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*　　千島　美智男*　　細川　成之*

Investigation of Wind and Carrier Swing Characteristic in Ropeway Installations and Estimate Method of Limit Wind Speed of Operation

by

Hisao SATO*　　Michio CHISHIMA*　　Naruyuki HOSOKAWA*

Abstract

Ropeway systems provide transportation using carriers that are suspended from cables. The main advantages of these systems against conventional railways are in that systems are applicable to steep slopes and enable line length between to be long.

It is very important in these ropeway installations to improve safety and operation control against winds. The purpose of this paper is to obtain wind and carrier swing characteristics in ropeway installations and to present an estimate method of limit wind speed of operation.

This paper presents (1) results of investigation of wind and carrier swing characteristics in 2 ropeway installations, (2) simulation results of carrier swing based on wind speed distribution and (3) an estimate method of limit wind speed of operation using carrier response simulation to random wind. Results of estimating limit wind speed of operation in 2 ropeway installations are reported as well.

原稿受付：平成１５年３月１７日
＊交通システム研究領域

１．はじめに

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、風特性を把握すること、風に対する搬器の動揺特性を把握すること、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正化を図るために極めて重要である。

これまで風特性については、Davenportや日野らの研究(1)があるが、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、運転限界風速については、鉄道関係では、今井らの研究(2)や吉野らの研究(3)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、風のもとでの搬器の運転限界風速は、主として経験的に決められており、安全上必ずしも十分とは言えないのが現状である。

本報では、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正化を図ることを目的として、まず、２つの索道施設における風特性および風に対する搬器の動揺特性の調査・解析結果について述べる。また、この風速分布をもとに、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とともに、その検討例として、２つの索道施設における運転限界風速の検討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２つの索道施設において行った。１つはゴンドラリフトの施設（以後「索道施設A」と記述する）であり、もう１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。２つの索道施設の概要をTable 1に示す。

Table 1 Installation specifications

Item	Installation (A)	Installation (B)
Ropeway system	Monocable gondola	Monocable detacchable 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

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れている。しかし、これらは、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、最近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て、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Fig.　1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

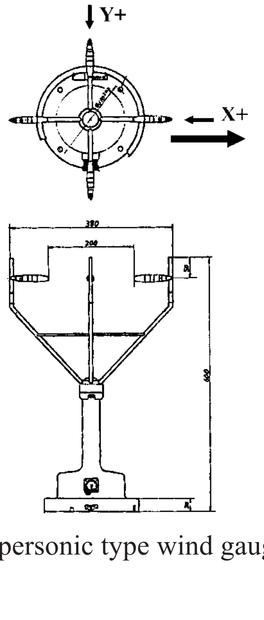
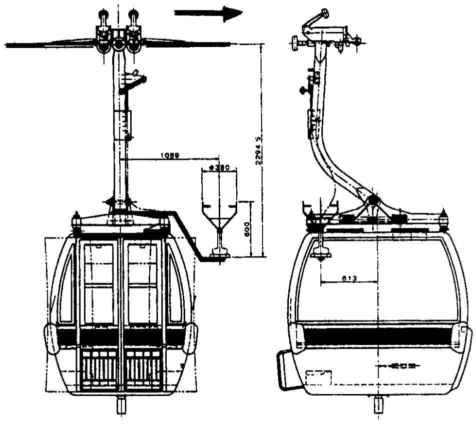


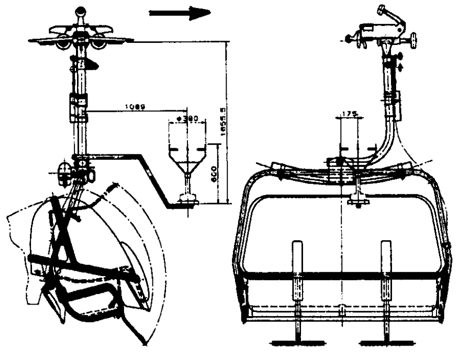
Fig.1 Supersonic type wind gauge

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Fig.　2に、測定状況をFig.　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。



