

待ち行列理論による 高速道路の所要時間算定

鶴 元史¹・木村真也²・石山静樹³・米川英雄⁴

¹非会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦1-8-11)
E-mail:m.tsuru.a@c-nexco-hen.jp

²非会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦1-8-11)
E-mail:s.kimura.a@c-nexco-hen.jp

³正会員 中日本高速道路(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19)
E-mail:s.ishiyama.ab@c-nexco.co.jp

⁴正会員 中日本高速道路(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19)
E-mail:h.yonekawa.aa@c-nexco.co.jp

高速道路の所要時間情報は経路選択を行う上で重要である。中でも渋滞時は、通過時間が時々刻々と変化するため、即時性や常時提供がより重要となる。中日本高速道路(株)では、2014年度に行う一宮道路管制センターの改修を契機に、更新周期を5分から1分に短縮し、さらに複数の所要時間算定式を用意した。

本研究では、そのうちのひとつである待ち行列理論による算定式を取り上げ、事故又は工事による全10渋滞を対象に実データにより検証を行った。その結果、ITSスポットプローブによる実通過時間との差は、車両感知器速度データを用いる従来方より、待ち行列理論による方法の方が僅かながら長くなるが、十分に使用に耐え得る精度を有していることが確認できた。

Key Words : traffic information, travel time, queuing method, congestion, probe data

1. 背景と目的

中京圏における高速道路ネットワークは、新東名や新名神等の新規区間の供用により複数ルートを選択が可能となる。このことは、通行止や渋滞を回避し得る経路のリダンダンシーを発揮し、高速道路走行の信頼性やサービスの質の向上をもたらすものと期待されている。

その一方で、経路選択の判断材料として重要な所要時間情報は、現行では、主要路線において概ね2km間隔で設置されている車両感知器の速度データを基に算出されているが、更新周期が5分であり即時性に劣ることや、事故渋滞時は所要時間情報を提供しないなど、運用面に問題を抱えている。

中日本高速道路(株)では、2014年度に行う一宮道路管制センターの改修(以下、「新システム」という)を契機に、所要時間提供方法の見直しを行う。その主眼は、①更新周期を1分に短縮すること、②所要時間を常時提供することの2点であり、上記に示す現行の問題に対応したものである。

この新システムでは、所要時間算定式を複数用意した。本研究は、そのうちのひとつである待ち行列理論による算定式を取り上げ、実データにより検証を行ったものである。

2. 待ち行列理論算定式

本章では、待ち行列理論による渋滞通過時間の算出方法、密度 K と渋滞捌け交通量 Qvd との関係式の設定方法について述べる。

(1) 算出方法

待ち行列理論による方法は、図-1に示す渋滞捌け交通量 Qvd と渋滞長 Ln 、さらに図-3に示す1車線当りの渋滞捌け交通量 Qvd/N から定まる1車線当りの密度 K から算出する。算定式(1)を以下に示す。

$$T = \frac{\sum (Ln \times N \times K)}{Qvd} \times 60 \quad (1)$$

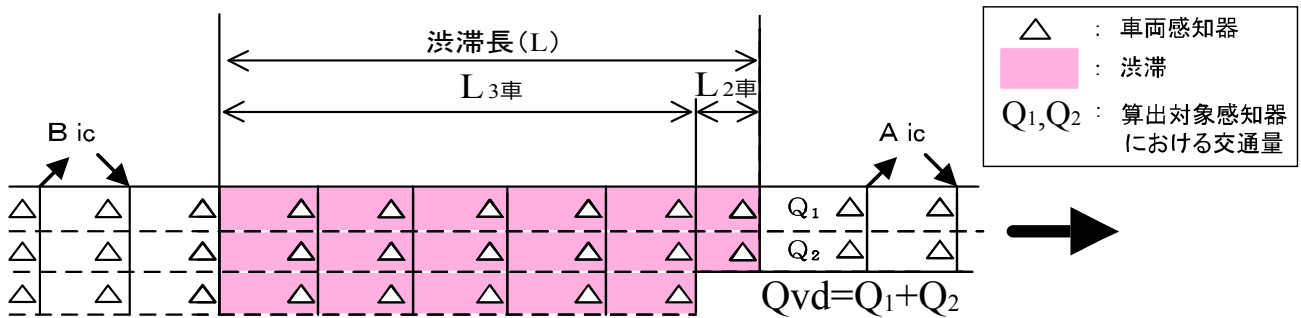


図-1 待ち行列理論による渋滞通過時間の算出

ここに、

- T : 渋滞通過時間 (分)
- L_n : N車線区間の渋滞長 (km)
- N : 車線数
- K : 1車線当りの密度 (台/km/N)
- Q_{vd} : 渋滞捌け交通量 (台/時)

