

簡易車両感知器とプローブカーを用いた信号制御システム

～システムの構築と道路工事実施時の片側交互通行区間への適用～

西内 裕 晶 *

吉井 稔 雄 **

1. はじめに

本研究では、設置除去が容易な簡易車両感知器とGPSを搭載したプローブカーを用いて交通状況を把握し、その状況に応じて信号制御パラメータを決定するシステムを構築する。さらに、獲得されるデータの精度ならびにシステムの導入効果について検証を行う。検証の結果、システムの入力値として必要となる飽和交通流率の推定方法に問題が残されているものの、それ以外のデータが精度良く獲得可能であることを確認するとともに、システムを道路工事実施時の片側交互通行区間に適用することによって、効率的な車両誘導を実現する可能性があることを確認した。なお、本研究では、オンラインではなく、オフラインで獲得されたデータを利用した定周期制御の信号制御を対象として想定している。

道路工事実施時の片側交互通行区間など、一時的に車両の誘導が必要となる場所においては、常設の信号機を設置することは効率的でないとの理由から、暫定的に交通を誘導する方法を導入していくことが求められる。現在、道路工事等による片側交互通行区間における車両の誘導は、工事発注・施工者によって、交通管理者の指導の下で行われるが、安全への配慮が最優先であるため、交通の円滑性という観点から見れば、必ずしも効率的な車両誘導がなされているとは言い難い状況にある。また、安全の確保を第一とすべきであることは間違いないので、今後は、車両の誘導は信号機で行い、誘導員は現場の安全確保に努めるというように役割分担していくことが必要であると考えられる。一方、信号機によって効率的な交通制御を行うには、交通状況をモニターすることが重要で、そのための車両感知器等が必要になる。し

かしながら、常設の感知器を設置することは効率的でなく、簡単に設置・除去可能な道具を使って交通状況を観測し、交通状況を把握した上で、信号機を用いて効率的な車両誘導を行う信号システムが必要とされる。

そこで本研究では、どこにでも移動が可能で、すぐに取り付けられ、すぐに除去することができる信号システムの構築を行う。

2. 既存の研究

信号交差点における信号制御は、孤立交差点を対象としたWebsterによる最適サイクル長¹⁾に基づいた制御に始まり、現在では、面的な道路ネットワークエリアを対象として、交差点を通過する車両の遅れ時間を直接観測して得られる情報に基づいて、オンラインで最適な信号パラメータに逐次更新する「次世代信号制御システム」の実証実験が行われようとしている²⁾。一方で、工事などによって実施される片側交互通行区間など、暫定的に車両の誘導が必要となる場所においては、安全性の確保を最優先とした誘導員による誘導が行われており、必ずしも効率的な誘導とはなっていない。例えば、片側交互通行区間における車両誘導方法に関して、吉田ら³⁾は、工事区間の交通容量に及ぼす影響要因を調査し、各要因が交通容量に与える影響を定量的に評価するとともに、交通誘導員による誘導方法のモデル化を行っている。一方、越ら⁴⁾も、誘導員による誘導方法をモデル化し、誘導員による誘導が車両感知式信号機によるものと同じく効率的なものであることを確認している。また、安井ら⁵⁾⁶⁾は、車両感知式工事用信号制御システムを開発し、定周期式の制御と比較して、遅れ時間を短縮できることを確認している。このシステムはすでに実用化されており、単一の工事区間を対象として、車両の遅れ時間の短

* 東京大学大学院工学系研究科 修士課程

** 京都大学大学院工学研究科 助教授

縮に貢献している。対して、本研究では、工事区間の近辺に信号機が設置されている状況や、同一路線上に連続して工事区間が設定されている状況へ拡張することを前提に、前後に位置する信号機や連続する工事区間での誘導と対象工事区間における誘導を系統的に実施することを可能とする信号制御システムの構築を目指している。具体的には、設置・除去が容易な車両感知器とプローブカーを用いて関係するエリア内の交通状況の把握を行い、その後、交通シミュレーションを用いた信号制御パラメータ決定ツールを用いて、工事区間における効率的な信号制御パラメータを決定するものである。

