

単一の時系列データにおける渋滞発生の予兆検知について

中村佳祐¹, 岡本和也², 林邦好³, 宮路智行⁴, 友枝明保⁵

¹ 関西大学 総合情報学研究科 ² 早稲田大学 理工学術院総合研究所

³ 京都女子大学 データサイエンス学部 ⁴ 京都大学 大学院理学研究科 ⁵ 関西大学 総合情報学部

概要

本研究では、単一の時系列データを用いた渋滞発生の予兆検知を目的とし、時系列データからトレンド成分を除去した残差成分について分析を行った。対象は、(i) 2018 年の阪神高速道路における密度が変化する実データと、(ii) 2003 年の円環状コースにおける密度固定の走行実験データである。各データから算出した自己相関係数は、いずれの場合も渋滞発生前に増大する傾向を示した。この結果から、単一時系列データにおける渋滞発生の予兆検知の指標となり得ることが明らかになった。

Detection of Precursors for the Onset of Traffic Congestion in Two Single Time-Series Datasets

Keisuke Nakamura¹, Kazuya Okamoto², Kuniyoshi Hayashi³,
Tomoyuki Miyaji⁴, Akiyasu Tomoeda⁵

¹ Graduate School of Informatics, Kansai University

² Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

³ Faculty of Data Science, Kyoto Women's University

⁴ Graduate School of Science, Kyoto University

⁵ Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract

This study aims to detect precursors for the onset of traffic congestion using two types of single time-series data. We analyzed the residual component obtained by removing the trend from the original data. Two datasets were examined: (i) real-world data from the Hanshin Expressway in 2018 under fluctuating density, and (ii) experimental data in 2003, collected from vehicles traveling on a circular course under fixed density. We found that the autocorrelation coefficient, calculated for each dataset, exhibited an increasing trend prior to the onset of traffic congestion in both cases. These results indicate that autocorrelation can serve as a potential indicator for detecting precursors of congestion in single time-series data.

1 はじめに

交通渋滞は多大な経済的損失を招くとともに、交通事故の誘発要因ともなる喫緊の社会課題である。この問題の解消に向け、従来より数理モデルを用いたアプローチが数多く展開してきた [1]。近年で

は、計測技術の進歩により大規模な交通データの取得が可能となり、時系列解析をはじめとするデータ駆動型手法を用いた研究が活発化している [2]。

先行研究 [3] では、システムが臨界点に近づく際に観測される臨界減速と呼ばれる現象に着目してい

る。臨界減速とは、システムが外乱を受けた際、元の平衡状態へ回復する速度が低下する現象を指す。同研究ではこれを Early-Warning Signals (EWS) として、状態遷移の予兆検知に応用している。また、この理論を交通流の文脈に適用し、車両台数の増加に伴う加速度の分散および自己相関係数の変化から EWS を観測した研究 [4] も存在する。しかし、当該研究 [4] は密度の異なる複数の時系列データを用いた分析であり、自由流と渋滞流は別々の時系列データに含まれている。したがって、自由流と渋滞流の双方が含まれる、単一の時系列データへの適用可能性に課題が残されていた。

こうした背景を踏まえ、本研究では先行研究 [3] の手法を適用し、単一の時系列データを対象として渋滞発生の予兆を捉えることを目的とする。本稿では、その分析手法および結果について報告する。

2 単一時系列データによる分析

2.1 分析対象データ

本研究では、密度変化の特性が異なる以下の 2 種類の単一の時系列データ (i), (ii) を分析対象とする。

(i) 密度が変化する単一の時系列データ

2018 年、阪神高速 11 号池田線（大阪方面）塚本合流付近で計測された車両走行データ [5]。計測区間内を走行する車両に関する、車両識別番号、時刻、速度、走行車線、走行位置情報を用いた。

(ii) 密度が固定された単一の時系列データ

2003 年、円環状コースを 22 台の車両が周回する実験データ [6, 7]。22 台の車両に関する、走行位置と時刻情報を用いた。

まず、各データの交通流特性について概説する。時系列データ (i) における片側 2 車線の基本図を図 1 に示す。基本図において流量が最大となる点を臨界点とする。図 1 より、臨界点における密度（臨界密度）は 60~70 台/km 付近であることが読み取れる。この臨界密度以下の密度領域が自由流、それ以上が渋滞流である。また、先行研究 [3] の前提条件との整合性を確認するため、時系列データ (i) の密度が単調増加傾向にあるかを検証した。検証には式 (1) に示すケンドールの順位相関係数 (τ) を用いた。

