



Tokyo Tech

シミュレーションによる重力波望遠鏡KAGRAにおける 地下水の重力勾配雑音の推定

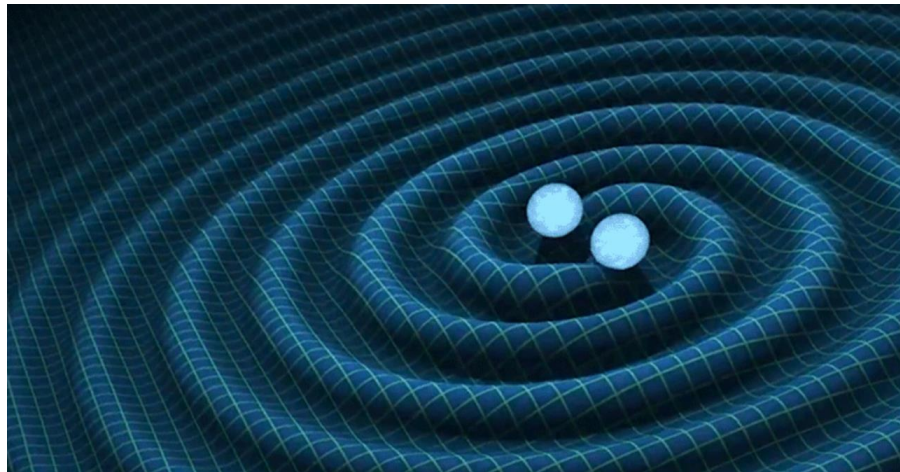
2022年3月16日 日本物理学会 宇宙線宇宙物理領域

東工大理, 国立天文台A, 東大宇宙線研B

鈴木孝典, 鷺見貴生A, 横澤孝章B, 宗宮健太郎,

KAGRA collaboration

重力波・重力波望遠鏡KAGRA

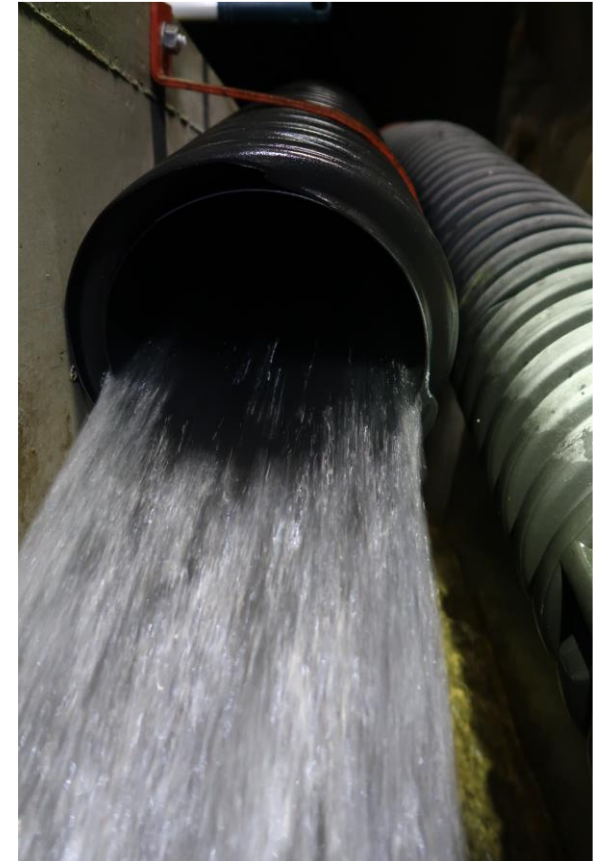


重力波のイメージ



大型低温重力波望遠鏡KAGRAの俯瞰図
画像提供：東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設

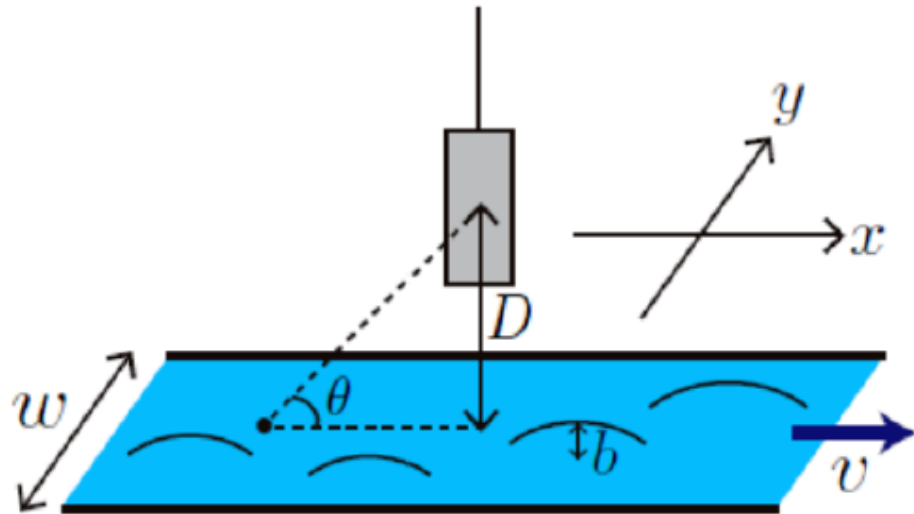
- KAGRAは地面振動による雑音を低減するために地下300mに建設されている。
- 排水される地下水がパイプ内で波打つことでKAGRAの鏡に対して重力勾配が生じ、雑音となる。



重力勾配雑音の定式化

- 水の質量の揺れが万有引力の揺れを引き起こす。
(重力勾配雑音, ニュートニアンノイズ)

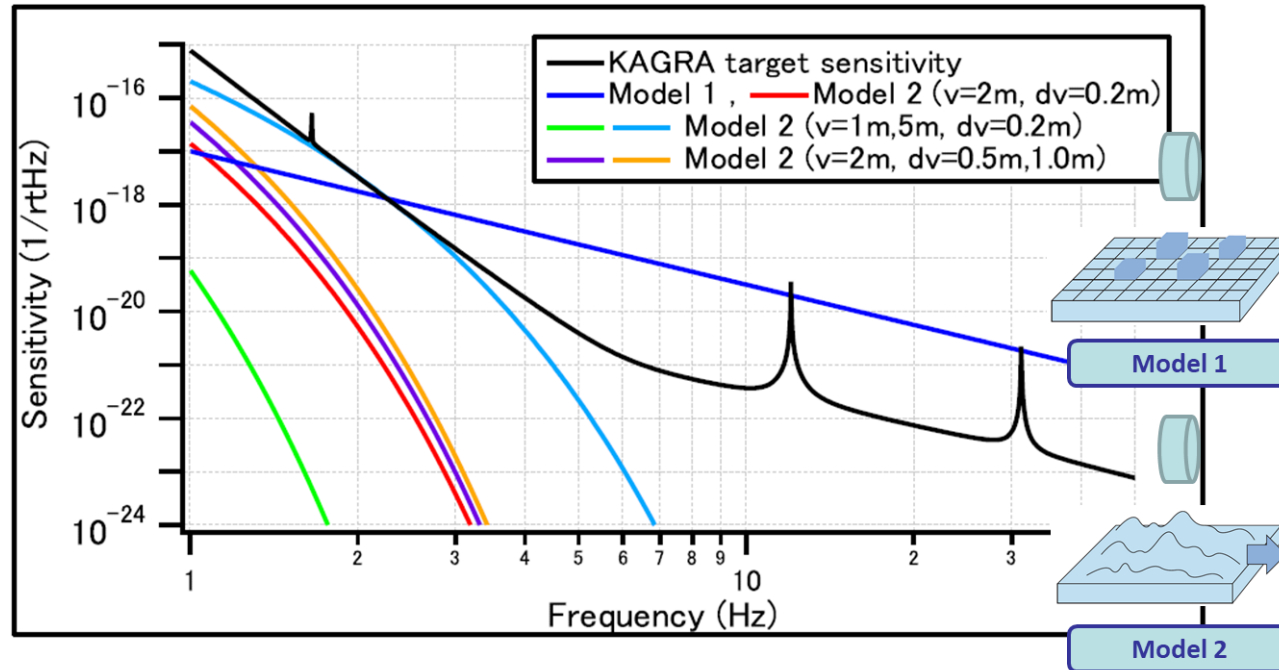
a : ミラーに与える加速度勾配(万有引力による雑音)



$$a = \iint \frac{G\rho b(x, y, t) \cos \theta}{D^2 + x^2 + y^2} dx dy$$

$$= G\rho \iint \frac{b(x, y, t)x}{(D^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} dx dy$$

理論モデル(Nishizawa-Chenモデル)



Newtonian noise from the underground water (Kentaro Somiya et al, TAUP2019)

Model 1, 2による重力勾配雑音の推定。ただし、

- ・実際の水面がこのように動くという保証はない。
- ・乱流の場合、各地点の水面を手計算できない。

⇒ 実際の水面の様子をシミュレーションで再現する。

雑音の推定のためのシミュレーション

- 実際の水の動きを再現する

雑音の計算

$$a(t) = \iint \frac{G\rho z(x, y, t) \cos \theta}{D^2 + x^2 + y^2} dx dy$$

$$h(t) = \frac{1}{L} \iint a(t) d^2 t$$

水面変化のデータ $z(x, y, t)$ [m]

水シミュレーション



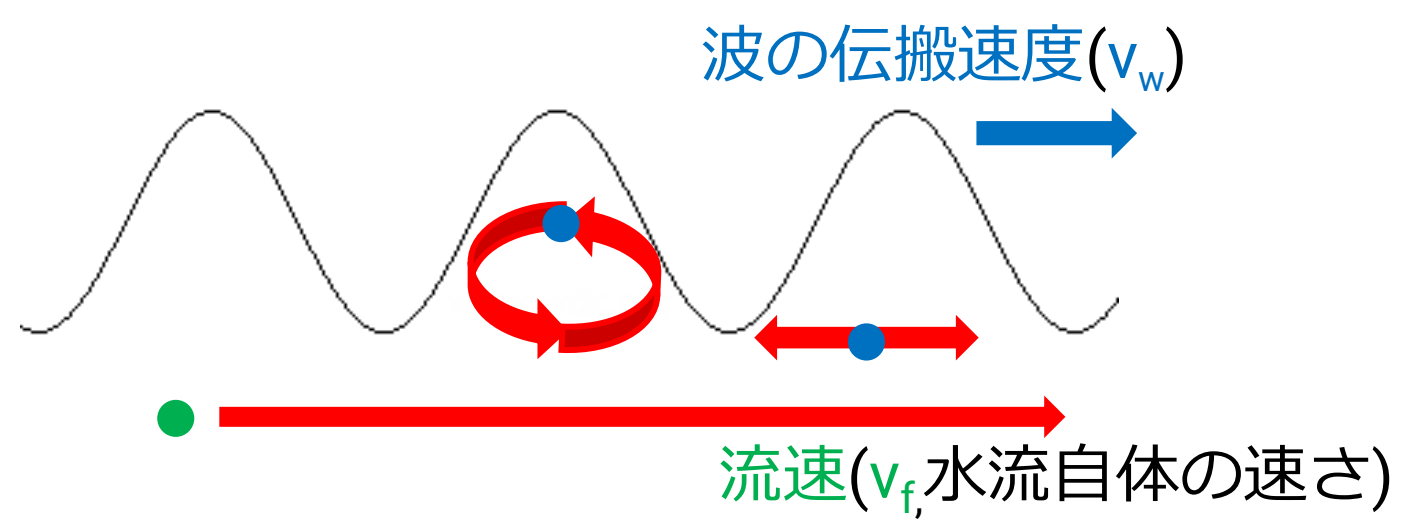
水量を測る



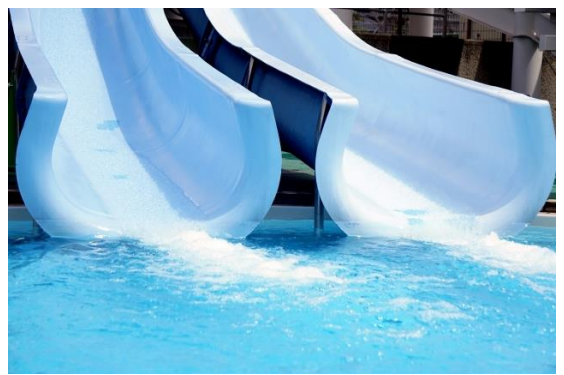
KAGRAの排水構造



射流、常流、跳水



常流 (Sub critical flow)



射流 (Super critical flow)

跳水 (Hydraulic jump)

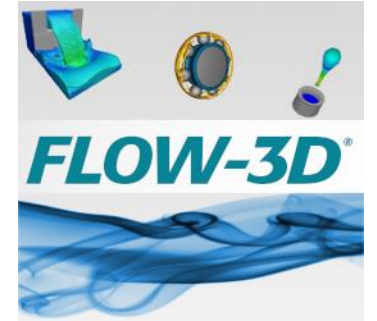
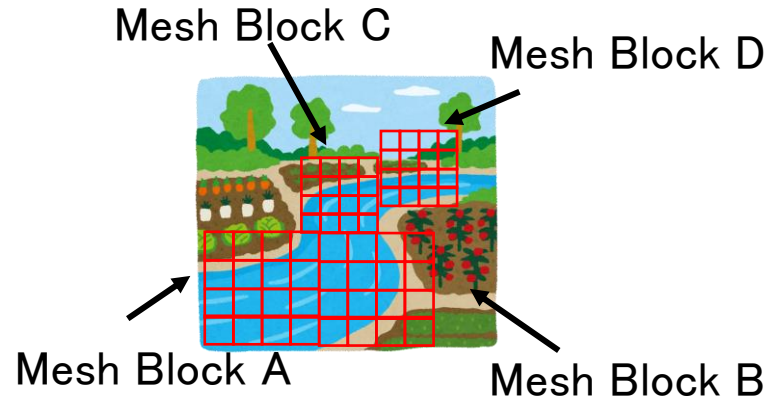
Video:



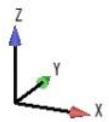
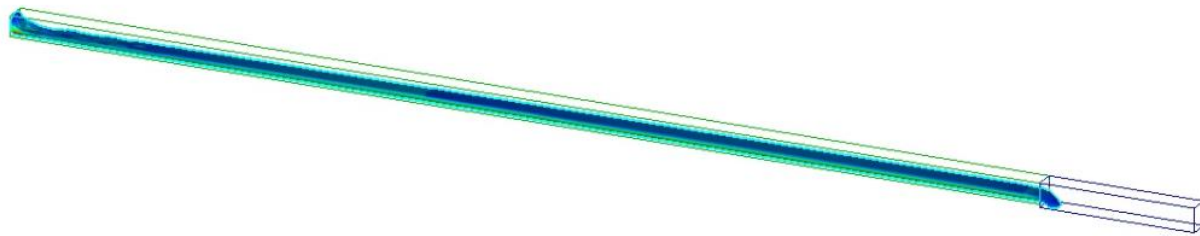
射流: $v_f > v_w$
 常流: $v_f < v_w$
 跳水: 境界(射流 → 常流)
 水深: 射流 < 常流

シミュレーションのセットアップ

●パイプの設計



Time = 300.003



FLOW-3D

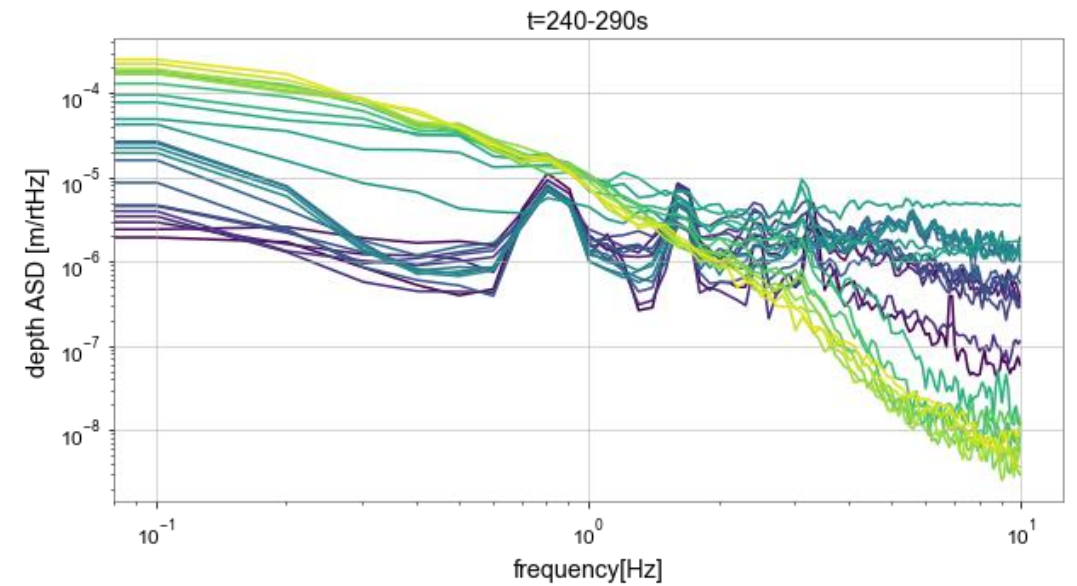
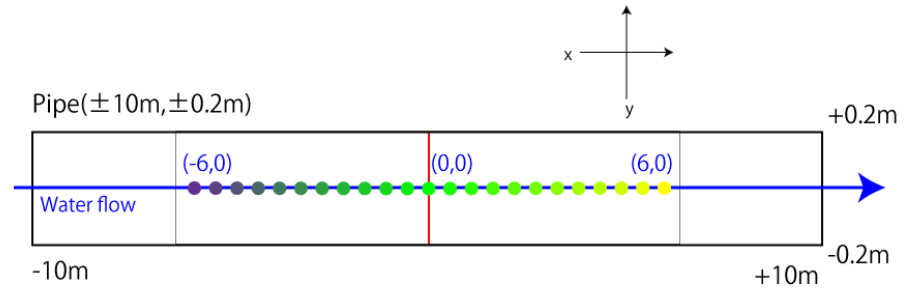
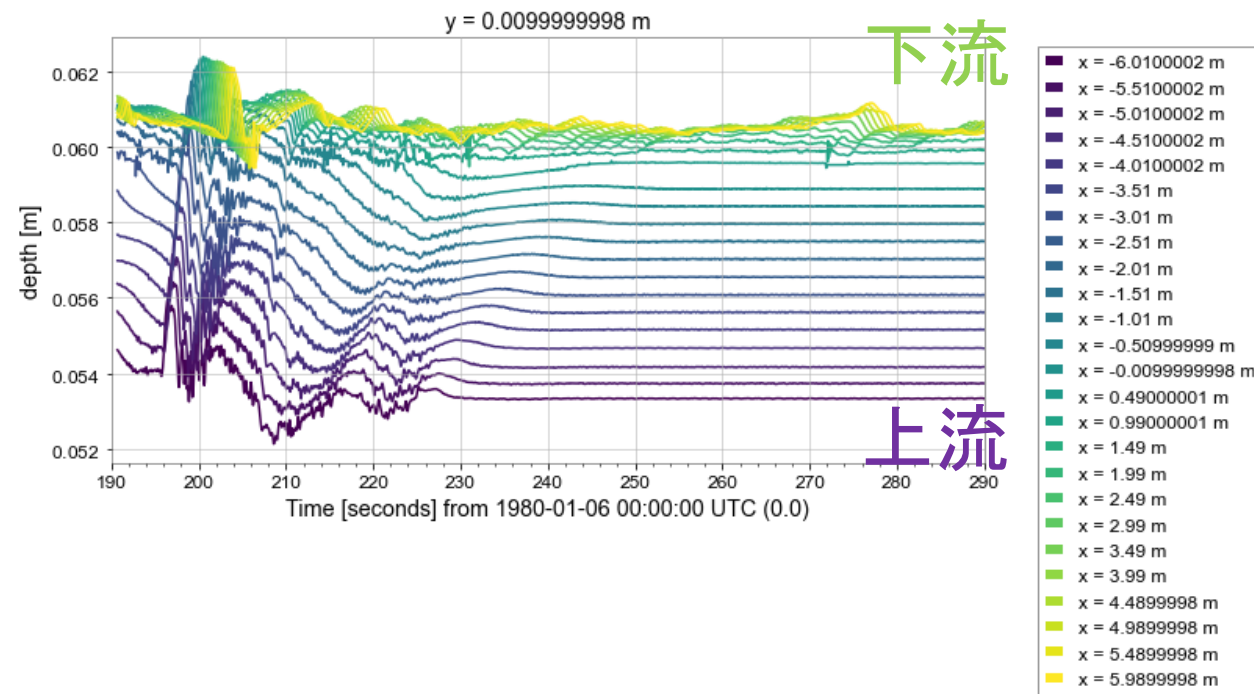
Pressure (Pa)

1.034e+05
1.029e+05
1.023e+05
1.017e+05
1.011e+05

パイプ長: 20m
 半径: 0.2m
 壁面粗さ: 1.6mm(→0.2mm)
 粗度係数: 0.016
 勾配: 0.3%
 流入量: 36.4 t/h
 (=0.1 × 0.2² × π m² × 0.8 m/s)

