

# 3車線高速道路における心理的状況を反映した交通シミュレーション

水谷, 亮 / MIZUTANI, Ryo

---

(発行年 / Year)

2014-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2014-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(理学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

# 3車線高速道路における心理的状況を反映した 交通シミュレーション

---

Psychological Traffic Simulation System on a Three-Line Highway

2013 年度

水谷 亮

Ryo Mizutani

法政大学大学院 情報科学研究科 情報科学専攻

E-mail: [ryo.mizutani.5g@stu.hosei.ac.jp](mailto:ryo.mizutani.5g@stu.hosei.ac.jp)

Supervisor: Prof. Kenji Ohmori

---

# 目次

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| Abstract                                      | 1  |
| 1 はじめに                                        | 2  |
| 2 想定するシミュレーション環境                              | 2  |
| 3 Psychological Traffic モデル                   | 2  |
| 3.1 消極的心理                                     | 2  |
| 3.2 積極型心理                                     | 3  |
| 3.3 環境依存型心理                                   | 4  |
| 3.4 モデル定義                                     | 4  |
| 4 Psychological Traffic Simulation System の実装 | 6  |
| 4.1 Netlogo                                   | 6  |
| 4.2 シミュレーション環境の設定機能                           | 6  |
| 4.3 システム仕様                                    | 8  |
| 4.3.1 シミュレーションの設定 (setup) と実行 (go)            | 8  |
| 4.4 各心理のタートル処理                                | 9  |
| 4.5 車線調整と車線変更                                 | 11 |
| 4.5.1 先行研究：2車線道路における車線調整方法                    | 12 |
| 4.5.2 本研究の車線調整方法                              | 12 |
| 5 走行法の検討実験                                    | 14 |
| 5.1 実験結果の集計法                                  | 15 |
| 6 実験結果と考察                                     | 16 |
| 6.1 分散による渋滞発生有無の分類                            | 16 |
| 6.2 平均速度                                      | 19 |
| 6.3 平均移動量                                     | 22 |
| 6.4 平均満足度                                     | 24 |
| 6.5 ミクロな視点による実験                               | 24 |
| 6.5.1 心理選択の合計数                                | 24 |
| 6.5.2 心理変更の間の回数                               | 25 |
| 7 まとめ                                         | 27 |
| 参考文献                                          | 27 |
| 付録                                            | 28 |
| 6. 1 分散による渋滞発生有無の分類                           | 28 |
| 6. 2 平均速度                                     | 30 |
| 6. 4 平均満足度                                    | 31 |
| 6. 5. 1 心理選択の合計数                              | 34 |
| 6. 5. 2 心理変更の間の回数                             | 35 |

## Abstract

In recent years, the rapid progress of information technology in automobiles has been bringing an increasing attention to a fully automatic driving system. The realization of the automatic driving system requires sufficient experiments and analyses, which need enormous time and cost when these are carried out using real cars because of the risk of having serious accidents. A traffic simulation system, which is proposed in this paper using psychological aspects of drivers, reduces time and cost in experiment and analyses. The traffic simulation system has three psychological types: aggressive; careful; and situation-dependent. Psychological Traffic Simulation System (PTSS) has been realized using Netlogo and has capability of analyzing traffic jams on a three-line highway. Results of experiment and analyses using PTSS are also described in this paper.

Keywords- 高度道路交通システム, 交通シミュレーション, Netlogo, 心理学的状況

## 1 はじめに

近年、自動車の運転支援システムが普及しつつある。プリクラッシュセーフティシステム (PCS) やアダプティブクルーズコントロール (ACC)[5] は代表的な例であり、これらは車の衝突事故の防止やドライバーへの快適性の向上が目的となっている。このような運転支援システムの発展の延長線上には自動運転システムがあり、自動運転システムは究極の ITS(Intelligent Transport Systems)[2] ともいわれている [1]。自動運転システムの実現は安全と効率に役立ち、例えば高速道路の渋滞時のヒューマンエラーによる事故や渋滞発生 [3][4] の抑制が可能になると考えられている。一時期、自動運転システムは実用化の見込みがみられずに関心が薄れたが、今年度開催されたアジア最大級規模の映像・情報・通信の国際展示会 CEATEC(Combined Exhibition of Advanced Technologies) JAPAN 2013 では、日産自動車が一般道路における自動運転システムの走行デモンストレーションを実施した。具体的には、有人運転自動車両と自動運転自動車を同時に走らせ、交差点や駐車車両に遭遇した場合に、自動運転自動車がどのように反応するかといったデモンストレーションである。技術進化に伴う自動車の IT 化により近年再び自動運転に関心が高くなっており、実社会での自動車の自動運転システムの実現が迫りつつある。それでもなお、自動運転システムの実現が困難を強いられると予測される。実現のための実験は危険を伴うため、数台で行う等小規模から行われている。地域と協力して実験を行っている例も存在する。実際の交通環境での実験は不可欠であるが、実験と分析には多大な時間や費用がかかる。この負担を軽減するためには交通シミュレーションを用いることが有効である。

従来の交通シミュレーションでは高速道路の交通流に関する研究が長年行われており、モデル化の手法は流体モデル・追従モデル・セルオートマトンモデルの 3 種に大別されている。流体モデルはマクロな視点からのモデルであり、追従モデルとセルオートマトンモデルはミクロな視点からのモデルであり。追従モデルは連続モデルに対し、セルオートマトンは離散モデルである。これらの研究では交通の基本概念をモデル化し、流量と車両密度からメタ安定相 [8] の発生メカニズムを解明することによって自然渋滞の発生軽減や渋滞解消を目指している。

本研究の交通シミュレーションでは心理的要素と複雑系科学を取り入れた Psychological Traffic モデルを提案する。複雑系システムでは、群集の行動予測をするときに、「群集と反群集」というモデルが着目されている。本論文でも対峙する心理的要素を導入することを考える [9]。それぞれが意志決定して行動する 3 種類の自律エージェントを定義したマルチエージェントベースのモデルである。提案モデルに基づきマルチエージェントプログラムが可能なモデリング環境 Netlogo[6] を用いて 3 車線高速道路を想定した交通シミュレーション (Psychological Traffic Simulation System) の開発とそれを用いた実験例を紹介する。

## 2 想定するシミュレーション環境

人間による運転操作と自動運転システムが混在した道路状況をシミュレーションすることを目指している。本研究ではより人間らしい運転を表現するために心理モデルを用いている。決められたルールにのみ基づいて行動するものと周囲の状況に応じて行動するものを定義する。それぞれの車が自身で判断して走行することから自律型走行車モデルとして考える。本研究のシミュレーションの結果から自律型自動走行運転システムの導入のための走行指針を得ることを目指す。具体的には、一定時間内においての各心理的速度・移動量・満足度等からモデル別のシミュレーション結果を考察することによって自動運転システムの走行法について検討する。

## 3 Psychological Traffic モデル

本研究では 3 種類の運転心理を車の運転モデルとして定義する。それぞれの心理モデルの説明は以下である。

### 3.1 消極的心理

制限速度に近い速度で運転する心理で、左寄りの車線を走り続け、制限速度付近での走行を試みる。生真面目な性格や安全運転を意識する運転手が対象となる。また、軽自動車やコンパクトカー等速い速度で走らない運転手もこの対象である。

消極型心理における特徴は、左側 2 車線上で走行することである。加速・減速と車線変更を行動にとる。これらの行動のための条件は前方に車が存在するか、隣の車線に車がいるか、自身がどの車線を走行しているかである。状況による行動の例を図 1 に示す。それぞれの状況を 3 桁の二進数で示す。車両の移動候補に車が存在すれば 1、存在しないとき 0 とし、左車線・中央車線・右車線の順で示す。例えば図 1 内の左の図において、左車線の後方を走行している車を自車とすると、左側車線の前方のみ車が存在している。この状況は 100 となり、このときは減速または車線変更を行うものとする。同様に図 1 の真ん中の図は中央車線走行中において 100 のときは加速行動をとり、図 1 の右図では 010 のとき減速行動を意味する。このようにして左車線と中央車線時の行動パターンの論理式表をそれぞれ表 1, 2 に示す。

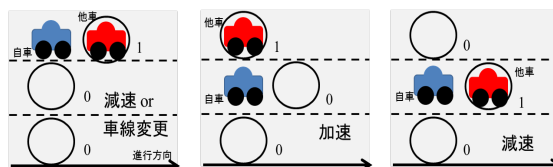


図 1. 消極型心理の行動パターン例

表 1. 消極型心理の左車線走行時の行動パターン

| 左車線 | 中央車線 | 右車線 | 行動        |
|-----|------|-----|-----------|
| 0   | 0    | x   | 加速または車線変更 |
| 0   | 1    | x   | 加速        |
| 1   | 0    | x   | 減速または車線変更 |
| 1   | 1    | x   | 減速        |

表 2. 消極型心理の中央車線走行時の行動パターン

| 左車線 | 中央車線 | 右車線 | 行動        |
|-----|------|-----|-----------|
| 0   | 0    | x   | 加速または車線変更 |
| 1   | 0    | x   | 加速        |
| x   | 1    | x   | 減速        |

3 桁の二進数によって 8 つの行動パターンが挙げられるが、消極型心理では左側 2 車線のみの走行とし右側車線の状況によって行動パターンの変化はないため、簡略することができる。

## 3.2 積極型心理

制限速度を超えて速い運転しようとする心理で、走行中前方に車がいるときは車線変更を行って走行しようとする。強気やせっかちな性格等、急いで走ろうとする運転手が対象となる。また、スポーツカーのような速い速度で走る車や走り屋と呼ばれるような運転手もこの対象である。

積極型心理では、3 車線全ての車線上で加速・減速・車線変更を行動にとる。またこれらの行動パターンを消極型心理と同様に論理式表として左車線時、中央車線時、右車線時の順に表 3~5 に示す。

表 3. 積極型心理の左車線走行時の行動パターン

| 左車線 | 中央車線 | 右車線 | 行動        |
|-----|------|-----|-----------|
| 0   | 0    | x   | 加速または車線変更 |
| 0   | 1    | x   | 加速        |
| 1   | 0    | x   | 車線変更      |
| 1   | 1    | x   | 減速        |

積極型心理は 3 車線全てで走行するため 24 の行動パターンが考えられる。しかし、消極型心理と同様に論理式を簡略できる。左車線走行時は右車線の状況によって影響がないため 4 パターンに簡略することができた。また積極型

表 4. 積極型心理の中央車線走行時の行動パターン

| 左車線 | 中央車線 | 右車線 | 行動   |
|-----|------|-----|------|
| x   | 0    | x   | 加速   |
| x   | 1    | 0   | 車線変更 |
| x   | 1    | 1   | 減速   |

表 5. 積極型心理の右車線走行時の行動パターン

| 左車線 | 中央車線 | 右車線 | 行動        |
|-----|------|-----|-----------|
| x   | 0    | 0   | 加速または車線変更 |
| x   | 1    | 0   | 加速        |
| x   | x    | 1   | 減速        |

の走行心理から主に右 2 車線を走行するため、中央車線と右車線走行時は左車線の状況に影響されず、それぞれ 3 パターンに簡略できた。中央・右車線走行時、積極型心理を対象とする運転手の中には前方に車両がいる際ひとつ左へ車線変更して追い越す、左抜きという行動の可能性も存在するが、一般的に右側車線が追い越し車線であり、そのような行動は交通マナーに反するため本研究ではこれを考慮しないものとする。

### 3.3 環境依存型心理

周りの状況に応じて適切な運転を試ようとする心理で、混雑していると判断した状況下では周りに合わせて走行を試み、混雑でないと判断した状況では加速を試みる。運転慣れや協調性のある運転手であり、最も一般的なものである。

環境依存型は、周りの状況を判断して快適に走行できると考えられる運転を試みる心理と定めるが、これは非常に曖昧な表現となる。本研究では、左車線または中央車線を走行時に、その一定前方とひとつ右車線の一定前方それぞれの混雑具合によって消極型行動あるいは積極型行動をとるものとする。図 2 は判断の例を示している。

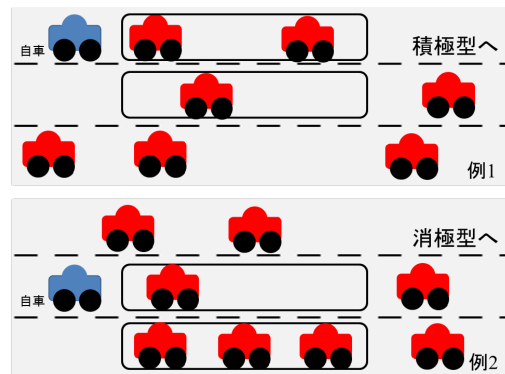


図 2. 環境型心理の選択

図 2 の上図と下図はそれぞれ、環境依存型が積極型と消極型を選択したときの例である。この例では自車と示した車を基準に、一定前方とひとつ右車線の範囲以内それぞれに 3 台以上の車が存在しないとき積極型、そうでないとき消極型を選択する例である。上図ではそれぞれの範囲に車が 2 台 (左車線) と 1 台 (中央車線) 存在しているので積極型行動を選択し、下図では中央車線では 1 台だが右車線に 3 台存在しているので消極型行動を選択している。

### 3.4 モデル定義

Psychological Traffic モデル (以降 PT モデル) の記述に用いる記号を以下に定義する。

1.  $L$  : 道路の長さ (座標)
2.  $T$  : 最大シミュレーション時間
3.  $N_{alp}$  : 道路上に存在する心理  $alp$  の車の数.

$alp$  は  $A, B, C$  の 3 つあり,  $A$  は積極型,  $B$  は消極型,  $C$  は環境依存型心理である. ( $N_A, N_B, N_C$ )

4.  $N$  : 道路上に存在する車の数. 3 との数式関係は以下

$$N = N_A + N_B + N_C$$

5.  $v_{alp,i}(t)$  : 時刻  $t$  における車  $i$  の速度. 3 と同様に  $v_{A,i}, v_{B,i}, v_{C,i}$  の 3 種類.

6.  $v_j(t)$  : 時刻  $t$  において前方車が存在する時, その車  $j$  の速度.

7.  $v_{limit}$  : 車道の制限速度.

8.  $Max\ v_{alp,i}$  : 心理  $alp$  の車  $i$  が希望する最高速度. 7 との数式関係は以下.

$$Max\ v_{alp,i} = v_{limit} + \tau_{alp,i} \quad (\tau_{A,i} > \tau_{C,i} > \tau_{B,i} \geq 0)$$

実際の車道では制限速度よりも少し速い速度で走っている傾向が多いため,  $v_{alp,i}$  は  $v_{limit}$  よりも大きくなることもある.  $\tau_{alp,i}$  は心理  $alp$  の車  $i$  における乱数値である.

9.  $V_{alp}(t)$  : 時刻  $t$  における心理  $alp$  の車の平均速度. 3, 5 によって導かれる.

$$V_{alp}(t) = \frac{1}{N_{alp}} \times \sum_{i=1}^{N_{alp}} v_{alp,i}(t)$$

10.  $p_{alp,i}(t)$  : 時刻  $t$  における心理  $alp$  の車  $i$  の満足度. 単位は % であり, 5, 8 によって導かれる.

$$p_{alp,i}(t) = \frac{v_{alp,i}(t)}{Max\ v_{alp,i}} \times 100$$

11.  $P_{alp}(t)$  : 時刻  $t$  における心理  $alp$  の平均満足度. 3, 10 によって導かれる.

$$P_{alp}(t) = \frac{1}{N_{alp}} \times \sum_{i=1}^{N_{alp}} p_{alp,i}(t)$$

12.  $x_{alp,i}(t)$  : 時刻  $t$  における心理  $alp$  の車  $i$  の座標

13.  $a_{alp}$  : 加速度.  $a_A$  と  $a_B$  の 2 種類のみである. 環境依存型の加速量は, 消極型または積極型行動の選択にそれぞれ依存する.

14.  $d_{alp}$  : 減速度.  $a_A$  と  $a_B$  の 2 種類のみである. 環境依存型の加速量は, 消極型または積極型行動の選択にそれぞれ依存する.

以上の記号を前提とし, PT モデルにおける運転ルールは以下である.

