ラウンドアバウトにおける クリティカルギャップ推定手法に関する考察

後藤 梓¹・中村 英樹²

¹正会員 国土技術政策総合研究所 高度道路交通システム研究室 (〒305-0804 つくば市旭1番地)
(元・名古屋大学大学院助教 環境学研究科 持続的共発展教育研究センター)
E-mail: goto-a92uj@mlit.go.jp

²フェロー会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 都市環境学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2(651))
E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

ラウンドアバウトにおけるクリティカルギャップは、流入交通容量の推定に必要であるほか、ドライバーの流入判断を安全面から評価する際にも用いることができると期待され、実観測データに基づいてこれを適切に推定することは極めて重要である。そこで本論文では、諸外国における代表的なクリティカルギャップ推定手法をレビューすると共に、これらを日本のラウンドアバウトに適用し、比較を行った。これにより、手法による推定結果の差異と観測サンプル数の偏りとの関係などが把握された。また、日本で一般に用いられるRaff's method以外の手法を用いることで、クリティカルギャップの代表値だけでなく、その分布のバラツキも考慮して、ドライバーの流入判断挙動を比較することが可能になった。

Key Words : roundabout, critical gap, gap acceptance

1. はじめに

クリティカルギャップとは、無信号交差点において「非優先側道路のドライバーが、優先側道路の交通流に対して通過あるいは流入可能と判断する最小の車頭時間」として定義される。ラウンドアバウトにおいては、例えば式(1)^{1,2)}に示すように、車両挙動に基づく流入交通容量の推定式に総じて用いられており、クリティカルギャップ t_c が長くなれば流入交通容量は低下するというように、円滑性を左右するパラメータのひとつとして認識されている。

$$c_{e,pc} = \frac{3600}{t_f} \left(1 - \tau \frac{q_{cir,pc}}{3600} \right) \exp \left[-\frac{q_{cir,pc}}{3600} \left(t_c - \frac{t_f}{2} - \tau \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 $c_{e,pc}$: 流入交通容量[pcu/h], $q_{cir,pc}$: 環道交通量[pcu/h], t_f : 流入車の追従車頭時間(フォローアップタイム)[sec], τ : 環道交通流の最小車頭時間(環道最小車頭時間)[sec], t_c : 臨界流入ギャップ(クリティカルギャップ)[sec]である。

一方で、クリティカルギャップ t_c はドライバーの流入判断を表すものであり、これが短すぎる場合には、環道

に対して強引な流入が行われがちであることを示しているというように、安全性を評価する指標ともなりえる。従って、実観測においてこの値を正確に把握することは、ラウンドアバウトの円滑性・安全性評価にとって極めて重要であるといえる。

わが国では、後述するRaff's method³⁾により、受入れギャップ(accepted gap)と見送りギャップ(rejected gap)の累積分布曲線の交点からクリティカルギャップ t_c を求める方法が多く用いられている^{4,5,6)など}が、この方法では、結果が優先側道路の交通量(ラウンドアバウトの場合でいう環道交通量)に依存することが指摘されている⁷⁾。また、Raff's methodでは、交点によりクリティカルギャップ t_c の代表値が求められるのみであるが、実際には、個々のドライバーによって判断にバラツキがあることから、一意の値ではなく分布を持ったパラメータである。このような分布のバラツキは、安全性に大きく影響するほか、代表値を用いて計算される交通容量の信頼性を左右すると考えられる。そこで、諸外国では、クリティカルギャップ t_c の分布を推定するための様々な方法が提案され、有用性が議論されている^{7,8,9)}。

2014年の道路交通法一部改正をきっかけとして、各地

でラウンドアバウト導入が進むわが国においても、目的に応じてクリティカルギャップ t_c の代表値だけでなく分布の特徴を把握する必要性は増してゆくと予想される。そこで本論文では、諸外国における代表的なクリティカルギャップ推定手法を紹介すると共に、これらを日本のラウンドアバウトの実観測データに適用し、得られた推定値を比較することでその特徴を考察する。

なお、Highway Capacity Manual¹⁰⁾などに示されるように「ギャップ(gap)」とは本来2台の車両の車間間隔(時間あるいは距離)を示す語であるが、日本においてはラウンドアバウトマニュアル²⁾にも用いられるように、「車頭時間(headway)」のことを便宜的にギャップと呼ぶことも多いことから、既述の通り本論文でも車頭時間のことをギャップと定義している。

