

# ラウンドアバウトに関する考察

大澤 秀雄

## 概要

この論文では、信号機制御によらない交差点システムの効率性について考察する。ヨーロッパの多くの国は、交差点の交通制御を信号機によらないラウンドアバウトと呼ばれるサークル状の区域を設け対応している。日本でもいくつかの地域でこうした試みも行われているが、未だ馴染みのないこの交通システムについて、数学モデルを考察しシミュレーションにより既存の信号機交差点との効率性の比較を行う。

## 1. はじめに

2007年4月から翌年3月までの1年間、筆者は英国ケンブリッジ大学ペンブルックカレッジの客員研究員として赴いた。その際に、乗用車を頻繁に運転する機会があり、信号機のない交差点（ラウンドアバウト）を体験するようになった。幸い英国は、日本と同じ車は左側通行であるので、ラウンドアバウトの通行にも支障なく慣れることができた。

図1.1はケンブリッジ市内から北側の郊外へ抜ける幹線道路の一つであるエリザベスウェイとそれを横切るチェスタートンロードとの交差点で、

図1.1 ケンブリッジのラウンドアバウトの一例



…<https://maps.yahoo.com> から抜粋

ラウンドアバウトの代表的な例である。このようにサークル状に交差点が作られ信号機によらない交通制御がなされている。

当時、日本では見受けられなかったこのシステムを体験して次のような印象をもった。まずは、スムーズに車が流れているときは止まることもなく交差点を通過できるという快適さである。特にそれほど大きな交差点でない場合、その効果は大きいと感じた。これは西洋人のもつある種の合理性というものであろう。しかし、後述する通り交差点に入る段階で、自らの右側から交差点内に走行する車がある限りはいくら待とうが自分は交差点に入ることはできない。小規模のラウンドアバウトにおいては、自分が入るべき交差点の一つ右側の入り口から交差点内に入ろうとする車があっても自らは待たねばならない。そうしたジレンマを感じたこともしばしばであった。

次に、車の流れが激しい交差点においてはこのシステムだけでは成り立たないのではないのかということである。事実、そのような交差点においては、信号機を併設して交通流を制御する態勢がとられていた。また、サークルの大きなラウンドアバウトでは交差点への進入時に進路方向の出口が見えず、慣れない地においてはその出口を見失い、さらにもう一回サークルを回らざるを得ないということも経験した。

このような経験の中から芽生えた疑問は、交差点における交通流の制御として、日本のように信号機のみで行うシステムと信号機に頼らないラウンドアバウトではいずれが効率よく交通流を制御できるのかということである。本論文では、そのための数学モデルを考え、シミュレーションを通してこれら2システムの効率性を比較することを目的とする。

ラウンドアバウトは交差点をサークル状にするため、それだけ広域にならざるを得ず、日本の都市部においては導入不可能であろう。しかし、郊外においてあるいは交通渋滞が起こらず広域のスペースが提供できる地域においては、信号機を不

要とする交差点は経済性の面からも考慮すべきものと考えられる。近年、そうした面を鑑み、日本においてもいくつかの地域で試験的にこのシステムの実験が行われている。

2012年に長野県軽井沢六本辻交差点における社会実験が始まり(軽井沢新聞(2012))、同県飯田市吾妻町ロータリーや滋賀県立田町交差点においてもラウンドアバウト化された。これらの実験的試みの成果が注目される。また、NHKのWEBニュースによると、2014年9月からラウンドアバウトの通行ルールを定めた改正道路交通法が施行され、宮城県や愛知県など34か所で設けられ実際に運用が始まった(NHK NEWSWEB(2014))。

そのような動向も考慮すると、理論的にラウンドアバウトの効果を検証することは非常に意味のあることと思われる。

本論文の構成は次の通りである。第2節ではラウンドアバウトにおける車の走行ルールについて述べる。それに基づいて、第3節ではラウンドアバウトに対する数学モデルを考察する。このモデルは解析的に複雑であるので、同時にシミュレーションのための離散時化モデルを提唱する。そのモデルに従い、第4節ではケンブリッジ市内にある実際の三叉路ラウンドアバウトに対するシミュレーションを実行した結果を示す。さらに、これと比較のために信号機制御によるT字路交差点に対するシミュレーション結果を提示する。

これまでにラウンドアバウトに関する研究は多く行われている(Brilon(1988), Mauro(2010))。これに関する国際的なシンポジウムも行われてきている。それらの多くは事例的なものであり、数学的モデルを構築して解析したものは見受けられないようである。ラウンドアバウトにおける状態の複雑さが大きな足枷なのであろうが、本論文ではまずその足掛かりを作ろうとするものである。

