

信号制御による CO₂ 削減効果の交通シミュレーションによる評価

梅津高朗†

概要: CO₂ 排出量の大きな割合を占める自動車による排気ガス量の削減は、CO₂ 削減には必要不可欠である。排気ガス量は自動車の挙動によって大きく変化するため、信号機等の適切な制御による交通制御が排気ガス量削減に効果的であると考えられる。しかし、既存の信号機制御の多くは停止時間削減を目的としており、信号機における停止時間と停止回数のトレードオフ性から、排気量削減に効果的である信号停止回数の削減に効果的でないという問題点がある。本稿では交通シミュレーションを用いて、CO₂ 排出量の削減を目的とした信号制御手法について検討を行う。

キーワード: 信号制御, 道路交通シミュレーション, CO₂ 排出量削減

Simulation based Evaluation of Traffic Signal Control for Less CO₂ Emission

TAKA AKI UMEDU†

Abstract: It is important to reduce the amount of CO₂ emission from vehicles, since it takes a large part of total CO₂ emission. The amount of CO₂ emission significantly depends on the behavior of a vehicle. So, smooth traffic conditions controlled by well-designed signal control strategy is effective for the purpose. There have been a lot of signal control methods designed for reducing stop duration of vehicles. However more effective way to reduce CO₂ emission is to reduce frequency of stops of vehicles. In this paper, I discuss about simulation based evaluation of signal controlling method for CO₂ reduction.

Keywords: Traffic Signal Control, Road Traffic Simulation, Reduction of CO₂ Emission

1. はじめに

温室効果ガスによる地球温暖化が大きな環境問題となっており、温室効果ガスの排出量の削減は早急の課題である。東京都で 2006 年度に行われた調査によると、温室効果ガスの発生原因における運輸部門の割合は 26.2 % に上り、そのほとんどが自動車の排気ガスによるものである。排気ガスは自動車が加速する際に特に多く排出されるなど、排出量は自動車の挙動によって大きく変化する。そのため、信号機等の適切な制御による交通制御が排気ガス量削減に効果的であると考えられる。

しかし、既存の信号機制御の多くは、円滑で効率的な交通を実現するため、自動車利用者らが目的地まで到達する旅行時間の削減を課題として設計されている。そのため、それらの手法は停止時間削減を目的として設計され、信号機における停止時間と停止回数のトレードオフ性から、より排気量削減に効果的である信号停止回数の削減には必ずしも効果的でない場合があるという問題がある。

また、現在、車車間通信などの実用に向けて開発が進んでおり、高度な情報収集方法によってより詳細な交通情報が収集でき、それらに基づくきめ細かな信号制御を行える可能性が生じている。本研究では、より詳細な信号周辺の交通状況を把握し、移動にかかる時間を増やさないまま停

止回数を削減できるような交通制御プランを算出する分散制御手法の提案を目標とする。

著者は文献[1]で、この問題に対して、ある程度、理想的な環境を仮定した交通シミュレーションによる解析で、総停止時間をほとんど増加させることなく、総停止回数を一般的な信号制御方式から 20% 程度削減できる信号切り替えタイミングが存在することを確認し、報告した。しかし、この検討におけるシミュレーションでは、交通制御を目的として占有可能な通信回線や単純な道路構造など、比較的単純なシミュレーション環境を前提条件として想定していたため、実環境での利用可能性に関してはより深い検討が必要である。

本研究では、より現実的な道路構造で、実際に利用可能な通信により収集した情報に基づき集められたリアルタイムのデータからを用いた信号制御により、CO₂ 排出量の削減が可能であるかどうかに関して検討を行う。研究を進める上での大きなポイントは次の 2 点である。すなわち、1) 理想的な信号切り替えタイミングを計算するための手法の考案、2) 収集した情報の質や量と、制御の結果得られる削減される CO₂ 排出量との間のトレードオフの見積もりである。これらのバランスにより、実用可能な性能を持つ制御パラメータ導出手法の提案を目指す。

