

自動車と自転車双方を考慮した 交通信号系統制御に関する研究

福山 大地¹・田中 伸治²・中村 文彦³・有吉 亮⁴・三浦 詩乃⁵

¹ 学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: fukuyama-daichi-hg@ynu.jp

² 正会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: stanaka@ynu.ac.jp

³ 正会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

⁴ 正会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

⁵ 正会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

近年我が国では自転車交通において走行空間に関しては全国各地で整備が行われるようになった。しかし、信号制御に関しては依然として議論が少ない。これは複数の信号交差点を互いに関連づけ遅れや停止回数を減らす系統制御においても同様で、系統速度は自動車の速度のみを扱っている現状である。本研究では、系統制御において自動車と自転車 2 つの異なる系統速度を扱う。研究手法として、第一に従来用いられているスループンド幅を最大にする幾何学的手法で理論を整理する。第二に交通シミュレーションを用い、理論の検証を行うとともに信号制御パラメータを少しずつ変化させ遅れや停止回数の感度を見る感度分析を行う。そして得られた結果の考察から、自動車と自転車双方の交通流を考慮した系統制御の設計手法を構築することを目指す。

Key Words: *signal control, bicycle traffic, coordinated control, offset*

1. はじめに

(1) 研究背景

我が国における自転車利用の現状として、平成 23 年に警察庁により自転車は『車両』であり、車道走行の原則を徹底するとの指示がなされた。また、翌年の平成 24 年には国土交通省と警察庁¹⁾により「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」が公表され、車道を中心とした自転車ネットワークを形成する方針が打ち出された。

以上のように、車道上において自動車交通と自転車交通の共存が目指されていると言える。走行空間に関しては自転車専用通行帯や自転車ナビラインといった整備が全国各地で行われるようになったが、信号制御に関しては依然として議論が少ない。

この度の研究では、単一路線において一連の隣接交差点を連動させて制御を行う系統制御に焦点を当てる。系統制御では全ての信号に共通のサイクル長を設定し、青開始時刻の差であるオフセットを調整することで遅れや停止回数を減らす役割が期待されている。対象リンク間

の走行速度を意味する系統速度は自動車の制限速度等を用いるのが一般的であり、これまで自転車の速度が考えられたことはない。そのため、現状の自動車交通に合わせた系統制御では自転車交通に対してはより多くの遅れや停止回数を誘発している可能性が考えられる。

(2) コペンハーゲンのグリーンウェーブ

大脇²⁾、古倉³⁾、Gössling⁴⁾によると、デンマークの首都コペンハーゲンでは、図-1に示すように自転車の通行量の多い特定の路線ではグリーンウェーブと呼ばれる系統速度を 20km/h とした自転車向けの系統制御が行われていることがわかる。



図-1 コペンハーゲンのグリーンウェーブ³⁾

コペンハーゲンは通勤通学における自転車分担率が 2010 年で 35% と世界一の水準にあり、朝夕の通勤ラッシュ時には多くの自転車が行き交う。1960 年代以降モータリゼーションが進んでいく中でコペンハーゲンでは自転車に乗り続ける人が多く、1970 年代には現在では 400km 程ある自転車ネットワークの半分が既に形成されていた。このように歴史を辿ってみると、半世紀以前より自転車文化が根付いていたと言える。近年では自転車戦略を策定し、2025 年での自転車分担率 50% 達成を目標に掲げている。

以上のように、自転車文化が十分に醸成されているためにこのような完全に自転車に合わせた系統制御を大胆に行うことに至っている。我が国はコペンハーゲンほどの自転車交通需要はなく自動車交通が中心であるため、都心部でこのような信号制御を行ってしまえば自動車交通に渋滞や道路混雑を引き起こしかねない。しかし、我が国も平成 12 年度国勢調査によれば自転車分担率は大阪市で 25%、東京 23 区で 14% と世界でも高い水準に位置する。そのため、完全に自転車に合わせるとまではいかずとも、自転車を考慮した系統制御を考える価値は十分にある。

(3) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

系統制御は従来よりスルーバンド幅と呼ばれる車群が隣り合う交差点を青時間で通過できる幅を最大にする幾何学的手法で系統制御の効果を示すことがなされてきた。越⁹⁾は複数の隣接交差点の系統制御においてスルーバンド幅が最大となるようなオフセット・サイクル長を求める手法を示した。また、上下方向別の交通量を考慮した系統制御の最適化を行う手法も示した。榊原・大口ら⁹⁾は 2 交差点間においてスプリットが 0.5 以外での系統効果の性質を定式化した。しかし、これまでの研究では系統速度は自動車の速度しか扱っておらず、単一の系統速度での系統制御の最適化のみに留まっている。

