

交通流の円滑化と安全化に関する交通情報システムの一構成

清水 光[†] 藤井 温子^{††} 小林 正明[†] 川久保和雄[†]

[†]福山大学

^{††}弓削商船高等専門学校

本稿では、現代社会の課題であるCO₂排出量の削減やガソリン消費量の削減に有効な、交通流の円滑化と安全化を図る交通情報システムの構成について提案する。主な内容は、道路解析に始まり、交通解析、信号制御システム、動的経路誘導システム、交通情報システムに至る内容で構成され、交通流ダイナミクスの制御の観点から一貫性をもって記述する。本研究の特長は、信号制御システムの記述の一貫性や信号制御法の拡張性、パラメータ最適化手法、リンク旅行時間の解析、交通情報システムの構成などであると考えられる。

A Configuration of Traffic Information System on Traffic Smoothness and Safety

Hikaru Shimizu[†], Haruko Fujii^{††}, Masa-aki Kobayashi[†] and Kazuo Kawakubo[†]

[†]Fukuyama University,

^{††}Yuge National College of Maritime Technology

Abstract This paper proposes a configuration of the traffic information system which is effective to reduce the exhaustion of CO₂ and gasoline consumption in urban road networks. This paper studies from the road analysis, traffic analysis, signal control system, dynamic route guidance system and up to the traffic information system from the viewpoint of the control of traffic flow dynamics with consistency. From the simulation results, it is confirmed that the description of the signal control system, extensibility of signal control algorithms, parameter optimization, analysis of the link travel time and the configuration of the traffic information system are applicable for real urban traffic networks.

Keywords road analysis, traffic flow dynamics, signal control system, dynamic route guidance system, traffic information system

1.はじめに

近年、交通量の増加と共に都市地域の幹線

道路を中心に朝夕のラッシュ時に交通渋滞が日常的に発生している。この対策として、主要都

市に信号制御システムが導入されてきた。遅れ時間を最小にするようにサイクル長、青信号スプリット、オフセットの3つの信号制御パラメータが個別に探索され、それらの効果について報告されている¹⁾⁶⁾。

3つの信号制御パラメータは以下のように定義される。サイクル長は信号表示によって与えられる現示が一巡する間の所要時間。青信号スプリットはサイクル長に対する青時間の比率。また、オフセットは基準時点から各信号機の青信号開始時点のズレを絶対オフセット、隣接信号機間の青信号開始時点のズレを相対オフセットという。

本稿では、現代社会の課題であるCO₂排出量やガソリン消費量の削減、交通事故の削減に有効な、交通流の円滑化と安全化を図る交通情報システムの一構成について提案する。ここでは、道路解析に始まり、交通解析、信号制御システム、動的経路誘導システム、交通情報システムに至る内容で構成され、交通流ダイナミクスの制御の観点から一貫性をもって記述する。本研究の特長は、信号制御システムの記述の一貫性や信号制御法の拡張性、パラメータ最適化手法、リンク旅行時間の解析、交通情報システムの構成などであると考えられる。

2. 道路解析

道路は、自動車が走行する社会基盤であり、道路法により高速自動車国道、一般国道、都道府県道、市町村道に分類されている。国道は、全国的な幹線道路網を構成するものであり、都

道府県道は、地方部における幹線道路網を構成するものである。また、市町村道は、市町村の区域内に設けられた生活道路である。

ここでは、交通流ダイナミクス記述の基礎となる交通量収支で、重要な役割を果たす交通容量の解析に必要な、道路の種別や級別、道路構造、交差形状、車線構成などについて解析する⁷⁾。

道路の種別が表1に示されている。その他の道路には、一般国道や都道府県道、市町村道が含まれている。高速自動車国道とその他の道路の主な違いは、日交通量や設計速度、出入制限、トリップ長などであり、当然の結果として高速自動車国道がより高規格な道路となっている。

道路の横断構成要素の基準値が道路構造令により示されている。道路の種別、級別に応じて車線幅員、中央帯、路肩などの基準値が設定されており、いずれも交通容量解析に必要な数値となっている^{8),9)}。

