

首都圏高速道路ネットワークの効率的利用のためのランプ制御手法の評価

佐津川 功季¹・森部 伸一²・和田 健太郎³・大口 敬⁴

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 博士後期課程 (〒 153-8505 目黒区駒場 4-6-1)

E-mail: kouki@iis.u-tokyo.ac.jp

²非会員 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (現 JR 東日本旅客鉄道株式会社)

³正会員 東京大学助教 生産技術研究所 (〒 153-8505 目黒区駒場 4-6-1)

E-mail: wadaken@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴フェロー会員 東京大学教授 生産技術研究所 (〒 153-8505 目黒区駒場 4-6-1)

E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

本研究では、首都圏高速道路を対象として、ネットワーク全体の効率的利用を達成するための最適制御手法について考察を行う。具体的には、まず首都圏高速道路における制御のベンチマークを導出するために、高速道路本線上で渋滞を発生させないという条件のもと、経路誘導とランプ制御を組み合わせた総旅行時間最小化状態を求める。そして、この結果を制御なしのケースやローカルランプ制御手法である ALINEA を実装したケースと比較考察し、首都圏高速道路でのランプ制御や経路誘導の効果について分析する。

Key Words: ramp metering, network flow optimization

1. はじめに

都市圏での慢性的な交通渋滞は依然として大きな社会問題である。これに対して、近年我が国では首都圏三環状道路が建設中であり、数年のうちに供用される予定であるなど、今後さらなる都市圏高速道路ネットワークの拡充が見込まれている。しかし、こうした環状道路の整備に関わらず、ピーク時間帯ではネットワーク上に存在するボトルネックを起点とした渋滞が発生している。そのため、このような面的な広がりを持つネットワークを最大限に混雑問題に対して機能させるためには、道路をより有効に活用するために交通施策が必要となる。

このような施策として現在戦略的な料金体系の導入が検討されており¹⁾、混雑状況に応じた通行料金を賦課することにより、環状道路の有効活用が達成されることが期待されている。しかし、一般的なネットワークにおいて、動的かつ適切な料金をつけるのは容易ではない。さらに、利用者の行動を直接的には制限できないため、迂回距離が長く、実質的に選択肢が最短経路しか存在しないような OD ペアの交通を制御することは難しい。そのため、こうした混雑課金のみならず、より利用者を直接的に制御することのできる手法との組み合わせが有効であると考えられる。

その代表が、ランプ制御である。一般的に、ランプ制御の効果としては、高速道路本線への流入を抑制し

渋滞を緩和させることや、車群による本線への流入を防ぎ合流を円滑化することが期待されている。しかし、現在最も普及している ALINEA²⁾をはじめとして、多くのランプ制御は局所的な基準 (e.g., ランプ直下流の渋滞緩和) に基づくローカルな制御であり、複雑化した道路ネットワーク上の全体の交通流に対する大局的な影響についての知見は十分に蓄積されていない。

本稿では、首都圏三環状道路でのランプ制御の効果を定量的に評価する研究の一環として、ランプ制御と経路誘導を組み合わせた最適制御のパターンについて考察する。具体的には、まず、高速道路本線上で渋滞が発生しないという条件のもとで、総旅行時間を最小化する最適化問題を定式化する。そして、首都圏三環状道路を対象として問題を解くことで、ベンチマークとなるような最適制御パターンと交通状態を導出する。そして、この結果を制御なしのパターンや既存のランプ制御手法の結果と比較し、首都圏高速道路でのランプ制御や経路誘導の効果について分析する。

2. 最適化問題の定式化

本稿で対象とするのは、複数の起点と終点を持つ一般構造のネットワークである。ネットワークはノード集合 N 、リンク集合 L 、需要が発生する起点の集合 O 、終点の集合 D で表現されている。各々の集合の要素は $i \in N$, $ij \in L$, $o \in O$, $d \in D$ とする。動的な交通流の

