



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

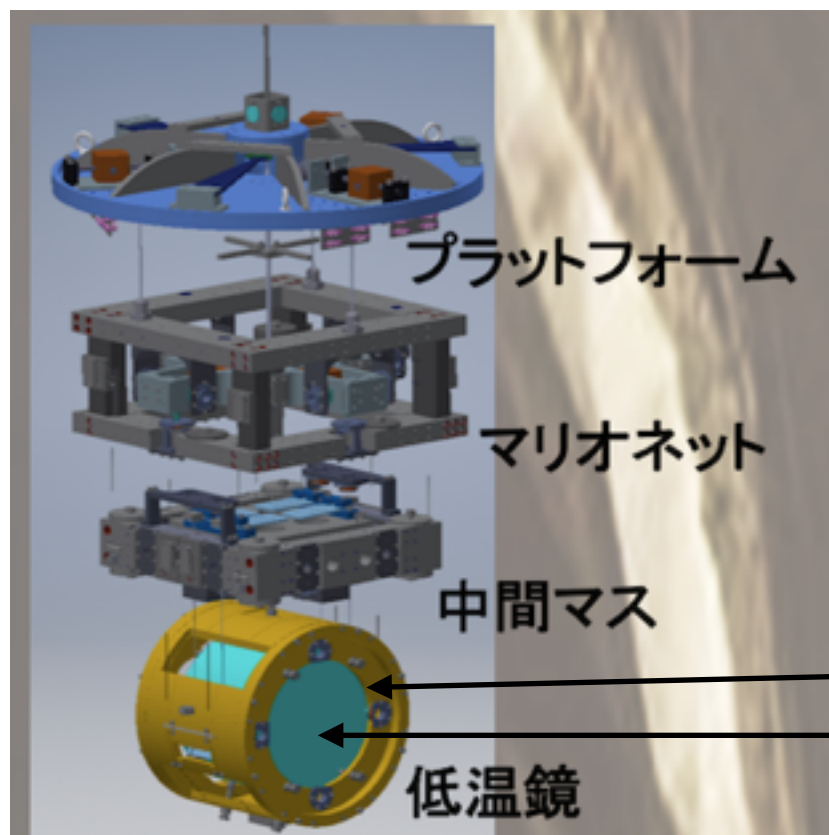
概要

- ・ 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ている。
- ・ KAGRAの1つのクライオスタット内で磁場を測定し、また周囲の機器の稼働中と非稼働中における磁場の比較を行った。

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

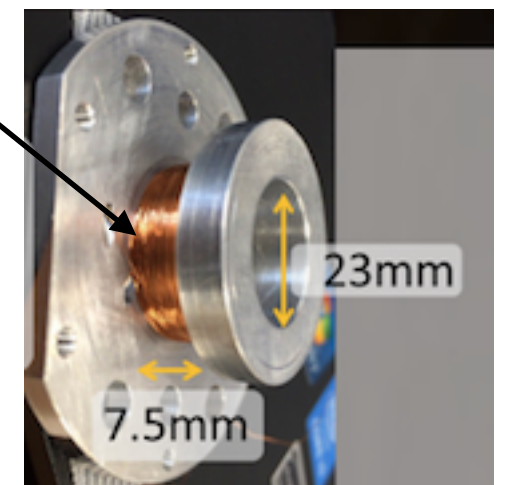
低温懸架系



マグネット

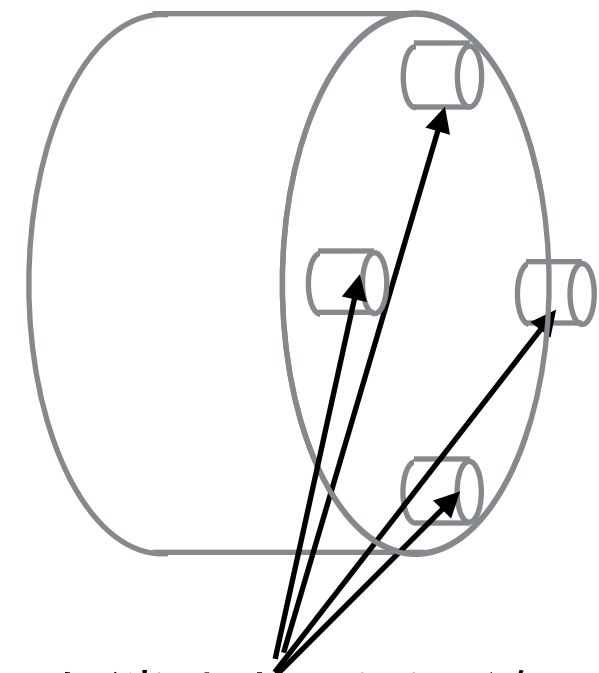


コイル



ミラー

リコイルマス



マグネット ($\phi 2$, $t2$, SmCo, カや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ている。
 - ・ (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} 磁気双極子モーメント

→ F 力 ($\mu \cdot \nabla H$)

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

μ_{mag} (マグネットの磁気双極子モーメント) $= 0.0027 \mu_0 (\text{Wb} \cdot \text{m})$

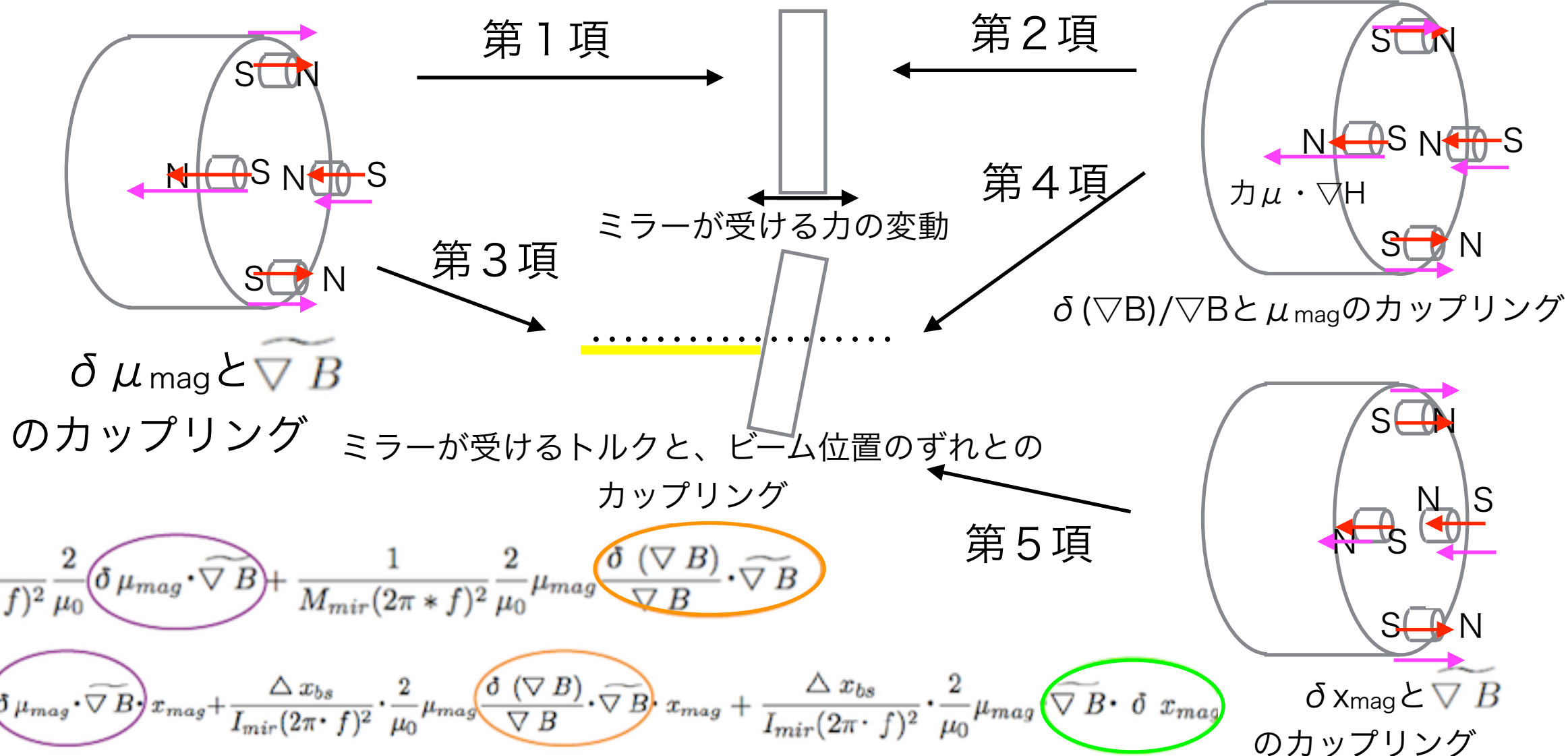
x_{mag} (マグネットのミラー中心からの位置) $= 0.11 (\text{m})$

