

集計QKを利用した ランプ流入制御手法の有効性評価

吉井稔雄¹・松本洋輔²・高山雄貴³・前原慎也⁴

¹正会員 教授 愛媛大学環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)
E-mail:yoshii@cee.ehime-u.ac.jp

²非会員 四国旅客鉄道株式会社
E-mail: baseballmori1@gmail.com

³正会員 助教 愛媛大学環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)
E-mail:takayama@cee.ehime-u.ac.jp

³非会員 学生 愛媛大学環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)
E-mail:maehara@cee.ehime-u.ac.jp

本稿では、高速道路ネットワークを対象とし、定点観測による観測値の獲得を実施要件とするランプ流入制御手法の有効性を検証する。検証では、オンランプ入口における一部車両の一般道路への経路変更挙動も考慮したシミュレーション解析を行い、高速道路ネットワークにとどまらず、一般街路への影響も考慮した上での評価を行った。その結果、提案した制御の実施が、高速道路ネットワークの円滑性を向上させるとともに、高速道路への流入台数を増加させ、一般道路の交通量を減少させる、すなわち、高速道路のみに留まらず一般道路ネットワークの混雑緩和効果をも有するとの結果が得られた。

Key Words : Ramp Metering, Network, Macroscopic Fundamental Diagram

1. はじめに

交通流の円滑性向上を目的に、様々なランプ流入制御手法が提案されている。

他のボトルネックとの相互干渉のない単一のボトルネック箇所あるいはボトルネック道路区間を対象として、同区間における高い交通流率の実現を図る制御アルゴリズムに関しては、Zhangら¹⁾によるニューラルネットワークを用いた制御アルゴリズム、あるいはPapageorgiouら²⁾によるゾーン制御モデルALINEAなど、多数の研究成果が報告されるとともに、Minnesota州やParisなどの欧米の高速道路ネットワークにおいて実用に供されている。

一方、相互干渉する多数のボトルネックを含む道路ネットワークを対象として、佐々木ら³⁾はLP型ランプ流入制御手法を提案した。同手法は高いネットワーク流動性を確保しうる優れた手法であるが、精度の高い予測OD交通量を必要とすることから、これまで複数の改良モデルが提案されているものの、実用化には至っていない。

そこで、米澤ら⁴⁾は、制御の実用化を視野に入れ、OD交通量の獲得を要件とすることなく、交通密度のみ

の管理で実行可能な「集計QK制御」を提案し、シミュレーション解析によりその制御効果を示した。さらに、遠藤ら⁵⁾は路線状か面的な広がりを持つかといったネットワーク形状、ならびに単一ボトルネックか複数ボトルネックかとのボトルネック数の差異に着目してネットワークを類型化し、各ネットワークに同制御を適用した際の制御効果について調べた。その結果、面的な広がりを持ち、かつ相互に干渉するボトルネックを含む道路ネットワークに対して、集計QK制御が有効に機能することを示すとともに、路線状のネットワークなど同条件を満足しない道路ネットワークでは制御効果を獲得することが出来ないとの知見を得た。そこで、集計QK制御が有効に機能しない路線状道路ネットワークにおいて、「ローカルLP制御」が提案されている。同手法も、予測データの獲得を必要としない流入制御手法である。ただし、その概念はLP型流入制御手法と同様で、LP型流入制御をオンランプ単位で局所的に実施する流入制御手法であり、一定の条件を満たす路線状道路ネットワークにおいて有効に機能する事が示されている。しかし、これら2つの制御は、単独で実施した場合の効果は確認されているものの、両制御を組み合わせた場合の効果の検証は行われていない。

そこで、本稿では、観測値の獲得を実施要件とするランプ流入制御の実用化を目的とし、面的な広がりを持つ道路ネットワーク部に対して集計 QK 制御を、その他の路線状道路ネットワーク部に対してはローカル LP 制御を適用した組み合わせ制御を提案する。そして、交通流シミュレーションを用いて、制御実施による円滑性向上効果を検証する。さらに、シミュレーションでは、制御または混雑状況により、オンランプ入口で高速道路の利用を断念し、一般道路へと経路を変更する車両の行動を取り扱う、言い換えれば、制御実施による高速道路への流入台数の増減について評価する。