本稿では、これらの内の 2 つ目のポイントに関して、シ

† 滋賀大学
Shiga University

シミュレーション環境の準備と予備実験として行った、平均移動速度や移動距離当たりの平均停止回数とCO₂排出量の関係に関するシミュレーション結果について報告する。

2. 研究の概要

本研究では、路側のセンサなどのインフラや、プローブカー、車車間、路車間通信などを介して収集したリアルタイムな車両の位置情報に基づき、より環境負荷が少なく、効率的な道路環境を実現できるように信号制御を行う手法について検討する。図1に、想定するシステムの概略図を示す。検討するシステムにおいては、リアルタイムに収集した情報から、効率的な信号切り替えタイミングを導出して信号を制御する。その結果は実際の交通流に影響を与え、その交通状況は再び情報収集システムにより把握され、以後の制御に用いられる。

提案手法では、まず、道路利用の効率を優先的に考え、なるべく平均旅行時間が短くなるよう、少なくとも、一般的に用いられる信号制御方式と同等かそれ以下の平均旅行時間がとなるように制御するという目標を置く。その上で、CO₂の排出量がなるべく小さくなるように制御を行う。CO₂は車両が加速を行うときに特に多く排出されるため、車両に再加速を促すことになる信号での停止はCO₂排出量の増大に繋がる。信号での停止は旅行時間の増大にも繋がるため、旅行時間を最小化する一般的な信号制御手法もCO₂排出量削減に有効である。しかし、よりCO₂削減を積極的に行うように目標を定めた制御を行う事で、排出量の更なる削減が可能である事は文献[1]で示した通りであり、

この手法を一般化し、対象環境を広げることが研究の目標とする。

2.1 既存研究

自動車による排気ガス量の推計方法については様々な研究がなされており、自動車の走行における挙動から排気量を求める手法[2][3]などが提案されている。これらのモデルによると、自動車による排気ガス量は、加速時に発生するものが大きな割合を占めており、同一の距離を走行する場合でも、一定の速度で走行する場合と、停止と発進を何度も行う場合では排気量に大きな違いが出ることが分かっている[4]。よって、各交通流に対してどのように通行権を与えるかを決定し、交通流上の車両の挙動を制御する交通信号制御の動作を改善することによって、発生する排気ガス量を削減できると考えられる。しかし、現在提案されている信号機制御手法は渋滞や遅れ時間の縮小を目的としたものが大半であり、排気ガス量の削減という観点から制御を行うシステムは少ないのが現状である。渋滞や遅れ時間の縮小を目的とした場合、信号機による車両の停止時間の削減が重要となるが、排気量最適化においては信号機による停止回数の削減が重要となる。しかし、文献[5]で述べられているように、信号機による停止時間と停止回数にはトレードオフ性があり、停止時間の削減を行う既存の手法が停止回数の削減に効果的であるとは必ずしも言えない。

また、代表的なマイクロ制御であるRHODES[6]は、評価関数を予想排気量とすることで排気量最適化に対しても対応できると考えられるが、対象エリア内の車両列の衝突を予測し、全ての衝突の回避方法の組み合わせに対する評価