以上より、本研究では系統制御において自動車と自転車 2 つの異なる系統速度を扱い、双方の交通流を考慮した系統制御の設計手法を構築することを目的とする。

(4) 研究手法

本研究は、第一にスルーバンド幅を用いた幾何学的手法で自動車と自転車 2 つの異なる系統速度による系統制御の理論を整理する。第二に交通シミュレーション AVENUE を活用し、理論の検証を行うとともに信号制御パラメータを少しずつ変え遅れや停止回数の感度を見る感度分析を行う。

以上より、理論の整理とシミュレーションの活用で得られた結果を考察し、自動車と自転車双方を考慮した系統制御の設計手法の構築を図る。

(5) 本論文中で表記する文字式の定義

本論文では、系統制御の整理のため数式を多用する。そのため、予め本節で文字式の定義を示す。

T : リンク往復所要時間【秒】

L : リンク長 (交差点間隔)【m】

V : 系統速度【km/h】

V_a : 自動車の系統速度【km/h】

V_b : 自転車の系統速度【km/h】

n : 自然数

C : サイクル長【秒】

また、T と L と V には以下の関係式が成り立つ。

$$T = 2 \times L / V \times 3.6 \quad (a)$$

2. 系統制御の理論の整理

本章では、従来より用いられているスルーバンド幅を最大にする幾何学的手法で系統制御の効果を整理する。また、ここでは上下両方向の交通流に対してほぼ同等の系統効果を与える平等オフセットについて議論することとし、簡略化のためスプリットを 50% とする。

(1) スルーバンド幅による系統制御の理論の整理

オフセットの調整により上下両方向の遅れを最小化できることを「系統効果が高い」、オフセットをどのように調整しても上下両方向の遅れが変わらないことを「系統効果が低い」という。また、それぞれは改訂交通信号の手引⁸⁾によれば以下の式が成り立つ際にそのように言えることがわかっている。

系統効果が高い

$$T = C \times n \quad (b)$$

系統効果が低い

$$T = C \times 2n - 1/2 \quad (c)$$

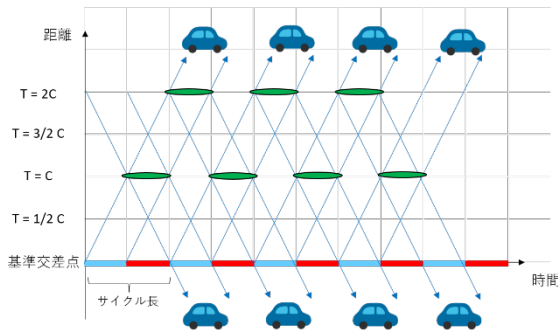


図-2 時間距離図を用いた自動車のスルーバンド幅

これらの関係式は図-2に示すように、時間距離図を用いても導くことができる。基準交差点の信号制御をもとに赤信号で停止しない上下両方向の自動車の軌跡を描く。その結果、 $T=C$ が成り立つリンク長においては基準交差点とのオフセットを 50% (交互式) とすることで上下両方向ともにスルーバンド幅を削らずに済むことが可能となる。また、 $T=2C$ においても基準交差点とのオフセットを 0% (同時式) とすることでスルーバンド幅を削らずに済む。結果として式(b)が成り立つことを示した。一方、 $T=1/2C$ や $T=3/2C$ では上下両方向のスルーバンド幅が全く被らないため、オフセットをどのようにとっても上下両方向を合わせたスルーバンド幅が変わらず、系統効果が低いということがわかる。結果として式(c)が成り立つことを示した。

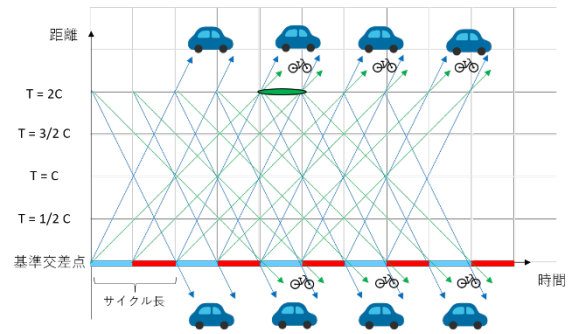


図-4 時間距離図を用いた自転車と自動車のスルーバンド幅

とがわかる。一方、 $T=C$ においては、自動車と自転車それぞれ単体では、自動車は交互式、自転車は同時式にすることで系統効果を高くすることができるが、双方同時に満たすことはできない。

