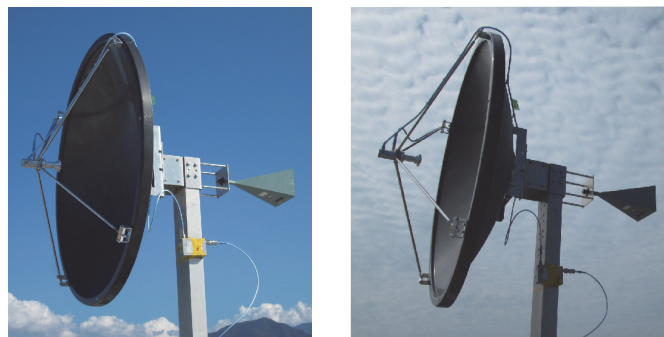


図6 スケールモデル指向性測定

Fig.6 Directivity measurement using the scale model

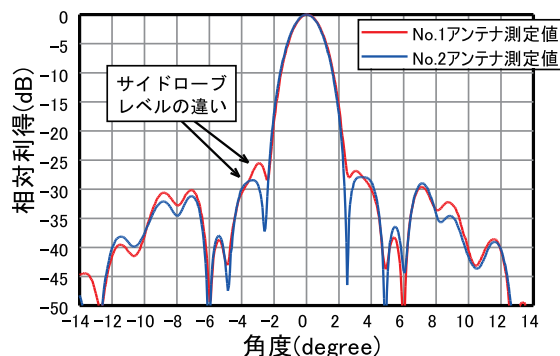


図7 No.1アンテナおよびNo.2アンテナの指向性測定結果
Fig.7 Directivity measurement results for No. 1 and No. 2 antennas

4.3 指向性変動量の解析

「指向性変動量」は、新たな代替手法においてスケールモデル指向性測定値に対する補正值として使用する。3.3項で述べた「製作誤差の影響を含める指向性解析」により、2式のアンテナ間における指向性変動量 Δ を求める。

解析は、2式のアンテナの各々における「鏡面座標」「一次放射器取付位置」「一次放射器単体指向性」の測定結果を用いて行う。

2式のアンテナの「鏡面座標」および「一次放射器取付位置」の測定結果を図8に示す。図8において、2式のアンテナが同型であるにもかかわらず、製作誤差により鏡面誤差の分布状態（各鏡面上の色の分布）が異なっていることが示されている。「一次放射器単体指向性」は電波暗室において測定する。

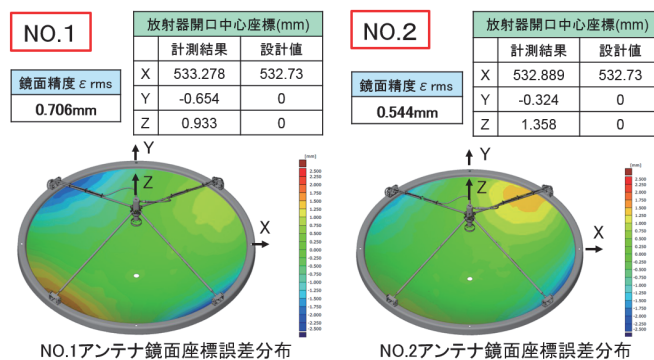


図8 鏡面座標および一次放射器取付位置測定結果
Fig.8 Measurement results of mirror surface coordinates and primary radiator mounting position

以上の測定結果を用いた指向性解析（PO法）により、表2に示す2通りの組み合わせにおいて製作誤差の影響による指向性変動量 Δ を求め、製作誤差の影響が最も大きく表れている「主ビームに近いサイドローブ方向付近における相対利得差」を指向性変動量 Δ とした。解析結果を図9および表3に示す。

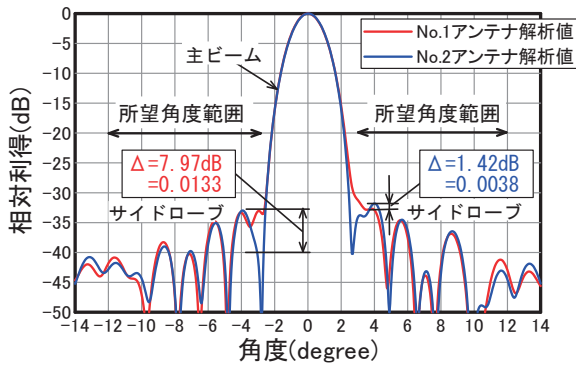


図9 製作誤差の影響を含める指向性解析結果 (指向性変動量 Δ)

Fig.9 Directivity analysis result including the effects of manufacturing errors (directivity fluctuation quantity Δ)

表3 各アンテナの組み合わせにおける指向性変動量
Table 3 Directivity fluctuation quantity for each antenna combination

組み合わせ	1/1スケールモデル	供試アンテナ	指向性変動量 Δ
[1]	No.1 アンテナ	No.2 アンテナ	0.0133
[2]	No.2 アンテナ	No.1 アンテナ	0.0038

4.4 指向性測定精度の検証結果

4.2項で述べたスケールモデル指向性測定結果に4.3項で述べた指向性変動量 Δ を加えることにより、供試アンテナの指向性を予測し、供試アンテナの実測指向性と比較して測定精度を検証する。

アンテナの指向性検査の可否は、指向性のサイドローブレベルの測定値が規格値を上回っているか否かにより判定するため、供試アンテナにおける予測指向性のサイドローブレベルが実測指向性のサイドローブレベルより高く、かつ規格値より低い場合には、新たな代替手法は指向性検査法として有効といえる。