なお、Q_{vd}は1分移動15分交通量の時間換算値である。

このように、渋滞通過時間は渋滞渦中の滞留台数 (式(1)の分子) を単位時間当りの捌け台数 (式(1)の分母) で除すことにより求められる。すなわち待ち行列の最後尾が先頭に到達するまでの時間と同義である。密度Kと渋滞捌け交通量Q_{vd}との関係式は予め用意するので (次節で詳述)、必要なデータは渋滞長L_nと渋滞捌け交通量Q_{vd}の2つになる。

(2) QK式の設定

a) 使用データと設定条件

使用データは、表-1に示すように東名阪道を対象に渋滞原因別 (交通集中、事故、工事) に、それぞれ10日分の渋滞時の車両感知器データを集計した。

交通量及び速度は1分移動15分平均値とした。1車線当り交通量は上記交通量を車線数で割った時間換算値、1車線当り密度は1車線当り交通量を上記速度で割った値とした。

渋滞判定は、1分移動15分平均値の速度が45km/hより小さい、もしくは1車線当り密度が35台/kmより大きいデータを渋滞と判定した。関係式の構築には、渋滞内の位置に関わらず、原則として渋滞判定された全車両感知器のデータを使用した。なお、1車線当り密度が150台/kmより大きい値は異常値として除外した。

b) 設定結果

図-2に渋滞原因別の1車線当り密度と1車線当り交通量の散布図を示す。図の赤の打点は交通集中、青は事故、緑は工事である。また、直線はそれぞれの回帰式を示す。

これをみると、交通集中と事故は同じような分布を示しているのに対し、工事は全体的に密度が低いことが分かる。工事渋滞は交通集中や事故に比べて規制区間が長

表-1 設定対象渋滞

渋滞開始日	曜日	渋滞開始時間	渋滞終了時間	起点KP	終点KP	最大渋滞長	渋滞原因
2013/1/12	土	15:45	18:35	60.84	75.30	7.11	交通集中
2013/1/13	日	15:00	21:15	66.02	83.61	17.59	交通集中
2013/2/17	日	15:20	20:00	66.02	80.25	14.23	交通集中
2013/2/23	土	15:45	19:50	60.50	75.30	14.80	交通集中
2013/3/16	土	15:10	20:15	60.50	80.25	19.75	交通集中
2013/3/17	日	16:00	21:20	66.02	83.61	17.59	交通集中
2013/3/24	日	14:15	22:10	68.19	87.20	19.01	交通集中
2013/4/21	日	15:30	19:35	60.50	75.30	14.80	交通集中
2013/7/21	日	15:20	19:05	66.02	75.30	9.28	交通集中
2013/10/12	日	15:50	19:45	66.02	78.75	12.73	交通集中
2013/1/9	水	9:48	12:55	65.00	76.95	11.95	事故
2013/2/3	日	10:50	12:15	65.80	72.60	6.80	事故
2013/2/3	日	15:14	17:40	72.00	83.61	11.61	事故
2013/2/10	日	11:40	22:25	66.02	84.10	18.08	事故
2013/3/15	金	15:25	19:00	67.60	83.61	16.01	事故
2013/4/13	土	15:35	20:00	62.30	76.95	14.65	事故
2013/4/14	日	16:05	19:55	59.50	81.06	21.56	事故
2013/6/16	日	14:25	18:55	68.19	85.80	17.61	事故
2013/7/13	土	7:25	13:05	54.10	75.30	21.20	事故
2013/10/3	木	20:30	22:30	63.64	70.15	6.51	事故
2013/10/6	日	18:15	21:00	66.02	75.30	9.28	事故
東名阪リフレッシュ工事期間: 2013/5/27(月)~5/31(金)桑名IC~IC伊勢関開							
東名阪リフレッシュ工事期間: 2013/6/3(月)~6/7(金)桑名IC~IC伊勢関開							
工事							
工事							

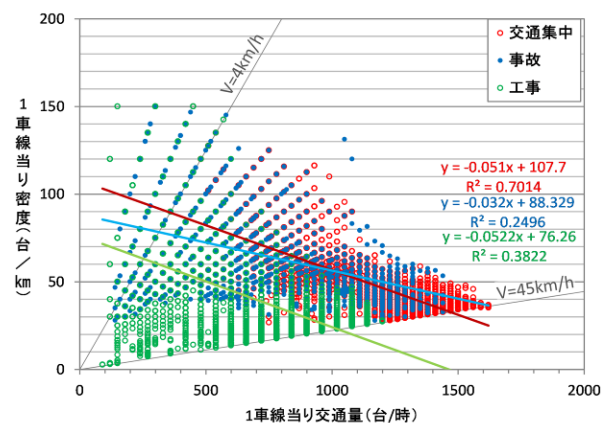


図-2 1車線当りの密度と交通量の回帰式 (渋滞原因別)

