

3. 振動解析

3.1 張力

図2に平均風速と平均風速釣合状態における送電線端部の張力との関係を示す。送電線単体モデルは径間距離を100mとし、弛度を変えることによってサグ比を変えている。連成系モデルは両径間距離を100mとし、サグ比をそれぞれ0.02, 0.10としている。図2より平均風速の増加とともに張力は増加しているが、平均風速20m/sあたりまではゆるやかな増加であるがそれ以上での増加の割合は大きく、平均風速40m/sでの値は平均風速0m/sでの値の約2倍となっている。また、サグ比が小さくなるにつれて大きな張力がかかっている、サグ比と端部張力は反比例している。連成系モデルではサグ比0.02側は送電線単体モデルより10~15%ほど小さな値となっている。

3.2 固有値解析

送電線単体モデルのサグ比が0.10と0.02の場合の平均風速と固有周波数との関係を図3, 図4に示す。これらより平均風速が増すにつれて固有周波数が増えている。これは、風速の増加と共に送電線が伸び、剛性が増しているからである。また、サグ比の小さな図4では図3には見られない面内1次モードが2次モードと3次モードの間に存在している。図5にサグ比が0.10のモデルにおける平均風速40m/s時の平均風速釣合位置での固有振動モードを示す。

3.3 周波数応答関数

図6に連成系モデル(サグ比がそれぞれ0.02と0.10)における両送電線中間点と鉄塔頂部の周波数応答関数を示す。ここで、剛性マトリックスは平均風速40m/sでの釣合位置で作成し、減衰マトリックスはRayleigh型(1次, 2次とも減衰定数1%)を用い、空力減衰を考慮する場合は式(4)のようにする。図6より、送電線部では空力減衰の影響でピークが平滑化され、上下方向の低次モードでもその影響が見られる。鉄塔頂部線路方向の周波数応答関数では、鉄塔1次モードより低い周波数域に送電線の振動モードがよく表れている。

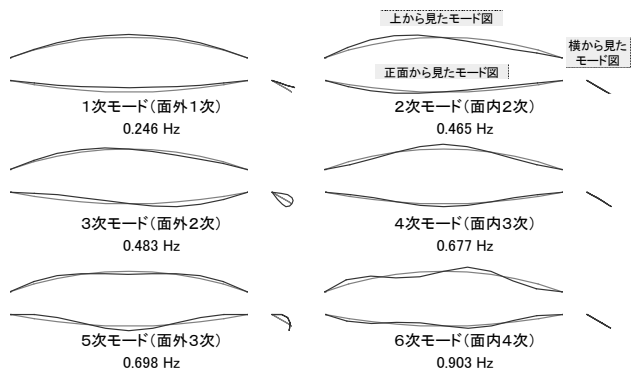


図5 固有振動モード (平均風速40m/s 釣合状態)

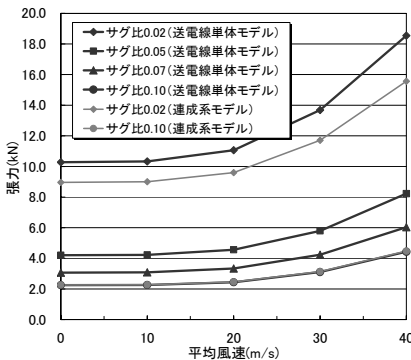


図2 平均風速と張力

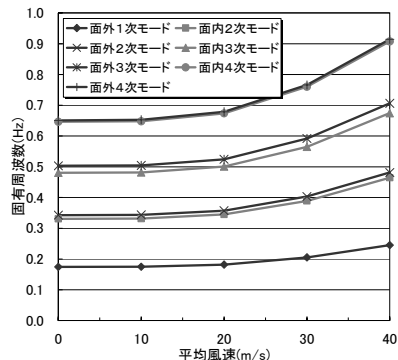


図3 平均風速と固有周波数 (サグ比: 0.10)

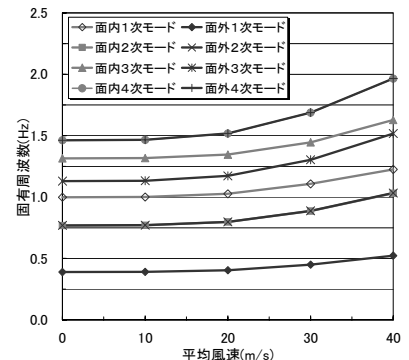


図4 平均風速と固有周波数 (サグ比: 0.02)