表1 道路の種別

道路の存する地域 高速自動車国道および自動車専用道路またはその他の道路の別	道路の種別	
	地方部	都市部
高速自動車国道および自動車専用道路 その他の道路	第1種	第2種
	第3種	第4種

3. 交通解析

3.1 交通流ダイナミクス

信号交差点の流入路において、図1に示されるように車線単位、並びにサイクル長単位で次式の交通量収支が成立する。

$$x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) - x_o(i, j, m, k) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_o(i, j, m, k) = \xi(i, j, m, k) \psi_x(i, j, m, k) \\ x_e(i, j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 i と j は信号交差点の位置、 m は信号交差点への車の流入路（ $m=1$ は東行き、 $m=2$ は南行き、 $m=3$ は北行き、 $m=4$ は西行き）をそれぞれ表す。また、 $k=k \angle T(k=1, 2, \dots, k_d)$ は時

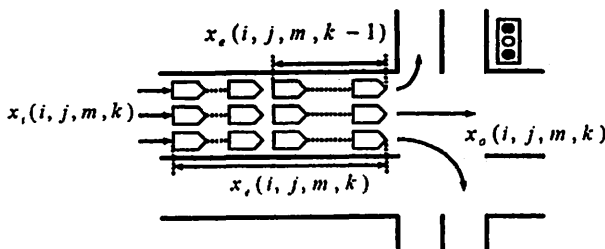


図1 信号交差点の交通量収支

刻を表し、 $x_e(i,j,m,k)$ 、 $x_i(i,j,m,k)$ 、 $x_o(i,j,m,k)$ はそれぞれ超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量を表し、超過流入交通量は流入路の黄信号終了時における待ち車列台数を表す。このように信号交差点流入路における各車線の待ち車列台数を、サイクル長単位の交通量収支に基づいて求める。(2)式の $\Psi_s(i,j,m,k)$ は各流入路の交通処理量で交通容量に青信号スプリットを乗じて求められ、 $\xi(i,j,m,k)$ はある交通流のもとで $x_o(i,j,m,k)$ を $\Psi_s(i,j,m,k)$ で除した比率で捌け率と呼ぶことにする。

この交通量収支に基づき、交通渋滞の発生や消滅、継続のメカニズムが定量的に記述できる¹⁰⁾。交通渋滞のメカニズムの観点から、信号制御システムの問題は、交通渋滞を消滅させるように捌け交通量を信号で制御する問題に帰着させることができる。

3.2 交通解析

信号制御システムと動的経路誘導システムによる交通流オンライン制御に必要な交通解析の項目は、以下のように考えられる。信号交差点の流入路における車線単位、並びにサイクル長単位の交通量、待ち車列長、待ち車列の平均車頭間隔、大型車混入率、リンク走行速度などであり、交通情報システム開発のテストの工程で使用される。さらに、動的経路誘導システムの開発では、発進遅れ時間も使用される。

以上の交通解析は、現地で録画した交通流の解析や人手を用いた待ち車列長測定などによって行われる。

3.3 交通規制

交通流の円滑性や安全性の観点から、道路標識や道路標示による交通規制が行われている。

道路標識には、速度制限を始め、右折禁止、一方通行、大型車進入禁止、駐車禁止、車線構成など多くの種類がある。また、道路標示には、専用レーンを始め、優先レーン、Uターン禁止、追い越し禁止、速度制限などがある。さらに、信号表示による現示も自動車の走行を車線単位、

サイクル長単位で規制するものであり、交通規制に含まれる。以上の交通規制は交通流を規定するものであり、現地で調査しておかなければならない。

4. 信号制御システム

ここでは、信号交差点の流入路における車線単位、サイクル長単位の交通流ダイナミクスを非線形ダイナミックシステムで記述し、フィードバック制御システムを用いて構成する^{10),11)}。

