

大型多導体送電線で観測された風応答振動の特性と原因に関する考察

Characteristics and possible mechanisms of wind-induced vibrations measured in the transmission lines

山口宏樹^{1*}, 石 卓峰², ロビウル アワル¹, 土師弘敬³, 磯崎正則³,
H. Yamaguchi¹, T. Ishi², Md. R. Awall¹, H. Haji³, M. Isozaki³,

¹ 埼玉大学 大学院理工学研究科 ² 工学部建設工学科

¹ Graduate School of Science & Engineering, ² Department of Civil & Environmental Engineering, Saitama University

³ 東京電力株式会社 技術開発研究所

³ Research and Development Center, Tokyo Electric Power Company

Abstract

The field-measured, wind-induced vibration data of the transmission lines are analyzed in the frequency and time-frequency domains, in order to discuss their characteristics and possible mechanisms. The eigenvalue and gust response analyses are also conducted for the finite element models of multiple bundled conductors. It is concluded through the experimental and theoretical modal analyses that the field observed data of wind-induced vibrations contain aerodynamically unstable phenomena with time-independent dominant frequency, while most of field observed vibrations could be non-stationary gust responses.

Key Words: transmission lines, field measured data, wavelet analysis, aerodynamic instability, gust response

1. はじめに

本研究は、強風箇所位置する大型多導体送電設備の一部において発生している電線異常振動について、振動対策を立案する上で振動様相の把握が重要となることから、当該設備で観測された電線振動および気象データをもとに解析を行ってその特性を同定するとともに、振動現象が強制振動であるか、あるいは不安定振動であるかの評価を行うことを目的とする。

具体的には、2つの大規模送電線で計測されたデータを基に、最大振幅、振幅 RMS 値と平均風速、

気象状況との関連を見た上で、周波数分析、時間周波数分析、ならびに実験モード解析を行って、それぞれの風応答振動の特性を考察している。さらに、風振動応答の発生原因について検討を加えるため、多導体送電線の固有振動解析を行って主要振動モードと固有振動数を把握した上で、現地の自然風特性をある程度反映したガスト応答解析を試み、計測された風応答振動がガスト応答であるか否かの可能性について考察した。

2. 対象とした送電線と計測概要

(1) A 送電線 対象とした送電線の一つは、8 導体幹線の耐張径間であり、径間長は 615m とスパンが極めて長い大型多導体送電線となっており、電線は

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
電話・Fax: 048-858-3552
Email: hiroki@mail.saitama-u.ac.jp

突起が付いている低騒音電線である。

送電線の風応答振動は、耐張径間の 1/4 点および 1/2 点で計測された。スパーサ内に取り付けられたセンサによって、水平・鉛直振動加速度、および捻回振動角速度が計測されている。いずれも、サンプリング周期は 0.12s で、180 秒間計測である。なお、センサ起動のトリガ条件は、振幅 1m 以上、捻回角度 10° 以上であり、1/4 点と 1/2 点での同時刻計測は行われていない。なお、気象データとしては平均風速、平均気温、降水量だけが記録されており、電線振動が観測された時の気温は比較的高く、降水量が無い。

(2) B 送電線 対象とした第二の送電線は、中間に 2 つの懸垂支持鉄塔を有する 2 導体送電線であり、スパン長は 149m + 439m + 421m である。

振動計測方法は A 送電線と同じであるが、振動が観測された際の気温は低く、降水もあり、電線に着氷雪があった場合を含んでいる。

3. 観測データ解析、振動特性同定と原因究明

対象とした 2 幹線での実測データを基に、最大振幅、振幅 RMS 値と平均風速、気象状況との関連を見た上で、周波数分析、時間周波数分析、ならびに実験モード解析を行って、それぞれの風応答振動の特性を考察した(図-1)。さらに、風振動応答の発生原因について検討を加えるため、多導体送電線の固有振動解析を行って主要振動モードと固有振動数を把握した上で、現地の自然風特性をある程度反映したガスト応答解析を試み、計測された風応答振動

