

加速度センサを用いた道路照明柱の損傷 に対するスクリーニング方法の検討

巻幡 憲俊¹・高橋 宗昭²・家入 正隆³・津川 拓也⁴

¹正会員 JIP テクノサイエンス(株) (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町一丁目2番5号)
E-mail:noritoshi_makihata@cm.jip-ts.co.jp

²正会員 JIP テクノサイエンス(株) (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町一丁目2番5号)
E-mail:muneaki_takahashi@cm.jip-ts.co.jp

³正会員 JIP テクノサイエンス(株) (〒532-0011 大阪府淀川区西中島2丁目12番11号)
E-mail:masataka_ieiri@cm.jip-ts.co.jp

⁴非会員 (株)NTTデータ テレコム・ユーティリティ事業本部 (〒135-8671 東京都江東区豊洲3-3-9)
E-mail:tsgawatk@nttdata.co.jp

本研究は、加速度センサを用いて道路照明柱の損傷を検知するスクリーニング方法について検討する。道路照明柱の1次振動成分付近のスペクトル形状に着目し、このスペクトル形状が安定して得られる加速度センサの選定および加振方法の考案を行う。多数の道路照明柱によるスペクトル形状の相対比較によりスペクトル乱れの形状を把握し、損傷種類との関連性について検討する。最後に、本スクリーニング方法の損傷検知に関する精度を明確にする。

Key Words: lighting pole, acceleration sensor, Fourier spectrum, screening

1. はじめに

我が国が管理する道路照明柱は約350万基に及び、代表的なインフラ構造物である橋梁と比較して、約5倍もの数が供用されており、その維持管理においては、約4分の1の自治体が点検を実施していない状況である¹⁾。道路照明柱が倒壊した場合、車道を閉鎖する可能性が高いことから、10年に1回の詳細点検、5年に1回の中間点検を行うといった、新たな点検要領が策定されつつあるが、道路照明柱は非常に数が多いことから、効率化を図るため、スクリーニング調査として非破壊検査の活用も可能とされている¹⁾。ここで言うスクリーニングとは、比較的簡易な方法で何らかの異常を検知し、詳細調査を実施すべき箇所を絞り込むための手法である。

道路照明柱の加速度応答値を用いたスクリーニング方法として、固有振動数に着目した方法が検討され、腐食やき裂等の損傷による剛性低下とともに固有振動数が変化することが期待されていたが、多少損傷した程度では低次の固有振動数はあまり変化しないことが知られている²⁾。一方、道路照明柱等の鋼管柱の基部形式がベースプレート型である場合、構造物を固定するアンカーボルト

の緩みにより、フーリエ振幅スペクトルの形状が乱れるという実験結果が報告されている³⁾。

そこで、本研究では、1次振動成分付近のスペクトル形状に着目し、アンカーボルトの緩み以外の損傷に対してもスペクトル形状が乱れる現象が起こり得るか検討する。最初に、地上から加振を行い、1次振動成分付近のスペクトル形状が安定して得られる方法について検討する。次に、道路照明柱には様々な形式があることから、自治体で供用されている多数の道路照明柱の振動計測で算出したスペクトル形状の相対比較により、その乱れ形状を把握し、様々な損傷種類との関連性について検討する。最後に、本スクリーニング方法の損傷検知に関する精度を明確にする。

2. 加速度センサを用いたスクリーニング方法の検討

道路照明柱の多くは長円形、直線形、Y形のタイプに属しており⁴⁾、類似する形式が多いため、空間的なスクリーニング(類似道路照明柱間の相対比較)が可能であ

ると仮定し、振動計測データから FFT (高速フーリエ変換)⁹⁾によりフーリエスペクトルを求め、1 次振動成分付近のスペクトル形状に着目した相対比較方法について図-1 のフローチャートに基づき検討を行う。

3. 加速度センサの選定および加振方法の考案

1 次振動成分が卓越したスペクトルを得るためには、道路照明柱の頭頂位置を加振するのが理想的である。高所作業車を用いれば頭頂位置を加振することは可能であるが、交通規制を伴うこととなり、費用的な面から現実的でない。そこで、地上から加振を行い、1 次振動成分付近が卓越したスペクトル形状を安定して得られる方法について検討する。

