

地下実験室における 地面振動重力勾配雑音の計算

国立天文台 鷲見貴生

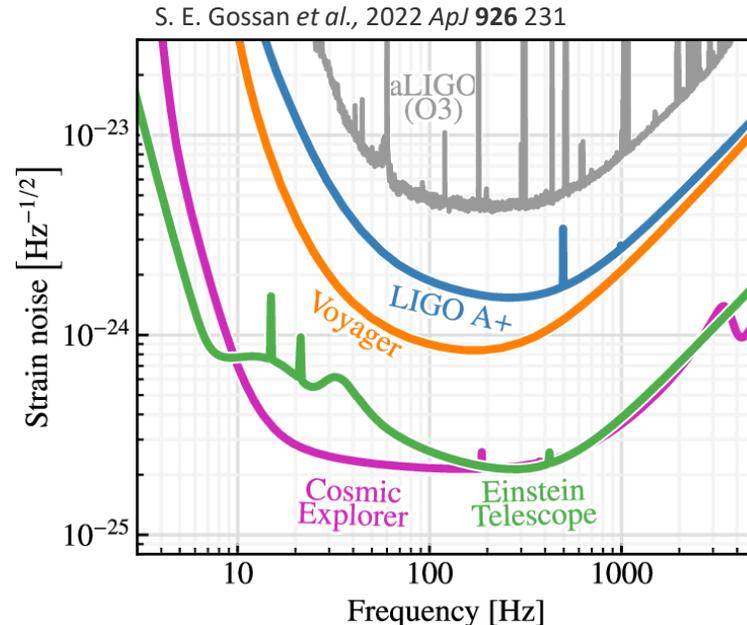
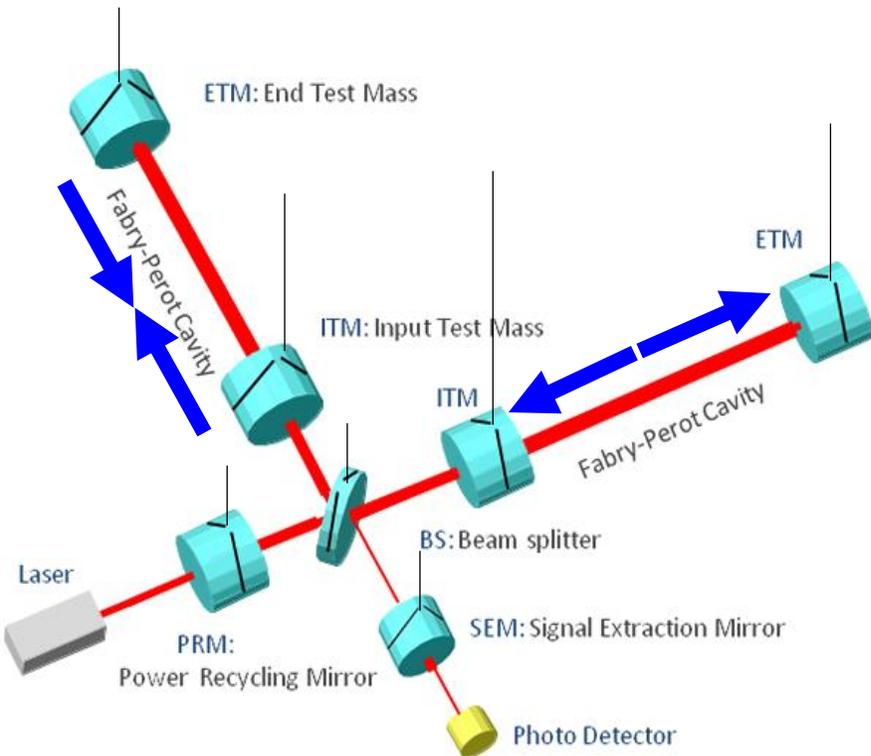
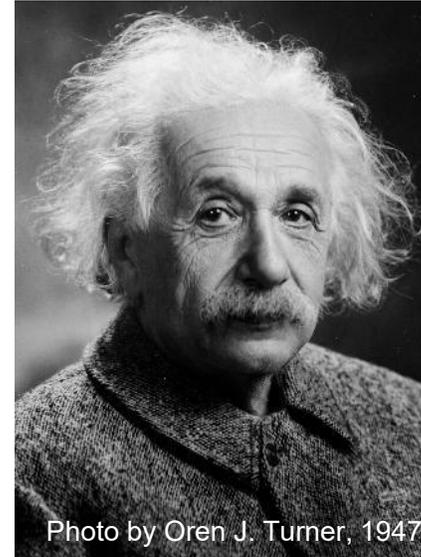
第2回 学術変革「地下稀事象」若手研究会@神戸大学, 2026-03-05

重力波とレーザー干渉計型重力波検出器

【重力波, Gravitational Waves】

アインシュタインの一般相対論で記述される、
時空の歪みが伝搬する波動

- 縦波のテンソル波 (潮汐歪み変位)
- ブラックホールや中性子星の連星、超新星爆発、初期宇宙の真空相転移などで発生する



【レーザー干渉計型重力波】

- LIGO @ 米Hanford/Livingston
- Virgo @ 伊Pisa
- KAGRA @ 神岡
- Future: CE (米), ET (欧)
- 観測周波数帯: Hz ~ kHz
- Strain $\sim 10^{-(23-25)} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz

KAGRA

神岡に建設された重力波検出器

- 3 km アームx2, L型
- 地下施設 (200~450m)
- 低温サファイア鏡 (20K, 23kg)

国際共同観測

- ✓ O3GK with GEO600 in April 2020, 2 weeks (BNS range ~0.7 Mpc)
- ✓ O4a with LV in May 2023, 4 weeks (BNS range ~ 1.3 Mpc)
- ✓ O4c with LV from June 2025 (BNS range ~ 7 Mpc)

昨日(3/4), 5年に一度の停電・電機設備点検がありました。

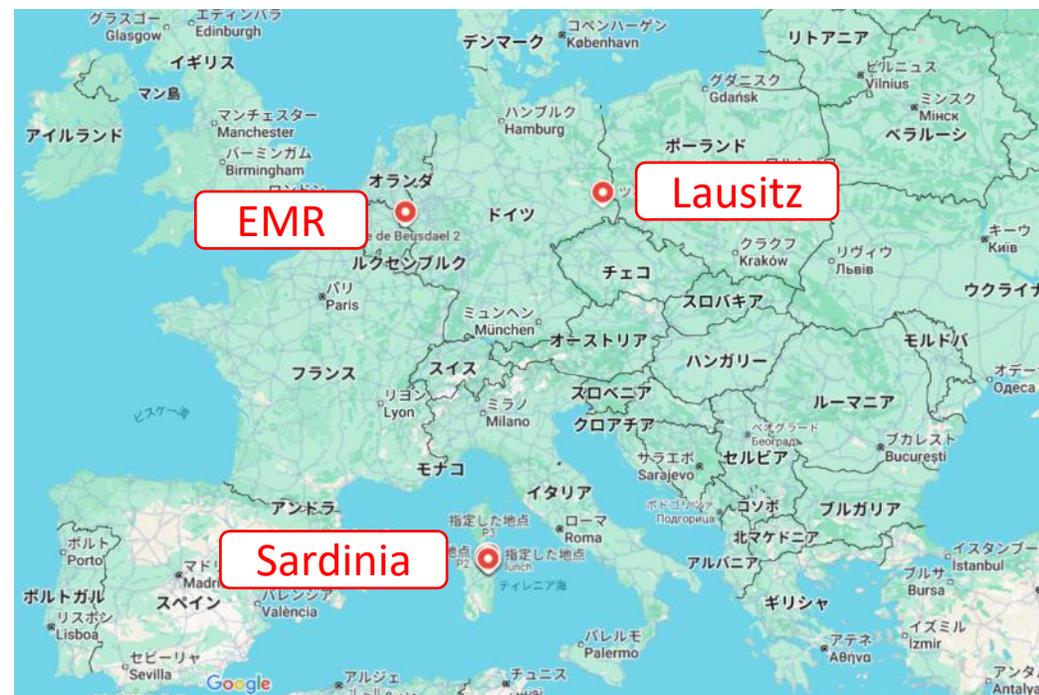
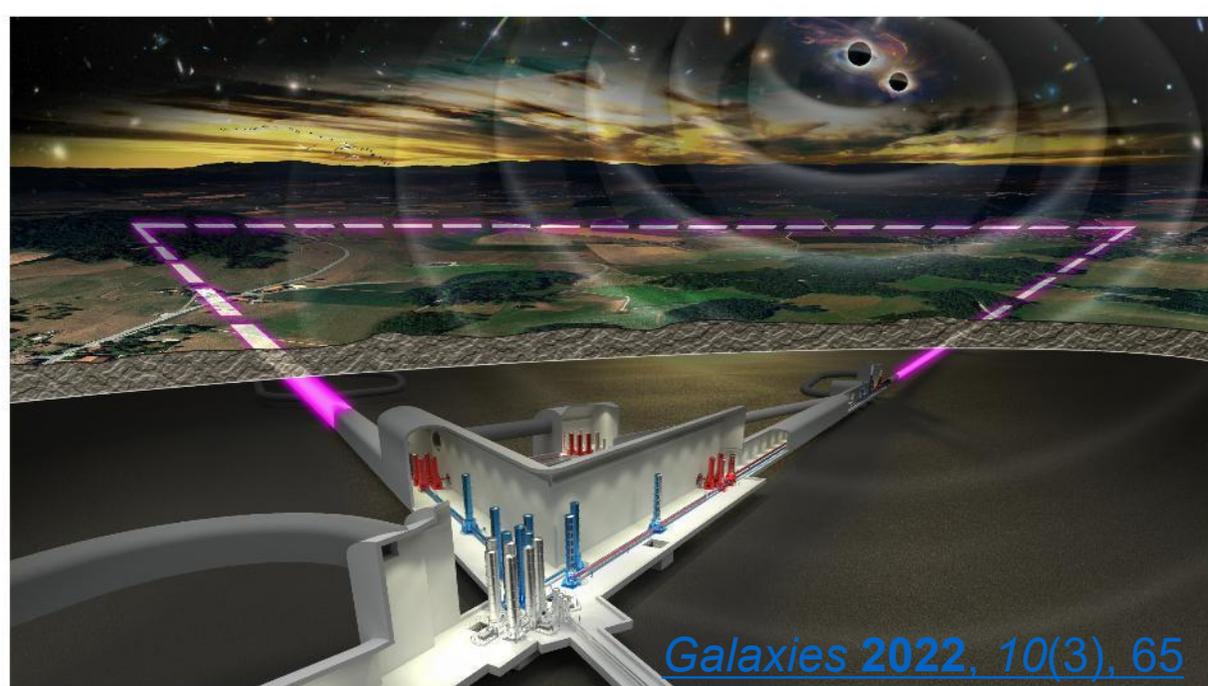
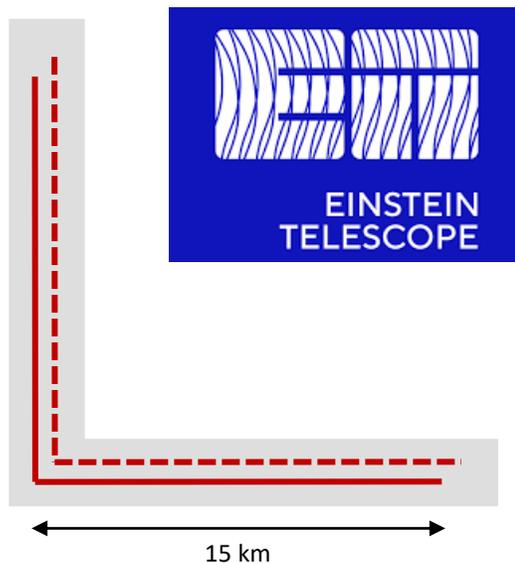
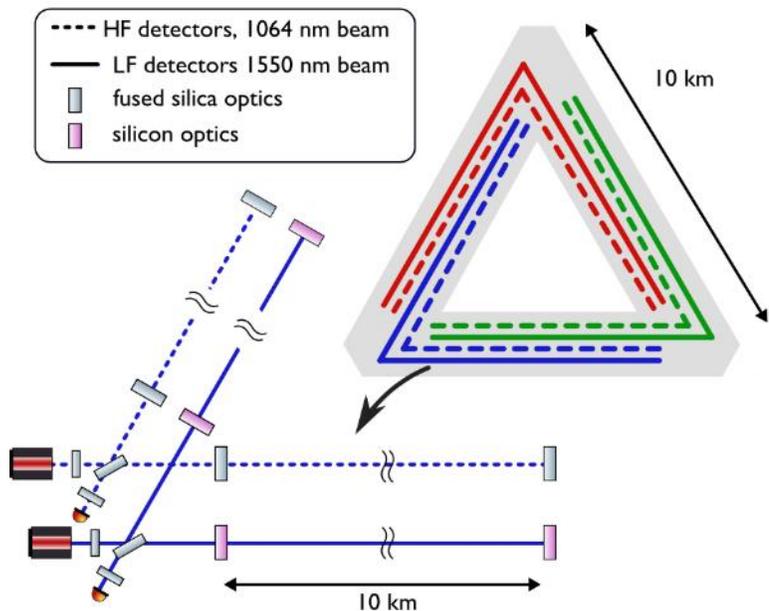