3. 信号制御システムの構築

3.1 システムの概要

本研究で提案するシステムは、

-) 交通状況のモニタリング
-) データの加工
-) 最適な信号制御パラメータの決定

の3つの段階から構成される(図-1参照)。

第1段階の交通状況のモニタリングでは、移動して設置・除去することが容易な簡易車両感知器とプローブデータを用いて、それぞれ、各通過車両の時刻と速度、プローブカーの走行軌跡データを獲得する。

第2段階のデータの加工では、簡易車両感知器から獲得されるデータを用いて、需要交通量、飽和交通流率を推定し、プローブデータを集計することで、対象区間の通過に要する旅行時間を獲得する。

第3段階では、異なる信号制御パラメータを入力値として、繰り返し交通シミュレーションを実行し、その結果を比較することによって最適な信号制御パラメータを決定する。

3.2 交通状況のモニタリング

本節では、交通状況のモニタリングに用いる簡易車両感知器とプローブカーによるデータ取得方法について示す。

(1) 簡易車両感知器

今回提案する簡易車両感知器は約20cm四方であり、容易に持ち運びすることが可能である(写真-1参照)。また、設置・除去に要する時間はともに1,2分程度で、

どこにでも容易に設置することが可能であり、今回提案する移動可能な信号制御システムで利用するのに適しているものと考えられる。写真-2には、簡易車両感知器を道路に設置した状況を示す。この簡易車両感知器では、感知器上を通過した車両の通過時刻、車長ならびに通過速度を計測することが可能である。

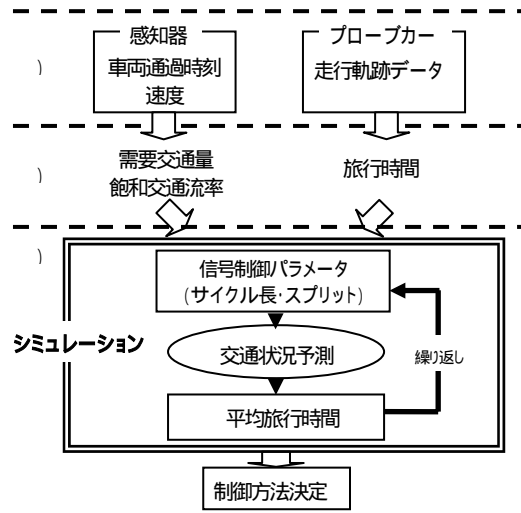


図 1 信号制御システムの概略



写真 1 簡易車両感知器



写真 2 簡易車両感知器を道路に設置した状況

(2) プローブカー

本システムで想定するプローブカーは、時々刻々変化する車両位置（緯度・経度）、速度、方位角を1秒ごとに計測することができる仕様とした。

(3) データ取得位置

片側交互通行区間を対象として、観測が必要となる場所・区間を図-3に示す。図中の地点A、B、C、Dには、簡易車両感知器を設置し、うち地点A、Dにおける区間交通量、地点B、Cにおいては、各方向の飽和交通流率を算定するために計測を実施する。さらに、対象区間を走行するプローブカーを用いて、図中の各矢印で示した区間（6区間）の旅行時間を計測する。

