等価単導体法を用いたシミュレーション計算結果による 架空送電線のギャロッピング基本特性

正員 山 岡 勝 (北海道電力)
正員 長谷川 淳 (北海道大)

Foundamental Characteristics of Overhead Transmission Line Galloping by Simulating Calculation Using Equivalent Single Conductor Method

Masaru Yamaoka (Hokkaido Electric Power), Jun Hasegawa (Hokkaido University)

Theoretical study and phenomenal examination have been done for a long time, but some electric power company even today has instantaneous power failure due to the galloping. Our study differs from other ones on the point that non-linear three dimensional simultaneous equations of conductor movement can be solved directly using numerical calculation. Fundamental characteristics of galloping can be made clear by that calculation changing parameters variously. This time, we used the method that bundle conductor are changed equivalently to single conductor. We could also make it clear that instable domain becomes wider when rotational movement of conductor occurs.

キーワード：送電線，ギャロッピング，シミュレーション計算，振動発生理論

1. ま え が き

架空送電線のギャロッピングの研究が開始されてから長い年月を経ていて、現象解明や理論解明が行われているが、ギャロッピングに起因する架空送電線の電線短絡防止技術は、いまだに確立されたということとはできなく、問題をかかえている電力会社では苦慮しているのが実態である。特に、瞬時停電（瞬時電圧低下）が需要家に大きな影響を及ぼすこともありうることから、ギャロッピング事故防止技術の確立が待たれているところである。

理論解明の分野では、振動方程式を作り線形化した後、自動制御理論などを用いて考察を加える研究⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾、風洞実験で振動状況を観察したり、風圧係数を測定して考察を加える研究⁽⁵⁾などが発表されている。

これらの研究の振動発生理論は、次の二つに分類できる。

- (i) 捻回を伴わない振動：二元連立方程式からの考察（デン・ハルトーク理論）⁽³⁾
- (ii) 捻回を伴う振動：三元連立方程式からの考察および実際の現象からの考察⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾

このような流れのなかで、著者らの研究⁽¹⁾⁽²⁾は非線形連立偏微分方程式を作り、これを数値計算法を用いて直接約に解く方法を確立したこと、そして計算機でシミュレーションすることを可能にした点で、他の研究、例えば方程式

を線形化して制御理論から考察を加える研究と異なる。著者らの方法を用いると、種々の入力データを代えることで簡単に種々の振動を発生させることができる。

本論文では、2導体を等価的に単導体に置換するシミュレーション計算法（等価単導体と呼ぶ）を提案し、この方法でどのようなことが表現できるか、特にギャロッピングの基本特性と不安定問題がどのように説明できるかを報告する。

不安定問題についての他の論文⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、主として風圧係数上で説明しており、送電線定数との関連性は明確でない。これに対して、本論文は送電線定数（上下方向周期と捻回方向周期）と関連させて不安定問題を説明している。

また、等価単導体法は、著者の一人が先に報告した多導体送電線の厳密解法⁽²⁾に比べ、計算時間を大幅に低減できる。

2. 等価単導体法によるシミュレーション計算

〈2・1〉 2導体送電線の等価単導体への置換方法

単導体送電線の捻回運動は、ねじれ剛性（GIP）を用いて表現できる。2導体送電線では、素導体電線相互の動きが束導体として見たときの見掛け上の捻回運動となるので、これを等価的に単導体のねじれ剛性値に置き換えて扱う必要がある。更に、素導体電線に働く風圧力も等価的に単導体に働くものとして扱う必要がある。

(1) 電線ねじれ剛性による2導体捻回特性の表現2導体の素导体電線の張力変動を伴った相互の動きを等価的に単導体の捻回運動に置き換えることは、厳密にはできないので、便法として、2導体送電線の捻回復元モーメント⁽⁸⁾から逆算する方法を用いた。

これは、文献(2)で論じた2導体送電線のスペーサ取付け部分の運動方程式を、線形化して求めた特性方程式の $\theta_{(s)}$ に関する項の係数が $(2GIP + I_s^2/2H)$ と表現され、電線張力 H が2導体の捻回運動に寄与することが式のうえでも結論できるためである。

一例として、1,160 mm² ACSR, 2導体送電線(径間300 m)で、1点捻回復元モーメントの最大モーメントとそのときの角度からねじれ剛性値を求めた結果を表1に示している。実際のシミュレーション時には、ねじれ剛性値を種々変化させ振動状況がどうなるかを調べた。

