

ビーコン情報による OD 交通量推計に関する研究

OD Demand Estimation from Beacon Information

桑 原 雅 夫*
 麦 倉 武 志**
 新 倉 聡***
 織 田 利 彦****

本研究は、光ビーコン情報から OD 交通量を推定する方法を提案し、その推定精度に関する考察を行なった後、横浜地区に本方法を適用し実用化への課題を整理したものである。光ビーコンは、従来の車両感知器と同様に交通量、オキュパンシーなどを計測できる感知機能に加え、路車間の双方向通信機能も備えている。双方向通信により車載器を搭載している個別の車両の動きを把握することができるので、様々な交通需要の推計に利用できる。本研究では、OD 交通量を推計する方法および精度を評価する方法を提案したが、その他の交通需要パターン、例えば交差点の方向別分岐交通量や経路交通量を推定する場合にも簡便で車載率が高くなった場合には有効な方法である。横浜地区への適用を通して得られた今後の課題としては、車種別に需要を推定する方法、計測誤差を考慮した需要推定方法および誤差の修復方法等の開発があげられる。

キーワード OD 交通量, 経路交通量, 方向別交通量, ビーコン, 双方向通信

1. はじめに

一般街路には光ビーコンが設置されてきており、交通量、オキュパンシーなどを計測できる感知機能に加え、路車間の双方向通信機能も備えている。双方向通信により車載器を搭載している個別の車両の動きを把握することができるので、車載車両の旅行時間情報、経路情報、車種情報等の高度な情報が収集可能である^{1,2)}。

本研究では、光ビーコンの機能についてまとめ後に、光ビーコンのアップリンク情報を用いて、OD 交通需要を推計する基礎的方法論と精度に関する統計的な考察を行う。また、本方法を横

浜地区のビーコン情報に適用し、データ特性、モデル仮定の妥当性などについて分析して今後の課題を整理する。

OD 交通量の推定に関する研究としては、リンク交通量カウントに基づいて日単位、時間帯別の OD を推計する方法がかなり以前から提案されている。ビーコンの情報に基づいた OD 推計方法の研究は今のところみられないが、類似の情報として、AVI によるナンバープレート読みとり結果を利用して、交通需要を推定する研究が幾つか試みられている。岡本、池之上、安井^{3,4)}は、AVI 計測に基づいて、自動車トリップ長の推定および道路区間ごとの流入・流出交通量の推計方法を提

* 東京大学生産技術研究所助教授 E-mail:kuwahara@nishi.iis.u-tokyo.ac.jp

** NTT コミュニケーションソフトウェア(株)マルチメディア事業部

*** 神奈川県警察本部交通管制課

**** 松下通信工業(株)情報システム事業部

案している。AVI計測値と車両感知器による断面交通量計測値を利用して各道路区間ごとに交通量保存則をたてて区間の流入・流出量を推定しているものである。また間藤ら⁶⁾もAVI計測に基づいた経路交通量の推計方法を別途提案している。これは、断面交通量およびAVIで計測された軌跡データをOD交通量と関連づけて連立方程式を解くという方法である。AVI装置による読みとり誤差、捕捉率等と推計精度の関係分析など興味深い結果を示しており参考とした。これに類似した研究としては、阪神高速道路における動的ODをAVIと車両感知器データに基づいて推計している杉山ら⁶⁾の研究がある。これら以外にも、車両感知器等による断面交通量データを用いて、中小規模ネットワークにおける動的なOD交通量を推計している研究⁷⁻¹⁴⁾は幾つか見られるが、本研究で扱っているビーコン情報を用いた交通需要推計に関する研究は著者の知る限り無い。

2. ビーコンの機能

光ビーコンは光学式車両感知器とも呼ばれ、赤外線を用いて、車両を感知する装置である。ビーコンは図-1に示すように、リンクの上流端(交差点の出口側)にすべての車線をカバーするように設置されている。光ビーコンは、感知機能と双方向通信機能の2つの機能を合わせ持つ。

