

自動車交通を支える交通情報システム の一考察

清水光[†] 藤井温子^{††} 森藤義之[†] 沖俊任[†]

自動車交通は、ドア・ツ・ドアの輸送や時間の制約がない、快適な走行などの理由で発展してきた。一方、交通量の増加に伴って、交通渋滞や交通事故、環境負荷の増加などの問題を有している。本稿では、交通流の円滑化や安全化、環境負荷の低減化を目的とする交通情報システムの構成について、交通流ダイナミクスの制御の観点から提案する。構成は、6層の階層構造で、道路設計、交通規制、信号制御システム、動的経路誘導システム、統合的交通流制御システム、交通情報提供システムより成る。第1層から第6層までの構成と機能について述べ、最後に、現在までの交通情報システムの開発事例について考察する。

A study of Traffic Information System Supporting Car Traffic

Hikaru Shimizu[†] Haruko Fujii^{††} Yoshiyuki Morito[†]
and Toshitaka Oki[†]

This paper proposes a configuration of the traffic information system which is effective to reduce the congestion, traffic accident, exhaustion of CO₂ and gasoline consumption in urban road networks. This paper studies from the road design, traffic regulation, signal control system, dynamic route guidance system and up to the traffic information service system from the viewpoint of the control of traffic flow dynamics. 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.

1. はじめに

経済の発展や道路の整備、信号のオンライン制御、車の技術革新などによって自動車交通は発展の一途をたどってきた。また、自動車交通は、時間の制約がない、ドア・ツ・ドアの移動、快適な高速走行などの特長を有し、我が国の交通機関の中で年間旅客総輸送量が最も多い¹⁾。一方、朝夕のラッシュ時には、都市の幹線道路を中心に交通渋滞や交通事故が日常的に発生している。

都市道路網における交通流の円滑化や安全化、環境負荷の低減化などの観点から、道路設計や交通規制、信号制御システム、動的経路誘導システム、統合的交通流制御システム、交通情報提供システムなどについて研究が進められている^{2)~8)}。

本稿では、信号交差点の交通流ダイナミクスを車線単位、サイクル長単位で記述し、交通流の最適制御や都市道路網の最大有効利用の観点から、交通情報システムの一構成法について提案する。ドライバーに必要な交通情報をオンラインで提供する交通情報システムは、6層の階層構造で構成される。すなわち、第1層が道路設計、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層が統合的交通流制御システム、第6層が交通情報提供システムとなっている。

2. 交通情報システムの現状

自動車のドライバーにとって、無事故、無違反、円滑で地球環境にやさしい走行は、最も望んでいることではないかと考えられる。

信号制御システムでは、車両感知器から交通量や占有率をオンライン入力し、サイクル長や青信号スプリット、オフセットから成る3つの信号制御パラメータを、あらかじめ用意された複数のパターンの中から選択し、遅れ時間と停止回数が最小になるように制御する。併せて、信号交差点における自動車と歩行者の錯綜を少なくし、交通流の安全化を図る。現行の信号制御システムは、遅れ時間の減少で一定の効果のあることが確認されているが、パラメータ探索の統一性や精度、評価関数などについて課題が残されているものと思われる。

VICS では、ドライバーに道路の渋滞や旅行時間、交通規制などの情報を車載器によりオンラインで提供し、円滑で安全な運転を支援する。

可変表示板では、ドライバーに渋滞長や旅行時間、交通規制、駐車場利用などの情報をオンラインで提供し、運転に必要な情報のサービスを図る。

[†] 福山大学

Fukuyama University

^{††} 弓削商船高等専門学校

Yuge National College of Maritime Technology

3. 交通情報システムの提案

現在の交通情報システムの問題点として、信号制御システムの性能向上や動的経路誘導システムの十分な機能整備などが考えられる。

ここでは、現在までの技術やシミュレーションなどの蓄積に基づいて、6つの階層から構成される交通情報システムの一構成法について提案する。

3.1 第1層 道路設計

道路は、道路法により、高速自動車国道、一般国道、都道府県道、市町村道に機能別に階層的に分類されている。車線幅員や中央帯、路肩などの道路設計の基準値が道路構造令に示されており、いずれの数値も交通容量解析に使用される。ここで、交通容量とは、与えられた道路条件と交通条件のもとで道路を疎通できる最大交通量と定義され、3.3.1で述べる交通処理量の解析の基礎となる。

