

耐張型送電線 - 鉄塔連成系の動的強風応答特性に関する研究

—電線部の幾何学的非線形性の影響について—

森 智治

1. 序

近年の台風などの乱れが大きく高い突風率が観測される強風時には、送電鉄塔の倒壊事故や、損壊事故などが報告されており、強風などの外因が送電鉄塔に及ぼす影響¹⁾を調べることは耐風設計の精度を上げるために重要な課題である。送電線 - 鉄塔連成系の振動特性を高精度に把握するには、送電線の変形挙動に伴う幾何学的非線形性を考慮することが必要であるが、既往の送電線 - 鉄塔連成系の解析²⁾⁵⁾では、幾何学的非線形性を考慮して算定した平均応答からの変動分に対しては線形と見なし、モード解析や周波数応答解析を行ってきた。より精密な検証を行うためには、変動変位に対しても非線形性の影響を検討する必要がある。本研究では電線部の幾何学的非線形性の影響を考慮した動的応答計算を行い、連成振動に及ぼす影響について考察する。

2. 解析手法の概要と対象鉄塔の基本特性

2.1 解析手法の概要

解析の第1ステップとして、送電線 - 鉄塔連成系モデルの自重及び平均風荷重による静的釣合位置を求めるのに、節点変位と部材軸力を未知数とする混合法²⁾³⁾を用い、次にその釣合状態から作成した剛性マトリックスをもとに固有値解析、周波数応答関数を計算する。また、動的応答計算には Newmark β 法⁷⁾を用いて時刻歴毎に応答変位と軸力を算出するが、本研究では以下の手順で解析を行う。

任意の外力を受ける多自由度系の増分運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_e\Delta\mathbf{x} = \Delta\mathbf{F} \quad (1)$$

ここに \mathbf{M} は質量マトリックス、 \mathbf{C} は減衰マトリックス、 \mathbf{K}_e は非線形剛性マトリックス、 $\Delta\mathbf{F}$ は増分外力ベクトル、 $\Delta\mathbf{x}$ は増分変位ベクトルである。電線部材の要素剛性マトリックス \mathbf{k} は以下のように、部分マトリックス \mathbf{N}_E で構成される弾性剛性マトリックスと、 \mathbf{N}_G で構成される幾何剛性マトリックスから成る。

$$\mathbf{k} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_E & -\mathbf{N}_E \\ -\mathbf{N}_E & \mathbf{N}_E \end{bmatrix} + \frac{P}{L} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_G & -\mathbf{N}_G \\ -\mathbf{N}_G & \mathbf{N}_G \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{N}_E, \mathbf{N}_G$ は(3)式のようになる。

$$\mathbf{N}_E = \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln \\ lm & m^2 & mn \\ ln & mn & n^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_G = \begin{bmatrix} 1-l^2 & -lm & -ln \\ -lm & 1-m^2 & -mn \\ -ln & -mn & 1-n^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

各パラメーターは次の通りである。

E : 電線要素の弾性係数 L : 電線要素の部材長

A : 電線要素の断面積 P : 電線要素の軸力

$l m n$: 電線部材の方向余弦

電線部の剛性マトリックスはその幾何学的非線形性を考慮し、時刻歴毎に逐次計算したものをを用いる。以下、これを釣合位置での剛性を一定として用いて動的計算をおこなった「線形応答」と比較するために「非線形応答」と呼ぶ。また構造減衰 \mathbf{C}_0 に空力減衰を考慮する場合の減衰マトリックスは空気密度 ρ 、風力係数 D 、平均風速 \bar{U} を用いて(4)式で表される。

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_0 + \rho \begin{bmatrix} D_1 A_1 U_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & D_n A_n U_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 対象鉄塔の基本特性

本研究の解析に用いた実線路鉄塔とその両隣の径間に支持される送電線下の図 2.1 に示す。鉄塔は220kV 山形鋼鉄塔であり塔高は 35.1m である。送電線は、対象鉄塔から左側に支持されるものを「若番」、右側を「老番」と鉄塔の番号に対応させて呼び、また電線材料はACSR410を用いる。鉄塔部は 15 質点に集中して解析を行う。鉄塔の諸元は下の表 2.1 に記す。鉄塔単独モデルで固有値解析を行い、1次モードで固有周波数 4.3Hz、2次モードで 11Hz となった。