感知機能は、既存の感知器と同様に車両の存在を感知する機能である。この機能により、ビーコンの下を通過する交通量、オキュパンシー等の情報を収集することができる。一方、双方向通信機

能は、ビーコンと車両との路車間でデータを双方向に交信する機能である。この機能により、車載装置を搭載した車両から、車両ID番号、前通過地点ビーコン番号、ビーコン間旅行時間、車種等の情報を収集することができる。

双方向通信機能による路車間の情報の流れを図-2に示す。1トリップにおいては以下に示したような流れになる。

- (1) トリップ開始時(エンジン始動時)には車載装置においてそのタイミングで初期ID番号がランダムに発生する。
- (2) 初回通過するビーコンでは、車両からその初期ID番号を送信し、初回通過ビーコン番号を情報として含んだ新たな車両ID番号、およびそのビーコン番号を受信する。この車両ID番号はトリップが終了するまで変わることなく維持される。
- (3) 次から通過するビーコンでは、車両から車両ID番号、前通過ビーコンID、旅行時間情報、車種等の情報を送信し、通過ビーコン番号を受信するという操作を繰り返す。
- (4) トリップ終了時(エンジン停止)に、その車両ID番号は車載装置から消去される。
- (5) 次のトリップ開始時に再び違う初期ID番号がランダムに発生する。

このシステムの下では車両ID番号により個別車両の通過経路を特定することができるが、その車両を一体誰が所有している車両であるのか分か

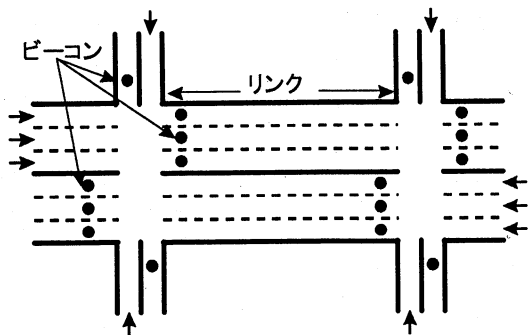


図-1 ビーコン設置位置

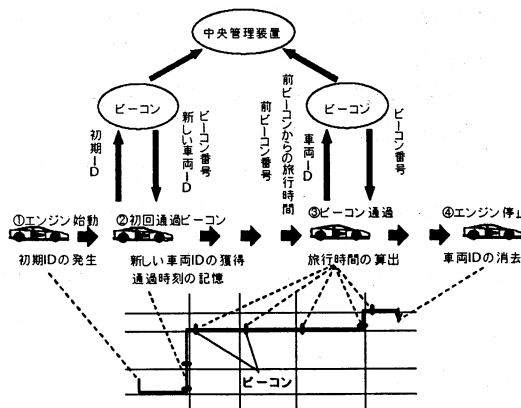


図-2 路車間通信システム

らないので、プライバシーは守られる仕組みである。

3. OD 交通量の推定方法

リンク o からリンク d への OD 交通量 X^{od} を推定することを考える。図-1 のようにリンクとビーコンは対応づけられるので、リンク番号とビーコン番号には同じ番号を付けることにする。つまり、 X^{od} はビーコン o を起点に、ビーコン d を終点とする交通量である。さらに簡単のために、時間を表す添字は省略しているが、以下の議論はすべて、ある対象時間帯における OD 交通量を考える。例えば、起点 o を午前 8 時から 9 時に出発した OD 交通量などが対象となる。

対象時間帯における起終点の情報は、車載器を搭載している車についてはアップリンク情報によって知ることができる。一方、全車両については OD 情報は分からないが、ビーコンの感知機能から各リンクの断面交通量を計測することができる。したがって、この断面交通量を車載車の OD パターンで振り分けることによって、全体の OD 交通量を推定するというのが基本方針である。本章では下記の仮定に基づいて方法論の提案を行う：

