

4 導体送電線部分模型の大振幅・低振動数のギャロッピングの発生機構の考察

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

1. はじめに

雪や氷が付着した送電線に風が作用すると、鉛直振動に水平・ねじれ振動を伴う大振幅・低振動数のギャロッピングと呼ばれる電線振動が発生することがある。筆者らは、送電線のギャロッピングの発生特性を解明するために、実径間と等価な大振幅・低振動数のギャロッピングを再現する 3 自由度振動実験手法を開発し¹⁾、4 導体送電線を対象とした風洞実験を実施してきた²⁾。本報告では、風洞実験で得られた 4 導体送電線部分模型の大振幅・低振動数のギャロッピングの発生機構を考察する。

2. 大振幅・低振動数 3 自由度振動実験

電力中央研究所内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m）にて、大振幅・低振動数 3 自由度振動実験を実施した。図 1～図 3、表 1 に実験条件を示す。部分模型は、三角形の着氷雪形状を有する ACSR410mm² の 4 導体送電線実寸模型とし、軸方向に離れた 2 つの支持点から、それぞれ 4 本の弾性ひもを用いて支持した。本研究では、風速 U を一定（=10.2 m/s）として模型迎角を支持台側の弾性ひも固定円盤の回転により変化させ、各迎角に対して模型に初期加振を与えた後の応答が定常的になった際の変位時刻歴データを取得した。

実験結果を図 4 に示す。ここで、横軸は模型迎角（有風時の静的つり合い角）に対応する模型ねじれ角の平均値とし、縦軸は変位の全振幅特性（単一振動数で振動したため、標準偏差× $2\sqrt{2}$ で定義）とする。図に示すように、実験では模型迎角が失速角（20 度）を超える範囲でギャロッピングが発生している。

3. ギャロッピングの励振力の考察

素導体毎に相対迎角・相対風速を定式化して、素導体毎の準定常空気力を算出するモデル²⁾を用いて計算した時刻歴応答解析結果を図 4 に併記する。本モデルを用いた解析では、4 導体全体で準定常空気力を算出するモデルでは再現できない大振幅振動時のギャロッピング応答特性も概ね再現できる。前報²⁾で示したように、素導体毎の準定常空気力を算出するモデルでは、4 導体全体のねじれ速度に伴う空気力が算出される点が大きな特徴である。

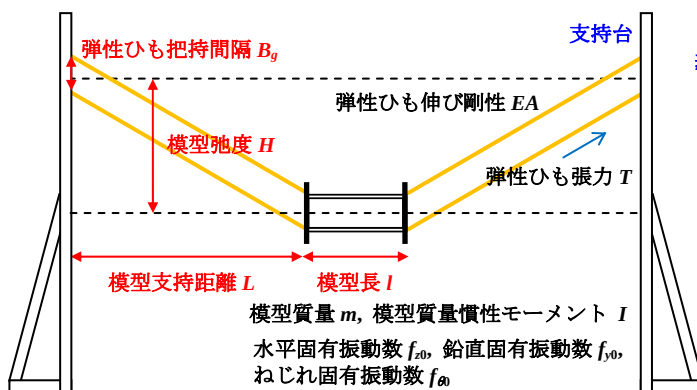


図 1 模型の弾性支持方法

表 1 実験諸元

m	6.692 kg	I	0.535 kg·m ²
L	6.255 m	H	1.560 m
B_g	0.4 m	EA	176.4 N
T	33.9 N	f_{z0}	0.399 Hz
f_{y0}	0.456 Hz	f_{θ}	0.428 Hz

