

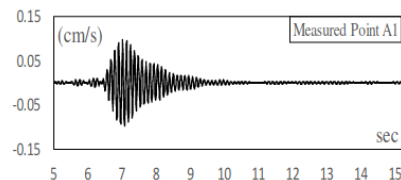
はじめに

橋梁点検→目視・打音
定性的、作業車や足場のコスト



高所作業車を用いた点検
写真：株式会社創研コンサルタント

振動計測や橋梁モニタリング
定量値、橋の上からで安全、低コスト



振動試験から固有振動数を同定



	2004年 (17年経過)	2012年 (25年経過)	2015年 (28年経過)	2017年 (30年経過)	2019年 (32年経過)
固有振動数 (鉛直逆対称1次)	11.62Hz	9.47Hz	9.46Hz	8.79Hz	8.69Hz

かじか橋の振動測定値

固有振動数の低減から部材の劣化評価を
することは確かめられていない

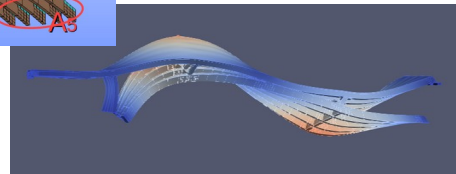
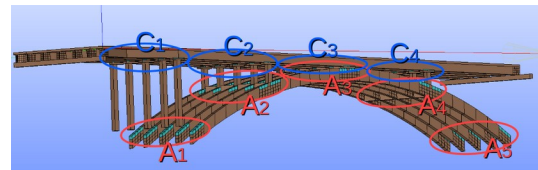


【最終的なゴール】

経年による固有振動数の低減データ（結果）から
部材の劣化性状（原因）を推定する

【本研究の内容】

解析上で木部材に部分的な腐朽（原因）を与えて
振動解析を行い、
部分的な腐朽が橋全体の振動数（結果）に
どの程度影響を与えるか感度解析する



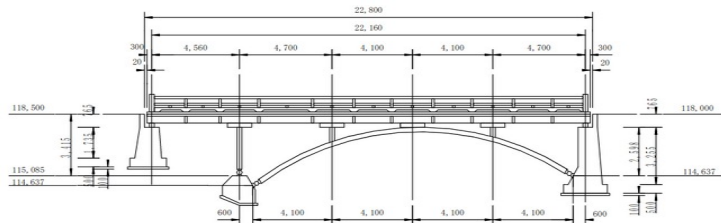
腐朽を与えて振動解析

対象橋梁



かじか橋（石川県 石川県民の森）

- ・竣工1987年12月（35年経過）
- ・橋長22.8m，幅員3.0m，ヒバ集成材
- ・近代木橋の上路アーチ橋として第一号橋



一般図

2019年の写真



苔生し



アーチ部の腐朽



アーチ端部の腐朽



5本のアーチと縦桁



高欄の割れ

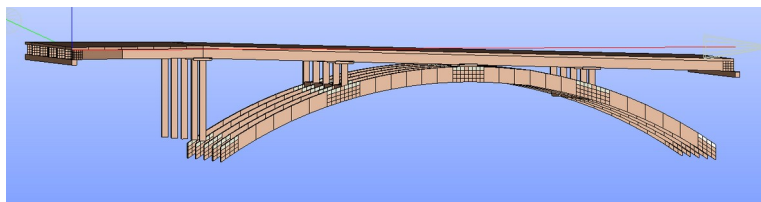


縦桁と枕梁の接合部の腐朽

過去の研究

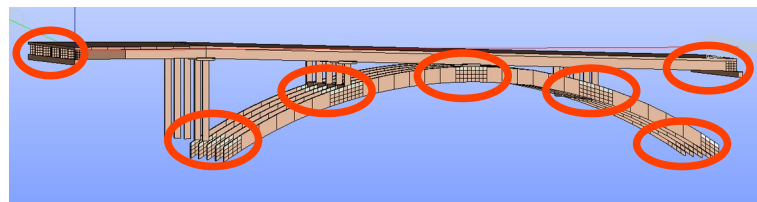
測定値と解析値を比較することによる部材ヤング率の推定

	健全時推定	2004年 (17年経過)	2012年 (25年経過)	2015年 (28年経過)	2017年 (30年経過)	2019年 (32年経過)
鉛直逆対称 モード測定値	12.79Hz (解析値)	11.62Hz	9.47Hz	9.46Hz	8.79Hz	8.69Hz
推定ヤング率	9.6GPa (ヒバ集成材)					???



