索道搬器の耐風性向上に関する研究*

(第 1 報, 風による事故解析および実搬器の風洞実験)

佐藤 久雄^{*1}, 千島 美智男^{*2}, 細川 成之^{*1}

Improvement of Windproof Performance of Ropeway Carriers (1st Report, Analysis of Accidents Due to Wind and Wind Tunnel Experiment of Real Carriers)

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

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

In order to increase the safety and reliability of ropeway systems, it is extremely important to improve windproof performance of carriers since the excessive swing of the carrier by wind may lead to a serious accident such as a collision with the columns. As the first step of studying improvement of windproof performance of ropeway carriers, this paper presents analysis results of accidents due to wind and results of wind tunnel experiments of real carriers. Analysis results of accidents clarified features of ropeway accidents due to wind. Results of wind tunnel experiments showed aerodynamic characteristics of two typical monocable carriers.

Key Words: Ropeway Carriers, Windproof Performance, Accident Analysis, Wind Tunnel Experiment

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、急勾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。

このような索道システムにおいて、輸送の安全性及び信頼性の面から重要と考えられている技術課題の一つが、搬器の耐風性の向上である。風による過大な搬器動揺（特に、横方向からの風による動揺）は、搬器の支柱との衝突、あるいは、搬器落下といった重大な事故に結びつく可能性があり、搬器の耐風性向上を図ることにより、輸送の安全性および信頼性をより高めることが求められている。

この搬器の耐風性向上を検討する上で、風による索道事故の現状を把握し分析を行うことは非常に重要である。これまで、索道事故の発生状況については、単年度毎に事故データの収集、集計および事例分析が行

われてきている。⁽¹⁾⁽²⁾ 一方、風により発生した事故に着目し、複数年度にわたる事故データについて統計的に分析し、その特徴等について考察を行った文献は見受けられない。

また、搬器の耐風性向上を検討するには、まず、搬器の空力特性や耐風性（特に、横方向の特性）について把握しておくことが重要である。鉄道関係では、列車の耐転覆性の検討のために、横風に対する車両の空力特性を把握するための風洞実験等⁽³⁾⁽⁴⁾が行われている。一方、索道関係では、搬器横方向の空力特性等に関して詳細な風洞実験を行った文献は見受けられない。

本報では、索道搬器の耐風性の向上を図ることを目的に、その第一ステップとして、風による事故解析および実搬器の風洞実験を行った結果について述べる。

風による事故解析については、単年度毎の索道事故の発生状況に関する調査結果データ⁽¹⁾⁽²⁾から、風による事故を抽出し分類を行うとともに、その内容について統計的に分析し、その特徴を明らかにした。調査・分析対象は、1990 年から 2000 年までの 11 年間の索道事故データである。

また、実搬器の風洞実験については、上記の事故解析結果に基づき、風による事故の発生確率の高い普通索道の搬器について行った。特に、この普通索道の搬器の中でも単線式の搬器が風により揺れ易く、事故の

* 原稿受付 2005 年 8 月 9 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

発生確率も高いことから、この種類の代表的な2型式の搬器を選定し、横風に対する搬器の空力特性および耐風性を明らかにした。

2. 索道における輸送の状況と索道事故の現状

索道の種類としては、閉鎖式の搬器を使用する普通索道といす式の搬器を使用する特殊索道に分けられる。普通索道としては、交走式の索道やゴンドラリフトなどがあげられ、特殊索道としては、チェアリフトや滑走式のリフトがあげられる。

我が国の索道の設置基数の推移を図1に、輸送人員の推移を図2に示す。現在の設置基数は、約3,000基であり、その約94%が特殊索道であり、約6%が普通索道となっている。また、2000年度の輸送人員は、約5億6千万人であり、その約89%が特殊索道であり、約11%が普通索道となっている。

