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

報　告　書

令和 4 年 3 月

国立大学法人　京都大学大学院　工学研究科

要旨

本研究は，ケーブル構造を持つ特殊橋について利用可能な計測データおよび目視点検記録から特殊橋の維持管理に必要な有益な情報の抽出と橋梁条件や架橋条件，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の明確化を計り，産・官・学の協力により 3 か年に渡って検討した成果をまとめたものである．

自治体管理の小規模吊り橋の点検には，橋梁全体に大きく影響を与える着目すべき部材，それらに対する配慮事項を検討・整理した．また，ケーブルや主塔の振動とケーブル振動から同定される張力および主塔の傾斜角を特徴量とした橋梁長期モニタリングの可能性について検討を行った．

小規模斜張橋を対象に行った長期モニタリング結果から，常時振動計測によるケーブル張力の推定は可能であるが，ケーブル長が長いケーブルの方が短いケーブルよる季節変動が大きいことから，季節変動のトレンド成分を考慮する必要性を明らかにした．一方，短期常時振動モニタリングでは，定着部ケーブルで計測される振動の SN 比は橋梁部ケーブルより低く，同定結果のばらつきが大きくなることが分かった．

自治体管理の小規模吊り橋を対象に行った，主塔加速度の平面軌道および傾斜角の長期モニタリング中に，隣接地域で地震が発生し，これを受け，振動モニタリングによる地震前後の異常発生可能性について検討を行った．その結果，地震前後の目立った変化は観測されなかった．塔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は高いと考える．また，試験的に行った長期モニタリングの知見をまとめ，小規模吊り橋および斜張橋の点検を補助できる，簡易モニタリング方法の提案した．

キーワード：自治体管理特殊橋，吊り橋，斜張橋，常時振動，長期モニタリング，季節変動，維持管理支援

目　　次

第 1 章　研究概要 ····· 1
1. 1　研究目的 ····· 1
1. 2　研究内容 ····· 2
1. 3　研究実施体制 ····· 3
1. 4　研究日程 ····· 4

第 2 章　ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法の提案 ····· 5
2. 1　特殊橋梁の維持管理における現状の課題及び問題点の再確認 ····· 5
2. 2　ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法の提案 ····· 8
2.2.1　吊り橋の構造と着目すべき部材 ····· 8
2.2.2　着目すべき部材と配慮事項 ····· 9
2.2.3　新技術を用いた課題解決手法の提案 ····· 18
2. 3　着目すべき部材と橋梁定期点検結果の分析 ····· 32

第 3 章　長期モニタリングによる吊り橋の応答検討 ····· 36
3. 1　概要 ····· 36
3. 2　小規模吊り橋のモニタリング ····· 37
3.2.1　対象橋梁 ····· 38
3.2.2　工程概要 ····· 39
3.2.3　計測概要 ····· 40
3. 3　短期常時振動による振動同定 ····· 54
3.3.1　橋桁部の振動 ····· 54
3.3.2　主塔の振動 ····· 55
3. 4　長期常時振動・傾斜モニタリング ····· 58
3.4.1　常時ケーブル振動 ····· 58
3.4.2　主塔の常時振動 ····· 61
3.4.3　主塔の傾斜角とケーブル振動との相関 ····· 67
3.4.4　地震前後のモニタリングデータの検討 ····· 69

第 4 章　直轄管理のケーブル構造の特殊橋の長期モニタリングの検討 ····· 76
4. 1　概要 ····· 76
4. 2　対象橋梁 ····· 77
4. 3　短期ケーブル振動モニタリング ····· 79
4.3.1　短期モニタリングデータによる基本振動特性 ····· 79
4.3.2　短期モニタリングデータによるケーブル張力同定 ····· 84
4. 4　長期ケーブル振動モニタリング ····· 88
4.4.1　長期モニタリングデータによる基本振動特性 ····· 88
4.4.2　長期モニタリングによるケーブル張力同定 ····· 90
4. 5　ケーブル張力モニタリングによる異常検知の可能性検討 ····· 94

4.5.1　有限要素モデルの妥当性 ····· 94
4.5.2　ケーブル腐食を想定した損傷解析とケーブル張力の同定ばらつきを考慮した損傷検知の可能性検討 ····· 97
4. 6　まとめ ····· 102

第 5 章　本研究プロジェクトの検討内容のまとめ ····· 103
5. 1　概要 ····· 103
5. 2　ケーブル構造をもつ特殊橋の簡易振動モニタリング ····· 105
5.2.1　小規模吊り橋のモニタリング案 ····· 106
5.2.2　小規模斜張橋のモニタリング案 ····· 108
5. 3　提案手法のまとめ ····· 110
5.3.1　ベイズケーブル張力同定手法 ····· 110
5.3.2　長期モニタリングにおける季節変動成分の低減手法 ····· 111
5. 4　今後の取り組み ····· 114

第 6 章　研究会議事録 ····· 116
6. 1　第 1 回研究会　議事録（令和 3 年 6 月 3 日） ····· 117
6. 2　第 2 回研究会　議事録（令和 3 年 12 月 9 日） ····· 119

巻末資料
附録 A ····· 122
附録 B ····· 127
附録 C ····· 136

令和元年度　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　報告書
令和 2 年度　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　報告書

第1章　研究概要

1.1　研究目的

本研究プロジェクトの目的は，**図 1-1** に示すように産・官・学の協力により，ケーブル構造を持つ特殊橋について利用可能な計測データおよび目視点検記録から特殊橋の維持管理に必要な有益な情報の抽出と橋梁条件や架橋条件，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の明確化を計り「特殊橋の劣化特性や実態を精査した情報の確保による維持管理手法の検討」を目的とする．

令和 1 年度の「ケーブル構造の特殊橋の劣化や実態の精査」，「ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査」，「長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備」，「長期計測データにおける季節変動の調査」の結果を踏まえて，令和 2 年度は，「定期点検の限界を補足できる条件の検討」，「長期計測における季節変動成分の除去法の構築」，「モニタリングデータと目視点検データとの相関検討」，「直轄管理のケーブル構造の特殊橋の長期対象にモニタリング実施」を行った．令和 3 年度は，「ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法の提案」，「長期モニタリングによる吊り橋の応答検討」，「直轄管理のケーブル構造の特殊橋梁の長期モニタリング検討」により本研究会の検討内容を取りまとめた．なお，本報告書は，令和 3 年度の研究活動とともに，3 年間の研究内容をまとめたものである．

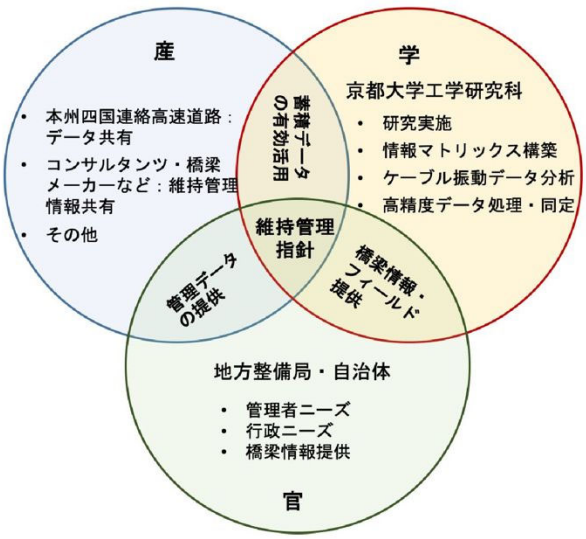


図 1-1 本プロジェクトの概要と体制

1.2 研究内容

1.1 節でも述べたように，令和 2 年度は，「ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法の提案」，「長期モニタリングによる吊り橋の応答検討」，「直轄管理のケーブル構造の特殊橋梁の長期モニタリング検討」の 3 項目について研究を行った．研究項目それぞれの概要は以下のとおりである．

(1) **橋梁条件や架橋条件，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について検討・整理：**近畿管内の自治体管理の吊り橋を対象に行なった橋梁台帳および聞き取り調査結果，橋梁条件や架橋条件による損傷部位、度合いの相関を確認するのは困難であったが，吊り橋の主な損傷である鋼部材の腐食であることが明らかになった．ケーブルを含む鋼部材腐食（損傷）によって生じうるリスクおよび適用可能なモニタリング法について検討・整理を行う．

(2) センサー情報による橋梁維持管理への支援策：センサー情報を橋梁維持管理にどのように活用できるかについて検討を行うために、（1）で検討する適用可能なモニタリング法の中で，自治体管理の吊り橋のモニタリングに有効と評価されるセンサを供用中の小規模吊り橋に導入し，モニタリングを実施する．また斜張橋でのモニタリング結果も合わせて，センサー情報による橋梁維持管理への支援策を検討する．

(3) ケーブル構造を持つ特殊橋梁の維持管理指針の提案：3年間の実橋梁での試験的なモニタリングや実態調査内容をまとめて，モニタリングの適用可能性と限界を整理し，ケーブル構造を持つ小規模の斜張橋および吊り橋の着目すべきリスクと維持管理のためのモニタリングの適用可能性と限界を明らかにし，ケーブル構造を持つ特殊橋梁の維持管理を支援できる資料を提案する．

1.3　研究実施体制

本研究は，下表のメンバーにて実施した．

新都市社会技術融合創造研究会　プロジェクトチーム　メンバーリスト
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」

	氏名	所属・役職	備考
学	金　哲佑	京都大学大学院　工学研究科　社会基盤工学専攻　教授	PJ リーダー
	八木　知己	京都大学大学院　工学研究科　社会基盤工学専攻　教授	
	五井　良直	京都大学大学院　工学研究科　社会基盤工学専攻　助教	
	林　　厳	大阪市立大学大学院　助教	
	古川　愛子	京都大学大学院　工学研究科　都市社会工学専攻　准教授	
	玉越　隆史	京都大学経営管理大学院　特定教授	オブザーバー
産	小野和行	株)エイト日本技術開発　国土インフラ事業部　神戸支店　道路・構造グループ	幹事
	遠山直樹	本州四国連絡高速道路(株) 長大橋技術センター	
	丸山武士	株式会社長大　西日本構造事業部	幹事
	織田敏彰	株式会社長大　西日本構造事業部	
	榊 一平	神鋼鋼線工業株式会社	
	矢島卓	東京製綱株式会社　鋼構造ケーブル部	
	大坪 裕	道路部　道路保全企画官	
	松本 太一	道路部　道路構造保全官	整備局 窓口
	富永 義人	近畿道路メンテナンスセンター　保全対策官	
	井上 謙	近畿道路メンテナンスセンター　技術課　保全企画係長	
	奈良 明彦	近畿技術事務所　副所長	
	高祖 亮一	近畿技術事務所　技術情報管理官	契約 担当
	竹田 佳宏	姫路河川国道事務所　副所長	
	田尻 尚登	姫路河川国道事務所　管理第二課長	
	松井 隆博	姫路河川国道事務所　管理第二課　専門員	

1.4 研究日程

令和 3 年度を含む過去 3 年間の研究活動の日程を以下に示す.

研究活動		開催日	主な内容	備考
令和元年度	第 1 回研究会	R1.8.8	・本研究会の趣旨及び研究内容の紹介 ・本年度の研究方針	近畿地方整備局にて開催
	幹事団会合	R2.1.14	・初年度研究内容の取りまとめ方針 ・次年度実施のモニタリングに関する内容	
	第 2 回研究会	R2.1.17	・初年度研究内容に関する研究内容の取りまとめ方針の報告 ・次年度モニタリング予定の橋梁の紹介	京都大学桂キャンパスにて開催
令和二年度	第 1 回研究会	R2.8.27	・昨年度研究内容の中間評価結果の報告 ・本年度の研究内容と目標及びスケジュールの確認	京都大学桂キャンパスにて開催（Web 会議併用）
	現地視察	R2.9.30	・モニタリング対象橋梁のカラウコ大橋の現地視察	現地にて
	現地計測器設置	R2.11.10-12	・カラウコ大橋にて計測器設置 ・短期計測の実施	現地にて
		R2.12.26	・長期モニタリングの開始	現地にて
	第 2 回研究会	R3.1.13	・本年度報告書目次の報告 ・カラウコ大橋モニタリング状況の報告	京都大学桂キャンパスにて開催（Web 会議併用）
令和三年度	第 1 回研究会	R3.6.30	・昨年度研究内容の報告 ・本年度の研究内容とスケジュールの報告 ・本年度実施予定の吊り橋のモニタリング対象の検討	京都大学桂キャンパスにて開催（Web 会議併用）
	幹事団会合	R3.10.20	・吊り橋モニタリング対象橋梁として奈良市管理の八幡橋にて決定 ・その他、モニタリングに関する事項の決定	
	現地計測器設置	R3.11.8	・吊り橋モニタリング対象橋の八幡橋にて計測器の設置 ・短期計測の実施	現地にて
	第 2 回研究会	R3.12.9	・吊り橋モニタリング状況の報告 ・本年度の報告書目次の確認	京都大学桂キャンパスにて開催（Web 会議併用）
	現地計測器撤去	R4.3.15	・吊り橋モニタリング対象橋の八幡橋にて計測器の撤去	現地にて
	現地計測器撤去	R4.3.25	・カラウコ大橋モニタリングにて計測器の撤去	現地にて

第 2 章　ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法の提案

2.1　特殊橋梁の維持管理における現状の課題及び問題点の再確認

本研究では初年度（R1 年）において，ケーブル構造を持つ特殊橋等について（吊橋，斜張橋，トラス橋，アーチ橋）点検の手法，精度（品質の確保）・診断の判定について，課題等の聞き取り調査を実施した（姫路河川国道，奈良県，和歌山県，京都府　等，14 自治体等に聞き取り）．その結果は下記のとおりである．

【　全般　】	
①	不可視部の調査をいつ，どのような方法で実施することが適切であるのか，その基準や運用の確立が課題.
②	単純桁橋であれば同種・同規模の橋梁と比較することで，劣化や損傷の程度を比較・判断することができるが，比較対象となるような橋梁が少ない特殊橋においては，その判断が難しく苦慮している.

【　吊り橋　】	
①	どの部材のどのような損傷がどの判定区分なのか判断が難しい.
②	防食テープが巻かれたケーブルについては，近接目視だけではテープ内部の状態を把握することは困難.
③	歩行者用吊橋の技術基準（小規模吊橋指針）が昭和59年から更新されていない．重要なメインケーブルの定着部及びケーブル全体の健全性判断が数値によるものではなく，経験上のものとなってしまう.

【　斜張橋　】	
①	ケーブルや支承等の主要部材の詳細調査を実施する必要性の有無について判断が難しい.
②	ケーブル不可視部の点検及び診断精度が課題.
③	PCケーブルのグラウト調査及び修繕.
④	PCケーブルの制振装置破損部分の交換にかかる材料の選定.
⑤	ケーブルの定着部は，橋梁が建設された年代での技術が用いられており，防食材（塗膜・カバー等）の形状もさまざまな技術．橋梁別に製作されている構造を理解して，構造に合わせて定期点検や詳細調査においてさまざまな特殊機器から選定する必要がある.

【　トラス橋　】	
①	トラス斜材のコンクリート埋込部について，近接目視だけではコンクリート内部の鋼材の状態を把握することは困難.

前述のコメントを総括すると，概ね以下のとおりである．

- ✓ 橋梁点検で着目すべき部位，さらに損傷程度が及ぼす影響
- ✓ ケーブル関連の点検手法，及び損傷程度による橋梁健全度の診断精度
- ✓ 一般的な桁橋と異なり，どのような損傷が橋に影響を及ぼすのか判断が困難

上記の課題の解決のため，令和 2 年度及び令和 3 年度に以下の検討を実施した．

①特殊橋梁に特化した橋梁定期点検の限界を補足できる条件の検討
②モニタリングの適用による橋梁健全度評価に係る検討

なお，検討において着目した事項は以下のとおりである．

- ➢ 劣化特性の精査や橋梁の項目別分類による重点着目箇所
  - ・ケーブルや定着の仕様・構造
  - ・径間形式，桁形式，
  - ・支承形式
  - ・ハンガー形式
  - ・寸法関係（塔，桁，幅員，など諸々組み合わせ）

ここで，近畿管内の自治体が管理する吊り橋及び斜張橋のような特殊橋梁は以下に示す通りである．

路線	事務所	出張所	名称	名称フリガナ	竣工年次	全幅員（m）	有効幅員（m）	橋梁形式	橋長（m）	設計活荷重
1	大阪国道	北大阪維持	新桜宮橋	ｼﾝｻｸﾗﾐﾔﾊﾞｼ	2006	19.75	18.75	2径間連続鋼非合成箱桁橋＋単純鋼ローゼアーチ橋	227	B活荷重
483	豊岡河川国道	朝来国道維持	大屋川橋（下り線）	ｵｵﾔｶﾞﾜﾊｼｼﾀﾀﾞﾘｾﾝ	2011	11.15	10.26	単純鋼ニールセンローゼアーチ橋+5径間連続非合成少数鈑桁	318.5	B活荷重
29	姫路河川国道	山崎維持	カラウコ大橋	ｶﾗｳｺｵｵﾊｼ	1990	9.7	8.5	単径間鋼箱桁斜張橋+2径間連続RCT桁ラーメン橋	179.5	TL-20

なお，斜張橋は姫路河川国道事務所が管理する国道 29 号のカラウコ大橋のみとなる．また，吊り橋については，全 198 橋架橋されており，現在も供用されている．その架橋状況は，**図 2-1** に示すとおりである．198 橋の内，70%程度の 130 橋が和歌山県に架橋されており，その他，奈良県，京都府に架橋されている．比較的，地形状況の厳しい府県に架橋されていることが確認できる．

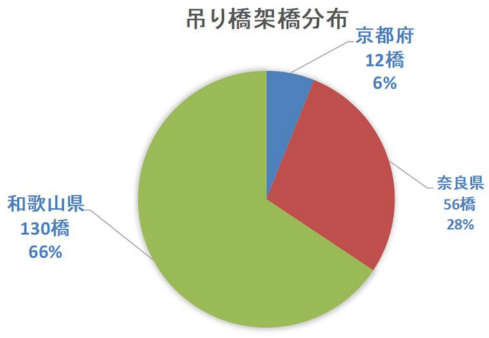


図 2-1　管内吊り橋分布図

これら 198 橋の吊り橋に対して実施されている橋梁点検結果をもとに，その損傷判定区分及び損傷内容を整理した．

まず，損傷判定区分（I~IV）については，**図 2-2** に示すとおりである．

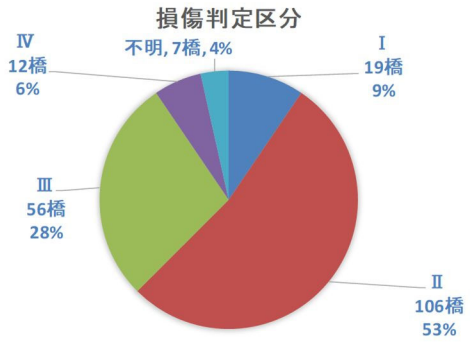


図 2-2　損傷判定区分

この図から，損傷判定I及びIIが比較的多いことが確認できる．なお，何らかの対策が必要とされるⅢ及びⅣの損傷が確認されている橋梁は 68 橋，全体の 35%程度となっている．

主な損傷は，

■主索及び吊索等の破断：オレンジハッチ
■主索及び吊索等の腐食：緑ハッチ

である．

これら損傷は，吊り橋全体の安全性に大きく係る部位であり，本研究の着目点の一つであり健全度評価を行う上で重要であるが，その損傷度合いの判定，判断が極めて難しいところが大きな課題である．

以上，本章では，「①特殊橋梁に特化した橋梁定期点検の限界を補足できる条件の検討」について，令和 2 年度検討の内容を基本として，ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法に関する一提案を行う．

2.2　ケーブル構造を有する特殊橋梁維持管理手法の提案

2.2.1　吊り橋の構造と着目すべき部材

図 2-3 に示すように吊り橋には，主ケーブルとハンガーの接合部や主ケーブルのアンカー定着部，サドル部など吊形式橋梁以外にはない特殊な構造も多く用いられている．そのため，一般的な桁橋の健全度評価が適用できないケースもあり，損傷度合いを適切に判断するには更なる知見が必要である．

表 2-1 には，一般的な吊り橋の点検位置，点検内容を示す．これらについては，概ね近接目視にて確認できる内容である．したがって，定期点検によって，対象となる吊り橋の現状の損傷状態は定性的に確認できることとなる．

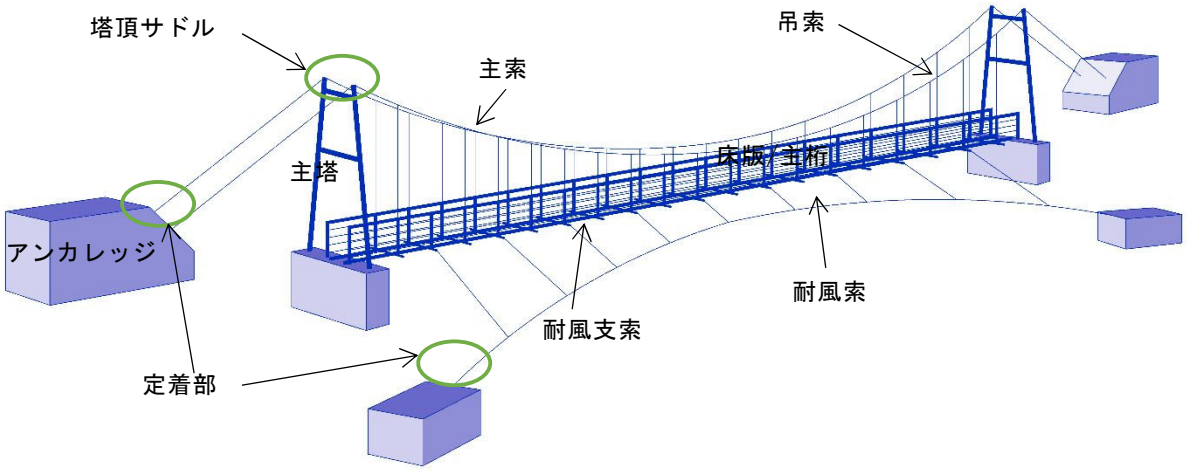


図 2-3　吊り橋構造概要図

表 2-1　一般的な吊り橋点検ポイント

点検位置	点検内容
橋の形状	橋面の傾き・変形，異常な振動など
ケーブル	ロープ径，腐食，断線，摩耗，軸折れ，弛み，取付方法など
定着部	ソケット抜出し，腐食，泥等の堆積，変形，弛み，湿潤環境など
吊　索	ロープ径，腐食，弛み，ワイヤグリップの弛み，ケーブルバンドの滑りなど
床板・手摺	損傷脱落，腐食，弛み（釘抜け）など
その他	ボルト類の脱落，ネジ部の腐食など

しかし，これらの損傷が橋全体に及ぼす影響を定量的に把握することは，現状では困難である．そのため，どの部位の損傷がどの程度の損傷であれば，対策を講じる必要があるのかという指標を示すことが重要な事項となる．そこで，本章では実際の橋梁点検調書を利用し，損傷部位と損傷状態を種々の構造諸元との相関性を分析することとする．

2.2.2 着目すべき部材と配慮事項

吊橋は，**図 2-3** に示すように主塔間を張り渡したメインケーブルから懸垂する形式の橋梁であり，上部構造の剛性ではなく，各種ケーブルの張力により成り立っている．そのため，これらの各種ケーブル（メイン索・吊索・耐風索等），アンカレッジ，主塔，塔頂サドル等の損傷が橋梁全体の健全度に大きく直接影響することとなる．

以上のことから，橋梁全体に大きく影響を与える着目すべき部材，それらに対する配慮事項を以下で整理する．

①主ケーブル

主ケーブルは，自重及び活荷重により下向きの力が作用するため，その影響がケーブルシステム全体に影響することとなる．規模の大きい吊り橋では，主ケーブルに作用している張力の大半を自重が占めることとなるため，活荷重が多少超過しても張力変化はわずかである．一方，規模が小さい吊り橋では，主ケーブルの断面に占める活荷重分の比率が大きく，その変化の影響が問題となる可能性がある．主ケーブルが健全であれば問題ないが，腐食，切断等の損傷が生じていればその影響は橋全体に及ぶこととなる．

主ケーブルは桁を懸垂するための吊材が，ケーブルバンドや種々の形式のクリップ等により摩擦力で抵抗するように固定されている．そのため，過度な鉛直力によってハンガーケーブルが引張られることで定着部が滑ることが懸念される．この際，主ケーブルとケーブルバンドの定着構造は，締付ボルトのクリープや主ケーブルの張力変化等に伴う影響で，当初の締付力が十分に期待できなくなっていることも懸念される．

⇩ 橋梁定期点検で留意すべき事項の提案

- ✓ ケーブル腐食度合い
  →「小規模吊橋指針・同解説」では，ケーブルは塗装若しくはめっき処理を基本としている．しかし，吊り橋のほとんどは，ケーブルの防錆処理が行われていないのが現状である．腐食の進行は，最悪，ケーブル破断に繋がるため，著しい腐食が確認される場合は，防錆処理を行うことが望ましい．
- ✓ ケーブル破断の有無
  →定期点検結果でもケーブル破断は確認されている．吊り橋の場合，主ケーブル破断は落橋の主要因となることから注意が必要である．ただし，ケーブル破断がすぐさま落橋に繋がるわけではないが，補修等を行っていく必要がある．
  なお，本報告書第 3 章および第 5 章にて吊り橋の長期モニタリングを踏まえた応答検討を取りまとめている．これらの結果を踏まえ今後の維持管理を行っていくことが望まれる．

<table>
<tr><td>
主ケーブルの腐食・破断①</td><td>
主ケーブルの腐食・破断②</td><td>
主ケーブルの腐食・破断③</td></tr>
<tr><td>
主ケーブルの腐食④</td><td>
主ケーブルの腐食⑤</td><td>
主ケーブルの腐食⑥</td></tr>
<tr><td>
耐風索の破断①</td><td>
耐風索の腐食・破断②</td><td>
ハンガーケーブルの腐食・破断</td></tr>
</table>

写真 2-1　ケーブルの損傷事例

以上，主ケーブルは，吊り橋全体にわたり影響を及ぼすことから，腐食及び破断等に対する維持管理は十分に行う必要がある．なお，ハンガーケーブル，耐風索等については，落橋に直接つながることはないが，使用性の観点から維持管理を継続して行っていく必要がある．

②ケーブル定着部

ケーブル定着部の構造は，圧縮止め・ソケット止め・くさび止め等が用いられる．なお，くさび止めは規模の大きい橋梁に適用され，中小規模の橋梁には圧縮止め・ソケット止めが適用される．

なお，各構造の概要図を**図 2-4～図 2-6** に示す．

橋梁定期点検で留意すべき事項の提案

✓ ケーブル定着部の腐食度合い

→同様に「小規模吊橋指針・同解説」では，定着部は他の部分より腐食しやすい傾向にあることから，十分な防錆処理を行うとともに維持管理にあたって特に注意が必要な箇所として示されている．主ケーブルと同様，腐食の進行は，最悪，定着部の破断に繋がるため，著しい腐食が確認される場合は，防錆処理を行うことが望ましい．なお，断面減少が著しい場合，取替えも視野に入れた維持管理が必要である．

ハンガーケーブル定着部の腐食①

ハンガーケーブル定着部の腐食②

ハンガーケーブル定着部の腐食③

主ケーブル定着部の腐食①

主ケーブル定着部の腐食②

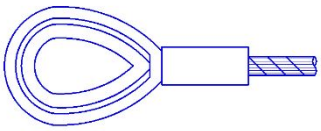
主ケーブル定着部の腐食③

主ケーブル定着部の腐食④

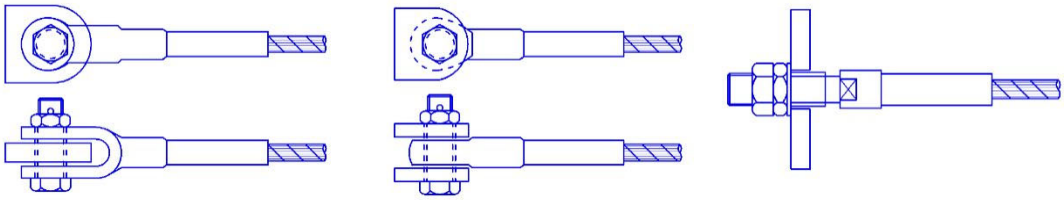
主ケーブル定着部の腐食⑤

主ケーブル定着部の腐食⑥

写真 2-2　ケーブル定着部の損傷事例



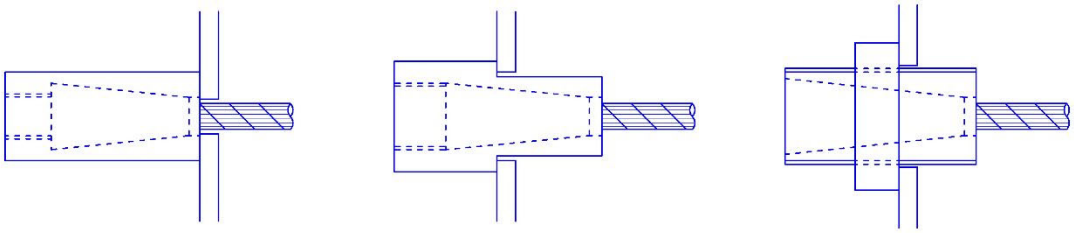
アイ圧縮止めタイプの形状



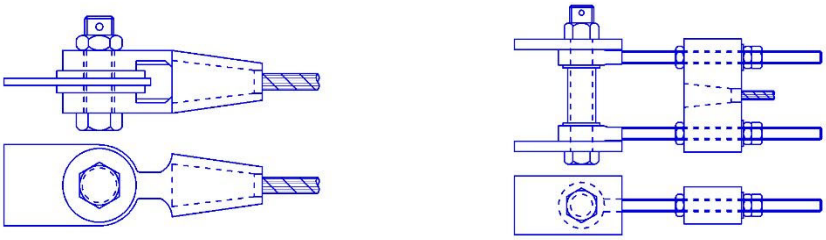
a) オープンタイプ　b) クローズタイプ　c) エンドネジタイプ

スウェージタイプの形状

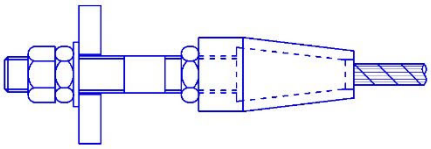
図 2-4　圧縮止め定着構造事例



a) 前面支圧タイプ　b) 背面支圧タイプ　c) ナット定着タイ

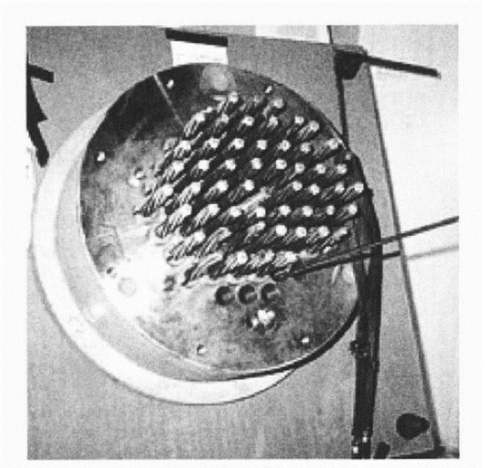


d) オープンタイプ　e) ブリッジタイプ



f) ロッド定着タイ

図 2-5　ソケット止め定着構造事例



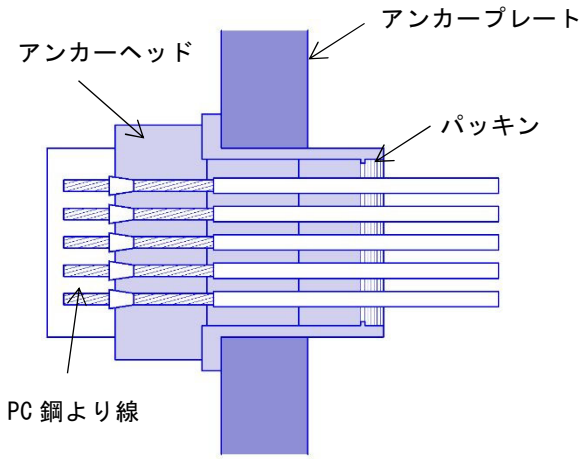


図 2-6　くさび止め定着構造事例

③アンカレッジ

図 2-3 に示すとおり，アンカレッジは，主ケーブルを定着し，その張力の全てを受け持つ部材である．一般的に用いられるアンカレッジの構造は，**表 2-2** のとおりである．

表 2-2　一般的なアンカレッジの構造形式

構造形式	概　　要	事　例
重力式	大規模な吊り橋で適用される構造である．	―
半重力式	規模を縮小した重力式と地盤への埋め込み抵抗を考慮する構造である．	
トンネル式	主ケーブルをアンカーフレームに接合，アンカーフレーム自体を地山に埋め込み抵抗を考慮する構造である．	

なお，本研究で対象としている吊り橋では，重力式は用いられておらず，半重力式，若しくはトンネル式のアンカレッジとなり，トンネル式が圧倒的に多い．この形式の場合，土砂や雨水の影響を直接受け，アンカーフレーム及び主ケーブル等の腐食が懸念される．

橋梁定期点検で留意すべき事項の提案

✓ <u>アンカレッジの損傷度合い</u>

→上述のとおり，アンカレッジは基本，無筋コンクリート構造である．そのため，材料の経年劣化による損傷が生じやすく，架橋環境によっては著しくなる可能性もある．アンカレッジは，主ケーブルの定着という重要な構造であることから土砂及び降雨等による損傷の進行を極力抑える管理が必要である．

また，アンカレッジと主ケーブルを接続するアンカーフレームは鋼製であることから，腐食等の損傷を受けやすい．これらにおいては，防食処理を十分に行い腐食進行を抑える維持管理が必要であると考える．

④主塔

主塔は，主ケーブルのサグを確保する他，鉛直荷重とケーブルサドルからの水平力を分担する構造である．

主塔には鋼製及びコンクリート製があるが，対象吊り橋では両構造が適用されている．鋼製の場合，溶接部のき裂，腐食による断面減少や添接ボルトの破断等に配慮が必要である．一方，コンクリート製の場合，コンクリート部材の損傷（ひび割れ，剥離・鉄筋露出），鉄筋の腐食等に配慮が必要である．

写真 2-3　鋼製主塔

写真 2-4　コンクリート製主塔

橋梁定期点検で留意すべき事項の提案

✓ 主塔の損傷度合い

→主塔は，鋼製若しくはコンクリート構造が適用されており，各々での対応に留意する必要がある．鋼製の場合，腐食，腐食に伴う断面減少等に留意する必要がある．特に，塔頂部のサドル周辺，塔基部は雨水が滞水しやすく，一般部に比べ腐食の進行が早い．これら箇所については，重点的な点検を行い損傷度合いを確認する必要がある．一方，コンクリート構造に関しても，同様に頭頂部及び基部の損傷に留意し，損傷の進行を抑える維持管理が必要である．

⑤ハンガーケーブル定着形式

ハンガーケーブルは，桁と主ケーブルを懸垂する部材であり，より線によるケーブル類が用いられることが多いが，鋼製ロッドも用いられている．主ケーブル同様，腐食，切断等の損傷は，通行安全性に影響を及ぼすこととなる．

また，ハンガーケーブルは主ケーブル及び桁に定着されており，その代表的な定着方法を**表 2-3** に示す．

表 2-3　代表的な定着方法

定着方法	概　　要	事　例
ソケットタイプ	ソケット内でばらした素線を樹脂充填等により固め，塗装等により防食機能を確保する． ソケット内部への雨水の進入による腐食が懸念される．	
ねじ,カップラータイプ	鋼製ロッドに用いられる定着方法であり，ねじ構造であることから長さ調節が可能となる． ねじ部の防食機能の劣化による腐食は，カップラー部，及びロッドへの影響が大きく損傷を生じ易い箇所となる．	
クリップタイプ	小規模吊り橋の定着方法として用いられる簡易な構造である． ケーブルとクリップ部において，雨水が滞留してしまいケーブル自体の腐食が進行する場合がある．	
ピンタイプ	ハンガーケーブルと桁の相対変位によって部材に過度な応力が生じないようピン構造を適用した定着方法である． ピンタイプは可動を条件に設計されており，腐食等による可動機能喪失の際には，設計で想定していない応力が生じ，き裂等の損傷が生じることが懸念される．	

橋梁定期点検で留意すべき事項の提案

✓ ハンガーケーブルの腐食度合い

→「小規模吊橋指針・同解説」では，他のケーブルと同様，十分な防錆処理を行う必要がある箇所として示されている．また，定着部は他の部分より腐食しやすい傾向にあることから，十分な防錆処理を行うとともに維持管理にあたって特に注意が必要な箇所である．したがって，これらの箇所については，十分な点検を行うとともに，損傷に対して適宜，防錆処理や取替え等の維持管理を行っていく必要がある．

2.2.3 新技術を用いた課題解決手法の提案

前項では吊り橋の維持管理手法に係る提案を行ったが，吊り橋の点検等を行う上でその構造と着目すべき部材以外にも，更なる課題及び問題等がある．具体的には下記に示すとおりである．

- 管内の吊り橋は，供用年数が 50 年を越えるものが 75%程度であり，構造諸元を示す設計図書が残っていない．
- 架橋位置が比較的厳しい地形条件の橋梁が多く，橋梁点検車等を用いた点検を行うことが困難である．
- モニタリングを実施しようとした場合，電力供給が不可能な状況にある．

次頁以降，これら課題及び問題点の解決手法を提案する．

①3D レーザースキャナーを用いた構造諸元等の計測

小規模な吊り橋においては，設計図書が残っていないことが殆どである．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，かつ労力を費やすこととなる．

以上のことを踏まえ，ここでは 3D レーザースキャナーを用いた吊り橋構造諸元の計測結果を紹介する．

【計測対象橋梁】

奈良県奈良市月ヶ瀬桃香野　八幡橋

本橋は，次章に示す吊り橋の長期モニタリングの対象橋梁である．なお，本橋は比較的規模の大きい吊り橋であり，かろうじて竣工図が存在していた．また，その竣工図をもとに橋梁一般図も作成されている．

竣工図が存在することから，レーザースキャナーでの計測結果の整合性も合わせて確認することができた．

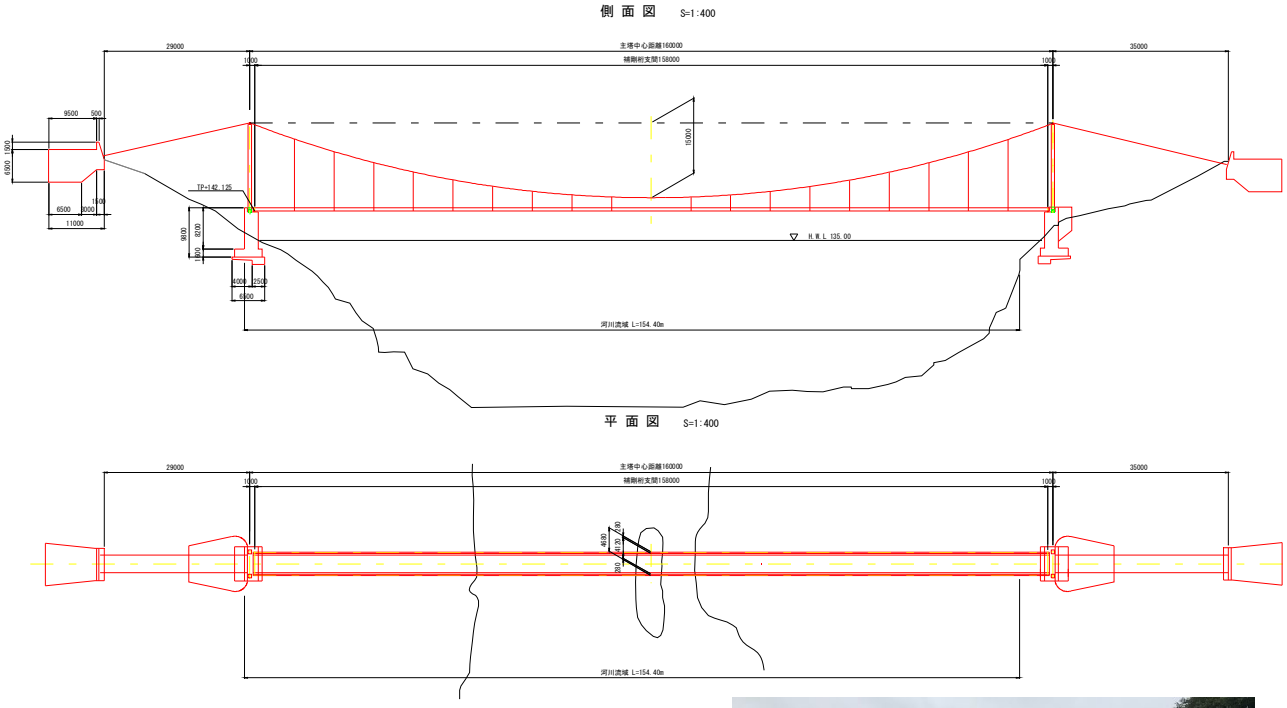


図 2-7　八幡橋概要図

【計測位置】

3D レーザースキャナーによる点群データの計測は，以下の 3 地点にてそれぞれ高密度（3mm@10m）と中密度（6mm@10m）にて実施した．

①北側遠方

②北側近方

③南側近方

図 2-8　計測箇所概要図

＜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″、距離制度：1.0mm+10ppm
動作温度範囲	-5℃～+40℃
重量	5.35kg

図 2-9　3D レーザースキャナー概要図

【計測結果】

以下，**図 2-10~1** には 3D レーザースキャナーによる計測結果を示す.

①北側遠方

▽高密度

図 2-10　計測結果（1）

▽中密度

今回の計測では，機械の不具合により精度よく測定できなかった.