δx_{mag} (マグネットの位置ばらつき) $= 0.001 (\text{m})$

I_{mir} (ミラーの慣性モーメント) $= 0.113$

Δx_{bs} (ビームスポットの位置のずれ) $= 0.001 (\text{m})$

∇B ... マグネットの表と裏の磁場勾配



$$\begin{aligned} \tilde{x} = & \frac{1}{M_{\text{mir}}(2\pi \cdot f)^2} \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{\text{mag}} \cdot \nabla B + \frac{1}{M_{\text{mir}}(2\pi \cdot f)^2} \frac{2}{\mu_0} \mu_{\text{mag}} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla B \\ & + \frac{\Delta x_{bs}}{I_{\text{mir}}(2\pi \cdot f)^2} \cdot \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{\text{mag}} \cdot \nabla B \cdot x_{\text{mag}} + \frac{\Delta x_{bs}}{I_{\text{mir}}(2\pi \cdot f)^2} \cdot \frac{2}{\mu_0} \mu_{\text{mag}} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla B \cdot x_{\text{mag}} \\ & + \frac{\Delta x_{bs}}{I_{\text{mir}}(2\pi \cdot f)^2} \cdot \frac{2}{\mu_0} \mu_{\text{mag}} \nabla B \cdot \delta x_{\text{mag}} \end{aligned}$$

(2) マグネットにかかるトルク

→ μ_{mag} 磁気双極子モーメント

→ F 力 ($\mu \cdot \nabla H$)

による効果

μ_{mag} (マグネットの磁気双極子モーメント) $= 0.0027 \mu_0 (\text{Wb} \cdot \text{m})$

y (マグネットの中心から底面までの距離) $= 0.001 (\text{m})$

δy (y のばらつき) $= 0.0001 (\text{m})$

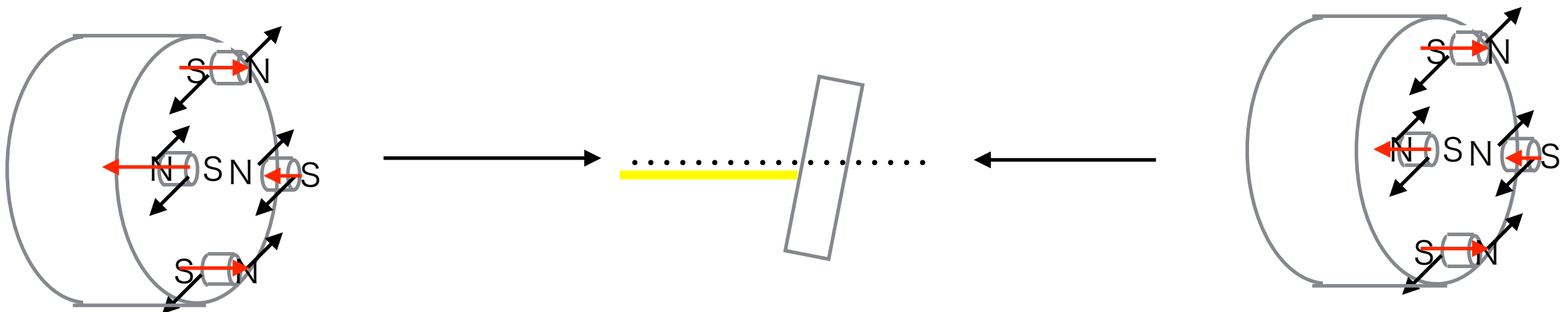
M_{mir} (ミラーの質量) $= 23 (\text{kg})$

・ 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。

$\delta \mu_{\text{mag}}$ が $\tilde{B}$ とカップルし、
ミラーがねじれる

ミラーのねじれと、
ビームのミラー中心から
のずれがカップル

δB によってマグネットが受ける
トルクにばらつきが生じ、
ミラーがねじれる



(3) ミラーの磁化による効果

→ 磁気双極子モーメント

→ F 力 ($\mu \cdot \nabla H$)

$$\mu_{mir} = \chi_m V_{mir} B$$

χ_{mir} (ミラーの磁化) $= 3.15 \times 10^{-6}$

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

M_{mir} (ミラーの質量) $= 23 (\text{kg})$

$\tilde{B}$... フーリエ変換された磁場 (磁場変動)