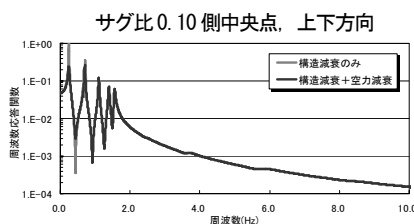
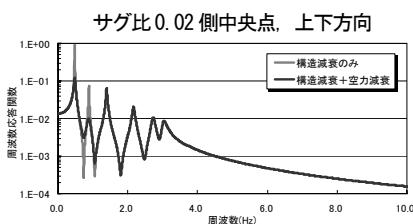
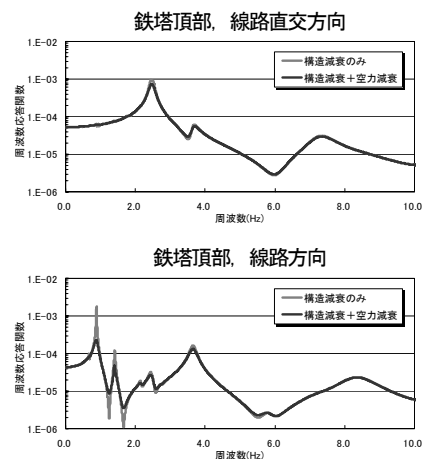
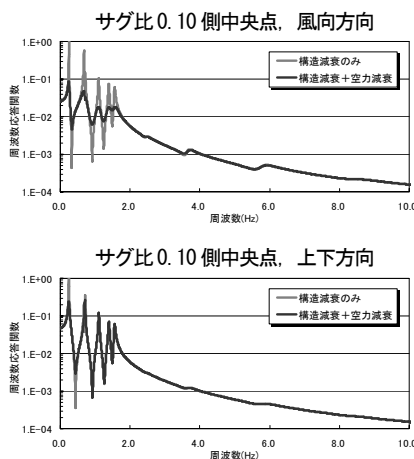
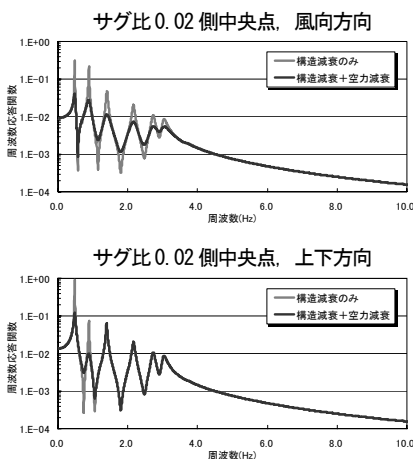


図6 周波数応答関数

4. 時刻歴応答解析

4.1 サイン波外力

径間距離 100m, 弛度 10m の送電線単体モデルにサイン波外力を加えた際の時刻歴応答解析の結果を示す。平均風速 40m/s で剛性を作成し, 送電線中間点に振幅 500N で周期 1 秒のサイン波外力を加える。剛性マトリックスは時刻ステップ毎に作成したもの (以下, 非線形剛性) と, 全時刻において平均風速位置での剛性を用いる場合 (線形剛性) とで比較する。なお, 時刻ステップは 0.05 秒とし, 空力減衰を加えて計算している。

表 4 に加振点の変動変位の計算結果を示す。線形剛性の場合には平均値が 0 となりプラス側, マイナス側の振幅は等しくなるが, 非線形剛性では平均値が 0 とならず, プラス側, マイナス側の振幅は必ずしも等しくはならない。図 7 に送電線中間点での変位のパワースペクトルを, 図 8 に加振点部材の張力のパワースペクトルを示す。線形剛性の場合には外力の周波数である 1Hz のみにピークがあるが, 非線形剛性の場合にはその整数倍の周波数にもピークが表れている。これは非線形振動に特有の倍振動が表れたと考えられる。

表 4 計算結果 (サイン波外力)

	変位				張力			
	風向方向		上下方向		左要素		右要素	
剛性	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
平均値	0.0	-0.6	0.0	0.1	4.10	4.10	4.10	4.10
最大値	53.4	52.1	1.1	1.2	4.52	4.52	4.52	4.53
最小値	-53.4	-56.2	-1.1	-1.1	3.68	3.68	3.68	3.69
標準偏差	38.0	38.6	0.8	0.8	0.30	0.30	0.30	0.30

(cm) (kN)