2. 流入制御手法

本稿では、集計 QK 制御とローカル LP 制御を組み合わせたランプ流入制御手法を提案する。

集計 QK 制御は、複数リンクから構成される道路ネットワークエリア内に存在する車両台数を事前に設定した台数に維持することを目標として同エリアへの流入交通量を調節する制御である。一方のローカル LP 制御は、ランプ接続部直下流の本線が渋滞している場合に、当該オンランプでの流入交通量を制限し、渋滞のランプ部上流への延伸を回避する制御である。詳しくは著者らによる先行研究⁶⁾を参照されたい。

3. シミュレーションを用いた有効性検証

(1) シミュレーション概要

本稿では、交通流シミュレーションSOUND⁷⁾を用いたシミュレーション解析を行う。SOUND⁷⁾は、各リンクに QK 関係を設定し、そこから導かれる車両速度-車頭距離関係に従ってスキヤニングタイムインターバル毎に個々の車両をネットワーク上で移動させるシミュレーションモデルである。図1に示すように、各リンクの QK 関係は、交通容量値を唯一のパラメータとし、自由流側曲線に原点を始点とする傾き 60km/h の線分、渋滞流側曲線は傾き -20km/h の線分として設定した。

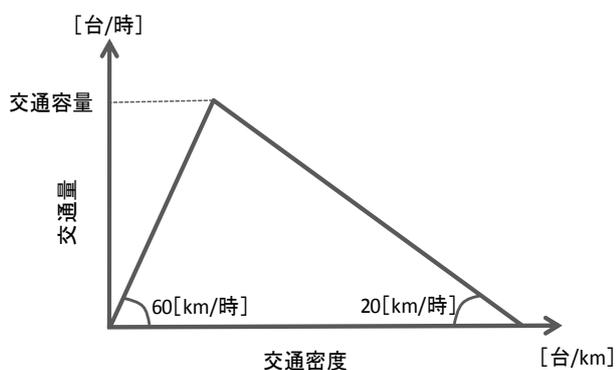


図1 各リンクに設定した QK 関係

a) 入力条件の設定

シミュレーションは、起終点調査結果と検知器情報に基づいて推定された OD データを用い、2008年5月22日の午前5時～正午の1時間単位の OD 交通量を対象に実行した。総発生車両台数は268,928台であった。

対象とするネットワークは、7号北神戸線、8号京都線、31号神戸山手線、湾岸垂水線を除く阪神高速道路ネットワーク(図2)である。なお、図中赤で示したリンクは集計 QK 制御の対象エリアで、環状線と放射線状各路線の一部から構成されるネットワークとした。また、高い制御効果を発現する交通混雑状態が発生しなかったことから、7:30～9:00の間、図に示すリンク(青矢印)の容量を半分とし、シミュレーションを実行した。集計 QK 制御対象エリアのオンランプ群に対しては集計 QK 制御を、同エリア外に位置する残り全てのオンランプに対してはローカル LP 制御を実施する。制御の単位時間は、集計 QK 制御、ローカル LP 制御共に5分とする。なお、本稿によるシミュレーション解析では、本線上での流率制御実施は想定していない。

集計 QK 制御の実施に際しては、制御パラメータとして最適集計交通密度の設定が必要となる。本分析では、制御対象エリア内の全リンクが臨界状態である場合の集計交通密度値を算定し、 $K_c=1,374$ (台/エリア) とした。

ローカル LP 制御は、オンランプ下流側リンクに渋滞が発生した場合に実施する。5分間平均速度が 57.6km/h を下回った場合に渋滞と判定する。なお、制御を実施する場合の制御流入交通量を一律 0、すなわち本分析では流率管理は実施せず、ランプ閉鎖または解放のいずれかを選択する制御を想定する。