3.2 第2層 交通規制

現実の道路網では、交通流の円滑化や安全化の観点から、様々な交通規制が実施されている。幹線道路における道路標識では、法定速度や右折禁止、進入禁止、一方通行、車線構成、駐車禁止などがあり、道路標示では、専用レーンや優先レーン、追い越し禁止、Uターン禁止、横断歩道などがある。また、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。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。

3.3 第3層 信号制御システム

3.3.1. システムの記述

急激な交通量の変動によって発生する渋滞を信号でオンライン制御するために、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。

図1に示される二方向交通幹線道路の流入路の各車線において、ある時刻 ΔT （ここでは、サイクル長に等しい）で以下の交通量収支が成立する。

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

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

ここで、 j は信号交差点の位置、 m は車の流入路（ $m=1$ は東行き、 $m=2$ は南行き、 $m=3$ は北行き、 $m=4$ は西行き）、 $k=k \cdot \Delta T$ ($k=1, 2, \dots, k_p$)は時刻をそれぞれ表す。また、 $x_e(j, m, k)$ 、 $x_i(j, m, k)$ 、 $x_o(j, m, k)$ はそれぞれ超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量を表わし、 $\psi_x(j, m, k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(j, m, k)$ はある交通流のもとで $x_o(j, m, k)$ を $\psi_x(j, m, k)$ で除した比率で捌け率と呼ぶことにする。捌け交通量をある交通流のもとで信号制御パラメータで制御できると仮定して制御入力 $u(j, m, k)$ で置き換えると、渋滞長の信号制御

システムは次式の非線形ダイナミックシステムで記述される。

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

渋滞長 $y_c(j, m, k)$ は状態変数 $x_e(j, m, k)$ に変換係数 $l_m(j, m, k)$ を乗じて求められる。ここで、変換係数 $l_m(j, m, k)$ は待ち車列の平均車頭間隔に相当する。制御入力 $u(j, m, k)$ は(2)式の捌け交通量 $x_o(j, m, k)$ に相等し、交通処理量 $\psi_x(j, m, k)$ の特性に基づき飽和特性を有する。

信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長 $l_r(j, m, k)$ 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 $e(j, m, k)$ を次式で定義する。

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

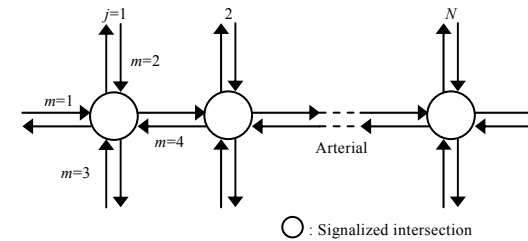


図1 二方向交通幹線道路の交通流
 Figure 1 Two-way traffic flows along arterial.

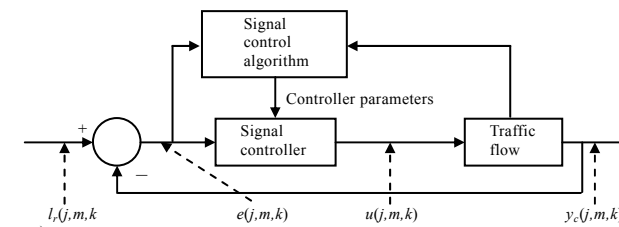


図2 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム
 Figure 2 Feedback control system of congestion length at each signalized intersection.

