

3 重球面鏡アンテナの設計法

浦崎 修治*

(平成24年 9 月21日 受付)

Design Method of a Triple Spherical Reflector Antenna

Shuji URASAKI

(Received Sep. 21, 2012)

Abstract

Design method of a triple spherical reflector antenna having three concentric spherical reflectors and two additional reflectors is presented. Since the outside spherical reflector is used for a main reflector of the first stage, the central spherical reflector is commonly used for both a subreflector of the first stage and a main reflector of the second stage, and the inside spherical reflector is used for a subreflector of the second stage, a triple spherical reflector antenna consists of two double spherical reflector antennas. Two additional reflectors have the function of focusing at the same point for the incident waves into two main reflectors of two double spherical reflector antennas.

Key Words: reflector antenna, aperture antenna, spherical reflector antenna

1. まえがき

主反射鏡と副反射鏡が同心円状の球面である 2 重球面鏡アンテナ⁽¹⁾において、球面収差を補正する補助反射鏡が存在するためには副反射鏡径が大きい場合に限られる⁽²⁾。このため副反射鏡による光線のブロッキング量が多くなり開口能率が低下する。

ここでは 2 重球面鏡を 2 段構成にし、初段の副反射鏡を次段の主反射鏡と兼用させることにより、ブロッキング量を低減できる 3 重球面鏡アンテナの鏡面設計法を示す。

まず 3 重球面鏡アンテナの設計パラメータを定義し、この設計パラメータ間の拘束条件から設計パラメータの数を減らしている。次に、2 重球面鏡の周辺における歪による補助反射鏡の存在範囲の条件⁽²⁾、および光線のブロッキングを避けるための各鏡面間のクリアランス条件から残りの設計パラメータを決定している。

2. 3 重球面鏡アンテナの設計パラメータ

図 1 に、3 重球面鏡アンテナを示す。主反射鏡 1、副反射鏡 1 は鏡軸である z 軸上の点 C を中心とした回転対称形

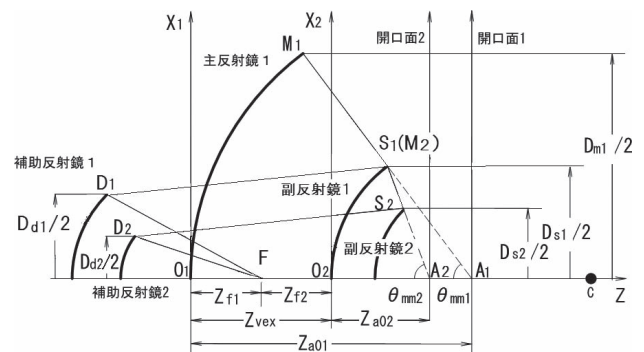


図 1 3 重球面鏡アンテナ (半分のみ)

球面鏡である。副反射鏡 1 は次段の主反射鏡 2 を兼ねており、副反射鏡 2 も点 C を中心とした回転対称形球面鏡である。補助反射鏡 1, 2 は各段の球面収差を補正する回転対称形非 2 次曲面である。各反射鏡の周辺を $M_1, S_1(M_2), S_2, D_1, D_2$ とし、 $\overline{M_1S_1}, \overline{M_2S_2}$ が Z 軸と交わる点を、各々、 A_1, A_2 とすると各段の設計パラメータは次のようになる。

- D_{m1}, D_{m2} : 初段, 次段の主反射鏡開口径
- D_{s1}, D_{s2} : 初段, 次段の副反射鏡開口径
- D_{d1}, D_{d2} : 初段, 次段の補助反射鏡開口径

* 広島工業大学工学部電気システム工学科

θ_{mm1} , θ_{mm2} : 初段, 次段の主反射鏡開口角

z_{f1} , z_{f2} : 初段, 次段における焦点 F の z 座標

ここで, 主反射鏡 1, 主反射鏡 2 の頂点は, 各々, 座標系 o_1-zx_1 の原点, 座標系 o_2-zx_2 の原点とする。 z_{f1} , z_{f2} は, 各々, 座標系 o_1-zx_1 , o_2-zx_2 で定義される z 座標である。

