

# 集計 QK を用いたエリア流入制御の有効性に関する研究<sup>\*1</sup>

A study on the efficiency of an area traffic control method using macroscopic fundamental diagram <sup>\*1</sup>

米澤悠二<sup>\*2</sup>・吉井稔雄<sup>\*3</sup>・北村隆一<sup>\*4</sup>

By Yuji YONEZAWA<sup>\*2</sup>・Toshio YOSHII<sup>\*3</sup>・Ryuichi KITAMURA<sup>\*4</sup>

## 1. はじめに

高速道路を対象とした流入制御手法として種々の制御手法が提案されている．なかでも，都市内高速道路のネットワークパフォーマンス向上を目的とする代表的な制御手法として，LP 型ランプ流入制御手法<sup>1)</sup>が提案されている．同手法は制御時間帯における高精度の予測 OD 交通量が必要であること，および一般街路への影響が考慮されていないことなど，いくつかの問題があり，これまでに複数の改良型モデルが提案されているものの，未だ実用化されるには至っていない．そこで，著者らによる先行研究<sup>2) 3)</sup>では，制御の実用化を視野に入れ，OD 交通量を要件とすることなく，ネットワーク全体の交通密度に基づいたエリア流入制御手法を提案し，阪神高速道路を対象としたシミュレーション解析により，その制御効果を示している．

本稿では，同先行研究が提案した“集計 QK を用いたエリア流入制御手法”が有効に機能するための条件を考察し，シミュレーション解析を実施して同条件の妥当性を検証する．以下，対象エリアを総括するマクロな交通状態量，集計交通流率ならびに集計交通密度を定義し，両者の関係を利用するエリア流入制御手法を説明する．続いて，環状部と放射状の流入路線からなるシンプルなネットワークを対象とし，エリアの大きさと交通量レベルに着目することで，制御が有効に機能するための条件を導出する．さらに，交通シミュレーションを用いて，導出した条件の妥当性を検証する．

## 2. 集計 QK

複数リンクから構成される道路ネットワークエリアの交通状態量として，集計交通流率と集計交通密度を定義し，両状態量間に存在する関係を集計 QK 関係と命名する．集計交通流率  $Q$  [台・km/h] は，道路ネットワークエリアに内包される全てのリンクについて，リンク単位で算定される単位時間あたりの車両台キロを合算した値，集計交通密度  $K$  [台/エリア] は，エリア内に存在

<sup>\*1</sup> キーワズ：流入制御，MFD，道路ネットワーク

<sup>\*2</sup> 学生員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

<sup>\*3</sup> 正員 博士（工学）京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻  
（京都市西京区京都大学桂，TEL 075-383-3239）

<sup>\*4</sup> 正員 Ph.D. 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

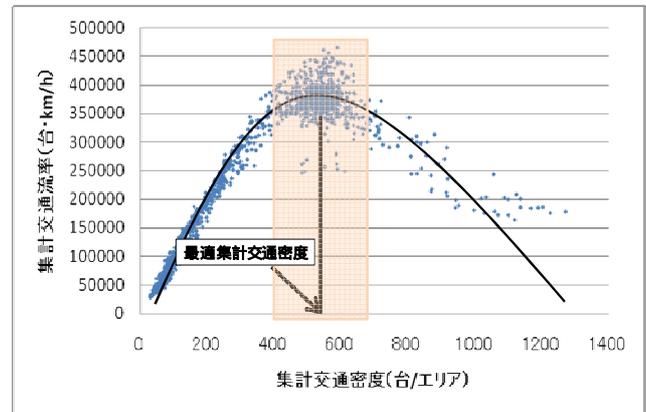


図1 集計 QK 関係の例(イメージ図)

する全ての車両台数と定義する．図1に集計交通流率と集計交通密度の関係例を示す．図は道路ネットワークエリアにおいて，集計交通密度が小さいうちは密度が増加するに伴って集計交通流率が増加するが，やがて集計交通密度が一定量以上に大きくなってくると，集計交通流率が低下することを示している．また，このような集計 QK 関係が成立する場合には，流入制御の実施によって適切なレベルの集計交通密度（図1中網掛け部分）を保つことで，高い集計交通流率を確保することが可能となる．

## 3. エリア流入制御手法

提案するエリア流入制御アルゴリズムは，交通密度が増加した際に，エリア集計交通密度を適切なレベルに維持することを目標とする．そこで，制御実施時の集計交通密度の目安になる値として，最適集計交通密度  $K_c$  を設定する． $K_c$  は，観測に基づいて事前に設定する制御パラメータである．また， $K_E$  は制御打ち切りの判断を行う閾値とする．