その他のシミュレーション詳細については先行研究⁶⁾を参照されたい。

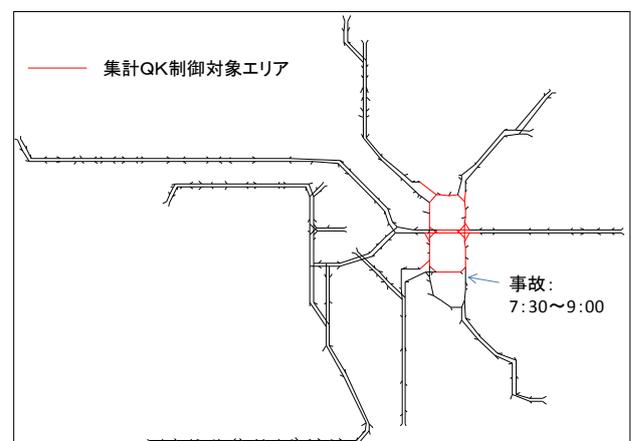


図2 対象とした阪神高速道路ネットワーク図

b) 一般道路への経路変更行動

本稿では、制御または混雑を原因として、オンランプ

において一般道路へ経路を変更する車両の行動をモデルで取り扱う。この経路変更の判定は、各車両が発生ノードにおいて発生する際に行う。なお、発生ノードはオンランプを表現するリンクの始点に位置する。シミュレーションでは、制御実施または本線上の渋滞を原因として、シミュレーション内の道路ネットワーク上に出現する余地のない車両が発生することがあり、これらの車両は発生ノードに滞留する。本分析では、この滞留車両台数が10台に達している場合、11台目に滞留することになる車両は一般道路へ経路変更するものとして取り扱う。一般道路へ経路変更した車両は、一般道路を利用して目的地に向かう、あるいは一般道路走行後に近隣のオンランプから再び高速道路へ流入して目的地へ到達する等の様々な行動をとると考えられるが、本分析では、再び高速道路を利用することはなく一般道路のみを利用して目的地に到達するものと仮定する。

このとき、一般道路へ経路変更した個々の車両の旅行時間は、阪神高速道路本線上のOD間距離をH17年道路交通センサデータ（平日・大阪府全域・一般道路計）の混雑時旅行速度である20.6km/hで除して算出する（式(1)）。

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{20.6} \quad (1)$$

ただし、

T : 一般道路へ経路変更した車両の総旅行時間（時間）

d_i : 車両*i*の高速道路本線ランプ間距離（km）

n : 経路変更した車両台数（台）

とする。

c) オンランプ閉鎖に関する制約

本分析では、実用化を見据えて、容易に実施できる閉鎖／開放の2パターンでの制御を想定すると共に閉鎖オンランプ数と閉鎖時間ならびに開放時間に関する制約条件を設けた制御を実施する。

閉鎖時間ならびに開放時間に関する制約条件として、連続閉鎖時間の上限值ならびに開放後の連続開放時間の下限値を設定する。集計QK、ローカルLPの両制御共に各オンランプの連続閉鎖時間の上限值を60分とし、開放後の連続開放時間の下限値は、直前時間帯の連続閉鎖時間分とする。例えば、ローカルLP制御において、閉鎖開始から20分経過した際にオンランプ下流リンクが自由流になった場合は、その時点で制御を終了し、その後、最低20分は開放するといった制御を実施する。しかし、同リンクが長時間渋滞流であった場合には、60分毎に閉鎖と開放が繰り返される。

続いて、集計QK制御において、閉鎖オンランプ数に関する制約条件を設ける。以下、同時に閉鎖するオンランプ数（以下、「同時閉鎖オンランプ数」）を集計QK制御対象の全オンランプの半数までとする制限を設ける。

