

Moving Bottleneck及びElephant Raceに着目した 高速道路の損失時間推定手法に関する研究

青島 悠真¹・野中 康弘²・

¹学生会員 芝浦工業大学大学院理工学研究科社会基盤学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: mh23001@shibaura-it.ac.jp

²正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-13-14 マルヤス機械ビル5F)

E-mail: y_nonaka@doro.co.jp

高速道路には卓越した移動機能, すなわち高い速達性と時間信頼性が求められる. 移動機能の評価指標の一つに渋滞や混雑に伴う損失時間がある. 高速道路の時間損失は非飽和状態 (非渋滞時) よりも飽和状態・近飽和状態 (渋滞・混雑時) に大きいことは自明である. しかし, 交通状態別の走行台キロは非飽和状態が多くを占めることを勘案すれば, 非飽和状態における時間損失を検討することの意義は大きい. 本研究では, 片側2車線の高速道路を対象として, 低速走行する車両によって疑似的な車線規制状況が形成されるMoving Bottleneck, これと相まって疑似的な車線閉塞状態が形成されるElephant Raceの現象に着目し, 非飽和状態における時間損失の推定について, 待ち行列理論からアプローチする方法論を提案する.

Key Words: expressway, quality of service, moving bottleneck, elephant race, queuing theory

1. はじめに

道路のQuality of Service (以降「QoS」と称す) について, 米国のHighway Capacity Manual (以降「HCM」と称す) では, 走行サービスの視点として交通密度を指標とした評価手法が提案されている.¹⁾一方, 日本においても近年, 道路の機能階層性と走行性能照査に関する研究を通して, 道路のQoS, とりわけ移動機能の評価に関する研究が進められている.²⁾

高速道路のQoSに着目すると, 高速道路には卓越した移動機能が求められる. すなわち, 高い速達性や時間信頼性が重視されることから, その評価には飽和・近飽和状態 (渋滞・混雑時) の損失時間を考慮する必要がある. ここで, 高速道路の時間損失は, 非飽和状態よりも飽和・近飽和状態のほうが大きいことは自明であるが, 全体の走行台キロは非飽和状態の方が圧倒的に大きいことを勘案すれば, 非飽和状態における時間損失も無視し得ない可能性があると考えられる. すなわち, 「時間損失は渋滞や混雑に特化したものであろうか. 渋滞していなければ, 十分な走行サービスを提供しているものと評価してよいであろうか.」との考えが生じた. このような視点から高速道路の利用状況を俯瞰してみると, 非飽和状態におけるMoving Bottleneck (以降「MB」と称す) やElephant

Race (以降「ER」と称す) 発現時の走行性能評価が必要であるとの問題意識に至った.

そこで本研究では, 片側2車線の高速道路を対象として, 低速走行する車両によって疑似的な車線規制状況が形成されるMB, これと相まって疑似的な車線閉塞状態が形成されるERの現象に着目し, 非飽和状態における時間損失の推定について, 待ち行列理論からアプローチする方法論を提案する.

2. 既往研究レビューと本研究の位置づけ

(1) 既往研究のレビュー

MB および ER に着目した高速道路の交通状態評価に関する主な既往研究の系譜まとめて図-1 に示す. MB に着目した交通現象解析は, D.C.Gazis・R.Herman³⁾によって初めて問題提起された. ここでは, 多車線高速道路において他車に比して著しく走行速度の低い車両が1車線を占有することで当該車両上流に車列が形成された場合, 当該車両が停止している状態と類似した交通状態になると提唱されている.

