索道施設における風特性と搬器動揺の調査解析および 運転限界風速の推定方法*

佐藤 久雄^{*1}, 千島 美智男^{*2}, 細川 成之^{*1}

Investigation of Wind and Carrier Swing Characteristics in Ropeway Installations and Estimation Method of Limit Wind Speed of Operation

Hisao SATO^{*3}, Michio CHISHIMA and Naruyuki HOSOKAWA

^{*3} Traffic System Research Department, National Traffic Safety and Environment Laboratory,
7-42-27 Jindaijigashi-machi, Chofu-shi, Tokyo, 182-0012 Japan

In ropeway systems, to more increase the safety and reliability of transportation, it is extremely important to do operation control under wind in accuracy since the excessive swing of the carrier by wind may lead to a serious accident such as a collision with the columns. This paper presents (1) results of investigation of wind and carrier swing characteristics in two ropeway installations, (2) simulation results of carrier swing based on wind speed distribution and (3) an estimation method of limit wind speed of operation using carrier response simulation to random wind. Results of estimating limit wind speed of operation in two ropeway installations are reported as well.

Key Words: Ropeway, Wind, Operation Control, Estimation Method, Limit Wind Speed

1. 緒言

架空された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。

この索道システムにおいては、風による過大な搬器動揺は、支柱との衝突等の大事故に結びつく恐れがあり、輸送の安全性および信頼性をより高めるためには、風のもとでの運転保安の向上を図るとともに、風に対する運行管理を適確に行うことが極めて重要である。

これまで風特性については、自然風の性質について、Davenport や日野の研究など数多くの研究が行われている⁽¹⁾が、索道施設において測定・解析されたものは、見当たらない。また、風に対する運行管理については、鉄道関係では、運転規制に関する研究⁽²⁾～⁽⁴⁾や車両の転覆限界風速に関する研究⁽⁵⁾などがあ

るが、索道関係での研究は見当たらない。索道関係では、搬器の運行停止風速は、主として経験的に決められており、風のもとでの運転保安の向上のためには、データに基づいた決定方法が必要と考えられる。即ち、索道システムにおける風特性を把握するとともに、風に対する搬器の動揺特性を把握し、さらには、風のもとでの搬器の運転限界風速を事前に検討し、適切な運行停止風速を決定することが重要となる。

本報では、索道システムの運転保安の向上および風に対する運行管理のより適確化を図ることを目的として、まず、二つの索道施設において風特性および風に対する搬器の動揺特性の調査・解析を行った結果について述べる。次に、この調査・解析結果をもとに、風に対する搬器動揺のシミュレーション方法について検討を行った結果について述べる。さらに、この風応答シミュレーションを用いて搬器の運転限界風速を推定する方法の提案を行うとともに、その検討例として、測定を行った二つの索道施設における運転限界風速の推定結果について報告する。

2. 風特性と搬器動揺の調査・解析

風特性と搬器動揺の調査・測定については、通常風の強いと言われている地域における二つの索道施設において行った。一つはゴンドラリフトの施設(以後「索

* 原稿受付 2004 年 9 月 7 日。

^{*1} 正員、(独)交通安全環境研究所(〒182-0012 調布市深大寺東町 7-42-27)。

^{*2} (独)交通安全環境研究所。

E-mail: h.sato@ntsel.go.jp

Table 1 Installation specifications

Item	Installation (A)	Installation (B)
Ropeway system	Monocable gondola	Monocable detachable chairlift with hood
Slope length (m)	2,820	954
Travel speed (m/s)	5	5
Carrier capacity (passengers)	8	4
Carrier mass including grip, hanger etc.(kg)	530	390
Carrier mass during measurement(kg)	660	520

道施設A」と記述する)であり、もう一つはフード付チェアリフトの施設(以後「索道施設B」と記述する)である。二つの索道施設の概要を表1に示す。

現在、索道施設における風向、風速の測定には、風杯型(半球形の風杯が風によって回る回転数から風速を、矢羽根の回転量から風向を測定する方式)あるいは風車型(プロペラの回転数から風速を、流線型胴体と尾翼で風向を測定する方式)の風向風速計が使用さ

