

## 着氷雪電線のギャロッピングにおいてねじれ振動が鉛直振幅に与える影響の評価

電力中央研究所 正会員 ○松宮 央登  
電力中央研究所 非会員 西原 崇  
京都大学 正会員 八木 知己

## 1. はじめに

着氷雪電線のギャロッピング応答特性を評価する際には、空気力を準定常理論に基づいて定式化して、非線形時刻歴応答解析が実施されることが多い。Parkinson & Smith<sup>1)</sup>が正方形断面の鉛直1自由度系不安定振動(ギャロッピング)を対象に示したように、非線形振動系では安定・不安定なリミットサイクル振幅が存在する。筆者ら<sup>2)</sup>は、鉛直1自由度系において安定・不安定なリミットサイクル振幅を評価できるエネルギー収支式を導出して、着氷雪4導体電線における非線形振動特性を示した。また、考慮する自由度、振動数比、ねじれ角(迎角)を変えて時刻歴応答解析を行い、着氷雪4導体電線での鉛直・水平・ねじれ3自由度系のギャロッピングには、鉛直1自由度振動が卓越する場合に加えて、鉛直・水平2自由度や鉛直・ねじれ2自由度の連成振動が支配的になる場合があることを示した。

本研究では、鉛直振動系におけるエネルギー収支式に基づき、空気力の無次元仕事量評価式を導出し、その式を用いて、鉛直・ねじれ2自由度振動系でねじれ振動が鉛直振幅に与える影響を評価する手法および、その評価結果を示す。

## 2. 時刻歴応答解析結果

既報<sup>2)</sup>で解析対象とした、着氷雪4導体電線の空気力係数(抗力係数 $C_{Df}$ 、揚力係数 $C_{Lf}$ 、空力モーメント係数 $C_{Mf}$ )を図1に示す。時刻歴応答解析は、次式に示す線形構造系を対象に、考慮する自由度(鉛直変位 $y$ 、水平変位 $z$ 、ねじれ角 $\theta$ )、振動数比、ねじれ角(迎角)を変えて実施した。

$$m_q \ddot{q} + 2m_q \zeta_{q0} \omega_{q0} \dot{q} + m_q \omega_{q0}^2 q = F_q \quad (q = y, z, \theta) \quad (1)$$

ここで、 $m_q$ は質量[kg] ( $q=y, z$ )もしくは質量慣性モーメント[kg・m<sup>2</sup>] ( $q=\theta$ )、 $\omega_{q0}$ は非減衰固有角振動数[rad/s] ( $=2\pi f_{q0}$ )、 $f_{q0}$ は非減衰固有振動数[Hz]、 $\zeta_{q0}$ は各自由度の構造減衰比、 $F_q$ は振動中の各自由度方向の準定常空気力[N, N・m]である。

鉛直・水平・ねじれ3自由度解析では、 $f_{z0}/f_{y0}=1.0$ 、 $f_{\theta 0}/f_{y0}=0.9$ のときに広い平均ねじれ角範囲で鉛直振幅が最大となった。前述の振動数比における3自由度解析(3DOF)、鉛直・ねじれ2自由度解析(2DOF)、鉛直1自由度解析(1DOF)を図2に示す。平均ねじれ角 $\bar{\theta}$ が20°付近を超える場合にギャロッピングが発生して、 $\bar{\theta}=60\sim 80^\circ$ 付近では鉛直・ねじれ2自由度連成振動が卓越する<sup>2)</sup>。また、鉛直・ねじれ2自由度解析におけるねじれ振動特性(片振幅 $A_\theta$ 、位相差 $\Psi_\theta$ )を図3に示す。鉛直・ねじれ2自由度連成振動が卓越した範囲では、 $A_\theta=5\sim 15^\circ$ 程度、 $\Psi_\theta=45\sim 60^\circ$ 程度となることがわかる。

