

振れ測定論理

石崎秀晴, 市川伸洋*, 森川洋行*

(2001年10月1日受理)

A Logic of the Run-Out Measurement

Hideharu ISHIZAKI, Nobuhiro ICHIKAWA*, and Hiroyuki MORIKAWA*

Abstract

The run-out measurements are used as a most easily method to detect axis oscillation. In this report, a method to set up the axis of the paraboloid of revolution, such as the main reflector of the Nobeyama Radioheliograph, by measurement of a run-out is considered. In order to set up the axis, we have to control an inclination of the axis and an eccentricity of the axis together. If the horizontal component of the measured run-out value of a slanted axis becomes constant by tuning up an inclination, the axis becomes perpendicular. Next, if the vertical component of the measured run-out value of the axis away from the center becomes constant by tuning up an eccentricity, the axis comes to the center. A general part having a solid of revolution can be applied to this work method in addition to a paraboloid of revolution.

1. はじめに

野辺山太陽電波観測所では、1998~2000年にかけて「電波ヘリオグラフアンテナの副鏡を改良」する事業が行われた。電波ヘリオグラフは、直径80cmの主鏡をもつ素子アンテナを東西と南北にT字型配列で84台配置して、17GHzと34GHzの2周波数で太陽像を合成する電波干渉計である(図1参照)。直径15cmの回転双極面である副鏡は、高い誘電率が得られる材質であるセラミックス製であり、表面には17GHz電波は反射し、34GHzは透過させる周波数選択膜(金メッキによって微細なエルサレムクロスパターンが形成)が施されている。

副鏡を改良する事業は、合成される太陽像(特に34GHz像)の画質の向上を達成するために、個々の素子アンテナの電気的特性の改善を目指したものである。そのために、セラミックスの材質がより純度の高いものに変更され、副鏡表面上の一部に施されていた周波数選択膜も回転双極面の全面に施され、かつその製造法が新規に開発された。また、野辺山の過酷な自然環境で必要な機能を維持し続けられるように、電波ヘリオグラフアン

テナ本体への設置方法も全面的に改良された^{1~9)}。

改良された副鏡を交換する際に問題となるのは、アンテナ本体の設置されている屋外で必要な精度を能率的に達成する技術を確立することである⁵⁾。具体的には主鏡と副鏡、17GHz、34GHzの電波受信ホーンのすべての中心軸を一致させることである。この問題の解決のために、われわれは数ヶ月に及ぶ共同研究を実施しアンテナサイトでの実験、議論を積み重ねてきた。

本報告は、軸合わせ法の手段として用いられた、振れ(run-out)測定の原理を論理的に明らかにし、ものづく



図1. 電波ヘリオグラフ。

* 株式会社赤阪鐵工所 (AKASAKA DIESELS LIMITED)

りの製造工程や維持・保全において広く利用可能な計測技術のひとつとして、その応用法の一例を確立する研究の成果を公表するものである。

2. 副鏡軸合わせ作業

最初に提案された副鏡の軸合わせ方法は以下のとおりである。副鏡を主鏡に対して軸合わせする際に用いる道具（測定機）は慣習的に治具と呼ばれている。予備の主鏡に治具を取付けて軸合わせ作業を再現した写真を図2に示す。図2(a)は、主鏡に治具を取付けた状態を上方から観察した全体写真である。3つのダイヤルゲージが見える。図(b)は、副鏡と治具を水平方向から拡大して見たところである。治具は、主鏡中心に突き出ている17 GHz ホーンの上部に被せる形で設置されている。その内部にベアリングが組込まれており、主鏡中心軸周りに回転することができる。副鏡上部から（2つの）ダイヤルゲージ部分を接写した図(c)も参照すると、ダイヤルゲージの探針は、副鏡の外周部側面と上部平面に、それぞれ接している（測定面としている）ことが観察できる。これらのダイヤルゲージは、治具中心部から金属棒（アーム）によって取付位置が（相対的に）固定されている。

治具中心部の回転に伴い、2つのダイヤルゲージも副鏡外周部を公転しながら副鏡の側面と上部平面を測定していく（ダイヤルゲージ自体は、探針が弱いバネで測定面に押付けられており、測定物表面の形状に沿いながら移動する。被測定物の表面形状に沿って探針が上下に変位した際、これを簡単な機構により拡大し、指針の回転角に変換して表示する。われわれが用いているダイヤルゲージは最小目盛：1/100 (mm)、測定範囲：±0.5 (mm)のものである）。

これら2つのダイヤルゲージのうち、副鏡の側面に探針が当てられている方は、副鏡の中心軸が主鏡中心軸に平行にズレている場合のズレ（偏心）量を測定している。ズレ（偏心）がある場合は、ダイヤルゲージが副鏡の回りを一公転したときに、一周期の正弦波状に指針がプラス・マイナスに振れる。偏心（量は、指針の振れの振幅）の許容値は0.1 (mm)である。

一方、副鏡中心軸が主鏡中心軸に対して傾斜している場合は、上部平面を測定するダイヤルゲージの指針が正弦波状に振れる。許される傾斜（角）0.5°に対する、半径75 (mm)の副鏡外周部を測るダイヤルゲージの振れの許容範囲は±0.01 (mm)である。

このように、2つのダイヤルゲージを用いることによ



図2(a). 主鏡と副鏡の軸合わせに用いる治具の全景.

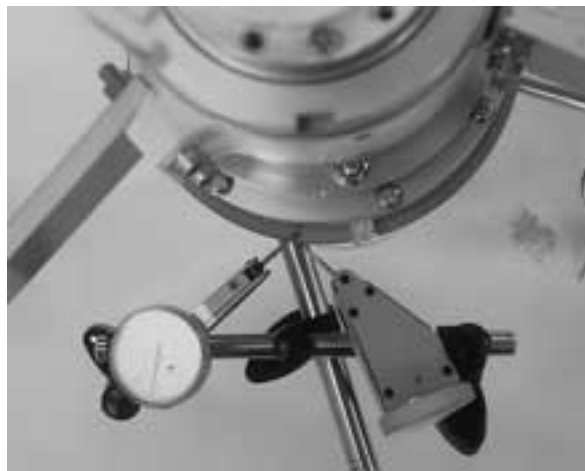


図2(c). 副鏡位置測定用ダイヤルゲージ.

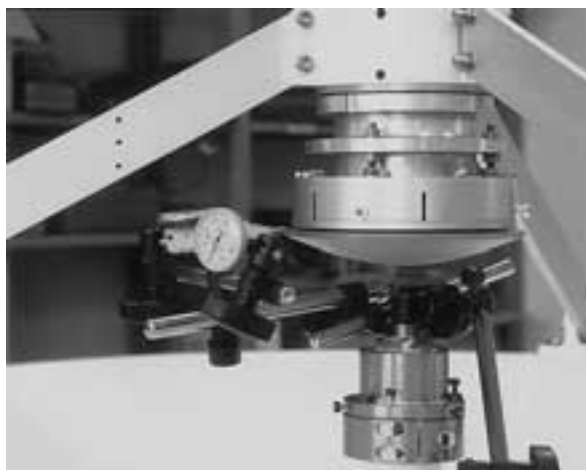


図2(b). 副鏡と治具の拡大.

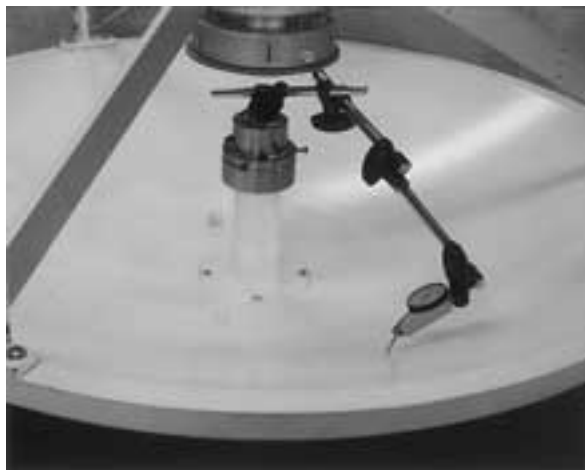


図2(d). 治具位置検定用ダイヤルゲージ.