Fig.1 Supersonic type wind gauge

Table 2 Specifications of supersonic type wind gauge

Item	Specifications
Measurement item	Component wind speed (x, y), Wind speed (vector composition), Wind direction
Measurable wind speed (m/s)	0 ~ 30
Accuracy (%)	1
Resolution (m/s)	0.005
Response frequency (Hz)	10

れている。しかし、これらは、「搬器横方向風速」のような特定の方向に関する風速を測定するには適していないので、今回は、超音波風速計により測定を行った。この風速計は、2点から交互に超音波の信号を出し、両信号が2点間を通過する時間の差から風速を測定するものであり、比較的最近になって実用化されたものである。早い風速変動や、小さな風速の測定も可能であり、検出器を組み合わせ、瞬間の各方向の風速を求めることができる。超音波風速計の形状を図1に、その仕様を表2に示す。

今回の風速の測定は、風の強い、いわゆる風の通り道と言われている場所に搬器を静止させた状態で行い、搬器の前方上部に超音波風速計を固定して取り付け、搬器横方向風速(以後「Y方向風速」と記述する)、全風速(ベクトル合成風速)等について測定を行った。超音波風速計を装着した搬器の形状を図2に、測定状況を図3に示す。

風に対する搬器の動揺については、搬器にジャイロを搭載して、ロール角等について測定を行った。なお、測定時の搬器の質量は、表1に示すとおりであり、測定器の搭載および1名乗車の状態での測定を行った。

(a) Carrier : A

(b) Carrier : B

Fig.2 Shape of carrier with wind gauge

(a) Carrier : A

(b) Carrier : B

Fig.3 Measurement circumstances

2・1 風特性について 風の性質を記述する統計的特性値については、種々のものが考えられるが、ここでは、重要と考えられる「突風率」、「風速の確率密度関数」および「風速のパワースペクトル密度関数」について解析を行った。なお、風速の方向については、索道の輸送の安全性からより重要と考えられるY方向風速について、主として解析を行った。Y方

Fig.4-1 Gust factor (Installation : A)

向風速については、搬器進行方向に対して左方向からの風速を(+)としている。また、風速の測定における搬器動揺分の補正については、風速の測定の際の搬器動揺が小さく、その影響は小さいと考えられるため、ここでは省略した。

2・1・1 突風率 突風率は、風速の変動性を表わす特性値であり、ある観測時間内における最大瞬間風速 U_{max} と平均風速 U との比 $G=U_{max}/U$ で表わされる。気象関係の分野では10分間の平均化時間が用いられ、航空関係の分野では2分間の平均化時間が用いられる。今回の解析では、航空関係の分野にない平均化時間は2分間とし、12秒間隔で突風率を求めた。なお、データのサンプリング時間は0.2秒とした。

索道施設AおよびBについての結果を図4-1および図4-2に示す。索道施設では、現在、全風速を測定し、これにもとづいて風に対する運行管理が行われている。比較のために、Y方向風速と全風速についての突風率の解析結果を示した。索道施設Aにおける突風率は、全風速について、平均2.42、最大4.58に対し、Y方向風速については、平均2.54、最大4.73であった。また、索道施設Bにおける突風率は、全風速

Fig.4-2 Gust factor (Installation : B)

について、平均1.99、最大2.79に対し、Y方向風速については、平均2.15、最大3.22であった。これらの結果を見ると、いずれの施設においても、Y方向風速についての突風率の平均値および最大値は、全風速についての突風率の値を上回っている。即ち、風に対する運行管理を行う場合、本施設のように風の通り道となっているような場合には、全風速について運行管理を行うよりも、特定の方向の風速（Y方向風速）について運行管理を行うほうが、輸送の安全上より適切な運行管理が行える可能性のあることを示していると考えられる。

