

風洞実験による着氷雪送電線の定常および非定常空力特性に関する研究

A WIND TUNNEL STUDY ON STEADY AND UNSTEADY AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF ICE - ACCRETED TRANSMISSION LINES

清水幹夫¹⁾, 石原 孟²⁾, ファバンフック³⁾

Mikio SHIMIZU¹⁾, Takeshi ISHIHARA²⁾, Pham Van Phuc³⁾

ABSTRACT

In many cases of usual transmission lines galloping simulations, steady aerodynamic coefficients of ice-accreted transmission lines were generally applied and aerodynamic forces were approximated as quasi-steady ones. However, to perform more realistic simulations, it seems that the coefficients data ever obtained are not enough, and characteristics of unsteady aerodynamic coefficients should be investigated. So in this study, two types of wind tunnel test were conducted to take an accurate measurement of steady and unsteady aerodynamic coefficients of 4-conductor bundled and single conductor section models with a piece of artificial accreted ice whose profiles were clearly defined. These coefficients were examined between steady and unsteady, as well as bundled and single conductors.

Key Words : transmission line, galloping, wind tunnel test, aerodynamic coefficient

1. はじめに

雪や氷が付着した送電線の自励振動現象、すなわちギャロッピングは、相間短絡や碍子あるいは支持物の損傷などの事故原因になり得るため、その対策法の確立が必要である。筆者らは、ギャロッピング事故の現象解明や対策法の効果検証を目的として、数値シミュレーション手法を開発¹⁾し、実務への適用を試みてきた²⁾。こうしたシミュレーション時の空気力は、従来、多くの場合に着氷雪電線の空力特性が定常空気力係数として得られている³⁾経緯から、準定常的に近似されてきた。しかし、送電線のギャロッピングは、風向方向の横振れに加え、風向に直交する鉛直振動および電線軸回りの回転振動を含む、曲げねじれフラッターに近い性状となる場合があり、また、木村らの風洞実験結果⁴⁾には、着氷雪4導体送電線に作用する空気力の非定常性がみられる。したがって、今後、より現実的なギャロッピングシミュレーションを行う上で、着氷雪電線の非定常空力特性を十分に把握し、ギャロッピングとの関係を評価しておくことが重要と考えられる。また、既往の風洞実験にみられる、着氷雪形状の多くが不明確、一本の電線すなわち単導体に比較して複数の電線を束ねた多導体送電線に関するデータ⁵⁾が少ない、といった問題も無視できない。

以上の背景の下、本研究では2通りの風洞実験、すなわち3分力天秤実験および大振幅回転加振実験によ

1) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

2) 東京大学大学院 工学系研究科 総合研究機構 助教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16)

3) 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 大学院生 (同上)

表 1 試験体の諸元

試験体名称	導体数	試験体長さ L(mm)	導体外形 D(mm)	着氷雪高さ (mm)	投影面積 A(mm ²)	代表径 B(mm)	備考
4-1.00D	4	1270	19	19(=1.00D)	48260	247	投影面積Aは上流側の導体2本分の投影面積として2D×Lで換算し、代表径Bは導体中心の間隔とした。
1-1.00D	1	1270	30	30(=1.00D)	38100	30	投影面積はD×Lで換算し、代表径は導体外径Dと同一の値とした。

注*：着氷雪高さは、着氷雪先端から導体表面までの最短距離を表す。図2参照。

表 2 風洞の諸元

風洞名称	風洞設置場所	測定対象	形式	測定部寸法(m)			模型支持・測定装置
				長さ	幅	高さ	
強風シミュレーション風洞	東京大学	定常空気力係数	縦置回流型	11	1.5	1.8	三分力天秤
構造物用低速風洞	三井造船昭島研究所	非定常空気力係数	水平回流型	20	2	3	大振幅非定常空気力測定装置

り、着氷雪した送電線の定常および非定常空気力係数を測定した。本検討では特に、空気力の非定常性に関する電線軸回りの回転角速度と多導体の後流の影響⁴⁾を分離して把握するため、同一（相似）の着氷雪形状の4導体と単導体の部分模型を実験対象とした。また、着氷雪形状を明確に定義し、模型の完全な再現を可能とした。測定結果に基づき、定常と非定常、および4導体と単導体との間で、空力特性を比較した。