配分を想定する時間は $[0, T]$ であり、その期間の OD 交通需要は与件とする。

(1) 基本問題

本稿では、森部ら³⁾により定式化された、動的なランプ・経路制御問題を取り扱う。より具体的には、ネットワーク上で渋滞が発生しないという条件の元で、ネットワーク全体の総旅行時間を最小化するように、ランプ流入制御と経路制御を行う。この最適化問題の目的関数と制約条件は以下のように表される：

$$\min_{\mathbf{r}, \mathbf{y} \geq 0} F(\mathbf{r}, \mathbf{y}) \equiv \sum_{od \in W} \int_0^T \int_0^t (q_{od}(s) - r_{od}(s)) ds dt \quad (1)$$

$$+ \sum_{ij \in L} \int_0^T \left(\sum_{d \in D} y_{ij}^d(t) \cdot t_{ij} \right) dt \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in O(i)} y_{ik}^d(t) - \sum_{k \in I(i)} y_{ki}^d(t - t_{ki}) = r_{od}(t) \delta_{oi}, \quad \forall d, \forall t, \forall i, \quad (3)$$

$$\int_0^T \sum_{k \in I(d)} y_{kd}^d(t) dt = \int_0^T \sum_{o \in O} q_{od}(t) dt, \quad \forall d, \quad (4)$$

$$\int_0^t q_{od}(s) ds - \int_0^t r_{od}(s) ds \geq 0, \quad \forall o, \forall d, \forall t. \quad (5)$$

$$\mu_{ij} - \sum_d y_{ij}^d(t) \geq 0, \quad \forall t, \forall ij, \quad (6)$$

$$\alpha_{od} r_o(t) = r_{od}(t), \quad \forall o, \forall d, \forall t. \quad (7)$$

$$r_o(t) = \sum_d r_{od}(t). \quad (8)$$

本最適化の制御変数は、時刻 t にリンク ij に流入する終点別交通流率 $y_{ij}^d(t)$ と、時刻 t にランプから実際に出発する OD ペア od の交通流率 $r_{od}(t)$ である。目的関数はネットワーク上での総走行時間 (1) と、ランプでの待ち時間 (2) から構成されている。ここで、 $q_{od}(t)$ は時刻 t にランプに到着する OD ペア od の交通流率、 t_{ij} はリンク (i, j) の自由旅行時間である。

制約条件 (3) は、終点を除く任意のノード i におけるフロー保存則である。 δ_{oi} は $i=o$ なら 1、そうでないなら 0 となる Kronecker のデルタ、 $I(i)$ はノード i に流入するリンクの始点となるノードの集合、 $O(i)$ はノード i から流出するリンクの終点となるノードの集合である。(4) は、終点ノードに関するフロー保存則であり、計画時間中にその終점에接続するダミーリンク上から流出するフローの合計が終点別の総需要と一致することを意味している。(5) はランプでの待ち行列台数の非負制約、(6) は各リンクの容量制約であり、 μ_{ij} はリンク ij の交通容量を表している。(7) は、森部ら³⁾の定式化に基づく、線形化された First-In-First-Out (FIFO) 条件であり、「各ランプに到着する車両の終点構成比率が一定である」ことを仮定している。ここで、 α_{od} は、起点 o と

なるランプに到着する、終点 d を持つ車両の構成比率であり、 $r_o(t)$ は時刻 t にランプ o から流出する交通流率である。

上記の問題を解くことにより得られる最適交通パターンは、森部³⁾で分析されたように、通行権取引制度^{4),5)}が導入されたときの均衡交通パターンに対応する。より具体的には、制約条件 (6) に対応した最適 Lagrange 乗数は、通行権導入後の均衡状態における通行権価格と解釈することができる。ただし、本稿ではランプ到着時刻を所与としており、出発時刻が固定された状態における通行権取引制度導入時の均衡状態であると考えられる。

(2) 迂回制約

前述した最適化問題は、最も効率的なベンチマークとなる交通状態である。しかし、極端に迂回させられる OD が存在しうるなど、OD 間の公平性の観点からは妥当な解が出るとは限らない。

そのため、後の 4. で行う数値実験では、前節で定式化したものに加え、迂回制約をつけた問題も考える。より具体的には、全車両が走行する総距離が、最短距離経路を走行した際の距離に対して数%以下の増加分となる制約を導入する。これは、各車両が最短距離を走行した際の総走行時間 RT_0 ¹ と、迂回許容率 β [%] を用いて、次のように表すことができる：

$$\sum_{ij \in L} \int_0^T \left(\sum_{d \in D} y_{ij}^d(t) \cdot t_{ij} \right) dt \leq (1 + \beta/100) RT_0. \quad (9)$$