Einstein Telescope (ET)

欧州の次世代重力波検出器計画
(2030年代中盤から運用予定).

- 建設候補地: Sardinia/EMR/Lausitz
- 30 km の地下トンネル
 - 基線長10 kmの Δ 型 or
 - 基線長15 kmのL型 or
- 低/高周波用の干渉計を組み合わせ

<https://www.gwoptics.org/research/et/layout/>



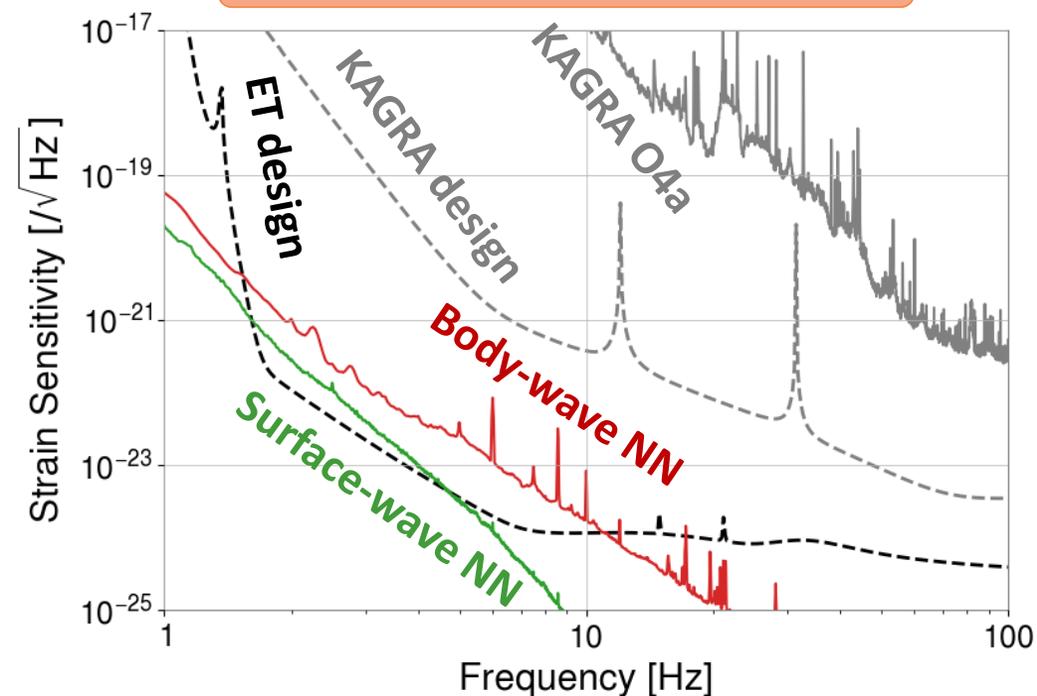
地上/地下GW検出器における重力勾配雑音

周辺の物体の運動や密度変化によるニュートン重力の変動で鏡が揺らされる雑音
Newtonian Noise (NN) や Gravity Gradient Noise (GGN) と呼ばれる

今日の
トピック

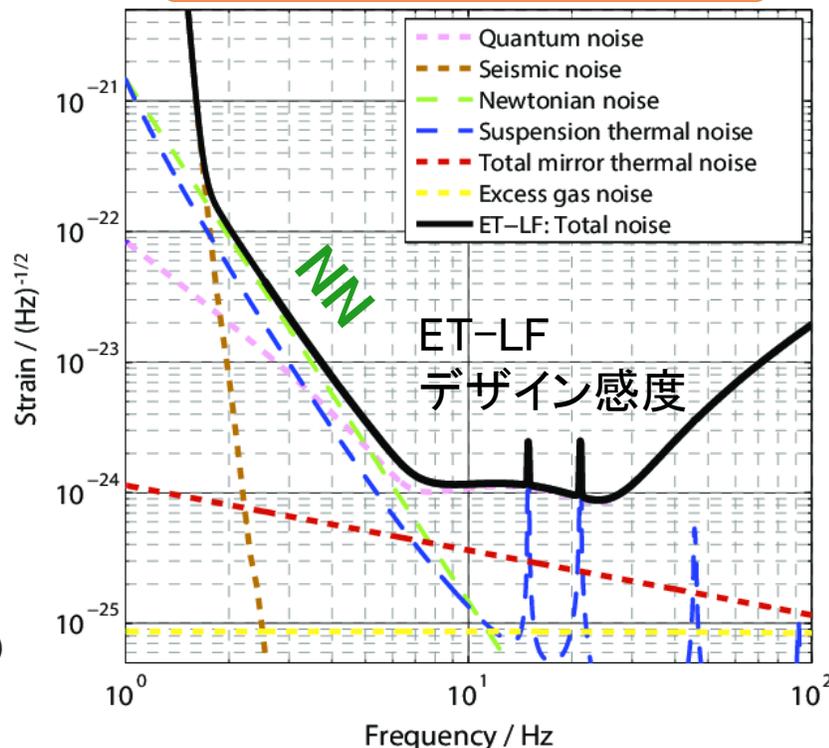
- 地面振動、水流、大気、機械や構造物の振動などで生じる
- 防振や遮蔽をすることができない(うまくモデリングすれば差し引けるかもしれない)
- 特にETなどの次世代GW検出器では、低周波感度を制限すると想定されている

KAGRAの地面振動NN見積もり

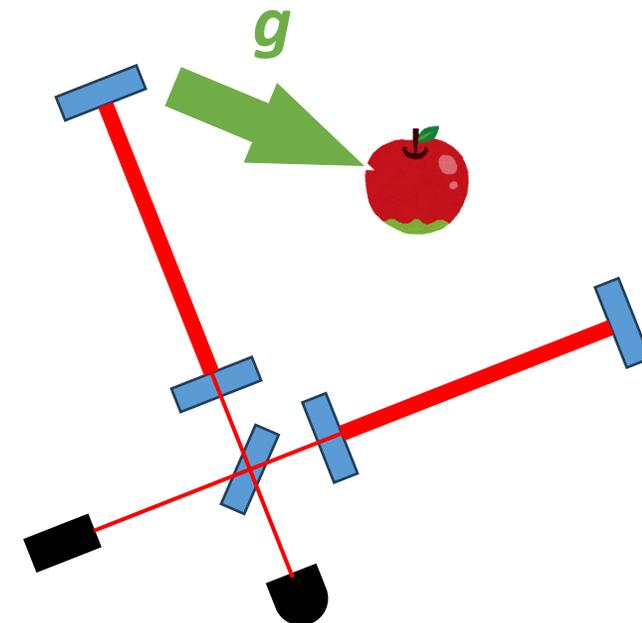


F. Badaracco *et al.*, PRD 104, 042006 (2021)

ETの地面振動NN見積もり



X. Korovesi *et al.*, PRD 108, 123009 (2023)



重いDM探索に使えるかも
(→本公募研究課題)