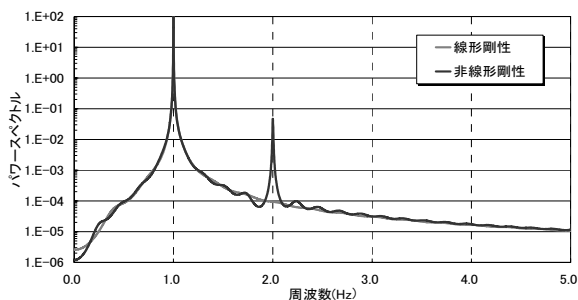


図 7 変位パワースペクトル

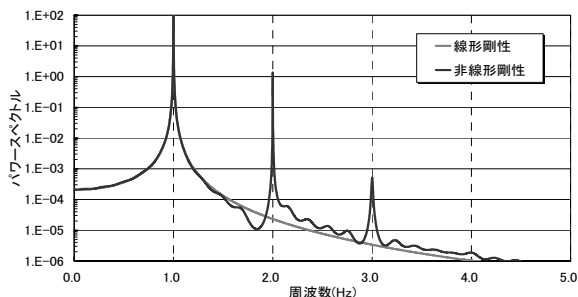


図 8 張力パワースペクトル

4.2 変動風速の作成

時刻歴応答解析に必要な風圧力は, カルマン型変動風速場を用いた自己回帰法により作成した変動風速をもとに計算する。風速場は高度 10m での平均風速を 40m/s, 乱れの強さを 10% とし, サンプリング周期 0.05 秒で 10 分間について検討している。また, 作成風速により結果にばらつきがでるため 10 パターンの変動風速で応答解析を行い, その平均を求めている。図 9 に作成した変動風速の一例を示す。

4.3 解析結果

上記の方法で作成した変動風速をもとに時刻歴計算した結果のうち, 送電線中間点の変動変位と送電線端部の張力を示す。表 5, 表 6 はそれぞれサグ比を 0.10, 0.02 とした送電線単体モデルの送電線中間点における変動変位の結果であり, 表 7 は送電線端部における張力の結果である。図 10 は変位波形, 図 11 は張力波形の一例である。これらより, 送電線中間点の変位は風向方向, 上下方向ともに非線形剛性にすることによって平均値が下がっている。また, 最大値は大きく最小値は小さくなり標準偏差が増加していることから, 剛性を非線形にすると振動が大きくなっている。

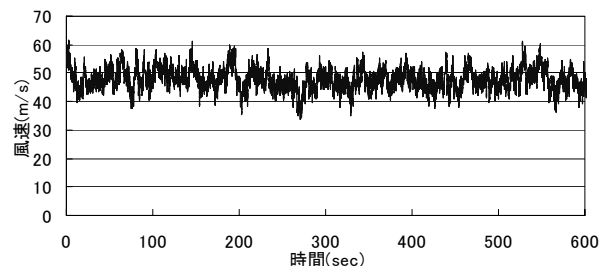


図 9 変動風速

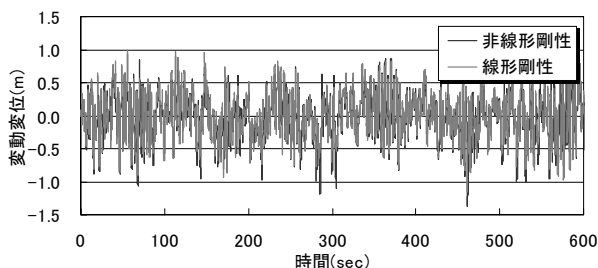


図 10 変動変位

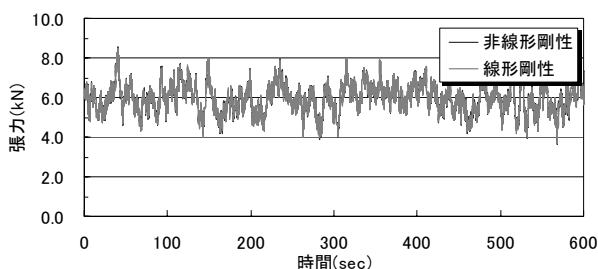


図 10 張力

表5 送電線中間点変動変位(送電線単体モデル, サグ比0.10)

空力減衰	風向方向				上下方向			
	無		有		無		有	
	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
剛性								
平均值	-0.7	-5.4	-0.7	-3.7	-1.7	-9.5	-1.7	-8.3
最大値	175.6	205.4	97.2	106.4	365.9	446.9	210.9	240.5
最小値	-179.3	-286.4	-108.1	-183.6	-391.1	-621.1	-241.4	-408.4
標準偏差	59.0	68.6	31.8	36.2	132.9	155.0	71.7	82.7

(cm)

表7 送電線端部張力(送電線単体モデル)

空力減衰	サグ比0.10				サグ比0.02			
	無		有		無		有	
	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
剛性								
平均值	5.92	5.92	5.92	5.92	24.29	24.22	24.29	24.24
最大値	8.26	8.40	8.09	8.10	34.75	34.92	32.60	32.24
最小値	3.36	3.47	3.59	3.61	13.40	13.37	15.89	15.72
標準偏差	0.74	0.74	0.70	0.70	3.07	3.08	2.52	2.52