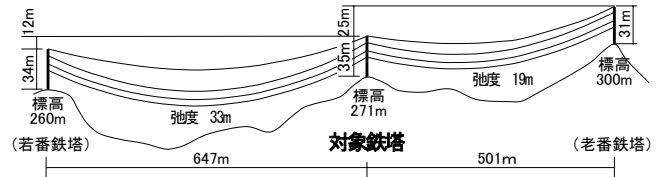


図 2.1 対象鉄塔とその両径間の送電線

表 2.1 解析対象鉄塔の写真(左図)とその諸元

番号	高さ(m)	重量(N)
1	35.1	584
2	32.6	1698
3	29.5	10270
4	28.5	4022
5	26.5	4090
6	23.5	16754
7	22.7	4560
8	21.1	4834
9	18.5	14746
10	17.5	5996
11	15.2	7278
12	12.8	8901
13	10.2	9951
14	7.3	11894
15	3.8	20765

3. 送電線 - 鉄塔連成系モデルの振動解析

3.1 固有値解析

本節では前説で紹介した実線路鉄塔とその両径間の送電線連成系モデルの静的釣合位置での振動特性を把握する。図 2.1 の実線路鉄塔とその両側の送電線 1 条から成る単純な解析モデルを用いて計算を行う。電線部の分割数は 30 とする。図 3.1 は固有値解析から求めた連成系モデルの固有モードである。固有周波数 0.4Hz は送電線部が別の形状に変化しようとする中間的な変形である遷移モード⁽⁴⁾に対応する。固有周波数 3.1Hz は送電線と鉄塔が線路方向に変形するモード（連成系線路方向 1 次モード）、4.2Hz は鉄塔が線路方向に変形するモード（連成系線路方向 2 次モード）、5.6Hz は老番側送電線と鉄塔が線路方向に変形するモード（連成系線路方向 3 次モード）、4.3Hz は鉄塔が線路直角方向に変形する連成系鉄塔線路直角方向 1 次モードであり、これらのモードは卓越する方向成分のみを描画している。図 3.2 はモード軸力分布であり、連成系線路方向 2 次モードは鉄塔部でほぼ等しい軸力分布になるが他のモードで鉄塔を境に電線の軸力差が大きくなり、これから鉄塔が強制変形されるものと考えられる。図 3.3 は平均風荷重の増加と固有周波数の関係を示し、

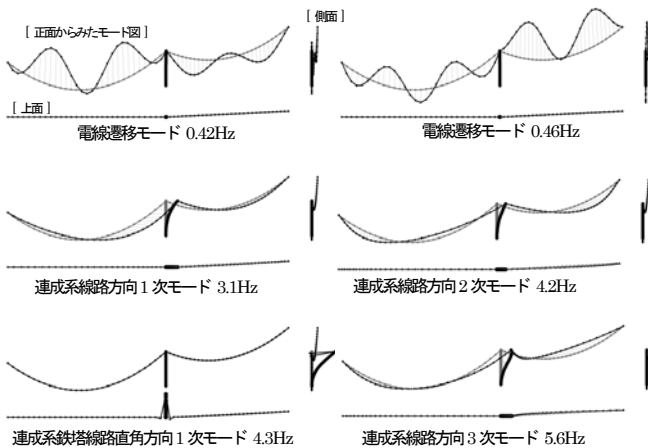


図 3.1 連成系モデルの固有モード

連成系線路方向 3 次モードでは平均風速による固有周波数への影響は無い。連成系線路方向 2 次モードは、風速の増加に伴い固有周波数が小さくなり、連成系線路直角方向 1 次モードでは電線の硬化の影響から固有周波数が大きくなる。

3.2 周波数応答関数

鉄塔頂部を加振点とした周波数応答関数を計算する。構造減衰は全モード 1% とする。線路方向加振、線路直角方向加振時の周波数応答関数のゲイン要素 $|H(\omega)|$ を図 3.4 に示す。無風時の周波数応答成分から、線路方向加振で多数の電線低次モードが見られ、その中で最も高いピークは送電線の遷移モードに対応する。また固有値解析で着目した連成系線路方向 1 次モード、連成系線路方向 2 次モード、連成系線路方向 3 次モードの周波数でも顕著なピークを示す。線路直角方向では、連成系鉄塔線路直角方向 1 次モードにあたる 4.3Hz にピークが見られる。平均風荷重及び空力減衰を考慮した場合、低周波数域では平均風速の増加と共に固有周波数が大きくなり、空力減衰の影響でピークが抑えられ平滑化されている。またどちらの方向でも、連成系線路方向 2 次、連成系鉄塔線路直角方向 1 次モードに対応する周波数にピークが見れる。線路直角方向では小さなピークが見られる。

