

首都高速道路における集計QKを用いたエリア流入制御の適用に関する研究

割田 博¹・桑原 雅夫²・吉井 稔雄³・稲富 貴久⁴

¹正会員 首都高速道路株式会社 保全・交通部（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1）
E-mail: h.warita1116@shutoko.jp

²正会員 東北大学大学院状況科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3-09）
E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

³正会員 愛媛大学大学院理工学研究科（〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番）
E-mail: yoshii@cee.ehime-u.ac.jp

⁴非会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通政策部（〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1）
E-mail: takahisa.inatomi@ss.pacific.co.jp

首都高速道路網の中心に位置する都心環状線は、都市間高速道路と接続する放射路線から多くの交通が流入する交通の要所である。都心環状線の渋滞は、放射路線を巻き込んだ道路網の機能低下につながるため、その渋滞対策は急務であり、流入制御の実施が既存道路網の機能を有効活用する施策であると考えた。本研究は、「面」に着目した渋滞対策として、都心環状線における集計QK関係を用いたエリア流入制御の適用可能性について検討した。具体的には、都心環状線における交通状況と流入交通量の関係から適切な流入制御箇所および流入制御量を検討し、シミュレーションを用いて、流入制御の効果を円滑性、安全性の観点から検証した。また、流入制御が将来の交通状況に与える影響について、ヒステリシス特性に着目した流入制御効果を検証した。

Key Words : area inflow control, macroscopic fundamental diagram, metropolitan expressway

1. はじめに

首都高速道路（以下、首都高）は路線延長約300km、1日の利用台数100万台以上の大規模な道路ネットワークであり、首都圏の大動脈としての機能を有している¹⁾（図-1）。近年の中央環状線開通（ネットワーク拡充）により渋滞緩和が図られているが、時間的な交通集中や事故等の突発事象を原因とした渋滞の解消には至っておらず、有効な対策を講じる必要がある。新規路線供用や拡幅等のハード的な対策にはコストと時間を要することから、既存路線を有効に活用した渋滞対策が必要であると考えられる。

ソフト的な渋滞対策や交通規制時の渋滞対策として、本線に流入する交通の総量を抑制する入口流入制御や料金所ブース制御等の流入制御手法が有効な対策であると考えられる。流入制御に関するこれまでの研究では、高速道路利用台数が最大となる制御理論によるLP制御手法が提案されている^{2,3)}。同手法は、制御時間帯における精度の高い予測OD交通量が必要とされることや入口で

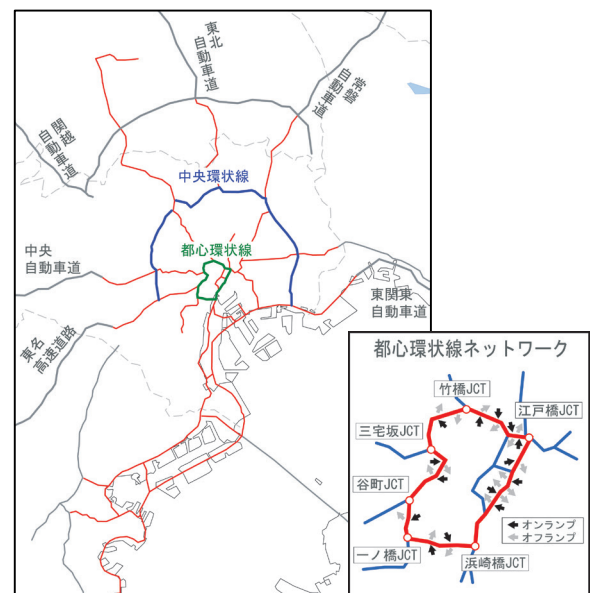


図-1 首都高速道路ネットワーク図

の制御であることによる一般街路へ与える影響等から、未だ研究の域に留まっている。また、一般街路への影響を考慮し、ボトルネック遅れ時間を最小化にするため、

各入口からの最適な流入量を決定するLP制御手法⁴⁾が提案されている。一方、阪神高速道路においては、エリアを対象とし集計QK関係を用いた流入制御手法による研究⁵⁾⁶⁾が報告されており、実用化に向けた期待が高まっているが、シミュレーションにおいて擬似的に交通量を低下させ、流入制御の効果検証を実施しており、交通集中により恒常的に渋滞が発生しているエリアにおける分析は実施されていない。

