

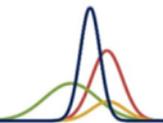
2022年10月31日

長大橋の観測データの活用による 維持管理支援システムの検討

プロジェクトリーダー: 京都大学工学研究科 金 哲佑

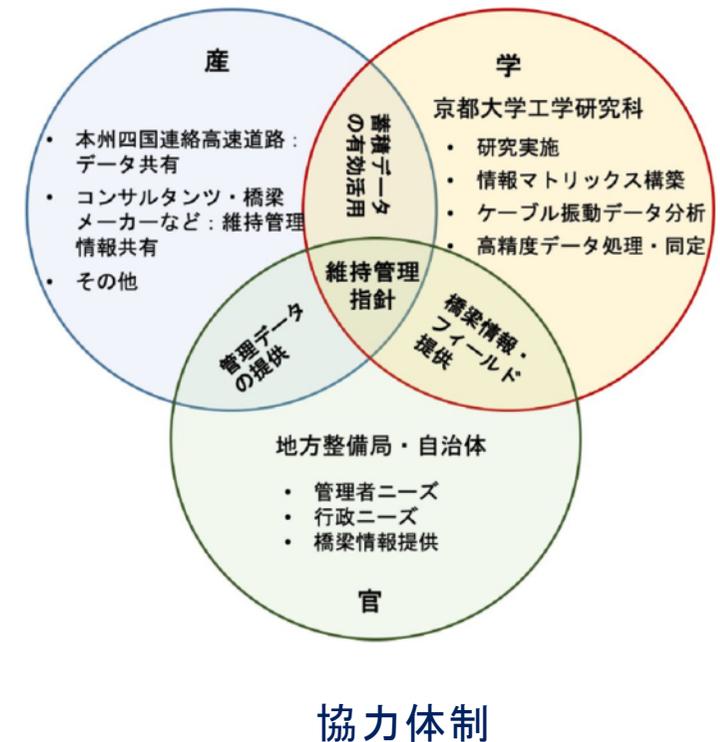
目次

1. 研究背景・目的
2. 管内のケーブル構造を有する特殊橋梁の劣化状況
3. 吊り橋の常時振動モニタリング
4. 斜張橋の常時振動モニタリング
5. ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理支援システム



研究背景・目的

- 自治体の長大橋管理を支援できる点検・モニタリング情報がほぼない,
 - 全てのケーブルを対象とした点検とモニタリングの難しさ,
 - 体系化された維持管理指針やモニタリング手法の不在.
-
- ケーブル構造を持つ特殊橋の着目すべきリスク事象に対するモニタリングの適用可能性と限界を検討
 - ケーブル構造の特殊橋の劣化：実態調査
 - 振動モニタリング実施：
 - 自治体管理の吊り橋の長期振動モニタリング
 - 管内の斜張橋の長期振動モニタリング



ケーブル構造を有する特殊橋梁の劣化状況

吊り橋の構造と着目すべき部材

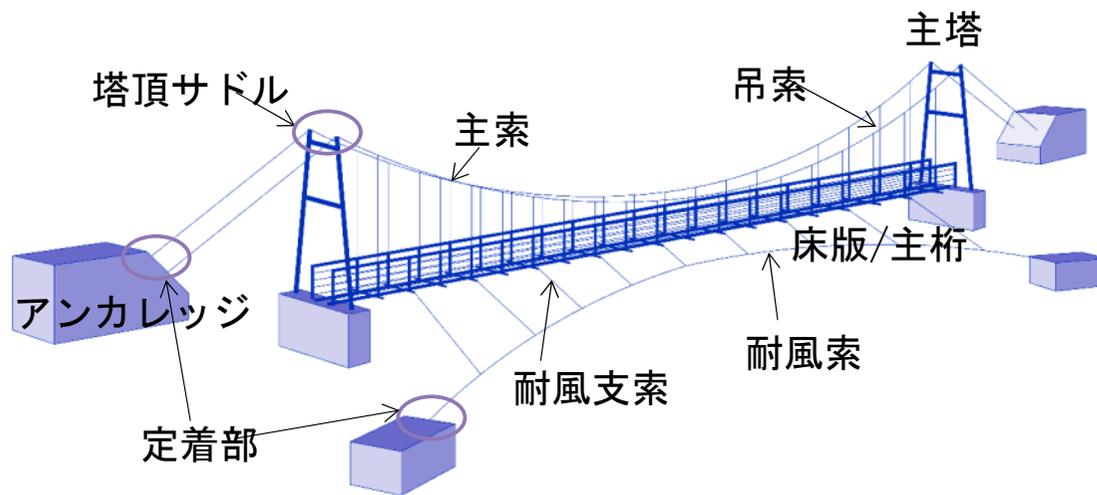


表 1 調査対象 (127橋)

架橋位置	橋梁数
奈良県十津川村	43橋
和歌山県田辺市	61橋
和歌山県古座川町	23橋



- 吊り橋の主たる損傷は“鋼部材の腐食”
- 主ケーブル, ハンガーケーブル, ケーブル定着部に集中
- 主塔

長期モニタリングによる吊り橋の応答検討

自治体管理の小規模吊り橋のモニタリング:実施項目および検討内容

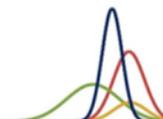
【実施項目】

- (1) 短期計測：令和3年11月19日
 - ・ 加速度計設置
 - ・ 常時振動計測（移動センサ群による計測）
- (2) 長期計測 令和3年11月20日～令和4年3月14日
 - ・ 塔頂部の加速度2箇所，傾斜角計測2箇所
 - ・ 主ケーブルの振動計測2箇所，温度計測
 - ・ 傾斜角

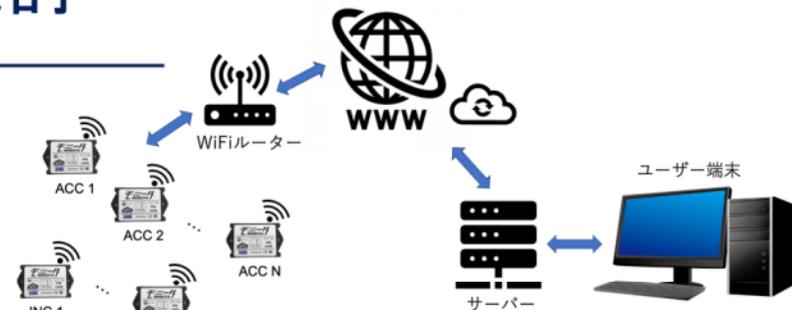


【検討内容】

- (1) 対象橋梁の基本振動特性の把握
- (2) WiFi機能搭載の振動センサによる塔頂部の軌道計測の可能性
- (3) WiFi機能搭載の振動センサによる塔の傾斜計測の可能性
- (4) 遠隔モニタリングの可能性
- (5) ソーラーパネルと蓄電池による長期モニタリングの可能性