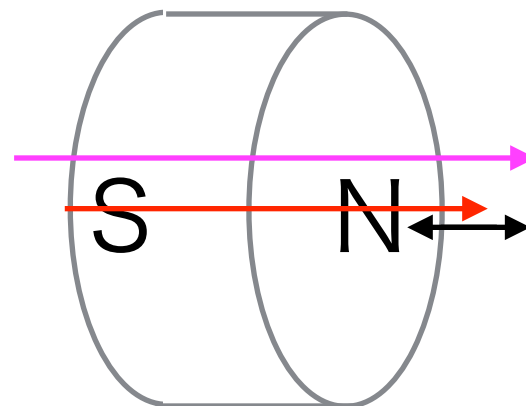
$\overline{B}$... 平均磁場

∇B ... ミラーの表と裏の磁場勾配

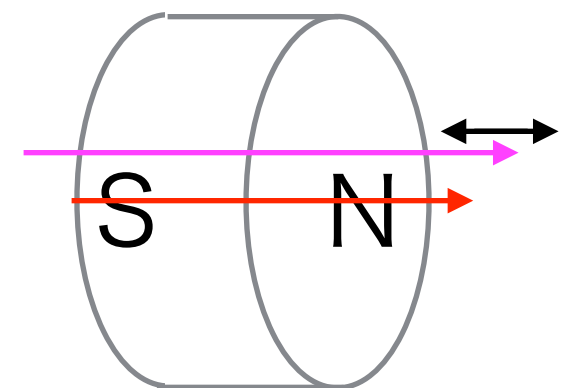
・ ミラーに力を与えるのはマグネットと平行な磁場。

※ 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。

第1項
 $\tilde{B}$ による μ_{mir} 変動が
 ∇B とカップルし、
ミラーが揺れる



第2項
ミラー磁化が
 ∇B とカップルし、
ミラーが揺れる



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

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となるよう求めている。

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

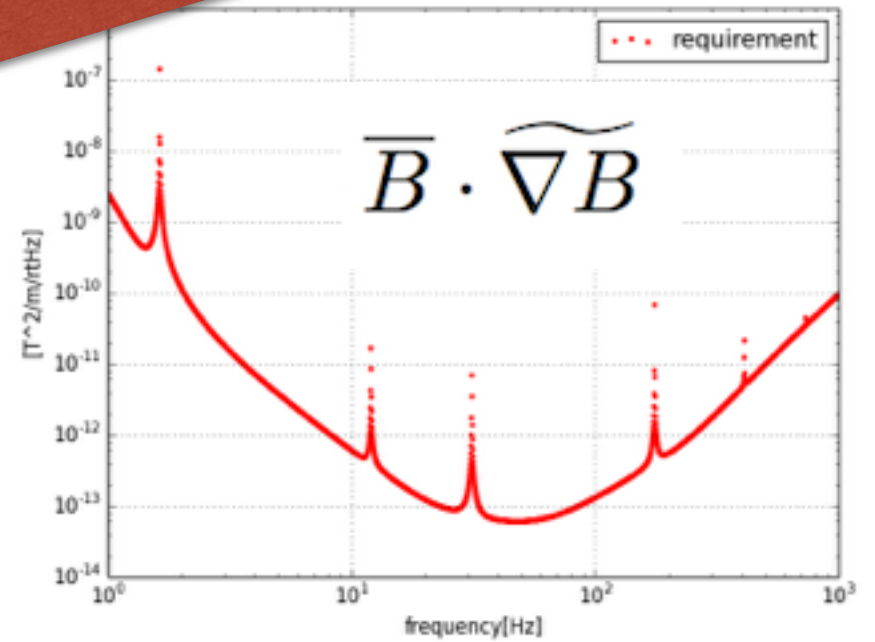
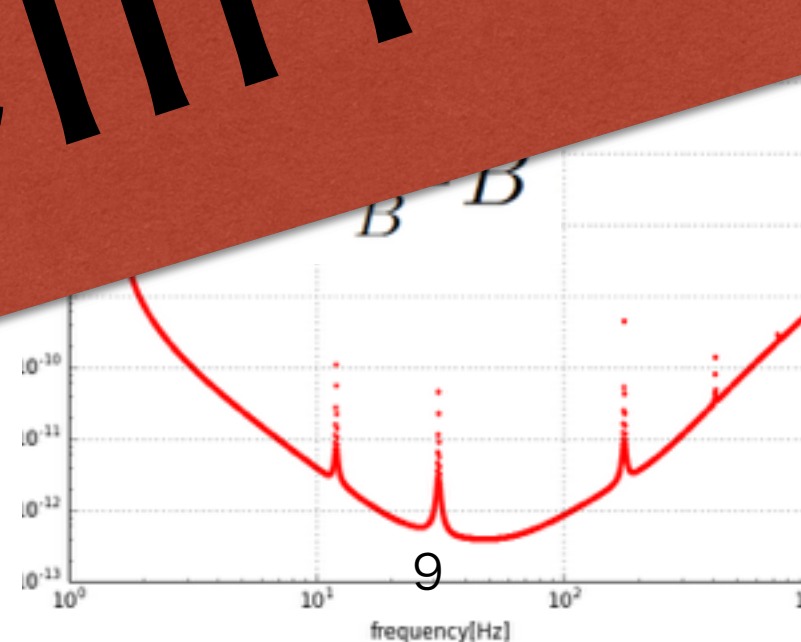
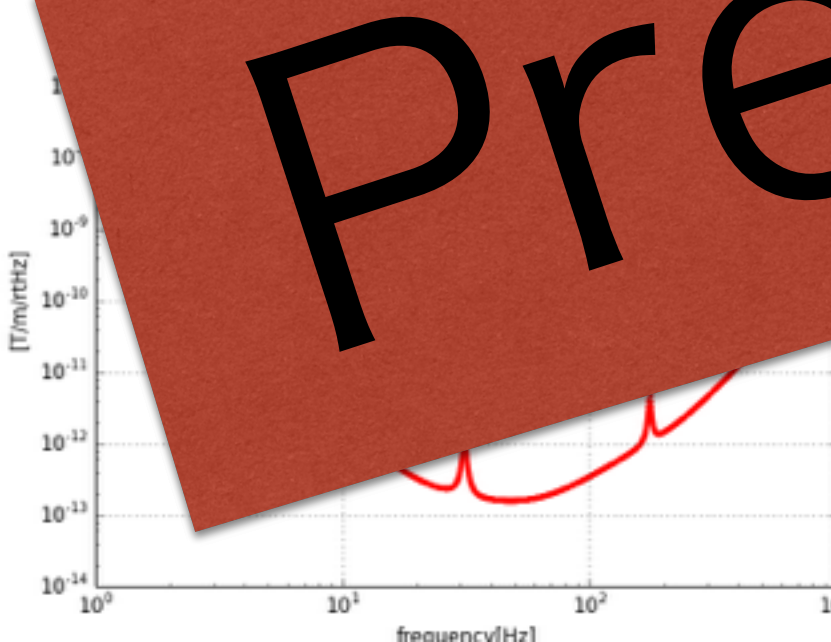
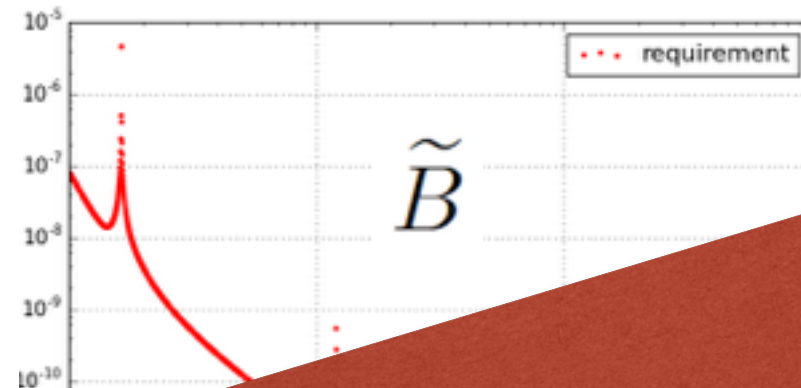
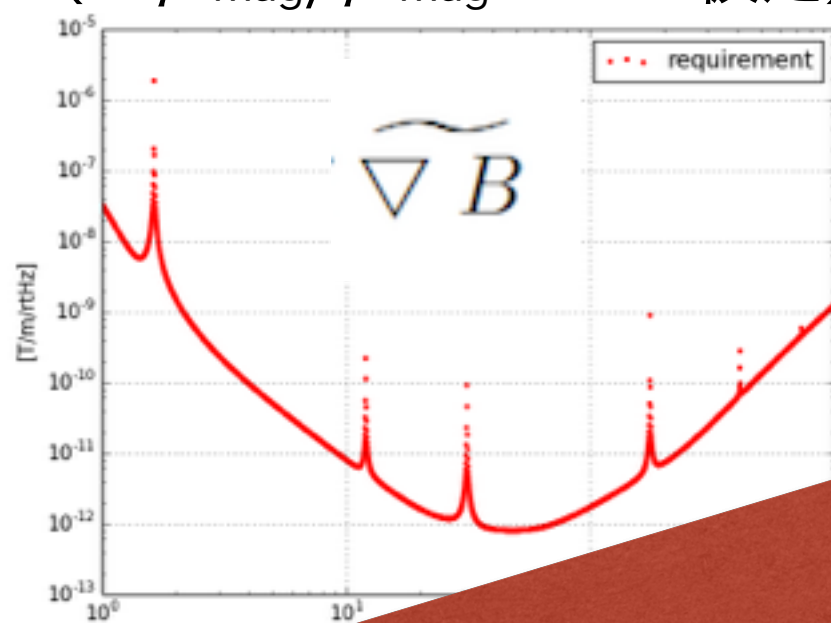
(光軸成分)

(光軸と垂直な成分)

ミラーの磁化由来

(光軸成分)

