

博士学位論文

橋梁健全度の遠隔診断システムのための
省電力・高精度無線センサの開発と
長期運用による性能検証

令和4年3月

茨城大学大学院理工学研究科

樺島 勝

橋梁健全度の遠隔診断システムのための 省電力・高精度無線センサの開発と 長期運用による性能検証

論文要旨

小規模な劣化を定期的な点検で発見して早期に修繕する予防保全によって橋梁を比較的 low コストで長寿命化することが標準的になっている。これに加えて、大規模災害の直後には、二次災害防止および救難経路確保の観点から、迅速に橋脚の健全度を診断しなければならない。大規模災害では多くの橋梁が同時に被災する一方、橋梁点検者の人数は限られているので、無線通信を介して健全度の初期診断を行う遠隔診断システムが求められる。

橋脚の固有振動数と振動モードは、阪神大震災後の橋脚の健全度評価で実績のある健全度評価指標である。振動モードを測定するためには、各橋脚に時刻同期した複数の加速度センサを設置しなければならない。設置の自由度のためにセンサ間の通信には無線が有利である。このような加速度型無線センサは、いつ起きるか分からない災害に備えて、電池駆動で長期間待機可能な省電力性が求められる。橋梁を振動させる外力として本格的な加振機は常設できないため、通行車両による加振を用いることが現実的である。このとき、橋梁の振動は数 gal にも満たない微小振動となるため、加速度センサには高い精度が求められる。

本研究では、省電力性能に優れた MEMS 型アナログ出力加速度計と低速であるが高分解能な $\Delta\Sigma$ 型 A/D 変換器を用いて必要な分解能を達成し、複数の加速度計を並列に接続することによって低ノイズレベルを達成する無線センサを開発した。この無線センサを 1~2ms 以内の精度で時刻同期させ、3年以上の待機時間を有する電池を組み込んで、各橋脚に3台設置することによって、固有振動数と振動モードによる橋梁の健全度診断システムを構築した。長期間の待機後でも確実に稼働できるように、システムは使用可能温度範囲が $-20^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ 以上の電子部品で構成し、特に無線センサは長時間の水没にも耐えられるように密閉して耐久性を確保した。

本システムの耐久性と性能は、常陸大宮市の引田橋での3年間に渡る長期運用によって検証した。2014年6月の設置後3年経過してもシステムが損傷せずに稼

働することが確認された。実運用で想定される待機時間に比べて頻繁に試験測定を行なったため、電池は1年ごとに交換したが、電池の消耗度には問題がなかった。2014年9月と2018年6月の測定において、橋脚の固有振動数と振動モードが安定的に測定できた。固有振動数は、加振の役割を担う通行車両の種類や数によらず、軽自動車による加振でも安定的に検出できた。橋脚の固有振動の振幅は、小さいながらも測定期間を通して継続的に存在するため、スペクトル解析の結果において他の周波数成分に埋もれずに現れていると考えられる。これを可能にしているのが、本研究で特に工夫した高分解能・低ノイズレベルの加速度計測回路である。

本システムは、大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で迅速に評価することを可能にするため、危険箇所の早期閉鎖、安全箇所の早期再開に役立ち、以って、災害からの復旧活動の効率化に貢献できる。さらに、本システムは、そのまま平時の定期点検でも利用可能であるので、点検作業の省力化に役立ち、また、橋梁の長寿命化のためのモニタリングにも応用可能である。

Development of Low-Power and High-Precision Wireless Acceleration Sensors for Remote Bridge Health Assessment System with Performance Verification by Long-Term Operations

Abstract

Preventive maintenance is a standard policy for extending the service life of bridges. All the bridges are regularly inspected to find and fix minor damages at early stages. Besides, in the event of large-scale disasters, bridges must be quickly inspected for possible major damages not only for preventing secondary disasters but also for securing routes for rescue services. It is crucial for the bridges to be inspected remotely through wireless communication channels because many bridges are affected at a time in the event of a large-scale disaster whereas relatively few bridge inspectors are available.

The resonance frequency and the mode of vibration are the standard indices of bridge health assessment used after the Great Hanshin Earthquake. Multiple accelerometers must be synchronized and mounted on each pier of the bridge for observing the mode of its vibration. Wireless sensors are advantageous in the latitude of installation. Such wireless sensors must consume little power of the battery in order to stay ready for a disaster taking place in an indefinite time. Passing vehicles are the only source of the external force to stimulate the bridge since we cannot keep a special device such as the vibration exciter. In such a situation, the vibration gets so small as a few gals that we need high-precision accelerometers.

In this study, a wireless sensor module has been developed which achieves the required resolution by the low-power analog MEMS accelerometers and the high-resolution delta-sigma AD converters and achieves the required low noise level by parallel configuration of the MEMS accelerometers. The wireless sensor modules are synchronized within the time difference of 1-2ms, powered by batteries durable for three years, and mounted on each pier on the bridge to constitute a system for bridge health assessment in terms of the resonance frequency and the vibration mode. For the sake of its reliable operation after seasons of standby, the whole system is made up of electronic components that work at the temperature from -20°C to $+75^{\circ}\text{C}$, and,

especially, the wireless sensor module is firmly sealed to survive even submergences.

The durability and performance of the system has been verified through long-term operations at the Hikita bridge in the city of Hitachi-omiya for four years. It was demonstrated that the system worked normally in June 2018, four years after its installation in June 2014. The batteries lasted for the expected period although we had changed them every year for the sake of tests that took place much more frequently than the real operation cycle. Two tests almost four years apart in September 2014 and June 2018 consistently resulted in almost the same resonance frequency and mode of vibration. The resonance frequency was consistently measured in various conditions of stimulations by different numbers of vehicles of different sizes including a light motor vehicle. Since the vibration of the bridge at its resonant frequency is persistent for a long time, despite its tiny amplitude, the spectral analysis for a long time successfully highlights the resonant frequency out of the other frequency components. That was made possible by the high-resolution and low-noise accelerometers on which this study focuses.

The system makes it possible to inspect the bridge piers by remote operation immediately after a disaster for the sake of timely closing down, re-opening, and helping efficient recovery process after the disaster. The system can be used for regular inspections as well in the normal time as an efficient means of preventive maintenance for prolonging the service life of bridges.

目次

1 章	序章	1
1.1	構造物の維持管理に対する国の取組	1
1.2	橋梁の維持管理に関する現状	3
1.3	自然災害発生時の橋梁の点検の必要性	7
1.4	橋梁の点検に関する従来研究	8
1.5	本研究の目的	10
1.6	本論文の構成	10
2 章	災害時の橋梁点検システムの課題	11
2.1	システム概要	11
2.2	システムの課題	12
3 章	要求仕様と設計	13
3.1	対象と目的	13
3.2	健全度の評価	13
3.3	要求分析	14
3.3.1	微小振動測定への要求	14
3.3.2	バッテリー駆動の省電力への要求	17
3.3.3	無線センサ間の時刻同期への要求	17
3.3.4	耐水性・耐久性への要求	17
3.4	設計	18
3.4.1	同時観測によるノイズ低減	18
3.4.2	加速度計のモジュールの設計	19
3.4.3	MEMS 型加速度センサの並列接続の検証	20
3.4.4	低消費電力の設計検討	25
3.4.5	時刻同期の設計検討	26
3.4.6	耐水性・耐久性の検討	27
3.5	設計結果	28

目次

3.5.1	無線センサ	28
3.5.2	中継器.....	33
3.5.3	親機（データ収集装置）	35
3.5.4	トリガーセンサ	37
4 章	実証試験と検証.....	38
4.1	長期モニタリング試験の概況	38
4.2	長期モニタリング試験の結果	41
4.3	サーボ型の加速度計と比較による性能確認	44
4.4	車両の種類と走行状況による影響の確認.....	45
5 章	結論.....	48
5.1	本研究の成果と意義	48
5.2	今後の課題.....	48
	謝辞.....	50
	参考文献.....	51
	著者による発表論文.....	56

1章 序章

1.1 構造物の維持管理に対する国の取組

本研究が貢献することを目指した分野の背景として、我が国においてメンテナンス元年と宣言された2013年から現在までの構造物の老朽化対策及び長寿命化を含む維持管理に対する国の取組の経緯をまとめる。

審議会等の整理合理化に関する基本的計画¹⁾が1999年（平成11年）に閣議決定され、従来9つあった審議会が2001年（平成13年）の中央省庁再編にあわせて再編され²⁾、社会資本整備について総合的に審議を行う社会資本整備審議会が国土交通省内に設置された³⁾。社会資本整備審議会の主な所掌事務は、国土交通大臣の諮問に応じて不動産業、宅地、住宅、建築、建築士及び官公庁施設に関する重要事項を調査審議すること、重要事項に関し関係行政機関に意見を述べること、これらに関する法律の規定によりその権限に属させられた事項を処理することである。審議会の中に設置された道路分科会は、道路法の規定により審議会の権限に属させられた事項の調査・審議を担い⁴⁾、道路分科会の中に設置された基本政策部会は、新しい課題に対応した道路政策⁵⁾のあり方を審議している。

基本政策部会において構造物の老朽化に対する議論がなされている。2002年（平成14年）8月の第2回道路分科会による中間報告⁶⁾には“構造物の老朽化があと10年ごろから集中的に進むということ等を考慮し2010年代初頭までに成熟型社会において最低限必要な道路整備に目途をつけなければならない。そのため、今後10～15年を目途とした集中投資期間を設定し、集中的な投資を実施すべきである”と示されている。道路分科会では、経済成長期に整備された構造物が50～60年を迎える頃に構造物の高齢化が将来急速に進むことへの対策の必要性が喚起された。対策は、国土交通省の道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会で検討され、2003年（平成15年）4月に“道路構造物の今後の管理・更新等のあり方 提言”⁷⁾で示された。2007年（平成19年）8月にはミネソタ州ミネアポリス市においてインターステートハイウェイI-35W号線の橋梁崩落事故^{8) 9)}が発生した。その直後の2008年（平成20年）5月には、道路橋の予防保全に向けた有識者会議による“道路橋の予防保全に向けた提言”¹⁰⁾が出された。しかし、国の政策として本格的な構造物メンテナンスと点検等の

1章 序論

明確化への取組が開始されるにはもう少し歳月がかかった。

さらに、2012年（平成24年）12月に中央自動車道において笹子トンネル天井板落下事故が発生し、社会は、構造物の老朽化の問題を強く認識することとなった。これを受けて国は、2013年（平成25年）1月に国土交通大臣をトップとする社会資本の老朽化対策会議¹¹⁾を設置し、「国民の命を守る」観点のもとで老朽化対策の取りまとめを開始した¹²⁾。この年がメンテナンス元年と位置づけられ、定期的な巡視・点検により施設の健全度を把握した上で対策の内容や時期等を長寿命化計画として策定する方針が定められ、大きくメンテナンスに舵を切る結果となる。

2014年（平成26年）4月に社会資本整備審議会 道路分科会が取りまとめた“道路の老朽化対策の本格実施に関する提言”¹³⁾が、国土交通大臣に手交された。この提言書は、冒頭で“最後の警告ー今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ”と始め、構造物の老朽化が危機的なレベルに達していることへの緊急性を強調して、本格的な老朽化時代になった状況において早くメンテナンス体制を構築する必要性を提言している。

2013年（平成25年）6月に道路法等の一部が改正され、維持・点検の措置を講ずることが規定された。2014年（平成26年）3月には、定期点検に関する省令が告示され、同年6月には、橋梁やトンネルなどそれぞれの構造物の定期点検要領が策定され、具体的な点検方法や記録項目などが示された¹⁴⁾。道路における構造物の定期点検を5年に1回の頻度で近接目視によって実施し、必要に応じて非破壊検査を行うことを基本とし、変状等の健全性の診断を4段階に区分した道路構造物の定期点検に関する共通規定が定められた。

インフラ長寿命化基本計画¹⁵⁾が、2013年（平成25年）11月に政府全体の取組として取りまとめられた。この基本計画には、長寿命化計画を核としたメンテナンスサイクルの実行体制の構築、産学官の連携による新技術の研究開発、メンテナンス産業の育成、2030年までのロードマップが含まれている。

研究開発に関しては、社会インフラのモニタリング技術の実用化に向けた現場実証等を目的として、国土交通省、内閣府、経済産業省及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の連携のもとで研究開発支援が強化された。NEDOによる“研究開発の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術”（2014年度～）と“インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト”（2014年度～）、国土

交通省による“社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発”（2014年度～）が実施されている。

5年に1回の定期点検に関わる最初のメンテナンスサイクルである2014年から2018年度（平成26年から30年度）の5年間に定期点検が一巡して構造物の健全性が把握された。2019年度（平成31年度）からメンテナンスのセカンドサイクルが始まっており、事後保全から予防保全への転換が進むと期待される。事後保全と予防保全でのライフサイクルコストの違い¹⁶⁾に示されているように、短いサイクルでの点検と補修によって、小規模な修繕で済み、架け替え等の大規模な更新を余儀なくされる状態に至るリスクも下げられるため、構造物の長寿命化につながる。

2019年度（平成31年度）からのサイクルでは、点検業務が定常的に機能し、構造物の長寿命化へ向けた対策が進むことになる。しかし、財政が厳しく専門技術者が不足している市町村においては、必ずしも計画どおりに老朽化対策が進むかどうか不透明な状況である。

1.2 橋梁の維持管理に関する現状

高度経済成長期に整備されてきた橋梁やトンネルなどの構造物の多くでは、老朽化が進行しており、効率的な維持管理が急務とされている。橋梁に関する現状は、国土交通省が公表している道路メンテナンス年報に示されている¹⁷⁾。その要点を以下にまとめる。

建設年度別の道路橋の数をグラフに図1.1に示す。橋長2m以上の橋梁は、全体で約73万橋あり。1955年（昭和30年）から1975年（昭和50年）の高度経済成長期にかけて建設されたものが約26%を占めている。建設後50年を経過した橋梁数は2017年度（平成29年度）時点で約25%、10年後の2027年度（令和9年度）には約50%に急増すると見込まれている。

道路管理者別の道路橋の数をグラフに図1.2に示す。地方公共団体が管理する橋梁は、都道府県で13.8万橋、政令都市で4.6万橋、市区町村で47.7万橋ある。これらの合計は、約66万橋で、全体の90%以上に占める。管理者別の橋長分布をグラフに図1.3に示す。市町村が管理する道路橋の内訳は、100m以上の長大橋が1%、100m未満の中小橋が99%であり、中小橋が大半を占める。ただし、このグラフには、建設年度が記録で確認できない古い橋梁は含まれていないことに留