(1) 加速

$$v_{alp,i}(t) \leftarrow v_{alp,i}(t-1) + a_{alp} \times 1 + \delta_{alp,i} \quad (*\ \delta_{alp,i} \text{ は心理 } alp \text{ の車 } i \text{ における乱数値である.})$$

$$\text{if } v_{alp,i} > Max\ v_{alp,i}$$

$$v_{alp,i}(t) \leftarrow Max\ v_{alp,i}$$

(2) 先行車を原因とする減速

$$v_{alp,i}(t) \leftarrow v_j - d_{alp}$$

$$\text{if } v_{alp,i}(t) < 0$$

$$v_{alp,i}(t) \leftarrow 0$$

(3) 移動

$$x_{alp,i}(t) \leftarrow x_{alp,i}(t-1) + v_{alp,i}(t) \times 1$$

図 3. PT モデルの運転ルール

## 4 Psychological Traffic Simulation System の実装

### 4.1 Netlogo

本研究では Netlogo を用いて運転心理交通シミュレーションを実現した。Netlogo は Northwestern 大学の Uri Wilensky らによって開発され、自然現象や社会現象をシミュレーションする為のプログラミング環境である。Netlogo はエージェント (agent) で成り立っている。エージェントは与えられた命令通りに動くものであり、タートル (turtle)、パッチ (patch)、リンク (link) 等がある。タートルはプログラム内で動くオブジェクトであり、パッチは四角い領域であり、背景のようなもので動かすことはできない。タートルは動かすことが可能である。本研究では車をタートル、3 車線道路をパッチで表現する。積極型心理は赤いタートル、消極型心理は青いタートル、環境依存型心理を薄青色とオレンジ色のタートルで表現し、実現した PTSS(Psychological Traffic Simulation System) は図 4 に示す。

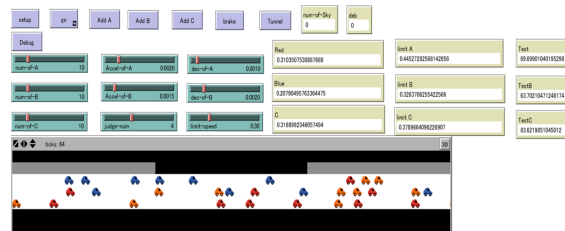


図 4. Psychological Traffic Simulation System

Netlogo は主に Interface, Info, Code の 3 ページで構成されている。Interface は図 4 のようにシミュレーションを実行するためのページであり、ここに様々な UI が設置される。UI には Button, Slider, Switch, Chooser, Input, Monitor, Plot, Output, Note, View がある。View は 1 個だけ使うことができ、それ以外は任意の数生成することができる。PTSS では Button, Slider, Monitor, Plot, View の 5 種の UI を使って構成している。詳細については後に記述する。Info はそのシミュレーションがどのようなものかを紹介するページである。最後に Code はプログラミングをするページである。Netlogo は関数型ベースのプログラム言語であり、シミュレーションの実行内容のほとんどがここで記述される。

### 4.2 シミュレーション環境の設定機能

シミュレーション環境の設定機能について説明する。PTSS の設定機能は 2 つの Button と 9 つの緑色の Slider がある。

Button について説明する。PTSS では Button は setup と go があり、setup はシミュレーションの準備を行い、go はシミュレーションを実行する。実装方法について説明する。Button の生成と編集の画面を図 5 に示す。

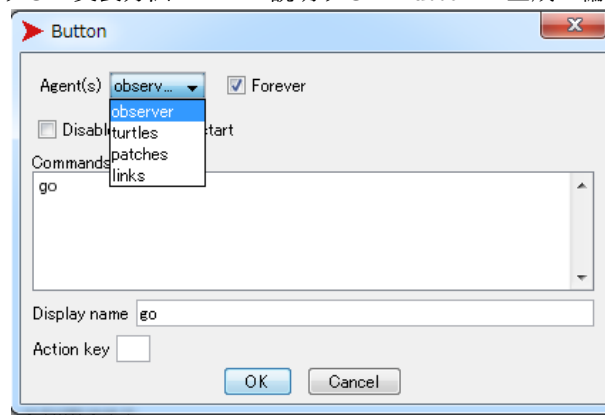


図 5. ボタンの生成例 (go)

主な編集点 Agent(s), Forever, Displayname, Commands について説明する。初めに Agent(s) について。Netlogo には observer, turtles, patches, links というエージェントで構成されている。Agent(s) ではどこの命令かを決定づ

けるものである。go はシミュレーションを実行する役割として用意したため、ここでは observer を選択している。次に Commands について。Commands はユーザーに Button が押された際に実行する中身を記述する所である。Commands に複数行記述してもよいし、または Code 内で記述した関数を呼ぶことも可能である。図 5 では Code 内の go という関数を呼ぶことにしているので、go とのみ記述している。この関数 go の詳細については後に記述する。Forever は Button が押された際に繰り返し実行する機能である。繰り返し実行を求めるときはチェックし、そうでないときはチェックをつけない。今回はチェックをつけているため、go の中身が繰り返し実行しているということになる。go ボタンを押すことでシミュレーションが実行され、実行中にもう一度 go ボタンを押すことで Forever による繰り返しは停止される。最後に Displayname は UI 側にみせる Button 名を決めるものである。これはユーザーにみせるものでしかないので、同じ Displayname を複数作ることができる。同じ名前のもを作るとは推奨はできないが、例えば実行に関する Button を作ろうとしたときつまり今回でいう go 関数。同じ名前前で 2 つ作り、片方のみ Forever にチェックをつけるようなことをすると繰り返し実行する Button と 1 回だけ実行する Button として使い分けられるように作ることができる。

次に Slider について説明する。Slider はシミュレーションで利用するパラメータを設定するものであり、プログラム内のグローバル変数として扱われる。また、使い方次第で動的なパラメータとして使うことが可能であり、シミュレーションの実行中にも変数の値変更をシミュレーションに反映させることが可能である。PTSS の為の設定した 9 つの Slider を表 6 に示す。

表 6. PTSS の Slider 一覧

| 変数名         | 説明                    | 動的/静的 |
|-------------|-----------------------|-------|
| num-of-A    | 積極型心理の車両数 ( $N_A$ )   | 静的    |
| num-of-B    | 消極型心理の車両数 ( $N_B$ )   | 静的    |
| num-of-C    | 環境依存型心理の車両数 ( $N_C$ ) | 静的    |
| Accel-of-A  | 積極型心理の加速量 ( $a_A$ )   | 動的    |
| Accel-of-B  | 消極型心理の加速量 ( $a_B$ )   | 動的    |
| dec-of-A    | 積極型心理の減速量 ( $d_A$ )   | 動的    |
| dec-of-B    | 消極型心理の減速量 ( $d_B$ )   | 動的    |
| limit-speed | 制限速度 ( $v_{limit}$ )  | 動的    |
| judge-num   | 環境依存型の選択基準            | 動的    |

車の数は setup を実行したときのそれぞれの車の数に依存する。それ以外の 6 つの変数は動的なパラメータとして利用できる。実装方法について説明する。Slider の生成と編集の画面を図 6 に示す。

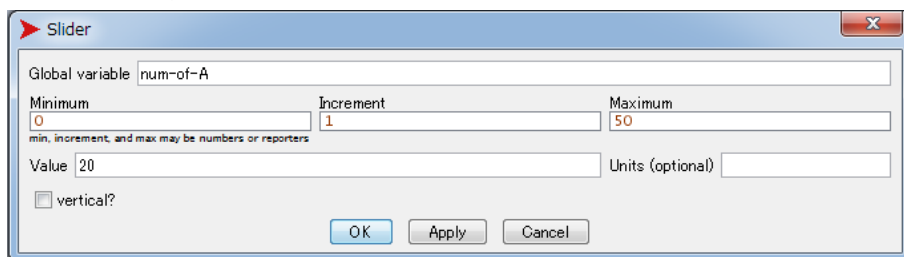


図 6. Slider の生成例 (num-of-A)

主な編集点 Global variable, Minimum, Increment, Maximum, Value について説明する。Global variable は変数名を決めるものであり、前述したように Code 内でグローバル変数として扱うことができる。Slider の値変更はシミュレーションの実行中にも反映されるので使い方次第では動的パラメータとして使うことができ、表 6 にはそれぞれの変数を動的か静的に使用しているかを示している。プログラムの実行関わるので Button の Displayname とは違い、同じ名前のもを作るとはできない。また、Global variable の場合はこれ自体がユーザー側にみえる設定パラメータ名になる。Button の Displayname のような見せるための名前設定は Slider には存在しない。Minimum, Maximum は Slider の最小値, 最大値を設定するものである。Increment は値変更の単位である。これによって小数値を含むか整数のみか等を決定づけることができる。例である図 6 では、num-of-A を積極型心理の車の数を決める

もとして使用するので、Increment を 1 とし車の台数は 0~50 としている。Value はそのシミュレーションを実行した際の初期値を決めるものである。表 6 で示した変数の Increment, Minimum, Maximum の設定状況を表 7 に示す。

表 7. Slider の設定範囲

| 変数名         | Increment | Minimum | Maximum |
|-------------|-----------|---------|---------|
| num-of-A    | 1         | 0       | 50      |
| num-of-B    | 1         | 0       | 50      |
| num-of-C    | 1         | 0       | 50      |
| Accel-of-A  | 0.0001    | 0       | 0.0099  |
| Accel-of-B  | 0.0001    | 0       | 0.0099  |
| dec-of-A    | 0.0001    | 0       | 0.0099  |
| dec-of-B    | 0.0001    | 0       | 0.0099  |
| limit-speed | 0.05      | 0.1     | 0.8     |
| judge-num   | 1         | 0       | 10      |

## 4.3 システム仕様

### 4.3.1 シミュレーションの設定 (setup) と実行 (go)

PTSS では大きく分けて設定 (setup) と実行 (go)2 つで構成されている。() 内はそれぞれ Button の名前である。setup では初期化 (clear-all), パッチの配置 (Set-road), タートルの配置 (setup-cars), ticks の初期化 (reset-ticks) を行い、Netlogo でのプログラムコードを図 7 に示す。

```
to setup
  clear-all
  Set-road
  setup-cars
  reset-ticks
end
```

図 7. プログラムコード : setup

clear-all は、Netlogo に組み込まれている命令であり、変数、ticks、タートル、パッチや Plot 等の描写全ての初期化を行う。パッチとは前述した通り Netlogo における背景、つまりパッチの配置 (Set-road) では道路の描画を行っている。この関数 Set-road で 3 車線道路を描画している。タートルの配置 (setup-cars) では Slider で設定している車両数に応じてランダムに車道としている範囲にタートル (車) を配置している。心理によって走行する車線を限定しており、消極型は左・中央車線の 2 車線のみの範囲、積極型と環境依存型は 3 車線全てに配置されるようにしている。環境依存型に関しては、消極型と積極型の走行法を選択する形になっているため配置された車線によって初期の心理選択を決めている。消極型の走行に右側走行時の行動パターンを用意していないため、右側車線に配置された環境依存型のタートルは強制的に積極型の走行を必ず選択するものとしている。左・中央車線に配置された環境依存型のタートルはランダムで消極型または積極型の走行を選択する。ticks とは並列システムのガードのような役割を担うものである。Netlogo では、各エージェントが独立して処理されている。処理のイメージを図 8 に示す。



図 8. ticks による処理 (左 : ticks 未使用時, 右 : ticks 使用時)

図 8 は 3 つのエージェント (turtle1, turtle2, turtle3) の処理を行っている例である。左図の ticks を使わない場合について、赤い部分は各エージェントがの初めの処理である。この場合 turtle2, turtle1, turtle3 の順で処理が終わり、それぞれが終わった後、独立的に次の処理に動いている。ticks を使っていない場合ではそれぞれが処理を終わ

るごとに描画が行われる。この場合だと 3 回描画することになる。それに対して ticks を使った場合 (図 8 の右図), 赤い部分の処理を終えた turtle1 と turtle2 は turtle3 の処理が終わるまで待機し, turtle3 が終わったとき 1 回にまとめて描画を行う。つまりエージェントの同期を行っている。ticks を使うことによって全てのエージェントが同時に動いているように見せかけることができる。エージェント数が多ければ多いほど ticks の利用は有効的になる。また ticks を使わない場合, 特にパッチの処理に時間がかかってしまう。パッチは小さなマスがたくさん敷き詰められているような状況なので ticks を使わない場合, 多数パッチが順に処理されることになるので ticks の使用が推奨される。Netlogo では ticks を使わない実行を continuous と呼び, ticks の処理を Code で実装していたとしても Interface のページで continuous と ticks の選択することも可能である。1step の処理は continuous では各エージェントの処理 1 回が 1step になり, ticks の場合はまとめた 1 回が 1step になる。reset-ticks は tick の値を 0 にする。clear-all の中には clear-ticks という命令も含まれているが, clear-ticks は 0 というよりも値なしにするものである。reset-ticks によって値を 0 にすることによって, plot 等の時系列更新の準備が行われるので, この文は clear-ticks の処理後に必要になる。

次に実行 (go) について説明する。go は消極型タートル, 積極型タートル, 環境依存型タートル, tick による同期の順で処理を行い, そのプログラムコードを図 9 に示す。

```
to go
  ;; blue car's case
  ask turtles with [color = blue] [Defensive]

  ;; red car's case
  ask turtles with [color = red] [Aggressive]

  ;; violet car's case
  Dual
|
  tick
end
```

図 9. プログラムコード : go

プログラムについて解説する。Netlogo ではタートルへの命令を記述する際, ask turtles [命令] という手順で記述する。この場合は全てのタートルに対して命令する。図 9 のような ask turtles with [color = blue] [Defensive] というように記述した場合, [color = blue] という部分はどのようなタートルに対する命令かを指定することができ, タートルの色が青色のものを指定している。PTSS では消極型タートルを青色, 積極型タートルを赤色にしているのでこのように指定している。また, Defensive や Aggressive はそれぞれ消極型と積極型の処理内容を記述している関数名であり, それを呼んでいることになる。Dual というのは環境依存型のための関数である。Defensive と Aggressive に比べて Dual では ask 文を使っていない。これは環境依存型が状況に応じて消極型または積極型の行動ととしてしているので, Dual 関数内で ask 文を使い Aggressive や Defensive を呼び出しているのがこのようにしている。最後に tick という文について, 前述した通りこの tick 文によって全てのタートルが同時に並行処理されているようにみせている。Netlogo は英語ベースの思考で作られている為, 単語の単数・複数系によって意味が異なっている。1 回という意味でここでは tick とプログラムに記述され, 複数系の意味するときは ticks と記述を要求される。また, go 関数内では繰り返し処理を表現していないが, Button の Forever によって繰り返し処理を行う。Code 内でループ処理を記述する必要がないのが Netlogo の特徴である。また, Forever のチェックを外せば, 1step ずつ様子を見ることがができる。ticks を利用しているのでここでの 1step とは全てのタートルがそれぞれ 1 回処理を行うことを意味する。次に消極型, 積極型, 環境依存型タートルの処理について順に説明する。

#### 4.4 各心理のタートル処理

3.A~D で紹介した Psychological Traffic モデルを Netlogo でそれぞれ実装した内容を説明する。まずは 3.A の消極型心理の処理についてである。消極型の心理は左側 2 車線上で走行すると述べた。この走行法で考えられるシチュエーションと行動パターンは表 1, 2 で示されており, これをシステムとしてフローチャートにしたとき図 10 のようになる。

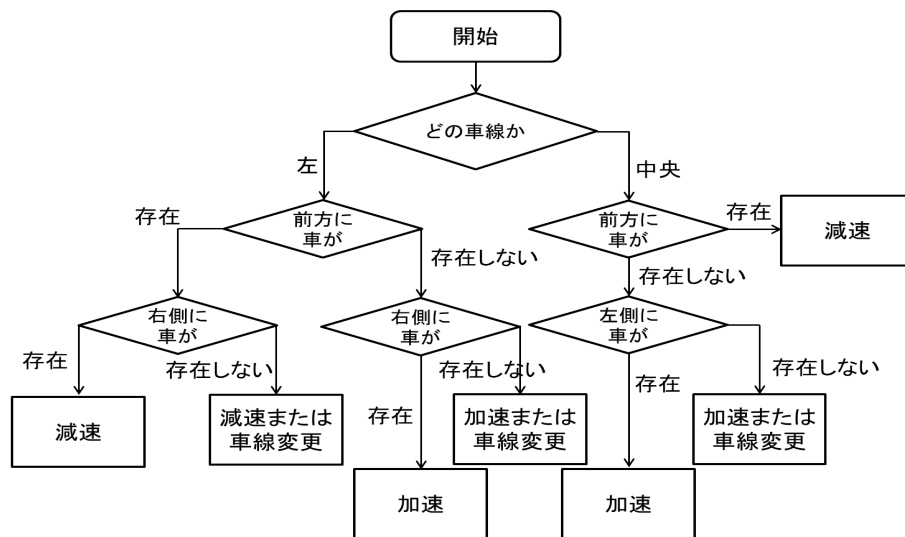


図 10. 消極型心理のフローチャート

プログラムの処理の流れに落としたとき，if，if-else 文を使って車線の確認，前方の車の有無，隣の車線の有無の順にした．積極型心理も同様な順である．表 3～5 のシチュエーションと行動パターンに従って積極型心理も同様にフローチャートを作ることができる．環境依存型の場合は少し異なり，図 11 のようになっている．

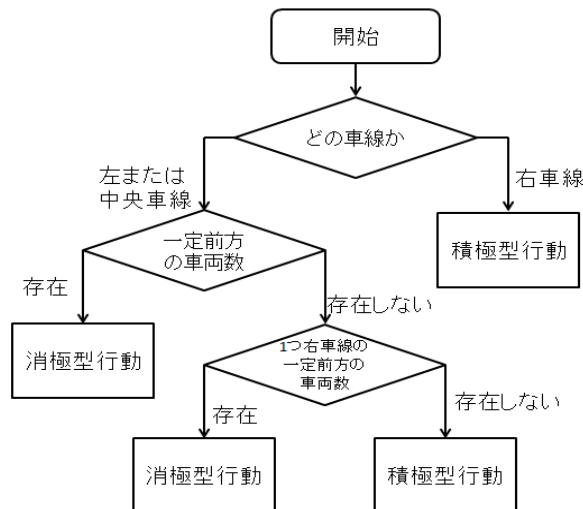


図 11. 環境依存型心理のフローチャート

左・中央車線時は常に一定前方と一つ右車線の一定前方の車両数を確認し，右側車線時は積極型行動としている．前方の車の有無，隣の車線の有無の詳細について説明する．Netlogo には他のタートルの存在を確認する方法が 2 つある．点で捉える方法と範囲で捉える方法である．例えば前方の車の存在を確認したい時のイメージ図を図 12 に示す．

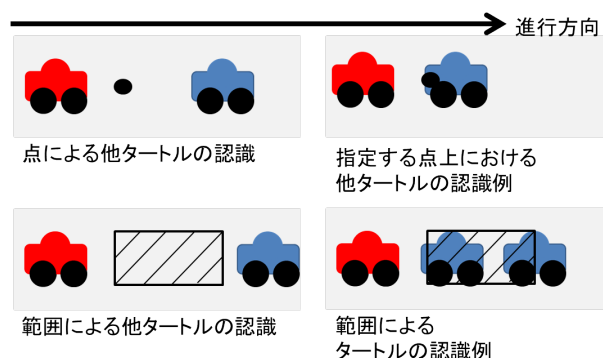


図 12. 点または範囲による他タートル認識のイメージ

図 12 はそれぞれ赤い車が他の車を Netlogo で点または範囲で認識しようとしているイメージ図である。図 12 をみた場合では範囲で捉える方法が有効であると思われるが、この 2 つの方法は返り値が異なる。点で捉える場合：確認したタートルのオブジェクトを取得、範囲で捉える場合：範囲内のタートルの数を取得する、という仕様になっている。点を使った方法ではタートルのオブジェクトのようなものを取得することにより、それを一時的に変数に入れることによってそのタートルのインスタンス変数を取得することができる。具体的にプログラムコードを使って説明する (図 13)。

```
let car-ahead one-of turtles-on patch-ahead 1
ifelse car-ahead != nobody
[ set speed [speed] of car-ahead
  slow-down-car ]
```