り、中心軸の「ズレ」と「傾斜」がほぼ独立に測定される。作業者は、これらの振れをそれぞれの許容範囲内に収まるように副鏡取付位置を調整する。調整は副鏡ホルダー（図 (b) において、副鏡の上部に見える部品）の調整ネジを用いてズレと傾斜を補正する。調整方法の詳細な説明は省略するが、それぞれのダイヤルゲージの振れを許容範囲内に収めることは比較的容易に達成でき、これで軸合わせ作業が完了する。

これは、ズレと傾斜という2つの規定値が、おのおの独立に測定し調整できるように配慮した設計の成果である。そこで、問題となるのは、治具の回転軸（＝中心軸）が主鏡中心軸に完全に一致しているだろうかということである（治具という呼称は本来、それ自身の回転軸が主鏡中心軸に十分な精度で一致していることが保証されている場合に用いられるべきである）。

実は、治具自体の回転軸の主鏡中心軸に対する軸合わせは、残りのダイヤルゲージひとつを用いて行う（図 2 (d) 参照）。やはり、ダイヤルゲージを主鏡中心軸周りに公転させ、主鏡面を測定して指針の振れを観察し、どうかして、治具の回転軸の「ズレ」と「傾斜」を分離し、治具の調整ネジを用いて軸合わせを行わなければならない（治具の調整ネジはズレと傾斜を独立に調整できる）。

実際、あるいは原理的に、ひとつのダイヤルゲージで主鏡面を測定するだけで、治具の回転軸の主鏡中心軸に対する「ズレ」と「傾斜」の分離が可能なのであろうか。

電波望遠鏡アンテナの製造と保全に長く携わる熟練技術者がこの作業を行うと、確かにダイヤルゲージ指針の振れ量が小さくなっていく状況をかいま見ることができる。しかし、報告者らが、それを見様見まねで作業した場合、あとでビームパターン（主鏡面上の2次元電波強度マップ）測定を行うと、軸合わせに失敗していることが確認されたことが少なからずあった。

そこで、あらためてこの方法で原理的に治具の「ズレ」と「傾斜」を分離して測定し補正することが可能なのであろうか、という疑問が湧いてくるのである。

3. 振れ測定

振れ測定については、よく知られているが、ここで簡単にまとめておく。振れとは、回転体の形状偏差（真円度、円筒度）と姿勢偏差（平行度、直角度、傾斜度）、位置偏差（位置度、同軸度、同心度、対称度）などの重畳した偏差量の測定値である。簡単な測定なので広く用いられている^{10, 11)}。回転体表面にあてた測微器（ダイヤルゲージ、マイクロメータ）の1回転中の読みの最大差が円周ぶれ (circular run-out deviation) と定義されている¹⁰⁾。

専門的な定義とは別に、本節では、図 3, 4 に示すようにダイヤルゲージやマイクロメータのような測定機を用いて行う測定一般に対して原理的に検討しておく。図 3 は、定盤上にダイヤルゲージを設置・固定し、被測定物を定盤に置き直線上をすべらせながら振れを測定する方

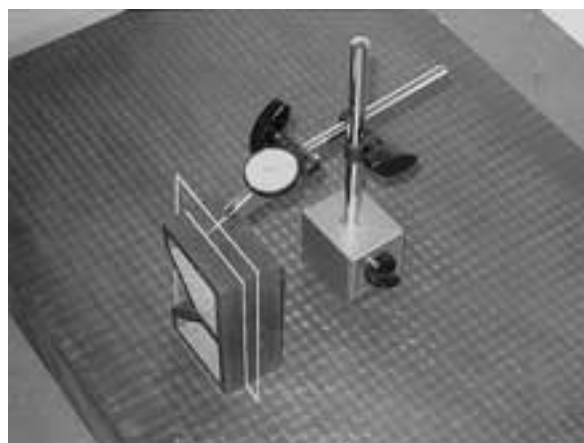


図 3. 平面上の直線に沿った測定。



図 4. 円筒面上の円周に沿った測定。

法を示している。これは普通、振れ測定には含めないのであるが、測定の原理を考える事例として検討する。

この方法は、固定されたダイヤルゲージに対して被測定物を相対的に直線運動させることにより、図中に書込んだように、被測定物を平面で切断し、その切断面の形状を精密に測定することと理解できる。この場合の測定量には、被測定物上（でダイヤルゲージ探針が接している）直線・平面の輪郭の偏差（真直度、平面度、表面粗さ）すなわち形状偏差 (form deviation) と、被測定物の隣り合う面同士の角度の偏差（直角度、傾斜度）や向かい合う面同士の平行度などが示す姿勢偏差 (orientational deviation) が一体となって測定される。

これらの偏差は、測定する直線上の区間の長さによって異なる分類に属する。測定する区間が短ければ、表面上の細かい凸凹＝表面粗さが検出される。区間が少し長くなれば、より波長の長いうねりの成分が見えてくる。細かい凸凹とうねりの成分は、観測された断面曲線 (profile) を波数で分解¹¹⁾するほか、検出対象によって探針先端の接触子半径を変えて測定する。検出対象として表面粗さを測定の目的とする場合は接触子半径を小さくし、うねり成分を目的とするときは半径を大きくして凸凹の包絡線 (envelop curve) を観測する。うねりは真直度・平面度を表す。さらに、うねりの最大点と次の極大

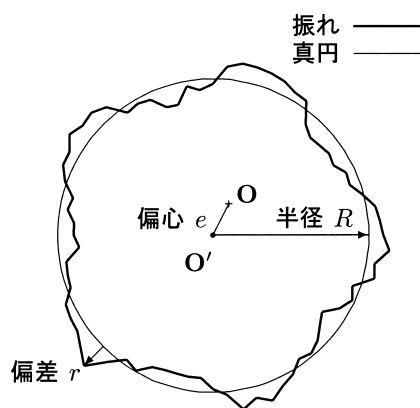


図 5. 真円度測定.

点を結んだ包絡直線（場合によっては、近似直線＝fitting curve）を基準面と比較すれば、平行度や直角度・傾斜度が確定する。よって、形状偏差と姿勢偏差の分離は、部品や装置としての利用の状態と目的に即した測定の対象と定義に依存する。なお図 3 のような測定では、測定値の基準となる直線は定盤の平面内にあり、測定精度（正確さ）は定盤の平面度により保証されているということに注意してほしい。

図 4 は、円柱状の被測定物を旋盤のチャックでつかみ、旋盤の案内面（＝定盤）に固定したダイヤルゲージで円周上の振れを測定しているところである。通常は専用の測定装置を用いるが、身近にある旋盤で代用したのである（旋盤やフライス盤の回転軸は、偏心やブレが非常に小さく十分に精密な回転が得られる）。この測定法でも、被測定物をその回転軸に直交する平面で切断し、断面形状（の偏差）を精密に測定していると見ることができる。そして、振れの測定により、形状偏差（真円度、円筒度、縁の輪郭度）と偏心、同心度、同軸度、対称度などが示す位置偏差（locational deviation）が複合的に見出される。

そこで、この場合の偏差測定の基準となる真円をどのようにして導出し、真円度（形状偏差）と偏心（位置偏差、または、測定上の系統誤差）をいかに分離するかという問題が生じる。測定機が単純なものであるだけに、測定に工夫が必要である。

図 5 は、図 4 の方法で円柱状（円形断面）部品の被測定物に対して振れ測定を行った結果を模式的に表示してある。どのような加工物でも程度の差はあるが、図 5 のように真円からのズレ（偏差）が必ず存在する。この、真円からのズレの程度を真円度（circularity deviation）という。真円度は、図 6 に示すような方法（測定装置）で測定する。あるいは、旋盤で部品加工の最中に図 4 のように測定することもある。

図 6 は、回転台に被測定物を置き、回転台とともに被測定物を回転させて、固定されたダイヤルゲージなどの測定機で被測定物の円筒部表面の振れ（変位）を測定する。このときの計測基準は回転台の回転軸である。回転中に回転軸がぶれ（振れ）たりしなければ、ダイヤル

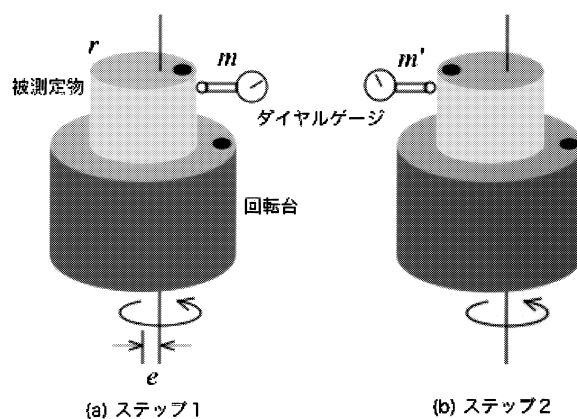


図 6. 反転法による真円度の精密計測.