1章 序論

意が必要である。建設年度不明の橋梁は約23万橋も存在し、その大半は橋長15m未満のため、市町村による管理の対象である。

○ 建設年度別橋梁数

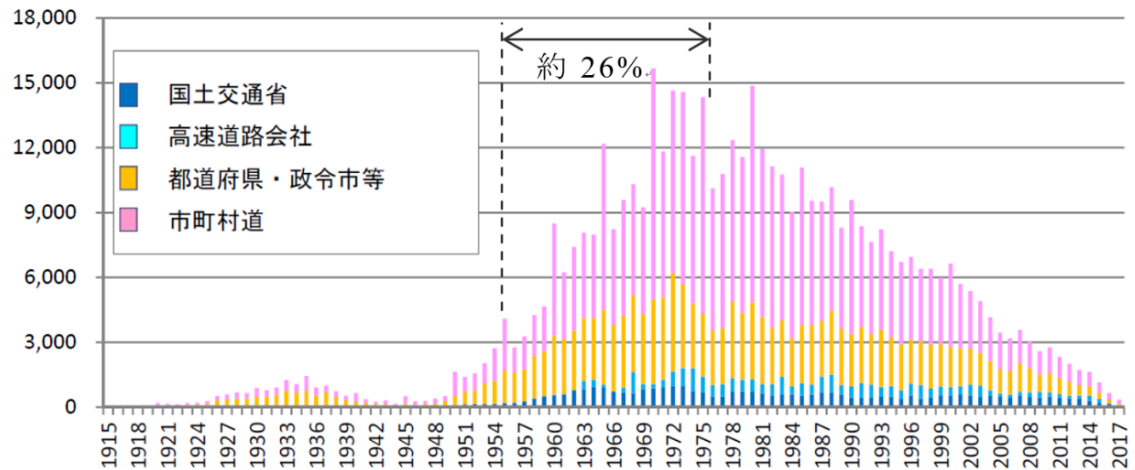


図 1.1 建設年度別橋梁数 (道路メンテナンス年報 平成 29 年度より)

○ 道路管理者別橋梁数

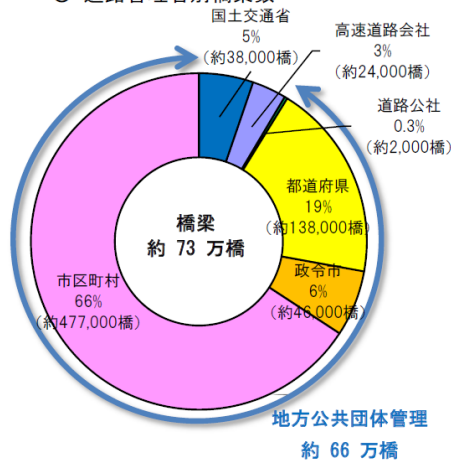


図 1.2 道路管理者別橋梁数 (道路メンテナンス年報 平成 29 年度より)

○ 管理者別の橋長分布

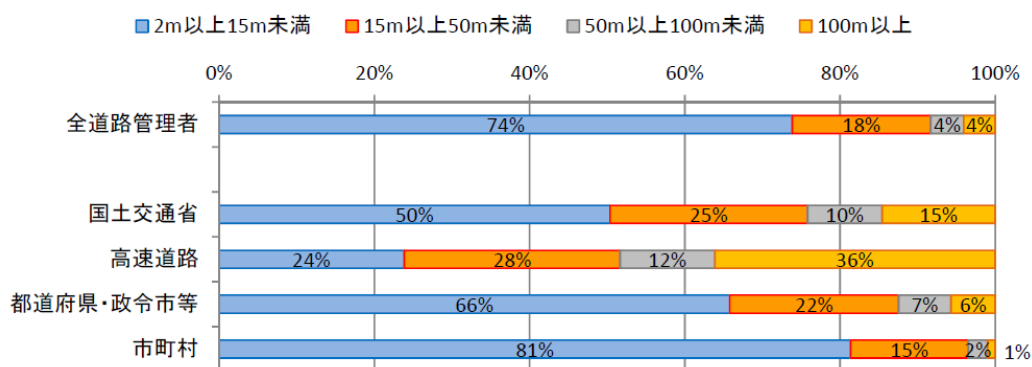


図 1.3 管理者別橋長分布（道路メンテナンス年報 平成 29 年度より）

5年に1回の頻度で実施される定期点検で用いられる健全性の判定区分表を表 1.1に示す。構造物の健全性は4段階の区分で診断され、Ⅰは健全、Ⅱは予防保全段階、Ⅲは早期措置段階、Ⅳは緊急措置段階である。判定区分Ⅲ、Ⅳの修繕は早期もしくは緊急に措置を講じる必要があるため、事後保全扱いになる。早めの修繕のコストは安く、長寿命化につながるという観点から、判定区分Ⅱの段階で修繕の予防保全措置を講じることが望ましいとされている。

事後保全型と予防保全型の修繕着手率を図 1.4に示す。橋梁での事後保全は15%、予防保全は3%である。道路管理者別の事後保全型と予防保全型の修繕着手率を表 1.2に示す。これをもとに地方公共団体の着手率を求めると、事後保全は12%、予防保全は2%である。地方公共団体において、限られた人員や財政の中での予防保全の難しさが表れている。事後保全さえ間に合わず、地方公共団体による通行規制の対象となった橋梁は、2016年（平成28年）4月時点で2559橋にのぼり、年々増加している。

このように、人材不足の状況でも低コストで予防保全に貢献できる中小橋梁向けの橋梁モニタリングシステムの需要が高まっている。

表1.1 健全性の判定区分表

(3) 橋梁・トンネル・道路附属物等の健全性の診断について

橋梁・トンネル・道路附属物等の健全性の診断は、以下の4段階に区分します。

区分	状態
I 健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
II 予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III 早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV 緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

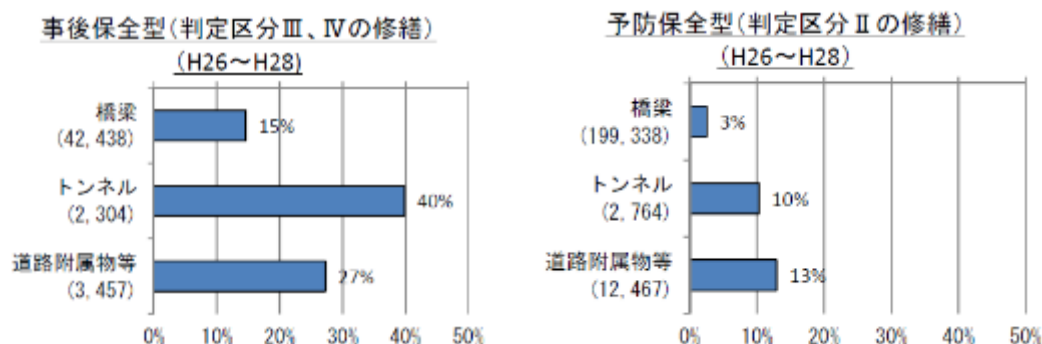


図 1.4 事後保全型と予防保全型の修繕着手率

表 1.2 判定区分Ⅱ，Ⅲ，Ⅳの修繕着手率（平成 26～28 年度）

	修繕が必要な施設数(A)		修繕に着手済みの施設数(B)	着手率(B/A)
	判定区分			
国	Ⅱ	7,225	1,808	25%
	Ⅲ	1,993	1,230	62%
	Ⅳ	4	3	75%
高速道路会社	Ⅱ	10,893	290	3%
	Ⅲ	1,174	422	36%
	Ⅳ	0	-	-
都道府県・政令市等	Ⅱ	53,172	566	1%
	Ⅲ	12,515	1,160	9%
	Ⅳ	21	13	62%
市町村	Ⅱ	128,048	2,413	2%
	Ⅲ	26,360	3,230	12%
	Ⅳ	371	146	39%

1.3 自然災害発生時の橋梁の点検の必要性

メンテナンスサイクルに従った計画的な橋梁モニタリングに加えて、自然災害の際には迅速な緊急点検が求められる。

自然災害は、気象災害と地象災害に大別できる。近年の災害は、集中豪雨・洪水・台風・竜巻などの気象災害や、地震・津波・土石流などの地象災害があり、これらが重なって複合災害が発生した場合の被害は甚大となる。

日本の年間降水量1668mmは、世界平均813mm（2014年）の2倍ほどあり¹⁸⁾、さらに、降雨は梅雨や台風時期に集中している。国土の約7割が山岳地帯ということもあり、降った雨は短い急勾配の河川を一気に海まで流れる。そのため、急激に水位が増して短時間のうちに洪水や土砂災害が発生するリスク¹⁹⁾が大きい。

強雨の状況を統計²⁰⁾でみると、2010年から2019年までの1時間降水量50mm以上(アメダス1,300地点あたり)の平均発生回数は327.1回であり、1990年から2019年までの30年間の平均290.9回に比べて大幅に増加している。台風の状況²⁰⁾については、2010年から2019年までの年平均が、発生25.2個、日本への接近12.3個、上陸3.7個であるのに対し、2015年から2019年の各年に上陸した台風は、4個、6個、4個、5個、5個と近年多い傾向にある。

水害統計調査によると、2007年度から2016年度までの水害被害の年平均は、約3380億円であるのに対して、2018年は約1兆4,050億円、2019年は約2兆1,800億円²¹⁾と桁違いの被害となり統計開始以来最大の被害額を記録した。

土砂災害発生状況²²⁾によると、1982年(昭和57年)からの集計開始以降の土砂災害件数は、年平均が1105件であるのに対し、2016年は1492件、2017年は1514件、2018年は3459件、2019年は1996件、2020年は1319件と近年特に多い傾向にあり、2018年の7月豪雨では集計が始まった1982年以降で過去最多を記録した。

日本列島は、4つの大陸プレートが重なりあう位置にあり、全世界で発生する地震の10%、マグニチュード6.0以上の地震の20%が日本周辺で発生し、分かっているだけでも2000の活断層²³⁾が存在するといわれる、地震大国である。日本付近で発生した主な被害地震²⁴⁾によると、阪神・淡路大震災や東日本大震災を含め150回以上にのぼり、近年多くの地震が発生している。また、見つからない活断層が測地学的データ²⁵⁾を用いて可視化できるようになり、地震の少ないとされてきた地域でも備えが必要になってきた。

この大震災を踏まえ、強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する、国土強靱化基本法が2013年（平成25年）12月に公布・施行され、国土強靱化基本計画が2014年（平成26年）6月に閣議決定された。

日本の河川数は35,485本であり²⁶⁾(ただし河川法適用外や農水路は含まない)多くの地域を分断しているため、橋梁は地域間を結ぶ交通網として重要なインフラである。大きな地震による強い揺れはもとより、強雨による水害でも河川の流れが洗掘、橋脚の沈下を経て、倒壊、落橋を引き起こすこともある。

国民の安全を守るために、橋梁の状況を迅速に点検して通行止めなどの緊急措置と情報発信が最優先に求められ、その後の復旧活動においては、損傷の程度に応じて優先順位を付けて対応することが重要になる。

1.4 橋梁の点検に関する従来研究

高度成長期に整備された道路橋は全体で73万橋あり、地方自治体の管理する道路橋は66万橋で全体の90%にのぼる²⁷⁾。老朽化が急速に進行しているため、それらの効率的な管理が急務となっている²⁸⁾。橋梁の健全性を定期的に評価するための橋梁モニタリングにおいては、近年、無線センサネットワークによる振動測定を用いた手法²⁹⁾、UAVで取得した画像を用いた手法³⁰⁾、光ファイバセンサによる応力測定を用いた手法³¹⁾など多様な手法が研究されている。

振動測定では、加速度計・速度計・変位計が用いられる。特に、塗装面やコンクリート表面に直接貼り付けられる加速度計がよく用いられる。振動データに基づいて振動スペクトル分析、モード解析、変位量解析などで得られた値を、FEM(有限要素法)による解析や健全時の既知の値と比較して得られる変状量から構造物の強度や損傷の程度を把握できる³²⁾。

伝統的な有線接続による振動データの収集は、橋梁に設置したセンサからから測定機器とパソコンまで間をケーブルで接続していた。センサ数が多くなると、測定機器の置かれた場所ではケーブルが集中して配線が混雑する問題があった。また、測定者は、測定機器の付近に在中して測定機器を操作しながらデータ収集を行う必要があり、長期間に渡って継続的に測定する場合は測定機器を監視保護する必要もあった。センサに無線通信機能を持たせると、ケーブルを省略でき、さらに、各センサから集めたデータをまとめて電話回線などでサーバーにアップロードする制御装置を置けば、現地に測定者を在中させずに遠

隔で操作することも可能である。

画像による測定では、カメラやUAVなどを用いて撮影した構造物全体や一部の映像を利用する³³⁾。ひび割れや損傷の程度を確認するために拡大して撮影を行い、複数枚撮影した画像を合成して全体画像を構築して損傷を確認することも可能である。画像相関法を用いて橋梁のたわみを測定する手法³⁴⁾、サンプリングモアレ法³⁵⁾を用いてひずみ・変位や固有振動を解析する手法がある。また、14ビット以上のハイダイナミックレンジ・イメージングでビデオ撮影された画像から取得したピクセルのエッジを時系列で解析することにより物体の振動を解析する手法もある³⁶⁾。

応力測定（ひずみ測定）では、ひずみゲージが一般的に用いられる。ひずみゲージは、鋼材や鉄筋などに直接貼り付けなければならないため、塗装面やかぶりコンクリートを除去し、金属表面を露出させてから削り地金を滑らかにする工程を要する。鋼材や鉄筋などの伸縮の変化量を測定することによって、部材にかかる力や変形量が直接把握できるため、構造物の強度や疲労の程度を高精度に推定できる³⁷⁾。ひずみゲージの代わりに光ファイバーを用いる多点型センシングの方法³⁸⁾は、光ファイバーを塗装面やコンクリート表面などに設置できるため、高価ではあるが長期モニタリングに適した手法である。応力そのものではなく、その結果として生じるひび割れの変化をクラックゲージで測定する方法もある。