また、現実的な速度として $V_a = 50$, $V_b = 15$ の場合を考える。図-4と同様に自動車と自転車の軌跡を描いてみるものの、双方のスルーバンド幅を削らずに済むポイントは見つけることができない。幾何学的に、両者の速度に整数倍の関係が成り立たない場合ではそのような条件が成立しにくいということが考えられる。そこで $V_a = 45$, $V_b = 15$ とし、 $V_a = 3V_b$ と整数倍の関係が成り立つ場合で考えると、 $T=C \times n$ が成り立つリンク長において双方のスルーバンド幅を削らずに済むポイントを見つけることができた。

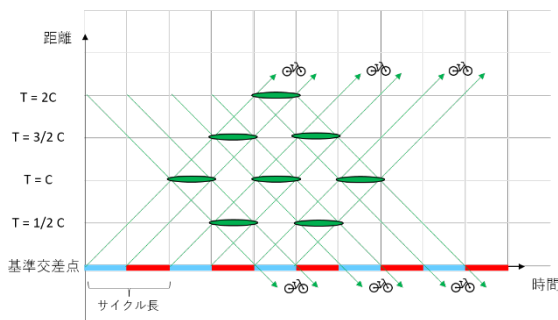


図-3 時間距離図を用いた自転車のスルーバンド幅

次に図-3に示すように、自転車のスルーバンド幅を考える。簡略化のため、自転車の速度は自動車の1/2倍とした。すると、 $T=C \times n/2$ が成り立つリンク長において、上下両方向ともにスルーバンド幅を削らずに済むことが可能となることがわかる。これは、自転車の場合では式(b)の左辺が2倍となることから容易に導ける。同様に、図-3や式(c)から $T=C \times (2n-1)/4$ が成り立つリンク長では系統効果が低いことが示される。

ここからは図-4に示すように、自動車と自転車2つの異なる速度を同時に扱う。すると、唯一 $T=2C$ が成り立つリンク長で自動車と自転車双方のスルーバンド幅を削らずに済む、系統効果が高い系統制御が可能となるこ

(2) 考察

自動車と自転車2つの異なる系統速度を同時に扱うことによる考察を記す。

初めに、どちらかのスルーバンド幅を優先するともう一方のスルーバンド幅を確保できなくなるといったように、双方の走行円滑性にトレードオフの関係が生じることが明らかになった。よって、自動車と自転車どちらを優先するか検討した上でオフセットの設定を行う必要があると考える。

次に、速度の違い自転車は自動車に比べてリンク往復所要時間とサイクル長の関係式の変化によるスルーバンド幅の変動が大きくなることが明らかになった。一方、自動車はスルーバンド幅の変動が小さい。そのため、自動車交通の需要が多い現状も鑑み自動車に合わせた系統制御をもとに少しずつ自転車に合わせた系統制御になるようオフセットの設定を行うことが妥当であると考えられる。

第三に、双方の速度に整数倍の関係が成り立つ際、 $T=C$ や $T=2C$ の関係式が成り立つ際に双方のスルーバンド幅を削らない系統効果が高い系統制御を行うことが可能となることが明らかになった。しかし、そのような関係式が成立することはごくまれである。両辺で値を変えることができるのはサイクル長 C のみであり、 C を変えるこ

とで関係式を成立させることが可能である。しかし、系統制御は隣接する全ての交差点で同じサイクル長を用いることから1つの2交差点間の系統効果を高めるためだけにCを変えるのは得策ではない。よって、双方ともに系統効果の高い系統制御を設定するのは非常に困難であると言える。

3. 交通シミュレーションの活用

本研究では、(株)アイ・トランスポート・ラボの街路網交通流シミュレーションシステム AVENUE を用いる。本シミュレーションの特徴は以下に挙げる通りである。

- ・数100mから数km四方のネットワークにおける信号制御等の交通運用施策の評価に適用可能であること。
- ・車両挙動を表現するためのパラメータが、道路の容量／飽和交通流率・自由流での速度・渋滞時の車両密度の3つと少なく、設定が容易であること。