ここで、制御オンランプの選定方法を定める必要が生じる。そこで、制御オンランプは前時間帯におけるオンランプ直下流の平均速度、同オンランプリンクの交通量等、オンランプ周辺の交通状態に基づいて選定することとする。具体的には、より多くの車両を制御することでエリア内の密度をより早く減少させることを目的に、前時間帯における5分間交通量が多いリンクを選定するものとする。なお、閉鎖中のリンクにおいては、設定した連続閉鎖時間の上限值の下で連続閉鎖を実施するものとする。例えば、制御すべき時間が120分、連続閉鎖時間の上限值を60分、開放後の連続開放時間の下限値を前時間帯の連続閉鎖時間分とすると、前半の60分は制御開始時に選定されたリンク群を連続閉鎖し、後半の60分は残りのリンク群を連続閉鎖する。

d) 検証ケース

本分析では、オンランプにおける一般道路への経路変更行動、オンランプ閉鎖に関する制約を考慮し、シミュレーションを実行する。本稿では、3ケースでの検証を行う。全て一般道路への経路変更行動を考慮し、制御を実施しない場合（ケース1）、集計QK制御ならびにローカルLP制御を組み合わせた制御を実施した場合（ケース2）、さらにオンランプ閉鎖に関する制約を設けた組み合わせ制御を実施した場合（ケース3）を想定し、制御の有効性を検証する。

(2) シミュレーション結果

a) 集計QK状態図

図3には、各ケースの集計QK制御対象エリアにおける集計QK状態図を示す。図より、制御を実施しない場合（ケース1）は、集計交通密度が上昇するにつれ、集計交通流率が上昇しているが、最適集計交通密度 $K_C=1,374$ 台付近を境に、集計交通流率が減少に転じていることが確認できる。

組み合わせ制御（ケース2）を実施した場合は、制御なしの場合との比較において、低い集計交通密度かつ高い集計交通流率が獲得できるとの結果が得られた。しかし、最適集計交通密度1,374台を超える集計交通密度が観測されている。これは、制御リンクである各オンランプリンクの制御交通流率を0に設定しても、制御を実施していない放射線上の本線リンクから多数の交通が環状線に流入する事となり、集計交通密度を最適集計交通密度に保つことが出来ない状況を示すものである。

オンランプ閉鎖に関する制約を設けた組み合わせ制御

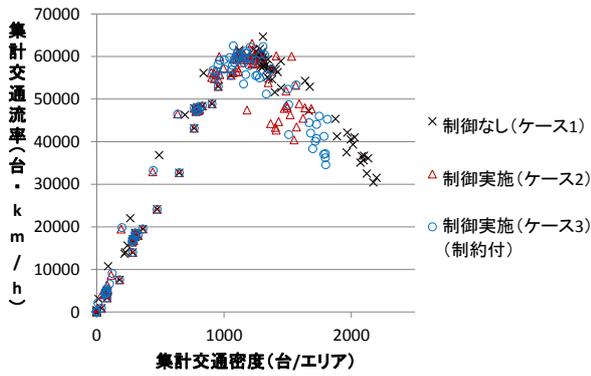


図3 集計 QK 状態図

(ケース 3) を実施した場合においては、制約を設けているため、制約を設けない場合 (ケース 2) との比較において、高い集計交通密度かつ低い集計交通流率が観測されている。それでも、制御を実施しない場合との比較においては、高い集計交通流率が観測されている。

b) 総旅行時間

表 1, 図 4 に各ケースの総旅行時間を示す。ここでの総旅行時間とは、ランプ部発生ノードにおける全車両の待ち時間の和を示す「総待ち時間」と、道路ネットワーク上に出現してから目的地に到達するまでの全車両の走行時間の和を示す「高速道路の総走行時間」と一般道路へ経路変更した全車両の走行時間の和を示す「一般道路の総走行時間」で構成されるものである。組み合わせ制御を実施した場合 (ケース 2) は、制御を実施しない場合 (ケース 1) と比較して、高速道路、一般道路共に旅行時間が減少し、総旅行時間では 26%減少するとの結果が得られた。オンランプ閉鎖に関する制約を設けた制御を実施した場合 (ケース 3) の総旅行時間は、制約を設けない場合 (ケース 2) には及ばないものの、制御を実施しない場合 (ケース 1) と比較すると 16%減少するとの結果が得られた。