これらの研究は、メンテナンスサイクルに従った計画的な橋梁モニタリングに資することを主眼としている。そこで得られた手法の原理は地震や水害の際の緊急点検にも応用可能であるが、地震や水害の発生に備えて、地方自治体管理の中小橋梁を含む多数の橋梁をいつでも遠隔で点検できる実用的なシステムは未だ得られていない。

1.5 本研究の目的

本研究は、地震や水害の際に、地方自治体管理の中小橋梁を含む多数の橋梁の状態を速やかに把握することを目的として、バッテリー駆動で長期間待機可能であり、橋脚の振動加速度を遠隔で測定して固有振動数と振動モードにて診断するシステムを設計・開発・試験することを目的としている。

1.6 本論文の構成

以下の第2章では、大規模災害時の橋梁の緊急点検を可能にするシステムの在るべき姿を導く。第3章では、そのシステムへの要求仕様を明らかにし、この要求仕様を満たすようにシステムを構築する方法を論じる設計過程、設計結果として得られた実システムの構成を示す。第4章では、橋梁の長期モニタリングに適用した実証実験および性能確認を示す。第5章では、結論として、本研究の成果と意義、今後の課題を述べる。

2章 災害時の橋梁点検システムの課題

2.1 システム概要

本研究は、地震や水害の際に、地方自治体管理の中小橋梁を含む多数の橋梁の状態を速やかに把握することを目的として、バッテリー駆動で長期間待機可能であり、橋脚の振動加速度を遠隔で測定して固有振動数と振動モードにて診断するシステムを設計・開発・試験することを目的とする。全体像を図2.1に示す³⁹⁾。

従来の有線測定では、高価な計測機器を利用して配線設置などの測定コストが高い傾向にある。無線を利用してシステムを安価に構築した先駆的な研究⁴⁰⁾では、電力消費が大きい無線LANを利用していたが、現在では、ローパワーな無線ICが登場したことにより、リチウム電池を用いた長期モニタリングのシステムを設計することも可能になっている。

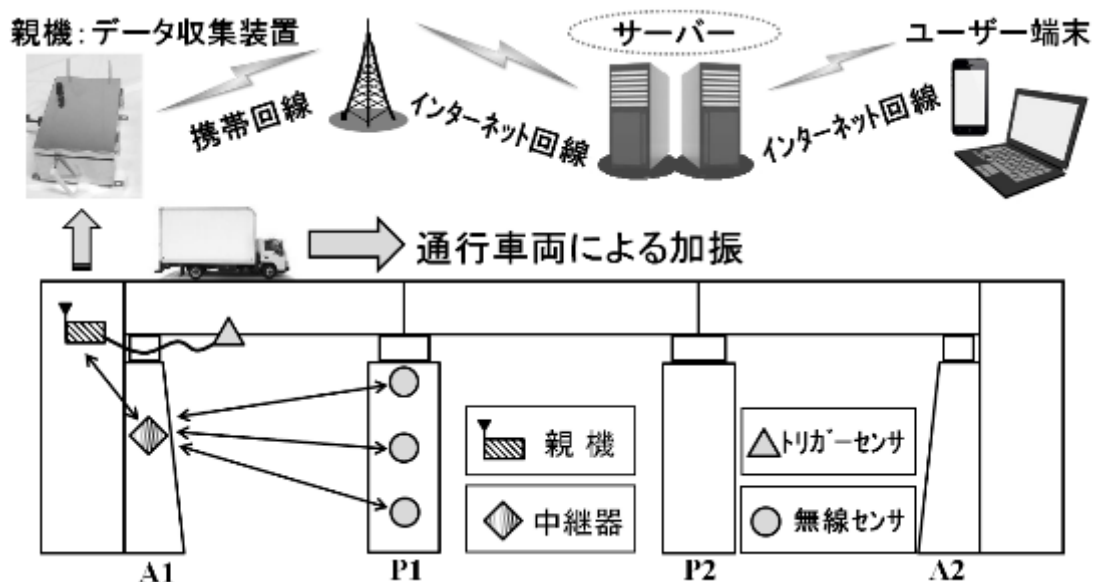


図 2.1 システム構成

2.2 システムの課題

橋脚の固有振動数と振動数モードの測定において、本格的な強制振動試験や衝撃振動試験で使用する起振機や重錘を用いて加振することは可能であるが、災害後に速やかに測定するためには、これらを橋梁に常設して待機しておかなければならない。長期観測や多点の同時観測では通行車両による加振を用いる方が現実的である。そのときの橋梁の振動は数 gal にも満たないという問題がある⁴¹⁾。

このような微小振動の測定に対して、起振機によって正確に周期的な加振が行えることを前提として、アナログ MEMS 型加速度計の出力波形を周期的に重ね合わせることによる高精度化が示されている⁴²⁾。本研究では、通行車両による加振を前提とするので、周期的な波形の重ね合せではなく、複数のアナログ MEMS 型加速度計で同時に測定した波形を加算する方法で、中小橋梁を対象とした場合に必要となる精度を満たすような加速度計測回路を目指す⁴³⁾。振動モードを求めるために必須なセンサ間の時刻同期に対しては、計測開始前に衝撃パルスを与えて計測データ上にパルス波を基準としたマーカーを挿入する方法²⁹⁾、GPS 時刻を利用した方法⁴²⁾、無線の RF デバイスの機能を利用した高精度な同期方法⁴⁴⁾が示されている。本研究では、標準的な Network Time Protocol に似た時刻同期方法を採用する。橋脚に取り付ける機器には、耐水性・耐久性の対策を施す必要がある。本研究では、耐水性・耐久性を前提として、加速度計測と時刻同期に関する要求精度を満たしつつ、バッテリー駆動での長期間待機を可能にするための省電力化に重点をおいてシステムを設計・開発・試験する。

3章 要求仕様と設計

3.1 対象と目的

橋脚を対象とし、大規模災害が起きた直後に、損傷の程度を遠隔で評価できる遠隔モニタリングを目的とする。大規模な水害や地震によって、橋梁は洗掘やひび割れなどの損傷を受けることがある。橋梁の損傷の程度を即座に評価することは、交通規制などの応急対策を迅速に指示するためにも、現地での本格的な確認作業を損傷の程度に応じて優先的・効率的に進めるためにも重要である。

3.2 健全度の評価

固有振動数、振動モードの変状の度合いは、被災時に橋梁が洗掘された状態や、ひび割れなどの異常の発生を判定する方法として利用されている⁴⁵⁾。この判定方法は、1991年より東海道新幹線のコンクリート構造物の健全度評価に採用されている⁴⁶⁾。橋脚の健全度診断に関して1995年の阪神淡路大震災の際に被災した京都から新大阪間の東海道新幹線橋脚の補強対策後に供用開始の可否を判定する際に運輸省（当時）から公認された方法である⁴⁷⁾。新大阪から姫路間の山陽新幹線においても多くの高架橋・橋梁の補修や補強対策が行われ耐震性の評価が行われた⁴⁸⁾。

損傷の程度あるいは健全度の評価は、災害前に計測した健全度指標を健全時データとしておき、災害後に計測した健全度指標と比較することによって行われる。健全度の指標として、以下の2つを採用する。

① 固有振動数：振動加速度波形を周波数分析して得られる周波数スペクトルで最大値をとる固有振動数の値。健全時の固有振動数の値に比べて災害後に固有振動数がどの程度低下したかの度合を見る^{49) 50)}。

② 振動モード：振動加速度波形を2階積分して得られる変位波形の固有振動数での振幅を表す振動モード図。健全時のモード形状と比較して災害後にモード形状がどの程度変化したかの度合を見る。モード形状から被災部位を推定

することもできる^{46) 49)}。

3.3 要求分析

大規模な災害では、被災した橋梁は広範囲に多数分布するので、健全度の評価は通信ネットワークを通じた遠隔操作によって行わざるを得ない。災害がいつ起きても即座に稼働できるように、遠隔モニタリングシステムは、長期に渡って待機していなければならない。振動モード図を得るためには、1つの橋脚に複数の加速度計を設置し、相互に同期した時刻で振動波形を計測しなければならない。河川橋の橋脚に長期間設置する機器には、高い耐水性・耐久性が求められる。

本格的な計測における加振には重錘による打撃が用いられるが、遠隔による長期観測や多点の同時観測を行うためには通行車両による加振を用いなければならない。

これらの要求を満たすように、システム全体は図2.1に示される構成とする。親機1台を橋台に設置する。親機の電源はバッテリーバックアップされた商用電源とする。親機は、携帯電話のネットワーク回線を通じて遠隔のパソコン・スマートフォン及びタブレットなどと通信するとともに、2.4GHz帯の通信プロトコルIEEE804.15.4で無線中継器を通じて無線センサと通信する。ここでいう無線センサは、通信無線モジュールと加速度計を一体化したものである。トリガーセンサは、親機に直接接続され通行車両による加振のタイミングを検出するために用いられる加速度計である。振動モード図を得るために、橋脚あたり3つの無線センサを設置する。

3.3.1 微小振動測定への要求

波形の振幅の測定精度については高い要求がある。通行車両による加振を前提としているため、加振直後の波形は、車両と橋梁を合成した系の振動を表しており、むしろ車両の振動特性が支配的である。橋脚の自然振動は、車両が通過して十分に時間が経過したのちに現れる。そのときの振動は1 gal程度まで微小になってしまうため、ノイズレベルが低く、分解能が高いセンサが必要にな

る。目標値として、ノイズレベルは0.1gal(rms)以下、分解能は0.1gal以下を必須とし、できるだけ細かくすることが求められる。

構造物の加速度計測に用いられる典型的な加速度計を**表3.1**に示す。サーボ型は、微小振動を高精度に測定できるが、高価で消費電力が大きい。圧電型は、精度がよくセンサ単体では電力を消費せず 使用温度範囲も広いが、高価で低周波振動が測定できない。ひずみ型は、精度がよく低周波数成分が 0Hz（直流成分）から測定できるが、高価で消費電力が大きく耐衝撃性が低い。これらは、低価格、低消費電力、周波数特性の観点で本システムには不向きである。MEMS型は、微小振動測定の精度が十分ではないが、価格、サイズ、消費電力、耐衝撃性で使われているため、弱点である精度を改善すれば、バッテリーを用いた長期モニタリングが可能になると期待できる。

表 3.1 加速度計の性能比較

	MEMS 型 LIS344ALH		サーボ型 LS-40C		圧電型 PV-93		ひずみ型 AS-2TG	
微小振動測定	△		◎		○		○	
低価格	◎	約 300 円	×	30 万円	×	14 万円	×	18 万
小型サイズ	◎	約 4mm	△	約 40mm	△	約 21mm	△	約 44mm
動作時の消費電力	◎	約 2.2mW	×	約 500mW*	△	約 0mW*	×	約 100mW*
耐衝撃性	◎	10000G	△	100G	○	500G	×	20G
周波数特性	○	0~2kHz	○	0~100Hz	△	1~10kHz	○	0~60Hz
使用温度範囲	○	-40~85℃	△	-40~60℃	◎	-50~160℃	△	-10~60℃
軸構成	3 軸		1 軸		3 軸		3 軸	
専用アンプ	不要		必要		必要		必要	
<p>光ファイバー型は、システム一式で数百万~数千万円なので加速度計の比較から除外。</p> <p>「動作時の消費電力」の欄では、センサ単体での消費電力を記載。</p> <p>「*」を付したセンサでは、専用アンプが別途必要なため、消費電力に関する評価が低い。</p>								

3.3.2 バッテリー駆動の省電力への要求

中継器，トリガーセンサ，無線センサは，橋脚に設置するためバッテリー駆動とする．これらは，省電力化のために，スリープ状態での待機を常態とし，10分間に1度だけウェイクアップして親機または中継器からの計測開始の指令が出ているかどうかを確認して再びスリープするように運用される．1ヶ月に1度の計測をする場合にバッテリーの交換なしで1年以上稼働することが求められる．

3.3.3 無線センサ間の時刻同期への要求

同期計測時には，IEEE802.15.4の上位層に独自の通信プロトコルを実装して，親機と各センサの間でNetwork Time Protocolに似た要領で通信を繰り返してセンサの時刻を同期する．計測対象と計測目的に合わせてセンサ性能への要求を検討する．固有振動数の計測には，構造物に特有な低周波で微小な振動の計測が要求される．構造物は，概ね振動周波数50Hz以下で揺れることが多いため，サンプリングレートは200Hzで十分である．時刻同期の精度は1サンプル間隔が5msであるので，2.5ms以内とすれば十分であると考えられる．

3.3.4 耐水性・耐久性への要求

河川橋の橋脚に長期間設置することを目的にしている無線センサには，水害での増水の影響による水没の可能性が大きく，防水でなく長時間の水没に対する保護が必要であり，高い耐水性・耐久性が求められる．

3.4 設計

3.3の要求分析の過程で,システム全体は既に図2.1の構成として設計された. また,表3.1での比較から安価で省電力なMEMS型の加速度計が本システムで利用する加速度計として適していること,そのMEMS型加速度計が微小振動測定のために精度改善を要することが示された.そこで,以下の設計ではMEMS型加速度計の精度改善について重点的に検討し,その上で省電力性能,時刻同期,耐水性・耐久性の実現方法を検討する.

3.4.1 同時観測によるノイズ低減

MEMS型加速度計は省電力性能に秀でているが,高価な加速度計に比べて内部ノイズが多い傾向にある.この問題を解決するため,文献42では,正確に同期して加振を繰り返す加振機の利用を前提として,何度も同じ振動を測定して得られた波形を周期的に重ね合わせることによる低ノイズ化が成されている.本研究では,通行車両による加振を前提としているため,並列化した複数のMEMS型加速度計で同じ振動を同時に測定して得られた波形を重ね合わせることにする.

