

河川流が引き起こす振動に基づく流量測定

澤崎 郁¹, Shakti P. C.²

防災科学技術研究所

(1:地震津波防災研究部門、2:水・土砂防災研究部門)

謝辞：本研究課題では2020年度大成学術財団研究助成によるご支援を頂きました
連絡先：sawa@bosai.go.jp



背景

<上流域での流量観測の現状>

- 上流域には多くの支流があり、急峻な地形のため、網羅的に水文観測点を設置することは困難
- 洪水時に欠測しやすい

安全に、遠隔から、欠測なしに、リアルタイムで、流況を観測する方法は？？？

- 新たな水文観測網：財政的に難しい・・・
- 人工衛星画像：日本のような小河川では困難・・・
- 降水分布からのリアルタイム流量シミュレーション：上流域の降水データ、地形データ等はまだまだ不十分・・・



地震計記録が使える？？

水位・流量観測の様子

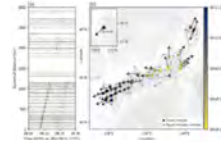


地震計で記録される「地震以外」の自然現象、社会活動

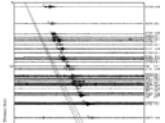
地すべり(Okuwaki et al., 2020)

火砕流(山里他, 1993)

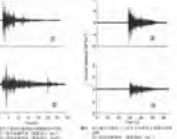
交通振動(Brenguier et al., 2019)



火球(Yamada and Mori, 2012)

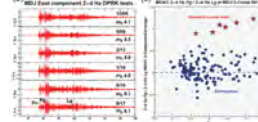


雪崩(今西他, 2004)

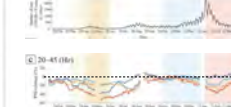


防災科研・陸海統合
地震津波火山観測網
「MOWLAS」

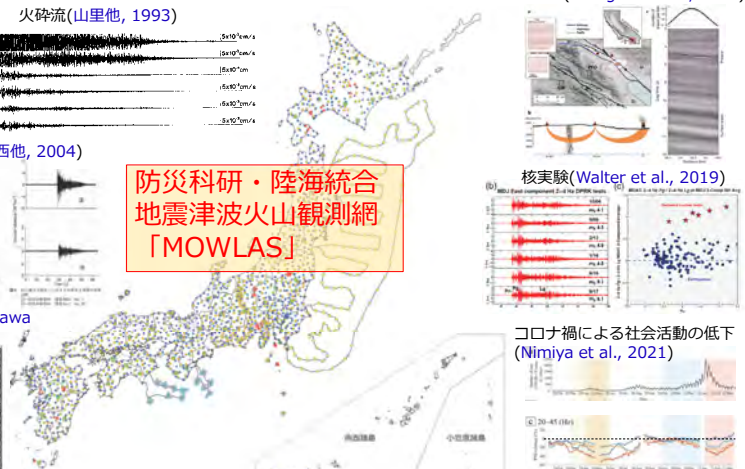
核実験(Walter et al., 2019)



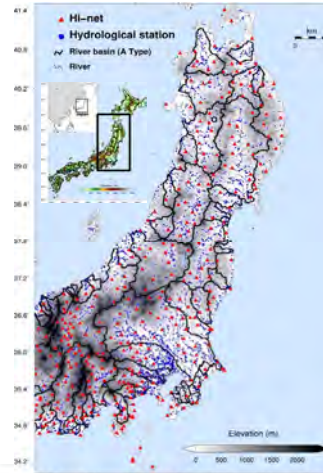
コロナ禍による社会活動の低下(Nimiya et al., 2021)



爆弾低気圧(Matsuzawa et al., 2012)



高感度地震観測網「Hi-net」と水文観測点の分布



<Hi-net>

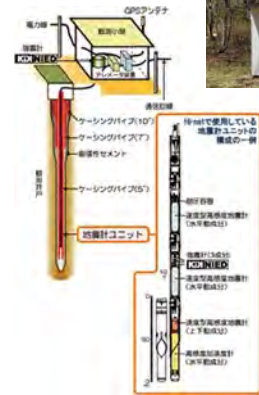
- 防災科研が運用する高感度地震観測網(Aoi et al., 2020).
- 日本の地震活動を網羅的に調べるため、約20km間隔（地殻の厚さ相当）で、全国ほぼ一様に設置（山間部も）
- 社会活動起源のノイズを避けるため、深さ100m以深に設置
- インターネットからほぼリアルタイムで無料で取得可能

