

凸状段差を乗り越える車輪機構の考案とモデル試作

村上順也*

凸状の段差（以降、線状の障害物と呼ぶ）に対して大きな荷重・衝撃や上下動なく通過でき、かつ、コンパクトな新しい車輪機構の概念を提案する。当該機構が幾何学的に動作可能か検証するため、CAD による 3D モデル描画、3D プリンタによる部品造形、組み立てを経て車輪機構の模型を作製した。模型は通常の事務用台車の脚部を代替する寸法とし、装着した台車による簡易な走行試験により、床に置かれた線状の障害物をまたいで乗り越える動作が可能であることを確認した。

キーワード：線状、障害物、乗り越え、車輪、3D プリンタ

1. はじめに

車輪は陸上を輸送する手段の足回りに広く用いられている。しかし、輸送の途上に段差や突起物がある場合、車輪では走行が不可能か、走行できても大きな上下動や衝撃が生じる。例えば、電源ケーブルが這い、高い沓摺のある建設現場、工場あるいは物流の一般的な運搬作業の場面などで、それら障害物に対して迂回ルートやスロープを設置することなく、また、上下動や傾斜を生じず走行できる車両があれば、生産性や安全性の向上が期待できる。本研究は、第一段階として手押し台車に搭載できる形態をイメージし、それらの条件を満足する車輪機構の考案を目指した。

車輪機構の先行事例としては、数 cm の段差に乗り上げる際に必要な力を低減する工夫を取り入れた車いす¹⁾や台車²⁾用の車輪機構が提案され、また、ループ状に配置された複数の車輪が繰り出されることで障害物をまたいで乗り越える車輪機構が提案されている³⁾（後述）。しかし、前者では段差に乗り上げるため段差にかかる荷重や輸送主体（例えば台車）の上下動は避けられない。仮にその段差が沓摺や電源ケーブルなどの場合、それらの構造物に対しては荷重や衝撃荷重を軽減することが求められる。また、後者では車輪機構の占める体積が実質的に増大し、台車の走行上の阻害要因となるおそれがある、といった問題がある。

本報では、凸状の段差（以降、線状の障害物と呼ぶ）（Fig.1）に対して大きな荷重・衝撃や上下動なく通過でき、かつ、コンパクトな新しい車輪機構の概念を提案する。まず、またぐ動作に着目した場合に生じる課題を取り上げ、次に、新しい車輪機構の考案に至る検討過程を述べ、その形状と乗り越え動作について図解する。最後に、当該機構が幾何学的に動作可能か検証するために作製した車輪機構の模型を用いた簡易な台車の走行試験の結果を述べる。

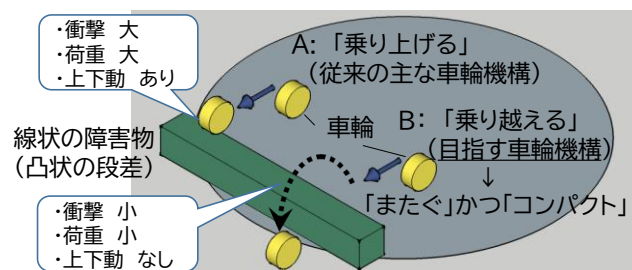


Fig.1 本研究で目指す車輪機構

2. 従来の技術とその課題

2.1 従来の技術

前記「またいで乗り越える」しくみの例³⁾を Fig.2 の左に示す。この既往特許は、台車の荷台の側部に、長円形等で環状溝が設けられた部材の溝内にチェーンが一周し、チェーンに複数の車輪が支持されており、これら複数の車輪のうちの 2 つの車輪を介して路面上に走行可能に支持されている。そして、台車を支持する複数の車輪のうちの 1 つの車輪が障害に突き当たったとき、台車に前進方向の力を加えると、環状溝が設けられた部材の前方への平行移動と環状溝に対する車輪の周方向位置の変化が生じる。その結果、他の 1 つの車輪が障害の先において路面上に着地し、これにより障害の乗り越えが行われる。