図 13. 点でタートルを捉えるプログラム例

まず一行目について。let car-ahead は関数型のプログラム言語でよくみる局所変数の宣言、つまり car-ahead という変数を宣言している。次にその後ろの one-of turtles-on この部分がタートルの 1 つを指定している。patch-ahead 1 は 1 前方のパッチに存在するという意味であり、まとめると 1 前方のパッチに存在するタートルを変数名 car-ahead に代入という意味である。1 とは座標の値でありここではタートル 1 個分程度の大きさと認識してほしい。この文は turtles への命令内のみで使え、なぜなら 1 前方という基準はその処理を行うタートルの座標を基準にしているからである。また前方ということでタートルの組み込まれている変数 (インスタンス) には heading という向きを指すものがある。heading は 0~360 の角度であり、y 軸正方向が 0 という基準で右回りになっている。車の進行方向は heading を 90 としている。次に ifelse car-ahead != nobody は if-else 文であり、1 行目でタートルを発見できなかった場合、car-ahead には nobody という値が代入されているのでここで前方の車の有無の判断ができる。nobody の時 3, 4 行目の内容を処理される。3 行目の set speed [speed] of car-ahead はこのタートルの speed という変数に car-ahead の speed を代入するという文である。speed というのはタートルに組み込んだ変数である。主体となるタートル側から他のタートルの変数を呼び出しは、[変数名] of 対象のタートル というように記述する。3.D モデル定義での図 3 の (2) 先行者を原因とする減速  $v_{alp,i}(t) \leftarrow v_j - d_{alp}$  の式の中の前方の車の速度を示している  $v_j$  の部分がこの 3 行目で実現している。4 行目の slow-down-car は  $-d_{alp}$  の部分の減速処理を行っている関数として記述している。点で捉える場合はこのように他のタートルのもつ変数を取得できるので減速に関わる前方の車の有無ではこの方法を使って実現している。

次に隣車線の車の有無について説明する。この実現には点で捉える方法は使わずに範囲で捉える方法を使って実装している。点では走っている場所を基準に 1 点しか探すことができないが、この場合だと検知できない可能性が高い。隣車線の車の有無は車線変更行動に関わるものであり、発見した車の速度に応じて何かをするというわけではなく車線変更を行うかどうかの判断のみなので範囲で捉える方法を利用している。車線変更を試みるための隣車線の検知する範囲は自身を基準に -2~+1 と定めている (タートル 3 個分程度の範囲)。この範囲内でタートルが 1 つでも存在すれば車線変更せず、そうでないときは車線変更を試みている。また、環境依存型の一定前方の車両数と 1 つ右車線の一定前方の車両数も範囲で捉える方法を使って実装している。ここでは自身を基準に +8 までの範囲と定めた。車両数の判断は表 6 内の judge-num の数に応じて行っている。

## 4.5 車線調整と車線変更

車線調整と車線変更について詳しく説明する。Netlogo においてタートルの位置は座標で決められ、移動は座標データの連続的な更新によって実現している。x 座標は -24~24, y 座標は左車線 1, 中央車線 0, 右車線 -1 として作っている。その範囲内をタートルが x 軸正の方向に動き、タートルの  $x > 24$  を超えるとき x が -24 側に飛んで繰り返し走行している。つまり、周回コースを走行しているようなものである。そして車線変更は例えば中央車線から右車線へ移るときは y 座標が 0 から -1 へ飛ぶのではなく、タートルが向きを保持しているのでその変更によって実現している。従来のセルオートマトンモデルでは大量のマスを用意してマスをワープして動くように作られているものもあるが、PTSS はそうではない。PTSS ではより実世界の交通のように表現することを目指しているため、このような実装を行っている。例えば、車線変更を試みようとしたとき、車線変更を始めるが状況によっては元の車線に戻

ることが実世界ではある．この具体例としては，自分が左車線から中央車線へ車線変更している途中に右側車線から中央車線に車線変更してきた車がいたとき，どちらかが戻るということが起きる．そうでなければ接触事故が起きてしまう．このような現象を再現するために車線変更も向きの変更による移動で実現している．それではその具体的な実装について解説する．

#### 4.5.1 先行研究：2車線道路における車線調整方法

先行研究”Netlogo を用いた心理的状況を反映した交通シミュレーション”[7] では2車線の高速道路シミュレーションを行っている．本研究の3車線道路の車線調整方法が異なるため，まずはじめに2車線の場合について説明をし違いを示す．2車線道路各車線での車線変更の軌道イメージを図14に示す．

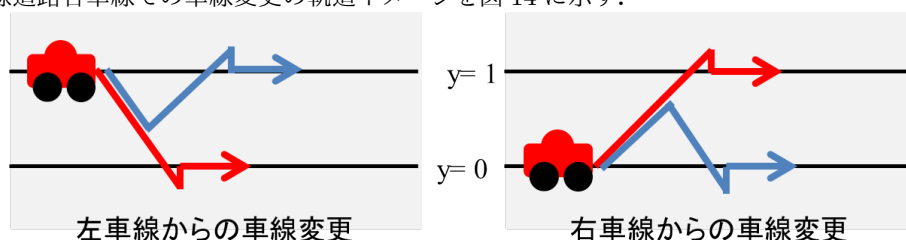


図14. 2車線での車線変更による軌道パターン (左図：左車線走行，右図：右車線走行)

図14の2車線道路では  $y = 1$  を左車線， $y = 0$  を右車線として実装している．各車線大きく2分けてパターンの車線変更の軌道があり，隣車線へ移動した場合 (図14内の赤線の軌道) と，車線変更を試みたが途中で引き返して元の車線に戻る場合 (図14内の青線の軌道) である．2車線での車線変更では，走行車線を基準にタートルの向きを変えて移動を行い，左車線から右車線への車線変更の例では (図14の左図の赤線)，タートル  $y$  座標が  $y < 0$  を満たした時， $y = 0$  にして，向きを横向きにする．右車線から左車線への車線変更では (図14の右図の赤線)， $y > 1$  を満たしたとき  $y = 1$  にして，そして向きを横向きにするという方法で実現している．

#### 4.5.2 本研究の車線調整方法

2車線道路の時の実装方法を示した．同様の手法で試みたときの3車線道路での軌道イメージを図15に示す．

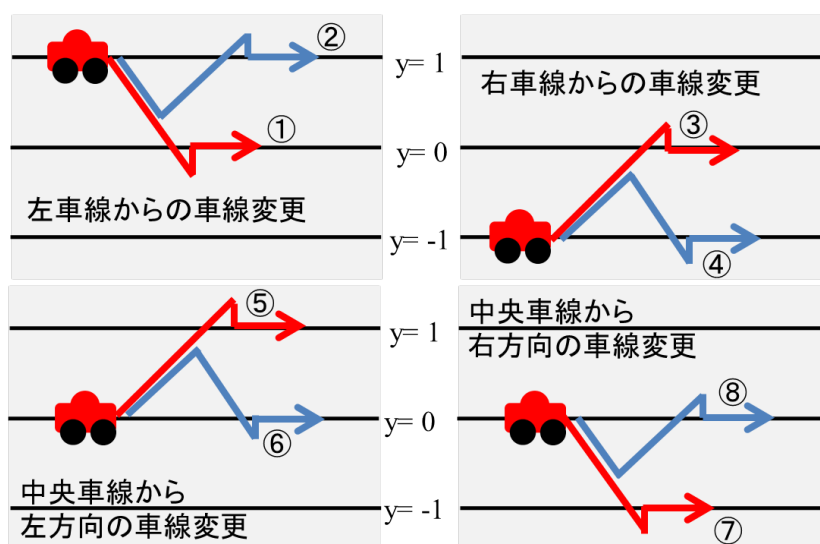


図15. 3車線での車線変更による軌道パターン (左上図：左車線走行，右上図：右車線走行，下図：中央車線走行)

図15の3車線道路では  $y = 1$  を左車線， $y = 0$  を中央車線， $y = -1$  とする．このときの車線変更は大きく分けた場合8パターンが考えられ，各パターン①～⑧とする (図15参照)．②，⑤の場合は  $y > 1$ ，④，⑦の場合は  $y < -1$  を満たしたときそれぞれ  $y = 1$  または  $-1$  と向きを横向きに設定するという2車線と同じ方法で実現できる．しかし，①，③，⑥，⑧の軌道パターンでは， $y > 0$  または  $y < 0$  を満たしたときに横向きに設定するという単純な方法

では成り立たない．この問題を解消するために，line という変数をタートルに組み込み，その値の管理で車線調整を実現した．PTSS は将来研究に合流車線も考慮して実装している．本論文では主に 3 車線の交通シミュレーションのみについて述べているが，4 車線の道路を既に用意しているのでこの場合について具体的に説明する．タートルに対して車線調整のために line という変数を持たせた．タートルの y 座標に応じて line に 0～6 の整数を代入してその値によって調整を行う．y の範囲による line の値と図を以下に示す (図 16)．

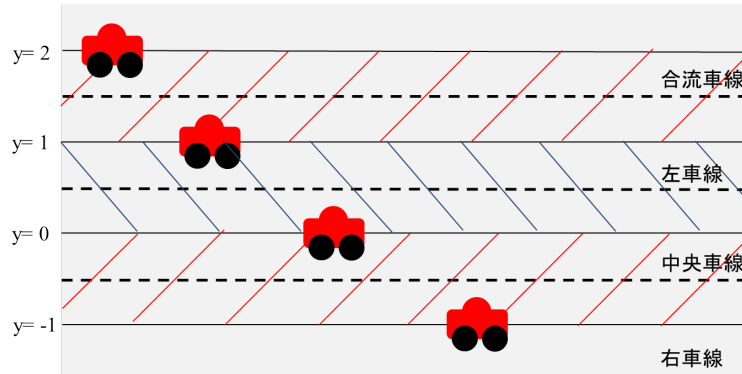


図 16. 車線調整 (点線：車線の境目，実線：y 座標を明示)

- $y = 2$  のとき      line = 0
- $1 < y < 2$  のとき line = 1
- $y = 1$  のとき      line = 2
- $0 < y < 1$  のとき line = 3
- $y = 0$  のとき      line = 4
- $-1 < y < 0$  のとき line = 5
- $y = -1$  のとき      line = 6

図 16 を含め以上の示したものと Communicating Sequential Processes(以下 CSP)[10] を使って式を記述する．CSP は並列動作を表現できるプロセス代数であり形式言語の一つである．近年では，検証ツールによって CSP の記述式を論理的に解析できる．ここでは PAT3 を使って，車線調整の式を表現し検証を行った．PAT3 に記述した CSP 式を図 17 に示す．

```

1  Line0 = right -> Line1 [] straight -> Line0;
2  Line1 = left -> Line0 [] right -> Line2;
3  Line2 = left -> Line1 [] right -> Line3 [] straight -> Line2;
4  Line3 = left -> Line2 [] right -> Line4;
5  Line4 = left -> Line3 [] right -> Line5 [] straight -> Line4;
6  Line5 = left -> Line4 [] right -> Line6;
7  Line6 = left -> Line5 [] straight -> Line6;
8  System = Line0;
9
10 #assert System divergencefree;

```

図 17. PAT3 による車線調整 CSP 式

左辺の Line0～Line6, System をそれぞれプロセス呼ばれ，right, left, straight はイベントという CSP における最小の単位である．例として 1 行目を説明する．line=0 のときを Line0 というプロセス名で表現し，Line0 では right という動作の後 Line1 に遷移する，または straight という動作の後，Line0 に遷移する (この場合は再帰) という意味である．[] は外部選択と呼ばれる選択を表現している．右方向への車線変更を right, 左方向への車線変更を left, 進行方向への直線移動を straight と名付けている．図 16 を参考にすると，合流車線上からの行動を Line0 では表現している．line=n のとき，Line n というプロセスとして 1～7 行目の式で 4 車線における CSP 式で表現している．8 行目はこの後の遷移グラフのスタート基準を示す式であり，10 行目は検証のための式である．divergencefree は全てのプロセス，イベントを到達できるかどうかを検証する．検証結果と CSP 式によるグラフを示す (図 18)．

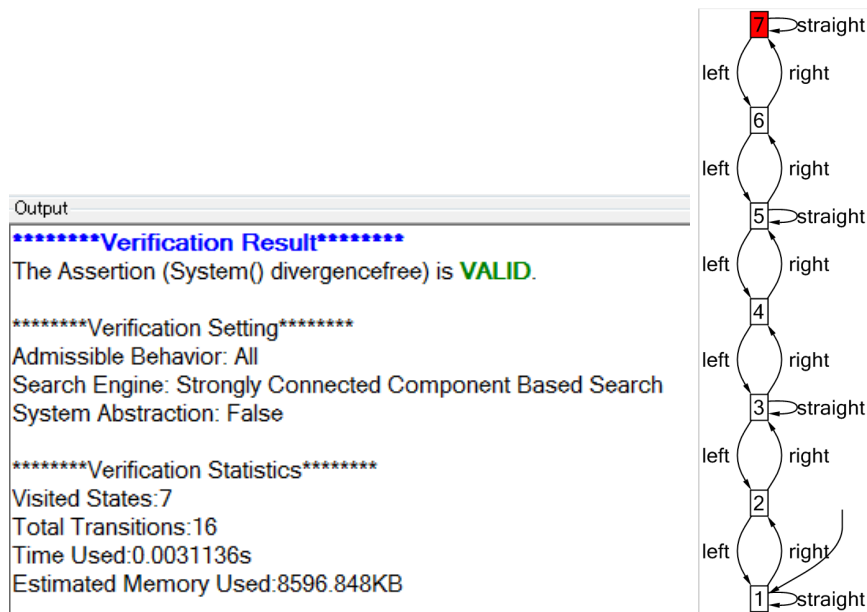


図 18. 左図：検証結果，右図：状態遷移

図 18 の左図は divergencefree の検証結果である．上部の VALID は正当であることを示し，つまり表現した CSP 式は全てのプロセス，イベントに到達できていることが確認できた．また，Verification Statistics では状態遷移の数や遷移パターン数がわかる．右図は CSP 式から判断される自動生成された遷移図である．これは Line0 からの遷移を 1 から始めている．遷移図をみると 1, 3, 5, 7 が合流車線，左車線，中央車線，右車線の状態にであり，2, 4, 6 がそれぞれ車線の間状態である．イベント straight から判断ができる．この状態遷移により，実現を目指していた車線変更を試みたけども元の車線に戻るというトレースが辿れる．例えば 1 の状態から left, right によってまた 1 に戻ってくる．注意としては，場合によってこのルールでは車線と車線の間で右，左にジグザグに迷うような行動が予測される．進行方向に真っ直ぐ走っているイベント straight を用意しているが，straight を使わないトレースが作れてしまう．しかしそれは実装の段階で車線変更を試みるときに十分な空間を認識してから車線変更を実行させているので，車線の間でさまよう現象を回避できている．

## 5 走行法の検討実験

PTSS を用いた交通シミュレーションの実験例を紹介する．車両数と速さに関して全 44 パターンの実験を行った．全車両数  $N$  は 60 の固定とし、それぞれ 20 台のとき ( $N_A, N_B, N_C = 20$ )，1 種 30 台他 2 種 15 台ずつ (例： $N_A = 30, N_B = 15, N_C = 15$ ) の全 4 パターンで行った．PTSS で配置できる車両数は最大で 147 台までになっており，1 車線あたり 49 台まで配置できる．これは幅  $L=49$  ( $-24 \leq x \leq 24$ ) に対して大きさ 1 のタートルが配置されていることが理由である．つまり 60 台は，最大配置量に対して 40% 程度の車両数と認識してほしい．次に加速量と減速量のパラメーター一覧 (全 11 パターン) を表 8 で示し，制限速度  $\text{limit-speed}=0.30$ ， $\text{judge-num}=4$  の固定とした．この実験を通して自動走行運転システムの走行法について考察する．

Netlogo では様々なデータを Plot という機能で時系列データをグラフ表示でき，またそのグラフの中身を csv ファイルで出力することが可能である．実験結果のグラフ例を図 19 に示す．

結果例では，平均速度 ( $V_A(t), V_B(t), V_C(t)$ )，制限速度  $v_{\text{limit}}$ ，希望最高速度の平均 ( $\text{Max } V_A, V_B, V_C$ ) をグラフ出力している．x 軸に並行な 4 線は上から  $\text{Max } V_A, V_C, V_B$ ，制限速度  $v_{\text{limit}}$ ．その他の時系列データが平均速度である．また，同時に平均満足度 ( $P_A(t), P_B(t), P_C(t)$ ) を別のグラフで出力している．本実験は 1 回の実験を  $2000\text{step}(T=2000)$  とし，1 パターンに対して 1000 回分データを集計した．各回分のデータを用いて最終的に平均速度，平均満足度，平均移動量，平均速度の分散を実験結果として紹介する．

表 8. 実験パラメーター一覧

| 番号 | Accel-of-A | Accel-of-B | dec-of-A | dec-of-B |
|----|------------|------------|----------|----------|
| ①  | 0.0010     | 0.0010     | 0.0010   | 0.0010   |
| ②  | 0.0010     | 0.0010     | 0.0010   | 0.0015   |
| ③  | 0.0010     | 0.0010     | 0.0010   | 0.0020   |
| ④  | 0.0010     | 0.0010     | 0.0015   | 0.0015   |
| ⑤  | 0.0010     | 0.0010     | 0.0015   | 0.0020   |
| ⑥  | 0.0010     | 0.0010     | 0.0020   | 0.0020   |
| ⑦  | 0.0015     | 0.0010     | 0.0010   | 0.0010   |
| ⑧  | 0.0015     | 0.0015     | 0.0010   | 0.0010   |
| ⑨  | 0.0020     | 0.0010     | 0.0010   | 0.0010   |
| ⑩  | 0.0020     | 0.0015     | 0.0010   | 0.0010   |
| ⑪  | 0.0020     | 0.0020     | 0.0010   | 0.0010   |

