

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

Steady aerodynamic characteristics of single and four-bundled conductors of overhead transmission lines under ice and snow accretion

松宮央登*, 清水幹夫**, 西原崇***

Hisato Matsumiya, Mikio Shimizu, Takashi Nishihara

* 工修, (財) 電力中央研究所, 地球工学研究所流体科学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

** 工博, (財) 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)

*** 工博, (財) 電力中央研究所, 地球工学研究所流体科学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

In this study, the aerodynamic coefficients of the single and four-bundled conductors were obtained with wind tunnel tests for five kinds of ice and snow accreted shapes. These tests were performed in variation with the wind speed. The results have shown that, because of surface roughness of the wire, aerodynamic coefficients of the ice and snow accreted conductors vary with the wind speed in the range where galloping could occur. Furthermore, to obtain the individual aerodynamic coefficients of each subconductor, surface pressure measurement tests on the individual conductor models were performed. It is clarified that the aerodynamic coefficient of the downstream side conductor decreases due to the wake generated by the upstream conductor.

Key Words: galloping, transmission lines, ice and snow accretion, aerodynamic coefficient

キーワード: ギャロッピング, 送電線, 着氷雪, 空気力係数

1. 序論

雪や氷が送電線に付着した場合, その断面形状が変化する. そこに風が作用すると, 大振幅に至る自励振動『ギャロッピング』が生じることがある. 送電線のギャロッピングが大振幅に達すると, 異なる相の電線間に混触が生ずることによる短絡や, 碍子・鉄塔の損傷などの事故につながることから, 現象解明・対策のため, 多くの研究が行われている¹⁾.

従来, 風工学の分野で研究が行われてきた, ギャロッピング現象は, 一般的に流れの剥離を伴う矩形断面などに生じる, 鉛直 1 自由度の自励振動を指し, ギャロッピングの発生の有無は, 準定常理論を用いた Den Hartog の条件式²⁾を用いて推測される. 一方, 送電線におけるギャロッピングは, 鉛直振動にねじれ・水平振動も伴うため, その特性は連成フラッターに近く, 振幅も非常に大きくなる. そのため, 現象の解明・振幅予測・対策法の検討には, Den Hartog の条件による判定だけではなく, 時刻歴に変化する応答を考慮する必要がある. そこで, 送電線の幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析プログラムが開発され, ギャロッピングのシミュレーショ

ンや振動特性の分析などが実施されている^{3), 4)}. これらの解析を行うためには, 構造特性や風特性などに加え, 断面に作用する空気力係数が必要である. 空気力係数は, 着氷雪による断面形状を明らかにした上で, あらかじめ風洞実験や数値計算によって, その断面に作用する力を計測しておく必要がある. 既往の研究において, 観測などで得られた着氷雪形状をそのまま再現した自然着氷雪型形状の空気力係数をはじめ, 形状を簡略化した三日月型, 先丸型, 三角型など様々な着氷雪形状を有する送電線断面の空気力係数が計測されている¹⁾. しかし, 自然着氷雪型などをはじめ, 着氷雪部の詳細形状が明らかでないものも多く, 着氷雪形状の変化による空気力係数の変化について詳細に検討した事例は少ない⁵⁾. 一方で, 任意形状の着氷雪送電線の空気力係数を求めるために, 数値計算による空気力係数の算出も行われている⁶⁾.

また, 複数の電線を束ねた多導体送電線においてもギャロッピングの発生がみられ, 4 導体送電線における事例は特に多い^{1), 7)}. 多導体送電線は, その電力容量の大きさから, 電気の安定供給の上で特に重要な線路であることが多く, 確実なギャロッピング対策が必要である. しかし, 既往の研究において計測されている空気力は,

その多くが単導体のものである。多導体における応答解析でも、各導体に対して単導体の空気力を用いての解析が多く実施されてきたが、本来、風下側の導体は風上側の導体の影響を受けるため、各導体が受ける力は単導体と異なる^{5),8)}。

本研究では、着氷雪時の4導体送電線に作用する空気力の特性について議論するために、着氷雪送電線部分模型を製作し、風洞実験において単導体および4導体送電線の着氷雪時の空気力係数を計測した。更に、4導体模型においては、各導体に圧力測定孔を設けて圧力測定実験を行い、4導体の各導体に作用する空気力を明らかにした。また、着氷雪形状は、その詳細形状の決定が容易である先丸型・三角型とし、着氷雪高さが異なる複数の着氷雪形状を用いることにより、着氷雪形状が変化した際の空気力係数の変化の特性について議論する。また、本研究では迎角を細かく変化させながら空気力を測定しているため、複数の着氷雪形状に対し、詳細な空気力係数データを取得することができた。

2. 実験概要

本実験では、鹿島技術研究所内の汎用境界層風洞（図－1、表－1）を用いて、空気力係数（本研究では、定常空気力係数を指す。）の測定実験を実施した。本章では、測定ケース、模型形状、実験手法について示す。

2.1 測定ケース

本実験における測定ケースを表－2に示す。本実験においては、3分力天秤（ロードセル）を用いて直接模型に作用する力を測定する『天秤測定』実験と、模型に設けた圧力測定孔に加わる圧力から全体に作用する力を計算する『圧力測定』実験の2種類の実験を行った。

また、着氷雪形状として、先端が丸い『先丸』断面と、鋭い『三角』断面を用いた。着氷雪高さ H が異なる3つのケース考慮し、導体直径 D に対し、

『高』： $H=1.0D$

『中』： $H=0.5D$

『低』： $H=0.25D$

と定めた。

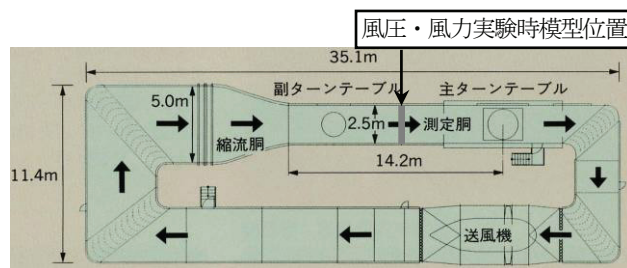
本実験は一樣流中で実施し、風速は、ギャロッピングの発生がよくみられる風速域である¹⁾、10, 20 m/sとした。なお、本実験では、実寸模型を用いての実験を行うため、これらの風速は実風速に対応する。このとき、レイノルズ数 Re の値はそれぞれ、

10 m/s： $Re=2.0 \times 10^4$

20 m/s： $Re=3.9 \times 10^4$

である。なお、 Re は導体直径 D を用いて、次式のように表される。

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{U D}{\nu} \quad (1)$$



図－1 汎用境界層風洞の概略図

表－1 汎用境界層風洞の概要

形 式	水平密閉式単帰回流型
全 長	周長：77.4 m，長軸：31.4 m，短軸：7.3 m
測 定 胴	幅：2.5 m，高さ：2.0 m，長さ：18.1 m ※2 次元実験時（側壁使用時）幅：1.83 m
縮 流 比	4.0

表－2 測定ケース

名称	導体	形状	高さ	風速	天秤	圧力
TH1	単	三角	高	10 m/s	○	—
TM1			中	10 m/s	○	—
				20 m/s	○	—
TL1		低	10 m/s	○	—	
CH1		先丸	高	10 m/s	○	○※1
CM1			中	10 m/s	○	—
TH4	4	三角	高	10 m/s	○	○
TM4			中	10 m/s	○	○
				20 m/s	○※2	○
TL4		低	10 m/s	—	○	
CH4		先丸	高	10 m/s	○	○
CM4			中	10 m/s	○	○

※1：4導体のうち3つの導体を取り外して測定

※2：模型の振動が広範囲で生じたためデータ欠落

ただし、 ρ は空気力密度 [Kg/m^3]、 U は風速 [m/s]、 μ は粘性係数 [Ns/m^2]、 ν は動粘性係数（15℃、標準気圧で $1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ）である。

2.2 模型形状

本実験においては、天秤測定と圧力測定の2種類の計測を行うため、それぞれに対して模型を製作した。模型は、公称断面積 410 mm^2 の鋼心アルミ撚り線（ACSR410送電線）を実寸サイズで模擬し、電線部分は素線を考慮した凹凸のある断面を用いている。ただし、本実験で実施する圧力測定実験では、スパン中央に設けた圧力測定孔を用いて、空気力算出を行うために、2次元性を確保する必要がある。そのため、本実験で用いる2種類の模型ではともに、実際の電線にみられるような素線の撚りは設けておらず、得られる空気力係数は、厳密には撚りがある送電線に着氷雪した場合の空気力係数とは異なる可能性がある点に注意が必要である。

実験で用いた模型の寸法を図－2に示す。4導体模型では、一般的なACSR410送電線の4導体の導体間隔を模擬し、導体中心間隔 $B=0.40 \text{ m}$ で設置している。また、