そこで本研究では、首都高における集計QK関係を用いたエリア流入制御の適用に向けた分析を実施する。具体的には、交通集中渋滞が恒常的に発生している首都高の都心環状線を対象とした集計QK関係を分析し、都心環状線の円滑性維持のために適切な流入制御箇所および流入制御量を検討した。次に、シミュレーションを用いて流入制御効果について、円滑性、安全性および効率的なネットワーク利用の観点から検証した。さらに、流入制御が将来の交通状況に与える影響について、ヒステリシス特性に着目し、流入制御の効果の持続性を時系列で整理した。

2. 集計QK関係について

(1) 集計QK関係の定義

複数のリンクから構成されるネットワーク（エリア）において、そのネットワークの交通状況やパフォーマンスを表す指標として、本研究では集計交通流率及び集計交通密度を用いる⁸⁾。この集計交通流率及び集計交通密度は、以下の式において定義し、交通状況进行分析する。

・集計交通流率

$$Q = (\sum q_i \times l_i) / L \quad (1)$$

ただし、

Q : 集計交通流率[台/h]
 q_i : リンク i の交通流率[台/h]
 l_i : リンク i の区間長[km]
 L : 総延長[km]

・集計交通密度

$$K = \sum k_i \times l_i \quad (2)$$

ただし、

K : 集計交通密度[台/area]
 k_i : リンク i の交通密度[台/km]

(2) 都心環状線における集計QK関係

首都高の都心環状線は、内回りと外回りの路線により構成されている。都心環状線内回りは全長14.2km（延車線長：約30.0km）であり、オンランプ、オフランプともに8箇所、また9箇所のジャンクション（合流部：8箇所、分流部：7箇所）から構成されており、34

区間に分割されている。一方、都心環状線外回りは全長14.2km（延車線長：約30.5km）であり、オンランプ6箇所、オフランプ9箇所、また、9箇所のジャンクション（合流部：7箇所、分流部：8箇所）から構成されており、32区間に分割されている。

本研究では、首都高道路網の中心に位置し、放射路線から多くの交通が流入・流出することから恒常的に渋滞が発生しており、その交通状況が通過交通に多大な影響を与える都心環状線を分析対象エリアとした。分析に用いるデータは、2010年7月における車両感知器5分区分間データ（交通量・速度）を用いる。また、本線上において事故等突発事象の要因がデータに登録されている場合は、その時間帯のデータを分析から除去した。

都心環状線内回り・外回りをエリアと捉えた集計QK関係を図-2に示す。図より、集計QK関係は上に凸の形状となっており、図中 K_c （臨界集計交通密度）以下の集計交通密度では、集計交通密度が増加するに従い、集計交通流率も増加しており、集計交通密度が K_c を超過した場合は、集計交通流率が減少している。よって、臨界集計交通密度付近を制約条件とし、都心環状線への流入交通量を調整することにより、高い集計交通流率を維持することが可能であると推測される。

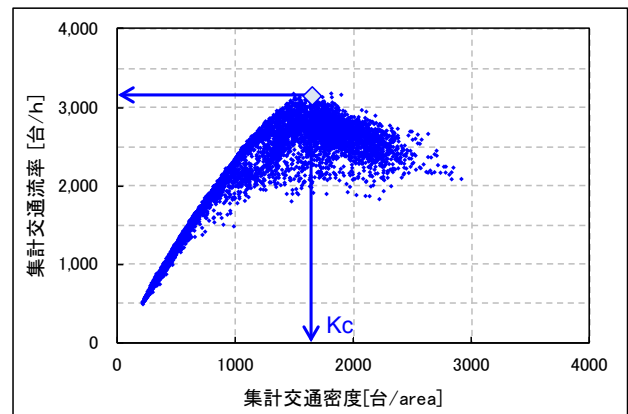


図-2 都心環状線における集計QK関係

また、最大集計交通流率が観測されたときの都心環状線の区間速度を確認すると、既に渋滞が発生している区間が確認された。都心環状線をエリアと捉えた場合、エリア全体が一様な交通状況ではなく、エリア内に交通状況が異なる区間が混在していることが分かった。そこで、都心環状線の全区間において、渋滞の発生を抑制する流入制御を検討するため、全区間の速度が40km/h以上という条件付けをした集計QK関係を図-3に示す。前述した集計QK関係と比較すると、自由流側のみのデータとなり、集計交通密度が増加するに従い、集計交通流率も増加する関係となっていることが分かる。図より、都心環状線の集計交通密度を1500[台/area]程度以下を目

