

## Alignment for the Accelerator with the Curvature on the Ellipsoid of Earth

Kenji Mishima<sup>1,A)</sup>, Norio Tani<sup>B)</sup>, Shinichiro Meigo<sup>B)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>B)</sup>, Masashi Shirakata<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> PASCOCO Corporation, 1-1-2 Higashiyama, Meguro-Ku, Tokyo, 153-0043, JAPAN

<sup>B)</sup> JAEA, 2-4 Shirakatashirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195, JAPAN

<sup>C)</sup> KEK, 1-1, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, JAPAN

### Abstract

The alignment of the accelerator equipment is often aligned on the horizontal plane. Because the earth is rounding, it is not a flat plane for the particle beam. In many cases, the accelerator is aligned for vertical direction with correction of curvature as a ball. However, the earth is ellipsoidal body. The curvature of the earth is different at the position. There is an influence like a huge accelerator. Recently, it is making high accurate for surveying instruments. Therefore, it is possible for the accelerator to be aligned by the curvature of the ellipsoidal body. The method of the correct of the vertical curvature by the earth as the ellipsoidal body is developed, and J-PARC under construction is aligning by this method.

## 地球楕円体の曲率を考慮した加速器のアライメント

### 1. はじめに

加速器の電磁石などの鉛直方向は、水平面上にアライメントする場合が多い。しかし、水平面上に加速器の機器をアライメントすることが、ビーム粒子にとって必ずしも平面上の軌道とはならない。地球が丸いためである。

この地球の曲率を補正する場合、地球を球に近似して曲率補正する場合が多い。国内最大の加速器であるKEK-Bでは半径6,370kmの球として、その前駆であるTRISTANでは半径6,300kmの球として補正している。

しかし、地球は周知のとおり回転楕円体であり、地球上の位置によりその曲率が異なる。大型の加速器では、楕円体としての地球の曲率の影響が顕著であることが予想された。

最近では、加速器の機器などのアライメントに使用する測量機材の高精度化が著しく、測量&アライメントで地球の曲率をコントロールすることも可能である。

報告者らは、地球を楕円体とした曲率補正の方法を確立し、現在茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器 (J-PARC) で実際に加速器の機器をアライメント中である。

本発表は、この事例の報告である。

### 2. ビームハイトに及ぼす地球の曲率

地球上に平面を設定する必要があるとき、地球の曲率と平面の間には図1のような関係が成り立ち、 $\delta H$  は、表1のとおりである。この量  $\delta H$  は決して無視できない量である。