各信号交差点の各流入路における飽和度は一般的に様ではなく、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 $g(j,m,k)$ を定義する。二方向交通幹線道路の渋滞長制御システムの目的は、次の評価関数 $J_a(k)$ を最小にする制御入力 $u(j,m,k)$ である3つの信号制御パラメータを統一的に探索することである。

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

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

(3) 式で記述される信号制御システムは、車線単位、サイクル長単位の交通量収支に基づいており、渋滞流や非渋滞流にかかわらず、また、単独信号交差点や幹線道路、都市道路網にかかわらず成立する。

3.3.2. システム構成

幹線道路の信号制御システムは、交通流の円滑化や安全化、環境負荷の低減化を図るために設計される。そのシステム構成は、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、交通量をコンピュータにオンライン入力し、信号制御法⁹⁾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表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提供する。

3.4 第4層 動的経路誘導システム

動的経路誘導システムは、道路網の出発地 (Origin) から目的地 (Destination) までの最短 OD 旅行時間経路をリアルタイムで探索し、ドライバーに提供し、交通流の適正なリンク配分を図るシステムである。このシステムの開発は、リンク旅行時間の解析や測定、推定、最短 OD 旅行時間経路の探索、などから構成される。本稿では、信号交差点における交通流ダイナミクスや信号制御パラメータ、自動車の進行方向などを考慮に入れて、リンク旅行時間を解析し、推定する。システムを実用化するには、車両感知器の配置や信号制御システムとのオンライン接続などが必要になる。

3.4.1. リンク旅行時間の解析

各リンクの旅行時間は、走行時間と停止時間の和より求められる。また、平均リンク旅行時間は交通渋滞の有無やオフセット制御の有無、下流側信号交差点での車の進行方向などを考慮に入れて場合分けし、車線単位、サイクル長単位で解析する。さらに、交通ネットワークの或る出発地から目的地までの平均OD旅行時間については、そのODを構成する各リンクの平均旅行時間の総和より求める¹⁰⁾。以下の式で使用する変数の意味についてはTable1に示す。

渋滞無し・オフセット制御有りの場合

この場合、自動車は信号交差点間を最も円滑に走行できる。なお、式を簡潔に表現するために右辺の変数については、添字 (i,j,m,k) を省略する。

i) 下流側信号交差点を直進

・ 走行時間

$$T_r(i,j,m,k) = t_{run} \quad (7)$$

・ 停止時間

$$T_s(i,j,m,k) = P_s \{ P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) + P_r (t_r / 2 + t_s) \} \quad (8)$$

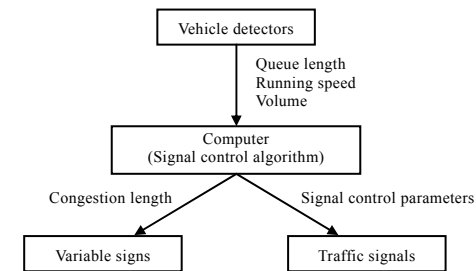


図3 信号制御システムの構成

Figure 3 Configuration of signal control system.

表1 変数の意味

Table 1 Notation

T_r, t_{run}	Link running time	y_l	Queue length
T_s	Link stopping time	v	Running speed of straightaway lane
P_s	Stopping rate at the downstream signalized intersection	q_s	Straightaway lane queue
t_{cr}	Outgoing time of right-turn lane queue	q_r	Right-turn lane queue
t_g, t_y, t_r	Green, Yellow and Red time	ϕ_s	Saturation flow on the approach of straightaway lane at the downstream signalized intersection
P_g, P_y, P_r	Probability of green, yellow and red time	ϕ_r	Saturation flow on the approach of right-turn lane at the downstream signalized intersection
C_y	Cycle length	t_{dr}	Time difference of green initiation between straightaway and right-turn directions
d	Link length	t_s	Starting delay

ii) 下流側信号交差点を右折

・ 走行時間

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cr} \quad (9)$$

・ 停止時間

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dr} / 2 + t_s \quad (10)$$

下流側信号交差点を左折する場合には、右折と同様な考えで解析する。

渋滞無し・オフセット制御無しの場合

この場合、自動車は下流側信号交差点において、青、黄、赤のいずれかの信号に遭遇する。

i) 下流側信号交差点を直進

・ 走行時間

$$\begin{aligned} T_r(i, j, m, k) &= P_g \cdot t_{run} \\ &+ P_y (t_{run} + t_{cs}) \\ &+ P_r (t_{run} + t_{cs}) \end{aligned} \quad (11)$$

