論文

正多角形断面を有する新型電線の空力特性とその低風圧化メカニズムの解明

Aerodynamic characteristics and wind drag reduction mechanism of a newly developed conductor with an 18-polygonal cross-section for overhead transmission line

西原 崇*1, 江口 譲*2, 上地 正夫*3, 雪野 昭寛*4, 菊池 直志*5
Takashi NISHIHARA, Yuzuru EGUCHI, Masao KAMIJI, Teruhiro YUKINO, Naoshi KIKUCHI

SUMMARY

A new conductor of low-wind drag type with an 18-polygonal cross-section for overhead transmission line has been developed. Aerodynamic characteristics of the conductor regarding the mean drag coefficient were studied by wind tunnel tests, including effects of wind speed and turbulence intensity. As a result, 50% reduction of drag coefficient has been achieved under designing wind speed condition. The mechanism of wind drag reduction of the conductor was also studied by flow visualization tests in a water tunnel based on Reynolds similarity law. The flow visualization test revealed that “drag crisis” arises in the flow around the new conductor by effects of polygonal cross-section at Reynolds number an order of magnitude lower than that of a smooth circular cylinder.

key words: Overhead transmission line, Wind drag reduction, Polygonal cross-section, Flow visualization

1. はじめに

架空送電線路は、電力の安定供給を担う重要設備として、想定される様々な自然環境下においてその健全性が確保されることが必須である。特に、台風時の強

風下（一般的な設計風速は 40m/s）で作用する風圧荷重は、上記設備の強度設計上最も重要である。中でも、送電線に作用する風圧荷重は上記設備に作用する全荷重の 3～5 割を占めている。これを低減することがで

*1 (財) 電力中央研究所地球工学研究所流体科学領域 主任研究員

Research Engineer, Fluid Dynamics Sector, Central Research Institute of Electric Power Industry

*2 (財) 電力中央研究所地球工学研究所流体科学領域 上席研究員

Senior Research Engineer, Fluid Dynamics Sector, Central Research Institute of Electric Power Industry

*3 関西電力株式会社研究開発室電力技術研究所電力基盤研究室（流通） 主席研究員

Senior Research Engineer, Power Engineering R&D Center, The Kansai Electric Power Co., Inc.

*4 関西電力株式会社研究開発室電力技術研究所電力基盤研究室（流通） 主任研究員

Senior Research Engineer, Power Engineering R&D Center, The Kansai Electric Power Co., Inc.

*5 株式会社ビスキャス送電事業部送電開発部 主幹

Chief Staff, Overhead Transmission Line Research & Development Department, VISCAS Corporation

(原稿受理年月日：2005 年 6 月 21 日，採用決定：2005 年 12 月 16 日)

きれば、送電鉄塔の建設費用削減や信頼性向上、その他メンテナンス費用低減が可能となる。このため、これまでに、通電面積を確保しつつも風圧荷重が低減可能な様々な形状の低風圧電線が開発されてきた¹⁾。

電線に作用する単位長さあたりの風圧荷重（抗力）は、一般に次式のように表される。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 d \cdot C_D \quad (1)$$

ここで、 F_D は電線に作用する単位長さあたりの抗力 [N/m]、 ρ は空気密度 [kg/m³]、 U は風速 [m/s]、 d は電線の等価外径である。 C_D は抗力係数と呼ばれ、物体の形状、および次式で定義されるレイノルズ数と呼ばれる無次元数に依存する。

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (2)$$

ただし、 ν は空気動粘性係数 [m²/s] で、常温では 1.5×10^{-5} m²/s である。一般に使用される電線の外径は、約 18~40mm であり、風速 40m/s では、上記のレイノルズ数は $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ になる。

