



物理学会

重力波検出器KAGRAにおける環境磁場変動による雑音の見積もり

2017年3月17日

東京大学 宇宙線研究所

梶田研究室博士1年 田中宏樹,

端山和大, 山元一広, 宮本昂拓, 木村誠宏^A, 都丸隆行^A,

鈴木敏一^A, 牛場崇文^B, 新谷昌人^C, 梶田隆章

Thanks to 下田智文, 道村唯太

概要

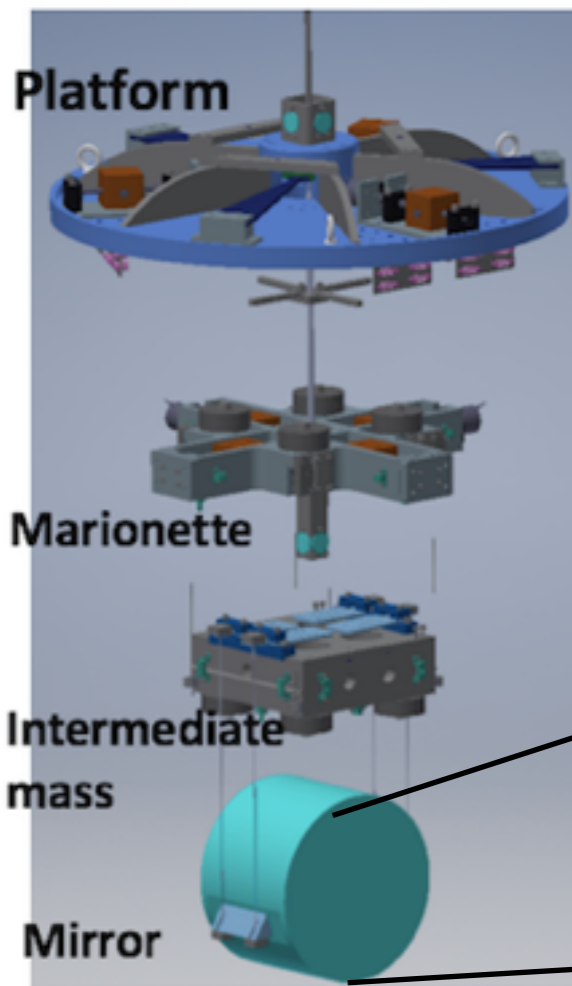
- ・重力波検出器KAGRAでは制御のため、コイル・マグネット・アクチュエータが使用され、各メインミラーにマグネットが取り付けられている。
- ・マグネットと環境磁場が相互作用するため、環境磁場の変動によってミラーが揺れ、変位雑音となる。
- ・KAGRAの感度に影響を与えないための環境磁場の大きさについて検討した。
- ・KAGRAの1つのクライオスタット内で磁場を測定し、KAGRAの感度への影響を検討した。

コイル・マグネット・アクチュ

エータ

目的:ミラーの位置制御

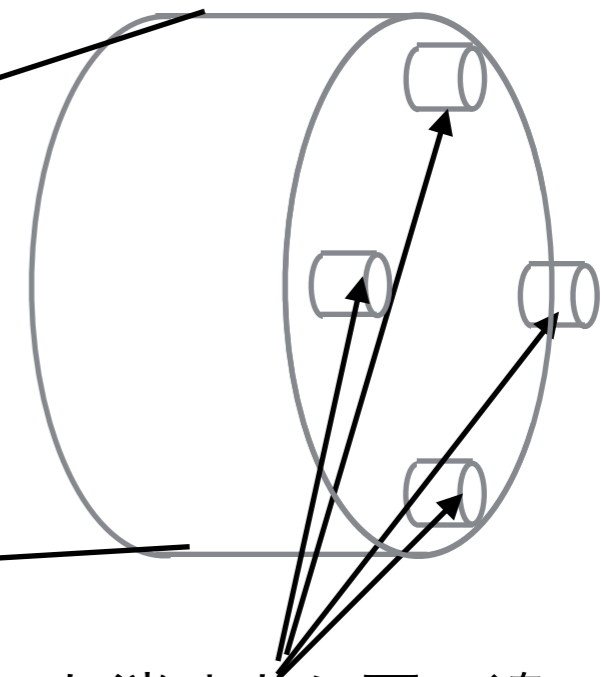
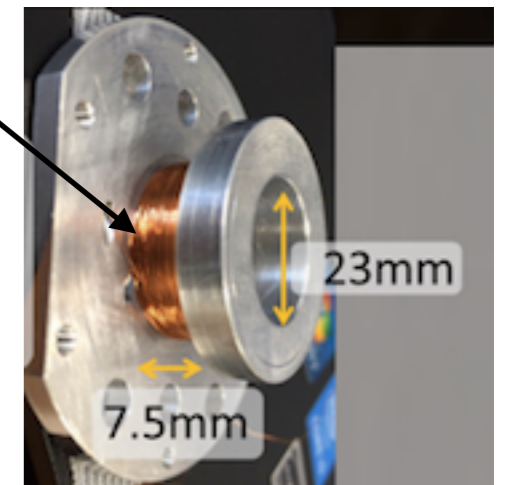
低温懸架系



マグネット



コイル



マグネット ($\phi 2$, $t 2$, SmCo, カヤトルクを打ち消すよう互い違い)

環境磁場との相互作用

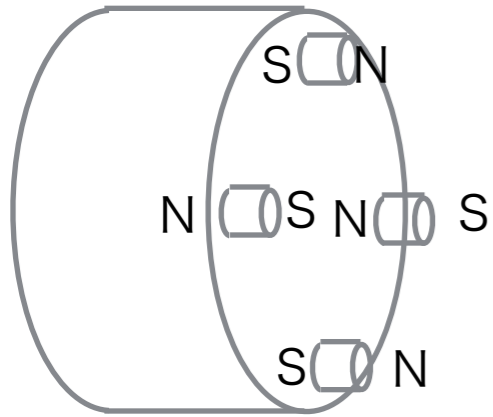
- ・ ミラーに取り付けたマグネットが環境磁場と相互作用することで、ミラーが揺れて変位雑音となる。
- ・ ミラー内に含まれた磁性体不純物（ Cr^{3+} や Ti^{3+} など）の影響で、ミラーが磁化したのと等価な状態が起こり、ミラー自身と環境磁場の相互作用によりミラーの変位雑音が生じる。

※環境磁場の例 地磁気、周囲のデバイスが発する磁場

外部磁場とカップルする効果

- ・ 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た。
 - ・ (1)各マグネットにかかる力による効果
 - ・ (2)各マグネットにかかるトルクによる効果
 - ・ (3)ミラーの磁化による効果

(1)各マグネットにかかる力による効果



μ_{mag} (マグネットの磁荷) = $0.54\mu_0(\text{Wb})$
 $\delta \mu_{mag}/\mu_{mag}$ (マグネットの磁荷のばらつき) = 0.2 (仮定値)
 x_{mag} (マグネットのミラー中心からの位置) = 0.11 (m)
 δx_{mag} (マグネットの位置ばらつき) = 0.001 (m)
 I_{mir} (ミラーの慣性モーメント) = 0.013
 Δx_{bs} (ビームスポットの位置のずれ) = 0.001 (m)
 ∇B ... マグネットの表と裏の磁場勾配

- ・ミラーに力を与えるのはマグネットと平行な磁場。

$$\tilde{x} = \frac{1}{M_{mir}(2\pi * f)^2} \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \nabla \tilde{B} + \frac{1}{M_{mir}(2\pi * f)^2} \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla \tilde{B}$$

マグネットの磁荷のばらつきと磁場勾配変動がカップリングし、ミラーが受ける力による効果

磁場勾配の非一様性によって、ミラーが受ける力による効果

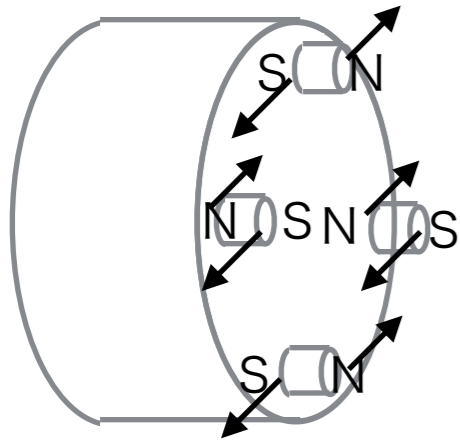
$$+ \frac{\Delta x_{bs}}{I_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \nabla \tilde{B} \cdot x_{mag} + \frac{\Delta x_{bs}}{I_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla \tilde{B} \cdot x_{mag} + \frac{\Delta x_{bs}}{I_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \nabla \tilde{B} \cdot \delta x_{mag}$$

マグネットの磁荷のばらつきと磁場勾配変動がカップリングしてミラーが受けるトルクが、ビーム位置のずれとカップリングする効果

磁場勾配の非一様性によってミラーが受けるトルクが、ビーム位置のずれとカップリングする効果

マグネット位置のばらつきと磁場勾配変動がカップリングしてミラーが受けるトルクが、ビーム位置のずれとカップリングする効果

(2) マグネットにかかるトルク による効果



μ_{mag} (マグネットの磁荷) = $0.54 \mu_0$ (Wb)
 y (マグネットの中心から底面までの距離) = 0.001 (m)
 δy (y のばらつき) = 0.0001 (m)
 M_{mir} (ミラーの質量) = 23 (kg)

- ・ マグネットは互い違いだが、マグネットの強さにばらつきがあるためトルクが生じ、ミラーを揺らす。
- ・ マグネットにトルクを与えるのはマグネットと垂直な磁場。