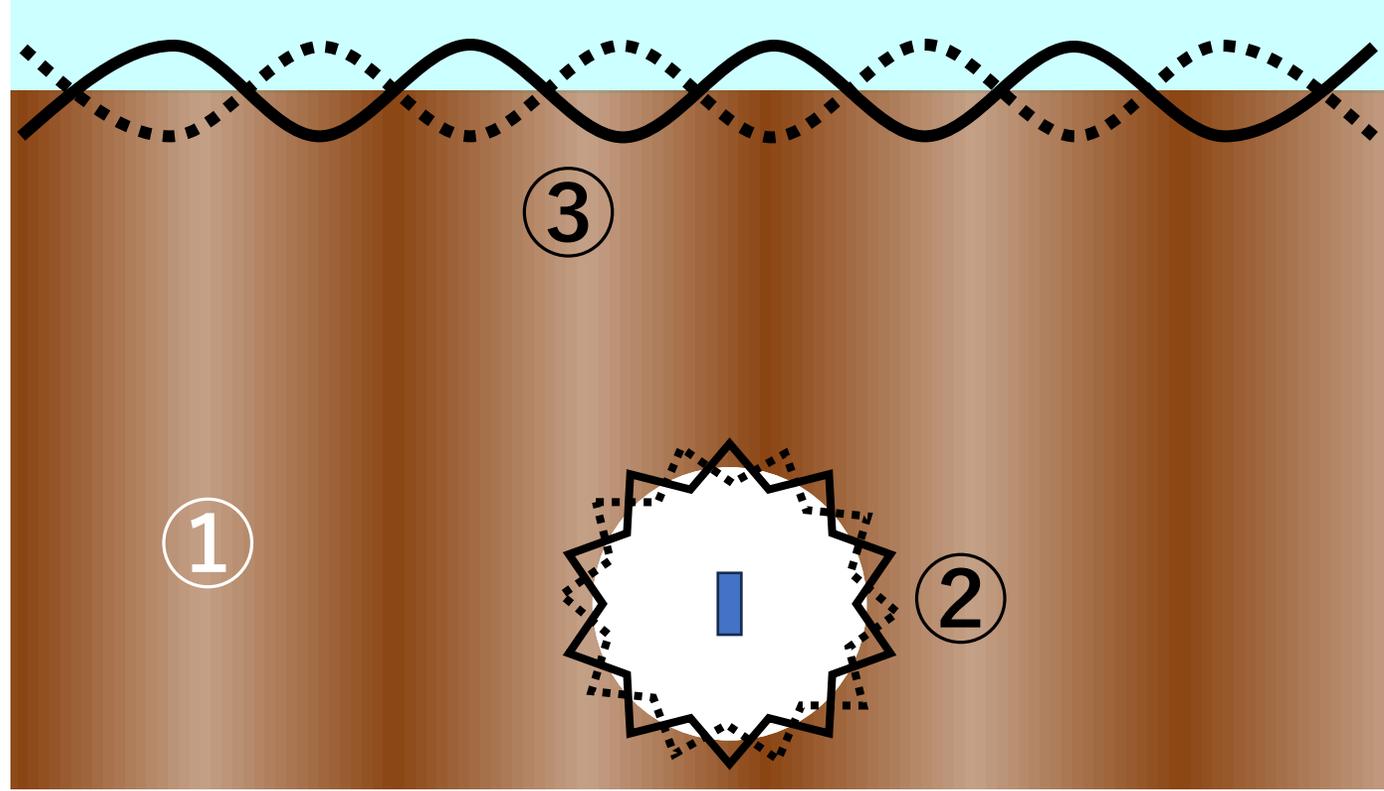
Seismic NN (概要)

◆ 地震波の種類:

- 実体波 (P波, S波)
- 表面波 (Rayleigh波, Love波)

◆ NN結合項:

- ① バルク項
- ② 空洞壁面項
- ③ 地表面項



密度摂動	$\delta\rho(\mathbf{r}, t) = -\nabla \cdot (\rho(\mathbf{r})\xi(\mathbf{r}, t))$
重力ポテンシャル摂動	$\delta\phi(\mathbf{r}, t) = -G \int d^3r' \frac{\delta\rho(\mathbf{r}', t)}{ \mathbf{r}' - \mathbf{r} }$
加速度摂動	$\delta\mathbf{a}(\mathbf{r}, t) = -\nabla(\delta\phi(\mathbf{r}, t))$
歪みニュートン雑音	$h_{\text{NN}}(t) = [(x_{\text{EX}}(t) - x_{\text{IX}}(t)) - (y_{\text{EY}}(t) - y_{\text{IY}}(t))]/L$

理論的定式化は [J. Harms \(2019\)](#) のレビューに基づく。(一部ノテーションを変更)

Seismic NN (バルク項)

- 一様な地盤密度 (ρ_0)
- 無限体積
- 散乱なし

$$\delta \mathbf{a}_{\text{bulk}}(\mathbf{r}, t) = G\rho_0 \int_V d^3 r' \frac{\nabla' \cdot \boldsymbol{\xi}(\mathbf{r}', t)}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} (\mathbf{r}' - \mathbf{r})$$

- 密度摂動を引き起こすのはP波のみ

$$\delta \tilde{\mathbf{a}}_{\text{bulk}}(\mathbf{r}, f) = 4\pi G\rho_0 \tilde{\boldsymbol{\xi}}_P(f) = 4\pi G\rho_0 \tilde{\xi}_P(f) \hat{\mathbf{k}}_P$$

$$\delta \mathbf{a} \parallel \boldsymbol{\xi}_P \parallel \mathbf{k}_P$$

$$S_{\delta a, \text{bulk}}(f) = (4\pi G\rho_0)^2 \langle |\hat{\mathbf{e}}_a \cdot \hat{\mathbf{k}}_P|^2 \rangle_{\mathbf{k}_P} S_{\boldsymbol{\xi}_P}(f)$$

特定方向の加速度パワー
スペクトル密度 $\hat{\mathbf{e}}_a$

= 1/3 (等方ランダムの場合)

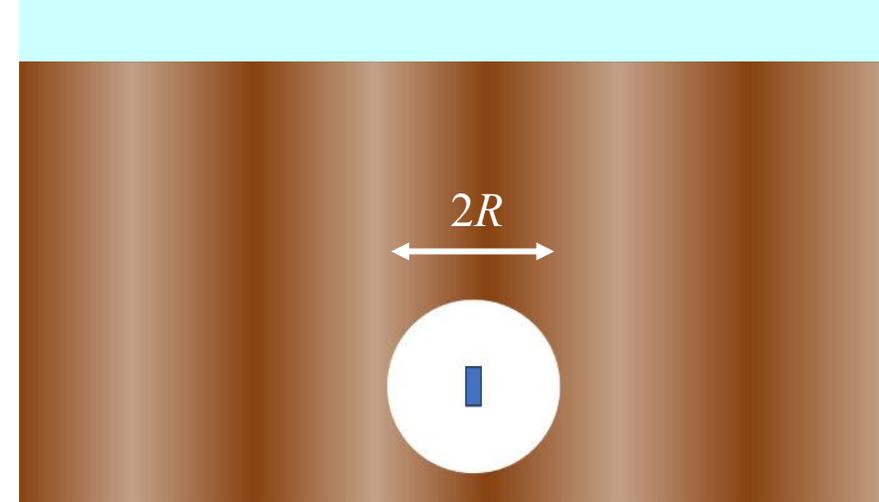
$$S_{\boldsymbol{\xi}_P}(f) = S_x(f) + S_y(f) + S_z(f) \sim 3S_z(f)$$

等方的な場合

- TM: 球形トンネル 中心 (半径 R)

$$\delta \tilde{\mathbf{a}}_{\text{bulk}}(\mathbf{r} = \mathbf{0}, f) = 4\pi G\rho_0 j_0(k_P R) \tilde{\boldsymbol{\xi}}_P(f)$$

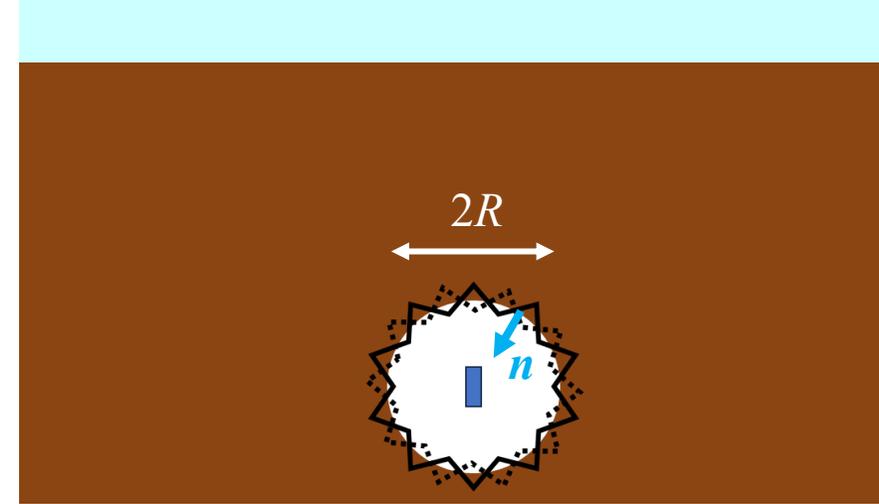
$$S_{\delta a, \text{bulk}}(f) = (4\pi G\rho_0 j_0(k_P R))^2 \langle |\hat{\mathbf{e}}_a \cdot \hat{\mathbf{k}}_P|^2 \rangle_{\mathbf{k}_P} S_{\boldsymbol{\xi}_P}(f)$$