(1) 加速度センサの選定

道路照明柱への加振位置を頭頂位置から低くすると、1 次振動で揺れにくくなることから、加速度センサの持つノイズの影響により、1 次振動成分付近のスペクトル形状が精度よく得られないことが想定される。そこで、ノイズの少ない加速度センサを用いることにより、頭頂部以外で 1 次振動成分が精度良く得られる加振位置について検討する。

振動試験の計測機器として、表-1 に示すセンサ精度の異なる 3 種類 (スマートフォン、MEMS、高精度 MEMS) を用いるものとし、コスト面 (安価だが低精度のスマートフォン、MEMS) と性能面 (高価だが高性能な高精度 MEMS) を考慮した上で、どのセンサが最も適しているのか検証する。

加振位置として、図-2 に示す位置 (頭頂、4m、3m、2m) とし、振動試験を実施する。頭頂位置はロープによる加振 (牽引)、4m、3m および 2m 位置は手による加振を行う (図-3)。サンプリング周波数は 100Hz とする。減衰振動が収束する時間を調査したところ、頭頂位置は 8 分程度、4m 位置は 6 分程度、3m および 2m 位置は 4 分程度であった (図-4) ことから、計測時間は頭頂位置を 8 分、4m 位置を 6 分、3m および 2m 位置を 4 分とする。

表-1 加速度センサの諸元

項目	スマートフォン	MEMS	高精度MEMS
メーカー	STMicroelectronics	STMicroelectronics	Seiko Epson
型式	LIS331DLH	LIS344ALH	M-A351AU
測定範囲	±2G	±2G	±5G
ノイズ密度	218 μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$	50 μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.5 μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$
消費電流	250 μ A	680 μ A	20000 μ A