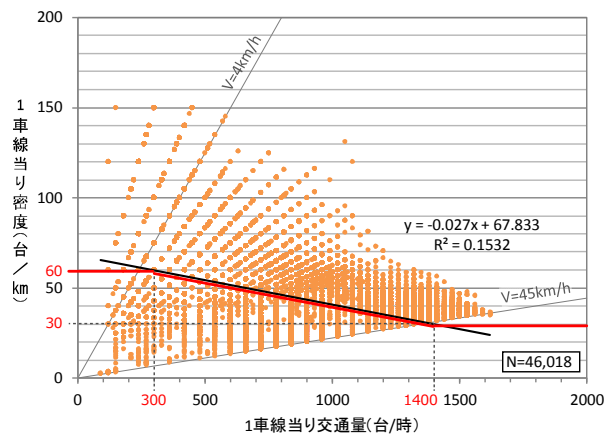


図-3 1車線当りの密度と交通量の関係式の設定

く、また沿線に規制材や工事関係車両が存在するため、ドライバーは前車との距離を空け慎重に運転しているのではないかと考える。

次に、渋滞原因を区分せず一つにまとめたものを図-3に示す。

このデータから得られた直線回帰式を基に関係式を設定した(図中の赤線)。なお、回帰式と速度4km/hと45km/hが交差する付近に密度の閾値を設定し、極端な密度を採ることがないように適用範囲を60台/km~30台/kmとした。

4. 実データによる検証方法

本章では、前章までに設定した待ち行列理論による渋滞通過時間を実データで検証する方法について述べる。

表-2に検証対象とした渋滞の一覧を示す。検証の対象とした渋滞は、車両感知器を概ね2km間隔に設置している区間において発生し、車両閉塞を伴い原因が事故又は工事であり、車両感知器の欠測や異常が全く無いものを2013年一年間から選定し、全10渋滞となった。

検証は次の2通りの方法で行った。

(1) 従来方と待ち行列理論による方法との比較

渋滞内に存在する車両感知器の速度データから得られた、単位区間毎の所要時間を同時刻で合算した従来方と、速度データを用いずに渋滞捌け交通量と渋滞長から渋滞通過時間を求めた待ち行列理論の相違について、表のNo.2の渋滞を中心に比較を行う。

次に、全10渋滞対象にITSスポットプローブの走行履歴から算出した実通過時間を真値であるものとみなし、実通過時間との差を検証する。

(2) 新システムの他の算定式との比較

待ち行列理論とともに新システムで導入予定の新同時刻和による方法、累積交通量による方法、回帰式による方法の4つの算定式について、(1)と同様にITSスポットプローブの実通過時間との差を比較する。また、それぞれの方法の適正や特長について整理する。

表-2 検証対象渋滞

No	平休区分	開始終了時刻	路線	上下区分	渋滞区間	渋滞原因
1	平日	16:40~21:00	東名	下り	岡崎~豊川	事故
2	日曜	16:55~18:55	東名	下り	豊田J~岡崎	事故
3	お盆	9:20~11:35	東名	下り	豊田J~岡崎	事故
4	平日	7:50~11:05	東名	下り	豊田J~音羽蒲郡	工事
5	日曜	8:50~11:50	東名	下り	豊田J~岡崎	事故
6	土曜	16:35~19:20	東名	下り	豊田J~音羽蒲郡	事故
7	日曜	9:10~12:15	東名	下り	豊田J~岡崎	事故
8	平日	8:20~10:10	東名	上り	豊田~名古屋	事故
9	平日	7:35~9:45	名神	上り	一宮~岐阜羽島	事故
10	平日	17:45~20:15	名二環	外回り	小幡~楠J	事故

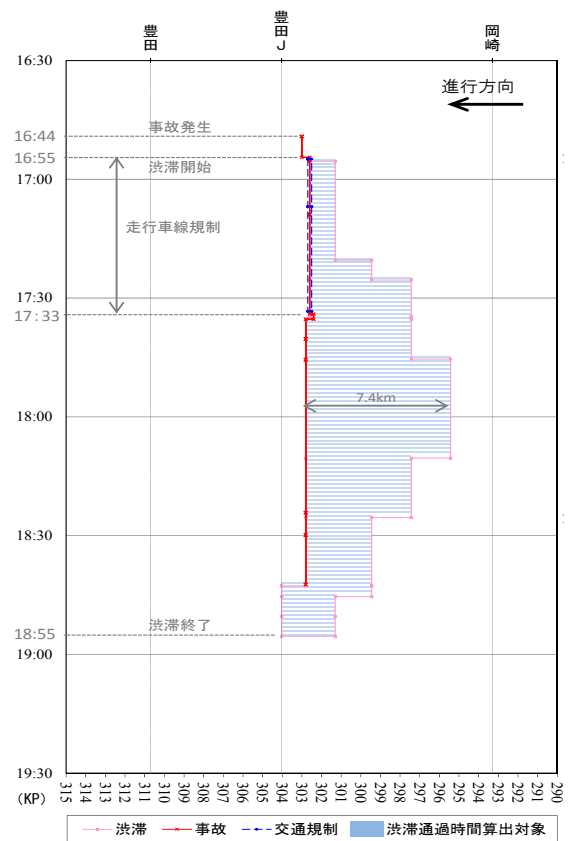


図-4 渋滞状況 (No.2)