シミュレーションの結果

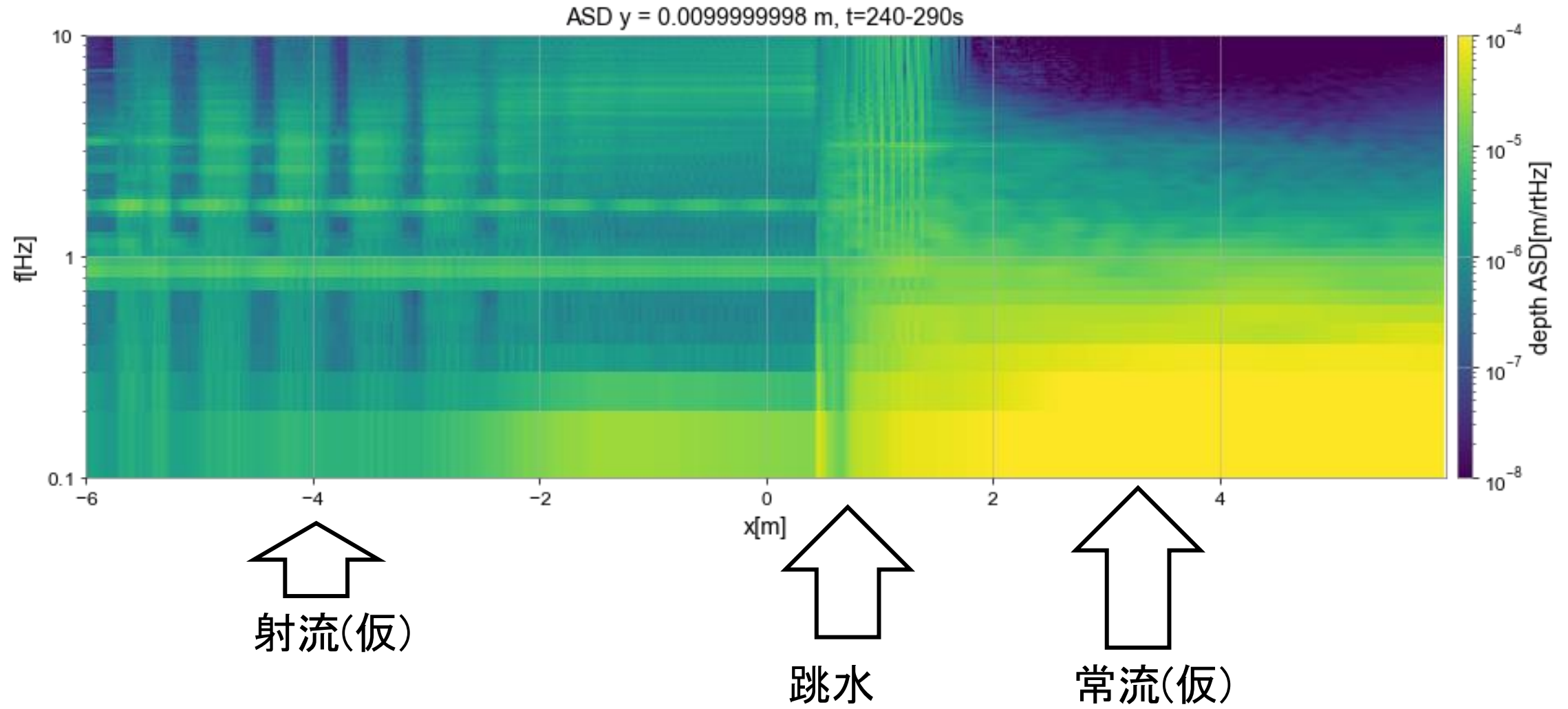
● 水深



上流は水深が浅く、下流になるにつれて深くなる。
上流と下流ではスペクトルが異なっている。

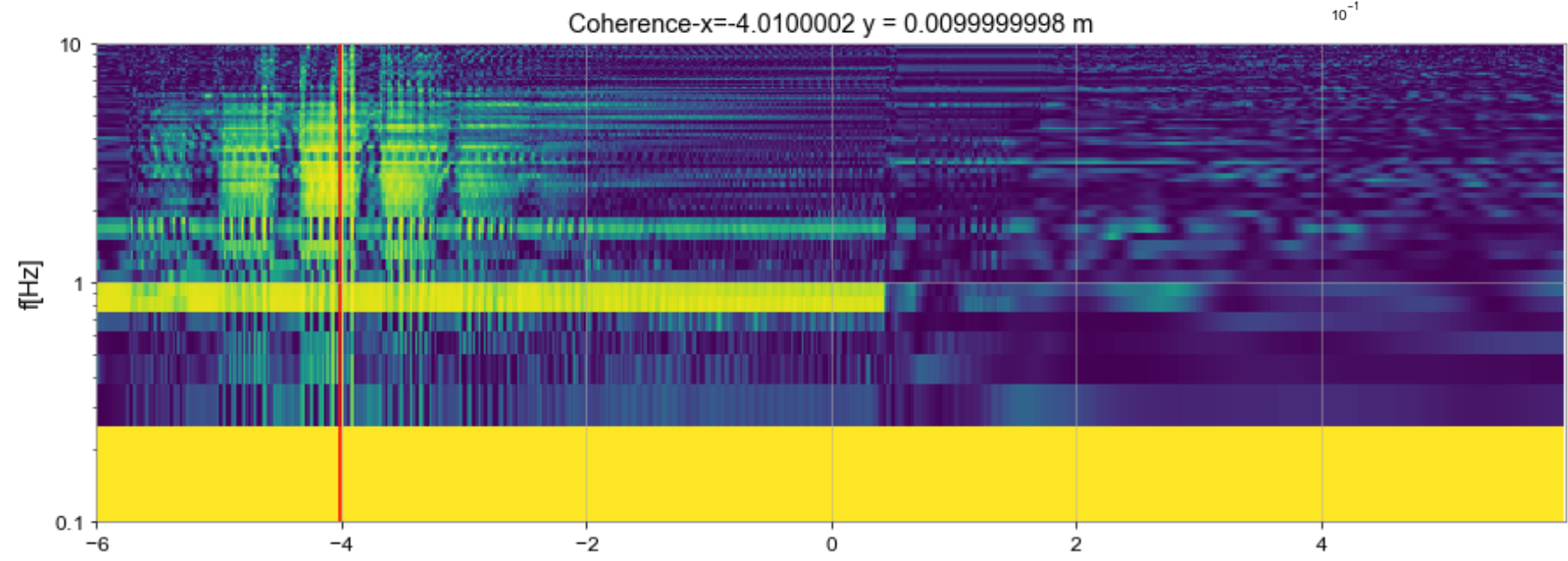
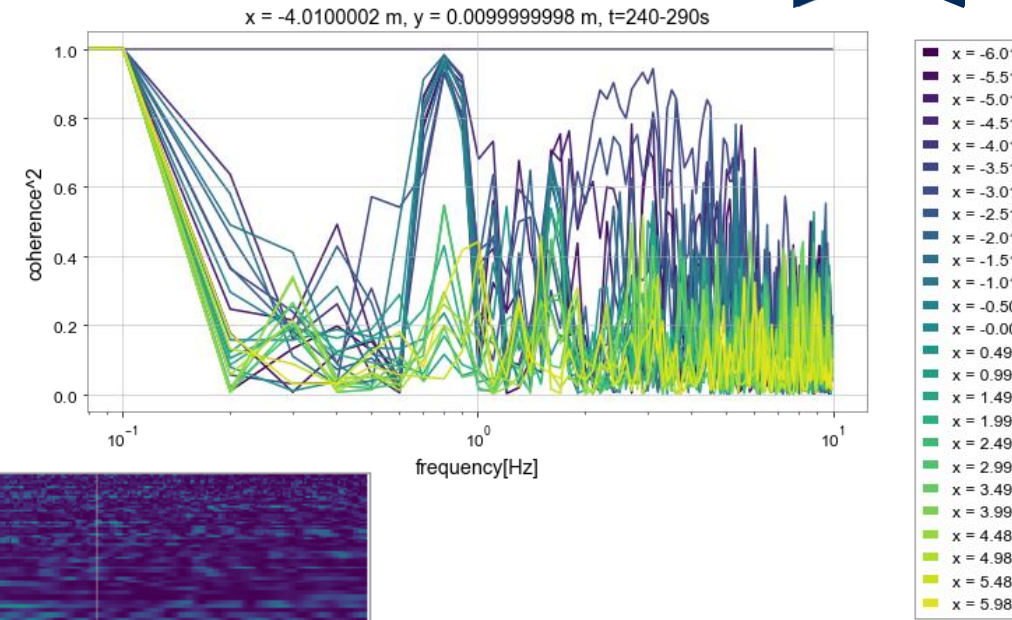
水深のスペクトログラム

● ASD(-6~6m,0)



水面のコヒーレンス

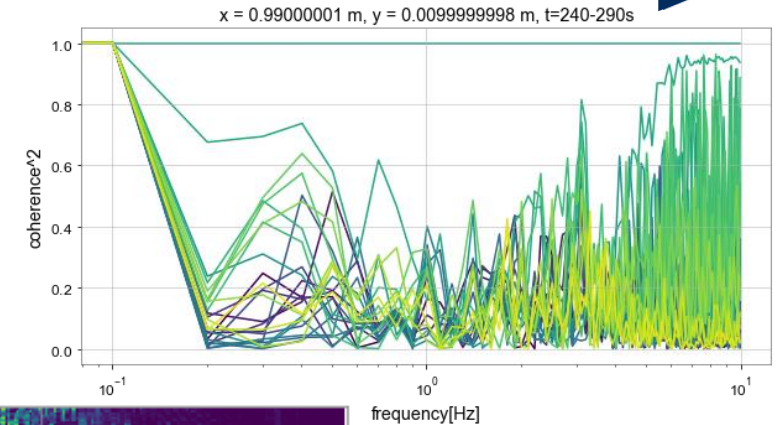
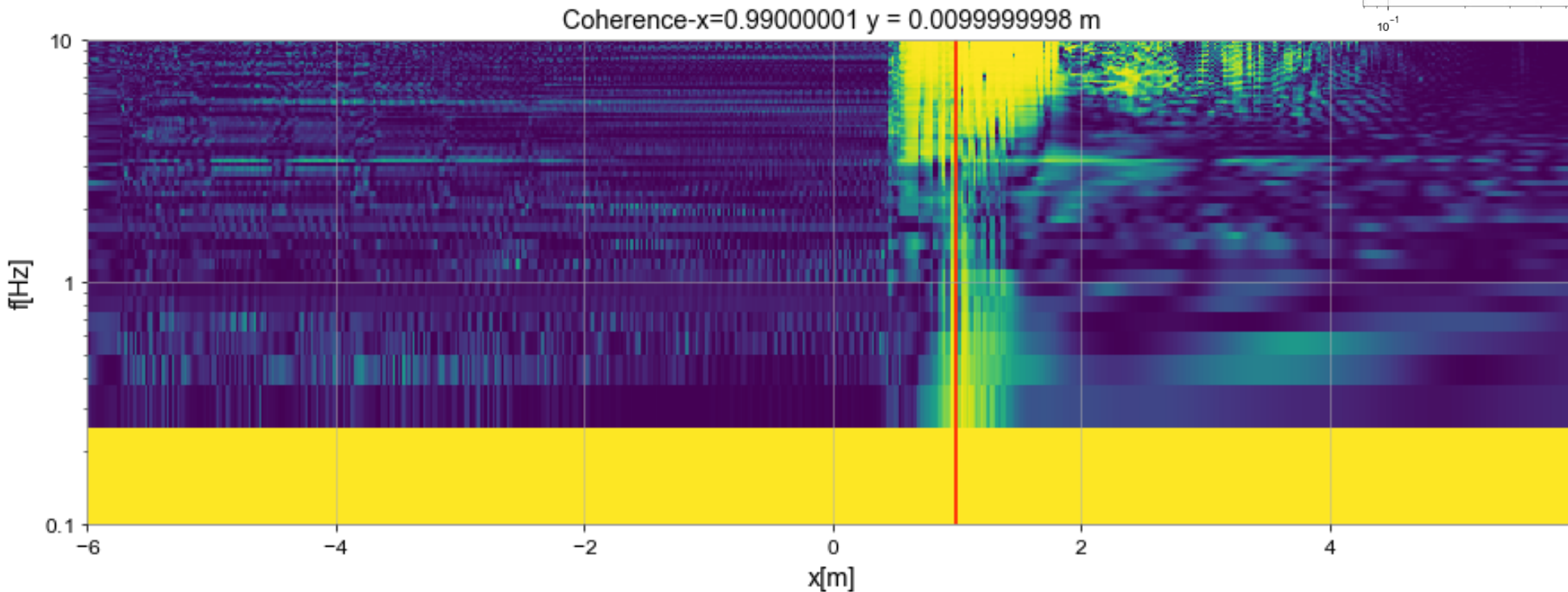
- 射流部分と他の地点とのコヒーレンス



射流領域ではcoherence: $x = -6\text{m} \sim 0.5\text{m}$ 。特に0.8 Hz ~ 1 Hz。
 0.5mより下流側にはコヒーレンスが無く、-6 ~ 0.5mが射流領域と考えられる。

水面のコヒーレンス

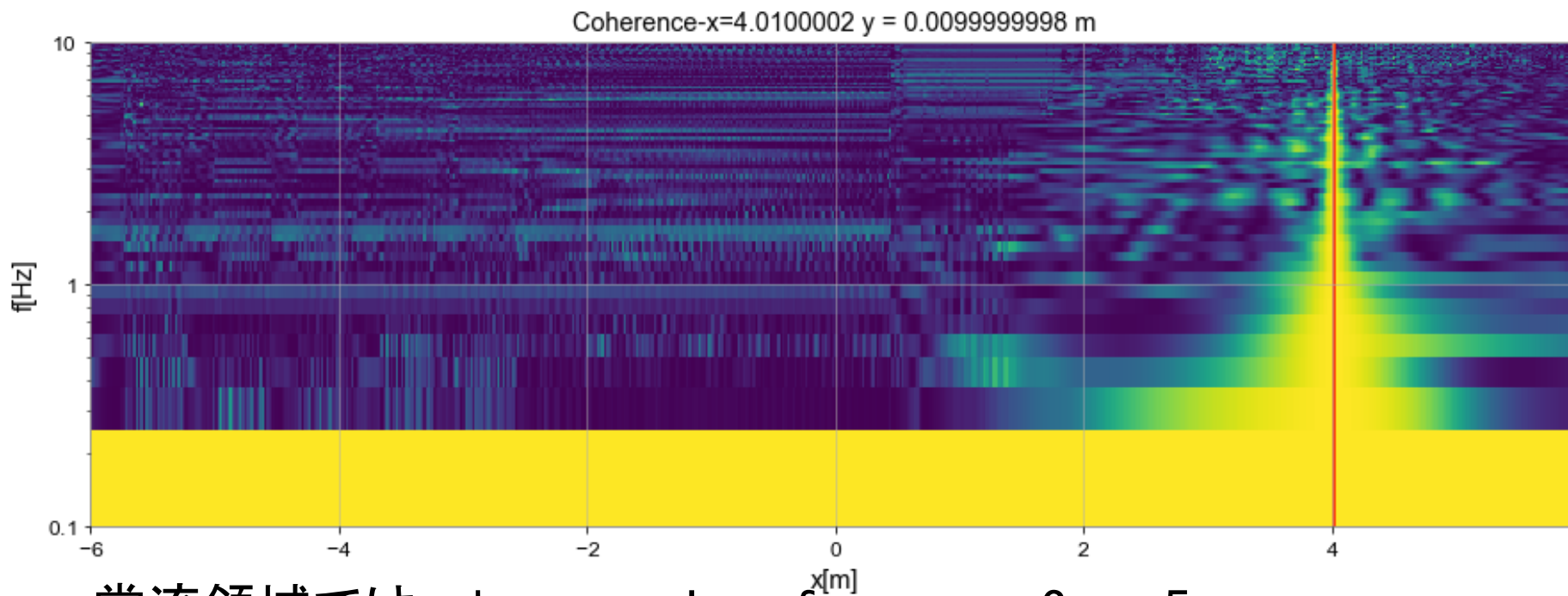
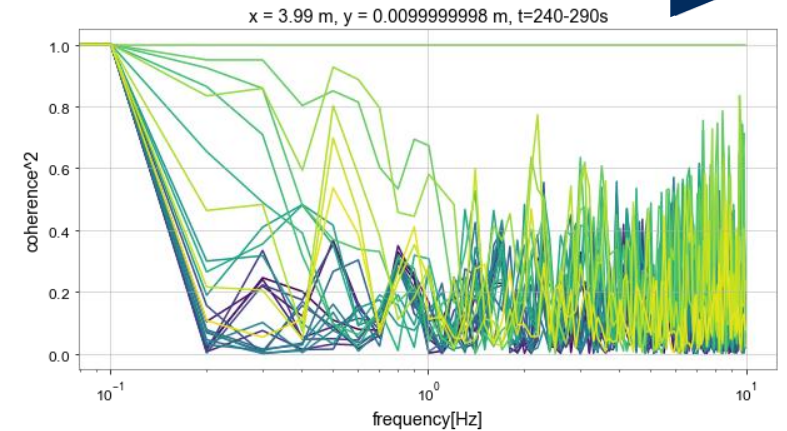
● 跳水部分 と他の地点とのコヒーレンス



跳水領域ではcoherence: $x = 0.5\text{m} \sim 1.9\text{m}$, 6-10Hz。下流側にコヒーレンスがあるが、上流側にはない。上流側は射流の特性より、波が上流側に伝搬していない。

水面のコヒーレンス

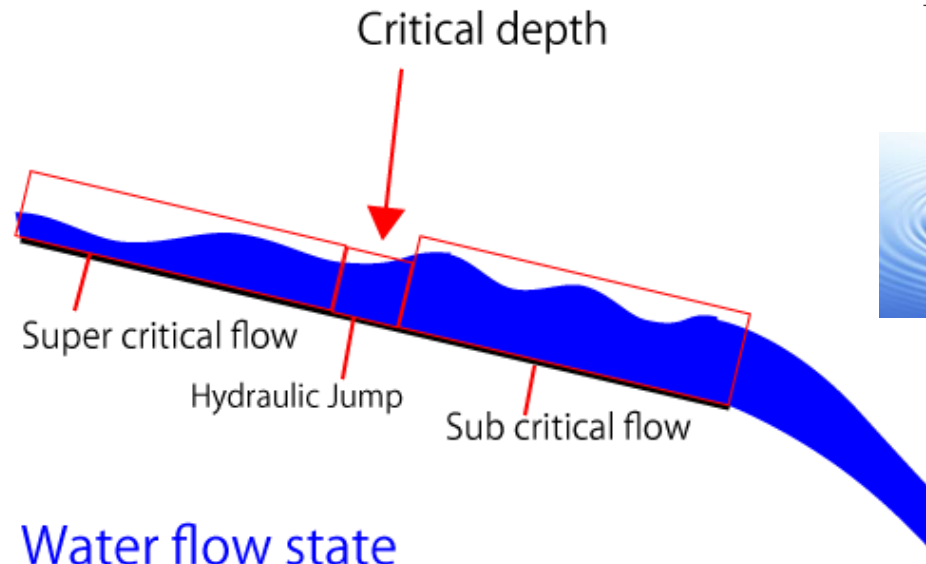
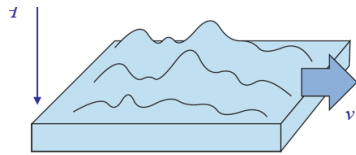
● 常流 と他の地点とのコヒーレンス



