

研究結果報告書

鉄塔構造物の損傷リスク評価に関する実証的研究

筑波技術大学 倉田成人

1. はじめに

社会インフラの高齢化が進行し、その中でも道路橋、水門等の河川管理施設、港湾岸壁等の約 60%が、2033 年までに建設後 50 年以上が経過する。こうした状況は 2000 年代の初めから指摘されていたが、重要な社会課題として顕在化したのは、2013 年の笹子トンネル天井板落下事故で、走行中の車両が巻き込まれて 9 名もの人命が失われたためである。同様の文脈で、通信や送電のために全国に遍在する「鉄塔構造物」の維持管理と建替えは、未だ顕在化していない喫緊の社会課題の一つである。「鉄塔構造物」は、鉄製の骨組み構造で構成されており、送電用鉄塔、携帯電話などの基地局用通信鉄塔、放送局の送信鉄塔の他、気象観測、灯台、消防の望楼などにも用いられている。送電用だけでも現在 24 万基もの鉄塔が電力供給を支えており、通信鉄塔と並んで、社会生活を支えるまさに「インフラ」となっている。送電用鉄塔の建設ラッシュは 1970 年代で、平均的な耐用年数は 40 年程度とされているが、更新期を過ぎている設備は全体の約半分の 12 万基に上る。例えば、2019 年 9 月に日本列島を直撃した台風 15 号により、1970 年代に建てられた千葉県君津市の送電用鉄塔が倒壊するなど実際に被害も出ているが、幸い人的被害は出ておらず、そのためにトンネル、橋梁等の社会インフラ維持管理のような社会課題としての重要性は顕在化していない。明らかに多くの鉄塔が更新を必要とする時期を迎え、台風や大地震が発生すれば倒壊するリスクも増大しているが、限られた予算と人員で更新を一気に進めることは難しく、健全性のモニタリングと長寿命化、建替え工事の平準化と円滑化が急務になっている。そのためには、鉄塔の状態を正確に把握することは欠かせない。センシングやデジタル技術を駆使して劣化を診断することが必要である。こうした現状を踏まえ、本研究では、鉄塔にセンサを設置し、数か月にわたる計測データを蓄積・分析することにより、鉄塔の健全性のモニタリングと長寿命化、建替え工事の平準化と円滑化に有益な知見を得るとともに、未だ顕在化していない鉄塔の倒壊による人命損失を未然に防ぐことを目的とする。

2. 鉄塔構造物におけるデータ取得

更新を必要とする多くの鉄塔について、建設からの年数ではなく、個々の鉄塔の健全性のモニタリングと長寿命化、建替え工事の平準化と円滑化を行うためには、鉄塔の状態を正確に把握することが重要である。こうした分析を行うためには、実際の鉄塔構造物を対象としたデータ取得と蓄積が欠かせない。そこで、図 1 に示すような静岡県沼津市に建設された鉄塔を対象として、数か月にわたる長期計測を行った。図 1 にセンサの配置とセンサの種類を