本稿で提案する流入制御手法は，以下にてエリアへの流入交通量調節を行う．

制御パラメータの決定： $K_c$ ， $K_E$  および制御単位時間  $\Delta t$  の値を決定する．

制御開始の判定：制御非実施時には，集計交通密度（エリア内車両台数）が最適集計交通密度  $K_c$  を上回った場合に制御を開始する．

制御終了の判定：制御実施時には，集計交通密度が制御終了判定値  $K_E$  を下回った場合に制御を終了する．

制御リンクの選定と制御交通量の算定：対象エリアに向かって流入するリンク（以下“流入リンク”）のうち、制御実施時に実際に車両の流入を制限するリンク（以下，“制御リンク”）を選定し、各制御リンクが許容する流入交通量の最大値（以下，“制御交通量”）を決定する。

制御の実施：次の制御時間帯において、制御リンクから対象エリアへの流入交通量を一定のレートに制限する。

上記の ~ を、単位時間 $\Delta t$ 毎に繰り返すことにより、エリア流入制御を実行する。

#### 4. エリア制御の有効性の考察

エリア流入制御では、集計 QK 関係が上に凸の形状で得られることを前提としている。しかし、実交通においては、上に凸の集計 QK 関係が得られず、エリア流入制御が有効に機能しない可能性がある。そこで本節では、対象エリアの規模と交通状態に着目し、エリア流入制御が有効に機能する条件について考察する。

##### (1) シンプルネットワークと前提条件

2008年、Nicolasら<sup>4)</sup>は、横浜市における観測データを用いた分析を行い、都心部道路ネットワークにおいて上に凸の形状を持つ集計 QK 関係が得られることを示している。これは、集計 QK 関係が上に凸の形状になることの一般性を証明したものではないが、本稿では、都心部の道路ネットワークでは上に凸の集計 QK 関係が成立するとの前提で考察を加える。以下、都心部道路ネットワークに放射路線が接続する都市内道路ネットワークを想定し、同ネットワークを代表するシンプルなネットワークとして、環状線とそれに向かう一つの放射線とから構成されるネットワークを考察の対象とする（図2参照）。

ネットワーク内の各リンクは、自由流側が角度  $\theta_1$  [rad]、渋滞流側が角度  $-\theta_2$  [rad] の直線で構成される三角形の QK 関係が成立するものとする。また、同ネットワークのうち都心部に相当する環状部をベースエリア、放射部を周辺リンク群と定義し、ベースエリアでは図3の台形 ABCD に示す集計 QK 関係が成立しているとの前提を置く。また、図中点 E は全てのリンクが臨界状態にあるとの理想的な状況下で達成される点であり、点 E の集計交通流率を  $Q_a$  [台・km/h] とする。一方の周辺リンク群については、自由流リンクと渋滞流リンクとに分け、それぞれのリンク群をひとまとめた自由流エリア（図4左）、渋滞流エリア（図4右）を想定して集計 QK を表現し、両エリアにおいて取り得る最大の集計交通流率をそれぞれ  $Q_{c1}$ ,  $Q_{c2}$  [台・km/h] とし、各エリア内の平均交通流量レベルを  $Q_{c1}$ ,  $Q_{c2}$  に対する割合  $r_1$ ,  $r_2$  ( $0 < r_1, r_2 < 1$ ) で示す。

