

新幹線用高所作業車の安全保護技術

Safety Technology for High Aerial Station Wagon

相模原製作所 塩 武 久*¹ 原 聖 一*²
 成 田 光*³ 高 野 真 一*⁴
 東海旅客鉄道株式会社 大 城 健 次*⁵

新幹線用高所作業車は、新幹線の電車線路で高所作業を行うために開発された車両である。建設用の高所作業車は平地で固定して使用するが、この車両は最大8°傾斜した場所で走行しながら使用するため安全装置の役割は非常に重要である。高所作業機の安全装置として過負荷防止装置、作業範囲制限装置及び障害物検知装置を装備したが、特に作業範囲制限装置では車体傾斜量に応じた補正を行う新しい方式を開発した。また、車両をモデル化し、数値解析ツールによる車両の安定性解析を行い、実際の車両による試験との比較で解析結果が妥当であることを確認した。

A high aerial station wagon (HW) has been developed for maintaining wires and other parts of superexpress railway systems. Safety systems are very important because the HW is used running on sloping ground (8 degrees max.) while general aerial vehicles are used fixed on level ground. Therefore, the HW is equipped with an overload limiter, working sphere limiter and obstacle finder. Especially, concerning the working sphere limiter, we have developed a new method to compensate for slopes. We have also analyzed the stability of the wagon against falling over using a computer and have confirmed it by evaluation testing.

1. ま え が き

新幹線用高所作業車（以下HWとする）は、新幹線電力用作業車の一機種として開発された車両で、電車線路（架線や架線支持物の総称）の保全作業や工事に使用する。車体後部にはクレーンアーム型の特殊な作業機（エレベータ装置）を装備している。このエレベータ装置の先端部にある作業用バスケットに乗り、高所にある電車線路設備の保守点検を行う。

建設工事に使用されている高所作業車は平地でアウトリガ等で車体を固定して作業を行うが、それに対しHWではサスペンションは固定するが、最大カント200（車体が左右方向に8°傾斜）の状態で行きながら作業しなければならない。さらに作業用バスケットを目的の場所に移動するには架線、吊架線等の電車線路を回避する必要がある。そのためエレベータ装置は操作が容易であるとともに、各装置、機器には高い信頼性と安全性が備わっている必要がある。

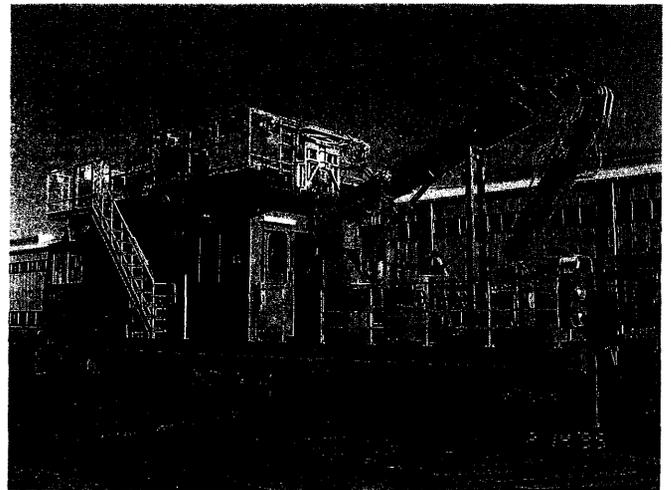


図1 HW外観 HWを左斜め後方から見た様子。
 Outside view of HW

2. 新幹線用高所作業車の構成

図1にHW外観を示す。

2.1 車体構造

HWはディーゼル機関を動力源とし、トルクコンバータ及び逆転機能付き変速機を経て推進軸、終減速機を介して後車軸を駆動する1軸駆動方式となっている。

車体構成は前運転室、後運転室、機関室、屋根上作業台及びエレベータ装置から成り、主要諸元は表1のとおりである。

また、主な特徴は以下のとおりである。

(1) マルチ運転席

鉄道車両として必要な前運転席・後運転席以外に、作業台及びエレベータ装置に携帯型の運転パネルを取付け可能とし、合計4箇所から運転位置を選択できる。

(2) 定低速走行機能

走行しながら保全作業を行う場合、一定の速度でゆっくりと走行する定低速走行機能（0～10 km/h）が必要となる。定低速運転のために、可変油圧ポンプ及び油圧モータを介して無段階に速度を変えられる電子制御式油圧駆動方式HST（Hydro Static Transmission）を内蔵した走行用トランスミッション