これまでに開発された低風圧電線では、“drag crisis”と呼ばれる抗力係数の急激な減少を利用したものがいくつかみられる²⁻⁴⁾。“drag crisis”は、滑面円柱の場合には、レイノルズ数が 5×10^5 付近（電線の使用条件よりも 1 桁大きい）で発生し、円柱表面から一度はく離したせん断層が下流側で再付着することによって引き起こされる。この結果、最終的には離点が大きく下流側へ移動し、抗力係数が 0.3 にまで大きく低下する⁵⁻¹⁰⁾。また、円柱表面に粗度を有する場合、粗度が大きいほど、より低いレイノルズ数にてこの現象が発生するが、そのときの抗力係数はさほど低下しなくなることも知られている¹¹⁻¹⁷⁾。従来型の普通電線は、直径数 mm の円形断面の素線が撚り合わされたものであり、その外周形状は粗度が非常に大きい。このため、滑面円柱よりも 1 桁小さいレイノルズ数 4×10^4 付近で抗力係数が最小値 0.9 程度をとる。一方、“drag crisis”を利用した低風圧電線では、表層の素線がセグメント化され、電線の外周形状は、滑面円柱の表面に螺旋状の溝を複数有する形状となる。これらの電線では、設計風速付近でちょうど抗力係数が最小となるように、溝の寸法や形状が決められてきた。しかしながら、このタイプの電線は、小径になると、設計風速におけるレイノルズ数が小さくなり、抗力係数を大幅に低下させることが難しい。これは、上述の通り、より低いレイノルズ数で“drag crisis”が発生されるために

は比較的大きな粗度が必要であるが、その場合、抗力係数はさほど低下しなくなる傾向があるためである。

本論文にて報告する電線は、円柱形状を基本とする断面に溝を付ける代わりに、18 角の比較的角度の多い正多角形を基本とする外周形状が採用されている。この結果、小径の電線においても設計風速付近にて大幅な抗力係数の低減が達成されている。本論文では、正 18 角形を基本断面にもつ 410mm² 相当品の抗力係数特性に関する風洞試験結果を報告する。また、拡大模型を用いたレイノルズ数相似に基づく水流動実験によって、電線模型周りの詳細な流れの可視化を行った結果を報告し、その低風圧化メカニズムを述べる。

2. 正多角形電線の形状

Fig. 1 は、本電線の断面形状および最外層の素線断

Fig. 1 正 18 角形電線 410mm² 相当品の断面形状と外層素線形状

Cross section (upper) and segment wire shape (above) of 18-polygonal conductor of 410mm²

面形状を示す。本電線は、セグメント化された 18 の素線で最外層が構成されている。セグメント素線の外層側は、円弧状ではなく、平らな面となっている。セグメント外周の両端は、浅い勘合溝が付けられている。その結果、本電線の外周は、正 18 角形の頂点にあたる箇所には浅い勘合溝を有する特殊な形状となる。

3. 風洞試験

Fig.1 に示す断面形状を有する、実際に素線を撚り合わせた実寸の電線を試作し、風洞試験によって抗力係数の測定を行った。電線の撚りのピッチは 284mm である。測定は、(株)ビスキャスの低騒音型風洞を使用した。Fig.2 は、風洞実験の概要を示す。風洞の吹き出し口は $1\text{m} \times 1\text{m}$ であり、吹き出し口下流に密閉型測定胴と安定胴が配置されている。測定胴の側壁から 30mm の位置に、端板が取り付けられており、電線の長さ 940mm 部分が受ける抗力を、3 分力検出器を用いて測定した。

Fig.3 に、抗力の測定結果を示す。横軸にレイノルズ数、縦軸に抗力係数を示す。入射風の乱れ強さは 0.2% 以下である。抗力係数は、 $\text{Re}=5 \times 10^4$ 付近から急激に減少し、設計風速条件 (40m/s , $\text{Re}=7.2 \times 10^4$) では抗力係数が 0.5 程度まで低下する。Fig.3 には、従来型の同サイズ品 (ACSR410mm²) の抗力係数も示されているが、従来型の普通電線よりも大幅な抗力係数の低減が達成されていることがわかる。このように、本電線では、滑面円柱に生じる“drag crisis”と同様の抗力係数の急減が、滑面円柱に比べて 1 桁小さいレイノルズ数にて発生することに特徴がある。また、円柱表面に均質な粗度を与えることによって、本電線と同等のレイノルズ数にて“drag crisis”を発生させるには、比較的大きな粗度が必要となる。この場合、過去の測定例¹¹⁻¹³⁾を見る限り、抗力係数はさほど低下しない。

