

講演7. 索道搬器における風と動搖のモニタリングに関する取組

交通システム研究部

※森 裕貴 小野 寛典

山口 大助

八木 誠（客員研究員）

1. はじめに

架空されたワイヤロープに搬器を懸垂させて輸送を行う、いわゆる索道システム（ロープウェイ等）は、急こう配に強いことや支柱間の線路長を長く設定できることなどの理由により、山間部の観光地やスキー場での旅客の輸送用に多く使用されている。また、近年、その特徴を生かして、臨海部や、丘陵地の大団地と鉄道駅との交通アクセス用等の都市交通機関への利用も見込まれている。

ワイヤロープに懸垂され走行する索道の搬器には動搖が発生しやすい。この動搖には、支柱通過時や加減速に伴うピッキング、搬器を懸垂する支索等の振動や搬器に作用する風の影響によるローリング、支柱通過時の上下振動などがある。特に、索道は風の影響を受けやすいため、搬器の動搖を考慮して、線路中の近接する支柱等の建造物や地表面などと接触することの無いよう、搬器と建造物等とは一定の間隔を設けられている⁽¹⁾ほか、支柱や停留場に設置された風速計による風の状況から運行の可否を判断し、運転規制等を行っている⁽¹⁾。一方、風速計が設置されている支柱や停留場から離れると風の状況を把握できないため、風速計による風の状況のみでは運行の可否の判断が難しく、熟練した運転係員による搬器揺れの観察等に頼っているのが現状である。

走行中の搬器でひとたび発生した動搖を減衰させる要素として、空気抵抗のほか、動搖減衰装置やジャイロモーメントによる方法⁽²⁾、動吸振器⁽³⁾による制振等が検討され、一部で実用化している。

そのような中でも、風が影響したと思われる索道事故は発生している。索道の事故種類は鉄道事故等報告規則において、索条切断事故、搬器落下事故、搬器衝突事故、搬器火災事故及び索道人身傷害事故の5項目と定められている。図1に過去10年間に発生した索道運転事故件数の推移⁽⁴⁾を示す。5項目の内、風が影響する事故は搬器落下事故及び搬器衝突事故が考えられ、その件数は下げ止まりの傾向にあるものの、年3~4件程度で推移している。幸いにして、索道においては近年死者を出すような大きな事故は発生していないものの、乗客が乗車した状態で搬器の落下または衝突が発生すれば、大きな被害が生じることは想像に難くない。

当研究所では、平成27年及び令和2年に起きた搬器衝突事故の原因調査を行っている。いずれも複線交走式索道であり、死亡者は出なかったものの、乗客が搭乗した搬器が周辺構造物と衝突した事例である。鉄道における運転状況記録装置のようなものがないため、事故当時の搬器の揺れや搬器が受けた風の影響が推定できず、原因分析については難航した。

