

ばねモデルを用いた交通信号機スプリット制御法

藤森立^{2,a)} 須賀聖² 山田悠司² 井原史渡² 高村大輝² 林健² 栗原聡^{1,b)}

概要: 現在, 世界の道路交通網において交通渋滞は大きな課題となっている. 本研究では交通渋滞解消へのアプローチとして, 交通信号に着目し, ばねモデルを用いた交通信号機のスプリット制御法とそれにもとづく自律分散制御手法を提案する. ばねモデルは交通流とスプリットの関係をばねの釣り合い式にもとづいてモデル化したものである. シミュレーションを用いた検証から, 提案手法が多様な形状の交差点を適切に制御することが可能であり, また現行の制御と比して優れた交通流円滑化効果を持つことを示した.

Traffic Signal Split Control Method Using Spring Model

1. はじめに

交通渋滞は大気汚染や経済損失といった様々な問題の要因であり, 現代社会の深刻な問題の一つである. 我々は交通渋滞を解消するためのアプローチとして信号機制御に着目し, 研究を行っている. 現在の日本においてはMODERATO[1]と呼ばれる信号機制御システムが導入されており, 感知器等から収集した道路交通情報を中央官制センターで集中処理し, 適切な信号機制御パラメータを算出している. こうした集中制御はエリア全体を管理することに適しているが, 個々の交差点に生じる交通情報の動的な変化に対して即応性が低くなってしまふ. この問題に対して, 我々は自律分散型の制御モデルを導入することで, 即応性を高めることを提案してきた. 本研究では, 自律分散型の信号機制御手法として, ばねモデルを用いた交通信号機スプリット制御法を提案する.

2. 信号制御

本節では, 本論で制御対象としている交通信号とスプリットについての説明を示す.

現在, 日本国内で稼働している信号制御はおおむね, 赤・青・黄といった信号機の点灯によって現示を示し, このサ

イクルを繰り返すことで制御されている. このような制御において, 単一交差点の信号制御パラメータは次の2つである.

- **サイクル長:** サイクル1周期の長さ
- **スプリット:** サイクルにおける各現示の時間比率

ここで, スプリットの配分について実例を用いて説明する.

図1のような十字路を仮定する. 図1中の1Φ・2Φは現示を示したものであり, 1ΦはAB方向の直進右左折, 2ΦはCD方向の直進右左折を表現している. 1Φ・2Φ, それぞれに交通権が与えられたとき, 現示に対応した走行が許可される.

スプリットの配分においては, サイクル長全体を100%として1Φ・2Φへの配分を行う. 例えば, 1Φに40%, 2Φに60%を配分したとする. サイクル長を c としたとき, 1Φは $0.4c$, 2Φは $0.6c$ となる. ただし, 実際には現示の切り替わりの際に必ず黄信号時間を挿入するなどの制約があり, 青信号時間の総和が実際のサイクル長と一致することは基本的にない.

本論では, このスプリットを対象とした制御手法を提案する.

3. 提案手法

3.1 環境設定

提案手法において想定する環境について説明する.

本手法では自律分散型の制御手法として, 制御対象となる信号化交差点それぞれに一台の制御ユニットを配置する. 以降, この制御ユニットのことをエージェントと呼ぶ.

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

² 慶應義塾大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

a) ryufmr@keio.jp

b) satoshi@keio.jp

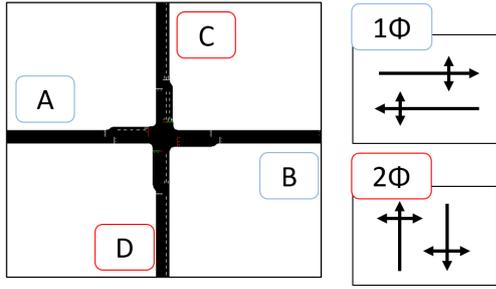


図 1 十字路

Fig. 1 An example of crossroad

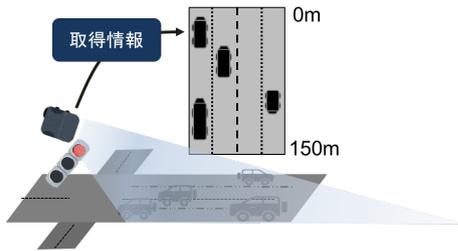


図 2 ミリ波レーダー

Fig. 2 Millimeter-wave radar

各エージェントはセンサによって自身の担当交差点周辺の交通情報を取得し制御を行う。このセンサによって、エージェントは道路のレーン上を走行する車両を認識することができる。本研究ではセンサの認識範囲は 150m と想定する。この値は実証実験に使用する予定である、smartmicro 社の UMR-11 Type 132 の認識距離公称値 175m を参考にした。^{*1}