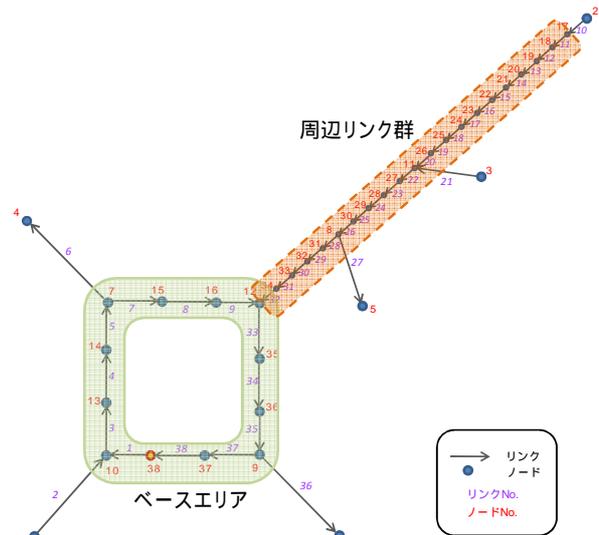


図2 対象ネットワーク

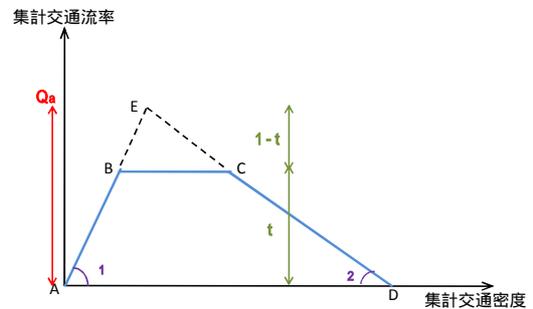


図3 ベースエリアの集計 QK 図

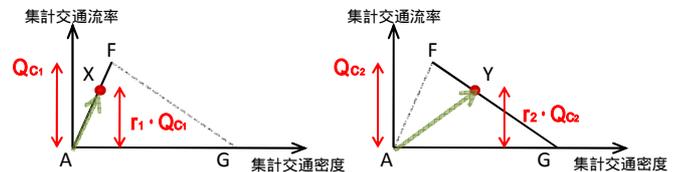


図4 周辺リンク群の集計 QK 図

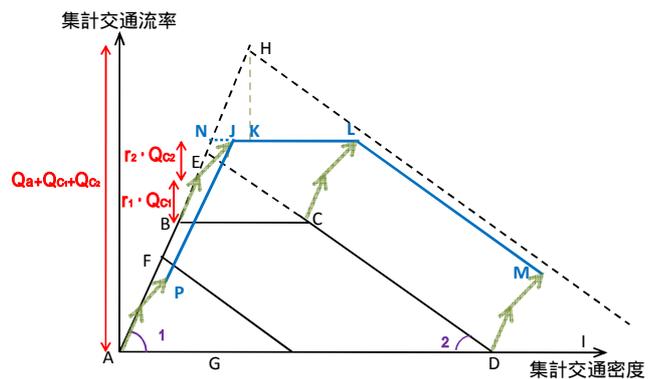


図5 周辺リンク群追加後のエリア集計 QK 図

##### (2) 制御が有効となる条件の導出

前節の前提条件の下、ベースエリアに周辺リンク群を加えた全対象ネットワークの集計 QK 関係は、ベースエリアの集計 QK である台形 ABCD に図4の周辺リン

ク群の交通状態を加えた台形 PJLM で示される (図 5) .

本研究では, 図 5 の点 H の集計交通密度を制御に用いる最適集計交通密度  $K_c$  として設定する. 点 H は全てのリンクが臨界状態にあるとの理想的な状況下で達成される状態を示し, 同  $K_c$  値は, エリア内の全リンクの臨界密度にリンク長を乗じた値の総和で算定される.

このとき, 制御により集計交通密度を  $K_c$  付近に維持することで高い交通流率が確保されるには, 点 H から台形 PJLM に向かって下ろした垂線の足 K が線分 JL 上にあることが必要である. すなわち,

$$\frac{NJ}{\tan \theta_1} \leq \frac{NK}{\tan \theta_1} \quad (1)$$

$$\frac{NK}{\tan \theta_1} \leq \frac{NL}{\tan \theta_2} \quad (2)$$

が同時に満たされているときに, 制御が有効に機能するものと考えられる. ここで, 線分  $NJ$ ,  $NK$ ,  $NL$  の長さは以下の式(3), (4), (5)で表される.

$$NK = \frac{1}{\tan \theta_1} \left\{ (1-t)Q_a + (1-r_1)Q_{c_1} + (1-r_2)Q_{c_2} \right\} \quad (3)$$

$$NL = \left( \frac{1}{\tan \theta_1} + \frac{1}{\tan \theta_2} \right) \left\{ (1-t)Q_a + (1-r_2)Q_{c_2} \right\} \quad (4)$$

$$NJ = (1-r_2) \left( \frac{1}{\tan \theta_1} + \frac{1}{\tan \theta_2} \right) Q_{c_2} \quad (5)$$

これらを連立して  $r_1$ ,  $r_2$  について解くと, 以下の連立一次不等式が得られる.

$$r_2 \leq ar_1 + b \quad (6)$$

$$r_2 \geq ar_1 + c \quad (7)$$

ただし

$$a = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \cdot \frac{Q_{c_1}}{Q_{c_2}},$$

$$b = (1-t) \frac{Q_a}{Q_{c_2}} - \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \cdot \frac{Q_{c_1}}{Q_{c_2}} + 1,$$

$$c = -(1-t) \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \cdot \frac{Q_a}{Q_{c_2}} - \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \cdot \frac{Q_{c_1}}{Q_{c_2}} + 1$$

図 6 斜線部に式(6),(7)が示す領域を図示する. すなわち, 追加する周辺リンク群の交通量レベル ( $r_1$ ,  $r_2$ ) が図 6 斜線部の領域内に存在すれば, 追加リンク群を含んだ全エリアにおいてエリア流入制御が有効に機能する可能性が高いと考えられる.

