

首都高速道路合流部の渋滞現象分析と運用施策の検討

The Analysis of Congestion Phenomena and Examination of Management Policy about Merging Section of Metropolitan Expressway

屋井研究室 10M30129 篠塚 知彦 (SHINOZUKA, Tomohiko)

Keywords : 首都高速 3 号線, 渋滞, 現象分析, 運用施策, CO₂ 排出
Metropolitan Expressway Route 3, Congestion, Phenomena Analysis, Management Policy, CO₂ Emission

1. はじめに

首都高速道路 3 号渋谷線 (以下, 3 号線) は, 都心部と東名高速道路を結ぶ重要な路線であり, 渋滞や混雑が頻繁に生じている。さらに下り線においては, 2010 年 3 月の中央環状新宿線完成に伴う大橋ジャンクション (以下, 大橋 JCT) 完成により, 交通量が局所的に増加し深刻な混雑となっている。

高速道路における渋滞の対策として, 環状線を中心としたネットワーク拡張, 付加車線の建設, ソフト面では ETC 等の料金徴収の効率化や, 利用者への情報提供, 速度低下箇所での注意喚起等様々な対策が行われている。これら対策により, 従来と比較して多くの混雑が解消されたが, 対策の対象とは別の場所で新たに混雑問題が発生している点も含め完全に渋滞が解消されたとは言えない状態は今もなお続いている。

以上の問題意識から, 3 号線の下り線に着目し, その渋滞の現象を分析して原因を確認していく事, また交通量や道路条件から速度を算出する統計モデル式に経路変更や出入口の制限などの運用施策時の仮想交通量を代入して計算することで, 所要時間や CO₂ 排出量の観点から効果を評価していく事, 以上の 2 点を本研究の目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

渋滞について研究している既往論文は多く存在している。その中でも, 近年では超音波やループコイルを用いて検知・計測している車両感知器のデータや, 2005 年頃から急速に普及した ETC¹⁾ による出入口調査のデータを用いている研究が増えている²⁾。本研究では渋滞の現象を分析するために出入口付近とそれ以外のノード間の交通状態も把握しておく必要があったため, 両者の把握可能なデータとして車両検知器データを取得している。

運用施策の研究としては, 付加車線を設置した際の効果検証³⁾ や, 流入規制, 交通信号制御⁴⁾, また標示板等の改良効果⁵⁾ を検討している研究が多い。本研究では実車走行や社会実験で

はなく統計モデル式に代入して定量的な評価を行うため, 渋滞箇所を避けるような経路に誘導するように出入口を調整するような施策を実施した際の改善効果を検証する。

また, 評価の項目に関して, CO₂ 排出量の抑制に着目する。CO₂ 排出量削減は, 京都議定書による数値目標もあるため, 各国で排出データをまとめる機関⁶⁾ や, 排出量推計の研究機関⁷⁾ が存在する。自動車の CO₂ 排出量低減に関しては機械工学の分野においてかなりの研究がすすめられているが, 交通工学の分野における根本的なエネルギー消費の低減を目指していく必要があると考えられる。交通工学では, エコドライブの効果を検証する研究⁸⁾ や, 自動車挙動から CO₂ 排出量へアプローチする研究⁹⁾ が進められている。本研究ではこれら既往研究の成果としているモデル式に代入することで CO₂ 排出に関する評価を行っていく。

3. データ分析による渋滞現象の分析概要

首都高速道路株式会社より, 3 号線下り全線の 2010 年 9 月 1 日~2010 年 10 月 19 日の車両感知器のデータをいただいた。また, ITDb (International Traffic Database) より, 2006 年 6 月 5 日~11 日の車両感知器データを取得している。いずれも 5 分間平均交通量, 5 分間平均速度のデータで, 観測区間は分合流の多いところを除いて約 600~1000m に分けてある。また, 2011 年 7 月 15 日~7 月 29 日における首都高速道路と並走する一般道の道路交通情報データをインターネットから取得した。その他にも 3 号線の傾斜データや, 大橋 JCT 合流部における渋滞発生の様子を実測・ビデオ観測により取得している。

まず, 2006 年と 2010 年のデータの平均や分散を比較して, 大橋 JCT 完成前後の交通現象の変化を現象としてとらえる。図 1 に池尻→三軒茶屋区間の交通量と速度の移動平均 (15 分平均, 平日平均) を示す。平均と分散を求めると, 交通量には有意差が見られないのに対し, 速度には有意差が見られた。

