

ガスト応答解析に基づく送電線実測振動の解釈

Interpretation of field-measured vibrations in transmission lines based on gust response analysis

山口宏樹^{1*}, ジャワド ハッサン グル¹, 熊谷 啓¹, 永喜多 徹², 磯崎正則²
H. Yamaguchi^{1*}, Jawad Hussan Gull¹, K. Kumagai¹, T. Nagakita², M. Isozaki²

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 gust response analysis is conducted for physically interpreting the large wind-induced vibrations measured in the different types of transmission lines with different numbers of bundled conductors. It is concluded that the field-measured vibration could be the gust responses, whose characteristics are dominated by the different structural as well as wind characteristics and well explained by the gust response theory.

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

1. はじめに

電力の一定かつ不断の供給を行うため、より信頼性の高い送電線システムの構築に向けた技術がこれまでに蓄積されてきた。しかし、架空送電線は極めてフレキシブルであり、自然風の作用に対して敏感であって、風による大振幅振動に起因した送電事故も数多く報告されている。そこで、送電線の風応答の理解を深めること、および各種事故の原因を探ることを目的として、東京電力は複数の送電線において現地の風速と振動応答を観測してきた。本研究では、現地計測された風速や風応答をいかに解釈するかを目的として、適切なデータ処理とデータ解析を行うだけでなく、ガスト応答解析など、理論的な検討をも加えて総合

的に考察することを試みた。鉄塔間の送電線の振動であるスパン振動を主たる対象とするが、ジャンパー装置の破損事故を考えた場合、風に起因したジャンパー振動のメカニズムをスパン振動との関連性に注意しながら考察することも重要な課題となり、これについても検討している。

2. 対象とした送電線と計測システムの概要

本研究では3つの実送電線において平成20年12月から21年7月に計測された観測データを研究対象とした。A線は鉄塔No.36~39間の3径間2導体送電線で径間長は249m+439m+421m、B線は鉄塔No.3~5間の耐張2径間(624m+407m)4導体送電線で、鉄塔No.4位置でのジャンパーの振動も計測している。また、C線は8導体送電線で、鉄塔No.58~59間の耐張1径間を対象としており、径間長は615mである。

* 〒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

風速の計測には3軸の超音波風速計を用い、サンプリング周期は0.02 secで連続計測している。風速成分としては東西方向、南北方向、および鉛直方向の3成分が計測されており、これらの記録から平均風速の送電線軸に対する風向が計算される。これに対して、送電線の風応答は加速度計により水平方向、鉛直方向、送電線軸方向の並進3成分と、角速度計によるねじれ(稔回)成分が計測されている。

3. 観測された現象の1次解釈

現地で観測された風応答の現象に関する1次解釈を、送電線の応答と風速の実測データから試みる。風の変動特性に関しては乱れの強さによってその特性を表し、応答の変動特性に関しては計測された時系列からRMS(Root Mean Square)を評価し、平均風速に対して整理している。

(1) 平均風速・風向と変動風速の乱れの強さ

全データに対して算出した水平平均風速(主流方向成分)と平均風向の関係を風向分布として求めた後、送電線に対する風向角を用いて、送電線軸直角方向に作用する風速を計算した。Fig. 1は各送電線における振動計測時の風の乱れの強さを平均風速に対してプロットしたものである。風の乱れの強さは平均風速の増加とともに減少することが確認され、水平方向の乱れの強さはA線で平均0.30程度、C線で平均0.190であるのに対し、鉛直方向ではその5割程度であって、A線で平均0.18程度、C線で平均0.104である。これに

対し、B線における風の乱れ強さ特性については、A線やC線でのそれに比べて大きな値となっているのが特徴的であり、平均風速9 m/sec付近では水平成分で0.7鉛直成分で0.45と極めて大きい。

