

# 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

AH19070 青島悠真

指導教員 岩倉成志



## 1. 背景と目的

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、交通密度を指標とした評価手法が提案されている。日本では近年、道路の機能階層性と走行性能の照査方法に関する研究を通して、日本版 HCM の策定を目指す動きがある。

高速道路の QoS に着目すると、高い速達性や時間信頼性が重視され、その評価には渋滞や混雑流に伴う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、渋滞や混雑流に伴う影響が大きいのは明らかだが、全体の走行台キロは非渋滞流での場合が圧倒的に大きく、非渋滞流域の時間損失も無視し得ない可能性があるのではないかと考える。すなわち「時間損失は渋滞や混雑流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。」という疑問が生じる。このような視点から高速道路の交通状況を俯瞰してみると、非渋滞流域における 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いう問題意識に至った。

そこで本研究では、高速道路での MB や ER に着目した研究の現状をレビューした上で、QoS 評価に資することを念頭に非混雑流域での時間損失の計測方法を検討する。

## 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

MB 及び 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 によって実証的な研究が行われ、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と結論付けられている。しかし、これらの既往研究は交通流に一樣分布を仮定したもので、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が指摘されている。実際には交通容量状態になくとも低速車同士の追越挙動である ER 事象によって

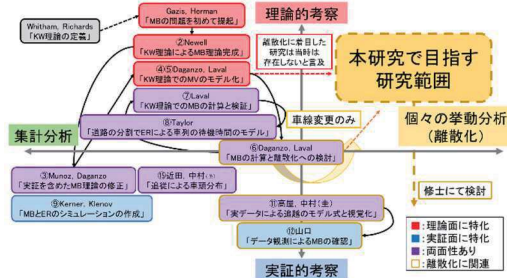


図-1 MB と ER に関する主な既往研究の系譜

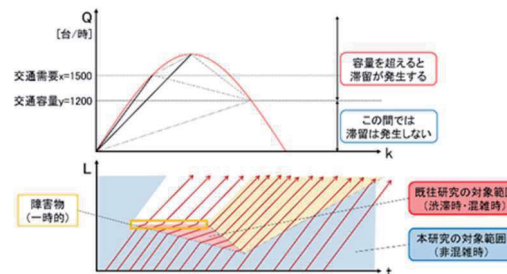


図-2 MB の分析対象範囲と解析イメージ

後続車が低速状態を余儀なくされる事も多い。この影響が渋滞・混雑現象も含めた損失時間に比して、どの程度の影響を持つかは不明である。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。

本研究では、図-2 での非渋滞流で生じるであろう時間損失に着目し、理論的な計測アプローチ方法を検討する。

## 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 を形成する場合の分析を行っている。実際には各車両の相対的な速度差によって、MB は多くの事例で発現する可能性がある。よって本研究では前者を絶対的な MB を扱うケースを Moving Bottleneck for all (MBA)、後者を相対的な 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渋滞・混雑流域に対して、本研究では青い枠囲みの非混雑流域を対象とする。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。

本研究では片側 2 車線の高速道路を対象とし、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 のとおり、MB となる基準車両の前後で場合分けをする。これは前後で影響が正反対

になるからであり，例えば前方では基準車両より速い車両はMBにならないが，後方では基準車両がMBとなる。

#### 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), (2)に示す。

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

$$Nq = W\lambda \quad (2)$$

ここで， $W$  は平均待ち時間[秒]， $\rho$  は車線利用率， $\lambda$  は到着間隔[台/秒]， $\mu$  は処理能力[台/秒]， $Nq$ ：平均待ち台数[台]である。

さらに，総待ち時間 $T_{Loss}$ [台・秒]を式(3)により求める。

$$T_{Loss} = W \times Nq \quad (3)$$

待ち時間の式は式(1)を基本とするが，対象車より高速車を対象として計測する。まず交通量を  $Q=n$  [台/時]とした上で各車両を先頭から  $v_i = v_1, v_2, \dots, v_n$  とする。さらに後方に速度  $v_j (v_i < v_j)$  での走行車両数を算出し，その車列の台数を  $P_i$  とする。この時相対速度差が小さいと，追い越しに多大な時間を要するので計測対象距離（時間）を考慮し，実際に追い越しが可能な車両を式(4)にて仮定する。この時車線利用率  $\rho_i$  は式(5)となる。

$$P_i^{real} = P_i \times \frac{L}{v_i} \quad (4)$$

$$\rho_i = \frac{P_i^{real}}{3600} \times \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