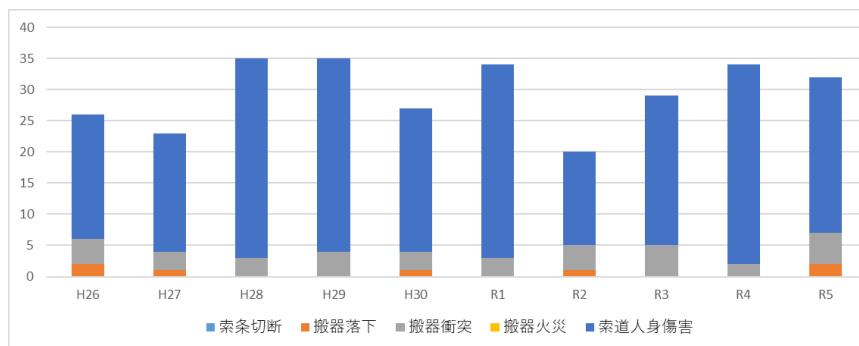


図1 10年間の索道運転事故発生件数の推移



図2 搬器衝突事故後の搬器

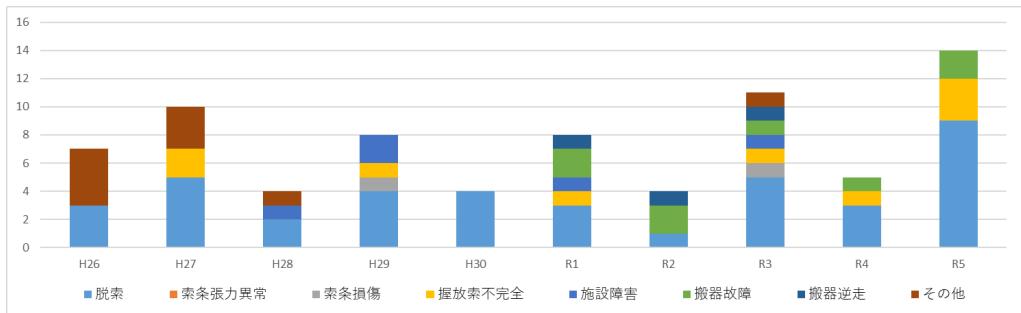


図3 10年間の索道インシデント発生件数の推移

同様に索道のインシデントについて、図3に過去10年間に発生した索道インシデント発生件数の推移⁽⁴⁾を示す。索道のインシデントは、脱索、索条張力異常、索条損傷、握放索不完全、施設障害、搬器故障、搬器逆走及びその他の8項目と定められている。8項目の内、風が影響するインシデントは主に脱索（ワイヤロープが案内輪から外れること）が考えられ、こちらも年3~4件程度で推移している。一度脱索が発生すると、乗客は自力で避難することはできず、救助を待つほか無い。索道における救助は地形等にもよるが、数時間以上要することは珍しくなく、乗客への負担は大きい。

多くの索道では支柱や停留場に設置した風速計の情報を基に運行の可否を判断し、運転規制等を行っている。一方、風速計が設置されている支柱や停留場から離れる風の状況を把握できないため、風速計の値のみでは運行の可否の判断が難しく、熟練した運転係員による搬器揺れの観察等に頼っているのが現状である。前述の通り、従来の風速計による風の状況把握や運転係員による観察だけでは搬器の動搖が原因の事故が発生する可能性がある。そこで、筆者らは索道に予防保全の考え方を取り入れることで、事故の発生を回避し、更なる安全性向上が可能であると考えた。

本研究ではワイヤロープに懸垂する搬器に着目し、予防保全の考え方から搬器に生じる動搖と搬器に作用する風を常時モニタリングする装置の開発を目的とする。また、索道事業者協力の下、搬器風速の試験測定を実施し、今後実施を予定している長期フィールド試験に向けて、モニタリング装置の改良を行ったので、その結果について報告する。

2. モニタリング装置の構築

今回構築したモニタリング装置は、風の状況の常時把握と、搬器動搖の常時把握の両方を取り入れた仕組

みとした。風の状況と搬器動搖の状況を両方から常時把握し、平常時から何らかの異変を検知することが目的となる。風が搬器に当たることで搬器が揺れるという関係性から、「いつ」、「どこで」、「どの程度の風向・風速の風」が搬器に当たって、「搬器がどう揺れたか」を同時に記録することで、これらの多く蓄積されたデータから運行の可否の判断をスムーズに行える可能性がある。更には、万が一、搬器が構造物などに衝突するような特異な事象が発生した場合にはその原因の究明が容易になることが期待される。

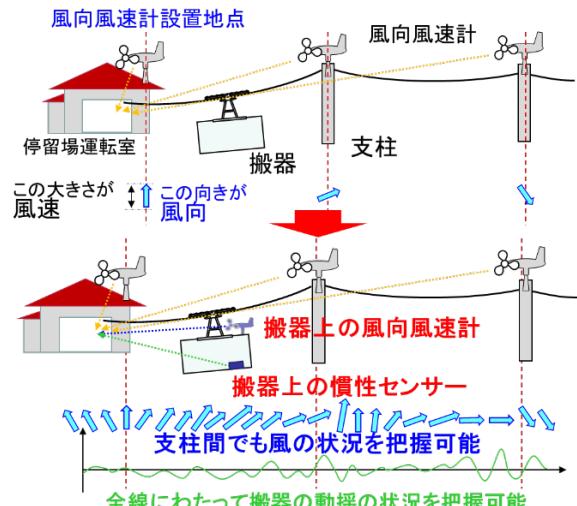


図4 モニタリング装置のコンセプト

図4に構築するモニタリング装置のコンセプトを示す。大きな目的として以下の3項目が挙げられる。

- 安全性の向上: 支柱間を含めて風の影響を検知でき、動搖を把握することで周辺構造物との接近を検知する。
- 利便性の向上: 運行開始は風と目視で揺れを評価していたが、具体的な数値で判断することが可能とする。