(2) 風応答のRMS値とその解釈

計測された加速度・速度データの数値積分により得た変位の時系列波形から、RMS値を計算し、平均風速の送電線軸直角方向成分に対してプロットした。Fig. 2に各送電線における風応答のRMS値と平均風速との関係を示す。面外応答(横振動)、面内応答(鉛直振動)、稔回応答(ねじれ振動)、径間1/2点、1/4点を問わず、RMS値の大きさは風速とともに増加し、ほぼ放物線分布をしており、観測された風応答の多くはガスト応答の可能性が高いと言える。ただし、A線の439m径間1/4点の鉛直振動の様相は異なっている。

一方、各送電線について風応答RMS値の大きさそのものを比較すると、C線、A線、B線の順で大きくなっている。これは前述の風の乱れ強さの違いに起因しているものと考えられる。また、B線の場合、T4-T5(407m)径間1/2点での横振動とねじれ振動は明らかに他に比べて大きな値となっているのに対し、鉛直振動ではT3-T4(624m)径間1/4点の値がT4-T5(407m)径間1/2点の値と同程度になっており、風応答において卓越する振動モードがある程度、予想できる。

4. ガスト応答解析に基づく2次解釈

ガスト応答理論を用い、計測された全データに

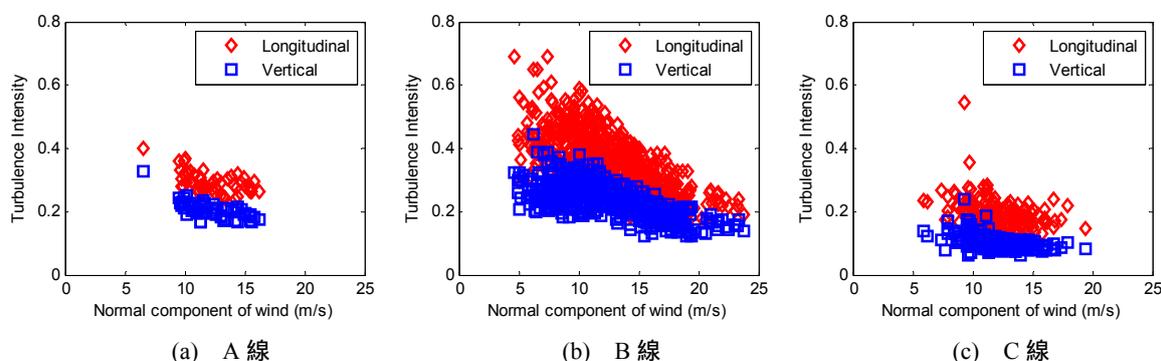
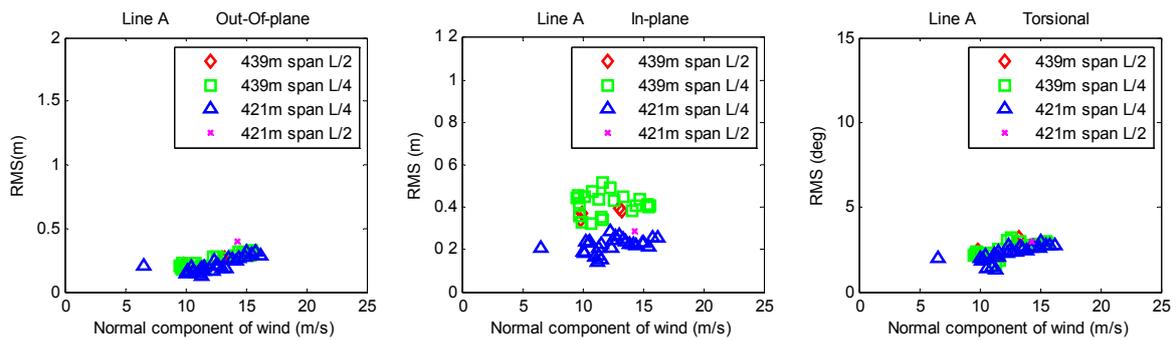
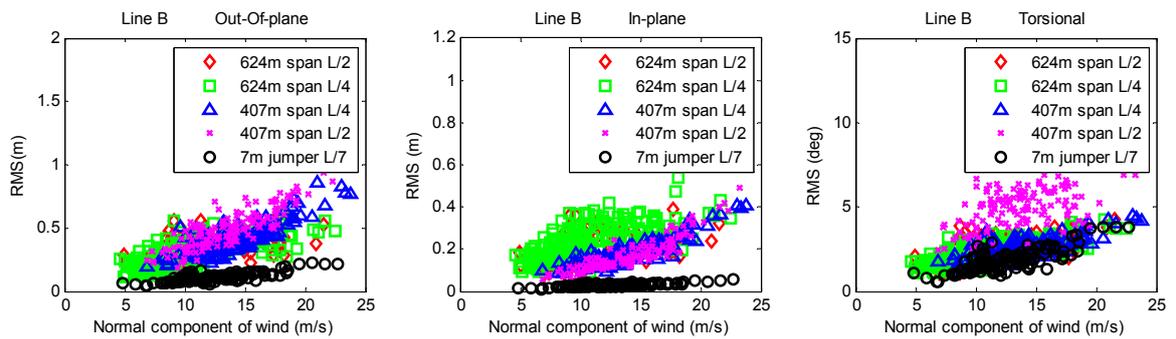