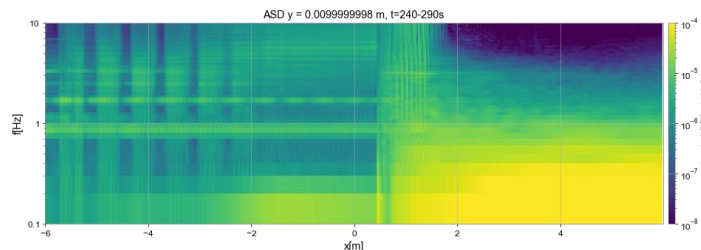
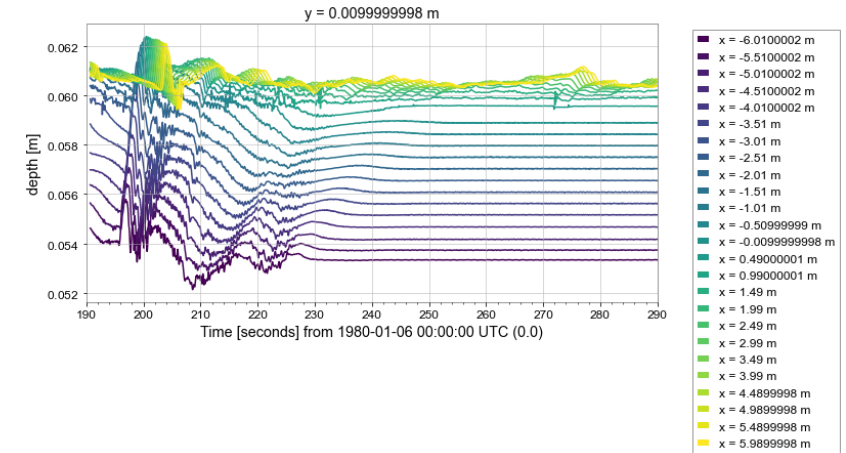
常流領域ではcoherence: Low frequency 3m~5m。
コヒーレント長は高周波につれて短くなっていく。

● イメージ

上流: 浅い、広い範囲にコヒーレンスがある
→ 遷移領域 or 射流



Water flow state



下流: 深い、狭い範囲に
コヒーレンスがある
→ 常流

● 水を素片に分けて、積分

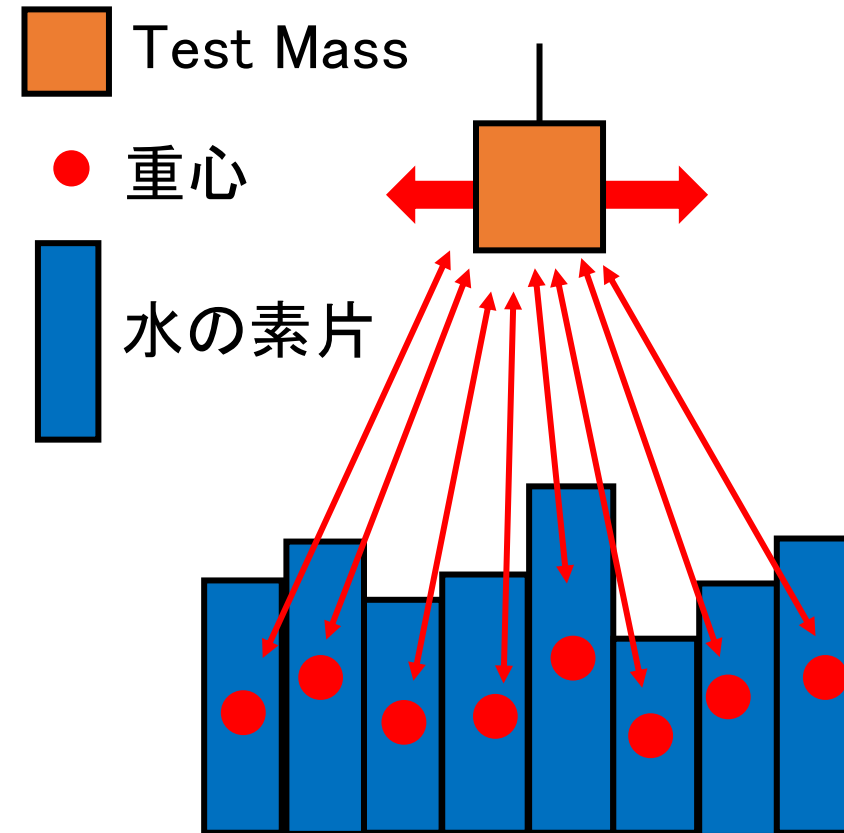
$$a = \int \int \frac{G\rho b(x, y, t) \cos \theta}{D^2 + x^2 + y^2} dx dy$$
$$= G\rho \int \int \frac{b(x, y, t)x}{(D^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} dx dy$$

水の素片

- 重心 : x, y, z (water half level)
- 質量 : $\rho \times b \times dx \times dy$

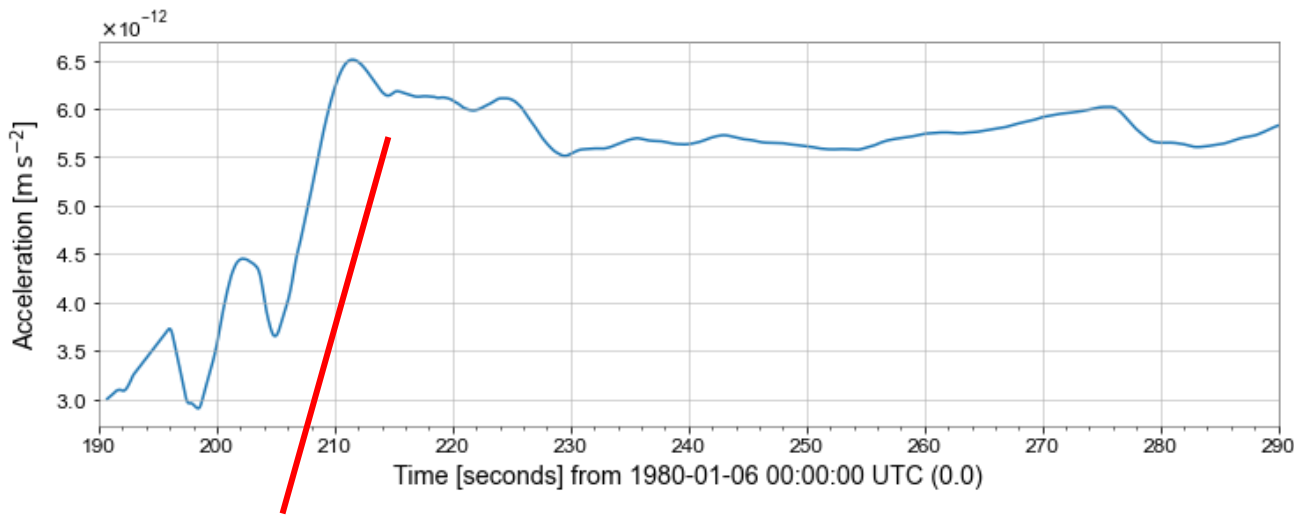
鏡 : $(x, y, z) = (0\text{m}, 0\text{m}, 5\text{m})$

D は水の素片の重心とtest massの z 方向の距離



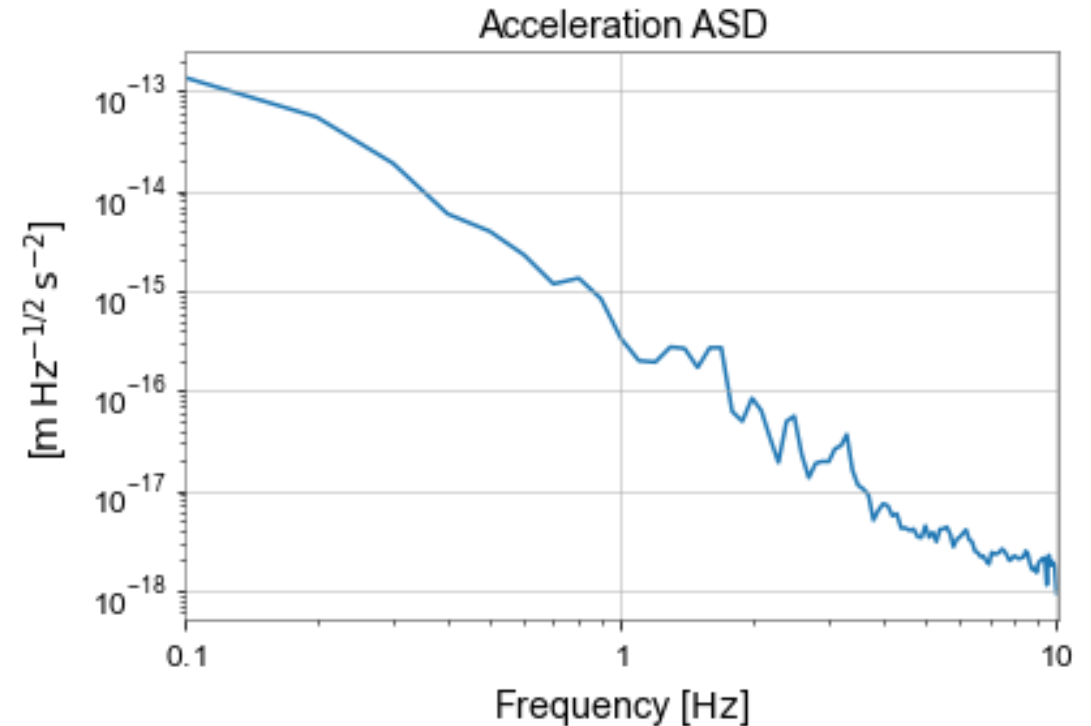
重力勾配雑音の計算結果(36.4t/h)

● 鏡に与える加速度



水面が大きく動くと、加速度にも影響がある。

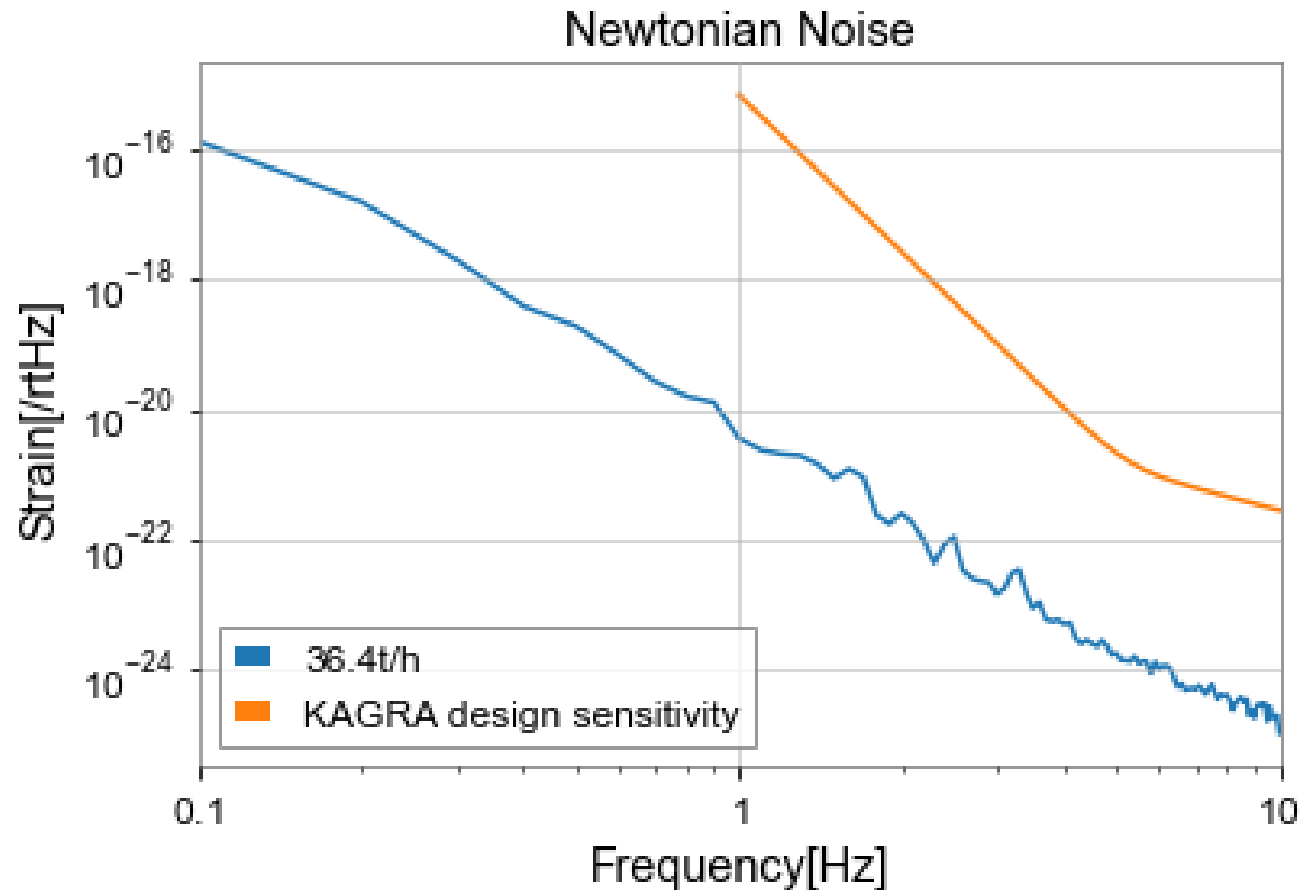
積分範囲 : $x=-6 \text{ m} \sim 6 \text{ m}$, $y=-0.2 \text{ m} \sim 0.2 \text{ m}$



(240s-290s, ASD)

重力勾配雑音(36.4t/h)

