

位置エネルギーを利用した省エネルギー型都市交通システムの

軌道縦曲線設計に関する研究

○ [機] 安藝 雅彦 音羽 勇哉 [機] 須田 義大 [機] 山口 大助 [機] 平沢 隆之 (東大生研)

表 久紀 (泉陽興業)

Study on Vertical Curve Design in Energy Saving Urban Transportation System

○Masahiko Aki Yuya Otowa Yoshihiro Suda

Daisuke Yamaguchi Takayuki Hirasawa, (University of Tokyo)
Hisanori Omote, (Senyo Kogyo)

This paper deals with a new energy saving urban transportation system called "EcoRide". The vehicle that does not have on-board driving devices runs using potential energy by the application of roller coaster technologies. 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, this paper deals with speed control design approach by vertical track geometry. First, vertical curve patterns were classified. Then, a track design procedure was explained. Finally, two case of vertical curve design were shown and vertical curve design was carried out.

キーワード：公共交通，ローラーコースター，縦曲線，シミュレーション

Key Words : Public Urban Transportation, Roller Coaster, Vertical Track Geometry, Simulation.

1. 緒言

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^{(1), (2)}。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、二酸化炭素排出削減のためには、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⁽³⁾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い。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^{(4), (5), (6)}」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の原理によるもので、位置エネルギーを積極的に活用する従来になかった新しい概念の公共交通システムである。本報では、本車両システムの速度制御と重要な関連がある軌道の縦断面曲線（以下、縦曲線）の設計コンセプトを示し、それに基づく縦曲線設計のケーススタディを示す。



Fig1 Energy Saving Urban Transportation System "EcoRide"

2. エコライド走行軌道

2.1 基本走行コンセプト

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2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2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る。

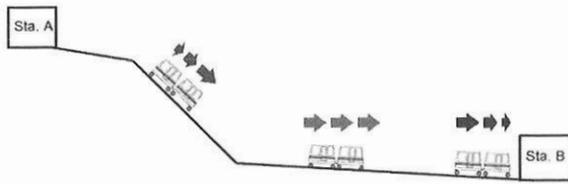


Fig.2 Speed Control Using Track Geometry

2.2 走行車両モデル

縦曲線における車体物理量を検討するために、軌道上を走行する 1 質点モデルを考える。タイヤと軌道の摩擦や空気抵抗を考慮して車両の前後方向の運動方程式を作成する。

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

ここに、 θ は軌道傾斜角、 m は車両質量、 g は重力加速度、 μ は動摩擦係数、 \dot{s} は車両進行方向速度、 V_{wind} は風速、 ρ は空気密度、 C_d は空気抵抗係数、 A は車両前面投影面積である。本報における縦曲線設計はこの式を用いた車両走行特性によって説明する。

Table 1 Specification of Vehicle

Car Weight (65 kg/psn × 12 psn/car)	3780kg
Train Set	4 car/set
Cross Section Area of Car Front	4.8m ²
Rolling Resistance	0.015
Wind	0m/s
Maximum Inclination Angle (Up)	14deg
Maximum Inclination Angle (Down)	8deg
Lift-up speed	10[km/h]
Lift-up angle	14[deg]

2.3 車両基本走行特性

エコライドは車両の速度制御を軌道設計によって行う。ある 2 点間の軌道縦断面を繋ぐ縦曲線の種類とは、

- (1) 下り傾斜のみ
- (2) 上り傾斜のみ
- (3) 上り傾斜から下り傾斜
- (4) 下り傾斜から上り傾斜

という 4 種類⁶⁾である (図 3)。したがってこれら基本的走行特性を解析し、4 種類の軌道縦曲線を最小単位とする走行特性線図から、基本的な車両走行性能を見積もることが出来る。

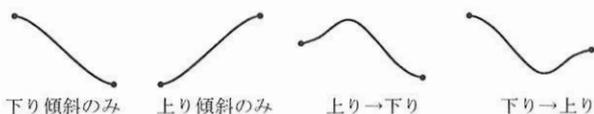


Fig.3 Vertical Curve Pattern

ここでは走行特性の一例として、上り傾斜 (巻き上げ) から下り傾斜の軌道における走行特性線図を示す。巻き上げから下り傾斜の縦曲線における概要を図 7 に示す。このとき始点と終点を同一高さとしている。この図において最大高低差: H [m] を変化させた時の、水平到達距離: L [m] と走行所要時間: t [sec] の変化、ならびに水平到達距離と最高速度の変化をグラフにまとめる。最大高低差と傾斜角が固定されているため、ある一定の距離以上は軌道が水平となり、車両は空気抵抗および転がり摩擦により徐々に減速する。制限速度下限値を 5[km/h] とし、車両の走行速度がこれを下回ったところで計算を終了する。初速を 10[km/h] とし、制限速度下限値を下回るまで進むことのできる距離とその所要時間を求めた。ここでは傾斜角 8 度のグラフを示す。