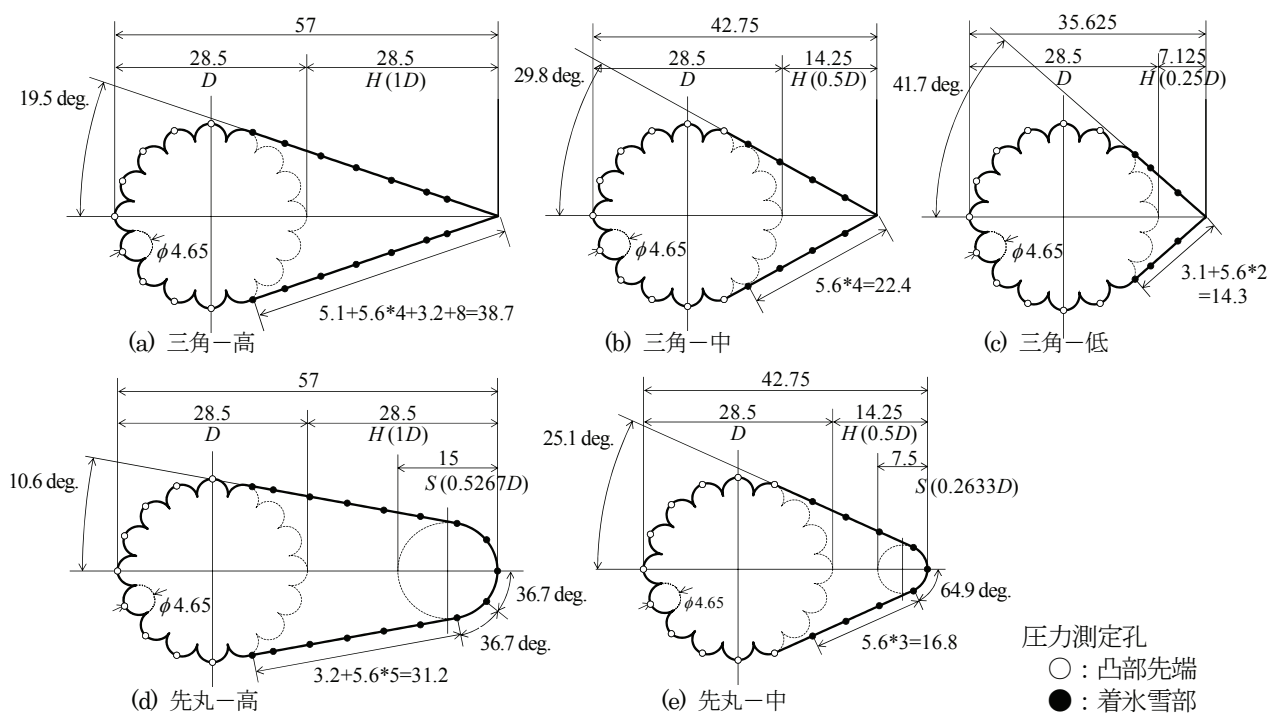
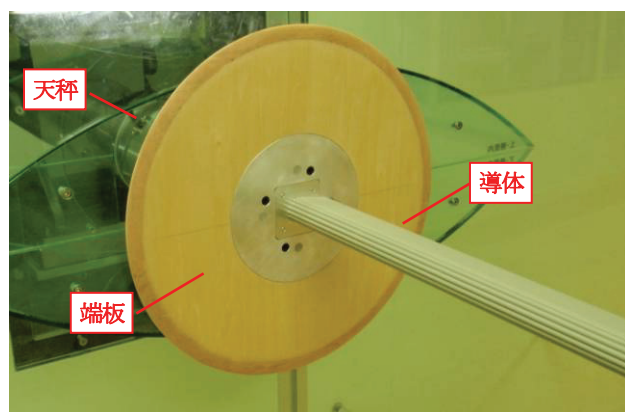
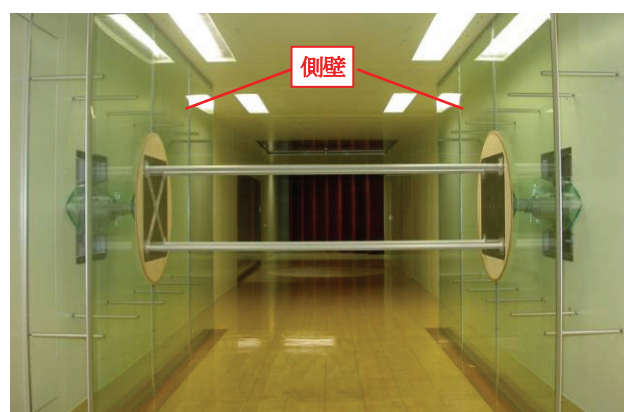


図-2 導体模型断面寸法および圧力測定孔位置 (単位 : mm)



(a) 単導体, 先丸-高, 天秤測定用



(b) 4 導体, 先丸-中, 圧力測定用

図-3 模型の風洞内設置状況写真

スパン長 l は, それぞれ

天秤測定実験用 : $l = 1.800 \text{ m}$

圧力測定実験用 : $l = 1.792 \text{ m}$

である。

圧力測定用模型のスパン中央には, 圧力測定孔を設けた。図-2 にそれぞれの模型における圧力測定孔の位置を併記した。また, 模型に作用する気流の二次元性を確保するため, 模型両端には端板を取り付け, 風洞内には, 模型に作用する気流の二次元性を確保するため側壁を設けた。模型の風洞内設置状況を図-3 に示す。

なお, 実験中, 模型に空気力が作用することによりたわみが生じることが予想されるが, あらかじめ風速 20 m/s における模型中央部でのたわみが 3 mm 以下となることを確認しており, 計測には影響がないと考えられる。

2.3 天秤測定実験

着氷雪形状を設けた送電線部分模型に作用する全体力を, 3 分力天秤で測定した。迎角及び空気力の定義を図-4 に示す。迎角は, 流れ方向と着氷雪部先端の角度で定義し, 頭上げ方向を正とした。また, 空気力は風軸で定義し, 抗力は流れ方向を正に, 揚力は流れ直角上向きを正に, モーメントは頭上げ方向を正とした。

迎角の設定は, 自動迎角制御システムを用いて行い, $0 \sim 40, 140 \sim 180 \text{ deg}$ の範囲では 2 deg 間隔, $40 \sim 140 \text{ deg}$ の範囲では 4 deg 間隔で計測を行った。また, 本実験では, 各ケースにおいて, 定められた風速に固定したまま, 迎角を段階的に変化させて, 空気力を測定した。本実験で対象とするような曲面を有する断面の場合, 周辺流れ場の変化が, その前の状況に影響し, 『迎角を段階的に増加させた場合』と『迎角を段階的に減少させた場合』

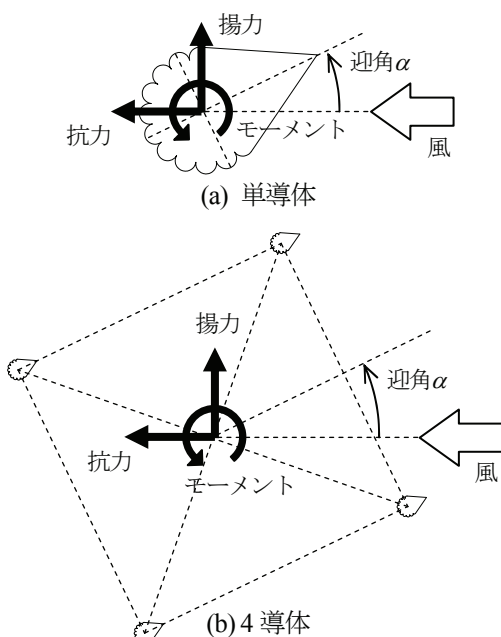
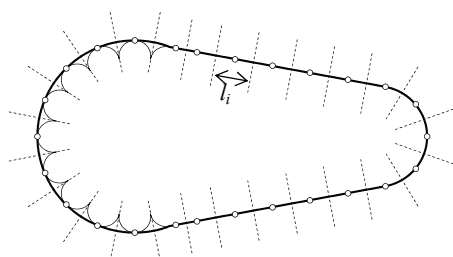


図-4 迎角および空気力の定義



○ : 圧力測定孔, — : 圧力測定孔の負担範囲
 -----: 隣接する圧力測定孔との負担範囲の境界

図-5 圧力積分時の l_i の定義

とで、その迎角における空気力が異なるような、迎角履歴への依存特性がみられることがあるが⁹⁾、『先丸一高4導体』の模型を用いて、風速 10 m/s において、圧力測定実験を実施し、両者に違いがないことを確認した。そのため、本実験では、迎角を段階的に『増加』させながら連続して計測を行った。なお、サンプリング周波数は 1000 Hz とし、各迎角では 32768 個 (32.768 秒) のデータを平均化した。

ここで、空気力係数の定義式を以下に示す。

$$C_D = \frac{D_F}{\frac{1}{2}\rho U^2 X l}, C_L = \frac{L_F}{\frac{1}{2}\rho U^2 X l}, C_M = \frac{M_F}{\frac{1}{2}\rho U^2 X Y l} \quad (2)$$

ただし、 C_D は抗力係数、 C_L は揚力係数、 C_M はモーメント係数、 D_F は抗力の平均値 [N]、 L_F は揚力の平均値 [N]、 M_F はモーメントの平均値 [Nm]、 X は見付幅 [m]、 Y は代表径 [m]、 l は模型スパン長 [m]である。

ここで、見付幅 X および代表径 Y は、以下のように定義する。

単導体 : $X=D=0.0285$ m, $Y=D=0.0285$ m

4 導体 : $X=2D=0.0570$ m, $Y=B=0.400$ m

2.4 圧力測定実験

模型のスパン方向中央部には、模型表面に作用する圧力を圧力センサーまで導くための内径 1.0 mm の圧力測定孔を設けている。模型表面に設けた各測定孔に作用する風圧は、測定孔からビニールチューブによって多点風圧測定システムに導き計測した。本実験における迎角の設定およびサンプリング周波数・個数は天秤測定実験と同様である。

模型表面の測定点 i における圧力係数 C_{pi} は、表面に作用する圧力 P_i を、模型に作用する基準速度圧 q で除したものであり、以下のように定義される。

$$C_{pi} = \frac{P_{di} - P_s}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{P_i}{q} \quad (3)$$

ただし、 P_{di} は測定点 i に加わる全圧、 P_s は風洞内静圧である。

また、圧力測定実験における空気力係数は以下のように導く。

$$C_D = \frac{\sum_i \bar{C}_{pi} l_i \cos \phi_i}{X}, C_L = \frac{-\sum_i \bar{C}_{pi} l_i \sin \phi_i}{X}, \quad (4)$$

$$C_M = \frac{-\sum_i \bar{C}_{pi} l_i r_i}{XY}$$

ただし、 $\bar{C}_{pi}$ は圧力係数の平均値、 l_i は圧力測定孔 i の負担幅 [m]、 r_i は圧力測定孔 i のモーメント長 [m]、 ϕ_i は圧力測定孔 i の圧力作用線と水平軸のなす角である。なお、単導体および4導体における、見付幅 X および代表径 Y の定義は、天秤測定実験と同様である。