- 保守の省力化:搬器上の風向風速計で十分となれば、支柱上の既設風向風速計が不要となり、メンテナンスコストや見回りの人手が削減可能。

以上のコンセプトを達成するため、モニタリング装置の仕様を検討し構築することとした。

2. 1. モニタリング装置の仕様

索道を対象とした搬器状態モニタリングの仕様について検討し、以下の仕様を定めた。

- 1) 停留場間を走行する搬器の位置と速度、搬器動搖(搬器に作用する加速度等)、搬器走行位置における風向及び風速を搬器内で連続的に自動収録する。
- 2) 搬器動搖、風向及び風速の測定値を搬器走行位置の情報とともに搬器から運転室やクラウドサーバ等にリアルタイムで無線伝送する。
- 3) 運転室や搬器内で各測定値を隨時確認できるようにする。
- 4) 測定値が事前に設定した許容値を超過した際は運転係員に通知する。
- 5) 日々の測定結果をクラウドサーバ等に一定期間蓄積する。
- 6) 搭載する機器の動作に必要な電源を確保する必要がある。

以上の仕様を満たす概略を図5に示す。

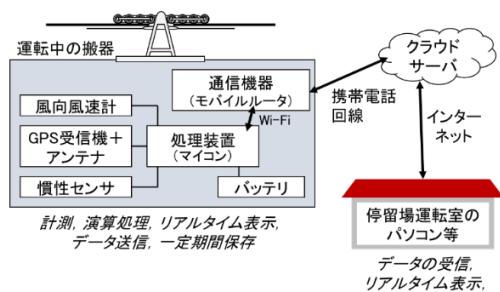


図5 モニタリング装置の概略

運転中の搬器に搭載する機器には、風向風速計は搬器上に風向や風速を測定可能な機器、GPS(Global Positioning System)受信機とアンテナは搬器の走行位置を測定するための機器、慣性センサは搬器の動搖を測定可能な機器、処理装置(マイコン)は風向風速計等からの測定データを集約するための機器、通信機器(モバイルルータ)は測定データを運転室へ送信するための機器がある。なお、バッテリは機器の駆動に必要な電源である。

2. 2. モニタリング装置の構成

図6にモニタリング装置の構成を示す。風向と風速の測定について、搬器の動搖を発生させる風の風向や風速を把握するために、風向の早い変化に対応可能な超音波風向風速計を選定した。搬器の外に風向風速計を設置し、「いつ」、「どの程度の風向・風速の風」が搬器に当たったかを記録する。これによって線路中のどの地点で著大な風が生じたかや地形等によって搬器が受ける風を把握することが可能になる。

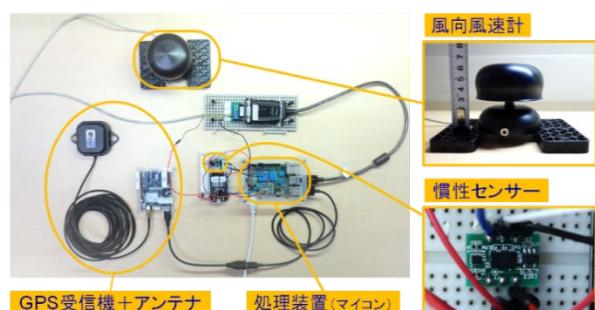


図6 モニタリング装置の搬器側構成

次に、搬器の動搖を前後方向、左右方向、上下方向の加速度と、ロール、ピッチ、ヨーの各回転の速度(角速度という)を測定する機器として慣性センサを選定する。搬器は同じ方向に傾き続けるような状態だけでなく、瞬間的な風や脈動する風を受けて動搖する状態もあり、揺れの方向が細かく変化するため、現在いくつかの索道事業者で採用されている傾度計では、この細かな変化に追従できず、測定には不十分といえる。採用した慣性センサでは加速度や角速度から搬器がどの程度揺れているかを把握することが可能である。筆者らのこれまでの取り組みから、搬器が支柱付近を走行する場合と支柱から離れた地点を走行する場合では、例えば前者では搬器の揺れが速く、後者ではその揺れが遅くなるような違いがあることが分かっている。従って、「搬器がどう揺れたか」を記録しておくことで線路中のどの地点で搬器に異常な動搖が生じたかを把握することが可能となる。

搬器の走行距離や運行速度は滑車の回転速度から検出し、運転室等の表示盤に表示する方法が主流である。しかし、今回のモニタリング装置においては、既存の装置から独立して稼働させるために不採用とした。モニタリング装置では、「どこで」、すなわち搬器の走行位置を測定するために、スマートフォンの地図アプリで自分の現在位置を示す、いわゆるGPSを探