仮定：車載器を搭載した車両の OD パターンは、全車両の OD パターンを代表する。

終点リンク d の断面交通量はビーコンの感知機能で計測可能であり、これを X_d とおく。リンク d の通過交通量のうち、OD 交通量 X^{od} の割合を p^{od} とおけば、これらの関係は次のように表すことができる。

$$X^{od} = X_d p^{od} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、対象 OD を起点出発時刻で定義した場合には、 X_d の計測時間帯を起点からリンク d までの旅行時間分シフトさせる必要がある。

ここでは終点リンク d の断面交通量 X_d を用いて議論を進めるが、起点リンク交通量 X_o を用いても p^{od} を起点リンク o から発生した交通量のうち OD 交通量 X^{od} の割合として、 $X^{od} = X_o \cdot p^{od}$ としてもよい。

p^{od} の値は未知であるが、仮定のように車載器を搭載した車両の OD パターンが、全体の車両の OD パターンを代表しているものとすれば、 p^{od} の推定値は以下のようになる。

$$\hat{p}^{od} = \frac{n^{od}}{n_d} \dots \dots \dots (2)$$

n^{od} : 対象時間帯に o から d に向かう車載車のうち終点リンク d における観測台数

n_d : 終点リンク d を通過する車載車の観測台数

式(1)の p^{od} に式(2)から推定される \hat{p}^{od} を代入して OD 交通量の推定値 \hat{X}^{od} が、 $\hat{X}^{od} = X_d \cdot \hat{p}^{od}$ のように求められる。

n^{od} は n_d のうち OD 交通 od を持つ台数なので、2 項分布 (n_d, p^{od}) に従う。よって、 \hat{p}^{od} の分散は $Var[\hat{p}^{od}] = Var\left[\frac{n^{od}}{n_d}\right] = \frac{1}{n_d^2} Var[n^{od}] = \frac{p^{od}(1-p^{od})}{n_d}$ となる。したがって \hat{X}^{od} の分散

は、 X_d と p^{od} が独立ならば、

$$Var[\hat{X}^{od}] = Var[X \cdot \hat{p}^{od}] \approx E[\hat{p}^{od}]^2 Var[X_d] + E[X_d]^2 Var[\hat{p}^{od}] \dots \dots \dots (3)$$

となり、変動係数は、

$$\begin{aligned} \sqrt{Var(\hat{X}^{od})}/E(\hat{X}^{od}) &\approx \frac{\sqrt{Var(X_d)}}{E(X_d)} + \frac{\sqrt{Var(p^{od})}}{E(p^{od})} \\ &= \frac{\sqrt{Var(X_d)}}{E(X_d)} + \sqrt{\frac{(1-p^{od})}{n_d p^{od}}} \\ &\approx \frac{\sqrt{Var(X_d)}}{E(X_d)} + \frac{1}{\sqrt{n^{od}}} \dots \dots (4) \end{aligned}$$

となり、断面交通量 \hat{X}_d の変動係数を表す第 1 項と \hat{p}^{od} の変動係数を表す第 2 項からなる。さらに、 p^{od} が十分小さい場合には、 \hat{p}^{od} の変動係数は $1/\sqrt{n^{od}}$ と近似できる。これより、 \hat{p}^{od} の変動係数がある値 ϵ 以下に抑えたいときに必要なサンプル数 n^{od} を決めることができる。

$$n^{od} > \frac{1-p^{od}}{\epsilon^2} \approx \frac{1}{\epsilon^2} \dots \dots \dots (5)$$

以上の議論は、 n^{od} が求められているものとし

て進められてきたが、実際どのように n^{od} を求めることができるのかについて考察する。車載車の走行軌跡はアップリンク情報から追跡することができるので、基本的にはこの軌跡から n^{od} を直接計測することができる。