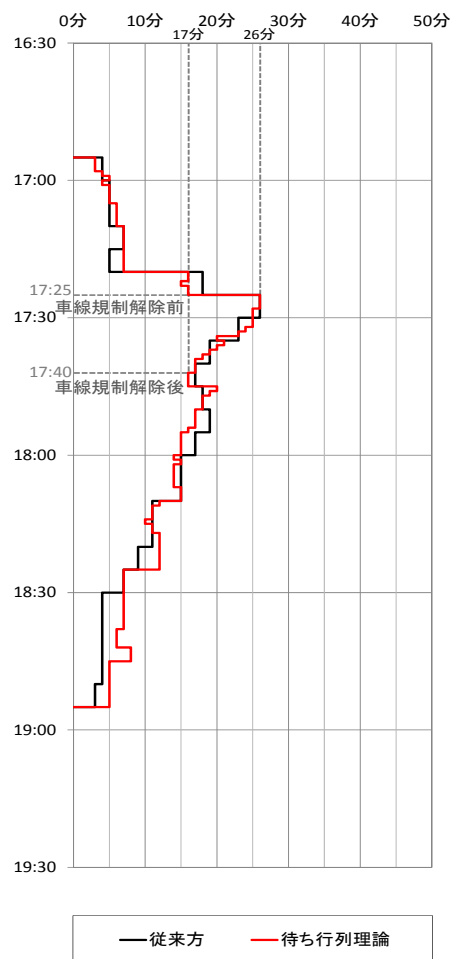


図-5 従来方と待ち行列理論による渋滞通過時間 (No.2)

5. 従来方と待ち行列理論による方法との比較

(1) No. 2の渋滞における渋滞通過時間の比較

図-4に表-2中のNo.2の渋滞の発生状況を、図-5に従来方と待ち行列理論による渋滞通過時間の時系列を示す。

図-4の渋滞は、二輪車の転倒事故をきっかけに16時55分に発生し18時55分まで2時間継続し最大渋滞長は7.4kmであった。また、事故の影響により16時55分～17時33分の間、先頭から200mの範囲で車線規制が行われた。

車線規制解除の17時33分前後の時間帯に着目して渋滞通過時間を比較したものを表-3に示す。

図-5及び表-3をみると、解除8分前である17時25分の渋滞通過時間は26分（従来方、待ち行列とも）であるのに対し、解除7分後である17時40分の渋滞通過時間は17分（従来方、待ち行列とも）であり9分短縮している。この時、渋滞長は17時25分が5.2km、17時40分は5.4kmであり解除後の方が0.2km長い。

渋滞長が0.2km長いにも拘らず、渋滞通過時間が9分短縮するのは、従来方の区間1、区間2において速度が8～9km/h上昇したためであり、これにより時間が短縮したことがわかる。一方、待ち行列理論は、式(1)の特性として、密度Kが大きく渋滞捌け交通量Qvdが小さくなるほど、渋滞通過時間が大きくなる。17時25分の1車線当りQvdは620台/時、1車線当り密度Kは図-5より51台/kmであるのに対し、17時40分の1車線当りQvdは840台/時、1車線当り密度Kは45台/kmであり、17時40分の方がQvdが大きく密度Kが小さい。このため時間が短縮したことが分かる。このように、待ち行列理論では渋滞捌け交通量の変化が所要時間に影響を与えることとなる。図-5をみると、速度データを用いる従来方と良く一致していることが分かる。

(2) 実通過時間との検証

従来方と待ち行列理論による方法の渋滞通過時間を実通過時間と比較する。実通過時間は、ITSスポットプローブ走行履歴から算出した。

図-6に、ITSスポットプローブ走行履歴から実通過時間を算出した事例を示す。

図-6の渋滞は、図-4及び図-5と同じ渋滞である。図の左図は、図-4にITSスポットプローブの走行履歴（緑線）を加えたものである。この渋滞を通過したITSスポット車載器搭載車両は14台であった。左図の緑線のうち渋滞内を通過していた範囲を実通過時間とし、渋滞末尾への到達時刻T1と渋滞先頭の通過時刻T2との差が実通過時間である。図の右図は、図-5にITSスポットプローブ走行履歴から算出した実通過時間（緑棒）を加えたものである。実通過時間は、渋滞末尾への到達時刻で表記した。