Mモデル（二年前）

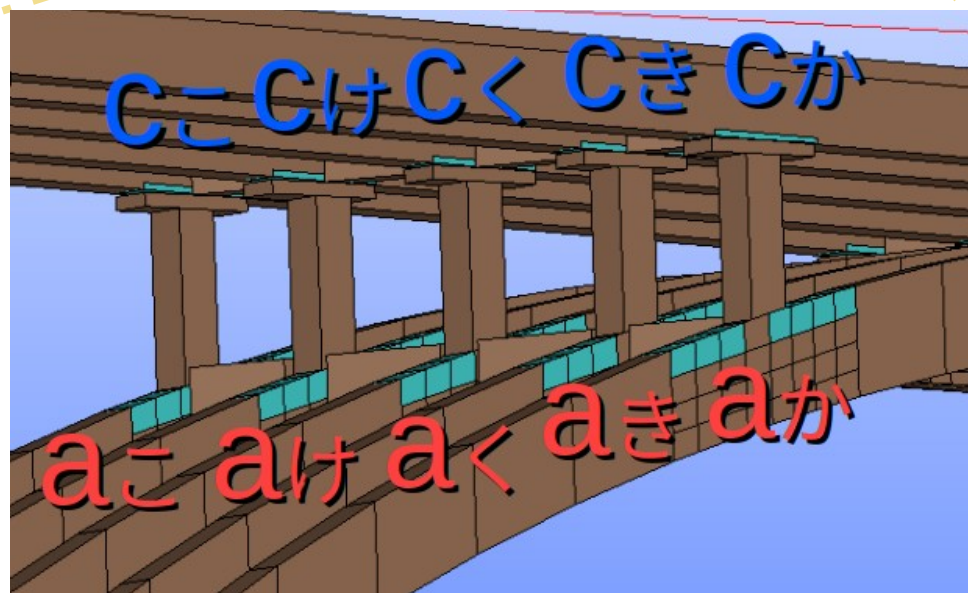
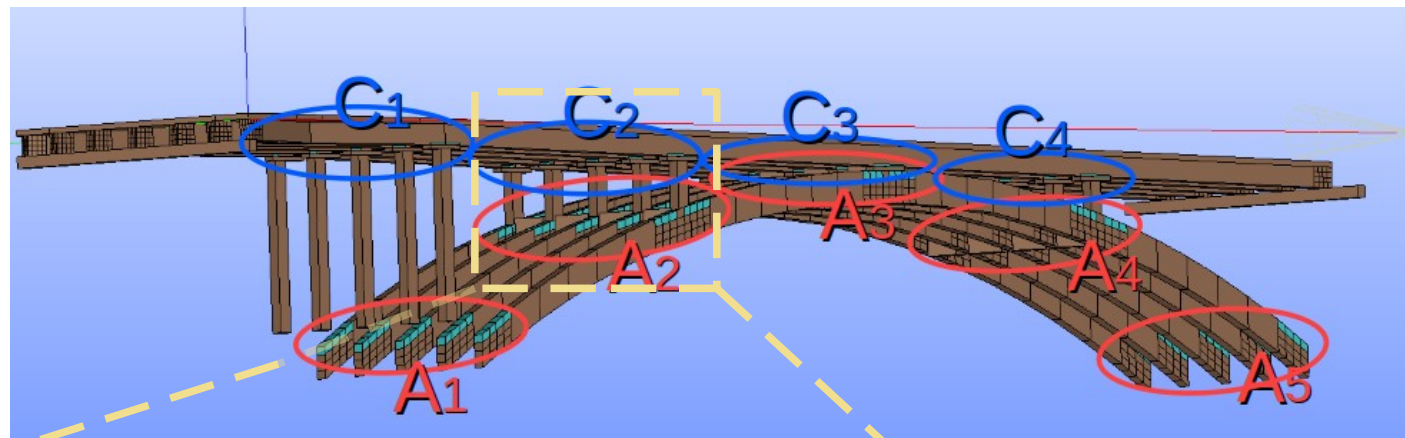
- 部分的な腐朽なし
- 推定ヤング率→2.93GPa（31%残存）
現実とは遠い、



Sモデル（昨年度）

- 部分的な腐朽あり
腐朽部分はヤング率を著しく落としてある
- 推定ヤング率→3.57GPa（37%残存）
これも現実とは遠い、

腐朽モデルの設定



- ・腐朽させる箇所は

アーチ5×5箇所…目視で腐朽を確認

A1(aあ～aお)、A2(aか～aこ)、A3(aさ～aそ)、
A4(aた～と)、A5(な～の)

縦桁接合部4×5箇所…雨水が滞留して腐朽しやすい

C1(cあ～cお)、C2(cか～こ)、C3(cさ～そ)、C4(cた～と)

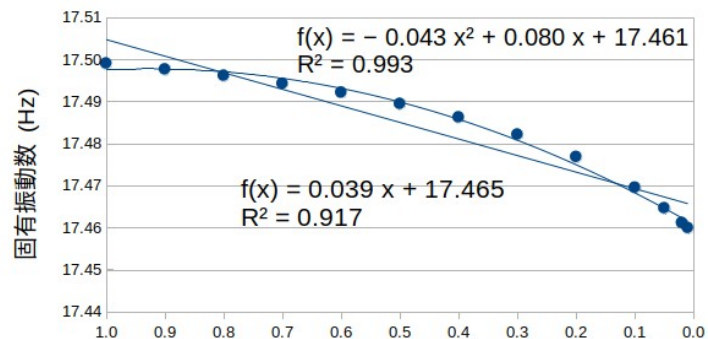
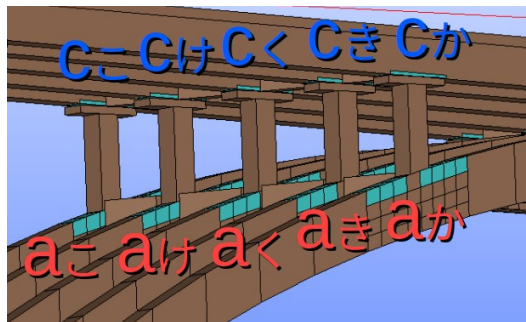
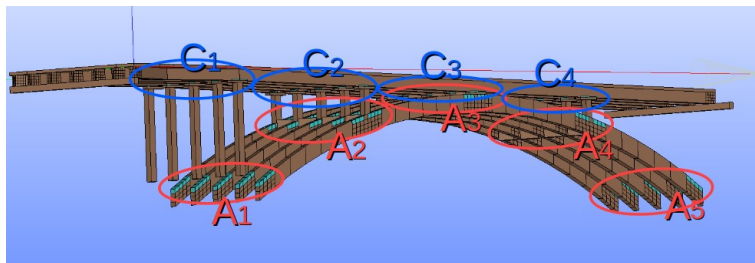
- ・周りの健全な木部材