Fig.4 は、入射風の乱れの影響を確認するため、吹き出し口と測定胴の間に乱流格子を設置して抗力係数を測定した結果を示す。乱れが強いほど、抗力係数が低下を始めるレイノルズ数が低下し、臨界時の抗力係数がやや増大しているものの、乱流下においても安定して抗力係数の低減効果が維持されていることが確認できる。既往の研究によれば^{18,19)}、入射流の乱れが円柱周りの亜臨界域の流れに与える影響は、乱れ強さのみではなく、乱れのスケールにも依存する。同じ乱れ強さであれば、乱れのスケールが小さいほど、境界層遷移への影響が大きく、また、乱れのスケールが円柱

Fig. 2 風洞を用いた抗力測定概要

Schematic arrangement of drag measurements in a wind tunnel

Fig.3 18 角形電線の抗力係数

Mean drag coefficients of an 18-polygonal conductor

Fig.4 乱流下の抗力係数

Mean drag coefficients in turbulent flow

直径以下でないと、乱れの影響は顕著には現れない。電線が実際に使用される大気乱流下での乱れの代表スケールは、本実験に使用した風洞の乱流格子による乱れの代表スケールよりも大きいと考えられる。従って、電線が使用される大気乱流下では、本電線の抗力係数低減効果は、少なくとも、Fig.4 に示す結果が確保されるものと考えられる。

4. 水流動試験

上述の通り、正多角形断面を基本形状にもつ本電線は、設計風速付近にて大幅な抗力係数の低減が達成されていることが確認された。今後、本電線の実用化をはかるにあたり、低風圧化をもたらす現象が、想定される様々な使用条件下でも安定して生じる現象であることを確認する必要がある。しかしながら、比較的角数が多い正多角柱周りの流れについては、研究例は非常に少なく²⁰⁾、本電線周りの流れ現象や“drag crisis”が比較的低レイノルズ数で生じながらも、大幅な抗力係数の低減が生じている理由は不明である。

“drag crisis”は、例えば円柱の場合、円柱表面からはく離れたせん断層内に発生する Kelvin-Helmholtz 波 (以下 K-H 波) およびこれに起因するせん断層の乱流遷移が大きく関与していることが知られている^{5,6,21)}。円柱周りの流れの場合、はく離せん断層内の K-H 波によって発生する速度変動が複数の研究者によって測定されており、それらの測定結果によれば、その卓越周波数 f_{SL} は次の通りである²²⁾。

$$f_{SL} = 0.0235 \text{Re}^{0.67} \cdot f_K \quad (3)$$

ただし、 f_K は、後流のカルマン渦周波数である。

本電線と直径が等しい円柱の場合、風速 40m/s 時の f_{SL} を式(3)によって求めると、 $1.24 \times 10^4 \text{Hz}$ となる。本電線周りの詳細な流れ特性と“drag crisis”現象を解明するためには、この K-H 波の挙動を明らかにすることが重要と考えられる。しかしながら、K-H 波の卓越周波数が円柱と同程度とすれば、設計風速付近では 10^4Hz 程度となる。このため、実寸電線を使用した風洞試験にてこのような高速の現象を観測することは困難である。一方、レイノルズ数相似に基づく水流動試験によって気流を模擬すれば、現象の時間スケールを大幅に拡大しつつ、相似な特性の流れを再現できる^{3,4,23)}。本研究では、大型水路と 3 章に述べた実寸電線を 7.2 倍に拡大して外周形状を模擬した模型を用いたレイノルズ数相似に基づく水流動試験を実施した。こ

Fig.5 電線模型設置状況
Layout of the large-scaled conductor model in test section of water tunnel

Fig.6 可視化実験概要
Schematic arrangement of flow visualization test

れにより、現象の時間スケールを約 700 倍に引き延ばして、実機と相似な特性の流れを再現し、電線表面流れの詳細な可視化実験を実施した。本章では、その詳細を述べる。

4. 1 試験水路と拡大模型の仕様

本実験では、ヘッドタンク式的大型水路設備を使用した²³⁾。本水路は、容量 1000m^3 の地下貯水槽、有効容量 300m^3 のヘッドタンク、鉛直水路部、排水バルブ、排水路から構成される。水路を運転する際には、排水バルブを閉じた状態で、ヘッドタンク内が所定の水位になるまで、地下貯水槽からヘッドタンクへ水をくみ上げる。タンク内の水の揺動が収まった後に静かに排