なお、この総走行時間 RT_0 は、リンク容量制約をはずした最適化問題を解くことにより求めることができる。

3. ネットワーク設定

本稿で対象とする首都圏高速道路ネットワークは、ノード数は 1514、リンク数は 1616 であり、これらのデータは首都高速道路株式会社の交通管制システムが採用している 300m~500m 程の「区間」をベースに作成されている。このノードのうち、オンランプ (i.e., 起点ノード) は 183、オフランプ (i.e., 終点ノード) は 185 である。また、各リンクには制限速度が設定されており、本研究ではこの制限速度でリンク延長を割ることにより、自由旅行時間を求めている。

前章で定式化した最適化問題を素朴にこのネットワークに適用した場合、リンク数や起終点のペアの多さ (i.e., 制御変数と制約条件の多さ) のために、現実的な計算時間で解くことは難しい。そのため、本研究では、最適化問題を現実的な計算時間で解くためにネットワー

¹ 渋滞が発生しないことを制約にしているため、走行距離の代替として旅行時間を用いることができる。

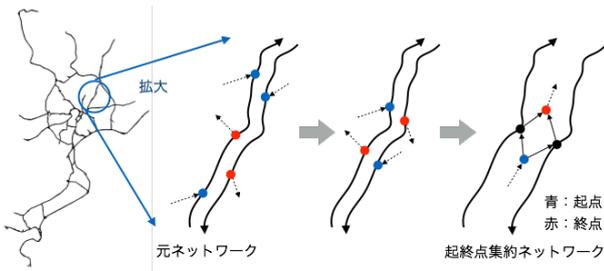


図-1 ネットワークの集約表現

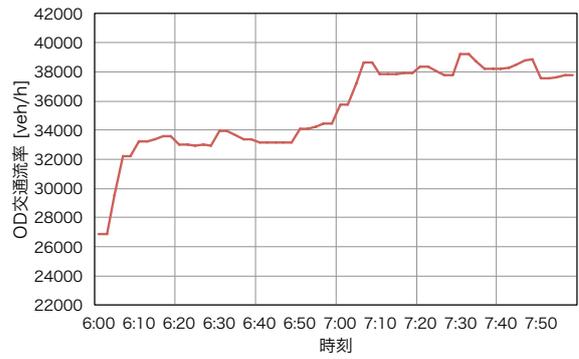


図-3 時々刻々の需要率

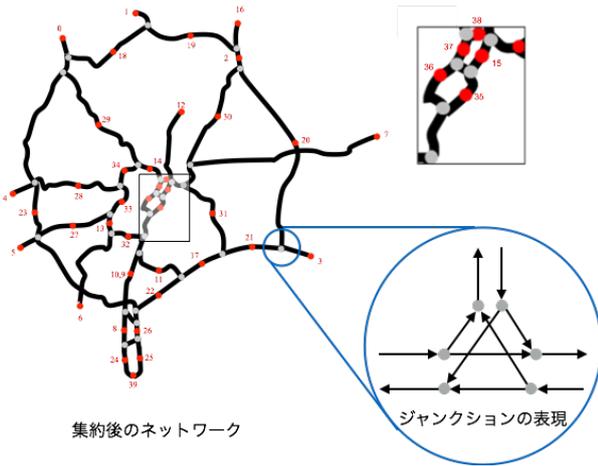


図-2 集約後の首都圏高速道路ネットワーク (赤ノード: 起点・終点, 灰色ノード: ジャンクション)

クの集約を行った。より具体的には、図 1 に示すように、二つのジャンクションにより挟まれた直線路線上における複数の起終点を一つの起点、終点に集約する。そして、地理的に近い起点と終点をさらに一つに集約し、容量無限大かつ旅行時間が 0 秒であるダミーリンクで各リンクにアクセスできるようにした。これにより、ネットワーク上のノード数は 257 (うち、起点数 40, 終点数 40)、リンク数は 358 にまで減らすことができ、現実的な計算時間で最適化問題を解くことができる。集約した後のネットワークを、図 2 に示す。なお、ジャンクション間の距離やその間の容量の関係については元のネットワークとの整合性を取る必要がある。そのため、集約したネットワーク上のリンクについて、旅行時間は集約に対応する複数リンクの旅行時間を足し合わせ、また容量はこれらのリンクのうち最小の容量に合わせる。