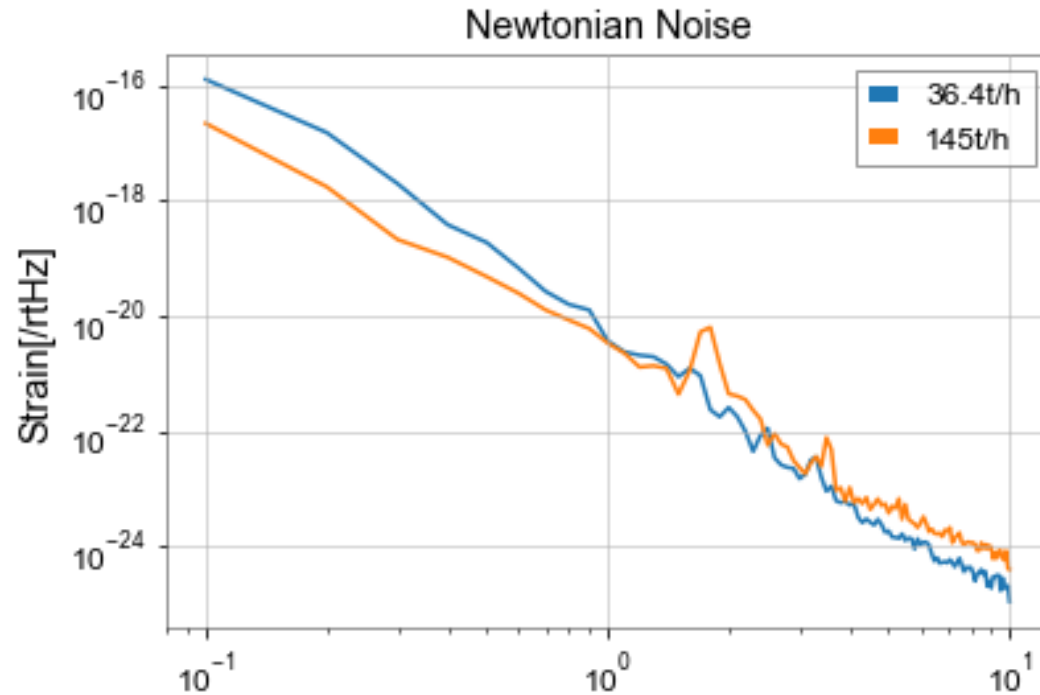
● 重力波信号に変換



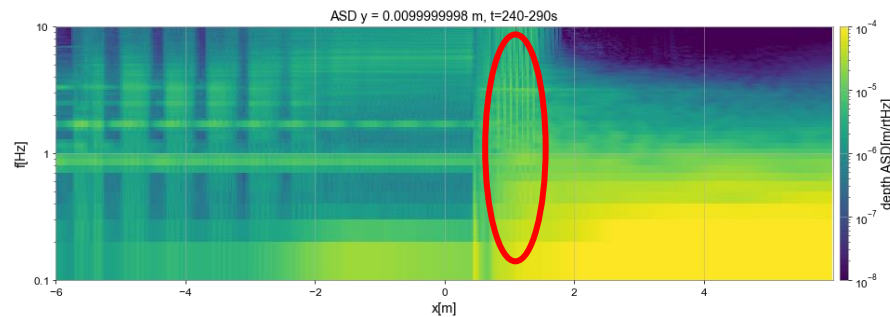
今回の設定(12mの直線水路)の場合、重力勾配雑音はKAGRAの設計感度よりも十分小さい。

雑音は $f^{-4} \sim f^{-3}$ in 1 Hz-10 Hz。低周波側は常流の影響を受け、膨らんでいる。

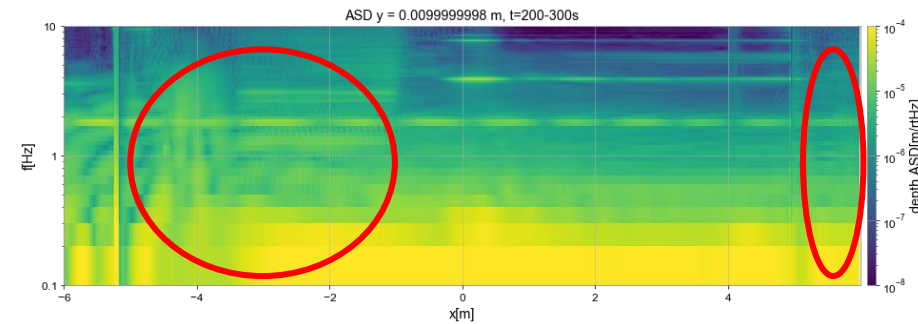
異なる流量での比較



跳水(を含む)の下流領域
の影響で高周波の雑音
は大きくなる。



36.4t/h



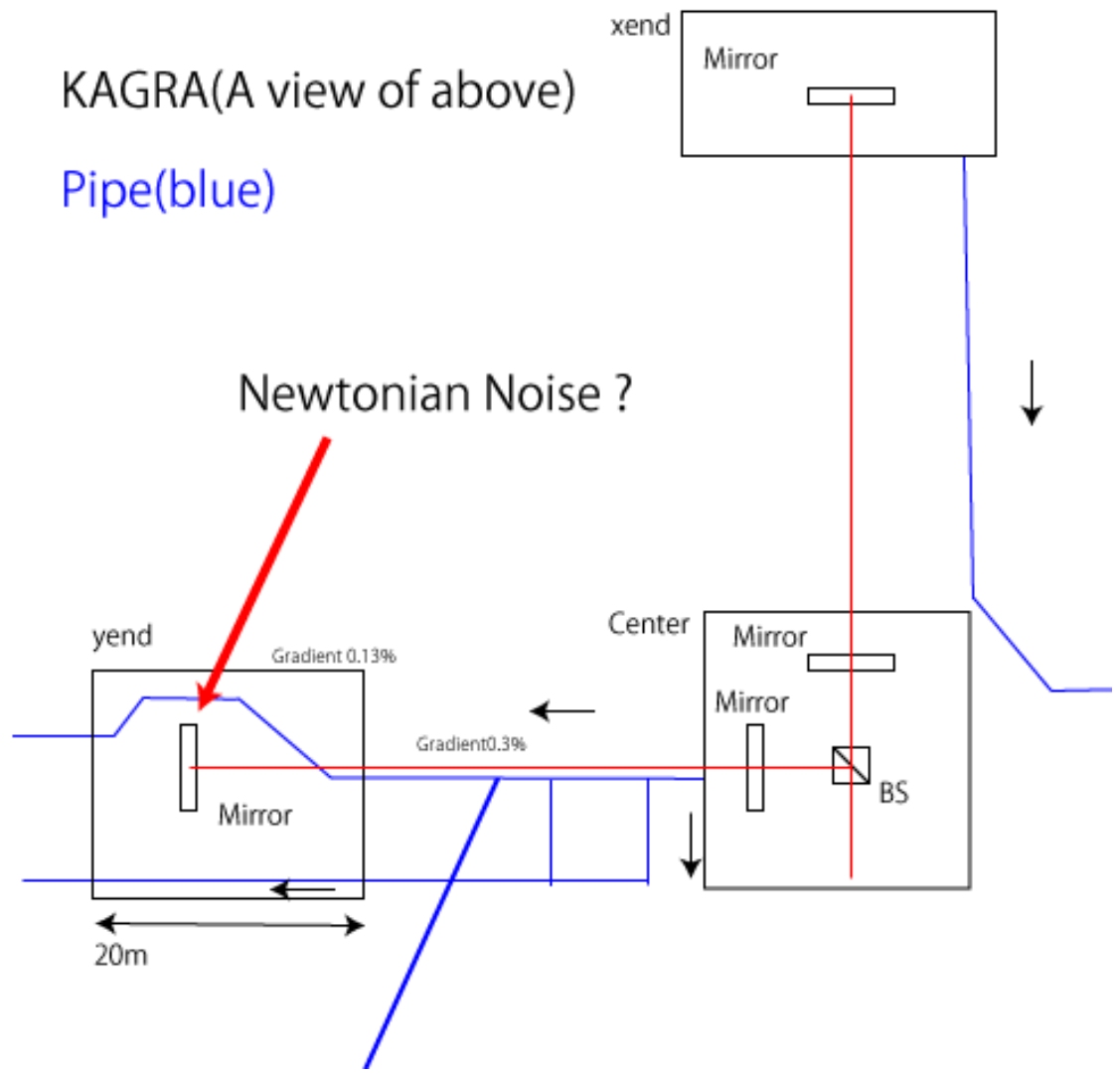
145t/h

パイプの配置

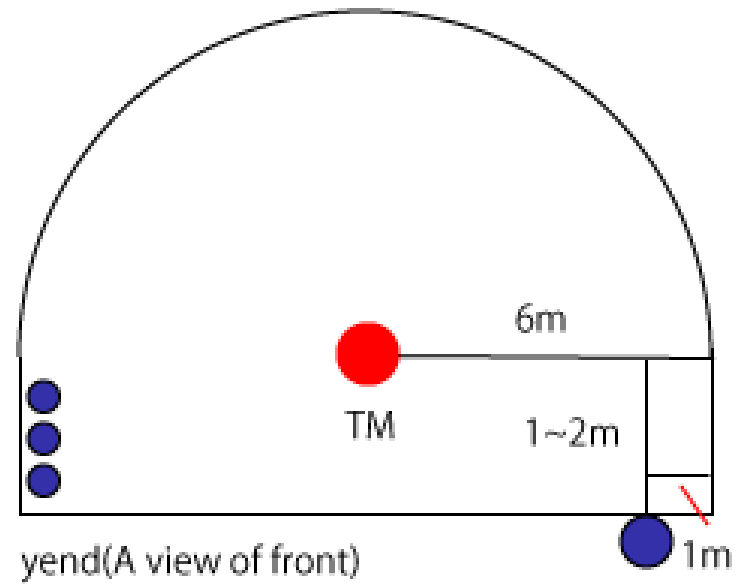
KAGRA(A view of above)

Pipe(blue)

Newtonian Noise ?

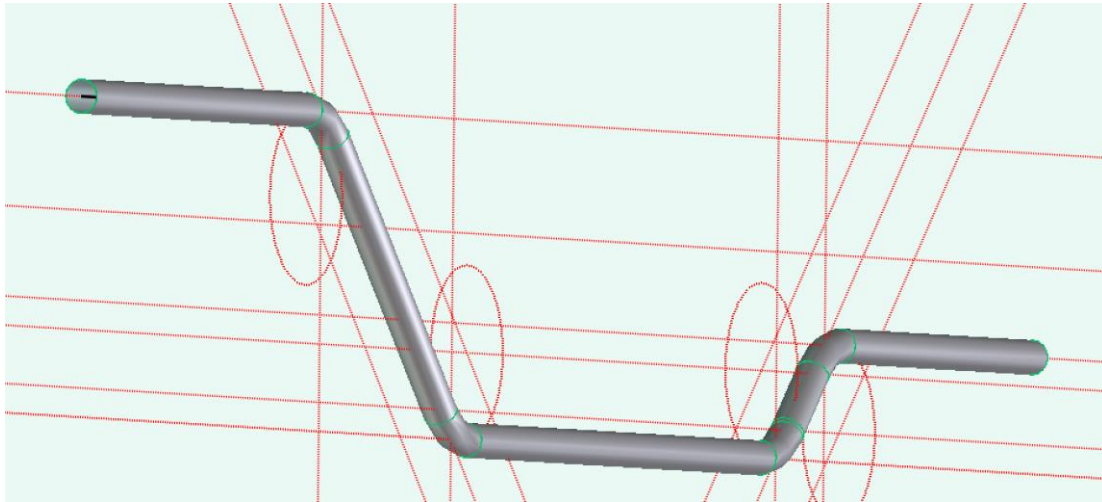


Yendでは特にパイプとミラーが近い。
横5m、高さでは1~2m離れている。



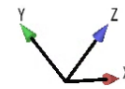
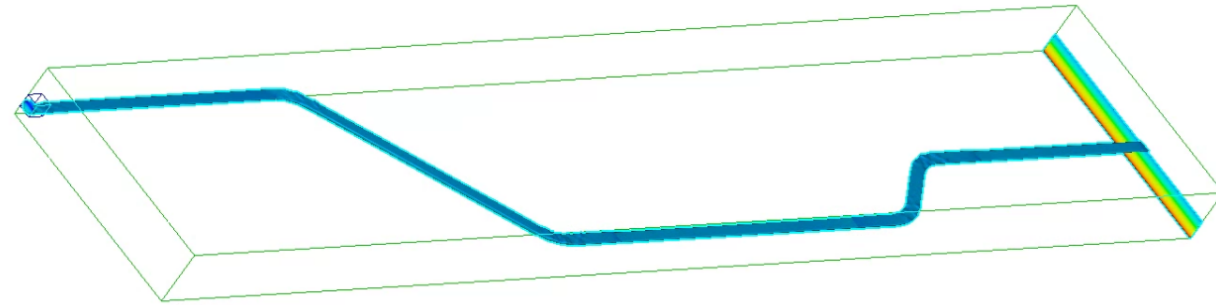
実際のパイプの再現

●パイプの設計とシミュレーション



CADソフトで、実際のパイプの形状を再現し、Flow-3Dで水を流す。
現在、シミュレーションの実行と解析を進めている。

Time = 1000.001343



FLOW-3D

Pressure (Pa)
1.069e+05
1.054e+05
1.039e+05
1.025e+05
1.010e+05

- 水には跳水、常流、射流といった状態があり、それぞれ水面のゆらぎの特徴が異なる。
- 特に跳水が発生すると、高周波の揺らぎが大きくなり、最終的な重力勾配雑音にも影響する。
- 今回の設定(12mの直線水路)では雑音はKAGRAの設計感度よりも十分に小さい。