ここで, D_{m1} を 10.0 に固定する。副反射鏡 1 は次段の主反射鏡 2 を兼ねているので, D_{m2} は初段の副反射鏡 D_{s1} と等しい。

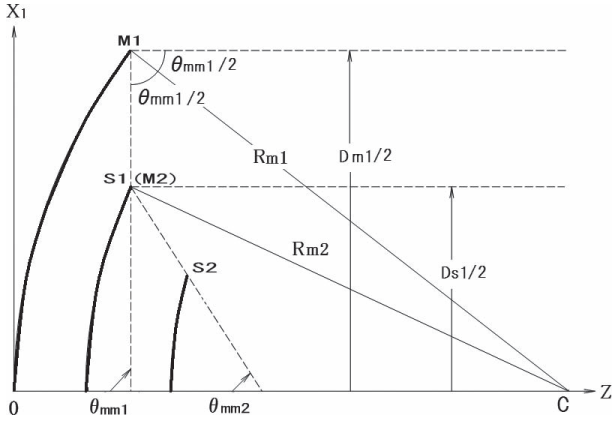


図 2 θ_{mm2} の決定

次に, 図 2 を用いて θ_{mm2} について求める。点 M_2 に入射した光線が反射して, 点 S_2 へ向う。この $\overline{M_2S_2}$ と z 軸とのなす角が次段の開口角 θ_{mm2} である。この θ_{mm2} は点 M_2 における反射の法則から定まり, 自由に与えることができない。

点 M_2 は初段の設計において定まっているので, 次段の主反射鏡の半径 R_{m2} は次のようになる。

$$R_{m2} = \frac{\sqrt{D_{m1}^2 + D_{s1}^2 + 2D_{m1}D_{s1}\cos\theta_{mm1}}}{2\sin(\theta_{mm1})} \quad (1)$$

また, 次段の主反射鏡の半径 R_{m2} と次段の主反射鏡開口径 D_{s1} には次の関係がある。

$$R_{m2} = \frac{D_{s1}}{2\sin(\frac{\theta_{mm2}}{2})} \quad (2)$$

式 (1) を式 (2) に代入して, 次段の開口角 θ_{mm2} は次のようになる。

$$\sin(\frac{\theta_{mm2}}{2}) = \frac{\alpha_1 \sin(\theta_{mm1})}{\sqrt{\alpha_1^2 + 2\alpha_1 \cos\theta_{mm1} + 1}} \quad (3)$$

ここで, α_1 は次式で定義する。

$$\alpha_1 = \frac{D_{s1}}{D_{m1}} \quad (4)$$

また, z_{f2} は次式で与えられる。

$$z_{f2} = z_{f1} - z_{vex} \quad (5)$$

ここで, z_{vex} は図 1 に示すように $|\overline{O_1O_2}|$ である。

最後に, ホーンの給電点, すなわち図 1 に示す焦点 F が球面鏡の中心 C に一致させた場合, 次式が得られる。

$$z_{f1} = R_{m1} = \frac{D_{m1}}{2\sin(\frac{\theta_{mm1}}{2})} \quad (6)$$

$$z_{f2} = R_{m1} - z_{vex} \quad (7)$$

ここで, z_{vex} は $|\overline{O_1O_2}|$ であるから, 次式で与えられる。

$$z_{vex} = R_{m1} - R_{m2}$$

以上から, 焦点 F を点 C に一致させると, 設計パラメータは D_{s1} , D_{d1} , θ_{mm1} , D_{s2} および D_{d2} の 5 個となる。

3. 光路長差

図 1 において初段の開口面 1, 次段の開口面 2 は, 各々, A_1 , A_2 を含み z 軸と垂直な平面とする。また, L_1 , L_2 を各開口面から点 F までの全光路長とする。各々の開口面を開口面 1 に共通としたときの光路長差 δ は次式で与えられる。

$$\delta = L_1 - [L_2 + z_{a01} - (z_{a02} + z_{vex})] \quad (8)$$

ここで, 図 1 に示すように, z_{a01} は $|\overline{O_1A_1}|$, z_{a02} は $|\overline{O_2A_2}|$ である。