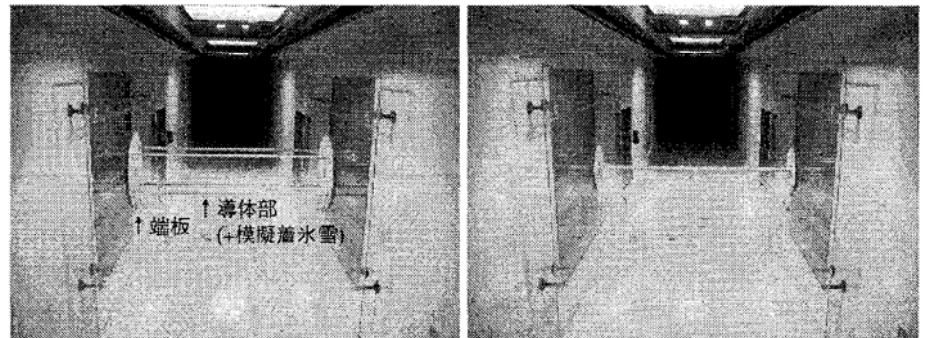
2. 実験方法

2.1 試験体と風洞

実験に用いた試験体と風洞の諸元をそれぞれ表1、2に示す。3分力天秤実験と大振幅回転加振実験には共通の模型を用い、測定対象の条件を合せた。

試験体の外観を図1に、導体部に取付けられた模擬着氷雪の寸法を図2に示す。図2の寸法は、ギャロッピング発生時に多くみられる自然着氷雪の形状³⁾を幾何学的に定量化したものであり、4、単導体間で相似の関係にある。また、試験体の材質は、端板がベニヤ板（治具および導体の取付部をアルミプレートで補強）、導体部がアルミパイプ、着氷雪が樹脂である。

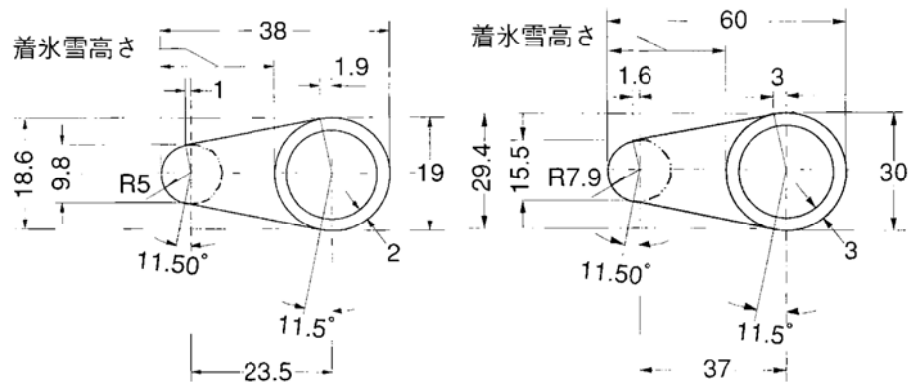
風洞としては、定常空気力係数を求める3分力天秤実験には東京大学の強風シミュレーション風洞を、非定常空気力係数を求める大振



(a)4 導体部分模型

(b)単導体部分模型

図 1 試験体外観図



(a)4 導体用：4-1.00D（4本用いる）

(b)単導体用：1-1.00D

図 2 模擬着氷雪断面寸法（単位：mm）

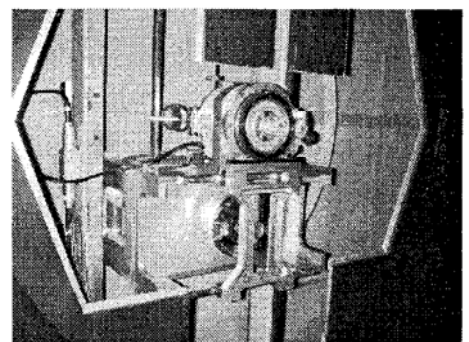


図 3 大振幅非定常空気力測定装置

幅回転加振実験には三井造船昭島研究所の構造物用低速風洞をそれぞれ用いた。試験体は、3分力天秤あるいは大振幅非定常空気力計測装置により、風洞外側から端板中心を支持され、測定部内に設置された。特に、大振幅非定常空気力計測装置は、図3に示すような外観で、支持点である端板中心を回転中心として、試験体を導体軸方向回りに回転加振すると同時に、空気抵抗力を測定する装置である。なお、この加振方向は、木村ら⁴⁾の風洞実験で、回転方向振動が非定常空気特性に大きく影響したことを考慮して定めたものである。