特に上流域では、平坦な場所が限られるため、Hi-net観測点は河川の近くに設置されている場合が多い。これらの上流域の河川には水文観測点はほとんど設置されていない

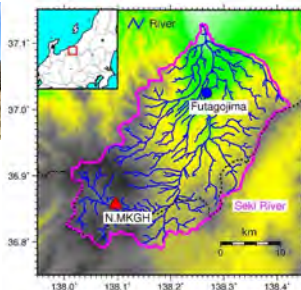


研究のきっかけ

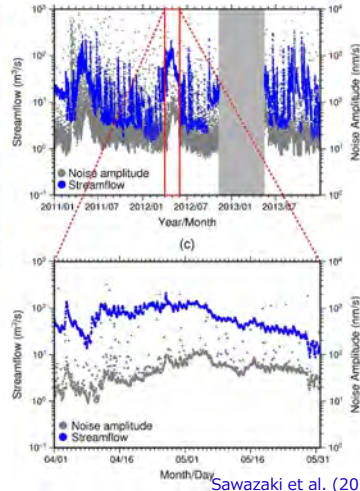
Hi-netの模式図



関川流域



Hi-netノイズ振幅と流量の関係



- 毎年4-5月に流量、ノイズとも増加
- 1日周期の増減（夕方近くにピーク）

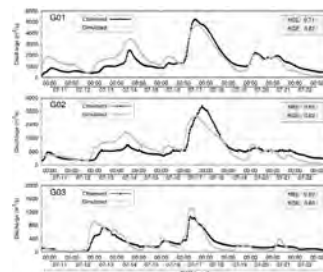
融雪洪水による流量変動と、それにより
励起された振動が観測される

RRIモデルに基づく流量計算

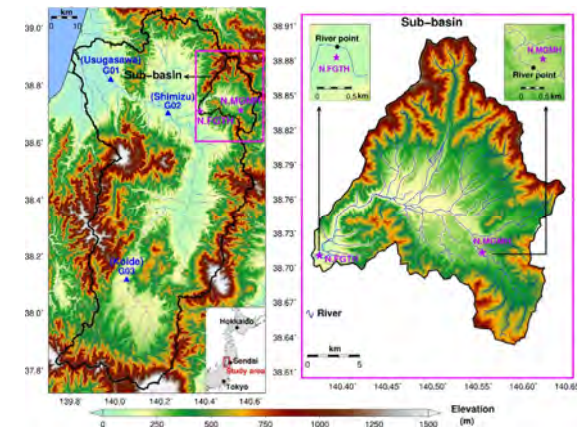
地震観測点の近くでの流量をどのように推定するか



降雨流出氾濫 (RRI, Sayama et al., 2012) モデルを利用



— : 観測流量
— : RRIモデルによる計算流量



▲ : 流量観測点
★ : Hi-net

地震計ノイズ記録の計算流量へのフィッティング

流量(Q)と地震計ノイズパワー(E)の経験式 (今回は1-2Hzを使用)

$$Q_{est}^i = \begin{cases} A(E_{obs}^i - E_0)^b + Q_0 & (E_{obs}^i > E_0) \\ Q_0 & (E_{obs}^i \leq E_0) \end{cases}$$

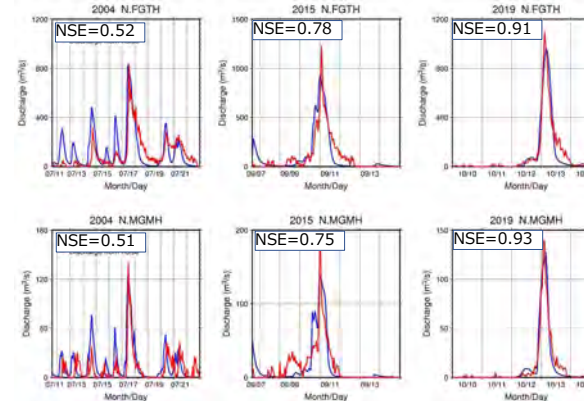
Q_0 : 洪水前の平均流量
 E_0 : 洪水前の平均ノイズパワー

地震計ノイズから推定した流量 Q_{est} と、RRIモデルにより計算した最寄り河川上地点の流量 Q_{sim} のNSE(Nash and Sutcliffe, 1970)が最大となるように、パラメータ A と b を最適化