2・1・2 Y方向風速の確率密度関数 図5に、Y方向風速に関する測定した確率密度関数（プロット点）および近似した確率密度関数（実線）を示す。風速の確率密度関数は、風速の振幅領域における確率密度分布を表わしている。索道施設AにおけるY方向風速の平均値は $\mu = -4.46\text{m/s}$ 、標準偏差は $\sigma = 2.19\text{m/s}$ 、索道施設BにおけるY方向風速の平均値は $\mu = 4.11\text{m/s}$ 、標準偏差は $\sigma = 1.60\text{m/s}$ であった。なお、風速の（－）は、搬器進行方向の右方向からの風であったことを示している。また、図5における実線

Fig.5 Probability density function of y-direction wind speed

は、それぞれのY方向風速の平均 μ および標準偏差 σ の正規分布を示している。Y方向風速の確率密度関数は、実測値と近似値ではほぼ一致しており、正規分布するとみなしてよいと考えられる。

2・1・3 Y方向風速のパワースペクトル密度関数 測定したY方向風速のパワースペクトル密度関数を図6に示す。これは、Y方向風速の二乗平均値の周波数領域における密度分布を表わしている。索道施設A、Bともに、同様な傾向を示しており、Y方向風速のパワースペクトル密度関数 $S(f)$ は、周波数 f の $(-0.73 \sim -0.74)$ 乗に比例した結果となっている。索道施設Aでは、近似的に $S(f) = 0.406 f^{-0.734}$ であり、索道施設Bでは、 $S(f) = 0.270 f^{-0.737}$ であった。

2・2 風に対する搬器の動揺特性 今回測定した風に対する搬器の動揺特性としては、安全上より重要と考えられる横方向の搬器動揺（ロール角）について解析を行った。

ロール角の確率密度関数を図7に示す。索道施設Aにおけるロール角の標準偏差は $\sigma = 1.26\text{deg}$ 、 3σ は 3.78deg 、最大値は 5.34deg であった。また、索道施設Bにおけるロール角の標準偏差は $\sigma = 0.24\text{deg}$ 、 3σ

Fig.6 Power spectral density function of y-direction wind speed

Fig.7 Probability density function of roll angle

Fig.8 Frequency response function of roll angle to y-direction wind speed

は 0.72deg, 最大値は 1.4deg であった。

また, Y 方向風速に対するロール角の周波数応答特性を図 8 に示す. 系の固有周波数を顕著に示しており, 索道施設 A の搬器では 0.275Hz, 索道施設 B の搬器では 0.280Hz であることがわかる。

ロール角のパワースペクトル密度関数を図 9 に示す. 索道施設 A, B ともに, 系の固有周波数において, ロール角のパワースペクトル密度が非常に増大していることがわかる。

3. ランダム風応答シミュレーション方法

風速分布をもとに, 搬器のランダム風応答シミュレーション方法について検討を行った. 風特性において, Y 方向風速の確率密度関数は, ほぼ正規分布するとみなしてよいとの結果が得られた. そこで, 測定して得られた Y 方向風速の平均値 μ および標準偏差 σ の正規分布の確率密度関数に従う乱数を発生させ, これを Y 方向風速とした時の搬器 A および搬器 B のロール角応答を求めた. ここでは, 搬器の運動は 1 自由度の振り子として扱い, 風外力 $F(t)$ は, 次式により与えた。

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho C_s A U(t) |U(t)|$$

Fig.9 Power spectral density function of roll angle

ここに、 ρ : 空気密度、 C_s : 搬器の横力係数、 A : 搬器横方向の投影面積、 $U(t) : (\mu, \sigma)$ の正規分布の確率密度関数に従う乱数として与えられるY方向風速である。なお、風速 $U(t)$ における搬器動揺の影響については、運転限界風速を安全側（厳しい側）に推定することを考慮して、ここでは省略している。シミュレーションに用いた搬器Aおよび搬器Bの諸元を表3に、その結果を図10 および図11に示す。(a)がシミュレーション値であり、(b)が実測値である。

