

潜在的ボトルネック交通容量の推定及び
交通容量の確率分布を用いた年間の渋滞予測検討*
Estimation of Latent Bottleneck Capacity of Expressways
and Application of Probabilistic Capacity Model to Yearly Congestion Prediction*

福島賢一**・Jian XING***・瀬戸稔和****・佐藤久長*****

By Kenichi FUKUSHIMA**・Jian XING***・Toshikazu SETO**** Hisanaga SATO *****

1. はじめに

高速道路の単路部における渋滞は、縦断線形のサグ部やトンネル入り口付近等が、交通容量上のボトルネックとなって発生することが広く知られている^{1) 2)}。

渋滞による社会的損失は多大なものであり、交通事故防止や地球環境問題への取り組みとしても、将来の交通需要の動向も踏まえた早急な渋滞対策が求められている。近年の社会経済情勢を踏まえると、より一層の効率的かつ効果的な対策の実施が必要であり、そのためには、現状の渋滞要因の把握とともに、将来の渋滞発生状況を精度良く予測する必要がある。渋滞予測の主な入力条件となるボトルネック交通容量は、その値が渋滞規模に直接関わり、対策工の選定にも影響を及ぼすため、ボトルネック交通容量の精緻化は渋滞を予測する上で非常に重要となる。

顕在化しているボトルネック付近に、渋滞対策として車線数の増加や付加車線を設置すると、これまで発生（顕在化）していなかった箇所での渋滞発生が予想されるため、渋滞予測の際には、こうした潜在的ボトルネック箇所の特定や交通容量の設定が必要となる。

これまで、暫定2車線区間においては、ボトルネック交通容量とボトルネック付近の道路構造との関係から潜在的ボトルネック交通容量の推定式が提案されている³⁾。しかし、2車線及び3車線区間における潜在的ボトルネック交通容量の推定式は提案されていない。

また、従来の渋滞予測に用いられる交通容量は、平均的な一定値として与えられることが多いが、渋滞発生回数等において再現性に課題がある。これまでの研究において、あるレベルの交通需要がボトルネックに到着しても、渋滞が発生する場合と発生しない場合が

あること、高いレベルの交通需要であっても必ずしも渋滞が発生するわけではないことが報告されている。そのため、従来のようにボトルネックでの渋滞発生と交通容量を確率的に扱うことに代わり、近年では交通渋滞の発生を確率事象としてボトルネック交通容量の確率論的定義を試行する研究も現れている^{4) 5)}。

以上の点を踏まえ、本検討では多車線（2車線、3車線）区間における潜在的ボトルネック交通容量の推定式を求め、それを非渋滞時のフローティング調査による速度低下状況から位置を特定した潜在的ボトルネックに適用して交通容量を算出した。さらに、渋滞発生時と非渋滞時の交通量データを用いて、ボトルネック交通容量確率分布を推定し、これらを将来渋滞予測の実務の場面で適用し渋滞予測の精度向上を試みた。

2. ボトルネック交通容量と道路構造等との関係

(1) ボトルネック付近の道路構造等

ボトルネック交通容量とボトルネック付近の道路構造等との関係を分析するため、既往検討結果等を参考に比較的重交通路線（東名、名神、中央道、東北道、関越道、常磐道、京葉道、中国道）の39箇所（3車線：16箇所、2車線：23箇所）におけるボトルネック付近の道路構造等を整理した。整理項目は表1のとおりであり、図1には説明図を示している。

表1 ボトルネック付近の道路構造等の整理項目

サグの上流側縦断勾配 (%)
サグの上流側縦断勾配長 (km)
サグの下流側縦断勾配 (%)
サグの下流側縦断勾配長 (km)
サグの縦断勾配差 (%)
縦断曲線長 (km)
縦断曲線半径 (km)
当該サグの上流1Cからの順位
平休区分 (平日: 0、休日: 1)
渋滞発生時間帯 (昼間: 0、夕方・夜間: 1)
ボトルネック道路構造 (サグ: 0、TN: 1)

*キーワード：交通流、交通容量、渋滞発生確率

**正員、工修、(財)高速道路技術センター 技術研究部

(東京都港区芝4-47-5、TEL03-6436-2089、FAX03-6436-2097)