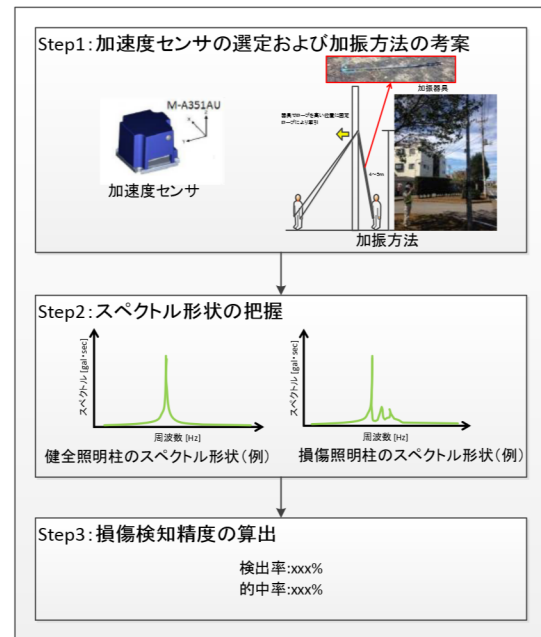


図-1 スクリーニング方法検討のフローチャート

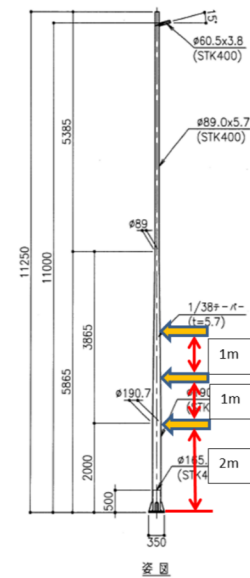


図-2 加振位置

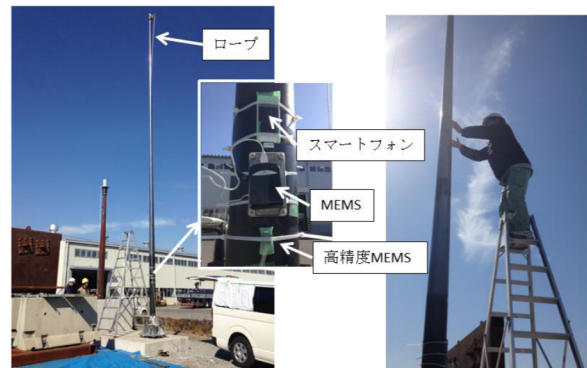
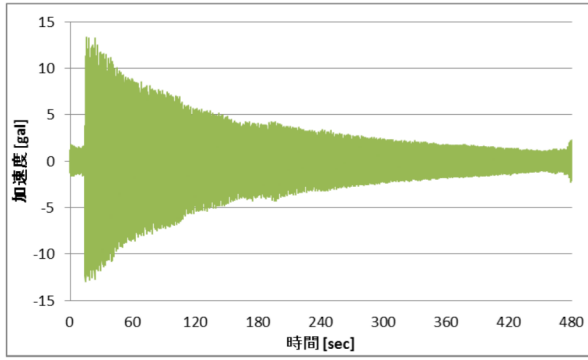
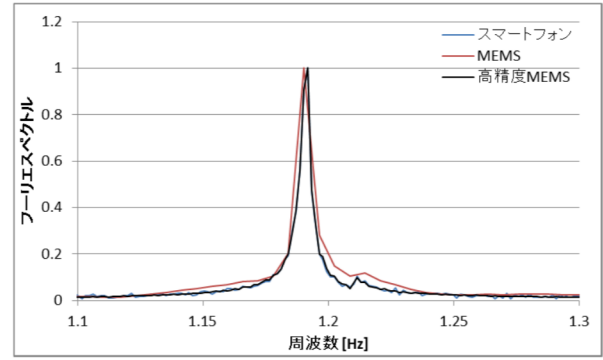