表-3 車線規制解除前後のデータ比較

時刻	算定式	区分	渋滞通過時間算出根拠			
			起点 ← 末尾			計
			区間1	区間2	区間3	
解除前 17:25	従来方	渋滞長(km)	1.3	1.9	2.0	5.2
		補正速度(km/h)	17	9	14	12
		所要時間(分)	5	12	9	26
	待ち行列理論	Qvd(台/時/N)	—			620
		K(台/km/N)	—			51
		所要時間(分)	—			26
解除後 17:40	従来方	渋滞長(km)	1.5	1.9	2.0	5.4
		補正速度(km/h)	25	18	16	19
		所要時間(分)	4	6	8	17
	待ち行列理論	Qvd(台/時/N)	—			840
		K(台/km/N)	—			45
		所要時間(分)	—			17

*補正速度とは、従来方で用いられている計測値に補正係数を乗じた速度

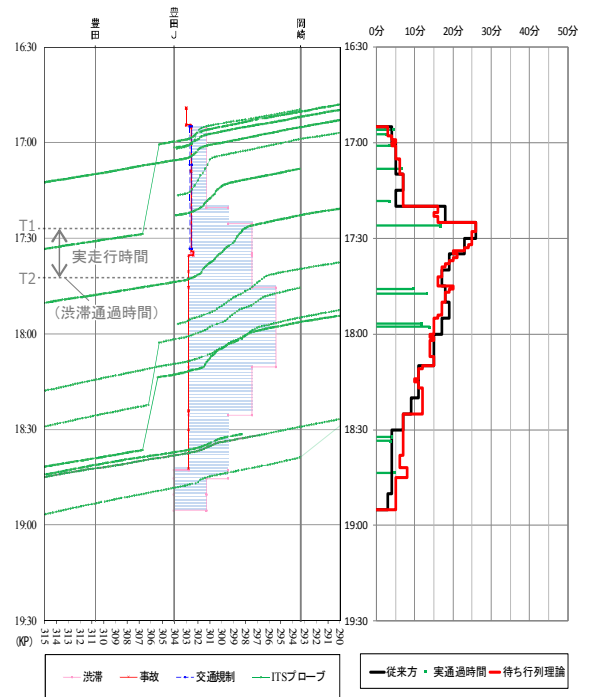


図-6 ITSスポットプローブ走行履歴

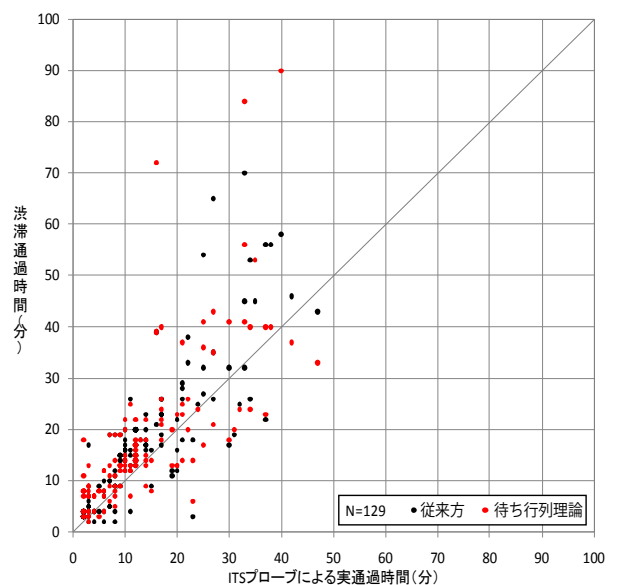


図-7 渋滞通過時間と実通過時間との比較

図-7に、同様の比較を表-2に示す10渋滞に対して行い、実通過時間と従来方及び待ち行列理論による方法との渋滞通過時間と比較した結果を示す。

図において、黒の打点は実通過時間と従来方の渋滞通過時間との関係を、赤の打点は実通過時間と待ち行列理論による方法の渋滞通過時間との関係を示す。

図を見ると従来方（黒）と待ち行列理論による方法（赤）との間には大きな違いが見られない。

図-8に、実通過時間に対する渋滞通過時間の差を渋滞長を5km毎に区分して従来方と待ち行列理論による方法とを比較した結果を示す。図中棒線は上から最大値、平均値、最小値であり、箱上下辺は平均値±標準偏差である。また、正の値は実通過時間よりも大きいことを表す。

図をみると、従来方（灰）、待ち行列理論による方法（赤）ともに渋滞長が長くなるに従って、徐々に実通過時間との差が大きくなっており、渋滞長毎に比較した場合においても顕著な相違は見られなかった。全体としてみると、実通過時間との差は従来方が3.7分、待ち行列理論による方法は4.1分である。従来方は平均速度、待ち行列理論は渋滞末尾車両の通過時間であるので、理論上は（従来方）<（待ち行列理論）となるが、差が0.4分だけなのは、従来方が計測値より低い値に速度補正を行っているためである。

6. 新システムの他の算定式との比較

本章では、待ち行列理論とともに新システムで導入予定の新同時刻和による方法、累積交通量による方法、回帰式による方法の4つの算定式について、5章と同じ10渋滞を対象に検証を行った。