ゲージの測定値がそのまま真円度を表している。しかし、回転台の幾何学的な中心と回転軸がズレていたり、回転軸に対して被測定物の中心軸を完全に一致させるように置くことができなかつた場合は、被測定物は回転軸に対して偏心（eccentricity）していることになる。このような、偏心を全くなくすることは不可能であり、精密な加工を行い精密計測を実施しようとする場合は、偏心と真円度は必然的に同程度の量となる。

また、図 4 のように旋盤加工中に測定しようとする場合でも同様の問題が生じる。旋盤の回転軸は非常に安定した高精度の基準となりえる。しかし、3本のツメで部品を固定するチャックが誘導する中心軸は、回転軸と必ずしも一致しない。なぜなら、チャック自体の部品の加工精度と組立精度に依存する形状偏差、姿勢偏差、位置偏差の存在と加工中の部品自体が表面形状、表面粗さに依存した形状偏差をもつためにチャックでつかまれたときの状態によって誘導される中心軸が変動するからである。

真円度と偏心を分離する方法の一例を紹介する。真円に対する偏差、すなわち、真円度を $r(\theta)$ 、回転中心と被測定物の中心との偏差を偏心 $e(\theta)$ とする。ただし、 θ は回転台の回転角である。

図 6(a) ステップ 1 のように、回転台を 1 回転 ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) させたときのダイヤルゲージの読み m は、回転角 θ に対して

$$m(\theta) = r(\theta) + e(\theta) \quad (1)$$

となって、真円度の測定値に偏心の影響が含まれて、正確な測定とならない。

そこで、図 6(b) ステップ 2 のように、回転台を $\theta = 0$ の位置に固定したまま、被測定物とダイヤルゲージを $\theta = 180^\circ$ の位置へ反転させてみる（この際、上記の、偏心の影響＝被測定物と回転台の設置上の位置関係、は十分な精度で再現されるものと仮定されている）。そして、ステップ 1 と同様に回転台を 1 回転させてダイヤルゲージの読み $m'(\theta)$ を測定する。すると、式 (1) に含まれる 2 つの変数とを含む式がもうひとつ成立する。すなわち、

$$m'(\theta) = r(\theta) - e(\theta) \quad (2)$$

を得る。

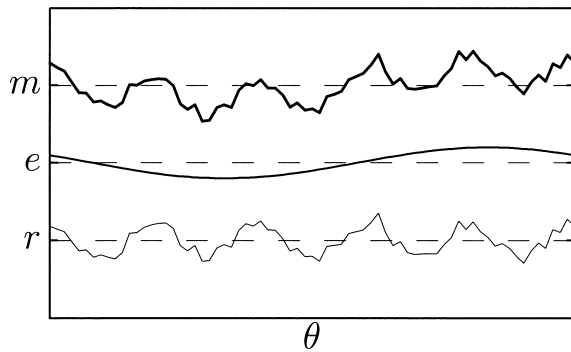


図 7. 調和解析.

式 (1), (2) を連立方程式としてを解くと、図 5 の実線に示したような真円度形状を求めることができる。この方法は反転法と呼ばれる¹²⁾。同じ考え方は、天文観測の現場でもよく知られており、古くから利用されてきた^{13, 14)}。

図 5 に示したような、被測定物の断面形状を精密に求めようとすれば、回転台を一定角度ステップ（例えば、数°）回転させることに、振れ測定を行う必要がある。そして、この測定を 2 回行って、目的が達成される。

測定方法を少し省力化して、回転台を 1 回転させるだけで真円度と偏心を分離する方法も一般的に用いられている（振れ測定の方法自体も、回転台を精密な駆動機構を用いて、一定角速度で回転させながら、電気マイクロメータのような測定機で測定値を一定周期ごとにサンプリングするという方法で省力化することも考えられる）。

一定角度ステップごとの、振れ測定値を m_j とする。ただし、1 回転 (360°) を n 等分し、連続関数 $m(\theta)$ を $m_j = m(2\pi \cdot j/n)$, $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ と標準化した場合、

$$m_j \doteq \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{n-1} \left(a_k \cos \frac{2\pi k j}{n} + b_k \sin \frac{2\pi k j}{n} \right). \quad (3)$$

ここに

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{\pi} \sum_{j=0}^{n-1} m_j \cos \frac{2\pi k j}{n}, \\ b_k = \frac{2}{\pi} \sum_{j=0}^{n-1} m_j \sin \frac{2\pi k j}{n}, \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

のように調和解析 (harmonic analysis) する。式 (4) はフーリエ係数である。

式 (3) で、1 次 ($k=1$) の項

$$e_j = a_1 \cos \frac{2\pi j}{n} + b_1 \sin \frac{2\pi j}{n} \quad (5)$$

が偏心 $e(\theta)$ を表し、2 次 ($k \leq 2$) 以上の項の合計

$$r_j = \sum_{k=2}^{n-1} \left(a_k \cos \frac{2\pi k j}{n} + b_k \sin \frac{2\pi k j}{n} \right) \quad (6)$$

が真円度 $r(\theta)$ である、として分離することができる（図 7 参照）。

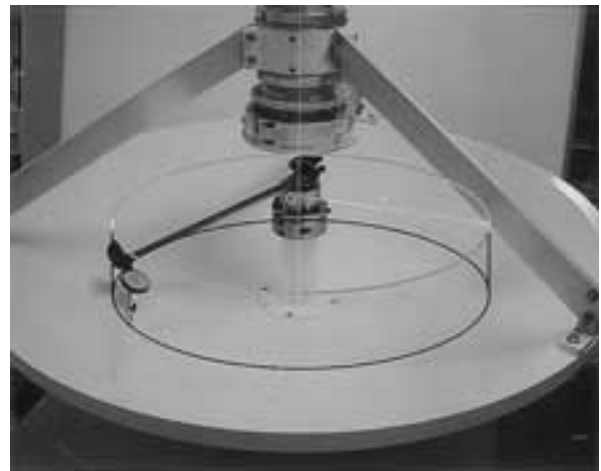


図 8. 「治具」を用いた振れ測定のモデル化.