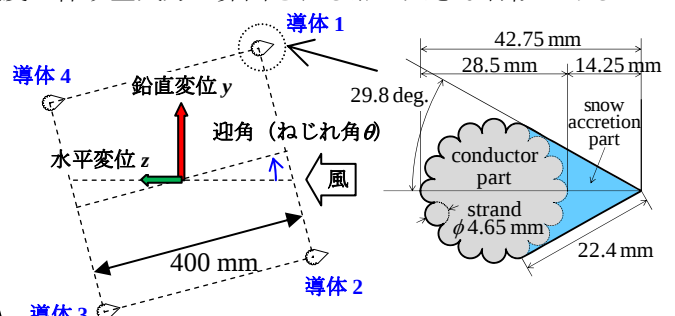


図 2 4 導体送電線部分模型形状

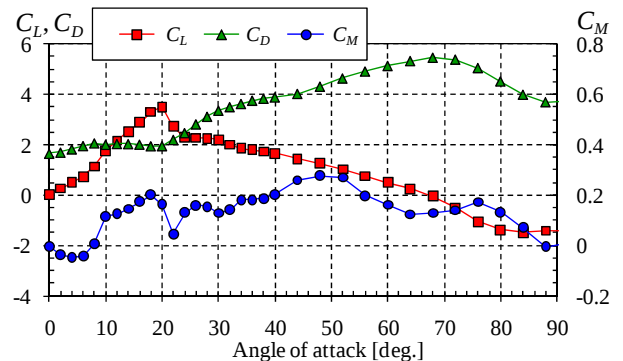


図 3 4 導体送電線部分模型の空気力係数³⁾

キーワード ギャロッピング, 4 導体送電線, 部分模型, 風洞実験

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

ここで、各自由度の変位・速度が微小であると仮定すると、素導体毎に算出された準定常空気力より、4 導体全体のねじれ速度に伴う変動空気力（揚力 $L_{F\dot{\theta}}$ 、抗力 $D_{F\dot{\theta}}$ 、空力モーメント $M_{F\dot{\theta}}$ ）が以下のように導出される。

$$L_{F\dot{\theta}} = \frac{1}{2} \rho U \frac{B}{\sqrt{2}} D l \dot{\theta} \times \left\{ \left(-2C_{Ls1}(\theta_0) - (C'_{Ls2}(\theta_0) + C_{Ds2}(\theta_0)) \right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta_0\right) + \left(- (C'_{Ls1}(\theta_0) + C_{Ds1}(\theta_0)) + 2C_{Ls2}(\theta_0) \right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta_0\right) \right\} \quad (1)$$

$$D_{F\dot{\theta}} = \frac{1}{2} \rho U \frac{B}{\sqrt{2}} D l \dot{\theta} \times \left\{ \left(-2C_{Ds1}(\theta_0) - (C_{Ls2}(\theta_0) + C'_{Ds2}(\theta_0)) \right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta_0\right) + \left(- (C_{Ls1}(\theta_0) + C'_{Ds1}(\theta_0)) + 2C_{Ds2}(\theta_0) \right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta_0\right) \right\} \quad (2)$$

$$M_{F\dot{\theta}} = \frac{1}{2} \rho U \frac{B}{\sqrt{2}} D l \dot{\theta} \times \left\{ \left(-2C_{Ms1}(\theta_0) - C'_{Ms2}(\theta_0) \right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta_0\right) + \left(-C'_{Ms1}(\theta_0) + 2C_{Ms2}(\theta_0) \right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta_0\right) \right\} \quad (3)$$

$$+ \frac{1}{2} \rho U \frac{B^2}{4} D l \dot{\theta} \times \left\{ \frac{(-C'_{Ls1}(\theta_0) - C'_{Ls2}(\theta_0) - C'_{Ls3}(\theta_0) - C'_{Ls4}(\theta_0) - 3C_{Ds1}(\theta_0) - 3C_{Ds2}(\theta_0) - 3C_{Ds3}(\theta_0) - 3C_{Ds4}(\theta_0))}{\left(\begin{aligned} &+ (C'_{Ls1}(\theta_0) - C'_{Ls2}(\theta_0) + C'_{Ls3}(\theta_0) - C'_{Ls4}(\theta_0)) \sin(2\theta_0) + \left(\begin{aligned} &-C_{Ds1}(\theta_0) + C'_{Ds2}(\theta_0) - C'_{Ds3}(\theta_0) + C'_{Ds4}(\theta_0) \\ &-C_{Ls1}(\theta_0) + C_{Ls2}(\theta_0) - C_{Ls3}(\theta_0) + C_{Ls4}(\theta_0) \end{aligned} \right) \cos(2\theta_0) \end{aligned} \right)} \right\}$$

ただし、 B は導体間隔、 D は導体直径、 ρ は空気密度、 C_{Dsi} , C_{Lsi} , C_{Msi} ($i=1\sim 4$) は各素導体の抗力・揚力・空力モーメント係数、 θ_0 は静的つり合い時の迎角、 $(\cdot)$ は迎角に対する勾配である。

