

9. 流体関連振動・風工学

とりまとめ：八木知己（京都大学）

論文題目：“実物大供試体を用いた橋梁の並列ケーブルのウェイクギャロッピング特性”

著者：久保義人，結城洋一，石井博典，畠中真一，河藤千尋

掲載：Vol.58A, pp.518-527, 2012年3月

◆討議 [木村吉郎（東京理科大学）]

ヘリカルワイヤの径が大きい程，制振効果が低いようですが，その理由を検討されていれば教えてください。

◆回答：理由は検討しておりません。なお，ヘリカルワイヤの最小径は既往の研究を参考とし決定しており，その径から大きくすると，制振効果が低いという実験結果でございました。

◆討議 [松田一俊（九州工業大学）]

実際の並列ケーブルは，それぞれのケーブルが自由度を有していますが，風洞実験では1本のケーブルのみ自由度を有した振動系となっています。この振動系は，耐風設計上安全側の評価を与えると考えて良いのでしょうか？

◆回答：実際の状況と合わせるため，他のケーブルにも自由度が望ましいと思いますが，本実験装置が非常に大型であり，設置の都合上，他のケーブルに自由度を与えるためにバネを設置することが困難でした。安全側の評価になっているかは正確には分かりませんが，WGが風上から2本目のケーブルが大きく揺れるという現象が主であり，本実験の主目的が制振対策であることを勘案すると，その問題は大きくはないと考えております。

◆討議 [勝地 弘（横浜国立大学）]

実験条件に関して，斜ケーブルで相似されていますが，水平ケーブルに関するスクルートン数の相似はどうなっているのでしょうか？

◆回答：試験体の寸法，重量は斜ケーブルに合わせておりますので，その差分（寸法は実際の1.17倍，重量は実際の1.4倍，）の影響が水平ケーブルのスクルートン数の相似に影響しています。

◆討議 [伊藤靖晃（清水建設）]

3列並列ケーブルの場合，最下流のケーブルが振動する可能性はないのでしょうか？

◆回答：無対策の状態においては，2本目のケーブルが振動するかどうかと，その振動に3本目のケーブルが影響するかを確認することを目的として実験を行い，3本目のケーブルの振動については検討していません。制振対策設置後については，2本目のケーブルを制振出来ることが確認できたので，1,2本目を固定した状態で3本目のケーブルを対象とした実験を行い，3本目のケーブルも制振出来ることを確認しています。

◆討議 [伊藤靖晃（清水建設）]

風洞実験において，閉塞率が高いようですが，その影響はないのでしょうか？

◆回答：1円柱の風圧測定を実施し，その分布を既存の研究結果と比べた結果，閉塞率の影響はほとんどないと考えております。

論文題目：“橋桁周りの飛来塩分挙動推定に関する研究”

著者：Ronald Chendra，勝地弘，山田均，佐々木栄一
掲載：Vol.58A, pp.528-541, 2012年3月

◆討議 [野田 稔（徳島大学）]

「付着する」という条件は何でしょうか？またそれに関連して，接近流に均一に塩分が含まれる場合，濃度分布は発生するのでしょうか？

◆回答：塩分粒子の速度が橋桁表面でゼロになったときに付着と判定しています。また，接近流に含まれる塩分粒子が均一濃度であっても，流れ状況によって濃度は不均一となります。

◆討議 [西原 崇（電力中央研究所）]

実際の橋桁で腐食しやすい部位は，本論文で示された飛来塩分が付着しやすい場所と概ね合致しているのでしょうか？

◆回答：下フランジの下面、桁内面など、解析で塩分粒子が多く付着している箇所は、定性的に実橋観測と一致していると思われます。

◆討議 [西原 崇 (電力中央研究所)]

実際の橋桁で腐食しやすい部位を推定する場合、雨洗効果等も考慮する必要があると思われますが、本論文の結果も踏まえて、腐食しやすい部位を推定する手順について、見通しがあれば教えてください。

◆回答：本解析では、雨水による洗い流し効果は再現できておりませんが、この点に関しては今後の課題と思われます。ただし、洗い流し効果があっても塩分粒子が付着しやすい箇所が、基本的には腐食しやすい箇所であり、その意味では、本解析手法は限定的ではありますが効果的と考えられます。

論文題目：“六自由度飛行軌道解析による平板状飛散物の飛行性状の検討”

著者：野田稔，長尾文明，政井一仁
掲載：Vol.58A, pp.542-551, 2012年3月

◆討議 [石井博典 (横川ブリッジホールディングス)]

ご提案の飛散物の軌道予測手法を、今後の防災や設計にどのように生かしていくか、教えてください。

◆回答：竜巻状流れや建物周りの流れにおける飛散物の飛散速度の発現確率を求め、対人、対物に対する飛散物のリスクを評価する予定です。飛散速度の空間的な分布を検討することで、強風遭遇時の行動マニュアルを構築する基本情報としたり、飛散物で可視化された竜巻の動画などから竜巻の規模を間接的に評価するためのツールとしての利用を考えています。

