

マルチエージェントシミュレーションを用いた 津波避難時の車利用にかかわる問題の分析

中居 楓子¹・畑山 満則²・矢守 克也³

¹学生会員 京都大学大学院情報学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町36-1)

E-mail: nakai.fuko.48n@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: hatayama@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

³非会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

近年、6割近い人が車で避難したという東日本大震災の実態や、要介護者の避難が検討される中で、津波災害における車避難を一部容認する動きが出始めている。しかし、未だ容認のための具体的な検討手法が確立されていないため、国内のほとんどの地域では着手されていないのが実態である。本研究では、高知県黒潮町を対象に、車利用の可能性と問題を、マルチエージェントシミュレーションを用いて検討する。具体的には、高台付近における交差点を対象として、車利用を希望している住民の数と照らし合わせて、最大待ち台数、最大渋滞延長、最大待ち時間（待ち行列の中で最も長い時間を費やす車の待ち時間）最終捌け時間（最後の車が高台に上がる時間）を分析し、起こり得る現象の分析をおこなう。

Key Words : tsunami, evacuation, cars, multi-agent simulation

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、避難者のうち6割近い人が車を利用したという実態¹⁾がある。高齢者の避難¹⁾や平野部の長距離避難²⁾などのやむを得ないケースもあり、実際に多くの命を救ったという実績もあるが、発生した渋滞に巻き込まれて津波に流されるケースもあったことから、車避難のルール化を検討する必要性が認識されるようになってきている。2012年4月には、内閣府の津波避難対策検討ワーキンググループが「自動車で安全かつ確実に避難できる方策³⁾」の指針を打ち出し、各自治体の計画においても車避難を一部容認する動きが出始めている。しかし、未だ容認のための具体的な検討手法は確立されておらず、国内のほとんどの地域では着手されていない。本研究では、高知県黒潮町を対象に、車利用の可能性と問題を、マルチエージェントシミュレーションを用いて検討する。具体的には、高台付近における交差点を対象として、車利用を希望している住民の数と照らし合わせて、最大待ち台数、最大渋滞延長、最大待ち時間（待ち行列の中で最も長い時間を費やす車の待ち時間）最終捌け時間

（最後の車が高台に上がる時間）を分析し、起こり得る現象の分析をおこなう。

2. 本研究で用いる車両避難のモデル

(1) 車両避難に関する既往の研究

車両の振る舞いや、車両避難に関しては、これまでも検討するためのモデルがいくつか提案されている。しかし、提案されているモデルを用いて、実際の地域に適用した数値計算をおこなっている例は少なく、特に住民の避難行動についてはいくつかのパターンを用いて分析をおこなっているものが多い。

西畑ら⁴⁾は、長井ら⁴⁾による最適速度モデルによって車両避難をモデル化し、東北地方太平洋沖地震発生時における、現地の避難の実態に照らし合わせながら、渋滞の再現をおこなっている。交差点の信号機の機能停止や、避難経路については実態を反映した形で設定されており、実際の渋滞発生箇所が概ね再現可能であったとしている。しかし、車の利用率や個別の避難行動については東北地方全体の調査の結果を勘案して複数設定しており、渋滞

¹ 『河北新報 ONLINE NEWS』,
http://www.kahoku.co.jp/special/spe1114/20130226_01.html,

(2015-04-11 最終確認), 2013.02.26 記事.

以外の問題点については議論されていない。また、金ら⁹⁾は、宮城県亶理郡亶理町の自治体が策定した津波避難計画案に基づいて車の津波避難行動を再現し、道路ネットワークおよび避難計画の評価をおこなっており、現況の計画を実行した際の問題点を指摘している。しかし、これは自治体がエリアごとに区切って避難の際の車利用について定めているものであり、地域住民の実際の願望に基づいているものではない。

孫ら⁹⁾は、2014年3月に発生した伊予灘地震において、高知県沿岸住民の避難行動に関する調査をおこなっている。この調査結果によると、避難した住民のうち73%が避難に車を使っていたが、孫らが災害以前に行った調査では、「避難に車を使う」と答えていた人は21%に過ぎなかった。

