

災害調査報告書

窓拭き用ゴンドラの落下による 作業者の墜落災害

(概要版)

1. 災害の概要

ビル屋上に設置された窓拭き用有人ゴンドラに作業員が搭乗して清掃作業を行っていたところ、ワイヤロープにつり下げられたゴンドラが突然落下して作業員が被災した。ゴンドラ上下動用のワイヤロープを巻き取るウィンチドラムは減速機の出力軸に接続されていたが、この出力軸が破断したため、ウィンチドラムが空回りしてゴンドラが落下したものである。

2. ゴンドラの破損状況と使用状況

2.1 破損状況

ゴンドラ上下動用のワイヤロープを巻き取るウィンチドラムは、図 1 に示すように片側の回転軸が減速機出力軸であり、もう一方の回転軸はベアリングユニットで支持される構造になっている。現地調査の結果、ウィンチドラムを回転させる減速機出力軸がウィンチドラム近傍で破断していた。ウィンチドラムのブレーキは減速機に付加されており、出力軸が破断した場合にウィンチドラムの回転を止める装置はない。このため、減速機出力軸の破断によってウィンチドラムが空回りし、ゴンドラが落下した。

2.2 使用状況

本件災害が発生したのはゴンドラの設置から 1 年程度であり、設置以来の清掃回数は数回程度とのことである。1 回の清掃におけるゴンドラの昇降回数は不明であるが、設置からわずか 1 年余りであることを考慮すると、減速機出力軸は非常に短期間に破損したことになる。

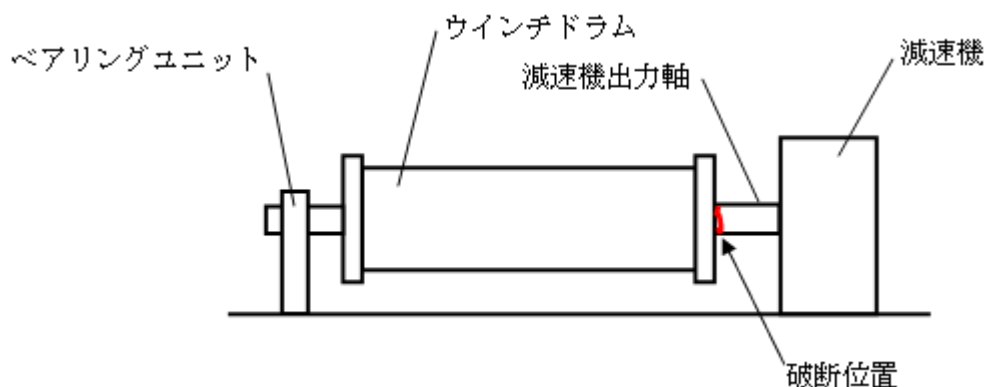


図 1 ウィンチドラム部の模式図と破損状況

3. 減速機出力軸の破断原因調査

3.1 減速機出力軸破断面のマクロおよびマイクロ鏡観察結果

写真1に減速機出力軸の破断面を示す。破断面は大部分平坦であり、繰返し荷重を受け疲労破壊したことが伺える。次に走査型電子顕微鏡（SEM）によるマイクロ観察を行った。写真2は、写真1中Aで示した外周部をSEMで観察した結果であるが、ストライエーションと呼ばれる疲労破壊に特徴的な破面様相が観察されている。ストライエーションは疲労き裂が進展した跡であり、外周部から半径方向に向かって分布している。これは、初期疲労き裂が出力軸の回転によって生じるせん断応力によって発生・進展したのではなく、引張りや曲げによる垂直応力によって発生・進展したことを示唆する。さらに、写真3に写真1中Bで示した内周部の破面を観察した結果を示すが、タイヤトラックと呼ばれるせん断型の疲労破面の特徴が観察されている。

これらのことから、出力軸はまず引張りもしくは曲げによる垂直応力によって疲労き裂が発生し、そのき裂が進展することによって軸の断面積が減少したことでせん断応力が大きくなり、せん断型の疲労破壊を生じたと考えられる。なお、出力軸表面に疲労き裂の起点となるような材料欠陥は観察されなかった。したがって、疲労き裂は材料欠陥を起点として発生したのではなく、軸表面に大きな垂直応力が作用したことによって発生したものと考えられる。