ここで、注意すべきことは 0 次の項 a_0 は、絶対値が測定できる測定機であれば、被測定物の半径 R を誘導するが、ダイヤルゲージのような相対変位の測定を行う装置を用いる場合は意味をもたない（ダイヤルゲージでも、適切にキャリブレーションを行えば絶対値測定は可能である）。

4. 問題の定式化

2 節で提起した疑問の解決法を、3 節で示した原理をふまえて考察する。作業の目標は、治具の回転軸の主鏡中心軸に対するズレ（位置偏差）と傾斜（姿勢偏差）を分離して調整することである。ただし、主鏡面の形状偏差（仕様で規定されている回転放物面との偏差、および、表面粗さ）は十分に小さく、ダイヤルゲージによる振れ測定値には含まれないことが仮定できるものとする。

3 節で振れ測定は被測定物を平面で切断し、その断面形状を精密計測するものと理解できることを述べた。図 8 が示すように、考察の対象とする治具のダイヤルゲージは、棒の先端に取付けられて（コンパスのように）回転するのだから、この測定は主鏡面を円柱面で切断し、その切口の形状を精密計測しているものと解釈することができる。

切口の形状はどのようなものとなるのだろうか。もし、主鏡面の形状偏差が全くなく、なおかつ、治具の回転軸と主鏡中心軸が完全に一致していれば、主鏡面の切口は真円となるだろう。逆に、治具の回転軸にズレや傾斜があれば、切口はゆがんだ閉曲線となるはずである。したがって、切口のゆがみ方やダイヤルゲージ指針のフレ方を観察することで、治具のズレと傾斜を分離し修正する方法が存在すると期待できる。

主鏡面を切断する円柱面について、もう少し詳しく定義しておこう。円柱面の中心軸は治具の回転軸に一致させ、治具の回転部（ベアリングが組込まれている）辺りに原点 O を定める。ダイヤルゲージ探針の先端に円柱面の母線があり、そこで主鏡面を切断する。円柱面の半径を r とし、回転角 θ の基準を任意に定める（副鏡を吊る

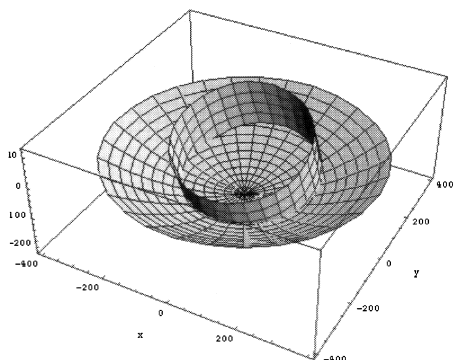


図 9. 円柱面による主鏡面の切口.

3本のステーのうちの1本は真北を向いている。これを念頭に例えば東方向に始線を決める。

治具を円柱面として抽象化すると、主鏡面も回転放物面であるから、切口は2つの曲面の交わりで表される空間曲線であると見なせる(図9)。

そこで切口の曲線形状を求めるため、図8に示すOを原点とするデカルト座標系 (x, y, z) を定める。 z 軸は主鏡中心軸に平行であり、 x 軸は θ の始線方向を向く。 (x, y, z) 座標系は、以後の作業を通して固定する。はじめに治具の回転軸が主鏡中心軸に対して傾斜していることを考える。したがって、傾斜した円柱面の方程式を (x, y, z) で表したい。この場合、座標軸を原点Oの周りに回転する座標変換を用いる。はじめ (x, y, z) と一致している座標系 (ξ, η, ζ) を z 軸の回りに角度 φ 回転させ、次に、そのときの ξ 軸の回りに角度 ψ 回転させる(図10)。この座標回転は式(7)で表される¹⁵⁾。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_z(\varphi)R_\xi(\psi) \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし、回転行列 R_z, R_ξ は、

$$R_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_\xi(\psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}.$$

いま、 ζ 軸が傾斜した治具の回転軸と一致するように回転角 φ, ψ を定める。すると、 (ξ, η, ζ) 座標系では半径 r の円柱面の方程式は、

$$\xi^2 + \eta^2 = r^2 \quad (8)$$

である。円柱面の方程式を (x, y, z) で表すために、式(7)を逆に解いた

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\cos \psi \sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \\ \sin \psi \sin \varphi & -\sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (9)$$

を式(8)に代入する。よって、

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fzx = r^2 \quad (10)$$

が傾斜した円柱面の方程式である。ここに、

$$A = \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \cos^2 \psi, B = \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \cos^2 \psi,$$

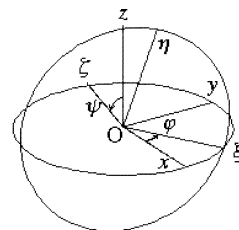


図 10. 座標系.

$$C = \sin^2 \varphi, D = \cos \varphi \sin \varphi \sin^2 \psi,$$

$$E = \cos \varphi \cos \psi \sin \psi, F = -\sin \varphi \cos \psi \sin \psi$$

である。

次に、座標系 $O-(x, y, z)$ (原点Oは治具の回転中心)に対して、主鏡面の中心軸が平行にズレている(ほんとは、治具の回転軸が主鏡面中心に対してズレている)効果を考える。この場合は、主鏡である回転放物面の方程式に対して座標の平行移動を行えばよい。すなわち、

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = 4p(z+h). \quad (11)$$

ここに、 p は主鏡頂点から主鏡焦点までの距離($4p$:主断面における直弦)で、 a, b は治具のズレの x, y 座標値、 h は原点から見た主鏡頂点の z 座標値である。つまり、治具の回転中心を基準とすると主鏡頂点の (x, y, z) 座標は $(a, b, -h)$ である。よって、式(10), (11)を連立させた

$$\begin{cases} Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fzx - r^2 = 0, \\ x^2 + y^2 - 2ax - 2by - 4pz + a^2 + b^2 - 4ph = 0 \end{cases} \quad (12)$$

が切口の形状を表す閉曲線の方程式である。

式(12)に基づき切口の曲線形状を調べるには、代数的、数値的に解く方法⁵⁾が一般的であるが、ここでは幾何学的(というより図形的)に解く方法を用いる。考え方は、円柱面の中心軸に平行である母線(generator)と主鏡面の交わる点を連続的に求めるということである。

(ξ, η, ζ) 座標系(図10)で、母線の方程式は、

$$\begin{cases} \xi = r \cos \theta, \\ \eta = r \sin \theta \end{cases} \quad (13)$$

と表される。式(13)は、式(8)をパラメータ θ を使って媒介変数表示しただけのようであるが、この場合 $\xi = \text{const.}, \eta = \text{const.}$ が与える2つの平面の交わりとしての直線の方程式である。

式(13)の ξ, η に式(9)を代入した式と式(11)を連立すれば、

$$\begin{cases} x \cos \varphi + y \sin \varphi = r \cos \theta, \\ -x \cos \psi \sin \varphi + y \cos \psi \cos \varphi + z \sin \psi = r \sin \theta, \\ x^2 + y^2 - 2ax - 2by - 4pz + a^2 + b^2 - 4ph = 0. \end{cases} \quad (14)$$

式(14)の θ を媒介変数として (x, y, z) について解けば、切口である閉曲線を連続的に求めることができる(二次方程式であるから2組の解が得られるが、求める解はグラフで判別される)。

以上の手続きに基づき、式(14)に含まれる定数のうち主鏡面の形状を表す p および主鏡面と治具の設置上の位

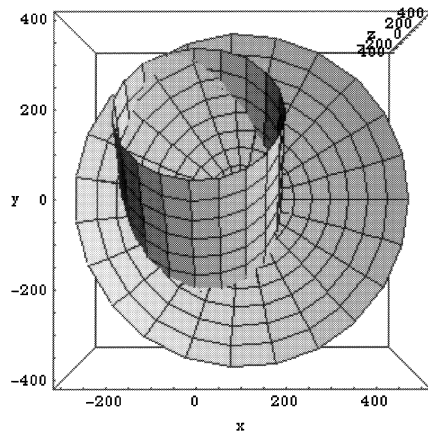


図 11. 例題 (モデル).

置関係を与える a, b, h と、傾斜を示す φ, ψ に適当な値を設定して例題として示したのが図 11 のモデル ($a=a_0, b=0; \varphi=\pi, \psi=\psi_0$) である (「ズレ」の成分は x 軸方向, 「傾斜」の成分は y 軸方向). これらの, 設定値は実際のアンテナ主鏡形状や現実的な組立誤差から離れて, 図 12 に示すように, 切口の形状が大きくゆがんで見えることをモデル化の主眼として決定された.

図 12 において, 太い (グレーの) 実線が図 11 のモデルの切口で, 細い実線はモデルに対して傾斜の成分だけ ($a=0, b=0; \varphi=\pi, \psi=\psi_0$) 点線はズレの成分 ($a=a_0, b=0; \varphi=0, \psi=0$) だけの場合の切口を示している ($p=p_0, h=h_0$ は共通).