この結果を見ると、シミュレーション波形の形状は、実測波形の形状と異なった形状となっているが、

Table 3 Carrier specifications in simulation

Item	Carrier (A)	Carrier (B)	Note
Carrier Mass during Experiment (kg)	660	520	(*)1
Position of Gravitational Center (m)	3.19	2.71	(*)1
Damping Coefficient Ratio	0.005	0.005	(*)2
Lateral Projected Area (m ²)	3.23	2.27	(*)1
Lateral Force Coefficient	0.57	0.36	(*)1

(*)1: measured value (*)2: estimated value

Fig.10 Random wind response of carrier (A)
(Y-direction mean wind speed : -4.5m/s)

最大値は、実測値に対して、確率密度関数の近似度に対応した結果となっていることがわかる。シミュレーション波形の形状が実測波形の形状と異なるのは、シミュレーションに用いた風速分布の確率密度関数には元の波形の位相情報が含まれていないためである。しかしながら、索道の場合は、波形の形状よりも波形の振幅値の大きさが安全上重要であり、特に、その最大値が重要となる。本シミュレーション波形の最大値は、実測値に対して、確率密度関数の近似度に対応した結果となっており、ほぼ妥当な結果が得られていると考えられる。

4. 運転限界風速の推定方法およびその推定例

索道システムにおいて、風のもとでの搬器の運転限界風速を事前に推定しておくことは、システムの運転保安の向上、および、風に対する運行管理のより適確化を図るために極めて重要である。前項で示したように、風速の確率密度関数を用いた搬器のランダム風応答シミュレーション結果は、ほぼ妥当な結果が得られている。そこで、風速の確率密度関数を用いた搬器のランダム風応答シミュレーションを行い、下記のような手順により、搬器の運転限界風速を推定する方法の提案を行う。

単線の索道の搬器の振れについては、索道施設の構

Fig.11 Random wind response of carrier (B)
(Y-direction mean wind speed : 4.1m/s)

造の技術基準として「支え索を中心に11度振れても支柱等に接触するおそれのないように設けるものとする」(「索道施設の審査及び維持管理要領」, 鉄道局長通達) が規定されている。そこで, 「運転限界風速」としては, 搬器の最大ロール角11度に対応する風速をいうこととする。

風による外乱力は, 定常風に変動風を重ね合わせたランダム風として与え, 変動風の性質(標準偏差値)は定常風速(平均風速)によらず変らないものとして, 複数回のシミュレーションを行い, この結果を用いて運転限界風速の推定を行う。具体的な算出方法は, 次のとおりである。

- (1) 平均風速5m/sから25m/s程度まで5m/s毎に, 各風速で複数回のシミュレーションを行う。
- (2) 各シミュレーション結果から, 風速の最大値および搬器ロール角の最大値を算出する。
- (3) その結果を「平均風速～最大ロール角」「最大風速～最大ロール角」の図にプロットする。
- (4) プロットした図において, 各風速での最大ロール角の上限値について, 最適な2次曲線を求める。
- (5) 求めた最適な2次曲線において, ロール角11度に対応する風速を「運転限界風速」として算出する。

(a) Carrier : A

(b) Carrier : B

 Fig.12 Random wind response simulation
(Y-direction mean wind speed : 20m/s)

以上の提案している運転限界風速の推定方法を用いた検討例として, 測定を行った二つの索道施設における運転限界風速の推定結果を示す。ここでは, 各風速で4回毎のシミュレーションを行った。図12に, Y方向平均風速20m/s時における搬器Aおよび搬器Bのランダム風応答シミュレーション結果の一例を示す。これらの結果を用いて得られた索道施設Aの搬器の場合の運転限界風速の推定結果を図13に, 索道施設Bの搬器の場合の結果を図14に示す。それぞれの図において, (a) は平均風速と最大ロール角の関係を, (b) は最大風速と最大ロール角の関係を示す。運転限界風速については, 索道施設Aの搬器の場合は, 平均風速では15.1m/s, 最大風速では23.3m/sと推定され, 索道施設Bの搬器の場合は, 平均風速では28.4m/s, 最大風速では34.6m/sと推定される。