Fig.1 Number of ropeway installations

Fig.2 Passengers carried in ropeways

Fig.3 Number of ropeway accidents

一方、索道運転事故の推移を図3に示す。運転事故は、年平均で約18件の発生となっている。

「索道運転事故」は、鉄道事故等報告規則(昭和62年運輸省令第8号)により、次の5項目に定められている。(1) 索条切断事故、(2) 搬器落下事故、(3) 搬器衝突事故、(4) 搬器火災事故、(5) 索道人身障害事故である。ここに、索道人身障害事故は、搬器の運転により人の死傷を生じた事故(前各号の事故に伴うものを除く)である。

1990年から2000年までに発生した索道運転事故での事故内容別の割合を図4に示す。運転事故の事故内容別割合は多い順に、人身障害事故76%、搬器落下事故13%、搬器衝突事故10%、索条切断事故1%となっている。人身障害事故の占める割合が高いが、ここでの人身障害事故のほとんどは、乗客の不注意あるいは係員の対応不備で発生したものである。

また、索道運転事故における死傷者数の推移を図5に示す。運転事故における死傷者数は、年平均で31人となっている。

1990年から2000年までに発生した索道運転事故に

Fig.4 Contents of ropeway accidents

Fig.5 Casualties in ropeway accidents

Fig.6 Contents of accidents in casualties of ropeway accidents

における死傷者数の、事故内容別の割合を図6に示す。死傷者数の事故内容別割合は多い順に、人身障害事故56%、搬器衝突事故30%、搬器落下事故13%、索条切断事故1%となっている。

3. 風による索道事故分析

3・1 風による索道運転事故件数 我が国における1990年から2000年までに発生した風による索道運転事故件数の推移を図7-1に、風による運転事故件数の割合を図7-2に示す。風による運転事故は23件発生しており、全体の運転事故の約11%を占めていることがわかる。

また、1990年から2000年までに発生した風による索道運転事故における事故内容別割合を図8に示す。

Fig.7-1 Number of ropeway accidents due to wind

Fig.7-2 Ratio of ropeway accidents due to wind

Fig.8 Contents of ropeway accidents due to wind

Fig.9 Ratio of carrier fall accidents due to wind

風による運転事故の事故内容別割合は多い順に、搬器衝突事故43%、搬器落下事故35%、人身障害事故22%となっている。

索道における重大運転事故としては、搬器落下事故および搬器衝突事故があげられる。全体の搬器落下事故の中での風による事故の割合を図9に、全体の搬器衝突事故の中での風による事故の割合を図10に示す。風による搬器落下事故は、全体の搬器落下事故の31%を占め、風による搬器衝突事故は、全体の搬器衝突事故の50%を占めている。風による運転事故は、索道における重大運転事故のかなりの割合を占めていることがわかる。

風による索道運転事故における索道の種類別割合を図11に示す。また、1施設当たりの風による平均的年間運転事故件数について、索道の種類別に比較したものを図12-1に示す。風による運転事故の索道種類別割合は、特殊索道が74%、普通索道が26%となっている。一方、1施設当たりの風による平均的年間運転事故件数は、普通索道では0.0030件/基、特殊索道では0.00054件/基となっており、普通索道の方が約5.5倍高くなっていることがわかる。

Fig.10 Ratio of carrier collision accidents due to wind

Fig.11 Types of ropeways in ropeway accidents due to wind

Fig.12-1 Ratio of "number of accidents due to wind" to "number of installations" in each type of ropeway

Fig.12-2 Ratio of "number of accidents due to wind" to "number of installations" in reversible trams and gondolas

また、普通索道における1施設当たりの風による平均的年間運転事故件数について、単線式と複線式の索道の種類別に比較したものを図12-2に示す。単線式索道では、0.0038件/基、複線式索道では、0.0020件/基となっており、単線式索道の方が約2倍高くなっていることがわかる。

3・2 風による索道運転事故における死傷者数 風による索道運転事故における死傷者数の推移を図13-1に、風による運転事故における死傷者数の割合を図13-2に示す。風による運転事故における死傷者数は41人であり、全体の死傷者数の約12%を占めていることがわかる。