・ 停止時間

$$\begin{aligned} T_s(i, j, m, k) &= P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) \\ &+ P_r (t_r / 2 + t_s) \end{aligned} \quad (12)$$

下流側信号交差点を右折、左折する場合には、渋滞無し・オフセット制御有りの場合と同様な考えで走行時間と停止時間に分けて解析する。

以上の式で、

$$t_{run}(i, j, m, k) = (d - y_i) / v \quad (13)$$

$$t_{cs}(i, j, m, k) = q_s / 2\phi_s \quad (14)$$

$$t_{cr}(i, j, m, k) = q_r / 2\phi_r \quad (15)$$

また、 $P_g(i, j, m, k)$, $P_y(i, j, m, k)$, $P_r(i, j, m, k)$ は、各信号時間をサイクル長で除した値である。

渋滞の場合

ここでは、信号制御が適切に行われ、青信号で交差点に進入した場合、その青信号を1回見送り、次の青信号で通過できると仮定する。リンク旅行時間は、上記の二つの場合と同様に直進、右折、左折の場合に分け、走行時間と停止時間について解析する。

3.4.2. 動的経路誘導システムの構成

都市道路網の動的経路誘導システムは、図4のシステム構成に示されるようにドライバーが車載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提供する。これらの交通情報に基づいて特定の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ある。動的経路誘導システムは、信号制御システムにおける制御入力の限界(飽和特性)を補うことができる。

3.5 第5層 統合的交通流制御システム

都市道路網の交通流の円滑化と安全化を最も効果的に実現するシステムとして、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接続する統合的交通流制御システムが考えられる。このシステムでは、信号制御システムにより、道路網の渋滞長の総和が最小になるようにサイクル長単位で信号表示が制御される。また、動的経路誘導システムにより、出発地から目的地までの最短OD旅行時間経路と平均OD旅行時間が、ドライバーにリアルタイムで提供され、特定リンクへの自動車の集中が避けられ、交通渋滞の軽減や解消に貢献する。さらに、信号制御システムの制御入力の飽和特性による限界を補うことが期待できる。これらの二つのシステムは独立に稼働し、

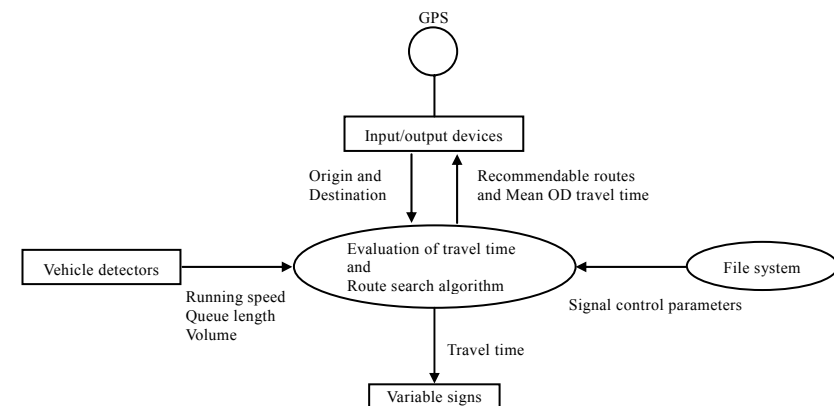


図4 動的経路誘導システムの構成

Figure 4 Configuration of dynamic route guidance system.

