

ワイヤレス計測センサーシステムを利用した強風下の の構造物振動計測システムの実用化：送電鉄塔振動 試験における無線伝送システムの評価

早田, 友彦
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

海老原, 修二
日本鉄塔工業株式会社

鶴, 則生
九州大学大学院人間環境学府

前田, 潤滋
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19104>

出版情報：都市・建築学研究. 13, pp.33-40, 2008-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

ワイヤレス計測センサーシステムを利用した強風下の 構造物振動計測システムの実用化

—送電鉄塔振動試験における無線伝送システムの評価—

A Cable-less System for Wind Response Measurement of a Structure
—Quality Evaluation by a Vibration Test of a Transmission Tower—

早田友彦*, 海老原修二**, 鶴 則生***, 前田潤滋****

Tomohiko HAYATA, Syuji EBIHARA, Norio TSURU and Junji MAEDA

The vibration measurement of a structure requires considerable labor for installing not a few signal cables in the structure, and it is difficult to deal quickly with the unexpected change of circumstances like the change of a typhoon path. It is obvious that cable-less installation of a measurement sensor, such as an accelerometer, has a lot of advantages. There are few reports about application of the cable-less measurement to a transmission tower, and so the reliability of measured data under a high electromagnetic field or a strong wind by a cable-less measurement system is unknown. The authors performed a vibration test of a transmission tower of 500KV using cable-less measurement systems and made comparisons of the signals with the wired signals, focusing on a wave shape, standard deviation and frequency analysis. Although some collateral conditions, such as measurement range of about 200m and 10Hz-low-pass-filtering, are required, it is confirmed that the present transmitter for the cable-less measurement has almost same quality as the wired measurement.

Keywords: Cable-less measurement system, Vibration test, Transmission tower

ワイヤレス計測, 振動試験, 送電鉄塔

1. はじめに

強風下における建物の振動計測では、風速計や加速度計などの計測センサーを有線ケーブルで収録アンプに接続する方法が一般的^{1)~16)}であり、計測センサーから記録装置まで多数本のケーブルを構造物に付設しなければならない。これには多大な労力と経費を要し、屋外の高所に配線することが多いなど安全性にも多くの配慮を必要とする。さらに、ケーブル設置には時間がかかるため、台風観測などのような風向変化にあわせた計測センサー設置場所の変更などに臨機応変な対応が難しい。

一方で、CCDカメラを利用した直接変位計測システムによる建物の振動計測^{17)~23)}も行われている。この方法はセンサーとのケーブル接続を要求しないが、直視可能な箇所での計測に限定され、またひずみなどの計測が不可能である。

PHS通信などを利用した遠隔データ収録システムとは異なる、構造物本体でのケーブル付設量を減少できるこのようなワイヤレス計測システムが多くの特長を有することは言うまでもないが、台風通過時など過酷な気象条件下での計測や高電圧線を有する送電鉄塔にどの程度の

信頼性、耐候性を有するかはこれまで検証された例がない。

本研究は強風下での送電鉄塔の振動計測が可能なワイヤレス計測センサーシステムの実用化を目指すもので、本報告では、市販の無線計測機器類を組み合わせた計測システムの実用性を高圧送電鉄塔の実機振動試験を無風時で行った場合と10m/s程度の強風下で行った振動計測データを用いて検証する。

2. ワイヤレス計測システムの概要

従来の計測センサーを接続できる2.4GHz帯のトランスミッター(A社製)とイントラネット用の無線LANを利用した無線式加速度計(H社製)を使用してワイヤレス計測システムを図1のように構築した。これらのワイヤレス計測システムの実用性を調べるために、従来の有線ケーブルを併用しながら後述の送電鉄塔の振動試験を実施した。2.4GHzトランスミッターは2~5kHzの周波数特性を持つが100Hzスキャンで使用した。2.4GHz帯トランスミッターは、本来は超音波風速計センサーに有線で接合して風速信号を無線伝送するものであるが、これを加速度計など一般の計測センサーが接続できるように改良して無線伝送システムを構築したもので、無線信号の到達距離は300m仕様である。無線式加速度計のスキヤニング周波数は100Hz固定で、センサー部に自身にディジタ