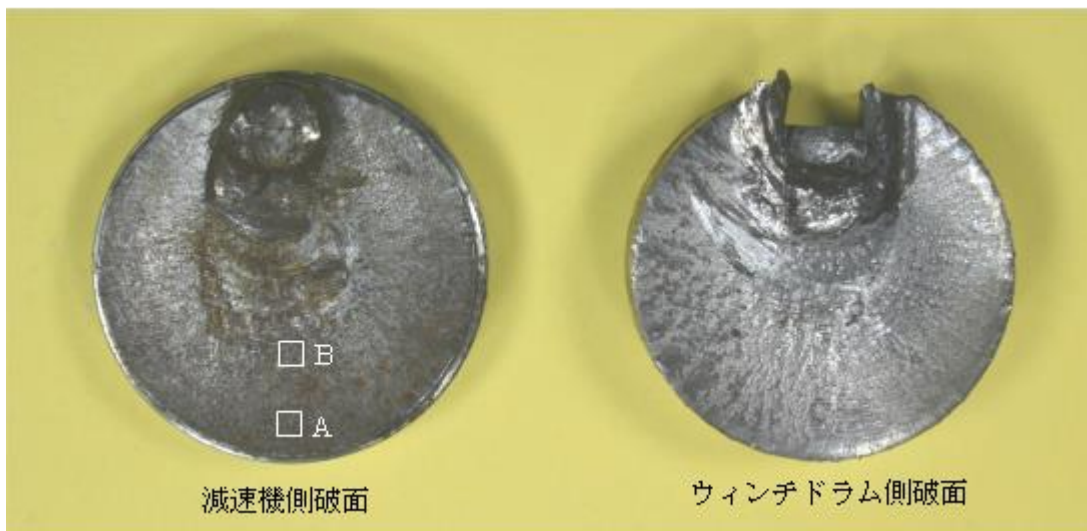


写真1 減速機出力軸の破断面

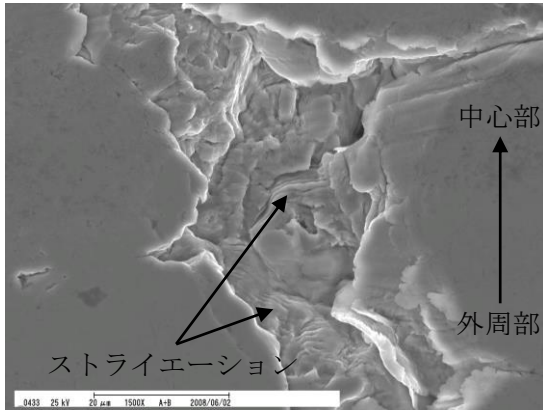


写真2 出力軸外周部の SEM 観察結果

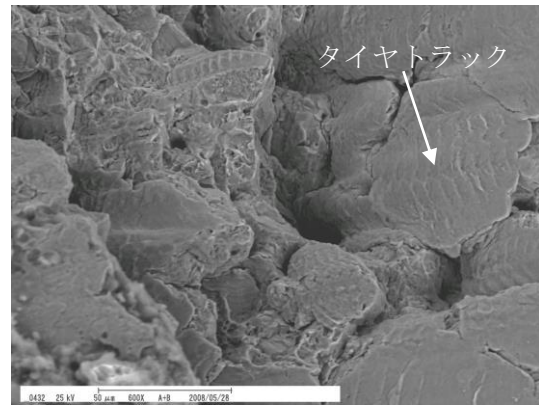


写真3 出力軸内部の SEM 観察結果

3.2 出力軸の成分分析および機械的性質調査

減速機出力軸に適切な材料が使用されていたかどうか検討するために、破断した出力軸について以下の調査を行った。

- ① 化学成分分析
- ② 引張試験
- ③ 結晶組織観察
- ④ 硬さ試験

(1) 化学成分分析

ゴンドラ的设计図によれば、出力軸に使用されている鋼材は JIS S45C である。表 1 に出力軸の化学成分分析結果を示すが、調査結果はこれと矛盾しない。

表 1 出力軸の化学組成 (wt%)

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	0.47	0.20	0.74	0.012	0.015	0.007	0.019	0.14