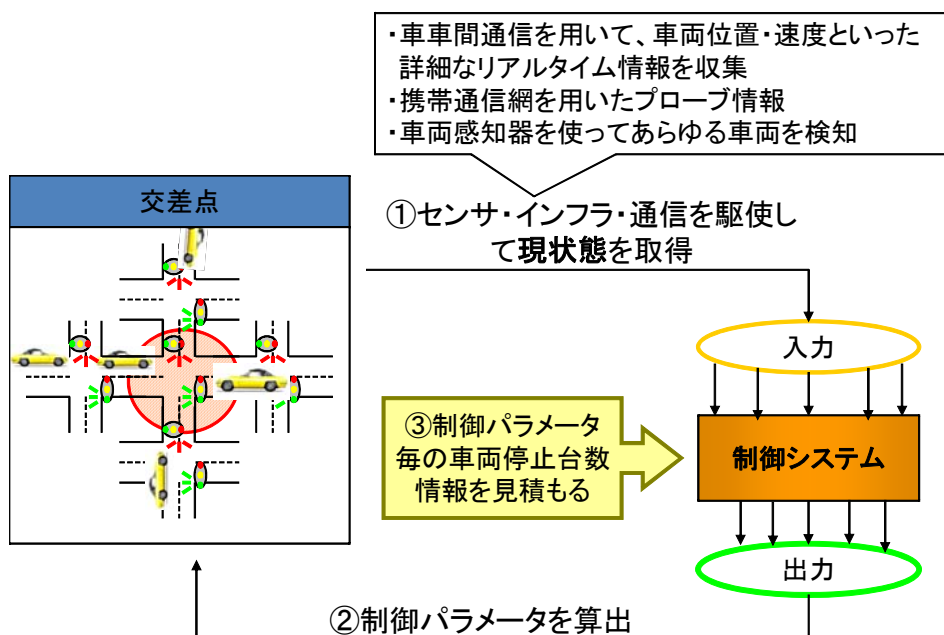


図1 提案する信号制御システムの概要
Figure 1 Image of Proposing Signal Control System

表 1 CO₂ 排出量推定のために用いるパラメータ
Table 1 Parameters to Estimate Amount of CO₂ Emission

車種	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
乗用車(ガソリン車)	0	0.553	0.161	-0.00289	0.266	0.511	0.183
乗用車(ディーゼル車)	0	0.324	0.0859	0.00496	-0.0586	0.448	0.23
バス	0	0.904	1.13	-0.0427	2.81	3.45	1.22

を求めため、広域のエリアでは計算量が爆発的に増加し、適用が困難であるという問題点がある。また、信号機と車両の相互通信が可能な環境を想定し、車両に対して適切な走行速度情報を送信することで停止回数と排気量を削減する手法も提案されているが[7][8]、これらの手法では車両の信号機への到着時刻の調整のために信号機間で十分な道路長が必要であり、都市街路のように道路長が短いエリアに対して適用できないという問題点がある。

2.2 信号制御手法の目標

まず、1章で挙げた1つ目のポイントに関しては、様々な道路環境でも利用できるロバストなシステムとするため、事前に設定の必要なパラメータ数などが少なく済む、適応的な手法となっている事が望ましい。前述の文献[1]で検討した手法では、ニューラルネットワークベースの強化学習手法を適用することで、過去の実測値から自動的に予測が導出されるように工夫した。一方で予測精度の向上には大量の学習用データが必要となるため、シミュレーション上の全ての交差点を同様の構造として単一のニューラルネットワークで制御するよう信号システムを実装した。こうすることで、全交差点が類似した挙動を示すため、全てのデータを1つのニューラルネットの学習に用いることが出来、短時間での検討が可能となった。しかし、実際には種々多様な道路構造に対応する必要があるため、実環境においてこのような手法を用いることは難しい。

また、2つ目のポイントに関しては、すでに VICS のための情報収集や信号制御に用いられている車両センサなどのインフラや、携帯電話網を用いたプローブ情報など、様々な交通情報が利用可能である。しかし、全ての車両の正確な位置や速度を完全に網羅することは難しい。そのため、それらの組み合わせにより得られた情報で、十分な精度での制御が行える事を示す必要がある。また、複数の信号が協調して都市全体など、広範囲の交通を纏めて制御するで、より一層の削減効果が見込めるため、複数信号間の協調に関しても検討する必要がある。

3. 交通シミュレータ VISSIM を用いたシミュレーション環境の構築

信号制御手法についてのシミュレーションによる評価の

ため、交通シミュレータ VISSIM[9]のバージョン 7.0 を用いたシミュレーション環境を構築した。シミュレーション環境では、シミュレーション内時間での一定時間ずつ交通シミュレータをステップ実行し、ステップ毎に車両に位置、速度、加速度を収集し、CO₂ 排出量などを計算して記録する。また、シミュレーションのシナリオに応じて、シミュレータのパラメータなどを調整する。