* 都市共生デザイン専攻 修士課程

** 日本鉄塔工業(株)

*** 人間環境学府

**** 都市・建築学部門

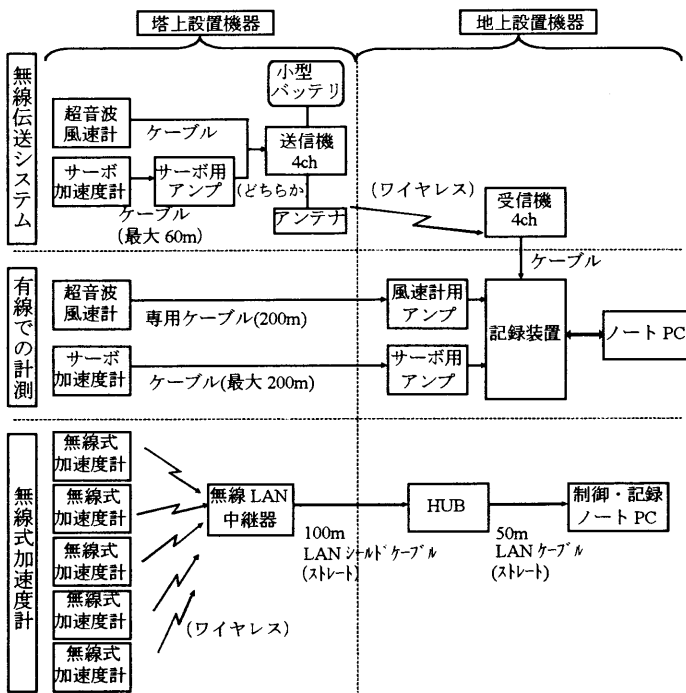


図1 ワイヤレス計測のフローチャート

ル信号発信部を有し、室内 LAN で一般に用いられる無線 LAN(IEEE802.11b)のアクセスポイントと同様の取り扱いで操作でき、無線信号の到達距離は 50m 仕様である。

しかしながら、今回の試験ではいずれも、H 社製の無線式加速度計からは十分なデータを取得できなかったため、以降、2.4GHz 帯トランスミッタを利用した無線伝送システムの検証結果のみを報告する。試験に使用した送電鉄塔は 2 種類(Tower A と B)あり、それぞれの鉄塔に配置した超音波風速計、有線のサーボ加速度計と加速度計用電源、および従来の有線タイプのセンサーを接続するトランスミッタの配置を図 2 と図 3 に示す。

3. 振動試験の概要

3.1 Tower A 振動試験

試験鉄塔 Tower A は 66kV の耐張型送電鉄塔で、そのスケルトン構造図を図 2 に示す。Tower A は塔高 174m、電線の架線条件は水平角度 45°、若番側は径間 856m、老番側径間は 526m である。同図に起振機^{12)~16)}、風速計、加速度計の取り付け位置を示す。図中の K1,3,5,7,9 の奇数番号が線路方向、K2,4,6,8,10 の偶数番号が線路直角方向の有線計測の加速度計で、トランスミッタに接続した場合の加速度センサーを Wireless1, Wireless2, Wireless3 …と記し、それぞれ有線の K1,K2,K3…に対応させて比較する。

3.2 Tower B 振動試験

試験鉄塔 Tower B は 500kV の耐張型送電鉄塔で、そのスケルトン構造図を図 3 に示す。塔高は 70m、電線の架

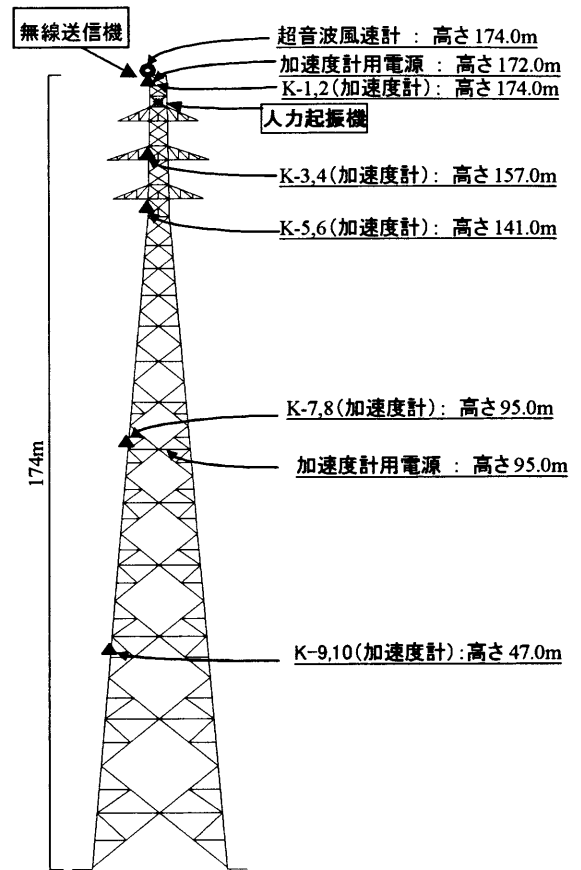


図2 観測鉄塔と計測センサー位置 (Tower A)

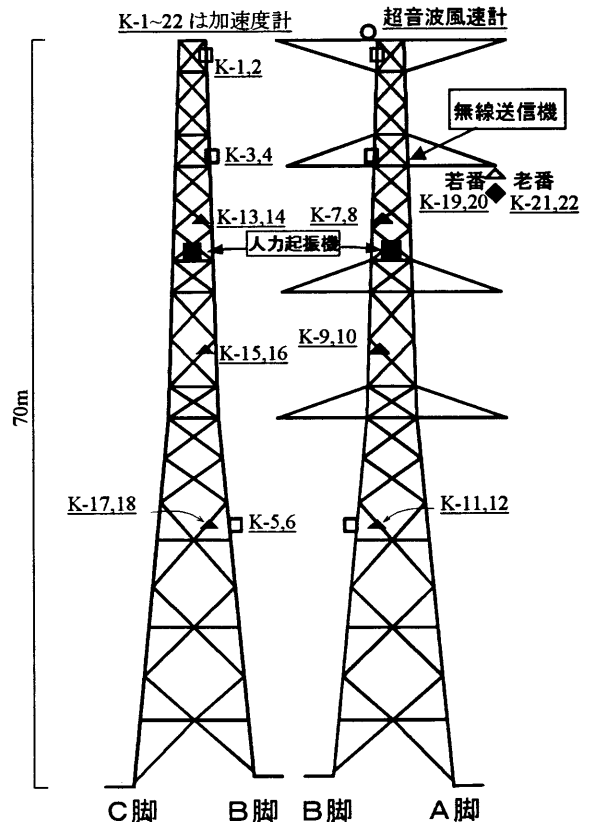


図3 観測鉄塔と計測センサー位置 (Tower B)