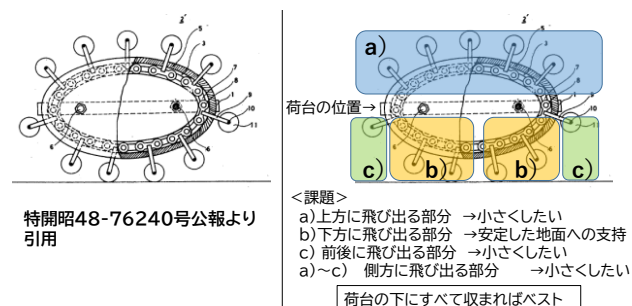


Fig.2 既往特許（左）と課題（右）

* 技術本部 技術研究所 循環工学研究室

2. 2 解決しようとする課題

上記の機構の課題を Fig. 2 の右に示す。上方に飛び出る部分、前後に飛び出る部分は走行や積荷に際して阻害要因となりうる。また、車輪装置全体は側方に飛び出ており走行の阻害要因となりうる。仮に、この機構のまま車輪装置を荷台下に配置すると、台車の車高が比較的高くなり、荷物を積んだ台車の走行安定性や、荷物の積み下ろし等の作業性の低下を招くおそれがある。また、下方に飛び出る部分は、車輪が次々に送り出された際、安定して車輪が地面へ支持されることが第一に求められる。

最善の形態は、安定した「またぎ動作」を確保した上で、荷台の下にすべての車輪装置を配置する形状である。

3. 乗り越え機構の考案

3. 1 考案の変遷

i) 基本形：

まず、単純な形状から考える。Fig. 3 に、単純な形状の乗り越え動作概念図を示す。ある中心点から放射状に車輪を複数配置した車輪装置をここでは基本形と呼ぶ。基本形は中心点周りの回転により、走行車輪とは別の上方に位置していた車輪が降りてくることで、線状の障害物に対して「またぐ」動作が実現できる。しかし、基本形は、①走行車輪であった第一の車輪の跳ね上げ方法、②またぐ動作に伴う鉛直方向の変位、③鉛直上方に大きなスペースが必要である、等の課題を有する。

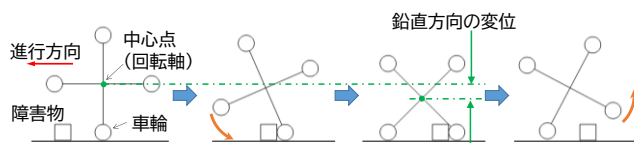


Fig. 3 基本形の乗り越え動作概念図

上記の課題を克服する車輪機構を検討した。Fig. 4 に、乗り越え動作を可能にする機構考案の概念図を示す。

ii) 高さの低減：

基本形の複数車輪が位置する平面を進行方向を軸に 45° 傾斜することで、高さ方向の省スペース化が図れる。

iii) 車輪の直立と高さの低減：

正四角錐の頂点に車輪を配置し、頭頂点から底面に下ろした垂線を回転軸とし、回転軸を進行方向を軸として 45° 傾斜させることで、走行車輪は地面に対して直立させることができると同時に、高さ方向のさらなる省スペース化が図れる。

iv) 安定化：

上記 iii) の装置を進行方向に間隔を取り設置することで、複数の車輪が縦列に配置できる。

v) 車輪の循環化：

乗り越え動作をしている際に少なくとも一輪は地面に接地させることで、無用な上下動を抑えられる。複数の

車輪を連結させ、長円形のレール上を車輪同士が等間隔を保ったままシンクロして循環することで、それを実現できる。

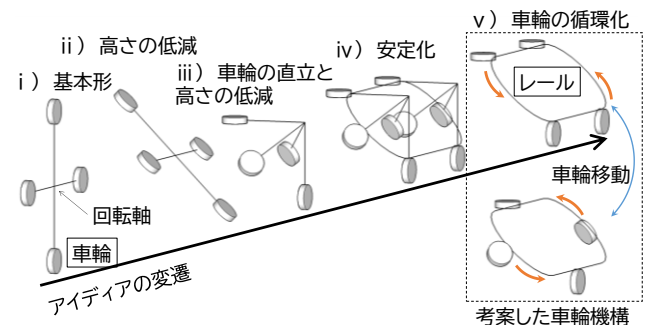


Fig. 4 乗り越え機構概念図

以上が新規乗り越え機構考案の変遷であり、v) が考案した乗り越え機構である。本機構は従来の車輪 1 箇所を代替する。つまり、例えば 4 輪の通常の手押し台車の場合、一つの車輪の位置に上記車輪機構一つが代替する。