◆討議 [木村吉郎 (東京理科大学)]

飛散物が特異な軌跡をとるケースにおいて、飛散物がどのような挙動をしているのか、教えてください。

◆回答：特異な軌跡は、飛散物がほとんど回転せずに滑空している状態になっています。

◆討議 [松宮央登 (電力中央研究所)]

今回検討の対象とした3種類の断面において、いずれも「全迎角に対する抗力の平均値」は概ね一致しているように思われます。その結果として、平均軌道が同じ様な軌道になっているのではないのでしょうか？また、平均速度の推定の議論の中で、「鉛直相対速度の収束値から求めた C_{Dmean} 」と「平均抗力係数 C_{Dexp} 」の比が辺長比に関係なく同程度としていますが、 C_{Dexp} が異なる断面を用いた場合は、どうなるのでしょうか？

◆回答：運動方程式をアンサンブル平均して得られる結果から、収束速度は立川数と平均抗力の積であらわされることが分かりました。結果、平均抗力がほぼ等しい平板については、立川数が等しければ、平均軌道もほぼ等しくなります。今回空気力を実測した平板以外について C_{Dexp} が大きく異なるケースについては、今後の検証が必要ですが、平均抗力に対応した収束速度となることが予想されるため、 C_{Dmean} と C_{Dexp} の比はやはり同程度となるのではないかと考えています。

論文題目：“テンタゲートの動的安定判別のための鋼棒切断加振実験”

著者：阿南景子，辻琢磨，石井徳章，奥達也，Charles W. Knisely
掲載：Vol.58A, pp.542-551, 2012年3月

◆討議 [結城洋一 (横川ブリッジホールディングス)]

ダンパー等で対策をとった事例はあるのでしょうか？

◆回答：スイスのシンツナッハにある河川に設置された逆置テンタゲートで、大型のダンパーを取り付け振動の発生を抑えた例があります。一般に、ゲートは非常に大型の構造物であるため、ダンパーのみで振動の発生を防ごうとすると、かなり大きなものを設置する必要があります。そこで、著者らは、現在、ワイヤーのばね定数と減衰比を調整して振動の発生を抑える方法を検討しています。

◆討議 [池田博嗣 (九州電力)]

フォルソングダムのテンタゲートの崩壊原因を教えてください。

◆回答：著者らのこれまでの研究により、テンタゲートの崩壊の原因および崩壊のシナリオが下記の通り明らかになっております。

- (1)フォルソングダムのテンタゲートは、本質的に非常に動的不安定なゲートであり、右側のトラニオンピンが摩擦によって錆びついてこじれた状態になっていた。
- (2)それに気づかずにゲートを巻き上げたため、あるところで右側のトラニオンピンが急に動きだし、ゲートが8.5mm以上、上下方向に加振された。それによって、クーロン摩擦による安定域を超えて強烈な動的不安定が発生した。そのときのゲート開度は0.762mであった。
- (3)振動を感じて驚いたオペレータがその状態でゲートを停止したため、さらに連成自励振動が激しくなった。
- (4)振動が大きくなって、スキンプレートの流水方向の振幅が11.9mmに達したとき、アームをつなぐボルトにかかる荷重が許容値を超えて破断し、ゲートが崩壊に至った。

◆討議 [池田博嗣 (九州電力)]

振動には放流量の変化が密に関係していると思いますが、最大流量に対して、何%程度が崩壊しやすいのでしょうか？

◆回答：水深と開度がどのような組み合わせのときに動的不安定が表面化するかは、ゲートによって異なりますが、上流側がほぼ満水の状態では、開度が水深の5~6%程度までのときに発生する振動が非常に激しくなることが分かっております。崩壊したフォルソンダムテンタゲートの場合、上流側の水深がほぼ満水の14.02mに対し、放水口開度が0.762mでした。これは水深の5.4%でした。

論文題目：“複数配置された太陽光発電用ソーラーパネルの風力係数に風向角が及ぼす影響の一検討”

著者：池田博嗣，木村吉郎，小林平，加藤九州男，久保喜延，池田浩一

掲載：Vol.58A, pp.559-566, 2012年3月

◆討議 [野田 稔 (徳島大学)]

上流側で発生した剥離渦の影響があると述べられていましたが、その場合、平均空気力の検討だけでは不十分と思われる。また、乱れの影響を考慮すると、瞬間最大の空気力を考える必要がありますが、その検討されているのでしょうか？さらに、乱れの影響が入ると空気力の場所による差は小さくなるのではないのでしょうか？