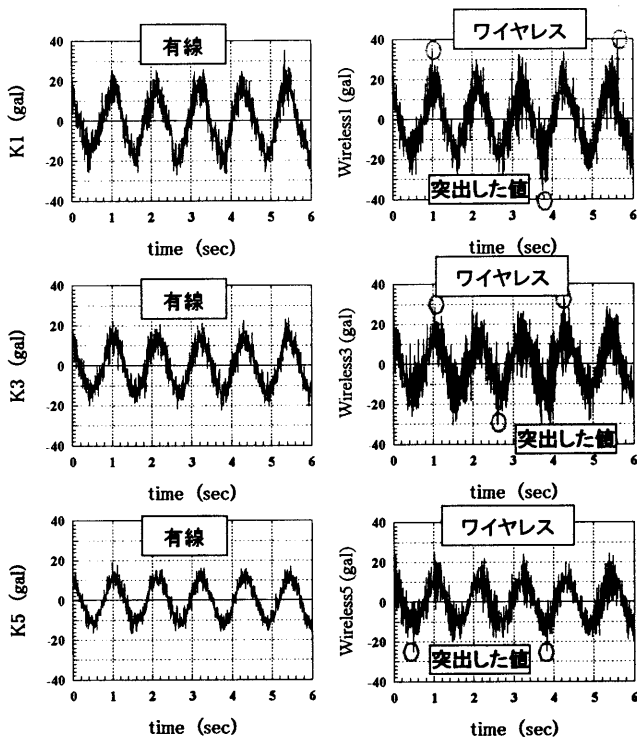


図4 線路方向1次加振時の加速度波形

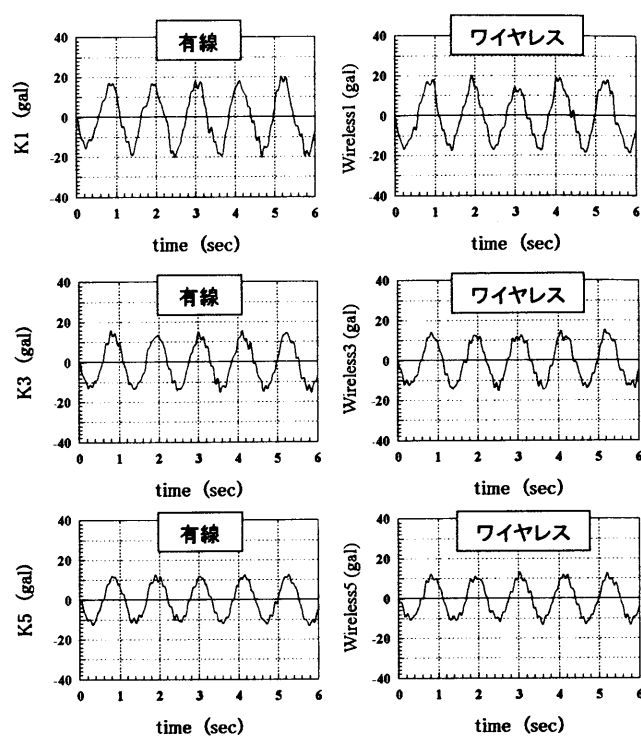


図5 図4の10Hzローパスフィルター処理波形

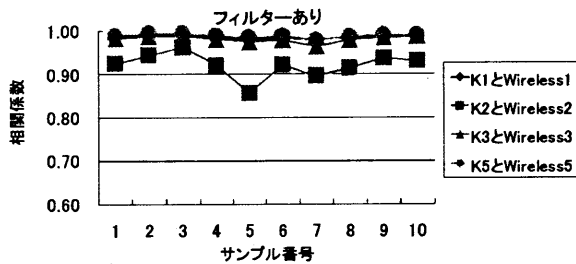
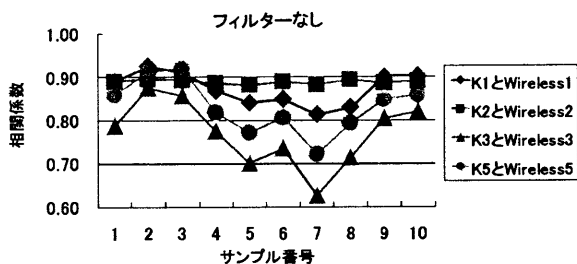


図6 加速度波形の相関係数

線条件は水平角度 3.56° 、若番側は径間 217m、老番側径間は 528m である^{24),25)}。図3に起振機、風速計、加速度計の取り付け位置を示す。K19とK20はそれぞれ吊架ジャンパー²⁵⁾の若番側接線方向と若番側半径方向の有線接続の加速度信号で、無線計測の加速度信号 Wireless19, Wireless20 に対応している。この鉄塔の吊架ジャンパーを自由振動させた時の加速度データを抽出し、有線データとワイヤレス計測データを比較した。

4. 有線ケーブルとワイヤレス計測による加速度データの比較 (Tower A の場合)