次に, 実験計画法の考え方をを用いて分散分析によって複数考

えられる速度低下要因のうち特に強いと考えられるサグと合流の影響の強さを分析していく。2010年データにおいて、サグの有無、合流の有無によって区間を分類し、1日の6時～翌1時のデータについて繰り返しのある二元配置法として計算を行った。分析結果は表1のようになり、P値の小さい方がより速度低下の要因になっていることが表わされるため、合流の方がサグよりも1日データにおける速度低下要因として大きいことが示された。

さらに2010年の渋滞現象を把握するために午後の渋滞の様子を速度帯毎に色付けした図2を作成した。図2から、三軒茶屋出口付近から渋滞が発生すること、渋滞時最も速度が低下する箇所は大橋JCT付近であり、大橋JCTから池尻入口付近、三軒茶屋出口付近へと徐々に速度を回復していることが読み取れる。このことから、渋滞の延伸はサグだけではなく合流による速度低下も要因として十分考えられることがわかる。そこで渋滞(40km/hを下回った状態とする)の発生要因と、ピーク時の渋滞延伸・収束要因に分けて考えることにした。

まず渋滞の発生要因を判別分析によって解明した。目的変数は速度V(km/h)を用いるが、渋滞状態が-、自由流が+になるような変数yに変換した。要因として考えられるサグ(ダミー)、合流、下流速度、交通量Q(台/5分)、傾斜、カーブ、トンネルから説明変数を選択した。渋谷→三軒茶屋の4区間において判別的中率が80%を超えるよう、図3のように変数を設定した上で回帰分析を行った結果、(1)のような線形判別式が得られた。サグも合流も交通量が多い時に初めて速度低下に起因すると考えられるため、それぞれの項に交通量を掛けている。(1)の係数は標準化回帰係数である。

(1)式による各区間の事故時を除く1ヶ月データとの判別的中率は表2のようになる。この係数の大小が発生要因としての影響力の大きさを示しているため、係数を比較するとサグの方が合流よりも渋滞の発生に起因していることが分かる。

次に、渋滞の波及・収束要因を解明するために、重回帰分析による統計モデル化を行った。対象時間帯を3日分の夕方へのピーク時に限定し、20km/h以下の渋滞状態となる谷町→池尻の7区間のデータを用いてモデルのパラメータを推定した。対象区間の一つ下流の速度と一つ上流の速度を比較することによって、対象区間での速度低下や回復のタイミングが分かると考え、また対象区間の下流部にある合流や出口は速度に影響すると考えられる。対象区間にサグがある際は速度がさらに低下すると考え、以上を踏まえ説明できている回帰分析より変数を選定し

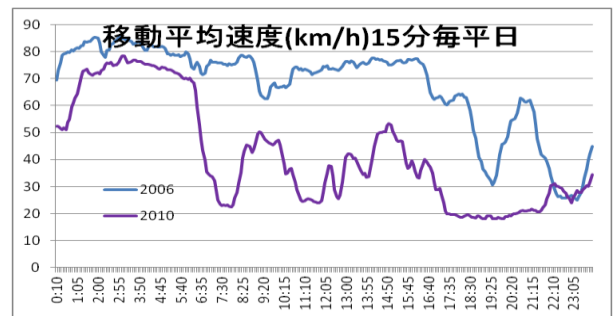
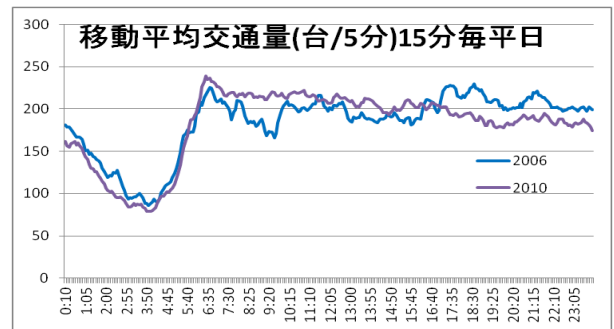


図1 移動平均交通量(上)と、移動平均速度(下)

表1 分散分析表

	分散	分散比	P-値
サグ	76963.69	223.0449	2.91E-45
合流	94892.64	275.0039	3.74E-54
交互作用	40666.78	117.8545	6.72E-26