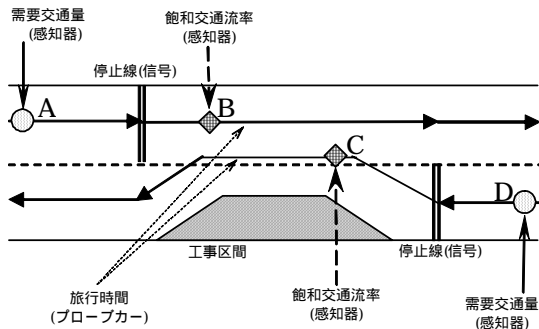


図 3 感知器の配置と旅行時間推定区間

3.3 データの加工

本節では、観測データを加工して、シミュレーションの入力データとして必要となる以下のデータを獲得する方法について示す。

-) 需要交通量
-) 飽和交通流率
-) 区間旅行時間

簡易車両感知器によるデータからは、需要交通量と飽和交通流率を獲得する。簡易車両感知器は、各地点を通過する車両の通過時刻を計測することができるので、対象とする片側交互通行区間の上流位置における(図-3中A、D)断面通過交通量を集計し、単位時間あたりの交通需要として集計する。一方の飽和交通流率に関しては、感知器によって観測された車頭間隔が一定の閾値以下の場合には車群を形成して走行しているものと仮定し、

それぞれの車群が感知器の設置地点を通過するのに要する時間に基づいて算定する。

さらに、プローブカーデータからは、片側交互通行区間ならびにその前後の区間における旅行時間(平均旅行速度)を観測する。具体的には、各区間の始点・終点に相当する位置の座標を用意し、その地点に一番近い位置座標を記録した時刻を当該地点の通過時刻と見なし、両地点の通過時刻の差を以て区間旅行時間とする。

3.4 最適な信号パラメータの決定

上記で獲得されたデータを入力値として、異なる複数の制御方法(サイクル長、スプリット)を用意し、交通シミュレーションモデルを繰り返して実行する。シミュレーション結果より、各サイクル長・スプリットを採用した場合の交通状況を予測することができる。この予測結果に基づいて、旅行時間等の評価指標値を最大にする信号パラメータを決定する。

ここで用いる交通シミュレーションは、基本的なロジックとしてSOUND 街路版⁷⁾を採用し、工事用の信号機が赤の場合には車両が移動出来ないという機能を付加したものである。

4. システムの検証

工事による片側交互通行が実施されている実際の道路区間を対象として、実地調査を実施し、調査結果よりデータの精度、シミュレーションモデルの再現精度ならびにシステムの効果を検証する。

4.1 調査

調査は、高知県幡多郡大月町馬路、国道321号における交互通行実施区間において2001年12月7日金曜日、午前7:00~9:00の通勤時間帯に行った。対象とする全区間長は2150m、工事のため片側交互通行となる区間の停止線間距離は450mであった。調査では、簡易車両感知機とプローブカーから得られるデータの精度を確認するため、調査員による交通量計測(図-3地点A、D)、ならびに4地点でのビデオ観測も合わせて行った。

4.2 入力データ取得結果

(1) 断面交通量(需要交通量)

地点A、Dにおける交通量の観測結果を表-1に示す。

また、図-4, 5には地点A, Dにおける簡易車両感知器と調査員の計測によって獲得された5分間交通量を示す。表-1より、観測時間帯(3時間)での両観測値の差は3%以内となっていることが確認出来る。さらに、図-4, 5より、簡易車両感知器による計測結果が、調査員による計測結果と良く一致していることが確認出来る。このことから、簡易車両感知器を用いた計測は、調査員による交通量観測結果とほぼ同等の結果を獲得できることが確認できる。

表 1 断面交通量(3時間計)

地点 (走行方向)	地点A (土佐清水市)	地点D (宿毛市)
調査員	617	690
感知器	609	710

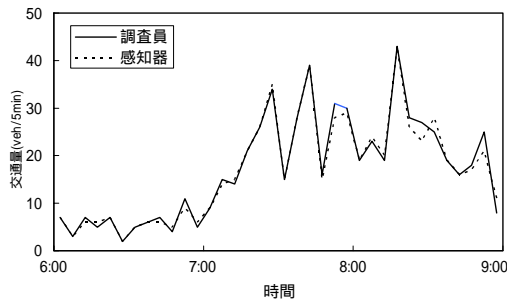


図 4 地点Aにおける断面交通量(5分間交通量)