用した。GPS は複数の衛星から発信される電波を利用して位置情報を計算するため、電波を受信するアンテナと電波の情報を利用して現在位置を計算する受信機が必要になる。この GPS では、複数の電波を利用することで速度の測定も可能である。

風向風速計、慣性センサ、GPS 受信機がそれぞれ測定したデータを同期、集約するために処理装置（マイコン）を用意する。この処理装置に組み込まれた WiFi 通信モジュールからモバイルルータを経由してクラウドサーバへデータを送信する。また、集約した測定データは処理装置内の SD カード等の記憶媒体にも一定期間保持される。処理装置は外部から電源供給のない搬器内に設置することから、小型かつ低消費電力であることが必須となる。近年、小型で低価格なコンピュータが多く流通しており、その中から Raspberry Pi 4 というマイコンを処理装置に選定した。図 7 に構築したモニタリング装置の外観を示す。

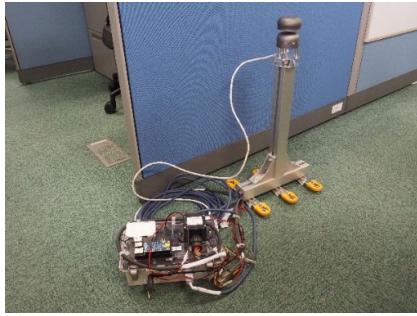


図 7 モニタリング装置の外観

3. 長期試験の事前測定

索道事業者協力の下、構築したモニタリング装置で搬器風速を測定したので、その結果について示す。測定は、比較的小型の搬器（8人乗り）が一定速度で循環する、自動循環式普通索道の A 路線と、2つの大型搬器（166人乗り）で山麓駅と山頂駅を交互に往復する、複線交走式普通索道の B 路線の2箇所で行った。モニタリング装置は、風向風速計は治具を用いて搬器上に設置し、他の機器は箱に収めて搬器内に設置した。図 8 に風向風速計の取り付け状況を示す。

なお、索道搬器の様な移動する物体は、まったくの無風状態であっても移動による空気抵抗が搬器及び風向風速計に作用し、見かけ上風速が作用しているように観測されてしまう。これは、搬器の移動速度（GPS 速度）によって数学的に補正可能であり、本研究では補正後の風向を真の風向、補正後の風速を真の風速と

呼ぶ。補正方法の概略を図 9 に示す。

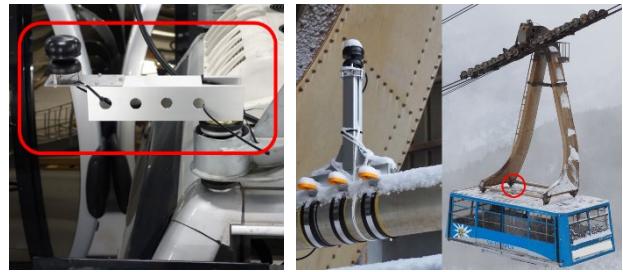


図 8 A 路線の取り付け状況（左）、
B 路線の取り付け状況（右）

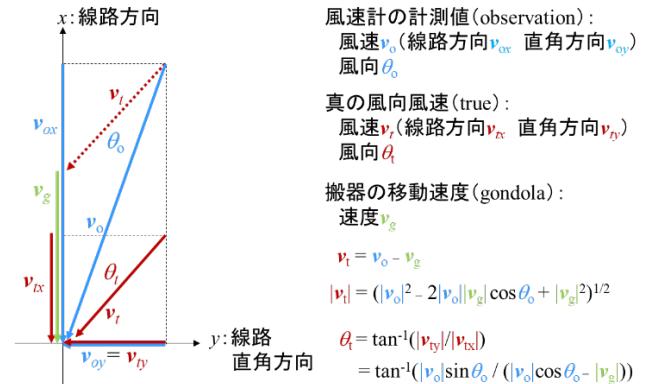


図 9 真の風向・風速の導出方法

3. 1. A 路線の風の測定結果

図 10 に A 路線の駅舎と支柱の位置関係を示す。測定は山頂駅から山麓駅までの往復を 11 時 30 分頃から 16 時 30 分頃まで実施した。本路線では第 2 号支柱に風速計、第 3 号支柱に風向風速計が設置されている。図 11 は第 3 号支柱に設置された風向風速計のデータである。当日は第 3 号支柱では南風が継続して観測されており、10m/s 前後の風速が確認できる。

