高速道路における連続 1 時間値を用いた旅行時間予測に関する研究

荒谷　純輝[1]・藤田　素弘[2]

[1]学生会員　名古屋工業大学大学院　工学研究科（〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町）
E-mail: a.aratani.746@stn.nitech.ac.jp

[2]正会員　名古屋工業大学教授　工学研究科（〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町）
E-mail: fujita.motohiro@nitech.ac.jp

混雑状況に応じた料金施策など，高速道路を効率的に活用するための検討が行われている．本研究では，日々変化する交通状況を視覚的・直感的に把握するために，交通量と所要時間のグラフを，1 分ごとにデータをずらして連続的に生成した 1 時間値を用いて分析する手法を提案した．連続 1 時間値の作成には，名古屋高速道路の車両感知器における 128 日分の 24 時間 1 分間値データを用いた．連続 1 時間値図における形状の分析を行いつつ，この形状特性を踏まえた 1 時間後の旅行時間を予測するモデルを重回帰分析において構築する試みを行い，結果として精度のよいモデルが示された．

Key Words: *traffic flow, continuous 1-hour values, travel time prediction, freeways*

1. はじめに

近年，道路ネットワークの充実や高速道路料金の合理化による交通の分散などの取り組みを行い，ヒト・モノの流れを良くし，高速道路を効果的・効率的に活用していくことへの検討が積極的に行われている．中京都市圏では2021年5月から新しい高速道路料金が導入され，対距離料金制を基本とした料金体系となった．この料金改定と併せて，迂回利用が料金の面において不利にならないように，経路によらず起終点間の最短距離を基本に料金を設定されるようになったため，利用度合いに応じた公平な料金体系でかつ，管理主体を超えたシンプルでシームレスな料金体系に大きく近づいたといえる．将来的には，時間帯ごとの混雑状況に応じた料金施策の適切な運用も検討され，このためには交通状況データを効果的に活用する必要がある．

そこで本研究では，日々変化する最大交通量や最大所要時間，交通量と所要時間の関係を視覚的・直感的に把握・分析するために，高速道路におけるトラカンデータを 1 分ごとの 1 時間値として集計して得られる，連続 1 時間値による交通量-所要時間図を用いた分析を提案する．また，連続 1 時間値図における形状の分析や実際の混雑分析，1 時間ごとの旅行時間予測を行い，交通状況の分析における連続 1 時間値の利用可能性を明らかにすることを目的とする．

ところで，我が国では，交通量-所要時間関係の分析としては，交通量配分で用いる BPR 関数の推定に関する研究が多数報告されている．溝上・松井ら [3]は道路交通センサスデータを活用した BPR 関数の推定を行っているが，主に一般道路の推定でありセンサスデータは交通量と速度の観測日が同一でない場合があることなどの課題がある．山本 [4]は，高速道路の車両感知器データによる BPR 関数の推定を行っており，時間帯別交通量と平均速度を 1 時間ごとに 1 時間値を集計して交通量-所要時間関係を分析している．しかし，1 時間ごとの集計であり，時系列的な関係の推移を詳しくみるには至っていない．

また，所要時間予測や渋滞予測に関する研究も多数報告されている．Wayne [5]はリンクパフォーマンス関数の精度改善や将来所要時間予測を目的とし，渋滞現象を関数としてモデル化する試みを行っており，1 時間以上の渋滞を考慮するため，ピーク時間帯の交通量ではなく年間平均日交通量（AADT）などを用いた渋滞状況の評価を行っている．Yanyan ら [6]は過去の交通流データを適用して渋滞発生前後の速度や交通量の値の範囲を特定し，交通流を特徴付けるために適切な交通流モデルを当てはめて渋滞予測を行う手法を提案している．

このように，交通量と速度のデータを用いた分析は行

われつつも，時間交通量-所要時間関係を時系列的に捉えて行った分析はなされてこなかった．そこで本研究では，連続1時間値による交通量-所要時間図を用いることで，高速道路区間上での交通状況の時間的推移を連続的に分析し，連続 1 時間値を用いた道路区間ごとの混雑分析や 1 時間後の所要時間予測を試みる．