***正員、工博、(財)高速道路技術センター 技術研究部(同上)

****中日本高速道路(株)東京支社 厚木工事事務所

(厚木市恩名1-44-43、TEL046-223-8721、FAX046-224-3982)

*****正員、中日本高速道路(株)名古屋支社

(一宮市丹陽町九日市場字竹の宮204、

TEL0586-76-4224、FAX0586-81-3052)

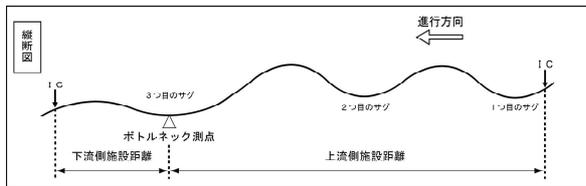
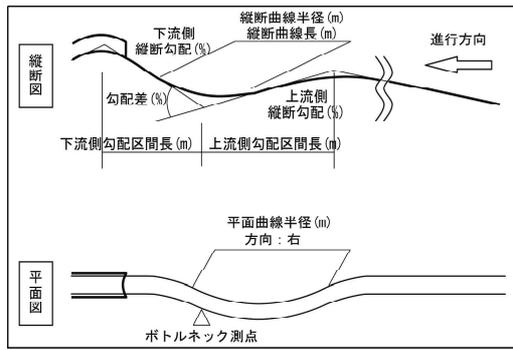


図1 ボトルネック付近の道路構造

(2) 潜在的ボトルネック交通容量の推定

ボトルネックの渋滞発生時交通量と渋滞発生後捌け交通量を目的変数、整理したボトルネック付近の道路構造等を説明変数として重回帰分析を行った。解析は、渋滞発生時交通量及び渋滞発生後捌け交通量と道路構造等との関係それぞれについて車線数別(3車線、2車線)に行った。なお、重回帰分析に用いる説明変数の選択は、変数増加法、変数減少法及び変数増減法にて分析を行い、最終的にはAIC値の小さい回帰式を採用した。

表2と表3に3車線区間における重回帰分析結果を示す。渋滞発生時交通量、渋滞発生後捌け交通量についての説明変数のt検定及び回帰式のF検定を実施した結果、いずれも有意であることが確認できた。2車線区間でも同様な結果が得られている。

表2 渋滞発生時交通量と道路構造の分析結果 (3車線区間)

(1)解析精度					
重相関係数 (R)	修正済重相関係数 (R)	赤池統計量基準 (AIC)			
0.86	0.81	218.2			
(2)分散分析表					
要因	偏差平方和	自由度	平均平方和	F値	有意確率
回帰変動	1078522.0	4	269630.5	8.00	0.00
誤差変動	370393.4	11	33672.1		
全体変動	1448915.4	15			
(3)重回帰式					
変数名	偏回帰係数	標準誤差	T値	有意確率	
定数項	4933	161.61	30.52	0.00	
渋滞発生時間帯	466.8	103.14	-4.53	0.00	
上流ICから当該地点までの順位	182.1	56.16	3.24	0.01	
縦断勾配差	133.5	48.00	2.78	0.02	
上流側縦断勾配長	-125.3	61.92	-2.02	0.07	

表3 渋滞発生後捌け交通量と道路構造の分析結果 (3車線区間)

(1)解析精度					
重相関係数 (R)	修正済重相関係数 (R)	赤池統計量基準 (AIC)			
0.95	0.92	196.2			
(2)分散分析表					
要因	偏差平方和	自由度	平均平方和	F値	有意確率
回帰変動	1611273.0	5	322254.6	17.57	0.00
誤差変動	165049.4	9	18338.8		
全体変動	1776322.4	14			
(3)重回帰式					
変数名	偏回帰係数	標準誤差	T値	有意確率	
定数項	4549	146.59	31.04	0.00	
渋滞発生時間帯	-563.5	72.02	-7.82	0.00	
縦断勾配差	72.97	47.70	1.53	0.16	
上流側縦断勾配長	-148.6	50.01	-2.97	0.02	
下流側縦断勾配長	298.7	95.63	3.12	0.01	
縦断曲線半径	-3.87	1.94	-1.99	0.08	

表4と図2にそれぞれ片側2車線及び3車線区間の潜在的ボトルネック交通容量の推定式、推定式を用いた推定値と観測値の相関関係を示す。推定式は修正済重相関係数0.81~0.92と高い精度である。