表1 主要諸元

Specification of HW

項目	仕様値
車両重量	27 000 kg
エンジン定格出力	230 PS/2 000 rpm
全長×全幅×全高	11 340×3 000×4 450 mm
バスケット	作業範囲 (水平方向×垂直方向)
	許容荷重
	9 000×8 000 mm
	250 kgf

*1 研究開発部電子機器課長

*4 研究開発部電子機器課

*2 研究開発部新製品開発課主務

*5 新幹線鉄道事業本部電気部電力課

*3 車両・機器技術部管理課

を開発した。

(3) 重連機能

回送時の運行形態で、複数台の車両が連結し、司令を行う車両（主機）の操作により他の車両（補機）の速度段切換・ブレーキ操作及びエンジン回転数制御を自動的に行う鉄道固有の機能である。

(4) エレベータ装置

旋回軸が2軸で旋回中心が915 mm オフセットした構造とし、ブーム旋回中心を車体中心から左右方向にずらせるようにした。そのため車体中心真上にある架線にぶつからないようブームを伸ばすことができ、電車線路周囲のあらゆる場所で作業可能となった。

図2にエレベータ装置の構造を、図3にエレベータ装置による高所作業の様子を示す。図中でトロリー線は蛇行して設置されているため長丸で表した。

2.2 電気系統

エレベータ装置を含む、車両全体の制御をプログラマブルロジックコントローラ（以下 PLC とする）により行っている。従来の制御ロジックはリレーで構成されていたが、それらをソフトウェアで置換えることにより、制御装置を大幅に小型化した。また、ソフトウェアであるため、仕様の追加・変更も容易に行うことができる。

運転席は、速度表示及びエンジン回転数表示をデジタル表示し、速度段の指示やアクセル指令も電氣的に行っている。そのため運転席一つ当たり約80点の入出力があるが、これらの入出力はPLCの通信機能で行い、配線量を従来の10分の1以下に削減している。

3. 安全システム

図4にHWの安全システムの概念図を示す。人命を守るのはもちろんのことだが、保全車両であるため、架線や線路を守るための安全装置や、非常脱出装置を装備した。安全システムの大部分はPLC内のソフトウェアで実現した。