また, 図 3 に示す 2 重球面鏡の設計パラメータを用いて, L_i , z_{a0i} ($i = 1, 2$) は次式で与えられる⁽²⁾。

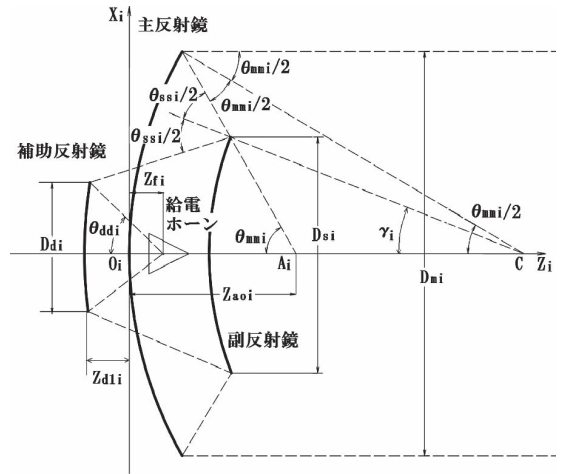


図 3 2 重球面鏡アンテナ

$$L_i = \frac{D_{mi}}{2} \left[\cot\theta_{mmi} + \frac{1}{\sin\theta_{mmi}} - \frac{\alpha_i}{\sin\theta_{mmi}} + \frac{\beta_i}{\sin\theta_{ddi}} + \frac{(\alpha_i - \beta_i)}{\sin(\theta_{ssi} - \theta_{mmi})} \right] \quad (9)$$

$$z_{a0i} = \frac{D_{mi}}{2} \left[\frac{1}{\sin\frac{\theta_{mmi}}{2}} - \frac{1}{\sin\theta_{mmi}} \right] \quad (10)$$

ここで, α_i , β_i , θ_{ssi} , および θ_{ddi} は次のようになる。

$$\alpha_i = \frac{D_{si}}{D_{mi}} \quad (11)$$

$$\beta_i = \frac{D_{di}}{D_{mi}} \quad (12)$$

$$\theta_{ssi} = 2(\theta_{mmi} - \gamma_i) \quad (13)$$

$$\tan \gamma_i = \frac{\alpha_i \sin \theta_{mmi}}{1 + \alpha_i \cos \theta_{mmi}} \quad (14)$$

$$\tan \theta_{ddi} = \frac{D_{mi}}{2} \frac{\beta_i}{(z_{fi} - z_{d1i})} \quad (15)$$

$$z_{d1i} = z_{a0i} - \frac{D_{mi}}{2} [\alpha_i \cot \theta_{mmi} + (\alpha_i - \beta_i) \cot(\theta_{ssi} - \theta_{mmi})] \quad (16)$$

したがって、初段と次段との光路長差 δ を零にすると、2章で示した5個の設計パラメータ D_{s1} , D_{d1} , θ_{mm1} , D_{s2} および D_{d2} 間に、関係式が成立するので、結局、設計パラメータは4個となる。

4. 鏡面間のクリアランス

図4において、 S_1 を通り z 軸に平行な光線が主反射鏡1と交わる点を $M1e$ とする。この $M1e$ に入射した光線は $S1e$, $D1e$ を経由して焦点 $F(=C)$ に集束する。

次に S_2 を通り z 軸に平行な光線が主反射鏡2と交わる点を $M2e$ とする。この $M2e$ に入射した光線は $S2e$, $D2e$ を経由して焦点 $F(=C)$ に集束する。