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



Preliminary

IXC内の磁場測定

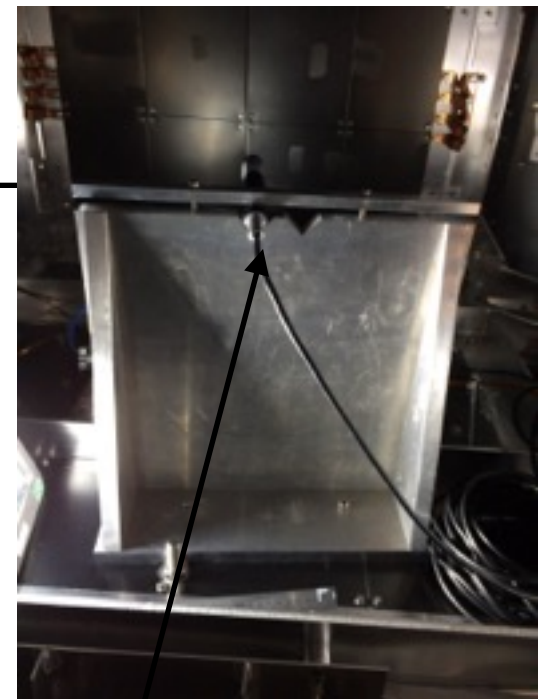
IXC

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

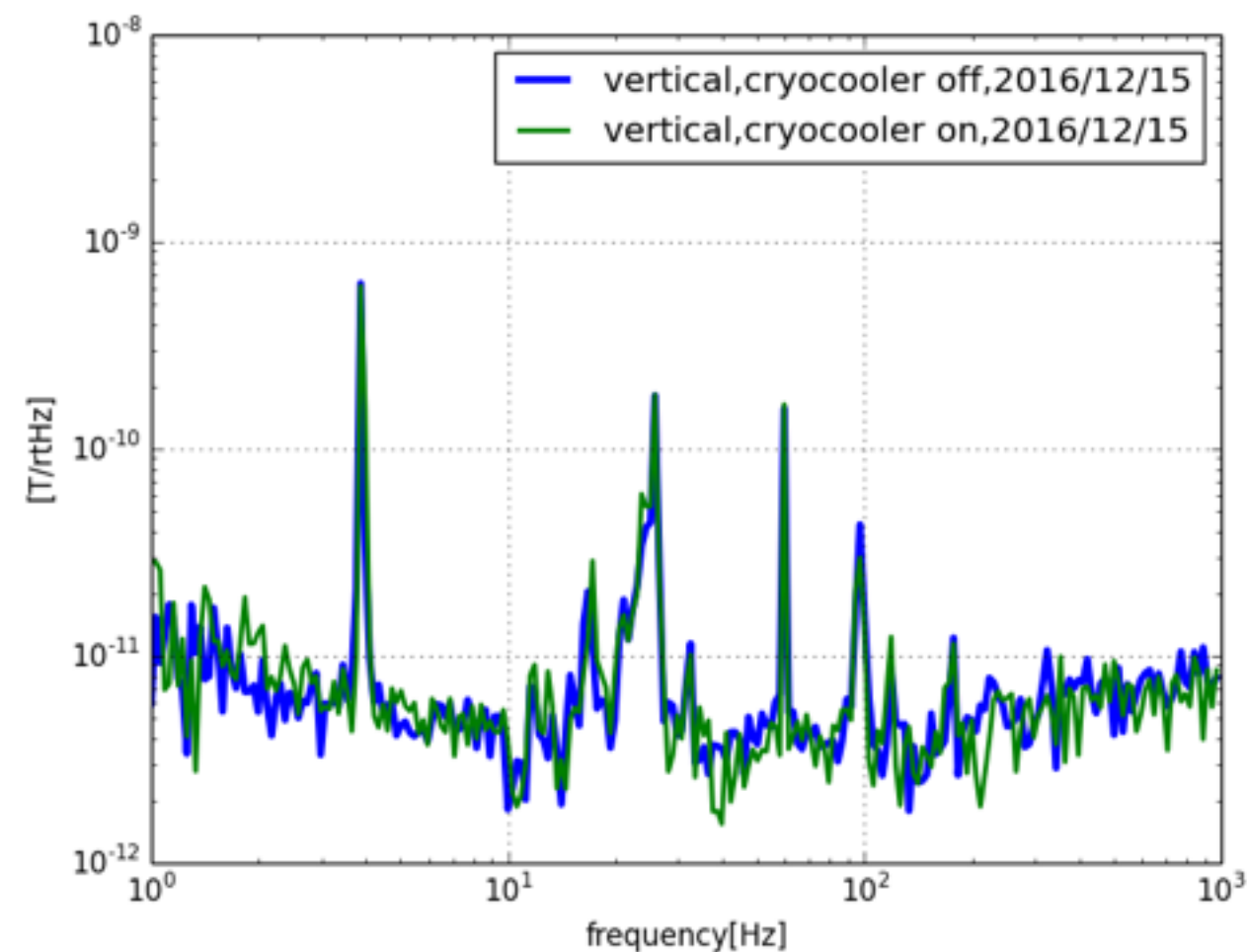
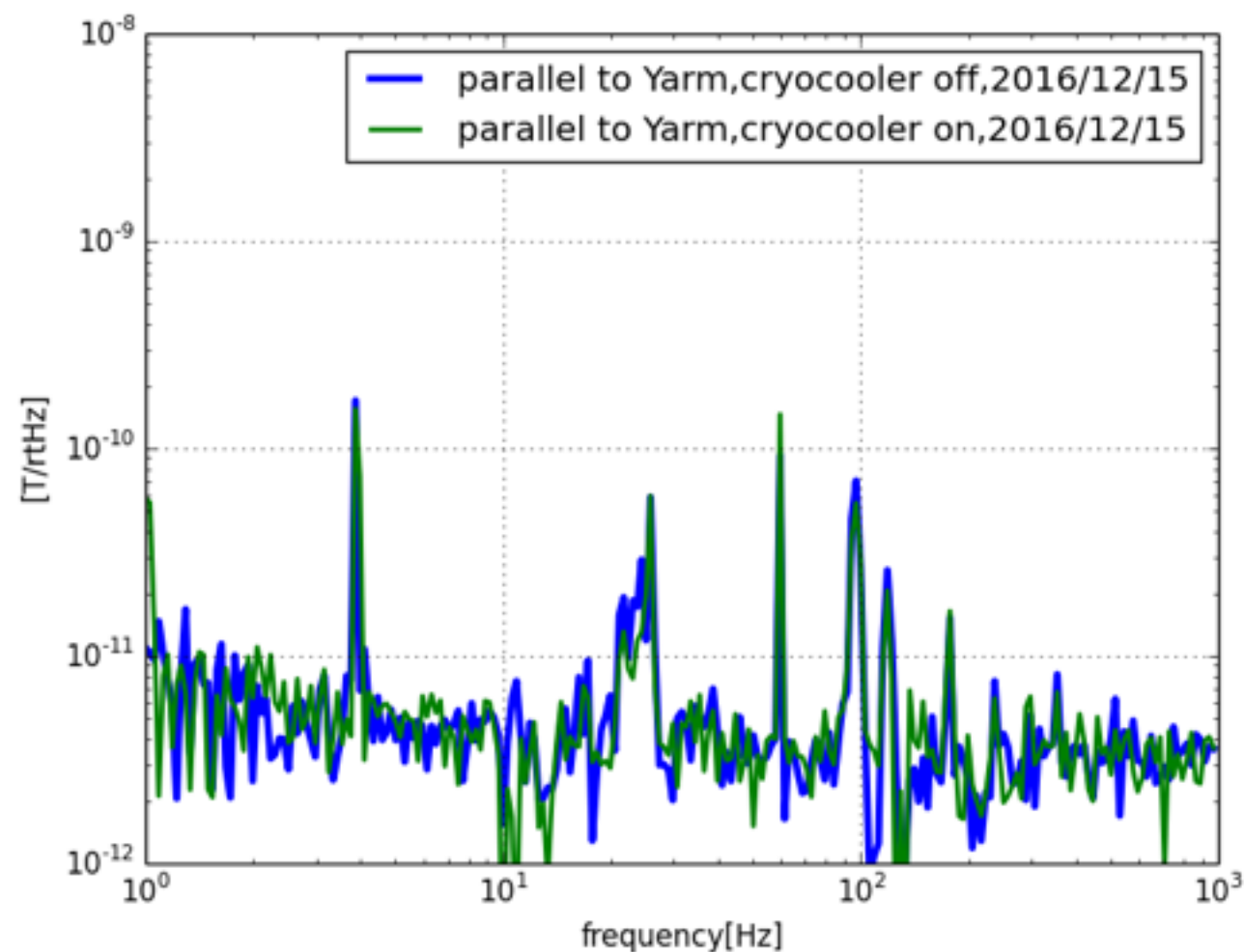
- ・ 冷凍機の稼働時と非稼働時の違いを比較した。
- ・ クライオスタットに導入していたエアドライヤーの稼働時と非稼働時を比較し、影響を調べた。