Seismic NN (空洞壁面項)

- 一様な地盤密度 (ρ_0)
- 無限体積
- 散乱なし

$$\delta \mathbf{a}_{\text{surf}}(\mathbf{r}, t) = -G\rho_0 \int_S d^2r' \frac{\mathbf{n}(\mathbf{r}') \cdot \boldsymbol{\xi}(\mathbf{r}', t)}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} (\mathbf{r}' - \mathbf{r})$$



- TM: 球形トンネル 中心 (半径 R)

$$\delta \tilde{\mathbf{a}}_{\text{wall}}(\mathbf{r} = \mathbf{0}, f) = -4\pi G\rho_0 \left[\left(j_0(k_P R) - \frac{2j_1(k_P R)}{k_P R} \right) \tilde{\boldsymbol{\xi}}_P(f) + \frac{j_1(k_S R)}{k_S R} \tilde{\boldsymbol{\xi}}_S(f) \right]$$

$$S_{\delta a, \text{wall}, P}(f) = (4\pi G\rho_0)^2 \left(j_0(k_P R) - \frac{2j_1(k_P R)}{k_P R} \right)^2 \langle |\hat{\mathbf{e}}_a \cdot \hat{\mathbf{k}}_P|^2 \rangle_{\mathbf{k}_P} S_{\boldsymbol{\xi}_P}(f)$$

= 1/3 (等方ランダムの場合)

$$S_{\delta a, \text{wall}, S}(f) = (4\pi G\rho_0)^2 \left(\frac{j_1(k_S R)}{k_S R} \right)^2 \langle |\hat{\mathbf{e}}_a \cdot \hat{\mathbf{k}}_S|^2 \rangle_{\mathbf{k}_S} S_{\boldsymbol{\xi}_S}(f)$$

- ◆ バルク + 壁面 (= 実体波合計)

$$\delta \tilde{\mathbf{a}}_{\text{bulk+wall}}(\mathbf{r} = \mathbf{0}, f) = 4\pi G\rho_0 \left(\frac{2j_1(k_P R)}{k_P R} \tilde{\boldsymbol{\xi}}_P(f) - \frac{j_1(k_S R)}{k_S R} \tilde{\boldsymbol{\xi}}_S(f) \right)$$

$j_0(k_P R)$ の項は相殺

Seismic NN (地表面項)

- 一様な地盤密度 (ρ_0)
- 半無限体積
- 散乱なし

$$\delta \mathbf{a}_{\text{surf}}(\mathbf{r}, t) = -G\rho_0 \int_S d^2r' \frac{\mathbf{n}(\mathbf{r}') \cdot \boldsymbol{\xi}(\mathbf{r}', t)}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} (\mathbf{r}' - \mathbf{r})$$

- Rayleigh波
- 平坦な地表面, TMの深さ H

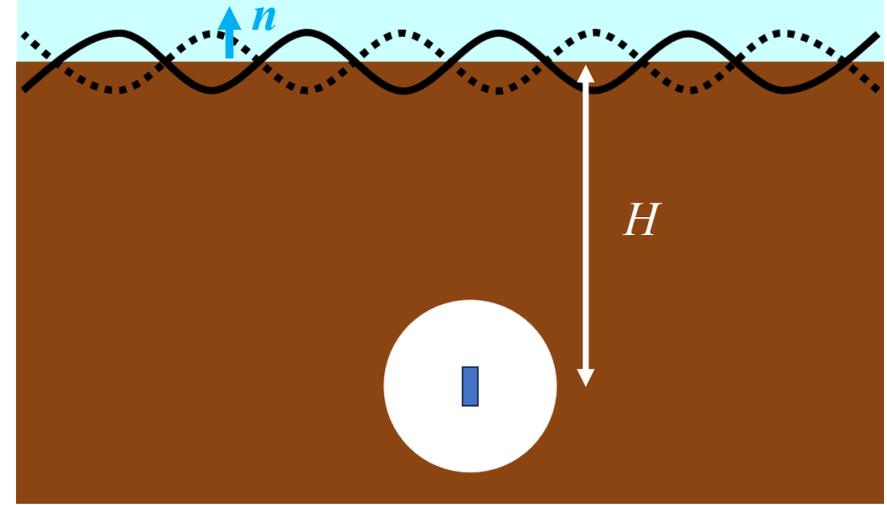
$$\delta \tilde{\mathbf{a}}_R(\mathbf{r}, f) = 2\pi G\rho_0 \gamma(\nu) e^{-k_R H(\mathbf{r})} \tilde{\xi}_{R,z}(f) \hat{\mathbf{k}}_R$$

$$S_{\delta a,R}(f) = (2\pi G\rho_0 \gamma(\nu) e^{-k_R H})^2 \hat{\mathbf{e}}_a^T \langle \hat{\mathbf{k}}_R \hat{\mathbf{k}}_R^T \rangle \hat{\mathbf{e}}_a S_z(f)$$

= 1/2 (水平方向)

$$\gamma(\nu) = \frac{k_R (1 - \zeta(k_R))}{q_{Pz} - k_R \zeta(k_R)}, \quad \zeta(k_R) = \frac{q_{Pz}}{q_{Sz}}$$

$$q_{Pz} = \sqrt{k_R^2 - k_P^2}, \quad q_{Sz} = \sqrt{k_R^2 - k_S^2}$$



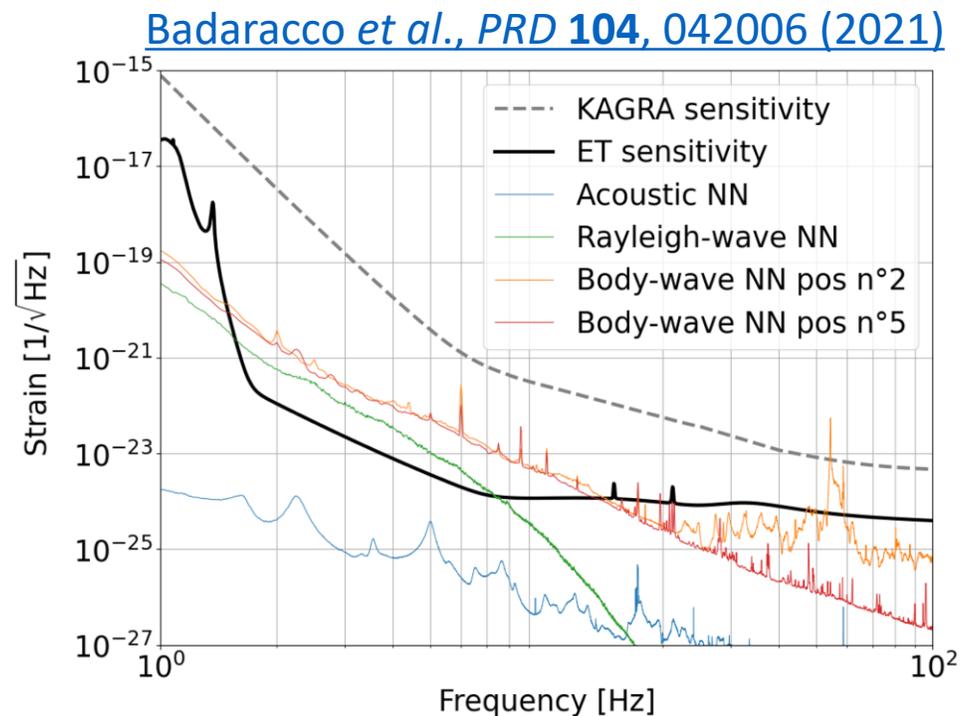
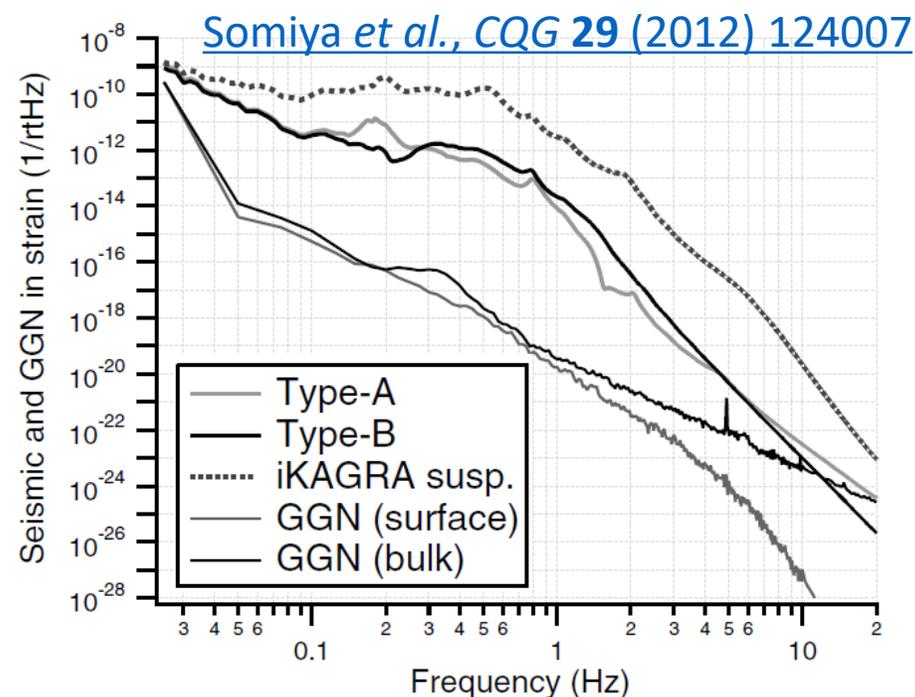
典型的には、 $\nu \sim 0.25-0.30$
 $\gamma(\nu) \sim 0.8-1.0$