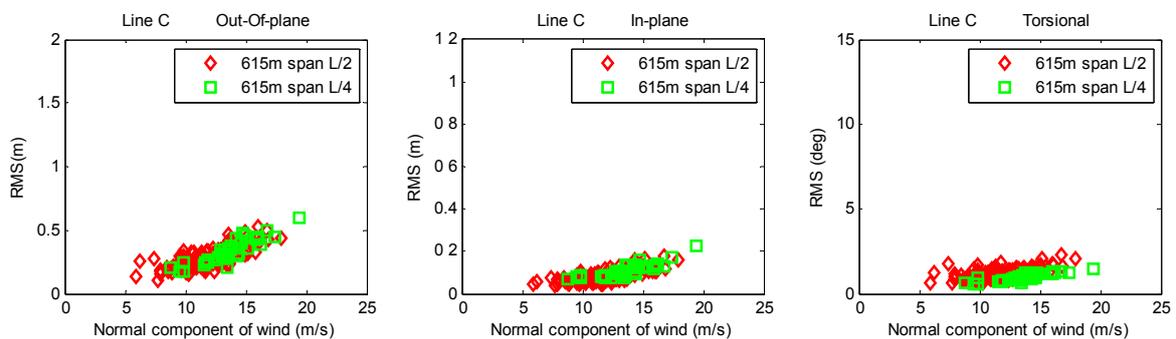
Fig. 1 観測された風の特徴：乱れの強さと平均風速との関係



(a) A線：面外応答（横振動），面内応答（鉛直振動），稔回応答（ねじれ振動）



(b) B線：面外応答（横振動），面内応答（鉛直振動），稔回応答（ねじれ振動）



(c) C線：面外応答（横振動），面内応答（鉛直振動），稔回応答（ねじれ振動）

Fig. 2 観測された風応答特性：応答変位 RMS 値と平均風速との関係

ついて、風速の時系列計測データから求めたパワースペクトルを入力として、送電線システムの風応答変位のパワースペクトルを求めるとともに、それを振動数領域で積分して風応答変位の RMS を算出した [1]。以下では、面外応答（水平振動）および面内応答（鉛直振動）について、ガスト応答解析から求めた RMS 値を軸直角方向平均風速に対してプロットし、実測から求めたそれと比較する。また、抗力係数を 1.07 とした時に、風応答変位の RMS 解析値と実測値との差が最も小さい

場合と、最も大きい場合について、ガスト応答解析からの風応答変位パワースペクトルと計測より求めたそれとを比較して考察を加える。

(1) 面外応答（横振動）

Fig. 3 は各送電線の面外応答について、ガスト応答解析結果と実測結果とを比較したものであり、(a) が平均風速に対する風応答変位 RMS の変化の比較、(b) が RMS の解析値と実測値の差が最も小さかった場合のパワースペクトルの比較、(c) が RMS の解析値と実測値の差が最も大きかった

