

エントロピーを用いた都市間高速道路の 渋滞発生メカニズムに関する考察

渡邊 航成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: ah20028@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

都市間高速道路の単路部における交通集中渋滞は、主にサグやトンネル部などのボトルネックで発生する。渋滞発生直前の交通容量は一般に、渋滞発生時交通流率（BDF：Breakdown Flow rate）として定義される。ここで、同一のボトルネックであってもBDFが大きく変動することが指摘されており、主な変動要因には、明暗や天候（降雨の有無）、曜日などが関係しているとされている。しかし、これらの要因で区分してもなおBDFの分散は大きく、この変動要因を完全には把握できていないのが現状である。さらに、渋滞直前の車群特性から渋滞発生メカニズムを解き明かそうとする既往研究も見られるが、渋滞発生条件の解明には至っていない。そこで本研究では、車両感知器パルスデータを用いたエントロピーによる渋滞発生判定手法を提案するとともに、その適用可能性について検討した。

Key Words: entropy, intercity expressway, congestion, mechanism of congestion generation

1. はじめに

都市間高速道路の単路部における交通集中渋滞は、主にサグ部やトンネル部などのボトルネックで発生する。渋滞発生直前の交通容量は一般に、渋滞発生時交通流率（BDF：Breakdown Flow rate）として定義される。ここで、同一のボトルネックであってもBDFが大きく変動すること、これによって交通状況予測における渋滞発生の判定精度が低下することが指摘されている。主な変動要因には、明暗や天候（降雨の有無）、曜日などが関係しているとされているが、これらを考慮してもなおBDFの分散は大きく、この変動要因を完全には把握できていないのが現状である。

一方で、渋滞直前の交通需要についてその車群特性から渋滞発生メカニズムを解き明かそうとする既往研究も見られる。ボトルネックにおける減速波の発生から上流への伝播を経て渋滞発生に至らしめる、車群の大きさとその後に到達する交通流率の組合せから渋滞発生現象の説明を試みたものである。しかし、同様の条件であっても必ずしも渋滞が発生するわけでもなく、渋滞発生の有無を捉えきれない。

そこで本研究では、データ取得の制約条件等実務上の

要請を考慮し、車両感知器パルスデータを用いた実用的な渋滞判定手法の検討を目指す。具体的には、集計単位時間当たりの交通量や平均車頭時間あるいは車群構成台数等に拠らない説明変数として、エントロピーによる交通状態の記述方法に着目する。これにより、渋滞直前の構成車群を捉える視点を変えることで、より精度高く渋滞発生現象を説明できるかについて考察する。

2. 既往研究レビューと本研究の着眼点

(1) 実証的アプローチによる研究事例

渋滞発生時の交通状態、特にBDFの変動に関する主な既往研究を以下に整理する。岡村ら¹⁾²⁾は同一ボトルネックであってもBDFは一定ではなく、ばらつきが大きいことを指摘している。この変動要因として平休日や明暗や天候の違いを挙げているが、個々の車両挙動がBDFの変動に及ぼす影響を明らかにしたものではない。

大口ら³⁾は渋滞が発生する追越車線の車群に着目し、平均車頭時間が1.5秒程度でかつ大きな車群が到着すると渋滞を発生させる傾向にあることを指摘している。

邢ら⁴⁾⁵⁾は減速波が発生し上流へ増幅伝播する条件を

明らかにすることを目的として、車両感知器パルスデータより渋滞発生時の車群特性を分析している。車頭時間が2秒未満の車両が連続する状態を車群として定義したうえで、以下の3つの条件をすべて満たす場合に渋滞が発生すると指摘している。渋滞判定条件①がショックウェーブを起こしたとする条件、渋滞判定条件②③が渋滞波を延伸させた条件となっている。

【渋滞判定条件】

- ①車群構成台数概ね20台以上の車群が通過
- ②車群通過後の追越車線交通量が30台/分以上
- ③車群通過後の追越車線交通量が80台/3分以上

酒井ら⁶⁾はボトルネックにおける渋滞発生時の交通現象について、車群状況を表現する方法として「マス」という概念を提案している。渋滞発生状況について全車線を1つのユニットとして考えることで、追従状態にある車両のみに着目した車群では説明できなかった低速大型車の並走が渋滞の要因となる交通現象を表すことができる可能性を示唆している。