表4 潜在的ボトルネック交通容量の推定式

片側3車線	渋滞発生時	$(466.8) \times [\text{渋滞発生時間帯 (夕夜1,他0)}] + (182.1) \times [\text{上流ICからの当該地点の順位}] + (133.5) \times [\text{縦断勾配差 (\%)}] + (-125.3) \times [\text{上流側縦断勾配長 (km)}] + 4933$
	渋滞発生後	$(563.5) \times [\text{渋滞発生時間帯 (夕夜1,他0)}] + (72.97) \times [\text{縦断勾配差 (\%)}] + (-148.6) \times [\text{上流側縦断勾配長 (km)}] + (298.7) \times [\text{下流側縦断勾配長 (km)}] + (-3.866) \times [\text{縦断曲線半径 (km)}] + 4549$
片側2車線	渋滞発生時	$(440.1) \times [\text{平休区分 (平0,休1)}] + (-326.6) \times [\text{ボトルネックのタイプ (TN1,ツ0)}] + (41.10) \times [\text{上流側縦断勾配 (\%)}] + (-84.05) \times [\text{渋滞発生時間帯 (夕夜1,他0)}] + 3556$
	渋滞発生後	$(353.3) \times [\text{平休区分 (平0,休1)}] + (-177.4) \times [\text{下流側縦断勾配長 (km)}] + (0.178) \times [\text{縦断曲線長 (km)}] + (-47.86) \times [\text{下流側縦断勾配長 (km)}] + 3112$

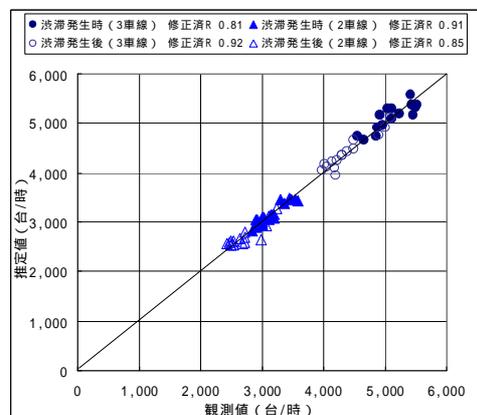


図2 ボトルネック交通容量の推定値と実測値

3. 交通容量確率分布の推定

(1) 交通量ランク別渋滞発生割合

顕在化ボトルネック箇所における交通量ランク別の出現頻度及び渋滞発生割合（渋滞発生頻度と出現頻度との比）を図3に示す。これを見ると、観測された渋滞発生時交通量はかなり広い範囲に分散し、各交通量ランクにおいても渋滞が発生する時と発生しない時があることが分かる。また、交通量レベルが大きくなると、交通量ランク別の渋滞発生割合は概ね高くなる傾向にあるが、図のように観測された最大交通量付近で低くなるケースもみられる。なお、ここに示す交通量出現頻度は、渋滞流を除いた15分間フローレートの階級別出現頻度である。

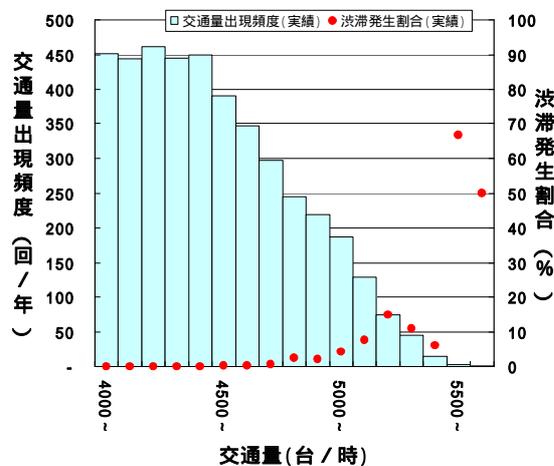


図3 交通量ランク別の出現頻度及び渋滞発生割合（東名（上り）：大和TN【H17】）

(2) 顕在化ボトルネック交通容量確率分布の推定⁵⁾

ここでは、最尤推定法を用いて、非渋滞発生時の交通量データも考慮して交通容量分布 $F_c(q)$ の推定を行った。最尤推定法では、以下の尤度関数の対数 $\ln(L)$ を最大化するように交通容量分布のパラメータを推定するものであり、過去に観測された交通量ランク別の渋滞発生頻度と非渋滞発生頻度を用いて、事前に仮定した交通容量の確率分布関数のパラメータを推定するパラメトリック法である。

$$L(x_i) = \prod_{i=1}^n f_c(q_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F_c(q_i)]^{1-\delta_i} \quad (1)$$