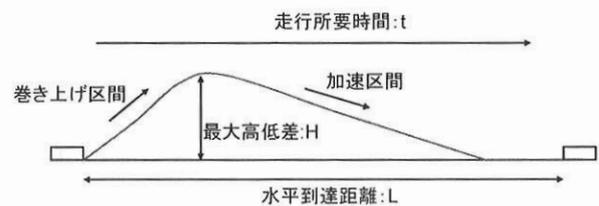


Fig.4 Vertical Curve (up-down)

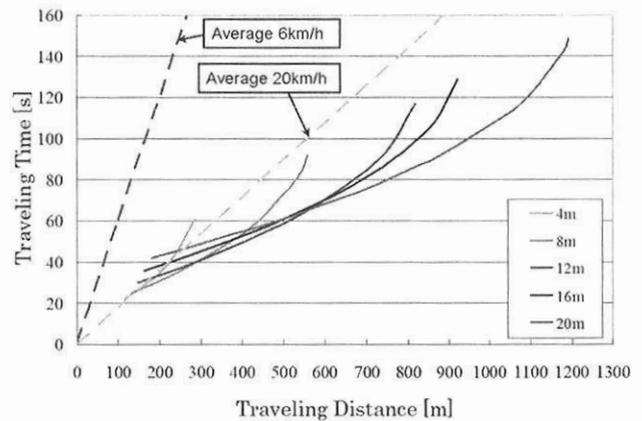


Fig.5 Time Required – Block Distance (Inclination Angle: 8deg)

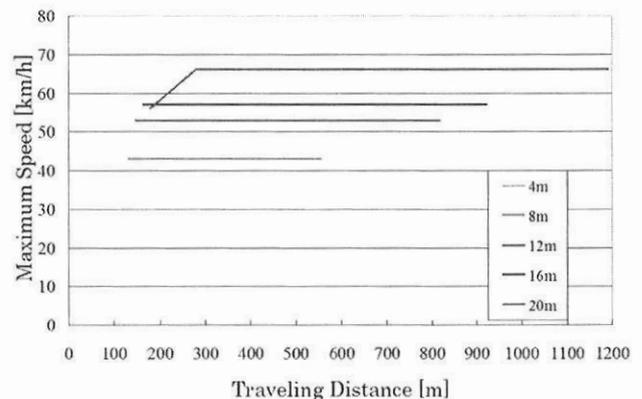


Fig.6 Maximum Speed – Block Distance (Inclination Angle: 8deg)

3. 軌道縦曲線設計

エコライドは、軌道形状が走行特性を決定付ける。特に、位置エネルギーを利用するという特徴から、軌道縦曲線の形状によりエコライドの速度パターンがほぼ決定され、それに伴って、駅間の所要時間やエネルギー効率、エコライドの乗り心地などが求められる。

一方で、エコライドはその導入の自由度の高さが、軌道形状の自由度の高さによるものが多い。そのため、軌道形状を決定するプロセスにおいて検討していく必要がある。

これらを踏まえ、軌道縦曲線の設計を検討していくにあたり、その設計手法を提案する。以下に、その設計手法を示す。

- ① 始点 S の位置情報及び終点 G の位置情報($X_s, Y_s, Z_s, X_g, Y_g, Z_g$)とそれぞれの地点における初速度(V_s)・終端速度(V_g)を設定する。
- ② 途中にある地形・建造物による位置の制約条件、速度の制約条件を書き出し、それぞれの制約条件が境界条件となるように区間を細分化する。ここで細分化された区間を、単位区間と呼ぶ。
- ③ それぞれの単位区間における境界条件(水平方向距離、許容高低差、初速、終端速度)を入力として設定し、最適な軌道形状を検討する。
- ④ 単位区間ごとの軌道形状を連結し、2 点間を結ぶ軌道形状に分割する。
- ⑤ 追い風・向かい風、空車・満車における条件を検討し、2 点間における最低制限速度・最高制限速度を満たすように③、④を再検討する。もしくは、必要に応じて巻上装置、減速区間の設置を検討する。
- ⑥ 2 点間の所要時間、平均速度を算出する。