(2) エントロピーに着目した数理的アプローチの研究事例

エントロピーに着目して交通状態の記述を試みた事例を以下に整理する。岩崎ら^{7) 9)}はエントロピーと交通密度から自動車交通流の評価をしており、従来、定性的な評価しかできなかった現象・事象を空間的確率現象として初めてエントロピーを用いて検討された。

また、岩崎ら¹⁰⁾は上記の研究を発展させ、実測データを加えた体系化を試みている。ここでは街路網に分布し走行する車群のパターンについてエントロピーを用いて定量化することで従来の交通量等では分析が不可能であった区間内の車両分布状況の情報化が可能であることを示している。この中で、空間平均速度が交通密度、エントロピーの関数として定義できることを指摘し、現実の交通流を観測して検証を行っている。

さらに岩崎ら¹¹⁾は上記の応用として交通流の瞬時画像から得られるエントロピーと交通密度から空間平均速度および交通量を推定する汎用的な関数方程式を提案している。

三浦¹²⁾は自己駆動粒子系におけるエントロピーを再定義している。自動車による交通流の時間発展の様子を表現する数理モデルは、空間スケールがマクロなものとして、Lighthill&Whithamらによる流体力学的モデル、ミクロなものとしてPrigogineらによる気体分子運動モデルが考案されている。それぞれのモデルが、物理学における流体力学、統計力学をベースに導出されており、自動車をニュートン力学の法則が成立する粒子として捉えている。また、物理学においては、マクロな理論である熱

力学や流体力学とミクロな理論である統計力学を結ぶ物理量としてエントロピーが存在する。一方で、自動車は自己駆動粒子であり慣性の法則や作用・反作用の法則を満たさず、前方に直進している場合は自動車間の相互作用が非対称である特徴を有している。このような自己駆動粒子について、過去エントロピーの検討が行われたものの十分に議論されてこなかった。このことを受け、車頭間隔に注目して自動車の位置のちらばり具合を定式化した先行研究を参考に、速度のちらばり具合を示すエントロピーをミクロの視点から新たに定義することで、系全体のエントロピー、相互情報量を定式化している。

高速道路における3台の自動車の追従走行実験のデータを利用して、相互情報量を算出したところ、3台の平均速度が高いが、3台の平均車間距離が広い場合と狭い場合で、相互情報量が異なる値をとることがわかり、平均速度が高く平均車間距離が狭い状態、つまり渋滞が発生する直前の状況（メタ安定状態）を相互情報量で検知できることがわかった。また、上記のメタ安定状態を再現することが可能な交通流ミクロモデルであるSOV (Stochastic optimal velocity) モデルとZRP+SLS (Zero range process + Slow start) モデルを用いて、一車線単路周期系における交通流シミュレーションを行い、定式化したエントロピーの時間発展の様子を探った。その結果、時間発展とともに系全体のエントロピーが増大する様子が確かめられたが、メタ安定状態が発生する車両密度では系全体のエントロピーが時間発展とともに減少する様子が見られた。具体的には渋滞していない状態から、渋滞している状態に遷移する場合にエントロピーが減少しており、このときにエネルギーの散逸が発生していると推測された。

また、三浦ら¹³⁾は岩崎・定方¹⁰⁾の車頭距離に着目したエントロピー式を車両の速度変動に着目したエントロピー式として再定義した。実測の高速道路上における3台の後続車両のGPSデータを計算することにより、相互情報を用いて準安定状態を検出し、定式化した相互情報の実用性を示している。

(3) 本研究の着眼点

以上のように、これまでも渋滞発生に至る交通状態を説明するために様々な視点からアプローチされてきたが、その変動について再現性高く説明するには至っていない。一方、エントロピーによるアプローチもシミュレーションは多くなされているが、高速道路の渋滞発生直前の交通状態評価に用いられたことはない。