出版済のKAGRAのSeismic NN評価

これまでに独立した2つの評価がある。

- 他の文献はいずれかの引用。
- CQG 2012では計算の詳細が示されていない。

	Somiya+, CQG (2012)	Badaracco+, PRD (2021)
地震動スペクトル	@CLIO	KAGRA X-arm (Body) Hi-net GIFH10 (Rayleigh)
地盤密度	?	3000 kg/m ³
Rayleigh波速度	?	3.2 km/s (measured)
$\gamma(\nu)$?	0.8
トンネル深さ	?	200 m

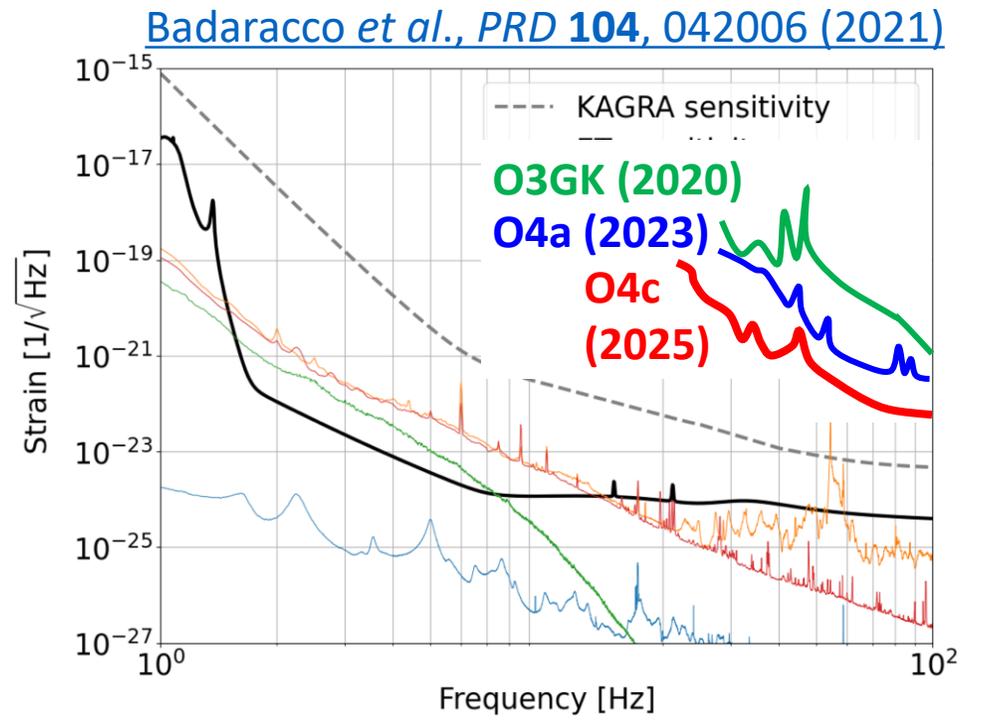
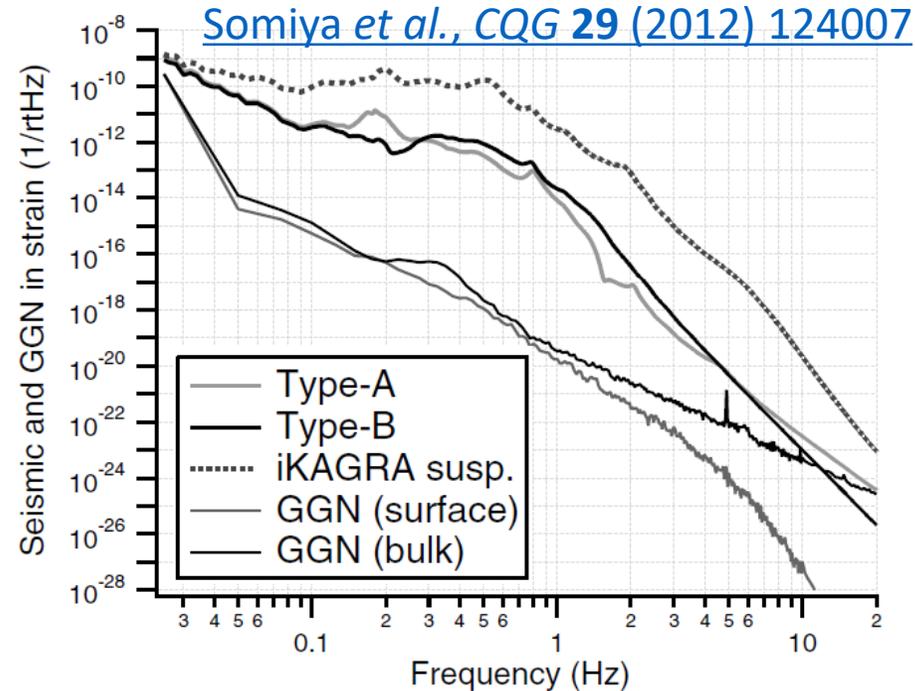


出版済のKAGRAのSeismic NN評価

これまでに独立した2つの評価がある。

- 他の文献はいずれかの引用。
- CQG 2012では計算の詳細が示されていない。

	Somiya+, CQG (2012)	Badaracco+, PRD (2021)
地震動スペクトル	@CLIO	KAGRA X-arm (Body) Hi-net GIFH10 (Rayleigh)
地盤密度	?	3000 kg/m ³
Rayleigh波速度	?	3.2 km/s (measured)
$\gamma(\nu)$?	0.8
トンネル深さ	?	200 m



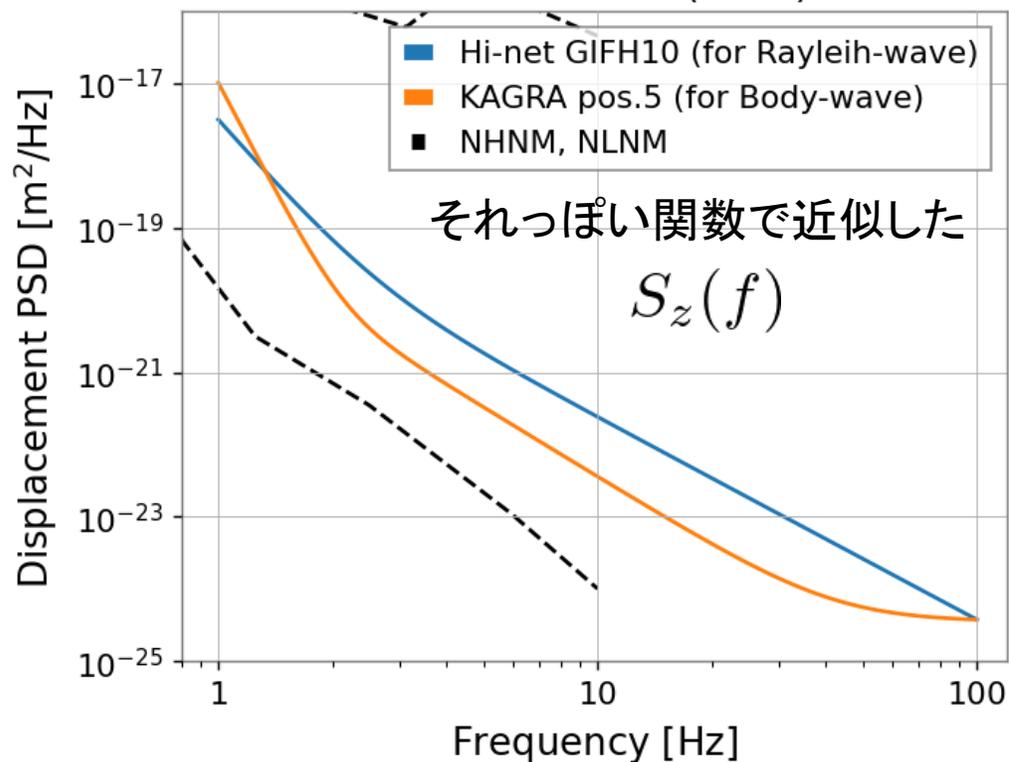
Rayleigh波/P波 NN の解析的公式

$$S_{\delta a,R}(f) = (2\pi G\rho_0 \gamma(\nu) e^{-k_R H})^2 \frac{1}{2} S_z(f), \quad \gamma(\nu) = 0.8, H = 200\text{m}$$

