iKAGRA BS鏡及び真空槽位置測定

2016年6月文責：大石奈緒子、測定：荒木栄(KEK)、寺田聡一

　iKAGRAで使用したBS鏡の位置を測定するため、6月7、8日にFARO社製3次元測定器を用いて測定を行った。結果、真空槽の横フランジを参照基準とした場合の鏡の位置は、予定の設置位置に対して0.5mm程度の誤差で

**x: -1.6mm, y: -6.2mm, z: -6.6mm**

であった。但し、測定時に鏡をストッパーで固定しているため、固定していない場合とは多少の差が生じている可能性がある。また、同時に行った床基準点位置の測定から、真空槽の設置精度が当初想定していたほどには良くないことが示唆された。BS周辺の基準点のうち、BS真空槽中心真下からy方向にそれぞれ±2mの位置にある床基準点2つの位置を測定した結果、真空槽は基準点に対して

x方向に+3.8mm、y方向に+9.5mm、z方向に-3.5mm

（x方向に+4.9mm、y方向に+10.2mm、z方向に-1.1mm：補正後）の位置にあり、

上から見て時計回りに約0.9度回転している

ことが示された。

　床基準点は、y+及びy-の2点しか測定していないため、今回の測定では真空槽のy軸周りの回転などは評価できないことに注意が必要であるが、この結果を用いて床基準点に対する鏡の位置ずれを求めると、次のようになった。

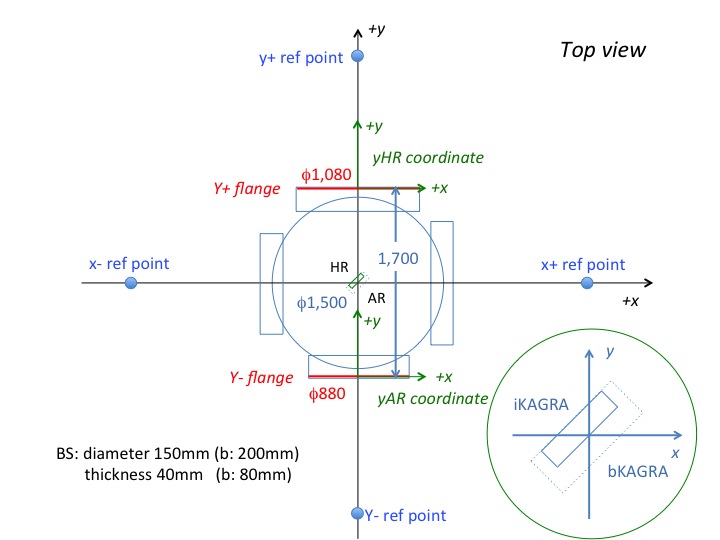
x: +2.2mm(+3.4mm), y: +3.3mm(+4.0mm), z: -10.1mm(-7.7mm)　（括弧内補整後）

以下測定の詳細のほか、oplev光軸やコイル板の角度についても述べる。

＃6月21日の追加測定でも、真空槽が床基準点に対してy方向に1cmほどずれていることが確認されたため、真空槽の再設置が予定されている。

1. **3次元測定器による測定概要**

　真空槽の基準は上フランジであるが、今回使用した3次元測定器の測定範囲の制約から、測定は横フランジを基準として行った。まずO-リング外周の面でxz平面を作成し、xz面に投影して横フランジの外周を測って円を作成した（y+フランジ）。、その円中心を座標原点として、平面に垂直な方向をy軸とした。同一平面上に横フランジの上1,100mmの位置に溶接されている450mmのフランジ外周（＃蓋側を測らないように注意）を投影して円を測り、この上小円中心をz方向として座標系を構築した。以下、このようにして直径1,080mmのy+フランジ側から作成した座標系をyHR座標、直径880mmのy-フランジ側から作成した座標系をyAR座標とする。



**図1**: 測定で用いた座標: y+側のフランジ(φ1,080mm)を基準とした座標をyHR座標、y-側のフランジ(φ880mm)を基準とした座標をyAR座標とした。真空槽の直径は1,500mm。基準にした横フランジ面間の設計値は1,700mm。

床の基準点は、真空槽中心真下からx軸、y軸上各2mの距離に計4ヶ所。

1. **y+面からの測定**

　yHR座標での測定結果を表１にまとめる。座標の構築に用いたフランジは、横の大開口(φ1,080mm；y+ flange)と上の小開口(φ450mm; sy+ flange)。構築した座標系で測定したのは、床の基準点y+ ref、ブレッドボード面(BB)、サスペンションの台(Table)、サスペンションフレーム(Frame)、および鏡(Mir)である。以下、表1の各項目を説明する。