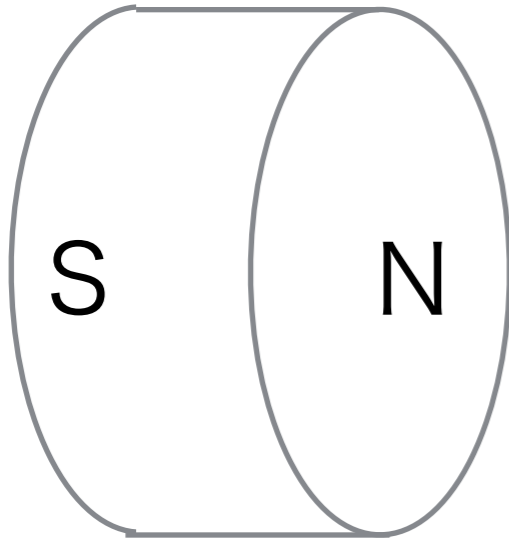
$$\tilde{x} = \frac{1}{M_{\text{mir}} \cdot (2\pi \cdot f)^2} \cdot 4 \frac{\mu_{\text{mag}}}{\mu_0} \tilde{B} \cdot \delta y \frac{1}{R_{\text{mir}}} + \frac{1}{M_{\text{mir}} \cdot (2\pi \cdot f)^2} \cdot 8 \frac{\mu_{\text{mag}}}{\mu_0} \cdot y \cdot \frac{\delta B}{B} \cdot \tilde{B} \frac{1}{R_{\text{mir}}} + \frac{1}{M_{\text{mir}} \cdot (2\pi \cdot f)^2} \cdot 4y \tilde{B} \cdot \frac{\delta \mu_{\text{mag}}}{\mu_0} \frac{1}{R_{\text{mir}}}$$

マグネットの厚さのばらつきと磁場変動が
カップリングする効果

磁場の非一様性による効果

マグネットの磁荷のばらつきと磁場変動が
カップリングする効果

(3) ミラーの磁化による効果



χ_{mir} (ミラーの磁化) = 3.15×10^{-6}

V_{mir} (ミラーの体積) = $0.0057 \text{ (m}^3\text{)}$

M_{mir} (ミラーの質量) = 23 (kg)

\tilde{B} ... フーリエ変換された磁場 (磁場変動)

\bar{B} ... 平均磁場

∇B ... ミラーの表と裏の磁場勾配

・ ミラーに力を与えるのはマグネットと平行な磁場。

※先述のマグネットの効果と比較すると十分小さく、主要な効果ではない。

$$\tilde{x} = \frac{1}{M_{\text{mir}}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{\chi_m}{\mu_0} V_{\text{mir}} \cdot \tilde{B} \cdot \nabla \bar{B} + \frac{1}{M_{\text{mir}}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{\chi_m}{\mu_0} V_{\text{mir}} \cdot \bar{B} \cdot \nabla \tilde{B}$$

磁場変動によって変動するミラーの磁荷が、
磁場勾配とカップルする効果

磁場によって磁化されたミラーの磁荷が
磁場勾配変動とカップルする効果

磁場に対する要求

6パラメータによる雑音の和が感度曲線の1/10となるよう求めた。

マグネットにかかる力由来 マグネットにかかるトルク由来

ミラーの磁化由来

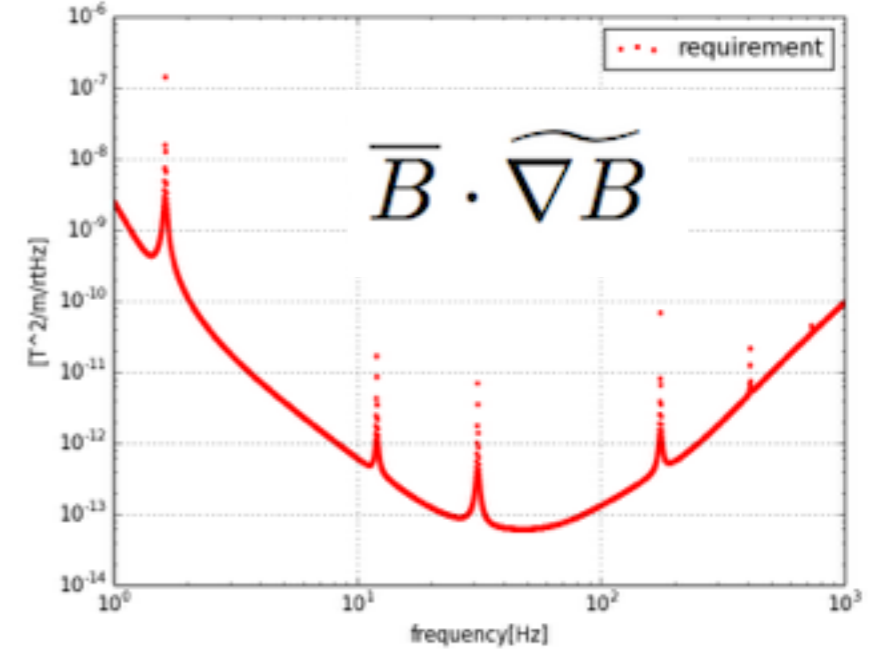
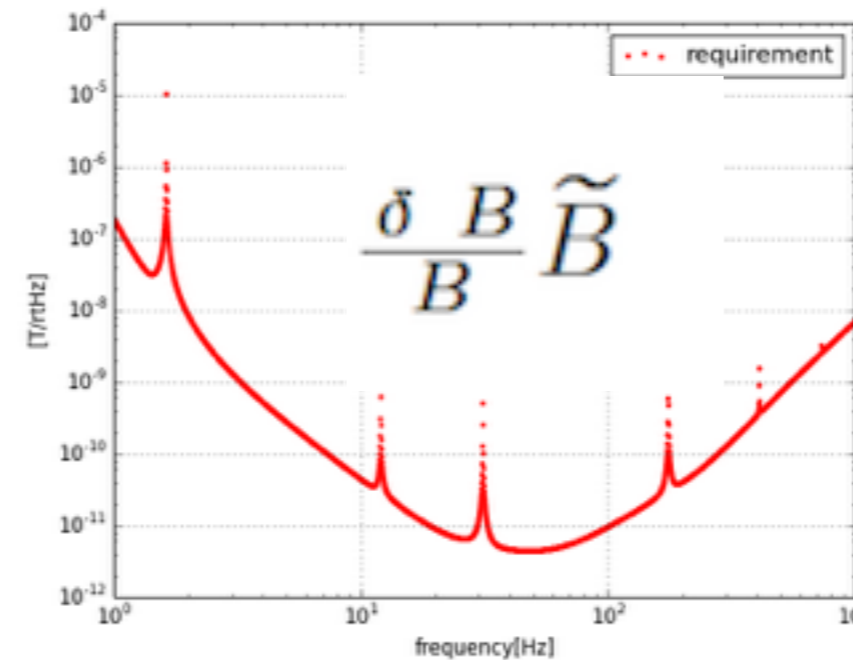
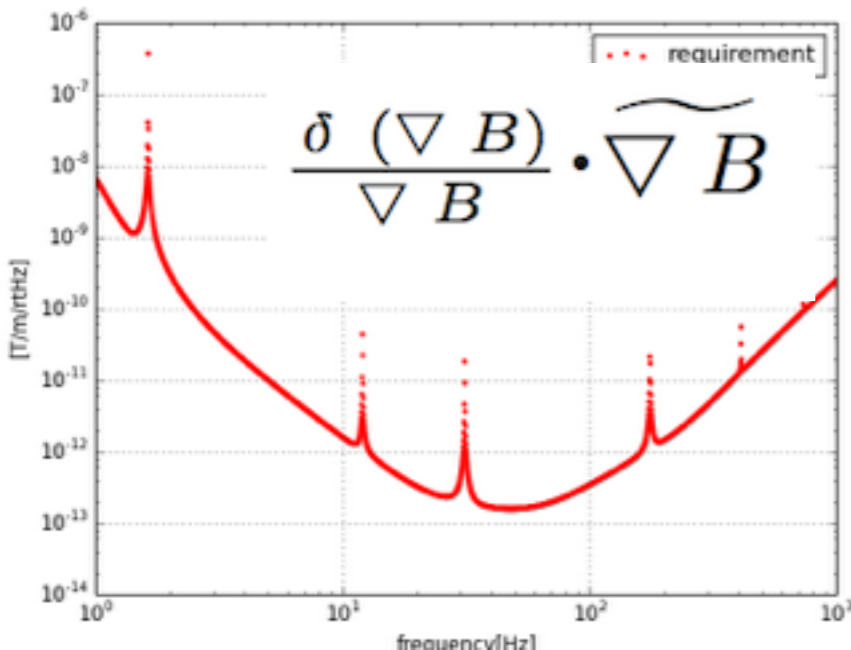
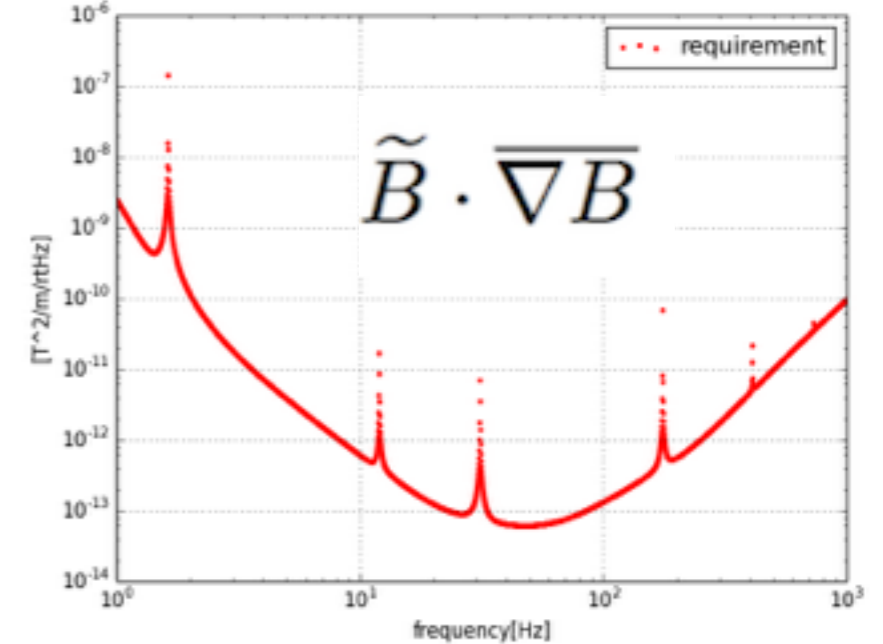
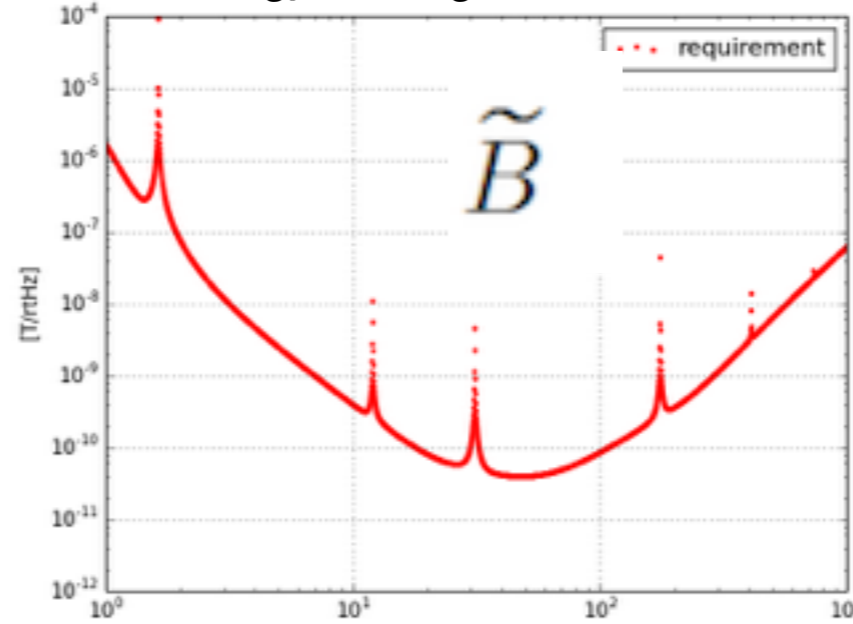
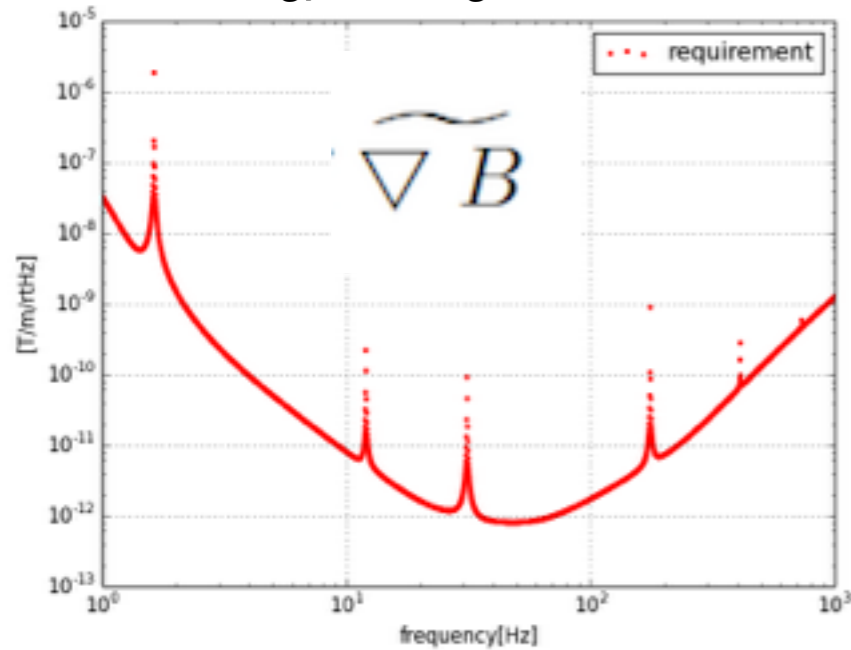
(光軸成分)