(a) Carrier : A



(b) Carrier : B

Fig.2 Shape of carrier with wind gauge

(a) Carrier : A　　(b) Carrier : B

Fig.3 Measurement circumstances

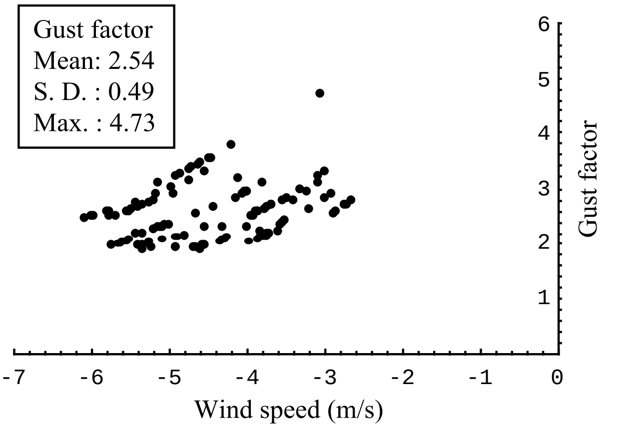
なお、測定時の搬器の質量は、Table　1　に示すとおりであり、測定器の搭載および１名乗車の状態で測定を行った。

２．１．風特性について

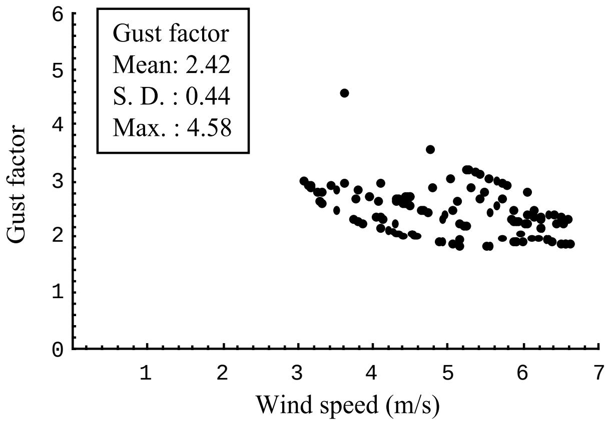
風の性質を記述する統計的特性値については、種々のものが考えられるが、ここでは、重要と考えられる「突風率」、「風速の確率密度関数」および「風速のパワースペクトル密度関数」について解析を行った。なお、風速の方向については、索道の輸送の安全性からより重要と考えられるY方向風速について、主として解析を行った。Y方向風速については、搬器進行方向に対して左方向からの風速を（＋）としている。