2.2 測定条件

3分力天秤実験では、試験体の迎え角を $-20 \sim 180$ 度まで2度($-20 \sim 20$ 度間)あるいは4度($20 \sim 180$ 度間)刻みで変化させ、その都度、抗力 F_D 、揚力 F_L および空力モーメント F_M を計測した。大振幅回転加振実験では、迎え角0を初期状態として、振動数0.3Hz、振幅 $\pm 5, 10, 20, 30, 40$ および55度で試験体を加振し、 F_D, F_L および F_M の時刻歴を計測した。迎え角の定義を図4に示す。いずれの実験においても、風速は10m/sに設定し、次式によって抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L および空力モーメント係数 C_M を測定した。

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho AU^2}, \quad C_L = \frac{2F_L}{\rho AU^2}, \quad C_M = \frac{2F_M}{\rho AB U^2} \quad \cdots (1)$$

ここに、 ρ : 空気密度、 A : 投影面積(表1参照)、 B : 代表径、 U : 風速である。上式は、空気力の計測結果を定常的に表された速度圧で除したものとなっているが、本検討では、3分力天秤実験によって得られる空気力と空気力係数をそれぞれ定常空気力、定常空気力係数、大振幅回転加振実験によって得られるそれらを非定常空気力、非定常空気力係数と称することとする。なお、10m/sはギャロッピングが発生し易い風速、0.3Hzは一般的な送電線の主要な固有振動数帯域を想定した値である³⁾。また、レイノルズ数は、代表長さを導体外径(19mmあるいは30mm)、動粘性係数を $15.4 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (25℃)とすれば 1.23×10^4 あるいは 1.95×10^4 となるが、既往の実験結果³⁾から、 $1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^5$ の範囲ではレイノルズ数効果がないと判断した。

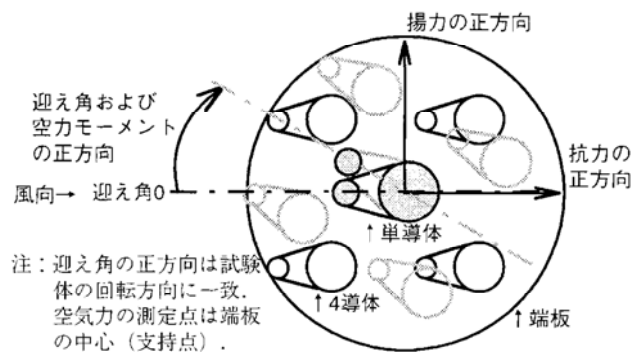
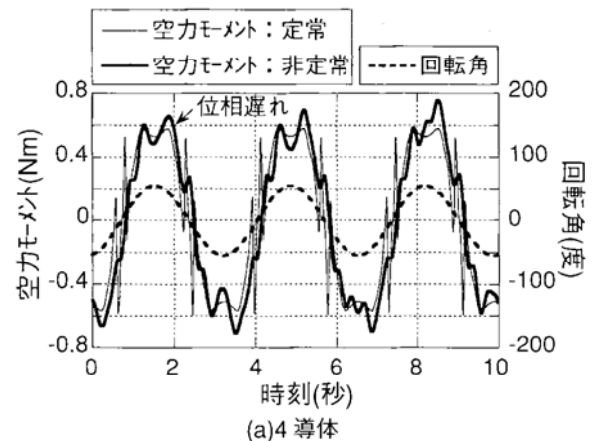
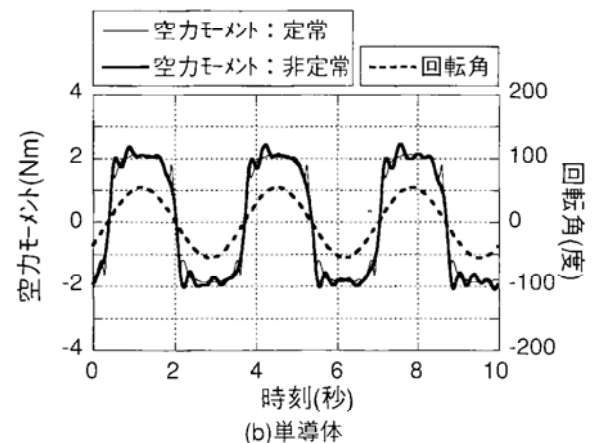


