

位置エネルギーを利用した省エネ小型公共交通の 走行乗り心地に関する検討

平沢 隆之* 須田 義大 山口 大助 安藝 雅彦 音羽 勇哉 (東大生研)
表 久紀 (泉陽興業 (株))

Examination of Comfort Evaluation during Riding of Energy Saving Small Urban Transport System Using Potential Energy

Takayuki Hirasawa*, Yoshihiro Suda, Daisuke Yamaguchi, Masahiko Aki,
Yuya Otowa (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)
Hisanori Omote (Senyo Kogyo Co., Ltd.)

This paper deals with a new energy saving urban transportation system called "Eco-Ride" moves under potential energy and has merits of low initial costs and high flexibility to install. The new urban transportation system is needed to be considered of ride comfort in traveling direction for using the vehicle system as public transportation system. Therefore, ride comfort on the Eco-Ride with secondary springs is performed through analyses of vibration and results of acceleration measurement. After that, this paper examines dynamic effects by difference of vertical track geometry, and a design procedure of the vertical curve is proposed.

キーワード：小型公共交通システム，ローラーコースター，乗り心地，加速度計測，振動計測，軌道縦断面形状
(Small Urban Transportation, Roller Coaster, Ride Comfort, Acceleration Measurement, Vibration, Vertical Track Geometry)

1. はじめに

都市の軌道系公共交通には、鉄道・地下鉄・モノレール・LRT などがあり、輸送力に応じた機能の分担が図られている。近年環境問題への関心の高まりから地球温暖化防止対策や二酸化炭素排出量削減が唱えられており、2020年までに二酸化炭素排出量 25%削減の目標を達成するためにも、運輸部門における削減は不可欠である。二酸化炭素排出削減のためには、化石燃料を使う自動車・バスから、鉄道などの輸送効率の良い軌道系公共交通への移行が有効である。しかし、近距離を効率良く輸送する軌道系交通システムを新規に導入するには、建設費や導入空間などの課題から実現が困難なことが多く、特に地方都市では、自家用車やバスに依存している。このような都市交通事情や環境問題を背景に、著者らは省エネルギー性、低建設コストに優れ、敷設場所の自由度が高い都市交通システム「エコライド⁽¹⁾」を開発している。

エコライドは動力を持たない車両を軌道の高い位置まで巻き上げ、高低差を利用して走行させるローラーコースター

一の技術によるもので、位置エネルギーを積極的に活用する従来にない新しい概念の公共交通システムである。

本研究では、エコライドの実用化に向けて、公共交通としての車内乗り心地を満たすため、試作車両を用いて上下振動を低減できるような二次ばねの検討を行う。また、軌道縦断面形状の設計を行い、前後方向の加速度について検討することで乗り心地の評価を行う。



Fig.1 Energy Saving Urban Transportation System "Eco-Ride"

2. 台車緩衝機構の設計

軌道からの上下振動の伝達を低減し、公共交通として適当な水準の乗り心地を確保するための台車緩衝機構として、二次ばねの採用を検討する。

(1) シミュレーション検討

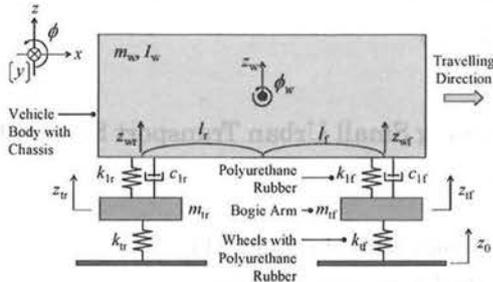


Fig.2 Vehicle Model with Secondary Spring

図 2 に示す車両運動モデルを用いて、二次ばねによる振動伝達低減方法をシミュレーションにより検討した。この車両運動モデルは前側台車に軌道の上下変位入力がかわって車両に振動が伝わるという想定をしている。