(2) 風圧力の等価単導体への置換方法 素导体電線に働く風圧力のうち、抗力と揚力は電線と着氷雪を合わせた重心点に働き、ピッチングモーメントは、電線中心に働く。これらを2導体スペーサ中心に関して考えると(図1参照)、素导体電線の揚力と抗力が2導体全体の重心点に、そしてピッチングモーメントがスペーサ中心に働くことが(1)、(2)式の上で表現できる。

2導体スペーサ中心のモーメント:

$$MA = \{(FL_1 - FL_2) l_g \sin \theta - (FL_1 + FL_2) l_g \sin \theta\} + \{(FD_1 - FD_2) l_g \cos \theta + (FD_1 + FD_2) l_g \cos \theta\}$$

図1 2導体と等価単導体の関係

Fig.1. Relationship between double conductor and equivalent single conductor.

表1 捻回復元モーメントからのねじれ剛性計算値
Table 1. Torsional rigidity calculated from torque-compensation moment.

電線張力 kg	捻回点	最大モーメント kg·m	最大モーメント時の角度 度	ねじれ剛性 kg·m ² /rad
5000	50m	32.3	75	1028
	100	24.5	60	1562
10000	50	53.3	80	1592
	100	34.9	75	1778

もし、 $FD_1 = FD_2$, $FL_1 = FL_2$ なら

$$MA = (FD_1 + FD_2) l_g \cos \theta - (FL_1 + FL_2) l_g \sin \theta \quad \dots \dots \dots (1)$$

(1)式は、 FD_1 と FD_2 および FL_2 が等価単導体の重心点に働くと考えられることを表現している。

次に、素导体電線のピッチングモーメントがスペーサ中心点回りではどうなっているかを見るため、素导体のモーメントをぐう力に分解してスペーサ中心で考えると、

$$MB = (1 + d/2)f_1 - (1 - d/2)f_1 + (1 + d/2)f_2 - (1 - d/2)f_2 = d f_1 + d f_2 = M_1 + M_2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。この式は、素导体に働くピッチングモーメントの合成値が等価単導体の中心に働くと考えられることを表現している。

3. 等価単導体法を用いたシミュレーション計算によるギャロッピング基本特性の説明

1,160 mm² ACSR, 径間長 300 m の2導体送電線で2種類の自然型着氷雪が付着した場合について、種々のパラメータを代えて振動状況がどうなるかを調べながら、ギャロッピングの基本特性を説明することを試みた。

〈3・1〉 計算条件 計算する送電線は、図2に示す径間数3で懸垂径間を考慮した。初期電線張力は、3種類(5, 7.5, 10 トン)を用い、ねじれ剛性は500, 1,000, 1,400, 2,000, 3,000, 3,500 (kg·m²/rad) などを用いた。これらの定数に伴う電線の上下方向と捻回方向の周期(各々 T_1 と T_2)の関係を図5に示しており、〈3・2〉節の各計算例で用いた定数に対応する各周期を表2に示している。風圧係数は、図3に示した自然型の着氷雪2種類を用いた。風速変動の与え方は図4に示した4種類を用いた。計算時刻の刻み幅は0.005秒で、最終計算時刻は30秒を、主に状況により50秒も用いた。なお、計算径間である3径間のうち中央径間は偏微分方程式を用い、第1径間と第3径間は放物線仮定の常微分方程式を用いた⁽¹⁾⁽²⁾。

〈3・2〉 自然型着氷雪の計算例 シミュレーション計算では、電線張力とねじれ剛性を調整して上下方向と捻回方向周期を変えたり、初期着氷雪角度と風速を適切に選んで着氷雪の向く方向を変えたり、あるいは、捻回方向の減衰定数を変化させて捻回運動を調節すると種々の振動が発生する。着氷雪形状で決まる風圧力(係数)と着氷雪の向く方向で振動の特性が異なるので、着氷雪が風上側を向くのか風下側を向くのかに分けて説明する。

(1) 初期着氷雪角度が風上側を向いている場合の例
主要な計算結果を図6～図19に示しており、各シミュ

図2 シミュレーションする送電線
Fig.2. Transmission line used in simulations.

図3 計算に用いた風圧係数
Fig. 3. Wind pressure coefficients used in simulations.

図4 風速変動の与え
Fig. 4. Wind speed in simulations.

図5 計算に用いた電線の上下方向、捻回方向
周期と電線定数の関係
Fig. 5. Relationship between the period of conductor vertical and rotational movement used in simulations and conductor parameters.