(1) 算出方法

各算定式の概要を表-4に示す。また、新同時刻和による方法、累積交通量による方法及び回帰式による方法について、渋滞通過時間の算出方法を概説する。

a) 新同時刻和による方法

新同時刻和による方法は、従来方と同様に、各車両感知器の勢力範囲ごとに、勢力範囲の距離（東名高速などの主要路線で概ね2km）を当該車両感知器のN分間平均速度で走行したとして算定した区間所要時間をIC間などで合算する。従来方との相違は、N分間平均速度が従来方は正5分であるのに対して、新システムでは非渋滞時が1分移動8分平均値、渋滞時が1分移動15分平均値となる点である。例えば事故渋滞では、密部に遭遇するときに停止し、疎部に遭遇するときに発進する現象により、所要時間が大きく変動すると考えられる。車両感知器の集計時間を長くする目的は、主に渋滞内の疎密波の影響などによる変動を小さくするためである¹⁾。

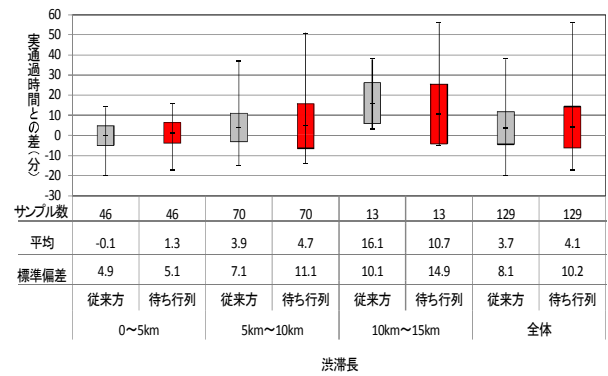


図-8 実通過時間との差（渋滞長別）

表-4 新システムの所要時間算定式の概要

使用データ	従来方	新システム			
		新同時刻和	累積交通量	回帰式	待ち行列理論
速度	○	○			
交通量			○		○
渋滞長	○	○		○	○
算出方法	区間所要時間 (区間距離/区間速度)の同時刻和	区間所要時間 (区間距離/区間速度)の同時刻和	滞留台数 / 捌け交通量 (累積需要交通量と累積捌け交通量の差から滞留台数を算出)	予め用意した、渋滞長と渋滞遅延時間との関係式を適用	滞留台数 / 捌け交通量 (予め用意したQK式を適用)
更新周期	5分		1分		

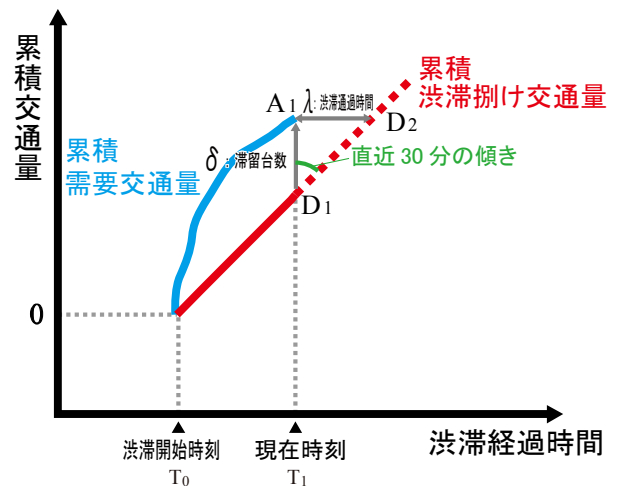


図-9 累積交通量による渋滞通過時間の算出²⁾

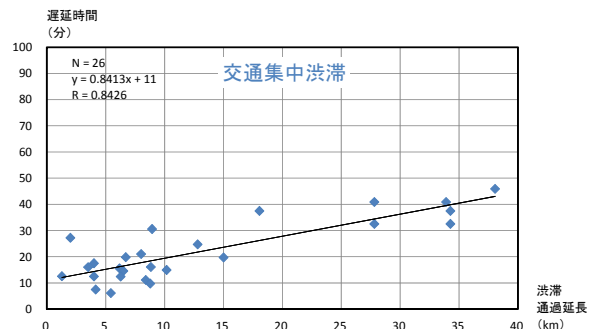


図-10 渋滞通過延長と遅延時間（交通集中渋滞）³⁾

b) 累積交通量による方法

累積交通量による方法は、筆者らが既に発表²⁾しているものをここで概説する。図-9に示すように赤線の渋滞捌け交通量の累積と青線の需要交通量の累積の2つから渋滞通過時間を算出する。図において、渋滞は時刻T0に始まり上下流2地点の車両感知器での交通量も時刻T0から累積を始める。現在時刻をT1とする。累積渋滞捌け交通量の点D1から累積需要交通量A1までの距離 δ が渋滞内の滞留台数となる。このとき渋滞末尾の車両A1が渋滞を通過する時間は、A1から横軸方向交通容量D2までの距離 λ となる。点D2は、累積渋滞捌け交通量の回帰式により推定する。回帰式は、直前の30分間のデータから求める。