場合のパワースペクトルの比較である。

まず A 線と B 線について、Fig. 3 (a) の平均風速に対する風応答変位 RMS の変化を見ると、風速 15 m/s 以下では解析値と実測値が極めて良く一致しているのに対し、風速 15 m/s 以上では解析値が実測値を大きく上回る。RMS におけるこれらの一致や差異の理由は、対応するパワースペクトルによって説明することができる。まず、風速 15 m/s 以下に対応するパワースペクトルは Fig. 3 (b) であって、A、B 両線とも、パワースペクトル自体が解析と実測で極めて良く一致している。これに対し、風速 15 m/s 以上に対応するパワースペクトル (Fig. 3 (c)) は、A、B 両線とも、形状は比較的良く一致しているものの、RMS 値を支配している最低次卓越ピークが解析結果では鋭く、値が大

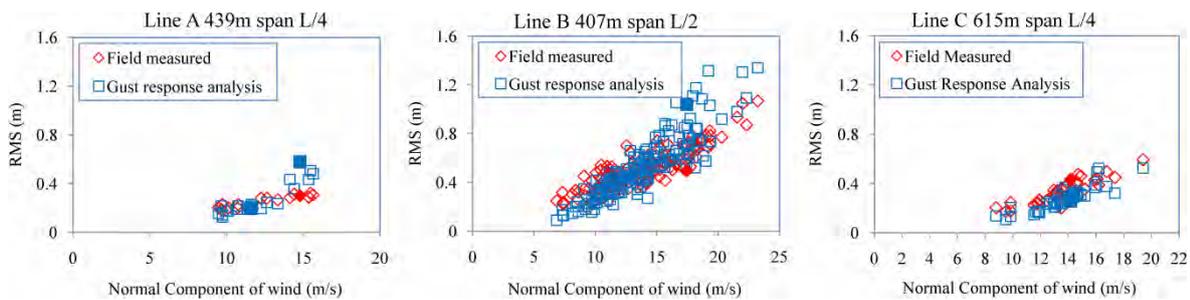
きくなっている。この原因として、ガスト応答解析で一定値を仮定したモード減衰比が、風速とともに増大すると考えられる空力減衰の特性を含んでおらず、過小評価したことが考えられる。

一方、C 線の場合、平均風速よらず、面外応答のガスト応答解析値と実測値は良く一致している。ただし、一致度の悪いケースのパワースペクトルでは、最低次卓越ピークは一致しているものの、スペクトル形状は必ずしも似てはいない。

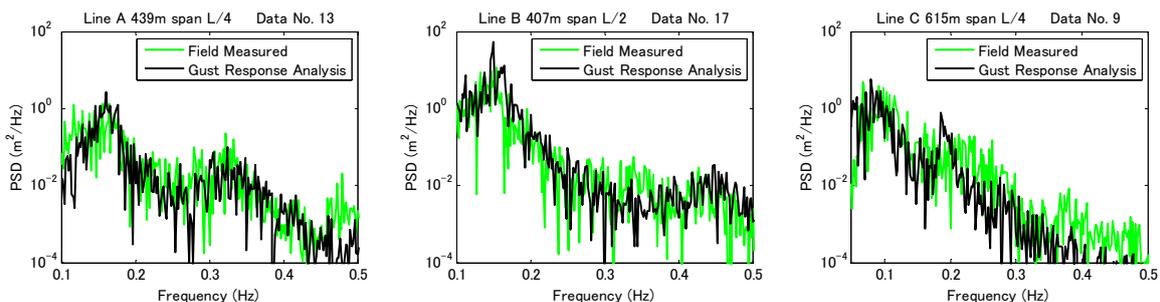
このように、一部に差は認められるものの、各送電線で観測された面外応答 (水平振動) はいずれもガスト応答解析結果で十分に説明でき、したがって、ガスト応答である可能性が高いと言える。