示す。センサの設置位置は、鉄塔の全体的・局所的な挙動を把握し、損傷に直結するデータを得られるように、鉄塔の頂部、中央部、基礎部とする。

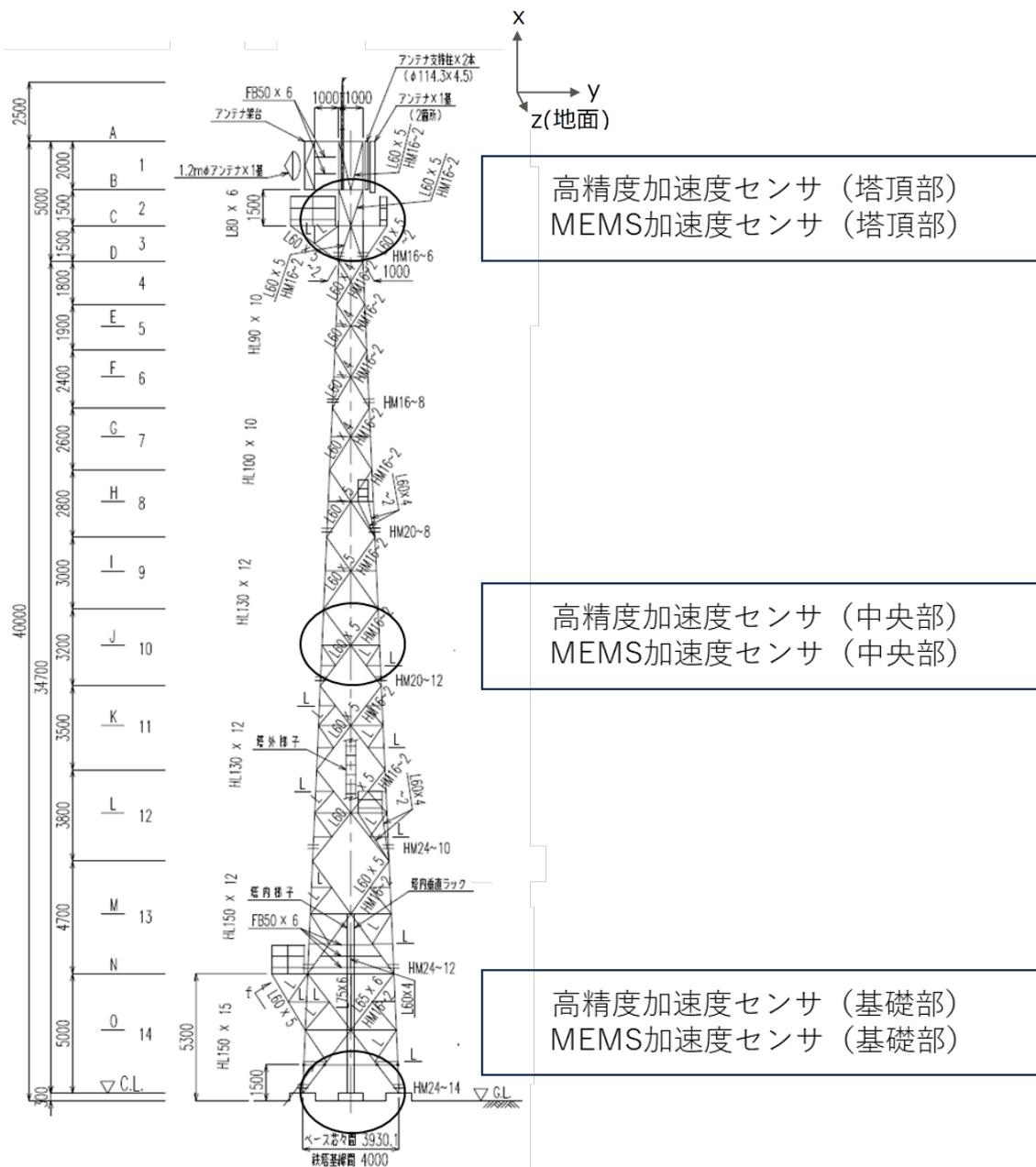


図1 鉄塔構造物とセンサ配置

図1中にも記載したセンサの種類について、得られる計測データ、計測目的等を表1に示す。加速度センサは、塔頂部・中央部・基礎部の加速度を計測する。各部とも、高精度加速度センサと安価なMEMS加速度センサの両者を設置する。表2に2種類の加速度センサのスペックを示す。いかなる分析を行うとしても、高精度な加速度センサでの計測が望ましい

が、計測システムの普及を考えると、精度は高くないが極めて安価な MEMS 加速度センサで、どこまでの分析が可能であるかを検討することは重要である。サンプリング周波数は 100Hz とし、毎正時から 10 分間、10m 秒ごとにデータを取得して保存する。各センサには無線通信機能を内蔵し、図 1 の基礎部に設置したデータ収録のためのロガーに無線でデータを送信する。ロガーはインターネットに接続し、遠隔からデータを取得できる。

表 1 センサと目的

センサの種類	設置場所	計測データ	計測目的
加速度センサ	塔頂部、中央部、基礎部	水平 2 方向・上下方向加速度	鉄塔の振動、塔頂部・中央部・基礎部相互間の変形

表 2 加速度センサのスペック

	高精度加速度センサ	MEMS 加速度センサ
型式	EPSON M-A351AS	Analog Devices ADXL355
方向	3 軸 (水平 2、上下 1)	3 軸 (水平 2、上下 1)
計測レンジ	±5G	±2G
ノイズ密度	0.5 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$	22.5 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$
温度	-20 $^{\circ}\text{C}$ to +85 $^{\circ}\text{C}$	-40 $^{\circ}\text{C}$ to +125 $^{\circ}\text{C}$
消費電力	20mA	200 μA

3. データ分析

加速度センサは、頂部・中央部・基礎部の加速度を計測し、鉄塔の主要振動モードを捉え、各部と各部相互間に過大な振動や変形が生じていないかどうかを確認できる。研究対象期間中、2～10月の9か月間に計測を行った。