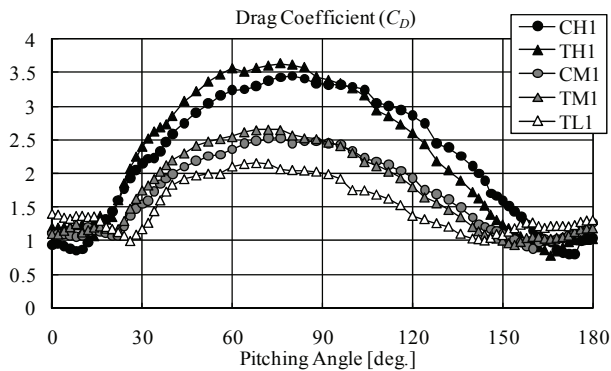
ここで、 l_i の定義については、図-5 に示すとおり、導線を模擬した凹凸部の圧力測定孔の負担幅 l_i は、導体全体を包絡する外接円の円弧の長さとして定義した。

3. 実験結果

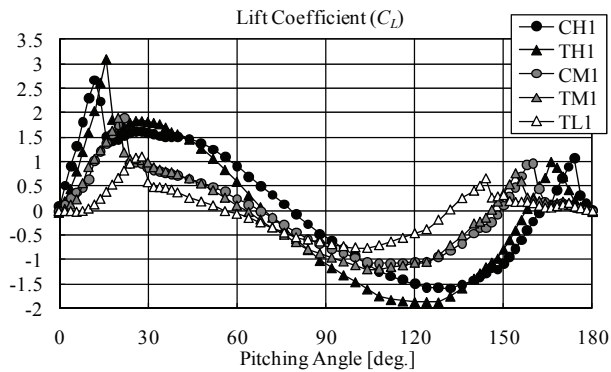
本章では、実験結果について考察を行う。3.1 節では、天秤測定実験で得られた単導体の空気力係数の特性を示し、3.2 節では、天秤測定実験および圧力測定実験で得られた4導体の空気力係数の特性を示す。3.3 節では両実験結果を用いて、風速依存性の検討を行う。

3.1 単導体の空気力係数

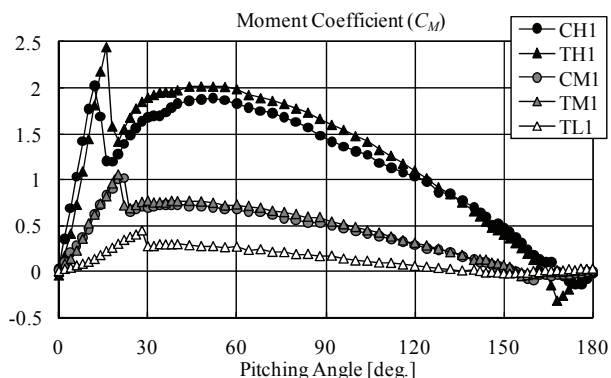
図-6 に、風速 10 m/s で測定された単導体の天秤測定実験結果を示す。図-6 (a) に示される抗力係数に着目すると、ある角度を越えたあたりから、迎角が増加するに従い、抗力係数は大きくなる。これは、迎角の変化により、受風面積が大きくなることや、模型からの流れのはく離が大きくなることが原因であると考えられる。表-3 に、抗力係数の最大値およびそのときの迎角を示す。着氷雪高さが高いものの方が、抗力係数の最大値は大き



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数

CH1：先丸高—単導体，TH1：三角高—単導体
CM1：先丸中—単導体，TM1：三角中—単導体
，TL1：三角低—単導体

図－6 単導体の空気力係数の比較（天秤測定実験，単導体，風速 10 m/s）

く，その時の迎角は 68～80 deg. 付近である。

図－6 (b) に示される単導体の揚力係数に着目すると，揚力係数は 0 deg. からある迎角までは概ね線形に増加し，その迎角を越えると急激に減少する．この角度は失速角であり，ここで模型上面において，前縁ではなく離れた流れは，再付着せずに完全にはく離していると考えられる．単導体における失速角を表－4 に示す．表－4 には，図－2 に示される着氷雪角度を併記した．表－4 に示されるように，着氷雪高さが高く，着氷雪の角度が小さいものの方が失速角は小さく，その時の揚力係数は大きいこ

表－3 抗力係数の最大値およびその迎角
(天秤測定実験，単導体，風速 10 m/s)

名称	着氷雪高	最大時迎角	C_D
TH1 (三角高)	1D	76 deg.	3.64
TM1 (三角中)	0.5D	72 deg.	2.66
TL1 (三角低)	0.25D	68 deg.	2.15
CH1 (先丸高)	1D	80 deg.	3.45
CM1 (先丸中)	0.5D	72 deg.	2.53

表－4 失速角およびその揚力係数

(天秤測定実験，単導体，風速 10 m/s)

名称	着氷雪角	失速角	C_L
TH1 (三角高)	19.5 deg.	16 deg.	3.10
TM1 (三角中)	29.8 deg.	20 deg.	1.89
TL1 (三角低)	41.7 deg.	28 deg.	1.11
CH1 (先丸高)	10.6 deg.	12 deg.	2.66
CM1 (先丸中)	25.1 deg.	22 deg.	1.88

とが分かる．なお，失速角は抗力係数が大きくなり始める迎角にも対応している．また，揚力係数は，150 deg. 付近においてもピーク値を持ち，この角度は着氷雪高さが高いものの方が大きい．

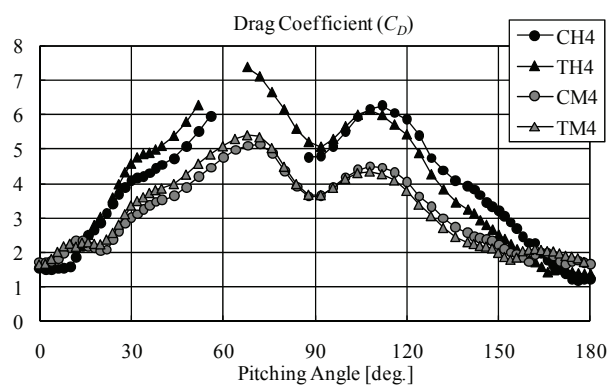
図－6 (c) に示されるモーメント係数は，失速角で最大値を示し，その後急激に減少する．その最大値は着氷雪高さが高いものの方が大きな値を示す．

また，図－6 に示されるように，着氷雪形状が異なると，空気力係数は大きく変わる．中でも着氷雪部先端形状より，着氷雪高さが空気力特性に大きく寄与する．これは，着氷雪高さが高いものの方が，迎角が変化した時に，受風面積の変化が大きいことが原因の一つであると考えられる．

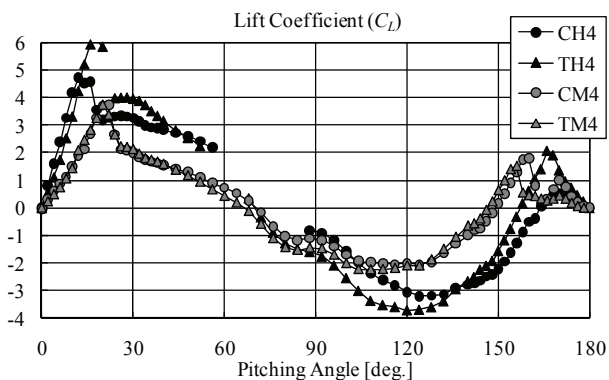
3.2 4 導体の空気力係数

図－7, 8 に，風速 10 m/s で測定された 4 導体の天秤測定実験結果，圧力測定実験結果をそれぞれ示す．4 導体の天秤測定実験では，一部の迎角範囲で，目視にて模型の振動が確認された．その範囲においては，データが欠落している．これは，模型スパン長が 1800 mm と長いこと，および，天秤測定実験では，模型を軽く作った為に，剛性が小さくなったことが原因であると考えられる．

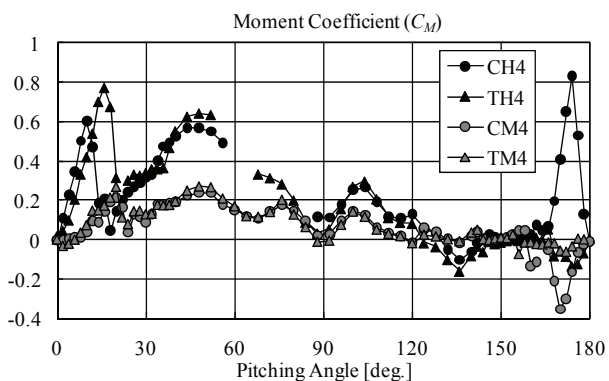
また，『三角—中—4 導体』における天秤測定実験結果と圧力測定実験結果の比較を図－9 に示す．図－9 に示されるように，全体的に両実験結果はよく一致しているが，抗力係数においては迎角が大きくなるにつれて，わずかに差がみられる．この傾向は他の着氷雪形状の結果でも同様にみられる．ここで，迎角の増加に伴い，素線を模擬した凹凸部分が風上側に位置する．つまり，凹凸部に大きな空気力が作用するときに，抗力係数の差は大きくなっている．そのため，この差は凹凸部の圧力評価方法によるものであると考えられ，本実験では，凸部の先端にのみ圧力孔を設けているため，凸部の斜面での圧力が上手く代表できていないことが原因と考えられる．したがって，今後厳密に圧力測定を実施するためには，