◆回答：簡便さ等を考え、本研究では空気力の瞬間最大値を、空気力の平均値に一般的なガスト影響係数を乗じることで評価することとしています。また空気力は、測定パネル全体に作用する合力として測定しているため、剥離渦の影響を詳細に検討することは困難です。空気力分布に及ぼす気流の乱れの影響は、検討をしなければ明らかにできませんが、定性的には今回の実験結果と同様の傾向になるものと想像しています。

◆討議 [勝地 弘 (横浜国立大学)]

順風状態での検討は、なされているのでしょうか？

◆回答：今回の実験は、設計で支配的となる逆風状態のみで検討しております。

論文題目：“乱れの小さい気流中における傾斜角10度の地上設置型太陽電池アレイの空力特性”

著者：伊藤靖晃，野澤剛二郎，菊池浩利

掲載：Vol.58A, pp.567-574, 2012年3月

◆討議 [松田一俊 (九州工業大学)]

実験模型の縮尺とパネルの板厚を教えてください。また、実機に換算すると、実機よりも厚い板厚に相当しますが、その影響を教えてください。

◆回答：模型の縮尺は1/20で、模型パネルの板厚は14mm（実機換算280mm）です。実機のパネル板厚は50mm~100mm程度と認識しておりますが、圧力チューブの制約上、模型の板厚が実機より厚くなりました。模型パネルの辺長比が約11あること、パネルが10°の迎角を有していること、アレイが複数配置されていることなどから、パネル板厚の相違が空力特性に与える影響は小さいと考えられます。

◆討議 [木村吉郎 (東京理科大学)]

局所的に大きな負圧が生じる実験結果が得られています。それによりパネルに損傷が生じる可能性はないでしょうか？また、本研究成果をパネルメーカーにフィードバックする必要があると思いますが、いかがでしょうか？

◆回答：JIS C8955において設計基準風速を34m/s、粗度区分をIII、設置高さを5m、ガスト影響係数を2.5とし、本研究で得られた風力係数の最大値（約1.8）を用いれば、モジュールに作用する空気力は約1,500Paとなります。一方、国内メーカーのモジュールは2,400Pa以上の強度を有している場合が多いようなので、風によりモジュールが損傷する可能性は低いと考えられます。ただし、モジュール面全体の空気力で評価を行うアレイ架台と比較して、モジュールは局所的な空気力の影響を受けやすいと言えます。このため、局所的なピーク風圧に及ぼす気流性状やアレイ傾斜角の影響などについては今後詳細な検討が必要と考えております。

◆討議 [勝地 弘 (横浜国立大学)]

風速勾配のある気流中で計測されていますが、風速の評価点はどこでしょうか？また、地面板等を用いずに風洞床上に設置されて、風速勾配のある中で実験が行われたのには、特別な理由があるのでしょうか？

◆回答：風力係数などは軒高（アレイ北端上縁）風速を用いて評価しております。CFDによる事前検討により、乱れの小さい気流中では円錐渦による強い局所負圧が生じることが確認されており、今回の実験はその検証が主目的であったため厳密な一様流である必要はなく、地面板等はいませんでした。

論文題目：“着氷時の4 導体送電線のギャロッピング観測結果とその発現条件の考察”

著者：松宮央登，西原崇，清水幹夫，雪野昭寛
掲載：Vol.58A, pp.575-588, 2012年3月

◆討議 [石井博典 (横川ブリッジホールディングス)]

GPSセンサには、動的な現象を捉えられるような精度があるのでしょうか？

◆回答：本研究で用いたGPS変位計測システムでは、電線に取り付けた計測器のほかに基準局を設け、RTK (リアルタイムキネマティック) 法^{※)} で計測することで、誤差は数cm程度の高精度の変位データをサンプリング周波数20Hzで取得することが可能となっています。

参考文献

※) 石田 亘：RTK - GPSの利用に関する研究，日本測量調査技術協会，先端測量技術 APA No.75-11, 2000.

◆討議 [結城洋一 (横川ブリッジホールディングス)]

ギャロッピング対策として用いられている「ルーズスペーサ」の特徴とその効果について教えてください。

◆回答：多導体送電線においては、複数の導体を束ねるため、ある一定間隔でスペーサが取り付けられています。標準のスペーサでは、その把持部は固定されていますが、ルーズスペーサは把持部のうち幾つかを回転可能 (ピン支持) にしたものになります (図参照)。また、回転範囲は±約80度程度に制限されています。その効果としては、未解明な部分が多いのですが、電線が回転することにより着氷形状および着氷先端の向きが変わることがギャロッピング抑制効果につながると考えています。今回の観測でも、標準スペーサ径間においてはギャロッピングが発現し大きな振動が確認されていたのに対し、ルーズスペーサ径間ではほとんど振動が生じていないことが確認されており、ルーズスペーサの効果でギャロッピングが抑制されていると考えています。ただし、観測地点は山の尾根上に位置しており、両径間の場所において、地上高の差により風速および風の吹き上げ角等の条件が異なっていた可能性もあります。そのため、今後ルーズスペーサ径間と標準スペーサ径間の位置を入れ替えての検証も考えており、ルーズスペーサのギャロッピング抑制メカニズム、抑制効果がみられる気象条件などについては、今後詳細に検討していきたいと考えています。