ここで、

$f_c(q_i)$: 交通容量 c の確率密度分布関数(PDF)

$F_c(q_i)$: 交通容量 c の累積確率分布関数(CDF)

n : 交通量ランク数

δ_i : 1 (渋滞が発生した場合)

δ_i : 0 (渋滞が発生しない場合)

x_i : 分布関数の未知パラメータ

なお、 $F_c(q)$ には、ワイブル分布を用いた。

$$\text{PDF} : f(q) = \alpha \beta^{-\alpha} q^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

$$\text{CDF} : F_c(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha} \quad \alpha, \beta > 0 \quad (3)$$

ここで、 α 、 β はそれぞれワイブル分布の形状、スケールパラメータである。

図4より、顕在化ボトルネックにおける推定された交通容量分布と観測された渋滞発生時交通容量の累積分布を比較すると、前者が後者より右に位置し、推定された交通容量が観測交通容量より大きいことがわかる。これは、後者は渋滞発生時のデータしか考慮していないのに対し、前者は渋滞非発生時のデータ（交通需要）も取り入れているためである。

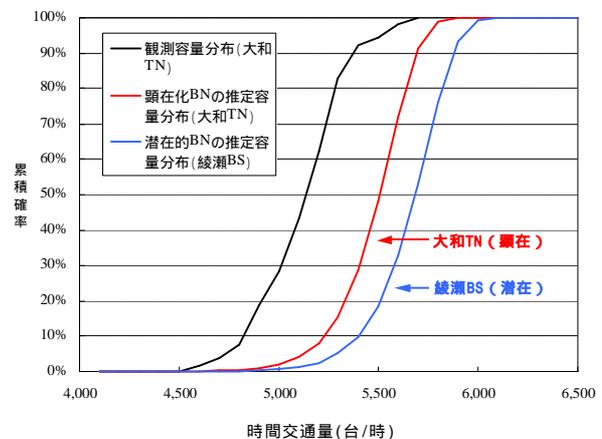


図4 観測及び推定ボトルネック交通容量の累積分布（東名（上り）：大和TN及び綾瀬BS【H17】）

(3) 潜在的ボトルネックの交通容量確率分布の推定
潜在的ボトルネックでは渋滞が顕在化していないため、直接的に交通容量確率分布を推定できない。そこで、分布形状パラメータについては同一IC区間内あるいは直近ボトルネックのそれと同じと仮定した。

また、スケールパラメータについては、回帰式から推定した潜在的ボトルネックの渋滞発生時交通量と同一IC区間内あるいは直近ボトルネックの観測された顕在化ボトルネック渋滞発生時交通量の平均値の差分を用いて、同一IC区間内あるいは直近ボトルネックの交通容量確率分布のスケールパラメータを下式にて補正して求めた。図4に推定結果の一例を示す。

$$F_c(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta'}\right)^\alpha} \quad (4)$$

$$\beta' = \beta + (Qc_{\text{潜}} - Qc_{\text{顕}}) / \Gamma(1 + 1/\alpha) \quad (5)$$

ここに、 q : 時間交通量

β' : 潜在的BNの交通容量分布のスケールパラメータ

$Qc_{\text{潜}}$: 潜在的BNの渋滞発生時交通量推定値(台/時)

Qc_ 頭 : 顕在化 BN の渋滞発生時交通量の平均値 (台/時)

4. 交通容量確率分布を用いた年間渋滞予測モデルの精度検証

本検討では、概念的には広義の I/O 法に属するポイントキュー法を渋滞予測モデルに用いた。整備効果検討に必要な将来渋滞予測を行うため、年間 365 日の日交通量に時間変動パターン (時間係数) を乗じて時間帯別交通量を算出し、これを設定した交通容量と比較しながら渋滞判定を行い、渋滞に関わる諸指標を算出した。なお、時間変動パターンは、現況再現時及び将来渋滞予測時ともに平日、土曜日、日曜日に交通混雑期 (GW、お盆、年末年始) を加えた 4 パターンで近似させた。