c) 制御リンク数の時間推移

制御を実施した場合 (ケース 2) , オンランプ閉鎖に関する制約を設けた制御を実施した場合 (ケース 3) の制御リンク数の時間推移をそれぞれ図 5, 図 6 に示す。両図は、集計 QK 制御, ローカル LP 制御における 5 分間の制御リンク数の時間推移を示しており、横軸に示す時刻の直前 5 分間における閉鎖オンランプ数を表している。

両図から、両ケース共に、ローカル LP 制御は 7 時 10 分に、集計 QK 制御は 7 時 40 分に制御が開始され、突発渋滞が発生した 7 時半以降、急激に制御リンク数が増加していることが確認できる。また、ケース 3 の集計 QK 制御においては、同時閉鎖オンランプ数の上限値を

表 1 総旅行時間

	ケース1	ケース2	ケース3
	制御なし	制御実施	制御実施 (制約付)
ランプ部の総待ち時間 (時間)	363	264	291
高速道路の総走行時間 (時間)	135,293	100,840	112,648
一般道路の総走行時間 (時間)	9,014	5,819	7,881
総旅行時間 (時間)	144,670	106,923	120,820
制御なしからの合計旅行時間の減少率		26%	16%

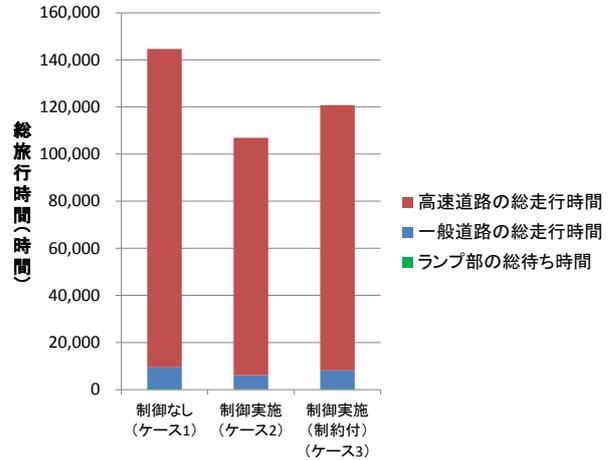


図 4 総旅行時間

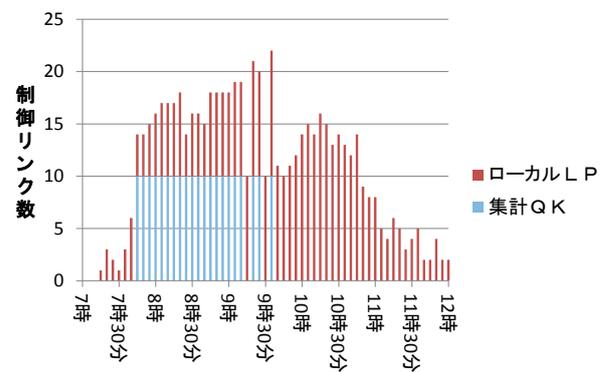


図 5 組み合わせ制御実施時 (ケース 2) における制御リンク数の時間推移

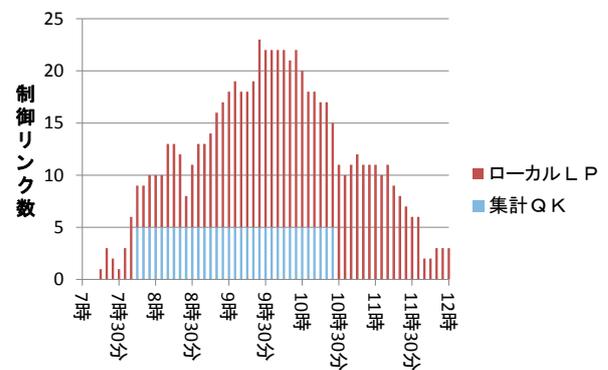


図 6 組み合わせ制御 (制約付) 実施時 (ケース 3) における制御リンク数の時間推移

設けているため、制御リンク数が、集計 QK 制御対象リンク全 10 リンクの半数で 5 リンクとなっている。

オンランプ閉鎖に関する組み合わせ制御を実施した場合（ケース 3）における集計 QK 制御の実施時間帯は、ケース 2 との比較において、長時間に及んでいることが見てとれる。これは、ケース 2 と比較してオンランプ閉鎖に関する制約を設けているために、制御対象エリアへの流入台数が増加し、エリア内の集計交通密度が制御終了を判定する集計交通密度 K_E を下回る時間が遅れたことを示している。