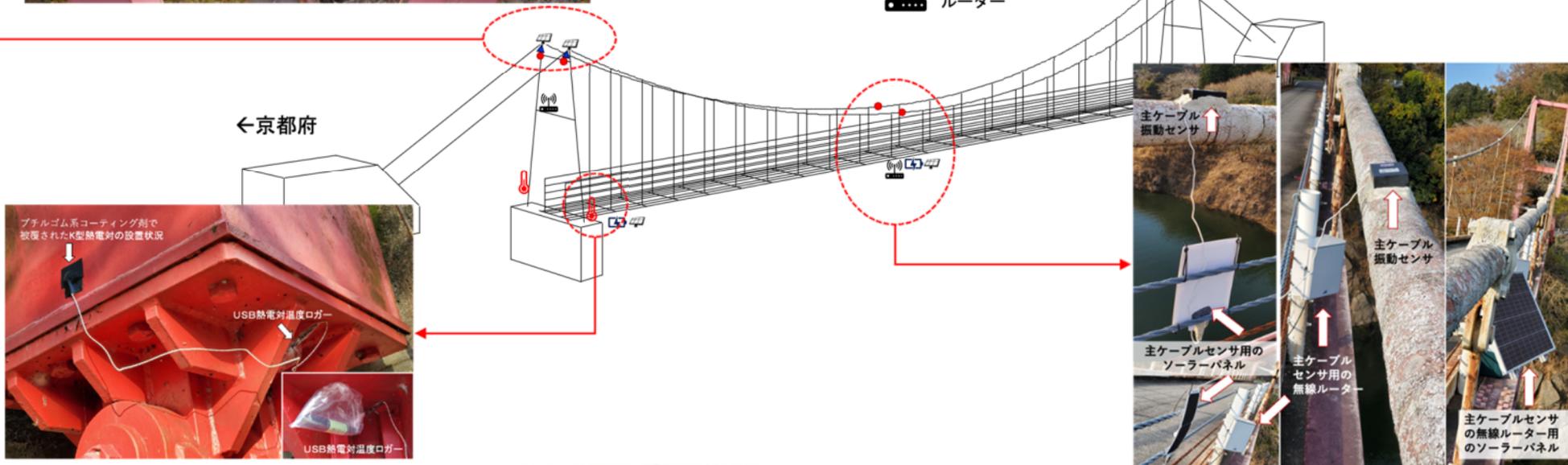
長期モニタリングによる吊り橋の応答検討



遠隔モニタリング概念図

- 無線センサ (加速度)
- ▲ 無線センサ (傾斜)
- 🌡️ 温度センサ

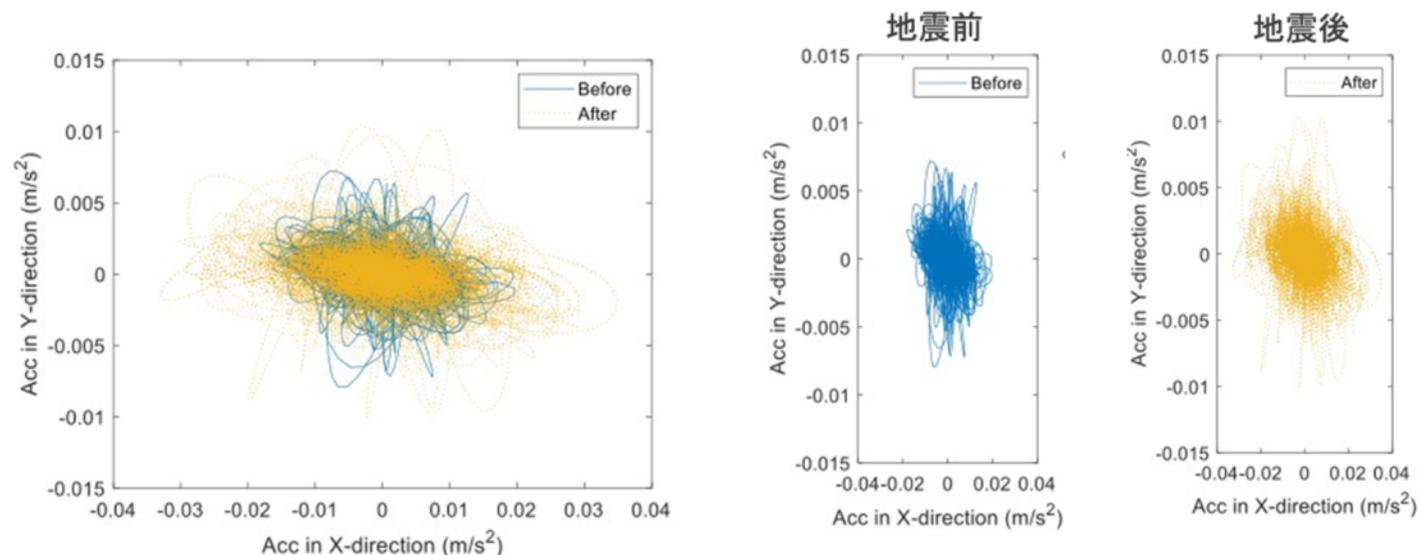
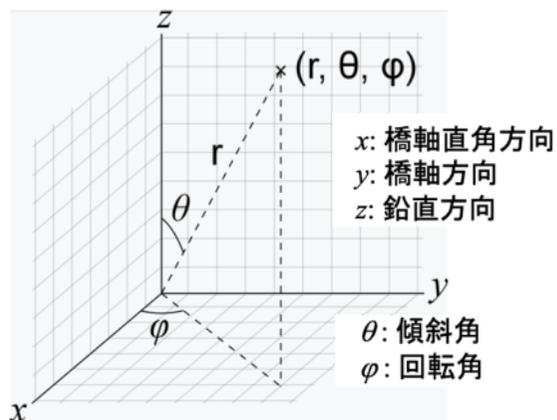
- ☀️ ソーラーパネル
- 🔋 蓄電池
- 📶 ルーター



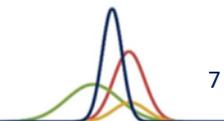
長期モニタリングによる吊り橋の応答検討

地震前後のモニタリングデータの検討

- 2021年12月3日午前9時28分頃, 和歌山県で地震が発生 (最大震度5弱)
- 隣接の奈良市でも震度1が観測



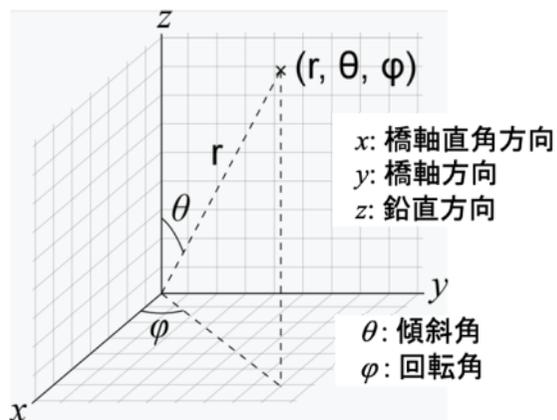
- 加速度のPSDから, 地震前後の目立った変化は観測されていない.
- 震度1の揺れによる対象橋の損傷は考えられないことで, 当然の結果.
- 頂部の加速度の平面の軌道はある共通の中心周りに軌道を描いており, 地震後もその中心のずれは観察されず, 地震による異常は考えられない.
- 塔頂部の加速度のある共通の中心周りの平面軌道の特徴量とし, パターン分析を行うことで橋梁の異常を評価できる可能性



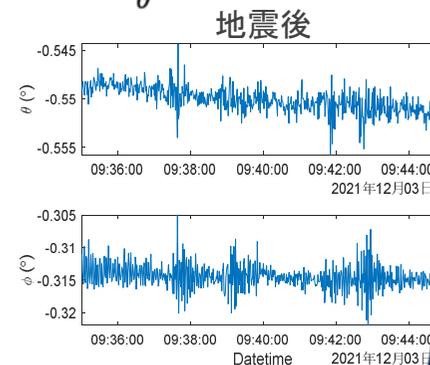
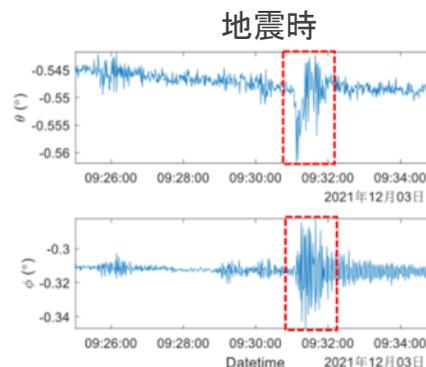
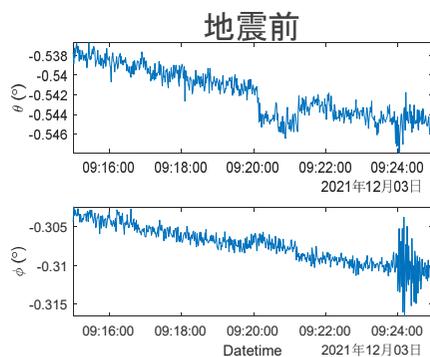
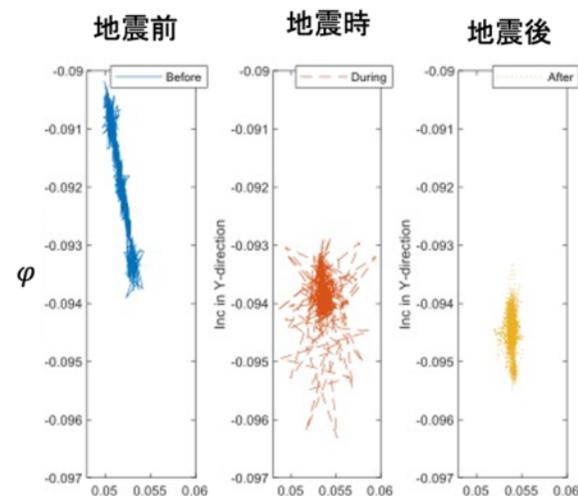
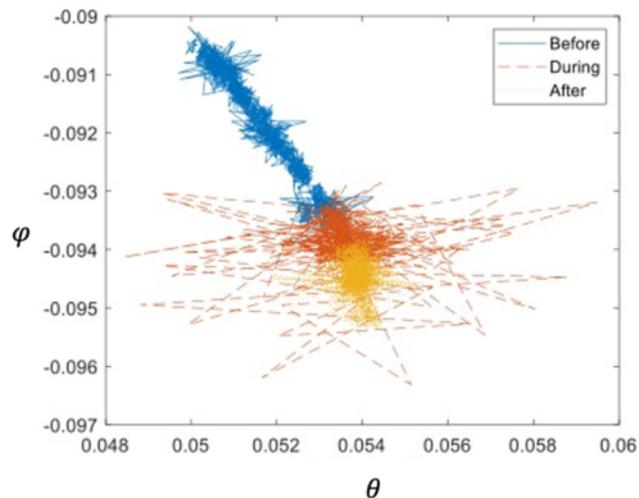
長期モニタリングによる吊り橋の応答検討

地震前後のモニタリングデータの検討

- 2021年12月3日午前9時28分頃、和歌山県で地震が発生（最大震度5弱）
- 隣接の奈良市でも震度1が観測



- 震度1規模の弱い揺れであるが、傾斜角の軌道は地震前と比べ大きい。
- 地震後の傾斜角の軌道は地震時に比べ変動幅が小さい。



斜張橋の常時振動モニタリング

斜張橋を対象に長期ケーブル振動と同定張力モニタリングを実施.