無風時において、線路方向に鉄塔本体の1次固有振動数で加振した場合の2.4GHzトランスミッタ(A社製)を使用した場合の加速度データを検証した。

4.1 波形の比較

図4に線路方向1次振動数加振時の加速度波形を、図5に図4の10Hzローパスフィルター処理波形²⁶⁾を示すが、いずれも左側は有線の場合、右側はワイヤレス計測

の場合である。図4より、ワイヤレス計測の方が所々に顕著なピーク値が現れ、また高周波成分を多く含むことがわかる。しかしながら、10Hzローパスフィルター処理後の波形では図5に示すように、目視ではほとんど差がない。

また、有線データとワイヤレス計測データの相関係数は図6のようになり、10Hz程度のローパス処理で高い相関に改善され、有線とほぼ同じデータが得られることがわかる。塔体の加振方向と異なる線路直角方向成分であるK2とWireless2は、成分値そのものが線路方向成分に比べて小さいにもかかわらず十分な相関を有することがわかる。

4.2 標準偏差の比較

図7は計測信号の標準偏差の誤差率を示すものであるが、フィルター処理後は、K2とWireless2を除くすべての信号で0.05以内に収まった。ただし、誤差率は以下で定義した。

$$\text{誤差率} = \frac{(\text{有線データ}) - (\text{ワイヤレスデータ})}{\text{有線データ}}$$

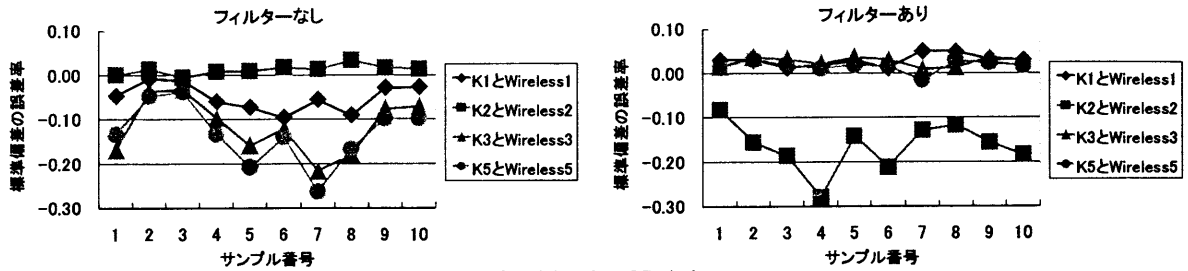


図7 標準偏差の誤差率

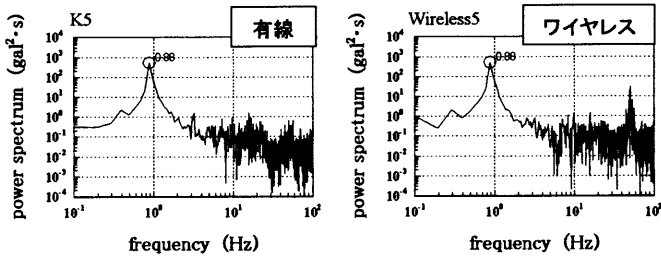


図8 図4の波形のパワースペクトル

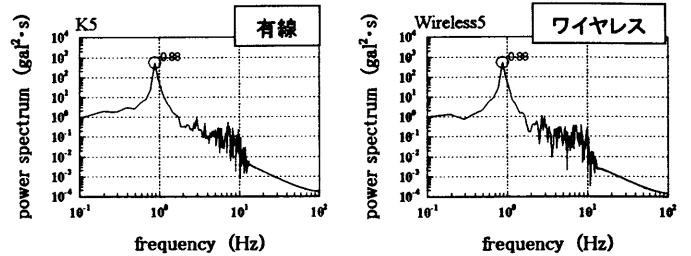


図9 図5の波形(10Hzローパスフィルター処理)のパワースペクトル

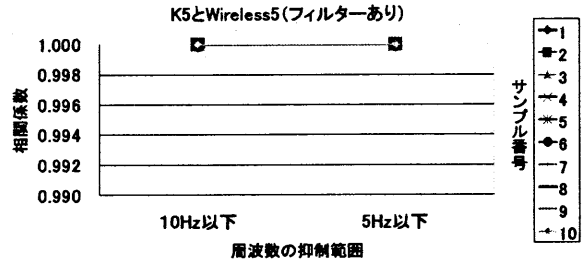
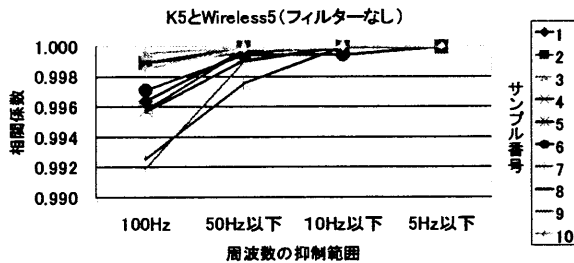


図10 パワースペクトルの相関係数

4.3 パワースペクトルの比較

図8は、図4のK5とWireless5波形のパワースペクトル²⁶⁾である。両者の1次固有周波数(0.88Hz)は良く一致しているが、有線データでは捉えている塔体の高次モードの周波数(3.22 Hz)が、ワイヤレスデータでは明確ではなく、50Hz付近の高周波ノイズが目立つ。しかしながら、図9に示すように10Hzのローパスフィルター処理後のパワースペクトルでは、両者に明確な差がなくなる。