切口の形状を観察 (測定) して, ズレと傾斜を分離し調整し切口の形状を真円に近づける (組立誤差の許容範囲内に追込む) ことが軸合わせ作業の目的であり, その方法を見つけ出すことが本報告の目標である.

5. 作業法の検討

機械設計は, 仕様として与えられた目的を達成するための構造や材料を選定して, その構造を具体化する作業である. この際, 構造それ自体の実現可能性を十分に検討するのみならず, 部品加工の可能性や組立作業の実施方法や手順, および, 実施の可否をも検討する. 本報告で議論する軸合わせ作業では, 2 節で示したように, ダイヤルゲージによる振れ測定を適用することが計画された. 振れ測定は 3 節で若干の事例を示した以外にも, 中心軸をもつ回転体の加工や組立における最も基本的な測定法であり日常的に実施されている. 報告者ら機械設計者としての経験からも, この作業法には仕様を達成するための可能性が十分あり, 最も妥当性の高い選択であると考えられた.

そこで, 作業を実施するにあたって機械工学における常識的な作業方法を踏襲するものとして考察する. まず, 測定面である主鏡面に対するダイヤルゲージのあて方を考える. 用いるダイヤルゲージの探針は, ダイヤルゲージ本体にもつ回転軸の周りに微小回転振動する. すなわち, 探針の運動はひとつの平面 (子午面) 内に限ら

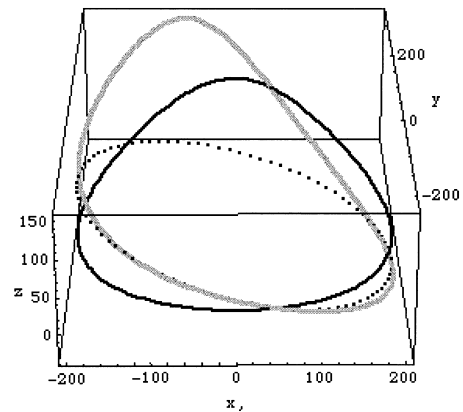


図 12. 例題 (切口の形状).

れる. この平面を主鏡面の法線の方向に設定すれば, 探針の運動による振れ測定値は, 主に法線方向の変位に対して強い感度をもち, 接線方向にはほとんど感度をもたない. この振れ測定値を, 鉛直方向と水平方向の変位に分解することができる. あるいはまた, 治具の回転軸に直交する成分と平行な成分に対して感度をもっているとの解釈も成り立つ. また, ダイヤルゲージ探針が運動する平面と主鏡面の法線との間の傾斜角が変化しても, 二つの成分に対する感度に差が生じる. どのような測り方をして本質的な違いはないと思われるが, 治具の回転軸に対して直交する成分だけ, または平行する成分だけを測定することが, この場合, 他に比べて有用であると思われる. なぜなら, 主鏡中心軸に対する治具回転軸の不正を直接的に検出する手段と考えられるからである.

振れ測定値を治具回転軸に直交する成分 (R) と平行な成分 (Z) に分けて,

$$R = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \quad Z = \zeta$$

とする.

作業者が, 切口の形状 (図 12) を振れ測定値から直接的に思い描くことは非常に高度な熟練性と深い洞察力を要すると思われる. そこで, 切口の形状から少し離れて議論を単純化する. 治具回転軸に平行な (Z) 成分だけを図 13 のように, ダイヤルゲージの探針の運動平面を設定して, 測定する (ダイヤルゲージの種類を選択, 治具の構造の設計などに工夫を施すことにより, この要請は比較的容易に実現できる).

また, 治具の回転半径 r は常識的な判断からなるべく大きくとることが望ましいと考えられるから, 実用的な範囲内で最大値とする.

作業方法としては, 振れ (Z 成分) を測定しながら, 「ズレ」と「傾斜」の一方を振れが十分に小さく (調整しても振れ測定値が改善しなく) なるまで調整して, その後, 他方を振れが許容範囲内に収まるように調整する, 場合によってはこれを交互に繰返す, というものが常識的に妥当なものと考えられる.

図 11 の例題における, Z 成分の測定結果を図 14 に示す. 線種の違いは図 12 の場合と同じである. 図 14(b)

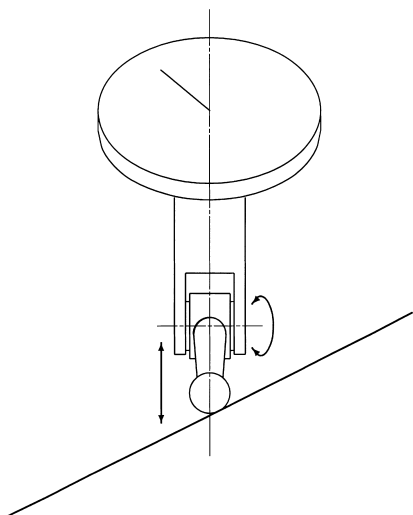
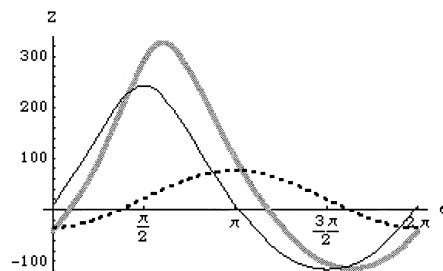
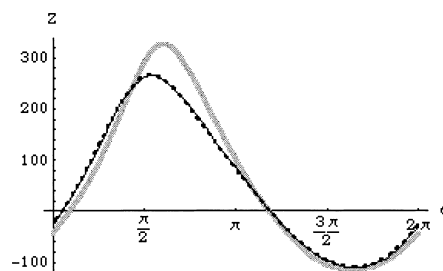


図 13. ダイアルゲージによる Z 成分の測定.

は、ズレだけと傾斜だけの測定値を足し合わせたものと、ズレと傾斜が共にある場合の測定値のグラフである。この図から、両者の間には近似的に、重ね合わせの原理が成立していることが分かる（次節で詳述するが、 $1/100$ (mm) 程度のオーダーの測定を行っている作業者にとっては、現実的に、厳密に重ね合わせの原理が成立しているといってもよい）。ゆえに、ズレだけと傾斜だけのそれぞれの測定値の振幅が等しく位相が 180° 異なるような場合が生じれば、ダイアルゲージの指針は全く振れない状態となるおそれがある。すなわち、「ズレ」と「傾斜」を分離する手掛りが失われてしまう場合があるのである。

そのような状態は非常にまれな場合にしか起こらないはずであると思いたいところであるが、作業上この問題は軽視できない。なぜなら、作業者が検出できる情報は「ズレ+傾斜」だけだからである。前述の作業方法を実施するとして、例えば、はじめに「ズレ」だけを調整する。作業者は実際の「ズレ」の大きさと方向が分からないから、たとえ「ズレ」がゼロになっても（「傾斜」があるので）指針は振れるので、そのまま作業を続行すると「傾斜」+「ズレ」 $\neq 0$ となるように「ズレ」を追込んでしまう危険性がある。これは、まさに先に掲げた状態そのままである。

ここに、振れ測定による軸合わせ作業を困難なものとする問題点がある。振れ測定では「ズレ」と「傾斜」という 2 つのパラメータの（近似的な）線型結合が観測されるのであり、これを分離しなければ正しく調整することができない。これを分離するということは、例えば、3 節の式 (1) と (2) のようにパラメータの結合関係を異にする観測方法を見つけ出すか、ひとつのパラメータを全く独立に決定しなければならないということである。加えて、（常識的に妥当と考えたが）誤った作業方法を実施した結果、2 つのパラメータを分離する手掛りさえ失ってしまう場合⁵⁾ があるということに大きな問題点がある。

図 14(a). 例題 (Z 成分).
ズレ+傾斜 (灰色実線), ズレだけ (点線), 傾斜だけ (細実線).図 14(b). 例題 (Z 成分).
ズレ+傾斜 \approx ズレだけ+傾斜だけ.