3.1 交通シミュレータ VISSIM と他のソフトウェアとの連携

VISSIM は、他のソフトウェアとの間の高い相互運用性を有している。まず、VISSIM は、VBScript, JScript, Python のスクリプトを読み込んでシミュレータ上で実行することができ、何らかのシナリオに基づくシミュレーションの自動実行などに利用できる。また、Windows で標準的に用いられる汎用的なソフトウェア間の通信規格である COM にも対応している。インストール後にシミュレータのメニューから COM サーバの登録を行うと、その Windows 上の他のソフトウェアから COM を介して VISSIM シミュレータを操作可能となる。実際に利用する場合は、COM に対応したプログラミング言語を用い、プログラム中で VISSIM オブジェクトを作成し、そのオブジェクトを介してシミュレータを操作することになる。この汎用性のため、Python, Ruby のようなスクリプト言語の他、一般的な開発環境上で用いる C++ や Java や C# など言語や、Excel 上の VBScript など、多くのプログラミング環境で VISSIM シミュレータを外部プログラムとして用いることができる。本稿ではデバッグ作業の容易さから開発環境としては Visual Studio 2013、言語としては C# を用いてシミュレーション環境の構築を行った。

3.2 CO₂ 排出量の推定

シミュレーションにおける CO₂ 排出量の推定には文献[3]の計算式およびパラメータを用いる。文献[3]では、定数 E_0 と、 $f_1 \sim f_6$ を定数項、および、係数とする速度と加速度についての二次式で得られる値の内の大きい方を推定排出量とする近似式が提案されている。また、様々な車種に対してそれらのパラメータの適切な値が報告されている。具体的には、 $v_n(t)$ と $a_n(t)$ を時刻 t における車両 n の速度[m/s]、および、加速度[m/s²]とした場合の CO₂ 排出量[g/s]を下記の

$E_n(t)$ の式で推定する。

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)]$$

なお、本稿のシミュレーションでは、ガソリン車、ディーゼル車、バスの3種類の車種を用いて予備実験を行った。これらの車種に対して文献[3]で紹介されていたパラメータは表1の通りであり、これらを用いてCO₂排出量のシミュレーションを行った。

4. シミュレーション実験

シミュレーション環境の動作確認と、手法の詳細な設計のための予備実験として、いくつかのシミュレーションを行った。まず、図2のような縦横600m、交差点間の距離が100mの格子状の道路ネットワークをシミュレータ上に構築した。車線数は対面1車線ずつで、各交差点には信号を設置した。右折レーンは設けていない。信号の切り替えパターンは、南北東西各方向へ直進する道路上の信号が常に同じ現示となる同時式オフセットと、赤と青が交互に現れるよう互い違いに設定した交互式オフセットの2種類を用いた。また、前者の直進道路上の現示が一致するパターンについては、信号サイクルが60秒と120秒の2種類を用いた。具体的な信号制御のシミュレーションシナリオは下記の3種類である。

- A) 同時式オフセット, 信号サイクル 60 秒
- B) 同時式オフセット, 信号サイクル 120 秒
- C) 交互式オフセット, 信号サイクル 60 秒

南北東西の全ての端点から一様に車両を発生させ、各車両は直進の確率0.8、右左折がそれぞれ0.1となるランダムウォークで走行させた。シミュレーション内に流入させる車両の種類は、ガソリン乗用車が91%、ディーゼル乗用車が7%、バスが2%の割合でのランダムとし、車両流入割合を各端点から100~460台/時と変化させて実験を行った。なお100台/時の車両発生割合は、捌け残り車両が発生しない(ある交差点に赤信号のために停止した全ての車両が、次の青信号の間に交差点を通過しきる)程度、460台/時は恒常的に渋滞が発生する程度の交通量となった。各パラメータセッティングに対してシミュレーション内の時間で5分間分をシミュレーションした。それ以外のパラメータについてはVISSIMのデフォルトを用いた。