また、有線データとワイヤレスデータのパワースペクトルを10サンプル算出し、両者の相関係数を示したのが図10である。横軸は相関係数算出の周波数範囲をそれぞれ100,50,10,5Hzまでとしたパワースペクトル間の相関係数を意味する。10Hzあるいは5Hz以下の成分に限定すれば、パワースペクトルでも高い相関が得られることがわかる。

4.4 コヒーレンスの比較

(1) 高さ方向2点間のコヒーレンスの比較

図11はそれぞれ10Hzのフィルター処理をしていないK1とK3、K1とK5のコヒーレンス²⁶⁾を示す。有線データは高次モードの周波数でも明確な相関が見られるが、ワイヤレスデータでは取得できていない。1次モードで

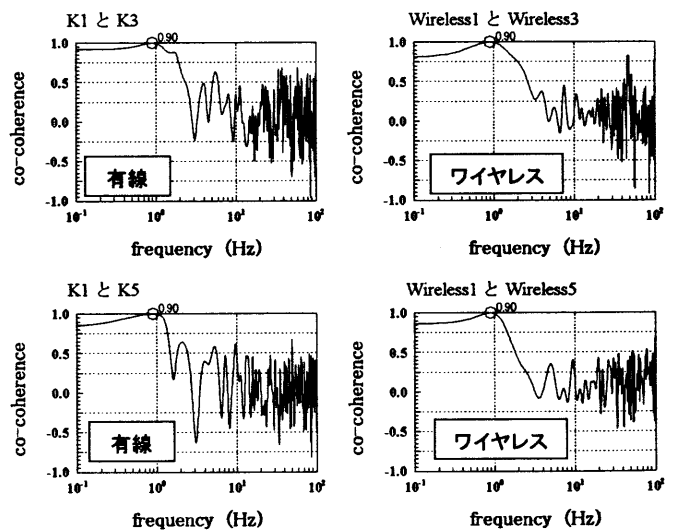


図11 高さ方向2点間のコヒーレンス

加振したために顕著となった1次の周波数(0.90Hz)はどちらもコヒーレンスは1になっている。

(2) 有線データとワイヤレスデータのコヒーレンス
同位置での10Hzのフィルター処理をしていない有線データとワイヤレスデータ間のコヒーレンスを図12

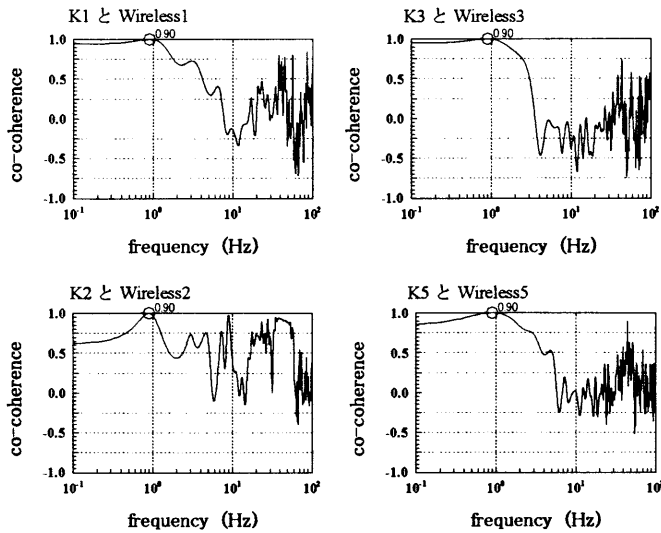


図 12 有線とワイヤレスのコヒーレンス

表 1 減衰定数とその誤差率

	K1	Wireless1	K3	Wireless3	K5	Wireless5
減衰定数(%)	0.844	0.862	0.857	0.919	0.863	0.873
	K1とWireless1		K3とWireless3		K5とWireless5	
誤差率	-0.021		-0.072		-0.012	

表 2 固有周波数(Hz)

K1	K2	K3	K5
0.928	0.928	0.928	0.928
Wireless1	Wireless2	Wireless3	Wireless5
0.928	0.928	0.928	0.928

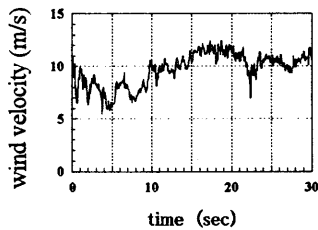


図 13 風速波形

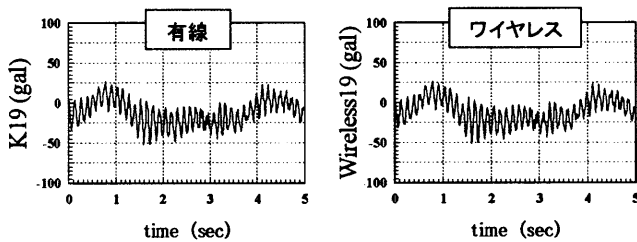


図 14 強風下吊架振動の加速度波形

に示す。本来、広い周波数範囲での高い相関を期待すべきであるが、10Hz以上の周波数帯ではノイズ成分を除いて有意なコヒーレンスを示さなかった。

4.5 減衰定数の比較

1次周波数で加振した場合での減衰定数を有線データからの算出値に対するワイヤレスデータの誤差率で示した結果を表1に示す。両者の差は非常に小さく、この場合のワイヤレスデータからの減衰定数算定には問題ないと言える。減衰定数の算定にはRD法²⁷⁾を用いた。