水バルブを開放すると、ヘッドタンク内の水は重力によって、鉛直水路内を流下し、排水バルブ、排水路を経て地下貯水槽へ戻る。このヘッドタンク式の水路では、大容量のポンプが無くとも大流量の実験が可能である。テストセクションは、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ の矩形断面で、流量の測定は、ヘッドタンク内の水位変化を容量式波高計（検出部：CHT4-300，アンプ：CH601A，ケネック）によって測定し、ヘッドタンクの断面積を用いて実験中の水の流出量に換算して行った。

Fig.5 は、拡大スケール電線模型の水路内への設置状況を示す。電線模型は、実電線と幾何学的に相似な断面形状を持ち、電線スパン方向の捻回も模擬した三次元模型である。スケールは実電線の 7.2 倍である。外径は約 198mm，電線外周形状を模擬した部分の長さは 1920mm である。模型片端は、水路側壁にフランジ固定され、もう一端は、直径約 1.5mm の 3 本のワイヤによって支持されており、ワイヤ支持部は直径 180mm，長さ 50mm の円形カバーが設置されている。可視化実験の都合上、端板は設置していない。

本実験では、電線模型周りの流れをトレーサー法によって可視化した。トレーサーはフルオレセインナトリウムを用いた。模型表面には、Fig.5 に示す位置、すなわち、水路可視化窓内面から 700mm 位置の断面内に可視化用染料注入孔が合計 10 箇所設けられ、模型内部の染料導管を通じて、水路外部から染料を注入可能である。Fig.6 は、可視化実験の概要を示す。水路側面からレーザーライトシートを照射し、模型表面から流出する染料を発光させ、染料の濃淡が移動する様子を水路正面からビデオカメラ（DCR-TRV900, Sony）および高速度カメラ（MEMRECAMci, Nac）によって撮影した。

4. 2 後流幅撮影結果

本電線にて生じる抗力係数の低減が、はく離点の下流への移動による後流幅の縮小，すなわち、いわゆる“drag crisis”と同様の現象によるものであることを確認するため、電線下流の後流幅を撮影した。Fig.7 は、電線模型周りの流れを可視化し、ビデオカメラ（DCR-TRV900）にて撮影した結果である。レーザーライトシートを当てて可視化した断面において、平らな面が上流淀み点となるように模型が設置されている。実験実施時の水温は 8°C である。

$\text{Re}=9 \times 10^3$ では、流れは上流淀み点から $75^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の位置にて、層流のまま電線表面からはく離している

(a) $\text{Re}=9 \times 10^3$ (実機風速換算 5m/s)

(b) $\text{Re}=1.8 \times 10^4$ (実機風速換算 10m/s)

(c) $\text{Re}=3.5 \times 10^4$ (実機風速換算 19m/s)

(d) $\text{Re}=5.1 \times 10^4$ (実機風速換算 28m/s)

(e) $\text{Re}=7.8 \times 10^4$ (実機風速換算 43m/s)

Fig.7 後流撮影結果

Photographs of wake around conductor model

ように見える。はく離したせん断層は、ある程度下流側で、特定の周波数の擾乱が成長してせん断層が波う

ち、小さな渦が形成される様子が観測される。このような流れは滑面円柱の亜臨界域における流れとほぼ同様であり、せん断層の波うちは、K-H 不安定によるものと考えられる。

$Re=1.8 \times 10^4$ および 3.5×10^4 では、 $Re=9 \times 10^3$ と同様に、電線表面から $75^\circ \sim 80^\circ$ で層流のままはく離しているように見える。また、K-H 不安定によるせん断層の波うちは、流速の増大に連れて、より上流側から発生するようになり、変動周波数も増大する。 $Re=3.5 \times 10^4$ では、電線表面からはく離した直後からすでにせん断層が大きく波うち、乱流へと遷移する様子が確認される。

$Re=5.1 \times 10^4$ では、電線表面から流れがはく離する位置が大きく下流側へ移動しており、 $110^\circ \sim 120^\circ$ で流れがはく離している。これに伴い、(a)~(c)の流況に比べて後流の幅が大きく縮小していることが確認される。ただし、はく離点が下流へ移動する過程については、現象が高速であるために目視では確認することはできない。

$Re=7.8 \times 10^4$ では、 $Re=5.1 \times 10^4$ とほぼ同じ流況であり、後流幅が大きく縮小していることが確認される。なお、模型設置角度を 10° 変化させ、可視化断面位置において勘合溝が上流淀み点に位置するケースについて撮影を実施したが、ほぼ同様の結果であった。