3. 2 車輪装置

考案した乗り越え機構の実現性を検討するために、車輪装置としての形状を CAD でモデル化し、実際に部品の作成が可能までの細部形状を検討した。Fig. 5 にそのモデルを示す。Table 1 に車輪装置の六面図を示す。

車輪装置は、台取付部と、台取付部に支持されたレール部と、レール部に支持された 4 つのランナー及び 4 つの補助ランナーと、4 つのランナーにそれぞれ支持された 4 つの車輪を備える。

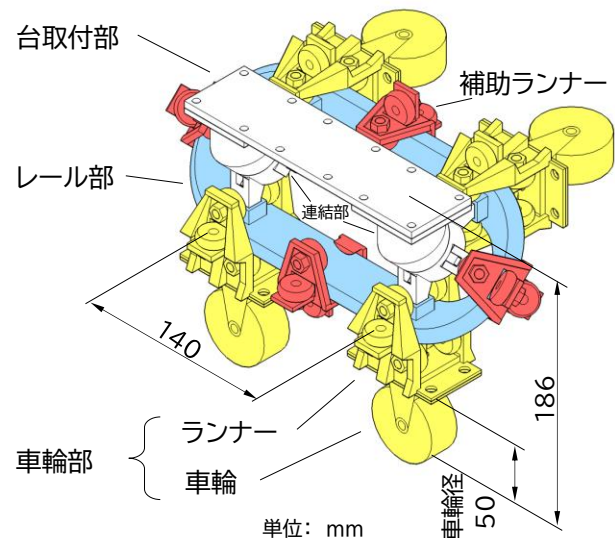
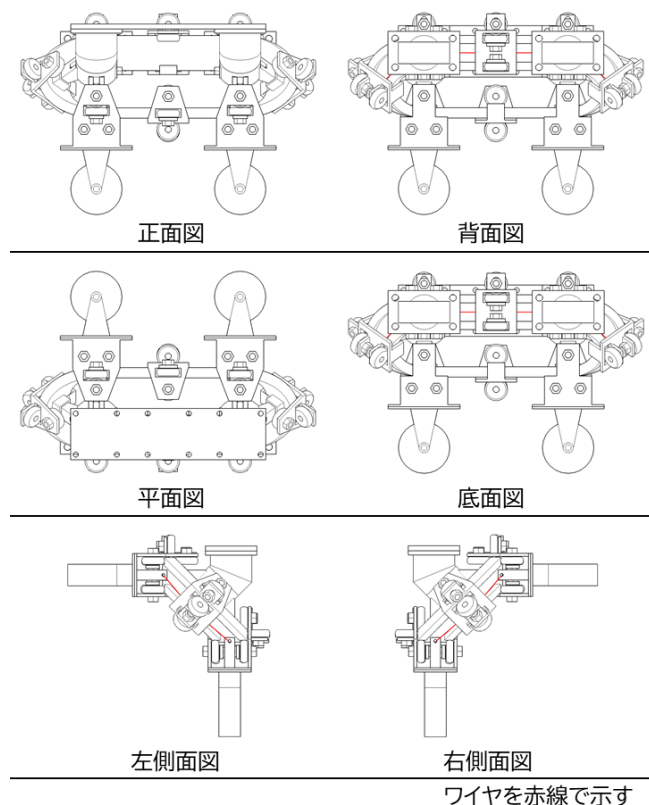


Fig. 5 考案した車輪装置

台取付部は、細長い矩形の板状部と、板状部下面に連なる 2 つの連結部を有する。板状部は、車輪装置の走行路面に対して平行をなし、複数のボルトを介して、台車（後述）の荷台にその下面において固定される。また、各連結部は、円形の横断面形状を有し、板状部から走行

路面に向けて下方へ伸び、さらに 45° の角度で「く」の字形に折れ曲がって伸び、先端部にはその周囲に互いに間隔をおいて配置された 3 つのプラグが設けられ、後述のレール部 (Fig. 7) に連結される。

Table 1 車輪装置の六面図



レール部は、立体図形であり、長円形の断面形状を有するすり鉢形の周面に沿ってその周方向へ伸びる 2 つの平板部及び両平板部にそれぞれ連なる 2 つの湾曲板部からなる。レール部にはソケットが設けられ、プラグを介して台取付部に連結されこれに支持される (Fig. 6, 7)。