(a) 抗力係数



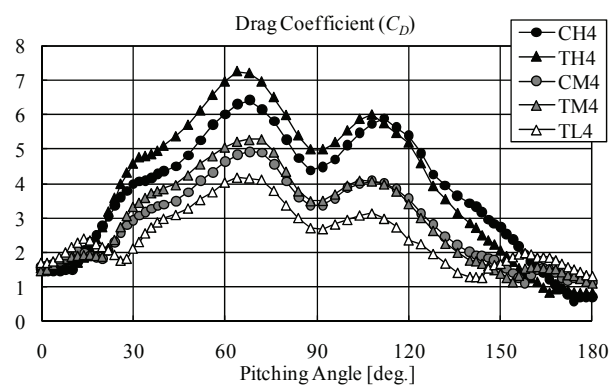
(b) 揚力係数



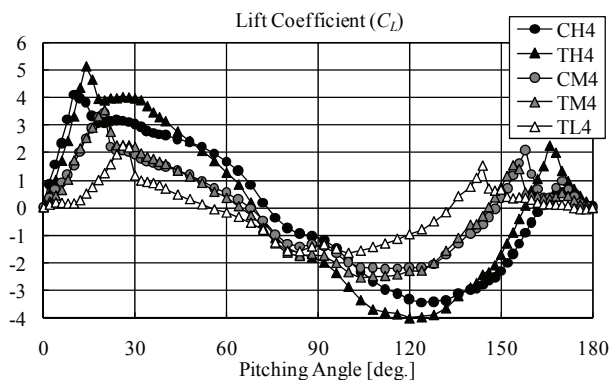
(c) モーメント係数

CH4 : 先丸高-4 導体, TH4 : 三角高-4 導体
CM4 : 先丸中-4 導体, TM4 : 三角中-4 導体

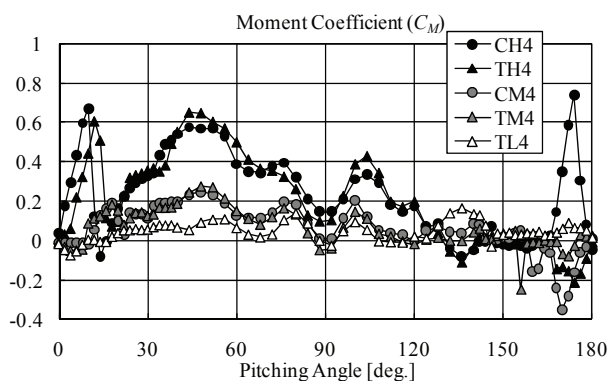
図-7 4 導体の空気力係数の比較 (天秤測定
実験, 4 導体, 風速 10 m/s)



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数

CH4 : 先丸高-4 導体, TH4 : 三角高-4 導体
CM4 : 先丸中-4 導体, TM4 : 三角中-4 導体
TL4 : 三角低-4 導体

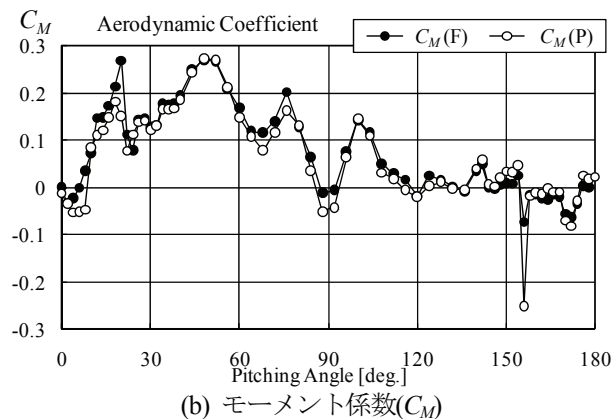
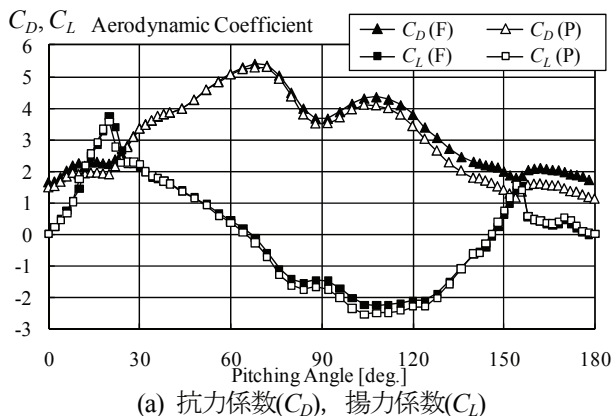
図-8 4 導体の空気力係数の比較 (圧力測定
実験, 4 導体, 風速 10 m/s)

圧力測定法に関する検討が必要である。

以上のように、圧力測定実験結果は基本的な特性は捉えられているものの、厳密には天秤測定実験の結果と差が見られることに注意が必要である。

表-5, 6 にそれぞれの実験結果で得られた 4 導体の空気力係数の失速角の値を示す。表-5, 6 と表-3 を比較すると、単導体・4 導体における失速角の値は概ね一致していることが分かる。また、4 導体の揚力係数の増減傾向は、単導体のものと類似している。一方、4 導体の抗

力係数は単導体のものとは異なる特性を示し、90 deg.付近で小さくなる特性を示している。また、4 導体のモーメント係数においては、単導体では比較的単調に増減しているのに対し、4 導体では全く異なった増減傾向を示している。これらの単導体と 4 導体の空気力係数の違いは、風下側の導体が風上側の影響を受けることが原因であると考えられ、詳細については、4 章にて検討を行う。



(F) : 天秤測定, (P) : 圧力測定

図-9 測定方法の比較 (4 導体, 三角一中, 風速 10 m/s)

3.3 空気力の風速依存性の検討

図-10 に、『三角一中-単導体』の風速 10, 20 m/s における天秤測定実験結果の比較, 図-11 に、『三角一中-4 導体』の風速 10, 20 m/s における圧力測定実験結果の比較を, それぞれ示す. なお, 4 導体においては, 圧力測定実験結果を比較に用いており, 前述のように, 天秤測定実験結果と差異が見られる可能性があるが, その傾向は大きく変わらないと考えられる.

ここで, 表-7 にそれぞれの実験における抗力の最大値を示す. 抗力の最大値で比較すると, 風速 20 m/s の結果では, 10 m/s の結果に比べ, 単導体で 10 % 程度, 4 導体において, 16 % 程度低減している. 一般的に, 円柱断面において, レイノルズ数が大きくなり, 亜臨界域から超臨界域に遷移し, 流れのパターンが変化すると, はく離せん断層が断面に近づくため, 抗力係数は低下する¹⁰⁾. 本実験においても, 風速 20 m/s のケースでは断面前縁からはく離した, はく離せん断層が, 断面に近づくことによって, 全体的に抗力が低減していると考えられる.

表-8 にそれぞれの実験結果における失速角およびそのときの揚力係数の値を示す. 揚力係数においては, 単導体・4 導体ともに, 全体的には風速 10 m/s の値が大きく, また, 迎角が 150 deg. 以上の範囲で増減傾向や値が大きく変わっていることがわかる. この範囲の揚力係数

表-5 失速角およびその揚力係数

(天秤測定実験, 4 導体, 風速 10 [m/s])

名称	着氷雪角	失速角	C_L
TH4 (三角高)	19.5 deg.	18 deg.	6.09
TM4 (三角中)	29.8 deg.	20 deg.	3.75
CH4 (先丸高)	10.6 deg.	12 deg.	4.71
CM4 (先丸中)	25.1 deg.	22 deg.	3.73

表-6 失速角およびその揚力係数

(圧力測定実験, 4 導体, 風速 10 m/s)

名称	着氷雪角	失速角	C_L
TH4 (三角高)	19.5 deg.	14 deg.	5.14
TM4 (三角中)	29.8 deg.	20 deg.	3.56
TL4 (三角低)	41.7 deg.	26 deg.	2.24
CH4 (先丸高)	10.6 deg.	10 deg.	4.10
CM4 (先丸中)	25.1 deg.	20 deg.	3.42

表-7 抗力係数の最大値 (三角一中)

導体	実験	風速	迎角	C_D
単	天秤	10 m/s	72 deg.	2.66
単	天秤	20 m/s	76 deg.	2.37
4	圧力	10 m/s	72 deg.	5.29
4	圧力	20 m/s	72 deg.	4.46

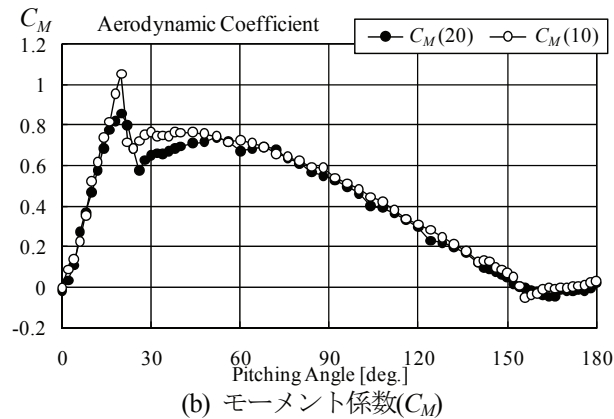
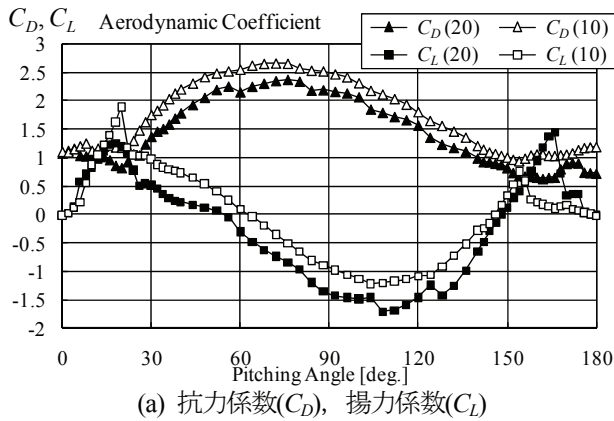
表-8 失速角およびその揚力係数 (三角一中)

導体	実験	風速	失速角	C_L
単	天秤	10 m/s	20 deg.	1.89
単	天秤	20 m/s	18 deg.	1.26
4	圧力	10 m/s	20 deg.	3.56
4	圧力	20 m/s	20 deg.	3.22

が急激に減少する領域では, 導体部が風上側にある. 迎角が増加することにより, 断面上面において, 前縁で剥離した流れが着氷雪部に再付着している状態から, 流れが再付着しなくなり, 完全にはく離することにより揚力係数が急激に減少すると考えられる. ここで, 風速 20 m/s の場合の方が, 風速 10 m/s の場合に比べて, はく離せん断層が断面に近づいたため, 大きい迎角まで模型上面での流れの完全なはく離が生じなかったと考えられる.

また, 風速 10 m/s と 20 m/s のモーメント係数を比較すると, 単導体では比較的似た特性を示しているが, 4 導体においては, 大きく差異がみられる.