G.F.Newell⁴⁾は, この提唱を受けて時空間上で車列が継続的に形成される状態にある場合, 他車に比して著しく

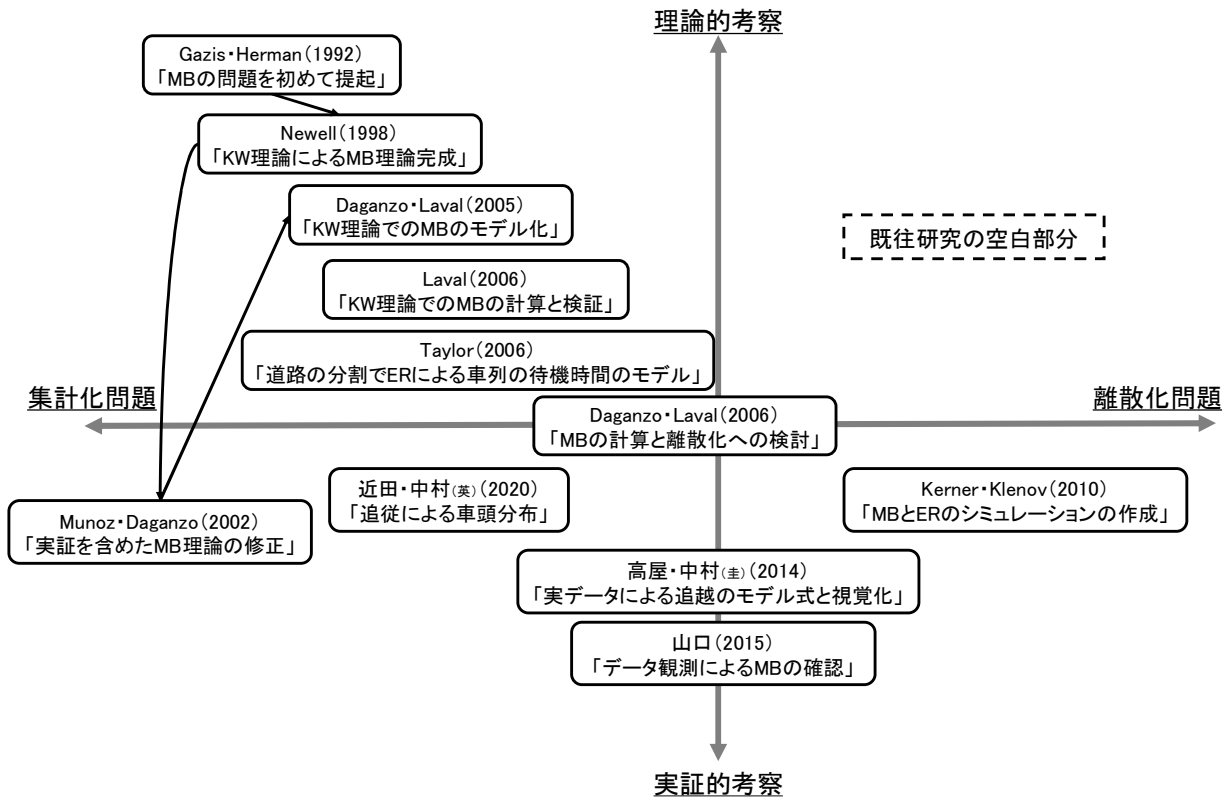


図-1 MB と ER に関する主な既往研究の系譜

走行速度の低い車両はボトルネックと同義であるとして、静止座標と移動座標の 2 視点を用いて Kinematic Wave Theory (以降「KW 理論」と称す) に基づくモデル構造を検討し、MB 理論を完成させた。

J.C.Munoz・C.F.Daganzo⁹⁾は、G.F.Newell の理論では観察結果と十分には一致しない点を指摘し、MB 理論を修正した上で、修正理論を前提とした MB 現象の実証研究を行っている。具体的には高速道路上に設置されている車両感知器から MB が発生している箇所を抽出し、MB による車両挙動が一般的なボトルネック（任意の箇所で見現するボトルネック）と比較して概ね同様の挙動を呈していることを示した。さらに、交通流中に試験車両を投入して MB の条件に合致するように走行する実験を行い、MB における交通容量は一般的なボトルネックの交通容量よりも大きくなる傾向にあることを示した。

その後、C.F.Daganzo・J.A.Laval^{6,8)}は、さらに研究を進めることになるが、その過程において「これらのモデルを使用して MB の任意の組合せが KW 理論上の交通流に与える影響を予測することができるが、これらのモデルを離散化する効率的な方法はまだ知られていない。」

(With these models it is possible to predict the effects of any set of moving obstructions on a KW traffic stream. Unfortunately, an efficient way of discretizing these models has not yet been found.) と言及している点が興味深い。続けて、固定の空間間隔と可変の時間間隔を持つ時空間格子上で KW 理論を基にし