4.1 実験結果

シナリオA~Cに対して、車両流入割合を各リンク当たり100台~400台/時間まで、40台/時間ずつ変化させて10

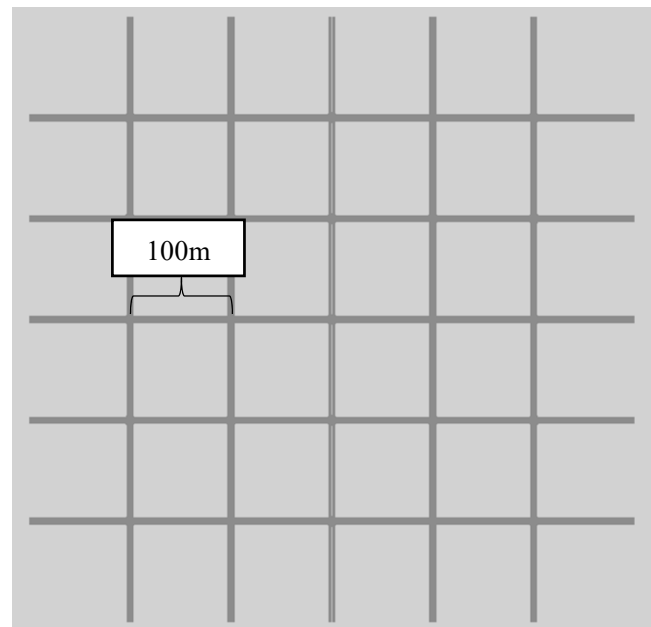


図2 シミュレーションで用いた道路ネットワーク

Figure 2 Road Network for Simulation

回シミュレーションを行った結果を、図3、図4、および図5に示す。

図3には、各シミュレーションにおける車両速度の平均を、流入台数、シナリオ毎にプロットしてある。いずれの場合も道路が混み合うにつれて平均速度が下がっている。シナリオ別に見た場合には、最も平均速度が低く、移動に多くの時間が必要となるのは、シナリオCの、赤信号と青信号が交互に並ぶ信号制御パターンの場合であった。また、信号サイクルが短いシナリオAよりも、サイクルの長いシナリオBの方が平均速度が低くなる結果となった。

図4には、同様に、移動距離当たりの停止回数を示した。車両密度の増加に伴い停止回数が増える事や、シナリオCの停止回数が特に多い事などは図3と同様の傾向と言える。一方で、シナリオAよりも信号切り替え間隔が大きいシナリオBの方が停止回数は少なく抑えられており、停止回数の最小化という点では、シナリオBの方が優れた信号制御方式であると言える。

図5では、移動距離当たりのCO₂排出量を示した。おおむね図3と同様の傾向が見られ、停止回数をなるべく減らすことがCO₂削減に有効である事が見て取れる。

CO₂排出量とその他の指標の間関係を検討するため、図6、および、図7を用意した。図6には、移動距離当たりのCO₂排出量と平均速度を、図7には、移動距離当たりのCO₂排出量と移動距離当たりの停止回数を、信号制御シナリオ毎にグラフのスタイルを変えてプロットしてある。図6を見ると、平均速度とCO₂排出量の関係については、信号制御シナリオ毎に異なった傾向を示していることが分かる。一方で、図7からは、停止回数とCO₂排出量の関係については、信号制御のシナリオ毎の傾向の違いは見られ