以下の手順により、振動の伝達が低減可能な周波数領域を広げること検討する。

①ばね定数の小さなものによって低次の固有振動数を小さくする

②共振周波数付近の振動伝達率を抑える

③低周波領域の振動伝達率を低くする

④以下の荷重を許容する

空車：920kg→二次ばね一つあたり 230kg (2254N)

積載（満員乗車）：1700kg→二次ばね一つあたり 425kg (4165N)

車体寸法などを考慮して二次ばねを検討した結果、3種類の二次ばねの振動伝達低減効果を調べる。ここでは二次ばねをタイプ A、タイプ B、タイプ C と呼ぶ。ばね定数は A→B→C の順に大きい。

三つの二次ばねの振動伝達低減効果についてシミュレーションを行った。図 3 に振動伝達特性のシミュレーション結果を示す。二次試作車両では、一次試作車両の共振周波数である約 13Hz 及び 18Hz 付近の振動伝達率をいずれも抑えられていることがわかる。

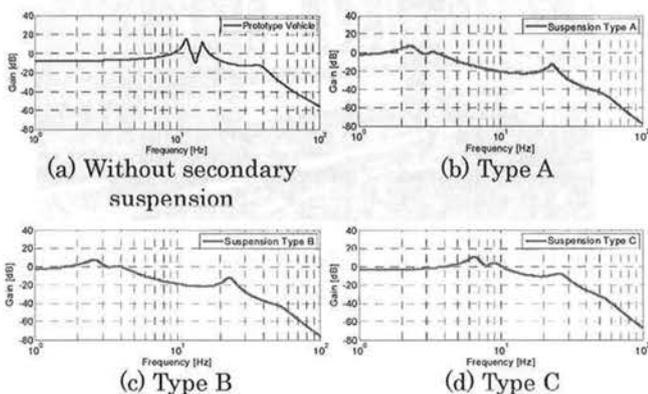


Fig.3 Simulation results of vibration response

(2) 試作車両による検討

シミュレーション結果に基づき、タイプ A、タイプ B、タイプ C の三つの二次ばねを二次試作車両に実装し、東京大学生産技術研究所千葉実験所内の実験線を走行した時の振動加速度を計測して、その振動伝達低減効果を調べた。加速度センサにより、車両進行方向（前後方向）、進行方向と横に直交する方向、進行方向と縦に直交する方向の三方向の加速度を計測した。初期試作車両（旧車両）と新規に制作した試作車両（新車両）を、新車両が進行方向前側になるように連結して走行させた。

今回は二次ばねの種類及び車両の荷重状態により以下の六つの条件を設けて計測を行った。

- ・条件 I タイプ A 実装、無負荷
- ・条件 II タイプ A 実装、780kg 負荷
- ・条件 III タイプ B 実装、無負荷
- ・条件 IV タイプ B 実装、780kg 負荷
- ・条件 V タイプ C 実装、無負荷
- ・条件 VI タイプ C 実装、780kg 負荷

ここで、無負荷は空車状態、780kg 負荷は定員 12 名乗車の状態をウェイト積載により模擬しており、負荷は一次・二次車両ともに行っている。計測された加速度のうち条件 I におけるデータを図 4 に示す。

二次ばねを実装していない一次車両よりも実装している二次車両の方が振動加速度振幅が小さいことより、二次ばねの実装により振動加速度の振幅を小さく抑えられていることがわかる。また、他の条件における振動加速度と比較した結果、タイプ A を実装したときの上下方向振動加速度が最も小さく、振動伝達低減に効果があるといえる。次いで、タイプ B、タイプ C の順に振動の伝達を低減できている。これはばね定数の小さな順に一致しており、ばね定数の小さな二次ばねを装着することで良好な振動伝達低減効果が得られると言える。

図 5 に振動加速度最大振幅の二次ばねの有無による比較の一例を示す。左側が二次ばねなし、右側が二次ばねありの結果である。本結果から二次ばねを実装することで軌道から車体への上下振動の伝達を大幅に低減できていることを確認できる。