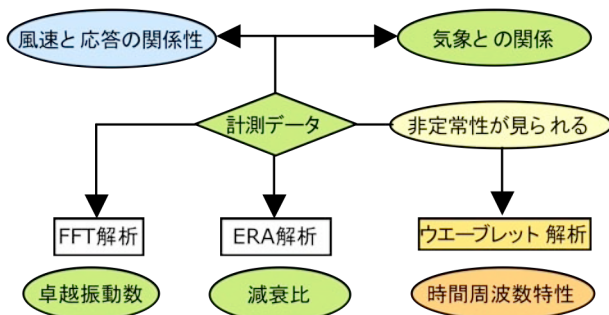


図-1 実測データの解析と特性同定

がガスト応答であるかの可能性について考察した。

4. 平均風速と風応答振動との関係

一例として、B 送電線で観測された風応答振動の RMS 値を平均風速に対してプロットした図を図-2 に示す。振動は平均風速 12~27m/s で観測されているが、風速とともに RMS 値が大きくなるという傾向は、鉛直方向振動に関して顕著ではなく、鉛直振幅で最大 2m に達していることから、空力不安定振動が含まれる可能性があると言える。この傾向は、水平方向については顕著ではない。

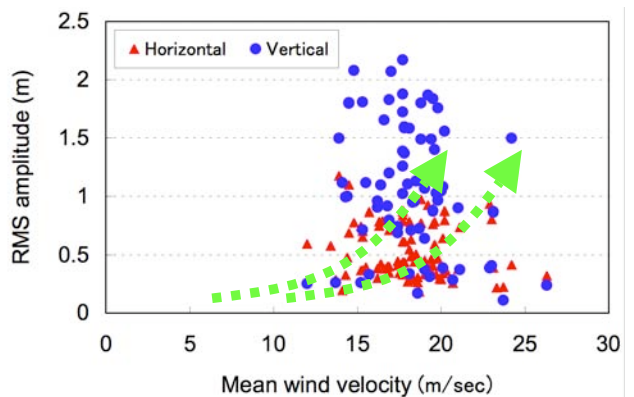


図-2 平均風速と振動応答 RMS 値との関係

5. 時間周波数特性と振動発生原因の考察

振動データの FFT 解析を行ったところ、A 送電線では水平方向と捻回方向に同一で特定の振動数が見られ、B 送電線ではいくつもの振動数でピークを持つという特徴が見られた。これらの振動数が定常的に現れているものなのかどうかを見る必要があるため、ウェーブレット変換による時間周波数解析を行い、時間ごとの周波数特性を見た。なお、マザーウェーブレットとして Gaussian Wavelet を用いている。

A 送電線では水平方向と捻回方向の卓越振動数の一致が見られた 12/27 16:42 のデータについて、B 送電線では複数の卓越振動数を有し、非定常性が強い 12/22 20:55 のデータについて、ウェーブレット解析結果を、振動の時系列とともに図-3 (a), (b) に示した。図-3 (a) より、A 送電線では水平方向、捻回方向に