**y+ flange**はy+側の横フランジ。円の中心を座標原点にしているので、座標値

(x, y, z) は (0, 0, 0)。円周は1,080の設計であるが、実測値は1,078.6であった。

**sy+ flange**は450のフランジ。下段設計値とよく一致している。

表１：y+面からの測定結果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | *x* | *y* | *z* | *I* | *j* | *k* | *r* | err |
| y+  flange | 0 | 0 | 0 | - | - | - | 1,078.6  (1,080) |  |
| sy+  flange | 0 | 0 | 1,100.1  (1,100) | - | - | - | 449.7  (450) |  |
| y+ ref | -16.8  0.0 | 1,140.8  1,150 | -1,196.9P  -1,200+3 | - | - | - | - |  |
| BB | - | - | -396.7 | 0.003 | 0.001 | 1.000 | - |  |
| Table | -0.4 | -637.8 | -396.7 | 0.707 | 0.707 | 0.001 | - |  |
| Frame | 15.7 | -729.9 | -206.6 | 0.722 | 0.692 | 0.001 | - |  |
| Mir | -32.1P  -30.4 | -826.0P  -819.6 | -6.8  0 | -0.713  -0.707 | 0.701  0.707 | 0.001  0.000 | 156.0P  156.0 |  |

**y+ ref**はy+側の床基準点。真空槽の設置予定位置中心真下から+y方向に+/-2.000mの点に打たれている。下段がこの予定位置から予想される参照点の位置。測定値にPがついているものは、測定器のプローブ（直径6mm）の大きさ補正が必要な測定値。点測定を使用しているため、zについては測定値-3mm（3mmはプローブの接触面からプローブ中心までの距離）の補正が必要。この結果、HR座標で測ったy+基準点位置のずれは、

(-16.8mm, -9.2mm, +0.1mm)となる。（横フランジ高さ設計値は1,200mm）。

**BB** ブレッドボード面。x方向に1/300くらいの傾斜。

**Table** サスペンションを載せている台。BB面上に投影して2辺を線として測定し、交点および辺の角度を載せた。1mm以下の精度で真空槽中心に置かれており、角度精度も良い。高さ19cm。

**Frame** サスペンションフレーム。底面の2辺を測定した。真空槽を基準とすると、上から見て時計回りに1.2度回転している。

**Mir**鏡の位置。1ページ目の図の右下に示したように、iKAGRAでは、AR面中心がほぼ真空槽の中心に来るように設置する計画であった。CLIOの鏡の直径は150mm、厚さは40mmであるから、HR面中心は真空槽中心からxに-40.0mm/sqrt(2) = -28.3mm、yに+40.0mm/sqrt(2)ずれた位置にくるはずである。y+横フランジ面と真空槽中心間の距離(y軸方向)は設計値で850mmであるため、yHR座標で測った鏡のHR面中心のy座標は-850+28.3=-821.7となるはずである。

　点測定を使用したので、測定値は面から+3mmの位置補正(+2.1, -2.1, 0)が必要である。以上を考慮した予想位置が下段であり、HR面での計画位置との差は、

(-1.7mm, -6.4mm, -6.8mm) となった。

1. **y-面からの測定**

　3次元測定器には、複数の点を別の設置位置で計測することで座標をつなぐ機能もあるが、今回それは使用せず、y-側から独立に同様の測定を行った。

表2: y-面からの測定結果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | *x* | *y* | *z* | *i* | *j* | *k* | *r* | *err* |
| y- flange | 0 | 0 | 0 | - | - | - | 879.3  (880) |  |
| sy- flange | 0 | 0 | 1099.7  (1,100) | - | - | - | 449.4  (450) |  |
| y- ref | +9.2  0 | -1,159.7  (-1,150) | -1,190.2P  -1,200+3 | - | - | - | - |  |
| BB | - | - | -396.0 | 0.000 | -0.001 | 1.000 | - |  |
| Table | -0.8 | 637.5 | -396.0 | 0.707 | -0.708 | 0.001 |  |  |
| Frame | -46.2 | 744.7 | -206.0 | 0.722 | 0.692 | 0.000 |  |  |
| Mir | 0.5P  2.1 | 841.8P  847.9 | -6.3  0 | 0.712  0.707 | -0.702  -0.707 | -0.003  0.000 | 155.9P  156.0 |  |

y-床基準点のずれは ( +9.2mm, -9.7mm, +6.8mm)。

鏡の位置ずれは(-1.6mm, -6.1mm, -6.3mm)。

1. **鏡の位置ずれと角度について**

　y+フランジ面とy-フランジ面から独立に測定した鏡の位置は、x, y, zの3軸ともそれぞれの予想値からのずれがほぼ0.5mm程度の誤差範囲内で一致した。

HR: (-1.7mm, -6.4mm, -6.8mm)