累積交通量による方法は、速度データを用いずに渋滞通過時間を算出することができる。しかし、上下流の車両感知器の捕捉精度誤差も累積するという問題があるため、渋滞延伸時のみ使用する。

c) 回帰式による方法

回帰式による方法は、村部ら³⁾が提案した渋滞通過延長と遅延時間との回帰式(図-10)を準用したものである。この回帰式は、ITSスポットプローブデータを用いて非渋滞時と渋滞時におけるRSU間の所要時間の差を遅延時間として求め、渋滞通過延長と回帰したものである。この方法は、地方部などで車両感知器配置が疎であるため速度や交通量データが得られない場合であっても、渋滞長からおおよその遅延時間を推定することができる。なお、この遅延時間は渋滞原因や車線閉塞によって変動

するため、実際の運用は渋滞原因と車線閉塞の組合せにより予め用意した回帰式を適用する。

(2) 検証結果

図-11に、図-4と同じ渋滞について、4つの方法で算出した結果を示す。

新同時刻和による方法(橙色)は、従来方と同様に区間速度と渋滞長を用いるが、従来方の速度が正5分平均値であるのに対し、新システムでは1分移動15分平均値を使用する。このため、図のように従来方比べて速度が平滑化され変動が小刻みである。

累積交通量による方法(水色)は、他の方法と比較して変動がさらに小刻みであることが分かる。これはこの方法が渋滞長を使用せず上下流(需給)の累積交通量差であることによる。また、速度データを用いず交通量データだけで算出することが可能である。なお、この方法は前述した通り渋滞延伸時のみ使用する。

回帰式による方法(ピンク)は、使用データが渋滞長だけであるため、渋滞通過時間も渋滞長に呼応して増減する傾向を示している。この方法は、主に車両感知器の配置が疎な地方部の区間での使用に適している。

次に、図-12にITSスポットプローブデータによる実通過時間に対する各算定式の渋滞通過時間の差を図-8と同様に示す。ただし、渋滞長別の区分は行っていない。

これを見ると、実通過時間との差の平均が5分以内であるのは、待ち行列理論による方法と新同時刻和による方法の2つである。累積交通量による方法と回帰式によ

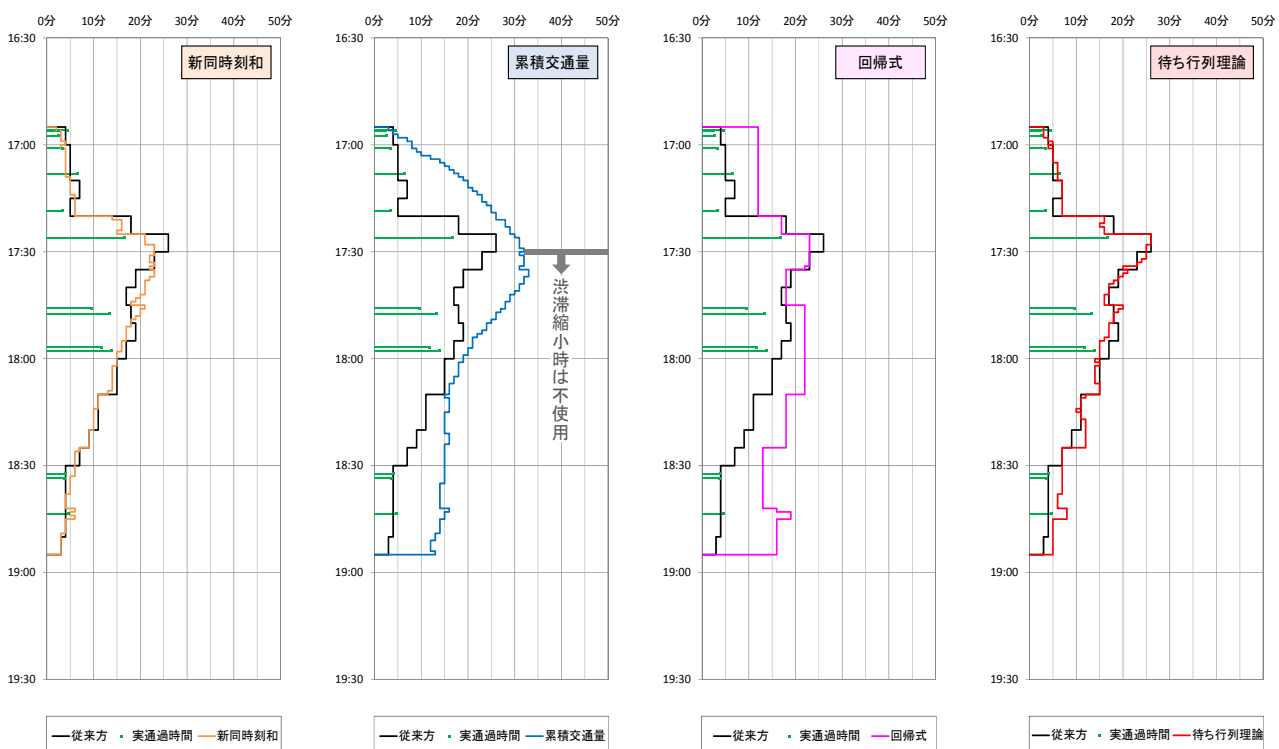


図-11 渋滞通過時間の比較(算定式別)