今後の予定

- 実際のパイプを再現したシミュレーションの解析をする。
データが大きいことが課題である。
- 実際のパイプにおいても、パイプの傾きや、流量などを変えてシミュレーションする。
- シミュレーションの結果と実際のKAGRAのデータを比較する。



Tokyo Tech

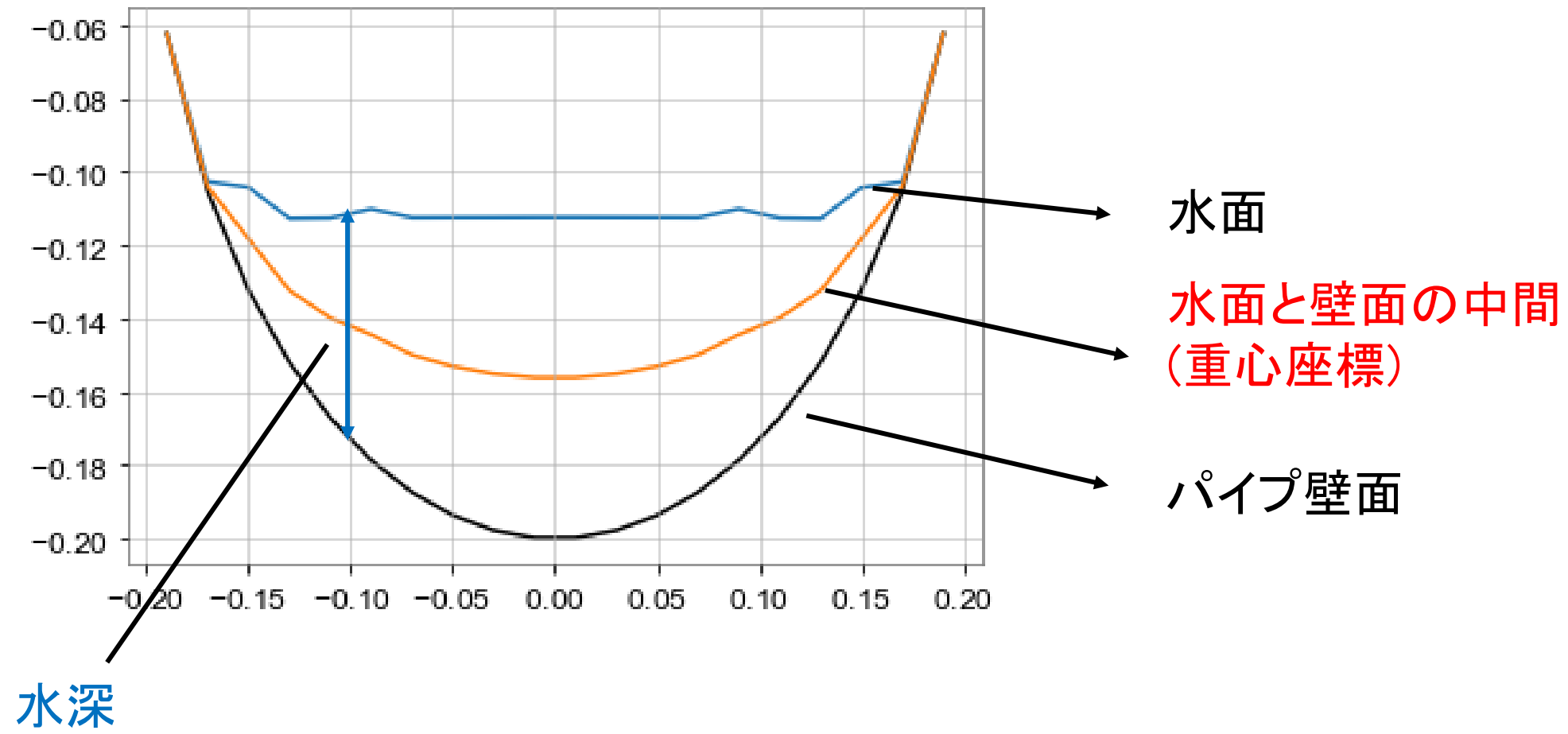
ご清聴ありがとうございました





Tokyo Tech

● 座標の設定



射流と常流の定義

- フルード数

流速/波の伝搬速度

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

v: 流速(average)

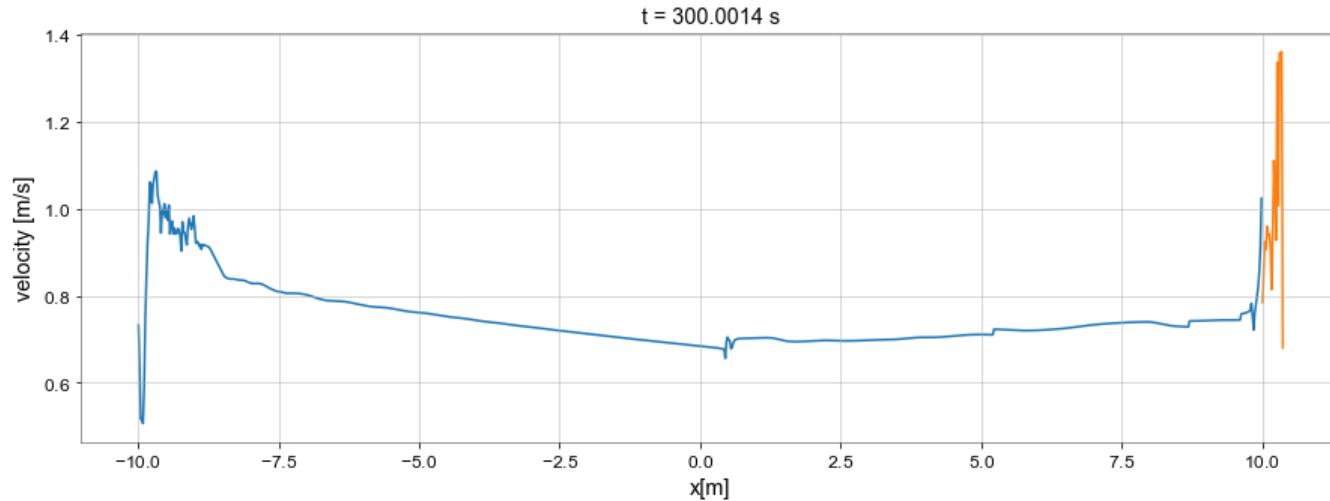
h: 水深(average)

射流 : $Fr < 1$

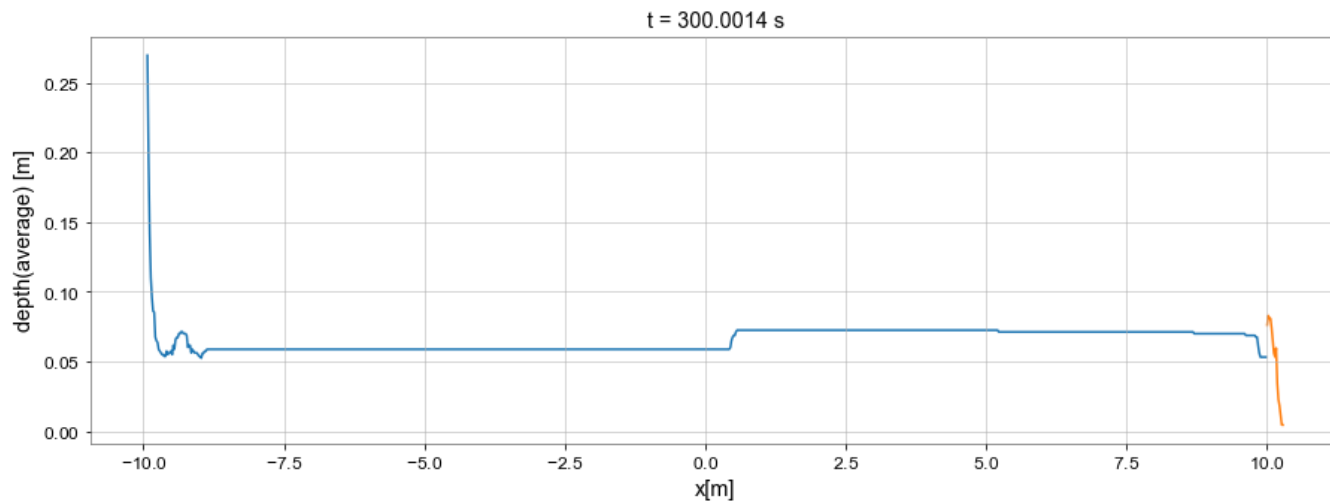
常流 : $Fr > 1$

跳水 : $Fr = 1$

- 各地点の速度と水深をパイプ断面で平均化



X=0.5m付近で平均速度に変化がある。

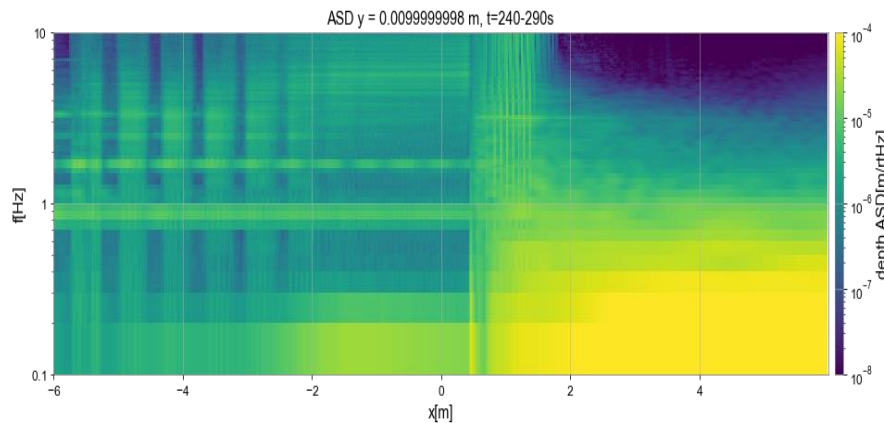
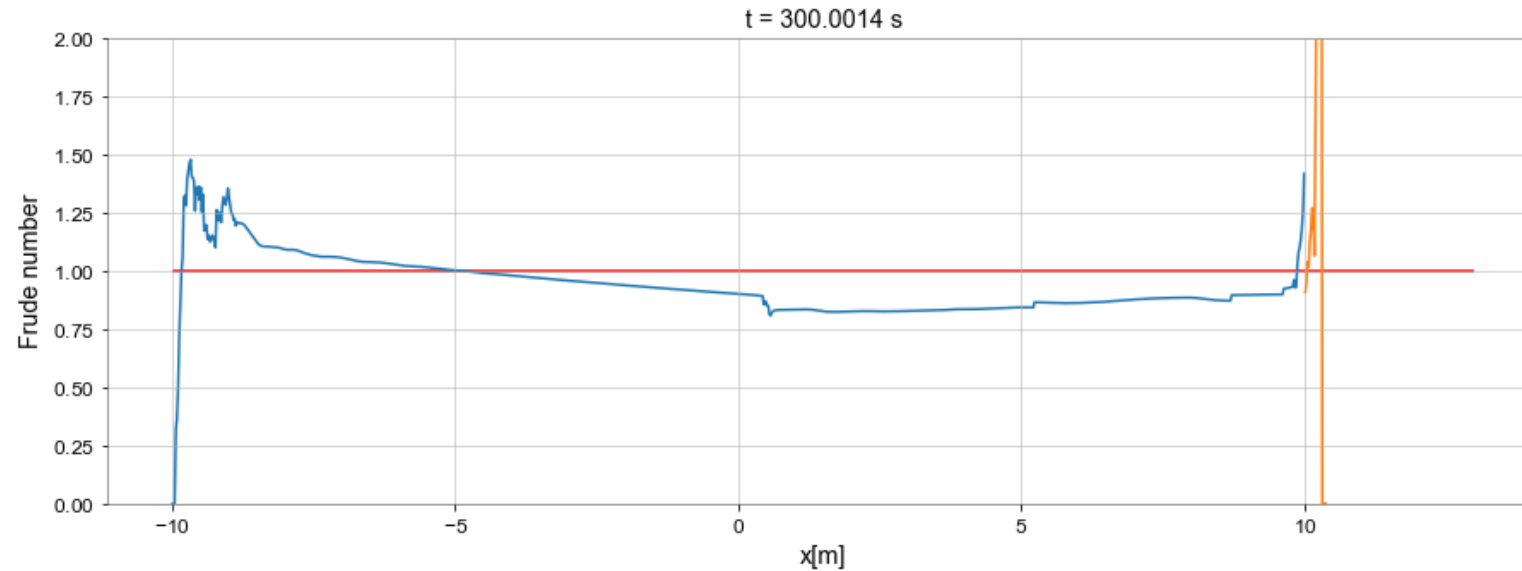