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、

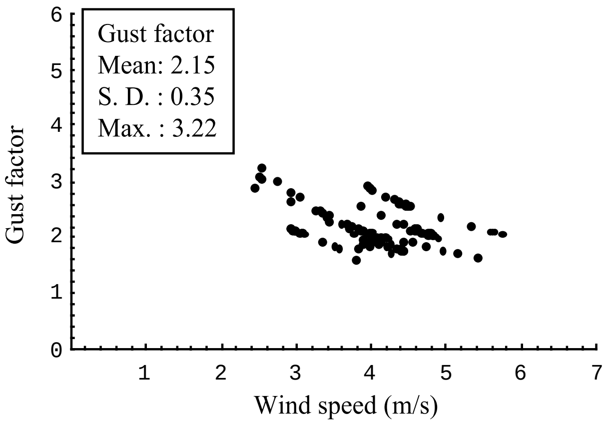


(a) Y-direction wind speed

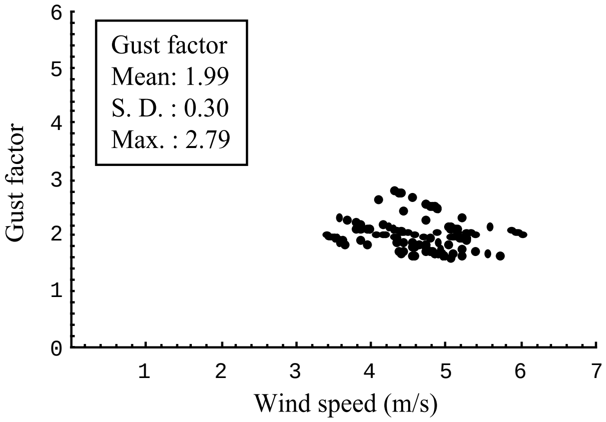


(b) Total wind speed

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



(a) Y-direction wind speed

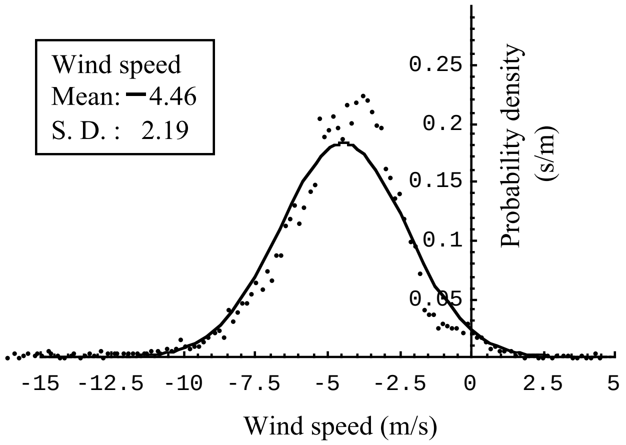


(b) Total wind speed

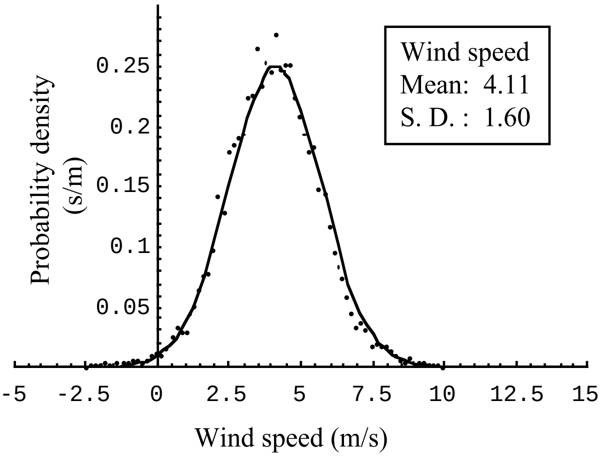
Fig.4-2 Gust factor (Installation : B)

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らい平均化時間は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Fig.　4-1およびFig.　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を行っている。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、全風速について、平均1.99、最大2.79に対し、Ｙ風速については、平均2.15、最大3.22であった。こららの結果を見ると、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、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と考えられる。