(光軸と垂直な成分)

(光軸成分)

($\delta \mu_{\text{mag}} / \mu_{\text{mag}} = 0.2$ と仮定)

($\delta \mu_{\text{mag}} / \mu_{\text{mag}} = 0.2$ と仮定)



磁場に対する要求

今回は、マグネットに生じるトルクの影響が問題となるかを検討した。

マグネットにかかる力由来 マグネットにかかるトルク由来

ミラーの磁化由来

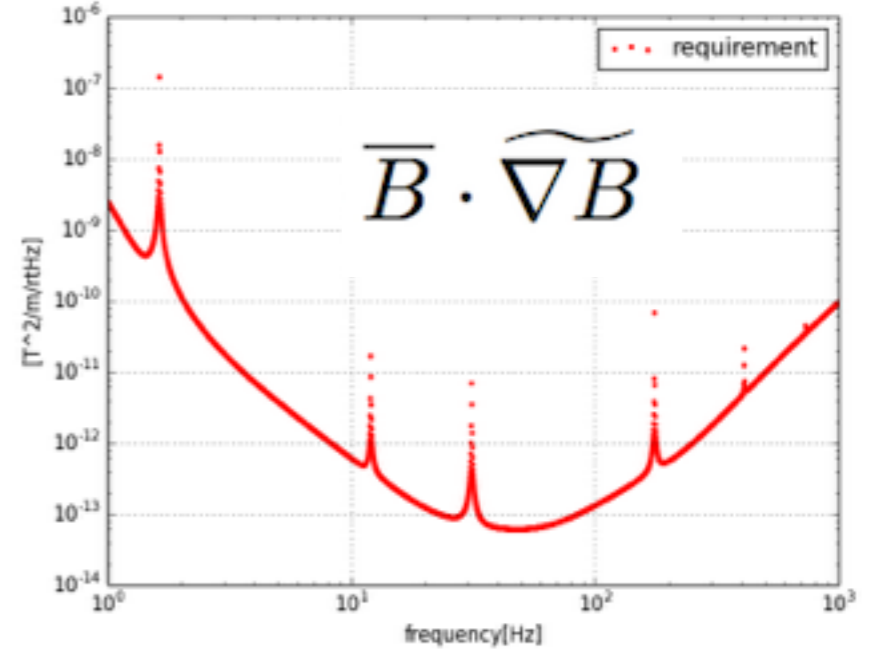
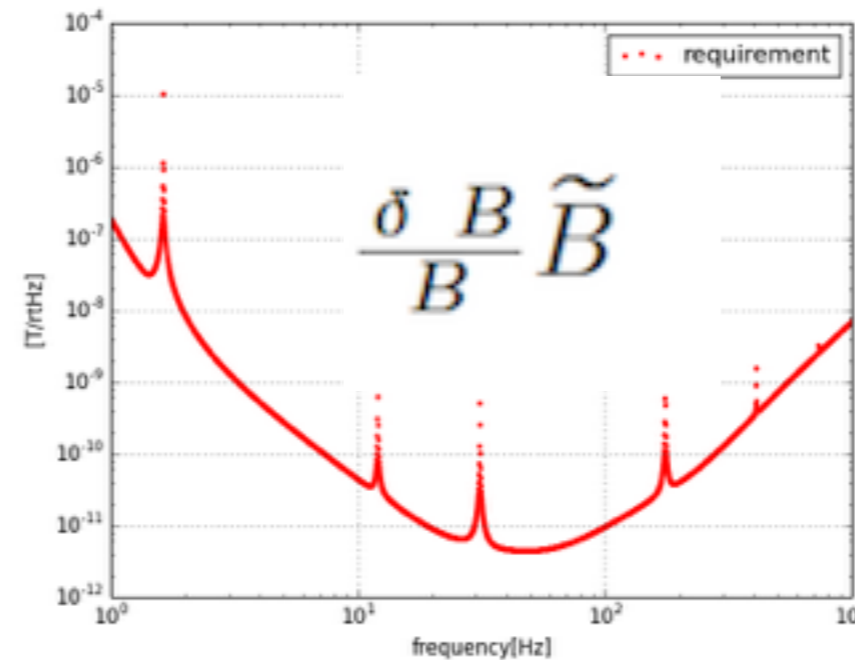
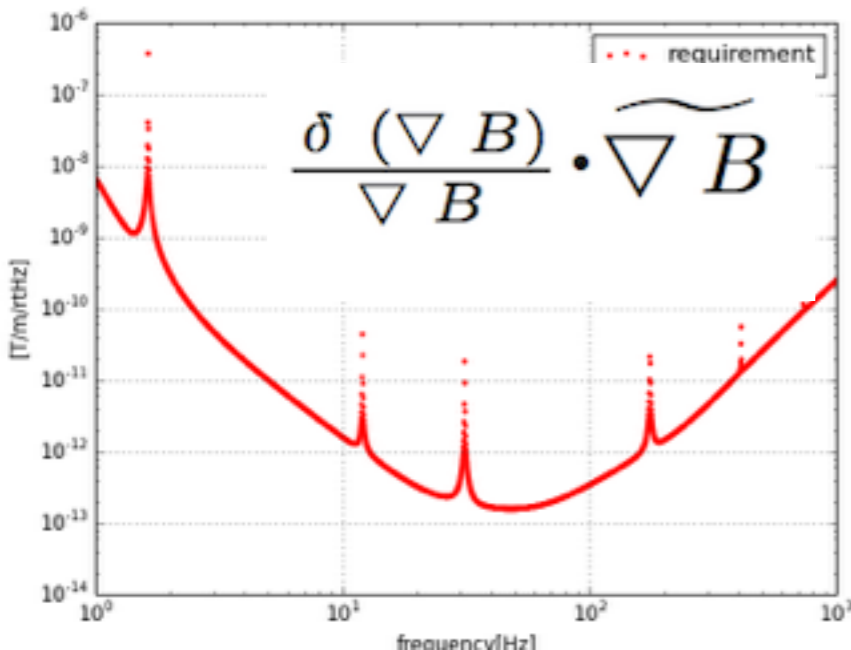
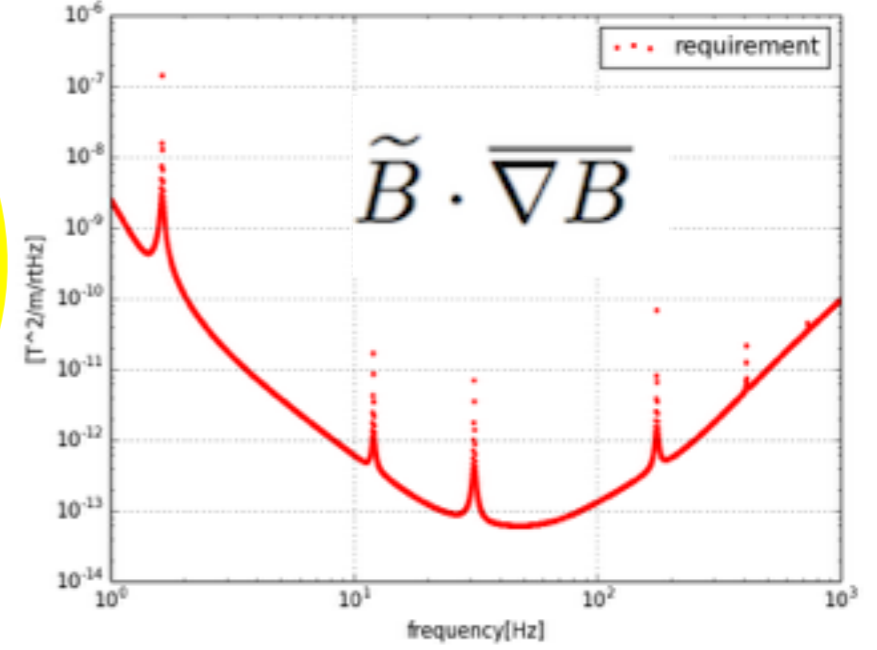
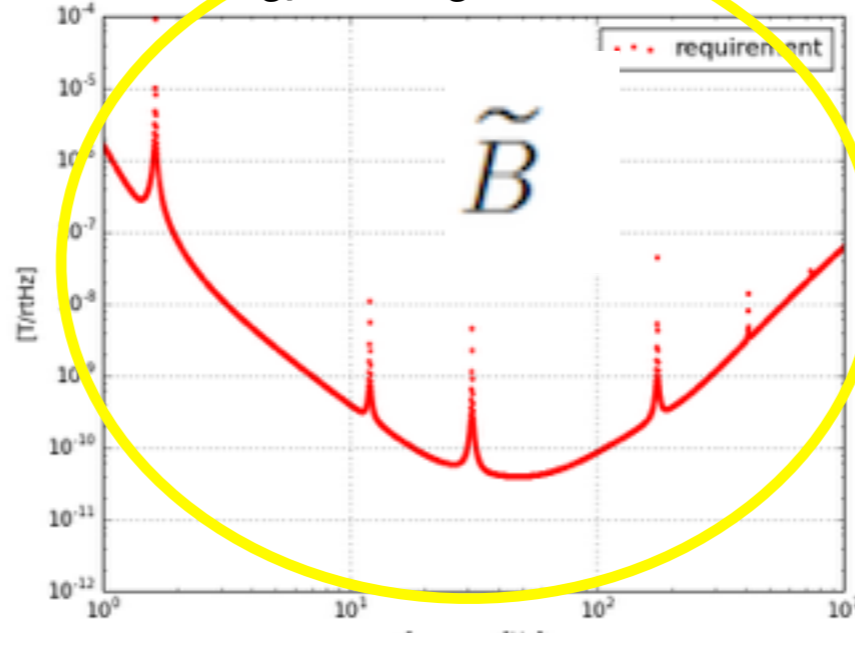
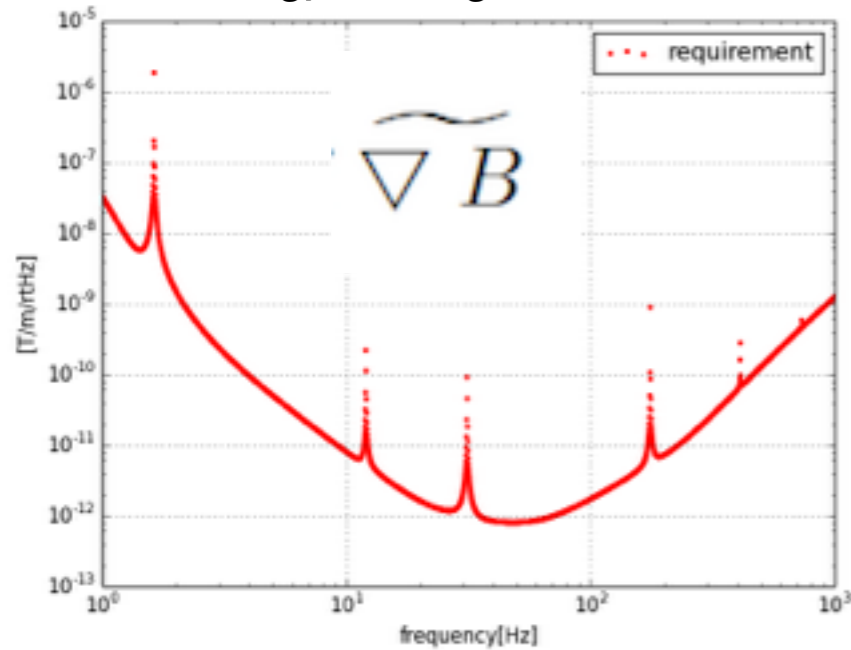
(光軸成分)

(光軸と垂直な成分)

(光軸成分)

($\delta \mu_{\text{mag}} / \mu_{\text{mag}} = 0.2$ と仮定)

($\delta \mu_{\text{mag}} / \mu_{\text{mag}} = 0.2$ と仮定)



IXC内の磁場測定

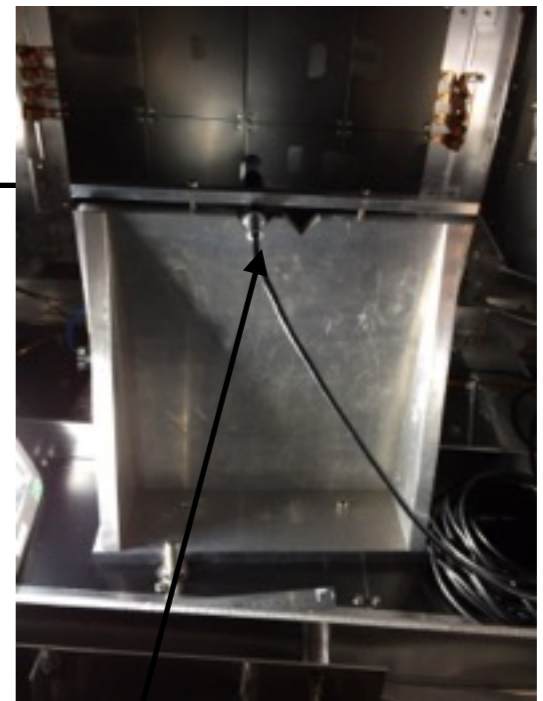
IXC

IXC...Xfrontクライオスタット

spectrum analyzer
(R9211C)