②北側近方

▽高密度

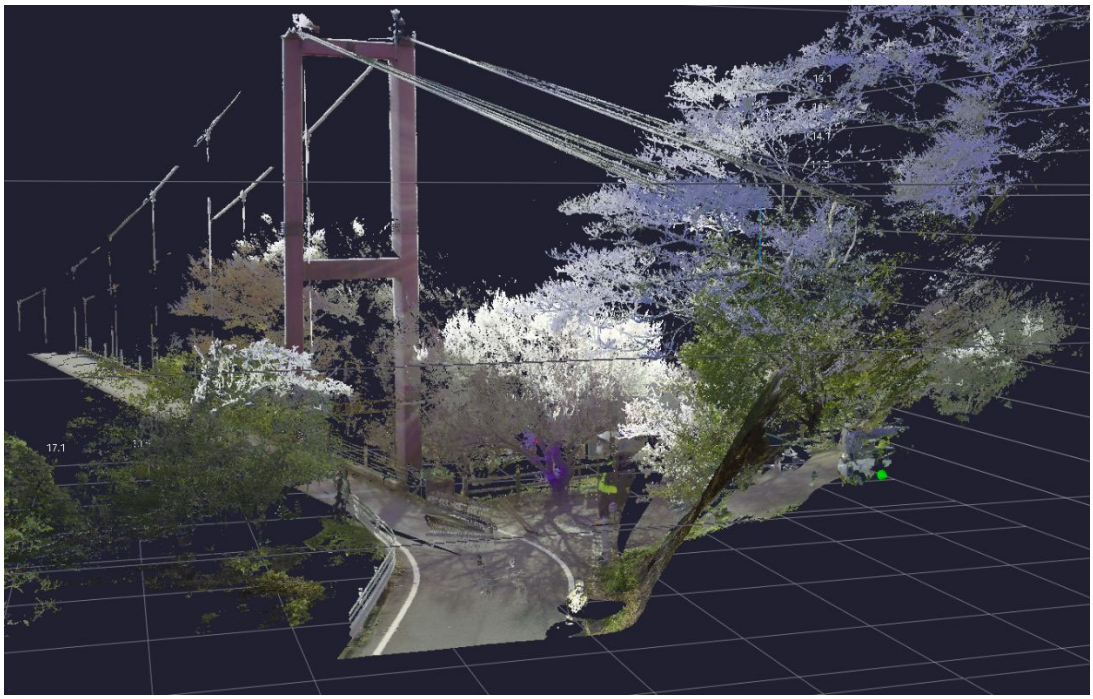


図 2-11　計測結果（2）

▽中密度

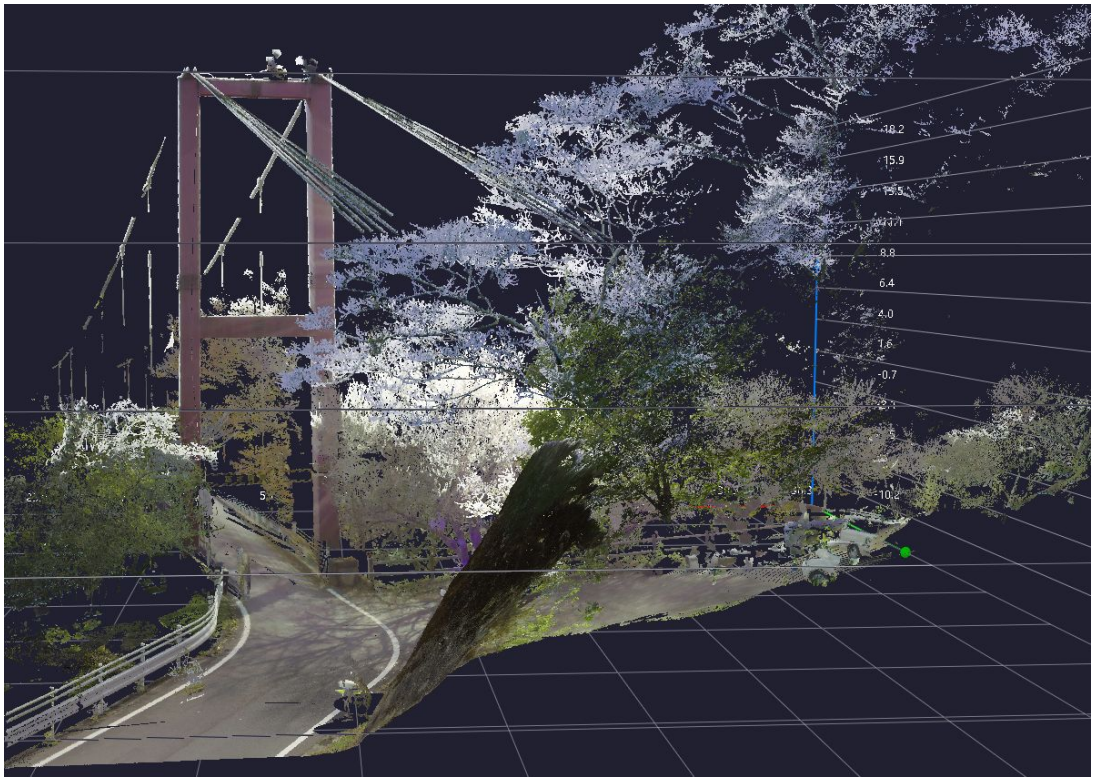


図 2-12　計測結果（3）

③南側近方

▽高密度

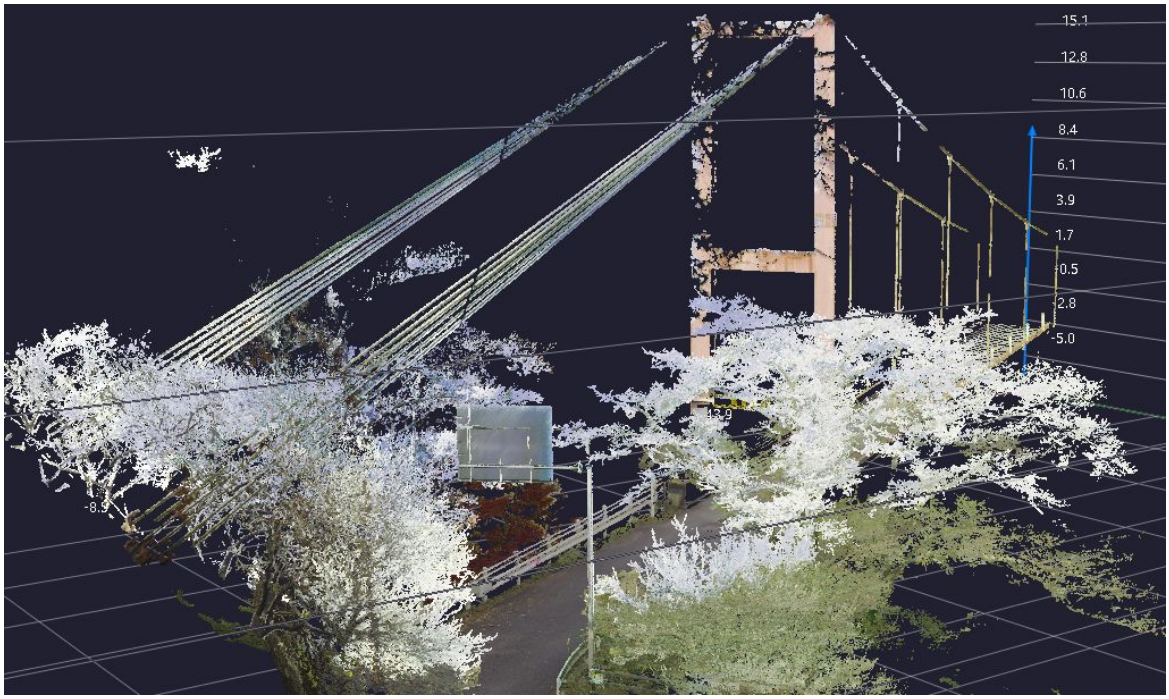


図 2-13　計測結果（4）

▽中密度

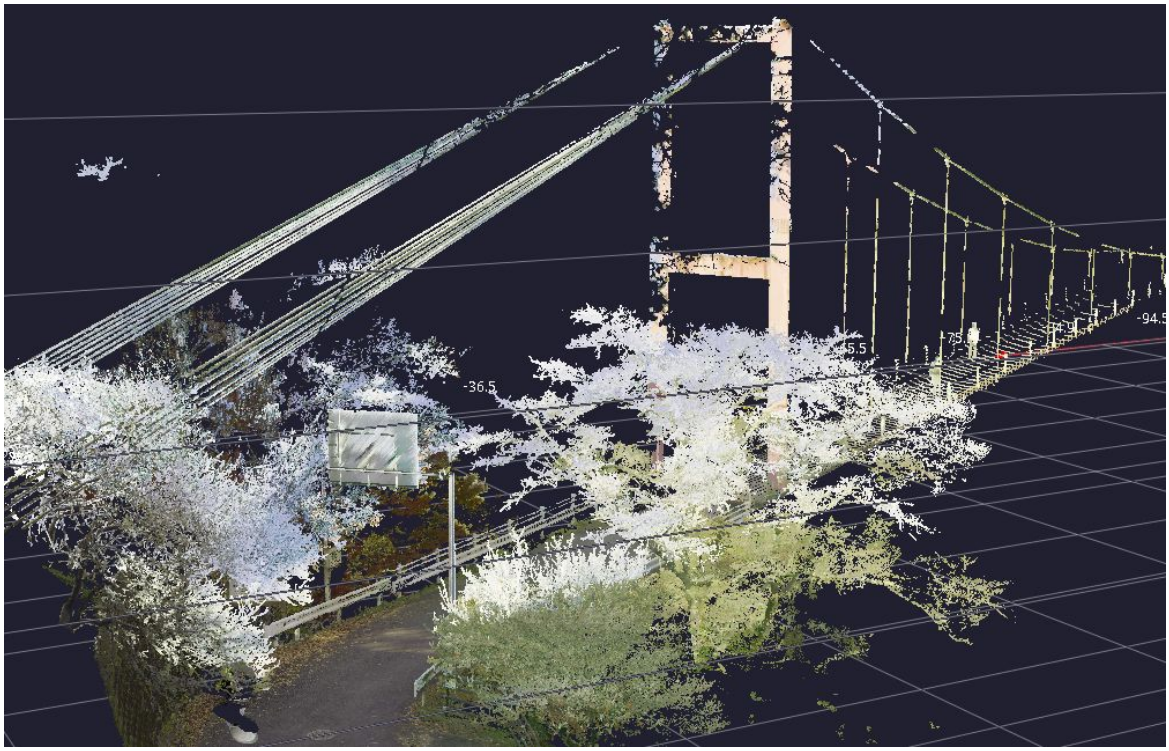


図 2-14　計測結果（5）

3D レーザースキャナーで取得した点群データを用いて，主塔の構造寸法を確認した．図 2-15 には主塔のスキャナーデータを示す．

なお，確認は次頁に示す既存図面と点群データを比較し，誤差は最大で 10mm 程度と非常に高い精度で計測できることを確認した．

＜南側　塔柱＞　　＜北側　塔柱＞

図 2-15 主塔計測結果

以下は，竣工図から抜粋した主塔構造図である．

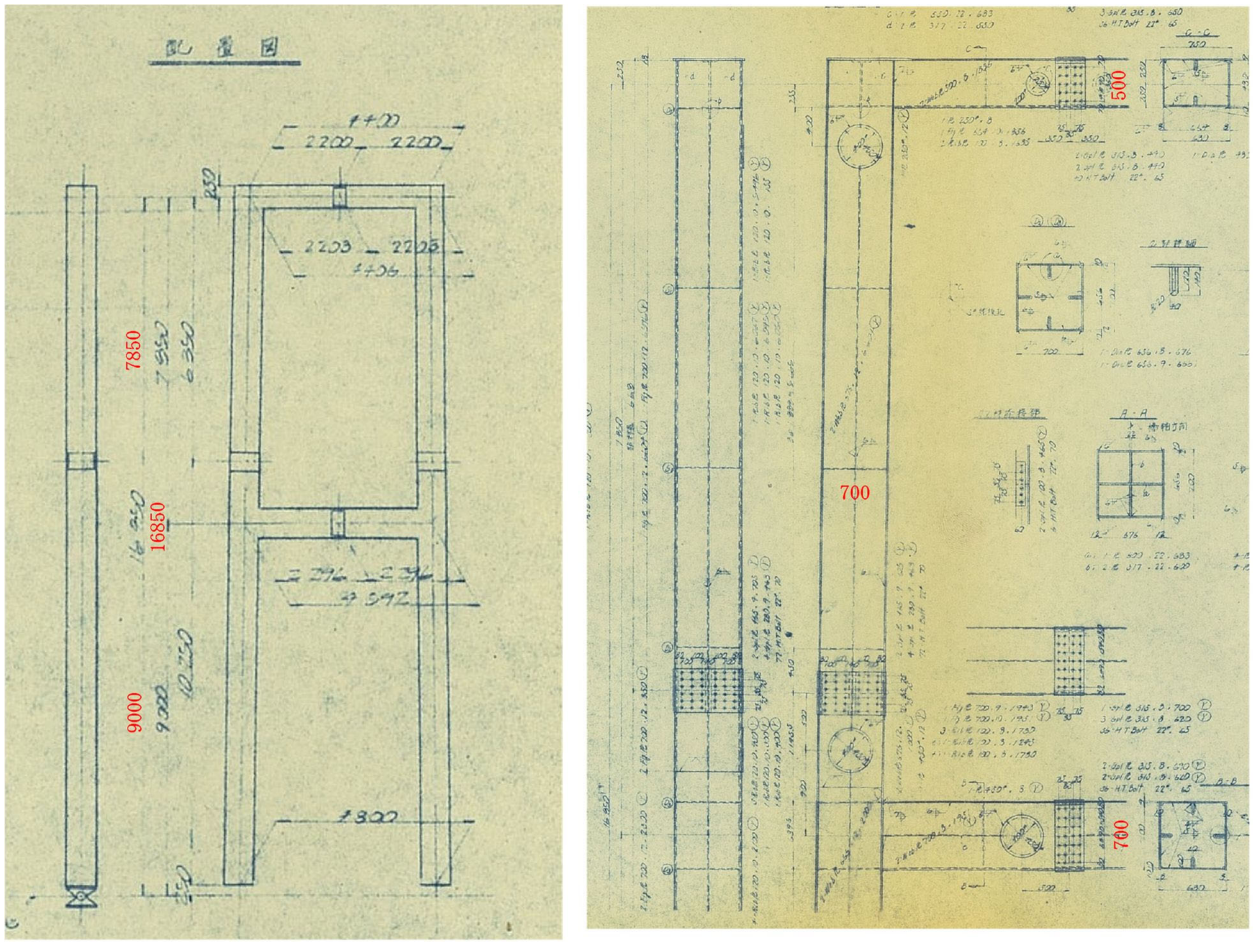


図 2-16　主塔構造図

【今後展望及び計測費用等】

現地計測が非常に厳しい環境にある吊り橋の橋梁一般図（構造寸法等が把握可能な）を作成する場合，3D レーザースキャナーは非常に有効な計測手段として適用できると考えられる．

以下では，計測費用，計測工程等を示す．

	1 橋当り	備　　考
計測費用	概ね 100 万円程度	図化及び経費込み
計測工程	計測：1 日，図化：3 日程度	

②ロープアクセスを用いた点検等

前述のとおり吊り橋の架橋位置は，環境・地形条件が比較的厳しい箇所であり，橋梁点検車等の利用が困難な場合が多い．そのため，主塔など高所部の点検等が非常煩雑となる．

このような場合，ロープアクセスによる点検の適用が考えられる．ロープアクセスによる点検は比較的規模の大きな橋梁（高橋脚）などで用いられいる．なお，ロープアクセスでは，橋面から橋脚，上から下への移動，地上から上部，下から上への移動，どちらでも対応可能である．

なお，今回，長期モニタリングを実施した八幡橋の主塔頂部へのセンサー設置は，ロープアクセスを用いて実施した．**写真 2-5，6** にその状況を示す．

写真 2-5　主塔へのアクセス状況

写真 2-6　主塔上での作業状況

【今後展望及び点検費用等】

橋梁点検車や梯子等での点検が困難な橋梁については，ロープアクセスによる点検が有効な手段として適用できると考える．

以下では，点検費用を示す．

	1 橋当り	備　　考
点検費用	概ね 50 万円程度	橋梁規模により変動するため見積もり徴収が必要

③ドローンを用いた点検支援技術

本技術は，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として，点検支援技術（ドローン）による状況確認を行うものである．

ドローンを用いた無人での撮影となることから，作業の各段階において精度管理を行い確実なデータを収集できるよう配慮している．**表 2-4**　には精度管理表の一例を示す．

表 2-4　精度管理表

項目		精度条件・設定値※1	事前チェック	飛行前チェック		画像チェック
準備 事前	ｷｬﾘﾌﾞﾚｰｼｮﾝ	既知のひび割れ（0.2ｍｍ程度が望ましい）	□ひび割れ幅及び点検調書	—		離隔・画質（機体カメラ、高画質カメラ）で撮影（__m, __m, __m）
環境	①　風速	平均風速 3m/s 以下(桁下飛行高さにて)	—	9 時 11 時	m/s m/s	—
	②天候	雨天・降雪時不可	—	9 時 11 時		—
	③外気温	10～35℃	—	9 時 11 時	℃ ℃	—
	④日照条件※2	1000lx 以上（点検箇所付近の値）	—	9 時 11 時	lx lx	—
機体	⑤飛行速度	0.5m/s 程度で飛行（画像ラップ率との関係）	□訓練記録及び実務記録簿の確認	—		ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 回 午前：画像 OK 午後：画像 OK
	⑥飛行離隔	レンズ前面と被写体との離隔 3m を確保	□訓練記録及び実務記録簿の確認	□対物センサーの動作確認		ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 回 午前：画像 OK 午後：画像 OK
カメラ	⑦撮影モード	MF（マニュアルフォーカス）	—	9 時：OK □ 11 時：OK □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif　OK □
	⑧画像サイズ	6016 x 4508 ピクセル	—	9 時：OK □ 11 時：OK □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif　OK □
	⑨画質	最高画質 JPEG	—	9 時：OK □ 11 時：OK □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif　OK □
	⑩ホワイトバランス	光源状況に応じて設定	—	9 時：OK □ 11 時：OK □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif　OK □
	⑪絞り	照度に応じて設定	—	9 時：　□ 11 時：　□		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif:f　□ Exif:f　□
	⑫シャッター速度	1/400～1250	—	9 時：1/1250 □ 11 時：1/1250 □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif:1/1250 □ Exif:1/1250 □
	⑬ISO 感度	100～1600	—	9 時：　□ 11 時：　□		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif:　□ Exif:　□
	⑭露出補正	±0	—	9 時：±0 □ 11 時：±0 □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif:±0 □ Exif:±0 □
	⑮焦点距離	3m 程度	—	9 時：オート □ 11 時：オート □		内業時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 枚 Exif:　m □ Exif:　m □
画像	⑯画像ラップ率	70%程度（オルソ画像作成上の必要条件）マニュアルによるランダム撮影	—	—		ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 回 午前：画像 OK □ 午後：画像 OK □
	⑰撮影角度	ピッチ(前後傾き)・ロール(左右傾き)はジンバルにて自動補正。ヨー(左右首振り)のみ操縦にて被写体に対して直角を確保	—	ジンバルの動作 10 時：確認 OK □ 12 時：確認 OK □		ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 回 午前：画像 OK □ 午後：画像 OK □
	⑱撮影した画像の出来映え	ピンぼけ、ぶれ、ハレーション、24 階調カラー異常など不良画像の有無	—	目視確認 午前：画像 OK □ 午後：画像 OK □		ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 2 回 午前：画像 OK □ 午後：画像 OK □

図 2-17 には，ドローンを用いた点検概要を示す．

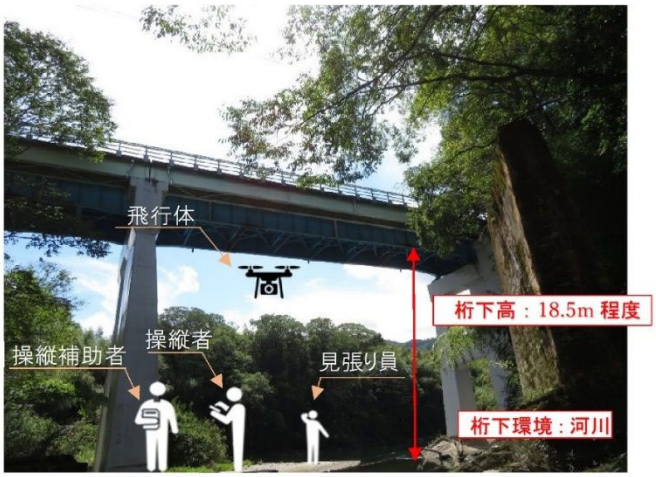


図 2-17　ドローンを用いた点検イメージ図

また，以下にはドローンによる撮影写真を示す．なお，撮影は動画も可能である．

写真 2-7　ドローンを用いた損傷部の状況

【今後展望及び計測費用等】

橋梁点検車や梯子等での点検が困難な橋梁については，ドローンを用いた点検支援技術が有効な手段として適用できると考える．

以下には，点検費用を示す．

	1 橋当り*橋長 100m 規模	備　　考
点検費用	概ね 40 万円程度	橋梁規模より変動するため見積もり徴収が必要

④センサーを用いた橋梁ヘルスモニタリングによる橋梁応答診断

本技術は，次章で示す八幡橋を対象に実施した橋梁ヘルスモニタリング技術である．詳細な説明は次章に示すものとし，ここでは概要を紹介する．

主塔やケーブルの常時振動をモニタリングし，応答の相違により損傷発生を把握しようとするものである．設置するセンサーは，加速度計や温度計等で対応が可能である．

なお，センサー及びデータ収集機には電力が必要となる．しかし，吊り橋架橋位置では電力の供給が困難なケースが多い．そのため，ソーラーパネルによる電力供給手段も効果的となる．**写真 2-8** には，センサー設置概要を示す．

写真 2-8　モニタリングセンサー設置状況写真

【今後展望及び計測費用等】

橋梁にセンサーを設置することで，通常の応答と異常時の応答を把握し，損傷発生の可能性をモニタリングする技術である．比較的大規模な橋梁等に適用することで，定期点検では確認できない損傷を把握することを可能とすることができる．

以下には，センサー費用を示す．なお，センサー費用のみで，周辺機器，設置，データ分析及び診断等には別途検討費用が必要となる．

	1 橋当り*今回計測の八幡橋がモデル	備　　考
モニタリング費用	概ね 100 万円程度	センサー設置により費用は異なることから見積もり徴収が必要

2.3　着目すべき部材と橋梁定期点検結果の分析

以下では，前項で示した吊り橋の維持管理において着目すべき部材に対して，実際行われている橋梁定期点検結果の内容を整理する．

整理に用いた橋梁定期点検は，下表のとおりである．

表 2-5　橋梁定期点検結果

架橋位置	橋梁数	備　　考
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	

県により点検結果の様式等は異なるが，これらの資料をもとに以下の示す項目にて整理した．

表 2-6　整理項目

橋梁名	
管理者	
橋長(m)	
径間数	
桁形式	
幅員(m)	
床版型式	
主塔の有無	有
	無
主ケーブル防食仕様の有無	有
	無
主ケーブル定着構造[1)]	重力式
	半重力式
	トンネル式[1)]
主ケーブル定着[2)]	圧縮止め
	ソケット止め
	くさび止め
バンガーケーブル	ケーブル類
	鋼製ロッド
ハンガー定着構造[3)]	ソケット
	ねじ/カップラー
	クリップ
	ピン

対象橋梁に生じている損傷	桁	腐食
		断面減少
		破断
	主塔	腐食
		き裂
		破断
	主ケーブル	腐食
		断面減少
		破断
	ケーブル定借部	腐食
		断面減少
		破断
	ハンガーケーブル（定着部も含む）	腐食
		断面減少
		破断

図 2-18 には，対象橋梁の主な諸元を示す．

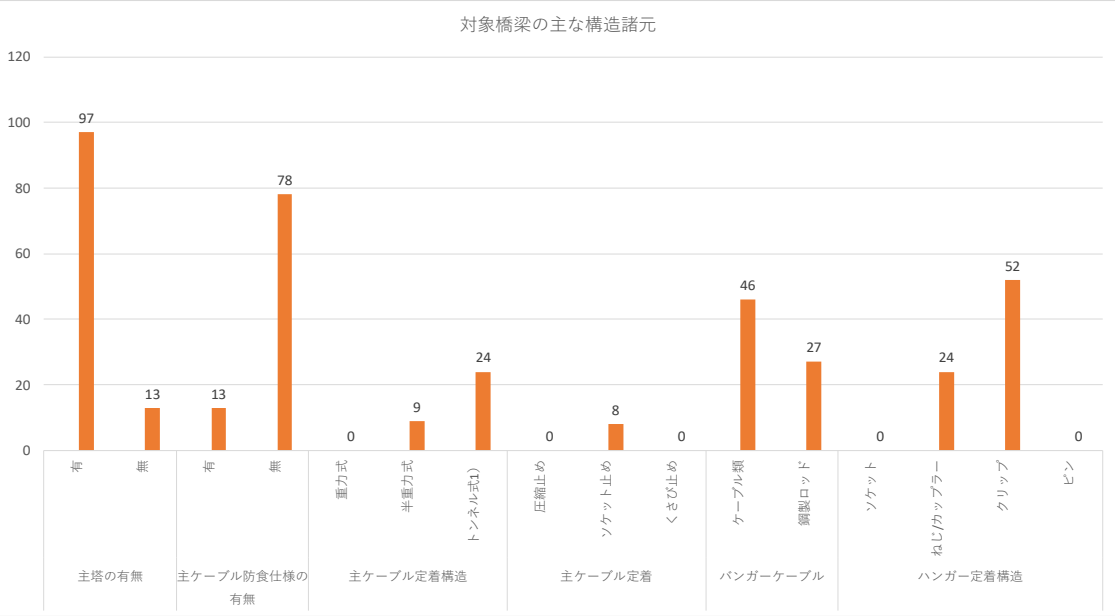


図 2-18　吊り橋の主な構造諸元

上図より，下記の事項が確認できる．

- ✓ ほとんどの吊り橋は，主塔が設置されており，主塔の損傷は橋全体の致命的な損傷に繋がる恐れがある．
- ✓ 主ケーブルの防食仕様は，写真で確認できる範囲では，ほとんどの吊り橋でない（既に防食仕様が機能していない？）状況にある．架橋年次の新しい一部の吊り橋では，防食対策が施されている．
- ✓ 主ケーブルの定着は，写真から確認できる範囲では，トンネル定着が多い．
- ✓ ハンガーケーブルは，ケーブル類が多く，確認できる範囲では 60%程度の吊り橋で用いられている．
- ✓ ハンガー定着構造は，クリップタイプが多く，確認できる範囲では 70 程度の吊り橋で用いられている．なお，奈良県（十津川村）の吊り橋は，そのほとんどがクリップタイプの定着であるのに対し，和歌山県（田辺市・古座川町）の吊り橋は，ねじ/カップラータイプである．

図 2-19 には，橋梁定期点検結果から判定できる損傷状況を示す．また，**図 2-20** には，対象吊り橋の供用年数を示す．

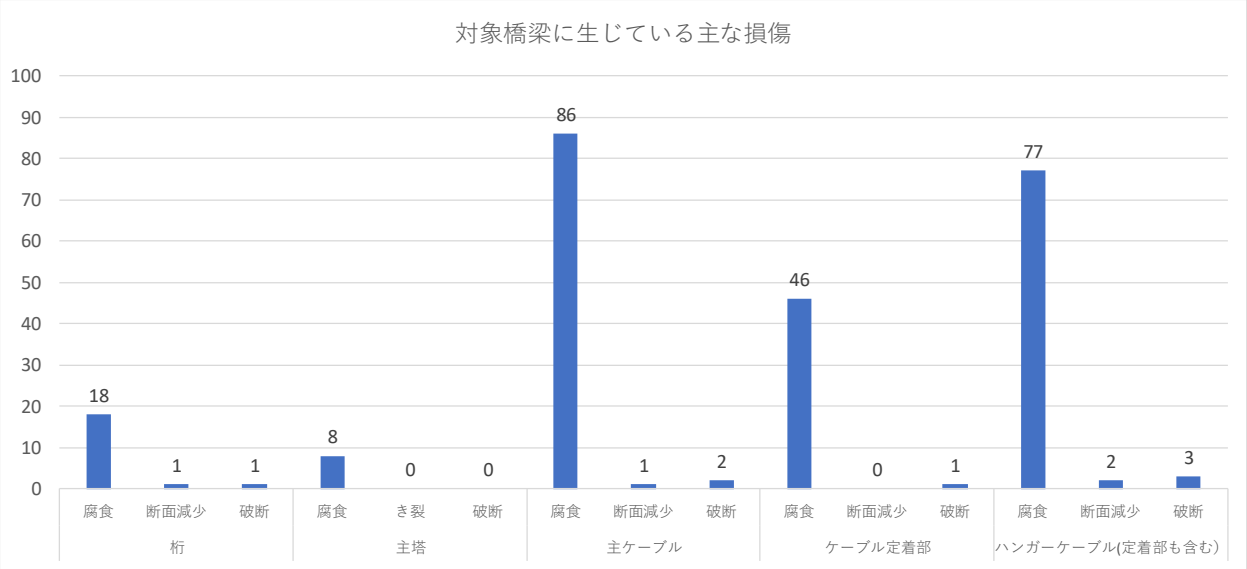


図 2-19　吊り橋に生じている損傷状況

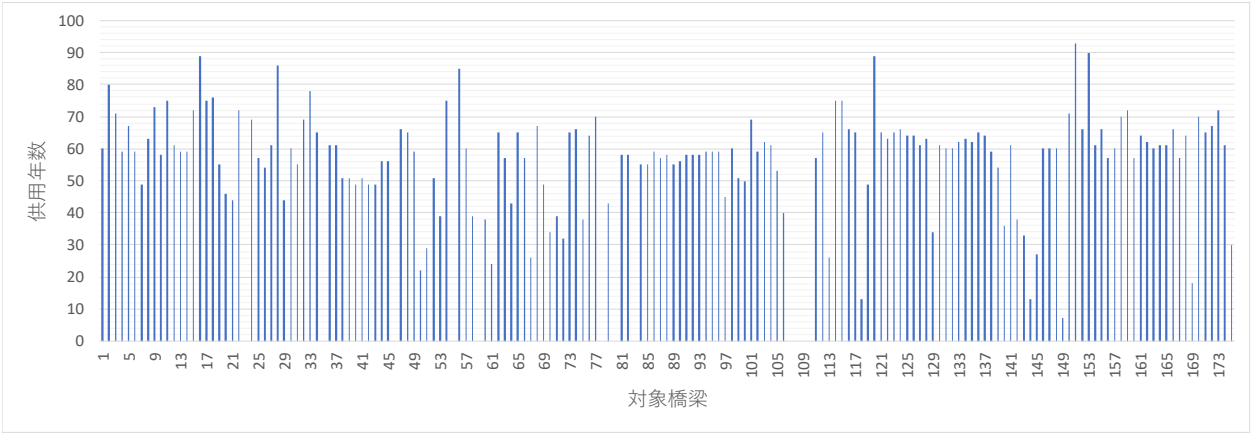


図 2-20　対象吊り橋の供用年数

上図より，下記の事項が確認できる．

- ✓ ほとんどの吊り橋は，架橋後，50 年以上経過し 90 年近いものも 6 橋あり損傷が顕著となっている．
- ✓ 特に鋼部材及びケーブル類については，対象橋梁のほとんどで腐食が顕著となっている．
- ✓ ケーブル類では，一部の吊り橋で部分的な破断が確認されている．

以上，吊り橋として着目すべき部材に対して，橋梁定期点検結果をもとに損傷状況を整理したが，主たる損傷は“鋼部材（ケーブルを含む）の腐食”であり，橋梁規模，各種形式による損傷部位，度合い等の相関性を確認することは困難である．

ただし，今回対象としている小規模吊り橋の場合，最も注意すべきはメインケーブル及びハンガーケーブルである．これらのケーブルのほとんどで腐食が生じており，ここに着目する必要がある．

さらに，これらケーブルの腐食で最も弱点となるのは定着部と考える．その中でもトンネル式定着構造は，周辺環境の影響を受けやすく，腐食の進行が他の部位より早いことが想定される．また，塔頂サドル部での腐食も同様に腐食環境にあると考えられる．

人道橋のような小規模吊り橋の場合，ケーブル破断は，活荷重の影響による直接的な要因ではなく，腐食等による断面減少により破断に至る可能性が高いと考えられる．

したがって，これらの損傷部位等を入念に点検することで落橋のような最悪の事態は免れると考える．これらの点検方法については通常の目視点検に加え，架橋位置，周辺環境状況等に応じて，本章で提案した新技術等も適宜活用し損傷箇所を把握することが望まれる．

さらに，このように入念な橋梁定期点検と合わせ，吊り橋でも比較的規模な大きなものについては，次章に示す簡易なモニタリングによる振動特性の変化に着目することも今後有効な維持管理手段になると考える．

第3章　長期モニタリングによる吊り橋の応答検討

3.1　概要

自治体管理の小規模吊り橋の合理的な維持管理のために，センサー情報を用いる構造ヘルスモニタリングの適用が模索されている．特に，構造ヘルスモニタリングを自治体管理の小規模吊り橋へ適用する際の理想の目標は，「少量のセンサ」による「健全度評価に必要な最大の情報」を得ることである．しかしながら，現状そのような理想的な手法は存在しておらず，自治体管理の小規模吊り橋のモニタリングについての体系化された検討は，始まったばかりである．

2章でまとめられた通り，自治体管理の小規模吊り橋の安全管理上，主ケーブルや定着部の破断を事前に把握することが重要である．主ケーブルや定着部材の応力変化を検知し異常判定に用いることは可能であるが，計測開始時の応力状態が未知の場合は，計測する応力変化量だけでは耐荷力評価が難しくなる．応力計測のためには，ひずみゲージを対象構造部材に設置することになる．一般にひずみ計測は，センサの設置作業が煩雑で，さらにデータロガーが高価であるため，遠隔管理を考えると関連費用が高くなる．

一方で，加速度センサのような振動センサー利用を考える場合，対象構造物の振動特性に着目したモニタリングが行われるが，対象とする振動特性によっては，大量のセンサ設置が必要となる．少量の振動センサを用いる場合は，振動特性とモニタリングしようとする損傷との相関関係を把握し，適切な場所にセンサを設置する必要があるが，振動特性と損傷との相関関係は未知であり，関連の経験則も存在しない．設置や運用面では，近年のMEMSやIT技術の飛躍的な発展に伴い，小型のセンサノードにWiFi機能を導入することも可能になり，モニタリング橋梁にWiFiルーターを設置するたけで遠隔モニタリングが可能になっている．さらに，クラウドサービスも一般化されており，遠隔モニタリングデータの管理も容易になっている．

本研究では，自治体管理の小規模吊り橋のモニタリング方法として，廉価で運用しやすい振動計測に着目している．また，振動計測による異常検知には，塔頂部振動の軌道と塔の傾斜角の変化に着目する．すなわち，従来の振動特性ではなく，塔の異常な動きに着目したモニタリングを検討している．これは，主ケーブルあるいは定着部に異常が生じる場合，主ケーブルの張力が変化し，その結果，塔頂部の動きも変化すると期待できるからである．塔頂部の動きモニタリングで，小規模吊り橋の異常が検知できれば，少ない振動センサで遠隔モニタリングが可能になる．さらには，振動データを用いた振動特性同定および同定される振動特性の解釈を必要としないことから，異常を直感的に理解することも可能になる．もちろん，ケーブル振動計測によるケーブル張力を同定できれば，ケーブル張力の変化から異常を直感的に理解することも可能になる．しかし，吊り橋の場合，斜張橋と異なり，主ケーブルはハンガーケーブルとつながっており，弦理論の適用における境界条件の把握が難しい．

自治体管理の小規模吊り橋のモニタリングの検討内容と実施項目は以下の通りである．

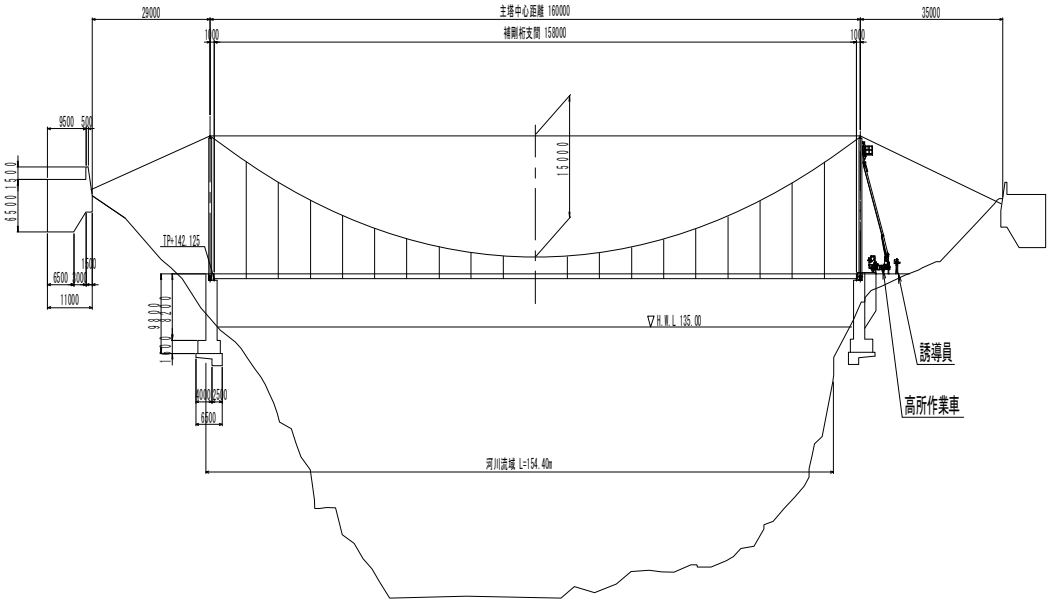
(1) 対象橋梁の基本振動特性の把握
(2) WiFi機能搭載の振動センサによる塔頂部の軌道計測の可能性
(3) WiFi機能搭載の振動センサによる塔の傾斜計測の可能性
(4) 遠隔モニタリングの可能性
(5) ソーラーパネルと蓄電池による長期モニタリングの可能性

3.2　小規模吊り橋のモニタリング

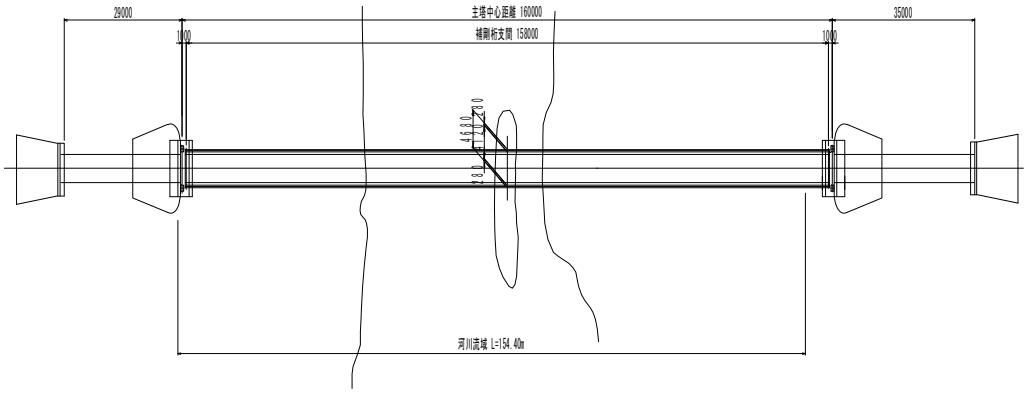
3.2.1 対象橋梁

対象橋梁は，奈良県奈良市月ヶ瀬桃香野所在の八幡橋である．本橋の橋長は160m，幅員は3.5mで，1968年架設され，現在も供用中である．供用開始から50年以上が経過しているが，平成30年10月の点検からは，構造安全上の問題はないと報告されている．図3-1に対象橋梁の位置と全景を示す．また，図3-2には，対象橋梁の一般図を示す．

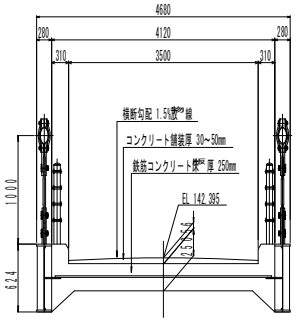
図3-1 モニタリング対象吊り橋の位置と全景



平 面 図 S=1:400



横 断 図 S=1:30



注） 本図は橋梁資料(紙データ)に基づき作成した図面である。

図3-2 モニタリング対象吊り橋の一般図

【橋梁一般】

設計荷重：T-9，等分布活荷重 200kgf/m^2
橋梁形式：重橋床式鉸吊橋
床版構造：床版厚 25.0cm 複鉄筋 RC 床版
補 剛 桁：I 型断面（腹板高 60.0cm）
塔柱構造：鋼製箱型断面，2 層門型ラーメン
主　　索：パラレルワイヤーストランド（PWS），直径 131.3mm（5mm 素線 80 本）（この直径の外側にプラスチックカバー）
橋　　長：160m
幅　　員：3.5m
竣　　工：1968 年

3.2.2 工程概要

令和3年11月18日から20日にかけて，センサとソーラーパネル設置および短期計測が実施された．短期計測においては，第4章の斜張橋の振動計測に用いた高精度のセンサ（3軸有線加速度センサ M-A352AD10（EPSON））を搭載した株式会社ロジカルプロダクト（以下，LP社と略記する）のバッテリ駆動の無線センサノードを用いた．短期振動計測は常時振動計測を基本とした．

また，長期振動計測における無線ルーターやセンサ用の電源確保のために，ソーラーパネルを設置した．長期モニタリングに適用したセンサノードは，蓄電池が内蔵のサンシステム株式会社のモニータ_mk2 を設置した．当該センサは，ソーラーパネルからの電力を蓄電することが可能である．一方で．電力消費量が多い無線ルーターは蓄電池が内蔵されておらず，蓄電機能を備えるためにソーラーパネルと共に蓄電池を整備した．塔の傾斜角や軌跡を長期モニタリングするために，高所作業車とロープアクセスによるセンサとソーラーパネルの設置を行った． 2021年11月20日から長期モニタリングを行っている．

1） 実施日程

橋梁管理関係者との協議

令和3年9月16日（Web会議：奈良市役所 建設部 道路インフラ保全課）
令和3年11月8日（奈良市役所：奈良市役所 建設部 道路インフラ保全課）
令和3年11月8日（奈良市月ヶ瀬行政センター：月ヶ瀬地区自治連合会長）

計測準備　令和3年11月18日
計測点，蓄電池，ソーラーパネルの設置場所の確認

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）
加速度のサンプリング間隔：200Hz

長期計測開始　令和3年11月20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

加速度のサンプリング間隔：125Hz

加速度の計測間隔：1時間毎に10分間

傾斜角：INC 1は1回/10秒，INC2は1回/秒

（初の設定はINC1とINC2共に1回/10秒の計測案だったが，長期モニタリング開始後にINC2の計測間隔設定がINC1と異なることが判明した．）

2）実験参加者

プロジェクト関係者

金，五井	（京都大学）
林	（大阪市立大学）
小野	（株式会社エイト日本技術開発）
丸山	（株式会社 長大）

実験補助

センサ設置・計測：　京都大学工学研究科社会基盤工学専攻　大学院生４名

高所作業車　：　イーグルアイ・リサーチ株式会社

ロープアクセス　：　株式会社きぃすとん

3.2.3　計測概要

1）短期計測

短期計測は，対象橋梁の基本振動特性を把握するために，LP社の無線加速度センサによる常時振動計測を行った．**図3-3**に無線加速度センサ設置概要を示す．短期モニタリングに導入した無線加速度センサは8基であり，対象橋梁の全体振動を把握する目的で，塔の柱部とスパン中の橋軸方向に，それぞれ2個ずつセンサを固定設置し，残り4つの無線センサをセンサグループとして桁上を移動しながら常時振動計測を行った．センサグループの移動計測は，以下の2つのグルーピングシナリオで行った．

センサ・グルーピング・シナリオ１：橋桁のねじれ振動モードも計測することを目的に，橋軸方向の2点と橋軸直角方向に2点のセンサ配置を一つのセンサグループとし，センサグループを移動しながら常時振動の計測を行った．**図3-4**にセンサ・グルーピング・シナリオ1の移動センサグループを示す．センサID2とID3は，塔の柱部に固定設置したセンサを表す．また，センサID4とID5は，スパン中の橋軸方向に固定設置したセンサを表す．移動センサグループを「Group A」から「Group D」に命名している．

センサ・グルーピング・シナリオ２：対象橋の曲げ振動モード計測に特化したセンサグルーピングのシナリオであり，**図3-5**に示すように固定センサは，**図3-5**のセンサ・グルーピング・シナリオ1と同様である．違いは，センサID6からID9を，スパン中の橋軸方向に設置していることにある．移動センサグループを「Group　E」と「Group F」に命名している．　参考として，塔の柱部に固定設置したセンサID2とID3の設置状況を**図3-6**に示す．

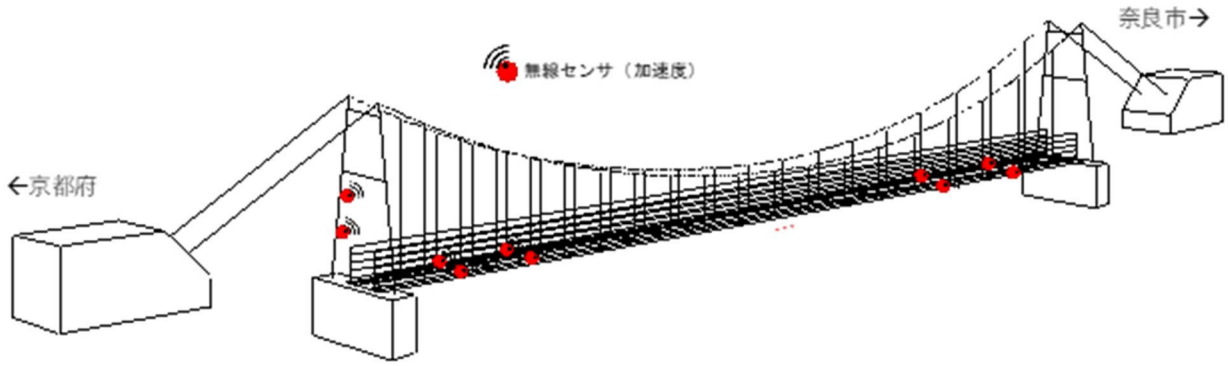


図 3-3 短期モニタリングのセンサ配置概要

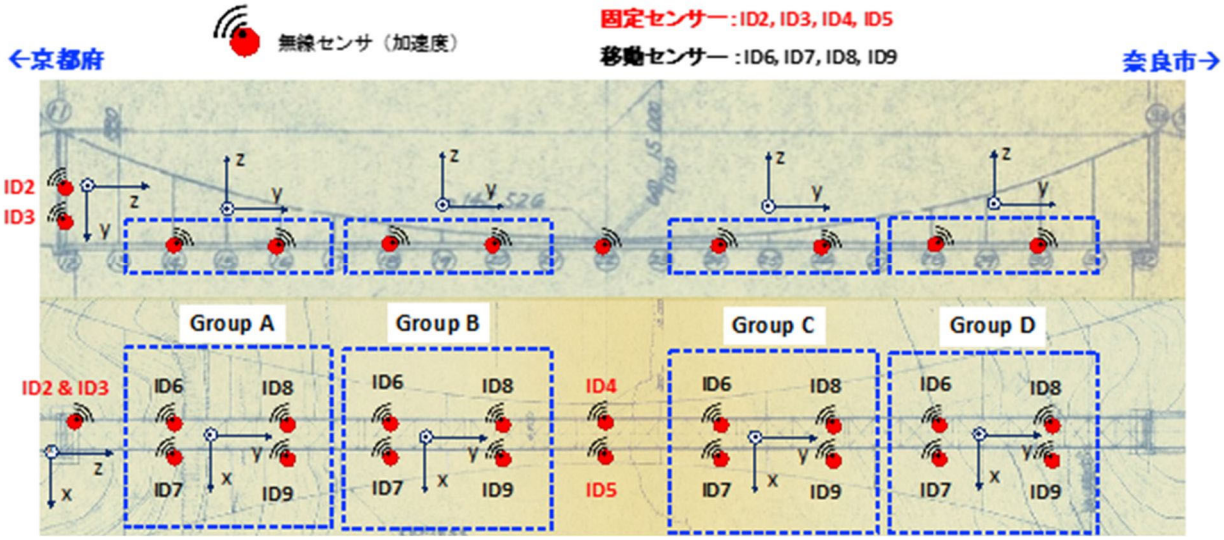


図3-4 センサ・グルーピング・シナリオ１の移動センサグループ

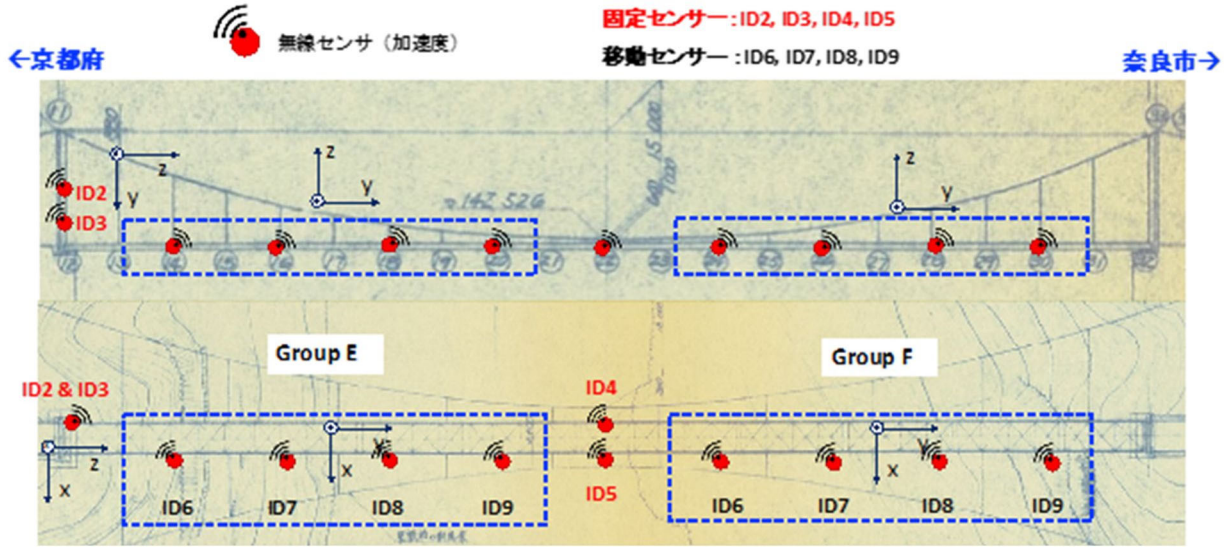


図3-5 センサ・グルーピング・シナリオ2の移動センサグループ

塔の柱部設置の
無線センサノード

桁部設置の無線センサノード

図3-6 短期モニタリング用の無線センサノード設置状況

表3-1　3軸無線加速度センサ

センサ	セイコーエプソン製　高精度加速度センサ　M-A352搭載
・加速度	±15G　3軸（分解能　0.06μG）
・傾斜	±45deg　（分解能　0.002μrad）
・低ノイズ	0.2μG/√Hz（Average）
・サンプリング	最大　1000Hz
・ローパスフィルタ	9Hz、16Hz、60Hz、210Hz、460Hz　※サンプリング周波数による
・同時計測台数	最大31台（リアルタイム波形表示は8台まで）
無線	ロジカルプロダクト製無線モジュール（国内電波法認証）
・周波数	920MHz帯
・アンテナ	ホイップアンテナ（防水仕様）
・通信距離	見通し500m　※周囲の状況で変化します
メモリ	Flashメモリ（1000Hzサンプリングで6時間分収録可能）
電池寿命	約12時間（満充電時）
外部端子	USBマイクロ（充電、有線データ転送用）
外形サイズ	90×90×60mm　アルミダイキャスト防水ケース

