

車頭時間のばらつきや追従挙動の変化が 長期的な交通容量逡減に与える影響 に関する研究

池谷 風馬¹・田中 伸治²・中村 文彦³・有吉 亮⁴・三浦 詩乃⁵

¹学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:ikeya-fuma-wm@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学大学院准教授 都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:stanaka@ynu.ac.jp

³正会員 横浜国立大学大学院教授 都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:nakamura-fumihiko-xb@ynu.ac.jp

⁴正会員 横浜国立大学大学院特任准教授 都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:ariyoshi-ryo-gd@ynu.ac.jp

⁵正会員 横浜国立大学大学院助教 都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:miura-shino-xr@ynu.ac.jp

近年、車両感知器などによる交通流データの蓄積により、長期にわたる交通状況のモニタリングを行うことが可能になった。その結果として、およそ15年前と比較すると、現在では全国各地で交通容量が減少していることが明らかになった。本研究は、交通容量の減少にドライバーの運転行動の変化が影響していると仮定し、それを明らかにすることを目的とした。はじめに研究の目的を明らかにする指標として、車頭時間のばらつきが使用可能であることを、確率分布を用いて表した。次に、追従挙動モデルを用いて、追従挙動が変化することで、交通容量にどのような変化があるのか分析を行った。分析の結果、先行車の減速度の推定値が影響しているのではないかと示唆することができた。現在は、実データを用いて、車頭時間のばらつきの経年変化を分析している。

Key Words : *Traffic Capacity, Driving Behavior, Variance of Time Headway, Car-Following Behavior, Long-Term Decrease*

1. はじめに

交通工学において、交通性能を評価する指標として、速度や交通密度、交通容量などが用いられている。これらの指標は周辺状況、交通条件に影響されて変化することが知られている。交通容量を算出する場合においても、道路幅員や沿道状況などを補正係数として用いている。これらの係数は、「道路の交通容量」¹⁾によって設定されて以降、変更がないため、交通条件による、算出される交通容量への影響の経年的な変化を想定していなかつ

たと考えられる。しかし、近年の研究²⁾では、運転環境などの多様化に伴う運転行動の変様により、実際の交通容量は経年的に変化している可能性が示唆されている。

また、近年は車両感知器などの感知器の実装から一定時間が経過したことにより、同一対象地域において、10年以上のスパンで観測データが蓄積されている。そのため、交通容量の経年変化に着目した研究が行われ始めている³⁾。これらの研究によって、日本各地における交通容量の長期的逡減を明らかにしているが、具体的な要因を明らかにしているものは存在しない。

2. 既往研究の整理と本研究の目的

(1) 交通容量に関する研究

交通容量に関する基礎的な内容は大口ら⁴⁾によって整理されているため、これを参照する。渋滞発生時交通容量は確率特性を有しており、実測した結果から、渋滞発生時の交通流率が210~330[台/5分/2車線]と広範囲に散らばっていることが明らかになっている。一度渋滞が発生すると渋滞列の発進交通流率は交通容量よりもかなり低くなるのが分かっており、この要因としてドライバーの運転挙動特性が関係しているのではないかと考察している。このように高速道路単路部の交通渋滞については、数多くの特徴や要因が明らかになっている。しかしながら、交通容量を予測できるような根本的メカニズムの解明には至っておらず、今後の課題として言及している。

上記の論文で言及していない研究内容として、第1章で述べた交通状況の長期的なモニタリングによるものがある。後藤ら²⁾は、都市間高速道路の39地点を対象に2003年から2016年までのおよそ14年間の交通量モニタリングを行った。実現最大交通量に着目した分析では、全39地点のうち38地点において減少していることを示しており、平均減少率は片側2車線区間において6.8%、片側3車線区間において7.7%、全体で7.2%になっていることを明らかにしている。また、QV図を経年で比較すると交通容量は全体的に減少しており、この減少がある特定の瞬間を切り取ったものではないことを確認している。

村上ら³⁾は、阪神高速道路3号神戸線上下を対象に2003年から2014年までのおよそ12年間の交通量モニタリングを行った。実績最大交通量を交通容量とした分析では、対象区間のほぼ全ての地点において交通容量が減少していることを明らかにしている。加えて、交通容量減少の一つの要因としてドライバーの運転挙動の変化や車両の性能の変化が関係していると述べている。