AR: (-1.6mm, -6.1mm, -6.3mm)

　3次元測定器を用いてフランジを参照基準とし、真空槽内へインストールした物の位置を測定することには一定の精度があることが確認できた。

　鏡面の角度は、各座標で0.5度, 0.4度上から見て反時計回りに回転していた。

HR: -0.713, 0.701, 0.001

AR: 0.712, -0.702, -0.003

1. **真空槽の位置ずれについて**

　真空槽内についての測定精度の良さから、今回の測定を信頼し、また床の基準点位置を信頼すると、基準点位置のずれは、真空槽の設置誤差によるものと考えられる。測定値は下記の2点しかないが、平均を平行移動量、残りを回転と解釈すると、表3のようになる。

表3:　真空槽の設置位置のずれによる床基準点位置のずれ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | x | y | z |
| y+床基準点 | -16.8mm | -9.2mm | +0.1mm |
| y-床基準点 | +9.2mm | -9.7mm | +6.8mm |
|  | -3.8mm+/-13mm | -9.5mm+/-0.3mm | +3.5mm+/-3.4mm |

結果、真空槽の位置は、予定位置から (+3.8mm, +9.5mm, -3.5mm)ずれていることになる。また、xの値の差から、真空槽は上から見て時計回りに0.9度（長さ850mmに対して；要再確認；+/-13mmの回転）回転しており、zの値から、x軸周りにy-方向へ0.2度程傾いていることが示唆される。

ここまで、床基準点は計画位置にあるとしてきたが、設置後、基準点の位置を測定した結果が以下のようである（単位[m]）。

1：x+＝（2.0279，-0.0254，-1.2121）

2：y+＝（0.0258，1.9760，-1.1910）

3：x-＝（-1.9755，-0.0233，-1.1876）

4：y-＝（0.0243，-2.0225，-1.1996）

光学座標系（補遺１）でのBS容器中心及び中心軸の床座標を、それぞれ

(0.0283, -0.0283, 0), (0.0240, -0.0246, -1.2005)とすると、

中心軸床基準から+/-2m地点に計画されたy+/-参照点の座標値は、だいたい

#xは変わらず=+0.0240

#yは-0.0246+/-2.000=1.9761, -2.0239

#zは-1.2005+/-2.000sin(1/300rad)=-1.1938, -1.2072

になるので、実測値と計画のずれは

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | X | y | z |
| y+ | +0.0018 (+1.8mm) | -0.0001(-0.1mm) | -0.0028 (-2.8mm) |
| y- | +0.0003 (+0.3mm) | +0.0014 (+1.4mm) | +0.0076 (+7.6mm) |

となる。これを補正する（差し引く）と、表3は、次のようになる。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | x | y | Z |
| +Y床基準：補 | -18.6mm | -9.3mm | +2.9mm |
| -Y床基準：補 | +8.9mm | -11.1mm | -0.8mm |
|  | -4.9mm+/-14mm | -10.2mm+/-0.9mm | +1.1mm+/-1.8mm |

zについては改善が見られるが、x, yについてはあまり変わらなかった。

1. **光てこの光路について**

　HR座標で光てこの光線位置を測定した。測定は、6mmプローブに光があたるようにして、光線上の3〜6点を測定した。各測定点について6点程位置を測定している。各点での位置の誤差は5mm程度あるが、線にフィットした場合の誤差は1mm程度であった。測定点を線でフィットし、鏡面との交点を求めた。

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | I | j | k | X | Y | Z | err |
| 下 | 0.5664 | -0.5770 | 0.5835 | -25.5P  -23.8 | -819.3P  -821.0 | -18.2P  -16.4 |  |
| 上 | -0.5841 | 0.5583 | 0.5891 | -28.4P  -26.7 | -822.2P  -823.7 | -14.9  -16.7 |  |
| 裏 |  |  |  | -28.6P | -822.4P | 19.7P |  |