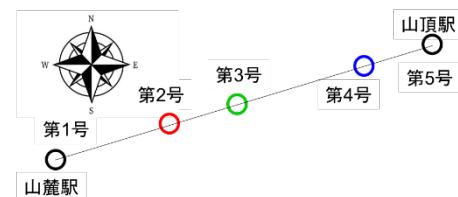


図 10 A 路線の支柱と駅舎の位置関係

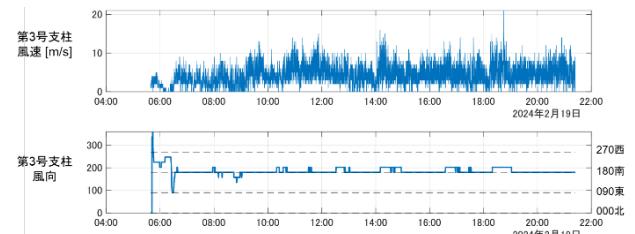


図 11 A 路線の第 3 号支柱の風向風速

図 12 にモニタリング装置での測定結果の一例を示す。風速については線路中で途切れずに記録できており、2.1 節で示したモニタリング装置の仕様を満たしていることが分かる。また、第 2 号支柱から第 3 号支柱の間で比較的強い風が吹いており、既存の風速計設置位置とは若干離れ、最も強い風が支柱間で吹いていることが分かる。

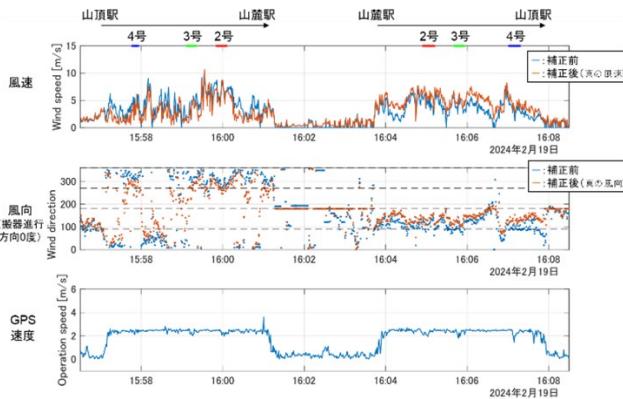


図 12 A 路線の測定結果

風向については、山頂から山麓へ向かう際は搬器の進行方向に対して右回りに約 300 度が南方向、山麓から山頂へ向かう際は約 120 度が南方向であり、線路中は図 11 で示した第 3 号支柱のデータと概ね一致している。第 4 号支柱の前後で風向が乱れているが、これは第 4 号支柱の南側に搬器位置よりも高層のビルが建っており、ビル風の影響と考えられる。GPS 速度については、実際の運行速度である 2.5m/s を良く追従しており、GPS 受信環境が良いことを示している。

3. 2. B 路線の風の測定結果

図 13 に B 路線の駅舎と支柱の位置関係を示す。当人は比較的風が強く、試運転を 1 往復した後に運休が決まつたので、1 往復のみ測定を実施した。本路線では、山頂駅と第 1 号支柱及び第 2 号支柱に風向風速計が設置されている。本風向風速計はログを残さないタイプのため記録はないが、表示器を撮影した動画（図 14）にて第 1 号支柱では北西の強い風が吹いていることが、第 2 号支柱では風が弱く風向が安定していないことがそれぞれ確認された。

図 15 にモニタリング装置での測定結果の一例（上り）を示す。風速については支柱ではなく、山麓と第 1 号支柱の間でもっとも強く風が吹いていることがわかる。風向については、山麓から山頂へ向かう際は搬器の進行方向に対して右回りに約 70 度が北西方向で

あり、第 1 号支柱の風向風速計の表示状況と一致している。第 2 号支柱の周辺で風速が低く風向が乱れていが、これは第 2 号支柱周辺が防風林に挟まれる形で線路が通っており、風の影響が減衰されているためと考えられる。GPS 速度については、風が強かつたためブレーキを繰り返しながらの運行であることを良く観測できており、GPS 受信環境が良いことを示している。