ヤング率9.6GPa、ポアソン比0.4、比重0.459

- ・メッシュサイズは5mm～100mm

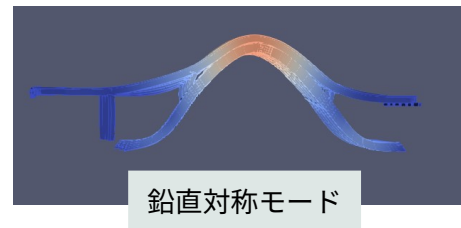
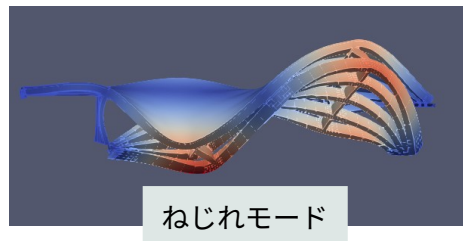
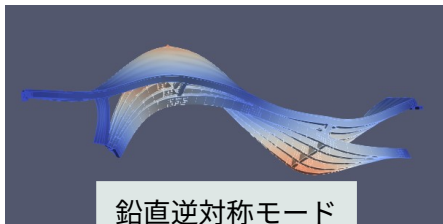
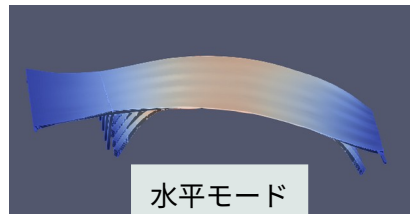
2次要素で約140万要素

解析手法

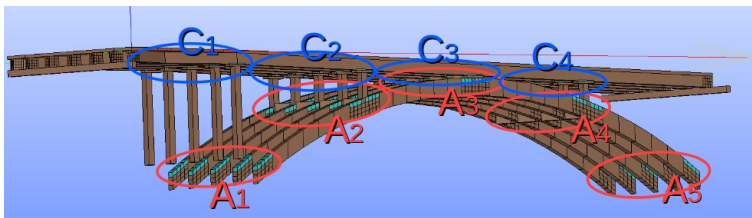


ヤング率の残存率
解析結果の一部

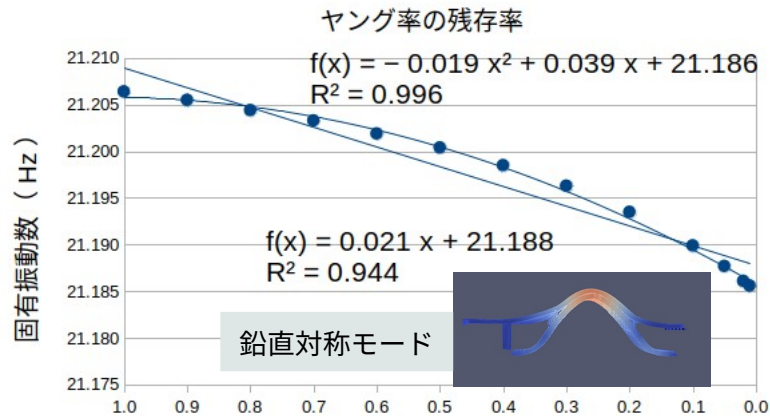
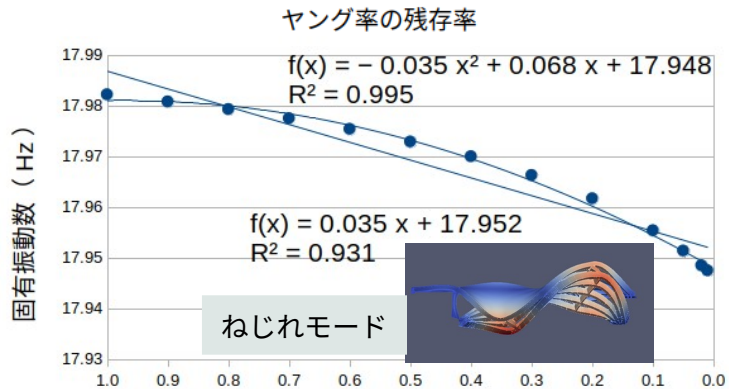
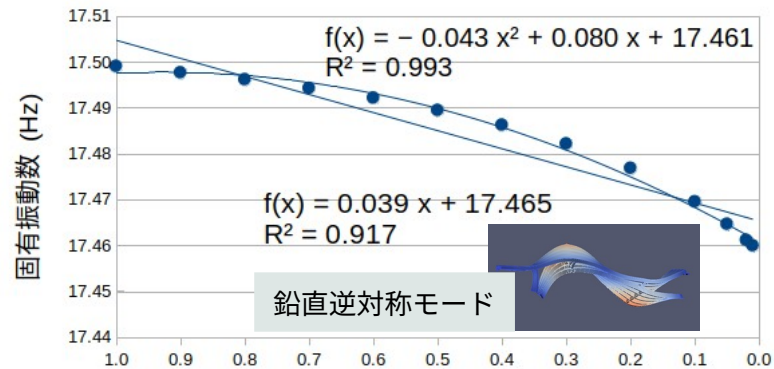
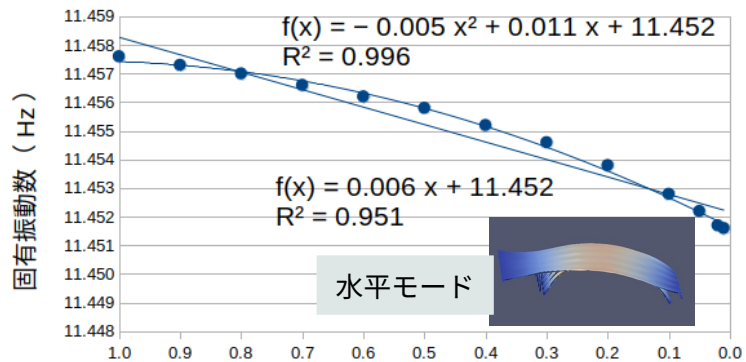
- 腐朽状態はヤング率の低減で表す
- 腐朽箇所のヤング率を「一箇所ずつ」下げていく
- 入力するヤング率は
健全時(9.6GPa)、健全時から0.9倍、0.8倍、...、
0.1倍、0.05倍、0.02倍、0.01倍の計13段階
- 計算された固有振動数は低次の4モードを読み取る
- 以上の操作を腐朽箇所A1-A5、C1-C4の9ケースと
aか-aこ、aさ-そ、aた-と、cか-こ、cた-との25ケース行う