adaptor
box

power supply
(E3630A)...10.00V



flux meter
(Mag13-MCL100)
noise <6pT/rtHz

マグネットが来る位置

IXCの磁場測定

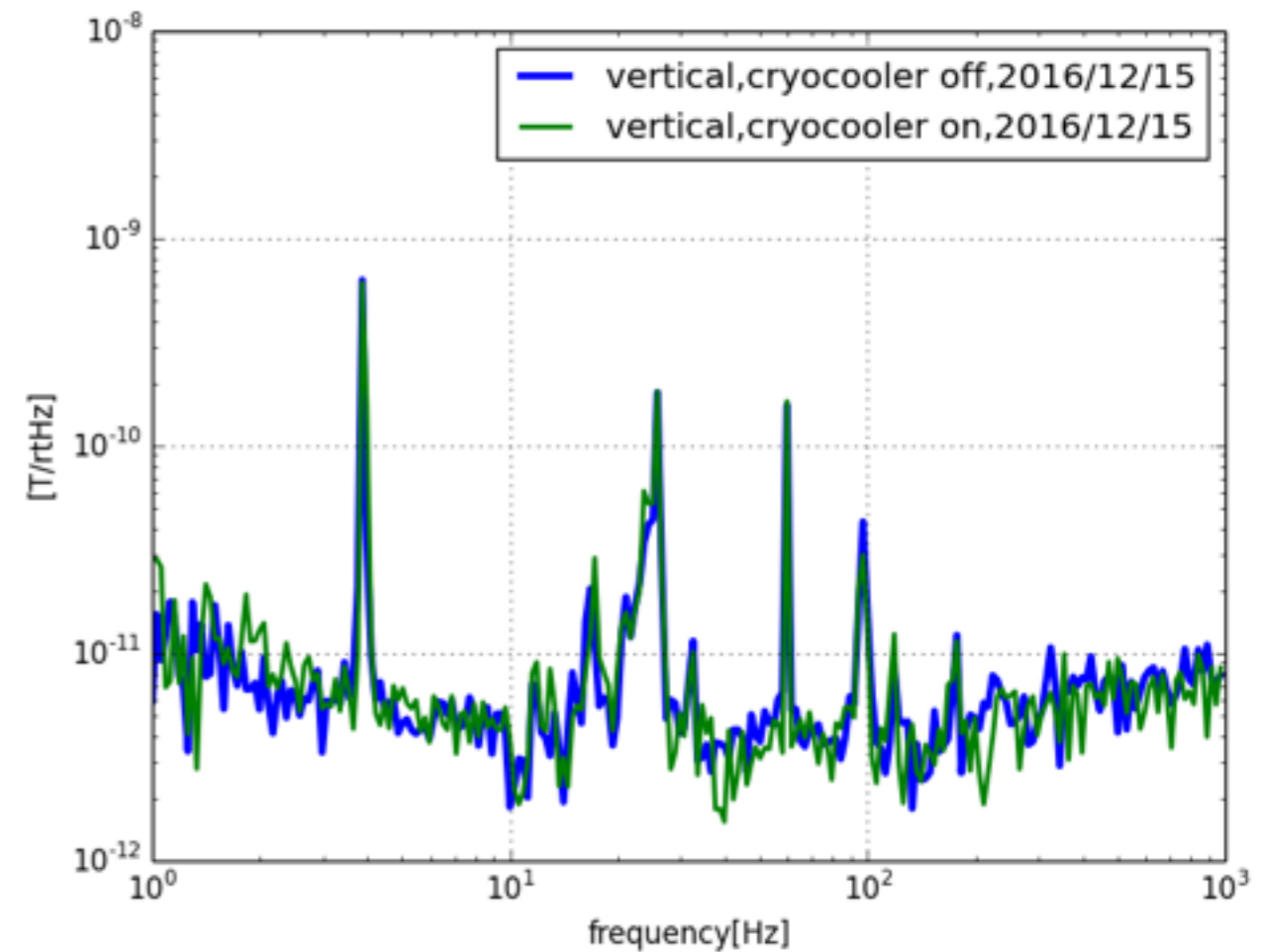
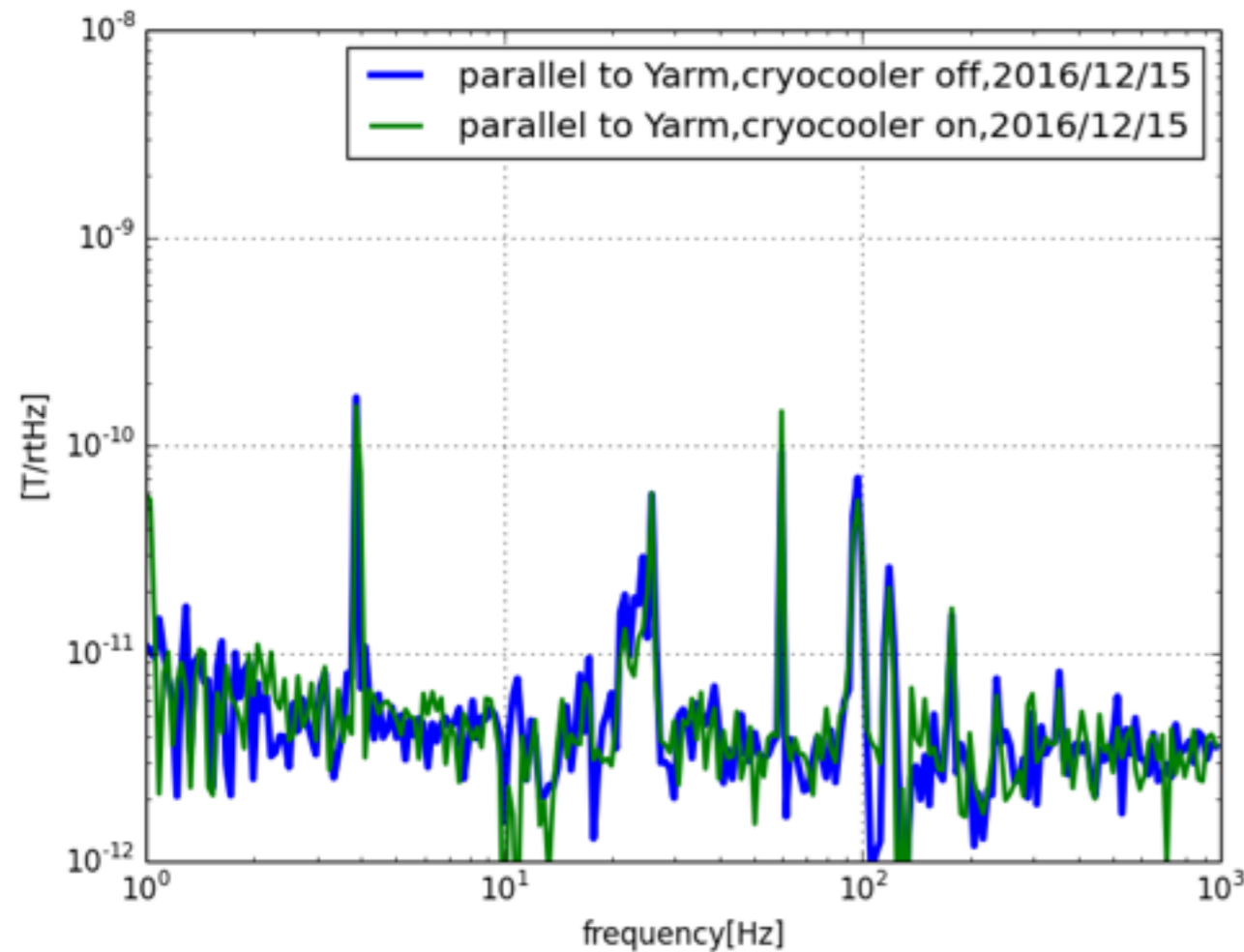
- ・ 冷凍機の稼働時と非稼働時の違いを比較した。
- ・ クライオスタットに導入していたエアドライヤーの稼働時と非稼働時を比較し、影響を調べた。