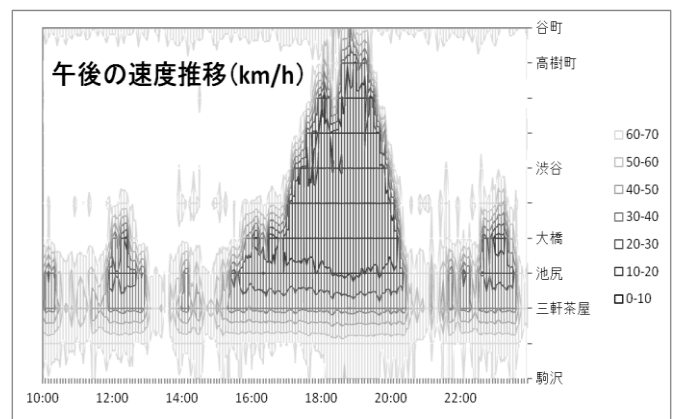


図2 午後の渋滞状況

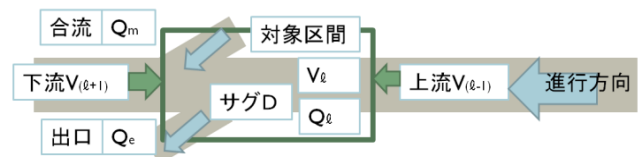


図3 変数の設定

$$y_l = 0.53V_{l+1} - 0.18DQ_l - 0.08Q_lQ_m - 0.19Q_l - 0.62 \quad (1)$$

表2 判別的中率

全的中率	三茶手前	池尻手前	大橋JCT	渋谷直後
84.4%	80.4%	82.2%	89.9%	85.3%

た上で、(2)(3)式のような指数型の統計モデルを作成した。

標準化回帰係数を見比べると、(2)より渋滞が波及する際はサグよりも合流の方が、影響が強いことが示された。また渋滞の収束モデルを作成する際、合流や交通量がわずかに影響し、サグ等の道路条件にはほとんど影響しないことが分かった。

また、渋滞の波及と収束を同時に考慮し、(2)と(3)で考案した説明変数を統合させたような線形統計モデルを作成し、係数を求めたところ(4)式ようになった。この式を渋滞現象のデータに代入すると、図4のようにあてはめのよい結果となることが示され、直前の速度データや交通量データ・道路条件により対象区間の速度を求める式を作成することができた。

なお、運用施策の検討の際は仮想の交通量で速度を計算するため、過去の速度を用いる形になり繰り返し計算をするうちに誤差が広がってしまう。そこで本研究では過去の速度データに依存しない、交通量データと道路条件のみで表わす統計モデルも作成した。その際新たに蓄積交通量 Q' を定義した。

対象区間には図5のような交通の流入出が考えられるが、流入量と流出量は一致せず、その差は対象区間内の密度変化として影響すると考えられる。蓄積交通量 Q' の定義と、それを説明変数として導入し、サグの項を上り坂傾斜 S に置き換えた線形式を(5)に示す。(5)を用いて谷町→三軒茶屋における所要時間を算出したところ、図6のようになり、渋滞の開始や終了のタイミングに誤差が生じているものの、元のデータと5%の有意差は見られず、総所要時間の誤差も10%以内に収まっている。

4. 運用施策案の検討

渋滞現象として、交通量が多くなると三軒茶屋出口手前区間でのサグによる速度低下が生じ始め、さらに交通量が増えると池尻入口・大橋 JCT の2か所の合流部を先頭とした渋滞が始まるのが把握できた。これらを踏まえて、本研究では3つの運用施策を考案し、施策施行時の所要時間短縮やCO₂排出量削減の効果を検証する。

1) 施策①:池尻入口封鎖

ランプメタリングの考え方をを用い、渋滞時に混雑の一要因として示された合流を一カ所なくすべく、池尻入口からの流入をなくす。

2) 施策②:大橋 JCT 回避経路

大橋 JCT 付近を通り三軒茶屋へ遠へ向かう車が、大橋 JCT での渋滞を回避するために、渋谷出口→池尻入口や富ヶ谷出口→池尻入口について一時的に一般道を利用しても追加課金を行わない制度を導入する。これにより経路選択の自由度が増す。

$$V_{\ell} = V_{\ell-1}^{a_1} V_{\ell+1}^{a_2} (Q_{\ell} Q_m)^{a_3} Q_e^{a_4} \exp(a_5 D + a_6) \quad (2)$$

$R^2=0.8594$	a1	a2	a3	a4	a5	a6
偏回帰係数	0.412	0.609	-0.031	0.039	-0.007	-0.065
標準化回帰係数	0.393	0.566	-0.174	0.068	-0.005	-0.088

$$V_{\ell} = V_{\ell-1}^{b_1} V_{\ell+1}^{b_2} (Q_{\ell} Q_m)^{b_3} Q_{\ell-1}^{b_4} \exp(b_5) \quad (3)$$