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。

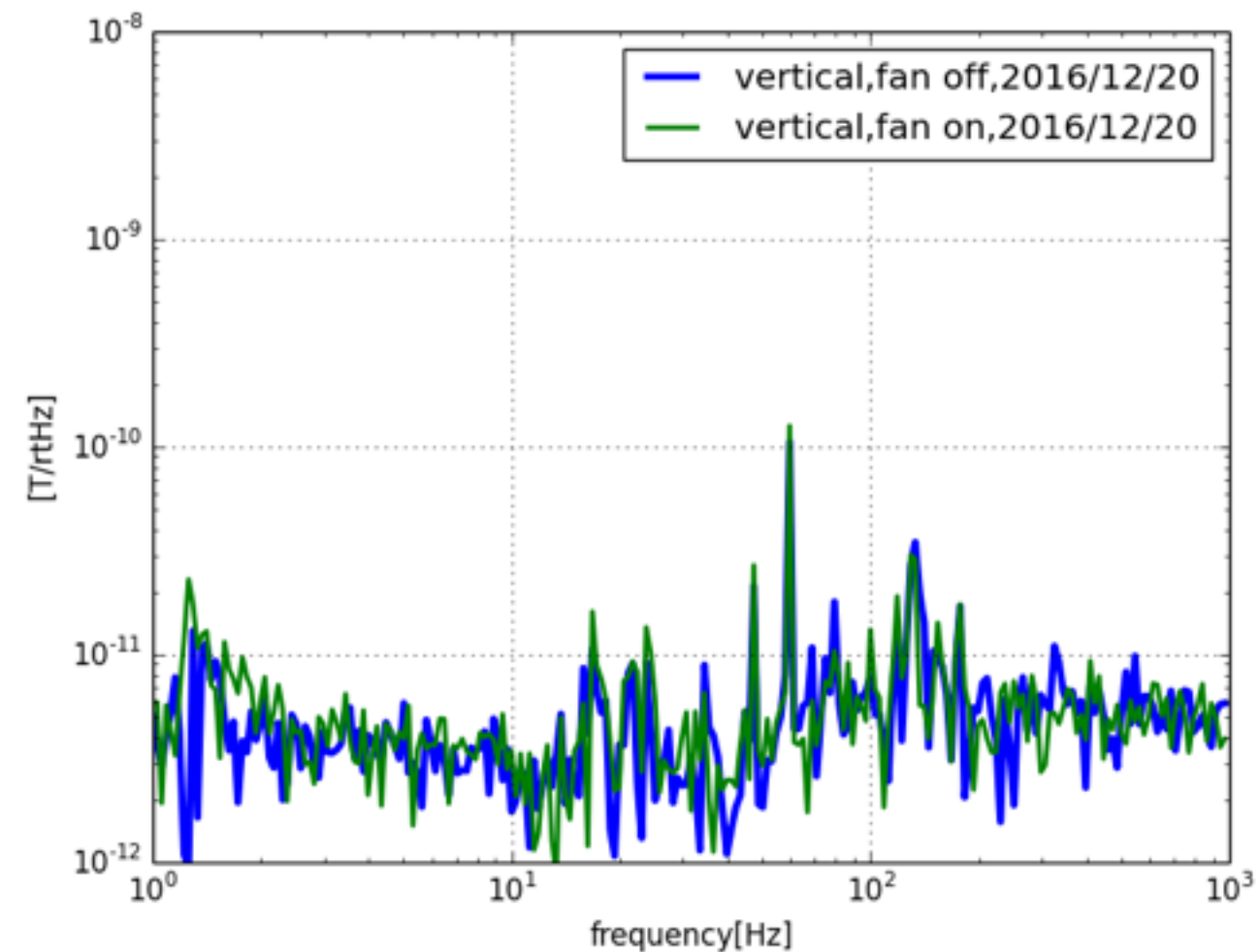
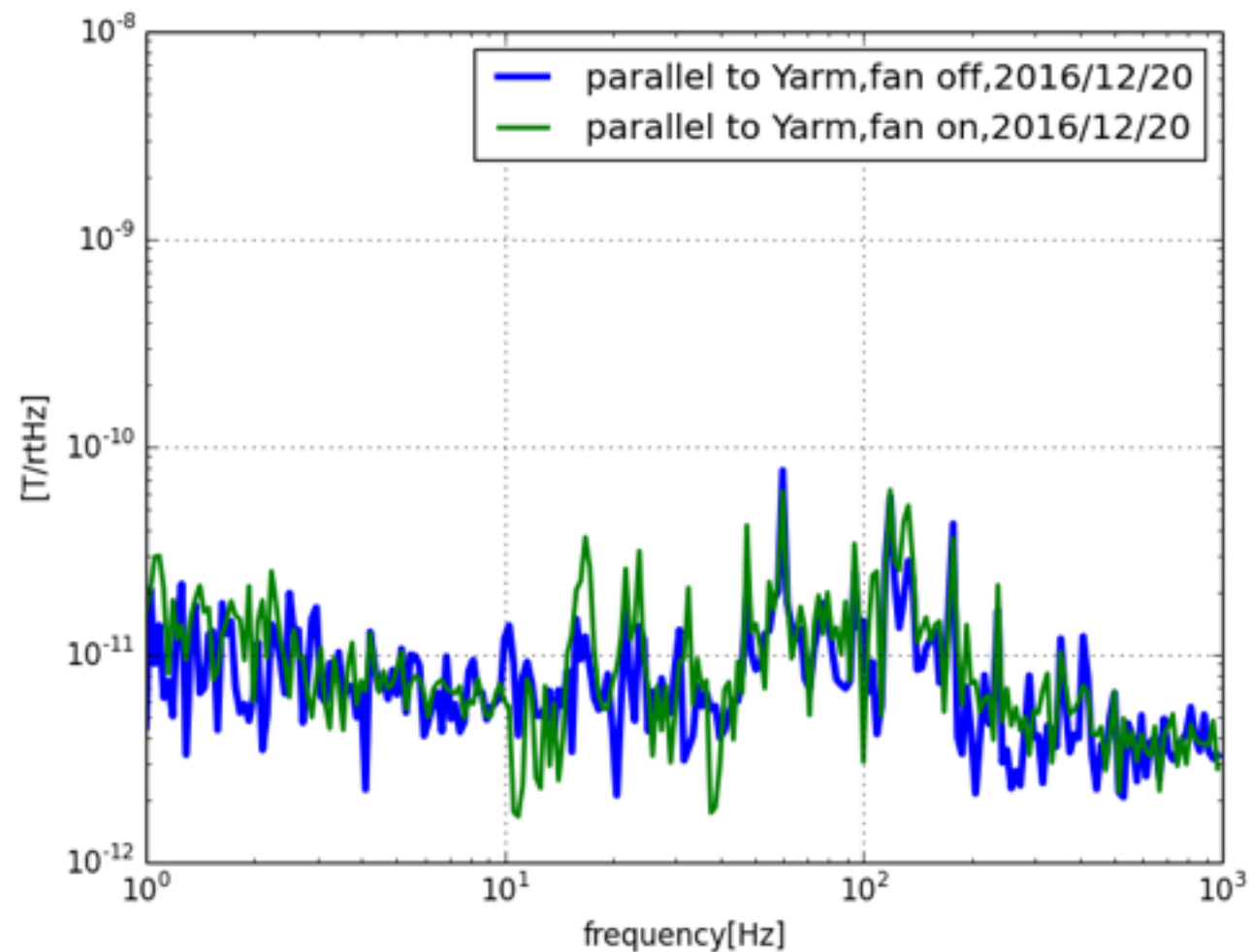
結果（エアドライヤー稼働/停止）

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。

Future work

- ・ 磁場に対する要求の計算を完成させる。
- ・ 磁場スペクトルの各ピークが、電気ノイズ起因か磁場起因かを確認する。
- ・ 測定した磁場変動が要求を満たしているかを確認する。
- ・ 磁場勾配を測定し、残り 5 つの要求を満たすか確認する。

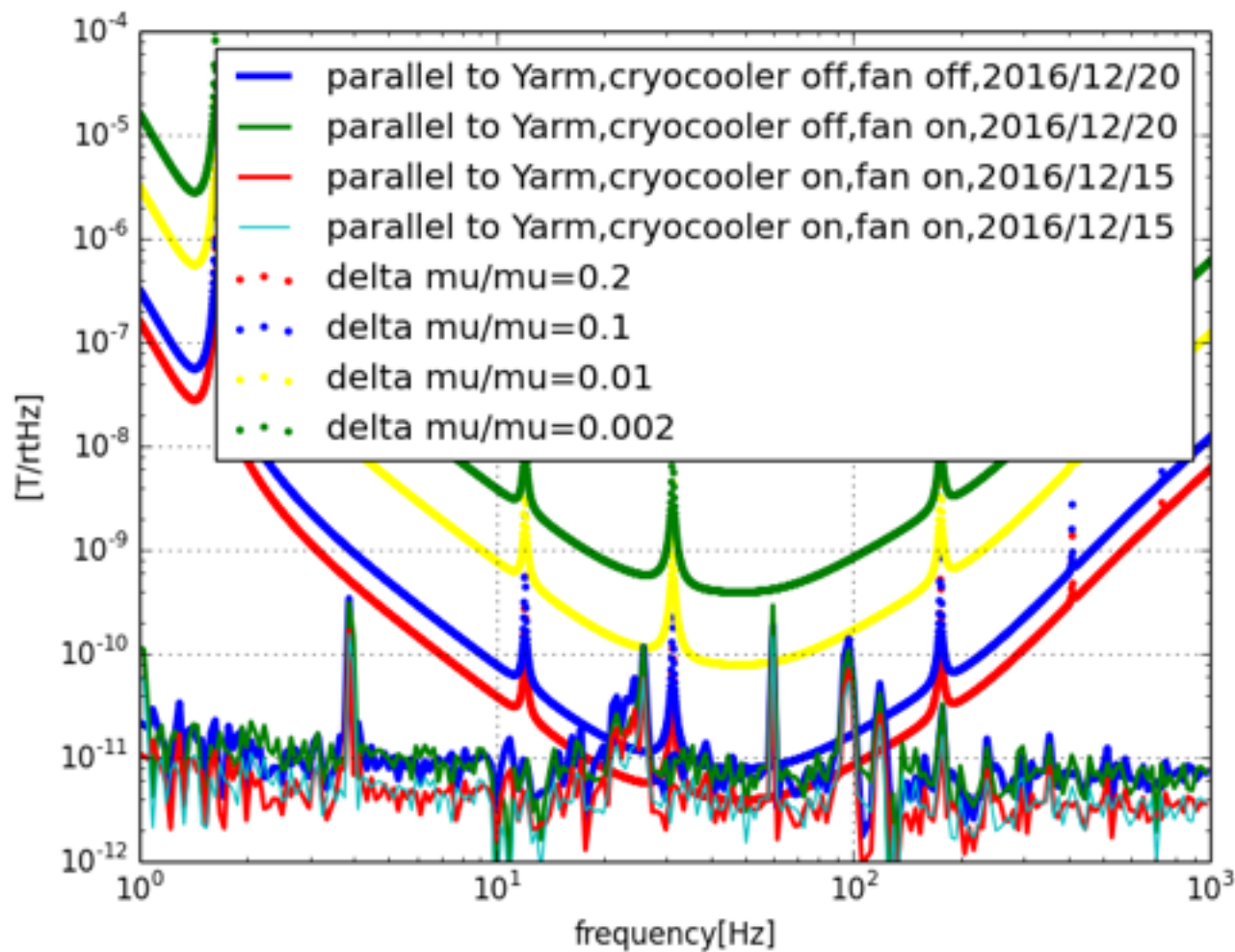
まとめ

- ・ 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。
- ・ 現在、磁場に対する要求を求めている。
- ・ 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。