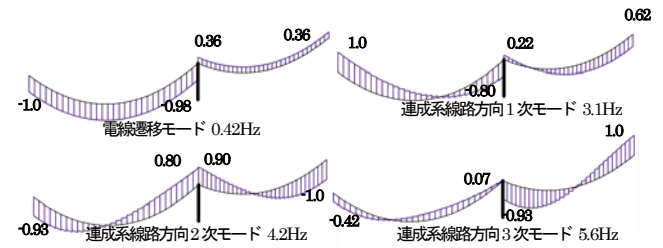


図 3.2 固有モードに対応する軸力分布

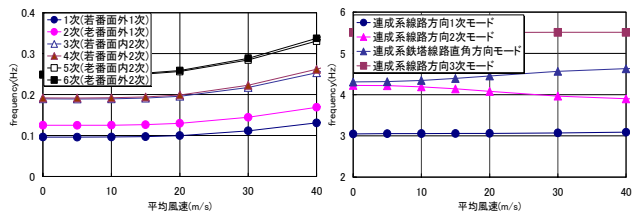


図 3.3 平均風速の増加と固有周波数の関係

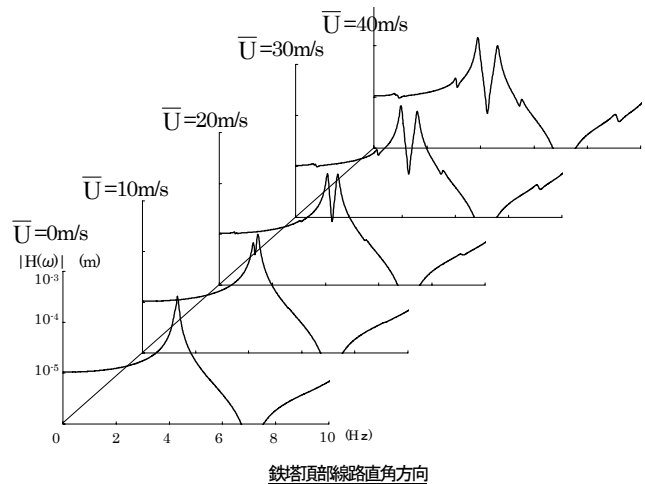
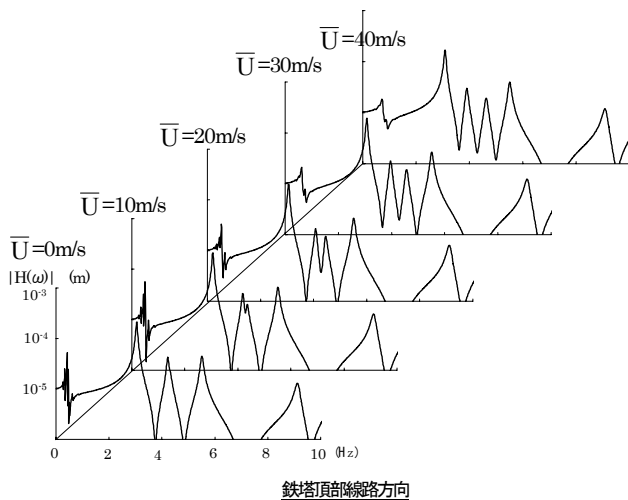


図 3.4 平均風速の増加と空力減衰の影響による周波数応答関数のピークの変遷

4. 実規模鉄塔の振動試験

4.1 鉄塔加振試験

図2.1の実規模鉄塔を用いて行った鉄塔加振試験について記す。鉄塔の加振には無電源起振機「YUSURU」を用いた。送電線の変動軸力の計測には高感度のロードセルを使用し、また加速度計を鉄塔の上部等に設置し、塔体の振動を計測した。加振周波数は図3.4の周波数応答関数から顕著なピークの示された周波数で行い、連成系鉄塔線路直角方向1次と連成系線路方向3次モードの加振試験結果について示す。