表3-2　920MHz データ送受信装置

無線	920MHz帯　ホイップアンテナ
I/F	USB　（PCに接続して使用）

表3-3　無線計測システム制御アプリケーション

主な機能	無線チャネル設定、計測時間設定、 計測開始/計測終了、 波形表示（リアルタイム表示）、 データ収集、データ出力（CSV）、 ステータス表示 波形表示/FFT表示（リアルタイム表示、CSVデータからの表示）、 ウォーターフォール表示
対応OS	Windows8.1　Windows10

短期計測に導入したセンサ

- 3 軸無線加速度センサ（LP 社）（型番:LP-WS92-EACS01-2）:EPSON の高精度 3 軸有線加速度センサ M-A352AD10 を内蔵（**表 3-1**，**図 3-7** 参照）．高精度 3 軸有線加速度センサは，水晶発振式の MEMS 素子を用いた低ノイズ・高感度の加速度センサである．このセンサの自己雑音によるパワースペクトル密度曲線を**図 3-8** に示す．**図 3-8** から分かるように土木構造物の振動数帯域である 0.1Hz～100Hz の振動数帯の自己雑音レベルが 0.1 μG/ √Hz オーダー程度となり極めて微弱であることがわかる．上記の特長は常時振動計測において風による加振や軽自動車の通過など微弱な外力に対しても振動推定が可能となる点から，モニタリングに有利と考えられる．
- 920MHz データ送受信装置（親機）（型番 : LP-RF92TR1）（**表 3-2**，**図 3-9** 参照）
- 無線計測システム制御アプリケーション（型番 : LP-HWSAP01-PRO）（**表 3-3** 参照）

図 3-7 参照無線センサノード

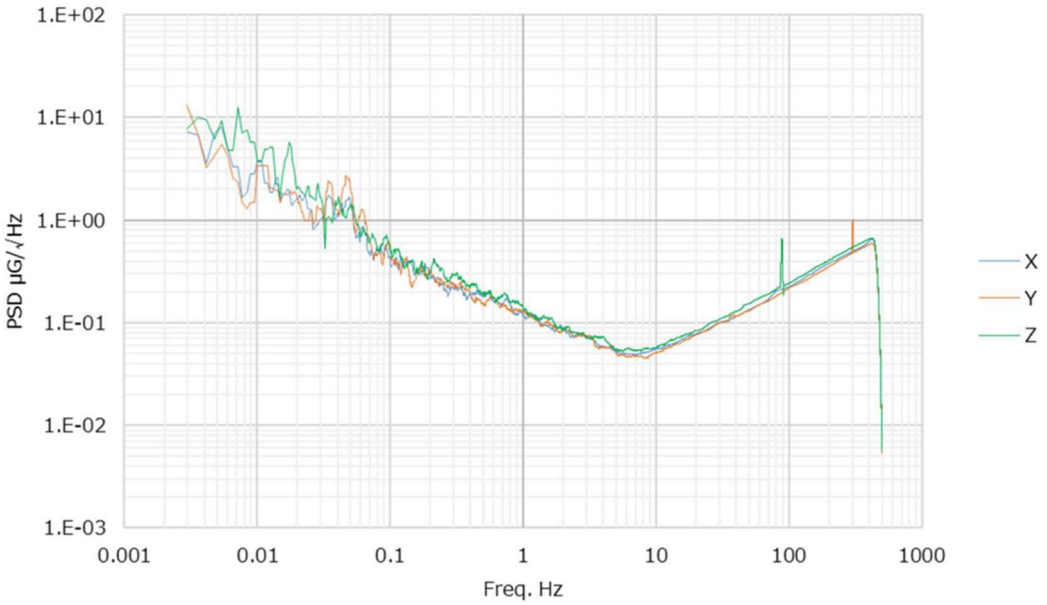


図 3-8　モニタリングに導入した加速度センサの自己雑音のパワースペクトル密度

図 3-9　無線センサ受信機

2）長期計測

対象橋梁の塔の挙動に着目した異常検知を検討のために，長期計測には，塔頂部の加速度振幅の平面軌跡と塔の傾斜の計測を行う．塔の傾斜は直接計測するのではなく，加速度から地球の重力の加速度の 3 つの軸に沿った成分から計算した傾きであることに注意されたい．異常検知において傾斜角の絶対値よりは，ある基準の傾斜に対する傾きの経年変化に着目することから，本研究のモニタリング対象として問題はないと考えた．

長期モニタリングに導入した無線加速度センサは 6 基であり（**図 3-10** と**図 3-11** 参照），対象橋梁の京都府側の塔頂部に 4 基（**図 3-12** 参照），スパン中央の主ケーブルに 2 基（**図 3-13** 参照）を設置した．塔頂部に 4 基の中，2 基はセンサノードの計測モード設定を傾斜角計測モードに調整し，傾き計測用として設置した．残り 2 基は，塔頂部の加速度を計測し，加速度振幅の平面軌跡を評価するために設置した．主ケーブルに設置したセンサによるケーブル振動計測は行っているが，ケーブル張力を同定する目的ではなく，ケーブル振動の特性変化と塔の挙動変化との相関を検討するためである．3.1 節でも述べた通り，ケーブル振動計測によるケーブル張力を同定できれば，ケーブル張力の変化から異常を直感的に理解することも可能になる．しかし，吊り橋は，斜張橋と異なり主ケーブルはハンガーケーブルとつながっており，弦理論の適用における境界条件の把握が難しい．

振動センサ以外に，温度センサ（**図 3-14** 参照），無線ルーター（**図 3-13**，**図 3-15** 参照），ソーラーパネル（**図 3-12**，**図 3-13** 参照），蓄電池を設置している．対象橋は鋼橋であり，季節ごとの温度の影響を受けやすいことから，計測センサ情報の季節変動との相関性を検討するために温度センサを設置している．設置したセンサノードは電池を内蔵しているが，長期計測を考えてセンサことにソーラパネルを設置している．また，無線ルーターへの安定的な電源供給のために，ソーラーパネルに加えて，大容量の蓄電池を整備している．

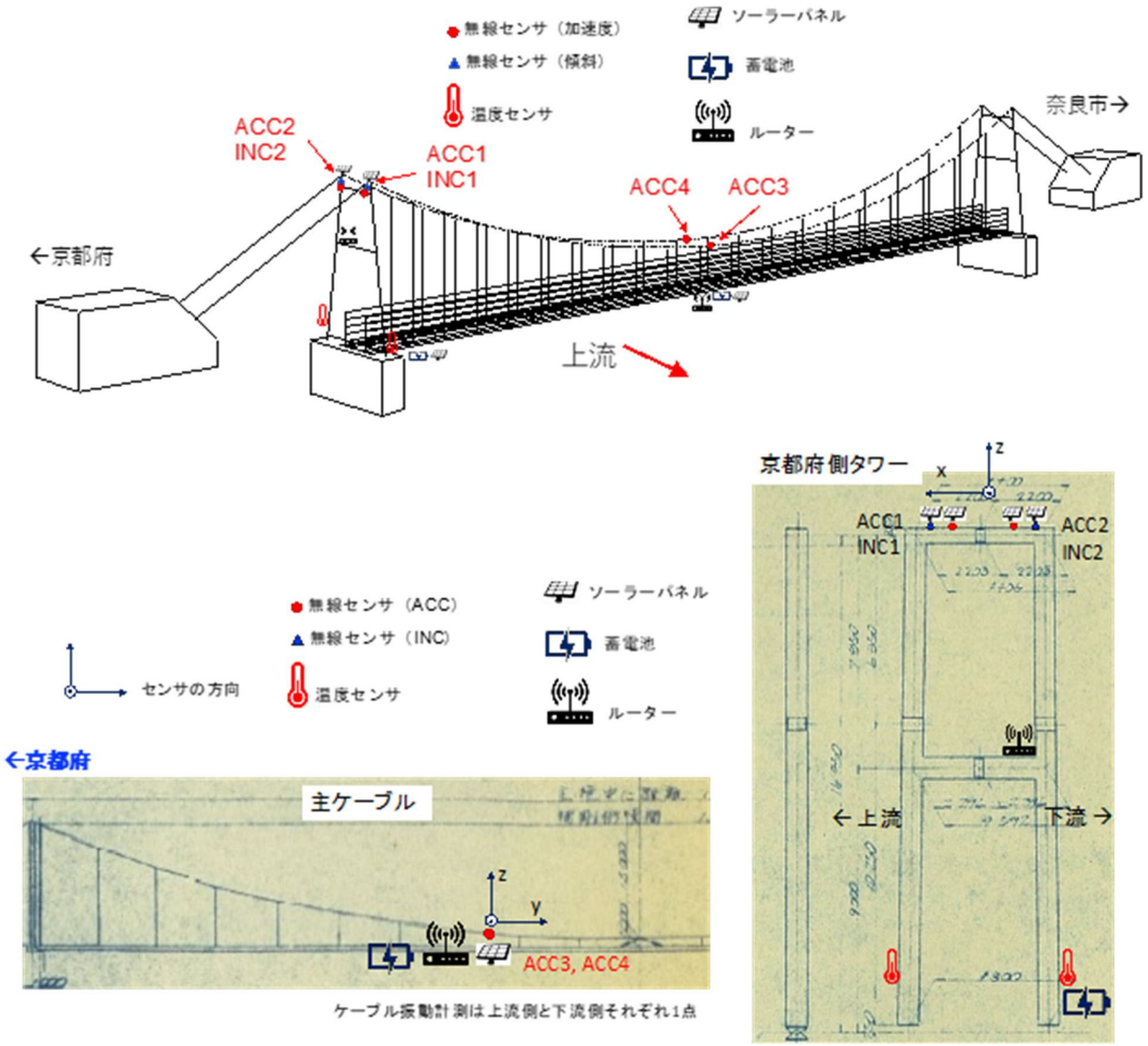


図 3-10 長期モニタリングのセンサと関連機器の配置概要

図 3-11 長期モニタリングのセンサと機器配置概要（京都府側の塔頂部）

図 3-12 長期モニタリング用の塔頂部の振動センサとソーラーパネル設置状況（INC:傾斜, ACC:加速度）

図 3-13 長期モニタリング用の主ケーブル振動センサ，ソーラーパネル，無線ルーター設置状況

図 3-14 長期モニタリングの温度センサ設置状況（京都府側）

図 3-15 長期モニタリング用の無線ルーター設置状況（京都府側の塔）

長期計測に導入したセンサおよび機器

WiFi 振動・傾斜計（サンシステムサプライ（株））：モニータ mk2（図 3-16，表 3-4 参照）

- 3 軸加速度センサ
- USB から再充電できる長寿命の充電式リチューム電池が内蔵
- 地球の重力の加速度を使い自己較正（傾き角の計算に利用）
- インターネット経由の WiFi 無線ネットワーク（図 3-17 参照）

熱電対・USB 熱電対温度ロガー

- 熱電対：K 型熱電対（図 3-18 参照）
- USB 熱電対温度ロガー： EL-USB-TC（図 3-19 参照）（バッテリ内蔵，30 分 1 回計測）

図 3-16 長期モニタリングに導入した WiFi 振動・傾斜計

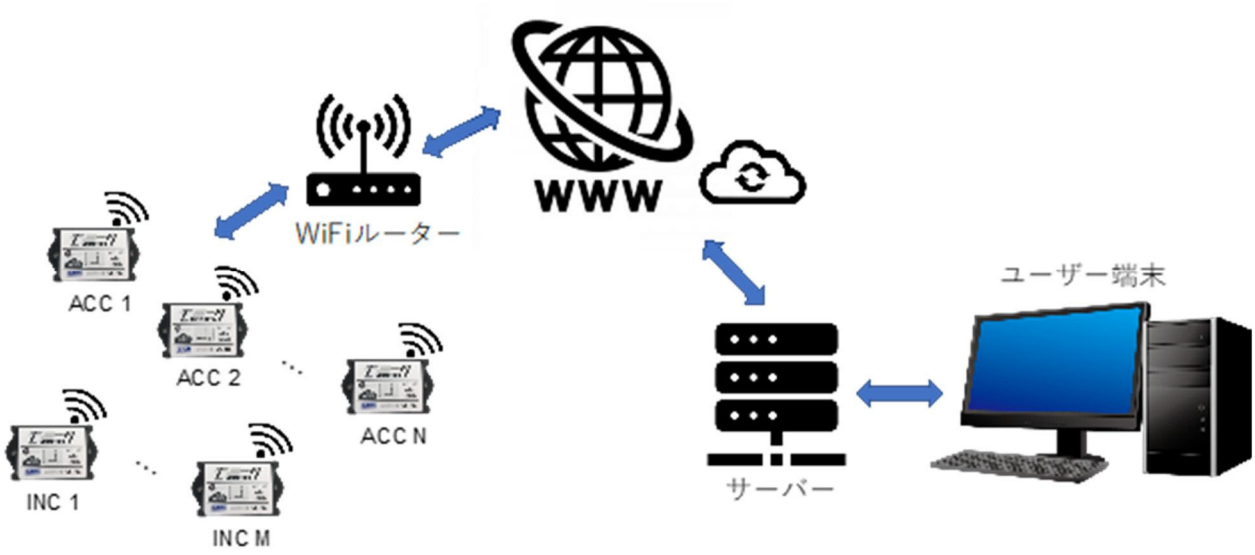


図 3-17 長期モニタリングにおける WiFi 無線センサネットワーク

図 3-18 長期モニタリングに導入した K 型熱電対

計測インターバル	データ保存可能期間
1 second	9 hours
10 seconds	3.5 days
1 minute	22 days
5 minutes	3.5 months
30 minutes	1.8 years
1 hour	> 2 years*
6 hours	> 2 years*
12 hours	> 2 years*

図 3-19 長期モニタリングに導入した USB 熱電対温度ロガー

表 3-4 長期モニタリングに導入したWiFi 振動・傾斜計の仕様（次ページへ継続）

仕様項目	仕　　様
測定成分数	• X,Y,Z 3成分
加速度センサ	• 低ノイズMEMS
測定範囲 (-8g)	• +/-8 g
上限周波数	• 調整可能, 最大 2 kHz (@ 4 kHz サンプリング/秒時)
下限周波数	• DC　(ハイパスフィルタ- Off) • 調整可能 10 mHz（100秒）~ *Fs*/2　(ハイパスフィルタ- On)
加速度ノイズ X-Y 成分 (典型値)	• -82 dBg (80 μg RMS) @ 125 Hz サンプリング率 • -66 dBg (500 μg RMS) @ 4 kHz サンプリング率 注：加速度ノイズは主にサンプリングレートの影響を受けます。 サンプリングレートが高いほどノイズが高くなります
加速度ノイズ Z 成分 (典型値)	• -80 dBg (100 μg RMS) @ 125 Hz サンプリング率 • -64 dBg (600 μg RMS) @ 4 kHz サンプリング率 注：加速度ノイズは主にサンプリングレートの影響を受けます。 サンプリングレートが高いほどノイズが高くなります
速度ノイズ X-Y 成分 (典型値)	• -94 dB-m/s (20 μm/s RMS) @ 1 Hz ハイパスカットオフ • -103 dB-m/s (7 μm/s RMS) @ 10 Hz ハイパスカットオフ 注：速度ノイズは主にハイパスカットオフ周波数の影響を受けます。 カットオフ周波数が低いほど、ノイズは高くなります。
速度ノイズ Z 成分 (典型値)	• -92 dB-m/s (25 μm/s RMS) @ 1 Hz ハイパスカットオフ • -101 dB-m/s (9 μm/s RMS) @ 10 Hz ハイパスカットオフ 注：速度ノイズは主にハイパスカットオフ周波数の影響を受けます。 カットオフ周波数が低いほど、ノイズは高くなります。
接続I/F	• USB • WiFi
計測データの種類	• 加速度時系列 (g またはm/s^2) • 速度時系列 (m/s) • 加速度の最小, 最大 と 平均値 (g または m/s^2) • 速度の最小, 最大 と 平均値 (m/s) • 傾斜 • 最小,最大と平均 RMS 振動レベル (linear または dB, g または m/s^2) • 最小,最大と平均 RMS速度レベル (linear またはdB, m/s)
傾斜角ノイズ	• $1E-3°$　(0.001 deg) 注：加速度の平均値を使用して測定し、ログ間隔は1秒で、本器はZ軸が垂直、X軸およびY軸は水平に設定しました
傾斜角 温度安定性	• 0.2°　　@温度範囲 ：-20 °C～+60 °C 注：加速度の平均値を使用して測定し、ログ間隔は1秒で、本器はZ軸が垂直、X軸およびY軸は水平に設定しました

表 3-4 長期モニタリングに導入したWiFi 振動・傾斜計の仕様 （前のページから継続）

警報メール	• 加速度信号閾値 (X, Y, Z 成分) • 速度信号閾値 (X, Y, Z 成分) • RMS 加速度レベル閾値 (X, Y, Z 成分) • RMS 速度レベル閾値 (X, Y, Z 成分) • バッテリ低容量
信号キャプチャのデューティレート	• 100% - ミスサンプル無し
スペクトル表示	• 3-成分 1024-ポイント パワースペクトル – dB または Lin スケール
動作モード	• 待機状態 (超低消費電力) • USB-接続時 (アクティブ) • 記録時 (スタンドアロン) • Auto-Rec (スタンドアロン) 　○ 待機中（非アクティブ） 　○ 記録中 （アクティブ期間）
校正	• 重力の加速度を利用した自己校正可能
バッテリタイプ	• リチュームポリマ内蔵電池 - USB-充電可能
再充電時間	• 約2 時間 30 分(典型値)
バッテリ持続(フル充電時)	• 最大1年間（待機状態時）＊ソーラパネル併用の場合は長期連続観測可能 • 16 日間～ 125 日間 （記録時）, 設定に依存します。
バッテリ寿命	• > 300 回充放電サイクル
使用温度範囲	• -20 ～ +60 ℃
記録用メモリ	• 不揮発性フラッシュメモリ
記録メモリ容量	• 16 Mバイト • 例： 4kHzのサンプリングで1成分の時系列信号を17分間連続記録可能。 • 例: 1 秒のサンプリングで3-成分の全統計レベルを5日間記録可能 • 例: 1 分のサンプリングで3-成分の全統計レベルを10ケ月間記録可能 ＊WiFiのリスナアプリを利用することで、複数台の長期連続観測が可能
記録/消去サイクル	• 100 000回
データ保持期間	• 20 年以上
寸法・形状	• 76.2 mm x 39.4 mm x 20.6 mm
重量	• 65 グラム
構造	• 耐候性ABS樹脂ケース(内部ポッティング処理)

3.3　短期常時振動による振動同定

3.3.1　橋桁部の振動

対象橋梁の振動特性を把握するために，3.2.3 節で述べた要領で短期モニタリングを実施，常時振動を用いた橋桁部の振動特性について検討を行った．**図 3-4** に示したセンサ・グルーピング・シナリオ 1（センサ ID4 と ID5 を固定し，ID6~ID9 をセンサグループ）に従い，センサグループを移動しながら計測した加速度を用いて検討した橋梁部桁振動の平均特異値スペクトルを**図 3-20** に示す．卓越振動数のモード形状を**図 3-21** に示す．振動特性推定には，高速ベイズ FFT を適用した．高速ベイズ FFT については，初年度の研究報告書（令和元年度活動報告書）の 4.2.2 節に概説されている．橋桁の曲げモードは 0.46Hz，1.05Hz，1.37Hz，2.16Hz に現れており，1.20Hz のねじれモードも観察された．また，モード減衰定数は 0.01～0.02 に分布している．

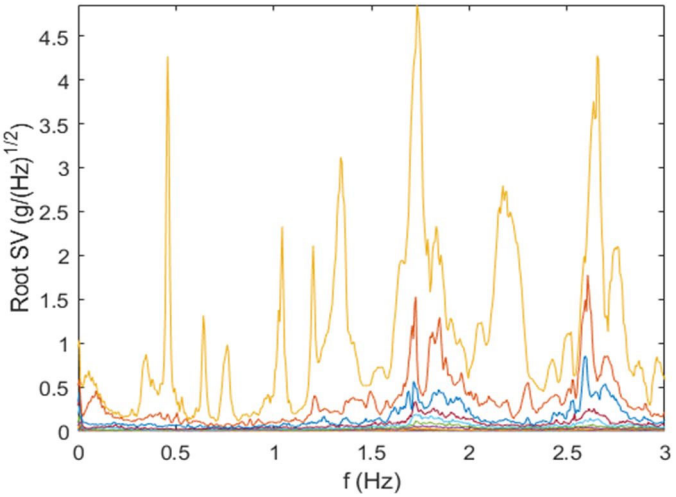


図 3-20 Group A ～Group D の平均特異値スペクトル.

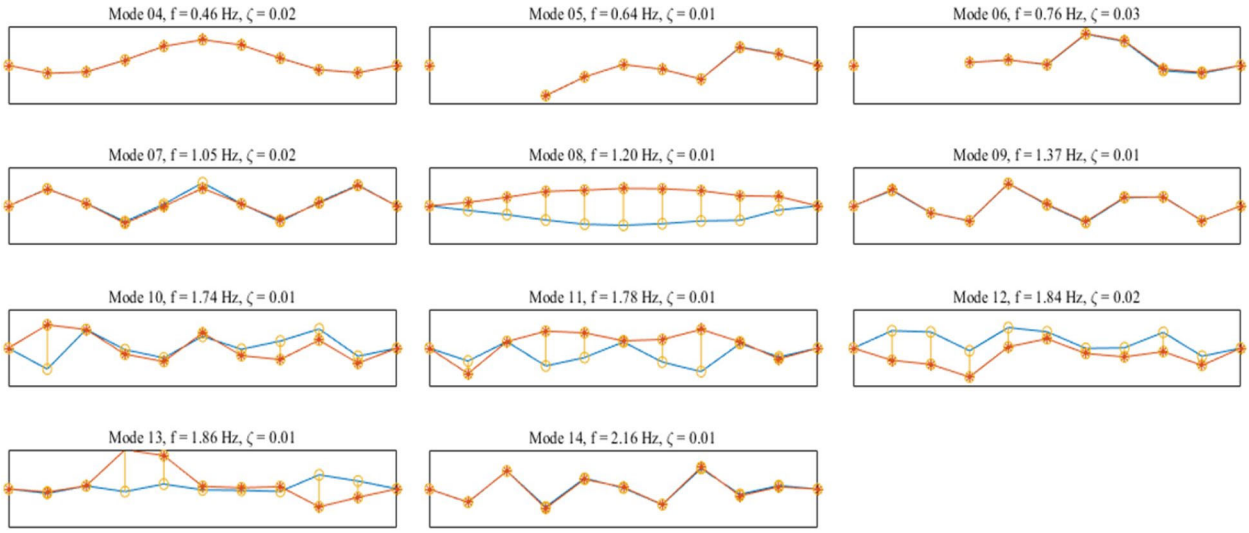


図 3-21 桁の鉛直振動モード

3.3.2　主塔の振動

主塔振動の特異値スペクトルを図3-22に，主塔の振動モードを図3-23と図3-24に示す．図3-23は，主塔の橋軸直角方向の振動モードを，図3-24は，主塔の橋軸方向の振動モードを示す．図3-23と図3-24から，主塔の橋軸直角方向の振動数は，主に1.65Hz~5.10Hz，橋軸方向の振動数は6.16Hz以上に分布していることがわかる．

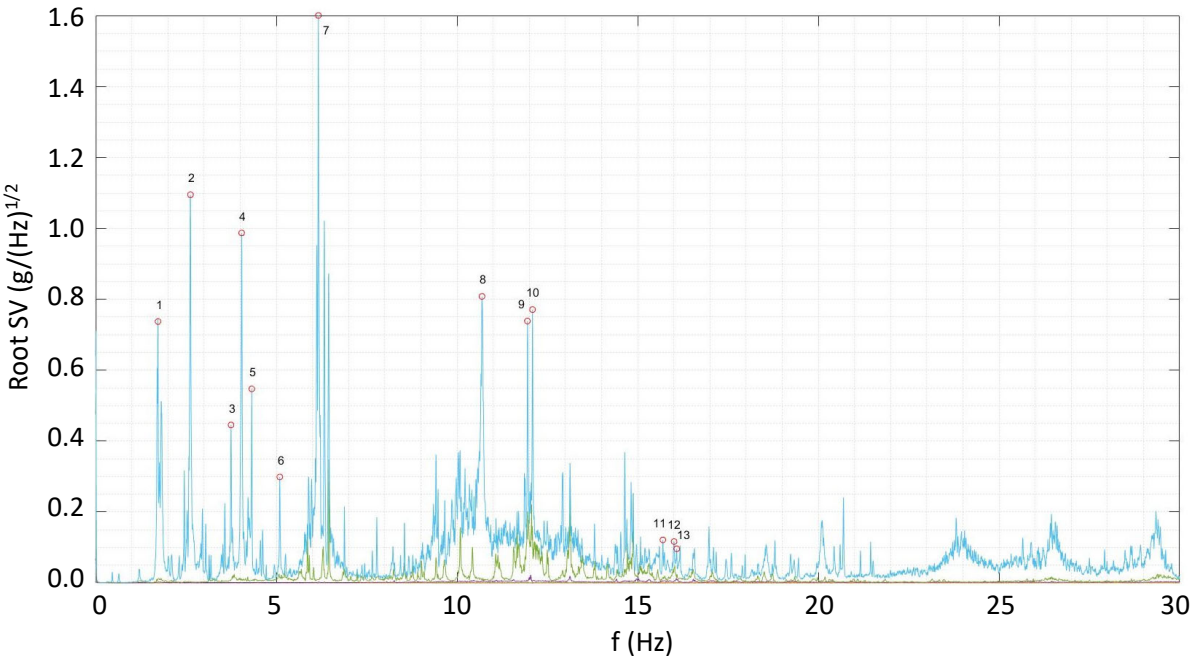


図3-22 主塔（京都府側）振動の平均特異値スペクトル（ID2とID3センサ）．

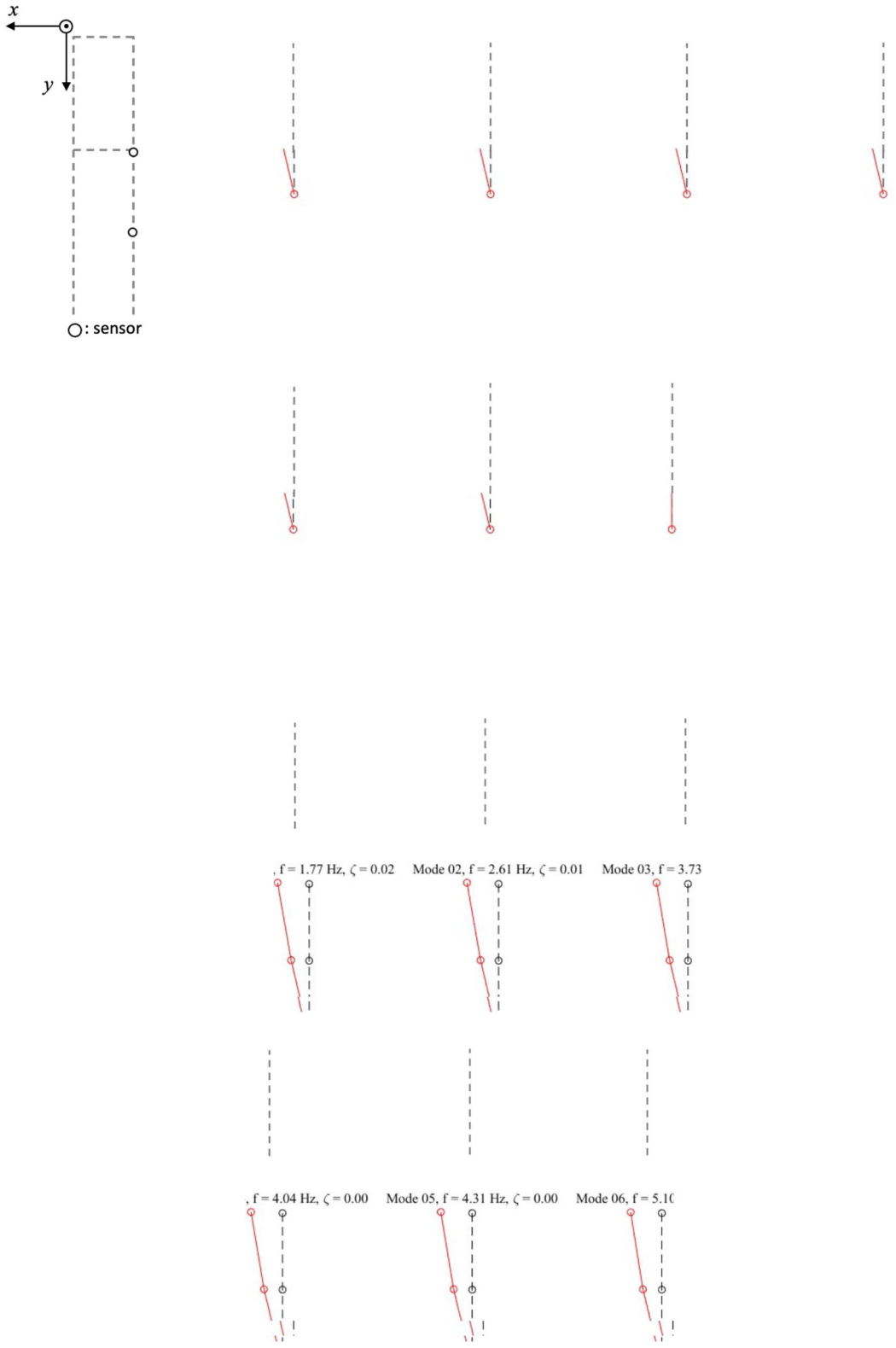


図 3-23 主塔（京都府側）の橋軸直角方向の振動モード（x–y 平面）

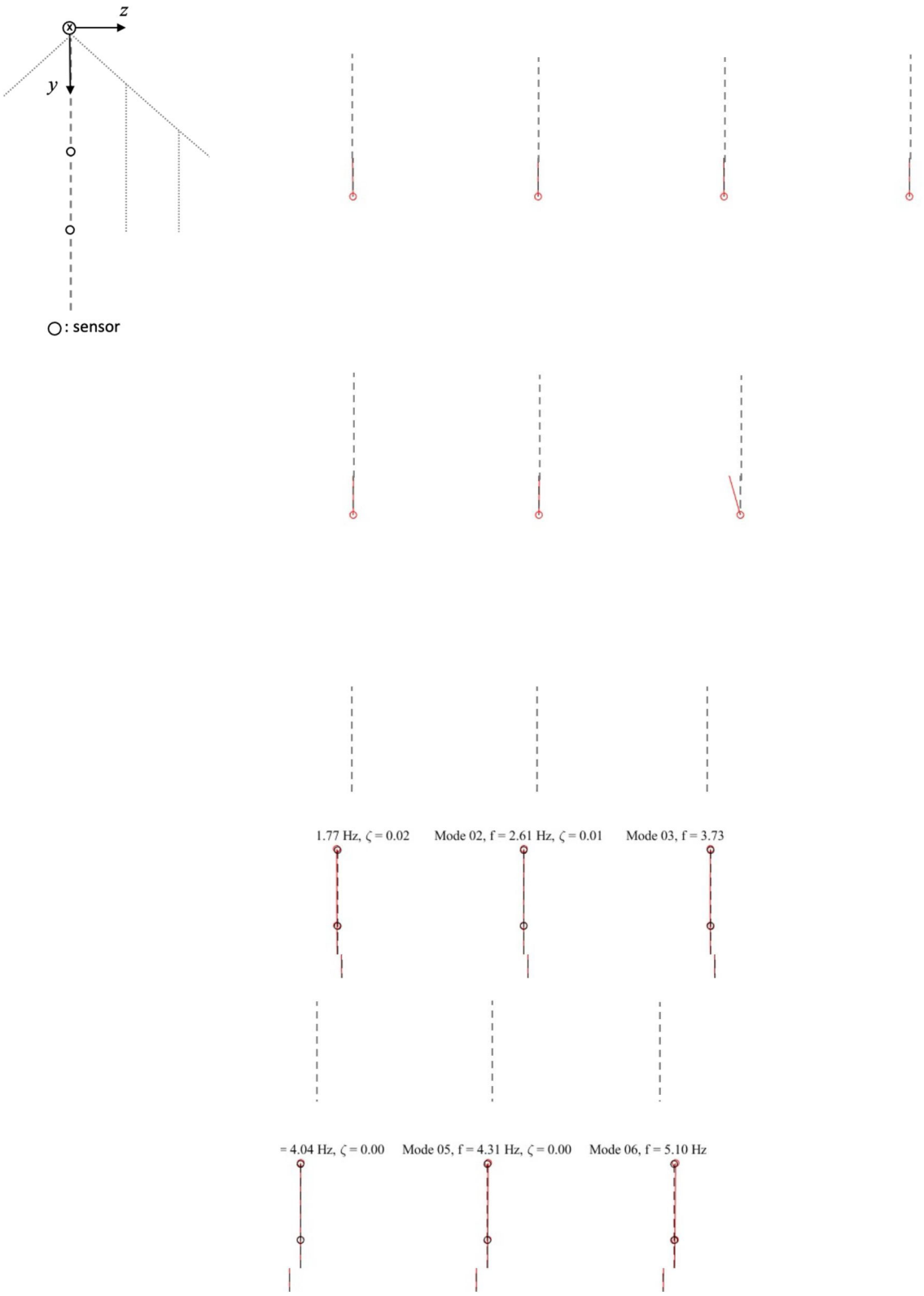


図 3-24 主塔（京都府側）の橋軸方向の振動モード（y–z 平面）

3.4 長期常時振動・傾斜モニタリング

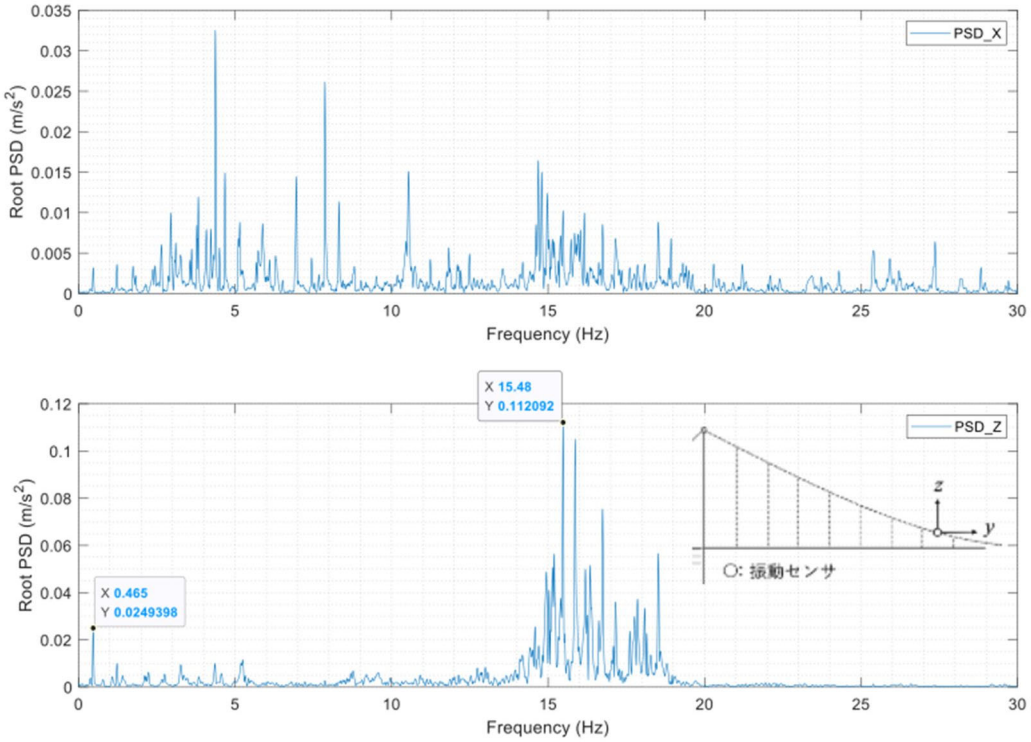
長期モニタリングを開始した2021年11月20日からの計測結果についてまとめる．また，2021年12月3日午前9時28分頃，和歌山県で最大震度5弱を観測する地震が発生し，隣接の奈良市でも震度1~2が観測された．これを受け，八幡橋の計測データを分析し，常時振動と異なる地震のような異常振動を検出できるかを検討する．震度1～2規模の地震による構造物の安全性への影響はないと予測できるが，モニタリングデータを用い，異常がないとの判断の可能性について検討を行う．

3.4.1 常時ケーブル振動

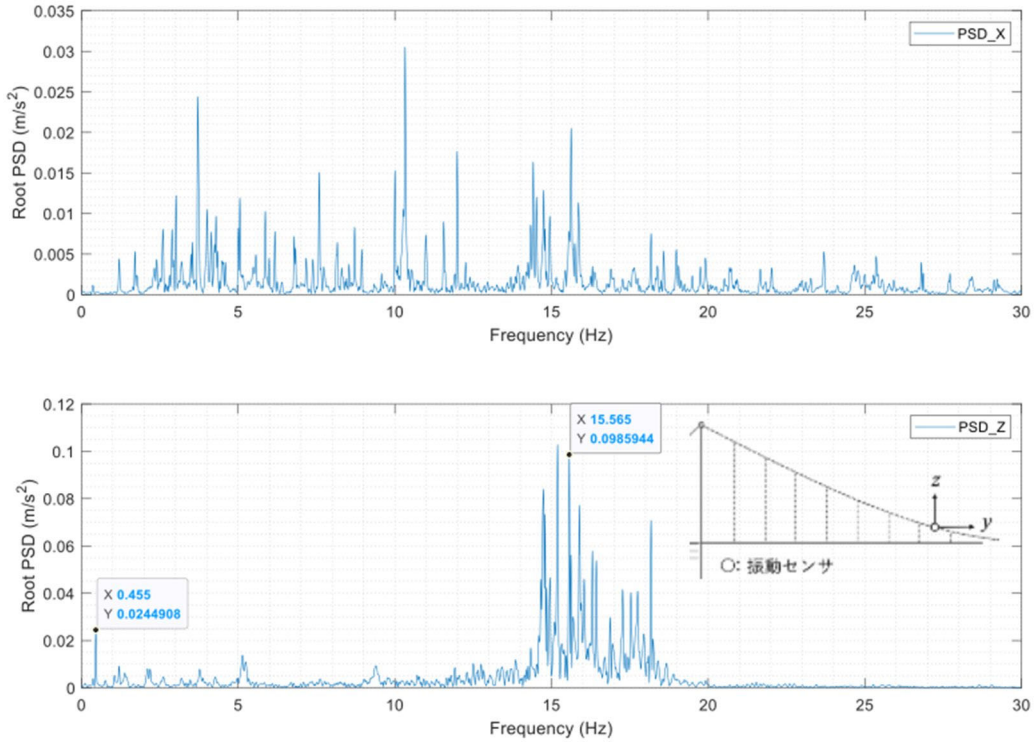
対象橋梁の長期モニタリングで計測したケーブル振動のPSDを図3-25に示す．図3-25のPSD_Xは，橋軸直角方向の振動を，PSD_Zは鉛直振動を表す．またACC3は上流側の主ケーブルに設置した加速度センサを，ACC4は下流側の主ケーブルに設置した加速度センサを表す．センサ軸の定義については，図3-10に示す通りである．

上流側と下流側の主ケーブルの振動特性に，違いはないことがわかる．また，橋軸直角方向の振動のPSD（PSD_X）を見ると，0.5Hzから28Hzまでの広範囲に渡ってケーブルの横振動が観測された．鉛直方向の振動のPSD（PSD_Z）を見ると，15.5HZ周辺の振動が卓越しており，図3-24の示す主塔の橋軸方向の振動（15.71 Hz～16.11Hz）と連成する可能性がある．また，0.46Hzの卓越振動は，図3-21に示す橋桁の鉛直曲げ振動の影響と考えられる．以上より，ケーブルの横振動よりは，鉛直振動のPSDが特徴量として取り扱いやすいことがわかる．

主ケーブルの鉛直振動の15.5Hz近傍の卓越振動数の1週間の変動を，図3-26に示す．卓越振動数の選定にはピーク・ピッキング法を適用した．選択された振動数のばらつきは大きいが，パータンを示しており，統計的アプローチを適用すれば，特徴量としての利用可能性を示している．また，主塔の振動特性について考察している通り，主塔の橋軸方向の振動モードは15Hz以上で卓越（図3-24，図3-30参照）しており，15Hz近傍のケーブル振動と主塔の橋軸方向の振動は関連性があると考えられる．

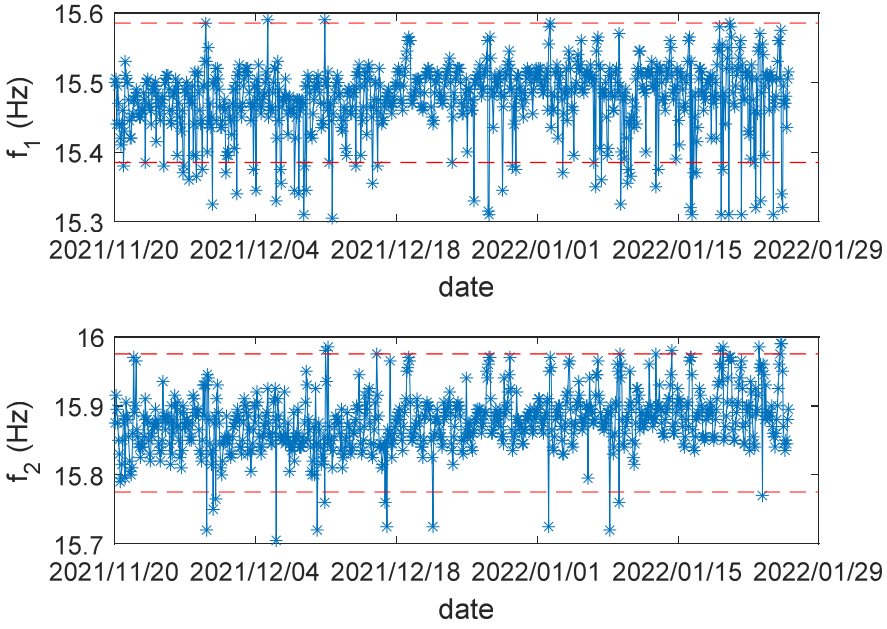


(a) 主ケーブル加速度の PSD（センサ： ACC3）

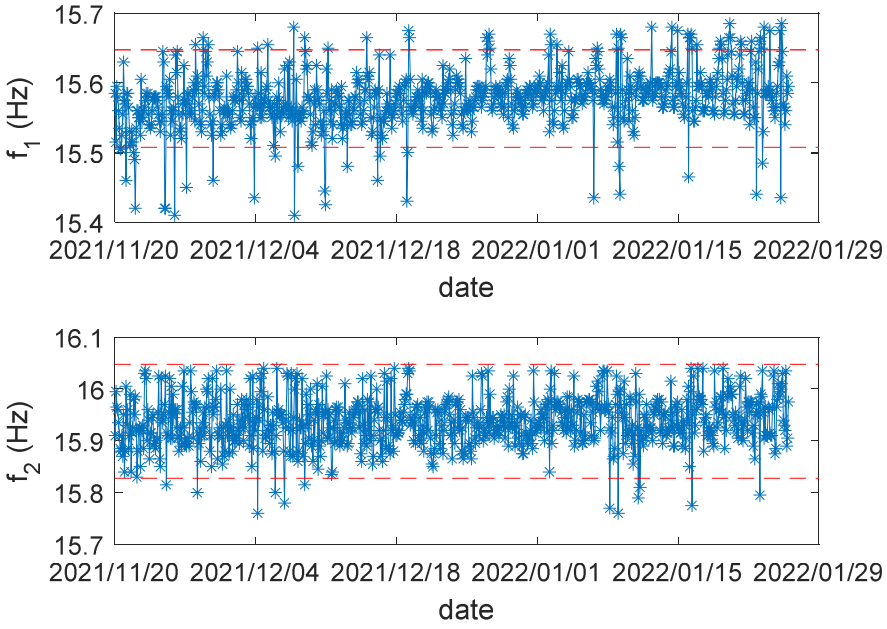


(b) 主ケーブル加速度の PSD（センサ： ACC4）

図 3-25 主ケーブル振動の PSD



(a) 上流側ケーブル振動(ACC3 センサ)