2. クリティカルギャップの推定方法のレビュー

本章では、既往研究によるクリティカルギャップ推定方法のうち、代表的なものを紹介する。いずれの手法も、観測された環道車のギャップ(車頭時間)のうち、流入車が流入したものを「受入れギャップ(accepted gap)」, 流入しなかったものを「見送りギャップ(rejected gap)」に分類して推定を行う。そこで、これ以降は、各手法に共通して用いる変数を以下の通り定義する。

- ・ $F_a(t)$: 受入れギャップの累積分布(観測値)
- ・ $F_r(t)$: 見送りギャップの累積分布(観測値)
- ・ $F_c(t)$: クリティカルギャップの累積分布(推定値)
- ・ t_c : クリティカルギャップの代表値(推定値, 主に平均値で表す)
- ・ σ_c : クリティカルギャップの標準偏差(推定値)

なお、本稿では、2台の環道車からなるギャップに対する流入判断を扱い、環道車が1台のみのラグ(判断開始時点から接近車両の到着までの時間差)は扱わない。

(1) ギャップ受入れ割合に基づく方法

クリティカルギャップの定義によれば、ドライバーは、環道のギャップがクリティカルギャップより長いとき流入することになる。従って、 $t[\text{sec}]$ のギャップを受入れるドライバーの割合を $p_a(t)$ とすると、これはクリティカルギャップが t 以下であるドライバーの割合 $F_c(t)$ に等しく、

$$F_c(t) = p_a(t) \quad (2)$$

となるはずである。ギャップ受入れ割合に基づく方法では、この $p_a(t)$ を求めるため、ギャップを Δt (例えば、0.5[sec], 1.0[sec]など)毎の W 個の区間に分類し、 $t_i \pm \Delta t/2$ の範囲からなる各区間 $t_i (i=1, 2, \dots, W)$ における受入れギャップ数 A_i および見送りギャップ数 R_i を用いて、下式(3)でクリ

ティカルギャップの分布 $F_c(t)$ を推定する。

$$F_c(t_i) = p_a(t_i) = \frac{A_i}{A_i + R_i} \quad (3)$$

クリティカルギャップの代表値となる平均値 t_c と標準偏差 σ_c は、下式(4)によって求めることができる。

$$t_c = \sum_{i=0}^W t_i \{F_c(t_i) - F_c(t_{i-1})\} \quad (4a)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sum_{i=0}^W \{t_i - t_c\}^2 \{F_c(t_i) - F_c(t_{i-1})\}} \quad (4b)$$

ただし、この方法を適用するためには、集計区間 Δt に対して、受入れギャップ・見送りギャップのサンプル数がそれぞれ充分でなければならず、一般に膨大な観測を必要とする。言い換えれば、限られたサンプル数の条件下でギャップ受入れ割合を計算するためには、集計区間 Δt を1.0[sec]毎などに大きくせざるを得ず、細かい精度の t_c を求めることができない。

(2) Raff's method

Raff's method⁹⁾は、もともとクリティカル「ラグ」を、受入れラグと見送りラグの観測台数が等しくなる値として推定したものである。これが応用され、今日では、受入ギャップの累積分布 $F_a(t)$ と見送りギャップの累積分布による $1-F_r(t)$ の交点を、クリティカルギャップの代表値 t_c とする方法が、広く用いられている。この方法は、比較的サンプル数が少ない条件においても、簡便に t_c を推定可能なため、ラウンドアバウトの観測データが限られたわが国においては一般的に用いられている。本論文でも、以降これをRaff's methodとして議論を進める。

しかしながら、この手法により得られる t_c は、優先側の交通量(ラウンドアバウトでいう環道交通量)が増えるにつれて短くなる傾向が指摘されている⁷⁾。これは、環道交通量が増えるにつれて、一台の車が見送るギャップの数が増えることにより、バイアスがかかってしまうためと考えられている。このため、近年、Troutbeck¹¹⁾により、交通量による影響を受けにくい修正Raff's method (以降、Rev. Raff's method)が提案された。これは、Raff's method同様に、ギャップの累積分布の交点を求める手法であるが、見送りギャップについては、観測された全ギャップではなく、一台の車に対して最大のもののみを用いるものである。Troutbeck¹¹⁾は、シミュレーションによる検証の結果、この手法においても、交通量による影響は完全には排除できないものの、従来のRaff's methodに比べて精度が向上し、後述する最尤推定法(MLM)に近い結果を得られることから、実務における有用性を述べて