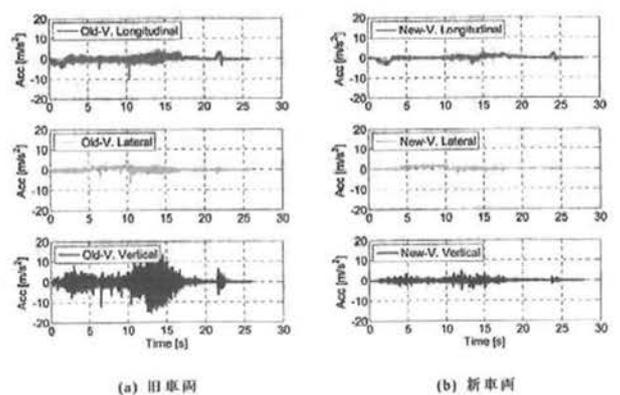


Fig.4 Result of Acceleration Measurement

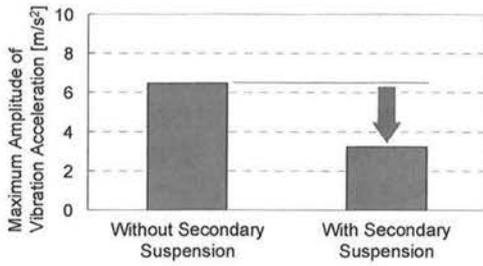


Fig.5 Effect of reduction of vibration transmission

3. 軌道線形形状の設計手法の検討

(1) 軌道線形の検討

乗り物の前後方向の乗り心地には、車両走行における加減速が深く関係しているため、急激な車速変動は乗り心地の面から好ましくない。そこでエコライドも鉄道やバスのような公共交通の乗り心地を目標として速度パターンを決定することが望ましい。エコライドは車体に動力を搭載しておらず走行には位置エネルギーを利用するため、前後方向の加速度を決定する要因は縦断面の軌道形状(縦曲線)であり、この設計が前後方向の乗り心地を決定する支配的要因である。

そこで本節では、前後方向に関する乗り心地について検討するため、希望する速度パターンを実現できる線形の設計方法を提案し、その手順に基づいて縦曲線設計を行う。

基本走行コンセプトとして、本交通システムの特徴である位置エネルギーを活用するための路線コンセプトを図 6 に示す。車両が A 駅から B 駅に移動する際は、位置エネルギーにより走行する。ここで A 駅から B 駅間は加速区間・定速区間・減速区間という 3 つの走行区間に分けられる。図 6 において、A 駅発車後の加速区間では急な加速のない滑らかな曲線軌道が望まれ、定速区間では速度を維持するために必要な軌道傾斜が必要である。

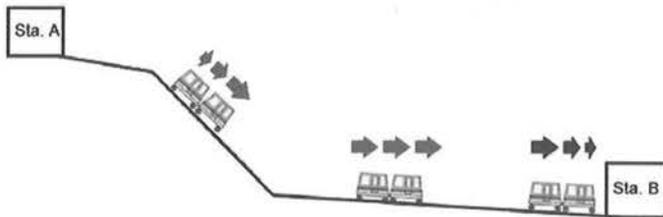


Fig.6 Speed Control Using Track Geometry

(2) 縦曲線設計方法

本検討ではエコライド縦曲線設計を行うにあたり、エコライドの運行速度パターンを入力値とし車両パラメータ及び摩擦係数などを設定することで、代数方程式を解いて軌道形状を設計する方法をとる。この縦曲線設計方法を検討するための力学モデルとしては質点モデルを用いる。

1 質点が 2 次元平面の軌道上を運動する力学モデルを構築し、前後方向の運動方程式を記述する。

$$m\ddot{s} = -mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta - \frac{1}{2} \rho C_d A (\dot{s} - V_{wind})^2 \quad (1)$$

ここで、

- s : 軌道距離[m]
- m : 車体重量[kg]
- g : 重力加速度[m/s²]
- θ : 軌道傾斜角[radian]
- μ : 摩擦係数
- ρ : 空気密度[kg/m³]
- Cd : 空気抵抗係数
- A : 車体前面投影面積[m²]