(2) 引張試験

出力軸の機械的性質を調査するため、出力軸から試験片を 3 本採取し、引張試験を行った。表 2 に試験結果を示すが、S45C の機械的性質として特に問題はみられない。

表 2 出力軸の機械的性質

試験片 No.	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)
1	360	672	26
2	350	670	27
3	372	668	26

(3) 組織観察

出力軸の周方向断面と軸方向断面の2種類について、結晶組織観察を行った。写真4(a), 4(b)にそれぞれ周方向断面、軸方向断面の観察結果を示す。両方向ともフェライトとパーライトの混合組織であり、一般的なS45Cの結晶組織をしている。また、結晶粒径も約25 μm と十分細かく、出力軸の結晶組織に特に問題はみられない。

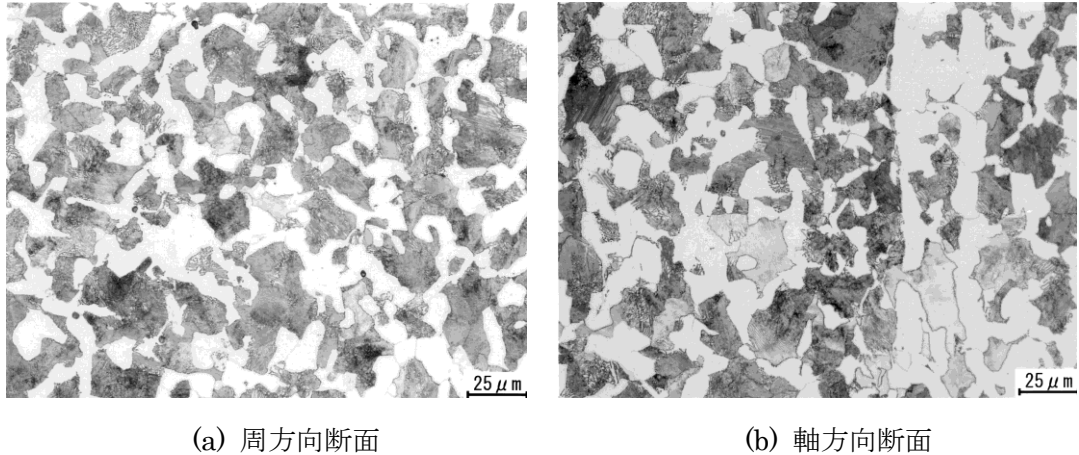


写真4 出力軸の結晶組織観察結果

(4) 硬さ試験結果

出力軸の周方向の断面について、半径方向に表面近傍から2mm間隔で硬さの分布を調査した。なお、試験力は98.1N(Hv10)である。結果を表3に示すが、硬さは表面から中心までほぼ一定であり、平均値は196Hvであった。これはS45Cの硬さとして特に問題はない。

表3 出力軸の硬さ試験結果 (Hv)

1 (表面)	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (中心)
197	196	194	195	190	191	202	184	183	221

以上の調査結果から、出力軸の材質はゴンドラの設計図で指定された通りS45Cであり、材質に特に問題はなかったと考えられる。

3.3 出力軸およびウィンチドラムを含む回転体の応力解析

次に、有限要素法(FEM)によってゴンドラのウィンチドラムを含む回転体について弾性応力解析を行った。

今回落下したゴンドラは、図 1 に示すようにウィンチドラムの一端がベアリングで支持されているが、減速機側はベアリングで支持されておらず、減速機が直接支持する構造になっている。これを有限要素解析用にモデル化したのが図 2 である。ウィンチドラムは、両端の軸に比べ剛性が高いことから、剛体と見なし形状を単純化している。ウィンチドラム両端の軸の材料定数は、ヤング率 $E=21000 \text{ kgf/mm}^2$ (206 GPa)、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。なお、モデル作成の都合上、SI 単位系ではなく、工学単位系を使用した。

図 3 に解析結果として軸方向の応力分布を示すが、出力軸の破損部の応力は 2.8 kgf/mm^2 (27 MPa) とゴンドラ製造メーカーの強度計算結果とほぼ同じであった。