3.2 2 現示制御

2 現示制御における提案手法とその適用について説明する。本項では現示を 2 項と同様に $1\Phi \cdot 2\Phi$ と示す

図 4 は提案手法における 2 現示ばねモデルの概略図であり、2 つのばねが 1 本の筒内で釣り合っている様子を示している。2 つのばねは $1\Phi \cdot 2\Phi$ それぞれのスプリットを表し、緑・赤・青の矢印は順に、外部から働く力、 1Φ のばねの弾性力、 2Φ のばねの弾性力を表している。本手法では、各現示に対応する交通量を外部から働く力と捉え、ばねの釣り合い位置を求めることで、釣り合い状態のばね長からスプリットを決定し制御を行う。

各現示のばね長を Φ_i とする。ばねモデルの筒の長さは結果に影響を及ぼさないため 1 と仮定すると次式が成立する。

$$\sum_{i=1,2} \Phi_i = 1 \quad (1)$$

*1 smartmicro 社 HP <https://www.smartmicro.com/>

なお、この仮定のもとで 2 つのばねの自然長はともに $\frac{1}{2}$ である。ばねモデルのばね定数を k 、現示間の交通量差に対応する外部からの力を F とすると、釣り合い位置の自然長からの変位量 x は

$$x = \frac{F}{2k} \quad (2)$$

と表される。よって、式 7, 2 より

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{1}{2} + \frac{F}{2k} \\ \Phi_2 &= \frac{1}{2} - \frac{F}{2k} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。このばね長をスプリットとして設定する。ただし、いずれかの現示のスプリットの値が 0 または 1 になってしまうと片方の現示にしか交通権が与えられなくなってしまうため、システムとしてはスプリットの値に上限・下限を設定する。

続いて、現示間の交通量差 F の算出法について説明する。

道路 l から交差点への車両流入台数をレーン数で割ったもの、すなわち道路 l のレーン単位の流入台数平均を $q_{l,in}$ 、同様に赤信号になったときのはけ残り台数平均を $q_{l,res}$ とする。これらの観測値から、道路 l の交通量を

$$q_l = q_{l,in} + a^{q_{l,res}} \quad (4)$$

と定義する。式 4 の右辺第二項は係数 a を底とする指数関数であり、はけ残り台数が多いほどこの項はより大きな値を取る。

現示 i に対応した交差点への流入路の集合を R_i とおく。これらを用いて、現示 i に対応した交通量 Q_i を

$$Q_i = \max(q_l | l \in R_i) \quad (5)$$

と定義する。以上の定義を用いて、2 現示制御における現示間交通量差を

$$F = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (6)$$

によって算出する。式 6 右辺の分数項は総和を用いて正規化することで無単位化している。なお、 k 、 a はシステムの管理者が事前に設定するパラメータである。

したがってシステムとしては、エージェントはセンサによって得た観測値に対して、式 3 と式 6 を用いて各現示のスプリットを決定する。観測値の集計は任意の時間周期で実行できるが、集計を各現示に平等に行うためにはサイクル単位に行うのがよいと考えられる。

3.3 3 現示制御

3 現示制御における手法とその適用について説明する。

図 5 は 3 現示ばねモデルの概略図である。図 6 は、3 つ

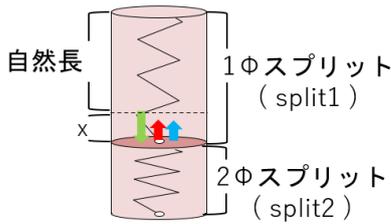


図 3 2 現示ばねモデル

図 4 Two phases Spring model

の現示に対応した 3 つのばねが筒内で釣り合っている様子
を示している。本モデルでも 2 現示ばねモデルと同様に外
部からの力とばねの弾性力による釣り合い状態のばね長か
らスプリットを決定し制御を行う。