式(3)の二重下線で示した項以外は、各素導体に作用する空気力の差から生じる項となる。4 導体送電線では、風下側素導体において、風上側素導体の後流域の影響で空気力が低減するため素導体毎の空気力に差があるものの、式(1)～式(3)の各項の中では相対的に式(3)の二重下線の項の影響が支配的になる。この項はねじれ振動系における空力減衰項であり、4 導体全体の揚力係数勾配に抗力係数を加えた $C'_L(\theta_0) + 3C_D(\theta_0)$ の項が負値を示す時にねじれ振動の励振力となる。図5に空気力係数より算出される Den Hartog の条件値 ($C'_L(\theta_0) + C_D(\theta_0)$) および $C'_L(\theta_0) + 3C_D(\theta_0)$ の値を示す。図に示すように、鉛直振動系に励振力を与える Den Hartog の条件値が負値を示す迎角範囲と概ね同じ範囲において、ねじれ振動系も励振力を得る。

また、ギャロッピング発生時の相対迎角の変動範囲を図6に示す。本研究では、鉛直・水平・ねじれの振動数が近い条件で実験を行っており、これらの3自由度系で相対迎角の変動範囲が大きくなるように連成して振動する。その結果、相対迎角の変動範囲が大きな励振力が生じる迎角範囲（迎角20～24度）を含むことで、励振力を得て振動していると推測される。

4. まとめ

4 導体送電線においてねじれ速度に伴う変動空気力の式を誘導し、鉛直振動系に励振力を与える迎角範囲と概ね同じ範囲において、ねじれ振動系も励振力を得ることを示した。また、ギャロッピング発生時には、相対迎角の変動範囲が大きな励振力が生じる迎角範囲を含むことで、励振力を得ていることを示した。

参考文献

- 1) 部分模型を用いた架空送電線のギャロッピング現象の解明 (その1): 松宮央登, 西原崇, 清水幹夫, 電力中央研究所研究報告, N09022, 2010.
- 2) 4 導体送電線の大振幅振動実験による準定常空気力モデルの妥当性評価: 松宮央登, 西原崇, 風工学会年次研究発表会概要集, 2013 (投稿中) .
- 3) 着氷雪時の単導体・4 導体送電線の定常空気力特性に関する研究: 松宮央登, 清水幹夫, 西原崇, 構造工学論文集, Vol. 56A, 2010, pp. 588 - 601.

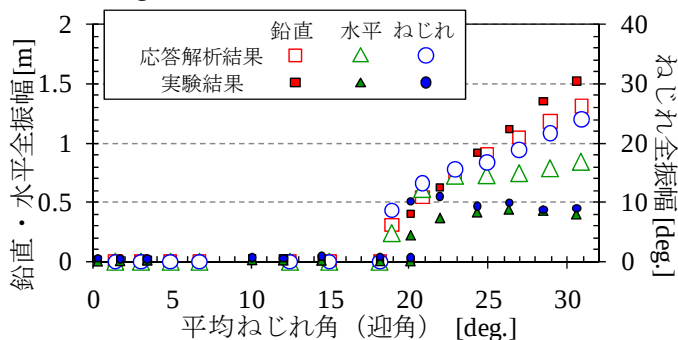


図4 平均ねじれ角に対する全振幅特性（実験・解析）

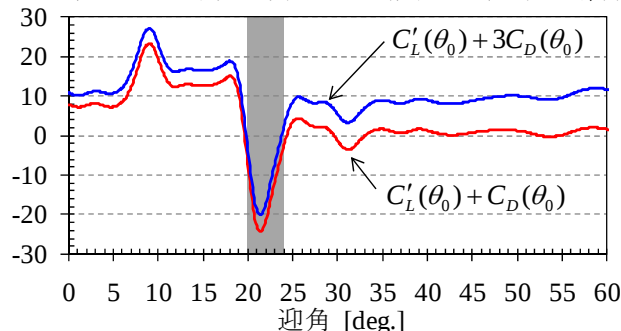


図5 鉛直・ねじれ振動系で励振力を得る迎角範囲

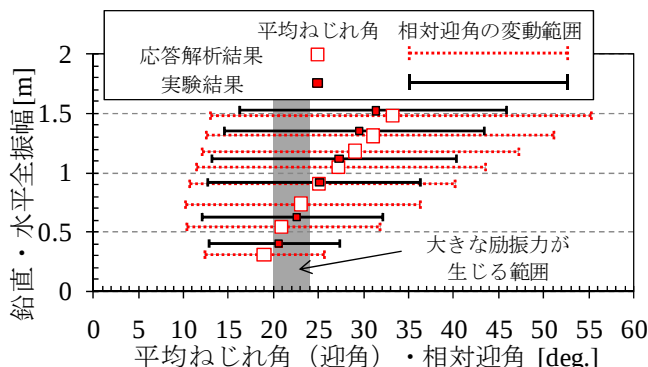


図6 ギャロッピング発生時の相対迎角の変動範囲