また、9 時 30 分のローカル LP 制御における制御リンク数を見ると、ケース 2 では 10 本であるのに対し、ケース 3 では 17 本となっている。これは、オンランプ閉鎖に関する制約を設けていないケース 2 の集計 QK 制御が、制約を設けているケース 3 の制御よりも有効に機能し、環状線から放射線上りの上流方向に延伸する渋滞が軽減されたことを示している。

d) 総旅行時間の時間推移

図 7 に各ケースにおける 30 分単位の出発時間帯別の総旅行時間の時間推移を示す。

いずれのケースも、制御を実施しない場合と比較して、制御実施によって全ての時間帯の総旅行時間が減少するとの結果が得られた。また、オンランプ閉鎖に関する制約を設けた制御を実施した場合には（ケース 3）、制約を設けない場合（ケース 2）と比較して、全ての時間帯において総旅行時間が増加するとの結果が得られた。さらに、制御を実施した両ケースにおいて、突発事象が発生し制御が開始された 7 時台よりも、一定時間が経過した時間帯において大きな旅行時間短縮効果が得られていることが確認できる。これは、流入制御の実施がネットワークの流動性を高めることから、制御実施開始直後に高速道路を利用する交通に対してよりも、制御開始から一定の時間が経過した後に高速道路を利用する交通に対してより大きな時間短縮効果をもたらしていることに他ならない。

e) 高速道路における総走行台キロの時間推移

図 8 に各ケースにおける高速道路本線の走行台キロの時間推移を示す。各プロットは、30 分単位の集計値を示している。

制御を実施しない場合は（ケース 1）、突発事象が発生した 7 時半以降大幅に走行台キロが減少している。対して、組み合わせ制御を実施した場合（ケース 2）には、走行台キロの減少が小さく抑えられている。また、オンランプ閉鎖に関する制約を設けた制御を実施した場合（ケース 3）においては、制約を設けない場合（ケース 2）ほど高い走行台キロを維持する事が出来ていないも