これらのフローパターンを風洞試験から得られた抗力係数 (Fig.3) と比較すると、抗力係数が大きく低下しているレイノルズ数範囲では、本水流動試験にて後流幅が大きく縮小していることが確認できる。(a)~(c)の流況は亜臨界域の流れに、(d)~(e)の流況は超臨界域の流れに該当するものと考えられる。

これらの結果より、本電線の設計風速条件における抗力係数の低減は、はく離点の下流への移動に伴う後流幅の縮小によるものであることが確認された。しかしながら、現象が高速であるために、この撮影結果では、はく離点が下流側へ移動する詳細な過程は捉えられていない。次節では、高速度カメラによって電線模型表面の流れを詳細に可視化した結果を述べる。

4. 3 電線表面流れ詳細可視化結果

本節では、高速度カメラを使用した詳細な流れの可視化結果を述べる。

Fig.8 は、上流側淀み点から $50^\circ \sim 90^\circ$ の電線表面の流れを高速度カメラによって撮影した結果を示す。(a)~(d)は、それぞれ $Re=1.8 \times 10^4$ 、 3.6×10^4 、 $5.4 \times$

10^4 、 7.2×10^4 、(水温 13°C 、実電線風速換算でそれぞれ 10, 20, 30, 40m/s 相当) であり、撮影速度は毎秒 500 コマである。模型設置角度は Fig.7 と同じであり、勘合溝が可視化断面位置で 50° 、 70° 、 90° にある。

$Re=1.8 \times 10^4$ の場合、Fig.7 では、電線表面の流れは $75^\circ \sim 80^\circ$ 付近ではく離しているように見えた。しかし、図 8(a)に示されるように、実際には 50° の勘合溝上流側エッジからはく離した流れは、一旦、勘合溝下流側エッジへ衝突するものの、その下流側で流れが再び小さくはく離して、電線表面からわずかに浮き上がったままはく離せん断層として流れる様子が確認される。はく離せん断層と電線表面の距離は、 70° 付近まではさほど変化せず、 70° 付近から下流側では徐々に大きくなる。 $Re=3.6 \times 10^4$ では、 50° 勘合溝下流側でわずかにはく離したせん断層が徐々に波うち始め、 70° を過ぎたあたりからは明瞭に小さな渦列を作る様子が観察できる。

一方、 $Re=5.4 \times 10^4$ および 7.2×10^4 では、 50° 勘合溝下流側でわずかにはく離したせん断層は 70° の勘合溝上流側では模型表面に非常に近接あるいは再付着しているように見える。そして、 70° 勘合溝下流で再度はく離して、模型表面からわずかに離れたまま流下している。

Fig.9 は、上流側淀み点から $70^\circ \sim 110^\circ$ の電線表面の流れを高速度カメラによって撮影した結果を示す。 $Re=1.8 \times 10^4$ では、はく離したせん断層は、斜め上方へと模型表面から離れていき、 90° の上方を過ぎ去るあたりから K-H 波の発生とそれによる渦列の形成が明瞭に観察できる。また、 $Re=3.6 \times 10^4$ でも、 $Re=1.8 \times 10^4$ と同様に、はく離せん断層が斜め上方へと模型表面から離れていくが、K-H 波の発達が明らかに上流側から始まっていることが確認できる。また、K-H 波が発達して形成される渦列の間隔が短い。

一方、 $Re=5.4 \times 10^4$ および 7.2×10^4 では、 70° 勘合溝で再度はく離したせん断層は、模型表面からわずかに離れたまま流下し、徐々にせん断層が波うち始める。 $Re=7.2 \times 10^4$ では、 90° 勘合溝上流側に再びせん断層が近接または再付着しているようにみえる。そして、 90° の勘合溝を越えると、急激に K-H 波が発達し、せん断層は模型表面からわずかに離れたままの状態を下流まで維持している。

Fig.10 は、上流側淀み点から $90^\circ \sim 130^\circ$ の電線表面の流れを高速度カメラによって撮影した結果を示す。

(a) $Re=1.8 \times 10^4$

(b) $Re=3.6 \times 10^4$

(c) $Re=5.4 \times 10^4$

(d) $Re=7.2 \times 10^4$

Fig.8 電線模型表面流れ (50° ~90° 付近拡大)
Close-up views around 50° - 90° of flow patterns around conductor model.