安に維持することにより、都心環状線内の交通渋滞を抑制することが可能であると考えられる。

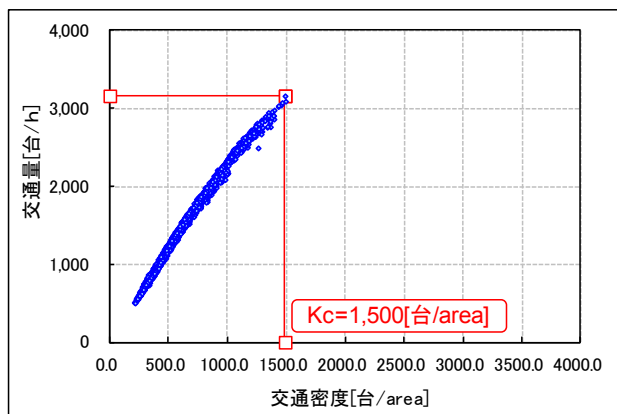


図-3 都心環状線における集計 QK 関係
(全区間速度：40km/h 以上)

(3) 集計QK関係によるエリア流入制御施策

都心環状線における集計QK関係を用いた流入規制施策について検討する。前項では、集計交通流率と集計交通密度の関係について分析してきたが、集計QK関係による流入規制施策を実施する際には、都心環状線への流入交通量と集計交通密度の関係を分析する必要がある。都心環状線への流入交通量と集計交通密度の関係について図-4に示す。図より、都心環状線の全区間速度が40[km/h]以上となる臨界集計交通密度（1,500[台/area]程度）の交通状況を維持するためには、都心環状線への流入交通量を2,000[台/5分]程度を目安に抑制する必要がある。

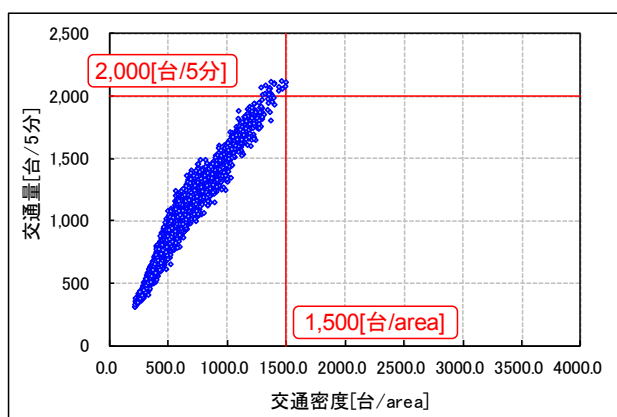


図-4 都心環状線における集計 QK 関係

次に、都心環状線への流入交通量について、都心環状線入口交通量と都心環状線に接続する放射路線からの流入交通量に区別し分析した結果を図-5に示す。図より、都心環状線への流入交通量を2,000[台/5分]程度以下に流入制御するための1つの方策として、都心環状線に存在する入口を流入制御することが考えられる。都心環状線

に存在する18箇所の入口から流入する交通は、必ず都心環状線に流入することになるため、都心環状線への影響を考慮すると、的確かつ有効なターゲット（入口）である。また、連続する入口合流が都心環状線のネットワークパフォーマンスを低下させていることが推測されるため⁹⁾、都心環状線の入口を流入制御することが適していると考えられる。さらに、都心環状線における走行距離について、都心環状線入口交通と放射路線からの流入交通について比較した結果を図-6に示す。図より、放射路線からの流入交通のほうが都心環状線の走行距離が長い傾向である。都心環状線入口交通における平均値は2.6kmであり、放射路線からの流入交通の平均値は4.2kmとなっている。都心環状線入口交通の走行距離が短い要因として、多く交通が放射路線下り方向を目的地としており、放射路線に接続するまでの短い距離を利用していると考えられる。そのため、少し一般道を走行することで、都心環状線の利用回避が可能である。さらに、利用者への広報という観点においても、過去にも都心環状線の入口規制の実績が多数あることや、規制対象を都心環状線の入口に限定していることにより、利用者への広報や理解を得やすい方策であると考えられる。