そこで本研究では、岩崎・定方¹⁰⁾が示したエントロピー式を用いた渋滞発生判定の検討を行う。具体的には、既往研究のうち邢ら⁵⁾の研究を対象に考察する。

なお、当該研究における渋滞判定精度を確認したとこ

ろ、度を確認したところ、渋滞が発生する条件でも渋滞しておらず、逆も然りであった。このことから既往研究では、渋滞発生の有無を捉えきれておらず渋滞判定条件は判定精度に課題があることが挙げられている。

3. エントロピーを用いた渋滞判定の考え方

(1) 車両分布パターンのエントロピーによる定量化

本研究では、岩崎ら¹⁰⁾が提唱するエントロピーによる道路交通流情報論を援用する。ボトルネック付近の車群形成状況をエントロピーにより定量化することで、車両分布パターンを情報化し、渋滞判定指標としての実用可能性を検討する。エントロピーによる車両分布パターン評価の考え方を以下に解説する（一部本論の主旨に合わせて改変している）。

図-1の上段に示すように、任意の区間 L (m) に存在する n (台) の車両分布について、ある時刻における現象として捉える。このとき、 i 番目の車両の車頭距離 D_i (m) ($i=1, 2, \dots, n$) が確率事象であること、相互に関連のない独立事象としてみれば、車両分布パターンのエントロピー H は、式(1)で表現される。

$$H = -\frac{D_1}{L} \log_2 \frac{D_1}{L} - \frac{D_2}{L} \log_2 \frac{D_2}{L} - \dots - \frac{D_n}{L} \log_2 \frac{D_n}{L}$$

$$= -\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{L} \log_2 \frac{D_i}{L} \quad (\text{bits}) \quad (1)$$

ここに、 H : 車両分布パターンのエントロピー

D_i : i 番目の車両の車頭距離 (m)

L : 時刻 t の対象区間長 (m)

n : 対象区間内の車両の台数 (台)

次に、図-1の下段に示すような極端な2つの状態を考える。まず、全車両が等間隔で並んでいる状態、すなわち全車両の車頭距離 ($D_i = L/n$) が等しい場合に車両分布パターンのエントロピーは最大値をとる。これを H_{max} とすると、 H_{max} の状態は式(2)で表現される。

$$H_{max} = -\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{L} \log_2 \frac{D_i}{L} - \frac{D_1}{L}$$

$$= -\log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (\text{bits}) \quad (2)$$

一方で、全車両が1つの車群が形成する状態、すなわち全車両の車頭距離が最小 (jam 状態) の場合に車両分布パターンのエントロピーは最小値をとる。これを

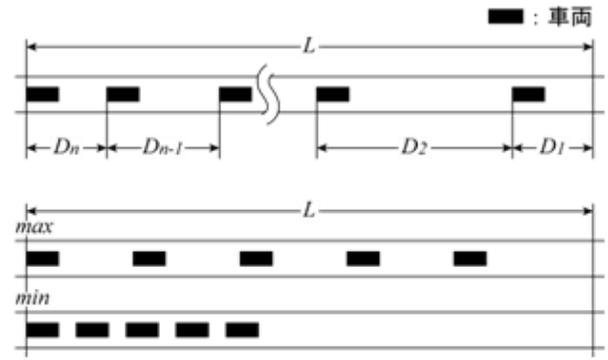


図-1 車両分布パターンのエントロピー計測の模式図

H_{min} とすると、1 台を除く全車両が最小車頭距離 D_j となり、 H_{min} の状態は式(3)で表現される。

$$H_{min} = -\frac{L - D_j(n-1)}{L} \log_2 \frac{L - D_j(n-1)}{L}$$

$$- \sum_{i=1}^{n-1} \frac{D_j}{L} \log_2 \frac{D_j}{L}$$

$$= -\frac{L - D_j(n-1)}{L} \log_2 \frac{L - D_j(n-1)}{L}$$

$$- (n-1) \frac{D_j}{L} \log_2 \frac{D_j}{L} \quad (\text{bits}) \quad (3)$$

(2) 車両分布パターンのエントロピーの基本的性質

車両分布パターンのエントロピーによる交通状態の比較にあたっては、交通量や交通密度といった基本統計量の違いを考慮に入れる必要がある。換言すると、同じ交通状態量におけるエントロピーの違いに着目することが重要である。ここで、交通密度は、対象区間内の車両存在台数に他ならないので、式(4)で表現される。

$$K = \frac{n}{L} \times 1,000 \quad (\text{台/km}) \quad (4)$$

以上のことから、交通密度と車両分布パターンのエントロピーの関係を可視化すると、車両分布パターンのエントロピー H は、図-2に示す H_{max} と H_{min} に包括されたエリアに分布する。