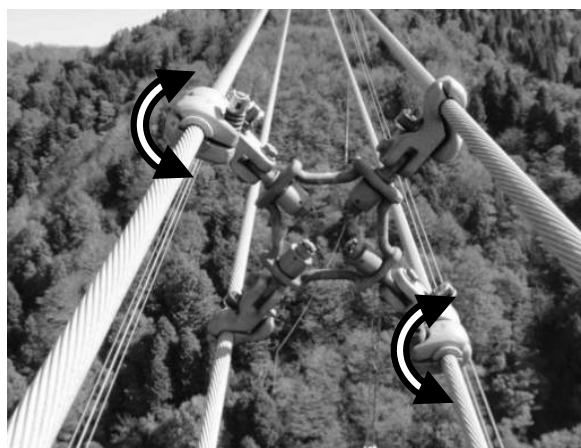


図 観測で使用したルーズスペーサ (ルーズ把持部:左上・右下)

◆討議 [木村吉郎 (東京理科大学)]

着氷送電線に関する精度の高い対風応答の実測結果が得られていますが、ギャロッピングのシミュレーションの結果と比較されたのでしょうか？位相差の傾向等は一致しているのでしょうか？

◆回答：今回の観測では、着氷形状の概略、風速、振動振幅データなどを取得することができましたが、シミュレーションにおいては、構造特性・着氷形状・着氷発達角などの入力条件を少し変えるだけで、大きく応答が変わってしまいます。そのため、どうしても不確定要素が含まれる自然着氷による観測結果と、位相差の傾向等の応答波形の比較は難しいと考えており、現状では、十分にシミュレーションとの比較を行っておりません。今後、比較の仕方 (風速の変化に対する定性的な比較など) を考えて、シミュレーションの検証を実施していきたいと考えています。一方で、各入力条件を明らかにすることができる部分模型を用いた大振幅・低振動数の自由振動実験^{※)} も実施しており、位相差の傾向などの詳細な応答特性をシミュレーションと比較し、空気力のモデル化などの検証を行っていく予定です。

参考文献

※) 松宮央登，西原崇，清水幹夫：架空送電線のギャロッピングを模擬した風洞実験，「フラッターの制御と利用」に関する第1回シンポジウム概要集，2011.

論文題目：“着氷雪送電線の定常空気力係数への初期着氷雪角度の影響”

著者：西原崇，清水幹夫，松宮央登

掲載：Vol.58A, pp.589-598, 2012年3月

◆討議 [八木知己（京都大学）]

ケーブル表面に凹凸があるにも関わらず，凸の位置のみで圧力測定を行っていますが，実験結果にその影響はないのでしょうか？

◆回答：着氷雪送電線模型を用いた著者らのこれまでの一連の実験の中で，模型の表面圧力分布測定値を積分して空気力を算出した結果と，天秤によって空気力を測定した結果を比較しており，両者に差異があることを確認しています．例えば，筆者らの文献^{※)}の図-9には，本論文の実験にも使用した4導体送電線模型（着氷雪形状：三角-中）の空気力係数を，風速10m/s，初期着氷雪角度0°条件にて，天秤測定および圧力測定で求めた結果を示しています．この結果では，導体素線を模擬した凹凸部が風上側に位置する条件（迎角が180°に近い条件）では，圧力測定から求めた定常抗力係数が，天秤による測定値に比べて，小さめの値となる傾向が見られます．この差異の理由は，ご指摘のとおり，導体素線を模擬した凹凸部で，凸の先端位置のみで圧力を測定して積分しているためと考えられます．このような結果をふまえて，本論文では，天秤による測定の方がより正確な値としています．このため，初期着氷雪角度がギャロッピング発生におよぼす影響を定量的に検討した図-15の $C_D + dC_L/d\alpha$ については，天秤測定値を使用して算出しています．一方，図-6，図-10，図-14には，圧力測定による素導体ごとの定常空気力係数を示していますが，素導体ごとの定常空気力係数の相対比較や，初期着氷雪角度によって4導体全体の空気力が変化する理由に関する定性的な議論に用いています．したがって，ご指摘のように，天秤測定と圧力測定では得られた空気力係数に差異がありますが，本論文の論旨に影響はないものと考えられます．

参考文献

※) 松宮央登，清水幹夫，西原崇：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，構造工学論文集，Vol. 56A, pp. 588 - 601, 2010.