

大型多導体送電線で観測された風による異常振動のモード解析

Modal analyses of large wind-induced vibrations observed in a transmission line

山口宏樹^{1*}, 熊谷 啓¹, グル ジャワード ハッサン¹, 福岡 崇², 磯崎正則²

H. Yamaguchi, K. Kumagai, Gull. Jawad. Hussan, T. Fukuoka, M. Isozaki

¹ 埼玉大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

² 東京電力株式会社 技術開発研究所

Research and Development Center, Tokyo Electric Power Company

Abstract

The theoretical as well as experimental modal analyses, including the gust response analysis, are conducted for discussing the characteristics and possible mechanism of the large wind-induced vibrations observed in the different spans of the transmission line with 8-bundled conductors. It is concluded that the field-measured vibration, analyzed in this study, could be non-stationary gust responses, whose characteristics are dominated by the different structural characteristics of different spans and the wind characteristics.

Key Words: transmission lines, field measurement, ERA, wavelet analysis, eigenvalue analysis, gust response

1. はじめに

送電線は風による異常振動によりこれまで多くの電気事故, 設備被害を受けてきた. その対策を行う上で風応答振動の特性と原因を把握することは極めて重要であり, 本研究では, 多導体送電線で実測された振動について各種の解析を行い, 考察を行った. 具体的には, 多導体送電線の固有値解析を行い, 主要振動モードと固有振動数を把握したうえで, 現地の自然風特性を反映したガスト応答解析を行うとともに, 実測された振動データについて周波数解析, 時間周波数解析, 実験モード解析を行って, 風応答振動の特性とその要因について考察を加えている.

表-1 に, 本研究にて用いた解析手法とその解析によって同定される振動特性パラメータの関係を示す.

2. 対象送電線と計測概要

解析対象とした送電線は 8 導体電線で, A 区間は中間に懸垂支持鉄塔を有する径間長 660m+662m の 2 径間, B 区間は径間長 615m の耐張径間である. ともにスぺ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, 捻回振動角速度が計測されている. 計測のトリガ条件は鉛直方向振幅 0.2m 以上, 捻回角度 4°以上であり, サンプリング周期は 0.10 秒, 計測時間は 600 秒間である. なお, 実測データを用いた解析には数値積分で得られた変位波形を使用し

表-1 解析方法と同定パラメータ

	解析方法	同定パラメータ
理論解析	固有値解析	固有振動数 理論モード形状
	ガスト応答解析	強制振動応答
データ解析	FFT	卓越振動数
	ERA	減衰比 実験モード形状
	Wavelet	時間周波数特性

* 〒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

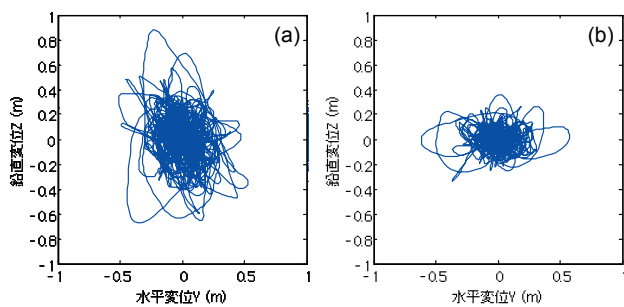


図-1 風応答軌跡：(a) A 区間，(b) B 区間

た(図-1)．本研究では主として，A 区間第 2 径間 1/2 計測点 2009 年 2 月 6 日 11:08 観測データ，および B 区間 1/2 計測点 2009 年 2 月 1 日 16:12 観測データを解析し，構造特性の異なる 2 送電線区間の振動特性を比較して考察を加えている．

3. 理論モード解析

上述の送電線に対し，汎用有限要素解析ソフト ANSYS を用いて固有振動解析を行い，固有振動数と振動モードを求めるとともに，ガスト応答解析により現地での風の乱れがどの程度の大きさのガスト応答を起こし得るかを考察した．

まず，各区間を有限要素法によってモデル化し，無風時における自重による静的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変動を仮定して線形化し，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．

有限要素モデルとしての多導体送電線は，導体を並進 3 変位とねじれ変位を自由度として持つ PIPE59 要素でモデル化し，初期張力による幾何剛性を考慮している．碍子とスペーサは曲げ剛性を考慮して，はり要素 BEAM4 でそれぞれモデル化している．A 区間では両端を完全固定の境界条件とし，全要素数は 1200，全節点数は 978，総自由度数は 5868，B 区間では耐張支持間をモデル化し，全要素数は 602，全節点数は 492，総自由度数は 2952 である．