東名 (東京 IC ~ 厚木 IC 間)、中央道 (高井戸 IC ~ 上野原 IC 間) を対象として、図 5、図 6 にそれぞれ渋滞発生日数及び渋滞量の実績値 (H17) と予測値の比較を示す。なお、本検討では推定した交通容量確率分布に乱数を発生させることで、ボトルネックにおける日々の渋滞発生時交通量を設定した。

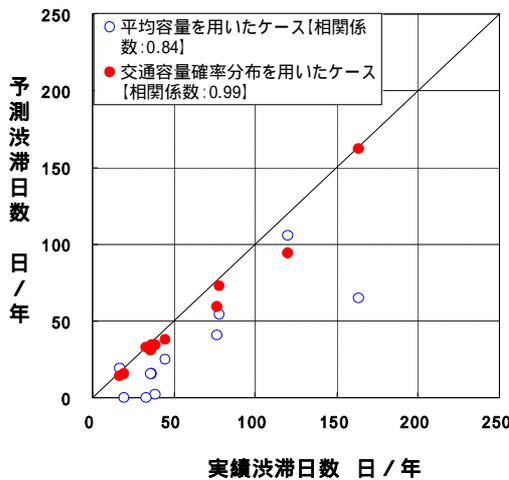


図 5 現況再現精度の比較 (渋滞日数)

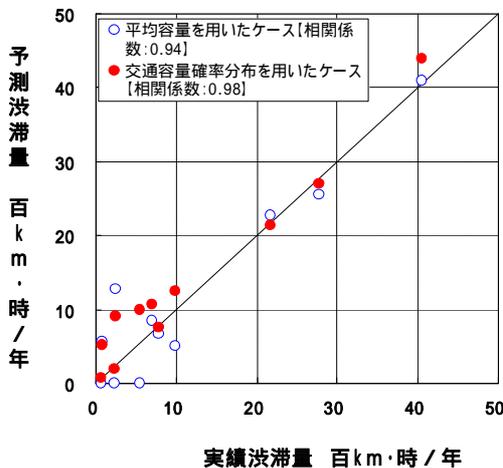


図 6 現況再現精度の比較 (渋滞量)

図に示すように、渋滞発生日及び渋滞量ともに、交通容量確率変動を考慮した場合は、従来の平均的な交通容量を用いた場合に比べて精度よく現況を再現できている。

交通容量確率分布を用いた渋滞予測は、以下の特徴を有しており、より実際に近い渋滞状況を再現できる。

- ・交通需要の大小に関わらず、渋滞が発生する日としない日を再現できる。
- ・同一 IC 間に複数のボトルネックがあり、上流側の交通容量が小さい場合でも上流側で発生せず下流側で発生するような事象を再現できる。

5. おわりに

2 車線及び 3 車線区間の潜在的ボトルネックの交通容量を推定するために、計 39 箇所を対象に重回帰分析をした結果、修正済重相関係数 0.81 ~ 0.92 と高い精度の推定式が得られた。また、これまでに提案された顕在化ボトルネックの交通容量確率分布に加え、潜在的ボトルネックにおける交通容量確率分布を提案した。これら交通容量分布を用いて年間の渋滞予測を試みた結果、従来の確定的容量を用いた場合に比べて、高い現況再現精度を確保できた。

今後の課題としては、様々な路線で渋滞予測の実績を積むとともに、潜在的ボトルネックの交通容量確率分布の検証、交通容量推定式への付加車線設置効果の反映等が考えられる。

参考文献

- 1) 越 正毅 : 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, 第 371 号/IV-5, pp1-7, 1986. 7.
- 2) 越 正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和 : 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458/4-18, pp65-71, 1993.
- 3) 高橋秀喜, 佐藤久長, 瀬古賢司, 吉川良一 : 高速道路暫定 2 車線区間のボトルネック交通容量の推定と 4 車線化の段階供用における渋滞予測, 交通工学, 第 41 巻 増刊号, pp85-91, 2006.
- 4) Lorenz, M. and L. Elefteriadou, A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown, Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, Transportation, Research Circular E-C018, Transportation Research Board, Washington D.C., 2001.6.
- 5) Jian XING, 佐藤久長, 高橋秀喜, 吉川良一 : 高速道路のボトルネック交通容量分布及び渋滞発生確率の推定, 第 26 回交通工学研究発表会論文報告集, 2006.11.