以上より、都心環状線のネットワークパフォーマンスを最大限に活かす流入規制施策の1つとして、都心環状線に存在する入口の流入規制が有効である知見を得た。

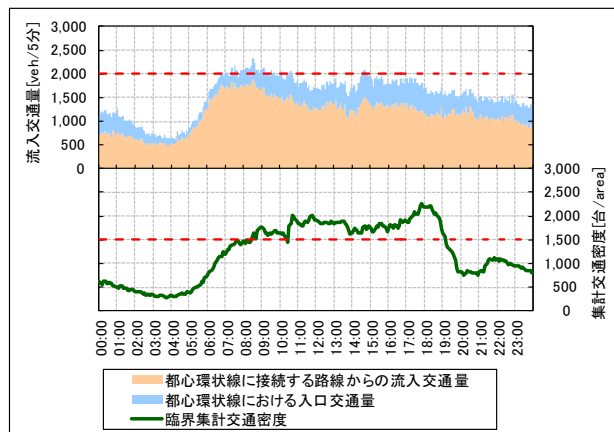


図-5 都心環状線の流入交通量と集計交通密度の関係

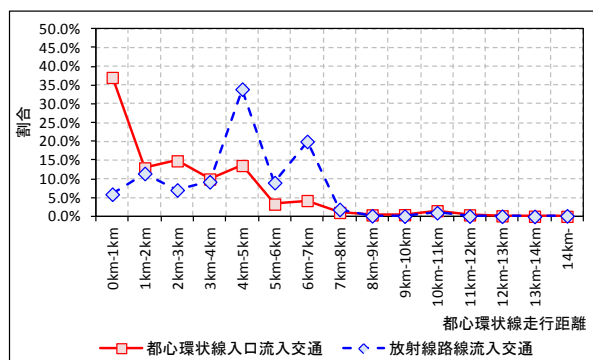


図-6 都心環状線の走行距離比較

3. 流入制御施策の効果検証

(1) シミュレーションによる流入制御施策の効果検証

都心環状線エリアを対象とした集計 QK による流入制御施策について、都心環状線に存在する入口を流入制御した際の交通状況を交通流シミュレーションにより試算し、流入制御の効果を検証した。本研究では、交通流シミュレーションに RISE (Real time traffic Information by dynamic Simulation on urban Expressway)¹⁰⁾ を用いて効果検証を実施した。2010 年 7 月 14 日 (水) をシミュレーション対象日とし、都心環状線への流入交通量が 2,000[台/5 分]を超過するタイミングの朝ピーク時間帯の午前 8 時～午前 10 時の 2 時間において、都心環状線入口を流入制御 (入口閉鎖) し、都心環状線の集計 QK 関係を分析した。また、都心環状線入口にて流入制御された交通は、各交通の目的地を確認し、都心環状線から流出する放射線下り方向の直近入口に転換させた。

都心環状線に存在する 18 箇所の入口対して、流入制御の実施有無による都心環状線の交通状況の比較を図-7 に示す。図より、都心環状線入口の流入制御無では、時間経過に伴い集計交通密度が臨界集計交通密度

(1,500[台/area]) を超過し、集計交通流率が低下している。制御開始～1 時間後と制御開始 1 時間後～2 時間後のデータを比較すると、シミュレーション実施時間が長くなると、集計交通密度の増加により、集計交通流率の低下する傾向が大きくなっている。この状況では、更なる時間の経過とともに、集計交通密度が増加し、集計交通流率が大きく低下することが懸念される。

一方、都心環状線入口の流入制御を実施した場合では、一時的ではあるが、集計交通密度は臨界集計交通密度 (1500[台/area]) を維持し、高い集計交通流率が観測されている。しかしながら、時間の経過とともに、集計交通流率及び集計交通密度が低下しており、過大に流入交通量を制御していることが推測される。そのため、都心環状線の集計交通密度に応じて、流入制御量をコントロールすることにより、臨界集計交通密度を維持する仕組みを検討する必要があると考えられる。

また、流入制御有無による都心環状線と首都高全線の総走行台キロの比較を表-1 に示す。表より、都心環状線における制御開始～1 時間後では、流入制御の実施有無による総走行台キロが同程度であることから、最大集計交通流率と臨界集計交通密度の維持が実現されている。首都高全線における流入制御有無による総走行台キロの比較では、流入制御を実施することにより、総走行台キロが増加している。この要因として、シミュレーションでは、各入口に流入交通量と OD 比率を設定する仕様となっており、今回の設定では都心環状線から放射線下り方向の直近入口に流入交通量を転換させたが、転換先