同じ信号波形を同時に観測して得られた観測波形を加算することによってノイズレベルを低減することは,電子回路の一般的な技法である⁵¹⁾.真の信号波形を s とし, N 個のMEMS型加速度計のうち i 番目の加速度計から出力される観測波形を a_i とし,内部ノイズを n_i とすると,

$$a_i = s + n_i \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

となる. これらを加算すると,

$$\sum_{i=1}^N a_i = \sum_{i=1}^N s + \sum_{i=1}^N n_i = Ns + \sum_{i=1}^N n_i$$

となる. 内部ノイズ n_i が共通の標準偏差 σ , 共通の平均 0 に従うガウス性白色雑音であるならば, $\sum_{i=1}^N n_i$ の標準偏差 σ_N は,

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i^2} = \sqrt{N} \sigma$$

となる. そのため, 加算結果のSN比は,

$$\frac{Ns}{\sigma_N} = \sqrt{N} \frac{s}{\sigma}$$

となり，個々の加速度計による観測波形の SN 比 $\frac{s}{\sigma}$ の \sqrt{N} 倍に改善され，ノイズレベルは $1/\sqrt{N}$ 倍に低減される．より多くの MEMS 型加速度計を並列に接続すれば低減率の向上が期待できる．

3.4.2 加速度計のモジュールの設計

MEMS 型の加速度計にはデジタルデータを直接出力するものが多い．16bit データ出力では分解能が粗いため，微小な振動の検知に向かない．また，低ノイズや 20bit データ出力の加速度計もあるがコストが高い．

アナログ出力タイプの MEMS 型加速度計を採用することによって，自由なシグナルパスの設計が可能である．本研究では，安価で， $50 \mu \text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ の低ノイズ性能もつ STMicroelectronics 社 LIS344ALH のデバイスを採用する．A/D 変換前にカットオフ周波数 50Hz，カットオフ特性 -24dB/oct のアナログ・アンチエイリアス・フィルタをかけて，エイリアシングの防止，不要な高周波成分の低減を図る．

A/D 変換には，低周波帯域で高い分解能を示す 24bit $\Delta\Sigma$ 型 A/D 変換器を採用し，ダイナミックレンジを考慮して最小分解能を $243 \mu \text{gal}$ に設定した．

3.4.3 MEMS型加速度センサの並列接続の検証

写真 3.1 は、単価 1～3 ドルほどの低価格でノイズの少ない MEMS 型加速度計を採用して実験用に試作した基板である。赤丸で示したデバイスが 1 個の MEMS 型加速度計であり、その大きさは約 4mm 角である。これを 1 枚当たり 25 個実装した縦 57mm・横 66mm の大きさの基板を縦横 2 枚ずつ計 4 枚並べて、合計で 100 個の MEMS 型加速度計を実装した。

図 3.1 と図 3.2 は、構造物において主な関心となる振動周波数である 0.1～10Hz の範囲で暗振動ノイズ波形にバンドパスフィルタ⁵²⁾をかけて得られた波形である。MEMS の構造的な仕様のために x 軸と y 軸に比べて z 軸のノイズは多い傾向にある⁵³⁾。図 3.1 は単一の加速度計を用いた場合の暗振動波形であり、図 3.2 は 100 個の加速度計を並列接続した場合の暗振動ノイズ波形を代表として載せてある。100 個の MEMS 型加速度計を並列接続したことによって、ノイズの片振幅は、ピーク値で 0.25 gal 以上から 0.05 gal 程度へと約 1/5 に低減できた。100 個の加速度計のノイズが無相関であると仮定した場合の理論的な低減率である 1/10 には達していない。

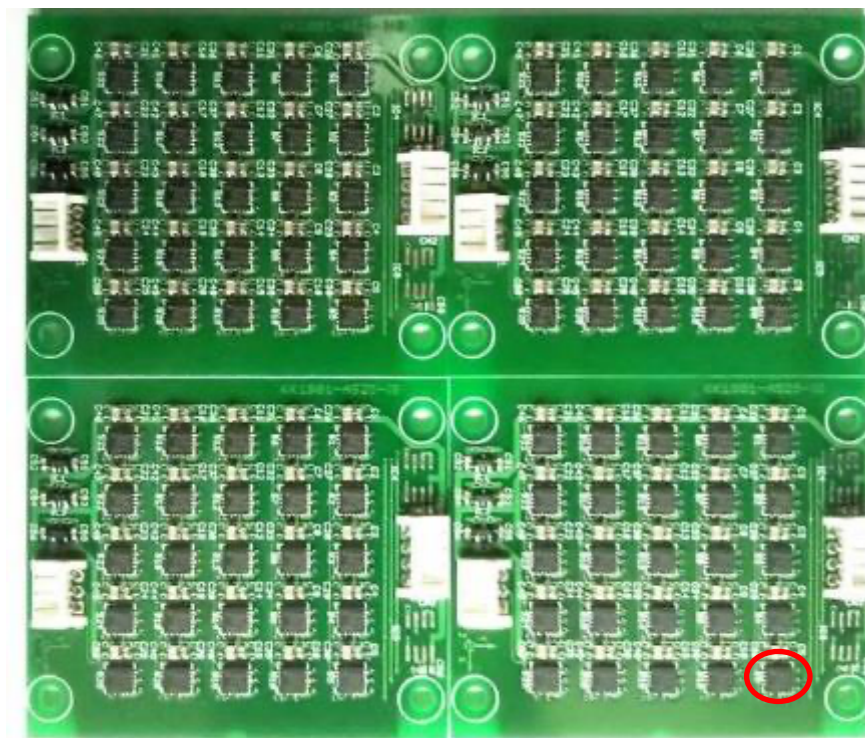


写真 3.1 100 個の MEMS 型加速度計を実装した基板

(4 枚 * 25 個) 外形 縦 57mm・横 66mm

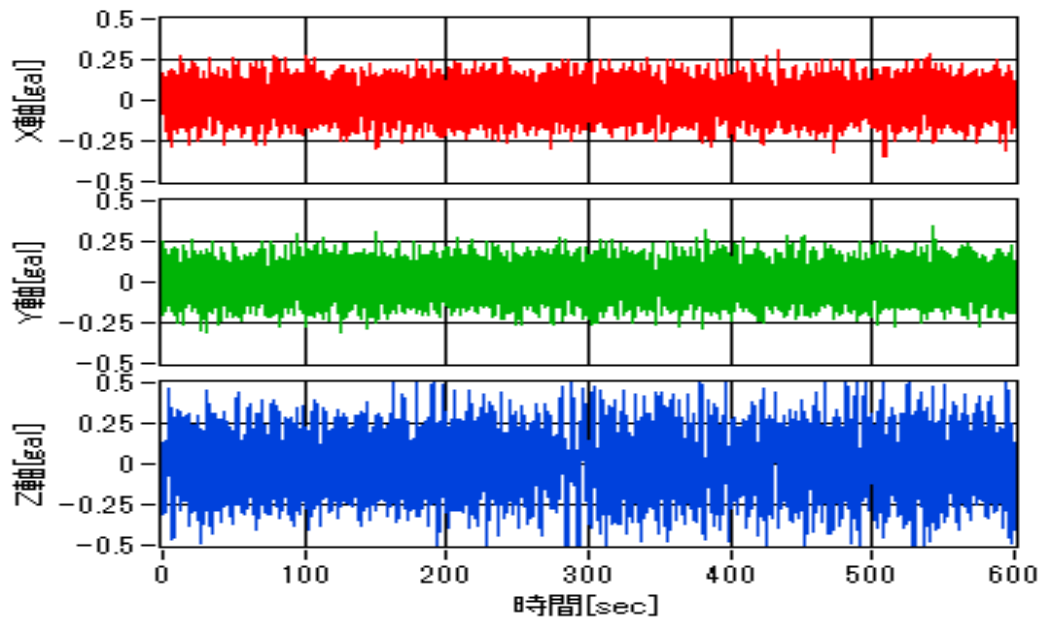


図 3.1 MEMS 単一のノイズ波形

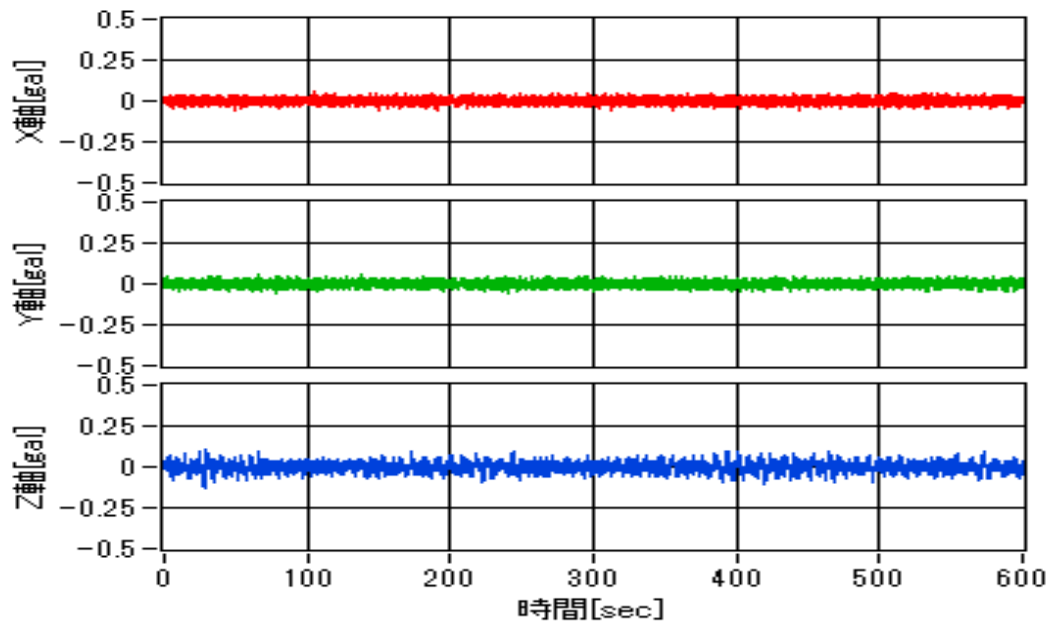


図 3.2 MEMS 100 個のノイズ波形

表 3.2 は、並列接続の個数によるノイズ低減の効果を検討するために、振動の少ない場所で計測された暗振動ノイズにバンドパスフィルタをかけた上で 2～10 分間の範囲で切り取って実効値を計算した結果を示している。個数の増加とともにノイズの実効値が確実に減少していく傾向は示されている。表 3.2 の最下行にある「MEMS なし」は、加速度計を全く接続せずに計測されたノイズであり基板自体の電氣的なノイズに相当する。

表 3.2 MEMS の個数とノイズ波形の測定値

MEMS[個]	x 軸	y 軸	z 軸
1	0.0794	0.0803	0.1572
2	0.0570	0.0561	0.1203
3	0.0454	0.0473	0.0917
4	0.0408	0.0418	0.0693
9	0.0285	0.0288	0.0568
16	0.0224	0.0229	0.0443
25	0.0198	0.0202	0.0383
36	0.0179	0.0179	0.0263
49	0.0165	0.0162	0.0273
64	0.0155	0.0148	0.0235
81	0.0146	0.0142	0.0192
100	0.0141	0.0140	0.0224
MEMS なし	0.0044	0.0046	0.0050

[gal (rms)]

図 3.3 では横軸を $1/\sqrt{N}$ とし、縦軸をノイズレベルとして、表 3.2 の値をプロットし、最小二乗法による回帰直線を破線等で描画している。直線に沿ってデータが分布していることから、概ね $1/\sqrt{N}$ に比例してノイズが低減されていることがわかる。x 軸と y 軸に比べて、z 軸の各値がばらつく傾向にあるのは、ノイズが他軸より少し多いことや地盤の振動の影響を受けているものと考えられる。

表 3.2 から、MEMS 型加速度計を 1 個から 100 個に増やしたことによるノイズの低減率を計算すると、xyz のそれぞれの軸について 0.178 倍、0.174 倍、0.142 倍であり、理論値である 0.1 倍までは低減できていないが 0.2 倍よりは低減できている。

回帰直線の切片は、xyz のそれぞれの軸について 0.00570、0.00550、0.00423 となっている。これらの切片は、本研究の実装での MEMS 型加速度計の個数 N を限りなく多くしても、それ以下にノイズレベルを低減できないことを示唆している。これには、「MEMS なし」の場合に相当する電子回路基板自体のノイズと、基板設置環境での地盤振動由来の「外来振動」が含まれていると考えられる。

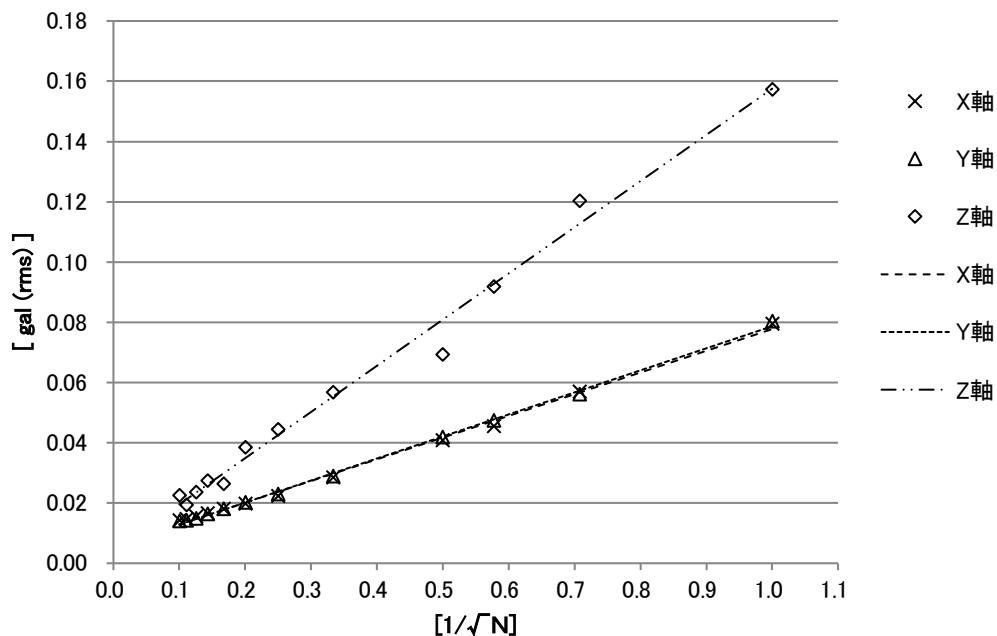


図 3.3 ノイズ理論低減率と実ノイズレベルの関係

図 3.4 は、MEMS 型加速度計の各軸の低周波における特性を調べるために、100 個の MEMS 型加速度計を並列接続して測定したノイズ波形の 0Hz から 0.3Hz の範囲におけるスペクトル分布を示す。x 軸と y 軸については 0.1Hz よりも低い周波数でのみスペクトル分布の上昇が見られるが、z 軸については 0.2Hz 付近から 0Hz へ近づくに従って様々な周波数成分が大きく現れている。この MEMS 型加速度計を 0.1Hz 以下の低周波数範囲で利用するときには注意が必要である。