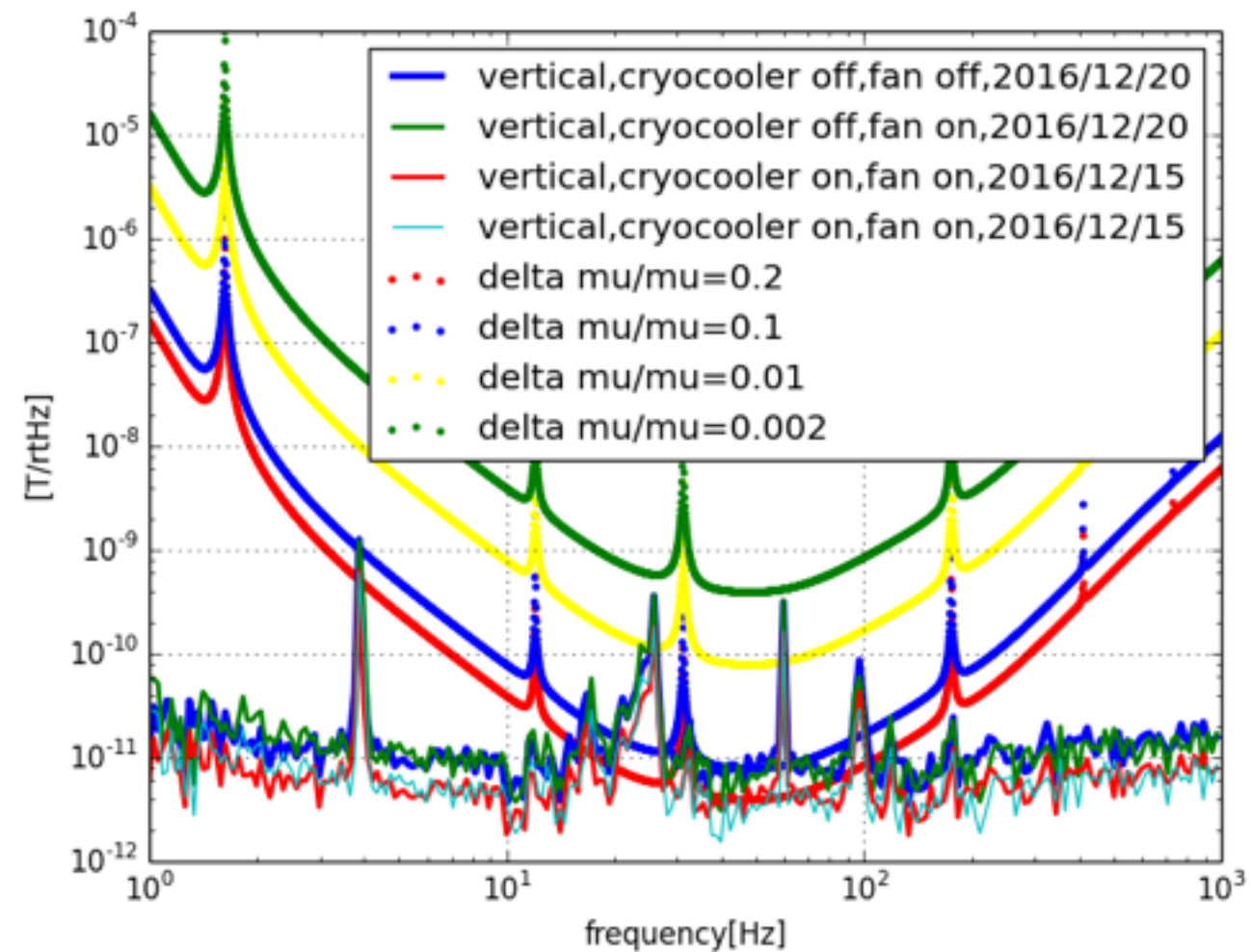
Thank you!

結果（要求との比較）

Yarm方向成分



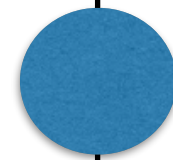
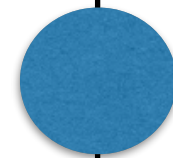
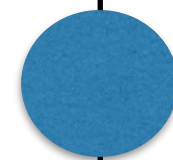
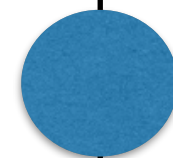
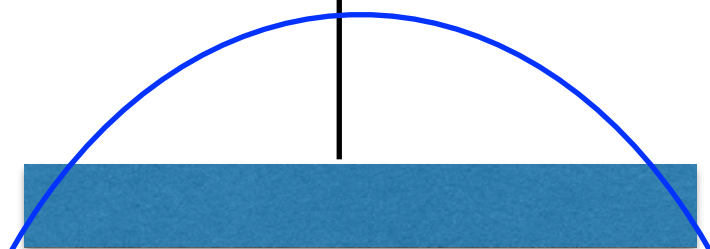
鉛直成分



マグネットの磁気双極子モーメントのばらつきが0.2%以下であれば要求を満たす。

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

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

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

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

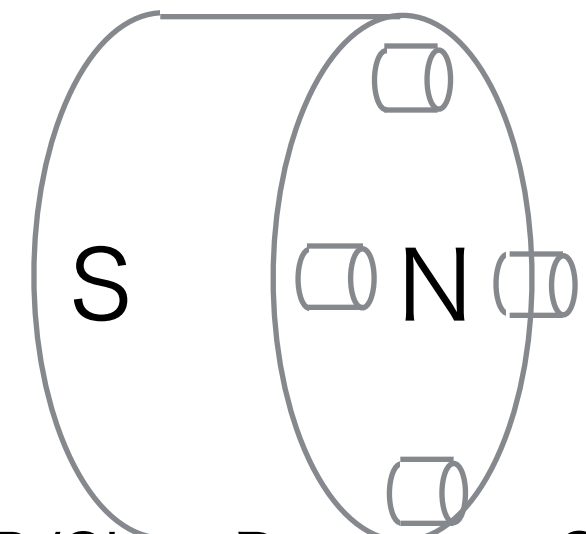
μ_{mir} (磁気双極子モーメント) = $\chi_{mir} \cdot V_{mir} \cdot B$ (Wb · m)

χ_{mir} (磁化) = 3.15×10^{-6}

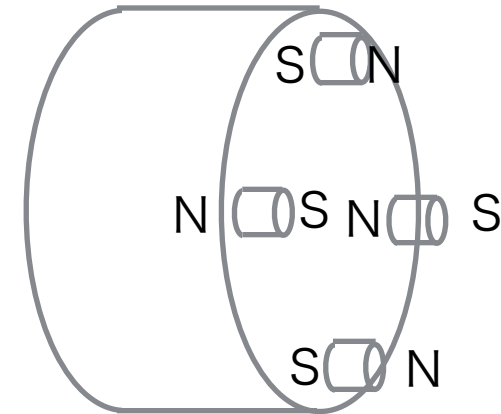
V_{mir} (体積) = 0.0057 (m³)

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

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



(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 (m)

δx_{mag} (位置ばらつき) = 0.001 (m)