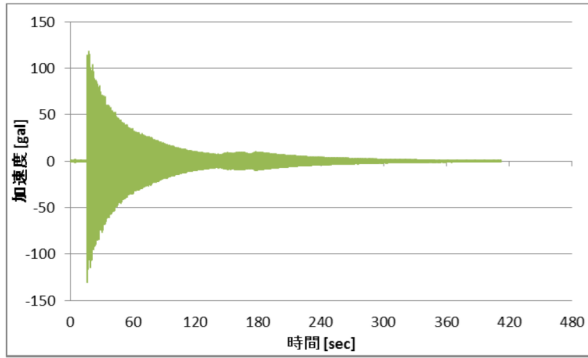
図-3 振動試験



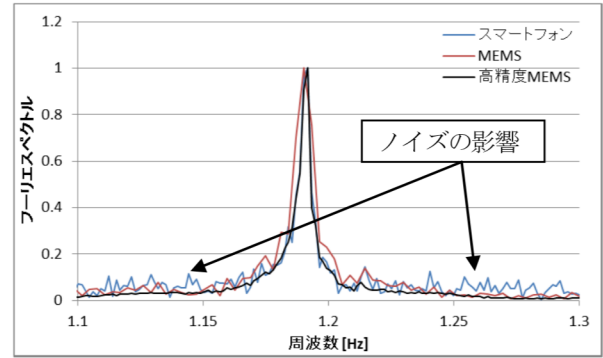
(a) 頭頂位置加振



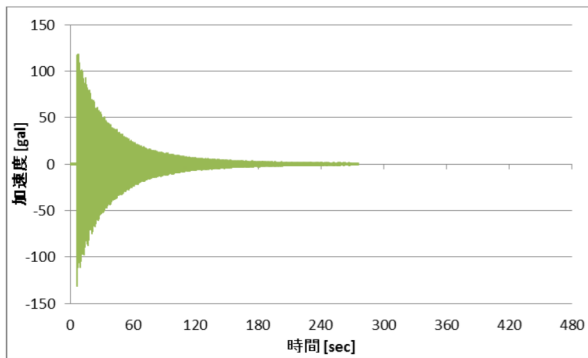
(a) 頭頂位置加振



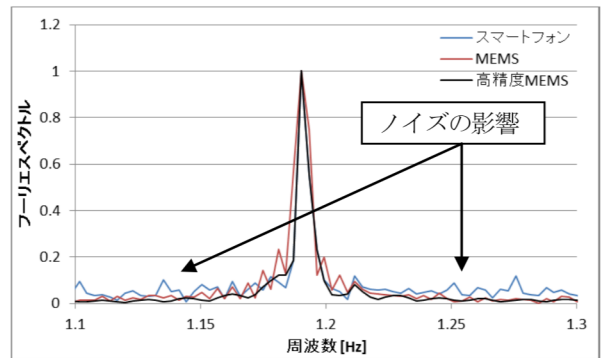
(b) 4m 位置加振



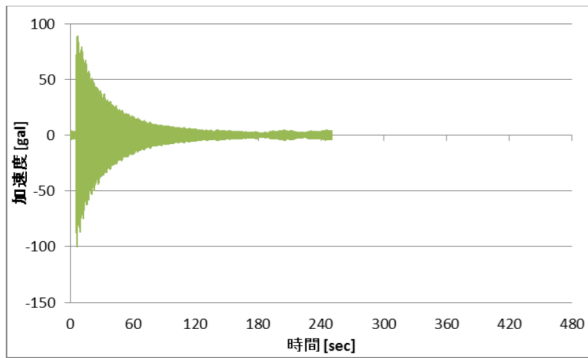
(b) 4m 位置加振



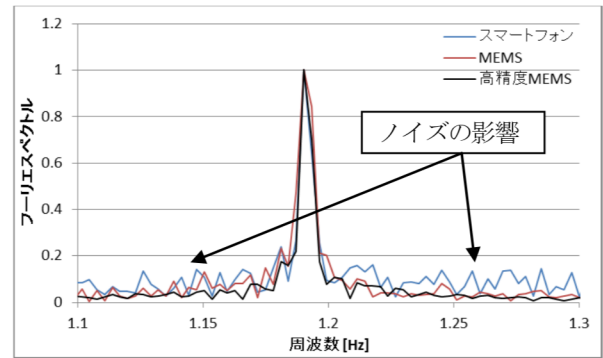
(c) 3m 位置加振



(c) 3m 位置加振



(d) 2m 位置加振



(c) 2m 位置加振

図4 高精度 MEMS による振動波形

図5 スペクトル形状

振動試験による、1次振動付近の(正規化した)スペクトル形状を図-5に示す。加振位置が頭頂位置である場合、3センサとも大きな違いはないものの(図-5(a))、加振位置4m位置では、高精度MEMSは頭頂加振時と比較して大きな違いはないが、MEMSおよびスマートフォンではセンサのノイズの影響により、スペクトル形状の乱れが生じる(図-5(b))。高精度MEMSにおいても、加振位置3m位置ではスペクトル形状が多少乱れ始め(図-5(c))、加振位置2mでは、スペクトル形状がさらに乱れている(図-5(d))。実際、加振位置を低くしていくと、2次以上のモードで振動させることになり、着目している1次の振動成分が小さくなっていくため、加速度センサのノイズの影響を受け易くなる。

試験結果から、頭頂加振時と同様なスペクトル形状を得るためには、加速度センサは高精度MEMSとし、加振位置は地上から4m以上とする必要があることを確認した。

(2) 加振方法の検討

道路照明柱の1次振動付近のスペクトル形状を、頭頂加振時と同様な形状で得るためには、地上から高さ4m以上で加振する必要性が確認されたことから、供用している道路照明柱に対する加振方法について検討する。

道路照明柱の上部を加振する方法について検討を行った結果、可搬性に優れた伸縮可能なロッドの先端にロープを取り付けた器具を製作し、この器具を用いて道路照明柱の上部(基部から4~5mの高さ)を牽引する、図-6の加振方法を考案した⁶⁾。この加振方法により、再現性の高いスペクトル形状が得られることを確認している。