(2) 車頭時間に関する研究

田村⁵⁾は交通流中の車両を自由走行車と追従走行車に分類し、設定した各車頭時間分布モデルのパラメータと交通量の関係を明らかにしている。研究結果として、自由走行車の車頭時間分布モデルは負の指数分布が十分有用であること、追従走行車の車頭時間分布モデルはlognormal分布が十分有用であることを示している。

平岡ら⁶⁾は先行車との車頭時間をリアルタイムで表示する装置を用いて、視覚情報の提示が先行車への追従行動にどの程度影響を与えるかを分析している。ドライビングシミュレータを使用した実験から、装置を用いた場合の方が設定した目標車頭時間に近づき、車頭時間のばらつきを抑制可能であることを明らかにしている。これらのことにより交通流率が増加することも示している。

(3) 追従挙動に関するモデル

交通状態を定量的に把握する手法として、追従挙動モデルを用いた分析がある。交通工学の分野では、このモデルの再現性を高める研究が多くあり、基礎的な内容は大口⁷⁾によって、整理されているため、これを参照する。

これまで提案された追従挙動モデルの中で、説明変数に運転行動の特性を用いたものとして、Gipps⁸⁾によって提案されたモデルがある。Gippsは、短時間後の車の座標を加速度や減速度、先行車の減速度の推定値などを用いて、式(1)のように表した。

$$v_n(t+\tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2.5a_n\tau(1 - v_n(t)/V_n)(0.025 + v_n(t)/V_n)^{1/2}, \\ b_n\tau + \sqrt{(b_n^2\tau^2 - b_n[2\{x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)\} - v_n(t)\tau - v_{n-1}(t)\hat{b}])} \end{array} \right\} \quad (1)$$

ただし n : n 番目の車両, t : 時刻(s), x : 車両の座標(m), v : 車両の速度(m/s), a : 車両の加速度(m/s²), b : 車両の減速度(m/s²), τ : 反応時間(s), V : 運転者による希望速度(m/s), \hat{b} : 先行車の減速度の推定値(m/s²)

上記の式によって、交通流や交通容量を示すことを可能であることを示した。また、この式を用いた分析によって、反応時間と先行車の減速度の推定値が、交通容量の決定に大きく関わっているのではないかと分析した。

柳原⁹⁾は、車両の軌跡は運転者が意図したものの結果として、運転意図に基づいた追従挙動モデルを提案した。また、この論文の中で、単純な挙動であれば古典的なモデルによって、十分に表すことができると考察した。

(4) 本研究の目的と手法

既往研究を整理した結果、交通容量や車頭時間、追従挙動に関する研究は数多く行われてきたことが分かった。しかしながら、近年の長期的な交通状況モニタリングによって明らかとなった交通容量の逡減に関しては、明らかになっていない部分が多い。特に、交通容量の逡減については、運転行動の変化が要因ではないかと考察されている研究はあるものの、それを表す指標は確立されていない。

本研究は、上記で述べた既往研究を参考に、運転行動の変化を表す指標として、車頭時間のばらつきと先行車の減速度の推定値を用いることができると仮説を立て、この仮説を明らかにすることを目的とする。そして、これらの指標が変化することによって、交通容量の値にどのような影響があるのかを確率分布や追従挙動モデルを用いて、分析を行う。交通容量の逡減に車頭時間のばらつきや先行車の減速度の推定値が影響していると明らかになれば、今後の交通容量の変化を考える上で重要な指標になると考えられる。

3. 車頭時間のばらつきに着目した分析

(1) 車頭時間分布モデル

車頭時間分布モデルは、田村⁹⁾の研究を参考にする。追従走行状態の交通流は、式(2)で表すことができるとされているため、本研究でもこちらの式を用いる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2a)$$

$$E(x) = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad (2b)$$

ただし、 $E(x)$: 車頭時間分布の期待値, x : 車頭時間(s)
 σ : ばらつきに関するパラメータ, μ : 平均値に関するパラメータ

自由走行状態については、負の指数分布が有用であるとされているが、交通量が最大になる臨界密度状態の交通流においては、ほとんどが追従状態であると考えられるため、本研究では取り扱わないこととする。