た MB 理論の検討を進めるとともに、離散化問題としてのアプローチを見越した車線変更挙動モデルを導入したモデルの検討を行っている。さらに J.A.Laval⁹⁾は、モデル構造に MB による交通流の長期的な影響の反映を視野に入れた検討を行い、低速車に複数の挙動パターンを想定した実験結果と、実際の交通現象を照合してその差異を検証している。

N. Taylor¹⁰⁾と B.S. Kerner・S.L. Klenov¹¹⁾は、MB に加えて ER の挙動もあわせたモデルについて検討している。特に後者では、MB と ER の挙動を解析するために三相交通理論のフレームワークを前提条件としたシミュレーションを実施し、ER が解消した後も影響が長時間にわたって残ることに言及している。

一方、わが国では、高速道路における MB や ER を直接的な研究対象として扱ったものは極めて限定的である。高屋・中村¹²⁾は、片側 2 車線の高速道路を対象に車両感知器のパルスデータを用いて個々の走行速度や車頭時間などの観点から、相対的に低速な車両の追越挙動を通して、追越車線に交通量が偏る現象について考察している。その結果、走行車線に低速車が存在する場合、それよりも少しだけ希望速度の高い車両が追越しのために車線変更することで、追越車線に相対的に遅い車両が混入することになり、これが追越車線の車群形成に影響している可能性があることを示した。すなわち、MB による影響の可能性について言及した研究であると言える。

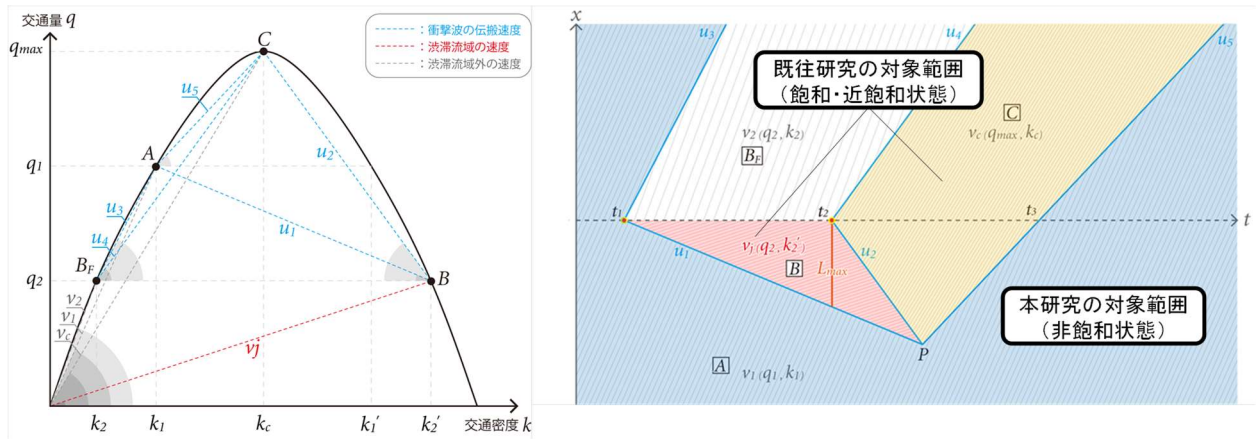


図-2 FD と Time-Space Diagram による既往研究と本研究の分析対象範囲の説明

山口¹³⁾は、片側 2 車線区間の高速道路単路部を対象に、複数断面のビデオ観測データから個々の車両の時空間的な走行挙動を分析している。その際に MB と ER の考えを取り込み、これらが追越車線への偏重に影響を与えると仮説を立て、追越車線へ交通量が偏在する要因を考察している。その結果、MB と ER に着目した車線利用率の偏在要因は、相対速度、絶対速度、後続の車群の大きさが関係することを示している。

近田・中村¹⁴⁾は交通流サービスの質の改善に向けた施策の必要性について述べており、追越車頭時間と非追従車頭時間成分の確率密度成分を検討している。その結果、Highway Capacity Manual の指針と比較しても十分精度の高いモデルを示すようになったことに言及している。

以上のとおり、MB と ER に関するこれまでの研究経緯を見ると、そのほとんどが KW 理論からアプローチされたものであり、Fundamental Diagram (以降「FD」と称す)を前提とすることで交通容量や渋滞現象の面から理論体系を研究したものである。

