

ランプ流入制御とVMSによる情報提供を 組み合わせたインシデント時の 交通マネジメントのための基礎分析

目黒 謙一¹・日下部 貴彦²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-20)
E-mail:k.meguro@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学助教 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-20)
E-mail:t.kusakabe@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-20)
E-mail:asakura@plan.cv.titech.ac.jp

都市高速道路における交通流のマネジメントには、流入制御などの供給側の施策と、情報提供などの需要側に働きかける施策がある。本研究では、突発事象発生時の都市高速道路の放射路線を想定し、ランプでの流入制御と路側でのVMS等での情報提供を組み合わせたマネジメント施策を検討するための基礎分析を行う。並行一般道と都市高速道路のオン・オフランプでの車両の分岐率に着目し、待ち行列の発生箇所を簡易なモデルで表現した。交通流シミュレーションによる分析により、分岐率と待ち行列の発生箇所及び総旅行時間の関係性を示すことができた。ボトルネック状態を簡易なモデルで表現し、その挙動を調べることで、インシデント時の交通流マネジメント戦略を検討できる可能性を示した。

Key Words: 交通流マネジメント, 突発事象, 流入制御, 情報提供, ボトルネック

1. 背景と目的

都市高速道路の交通渋滞の軽減を目的とした道路管理者による利用者への働きかけとして、オンランプでの流入制御と高速道路上の可変情報板(VMS)による情報提供は非常に重要な役割を果たし得る。特に、流入制御は、世界各地で交通マネジメント施策としての検討・導入がなされている¹⁾。また、突発事象の発生時には普段と異なる交通状態が発生することから、より効率的な交通流の状態を維持するには、それらのマネジメント施策は重要となるだろう。

流入制御手法の一例として、Papageorgiouら²⁾のALINEAでは、パリとアムステルダムにおける実証実験³⁾の結果、制御による総旅行時間の減少と総走行台キロの増加が示されている。国内の事例としては、吉井ら⁴⁾によって集計QK関係を用いた流入制御(MFDメータリング)が提案され、阪神高速道路のネットワークを対象としたシミュレーションにおいて総旅行時間が減少することを示している。

情報提供の効果を検証した事例として、Arnottら⁵⁾は、

情報提供が利用者の経路選択に影響を与えていることを示すと同時に、全員が提供された情報に従う形で意思決定を行った場合に系全体での旅行コストを増大させることを示唆した。大口ら⁶⁾は、東名高速下り線57.93kp-77.66kpに存在する2ルート並行区間の交通流観測結果をもとに、VMSに表示される双方のルートの渋滞長の差と利用者の経路選択比率の間に存在する正の相関関係をモデルに組み込むことで、情報提供の結果としての旅行コストの増加をシミュレータ上の現況再現により示した。

流入制御や情報提供が交通ネットワークフローに及ぼす影響を評価する指標として、総旅行時間や単位時間の総走行台キロがあるが、流入制御や情報提供を行う際には需要の変動等があることから、事前に制御後の総旅行時間を把握して制御を実施することは容易ではない。既往の研究で用いられているALINEAや集計QKによる制御方法では、制御実施後の総旅行時間を予測して制御を行うかわりに、トラカン等で観測可能な時間占有率などの指標を用いて流率の維持を行い、結果として総旅行時間や単位時間の総走行台キロの改善を行っている。しかし、これらの既往の方法では、制御対象のランプと流率

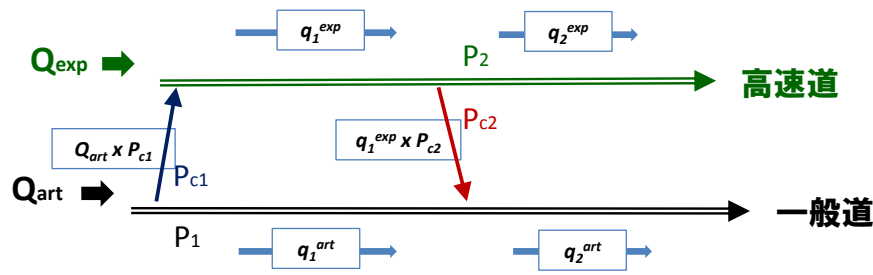


図-1 高速道路・一般道の並行区間を想定した仮想ネットワーク
(q_i : 区間 i における単位時間あたりの交通量)