【橋梁概要】

- 形式：単径間鋼箱桁斜張橋＋2径間連続RCT桁ラーメン橋
- 完成年度：1990
- 橋長：179.500 m
- 主径間長：124.000 m
- 全幅員：9.70 m

【長期モニタリング】

令和2年12月26日～令和4年3月24日

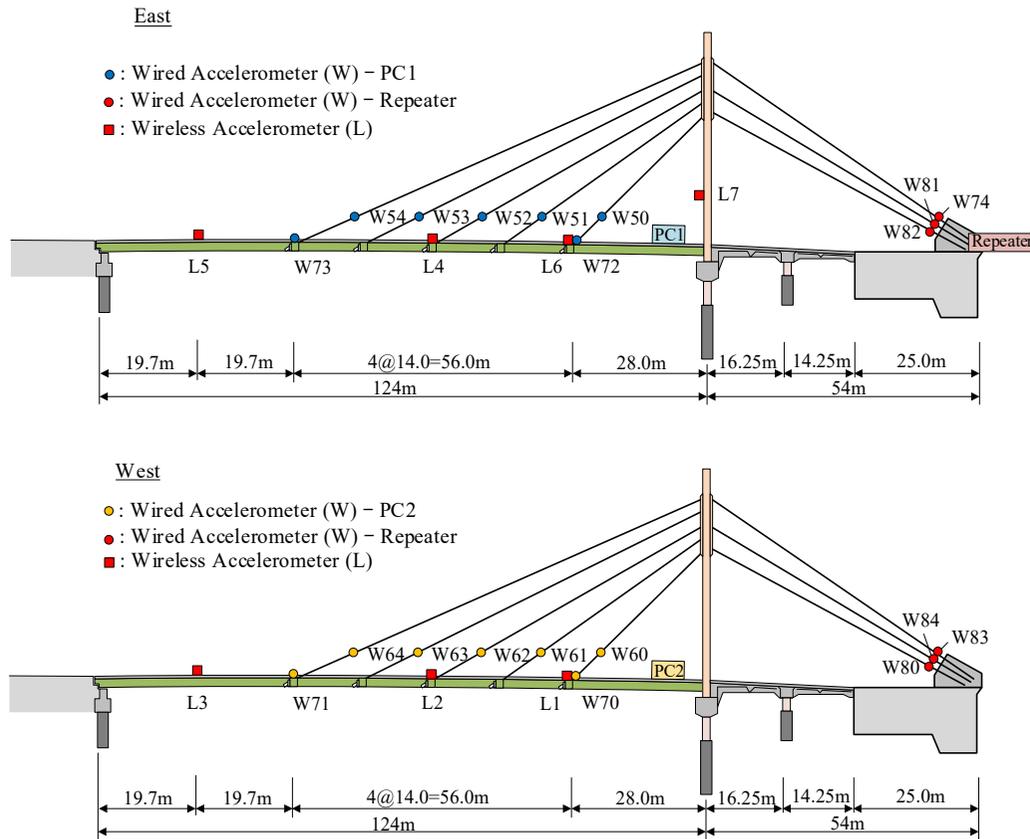
目的：ケーブル張力推定によるモニタリングの有効性検討

- 常時振動による同定張力のばらつき
- 同定張力の季節変動によるばらつき
- 同定張力を用いたケーブル損傷検知へのばらつきの影響

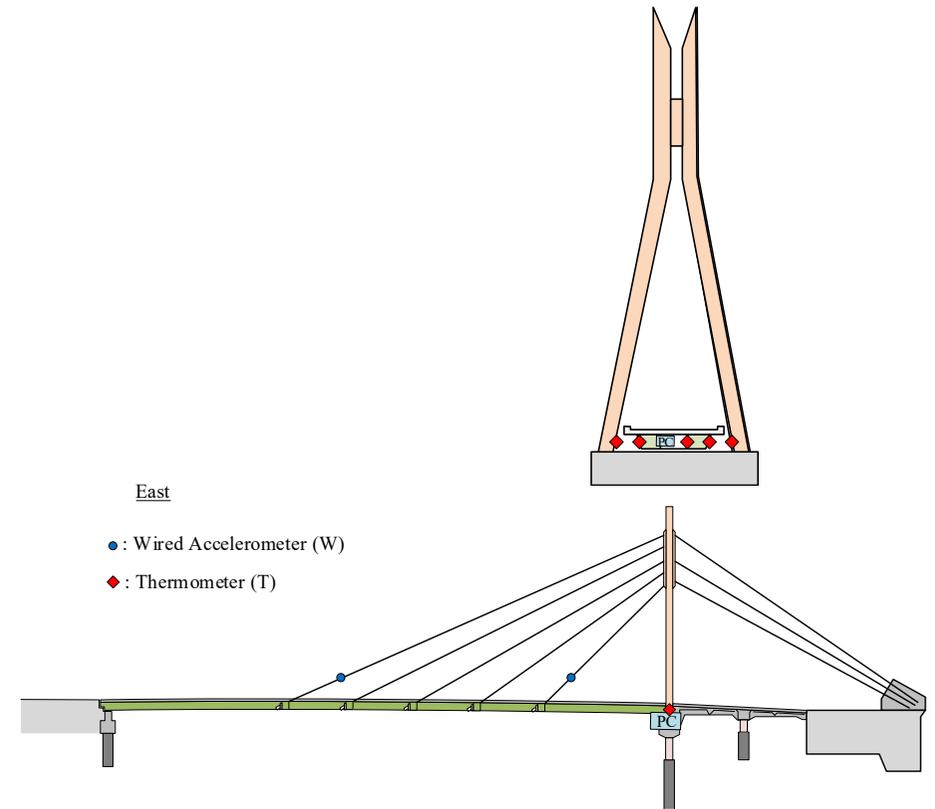


斜張橋の常時振動モニタリング

短期モニタリング: 基本振動特性把握とFEモデル構築



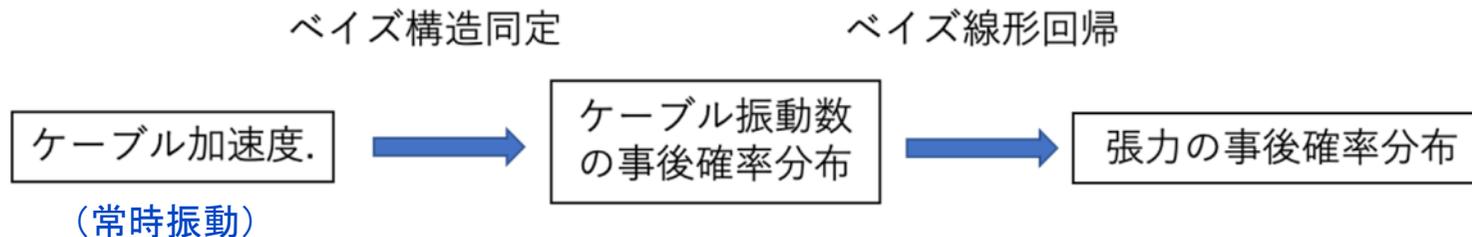
長期モニタリング: ケーブル振動計測による異常検知可能性検討



斜張橋の常時振動モニタリング

ベイズケーブル張力同定手法

- ばらつきを持つ常時の計測データ：決定論的な同定よりは確率的なアプローチ
- ベイズ実働モード解析を適用しケーブル振動数の事後確率分布を同定
- ケーブル振動数の事後確率分布 → ケーブル振動数と張力との関係式はベイズ線形回帰
→ 張力の確率分布を同定



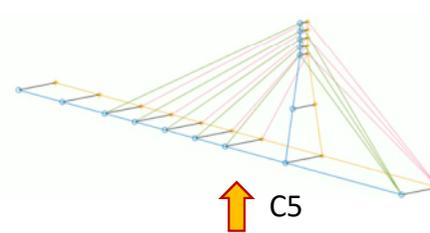
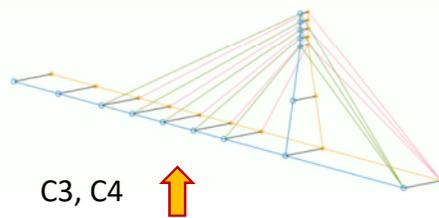
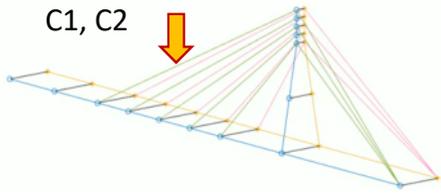
斜張橋ケーブル振動モニタリング

短期モニタリング

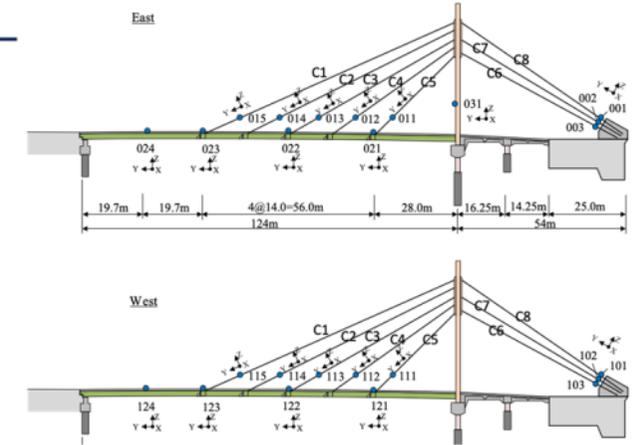
1次: $f_1 = 0.84\text{Hz}$, $\zeta_1 = 0.0084$

2次: $f_2 = 1.43\text{Hz}$, $\zeta_2 = 0.0132$

3次: $f_3 = 2.45\text{Hz}$, $\zeta_3 = 0.0009$



※ C_i : 桁の振動モードに影響を受けやすいケーブル, $i = 1, \dots, 5$ (左側のケーブルからC1, C2, ...)