入口の OD 比率を用いて交通量を発生させていることが要因であると推測される。流入制御を実施する入口の流入交通量について、転換先入口までの距離や目的地の方向等を考慮し、転換先入口を精緻に検討することが課題として考えられる。

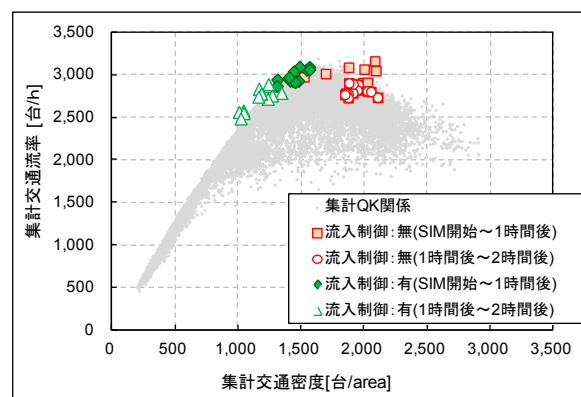


図-7 都心環状線の走行距離比較

表-1 流入制御有無による総走行台キロ比較

	都心環状線		首都高全線	
	制御開始～ 1 時間後	制御開始～ 2 時間後	制御開始～ 1 時間後	制御開始～ 2 時間後
流入制御無	84,950	164,790	1,276,820	2,502,230
流入制御有	84,880	162,040	1,287,990	2,523,530
差分	-70	-2,750	11,170	21,300
差分割合	-0.1%	-1.7%	+0.9%	+0.9%

(2) 擬似的な流入制御による効果検証

首都高では、2007 年 12 月に中央環状線西新宿 JCT⇄熊野町 JCT が開通し、また、2009 年 3 月に中央環状線大橋 JCT⇄西新宿 JCT が開通している。この新規供用路線のネットワーク整備により、都心環状線への流入交通量が減少しており、恒常的に渋滞しているエリアへの流入交通量を減少させることは、流入制御と同様の効果が期待される。そこで、流入制御が擬似的に実施されている状況と想定し、新規路線供用前後における都心環状線の円滑性・安全性の変化について分析する。

新規供用路線の開通による都心環状線の集計 QK 関係の変化を図-8 に示す。図より、新規供用路線開通により集計 QK 関係の形状が変化していることが分かる。新規供用路線が開通前の 2007 年 10 月の集計 QK 関係は、渋滞発生後の集計交通密度が 2,500[台/area]以上のデータが多く存在しているが、2010 年 10 月の集計 QK 関係は、集計交通密度が 2,500[台/area]以上のデータが少ない。また、自由流である集計交通密度が 1,500[台/area]以下のデータを比較すると、2010 年 10 月の集計 QK 関係の方が、データの割合が高い。よって、中央環状線が新規供用されたことにより、いままで都心環状線を走行していた交通が中央環状線に経路を変更し、その結果、都心環状線の交通状況が改善したことが推測される。

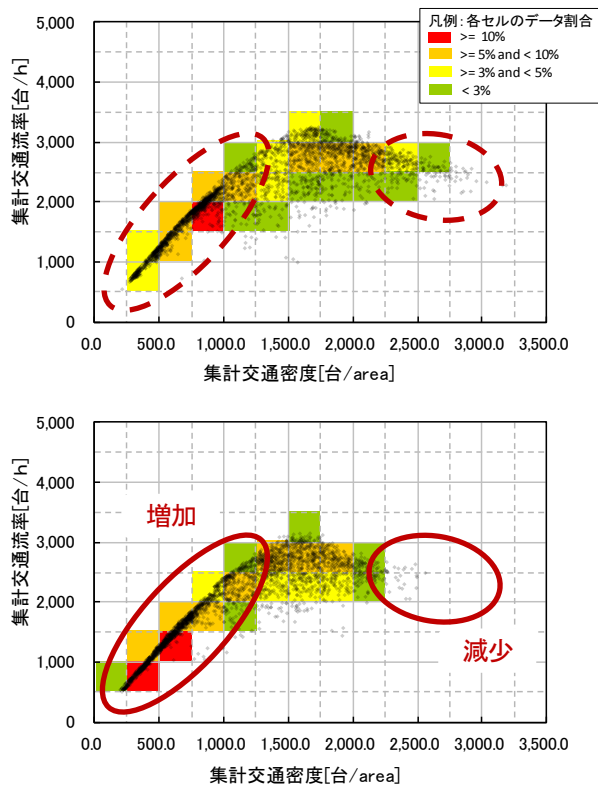


図-8 新規路線供用による都心環状線集計 QK の変化
(上段：2007 年 10 月，下段：2010 年 10 月)