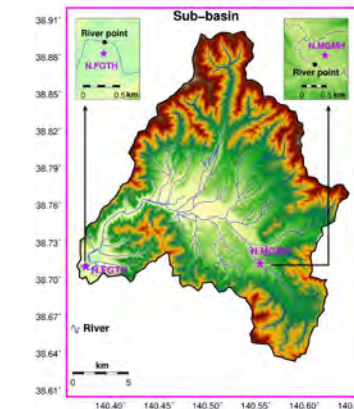
$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{est}^i - Q_{sim}^i)^2}{\sum_i (Q_{sim}^i - \bar{Q}_{sim})^2}$$

NSE>0.6のとき、再現性が
「概ね良好」と判断される

最寄り河川上地点における計算流量とHi-net地震計記録の比較

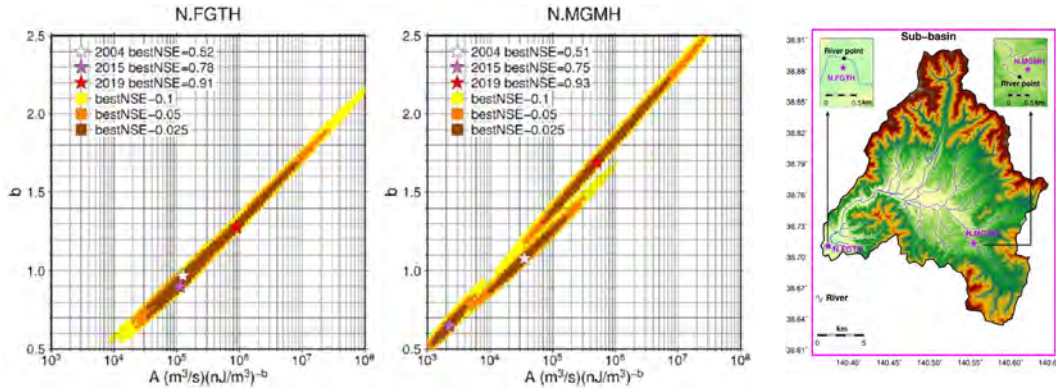


— : RRIモデルによる計算流量 Q_{sim}
— : Hi-netノイズから推定した流量 Q_{est}



洪水予測において特に重要な、**流量のピーク値とタイミング**が良く合っている

洪水イベントごとのパラメータの再現性



より上流側のN.MGMHで再現性があまりよくない
 → 計算流量が実際の流量を反映していない
 ・ノイズー流量関係を単純なべき乗則では説明できない

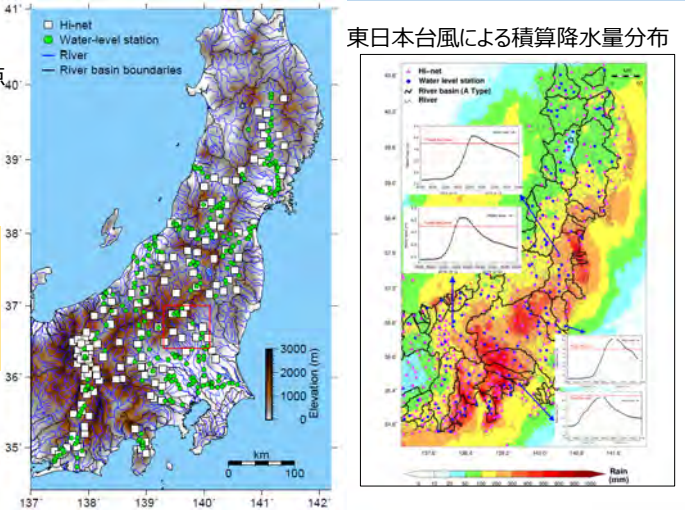
使用したデータ

- Hi-net : 143点
- 水位観測点 (国土交通省) : 347点
- Hi-net/水位観測点ペア: 4302
- 解析期間 : 2019/10/10-17
 (12-13日に令和元年東日本台風が上陸)