2. 分析方法

(1) 使用データ

本研究では，**図-1** に示すネットワークを持つ名古屋高速道路の 2 路線を対象とする．名古屋高速道路は名古屋市と名古屋市周辺地域にある路線長 81.2km の都市高速道路である．このうち，時計回り一方通行の都心環状線と都心環状線から南に分岐する大高線下りを研究対象とする．分析データは，名古屋高速道路が設置している車両感知器から取得されている，1 分単位で集計された車線ごとの平均速度と交通量のデータ（2019 年 11 月 25 日～2020 年 3 月 31 日の計 128 日分）を使用する．

(2) データの分析方法

a) トラカン区間の 1 分間値

提供データは車線ごとに集計されたデータであったが，実際の交通量配分が全車線で行われていることに合わせて，交通量データは全車線の合計値とし，速度データは各車線の速度を車線の交通量で加重平均し 1 分間平均値とした．そして，車両感知器から得られる速度は区間内（約 0.5km）で一定であると仮定し，速度データの逆数をとり，比較しやすいように単位を調整することで，1km あたりの単位所要時間（分/km）を算出した．

b) 連続 1 時間値

1 時間データの変化を詳細に把握することを目的として，1 分間値を連続 1 時間値に変換した 1 時間値の分析を行う．それぞれの区間において，1 日ごとの時間帯 0:00~23:59 における 1 分間データ 7199 個を用いて，式(1), 式(2)のように時間交通量Q_{jk}と所要時間の 1 時間平均値T_{jk}を求める．すなわち，区間jにおける時間帯kの交通量Q_{jk}は，時刻kを開始時刻として 60 個の 1 分間交通量の合計値である．T_{jk}は同様に$i = k \sim k + 59$の時刻の 60 個の 1 分間所要時間の平均値である．例えば，7:00~7:01 では$k = 420$，8:00~8:01 では$k = 480$となる．