の低下箇所との関連を明示的に扱って制御を行うものとはなっていない。オンランプでの流入制御だけでなく、オフランプ手前のVMS等を利用した情報提供を組み合わせた一元的な交通マネジメントを行う際にも、相互の影響を考慮した流率のマネジメント戦略が必要とされるだろう。

そこで、本研究では、並行一般道を有する都市高速道路の放射路線を対象とし、流入制御と情報提供がオンランプ、オフランプの選択率に影響を与えるという想定のもと、渋滞の発生地点となるボトルネックの箇所が総旅行時間に与える影響を示すことを目的とする。本研究では、流入制御や情報提供によるオンランプ、オフランプでの分岐率の違いによる待ち行列の発生箇所を記述した簡易なモデルを構築し、モデルで推定された待ち行列発生地点と総旅行時間の関連性について、仮想ネットワークを対象としたシミュレータによる解析結果として示す。

2. ボトルネック状態の概要とその定義

本研究では図-1に示す並行一般道を有する都市高速道路放射部を想定する。(1)では、ネットワークの定義を述べる。(2)では、ネットワークの流入台数が一定のとき、制御等でオンランプ、オフランプで一定の分岐率が達成された時の待ち行列の発生箇所を簡易なモデルで記述し、ボトルネック状態を定義する。

(1) 想定するネットワーク

図-1に示すように、並行一般道からのオンランプが一カ所と高速道路からのオフランプが一カ所あるネットワークを想定する。並行一般道を有する都市高速道路での突発事象発生時には、高速道路利用者は、VMS等の情報によって渋滞列に巻き込まれないために並行一般道への経路変更を行うものと考えられる。また、道路管理者は、高速道路上の渋滞を悪化させないためにオンランプでの流入制御を実施することがある。このようなネットワー

クでは一般に、交通流率の低下はボトルネック部から延伸した渋滞列によってもたらされるが、渋滞の原因となっているボトルネックの箇所によって待ち行列延伸の挙動は異なり、流率の低下によりボトルネック容量を必ずしも効率的に使い切れないことが想定される。このことから、マネジメント施策によって渋滞の原因となるボトルネックの箇所をマネジメントすることができれば、総旅行時間や単位時間あたりの総走行台キロの改善に寄与し得ると考えられる。

高速道路と並行一般道の交通容量を、それぞれ C^{exp} と C^{art} で表し、高速道路と並行一般道の最下流部には、それぞれ $C_{BN}^{exp} \leq C^{exp}$ かつ $C_{BN}^{art} \leq C^{art}$ を満たす容量 C_{BN}^{exp} 、 C_{BN}^{art} のボトルネックの存在を仮定する。また、ネットワークへの流入台数は、時刻によって変化せず一定と仮定し、高速道路最上流部からの流入交通量を Q_{exp} 、並行一般道への流入交通量を Q_{art} とする。なお、このネットワークでは、

$$C_{BN}^{exp} + C_{BN}^{art} \leq Q_{exp} + Q_{art} \quad (1)$$

の状況では、必ず一カ所以上で渋滞が発生する。

(2) ボトルネック状態の定義

(1)で定義したネットワークでは、流入交通量(Q_{exp} , Q_{art})の組が与えられたとき、各リンクへの流入交通量は、オンランプでの分岐率 P_1 (%)とオフランプでの分岐率 P_2 (%)を与えることで求めることができる。これらの分岐率(P_1 , P_2)は、流入制御や情報提供を行うことで操作可能な変数として定義する。このとき、各区間の交通量は、分岐率(P_1 , P_2)を用いて、以下の式(2a)-(2d)として求められる。