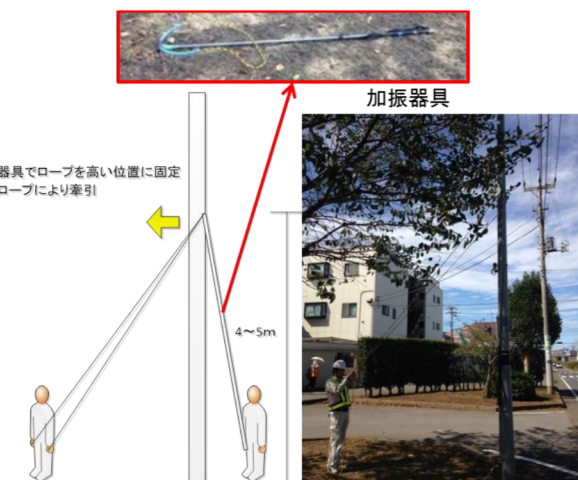


図-6 加振器具および加振方法

4. スペクトル形状の把握

高所の加振方法を考案した結果、再現性の高いスペクトル形状が得られるようになったことから、道路照明柱が同形式の場合、同様のスペクトル形状が得られることが想定される。そこで、多数の道路照明柱を振動計測し、算出したスペクトル形状の相対比較を行う。このとき、出現頻度の高いスペクトル形状を「健全」、出現頻度の低いスペクトル形状を「異常」と仮定したスクリーニング手法を検討する。

(1) 長円形照明柱に対するスペクトル形状の把握

最も供用数が多いとされる長円形の道路照明柱(図-7)を対象として、そのスペクトル形状を把握する。計測対象とする道路照明柱は全て同一形式(支柱形式:長円形, 基部形式:ベースプレート型, 高さ:8m)とし、点検調査から供用中のものを調査した結果、A市内の道路照明柱(11基)を選定した。振動計測のサンプリング周波数は200Hzとする。計測時間については、最も減衰が遅い12mの道路照明柱に対して加振位置4mにおいて減衰振動が収束する時間が6分以下であったため、6分/回とする。道路照明柱1基あたりの計測回数については、1次振動付近のスペクトル形状に再現性があるかを確認する目的で、繰り返し3回計測とし、加振方向は道路軸直角方向とする。

対象道路照明柱の振動計測を行い、スペクトルの算出を行った結果、11基中7基の道路照明柱において、1次振動付近のスペクトル形状が左右対称(乱れ無)(図-8)であった。これら7基に対して、近接目視による二次調査を行った結果、損傷が確認できなかったことから、実際に健全であると推測される(表-2)。

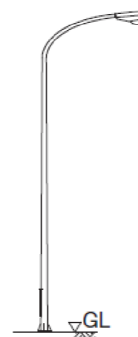


図-7 長円形照明柱(ベースプレート型)⁷⁾



図-8 左右対称のスペクトル形状 (7/11 基)

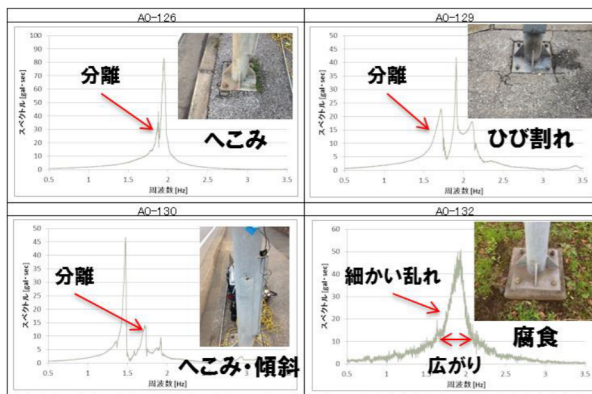


図-9 スペクトル形状乱れの特徴 (4/11 基)

表-2 調査結果

スクリーニング による結果		乱れ無		乱れ有		対象数
近接目視等 による結果		損傷無	損傷有	損傷有	損傷無	
判定		○	×	○	×	
長円形	ベース	7	0	4	0	11

一方、図-9 に示す 11 基中 4 基についてはスペクトル形状に乱れ(乱れ有)が生じており、同様に近接目視による二次調査を行った結果、へこみ、基礎部のひび割れ(沈下)、腐食等何らかの損傷が生じている(図-9)ことを確認した(表-2)。

スペクトル形状の乱れについては、へこみ・傾斜がある場合(スペクトルの分離)、腐食している場合(スペクトルの細かい乱れ、かつ広がり)等、損傷の違いにより異なるスペクトル形状が発現する傾向にある(図-9)ことを確認した。