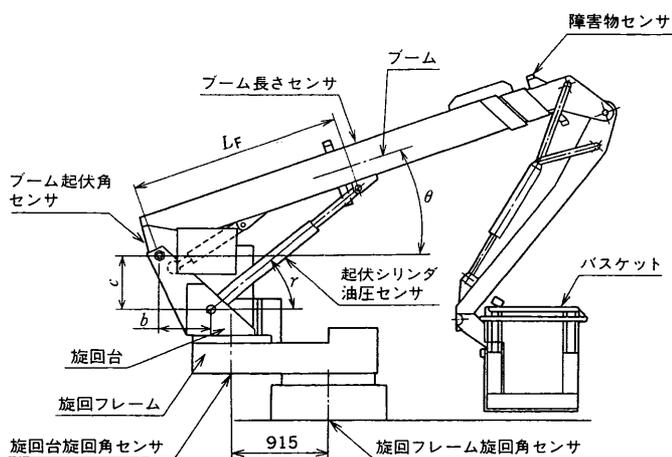


図2 エレベータ装置の構造 エレベータ装置の構造とセンサ取付位置。
Mechanical structure of elevator

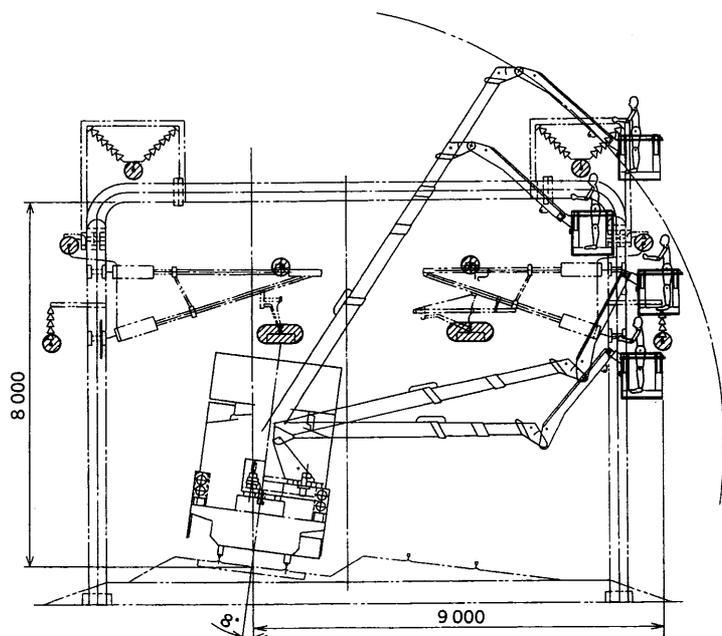


図3 HWによる高所作業 エレベータ装置を使用した高所作業の様子。車体は約8°傾斜している。太線の丸は架線などの線路である。
HW elevator in operation

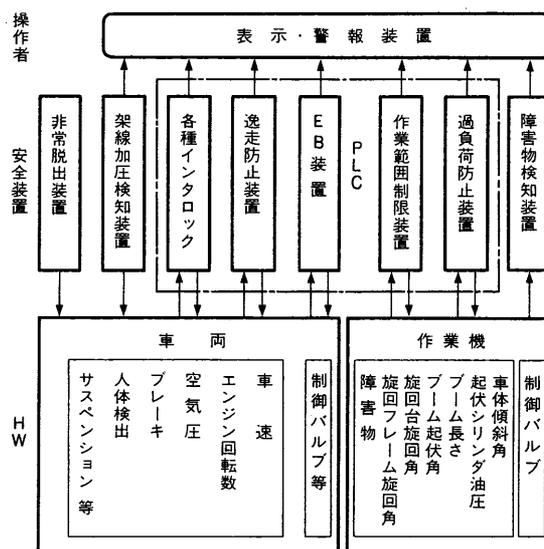


図4 安全システム HWに装備されている安全システム。矢印は情報の流れを表している。
Diagram of safety system

3.1 走行機能安全装置

走行機能では次のような安全装置を装備している。

- (1) 非常脱出装置
制御装置が故障したとき、車両がそのまま線路上にいると営業運転の妨げになる。そこでエンジンなどを直接操作して走行し、保守基地へ戻るための装置を設けた。
- (2) 架線加圧検知装置
架線に電気が加圧されているときに保全作業を行うと感電する危険があるため、架線加圧時に警報を発する。
- (3) 各種インタロック
運転席切替時、走行モード切替時、作業時などにインタロック（条件がそろわないと操作できない）を設定した。
- (4) 逸走防止装置
停車時に運転者がブレーキをかけずに離席すると、逸走の危険があるため警報を発しブレーキをかける。
- (5) EB (Emergency Brake) 装置
車速が15 km/hを超えた状態で、一定時間以上運転操作を行わないと警報を発しブレーキをかける。