図4 迎え角と空気力の正方向の定義



(a)4 導体



(b)単導体

図5 非定常空力モーメント時刻歴（加振振幅 ± 55 度）

3. 実験結果と考察

実験の結果、定常と非定常および4導体と単導体との間の空力特性の差は、空力モーメント、揚力係数および空力モーメント係数に顕著にみられた。したがって以下では、これらの実験結果を示し、考察する。

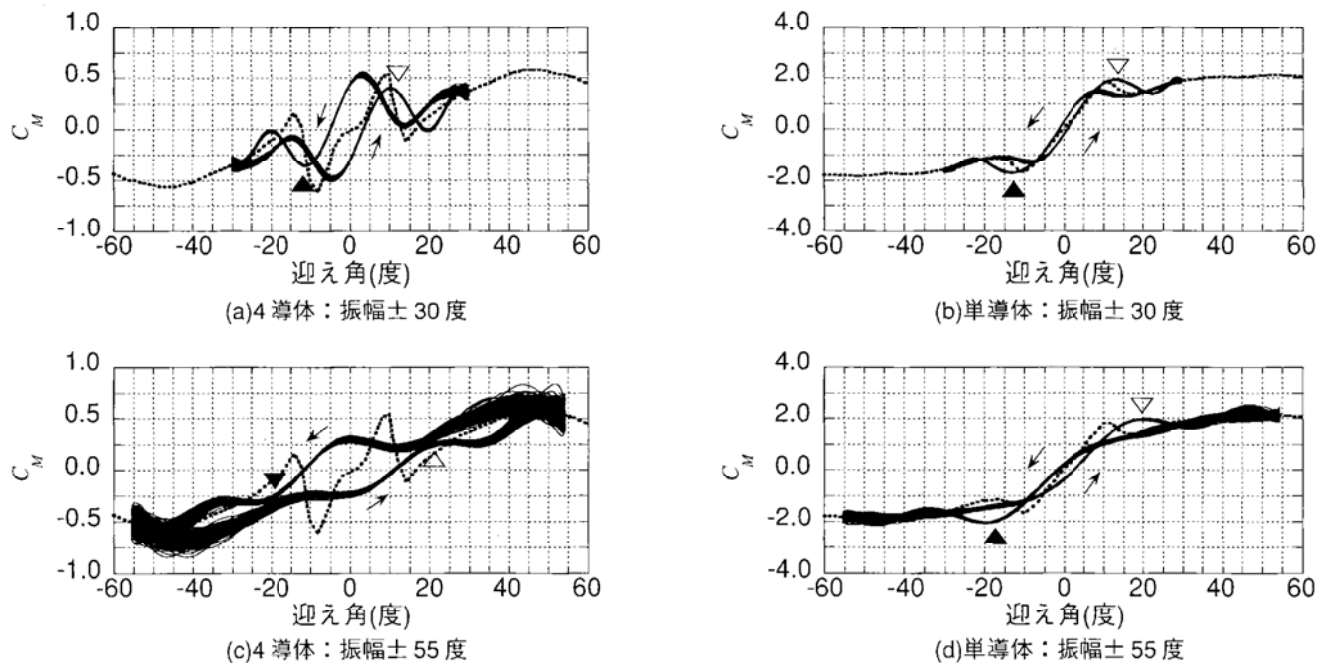
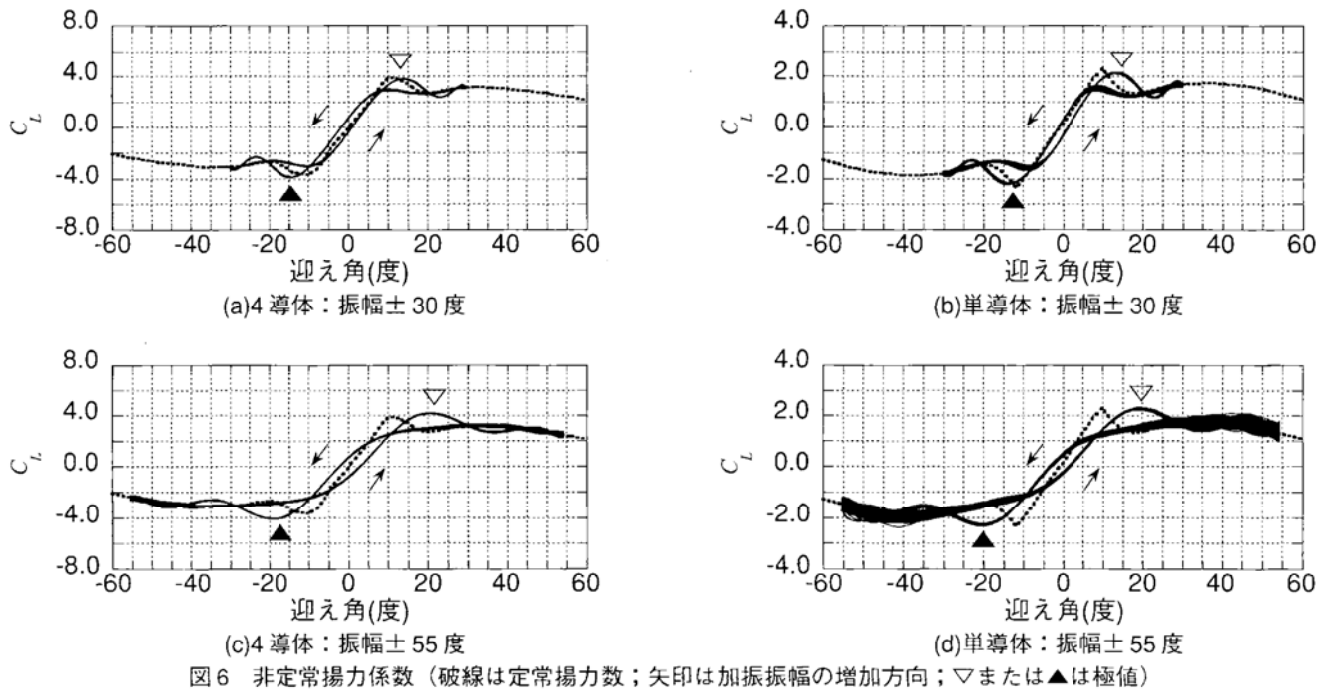
3.1 揚力と空力モーメント