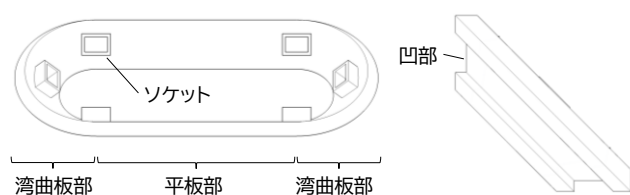


Fig. 6 レール部の斜視図 (左) と側面図 (右)

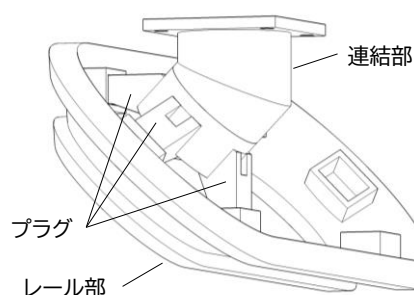


Fig. 7 レール部、プラグ及び連結部 (1箇所) の拡大図

ランナーと補助ランナー (Fig. 8) はレール部にその周方向へ移動可能に支持され、交互に等間隔をおいて配置される。また、互いに隣接するランナー及び補助ランナーがワイヤを介して互いに連結される。ワイヤは、レール部の外周面に設けられその周方向へ伸びる凹部内 (Fig. 6 のレール凹部) に配置される (Table 1)。ランナーと補助ランナーはベアリングを保持しレール上を滑らかに走行する。ランナーに取り付けられた車輪により、地面からの反力はレール、台取付部、荷台へ伝わる。補助ランナーはランナーの相対移動をより円滑にする働きをなす。

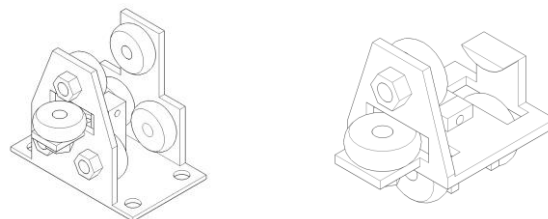


Fig. 8 ランナー (左) と補助ランナー (右)

3. 3 乗り越え動作

車輪装置は、角材のような線状の障害物の乗り越えが可能である。Table 2 に障害物を乗り越える動作をその局面 (シーン) ごとに示す。

<シーン1> 車輪装置が前方へ走行中、障害物に遭遇し、両車輪のうちの前方の車輪 A が障害に突き当たり、車輪 A の転動が停止した状態を示す。車輪が障害物に突き当たったとき、車輪装置にその走行方向への外力を加えると、車輪 A は当該車輪に対する障害物の反作用により、進行方向と逆向きの力を受ける。車輪 A が前記逆向きの力を受けると、レール部が車輪 A 及びこれを支持するランナーに対して相対的に前方へ平行移動する。

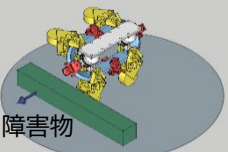
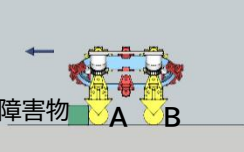
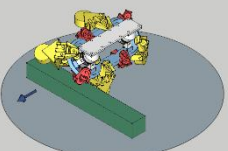
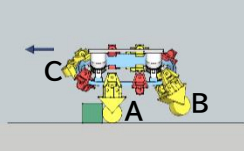
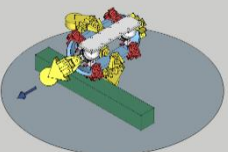
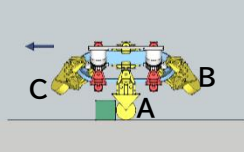
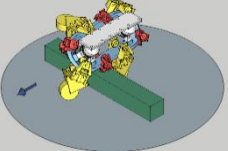
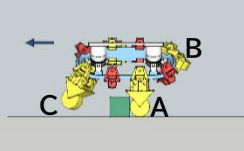
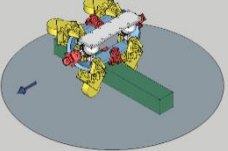
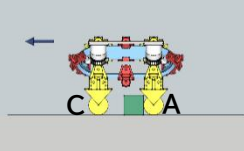
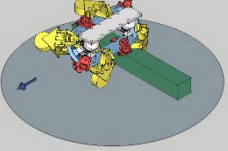
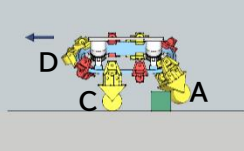
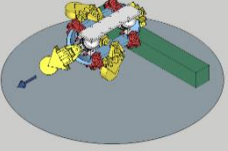
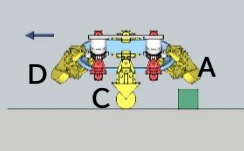
<シーン2> レール部の前記平行移動の間、各車輪及びこれを支持する各ランナーと各補助ランナーとがレール部に対するその周方向における相対位置 (周方向位置) を変える。換言すると、車輪 A が前記逆向きの力を受けると、ランナー及び補助ランナーを繋ぐワイヤに緊張が生じ、車輪 A を支持するランナーが板体レール部の平板部に対して相対的に後方 (図上右方) へ移動し、車輪 A を支持するランナーの移動は他のランナー及び補助ランナーの移動を引き起こす。これにより、全ての車輪がレール部に対して相対的にその周方向へ等間隔を保ちながら図上を反時計回りに移動する。