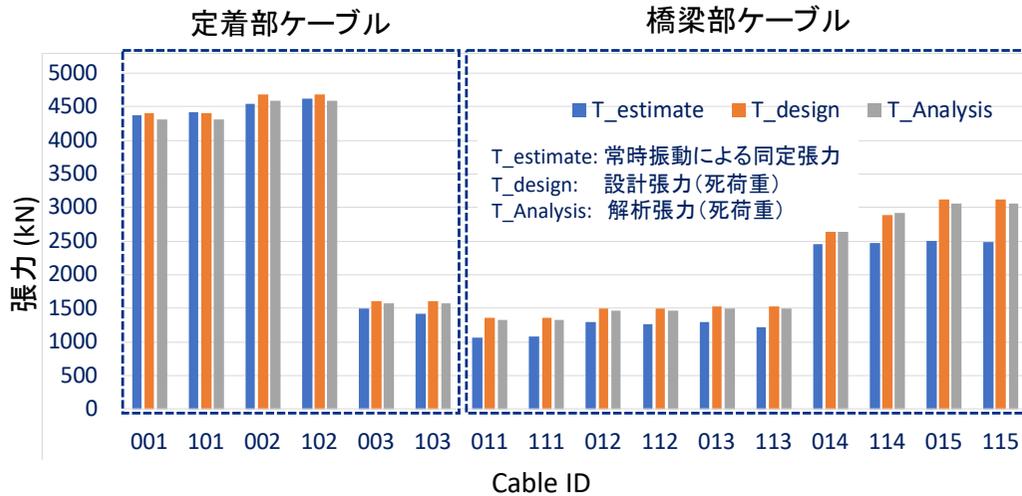
ケーブルID	ケーブルNo.	推定値	モード次数				
			2	3	4	5	6
C5	011	平均 (Hz)	4.13	6.24	8.34	10.64	12.96
		標準偏差 (Hz)	0.04	0.01	0.17	0.03	0.05
		変動係数 (%)	1.0	0.2	2.0	0.3	0.4
C4	012	平均 (Hz)	3.60	5.40	7.22	9.08	10.94
		標準偏差 (Hz)	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03
		変動係数 (%)	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3
C3	013	平均 (Hz)	2.75	4.35	5.83	7.27	8.77
		標準偏差 (Hz)	0.11	0.01	0.03	0.02	0.02
		変動係数 (%)	4.0	0.2	0.5	0.3	0.2
C2	014	平均 (Hz)	2.44	3.69	4.94	6.19	7.45
		標準偏差 (Hz)	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03
		変動係数 (%)	0.4	0.3	0.0	0.3	0.4
C1	015	平均 (Hz)	2.13	3.18	4.25	5.33	6.41
		標準偏差 (Hz)	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01
		変動係数 (%)	1.9	0.3	0.5	0.2	0.2

ケーブル ID	ケーブル No.	推定値	モード次数				
			2	3	4	5	6
C8	001	平均 (Hz)	3.3	5.02	7.23	8.08	9.85
		標準偏差 (Hz)	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05
		変動係数 (%)	1.5	1.4	1.0	0.7	0.5
C7	002	平均 (Hz)	3.79	5.59	7.23	8.83	10.42
		標準偏差 (Hz)	0.21	0.12	0.14	0.14	0.17
		変動係数 (%)	5.5	2.1	1.9	1.6	1.6
C6	003	平均 (Hz)	3.16	4.71	6.16	7.98	9.8
		標準偏差 (Hz)	0.01	0.08	0.13	0.01	0.2
		変動係数 (%)	0.3	1.7	2.1	0.1	2.0

- 1次振動は桁の振動の影響
- 2次以上は安定的に推定可能
- 常時振動でもケーブル振動の推定が可能
- 定着部ケーブルの同定振動数の変動係数は、橋梁部ケーブルの同定振動数の変動係数に比べ最大で10倍大きい

斜張橋ケーブル振動モニタリング

常時振動によるケーブル張力推定 (短期モニタリング)



定着部ケーブル

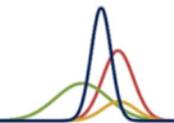
橋梁部ケーブル

ケーブル ID	平均 (kN)	標準偏差 (kN)	変動係数 (σ) (%)	変動係数 (2σ) (%)	変動係数 (3σ) (%)
001	4374.0	29.5	0.67	1.35	2.02
101	4421.6	28.4	0.64	1.28	1.93
002	4544.4	23.0	0.51	1.01	1.52
102	4617.7	25.7	0.56	1.11	1.67
003	1502.2	7.4	0.49	0.99	1.48
103	1426.3	4.9	0.34	0.69	1.03
011	1055.7	2.9	0.27	0.55	0.82
111	1081.9	2.4	0.22	0.44	0.67
012	1292.2	1.2	0.09	0.19	0.28
112	1263.8	1.3	0.10	0.21	0.31
013	1292.0	1.5	0.12	0.23	0.35
113	1223.3	1.4	0.11	0.23	0.34
014	2459.5	2.1	0.09	0.17	0.26
114	2474.8	2.1	0.08	0.17	0.25
015	2505.3	1.5	0.06	0.12	0.18
115	2493.6	2.2	0.09	0.18	0.26

- ケーブルにかかわらず概ね一定の張力推定
- 定着部ケーブルの同定張力の標準偏差は5kN~30kNに分布
→ 3σ の変動を考えても90kN以上の変化であれば異常感知の可能性
- 橋梁部ケーブルの同定張力の標準偏差はわずか1kN~3kNに分布
→ 3σ の変動を考えても9kN以上の変化であれば異常感知の可能性

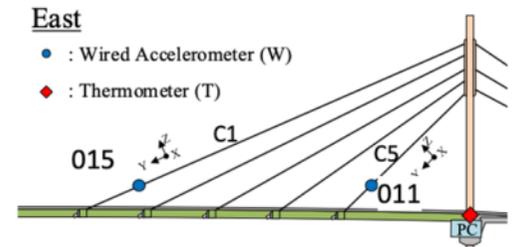
短いケーブルの方が変動が大きい。

ただし、
季節変動が大きい長期モニタリングの変動は
短期モニタリングより大きいはず。

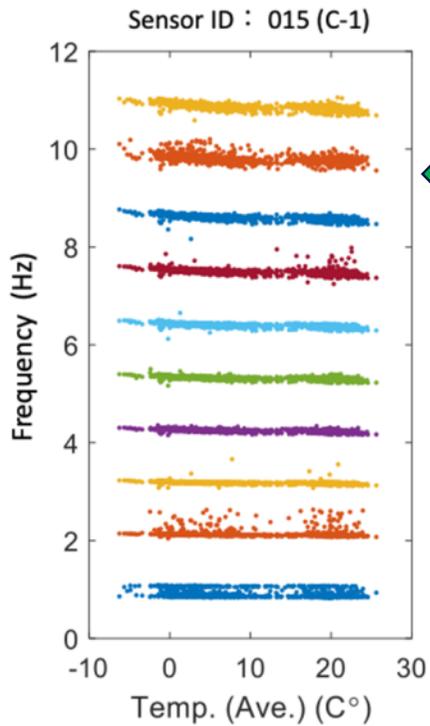


斜張橋ケーブル振動モニタリング

長期モニタリング



同定振動数 vs 温度

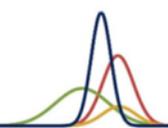
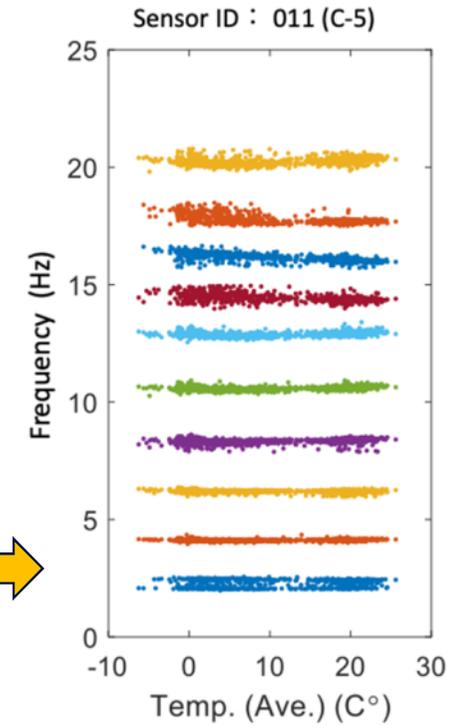


【最長ケーブル (C1)】

- 温度上昇にともない振動数が下がる傾向
- 2次, 7次, 9次モードの振動数は, 他のモード次数の振動数よりばらつきが大きい.