$$q_1^{exp} = \min \{C^{exp}, Q_{art} \times \left(1 - \frac{P_1}{100}\right) + Q_{exp}\} \quad (2a)$$

$$q_1^{art} = Q_{art} \times \frac{P_1}{100} \quad (2b)$$

$$q_2^{exp} = q_1^{exp} \times \frac{P_2}{100} \quad (2c)$$

表-1 各ボトルネック状態に対する状態番号の割り当て
(○：待ち行列発生 / ×：待ち行列非発生)

待ち行列の起点	状態番号															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
オフランプ合流部	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
オンランプ合流部	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○
一般道最下流部ボトルネック	×	×	○	○	×	×	○	○	×	×	○	○	×	×	○	○
高速道最下流部ボトルネック	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○

$$q_2^{art} = \min \{C^{art}, q_1^{exp} \times \left(1 - \frac{P_2}{100}\right) + q_1^{art}\} \quad (2d)$$

ここに,

P_1 : オンランプ前後で一般道の利用を継続する車両割合 (オンランプにおける分岐率) (%)

P_2 : オフランプ前後で高速道路の利用を継続する車両割合 (オフランプにおける分岐率) (%)

である.

オンランプ, オフランプ自身の容量制約に起因する待ち行列が発生しないと仮定すると, 渋滞先頭となりうる場所は2箇所の合流部分, 2箇所の最下流部ボトルネックであり, 合わせて4箇所である. このとき, 各ボトルネックでの待ち行列発生の判定は以下によって行うことができる.

1. $q_1^{exp} \times (1 - P_2/100) + q_1^{art} \geq C^{art}$ であるならばオフランプ合流部を先頭とする待ち行列が発生
2. $Q_{art} \times (1 - P_1/100) + Q_{exp} \geq C^{exp}$ であるならばオンランプ合流部を先頭とする待ち行列が発生
3. $q_2^{art} \geq C_{BN}^{art}$ であるならば一般道最下流部ボトルネックを先頭とする待ち行列が発生
4. $q_2^{exp} \geq C_{BN}^{exp}$ であるならば高速道路最下流部ボトルネックを先頭とする待ち行列が発生

以上の4条件は各々の待ち行列発生地点について“発生”または“非発生”を判断するものであるから, ネットワーク全体では $2^4 = 16$ 通りの待ち行列発生地点の組み合わせが存在する. このとき, ネットワークへの流入交通量である(Q_{exp}, Q_{art})と制御変数である分岐率(P_1, P_2)が与えられた場合の待ち行列の発生地点の組み合わせを“($P_1, P_2, Q_{exp}, Q_{art}$)に対するボトルネック状態”と定義し, 各ボトルネック状態に1対1で対応する番号として表-1に示す状態番号を与える. なお $C_{BN}^{exp} \leq C^{exp}$ かつ $C_{BN}^{art} \leq C^{art}$ を仮定していることから, 表-1に状態番号8, 9, 12, 13 で表されるボトルネック状態は実現せず, 実現しうるボトルネック状態は12通りとなる.

3. ボトルネック状態と総旅行時間の関連性分析

本章では, 2章で定義したボトルネック状態と総旅行時間の関連性を示すため, マクロ交通流シミュレータを用いた分析を行う. 分析では, Daganzo^{7), 8)}のCell Transmission Model に基づくマクロ交通流シミュレータを用いて, 流入側, 流出側双方の分岐率(P_1, P_2)に応じた総旅行時間増減傾向を求め, ボトルネック状態と比較する. また, 高速道路最下流部における突発事象発生を想定し, 交通容量 C_{BN}^{exp} が C_{BN}^{exp} に減少した場合のシナリオを複数想定し, 分析を行う.