結果（冷凍機稼働/停止）

エアドライヤー…稼働

Yarm方向成分

鉛直成分



冷凍機稼働前と稼働中で、磁場の変化は小さかった。

3.9Hz、25.8Hz、97.2Hzのピークの原因は今後解明していく。

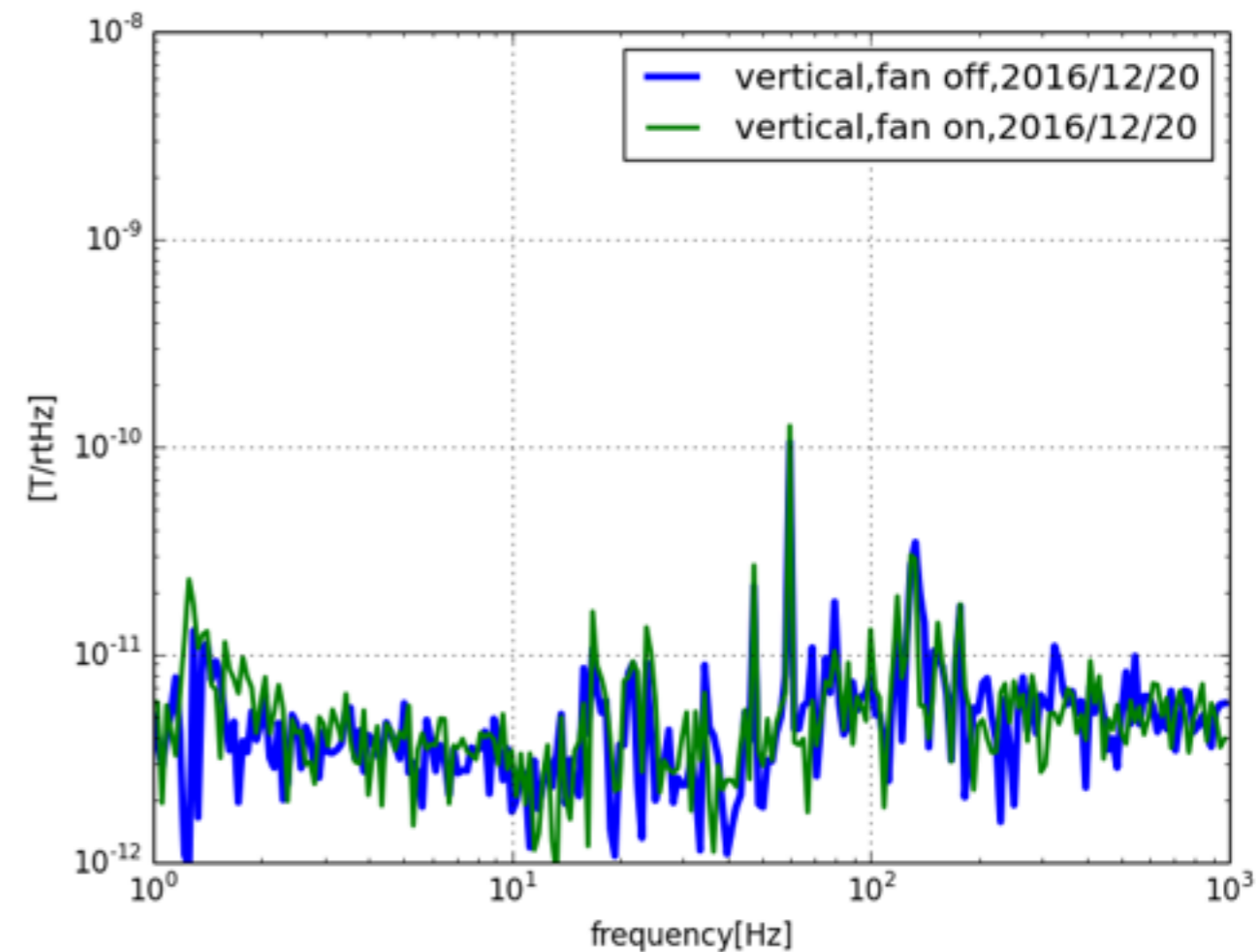
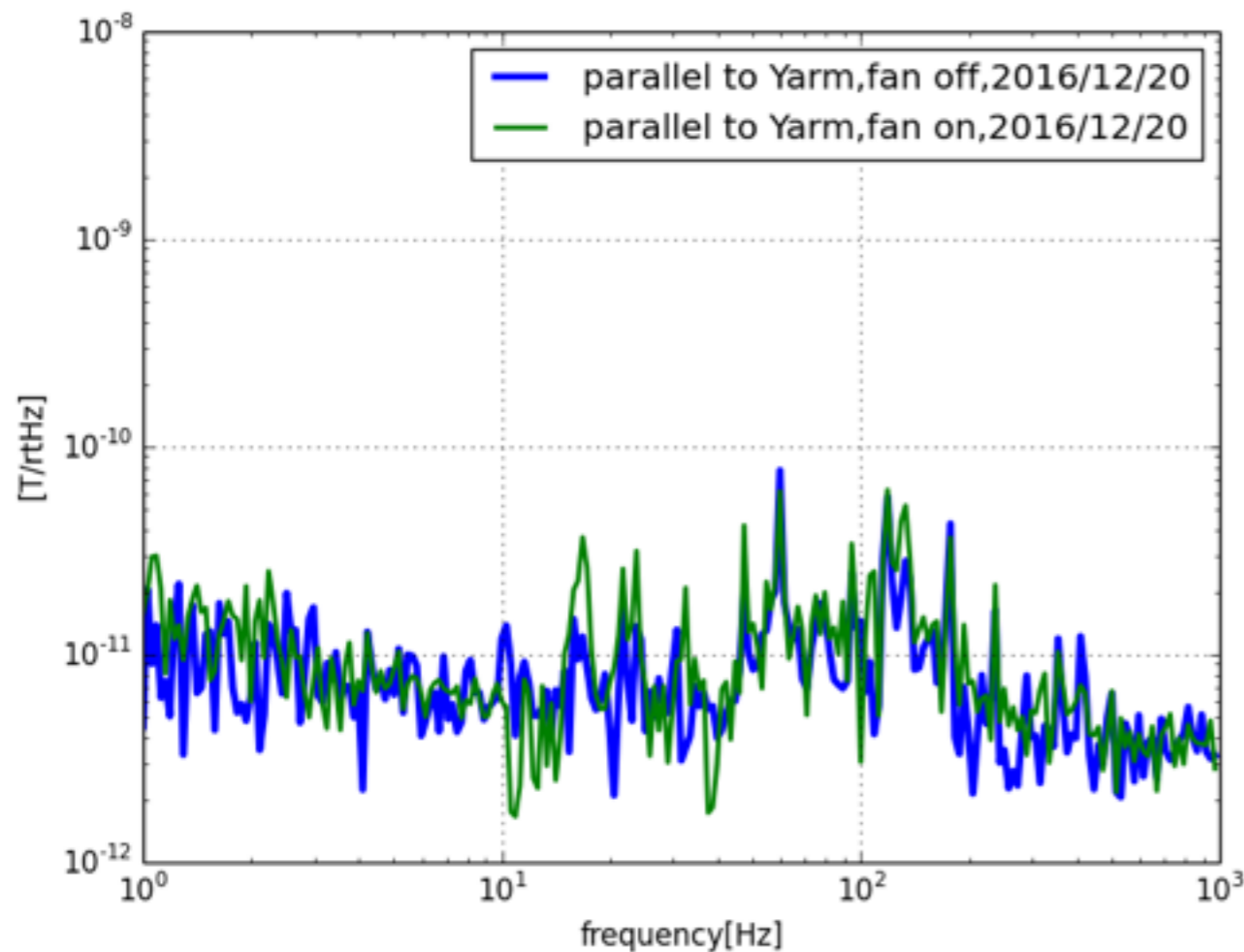