実際のモニタリングに使用する場合には、並列接続する加速度計の個数を増やすと実装面積が大きくなるため小型化と省電力に反し、製造コストにも影響するため、xyz 軸ともに要求ノイズレベル 0.1 gal (rms) 以下となる MEMS 型加速度計 3 個の場合を採用した。

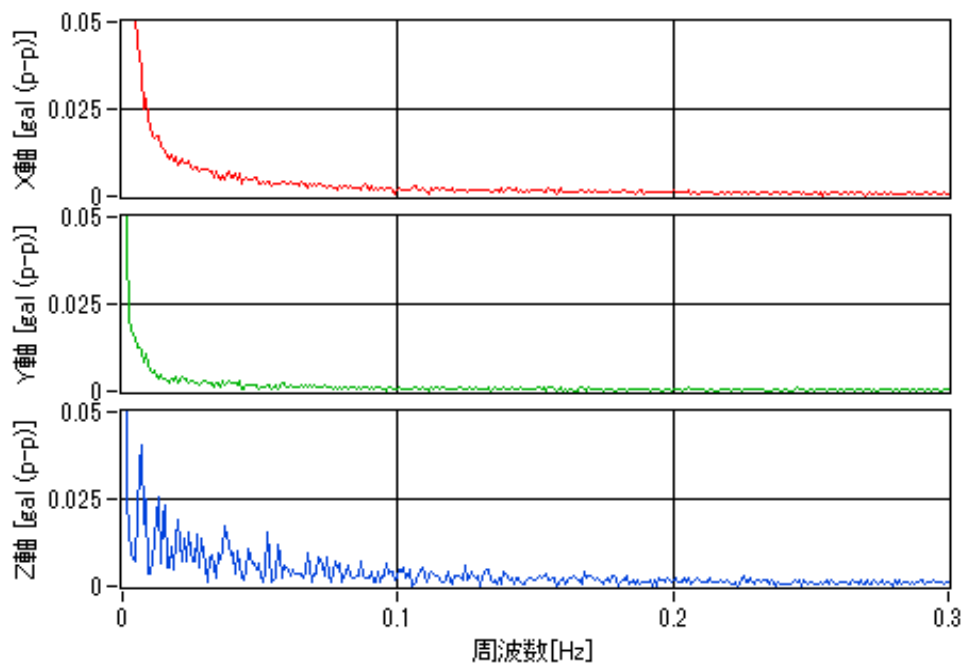


図 3.4 100 個の MEMS 型加速度計を用いた場合のノイズスペクトル分布

3.4.4 低消費電力の設計検討

加速度計のモジュールは、スリープ時に MEMS 型加速度計や A/D 変換器などの電源を切っており、マイクロコントローラと RF 通信モジュールは、合わせて $100\mu\text{A}$ 以下のスリープ時電流で待機している。10 分間に 1 秒以下の断続的な時間内に 100mA 程度の消費電流でウェイクアップして計測指令があるかどうかを確認する。その消費電流を 10 分間に均すと $170\mu\text{A}$ 程度となる。これらを合わせた $270\mu\text{A}$ の平均消費電流で待機を続ければ、 8500mAh のバッテリーで 3.6 年間待機できることになる。

実際に災害が起きた直後に、振動波形の計測を行うときには、通行車両の通過を見張っていなければならないので比較的多くの電力を消費する。加速度計のモジュールの消費電流は 8mA である。RF 通信モジュールの消費電流は 100mA 程度であるので、災害が起きたときにバッテリー残量が 500mAh 程度であれば、その後 4 時間程度の計測が可能といえる。

3.4.5 時刻同期の設計検討

無線センサ間の時刻同期は、親機であるデータ収集装置から各無線センサへ同期信号を送信することによって行われる。時刻同期はウェイクアップ直後に1度と、その後20秒程度ごとに定期的に行われるので時刻の誤差は累積しない。収集データの最初から最後の時間長は、無線センサの制御クロックの周波数偏差の影響を受けるが、その周波数偏差は $\pm 10\text{ppm}$ なので無視できる。時刻同期の精度を検証するために、無線センサを取り付けた橋脚を打撃して測定された波形の時間ずれを評価したところ、 $1\sim 2\text{ms}$ 以内に収まっていた。図3.5に各無線センサの加速度の波形の立ち上がりを示す。立ち上がりのサンプリング時刻は一致している。

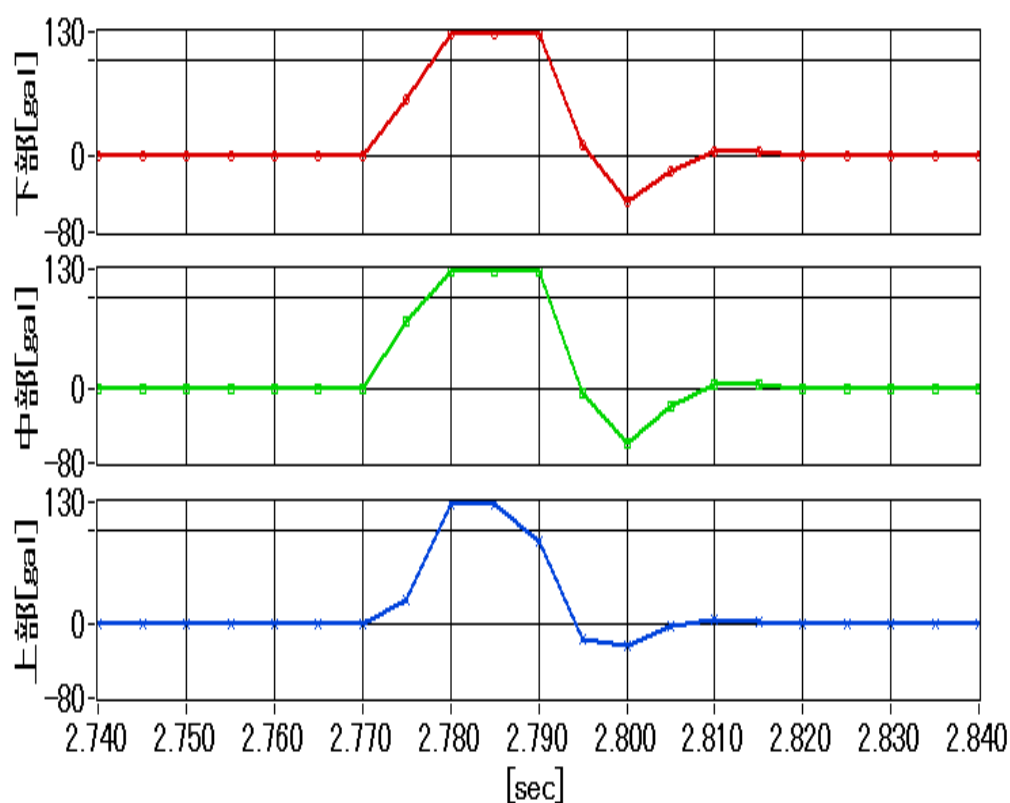


図 3.5 各無線センサ同期波形（橋軸直角方向成分のみ）

3.4.6 耐水性・耐久性の検討

無線センサの収納には、耐久性に優れているポリカーボネート樹脂製で、防塵防水規格の IP65 等級の密閉ケースを採用する。このケースは、防水性を有するが耐水没性までは保証されていないので、本体とフタの接合部には、ブチルゴム製の粘土を付け、ブチルゴム製の融着テープで巻いて固定した。外部アンテナのコネクタ部分も同様にシールした。無線センサの製作には使用可能温度範囲が -20°C ~ 75°C 以上の電子部品を使用する。

3.5 設計結果

大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で評価することを可能にするシステムの開発を目的として、**図2.1**のシステムを構成する各装置を3.1から3.4で設計した。ここでは、設計結果として得られた各装置の仕様をまとめる。

3.5.1 無線センサ

3.4.1 から 3.4.3 での検討・検証に基づいて、加速度は、並列に接続された 3 個の MEMS 型アナログ 3 軸加速度センサ (STM 社製 LIS344ALH) で計測される。このアナログ処理部では、**図 3.6** のブロック図に示されるように、3 個の加速度センサからの各軸出力を xyz それぞれの軸用の合成加算回路で加算して各軸の加速度信号を合成する。低い周波数帯域の橋脚振動を計測するにあたり、40Hz 付近までフラットな特性を確保する必要があるため、アンチエイリアス用アナログ・ローパスフィルタのカットオフ周波数は 50Hz に設定した。0.1Hz 程度の長周期振動の計測を素早く行うために、起動から安定までに時間を要するカットオフ周波数が低いアナログ・ハイパスフィルタは使用せず、0Hz (直流成分) に関するオフセット調整は MCU 内でデジタル処理にて行う。

ローパスフィルタは、一般的によく使用される Sallen-Key 型の LPF を 2 段カスケード接続 (カットオフ特性 -24dB/oct) して構成し、そのゲインは 1 に設定した。MEMS 型加速度センサの出力は、簡易な CR フィルタを通して使用するように想定されているので、出力インピーダンスが $110\text{k}\Omega$ と高く設定されている。高インピーダンスの入力フィルタとして、カスケード接続によって高次のフィルタを構成可能な Sallen-Key 型のローパスフィルタを採用した。

デジタル処理部では、**図 3.7** のブロック図に示されるように、 $\Delta\Sigma$ 型 24bit A/D 変換器 (ADI 社製 ADS1247) で量子化した 24bit のデジタルデータを省電力 8bit MCU (Microchip 社製 PIC18F46J50) に送信する。データ収集開始前の 1 秒間のデータ平均値をオフセット値としてゼロ調整する。24bit のデジタルデータは、設定スケール範囲のデータを抽出して 16bit に縮小する。データを少なくすることで、データ送信時間とシステムの稼働時間が短縮され、低消費電力化につながる。橋脚の振動は数 gal から数十 gal 程度の微小振動であるため、加速度センサのフルスケール $\pm 2\text{G}$ の範囲の一部分の範囲しか計測されない。

そのため、使われていない上位 bit は送信する必要がない。振動データを増幅した後 A/D 変換すると最小分解能が向上して良い結果になると想定できるが、微小振動のためにノイズレベルに近い場合分解能を上げ過ぎても意味を持たない。有効なフルスケールの範囲を $\pm 125\text{gal}$ 設定してこの範囲で有効な 16bit 処理を実行してデジタルデータを取得した。

これは、フルスケール $\pm 2\text{G}$ の範囲を一般的によく利用される 16bit A/D 変換器を用いるものより、 $2\text{G}/125\text{gal} \approx 16$ 倍程度分解能が向上したことになる。これは固有振動値を求めるためのスペクトル解析に十分な分解能である。また、分解能が約 16 倍に向上したことは、ゲイン 16 倍のアナログ増幅回路を用いたことと同等の効果となり、3 軸分の増幅回路の部品代・製造のコスト削減と基板実装のスペース削減で小型化にも寄与する。アナログ増幅回路で増幅率を変更するより、MCU のプログラムで増幅率を設定できることもコスト削減になる。また、ユーザーからの外部通信により、橋脚や設置状況の違いによる測定範囲設定を簡単に行うことも可能になった。

以上のようにして構成される無線センサの仕様を表 3.3 にまとめる。

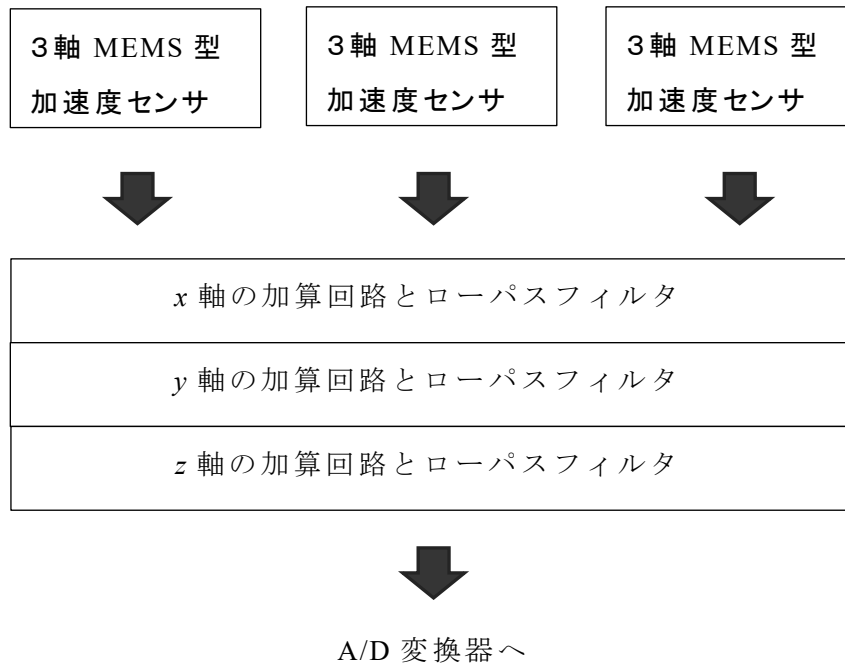


図 3.6 各軸の加速度信号のアナログ処理のブロック図

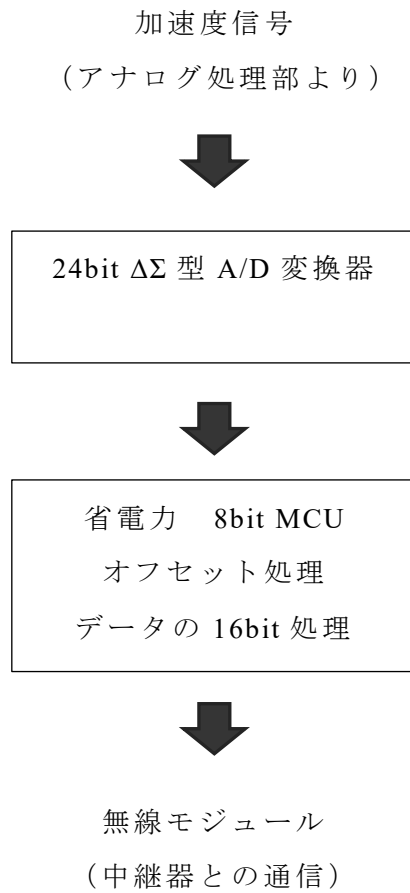


図 3.7 加速度信号のデジタル処理のブロック図

表 3.3 無線センサの仕様

項目	仕様内容	備考
センサ	MEMS 型加速度センサ アナログ出力	
測定軸数	3 軸	
測定範囲	約±125[Gal/FS] 約±250[Gal/FS] 約±500[Gal/FS] 約±3000[Gal/FS]	プログラムで設定
使用周波数帯域	DC～50Hz	
カットオフ特性	-24dB/oct	
サンプリング周波数	200Hz	
耐衝撃性	1000G	
電源	単 2 型 塩化チオニル リチウム電池	アルカリ電池使用可能
無線モジュール 無線周波数 (LP 社製 LP-RF24DS)	2.4GHz 帯	国内電波法取得
無線通信距離	標準外部アンテナの場合 見通しで約 50m	高感度アンテナにより 約 100m 通信可能
送信出力	+ 5dbm	