式 (1) における n は観測値の個数を表す。

$$\tau = \frac{(\text{順方向のペア数}) - (\text{逆方向のペア数})}{n C_2} \quad (1)$$

算出の結果、 $\tau = 0.728$ となり密度は単調増加傾向であると判断した。

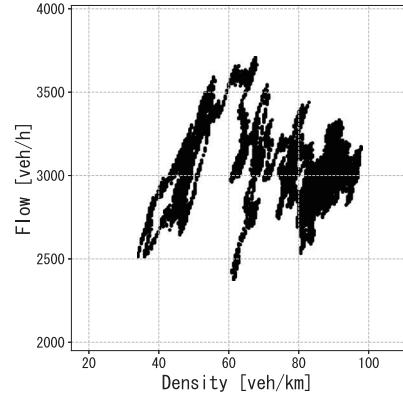


図 1: 基本図 / 時系列データ (i)

次に、時系列データ (ii) の車間距離および速度の時系列推移を図 2 に示す。円環状の交通流において、一様流（自由流）は「車間距離が一定」かつ「相対速度が 0」の状態と定義される。図 2 を参照すると、時刻 70~150 秒付近において一様流に近い挙動を示していることが確認できる。加えて、時空図（図 3）では、時刻 150 秒付近から渋滞が発生している。以上より、本稿では時系列データ (ii) における渋滞発生時刻は 150 秒と設定する。

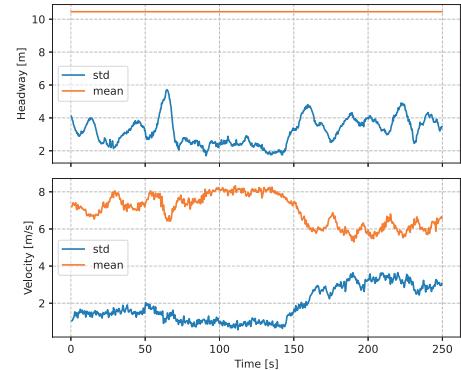


図 2: 車間距離および速度 / 時系列データ (ii)

2.2 指標の算出方法

先行研究 [3] に倣い、指標は後述する残差成分から算出した自己相関係数とし、その値が顕著に変化す

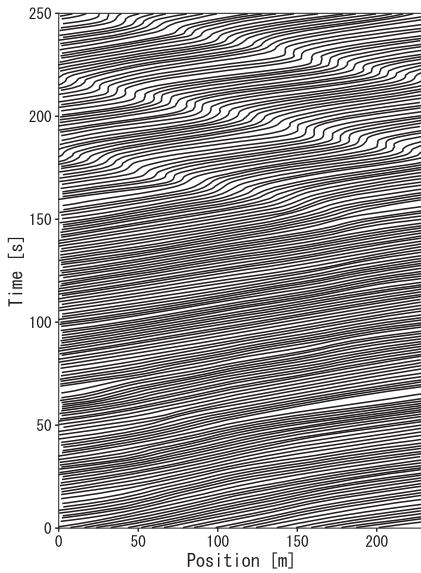


図 3: 時空図 / 時系列データ (ii)

るポイントを予兆と定義する。また、指標の算出には渋滞発生時刻以前のデータのみを使用した。具体的な算出プロセスは以下の通りである。

2.2.1 時系列データの前処理

分析対象には複数台の車両データが含まれるが、データの性質に応じて以下の通り異なる前処理を行い、单一の時系列データを生成した。

- **時系列データ (i) の場合**：各車両のデータ長や計測開始・終了時刻が不統一であるため、まず各時刻における全車両の速度の平均値を算出し、これを单一の時系列データとした。その後、この平均値に対して指標の算出を行った。
- **時系列データ (ii) の場合**：全 22 台の車両が同一長の時系列データを持つため、まず各車両の加速度の時系列データに対して個別に自己相関係数を算出した。その後、全車両の指標値の平均を計算し、最終的な指標とした。

2.2.2 トレンド除去と指標算出

得られた時系列データに対し、以下の手順で指標を算出した。

1. **トレンド成分の除去**：ガウスカーネル平滑化関数を用いてトレンド成分を算出し、元データとの差分を残差成分とした。平滑化のパラメータ（バンド幅）は、ウィンドウ内の残差成分が定常性を満たすように決定した。なお、定常性の判定には ADF 検定を用い、有意水準 (p 値) 0.05 未満を基準とした。この処理により、対象の時系列データ全体を通しては非定常の可能性はあるが、各ウィンドウ内における局所的な定常性は確保される。
2. **移動窓による指標算出**：残差成分に対して移動窓を適用し、各ウィンドウ内における自己相関係数を算出した。算出した値はウィンドウ末尾の時刻に対応付けた。
3. **ウィンドウ幅の設定**：ウィンドウ幅は先行研究 [3] より頑健性が報告されている設定を採用し、計測開始から臨界点（渋滞発生）までの期間の半分とした。具体的には、時系列データ (i) では約 8 分 40 秒間、時系列データ (ii) では 75 秒間と設定した。