(1) 計測期間の加速度最大値

図 2 に計測期間中の高精度加速度センサによる計測データの最大値を示す。

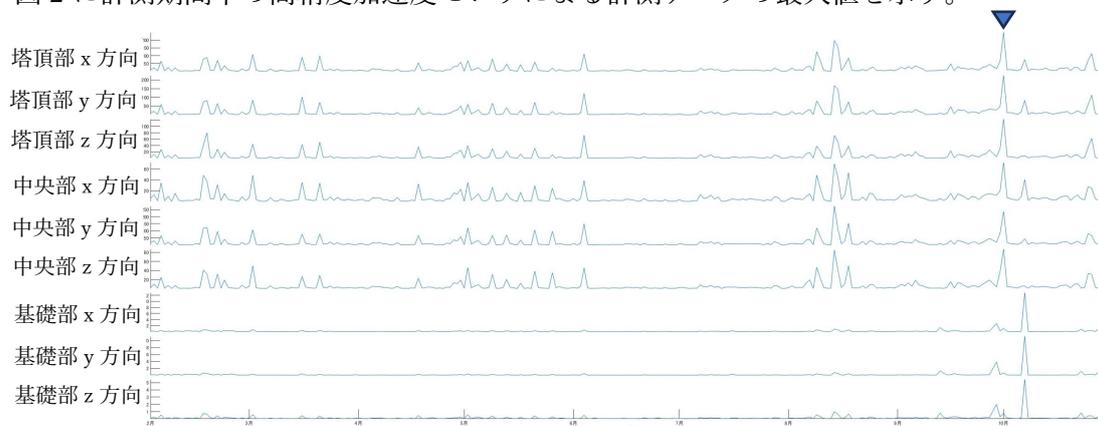
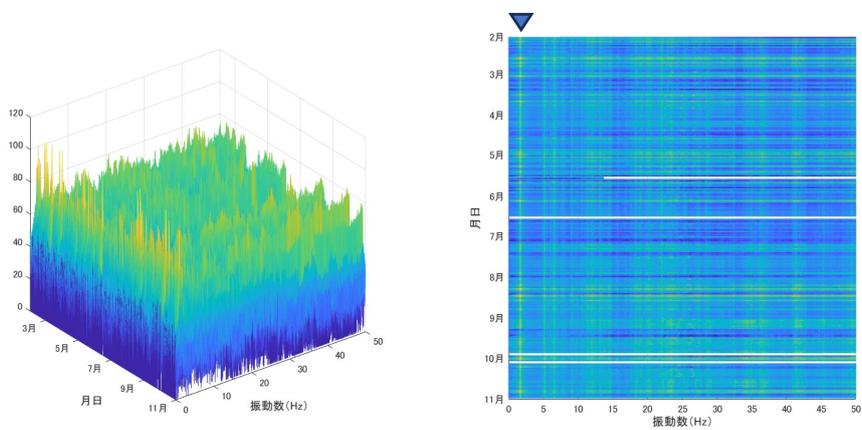


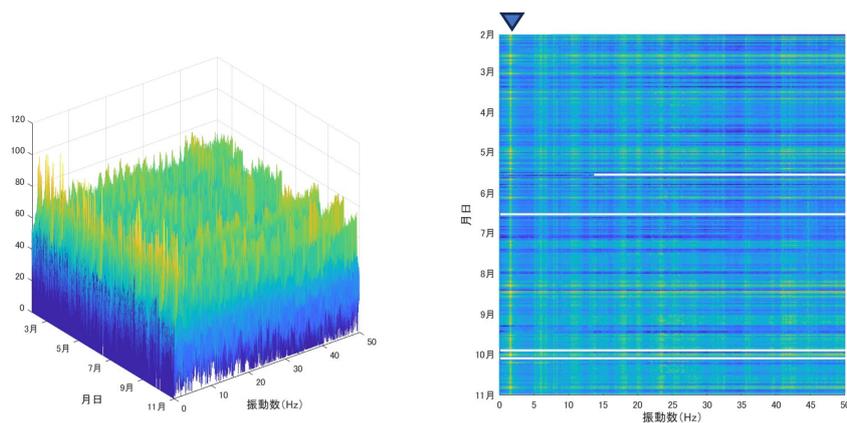
図 2 計測期間中の高精度加速度センサによる計測データの最大値

(2)計測期間の塔頂部の加速度フーリエスペクトル

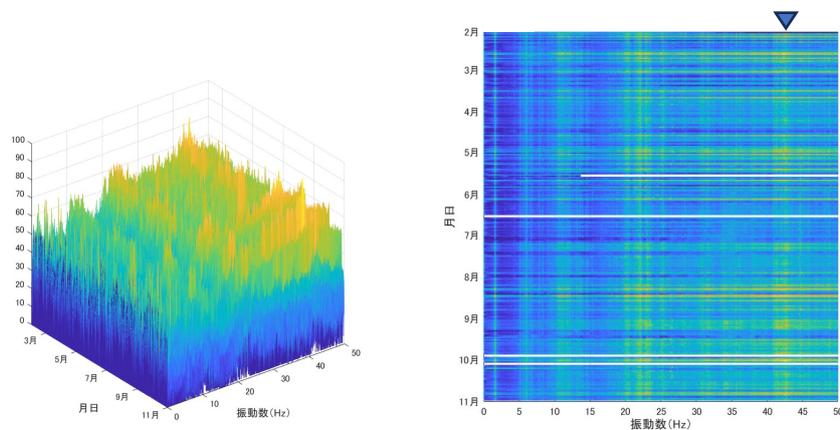
図 3 に計測期間の高精度加速度センサによる塔頂部の計測データのフーリエスペクトルを示す。