さらに、同じ交通密度の状態における H_{max} と H との差をとることで、いわば交通密度によって正規化されたエントロピーを得ることができる。これを車両分布パターンのエントロピーの相対値 H_d とすると、 H_d は式(5)で表現される。

$$H_d = H_{max} - H \quad (\text{bits}) \quad (5)$$

上記と同様に、交通密度と車両分布パターンのエント

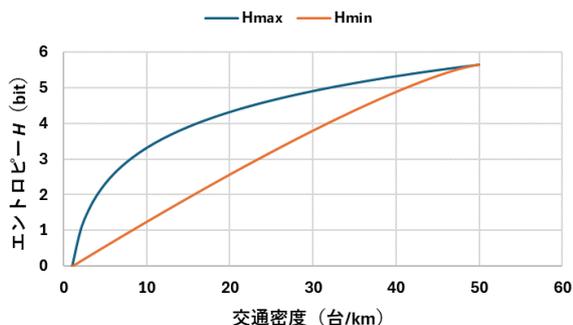


図-2 交通密度と車両分布パターンのエントロピーの関係 (H_{max} と H_{min} に着目して整理)

ロピーの相対値の関係を可視化すると、

車両分布パターンのエントロピーの相対値 H_d は、図-3 に示すエリアに分布する。

なお、エントロピーの相対値は、 H_{min} と H との差をとることや、 H_{max} あるいは H_{min} との比をとるなどのバリエーションも考えられる。

(3) パルスデータを用いたエントロピー算出条件

本研究では、後述する車両感知器パルスデータから得られる個々の車両の通過時刻と地点速度を扱うことから、直接的に区間情報を計測することはできない。そこで、以下の重要な仮定条件を前提に車両分布のエントロピーを算出する。

- ・個々の車両の走行速度は変化しないと仮定
- ・後続車が先行車に追いつく場合には、最小車頭距離 20m で追従状態に入ると仮定

4. エントロピーを用いた渋滞発生判定の適用可能性検証

(1) 分析対象箇所と分析対象日

分析対象箇所と分析対象日を図-4に示す。本研究では、2009年に関越自動車道(上り線)花園IC付近のボトルネックで交通集中渋滞が発生した休日5日間を対象とする。分析対象日は明暗や天候の影響がない同一条件であり、渋滞発生は全て昼過ぎから夕方にかけての時間帯である。なお当該ボトルネックは花園ICから約1km下流にあるサグであり、その後改築により付加車線が設置され、現在渋滞は解消されている。

(2) 分析データの概要

本研究では邢ら⁵⁾の研究と同じデータを用いて適用可能性の検証を行う。分析データは花園IC本線合流直後に位置する車両感知器パルスデータを使用する。分析対

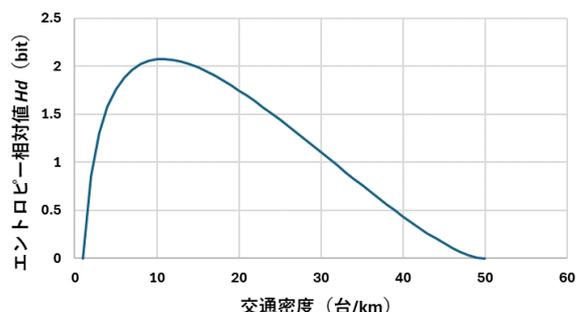
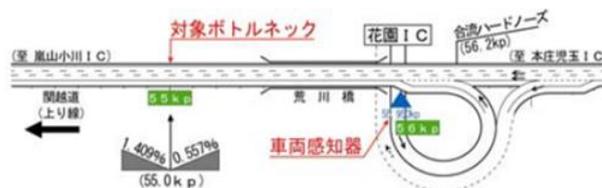