風による索道運転事故における死傷者数の、事故内容別の割合を図14に示す。風による運転事故における死傷者数の事故内容別割合は多い順に、搬器落下事

Fig.13-1 Casualties in ropeway accidents due to wind

Fig.13-2 Ratio of casualties in ropeway accidents due to wind

Fig.14 Contents of accidents in casualties of ropeway accidents due to wind

Fig.15 Types of ropeways in casualties of ropeway accidents due to wind

Fig.16 Ratio of "number of casualties in accidents due to wind" to "number of installations" in each type of ropeway

故44%，搬器衝突事故37%，人身障害事故19%となっている。

風による索道運転事故における死傷者数の索道種類別割合を図15に示す。また、1施設当たりの風による運転事故における平均的年間死傷者数について、索道の種類別に比較したものを図16に示す。風による運転事故における死傷者数の索道種類別割合は、特殊索道が68%、普通索道が32%となっている。一方、1施設当たりの風による運転事故における平均的年間死傷者数は、普通索道では0.0064人/基、特殊索道では0.00088人/基となっており、普通索道の方が約7.3倍高くなっていることがわかる。

3・3 風による運転阻害事故件数 索道の事故については、「索道運転事故」以外に「運転阻害事故」が鉄道事故等報告規則に分類されている（2001年10月以降は本規則の改正により、「運転阻害事故」の報告義務が廃止されている）。この運転阻害事故は、搬器の運転に障害を生じた事故で、24時間以上運転を休止したものである。

1998年から2000年における風による運転阻害事故

Fig.17-1 Operation obstruction accidents due to wind

Fig.17-2 Ratio of operation obstruction accidents due to wind

Fig.18 Types of ropeways in operation obstruction accidents due to wind

Fig.19 Ratio of "number of operation obstruction accidents due to wind" to "number of installations" in each type of ropeway

件数の推移を図17-1に、風による運転阻害事故件数の割合を図17-2に示す。風による運転阻害事故は972件発生しており、全体の運転阻害事故件数の約73%を占めていることがわかる。

風による運転阻害事故における索道種類別割合を図18に示す。また、1施設当たりの風による平均的年間運転阻害事故件数について、索道の種類別に比較したものを図19に示す。風による運転阻害事故の索道種類別割合は、普通索道が67%、特殊索道が33%

となっている。一方、1施設当たりの風による平均的年間運転阻害事故件数は、普通索道では1.16件/基、特殊索道では0.038件/基となっており、普通索道の方が約31倍高くなっていることがわかる。このように運転阻害事故においては、“風による運転阻害事故件数”および“1施設当たりの風による運転阻害事故件数の割合”の両者で、普通索道の場合に顕著に高いことが大きな特徴となっている。これは、一般的に普通索道の場合、搬器の構造あるいは線路の設置条件等により、風の影響を受け易くなっているからであると考えられる。

4. 実搬器の風洞実験

索道事故の分析結果に示されるように、風による運転事故は重大事故に高い確率で結び付いており、搬器が支柱に衝突する搬器衝突事故やその反動で搬器が落下する搬器落下事故を引き起こしている。これらの事故は、搬器が風により横方向に大きく振られる物理現象が要因となっている。搬器の横方向の振れに関する技術的要因としては、搬器横方向の風速、搬器横方向空力特性、搬器横方向投影面積、搬器質量などが考えられる。そこで、搬器横方向の風に対する搬器の空力的な特性（横力、揚力、横力係数、揚力係数）ならびに空車時・満車時における耐風性（搬器傾斜角）について、風洞実験により測定・解析を行うこととした。

実搬器の空力特性を把握する方法としては、CFDコードを用いたシミュレーションによる方法も考えられるが、搬器とハンガーの接続部はかなり複雑な形状をしていることなどを考慮して、精度と信頼性の面から風洞実験の実施を選択した。