解析結果①



A1の解析結果



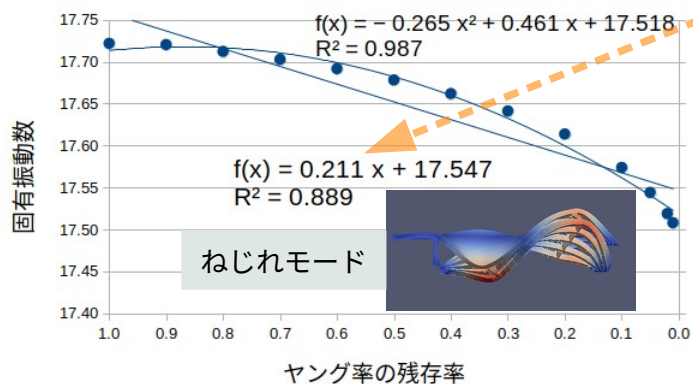
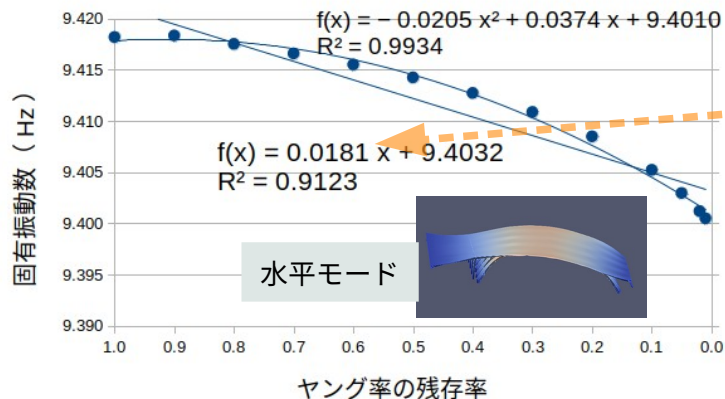
ヤング率の残存率

ヤング率の残存率

解析結果②

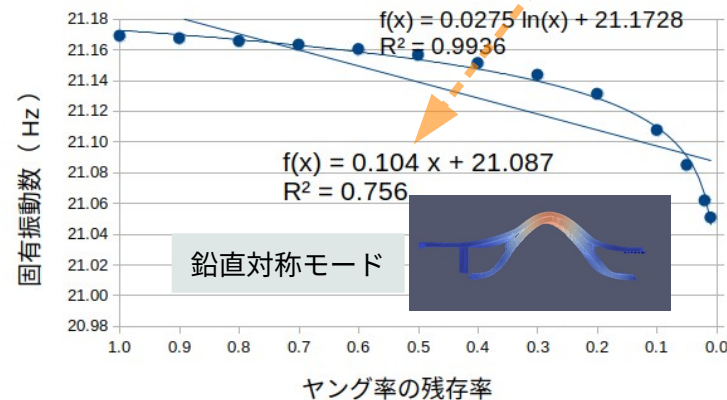
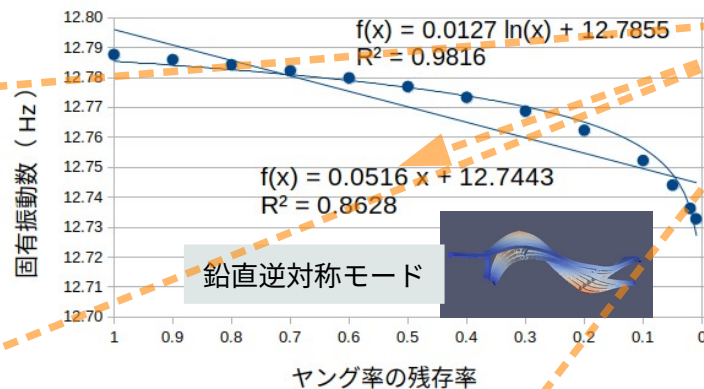