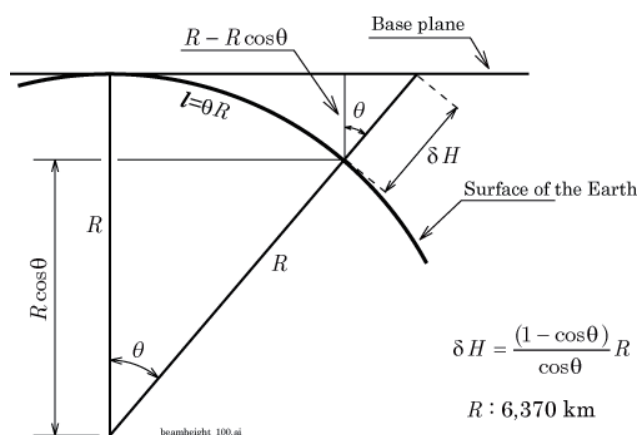


図 1 基準面と地球の曲率との関係

表 1 地球の曲率がビームハイトに及ぼす影響

$L$ [m]	$\delta H$ [mm]
50	0.20
100	0.78
200	3.14
500	19.62
1000	78.49

### 3. J-PARCにおける地球曲率の影響

#### 3.1 基準平面の設定

東海村に建設中の大強度陽子加速器 (J-PARC) は、南北に約1000m、東西に約500m程度の大型加速

<sup>1</sup> E-mail : kenji\_mishima@pascoco.jp

器なので、1つの基準平面では、基準平面と実際の地球表面との差が大きくなる。したがって、J-PARCでは各ユニットごとに3つの基準平面を設定した(図2参照)。

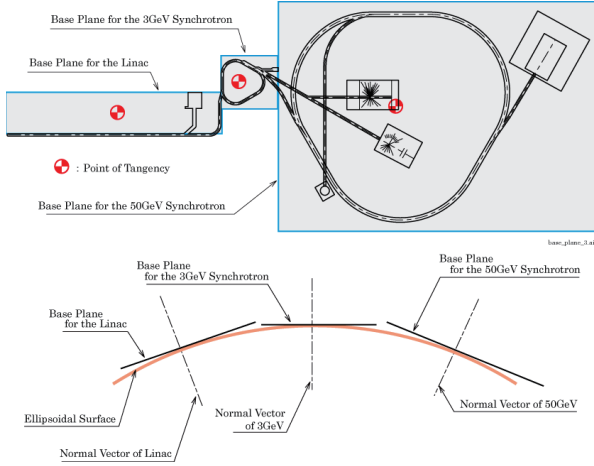


図2 J-PARCで設定した3つの基準平面

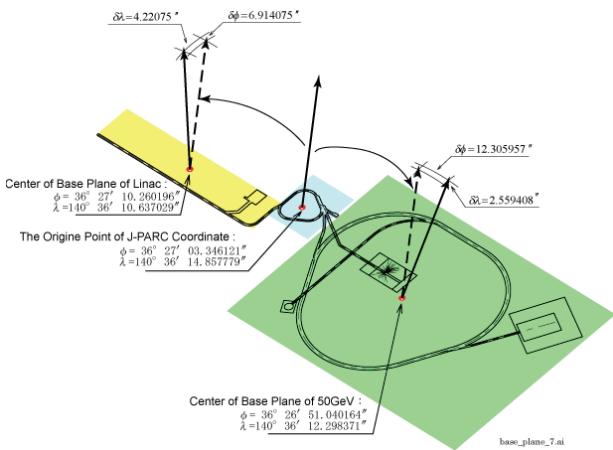


図3 それぞれの基準平面の関係

図3は、基準平面間関係であり、3GeVと50GeVの平面の交角は最大で12"程度となる。

### 3.2 地球の曲率とビームハイトの関係式

地球表面の位置は、地心3次元座標系で緯度 $\phi$ 、経度 $\lambda$ と卯酉線曲率半径 $Q$ によって次式(1)のように表せる(図4参照)。

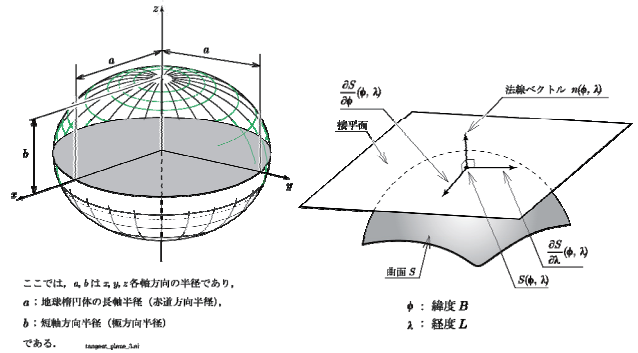
$$S(\phi, \lambda) : \begin{cases} x = Q \cos \phi \cos \lambda \\ y = Q \cos \phi \sin \lambda \\ z = \frac{b^2}{a^2} Q \sin \phi \end{cases} \quad (1)$$

したがって、曲面(地球表面)上の緯度 $\phi$ 、経度 $\lambda$ に接する平面の傾きは式(1)を微分することで得られる(図4参照)。すなわち、次式(2)のとおりで