(b) 下流側ケーブル振動(ACC4 センサ)

図 3-26 主ケーブル卓越鉛直振動数の時系列

3.4.2　主塔の常時振動

1）主塔の振動特性

対象橋梁の長期モニタリングで計測した主塔振動の PSD と特異値スペクトルを，それぞれ**図 3-27** と**図 3-28** に示す．**図 3-27** の PSD_X は，橋軸直角方向の振動を，PSD_Y は橋軸方向振動を表す．橋軸直角方向は概ね 5Hz 以下の振動が卓越していることがわかる．一方で，橋軸方向の振動特性は，6Hz 以上の振動が卓越しており，特に，15Hz 周辺の振動が卓越している．15Hz 周辺の主塔の PSD は主ケーブルの鉛直振動の PSD と類似しており，主ケーブルと主塔の 15Hz 周辺の橋軸方向の振動は互いに影響されていると推察できる．**図 3-28** の特異値スペクトルに現れる卓越振動数（1～13）に対応するモード形状を，**図 3-29** と**図 3-30** に示す．**図 3-29** は，主塔の橋軸直角方向の振動モードを，**図 3-30** は，主塔の橋軸方向の振動モードを示す．短期モニタリングと同様（**図 3-23** と**図 3-24** 参照）に，**図 3-29** と**図 3-30** から，主塔の橋軸直角方向の振動数は 1.75Hz~5.12Hz，橋軸方向の振動数は 6.17Hz 以上に分布していることがわかる．

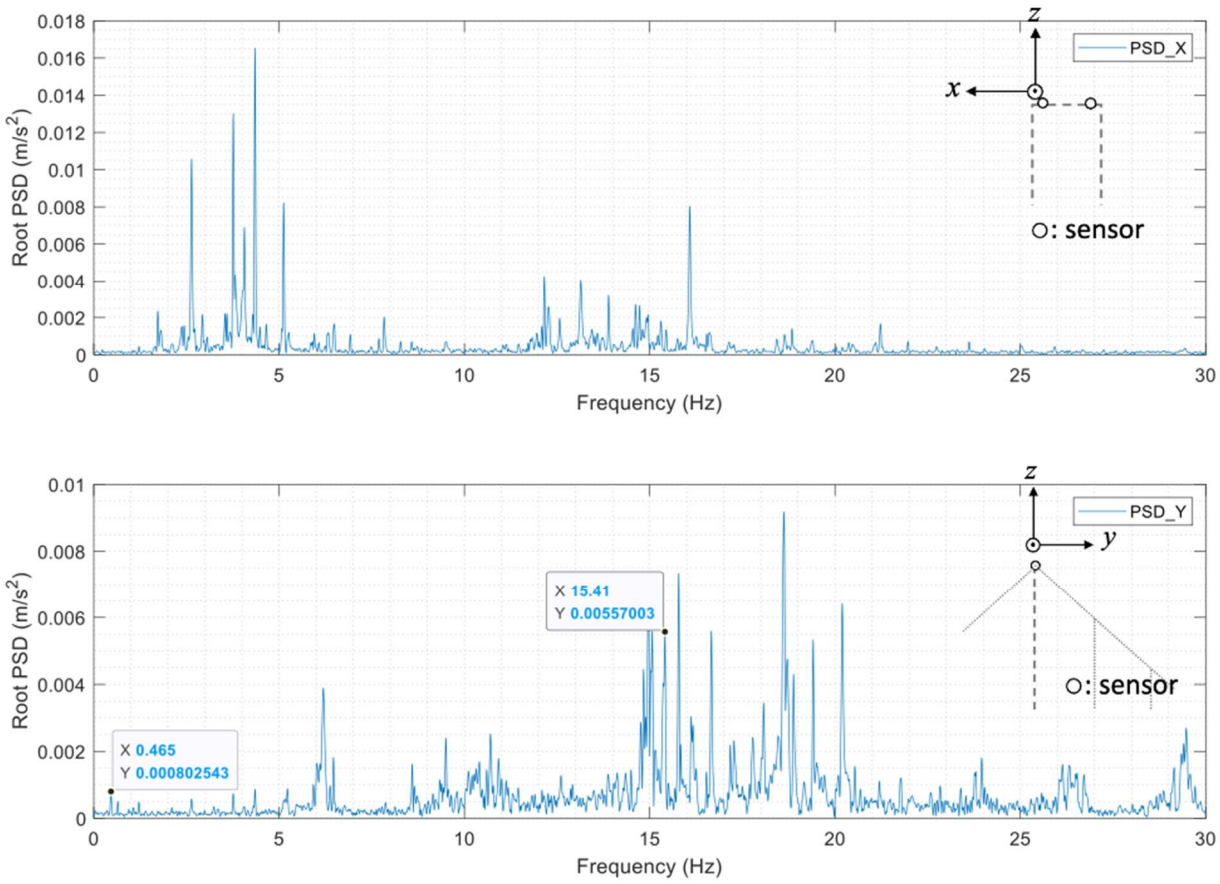


図 3-27 主塔振動の PSD（ACC1 の加速度）

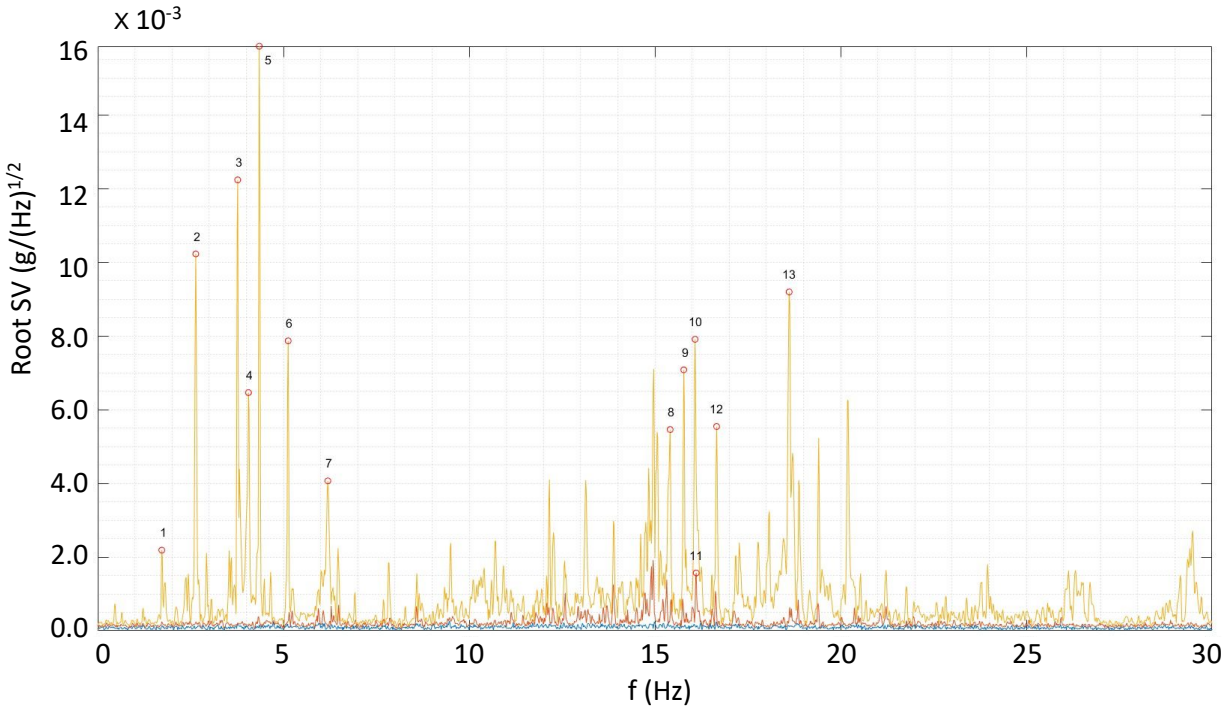


図 3-28 主塔（京都府側）振動の平均特異値スペクトル（ACC1 と ACC2 センサ）.

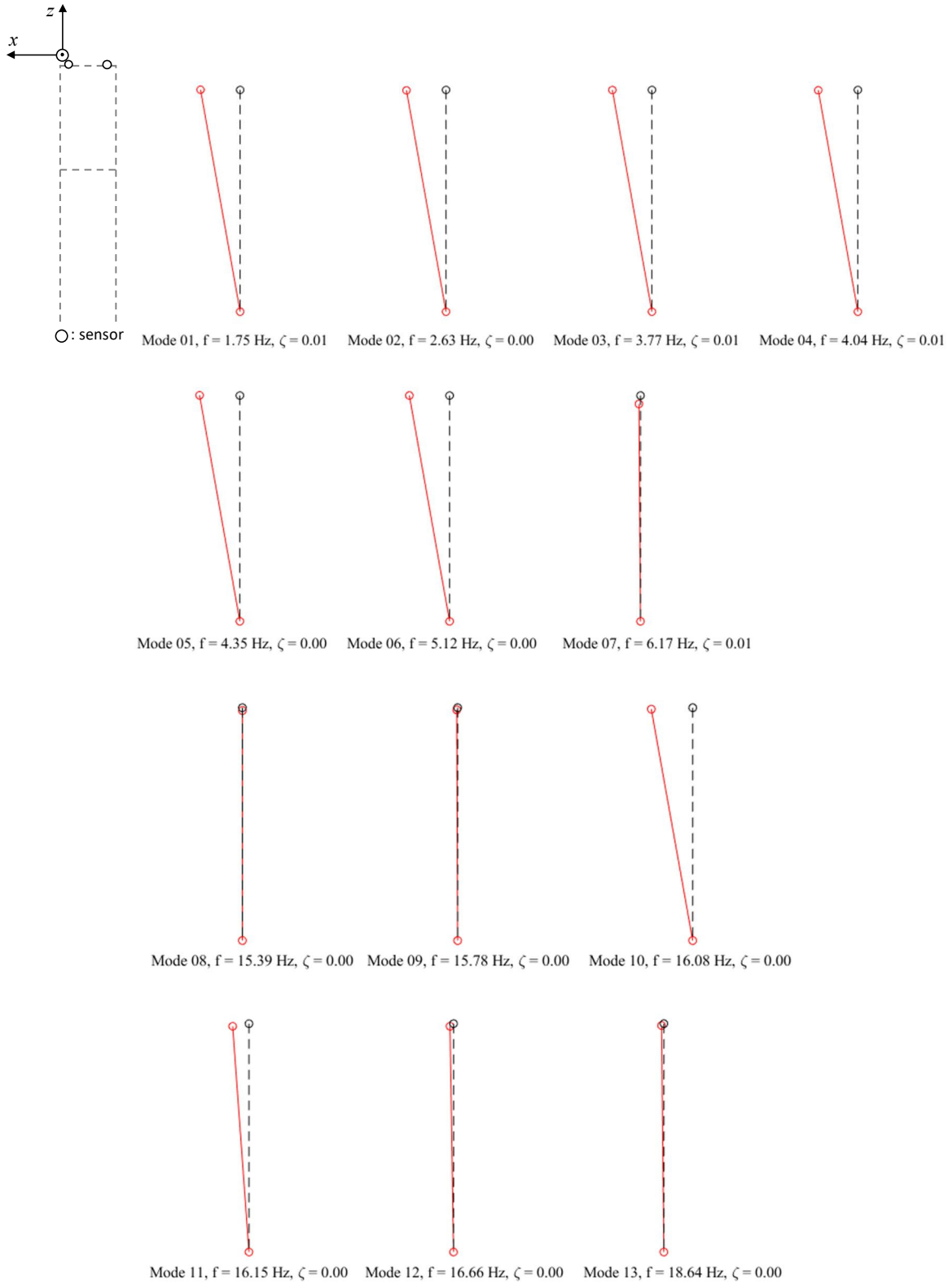


図 3-29 主塔（京都府側）の振動モード（x–z 平面）

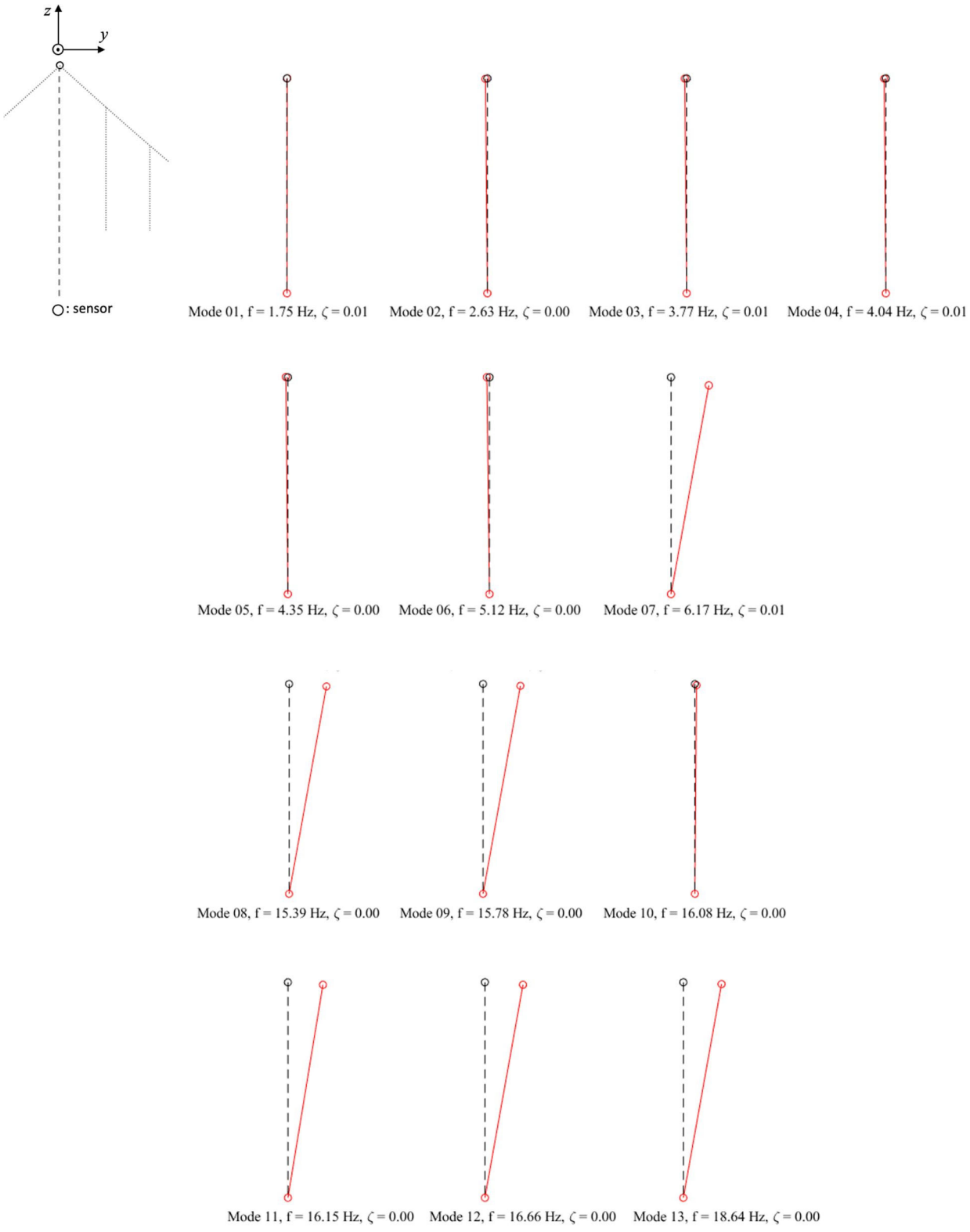
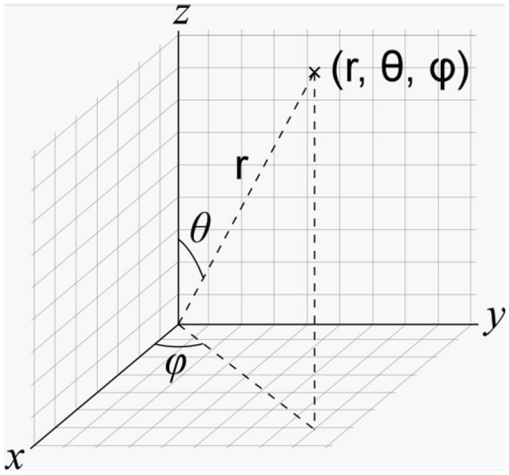


図 3-30 主塔（京都府側）の振動モード（y–z 平面）

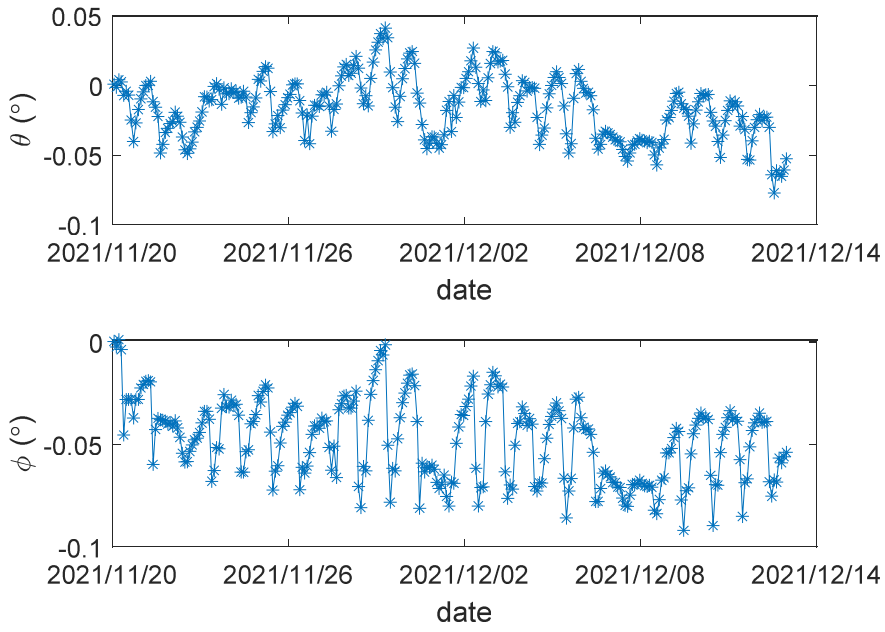
2）主塔の傾斜角の特性

主塔の傾斜角の変動を調べる．センサの傾斜角および回転角の定義は図 3-31 に示す．塔の傾斜角の変動を，図 3-32 に示す．長期モニタリング開始時（2021 年 11 月 20 日）を基準に傾斜角を調整している．ただし，2021 年 12 月 13 日以降の傾斜角データがサーバーに保存されていないことから，図 3-32 には，12 月 13 日までのデータを用いている．主塔の傾斜角（θ）の推移を見ると，上流側（INC1）は $0.05°\sim-0.05°$に，下流側（INC2）は $0.1°\sim-0.05°$ に変動しており，下流側の変動幅が，上流側に比べ若干大きい．主塔の回転角（ϕ）の推移を見ると，上流側（INC1）は $0.0°\sim-0.1°$ に，下流側（INC2）も $0.0°\sim-0.15°$ に変動しており，主塔の傾斜角（θ）の推移と同様に下流側の変動幅が，上流側に比べ若干大きい．一方で，主塔の回転角（ϕ）にはトレンドが観察された．

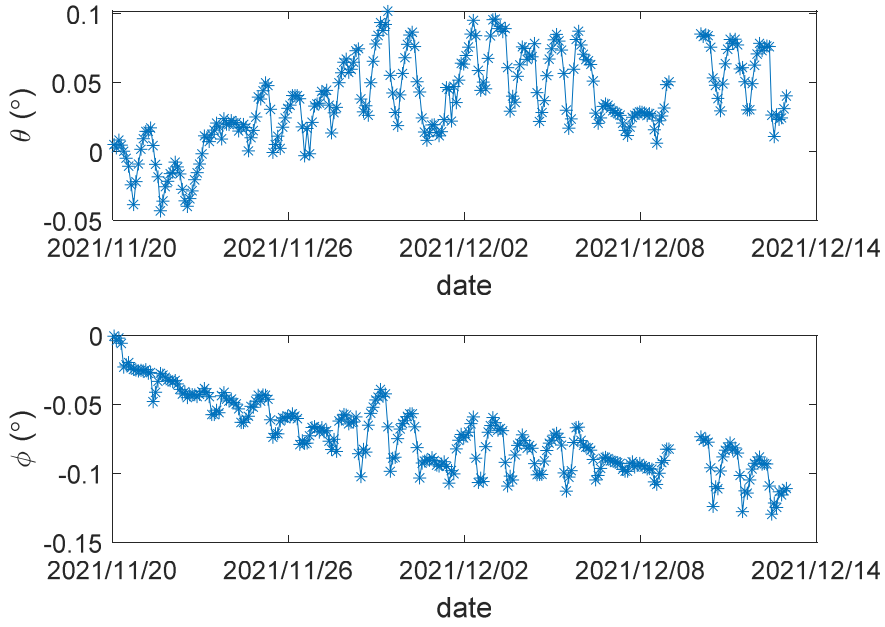


x: 橋軸直角方向
y: 橋軸方向
z: 鉛直方向
θ: 傾斜角
φ: 回転角

図 3-31 傾斜角と回転角の定義



(a) 主塔の傾斜角(INC1 センサ:上流側)

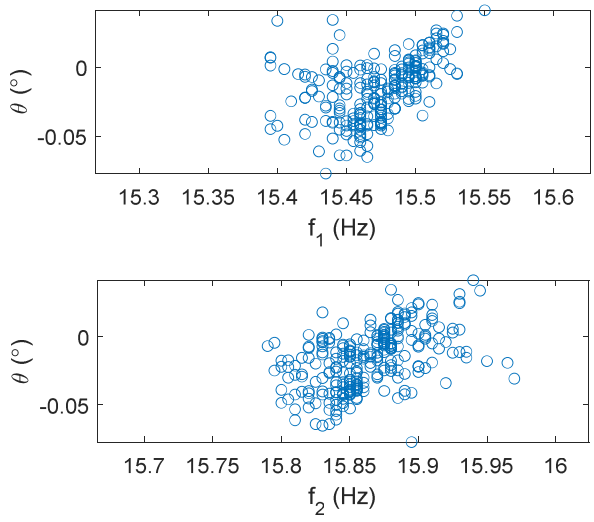


(b) 主塔の傾斜角(INC2 センサ:下流側)

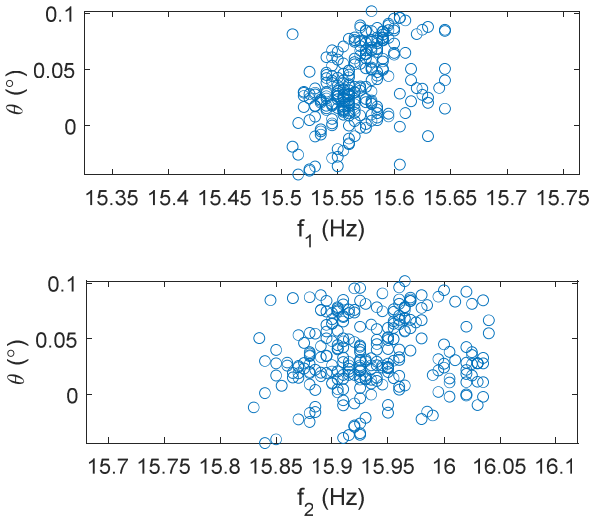
図 3-32 主塔の傾斜角の推移

3.4.3　主塔の傾斜角とケーブル振動との相関

主塔の傾斜角と主ケーブルの卓越振動数（15.5Hz 近傍）との相関を**図 3-33** に，主塔の回転角と主ケーブルの卓越振動数（15.5Hz 近傍）との相関を**図 3-34** に示す．15.5Hz の主ケーブルの卓越振動数と主塔の傾斜角との間には相関があることが観察された．3.4.2 1)で考察した通り，主ケーブルと主塔の 15Hz 周辺の振動はお互いに影響されていると推察できる．

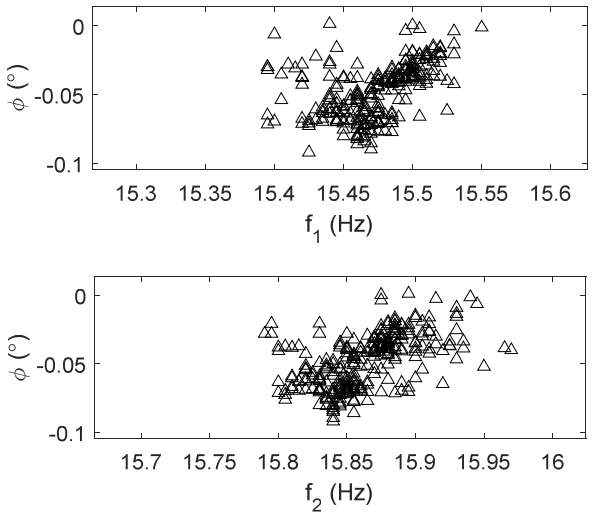


(a) INC1 の傾斜角と ACC3 の卓越振動数の関係

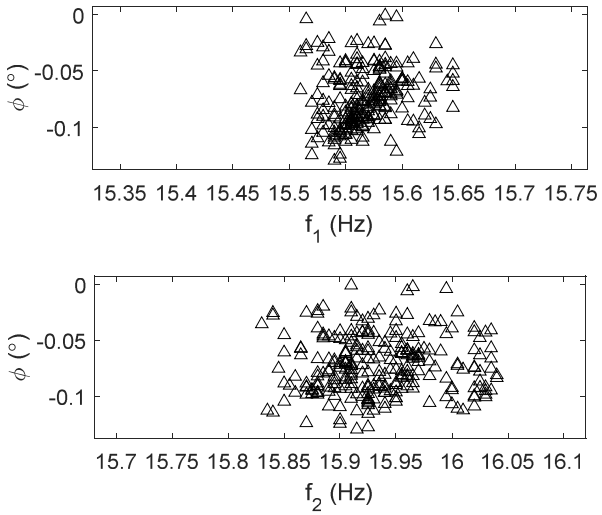


(b) INC2 の傾斜角と ACC4 の卓越振動数の関係

図 3-33 主塔の傾斜と主ケーブルの卓越振動数との相関



(a) INC1 の回転角と ACC3 の卓越振動数の関係



(b) INC2 の回転角と ACC4 の卓越振動数の関係

図 3-34 主塔の回転と主ケーブルの卓越振動数との相関

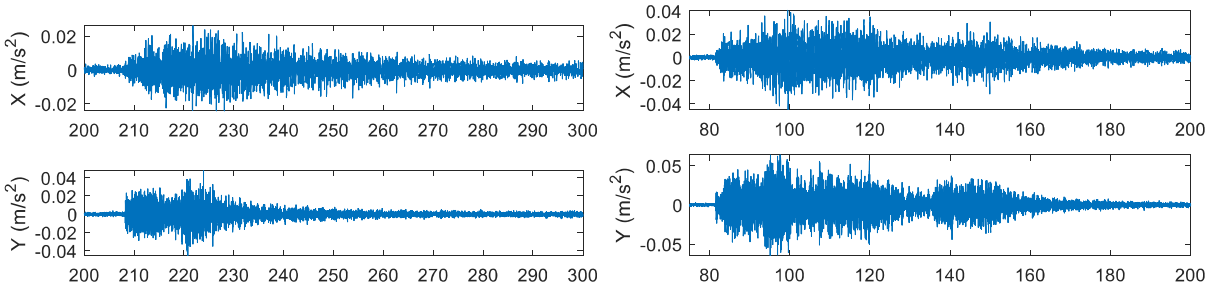
3.4.4　地震前後のモニタリングデータの検討

長期モニタリング中の 2021 年 12 月 3 日午前 9 時 28 分頃，和歌山県で最大震度 5 弱を観測する地震が発生し，隣接の奈良市でも震度 1~2 が観測された．これを受け，八幡橋の計測データを分析し，常時振動と異なる地震のような異常振動を検出できるかを検討する．震度 1~2 規模の地震による構造物の安全性への影響はないと予測できるが，モニタリングデータを用い，異常がないとの判断の可能性について検討を行う．

1）主塔の振動特性

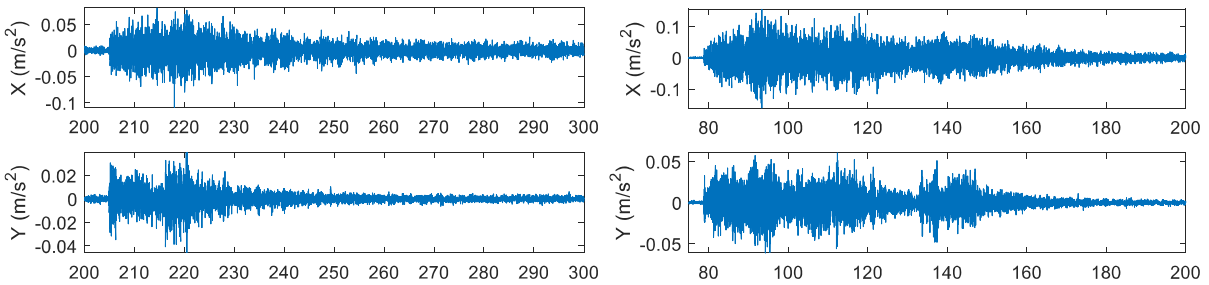
対象橋梁の地震前後で計測された主塔振動の時系列を**図 3-35** と**図 3-36** に示す．また，その PSD を**図 3-37** に示す．加速度の PSD から，地震前後の目立った変化は観測されていない．震度 1～2 の揺れによる対象橋の損傷は考えられないことで，当然の結果である．一方で，供用して 50 年以上を経過しており，性能低下を考えることから，このような地震前後の計測データから構造物の状態の変化を確認できる可能性がある．モニタリング情報の活用方法の一つの良い例であると考える．

塔頂部の加速度の平面の軌道にも着目し，地震前後の異常発生可能性について検討を行う．地震前後の塔頂部の加速度の平面軌道を**図 3-38** と**図 3-39** に示す．地震後の軌道の変動幅は地震前より少し大きく観察されているが，風や通過車両の影響による違いも考えられる．一方で，塔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，地震後に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を特徴量とし，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はあると考えられる．



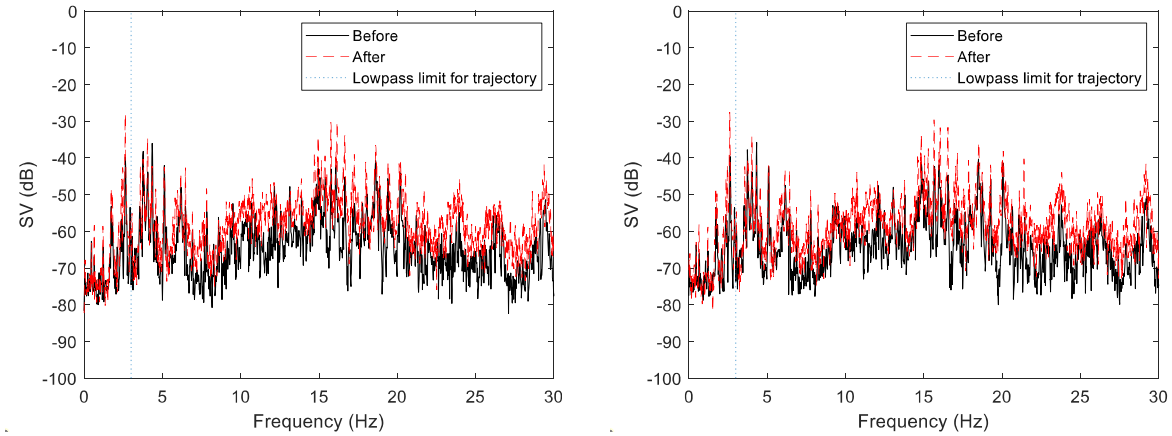
(a) 2021 年 12 月 3 日 09:28 の地震前　　(b)2021 年 12 月 3 日 09:28 の地震後

図 3-35 主塔の地震前後の加速度時系列（ACC1）（X：橋軸直角方向，Y：橋軸方向）



(a) 2021 年 12 月 3 日 09:28 の地震前　　(b)2021 年 12 月 3 日 09:28 の地震後

図 3-36 主塔の地震前後の加速度時系列（ACC2）（X：橋軸直角方向，Y：橋軸方向）



(a) ACC1　　(b) ACC2

図 3-37 主塔の地震前後の加速度時系列の PSD（Before：地震前，After：地震後，Lowpass：図 3-32 の軌道を評価するために適用した Low Pass Filter の cut off 振動数）

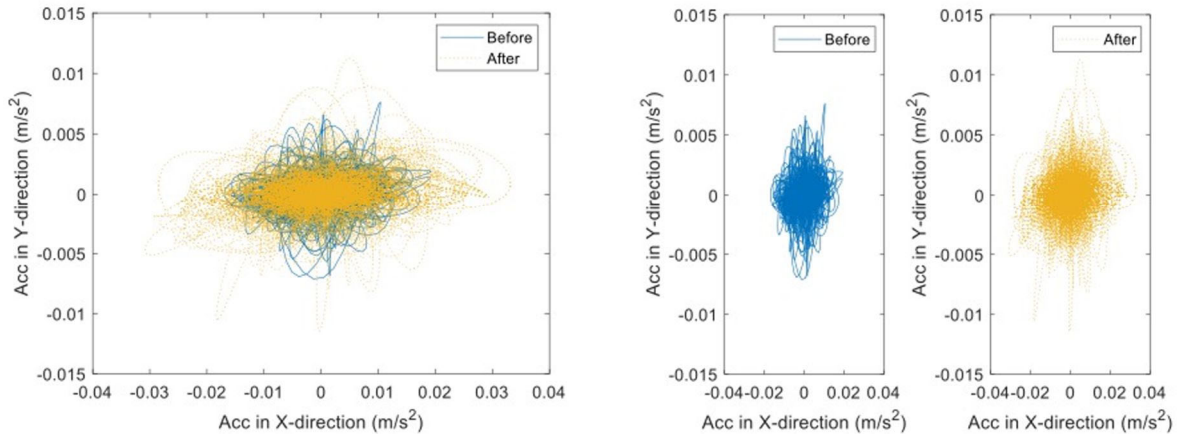


図 3-38 主塔の地震前後の加速度（ACC1）の軌道（Before：地震前，After：地震後）

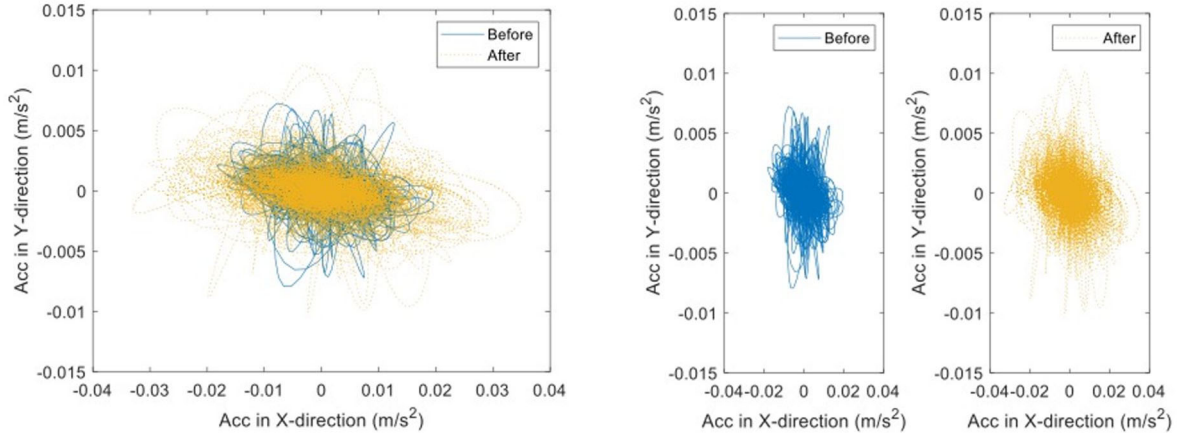
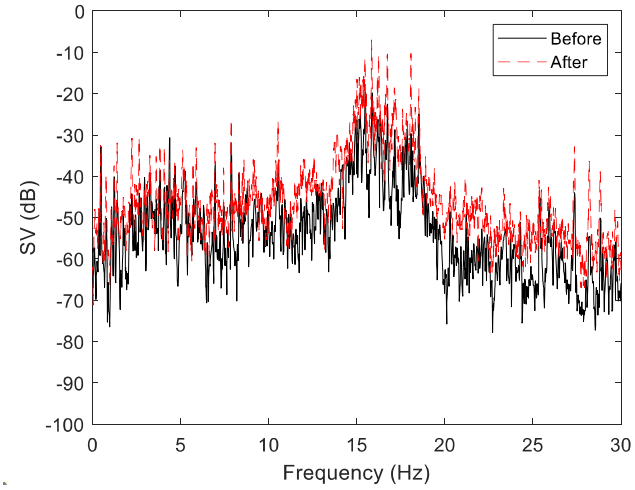


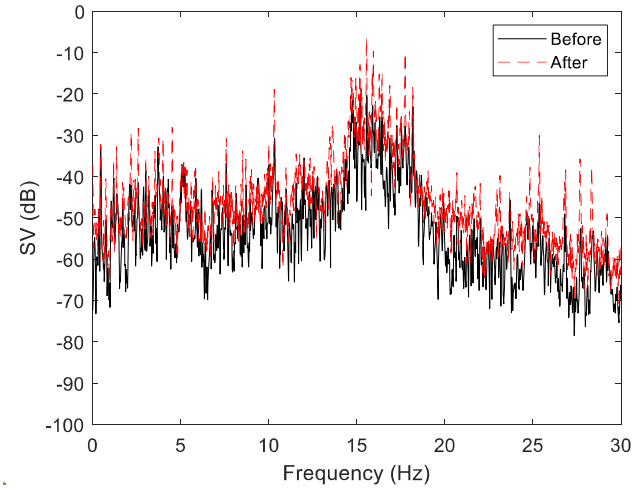
図 3-39 主塔の地震前後の加速度（ACC2）の軌道（Before：地震前，After：地震後）

2）主ケーブルの振動特性

対象橋梁の地震前後で計測された主ケーブル加速度のPSDを図3-40に示す．加速度のPSDから，地震前後の目立った変化は見られない．震度1～2の揺れによる対象橋の損傷（異常）はないと考えられる．



(a) ACC3



(b) ACC4

図3-40 主塔の地震前後の加速度時系列のPSD（Before：地震前，After：地震後）

3）主塔の傾斜角の変化

対象橋梁の地震前，地震時および地震後の傾斜角を**図 3-41** および**図 3-42** に示す．震度 1～2 規模の弱い揺れであるが，地震時の 09:30 頃に大きな変動が観察された．また，対象橋梁の地震前後および地震時の傾斜角の軌道を**図 3-43** および**図 3-44** に示す．震度 1～2 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ことが観察された．また，地震後の傾斜角の軌道は地震時に比べ変動幅が小さく観察された．