(2) 分析手法

本研究では、車頭時間の確率分布を基に乱数を用いて、各車両の車頭時間を割り当てる。これらの車両を基に、一定時間内の車両台数をカウントし、その値を交通容量とする。車頭時間のばらつきの変化が、交通容量に対して、どのように影響するのかを詳細に把握するため、感度が高くなるように、設定時間を1時間にする。そして、車頭時間のばらつきに関するパラメータのみを変化させることで、交通容量がどのように変化するのかを分析する。各パラメータに対して、この作業を10回ずつ行う。

図-1は、邢ら¹⁰⁾によって示された関越道上り線のパルスデータより得られた4日間の渋滞発生前15分間の車頭時間分布構成率である。図-1より、渋滞直前のほとんどの車両は、車頭時間0.5~5.0秒の範囲で走行していることが分かる。また、適正な車両間隔に関する研究¹¹⁾において、車頭時間分布の平均値は2秒程度であると示されている。したがって、本研究においては、上記での研究を参考に、車頭時間範囲を0.5~5.0秒に、車頭時間分布の平均値を2秒となるように設定する。

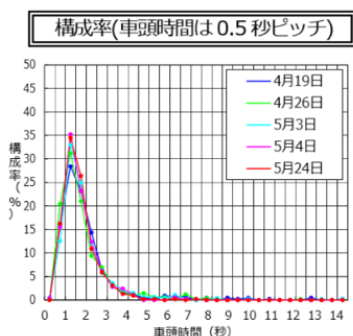


図-1 実データによる車頭時間分布構成率¹⁰⁾

(3) σ と車頭時間のばらつきの関係

本研究で用いた σ は16パターンである。それぞれの値と車頭時間のばらつきの関係を表-1に示す。 $\sigma=5,10$ については、車両同士が影響しあわない、独立の状態を表しており、現実的な状況では考えられないが、交通容量が減少していった場合の収束範囲を調べるために、分析を行うこととする。

表-1 σ と分散の関係

σ	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
分散(σ^2)	0.00	0.04	0.17	0.41	0.81	1.46	2.48	4.13
σ	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	5	10
分散(σ^2)	6.80	11.22	18.68	31.57	54.37	95.81	2.07E+22	2.89E+87

図-2は $\sigma=0.5\sim0.8$ までを代入したlognormal分布の確率密度関数である。最頻値の確率などを基に、図-1の実データと比較を行うと、 $\sigma=0.6\sim0.7$ 程度が現実に近い値であると考察できる。

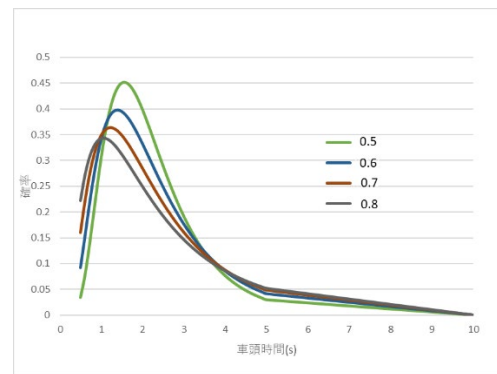


図-2 車頭時間の確率密度関数($\sigma=0.5\sim0.8$ まで)

(4) 分析結果

上記で述べた確率分布を基に、各ばらつきにおける個通容量の値を求めた結果を図-3に示す。

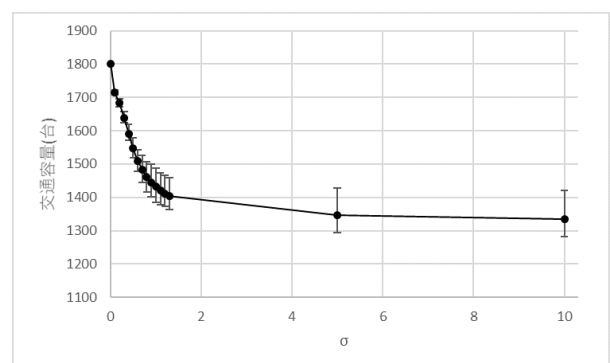


図-3 σ と交通容量の関係

この図より、 $\sigma=0$ の場合、交通容量は1800[veh/h]であるのに対して、 σ が大きくなることで、つまり車頭時間のばらつきが大きくなることで、交通容量が減少してい