ある。

$$\frac{\partial S}{\partial \phi} = \left( \frac{\partial x}{\partial \phi}, \frac{\partial y}{\partial \phi}, \frac{\partial z}{\partial \phi} \right) = \left( -Q \sin \phi \cos \lambda, -Q \sin \phi \sin \lambda, \frac{b^2}{a^2} Q \cos \phi \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \lambda} = \left( \frac{\partial x}{\partial \lambda}, \frac{\partial y}{\partial \lambda}, \frac{\partial z}{\partial \lambda} \right) = \left( -Q \cos \phi \sin \lambda, Q \cos \phi \cos \lambda, 0 \right)$$



ここでは、 $a, b$ は $x, y, z$ 各軸方向の半径であり、  
 $a$ :地球楕円体の長軸半径(赤道方向半径)、  
 $b$ :短軸方向半径(極方向半径)  
である。

図4 地球楕円体の法線ベクトルと基準平面

また、その法線ベクトル $n(\phi, \lambda)$ は、次式(3)で表せる。

$$n(\phi, \lambda) = \frac{\frac{\partial S}{\partial \lambda} \times \frac{\partial S}{\partial \phi}}{\left\| \frac{\partial S}{\partial \lambda} \times \frac{\partial S}{\partial \phi} \right\|} = \frac{\left( \frac{b^2}{a^2} \cos \phi \cos \lambda, \frac{b^2}{a^2} \cos \phi \sin \lambda, \sin \phi \right)}{\sqrt{\left( \frac{b^2}{a^2} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi}} \quad (3)$$

ここで、単位法線ベクトルを $n_0(\phi, \lambda) = (\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ とおくと、曲面上(地球表面上)の点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ で曲面(地球表面)に接する接平面の方程式は、

$$\alpha_0(x - x_0) + \beta_0(y - y_0) + \gamma_0(z - z_0) = 0 \quad (4)$$

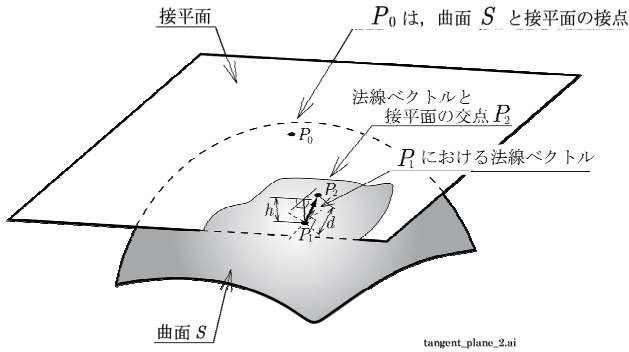
で表される。

電磁石などの加速器の機器上の測点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ における単位法線ベクトルを $n_1(\phi, \lambda) = (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ とすると、その法線の方程式は、次式(5)となる。

$$\frac{x - x_1}{\alpha_1} = \frac{y - y_1}{\beta_1} = \frac{z - z_1}{\gamma_1} \quad (5)$$

接平面(4)と $P_1(x_1, y_1, z_1)$ における法線(5)との交点までの距離(基準平面に下ろした垂線の足の長さ) $h$ が地球楕円体の曲率による補正量である(図5参照)。

$$h = \frac{|\alpha_0(x_0 - x_1) + \beta_0(y_0 - y_1) + \gamma_0(z_0 - z_1)|}{\sqrt{\alpha_0^2 + \beta_0^2 + \gamma_0^2}} \quad (6)$$