(a) Installation : A

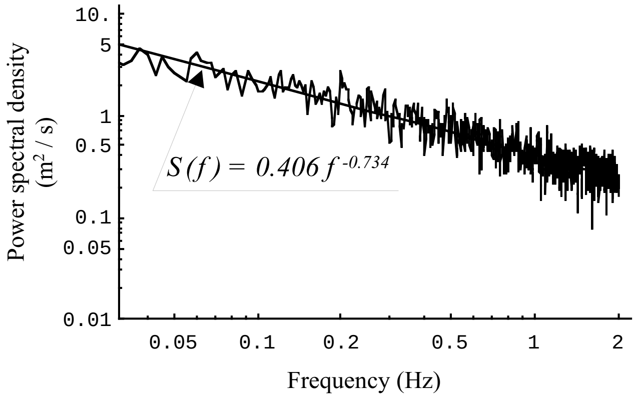


(b) Installation : B

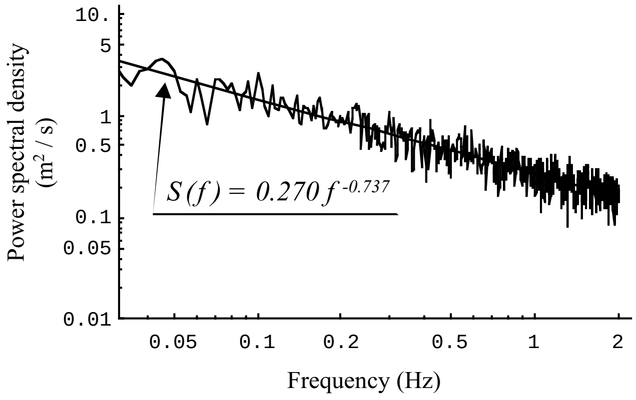
Fig.5 Probability density function of y-direction wind speed

２．１．２．Ｙ方向風速の確率密度関数

Fig.　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μ＝－4.46m/s、標準偏差はσ =2.19m/s、索道施設ＢにおけるＹ方向風速の平均値はμ =4.11m/s、標準偏差はσ =1.60m/sであった。Fig.　5(a)(b)における実線はそれぞれの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。

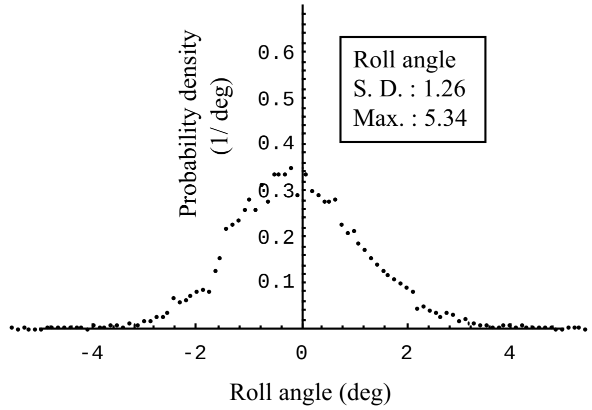


(a) Installation : A

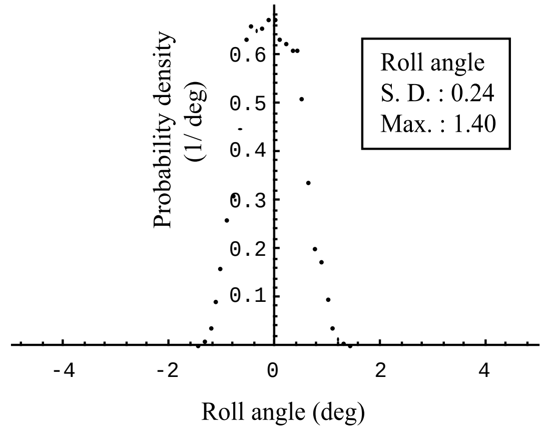


(b) Installation : B

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



(a) Installation : A



(b) Installation : B

Fig.7 Probability density function of roll angle

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Fig.　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～-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　$S(f)=0.406f^{-0.734}$　であり、索道施設Bでは、$S(f)=0.270f^{-0.737}$ 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。

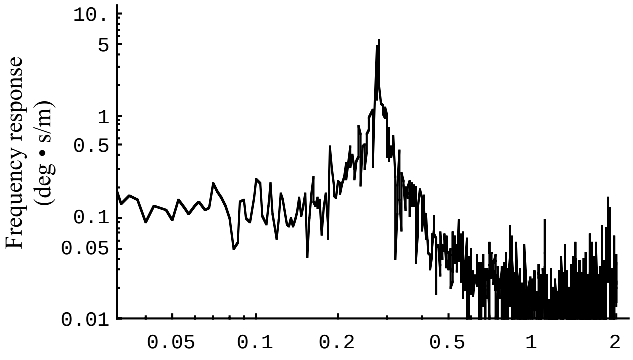
ロール角の確率密度関数をFig.　7に示す。索道施設Aにおけるロール角の標準偏差はσ=1.26deg、3σは3.78deg、最大値は5.34degであった。また、索道施設Bにおけるロール角の標準偏差はσ=0.24deg、3σは0.72deg、最大値は1.4degであった。