需要は、午前 6 時～午前 8 時の午前ピークのデータを用いており、起終点別に 5 分毎に集計したものをを用いている。この需要についても、前節で行ったネットワークの集約に合わせて集約を行った。ただし、集約した際に起点と終点がダミーリンクのみで接続するような起終点のペアについては需要を取り除く。結果、総

発生車両台数は 70,825 台となった。図 3 に時々刻々の OD 交通流率を示す。また前章で説明した、線形化した FIFO 条件に合わせて、各ランプに到着する車両の終点構成比率が一定になるように需要の構成比率を調整した。具体的には、総需要における終点別構成比率と同一になるように、各時間帯にランプに到着する車両の終点別構成比率を設定している。

4. 数値実験

本章では、ここまでで構築した最適化問題を解くことにより、首都圏高速道路におけるランプ制御の効果分析を行う。まず、(1) では、本稿で行う数値実験のシナリオについて説明する。そして、(2) で、各シナリオの結果を比較検討し、ネットワークを効率的に利用するための方策やその特性について検討する。

(1) 数値実験シナリオ

本稿で考えるシナリオは次の 4 つである：

1. ランプ制御なし
2. ALINEA 制御導入
3. 最適化：迂回制約なし
4. 最適化：迂回制約あり

制御なし、ALINEA 制御の効果を検証するために、本稿では交通流シミュレーションモデル「SOUND⁶⁾」を用いている。また、異なる交通状態における制御の有効性を検討するため、本稿ではそれぞれのシナリオについて、ネットワークのリンク容量を 1 倍、0.8 倍にしたケースで数値実験結果を考察する。

なお、SOUND では、各リンクに QK 関係を設定し、そこから導かれる車両速度・車頭間隔関係に従い、ある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ている。本稿では各リンクの QK 関係として、本稿では交通容量値を唯一のパラメータとし、自由流速度として 70km/h、飽和密度として 120[veh/km] を

制御パターン	制御なし	ALINEA	最適化	迂回制約
ランプでの待ち時間 [sec]	2,043,150	5,190,450	14,595	14,373,258
本線走行時間 [sec]	89,290,860	86,200,680	74,044,063	72,522,000
総旅行時間 [sec]	91,334,010	91,391,130	74,058,658	86,895,258
改善率 [%]	-	-0.06	18.93	4.86
迂回率 (迂回制約) [%]	1.66	2.07	4.15	2

表-1 総旅行時間：容量 1 倍時

設定した。

また、制御の比較対象として ALINEA^{2),7)} を SOUND 上で実装し、その結果を比較する。ALINEA はローカルなフィードバック制御手法であり、あるランプ接続部直下の本線が渋滞状態にある場合に、当該ランプでの流入交通量を制限することで、交通状態の改善やさらなる悪化の予防を行う。本稿では、次のように密度ベースの ALINEA を適用する：

$$r_o(t) = r_o(t - 1) + K_R [d_o^* - d_o(t)]. \quad (10)$$

ここで d_o^* は目標密度であり、本稿ではランプ直下リンクの臨界密度とした。 $d_o(t)$ は時刻 t におけるランプ直下リンクの密度、 K_R は制御パラメータであり、本稿では $K_R = 35$ と設定する。

(2) 数値実験結果

表 1 に、容量 1 倍時における各シナリオの総旅行時間と、その詳細について示す。ここで迂回率は、容量を 100 倍に拡大し全利用者を最短経路に配分したときの総走行距離に対する、各ケースでの総走行距離の増分を表している。

まず、最適化の結果を見ると、制御なしのケースと比較して、総旅行時間が 18.93% 改善するとの結果が得られた。このケースではランプにおける待ち時間は総旅行時間と比較して微小であり、ランプ制御はほぼ行われていない。対して、迂回率は 4.15% と大きくなっており、迂回行動が総旅行時間の改善に大きく影響していることがわかる。次に、迂回制約を導入し制御なしの迂回率に近づけたケースを見ると、迂回制約を設けない場合には及ばないものの、制御を実施しないケースと比較すると 4.86% の向上が見られた。また、このケースではランプでの待ち時間が増加しており、ランプ部での流入制御が行われていることがわかる。一方で ALINEA を導入したケースでは、本線走行時間は改善しているがランプでの待ち時間が大きくなり、総じて旅行時間は改善されていないことが確認できる。