$d$ :  $P_1$ における法線ベクトルと接平面の交点  $P_2$  間の距離  
 $h$ :  $P_1$ において接平面に下ろした垂線の足の長さ

図 5 地球楕円体上の点と基準平面の距離

## 4. 曲率補正の計算結果

### 4.1 Linacにおける地球の曲率補正量

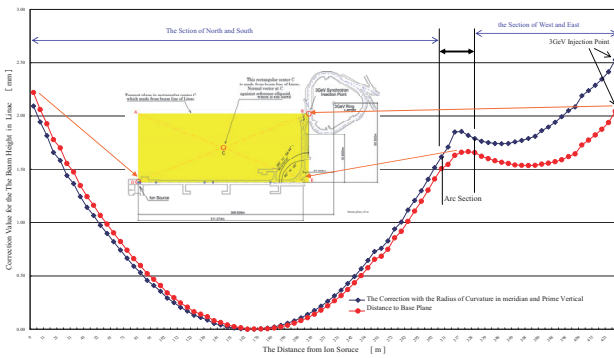


図 6 Linacにおける地球楕円体の曲率補正

図6は、水平にアライメントすべきLinacの機器に対する地球楕円体の曲率補正量である。単純な球として近似した場合とアーク部の手前まで大きな差はないが、アーク以降の下流側で差が0.5mm程度生じる。また、イオン源（始点）と3GeVリングの入射点（終点）を対角とする四角形を基準平面と設定し

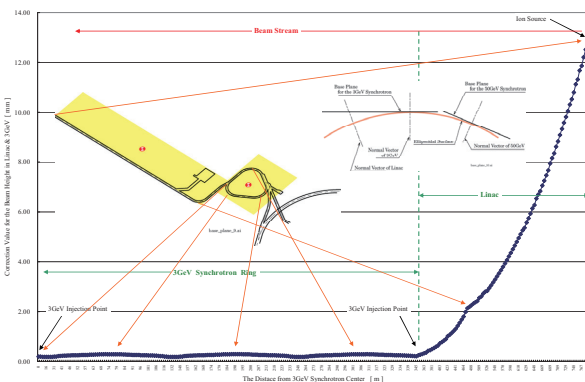


図 7 Linacと3GeVの地球楕円体の曲率補正

ている。その結果、始点と終点の両端で地球楕円体の曲率補正量が同量となった。さらに、アーク部の補正量の緩やかな曲線は、この補正方法でなければ得られない。

図7は、Linacと3GeVを同一平面で地球楕円体の補正量を求めた例である。イオン源（始点）から、3GeVを1周すると、最大で12.9mm程度の補正が必要となる。基準平面を3面に設定した妥当性が検証できた。

### 4.2 50GeV Main Ring における地球の曲率補正量

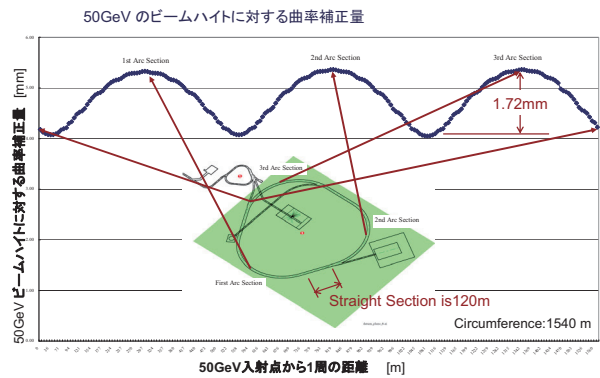


図 8 50GeVにおける地球楕円体の曲率補正

図8は、水平にアライメントすべき50GeVの電磁石に対する地球楕円体の曲率補正量である。周長約1500mの大型加速器であるにもかかわらず、曲率補正量が最大で1.7mm程度である。これは、曲率補正は直線区間に有効であり、曲線区間は地球の曲面に加速器の円弧がフィットするためである。

### 4.3 3NBTにおける地球の曲率補正量

3NBTは、傾斜区間があり、3GeVの基準平面と地上の中性子ターゲットを含んだ2つの基準面を設定している。また、曲線区間があり、150°で交差しているため、地球を球に近似した曲率補正では精度のよい曲率補正は難しい。