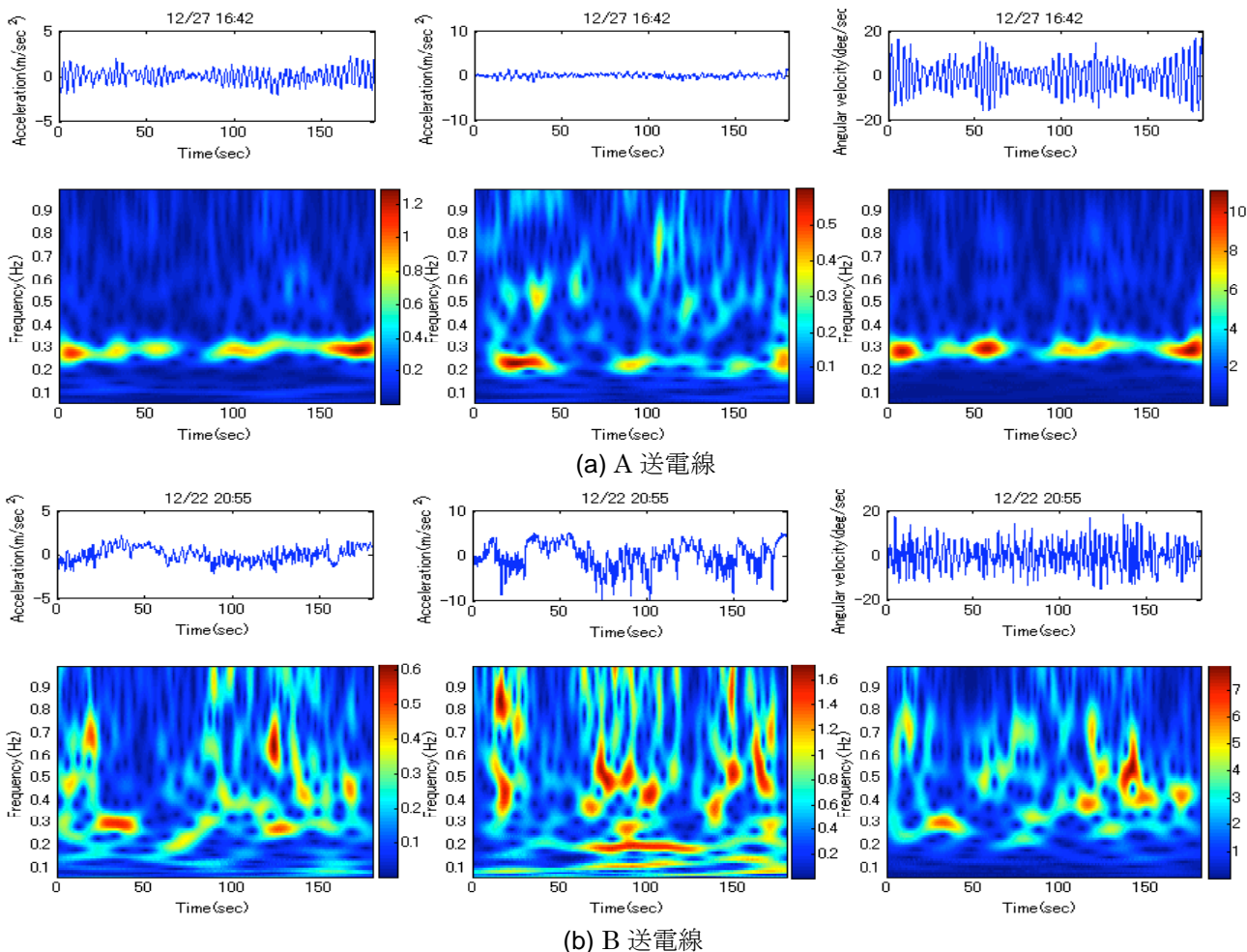


図-3 観測された風応答振動の時系列とウェーブレット解析結果 (a) A 送電線, (b) B 送電線

0.28Hz の卓越振動数が定常的に現れており、空力不安定現象の可能性が考えられる。これに対し、図-3 (b) に示されるように、B 送電線では鉛直振幅は極めて大きいものの、複数の卓越振動数成分が非定常に出現している。全体的には、捻回方向で時間的に安定した振動数が見られるが、鉛直方向では時間ごとに異なった振動数が見られる。鉛直振動では特定の振動数でなく、さまざまな振動数が混在しているが、B 送電線が懸垂支持であることに起因している可能性もある。

6. 送電線の固有振動解析とガスト応答解析

計測された振動データから振動特性を考察してきたが、その発生要因に言及するには理論解析による検討が不可欠である。そこで、対象送電線の固有振動解析により、その主要モード形状と固有振動数

を推定するとともに、ガスト応答解析により、現地での自然風の乱れ成分がどの程度の大きさのガスト応答（パフェッティング振動）を起こし得るかを考察することとした。

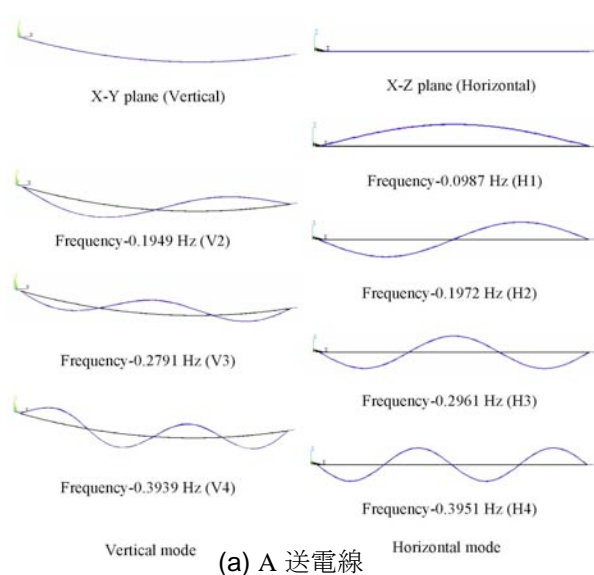
まず、多導体送電線を有限要素法によってモデル化し、自重による静的つり合い形状（無風時つり合い形状）を静的非線形解析により求めた後、そのつり合い位置からの微小振動を仮定して線形化、固有振動解析を行っている。また、有風時には送電線は吹き流され、平均風速によって新たなつり合い位置に至るが、その形状を静的非線形解析によって求めた上で固有値解析とガスト応答解析を行った。

(1) 多導体送電線の有限要素モデル 多導体送電線は有限要素法汎用ソフト ANSYS によってモデル化した。導体はねじれ変位をも自由度として持つ PIPE59 要素によってモデル化し、初期張力による幾