ここで， $P_i^{real}$  は実関連台数[台/トリップ長]， $P_i$  は関連台数[台]， $L$  はトリップ長[km]， $v_i$  は基準車両速度[km/h]， $\rho_i$  は  $i$  台目車列の車線利用率， $\mu$  は処理能力[台/秒]である。式(1)に代入し，平均待ち時間は式(6)となる。

$$W_k^{MBS} = \sum_{i=1}^n W_{MBSi} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_i}{1-\rho_i} \times \frac{1}{\mu} \right) \quad (6)$$

ここで， $W_k^{MBS}$  は  $k$  パターン目の車列での合計待ち時間[秒]， $W_{MBSi}$  は  $i$  台目による車列の平均待ち時間[秒]である。

平均待ち台数も車両毎に式(7)を用いて計算を行う。これらを式(3)に代入すると，総待ち時間は式(8)となる。

$$Nq_i = \frac{P_i^{real}}{3600} \times W_{MBSi} \quad (7)$$

$$T_{Lossk}^{MBS} = \sum_{i=1}^n (W_{MBSi} \times Nq_i) \quad (8)$$

ここで， $Nq_i$  は車両毎に発生する待ち行列の平均待ち台数[台]， $T_{Lossk}^{MBS}$  は  $k$  パターン目の車列での総待ち時間[台・秒/時/トリップ長]である。ただしこれらは先述の通り複数の車両順のうち 1 つの事例の状況のみを算出している。車両順は交通需要が  $n$ [台]とした場合， $n!$ 通りあることから，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下の式(9), (10)となる。

$$W^{MBS} = \sum_{k=1}^{n!} (Prb_k \times W_k^{MBS}) \quad (9)$$

$$T_{Loss}^{MBS} = \sum_{k=1}^{n!} (Prb_k \times T_{Lossk}^{MBS}) \quad (10)$$

ここで， $W^{MBS}$  は総平均待ち時間[秒]， $T_{Loss}^{MBS}$  は全体総待ち時間[台・秒/時/トリップ長]である。ただし各値が複数サンプルの平均に近似すると仮定し，式(11), (12)とする。

$$W^{MBS} \approx \frac{1}{n!} \sum_{k=1}^{n!} W_k^{MBS} \quad (11)$$

$$T_{Loss}^{MBS} \approx \frac{1}{n!} \sum_{k=1}^{n!} T_{Lossk}^{MBS} \quad (12)$$

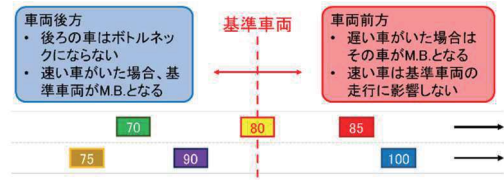


図-3 MB・ERにおける待ち行列理論適用の考え方

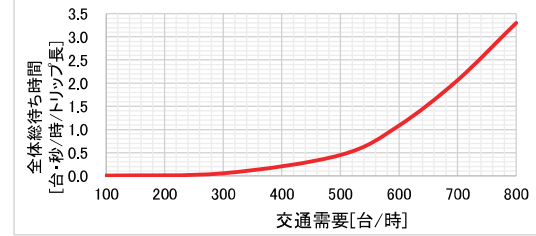


図-4 交通需要と全体総待ち時間の相関

##### 4-2. 計測結果の一例

最後に交通需要と全体総待ち時間の相関を図-4に示す。前提条件として，1車線あたりの交通容量は（一社）交通工学研究会の成果報告書より 1200[台/時]とし，走行速度は平均 80km/h で 40～120km/h の範囲に正規分布すると仮定し，基準長を高速道路での一般的なトリップ長である 50km とする。検証サンプルは車列順序を乱数発生させて 10 通り作成する。うち 2 つはそれぞれ各車両が後方全車両の MB とならない場合と MB となる場合とする。

図-4より，500[台/時]までの間は大きな増加はない一方でそれ以降では急激に増加している。ここから交通容量の約半分の交通需要の時点でERの現象が多く発生していると推測できる。これを 1 日当たりの往復交通量で換算すると約 24000[台/日]となり，地方部でも片側 2 車線でこの程度の交通需要を持つ高速道路は多いことから同様の事象が発生している可能性は高いと考察できる。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では，MB と ER に着目した非渋滞流域で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出来たと考える。

今後の課題として，まず基準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為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が未想定である事からこの状況の反映が必要である。今後はこれらの課題を解決したうえで，シミュレーションや実証研究へとつなげていきたいと考えている。

#### 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

#### 謝辞

多大なるご指導を頂いた株式会社道路計画の野中康弘客員教授に厚くお礼申し上げます。