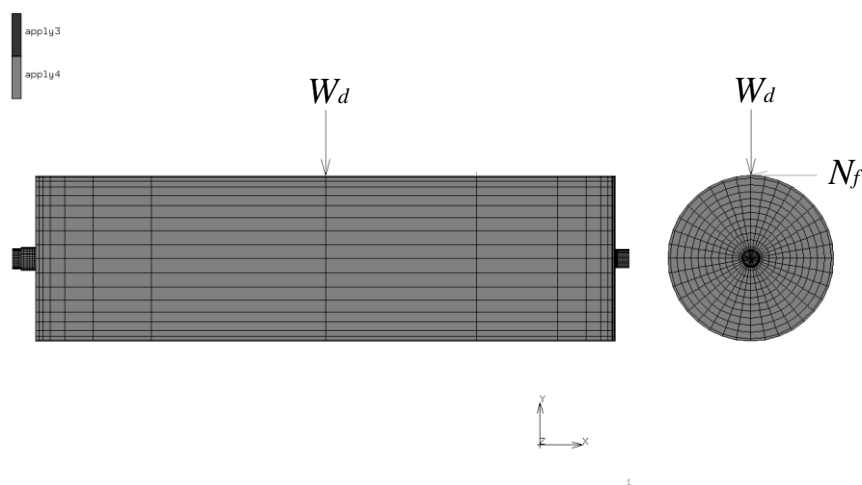


図 2 ウィンチドラムの有限要素モデル

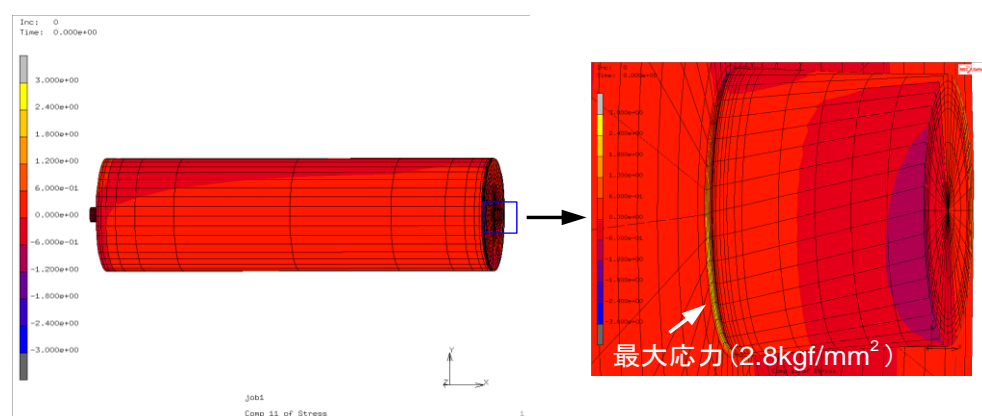


図 3 ウィンチドラムに作用する応力の有限要素解析結果

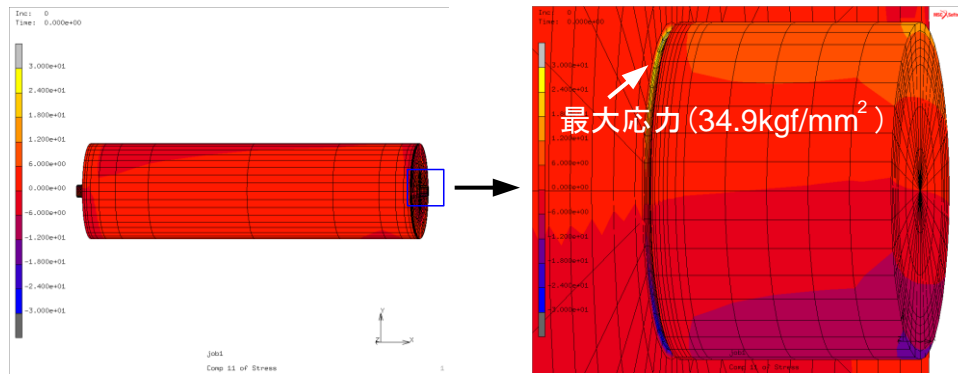


図4 軸芯が1mm上方にずれた場合の応力分布

上記の有限要素解析は減速機出力軸とウィンチドラムの軸芯が一致していることが前提となっている。しかしながら、図1に示すようにウィンチドラムは両端をベアリングで支持されておらず、片側は減速機が支持体を兼ねている。このような構造では、ウィンチドラムおよび減速機の据付けにおいて軸芯のずれが発生しやすい。そこで、軸芯がずれていた場合の応力解析を行った。図4は減速機出力軸を1mmだけ上方に強制変位させたときの応力分布である。軸芯がずれたことにより、破損した出力軸表面には曲げによる非常に大きな軸方向応力が発生し、その大きさは 34.9 kgf/mm^2 (342 MPa)と、表2に示した出力軸の0.2%耐力と同程度にまで達している。一般に0.2%耐力は疲労破壊が生じる限界の応力である疲労限よりもかなり大きな応力であり、このように高い応力が鉄鋼材料に繰り返し作用すると、容易に疲労破壊することが知られている。したがって減速機出力軸は、ウィンチドラムの軸芯とずれて設置されたために、軸表面に曲げによる大きな引張応力が作用し、極めて短期間に疲労破壊したと考えられる。これは破断面の電子顕微鏡観察結果を説明できるものである。なお、軸芯のずれとして上方だけでなく水平方向（ワイヤロープの張力方向）にも強制変位を与えてみたが、結果はほとんど同じであった。

有限要素解析ではウィンチドラムを剛体と見なしていることや変位境界条件による拘束が厳密なため、出力軸にわずか1mmの強制変位を与えただけで大きな応力が発生する。しかし、実際はウィンチドラムやその支持体および支持体を固定しているゴンドラ本体の変形や各部のあそびのため、解析結果より若干小さな値になることが予想される。

以上、出力軸破断面のマイクロ観察結果と有限要素法による応力解析結果から、出力軸が極めて短期間に疲労破壊した原因は、ウィンチドラムの片側だけをベアリングユニットで支持していたこと、及びウィンチドラムと減速機の据付け方法に問題があり、減速機の出力軸とウィンチドラムの軸芯にずれを生じたためと考えるのが妥当である。