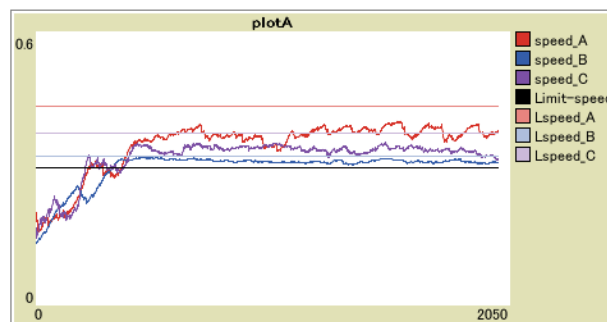


図 19. 実験結果例

## 5.1 実験結果の集計法

Netlogo ではデータのグラフ化と結果を csv ファイル出力できることを紹介した。出力される csv ファイルの例は以下である (図 20)。

|    | A                                          | B          | C        | D         | E          | F           | G           | H              | I         | J        | K     | L         | M  | N             | O     | P         | Q  | R          | S     | T         | U     |
|----|--------------------------------------------|------------|----------|-----------|------------|-------------|-------------|----------------|-----------|----------|-------|-----------|----|---------------|-------|-----------|----|------------|-------|-----------|-------|
| 1  | export-plots data (NetLogo 5.0.4)          |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 2  | PsychologicalTrafficSimulationSystem.nlogo |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 3  | 11/06/2013 15:20:12.642 +0900              |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 4  |                                            |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 5  | MODEL SETTINGS                             |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 6  | dec-of-a                                   | accel-of-t | num-of-c | num-of-a  | accel-of-a | dec-of-b    | limit-speed | judge-num      | num-of-b  |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 7  | 0.001                                      | 0.001      | 20       | 20        | 0.001      | 0.001       | 0.3         | 5              | 20        |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 8  |                                            |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 9  | "plotA"                                    |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 10 | x min                                      | x max      | y min    | y max     | autoplot?  | current-pen | legend-open | number-of-pens |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 11 | 0                                          | 2050       | 0        | 0.5       | TRUE       | "speed_A"   | FALSE       | 7              |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 12 |                                            |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 13 | pen name                                   | pen down?  | mode     | interval  | color      | x           |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 14 | "speed_A"                                  | TRUE       | 0        | 1         | 15         | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 15 | "speed_B"                                  | TRUE       | 0        | 1         | 105        | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 16 | "speed_C"                                  | TRUE       | 0        | 1         | 115        | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 17 | "Limit-speed"                              | TRUE       | 0        | 1         | 0          | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 18 | "Lspeed_A"                                 | TRUE       | 0        | 1         | 17         | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 19 | "Lspeed_B"                                 | TRUE       | 0        | 1         | 106        | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 20 | "Lspeed_C"                                 | TRUE       | 0        | 1         | 118        | 2001        |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 21 |                                            |            |          |           |            |             |             |                |           |          |       |           |    |               |       |           |    |            |       |           |       |
| 22 | "speed_A"                                  |            |          |           | "speed_B"  |             |             |                | "speed_C" |          |       |           |    | "Limit-speed" |       |           |    | "Lspeed_A" |       |           | "Lspe |
| 23 | x                                          | y          | color    | pen down? | x          | y           | color       | pen down?      | x         | y        | color | pen down? | x  | y             | color | pen down? | x  | y          | color | pen down? | x     |
| 24 | 0                                          | 0.211683   | 15       | TRUE      | 0          | 0.153259    | 105         | TRUE           | 0         | 0.180645 | 115   | TRUE      | 0  | 0.3           | 0     | TRUE      | 0  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 0     |
| 25 | 1                                          | 0.185991   | 15       | TRUE      | 1          | 0.1502      | 105         | TRUE           | 1         | 0.161073 | 115   | TRUE      | 1  | 0.3           | 0     | TRUE      | 1  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 1     |
| 26 | 2                                          | 0.188668   | 15       | TRUE      | 2          | 0.150175    | 105         | TRUE           | 2         | 0.164988 | 115   | TRUE      | 2  | 0.3           | 0     | TRUE      | 2  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 2     |
| 27 | 3                                          | 0.184524   | 15       | TRUE      | 3          | 0.146742    | 105         | TRUE           | 3         | 0.169431 | 115   | TRUE      | 3  | 0.3           | 0     | TRUE      | 3  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 3     |
| 28 | 4                                          | 0.185994   | 15       | TRUE      | 4          | 0.147406    | 105         | TRUE           | 4         | 0.1661   | 115   | TRUE      | 4  | 0.3           | 0     | TRUE      | 4  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 4     |
| 29 | 5                                          | 0.18712    | 15       | TRUE      | 5          | 0.148184    | 105         | TRUE           | 5         | 0.171101 | 115   | TRUE      | 5  | 0.3           | 0     | TRUE      | 5  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 5     |
| 30 | 6                                          | 0.188472   | 15       | TRUE      | 6          | 0.148304    | 105         | TRUE           | 6         | 0.175046 | 115   | TRUE      | 6  | 0.3           | 0     | TRUE      | 6  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 6     |
| 31 | 7                                          | 0.19013    | 15       | TRUE      | 7          | 0.149088    | 105         | TRUE           | 7         | 0.175581 | 115   | TRUE      | 7  | 0.3           | 0     | TRUE      | 7  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 7     |
| 32 | 8                                          | 0.191251   | 15       | TRUE      | 8          | 0.149676    | 105         | TRUE           | 8         | 0.173486 | 115   | TRUE      | 8  | 0.3           | 0     | TRUE      | 8  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 8     |
| 33 | 9                                          | 0.192677   | 15       | TRUE      | 9          | 0.150782    | 105         | TRUE           | 9         | 0.178221 | 115   | TRUE      | 9  | 0.3           | 0     | TRUE      | 9  | 0.455201   | 17    | TRUE      | 9     |
| 34 | 10                                         | 0.18854    | 15       | TRUE      | 10         | 0.151609    | 105         | TRUE           | 10        | 0.179125 | 115   | TRUE      | 10 | 0.3           | 0     | TRUE      | 10 | 0.455201   | 17    | TRUE      | 10    |
| 35 | 11                                         | 0.189837   | 15       | TRUE      | 11         | 0.152259    | 105         | TRUE           | 11        | 0.182473 | 115   | TRUE      | 11 | 0.3           | 0     | TRUE      | 11 | 0.455201   | 17    | TRUE      | 11    |

図 20. 出力される csv ファイル例

出力される csv ファイルにはそのシミュレーションのパラメータや時系列データが出力される。csv ファイル出力するときの step 数に応じて csv ファイルに記述されるセルの場所がずれるが (時系列データであるため)、本実験では 2000step という固定のタイミングで csv ファイル出力に成功したので、結果のセルの位置を固定することができた。これを利用して VBA を使って集計を行った。手順としては、csv ファイルを 1 パターンに対して 1000 ファイル生成し、それを集計する、この際にそのパラメータの平均等処理する。44 パターン分の集計後、車両パターン毎に分けて集計し、グラフ化を行った。その集計データを次章で紹介する。

## 6 実験結果と考察

44 パターンの実験結果を通して、どのような走行法が優位的か考察する．種類が多い為，ここで実験結果を指す用語を定義する．車両数のパターンについては  $N_A = 30$  (他 2 種 15 ずつ) の時実験 A，同様に  $N_B$  は実験 B， $N_C$  は実験 C，そしてそれぞれ 20 台の時を実験 D とし，(車両数のパターン)-(パラメータパターン (表 8 参照)) とする．例えば， $N_A = 30$ ， $N_B = 15$ ， $N_C = 15$ ，各パラメータ 0.0010 のときは A- ①と示す．パラメータの種類は全てのパラメータ 0.0010 の①基準に減速のみ変化させたものを②～⑥，加速のみ変化させたものを⑦～⑪としている．②～⑥の減速量の大小関係は積極型  $\leq$  消極型，⑦～⑪の加速量の大小関係は積極型  $\geq$  消極型としている．

### 6.1 分散による渋滞発生有無の分類

始めに実験 1000 回の積極型心理の速度に関する分散結果 (実験 A～D) を図 21 に示し，交通流における高速道路の交通基本図の例を図 22 に示す．

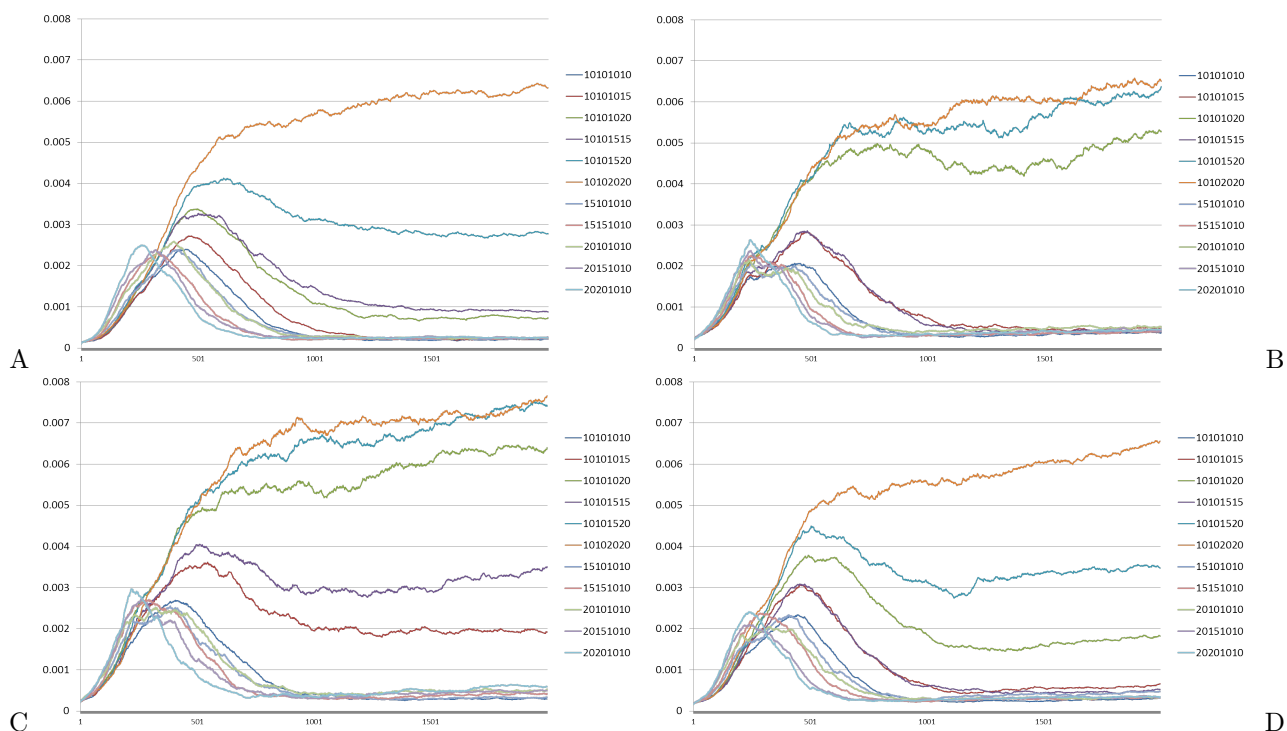


図 21. 積極型心理の平均速度に関する分散 (左上：実験 A，右上：実験 B，左下：実験 C，右下：実験 D)

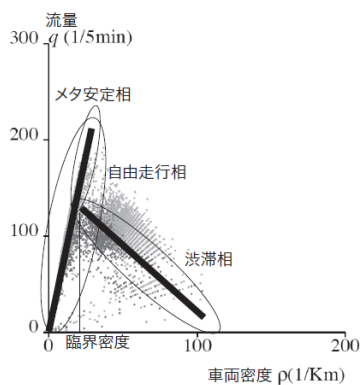


図 22. 高速道路における交通基本図の例

高速道路における交通基本図 (図 22) では，臨界限度を境にメタ安定相または渋滞相が現れる (横軸：車両密度，縦軸：流量)．分散のグラフ (横軸：時間 (step)，縦軸：分散値) では  $t$  が 300～500 前後で山なりの結果になり， $t \geq 1000$  では多くが低い値を維持している．分散値が低い時は，メタ安定相に入り速度が安定していることが予測できる．

部結果は  $t \geq 1000$  でも分散値が大きくなっている。その結果になっているパラメータは図 21 内の上から ⑥, ⑤, ③ が顕著にみられる。これらのパラメータの特徴は他のパラメータに比べて減速度が大きいことである。渋滞発生の原因の 1 つは車の減速の連鎖反応によって生じることである。減速度が大きほど、その様子が顕著になることから ⑥, ⑤, ③ のときに渋滞が発生したケースが多いために分散値が多くなったのではないかと推測した。実際に渋滞が発生した場合の実験結果例を図 23 に示す。

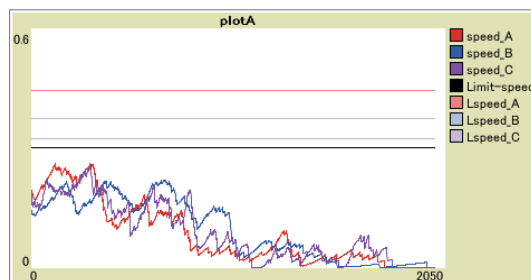


図 23. 渋滞発生時の結果例

高速道路における交通基本図の例では、臨界限度を境に渋滞相またはメタ安定相を見分けられる。分散の結果では  $t=1000$  を前後で分散値低くなっているものが多いので、この付近では全体的に臨界限度を過ぎている可能性がある。本実験では、渋滞発生した結果とそうでない結果の分離を試みた。 $t=1000$  では臨界限度を過ぎていると仮定して  $\sum_{t=1001}^{2000} V_A(t) \geq 300$  を満たした時、渋滞が発生、満たさないときは渋滞発生せず快適に走行しているものとして分離を試みた。基準としている 300 は制限速度 (0.30) を 1000step 走行した場合の計算から選択している。この試行による各パラメータの渋滞発生回数を表 9 に示す。この渋滞発生の結果を取り除いた実験結果の分散は図 24 である。

表 9. 各パラメータでの渋滞発生数 (1000 回中)

| 実験番号 | 渋滞発生数 | 実験番号 | 渋滞発生数 | 実験番号 | 渋滞発生数 | 実験番号 | 渋滞発生数 |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| A-①  | 0 回   | B-①  | 0 回   | C-①  | 1 回   | D-①  | 0 回   |
| A-②  | 1 回   | B-②  | 4 回   | C-②  | 19 回  | D-②  | 3 回   |
| A-③  | 8 回   | B-③  | 68 回  | C-③  | 92 回  | D-③  | 14 回  |
| A-④  | 10 回  | B-④  | 1 回   | C-④  | 33 回  | D-④  | 3 回   |
| A-⑤  | 36 回  | B-⑤  | 88 回  | C-⑤  | 154 回 | D-⑤  | 34 回  |
| A-⑥  | 81 回  | B-⑥  | 103 回 | C-⑥  | 173 回 | D-⑥  | 65 回  |
| A-⑦  | 0 回   | B-⑦  | 0 回   | C-⑦  | 1 回   | D-⑦  | 1 回   |
| A-⑧  | 0 回   | B-⑧  | 0 回   | C-⑧  | 1 回   | D-⑧  | 0 回   |
| A-⑨  | 0 回   | B-⑨  | 1 回   | C-⑨  | 2 回   | D-⑨  | 0 回   |
| A-⑩  | 0 回   | B-⑩  | 0 回   | C-⑩  | 1 回   | D-⑩  | 0 回   |
| A-⑪  | 0 回   | B-⑪  | 0 回   | C-⑪  | 2 回   | D-⑪  | 0 回   |
| 合計   | 136 回 | 合計   | 265 回 | 合計   | 479 回 | 合計   | 120 回 |

表 9 ではどの車両数のパターンでも、⑥, ⑤, ③ の順で渋滞発生回数が多い。これは図 21 の分散の値が大きくなっているものと同様の順である。減速度の大きさによって渋滞発生率が高くなっているのではないかとこの仮説が事実となった。渋滞発生数の合計数に関しては実験 C, B, A, D の順となった。実験 A と D に関しては僅かな差であるが、実験 B, C は一番少ない実験 D と比較したとき、実験 B とは 2 倍以上、実験 C に関してはほぼ 4 倍の差がみられた。この結果から提案する 3 種の心理の車両数の割合が交通状況の変化に影響するといえる。環境依存型心理は周囲の状況に応じて積極型または消極型の走り方をするとして定めている。推測ではこの車両によって交通流はよくなるのではないかとおもわれたが、実験 C の渋滞発生数からむしろ渋滞の発生率が上がっていることが現段階では示される。実験 B の場合では、現実世界の交通に例えると休日しか運転しないサンデードライバーが多い交通状況と考えたとき、渋滞の発生率が高くなっていることに合点がつく。しかし、実験 A と実験 D を比較した時に関しては実験 D のほうが少ないことに疑問が生じる。積極型が多い実験 A のほうが速く走ろうと思う人が多い状況のほうが、渋滞発生しにくいのではないと思えるからである。これに関しては今回の走り方の定義が関係していると推測する。消極型

は3車線中左側2車線のみ走行，積極型は3車線中全てを走行すると定めているが，実際はほぼ右側2車線を走行する．なぜなら，積極型の走行に中央車線から左側車線への車線変更は今回用意していないからである．積極型の走行で左側車線を走るケースはシミュレーション開始時に左側車線に配置されてその車が中央車線に移動するまで，または環境依存型が左側車線走行時に積極型の走行を選択した時という2ケースしか主に存在しない．つまり心理による車両の割合が各車線の車両数の割合にも左右することになる．実験Aが実験Dよりも渋滞発生が多くなった原因は，この車線による車両数の割合が引き起こしているのではないかと考えられる．