索道施設Bの搬器の運転限界風速がAの搬器の場合より高い理由は, 搬器質量に対する搬器横方向の投影面積および空力係数の割合がかなり小さいことによると考えられ, 上記の結果は, 索道施設Bの搬器がより耐風性が高いことを顕著に示している。本索道施設における風に対する運行管理を検討する際に, 運行停止風速としては, 上記の運転限界風速の推定結果が有力

(a) Mean wind speed vs. maximum roll angle

(b) Maximum wind speed vs. maximum roll angle

Fig.13 Limit wind speed of operation for carrier (A)

(a) Mean wind speed vs. maximum roll angle

(b) Maximum wind speed vs. maximum roll angle

Fig.14 Limit wind speed of operation for carrier (B)

な裏付けデータになるものと考えられる。

5. 結 論

本報では、索道システムの運転保安の向上および風に対する運行管理のより適確化を図ることを目的として、索道施設における風特性と搬器動揺の調査・解析結果、風速分布を用いたランダム風応答シミュレーション方法についての検討結果、さらに、このシミュレーション方法を用いた搬器の運転限界風速の推定方法の提案、および、その推定例について報告した。主な結果をまとめると、次のとおりである。

(1) 搬器横方向風速についての突風率の平均値および最大値は、全風速についての突風率の値を上回る結果が認められた。風に対する運行管理を行う場合、特定方向（搬器横方向）の風速に対する運行管理も検討する必要があると考えられる。

(2) 搬器横方向風速の確率密度関数は、ほぼ正規分布するとみなしてよいと考えられる。

(3) 搬器横方向風速のパワースペクトル密度関数 $S(f)$ は、周波数 f の $(-0.73 \sim -0.74)$ 乗に比例した結果が認められた。索道施設 A では、近似的に $S(f) = 0.406 f^{-0.734}$ であり、索道施設 B では、 $S(f) = 0.270 f^{-0.737}$ であった。

(4) 搬器横方向風速に対するロール角の周波数応答特性に関する解析結果は、系の固有周波数を顕著に示しており、索道施設 A では 0.275Hz 、索道施設 B では 0.280Hz であることが認められた。

(5) 正規分布に従う搬器横方向風速の確率密度関数を用いた搬器のロール角応答シミュレーション結果については、実測値に対して、確率密度関数の近似度に対応した結果が認められた。

(6) このランダム風応答シミュレーションを用いて、搬器の運転限界風速（搬器の最大ロール角 11 度に対応する風速）を推定する方法について提案を行った。

(7) 運転限界風速の推定例として、二つの索道施設における推定結果を示した。この運転限界風速の推定結果は、運行停止風速を決定する際に、有力な裏付けデータになるものと考えられる。

一方、運転限界風速の推定精度の向上のためには、索道施設における変動風の性質、特に、定常風速との関係をより一層明確に把握することが重要と考えられ、この点については、今後も調査・検討を行っていきたいと考えている。

文 献

- (1) 岡内功・伊藤学・宮田利雄，耐風構造，(1977)，丸善
- (2) 今井俊昭・藤井俊茂・種本勝二・島村泰介，鉄道強風規制のための風速評価の試み，鉄道総研報告，11-10(1997)，29-34
- (3) 吉野伸一・松田洋一・進藤州弘，風向要素を取入れた運転規制手法の開発，JREA，41-2(1998)，25206-25209
- (4) 島村誠・小林範俊，強風警報システム (WINDAS) の開発，JREA，45-9(2002)，28631-28634
- (5) 日比野有・石田弘明，車両の転覆限界風速に関する静的解析法，鉄道総研報告，17-4(2003)，39-44