4・1 実搬器の形状 実搬器としては、前記の事故解析結果（図12-1）に基づき、風による事故の発生確率の高い普通索道の搬器を用いることとした。特に、この普通索道の搬器の中でも単線式の搬器が風により揺れ易く、事故の発生確率も高い（図12-2）ことから、この種類の代表的な2型式の搬器を選定した。実験に用いた実搬器の形状を図20-1に、横方向の搬器断面図を図20-2に示す。また、その搬器仕様を表1に示す。以後、これらの2種類の搬器を「搬器A」および「搬器B」と呼ぶこととする。

4・2 実験方法 実験は、(財)日本自動車研究所の実車風洞を使用して行った。風洞の概略を図21に、仕様を表2に示す。この風洞は、開回路型（エッフェル型）で、測定部は幅6m×高さ5mであり、風速20m/sまでの実験が可能である。今回の実験では、風速を10m/sから20m/sまで2.5m/s毎に

Fig.20-1 Shape of full-sized carriers

Fig.20-2 Cross section of carriers in lateral direction

Fig.21 Wind tunnel

Table 2 Specifications of wind tunnel

Type of wind tunnel		Eiffel type
Size of test section	Width(m)	6.0
	Height(m)	5.0
Maximum wind speed (m/s)		20
Capacity of 2 component balance	Lift (N)	-2,000~2,000
	Drag (N)	-3,000~3,000

変えて行った。本実験におけるレイノルズ数 (Re) は、代表長さを空気の流れ方向の搬器の長さ (搬器幅) にとると、 $Re = (1.3 \sim 2.6) \times 10^6$ の範囲である。測定部の下部には、二分力天秤が設置されており、抗力と揚力の測定が可能となっている。

図 22 に、搬器と風の方向の関係、および測定を行った搬器横力と揚力を示す。ここでは、搬器横力は、図に示すように、搬器横方向の風による搬器抗力を示

Table 1 Specifications of full-sized carriers

		Carrier (A)	Carrier (B)
Length from the rope center to the bottom of the carrier (m)		3.80	3.50
Size of the Carrier (m)	Width	1.95	1.62
	Height	1.75	1.85
	Length	1.55	2.05
Side projected area (m^2)	Carrier itself	2.70	3.31
	Carrier with hanger and grip	3.23	3.55
Passenger capacity (person)		8	6
Empty carrier mass (kg)	Carrier itself	530	490
	Hanger	285	320
	Grip	130	82
Fully loaded carrier mass (kg)		1,010	850

Fig.22 Wind direction and measured aerodynamic forces

している。

空力特性を測定する場合は、搬器を支持台を介してセットし、搬器のみの場合および搬器にハンガーと握索装置を取り付けた場合について、横力および揚力を測定し空力係数を求めた。なお、揚力については、上向きを正とした。搬器にハンガーと握索装置を取り付けて測定する際には、測定にできるだけ影響が出ないようにロープなどでハンガーの支持を行った。なお、搬器にかかる空気力については、予め支持台のみの空気力を測定しておき、その後の実験では、その値を測定値から差し引くこととした。

次に、搬器の耐風性を調べるために、吊した状態で、各風速に対する搬器の傾斜角を測定した。搬器の傾斜角については、ジャイロを搭載して計測を行い、

Fig.23 Experiment circumstances

データのサンプリング時間は0.2秒、平均化時間は、低周波変動を考慮して20秒とした。荷重条件としては、空車状態と満車状態を測定した。また、使用した搬器の形状が乗降口等により左右で若干異なるため、左右方向からの風についても測定を行った。

実験の状況を図23に示す。

4・3 空力特性 実搬器単体の空力特性について、風洞実験を行った結果を図24に示す。(a)は「搬器A」の場合であり、(b)は「搬器B」の場合の結果である。ここに、空気力係数の代表面積は横方向投影面積にとって算出した。算出式は、次のとおりである。