4. 同種災害の再発防止策

本件災害は減速機の出力軸とウィンチドラムの軸芯にずれを生じたことが主要因と考えられるため、このようなずれが生じにくい構造にすることが必要である。具体的には、ウィンチドラムの片側だけをベアリングユニットで支持するのではなく、両側をベアリングユニットで支持する構造とし、ウィンチドラムと減速機の据え付けは現場ではなく、精度の出しやすい工場で行うことが考えられる。また、万一の減速機出力軸の破断に備えるため、ウィンチドラム自身に何らかのブレーキ機構を組み込むことも考えられる。

5. まとめ

窓拭き用有人ゴンドラの墜落災害に関して、減速機出力軸破断の原因調査を行った。結果は以下のとおりである。

- (1) 本件災害のゴンドラは、ウィンチドラムを回転させる減速機の出力軸がウィンチドラム近傍から破断していた。
- (2) 減速機出力軸の破断面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、疲労破壊の特徴であるストライエーションが観察された。ストライエーションは出力軸の外周部から半径方向に分布しており、疲労き裂は軸のねじり（せん断応力）ではなく、引張りもしくは曲げ（垂直応力）により発生・進展していた。
- (3) 破断した減速機出力軸に対して、①化学成分分析、②引張試験、③結晶組織観察、④硬さ試験を行った結果、出力軸の材料は設計図で指定された通り JIS S45C 相当の鋼材であり、機械的性質に問題は見られなかった。
- (4) ウィンチドラムを含む回転体について、有限要素法により弾性応力解析を行ったところ、ゴンドラ製造メーカーの強度計算に問題はなかった。
- (5) 有限要素法でウィンチドラムと減速機出力軸の軸芯がずれた場合の応力解析を行ったところ、1mm ずれるだけで曲げによる非常に大きな引張応力が生じることが判明した。
- (6) 電子顕微鏡による出力軸破断面のミクロ観察結果と有限要素法による応力解析結果から、ウィンチドラムと減速機の据付け方法に問題があり、減速機の出力軸とウィンチドラムの軸芯にずれが生じていたために、出力軸が極めて短期間に疲労破壊したと考えられる。
- (7) 同種災害の再発防止策としては、ドラムユニットの両側をベアリングユニットで支持するとともに、ドラムユニットと減速機の据え付けは現場ではなく、工場で行うことなどが考えられる。
- (8) 万一の減速機出力軸の破断に備えるため、ウィンチドラム自身にクランプ式などのブレーキ機構を組み込むこと。