



物理学会

KAGRAにおける環境磁場雑音見積もりのための
磁石の磁気モーメントの個体差の測定

2018年3月22日

東京大学 宇宙線研究所

梶田研究室博士2年 田中宏樹

牛場崇文, 都丸隆行^A, 宮本昂拓, 山元一広^B, 梶田隆章

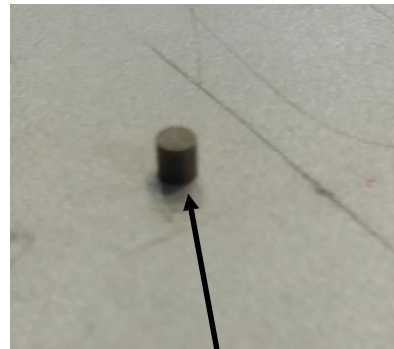
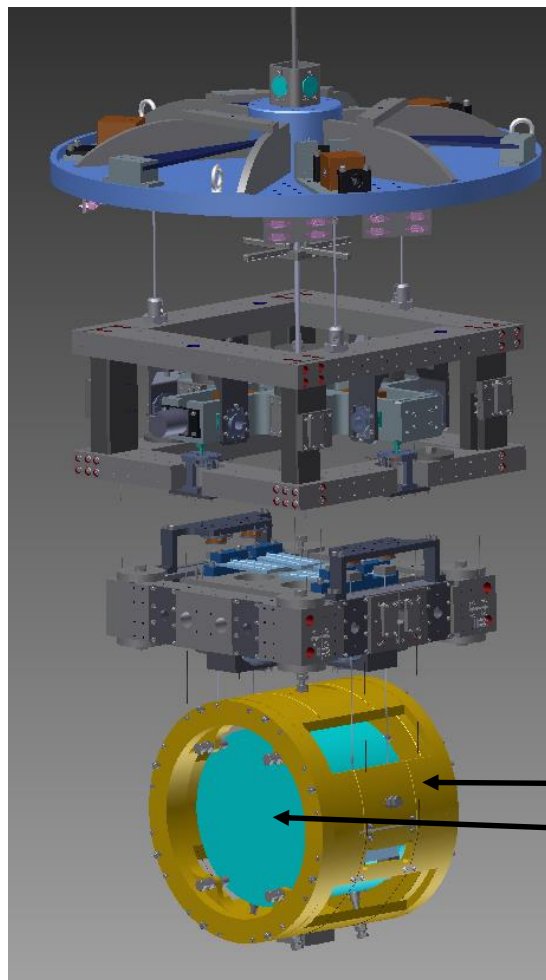
宇宙線研、高工研^A、富山大^B

概要

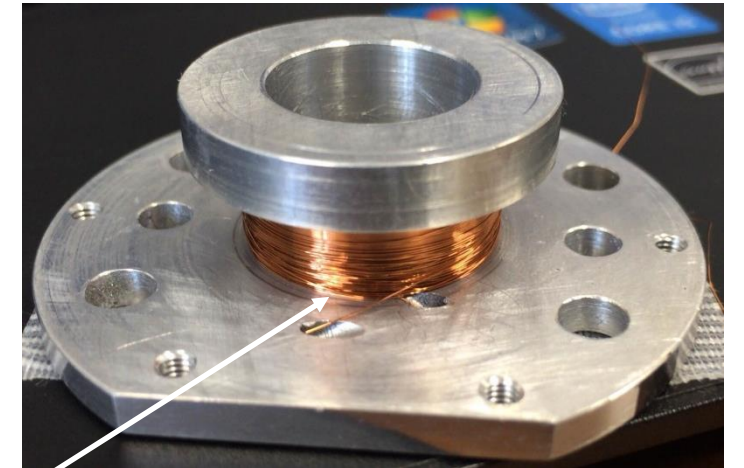
- 重力波検出器KAGRAでは制御のため、コイル-マグネット-アクチュエータが使用され、各ミラーに磁石が取り付けられる。
- 磁石と環境磁場が相互作用するため、環境磁場の変動によってミラーが揺れ、変位雑音となる（磁場雑音）。
- 磁場雑音は主に磁石の磁気モーメントの個体差と磁石位置の磁場のばらつきに起因するが、今回は前者に着目して磁石の磁気モーメントの個体差を測定し、その結果からKAGRAにおける環境磁場の要求値を求めた。

コイル-マグネット-アクチュエータ

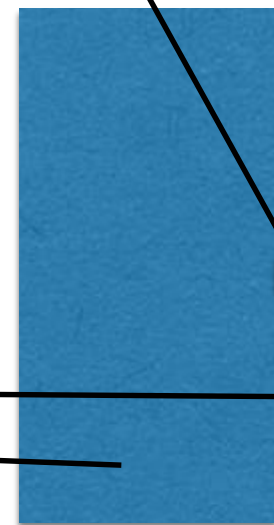
低温懸架系



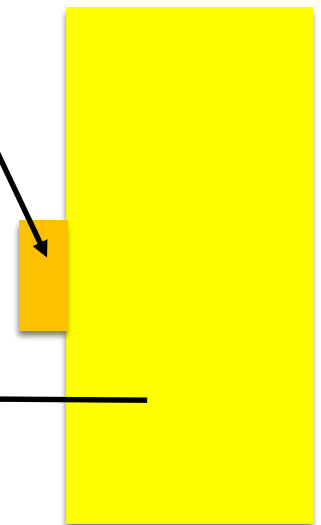
SmCo磁石
($\phi 2\text{mm}$, $t 2\text{mm}$, 240mT)