$R^2=0.8648$	b1	b2	b3	b4	b5
偏回帰係数	0.516	0.586	-0.180	-0.015	0.571
標準化回帰係数	0.523	0.530	-0.026	-0.080	0.744

$$V_{\ell} = 0.512V_{\ell-1} + 0.569V_{\ell+1} - 0.043Q_{\ell} - 0.00055Q_{\ell}Q_m + 0.187Q_e - 0.121DQ_{\ell} + 3.899$$

$$R^2 = 0.8586 \quad (4)$$

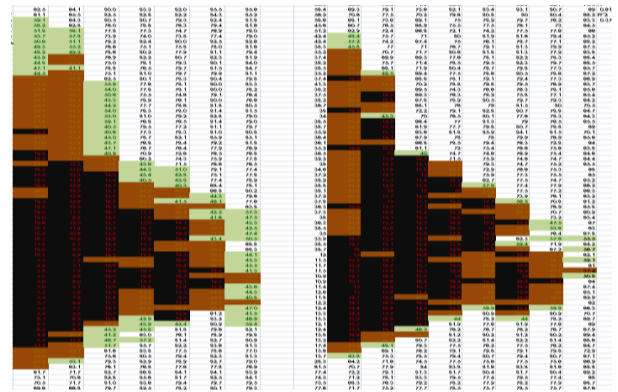


図4 速度カウンター図 (左:モデル, 右:生データ)

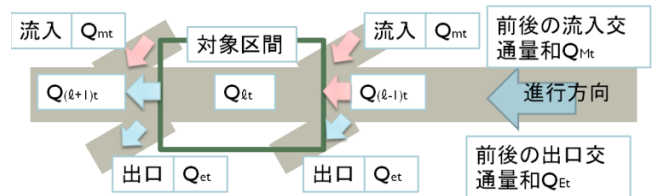


図5 Q' の定義

$$Q'_{\ell t} = Q'_{\ell(t-1)} + \Delta Q'_{\ell t} \quad (Q'_t < 0 \text{ の時は } Q'_t = 0)$$

$$\Delta Q'_{\ell t} = Q_{(\ell-1)t} + Q_{\ell t} - Q_{(\ell+1)t} - Q_{\ell t}$$

$$V_{\ell} = -0.307Q'_{\ell t} - 0.0036Q_{\ell}Q_m + 0.846Q_e - 6.66SQ_{\ell} - 0.131Q_{\ell} + 85.2 \quad R^2 = 0.8689 \quad (5)$$

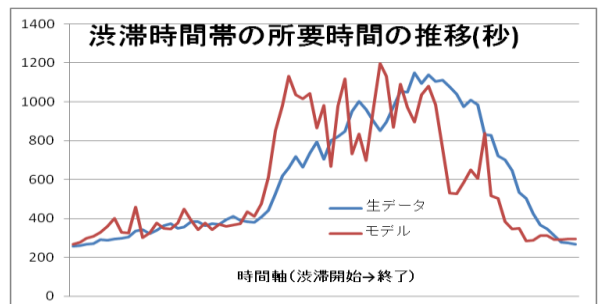


図6 所要時間の算出

3) 施策③:三軒茶屋出口封鎖

三軒茶屋出口利用者について、混雑時は一つ手前の出口(渋谷・富ヶ谷)から一般道を使用してもらうよう三軒茶屋出口を封鎖することによって、大橋 JCT 付近の交通量を減らす。

計算の際、施策開始のタイミング、施策②③では一般道の速度、また施策②では一般道の経路を選択する交通量の3つを設定する必要がある。施策①では池尻入口付近、施策②③では渋谷出口付近が渋滞状態になった時に施策開始とする。一般道の平均速度は 16km/h、施策②における一般道への経路選択は 10台/5分とした。