## 2. ラウンドアバウトにおける走行

この節では、英国の交通ルールに則り、ラウンドアバウトにおける車の通行について解説する。

ルールは至ってシンプルであり、交差点に設けられたサークル内への進入の際に、基本的に自らの右側から他車が近づいてくる場合一時停車しなければならないというのが原則である。そうした車が無いことが確認できれば、サークル内への進入が認められる。すなわち、右側優先が原則である。なお、英国以外の欧州の国々は大方、車は右側通行でありラウンドアバウトにおいては左側優先である。

サークルへ進入した車は、進むべき方向への出口までその中を周り、サークルから出ていく。なお、フランスなどの車が右側通行の国では、当然サークル内の周回も英国とは逆方向となるので、サークル内への進入の際は、自らの左側から他車が近づいてくる場合一時停車しなければならないことになる。本論文では、英国におけるラウンドアバウトのルールに対するモデルを考えることにする。

図 2.1 は基本的なラウンドアバウトの例である。通常のクロス型の交差点 (図 2.2) に対応するものと考えられる。この図におけるラウンドアバウトの構成は、サークルとそれに附随する車の進入口および退出口 (まとめて、進退口と記すこともある) 4 本である。サークル内は進入口から接続されるステージにより成り立ち、図 2.1 では  $i$  番目の進入口から進入した車はステージ  $i$  に入り、その後サークル内を目的の退出口まで周回す

ることになる。その進入の際にステージ  $i-1$  に自らの進入を妨げる車が通行していないことを確認しなければならない。ここで  $i=1, 2, 3, 4$  であり  $1-1=0\equiv 4 \pmod{4}$  とする。

例えば、進退口 1 から 3 方向に進行する車は、進入口 1 においてステージ 4 を走行する車が無いことを確認できたならばステージ 1 に入り、サークル内をステージ 2 に進み退出口 3 からラウンドアバウトを退出する。ただし、小規模なラウンドアバウトでは場合によって、たとえステージ 4 に走行する車が無くても、進入口 4 から進入しようとする車があるときはステージ 1 に進入できないこともある。

一般に  $K$  叉路 ( $K \geq 3$ ) のラウンドアバウトを考えよう。進退口およびステージに対する番号は  $K$  を法とする合同数で表す、すなわち  $K+j \equiv j \pmod{K}$ , ( $j=0, 1, \dots, K-1$ ) である。車が左側通行の交通システムを考えるので、番号は時計回りに付ける。

進入口  $i$  ( $i=1, 2, \dots, K \equiv 0$ ) から侵入する車  $\kappa$  の走行ルールは次の通りである。

(R1)  $\kappa$  から見て右側のステージ  $i-1$  に、進入の妨げにならない車がなければステージ  $i$  に進入できる。(図 2.3)

(R2) ステージ  $i-1$  を走行する車がない場合でも、その規模が小さく進入口  $i-1$  から進入し

図 2.1 ラウンドアバウトの例

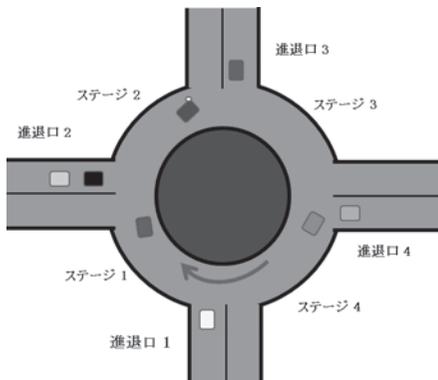


図 2.2 信号機付きの交差点 (クロス型)

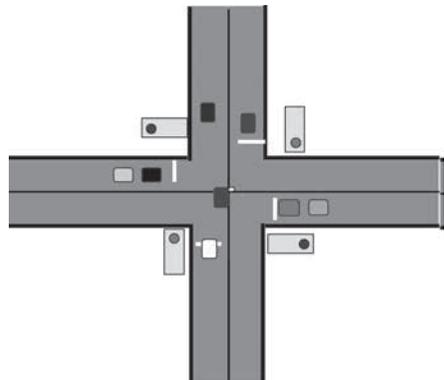
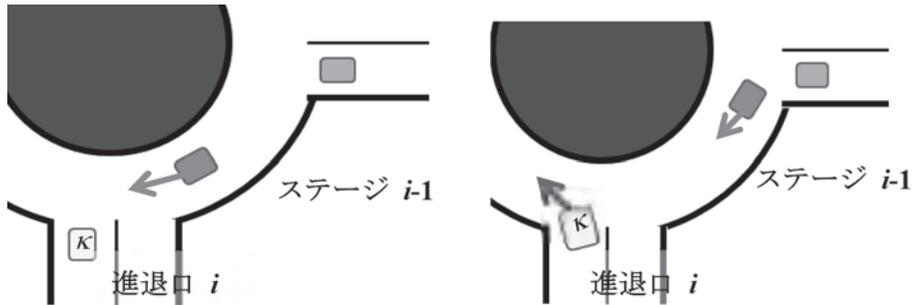