以上のように, 単導体・4 導体ともに, 風速 10 m/s と 20 m/s の結果には, 差異がみられる. このことから, 本実験で比較した風速域にて, 空気力係数の風速依存性 (レイノルズ数依存性) があるといえる. 既往の研究¹⁾では, 送電線のギャロッピングが対象となるような風速域において, 着氷雪送電線の空気力係数には, あまり風速依存性がみられないとの報告があるが, これらは, 導体部を円柱形状で模擬した実験結果に基づいている. 本実験では, 導体部に素線を模擬した凹凸を設けているため, 表面粗度が上がる効果がある. そのため, 導体部が円柱形状の場合にはより高いレイノルズ数域で生じる遷移現象が, 比較的低い $Re=2.0\sim3.9\times10^4$ の範囲で生じたと考えられる. なお, 円柱断面が $Re=5.0\times10^5$ 付近で



(10) : 風速 10 m/s, (20) : 風速 20 m/s

図-10 風速による空気力係数の比較 (天秤測定実験, 単導体, 三角一中)

抗力係数が減少するのに対して, 一般的な送電線では, 素線による表面粗度の影響により, 1 桁小さいレイノルズ数域において, 抗力係数が減少することも報告されている¹¹⁾.

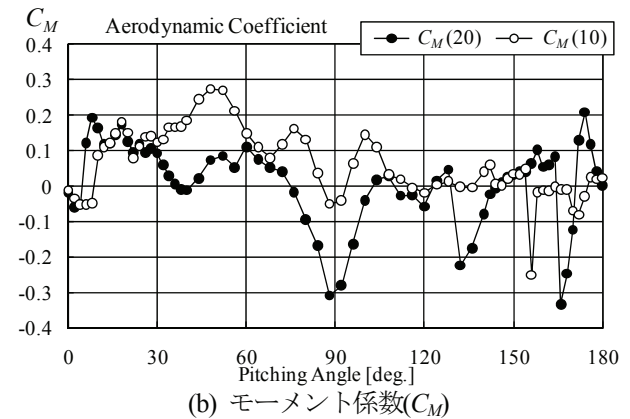
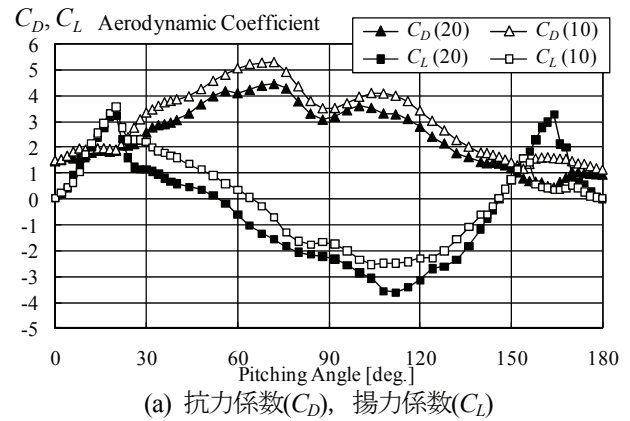
ここで, 本実験で用いた模型では, 素線の凹凸は模擬しているものの, 撚りを考慮しておらず, その特性に違いがある可能性もあるが, 素線の撚りを考慮した着氷雪送電線断面の空気力測定実験において, 風速依存性が確認された例もある¹²⁾. 以上のことから, 実際の送電線に着氷雪が生じた場合では, ギャロッピングが生じる風速域において, 空気力係数が変化する可能性があり, 風速依存性について詳細に検討する必要がある.

4. 導体ごとの空気力係数の把握

本章では, 圧力測定実験結果を用いて, それぞれの導体の空気力係数を示し, 4 導体に作用する空気力の特性を把握する.

4.1 各導体に作用する空気力

図-12~17 に, 圧力測定実験で得られた導体ごとの空気力係数を示す. それぞれの導体に加わる空気力係数は,



(10) : 風速 10 m/s, (20) : 風速 20 m/s

図-11 風速による空気力係数の比較 (圧力測定実験, 4 導体, 三角一中)

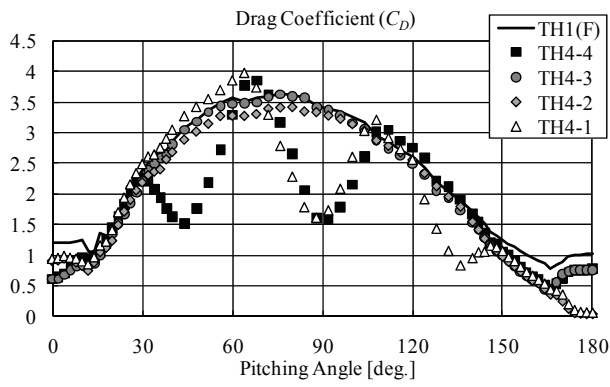
図-4 (a)に示される, 単導体における定義を用いて係数にしている. また, 図-12~17 には, 単導体の天秤測定実験で得られた結果 (図中: F) も併記したが, 前述の通り, 迎角が大きくなった範囲では圧力測定実験結果と差異が認められることに注意が必要である.

図-12~17 に示されるように, 4 本の導体それぞれに着目すると, すべての着氷雪形状において, 他の導体に比べて, 空気力の絶対値が低減している導体がある. これらの導体およびその迎角を表-9 に示す. また, その迎角においては, これらの導体が, 流れに対して他の導体の後ろ側に位置する. この風上側に位置する導体についても, 表-9 に併記した. このように, 他の導体が風上側に位置することによって, 風下側の導体の空気力が低減している.

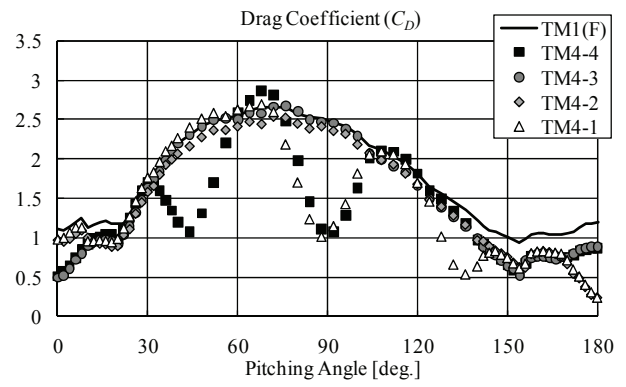
ここで, それぞれの導体の空気力係数と, 4 導体全体の空気力係数との関係は, 導体直径 D と, 導体間隔 B を用いて, 以下のように表される.

$$C_{Da} = \frac{1}{2} (C_{D1} + C_{D2} + C_{D3} + C_{D4}) \quad (5)$$

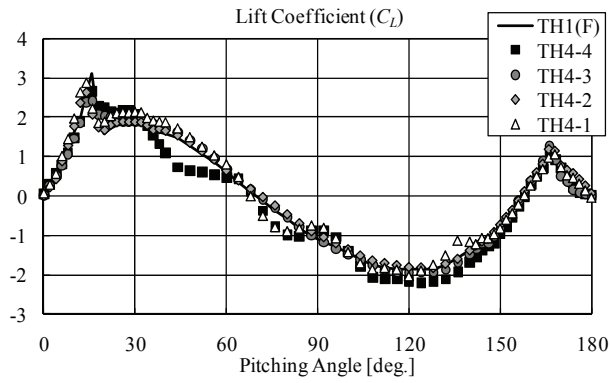
$$C_{La} = \frac{1}{2} (C_{L1} + C_{L2} + C_{L3} + C_{L4}) \quad (6)$$



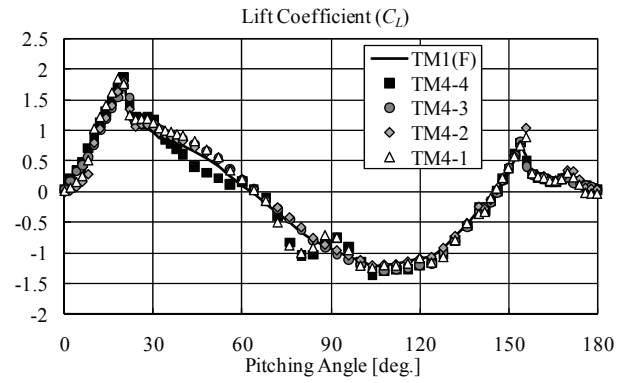
(a) 抗力係数



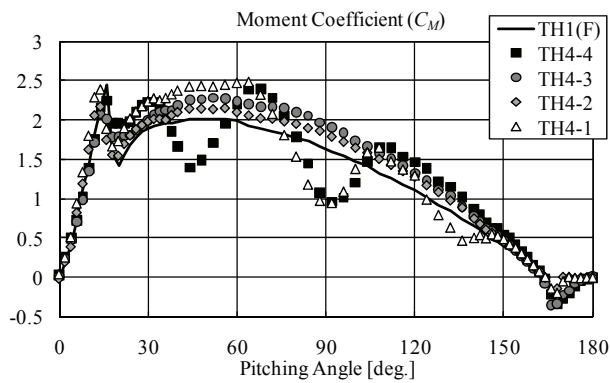
(a) 抗力係数



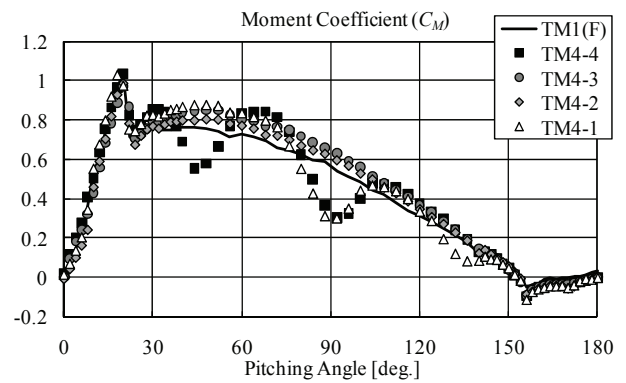
(b) 揚力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数



