

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) (括弧内補正後)

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φ450mm 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。

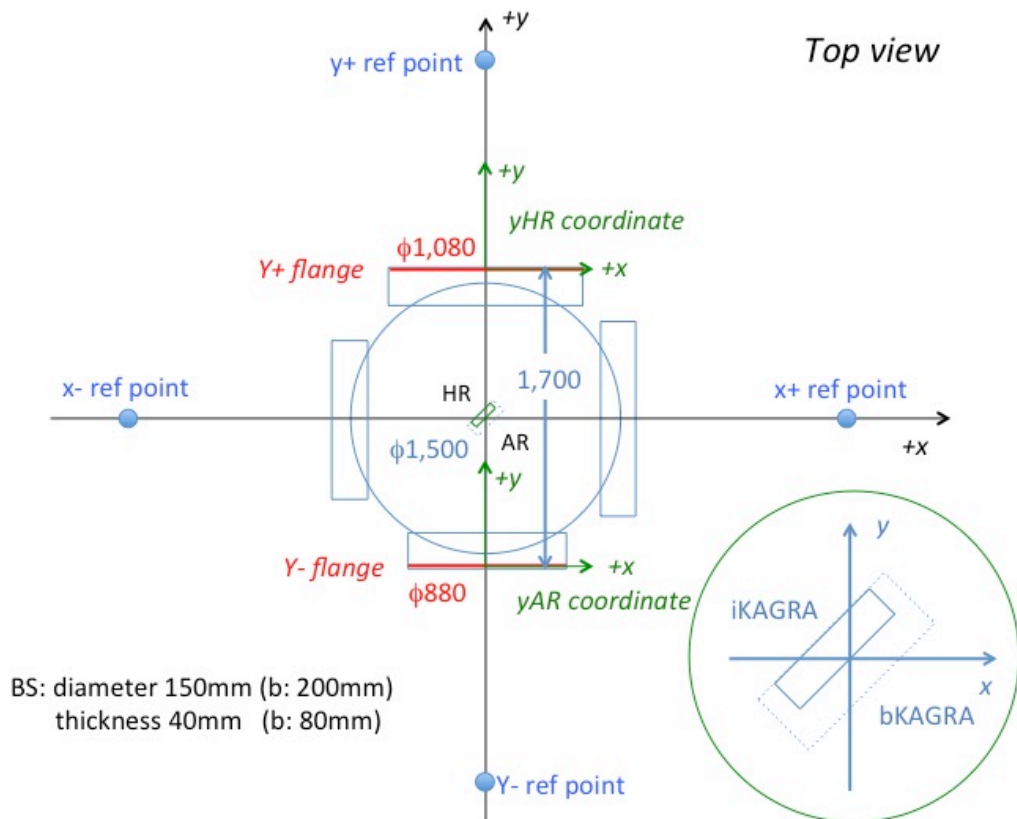


図 1: 測定で用いた座標: $y+$ 側のフランジ($\phi 1,080$ mm)を基準とした座標を yHR 座標、 $y-$ 側のフランジ($\phi 880$ mm)を基準とした座標を yAR 座標とした。真空槽の直径は $1,500$ mm。基準にした横フランジ面間の設計値は $1,700$ mm。床の基準点は、真空槽中心真下から x 軸、 y 軸上各 2 m の距離に計 4 ヶ所。

2. $y+$ 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($\phi 1,080$ mm ; $y+$ flange)と上の小開口($\phi 450$ mm; $sy+$ flange)。構築した座標系で測定したのは、床の基準点 $y+$ ref、ブレットボード面(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ため、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 $\phi 450$ 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

	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>I</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>r</i>	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 $-40.0\text{mm}/\sqrt{2} = -28.3\text{mm}$ 、y に $+40.0\text{mm}/\sqrt{2}$ 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。

3. 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

	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>r</i>	<i>err</i>
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)。

4. 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

5. 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なものである（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 $\pm 2\text{m}$ 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 $-0.0246 \pm 2.000 = 1.9761, -2.0239$

#z は $-1.2005 \pm 2.000 \sin(1/300\text{rad}) = -1.1938, -1.2072$

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 \pm 14mm	-10.2mm \pm 0.9mm	+1.1mm \pm 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。

6. 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良好に一致したが、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。

7. 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。

8. 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系を張り、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。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。

9. 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。

A. 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ため、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、 $40\text{mm}/\sqrt{2}=28.3\text{mm}$ 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 $1.2\text{m}/300=4\text{mm}$ 程ずれる。