図 2.3 ラウンドアバウトの走行



ようとする車があれば  $\kappa$  はステージ  $i$  に進入できないことがある。

(R3) (R2) の場合、進入口  $i-1$  から進入しようとする車がステージ  $i-2$  および進入口  $i-2$  の状況によりステージ  $i-1$  に進入できなければ、 $\kappa$  はステージ  $i$  に進入できる。

以上の通り、 $\kappa$  は自らの右側に進入を妨げる車を見ない限りステージへの進入が認められるというのが基本である。もちろん、車が右側通行の国では上記の規則において、右を左に読み換えることになる。また当然ながら、ラウンドアバウトの規模は無限ではなく、同時に各ステージを走行できる車の数（容量）は限られ、ステージ  $i$  の容量を  $C_i$  とする。

ラウンドアバウトの最大の利点は信号に寄らないスムーズな通行であろう。特に、それほど混雑のない交差点においては、ほとんど停止することなく通行可能である。また、放射状に進退口を付けられるので進行方向の設定にかなりの自由度がある。しかし輻輳の激しい交差点ではステージ内の通行にとぎれがなくなり、ラウンドアバウトといえども信号機を併用せざるを得ない。また、交差点の規模が大きくなるほど広大な面積を要し、日本における採用は限られてくるものと考えられる。本論文では、信号機での制御による交差点とラウンドアバウトシステムにおける輻輳の状況を比較し、これらの効率性を考察することを目的とする。

### 3. 数学モデル

#### 3.1 通常モデル

この節ではラウンドアバウトの数学モデルを考察する。まず、システムの状態を表す次の変数を定義する。

- $L_i(t)$  : 時刻  $t$  において進入口  $i$  で進入を待つために並んでいる車の数,
- $Q_i(t)$  : 時刻  $t$  においてステージ  $i$  を走行中の車の数,
- $A_i(h)$  : 時間  $h$  の間に進入口  $i$  に新たにきた車の数,
- $B_i(h)$  : 時間  $h$  の間に進入口  $i$  からステージ  $i$  に進入した車の数,

ここで、ステージの容量により  $0 \leq Q_i(t) \leq C_i$  である。また、これらの変数に関して次の仮定を設ける。

- (H1)  $A_i(h)$  は時刻  $t$  に無関係で、他の変数とも独立である。
- (H2) (R1) ~ (R3) により、 $B_i(h)$  は  $A_i(h)$  を除く他の変数の影響を受ける。

特に、 $L_i(t)$ ,  $L_{i-1}(t)$ ,  $Q_{i-1}(t)$  の状態に強く制限される。

さらに、これらの変数について

$$L_i(t+h) = L_i(t) + A_i(h) - B_i(h).$$

が成り立つ。

(H2) の関係は非常に複雑であり、単純にモ

デル化はできない。そこで、次の小節では、時刻を微小な時間に離散化してシミュレーションのための離散時化モデルを再構築する。

### 3.2 離散時化モデル

まず、変数を次のように読み替える。

$L_i(n)$  : 時点  $n$  において進入口  $i$  で進入を待つために並んでいる車の数,

$Q_i(n)$  : 時点  $n$  においてステージ  $i$  を走行中の車の数,

$A_i(n)$  : 時点  $n$  において進入口  $i$  に新たに来た車の数,

$B_i(n)$  : 時点  $n$  において進入口  $i$  からステージ  $i$  に進入した車の数,

前述のとおり、 $0 \leq Q_i(n) \leq C_i$  である。また、 $A_i(n)$ 、 $B_i(n)$  については次の仮定をおく。

(HA)  $A_i(n)$  の取りうる値は 0 または 1 であり、時点  $n$  に無関係で、

$$P[A_i(n) = 1] = \lambda_i, \quad P[A_i(n) = 0] = 1 - \lambda_i.$$

(HB)  $B_i(n)$  の取りうる値は 0, 1 または 2 であるとする。

すなわち、状態により同時に 2 台までの車がサークル内に進入できる。

さらに、

$$L_i(n+1) = L_i(n) + A_i(n) - B_i(n)$$

が成り立つ。

この離散時化モデルにおいても  $B_i(n)$  に対する動向を表すのは煩雑であり、一概に規定できない。そこで、シミュレーションモデルにおいては時点  $n$  におけるステージ  $i$  の状態に関して次の変数を導入する。

$q'_i(n) = 1$  :  $i$  から  $i+1$  へラウンドまたは退出口  $i+1$  から出る車が有る

$q'_i(n) = 0$  : 上記の状況の車が無い

$q_i(n)$  : 上記の車を除き  $i$  を走行中の車の数、ただし  $q_i(n) < C_i$  であり、 $Q_i(n) = q'_i(n) + q_i(n)$  である。