3.5.2 中継器

中継器のブロック図を図 3.8 に示す。中継器内部には子機と通信する無線モジュールと親機と通信する無線モジュールが各 1 台と無線モジュールを制御する通信制御用の MCU を搭載している。中継器は同時に 5 台の無線センサを制御して同期データを収集できる。また、中継器はマルチホップ中継機能をもつため、橋脚と橋脚の径間距離が長い場合でも利用できる。

実証試験では、橋脚に設置する 3 台の無線センサと 1 台の中継器で親機に加速度データを送信できるように構成した。

以上のようにして構成される無線センサの仕様を表 3.4 にまとめる。

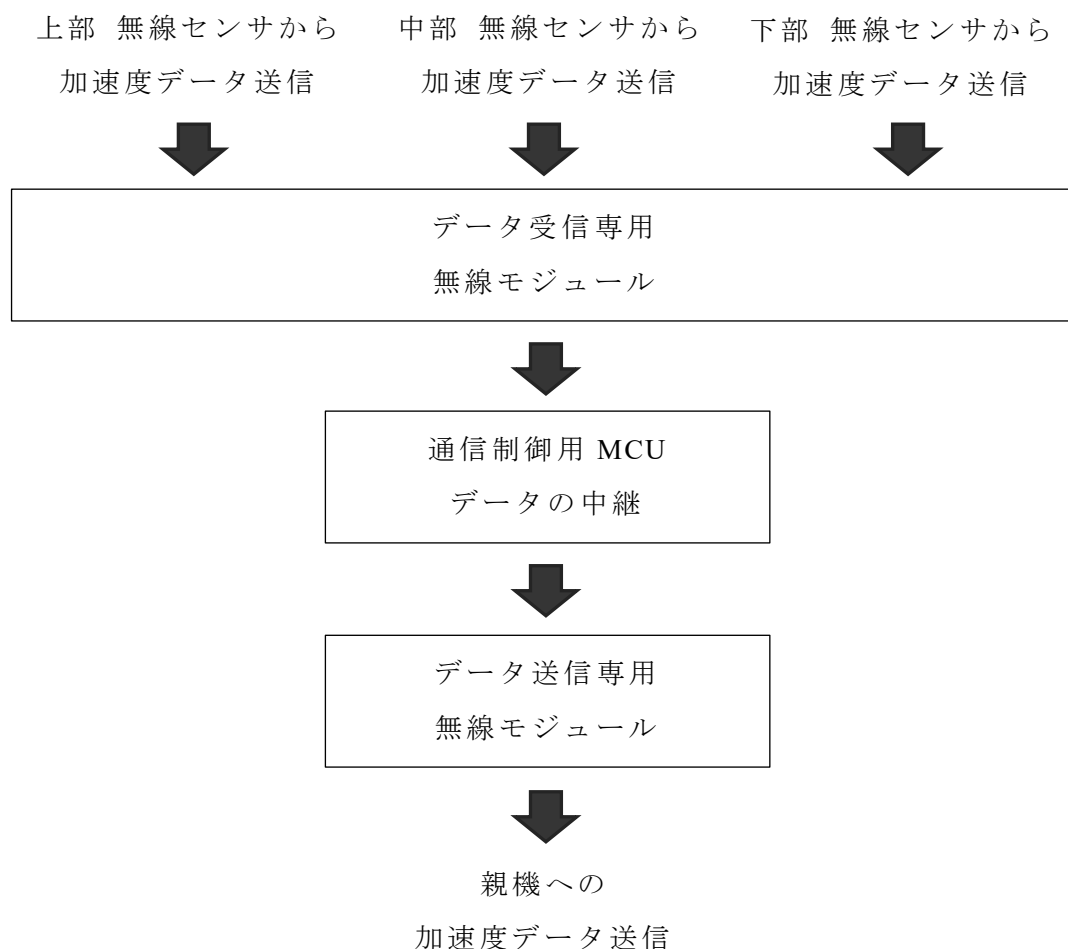


図 3.8 中継器のブロック図

表 3.4 中継器の仕様

項目	仕様内容	備考
データ受信専用 無線モジュール (LP 社製 LP-RF24DS)	無線センサとの データ受信	
通信制御用 MCU	データの中継 同期制御	
データ送信専用 無線モジュール (LP 社製 LP-RF24DS)	無線センサとの データ送信	
電源	単 2 型 塩化チオニル リチウム電池, 2 本	アルカリ電池使用可能
無線周波数	2.4GHz 帯	国内電波法取得
無線通信距離	標準外部アンテナ 見通しで約 50m	高感度アンテナにより 約 100m 通信可能
送信出力	+ 5dbm	

3.5.3 親機（データ収集装置）

親機のブロック図を図3.9に示す。中継器から送信された加速度データを集めて一時的にLinux組み込みボードに搭載したSDメモ리카ードに保存する。FOMAモジュールから携帯電話回線を通してサーバーにデータをアップロードする。親機は、携帯電話回線経由でユーザーから指令を受けるため、橋台に設置され、有線で電源供給を受けている。

以上のようにして構成される親機の仕様を表3.5にまとめる。

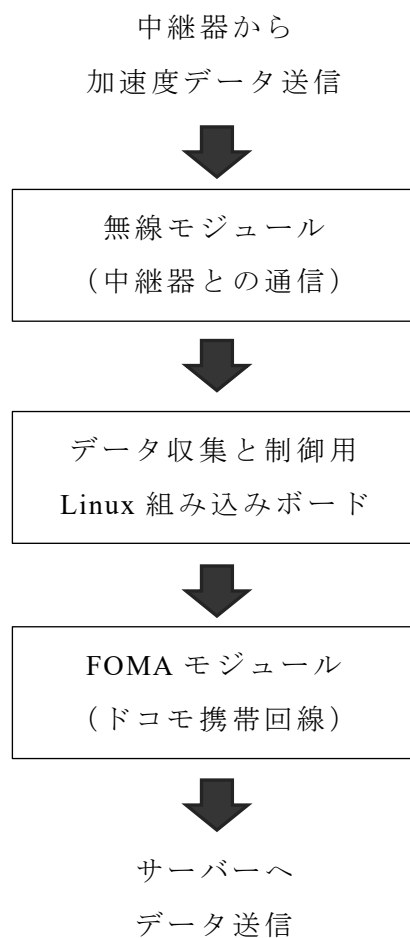


図 3.9 親機のブロック図

表 3.5 親機の仕様

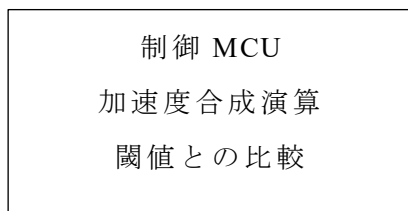
項目	仕様内容	備考
データ受信専用 無線モジュール (LP 社製 LP-RF24DS)	中継器との データ通信	
電源	商用電源 AC100V	直流外部電源 使用可能
無線周波数	2.4GHz 帯	国内電波法取得
無線通信距離	標準外部アンテナ 見通しで約 50m ダイバーシティ方式	高感度アンテナにより 約 100m 通信可能
送信出力	+5dBm	
ネットワーク制御	組み込みポート Linux	データ蓄積 255 件
FOMA モジュール	ドコモ携帯回線	

3.5.4 トリガーセンサ

トリガーセンサのブロック図を図3.10に示す。トリガーセンサは常に稼働して加速度データを常時モニタリングしておくために親機から有線で電源供給を受けている。事前に閾値を設定しており、 xyz の3軸加速度の合成値をMCUで演算した結果が設定閾値を超えると、有線で接続した通信ラインから親機にトリガー信号を出力する。これに応じて親機は無線センサーネットワークに指令を出して計測がスタートすることになる。

以上のようにして構成されるトリガーセンサの仕様は表3.3の子機の仕様と同じである。

3 軸の MEMS 型加速度センサ
(アナログ型)
無線センサ (子機) と同等品



トリガー出力
(親機へ通知)

図 3.10 トリガーセンサのブロック図

4章 実証試験と検証

4.1 長期モニタリング試験の概況

2014年から茨城県管轄の引田橋を対象として、MEMS型加速度計の3個並列化したセンサを用いて長期モニタリングの実証試験を開始した⁵⁴⁾。橋梁が架かる久慈川支流の玉川は、周辺に田園風景が広がる河川である。その位置を、国土地理院から取得した地図に赤丸で**図4.1**に示す。橋梁の種類は、2004年竣工の2径間中空床板橋であり、その全景を**写真4.1**に示す。この橋を通る県道の交通量は、あまり多くなく、時折大型車両が通行する程度である。この橋脚は、大型車による加振でも数gal程度までしか揺れないため、微小振動の実証試験に適すると考えられる。



图 4.1 茨城県管轄 引田橋梁 地図



写真 4.1 茨城県管轄 引田橋梁 全景

4章

橋脚の下流側に上部・中部・下部部分に3軸（xyz軸）の加速度型無線センサを計3台、橋台側に親機と中継器を各1台、橋台近くの床板にトリガーセンサ1台を設置した。各機器の設置状況の現場写真を**写真4.2**に示す。

モニタリング計測の制御は、パソコンやスマートフォンなどで行う。スリープ状態にある各機器をウェイクアップさせた後、測定を開始する。大型車両が橋梁に接近して通行が開始されると、加振の大きさをトリガーセンサが検出して、親機に当たるデータ収集装置から中継器を通じて各加速度型無線センサでの計測を同時に開始させる。トリガーセンサの閾値は大型車による衝撃振動レベルに合わせて設定した。引田橋は通行量の少ない2径間橋梁であるため、大型車両が典型的に橋を1台ずつ通行する状況での測定を想定している。測定時間の長さは大型車両の通過後から振動がノイズレベル程度へ減衰するまでの時間として15秒間に設定した。1回の計測では、加速度型無線センサの3軸とも200Hz サンプリングレートで15秒間に渡って振動を計測し、1系列あたり3000サンプルのデータを3軸×(上部・中部・下部)の9系列分収集した。



無線センサ(上)と
サーボ型加速度計
(下)

写真 4.2 橋梁への各機器の設置状況

橋脚に無線センサを3台設置(中央丸棒)、親機(右上)、中継器(右中)
トリガーセンサ(右下)

(サーボ型加速度計については3.3.1節を参照)

4.2 長期モニタリング試験の結果

複数回の測定データを重ね合せた波形を解析して得られた橋軸直角方向の周波数スペクトルを **図 4.2** と **図 4.3** に示す。 **図 4.2** と **図 4.3** より、ピークに対応する卓越した固有振動数は、12.6Hz 付近（2014 年 9 月）と 12.6Hz 付近（2018 年 6 月）にある。スペクトルの形状は少し変わっているが、固有振動数は共通していることが分かる。 **図 4.4** と **図 4.5** は、固有振動数付近の周波数成分だけをバンドパスフィルタで抽出したのち、2 階積分を行って得た変位波形における自由振動時の振動モード図である。振動モード図は、逆ハの字で立っている状態に近く、大きく折れてはいない。これらより、橋脚において実証試験開始時点と 2018 年 6 月時点では、振動モードにも大きな変化がないことが分かる。

図 4.2 と **図 4.3** において固有振動数以外の周波数成分は暗振動ノイズのスペクトルに対応する。これを 0.1～10Hz の範囲で合計するとノイズレベル 0.1gal(rms) になるが各周波数成分としては 0.01gal 程度の振動の振幅となっている。このため橋脚の固有振動数の振幅が 0.02gal 程度であれば、固有振動数として検出可能といえる。

無線センサの電池には、電池容量 8500mAh の塩化チオニル・リチウム電池を使用している。自己放電率が 1%/年 程度であり 10 年ほどの長期使用に適している。電池の設計寿命は 3.6 年であるが、システム試験のための測定を頻繁に行ったため、1 年程度で電池交換を行った。この運用では、少なくとも 1 年間は電池交換が不要であることが実証できた。

2014 年 6 月から 4 年経過した無線センサの密閉ケースの状況を **写真 4.3** に示す。水の侵入は認められなかった。耐久性についても透明なフタの影響で配線の日焼けが認められたが動作には問題なかった。