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

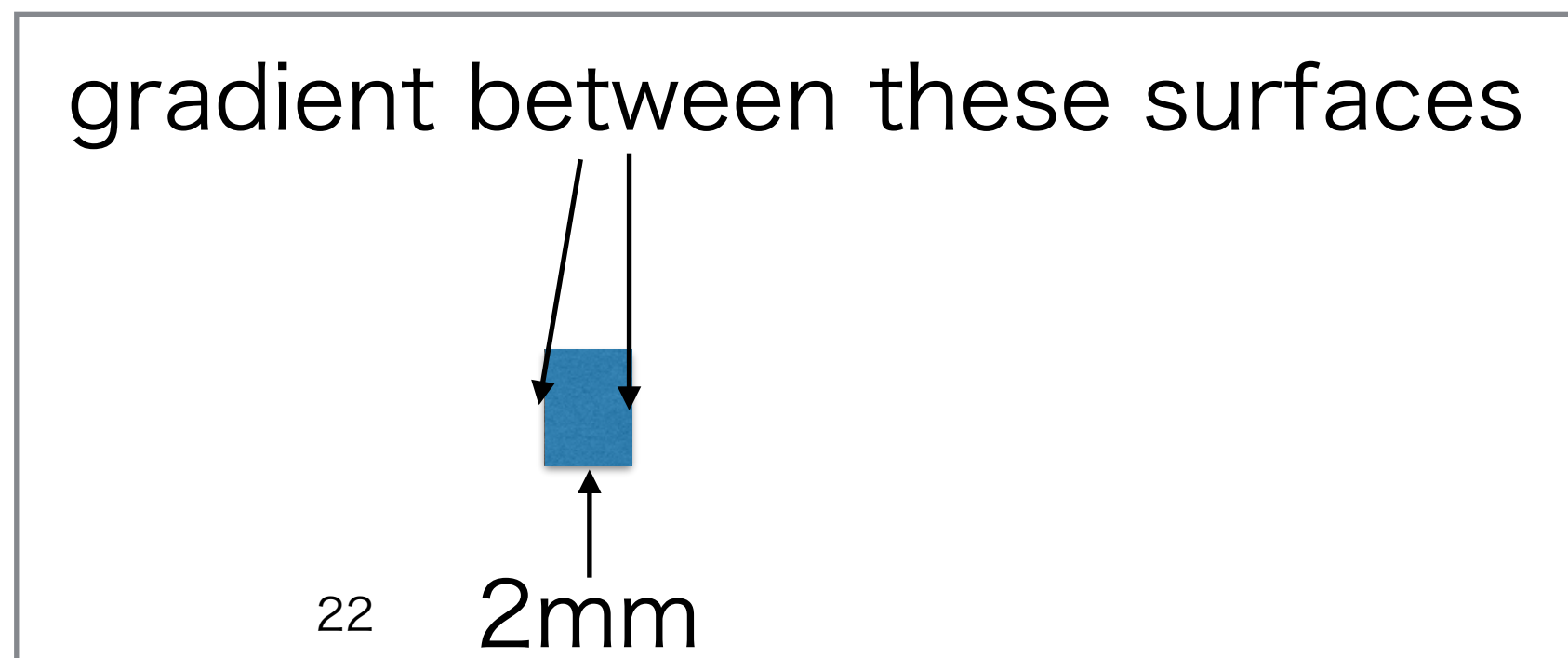
$$N_{2-tot} = \sum_{i=1}^4 \mu_{mag,i} \cdot \nabla H_i \cdot x_{mag,i} = \frac{2}{\mu_0} \delta \mu_{mag} \cdot \nabla B \cdot x_{mag} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \frac{\delta (\nabla B)}{\nabla B} \cdot \nabla B \cdot x_{mag} + \frac{2}{\mu_0} \mu_{mag} \cdot \nabla B \cdot \delta x_{mag}$$



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

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

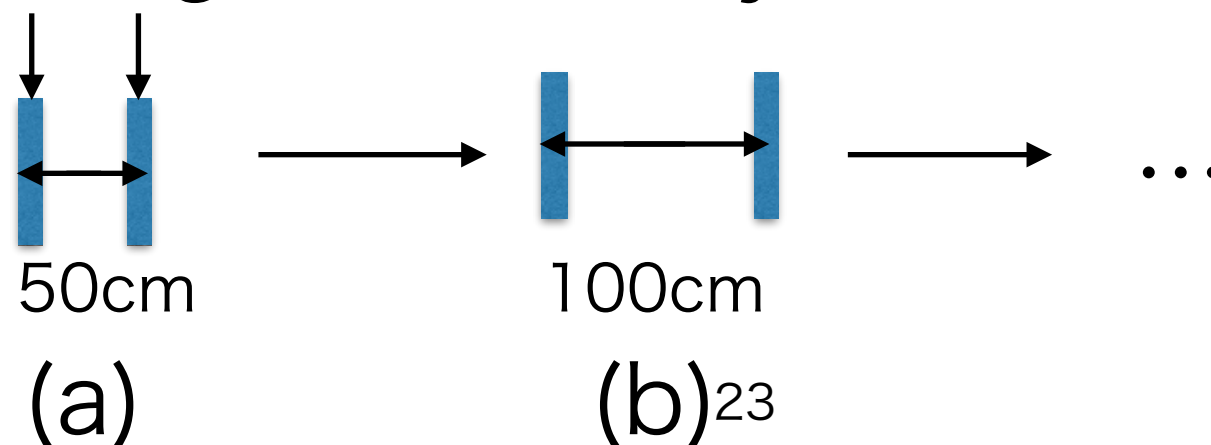
First I will put two flux meters like (a) below and measure the gradient.

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

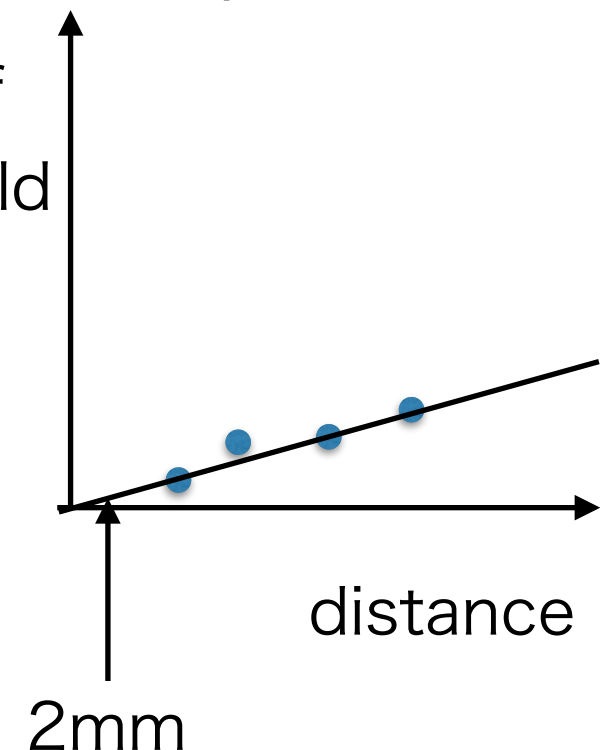
Then I will know how the gradient changes depending on the distance.

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

flux meters (high-sensitivity MFS-06)



gradient of
magnetic field



磁石にかかる力由来の雑音

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

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

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

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

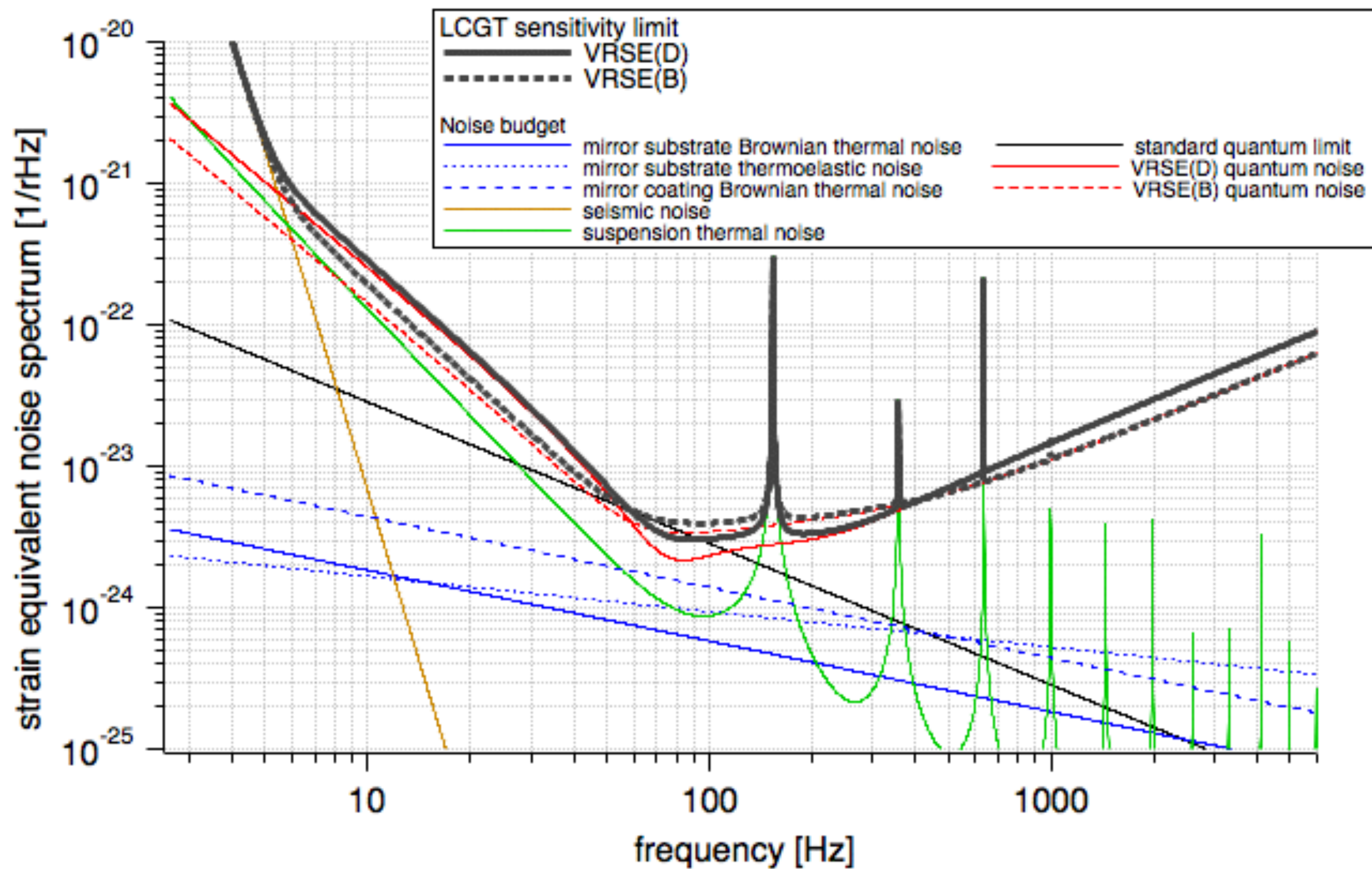
$$x_{mag,i} = \pm \mu_{mag} + \delta x_{mag,i}$$