(2) 任意形式照明柱に対するスペクトル形状の把握

長円形の道路照明柱で確認したスクリーニング手法の妥当性を検証するため、支柱形式が異なる、(a)長円形、(b)直線形、(c)Y形の3種類(図-10)および、基部形式が異なる(1)埋め込み、(2)ベースプレートの2種類を対象としたスペクトル形状を確認する。

計測対象の道路照明柱については、A市およびB市の2自治体を実証フィールドとして、供用中のものからランダムに151基抽出し、振動計測および目視点検を実施した(表-3)。

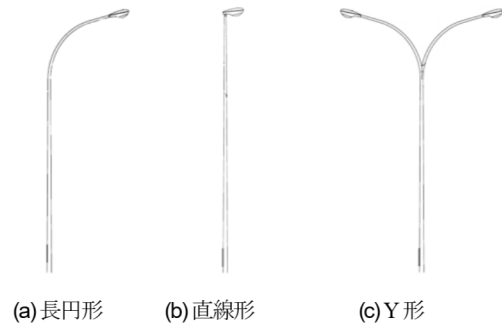
図-10 道路照明柱の形式⁸⁾

表-3 調査結果

スクリーニング による結果		乱れ無		乱れ有		対象数
近接目視等 による結果		損傷無	損傷有	損傷有	損傷無	
判定		○	×	○	×	
長円形	埋込	37	4	17	4	62
	ベース	29	0	0	2	31
直線形	埋込	23	0	5	2	30
	ベース	11	0	0	0	11
Y形	埋込	12	0	0	0	12
	ベース	5	0	0	0	5
計		117	4	22	8	151

最初に、出現頻度の高いスペクトル形状が、道路照明柱の形式に依存するかについて調査を行った。各形式における出現頻度の高いスペクトル形状は計 117+4=121 基で(表-3)，道路照明柱の形式によらず左右対称(乱れ無)であることを確認した(図-11)。それ以外の計 22+8=30 基の道路照明柱に対しては、スペクトル形状に乱れ(乱れ有)が発生していた(表-3)。

次に、全数に対して近接目視または地中部腐食に対する非破壊検査機器⁹⁾を用いた二次調査を行ったところ、スペクトル乱れ無の道路照明柱に対して計 4 基、スペクトル乱れ有の道路照明柱に対して計 22 基に何らかの損傷が発生していることを確認した(表-3)。スペクトル形状の乱れが発生し、かつ損傷している計 22 基(表-3)に対して、長円形道路照明柱で実験した際と同様のスペクトル形状の乱れの特徴を確認した(図-12)。

本実験により道路照明柱の損傷とスペクトル形状の乱れに一定の相関性を確認できたものの、調査対象数が不足していることから、今後は計測対象の母数を増やして継続調査する必要がある。また、本実験は冬季に実施したが、鋼管柱やコンクリートの膨張度合が異なる夏季において、スペクトル形状に影響がないか追加調査する必要がある。

5. 損傷検知精度の算出

2 自治体における調査結果(表-3)に対して、本スクリーニング方法による検出率(式(1))および的中率(式(2))を算出した(表-4)。その結果、検出率は 84%(16%は損傷有にも関わらずスペクトル乱れ無し)、的中率は 73%(27%はスペクトル乱れ有にも関わらず、損傷を確認できず)であった。今後、検出率の向上に向けて、加振方向の追加(道路軸方向、道路軸直角方向の 2 方向)等の検討を行う。また、的中率の向上に向けて、スペクトル乱れを抽出したものの、損傷を確認できなかった道路照明柱に対しては、非破壊検査機器等を用いてき裂等の欠損がないか追加調査を行う。

表-4 検出率および的中率

スクリーニング による結果	乱れ無		乱れ有		対象数	検出率	的中率
	近接し損傷 による結果	損傷無	損傷有	損傷有			
判定	○	×	○	×			
長円形	埋込	37	4	17	4	62	81%
	ベース	29	0	0	2	31	0%
直線形	埋込	23	0	5	2	30	100%
	ベース	11	0	0	0	11	-
Y形	埋込	12	0	0	0	12	-
	ベース	5	0	0	0	5	-
計		117	4	22	8	151	84%
							73%