あるいは、図-3のように終点リンク d におけるフロー保存則を立てることによって求めることができる。車両からのアップリンク情報には、その車両が最初に通過したビーコン番号と通過時刻が含まれているので、終点リンク d 上のビーコンを通過した車両から起点 o を出発した車両のみを容易に抜き出すことができる。そこで、起点リンクが o の車載車のみについて、終点リンク d におけるフロー保存則を立てることによって n^{od} を次のように求めることができる。

$$n^{od} = n_d^o - \sum_{b'} n_{ab'}^o \dots \dots \dots (6)$$

n_d^o : 対象時間帯にリンク o から発生して、リンク d を通過する車載車の台数

$n_{ab'}^o$: 対象時間帯にリンク o から発生して、リンク d 、 b を通過する車載車の台数

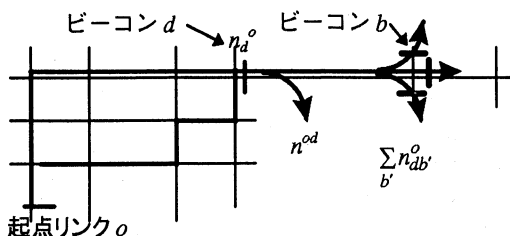


図-3 OD 交通量の推定

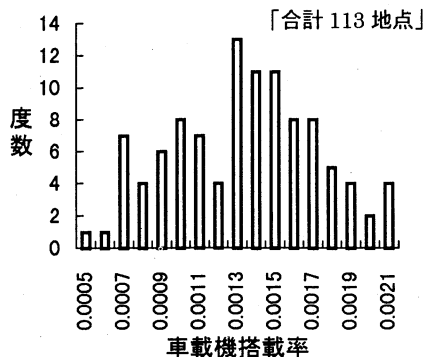


図-4 車載器搭載率の分布

(リンク b はリンク d の下流に接続しているリンクを表す。)

以上の手順をまとめると、次のとおりである：

1. 終点リンク d の断面交通量 X_d 、 n_d と車載車の OD 交通量 n^{od} を計測する。
2. 式(2)より終点リンク d を通過する交通のうち OD 交通 od を持つ割合 \bar{p}^{od} を計算する。
3. 式(1)の p^{od} に \bar{p}^{od} を代入して、OD 交通量 \bar{X}^{od} を求める。
4. 式(3)、(4)より、 \bar{X}^{od} の分散、変動係数を求め推定精度を評価する。

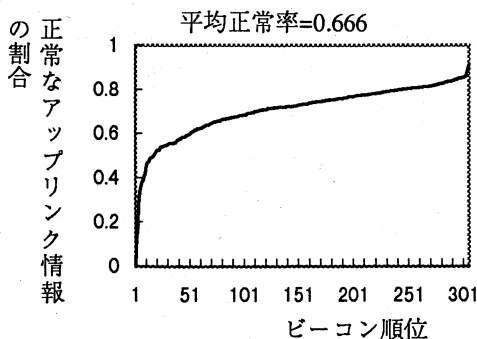
4. 交通需要推計方法の適用実験

4.1 対象データ

適用実験に用いた、日時、場所、使用データはそれぞれ以下のとおりである。

日時	1996年11月1日～11月30日
場所	横浜地区(図-6参照)
使用データ	車両ID情報(アップリンク情報) 断面交通量(従来感知器情報)

本稿ではアップリンク情報としてビーコンの双方向通信機能による車両ID情報を取得し、断面交通量はビーコンにできるだけ近い地点の従来型車両感知器データで代用した。本来ならば、ビーコンの感知機能で計測した断面交通量を用いるべ



注) 本研究でいう正常なアップリンクデータとは、通過地点のビーコン番号、前通過ビーコン番号、起点ビーコン番号の3種類の情報がすべて正常に収集されたデータである。

図-5 ビーコン正常率の分布

きであるが、現在ビーコンの感知情報はデータ蓄積が行われていないためビーコン近傍の従来型の車両感知器で代用した。

4.2 車載機搭載率の分析

現在の車載装置の普及状況、地点による車載機搭載率のばらつきを確認するため、横浜地区における車載機搭載率の分布を求めてみた。ここでは、横浜地区のビーコン 307 地点の中から、ビーコン設置位置の近傍に従来車両感知器が存在する 113 地点に限定し、平日・休日共に含めた 1996 年 11 月の 1 カ月間に通過した車載機搭載車の台数と総通過台数とから、その比である車載機搭載率を算出した。図-4 は、車載器の搭載率の頻度分布で、1 ビーコン当たりの車載機搭載率の平均、及び標準偏差、平均断面交通量はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \text{平均} (\bar{a}) &= 0.00134 \\ \text{標準偏差} &= 0.00038 \\ \text{平均断面交通量} (\bar{X}) &= 585611 (\text{台}) \end{aligned}$$