コイル



ミラー



リコイルマス

コイルに電流を流し、ミラーに取り付けた磁石に力を加えることでミラーを動かしてミラー位置を制御。

磁場雑音

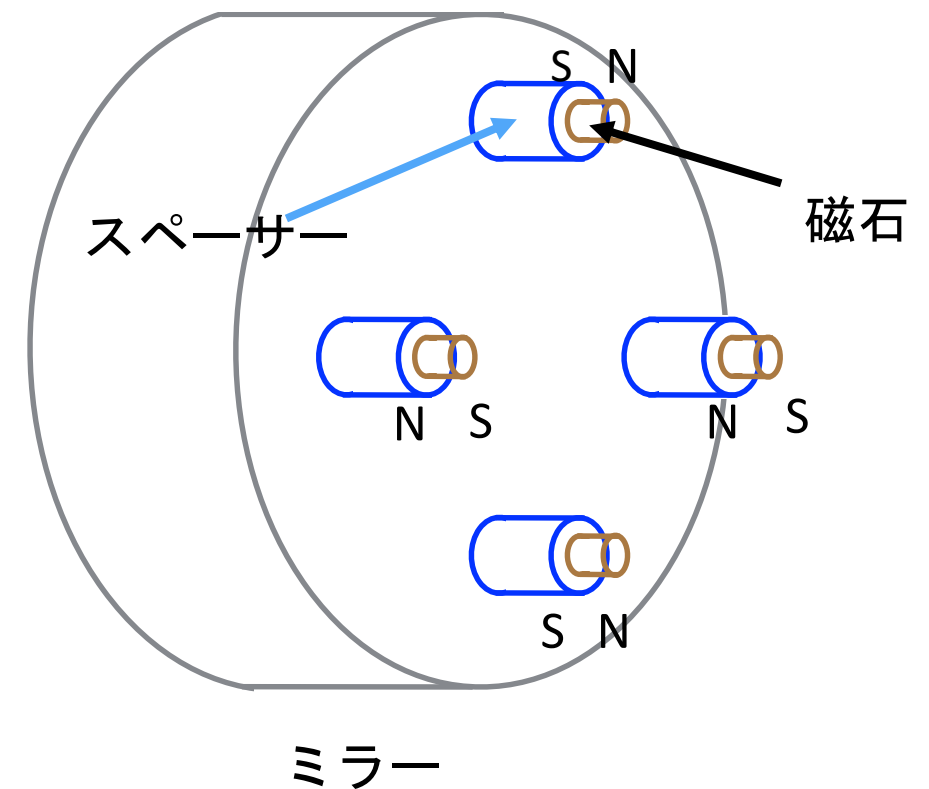
- ミラーに取り付けた磁石が環境磁場と相互作用することでミラーにかかる力やトルクが変化し、ミラーが揺れて変位雑音が生じる（磁場雑音）。

※環境磁場の例

- 地磁気
- 周囲のデバイス（冷凍機、ポンプ、エアフィルターetc）が発する磁場
- 周囲の構造体による磁場

磁石の向き

- ・ 環境磁場によってミラーにかかる力やトルクが打ち消しあうよう、磁石はミラーの上下左右に互い違いに取り付けられる。
 - ・ 4つの磁石の磁気モーメントや4つの磁石位置の磁場が等しいとき、ミラーにかかる力とトルクはゼロとなる。
- ・ 実際には磁石の磁気モーメントや磁石位置の磁場にはばらつきが存在し、ミラーには力やトルクがかかる。
 - ・ 今回、磁石の磁気モーメントの個体差を測定した。



磁石の磁気モーメント測定

- 磁石の磁気モーメントは $\mu_{\text{mag}} = \sigma \pi r^2 d / \mu_0$ と書ける（ σ は表面磁束密度、 r は底面の半径、 d は厚さ、 μ_0 は真空の透磁率）。
- 計25個の磁石の σ, r, d を測定し、 μ_{mag} の個体差の小さい4組を選定した。

磁石の表面磁束密度測定

xyz各ステージでテスラメータを $10\mu\text{m}$ ずつ動かし、
磁石の表面磁束密度の最大値を測定した。

テスラメータ
TM-801



テスラメータのセンサー部分

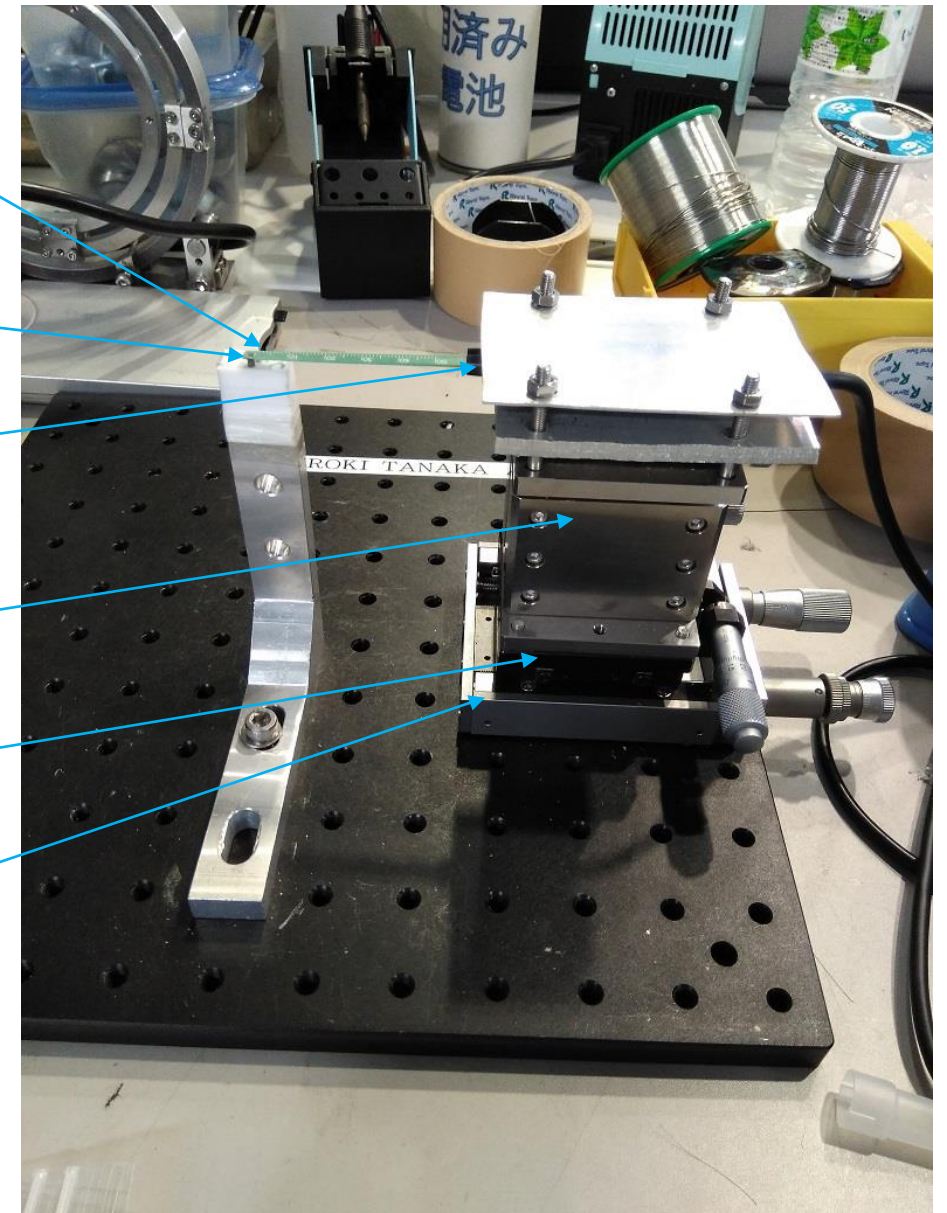
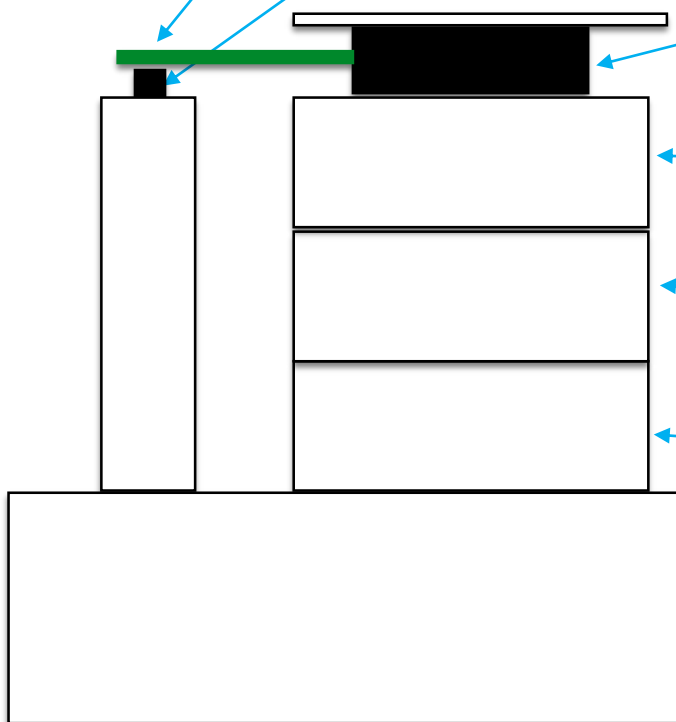
磁石