表2 計算に用いた電線の上下方向と捻回方向周期
Table 2. The period of conductor vertical and rotational movement used in simulation.

計算 ケース	T_1 (秒)	T_2 (秒)	T_2 / T_1	計算 ケース	T_1 (秒)	T_2 (秒)	T_2 / T_1		
着氷 雪 角度 度 風 上	1	5.42	5.63	1.04	1 2	5.42	8.0	1.48	
	2	5.42	5.63	1.04	1 3	5.42	8.0	1.48	
	3	5.42	5.63	1.04	1 4	5.42	3.98	0.734	
	4	5.42	3.25	0.60	着氷 雪 角度 度 風 下	1 5	3.83	3.02	0.789
	5	5.42	3.05	0.557		1 6	3.83	3.98	1.04
	6	5.42	3.98	0.734		1 7	3.83	3.98	1.04
	7	5.42	3.02	0.557		1 8	3.83	3.6	0.94
	8	5.42	8.0	1.48		1 9	3.83	3.02	0.789
	9	4.40	4.8	1.09		2 0	3.83	3.25	0.849
	1 0	3.83	3.25	0.849		2 1	5.42	5.63	1.04
	1 1	5.42	3.02	0.557		2 2	5.42	3.98	0.734

図6 シミュレーション結果：ケース1
Fig. 6. Simulation result: case 1.

図7 シミュレーション結果：ケース2
Fig. 7. Simulation result: case 2.

図8 シミュレーション結果：ケース3
Fig. 8. Simulation result: case 3.

レーション計算の主要なパラメータは表3に示している。
また各々の目的とするところは次のとおりである。
ケース1 (図6) とケース2 (図7) は風圧係数は異なる

が、上下周期と捻回周期をほぼ等しくなるようにパラメータを選定した例である。ケース3 (図8) はケース2より風速を強くして、着氷雪が異なる方向に向くようにした例

図9 シミュレーション結果：ケース4
Fig. 9. Simulation result: case 4.

図14 シミュレーション結果：ケース9
Fig. 14. Simulation result: case 9.

図10 シミュレーション結果：ケース5
Fig. 10. Simulation result: case 5.

図15 シミュレーション結果：ケース10
Fig. 15. Simulation result: case 10.

図11 シミュレーション結果：ケース6
Fig. 11. Simulation result: case 6.

図16 シミュレーション結果：ケース11
Fig. 16. Simulation result: case 11.

図12 シミュレーション結果：ケース7
Fig. 12. Simulation result: case 7.

図17 シミュレーション結果：ケース12
Fig. 17. Simulation result: case 12.

図13 シミュレーション結果：ケース8
Fig. 13. Simulation result: case 8.

図18 シミュレーション結果：ケース13
Fig. 18. Simulation result: case 13.

である。ケース4(図9)はケース2よりねじれ剛性を強くし、また、ケース5(図10)はケース1よりねじれ剛性を強くして、着氷雪が該当のケースと異なる方向に向くようにした例である。ケース6(図11)は、風圧係数 a で初期着氷雪角度を -40 度(320 度)に選定して捻回運動を完全になくした例(デン・ハルトーク理論の例)である。ケース7(図12)はケース5の風速を強くした例、すなわちケース1の風速とねじれ剛性を強くした例である。ケース8(図13)は、ねじれ剛性を小さくして捻回運動が大きくなるようにした例である。ケース9(図14)は、ケース1~3と同様に上下周期と捻回周期をほぼ等しくなるようにパラメータを選定するとともに、捻回の減衰定数を小さくして捻回運動が大きくなるようにした例で、振幅の大きな振動が発生する。ケース10(図15)は、ケース9と異なり両方の周期をずらした状態で捻回の減衰定数を小さくした例である。ケース11(図16)は、ケース7で捻回の減衰定数を小さくした例で、捻回運動は大きい周期がずれているために振動が大きくなる例である。ケース12(図17)は、減衰定数とねじれ剛性の両方を小さくして捻回運動が大きくなるようにした例で、振幅の大きい縦長の振動になる。ケース13(図18)は、ケース12の初期着氷雪角度と風速を変えて、着氷雪が風下に向くようにした例で、縦長の楕円状の振動が発生する。ケース14(図

19)は、風圧係数 b で初期着氷雪角度を 0 度にして捻回運動を完全になくした例である。

これらの結果から説明されることは以下の事項である。

(i) 風上側では、ねじれ剛性や減衰定数を適切に選定して、捻回運動を大きくすると、上下周期と捻回周期が同期する、いわゆる‘捻回を伴ったギャロッピング’が発生する。この場合、上下周期と捻回周期が同期しないときには振動が減衰する。