(2) 本研究の位置づけ

MB に起因する渋滞現象に関する記述は、これらの研究で一応の決着をみたと結論付けられている。しかし、FD における交通状態解析は、交通流に一樣分布を仮定したものであり、離散的な個々の車両挙動の集積としての時間損失を扱っていないことの課題も指摘されている。実際の現象では、非飽和状態においても低速車同士の追越挙動、すなわち ER 事象によって後続車が低速状態を余儀なくされることも多い。飽和状態、いわゆる渋滞時において時間損失が計上されることは言うまでもない。しかし、非飽和状態において MB や ER の影響による時間損失が、飽和状態のそれに比して取るに足りない程度の規模なのか、それとも無視し得ない規模のものなのかは、実のところよくわかっていない。

経済学でしばしば登場する考えに、Long Tail Theory がある。ごく一部の人気商品よりもニッチではあるが種類

が豊富である商品の方が全体の売り上げの方が大きいといった考え方である¹⁵⁾。この理論に完全に符合するわけではないが、飽和状態は交通量も多く、したがって時間損失も大きい。一方で、非飽和状態の交通量は少なく、時間損失も少ないが、遭遇機会あるいは走行台キロは相対的に大きい状態であることを考慮すれば、非飽和状態での単位時間当たりの時間損失は少ないものの、総量としての損失時間は飽和状態に比して遜色ないものになる可能性もあるのではないかと考える。

そこで本研究では、図-2に示すように非飽和状態の領域において生じていると考えられる時間損失に焦点をあてる。しかし、これらをデータオリエンテッドに分析することはデータ制約上の面で難しいことから、本研究では理論的なアプローチの方法論について提案する。

3. 検討方針

(1) 既往研究からの指針

既往研究では、MB 事象について特殊な環境下での分析、つまり極めて低速な車両が MB を形成する場合を扱っている。実際には、各車両の相対的な速度差によって、MB 事象はあらゆるシーンで発現する可能性がある。本研究では、前者の絶対的な MB を扱うケースを Moving Bottleneck for all (MBA)、後者の相対的な MB を扱うケースを Moving Bottleneck for someone (MBS) と区別することを提唱する。

また、図-2より既往研究で対象とした赤い枠囲みの飽和状態領域に対して、本研究では青い枠囲みの非飽和状態領域を対象とする。さらに、既往研究では FD 上で交通流に一樣分布を仮定しているのに対し、本研究では個々の車両の到着特性に着目した分析方針とする。具体的には、片側 2 車線の高速道路を対象として、待ち行列理論による時間損失計測手法のプロトタイプを提案する。