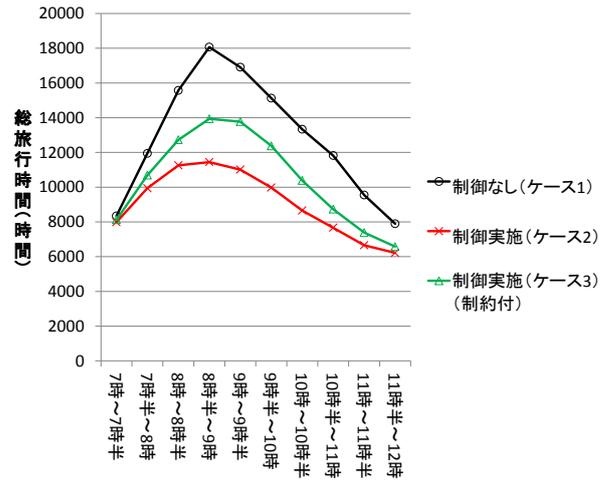


図 7 総旅行時間の時間推移

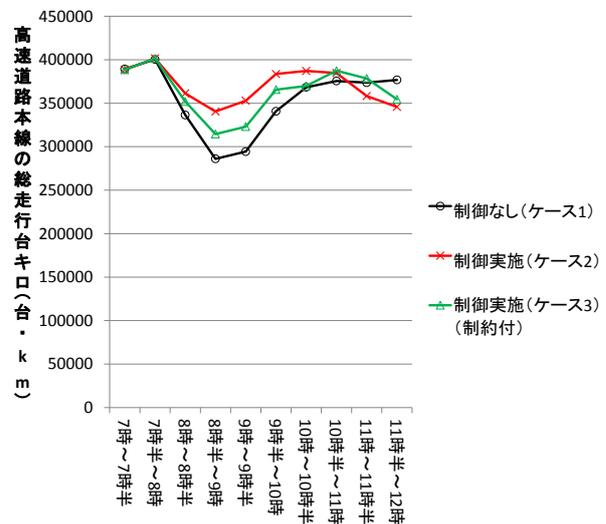


図 8 高速道路本線における走行台キロの時間推移

の、制御を実施なしの場合との比較では、高い走行台キロが維持できるとの結果を得た。

なお、11 時半～12 時において、制御を実施する両ケースの値が、制御なしの場合と比較し低下している。これは、制御を実施する場合には、制御なしの場合と比較して、早い時点で多数の交通が目的地に到着できることから、ネットワーク上に残存する交通が減少したことを反映したものである。

f) 各道路の利用台数

表 2、図 9 に各ケースにおける高速道路への流入台数ならびに一般道路へ経路変更した車両台数を示す。組み合わせ制御を実施した場合（ケース 2）は、高速道路への流入台数が、制御を実施しない場合（ケース 1）と比較して 2,778 台増加するとの結果が得られた。また、オンランプ閉鎖に関する制約を設けた組み合わせ制御を

表 2 各道路の利用台数

	ケース1 制御なし	ケース2 制御実施	ケース3 制御実施 (制約付)
高速道路(台)	259,013	261,791	259,398
一般道路(台)	9,915	7,137	9,530
制御なしからの 高速道路への流入台数の増加分(台)		2,778	385

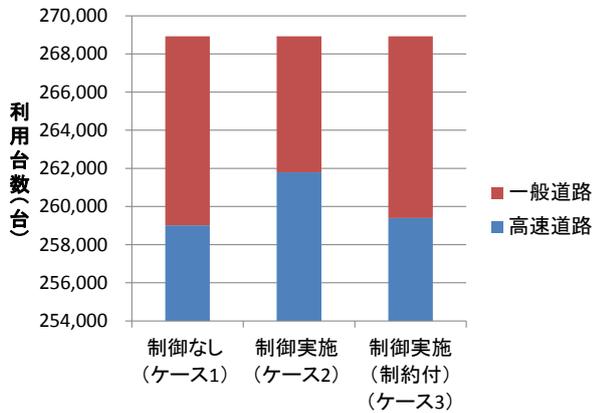


図 9 各道路の利用台数

施した場合 (ケース 3) には、高速道路への流入台数が 385 台増加するとの結果が得られた。

同結果は、高速道路への流入を制御することが、結果的に一般道路を通行する車両台数をも減少させることを示している。すなわち、オンランプにおける流入制御は、高速道路の流動性を高めることにより、高速道路、一般道路、両者の交通状況を共に改善する可能性を有する制御であることが示された。

g) 経路変更台数の時間推移

図 10 に各ケースにおいて一般道路へ迂回した車両台数の時間推移を示す。各プロットは 30 分単位の集計値を示している。

図より、制御を実施しない場合 (ケース 1) は、突発事象が発生した 7時半以降、大幅に迂回台数が増加していることが確認できる。対する組み合わせ制御を実施した場合 (ケース 2) には、制御を実施しない場合と比較して、7 時台の制御開始直後は、迂回台数が急激に増加し、制御なしの状況よりも大きな値を示しているが、一定の時間が経過すると、その迂回台数の増分を相殺する迂回台数の減少が見られる。また、オンランプ閉鎖に関する制約を設けた制御を実施した場合 (ケース 3) においても、制御開始直後に迂回台数が制御なしの状況よりも大きくなる。しかしながら、10 時半以降においては、迂回台数が減少して制御なしの状況よりも小さな値を示している。