テスラメータ
TM-801

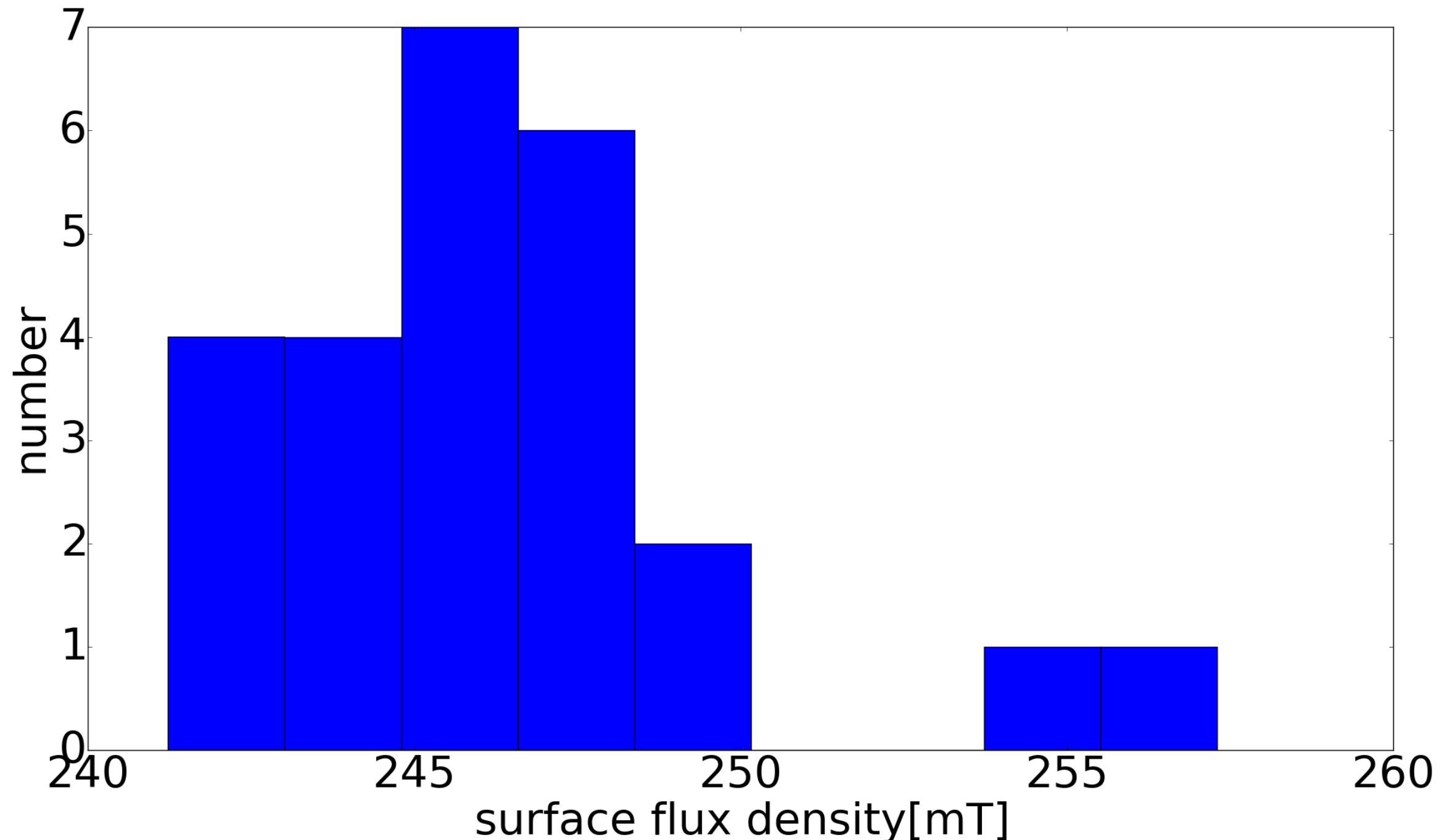
Z stage (鉛直)

Y stage (前後)

X stage (左右)