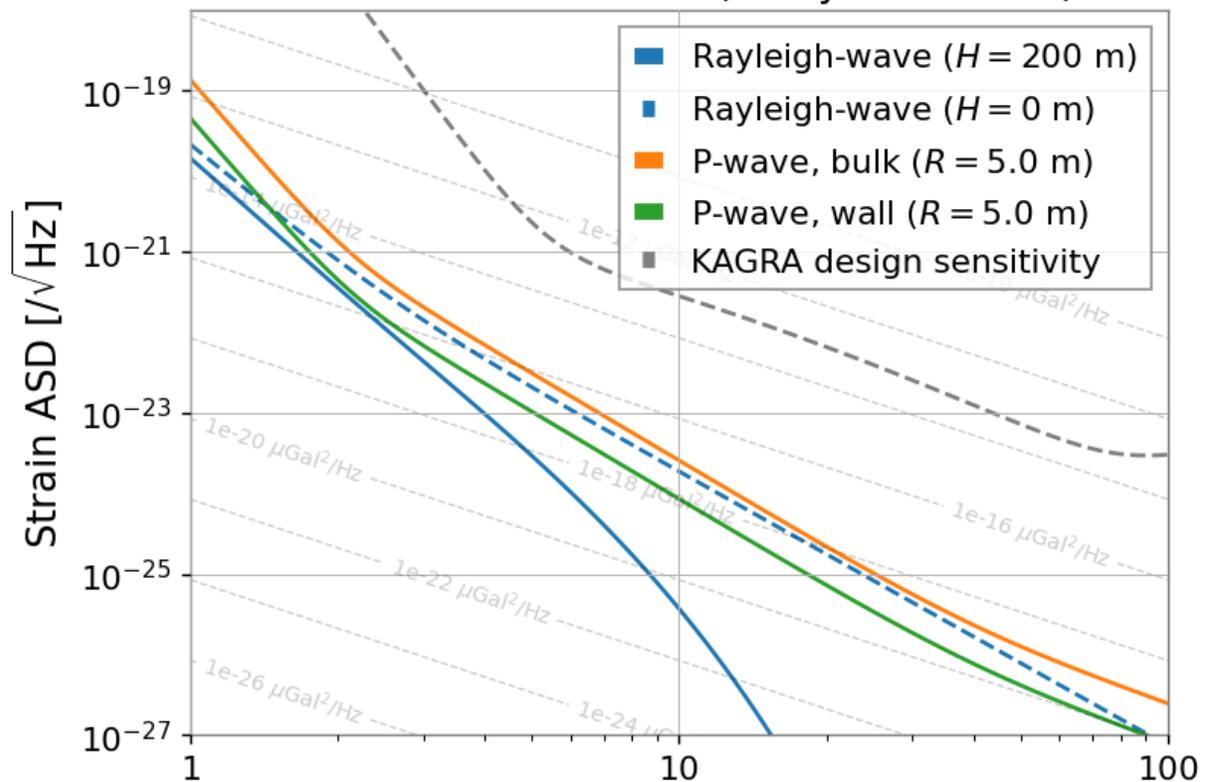
$$S_{\delta a,\text{bulk}}(f) = (4\pi G\rho_0 j_0(k_R P))^2 S_z(f)$$

$$S_{\delta a,\text{wall}}(f) = (4\pi G\rho_0)^2 \left(j_0(k_P R) - \frac{2j_1(k_P R)}{k_P R} \right)^2 S_z(f) \quad \sqrt{S_h} = \frac{\sqrt{4S_{\delta a}}}{(2\pi f)^2 L}$$

approximated seismic spectra
for Badaracco+ (2021)



Seismic NN at KAGRA (Analytic Formula)

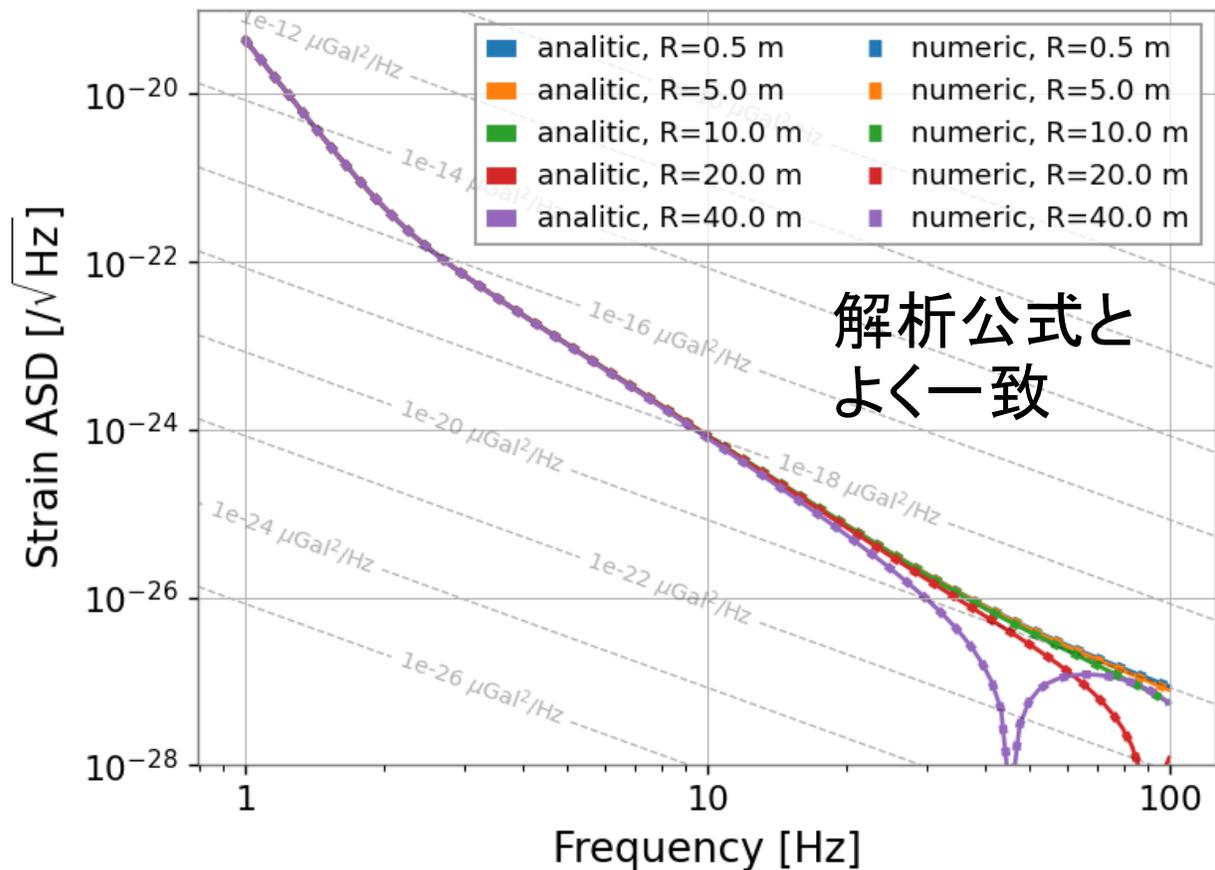
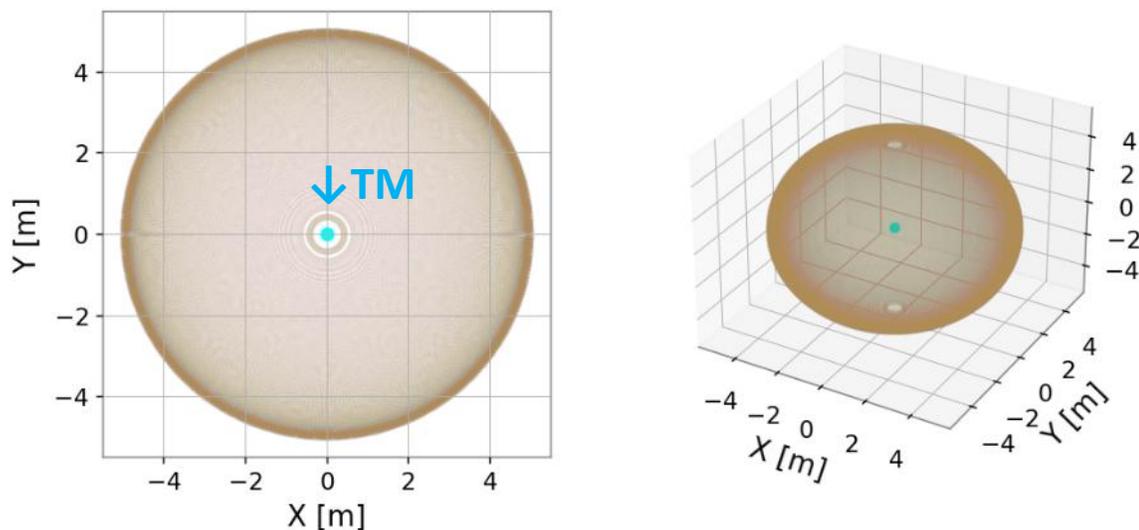


空洞壁面NNの数値積分

より現実的な形状を評価するため、数値積分プログラムを開発中。

$$S_{\delta a, \text{surf}}(\mathbf{r}, f) = \frac{(4\pi G\rho_0)^2}{\sum_k w_k} \sum_k w_k \left| \sum_p \frac{(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}) \cdot \hat{\mathbf{e}}_a}{|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}|^3} (\mathbf{n}_p \cdot \hat{\mathbf{k}}) e^{i\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_p - \mathbf{r})} \Delta S_p \right|^2 \cdot 3S_z(f)$$