(a)x 方向



(b)y 方向



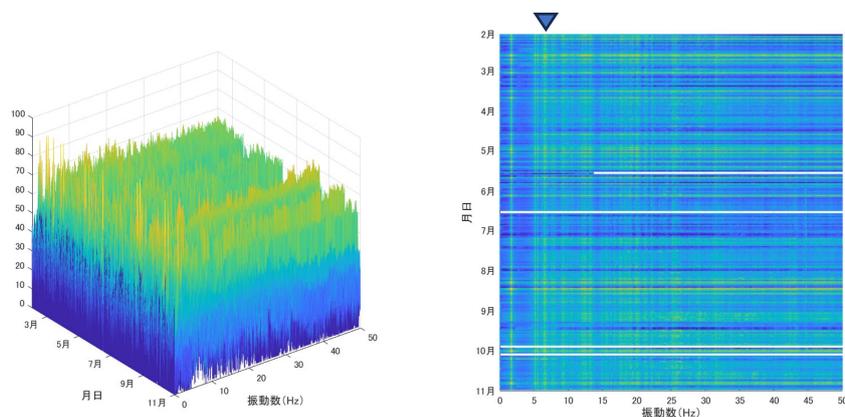
(c)z 方向

図 3 計測期間中の高精度加速度センサによる塔頂部の計測データのフーリエスペクトル

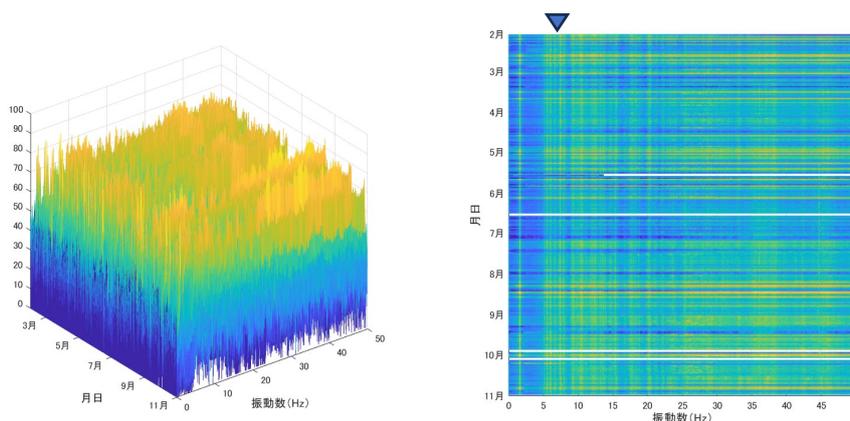
図3の各(a)から(c)において、左図は横軸に計測期間の9か月の月日と振動数を取り、縦軸に振幅をプロットした3次元フーリエスペクトル、これを真上から見て、月日と振動数を軸に取り、振幅をカラーで表現したものが右図である。右図で白色部はデータ欠損部である。左図から9ヶ月間に、塔頂部の加速度に関して、どの振動数が卓越したか、その振動数が変化したかどうかの概要がわかる。右図からは、卓越した振動数とその変化が明確に観察できる。塔頂部の加速度であるから、対象とした鉄塔の水平方向の1次固有振動数を捉えることができる。図3(a)からx方向では、1.66Hzに、(b)からy方向では、1.59Hzに水平方向の固有振動数が確認でき、かつ、計測を行った9か月間に変化が見られていないことがわかる。(c)からは、上下方向(z方向)の固有振動数が42.5Hzに確認できる。