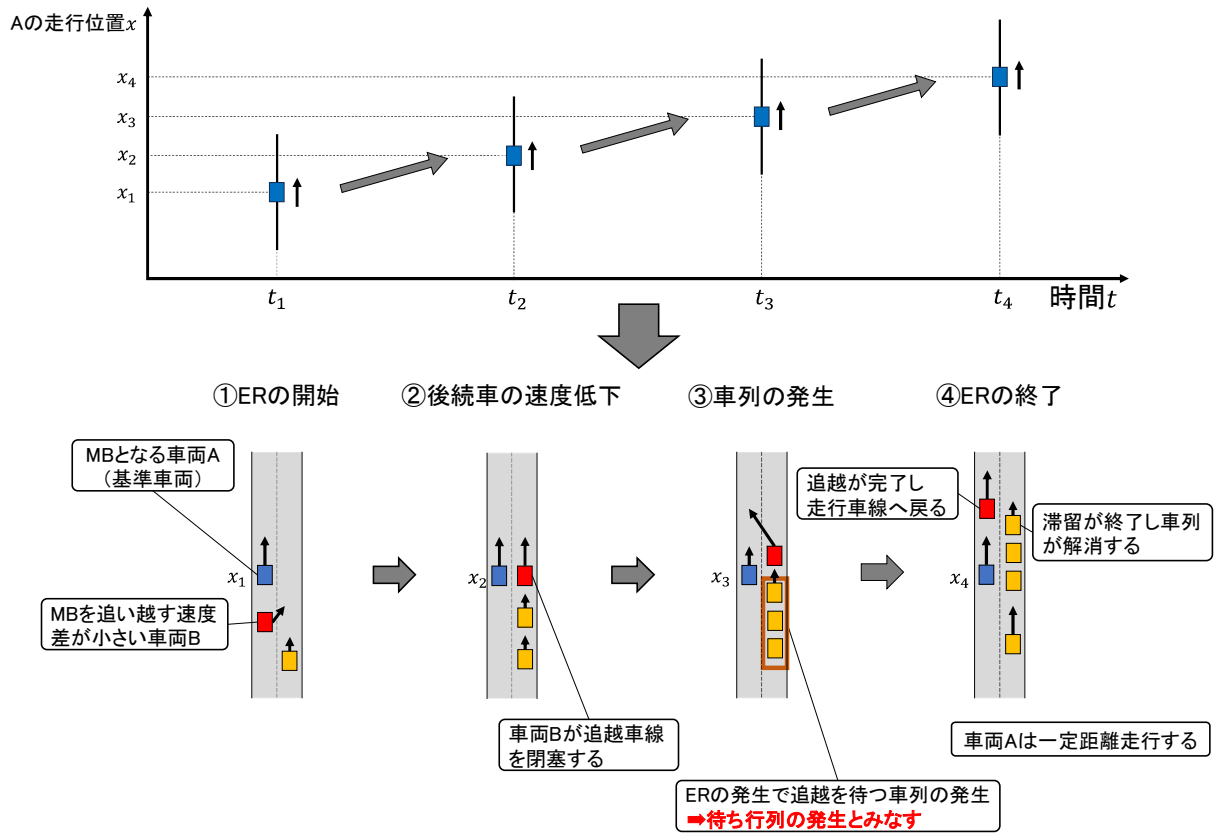


図-3 MB・ERの発生による待ち行列理論適用の考え方

(2) 待ち行列理論の採用

既往研究を参考した結果、本研究では待ち行列理論を用いたモデル式を検討する。待ち行列理論とは本来は窓口の処理能力と利用者の到着間隔よりどれだけの待ち時間と平均待ち人数が発生するかを算出し、効率の良い状態を検討するために用いる手法である。なお、本研究では、飽和状態は扱わないこととする。

MBとERの発生時では図-3のように、MBSとなる車両の距離軸の変化を固定してERの経過を確認した場合、その過程でERの要因となる車両の後続に複数の車両が滞留することになる。この車列を窓口に並ぶ待ち行列とみなすことが出来ると考えている。また、計算式の特徴として、主に処理能力が到着間隔に対して下回ることがなく、最終的には時間内に処理出来る状態での計算式であるという点が挙げられる。その上で、到着間隔や処理能力は平均をとっているものの一定の条件を持って分布していると仮定しているため、本研究において検討する高速道路の非飽和状態における損失時間算出においても、適当に機能する可能性があると考ええる。

待ち行列理論にて用いられる変数を道路交通の変数へ置き換える方針で計算を行う。本研究では片側2車線の高速道路がMBSによって1車線に規制されている状態であると考えことから窓口が1つのみの場合であると

考えるため、M/M/1モデルを原型とする。M/M/1モデルの計算式を確認すると、客が到着する間隔が λ 、窓口の処理スピードが $\mu (> \lambda)$ である時、行列の平均待ち時間 W となる窓口の処理スピードが $\mu (> \lambda)$ である時、行列の平均待ち時間 W となる。

しかしながら、自動車の車頭時間間隔は指数分布となるものの、相対速度で代替する仮想処理能力は正規分布となる可能性が高いため、単純なM/M/1モデルでは対応できないため、今後の課題として残される問題である。

4. MBとERによる時間損失計測方法の検討

(1) 損失時間計測式の検討

待ち行列理論の基本式を式(1)に示す。

$$W = \frac{\rho}{1 - \rho} \times \frac{1}{\mu} \tag{1}$$

(ただし $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$)

ここに、 W は平均待ち時間[秒]、 ρ は1車線区間の利用率、 λ は到着間隔[台/秒]、 μ は処理能力[台/秒]である。

平均待ち時間の算定は式(1)を基本とするが、着目車両よりも相対的に高速な車両を対象として計測する。まず、交通量を $Q=n$ [台/時]とし、各車両の速度を先頭から $v_i = v_1, v_2, \dots, v_n$ とする。さらに、着目車両の後方に存在する速度 $v_j (v_i < v_j)$ の車両台数を P_i とする。ここで、相対速度差が小さいと、追い越しに多大な時間を要するため計測距離(時間)に制限を設けることとし、実際に追い越しが可能な車両台数を式(2)と仮定する。