図4.1 無電源起振機「YUSURU」(左図)とロードセル(右図)

4.1.1 連成系鉄塔線路直角方向1次モード

起振力約1kN, 周波数 4.3Hz で線路直角方向に加振した図4.2に、鉄塔上部線路直角方向加速度, 若番側及び老番側電線軸力変動成分の波形のワースペクトルを示す。いずれも加振周波数である4.3Hzで高いピークが見られるが、電線軸力にはその整数倍の周波数においてもピークが見られる。

4.1.2 連成系線路方向3次モード

起振力約1.7kNで線路方向に周波数 5.6Hz で加振した。鉄塔上部線路方向加速度, 若番側及び老番側電線軸力波形

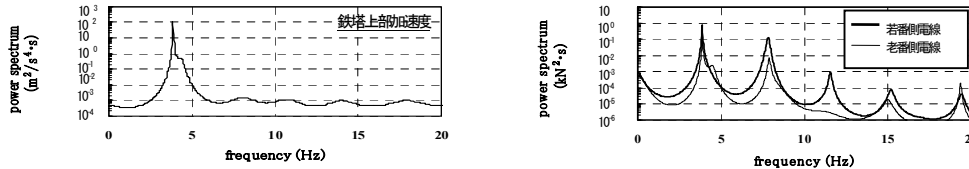


図4.2 連成系鉄塔線路直角方向1次モード パワースペクトル(加振試験)

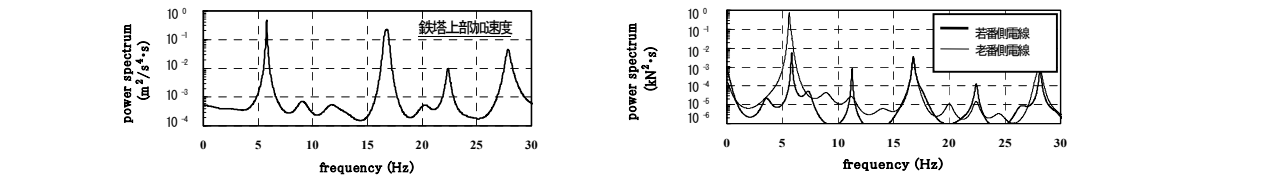


図4.3 連成系線路方向3次モード パワースペクトル(加振試験)

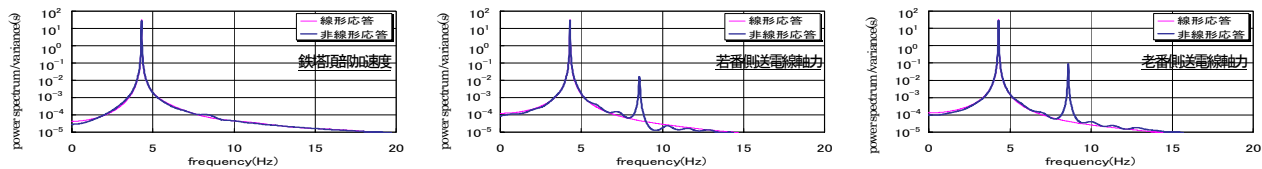


図4.4 連成系鉄塔線路直角方向1次モード パワースペクトル(時刻歴応答計算)

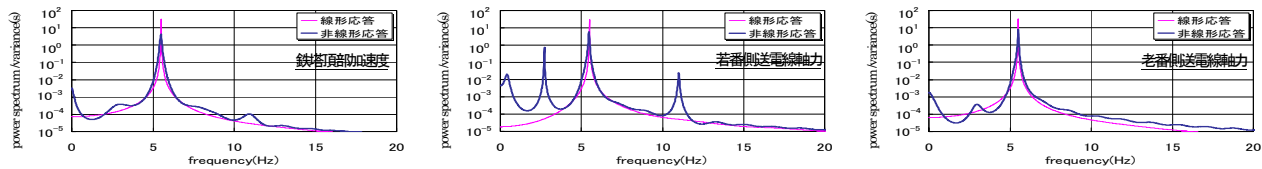


図4.5 連成系線路方向3次モード パワースペクトル(時刻歴応答計算)