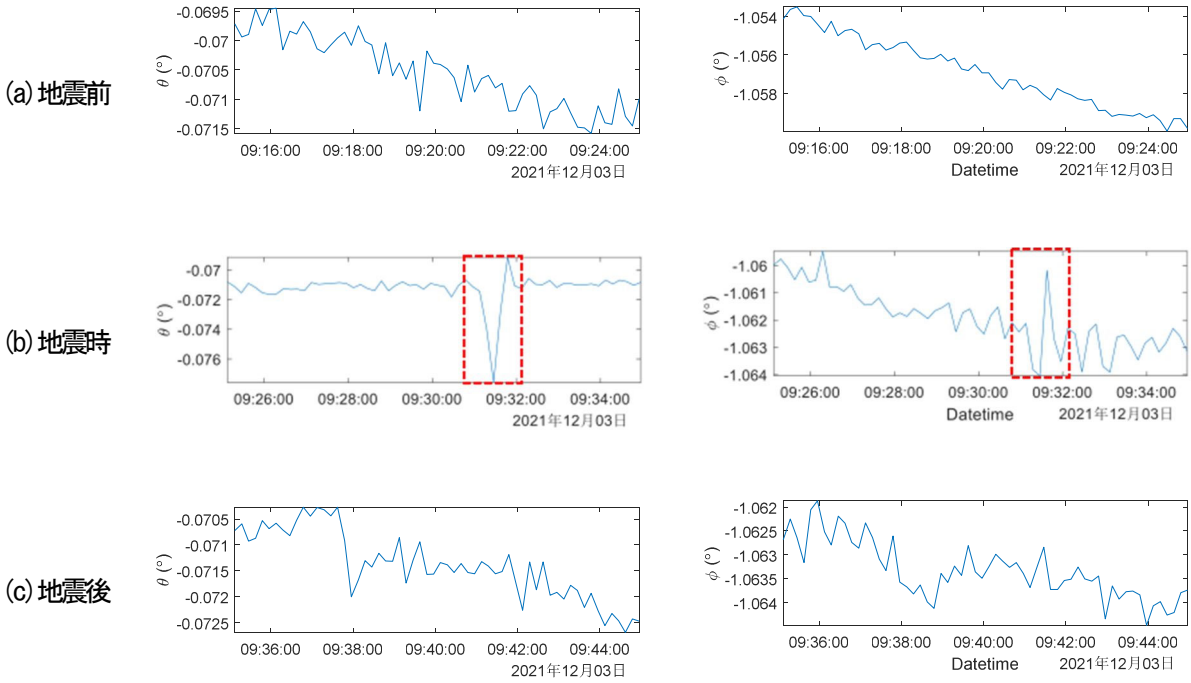


図 3-41 主塔の地震前，地震時および地震後の傾斜角と回転角（INC1，計測間隔：1 回/10 秒）

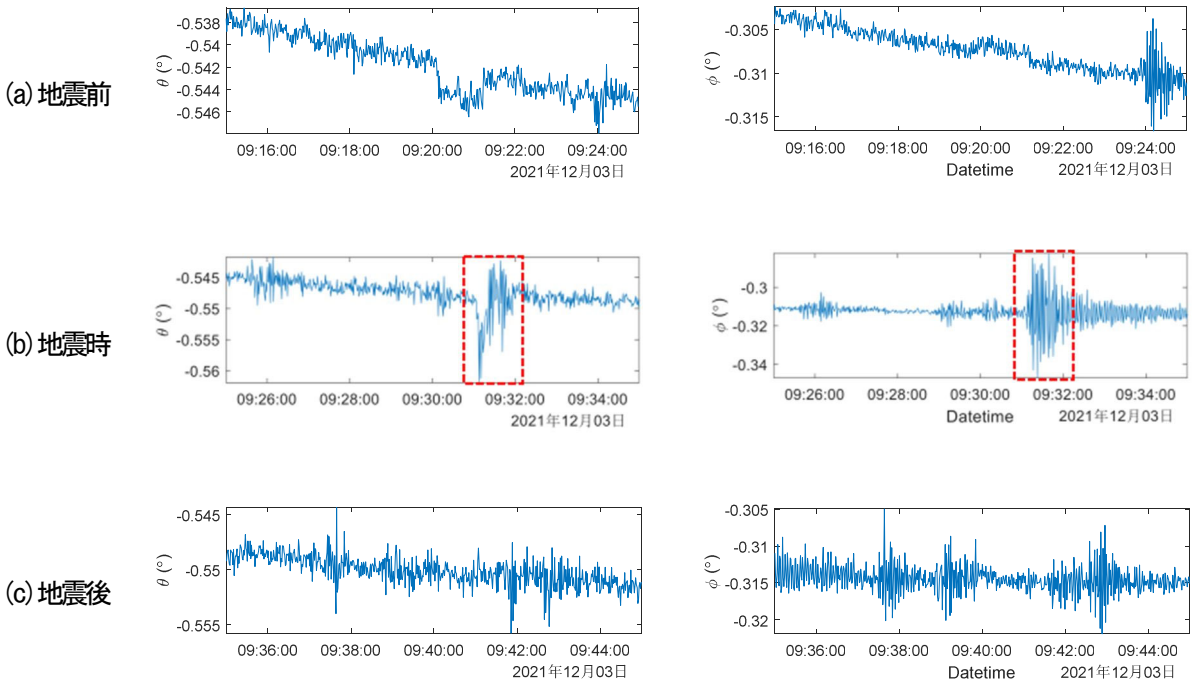


図 3-42 主塔の地震前，地震時および地震後の傾斜角と傾斜角（INC2，計測間隔：1 回/秒）

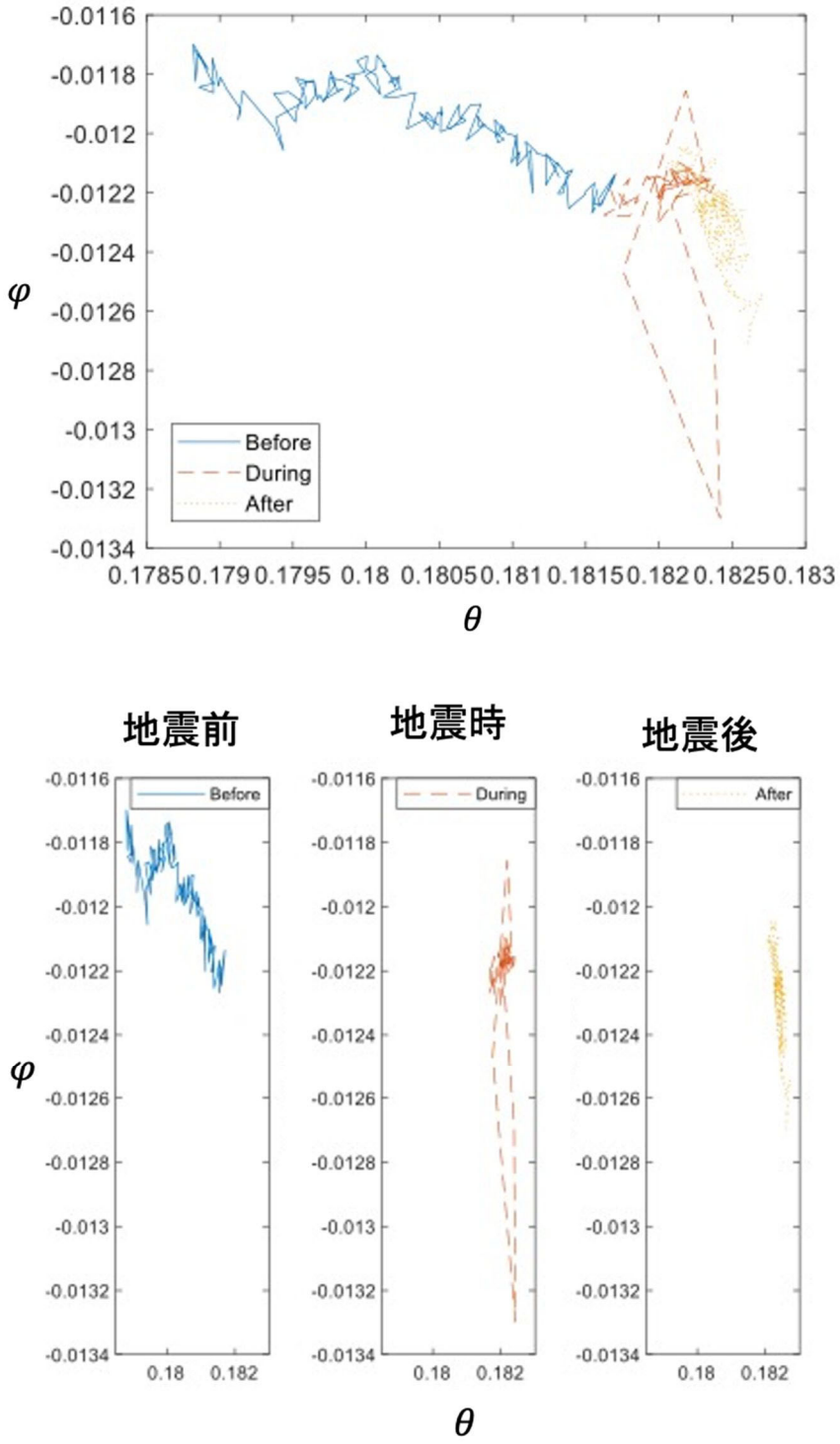


図 3-43 主塔の地震前後および地震時の傾斜角の軌道（INC1，計測間隔：1 回/10 秒）

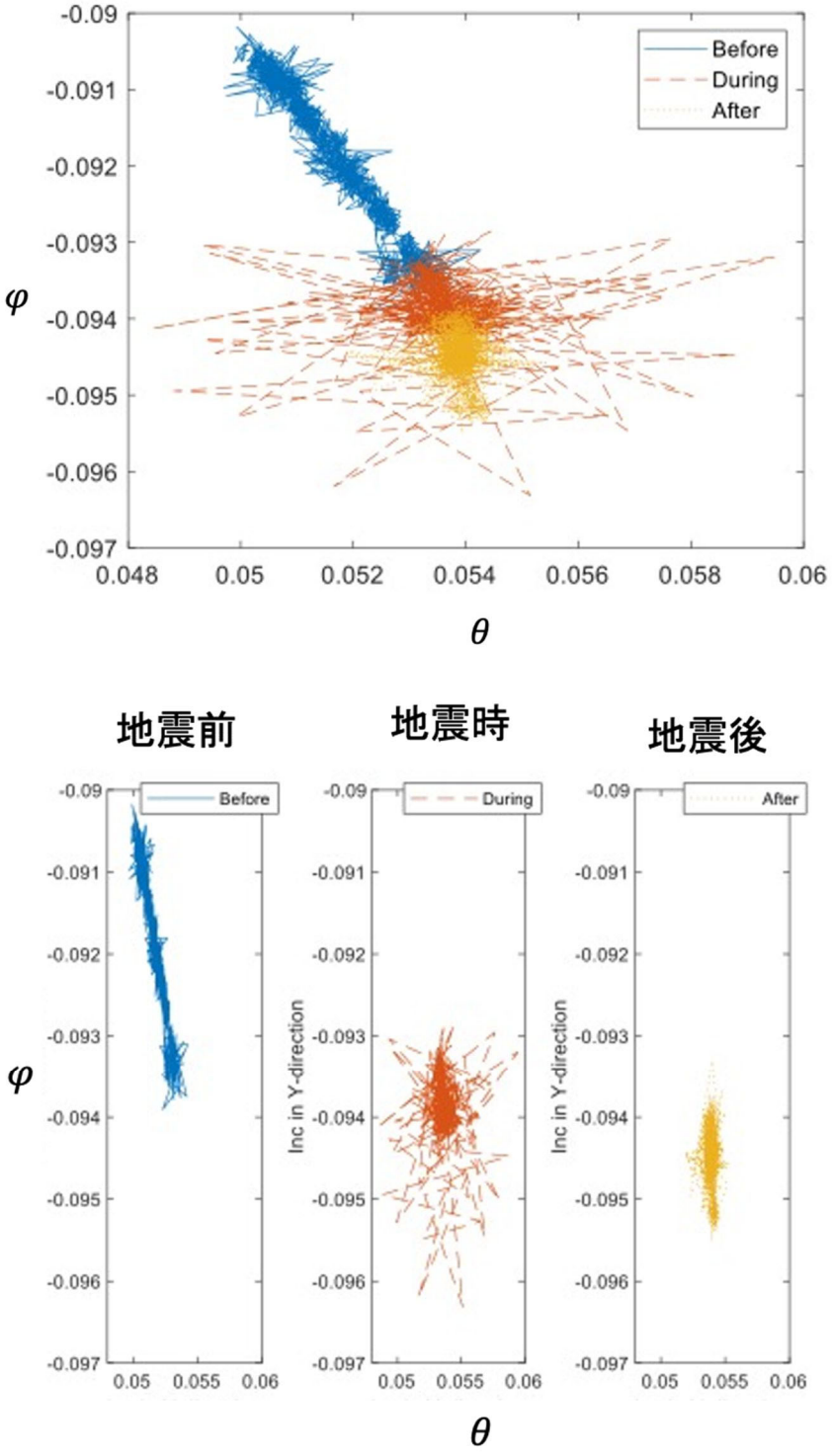


図 3-44 主塔の地震前後および地震時の傾斜角の軌道（INC2，計測間隔：1 回/秒）

第4章　直轄管理のケーブル構造の特殊橋の長期モニタリング検討

4.1　概要

鋼部材の腐食に伴うケーブルおよび定着部の損傷検出を目的として，直轄管理のケーブル構造をもつ特殊橋を対象にケーブル張力計測を中心としたモニタリングが実施されている．　令和 2 年度から令和 3 年度まで，小規模斜張橋をモニタリング対象橋とし，短期モニタリングおよび長期モニタリングが実施された．短期モニタリングは，FE モデルモデルの検証と初期張力の推定を主な目的としている．また，長期モニタリングは，ケーブル張力推定によるモニタリングの有効性検討を主な目的としている．

本章では，計測結果に基づく対象橋梁の振動特性，ケーブル張力の推定についてまとめる．また，長期モニタリングにおける季節変動などの影響についても検討を行い，同定張力の変化に着目した斜張橋のケーブルの損傷検知について検討を行う．

4.2　対象橋梁

対象橋梁は，兵庫県宍粟市にある姫路河川国道事務所管理の「カラウコ大橋」である．**図 4-1** に位置と橋梁の全景写真を示す．この写真に示されるように，本対象橋梁は主塔より姫路側の径間（以下，主径間と呼称する．）が鋼箱桁，鳥取側の径間が RCT 桁で構成された非対称な構造である．また，鳥取側のケーブルは桁ではなくアンカレッジに定着されている．**図 4-2** に橋梁全体の寸法を示す．

ケーブルの振動は構造全体の特性からも影響を受けることが想定される．ただし RCT 桁により構成される径間は構造的に斜張橋から独立しているためケーブルの張力には影響しない．したがって損傷によるケーブル張力への影響の把握を目的とした FE モデルの構築を行うにあたっては，主塔 - 鋼箱桁－ケーブルからなる構造全体の特性の把握が望まれる．一方で，モニタリングにおいては経済的な観点から，損傷に対して鋭敏に変動する特徴量を少数抽出して計測すること

図 4-1　モニタリング対象橋の位置と全景

が望ましい．本研究ではケーブルの破断にいたる深刻な腐食の発生を想定し，いずれかのケーブルが破断した際に荷重分担に大きな変動が生じると想定される 2 本のケーブルを抽出して長期計測の対象とした．以上の検討に基づき，上述の長期計測においては次の項目について計測するものとする．

長期計測

- ケーブル 2 本の張力変動の監視を目的とした振動計測
- 橋梁各部の表面温度計測
- 計測開始：令和 2 年 12 月 26 日～

【橋梁諸元】

橋梁形式：　単径間鋼箱桁斜張橋（姫路側）＋2 径間連続 RCT 桁ラーメン橋（鳥取側）
完成年度：　1990 年
橋　　長：　179.500m
主径間長：　124.000m
全 幅 員：　9.70m

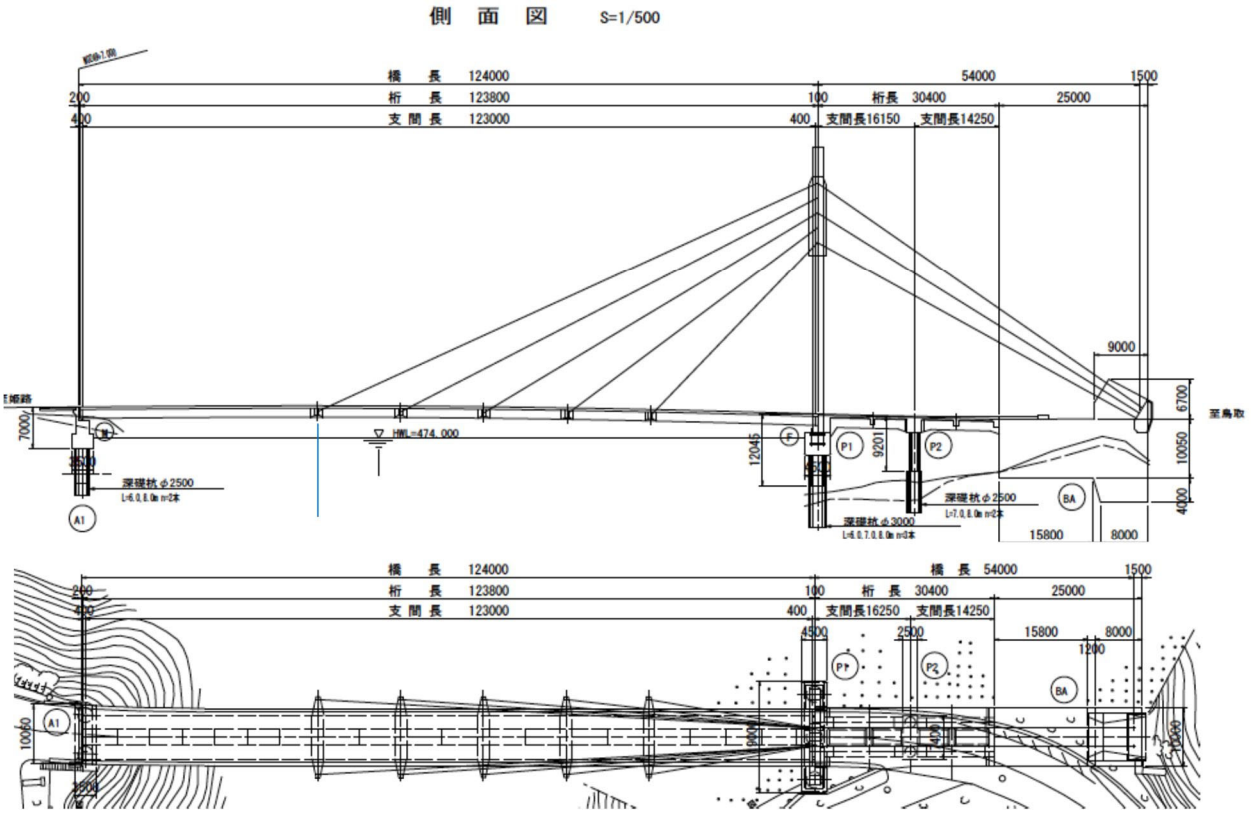
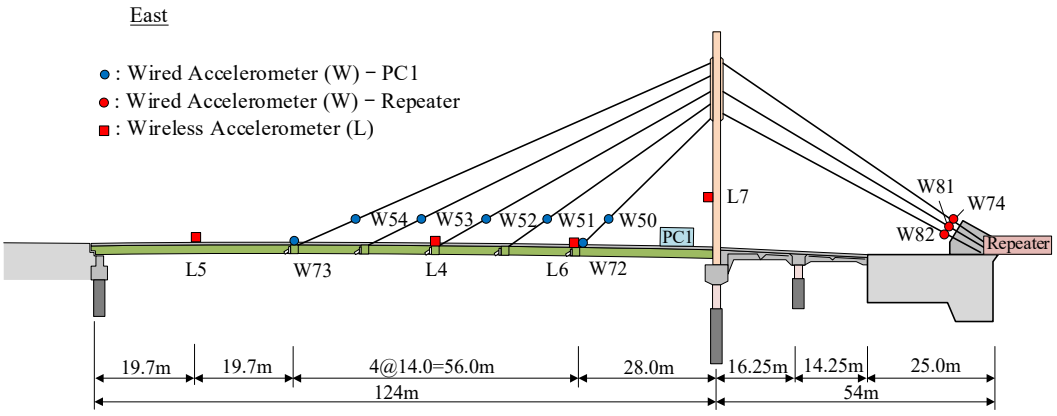


図 4-2 モニタリング対象橋の諸元

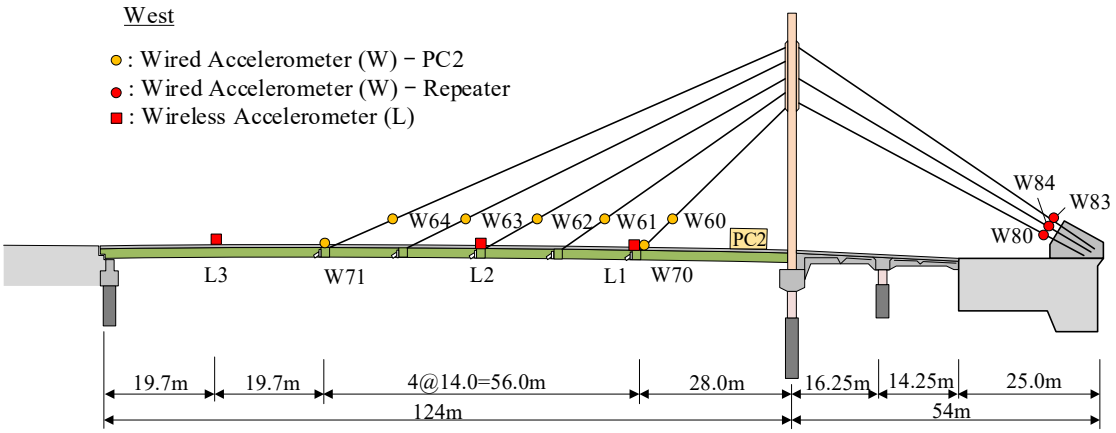
4.3　短期ケーブル振動モニタリング

4.3.1 短期モニタリングデータによる基本振動特性

対象橋梁の短期モニタリングにおけるセンサの配置図を**図4-3**に示す．また，本研究の考察で用いたセンサIDを**図4-4**にまとめる．



(a) 東側のセンサ配置



(b) 西側のセンサ配置

図 4-3 短期モニタリングにおけるセンサ配置

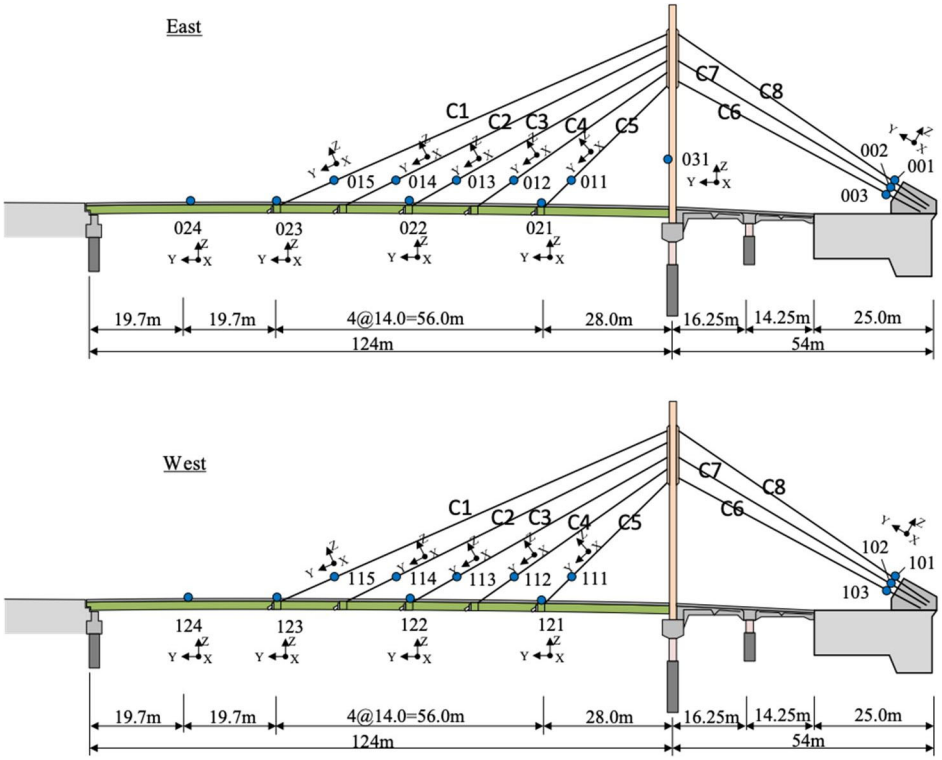


図 4-4 各センサの ID 番号とケーブル ID.

表4−1　短期モニタリングデータによる橋梁部ケール部の同定振動数（Std：標準偏差，COV：変動係数）

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

表4−2　短期モニタリングデータによる定着部ケール部の同定振動数（Std：標準偏差，COV：変動係数）

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

対象橋梁の短期モニタリングで，同定された基本振動特性についてまとめる．振動特性の同定には，ベイズ実働モード解析法(Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA)を適用している．ベイズ実働モード解析法については付録Bに簡単に整理してある．

短期モニタリングより同定された橋梁部と定着部ケーブルの 2 次モード以上の振動数を，それぞれ**表 4-1** および**表 4-2** に示す．橋梁部と定着部ケーブルの振動数同定における不確定性を検討するために，**表 4-1** と**表 4-2** の同定振動数の変動係数に着目すると，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概ね 10 倍大きい結果となった．橋梁部ケーブルは車両通過時の橋梁振動にケーブル振動も励起されることから比較的にケーブル固有の振動特性が現れやすいと考えられる．一方で，対象橋梁の定着部ケーブルの主な加振源は主塔の振動と風である．すなわち，橋梁部のケーブルに比べ振動が十分励起されてないことが，振動数同定において変動係数が大きくなった原因であると考えられる．

衝撃加振によるケーブル振動数の推定結果と常時振動によるケーブル振動数の推定結果の比較から，常時振動を利用する場合，ケーブルの 1 次振動数は桁の振動などに影響されやすい傾向があることから，2 次以上の振動数に着目している．橋梁部の振動計測で同定された橋梁全体系の振動モードを**図 4-5** に示す．また，橋梁部の振動とケーブル振動の関係を調べるために，橋梁振動の特異値スペクトル，橋梁部の最長ケーブル振動（C1 ケーブルの 015 センサ）の PSD，橋梁部の最短ケーブル振動（C5 ケーブルの 011 センサ）の PSD，定着部の最長ケーブル振動（C8 ケーブルの 001 センサ）の PSD を**図 4-6** に示す．

図 4-6a)と **b)**を見ると，橋梁部ケーブルの低次の振動特性は，橋梁振動の振動特性と重なることがわかる．一方で，定着部ケーブル振動は橋梁部の振動特性に影響をほとんど受けてないことがわかる（**図 4-6c)**）．特に，斜張橋のケーブル振動計測の重要な目的の一つがケーブル張力推定であることを考えると，ケーブル張力推定に安定的で精度のいい振動数を用いる必要があるため，2 次以上の振動数に着目すれば常時振動は有用であると考えられる．

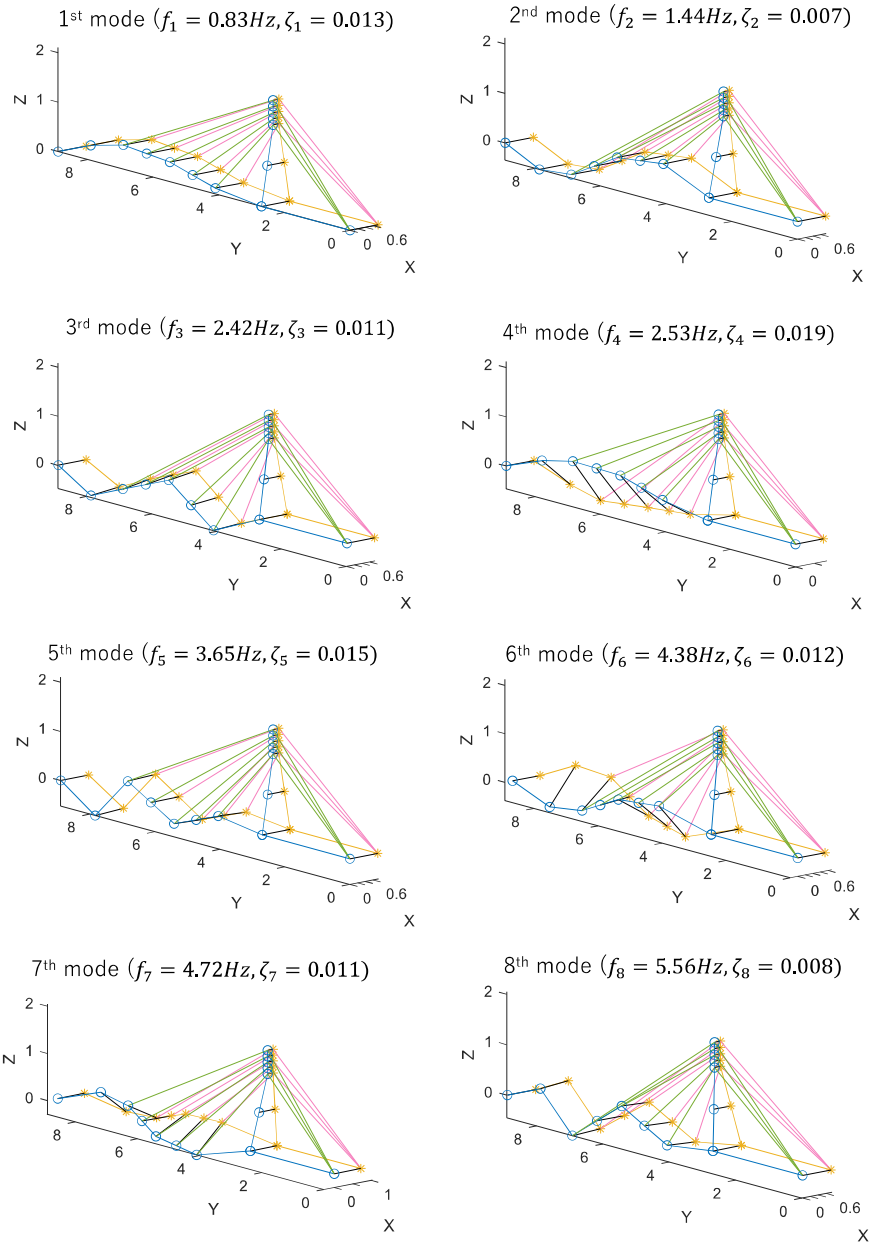
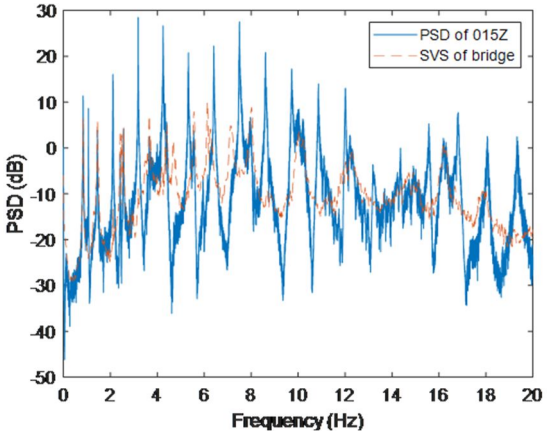
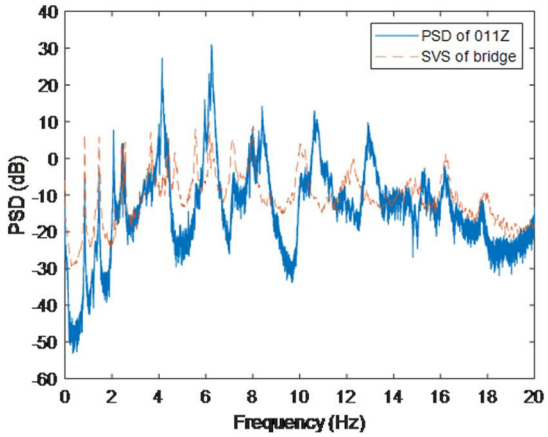


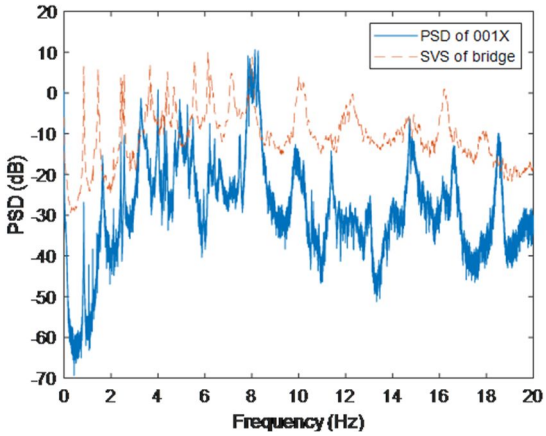
図 4-5 橋梁部振動計測データから同定される平均振動特性



(a) 橋梁部の最長ケーブル振動（C1 ケーブルの 015 センサ）



(b) 橋梁部の最短ケーブル振動（C1 ケーブルの 015 センサ）



(c) 定着部の最長ケーブル振動（C1 ケーブルの 015 センサ）

図 4-6 橋梁部振動の特異値スペクトル（オレンジ）とケーブル振動の PSD（青色）.

4.3.2 短期モニタリングデータによるケーブル張力同定

対象橋の常時振動計測データからケーブルの振動数を同定し，同定振動数を用いたケーブル張力の同定を行う．ケーブル張力同定には，本研究で提案しているベイズケーブル張力同定法を用いる．すなわち，付録 C の**図 C-1** に示すように，ベイズ実働モード解析によりケーブル振動数の事後確率分布を同定し，ケーブル振動数と張力の関係式にベイズ線形回帰を適用することで，ケーブル張力の事後確率分布を同定する．**表 4-3** に対象橋梁のケーブル諸元を示す．また，設計張力と曲げ剛性を**表 4-4** に示す．短期常時モニタリングでは，車両通過がほとんどなく，活荷重状態でも車両 1 台のみの載荷状態であったため，同定張力の検討には，**表 4-4** の最小設計張力と比較検討を行う．

表 4-3 ケーブル諸元

ケーブル ID*	種類	直径 (mm)	長さ (m)	単位長さ当り質量 (kg/m)	破断荷重 (kN)
C-8	Hi-Am 283	180	66.028	91.6	17100
C-7	Hi-Am 283	180	63.335	91.6	17100
C-6	Hi-Am 121	140	60.68	39.4	7310
C-5	Hi-Am 109	125	40.311	35.5	6590
C-4	Hi-Am 109	125	52.474	35.5	6590
C-3	Hi-Am 109	125	65.435	35.5	6590
C-2	Hi-Am 199	160	78.893	64.3	12000
C-1	Hi-Am 199	160	92.544	64.3	12000

* C-1 ~ C-5： 桁部ケーブル，C-6~ C-8： 定着部ケーブル

表 4-4 設計張力と曲げ剛性

ケーブル ID*	T_{max} (kN)	T_{min} (kN)	EI (kN·m^2)**
C-8	5480	4400	10048
C-7	5680	4680	10048
C-6	1990	1610	3677
C-5	2060	1360	2337
C-4	2020	1490	2337
C-3	2020	1530	2337
C-2	3720	2890	6273
C-1	3850	3120	6273

* C-1 ~ C-5： 桁部ケーブル，C-6~ C-8： 定着部ケーブル

**ヤング係数$E = 1.95 \times 10^5$MPa と仮定, T_{max}：最大設計張力（死荷重＋活荷重）, T_{min} (kN)：最小設計張力（死荷重）

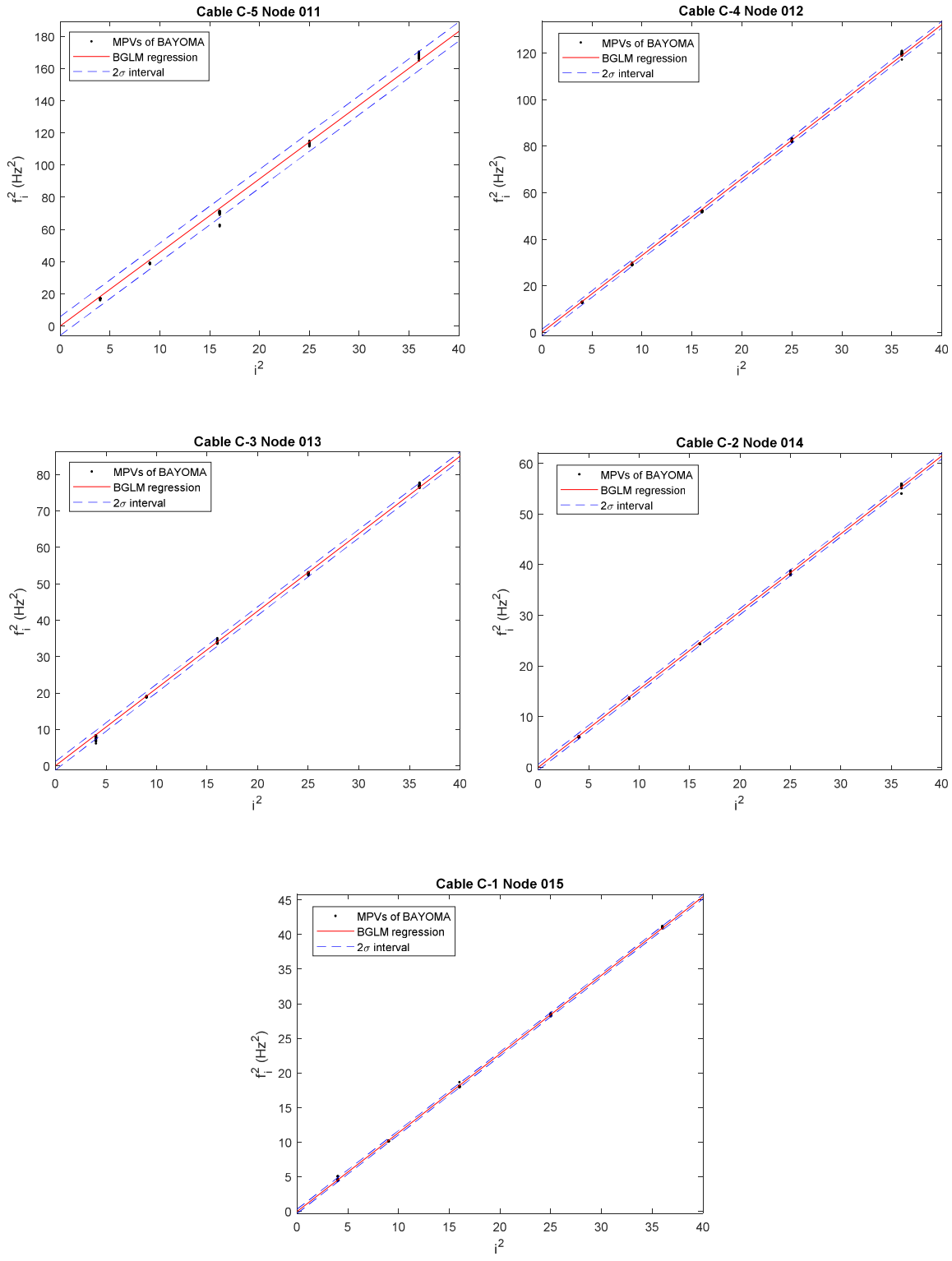


図 4-7 桁部ケーブル振動数と振動次数の線形回帰（黒点：振動数の最確値と振動次数の関係，赤線：ベイズ一般化線形モデル，青破線：±2σ（σ：標準偏差））．

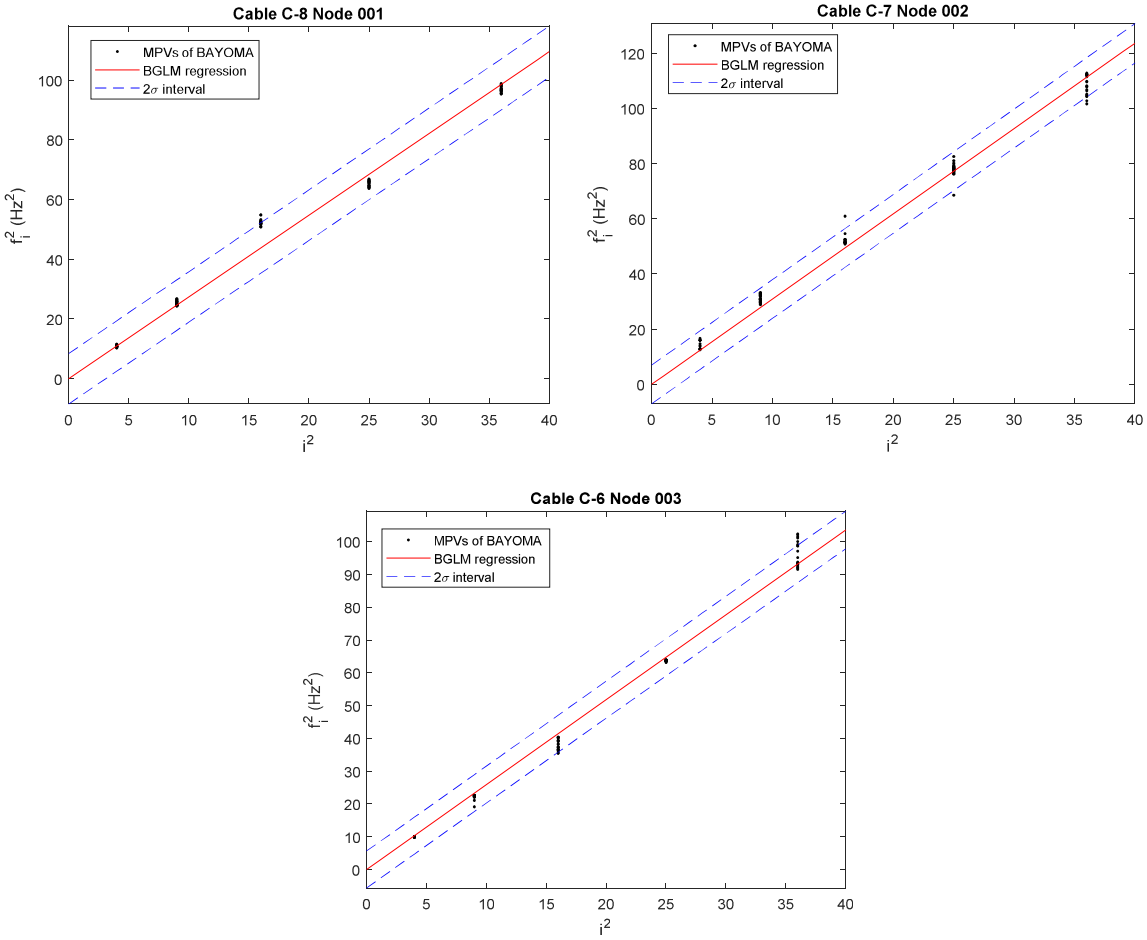


図 4-8 定着部ケーブル振動数と振動次数の線形回帰（黒点：振動数の最確値と振動次数の関係，赤線：ベイズ一般化線形モデル，青破線：±2σ（σ：標準偏差））．

ケーブル張力は，ベイズ一般化線形モデル（BGLM）を用いて推定した．振動数f_iと次数 i の線形関係を**図 4-7** と**図 4-8** に示す．**図 4-7** は桁部ケーブル（東側）の振動数と振動モード次数との線形関係を，**図 4-8** には定着部ケーブル（東側）の振動数と振動モード次数との線形関係を示す．関連して，省略している西側のケーブルについても同様の傾向を確認している．

図 4-7 と**図 4-8** の振動数と振動モード次数の線形関係のばらつき（図の±2σ）を見ると，定着部ケーブルの振動数と振動次数の線形関係のばらつきが，桁部の振動数と振動次数の線形関係のばらつきより大きいことが分かる．桁部は，車両走行による桁の振動がケーブル振動を励起するが，定着部ケーブルの場合，風あるいは主塔の振動により励起されることから桁部のケーブルよりか信号が弱く，同定のばらつきが大きくなると考えられる．

短期の常時振動モニタリングデータを用い無情報事前分布によるベイズ張力推定を行った結果を**表 4-5** にまとめる．桁部のケーブルの同定張力は設計張力の約 80%になっていることが分かる．一方で，定着部ケーブルの同定張力は，設計張力の 99%～89%の張力を示している．特に，桁部のケーブルの同定張力の標準偏差はわずか 1kN～3kN に分布しており，同定における不確定性は少ない結果である．定着部ケーブルの同定張力の標準偏差は 5kN～30kN に分布してお

り，桁部ケーブルの同定張力に比べてばらつきが大きい結果となった．同定ケーブル張力の平均値，設計張力と FE 解析による解析張力を図 4-9 に示す．

表 4-5 同定張力

ケーブル ID	番号	弦理論(無情報事前分布)		
		事後確率の平均 (kN)	事後確率の標準偏差(kN)	設計張力 (T_{min}) との差
C-8	001	4374.0	29.5	-0.6%
	101	4421.6	28.4	0.5%
C-7	002	4544.4	23.0	-2.9%
	102	4617.7	25.7	-1.3%
C-6	003	1502.2	7.4	-6.7%
	103	1426.3	4.9	-11.4%
C-5	011	1055.7	2.9	-22.4%
	111	1081.9	2.4	-20.5%
C-4	012	1292.2	1.2	-13.3%
	112	1263.8	1.3	-15.2%
C-3	013	1292.0	1.5	-15.6%
	113	1223.3	1.4	-20.0%
C-2	014	2459.5	2.1	-14.9%
	114	2474.8	2.1	-14.4%
C-1	015	2505.3	1.5	-19.7%
	115	2493.6	2.2	-20.1%

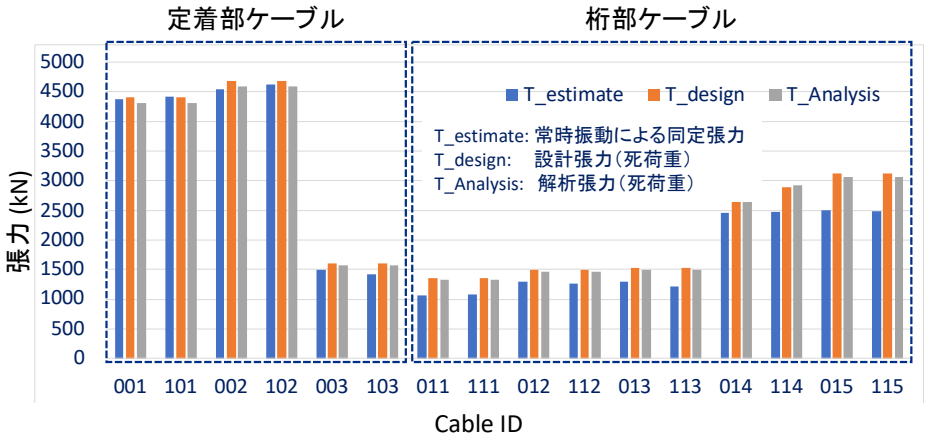


図 4-9 平均同定ケーブル張力，設計張力と解析張力

4.4　長期ケーブル振動モニタリング

4.4.1 長期モニタリングデータによる基本振動特性

対象橋梁の長期モニタリングにおけるセンサの配置とセンサIDを**図4-10**に示す．橋梁部の最長ケーブル（C1）の東側ケーブル（no. 015）と最短ケーブル（C5）の東側ケーブル（no. 011）を対象に，長期ケーブル振動および張力モニタリングを行った．

令和2年12月26日から令和3年7月1日までの半年間の同定ケーブル振動数を**図4-11**にまとめる．**図 4-11**の令和3年4月1日から5月12日までのブランクは，WiFiのトラブルによるデータ欠損期間である．**図4-11(a)**には，最長ケーブル（C1）の1次から10次までの同定振動数を，**図 4-11(b)**には，最短ケーブル（C5）の1次から10次までの同定振動数を示す．同定振動数は張力同定に利用しているが，4.3.1の短期常時モニタリングで得られた結論である「常時振動を利用する場合，ケーブルの1次振動数は桁の振動などに影響されやすい傾向」を勘案して，ケーブルの2次以上の振動数を張力同定に考慮する．

温度変化に伴うケーブル振動数の傾向を把握するために，横軸に温度を，縦軸にケーブル振動を示す関係図を**図4-12**に示す．**図4-12(a)**の最長ケーブル（C1）の関係図をみると，温度上昇にともない振動数が下がる傾向を示している．また振動モード次数によっては，その傾向に差があることが確認できる．特に，最長ケーブル（C1）の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．一方で，最短ケーブル（C5）の場合（**図4-12(b)**）をみると，温度上昇にともない振動数が下がる傾向を示しているものの，最長ケーブル（C1）よりはその傾向が弱い．最短ケーブル（C5）の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．

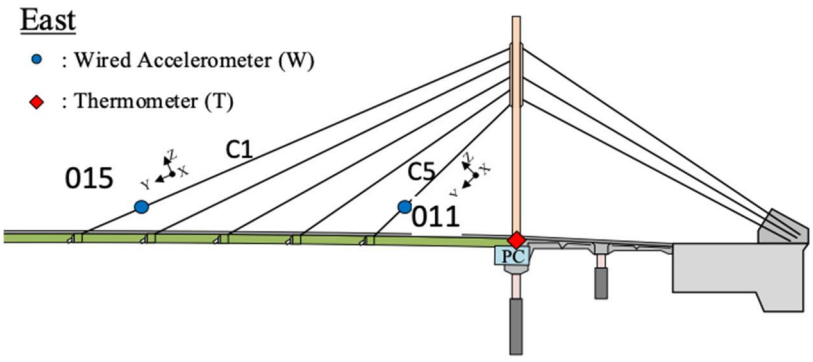
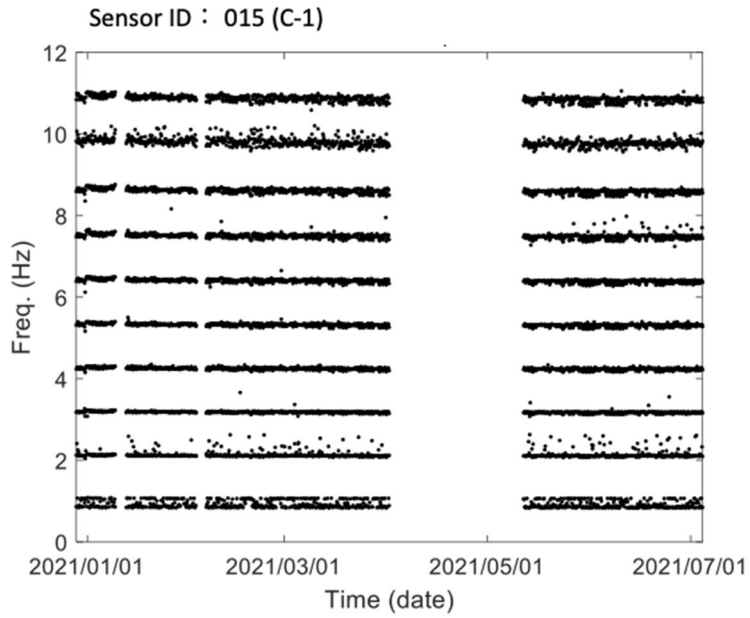
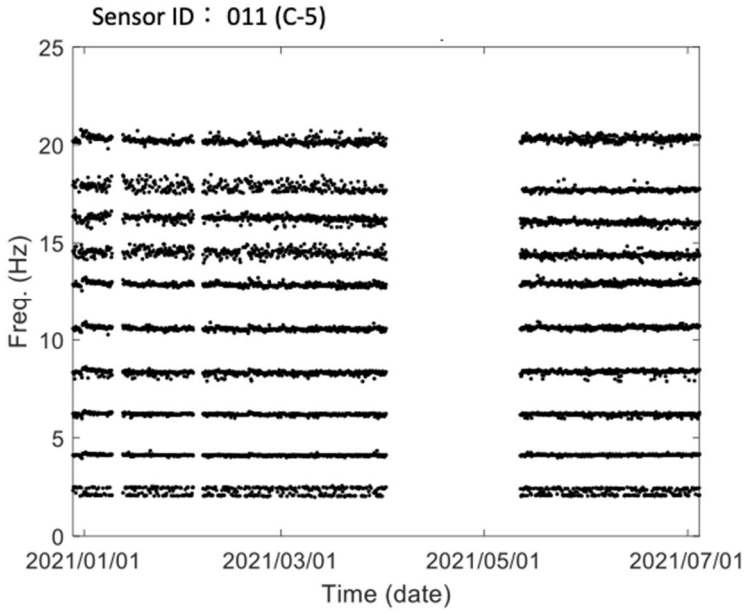


図 4−10 センサ配置（長期モニタリング）

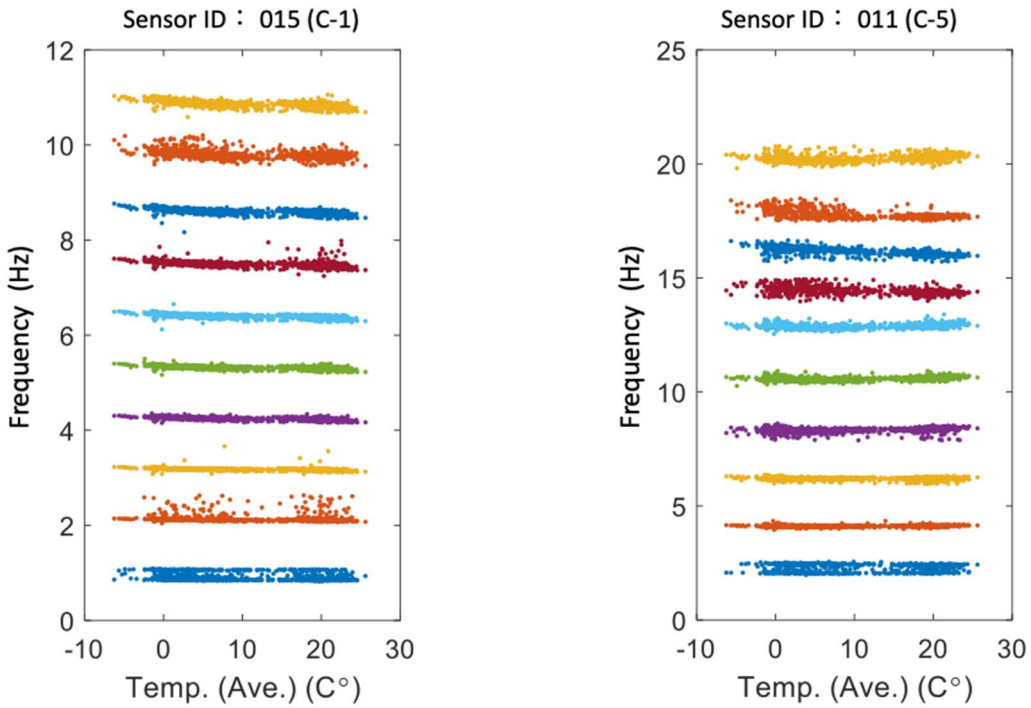


(a)橋梁部の最長ケーブル



(b) 橋梁部の最短ケーブル

図 4−11 1 次から 10 次までの同定ケーブル振動数の長期トレンド（1 次振動数は桁部の振動成分のため張力算定には利用していない）.