この時、1車線区間の利用率 ρ_i は式(3)となる。

$$P_i^{real} = P_i \times \frac{L}{v_i} \quad (2)$$

$$\rho_i = \frac{P_i^{real}}{3600} \times \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

ここに、 P_i^{real} は計測区間長当りの計測対象台数[台]、 P_i は計測対象台数[台]、 L は計測区間長[km]、 v_i は着目車両の速度[km/h]、 ρ_i は i 台目の 1 車線区間の利用率、 μ は処理能力[台/秒]である。

式(1)と式(3)から、平均待ち時間は式(4)、総待ち時間は式(5)となる。

$$W_k^{MBS} = \sum_{i=1}^n W_{MBSi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i}{1 - \rho_i} \times \frac{1}{\mu} \right) \quad (4)$$

$$T_{Lossk}^{MBS} = \sum_{i=1}^n (W_{MBSi} \times P_i^{real}) \quad (5)$$

ここに、 W_k^{MBS} は k パターン目の車列の合計待ち時間[秒]、 W_{MBSi} は i 台目での車列の平均待ち時間[秒]、 T_{Lossk}^{MBS} は k パターン目の車列での計測区間長当りの総待ち時間[台・秒]である。

これらは先述のとおり複数の車両発生パターンのうち 1 つの事例の状況のみを算出している。車両発生順は交通需要が n [台]とした場合、 $n!$ 通りあるので、各パターンが発生する確率を Prb_k とした場合の待ち時間と総待ち時間はそれぞれ式(6)、式(7)となる。

$$W^{MBS} = \sum_{i=1}^{n!} (Prb_k \times W_k^{MBS}) \quad (6)$$

$$T_{Loss}^{MBS} = \sum_{i=1}^{n!} (Prb_k \times T_{Lossk}^{MBS}) \quad (7)$$

ここに、 W^{MBS} は総平均待ち時間[秒]、 T_{Loss}^{MBS} は計測区間長当りの全体総待ち時間[台・秒時]である。

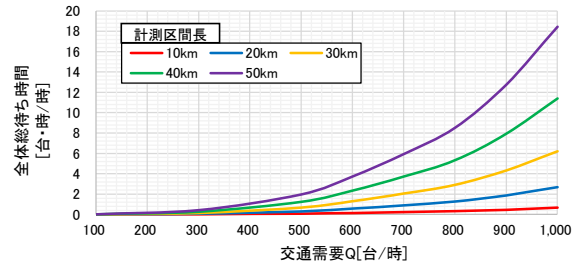


図-4 交通需要と全体総待ち時間の相関

ただし、複数サンプルの平均に近似し、式(8)、式(9)とする。

$$W^{MBS} \approx \frac{1}{n!} \sum_{i=1}^{n!} W_k^{MBS} \quad (8)$$

$$T_{Loss}^{MBS} \approx \frac{1}{n!} \sum_{i=1}^{n!} T_{Lossk}^{MBS} \quad (9)$$

(2) 計測結果の一例

交通需要と全体総待ち時間の相関を計測区間長ごとに比較して図-4に示す。前提条件として、1車線当りの交通容量を 1200[台/時]とし、走行速度は平均 80km/h、標準偏差 12km/h の正規分布を仮定する。車両発生順は、乱数発生により 10 通り作成し、うち 2 通りは値が最大・最少、すなわちそれぞれ各車両が後方全車両の MBS となる場合とならない場合とする。なお、計測区間長は、高速道路の平均的な連絡等施設間距離の 10km 程度から、平均トリップ長相当の 50km 程度の範囲で設定した。図-4より、300 台/時クラスの交通量から損失時間が発生している様子がわかる。計測区間長が大きいほど損失時間の増加率は大きく、概ね計測区間長の比で差異が生じていることがわかる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、MB と ER に着目した非飽和状態の時間損失の計測方法を待ち行列理論からのアプローチで検討した。今回は基礎的な計測方法の提示に留まるが、机上での計測方法のプロトタイプは提示できたと考える。