また、 $q'_i(n) = 1$  のもとで、ステージ  $i$  から  $i+1$  へラウンドする確率を  $\zeta_i$  とする。このとき  $1 - \zeta_i$  は同じ条件下で退出口  $i+1$  から出る確率である。

これらの記述にしたがい、 $B_i(n)$  の動向を基本的に進入時においては高々 2 台進入できるものとし、次のように規定する。

- (I) 進入口  $i$  からステージ  $i$  への進入可能な場合  
 ステージ  $i-1$  が空 ( $Q_{i-1}(n) = 0$ ) または  $q'_{i-1}(n) = 1$  で該当車が退出口  $i$  から出て、かつ  $q_{i-1}(n) = 0$  ならば  $B_i(n) = \min(L_i(n), 2)$ ,  
 (II) 上記の場合以外は、進入口  $i$  からステージ  $i$  への進入は不可能であり  $B_i(n) = 0$ .

## 4. シミュレーションの例

前節の離散時化モデルに従い、シミュレーションを実行する。これは  $K = 3$  (三叉路) の例でケンブリッジの中心街に近いラウンドアバウトである (図 4.1)。進入口 1 からの流入が最も激しく、進入口 2 および 3 からの流入はほぼ同じであるが 1 からの流入の半分以下の率である。

信号機制御による交差点との比較のために、この三叉路ラウンドアバウトに相当する T 字路型のモデル (図 4.2) を考える。

### 4.1 三叉路のラウンドアバウト例

図 4.1 の三叉路ラウンドアバウトにおけるシミュレーションモデルでは、次のパラメータを設定する。

$\lambda_i$  : 進入口  $i$  における新たな車の到着率

$\zeta_i$  :  $q'_i(n) = 1$  のもとで、ステージ  $i+1$  へのラウンド率

$C_i$  : ステージ  $i$  の容量

ここで、 $i = 1, 2, 3$ .

シミュレーションの実行にあたっては実際の状況を考慮して、進入口 1 への到着率 ( $\lambda_1$ ) を高くして、2 および 3 への到着率 ( $\lambda_2, \lambda_3$ ) はそれより低くする。また、退出口も同様としてラウンドする率も同じような設定とするため、退出口 1 か

図 4.1 三叉路のラウンドアバウトの例 ( $K = 3$  の場合)



…<https://maps.yahoo.com> から抜粋

らの退出率  $1 - \zeta_3$  を高く,  $1 - \zeta_1$ ,  $1 - \zeta_2$  を低く設定する. そのような状況から  $\lambda_i$ ,  $\zeta_i$  を次のように設定した.

$$\text{(Sim 1.1)} \quad \lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = \lambda_3 = 0.5, \zeta_1 = \zeta_2 = 0.45, \zeta_3 = 0.3$$

$$\text{(Sim 1.2)} \quad \lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = \lambda_3 = 0.4, \zeta_1 = \zeta_2 = 0.4, \zeta_3 = 0.2$$

ステージの容量も実状を踏まえて,  $C_1 = 5$ ,  $C_2 = 5$ ,  $C_3 = 4$  とした.

シミュレーションの結果は各進入口における車の数  $L_i(n)$  のグラフで示す. 同じ設定で繰り返し実行した中で, よく現れた2つのパターンが図 4.3 である. 図 4.3 (1) の2つのグラフは (Sim 1.1) のパラメータのもとでのシミュレーションの実行例である. Sim 1.1-1 のように進入口 1 に激しい渋滞がみられ, それが解消されない状況が観測される. それに比して, Sim 1.1-2 はやはり途中で進入口 1 に渋滞がみられ, その後解消されたようにみえるがこれもさらにシミュレーションを続ければどうなるか不明である. シミュレーションを繰り返し行った結果では, 前者のような現象が現れる場合が多く観測された. 従って, このパラメータ

に対しては安定した交通流を求めるのは困難ではなかろうか.

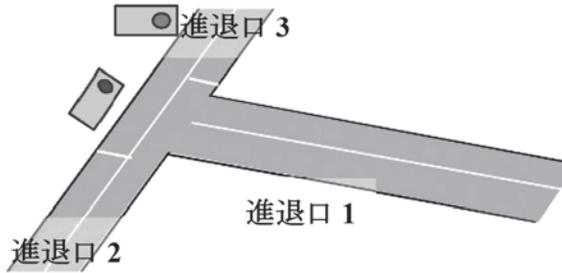
それに対して, (Sim 1.2) の実行例である図 4.3 (2) の状況は非常に安定した交通流が観測される. このパラメータの設定では, 同じような状況が繰り返し現れたことを考えると, 安定した流れか否かを分けるパラメータの設定が (Sim 1.1) と (Sim 1.2) の間にあることが予想される.