(1) 分析方法

各分岐率(P_1, P_2)に対するボトルネック状態および総旅行時間の評価は, 図-1で設定したネットワークに区間長の設定を加えた図-2に示す仮想ネットワーク上で行う. 一般道, 高速道路の最下流部には, 他の区間よりも交通容量が小さいボトルネック地点があることを想定している. 区間長は, 一般道, 高速道路で同じとし, オンランプからオフランプまでを1.5km, オフランプからボトルネック部までを3.0kmとしている. 一般道, 高速道路での最下流部のボトルネック以外については, 飽和密度が150(台/km)であるような単路部を想定し, Q-K関係はそれぞれ図-3のように設定した. また, ランプ部の交通流量には制約を設けず, ランプ長を200(m), ランプ部の自由流速度を36(km/時), ランプウェー自体に存在しうる最大の車両台数を30(台)と設定する. また, 最下流部のボトルネック地点での交通容量は, (2)で説明するシナリオ毎に設定する. 流入交通量は全シナリオに対し(Q_{exp}, Q_{art}) = (1800, 1200) (台/時)とし, シミュレーション中は, 時刻によって変化を生じないものとする. また, シミュレータのスキャンインターバルは20秒に設定する. なお, ネットワークの初期状態は, 高速道路・一般道とも飽和状態にあるが, ネットワーク上に一切の待ち行列が生じていない状態を与える.

ボトルネック状態と総旅行時間の関連性の分析では, 時刻 t から $t + \tau$ の流入制御や情報提供の戦略が, 時刻

$t - \tau$ から t の交通流量の観測値に応じて、逐次的に決定されることを想定して分析を行う。このことから、本研究では、流入制御や情報提供によって制御された分岐率(P_1, P_2)が適用される時刻 t から $t + \tau$ までの間にネットワークに流入した車両について、それらの車両がネットワークから流出するまでの総旅行時間を指標として用いる。なお、本論文では更新間隔 τ を5分とし、時刻 t から5分を経過するまでに流入した車両の総旅行時間を用いて分析結果を提示する。先に定めた流入交通量に関する設定より、5分間には、高速道路最上流部から150台、一般道から100台の車両が流入することになることから、結果的に、5分間に流入した250台がネットワークを完全に通過するまでの総旅行時間について分析することとなる。

(2)で説明する各シナリオについて、分岐率(P_1, P_2)をそれぞれ50~100%の1%刻みで与えることにより、シミュレーションを実施し、総旅行時間とボトルネック状態の関係性について分析を行う。

(2) シナリオ設定

分析では、時刻 t に高速道路最下流部ボトルネックで突発事象が生じ、この区間の交通容量が低下した状況を想定して、シナリオを設定する。シナリオ1は、平常時のシナリオとし、総旅行時間の分析対象である時刻 t の後も平常時と同じ交通容量を設定する。シナリオ2~4では、総旅行時間の分析対象である時刻 t より後は平常時より低い交通容量を設定する。なお、これらのシナリオは突発事象に伴う車線の閉塞状況の大小を反映したものであり、シナリオ2は軽度の突発事象(路面清掃・落下物など)を、シナリオ4は車線閉塞を伴う重程度の突発事象(衝突事故など)を想定したシナリオである。

突発事象の表現はマクロシミュレータ上で高速道路最下流部セルの交通容量を低下させることにより与える。以上4つのシナリオについて、流入交通量と交通容量に着目し整理したものを表-3に示す。

(3) 分析結果

ボトルネック状態と総旅行時間との関連性を確認するため、各シナリオに対し、ボトルネック状態を状態番号ごとに色分けしたカラープロットと総旅行時間の等高線図を重ね合わせたものを図-4に示す。図-4のボトルネック状態と総旅行時間の重ね合わせは、各ボトルネック状態に固有の総旅行時間の増減傾向の有無を確認することを意図している。なお、ボトルネック状態のカラープロットは、ある流入交通量(Q_{exp}, Q_{art})を固定したとき、分岐率(P_1, P_2)の組み合わせを変数とみた場合の各ボトルネック状態の分布を $P_1 - P_2$ 平面上に描画したものであり、ネットワーク中の交通容量が全区間で既知であれば、時刻 $t - \tau$ から t までにネットワーク最上流部で観測され