この問題を克服するためには、作業法に対する戦略の構築が必要である。

6. 作業法の解決

軸合わせの作業法に対する戦略を構築する手掛りとするため、改めて、切口の形状がもつ性質を検討する。

図 11 は、主鏡面の真上 (z 軸上方) から眺めた様子である。ここで、少し視点をずらして円柱面の真上 (ζ 軸上方) から観察したらどうだろうか。当然のことながら、円柱面はもはや真円にしか見えない。このことは、ひとつの手掛りとなりうる可能性がある。

治具の構造などに工夫を施したうえで、図 15 のようにダイアルゲージを設置して、治具の回転軸に直交する (R) 成分を測定してみる。すると、 $R \equiv$ 一定である。なぜなら、円柱面を軸上方から眺めると真円にしか見えないからである（図 16: 透視投影 (perspective projection) により描かれているので、 ζ 成分の違いにより切口がずれて見える）。この観測事実を手掛りのひとつとして掲げる。すなわち、

手掛り 1: 振れ測定値の、治具回転軸に対して直交する (R) 成分は一定である。

つまり「ダイアルゲージによる振れ測定で、治具の回転軸に直交する成分だけを検出する手段（測定の方法）で R 成分を測定したら指針は全く振れない」ということである。したがって、このときの Z 成分が全く振れないように、調整すれば軸合わせは完了するのであるが、それは前節で議論したように困難なのである。

図 12 の点線の切口は、円柱面の中心軸が主鏡面の中心軸に平行 ($\zeta // z$) で傾きは無いが、重なってはいない場合を示している。この状態で、 R 成分を測定すれば上記

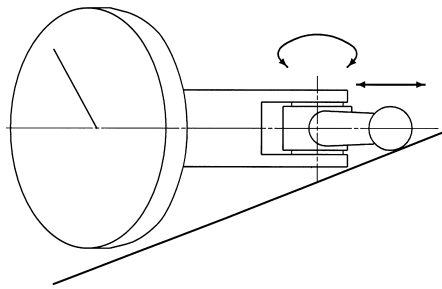


図 15. ダイヤルゲージによる R 成分の測定.

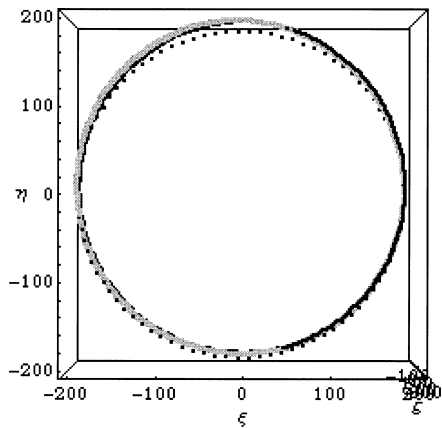


図 16. 例題 (R 成分).

のごとく $R=r$ 一定で、Z 成分は単純な正弦波 (例題の場合 $Z \propto -\cos \theta$) となり平面で切断した場合と同じである。一方、傾斜の切口 (図 12 で細い実線) は正弦波の二次の成分を含み、一回転 ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) で二周期の振動が (測定機が精密なら) 測定される状態となり、非常に複雑な形状となる。したがって、

手掛り 2: ズレだけがある場合、切口の形状は単純であり、振れ測定値の治具回転軸に平行な (Z) 成分だけが検出される。

傾斜がなく、ズレだけがある場合は Z 成分を測定して、これが一定になるように (当たり前だが) ズレだけを調整すれば軸合わせできる。

軸合わせ作業を行う際、主鏡面は天頂を向ける。これは作業上の要請に基づいている。しかし、このことによって主鏡中心軸は鉛直線に平行となったという事実も重要な手掛りとなる。

切口の形状を主鏡面の中心軸に直交する成分と平行な成分に分けて、

$$H = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad V = z$$

という定義も加える。図 17(a) のズレだけ (点線) の場合のグラフは、振れ測定値の H 成分が恒等的にゼロである。これは「手掛り 1」に示したように、円柱面はその軸上から眺めると真円にしか見えないし、なおかつ、円柱面の中心軸は主鏡面の中心軸に平行 ($\zeta // z$) だからである。また、明らかに H 成分の測定値は「ズレ+傾斜」≠「ズレだけ」+「傾斜だけ」であり、近似的にも重ね合わせの原理は成立していない。よって、この H 成分は傾斜に関する何らかの固有の情報を示していると考えられ

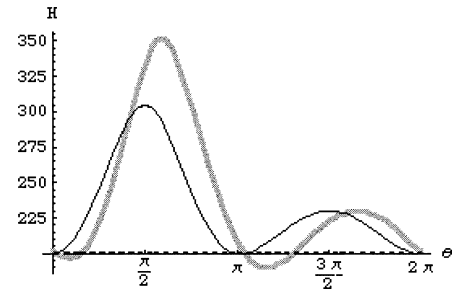


図 17(a). 例題 (H 成分).
ズレ+傾斜 (灰色実線), ズレだけ (点線), 傾斜だけ (細実線).

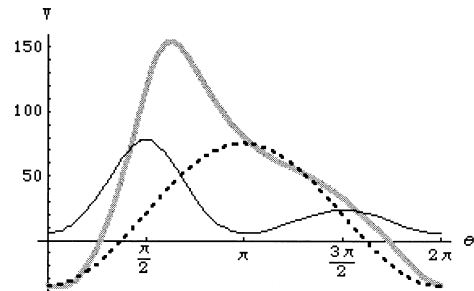


図 17(b). 例題 (V 成分).

る。

今もし、軸合わせが理想的に完了していれば、測定値は $R=H(=r)$ 一定のはずである。そこで、軸合わせを開始する時点で、ダイヤルゲージなどの測定機のセッティングを工夫して水平 H 成分を測定する (図 15 と同様にダイヤルゲージを設置し、水平面に平行となるようにダイヤルゲージ本体の平らな部分に水準器を置いて微調整する)。そして、H 成分の測定値が一定になるように治具の「傾斜」だけを調整する。はじめは図 17(a) に示すように、振れ測定値は観測されるのであるが、これがなくなるように傾斜を調整するという事は、 $R \rightarrow H$ というように z 軸に平行になるように修正するという事である。つまり、「ズレ+傾斜」の形状 (グレーの実線) を測定して (ズレだけや傾斜だけを分離して測定する方法は見つかっていないが、「傾斜」が存在すれば H 成分は一定にはならない)、結果として傾斜の成分だけを修正する方法が見出されたと考えられる。

調整作業の過程において、例題の場合は、最初 y 軸正の向きに傾斜 ($\varphi = \pi, \varphi = \phi_0$) を与えているのであるが、切口の形状測定値は $\pi/2 < \theta < \pi$ にピークがくる。作業者は、「ズレ+傾斜」の測定値以外に情報がないから、このピークの方に治具の回転軸が傾斜していると考え、そして、ダイヤルゲージの指針の振れを見ながら、これを縮小するように傾斜を調整する。一度、治具の傾斜を修正すれば切口の形状も変化するので、測定値のピークの値やそのときの角度 θ もそのつど変動する。そこで、その時点でのピークを小さくするように調整を繰り返し、H 成分の測定値を傾斜の許容範囲以内に収めることができれば、傾斜の調整作業は終了する。

以上で、 $R=H$ であると同時に $Z=V$ が達成されたと

表 1. 計算に用いた諸量.