## 4.2 信号機付き交差点

図 4.2 は, 図 4.1 の三叉路ラウンドアバウトに相当する T 字路型の信号機交差点モデルである. この信号機付きの交差点モデルを次のように規定する. ラウンドアバウトモデルと同様に, 進入口に対する番号は時計回りに付ける. 3 を法とする合同数で表す, すなわち  $3 + j \equiv j$ , ( $j = 0, 1, 2$ ) である. 車が左側通行の交通システムを考慮するので, 番号は時計回りに付ける. また, 交差点内は通過のみで, ラウンドアバウトと異なりステージはない. 次の変数を定義する.

$L_i(n)$ : 時点  $n$  において進入口  $i$  で交差点を通過

図 4.2 T字路型交差点の例



するために並んでいる車の数,

$A_i(n)$ : 時点  $n$  において進入口  $i$  に新たに来た車の数,

$B_i(n)$ : 時点  $n$  において進入口  $i$  から交差点を通過する車の数,

三叉路ラウンドアバウトとの比較を考慮して,  $A_i(n)$ ,  $B_i(n)$  については次の仮定をおく.

(TA)  $A_i(n)$  の取りうる値は 0 または 1 であり, 時点  $n$  に無関係で,

$$P[A_i(n) = 1] = \lambda_i, \quad P[A_i(n) = 0] = 1 - \lambda_i.$$

(TB)  $B_i(n)$  の取りうる値は, 対面する信号機により制御される.

・対面する信号機が青の場合,

$$P[B_i(n) = \ell] = \mu_i(\ell), \quad \ell \geq 1,$$

ここで,  $\sum_{\ell \geq 1} \mu_i(\ell) = 1.$

その平均  $v_i$  は交差点を通過するのみなので, 一般にラウンドアバウトよりも大きな値をとる.

・対面する信号機が赤または黄の場合,  $B_i(n) = 0$  である.

さらに,

$L_i(n+1) = \max(0, L_i(n) + A_i(n) - B_i(n))$  が成り立つ.

パラメータ  $\mu_i(\ell)$  の設定は複雑になるが, ここではラウンドアバウトとの比較が目的なので, サークル走行がないことを考慮し交差点を通過する車の速度を一定と設定する. 具体的にはラウンドアバウト交差点のサークルの規模から考えて,

信号機の交差点内はラウンドアバウトのサークルの直径以下の距離を走行すればいいので単位時間当たりの交差点を通過する車の平均数  $v_i$  を一律に高々円周率  $\pi$  と仮定する.

さらに, 信号機交差点では青信号の時間設定が必要である. 進入口  $i$  に対する青信号の時間を  $\tau_i$  として, 交通量の高い進退口に対して, より大きな値を設定する. 以上を考慮して, (Sim 1.1) と (Sim 1.2) に対応して次のパラメータを設ける.

$$\text{(Sim 2.1)} \quad \lambda_1 = 0.9, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = 0.5, \quad \tau_1 = 40, \\ \tau_2 = \tau_3 = 20$$

$$\text{(Sim 2.2)} \quad \lambda_1 = 0.9, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = 0.4, \quad \tau_1 = 40, \\ \tau_2 = \tau_3 = 20$$

以上のモデルのもとで行ったシミュレーションの実行例が図 4.4 である. (1), (2)においては, 交差点への車の流入を, それぞれ図 4.3(1) Sim 1.1-1, 図 4.3(2) Sim 1.2-1 と全く同じ状況として, 各進入口での車の行列数を記録しグラフとした. いずれの場合でも, 一時的に赤信号の間, 信号待ちの車が列をなすが次の青信号の間に行列は解消され, 非常に良い状況で交通量を制御しているといえよう.

(Sim 1) と (Sim 2) の実行例を比較すると, 交通量の多い場合は信号機による制御が有効であることが覗かれる. しかし, それほどの交通量でない場合, ラウンドアバウトにより快適な車の流れをうみ出していることも観察される. その境界がどこに設定できるのか今後の課題となろう.