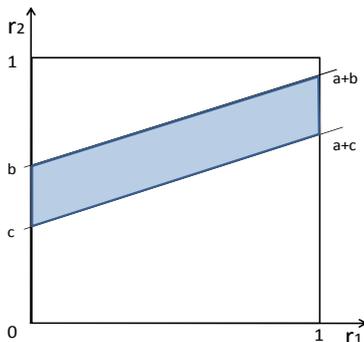


図 6 制御が有効に機能する条件を示す領域

## 5. 交通シミュレーションを用いた有効性の検証

前章において, 制御が有効に機能するための条件を示した. 本章では, 交通流シミュレーション SOUND<sup>5)</sup>を用いて同条件の妥当性を検証する. 具体的には, 図 6 に示した制御が有効に機能する領域 と有効に機能しない領域, の交通状況が出現した場合のエリア流入制御実施効果を調べる.

### (1) シミュレーションパラメータ

SOUND モデルでは, 各リンクに設定した QK 関係から導かれる車両速度-車頭距離関係に従ってスキャンングタイムインターバル毎に各車両がネットワーク上を移動する. 各リンクの QK 関係は, 自由流側では原点を始点に傾き 60km/h の線分, 渋滞流側では傾き -20km/h の線分とした. 図 2 に示した対象ネットワークはオンランプ, オフランプ各 3 箇所ずつを有し, 環状部 1 周の長さは 9,200m, 各オンランプ, オフランプのリンク長は 300m と設定した. また各リンクの交通容量は 3,600 [台/h] を基本とし, 環状エリアにボトルネックを作成するため, 図中リンク 9 の交通容量のみ 1,800 [台/h] とした. 互いに合流するリンクがともに渋滞している場合の合流比率は原則として 1:1 に設定し, リンク No.1 とリンク No.2 の合流比のみ 3:7 に設定した. なお, ベースエリアと周辺リンク群を併せた範囲を制御対象エリアとする.

### (2) 流入制御アルゴリズム

本検証では, 制御交通量を式(8)にて算定する. なお, 流入制御を行う際の制御目標となる最適集計交通密度  $K_c$  は, 4 章で述べた通り, 全てのリンクが臨界状態である場合の集計交通密度をもって設定した. また, 制御の単位時間  $T$  を 5 分とした.

$$N_l(t) = q_l(t-1) \times \left[ 1 + \frac{\sum_{i \in B} q_i(t-1) \Delta T - \{K(t-1) - K_c\} - \sum_{i \in A} q_i(t-1) \Delta T}{\sum_{i \in C} q_i(t-1) \Delta T} \right] \quad (8)$$

$N_l(t)$ :  $t$  番目時間帯における制御リンク  $l$  の制御交通流率 (台時)

$q_i(t)$ :  $t$  番目時間帯におけるリンク  $i$  の交通流率 (台時)

$K(t)$ :  $t$  番目時間帯終了時の集計交通密度 (台/エリア)

A : 流入リンクの集合

B : 流出リンクの集合

C : 制御リンクの集合

### (3) 制御が有効に機能する交通状況 (領域) の場合

周辺リンク群の総延長を 3,000m とし表 1 に示す OD を発生させた場合, 制御実施時間中には概ね領域 の交通状態を示していた. 同設定で, エリア流入制御を実施した場合および実施しない場合の 5 分集計の集計 QK 値を図 7 に示す. 図より, エリア流入制御の実施により, 集計交通密度が最適集計交通密度付近を維持し, 高い集

表1 OD交通量(ケース)

最初の2時間

OD	4	5	6	計
1	600	0	3000	3600
2	1600	0	400	2000
3	1600	0	400	2000
計	3800	0	3800	7600

単位[台/時間]

次の2時間

OD	4	5	6	計
1	333	0	1667	2000
2	240	0	60	300
3	240	0	60	300
計	813	0	1787	2600

単位[台/時間]

表2 総旅行時間の比較(領域)

	総待ち時間	総走行時間	総旅行時間
制御なし	3582	7246	10828
制御あり	2726	3334	6060

単位[時間]