(2) 面内振動 (鉛直振動)

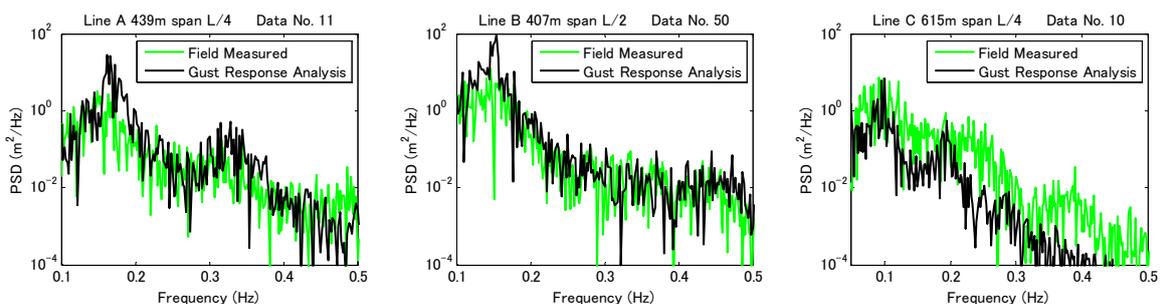
Fig. 4 は面内応答について、ガスト応答解析結



(a) RMS 値の比較：A 線，B 線，C 線



(b) RMS 値が最も良く一致したケースのパワースペクトルの比較：A 線，B 線，C 線



(c) RMS 値の一致が最も悪かったケースのパワースペクトルの比較：A 線，B 線，C 線

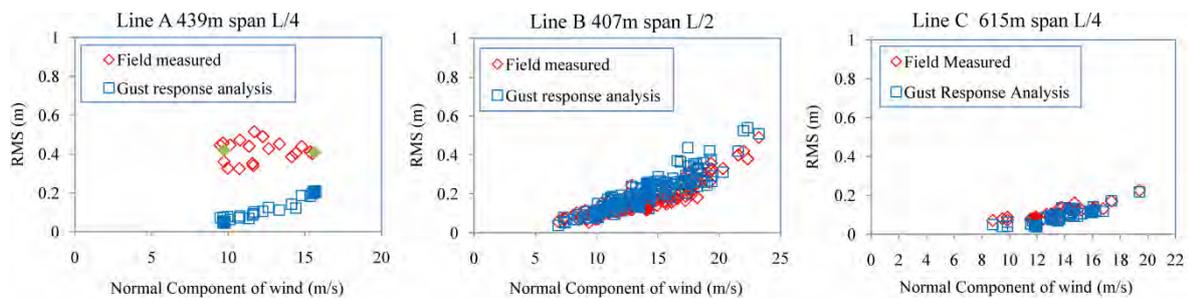
Fig. 3 ガスト応答解析と実測データとの比較 (面外応答：横振動)

果と実測結果とを比較したものである。Fig. 3 と同じく，(a) が平均風速に対する風応答変位 RMS の変化の比較，(b) が RMS の解析値と実測値の差が最も小さかった場合のパワースペクトルの比較，(c) が RMS の解析値と実測値の差が最も大きかった場合のパワースペクトルの比較である。