のワースペクトルを図4.3に示す。鉄塔加速度では加振周波数に加えて加振周波数の3倍と5倍でもピークが見られ電線軸力についても奇数倍でピークが見られ、またレベルは小さいものの若番側張力では偶数倍のピークが見られる。

4.2 連成系モデルを用いた時刻歴応答計算

前節4.1で述べた送電用鉄塔加振試験の結果検証するために、連成系単純モデルの鉄塔頂部にサイン波外力を加え、時刻歴応答計算を行う。電線部の分割数は100とし、応答時間は120秒、時間間隔は0.01秒、 β は1/4とする。応答計算は「線形応答」と、「非線形応答」の2つの場合で行う。

4.2.1 連成系鉄塔線路直角方向1次モード

鉄塔頂部線路直角方向に振幅kNで周期4.3Hzのサイン波を加え時刻歴応答計算を行った。図4.4は鉄塔頂部線路直角方向の加速度波形, 若番側及び老番側送電線端部軸力変動成分の波形に対応するワースペクトルであり加振周波数の4.3Hzでピークが見られ、また電線軸力のワースペクトルでは非線形応答の場合、加振周波数の2倍においてもピークが見られる。加振試験に似た結果である。

4.2.2 連成系線路方向3次モード

鉄塔頂部を線路方向に2kNの周波数5.6Hzのサイン波外力を加え時刻歴応答計算を行った。図4.5は鉄塔頂部線路方向加速度波形, 若番側及び老番側送電線端部軸力波形のワースペクトルであり、いずれも加振周波数の5.6Hzで顕著なピークが見られ非線形応答では若番側軸力のワースペクトルに、2倍の周波数でピークが見られる。

5. 送電線 - 鉄塔連成系モデルの強風応答特性

送電線 - 鉄塔連成系単純モデル（電線部分割数 30）に、AR 法を用いシミュレートした平均風速 40m/s, 乱れの強さ 10%, Kármán 型のスペクトル構造を持つ風外を与え時刻歴応答計算を行う。応答時間は600秒、時間間隔は0.01秒、 β は1/4、減衰定数は1%とし、空力減衰の影響についても検討する。また風向は線路直角方向である。図 5.1 は鉄塔頂部と中間点の生成風速波形である。図 5.2 はその風速波形のパワースペクトルと、鉄塔頂部を基準とした鉄塔中間点(質点 9)、鉄塔最下点(質点 15)間の風速波形のコヒーレンスを示し、目標としたスペクトルモデル及び空間相関を再現している。図 5.3 は送電線軸力の変動分の波形である。非線形応答では波形の振幅が大きくなるが、線形、非線形応答共に空力減衰を考慮すると、その影響から振幅が抑えられている。空力減衰を考慮すると、軸力は安全側に見積もられる。また、図 5.4 に図 5.3 の軸力波形に対応するパワースペクトルを示す。若番、老番送電線軸力ともに低周波数域では遷移モードに対応する周波数に顕著なピークが見られ、強風時の電線軸力は遷移モードの影響が大きいがわかる。さらに、空力減衰を考慮した場合、電線低次モードのみならず前述の連成系モードにおいても空力減衰の影響によりピークが抑えられ、非線形応答ではその影響が大きくなる。軸力変動成分の標準偏差、最大値での振幅の線形応答に対する割合を図 5.5 に示す。非線形応答の軸力の増幅は大きいものの、強風時の軸力は平均成分が支配的であり軸力全体では線形応答と大きな差はない。

6. 総括

本研究では、耐張型送電線 鉄塔連成系モデルの動特性に及ぼす電線部の幾何学的非線形性の影響について考察を行った。周波数応答関数からこの連成系モデルでは電線遷移モードと連成系線路方向のモードが支配的であることがわかる。また実線路鉄塔による加振試験では、鉄塔頂部の加速度及び電線軸力波形のパワースペクトルに、加振周波数の整数倍のピークが見られる電線の振動固有の現象を得た。加振試験に対応した連成系単純モデルによる非線形時刻歴応答計算では、軸力波形のパワースペクトルから加振試験に対応した加振周波数の2倍の周波数にピークが見られるなど、電線部の幾何剛性の影響と考えられる現象を再現できた。強風応答では、軸力のパワースペクトルに電線低次モード（電線遷移モード）で顕著なピークが見られる。また軸力は平均成分が支配的であることから、非線形応答でも軸力全体では大きな差がない。今後の課題として、別の実線路鉄塔モデルによる、送電線支持方式、加振状況、風向を変化させるなどのパラメータスタディによる結果の比較が挙げられる。