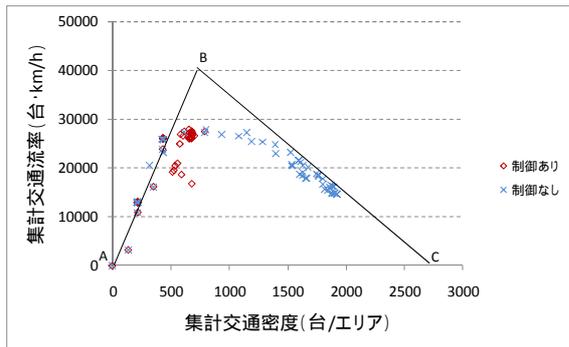


図7 制御による集計QK関係の変化(領域)

表3 OD交通量(ケース)

OD	4	5	6	計
1	800	0	1600	2400
2	1200	800	400	2400
3	1200	2000	400	3600
計	3200	2800	2400	8400

単位[台/時間]

表4 総旅行時間の比較(領域)

	総待ち時間	総走行時間	総旅行時間
制御なし	37105	15843	52948
QK制御	39213	15527	54740

単位[時間]

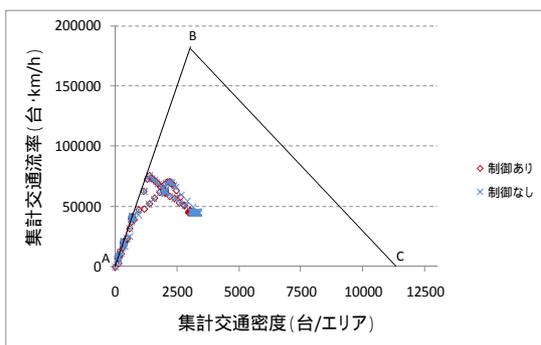


図8 制御による集計QK関係の変化(領域)

計交通流率が実現されていることが確認できる。また、シミュレーションで発生させた全車両の総旅行時間を表2に示す。表では、エリアに流出することが出来ずランプに待機していた時間(総待ち時間)と、エリア内での移動に要した時間(総走行時間)とに分けて記す。結果、流入制御の実施により、総待ち時間(約35%)、

総移動時間(約64%)、総旅行時間(約40%)いずれも大幅に減少しており、流入制御が混雑緩和効果を有することが示された。

(4) 制御が有効に機能しない交通状態(領域)の場合次に、同様に領域の状態を意図的に作り出して検証を行う。不等式(6)、(7)より、渋滞側に属する周辺リンク群の取り得る最大の集計交通流率  $Qc_2$  の、ベースエリアが取り得る最大の集計交通流率  $Qa$  に対する比率が大きくなるほど、制御が有効となる領域が狭くなることからわかる。そこで、 $Qc_2$  が  $Qa$  に対して大きくなるように、周辺リンク群のリンク長を41400mとすることで、制御開始前30分間の平均値において、領域に相当する交通状態を作り出した。設定したOD交通量を表3に示す。ODは4時間にわたり発生させた。エリア流入制御実施の有無別5分集計の集計QK値を図8に、全車両の総旅行時間を表4に示す。これらの結果より、流入制御によりエリア内の総走行時間はわずかに減少するものの、それ以上にエリア外で待たされる時間が増加するため、制御の実施によって総旅行時間が微増することが確認された。紙面の関係上割愛するが、領域に属する交通状態で同様の検証を行った場合も、同様に制御が有効に機能しないとの結果を得ている。

これらの結果より、図6に示した領域による判定方法によって制御の有効性を判断できる可能性があることが示された。

## 5. おわりに

本研究では、エリアの大きさと交通量レベルに着目し、エリア流入制御が有効に機能する条件を導出した。また、シミュレーション解析を通じて条件の妥当性を支持する結果を得た。今後は、一般街路を含めた道路ネットワークでの分析を進めていきたい。

北村隆一教授におかれましては、H21年2月にご逝去されました。ここに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。また、本研究を進めるにあたっては、阪神高速道路株式会社、情報システム部・情報企画グループの方々から貴重なデータを、大藤武彦氏には貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐佐木綱, 明神証; 都市高速道路網における流入車制御理論, 交通工学, Vol.3, No.3, pp.8-16, 1968.
- 2) 吉井稔雄, 塩見康博, 孫瀟瀟, 北村隆一; 集計QKを用いたエリア流入制御手法, 第37回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2008.
- 3) 米澤悠二, 吉井稔雄, 北村隆一; 集計QKを用いたエリア流入制御の実施効果検証, 第38回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2008.
- 4) Geroliminis N. and Daganzo C.F.; Macroscopic modeling of traffic in cities, 86<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C. 2007.
- 5) 吉井稔雄・桑原雅夫・森田緯之; 都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol. 30, No.1, pp.33-41, 1995.