$$Q_{jk} = \sum_{i=k}^{k+59} q_j(i) \tag{1}$$

$$T_{jk} = \sum_{i=k}^{k+59} t_j(i) / n_{jk} \tag{2}$$

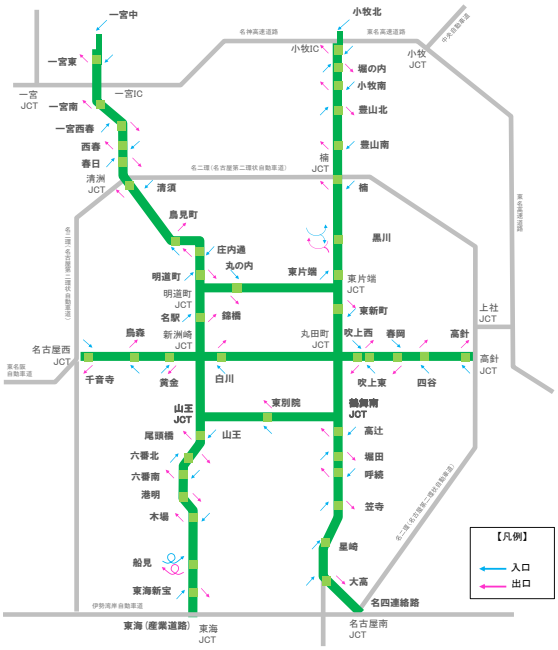


図-1 名古屋高速道路ネットワーク

ここで，

$q_j(i)$：区間jの時間帯iにおける 1 分間交通量（台/分）

$t_j(i)$：区間jの時間帯iにおける 1 分間所要時間（分/km）

n_{jk}：区間jの時間帯kでの 1 分間所要時間のデータ数

3. 連続 1 時間値の交通量–所要時間図による分析

(1) 連続 1 時間値の特徴

全時間帯（0:00~23:00）のデータを用いて，集計方法の違いによる交通量-所要時間図を比較した．都心環状線のある区間における交通量 1 分間データ（1 日 24 時間分）を利用した交通量と単位旅行時間の関係を**図-2** に，1 時間ごとの時間帯別交通量と時間平均所要時間の関係を**図-3**，本研究で扱う連続 1 時間値による時間交通量と時間平均所要時間の関係を**図-4** に示す．**図-2** をみると，1 分間データは 1 分間ごとのばらつきが大きくなり，時系列の交通流を正確にとらえることができないといえる．また，**図-3** をみると，1 時間ごとのデータは点の数が少ない．このデータのない時刻での変化は後述のように多様で，時系列推移を捉えることは難しい．しかし**図-4** をみると，連続 1 時間値は点が連続的に繋がり，混雑発生から混雑解消にかけてループが形成されており，交通状況の推移を具体的に知ることができる．このように，連続 1 時間値による交通量-所要時間図は 1 時間ごとの離散的な値の図よりも詳細かつ明瞭に交通流の推移を捉えられることが明らかとなった．

(2)　各区間の交通量-所要時間図による混雑箇所の分析

連続1時間値による交通量-所要時間図は交通特徴が分かりやすくなることを踏まえ，名古屋高速道路上の複数区間の交通量-所要時間図を**図-5**，**図-6** のように作成した．**図-5** は都心環状線（時計回りの一方通行）の 11 月末の平日 5 日間における混雑状況である．JCT やランプが密集しているため，図の形状の変化が大きい．特に JCT 付近では，交通量の増減とともに所要時間が大きく変化していることがわかるため，混雑状況を区間ごとの関係から読み取りやすい．

図-6 は大高線下り「鶴舞南 JCT(A)から堀田出口(C)間」の 2019 年 11 月 28 日（木）の混雑状況である．この路線は都心環状線の鶴舞南 JCT から南向きに接続されている．各区間の交通量-所要時間図に着目すると，高辻入口(B)の交通量が増加したことにより，その前後で最大交通量と最大所要時間が大きく変化している．午前 7 時頃を中心に所要時間が増加し始め，午前 9 時頃まで混雑が発生している状況を読み取れる．

4.　連続 1 時間値図の形状分析

これまで述べてきたように，連続1時間値の交通量-所要時間図はコンパクトに交通量-所要時間の関係を示し，交通の流れを直感的に把握することができる．しかし，図からより多くの情報を読み取るには，連続 1 時間値の交通量-所要時間図の形状を決定する要因把握が必要である．そこで，式の導出や図上での分析によって形状が異なる要因を明確にする．

(1)　連続 1 時間値図のループ形状特性

連続1時間値の交通量-所要時間図の形状が日によって多様であることを確認するために，大高線下り高辻入口手前の区間番号 302 における 128 日分の図を作成した．

図-7 は作成した 128 日分の図の内の 2019 年 12 月 13 日(A)と 2019 年 12 月 16 日(B)の連続 1 時間値による交通量-

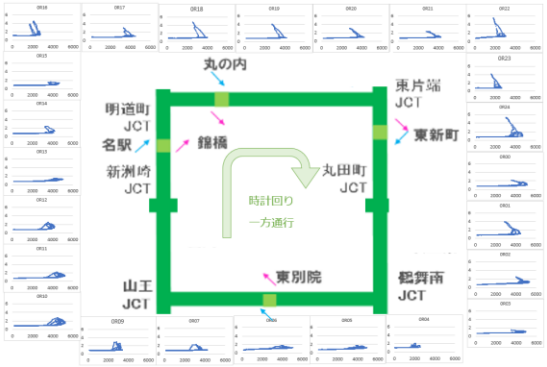


図-5　交通量-所要時間図 (都心環状線)