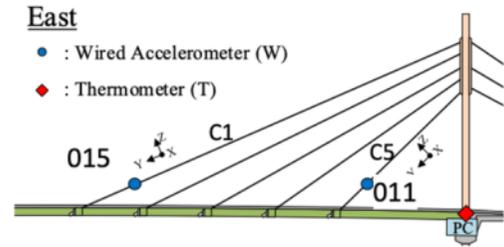
【最短ケーブル (C5)】

- 温度上昇にともない振動数が下がる傾向 (最長ケーブル (C1) よりはその傾向が弱い)
- 7次振動モード以上の振動数は, 2次~6次のモード次数の振動数よりばらつきが大きかった.



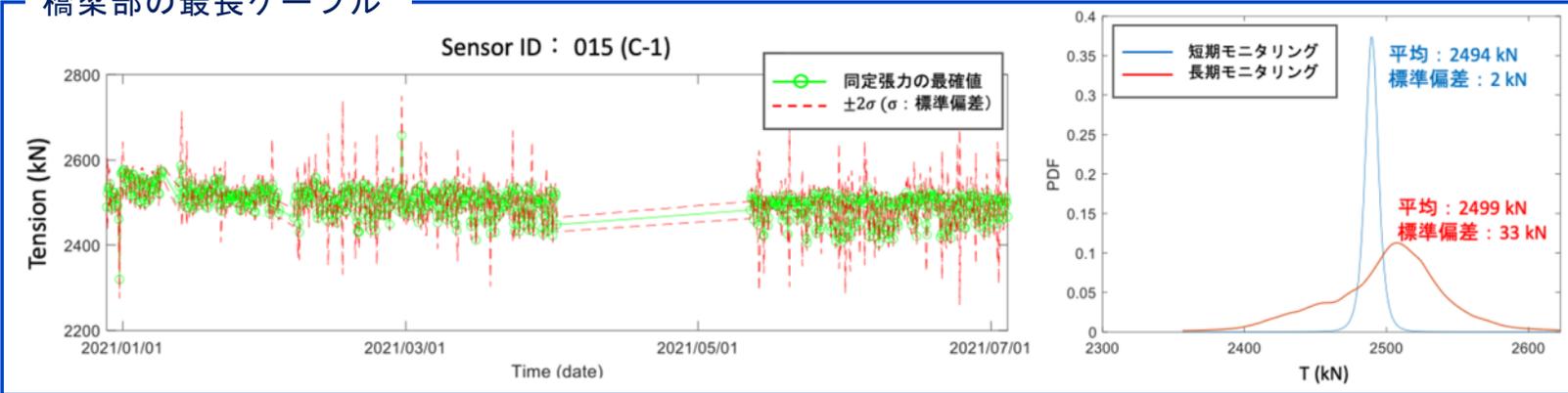
斜張橋ケーブル振動モニタリング

長期モニタリング



長期常時モニタリングの加速度データから同定したケーブル張力の時系列

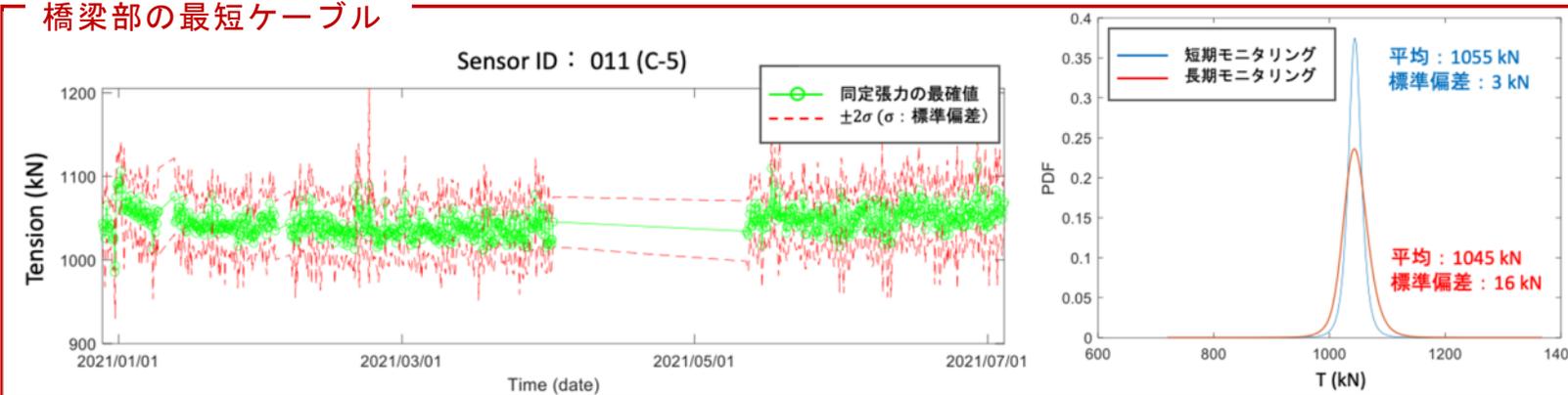
橋梁部の最長ケーブル



【同定張力のばらつき】
(短期モニタリングに比べ)

- 短いケーブルで5倍：大
- 長いケーブルで15倍：大
- **長いケーブルの方が季節変動の影響を受けやすい。**

橋梁部の最短ケーブル



cf. 短期モニタリングでは、短いケーブルの方が変動が大きい。

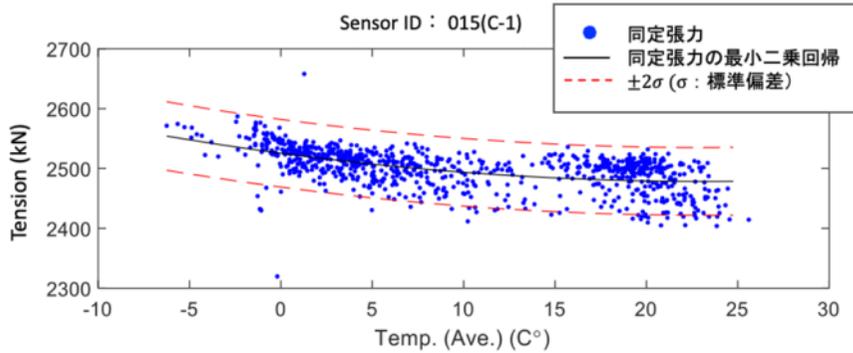


斜張橋ケーブル振動モニタリング

長期モニタリング

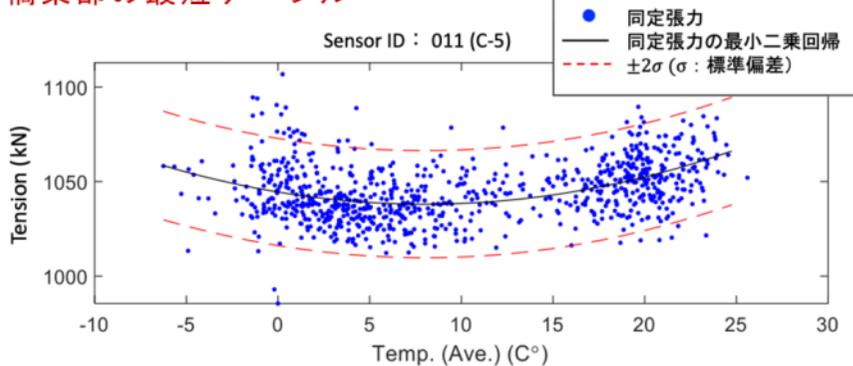
ケーブル張力 vs 温度 令和2年12月～令和3年7月の
同定ケーブル張力と温度の関係