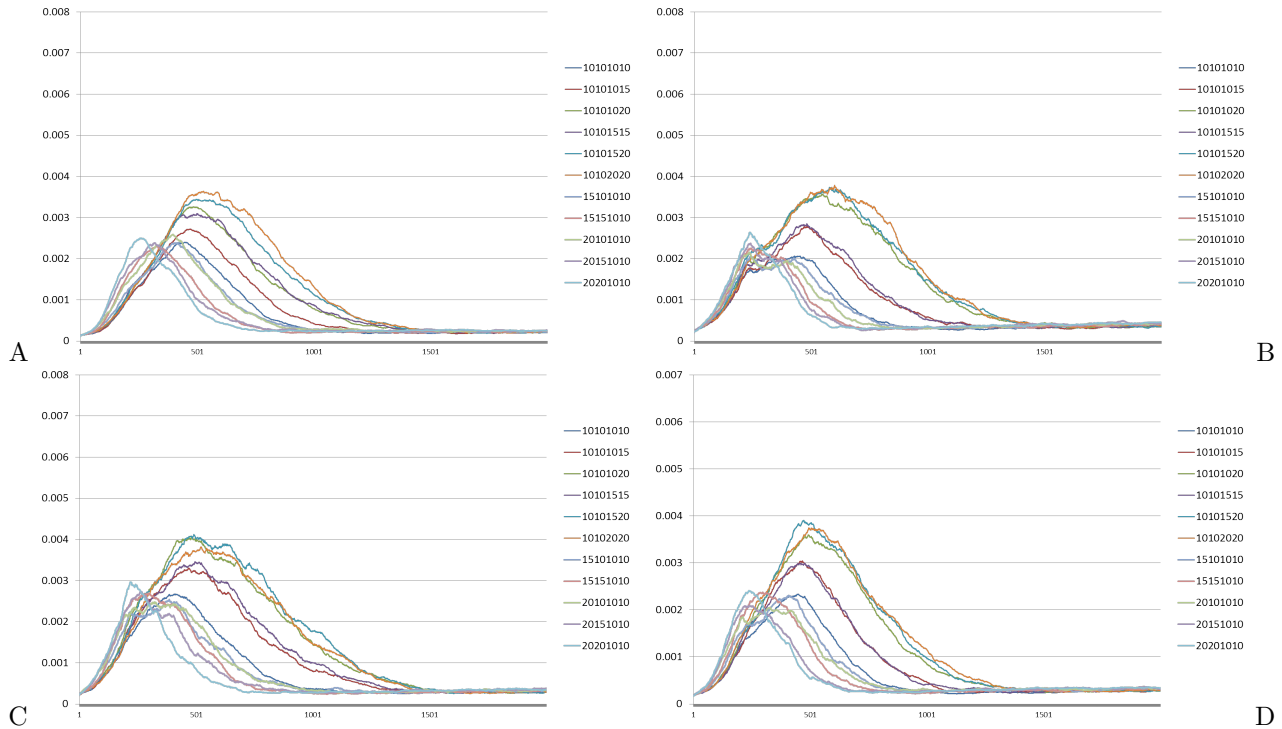


図 24. 渋滞を取り除いた時の分散 (左上：実験 A，右上：実験 B，左下：実験 C，右下：実験 D)

渋滞発生の結果を取り除いた実験結果の分散を示す図 24 では， $t \geq 1000$  以降で図 21 と比較したとき分散値を低くすることができた．この結果の中でも分散値がより大きい傾向のものがあ，これは臨界限度の位置が遅いことが予測される．以降の実験では，この渋滞発生した結果を取り除いた実験結果を集計したものを使用する．それぞれ平均値を示しているが渋滞発生数の違いによって母数に少し違いがあることに留意してほしい．

## 6.2 平均速度

積極型心理の平均速度のグラフを図 25 に示す．上から実験 A～D の順であり，左列は①～⑥の結果，右列が①と⑦～⑪の結果を示している．

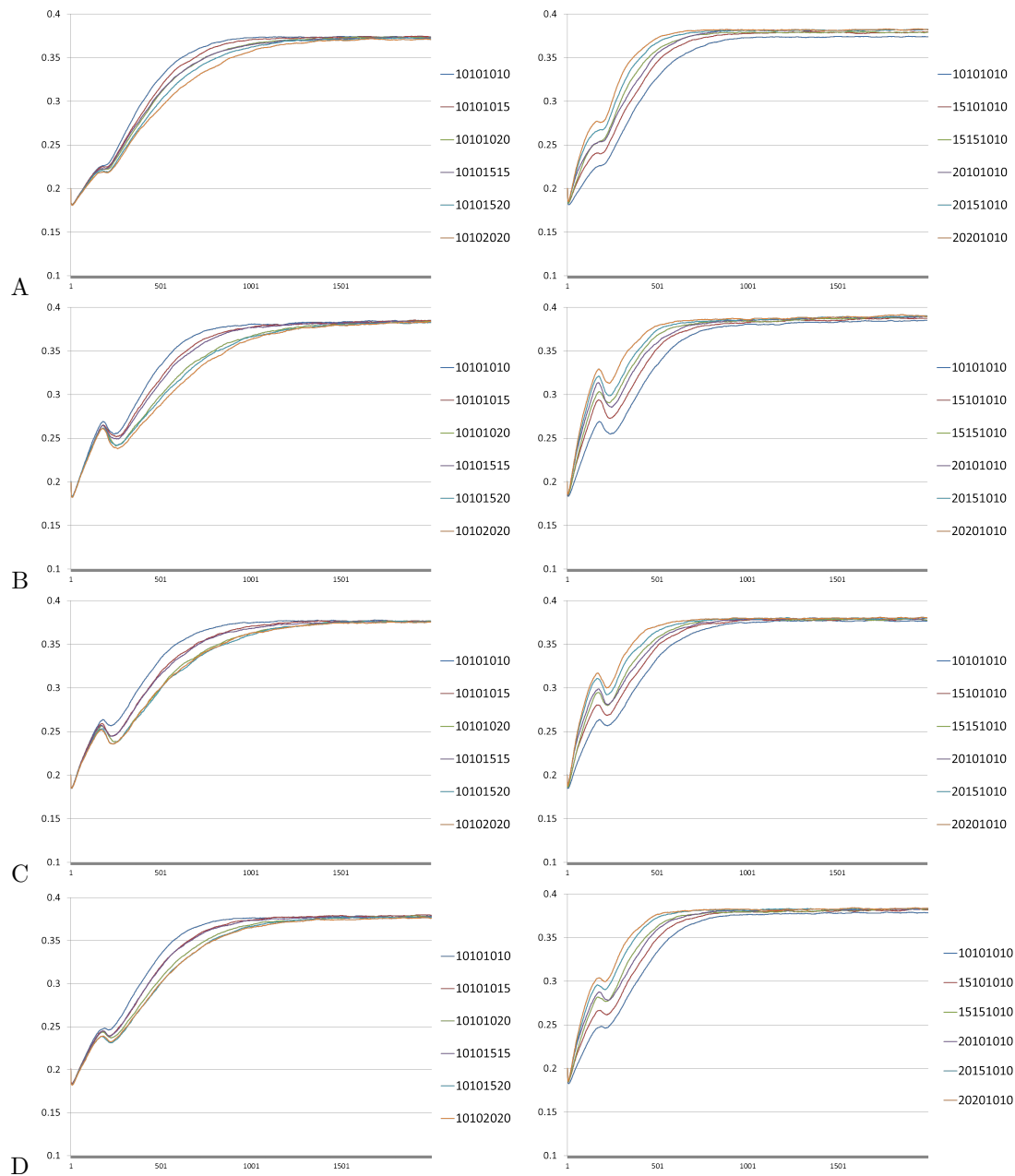


図 25. 積極型の平均速度 (左列：①～⑥，右列：左列：①と⑦～⑪)

$0 \leq t \leq 1000$  の間で違いが見え，減速量 ( $d_A$ ,  $d_B$ ) が大きくなればなるほど，速度が遅い結果になった．また， $0 \leq t \leq 500$  の間を着目すると，加速している途中に一度減速され，また加速している様子がみられる． $1000 \leq t \leq 2000$  は最終的に速度が収束しており，6.1 の分散値が低くなっている結果と繋がる．パラメータによって変化は加速していく様子に変化がみられるが，最終的な速度には大きな違いがみられず，近似している傾向がある．このグラフの傾向は，⑦～⑪の結果でも同様であり，その結果では加速度が大きくなればなるほど， $0 \leq t \leq 1000$  での速度が大きくなっている差がうまれた．消極型心理でも同様な結果となり，積極型と比較すると最大速度に違いがある結果だった．消極型の結果は付録にて図を載せる (図 38)．一方で，環境依存型のグラフの特徴に少し違いがあり，その結果を図 26 に示す．

積極・消極型では， $0 \leq t \leq 500$  の間で加速中に一度減速し，再度加速する傾向がみられた．しかし，環境依存型ではその傾向がみられず，消極・積極型よりも滑らかに加速していく様子がみえた．各実験の最終 step(2000step 目)

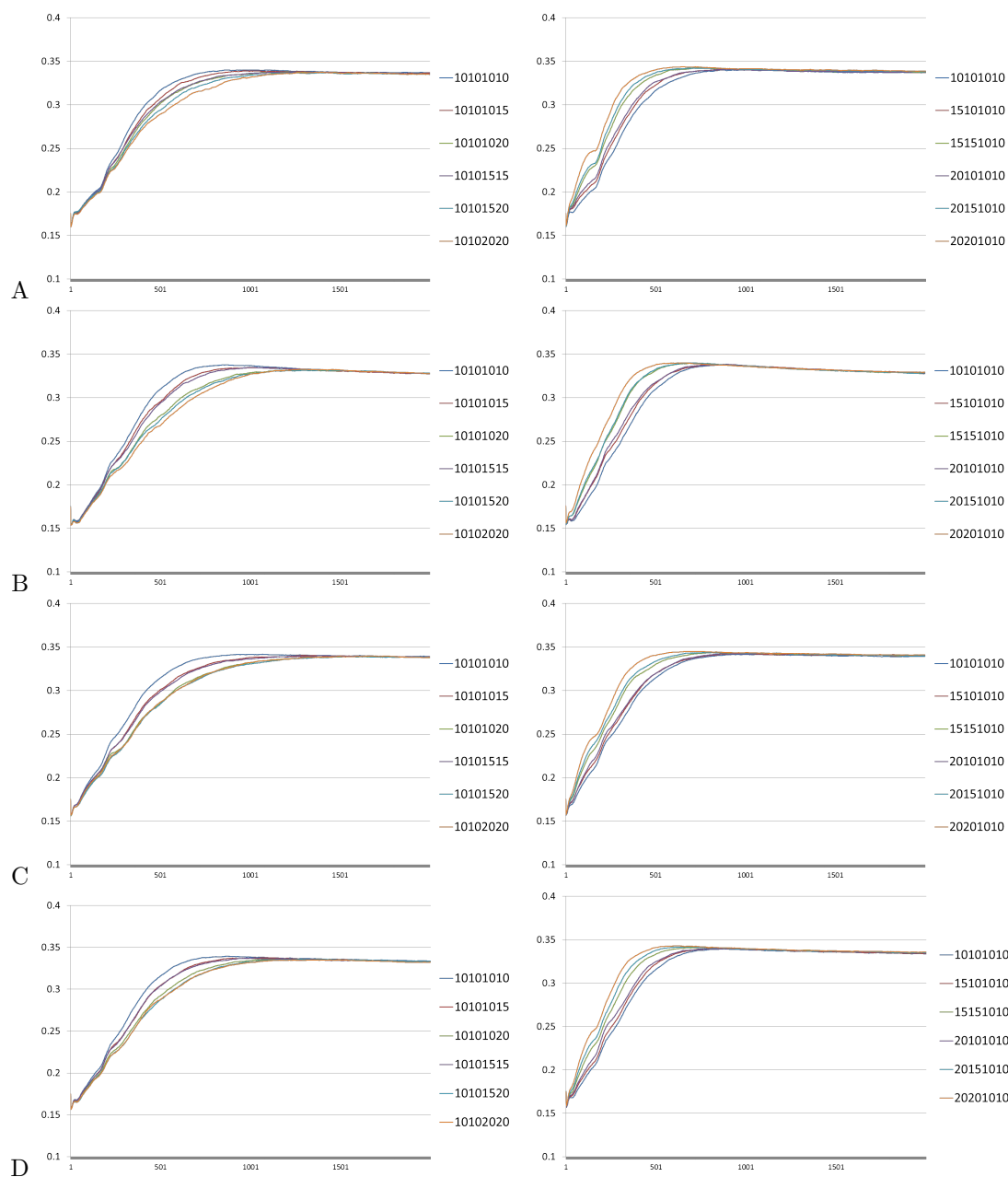


図 26. 環境依存型の平均速度 (①~⑥)

での平均速度を棒グラフで示す (図 27~29 ).

最終的な速度は、積極型 : 0.371~0.384, 消極型 : 0.311~0.318, 環境依存型 : 0.327~0.341 という結果になっている (小数第 4 位を四捨五入). 環境依存型が最大最小の差が一番大きい 0.014 という状況だが, 実験の加速量または減速度のパラメータが 0.0010~0.0020 という範囲から考慮するとこの差は非常に小さいことが改めていえる. 心理毎の平均速度の大きさは積極型, 環境依存型, 消極型の順という結果になっている.

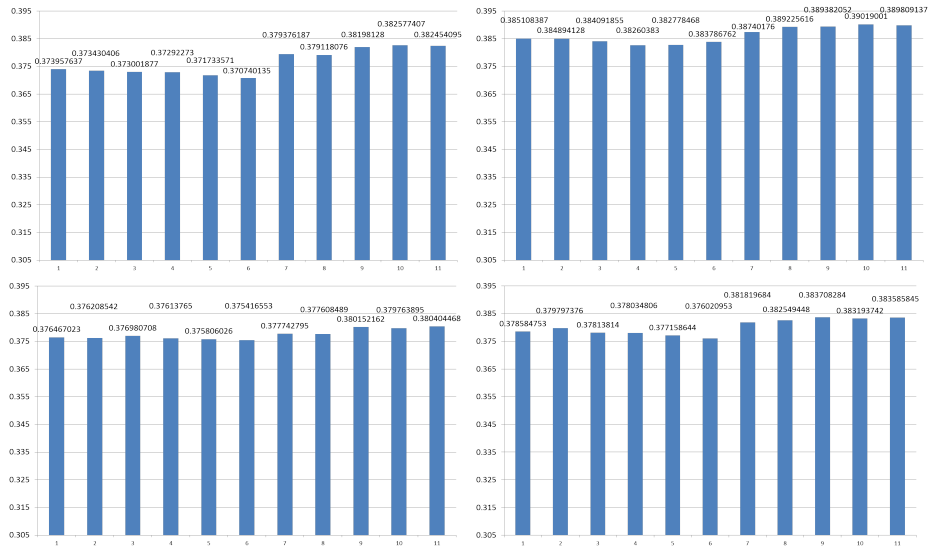


図 27. 最終 step の平均速度 (積極型)

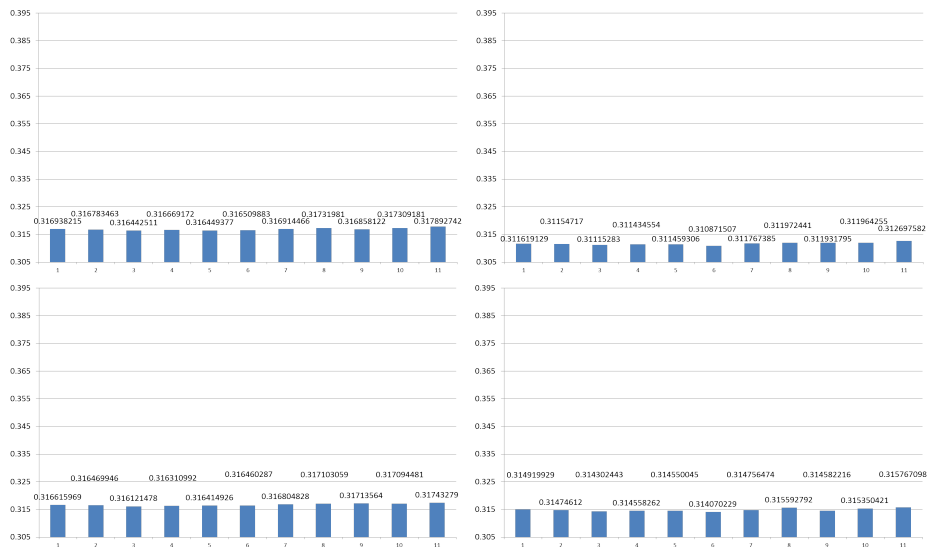


図 28. 最終 step の平均速度 (消極型)

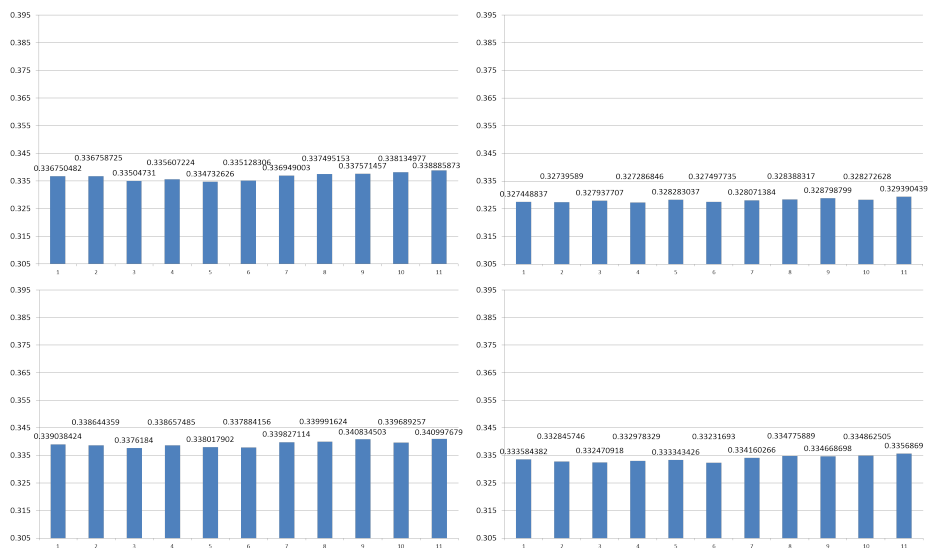


図 29. 最終 step の平均速度 (環境依存型)