$Re=1.8 \times 10^4$ および 3.6×10^4 では、せん断層が模型表面から大きく離れていく。これに対し、 $Re=5.4 \times 10^4$ および 7.2×10^4 では、急速に発達した K-H 波が渦を形成しつつ、模型表面を流下しながら非定常的に 110° の勘合溝付近に衝突、付着する様子が観察される。そして、そのやや下流から最終的に流れがはく離していく。また、 $Re=7.2 \times 10^4$ では明瞭な渦ではなく、

(a) $Re=1.8 \times 10^4$

(b) $Re=3.6 \times 10^4$

(c) $Re=5.4 \times 10^4$

(d) $Re=7.2 \times 10^4$

Fig.9 電線模型表面流れ (70° ~110° 付近拡大)
Close-up views around 70° - 110° of flow patterns around conductor model.

比較的乱れた流れになっており、せん断層の乱流遷移が大きく促進されていることがわかる。

Fig.11 には、高速度カメラによる Fig.9 の位置における撮影動画から目視で求めた K-H 波のおおよその卓越周波数を示す。同じレイノルズ数条件における滑面円柱のそれに比較して約 2 倍程度高い結果となっている。

(a) $Re=1.8 \times 10^4$

(b) $Re=3.6 \times 10^4$

(c) $Re=5.4 \times 10^4$

(d) $Re=7.2 \times 10^4$

Fig.10 電線模型表面流れ (90° ~ 130° 付近拡大)
Close-up views around 90° - 130° of flow patterns around conductor model.

4. 4 はく離点移動のメカニズムに関する考察

前節に示した高速度カメラを用いた電線模型表面の流れの詳細な可視化結果をもとに、本電線の設計風

Fig.11 K-H 波の卓越周波数
Frequency of K-H instability

速付近での抗力係数の急減をもたらす、はく離点の下流への移動メカニズムを考察する。

“drag crisis”は、滑面円柱の場合、以下のような機構で生じるとされている²¹⁾。亜臨界域($Re < 2 \times 10^5$)では、円柱表面の境界層がはく離する位置は上流淀み点から 78° 付近で一定である。はく離したせん断層には、K-H 不安定に起因した遷移が生じ、せん断層内に渦列が形成される。このような渦列は、せん断層において円柱外流との流れの混合を促進する。その結果、外流の運動量が円柱表面近くの流れにまで伝わりやすくなり、流れは円柱表面に沿って流れやすくなる。この K-H 不安定は、レイノルズ数の増大とともに徐々に上流側で発生するようになり、この遷移がはく離点近傍にまで達すると、はく離せん断層の再付着に至る。

本電線においても、K-H 波の発達による渦列の形成によってせん断層の非定常的な再付着が引き起こされ、はく離点の下流への移動が生じていることが 4.3 節の可視化結果から確認できる。ただし、本電線では、このような現象が発生するレイノルズ数が滑面円柱よりも 1 桁小さいことに特徴がある。これには、以下に述べる滑面円柱と本電線におけるフローパターンの違いが関係すると考えられる。

まず、滑面円柱の亜臨界域の流れでは、はく離点がほぼ 78° であり、はく離した流れは急速に円柱表面から離れていく。これに対し、Fig.8 に示されるように、本電線では 50° 溝の下流エッジにて小さく流れがはく離している。すなわち、流れ場全体として見たとき、はく離せん断層の起点が滑面円柱よりも本電線の方が上流側にあるといえる。このことは、本電線の方が、せん断層内での K-H 波の発達という現象が上流側から発生しやすいと考えられ、K-H 波の発達とそれによる“drag crisis”という遷移現象を低レイノルズ数側へ

と早めていると考えられる。実際、Fig.11 に示すように、本電線で観測された K-H 波の周波数は、滑面円柱のそれよりも高い。K-H 波の周波数はせん断層の厚さに反比例するが、Fig.11 の結果は、本電線では、上流側のせん断層厚さが薄い位置から K-H 波が成長し始めていることを裏付ける結果と考えられる。