橋梁部の最長ケーブル

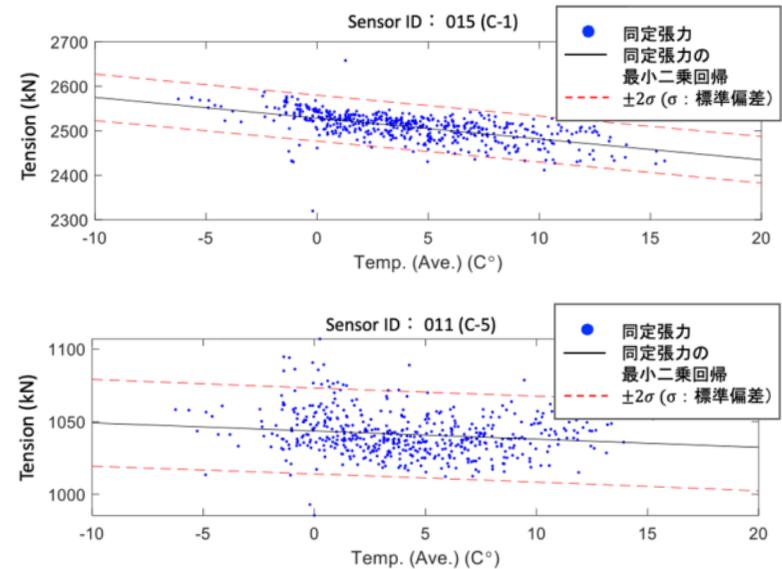


張力と温度との関係は、線形よりは非線形関係に近い

橋梁部の最短ケーブル



cf. 令和2年12月～令和3年3月の同定ケーブル
張力と温度の関係：線形関係に見える



【注意】

観測期間によっては、同定張力と季節変動との回帰モデルが異なる可能性がある。

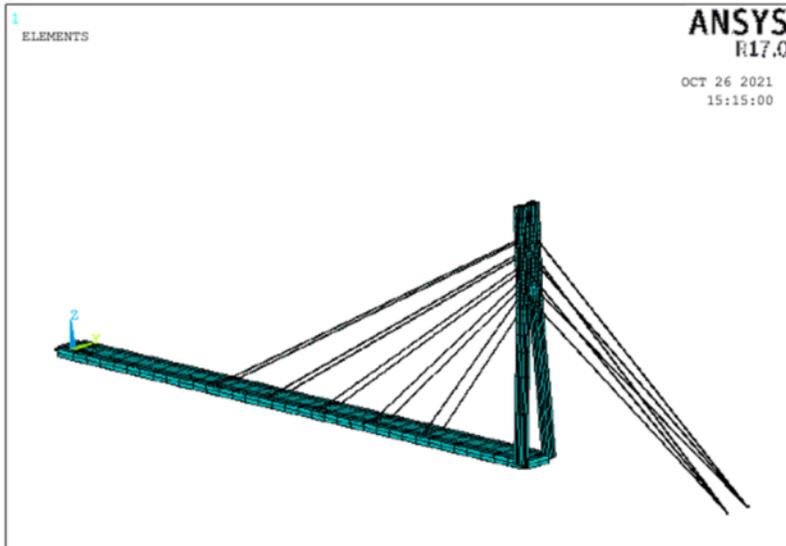
回帰ベースの季節変動除去法(EOV駆動法)よりは、非EOV駆動法による季節変動除去の方が、季節変動除去の精度が高くなる可能性。

斜張橋ケーブル振動モニタリング

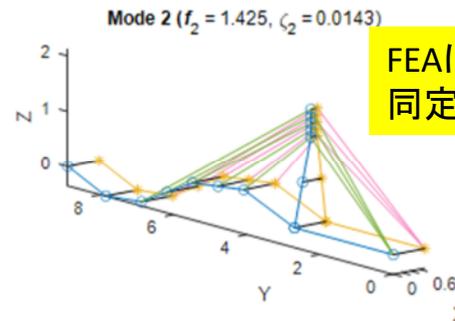
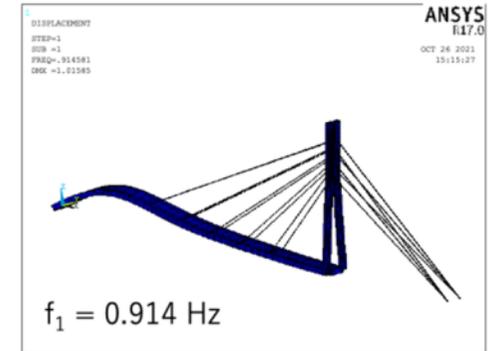
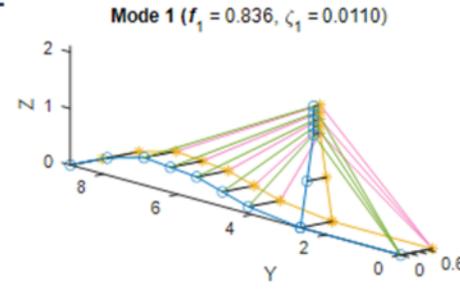
長期モニタリング

ケーブル張力モニタリングによる異常検知の可能性

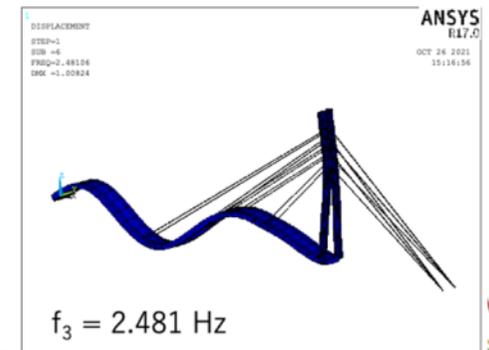
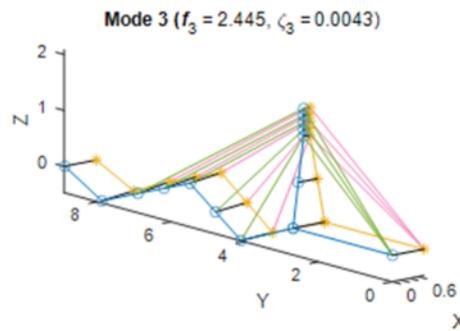
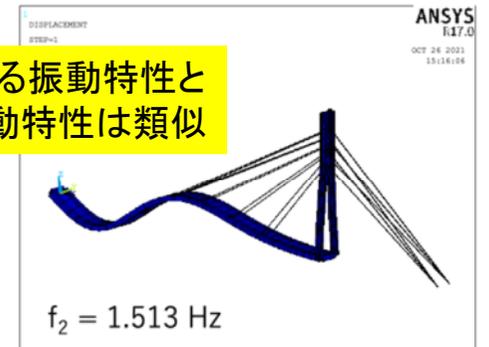
- ケーブル損傷: FE解析による張力変化
- 張力のばらつき: 短期・長期モニタリングの変動を利用



Items	Element type	Elastic modulus (MPa)	Density (kg/m ³)
Girder	Beam 188	2.06e5	7850
Deck	Shell 181	3.15e4	2500
Tower	Beam 188	2.06e5	7850
Cable	Link 180	2.06e5	3000



FEAによる振動特性と
同定振動特性は類似



斜張橋ケーブル振動モニタリング

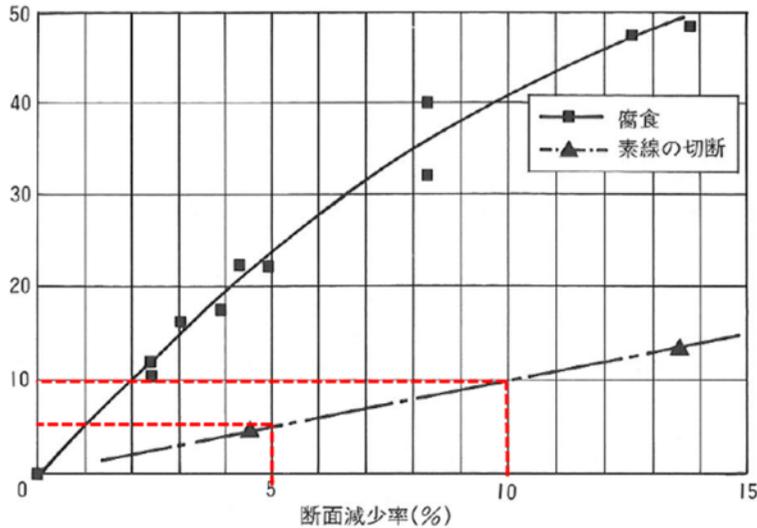
長期モニタリング

ケーブル張力モニタリングによる異常検知の可能性

ケーブル損傷モデル

断面減少率と切断荷重低下率との関係*

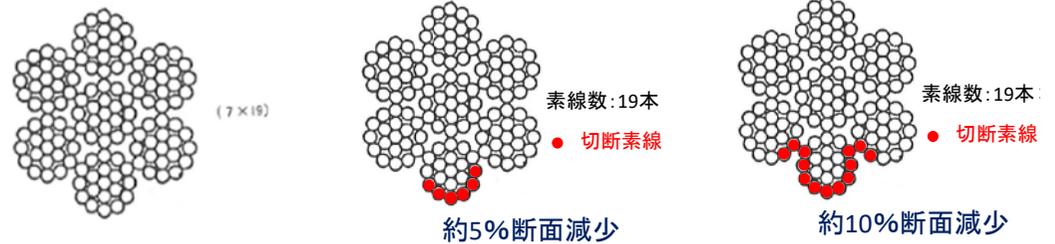
切断荷重低下率(%)



- 素線切断の場合：断面減少率と切断荷重低下率は同程度
- 腐食による断面減少の場合：切断荷重低下率は断面減少率を上回る

素線切断による断面減少率の計算例

- ケーブル腐食または素線切断を断面減少率として換算



素線6本が切断と仮定

$$\text{断面減少率} : 1 - \left(\frac{7 \times 19 - 6}{7 \times 19} \right) = 0.045 = 4.5\%$$