図-3 交通密度と車両分布パターンのエントロピーの相対値の関係



対象日	渋滞発生時刻	対象時間	天候
2009/4/19(日)	14:34	14:04~14:43	晴
2009/4/26(日)	15:09	14:39~15:18	晴
2009/5/3(日・祝)	16:05	15:35~16:14	晴
2009/5/4(月・祝)	14:03	13:33~14:12	晴
2009/5/24(日)	15:54	15:24~16:03	晴

図-4 分析対象箇所と分析対象日

象時間は渋滞発生30分前から渋滞発生10分後の40分間とし、渋滞発生の特定は邢ら⁵⁾の研究で車両感知器パルスデータの個々の時系列速度より算出している値に準じる。また、邢ら⁵⁾の研究と同様、交通集中渋滞発生のきっかけとなる追越車線の交通状態に着目して分析を行う。

(3) 実データによる適用可能性検証

式(1)に基づいて、車両分布パターンのエントロピーを算出した結果の一例(2009/5/24)を図-5に示す。エントロピーの算出に際して、区間長 L は1,000(m)、最小車頭距離 D_j は20(m)と設定した。区間長の設定は、車両感知器の位置から当該区間のボトルネックまでの距離が約1,000mであること、最小車頭距離は一般的な渋滞時の交通密度が50(台/km)程度であることに拠るものである。また、分析対象時間は渋滞発生30分前から渋滞発生10分後の計40分間とし、毎正時1分ごとのエントロピーとエントロピーの相対値を算出し、渋滞発生時刻は赤線で表示した。

さらに、エントロピーの変動傾向を考察するために、1分単位の交通量、平均車頭時間、平均車頭距離の算出結果も併記した。

図-5をみると、渋滞発生前の1分間交通量は変動(振幅)が大きく、渋滞発生時の交通量よりも大きな交通量が発現しても渋滞せず、それよりも低い交通量で渋滞に至っている様子がわかる。これがいわゆる渋滞発生の確