表面磁束密度の個体差

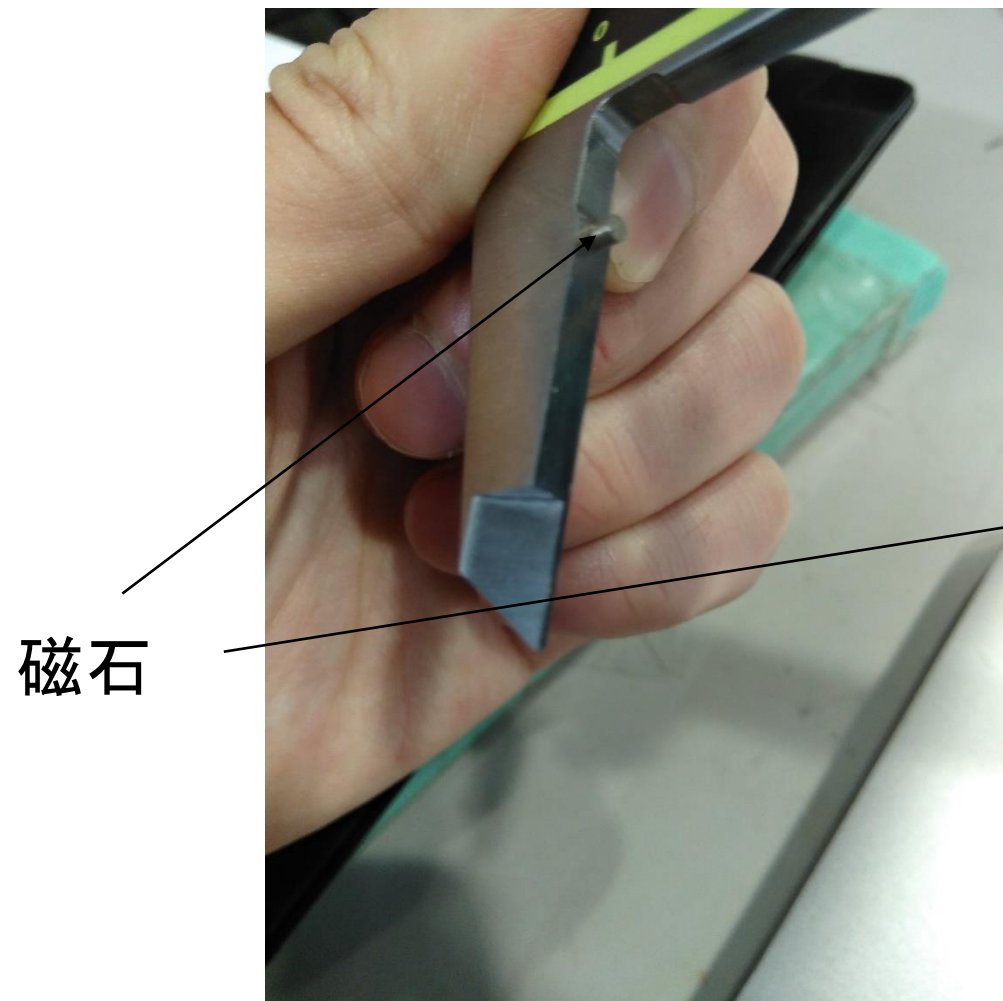


磁石の厚さと径の測定

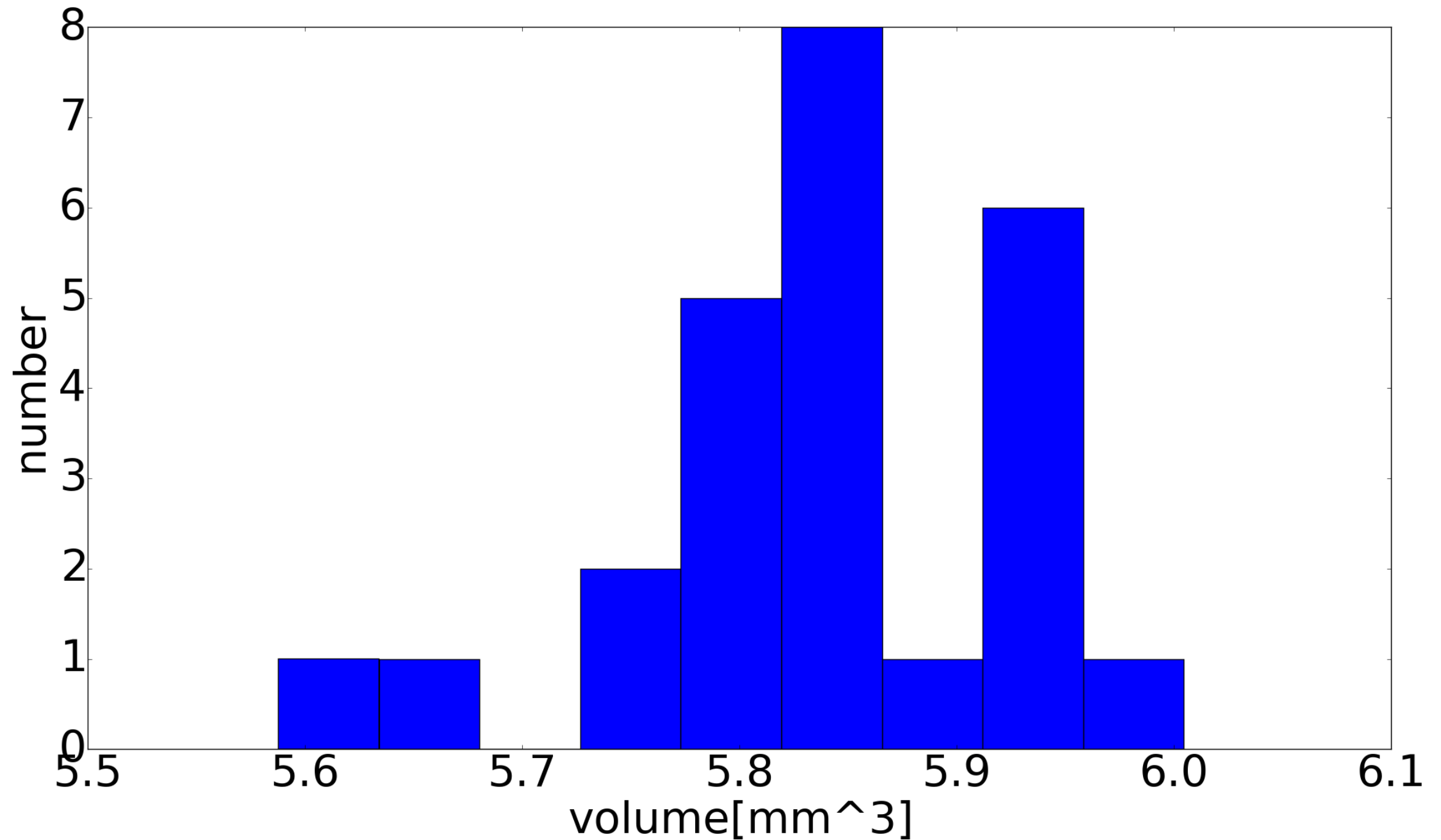
磁石の厚さと直径をノギスで測定した。半径は直径を1/2した。

磁石の厚さ

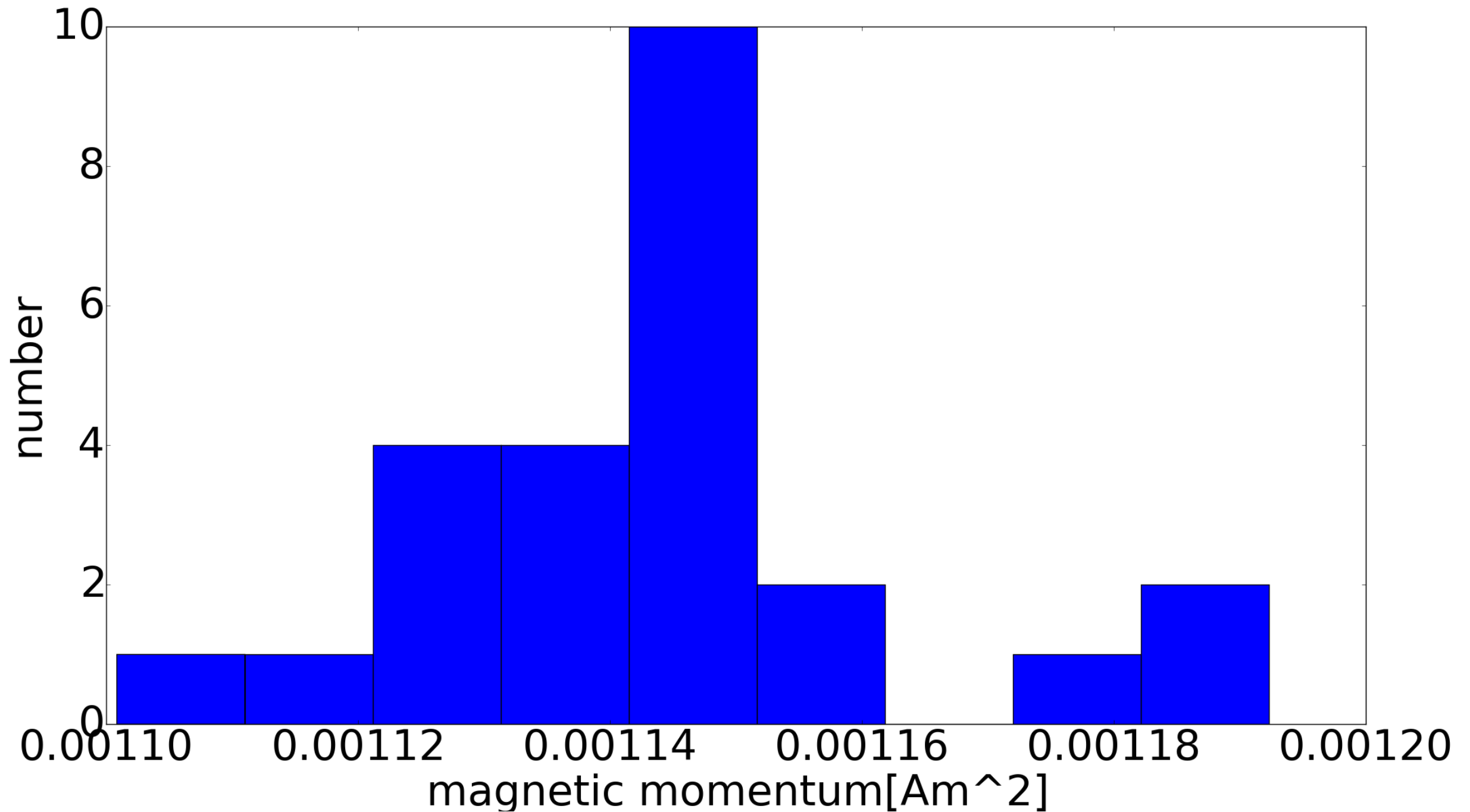