<シーン2～シーン5> 車輪 A が障害物に突き当たった状態のまま、レール部が前方に相対移動する。他方、車輪 A はレール部の下位の平板部に対して図上を右方へ相対移動する。この間、車輪 A に隣接する後方の車輪 B は平板部から後方の湾曲板部へと相対移動し (シーン 2)、次いで湾曲板部に沿って相対移動し (シーン 3～シーン 4)、その後、湾曲板部から上位の平板部へと相対移動する (シーン 5)。また、車輪 A に隣接する前方の車輪 C は上位の

平板部から前方の湾曲板部へと相対移動し（シーン 2），次いで湾曲板部に沿って相対移動し（シーン 3～シーン 4），その後，下位の平板部へと相対移動する（シーン 5）。この相対移動の結果，車輪 C は障害物の前方において走行路面上に着地し，走行路面上に直立する。

＜シーン 6～シーン 7＞ 車輪装置への前記外力の付与を継続すると，レール部がさらに前方へ平行移動し（シーン 6～シーン 7），車輪 A がレール部に対してその後方の湾曲板部の側へと相対移動し，車輪 A は障害物の上方位置に存する状態におかれる。同時に，車輪 C が走行路面上を前方に向けて転動し，車輪装置は一輪走行をする。このとき，残りの 1 つの車輪 D は，平板部から前方の湾曲板部へと相対移動する。これにより，車輪装置の障害物の乗り越えが完了する。

Table 2 乗り越え動作イメージ図

シーン	i) 鳥瞰図	ii) 立面図
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

4. 試作

4. 1 車輪装置の試作

上記の車輪機構の模型を試作した。Photo.1 に，車輪装置を構成する部品を示す。主要な部品は CAD で部品ごとの 3D モデルを作成後，熱溶解積層法の 3D プリンタで作製した。使用した 3D プリンタフィラメントは直径 1.75mm で，材質は PLA（ポリ乳酸）樹脂や ABS（アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン）樹脂を使用した。両者とも 3D プリンタで使用される最も一般的な樹脂の一種である。一般に，PLA は，植物由来／プリント安定性にすぐれる／脆く壊れやすい／熱に弱いといった特徴を有し，一方の ABS は，強度が高く丈夫／反りやすいといった特徴を有する。

今回の試作を通して，PLA は ABS より低温で造形できるため，造形→取り外しのサイクルを早めやすく，モデルの修正→再試作を素早く行えるため試作に適していた。一方で，やすり等で表面処理がしやすいのは ABS であり，PLA では造形後に削って微妙な寸法調整を行うには時間がかかり不利であった。また，長さ 30cm 程度の大きい造形モデル（1 回にまとめて複数部材を造形する際も同様）では ABS，PLA を問わず，反りがしばしば生じた。その原因としては 3D プリンタの設置環境条件（温度や相対湿度）や 3D プrint の描画条件の影響が考えられたが，明確な要因を特定することは難しく，試行錯誤して条件を整えることが必要であった。材質や環境条件を含め安定的な 3D プrint の条件を見出すことは今後の課題である。

Photo.2 に，部品をボルト，ナット，ベアリング，ワイヤ及び車輪（自在キャスター）と合わせて組み上げた車輪装置を示す。レール部の平板部の長さは 140 mm，キャスター車輪直径は 50 mm，台取付部の矩形板状部上面から地面までの距離は設計上は 186 mm である（Fig.5）。



