

⑪ロープウェイ搬器における風と動揺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 一柳 洋輔 小野 寛典
八木 誠 (客員研究員)

1. はじめに

ワイヤロープに懸垂され走行するロープウェイ搬器(客車)で発生する動揺としては、支柱通過時や加減速に伴うピッチング、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。索道(ロープウェイ等)は風に影響されやすいため、線路中で風の影響が大きい地点に風速計を設置して運行可否を判断している⁽¹⁾。また、搬器の動揺を考慮し、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、搬器とこれら建造物等とは一定の間隔を設けている⁽¹⁾。走行中の搬器でひとたび発生した動揺を減衰させる要素として、空気抵抗等のほか、急停止時や支柱通過時に発生しやすいピッチングへの対策として、運転速度次第ではオイルダンパなどの動揺減衰装置が設置されている⁽¹⁾。搬器のローリングに対しては、ジャイロモーメントによる方法⁽²⁾や動吸振器⁽³⁾による制振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が発生している。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はあるものの、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亡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起これば、大きな被害が生じることは想像に難くない。

同様に索道のインシデントについて、図2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。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、数時間以上かかることは珍しくなく、乗客への負担は大きい。

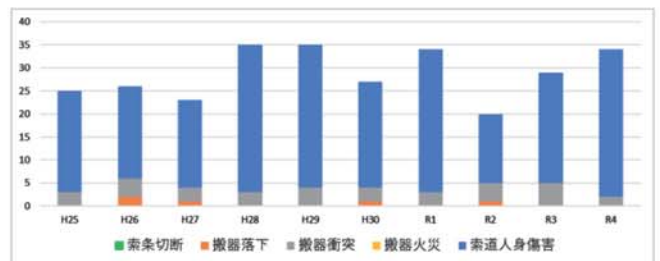


図1 10年間の索道事故発生件数の推移

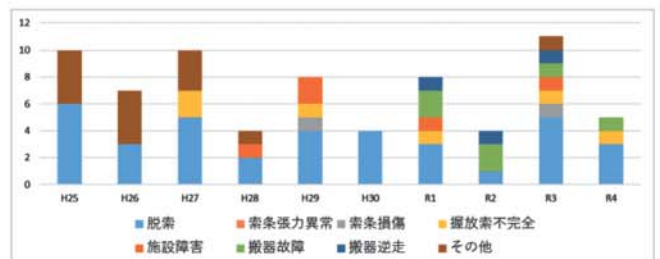


図2 10年間の索道インシデント発生件数の推移

多くの索道では慣例的に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と風の状況を把握できないため、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。本研究では、予防保全の考えを採り入れることで、さらなる安全性向上が可能であると考え、ワイヤロープに吊り下がる搬器に着目し、その動揺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、搬器風速の試験測定を実施したので、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、搬器動揺の常時把握の両方を採り入れた仕組みとした。風の状況と搬器動揺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。

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、搬器動揺(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) 搬器動揺、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随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3に示す。

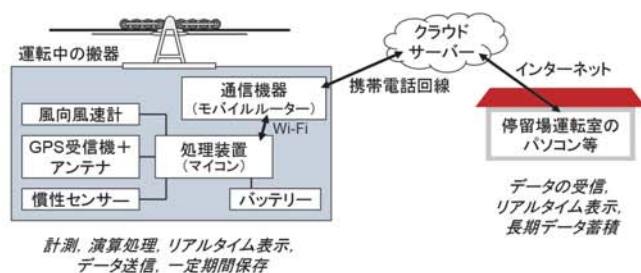


図3 モニタリング装置の概略

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揺を測定可能な機器、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処理装置、通

信機器（モバイルルーター）は測定データを運転室へ送信するための通信機器がある。なお、バッテリー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4に現在の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、搬器の動揺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。

次に、搬器の動揺を前後方向、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揺する状態もあり、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揺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を採用した。GPSは複数の衛星から発信される電波を利用するため、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 Wi-Fi 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。