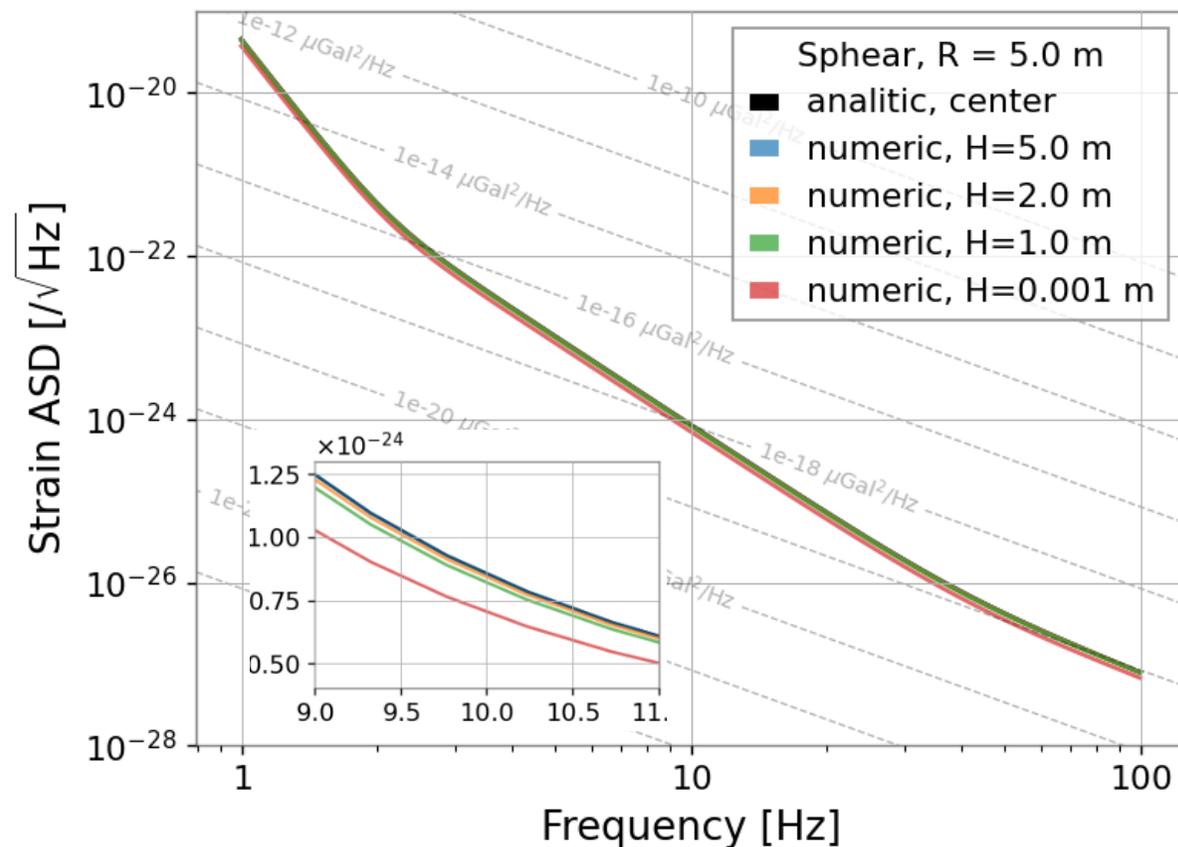
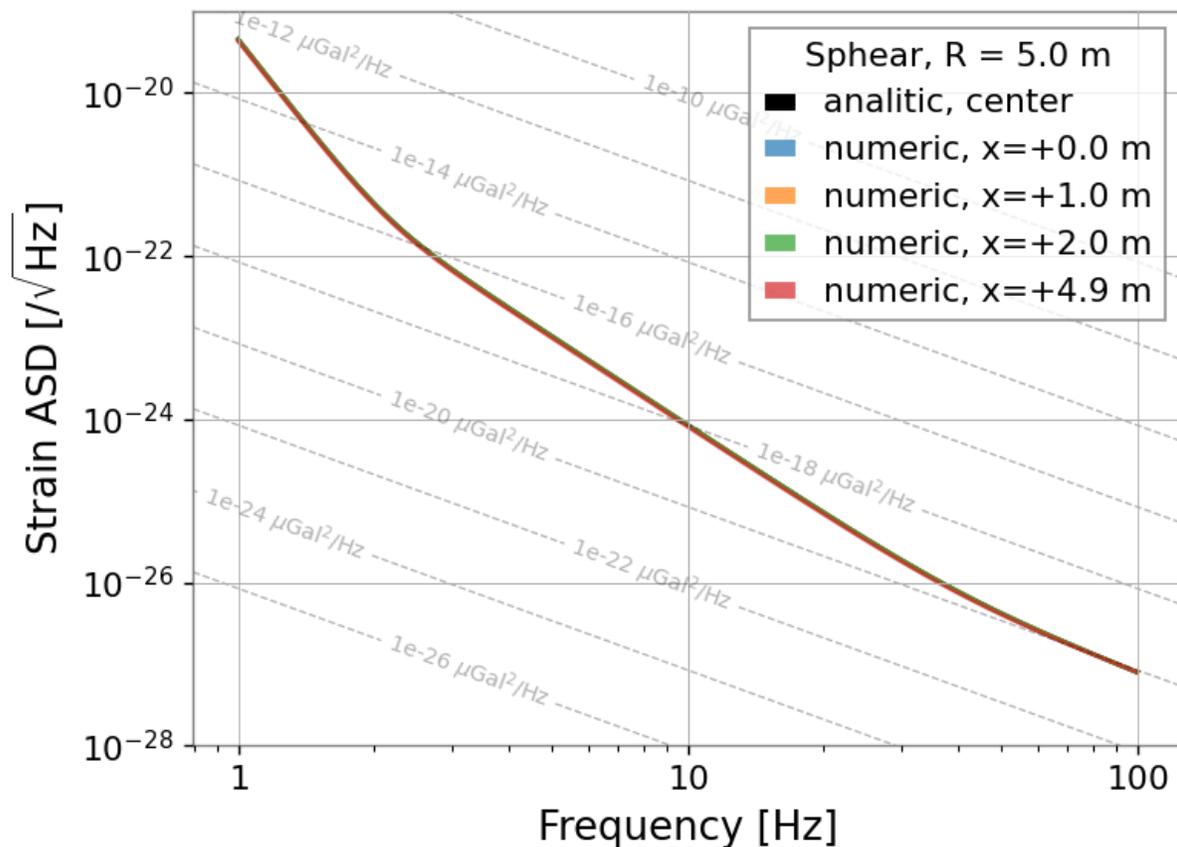
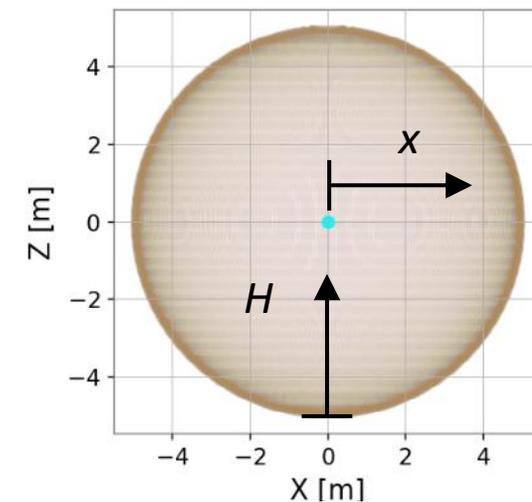
- ✓ Pythonコード (GWpyベース)
- ✓ 等方的な入射方向としてLebedev平均
- ✓ 計算の高速化: Numba jit + prange
- ✓ メモリ節約: バッチ処理 (周波数), チャンク処理 (位置)
- ✓ 可視化