また、Y方向風速に対するロール角の周波数応答特性をFig.　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では0.275Hz、索道施設Bでは0.280Hzであることがわかる。

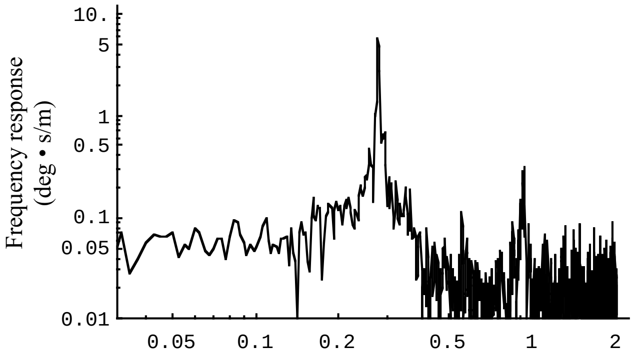
ロール角のパワースペクトル密度関数をFig.　9に示す。索道施設A、Bともに、系の固有周波数において、ロール角のパワースペクトル密度が非常に増大していることがわかる。

３．ランダム風応答シミュレーション方法の検討

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



(a) Installation : A



(b) Installation : B

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

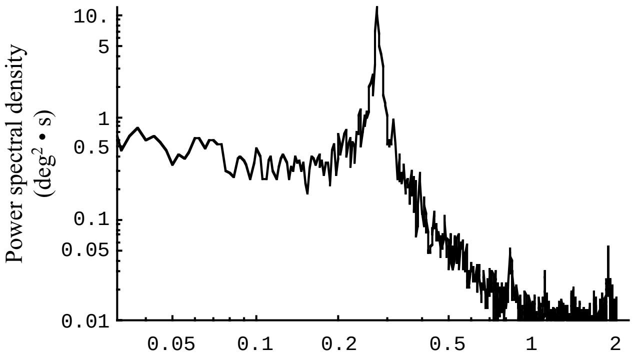
Table 2 Carrier specifications in simulation

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)

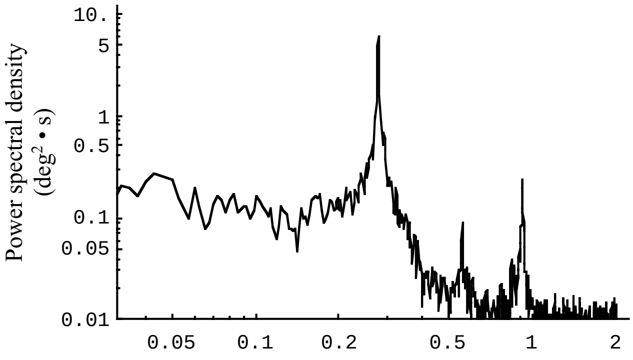
(*1): measured value (*2): estimated value