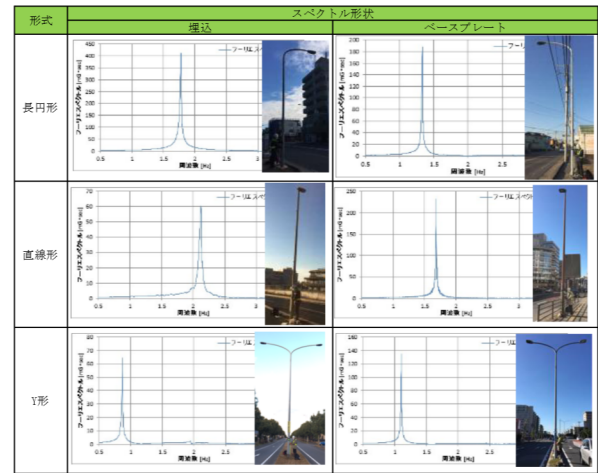
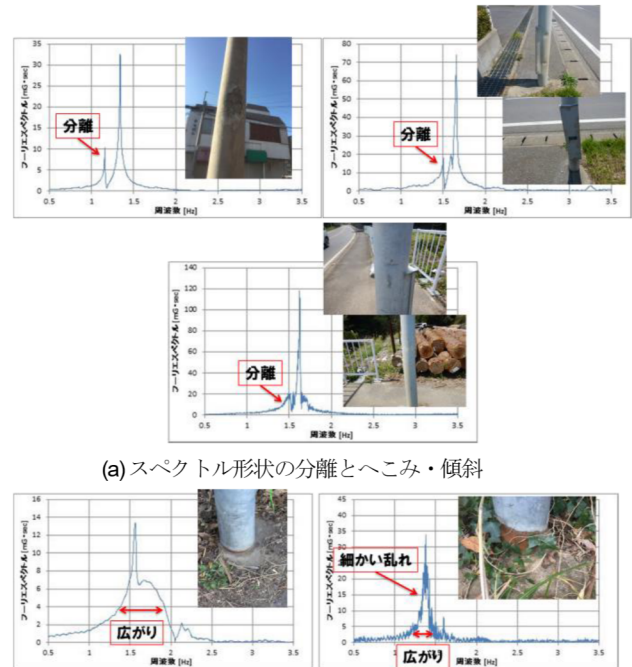


図-11 各形式の出現頻度の高いスペクトル形状



(a) スペクトル形状の分離とへこみ・傾斜

(b) スペクトル形状の細かい乱れ・広がりと腐食

図-12 スペクトル乱れと損傷

$$(\text{検出率}) = \frac{(\text{乱れ有かつ損傷有})\text{の数}}{(\text{損傷有})\text{の数}} \quad (1)$$

$$(\text{的中率}) = \frac{(\text{乱れ有かつ損傷有})\text{の数}}{(\text{乱れ有})\text{の数}} \quad (2)$$

6. まとめ

本研究では、道路照明柱を対象として、加速度センサを用いて振動計測により算出したスペクトル形状に着目し、そのスペクトル形状の乱れによるスクリーニング方法について検討した。健全性の高い道路照明柱に対するスペクトル形状は、道路照明柱の形式によらず左右対称であることを確認し、スペクトル形状に乱れが生じる場合は何らかの損傷が発生している可能性が高いことを確認した。A市およびB市、2自治体を実証フィールドとして、本スクリーニング方法の精度を確認し、検出率は84%、的中率は73%という結果が得られた。

道路照明柱の点検は目視が基本であり、本手法を導入することにより作業コストは増加するものの、目視点検では見逃す恐れのある損傷を検知できる可能性があり、第三者被害の防止と安全・安心のまちづくりが実現できる技術として確立を目指す。