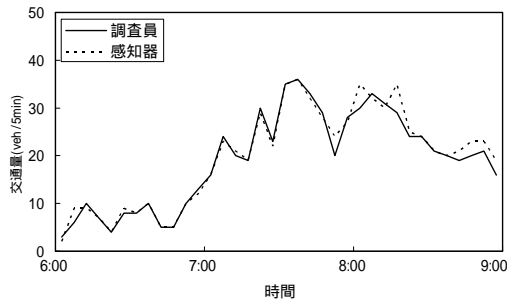


図 5 地点Dにおける断面交通量(5分間交通量)

(2) 飽和交通流率

前節で示したように、飽和交通流率は、車群が各感知器を通過するのに要する時間に基づいて算出される。そのため、車群の判定方法によってその値が異なることになる。車群の定義に関しては、感知器では車頭間隔が5

秒以上の場合には車群が切れたものと判断し、ビデオでは青開始時に停止線に待ち行列を形成している車両群を車群としている。図-6には観測された各車群に属する車両台数と、車群の通過に要する時間の関係を示す。さらに、図-7には両方法によって車群と判定された各車群の車両台数の分布を示す。図-6, 7より、感知器によって判定される車群の方がビデオの解析結果から判断される車群よりもその台数が小さくなる傾向にあることが確認できる。すなわち、感知器による判定では、5秒以上の車頭間隔を以て車群の切れ目と判断するため、待ち行列を形成する車群の中で先行車から間隔を空けて走行する車両が発生した場合に、本来容量を考える際には同じ車群として扱うべきものを複数の車群と見なしてしまうことになる。この結果、感知器によって算定される車頭間隔はビデオによるものと比較して小さくなるため、飽和交通流率が過大に算定されることとなる。今後は、このことに起因する誤差を排除し、感知器を利用して、より正確に飽和交通流率を算定する方法を確立することが課題である。

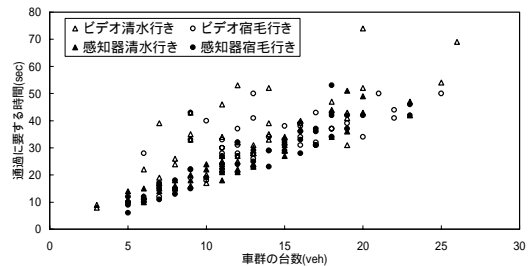


図-6 車群の台数と通過に要する時間の関係

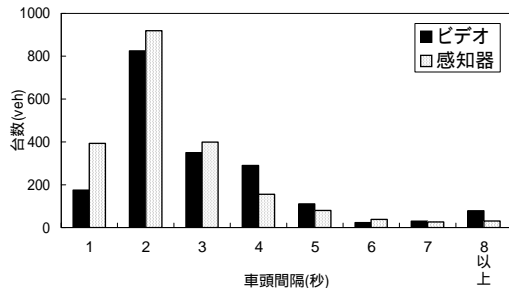


図-7 車群に属する車両台数

(3) 区間旅行時間

プローブカーデータを加工して獲得される区間旅行

時間は、図-3の地点Aから地点Dに至る区間の旅行時間を、ビデオ観測結果により各車両をマッチングして獲得される区間旅行時間と比較することで、その精度を検証する。プローブカーデータとビデオ観測から得られる区間旅行時間を比較した結果を図-8に示す。RMSE（平均二乗平方根誤差）を計算したところ、土佐清水市行き（図-3で左方向へ向かう交通）の2.25秒に対して、反対方向の宿毛市行きではRMSEが0.81秒となり、方向によって異なる結果を示した。このことから、プローブカーの位置データに多少の傾向誤差が含まれることが推測される。しかしながら、その誤差は小さく、多少の誤差は含まれるものの、プローブカーで計測する区間旅行時間が、まずまずの精度を持つことを確認できた。