この度の研究は、信号制御を設定する交通管理者の立場に立ち、自動車交通、自転車交通ともに一律な速度で流れることを前提として系統制御の効果の評価を行う。

(1) 対象路線の選定

交通シミュレーションを行う対象路線として、東京丸子横浜線（綱島街道）を選定した。

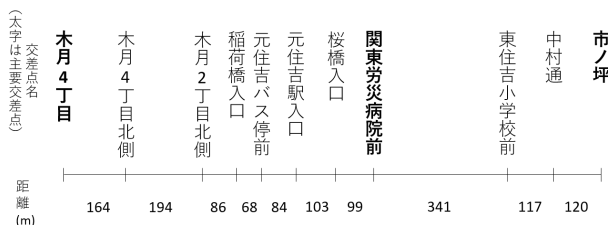


図-5 シミュレーション対象路線と区間

選定理由は、第一に自転車専用通行帯が整備されており、自動車交通と自転車交通それぞれ専用の走行空間を有していることである。第二に対象区間周辺で交通信号の面制御が行われており、単一路線で見れば系統制御に近い信号制御が行われていることである。

シミュレーションに使用するデータは交通量データと信号制御データで、最新の一般交通量調査が行われた平成27年11月12日(木)のデータを用いる。時間帯は8時から9時の混雑時、14時から15時の非混雑時の2つとする。

(2) スルーバンド幅理論の検証並びに感度分析

改訂交通信号の手引き⁸⁾によれば、そもそもオフセッ

トを解析的に求めるのは困難であるとされており、その中でスルーバンド幅を最大にするという考え方が用いられてきた。しかし、スルーバンド幅は交通における遅れや停止回数と直接的な関連がなく、系統効果の評価として適切であるとは一概に言えない。そこで、近年ではスルーバンド幅の最大化に代わるオフセットの設計手法として交通シミュレーションの活用が挙げられている。具体的にはオフセットを変化させながら遅れや停止回数の感度を見ることで、適切なオフセットを設定するという方法である。

前述でスルーバンド幅理論は適切でないとしたが、系統制御を行うための適切なサイクル長、オフセットの設定の目安を立てるためのツールとして欠かすことのできないものであるとも言える。そのため、オフセットを変化させながら遅れや停止回数の感度を見る感度分析も兼ね、スルーバンド幅理論から導出された信号制御パラメータの系統効果の検証を行う。また、感度分析ではオフセットのみならず、サイクル長やスプリットも変化させながら遅れや停止回数の評価を行う。得られた結果より、系統制御の効率化のための信号制御パラメータ設定の知見を得ることを最終目的とする。

4. おわりに

本稿では、理論面の考察と交通シミュレーションを今後行うにあたってのシミュレーション対象路線の概要と手法について記述した。今後は交通シミュレーションを実施し、得られた結果の考察を行い、自動車と自転車双方を考慮した系統制御の設計手法の構築を目指していく。

謝辞：本研究を行うにあたり、神奈川県警察本部交通部交通規制課の皆様には信号制御データや対象路線データの利用についてご協力を頂いた。ここにその謝意を表明させていただきます。

参考文献

- 1) 国土交通省、警察庁：安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン，2012。
- 2) 大脇鉄也：コペンハーゲンの自転車空間，土木技術資料，51-4，pp.22-25，2009。
- 3) 古倉宗治：欧州諸都市にみる自転車政策の先行性と我が国への教訓，第56回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2017。
- 4) Stefan Gössling：Urban transport transitions: Copenhagen, City of Cyclists, Journal of Transport Geography, Volume 33, pp.196-206, 2013。
- 5) 越正毅：交通信号の路線系統化について，道路 road engineering & management review, 291, pp.354-365, 1965。

- 6) 榊原肇, 大口敬 : 2 交差点間の系統制御に関する考察, 交通工学論文集, 第 2 巻, 第 6 号, pp.1-10, 2016.
- 7) 榊原肇, 大口敬 : 青時間が異なる 2 交差点間の系統制御に関する考察, 交通工学論文集, 第 5 巻, 第 3 号, pp.1-10, 2019.
- 8) 社団法人 交通工学研究会 : 改訂 交通信号の手引き, pp.54-59, 2006.
- (2019. ?? . ?? 受付)