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。

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



(a) Installation : A

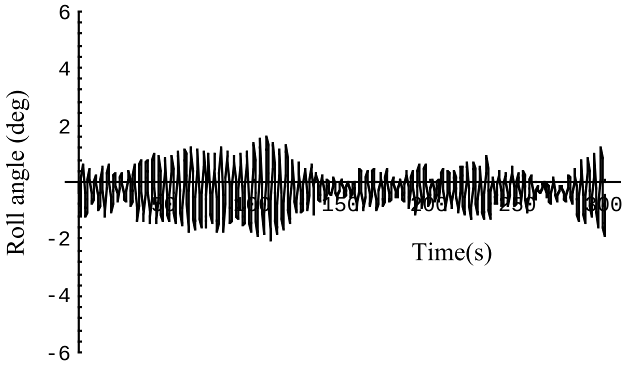


(b) Installation : B

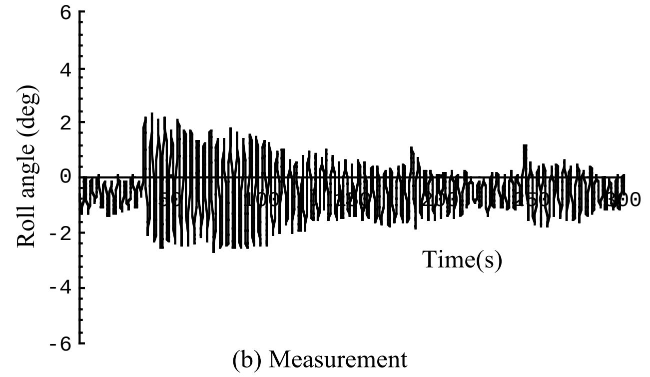
Fig.9 Power spectral density function of roll angle

なお、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)*:（μ、σ）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。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 Table　2 に、その結果を Fig.　10　および Fig.　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、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。