3 現示制御の具体例としては図 5 を参照されたい。

各現示のばね長を Φ_i とする。3.2 節と同様にばねモデル
の筒の長さを 1 とすると

$$\sum_{i=1,2,3} \Phi_i = 1 \quad (7)$$

が成立する。ばねモデルのばね定数を k 、外部からの力は、
ばねモデルにおいて隣接する現示間の交通量差に対応し、
 $\Phi_1 \cdot \Phi_2$ 間の力を F_1 、 $\Phi_2 \cdot \Phi_3$ 間の力を F_2 とする。そして
図 5 中にあるように、ばねの自然長からの変位量をそれぞ
れ $x_1 \cdot x_2$ とすると、ばねの釣り合い状態ではこれらの変数
の間に次の関係が成立する

$$\begin{aligned} kx_1 + k(x_1 - x_2) &= F_1 \\ k(x_2 - x_1) + kx_2 &= F_2 \end{aligned} \quad (8)$$

式 7 と式 8 から変位量を求め、各現示に対応するばね長を
求めると次のようになる

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{1}{3} + \frac{2F_1 + F_2}{3k} \\ \Phi_2 &= \frac{1}{3} + \frac{-F_1 + F_2}{3k} \\ \Phi_3 &= \frac{1}{3} + \frac{F_1 + 2F_2}{3k} \end{aligned} \quad (9)$$

このばね長をスプリットとして設定する。3.2 節と同様に、
各スプリットが 0 または 1 とならないように上限・下限を
設定する。

続いて現示間交通量差 F_1 、 F_2 の算出法を説明する。各
道路の交通量 q_i 、現示 i に対応した交差点への流入路の集
合 R_i 、現示 i に対応した交通量 Q_i の定義は 3.2 節と同様
とすると、 F_1 、 F_2 は

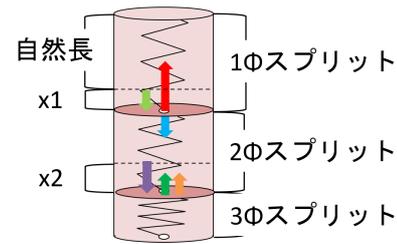


図 5 3 現示ばねモデル

Fig. 5 Three phases Spring model

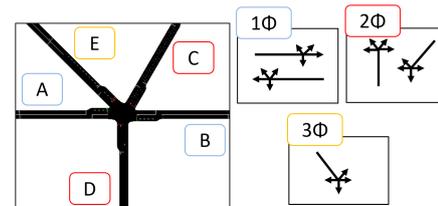


図 6 五差路

Fig. 6 An example of five-forked road

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \\ F_2 &= \frac{Q_2 - Q_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \end{aligned} \quad (10)$$

によって算出される。

3.4 変動抑制制御

本項では主に交通流が飽和状態に近い状況において、ば
ねモデルを安定して運用するための変動抑制制御について
説明する。

現示間の交通量差が短期的に大きくなったとき、ばねモ
デルは交通量が支配的な現示に優先的にスプリットを配分
する。しかし、どの現示にも継続的に高い需要があるとき、
優先された現示の需要は一時的に緩和されるが、優先され
なかった現示の需要は一時的に増大する。これにより、次
サイクルでは、前サイクルで優先されなかった現示に対し
て優先的にスプリットが配分される。このようにして、交
通需要が高い場合にはスプリット値が振動を起こしてし
まう場合がある。このような振動が起こると適切な制御が
できなくなることから、経験的に毎サイクルにおけるスプ
リットの変動幅に対して制限を設けることによって、交通
需要が高い場合にも安定的な制御を可能にする。本研究で
は、この制限幅はサイクル長に対する割合によって設定す
る。この制限幅の具体的な値と、制限を設けることによる
効能については次節以降に実験結果を示して議論する。

4. 実験

本節ではシミュレーション上に構築した道路ネットワー
ク上での実験内容を示す。実験用道路ネットワークは大

まかに、単一交差点・人工的な大規模グリッド状道路ネットワーク・実在する実証エリア道路ネットワークの3種を用意した。実験環境用のシミュレータには、Simulation of Urban MObility(SUMO)[2] [3] を用いた。