図 4.3(1) Sim 1.1-1 :  $\lambda_1=0.9, \lambda_2=\lambda_3=0.5, \zeta_1=\zeta_2=0.45, \zeta_3=0.3$

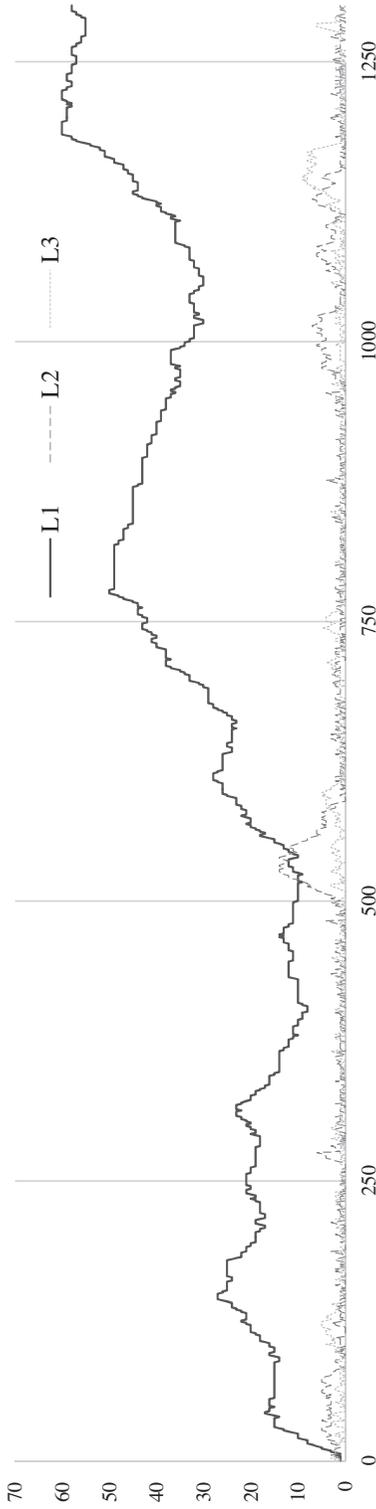


図 4.3(1) Sim 1.1-2 :  $\lambda_1=0.9, \lambda_2=\lambda_3=0.5, \zeta_1=\zeta_2=0.45, \zeta_3=0.3$

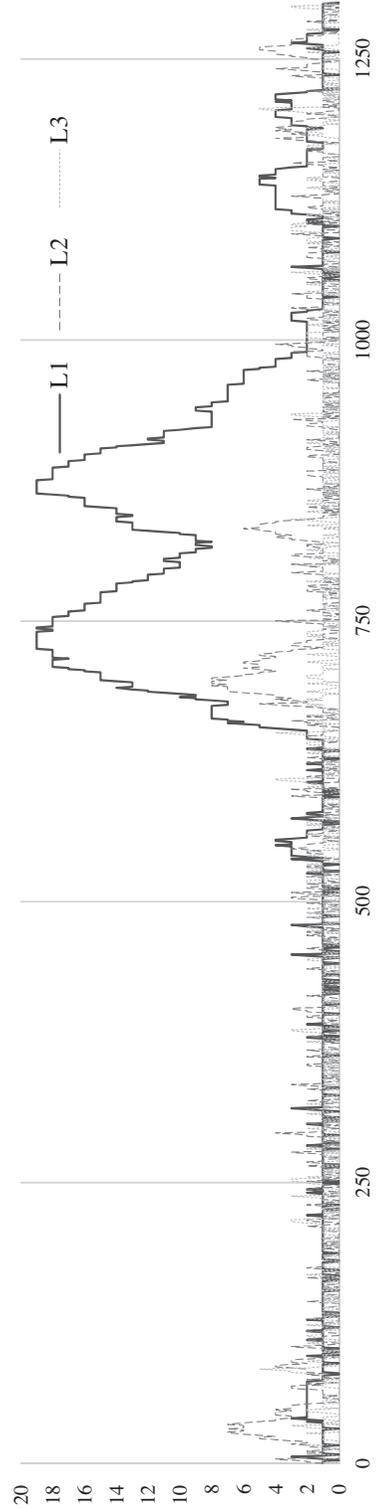


図 4.3(2) Sim 1.2-1 :  $\lambda_1=0.9, \lambda_2=\lambda_3=0.4, \zeta_1=\zeta_2=0.4, \zeta_3=0.2$