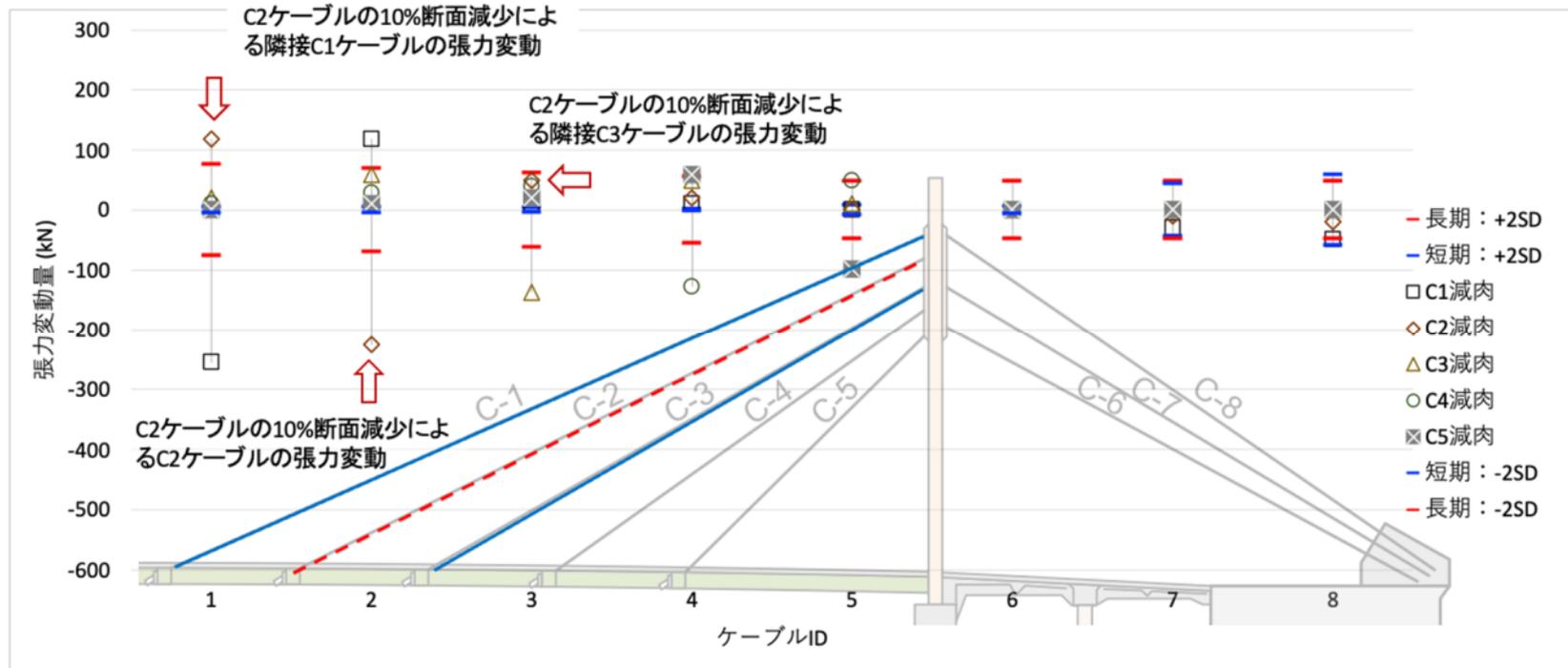
*野村ら：腐食の生じたストランドロープの残存強度，川田技報，Vol.12, pp.127-130, 1993.

ケーブル減肉と同定張力の関係

→ ケーブルの減肉がケーブル張力変化に及ぼす影響

→ **桁部ケーブル**: 同定張力による損傷ケーブルと隣接ケーブルの張力低減の検知可能性

→ 季節変動を減らせば長期モニタリングによる異常検知の可能性は増加

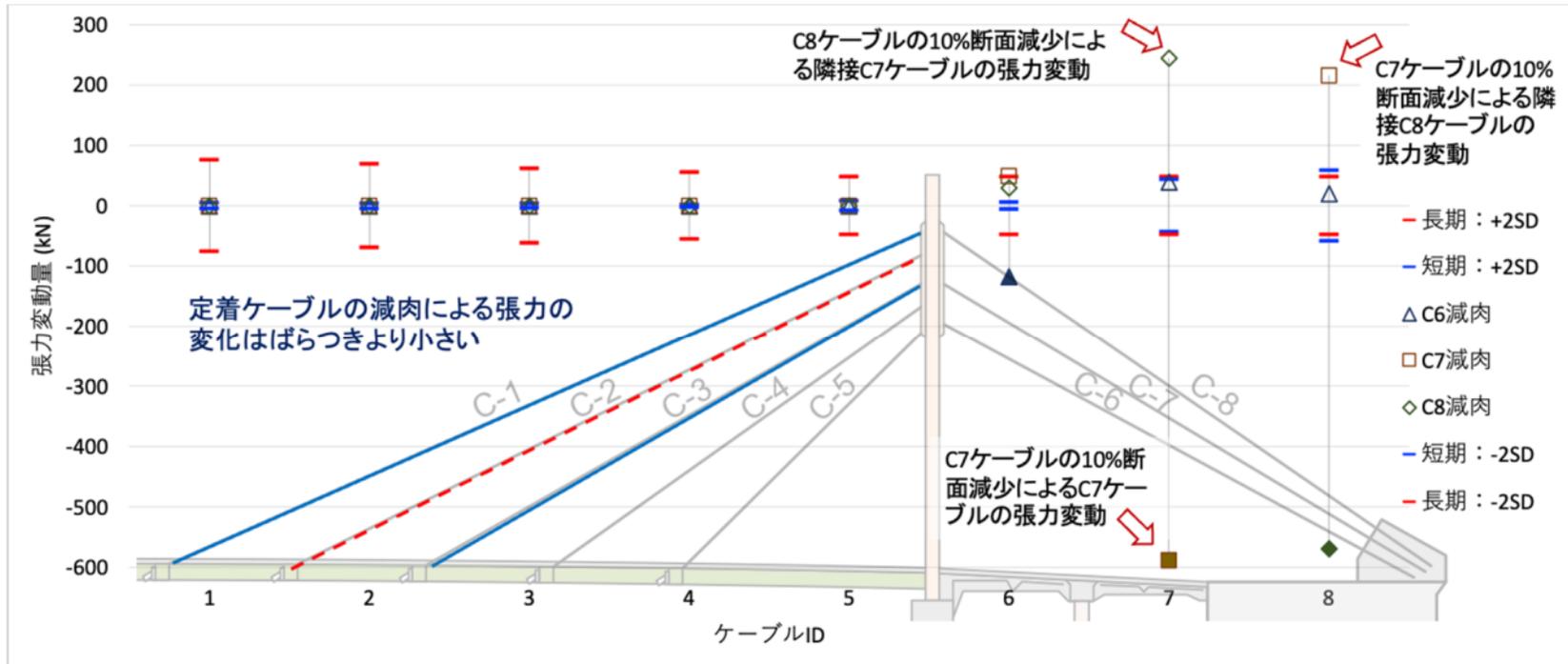


ケーブル減肉と同定張力の関係

→ ケーブルの減肉がケーブル張力変化に及ぼす影響

→ **定着部ケーブル**: 同定張力による損傷ケーブルと隣接ケーブルの張力低減の検知可能性

→ 季節変動を減らせば長期モニタリングによる異常検知の可能性は増加



ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理支援システム

① 3Dレーザースキャナーを用いた構造諸元等の計測

- 小規模な吊り橋 → 設計図書が残っていない
- 各種部材寸法等については簡単に計測できるが。。
- 橋梁全体の諸元を把握することは非常に煩雑、かつ労力を費やす

<仕様>

RTC360



スキャン範囲	360° (水平) / 300° (鉛直)
測定範囲	0.5 ~ 130m
スキャンスピード	最大 2,000,000 点/秒
スキャン密度	3mm @ 10m, 6mm @ 10m, 12mm @ 10m
精度	測角精度: 18", 距離精度: 1.0mm+10ppm
動作温度範囲	-5°C ~ +40°C
重量	5.35kg