くことを理解できる。また、それぞれの点での縦方向についている交通容量の誤差範囲に着目すると、車頭時間のばらつきが大きくなることで、誤差範囲が広がっていくことが分かる。 $\sigma=5$ と $\sigma=10$ の場合を比較すると、交通容量の値に大きな変化がないことから、交通容量は1300[veh/h]程度に収束すると考えられる。以上の分析により、車頭時間のばらつきが大きくなることで、交通容量は減少し、その値は、1800[veh/h]から1300[veh/h]まで、約28%減少すると考察できる。

図-4は、式(2b)で示した期待値から算出した交通容量と図-3の交通容量の比較を行ったものである。

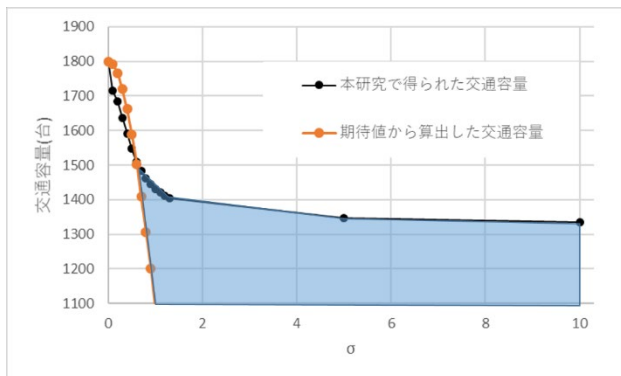


図-4 期待値から算出した交通容量との比較

この図から、青で示した車頭時間のばらつきが大きくなる部分において、期待値から算出した交通容量と本研究で得られた交通容量に大きな差が生じていることが分かる。このことは、本研究の結果が、lognormal分布の期待値による結果と同一のものではないことを示している。また、この差は、本研究の計算において、車頭時間の範囲に制限をかけたことが原因であると考えられる。特に、ばらつきの大きくなるほど乖離が激しくなることから、最長車頭時間の範囲を制限したことが、交通容量の値に大きく影響しているのではないかと考えられる。

4. 先行車の減速度の推定値に着目した分析

(1) 追従挙動モデル

追従挙動モデルに関しては、Gipps[®]のモデルを参考にする。このモデルを用いた研究において、先行車の減速度の値と、その減速度について追従する車の運転者の推定値に差異がある場合、追従挙動が変化することが明らかになっている。図-5は、実際の値よりも推定値が小さい場合の追従挙動を示しており、図-6は実際の値よりも推定値が大きい場合の追従挙動を表している。これらの図において、横軸は時間(秒)、縦軸は速度(秒速)を表している。

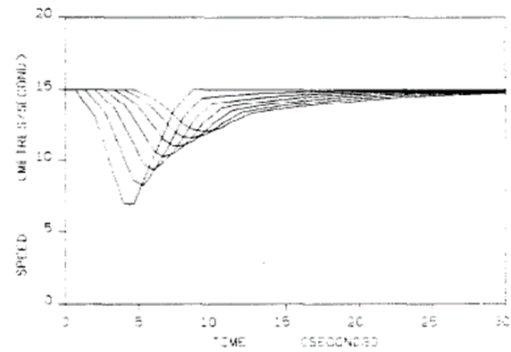


図-5 先頭車から7台目までの追従挙動[®]
(実際の値よりも推定値が小さい場合)

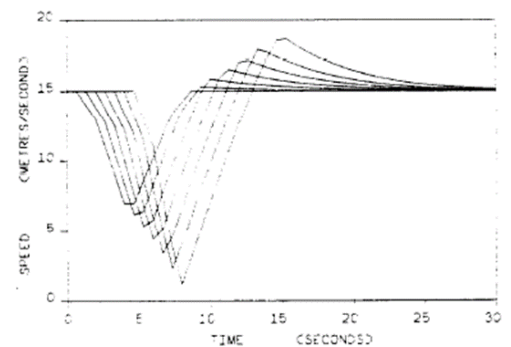


図-6 先頭車から7台目までの追従挙動[®]
(実際の値よりも推定値が大きい場合)