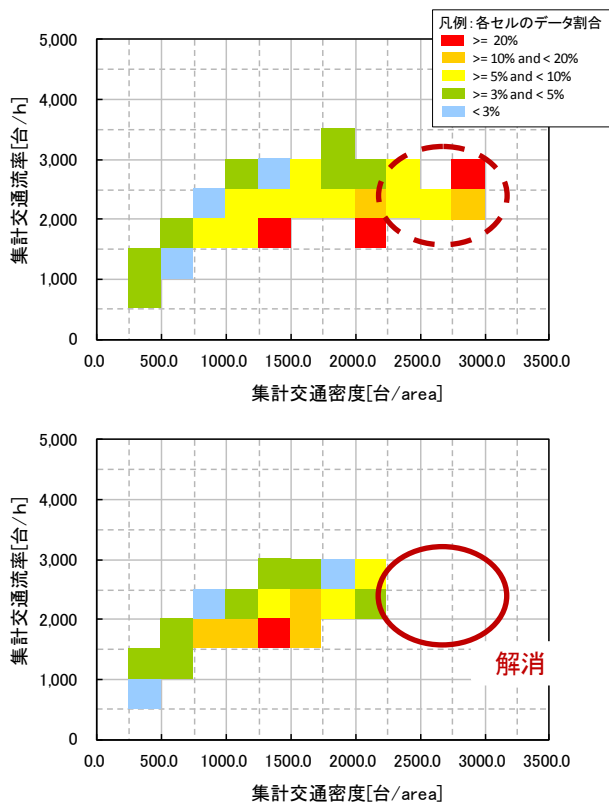


図-9 都心環状線集計 QK と事故発生状況の関係
(上段：2007 年 10 月，下段：2010 年 10 月)

また、都心環状線の事故発生状況について、交通状況との関連性を分析した。まず、2007 年 10 月と 2010 年 10

月では、1 ヶ月間に都心環状線で発生した事故件数は減少している（163 件→140 件）。そして、都心環状線の集計 QK 関係と都心環状線内における事故発生状況との関係を図-9 に示す。図では、集計交通流率と集計交通密度のセル毎に事故発生件数を交通状況が観測されたデータ数で除して事故発生件数の割合を示している。図より、2007 年 10 月では、渋滞状況において多数事故が発生していることが分かる。一方、2010 年 10 月では、交通状況が改善され、渋滞が発生しない状況に変化したため、渋滞状況における事故発生割合が大きく減少している。

よって、新規供用路線による交通状況の変化を擬似的に流入制御が実施された状況と捉え、都心環状線の交通状況の変化を集計 QK 関係により分析した結果、流入制御を実施することにより、円滑性及び安全性の両方の効果が相乗して発現していることを確認した。

(3) ヒステリシス特性に着目した流入制御効果

流入制御の効果について、ヒステリシス特性に着目した分析を実施した。流入制御を実施した後の時間帯における交通状況の変化を時系列で把握するために、前述した RISE を用いて、2010 年 7 月 14 日（水）を対象とし、都心環状線入口を朝ピーク時間帯の午前 8 時～午前 10 時の 2 時間のみ流入制御した際のシミュレーションを実施した。

流入制御の有無による首都高全線における時間帯別渋滞損失時間の比較を図-10 に示す。図より、流入制御を実施した 8 時～10 時以降の 2 時間（10 時台、11 時台）まで、流入制御の影響が持続しており、流入制御実施後の一定時間において、渋滞削減効果が発現している。一方で、朝ピーク時間帯に流入制御実施した場合に、オフピーク時間帯で流入制御無の交通状況と同様になっており、夕ピーク時間帯には、流入制御の効果が持続していない。よって、朝、夕ピーク時間帯の渋滞を削減するためには、各ピーク時間帯における渋滞発生直前を対象とした流入制御が効果的であると考えられる。また、流入制御を実施する時間長や夕ピーク時間帯を対象とした流入制御タイミングの検討を実施することが必要である。