(2)計測期間の中間部の加速度フーリエスペクトル

図4に計測期間の高精度加速度センサによる中間部の計測データのフーリエスペクトルを示す。



(a)x 方向



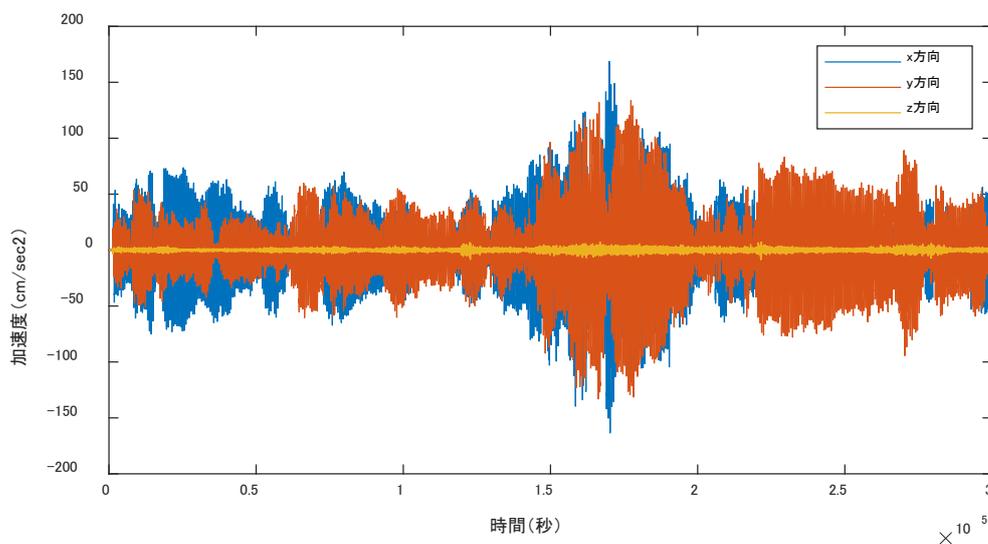
(b)y 方向

図4 計測期間中の高精度加速度センサによる中間部の計測データのフーリエスペクトル

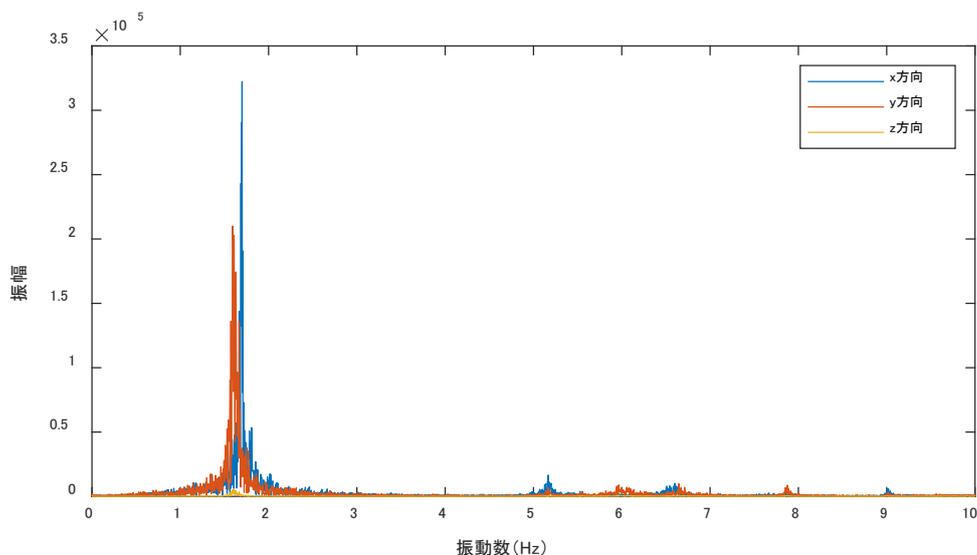
中央部の加速度であるから、対象とした鉄塔の水平方向の 2 次固有振動数を捉えることができる。図 3 (a)、(b)から x 方向、y 方向とも、6.5Hz 近辺に卓越振動数が見られるが、明確なピークは生じていない。また、計測を行った 9 か月間に変化が見られていないことがわかる。

(3)計測期間の最大加速度が生じた日のデータ

図 2 中に、計測期間の最大加速度が生じた日を▼で示した。このときの高精度加速度センサによる塔頂部での計測データの時刻歴波形を図 5 に示す。



(a)時刻歴波形

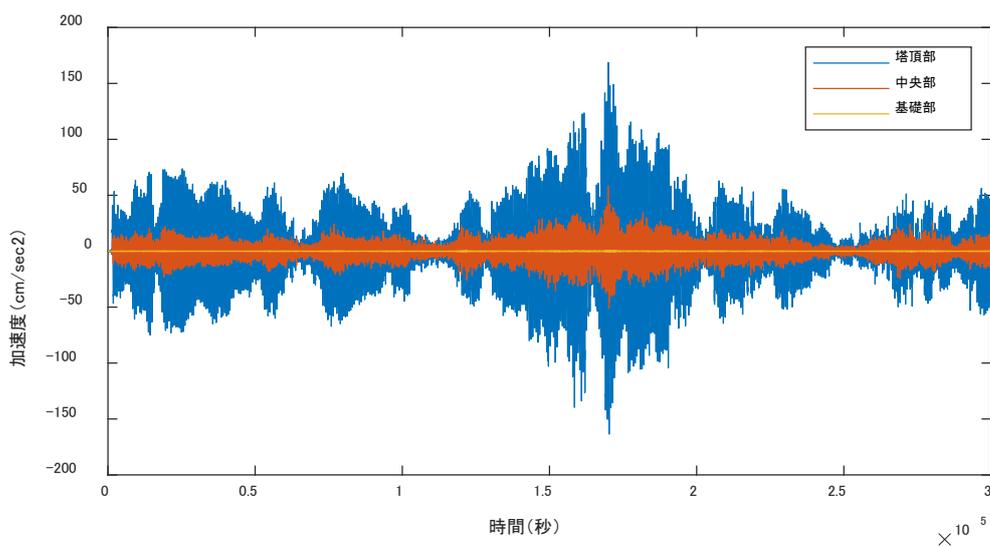


(b)フーリエスペクトル

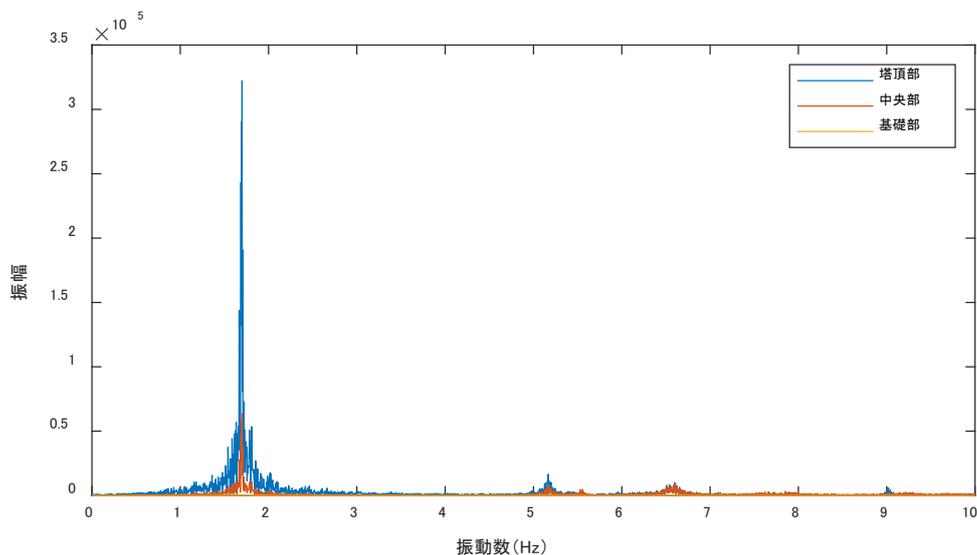
図 5 最大加速度を生じた日の計測データ (塔頂部)