これらの図から、実際の値よりも推定値が小さい場合では、速度の変化が縮小傾向にあるのに対し、実際の値よりも推定値が大きい場合では速度の変化が増幅傾向にあることが分かる。2つの図に違いが生じる理由としては、実際の値よりも推定値が小さい場合(図-5)は、実際の値と推定値が同じ場合に比べて、減速度を過大評価しているため、あらかじめ車頭距離を長く取ることが分かっている。一方で、実際の値よりも推定値が大きい場合(図-6)は、同じ場合に比べて、減速度を過小評価しているため、車頭距離を短く取ることが分かっている。そして、その結果、図-6では、先行車の減速にうまく対応できず、減速度が大きくなり、また復元するために加速度も大きくなるのではないかと考えられる。

本研究では、実際の値と推定値の差異による追従挙動の変化が交通容量の値に影響していると仮定し、それを明らかにする分析を行う。

(2) 分析手法

式(1)で表した追従モデルを用いて、先行車の減速度の実際の値と推定値の関係が変化することで、交通容量にどのような影響があるのかを分析する。式(1)におけるパラメータに関しては、Gippsでの分析を参考にし、以下のように定める。

$$a = 2.0 \quad (m/s^2) \quad (3a)$$

$$b = -3.0 \quad (m/s^2) \quad (3b)$$

$$v(0) = 15 \quad (m/s) \quad (3c)$$

$$\tau = 2/3 \quad (s) \quad (3d)$$

$$V = 20 \quad (m/s) \quad (3e)$$

これらの値を用いたモデルに対して、先行車の減速度の推定値が実際の値と同じ場合、小さい場合($\hat{b} = -3.5$), および大きい場合($\hat{b} = -2.5$)を用意し、それぞれの場合において、交通容量の値を算出する。はじめに、先頭車の挙動を図-7で示すような、ある地点で減速し、その後加速して、最初の速度に戻るよう設定する。そして、この図における丸で示した地点で、交通容量の算出を行う。この地点は、減速が始まる地点、最も速度が遅くなる地点、および速度が回復してからある程度進んだ地点を表している。なお、本研究では、追従挙動による交通容量への影響を分析するために、走行環境は単路部で1車線の道路を想定している。

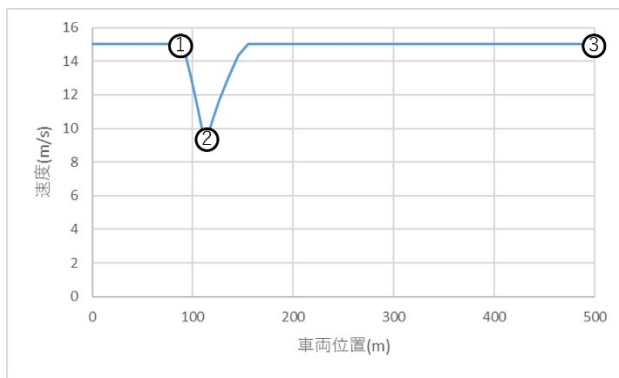


図-7 先頭車の挙動

(3) 分析結果

上記の追従挙動モデルを基に、各算出地点における分析結果を表-2に示す。今回の分析においては、各地点の5分間交通量を計測し、その値を交通容量として用いることとする。

表-2 先行車の減速度の関係と交通容量

単位 (Veh/5分)	減速度の実際の値と推定値の関係		
	同じ	小さい	大きい
地点①	172	143	125
地点②	173	143	126
地点③	173	143	128

表-2によって、減速度の実際の値と推定値に違いがある場合は、どちらの場合においても、実際の値と推定値が同じ場合よりも、交通容量が減少していることが理解

できる。これにおける推定値の大きい場合の交通容量が最も小さくなった原因としては、図-6で示すように、追従車の方が速度が低くなるため、停車した車両が発生したことが考えられる。また、実際の値よりも推定値が小さい場合は速度が回復した後も交通容量が変化しないのに対し、推定値が大きい場合は交通容量が増加していることが分かる。これは、図-6で示すように、速度が最初の値よりも速度が高くなる時間帯があるため、それによって、車頭距離が詰まり、交通容量が増加したのではないかと考えられる。