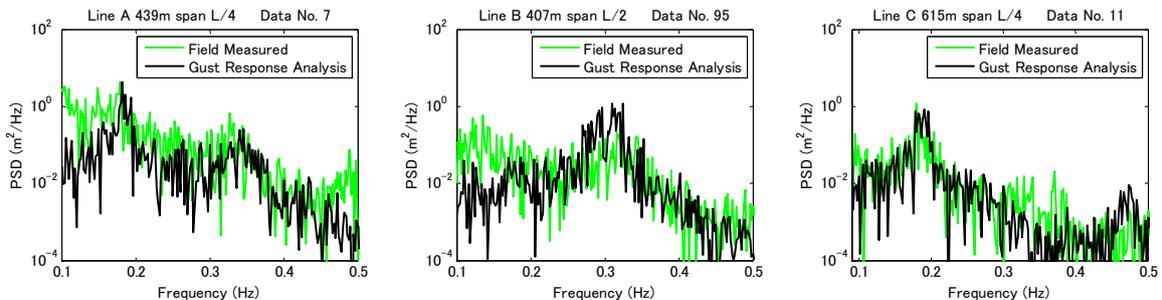
鉛直振動である面内応答では，A 線において RMS の一致度が極めて悪い。Fig. 4 (b)，(c) に示された A 線に対応するパワースペクトルを見ると，実測値のほうが振動数の全領域で大きくなっており，卓越ピークも明確ではないことが分かる。特に，値が最も大きくなっている 0.15 Hz 以下の振動数域で実測値は解析値を大きく上回っており，このことが RMS 値での大きな差をもたらした

ていると考えられる。0.15 Hz 以下の振動数域に送電線の固有振動数は存在せず，単純な共振現象ではないことは確かであるが，風の息（風圧の大きな変動）による準静的な応答が大きい可能性や，ガスト応答以外の現象の可能性が考えられる。

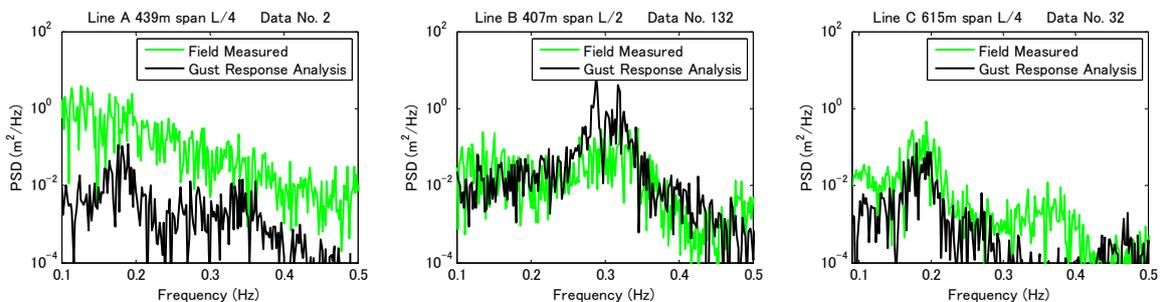
一方，B 線の面内応答では，RMS の対応は比較的良いものの，パワースペクトルにおいては低振動数域で実測値が大きく，卓越ピーク付近では解析値のほうが大きくなっていて，これらが相殺した結果と思われる。前者は加速度データの積分誤差，後者はガスト応答解析で仮定した空力減衰の誤差の可能性が高い。いずれにせよ，B 線で観測された風応答はガスト応答である可能性が高い。