3.2 高所作業安全装置

高所作業用に以下の安全装置を装備した。

(1) 作業範囲制限装置

作業用バスケットの位置を監視し、安定度が1.3未満になりうる領域への移動を制限する。

(2) 過負荷防止装置

車両を転倒させようとする力を監視し、この力が規定値以上になると警報を発する。またその際、ブームの伸長・伏倒及び車体中心から遠ざかる方向への旋回を禁止する。

(3) 障害物検知装置

エレベータ装置のブームの周囲に透過型の光センサを配し、ブームが架線等に接近すると警報を発する。

4. 転倒防止技術

高所作業車構造規格（労働省告示第70号）によれば、安定度は次式で定義される。

$$\text{安定度} = \frac{\text{安定モーメント}}{\text{転倒モーメント}}$$

ここで安定モーメントとは転倒支点より安定側にある累積モーメント、転倒モーメントは転倒支点より転倒側にある累積モーメントである。

この規格では水平な場所で安定度が1.3以上でなければいけないとしている。一般の高所作業車は水平な場所で作業を行うのに対し、HWは最大8°傾斜した場所で作業を行うため、この規格を参考にして8°傾斜した場所で安定度が1.3以上になるように車両を設計し、安全装置を設定した。

4.1 過負荷防止

転倒モーメント（負荷）を計測する方法は種々考えられているが、HWでは起伏シリング油圧を基に計算する方法を用いた。この方法は油圧配管に油圧センサを取付けるだけで良いため、機械的強度を損なわないという利点がある。図2のような構造の場合、転倒モーメント M_U は次式により求めることができる。

$$M_U = PA \sin \gamma \times L_F \cos \theta$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{L_F \sin \theta + c}{L_F \cos \theta - b}$$

ただし

P : 起伏シリング油圧 (kgf/cm²)

A : 起伏シリング断面積 (cm²)

L_F : 定数 (起伏シリング取付位置) (mm)

γ : 起伏シリング起伏角 (°)

θ : ブーム起伏角 (°)

b, c : 定数 (mm)

4.2 作業範囲制限

作業範囲制限を実現する方法として、ブームの長さを旋回方向に応じて数段階に規制する方法が広く用いられている。具体的には作業領域を前後左右の4領域に分割し、それぞれに作業範囲を設定する方法などがとられている。この方法では装置を簡単にすることができるが、その一方で安全であるにもかかわらず作業を行うことができない領域があるという欠点を持つ。HWでは作業性を犠牲にしないようにするために、バスケットの位置を監視する方法をとった。この方法ではセンサ情報を基にバスケットの位置を計算して制限を行うので、安全な領域のどこでも作業を行うことができる。

図2のようにエレベータ装置に取付けたセンサの情報から、ブ

ーム先端と車体中心との左右方向の距離 Y は以下のようにして求まる。

$$Y = |L \cos \theta \times \sin(\alpha + \beta) + l \sin \alpha|$$

ただし、

L : ブーム長さ (mm)

l : 旋回フレームの長さ (mm)

α : 旋回フレーム旋回角 (収納状態が原点) (°)

β : ブーム旋回角 (収納状態が原点) (°)

なお、車体に対して前後方向に関しては、車両がカウンタウェイトの役割を果たすため規定荷重内では転倒の危険性がなく、作業範囲制限では考慮しないこととした。

前述の式で求まるバスケットの位置は、車体を基準とした座標系のものである。そのため、車体が傾くと座標軸も一緒に傾いていく。車体が8°傾くと地上高8mの地点では位置が1m以上もずれてしまい、誤差としては大きすぎる。そこで車体に車体傾斜計を取付け、傾斜量に応じた補正を行うこととした。

車体傾斜分の補正は、車体前後方向を軸として座標軸を回転させると考えればよい。補正後の座標軸は地面を基準にしたものになる。車体傾斜量の補正は、以下の行列演算により行う。

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \cos \delta + Z \sin \delta \\ -Y \sin \delta + Z \cos \delta \end{pmatrix}$$

ただし、

δ : 車体傾斜角 (°)

Y : ブーム先端と車体中心との左右方向の距離 (mm)

y : 補正後の左右方向の距離 (mm)

Z : ブーム先端から車体下面までの距離 (mm)

z : ブーム先端の地上高 (mm)

上記の補正後の作業範囲を車体後方から見ると、図5のようになる。網かけ部が作業範囲制限装置で制限される領域である。車体の傾斜量にかかわらず、地上から見た作業範囲は変化しない。