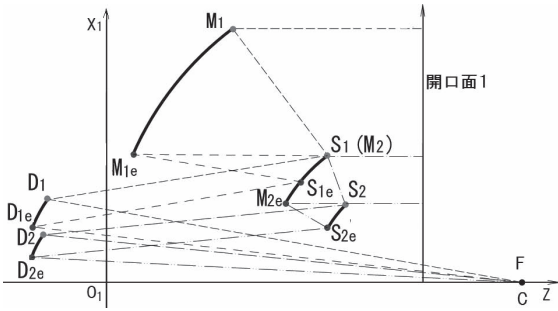


図4 各段の鏡面利用範囲

3重球面鏡アンテナでは、初段と次段で別々の2重球面鏡アンテナを使用するため、各鏡面が光線をブロックするとアンテナとして機能しないので、鏡面間にクリアランスが必要となる。

ここでは、このクリアランスを評価するものとして次の3ケースを考慮する。

- (1) 光路 $\overline{D_{1e}F}$ を補助反射鏡2がブロックする。
- (2) 光路 $\overline{D_1F}$ を副反射鏡2がブロックする。
- (3) 光路 $\overline{S_2D_2}$ を副反射鏡1, 補助反射鏡1がブロックする。

4.1 光路 $\overline{D_{1e}F}$ を補助反射鏡2がブロックする場合

$\overline{D_{1e}F}$ と z 軸とのなす角 θ_{d1e} , $\overline{D_2F}$ と Z 軸とのなす角 θ_{d2} は次のようになる。

$$\theta_{d1e} = \tan^{-1}[x_{d1e} / (z_{f1} - z_{d1e})] \quad (17)$$

$$\theta_{d2} = \tan^{-1}[x_{d2} / (z_{f1} - z_{d2})] \quad (18)$$

ここで、座標系 o_1-zx_1 において、点 D_{1e} を座標 (z_{d1e}, x_{d1e}) , 点 D_2 を座標 (z_{d2}, x_{d2}) としている。

したがって、図5に示すクリアランスの評価関数 θ_α を次のように定義する。

$$\theta_\alpha = \theta_{d1e} - \theta_{d2} \quad (19)$$

4.2 光路 $\overline{D_1F}$ を副反射鏡2がブロックする場合

$\overline{D_1F}$ と z 軸とのなす角 θ_{d1} , $\overline{S_{2e}F}$ と Z 軸とのなす角を θ_{s2e} は次のようになる。

$$\theta_{d1} = \tan^{-1}[x_{d1} / (z_{f1} - z_{d1})] \quad (20)$$

$$\theta_{s2e} = \tan^{-1}[x_{s2e} / (z_{f1} - z_{s2e})] \quad (21)$$

ここで、座標系 o_1-zx_1 において、点 D_1 を座標 (z_{d1}, x_{d1}) , 点 S_{2e} を座標 (z_{s2e}, x_{s2e}) としている。

したがって、図5に示すクリアランス評価関数 θ_β を次のように定義する。

$$\theta_\beta = \theta_{s2e} - \theta_{d1} \quad (22)$$

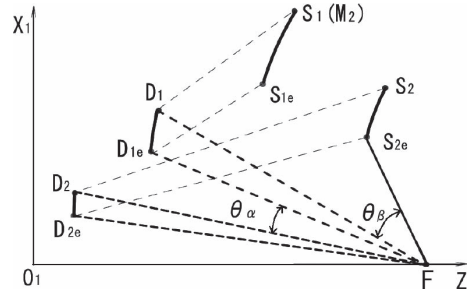


図5 $\theta_\alpha, \theta_\beta$

4.3 光路 $\overline{S_2D_2}$ を副反射鏡1, 補助反射鏡1がブロックする場合

副反射鏡1によるブロッキングにおいて、 S_{1e} , M_{2e} のうち z 軸に近い方のブロッキングが問題となる。ここでは z 軸に近い点が S_{1e} と仮定して評価関数を求める。