解析の手順

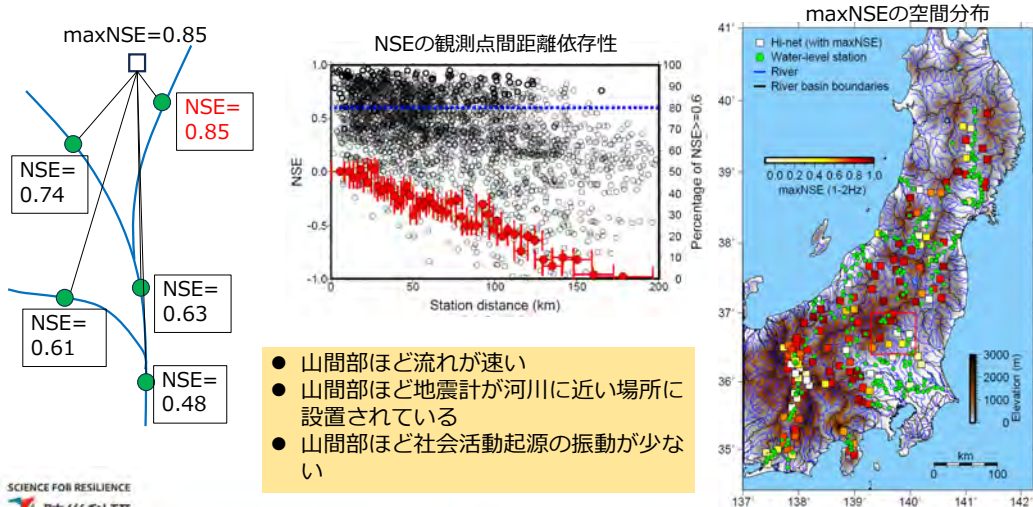
1. 地震計ノイズ記録から、ペアを組んだ水位記録の再現を行う
2. 再現性が高い (高いNSE値) Hi-net観測点の特徴を調べる

$$H_{est}^i = \begin{cases} A(E_{obs}^i - E_0)^b + H_0 & (E_{obs}^i > E_0) \\ H_0 & (E_{obs}^i \leq E_0) \end{cases}$$



東日本台風による積算降水量分布

NSEの観測点間距離依存性、“maxNSE”の空間分布



- 山間部ほど流れが速い
- 山間部ほど地震計が河川に近い場所に設置されている
- 山間部ほど社会活動起源の振動が少ない

河川振動励起の物理的背景

乱流モデル (Gimbert et al., 2014)に基づく河川振動と水位の関係

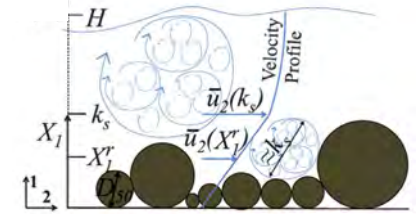
$$E_t \propto F^2 \quad \text{振動のパワーは物体に加わる力の2乗に比例}$$

$$F \propto V^2 \quad \text{流体中の物体に加わる力は流速の2乗に比例}$$

$$V \approx \frac{1}{n} H^{2/3} I^{1/2} \quad \text{流速は河床勾配の平方根に比例 (マンニング則)}$$

$$E_t \propto \int_{river} H(s,t)^{8/3} I(s)^2 |G(s-s_0)|^2 ds$$

- E_t : 理論上の河川振動のパワー
- F : 河川中の物体に加わる力
- V : 流速
- H : 河川の水位 (矩形断面を仮定)
- I : 河床勾配
- n : マンニングの粗度係数
- C : 比例定数
- G : グリーン関数 (振動の距離減衰を反映)



Gimbert et al. (2014)

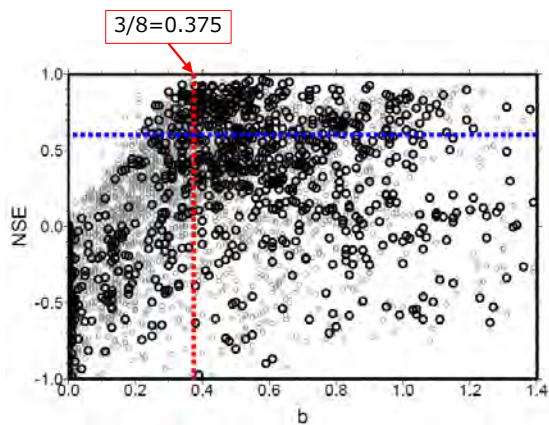
- 河川振動のパワーは水位の8/3乗に比例
- 河川振動のパワーは河床勾配の2乗に比例