### 6.3 平均移動量

平均速度から平均移動量を求めた．

移動量 =  $\sum_{t=1}^{2000} V_{alp}(t)$  とし，各回でこの移動量を求め，1000 回分の結果の平均を平均移動量とする．実験結果による平均移動量を各心理に分けて図 30～32 に示す．

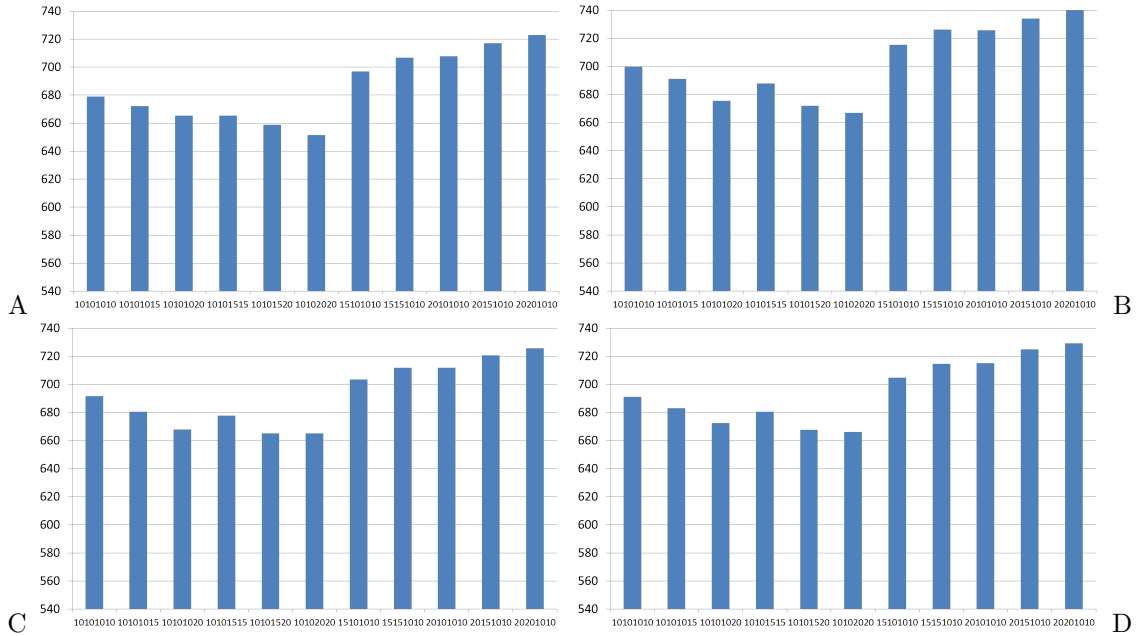


図 30. 積極型の平均移動量

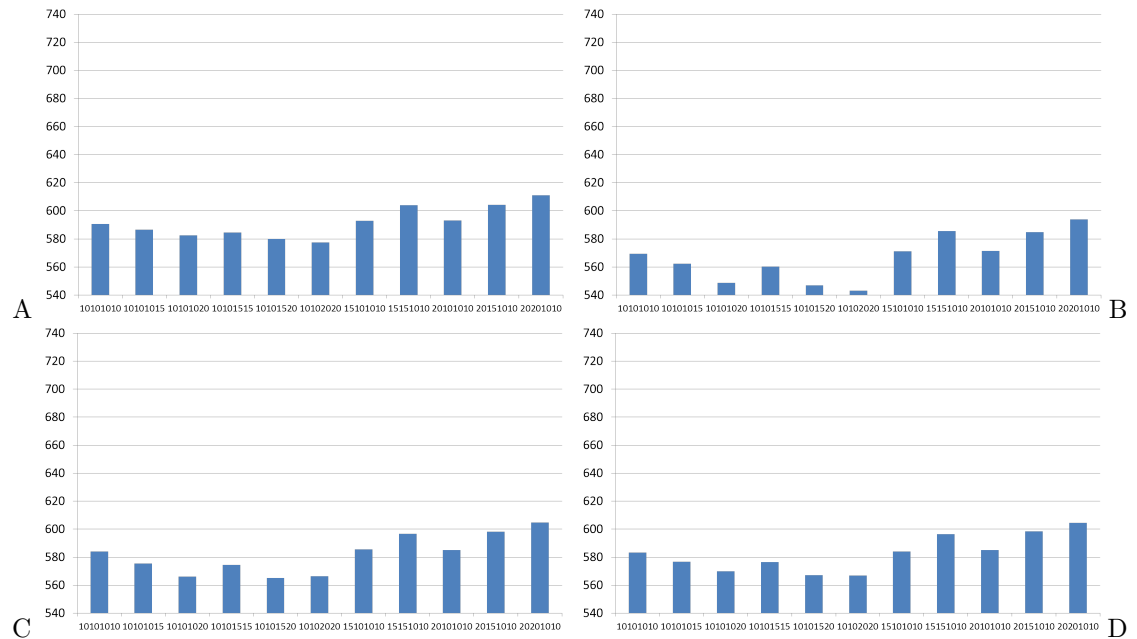


図 31. 消極型の平均移動量

各心理の実験結果は左から①～⑪の順で示している．移動量の大きさは平均速度と同様に積極型・環境依存型・消極型の順である (同じ車両数かつ同じパラメータにおいて)．例えば各心理の D-⑩についてみたときそれぞれの平均移動量は積極型：722.83，消極型：611.20，積極型：651.64(それぞれ小数第 3 位を四捨五入)．積極型と消極型を比較すると 111 程度の差がある．1step あたりを制限速度の  $v_{limit} = 0.30$  から考慮すると 370step 分の差，全体 (2000step) の時間の約 18.5% の差がうまれていることになる．

パラメータについて着目した時，加速量について (⑦～⑪) と減速度量について (②～⑥) とで大きく差が生まれてい

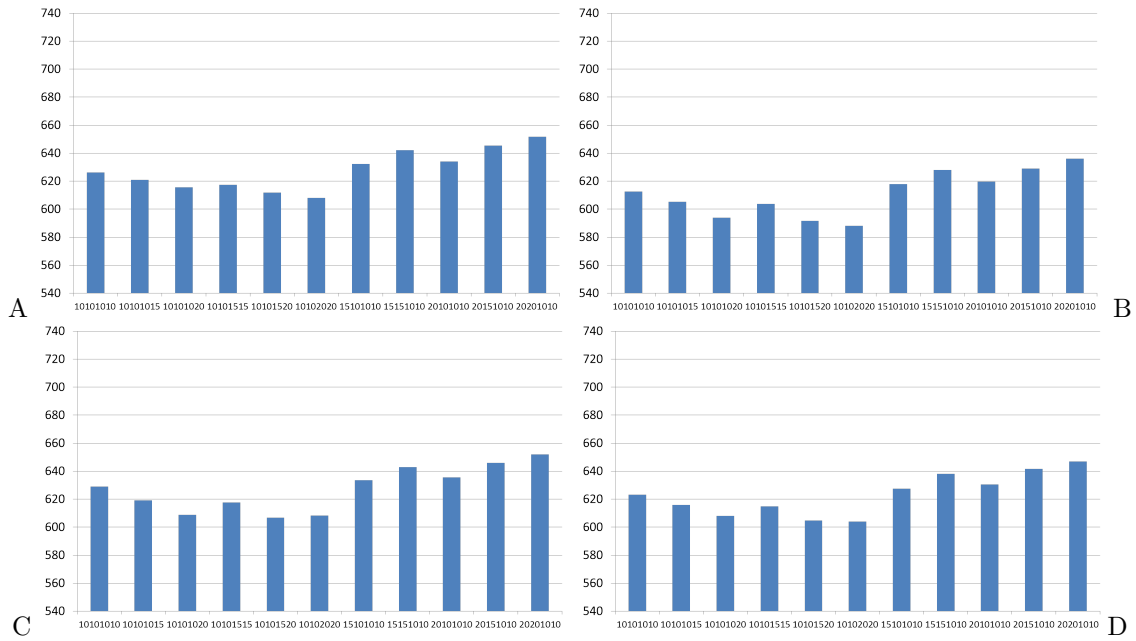


図 32. 環境依存型の平均移動量

る。加速量が大きくなるほど、移動量が大きくなり、減速量が大きくなるほど移動量は小さくなっている。減速量の平均移動量は②, ④, ③, ⑤, ⑥の順であるものが多い。③と④の減速量は、前者は  $(d_A, d_B) = (0.0010, 0.0020)$ , 後者は  $(d_A, d_B) = (0.0015, 0.0015)$  となっている。両者は減速量の合計  $(d_A + d_B)$  は等しいが値の組み合わせが異なる。減速量の最大値が大きいほど平均移動量が低くなる、または 2 つの減速量に差があればあるほど平均移動量が低くなるという推測がたてられる。②～⑥の中では全てにおいて⑥が一番低い。③と⑤はどれも近似しており、しいていうならば③のほうが僅かに大きい結果になっている。 $(d_A, d_B)$  の総和が影響するとして、③と⑤の結果では減速量の最大値が関係していると考えられる。

各心理について考察する。積極型の移動量に関して平均移動量が大きいパラメータはどれも⑪である。車両パターンで分けるならば B-⑪(740.853), D-⑪(729.285), C-⑪(725.573), A-⑪(722.826) の順である (小数第 4 位を四捨五入)。この順は 6. 1 で述べたように車両数の割合による各車線の車両数が影響していると考えられる。実験 B, D, C, A の順はまさに右側 2 車線を走る車の数が大きくなる順である。消極型に関しては A-⑪(611.20), B-⑪(593.989), C-⑪(604.738), D-⑪(604.452) となっており、実験 A, C, D, B の順となっている。この C-⑪と D-⑪は、604.738 と 604.452 と差がほとんどないのでどちらのほうが優位的とはいえないが、積極型の最大と最小が実験 B と実験 A に対して消極型の最大と最小が順が逆の実験 A と実験 B になっている。ここの差はまさにそれぞれ走る車線の車が少なくなる順になっている。複雑系科学の利己的な点で考えるならば、走りたいと思っている車線が都合よく車が少なくなる交通状況であるために、走りやすい状態になっているのではないかと考えられる。

## 6.4 平均満足度

平均満足度のグラフ結果は平均速度と依存関係があるので、似た形グラフになる。ここでは最終 step(2000step) 目の満足度を表 10 に示す。最終 step の平均速度が近似しているものが多いので (6.2 参照)，ここではパラメータ①～⑪の満足度の平均を示すものとし、車両数 4 パターンと心理 3 パターンの全 12 パターンを示す。また、平均満足度の時系列データのグラフ付録にて図を載せる (図 39～41)。

表 10. 最終的な満足度

|      | 積極型    | 消極型    | 環境依存型  |
|------|--------|--------|--------|
| 実験 A | 83.66% | 97.53% | 89.79% |
| 実験 B | 85.84% | 95.89% | 87.49% |
| 実験 C | 83.88% | 97.45% | 90.45% |
| 実験 D | 84.51% | 96.86% | 89.01% |

平均速度・平均移動量の値の大きさは共に積極型・環境依存型・消極型の順であったが、満足度では消極型・環境依存型・積極型の順になった。満足度はその心理が走りたいと思っている速度に対してどこまで希望通りに走れているかを示している。つまり、消極型心理の 95.89%～97.53% という結果は運転手にとってほとんどストレスの感じない走行ができていることを示している。一方で速度・移動量で勝っている積極型は、平均速度のグラフで速度が途中からほぼ一定となり、希望最高速度付近で走れているのではないかと思われたが、実際は交通状況から速度がボトルネックになっていたことがわかった。

## 6.5 ミクロな視点による実験

6. 1～6. 4 の実験では心理ごとの平均をとるというように全体をみており、つまりマクロな視点の実験を行った。Netlogo によるシミュレーションではエージェントそれぞれのデータを出力させることも可能である。このことからミクロな視点による調査も可能なので、その実験例を紹介する。実験は環境依存型について 2 種類の実験を行った。1 つ目は心理の変更を何回行ったかについて、2 つ目は心理変更するまでの間の回数について調査を行った。

### 6.5.1 心理選択の合計数

PTSS の特徴の 1 つである環境依存型について調査を行った。心理選択という点に着目して環境依存型心理が全部で何回の心理選択の変更を行っているかについて調べた。心理選択の変更とは、積極型選択状態から消極型への選択、または消極型選択状態から積極型への選択のことをさす。臨界密度を境にこの心理選択の変更に変化があるのではないかと、つまり 1000step までとそれ以降では違いがでるのではないかと予測してそれぞれ全部で何回心理選択の変更が行われているか調べた。1～1000step と 1001～2000step の 2 パターンに分けているので、それぞれ最大回数は 1000 までになる。対象は車の数がそれぞれ 20 台であり (実験 D)、パラメータパターンは①、⑥、⑪の 3 つのみとする。また注意としてここでは平均速度・平均移動量・平均満足度と異なり、渋滞発生時のデータも含んでいる。1 パターンに対して環境依存型 20 台 ×1000 回分、つまり 20000 台の環境依存型心理の車についての心理選択変更の合計回数の結果を図 33 に示す。

縦軸がエージェントの個数、横軸が心理選択変更の回数である。縦に伸びているほど、その心理選択の回数であった環境依存型心理のエージェント数が多いということになる。図 33 のグラフは全て縦軸の最大値を 300 の固定としている。1～1000step では心理選択の変更数 80 前後でエージェント数が一番多くなっており、その部分を頂上とした山なりの形状になっている。1001～2000step の結果ではどれも心理選択回数が少ないほうがエージェントの数が多い結果になっている。この比較から 1～1000step までと 1001～2000 までで心理選択変更回数に変化が表れていることがわかる。また、パラメータの変化による大きな変化はみられなかった。注意としては、このグラフでは形状を比較することを目的にしているため、全て縦軸の最大値 300 に固定している。右列の 1001～2000step の結果では心理選択変更回数が少ない部分で極端にエージェント数が多い結果になっているので、このグラフでは途切れている部分が存在する。全ての部分を表示しているグラフを付録にて図を載せる (図 42)。

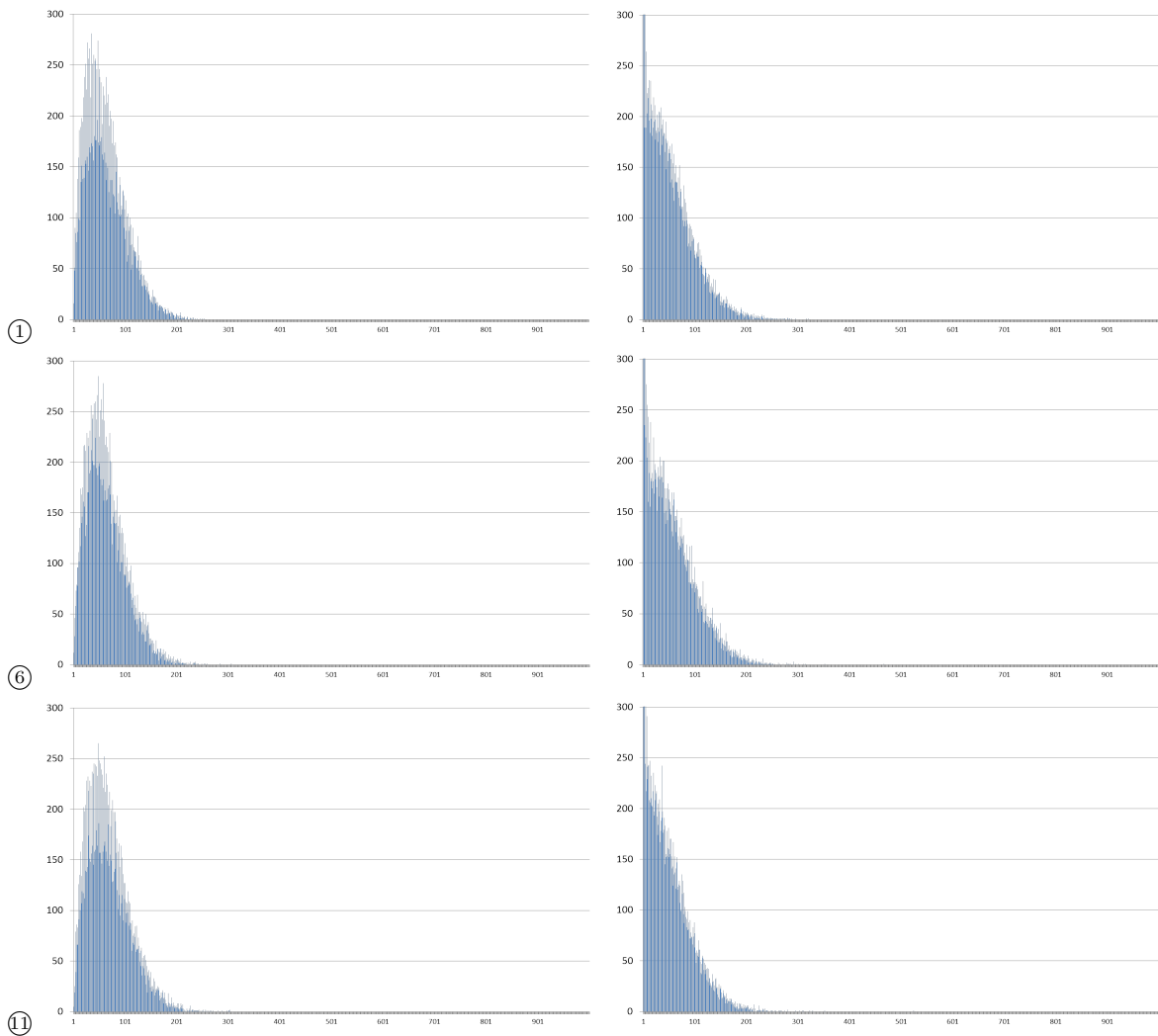


図 33. 環境依存型心理の心理選択変更の合計数 (左列：1～1000step, 右列：1001～2000step)