主鏡面に関する量	$p=280$ (mm)	頂点から焦点までの距離
	$h=180$ (mm)	治具の回転中心 (原点 O) から頂点までの距離
	$a=0.1$ (mm) $b=0$	ズレの x 軸成分 y 軸成分
	$\sqrt{a^2+b^2} \leq 0.1$ (mm)	仕様によるズレの許容量
円柱面に関する量	$100 \leq r \leq 300$ (mm)	治具の回転半径 (現実的に可能な範囲)
	$0 \leq \theta < 2\pi$ (rad)	ダイヤルゲージの治具回転軸周りの回転角
	$\varphi = \pi$ (rad) $\phi = 0.5$ $= \frac{\pi}{21600}$ (rad)	z 軸周りの座標回転角 ξ 軸周りの座標傾斜角
	$\phi \leq 0.5$	仕様による傾斜の許容値

考えられる。つぎは「手掛り 2」に従って、 V (鉛直) 成分を測定しながら「ズレ」だけの修正を繰返して、ズレの許容範囲以内に追込むことができれば軸合わせ作業は完了である。

ここで、この作業法について振り返ってみると、軸合わせ作業の目的が主鏡中心軸と治具の回転軸を一致させるということであるのに対して、作業の過程で鉛直線と水平線という新たな基準を導入していることに注意する必要がある。主鏡が正しく天頂を向くかどうかは、主鏡と副鏡 (および、2 周波数の受信ホーン) が機械的に正しく軸合わせされたうえで (キャリブレーション) 観測により、確定されたり補正されたりするものである。したがって、鉛直線や水平線に過度に頼るのは危険である。一方、現実的にもダイヤルゲージなどの測定機を鉛直成分だけ、水平成分だけを厳密に分離して測定すること自体、非常に難しいことである。水平成分の測定に多少の鉛直成分が含まれたり、その逆も生じるはずである。

実際の調整方法について詳しく述べてこなかったが、モデルに対して数値的にシミュレーションしたところ、振れ測定値の振幅が 1/10 程度となるように「傾斜」を補正した場合、(図 17(a) にも見えている) 1 回転で 2 周期の振動成分の振幅が同じ程度となってしまう (測定値のピークと本来の傾斜の向きの位相のズレも徐々に増大する)、本当の「傾斜」の向きが分かりにくくなる。したがって実際の作業は、 H 成分を測定して「傾斜」を測定値の半分程度まで調整し、次に V 成分を測定して「ズレ」を修正する方がよい。 V 成分も「ズレ」と「傾斜」の重ね合わせが測定されているが、「傾斜」は縮小されているので測定値は「ズレ」を示していると仮定して、これも半分程度まで調整する。そしてまた、「傾斜」→「ズレ」→…を繰返すことが望ましいと考えられる。それを考慮すれば、ダイヤルゲージによる測定の水平線と鉛直

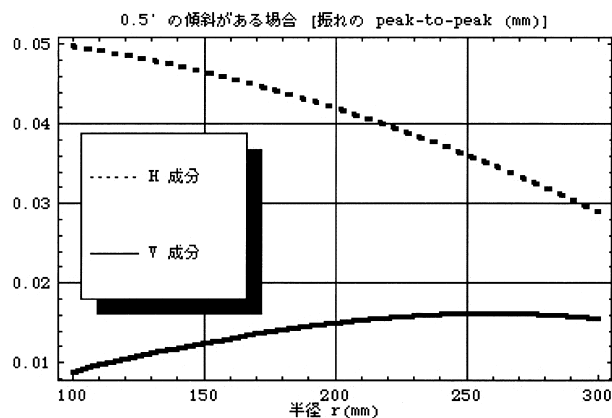


図 18(a). 実際に 0.5° の傾斜がある場合の測定値.

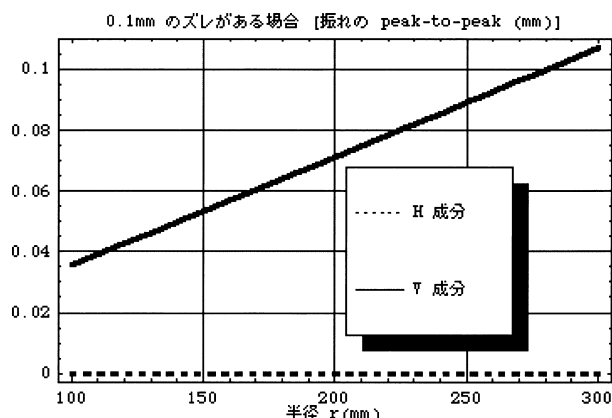


図 18(b). 実際に 0.1 mm のズレがある場合の測定値.

線の基準はそれほど厳格に要求する必要はないであろう。

実際の軸合わせ作業で、仕様を達成するためにダイヤルゲージで測定される振れを定量的に確認しておく。主鏡面の形状を定める定数と治具の取付位置および、ズレと傾斜の仕様に定められた許容値を表 1 に掲げる。

表 1 に示した諸量を用いて、許容される限界の傾斜だけ、ズレだけがある場合の測定値 (H , V 成分) を計算した結果が図 18 のグラフである。

図 18(a) が「傾斜」の測定値に対する許容値、図 18(b) が「ズレ」の許容値である。両図とも、横軸に治具の回転半径 r が現実的に測定可能な 100~300 (mm) を与え、これに対する振れ測定量の peak to peak の値を縦軸に (mm) 単位で表している。

図 18(a) の H 成分のグラフを見ると、治具の回転半径 r を大きくするとかえって測定される振れ幅が減少することが分かる。これは、通常感覚と異なる結果であり注意を要する。しかし半径 r が小さい部分では主鏡面の勾配も小さいので H 成分の測定は非常に困難である。そこで、現実的には中間程度の半径で測定することになる。

一方、図 18(b) の V 成分のグラフは半径 r に対して振れの測定値が比例することを示している。これは半径を大きくとることが有利であることが分かるが、直径

$\phi 800$ (mm) の主鏡で現実的に測定が可能なのは $r \leq 300$ (mm) 程度であろう。

実際の作業を想定し、図 18(a) の H 成分の曲線を見て治具の回転半径 $r \doteq 220$ (mm) に設定すると、ダイヤルゲージの指針の振れが一周で ± 0.02 (mm) 以内に収められるように治具の傾斜を調整する必要があることが分かる。この目標を達成できれば、傾斜の補正は完了である。

次に、図 18(b) の V 成分から、治具の回転半径 $r \doteq 280$ (mm) に設定し、 V 成分の測定範囲が一周で ± 0.05 (mm) 以内になるようにズレを修正すれば治具の軸合わせ作業は完全に達成される。

7. 副鏡取付作業

前節(6節)の方法で、原理的にダイヤルゲージを用いて主鏡面の中心軸へ治具の回転軸を一致させることができることが分かった。これによって、副鏡の軸合わせ作業も実施できる可能性が見えてきた。しかし、副鏡交換作業は 84 台のアンテナすべてに対して実施されるのであり、実施時期の 2000 年は太陽活動のピークを迎えており、観測の中断は絶対に避けたいという要請から、作業は観測終了後の夜間に行われることが決定されていた。したがって、作業方法を決定するに当たって能率や効率という観点も重要である。

前節で示した方法は、ダイヤルゲージの設定や測定値の読取り、複雑な作業手順など、作業者の熟練性や技能に依存する部分も大きい。そのほか、観測する周波数 17 (GHz) と 34 (GHz) に対する電波の波長が 17.6 (mm) と 8.8 (mm) であることから、主鏡面の鏡面精度として仕様上 0.3 (mm) r.m.s が許容されている。これに対して、いくつかのアンテナの鏡面精度が製作時に測定され報告されているが、実際の形状偏差は $R_{\max} = 0.1$ 以下¹⁶⁾ にほぼ収まっているようである。しかし、前節で示したように切口の形状を 0.01 (mm) の程度で測定する必要がある作業に対して、主鏡面は測定の基準 (reference) として不適切であることも事実である。

以上のような理由から、治具の軸合わせにダイヤルゲージ測定を用いる方法の適用は断念せざるをえなかった。そこで、治具の軸合わせ法は新たに考え直された。

主鏡面の中心に突き出ている 17 (GHz) 受信ホーン(図 2 参照)は、テフロン製のキャップを外すと、内部がラッパのように上部へ広がった円錐状に削り出された管状の構造となっている。この円錐面に面同士がすきまなく接触して、軸心がホーンを中心に一致するように加工された部分をもつ治具が新たに製作された。部品の円錐面状に加工された部分をテーパ (taper) と呼ぶ。図 19 に治具の頭部の写真を示す。これをホーンに挿入すれば、直ちに軸心が一致することが想像できるであろう。テーパは軸心の高い一致度が求められる場合、例えば工作機械など、によく用いられる基本的な構造である。