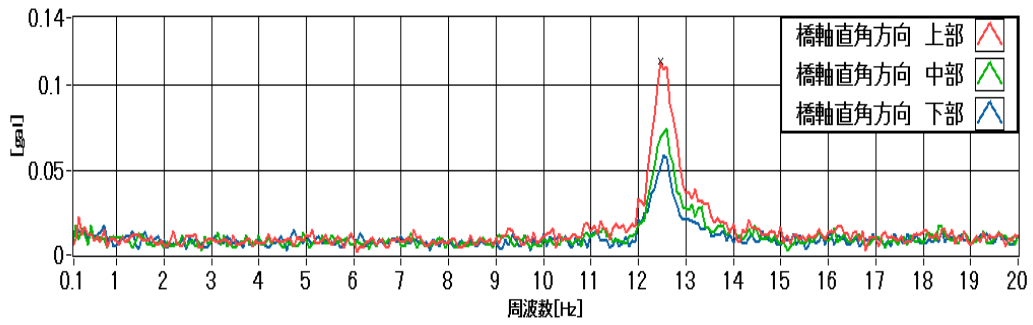


図 4.2 スペクトル分布 2014 年 9 月

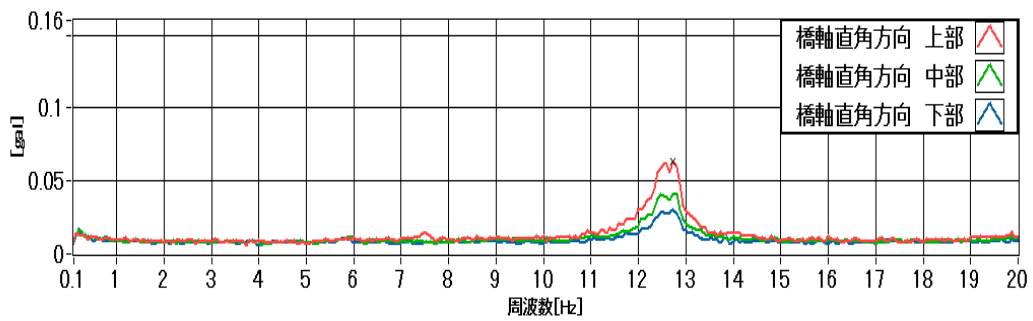


図 4.3 スペクトル分布 2018 年 6 月

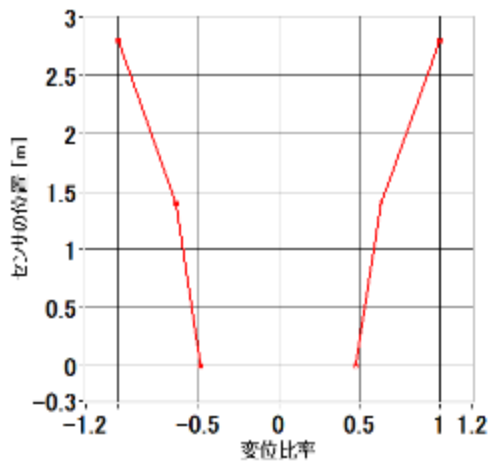


図 4.4 振動モード図 (2014 年 9 月)

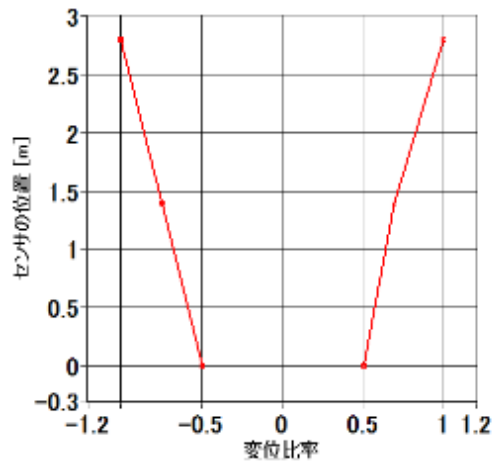


図 4.5 振動モード図 (2018 年 6 月)



写真 4.3 設置後 4 年経過時の無線センサ (2018 年 9 月)

4.3 サーボ型の加速度計と比較による性能確認

無線センサで検出される固有振動数の妥当性を検証するため、校正済のRIONのLS-40Cサーボ型加速度センサを中部の橋軸直角方向の位置に取り付けて2018年9月に無線センサとサーボ型加速度計で大型車両の振動データの測定を実施した。

図4.6は無線センサで測定された振動波形とそのスペクトルである。図4.7はサーボ型加速度センサで測定された振動波形とそのスペクトルである。図4.6のスペクトルから検出された橋軸直角方向の固有振動数は12.6Hzであり、図4.7のスペクトルから検出された固有振動数も12.6Hzであり、これらは一致している。

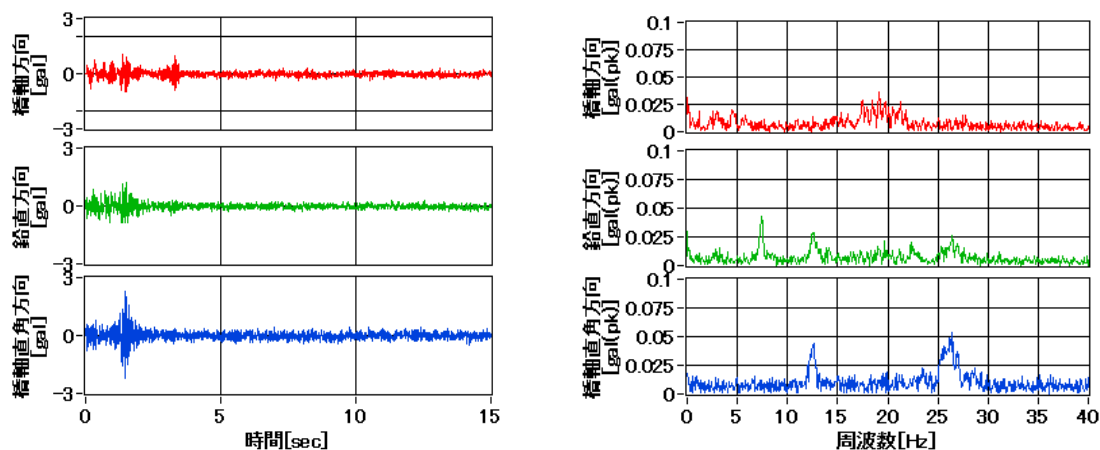


図4.6 無線センサで測定した 振動波形(左)と、スペクトル分布(右)

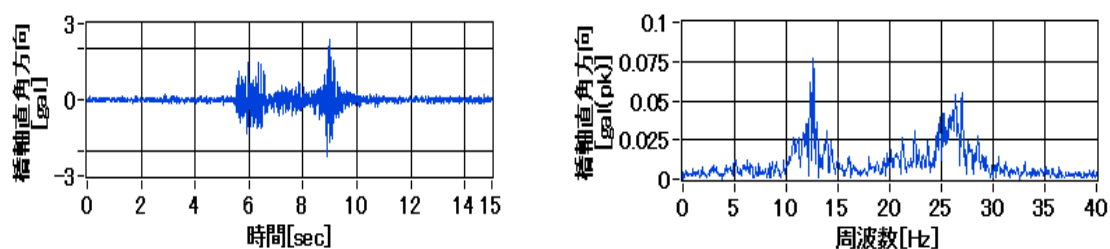


図4.7 サーボ型加速度センサで測定した 振動波形(左)と、スペクトル分布(右)、
(橋軸直角方向)

4.4 車両の種類と走行状況による影響の確認

車両の種類や走行状況が固有振動数の検出に影響しないことを念のために検証するため、校正済のRIONのLS-40Cサーボ型加速度センサを同じ位置に取り付けて2018年9月に通行車両別の振動データを測定した。

図4.8に、代表例として大型車両の通過による橋脚の橋軸直角方向の加振データのグラフを示す。橋脚の通過車両時の全体の振動波形から、段階的な橋脚への加振の過程を図中のA～Eで表した。それらは、

- A 最初に桁を踏んだ時に桁へ与える衝撃
- B 通行中に移動しながら桁へ与える荷重
- C 通行中に車両から伝わる車両固有の振動
- D 最後に桁を踏んだ時に桁へ与える衝撃
- E 橋脚の自由振動

である。無線センサによる計測は、通行車両による区間Aの衝撃をトリガーセンサが検出して開始されるため、測定波形には 衝撃AとDと車両荷重の影響Bと車両固有の振動Cによる加振の影響を含んでいる。車両重量が測定結果にどれだけ影響するか、車両固有の振動がどれだけ影響するか検証する。

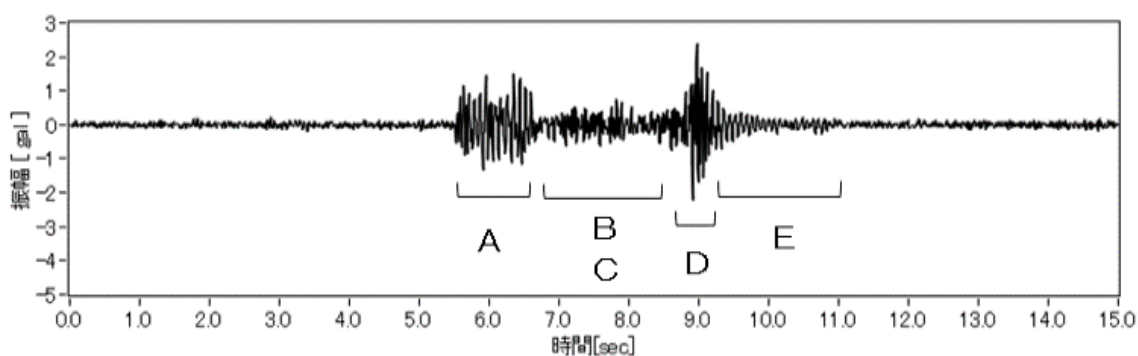
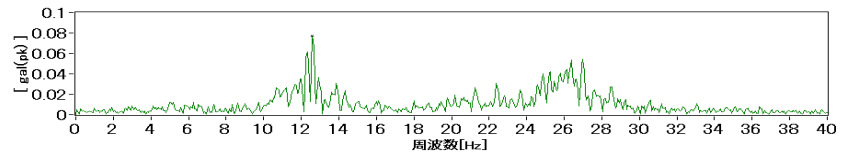


図4.8 大型車両通過の加振データ（橋軸直角方向）

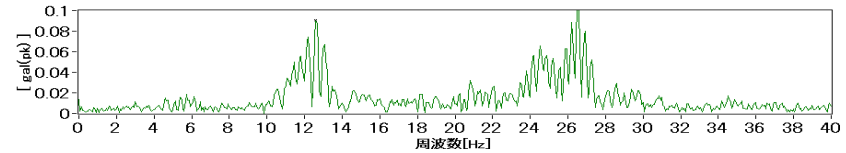
様々な車種で加振された振動波形をサーボ型加速度計で測定し、図4.8に示されるA～Eの全ての過程を含む15秒間のデータとして切出した。スペクトル分布を図4.9に、固有振動数を表4.1に示す。

4章

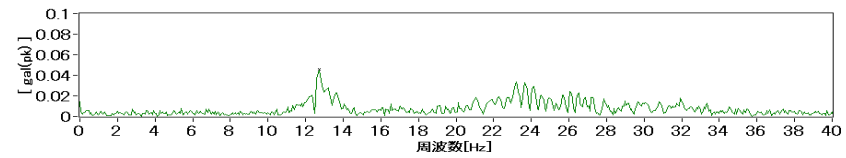
a : 大型車



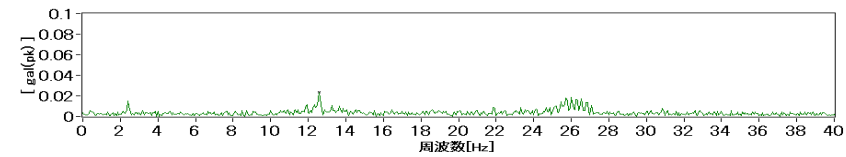
b : 大型車 (a と逆方向)



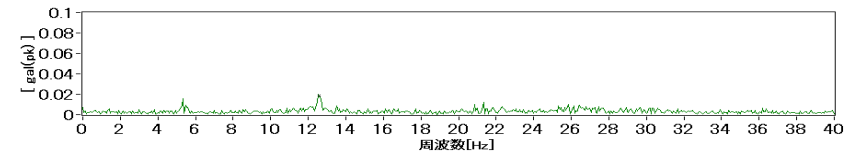
c : 中型車



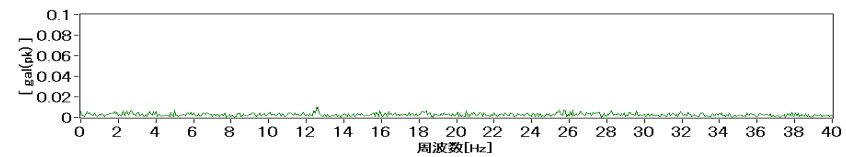
d : 小型トラック



e : 普通自動車



f : 軽自動車



g : 普通車 3 台

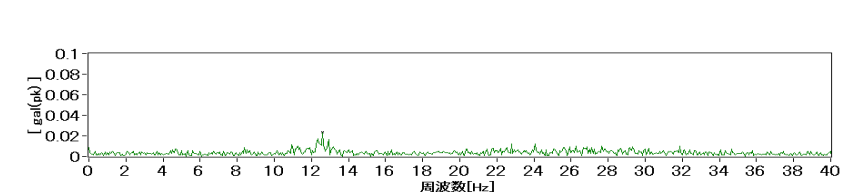


図4.9 加振車両の種類と振動スペクトル分布

図4.9において橋脚の固有振動は12.6Hz付近に安定的に現れている。橋脚の固有振動の振幅は小さいながらも測定期間を通して継続的に存在するため、スペクトル解析の結果において他の周波数成分に埋もれずに現れていると考えられる。これを可能にしているのが、高分解能・低ノイズレベルの加速度計測回路である。

表4.1 加振車両と測定された固有振動数との対応

a : 大型車	12.60 Hz
b : 大型車 (a と逆方向)	12.60 Hz
c : 中型車	12.73 Hz
d : 小型トラック	12.60 Hz
e : 普通車	12.53 Hz
f : 軽自動車	12.60 Hz
g : 普通車 3 台	12.60 Hz

20Hz～30Hz付近に現れている様々なスペクトルは、車種によって大きく異なっているため、車両による衝撃と車両の固有振動に対応していると考えられる。複数の車種によるデータを比較すると、固有振動数が12.6Hzであることが再確認できる。この橋梁において車両の形状や総重量や走行状態の違いによる橋脚の固有振動数の測定への影響は少ないことが検証された。

軽い車種による加振では、全体の振動が小さくなり、固有振動の振幅も小さくなる。軽自動車で加振した場合の固有振動の振幅は0.01galであるため、MEMS型加速度計3個の並列接続では検出できないことになる。普通車の場合には固有振動数の振幅は0.02galであるため、MEMS型加速度計3個の並列接続でも検出可能と考えられる。

実際のシステムの運用では、大型車による衝撃振動レベルに合わせてトリガーセンサの閾値を設定し、衝撃を検知後1秒以内で計測を開始する方式をとっているため、データは図4.8の過程Aでは取得せず、過程B～Eでのみ取得している。そのようなデータに基づく図4.9のスペクトルから検出された橋軸直角方向の固有振動数は12.6Hzであり、全ての過程A～Eで取得したデータに基づく表4.1のスペクトルから検出された固有振動数も12.6Hzである。衝撃による初期振動を計測しなくても、固有振動数の検出は可能となっている。