aかの解析結果



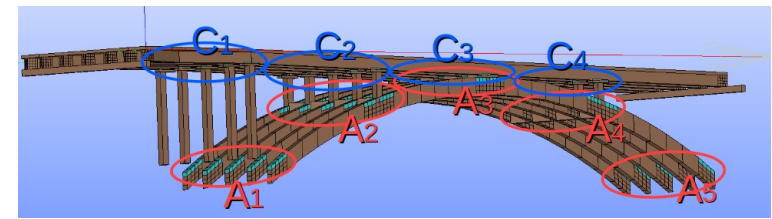
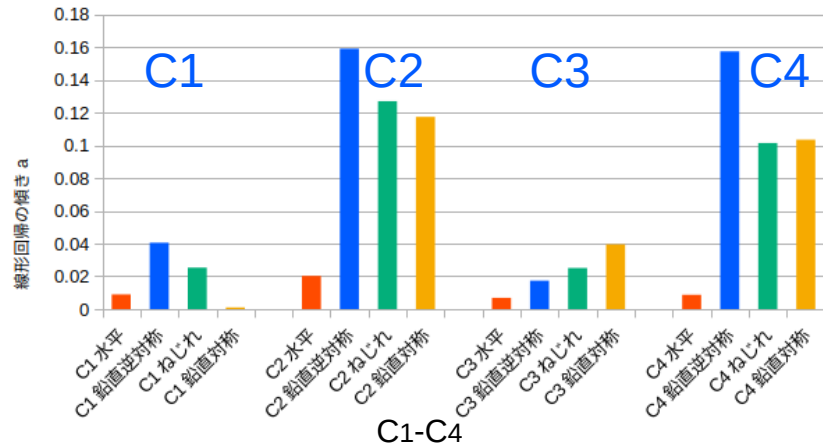
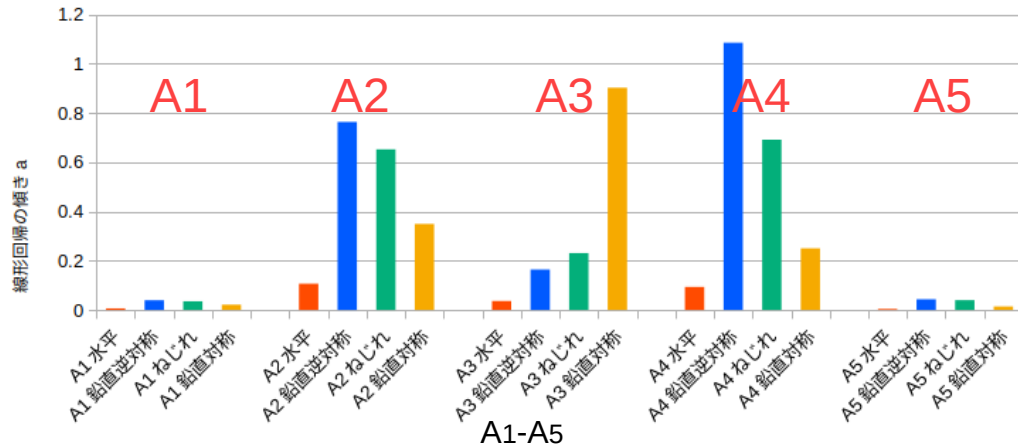
腐朽ヤング率と固有振動数の低減の関係は
「2次の多項式」または「対数」で回帰する！

感度の指標に
”回帰直線の傾きの大きさ”
を用いる

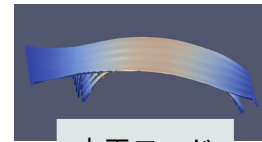


感度解析①

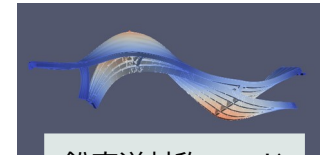
線形回帰の傾きの大きさ（感度の高さ）を
A1-A5、C1-C5の腐朽箇所で4つの振動モードごとに棒グラフ化



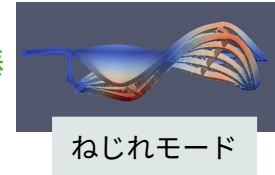
赤棒



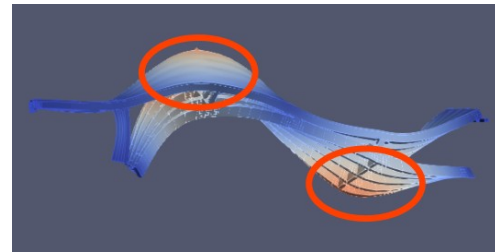
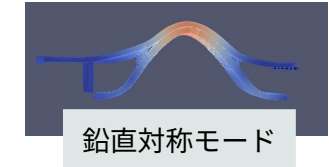
青棒