信号制御システムがサイクル長単位で常時稼働するのに対して、動的経路誘導システムはドライバーから要求が発生した時にのみ、経路探索を行い、必要な情報をドライバーに返す。統合的交通流制御システムの制御アルゴリズムは以下のように示される。

Step 1: 統合的交通流制御システムのパラメータや初期値などを設定する。

信号制御システム

Step 2: 車両感知器よりサンプリング周期 ΔT でオンライン入力された走行速度や待ち車列長、交通量の測定値をネットワーク制御アルゴリズム⁹⁾に入力する。

Step 3: ネットワーク制御アルゴリズムを用いて渋滞長の総和に関する評価関数を最小にする 3 つの信号制御パラメータの最適値を求める。求められた最適信号制御パラメータと車両感知器より入力された測定データを統合的交通流制御システムのファイルシステムに入力する。

Step 4: 3 つの最適信号制御パラメータを用いて交通信号機の現示（表示時間）を制御し、交通ネットワーク内の渋滞長の総和を最小にする。また、主要信号交差点の渋滞長を可変表示板に表示する。

以上の Step2 から Step4 までの処理をサンプリング周期 ΔT で常時実行する。

動的経路誘導システム

Step 5: ドライバーは、車載入出力装置から出発地と目的地を経路探索アルゴリズムに入力する。

Step 6: 走行速度や待ち車列長、交通量、最適信号制御パラメータなどをファイルシステムより経路探索アルゴリズムに入力し、求められた推奨経路を平均 OD 旅行時間の短い順にソートし、車載入出力装置に表示する。また、利用頻度の大きい主要な OD 旅行時間を可変表示板にリアルタイムで表示する。

Step 7: ドライバーは、出力された複数の推奨経路の中から最も適当と判断した目的地までの走行経路を選択する。

以上の Step5 から Step7 までの一連の処理はドライバーの要求時に稼働し、主要な OD 旅行時間の算定と表示はサンプリング周期 ΔT で常時実行する。統合的交通流制御アルゴリズムの処理手順を示すと図 5 のようになる。

3.6 第 6 層 交通情報提供システム

第 1 層から第 5 層までは、交通流の円滑化や安全化、環境負荷の低減化という目的を共有している。交通情報提供システムの目的は、ドライバーが安全で快適な運転ができるように必要な情報をリアルタイムで提供することである。

ドライバーが必要とする交通情報として、最短平均 OD 旅行時間経路、推奨経路、平均 OD 旅行時間、渋滞長、走行速度、混雑度、赤信号時間、などが考えられる。これらの交通情報は、第 1 層から第 5 層までのシステムが仕様通りに設計されたならば、

すべてリアルタイムでドライバーに提供可能となる。

4. システム開発の事例

広島県福山市内道路網において、第 1 層から第 4 層までのシステム開発事例と第 5 層から第 6 層までのシステム開発計画について紹介する。第 1 層の道路設計については、図 6 に示されるように、11 の主要信号交差点から構成され、駅前通りは片側 3 か

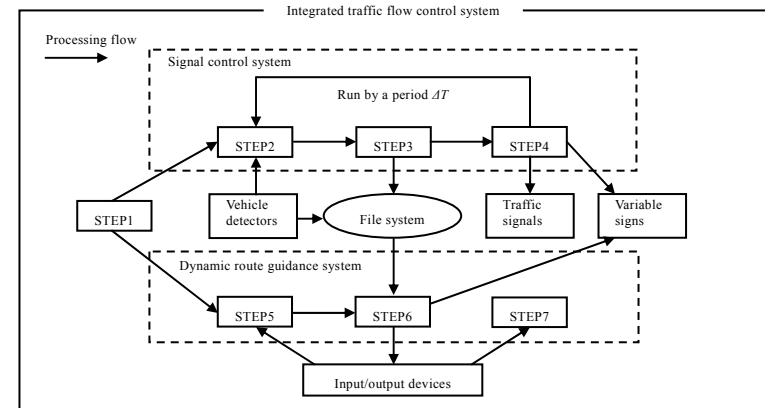


図 5 統合的交通流制御アルゴリズムの処理手順
 Figure 5 Procedure of integrated traffic flow control algorithm.