また、正 18 角形を基本断面形状とする本電線では、 50° 勘合溝下流側の表面形状はフラットな面となり、円柱のような一定の曲率を有する表面（フラットな面と比べれば外側に凸な面）と異なっている。物体表面からはく離れた直後のせん断層への外部流の影響を考えた場合に、下流がフラットな面となっている方が、はく離せん断層が入射流と同じ方向へ曲げられやすいのではないかと考えられる。さらに、上述の K-H 波の発達による流れの混合は、せん断層を電線表面側へ引き戻す効果をもつ。これらの作用により、 $Re=5.4 \times 10^4$ および 7.2×10^4 のケースでは、 90° 位置付近まで、溝エッジからの微小なはく離と一つ下流の溝上流側への再付着が繰り返され、 90° 溝下流での K-H 波の急激な発達と 110° 付近への非定常的な再付着へと至るものと考えられる。Szalay²⁰⁾は、正十六角柱周りの流れについて、表面圧力分布の測定をしているが、正十六角断面の 22.5° 、 45° 、 67.5° の頂点を流れが回り込む付近の圧力低下と十六角断面の辺に相当する平面部での圧力回復が繰り返される結果がみられる。これは、角数が違うものの、本実験で観測された流れのはく離と再付着の繰り返しと整合する現象であると考えられる。このような流れは、比較的角度の多い正多角柱周りの流れ固有の現象と考えられる。

なお、Fig.8, 9 について、 $Re=5.4 \times 10^4$ および 7.2×10^4 のケースでは、 $Re=3.6 \times 10^4$ よりも K-H 波の発達が下流側へ遅れているように見えるにもかかわらず電線表面から流れが離れていかない理由は以下の通りと思われる。 $Re=5.4 \times 10^4$ および 7.2×10^4 では、レイノルズ数が高い分、はく離直後から K-H 波は発達しやすいと考えられる。このため、はく離直後に流れがより強く電線表面側へ曲げられ、電線表面にせん断層が近づく。この結果、流れが拘束を受けるため、逆に流れが安定化され、K-H 波の発達が抑制される。このような 2 つの相反する効果がバランスする結果が、Fig.9(c)および(d)に示される流況となるのではないかと考えられる。

また、均質な粗度を円柱表面に与えた場合、円柱表面の流れは、粗度によって流れが境界層のまま強制的

に乱流へ遷移させられる。一方、本電線における“drag crisis”発生時の流況は、 90° 勘合溝までは、せん断層が比較的層流に近い状態のままであり、 90° 勘合溝下流側からせん断層本来の不安定性によって流れの再付着が誘発される。すなわち、滑面円柱の“drag crisis”に比較的近い現象が発生しているものと考えられる。このため、滑面円柱よりも 1 桁小さいレイノルズ数で“drag crisis”が発生しながらも、円柱に均質な粗度を与える場合と比較して、抗力係数の低下が大きいのではないかと考えられる。

5. まとめ

正 18 角形を基本断面形状とした 410mm^2 相当の送電線について風洞試験を実施した。また、電線の外周形状を模擬した拡大模型を用いたレイノルズ数相似に基づく水流動実験によって、電線模型周りの詳細な流れの可視化を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 上記電線の抗力係数は、レイノルズ数が 5×10^4 付近にて急激に減少し、抗力係数が 0.5 程度に低減される。すなわち、滑面円柱にみられる“drag crisis”と同様の抗力係数の急減が 1 桁小さいレイノルズ数にて生じていながら、円柱表面に均質な粗度を与えるケースよりも大幅な抗力係数の低減が見られた。また、入射風の乱れが強いほど、抗力係数が低下を始めるレイノルズ数も低下するが、乱流下においても安定して抗力係数の低減効果が維持されることが確認された。
- (2) レイノルズ数が 5×10^4 より大きい条件では、はく離点が下流へ移動し、後流幅が大きく縮小していることが、水流動試験による可視化結果から確認された。本電線の抗力係数の低減は、はく離点の下流への移動に伴う後流幅の縮小によるものであると考えられる。
- (3) 高速度カメラによる電線表面流れの詳細可視化により、はく離点の下流への移動は、以下に述べる角数が多い正多角形特有の流れによって引き起こされると考えられる。すなわち、上流淀み点から 90° より上流側では、正多角形頂部に位置する勘合溝での微小な流れのはく離と一つ下流の溝上流側への流れの再付着現象が繰り返される。また、 90° 勘合溝下流のはく離せん断層内には、Kelvin-Helmholtz 波が急激に発達し、これに伴い、はく離せん断層の 110° 付近への非定常的な衝突が生じる。前者は、最終的な流れの再付着が生じる前の流れのはく離点自体を $80^\circ \sim 90^\circ$ の勘合溝付近（滑面円柱のはく離点 78° よりも下流側）