[各計算ケースとの関連性：ケース1, 2は T_1 と T_2 をほぼ等しくなるように選定しているのに対して、ケース4, 5は T_1 と T_2 が異なるように選定しているの振動が減衰している。ケース8は、GIPを小さく、ケース12, 13はGIPと減衰定数の両方を小さく選定して捻回運動が大きくなるようにしているために振動が発生している。一方、ケース11, 12は減衰定数を小さくして捻回運動を大きくしているが、 T_1 と T_2 が異なるため、振動が小さくなっている。ケース3は、 T_1 と T_2 がほぼ等しいにもかかわらず着氷雪角度が不安定領域に向いているので、振動が減衰している。

以上のように、 T_1 と T_2 の関係、捻回運動の状況、着氷雪角度の向きにより振動発生状況が異なることが、シミュレーション計算から説明される。]

(ii) ねじれ剛性が強いと風上側でも捻回運動が少ないギャロッピングが発生する場合がある。しかし、この場合は、風下側と異なり、捻回運動が全くなると振動は小

図19 シミュレーション結果：ケース14
Fig. 19. Simulation result: case 14.

表3 主要パラメータ (着氷雪が風上側の場合)
Table 3. Main parameters (ice faces to the windward).

計算 ケース	図面 NO	風圧 係数	初期電 線張力 kg	ねじれ剛性 $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{rad}$	初期着 氷雪角 度(度)	風速 変動
1	図6	a	5000	1000	-60	b
2	図7	b	5000	1000	-60	b
3	図8	b	5000	1000	-60	a
4	図9	b	5000	3000	-60	b
5	図10	a	5000	3500	-60	b
6	図11	a*	5000	2000	-40	b
7	図12	a	5000	3500	-60	a
8	図13	b	5000	500	-60	a
9	図14	b	7500	1400	-50	c
10	図15	b	10000	3000	-50	d
11	図16	a	5000	3500	-60	a
12	図17	b	5000	500	-60	a
13	図18	b	5000	500	-10	b
14	図19	b*	5000	2000	0	b

注 ケース9~14は他のケースより捻回の減衰定数が1桁小さい

図20 シミュレーション結果：ケース15
Fig. 20. Simulation result: case 15.

図21 シミュレーション結果：ケース16
Fig. 21. Simulation result: case 16.

図 22 シミュレーション結果：ケース 17
Fig. 22. Simulation result: case 17.

図 23 シミュレーション結果：ケース 18
Fig. 23. Simulation result: case 18.

図 24 シミュレーション結果：ケース 19
Fig. 24. Simulation result: case 19.

さくなる。

〔各計算ケースとの関連性：ケース 1, 2, 7, 8 は、捻回運動が減衰して θ の振動範囲が小さくとも、 Y 方向振動が大きくなっているのに対して、ケース 6 のように捻回運動を完全に零にすると Y 方向振動は小さくなる。〕

(2) 着氷雪が風下側を向いている場合の例 主要な計算結果を図 20～図 27 に示しており、それに対応する計算条件を表 4 にまとめている。各計算ケースの目的とするところは次のとおりである。

図 25 シミュレーション結果：ケース 20
Fig. 25. Simulation result: case 20.

図 26 シミュレーション結果：ケース 21
Fig. 26. Simulation result: case 21.

図 27 シミュレーション結果：ケース 22
Fig. 27. Simulation result: case 22.

表 4 主要パラメータ (着氷雪が風下の場合)
Table 4. Main parameters (ice faces to the leeward).

計算 ケース	図面 NO	風圧 係数	初期電 線張力 Kg	ねじれ剛性 $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{rad}$	初期着 氷雪角 度(度)	風速 変動
15	図20	a	10000	3500	90	a
16	図21	a	10000	2000	93	a
17	図22	a	10000	2000	90	a
18	図23	b	10000	2500	94	a
19	図24	a	10000	3500	90	a
20	図25	a*	10000	3000	90	a
21	図26	b	5000	1000	90	a
22	図27	b*	5000	2000	90	b

注 ケース 19 は他のケースより捻回の減衰定数が 1 桁小さい

ケース 15 (図 20) は、ねじれ剛性を強くして着氷雪角度を 90 度付近に保ちやすくするとともに上下方向周期と捻回周期をずらした計算例である。ケース 16 (図 21) は、ねじれ剛性をケース 15 より弱くして、着氷雪角度が 80～90 度付近で、かつ上下周期と捻回周期をほぼ等しくした例である。ケース 17 (図 22) は、ケース 16 の初期着氷雪角度を少しずらして着氷雪角度が 90 度以上になるようにした例である。ケース 18 (図 23) は、風圧係数 b を用いて着氷雪角度を 95～102 度の範囲で捻回運動をするように設定した例である。ケース 19 (図 24) は、ケース 15