となった。したがって、現在のところ車載率は 0.1% 程度と非常に低い状況である。

もしも対象地域全体で車載率が一律に \bar{a} で断面交通量が \bar{X} の場合には、車載率の観測値の標準偏差は、

$$\sqrt{\frac{\bar{a}(1-\bar{a})}{\bar{X}}} = 0.000048 < 0.00038 \dots\dots\dots (7)$$

となる。もちろん各ビーコンごとに断面交通量は異なるので、この値は一つの目安にすぎない値で

あるが、実際の標準偏差はこれに比べて非常に大きい。標準偏差が大きくなる原因として以下のことが考えられる。

(1) 車種によって車載率がかなり異なり、移動のパターンも車種によって違うので、地点によって車載率が大きく異なることが推測される。車載器側には車種の情報 (6 車種区分) がインプットされているので、横浜地区 307 地点全体のアップリンク情報から車種分布を見ると表-1 の様であった。普通車両が 90% 以上と圧倒的に多く、なかでも 3 ナンバー乗用車に搭載率が高いと推測される。表-1 の情報からは乗用と貨物車の区別はできないが、乗用車と貨物車では移動のパターンも異なり、今のところ乗用車のアップリンク情報がほとんどと思われる。したがって、全車種を対象とした OD 推計については、本研究の仮定は今のところ成立しにくく、車種別に 3 章の方法を適用し、車種別の OD 交通量を求める必要があるだろう。

(2) 感知器情報と双方向通信情報の両者とも、

表-1 アップリンク情報による車種分布

軽車両	0.9 %
小型車両	8.2 %
普通車両	90.4 %
大型車両	0.3 %
特定車両	0.2 %
大型特定車両	0.0 %

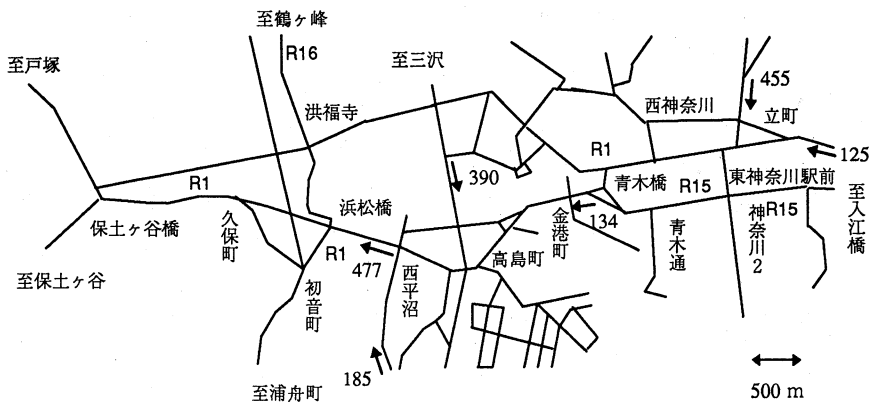


図-6 対象ネットワーク

ある程度の誤差を含んでいるために、車載率を正しく計測できていない可能性がある。ビーコンの計測誤差の種類は大きく分けて①ダブルカウント、数え落とし等の従来の感知器にも存在するエラーと②路車間通信システムの中のID内容に関するエラーの2種類がある。①のダブルカウントは路車間通信システムのソフト上でなくなるように設計されているが、数え落としについてはどの程度存在するか分からない。②のエラーは、路車間通信の過程において、車載装置の問題、通信のダウンリンクの問題、アップリンクの問題が複雑に絡み合っており、情報内容にエラーが生ずると考えられる。車両ID情報の内容を検証した結果、エラーがあるデータには、異常な数値が入っているため正常データと異常データの判別は可能である。図-5は307ビーコンにおける正常なアップリンク情報の割合を小さい順に並べた図である。1ビーコンあたり平均で1/3位のアップリンク情報にエラーがあることが分かる。なお、本適用実験では、車両ID情報内容が正常と思われるもののみを用いて分析している。