へと移動させ、後者は、最終的な流れのはく離点を $110^\circ \sim 120^\circ$ 付近へと大きく下流へ移動させる。これらの特有の流れによる最終的な流れのはく離点の大幅な下流への移動より、滑面円柱よりも1桁小さいレイノルズ数にて“drag crisis”が生じていながら、円柱表面に均質な粗度を与えるケースよりも大幅な抗力係数の低減が達成されているものと考えられる。

参考文献

- 1) 雪野昭寛, 他 6 名, 「架空送電線の低風圧電線の開発」, 日本風工学会論文集, Vol.98, pp. 37-44, (2004).
- 2) Sakabe, S. et al., “On the Reduction of Wind Loading on Overhead Transmission Line”, S22-81, CIGRE Symp. Stockholm, (1981).
- 3) Eguchi, Y. et al., “Boundary layer structure around an electric wire designed for wind force reduction”, Proc. ASME Fluids Engineering, FEDSM98-4895, Washington D.C., (1998).
- 4) Eguchi, Y. et al., “Drag reduction mechanism and aerodynamic characteristics of a newly developed overhead electric wire”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.90, pp. 293-304, (2002).
- 5) Roshko, A., “Perspectives on bluff body aerodynamics”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.49, pp.79-100, (1993).
- 6) Williamson, C.H.K., “Vortex dynamics in the cylinder wake”, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 477-539, (1996).
- 7) Zdravkovich, M.M., “Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.33, pp.53-62, (1990).
- 8) Zdravkovich, M.M., Flow around circular cylinders, vol.1: Fundamentals, Oxford University Press, (1997).
- 9) Roshko, A., “Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number”, J. Fluid Mech., Vol.10, pp.345-356, (1961).
- 10) Achenbach, E., “Distribution of local pressure skin friction around a circular cylinder in cross flow up to $Re = 5 \times 10^6$ ”, J. Fluid Mech., Vol. 34, pp.625-639, (1968).
- 11) Achenbach, E., “Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder”, J. Fluid Mech., Vol. 46, pp.321-335, (1971).
- 12) Achenbach, E., “On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 ”, J. Fluid Mech., Vol. 109, pp.230-251, (1981).
- 13) Buresti, G., “The effect of surface roughness on the flow regime around circular cylinders”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.8, pp.105-114, (1981).
- 14) Nakamura, Y., Tomonari, Y., “The effects of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers”, J. Fluid Mech., Vol. 123, pp.363-378, (1982).
- 15) 安達勤, 他 4 名, 「高レイノルズ数領域における円柱まわりの流れ（表面粗さの影響）」, 日本機械学会論文集中編, Vol.55, No. 511, pp.685-692, (1983).
- 16) Ribeiro, J.L.D., “Effect of surface roughness on the two-dimensional flow past circular cylinders, Part I: mean forces and pressures”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.37, pp.299-309, (1991).
- 17) Shih, W.C.L. et al., “Experiments on flow past rough circular cylinders at large Reynolds numbers”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.49, pp.351-368, (1993).
- 18) Kiya, M. et al., “A contribution to the free stream turbulence effect on the flow past a circular cylinder”, J. Fluid Mech., Vol. 115, pp.151-164, (1982).
- 19) 日本機械学会, 配管内円柱状構造物の流力振動評価指針, 解説 B2, pp.B22-B24, (1998).
- 20) Szalay, Z., “Drags on several polygon cylinders”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.32, pp.135-143, (1989).
- 21) Singh, S.P., Mittal, S., “Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis”, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol.47, pp. 75-98, (2005).
- 22) Prasad, A., Williamson, C.H.K., “The instability of the shear layer separating from a bluff body”, J. Fluid Mech., Vol. 333, pp. 375-402, (1997).
- 23) 西原崇, 他 2 名, 「(財) 電力中央研究所における大型水風洞設備の建造とその概要」, 日本風工学会誌, Vol.77, pp.23-28, (1998).