

Moving Bottleneck および Elephant Race に着目した
高速道路の走行サービス評価手法に関する研究

芝浦工業大学大学院 学生会員 ○青島 悠真
(株) 道路計画 正会員 野中 康弘

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)の時間損失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ほう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。」との疑問が生じる。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、高速道路における MB や ER に着目した既往研究を俯瞰した上で、高速道路の QoS 評価に資することを念頭に、非飽和状態における時間損失の計測方法について検討する。

2. 既往研究レビューと本研究の位置づけ

2-1. 既往研究のレビュー³⁾

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を体系的にまとめて図-1 に示す。MB に着目した交通現象解析は、Gazis&Herman が初めて問題提起した。その後 Newell, Daganzo, Laval らにてモデル化が試みられた。さらに Munoz&Daganzo の実証的な研究により、MB 理論に修正が加えられた。

これらは、Kinematic Wave Theory のもと、Fundamental Diagram (以降「FD」と称す) において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。

2-2. 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

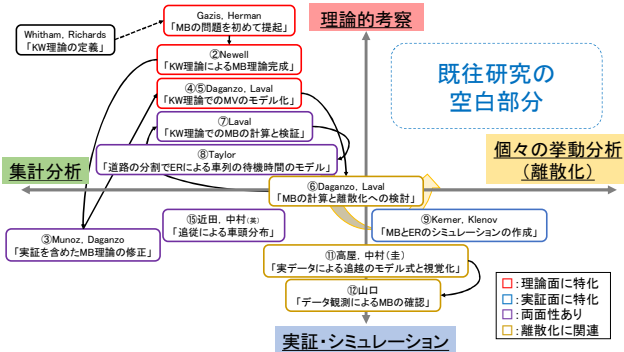


図-1 MB と ER に関する主な既往研究の系譜

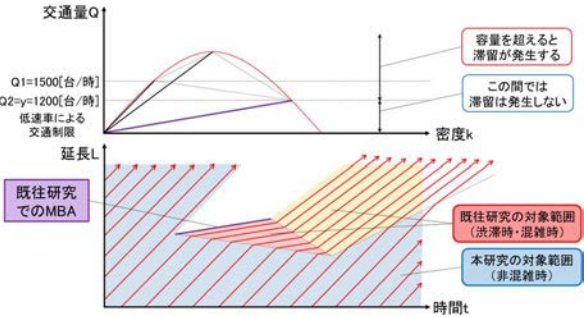


図-2 本研究の分析対象範囲

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えていないことの課題も指摘されている。実現象では、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。しかし、この影響が飽和状態での損失時間に比して、どの程度の影響を有するかはわかっていない。また、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。

そこで本研究では、図-2 に示すように非飽和状態領域において生じているであろう時間損失に焦点をあて、理論的な計測アプローチ方法について検討する。

3. 検討方針

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の計測手法のプロトタイプを提案する。計測イメージは図-3に示すとおり、着目車両の前後で影響が正反対になるからであり、例えば前方では着目車両より速い車両はMBSにならないが、後方では着目車両がMBSとなることによる。

4. MBとERによる時間損失計測方法の検討

4-1. 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。

$$W = \frac{\rho}{1-\rho} \times \frac{1}{\mu} \quad (\text{ただし } \rho = \frac{\lambda}{\mu}) \quad (1)$$

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 $v_1 = v_1, v_2, \dots, v_n$ 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順のうち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。

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

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

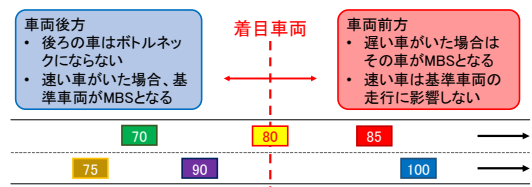


図-3 MB・ERにおける待ち行列理論適用の考え方

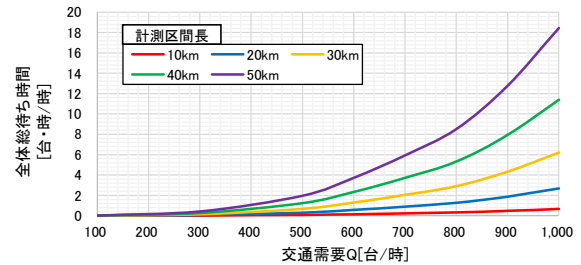


図-4 交通需要と全体総待ち時間の相関

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。ただし、複数サンプルの平均に近似し、式(8)、式(9)とする。

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

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

4-2. 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通りはそれぞれ各車両が後方全車両のMBS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/時クラスの交通需要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。

今後の課題として、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である。今後はこれらの課題を解決した上で、シミュレーションや実証研究へと繋げていきたい。

参考文献

- 1) Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, Sixth Editions, 2016
- 2) (一社) 交通工学研究会: 機能階層型道路ネットワーク計画のためのガイドライン(案), 2018
- 3) たとえば, G. F. NEWELL, A MOVING BOTTLENECK, Transpn Res.-B, Vol.32, No. 8, pp.531-537, 1998