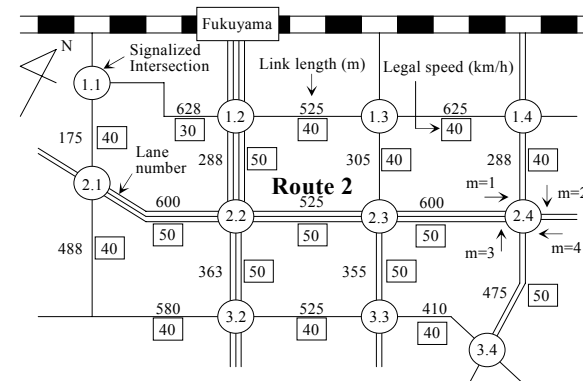


図 6 福山市内道路網
 Figure 6 Road network in Fukuyama city.

ら4車線、国道2号線は片側3車線とリンクの交通容量が大きく設計されている。第2層の交通規制については、駅前通りと国道2号線で朝のラッシュ時にバス専用レーンが設置されている。法定速度は、片側2車線以上の主要道路で50km/hとなっている。第3層の信号制御システムについては、(1)式のダイナミックシステムに基づき、道路網の信号交差点における渋滞長の総和を最小にするように、ネットワーク制御アルゴリズムを用いて3つの信号制御パラメータが統一的に探索され、制御される。車線単位、サイクル長単位で信号制御パラメータがきめ細かく制御され、現実に運用されているパターン選択法に比べて有効な結果を得ることができた⁹⁾。第4層の動的経路誘導システムについては、出発地から目的地までの右左折を含む推奨経路と平均OD旅行時間が比較的精度良く求められた¹⁰⁾。第5層の統合的交通流制御システムについては、現在までに開発された信号制御システムと動的経路誘導システムをデータベースを介してオンラインで接続し、交通流制御アルゴリズムをシミュレーションにより検証していく計画である。第6層の交通情報提供システムについては、都市道路網の交通流の円滑化と安全化、環境負荷の低減化に有効な情報を、リアルタイムでドライバーに提供できるデータベースを構築する計画である。

5. まとめ

広島県福山市内道路網における交通情報システムの機能と構成について考察した。交通工学や制御工学、情報工学などの複数の専門分野にわたっており、プロジェクトチームによってシステムを開発することが適していると思われる。

今後の当面の課題として、信号制御システムの遅れ制御や動的経路誘導システムにおける自動車の右左折確率の推定、車両感知器の適正な設置などが考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省: 国土交通白書 2008, p258(2008).
- 2) 今西, 石田, 箕: 道路整備後の交通量・CO₂排出量の短期的変化に関する実証的研究, 交通工学, Vol.43, No.3, pp53-63(2008).
- 3) 大口敬: 交通運用を活かす道路設計試論, 交通工学, Vol.38, 増刊号, pp.14-20 (2003).
- 4) 森本励: 地域に応じた道路構造の見直し, 交通工学, Vol.38, 増刊号, pp.21-25 (2003).
- 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) 天目, 山口: 道路網の動的経路誘導システム, 計測と制御, Vol.42, No.3, pp.211-216 (2002).
- 7) N. H. Gartner: Combined Models for Signal Control and Route Assignment in Urban Traffic Networks, 計測と制御, Vol.42, No.3, pp.217-224 (2002).
- 8) 情報システムと情報技術事典編集委員会編: 情報システムの実際 1 官公庁・公共サービスシステム: 培風館, pp.66-81 (2003).
- 9) 石川, 清水他: 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).

- 10) 小林, 清水他: 交通ネットワークの動的経路探索アルゴリズム, 第17回交通工学研究発表会論文報告集, pp.169-172 (1997)