である。また、Vwind がプラスのときを追い風、マイナスのときを向かい風とする。

以上のパラメータより構成される式(1)を用い、図 7 に示される 2 種類の軌道 (Track A, Track B) を走行させた場合の応答を算出する。図 7 に示される縦曲線を元に計算した結果が図 8, 図 9, 図 10 である。それぞれの図は横軸が水平距離であり、縦軸は図 7 が鉛直高さであり、図 8 が水平距離に対する走行速度、図 9 が水平距離に対する前後方向加速度、図 10 が水平距離に対するピッチ角速度を示す。

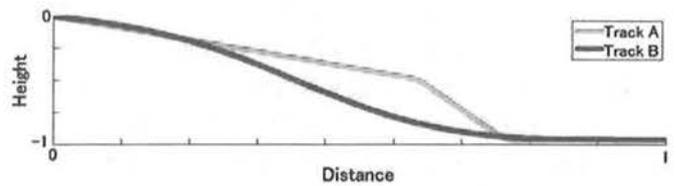


Fig.7 Track Geometry in Vertical Plane

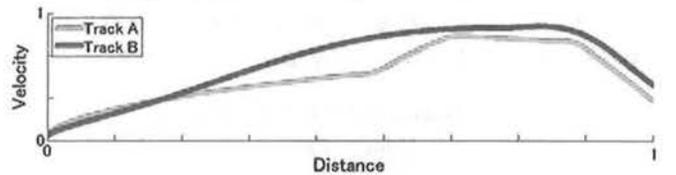


Fig.8 Velocity in Travelling Direction

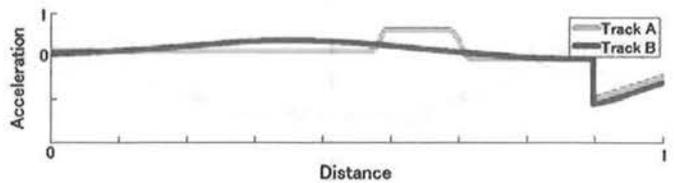


Fig.9 Acceleration in Travelling Direction

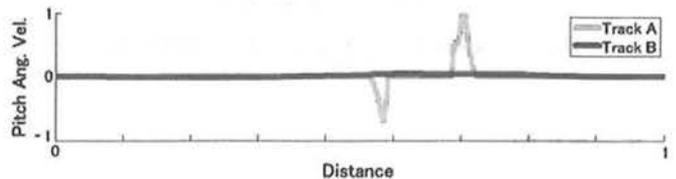


Fig.10 Pitch Angular Velocity

図 9 より加速領域において滑らかなカーブを描くことで前後加速度の変化が緩やかになっており、更に図 10 よりピッチ角速度の変動も小さく抑えられていることが確認でき

る。このことから、滑らかな加速領域を持つように縦曲線設計することが重要であることが確認できる。

(3) 縦曲線設計方法の検討

(2) で滑らかな曲線の加速領域を持つことが乗り心地にとって重要であることが確認された。本章では縦曲線設計方法を検討する。本縦曲線設計の基本コンセプトは、車両の速度パターンや各走行位置における向かい風の影響及びタイヤと軌道の摩擦係数などを運動方程式に入力することで、入力に応じた軌道傾斜角を逐次計算するものである。そこでまず、車両前後方向の運動方程式 (式 (1)) について軌道傾斜 θ を未知数とする式に変形すると、

$$\theta = -\sin^{-1} \left(\frac{m\ddot{s} + \frac{1}{2}\rho C_d A (\dot{s} - V_{wind})^2 + \mu\sqrt{a}}{mg(1+\mu^2)} \right) \tag{2}$$

$$a = (mg)^2 (1+\mu) - m\ddot{s} \left(m\ddot{s} + \rho C_d A (\dot{s} - V_{wind})^2 \right) - \left(\frac{1}{2}\rho C_d A (\dot{s} - V_{wind})^2 \right)^2 \tag{3}$$