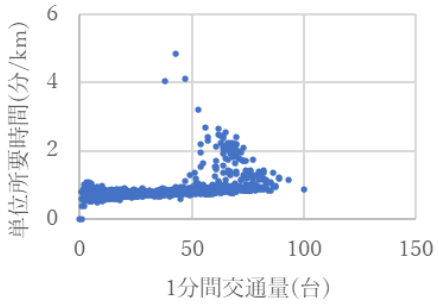


図-2　1 分間データによる交通量-所要時間図

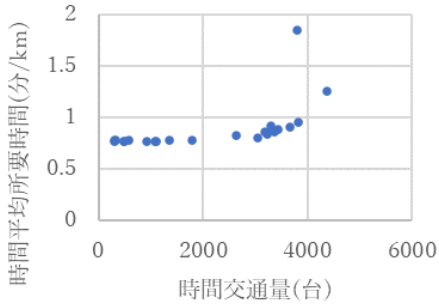


図-3　時間帯別データによる交通量-所要時間図

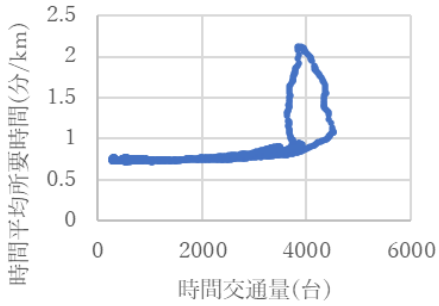


図-4　連続 1 時間値による交通量-所要時間図

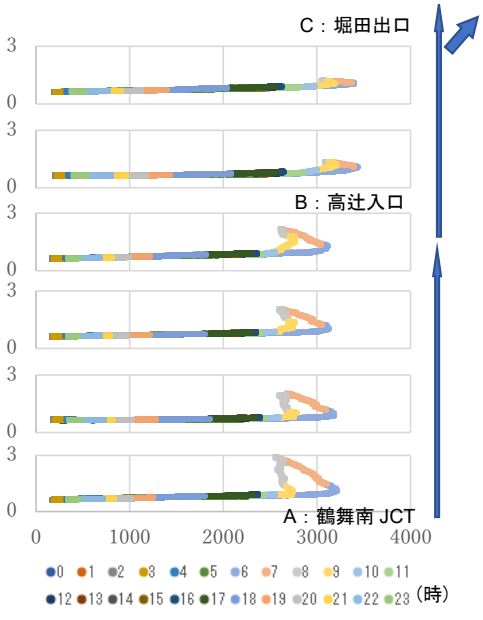


図-6　オンランプ付近の交通量-所要時間図

所要時間図である．A は交通量が最大となった直後から，交通量が減少しながら所要時間が大きく増加していることが確認できるが，B は交通量が最大となる前から，交通量が増加しながら所要時間が大きく増加している．このように同じ区間でも日によってループの形状が異なることが確認でき，ループの立ち上がりの角度はAとBの2パターンで分けることができる．

図-8は前述の区間302における128日分の連続1時間値による交通量-所要時間図である．交通量が最大となった直後から，交通量が減少しながら所要時間が大きく増加している**図-7** の A のようなループ形状の日を橙色の四角で囲ってあり，交通量が最大となる前から，交通量が増加しながら所要時間が大きく増加している**図-7** の B のようなループ形状の日は青色の四角で囲ってある．128日の内，Aループ形状の日は29日，Bループ形状の日は34日，ループがみられない日は65日あった．このようにループ形状は日によって異なっていることがわかる．