4.3 OD交通量の推定

1) 対象地点

OD交通量の推定は、図-6の国道1号線の西平沼から浜松橋にかけてのリンク(477番)を終点とする交通量の推定を行った。起点についてはサンプルの多かったビーコン番号134番(国道1号金港町)、125番(国道1号浦島が丘)、185番(県道平戸桜木町線日ノ出町)、455番(国道1号西神奈川)390番(三沢方面)について推定する。

2) 推定結果

求めるODの車両ID情報のサンプル数は非常に少なく時間帯毎に推定するのが困難なので、11月の1日平均OD交通量を推定することとした。終点リンクの断面交通量 X_d には対象月の日平均交通量を代入した。また、アップリンク情報のうち異常データを除いた後、式(6)の交通量保存則から n^{od} を求め、次に式(2)に終点リンクの車載車交通量 n_d と n^{od} を代入して \hat{p}^{od} を推定した。

推定結果は図-7と表-2に示されているように、一番OD交通量が多い起点134の場合でも、 \hat{p}^{od} の変動係数は0.19で、その他については0.5程度の値であった。これらの結果は前述の仮定に基づいたモデルによるものであり、特に前節で述べたように車載器搭載車は乗用車が極めて多く、今のところ全車種のODパターンを代表しているとは言い難い。

5. おわりに

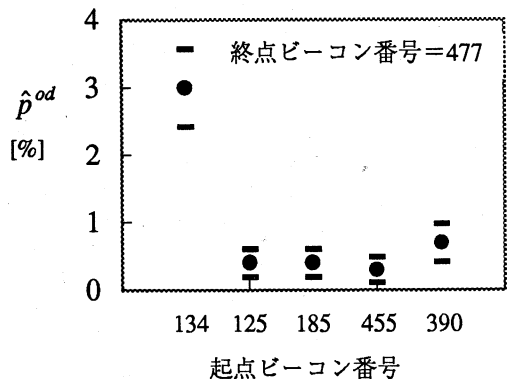
本論文では、ビーコン情報を使ってOD交通需要を推計する方法、及びその精度評価の方法論を構築し、横浜地区のOD交通量推定に適用した。その結果、今後に向けて以下のような課題、及び方針が提示された。

(1) 車種ごとに車載機搭載率がかなり異なるこ

表-2 OD交通量推定結果

起点番号	n_d	n^{od}	\hat{p}^{od}	X_d	\hat{X}^{od}	$\frac{\sqrt{\text{Var}(\hat{p}^{od})}}{E(\hat{p}^{od})}$
134	896	27	0.030	24456	734	0.19
125	896	4	0.004	24456	98	0.53
185	896	4	0.004	24456	98	0.53
455	896	3	0.003	24456	73	0.61
390	896	6	0.007	24456	171	0.40

交通量の単位は [台/日]



注) $\bar{\bullet}$ は $\hat{p}^{od} \pm \sqrt{\text{Var}(\hat{p}^{od})}$ を示す。

図-7 OD交通量の推定

とが考えられるため、交通需要を車種別に推定する方法、他の OD 情報源を活用して推計された OD を修正する方法などについて研究が必要である。

- (2) ビーコンの双方向通信機能、感知機能ともに計測エラーがどの程度あるのか定量的に再分析するとともに、エラーの原因把握が必要である。
- (3) 車両走行軌跡を完全に把握するためには、走行経路上のビーコン情報が全て完璧である必要があり、一つ一つのビーコンの計測・通信エラーがほとんど皆無にならないと困難である。実用上は従って、ある程度のエラーは存在するものとして、エラーデータを検出する方法およびエラーによって分断されたり、2 本以上数え上げられたりする走行経路をソフト的に修復させる方法を開発する必要がある。