磁石の径



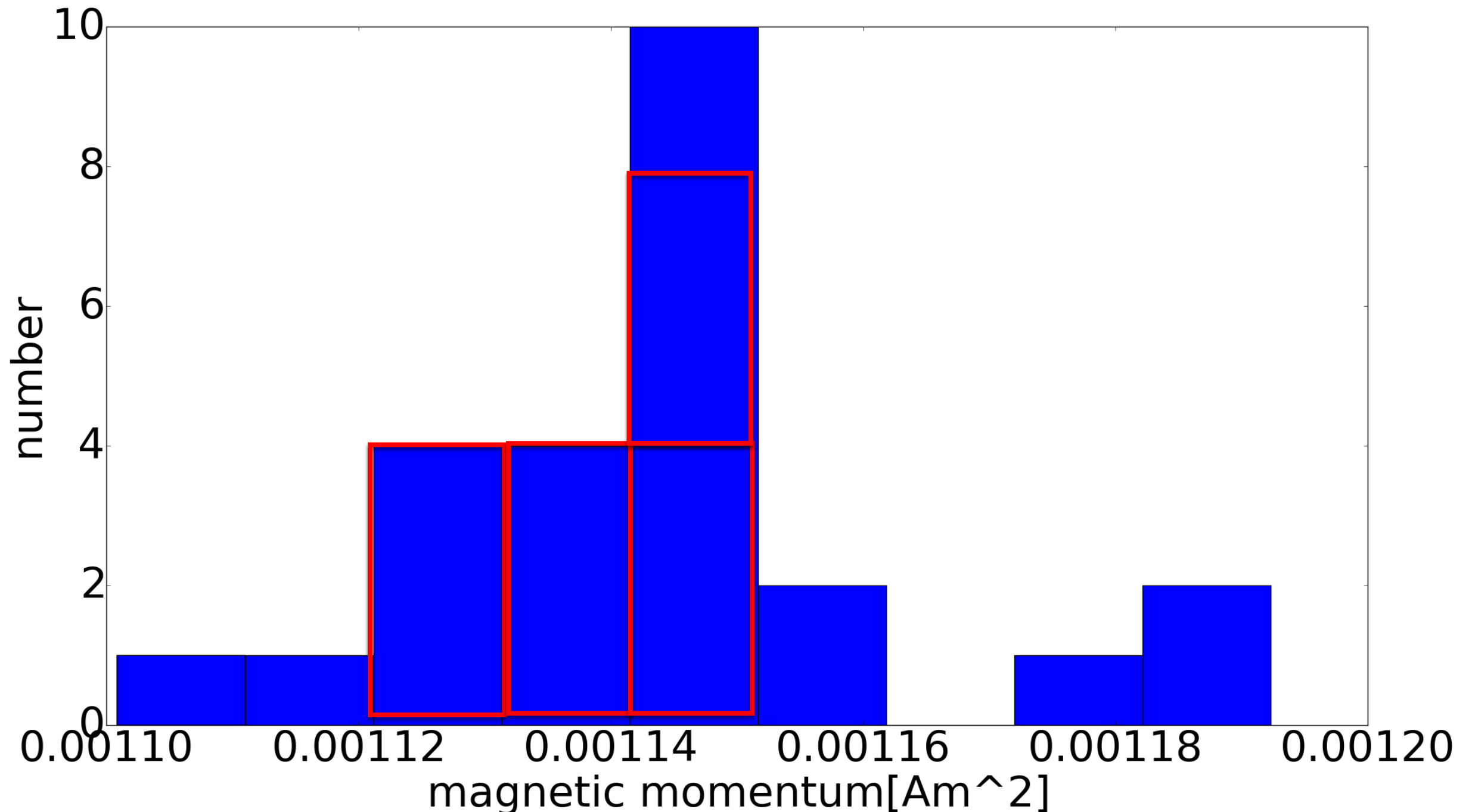
体積の個体差



磁気モーメントの個体差



磁石の選択

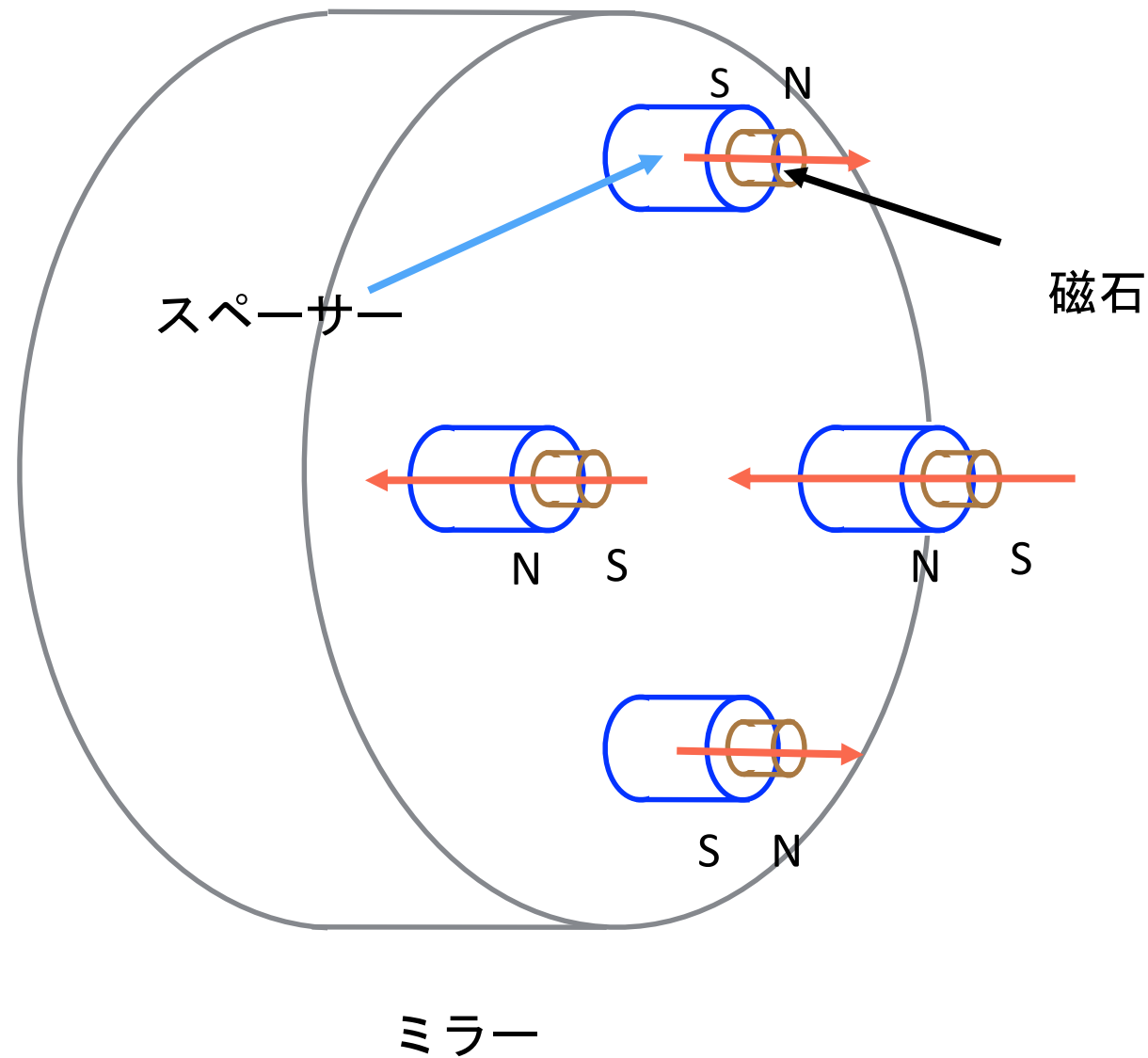


上の4組を4つのミラーに使用すれば $\delta \mu_{\text{mag}} / \mu_{\text{mag}} \sim 0.5\%$