(c) モーメント係数

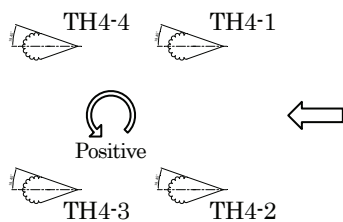


図-12 4 導体各導体の比較 (圧力測定実験, 三角-高, 風速 10 m/s)

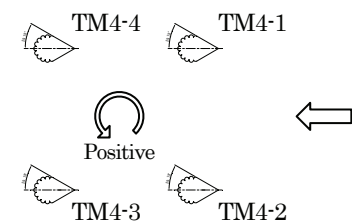
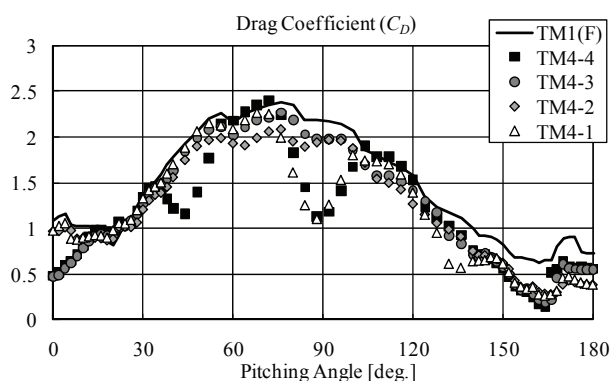


図-13 4 導体各導体の比較 (圧力測定実験, 三角-中, 風速 10 m/s)

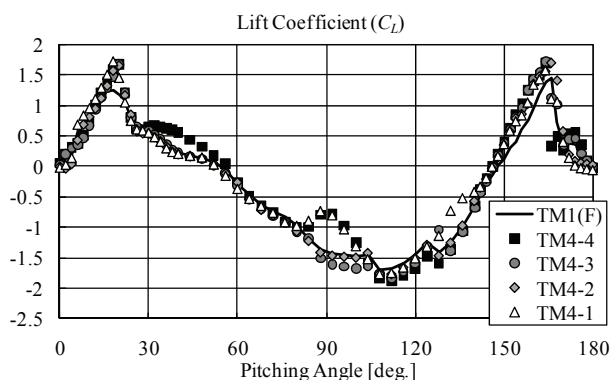
$$C_{Ma} = \frac{D}{2B} (C_{M1} + C_{M2} + C_{M3} + C_{M4}) + \frac{1}{2\sqrt{2}} (C_{D1} - C_{D3}) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) - \frac{1}{2\sqrt{2}} (C_{D2} - C_{D4}) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) \quad (7)$$

$$+ \frac{1}{2\sqrt{2}} (C_{L1} - C_{L3}) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right) + \frac{1}{2\sqrt{2}} (C_{L2} - C_{L4}) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \alpha\right)$$

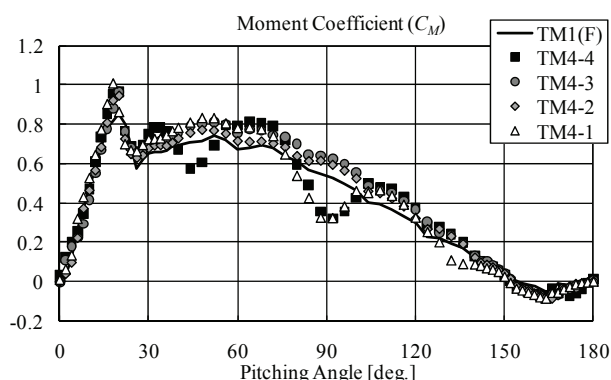
ただし、添え字 a は4 導体の全体の空気力係数、添え字 1~4 はそれぞれの導体の空気力係数、 α は迎角である。



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数

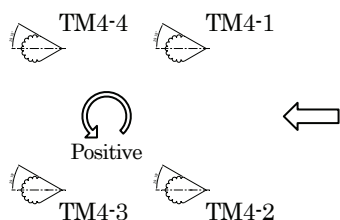
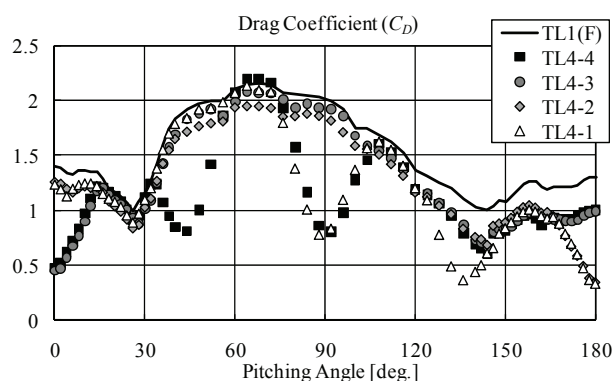
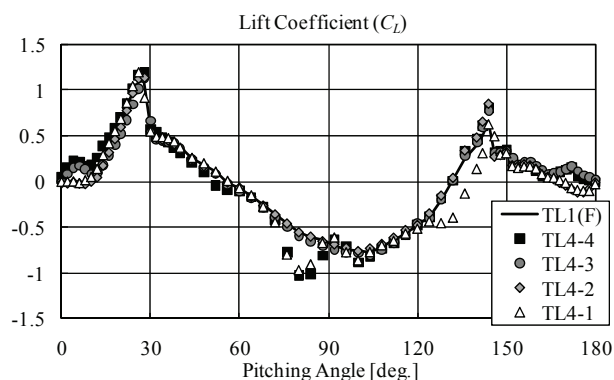


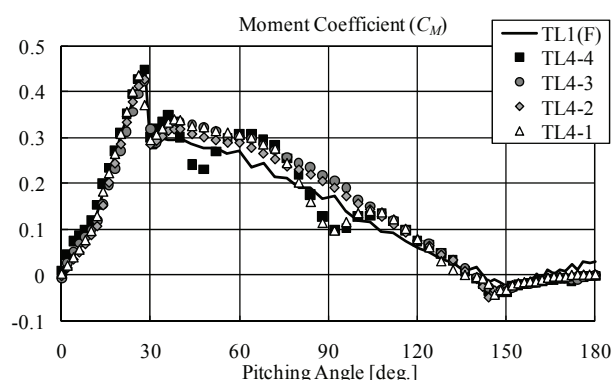
図-14 4 導体各導体の比較 (圧力測定実験, 三角一中, 風速 20 m/s)



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数

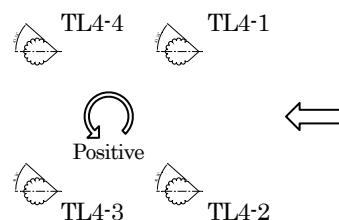
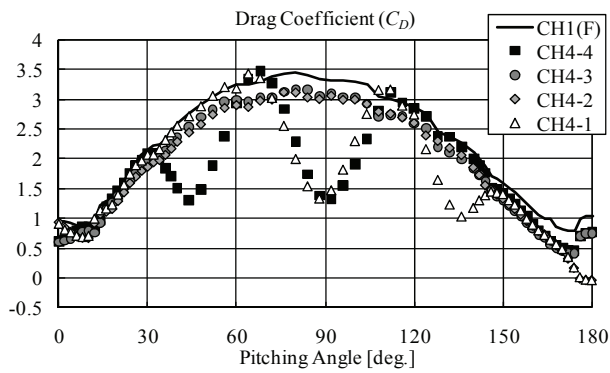


図-15 4 導体各導体の比較 (圧力測定実験, 三角一低, 風速 10 m/s)

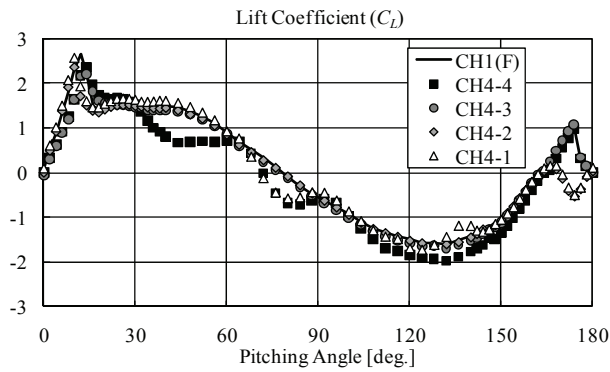
式(5), (6) に表されるように, 抗力・揚力係数は, 4 導体と単導体の空気力係数の定義の差の換算は必要であるが, 各導体の空気力係数を足し合わせると 4 導体の空気力係数となる。また, 前述の通り, 表-9 に示される迎角付近では, 風下側の導体の空気力が低減していた。この特性は, 絶対値が大きい抗力係数において最も顕著に表れており, 特に, 90 [deg.] 付近では, 4 本中 2 本の導

体が, 他の導体の後ろ側に位置するため, 4 導体全体の抗力係数は大きく低減する。一方, 揚力係数においては, 表-9 に示される迎角付近では, 絶対値が比較的小さいため, 4 導体全体の揚力係数の変化はわずかである。

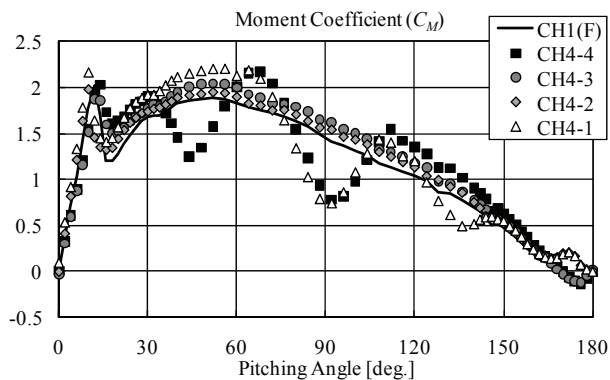
各導体のモーメント係数においては, 抗力係数同様に, 比較的顕著に空気力係数の絶対値が低減している。また, 式(7)に表されるように, 4 導体全体のモーメント係数は,