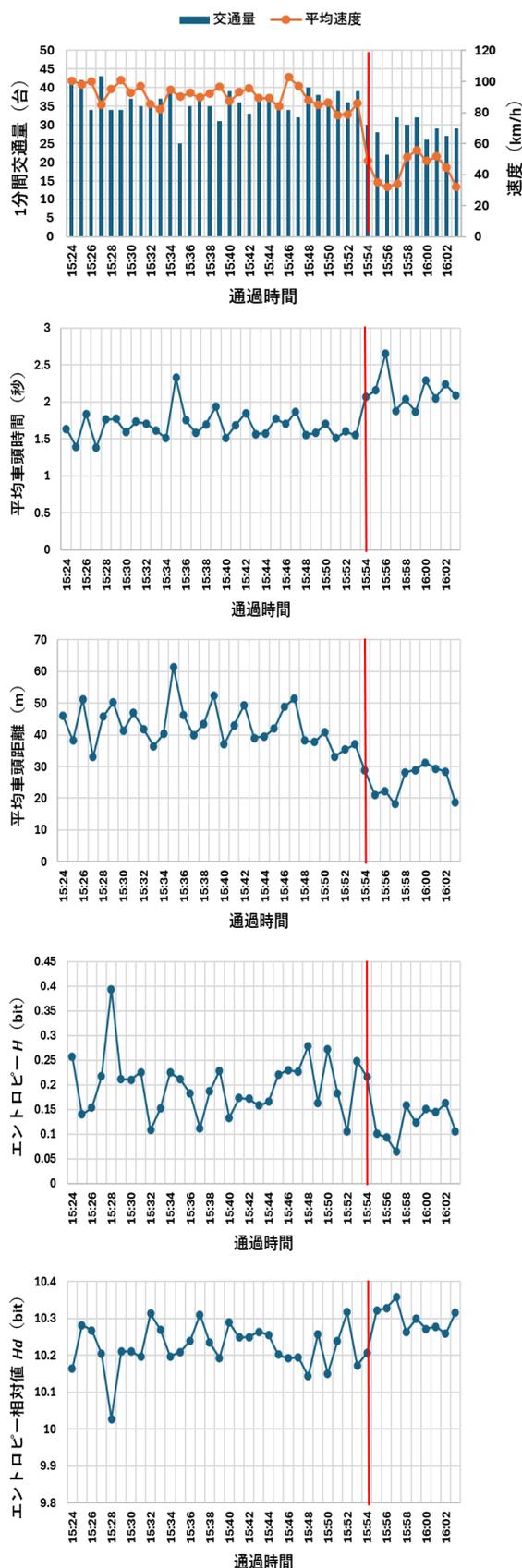


図5 車両分布パターンのエントロピーの算出結果 (2009/5/24 の例) ※比較参考指標併記

率的現象であり、直前における渋滞判定精度の阻害要因となっている。交通量の逆数に相当する平均車頭時間も当然のことながら同様の傾向を呈しており、車両感知器

で計測されるボリュームによる判定には限界があることがわかる。

他方、車両感知器で計測された地点速度が維持される仮定条件のもとで算出した平均車頭距離をみると、渋滞直前において相対的に密な状態が発現しており、判定精度向上に寄与する可能性がある。

これらの指標に対して、車両分布パターンのエントロピーの算出結果についても変動(振幅)の大きさは同様に発現しているし、エントロピーの時経的変動は渋滞発生時に向けて一定の傾向はあるものの、渋滞発生直前における解釈の難しさが残りそうである。この原因には、算出の仮定条件として設定した等速走行および追従挙動設定が考えられるため、対象区間を短くして集計することや、分析サンプル数を増やして検証を重ねる必要があるだろう。

5. まとめと今後の課題

本研究では、渋滞判定精度の向上を図ることを目的として、車両分布パターンのエントロピーに着目して、その適用可能性を検証した。検討の結果、渋滞判定精度向上のためのエントロピーの有用性に関する糸口を掴むにとどまり、検証サンプル数が少ないこと、エントロピーの算出条件として時空間の分解能を変化させたケースの追加検証が必要なこと、その他の条件との組合せについて追加検証が必要なこと等、実用化に向けての課題を把握した。今後はこれらの課題に対応しつつ、渋滞直前における情報提供に資する判定精度の確保に向けた検討が必要であると考えられる。

謝辞：研究を進めるにあたり、データ提供していただいた東日本高速道路株式会社様に厚く感謝申し上げます。

REFERENCES

- 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究(上), 高速道路と自動車, Vol.44, No.2, pp.31-38, 2001.
- 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究(下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, Vol.44, No.12, pp.27-34, 2001.
- 邢健, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 車両感知器パルスデータを用いた渋滞発生時交通現象分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, 2010.
- 邢健, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 渋滞を引き起こす交通流の車群特性分析, 土木計画学研究・講演

- 集, CD-ROM, VOL.42, No.82, 2010.
- 6) 酒井克典, 下川澄雄, 吉岡慶祐: 都市間高速道路における渋滞発生時の交通現象に関する分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.57, 2018.
 - 7) 岩崎洋一郎, 定方希夫, 高山秀造: エントロピーと交通密度による自動車交通流の評価について, オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.58-59, 1986.
 - 8) 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーと交通密度による自動車交通流の評価について(その2), オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.117-118, 1987.
 - 9) 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーと交通密度による自動車交通流の評価について(その3), オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.24-25, 1987.
 - 10) 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーによる道路交通流情報, オペレーションズ・リサーチ, Vol.33, No.8, pp.408-416, 1988.
 - 11) 岩崎洋一郎, 定方希夫: エントロピーを用いた道路交通流制御用情報, オペレーションズ・リサーチ, Vol.38, No.7, pp.358-364, 1993.
 - 12) 三浦紋子: 自己駆動粒子系におけるエントロピーの特性と自己駆動粒子によって体験される時間に関する研究, 東京大学学位博士論文, 2016.
 - 13) 三浦紋子, 友枝明保, 西成活裕: 1次元交通流におけるエントロピーの定式化と相互情報量を利用したメタ安定状態の検知, 交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, vol.26, pp.43-46, 2020.
- (Received ???)
(Accepted November ???)

A STUDY ON THE MECHANISM OF CONGESTION ON EXPRESSWAYS USING ENTROPY

Kosei WATANABE, Yasuhiro NONAKA