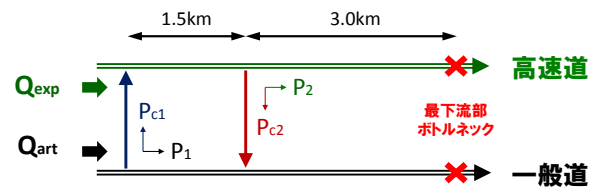


図-2 評価に用いる仮想ネットワークの区間距離設定

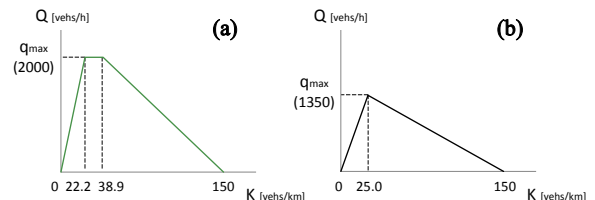


図-3 現況再現シミュレータに設定するQ-K関係

(a) 高速道路 / (b) 一般道

表-3 シナリオごとに与えるパラメータ群

シナリオ番号	1	2	3	4
高速道路流入交通量 Q_{exp} (台/時)			1800	
一般道流入交通量 Q_{art} (台/時)			1200	
高速道路最下流部BN容量 C_{BN}^{exp} (台/時)	1800	1575	1125	675
一般道最下流部BN容量 C_{BN}^{art} (台/時)			1200	

る流入交通量を用いて、時刻 t に一意に求められる。

シナリオ1のシミュレーション結果である図-4(a)では、各ボトルネック状態に、固有の総旅行時間の等高線の傾向があることがわかる。一部のボトルネック状態の境界線上では総旅行時間の等高線が折れ曲がりを生じており、カラープロット上で隣接するボトルネック状態の総旅行時間の降下方向が異なることがあることがわかる。以上のことから、各々のボトルネック状態は、分岐率(P_1, P_2)に対して固有の総旅行時間の増減傾向を有し、待ち行列の発生地点の違いが遅れ時間に与える影響が異なることが示唆されているといえる。

軽度の突発事象時を示したシナリオ2の分析結果である図-4(b)に着目すると、総旅行時間は、待ち行列の発生によりシナリオ1のものより大きくなっていることがわかる。一方で、各々のボトルネック状態が、分岐率(P_1, P_2)に対する総旅行時間の増減について固有の傾向を持つという性質は読み取れる。中程度、重度の突発事象を想定したシナリオ3, 4に基づくシミュレーション結果である、図-4(c), 4(d)では、等高線の折れ曲がりがある他のシナリオでの結果に比べ顕著ではなくなるものの、各々のボトルネック状態に対して総旅行時間の降下方向は一貫性があることが読み取れる。