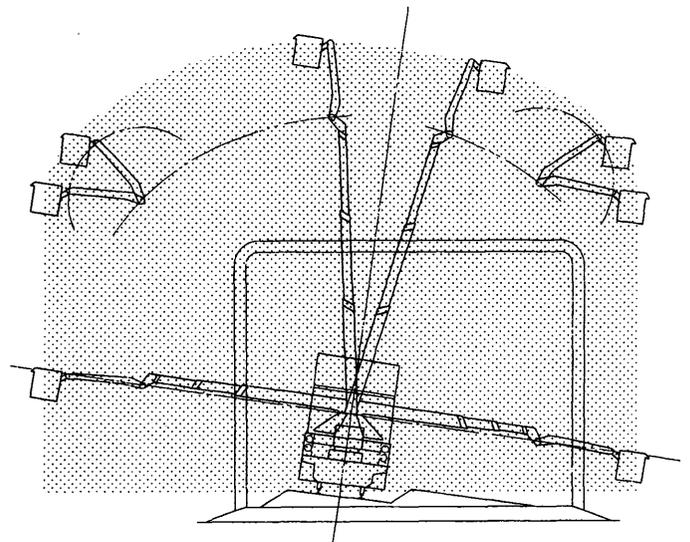


図5 作業範囲図 作業範囲制限装置による作業範囲。
Working sphere

5. 安定性解析

車両の安定性解析のためにHWの計算モデルを作成し、数値解析ツールによる解析を行った。計算モデルでは図6に示すように車体を11の部品に分割し、それぞれの形状、重量、重心位置、互いの連結方法を定義した。

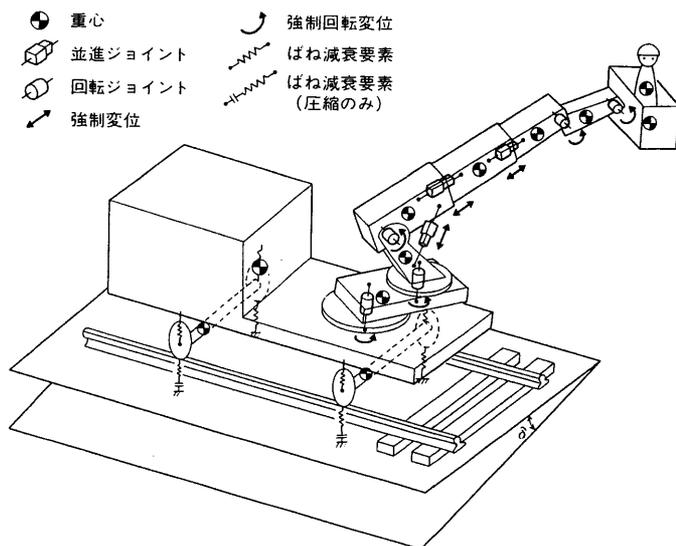


図6 計算モデル 数値解析に用いた計算モデル。
Numerical analysis

数値解析における慣性等の大きさは、積載荷重 250 kgf、風速 16 m/s、昇降慣性力 0.25 m/s^2 相当、旋回慣性力 0.05 m/s^2 相当、走行慣性力 0.1 m/s^2 相当とした。ここで昇降慣性力とはブームの起伏・屈折等の運動の加減速に伴って生じる慣性力、旋回慣性力とはブームの旋回運動の加減速に伴って生じる慣性力、走行慣性力とは走行運動の加減速に伴って生じる慣性力である。