緑棒



橙棒

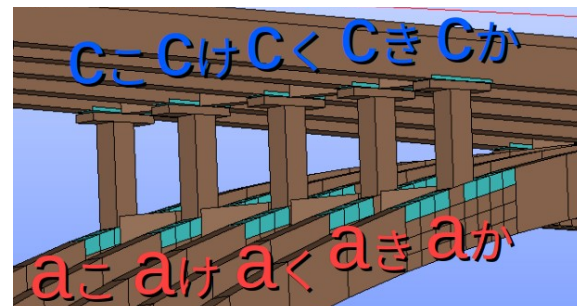
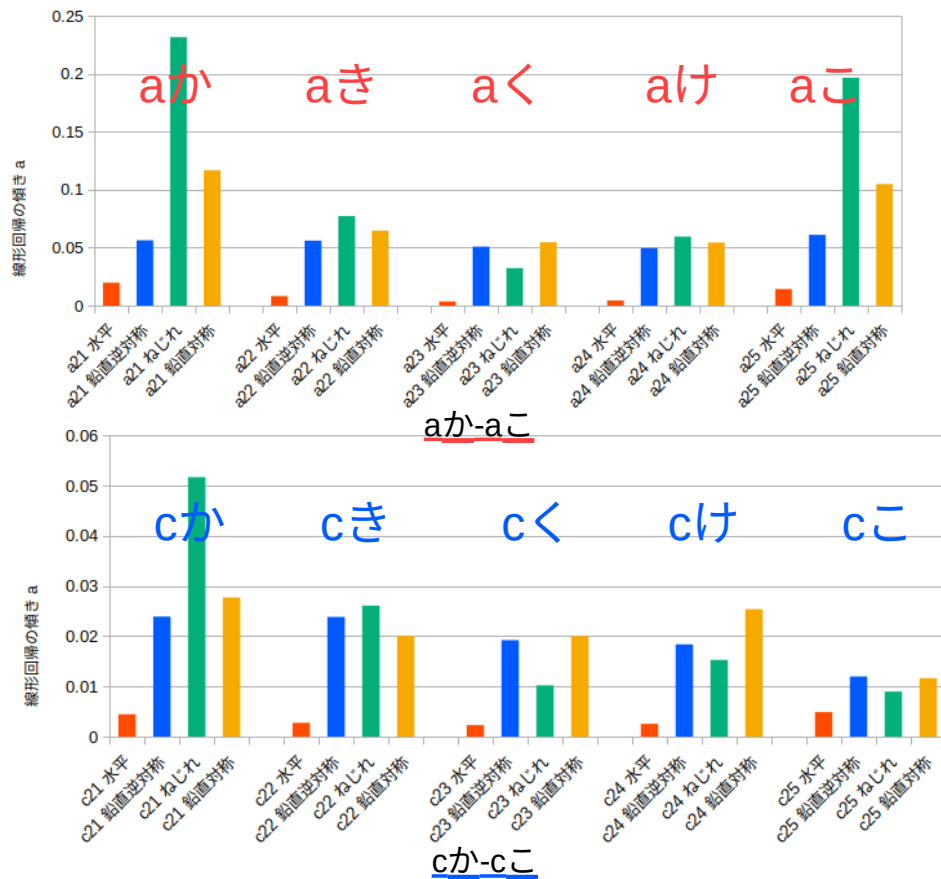


鉛直逆対称モードの腹

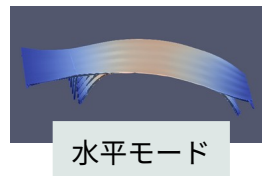
- ・ 振動の腹となる部分→感度 大
節となる部分→感度 小
- ・ 水平モードは今回の腐朽箇所では
全体的に感度 小

感度解析②

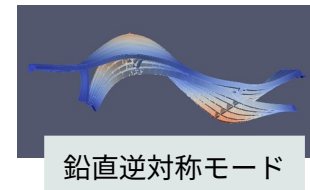
線形回帰の傾きの大きさ（感度の高さ）を
aか-aこ、aさ-そ、aた-と、cか-こ、cた-との
 腐朽箇所で4つの振動モードごとに棒グラフ化



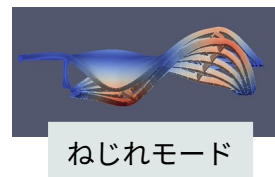
赤棒



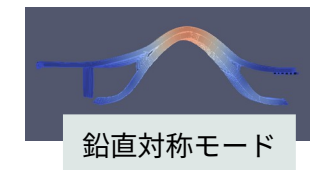
青棒



緑棒



橙棒

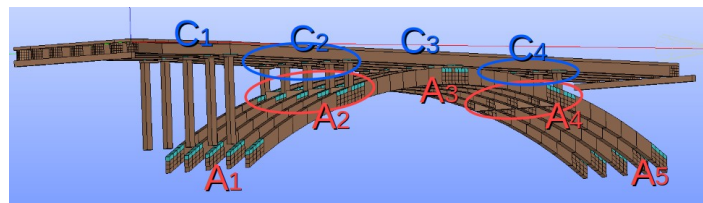


- ねじれモード(緑)
 振動の腹となる部分→感度 大
 節となる部分→感度 小
- ほかの振動モードは概ね一定
 →一部が腐朽しても全体では剛性が保たれているか

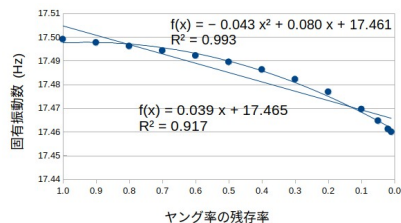
測定値との比較

鉛直逆対称1次モードの固有振動数について測定値と解析値を比較しながらモデル妥当性検証・部材ヤング率を推定
A2、A4、C2、C4腐朽モデルを用いる

	健全時推定	2004年 (17年経過)	2012年 (25年経過)	2015年 (28年経過)	2017年 (30年経過)	2019年 (32年経過)
固有振動数	12.79Hz (解析値)	11.62Hz	9.47Hz	9.46Hz	8.79Hz	8.69Hz
推定ヤング率	9.6GPa (ヒバ集成材)					???