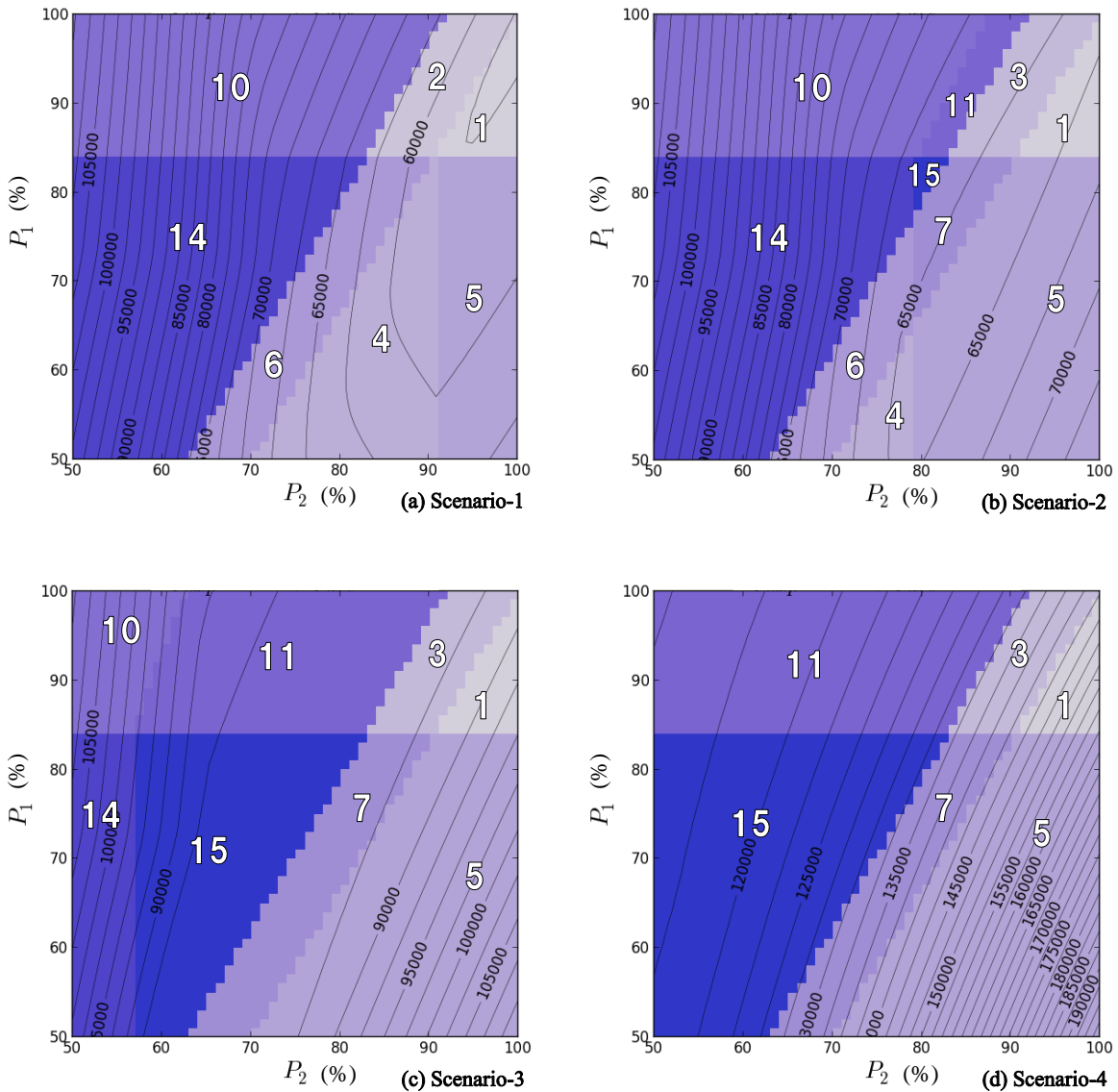


図4 異なるインシデントシナリオに対するボトルネック状態と総旅行時間等高線の重ね合わせ
(等高線の数値は、5分間の流入車両250台の総旅行時間(秒))

(4) 分析結果の考察

平常時を想定した図-4(a)において総旅行時間が最小となる状態番号は1や5であるが、図4(c)、4(d)で示される、容量低下が大きいシナリオに近づくにつれ、総旅行時間が小さい状態番号は7, 11そして15へと遷移していくことがわかる。したがって、いずれの状態にも共通する“最良の状態番号”は存在しないことが予想されるが、一般道・高速道路の双方の最下流部のボトルネックで待ち行列が生じ、ボトルネック容量を使い切っている状態、すなわち状態番号3, 7, 11, 15で表される状態がいずれのシナリオであっても、比較的小さな総旅行時間となっていることが見受けられる。このことは、交通容量の低下が大きいほど、すなわち、式(1)の右辺(流入交通量の総和)