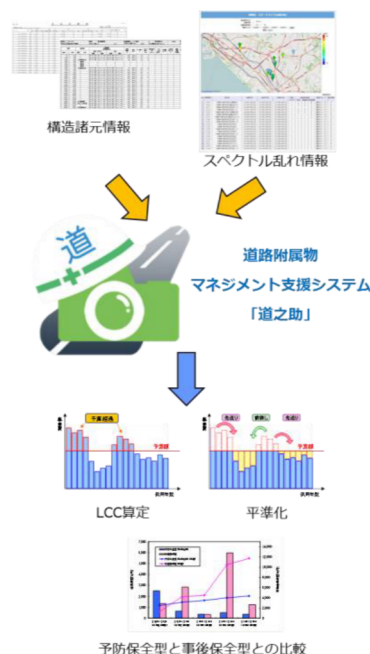


図-13 道路附属物マネジメント支援システムとの連動

7. 今後の展開

本研究の調査対象数は151基と十分とは言えず、今後は計測対象の母数を増やして継続調査していく。次に、損傷種類と関連性が高いと推測されるスペクトル乱れのクラスを、ディープラーニングを用いて分類し、へこみや腐食などの損傷種類について自動判定が可能か検討する。また、道路照明柱に対する疲労損傷度評価において構築したプラットフォーム⁹⁾を拡張し、サーバに送信された振動データを自動で処理し、スペクトル乱れが生じている道路照明柱の位置を地図上に可視化するシステムを構築する予定である。次に、これまでの目視点検結果に加えて、スペクトル乱れを考慮したマネジメント手法を検討し、JIPテクノサイエンス(株)で開発・販売している「道之助」¹⁰⁾(道路附属物マネジメント支援システム)との連動(図-13)を行う予定である。

謝辞：本稿は、(国立研究開発法人)情報通信研究機構(NICT)の高度通信・放送研究開発委託研究(採択番号178B02, 課題名:道路付帯構造物のセンシングおよび診断方法の研究)において採択され実施いたしました。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：これからの小規模附属物マネジメント、<<https://www.mlit.go.jp/common/001176826.pdf>>, (入手2017.7.7)。
- 2) 井舎英生, 北田俊行, 山口良弘, 徳増健：道路橋における照明柱・標識柱の振動特性に関する基礎的研究, 鋼構造論文集, 第11巻第43号, pp.147-158, 2004。
- 3) 村上琢哉, 盛川仁：時間一周波数解析を用いたボルトの緩み検出方法に関する一考察, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1111-1120, 2006。
- 4) 玉越隆史, 星野誠, 市川明弘：道路付属物支柱等の劣化・損傷に関する調査, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0685pdf/k_s0685.pdf>, (入手2014.11.6)。
- 5) James W. Cooley and John W. Tukey: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comp.* 19, pp.297-301, 1965。
- 6) 巻幡憲俊, 高橋宗昭, 狩野正人, 家入正隆, 津川拓也：加速度センサを用いた道路照明柱に対する風振動による疲労損傷度評価に関する検討, 土木学会論文集F3(特集号) Vol.72, pp.112-121, 2016。
- 7) 新日鐵住金(株)：建設用資材ハンドブック, 2017。
- 8) 国土交通省：附属物(標識, 照明施設等)点検要領, 2014。
- 9) (株)ジオファイブ：鋼製柱腐食診断装置 Corrosion Doctor, <<http://www.geo5.co.jp/>>, (アクセス2017.7.6)。
- 10) JIPテクノサイエンス(株)：道之助, <https://www.jip-ts.co.jp/product_service/michinosuke/>, (アクセス2017.10.24)。

(2017.10.26 受付)

STUDY ON SCREENING METHOD FOR DAMAGE TO LIGHTING POLES USING AN ACCELERATION SENSOR

Noritoshi MAKIHATA, Muneaki TAKAHASHI, Masataka IEIRI
and Takuya TSUGAWA

In this study, a screening method to detect any damage to a lighting pole using an acceleration sensor is considered. The spectral shape near the primary vibration component of a lighting pole is focused. The selection of an acceleration sensor and the invention of an vibration method is considered, where this spectral shape can be obtained stably. By the relative comparison of spectral shapes by many lighting poles, the shapes of spectral disturbance are understood, and the relationship between the shapes of spectral disturbance and damage types is considered. Finally, the accuracy of damage detection of this screening method is clarified.