結果 (エアドライヤー稼働/停止)

冷凍機…非稼働

※近くで大電力の機器が動いている場合の比較検討としてこれを実施

Yarm方向成分

鉛直成分



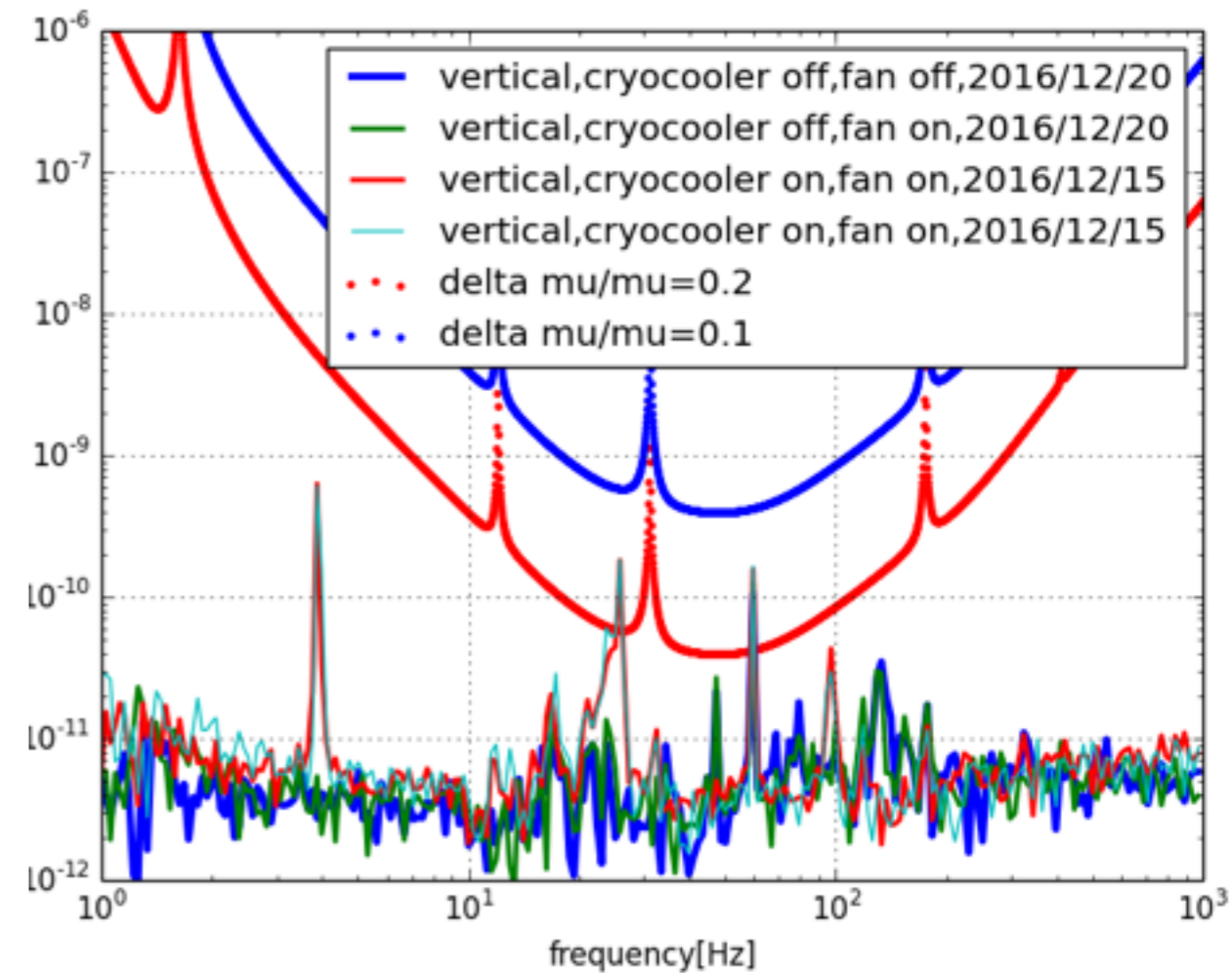
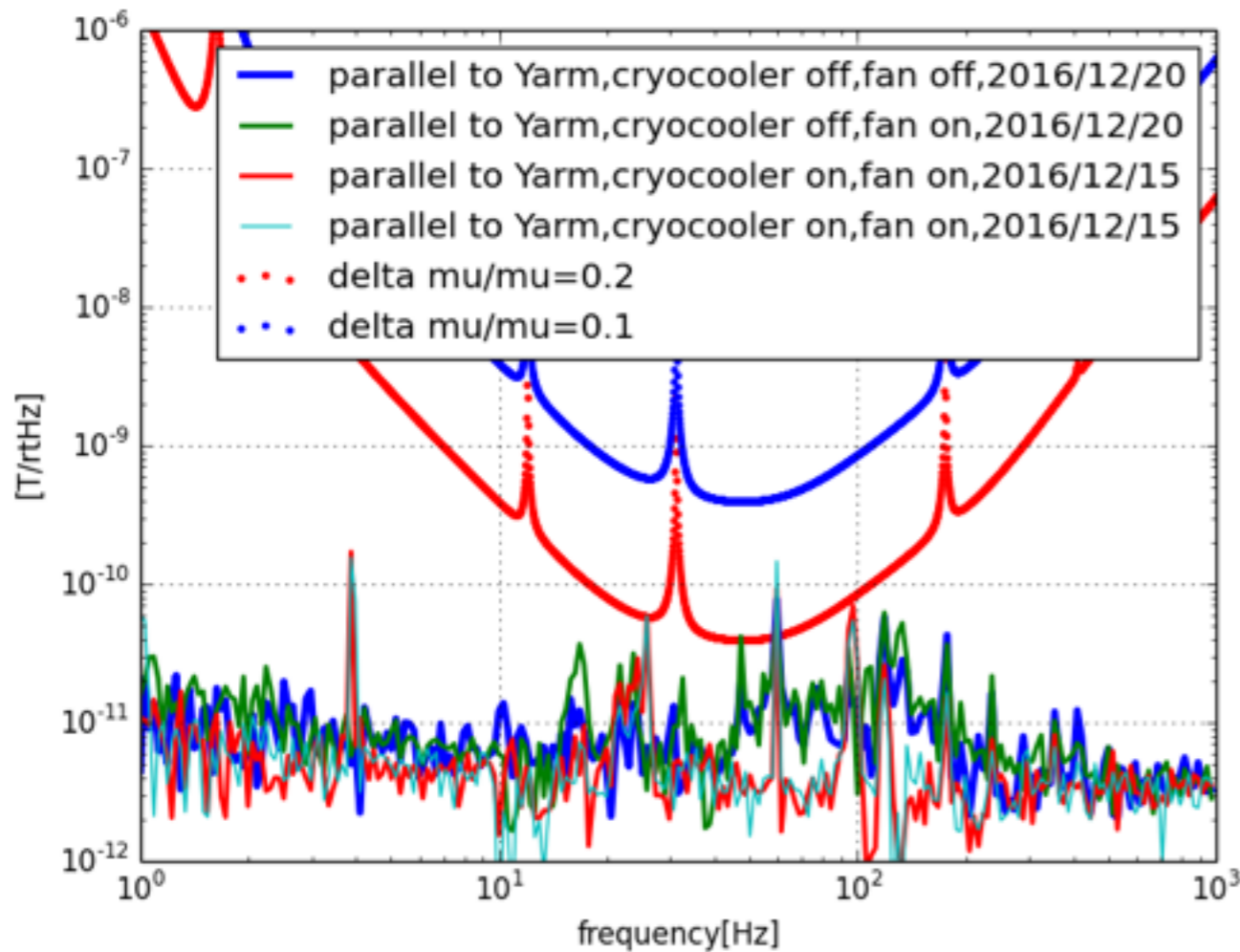
エアドライヤーの稼働前と稼働中で磁場の変化は小さかった。