課題として、まず着目車両より前方に位置する相対的低速車を考慮していない点がある。実際には前方にも遅い車両が存在し、基準車両の速度が低下するため、損失時間は変化すると考えられる。また、追い越しに要する距離(時間)が未想定であり、これを反映させる必要がある。今後はシミュレーションを用いた検証や実際の高速道路の統計を用いた実証研究を加えた上で、先述の課

題の解消と政策評価が可能という条件を満たす検討式の作成を継続する。

最後に、国土交通省¹⁶⁾ 第76回基本政策部会配布資料「今後のICT交通マネジメント」において、自由走行速度と実勢速度の差に着目した議論が開始されている。ここでは、自動車の移動時間について、渋滞などの非効率により損失している時間として自動車走行の「時間ロス」に加えて、スムーズに移動できた場合でも必要な移動時間を計測している。前者がいわば渋滞時のロスとすれば、後者が近飽和・非飽和状態のロスと解釈できるし、非飽和・近飽和のほうが飽和状態よりも時間ロスが大きいことも示唆されている。すなわち、今後は非飽和状態における時間ロスも勘案すべきとの見解であると解釈され、本研究が時宜を得ていることの証左であると考えられる。

この集計方法の詳細は非公開であるため把握できていないが、集計化問題としての可能性が高く、よって非飽和状態における時間損失は、本論での指摘のとおり抜け落ちていた可能性が高いものと考えられる。今後は国土交通省の動向も踏まえながら、研究の方向性を探索していきたいと考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：新たな広域道路ネットワークに関する検討会中間とりまとめ, https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_network/pdf/interim-report.pdf, 2020.
- 2) 国土交通省：2040年道路の景色が変わる, <https://www.mlit.go.jp/road/vision/index.html>
- 3) D.C.Gazis, R.Herman : The moving and "phantom" bottlenecks, *Transportation Science* Vol.26. No.3, pp.223-229, 1992.
- 4) G.F.Newell : A moving bottleneck, *Transportation Research Part B:Methodological* Vol.32, No.8, pp.531-537, 1998.
- 5) J.C.Munoz, C.F.Daganzo : Moving Bottlenecks: A Theory Grounded on Experimental Observation, *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century*, Emerald Group Publishing Limited, pp.441-461, 2002.
- 6) C.F.Daganzo, J.A.Laval : On the Numerical Treatment of Moving Bottlenecks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.39, No.1, pp.31-46, 2005.
- 7) C.F. Daganzo, J.A. Laval : Moving Bottlenecks: A Numerical Method that Converges in Flows, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.39, No.9, pp.855-863, 2005.
- 8) C.F. Daganzo, J.A. Laval : Lane-changing in traffic streams, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.40, No.3, pp.251-264, 2006.
- 9) J.A. Laval : Stochastic Processes of Moving Bottlenecks: Approximate Formulas for Highway Capacity, *Transportation Research Record*, 2006.
- 10) N. Taylor : Extending Horizontal Queuing to Whole Routes of Moving Bottlenecks, In *European Transport Conference*, 2006.
- 11) B.S. Kerner, S.L. Klenov : A theory of traffic congestion at moving bottlenecks, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, Vol.43, No.42
- 12) 中村圭佑, 高屋雄太, 清田裕太郎, 石田貴志, 野中康弘 ; 高速道路の車線利用特性に関する微視的考察, *土木計画学研究・講演集*, Vol.50, CD-ROM 5pages, 2014.
- 13) 山口恭平, 清田裕太郎, 野中康弘, 岩倉成志 ; ビデオ観測データに基づく高速道路単路部の車線利用率偏在要因の考察, 第70回年次学術講演会講演概要集第4部, pp.117-118, 2015.
- 14) 近田博之, 中村英樹 : 高速道路における追従状態を考慮した交通流のサービスの質に関する評価指標の検討, *交通工学論文集* Vol.6, No.2, pp.9-pp.15, 2020.
- 15) 篠森裕子 : ロングテール「売れない商品」を宝の山に変える新戦略, 早川書房, 2006.
- 16) 国土交通省 : 今後の ICT 交通マネジメント, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001595751.pdf>, 2023.

(Received ?? ??, ??)

(Accepted ?? ??, ??)

A STUDY ON ESTIMATION METHOD OF LOST TIME ON EXPRESSWAY FOCUSING ON MOVING BOTTLENECK AND ELEPHANT RACE

Yuma AOSHIMA, Yasuhiro NONAKA