磁石にかかるトルク由来の雑音

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

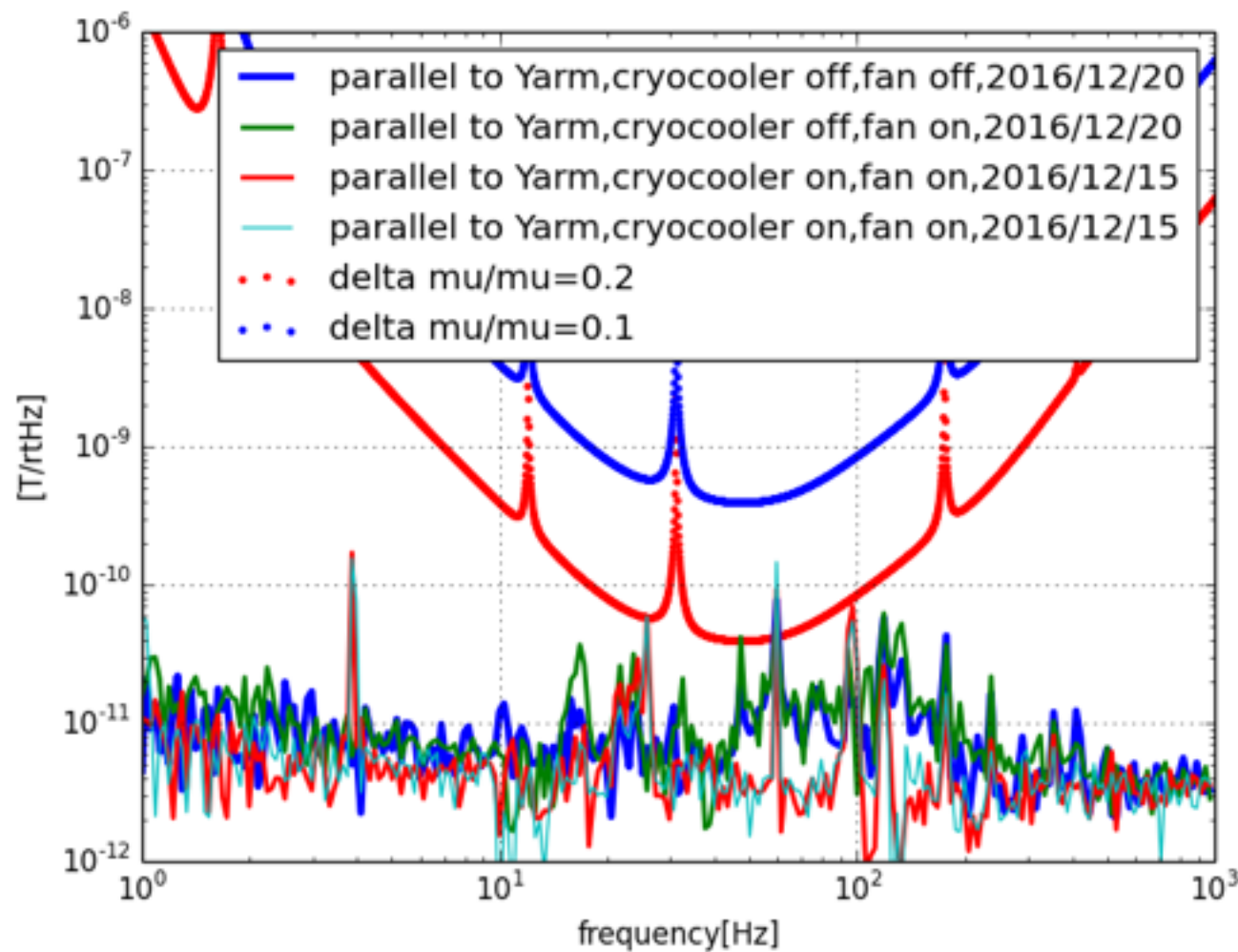
$$F_i = (\mu + \delta \mu_i) \cdot 2(H + \delta H_i) \cdot (y + \delta y_i) / R_{mir}$$

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

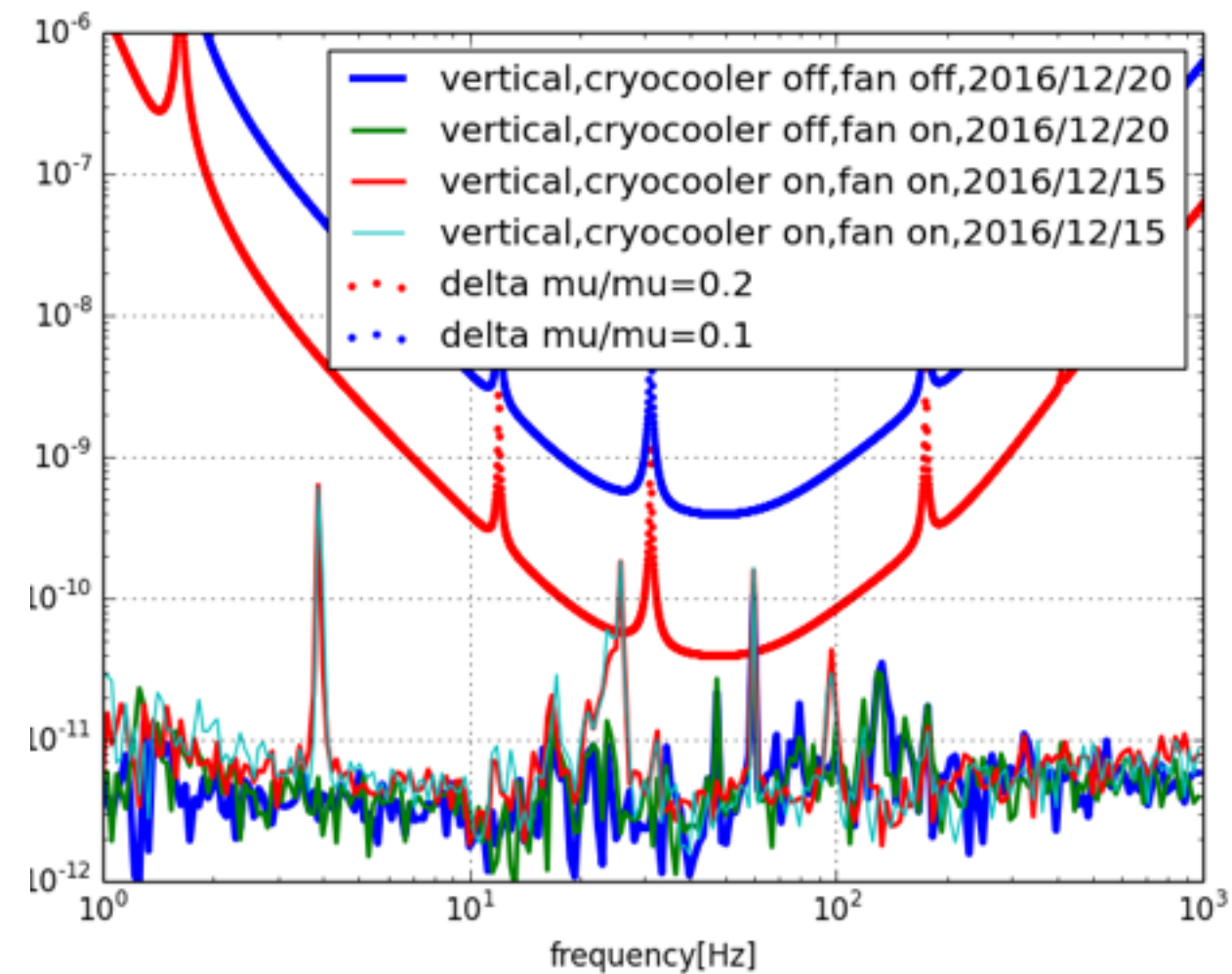


結果（要求との比較）

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。