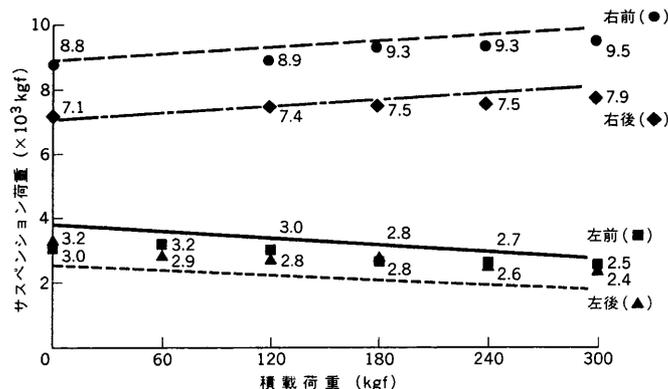
数値解析の結果、車体傾斜 8° の状態で車体左右方向に 9 m 強の範囲内で安定度が 1.3 以上になることが分かった。これはすべての電車線路の保守を行うのに十分な範囲であり、保全作業において車両が規格を満たしていることが分かる。また、数値解析で求めた転倒モーメントの大きさを基に、過負荷防止装置のパラメータを設定した。

6. 評価試験

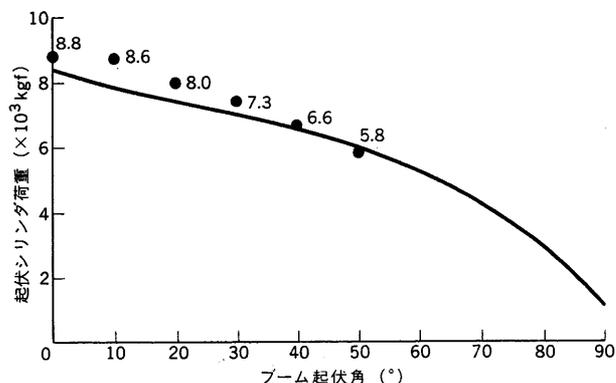
数値解析の結果の評価のため、実際の車両による試験を行った。試験要領は以下のとおりである。

- (1) バスケットの積載荷重 0 kgf の状態で、車両進行方向に対して水平真横にブームを伸ばしていき、ブーム長さで起伏シリンダ油圧との関係を測定する。
 - (2) その状態でバスケットに 60 kgf ずつ 300 kgf まで 5 回に分けて重りを載せてゆき、積載荷重と起伏シリンダ油圧との関係及び、積載荷重と車輪の板ばねのたわみ量との関係を測定する。
 - (3) 重りをすべて下ろして、ブームを伸ばした状態でブームの起伏操作を行い、起伏角と起伏シリンダ油圧との関係を測定する。
- 試験と同じ条件で同じ動作を数値解析ツールで解析し、それぞれの関係のグラフを求めた。図7に結果の一部を示す。

(a) のグラフから車体のバランスの変化が分かるが、解析結果と実測値がほぼ一致している。そのため保全作業において車両が安定していること、及び作業範囲制限の範囲が妥当であることが分かる。



(a) ブームを伸ばした状態で積載荷重を増加させる



(b) 積載荷重 0 kgf でブームを起す

図7 試験結果 数値解析による計算結果に評価試験の結果をプロットした。

Results of evaluation test

(b) のグラフで、操作時の油圧は実測値の方が最大 10% 程度大きいですが、起伏角が小さいとき実測値は解析結果より小さくはならないことが分かる。そのため数値解析結果を基に過負荷防止装置のパラメータを設定すれば、過負荷防止装置は実際よりさらに安全サイドで機能することになる。

これらの結果から、高所作業において HW は十分な安全性を持っていると言える。

7. あとがき

HW は国産では初めての製品である。既存の外国製の車両と比較してみると、まず旋回軸が一つしかなかったのがオフセット付 2 段になり作業性が大幅に向上した。また、運転席が 4 箇所になった上、運転席の操作性も勝っている。エレベータ装置の安全装置は、従来製品では障害物検知と過負荷防止のみであったのに対し、作業範囲制限を加えた三つの安全装置を装備している。特に作業範囲制限では車体傾斜分の補正を行う新しい方式を用いており、作業性を損なうことなく安全性を確保している。

今後もユーザーズを取入れた改良や付加機能の充実等により、安全性を損なうことなく操作性に優れた製品造りに向けて努力していきたい。