5. 結論

本研究では、近年明らかになった交通容量の長期的な逓減に対して、各車両の車頭時間のばらつき、および先行車の減速度の推定値に着目して、これらが交通容量に与える影響を分析した。結果として、車頭時間のばらつきが増加することで交通容量が減少し、交通容量の誤差範囲も大きくなることを示した。また、期待値から算出した交通容量と比較することで、交通容量の減少には、最長車頭時間がかかっているのではないかと考察を行った。先行車の減速度の推定値に関しては、追従挙動モデルを用いた分析を行い、この値が実際の値と異なる場合に交通容量が減少すること、実際の値よりも推定値が大きい場合には停車する車両が発生することを示した。以上より、今後の交通容量の変化を分析するにあたり、車頭時間のばらつきや先行車の減速度の推定値が重要な指標の一つになるのではないかと考察できる。

本研究は、実データではなく確率分布や追従挙動モデルなど理論面のみでの分析であるため、研究結果と実態に多少のずれが存在することが考えられる。今後は実データを用いた仮説の検証、および分析を行うことが課題として挙げられる。加えて、本研究では分析を単純化するために走行環境や車両属性などをシンプルにして、分析を行っている。このことについても、様々な環境条件などを設定した研究を行う必要があると考えられる。

また、交通容量の逓減には、本研究で示したものの以外にも、車両形状の変化など様々な要因が考えられる。今後は、交通容量の逓減を明らかにするために、車頭時間以外の指標についても、分析を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路の交通容量，丸善，1984
- 2) 後藤誠，石田貴志，野中康弘：都市間高速道路における交通性能の経年変化に関する研究，交通工学論文集(特集号A)，5巻，2号，pp.90-98，2019
- 3) 村上友基，井料隆雅，中田諒，萩原武司：車両感知器データによる交通容量の長期変動モニタリング，

- 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.5, pp.1275-1281, 2016
- 4) 大口敬, 中村英樹: 日本における交通容量・サービスの質に関する研究の概観と展望, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.3, pp.217-229, 2011
 - 5) 田村洋一: 車頭時間分布モデルのパラメータと交通量との関係, 山口大学工学部研究報告, 31巻, 2号, pp.327-332, 1981
 - 6) 平岡敏洋, 橘崇弘, 葛西誠, 松本修一: 目標車頭時間の視覚情報提示が先行車追従行動に与える影響, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, pp.857-864, 2015
 - 7) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.39-51, 2000
 - 8) Gipps.P.G.: A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation, *Transpn. Res.*, Vol.15B, No.2, pp.105-111, 1981.
 - 9) 柳原正実: 運転意図の推移を考慮した車両挙動解析に関する研究, 博士学位論文, 京都大学, 2014.3
 - 10) 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・論文集, Vol.41, 2010
 - 11) 公益財団法人高速道路調査会: 高速道路における適正な車両間隔に関する調査研究報告書, 2017
- (?受付)

A STUDY ON THE EFFECT OF LONG-TERM DECREASE OF TRAFFIC CAPACITY IN TIME HEADWAY VARIANCE AND CAR-FOLLOWING BEHAVIOR

Fuma IKEYA, Shinji TANAKA,
Fumihiko NAKAMURA, Ryo ARIYOSHI, and Shino MIURA

In recent years, it became possible to monitor the traffic conditions at the same points in Japan over a long time by accumulating traffic data with traffic counter. So, we knew that the traffic capacity was decreasing at a lot of points in Japan compared to about 15 years ago. The purpose of our study was to clarify that changes in driver's driving behavior had an effect on the decrease in traffic capacity. First, we used the probability distribution and we showed that the time headway variance can be used as an index to clarify the purpose of the research. Then, using the car-following behavior model, we analyzed how the traffic capacity changes as the following behavior changes. As a result of the analysis, we could suggest that the estimated value of the deceleration of the preceding vehicle might have an effect on the decrease in traffic capacity. Now, we analyze changes over time in the time headway variance using actual data.