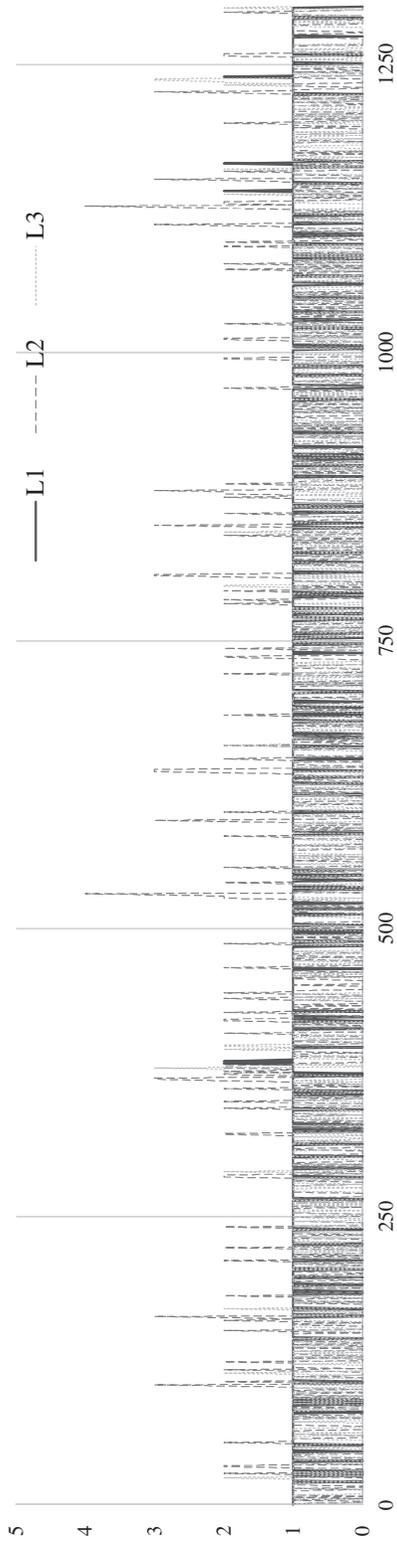


図 4.3(2) Sim 1.2-2 :  $\lambda_1=0.9, \lambda_2=\lambda_3=0.4, \zeta_1=\zeta_2=0.4, \zeta_3=0.2$

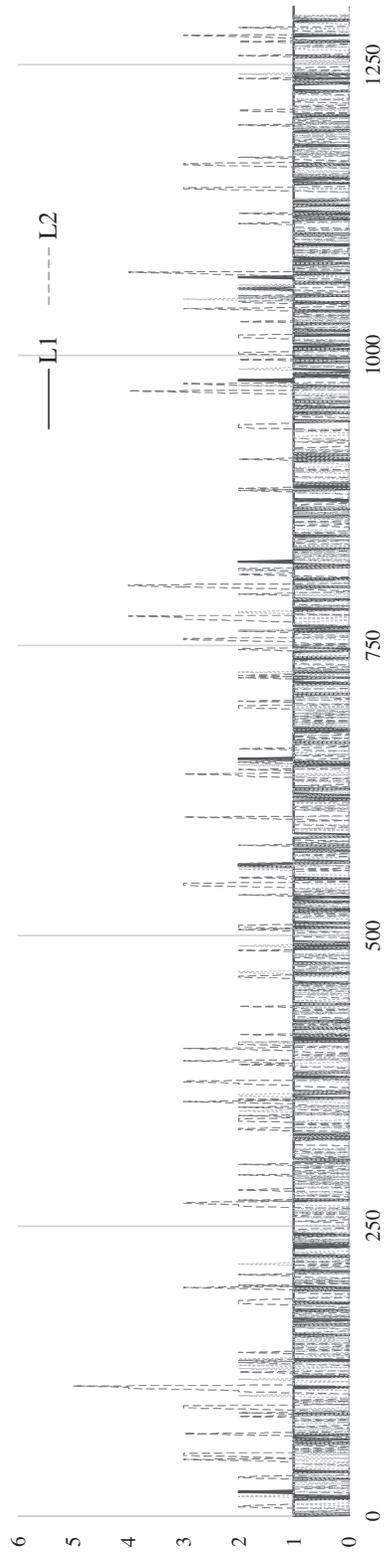


図 4.4 (1) Sim 2.1 :  $\lambda_1=0.9, \lambda_2=\lambda_3=0.5, \tau_1=\tau_2=40, \tau_3=20$