(1) 固有振動数とモード形状

固有振動解析により求められた振動モード形状を固有振動数と共に図-2 に示す．観測データのスペクトルで主要なピークが見られた振動数には◎を付している．図-2 より，水平・捻回モードは A 区間，B 区間で明確な違いは見られず，1 径間に対し，水平方向では 1 ループ，捻回方向では 3 ループのモードがスペクトルピークに対応している．一方，鉛直方向では，A 区間においては 1 径間あたり 1 ループが，B 区間においては 2 ループが最低次モードとなっているが，FFT 解析結果における卓越振動数 0.1Hz，0.2Hz に対応している．A，B 区間の懸垂支持，耐張支持の違いが影響したものと考えられる．

(2) ガスト応答解析

観測された振動が風の乱れに起因した強制振動であるかどうかを判断するため，ANSYS を用い，A，B 両区間の振動応答発生時に計測されている風速・風向データを対応させたガスト応答解析を行った．そのガスト応答解析結果を図-3 に示す．

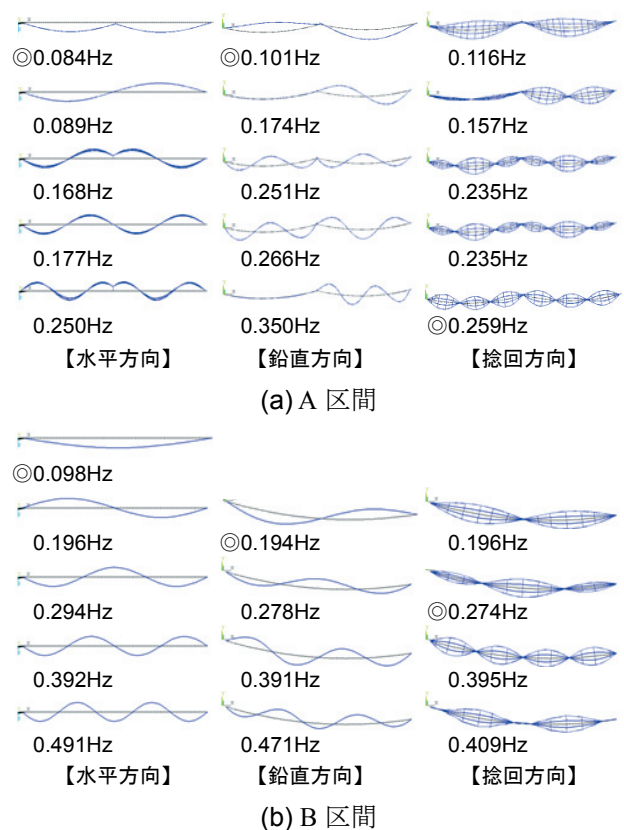
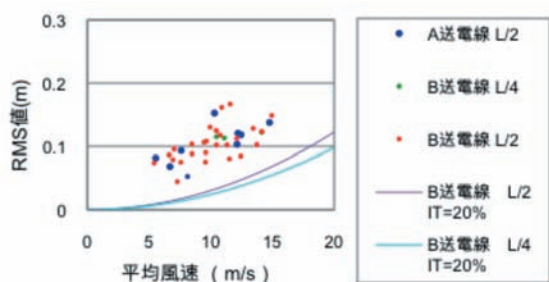
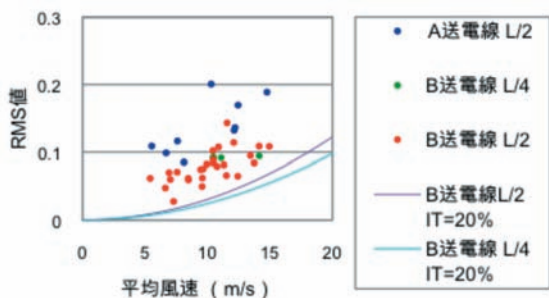


図-2 モード形状と固有振動数



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図-3 平均風速・応答振幅 RMS 値関係

周波数領域のガスト応答解析は、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-3 では実測データから算出した RMS 値も同時に示しているが、水平方向では振動が5~15m/sで観測されており、風速とともに RMS 値が大きくなるという傾向が顕著であるのに対し、鉛直方向では顕著ではない。また、全体的にガスト応答解析よりも実測された RMS 値の方が大きい。このことから、実際の振動発生時にはガスト応答以外の振動要因も含まれている可能性が考えられる。