座標系 o_1-zx_1 において、点 S_{1e} , D_{1e} を各々、座標 (z_{s1e}, x_{s1e}) , 座標 (z_{d1e}, x_{d1e}) とする。この点 S_{1e} , D_{1e} を通り z 軸への垂直線と $\overline{S_2D_2}$, との交点を、各々、座標 (z_{s1e}, x'_{s1e}) , 座標 (z_{d1e}, x'_{d1e}) とすると、 x'_{s1e} , x'_{d1e} は次のようになる。

$$x'_{s1e} = x_{s2} + \xi(z_{s1e} - z_{s2}) \quad (23)$$

$$x'_{d1e} = x_{d2} + \xi(z_{d1e} - z_{s2}) \quad (24)$$

$$\xi = (x_{s2} - x_{d2}) / (z_{s2} - z_{d2}) \quad (25)$$

したがって、図6に示すクリアランスの評価関数 Δx_{s1e} , Δx_{d1e} を次のように定義する。

$$\Delta x_{s1e} = x_{s1e} - x'_{s1e} \quad (26)$$

$$\Delta x_{d1e} = x_{d1e} - x'_{d1e} \quad (27)$$

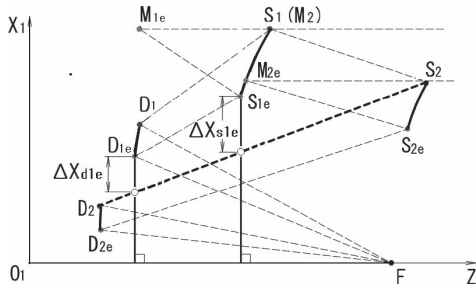


図6 Δx_{s1e} , Δx_{d1e}

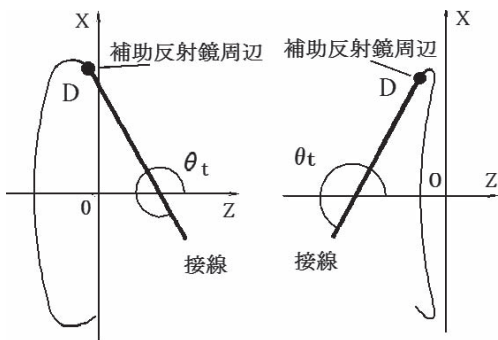
5. 補助反射鏡の存在条件

非2次曲面である補助反射鏡の鏡面設計において、図7に示すように補助反射鏡周辺の x 座標よりも大きな x 座標をもつ補助反射鏡が存在すると、副反射鏡から補助反射鏡周辺へ向かう光線はブロックされ、補助反射鏡は機能せず形成できなかったことにならない⁽²⁾。

この存在できない条件は、補助反射鏡の周辺における微分値 dx/dz から求まる接線方向と z 軸とのなす角 θ_t を用いて決めることができ、次のようになる。

$$\sin \theta_t < 0 \quad (28)$$

ここで、 θ_t は補助反射鏡の周辺 $D(x_{d1}, z_{d1})$ における微分値 dx/dz から求めることができ、またこの微分値は設計パラメーターを与えると決定される。



(a) $\sin \theta_t < 0$ (b) $\sin \theta_t < 0$

図7 補助反射鏡が存在できない条件

6. 設計結果

まず、5個の設計パラメーターに対して、光路長差 δ を零にする条件から4個の設計パラメーターにし、次に4個の設計パラメーターに対してクリアランスの条件、補助反射鏡の存在条件から最終的にすべてのパラメーターを決定する。

6.1 光路長差 δ が零の場合

5個の設計パラメーター D_{s1} , D_{d1} , θ_{mm1} , D_{s2} および D_{d2} において、表1のようにパラメーターを選定した。表1において、光路長差 δ が零となる設計パラメーター間の関係を図8に示す。

表1 光路長差 $\delta = 0$, $D_{s2} = 3.0$

図番	図8 (a)	図8 (a)	図8 (b)
D_{s1}	縦軸	5.0	5.0
D_{d1}	3.0	縦軸	3.0
$\theta_{mm1} [^\circ]$	60	60	縦軸
D_{d2}	横軸	横軸	横軸