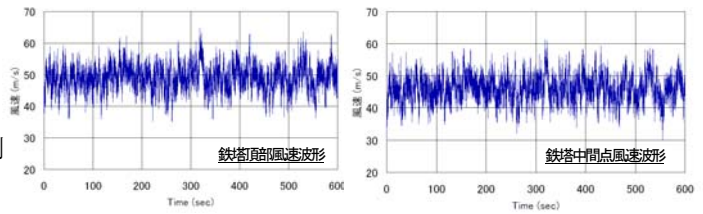


図 5.1 鉄塔頂部と鉄塔中間点の生成風速波形

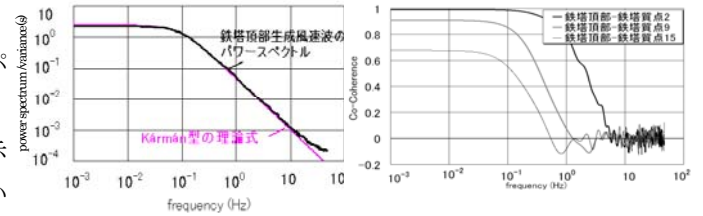


図 5.2 鉄塔頂部風速波形のパワースペクトルとココヒーレンス

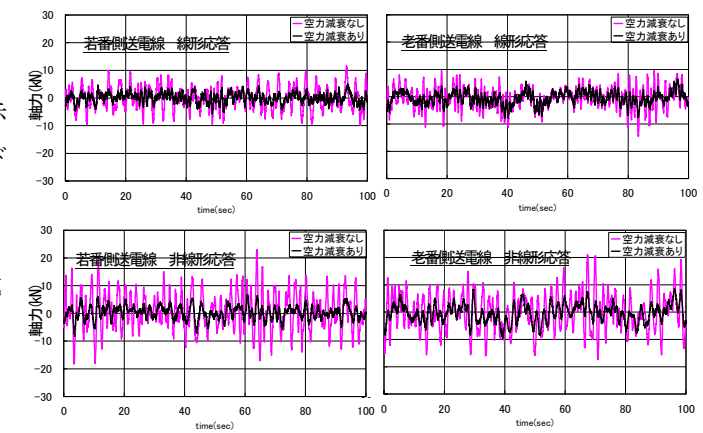


図 5.3 強風時軸力変動成分の波形 (100 秒間)

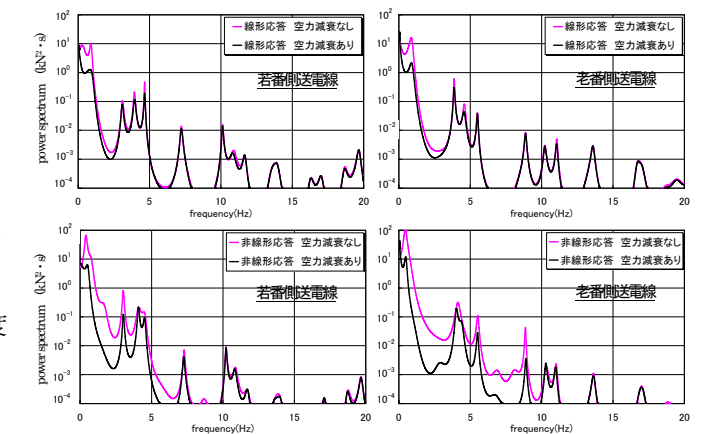


図 5.4 軸力波形のパワースペクトル

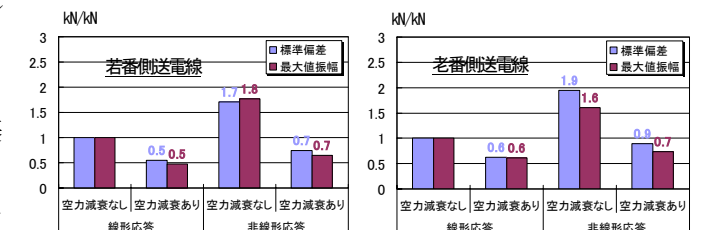


図 5.5 非線形応答による軸力変動成分への影響

*参考文献はまとめて本論に記載する