このように、災害時の避難行動については、個人の事前の行動計画と実際の行動にも乖離があり、ましてや自治体の避難計画通りにはなかなか動けないというのが実態である。しかし、個人の行動計画は日ごろからの避難訓練時に実行されるものでもあるため、訓練を積めば本番でその計画通りに動くことのできる可能性もある。そこで、本研究では、まず個々の住民の事前の行動計画に基づいて、車利用の可能性と問題を検討した後、地域住民の70%が車を使ってしまうケースを検討し、問題点を指摘する。また、いくつかの改善策とその効果について考察する。

(2) モデルの検討

車両の動きについては、巨視的なモデルと微視的なモデルによる表現がある。本研究では車両避難の大きな問題である渋滞を表現し、高齢者や障害者などの避難者の個人属性も考慮した対策を評価したいことから、微視的なモデルを用いることとする。

微視的なモデルとして代表的なものに、追従モデルや待ち行列理論がある。追従モデルでは、先行車の走行状態とそれに対する運転者の反応感度を用いた運動方程式によって個々の車両の動きを制御しており、待ち行列理論では、道路の流入容量と交通量を用いて、渋滞を待ち行列として表現している。また、歩行者など、車両に比べて多様な振る舞いをする主体などを考慮する場合、より拡張性の高いエージェントモデルなどが用いられる。このモデルでは、エージェントと呼ばれる複数の行動主体の挙動をモデリングし、それらの相互作用からボトムアップ的に全体の挙動を再現することができる。

現段階では、各行動主体の初期位置については調査中であり、データに限りがあることから、津波浸水域全体ではなく、問題と考えられる道路のみに着目した分析をおこなう。そのため、渋滞の分析については待ち行列理論を用いる。その到着率については畑山らによって検討

されたマルチエージェントシミュレーションの結果を用いて、分布を決定する予定であるが、本稿では、各地域の所要時間サンプルからパラメータを求めて到着分布を作成した。エージェントシミュレーション結果による到着率についての検討は今後おこなう予定である。

3. 対象地域について

(1) 概要

本研究では、南海トラフ巨大地震による被害が想定されている高知県黒潮町の大方地区を対象に検討をおこなう。黒潮町大方地区は平野部が大きく広がっており、高台までの避難所要時間は、徒歩で20分以上かかるような避難困難地域を有する場所である。図1は、対象地域である高知県黒潮町の地図に黒潮町ハザードマップ⁷⁾を重ね合わせたものである。



図1 対象地域 高知県黒潮町の地図と浸水域

(2) 検討する避難場所

大方地区には約50か所の避難場所があるが、最も多くの住民が逃げる予定であるのは、図1の○で示した位置にある錦野団地という高台である。保育園、小・中学校、高等学校などがあり居住性が確保できるようになっているほか、先に山が続いているため、より高いところへの二次避難が可能である。大方地区の浸水域には、2014年3月に4つの新しい避難タワーが建設されており、南海トラフ巨大地震の新想定に耐えるように設計されている。しかし、吹きさらしで居住性がなく、二次避難もできないことから、多くの住民が可能ならば団地の方へ逃げたいという意向を持っている。

今回は、最も渋滞が問題となりそうな場所に着目した分析をおこなうため、地区内の避難場所のうち、図1で示した錦野団地のみを対象とした分析をおこなう。そのため、大方町内の道路ネットワークのうち、最も多くの人が殺到すると思われる高台手前の交差点と、それに接続する道路のみを扱う。道路のデータについては、黒潮町道路台帳から入手し、道路幅などを明らかにした。

4. 検討するシナリオの設定

(1) 車の利用率

a) 個人の現状の計画に基づいた設定

車の利用率の設定は、高知県黒潮町が平成23年におこなった個別避難カルテから得られたものを用いる。大方地区の浸水域で車を利用する人数は現段階で379人、全人口の11.9%が使用することになっている。このうち、今回検討する、錦野団地へ逃げる車避難世帯は30世帯で、30台の車が高台前の交差点を通過して上がることになっている。また、要援護者、つまり本当に車がなければ避難できないという人の数も把握されており、全体で277名となっている。この数字は、最低限277台程度は車を使いたいという地域の要望でもあるととらえられるため、今後の検討において、考慮すべき数字である。

b) 伊予灘地震時の避難行動調査に基づく設定

2014年3月に発生した伊予灘地震において、当該地域の万行という地区（表1の2行目）で避難行動を調査した孫ら⁹⁾の結果から、避難者の70%程度が車を利用したことがわかっている。そのため、高台に避難する住民447人（個別避難カルテの結果により判明）のうち313人（70%）が車を使うと仮定した。