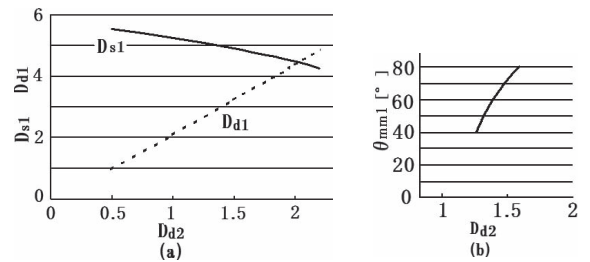


図8 光路長差 δ が零の関係

ここで、 D_{s2} を3.0と固定し、図の横軸は D_{d2} としている。縦軸は残り3個の初段の設計パラメーター D_{s1} , D_{d1} , θ_{mm1} のうち1個を表1のようにしている。

次に、 D_{d2} を1.6と固定し、横軸を D_{s2} とし縦軸を表2のようにした場合の、光路長差 δ が零となるパラメーター間の関係を図9に示す。

図8, 図9の結果から光路長差 δ が零、すなわち各段が同相となる設計パラメーターの存在することが分かった。

したがって、パラメーターが一個減り、残りは4個となる。

表2 光路長差 $\delta = 0$, $D_{d2} = 1.6$

図番	図9 (a)	図9 (a)	図9 (b)
D_{s1}	縦軸	5.0	5.0
D_{d1}	3.0	縦軸	3.0
$\theta_{mm1} [^\circ]$	60	60	縦軸
D_{s2}	横軸	横軸	横軸

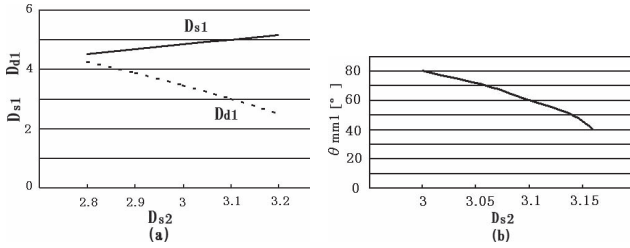


図9 光路長差 δ が零の関係

6.2 クリアランス

光路長差 δ が零の場合におけるクリアランス θ_α , θ_β , ΔX_{sle} , および ΔX_{dle} を求める。

ここで, D_{s2} を3.0と固定し, 残り3個の初段の設計パラメーター D_{s1} , D_{d1} , θ_{mm1} を表3に示す。この表3に示す設計パラメーターに対するクリアランスを図10に示す。図の横軸は D_{d2} , 縦軸はクリアランス θ_α , θ_β , ΔX_{sle} , および ΔX_{dle} である。図10において, 点線で示したクリアランスでは補助反射鏡が形成できない領域⁽²⁾となり, 点線部の領域において設計パラメーターを選定をできない。

表3 クリアランス $D_{s2} = 3.0$

図番	図10 (a)	図10 (b)	図10 (c)
D_{s1}	図8 (a) の縦軸	5.0	5.0
D_{d1}	3.0	図8 (a) の縦軸	3.0
$\theta_{mm1} [^\circ]$	60°	60°	図8 (b) の縦軸
D_{d2}	横軸	横軸	横軸

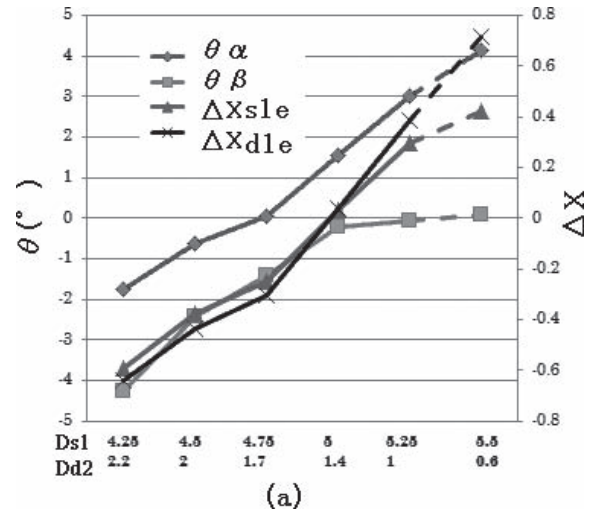
次に, D_{d2} を1.6と固定し, 残り3個の初段の設計パラメーター D_{s1} , D_{d1} , θ_{mm1} を表4に示す。この表4に示す設計パラメーターに対するクリアランスを図11に示す。ここで, 図の横軸は D_{s2} , 縦軸はクリアランス θ_α , θ_β , ΔX_{sle} , および ΔX_{dle} である。ここでも, 点線で示したクリアランスは補助反射鏡が形成できない領域であり, 点線部の領域において設計パラメーターを選定をできない。