いる。

ただしこれらの手法では、交点による代表値しか求められないため、クリティカルギャップの分布 $F_c(t)$ のパラメータ σ_c を把握することはできない。

(3) Logit model

Logit model (ロジットモデル)による推定¹²⁾などは、流入車のドライバーによるギャップの受入れを1、見送りを0とした二項選択として、ギャップ t の受入れ確率 $p_a(t)$ を式(5)により推定する手法である。

$$F_c(t) = p_a(t) = \frac{1}{1 + \exp(-V_a)} \quad (5)$$

ここに、 V_a はギャップを受入れることによる効用関数であり、最も単純な例では、ギャップ t の線形関数として式(6)が用いられる。

$$V_a = \alpha + \beta t \quad (6)$$

この式(6)のパラメータ α , β を推定することで、クリティカルギャップの分布 $F_c(t)$ を得ることができる。このとき、クリティカルギャップの代表値となる平均値 t_c と標準偏差 σ_c は、下式(7)の通りとなる。

$$t_c = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (7a)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\pi^2}{3\beta^2}} \quad (7b)$$

この手法の特徴として、ギャップの時間長 t 以外の変数を式(6)に組み込むことによって、例えば、流入車がラウンドアバウトに到着してから総待ち時間や見送り台数、環道車の走行速度などの影響を考慮することができる点がある。国内のラウンドアバウトにこの手法を適用した例として、塩見・今仲¹³⁾は、流入部直前に流出する車両の影響を考慮したラグ選択確率の推定を行っている。

ただし、この手法による結果も、Raff's method同様に、環道交通状況への依存が強いことが指摘されている⁷⁾。

(4) 最尤推定法(MLM)

Troutbeck¹⁴⁾による最尤推定法(Maximum Likelihood Method; MLM)は、前述のRaff's methodやLogit modelと異なり、環道交通量に依存しない一貫性・信頼性の高いクリティカルギャップ値 t_c を得られることが示されている^{7),11),14)}。このため、アメリカ(Highway Capacity Manual; HCM¹⁰⁾)やドイツ(Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen; HBS¹⁾)のガイドラインに示されているクリティカルギャ

ップは、この手法で求められている^{15),16)}。

この手法では、流入車 d の見送りギャップが r_d 、受入れギャップが a_d のとき、クリティカルギャップが r_d と a_d の間にある確率を計算する。このために、クリティカルギャップの $F_d(t)$ 分布の一般形を予め仮定した上で、式(8)で表される尤度関数 L^* (実際には、その対数である対数尤度関数式(8'))を最大化するような分布パラメータを繰り返し計算によって求める。 $F_c(t)$ の分布形には対数正規分布を仮定し、その平均値 t_c と分散 σ_c を推定することが多いが、Brilon¹⁷⁾の検証によれば、クリティカルギャップの代表値のみをみるのであれば、分布形の過程による差異は大きくないとされている。

$$L^* = \prod_{d=1}^n \{F_a(a_d) - F_r(r_d)\} \quad (8)$$

$$L = \sum_{d=1}^n \ln \{F_a(a_d) - F_r(r_d)\} \quad (8')$$

しかしながら、この手法では、上述の通り、流入車 d に対して、見送りギャップ r_d と受入れギャップ a_d の両方が必要となる。両者のデータを併せ持たないサンプルのうち、ラウンドアバウトに到着して最初のギャップですぐに流入した、見送りギャップを持たないサンプルについては、見送りギャップを0あるいは限りなく0に近い値にすることで用いる⁹⁾が、ギャップをすべて見送って環道車がいなくなってから流入した、受入れギャップを持たないサンプルは推定に用いることができない。さらに、見送りギャップ r_d は、Rev. Raff's method同様に、ひとつのサンプルに対して最大のもののみを用いることとなり、1台の流入車が複数のギャップを見送ったとしても、最大値以外は使用されないことになる。そのため、他の手法に比べて、サンプル数を確保するのに長い観測時間を要することになる。Troutbeck⁹⁾のシミュレーションによる検証によれば、25~30台以上の車を観測することができれば、有効な結果が得られるとされている。