Photo. 1 3D プリンタで成形した部品



Photo. 2 車輪装置

4. 2 台車の試作

本車輪機構の動作検証には、最低限、前方に車輪装置2箇所、後方に同2箇所の計4箇所です立する形態の試験体で実施すれば、前方が全て線状障害物で塞がれた路面に対して乗り越え、さらにそのまま通過するまでを検証するのに十分である。また、走行試験をするにあたっては手押しハンドルを有することで利便性が向上する。上記形態は同時に、建設現場や工場、物流、あるいは日常の場面で使用されうる最も単純な車両形状といえる。以上、走行試験への適用性及び今後用途開発を図る上での第一段階としての単純性の両面から「手押し台車」形態の模型を試作した。

Fig. 9に2対（4つ）の車輪装置を備える台車を示す。

車輪装置が台取付部を介して台車の荷台に取り付けられるとき、レール部の両湾曲板部が台車の進行方向における前後に配置されるように設置する。また、2対の車輪装置はそれぞれ荷台の前部及び後部に配置する。また、各対の車輪装置を、これらのレール部の上位の平板部が荷台の幅方向に関して互いに相対するように配置する。

以上の配置方法は、車輪装置は荷台からその側方に突出することなく荷台下に収まるようにすることができる。

図示の台車は、荷台の後部に配置された手押しハンドルを有する。

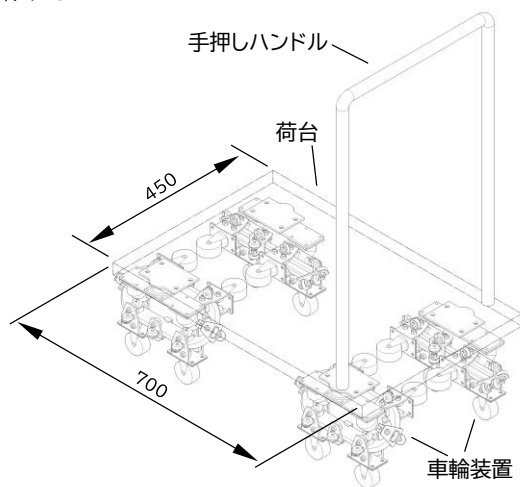


Fig. 9 台車に取り付けられた4つの車輪装置

Photo. 3に、車輪装置を4つ荷台に取り付けた台車模型を示す。



Photo. 3 台車に取り付けられた4つの車輪装置

5. 走行試験

5. 1 走行試験1（定性評価）

5. 1. 1 方法

簡易的に定性評価を行うことを目的に、市販の台車（ここでは、静音台車と呼ぶ）と開発した試作模型（ここでは、レール台車と呼ぶ）について、障害物3種（角材、沓摺、コードカバー）それぞれにつき、重量物は積載しない状態で、台車の手押しハンドル部分を人が手で押して走行させ障害物を乗り越えられるかどうかを評価した。

5. 1. 2 結果

Table 3に試験結果を、Table 4に実施風景を示す。居室から廊下に向かったの沓摺の通過及びコードカバーの通過は、静音台車もレール台車も通過することができたが、静音台車は鉛直方向の上下動は大きかった。角材に対しては、静音台車は乗り越えることができないのに対し、レール台車は乗り越えることができた。レール台車は、いずれの障害物に対してもまたぐ動作が機能することを確認できたが、試技によっては沓摺やコードカバーをまたがずに乗り上げて通過してしまうケースも散見された。これは個々のランナーのレール部に対する滑動性の良し悪し（回りづらさ）に起因すると考えられた。

Table 3 定性評価結果（走行試験1）

	障害物 ^{c)}		
	i) 角材	ii) 沓摺	iii) コードカバー
静音台車 ^{a)}	×	△	△
レール台車 ^{b)}	○	○	○

a) 市販品。キャスター径100mm。荷台天端-地面間距離166mm。

b) 今回開発模型。キャスター径50mm。荷台天端-地面間距離241mm。

a)b)共に、荷台(W450×D700)と手押しハンドルは同一形状

c) ×:乗り越え不可 △:乗り越えられるが上下動が大 ○:乗り越えられる

Table 4 実施風景（走行試験1）

	障害物		
	i) 角材	ii) 沓摺	iii) コードカバー
静音台車			
レール台車			

5. 2 走行試験 2 (側方からの観察)