3 結果

算出された指標の推移を確認する。時系列データ (i) の計算結果を図 4 に示す。

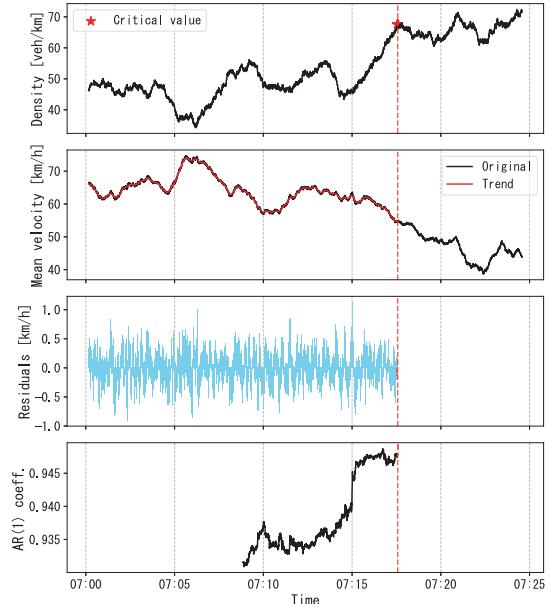


図 4: 計算結果 / 時系列データ (i)

図 5 は図 4 における自己相関係数の拡大図であり、図 6 は時系列データ (ii) から算出した自己相関係数の結果である。これらの図中の赤垂線は渋滞発生時刻（臨界点）、青垂線は指標の顕著な増大が生じた時刻を示す。また、灰色の破線は青垂線までの範囲でフィッティングした回帰直線である。

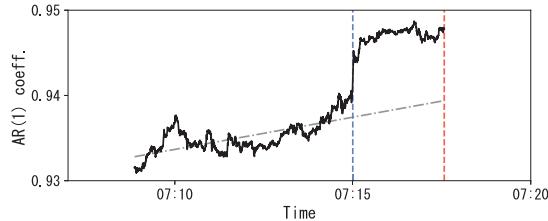


図 5: 自己相関係数 / 時系列データ (i)

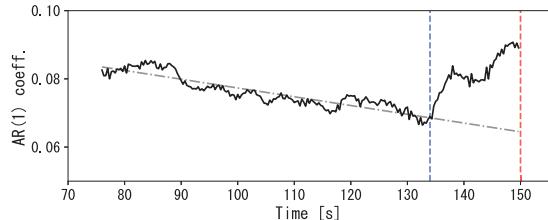


図 6: 自己相関係数 / 時系列データ (ii)

図 5 より、赤破線以前の時刻 07 時 15 分付近で、自己相関係数が回帰直線から離れていることが確認できる。同様に、図 6 においても赤破線より前の時刻 135 秒付近で値が回帰直線から乖離し増大する傾向が確認できる。

4 考察

図 5 および図 6 の結果より、いずれの場合も渋滞への遷移前に指標が増大することが確認された。このことは、渋滞の予兆検知への本指標の応用可能性を示唆している。

一方で、自己相関係数の増大箇所から実際に渋滞が発生するまでの時間には、時系列データ (i), (ii) で相違が見られた。この要因については、さらなる検討が必要であるが、平均速度が最低値に達するまでの所要時間の差異などが影響している可能性が考えられる。

また、対象とした 2 つの時系列データは渋滞流へ遷移するという共通点があるが、ボトルネックの有無において異なり、時系列データ (i) は合流部に起因

するボトルネックを含むが、時系列データ (ii) はこれを含まない。この違いが予兆検知に与える影響や、自己相関係数が増大を示す詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。特に時系列データ (ii) は、車両台数（密度）が固定された系であり、密度増大に伴う臨界点到達というプロセスを経ないにもかかわらず、自己相関係数が増大が確認された。したがって、典型的な臨界減速の理論のみならず、密度変化を伴わない遷移現象において自己相関係数が反応する要因について、詳細な検討が必要である。

5 まとめ

本研究では、先行研究 [3] の理論を適用し、自由流と渋滞流の双方が含まれる単一の時系列データに対する渋滞の予兆検知の有効性を検証した。特性の異なる 2 種類の実測データを用いた分析の結果、双方のデータにおいて渋滞流への遷移直前に指標の顕著な増大が確認されたことから、本指標を予兆検知に応用できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究で用いた Zen Traffic Data をご提供いただきました阪神高速道路株式会社に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 杉山 雄規, 交通流の物理, ながれ, **22**, 95-108 (2003)
- [2] 玉井 魁人, 宇野 伸宏, 連続車両軌跡データを用いた個車追従モデルの推定と車両挙動多様性の分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), **77** (5), I-675-I-685 (2022)
- [3] Scheffer, M. et al., Early-warning signals for critical transitions, Nature, **461** (7260), 53-59 (2009)
- [4] Ghadami, A. et al., Forecasting the onset of traffic congestions on circular roads, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., **22** (2), 1196-1205 (2021)
- [5] ZenTrafficData, 阪神高速道路株式会社, <https://zen-traffic-data.net/>
- [6] Sugiyama, Y., et al. Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam, New J. Phys., **10**, 033001 (2008)
- [7] Nakayama, A., et al. Metastability in the formation of an experimental traffic jam, New J. Phys., **11**, 083025 (2009)