(5) 確率均衡法(PEM)

Wu¹⁸⁾は、ギャップ t の受入れ確率と見送り確率のマルコフ連鎖を式(9)のように記述することにより、クリティカルギャップ分布 $F_c(t)$ を、受入れギャップと見送りギャップそれぞれの累積分布 $F_a(t)$, $F_r(t)$ のみからなる式(10)によって推定する手法を提案している。この手法は、確率均衡法(Probability Equilibrium Method; PEM)と呼ばれる。

$$\begin{pmatrix} F_c(t) \\ 1 - F_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_r(t) & F_a(t) \\ 1 - F_r(t) & 1 - F_a(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_c(t) \\ 1 - F_c(t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$F_c(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \quad (10)$$

分布形が得られれば、平均値 t_c と標準偏差 σ_c は、前述の式(4)によって求めることができる。

この手法では、Logit modelや最尤推定法のように予め分布形を仮定する必要がなく、また、繰り返し計算を行わなくても容易に分布形を得ることができる。さらに、Wu¹⁸⁾は、データセットが同じであれば、最尤推定法(MLM)に類似した結果を得られるとしているが、その後のTroutbeck⁹⁾の検証により、その他多くの手法同様、交通量による影響が避けられないことが確認されている。

なお、式(10)に対して、Raff's modelで求めるクリティカルギャップ代表値、すなわち累積分布の交点の条件 $F_d(t)=1-F_r(t)$ を代入すると、

$$F_c(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + F_a(t)} = 0.5 \quad (11)$$

となる。これは、確率均衡法(PEM)で得られるクリティカルギャップ分布を真とするならば、Raff's modelで得られるクリティカルギャップ代表値は、その平均値ではなく中央値を求めていることを意味している。

3. 日本の実観測データへの適用

本章では、わが国で実観測されたギャップのデータを用いて、前章の各手法によるクリティカルギャップの推定を行い、その特徴を把握するとともに、ラウンドアバウトの幾何構造や各種条件がクリティカルギャップに与える影響について考察する。

(1) 対象ラウンドアバウトの概要とギャップ計測方法

本論文の分析には、図-1に示す沖縄県糸満市の糸満ラウンドアバウト(以降、糸満RAB)において撮影されたビデオ画像を用いる。糸満RABは、2015年10月3日から2016年3月31日まで、既存信号交差点とロータリーを単独のラウンドアバウト化する社会実験が行われ、現在はラウンドアバウトとしてそのまま運用されている箇所である¹⁹⁾。今回分析に使用するビデオは、社会実験開始から約1か月後の11月9日(月)7:00~19:00に撮影されたものである。なお、撮影時間帯中、降雨などの悪天候の影響はなかった。また、車長によるギャップ(車頭時間)への影響をできるだけ排除するため、普通車のみから得られたデータを用いている。

図-1に示す通り、対象ラウンドアバウトは五枝であり、流入部の幅員や流入角度などの構造が様々となっている。各流入部の幾何構造諸元値を表-1に示す。流入部幅員 e 、

図-1 分析対象の糸満ラウンドアバウト

図-2 ギャップの計測断面

流入部の流入車線幅員 v 、フレア区間長 l 、曲線半径 r 、流入角度 θ は、Kimber²⁰⁾の定義によるものである。また、環道への合流角度 ϕ は、環道中央線と流入部中央線からなる角度²¹⁾である。本論文では、図-1の通り各流入部に名称を付し、流入部ごとにギャップの観測およびクリティカルギャップの推定を行う。