表4 クリアランス $D_{d2} = 1.6$

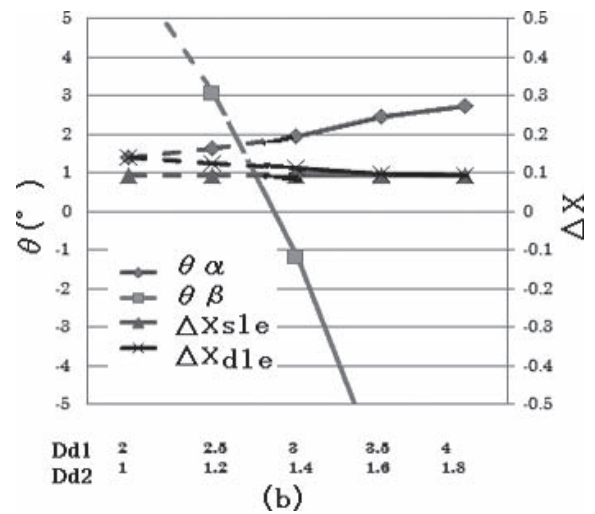
図番	図11 (a)	図11 (b)	図11 (c)
D_{s1}	図9 (a) の縦軸	5.0	5.0
D_{d1}	3.0	図9 (a) の縦軸	3.0
$\theta_{mm1} [^\circ]$	60°	60°	図9 (b) の縦軸
D_{s2}	横軸	横軸	横軸

6.3 光線追跡法 (ray tracing)

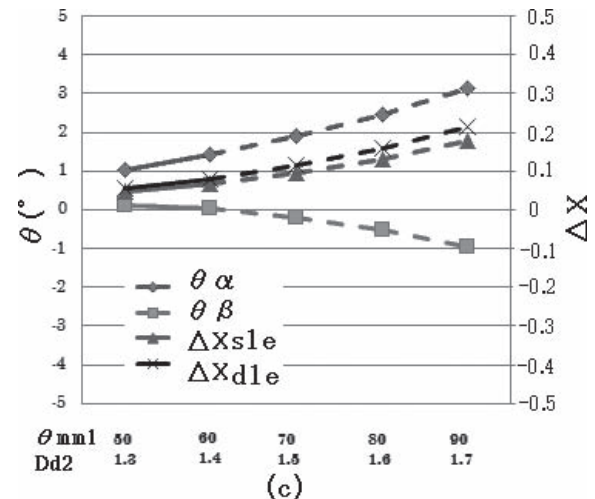
図10 (b), 図10 (c) および, 図11 (a) において, すべてのクリアランスが正の範囲で補助反射鏡の形成条件が満足できる設計パラメーターを選定できる。図10 (b) にお



(a)



(b)



(c)

図10 クリアランス ($D_{d1} = 3.0$, $\theta_{mm1} = 60^\circ$)

いて, 選定できるパラメーターとして D_{d2} が1.3, D_{d1} が2.85, D_{s1} が5.0, D_{s2} が3.0, θ_{mm1} が60°である。これらの設計パラメーターを選定したときの鏡面系, および ray tracing を図12に示す。クリアランスが正の範囲であり, また補助反射鏡の形成条件を満足している。