る方法は差が5分を超えるが、既往研究²⁾では、累積交通量による方法は経過時間が2時間以上になると誤差が大きくなる事が判明している。

新システムで導入予定の他の算定式と比較しても、待ち行列理論による方法は高い精度を有していることが分かった。

7. まとめ

本研究では、2014年度稼働予定の一宮新管制システムに導入する、待ち行列理論による新たな所要時間算定式について実データを用いて検証を行った。

その結果、実通過時間との差は車両感知器速度データを用いる従来方より、待ち行列理論による方法の方が僅かながら長くなるが、十分使用に耐え得る精度を有していることが確認できた。また、新システムで導入予定の他の算定式と比較しても同様であった。

このように、待ち行列理論による方法は、渋滞長Lnと渋滞捌け交通量Qvdの2つのデータから簡便に算出することが可能であり、車両感知器速度データによる従来からの方法に加えて、所要時間の常時提供を行う上での冗長性を確保できる有効性を示した。

なお、図-13に新システムで最終的に提供される所要時間の例を示す。採用値は渋滞内の疎密波の影響を考慮し、4つの算定式の中から最大値を採り図の右図のようになる。

今後は、運用後の検証を通じて更なる精度向上を図って行きたい。

参考文献

- 1) 小川清香, 山口孝, 米川英雄: 情報提供に用いる車両感知器の平均速度に関する一考察, 第 33 回交通工学研究発表会・論文集, pp.315-322, 2013.
- 2) 石山静樹, 鶴元史, 木村真也, 米川英雄: 高速道路の所要時間算定における累積交通量の導入, 第 34 回交通工学研究発表会・論文集, 2014.
- 3) 村部敏彦, 木村真也, 米川英雄: ITS スポットプローブデータを用いた車両感知器未整備区間における所要時間算定式構築, 土木計画学研究講演集 vol.48, 2013.

(2014. 8.1 受付)

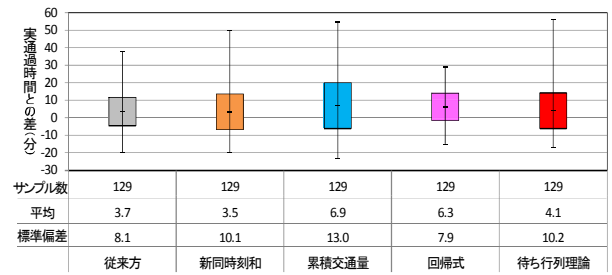


図-12 実通過時間との差 (算定式別)

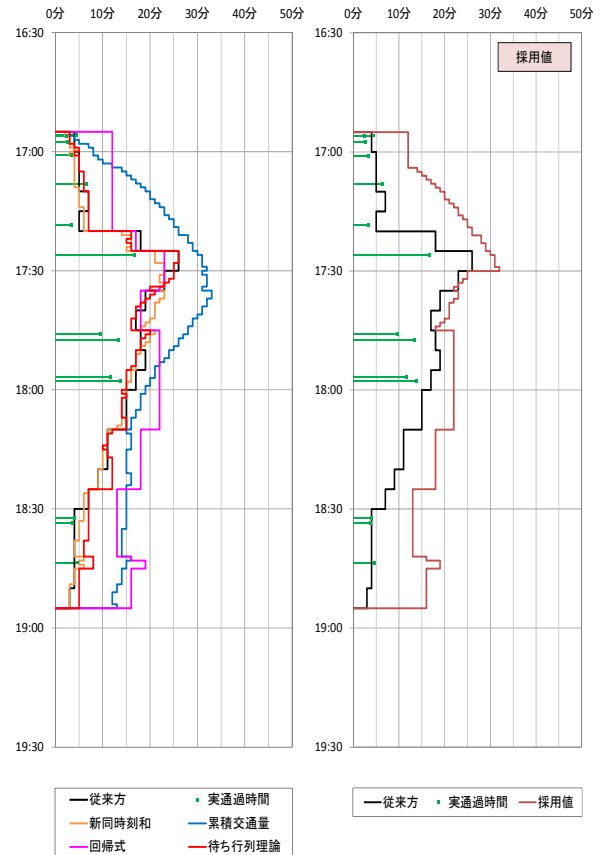


図-13 新システムで提供される採用値