### 6.5.2 心理変更の間の回数

心理選択変更の合計数ともうひとつは、心理変更の間の回数について調べた。例えば、ある環境依存型心理の 5step 間の心理が消極型・消極型・積極型・消極型・消極型の順であったとする。この場合の心理変更の間の回数は、2 回・1 回・2 回という結果である。この調査によってどれくらいの頻度で環境依存型心理が心理選択の変更を行っていたかがわかる。心理選択の合計数と同様に 1～1000step までと 1001～2000step に分け、実験 D の①, ⑥, ⑪について行った (図 34)。

図 34 は縦軸の最大値 1000 に固定している。グラフの形状は似ているが、1～1000step のほうが少ない回数においてのエージェント数が多い結果になっている。元のサイズとなる図は付録に載せる。全てのグラフの形状から、この結果はべき乗則の関係があるのではないかと考えた。べき乗則の関係は、自然現象の関係を示すものといわれている。実験 D-①について基数 10 とした対数グラフは図 35 に示す。

図 35 より、左列の 1～1000step の結果と右列の 1001～2000step と比較したとき、左列のほうが僅かながら少ない回数の傾向が強い。x 軸の 900 前後のエージェント数が特に左列と右列で異なった特徴が見えている。また、x 軸の最終値 1000 の部分が少し飛び出す結果がみえる。この調査では、1000step ずつに区切っており、1～1000step または 1001～2000step の間ではそれぞれ 1 度も心理変更が行われなかったときに現れる結果である。この部分に限っては右列の 1001～2000step のほうが多い結果になっている。つまり、1000step 以降のほうが交通が安定しているため、心理変更を行わない車両が多いと予測される。グラフの形状は完全とはいえないがべき乗則の関係があるのではないかと考える。全てのスケールにおいて自己相似している結果はスケール不変性を有すると呼ばれ、べき乗則関係であるときそのスケール不変性が存在する。図 35 のグラフからは自己相似している部分が存在している結果になっ

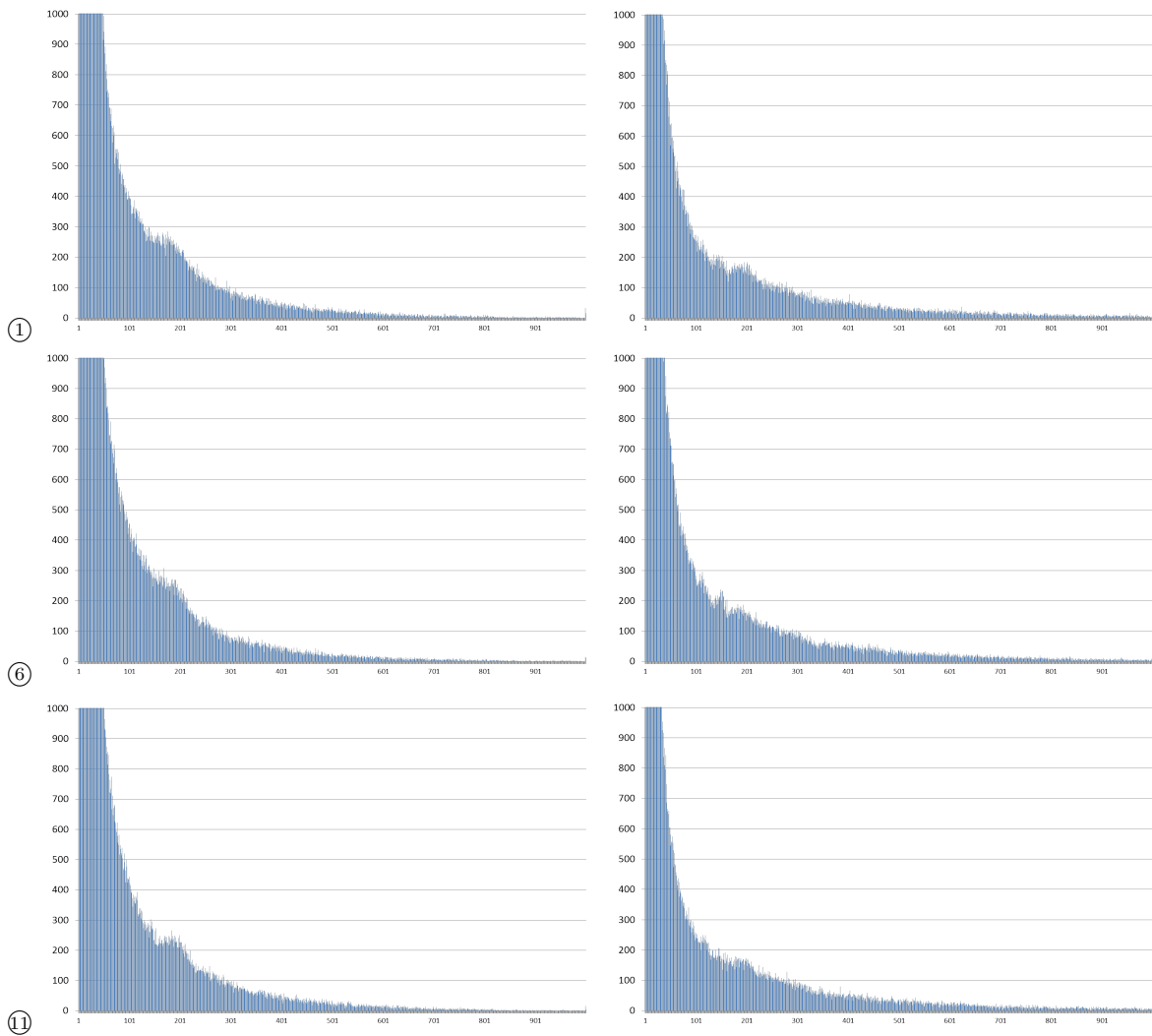


図 34. 環境依存型心理の心理変更の間の回数 (左列：1～1000step，右列：1001～2000step)

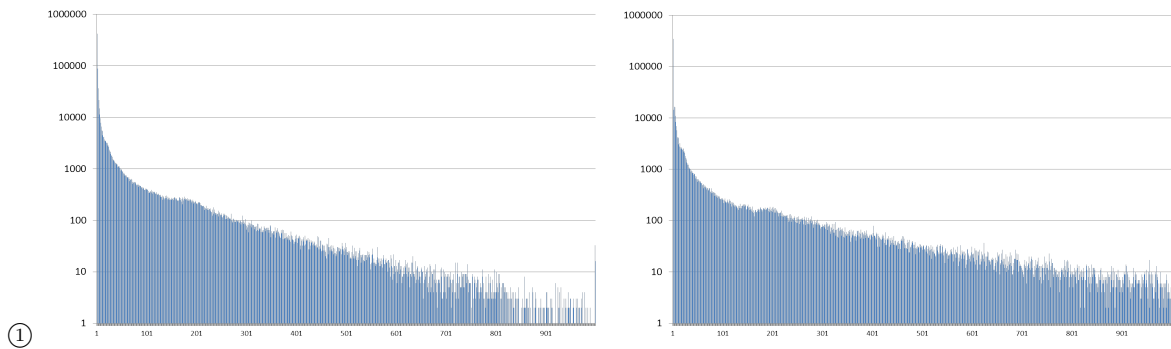


図 35. D-①の対数目盛によるグラフ (左列：1～1000step，右列：1001～2000step)

ている。自然現象のような複雑システムにおいて、べき乗則は階層性と構造安定性のしるしであると考えられている (例：地震の大きさに関するグーテンベルク・リヒター則)。べき乗則の関係の研究やこの関係による現実世界での正当性を証明する研究も行われている [11]。今回の実験では環境依存型心理は毎 step 心理を選ぶという非常に細かい設定になっている。当然心理選択の間隔を変えることにより異なる結果が現れると予測されるが、本実験ではこのような結果がみられたことは交通というある種の自然現象・複雑システムを PTSS は再現に近づいているのではないかと考えるとともに、この交通という分野にも、べき乗則関係をもつものがあるのではないかと示唆する。

## 7 まとめ

本論文では3種類の走行心理(積極型・消極型・環境依存型)を考慮したPTモデルを用いて3車線高速道路の交通シミュレーションを実装した。実装したPsychological Traffic Simulation Systemは車両数と動的に変化できる加減速・減速量等, 全9種類のパラメータを設定することができる。このシミュレーションを使いマクロな視点とミクロな視点の実験例を紹介した。前者では, 44パターンのパラメータから各心理の平均速度・平均移動量・分散・平均満足度について調べ, その実験結果から走行の優位性について考察した。走行の速度・移動量の点では積極型心理が優位的であったが, 満足度の点では消極型心理が勝る結果になった。これにより自動運転システムの走行法を考える際, 移動量のみに特化した走り方や運転手にとって精神面を考慮した走行等, 選択できるようなシステムが実現されるとよいのではないかと提案する。また, ミクロな視点では, 環境依存型に関する実験を2種類紹介した。一つの実験からは複雑システムの特徴である, べき乗則関係に近いグラフが得られた。これにより, この交通という分野にもべき乗則関係があるものが存在する可能性を示した。このようにPTSSでは従来にはない調査が行える可能性があることを紹介した。

本実験では, 心理的要素と複雑系科学を取り入れ, 前方と左右の状況によってそれぞれの車が利己的に運転の選択を行っている。しかし, 実世界では後方を確認して譲る等, 他にも様々な心理や状況が存在する。将来研究として後方状態を考慮した運転の選択や合流による動的な車両数の変動という要素を追加することにより, 実世界の交通シミュレーションの実現により近づけるのではないかと予測する。

## 参考文献

- [1] 津川 定之, “自動車の自動運転-その特長と課題-”, 情報処理学会研究報告, Vol.2009-MBL-51, No.9
- [2] 安藝 雅彦, 亀井 潤也, 平沢 隆之, 須田 義大, “既存自動車のインフラ設備による自動運転-パーク・アンド・ライドへの適用に関する基礎検討-”, 生産研究, Vol.64, No.2, pp. 215-218(2012)
- [3] 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, pp. 65-71(1993)
- [4] 大口 敬, “高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係”, 土木学会論文集, No.524, pp. 69-78
- [5] 稲垣 敏之, “運転支援システムへの過信と依存”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 100, No. 242, pp. 21-24(2010)
- [6] Seth Tisue, Uri Wilensky, “Design and implementation of a multi-agent modeling environment”, Proceedings of the Agent 2004 Conference on Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence, Chicago, IL.
- [7] 水谷 亮, 大森 健児, “Netlogo を用いた心理的状況を反映した交通シミュレーション”, FIT2013(第12回情報科学技術フォーラム), M-043
- [8] 増淵 達也, 荒井 幸代, “前方情報を考慮したルールによるメタ安定相の発生と特徴の解析”, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J92-D(11), 1935-1944, 2009-11-01
- [9] ニール・ジェンソン (著), 阪本 芳久 (翻訳), “複雑で単純な世界: 不確実なできごとを複雑系で予測する”
- [10] Ryo Mizutani, Kenji Ohmori, “A Design and Implementation Method for Embedded Systems using Communicating Sequential Processes with an Event-Driven and Multi-Thread Processor, Cyberworlds(CW), 25-27 Sept, 2012.
- [11] マーク・ブキャナン (著), 水谷 淳 (翻訳), “歴史は「べき乗則」で動く-種の絶滅から読み解く複雑系科学-”

## 付録

付録では、本文では載せられなかった図を補足する。

### 6. 1 分散による渋滞発生有無の分類

6. 1 では実験 A～D の積極型心理の平均速度に関する分散 (図) と渋滞を取り除いた時の分散について紹介している。ここでは実験 A～D の消極型心理と環境依存型のときの結果についての図を補足する。上から順に実験 A, B, C, D. 左列が初めの分散の様子, 右列に渋滞を取り除いた時の分散の様子を示す。

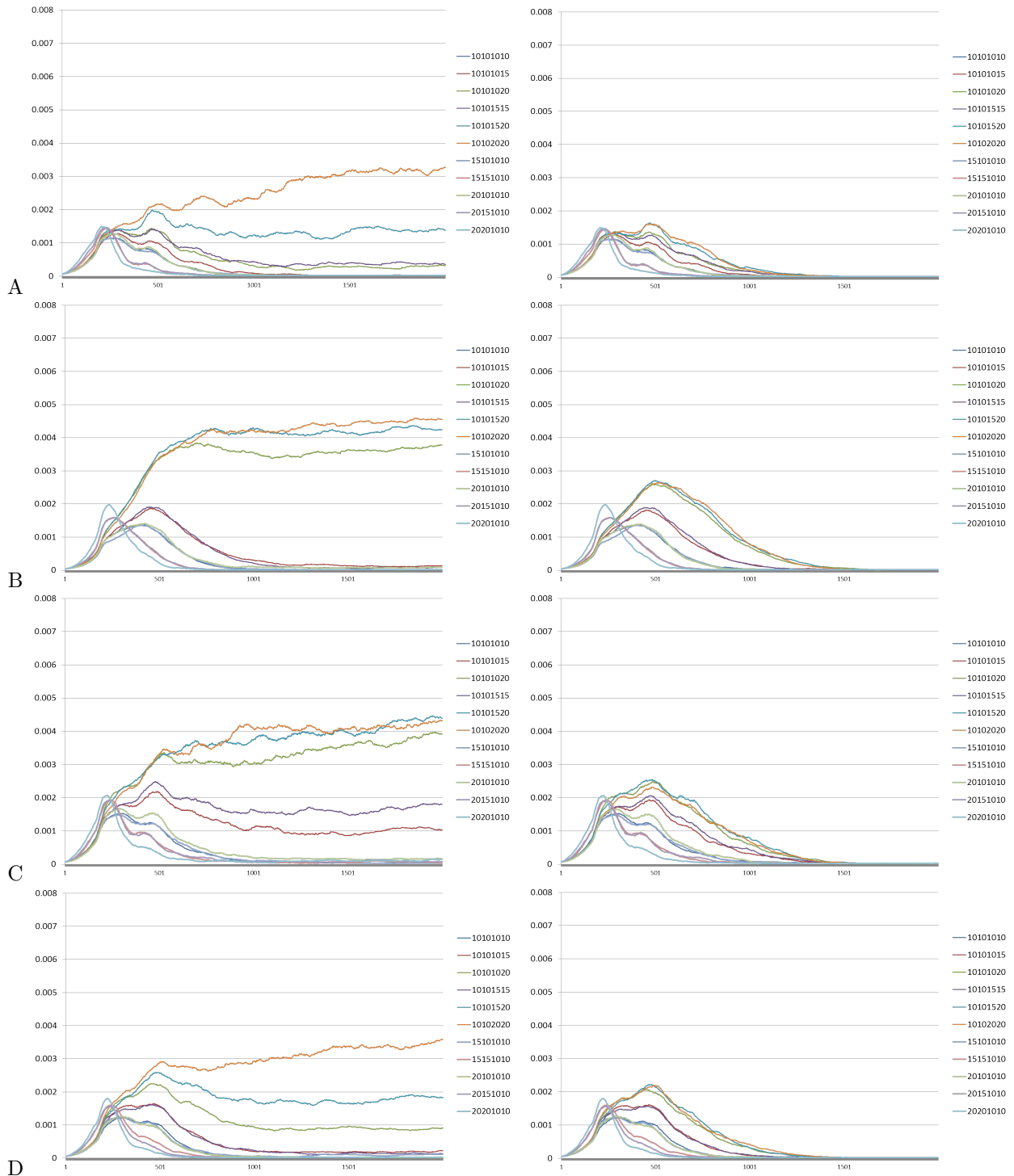


図 36. 消極型心理の平均速度に関する分散 (左列：全ての結果の分散, 右列：渋滞を取り除いた時の分散)



図 37. 環境依存型心理の平均速度に関する分散 (左列：全ての結果の分散，右列：渋滞を取り除いた時の分散)

## 6. 2 平均速度

6. 2 では積極型心理と環境依存型心理の平均速度について図を載せている。消極型心理の平均速度の結果について図を補足する。

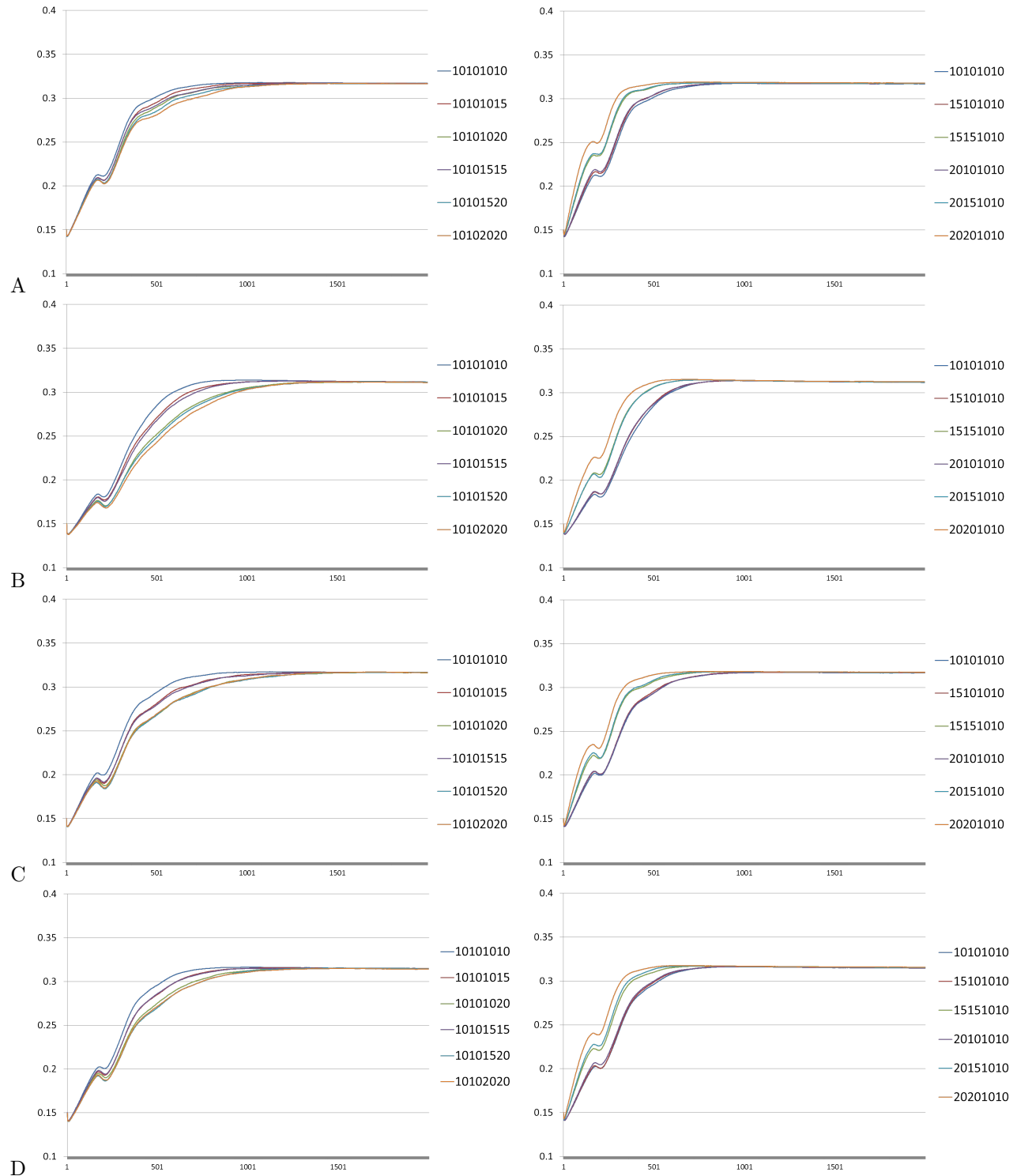


図 38. 消極型心理の平均速度 (左列：①～⑥，右列：①と⑦～⑪)