磁場雑音の計算で考えた効果

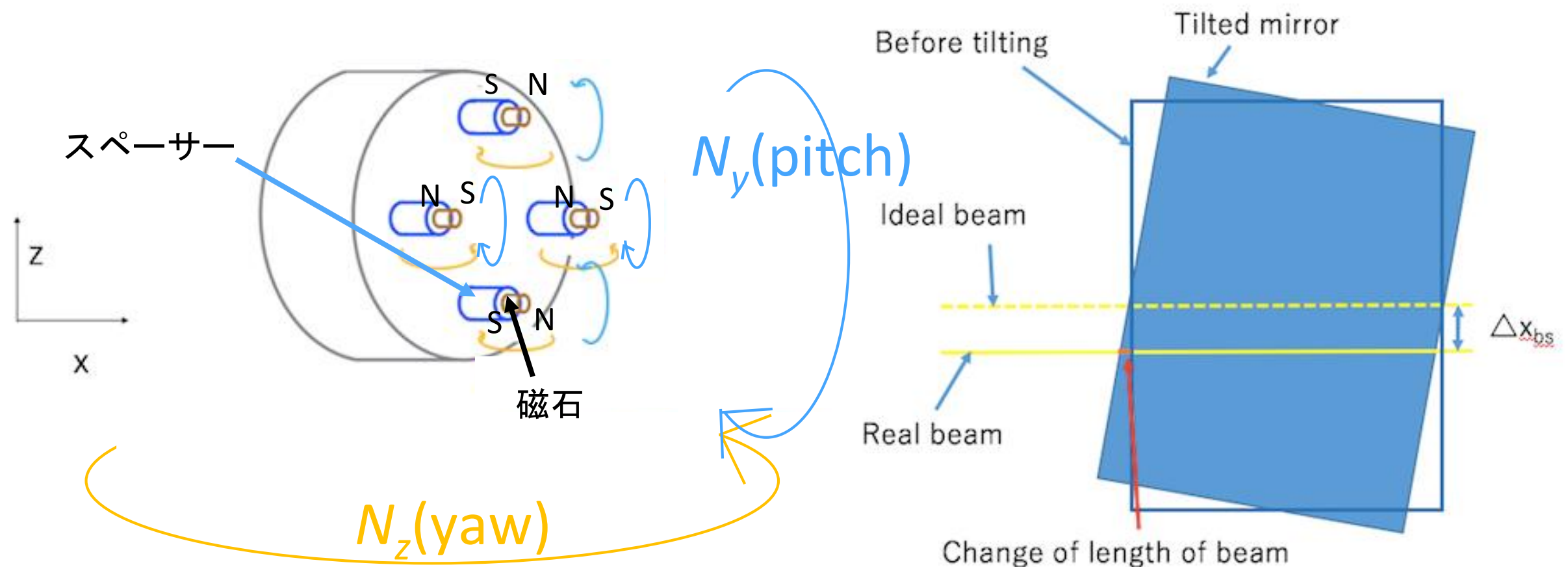
- 前述の4組の磁石を選定したと仮定して、磁場がどのくらい小さければKAGRAの感度に影響を及ぼさないかを以下の効果から求めている。
 - (1)磁石にかかる力による効果
 - (2)磁石にかかるトルクによる効果