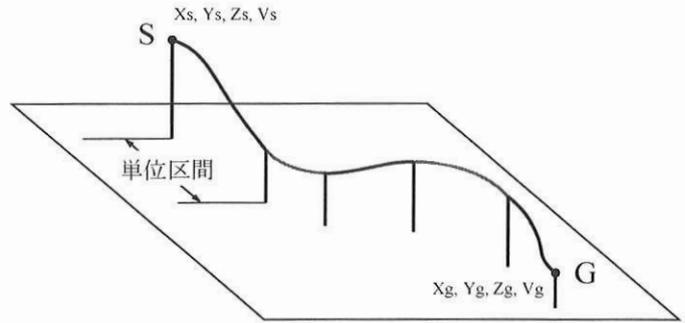


Fig.8 Design of Vertical Curve

それぞれのプロセス (図 7) における入力と出力を表 2 にまとめる。

②における制約条件は、極端な傾斜になっている地形を通る場合や、建造物や道路を乗り越える・高架の下をくぐるなどの場合に検討する必要がある。制約条件が発生するごとに軌道を区切り、単位区間とする。ここで単位区間とは図 3 で示される 4 種類の基本曲線である。

この手法において重要となるのは、③における単位区間での軌道の設計である。今回提案した手法においては、単位区間の両端の境界条件を満たすように軌道を自由に設計できる。

単位区間における境界条件によって、軌道縦曲線の形状を図 3 の 4 通りから選択し、実際に運用する上で許容される水平方向距離・鉛直方向高さ・所要時間・平均速度から、最適な軌道縦曲線を決定する。

軌道縦曲線の決定にあたり、上り傾斜のみが必要な場合は巻き上げ区間を設置することが考えられるため、その距離や所要時間は巻き上げ区間の性能によって決定される。また、それ以外の下り傾斜のみ、上り傾斜→下り傾斜、下り傾斜→上り傾斜における検討は走行特性線図を基に行う。

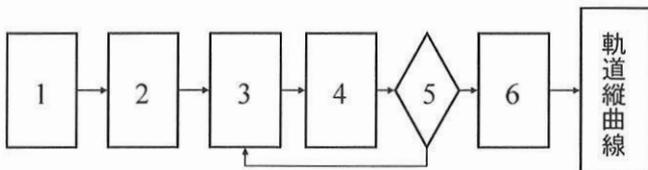


Fig.7 Vertical Curve Design Flow

Table 2 Vertical Curve Design

	入力	出力
1	$X_s, Y_s, Z_s, X_g, Y_g, Z_g, V_s, V_g$	
2	(x, y, z)の制約条件, v の制約条件	最小区間の両端における(x, y, z), v
3	最小区間での水平距離, 高低差, 初速度, 終端速度	軌道形状, 所要時間
4	最小区間の軌道形状	全体の軌道形状
5	軌道形状, 追い風・向かい風, 空車・満車, 最低制限速度・最高制限速度	速度パターン, 所要時間
6	軌道形状	速度パターン, 所要時間

4. 軌道設計ケーススタディ

本報における軌道縦曲線設計手法について、実際のケーススタディに模擬的に適用し検討を行う。

(1) 高さ制限がある場合

図9における地表上の始点A及び終点Bの二点間を結ぶ軌道縦曲線について検討する。ただし、始点Aにおける初速は0km/hとする。また、始点Aより400mの地点には高さ5mの障害物があり、それを乗り越えなければいけないものとする。障害物の上端をPとする。ここで、巻き上げ区間は軌道傾斜角を 14° とし、巻き上げ速度は10km/hとして検討する。また、最高制限速度を40km/hとする。

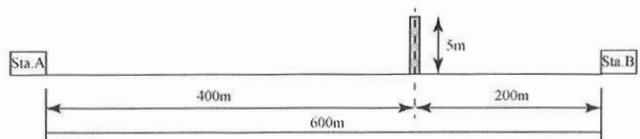


Fig.9 Configuration of Case 1

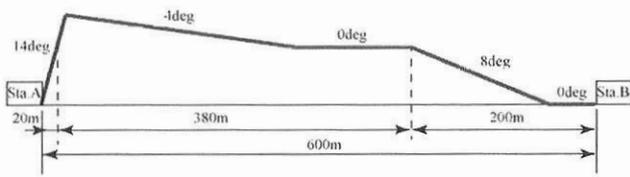


Fig.10 Vertical curve in Case 2

このケースの場合、全体区間を「上り傾斜のみ」、「上り傾斜から下り傾斜」、「下り傾斜のみ」の3つの区間に分割する。

上り傾斜のみの区間において、P点を越えるためには最低5m以上は巻き上げなくてはならない。そこで、まず点Aから5mの高さまで巻き上げ区間を設定する。巻き上げ区間は傾斜角14°と設定するため、水平方向はおよそ20mとなる。