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数

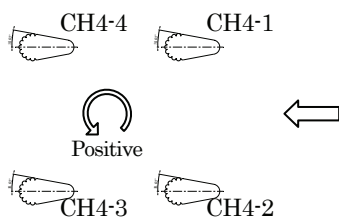
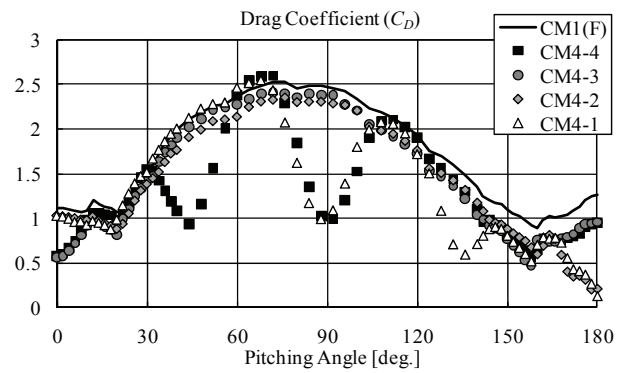
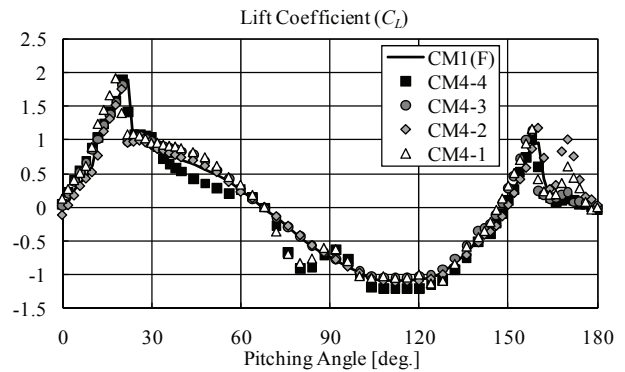


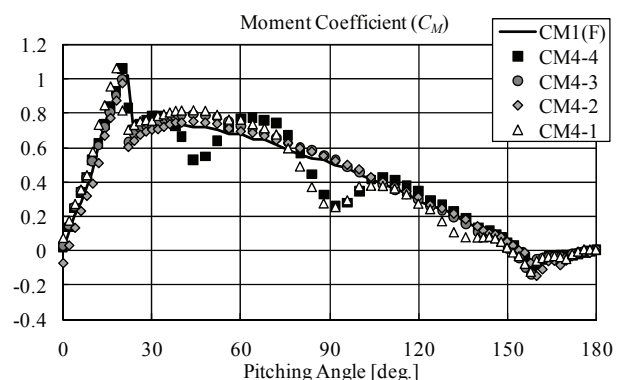
図-16 4 導体各導体の比較 (圧力測定実験, 先丸一高, 風速 10 m/s)



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数



(c) モーメント係数

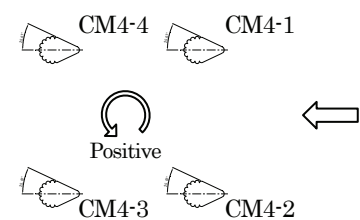


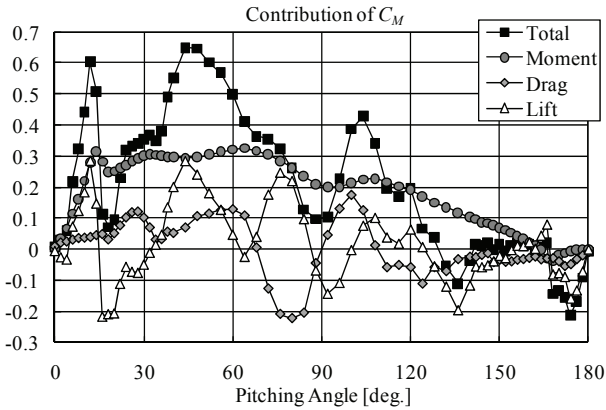
図-17 4 導体各導体の比較 (圧力測定実験, 先丸一中, 風速 10 m/s)

それぞれの導体のモーメント係数に、対角方向の導体の抗力・揚力係数の差が加わる複雑な形をしている。ここで、図-18に、『三角一高-4 導体』を例に、4 導体モーメント係数における、各導体のモーメントの寄与 (式(7) 右辺第1項)・抗力の寄与 (式(7) 右辺第2,3項)・揚力の寄与 (式(7) 右辺第4,5項) を示す。図-18に示されるよ

うに、4 導体のモーメント係数における、各導体の抗力・揚力係数の差の寄与は大きく、これにより単導体に比べ4 導体のモーメント係数が非常に複雑な特性を示していると考えられる。

表一9 空気が低減する迎角範囲および
その導体, 風上側に位置する導体

空気が低減 する迎角	空気が低 減する導体	その風上側 にある導体
0 deg.付近	導体 3, 4	導体 1, 2
45 deg.付近	導体 4	導体 2
90 deg.付近	導体 1, 4	導体 2, 3
135 deg.付近	導体 1	導体 3
180 deg.付近	導体 1, 2	導体 3, 4



Total : 4 導体のモーメント係数
Moment : 各導体のモーメントによる寄与
Lift : 各導体の揚力による寄与
Drag : 各導体の抗力による寄与

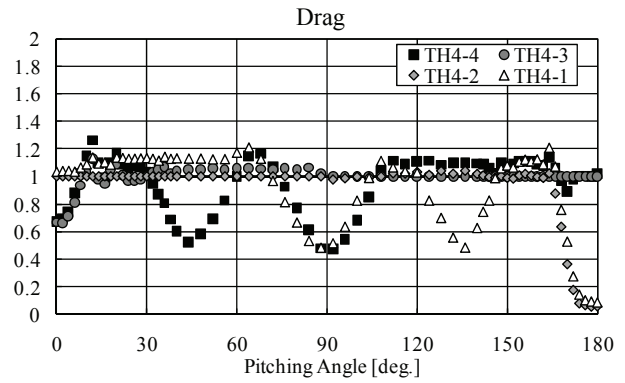
図一18 4 導体モーメント係数の寄与 (圧力
測定実験, 三角一高, 風速 10 m/s)

4.2 風上側の導体の後流域の影響

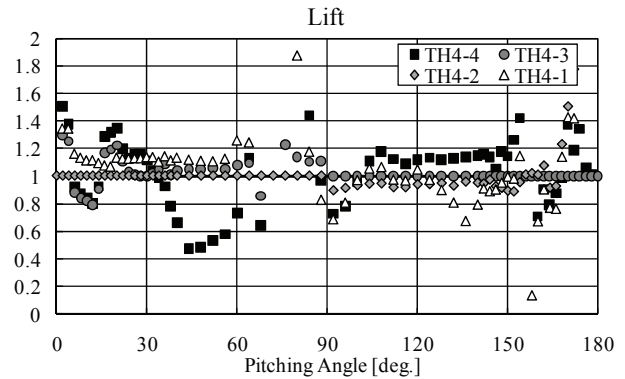
前述の通り, 4 導体においては, 他の導体が風上側に位置することによって, 風下側の導体の空気が低減している. この主な原因として, 風上側の導体によって流れ場が変化する領域 (後流域) に, 風下側の導体が位置していることが考えられる. 図一19 に, 『三角一高4 導体』の圧力測定実験結果を用いて, それぞれの導体の空気力係数の単導体の値に対する比率を示す. ただし, 前述のように, 圧力測定実験と天秤測定実験の結果には, わずかに差が見られる. そのため, 圧力測定実験で得られた, 最も風上側の導体 (0~90 deg.: 導体 2, 90~180 deg.: 導体 3) の空気力係数を代表の単導体の値として用いた. なお, 『先丸一高』断面を用いて 4 導体のうち 3 つの導体を取り外して圧力測定することにより, 最も風上側の導体の空気力係数は, ほぼ単導体のものと対応していることを確認している.

図一19 に示されるように, 各導体の抗力係数とモーメント係数の低減率は非常に似ている. 揚力係数の低減率においては, 単導体の揚力係数の絶対値が小さく正負が反転するような領域 (0, 70, 160, 180 deg.付近) においては, 差があるものの, それ以外の領域では抗力係数とモーメント係数の低減率と類似した特性を示している.

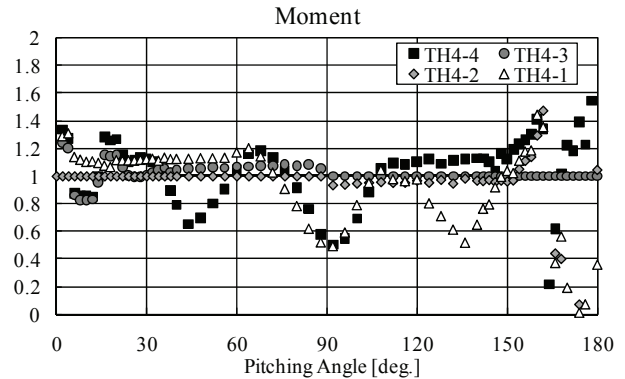
ここで, 次式のとおり, 各導体の抗力係数の単導体の



(a) 抗力係数の比率



(b) 揚力係数の比率



(c) モーメント係数の比率

(M) : 実験値, (C) : 算出値

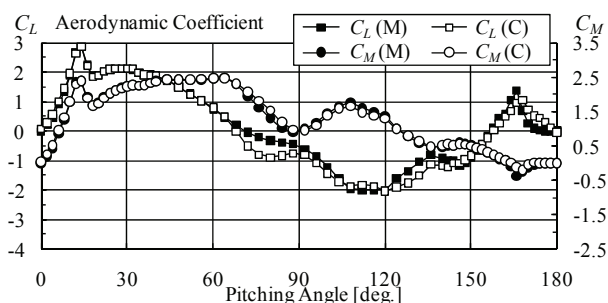
図一19 各導体の空気力の単導体の空気力に対する比率 (三角一高, 風速 10 m/s)

値に対する比率 γ_i を用いて, 各導体の揚力係数, モーメント係数の計算値 C_{Li}^*, C_{Mi}^* を導出する.