A2、A4、C2、C4腐朽モデル



$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

梁の曲げ振動理論式

ヤング率と固有振動数の関係

腐朽箇所（A2、A4、C2、C4）のヤング率は健全ヤング率の1%で0.096GPa
全体の部材ヤング率は9.6GPa（12.79Hz）から解析値8.69Hzになるまで低減させる

・気幹密度（含水率15%）…ヤング率4.24GPa（44.2%残存）→まだ低すぎる

参考

架設後27年経過しためおと橋（秋田県）の部材測定値…約80%残存

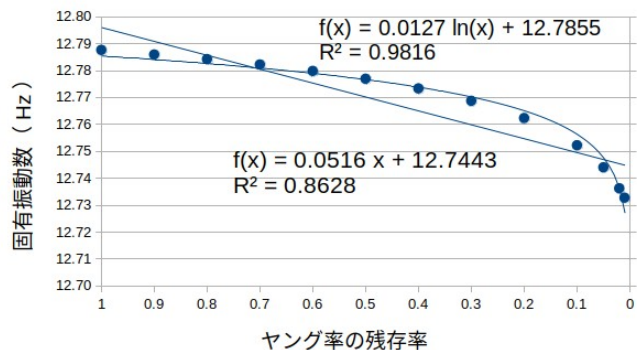
密度（含水率）の影響も大きいのか？

・気幹密度の1.5倍（含水率42%）…ヤング率6.41GPa（66.8%残存）

→妥当な結果！！

まとめ

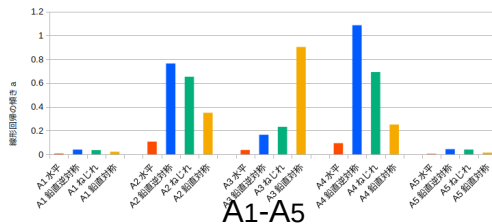
解析上で木製アーチ橋の木部材へ部分的に腐朽を与えて振動解析を行い、各腐朽箇所では橋全体の固有振動数にどの程度影響を与えるか感度解析をした



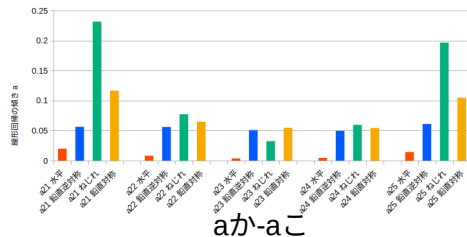
腐朽ヤング率と固有振動数の低減の関係
「2次の多項式」または「対数」で回帰する

今後の検討

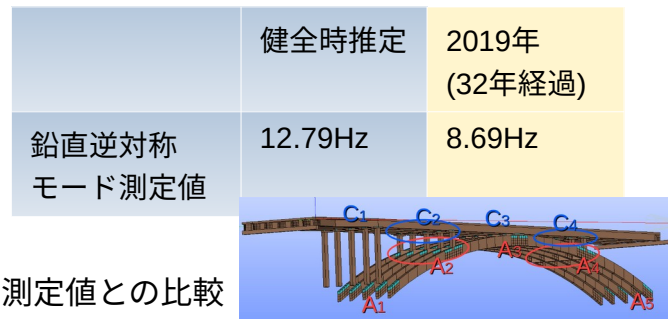
- 水平モードの感度要素の検討
- 固有振動数の測定値の低減（結果）から部材の推定ヤング率（原因）を導出する
- 他の木橋で同様の感度解析をし、データを蓄積する
- 含水率と固有振動数の関係を調べる



A1-A5
アーチ、縦桁5本ずつまとめた感度解析
振動の腹→感度大 振動の節→感度小



aか-aこ
アーチ、縦桁1箇所ずつ感度解析
概ね一定→一部が腐朽しても全体では剛性が保たれるか



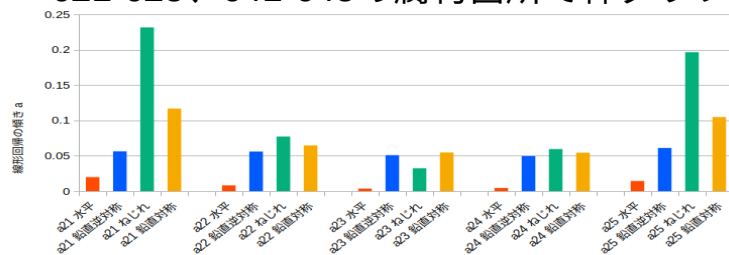
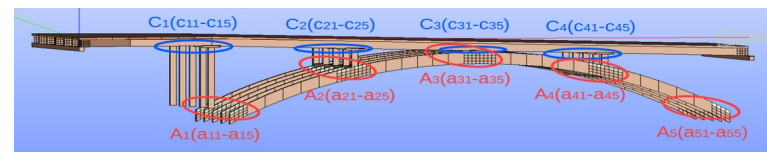
測定値との比較

- 気幹密度（含水率15%）
…ヤング率44.2%残存 まだ低すぎる
- 気幹密度の1.5倍（含水率42%）
…ヤング率66.8%残存 妥当な結果！！

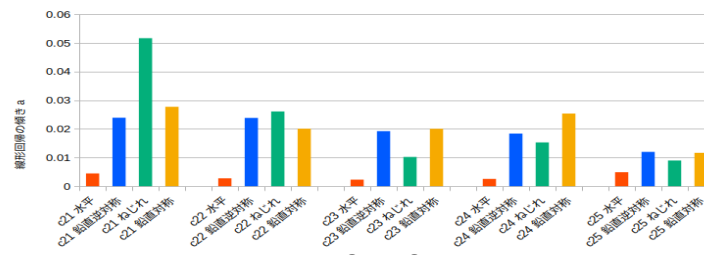
	架設時推定 解析値	2004年 (17年経過)	2012年 (25年経過)	2015年 (28年経過)	2017年 (30年経過)	2019年 (32年経過)
水平1次	9.42Hz	5.17Hz (0%)	3.13Hz (-39.5%)	2.92Hz (-43.5%)	2.81Hz (-45.6%)	2.73Hz (-47.2%)
鉛直逆対称1次	12.79Hz	11.62Hz (0%)	9.47Hz (-18.5%)	9.46Hz (-18.6%)	8.79Hz (-24.4%)	8.69Hz (-25.2%)
鉛直対称1次	21.14Hz	15.82Hz (0%)	15.82Hz (0%)	15.51Hz (-1.96%)	15.43Hz (-2.47%)	15.38Hz (-2.78%)