5. 2. 1 方法

開発したレール台車が障害物通過時に上下動が生じない様子を、通常の台車の場合と視覚的に比較・確認することを目的に以下のように側方から観察を行った。

Fig. 10 に試験 (観察) 状況を示す。障害物はコードカバーとし、床面が P タイルである居室の床面に走行試験 1 で用いたコードカバーを両面テープで固定した。日常の現実的な条件を想定し、荷台の中央に 18 kg 相当の荷物 (2 リットルペットボトル入りミネラルウォーター等) を積載し、台車の手押しハンドル部分を人の手で押し 0.6 ~ 0.8 m/s の一定の速度で障害物を通過させた。台車の進行方向に対して側面側で、障害物の延長線上の定点から動画撮影した。また、撮影後に画像を解析し、障害物通過時の荷台の傾斜角度 a と鉛直変位 b とを求めた。

5. 2. 2 結果

レール台車がコードカバーを乗り越える経過を撮影した動画から、台車の前輪部分が障害物を通過した場面を切り出したコマ送り画像を Fig. 11 に示す。画面左から右に台車が走行し、コードカバーをまたぐ動作中、荷台の高さ (図で緑色のライン) に上下動は生じないことを確認できた。同様に静音台車の観察結果を Fig. 12 に示す。静音台車では障害物を通過する際障害物に乗り上げるた

め、荷台が鉛直上方に変位し最高地点に到達したとき、荷台は 3° 傾斜し、荷台先端近傍は障害物に乗り上げていない状態と比べ 34 mm 上昇する様子が観察されている。Table 5 に上記結果をまとめた。

以上より、開発したレール台車が通常の台車とは対照的に上下動や傾斜が生じず積荷の水平も保たれることを視覚的に確認することができた。

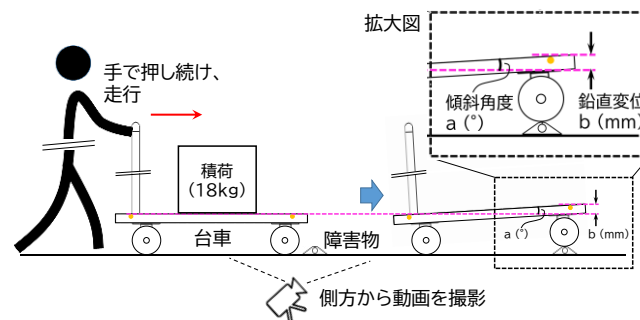


Fig. 10 側方からの観察状況 (走行試験 2)

Table 5 障害物通過時の挙動 (走行試験 2)

	荷台の傾斜角度 $a (^\circ)$	鉛直変位 $b (mm)$
レール台車	0	0
(参考) 静音台車	3	34

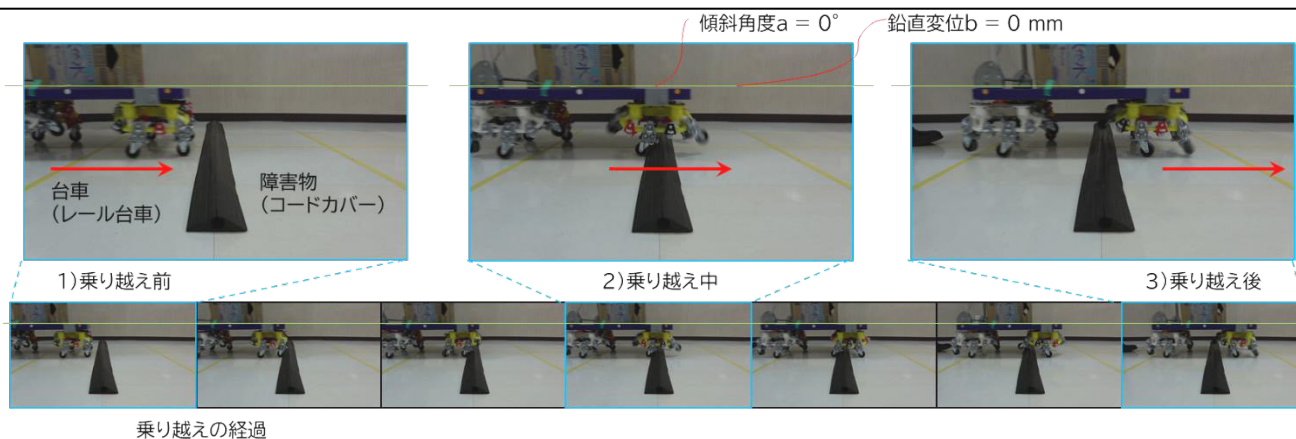


Fig. 11 開発したレール台車の観察結果 ~上下動が生じない乗り越え動作の様子~ (走行試験 2)