(1)磁石にかかる力による効果



- 磁石にかかる力が打ち消しあわず、合力がかかる。
- 磁石の表と裏の磁場勾配によって生じる。

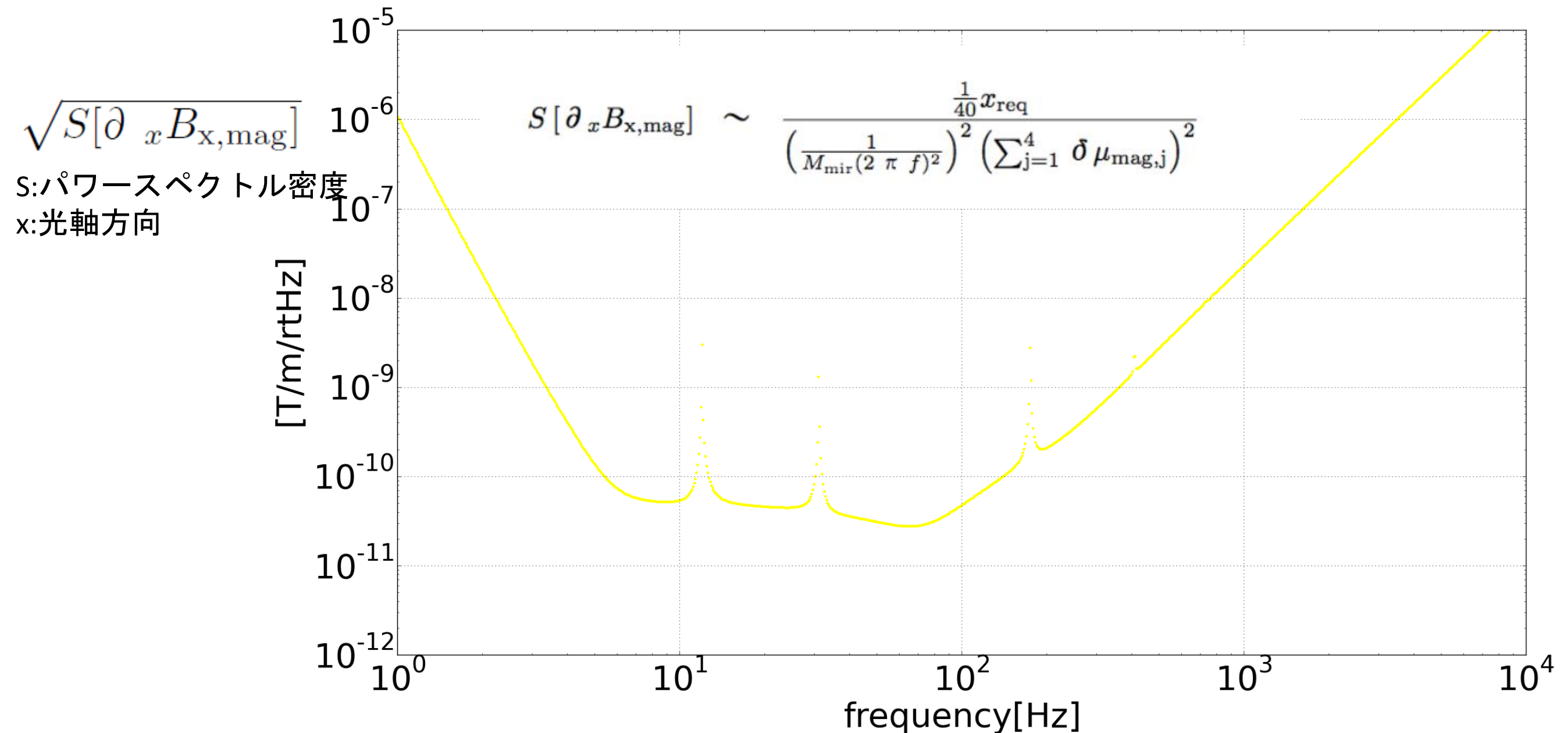
(2) 磁石にかかるトルクによる効果



- 4つの磁石にかかるトルクが打ち消し合わず、和がミラーにかかる。
- Pitchやyawのトルクがミラーにかけると、ミラーが傾き、ビーム位置のずれとカップリング。
- (勾配でなく) 磁場そのもの¹⁴によって生じる。

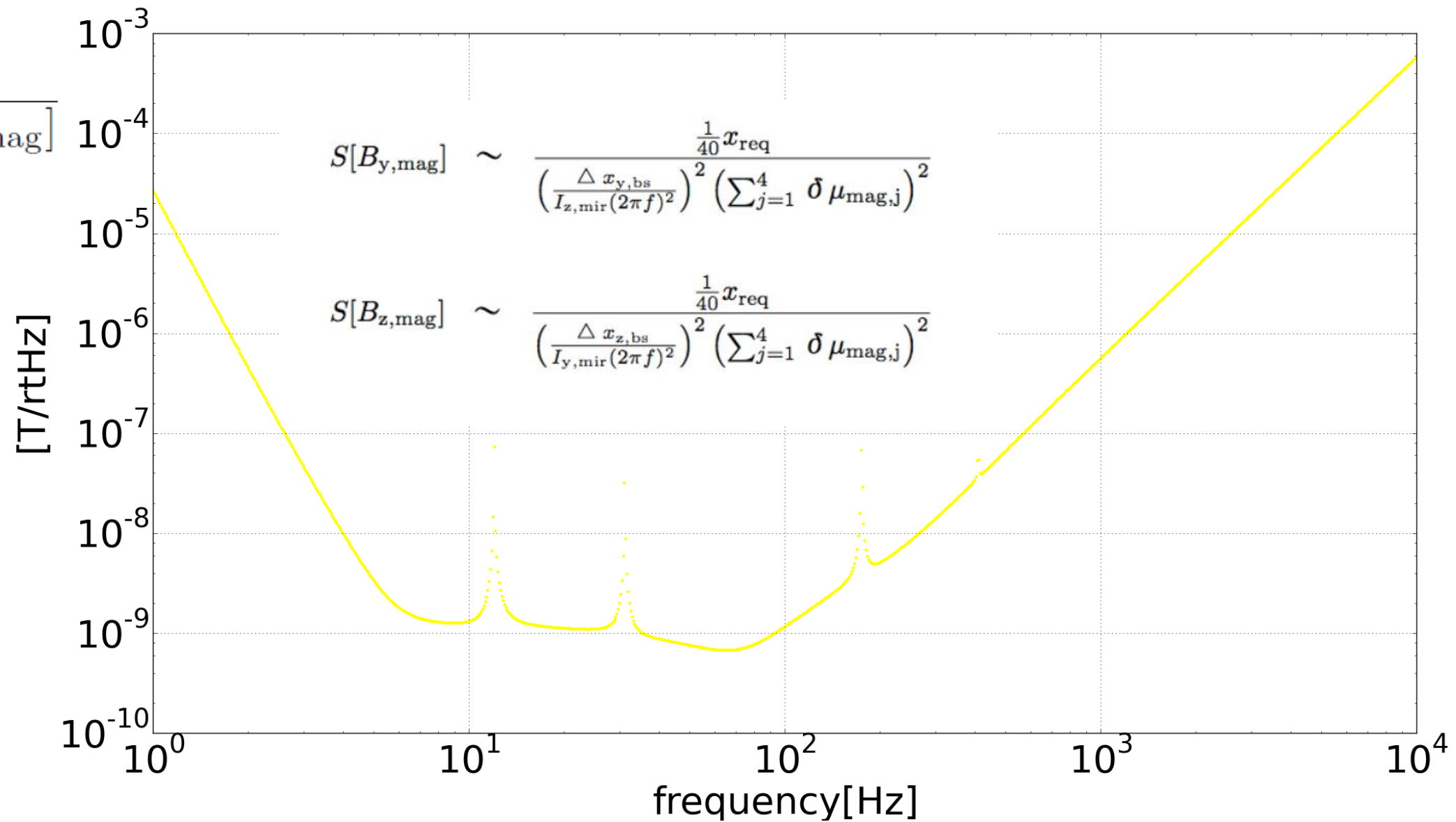
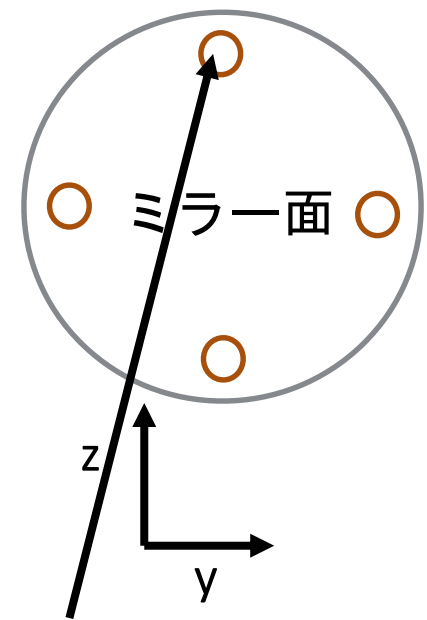
磁場勾配の要求曲線