5章 結論

5.1 本研究の成果と意義

大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で評価することを目的とするシステムとして、以下の特徴をもつシステムを設計・開発・試験した。省電力性能に優れた MEMS 型アナログ出力加速度センサと低速であるが高分解能な $\Delta \Sigma$ 型 A/D 変換器を用いて必要な分解能を達成した。複数の加速度計を並列に接続することによって暗ノイズレベルを低減している。1~2ms 以内の精度で時刻同期した複数の加速度センサを橋脚に設置することによって、固有振動数のみならず振動モードの計測も可能となっている。

2014年6月から茨城県管轄の引田橋を対象として長期モニタリング試験を実施し、2018年9月の時点で橋脚の固有振動数、振動モードに変化がないことを確認した。2018年9月の時点でサーボ型加速度センサでの測定データと対比してシステムによる固有振動数の検出結果の妥当性を検証した。耐水性・耐久性については、設置後4年間経過した無線センサのケースには問題が生じていないことが確認された。

以上のように、本研究で開発されたシステムは、大規模災害の直後に橋脚の健全度を遠隔で迅速に評価することを可能にするため、危険箇所の早期閉鎖、安全箇所の早期再開に役立ち、以って、災害からの復旧活動の効率化に貢献できる。さらに、本システムは、そのまま平時の定期点検でも利用可能であるので、点検作業の省力化に役立ち、また、橋梁の長寿命化のためのモニタリングにも応用可能である。

5.2 今後の課題

引田橋は通行量の少ない2径間橋梁であるため、大型車両が典型的に橋を1台ずつ通行する状況を想定している。いつも大型車両が通過する保証はなく、車両の重量の違いによる影響を詳細に分析するため、今後は乗用車による加振での振動波形での健全度評価を行うことが望ましい。また、長大橋の場合や交通量が多い場合には、複数の通行車両に起因する振動波形が重畳することの影響を評価する必要がある。

使用した塩化チオニル・リチウム電池の中に、電池寿命が短いもの、電池容量は残っているのに使用できないものが存在した。このタイプの電池固有の問題として、電池を使用しない期間が長いと自己放電を抑えるために酸化被膜を形成する機構の影響、個体差の影響が懸念事項となる。システム供用時には、電池を慎重に選定する必要がある。

2.4GHz帯の無線は、200kbps程度の通信ボーレートを有してはいるが、電波の特性上、障害物があると通信障害を起こすことが知られているため、中継器を用いて障害物を回避する必要がある。また特定小電力機器として最大20mW出力での使用が認められているが、センサと親機の間が長距離になった場合の通信の安定性の確保は難しい。対象とする橋梁の長さによっては、通信速度は遅いものの長距離伝送可能な920MHz帯の無線を使用することも検討すべきである。

謝辞

本研究を結ぶにあたり，本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり，ご指導とご支援をいただいた方々に感謝申し上げます。

指導教員として，研究についての在り方や論文執筆のご指導をいただきました 茨城大学理工学研究科 鎌田賢教授，筆者を学位取得へ導いてくださり防災減災研究とUAVのご指導いただきました 茨城大学工学部AI・ICT次世代広域応用教育研究センター 齋藤修特命教授に心より深謝申し上げます。

リモートセンシングのご指導を頂きました 茨城大学工学部 桑原祐史教授，通信システムのご指導を頂きました 茨城大学工学部 羽淵裕真教授，橋梁振動の解析でご指導いただきました 茨城大学工学部 原田隆郎教授に心より深謝申し上げます。

モニタリングシステムのクラウド化にご協力いただきました 有限会社ラーニングアイ 新堀道信様に心より深謝申し上げます。

橋梁モニタリングの研究開発に10年以上関わり，ご指導いただきました 株式会社 福山コンサルタント 丸山泉様，計測検査株式会社 永田伸二様に心より深謝申し上げます。

学位取得にあたり遠方の九州福岡の北九州市から茨城県まで研究活動させて頂いた計測検査株式会社 坂本敏弘社長を始め，社員の皆様に心より深謝申し上げます。

最後に，いつも陰ながら筆者を支えてくれた家族に心より深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣官房 閣議決定, “審議会等の整理合理化に関する基本的計画”, http://www.cas.go.jp/jp/gaiyou/jimu/jinjikyoku/files/satei_01_04_02.pdf, 1999.
- 2) 国土交通省 審議会再編成, <http://www.mlit.go.jp/singikai/infra/index.html>, 2001.
- 3) 国土交通省 社会資本整備審議会, <https://www.mlit.go.jp/singikai/infra/proceed.html>, 2001.
- 4) 国土交通省 道路分科会, http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s202_douro01.html, 2002.
- 5) 国土交通省 基本政策部会, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/kihon/index.html>, 2002.
- 6) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会 基本政策部会中間報告, “今, 転換のとき～よりよい暮らし・経済・環境のために～”, <https://www.mlit.go.jp/road/singi/bunkakai/2-3.pdf>, 2002.
- 7) 国土交通省 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会, “道路構造物の今後の管理・更新等のあり方 提言”, <http://www.mlit.go.jp/common/000986137.pdf>, 2003.
- 8) 国土交通省 米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査団, “米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告”, https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/06/061023_2/01.pdf, 2007.
- 9) Federal Government of the United States, National Transportation Safety Board, Collapse of I-35W Highway Bridge, Accident Reports, “Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota August 1, 2007”, <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Pages/HAR0803.aspx> (HAR-08-03), 2008.
- 10) 国土交通省 道路橋の予防保全に向けた有識者会議, “道路橋の予防保全に向けた提言”, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_2.pdf, 2008.
- 11) 国土交通省 社会資本の老朽化対策会議, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000006.html, 2008.
- 12) 国土交通省, “「社会資本の老朽化対策会議」の設置について”, <http://www>

- w.mlit.go.jp/common/000985619.pdf, 2013.
- 13) 国土交通省, “道路の老朽化対策の本格実施に関する提言”, <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo10.pdf>, 2014.
 - 14) 国土交通省, “道路橋定期点検要領”, <https://www.mlit.go.jp/common/001044574.pdf>, 2014.
 - 15) 内閣官房, インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議, “インフラ長寿命化基本計画”, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuu/ka/pdf/houbun.pdf, 2013.
 - 16) 国土交通省, 国道(国管理)の維持管理等に関する検討会, 第3回配付資料, “道路構造物の修繕及び更新について”, http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_maintenance/pdf/20.pdf#page=4, 2012.
 - 17) 国土交通省 道路局, “道路メンテナンス年報 (平成29年度)”, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/h29/30_03maint.pdf, 2018.
 - 18) 国土交通省, 国土交通白書2016, “資料6-7 世界各国の降水量等”, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/hakusho/h28/data/html/ns006070.html>, 2016.
 - 19) 国土交通省, “日本と世界の河川の比較”, http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/gaiyou2005/pdf/c1.pdf, 2005.
 - 20) 国土交通省 水管理・国土保全局, “河川データブック2020”, 2-3 降水量等, https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11690596/www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen_db/pdf/2020/0-1all.pdf, pp.37-38, 2020.
 - 21) 国土交通省 水管理・国土保全局河川計画課, 水害統計調査, “令和元年の水害被害額(確報値)を公表”, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/download?statInfId=000032076003&fileKind=2>, 2021.
 - 22) 国土交通省, 水管理・国土保全局, 統計資料, “令和2年の土砂災害”, <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasaigai.pdf#page=3>, 2020.
 - 23) 文部科学省 地震調査研究推進本部 地震本部, “日本の地震防災 活断層”, 第2章 日本の活断層, <https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/katsudanso/>, 2004.
 - 24) 国土交通省 気象庁, “日本付近で発生した主な被害地震(平成8年以降)”, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html>,

2021年9月24日入手.

- 25) 西村卓也, “GNSS データから見出される日本列島のひずみ集中帯と活断層及び内陸地震”, 活断層研究, Vol.2017, No.46, pp.33-39, 日本活断層学会, 2017.
- 26) 国土交通省 水管理・国土保全局, “河川データブック 2020”, 4-1-2 河川数等, https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11690596/www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen_db/pdf/2020/0-1all.pdf, pp.190, 2020
- 27) 国土交通省 道路局, “道路メンテナンス年報 (平成 29 年度)”, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen_maint_h29.html, 2018.
- 28) Yozo Fujino and Dionysius Manly Siringoringo, “Bridge monitoring in Japan: The needs and strategies”, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.7, No.7-8, pp.597-611, 2011. DOI:10.1080/15732479.2010.498282
- 29) 三木千壽, 山口浩, 判治剛, 田辺篤史, “無線センサネットワークによる鋼橋部材の疲労損傷原因の特定の試み”, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.671-679, 土木学会, 2010.
- 30) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩, “橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価”, 応用測量論文集, Vol.24, pp.52-61, 日本測量協会, 2013.
- 31) 小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一, “FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築”, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 土木学会, 2003.
- 32) 大山晶子, 山口栄輝, 永田伸二, 中村昌弘, “日射による橋梁の温度分布と応力測定に関する基礎的研究”, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部門 (土木学会第 63 回年次学術講演会), pp.823-824, 土木学会, 2008.
- 33) 西村 正三, “光学的計測法を用いた新しい橋梁点検手法について”, 精密工学会誌, Vol.80, No.11, pp.970-974, 精密工学会, 2014.
- 34) 米山聡, 北側彰一, 岩田節雄, 谷和彦, 北村幸嗣, 菊田久雄, “デジタル画像相関法を用いた橋梁の非接触たわみ分布測定”, 非破壊検査, Vol.55, No.03, pp.119-125, 日本非破壊検査協会, 2006.
- 35) 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大, “サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測”, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, Vol.54, No.1,

- pp.32-38, 日本真空学会, 2011.
- 36) Jeffrey Robert Hay, “High dynamic range imaging for the detection of motion”, Doctoral Dissertation, University of Louisville, <https://doi.org/10.18297/etd/589>, 2011.
 - 37) 小塩達也, 山田健太郎, 森田俊樹, 李相勲, “交通振動下にある高架橋付属構造物の振動測定と疲労耐久性の評価”, 土木学会論文集, Vol.2004, No.766, pp.219-232, 土木学会, 2004.
 - 38) 三木千壽, 古東佑介, 佐々木栄一, 齋藤一成, 石川裕治, “光ファイバセンサシステムを用いた都市高速道路橋の長期継続モニタリング”, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.416-428, 土木学会, 2015.
 - 39) Masaru Kabashima, Shinji Nagata, Osamu Saitou, Masaru Kamada and Yuji Kuwahara, “A structure health monitoring system using wireless sensor”, International Symposium on Remote Sensing 2014, Busan, Korea, C D-ROM (4 pages), 2014.
 - 40) 長井望, 三田彰, 矢向高弘, 佐藤忠信, “構造ヘルスマニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究”, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.4, pp.1-13, 日本地震工学会, 2003.
 - 41) 長山智則, “センシング技術を利用したインフラ状態評価”, 計測と制御, Vol.52, No.11, pp.1003-1008, 計測自動制御学会, 2013.
 - 42) 日高ちはる, 齋藤拓馬, 渡邊和樹, 佐伯昌之, “精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した周波数応答関数計測手法の基礎的検討”, 応用力学論文集, Vol.14, No.2, pp.I_875-I_883, 土木学会, 2011.
 - 43) 樺島勝, 齋藤修, 永田伸二, “橋脚ヘルスマニタリングのための省電力・高精度無線センサシステム”, 応用測量論文集, Vol.30, pp.15-25, 日本測量協会, 2019.
 - 44) 鈴木誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之, “同時送信型フラッドィングを利用した構造モニタリング”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J100-B, No.12, pp.952-960, 電子情報通信学会, 2017.
 - 45) 西村昭彦, 羽矢洋, “橋梁基礎の健全度判定法と判定例”, 地震工学研究発表会講演概要, Vol.21, pp.625-628, 地震工学会, 1991.
 - 46) 関雅樹, 水谷健太, 西村昭彦, 中野聡, “兵庫県南部地震によるラーメン

- 高架橋の振動特性に関する考察”，土木学会論文集，Vol.1996，No.550，p p.145-154，土木学会，1996.
- 47) 丸山泉，“橋梁モニタリングシステムの実橋試験”，計測技術，Vol.42，pp.31-38，日本工業出版，2014.
- 48) 池田靖忠，“山陽新幹線高架橋 橋りょうの復旧工事”，コンクリート工学，Vol.34，No.2，pp.43-49，日本コンクリート工学会，1996.
- 49) 関雅樹，西村昭彦，丸山泉，中野聡，“ラーメン高架橋の健全度評価の一手法”，地震工学研究発表会講演論文集，Vol.24，pp.373-376，地盤工学会，1997.
- 50) 関雅樹，田中宏昌，堤要二，山下和敏，中野聡，西村昭彦，“鉄道橋の固有振動数に着目した洪水時の安全管理システム”，土木学会論文集，Vol.2001，No.686，pp.79-89，土木学会，2001.
- 51) 三谷政昭，“やり直しのための信号数学”，CQ出版，pp.15-17，2004.
- 52) アナログ・デバイセス（電子回路技術研究会訳），“OP アンプ大全 OP アンプの歴史と回路技術の基礎知識”，Vol.1，pp.191-206，CQ出版，2002.
- 53) STMicroelectronics，“LIS344ALH MEMS inertial sensor high performance 3-axis $\pm 2/\pm 6g$ ultracompact linear accelerometer”，<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis344alh.pdf>，2021年9月24日入手.
- 54) 樺島勝，齋藤修，永田伸二，“構造物に適応した無線センサシステム 茨城県引田橋梁での長期実証試験”，土木情報シンポジウム講演集，Vol.43，pp.49-52，土木学会，2018.

著者による発表論文

学術誌論文

樺島勝，齋藤修，永田伸二，“橋脚ヘルスマニタリングのための省電力・高精度無線センサシステム”，応用測量論文集，Vol.30，pp.15-25，日本測量協会，2019.

国際会議論文

Masaru Kabashima, Shinji Nagata, Osamu Saitou, Masaru Kamada and Yuji Kuwahara, “A structure health monitoring system using wireless sensor”, International Symposium on Remote Sensing 2014, Busan, Korea, CD-ROM (4 pages), 2014

シンポジウム論文

樺島勝，齋藤修，永田伸二，“構造物に適応した無線センサシステム 茨城県引田橋梁での長期実証試験”，土木情報シンポジウム講演集，Vol.43，pp.49-52，土木学会，2018.