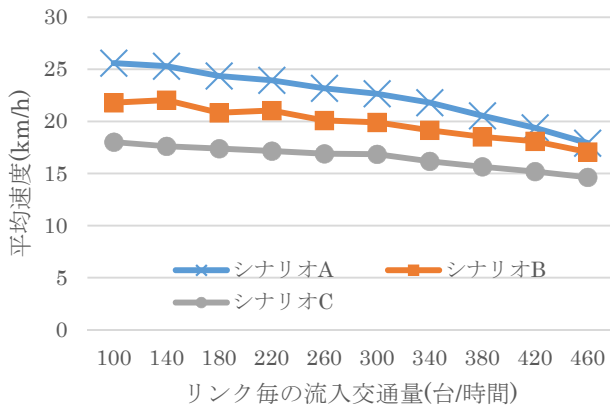


図 3 シミュレーションシナリオ別の平均速度

Figure 3 Average Speed for Each Simulation Scenario

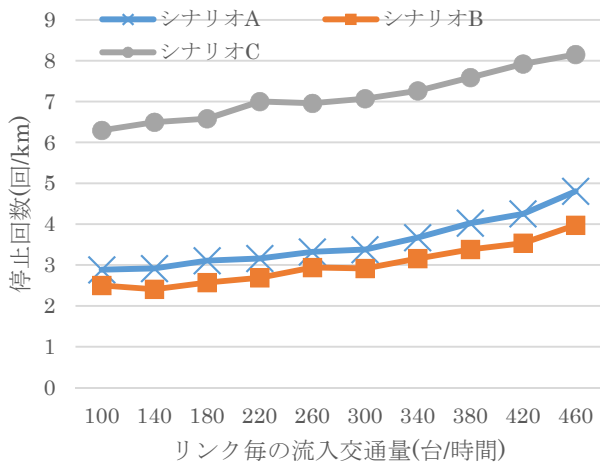


図 4 シミュレーションシナリオ別の停止頻度

Figure 4 Frequency of Stops for Each Simulation Scenario

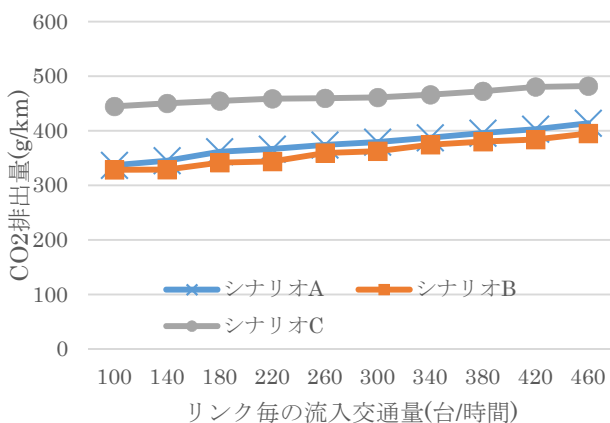


図 5 シミュレーションシナリオ別の
距離当たりの CO₂ 排出量

Figure 5 Amount of CO₂ per Distance
for Each Simulation Scenario

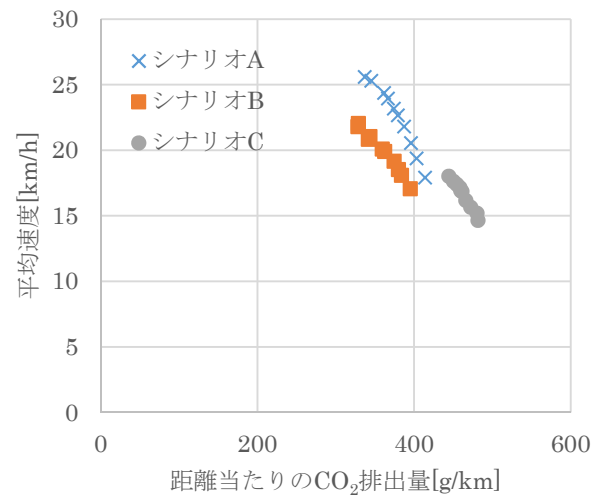


図 6 平均速度と CO₂ 排出量の関係

Figure 6 Frequency of stops and Amount of CO₂ Emission

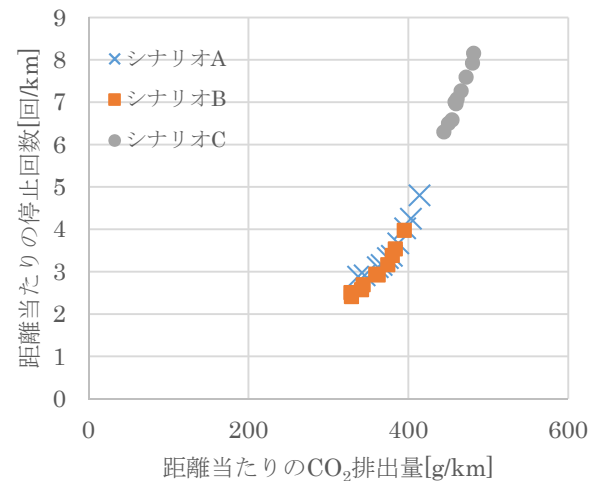


図 7 停止回数と CO₂ 排出量の関係

Figure 7 Average Speed of Vehicles
and Amount of CO₂ Emission

ず、全体として1つの傾向を示している事が分かった。なお、それぞれの相関係数を求めると、平均速度と CO₂ 排出量との間の相関係数が約-0.84 であり、停止回数と CO₂ 排出量との間の相関係数は約 0.98 となり、ここからも、停止回数との間の極めて高い相関が見取れる。これらの結果より、CO₂ 排出量を削減するという目標は、車両の停止回数を減らすという、よりシンプルで具体的な戦略により達成できる可能性が示された。

5. まとめと今後の課題

本稿では、CO₂ 排出量の削減を目標とする信号制御手法の検討を行い、評価に用いるシミュレーション環境の整備と、手法の検討に際して実施した実施した予備実験の結果

について報告した。シミュレータを用いていくつかのシナリオで実験を行った結果、車両の停止回数を減らすことが状況に依存せずCO₂排出量の削減という目的を達成するための有効な戦略である事を改めて確認した。この結果を踏まえ、具体的な情報収集手法と、多数の信号機を協調して動作させられるような、停止回数ができるかぎり小さくなるような信号切り替えタイミングを導出する手法を検討していく。

具体的には、まず1つの交差点に対しての信号制御手法を検討する。ここでは、交差点に対して接近する車両がある場合に、それらに関する状況を、どのタイミングで何台の車両がどのリンクから交差点に至ると予想されるかという形の情報に集約する。その予想に基づき、信号切り替えのタイミングを導出する手法は文献[1]で提案したが、この手法は大量のデータを用いた学習に基づいているため、一般的な利用が難しい。そこでより少ないデータから最適な制御方式を導出できるよう、別の方法なども検討する。次に、信号制御の結果、何台の車がどのリンクからどのタイミングで交差点を通過できるかを予測する手法を検討する。通過車両の予測結果を近隣の交差点の到着予想と組み合わせることで、多数の信号が協調してCO₂排出量の削減という目標を達成できるようにシステムを設計していく。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 25330370, 80173144 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Umedu, Y. Togashi, T. Higashino: "A Self-learning Traffic Signal Control Method for CO₂ Reduction Using Prediction of Vehicle Arrival", Proceedings of the 15th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC 2012), 2012.