これらの結果は、制御なしの場合と比較して、制御開

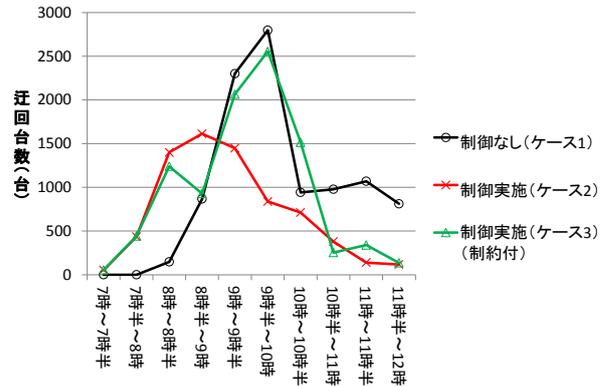


図 10 迂回台数の時間推移

始直後においては制御オンランプ利用交通への悪影響を与える事が避けられないが、一定時間が経過すると制御オンランプ利用交通に対しても、正の影響を与えるというランプ流入制御の特性を示すものである。

4. まとめ

本稿では、一般道路への経路変更行動を考慮したシミュレーション解析を通して、観測値のみを実施要件とする高速道路ランプ流入制御の有効性を検証した。

検証の結果、提案した制御の実施が、高速道路ネットワークの円滑性を向上させるとともに、高速道路への流入台数を増加させるとの結果が得られた。ここで、高速道路流入台数の増加は、一般道路の交通量減少と同値である。すなわち、同制御の実施が、高速道路のみに留まらず一般道路ネットワークの混雑緩和効果を有するとの結果が得られた。ただし、本稿で得られた結果は、その一般性を示したものではないことから、ネットワークの交通状況によっては効果が発現しない可能性もある。

そこで、集計 QK を利用したランプ流入制御が効果を発現する条件を示すこと、ならびに経路変更の際のドライバー行動を高精度に記述する経路選択モデルを開発してシミュレーションに取り込むことを今後の課題としたい。

最後に、本研究をすすめるにあたっては、阪神高速道路株式会社より貴重なデータをご提供いただきました。

またシミュレーションパラメータの設定に際しては、(株)交通システム研究所の大藤武彦氏、同小澤友記子氏、(有)都市未来の土田貴義氏に多大なご支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) H. Zhang, S.G. Ritchie and W.W. Recker, Some general results on the optimal rampcontrol problem, Transpn Res. part C, Vol. 4, No.2, pp. 51-69, 1996.

- 2) M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem and F. Middelham, ALINEA local ramp metering -summary of field results, Transportation Research Record 1603, TRB, 1997.
- 3) 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.
- 4) 米澤悠二，吉井稔雄，北村隆一：都市内高速道路における集計 QK エリア流入制御の実施効果検証，第 29 回交通工学研究発表会論文報告集，pp181-184, 2009.11
- 5) 遠藤皓亮・吉井稔雄・藤井聡：ネットワーク形状と交通状況に適応したランプ流入制御手法,土木計画学研究発表会・講演集 (CD-ROM) ,2010.
- 6) 松本洋輔・吉井稔雄：集計 QK ならびにローカル LP を組み合わせたランプメータリング制御の提案，第 31 回交通工学研究発表会論文集(CD-ROM),2011.
- 7) 吉井稔雄・桑原雅夫・森田綽之：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,No1,pp33-41, 1995