X=0.5m付近で平均水深が大きくなっている。

フルード数

- 平均速度と水深からフルード数を計算

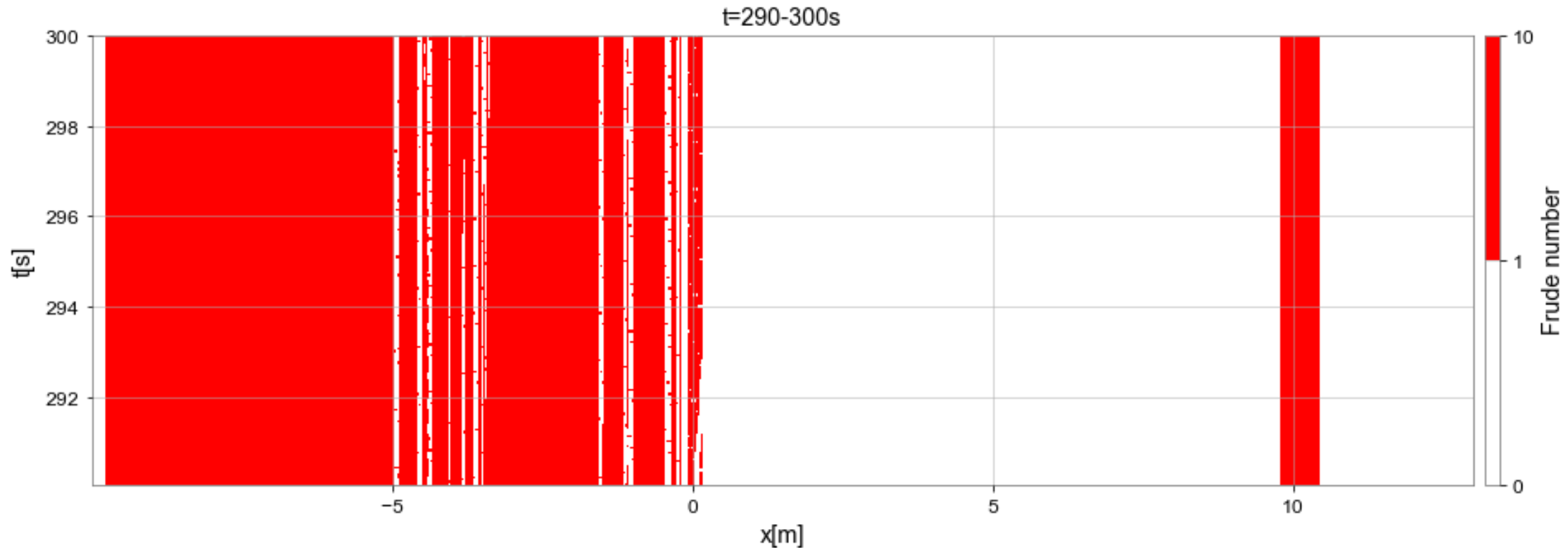
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$



- Fr=1を基準にすると跳水の位置がずれる。
- 計算誤差。
- 遷移領域が数mある。

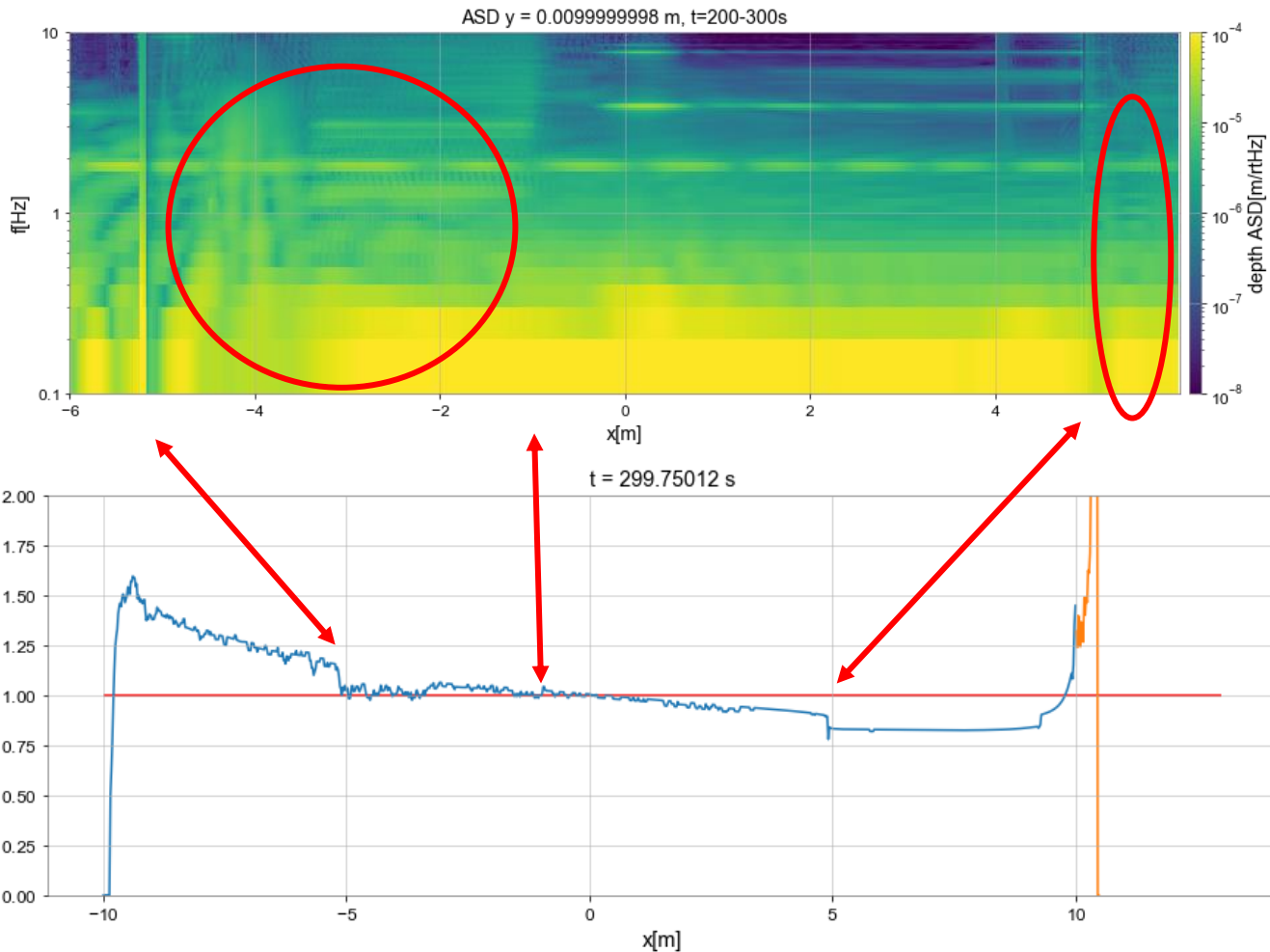
遷移領域(145t/h)

- 初期流量145t/hを例に見てみる



0~5mで $Fr=1$ 付近で揺れている。

フルード数と水面のゆらぎのスペクトル(145t/h)



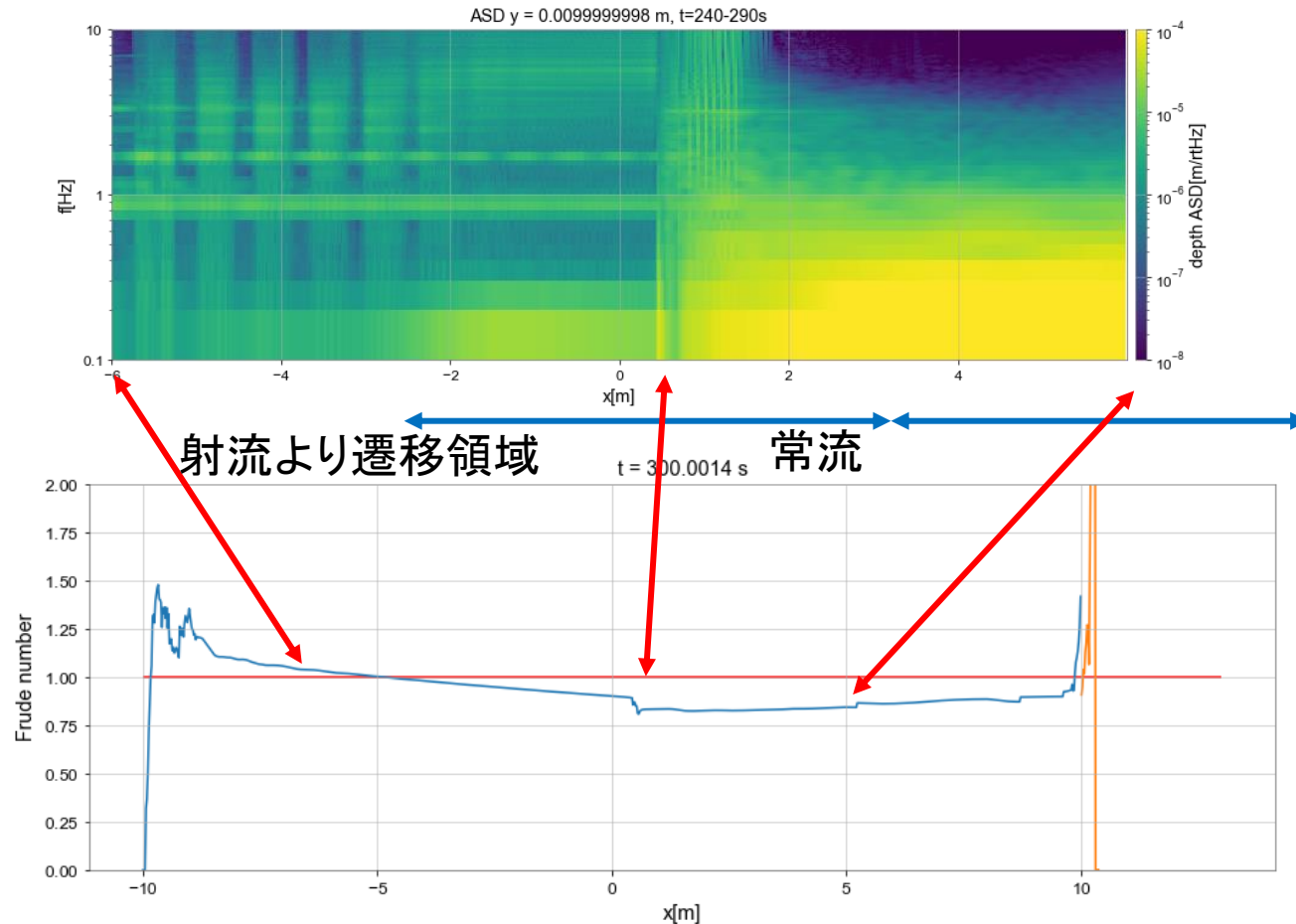
- Fr=1の前後で跳水が発生している。(2回)
- Fr=0.75~1で跳水が発生しているのは36.4t/hの時と同じ。
- 跳水の後ろの領域は高周波にもゆらぎがある。

跳水(145t/h)

- 2回跳水が起こる。(遷移領域の前後)
- 跳水は $Fr=1 \pm 0.125$ で起こる。
跳水が遷移領域の境界で起こるとすると、
射流 $> 1.125 >$ 遷移領域 $> 0.875 >$ 常流
(射流 $> 1 >$ 常流)
- 跳水直後では高周波の揺らぎが大きい。