$$C_s = S / \{ (1/2) \rho U^2 A \}$$

$$C_L = L / \{ (1/2) \rho U^2 A \}$$

ここに、 C_s ：横力係数、 C_L ：揚力係数、 S ：横力、 L ：揚力、 ρ ：空気密度、 U ：風速、 A ：搬器横方向投影面積である。

実験結果によれば、横力係数、揚力係数ともに風速によらず、ほとんど変わらないことが分かる。この傾向は、「搬器A」および「搬器B」についても同様の結果であった。平均的な値についてみると、「搬器A」では、横力係数は左側面で約0.40、右側面（扉側）では約0.43であり、揚力係数は左側面で約0.15、右側面では約0.16であった。「搬器B」では、横力係数は左側面で約0.47、右側面（扉側）では約0.42であり、揚力係数は左側面で約0.11、右側面では約0.16であった。「搬器A」、「搬器B」ともに風向により空力特性の差が若干認められたが、これは搬器の左右側面の表面形状

Fig.24 Aerodynamic characteristics of full-sized carrier without hanger and grip

Fig.25 Aerodynamic characteristics of full-sized carrier with hanger and grip

が、乗降口の有無などにより若干異なることによるものと考えられる。

次に、搬器にハンガーおよび握索装置を取り付けた場合の空力特性を図25に示す。(a)は「搬器A」の場合であり、(b)は「搬器B」の場合の結果である。この

場合においても、横力係数、揚力係数ともに風速によって、ほとんど変わらないことが分かる。この傾向は、「搬器A」および「搬器B」についても同様の結果であった。平均的な値についてみると、「搬器A」では、横力係数は左側面で約0.57、右側面では約0.57であり、揚力係数は左側面で約0.09、右側面では約0.10であり、左右側面で同様の値を示している。「搬器B」では、横力係数は左側面で約0.57、右側面では約0.56であり、揚力係数は左側面で約0.10、右側面では約0.11であった。このように、搬器にハンガーおよび握索装置を取り付けた場合、左右側面の表面形状の差は、ほとんど認められなかった。これは、ハンガーの左右の非対称性等の影響により、搬器単体の場合における左右側面の空力特性の差が、減少したと思われる。

また、搬器にハンガーを取り付けた場合と搬器単体の場合の横力係数および揚力係数を比較すると、揚力係数についてはほとんど差が認められないが、横力係数については差が認められ、「搬器A」では搬器単体の場合より0.14～0.17高く、「搬器B」では0.10～0.14高くなっている。

4・4 耐風性 搬器の左右表面形状等の違いによる、風速と傾斜角の関係を図26に示す。これによれば、「搬器A」、「搬器B」ともに、ほとんど差が認められないことがわかる。これは、ハンガーおよび握索装置を取り付けた搬器の、左右側面における空力特性実験の結果を反映しているものと考えられる。

また、積載状態の違いによる風速と傾斜角の関係を図27に示す。これによれば、積載状態の違いによる影響が明確に現われており、この点については風速の増大とともに顕著となっている。風速20 m/sにおける搬器傾斜角は、「搬器A」では、空車状態で4.8度、満車状態で2.1度程度となっており、「搬器B」では、それぞれ7.1度および2.5度程度となっている。このように、「搬器A」の空車状態における傾斜角は、満車状態に比べて2.3倍程度、「搬器B」では2.8倍程度になることが認められた。

2種類の搬器の空気力係数は、図25に示すようにほぼ同じであるが、図26および図27における2種類の搬器の傾斜角が異なる結果を示した理由は、搬器に作用する空気力および搬器質量が2種類の搬器で異なることによるものと考えられる。即ち、空気力係数がほぼ同じであるが、横方向投影面積については「搬器B」の方が大きいため、作用する空気力は「搬器B」の方が大きくなり、加えて、搬器質量は空車、満車ともに「搬器B」の方が小さいため、力学的結果として、「搬器B」の方が傾斜角が大きくなったものと考

Fig.26 Influence of carrier side surface on carrier inclination angle (Load : empty)

Fig.27 Influence of carrier loading condition on carrier inclination angle (Carrier side : right)

えられる。

今回、耐風性について、定常風に対する搬器の応答を示したが、事故との対応については、非定常な風に対する搬器の応答の検討も重要であると考えられる。

非定常風下での搬器の応答を検討するためには、索道施設における風特性を把握する必要がある。現在、索道施設における風特性のデータを蓄積しつつあり、これらの風特性を考慮した非定常な風に対する搬器の応答の検討は、今後の課題としたい。