という式が得られるため、発車から停車までの走行区間において、この式で入力速度に対して傾斜角を逐次計算することで、希望する走行速度を満たす軌道傾斜角が算出され、縦曲線が決定する。この縦曲線設計手順を図 10 に示す。

この縦曲線設計において、前後方向の運動方程式への入力が直接縦曲線形状及び乗り心地に関係する。乗り心地に関するパラメータとして前後方向の速度、加速度、加加速度などが考えられ、これらを適切に設定することが必要である。そこでこれらの考慮した最適な乗り心地が得られる速度パターンを生成することが重要なテーマである。

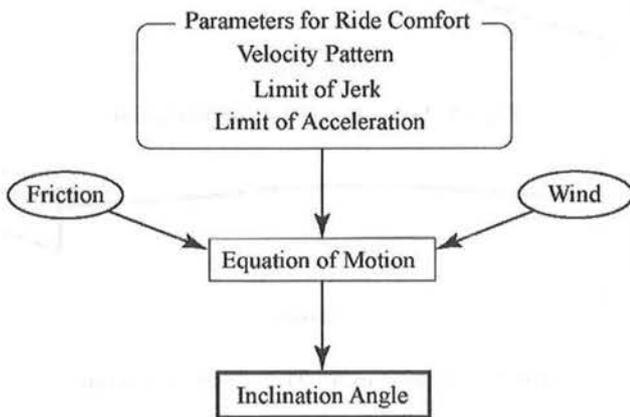


Fig.11 Concept of Track Geometry Design

4. まとめ

本論文では車両側に駆動装置を持たない省エネ・省コスト型交通システム「エコライド」について、公共交通として適当な水準の乗り心地の評価について検討を行った。

試作車両に三種類の二次ばねを実装するシミュレーションおよび実車走行実験を行い、上下振動を低減することが

できることを確認した。また、シミュレーションと走行実験の結果、タイプ A の二次ばねが最も上下方向の振動加速度を低減することができることがわかった。

次に、前後方向の加速度を決定する要因として、縦曲線設計方法について検討を行った。まず縦曲線形状によって車両前後方向の速度、加速度、ピッチ角速度が大きく変化することから、乗り心地には縦曲線設計が重要であることを確認した。そこで、速度パターンを運動方程式に入力することで軌道設計を行う手法の手順を示した。今後は、公共交通としての乗り心地を満たすことができる速度パターンを検討し、縦曲線設計を行っていく必要がある。

謝 辞

本研究は平成 21 年度に関東経済産業局の委託研究「ITS 中量公共交通機関「エコライド」の開発による低炭素化地域交通モデルの実証研究」として行われた。関係各位に深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) 関口明浩, 金山泰雄, 表久紀, 須田義大, 山口大助: 省エネ型都市交通システム「エコライド」の開発, 日本機械学会第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, No.09-30, pp.370-374, (2009)
- (2) 山口大助, 須田義大, 安藝雅彦, 音羽勇哉, 表久紀, 金山泰雄, 関口明浩: 省エネ型都市交通システム「エコライド」の台車緩衝機構に関する基礎的研究, Dynamics & Design Conference, No.10-8, pp.294, 2010
- (3) 日本機械学会: 「鉄道車両のダイナミクス—最新の台車テクノロジー—」, 電気車研究会, (1994)
- (4) 安藝雅彦, 須田義大, 音羽勇哉, 平沢隆之, 山口大助, 表久紀, 金山泰雄, 関口明浩: 省エネ型交通システムにおける軌道の縦断面曲線設計法の検討, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, No.10-1, Vol.7, pp.427-428, (2010)
- (5) Nishimura, S., Tsukamoto, N., Kataoka, T. and Sekiguchi, A.: Investigation for Track Geometry Layout of Urban Transportation System Using Potential Energy, Proceedings of Annual Conference in Kansai Affiliate, Japan Society for Design Engineering, pp.53-56 (2007)