こうした改善率の違いについて考察するために、まずそれぞれのケースにおける制御特性の違いを整理しよう。本稿で取り扱った制御は次の 2 つから構成される：(1) 経路誘導 (迂回行動)、(2) ランプによる流入

制御手法	経路誘導	ランプ制御
制御効果		
ネットワーク容量低下防止	○	○
ネットワーク容量拡大	○	

図-4 制御手法とその効果についての整理

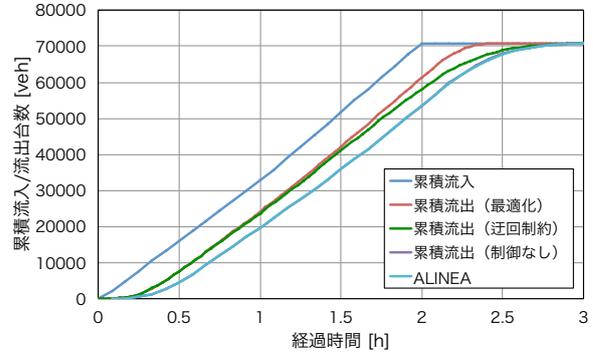


図-5 容量 1 倍時の累積流入/流出曲線

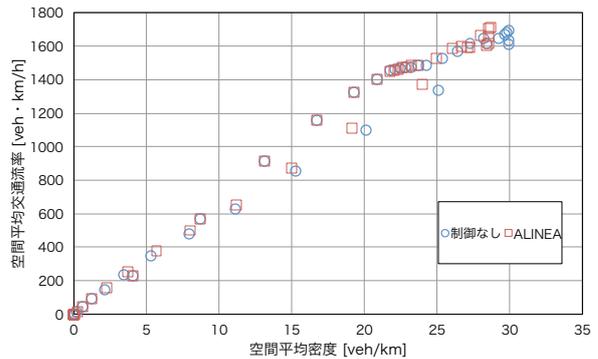


図-6 容量 1 倍時の MFD

制御。このうち、ランプ制御には待ち行列の延伸 (i.e., 先詰まり) を防止することによるネットワーク容量低下防止効果が、経路誘導にはこの効果に加えて、OD 間で利用できる経路を増加させることにより、終点に流入することのできる最大交通量 (i.e., ネットワーク容量) を拡大させる効果が存在する (表 4)。すなわち、各制御による旅行時間の改善効果は、

- ランプ制御 or 迂回によるネットワーク容量低下の防止効果
- 迂回によるネットワーク容量拡大効果

から構成されていることがわかる。

以上の整理に基づき、ケース間の比較から首都圏高速道路における各効果について考察を行おう。時々刻々のネットワーク容量を分析するために、図 5 にネットワークへの累積流入曲線と、各ケースにおける累積流出曲線を示す。この累積流出曲線の傾きがネットワー

ク容量を示しており、傾きを比較することにより各制御間での容量低下防止・容量拡大効果を考察することができる。

まず、ランプ制御によるネットワーク容量低下の防止効果について見ていこう。制御なしと ALINEA ケースを比較すると、これらの累積曲線はほぼ一致していることがわかる。これは、ネットワークの混雑度合いが低く、制御なしケースにおいても待ち行列の延伸によるネットワーク容量の低下が起きていないことを意味している。実際、ネットワークの流動性を示す MFD (図 6) を見ると、ネットワークの混雑領域 (空間平均密度の増加に伴い平均交通流率が低下する領域) は発現していないことがわかる。そのため容量 1 倍のケースでは、総旅行時間の改善は主に迂回行動によるネットワーク容量の拡大に基づくことがわかる。

次に、迂回によりネットワーク容量がどれだけ増加しているのかを見ていこう。まず、迂回制約を設けない最適化のケースと制御なしのケースの累積曲線を比較すると、前者の累積曲線の傾きが大きく、迂回行動によりネットワーク容量が拡大していることが見て取れる。具体的に、数値実験を開始してから 1 時間 ~ 2 時間におけるネットワーク容量を比較すると、最適化のケースでは 37,144[veh/h]、制御なしのケースでは 33,827[veh/h] であり、およそ 10% 近い容量の拡大が達成されていることがわかる。この結果からは、首都圏高速道路のような経路選択枝が多いネットワークを空間的に有効活用することによる効果がわかる。