図 5 より、塔頂部では、水平方向である x 方向と y 方向では同程度の大きさの加速度が生じており、上下方向である z 方向ではほとんど加速度が生じていないことがわかる。上記 (2) で示したように、x 方向では、1.66Hz に、(b) から y 方向では、1.59Hz に水平方向の固有振動数が確認できる。一般的に、鉄塔構造物は、x 方向と y 方向で構造的な差がほとんどないので、固有振動数も近くなる。

計測期間の最大加速度が生じた日の高精度加速度センサによる各方向の計測データの時刻歴波形とフーリエスペクトルを図 6、7 に示す

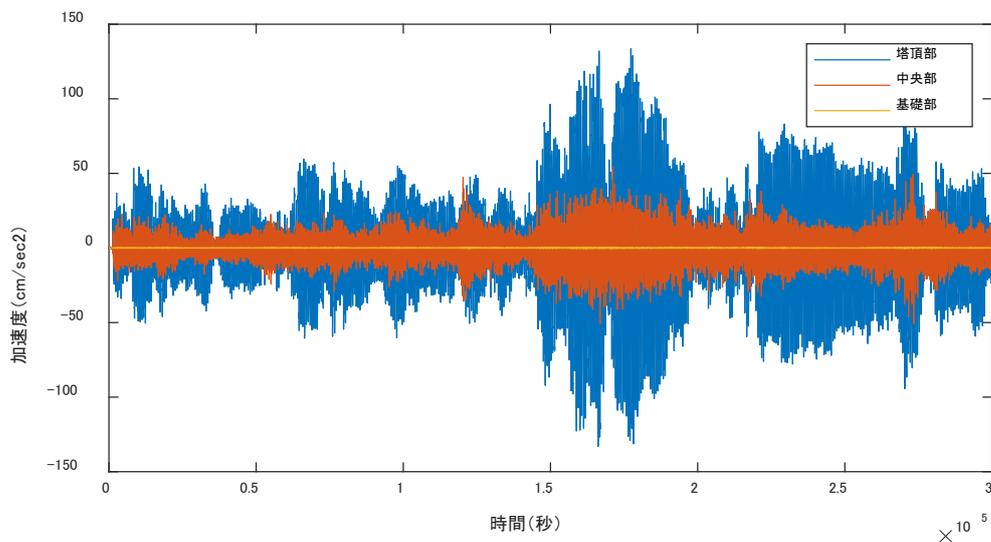


(a)時刻歴波形

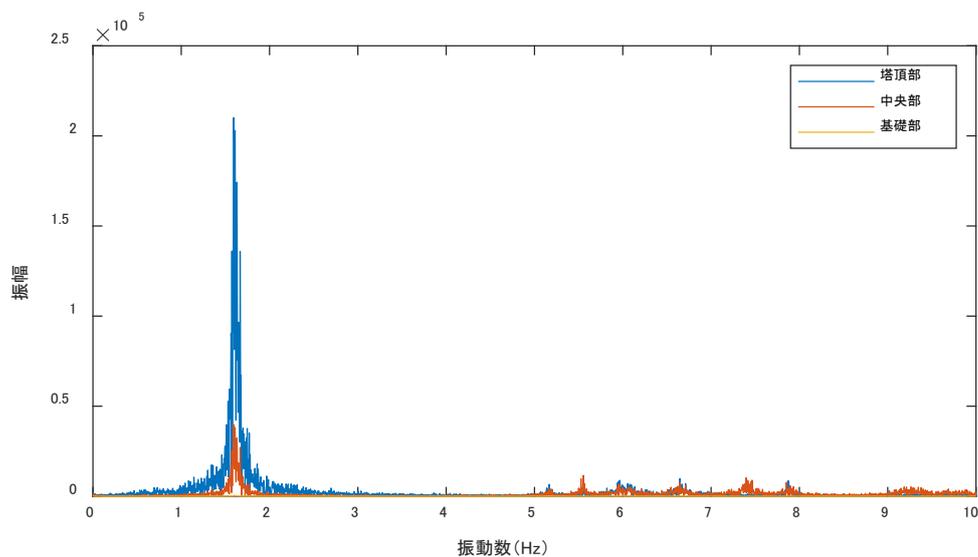


(b)フーリエスペクトル

図 6 最大加速度を生じた日の計測データ (x 方向)



(a)時刻歴波形



(b)フーリエスペクトル

図7 最大加速度を生じた日の計測データ (y 方向)