(a)橋梁部の最長ケーブル　　(b) 橋梁部の最短ケーブル

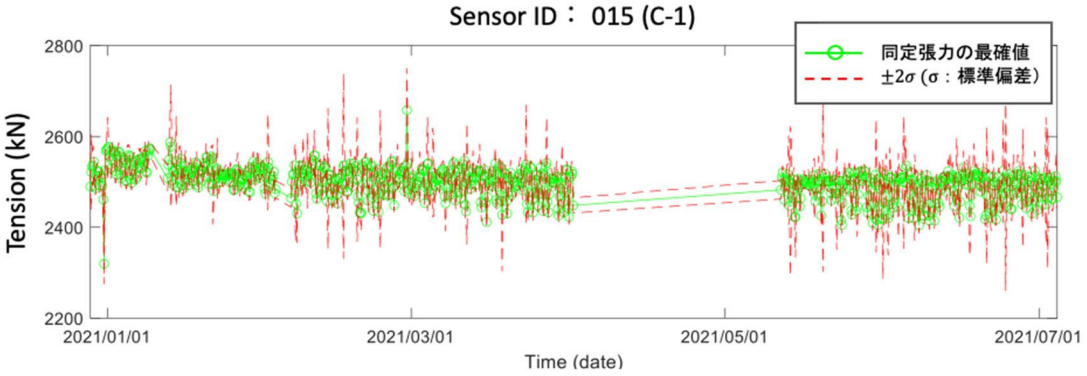
図4-12ケーブル振動数と温度の関係

4.4.2 長期モニタリングによるケーブル張力同定

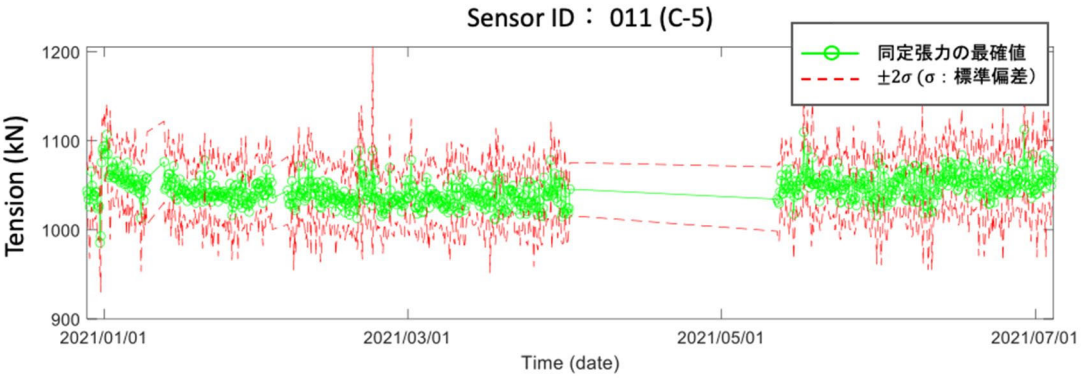
長期常時振動計測データから同定されるケーブルの振動数（**図4-11**および**図4-12**参照）を用いて，ケーブル張力の同定を行う．4.4.1で考察した通り，長期常時振動計測データを用いた同定ケーブル振動数のばらつきは，振動モードによってもその傾向が異なることから，ベイズケーブル張力同定法を用いる．令和2年12月26日から令和3年7月1日までの半年間の同定ケーブル張力の最確値と標準偏差の時系列を**図4-13**に示す．

長期モニタリングの同定張力のばらつきの傾向を把握するために，短期モニタリングのばらつきと比較してみる．**図4-14**に長期モニタリングと短期モニタリングで同定した張力の確率分布を示す．**図4-14(a)**に示すとおり，長期モニタリングで同定した最長ケーブルの張力の確率分布は正規分布ではなく右に偏っていることから，平均値とモードが離れている点に注意されたい．

図4-14から分かるように，長期常時モニタリングによる同定張力のばらつきは，短期モニタリングに比べ，短いケーブルで5倍，長いケーブルで15倍，大きいことが分かる．すなわち，長いケーブルの方が季節変動によるばらつきが大きいことを意味する．**表4-5**からわかるように，短期モニタリングでは，短いケーブルに比べ長いケーブルのばらつきが小さかった点は，特記すべきである．

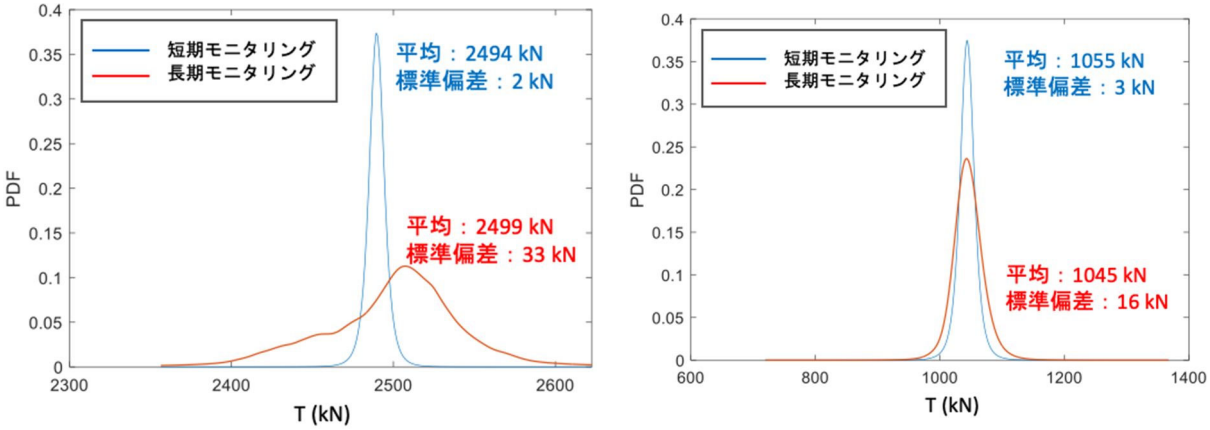


(a)橋梁部の最長ケーブル



(b) 橋梁部の最短ケーブル

図 4-13 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.



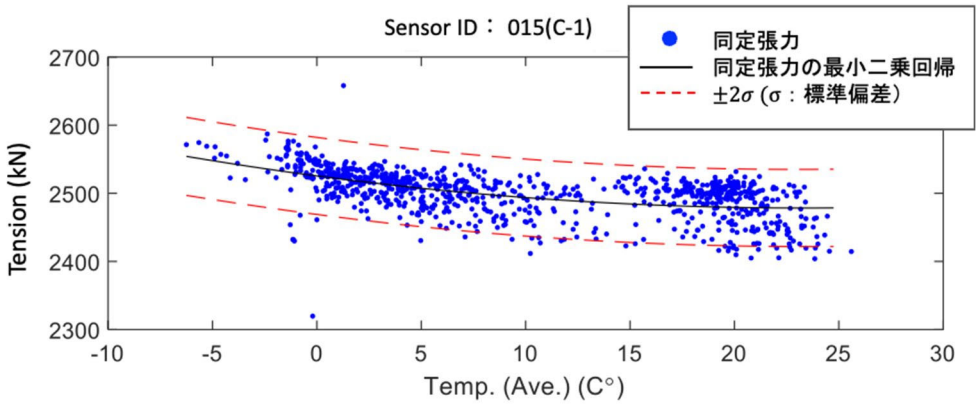
(a)橋梁部の最長ケーブル（長期モニタリングの同定張力の分布は正規分布ではなく右に偏っていることに注意）

(b) 橋梁部の最短ケーブル

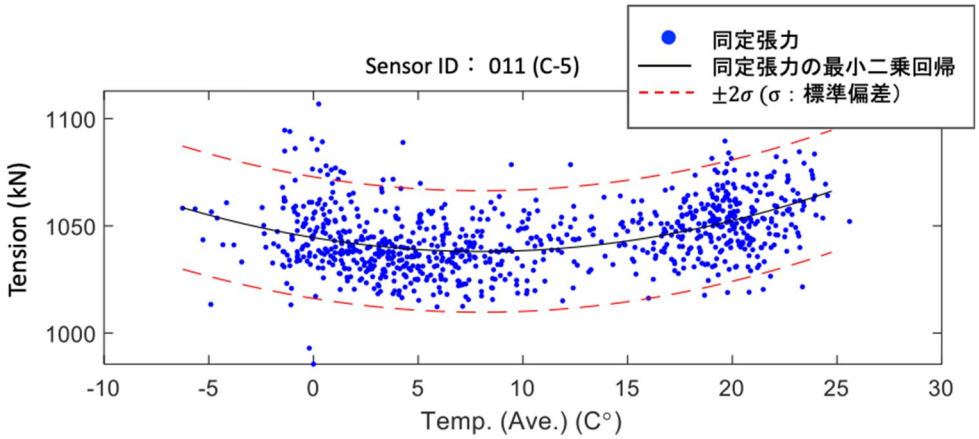
図 4-14 長期と短期常時モニタリングで同定したケーブル張力の確率分布.

張力と温度との関係を**図4-15**に示す．張力と温度との関係は，線形よりは非線形関係に近いことが**図4-15**にからわかる．特に，短いケーブル（**図4-15(b)**）の場合，10℃までの温度の上昇に伴い同定張力は低下するが，10℃を境に温度がさらに上昇すると張力が増加する傾向を示している．そのメカニズムや原因については，検討の余地があるが，複数の斜ケーブルにより支持される斜張橋の特性の可能性も考えられる．

令和3年3月までの同定張力と温度の関係を**図4-16**に示す．**図4-15**よりサンプルが少ないこともあり，張力と温度は線形関係にあるように見える．このように観測期間によっては，モニタリング特徴量と季節変動との回帰モデルが異なる可能性がある．その結果，同定張力の誤差レベルも変わる．このことから，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が高い．

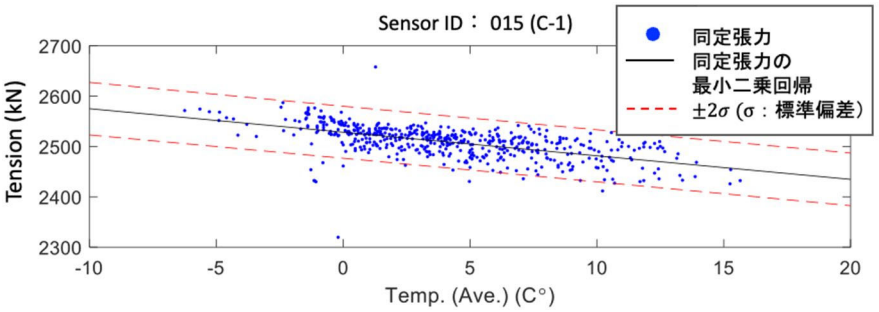


(a)橋梁部の最長ケーブル

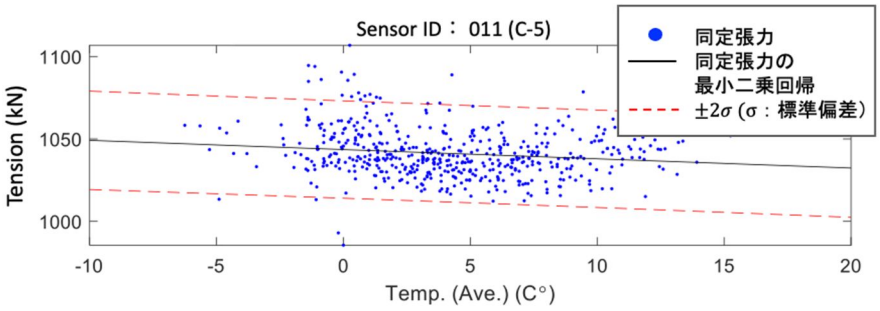


(b) 橋梁部の最短ケーブル

図 4-15 長期常時モニタリング（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.



(a)橋梁部の最長ケーブル



(b) 橋梁部の最短ケーブル

図 4−16 長期常時モニタリング（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.

4.5　ケーブル張力モニタリングによる異常検知の可能性検討

4.5.1 有限要素モデルの妥当性

長期常時振動モニタリングで同定される斜張橋のケーブル張力を用いた損傷検知の可能性を検討する．供用中の対象橋梁への損傷実験はできないため，ケーブルの減肉を模擬した対象橋梁の有限要素解析を行い，解析による張力変化量と同定張力のばらつきを比較し，同定される斜張橋のケーブル張力による損傷検知の可能性を検討する．

検討にあたり，まず，設計図面に基づき有限要素解析モデル（以下 FE モデル）を構築する．その後，FE モデルを用い固有値解析を行う．固有値解析の振動数と振動モード形状を，車両走行実験の加速度応答から同定した対象橋梁の振動特性と比較することで，基本 FE モデルの妥当性を検証する．また，同 FE モデルを用いて，ケーブル損傷時の橋梁応答の変化についても検討を実施する．

図 4-17 に FE モデルを示す．有限要素解析ソフトウェアパッケージは ANSYS R17.0 である．解析に導入した有限要素の種類と物性値を**表 4-6** に示す．FE モデルの妥当性を把握するために，固有値解析による振動数と振動モードと，常時振動でーたから同定した振動特性との比較を行った．**図 4-18** に固有値解析と常時振動データから同定した振動特性をまとめる．固有値解析の曲げ 1 次振動数は，同定振動数より 9%高くなっているが，他の振動モードでは 2～6%の差で振動特性を精度良く再現している．

また，死荷重を考慮した計算張力と，設計図書のケーブル張力および短期モニタリングの常時振動データから同定した張力を**表 4-7** に示す．本 FE モデルによる解析張力と設計図書のケーブル張力が概ね一致していることが分かる．以上のことから，別途の FE モデルアップデートを行わずに，基本 FE モデルをケーブルの減肉を模擬した対象橋梁の有限要素解析に用いる．

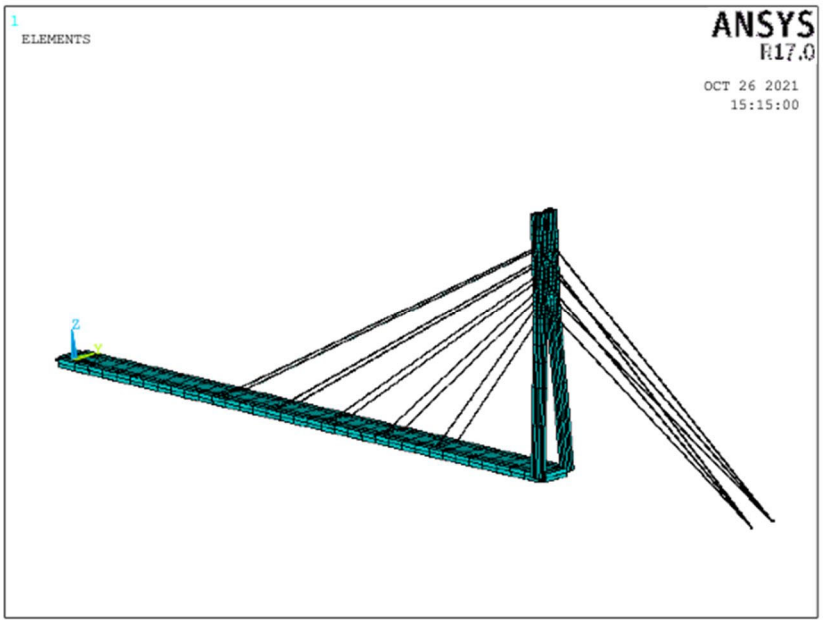
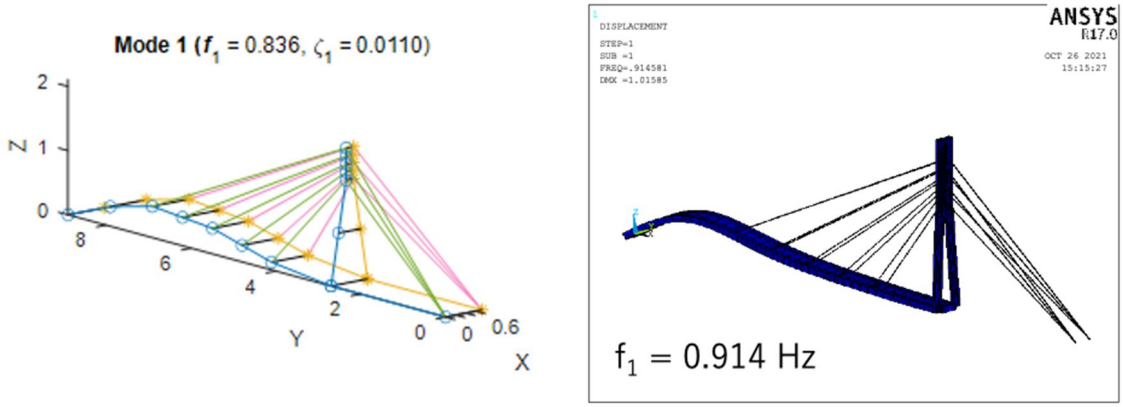


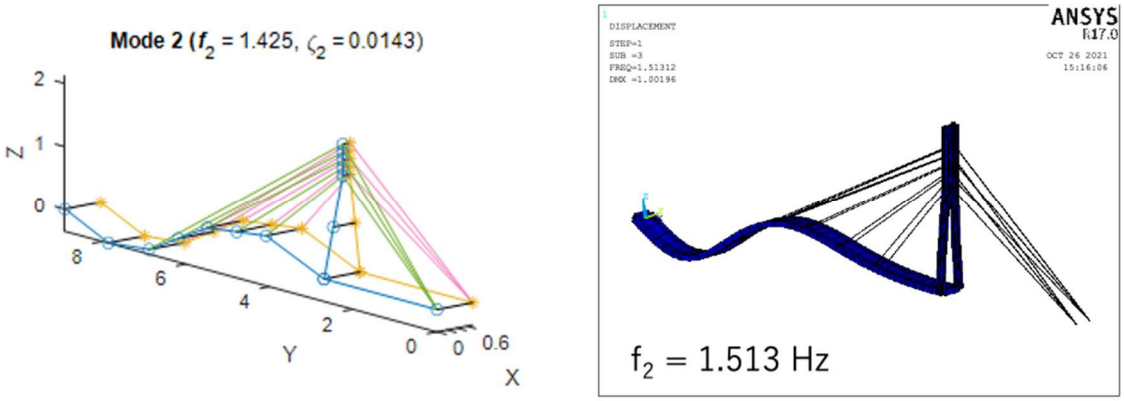
図 4-17 対象斜張橋の有限要素モデル．

表 4−7 有限要素モデル（ANSYS R17.0）と物性値.

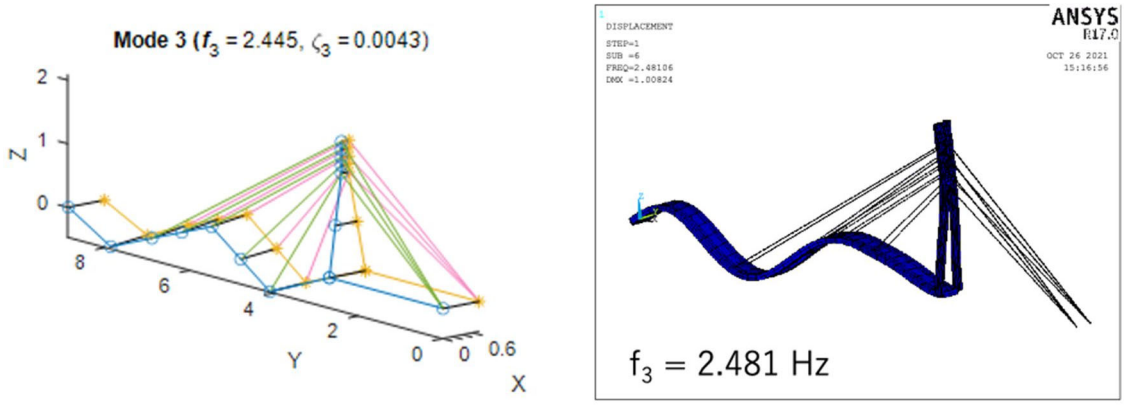
Items	Element type	Elastic modulus (MPa)	Density (kg/m^3)	Linear expansion coef.
Girder	Beam 188	2.06e5	7850	1.1e-5
Deck	Shell 181	3.15e4	2500	
Tower	Beam 188	2.06e5	7850	
Cable	Link 180	2.06e5	3000	



(a)曲げ1次モード



(b)曲げ2次モード



(c) 曲げ3次モード

図 4−18 対象斜張橋の同定振動特性と有限要素解析による振動特性.

表 4−6 有限要素モデル（ANSYS R17.0）と物性値.

Items	Element type	Elastic modulus (MPa)	Density (kg/m^3)	Linear expansion coef.
Girder	Beam 188	2.06e5	7850	1.1e-5
Deck	Shell 181	3.15e4	2500	
Tower	Beam 188	2.06e5	7850	
Cable	Link 180	2.06e5	3000	

表 4-7 ケーブルの同定張力，死荷重を設計張力と有限要素解析による張力

ケーブル ID	番号	短期モニタリングの同定張力 (kN)	有限要素解析 (kN)	設計張力 (kN)
C-1	015	2505	3127	3120
	115	2494	3140	
C-2	014	2460	2762	2890
	114	2475	2776	
C-3	013	1292	1324	1530
	113	1223	1331	
C-4	012	1292	1406	1490
	112	1264	1413	
C-5	011	1056	1200	1360
	111	1082	1209	
C-6	003	1502	1635	1610
	103	1426	1636	
C-7	002	4544	4588	4680
	102	4618	4590	
C-8	001	4374	4256	4400
	101	4422	4257	

4.5.2 ケーブル腐食を想定した損傷解析とケーブル張力の同定ばらつきを考慮した損傷検知の可能性検討

長期常時振動モニタリングによるケーブル損傷の検知可能性を検討するために，同定張力のばらつきを考慮した断面減少による張力の変化の検知可能性を検討する．ケーブル腐食または素線切断を断面減少率として換算し，検討を行う．**図4-19**に，室内実験で得られた断面減少率と切断荷重低下率との関係を示す．**図4-19**から分かるように，素線切断の場合，断面減少率と切断荷重低下率は同程度である．一方で，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．

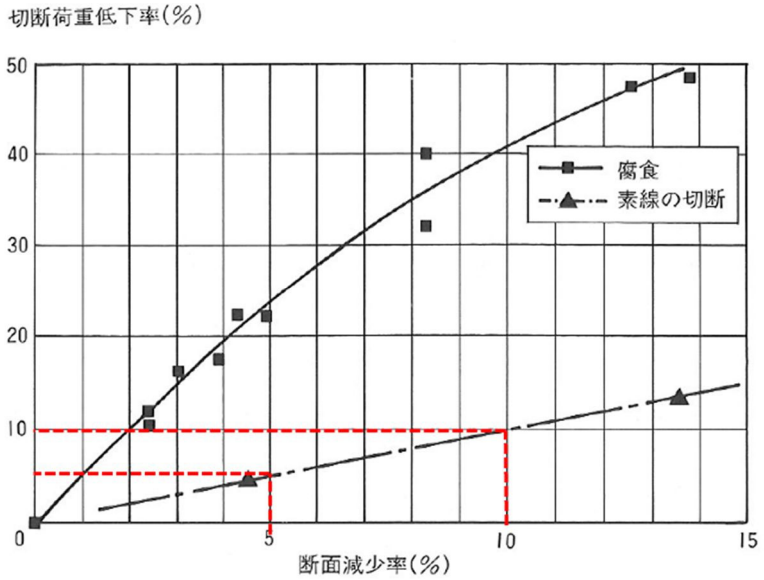


図4-19 断面減少率と切断荷重低下率との関係（野村ら：腐食の生じたストランドロープの残存強度，川田技報，Vol.12, pp.127-130, 1993）

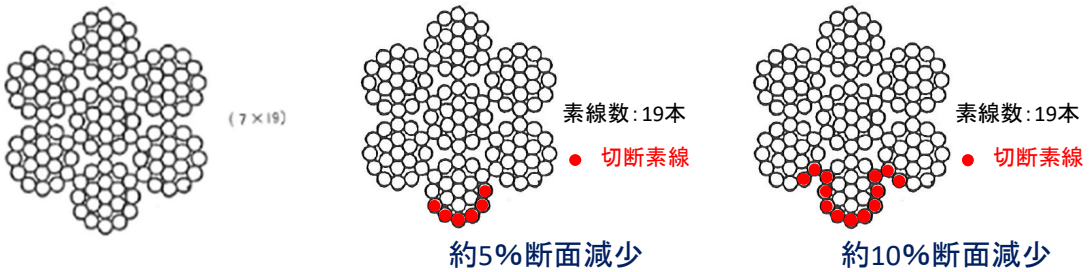


図4-20 断面減少率の計算例に用いたケーブル断面

素線切断による断面減少率の計算例を示す. 図4−20の7本のストランドを持つケーブル断面を考える．各々のストランドは19本の素線で構成されている．素線6本が切断されると場合を考えると，断面減少率は次のように計算される．

$$1-\left(\frac{7\times 19-6}{7\times 19}\right)=0.045=4.5\% \tag{4-1}$$

各ケーブルに対して模擬損傷を与え，固有振動解析および死荷重解析を行い，ケーブルの断面減少によるケーブル張力の変化を検討する. 模擬損傷は，ケーブルの直径に対して，一律に 5%，10%減肉させる．損傷を与えるケーブルは，東側の各ケーブルとする．損傷によるケーブル張力の変化を**表 4-8** と**表 4-9** に示す．**表 4-8** と**表 4-9** の黒字は，実際に長期モニタリングが行われたケーブル(C1,015 と C5,011)の張力とそのばらつきを表す. 参考のために. その他のケーブルの張力の平均値（赤字）は，短期モニタリングの張力を表す．また，その他のケーブルの張力の標準偏差（赤字）は，実際に長期モニタリングで観測された最長と最短ケーブルのばらつきを線形的に補間して求めた.

表 4-8 と**表 4-9** から，断面欠損があるケーブルの張力は減少し，その周りのケーブル張力は増加する傾向が見てとれる．また，長期モニタリングの同定張力の「2*標準偏差/平均」と比べ，損傷による「変化張力/健全張力」が大きくなると，季節変動成分を除去しなくても長期モニタリングの張力変化によるケーブルの異常検知の可能性があることを示す．**表 4-8** と**表 4-9** を見ると，断面減少率が 5%の場合，断面欠損があるケーブルの異常検知は可能であるが，その周辺のケーブルの張力からは異常検知が難しいことが分かる．一方で，橋梁部ケーブルの場合，断面減少率が 10%では，断面欠損があるケーブルだけでなく，その隣接ケーブルの異常検知可能性がうかがえる.

以上のことから，長期モニタリングのケーブル張力の変化に着目した異常検知には，軽微なケーブル損傷の場合（本研究のケーブル断面減少率が 5%程度），季節変動を除去する必要があることが明らかになった．あるいは，全てのケーブルにセンサを設置すれば，断面減少率が 5%でもケーブルの異常検知が可能である. 季節変動を除去しない場合でも，本研究で検討したケーブル断面減少率 10%以上であれば，異常検知の可能性があると考えられる.

橋梁部ケーブルの断面減少率が 10%の場合において，各ケーブルの張力変化と，短期および長期モニタリングの同定張力の標準偏差の±2 倍を図化した結果を**図 4-21** 示す．また，定着部ケーブルの断面減少率が 10%の場合において，各ケーブルの張力変化と，短期および長期モニタリングの同定張力の標準偏差の±2 倍を図化した結果を**図 4-22** 示す.

表 4-8 ケーブルの断面欠損率が 5%の場合の解析による張力変化

ケーブル ID	番号	長期モニタリングの同定張力			FEA (INT)	FEA (DMG1)			FEA (DMG2)		
		平均 (kN)	2*標準偏差 (kN)	2*標準偏差/平均 (%)	健全張力 (kN)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)
C-1	015	2499	67	2.69	3127	3030	-97	-3.10	3155	27	0.88
	115	2494	67	2.69	3140	3174	34	1.10	3150	10	0.33
C-2	014	2460	58.00	2.36	2762	2799	36	1.31	2672	-90	-3.27
	114	2475	58.00	2.34	2776	2789	13	0.48	2796	20	0.74
C-3	013	1292	49	3.79	1324	1331	7	0.55	1346	22	1.68
	113	1223	49	4.01	1331	1328	-4	-0.26	1338	7	0.52
C-4	012	1292	40	3.10	1406	1408	2	0.14	1415	9	0.66
	112	1264	40	3.17	1413	1406	-6	-0.46	1410	-3	-0.19
C-5	011	1045	31	2.99	1200	1202	2	0.16	1203	3	0.24
	111	1082	31	2.87	1209	1204	-5	-0.37	1203	-6	-0.52
C-6	003	1502			1635	1632	-2	-0.15	1634	-1	-0.04
	103	1426			1636	1635	-1	-0.04	1636	1	0.04
C-7	002	4544			4588	4582	-6	-0.12	4587	-1	-0.02
	102	4618			4590	4587	-2	-0.05	4591	1	0.03
C-8	001	4374			4256	4248	-8	-0.19	4255	-1	-0.02
	101	4422			4257	4253	-4	-0.09	4259	1	0.03

ケーブル ID	番号	長期モニタリングの同定張力			FEA (INT)	FEA (DMG3)			FEA (DMG4)		
		平均 (kN)	2*標準偏差 (kN)	2*標準偏差/平均 (%)	健全張力 (kN)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)
C-1	015	2499	67	2.69	3127	3131	4	0.12	3128	1	0.03
	115	2494	67	2.69	3140	3138	-2	-0.06	3137	-3	-0.09
C-2	014	2460	58.00	2.36	2762	2777	15	0.54	2768	5	0.19
	114	2475	58.00	2.34	2776	2780	5	0.17	2774	-2	-0.06
C-3	013	1292	49	3.79	1324	1277	-47	-3.53	1336	12	0.91
	113	1223	49	4.01	1331	1339	8	0.62	1335	4	0.27
C-4	012	1292	40	3.10	1406	1420	14	0.99	1361	-45	-3.19
	112	1264	40	3.17	1413	1417	4	0.29	1423	10	0.69
C-5	011	1045	31	2.99	1200	1205	4	0.37	1217	17	1.39
	111	1082	31	2.87	1209	1206	-3	-0.24	1212	3	0.23
C-6	003	1502			1635	1634	0	-0.01	1634	0	-0.01
	103	1426			1636	1636	0	0.02	1636	0	0.01
C-7	002	4544			4588	4588	0	0.00	4588	0	-0.01
	102	4618			4590	4590	1	0.02	4590	0	0.01
C-8	001	4374			4256	4256	0	0.00	4255	0	0.00
	101	4422			4257	4258	1	0.02	4258	0	0.01

ケーブル ID	番号	長期モニタリングの同定張力			FEA (INT)	FEA (DMG5)		
		平均 (kN)	2*標準偏差 (kN)	2*標準偏差/平均 (%)	健全張力 (kN)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)
C-1	015	2499	67	2.69	3127	3128	1	0.02
	115	2494	67	2.69	3140	3139	-1	-0.04
C-2	014	2460	58.00	2.36	2762	2763	1	0.04
	114	2475	58.00	2.34	2776	2773	-2	-0.09
C-3	013	1292	49	3.79	1324	1327	3	0.20
	113	1223	49	4.01	1331	1329	-2	-0.13
C-4	012	1292	40	3.10	1406	1417	11	0.80
	112	1264	40	3.17	1413	1415	2	0.13
C-5	011	1045	31	2.99	1200	1171	-30	-2.47
	111	1082	31	2.87	1209	1220	11	0.90
C-6	003	1502			1635	1634	0	-0.03
	103	1426			1636	1635	0	-0.01
C-7	002	4544			4588	4587	-1	-0.01
	102	4618			4590	4589	0	-0.01
C-8	001	4374			4256	4255	0	-0.01
	101	4422			4257	4257	0	-0.01

INT: 健全,

DMG1: C1 (015)ケーブルの断面欠損率が 5%, DMG2: C2 (014)ケーブルの断面欠損率が 5%,

DMG3: : C3 (013)ケーブルの断面欠損率が 5%, DMG4: C4 (012)ケーブルの断面欠損率が 5%,

DMG5: C5 (011)ケーブルの断面欠損率が 5%

表 4-9 ケーブルの断面欠損率が 10%の場合の解析による張力変化

ケーブル ID	番号	長期モニタリングの同定張力			FEA (INT)	FEA (DMG1)			FEA (DMG2)		
		平均 (kN)	2*標準偏差 (kN)	2*標準偏差/平均 (%)	健全張力 (kN)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)
C-1	015	2499	67	2.69	3127	2929	-198	-6.33	3183	56	1.79
	115	2494	67	2.69	3140	3210	70	2.24	3161	21	0.66
C-2	014	2460	58.00	2.36	2762	2836	74	2.68	2579	-184	-6.65
	114	2475	58.00	2.34	2776	2803	27	0.99	2817	42	1.50
C-3	013	1292	49	3.79	1324	1339	15	1.13	1369	45	3.43
	113	1223	49	4.01	1331	1324	-7	-0.54	1345	14	1.06
C-4	012	1292	40	3.10	1406	1410	4	0.28	1425	19	1.35
	112	1264	40	3.17	1413	1400	-13	-0.92	1407	-5	-0.38
C-5	011	1045	31	2.99	1200	1204	4	0.33	1206	6	0.49
	111	1082	31	2.87	1209	1200	-9	-0.74	1196	-13	-1.08
C-6	003	1502			1635	1630	-5	-0.31	1633	-1	-0.08
	103	1426			1636	1634	-1	-0.07	1637	1	0.08
C-7	002	4544			4588	4576	-12	-0.25	4586	-2	-0.05
	102	4618			4590	4585	-5	-0.10	4592	3	0.06
C-8	001	4374			4256	4239	-16	-0.38	4254	-2	-0.04
	101	4422			4257	4250	-8	-0.18	4260	3	0.07

ケーブル ID	番号	長期モニタリングの同定張力			FEA (INT)	FEA (DMG3)			FEA (DMG4)		
		平均 (kN)	2*標準偏差 (kN)	2*標準偏差/平均 (%)	健全張力 (kN)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)
C-1	015	2499	67	2.69	3127	3135	8	0.24	3129	2	0.06
	115	2494	67	2.69	3140	3136	-4	-0.11	3134	-6	-0.18
C-2	014	2460	58.00	2.36	2762	2792	30	1.09	2773	11	0.40
	114	2475	58.00	2.34	2776	2785	9	0.34	2773	-3	-0.11
C-3	013	1292	49	3.79	1324	1228	-96	-7.25	1349	25	1.86
	113	1223	49	4.01	1331	1348	17	1.26	1338	7	0.55
C-4	012	1292	40	3.10	1406	1434	28	2.01	1314	-92	-6.51
	112	1264	40	3.17	1413	1421	8	0.60	1433	20	1.41
C-5	011	1045	31	2.99	1200	1210	9	0.75	1234	34	2.83
	111	1082	31	2.87	1209	1203	-6	-0.49	1214	6	0.47
C-6	003	1502			1635	1634	0	-0.02	1634	0	-0.03
	103	1426			1636	1636	1	0.04	1636	0	0.03
C-7	002	4544			4588	4587	0	-0.01	4587	-1	-0.01
	102	4618			4590	4591	1	0.03	4590	1	0.02
C-8	001	4374			4256	4256	0	0.00	4255	0	0.00
	101	4422			4257	4259	2	0.04	4258	1	0.02

ケーブル ID	番号	長期モニタリングの同定張力			FEA (INT)	FEA (DMG4)		
		平均 (kN)	2*標準偏差 (kN)	2*標準偏差/平均 (%)	健全張力 (kN)	損傷張力 (kN)	変化張力 (kN)	変化張力/健全張力 (%)
C-1	015	2499	67	2.69	3127	3129	2	0.06
	115	2494	67	2.69	3140	3134	-6	-0.18
C-2	014	2460	58.00	2.36	2762	2773	11	0.40
	114	2475	58.00	2.34	2776	2773	-3	-0.11
C-3	013	1292	49	3.79	1324	1349	25	1.86
	113	1223	49	4.01	1331	1338	7	0.55
C-4	012	1292	40	3.10	1406	1314	-92	-6.51
	112	1264	40	3.17	1413	1433	20	1.41
C-5	011	1045	31	2.99	1200	1234	34	2.83
	111	1082	31	2.87	1209	1214	6	0.47
C-6	003	1502			1635	1634	0	-0.03
	103	1426			1636	1636	0	0.03
C-7	002	4544			4588	4587	-1	-0.01
	102	4618			4590	4590	1	0.02
C-8	001	4374			4256	4255	0	0.00
	101	4422			4257	4258	1	0.02

INT: 健全,

DMG1: C1 (015)ケーブルの断面欠損率が 10%, DMG2: C2 (014)ケーブルの断面欠損率が 10%,

DMG3: : C3 (013)ケーブルの断面欠損率が 10%, DMG4: C4 (012)ケーブルの断面欠損率が 10%,

DMG5: C5 (011)ケーブルの断面欠損率が 10%

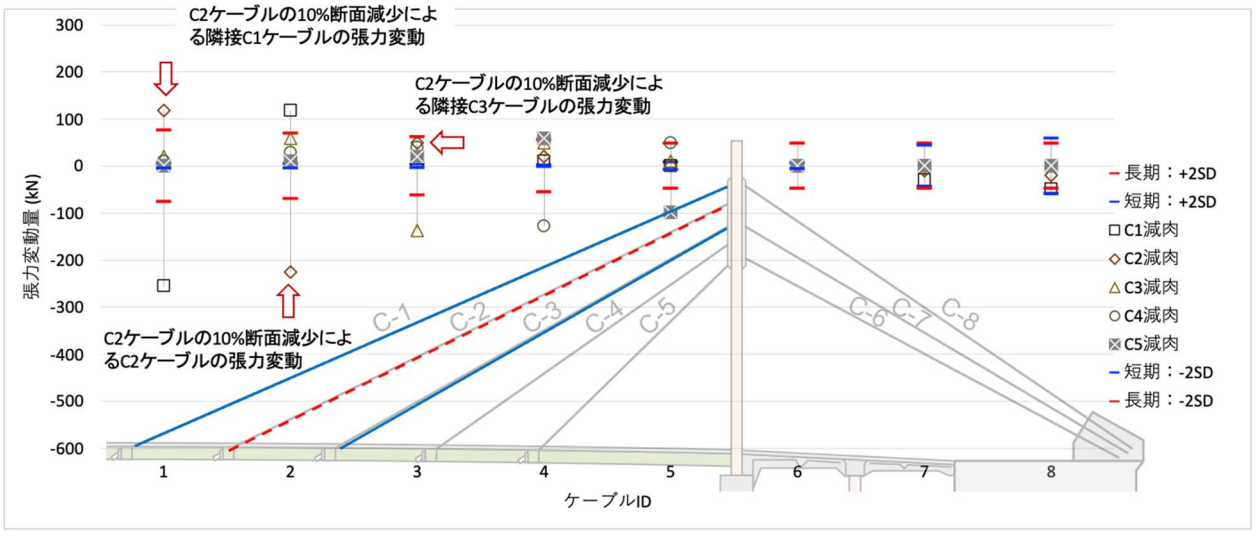


図 4-21 橋梁部ケーブルの断面欠損によるケーブル張力の変化

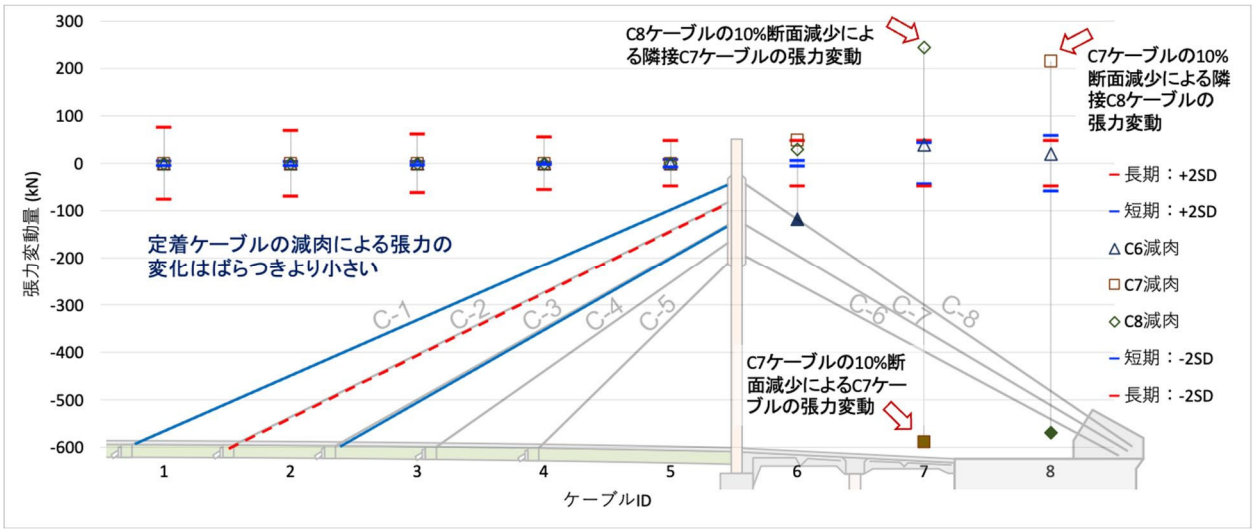


図 4-22 定着部ケーブルの断面欠損によるケーブル張力の変化

4.6 まとめ

斜張橋を対象とした短・長期振動モニタリングデータを用いた同定張力の変動と，有限要素解析による擬似損傷解析による威助検知の可能性について検討を行った結果を以下にまとめる．

- 2 次モード以上のケーブル振動数に着目すると常時振動を用いたケーブル振動数および張力推定が可能
- 長期常時モニタリングによる同定張力のばらつきは，短期モニタリングに比べ，短いケーブルで5倍，長いケーブルで15倍，大きかった．
- 長いケーブルの方が，短いケーブルよる季節変動によるばらつきが大きかった
- 短期モニタリングでは，短いケーブルの方が，長いケーブルよりばらつきが大きかった．
- 張力と温度との関係は，線形よりは非線形関係に近い．観測期間によっては，モニタリング特徴量と季節変動との回帰モデルが異なる可能性があり，それによる誤差レベルも変わる．このことから，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が高い．
- 橋梁部ケーブルの断面減少率が10%では，季節変動を除去しなくても断面欠損があるケーブルだけでなく，その隣接ケーブルの異常検知可能性がうかがえる．
- 長期モニタリングのケーブル張力の変化に着目した異常検知精度向上には，季節変動を除去する必要があることが明らかになった．あるいは，全てのケーブルにセンサを設置すれば，断面減少率が5%でもケーブルの異常検知が可能である．