表：光てこ光軸位置

zについては、鏡面上の反射位置は比較的よく一致したが、x, yは入射光軸に対して反射光軸が3mmほど奥にずれている。表面反射と裏面反射では位置はほぼ同じになっているので、入射と反射ではプローブに光の当たっている方向が変わる影響が現れていると考えることができる。入射では測定者から見てプローブの右面、反射は左面に光が当たるので、それぞれ測定位置が手前、奥側にずれることが予想される。

　zの値は予想位置から-16.5mm程下である一方、鏡も-6.6mm下なので、oplevの光は鏡中心からは10mm下に当たっていたことになる。x、yについては入射、反射の中点をとって-27.0Pmm, -820.8Pmmとすると、x軸は+3.4mm、y軸については-1.2mmのずれとなる。HR面中心位置との差にすると、それぞれ+5.0mm、+5.0mmとなる。すなわち、

HR面から見て、左に7mmずれていたことになる。

　まとめると、oplevの光は、BS鏡のHR面上で、中心から左に7mm下に10mmずれたところに当たっていたと考えられる。

1. **コイルと磁石の距離について**

　iKAGRA運転前のアラインメント時から、BSのコイルと磁石の距離が左右で見た目にも違うことが分かっていた。AR面からコイルの支持板の傾きを測定すると、

i: -0.692, j: 0.722となり、時計回りに1.2度回転していた。これはサスペンションフレームの回転角度と一致する。鏡面は反時計回りに0.4度程度回転していたので、鏡面に対してコイル支持板は時計回りに1.6度回転していたことになる。1.6度の傾きは、100mmで2.8mmのずれを生じるので、コイルと磁石の距離が見た目にも違ったことと整合する。

1. **追加測定**

　真空槽のyに+10mmの位置ずれは中の防振系で吸収することが難しいため、測定が間違っていない場合は、真空槽を設置し直す必要がある。6月21日（火）に確認のための追加測定を行った（寺田、大石）。測定方法は、次のようである。y+, y-床基準点上にレーザー墨出し器を設置し、真空槽横フランジの中心縦横に墨出しを使って水糸を張り、横フランジの左右端から墨出し器上部およそ1.2mの位置にメジャーを伸ばして墨出し器上に伸ばした基準点位置で長さを測定した。また、この結果から、床基準点と横フランジの相対位置の計画値との差 (dy, dx) を評価した。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | x+ | x- | dy | dx |
| y+ | 1,268mm | 1,258mm | 8mm | -12mm |
| y- | 1,238mm | 1,245mm | 11mm | +10mm |

結果、3次元測定器の結果と同じように、y+方向に8mm,11mmのずれ、x方向に-12mm, +10mmのずれとなったた。但し、y+側のxの値については差が大きい。

また、高さについても調べたところ、BS設置時の高さが、y+側の柱に貼った金尺上で、およそ7mm下であったことを確認した。

更に、確認のため、床基準点の鉛直線上から、真空槽側面へメジャーで距離を測った結果は、

x+:1,238mm, y+:1,226mm, x-:1,239mm, y-:1,249mm

であった。基準点に対する真空槽の位置ずれは、xはほとんど中心、yは23mm差なのでy+方向に11.5mmのずれとなった。

いずれの方法でも、y方向については、2mm程度の精度以内で、y+方向に10mm程度のずれがあるという結果が得られた。

x方向については、yと比べて誤差が大きいため、ベローズを外しての測定が望まれる。

1. **まとめ**

　3次元測定器を用いてiKAGRA BS鏡の位置を測定した。測定精度0.5mm程度で、

真空槽を基準として、鏡は**x: -1.6mm, y: -6.2mm, z: -6.6mm**予定位置からずれていた。高さについては、何らかの理由で7mmほど下にずれて設置したと考えられる。また、床基準点に対して、真空槽の位置が、x: +4.9mm、y: +10.2mm、z: -1.1mmずれていることがわかった。y方向のずれが大きいため、BSインストール開始前に、真空槽の再設置が予定されている。x方向についてはベローズを外しての追加測定が望まれる。また、基準点間の位置の再測定なども望まれる。

1. **補遺：光学座標系**

KAGRAトンネルは、排水等のために鉛直方向に対して、中央からy方向に-1/300、x方向に+1/300の傾斜をつけてある。光学座標系はこの1/300傾いた光軸を基準として、座標原点をBSのHR面中央に取っているので、中央エリアのlocalの鉛直や水平とは角度でおよそ1/300radずれている。たとえば、厚さ80mmのBS鏡の中心は、HR面から40mmのところに位置するので、40mm/sqrt(2)=28.3mmを用いて、(+28.3, -28,3, 0)が光学座標系上でのBS鏡中心位置であるが、鏡の中心からlocalの鉛直方向に床面に下ろした点は、高さが1.2mあるので、x, yとも1.2m/300=4mm程ずれる。