図-2に示すように、流入部の分離島上流端から中央島中心を結ぶ計測断面を設定し、ここを通過する環道車の車頭時間によって見送りギャップおよび受入れギャップを得るものとする。ただし、車頭時間が長ければ長いほど、先行環道車が計測断面を通過した時点で、後続環道車がまだ環道内に流入しておらず、流入車に「ギャップ」として認識されていない可能性が高くなる。流入車が「ギャップ」と認識するか否かの閾値は、ラウンドアバウトの幾何構造や、環道車が流入してくる方向、視距などによる影響を受けると考えられるが、今回はビデオ画像による確認を行ったところ、環道車が環道に流入してから対象流入部の車頭時間計測断面を通過するまでに要する時間が長くても10[sec]程度であること、また、10[sec]を超える見送りギャップが観測されなかったことから、便宜的にこの値を閾値としている。

(2) クリティカルギャップの推定手法の比較

2.(1)の受入れ割合に基づく方法によって、クリティカルギャップの分布 $F_c(t)$ を推定した例を図-3に示す。図中の黒線がギャップ受入れ割合 $p_c(t)$ 、すなわちクリティカルギャップ分布 $F_c(t)$ であるが、図からわかる通り、観測されたサンプル数が充分でなく、 $F_c(t)$ が単調増加となっ

表-1 幾何構造諸元値

流入部	A	B	C	D	F
流入部幅員 d [m]	4.15	3.87	3.26	3.99	3.74
流入部の流入車線幅員 v [m]			3.00		
流入部のフレア区間長 l [m]	7.17	4.95	2.42	4.68	7.61
流入部の曲線半径 r [m]	21.5	23.5	6.0	21.5	39.0
流入角度 θ [deg]	43.0	40.0	45.0	37.0	33.0
環道への合流角度 ϕ [deg]	15.0	39.5	37.0	26.5	28.5

表-2 クリティカルギャップの推定結果

流入部		A	B	C	D	F
サンプル数	受入れギャップ	64	56	66	71	59
	見送りギャップ(全て)	61	60	60	165	93
	最大見送りギャップ	49	31	25	116	57
	受入れ・見送り両者を持つ車両数	3	5	1	4	7
代表値 t_c [sec]	Raff's method	5.5	4.7	5.1	5.6	4.6
	Rev. Raff's method	5.5	4.9	5.5	5.7	4.7
	Logit model	5.4	4.9	5.0	6.2	5.0
	最尤推定法(MLM)	5.9	-	-	-	4.4
	確率均衡法(PEM)	5.7	4.9	5.2	5.8	4.6
標準偏差 σ_t [sec]	Logit model	2.2	1.1	1.3	1.5	1.5
	最尤推定法(MLM)	1.0	-	-	-	1.0
	確率均衡法(PEM)	1.3	0.8	0.8	0.8	1.1

[-]は、解が不定となり得られなかったことを表す。

ていない。このため、式(4)により平均値 t_c や標準偏差 σ_c を計算することができず、適用困難であることがわかる。

従って、以降では、2.(2)~(5)に示した、Raff's method, Rev. Raff's method, Logit model, 最尤推定法(MLM)および確率均衡法(PEM)の五種類を適用した結果を示す。

五種類の手法により推定されたクリティカルギャップの代表値 t_c および標準偏差 σ_c を表-2に示す。

表-2には、それぞれの手法で用いることのできたサンプル数を併せて示している。Raff's method, Logit model, 確率均衡法(PEM)については、全ての受入れ・見送りギャップを使用可能である。一方、Rev. Raff's methodでは、見送りギャップは最大値のみを用いる(表中には「最大見送りギャップ」と記載)。また、最尤推定法(MLM)では、見送りギャップが最大値のみになることに加え、受入れギャップを持たない車の見送りギャップも使用できないため、サンプル数は、受入れギャップ数と等しくなる。ただし、このうち、ラウンドアバウトに到着後最初のギャップを受け入れて見送りギャップを持たない車については、2.(4)に述べた通り、見送りギャップの値が0となっている。このような車両を除いた、本義的に「見送りギャップと受入れギャップの両者を持つ車両数」は、表-2に示す通り、ごくわずかに過ぎず、Troutbeck⁹⁾が示した25~30台の基準に満たない。このような限定された条件のため、最尤推定法(MLM)については、流入部B, C, Dにおいて解が不定となり得られなかった。全五つの手法すべてでクリティカルギャップが推定された流入部A, F

図-3 ギャップ受入れ割合に基づくクリティカルギャップ分布の推定例(糸満RAB・流入部A)