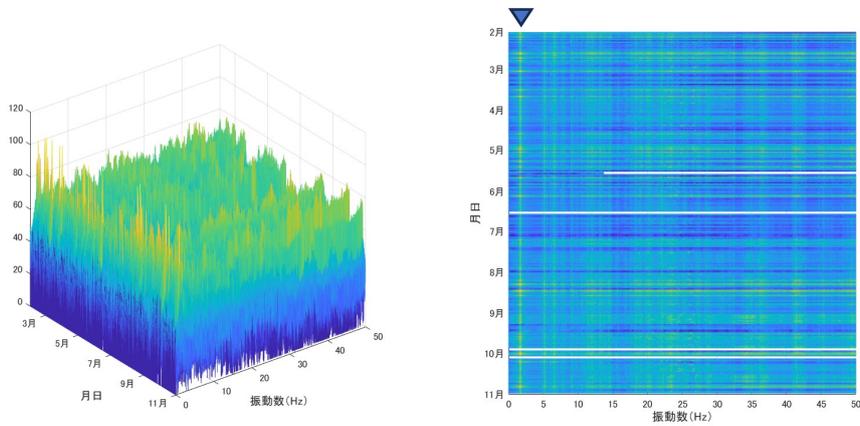
図6に示したx方向、図7に示したy方向とも、基礎部は振動しておらず、中央部、塔頂部と上にいくほど、加速度が大きくなること、1次モードの振動が支配的であり、高次モードの振動は小さいことがわかる。従って、鉄塔の劣化や損傷を検出するための損傷リスク指標としては、水平2方向の1次固有振動数が適切であり、今回の9か月にわたる計測においては変化は見られないものの、継続的な計測により、変化を検出できれば、緊急点検の要否を判断すること等が可能となることが期待される。

4. 高精度加速度センサと MEMS 加速度センサの比較

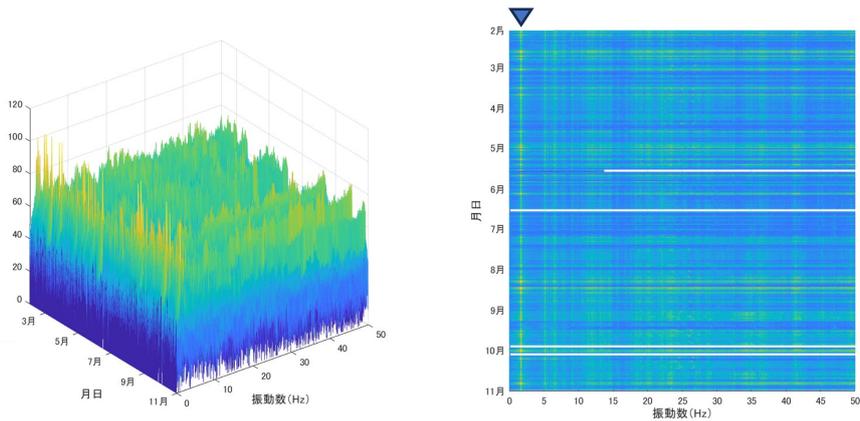
前述の通り、加速度センサは、塔頂部・中央部・基礎部の加速度を計測したが、各部とも、高精度加速度センサと安価な MEMS 加速度センサの両者を設置した。いかなる分析を行うとしても、高精度な加速度センサでの計測が望ましいが、計測システムの普及を考えると、精度は高くないが極めて安価な MEMS 加速度センサで、どこまでの分析が可能であるかを検討することは重要である。そこで、下記の通り、比較を行い、MEMS 加速度センサの実用性について検討した。

(1)計測期間の塔頂部の加速度フーリエスペクトル

図 8 に計測期間の高精度加速度センサ、及び MEMS 加速度センサによる塔頂部の計測データ (x 方向) のフーリエスペクトルを示す。



(a)高精度加速度センサによる計測結果 (x 方向)



(b)MEMS 加速度センサによる計測結果 (x 方向)