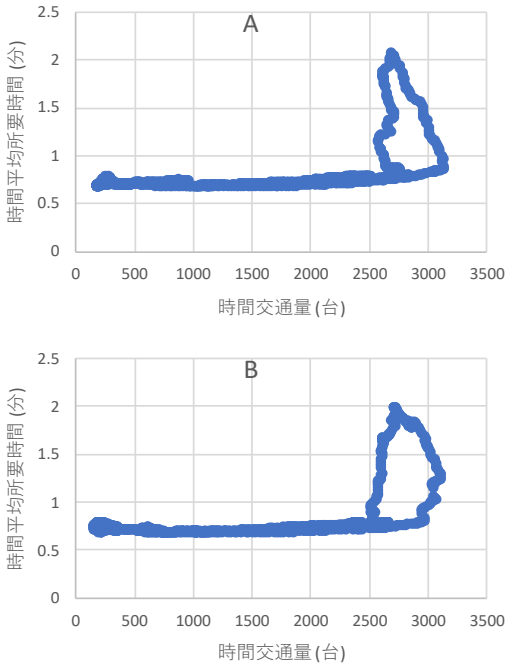


図-7　ループ形状が異なる交通量-所要時間図



図-8　128 日分の交通量-所要時間図

(2)　ループ角度の決定要因の分析

渋滞発生時の交通流の把握は，渋滞要因分析において重要である．よって自由流から渋滞流へと遷移する交通容量付近のループの形状を調べることとし，ここではループの角度がどのように決定されているかを考える．

時間交通量（台）を横軸，時間平均所要時間（分/km）を縦軸とした座標平面上で，ある時間帯のデータとその1分後の時間帯のデータを結んだ線分において，始点での水平右方向を始線とし，上側の角度をθ（$0^\circ \leqq \theta \leqq 180^\circ$）とする．このとき$\tan\theta$は線分を延長してできる直線の傾きと等しくなる．この$\tan\theta$について式を展開すると以下のようになる．前提条件として，$Q_{k+1} \neq Q_k$，$q_{k+60} \neq q_k$となる必要があるが，時間交通量や60分の間で交通量が1台も変化しないことは確率的にとても低く，検証を行うにあたって考慮しなくても差し支えないと考え，$Q_{k+1} \neq Q_k$，$q_{k+60} \neq q_k$と仮定する．

$$
\begin{aligned}
\tan\theta &= \frac{T_{k+1} - T_k}{Q_{k+1} - Q_k} \\
&= \frac{\frac{\sum t_{k+1}}{60} - \frac{\sum t_k}{60}}{\sum q_{k+1} - \sum q_k} \\
&= \frac{\frac{1}{60}(t_{k+60} - t_k)}{q_{k+60} - q_k} \\
&= \frac{1}{60}\left(\frac{1}{v_{k+60}} - \frac{1}{v_k}\right)\left(\frac{1}{q_{k+60} - q_k}\right) \\
&= \frac{1}{60}\left(\frac{v_k - v_{k+60}}{v_k v_{k+60}}\right)\left(\frac{1}{q_{k+60} - q_k}\right) \\
&= -\frac{1}{60 v_k v_{k+60}} \cdot \frac{v_{k+60} - v_k}{q_{k+60} - q_k}
\end{aligned}
\tag{3}
$$

ここで，

$\tan\theta$：連続 1 時間値の交通量-所要時間図の時刻k，$k+1$における2点でできる線分の傾き

T_k：時刻kの時間平均所要時間（分）
Q_k：時刻kの時間交通量（台）
t_k：時刻kの1分間平均所要時間（分）
q_k：時刻kの1分間交通量（台）
v_k：時刻kの1分間平均速度（km/分）

上式において，$v_k > 0$，$v_{k+60} > 0$より，$\frac{1}{60 v_k v_{k+60}}$は正である．よって，$\frac{v_{k+60} - v_k}{q_{k+60} - q_k}$の符号によって，$\tan\theta$の符号

が決定する，すなわちこの符号によって連続 1 時間値の交通量-所要時間図の傾き具合が決定するといえる．

以上から，連続1時間値の交通量-所要時間図の角度は 1 分間データにおけるある時間帯とその 1 時間後の時間帯の 2 点間の交通量，速度データの増減で決まり，1 時間内の時間のデータは影響を与えないことがわかった．また，1 分間データの q-v 図の 1 時間後の点との傾きの逆符号が連続1時間値の交通量-所要時間図の傾きの符号となることが明らかとなった．