で減衰定数を小さくして、風上側と同様に捻回運動を大きくするようにした例である。ケース 20 (図 25) は、風圧係数 a で初期着氷雪角度を 90 度に設定して捻回運動を完全に零にした例である。ケース 21 (図 26) は、上下方向と捻回方向の周期をほぼ等しくしているが、ねじれ剛性が小さいため着氷雪角度が振動を起こさない方向 (80 度以下) に向くようにした例である。ケース 22 (図 27) は、風圧係数 b 、着氷雪角度が 90 度の場合で捻回運動を完全に零にした例である。

なお、ケース 16, 17 は計算時間が進に従って 3 ループ振動が、ケース 22 は最初からそれが発生している。

これらの計算結果からギャロッピング現象について説明されることは以下の事項である。

(i) ねじれ剛性、初期着氷雪角度あるいは風速を適切に選定して着氷雪角度が不安定領域に向くようにすると、捻回運動が風上側より少ないギャロッピングが発生する。この場合は、捻回運動は少ないものの、上下運動と捻回運動の周期がほぼ一致する振動である。

〔各計算ケースとの関連性：ケース 15, 16, 17, 18, 19 は、着氷雪角度が不安定領域にあるので振動が発生しているのに対して、ケース 21 は、不安定領域外になるため減衰振動になる。ケース 16, 17, 18 は、捻回角度が小さいものの Y と θ が同期している。また、ケース 15 は T_1 と T_2 を異なるように選定し、ケース 19 は T_1 と T_2 をほぼ等しく選定しているが、両ケースとも Y , θ が同期しながら発散する振動とな

る。この 2 ケースとも、 θ が増大して不安定領域外になっても振動が継続し発散に至っている。以上のように、風下側の場合でも捻回運動に伴って振動が発生することが、シミュレーションできる。〕

(ii) 捻回運動が全くない場合にも、着氷雪角度が不安定領域に位置するときは、大振幅のギャロッピングが発生する (デン・ハルトーク理論)。

〔各計算ケースとの関連性：完全に捻回を零にしたケース 20, 21 では、着氷雪角度が不安定領域内にあるので振動が発生しているが、それを外れると (この例は図示していない) 振動が発生しない。〕

〈3・3〉 等価単導体法によるシミュレーション計算結果と実際の現象との対比 前記シミュレーション計算結果と実際のフィールド観測例とを対比すると次のように考察される。

(i) シミュレーション計算では捻回運動が重要な役割を果たしていることが明確になった。当社の 2 導体送電線では、2 導体の各電線が相互に動き、束導体としての捻回運動が観測されており、国内の試験線の実験でも同様なことが報告されている⁽¹⁰⁾。また、当社試験線における著者の観測経験では、すべてが素導体電線の相互の動きを伴うものである。

このように実際の観測事例とシミュレーション計算での捻回運動の役割は整合する。

(ii) 当社の実際のギャロッピングは、発達した低気圧の前面で着氷雪の付着している方向から風が吹いていると

表 5 等価単導体法によるシミュレーション計算結果からの不安定領域
Table 5. Unstable domain of simulation result using equivalent single conductor method

きと低気圧の後面でそれと逆方向から風が吹いているときの両方で発生している。シミュレーション計算でも条件設定を適切にすることにより風上、風下両方でギャロッピングが発生することを示すことができ、両者が整合する。

(iii) 単導体送電線の場合は、ねじれ剛性が小さいため通常は風上側に着氷雪角度を保つことは不可能であり、風下側の不安定領域に着氷雪角度が位置するときだけギャロッピングが発生する。この点が等価単導体と単導体が異なる点で、等価単導体法を用いることにより2導体と同様な不安定領域で振動を発生させることが可能となる。

(iv) 今回計算例として示したのは、すべて懸垂径間であるが、シミュレーションでも懸垂がいし連の動きを伴った隣接径間の相互のやりとりを表現できる。耐張径間の場合は、振動周期が懸垂径間と異なることをシミュレーションでできる。