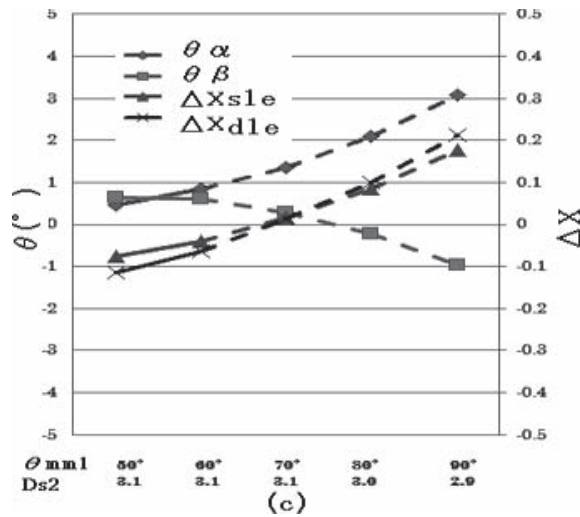
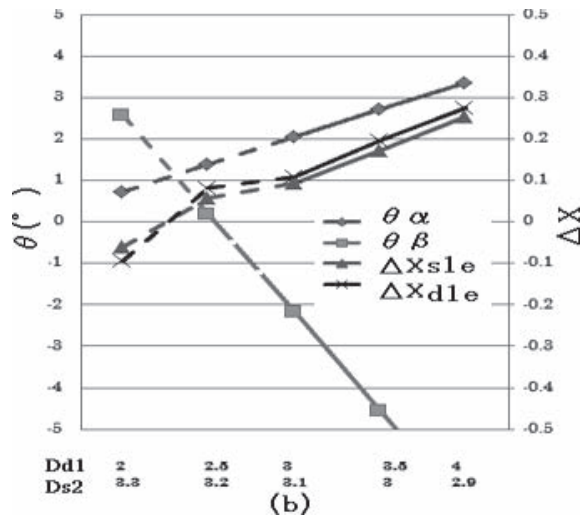
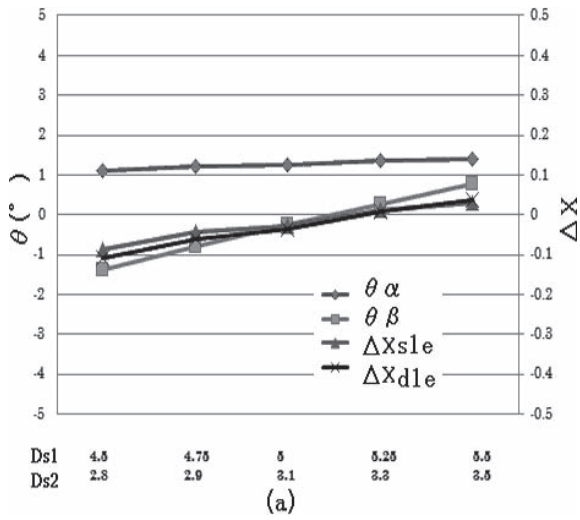


図11 クリアランス ($D_{d1} = 3.0$, $\theta_{mm1} = 60^\circ$)

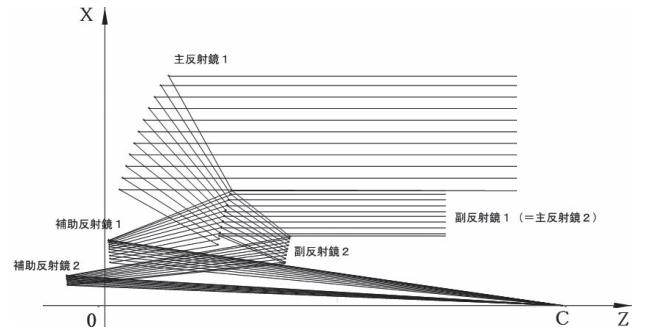


図12 ray tracing

7. むすび

球面鏡の中心とホーンの位相中心とを一致させた3重球面鏡において、ビーム偏向は補助反射鏡のみの変位によって可能となる。

文 献

- [1] A. Ishimaru, H. Sreenivasiah, and V. K. Wong, "Double Spherical Cassegrain Reflector Antennas", IEEE Antennas Propagat., vol. AP-21, no. 6, Nov. 1973.
- [2] 木本, 浦崎, "2重球面鏡アンテナの設計法", 信学技報, A・P2011-56 (2011-8).