4.5 固有周波数の比較

固有周波数の比較では、表2に示すように、有線とワイヤレスデータはともに0.93Hzで一致した。

5. 有線ケーブルとワイヤレス計測による加速度データの比較 (Tower Bの場合)

Tower Bでは、500kV送電下での吊架ジャンパーの振動計測に2.4GHzトランスミッタ(A社製)を使用した場合の加速度データの検証を行った。なお、試験時には図13に示すように塔頂部で10m/s程度の風況下であり、この時の吊架ジャンパーの振動データを使用した。

5.1 波形の比較

図14に吊架ジャンパーを自由振動させた時の加速度波形を、図15に図14の10Hzローパスフィルター処理波形を示す。10Hzローパスフィルターの処理前後で、両者の波形目視には明確な差は見あたらない。

有線データとワイヤレスデータの相関係数は図16のようになり、10Hzローパス処理前後いずれも、高い相関を示した。K20とWireless20は吊架半径方向成分であるために、信号そのものが小さいにもかかわらず十分な相

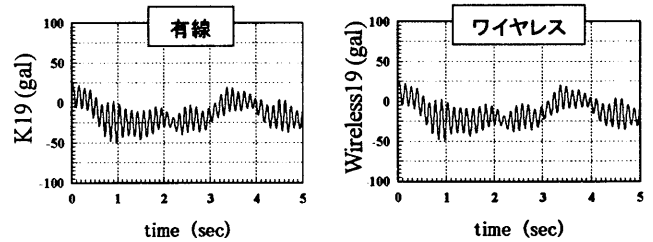


図 15 図 14 の 10Hz ローパスフィルター処理波形

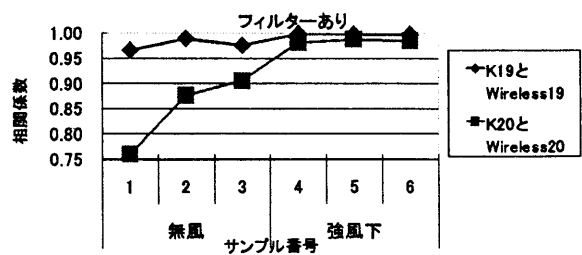
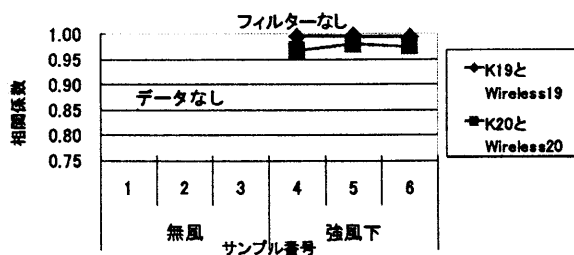