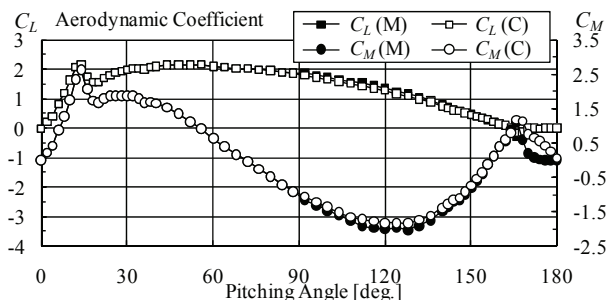
$$C_{Li}^* = C_{Lr} \times \gamma_i, C_{Mi}^* = C_{Mr} \times \gamma_i, \gamma_i = C_{Di} / C_{Dr} \quad (12)$$

ただし, 添え字 i は導体番号 ($i=1\sim4$) であり, 添え字 r はそれぞれの代表値を表す.

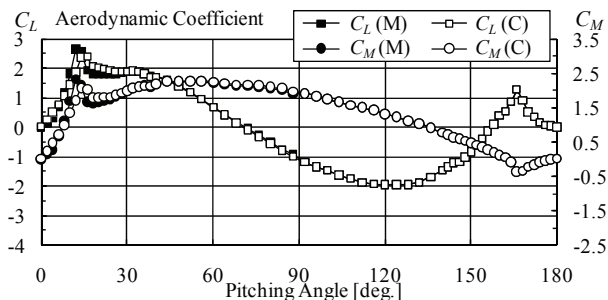
『三角一高』の 4 導体において, 式(12)で計算された導体ごとの揚力係数, モーメント係数の計算値と, 圧力測定実験で測定された結果との比較を図一20 に示す. 図一20 に示されるように, 揚力係数の導体 1, 4 の 90 deg. 付近など, 本来その絶対値が小さい領域において差がみ



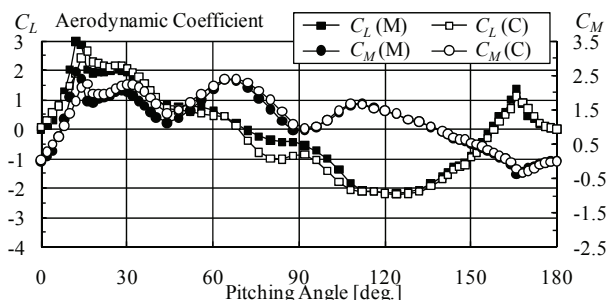
(a) 導体1における揚力・モーメント係数の推定値



(b) 導体2・モーメントにおける揚力係数の推定値



(c) 導体3・モーメントにおける揚力係数の推定値

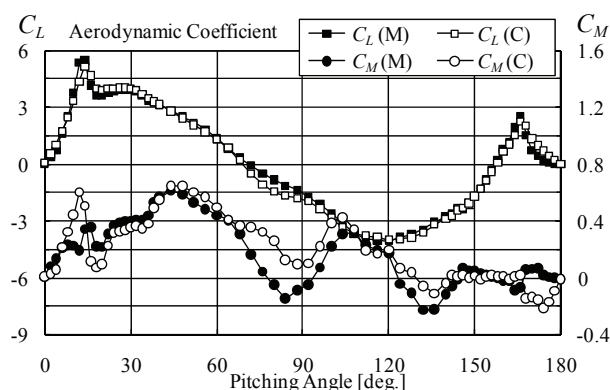


(d) 導体4・モーメントにおける揚力係数の推定値

(M) : 実験値, (C) : 算出値

図-20 各導体における揚力係数およびモーメント係数の算出値 (三角一高, 風速 10 m/s)

られる以外は、それぞれの導体の揚力係数、モーメント係数の計算値は実験結果と概ね一致していることがわかる。この傾向は他の着氷雪形状の結果でも同様にみられる。また、式(12)で計算された各導体の空気力係数から、4 導体全体の揚力・モーメント係数を算出した結果を図-21 に示す。90 deg.付近において、モーメント係数に差がみられるが、4 導体全体の揚力係数・モーメント



(M) : 実験値, (C) : 算出値

図-21 各導体の抗力係数の比率から4 導体揚力・モーメント係数の算出 (三角一高, 風速 10 m/s)

係数の算出値は圧力測定実験で測定された結果と、概ね一致している。

以上のことから、風下側の導体の3つの空気力(揚力・抗力・モーメント)係数は、概ね一様に低下していると考えられる。ここで、風上側の導体の後流域では、『流れの方向の変化』、『流速の低下』、『乱れの生成』などの流れ場の変化が考えられるが、3つの空気力係数は概ね一様に低下していることから、それぞれの導体位置においては『流れの方向の変化』は非常に小さいと考えられる。また、式(2)に示されるように、各空気力係数は、代表風速で無次元化されている。そのため、本来の流入風速が、代表風速より小さいと仮定すると、3つの空気力係数は一様に小さくなる。このことから、『流速の低下』が風下側の導体の空気力係数を低減させる一因であると考えられる。

次に、『乱れの生成』による影響を検討する。既往の研究において、着氷雪していない送電線において、流入風に乱れが生じると、抗力が低下するレイノルズ数が小さくなることが明らかにされている¹¹⁾。つまり、流入風に乱れが生じると、より低い風速域において、レイノルズ数が亜臨界域から超臨界域へと遷移する。このことから、着氷雪送電線においても、3.3節で述べた、風速依存性(レイノルズ数依存性)と同様に、乱れの効果によって、同じ平均風速においても空気力係数が低下する可能性があると考えられる。しかし、乱れが生成されたことによって、レイノルズ数が亜臨界域から超臨界域へと遷移すると、断面周りの流れ場が大きく変わるため、必ずしも3つの空気力係数を一様に低下させるとは限らない。

以上のように、着氷雪送電線における気流の乱れによる空気力係数の変化については、今後検討する必要があるが、4 導体において、他の導体が風上側に位置することによって、風下側の導体の空気力が低減しているのは、風下側の導体位置における、『流速の低下』が大きな一因となっていると考えられる。

また、後流域の影響が『流速の低下』のみであると考え

えると、単導体送電線まわりの平均流速分布を把握することができれば、風下側導体の空気力係数を単導体の空気力係数から推定することが可能であると考えられる。これにより、様々な導体間隔・導体数の多導体送電線の空気力係数を、単導体の空気力係数を用いて推定することができると考えられる。今後、実験による風速場の計測や、数値計算によって、単導体周りの平均流速分布を把握し、本推定方法の適用性について検討する。

5. 結論

- ・5つの着氷雪形状を有する単導体および4導体の空気力係数を測定し、着氷雪形状による空気力特性の変化を明らかにした。また、圧力測定実験により、4導体の各導体に働く空気力を明らかにした。
- ・本実験では、素線の凹凸を模擬した模型を用いて実験を実施したため、単導体・4導体ともに、風速10[m/s]と20[m/s]の間で空気力係数の風速依存性がみられた。実際の送電線のように、素線の凹凸がある断面に、着氷雪した場合には、ギャロッピングが生じるような風速域において、空気力係数の風速依存性があると考えられる。
- ・4導体全体の抗力・揚力は各導体の和になるのに対して、モーメントは、各導体の揚力・抗力の差が寄与するため、迎角に対するその増減傾向は単導体のものと大きく異なることがわかった。また、2つの導体が流れ方向に並ぶ迎角(0, 45, 90, 135, 180 [deg.]付近)では、風上側の導体の後流域の影響で、風下側導体の抗力・揚力・モーメント係数の絶対値がほぼ同じ割合で低減することがわかった。
- ・着氷雪単導体送電線まわりの平均流速分布を把握することにより、着氷雪単導体送電線の空気力から様々な電線径・導体間隔・導体数の着氷雪多導体送電線の空気力を推定できる可能性を示した。

6. 今後の課題

- ・本研究で実施した圧力測定実験の結果は、抗力係数において素線の凹凸部が風上側に来た時に、天秤測定実験の結果とわずかに差がみられた。今後厳密に空気力を計測するためには、凹凸部の圧力測定方法について検討が必要である。
- ・実験による風上側の導体の後流域の計測や、数値計算による4導体送電線周りの流れ場の把握を行い、後流の影響を明らかにする。また、着氷雪単導体送電線の空気力から着氷雪多導体送電線の空気力を推定する方法を詳細に検討する。
- ・着氷雪形状とギャロッピングの振幅および発生条件などの関係について検討する。

謝辞

本研究の遂行にあたり、鹿島建設株式会社の近藤宏二氏、山本学氏、大窪一正氏には実験の実施にあたり多大なご協力を頂きました。株式会社風技術センターの横川正久氏には模型制作にご協力頂きました。また、九州工業大学の木村吉郎准教授には、実験計画およびデータ解析にあたり助言頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 架空送電線のギャロッピング現象・解析技術調査専門委員会：架空送電線のギャロッピング現象解析技術，電気学会技術報告，第844号，2001.
- 2) J.P. Den Hartog: Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, 1956.
- 3) 清水幹夫，守護雅富，佐藤順一：送電線のギャロッピングの幾何学的非線形解析，構造工学論文集，Vol. 44A, pp. 951-960, 1998.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 清水幹夫，岡新一，石原孟：着氷雪送電線の空気力特性予測システムの開発，第19回風工学シンポジウム論文集，pp.477-482, 2006.
- 7) 吉岡正幸：送電線のギャロッピングと対策技術の現状，日本風工学会誌，No. 65, pp. 43-49, 1995
- 8) 大熊武司，ほか：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梗概集，PP. 207-208, 1998.
- 9) 山本学，近藤宏二：風車翼の空力特性に及ぼすレイノルズ数と乱れの強さの影響，日本風工学会誌（平成19年度年次研究発表会梗概集），Vol. 32, No. 2, pp.195-196, 2007.
- 10) 日本流体力学会：流体力学ハンドブック第2版，丸善株式会社，1998.
- 11) 西原崇，ほか：正多角形断面を有する新形電線の空力特性とその低風圧化メカニズムの解明，日本風工学会誌，Vol. 31, No. 2, pp. 25-34, 2006.
- 12) 雪野昭寛，森島弘吉：各種着雪形状電線の空力特性測定結果，平成10年電気学会 電力・エネルギー部門大会，No. 470, pp. 449-450, 1998.

(2009年9月17日受付)