② ロープアクセスを用いた点検等

- 吊り橋の架橋位置: 環境・地形条件が比較的厳しい
- 橋梁点検車等の利用が困難な場合が多い

③ ドローンを用いた点検支援技術

- 桁下への進入及び近接が困難な橋梁について、損傷状況や範囲、原因究明のための情報等を得ることを目的
- ドローンによる状況確認が可能



計測結果事例

ドローンにより撮影

吊り橋主塔頂部への

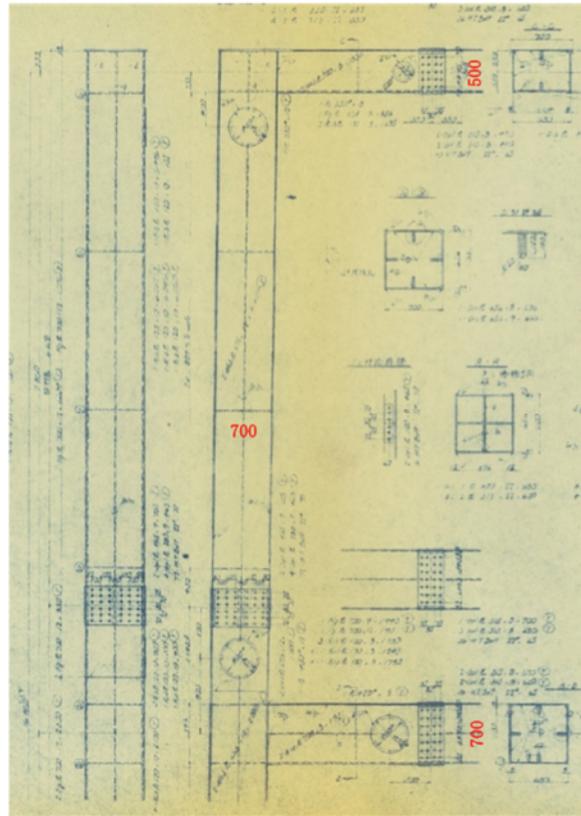
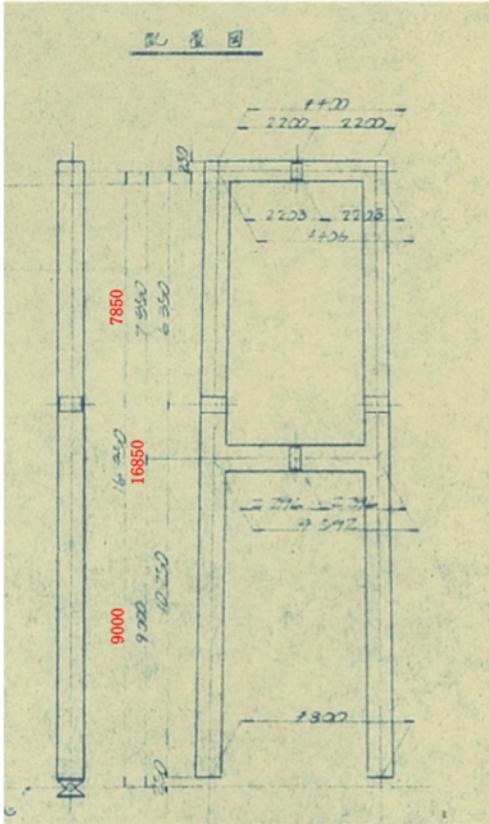
吊り橋主塔頂部での作業状況

桁下高: 18.5m 程度

桁下環境: 河川

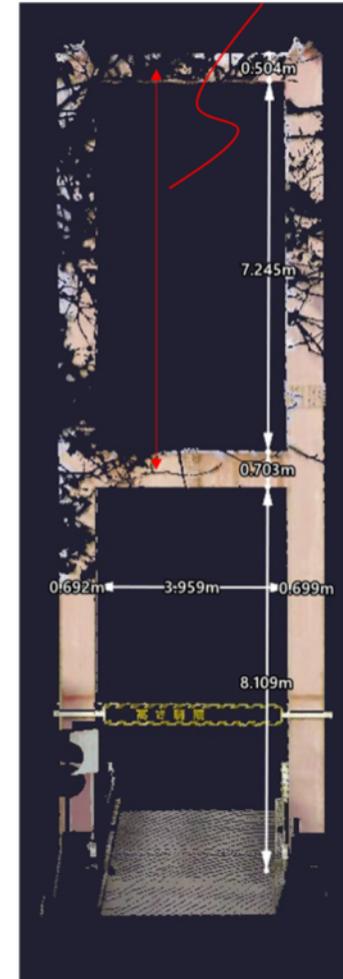
ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理支援システム

① 3Dレーザースキャナーを用いた構造諸元等の計測



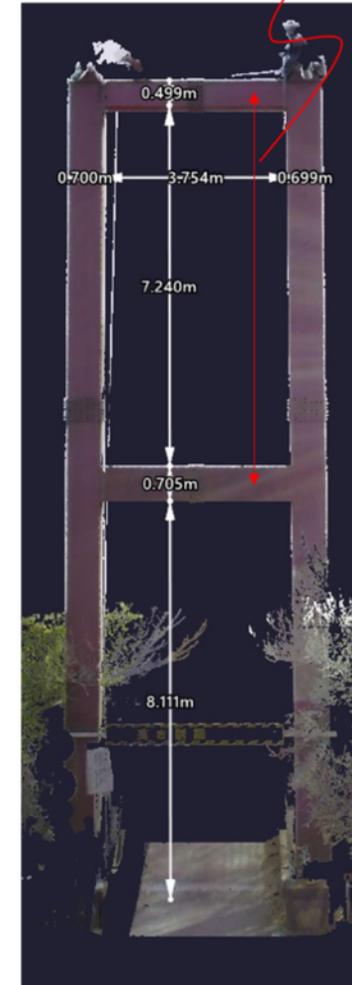
$$0.504/2+7.245+0.703/2=7.848$$

(-0.002)



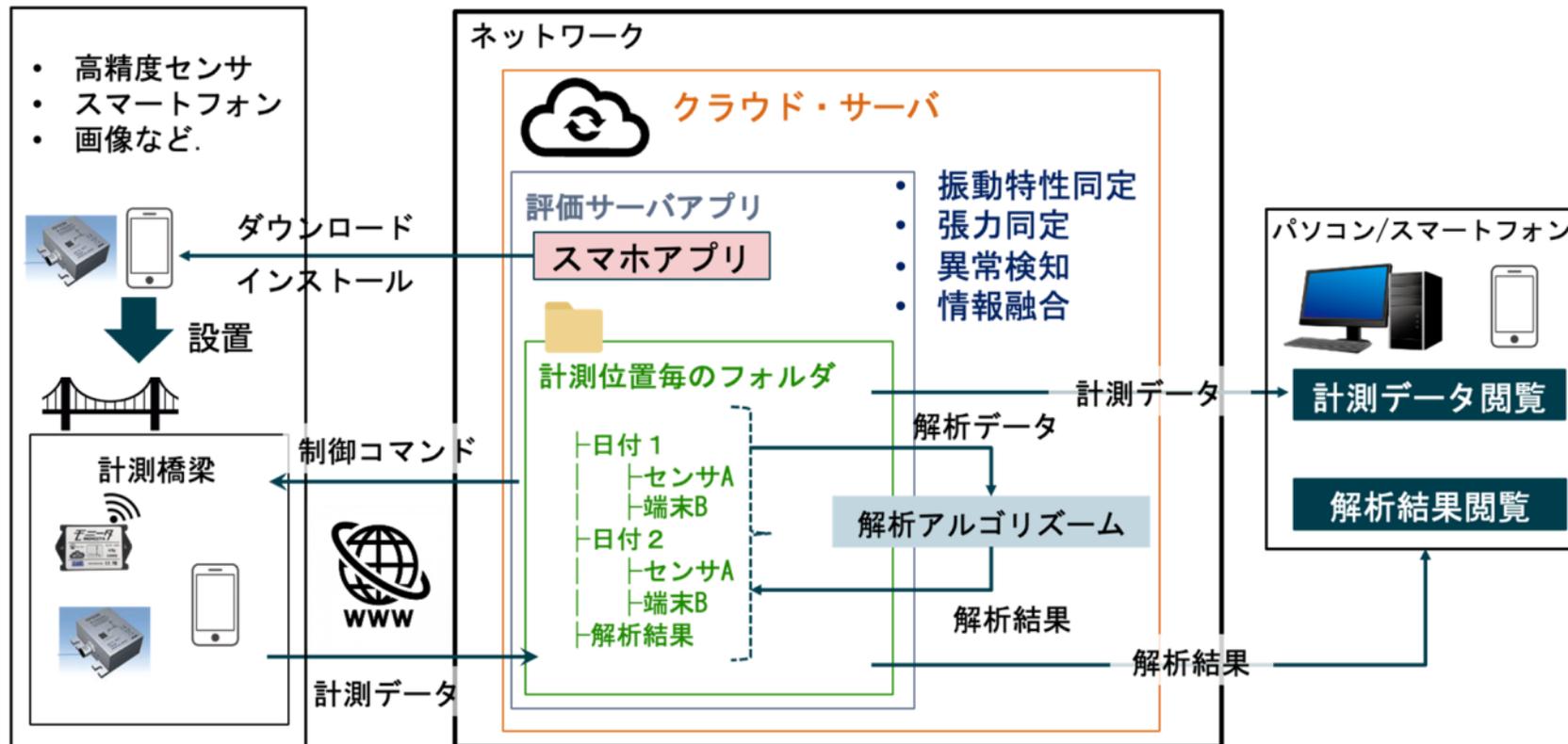
$$0.499/2+7.240+0.705/2=7.842$$

(-0.008)



遠隔モニタリングによる維持管理支援システム

- クラウド上に集約されるモニタリングデータを用いた異常検知プロセスの自動化
- 集中管理が可能



まとめ

- 自治体の予算や技術者確保の制約を勘案し、人による点検を補助できる
センサ情報の活用が現実的
 - 長期モニタリングによる特徴量の傾向に着目
 - 斜張橋のケーブル振動・張力：特徴量として有用
 - 主塔の傾斜角・振動：特徴量として有用
- 長期モニタリング：特徴量の経年変化に着目し特徴量から何らかの異常の兆候を捉え、
橋梁の詳細点検の可否判断につなげる目的のスクリーニングの考え方
- 供用中や季節変動の影響を受ける長期モニタリング：季節変動低減と統計的アプローチ
- 目視点検情報との融合の観点から簡単なモニタリング情報であっても蓄積が重要

- 自治体管理の小規模吊り橋・斜張橋の簡易モニタリング：報告書参照