以降、実験においてばねモデルのパラメータはばね定数 $k = 0.6$, 捌け残り台数に対する指数関数の底 $a = 1.5$ とし、とくに断りが無い場合、変動抑制の制限幅はサイクル長の10%とした。

また各シナリオにおける手法間での同一車両の流入位置と走行経路はすべて同じであり、シミュレーションは全ての車両が走行を終えるまで継続した。

4.1 単一交差点における実験

単一交差点における実験では四差路に対して実験を行う。

本項における実験の比較手法には、現行制御の方式に則った、交通需要にもとづくスプリットパラメータでの静的制御を用いる。実験環境が単一交差点であり、交差点への流入計画を既知のものとしてスプリットパラメータを設定するため、統計にもとづく現実とは異なる理想的なスプリットパラメータであることに留意されたい。

なお、本項での実験においてはすべての手法でサイクル長を100sとした。

4.1.1 四差路交差点

図1の道路ネットワークに対して実験を行う。実験シナリオを以下に示す。

Scenario 1-1

1Φ方向と2Φ方向の車両流入比を0s~3600sは7:3, 3601s~7200sは3:7として流入させる。ネットワーク全体では1000台/hが流入する。

Scenario 1-2

車両流入比はScenario 1-1と同じとし、流入台数を2000台/hとする。

Scenario 1-3

車両流入比はScenario 1-1と同じとし、流入台数を2500台/hとする。

4.2 実エリアにおける実験

実エリアにおける実験では、図7に示す実証予定地をシミュレーション上に再現した図8の道路ネットワーク上での実験を行う。^{*2} 実エリアでは図9に示す16ヶ所の信号化交差点を制御対象とする。本実験では以下のシナリオにもとづいて道路ネットワーク上に車両を流入させ評価を行う。本シナリオは現実時間の9時間に相当する。以降、シナリオ説明のため、図8上の位置を示す文字A~Gを用いる。

Scenario 2

A, C 方面は市街地である。0s~10800sを市街地へ



図7 実エリア
Fig. 7 Real area

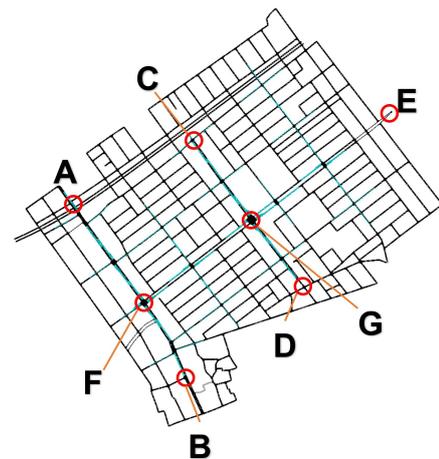


図8 シミュレーション道路ネットワーク
Fig. 8 Simulation of real area

の通勤ラッシュとし、 $B \rightarrow F \rightarrow A, D \rightarrow G \rightarrow C, E \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow A$ を主要な交通流とする。10801s~21600sは主要な交通流のない状況である。21601~32400sは市街地からの帰宅ラッシュとし、 $A \rightarrow F \rightarrow B, C \rightarrow G \rightarrow D, A \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow E$ を主要な交通流とする。各時刻の主要な交通流に対しては合計1500台/hの車両を走行させる。また全ての時刻においてネットワーク内には流入箇所と走行経路をランダムに500台/hを走行させる。

本項における実験の比較手法には、現在現地に用いられているMODERATO制御のパラメータを使用した制御を用いた。また本項の実験ではすべての手法について、サイクル長に実際のMODERATO制御のパラメータを使用した。

5. 結果

図10~14に各シナリオの実験結果に関するグラフを、表1, 2に各シナリオにおける評価指標として平均損失時間(理想的な速度を下回ったことによる損失時間)・平均停止回数を示す。また図14は、車両を出発時刻によって一定間隔でビンに分け、平均損失時間を算出したものである。