上記について実際の図で確認する．**図-9** と**図-10** は前述の 2019 年 12 月 13 日(A)と 2019 年 12 月 16 日(B)の連続 1 時間値における交通量-所要時間図と，同一地点・同日における 1 分間データによる Q-V 図とをそれぞれ対応させたものである．**図-9** からは，連続 1 時間値の図における時間帯 7：02 付近の 3 点は左上方向に点が続くのに対して，1 分間データは時間帯 7：02 付近のデータから 1 時間後である時間帯 8：02 付近のデータへ左下方向に点が移動していることが確認できる．また，**図-10** からは，連続 1 時間値の図における時間帯 6：27 付近の 3 点は右上方向に点が続くのに対して，1 分間データは時間帯 6：27 付近のデータから 1 時間後である時間帯 7：27 付近のデータへ右下方向に点が移動していることが確認できる．

このように，理論に基づく式と実際の図での確認によって，連続1時間値の交通量-所要時間図のループの角度は 1 分間データの q-v 図の 1 時間後の点との位置関係で決定されることが明らかとなった．すなわち，日によって連続 1 時間値図の交通容量付近のループ角度が異なるのは，1 分間データにおける自由流から渋滞流に移り変わるある時間帯とその 60 分後の交通量・速度の変化の仕方が日によって異なるからであることが示せた．

これは逆に，連続 1 時間値のループの角度を見ることによって 1 分間データの Q-V 関係の推移が把握できるといえるため，連続1時間値の交通量-所要時間図は交通流の効率的な具体的把握が可能であることがわかった．

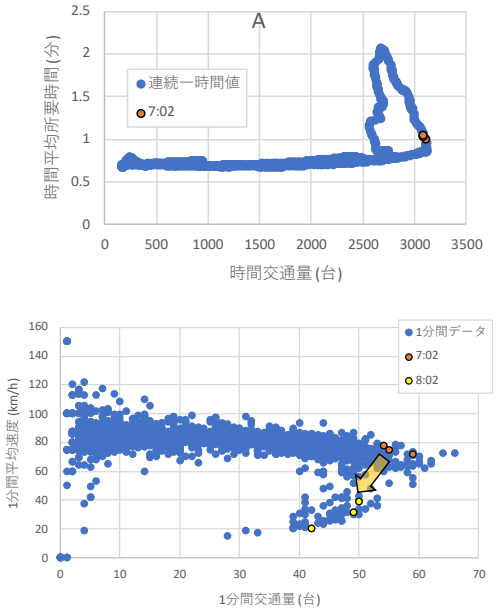


図-9　連続 1 時間値の図と q-v 図の対応関係（A）

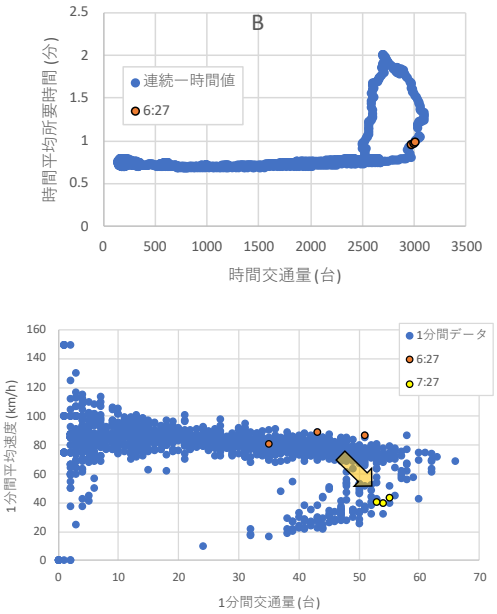


図-10　連続 1 時間値の図と q-v 図の対応関係（B）

5.　連続 1 時間値による所要時間予測と分析

ピーク時における交通施策を検討するにあたって，現時点から 1 時間後などの将来時点を予測できることは利用価値が高い．ここでは，大高線の鶴舞南 JCT をスタート区間，堀田ランプから先の区間を終了区間とした 2 車線 4.19km の計 8 区間において，渋滞が始まる午前 7 時の 1 時間値を利用して，1 時間後の午前 8 時の所要時間を予測するモデルの構築を試みるとともに，所要時間変動に影響を与える要因を分析する．