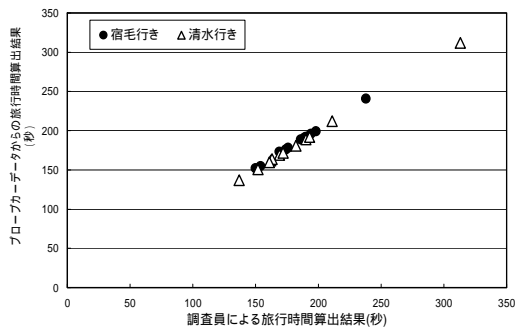


図-8 区間旅行時間の比較(プローブカーとビデオ観測)

4.3 交通シミュレーションモデルの現況再現性検証

ここでは、構築したシミュレーションモデルの再現精度について検証を行う。検証では、シミュレーションが出力する旅行時間とビデオ観測から得られる旅行時間との照合を行う。

シミュレーションを用いて現状再現を実行する際に必要となる入力データは、ネットワークの幾何構造データに加えて、調査によって獲得したデータ(断面交通量、飽和交通流率、区間旅行時間)および、現地で運用されていた信号制御パラメータ(サイクル長、スプリット)である。このうち、断面交通量に関しては、5分ごとの観測値をシミュレーションに入力し、シミュレーションでは、上流地点より一定間隔で発生させた。飽和交通流率に関しては、感知器から獲得される値に誤差が含まれるため、ビデオ観測によって獲得された値を用いた。さ

らに、区間旅行時間に関しては、プローブから獲得された各区間の旅行時間の平均値を全車に適用した。また、信号に関しては、サイクル長170秒、各方向のスプリットはともに30秒、各方向の青終了後の全赤時間はいずれも55秒で運用されていたが、青開始直前ならびに青終了直後に信号を無視して片側交互区間に進入する車両が存在し、実質的には40秒程度以上の青が出ていた(全赤時間は45秒以下)に等しい状態であった。そこで、各方向の有効青時間をパラメータとして取り扱い、サイクル長一定で、有効青時間を変化させて、繰り返しシミュレーションを実行した。その結果、全通過車両の平均旅行時間を指標に、最も現実の状況を再現出来るような有効青時間は、各方向それぞれ、50秒、47秒(全赤時間はそれぞれ35秒、38秒)と求められた。

このとき、ビデオ観測結果に基づいて獲得した各車両の実旅行時間の分布を図-9、10に、シミュレーションから得られる旅行時間の分布を図-9、10に示す。なお、ビデオ観測では、全ての車両についてマッチングすることが出来ていないため、シミュレーション結果と比較して旅行時間のサンプル数が小さくなっている。図-9の土佐清水市行きに関しては、実旅行時間の平均が178.8秒であるのに対して、シミュレーションでは180.5秒、図-10の宿毛市行きに関しては、実旅行時間の平均が178.0秒であるのに対して、シミュレーションでは179.2秒という結果となり、両方向ともに、ビデオ観測による実旅行時間とシミュレーションが出力する旅行時間の平均値はよく一致している。なお、これらの差の検定を行った結果、平均値が同じであるという仮説は危険率5%水準で棄却されなかった。

さらに、実旅行時間の分布に対する、シミュレーション結果の旅行時間分布の適合度の検定を行った。検定は、階級を110秒以下、110~250秒(10秒単位)、250秒以上の16階級として、シミュレーションによる旅行時間の各階級における度数が、実旅行時間の分布から得られる各階級での期待度数に適合しているか否かについて²検定を行った。その結果、土佐清水市行き、宿毛市行き、それぞれの²値は20.6、122.1(自由度15のとき、 $\chi^2_{0.05} = 25.0$)となり、土佐清水行きに関しては、有意水準5%で仮説は棄却されなかったものの、宿毛市行きに関しては、棄却される結果となった。