が左辺(交通容量の総和)を大きく上回るシナリオで特に顕著であり、一般道の交通容量を使い切れていない状態番号1, 5や高速道路の交通容量を使い切れていない状態番号6, 10, 14のボトルネック状態では総旅行時間が長くなるが見取れる。また、これらのボトルネック状態では、等高線の間隔が狭いため分岐率(P_1, P_2)のわずかな変化に対して総旅行時間を急激に増大させるリスクが存在し、不安定かつ避けることが望ましい状態であると考えられる。このことより、流入制御と情報提供を組み合わせ分岐率(P_1, P_2)をマネジメントする方策を検討する際には、渋滞発生箇所を検知することで、突発事象等の影響を小さくできるマネジメントが行えることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、並行一般道を有する都市高速道路の放射部を模したネットワークを対象とするシミュレータベースの解析により、オンランプ、オフランプでの分岐率の違いによる待ち行列の発生箇所を記述した簡易なモデルにより推定されたボトルネック状態と総旅行時間の増減傾向の関連性を示した。また、突発事象の発生を組み込んだ複数のシナリオに対して分析を行うことにより、ボトルネック状態と総旅行時間の増減傾向がインシデント時にも関連性を有することを示した。以上の結果から、平常時・インシデント状況下を問わず、ボトルネック状態を検知し、ランプ流入制御とVMS等による情報提供を組み合わせ、オン・オフランプでの分岐率をマネジメントすることで、総旅行時間を小さくする交通状態を達成できる可能性が示された。

参考文献

- 1) Bogenberger, K., May, A. D. : Advanced Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering Strategies, California PATH Working Paper, UCB-ITS-PWP-99-19, 1999
- 2) Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., Blosseville, J. M. : ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering, Transportation Research Record 1320, pp.58-64, 1991
- 3) Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., Middelham, F. : ALINEA Local Ramp Metering: Summary of Field Results, Transportation Research Record 1603, pp.90-98, 1997
- 4) 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
- 5) Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R. : Does Providing Information to Drivers Reduce Traffic Congestion?, Transportation Research Part A, Vol.25A, No.5, pp.309-318, 1991
- 6) 大口敬, 佐藤貴行, 鹿田成則 : 渋滞時の代替経路選択行動に与える交通情報提供効果, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.4, pp.799-804, 2005
- 7) Daganzo, C. F. : The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydro-Dynamic Theory, Transportation Research Part B, Vol. 28B, No.4, pp.269-287, 1994
- 8) Daganzo, C. F. : The Cell Transmission Model: Network Traffic, Transportation Research Part B, Vol. 29B, No.2, pp.79-93, 1995

(2013. ? . ? 受付)

EFFECTS OF TRAFFIC MANAGEMENT ON URBAN EXPRESSWAY FOR TRAFFIC INCIDENT CONGESTION USING RAMP METERING AND INFORMATION PROVISION

Kenichi MEGURO, Takahiko KUSAKABE and Yasuo ASAKURA

Ramp metering and information provision is the major approach to make traffic flow on urban expressways smooth. To propose the future integrated traffic management method especially under incidental condition, this research focuses on the relationship between travel time and “bottleneck status” which represents whether queues are generated or not for each bottlenecks. In this paper, simple model focusing on turning percentage of the traffic at each rampway is introduced to estimate the bottleneck status. Analysis with dynamic traffic simulation on radial road section consists of paralleled urban expressway and arterial reveals that estimation of the bottleneck status based on the model and total travel time have similar tendency corresponding to turning percentage of the vehicles. Result of this analysis implies that the knowledge on bottleneck status and the amount of input flow to the network let integrated traffic management method applicable.