空洞壁面NNの数値積分

TMの位置変更は容易に行える。

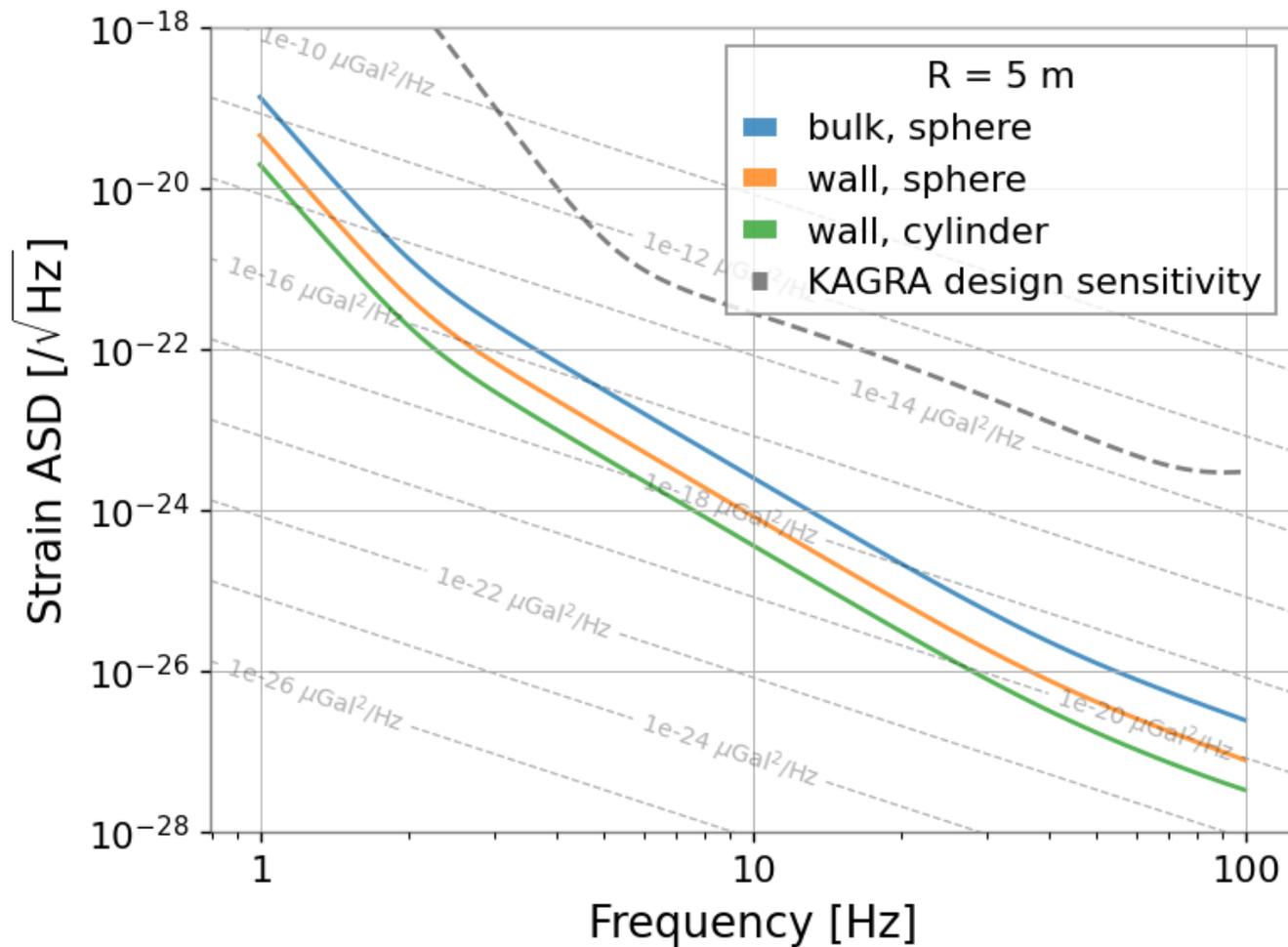
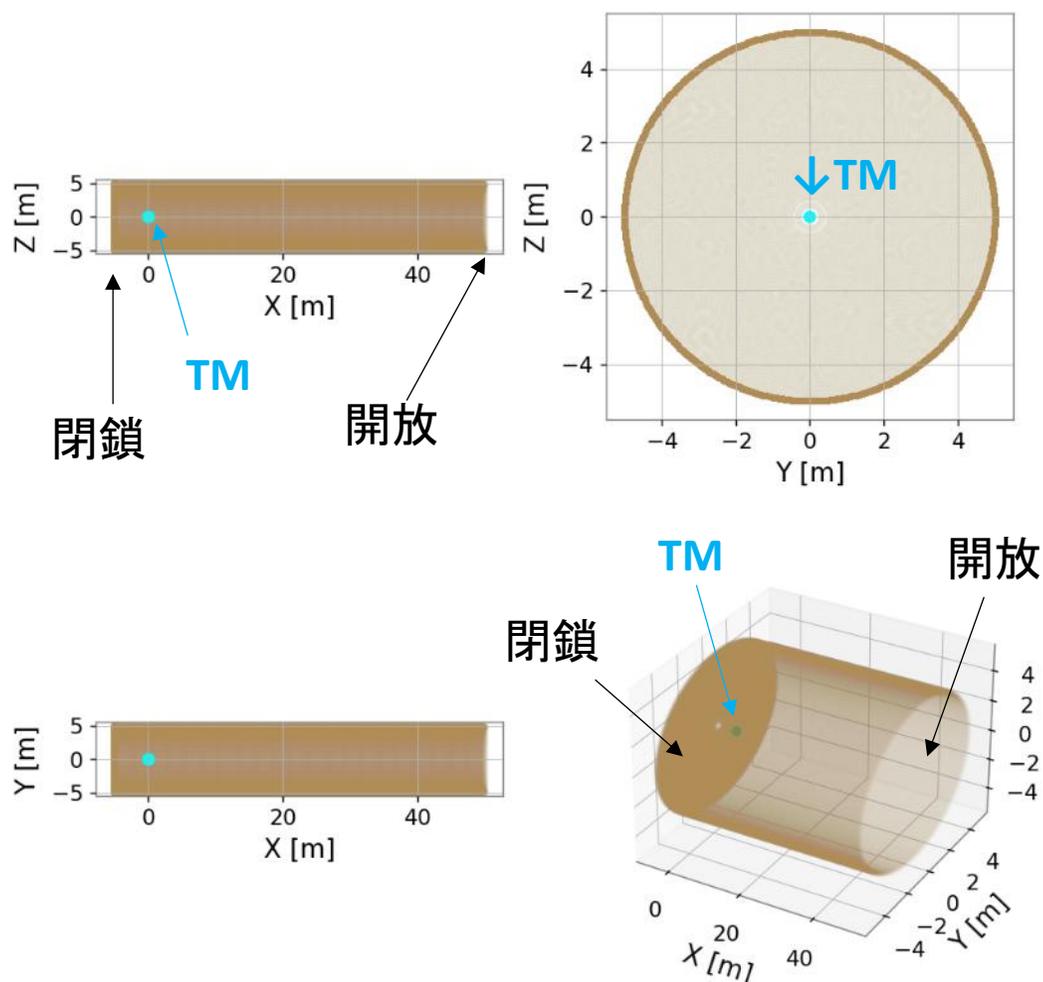
➤ 球形の場合、結果に大きな変化はない。



空洞壁面NNの数値積分

円筒形トンネルの場合、壁面NNは球形の場合より小さく計算される。

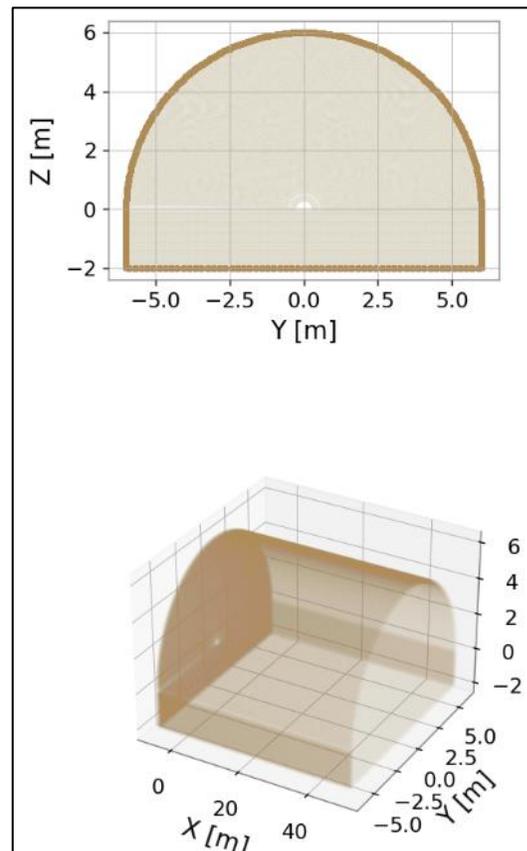
◆ 壁面NNが小さい場合、実体波NN合計 (バルク+壁面) はむしろ大きくなることに注意。
バルク項と壁面項の重力の方向が逆であるため。



Seismic NNに関する進行中・今後の研究

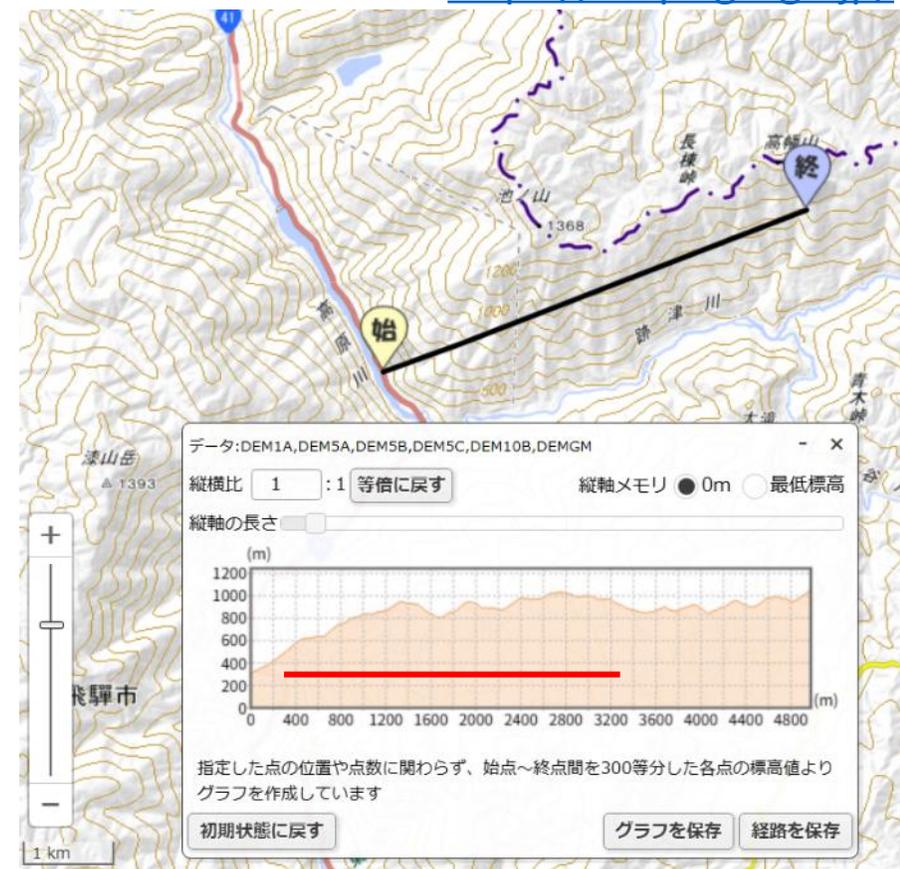
- より現実的なトンネル形状の壁面項計算 (カマボコ型, 3D CAD)
- 実際の地形に対する地表面項の計算
- KAGRAの山(池ノ山)への地表地震計の設置
- ETのサイト・トンネル設計への応用

<https://maps.gsi.go.jp/>



KAGRA X-end CAD

[PTEP 2021, Issue 5, 05A101](#)



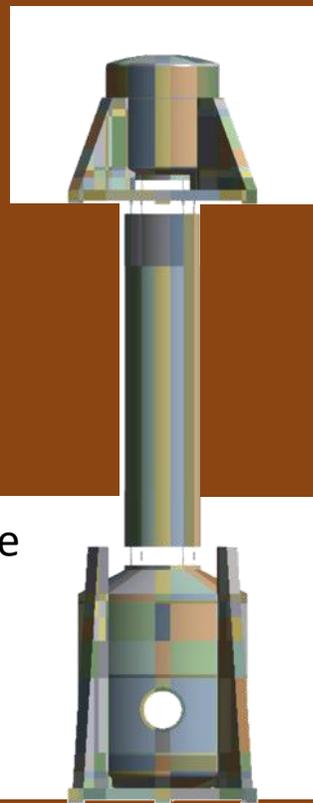
Seismic NNに関する進行中・今後の研究

- より現実的なトンネル形状の壁面項計算 (カマボコ型, 3D CAD)
- 実際の地形に対する地表面項の計算
- KAGRAの山(池ノ山)地表にも地震計を設置
- ETのサイト・トンネル設計への応用

Virgo-like



KAGRA-like



3D CAD by
<https://indico.ego-gw.it/event/841/contributions/7789/attachments/4390/7973/2025-03-26%20-%20ET-LF%20Tower%20Integration%20Workshop.pdf>