(1)　所要時間予測で用いる 1 分間値の分析方法

所要時間予測で用いる所要時間の 1 分間値は，複数のトラカン区間を繋ぎ合わせた 1 分間値とし，タイムスライス法で算出を行う．タイムスライス法とは，各区間への流入時刻における区間所要時間から次の区間への流入時刻を得て，この次の区間への流入時刻の区間所要時間を計算して，また次の区間の流入時刻を得るという，逐次的な計算手法である．ここでの交通量データは 2 車線の合計値とし，速度データは 2 車線の速度を車線の交通量で加重平均をとった速度データとし，所要時間を算出する．

(2) 1時間値による所要時間予測

前節により得られる 1 分間値から，式(1)，式(2)のように連続 1 時間値を求め，重回帰分析を行うことで，7 時発のデータから 8 時の所要時間を予測するモデルを作成するとともに，渋滞要因分析を行う．

8 時の所要時間を目的変数として作成した重回帰予測モデルを**表-1**，**表-2** に示す．最初は 7 時の本線交通量とランプ交通量を説明変数として分析を行った．説明変数の交通量は 5 乗したデータを用いて分析を行った．5 乗を用いたのは，交通量は一定の閾値を超えると所要時間が急に増大する傾向があり，5 乗が最も適切であったからである．**表-1** の予測モデル 1 は交通量のみを説明変数とする最も精度の高いモデルである．全ての説明変数が 10%有意に収まっており，変数の当てはまりは良いとされるが，自由度調整 R2 乗は 0.582 と予測モデルとしては改善の余地がある．

そこで，連続 1 時間値の特性や時系列的な推移形状を考慮して，「T7-Y7」という変数を加えることとする．T7 は午前 7 時の所要時間の 1 時間値である．Y7 は渋滞していない時間帯のデータのみで作成した非渋滞関数（交通量-所要時間関数）に 7 時交通量(高辻入口手前の本線交通量)を入力して得た，非渋滞時の 7 時の所要時間である．**表-2** の予測モデル 2 は，この「T7-Y7」を加えて作成した最も精度の高いモデルである．自由度調整 R2 乗は 0.816 と非常に高く，説明力がある予測モデルといえる．また，全ての変数の当てはまりも良いといえる．連続 1 時間値の特性や図の形状を活かすことで，予測精度や説明力を向上させることができた．

モデルの変数をみると入口交通量の影響が大きいことがわかる．高辻入口交通量が所要時間に与える影響が大きい理由は，本線混雑時に右車線側から合流してくる速度の遅い車両によって本線車両が更に大きく減速するためと考えられる．

高辻入口交通量の影響を理解するために**図-11** に高辻入口の時間交通量と 8 時の平均所要時間(T8)の関係を示す．図中の点線は図中の式に示すように予測モデル 2 によって以下の式から導かれる値（321 台）である．この図から，入口交通量がこの値程度を超えると，所要時間が急激に増加することがわかる．

$$t_8 = 3.17 + 0.989 \times (T7 - Y7) + 2.93 \times 10^{-13} \times {x_7}^5$$

$$= 3.17 + 0.989 \times (T7 - Y7) + \left\{ \frac{x_7}{\left(\frac{1}{2.93 \times 10^{-13}}\right)^{\frac{1}{5}}} \right\}^5 \quad (4)$$

表-1 予測モデル 1

説明変数	推定値	t 値
切片	3.36	21.1***
【ランプ】高辻入口(台)[5]	6.80E-13	9.05***
【本線】堀田出口手前(台)[5]	-1.44E-18	-1.78*
R2 乗	0.588	
自由度調整 R2 乗	0.582	
p 値(Prob>F)	<.0001	
標本数	128	

表-2 予測モデル 2

説明変数	推定値	t 値
切片	3.17	34.0***
T7-Y7	0.989	12.9***
【ランプ】高辻入口(台)[5]	2.93E-13	8.18***
R2 乗	0.819	
自由度調整 R2 乗	0.816	
p 値(Prob>F)	<.0001	
標本数	128	