解析結果③

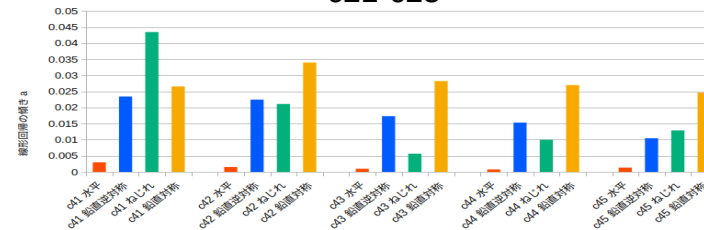
結果①のグラフの線形回帰の傾きの大きさ（感度の高さ）を4つの振動モードごとにa21-a25、a31-a35、a41-a45、c21-c25、c41-c45の腐朽箇所で棒グラフ化



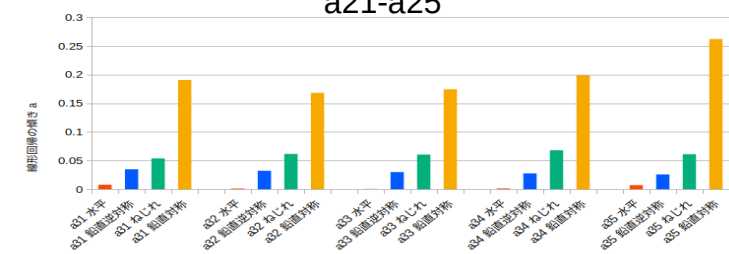
a21-a25



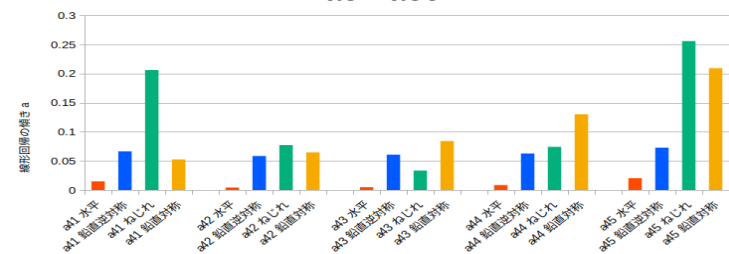
c21-c25



c21-c25



a31-a35



a41-a45

赤棒
水平モード(1次)

青棒
鉛直逆対称
モード(2次)

緑棒
ねじれモード(3次)

橙棒
鉛直対称モード(4次)

- ねじれモード(緑)
振動の腹となる部分→感度 大
節となる部分→感度 小
- 概ね一定→一部が腐朽しても全体では剛性が保たれている

	架設時推定 解析値	2004年 (17年経過)	2012年 (25年経過)	2015年 (28年経過)	2017年 (30年経過)	2019年 (32年経過)
水平1次	9.42Hz	5.17Hz	3.13Hz	2.92Hz	2.81Hz	2.73Hz
鉛直逆対称1次	12.79Hz	11.62Hz	9.47Hz	9.46Hz	8.79Hz	8.69Hz
鉛直対称1次	21.14Hz	15.82Hz	15.82Hz	15.51Hz	15.43Hz	15.38Hz

振動モード	水平	鉛直逆対称	ねじれ	鉛直対称
Hz	6.20	8.69	10.99	13.66

実橋の部材劣化を考察

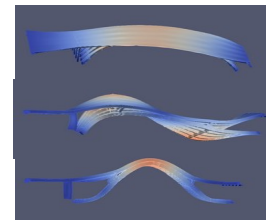
最後に、以上の成果をもとに
積年の測定値の低減のようすから実際の橋梁の部材劣化を考察する

	架設時推定 解析値	2004年 (17年経過)	2012年 (25年経過)	2015年 (28年経過)	2017年 (30年経過)	2019年 (32年経過)
水平1次	9.42Hz	5.17Hz (0%)	3.13Hz (-39.5%)	2.92Hz (-43.5%)	2.81Hz (-45.6%)	2.73Hz (-47.2%)
鉛直逆対称1次	12.79Hz	11.62Hz (0%)	9.47Hz (-18.5%)	9.46Hz (-18.6%)	8.79Hz (-24.4%)	8.69Hz (-25.2%)
鉛直対称1次	21.14Hz	15.82Hz (0%)	15.82Hz (0%)	15.51Hz (-1.96%)	15.43Hz (-2.47%)	15.38Hz (-2.78%)

各振動モードの振動数の減少率

- ・ 水平モード 大
- ・ 鉛直逆対称モード 中
- ・ 鉛直対称モード 微

測定値は
水平モード



鉛直逆対称モード

鉛直対称1次モード

鉛直対称2次モード

が存在する。

ねじれモードは測定されていない