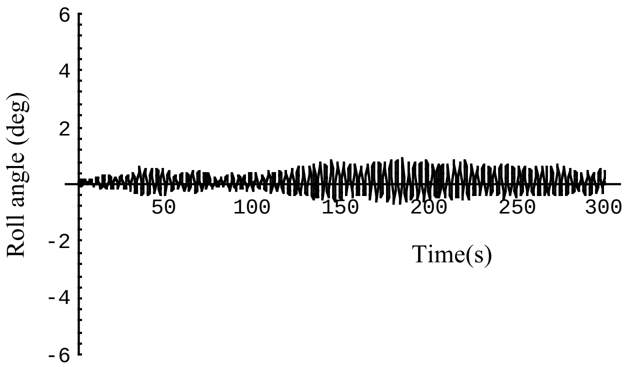


(a) Simulation

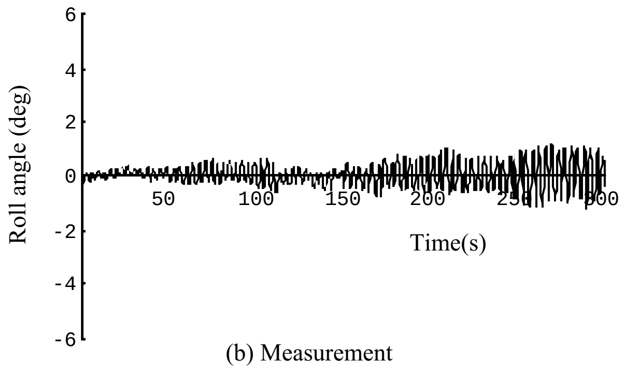


(b) Measurement

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



(a) Simulation



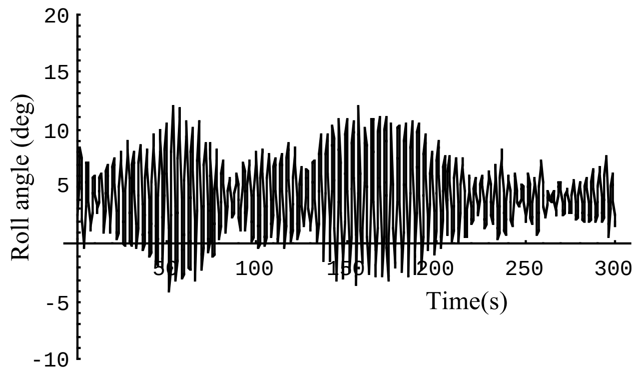
(b) Measurement

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

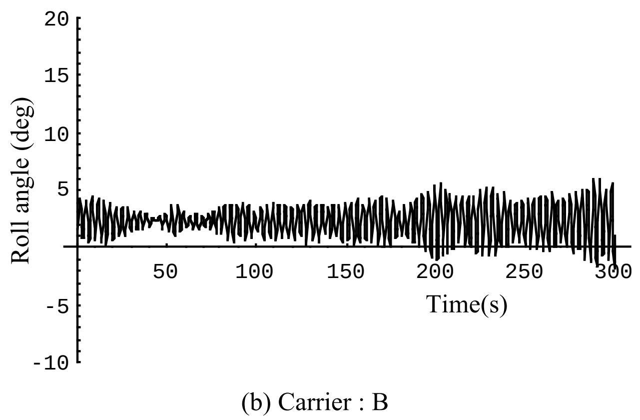
４．運転限界風速の推定方法の提案

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検討しておくことは、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正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、索道施設の構造の技術基準として「支えい索を中心に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）ことが規定されている。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。



(a) Carrier : A



(b) Carrier : B

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

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。

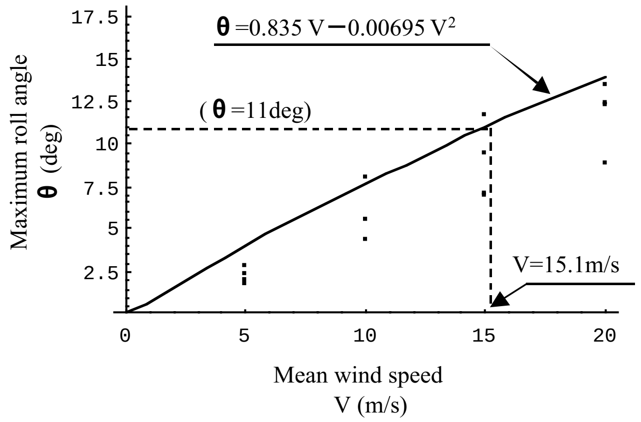
（４）プロットした図において、各風速での最大ロール角の上限値について、最適な２次曲線を求める。

（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。

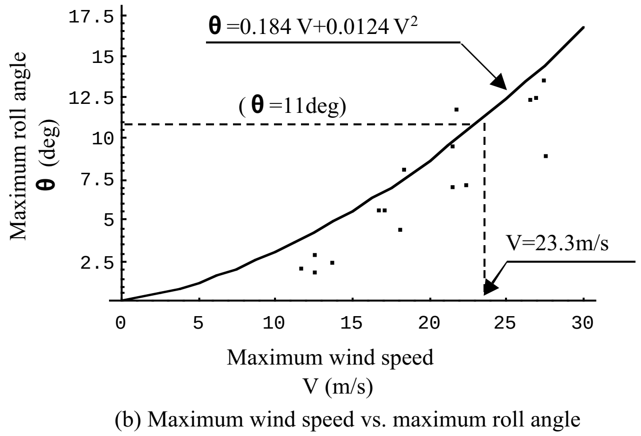
５．索道施設における運転限界風速の検討例

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、２つの索道施設における運転限界風速の検討結果を示す。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Fig.　12に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検討結果をFig.　13に、索道施設Ｂの搬器の場合の結果をFig.　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　であった。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　であった。