このように、本シミュレーションモデルは、平均的な旅行時間に関しては比較的精度良く再現しているが、各

車個別の旅行時間については必ずしも精度良く再現することが出来なかった。この理由の一つとして、宿毛市に向かう交通については、上流の信号等の影響で、より

多くの車両が車群を形成して当該区間に到達するため、その到着分布の偏りをシミュレーションが再現しきれなかったことが考えられる。

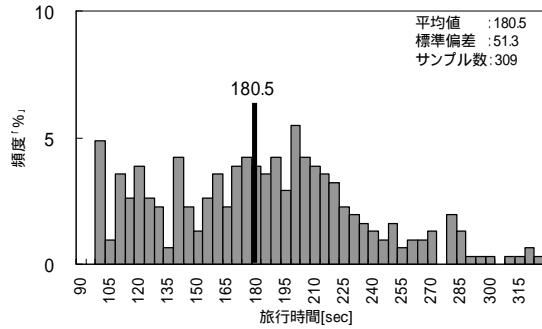
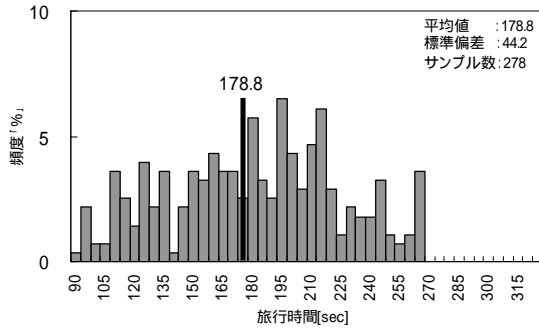


図-9 旅行時間分布の比較(土佐清水市行き)

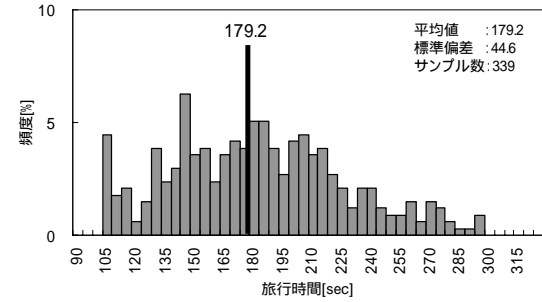
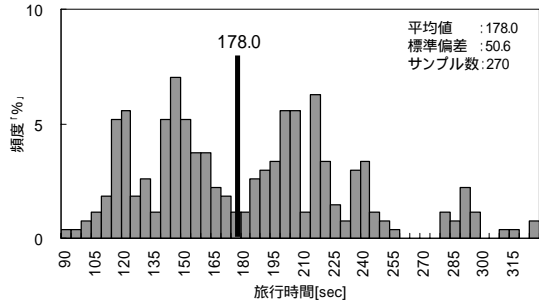


図-10 旅行時間分布の比較(宿毛市行き)

(2) 信号制御システムの適用

今回調査を実施した片側交互通行区間に、構築したシステムを適用し、システムを利用することによる、旅行時間削減効果について検証を行う。ただし、全赤時間に関しては、前節で求めた値(35秒,38秒)を用いる。

表-2 には、各方向からの有効青時間のスプリットを変えた場合の平均遅れ時間を示す。表より、スプリットが(75秒,65秒)の時に、平均遅れ時間が最小になり、このとき、現状の平均遅れ時間(82.3秒:平均旅行時間から、シミュレーションで用いている自由流旅行時間を差し引いて算出)と比較して15秒(約2割)の短縮効果を期待できる。このことより、本システムを片側交互通行区間に適用した場合に、より効率的な車両の誘導を実現できる可能性を確認することができる。

ットが(75秒,65秒)の時に、平均遅れ時間が最小になり、このとき、現状の平均遅れ時間(82.3秒:平均旅行時間から、シミュレーションで用いている自由流旅行時間を差し引いて算出)と比較して15秒(約2割)の短縮効果を期待できる。このことより、本システムを片側交互通行区間に適用した場合に、より効率的な車両の誘導を実現できる可能性を確認することができる。

表-2 サイクル長と平均遅れ時間の関係 [秒]