(kN)

表9 送電線中間点変動変位(連成系モデル, サグ比0.02側)

空力減衰	風向方向				上下方向			
	無		有		無		有	
	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
剛性								
平均值	0.3	-0.8	0.3	-0.5	0.2	-0.9	0.1	-1.0
最大値	71.0	63.9	56.3	49.3	78.3	90.3	56.5	50.2
最小値	-65.3	-77.9	-52.1	-61.6	-77.9	-93.0	-51.5	-68.9
標準偏差	19.6	20.0	15.5	15.8	24.7	25.8	15.9	16.5

(cm)

空力減衰を考慮すると標準偏差は小さくなっていて、サグ比が0.10のモデルでは、線形剛性の場合には空力減衰による平均値の変化はないが非線形剛性の場合には平均値の変化が小さくなっている。送電線端部の張力に関しては大きな変化は見られない。

表8, 表9は連成系モデル(サグ比がそれぞれ0.02, 0.10)における各送電線中間点での変動変位の計算結果であり、表10は各送電線と鉄塔との結合部での張力の計算結果である。サグ比0.10側の送電線の変位は剛性を非線形にすると振動が大きくなっていて、その値は送電線単体モデルとほとんど変わらない。サグ比0.02側の送電線の変位は送電線単体モデルと比較すると、平均値は小さくなっているが最大値や標準偏差などは大きな値を示し、連成系モデルの方が大きく振動している。連成系モデルにおける鉄塔と送電線との結合部での送電線張力は、サグ比の大きなサグ比0.10側では送電線単体モデルより大きな値を示しているが、サグ比の小さなサグ比0.02側では送電線単体モデルより小さな値を示している。しかし、剛性を非線形にすることによる張力への影響はあまり見られない。

表6 送電線中間点変動変位(送電線単体モデル, サグ比0.02)

空力減衰	風向方向				上下方向			
	無		有		無		有	
	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
剛性								
平均值	0.6	-0.1	0.6	0.0	0.5	-0.5	0.5	-0.5
最大値	43.1	48.2	33.9	30.0	60.0	74.3	41.5	40.3
最小値	-45.3	-51.6	-34.2	-41.1	-60.3	-83.6	-42.5	-57.4
標準偏差	13.0	14.0	10.4	10.7	19.3	22.8	13.2	14.1

(cm)

表8 送電線中間点変動変位(連成系モデル, サグ比0.10側)

空力減衰	風向方向				上下方向			
	無		有		無		有	
	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
剛性								
平均值	0.0	-4.6	0.0	-3.0	0.1	-8.1	0.0	-6.6
最大値	195.7	212.8	99.1	94.7	381.0	430.4	215.8	206.0
最小値	-187.4	-315.7	-111.1	-172.4	-384.6	-690.1	-223.0	-398.9
標準偏差	56.7	65.2	31.8	35.6	124.7	145.4	70.7	80.0

(cm)

表10 送電線端部張力(連成系モデル)

空力減衰	サグ比0.10側				サグ比0.02側			
	無		有		無		有	
	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形	線形	非線形
剛性								
平均值	5.99	5.99	5.99	5.99	19.81	19.74	19.81	19.77
最大値	8.66	8.91	8.46	8.68	27.92	27.63	26.46	26.16
最小値	3.07	3.07	3.34	3.32	11.86	11.35	13.43	12.92
標準偏差	0.80	0.82	0.74	0.76	2.30	2.34	1.89	1.95

(kN)

5. 結

強風時における送電線の振動特性に関して調べ、非線形性を考慮することによる影響について検討した。

- (1) 風速が増加すると送電線の剛性が大きくなり(送電線が伸びて硬くなり)張力や固有周波数は増加する。
- (2) 空力減衰を付加すると周波数応答関数のピークを抑えるが、風向方向のみでなく上下方向の低次モードでも見られる。また、連成系モデルでは鉄塔の線路方向で多数の送電線モードがみられる。
- (3) サイン波外力による時刻歴応答では、剛性を時刻毎に作成し直すことにより非線形特有の現象(倍振動等)が表れ、より詳細な振動特性を調べることができる。
- (4) 変動風による応答では、非線形剛性を適用することで線形剛性のときよりも振動が大きくなっているが、張力に関しては大きく変わっていない。

参考文献

- 1) 真柄, 他: 混合法によるケーブルネットの解析(その1) 日本建築学会論文報告集, 第218号, 1974
- 2) 真柄, 他: 混合法によるケーブルネットの解析(その2) 日本建築学会論文報告集, 第220号, 1974
- 3) 小園, 他: 多スパン鉄塔—送電線系の動的応答特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第353号, 1985