(2) 交差点の設定

ボトルネックになりそうな交差点は多枝交差点となっている（図2）。図3に示すように、分析対象交差点は海側に位置する浸水域エリアから車や歩行者が押し寄せる場所と考えられることが、孫ら⁹⁾の結果からも示唆される。今回は、災害時を想定して、(1)から(3)への交通流はないと仮定している。

(3) 交通量の設定

津波避難にかけられる時間を1つの単位とし、その間に各道路を通る車の台数と歩行者数は、個別避難カルテのデータから明らかにされている。今回の分析で対象とする交差点の避難時の交通量を図2に示す。この個人の避難行動計画に基づけば、30台が交差点に入る車の台数である。

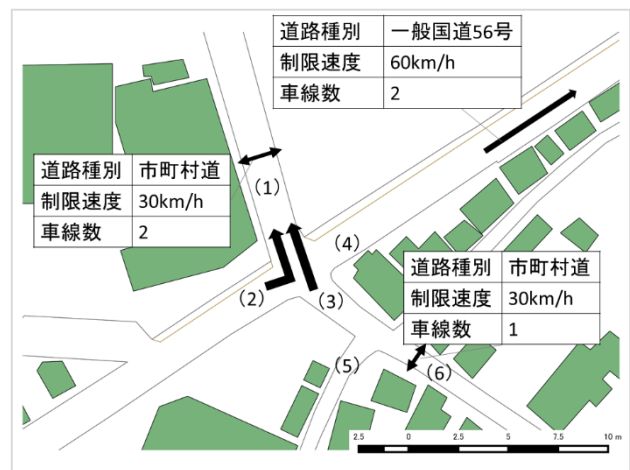


図2 分析対象交差点



図3 分析対象交差点の避難時の交通量

表1 個別避難カルテに基づいた車の利用率の設定

地区名	人口 (人)	車避難 数(人)	車利用 率(%)	要援護 者数(人)
下田の口	410	39	9.5	32
万行	616	133	21.6	70
浜の宮	276	34	12.3	20
町	92	17	18.5	14
入野本村	409	17	4.2	24
芝	298	30	10.1	30
早咲	618	99	16	64
上田の口	203	5	2.5	14
緑野	267	5	1.9	9
合計	3189	379	11.9	277

5. 行列の長さの計算方法について

本研究では、図1の高台の海側にある、●に示す交差点を対象とし、最大待ち台数、最大渋滞延長、最大待ち時間（待ち行列の中で最も長い時間を費やす車の待ち時間）最終捌け時間（最後の車が高台に上がる時間）を分析する。車の利用率については、4章で示した、A. 個々

の住民の事前の行動計画に基づくもの、B.高台に避難する住民の70%が車を使ってしまった場合の2ケースを検討する。また、車の到着に関して最悪のシナリオは、全ての車が同時に到着した場合であることから、まずはじめにすべての車が「同時到着」というケースについて検討する。さらに、実際は、表1に示す各地区において、その避難開始時刻と所要時間はばらつきがあると思われるため、交差点への到着時間が正規分布に従うと仮定した場合について、IO法を用いて検討する。

(1) 交差点の可能交通容量

交差点の流出部の可能交通容量は、以下の式によって求められる。通常、交差点の可能交通容量は下記の式を用いて各流入部において算定される⁸⁾。しかし、今回は高台に上がる交通流のみを考えるため、図4中の(1)で示される道路で可能交通容量を定めることとする。

$$S_i g_i = S_i \frac{G_i}{C} \quad (1)$$

ここで、 S_i ：流出部の飽和交通流率[台/青1h]、 C ：サイクル長[秒]、 G_i ：有効青時間[秒]である。

対象地域の青時間比は以下の表のとおりとなっている。交差点の飽和交通流率は1200 pcu/hで、図中(1)の流出部の交通容量は以下の表のとおりとなっている。なお、時間帯ごとの青信号時間は四万十市中村警察署への問い合わせによる。当該交差点は、21時以降は点滅状態となっている。