- [2] 横田 久司, 鹿島 茂, 國領 和夫, 田原 茂樹: "走行動態に基づく自動車からの環境負荷推計モデルの開発", 大気環境学会誌, Vol.40, No.2, pp.67-82, 2005.
- [3] L. I. Panis, S. Broekx, R. Liu : "Modelling Instantaneous Traffic Emission and the Influence of Traffic Speed Limits", Science of the Total Environment, Vol.371, pp.270-285, Elsevier Science, 2006.
- [4] H. Rakha, Y. Ding : "Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption and Emissions", American Society of Civil Engineers, Journal of Transportation Engineering, Vol.129, No.1, pp.23-32, 2003.
- [5] S. K. Zegeye, B. De Schutter, J. Hellendoorn, E. A. Breunisse : "Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control", Proceedings of the 2009 American Control Conference, pp.5392-5397, 2009.
- [6] P. Mirchandania, L. Head : "A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis", Transportation Research Part C, Vol.9, pp.415-432, 2001.
- [7] S. Mandava, K. Boriboonsomsin, M.Barth : "Arterial velocity planning based on traffic signal information under light traffic conditions ", Proceedings of the 12th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp.1-6, 2009.
- [8] K. J. Malakorn, P. Byungkyu : "Assessment of Mobility, Energy, and Environment Impacts of IntelliDrive-based Cooperative

Adaptive Cruise Control and IntelligentTraffic Signal Control", Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium, pp.1-6, 2010

[9] VISSIM, <http://www.vissim.com/>