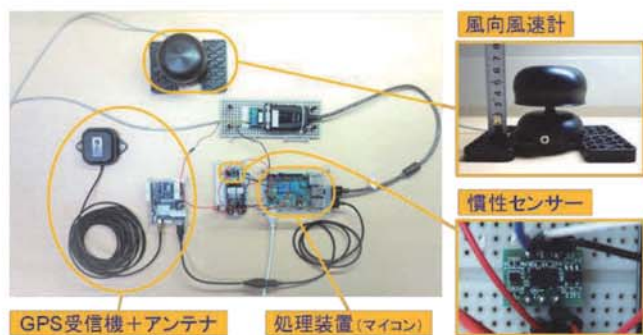


図4 モニタリング装置の搬器側構成

3. 搬器風速の試験測定

索道事業者協力の下、搬器風速をモニタリング装置で測定したので、その結果について報告する。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、その他の機器は箱に収めて搬器内に設置した。図5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。



図5 A路線の取り付け状況(左)、
B路線の取り付け状況(右)

3. 1. A路線の風の測定結果

図6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7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。

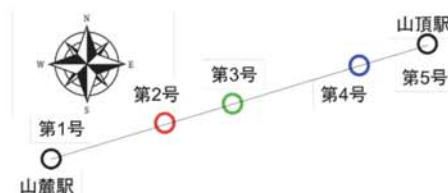


図6 A路線の支柱と駅舎の位置関係

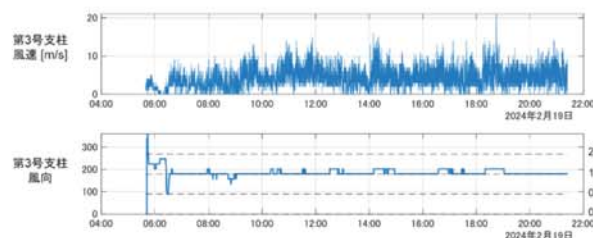


図7 A路線の第3号支柱の風向風速

図8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、モニタリング装置の当初の仕様を満たしていることが分かる。また、2号支柱から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。

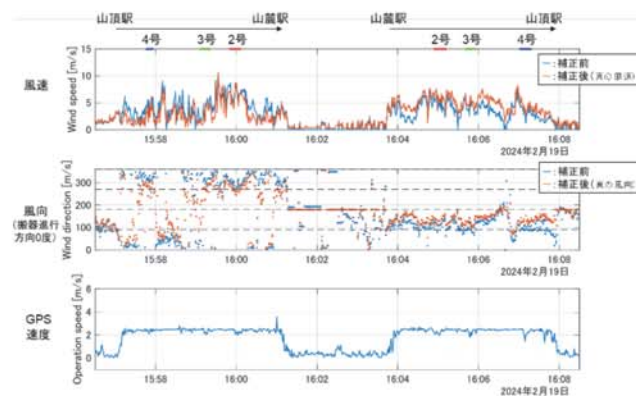


図8 A路線の測定結果

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、線路中は概ね当日の第 3 号支柱のデータと一致している。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 9 に B 路線の駅舎と支柱の位置関係を示す。当日は比較的風が強く、試運転を 1 往復した後に運休が決まったので、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 10)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確認された。

図 11 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るが、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、風が強かったためブレーキを繰り返しながらの運行であった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 9 B 路線の支柱と駅舎の位置関係



図 10 B 路線の第 1 号支柱の風向風速

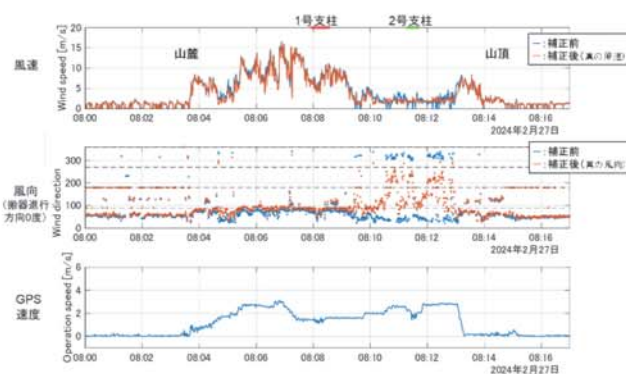


図 11 B 路線の測定結果

4. 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、動揺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。一方で、慣性センサについては、推定アルゴリズムに課題が生じた。

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、常時監視を実現する必要がある。そのために、モニタリング装置の更なる改良に着手したい。また、動揺の測定についても検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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 巻、534 号、pp. 497-503 (1991)
- 3) 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 巻、562 号、pp. 115-120 (1993)
- 4) 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”(2023)