磁場雑音が感度曲線の1/10となるよう要求値を求めている。



磁場の要求曲線

$$\sqrt{S[B_{z,\text{mag}}]}, \sqrt{S[B_{y,\text{mag}}]}$$



Future work

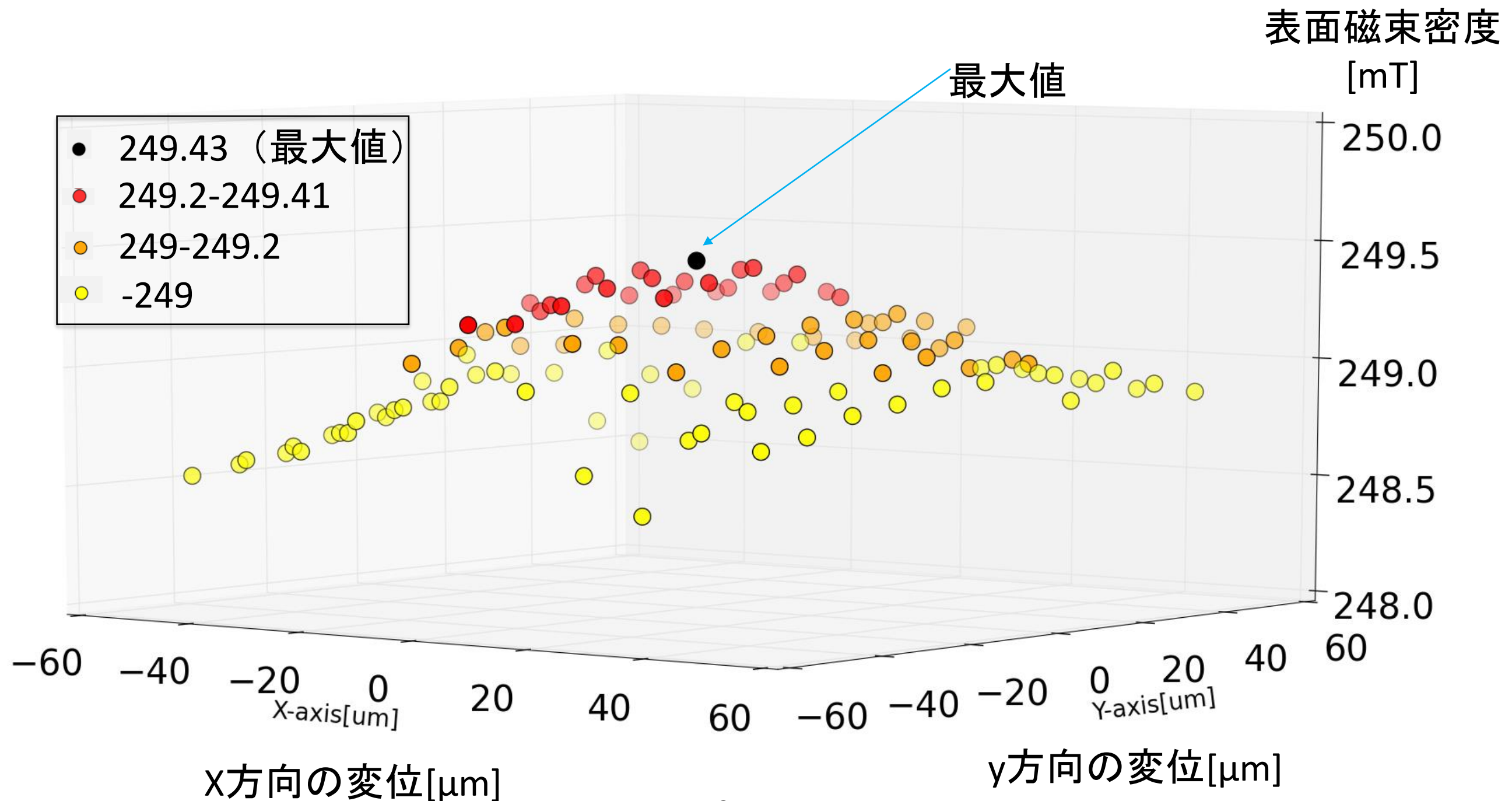
- 磁石位置の磁場を測定し、要求を満たしているかを確認する。
- 要求が満たされていない場合、磁気モーメントの個体差がさらに(0.1%等)小さくなるような磁石を選定するなどの工夫を行う。

まとめ

- 磁場雑音は磁石の磁気モーメントの個体差と磁石位置の磁場のばらつきに起因するので、このうち磁石の磁気モーメントの個体差を測定し、うまく磁石4組を選定すれば、個体差を約0.5%まで小さくできることを示した。
- 上記の磁石の組を選定したと仮定して、環境磁場が磁石に与える効果を考えて磁場雑音の要求値を求めた。

Thank you!

表面磁束密度の変化



3Dプロット