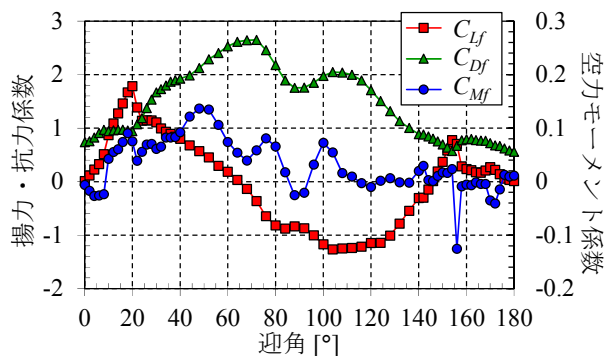


図1 着氷雪4導体電線の定常空気力係数

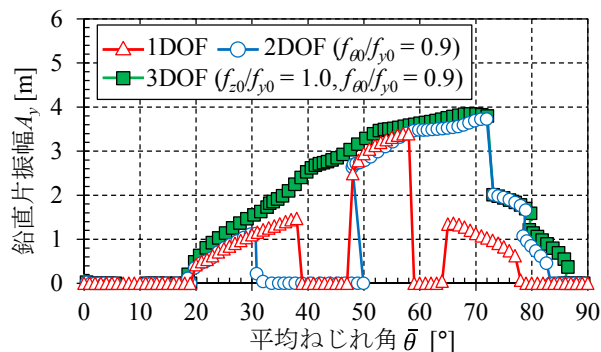
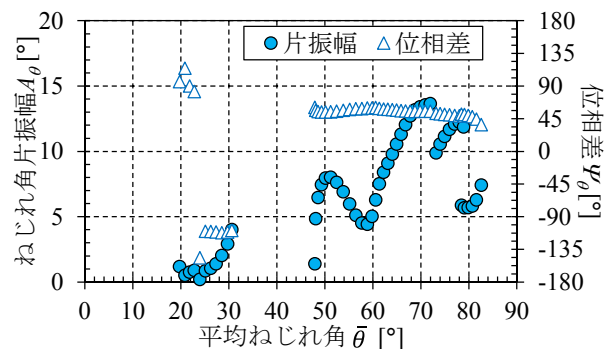
図2 鉛直応答振幅(解析諸元は既報<sup>2)</sup>参照)

図3 ねじれ振動特性(2自由度解析結果)

キーワード 4導体電線, ギャロッピング, エネルギー収支, ねじれ振動

連絡先 〒270-0021 千葉県我孫子市我孫子1646 一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 04-7182-1181

### 3. 鉛直振動系の空気力の無次元仕事量による振幅評価

既報<sup>2)</sup>では、振動物体に作用する力が1周期で物体に与えるエネルギー収支、つまり、空気力のする仕事と減衰力がする仕事の収支を考慮することで、鉛直1自由度系における振幅評価方法を述べた。導出したエネルギー収支式を無次元化された式に変形すると、エネルギー収支  $E_T > 0$  となる条件は、以下のように表される。

$$E_T^* = E_a^* - \frac{S_c}{U^*} > 0, \quad S_c = \frac{4\pi m_y \zeta_{y0}}{\rho(4D)^2 l}, \quad U^* = \frac{U}{(4D)\omega_{y0}}, \quad E_a^* = \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + (A_y^* \cos \psi)^2} (C_L(\phi_r) - C_D(\phi_r) A_y^* \cos \psi) \frac{\cos \psi}{A_y^*} d\psi, \\ \phi_r = \theta - \tan^{-1}(A_y^* \cos \psi), \quad A_y^* = \frac{A_y \omega_{y0}}{U} = \frac{A_y}{(4D)} \cdot \frac{1}{U^*} \quad (2)$$

ここで、 $E_a^*$ は空気力のする無次元仕事量、 $A_y^*$ は無次元鉛直振幅、 $U^*$ は無次元風速、 $S_c$ はスクルートン数である。 $E_T^* > 0$ 、つまり、 $E_a^* > S_c/U^*$ となる条件を満たす無次元鉛直振幅は、無次元風速・スクルートン数で決まる。また、 $A_y^*$ は振動数と風速で無次元化されており、無次元速度とも解釈できる。

鉛直1自由度系における応答振幅を推定する場合には、 $\theta = \theta_s$  (定数) として、無次元鉛直振幅  $A_y^*$  に対して  $E_a^*$  を計算して、 $E_a^* > S_c/U^*$  (図2の諸元では0.8程度) となる範囲の上端が安定なリミットサイクル振幅 (定常応答振幅) に、下端が不安定なリミットサイクル振幅 (応答に必要な初期変位) となる。図1に示す空気力係数を用いて算出した  $E_a^*$  を図4に示す。本図を用いることで、様々な条件 (風速、固有振動数、構造減衰) での、応答振幅が推定可能である。

一方、鉛直・ねじれ2自由度系において、鉛直振幅に与えるねじれ振動の影響を評価する場合には、ねじれ角  $\theta(t)$  を以下のような正弦波とみなせばよい。

$$\theta(t) = \bar{\theta} + A_\theta \omega_{y0} \sin(\omega_{y0} t - \Psi_\theta) \quad (3)$$