^{*2} 画像はOpenstreetMapから引用した
<https://www.openstreetmap.org/>



図 9 制御対象交差点

Fig. 9 Intersections under controlled

Scenario 1-1 から Scenario 1-3 について、表 1, 2 からばねモデルには損失時間と停止回数をへらす効果がある。また図 10~12 から制限ありのばねモデルは理想的配分と近い値で変動している。一方で、制限なしのばねモデルは方向別の交通量差が大きい場合にはどちらかに最大値を与えるような制御になってしまい、また車両台数が増えるほど、スプリット値が大きく振動してしまっている。

このように変動が大きい制御は現実には好ましくなく、また指標の面からも制限ありのばねモデルのほうが優れている。そして、Scenario 1-3 における制限幅に関する解析結果が図 13 である。制限幅がサイクル長の 25% を超えたあたりから平均損失時間が増加する。このことから本研究における制限幅をサイクル長の 10% とした。

Scenario 1 の実験結果から、制限ありばねモデルは交通流の情報が未知の場合でも、統計情報にもとづく制御と同等かそれ以上の交通流円滑化効果を期待できる。また表 1 における指標から、理想的配分での静的な制御において損失時間が増大するような状況、すなわち交通流の飽和あるいは過飽和な状態においてはばねモデルは大きな効果を発揮しており、このことからばねモデルは制御対象交差点の実質的な交通容量を増加させる効果をもつといえる。

Scenario 2 について図 14 より、現行制御と比較して主要な交通流の存在する場合にはばねモデルは平均損失時間を減少させる効果がある。一方で主要な交通流の少ない状況では現行制御と同等の平均損失時間となっている。シナリオ全体では表 1 より、制限ありばねモデルは現行制御と比較して、平均損失時間を 9.4% 減少させた。

Scenario 2 の広域制御における実験結果から、ばねモデルを用いた自律分散制御は多数の信号化交差点をもつ広い制御エリアや複雑な交差点形状をもつ現実の環境においても制御が可能であり、また交通流を円滑化する効果を持つことが示された。

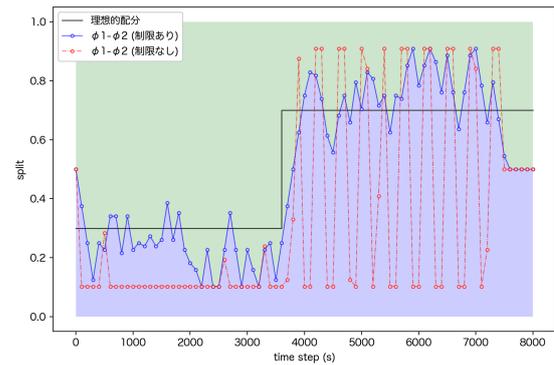


図 10 Scenario 1-1 スプリット値変動の様子

Fig. 10 Scenario 1-1 Fluctuation of split value

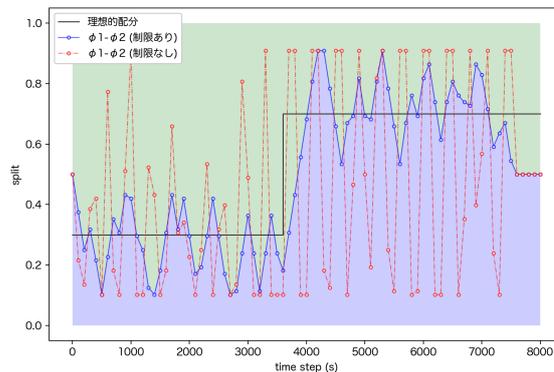


図 11 Scenario 1-2 スプリット値変動の様子

Fig. 11 Scenario 1-2 Fluctuation of split value

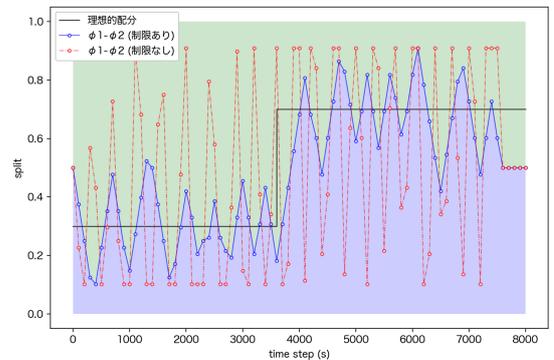


図 12 Scenario 1-3 スプリット値変動の様子

Fig. 12 Scenario 1-3 Fluctuation of split value

6. まとめ

本研究では、交通流とスプリットの関係をばねの釣り合い式にもとづいてモデル化したばねモデルと、ばねモデルによる自律分散制御手法を提案し、シミュレータ上での実験により提案手法の有用性を検証した。検証の結果、提案手法は単体の交差点と多数の交差点をもつ広域エリアを自律的に制御することが可能であり、また交通流を円滑化する効果があることが示された。