さらに、迂回制約をつけたことによる改善率の違いについて考察していこう。迂回制約をつけたケースの累積流出曲線を見ると、数値実験の初めのうちは迂回制約なしのケースのものとはほぼ一致しており、ネットワーク容量が大きく向上していることがわかる。しかし、数値実験を開始してからおよそ 1 時間経過後になると、累積曲線の傾きの上昇 (i.e., ネットワーク容量の拡大) が止まり、迂回制約なしのケースとの乖離が生じていることわかる。これは、迂回制約をつけているケースでは全利用者を均等に迂回させるのではなく、より早期に流入する利用者を優先して迂回させていることを意味している。そのため、後に流入する車両は迂回を行うことができなくなり、迂回制約なしほどのネットワーク容量を達成できず、改善率が低下するようになることがわかる。

また、このケースでランプ待ち時間が増加したのは、迂回の持つネットワーク容量低下の防止効果を、迂回ができない時間帯において肩代わりしたためである。迂回制約なしとの乖離が生じている時間帯のネットワーク容量を求めると、迂回制約をつけたケースでは 34,434[veh/h] となり、制御なしのケースと比較して 2% の向上が見ら

制御パターン	制御なし	ALINEA	最適化	迂回制約
ランプでの待ち時間 [sec]	9,079,050	32,440,950	4,248,104	39,586,063
本線走行時間 [sec]	122,058,090	96,971,700	77,249,439	73,233,000
総旅行時間 [sec]	131,137,140	129,412,650	81,497,543	112,820,063
改善率 [%]	-	1.31	37.85	13.97
迂回率 (迂回制約) [%]	2.61	2.68	8.66	3

表-2 総旅行時間：容量 0.8 倍時

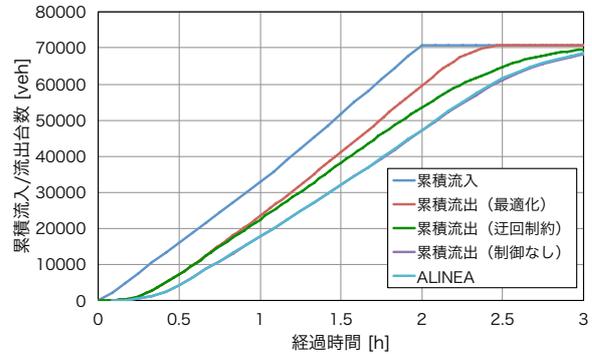


図-7 容量 0.8 倍時の累積流入/流出曲線

れる。これが協調ランプ制御による効果であると解釈することができる。

次に、容量を 0.8 倍にし、ネットワークの混雑度合いを上昇させたパターンを見てみよう。表 2 に、容量 0.8 倍時における各シナリオの総旅行時間と、その詳細について示す。まず、最適化のケースを見ると、制御なしのケースと比較して 37.85% にも及ぶ改善が見られた。このケースでは迂回率が 8.66% と、容量 1 倍時と比較して倍以上利用者を迂回させている。ただし、同時にランプでの待ち時間が増えており、容量 1 倍時の迂回制約なしのケースとは異なりランプ制御が行われていることがわかる。次に迂回制約をつけた最適化のケースを見ると、やはり迂回制約を設けないケースには及ばないものの、13.97% の改善が達成されていることがわかる。また、ALINEA を導入したケースを見ると、若干ではあるが総旅行時間の改善ができていることがわかる。これらの結果からは、ネットワークの混雑度合いが若干上昇し、ランプ制御による容量低下の防止効果が発現してきたことがわかる。

これらの改善について、容量 1 倍時のケースと同様に累積流出曲線を用いた考察を行おう。図 7 に容量 0.8 時の各ケースにおける累積流入/流出曲線を示す。まず、制御なしのケースと ALINEA のケースを比較すると、容量 1 倍時のケースと同じく、これらの流出曲線はほぼ一致している。すなわち、今回のシミュレーション設定では容量 0.8 倍時においてもネットワーク容量の低下があまり起きておらず、そのために ALINEA による

ランプ制御の効果が微小になったことがわかる。

次に、迂回行動によるネットワーク容量の改善効果を見てみよう。最適化と制御なしのケースにおける累積流出曲線の傾きを比較すると、容量 1 倍時と同じく最適化ケースは制御なしケースより大きいことがわかる。具体的には、数値実験を開始してから 1 時間~2 時間の間の傾きを求めると、制御なしのケースでは 29418[veh/h]、最適化のケースでは 36116[veh/h] であり、およそ 23% の向上が見られた。