図5に、大振幅回転加振実験の加振振幅 ± 55 度の場合について、非定常空力モーメントおよび試験体の回転角を時刻歴で示す。図には、3分力天秤実験時に計測された定常空力モーメントと試験体の回転角との関係を併

せて示した。図より、単導体の空力モーメントは、非定常、定常ともに、回転角0の時刻でほぼ0の値を示し、回転角と同位相で変動しているが、4導体の非定常空力モーメントには、定常空力モーメントおよび回転角に対して、位相の遅れがあることがわかる。したがって、空気力の非定常性は、4導体の空力モーメントの回転角に対する位相遅れとして説明でき、単導体にはみられないことから、風上側の導体の後流によるものと考えられる。なお、抗力、揚力および±55度より小さい振幅時の空力モーメントについては、上記位相遅れは顕著にみられない結果となった。

3.2 揚力係数と空力モーメント係数

図6, 7に、非定常揚力係数、非定常空力モーメント係数を、それぞれ定常の値と比較して示す。図では、



定常の値を破線で表し、大振幅回転加振実験において振幅が増加する方向を矢印で示した。また、ここでは定常と非定常との差が顕著に現れ始める振幅 ± 30 度および最大振幅 ± 55 度の結果を検討対象とする。

図6の非定常揚力係数には、4導体、単導体とも定常と異なり、加振方向に依存して、同一の迎え角に対応する値が異なる傾向、すなわち、変化の軌跡がループを描く傾向がみられる。また、加振振幅が ± 30 度から ± 55 度となった場合、振幅増加時に現れる極値（図中、 ∇ または $\triangle$ で表示）に対応する迎え角は増加し、振幅減少時に現れる極値（図中、 $\blacktriangle$ または $\blacktriangledown$ で表示）に対応する迎え角は減少する。さらに、筆者らは既に、表1の投影面積を用いた場合、4導体の定常揚力係数は、単導体のそれの約2倍となること、すなわち、導体1本あたりの値は4、単導体間で互いに等しくなることを確認している⁶⁾が、図より、非定常揚力についても、両導体間に同様の関係があるということが出来る。