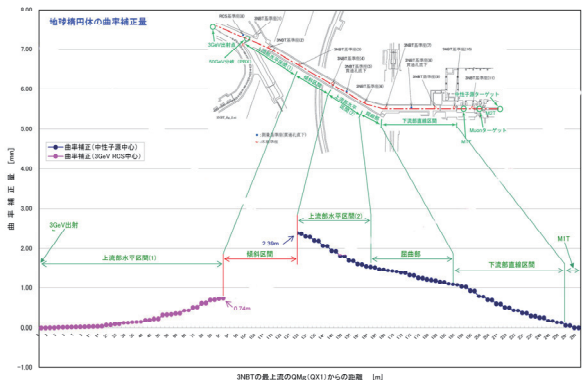


図 9 3NBTにおける地球楕円体の曲率補正

図9は、3GeV RCSから下流側への曲率補正量と中性子ターゲットから上流側への曲率補正量を表している。すなわち、陽子ビーム輸送系(3NBT)に対する地球楕円体の曲率補正量である。傾斜区間の両端の垂直系の偏向電磁石の比高差(高低差)と設計距離で傾斜を計算している。設計の傾斜角は $7.5^\circ$ であるが、 $7^\circ 29' 13''$ でアライメントした。

## 5. まとめ

以上の結果から次の結論を得ることができた。

### (1) 基準平面の設定

大型の加速器では基準平面を適宜分割することは有効である。

### (2) 地球楕円体の曲率補正

幾何学的な基準平面に近似してアライメントするためには曲率の補正が必要であり、基準平面に高精度にアライメントするためには、地球楕円体の経度・緯度によって決まる局地的な曲率を補正しなければならない。

### (3) 複雑な形状のアライメントには有効である

曲線区間の大きなシンクロトロンなどは、地球の曲率にフィットしてしまうため、大型であっても曲率の影響は少ない。しかし、直線区間はその影響が大である。したがって、Linacなどは地球楕円体の影響を評価することが必要である。また、ビーム輸送系などの複雑な形状のアライメントを高精度に基準平面にアライメントするためには効果的である。

ただし、J-PARC程度の規模の加速器施設でもその曲率補正量はわずかである。一方で、J-PARCは堅固な地質上に建てられた施設とはいいがたく、建屋の沈下傾向が収束していない箇所もある。そのような建屋の状況の中で、わずかな量である地球楕円体の曲率補正を施しても、建屋変動が上回るため無意味との意見も多い。

粒子ビームにとっては幾何学的な平面よりスムーズな軌道が重要であり、ビームが不安定になるような摂動力が生じるアライメント誤差が問題とされる。国内のKEKBに次ぐ大型加速器であるSpring-8では、スムージングを重視し、ジオイドに沿ってアライメントしており、また、それで問題は生じていない。

しかし、最近の測量&アライメントに使用される計測機器の高精度化は長足の進歩があり、測定方法・使用方法によっては $10\mu\text{m}$ の分解能(アライメント精度ではない。)で測定可能である。すなわち、地球楕円体の曲率もコントロールできる精度であり、その可能性を追求すべきであると確信する。

さらに基準平面の設定の精度を向上させるためには地球物理的な平面を設定することが必要となる。そのためには重力測量によってブーゲ異常を把握し、ジオイドモデルを決定し、ジオイドと基準平面との

差を補正することが、今後の課題となる。

## 6. 謝辞

本報告にあたりKEKの遠藤有聲教授、菅原龍平教授、Spring-8の松井佐久夫氏の方々に各大型加速器の地球の曲率の処理に関して貴重なご意見、ご指導をいただいた。ここに深甚なる謝意を表する次第である。

## 文献

- [1] Kenji Mishima, Others, "Geodetic Survey Work of High Intensity Proton Accelerator Facility", IWAA'06, SLAC, September 2006.
- [2] Kenji Mishima, Others, "Geodetic Survey Work of High Intensity Proton Accelerator Facility", IWAA'04, CERN, September 2004.
- [3] 白形政司 他, "J-PARC主リング電磁石インストールとアライメント", 第4回日本加速器学会年会.