100Hz付近の盛り上がりの原因は今後解明。

結果（要求との比較）

Yarm方向成分

鉛直成分



マグネット磁荷のばらつきが10%であれば、要求を満たす。

Future work

- ・ 各ピークが、電気ノイズ起因か磁場起因かを確認する。
- ・ 磁荷のばらつきを調べ、10%以下となる組み合わせを選定する。
- ・ 磁場勾配を測定し、残りの5つの要求を満たしているかを確認する。

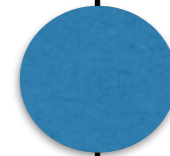
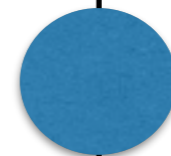
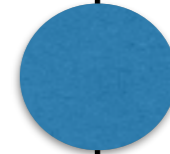
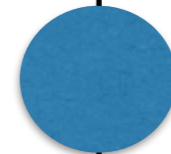
まとめ

- ・ KAGRAのコイル・マグネット・アクチュエータのマグネットが環境磁場と相互作用してミラーが揺れ、変位雑音となるので、これが十分小さいことを確かめなければならない。
- ・ 冷凍機の稼働前と稼働中で磁場の変化は小さかった。
- ・ エアドライヤーの稼働前と稼働中で磁場の変化は小さかった。
- ・ マグネットの磁荷のばらつきが10%以下であれば要求の1つを満たす。

Thank you!

KAGRA低温懸架系

TypeA (常温部)

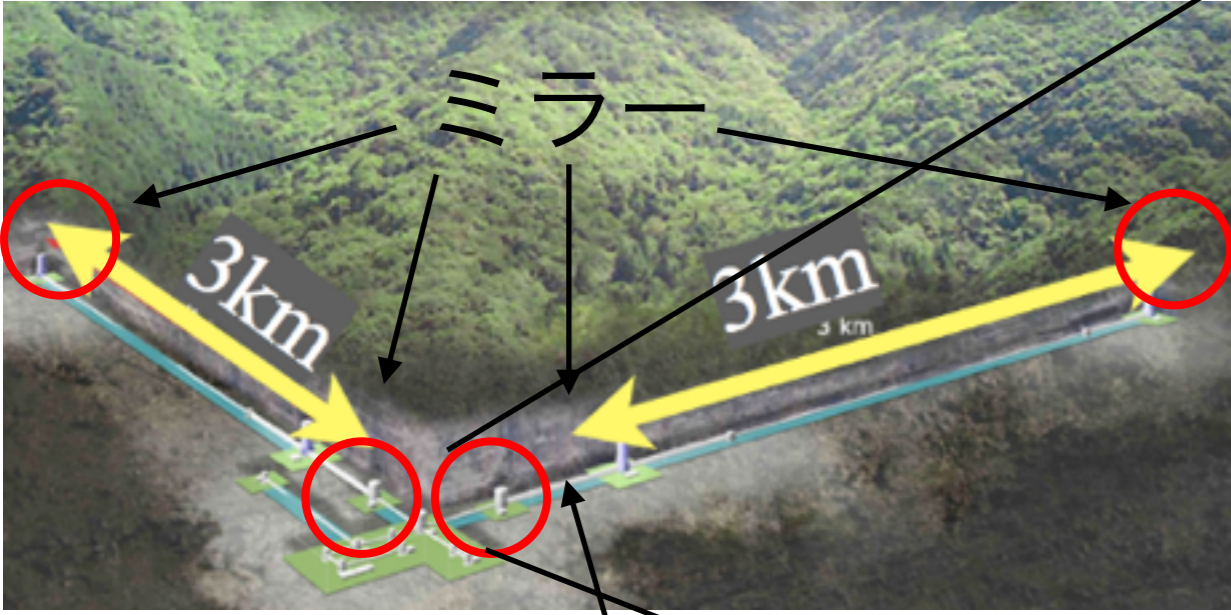


Test Mass

Recoil Mass

IXC

クライオスタット内 (低温部)



(1) ミラーの磁化による効果

$$F_1 = \frac{\mu_{mir}}{\mu_0} \cdot \nabla B = \frac{\chi_m \cdot V_{mir}}{\mu_0} \cdot B \cdot \nabla B$$

$$\widetilde{F}_{1-1} = \frac{\chi_m}{\mu_0} V_{mir} \cdot \widetilde{B} \cdot \overline{\nabla B}$$

$$\widetilde{F}_{1-2} = \frac{\chi_m}{\mu_0} V_{mir} \cdot \overline{B} \cdot \widetilde{\nabla B}$$

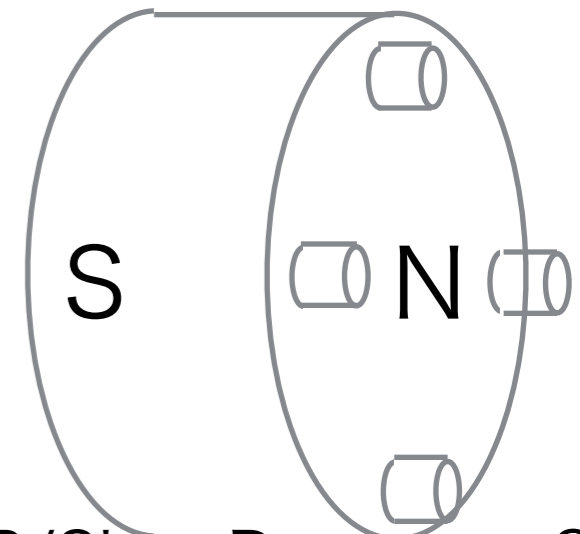
μ_{mir} (磁気双極子モーメント) = $\chi_{mir} \cdot V_{mir} \cdot B$ (Wb · m)

χ_{mir} (磁化) = 3.15×10^{-6}

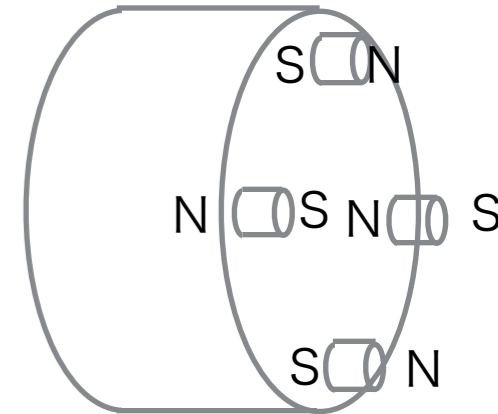
V_{mir} (体積) = 0.0057 (m³)

$$\widetilde{x}_{1-1} = \frac{1}{M_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \widetilde{F}_{1-1} = \frac{1}{M_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{\chi_m}{\mu_0} V_{mir} \cdot \widetilde{B} \cdot \overline{\nabla B}$$

$$\widetilde{x}_{1-2} = \frac{1}{M_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \widetilde{F}_{1-2} = \frac{1}{M_{mir}(2\pi * f)^2} \cdot \frac{\chi_m}{\mu_0} V_{mir} \cdot \overline{B} \cdot \widetilde{\nabla B}$$