上り傾斜から下り傾斜における区間において、最高制限速度以内で走行する条件の下で、8mの巻上げの後、4°の下り傾斜を走行させる軌道縦曲線によって、380mを60秒弱で走行可能であることがわかった。

下りのみの区間において、下り傾斜の高低差5m、および水平方向距離200mの条件において、下り傾斜8°の軌道縦曲線によって、200mをおよそ30秒で走行可能であることがわかった。

(2) 駅間距離が長い場合

図11における地表上の始点A及び終点Bの二点間を結ぶ軌道縦曲線について検討する。ただし、始点Aにおける初速は0km/hとする。巻き上げ区間は軌道傾斜角を14°とし、巻き上げ速度は10km/hとして検討する。また、最高制限速度を40km/hとする。

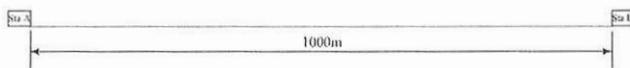


Fig.11 Configuration of Case 2

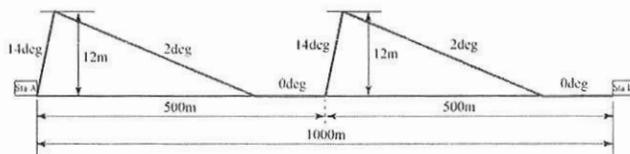


Fig.12 Vertical curve in Case 2

1000m程度の距離の場合、一回巻き上げで走行させると一回の巻き上げ高さが大きくなる。そこで1000mの区間を500mずつ二回巻き上げる軌道縦曲線について検討する。軌道特性線図を検討した結果、最高制限速度以内で走行する条件の下で、12mの高さまで巻き上げ、傾斜角2°の下り傾斜で走行させる軌道縦曲線が最も短い時間で走行できる軌道縦曲線であることが求められた(図12)。なおこの時、1000m走行するのにかかる時間はおよそ150秒となった。

5. 結言

本報では、ジェットコースターの技術を利用した省エネ型交通システム「エコライド」が公共交通として成立するために、重要な要素である軌道縦曲線の設計手法の検討を行った。本報における軌道縦曲線の設計手法は、全体の軌道形状を細分化して個々に最適化してゆき、再度全体にまとめることで軌道縦曲線を決定するものである。この手法を用い2種類の駅配置におけるケーススタディを行い、実際に縦曲線設計を行った。その結果、高さや最高速度に制限がある条件においても縦曲線設計可能であることが示された。今後、さらに実際の地形条件を元にケーススタディを行ってゆく。

参考文献

- (1) Ohta, K., (2003), Transport Environment and Policy towards Sustainable Society, IATSS Review, Vol.28, No.3.
- (2) Fujii, S., (2006), Development of Mobility Management in Japan, IATSS Review, Vol.31, No.4.
- (3) ULTra PRT System, Homepage:
<http://www.ultraprt.com/>
- (4) Sekiguchi, A., Kanayama, Y., Omote, H., Suda, Y. and Yamaguchi, D., (2009). Development of Energy Saving Urban Transportation System "Eco-Ride". Proceedings of the 11th Motion and Vibration Conference 2009 (MoViC2009), pp.370-374 (in Japanese), Japan Society of Mechanical Engineers.
- (5) Suda, Y., Omote, H., Kanayama, Y., Sekiguchi, A., Nakano, K., Hirasawa, T., Yamaguchi, D., Aki, M. and Otowa, Y., (2010). Evaluation on Ride Comfort of Energy Saving Urban Transportation System "Eco-Ride", Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, MECHATRONICS2010-135, CD-ROM, International Federation of Automatic Control.
- (6) Aki, M., Otowa, Y., Suda, Y., Yamaguchi, D., Hirasawa, T. and Omote, H., Speed Control by Vertical Curve Design in Energy Saving Urban Transportation System, Proceedings of the 12th Motion and Vibration Conference 2009 (MoViC2011), pp.163-168 (in Japanese), Japan Society of Mechanical Engineers.