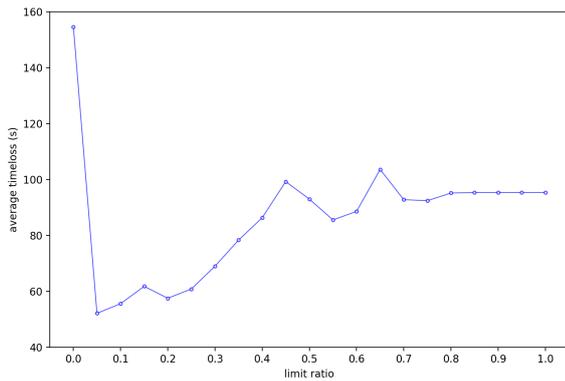


図 13 Scenario 1-3 制限幅と平均損失時間

Fig. 13 Scenario 1-3 Relationship between width limitation and average timeloss

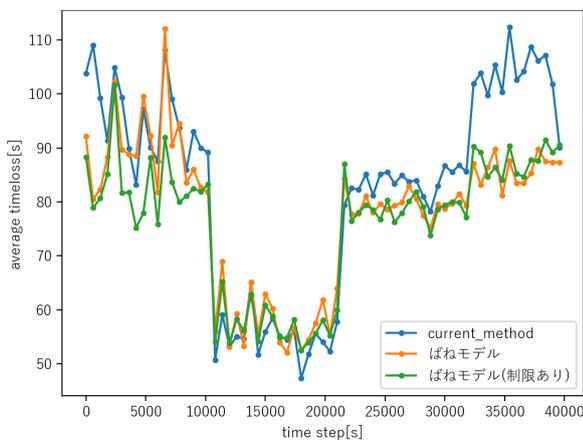


図 14 Scenario 2 平均損失時間の時間推移

Fig. 14 Scenario 2 Fluctuation of average time loss

表 1 シナリオ・手法ごとの平均損失時間と標準偏差 (単位:s)

Table 1 Average loss time and standard deviation per scenario and method (s/veh)

Scenario		method		
		理想的配分	ばねモデル	ばねモデル (制限あり)
1-1	average	34.09	31.05	30.80
	std	20.80	23.85	23.37
1-2	average	49.43	64.13	43.07
	std	25.08	44.48	29.81
1-3	average	154.59	95.37	55.61
	std	86.16	53.75	36.83
ばねモデル (制限あり)				
5	average	86.97	81.65	78.82
	std	49.07	54.73	48.17

今後の課題としては、来年度に予定される実証実験をもとに実際の効果の検証を行うこと、実環境における自律分散制御運用の課題点を洗い出すことなどが挙げられる。

参考文献

[1] Sakakibara, H., Usami, T., Itakura, S. and Tajima, T.: MODERATO (Management by Origin-DEstination Related Adaptation for Traffic Optimization), *Proceedings 199 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems (Cat. No.99TH8383)*, pp. 38-43 (1999).

表 2 シナリオ・手法ごとの平均停止回数と標準偏差 (単位: 回)

Table 2 Average waiting count and standard deviation per scenario and method (times/veh)

Scenario		method		
		理想的配分	ばねモデル	ばねモデル (制限あり)
1-1	average	0.596	0.507	0.508
	std	0.492	0.525	0.510
1-2	average	0.836	1.015	0.670
	std	0.525	0.791	0.577
1-3	average	2.994	1.654	0.915
	std	1.876	1.048	0.686
ばねモデル (制限あり)				
5	average	2.125	1.976	1.956
	std	1.411	1.427	1.371

[2] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J. and Krajzewicz, D.: SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview, *SIMUL 2011*, ThinkMind (2011).

[3] GermanAerospaceCenter(DLR) and others.: Simulation of Urban MObility, <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (2021).