図 16 加速度波形の相関係数

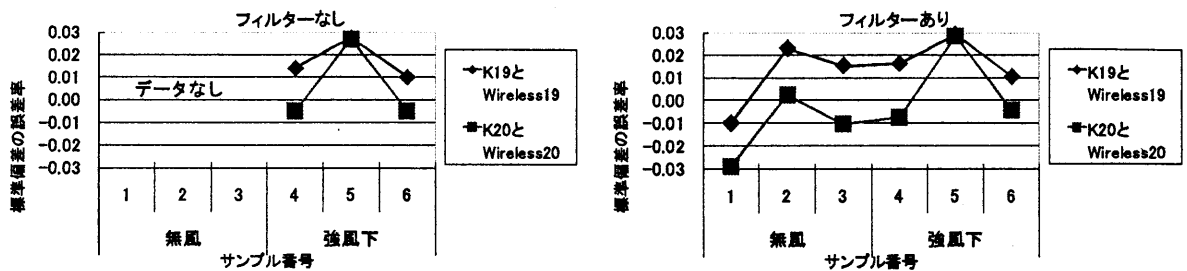


図 17 標準偏差の誤差率

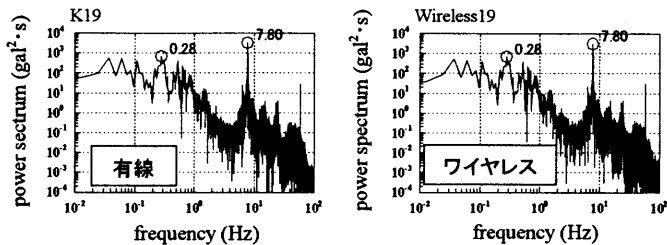


図 18 図 14 の波形のパワースペクトル

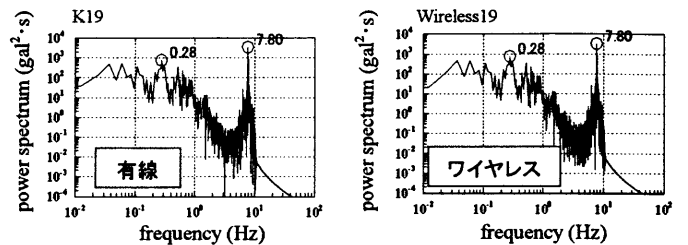


図 19 図 15 の波形(10Hz ローパスフィルター処理)のパワースペクトル

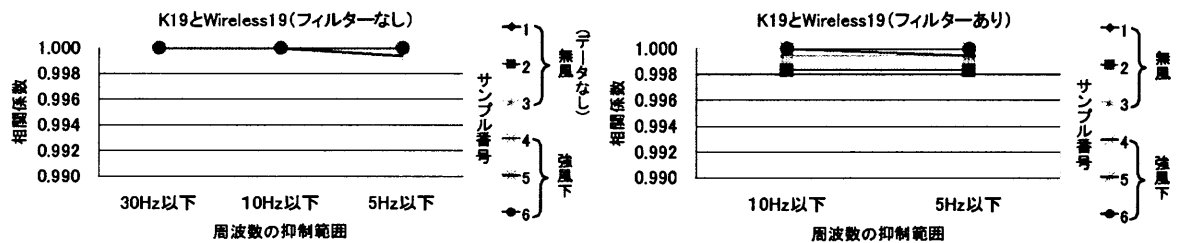


図 20 パワースペクトルの相関係数

関を有することがわかる。

5.2 標準偏差の比較

図 17 はそれぞれ有線データとワイヤレスデータの標準偏差の誤差率であるが、10Hz ローパス処理前後いずれも、0.03 以内に収まっている。誤差率の定義は前述と同じである。

5.3 パワースペクトルの比較

図 18 は図 14 の K19 と Wireless19 波形のパワースペクトルで、図 19 はその 10Hz ローパス処理後のパワースペクトルある。10Hz ローパス処理前後で、有線データとワイヤレスデータ間に明確な差がないことがわかる。

また、有線データとワイヤレスデータのパワースペクトルを 6 サンプル算出し、両者の相関係数を示したのが図 20 である。横軸はそれぞれ 30, 10, 5Hz までの周波数範囲を対象にそれぞれのパワースペクトル間の相関係数を算出したことを意味する。いずれの場合も高い相関があることがわかる。

5.4 有線データとワイヤレスデータのコヒーレンス

図 21 は同位置に配置した加速度計の有線データとワイヤレスデータのコヒーレンスを示す。接線成分の

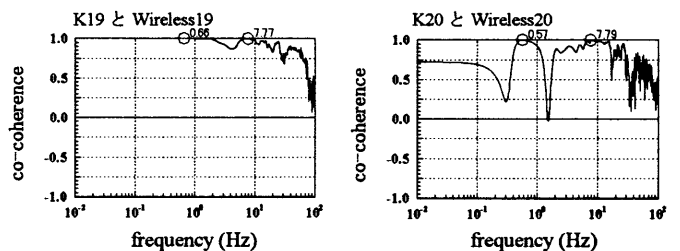


図 21 有線とワイヤレスのコヒーレンス

K19 と Wireless19 によるデータでは広い周波数範囲で高いコヒーレンスとなった。一方、本来信号値が小さい鉛直成分の K20 と Wireless20 の組み合わせでは、10Hz 以下の周波数帯でも必ずしも高い相関は得られず、どちらかの取り付けに不具合があった可能性があるが、原因は不明である。

5.5 減衰定数の比較

吊架の自由振動波形から算出した減衰定数を有線データからの算出値に対するワイヤレスデータの誤差率を表 3 に示す。両者にはさほど差はないといえる。

なお、K19 と Wireless19 は図 18 に示すように、固有周波数の近傍に多くの周波数成分を含んでいるため、通常の RD 法では減衰定数を算出できなかったため記載していない。

表 3 減衰定数とその誤差率

		K19	Wireless19	K20	Wireless20	
減衰定数(%)	無風	1	2.23	2.03	2.98	2.48
		2	4.50	4.05	3.16	2.09
		3	0.72	0.79	0.80	0.72
	強風下	4	×	×	2.69	2.35
		5	×	×	3.63	3.69
		6	×	×	1.43	1.58
		K19とWireless19		K20とWireless20		
誤差率	無風	1	0.090	0.168		
		2	0.100	0.338		
		3	-0.093	0.101		
	強風下	4	×	0.127		
		5	×	-0.016		
		6	×	-0.095		

表 4 固有周波数(Hz)

		K19	Wireless19	K20	Wireless20
無風	1	0.29	0.29	0.59	0.59
	2	0.29	0.29	0.59	0.59
	3	0.29	0.29	0.59	0.59
強風下	4	0.28	0.28	0.60	0.60
	5	0.28	0.28	0.55	0.55
	6	0.28	0.28	0.57	0.57

5.6 固有周波数の比較

固有周波数を表 4 に示す。有線とワイヤレスデータではすべて一致した。

6. まとめ

強風下でのワイヤレス計測システムの実用化を目指して、2種類の送電鉄塔(Tower A と B)の振動試験で市販の 2.4GHz 帯のトランスミッタを用いてワイヤレス計測を行い、有線データとの比較検証を行った。振動データとして、鉄塔線路方向 1 次モードでの加振時(Tower A)データと風速 10m/s 程度の風況下で振動した送電鉄塔の吊架ジャンパーの振動計測(Tower B)のデータを用いて検討したところ、以下の所見が得られた。