本研究では OD 交通量の推定に焦点を当てたが、アップリンク情報によって車両の走行軌跡が分かるので、OD 交通量の推定以外の交通需要推定にも応用できる。例えば、交差点における右左折・直進方向別交通量や経路交通量などの推定にもここで提案した方法論は適用可能である。

アップリンク情報からは、このような各種の交通需要の推定が簡便に行える可能性があり、信号制御、流入制御などの交通管理策への活用が望まれる。現在のところ、車載器の普及率はまだまだ低い状況ではあるが、普及は加速される方向にあり、今後のアップリンク情報の利用に関する研究が期待される。

参 考 文 献

- 1) Oda, T., Takeuchi, K., Yoshio, Y., and Niikura, S.; "Evaluation of Measured Travel Time Utilizing Two-way Communication in UTMS", proceedings of the 3rd World Congress on ITS, Orlando, 1996.
- 2) Massart, M., Koshi, M., and Kuwahara, M.; "Traffic

Signal Control based on Travel Time Information from Beacons", proceedings of the 2nd World Congress on ITS, Yokohama, 1995.

- 3) 岡本晃, 池之上慶一郎, 安井一彦; "自動車登録番号照合法による流出率の推定について", 第 13 回交通工学研究発表会論文集, 1993 年 11 月.
- 4) 岡本晃, 池之上慶一郎, 安井一彦; "ナンバープレート照合法による都市内自動車トリップ長の推定方法に関する研究", 第 14 回交通工学研究発表会論文集, 1994 年 11 月.
- 5) Mato, R., Ohe, I., and Yano, D.; "AVI 装置による OD 交通量の推定", proceedings of the 4th World Congress on ITS, Berlin, 1997.
- 6) Sugiyama, M., Tanabe, J., Asakura, Y., and Daito, T.; "Time Dependent OD Matrix Estimation from Traffic Counts and AVI Data on the Hanshin Expressway", proceedings of the 3rd World Congress on ITS, Orlando, 1996.
- 7) M. Cremer and H. Keller; "A New Class of Dynamic Methods for the Identification of Origin-Destination Flows", Transp. Res. Vol. 21 B No. 2, pp. 117-132, 1987.
- 8) H. Keller, G. Ploss; "Real-Time Identification of O-D Network Flows from Counts for Urban Traffic Control", Transp. and Traffic Theory, pp. 267-284, 1987.
- 9) N. L. Nihan and G. A. Davis; "Application of Prediction-Error Minimization and Maximum Likelihood to Estimate Intersection O-D Matrices from Traffic Counts", Transp. Sci. Vol. 23 No. 2, pp. 77-90, 1989.
- 10) 楊海, 飯田恭敬, 佐佐木綱; "観測リンク交通量を用いた時間 OD 交通量の動的推計法", 土木計画学研究・講演集 No. 13, pp. 599~606, 1990.
- 11) 楊海, 秋山孝正, 佐佐木綱; "時系列観測交通量を用いた OD フローのオンライン推計法", 交通工学 Vol. 27 No. 1, pp. 33~41, 1992.
- 12) E. Cascetta, D. Inaudi and G. Marquis; "Dynamic Estimators of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts", Transp. Sci. Vol. 27 No. 4, pp. 363~373, 1993.
- 13) 松本幸正, 藤田素弘, 松井寛; "リンク交通量に基づく時間 OD 交通量の推定手法に関する研究", 交通工学, Vol. 29, No. 3, pp. 11~19, 1994.
- 14) Sherali, H. D., Arora, N., and Hobeika, A.; "Parameter Optimization Methods for Estimating Dynamic Origin-Destination Trip Tables", Transportation Research B. Vol. 31, No. 2, pp. 141~157, 1997.

(1996 年 7 月 7 日受 付)
(1997 年 12 月 26 日再受 付)