可能交通容量[pcu/s]は、単位時間当たりの処理可能台数、つまり $D(t)$ の傾きであるから、以下の式であらわされる。

$$D_j(t) = \alpha_j t \quad (2)$$

ここで、 $j = 1, 2, \dots, 5$ は、表3に示す各時間帯である。一般的には、可能交通容量の時間の単位は[pcu/h]を用いるが、今回は津波避難時間という1時間未満の現象を観察するため、時間単位を[pcu/s]（毎秒）に換算して計算している。

今回の分析では、18:30～21:00の間の、流出部(1)の可能交通容量が最も少ない時間帯、つまり、国道を渡ろうとする車にとって最もシビアなケースのみについて検討する。

表2 交差点の制御パラメータと流出部の可能交通容量

時間帯	信号周期 [秒]	流入部 有効青時間[秒]		可能 交通容量 [pcu/s]
		(2)	(3)	
06:00～07:00	80	47	33	0.14
～09:00	120	82	38	0.11
～16:00	100	67	33	0.11
～18:30	120	87	33	0.09
～21:00	80	67	13	0.05
21:00以降	-	-	-	-

表3 各地域、車利用率A・Bケースにおける流入部のパラメータ

流入部	流入地域	流入数n(台)		μ	σ
		A	B		
(2)	芝	11	26	4	1
(5)	万行	19	130		
(3)	浜の宮, 町, 入野本村			7.25	2.86

(2) 到着率の設定

到着率は、2つの分布を検討する。一つは、車の到着に関して最悪のシナリオと考えられる、全ての車が同時に到着した場合、つまり、全ての車が「同時到着」というケースである。もう一つは、到着時間が正規分布(式3)に従うと仮定したケースである。パラメータである平均値 μ 、標準偏差 σ は表3に示す値を用いた。パラメータの設定は、錦野団地に逃げる住民を含む地域(芝・万行・浜の宮・町・入野本村)に複数個所ポイントを設定し、各地域の各ポイントからの所要時間を算出して求めた。

$$f_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (3)$$

$$V_i(t) = n_i \int_0^\infty f_i(t) dt \quad (4)$$

ここで、 $i = \{2, 3\}$: 流入部の番号である。

交差点への流入は、図2の矢印で示している、(2)の道路と(3)の道路のみとする。(4)については、図3に示す調査の結果から、車利用者が0であり、交差点より東側の住民は別の高台に上がる専用道路を利用するためである。

交差点への流入数(表3)については、車利用率Aのケースでは、高台に上がる車は全部で30台であるから、各流入部からの流入台数は、調査の結果(図3)より、(2):(5):(6) = 11:3:16とする。また、図2の(5)(6)の合流点は信号制御がないが、今回は合わせて(3)の一つの流

入部とするため、流入部(2) : (3)は11 : 19とする。車利用率B (70%) のケースでは、高台に避難する住民447人 (個別避難カルテの結果により判明) のうち70% (313人) が車を使った場合を仮定した。車利用については、世帯で1台と考えられるが、対象地域の平均世帯構成人数が2人であったことから、2人で1台利用すると仮定し、156台の車が高台に上がるケースとした。流入部(2)(3)の道路の利用者の比率は、歩行者と車利用者を合わせると約1 : 5であることから、156台を(2) : (3)=1 : 5とし、(2)に26台、(3)に130台流入することとした。

(3) 「同時到着」の場合の計算方法

同時到着の場合は、 $D_j(t)$ =流入台数となる t を求めると、同時に到着した車が車が待ち行列中で費やす時間と距離、ある時間の待ち台数を求めることができる。しかし、最終捌け時間 (最後の車が高台に上がる時間) は、いつ同時到着するかによって異なるため、求めない。

(4) 到着率に正規分布を仮定した場合の計算方法

ここでは、Input-Output Diagram を用いて計算する。I/O法では、交差点への到着分布を累積分布にした曲線をインプット、ボトルネックにおける可能交通容量 [pcu/s] を傾きとした直線をアウトプットとして、車が待ち行列中で費やす時間と距離、ある時間の待ち台数、最終捌け時間 (最後の車が高台に上がる時間) などを分析することができる (図4)。縦軸に累積到着台数、横軸に時間をとる。インプット曲線の傾きがアウトプット曲線を上回る t の区間について、インプット曲線の積分値から、アウトプット曲線の積分値を引けば、ボトルネックにおいて待ち行列の中に入った車が費やす総待ち時間を求めることができる。ここで、インプット曲線の値とアウトプット曲線の差の最大値は最大待ち台数となり、インプット曲線の傾きがアウトプット曲線を上回る t の区間は、待ち行列が発生している時間を指す。