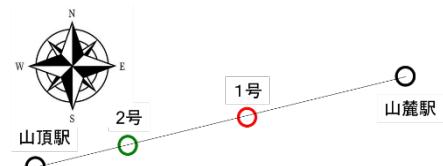


図 13 B 路線の支柱と駅舎の位置関係



図 14 B 路線の第 1 号支柱の風向風速

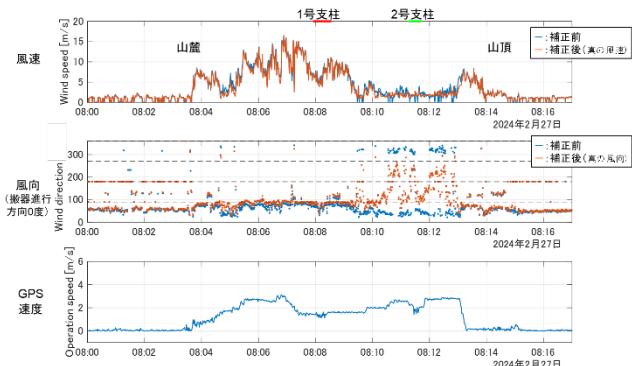


図 15 B 路線の測定結果（上り）

4. 事前測定後のモニタリング装置改良

3 章の結果より、構築したモニタリング装置にて搬器の風向・風速を取得できることが示された。しかしながら、長期フィールド試験を行うにあたり、いくつかの課題が判明したので、その改善策とともにここで紹介する。

4. 1. 安定的な電源の取得

構築したモニタリング装置はバッテリにて駆動する仕組みであるが、現行は携帯性の良いリチウムイオンバッテリーより電源を取得していた。当然のことながら、長期試験を始めると係員が常に監視することは困難であり、バッテリ充電についても電源が枯済する度に交換することは現実的でない。そのため、搬器に搭載された電源より給電を受ける必要がある。電源部分を改造し、搬器電源より給電を受けている様子を図17に示す。



図 17 配電盤とモニタリング装置

4. 2. 風向・風速計の設置位置変更

全体を通じて測定結果を比較すると、上りの風速は1日を通じて安定した波形となることが多く、下りの風速は乱れことが多い傾向にあった。当初は搬器中央に風向・風速計を設置していたが、下り走行の際に搬器の後ろ側へ隠れることとなり、剥離流等の影響が考えられた。そこで、センサの設置位置を搬器の下り方へ移すとともに、40cm程度であった高さ方向も100cmに上げ、外部影響のなるべく少ない位置へ変更することとした。

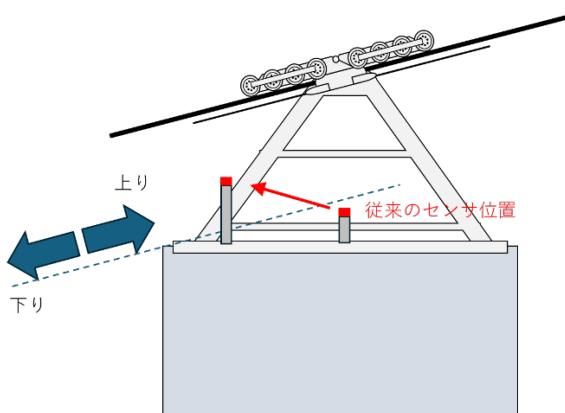


図 18 風向・風速計の設置位置変更

5. おわりに

本研究では、ワイヤロープに吊り下がる搬器に着目し、動搖と搬器に作用する風を常時モニタリングする装置の構築を行った。また、索道事業者協力の下、搬器風速の測定を行うことで、構築したモニタリング装置の風の測定に関する仕様を確認した。その結果、風向風速計とGPSにおいては当初の仕様通り、良好な測定データを得ることができた。

風の測定結果については、事業者が設置した風向風速計の位置においては概ね一致していることが確認された。また、最大風速は支柱以外で測定されるなど、これまでに無い知見を得ることができた。

今回の測定は一日の試験測定に留まっているため、今回の結果が定常的なものかどうかは、長期フィールド試験を実施する必要がある。本検討にて、一日の試験測定において、いくつかの改善点が確認され、モニタリング装置の改良に着手した。この改良を経て、長期フィールド試験を実施をしていきたい。

謝辞

本研究は国土交通省鉄道局の「鉄道技術開発・普及促進制度」の助成を受けて実施するものです。

参考文献

- 日本鋼索交通協会、“索道施設設計標準・管理標準及び同解説 2018年改訂版”(2018)
- 西原修、松久寛、佐藤進、“ジャイロモーメントを用いる制振機構”、日本機械学会論文集(C編)、57卷、534号、pp.497-503 (1991)
- 松久寛、顧栄栄、王永金、西原修、佐藤進、“索道搬器の動吸振器による制振”、日本機械学会論文集(C編)、59卷、562号、pp.115-120 (1993)
- 国土交通省鉄道局、日本鋼索交通協会、“令和5年度索道技術管理者研修会テキスト”(2024)