ここで、 $A_\theta = 15^\circ$ ,  $\Psi_\theta = -45^\circ, 0, 45^\circ$  と変えて算出した  $E_a^*$  を図5に示す。ねじれ振幅に加えて、位相差 (主にその正負) が重要な要素になり、定常応答振幅 ( $E_a^* > S_c/U^*$  となる上端) が変化している。図3に示す時刻歴応答解析では、 $(A_\theta, \Psi_\theta) = (15^\circ, 45^\circ)$  程度であり、図5(c)に示すように、広い範囲で鉛直振動を助長することがわかる。なお、図5では、ねじれ振動があることを仮定しており、 $E_a^* > S_c/U^*$  となる下端は不安定なリミットサイクルにはならず、物理的な意味を持たない。

### 5. まとめ

鉛直振動系における空気力の無次元仕事量評価式を用いて、ねじれ振動が鉛直振幅に与える影響を評価する手法を示した。本研究では、ねじれ振動特性を仮定して鉛直振幅へ与える影響を評価したが、今後、鉛直振幅・ねじれ振幅およびその位相差を併せて評価する方法を検討する。

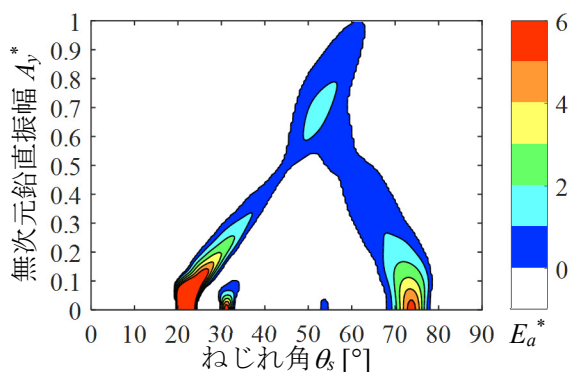


図4 鉛直1自由度系での無次元仕事量  $E_a^*$

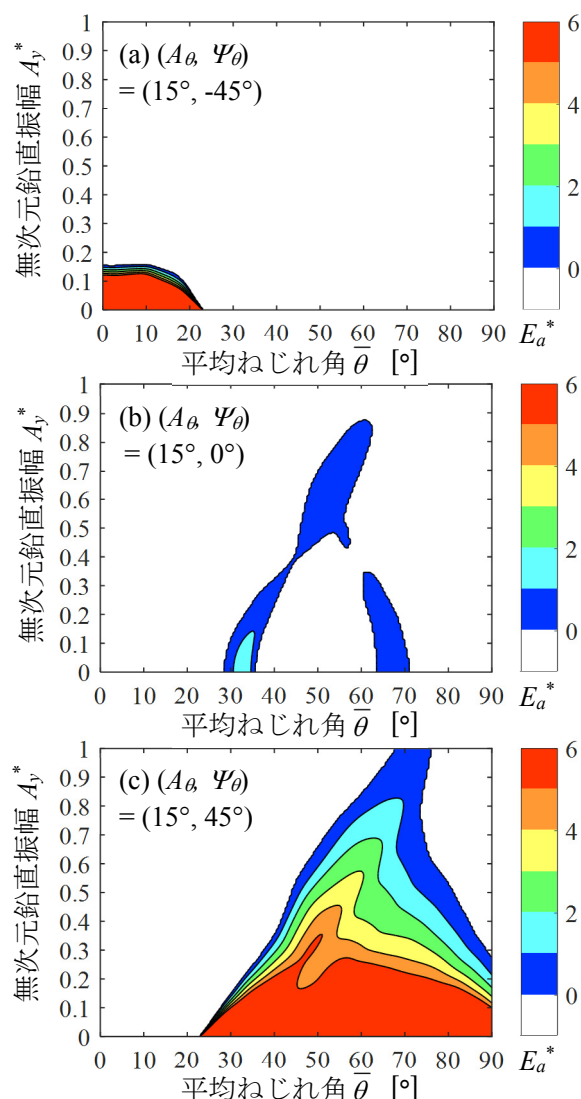


図5 ねじれ振動による無次元仕事量  $E_a^*$  の変化

**参考文献** 1) G.V. Parkinson, J.D. Smith: The square prism as an aeroelastic non-linear oscillator, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 17, pp. 225-239, 1964. 2) 松宮央登, 西原崇, 八木知己: 4 導体電線のギャロッピングにおける非線形振動特性, 第24回風工学シンポジウム論文集, pp.301-306, 2016.