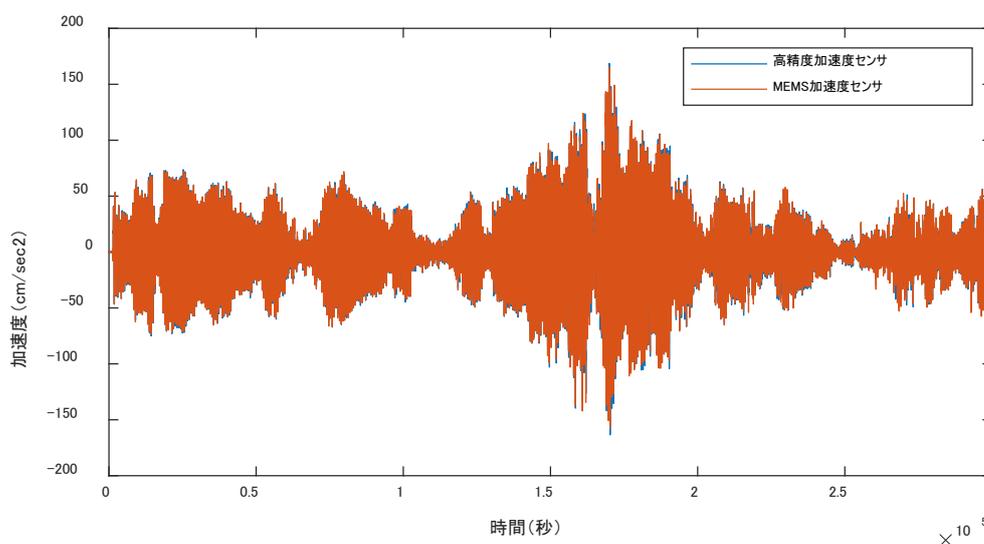
図 8 計測期間中の塔頂部の計測データのフーリエスペクトルの比較

表 2 に示したように、MEMS 加速度センサは高精度加速度センサと比較して、ノイズ密

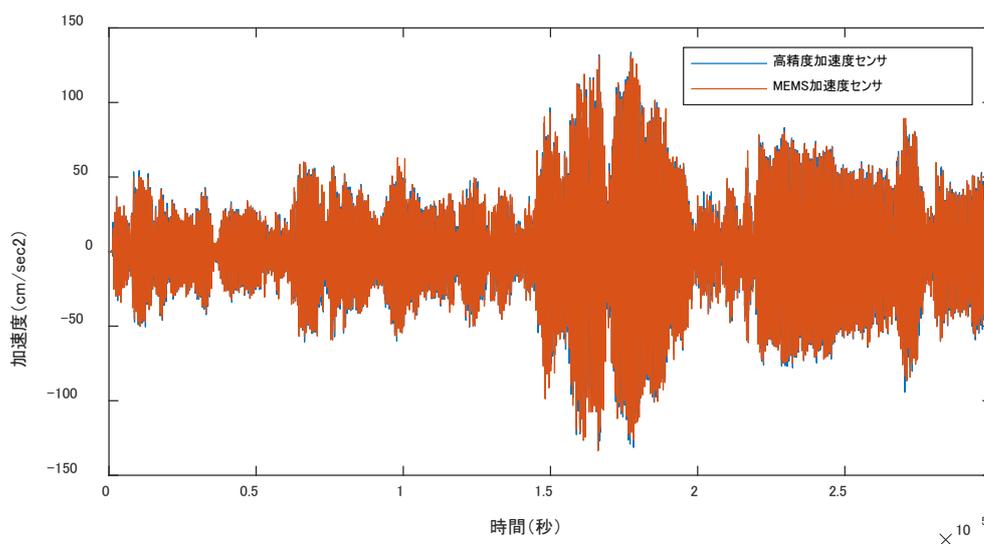
度の性能が低く、小さい加速度を精確に計測することは困難である。そのため、図 8(a)及び(b)の右図を比較すると、MEMS 加速度センサの方が全体的に図の鮮明度が低い。しかしながら、▼で示すようなピークは高精度加速度センサと同様に捉えられており、損傷リスク指標としての固有振動数を判別することは十分可能と考えられる。

(2) 計測期間の最大加速度が生じた日のデータ

図 2 中に、計測期間の最大加速度が生じた日を▼で示した。このときの高精度加速度センサ、及び MEMS 加速度センサによる塔頂部での計測データの時刻歴波形を比較して、図 9 に示す。



(a) 高精度加速度センサ、MEMS 加速度センサによる計測結果の比較 (x 方向)



(b) 高精度加速度センサ、MEMS 加速度センサによる計測結果の比較 (y 方向)

図 9 最大加速度を生じた日の計測データ

図9より、高精度加速度センサ、及びMEMS加速度センサによる計測結果は、ほぼ一致しており、損傷リスク指標としての固有振動数を判別するために重要な大振幅時の計測には問題ないことがわかる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、鉄塔にセンサを設置し、数か月にわたる計測データを蓄積・分析することにより、鉄塔の健全性のモニタリングと長寿命化、建替え工事の平準化と円滑化に有益な知見を得ることを目的に実施した。9か月間にわたる計測とデータの分析から、対象とした鉄塔構造物では一次固有振動数での振動が支配的であるが、高次モードの固有振動数も確認できた。損傷リスク指標として鉄塔構造物の固有振動数を継続的に追跡していくことが有効であると考えられる。損傷リスク指標に変化が生じた場合、具体的には、固有振動数が低くなる傾向が捉えられた場合は、構造物としての剛性が低下したことが想定されるため、詳細点検の優先順位を上げ、計画的な建替え工事につなげることが可能となる。また、データ分析には、高精度加速度センサの利用が望ましいが、安価なMEMS加速度センサの利用も十分実用的であることが確認された。究極的には、鉄塔構造物の塔頂部に、1台の安価なMEMS加速度センサを設置し、継続的な計測とデータ分析を行うだけで、有益な情報が得られることが期待できる。

今後の課題としては、こうした定点観測的なデータ計測と分析により、鉄塔の経年的な構造性能の劣化が捉えられる可能性がある一方で、鉄塔の倒壊リスクが大きい台風等の強風時、地震時のイベントのデータ、及び、その時にどのような事象が発生しているかを把握するための映像を取得し、それらの時刻同期性を確保する計測システムの開発が望ましいと考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人大畑財団の研究助成により実施致しました。ここに記して謝意を表します。