索道施設Ｂの搬器の運転限界風速がＡの搬器の場

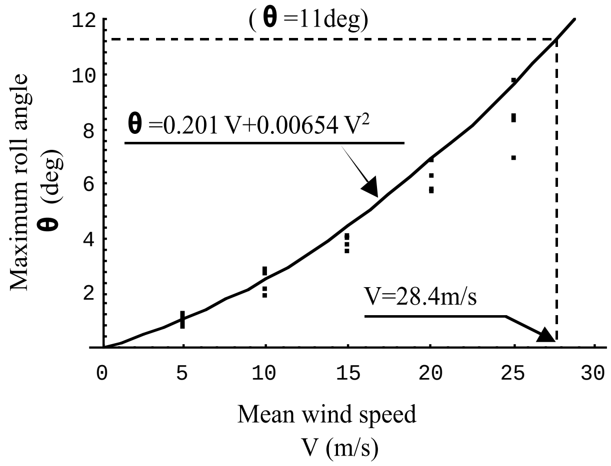


(a) Mean wind speed vs. maximum roll angle

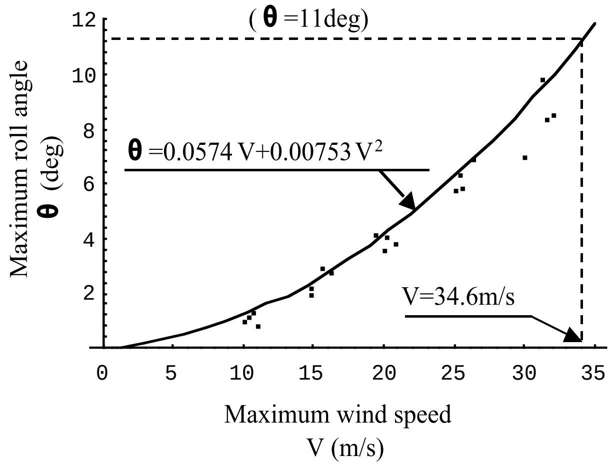


(b) Maximum wind speed vs. maximum roll angle

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)

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については、上記の結果が一つの目安になると考えられる。

６．まとめ

本報では、索道施設における風特性と搬器動揺の調査・解析結果、風速の確率密度関数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、これを用いた搬器の運転限界風速の推定方法の提案、および、２つの索道施設における運転限界風速の検討例について報告した。以上の結果をまとめると、次のとおりである。

（１）風に対する運行管理を行う場合、全風速に対してよりもＹ方向風速に対し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と考えられる。

（２）Ｙ方向風速の突風率は、索道施設Ａでは平均2.54、最大4.73であった。索道施設Ｂでは平均2.15、最大3.22であった。

（３）索道施設ＡにおけるＹ方向風速の平均値はμ＝－4.46m/s、標準偏差はσ =2.19m/s、索道施設ＢにおけるＹ方向風速の平均値はμ =4.11m/s、標準偏差はσ =1.60m/sであった。

（４）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考えられる。

（５）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～-0.74)乗に比例した結果となっており、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。

（６）Ｙ方向風速に対するロール角の周波数応答特性は、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であった。

（７）平均値μおよび標準偏差σの正規分布に従うＹ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については、確率密度関数の近似度に対応した結果が認められた。

（８）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。

（９）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　であった。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　であった。本索道施設における風に対する運行管理については、上記の結果が一つの目安になると考えられる。

最後に、今回の風特性と搬器動揺の調査測定に際して、多大なご協力をいただいた安比総合開発（株）および日本ケーブル（株）の関係各位に謝意を表します。

（参考文献）

（１）岡内、伊藤、宮田：「耐風構造」、丸善、1977
（２）今井、藤井、種本、島村：「鉄道強風規制のための風速評価の試み」、鉄道総研報告、Ｖol.１１、No.10、1997.10
（３）吉野、松田、進藤：「風向要素を取入れた運転規制手法の開発」、JREA、Vol.41、No.2、1998
（４）最所、久保、田中：「強風時における架空配電線路の動態観測」、共和技法、No.457、1996
（５）前田、種本：「横風に対する車両の空力特性」、鉄道総研報告、Vol.9、No.3、1995.3
（６）佐藤、千島、細川：「索道施設における風特性と搬器動揺の調査解析および搬器の風応答シミュレーション」、日本機械学会Dynamics　and　Design Conference、2002.9
（７）佐藤：「索道搬器のランダム風応答シミュレーションおよび運転限界風速の検討」、鉄道技術連合シンポジウム　(J-RAIL02)、2002.11