4. 実験モード解析

(1) ERA による減衰比同定

観測波形から Natural Excited Technique (以降 NExT) を用いて自由振動波形を抽出した後に、時間領域における高精度モード同定法として、Eigensystem Realization Algorithm (以降 ERA) を適用した。NExT ではクロススペクトルの逆フーリエ変換から相互相関関数を算出し、これを自由減衰振動波形とみなし

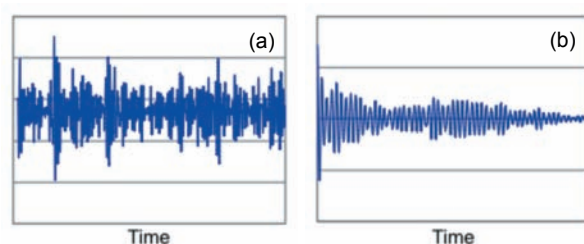


図-4 (a) 原波形, (b) 自由振動波形 比較例

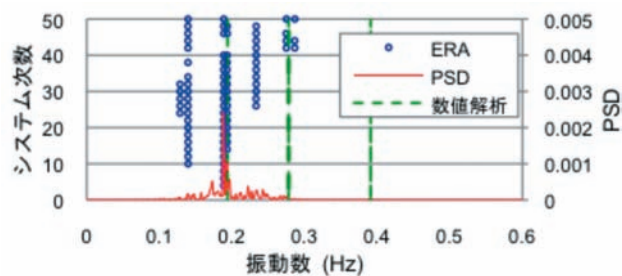


図-5 ERA, PSD, 固有値解析, 各結果比較例

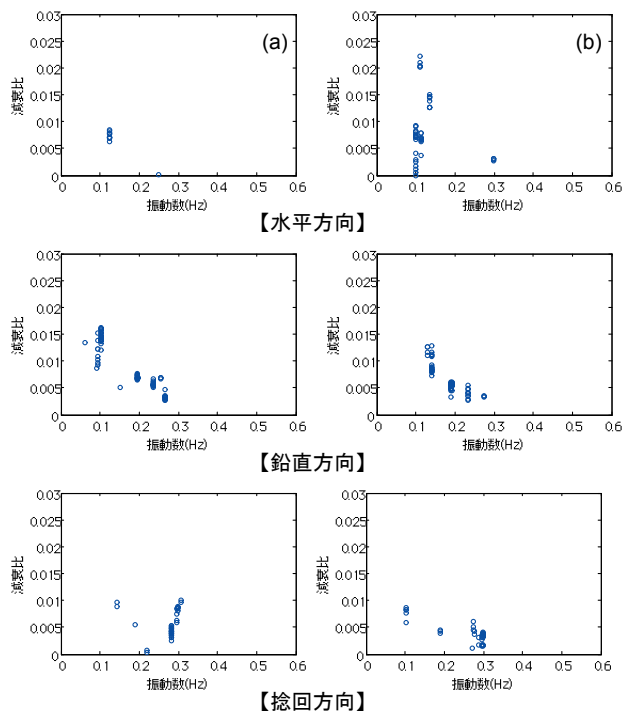


図-6 振動数-減衰比関係 : (a) A 区間, (b) B 区間

表-2 ERA 解析結果 (主要モード)

		水平方向	鉛直方向	捻回方向
A 区間	振動数 (Hz)	0.124	0.101	0.298
	減衰比	0.0074	0.0146	0.0082
B 区間	振動数 (Hz)	0.998	0.189	0.297
	減衰比	0.0056	0.0053	0.0031

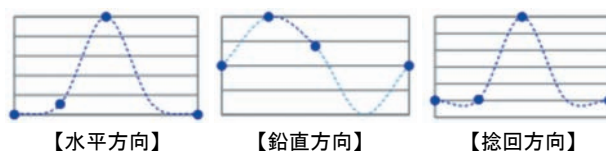


図-7 B 区間の実測モード形状

ている．強制振動波形と NExT によって抽出された自由振動波形の比較を図-4 に示す．また，ERA の有用性を検討すべく解析結果の一例を，ERA 安定図とスペクトルとを重ねて図-5 に示した．図より，ERA の結果は FFT 解析および固有振動解析の結果と，主要なピークで概ね一致していることが分かる．

ERA によって同定された振動数と減衰比の関係を図-6 に，主要モードでの値を表-2 に示す．図-6，表-2 より減衰比が非常に小さい場合もあり，このことから，空力不安定振動の可能性も考えられる．また，B 区間では 1/4 計測点との同期計測も行われているため，多点参照の ERA 解析を行っており，その結果から同定された正規化モード形状を図-7 に示す．