	宿毛市行きスプリット[sec]											
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	
土佐清水市行きスプリット	30	374.4	298.1	295.6	324.0	360.0	396.3	422.3	435.3	445.3	454.6	462.7
	35	313.4	224.8	190.7	211.1	238.9	267.5	295.2	323.7	351.7	378.5	408.7
	40	313.2	197.3	118.9	128.4	148.0	173.1	197.9	222.8	247.2	270.9	294.8
	45	340.8	214.3	125.3	88.5	94.3	101.2	123.3	145.5	167.6	188.9	210.8
	50	372.1	242.7	142.3	89.5	78.1	81.8	84.0	94.5	107.3	125.0	144.5
	55	407.8	268.8	170.1	90.4	78.7	72.9	75.9	81.2	82.5	91.1	100.2
	60	442.4	301.9	193.4	113.1	77.8	71.6	73.7	72.5	77.6	82.1	81.0
	65	480.1	330.8	221.1	135.1	80.9	73.8	68.1	71.1	74.0	72.2	77.1
	70	512.0	362.5	247.8	159.0	92.7	74.1	69.9	69.7	68.7	70.8	77.1
	75	534.7	393.5	274.9	185.4	111.6	78.6	71.5	67.3	67.9	72.0	71.7
	80	546.3	424.6	304.0	208.5	134.1	83.8	72.7	67.8	69.6	69.8	69.8

網掛けの部分は、平均値の差を検定(両側検定)した結果を表す(有意水準5%で棄却されないもの)。

5. おわりに

本稿では、移動、設置、除去が容易な簡易車両感知器と詳細な走行データの取得が可能なプローブカーを用いて交通状況観測を行い、交通シミュレーションを実行することによって、観測された交通状況に対して最も適切な信号制御パラメータを決定する信号制御システムの構築を行った。さらに、交通シミュレーションの入力に必要なデータの精度検証を行い、感知器から得られる需要交通量とプローブカーから得られる旅行時間データは高い精度を確認することが出来るものの、感知器から算出する飽和交通流率に関しては多少の誤差が含まれるという結果を得た。

最後に、構築したシステムを実際の片側交互通行区間において適用し、現状とは異なるスプリットを与えることにより、効率的な車両の誘導を行う可能性があることを確認した。

今後は、

- 1) 簡易車両感知器から飽和交通流率を算定する方法の改善
- 2) 片側交互通行区間の近辺に信号交差点が存在する場合や連続して片側交互通行区間が存在する場合へのシステムの適用
- 3) 適用繰り返し計算時における効率的な制御方法（スプリット）更新のアルゴリズムの確立を行う。

謝辞

本研究を進めるにあたっては、国土交通省四国地方整備局中村工事事務所、(財)計量計画研究所より多大なご支援を頂きました。また、神戸大学朝倉康夫教授をはじめ高知中村プローブカーWGの委員の皆様より多くの貴重なご意見を頂戴しました。さらに、高知工科大学大学院 M1 の片岡源宗君にはデータ整備において大変お世話になりました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) F.V. Webster : Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper, No.39, London, HMSO,1958
- 2) 尾上和志 : 名古屋信号制御実証実験の概要, 交通工学, Vol.38, pp36-40, 2003
- 3) 吉田賢太郎, 石井宏幸他 : 導管埋設工事による交通流への影響評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集 19(1), pp597-600, 1996.11
- 4) 越正毅, 安井一彦他 : 片側交互通行区間における交通誘導員の行動把握とモデル化に関する研究, 第 19 回交通工学研究発表会論文報告集, pp37-40, 1999.12
- 5) 安井一彦, 池之上慶一郎, 佐藤彰 : 工用感応信号制御機の試作と適用試験結果について, 第 14 回交通工学研究発表会論文報告集, pp9-12, 1994.11
- 6) 越正毅, 安井一彦, 山本健一 : 感応式工用信号パラメータと車両感知器設置位置の最適化に関する研究, 第 17 回交通工学研究発表会論文報告集, pp33-36, 1997.11
- 7) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 森田紳之, 岡村寛明 : 広域ネットワーク交通流シミュレーション SOUND の開発, 生産研究 Vol.48, No.10, pp49-52, 1996.10