(a) RMS 値の比較：A 線，B 線，C 線



(b) RMS 値が最も良く一致したケースのパワースペクトルの比較：A 線，B 線，C 線



(c) RMS 値の一致が最も悪かったケースのパワースペクトルの比較：A 線，B 線，C 線

Fig. 4 ガスト応答解析と実測データとの比較（面内応答：鉛直振動）

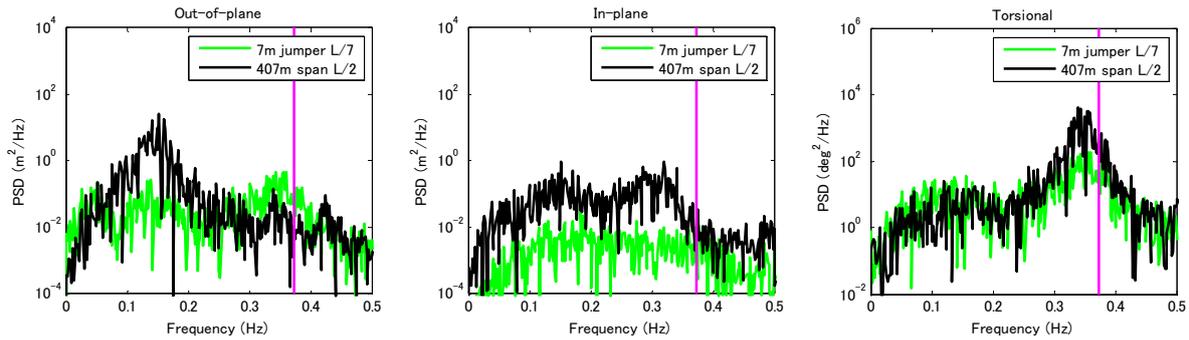
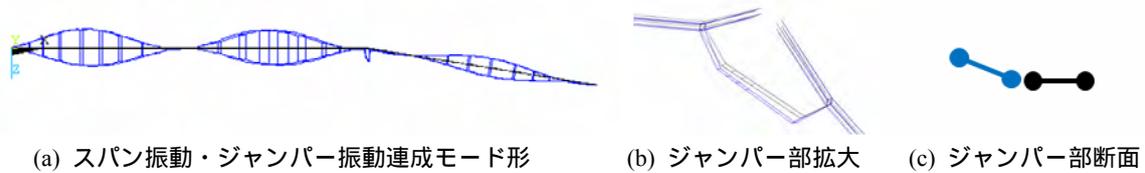


Fig. 5 B線でのスパン振動とジャンパー振動のスペクトル比較：面外応答，面内応答，捻回応答



(a) スパン振動・ジャンパー振動連成モード形

(b) ジャンパー部拡大

(c) ジャンパー部断面

Fig. 6 B線のスパン振動とジャンパー振動の連成モード（固有振動数0.373Hz）

C線の面内応答については，風応答変位のRMS値は解析と実測で極めて良く一致しており，実測で認められる高次モードの第2ピークを除けば，パワースペクトルの形状も良く一致している．

5. ジャンパーの風応答特性とメカニズム

Fig. 5に，B線で計測されたスパン振動とジャンパー振動の風応答のパワースペクトルを比較して示した．図には，同時性はないものの，各計測点のパワースペクトルを単純に重ねて示したが，0.35 Hz付近にあるジャンパーの水平振動およびねじれ振動の卓越ピーク振動数は，スパン内送電線のねじれ卓越振動数とほぼ一致していることが分かる．このことは，有限要素法によるB線システムの固有振動解析結果からも裏付けられ，Fig. 6に示したように，B線では固有振動数0.373 Hzに対応する振動モードにおいて，スパンのねじれ振動にジャンパーの水平・ねじれ振動が大きく連成している．以上より，B線のジャンパー装置で観測された大きな風応答は，径間内送電線の風振動（ガスト応答）に連成して生じたものであると考えられる．

6. まとめ

導体数，径間数の異なる3つの送電線において実測された電線挙動データと気象データをもとに，当該径間で発生している振動の様相について分析を行い，現象の1次解釈を行った．また，観測された風速記録を用いたガスト応答解析を行って風応答のスペクトルを求め，これと実測したスペクトルとの比較から観測された振動が何であるかの2次解釈を行った．その結果，A線の面内応答を除き，当該径間で発生している振動はガスト応答である可能性の高いことが明らかとなった．さらに，ジャンパー装置を含めて計測を行ったB線では，ジャンパーの水平振動とねじれ振動の卓越振動数が，送電線のねじれ卓越振動数とほぼ一致しており，これがスパンのねじれ振動とジャンパーの水平・ねじれ振動との連成振動モードに対応することから，ジャンパー装置で観測された大きな風応答は，径間内送電線のガスト応答に連成して生じたものであると考えられた．

参考文献

[1] Jawad Hussan Gull: Interpretation of large field-observed vibrations in transmission line systems based on numerical and measured data analyses, 埼玉大学修士論文, 2010.