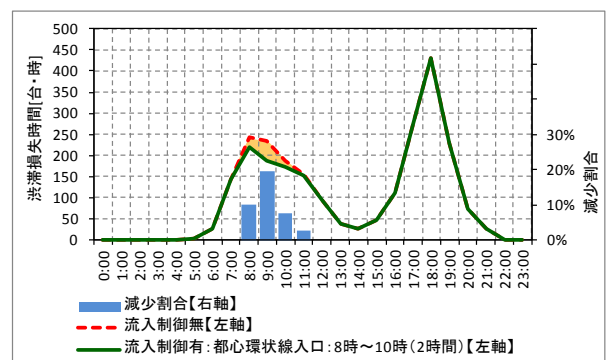


図-10 流入制御有無による時間帯別渋滞損失時間比較

4. まとめ

本研究は、首都高の都心環状線を対象エリアとし、集計 QK 関係を分析することにより、エリア流入制御の適用に向けた検討を実施した。都心環状線内回り・外回りをエリアと捉え、臨界集計密度 (1,500[台/area]) を維持するためには、都心環状線への流入交通量を 2,000[台/5 分] に維持することが適しており、流入制御施策の 1 つとして、都心環状線に位置する入口を流入制御する施策が有効である知見を得た。また、シミュレーションを実施した結果、都心環状線入口を流入制御することにより、一時的に臨界集計交通密度が維持され、高い集計交通流率が維持されることを確認した。さらに、新規供用路線による交通状況の変化を擬似的に流入制御が実施された交通状況と捉え、都心環状線の交通状況の変化を集計 QK 関係により分析した結果、都心環状線の交通状況が大きく改善され、円滑性及び安全性の両方の効果が相乗して発現していることが確認された。また、流入制御が将来の交通状況に与える影響について、ヒステリシス特性に着目し、流入制御の効果の持続性を時系列で整理した結果、流入制御後の一定時間において渋滞損失時間が減少する持続性の効果を確認した。

今後の課題として、より効果的な集計 QK 関係による流入制御施策を検討することが考えられる。具体的には、最適な都心環状線の交通状態を維持するために、理論的な制御対象入口の選定や制御交通量の算出、入口での待ち時間を考慮した総旅行時間を指標として検証を実施することが必要であると考えている。また、流入制御された交通の転換先入口に関する分析やネットワークが効率的に利用されるような流入制御施策について、ヒステリシス特性を考慮した適切な流入制御時間の設定方法を検討していくことを考えている。

参考文献

- 1) 首都高速道路株式会社 HP : <http://www.shutoko.jp/>
- 2) 佐々木網, 明神証: 都市高速道路網における流入車流入制御, 交通工学, Vol3, NO3, pp8-16, 1968.
- 3) 松井寛, 藤田素弘, 堀尾朋宏: 交通量の空間的分析を考慮したファジィ LP 制御, 土木計画学研究・論文集, NO10, 1992.
- 4) 岡田知朗, 桑原雅夫, 森田綽之, 割田博: 都市内高速道路における待ち行列を考慮した流入制御モデルの構築と適用, 土木計画学研究・講演集, Vol39, 2009.
- 5) 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, 土木計画学研究・講演集, Vol37, 2008.
- 6) 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, 土木計画学研究・講演集, Vol38, 2008.
- 7) 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.
- 8) Gerolimini N. and Daganzo C.F., Macroscopic modeling of traffic in cities, 86th Annual Meeting Transportation Research Board, Washington D.C. 2007
- 9) Takahisa INATOMI, Hiroshi WARITA, Takashi OKANO, Takahiro TSUBOTA, Toshio YOSHII, Masao KUWAHARA, A feasibility study of an area traffic control method for Tokyo Metropolitan Expressways based on macroscopic fundamental diagram, OPTIMUM2013 International Symposium on Recent Advances in Transport Modelling, 2013
- 10) 宗像恵子, 割田博, 田村勇二, 白石智良: 「首都高速道路におけるリアルタイム予測シミュレーションの開発」, 第 29 回交通工学研究発表会, pp.293-296, 2009

(2014. 4. 25 受付)

A FEASIBILITY STUDY OF AN AREA TRAFFIC CONTROL METHOD FOR TOKYO METROPOLITAN EXPRESSWAYS BASED ON MACROSCOPIC FUNDAMENTAL DIAGRAM

Hiroshi WARITA, Masao KUWAHARA, Toshio YOSHII, Takahisa INATOMI