捌け交通量を或る交通流のもとで3つの信号制御パラメータで制御できると仮定して、システム構成の観点から制御入力 $u(i,j,m,k)$ で置き換えると、渋滞長の信号制御システムは次式で記述される。

$$\begin{cases} x_e(i,j,m,k) = x_e(i,j,m,k-1) + x_i(i,j,m,k) - u(i,j,m,k) \\ y_c(i,j,m,k) = l_m(i,j,m,k) \cdot x_e(i,j,m,k) \end{cases} \quad (3)$$

渋滞長 $y_c(i,j,m,k)$ は状態変数 $x_e(i,j,m,k)$ に変換係数 $l_m(i,j,m,k)$ を乗じて求められる。ここで、変換係数 $l_m(i,j,m,k)$ は待ち車列の平均車頭間隔に相当する。制御入力 $u(i,j,m,k)$ の上限値は(2)式によって決定され飽和特性を有する¹⁰⁾。

信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長 $l_r(i,j,m,k)$ を、制御入力に3つの信号制御パラメータを、出力に渋滞長をそれぞれ対応させる。その時、各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システムが図2で構成される。制御システムにおいて制御偏差 $e(i,j,m,k)$ を次式で定義する。

$$e(i,j,m,k) \triangleq l_r(i,j,m,k) - y_c(i,j,m,k) \quad (4)$$

各信号交差点の各流入路における飽和度は一般に一樣ではなく、飽和度が最大となる流入路を優先的に制御する考えより、以下の関数 $g(i,j,m,k)$ を定義する。

$$g(i,j,m,k) \triangleq \begin{cases} 0 & e(i,j,m,k) \geq 0 \\ |e(i,j,m,k)| & e(i,j,m,k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

2 方向交通都市道路網の渋滞長制御システムの目的は、次式の評価関数 $J_n(k)$ を最小にする制御入力 $u(i,j,m,k)$ の3つの信号制御パラメータを統一的に求めることである。

$$J_n(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i,j,m,k) \quad (6)$$

ここで、 L, N はそれぞれ都市道路網の南北方向及び東西方向の信号交差点数を表す。

以上のシステム記述は、単独信号交差点を始め、幹線道路、都市道路網において、また、渋滞流や非渋滞流に関わらず、一貫して使用できる。

5. 信号制御法

信号制御システムでは、サイクル長、青信号スプリット、オフセットから構成される3つの信号制御パラメータを統一的に最適化し、信号交差点の各流入路における渋滞長のバランスを取りつつ、渋滞長の総和で定義される評価関数を最小にする。

単独信号交差点では、サイクル長と青信号スプリットの2つの信号制御パラメータが、いずれも評価関数 $J_s(k)$ を最小にするように統一的、逐次的に探索される。つぎに、単独信号交差点をリンクで直列に接続した幹線道路では、3つ

の信号制御パラメータが、いずれも評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように段階的、統一的に探索される。これは、単独信号交差点における信号制御法を幹線道路方向のオフセットに関して拡張したものである。最後に、単独信号交差点をリンクで格子状に接続した都市道路網では、3つの信号制御パラメータが、いずれも評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように段階的、統一的に探索される。これは、幹線道路における信号制御法を、幹線道路に交差する方向のオフセットに関して拡張したものである。

ここで、単独信号交差点と幹線道路の評価関数 $J_s(k), J_a(k)$ は、以下のように定義される。また、関数 $g(m,k)$ と $g(j,m,k)$ は、(5)式と同様な考えで定義される。

$$J_s(k) = \sum_{m=1}^4 g(m,k) \quad (7)$$

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j,m,k) \quad (8)$$

都市道路網の信号制御システムは、図3に示されるように車両感知器よりリンク走行速度や待ち車列長、交通量をオンライン入力し、信号制御法を用いて3つの信号制御パラメータの最適値を探索し、それらを用いて信号機の現示をリアルタイムで制御する。また、主要信号交差点の渋滞長を可変表示板に出力し、一般のドライバーに供する。