について、その分布 $F_c(t)$ を図-4に示す。

表-2より、クリティカルギャップの代表値 t_c については、Raff's methodより Rev. Raff's methodの方がわずかに大きい値となっている。これは、一台の車が複数のギャップを見送ったことによる影響を除外したことによるものである。また、Raff's methodと確率均衡法(PEM)は、推定値の差が最大で0.2[sec]しかなく、非常に近い値となっている。これは、2.(5)に示した通り、両者は同じ分布の中央値と平均値の関係にあり、分布に偏りが少ない場合には、ほぼ等しくなるためである。一方で、Logit modelによる t_c は、流入部D, Fのように、受入れギャップのサンプル数に比べて見送りギャップのサンプル数が多い流入部において、Raff's methodや確率均衡法(PEM)よりも大きい値を示す傾向がある。図-4(b)に示した糸満RAB・流入

部Fの例からも、Logit modelによるクリティカルギャップ分布 $F_c(t)$ が、受入れギャップの累積分布 $F_a(t)$ 側にやや偏る傾向が確認できる。最尤推定法(MLM)による値は、他の方法との差が大きい結果となった。既往研究において最も信頼性の高いとされる手法ではあるが、前述の通り、今回はサンプルが極めて限定された条件で推定を行っているため、今後精査が必要といえる。

また、標準偏差 σ_c については、総じて、Logit modelの推定値の方が確率均衡法(PEM)の推定値より大きくなっている。これは、図-4に示すように、クリティカルギャップ分布 $F_c(t)$ が、Logit modelでは左右対称なロジスティック曲線になるのに対して、確率均衡法(PEM)では立ち上がりの急な非対称形となっていることに影響されていると考えられる。Logit modelでは、対称形の分布となることで、 $F_c(t)=0\%$ 付近で $F_c(t)>F_a(t)$ となってしまうたり、逆に $F_c(t)=100\%$ 付近で $F_c(t)<F_a(t)$ となってしまうといった非現実的な問題がみられる。このため、クリティカルギャップのバラツキや分布を評価するには適さないと考えられる。

(3) クリティカルギャップ分布の流入部による違いに関する考察

各流入部によるクリティカルギャップの違いを可視化するため、図-5に、確率均衡法(PEM)による分布(最大値 $\max_{t_c}$ 、最小値 $\min_{t_c}$ 、 t_c および $t_c \pm \sigma_c$)とRev. Raff's method, Logit model, 最尤推定法(MLM)による t_c を示す。これより、各ラウンドアバウト流入部によって、代表値 t_c だけでなくそのバラツキも大きく異なることが明らかである。

図-5より、特に流入部BやFは、他の流入部に比べて t_c が小さい傾向にある。これには、流入部の曲線半径 r が大きいことや環道への合流角度 ϕ がやや浅いことにより、ハンドル操作が比較的容易である影響などが考えられる。

また、分布のバラツキに着目すると、流入部AとFが大きいことがわかる。これらの流入部に共通して、フレア区間長 l が他の流入部より長いという特徴があり、クリティカルギャップの分布のバラツキへの影響について、今後検証が求められる。また、流入部A, D, Fは、社会実験前の幾何構造では、流入部正面に比較的広い空間があったのに対して、社会実験によって中央島が拡大され、視界が大きく変化した箇所である。社会実験開始から約1か月後で、まだこのような変化に慣れ切っていないドライバーもいると考えられ、流入判断にバラツキが生じている可能性も予想される。

流入部Aでは、平均値 t_c は流入部B, Cより大きいものの最小値では $\min_{t_c}=3.2[\text{sec}]$ とこれらの流入部(それぞれ $3.5[\text{sec}]$, $4.0[\text{sec}]$)を下回っており、また最大値は $\max_{t_c}=9.7[\text{sec}]$ とかなり大きい値となっている。これは、短いギ

図4 推定方法によるクリティカルギャップの違い

図5 クリティカルギャップ分布の比較

ャップで流入するドライバーが存在する一方で、多くのドライバーにとっては十分と思われるギャップであっても流入を躊躇ってしまうドライバーも存在することを意味している。このような状況では、環道や他の流入部を走行するドライバーあるいは後続して流入しようとするドライバーは、流入車の挙動を予測しづらいため、安全性への影響があると考えられる。また、ドライバーによってクリティカルギャップが大きく異なる背景には、流入判断に影響する安全上の要因などが影響している可能性があり、さらなる精査が必要である。