主鏡面と 17 (GHz) ホーンは、それらの製作時の機械加工精度の程度 (軸合わせの要求精度 = 組立精度よりは



図 19. 新規に製作された治具 (頭部部品)。



図 20. 回転治具。

るかに高い程度) で軸心が一致することが設計上保証されている。これで、主鏡面と 17 (GHz) ホーン、副鏡の中心軸が仕様で要求する精度を達成できる。

次に、副鏡の内側に設置されている 34 (GHz) ホーンの軸心も一致させるために、図 20 のような回転治具も考案された。これは、内部にベアリングが組込まれている回転ステージである。回転治具に副鏡ホルダーを設置し、副鏡取付金具、副鏡を順次組み立てる。そして、ダイヤルゲージを用いて振れを測定し、測定された振れに基づき副鏡と副鏡ホルダーの中心軸を (調整ネジを用いて) 完全に一致させておく。これら、半ば組立てられた一体部品が主鏡本体に取付けられる際、副鏡ホルダーと 34 (GHz) ホーンの中心軸も機械加工精度の程度で一致する。これは、副鏡ホルダーの内径部の中心軸と 34 (GHz) ホーンの中心軸を同心状に一致させるドーナツ型のフランジ部品を十分に小さな隙間ではめ込むことで保証されている。

これで、主鏡と副鏡、および、17 (GHz)、34 (GHz) ホーンのすべての中心軸の一致度に対する仕様が完全に満足される。

最後に、上記の副鏡周辺の半組立部品を一体として主鏡本体に取り付ける。その際、治具を用いて副鏡中心軸の振れを調整する必要がある場合は、主鏡本体と副鏡周

辺の半組立部品を結合する3本のステーの取付けネジを緩めて、この部分で調整する。ステーの設置位置を調整するための治具や副鏡頂点と主鏡頂点の距離を設定するための治具など、必要な部品がすべて新規に開発された。

以上の、数多くの部品が作業に供され副鏡交換作業は2週間の夜間作業をもって成功裏に完了することができた。結果として、新規に開発された治具や作業方法は、要求された仕様や条件に即してベストな解の組合せであったと考えられる。それらの詳細は専門的に過ぎるので本報告では割愛する。

8. まとめ

振れ測定は、円柱部品の軸振れを最も簡単に検出する手段として用いられている。本報告では振れ測定を行って、回転放物面をもつ部品（電波ヘリオグラフアンテナ主鏡）の中心軸を決定する方法が考察された。中心軸を決定するためには、中心軸の傾斜角（傾斜）と偏心（ズレ）をとともに制御する必要がある。目標とする軸の向きに対して、直交する成分の振れ測定値が一定になるように対象部品の傾斜角（傾斜）を調整すれば、対象部品の中心軸は目標の軸に平行にできる。つぎに、目標とする軸に平行な成分の振れ測定値が一定になるように対象部品の偏心（ズレ）を調整すれば、対象部品の中心軸は目標の軸に一致させられる。本報告で、考察された作業法は回転放物面のみならず、回転柱面をもつ部品一般に適用できる。

野辺山太陽電波観測所では、電波ヘリオグラフアンテナの副鏡改良事業が実施された。その際、アンテナ本体の設置されている屋外で主鏡と副鏡、および、17 GHz、34 GHzの2周波数の電波受信ホーンのすべての中心軸を一致させる方法を確立する必要があった。そのために、ダイヤルゲージなどの測微機を用いた振れ測定により軸合わせを完了するための作業法が解析的に検討された。振れ測定は簡便に実施できるが、本質的に複数のパラメータが複合して観測される。したがって、振れ測定を実施するためには対象とするパラメータを分離するための論理が重要である。ものづくりの過程において、振れ測定は日常的に実施されており、これまでも複合的に観測されたパラメータを分離するため数々の論理が構築されてきた。不幸にして、本報告で検討された作業法は実際には採用されなかったが、簡単でありながら、確実に中心軸を決定できる論理が新たにひとつ確立されたと考えられる。

この成果が、直接的に適用できない場合であっても、対象として回転放物面以外の回転柱面一般に適用できることや、複合的に観測されたパラメータを分離するために工夫された論理・考え方など応用範囲は広いと考えられる。

謝辞

野辺山太陽電波観測所所長柴崎清登教授は、本報告の出版にご支援下さった。関口英昭助教授ならびに、斎藤泰文技術係長、川島 進助手、および、篠原徳之技術係長には本研究の推進において実験への惜しめない援助と有意義な議論を賜った。

森 明さんは、法月鐵工所と赤阪鐵工所を歴任されて熟練性を蓄え、これを遺憾なく発揮されて本事業の遂行を支えて下さった。

方程式の根とグラフの作成は Mathematica 4.0 (Wolfram Research, Inc.) によった。

ここに記して、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 関口英昭, 石崎秀晴, 斎藤泰文, 川島 進, 中島 弘, 鷹野敏明: 電波ヘリオグラフ副鏡回りの改良, 第18回天文学に関する技術シンポジウム1998集録, 102-110 (1998).
- 2) 関口英昭, 石崎秀晴, 川島 進, 斎藤泰文, 篠原徳之, 中島 弘: 電波ヘリオグラフ改良型副鏡の性能評価, 第19回天文学に関する技術シンポジウム1999集録, 37-46 (1999).
- 3) 斎藤泰文, 関口英昭, 石崎秀晴, 篠原徳之, 川島 進, 中島 弘: エルサレムクロス・パターンの特性, 第19回天文学に関する技術シンポジウム1999集録, 47-55 (1999).
- 4) 篠原徳之, 関口英昭, 石崎秀晴, 川島 進, 斎藤泰文, 中島 弘: 電波ヘリオグラフ改良型副鏡の保護膜, 第19回天文学に関する技術シンポジウム1999集録, 56-62 (1999).
- 5) 石崎秀晴, 関口英昭, 斎藤泰文, 川島 進, 篠原徳之, 中島 弘: 電波ヘリオグラフアンテナの主鏡と副鏡の軸合わせ, 第19回天文学における技術シンポジウム1999集録, 63-76 (1999).
- 6) 関口英昭, 石崎秀晴, 川島 進, 斎藤泰文, 篠原徳之, 中島 弘: 電波ヘリオグラフ改良型副鏡の本製作, 第20回天文学に関する技術シンポジウム2000集録, 80-88 (2000).
- 7) 石崎秀晴: 電波ヘリオグラフアンテナのセラミック副鏡支持における設計上の諸問題—ものづくりの方法論としての事例研究—, 第20回天文学における技術シンポジウム2000集録, 89-104 (2000).
- 8) 中島 弘, 川島 進, 斎藤泰文, 関口英昭, 篠原徳之, 鷹野敏明: 電波ヘリオグラフ2周波光学系改修—I (概要), 日本天文学会2001春季年会, V 16a (2001).
- 9) 関口英昭, 川島 進, 斎藤泰文, 篠原徳之, 中島 弘, 鷹野敏明: 電波ヘリオグラフ2周波光学系改修—II: 全面FSS型副鏡の詳細, 日本天文学会

振れ測定の論理

- 2001 春季年会, V44b (2001).
- 10) 社団法人日本機械学会編: 機械工学便覧応用編 B 2 加工学・加工機器, 丸善株式会社, 202-206 (1984).
 - 11) 石崎秀晴, 西野徹雄, 岡田則夫, 大島紀夫, 福田武夫, 神澤富雄: 回転軸の不安定現象 (第 2 報), 国立天文台報, 3, 117-133 (1998).
 - 12) 高偉 (Wei Gao): 基準を作りながらの知的精密計測, 日本機械学会誌, 104, 370-371 (2001).
 - 13) 関口直甫: 星の位置と運動, 東海大学出版会, 17 (1977).
 - 14) 青木信仰: 時と暦, 東京大学出版会, 196 (1982).
 - 15) 石崎秀晴: 回転運動の可視化, 国立天文台報, 2, 455-467 (1994).
 - 16) (株)赤阪鐵工所: 電波ヘリオグラフアンテナ系試験成績書 (1) 主鏡面精度 (1990).