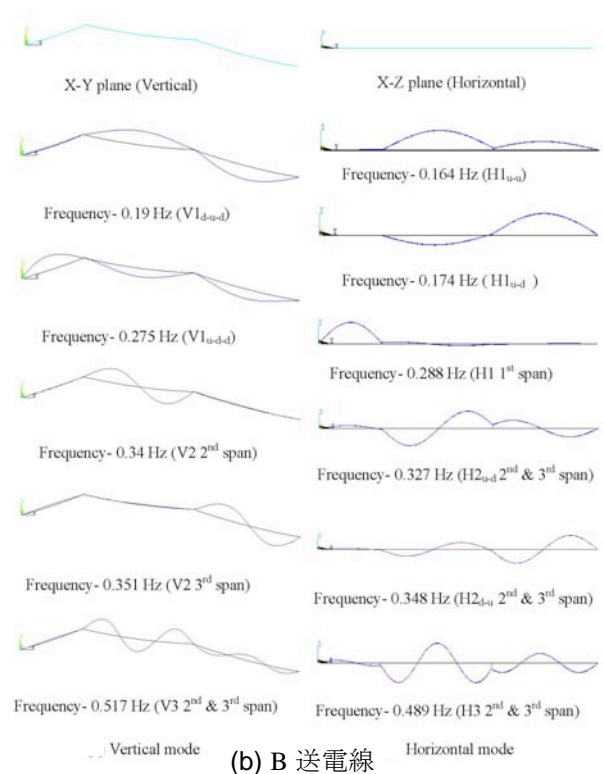
何剛性を考慮している。また、碍子については、その曲げ剛性も考慮して、はり要素 BEAM4 によりモデル化している。さらに、多導体間を一定に保つためのスペーサについてもはり要素 BEAM4 によりモデル化した。A 送電線では耐張径間 No.58-No.59 を両端完全固定の境界条件でモデル化し、全要素数は 1098、全節点数は 972、総自由度数は 5832 である。一方、B 送電線では耐張鉄塔間の No.36-No.39 をモデル化し、全要素数は 467、全節点数は 442、総自由度数は 2652 である。

(2) 固有振動解析結果 主要モード形状と固有振動数を図-4 に示す。A 送電線の計測点 1/2 点で水平方向に見られた 0.28Hz の卓越振動数は、図-4 (a) の 3 ループ振動モードに対応した固有振動数 0.30Hz に近いことから、水平方向においては 3 ループ振動が主体の風応答振動であったものと考えられる。しかし、鉛直方向や B 送電線においては卓越振動数に近い固有振動数は得られていない。

(3) 周波数領域のガスト応答解析 周波数領域のガスト応答解析は、不規則振動論に基づき、変動風速のパワースペクトルから変動空気力のパワースペクトルを評価し、各種アドミッタンスを乗じて不規則振動応答のパワースペクトルを評価するものである。その応答のパワースペクトルからガスト応答振幅の RMS 値を求めた (図-5)。



(a) A 送電線



(b) B 送電線

図-4 対象送電線の主要モードと固有振動数

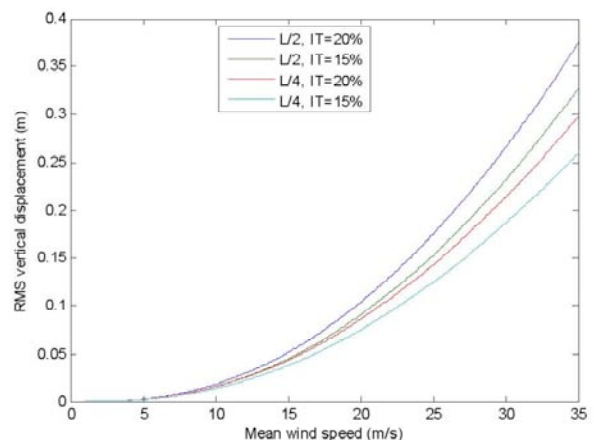


図-5 平均風速-応答振幅 RMS 値関係

7. まとめ

以上より、大型多導体送電線で観測された風応答振動には、卓越振動数が時間的に顕著である、定常的な空力不安定振動を含むものの、多くは自然風の乱れに起因したガスト応答であり、特に非定常性の強い、瞬間的な大振幅振動はガスト応答の可能性が高いことが明らかとなった。ただし、本研究で対象としたデータでは自然風の計測が必ずしも十分でなく、今後、より詳細な計測と解析が必要である。