(***：1%有意，**：5%有意，*：10%有意)

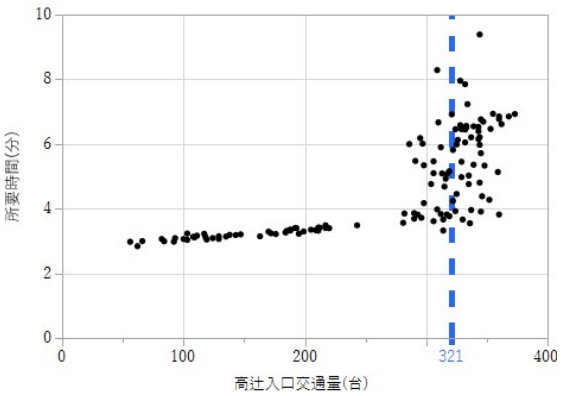


図-11 高辻入口時間交通量と平均所要時間の関係

$$= 3.17 + 0.989 \times (T7 - Y7) + \left(\frac{x_7}{321}\right)^5$$

ここに，

t_8：8 時の所要時間（分）

$T7 - Y7$：実際の 7 時の所要時間から非渋滞時所要時間を差し引いた時間（分）

x_7：7 時の高辻入口時間交通量（台）

このように，連続 1 時間値の時間推移を考慮した 1 時間ごとの所要時間の統計的予測を行うことで，混雑要因を検討・考察することができた．

6. おわりに

本研究では，日々変化する交通状況を視覚的・直感的に把握するために、交通量と所要時間のグラフを、1 分ごとにデータをずらして連続的に生成した 1 時間値を用いて分析する手法を提案した．得られた知見を以下に示す.

まず，連続1時間値の交通量-所要時間図は，プロットが連続的になり，離散的なデータよりも交通流の推移をより詳細かつ明瞭に示した．連続 1 時間値の図を高速道路網と照らし合わせることで渋滞要因を分析することができた．連続 1 時間値の図の形状の理論的検証により，連続 1 時間値の交通量-所要時間図を見ることで Q-V 関係の時間的推移が把握できることを示した． また，連続 1 時間値を用いた時間ごとの所要時間予測モデルは高い精度で統計的に構築された.

今後の課題としては，連続1時間値の交通量-所要時間図における渋滞領域に描かれるループを使った更なる渋滞現象の分析が挙げられる.

謝辞：本研究にあたり名古屋高速道路公社での需要推計議論や研究補助，データ等の提供を受けた．ここに謝意を表します.

REFERENCES

1) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編 利用者均衡配分の適用に向けて，2003. [Japan Society of Civil Engineers: *Guidebook on Traffic Demand Forecasting Volume* I: *Application of User Equilibrium Assignment Techniques*, 2003.]
2) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第Ⅱ編 利用者均衡配分モデルの展開，2006. [Japan Society of Civil Engineers: *Guidebook on Traffic Demand Forecasting Volume* II: *User Equilibrium Assignment Models and Their Developments*, 2006.]
3) 溝上章志，松井寛，可知隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集，No.401/IV-10，pp. 99-107，1989. [Mizokami, S.， Matsui, H. and KACHI, T.: Link performance function for use in traffic assignment for an entire day, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, No.401/IV-10, pp. 99-107，1989.]
4) 山本隆：全国高速道路の交通量推計に用いる BPR 関数の推定に関する研究，交通工学，49 巻 1 号，pp. 81-90，2014. [Yamamoto, T.: A study on estimation of the BPR functions for expressways, *Traffic engineering*, Vol. 49, Issue 1, pp. 81-90, 2014.]
5) Wayne D. C.: Empirical freeway queuing duration model, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, No. 1, pp.13-20, 2001.
6) Yanyan, C., Shiwei, L., Yuyan, P. and Jian, Z.: Empirical freeway queuing duration model, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, Vol. 148, No. 6, 2022.