第５章　本研究プロジェクトの検討内容のまとめ

5.1　概要

本章では，自治体管理のケーブル構造を有する特殊橋の維持管理を支援できるモニタリング手法について検討・提案した内容をまとめる．維持管理費用や技術者に制約を抱えている自治体が保有している特殊橋の維持管理を支援できるモニタリング手法を模索した．その結果，予算や技術者確保の制約を勘案し，自治体管理の特殊橋のモニタリングは，人による点検を補助できるセンサ情報の活用が現実的であるとの結論に至った．もちろん，センサや情報関連技術の飛躍的な進歩が予想されることから，技術進歩にともないモニタリングの考え方も変わっていくが，本研究の提案は，ここ 3 年間の技術動向を踏まえて行った検討に基づいている．

本研究で整備された構造同定手法と季節変動調整法は，特殊橋のモニタリングに適したモニタリング法の検討に利用した．特に，構造同定法として，周波数領域の実働モード同定法であるベイズ FFT に基づくベイズ実働モード解析法（Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA）（付録 A の A.2.2 ベイズ実働モード解析法を参照）を整備し，本研究で検討を行った斜張橋および吊り橋の構造同定に適用した．ベイズ実働モード解析法は，高い精度での推定が可能であり，着目する振動数帯域の卓越振動特性の事後確率分布を推定することから意思決定やリスク評価において有用な同定結果を提供することが期待できる．

長期モニタリングの観点からは，高精度に構造同定が行われても，同定振動特性は構造物の状態の変化がない場合でも季節変動がもたらす変化が観測されることから，季節変動の影響を除去し構造物の異常について検討を行う必要がある．一方で，実橋でのモニタリングデータを用いた季節変動の推定と調整法に関する検討は，供用期間中の健全性のトレンドを分析する長期モニタリングには欠かせない項目であるが，関連研究は少ないのが現状である．それで，長期モニタリングにおける季節変動などの外部因子（Environmental and Operational Variables: EOV）の影響を考慮するために手法の整備を行った（付録 B を参照）．

整備した解析手法による長期モニタリングの概念を**図 5-1** に示す．

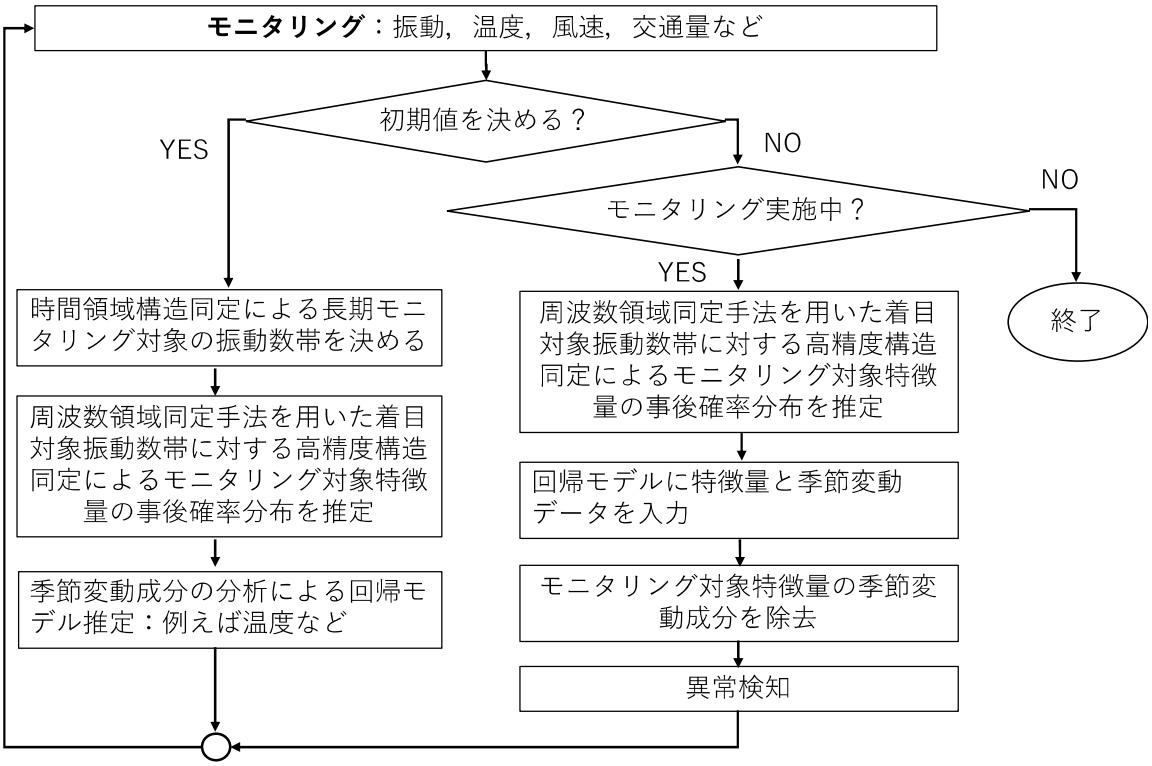


図 5-1 整備した解析手法による長期モニタリングの概念

5.2　ケーブル構造をもつ特殊橋の簡易振動モニタリング

橋梁ヘルスモニタリングでは，設置されたセンサーの特性上，構造物の局所的な変化に特化した情報が得られるローカルモニタリングと，構造物全体の挙動に特化された情報が得られるグローバルモニタリングに分類できる．また，評価や意思決定に使われるセンサー情報の長さにより，短期モニタリングと長期モニタリングに区別できる．短期モニタリングでは，短期間で集中的に計測が行われ，外力の計測も伴うこともある．また，場合によっては，交通規制を行うことも考えられる．一方で，橋梁の健全度は経年劣化に伴い徐々に変化することから，長期モニタリングでは，特徴量の経年変化に着目することが多い．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でもある．

ケーブルや主塔の振動とケーブル振動から同定される張力および主塔の傾斜角を特徴量とし，橋梁の長期モニタリングの可能性について検討を行い得られた内容をまとめる．

5.2.1 小規模吊り橋のモニタリング案

本研究で提案する，自治体管理の小規模吊り橋の簡易モニタリングを以下にまとめる．

1）定着部の主ケーブルが複数に分かれていない吊り橋

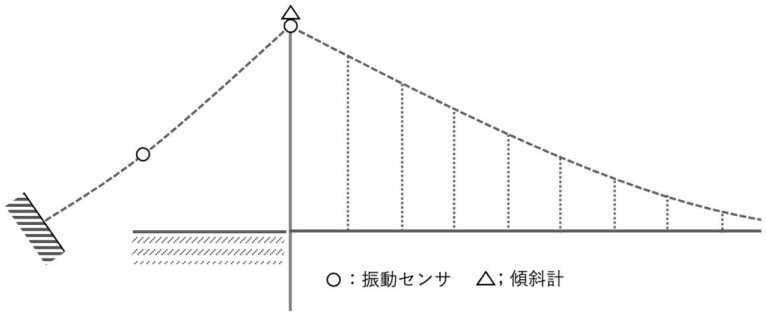


図 5-2 小規模吊り橋の簡易モニタリング：定着部の主ケーブルが複数に分かれていない場合

特徴	• 橋梁部主ケーブルの振動は，吊り材によって拘束されることから，吊り材や橋梁振動の影響を受ける． • SN 比（信号ノイズ比）も低い傾向を示す． • 以上の状況から，振動計測による張力の同定は容易ではない • 自治体管理の小規模吊り橋の多くは，定着部に橋梁区間を持ったないことが多く，定着部の主ケーブルには吊り材が設置されていない． • 橋梁部の主ケーブルに比べ，定着部の主ケーブルの方が，振動モニタリングによる張力同定の可能性は高い．
モニタリング案	• 以上の状況を勘案し，定着部ケーブルに設置した振動センサの振動から同定した張力の変化と，主塔に設置した最小限の振動センサによる主塔の傾斜や動きの軌跡を用いて，橋梁の変状の関するモニタリングを行う．
モニタリングの注意点	• 定着部ケーブルで計測される振動の SN 比は橋梁部ケーブルより低く，同定結果のばらつきが大きくなることには注意が必要である． • また，長期モニタリングおける主塔およびケーブル振動についても，季節変動のトレンド成分を考慮する必要がある． • ケーブル振動のばらつきの定量的評価については，本研究会で適用しているベーイズ同定から得られる，振動数および張力の平均および分散から評価できる．（ベーイズ同定法：付録 A の A.2.2 ベイズ実働モード解析法と付録 C の C.2.2 ベーイズケーブル張力同定を参照）

2）定着部の主ケーブルが複数に分かれている吊り橋

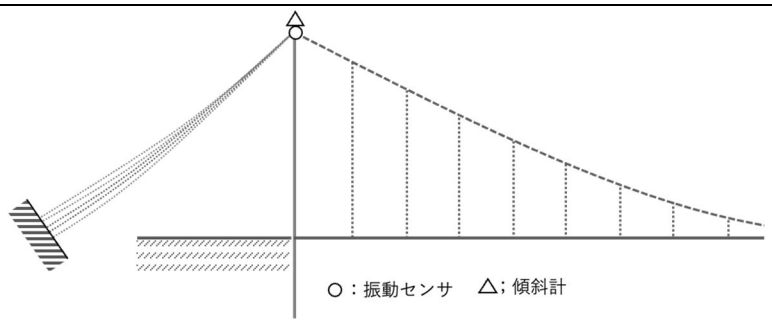
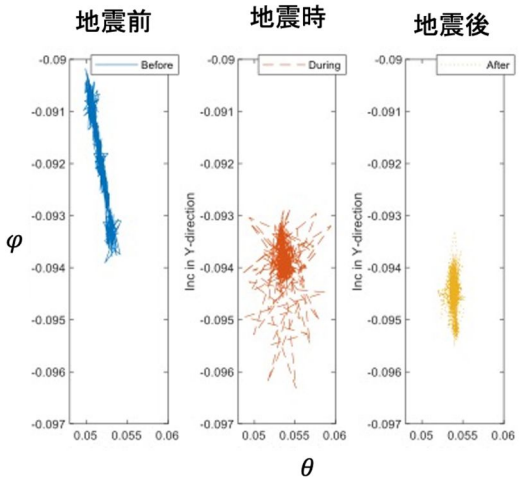


図 5-3 小規模吊り橋の簡易モニタリング：定着部の主ケーブルが複数に分かれている場合

特徴	• 定着部の主ケーブルが複数に分かれている場合，定着部のケーブルの振動計測には複数のセンサを要する． • あるいはモニタリング対象のケーブルを指定する必要がある
モニタリング案	• 主塔に設置した最小限の振動センサによる主塔の傾斜や動きの軌跡と，定着部ケーブルの目視点検を併用する． • 傾斜角の利用可能性を，**図 5-4**（**図 3-44** を再掲）に示す． • **図 5-4**：長期モニタリング中の 2021 年 12 月 3 日午前 9 時 28 分頃，和歌山県で最大震度 5 弱を観測する地震が発生した際の対象橋梁で計測した傾斜角と回転角の軌跡（横軸の傾斜角（θ）に着目すると，地震時は変動幅が大きいが，地震後の変動幅は狭く地震前の変動幅と類似．地震による構造物への影響はないことが間接的に把握）  **図 5-4 吊り橋主塔の地震前後および地震時の傾斜角の軌道**
モニタリングの注意点	• 主塔の動きだけのセンサ情報によるモニタリング案であり，第 2 章でまとめた着目すべき部材に注意しながらモニタリングデータを活用する必要がある． • 長期モニタリングにおける主塔の挙動についても，季節変動のトレンド成分を考慮する必要がある．

5.2.2 小規模斜張橋のモニタリング案

本研究で提案する，小規模吊り橋の簡易モニタリングを以下にまとめる．

１） ２面吊り方式斜張橋

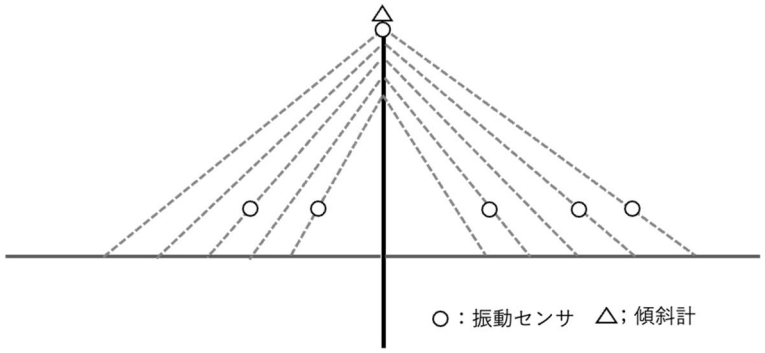


図 5-5 小規模斜張橋の簡易モニタリング：２面吊り方式斜張橋

特徴	• 主ケーブルの振動は桁の振動により励起され，ケーブルの常時振動計測によるケーブル張力同定は有効である． • 供用中の振動モニタリングによるケーブル張力同定の可能性が高い．
モニタリング案	• 全てのケーブルにセンサを設置するのが望ましいが，ケーブル長が長いケーブルを優先に間引き計測も可能． • 断面欠損による長いケーブルの張力低下は，隣接ケーブルの張力増加につながり，間引き計測による張力変化の検知可能性はある． • 可能であれば，主塔に設置した最小限の振動センサによる主塔の傾斜や動きの軌跡を用いて，橋梁の変状の関するモニタリングを行うと良い．
モニタリングの注意点	• ケーブルの常時振動の 1 次振動数はケーブル固有のものより，桁の振動成分である可能性が高いため，2 次以上のケーブル振動数に着目． • モニタリングを実施する前に，短期常時振動計測を行い振動特性を把握した上でモニタリング計画を立てる．事前計測が難しい場合は，*n* 次のケーブル振動数は 1 次ケーブル振動数の *n* 倍になることを活用し，複数モードの振動数からケーブル以外の振動数を選別する． • 同定結果のばらつきが大きくなることには注意が必要． • 長期モニタリングでは季節変動のトレンド成分を考慮する必要． • ばらつきの定量的評価：本研究会で適用しているベーイズ同定から得られる，振動数および張力の平均および分散から評価可能（ベーイズ同定法：付録 A の A.2.2 ベイズ実働モード解析法と付録 C の C.2.2 ベーイズケーブル張力同定を参照）．

2）片持ち式斜張橋

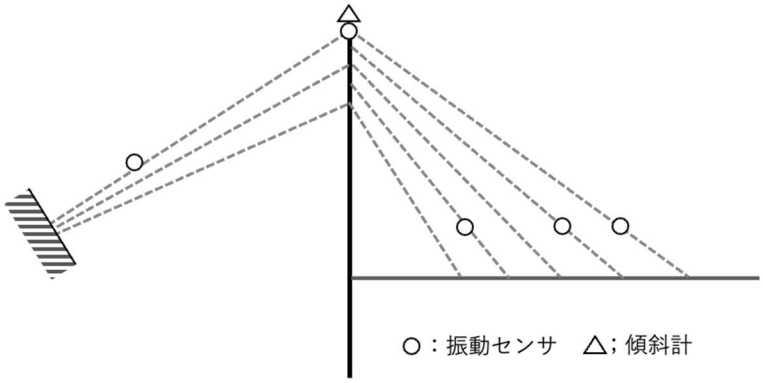


図 5-6 小規模斜張橋の簡易モニタリング：片持ち式斜張橋

特徴	• 橋梁部の主ケーブルの振動は，桁の振動により励起され，ケーブルの常時振動計測によるケーブル張力同定は有効である． • 供用中の振動モニタリングによるケーブル張力同定の可能性が高い．
モニタリング案	• 2 面吊り方式斜張橋と同様に，全てのケーブルにセンサを設置するのが望ましいが，ケーブル長が長いケーブルを優先に間引き計測も可能 • 断面欠損による長いケーブルの張力低下は，隣接ケーブルの張力増加につながり，間引き計測による張力変化の検知可能性はある． • 可能であれば，主塔に設置した最小限の振動センサによる主塔の傾斜や動きの軌跡を用いて，橋梁の変状の関するモニタリングを行う．
モニタリングの注意点	• ケーブルの常時振動の 1 次振動数はケーブル固有のものより，桁の振動成分である可能性が高いため，2 次以上のケーブル振動数に着目． • モニタリングを実施する前に，短期常時振動計測を行い振動特性を把握した上でモニタリング計画を立てる．事前計測が難しい場合は，n 次のケーブル振動数は 1 次ケーブル振動数の n 倍になることを活用し，複数モードの振動数からケーブル以外の振動数を選別する． • 定着部に橋梁区間を持ったないことから，主ケーブルの桁振動による励起は期待できない．そのため，定着部ケーブルで計測される振動の SN 比は橋梁部ケーブルより低く，同定結果のばらつきが大きくなることには注意が必要である． • 同定結果のばらつきおよび長期モニタリングでは季節変動のトレンド成分を考慮する必要がある． • ばらつきの定量的評価：本研究会で適用しているベーイズ同定から得られる，振動数および張力の平均および分散から評価可能（ベーイズ同定法：付録 A の A.2.2 ベイズ実働モード解析法と付録 C の C.2.2 ベーイズケーブル張力同定を参照）．

5.3　提案手法のまとめ

ケーブル構造を持つ特殊橋のケーブル振動と張力を同定するために，本研究で提案した手法と，長期モニタリングおける季節変動成分の除去あるいは低減につながる手法について簡単にまとめる．

5.3.1 ベイズケーブル張力同定手法

常時振動計測データを用いたケーブル振動数同定や張力同定は，適用理論の限界やノイズなどによって影響される．このような状況を踏まえると，決定論的な同定よりは確率的なアプローチが望ましい．本研究では，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し，ケーブル振動数の事後確率分布を用いて，ケーブル振動数と張力との関係式の係数および変数をベイズ線形回帰におきかえて，張力の確率分布を同定する方法を提案している（付録 C の C.2.2 参照）．ケーブ振動計測による張力同定の概念を**図 5-7** に再掲する．

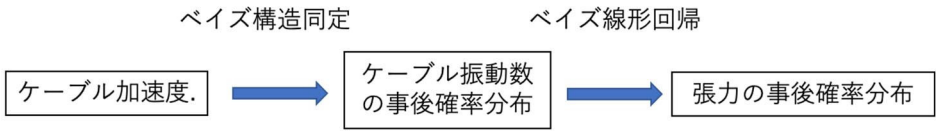


図 5-7 ベイズケーブル張力同定の流れ

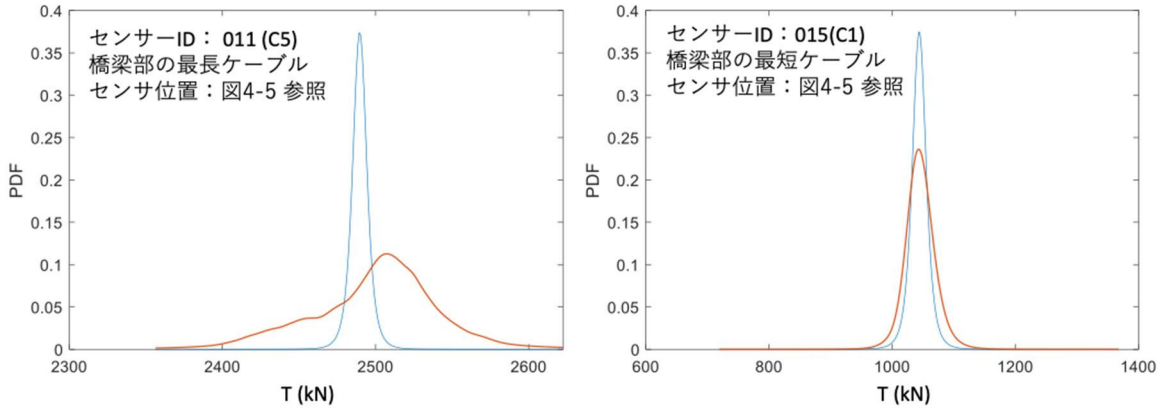


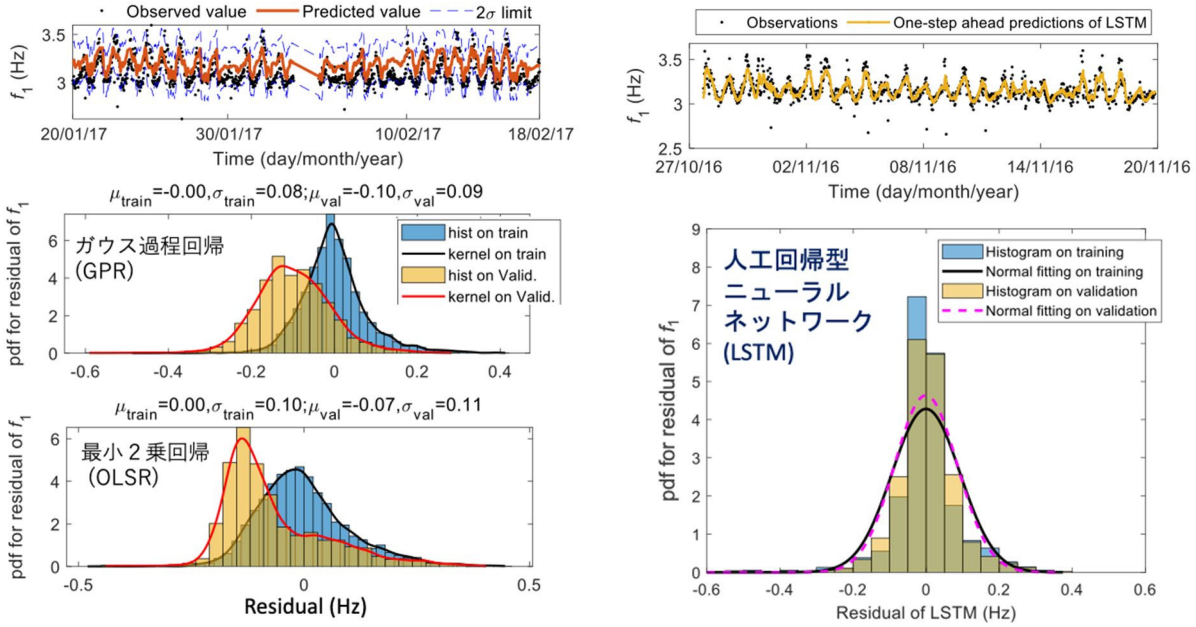
図 5-8 短・長期モニタリングの同定ケーブル張力の事後確率分布（青線：短期計測，赤線：長期計測）

5.3.2 長期モニタリングにおける季節変動成分の低減手法

長期モニタリングの常時振動計測データを用いて同定したケーブル振動数や張力は，気温の変化や通過交通パターンなどの季節や供用中の諸要因によって変動することが観測からわかってきた．例えば，短期モニタリングで同定したケーブル張力の事後確率分布と，長期モニタリングで同定したケーブル張力の事後確率分布の一例を**図 5-8** に示す．青の波線は短期モニタリングで同定した張力の事後確率分布を，赤の実線は長期モニタリングで同定した張力の事後確率分布を表す．最長ケーブルの場合，長期モニタリングで同定した張力のばらつきが，短期モニタリングのばらつきに比べ大きいことがわかる．

損傷による張力等の変化を感度良く判別するためには，供用あるいは季節変動要因を低減する必要がある．本研究では，EOV 駆動法と非 EOV 駆動法について検討を行い，それぞれの長所・短所について検討を行った．特殊橋の長期モニタリングにおける季節変動成分の考慮については，国内外の研究動向をみても検討が始まったばかりであるが，本研究を通して体系化向けての知見をまとめることができた．

EOV 駆動法と非 EOV 駆動法の適用例を**図 5-9** に示す．EOV 駆動法の適用には，計測温度のみを既知情報としており，その他の季節変動要因による成分が考慮されていないため，予測誤差が生じている．一方で，非 EOV 駆動法の適用例をみると，予測誤差が極めて小さいことがあわかる．非 EOV 駆動法の注意点としても述べた通り，基本的にブラックボックスモデルによる方法であり，その除去プロセスを確認できることが極めて難しい．このような短所を克服するために，特異スペクトル解析（Singular Spectrum Analysis：SSA）の提案を行った．その一例を，**図 5-10** に示す．



(a) EOV 駆動法による季節変動成分の除去　　(b) 非 EOV 駆動法による季節変動成分の除去

図 5-9　EOV 駆動法と非 EOV 駆動法による季節変動成分の除去後の予測誤差分布

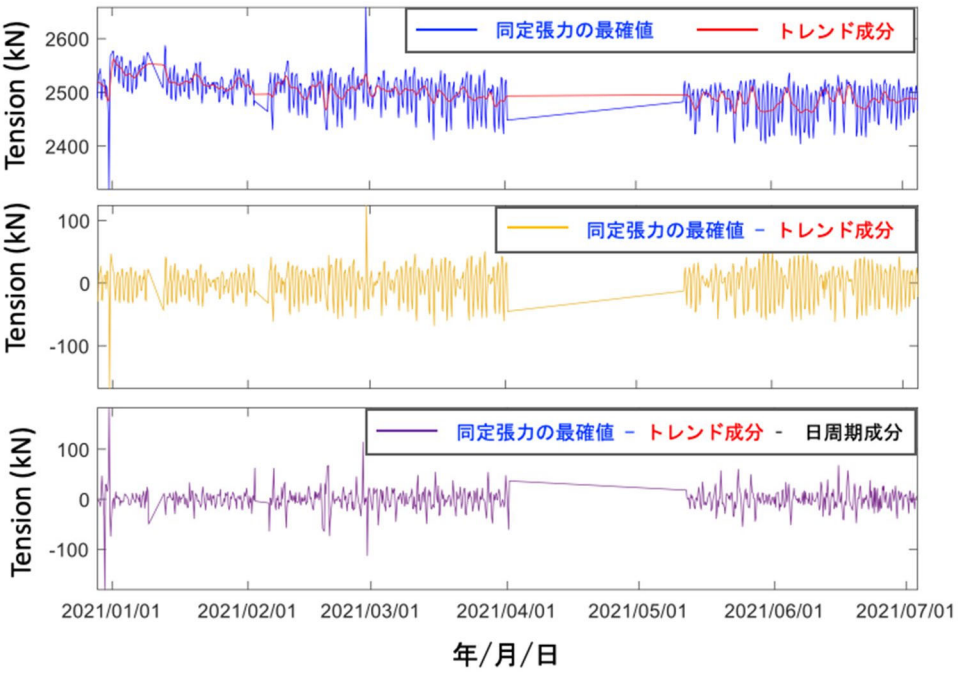


図 5-10 非 EOV 駆動法の特異スペクトル解析による季節変動成分の分離（上段：図 4-13(a)のケーブル張力の最確値（元データ）と SSA より分離した長期トレンド成分，中段：元データに長期トレンド成分を除去した張力の時系列，下段：元データに長期トレンド成分を除去した張力の時系列から日周期成分を除去した張力の時系列）

1）EOV 駆動法

特徴	• EOV 駆動法は，季節変動要因を既知の情報とし，特殊橋のモニタリング情報（観測情報）に含まれる季節変動成分を低減する方法であり，直感的に分かりやすい点には，使いやすさがある.
手法	• 最小 2 乗回帰モデル（Ordinary Least Squares Regression: OLSR) • スパースモデル（Least absolute shrinkage and selection operator : LASSO) • ベイズ線形回帰（Bayesian linear regression: BLR) • ガウス過程回帰（Gaussian process regression: GPR）など
注意点	• 長期 SHM においてすべての EOV を監視することは非常に困難. • 長期 SHM による特徴量の変動要因を全て特定しない限り，EOV 駆動法による季節変動成分の除去には限界がある. • 既知情報として考慮されていない要因による変動は，除去できないことから，EOV 駆動法の適用においては，このような点を理解して上で適用する必要がある.

2）非 EOV 駆動法

特徴	• 既知情報を必要とする EOV 駆動法の問題点を回避するために，部分的に測定された EOV を利用せずに，教師なしの方法として扱うことができる.
手法	• Seasonal ARIMA (SARIMA)モデル • Long Short Term Memory (LSTM)ネットワーク • 特異スペクトル解析（Singular Spectrum Analysis : SSA）など
注意点	• 非 EOV 駆動法は，基本的にブラックボックスモデルによる方法であり，適用前にその特性を十分把握してから利用するのが望ましい.

5.4 今後の取り組み

本研究では,斜張橋と吊り橋を対象に,長期計測による変化を捉え橋梁点検を支援する目的で,振動センサの情報に着目した簡易的な方法を提案している.ひずみ計測によるケーブル張力の変化をモニタリングする方法を否定するものではないが，WiFi 機能付きの振動センサの運用に比べ，その運用費用が高いことから，振動センサの情報に着目した簡易的な方法の提案に至っている.

現在の WiFi 機能付きの振動センサは，バッテリ内蔵のセンサノードにセンシングとデータ送信機能を揃えており，相対的に設置しやすい．データはクラウド上で一括処理できるため，集中管理ができる仕組みになっており，縦割の情報共有から横割の情報共有に展開できる．今後は，センサを活かすモニタリングによるインフラ点検支援の効率はさらに向上すると考える．さらに,クラウド上に集約される簡易モニタリングのセンサ情報は,管理対象の特徴量さえ決まれば,近年目覚ましい開発を遂げている統計的パターン処理や人工知能の技術を活かすことで,高度な情報として維持管理に活用できる．近い将来にインフラ関連部門にも到来する DX（デジタル・トランスフォーム）に対応するためにも，センサ情報の活用，クラウド上での集中管理，新技術を駆使した集積データの再活用につながることが期待される.

本研究を通して,少ないセンサを用いた簡易的な振動計測によるケーブル構造を持つと特殊橋の異常検知について検討を行った．特に，センサ情報の長期的な変化に着目し，季節変動の低減法についても最新の情報を取り込んで検討を行った.センサ情報を用いる構造ヘルスモニタリングに成功を左右する因子として,異常検知に感度の良い特徴量の開発と不確定性の低減が取り上げられる．本研究では，ケーブルの張力と主塔挙動の経年変化を特徴量として検討を行った．不確定性の取り扱いについては，ベイズ理論を基盤とする手法を提案している．今後の取り組みを以下にまとめる.

1）実橋梁への適用事例を増やし，提案手法の信頼性を検証.

2）長期運用によるモニタリング結果と目視点検との相関について検討.

3) 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（**図 5-11** に例を示す）.

4）長期モニタリングで集積されるデータや特徴量のデータベースを用いた機械学習による統計的パターン認識や人工知能技術を駆使した異常検知の枠組み構築.

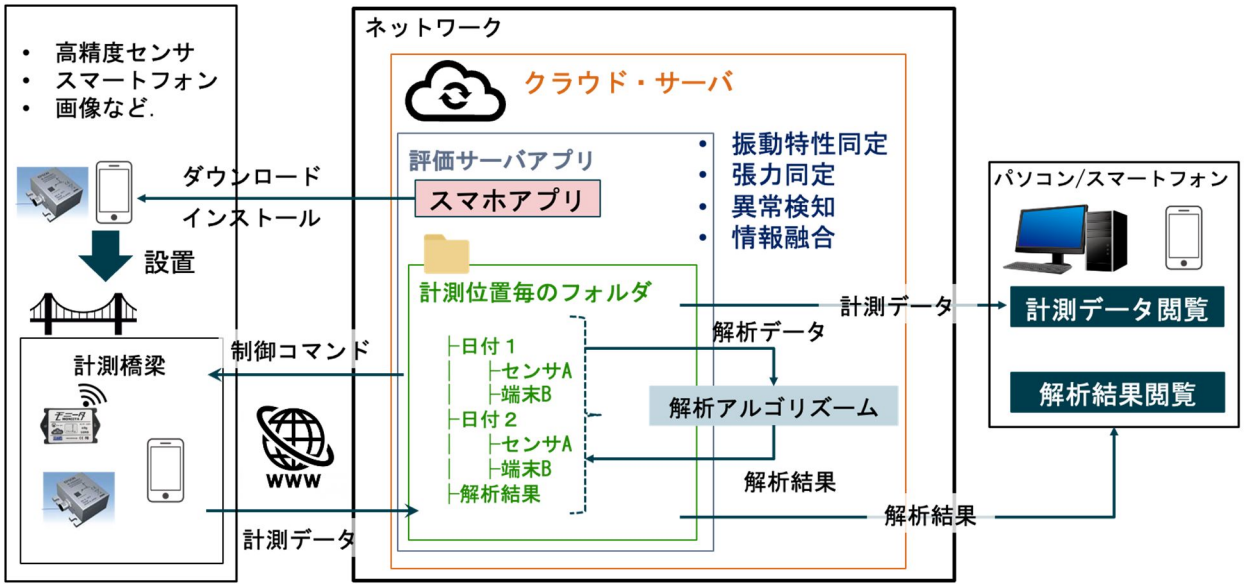


図　5-10 スペククラウド上に運用される長期モニタリングシステムの例

第 6 章　研究会議事録

新都市社会技術融合創造研究会
「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
第 1 回会議議事録

日時：令和 3 年 6 月 30 日（水）10：00～11：30
場所：京都大学桂キャンパス　C1 棟会議室（C1-152）
出席者：八木、金、五井、大坪、松本、丸山、玉越（Web）、奈良（Web）、富永（Web）、松井（Web）、林（Web）、古川（Web）、榊（Web）、矢島（Web）、織田（Web）、小野（記録）（敬称略、順不同）
配布資料：1-0　議事次第
1-1　研究成果概要
1-2　メンバーリスト
1-3　今年度の研究内容
1-4　本年度実施の吊り橋モニタリングに関する資料
1-5　WG と役割分担（案）

１．本年度のプロジェクト構成員の紹介（資料 1-2）
（小野）
本研究会のプロジェクトチームメンバーは、メンバーリストのとおりである。
*各委員からの自己紹介

2. 昨年度研究内容の報告（資料 1-1）
（金教授）
昨年度研究成果の概要に示すように、4 つの項目に対する検討を実施し、その結果を取りまとめた。以下のとおりである。
■橋梁定期点検の限界を補足できる条件の検討
吊り橋の損傷部位を把握、特にケーブル関係の腐食が顕著となっている。そのため、点検ではケーブル類、定着部の入念な調査が必要である。また、点検に加え、モニタリングによる特徴量の変化に着目した「点検とモニタリングの融合」も今後有効な維持管理手段となり得る。
■長期計測における季節変動成分の除去法の構築
昨年度は、深層学習（ディープランニング）による手法を用いた検討を実施した。その結果、初年度に実施していた季節変動影響の除去法に対し、深層学習法を用いることで予測誤差平均がほぼゼロとなることが確認できた。
■自治体管理のケーブル構造の特殊橋の長期モニタリング
姫路河川国道事務所管理の国道 29 号カラウコ大橋を対象に、昨年度、短期モニタリング及び長期モニタリングを実施した。
短期モニタリングでは、衝撃加振による推定ケーブル振動数と常時振動による推定ケーブル振動数の比較を行った。さらに、常時振動によるケーブル張力同定も可能であることを確認した。
なお、長期モニタリングについては、現在も実施中であり、本年度の計測結果を分析していく予定である。また、近畿道路メンテンナスセンターが同橋で実施したモニタリングのセンサーは、本研究会で引き継ぐ予定である。現在、サンシステムと調整中である。
■モニタリングデータと目視点検との相関性
損傷によるケーブル張力の変動に着目した解析を実施、損傷として減肉を導入すると、その損傷ケーブルの張力は低下し、その分隣接ケーブルの張力が増加することが確認された。なお、検討ではケーブル減

肉 5%によって生じるケーブル張力変化を検知することが確認できた。
（古川先生）
温度変化で張力がばらつくには？
（金教授）
ケーブルの振動数が変化することが要因である。
（八木教授）
カラウコ大橋は、片側はアンカレッジに定着されており一般的な斜張橋と異なる。今回分析されているケーブル張力が左右でバランスしていないのはおかしい。可能であれば設計値との比較した方が良い。
なお、今回の結果をみれば、季節変動の影響を除去できれば、ケーブル緊張力の変化により損傷がうまく把握できるのではないか。ただし、ケーブル減肉 5%、10%は現実的にあり得ないのではないか。
また、カラウコ大橋は特殊な斜張橋であることから、今後、一般的な斜張橋でのモニタリングも必要ある。
（金教授）
減肉については、文献により確認したあくまで想定の数値である。
（玉越氏）
本研究会での目的は、一般的に用いることのできる知見を提案することである。これに対し、どのような切り口で整理するかが重要である。
減肉の影響による緊張力の変化は解析モデルに大きく影響する。したがって、橋梁をどうモデル化すればいいのかが重要な課題となる。橋毎に解析の感度を探ることも考えられる。
本研究会では、長大橋の維持管理手法について何らかの提案をする必要がある。本年度の研究において、その点を踏まえた検討が必要であると考える。

3. 本年度の研究内容とスケジュール（資料 1-3 及び 1-4）
（金教授）
本研究会の目的である吊り橋のモニタリングを実施する予定である。なお、モニタリングは短期に加え長期も実施することを考えている。メインケーブルを対象として、ひずみ・加速度等を計測する予定である。なお、計測実施は9月頃を考えている。
対象とする吊り橋として、現状、奈良市管理の「八幡橋」を選定している。
なお、以上の事項は決定案ではないので、ご意見等を頂ければ助かる。

また、昨年度実施したカラウコ大橋の短期モニタリングに対して、新たに入手した竣工図及び計算書により、モデルの改良を行い解析精度の向上を図るとともに、現在実施中の長期モニタリングデータを利用した分析も合わせて実施する。
以上、今年度実施する小規模吊り橋の短期モニタリングにより、吊り橋の振動特性を把握するとともに、これまで実施してきた研究内容との整合を図り、吊構造を有する特殊橋梁に関して、今後の維持管理手法を提案する。

4. 次回開催予定
（金教授）
次回会議は、9月を予定している。詳細は追って調整する。なお、次回会議までに計測対象とする吊り橋を決定する。メールにて対象吊り橋、計測内容等の意見を頂くようにする。
なお、計測対象の吊り橋に対しては、最終、整備局の方から管理者に連絡頂き調整することととする。

― 以上 ―

新都市社会技術融合創造研究会
「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
第 2 回会議議事録

日時：令和 3 年 12 月 9 日（木）10：00～11：30
場所：京都大学桂キャンパス　C1 棟会議室（C1-152）
出席者：八木、金、五井、大坪、松本、丸山（Web）、玉越（Web）、富永、竹田（Web）、松井（Web）、古川、榊、矢島（Web）、小野（記録）（敬称略、順不同）
配布資料：2-0　議事次第
2-1　第 1 回研究会議事録（案）
2-2（1）　八幡橋モニタリング資料一式
2-2（2）　八幡橋 3D スキャン計測結果
2-3　今年度の報告書目次
2-4　幹事団打合せメモ（20211020）
（追加資料）八幡橋長期遠隔モニタリング速報

１．第 1 回研究会の議事録確認（資料 2-1）
（小野）
議事録（案）を説明、了解を得る。

2. 吊り橋（八幡橋）モニタリングに関して（資料 2-2（1）及び（2））
（小野）
第 1 回研究会で報告したとおり、奈良市管理の八幡橋を対象としてモニタリングを実施している。モニタリングに際しての概要は下記のとおりである。
＜長期モニタリング＞R3.3 末を予定
■計測器設置日：令和 3 年 11 月 19 日（金）
■設置計測器：京都府側主塔：2 箇所の速度計、傾斜設置、1 箇所の温度計
支間中央主ケーブル：2 箇所の加速度設置
計測器は、昨年度、カラウコ大橋で利用したサンシステムのものを用いている。

＜短期モニタリング＞
当日、加速度センサー8 つを用いて橋梁全体の加速度応答を計測

（金教授）
モニタリングデータは、受信できていることは確認しているが、現状、データ分析までには至っていない。今後、データ分析結果は、メールにて共有するようにする。
なお、先日（R3.12.3）、紀伊水道を震源とする地震が発生したが、本橋の計測器にて得られたデータを簡単に整理した。
・加速度及び傾斜計のデータは受信できていることが確認できた。
・加速度は地震発生時には、計測されていないことから、地震前及び地震後で整理した。
・その結果、顕著な違いは確認されなかった。
・傾斜計については、地震時の計測データが受信できており、地震の影響を受けた応答を捉えていることが確認された。

・なお、十分な検討ができていないことから、的確な考察はできない。今後、データを吟味して共有する予定である。

3. 今年度の報告書目次（資料 2-3）

（小野）

本研究会の目的であるケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法に着眼した報告書のとりまとめを予定している。

なお、本年度の報告書の主たる内容は下記のものを予定している。

■ケーブル構造を有する特殊橋梁の維持管理手法の提案

・特殊橋梁の現状での維持管理に係る課題及び問題点等の再整理

・それら課題等を解決するための新技術等の紹介

・モニタリングの適用性の提案

■長期モニタリングによる吊り橋の応答検討

・今年度、実施している八幡橋のモニタリングによる橋梁応答の分析

・竣工図を用いたモデリングによる解析的アプローチ

これらの検討を実施し、特殊橋梁のモニタリング手法の提案を行うことを目標とする。

■自治体管理のケーブル構造を有する特殊橋梁の長期モニタリングの検討

・昨年度から実施している姫路河川国道事務所管理の国道29号カラウコ大橋のモニタリング検討の継続

・なお、計測器の撤去は来年4月頃を予定している。

（富永氏）

特殊橋梁の維持管理手法の提案においては、自治体向けにつかいやすさを考慮したものとすることが望ましい。

（松本氏）

点検する必要がある部位、損傷が生じ易い箇所等を明確に示して整理することが望ましい。

（金教授）

モニタリングについては、如何に簡単で安価で対応でき、損傷等を把握できるようにすることが望ましい。そのため、センサー等は現地状況に応じたものをセレクトできるようにする必要がある。

八幡橋の長期モニタリングの検討は、これからであるが、手探り状態での対応となる。今後、データ分析を行い、情報共有する予定である。

以上、本年度の報告書の主たる内容は、上記の3項目で決定した。

4. 今後の予定

（金教授）

1月中には、報告書の概要を整理、各位にメール配信する。その後、2月~3月上旬で最終成果として取りまとめる。

また、本年度は本研究会が最終年度であることから、報告書完成時の 3 月に第 3 回研究会を実施する予定とする。日程調整は、1 月に改めて実施する予定である。

― 以上 ―

巻末資料

附録_A　振動同定手法
附録_B　長期計測における季節変動成分の除去法の構築
附録_C　ケーブル張力同定手法

付録 A　振動同定手法

A.1　概要

振動計測による橋梁ヘルスモニタリグの目的は，計測振動データから橋梁の維持管理や設計へフィードバックできる構造物の状態を推定・評価することにある．特に，橋梁の振動データから橋梁の動的システムの数理モデルを決定し，その数理モデルから振動数，減衰定数，振動モードを検出し，橋梁に生じ得る損傷の有無，位置，程度，さらには余寿命評価までを期待している．橋梁の振動データから橋梁の動的システムの数理モデルを決定することを構造同定という．数理モデルは対象橋梁の特徴を表すもので，数理モデルから振動数，減衰定数，振動モード（以下，振動特性と称する）を検出できる．橋梁に損傷が生じると，振動データに変化をもたらし，数理モデルの変化にもつながることから，振動特性は特徴量の一つとして橋梁の損傷検知に使われる．

モニタリング対象の構造物をシステムとすれば，システムの物理的な状態は何らかの数理モデルとして表現できる．その数理モデルを決定するためには，まず橋梁にセンサーを設置し，そのセンサー情報（出力情報）を収集する必要がある．また，物理現象の因果関係から橋梁の物理的な挙動が出力情報として現れるのは，何らかの原因があるはずで，それが入力情報である．

ロードセルがついたインパクトハンマー実験や加振機実験のように，入力と出力がわかれば未知のシステムの数理モデルは容易に決まる．一方で，インパクトハンマー実験あるいは加振機実験を供用中の橋梁に適用するのは交通規制を要するため好ましくない．その代わりに，出力情報だけを用いる実稼働モード解析（Operational Modal Analysis）が使われている．出力情報だけで未知のシステムの数理モデルを同定するためには入力を何らかの形でモデル化する必要がある．一般的に入力モデルとして白色雑音が使われている．

橋梁ヘルスモニタリングでは，設置されたセンサーの特性上，構造物の局所的な変化に特化した情報が得られるローカルモニタリングと，構造物全体の挙動に特化された情報が得られるグローバルモニタリングに分類できる．また，評価や意思決定に使われるセンサー情報の長さにより，短期モニタリングと長期モニタリングに区別できる．短期モニタリングは構造物の安全性評価のために集中的に短期間で計測が行われ，外力の計測も伴う．また，場合によっては，交通規制を行うことも考えられる．一方で，橋梁の健全度は経年劣化に伴い徐々に変化することから，長期モニタリングでは，特徴量の経年変化に着目することが多い．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もある．

実稼働モード解析法の中，長大橋の振動特性を推定に有効であると判断した，確率部分空間法（Stochastic Subspace Identification: SSI）とベイズ実働モード解析法(Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA)についてまとめる．

A.2　構造同定手法

A.2.1 確率部分空間法（Stochastic Subspace Identification: SSI）

橋梁の加速度応答から振動特性を同定する時間領域の同定手法の 1 つである確率部分空間法(Stochastic Subspace Identification: SSI)について簡単にまとめる．安定的に卓越する振動モードを抽出するために，Stabilization Diagram (SD)を用いる．

橋梁の運動方程式は式(A-1)のように，状態方程式で表現することができる．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}(k+1) &= \mathbf{A}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{w}(k)\\ \boldsymbol{y}(k) &= \mathbf{C}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{v}(k)\end{aligned} \tag{A-1}$$