図7の非定常空力モーメント係数には、図6と同様、ループを描く傾向がみられるが、特に4導体の場合に顕著であり、定常の値との差も大きい。また、4導体、単導体のいずれについても、上記図6と同様、加振振幅に伴う極値の位置の移動がみられる。ただし、この傾向は4導体で特に顕著であり、加振振幅によって、極値の値およびループ形状自体が大きく変化している。これに対し単導体では、非定常空力モーメント係数と非定常揚力係数がほぼ同じループ形状となっている。

以上のとおり、空気力の非定常性は、揚力係数および空力モーメント係数の軌跡がループを描く傾向として、4導体、単導体のいずれにも現れ、加振振幅によって変化することから、試験体の回転角速度に依存することが明らかになった。また、特に4導体の空力モーメント係数に顕著なことから、単導体にはない、風上側に位置する導体の後流の影響を強く受けるものと考えられる。したがって次節では、空力モーメント係数について、試験体の回転角の換算速度を定義した上で、4導体と単導体との非定常性の相違を示す。

3.3 換算角速度に基づく空力モーメント係数の非定常性の把握

図8に、迎え角および換算角速度と非定常空力モーメント係数との関係を示す。ここでは換算角速度を、木村ら⁴⁾と同様、試験体の回転角速度 $\dot{\theta}$ （迎え角の時間微分）、代表径 B 、および風速 U から $\dot{\theta}B/U$ と定義した。図では、各加振振幅ごとに得られた実験結果を、線形補完して面として示した。この面と、換算角速度0および2.0度の平面との交線を、定常空力モーメント係数と併せて図9に示す。

図9では、4導体、単導体のいずれについても、換算角速度0に比較して2.0度の場合に、定常と非定常との差が大きく、非定常空力モーメント係数の角速度依存性がみられる。換算角速度0の場合、単導体では定常と非定常はほぼ一致しているが、4導体では一致が悪い。この原因については、前述の図5(a)に示した位相遅れ、あるいは風上側に位置する導体の後流の影響が考えられるが、その他、補完の精度の問題も無視できない。したがって今後、0以外の迎え角における実験結果も含め、より精度の高い補完の結果を待つて検