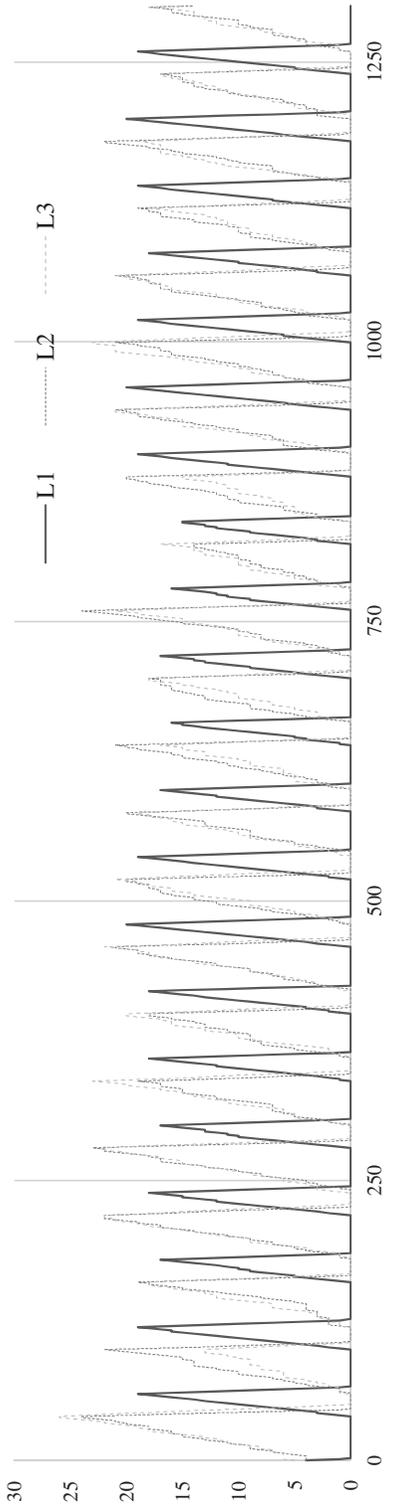
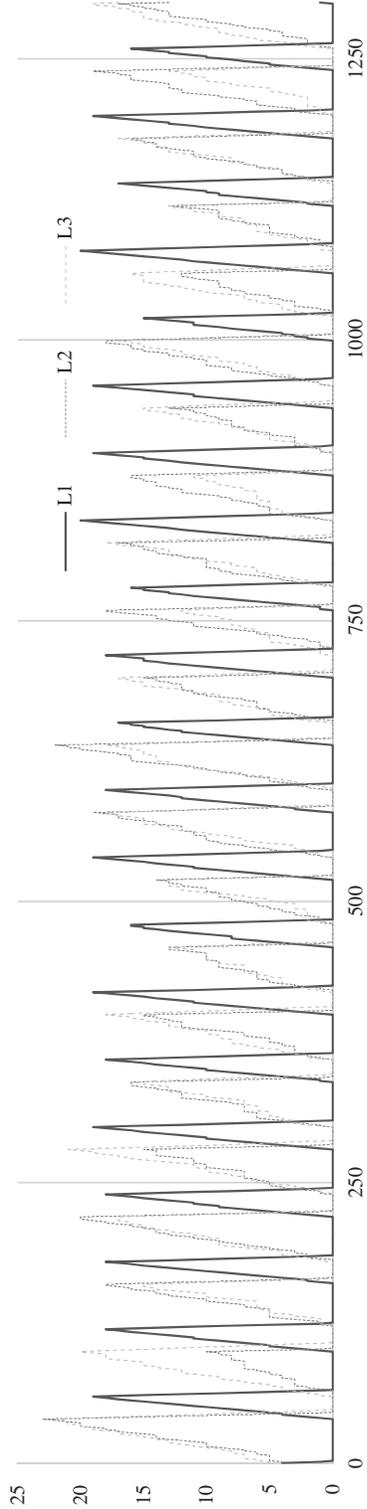


図 4.4 (1) Sim 2.2 :  $\lambda_1=0.9, \lambda_2=\lambda_3=0.4, \tau_1=\tau_2=40, \tau_3=20$



## 5. まとめ

この論文では、信号制御によらない交差点システムであるラウンドアバウトに対する数学モデルを考察した。それに基づいて、シミュレーションモデルを構築し実行した。

その結果、ラウンドアバウトでは交通量の激しい場合、大渋滞を起こす可能性もあり制御できないこともある。同じ状況下で信号機交差点では青信号時間の設定により周期的な安定した交通の流れが観測された。以上を鑑みると、交通量のそれほど激しくない交差点ではラウンドアバウトは有効な制御手段とみられる。逆に、交通量が激しい進入口を有する交差点では、信号機を併設するなどの方法を用いてラウンドアバウトを設ける必要もあろう。

今回の数学モデルならびにシミュレーションモデルは、必ずしも現実を反映したものとはいえない面もある。今後、モデルの改善およびその解析的研究が望まれる。

いずれにしても本研究課題は端を発した段階で

あり、これからの進展が臨めよう。また、ラウンドアバウトシステムについては本研究のような効率面の研究のみならず、経済的な側面からの研究も必要であろう。

## 謝辞

本研究は日本大学経済学部経済研究所のプロジェクト研究の一環として遂行されたものである。著者は、この場を借りて当研究所の支援に対して感謝の意を表したい。

## 参考文献

- Brilon, W. (Editor), (1988) *Intersections without Traffic Signals II*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Mauro, R., (2010) *Calculation of Roundabouts*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- NHK NEWSWEB, (2014) 「ラウンドアバウト：来月から運用開始」, <http://www3.nhk.or.jp/news/html>
- Yahoo Maps, (2014) <https://maps.yahoo.com/>
- 軽井沢新聞, (2012) 「ラウンドアバウトの実験開始」, [http://www.karuizawa.co.jp/newspaper/news/n\\_2012-112.php](http://www.karuizawa.co.jp/newspaper/news/n_2012-112.php)