べき指数bの推定値

$$E_t \propto \int_{river} H(s,t) \frac{8}{3} I(s)^2 |G(s-s_0)|^2 ds$$

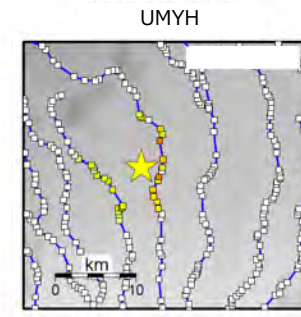
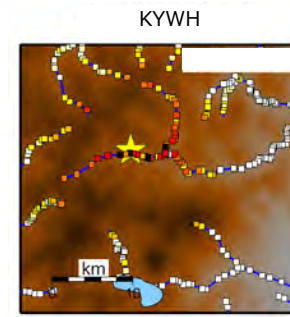
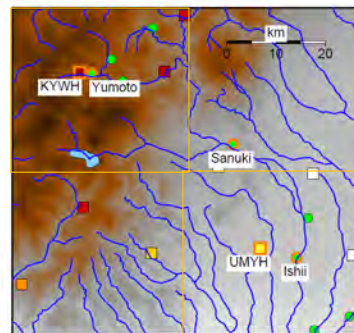
$$H_{est}^i = \begin{cases} A(E_{obs}^i - E_0)^b + H_0 & (E_{obs}^i > E_0) \\ H_0 & (E_{obs}^i \leq E_0) \end{cases}$$

理論的には $b=3/8=0.375$



NSEが高い観測点ペアでは、b値は0.3~0.8くらいの値をとる傾向

河川振動の感度カーネル



$$E_t \propto \int_{river} H(s,t) \frac{8}{3} I(s)^2 |G(s-s_0)|^2 ds$$

※表面波を仮定 $|G(r)|^2 \propto \frac{1}{r} e^{-cr}$

- 積分核の $I^2|G|^2$ は、山間部が平野部より大きい
- 概ね10km離れると河川振動は検出されない

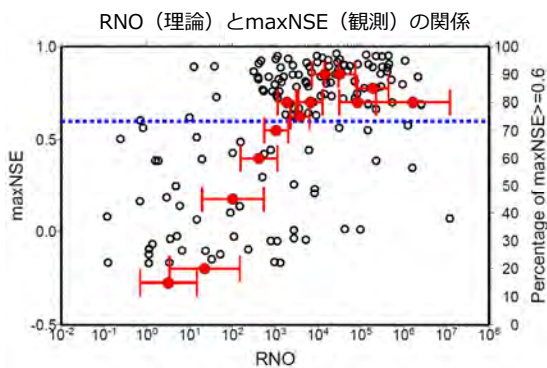
河川振動の「観測しやすさ」指標

$$E_t \propto \int_{river} H(s,t) \frac{8}{3} I(s)^2 |G(s-s_0)|^2 ds$$

理論上の河川振動の観測しやすさ
River Noise Observability (RNO)

$$RNO = \frac{E_t(H=1m)}{E_0}$$

E_t : 理論上の河川振動のパワー
 E_0 : 河川振動以外の振動のパワー



- maxNSE が0.6以上の観測点の割合は、RNOと強い相関がある
- 河川振動を計測するには、RNOが高い場所に地震計を設置すると良い

まとめ

- 河川振動を観測しやすい条件は、
 1. 地震計が河川に近い
 2. 河床勾配が急峻
 3. 河川以外による振動（特に社会活動による振動）が少ない
 上流域は下流域よりこれらの条件を満たしやすく、流況観測に適している
- 乱流モデルにより、河川振動パワーと流況の関係を定量的に表現可能
- 水位観測点がない河川上の地点での流況は、RRIモデルにより推定可能

従来の水文学的手法による流況観測が難しい上流域において、地震計ノイズ記録を用いた流況推定が可能であることを実証した。