(2) 各マグネットにかかる力による効果



$$\mu_{mag,i} = \pm \mu_{mag} + \delta \mu_{mag,i}$$

$$\nabla B_i = \nabla B + \delta (\nabla B)_i$$

$$x_{mag,i} = x_{mag} + \delta x_{mag,i}$$



μ_{mag} (磁気双極子モーメント) = $0.0027 \mu_0 (\text{Wb} \cdot \text{m})$
 $\delta \mu_{mag} / \mu_{mag}$ (磁荷ばらつき) = 0.2
 x_{mag} (ミラー中心からの位置) = $0.11 (\text{m})$
 δx_{mag} (位置ばらつき) = $0.001 (\text{m})$

$$F_{2-tot} = \sum_{i=1}^4 \mu_{mag,i} \cdot \nabla H_i = \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \nabla B + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla B$$

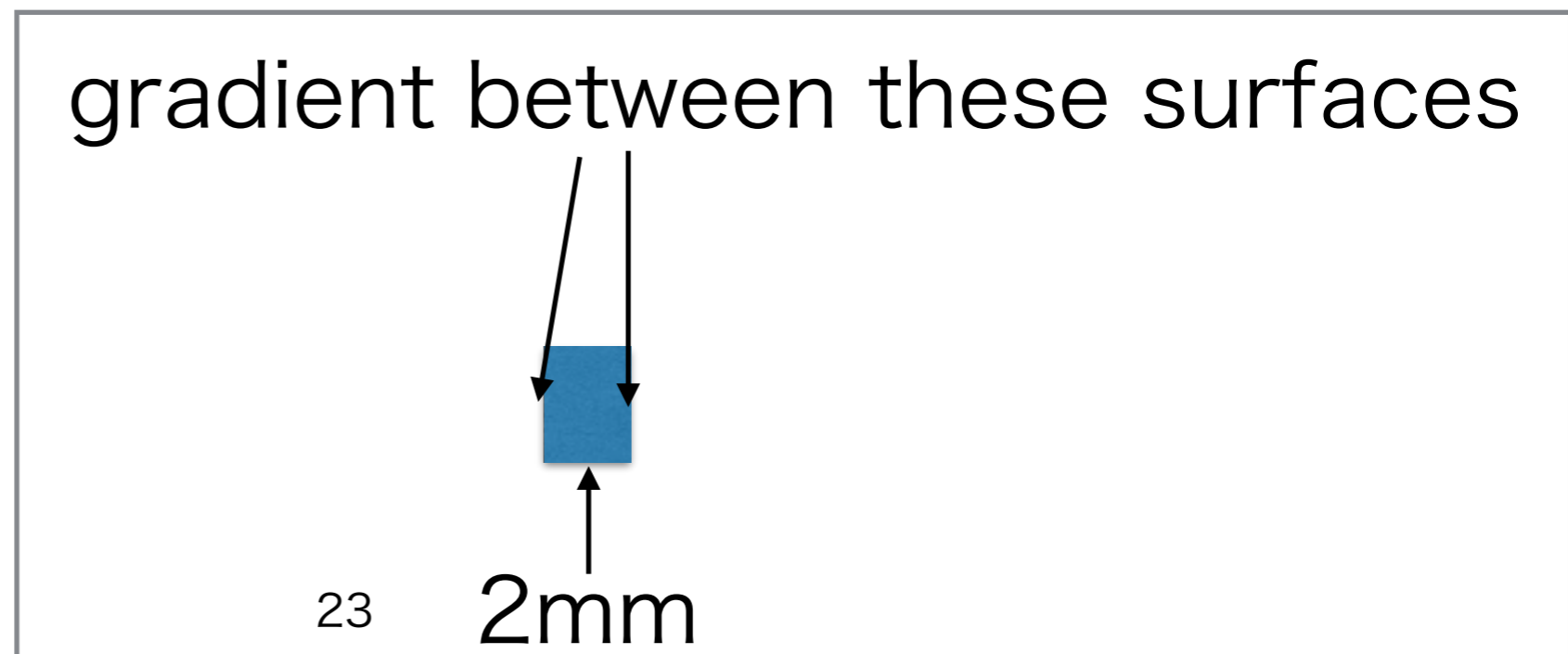
$$N_{2-tot} = \sum_{i=1}^4 \mu_{mag,i} \cdot \nabla H_i \cdot x_{mag,i} = \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \nabla B \cdot x_{mag} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla B \cdot x_{mag} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \cdot \nabla B \cdot \delta x_{mag}$$



$$\begin{aligned}
 \widetilde{F}_{2-tot} + \widetilde{N}_{2-tot} = & \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \widetilde{\nabla B} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \widetilde{\nabla B} \\
 & + \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \widetilde{\nabla B} \cdot x_{mag} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \widetilde{\nabla B} \cdot x_{mag} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \cdot \widetilde{\nabla B} \cdot \delta x_{mag}
 \end{aligned}$$

How to measure the gradient of magnetic field

- Strictly speaking, “the gradient of magnetic field” means the gradient between two surfaces of the magnet (2mm).
- It is difficult to measure, so I considered another plan.



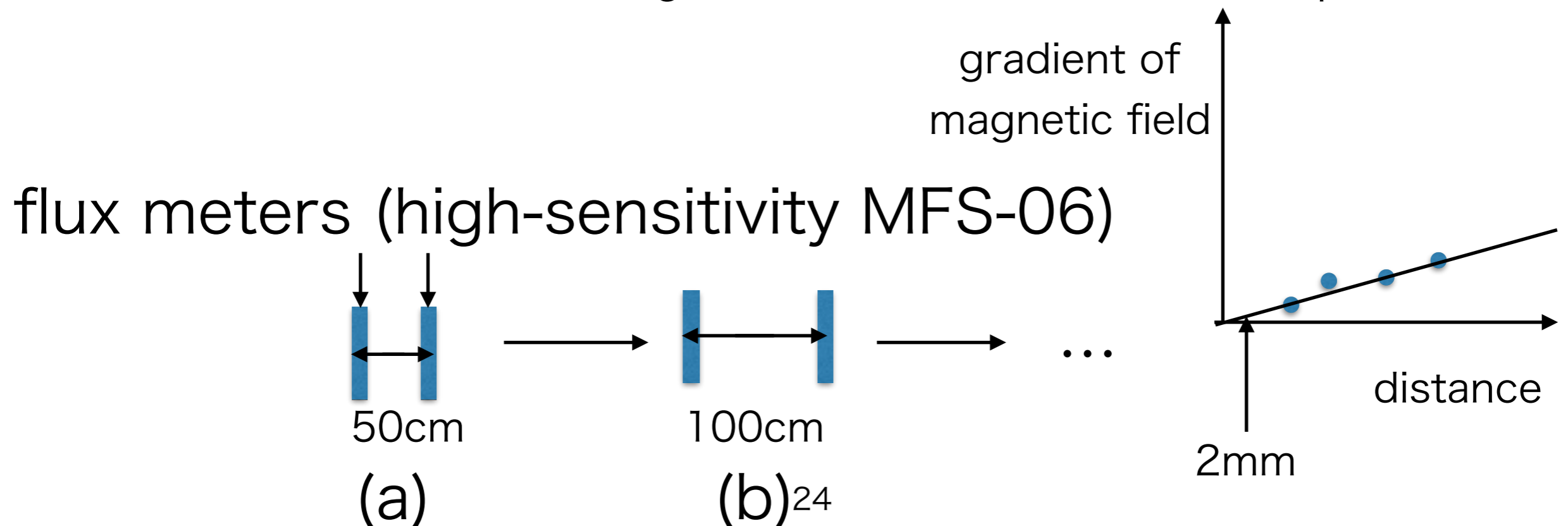
How to measure the gradient of magnetic field

First I will put two flux meters like (a) below and measure the gradient.

After that I will change the distance between the flux meters like (b) and measure again. And I will change the distance again...

Then I will know how the gradient changes depending on the distance.

Then I can calculate the gradient between 2mm distance points.



磁石にかかる力由来の雑音

$$F_{2-tot} = \sum_{i=1}^4 \mu_{mag,i} \cdot \nabla H_i$$

$$N_{2-tot} = \sum_{i=1}^4 \mu_{mag,i} \cdot \nabla H_i \cdot x_{mag,i}$$

$$\mu_{mag,i} = \pm \mu_{mag} + \delta \mu_{mag,i}$$

$$\nabla B_i = \nabla B + \delta (\nabla B)_i$$

$$x_{mag,i} = \pm \mu_{mag} + \delta x_{mag,i}$$

磁石にかかるトルク由来の雑音

$$N_i = \mu_i \cdot H(r_i + y_i) \cdot y_i + \mu_i \cdot H(r_i - y_i) \cdot y_i \sim \mu_i \cdot 2H(r_i) \cdot y_i$$

$$F_i = (\mu + \delta \mu_i) \cdot 2(H + \delta H_i) \cdot (y + \delta y_i) / R_{mir}$$

$$\widetilde{F}_3 \sim (4\mu \cdot \widetilde{H} \cdot \delta y + 8\mu \cdot y \cdot \frac{\delta H}{H} \widetilde{H} + 4y \cdot \widetilde{H} \cdot \delta \mu) / R_{mir}$$