以上のような、幾何構造やドライバーの慣れによるクリティカルギャップへの影響については、神戸ら²⁰⁾などにより分析が進められているが、代表値 t_c のみの議論にとどまっている。本論文で紹介した手法によって分布のバラツキについても考慮することで、これらの影響をよ

り具体的に把握することができると期待される。

(4) クリティカルギャップの流入交通容量への影響

式(1)に示される通り、クリティカルギャップは流入交通容量に直接影響する。図-6は、環道交通量 $q_{circ}=300$, 600 [pcu/h], フォローアップタイム $t_f=2.9$ [sec], 環道最小車頭時間 $\tau=2.1$ [sec]と仮定した場合のクリティカルギャップと流入交通容量の関係を示している。ここで、フォローアップタイムと環道最小車頭時間は、日本のラウンドアバウトマニュアル²⁾において、当面適用することとされているドイツのガイドラインHBS¹⁾の標準値である。

表-2において、Raff's methodとその他の手法による代表値 t_c の差は最大でも 0.6 [sec](流入部Dにおけるlogit modelとの差)であるが、これは図-6の仮定のもとでは流入交通容量にして $40\sim 50$ [pcu/h]程度の違いとなっており表れる。Raff's methodは簡便にクリティカルギャップを算出可能であることから有用性が高い手法であるが、流入交通容量にして数十台程度の誤差が生じる可能性がある点に留意した上で実務に適用すべきといえる。

また、クリティカルギャップの標準偏差は $\sigma_c=1.0$ [sec]程度であるが、図-6からわかる通り、クリティカルギャップが約 1.0 [sec]増減すると流入交通容量にして $60\sim 100$ [pcu/h]ほどの変動がある。このような流入交通容量の信頼性についても、今後議論が必要といえよう。

4. おわりに

本論文では、ラウンドアバウトのクリティカルギャップ推定手法についてレビューを行い、わが国で一般に用いられるRaff's methodだけでなく、Rev. Raff's method, Logit model, 最尤推定法(MLM), 確率均衡法(PEM)を用いて、クリティカルギャップの代表値や分布の特徴について比較した。これにより、Raff's method, Rev. Raff's methodと確率均衡法(PEM)の代表値は比較的差が小さいこと、Logit modelは、受入れ・見送りギャップのサンプルに偏りがある場合にその他の手法の結果と差が大きいこと、Logit modelの方が確率均衡法(PEM)よりも分布のバラツキが大きい推定結果となることがわかった。

しかしながら、今回はサンプル数の制約により、既往研究⁷⁾において最も信頼性の高い手法として推奨されている最尤推定法(MLM)を用いた推定が充分に行えなかった。今後は、実観測データのサンプル数を増やし、この手法により得られるクリティカルギャップの結果と比較することで、各手法の一貫性・妥当性を検証することが課題である。

本論文で紹介した手法を用いることにより、代表値による比較だけでなく、分布のバラツキに基づいた各流入

図-6 クリティカルギャップと流入交通容量の関係

部の流入判断状況が考察可能となった。今後、分布のバラツキも考慮した分析をさらに進めることで、安全性との関係や、交通容量の信頼性との関係を把握し、ラウンドアバウトの性能評価に役立てていくことが期待される。