また、迂回制約をつけたケースの累積流出曲線を見ると、数値実験を開始してからおよそ 0.8 時間までは迂回制約なしのケースと一致するが、それ以降は乖離が生じていることが見て取れる。すなわち、容量 1 倍時と同じく、より早期に流入する車両を優先して迂回させており、後に流入する車両についてはランプで流入制御することにより、ネットワーク容量の低下を防止していることがわかる。このケースの累積流出曲線の傾きを求めると、31,055[veh/h] と制御なしと比較して 5% 程度向上しており、混雑度合いが若干上昇するとともに、協調ランプ制御の効果も上昇していることが確認できる。

以上の結果からは、経路誘導によるネットワークの空間的・時間的な有効活用が交通状態の改善に大きく影響することがわかる。また、迂回制約つきの結果の考察からは、ほぼ迂回をさせないという状態でも、ランプを協調して制御することで交通状態の改善を行うことができる可能性が示唆された。今回の数値実験のケースでは、交通状態の改善は迂回によるものが大きかったが、より混雑度合いが高くネットワーク容量が低下する状況を考えた場合は、こうした協調制御により交通状態を大きく改善することができると考えられる。

5. 終わりに

本稿では、首都圏高速道路ネットワークを対象として、ベンチマークとなる最適交通状態の導出とそれを達成するための制御について効果の分析を行った。具体的には、本線上で渋滞が発生しないという制約に基づいた総旅行時間最適化問題を解き、理想的な交通状態とその制御パターンを導出した。そして、その結果を制御なしのケースやローカルなランプ制御である ALINEA ケースと比較することで、本稿で行った経路誘導とランプ制御の効果について分析を行った。分析の結果からは、動的かつ適切な経路誘導を行うことができれば、交通状態改善効果は著しいことが明らかとなった。一方で、容量が低下しネットワークの混雑度合いが上昇し、ネットワーク容量の低下が発生すると、ランプ制御による効果が向上するようになることが示唆された。

本稿では混雑した交通状態を想定するために容量を 0.8 倍に制限したケースでの数値実験を行ったが、実際にはネットワークが混雑していないことが確認されている。一方で、首都圏高速道路の実証研究⁸⁾では、日常的に MFD の渋滞領域が観測されることを述べている。そのため今後は、経路選択パラメータなど、シミュレーションのキャリブレーションを正確に行ったうえでの比較考察を行う必要がある。

また、本稿の最適化では、将来の OD 交通需要が既知であるという前提の元、開ループ制御を行っている。そのため、一度最適化が想定する交通状態との乖離が発生すると、交通性能は時間とともに悪化する。このような交通状態の変化に対応するためには、本稿で導出した最適制御パターンの特性 (e.g., 協調して制御されるランプの空間的な位置、ターゲットとするリンクやその容量) を明らかにし、ALINEA をはじめとするフィードバック制御と組み合わせることで手法のロバスト化を図る必要がある。こうした協調制御の特性とその効果については研究発表会で報告する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局: 首都圏の新たな高速道路料金に関する具体的方針(案), 2015.
- 2) Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., and Blosseville, J.-M.: ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering, *Transportation Research Record*, 1991.
- 3) 森部伸一, 和田健太郎, 大口敬: 一般ネットワークにおける最適ランプ制御パターンの導出とその考察, 土木計画学研究・講演集, No. 54, pp.1983-1990, 2016.
- 4) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集, Vol.63, No.3, pp.287-301, 2007.
- 5) Wada, K. and Akamatsu, T.: A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration: An auction mechanism with day-to-day capacity control, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.60, pp.94-112, 2013.
- 6) 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田紳之: 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.
- 7) Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., and Wang, Y.: Review of Road Traffic Control Strategies, *Proc. IEEE*, Vol.91, No.12, pp.2043-2067, 2003.
- 8) Wang, P., Akamatsu, T., and Wada, K.: Exploring the relationship between the features of macroscopic fundamental diagram and congestion pattern for expressway networks: A case study of Tokyo metropolitan expressways, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, pp.2523-2529, 2016.

(2017. 4. 28 受付)