- (1) 波形・標準偏差・パワースペクトルで比較検証したところ、いずれも 10Hz 程度のローパスフィルターを通すことによって、ワイヤレス計測は有線データとほぼ同質のデータを得ることができた。10Hz 以下を対象にする構造物の振動計測には、本ワイヤレス計測システムは有用な手段となりうる。
- (2) 無線距離が最大 174m の長距離、また高圧送電鉄塔腕金部など電磁界が大きい環境や 10m/s 程度の強風下においてワイヤレス計測が可能である。

今回の結果は無線伝送システム(A社製)を使用したものであるが、4チャンネルに限定された計測チャンネル数の拡大が必要である。また、台風通過時など過酷な気象条件下での耐水性能や長期観測に向けた耐候性能など検討課題は多い。

謝辞

本研究は、九州電力(株)との平成 18 年度共同研究「鉄塔耐風性能に及ぼす部材振動の影響とその長期的影

響評価に関する研究」の支援を受けました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 前田潤滋, 他: 風観測および送電鉄塔の風応答観測の現状, 日本風工学会誌・日本風工学会論文集, 第 98 号, pp.21-28, 2004.1.
- 2) 藤本盛久, 他: 7920 台風時の建物風圧力および建物振動についての実測結果, 第 6 回風工学シンポジウム論文集, pp201-208, 1980.
- 3) 松下一郎, 他: 通信用鉄塔の風による振動観測, 第 7 回風工学シンポジウム論文集, pp303-310, 1982.
- 4) 大熊武司, 他: 鉄塔 - 架渉線練成系の風応答に関する研究, 第 11 回風工学シンポジウム論文集, pp347-352, 1990.
- 5) 勝村章, 他: 東京国際空港新管制塔における風応答観測(その 1), 日本風工学会誌, 第 55 号, pp55-56, 1993.
- 6) 若原敏裕, 他: 強風時における高層タワーの応答特性, 日本風工学会誌, 第 55 号, pp53-54, 1993.
- 7) 鈴木慎一, 他: 送電用鉄塔に加わる架渉線の張力変動と部材応力の動的挙動に関する考察, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, pp569-574, 1998.
- 8) 三上康朗, 漆原育男, 他: 特殊地形における送電用鉄塔・架渉線練成系の耐風設計に関する研究(その 3)および(その 4), 日本風工学会誌, 第 83 号, pp.117-140, 2000.
- 9) 巻幡俊秋, 他: 鉄塔支持型鋼製煙突の風応答に関する実機観測, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp457-462, 2002.
- 10) 大熊武司, 他: 山岳地における送電鉄塔の風応答, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp509-514, 1994.
- 11) Momomura, Y., et al.: Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp.241-252, 1997.
- 12) 本村禎浩, 他: 人力起振機による送電線・鉄塔連成系の振動試験, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第 8 号, pp.69-78, 2005.7.
- 13) 前田潤滋, 他: 人力起振機試験による送電線変動張力の計測の試み, 日本建築学会技術報告集, No.21, pp.61-66, 2005.7.
- 14) 鶴則生, 他: 2 段滑動支持台上での無電源起振機加振時特性, 日本建築学会研究報告九州支部, pp.517-520, 2006.3.
- 15) 石田伸幸, 他: 無電源起振機による送電鉄塔の加振実験, 日本建築学会研究報告九州支部, pp.241-244, 2004.3.

- 16) 白濱美香, 他: 既設 66kV 送電鉄塔の耐風性能に関する研究 その 1 小型起振機による振動試験実施報告, 日本建築学会研究報告九州支部, pp.217-220, 2004.3.
- 17) 荊尾治邦, 他: 懸垂型送電鉄塔の強風時応答特性に関する実測的研究, 日本風工学会誌, 第 63 号, pp.197-202, 1995.
- 18) 前田潤滋, 他: 大戸ノ瀬戸海峡横断鉄塔での T9612 号観測報告(その 1)~(その 3), 日本風工学会誌, 第 71 号, pp.19-24, 1997.
- 19) 前田潤滋, 他: 直接変位計測による超高鉄塔の強風時応答特性の検証, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, pp.251-256, 1998.12.
- 20) Maeda, J., et al.: Wind response behavior of a power transmission tower using new displacement measurement, Proc. 10th International Conference on Wind Engineering, pp.481-486, 1999.6.
- 21) 森本康幸, 他: 直接変位計測法で見る送電鉄塔の強風時動的応答特性, 九州大学工学集報, 第 73 巻, 第 4 号, pp.345-351, 2000.
- 22) 前田潤滋: 強風時での送電鉄塔応答変位の絶対値成分を計測する試み, 日本風工学会誌, 第 94 号, pp.29-36, 2003.
- 23) 川島裕治, 他: 超高压送電用鉄塔の強風時応答特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), B-1, pp.209-212, 1996.
- 24) 海老原修二, 他: 強風時における送電鉄塔の構面外振動の特性について(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), B-1, pp.151-152, 2004.8.
- 25) 本田誠, 他: 強風時における吊架ジャンパ装置と塔体の動的相互作用に関する基礎的研究, 日本風工学会誌, 第 32 巻第 2 号 (通号第 111 号), pp.247-248, 2007.4.
- 26) J.S.Bendat, A.G.Piersol: ランダムデータの統計的処理, 培風館, 1976.
- 27) 田村幸雄, 他: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 454 号, pp.29-38, 1993.12.

(受理: 平成 19 年 12 月 6 日)