6. 動的経路誘導システム

現在、目的地までの走行経路を表示するナビゲーションシステムが普及している。また、VICSにより渋滞情報がリアルタイムで表示されている¹²⁾。ここでは、都市道路網内に設置された車両感知器により、交通量や待ち車列長、走行速度をオンライン入力し、交通管制センターに設置されたコンピュータを用いて、目的地までの最短平均旅行時間経路を含む複数の推奨経路をリアルタイムで探索する動的経路誘導シ

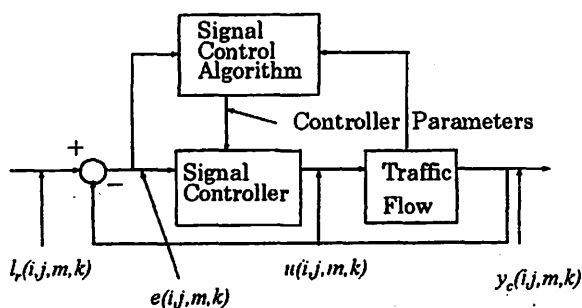


図2 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

システムについて提案する。

OD 旅行時間の基礎となるリンク旅行時間は、走行時間と停止時間の和より求める。これらの時間は、交通渋滞の有無やオフセット制御の有無、下流側信号交差点における車の進行方向、(3) 式の交通流ダイナミクスなどを考慮に入れて、車線単位、サイクル長単位、リンク単位で解析する。

目的地までの推奨経路の探索は、最適解が保証されているダイクストラ法を用いて行う。

都市道路網の動的経路誘導システムは、図 3 のシステム構成に示されるようにドライバーが車載入出力装置より目的地をオンライン入力し、経路探索アルゴリズムと交通情報を用いて最短平均 OD 旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路を探索し、それらを平均 OD 旅行時間の短い順に車載入出力装置にリアルタイムで出力する。ドライバーは複数の推奨経路の中から最も適当と判断した経路を選択し走行する。また、利用頻度の大きい主要な平均 OD 旅行時間を可変表示板にリアルタイムで出力し、一般のドライバーに供する。これらの交通情報に基づいて特定リンクへの交通流の集中や 2 つの特定 OD 経路間における交通流の交互の増減(振動)を防ぎ、交通渋滞を回避、および軽減する安定なシステムで、VICS に比べてより有効な経路情報を提供できる。

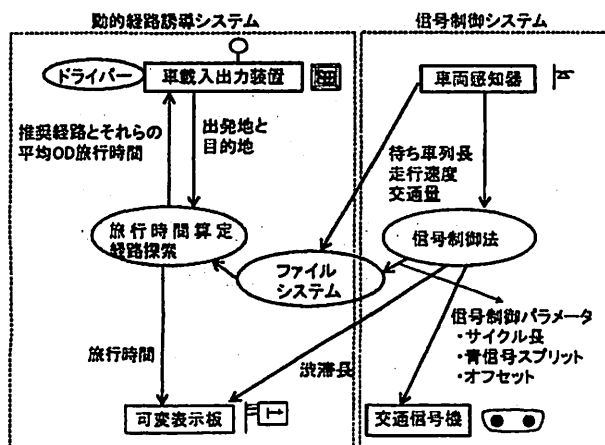


図 3 統合的交通流制御システム

図 3 は、信号制御システムと動的経路誘導システムをオンラインで結合した統合的交通流制御システムの構成を表している。このシステムにより、信号制御システムの制御入力の限界を動的経路誘導システムで補完する(渋滞リンクへの流入を回避する)ことが可能になる。

7. 交通情報システム

以上考察してきた道路を始め、交通、信号制御システム、動的経路誘導システムは、自動車をパケットに対応させると、表 2 に示される 5 つの階層から構成される情報ネットワークシステムとして扱うことができる。すなわち、第 1 層が道路、第 2 層が交通規制、第 3 層が信号制御システム、第 4 層が動的経路誘導システム、第 5 層が交通情報である。交通情報は、車載出力装置や可変表示板、ラジオ、テレビ、インターネットなどに送信され、ドライバーの安全で円滑な運転を支援する。