5. 結 論

本報では、索道搬器の耐風性の向上を図ることを目的に、その第一ステップとして、風による事故解析および実搬器の風洞実験を行った結果について報告した。

風による索道事故の分析結果について、特徴的な点をまとめると、次のとおりである。

(1) 風による運転事故件数は、全体の運転事故件数の11%程度であるが、搬器衝突事故や搬器落下事故といった重大事故に結びつく割合が高い。

(2) 風による搬器衝突事故件数は、全体の搬器衝突事故件数の50%程度を占め、風による搬器落下事故件数は、全体の搬器落下事故件数の31%程度を占める。

(3) 1施設当たりの風による運転事故件数の割合は、普通索道で高く、特殊索道の場合の5.5倍程度である。

(4) 普通索道における1施設当たりの風による運転事故件数の割合は、単線式索道で高く、複線式索道の場合の2倍程度である。

(5) 風による運転阻害事故件数は、全体の運転阻害事故件数の73%程度を占める。

(6) 1施設当たりの風による運転阻害事故件数の割合は、普通索道で非常に高く、特殊索道の場合の約30倍である。

また、実搬器の風洞実験結果についてまとめると、次のとおりである。

(1) 風による事故の発生確率の高い単線式普通索道用の搬器を選定して風洞実験を行い、代表的な2型式の搬器の横風に対する空力特性および耐風性を明らかにした。

(2) 搬器の横力係数および揚力係数は、風速によらずほとんど変らない傾向が認められた。この傾向は、2種類の搬器において同様であった。

(3) 横力係数および揚力係数の値については、2種類の搬器においてほぼ同様の値になることが認められ、横力係数は約0.57、揚力係数は約0.10であった。

(4) 搬器の左右表面形状の違いによる風速と搬器傾斜角の関係は、測定した2種類の搬器において、ほとんど差が認められなかった。

(5) 積載状態の違いによる風速と搬器傾斜角の関係は、風速の増大とともに顕著となり、「搬器A」の空車状態における傾斜角は、満車状態に比べて2.3倍程度、「搬器B」では2.8倍程度になることが認められた。

今回、風による事故解析結果および実搬器の風洞実験結果について示したが、事故への対応については、風対策の方法を検討する必要がある。風対策の方法としては、地上側からの対策と搬器側からの対策があげられ、搬器側からの対策としては、搬器に空力付加物を装着することにより搬器の空力的特性を改善する方法が考えられる。この方法は、実施面では、既存の搬器の形状を変更することなく比較的容易に行え、性能面においても、風とともにその効果が増大することが期待され、搬器の耐風性向上のために好ましい方法とも考えられる。次報において、この方法による搬器の耐風性向上の可能性について、風洞実験により検討を行った結果について報告する予定である。

また、事故防止の観点から、各種の搬器についても、横方向の空力特性に関する風洞実験を実施していく必要があると考えており、この点については、今後の課題としたい。

References

- (1) Japan Funicular Transport Association ed., *Workshop Textbook for Engineering Managers of Ropeway in Japanese*, (1991)～(2001), Japan Funicular Transport Association.
- (2) Japan Funicular Transport Association ed., *Report on Prevention Measure of Ropeway Accidents in Japanese*, No.1(1993)～No.9(2001), Japan Funicular Transport Association.
- (3) Maeda, T. and Tanemoto, K., Aerodynamic Characteristics of Vehicles Due to Cross Winds, *Railway Technical Research Institute Report*, Vol.9, No.3(1995), pp.31-36.
- (4) Tanemoto, K. et al., The Wind Tunnel Tests on Aerodynamic Characteristics of Train/Vehicles Due to Cross Winds, *Railway Technical Research Institute Report*, Vol.13, No.12(1999), pp.47-52.
- (5) Okauchi, I. et al., *Wind-resistant Structure in Japanese*, (1997), Maruzen.