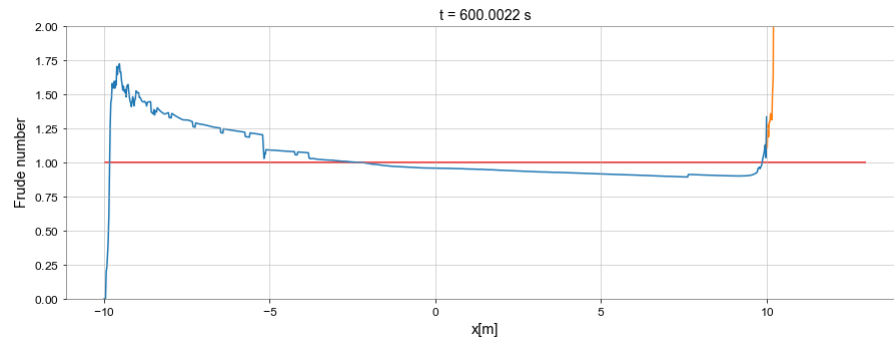
145t/hの解析からの考察

● 36.4t/hの解釈

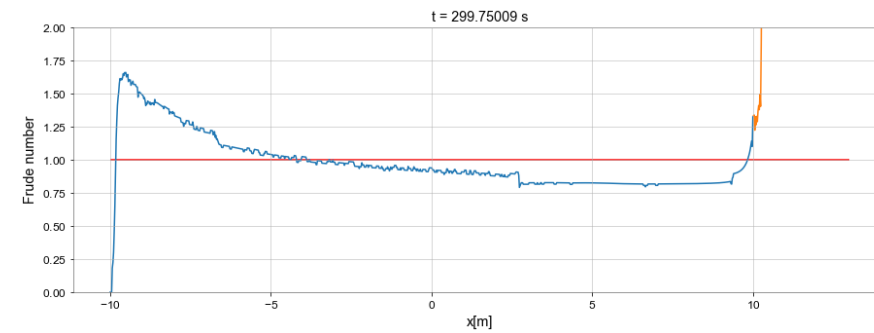


- ・射流だと思っていた領域は遷移領域の方が近い？
- ・上流側の構造は遷移領域であることが関係している可能性がある。

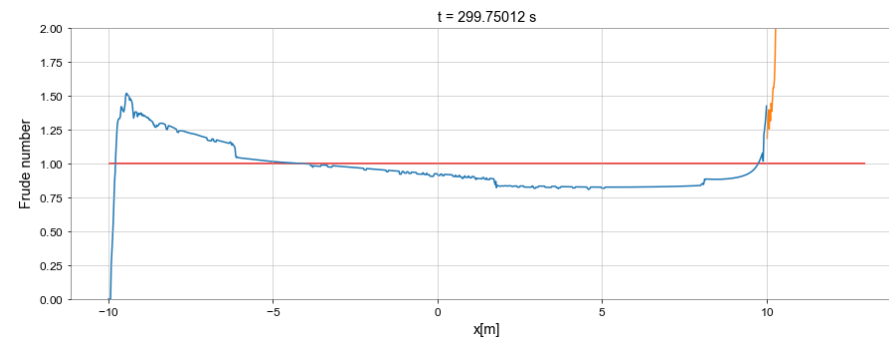
● Other flow rate



72.6t/h

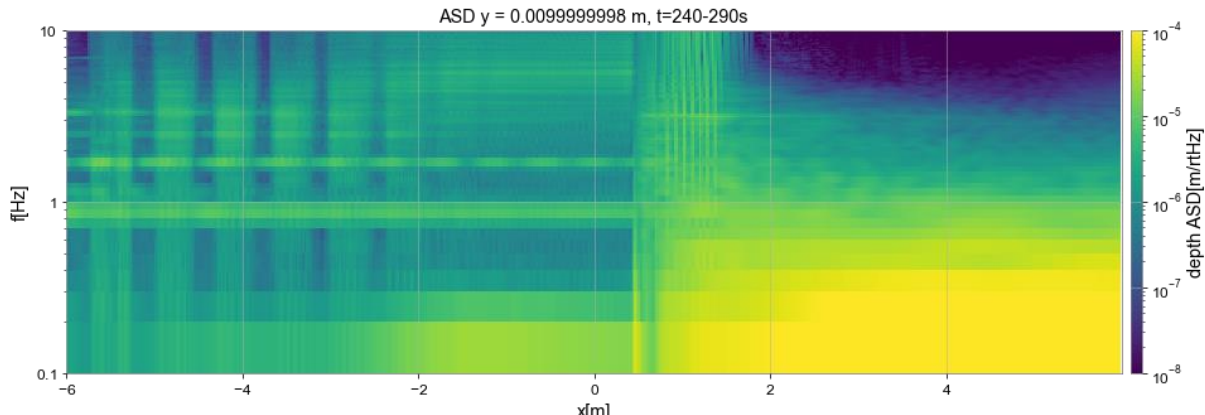


109t/h

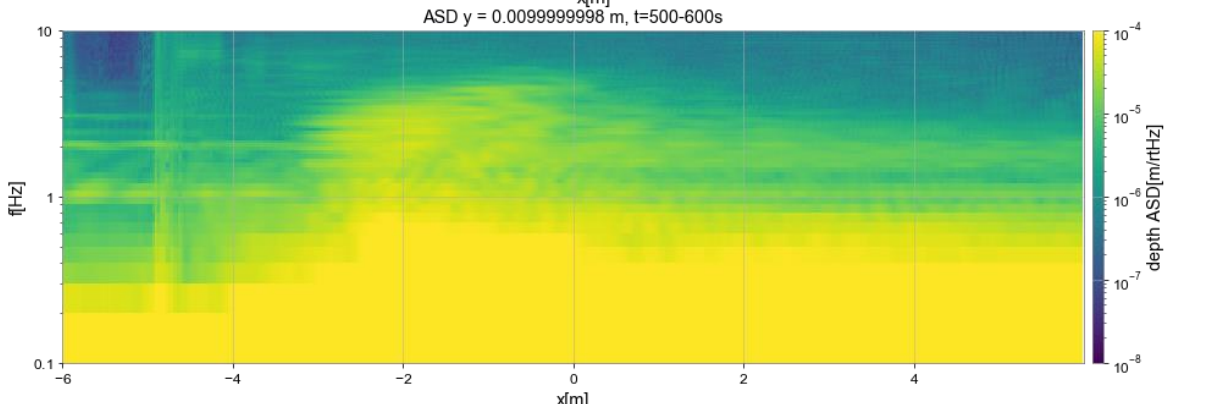


181t/h

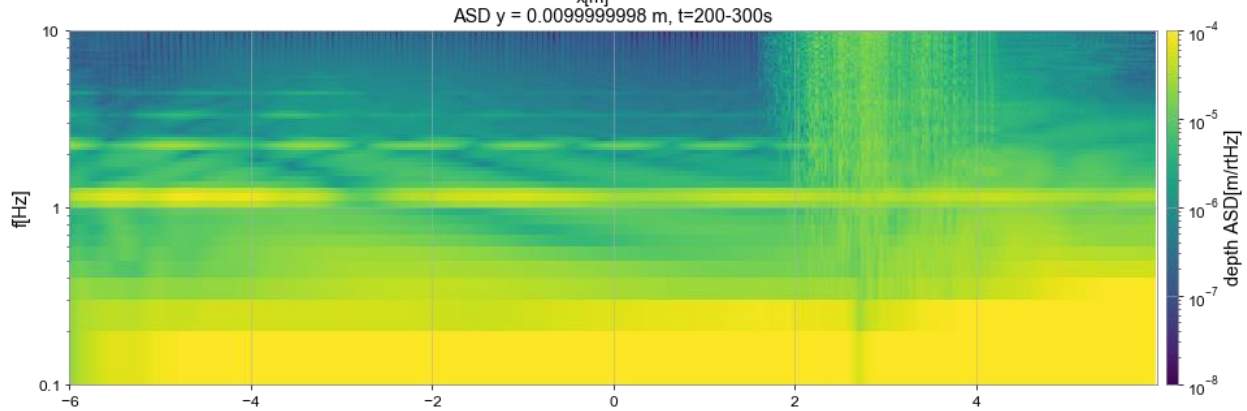
跳水は 1 ± 0.125 で発生。



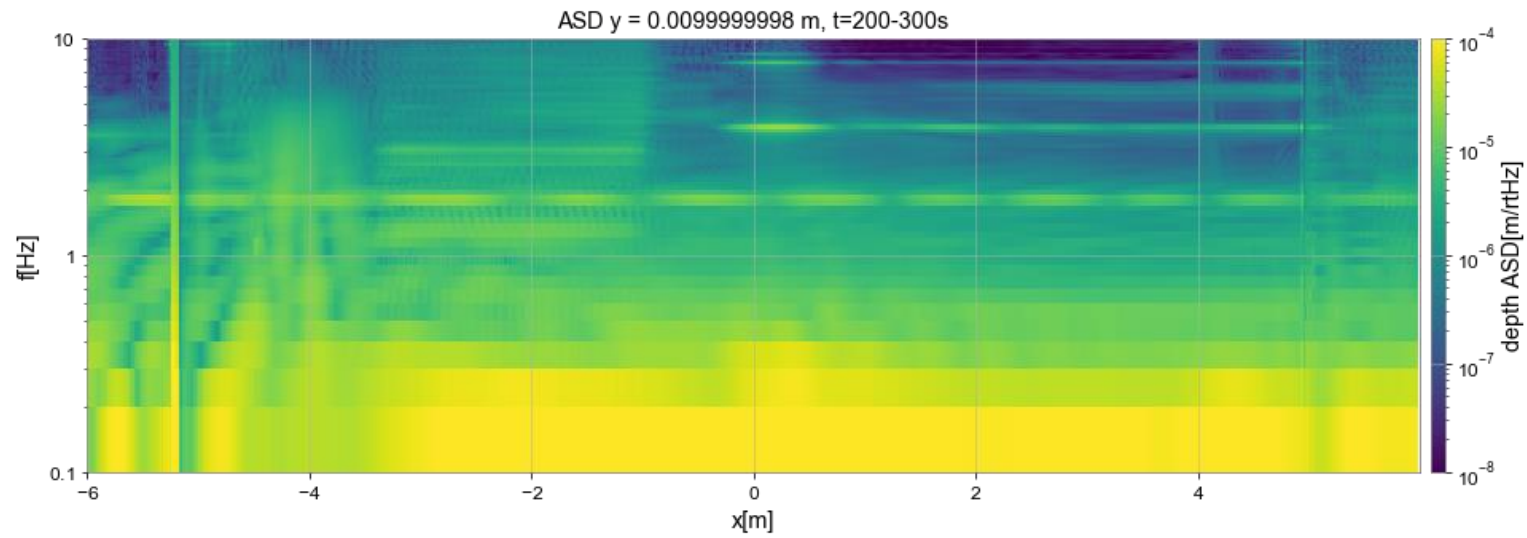
36.4t/h



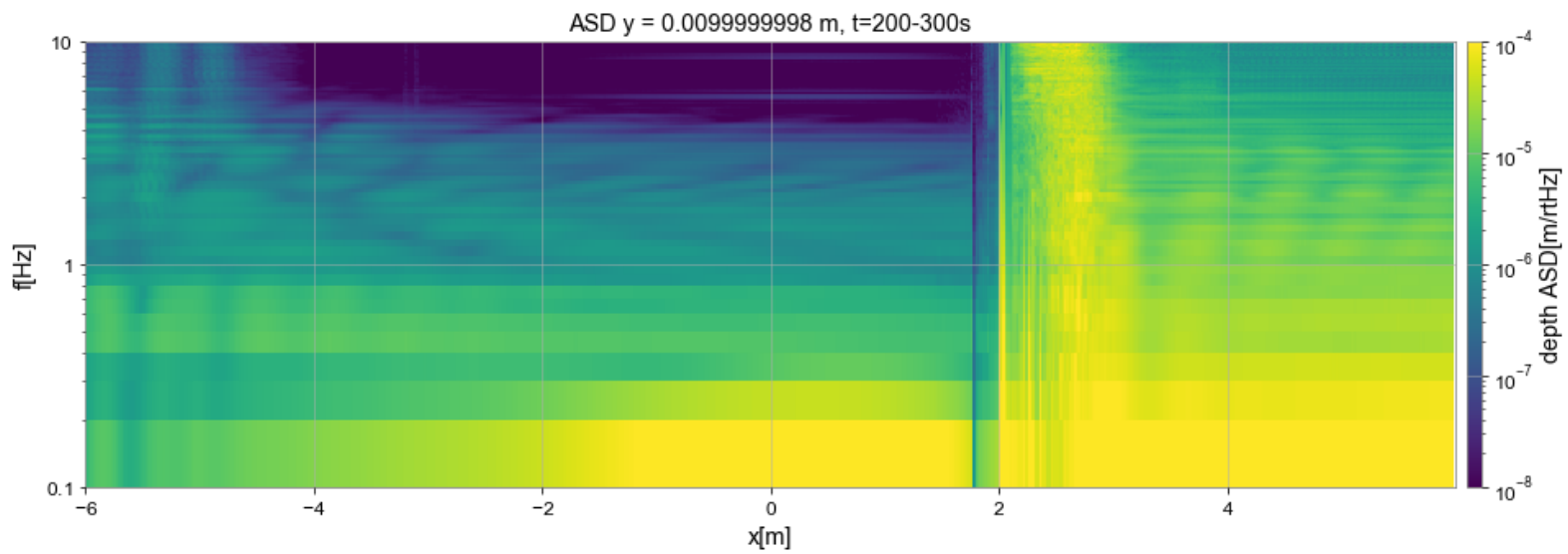
72.4t/h



109t/h

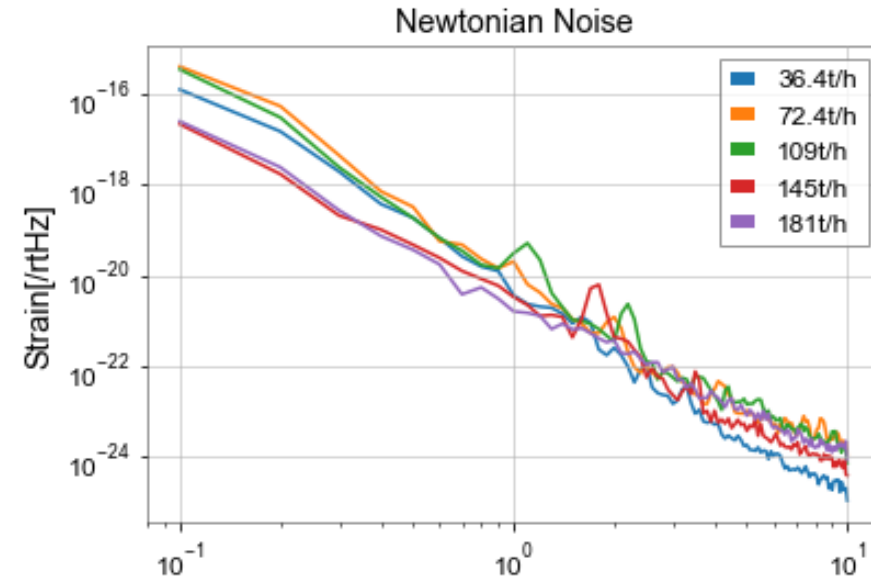
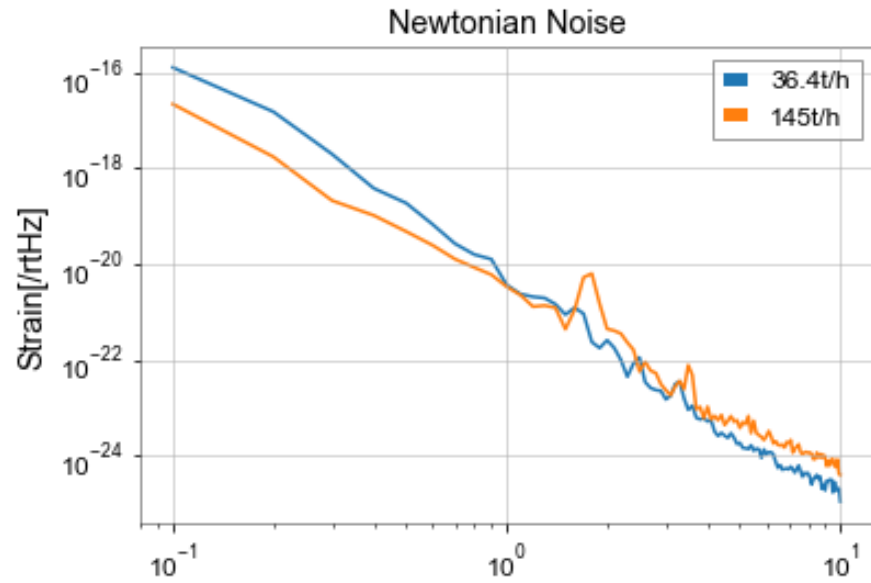


145t/h



181t/h

他の流量との比較



- 対象のパイプを含む流量