現在まで、道路解析や交通解析、信号制御システム、動的経路誘導システムが、12 の信号交差点から構成される広島県福山市内の道路網を対象にシミュレーション値と測定値の比較や考察に基づいて開発された^{10),11)}。

8. まとめ

本稿では、道路に始まり、交通規制、信号制御システム、動的経路誘導システム、交通情報提供に至る交通情報システムの開発について、交通流ダイナミクスの制御の観点から考察した。

主な研究結果は、以下のように要約される。

- (i) 道路は、種別、級別に応じて横断構成要素の基準値が決定され、道路の車線幅員や側方余裕、中央帯などの設計値が交通容量解析に使用される。
- (ii) 信号交差点の各流入路における交通量収支に基づいて、交通流ダイナミクスを車線単位、サイクル長単位で記述する。この記述は、単独信号交差点を始め、幹線道路、都市道路網において、また、渋滞流や非渋滞流に関わらず一貫

表 2 交通情報システムの階層構造

階層	対象	主な評価指標
第5層	交通情報	安全性、円滑性、経済性、環境負荷
第4層	動的経路誘導システム	旅行時間
第3層	信号制御システム	渋滞長
第2層	交通規制	交通流の安全性、円滑性
第1層	道路	交通流の安全性、円滑性

性を有する。

(iii)信号制御システムは、その評価関数が信号交差点の各流入路における渋滞長の総和で定義され、フィードバック制御システムを用いて、交通流ダイナミクスと同様に交通ネットワークポロジや交通流に関わらず、一貫性をもって記述される。

(iv)複数の信号制御パラメータは、渋滞長の総和で定義される評価関数を最小にするように統一的に探索され、交通ネットワーク規模の拡大に対応できる拡張性を有する。

(v)旅行時間を車線単位、サイクル長単位、リンク単位で解析し、出発地から目的地までの複数の推奨経路をダイクストラ法によりリアルタイムで探索できる。

(vi)交通流の円滑化と安全化をリアルタイムで実現する交通情報システムは、道路、交通規制、信号制御システム、動的経路誘導システム、交通情報の5つの階層構造で記述される。

今後、信号制御システムの実用化に当たって、時間遅れ制御に対する考察、並びに流入交通量や捌け交通量をオンライン計測する車両感知器の配置や超過流入交通量の推定などが課題であると考えられる。

参考文献

- 1) Hunt, P.B., Robertson, D.I., Bretherton, R.D. and Winton, R.I.: SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, TRRL Laboratory Report 1014 (1981).
- 2) Bretherton, R.D.: SCOOT – Current Development, Proc. 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama, Vol.1, pp.364-368 (1995).
- 3) Sims, A.G. and Dobinson, K.W.: The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System, Philosophy and Benefits, IEEE Trans., VT-29, No.2, pp.130-137 (1980).
- 4) Hayashi, K. and Sugimoto, M.: Signal Control System (MODERATO) in JAPAN, Proc. of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.988-992 (1999).
- 5) 宇佐美、榊原：道路網の信号制御システム、計測と制御、Vol.41, No.3, pp.205-210 (2002).
- 6) Heung, T.H., Ho, T.K. and Fung, Y.F.: Coordinated Road-Junction Traffic Control by Dynamic Programming, IEEE Trans. ITS-6, pp.341-350 (2005).
- 7) 竹内、本多、青島：交通工学、鹿島出版会、pp.186-212 (1986).
- 8) 米谷栄二監修：交通工学、国民科学社、pp.103-132 (1977).
- 9) 交通工学研究会：道路の交通容量 1985、コロナ社、pp.169-202 (1987).
- 10) 清水、真柴、傍田、小林：幹線道路の渋滞長制御、情報処理学会論文誌、vol.42, No.7, pp.1876-1884 (2001).
- 11) 石川、清水、傍田、小林：交通ネットワークの渋滞長制御、情報処理学会論文誌、vol.45, No.4, pp.1154-1162 (2004).
- 12) 電気学会・道路環境センシング調査専門委員会：ITS 道路交通センシング、オーム社、pp.118-122 (2005).