ここで，$\boldsymbol{x}(k)$，$\boldsymbol{y}(k)$はそれぞれ時刻 k での橋梁の状態変数，観測値を示す．また，$\boldsymbol{w}(k)$，$\boldsymbol{v}(k)$はそれぞれプロセスノイズと観測ノイズを示し，定常なホワイトノイズを仮定する．**A**，**C** はそれぞれシステム行列であり，モード情報を持っている．システム行列については，一期先予測の非定常カルマンフィルタによる状態変数の予測値と真値との誤差を最小二乗法により最小化することで，推定することが可能となる．

さて，次式により定義される Projection Matrix $\boldsymbol{O}_i$ について考える．

$$\boldsymbol{O}_i = \mathbf{Y}_f\mathbf{Y}_p^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{Y}_p\mathbf{Y}_p^{\mathrm{T}}\right)^{\dagger}\mathbf{Y}_p \tag{A-2}$$

ただし，$(\cdot)^{\dagger}$は Moore-Penrose の擬似逆行列を表すものとする．また，$\mathbf{Y}_p$，$\mathbf{Y}_f$はそれぞれ観測値の過去および未来の情報を持つブロックハンケル行列で，それぞれ以下のように定義される．

$$\begin{pmatrix}\mathbf{Y}_p\\ --\\ \mathbf{Y}_f\end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(0) & \cdots & \mathbf{y}(j-1)\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \mathbf{y}(i-1) & \cdots & \mathbf{y}(i+j-2)\\ \hline \mathbf{y}(i) & \cdots & \mathbf{y}(i+j-1)\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \mathbf{y}(2i-1) & \cdots & \mathbf{y}(2i+j-2)\end{bmatrix} \tag{A-3}$$

行列$\boldsymbol{O}_i$に次式のような特異値分解を行うと，

$$\boldsymbol{O}_i = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^{\mathbf{T}} = (\mathbf{U_1}\mathbf{U_2})\begin{pmatrix}\mathbf{S_1} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{S_2}\end{pmatrix}(\mathbf{V_1}\mathbf{V_2})^{\mathbf{T}} \simeq \mathbf{U_1}\mathbf{S_1}\mathbf{V_1^T} \tag{A-4}$$

が得られる．ここで，行列**U**，**V**はユリタリ行列であり，行列 **S** は対角成分に絶対値の大きな順に特異値が配置される．つまり，行列を構成する行空間および列空間それぞれに対応する基底ベクトルが，行列の各成分への寄与率の大きい順に並ぶことになる．この性質を利用することでより低いランクの行列で元の行列を効果的に近似できる．最小二乗法よりカルマンフィルタを用いて推定される状態変数$\mathbf{X}_i = [\mathbf{x}(i) \quad \mathbf{x}(i+1) \quad \cdots \quad \mathbf{x}(i+j-1)]$は次式で得られる．

$$\mathbf{X}_{\mathrm{i}} = \mathbf{S_1^{1/2}}\mathbf{V_1^T} \tag{A-5}$$

式(A-4)の特異値分解により推定値の時系列 $\mathbf{X}_i$の行数は減少し，結果としてシステム行列の次元が小さくなる．つまり，システムの極が減少することを意味し，特異値分解を経て，システムにおいて卓越した振動特性が抽出されるものと解釈できる．

次に，システム同定において安定的に同定される振動モードを抽出するための手法として SD を用いる．例えば，システム同定におけるモデル次数を 1 次か n 次程度の範囲にわたって変化させ，横軸に同定された振動数，縦軸にモデル次数をとって，グラフにしたものである．各モデル次数で同定された結果の中で，安定的であると判断されるモードが最終的に抽出される．SD においては次のように閾値を設定して卓越するモードであるかどうかの判定を行う手法が提案されており，本研究においても以下の閾値を用いる．

$$f_{p+\kappa} - f_\epsilon < f_p < f_{p+\kappa} + f_\epsilon \tag{A-6a}$$

$$\zeta_{p+\kappa} - \zeta_\epsilon < \zeta_p < \zeta_{p+\kappa} + \zeta_\epsilon \tag{A-6b}$$

$$\mathrm{MAC}_l < \mathrm{MAC}_{(p,p+\kappa)} \tag{A-6c}$$

$$(\kappa = -\kappa_\epsilon, \dots, -1, 1, \dots, \kappa_\epsilon)$$

ここで，式(4-6a)は振動数，式(4-6b)は減衰定数，式(4-6c)はモード形状に関する卓越モードの評価式であり，κ_ϵはモデル次数 p の上下それぞれで考慮するモデル次数の個数である．f_ϵとζ_ϵはそれぞれ振動数と減衰定数の許容変動量を表す．$\mathrm{MAC}_{(p,p+\kappa)}$はモード形状$\psi_p$と$\psi_{p+\kappa}$の相関を表す指標であるモード信頼性評価基準(Modal Assurance Criterion: MAC)値，MAC_lは MAC 値の許容最小値である．MAC 値はモード形状の相関を算出する指標であり，0 から 1 までの値を持ち，1 に近いほど相関が強いことを意味する．MAC 値は式(b-7)から求められる．

$$MAC_{(p,p+\kappa)} = \frac{\left\|\boldsymbol{\psi}_p^T \boldsymbol{\psi}_{p+\kappa}\right\|^2}{\left\|\boldsymbol{\psi}_p\right\|^2 \left\|\boldsymbol{\psi}_{p+\kappa}\right\|^2} \tag{B-7}$$

κ_ϵ，f_ϵ，ζ_ϵ，MAC_lの 3 つの閾値すべてを満たす振動特性を固有振動特性として同定する．これらの閾値については，明確な決定手法が未だ確立されていないため，データ長，サンプリング周波数，橋梁形式などを総合的に勘案して経験に基づき決定することが多い．

A. 2. 2 ベイズ実働モード解析法（Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA）

(1) ベイズ推定の概要

ベイズ理論によるパラメータ推定においては，適当な観測データ集合 D が得られたとき，それらのデータを生起する統計的モデルの支配パラメータの集合 θ について，それらが従う確率分布を観測データ D から推定する．観測データから事後的に推定されたパラメータの確率分布は事後分布と呼ばれ，次のベイズの定理に基づき条件付き確率密度関数 $p(\theta \mid D)$で表される．

$$p(\theta|D) = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{p(D)} \tag{A-8}$$

ここに，右辺の条件付き確率密度関数 $p(D|\theta)$は尤度関数と呼ばれ，パラメータ θ により構成される統計的モデルにおいて観測データ D が得られた際のモデルの尤もらしさを表す関数として知られる．また，$p(\theta)$ は観測データ D が得られる以前の情報から事前に仮定されるパラメータ θ の確率分布であり，事前分布と呼ばれる．

加速度時系列の FFT データのように数多くの観測値が得られる場合，尤度関数は事後分布に対して事前分布よりも支配的となることが知られているため，既往研究においては事前分布として無情報事前分布を適用することが提案されている．無情報事前分布を仮定した場合，事後分布の確率密度関数は尤度関数に比例する．したがって振動計測において観測されたデータの尤度関数を振動特性の適当な関数として定式化することで，振動特性の事後分布を推定することが可能となる．

(2) 統計的な不確かさを考慮した振動モード同定

観測された自由度 n の加速度の時系列$\ddot{\boldsymbol{x}}_j \in R^n\ (j = 1, \ldots, N)$は i 次のモード応答加速度$\ddot{\eta}_i$ (i=1, 2, …, m)の適当な重ね合わせとして次のように表される.

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_j = \sum_{i=1}^{m} \boldsymbol{\phi}_i \ddot{\eta}_i(t_j) + \boldsymbol{\epsilon}_j \tag{A-9}$$

ただし，$\boldsymbol{\epsilon}_j$はホワイトノイズとしてモデル化された観測誤差，$\boldsymbol{\phi}_i \in R^n$は i 次のモード形状である．モード応答加速度はi次の固有角振動数ω_i，モード減衰比ζ_i，モード外力p_iを用いて次の運動方程式で表される.

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2\eta_i(t) = p_i(t) \tag{A-10}$$

この手法においては一般的な時間領域の実稼働モード同定手法と同様に全てのモード外力が一定の PSD をもつと仮定されているが，上記の仮定は必ずしも現実に即したものではない. 実際, 後述する対象橋梁について筆者らが時間領域の実稼働モード同定手法の一つである SSI を適用した先行研究においては振動データの高周波帯域に顕著なノイズが分布しており, ローパスフィルタを適用しなければ振動特性推定は困難であった. ただしこのような信号処理は元の時系列の波形を歪めるため推定される振動特性に偏りを生じる恐れがある. 以上の問題を避ける方法として対象とする振動モードについてそれらに対応した周波数帯域のみに着目した振動特性推定が挙げられる．このような周波数領域の振動特性推定の手法として FFT に基づくベイズ推定の手法 Yuen と Katafygiotis により提案された.

観測された加速度の時系列$\ddot{\boldsymbol{x}}_j$の FFT は次のように定義される.

$$F_k = \sqrt{\frac{2\Delta t}{N}} \sum_{j=1}^{N} \ddot{\boldsymbol{x}}_j \exp\left[-\frac{2\pi\mathbf{i}(k-1)(j-1)}{N}\right] \tag{A-11}$$

ただし，$\mathbf{i}$は虚数単位，Δtはサンプリング周期である． ここで，FFT データの実部と虚部により構成される次のようなベクトルを考える.

$$\boldsymbol{Z}_k = \begin{bmatrix} \mathrm{Re}\, F_k \\ \mathrm{Im}\, F_k \end{bmatrix} \in R^{2n} \tag{a-12}$$

このとき，式(A-12)のベクトル$\boldsymbol{Z}_k$は次のような共分散行列をもつガウス分布として定式化される.

$$\mathbf{C}_k = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}\mathrm{Re}\,\mathbf{H}_k\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} & -\boldsymbol{\Phi}\mathrm{Im}\,\mathbf{H}_k\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{\Phi}\mathrm{Im}\,\mathbf{H}_k\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{\Phi}\mathrm{Re}\,\mathbf{H}_k\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} - \frac{S_e}{2}\mathbf{I}_{2n} \tag{A-13}$$

ここに，$\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2, \ldots, \boldsymbol{\phi}_m]$であり，$S_e$は予測誤差$\boldsymbol{\epsilon}_j$の PSD（定数），$\mathbf{I}_{2n}$は $2n$ 次の単位行列である．また，$\mathbf{H}_k \in C^{m\times m}$は式(B-10)から理論的に導出される次式のようなモード加速度の PSD 行列である.

$$\mathbf{H}_k = \mathrm{diag}(\boldsymbol{h}_{\mathrm{k}})\ \mathbf{S}\ \mathrm{diag}(\boldsymbol{h}_k^*) \tag{A-14}$$

ここに$\mathbf{S} \in C^{m\times m}$はモード外力の PSD 行列（定数行列）である．また diag(·)はベクトルの対角行列への変換を表し，アスタリスク[·]*は共役転置を表す．また$\boldsymbol{h}_{\mathrm{k}} \in C^{m}$は第 i 成分が次式で与えられるモード伝達関数のベクトルである．

$$h_{ik} = \left[\left(\beta_{ik}^2 - 1\right) + \mathbf{i}(2\zeta_i\beta_{ik})\right]^{-1} \tag{A-15}$$

ここに，$\beta_{ik} = f_i/\mathrm{f}_k$は固有振動数$f_i = \omega_i/2\pi$と FFT に対応する周波数$f_k = (k-1)/N\Delta t$との比で定義される周波数比である．

以上から，観測値 D=$\{\boldsymbol{Z}_k\}$について尤度関数を次のように定義できる．

$$p(\{\boldsymbol{Z}_k\}|\theta) = (2\pi)^{-nN}\exp\left[-L(\theta)\right] \tag{A-16a}$$

$$L(\theta) = \frac{1}{2}\sum_k \ln|\mathbf{C}_k(\theta)| + \frac{1}{2}\sum_k \boldsymbol{Z}_k^T\mathbf{C}_k(\theta)^{-1}\boldsymbol{Z}_k \tag{A-16b}$$

ここに，パラメータθは固有振動数f_i，減衰比ζ_i，モード形状$\boldsymbol{\phi}_i$，モード外力の PSD 行列$\mathbf{S}$および予測誤差の PSD である S_eの集合として定義される．また$L(\theta)$は負の対数尤度関数（NLLF: Negative Log Likelihood Function）である．無情報事前分布を仮定した場合，パラメータの事後分布は尤度関数に次式のように比例する．

$$p(\theta|\{\boldsymbol{Z}_k\}) \propto \exp\left[-L(\theta)\right] \tag{A-17}$$

したがって事後分布の確率密度関数$p(\theta|\{\boldsymbol{Z}_k\})$におけるパラメータ$\theta$の最確値（MPV: Most Probable Value）を求める問題は，目的関数 NLLF の最小化問題となる．上記のような NLLF を最小化する（すなわち，尤度関数を最大化する）パラメータθの推定問題は，統計学の分野で最尤推定法として知られている．

パラメータθ の MPV を$\hat{\theta}$ で表す．このとき， NLLF は$\hat{\theta}$についてのテイラー展開により次のように近似される．

$$L(\theta) \approx L\left(\hat{\theta}\right) + \frac{1}{2}\left(\theta - \hat{\theta}\right)^T\hat{H}_L\left(\theta - \hat{\theta}\right) \tag{A-18}$$

ここで，$\hat{H}_L$は NLLF のヘッセ行列である．これを式(B-16)に代入すると

$$p(\theta|\{\boldsymbol{Z}_k\}) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\theta - \hat{\theta}\right)^T\hat{H}_L\left(\theta - \hat{\theta}\right)\right] \tag{A-19}$$

となるため，パラメータの事後分布$p(\theta|\{\boldsymbol{Z}_k\})$は期待値$\hat{\theta}$共分散行列$\hat{H}_L^{-1}$の多変量正規分布として与えられる．

以上より，固有振動数f_i，減衰比ζ_i，モード形状$\boldsymbol{\phi}_i$，モード外力の PSD 行列$\mathbf{S}$および予測誤差の PSD である S_eのそれぞれについて，観測された加速度データにより算出される事後分布から，最も確からしい値を示す期待値および推定値の不確かさを示す分散を得ることができる．

付録　B 長期計測における季節変動成分の除去法の構築

B.1　概要

構造物のモードパラメータのような振動特性は, 構造物の健全性を反映する指標と考えられるため，振動に基づく構造物の長期ヘルスモニタリング（SHM）の研究で広く利用されている．橋梁構造物のモードパラメータ同定においては, 常時振動データを用いて出力のみのシステム同定を行う実働モード解析（OMA）が実用的な構造物の振動同定方法となっている．一方で，長期モニタリングにおいては，温度，交通，湿度，風などの様々な環境および供用時の変動要因（Environmental and Operational Variables: 以下 EOV と称する）によって，同定振動特性にはばらつきあるいは変動が生じうる. このような変動は損傷や劣化に起因する振動特性の変化との区別が難しく，モニタリングによる構造物の状態評価の精度を低下させる [1].

本研究を通して検討した長期 SHM における同定特徴量の変動性に対処する方法として，EOV 駆動法（EOV-driven approach）と非 EOV 駆動法（non EOV-driven approach）についてまとめる．

B.2　EOV 駆動法 (EOV-driven approach)

B.2.1 最小２乗回帰モデル（Ordinary Least Squares Regression: OLSR)

長期モニタリングにおける変位，振動数のようなセンサ情報をy，また気温，交通量，風速などの外部因子を$\boldsymbol{X}$とすると，観測センサ情報と外部因子の線形回帰モデルの一般的形式は式 (B-1)にようにに表す.

$$y = \boldsymbol{w}\boldsymbol{X} + \varepsilon \tag{B-1}$$

ここに，$\boldsymbol{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$は外部因子，$\boldsymbol{w} = [w_1, w_2, \cdots, w_n]$は観測センサ情報と外部因子の線形関係を表す線形回帰係数ベクトル，また，εは誤差項を表す.

長期モニタリングにおける観測センサ情報と外部因子の線形的な関係は, 線形回帰係数ベクトルによりしはされることになる．結局，下記の目的関数の式（B-2）を最小にする係数ベクトル（$\hat{w}$）の同定問題に帰着する.

$$J(w) = \frac{1}{n}\|y - w\boldsymbol{X}\|_2^2 \tag{B-2}$$

ここに，$\|\cdot\|_2$は L_2 ノルムを表す.

B.2.2 スパースモデル（Least absolute shrinkage and selection operator : LASSO)

スパースモデリングは，近年，情報学，機械 学習，統計学など，様々な分野から注目を集めているが，統計学で最もよく用いられるスパースモデリングは，L_1 正則化法であり，その代表が，LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)である．LASSO は，回帰モデルの損失関数にパラメータの L_1 ノルムに基づく正則化項を加えた正則化損失関数を最小化することに

よってパラメータを推定する方法で，推定の安定化とともに変数選択も行うことができる．LASSO 型の目的関数を式（B-3）に示す．

$$J(w) = \frac{1}{n}\|y - w\boldsymbol{X}\|_2^2 + \lambda\|w\|_1 \tag{B-3}$$

ここに，$\|\cdot\|_1$は L_1 ノルムを，λは正則化係数を表す．

B. 2. 3 ベイズ線形回帰（Bayesian linear regression: BLR)

ベイズ線形回帰は線形回帰にベイズ推論を導入した手法である．例えば，季節変動の訓練データの数は限られている場合，対象となるモデルのパラメータの事前分布を仮定し，得られたデータの情報を用いてパラメータの事後分布（教師信号の予測分布）を求めるベイズ線形回帰による季節変動の予測に適用されている．

同様に長期モニタリングにおける観測センサ情報と外部因子の線形的な関係を表す線形回帰係数ベクトルの推定にも利用できる．ただし，線形回帰式(B-1)の誤差の分布は平均０，逆 Gamma 分布分散を持つ正規分布と仮定する（式(B-4)参照）．

$$\begin{cases} \varepsilon \sim N(\varepsilon|0,\sigma_n^2) \\ \sigma_n^2 \sim Inv-Gamma(\sigma_n^2|a,b) \end{cases} \tag{B-4}$$

ここに，εは回帰の誤差分布，σ_n^2は誤差の逆 Gamma 分布分散，aおよび bは超パラメータを表す．

ベイズ理論により推定係数ベクトルの事後確率分布を式（B-5）に示す．

$$p(w|X,y,\sigma_n^2) = \frac{p(y|X,w,\sigma_n^2)p(w)}{p(y|X,\sigma_n^2)} \tag{B-5}$$

ここに，$p(\cdot)$は確率密度分布を，$p(\cdot\,|\,\cdot)$は条件月確率分布を表す．

式（B-5）から MPV（Most Probable Value）推定により$\hat{w}$が得られる．ベイズ線形回帰の仕組みは逐次推定への拡張が容易であり，モニタリングデータの実時間処理に有用である．

B. 2. 4 ガウス過程回帰（Gaussian process regression: GPR)

ガウス過程回帰は，式（B-6）のように，入力変数 X から出力変数である実数値 y への関数 $y = f(X)$を推定するモデルの一つであり，線形回帰モデルの無限次元への拡張を表すものである．また，潜在機能（Latent function）$f(X)$の推定にはベイズ推定を利用する．

$$y = f(X) + \varepsilon \tag{B-6}$$

式（B-6）の$f(X)$は式（B-7）の確率過程を従うと仮定する．

$$f(X) \sim \mathrm{GP}[0, k(X, X^T)] \tag{B-7}$$

ここに，$k(X,X^T) = \mathrm{E}[f(X)f(X^T)]$ は分散を表す．T は転置を表す．$\varepsilon \sim N(0,\sigma_n^2)$が IID，$k(\cdot)$がカーネル分散行列を表すと，予測事後確率分布は式（B-8）のように求められる．

$$p(f_*|X,y,X_*,\sigma_n^2) = N\left(f_*\middle|\bar{f}_*, cov(f_*)\right)$$
$$\bar{f}_* = k(X_*,X)[k(X,X)+\sigma_n^2 I]^{-1}y \tag{B-8}$$
$$cov(f_*) = k(X_*,X_*) - k(X_*,X)[k(X,X)+\sigma_n^2 I]^{-1}k(X,X_*)$$

ここに，X_*はテストデータを，f_*はテストデータによる予測潜在機能を，$\bar{f}_*$は平均予測潜在機能を表す．

ガウス過程回帰の特徴の一つはその非線形性であり，線形回帰ではうまくフィッテイングできない場合にも有効である．もう一つ重要な特徴はベイズ推定を用いる点である．推定される関数は一つの関数ではなく，関数の分布として得られることから，推定の不確実性を表現することができる．ただし，高次元データを取り扱う場合 GPR の計算負担は高く，さらに尤度関数が非ガウス分布の場合は取り扱いにくい点もある．

B.3　非 EOV 駆動法 (Non EOV-driven approach)

B.3.1 自己回帰和分移動平均モデル（Autoregressive integrated moving average model: ARIMA model）

定常な時系列過程を前提とした ARMA モデルとは異なり ARIMA モデルは非定常過程に対する時系列モデルである．時系列において平均値が時間的に変動する場合（傾向変動が見受けられる場合など）は非常によく見受けられるものであり，それらに対して，ARMA モデルはそのままでは適用できない．そのため，平均値揺動を取り除くために様々な方法が用いられるが，時系列の階差をとり，その階差時系列に対して ARMA モデルを適用する．このモデルを ARIMA モデルあるいは自己回帰和分移動平均モデルという．

ARIMA(p, d, q)モデルの基本形式を式(B-9)に示す．

$$\left(1-\sum_{i=1}^{p}\emptyset_i L^i\right)(1-L)^d y_t = \left(1+\sum_{i=1}^{q}\theta_i L^i\right)\varepsilon_t \tag{b-9}$$

ここに，Lは時間遅れ演算子を，p は AR 成分の次数を，q は MMA 成分の次数を，d は積分次数を表す．パラメータ(p, d, q)が決まれば，観測データおよび誤差 ε_tの統計特性から係数 $\emptyset_i$と θ_iが計算できる．

B.3.2 共和分・多次元誤差修正モデル（Co-integration and vector error correction model: VECM)

経済時系列データの因果関係の分析法である多次元誤差修正モデル（VECM）は，変数間に共和分関係があるときに使えるモデルであり，誤差修正モデルに双方向の因果を想定した次元時系列モデル(Multiple Time Series Models)の 1 つである多次元自己回帰モデル(VAR)の概念を加えたものである．したがって，多次元誤差修正モデルも多重時系列モデルの 1 つである．多くの時系列では一般的に，最初の差分で定常になると考えられ，時系列データの差分を取り，前述の ARIMA などのモデルを推定する．そのようなモデルからの予測は，データにある周期性と季節性を反映するが，データに含まれる長期的なトレンドに関する情報は失われ，長期予測は信頼で

きなくなる欠点が指摘されている．

VECM の概念は，定常変数を生み出す線形結合をあるシステム内の長期的な均衡関係式とみなし，過去に生じた誤差（均衡からの外れ具合）が均衡に向けて修正される動きが現在の短期的変動にも影響を与える，という解釈を施すのである．VECM は変数間に何らかの長期的均衡が存在する場合の分析手法として用いられる．

１）共和分モデル（Cointegration model）

非定常性を持つ時系列データで，データの合成によって定常過程（$I(0)$）として表現できる場合，これらのデータ間には共和分関係があると言える．そのときの共和分モデルを式（B-10）に示す．

$$u_t = \theta^T X_t,\ u_t \sim I(0) \tag{B-10}$$

ここに，θ は共和分ベクトルを示しており，データ X_tの成分同士の長期的な関係（例えば，季節変動のようなトレンド）を示す係数行列，u_tは定常確率過程（$I(0)$）を表す．

２）多次元誤差修正モデル（VECM）

ある時系列変数同士が共和分の関係にあれば，その時系列変数同士の短期的な関係を適切に表現し系列データ同士の共和分関係を自動的に構築する誤差修正モデル（ECM）が存在する（式（B-11））．

$$AR(L)(1-L)X_t = -\lambda u_{t-1} + \varepsilon_t \tag{B-11}$$

ここに，Lは ARIMA モデルと同様には時間遅れ演算子を，$AR(L)$は AR 多項式を，λは一般的に $\lambda \in (0,1)$の調整係数を，ε_tは白色雑音の誤差モデルを表す．

式（B-11）によると，X_tは過去の値ののみならず過去の均衡バイアスと関連がある．過去のu_{t-1}を用いて， X_tの修正が可能である． すなわち，修正前の均衡バイアスが正であれば，修正項が負になり，結果的にΔu_tとともに $\Delta X_t = (1-L)X_t$の低減につながる．言い換えれば，過去より現在がより均衡点に近いことを示す．共和分・多次元誤差修正モデルの推定には一般的に Eagle–Granger テストと Johansen テストが用いられる．

<u>Eagle–Granger テスト</u>

ステップ１： 変数に対する最小 2 乗回帰（OLSR）と残差に対する拡張ディッキー–フラー検定（Augmented Dickey–Fuller test : ADF test) を適用．上記のように，残差に定常性があれば共和分が存在する．

ステップ２：修正誤差モデル（ECM）構築のために最小 2 乗回帰（OLSR）を適用．ただし，Eagle–Granger テストは安定的な手法である反面，一つの最小 2 乗回帰に対して一つの共和分を考慮するために， 2 変数までのデータに有効である．

<u>Johansen テスト</u>

Eagle–Granger テストの弱点である多次元データに適用するために提案された手法である．Johansen テストは最尤法と多次元誤差修正モデル（式（B-12））を用いて，多次元データ間の共

和分関係を判別する.

$$\Delta \boldsymbol{y}_i = \boldsymbol{\Pi} \boldsymbol{y}_{i-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \boldsymbol{B}_j \boldsymbol{y}_{i-1} + \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{D}(t) + \boldsymbol{\varepsilon}_t \tag{B-12}$$

ここに，$\boldsymbol{\Pi} = \mathbf{AB}$，（ただし**A**は調整係数行列，**B**は 共和分ベクトルで構成される行列），$\boldsymbol{B}_j$は AR モデルの係数行列を，$\boldsymbol{\phi} \boldsymbol{D}(t)$は共和分ベクトル内に（または共和分ベクトルを制約する）決定論的な項があることを示している. もちろん共和分ベクトル外の決定論的な項を使用することもできる．$\boldsymbol{\varepsilon}_t$は白色雑音の誤差モデルを表す. また，**Π**のランクは，多次元変数間の共和分の数に一致する．

B. 3. 3 SARIMA モデル（Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average)

SARIMA モデルは，トレンド，季節性，ランダム成分を含むデータの変動を追跡できる古典的な線形時系列モデルである [2)]．SARIMA モデルの一般的な乗算表現である$\mathrm{SARIMA}(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$モデルは，式(B-13)式のよう表すことができる.

$$\phi_p(B)\Phi_P\left(B^s\right)\nabla^d \nabla_s^D y_t = \theta_q(B)\Theta_Q\left(B^s\right)\varepsilon_t \tag{B-13}$$

ここで，B は $By_t = y_{t-1}$の後方シフト演算子を示す．また，s は季節性期間，$\nabla = 1 - \mathrm{B}$ は差分演算子，$\nabla_s = 1 - B^s$ は季節差分演算子を表す．多項式である$\phi_p(\cdot)$，$\Phi_P(\cdot)$，$\theta_q(\cdot)$，$\Theta_Q(\cdot)$は，それぞれ未知の係数を持つ p, P, q, Q として順序付けされている．また，d と D は，それぞれ差分と季節差分の次数を表す．イノベーションは，一般的にガウス分布またはスチューデント t 分布に従うと仮定する.

SARIMA モデルの次数パラメータの初期設定には，自己相関関数(ACF)と部分自己相関関数(PACF)を用いたプロットを参照することができる．さらに，赤池情報基準(AIC)やベイズ情報基準(BIC)などの指標は，モデルの最適な構造を評価するのに有用である．一般的には，AIC や BIC の小さいモデル次数パラメータを採用することができる．推定する係数の数を k，サンプルサイズを n，最尤度を$\hat{L}$とすると，式(B-14)および式(B-15)を用いて，それぞれ AIC と BIC を推定することができる.

$$\mathrm{AIC} = 2k - 2\ln\left(\hat{L}\right) \tag{B-14}$$

$$\mathrm{BIC} = k\ln(n) - 2\ln\left(\hat{L}\right) \tag{B-15}$$

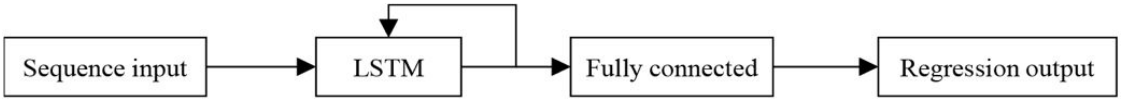
B. 3. 4 *Long Short-Term Memory* (*LSTM*)

前述の SARIMA のような古典的な時系列モデルにはいくつかの欠陥がある．線形性は予測された応答の分布を制限し，残差に異種混合性（heteroscedasticity）を生じさせる可能性がある．時系列の近似化として有限次数の時系列モデルを考えると，その近似化が残差の不偏性に影響

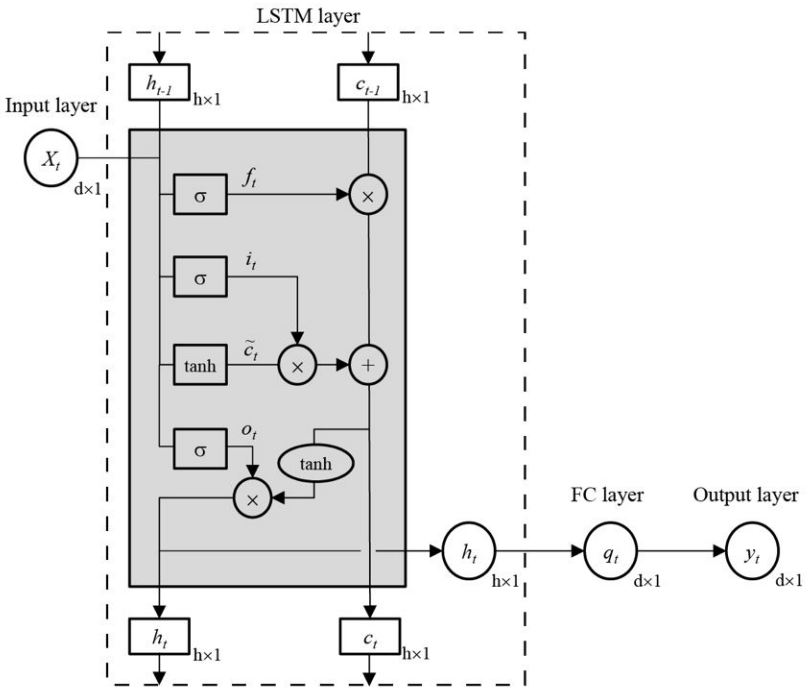
を与える可能性がある．SARIMA のこのような問題点は， LSTM 層を持つ非線形ニューラルネットワークにより解決できる可能性がある．

LSTM ニューラルネットワークはリカレントニューラルネットワーク(RNN)の一種であり，時系列データの長期依存性を学習することができる [3)-5)]．従来の RNN では，時間を通じたバックプロパゲーション(Back Propagation Through Time: BPTT)アルゴリズムにおいて，勾配消失・爆発と呼ばれる計算問題があるため，長期依存性の学習は現実的に困難であったが，LSTM ネットワークでは，各時間ステップからの情報を忘れて更新するためのセル状態といくつかの特別なゲートを導入することで，この問題をうまく解決する仕組みを持っている．

時系列回帰問題のための一般的な LSTM ネットワークは，**図 B-1(a)**に示すような階層構造を持っている．多層パーセプトロン（MLP）や畳み込みニューラルネットワーク（CNN）のような従来のフィードフォワードニューラルネットワークと比較して, LSTM 層の大きな違いはリカレント構造であることである．バニラ LSTM 層の局所的な詳細を示す模式図を**図 B-1(b)**に示す．縦方向は時間的なデータの流れを示し，横方向は入力から出力までのデータの流れを示している．



(a) **時系列の** LSTM **ネットワーク構造**



(b) LSTM 層

図 B-1 LSTM ネットワーク

アーキテクチャは，主にセルと，それぞれの忘却ゲート（forget gate），入力ゲート（input gate）,出力ゲート（output gate）と呼ばれる 3 つのゲートで構成されている．セルは時系列の依存性を追跡して記録するために使用され，ゲートはセルに出入りする情報の流れを制御する．LSTM 層におけるフォワードパスの詳細な動作は，以下のように記述できる．

$$f_t = \sigma_g\left(W_f X_t + U_f h_{t-1} + b_f\right) \tag{B-16a}$$

$$i_t = \sigma_g\left(W_i X_t + U_i h_{t-1} + b_i\right) \tag{B-16b}$$

$$o_t = \sigma_g\left(W_o X_t + U_o h_{t-1} + b_o\right) \tag{B-16c}$$

$$\tilde{c}_t = \sigma_c\left(W_c X_t + U_c h_{t-1} + b_c\right) \tag{B-16d}$$

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \tilde{c}_t \tag{B-16e}$$

$$h_t = o_t \circ \sigma_c\left(c_t\right) \tag{B-16f}$$

ここで，演算子∘は Hadamard 積を表し，$X_t \in R^{d\times 1}$は d 個の特徴量を持つ入力ベクトルである．$f_t \in R^{h\times 1}$，$i_t \in R^{h\times 1}$，$o_t \in R^{h\times 1}$は，LSTM 層の隠れユニットの数に等しい h 次元を持つ忘却ゲート，入力ゲート，出力ゲートの出力である．$h_t \in R^{h\times 1}$は出力ステップと次ステップに配信される隠れ状態ベクトルであり，$\tilde{c}_t \in R^{h\times 1}$は候補セル状態の入力である．$c_t \in R^{h\times 1}$は長期依存性を記録したセル状態ベクトル，$W \in R^{h\times d}$，$U \in R^{h\times h}$，$b \in R^{h\times 1}$は，それぞれ学習する入力重み行列，再帰重み行列，バイアスベクトルを，σ_gはシグモイド関数であるゲート活性化関数，σ_cは一般的に双曲正接関数を用いた状態活性化関数を表す．

一歩先の予測の場合には，逐次入力である$\{X_i\}_{i=1}^{t} = \{y_i\}_{i=1}^{t}$と一歩先の出力である$y_{t+1}$との学習相関関係は，最終的には式(B-17)のようになる．

$$y_{t+1} = \varphi\left(\{y_i\}_{i=1}^{t}, h_0, c_0\right) + \varepsilon_{t+1} \tag{B-17}$$

初期状態 h_0 と c_0 を一般的に 0 とする 2 つの超パラメータを持つ非線形でノーカットオフの自己回帰モデルとみなすことができる．$\varphi(\cdot)$は 1 ステップ先の予測$\hat{y}_{t+1}$と過去の観測値$\{y_i\}_{i=1}^{t}$との長期的な相関関係を表示する非線形関数である．

B.4 まとめ

長期モニタリングにおける季節変動成分の除去法として，EOV 駆動法と非 EOV 駆動法の除去性能の検討例を示す．**図 B-2** に示すように，ある橋梁おいて 5 ヶ月間で計測された振動数の時系列について検討を行う．**図 B-2** の赤の縦線はその左側のデータを学習データ，また右側のデータをテストデータとする境界線を表す．EOV 駆動法であるベイズ線形回帰とガウス線形回帰による除去後の誤差分布をそれぞれ**図 B-3** と**図 B-4** に示す．また，非 EOV 駆動法である SARIMA と LSTM 除去後の誤差分布をそれぞれ**図 B-5** と**図 B-6** に示す．

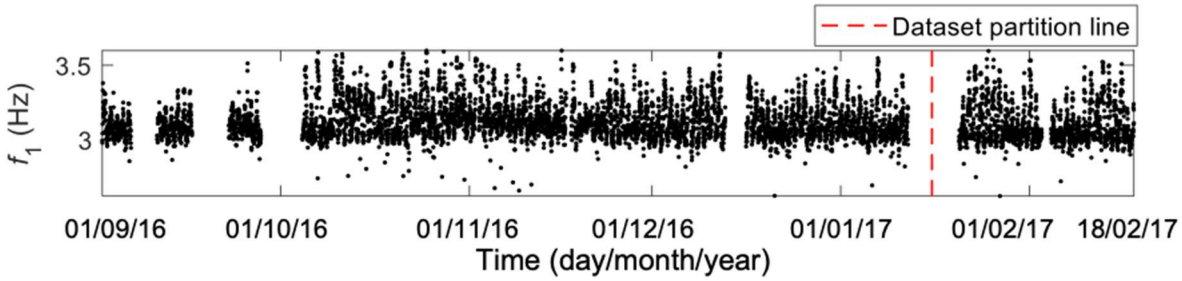


図 B-2 長期モニタリングで観測された振動数の時系列

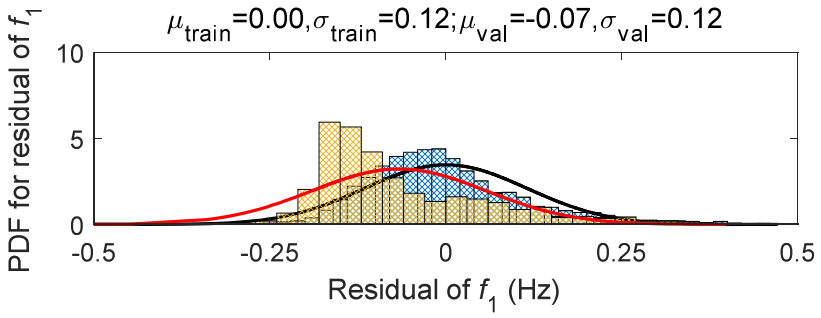


図 B-3 EOV 駆動法による f_1 の予測残差分布（ベイズ線形回帰：BLR）

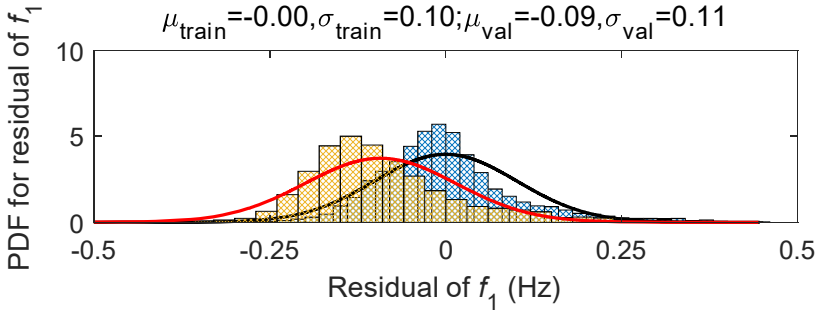


図 B-4 EOV 駆動法による f_1 の予測残差分布（ガウス過程回帰：GPR）

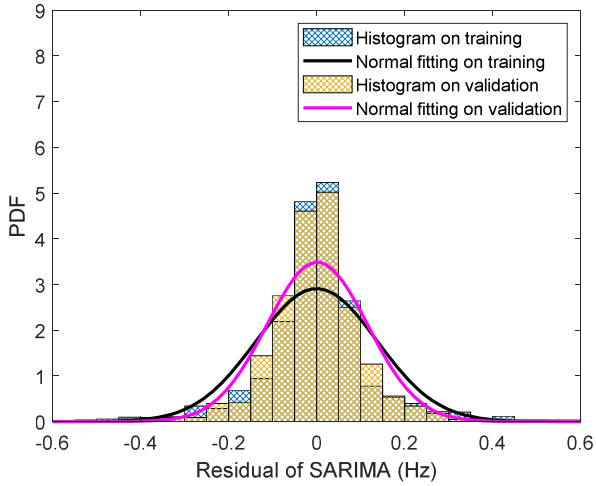


図 B-5 SARIMA モデルによる f_1 の訓練データと検証データの予測残差分布

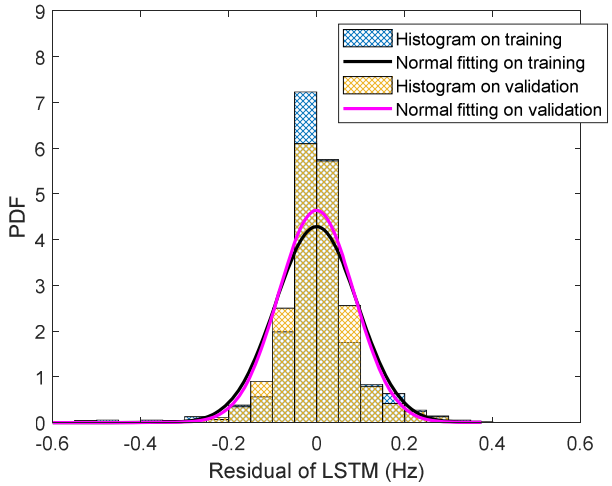


図 B-6 LSTM による f_1 の訓練データと検証データの予測残差分布

参考文献

1. Guo, A., A. Jiang, J. Lin, and X. Li. 2020. “Data mining algorithms for bridge health monitoring: Kohonen clustering and LSTM prediction approaches.” *The Journal of Supercomputing*, 76, 932–947. https://doi.org/10.1007/s11227-019-03045-8.
2. Box, G. E. P., G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung. 2015. *Time Series Analysis: Forecasting and Control (Fifth edition)*. Wiley.
3. Hochreiter, S. and J. Schmidhuber. 1997. “Long short-term memory.” *Neural Computation*, 9 (8), 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.
4. Gers, F. A., J. Schmidhuber, and F. Cummins. 2000. “Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM.” *Neural Computation*, 12 (10), 2451–2471. https://doi.org/10.1162/089976600300015015.
5. Graves, A. 2012. *Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks*. Berlin Heidelberg: Springer.

付録 C ケーブル張力同定手法

C.1 概要

鋼部材の腐食に伴うケーブルおよび定着部の損傷の検出を目的として，自治体管理のケーブル構造をもつ特殊橋を対象にケーブルの張力計測を中心としたモニタリングが実施されている．付録 A で整理された振動同定手法を用い，ケーブルの振動数が同定できれば，ケーブル振動と張力の関係式からケーブル張力を同定することができる．本研究で提案したケーブル張力手法をまとめる．

C.2 常時振動計測によるケーブル張力同定

ケーブル張力同定には弦理論とはり理論を利用する．ただし，対象橋梁はケーブル直径も大きくないため，弦理論が相応しいと判断しているが，比較のためにはり理論による張力同定もおこなう．また，張力同定における回帰モデル推定にはベイズ一般化線形モデル（Bayesian Generalized Linear Model: BGLM）を利用する．BGLM を適用する理由は，常時振動による同定ケーブル振動数のばらつきや不確定性を考慮するためである．

C.2.1 ケーブル張力同定

式（C-1）に弦理論による振動数と張力の関係式を示す．

$$f_i^2 = \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \tag{C-1}$$

ここに，f_iはケーブルの i 次振動数，T はケーブル張力，ρはケーブルの密度，A はケーブルの断面積，L はケーブル長を表す．

高次モードまでの振動数を利用する場合，式（C-1）は，次の式（C-2）のように回帰モデルとして書きなおすことができる．

$$f_i^2 = ai^2 \tag{C-1}$$

結局，振動数f_iと次数 i の線形関係の傾き a を求めることで張力 T の推定で可能である．

はり理論による振動数と張力の関係式を式（C-3）に示す．

$$f_i^2 = \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 + \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 \tag{C-3}$$

ここに，f_i，T，ρ，A，L は，式（C-1）と同じである．πは円周率，E はヤング係数，I はケーブルの断面 2 次メーメントを表す．

弦理論と同様に，式（C-3）は，次の式（C-4）のように回帰モデルとして書きなおすことができる．

$$\left(\frac{f_i}{i}\right)^2 = a + bi^2 \tag{C-4}$$

結局，振動数f_iと次数iの線形関係の傾きaを求めることで張力Tの推定で可能である．

C.2.2 ベーイズケーブル張力同定

振動同定により複数モードのケーブル振動数が既知とすると，式(C-1)あるいは式(C-3)は，回帰の問題として取り扱うことができる．ベイズ線形回帰モデル(BLR)の基本式は，以下の式(C-5)で表現できる．

$$y = X\beta + \varepsilon,\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \tag{C-5}$$

ここで，yは観測情報（本研究では，ケーブル振動数：$y = \left\{\left(\frac{f_i}{i}\right)^2\right\}_{n\times 1}$），$X$は既知の情報（本研究では，ケーブルの長さ，質量，振動モード次数：$X = \left[\frac{\pi^2 i^2}{4ml^4} \quad \frac{1}{4ml^2}\right]_{n\times 2}$），$\beta$は同定対象（本研究では，ケーブル張力と剛性：$\beta = \begin{Bmatrix} EI \\ T \end{Bmatrix}_{2\times 1}$），$\varepsilon$は予測誤差で，平均ゼロ，分散$\sigma^2$の独立同一分布に従う．

同定対象（β, σ^2）の事後確率分布は，ベイズ定理に従い式（C-6）に表される．

$$p(\beta, \sigma^2 | y, X) = \frac{p(y|X, \beta, \sigma^2)p(\beta, \sigma^2)}{p(y|X)} \tag{C-6}$$

本研究で提案するベイズケーブル張力同定の概要を**図 C-1** に示す．

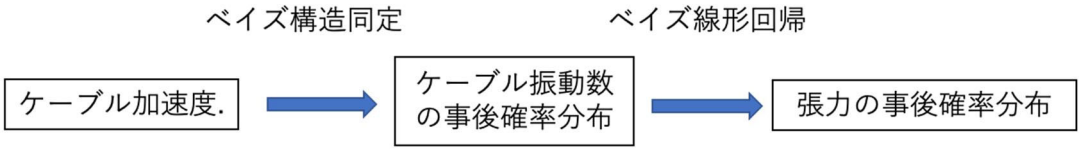


図 C-1 ベイズケーブル張力同定の流れ