(2) Wavelet 変換による時間周波数解析

ERA 解析では振動応答を定常過程として扱っているものの，風に対する応答は時々刻々と変化していると考えられる．そこで，卓越振動数の時間変化をみるために Wavelet 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．Wavelet 変換の解析結果を図-8(a)に示す．比較として，計測条件(サンプリング周期 0.12 秒，計測時間 180 秒)やトリガ条件(振幅 1m 以上，捻回角度 10°以上)は異なるが，より大きな振幅が観測された際の解析結果を図-8(b)に示した．図-8(a)から明らかなように，A 区間では水平，鉛直の 2 方向においてスペクトルで見られたピークが定常的に卓越し，B 区間においても同様の傾向がみられる．また，捻回方向においては両区間とも 0.3Hz 付近に定常的な卓越が見られる一方，図-8(b)より，B 区間において大振幅が生じる場合，鉛直方向の卓越振動数は瞬間的なものであると言える．ただし，水平方向，捻回方向においては両区間とも最低次モードが定常的に卓越しているといえる．

5. 結論

以上より，今回対象とした風応答振動では，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の可能性を含むものの，大振幅は観測されておらず，風の乱れに起因するガスト応答の可能性が高い

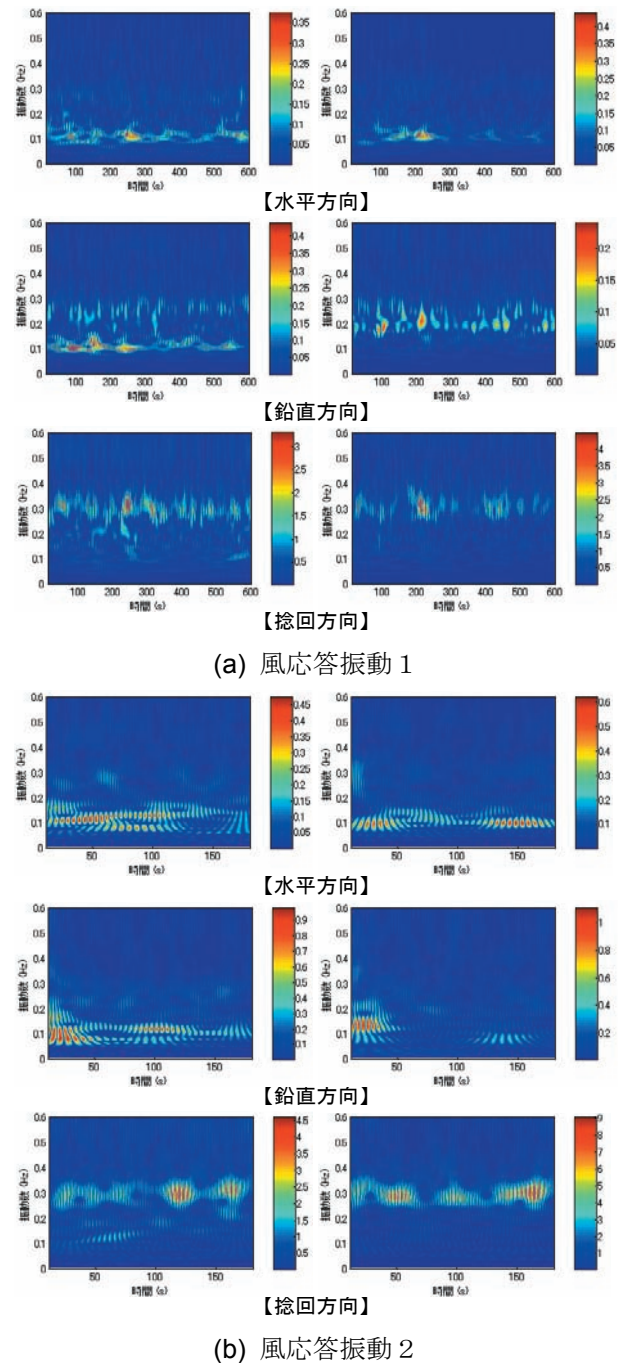


図-8 時間周波数解析結果：A 区間 (左)，B 区間 (右)

と考えられる．また，B 区間で見られたように，鉛直方向の大振幅時には，風の乱れによる非定常性がより顕著となる傾向が得られた．構造特性として着目した送電線の支持方法の違いについては，水平・捻回方向において振動特性に大きな違いは見られなかった．しかし，鉛直方向において最低次モードが変化し，両幹線ともに最低次モードが卓越するが振動時の振動数が変化する可能性が示唆された．