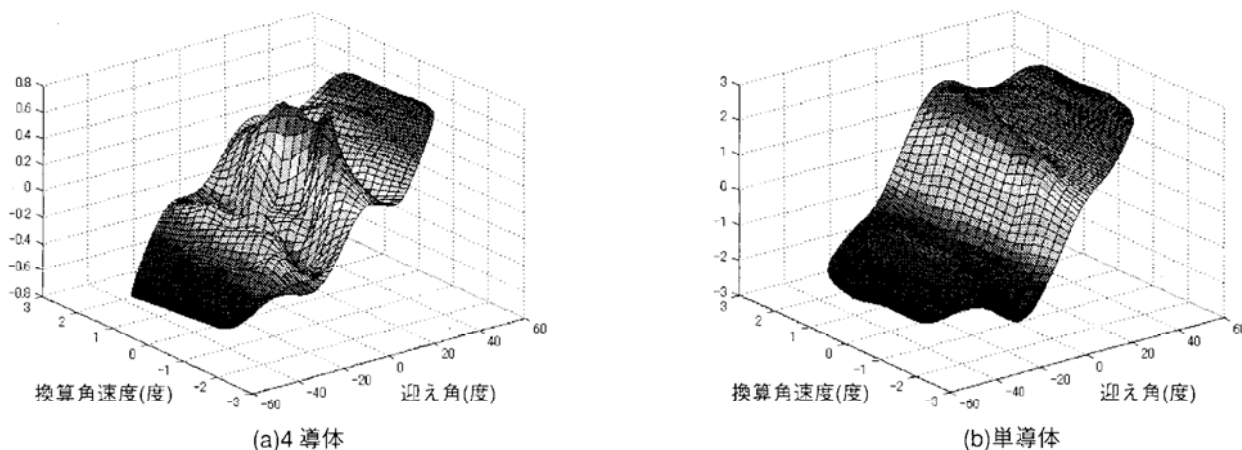


図8 非定常空力モーメント係数の3次元プロット：換算角速度および迎え角との関係

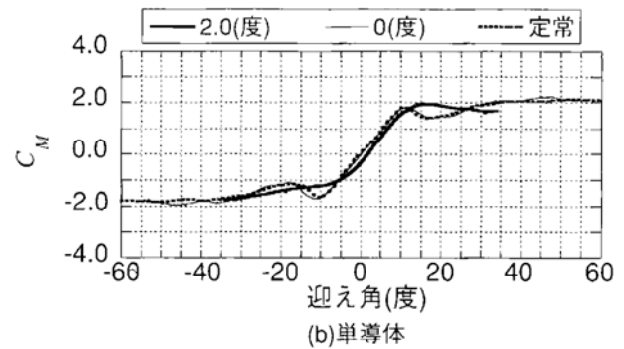
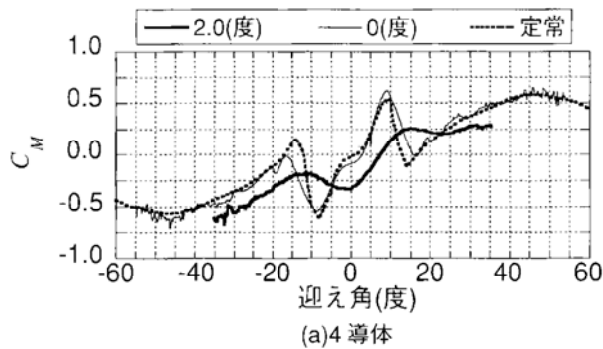


図9 定常・非定常空力モーメント係数と換算角速度との関係

討したい。また、換算角速度2.0度の場合、4導体と単導体の間で非定常の結果が大きく異なり、ここでも4導体における後流の影響をみることができる。

4. まとめ

本検討では、厳密に断面寸法を定義した、同じ着氷雪形状の4導体と単導体の部分模型に対して2通りの風洞実験を実施し、定常と非定常、および4、単導体間で空力特性を比較した。得られた知見を以下に示す。

- ①迎え角（試験体の軸回り回転角）および空気力の変化の時刻歴において、非定常性は4導体の空力モーメントの、迎え角に対する位相遅れとして現れる。これは、単導体にはみられないことから、4導体の風上側に位置する導体の、後流の影響が現れたものといえることができる。
- ②迎え角と空気力係数との関係において、非定常性は揚力係数および空力モーメント係数の軌跡が描くループ形状として現れる。この形状は、回転加振振幅とともに変化し、その度合いは特に、4導体で顕著である。また、非定常揚力係数と非定常空力モーメント係数のループ形状の関係は、単導体では類似したものとなるが、4導体では大きく異なり、上記①と同様、後流の影響がみられる。
- ③定常、非定常ともに、導体1本あたりの揚力係数は、4導体と単導体の間で概ね一致する。
- ④空力モーメント係数にみられる非定常性は、試験体の回転角速度に依存し、4導体の場合にはさらに、後流の影響を受ける。

謝辞：風洞実験の実施にあたり多大なご助力、ご指導を頂きました、九州工業大学工学部建設社会工学科の木村吉郎先生、三井造船（株）鉄鋼・物流事業本部の井上浩男氏、同技術本部CAEセンターの林健一氏に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 清水幹夫、佐藤順一：4導体送電線のギャロッピング観測およびシミュレーション、構造工学論文集，Vol. 47A，pp. 479-488，2001.
- 2) 清水幹夫：日カ魚津線のギャロッピング現象の解明，電力中央研究所依頼報告，U00515，2001.
- 3) 架空送電用電線の機械的特性調査専門委員会：架空送電用電線の機械的特性，電気学会技術報告，第471号，電気学会，1993.
- 4) 木村吉郎，他：大振幅加振時に4導体送電線に作用する非定常空気力の特性，構造工学論文集，Vol. 46A，pp. 1055-1062，2000.
- 5) 大熊武司，他：乱流中での架空送電線のギャロッピング解析 その1. 4導体の風力係数，日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 207-208，1998.
- 6) 清水幹夫，石原孟，ファフックバン：3分力天秤実験に基づく着氷雪多導体および単導体送電線の定常空気力特性に関する検討，構造工学論文集，Vol. 50A，pp. 647-656，2004.