4. 等価単導体法を用いたシミュレーション計算によるギャロッピング発生条件の考察

著者の一人は、文献(2)で等価単導体に置換した2導体送電線を例に、特性方程式の根判別法で風圧係数上での不安定領域を示し、着氷雪角度がデン・ハルトーク理論の範囲より広い領域で不安定になることを報告した。表5に具体的なシミュレーション計算の主要なものを風圧係数と対応させて示しているように、同様な結果を得ることができた。この結果からギャロッピング発生条件を考察すると以下のようにまとめられる。

(1) 捻回を伴わない場合の不安定領域 本論文で用いた2種類の風圧係数でのデン・ハルトークの不安定領域は、表4に示しているように、風圧係数 a では着氷雪角度が80~100度付近、風圧係数 b では-30~-10度付近と80~100度付近である。一方、シミュレーション計算では、捻回を完全になくした場合には、ほぼ同じ範囲で不安定になる。

(2) 捻回運動を伴う場合の不安定領域 シミュレーション計算では、ねじれ剛性と減衰定数を調整して捻回運動を大きくした場合に大振幅の振動が起きること、そしてこの場合はデン・ハルトークの不安定領域を外れても振動が継続すること、および単に捻回運動とだけ関係するのではなく上下方向の運動とも関係することなどが明らかになった。

5. あとがき

本論文では、主として等価導体法を用いたギャロッピングシミュレーション計算でパラメータを種々変えることにより、ギャロッピングの基本特性を説明できることを示した。この基本特性は、著者らが実規模試験線あるいは実線路で観測してきたこととも整合性がとれる。

ただし、シミュレーション計算は定性的な説明に対しては非常に有効であるが、実際のギャロッピングを定量的に

表現する点では完全ではない。しかし、短時間で簡便にギャロッピングの検討ができるという大きなメリットをもっている。今回報告する第Ⅷ単導体法と前回報告した厳密計算法の計算時間を参考まで記すと、ミニコンの場合、前者が10分程度で後者は12時間程度である。最近EWSでも実行しているが、前者は1分程度である(EWSの後者のプログラムは未完成)。

今後は、シミュレーションの精度向上の検討や事故防止対策のための定量的検討などを行う予定である。

終りに、日ごろ研究の機会を与えていただいている、北海道電力総合研究所 田賀所長、吉川次長、そして研究担当の大浦、伊藤氏に対して謝意を表します。

(平成6年3月28日受付、同6年6月27日再受付)

文 献

- (1) 五藤員雄・小池東一郎：「架空送電線のギャロッピング振動の数値計算法と一防止方法」, 電学論B, **97**, 405 (昭52)
- (2) 山岡 勝：「多導体送電線のギャロッピング振動の数値計算法」, 同上B, **99**, 569 (昭54)
- (3) J. D. Den Hartog: "Transmission Line Vibration due to Sleet", *AIEE Trans.*, **51**, 1074 (1932-12)
- (4) W. N. McDaniel: "An Analysis of Galloping Electric Transmission Line", *AIEE Trans.*, **PAS-79**, 406 (1960-8)
- (5) J. J. Ratokowski: "Factors Relative to High-Amplitude Galloping", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-87**, 1368 (1968-6)
- (6) O. Nigol & P. G. Buchan: "Conductor Galloping, Part I: Den Hartog Mechanism; Part II: Torsional Mechanism", *ibid.*, **PAS-100**, 699 (1981-2)
- (7) 柏村良一・大月 晃：「架空送電線のギャロッピングの研究」, 電気学会電力技術研資, ET-73-7 (昭48)
- (8) 吉田・松林義数：「多導体方式送電線のねん回に関する理論的研究」, 電学誌, **79**, 248 (昭34-3)
- (9) 山岡 勝：「シミュレーション計算による架空送電線のギャロッピングの基本特性の説明」, 平5電気学会全大, No. 1346
- (10) 「架空送電線のギャロッピング」, 電気学会技報 (II部), No. 82, p. 82 (昭54)

山岡 勝 (正員) 1944年9月5日生。1971年3月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月北海道電力(株)入社。主として、総合研究所にて送電部門に関する研究(電線着雪、ギャロッピングなど)に従事。現在、総合研究所主幹研究員。1992年4月から北海道大学大学院社会人特別選抜博士課程在学。日本雪氷学会会員。

長谷川 淳 (正員) 1943年12月13日生。1971年3月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部講師、助教授を経て、1985年4月同教授、現在に至る。工学博士。主として、電力系統の計画・運用・制御・解析、およびエネルギー貯蔵に関する研究に従事。資源学会、日本エネルギー学会、低温工学学会会員。