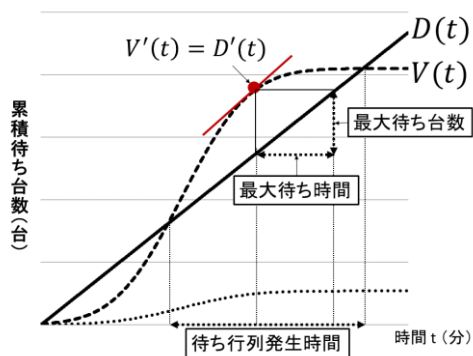


図4 Input-Output Diagram (Lawson(1997)⁹⁾を基に加筆・修正)

6. 結果

(1) 住民の事前の行動計画に基づいた車の利用率

同時到着の場合、最大の待ち時間は9分、渋滞の延長は156mとなった。この値は同時到着の時刻によっても深刻さが違うが、高知県黒潮町が最短22分程度で津波が来る¹⁰⁾と想定されていることを踏まえれば、少なくとも12分以内には交差点に到達している必要がある。もっとも遠いエリアの住民は、平常時に車を使っても5分程度かかるため、7分以内に地区を出るという条件が求められる。

しかし、到着率に正規分布を仮定した場合の結果を見ると、図5に示すように、交差点の可能交通量に対してすべての時間帯で余裕で通れるという結果になり、待ち行列が発生しないということがわかった。そもそも、正規分布を仮定して良いのか、改めて検証する必要があり、パラメータなどの設定も検証の余地が大いにあるが、「到着分布」をなだらかな形になるような対策を打てば、より多くの台数をさばけるということが示唆できる。

(2) 地域住民の70%が車を使った場合

分析の結果、同時到着の場合、正規分布を仮定した場合の両方において、最大待ち時間も最短の22分を大幅に上回ることがわかった。前述の行動計画に基づいたより少ない台数の場合は、到着分布をなだらかな形にすればより多くの台数を通過させられる可能性が示唆できたが、伊予灘地震の時のように、避難者の70%が車を使った場合は、図5のグラフに示すように、長い待ち行列が発生することがわかった。また、より多くの青信号時間が高台に行く道路に割り当てられている朝の時間帯についても、待ち行列が発生するということはわかった。利用者に車利用を控えるよう喚起することはもちろん、信号制御を災害時には変更するなどして、可能交通容量を上げる必要もあることが示唆される。

平常時には、国道の通過交通量が多いため、表2に示すように、国道により多くの青信号時間が割り当てられている。しかし、災害時には、国道よりも国道を通過する側の道路の利用者が圧倒的に多いため、平常時と同じ信号制御をおこなうとすれば、本来(1)の流出部に入れる車の数を下回ることになり、効率的にさばけないことになる。

7. まとめ

本論文では、高台付近における交差点を対象として、車利用を希望している住民の数と照らし合わせて、最大待ち台数、最大渋滞延長、最大待ち時間 (待ち行列の中で最も長い時間を費やす車の待ち時間) 最終捌け時間 (最後の車が高台に上がる時間) を分析し、起こり得る現象の分析をおこなった。個々の住民の事前の行動計画

に基づき、30台が流入した場合と、地域住民の70%が車を使ってしまう、156台が流入する2つのケースを検討した。また、到着の分布については、全ての車が「同時到着」というケース、到着時間が正規分布に従うと仮定したケースを検討した。分析の結果、70%の利用効率では、同時到着の場合、正規分布を仮定した場合の両方において、最大待ち時間も津波の最短到達時間である22分を大幅に上回ることがわかった。また、個別計画に基づく30台のケースでも、到着時刻が遅ければ、もちろん避難完了が津波到達に間に合わない可能性もあることがわかった。災害時と、平常時の交通の流れが異なることから、信号制御を変更するなどして、可能交通容量を上げる必要もあることが示唆された。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 23 年度東日本大震災における避難行動等に関する面接調査（住民），東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会第9回会合資料2，pp.8，2012.
- 2) 内閣府：平成 23 年度東日本大震災における避難行動等に関する面接調査（住民），東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会第9回会合資料2，pp.8，2012.
- 3) 西畑剛，森屋陽一，安野浩一朗，今村文彦：津波からの