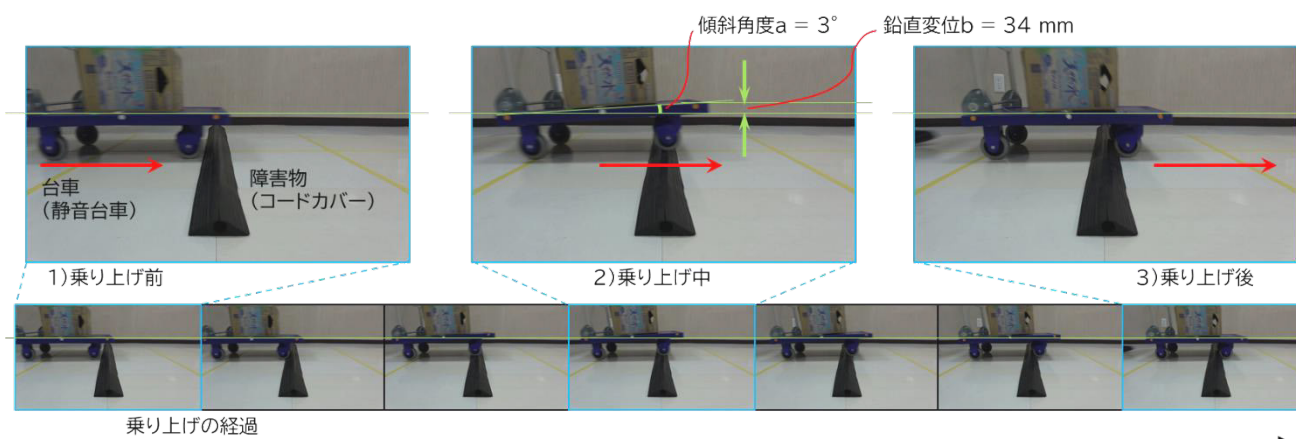


Fig. 12 (参考) 通常の静音台車の観察結果 ~上下動が生じる乗り越え動作の様子~ (走行試験 2)

6. まとめ

台車の荷台の下に装着できるほどコンパクトで、線状の障害物を乗り越えることができる車輪機構を考案した。CADにより3Dモデル描画し、3Dプリンタにより部品を成形し、他の部品と合わせて組み立て、当該車輪機構の模型を作製した。当該模型を荷台に装着し、手押し台車として簡易走行試験に供した。試験の結果、4 cm 角の角材、研究室と廊下との間の沓摺及び3 cm 高のコードカバーの3条件いずれの障害物もまたぎ越えることができた。コードカバーでの走行試験で、動画画像による解析により大きな上下動や傾斜は生じていないことを確認した。

以上より、大きな上下動なくまたいで障害物を通過できる走行機構実現の可能性を示せた。

課題としては、車輪装置の滑動性の調整等の改良、用途開発等が挙げられる。

謝辞

本車輪機構の試作、走行試験等で技術研究所の鈴木宏和氏及び環境工学研究室の方々に多大な協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 白石聖稀, 李根浩, 豊田彬敏, 米倉裕貴, 野口尚人: 軸移動により段差乗り越え能力を高めた車輪機構の研究開発, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 848, p. 16-00471, 2017
- 2) 特開 2019-99066
- 3) 特開昭 48-76240 号公報

Devising and Prototyping a Wheel Mechanism to Step Over Linear Obstacles

Junya MURAKAMI

Abstract

The author devised a wheel mechanism compact enough to be mounted under a cargo bed and capable of stepping over linear obstacles. The wheel mechanism was modeled mainly with plastic by drawing a 3D model using CAD, molding the parts with a 3D printer, and assembling them with other parts. The model was attached to a loading platform and used as a hand truck for several simple tests. As a result of the running tests, the following facts were found: The trolley was able to get over 4 cm square lumber, a door sill between the laboratory and the corridor, and a 3 cm high cord cover. From the video images, it was confirmed that there was no large vertical movement or tilt in the cord cover test.

Keywords: linear, obstacle, step over, wheel, 3D printer