供試アンテナとスケールモデルの組み合わせを変えて得た指向性の予測値と実測値の比較結果を図10および図11に示す。供試アンテナの実測指向性(黒色線)と予測指向性(赤色線)の差は、予測指向性を求める際、全ての角度におけるスケールモデルの実測指向性(青色線)に対し、指向性解析により求めた指向性変動量 Δ を一律に加算することにより生じる。図10および図11のいずれの場合においても、指向性の予測値(赤色線)におけるサイドローブレベルの最高値は、実測値(黒色線)のサイドローブレベルの最高値より高いが、規格値を超えることはない(図11において、-3度付近における予測指向性のサイドローブレベルが実測指向性のサイドローブレベルを下回っているが、全サイドローブの最高値により両者を比較すると上回っている)。

以上により、本手法は大口径パラボラアンテナの指向性検査手法として有効であることを実証した。

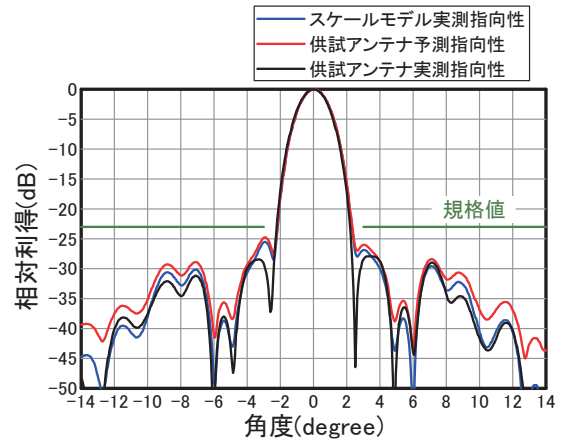


図10 指向性の予測値と実測値の比較

([1] No.1: スケールモデル, No.2: 供試アンテナ)

Fig.10 Comparison of predicted and measured values of directivity

([1] No.1: Scale model, No.2: Test antenna)

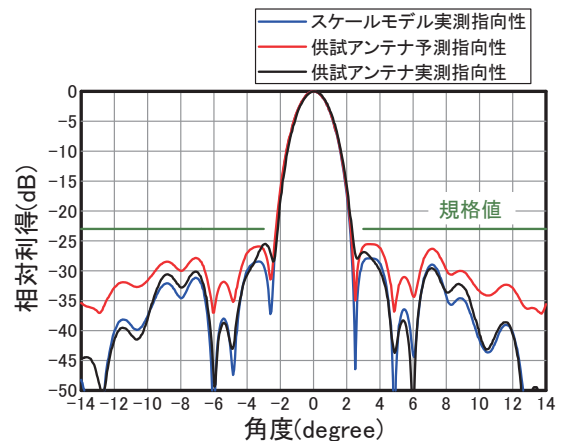


図11 指向性の予測値と実測値の比較

([2] No.1: 供試アンテナ, No.2: スケールモデル)

Fig.11 Comparison of predicted and measured values of directivity

([2] No.1: Test antenna, No.2: Scale model)

5. あとがき

本稿では、実際に測定することが困難である大口径パラボラアンテナの指向性測定を実現する新たな代替手法の開発およびその有効性について紹介した。本手法により、大口径パラボラアンテナの指向性を既存設備のみにより高い精度で検査することが可能となり、これまで困難とされていた直径5 mを超える大口径パラボラアンテナの開発が可能となる。本開発は、大口径パラボラアンテナを備える大型気象レーダや衛星通信ハブ局等の大規模システムの普及に大きく貢献する。

今後、指向性測定精度を更に向上すべく手法の改良を進め、付加価値を高めてゆく。

参考文献

- (1) “Weather Radar — Part 1: System Performance and Operation,” ISO/WMO Standard, ISO19926-1:2019
- (2) 手代木, 安藤, “アンテナの測定”, アンテナ工学ハンドブック第2版, 第11章, オーム社, 2008年6月, pp.699-768
- (3) T.H.Lee, et al., “A Surface Distortion Analysis Applied to the Hoop/Column Deployable Mesh Reflector Antenna,” IEEE Trans. A.P., Vol.37, No.4, (April 1989), pp.452-456
- (4) 夏原他, “鏡面測定座標を用いた大口径パラボラアンテナ指向性解析,” 2017年電子情報通信学会信越支部大会, 4D-5, 2017年10月, p.76
- (5) 夏原他, “鏡面座標と一次放射器指向性測定値を用いた大口径パラボラアンテナの指向性解析_交差偏波検討,” 2019年電子情報通信学会信越支部大会, 5D-1, 2019年9月, p.86
- (6) 安藤, “物理光学近似,” 電磁波問題解析の実際, 第4章, 電子情報通信学会, 1993年1月, pp.139-179
- (7) 夏原他, “大口径パラボラアンテナ指向性測定の代替案: スケールモデル測定と製作誤差の影響を指向性解析の併用,” 2020年電子情報通信学会信越支部大会, 3E-5, 2020年9月, p.85

用語一覧

指向性: アンテナの回転角度と電波の放射強度の関係を示すパターン
(放射した電波が遠方電界とみなせる十分離れた位置において測定する)

指向性測定: 被測定アンテナから十分離れた点 (遠方電界とみなせる点) において送信された電波を用いて, 被測定アンテナを回転させながら受信電力パターンを測定すること

スケールモデル: アンテナの形状を既定のスケール (縮尺) に基づいて忠実に再現した模型

実測指向性: アンテナの実物を用いて測定した指向性

Sバンド: 2~4 GHzの周波数帯

Xバンド: 8~12 GHzの周波数帯

PO法: Physical Optics Method (物理光学法)

AI法: Aperture Integration Method (開口面積分法)

サイドローブ: アンテナから放射されるローブのうち最大放射レベル以外のもの

サイドローブレベル: 全てのサイドローブ内における最大の振幅レベル