- 避難車両のモデル化と渋滞等の評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），vol. 68, no. 2, pp. 1316-1320, 2012.
- 4) 長井亮一，長谷隆，山田晃生：多相交通流モデルの交通状態と渋滞転移，ながれ，vol.24, pp.619-628, 2005.
 - 5) 金進英・片岡侑美子・奥村誠：交通シミュレーションを用いた自治体の避難計画の評価，2014.6.8，東北工業大学，土木計画学研究・講演集(CD-ROM)，Vol.49，No.261,7pages.
 - 6) 孫英英，中居楓子，矢守克也，畑山満則：2014年伊予灘地震における高知県沿岸住民の避難行動に関する調査，自然災害科学2，vol.33, no.1, pp. 53-63, 2014.
 - 7) 黒潮町：黒潮町地震・津波ハザードマップ No.1，<http://www.town.kuroshio.lg.jp/bousai/docs/map01.pdf>，(2015-04-04 最終確認)，2014.
 - 8) 飯田恭敬監修，北村隆一編著：交通工学，pp.222，オーム社，2008.
 - 9) Lawson, Tim W., David J. Lovell, and Carlos F. Daganzo. "Using input-output diagram to determine spatial and temporal extents of a queue upstream of a bottleneck." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1572.1, pp.140-147, 1997.
 - 10) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>，2012,(2014-03-05 最終確認).

表4 各利用率，分布ごとの結果

車利用率パターン	到着率	流出部(1)への流入台数(台)	最大待ち台数(台)	最大延長(m)	最大待ち時間(分)	最終捌け時間(分)
計画通り	同時	26	26	156	9	-
70%利用率	同時	130	130	780	43	-
計画通り	正規分布	26	0	0	0	-
70%利用率	正規分布	130	68	408	37	50

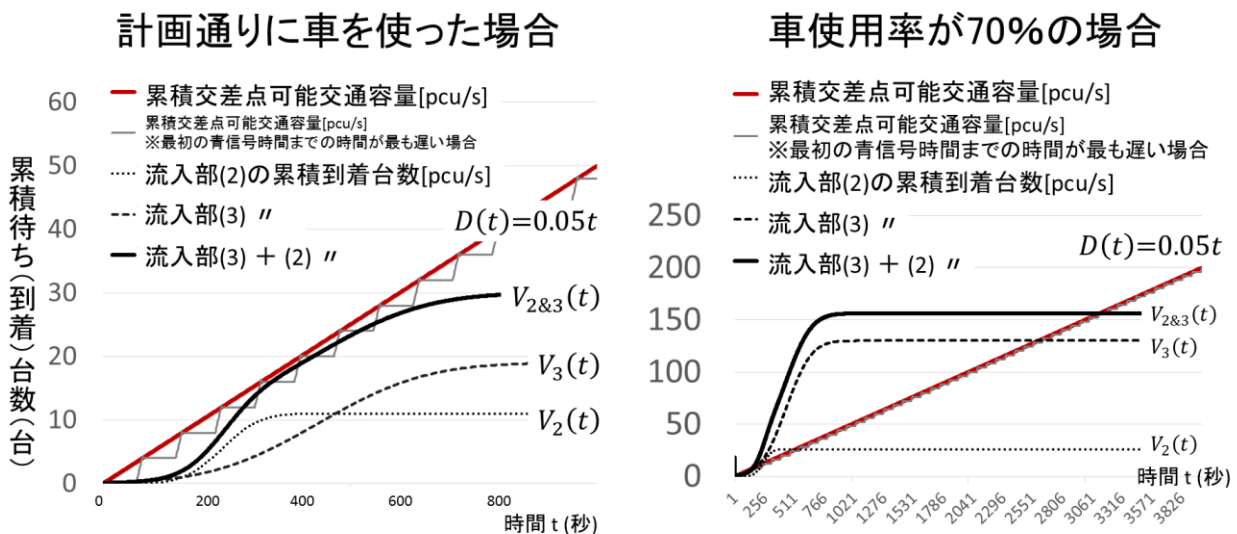


図5 到着率に正規分布を仮定した場合の Input-Output Diagram