謝辞：本研究は、JSPS科研費基盤研究(B)16H04426の助成を受けたものです。また、糸満ラウンドアバウトのビデオデータは沖縄県南部土木事務所からご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。さらに、対象ラウンドアバウトに関する様々な情報をご提供頂いた(株)オリエンタルコンサルタンツ神戸信人氏、データ取得にご協力いただいた名古屋大学大学院・趙宇嘉氏、上田健人氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Germany, 2005.
- 2) (一社)交通工学研究会：ラウンドアバウトマニュアル, pp. 24-26, 2016.
- 3) Raff, M. S. and Hart, J. W.: A volume warrant for urban stop signs, *Traffic Engineering and Control*, pp. 255-258, 1950.
- 4) Kang, N., Nakamura, H. and Asano, M.: An empirical analysis on critical gap and follow-up time at roundabout considering geometry effect, 土木計画学研究発表会・講演集, No. 46, 8ページ, CD-ROM, 2012.
- 5) 河本直志, 今田勝沼, 木村泰, 上野朋弥, 高宮進：大型車を考慮したラウンドアバウトの交通容量に関する考察, 土木計画学研究発表会・講演集, No. 53, 5ページ, CD-ROM, 2016.
- 6) 宗広一徳, 高田哲哉, 石田樹：冬期条件下のラウンドアバウトの車間パラメーターの実測, 土木計画学研究発表会・講演集, No. 53, 7ページ, CD-ROM, 2016.
- 7) Brilon, W., Koenig, R. and Troutbeck, R. J.: Useful estimation procedures for critical gaps, *Transportation Research Part A*, Vol. 33, pp. 161-186, 1999.
- 8) Vasconcelos, L., Seco, A. and Silva, A. B.: Comparison of procedures to estimate critical headways at roundabouts,

- PROMET –Traffic & Transportation, Vol. 25, pp. 43-53, 2013.
- 9) Troutbeck, R. J.: Estimating the mean critical gap, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2461, pp. 76-84, 2014.
 - 10) Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual*, 6th ed., 2016.
 - 11) Troutbeck, R.J.: Revised Raff's method for estimating critical gap, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2553, pp. 1-9, 2016.
 - 12) Cassidy, M. J., Madanat, S. M., Wang, M. and Yang, F.: Unsignalized intersection capacity and level of service: revisiting critical gap, *Transportation Research Board Annual Meeting*, 1995.
 - 13) 塩見康博, 今仲弘人: 車両走行軌跡データに基づくラウンドアバウト環道流入挙動の分析, 土木計画学研究・講演集, No. 50, 6ページ, CD-ROM, 2014.
 - 14) Troutbeck, R. J.: Estimating the critical acceptance gap from traffic movements, *Research Report 92-5*, Physical Infrastructure Centre, Queensland University of Technology, 1992.
 - 15) Transportation Research Board: NCHRP Report 572 Roundabouts in the United States, pp. 38-43, Washington, D.C., 2007.
 - 16) Weinert, A.: Estimation of critical gaps and follow-up times at rural unsignalized intersections in Germany, *Fourth International Symposium on Highway Capacity*, pp. 409-421, 2000.
 - 17) Brilon, W.: Some remarks regarding the estimation of critical gaps, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2553, pp. 10-19, 2016.
 - 18) Wu, N.: Equilibrium of probabilities for estimating distribution function of critical gaps at unsignalized intersections, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2286, No. 1, pp. 49-55, 2012.
 - 19) 糸満市: 糸満ロータリーラウンドアバウト社会実験結果について, <http://www.city.itoman.lg.jp/docs/2016042500024/> (最終閲覧日: 2017年7月7日)
 - 20) Kimber, R.: Traffic Capacity of Roundabouts, Transportation and Research Laboratory, Laboratory Report LR942, Crawthorne, Berkshire, UK, 1980.
 - 21) 神戸信人, 中村英樹, 尾高慎二: 幾何構造要因を考慮したラウンドアバウト流入交通容量のモデル化, 土木計画学研究・講演集, No. 55, 12ページ, CD-ROM, 2017.
 - 22) 神戸信人, 尾高慎二, 中村英樹: ラウンドアバウトの幾何構造が車頭時間パラメータに与える影響に関する分析, 土木計画学研究・講演集, No. 54, 6ページ, CD-ROM, 2016.

(2017. 2. 24 受付)

A STUDY ON ESTIMATION PROCEDURE OF CRITICAL GAPS AT ROUNDABOUTS

Azusa GOTO and Hideki NAKAMURA

Critical gap is an important parameter for not only entry capacity estimation but also safety evaluation at roundabouts. This paper gives an overview on the existing procedures for estimating critical gaps and compares them by applying into an empirical data observed at a roundabout in Japan. Application of other procedures than Raff's method, which has been commonly used in Japan, enables to estimate not only a single representative value of critical gaps (e.g., mean or median) but also their distribution. Through a comparison, differences of the estimated critical gap distributions are presented and discussed considering the limitation in the observed samples.