また、CO₂ 排出量に関しては、大口⁹⁾の排出量推定式を用い

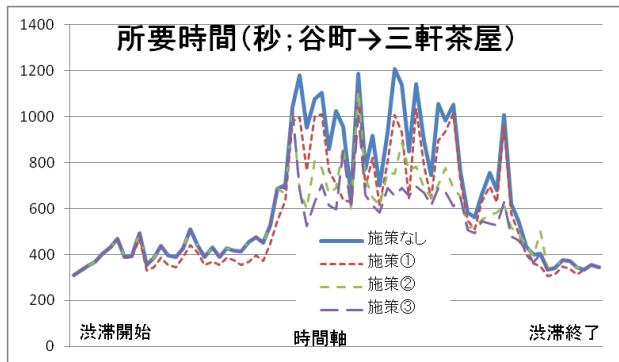


図7 運用施策による所要時間短縮

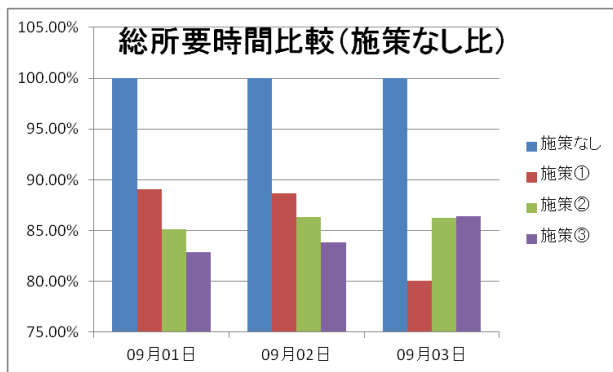


図8 施策による総所要時間の比較

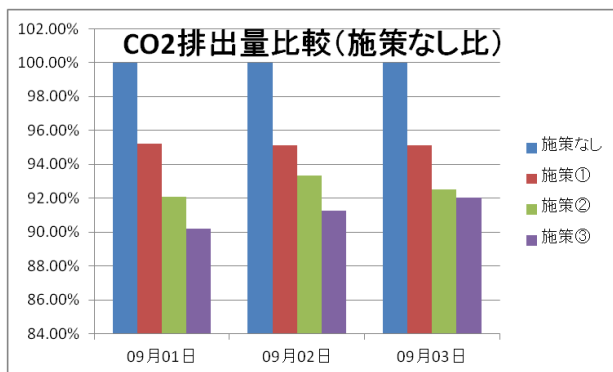


図9 施策によるCO₂排出量の比較

る。この式では燃料消費量と CO₂ 排出量が線形の関係と仮定しているため、燃料消費量で比較できる。谷町 JCT→三軒茶屋の全区間を走る自動車について、途中から一般道を走る自動車も含めて計算を行った。一般道については、40km/h で走行しつつ、渋谷→池尻(1.2km、信号 6 基)で 2 回、池尻→三軒茶屋(1.2km、信号 3 基)で 2 回信号によって完全停止をすることを想定している。3 日分の夕方ピーク時間帯のデータに施策を講じた場合を想定して計算した。図 7 はそのうち一日分について施策を講じた場合の所要時間の推移を示す。

全ての施策において総所要時間、CO₂ 排出量共に施策なしに比べ効果を示すことができた。また、1 か所の合流をなくすことよりも混雑箇所での交通量を減らす方が、効果が大きいことが示された。ただし、本研究では一般道の影響をあまり考慮できていないため、これらの影響を加味した運用施策案の改良が今後の課題になると考えられる。

5. おわりに

3 号線下りの渋滞は、三軒茶屋付近にあるサグや上り坂が原因だと言われてきた。しかし、本研究で大橋 JCT 完成後のデータを分析したことにより、交通量の増加や合流による速度低下の影響を無視できないことが示された。特に夕方ピーク時における渋滞の波及は合流の影響が強いことを示すことができた。

また、ドライバーに最も混雑する区間を回避できる、回避させる施策をとることにより、所要時間の低減効果、CO₂ 排出量削減効果を示すことができた。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：ETC 利用状況の推移，2011
- 2) 例えば，中村司・内海和仁・割田博・稲富貴久：首都高速道路における大規模交通規制時の影響分析，第 31 回交通工学研究発表会論文集，2011
- 3) 例えば，吉川良一・長浜和実・寒河江克彦・吉井稔雄・北村隆一：暫定 2 車線区間のボトルネック上流の付加車線設置による渋滞軽減効果の検討，第 30 回土木計画学研究発表会，2004
- 4) 例えば，加藤翼・安井一彦：高速道路のボトルネック区間における渋滞回避対策とその効果，第 29 回交通工学研究発表会論文集，2009
- 5) 例えば，Jian XING・鶴元史・石田貴志・村松栄嗣：片側 3 車線区間における LED 標識を用いた車線利用率平準化渋滞対策の効果検証，第 31 回交通工学研究発表会論文集，2011
- 6) 例えば，日本では温室効果ガスインベントリオフィス，世界では IEA (国際エネルギー機関)
- 7) 例えば，日本では国立環境研究所 (NIES)，米国では U.S. Environmental Protection Agency
- 8) 例えば，小林功・松本修一・坪田幸政・川嶋弘尚：エコドライブ走行が交通流に与える影響に関する基礎的研究，第 27 回交通工学研究発表会論文集，2007
- 9) 例えば，大口敬・片倉正彦・谷口正明：都市部道路交通における自動車二酸化炭素排出量推定モデル，土木学会論文集 No695/IV-54 pp.125-136，2002