## 6. 4 平均満足度

6. 4 では実験の最終 step の時の満足度の平均を表で示している．元となる時系列の平均満足度の結果を各心理補足する．

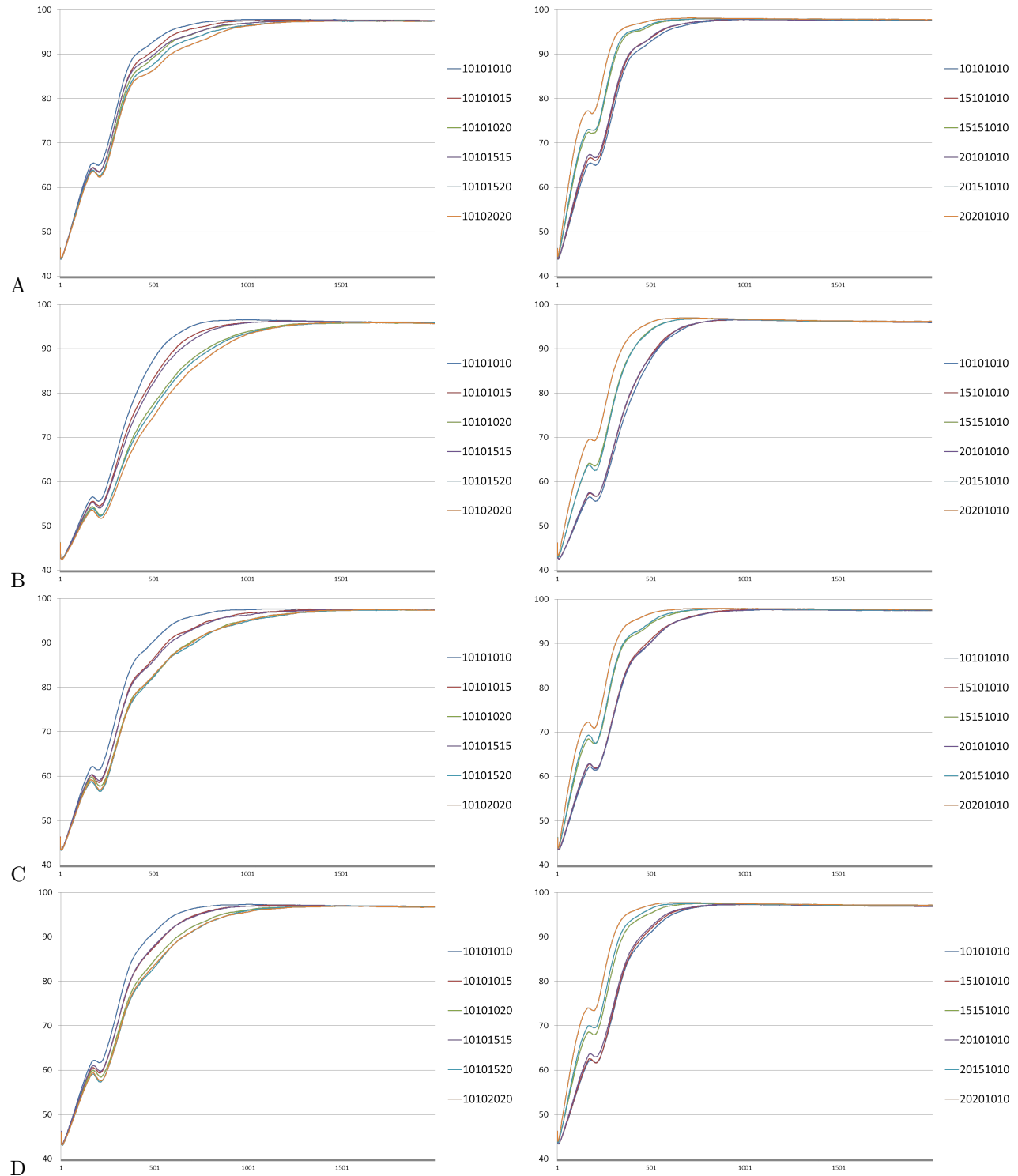


図 39. 消費型心理の平均満足度 (左列：①～⑥，右列：①と⑦～⑪)

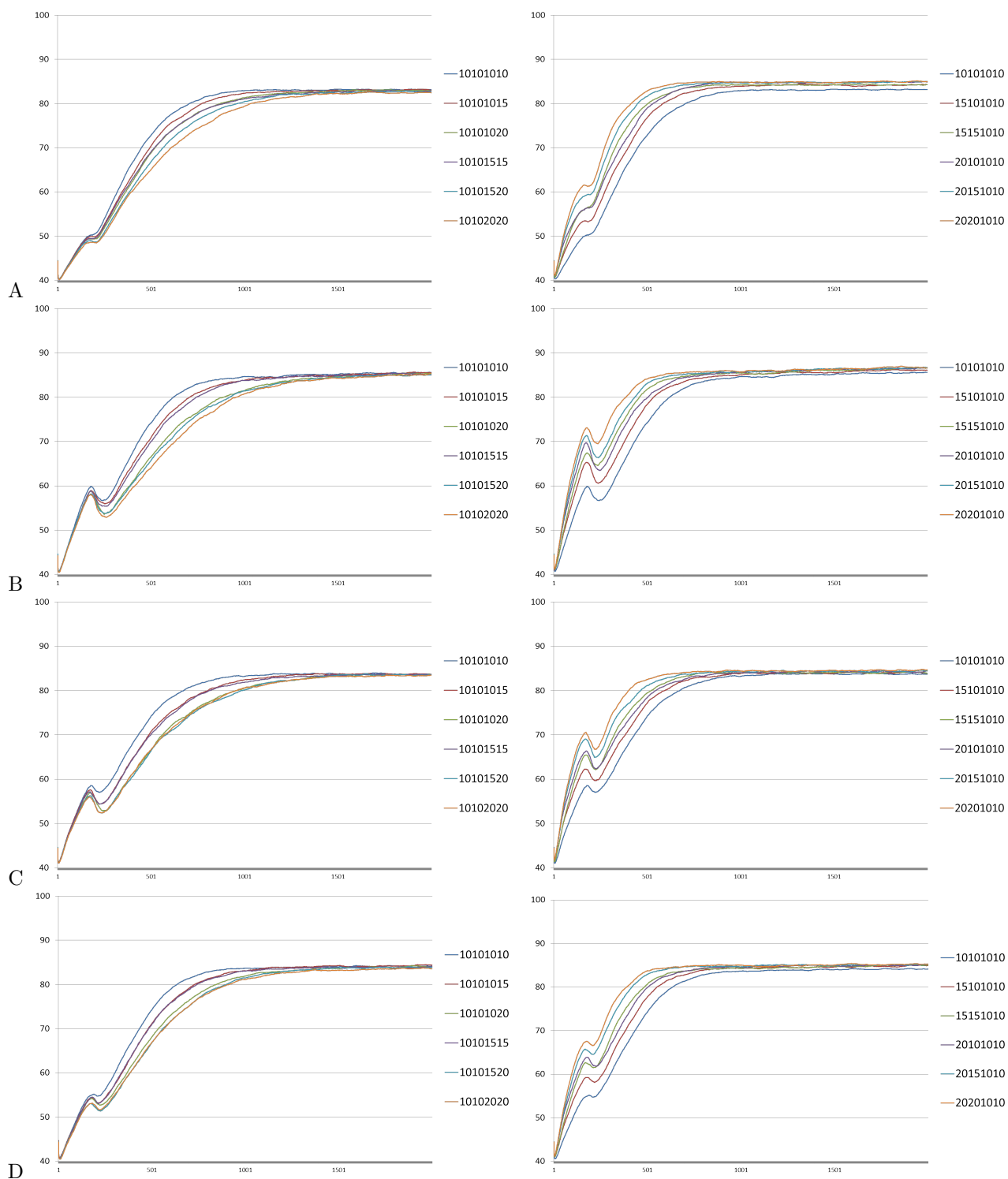


図 40. 積極型心理の平均満足度 (左列：①～⑥，右列：左列：①と⑦～⑪)

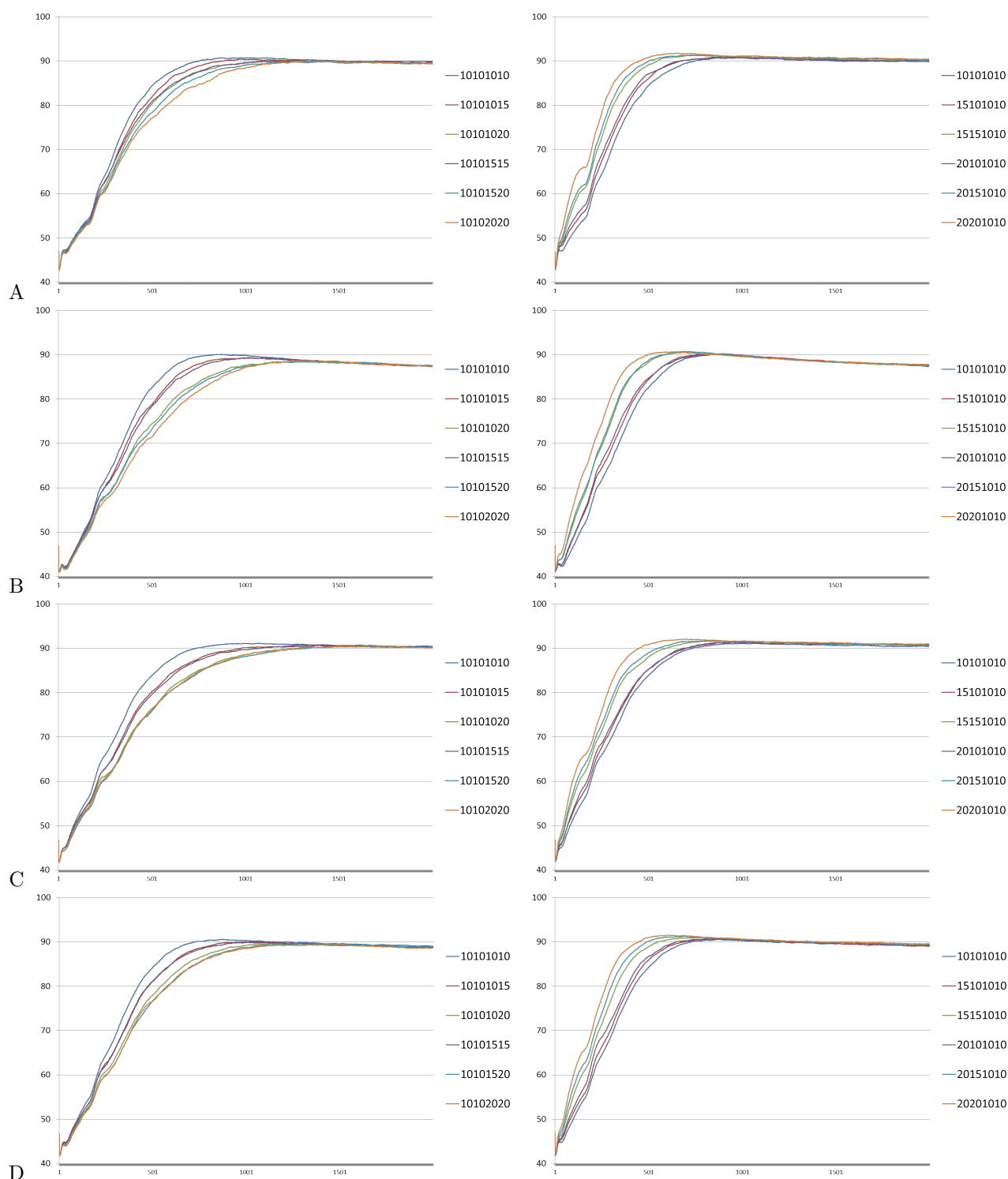


図 41. 環境依存型心理の平均満足度 (左列：①～⑥，右列：①と⑦～⑪)

### 6. 5. 1 心理選択の合計数

6. 5. 1 では実験 D-①, D-⑥, D-⑪の心理選択の合計数の結果を紹介している．その図 33 内の右列である 1001～2000step 結果に関しては紹介している．ここでは原寸大の結果を補足する．

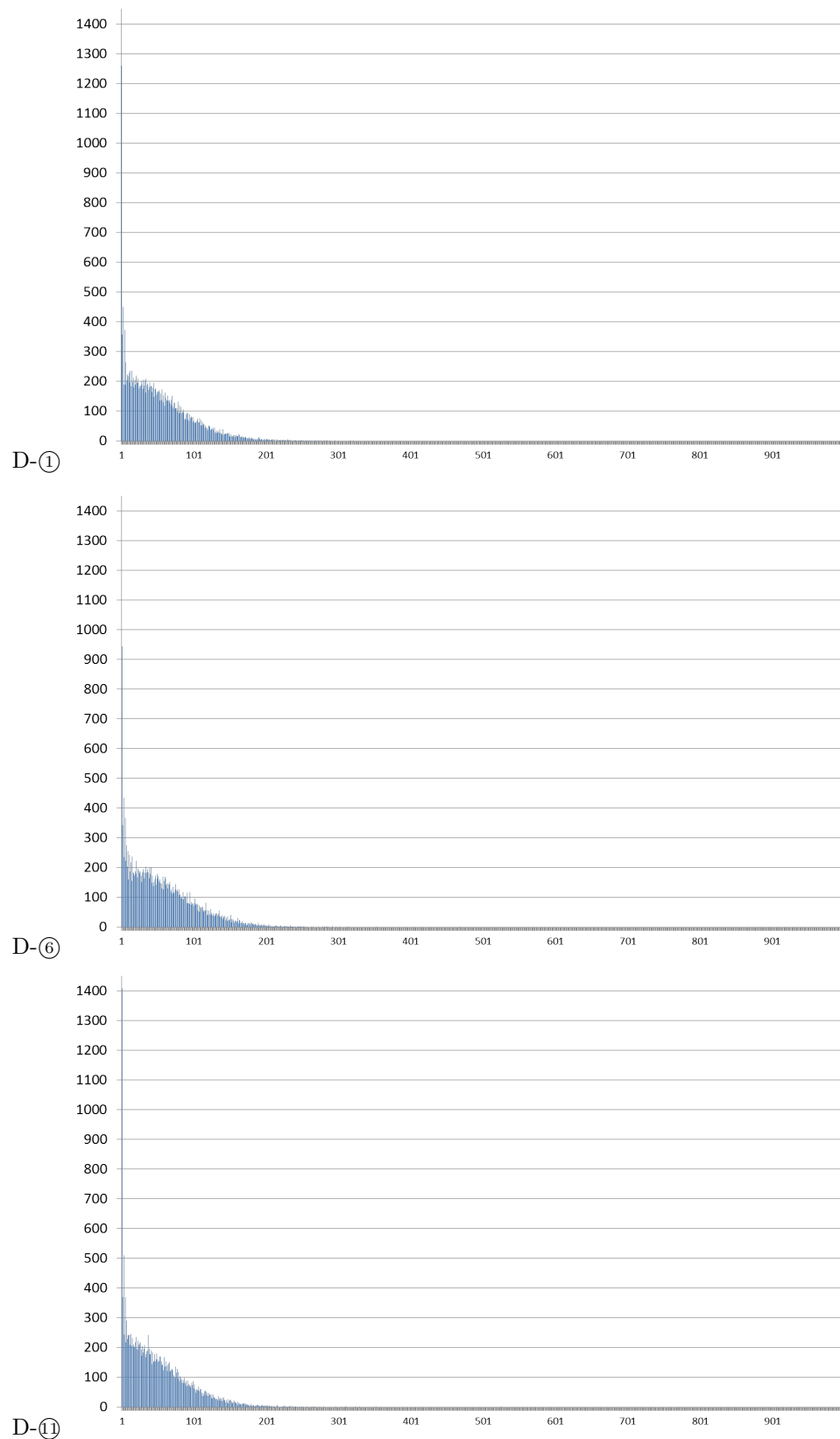


図 42. 環境依存型心理の心理選択変更の合計数 (1001～2000step について, 上 : D-①, 中央 : D-⑥, 下 : D-⑪)

## 6. 5. 2 心理変更の間の回数

6. 5. 2 では実験 D-①, D-⑥, D-⑪の心理変更の間の回数の結果を拡大して紹介している．図 43 はその結果の元の大きさのグラフを補足する．また，実験 D-①のみ対数目盛りによるグラフを紹介している．実験 D-⑥，実験 D-⑪についての対数目盛によるグラフを図 44 で補足する．

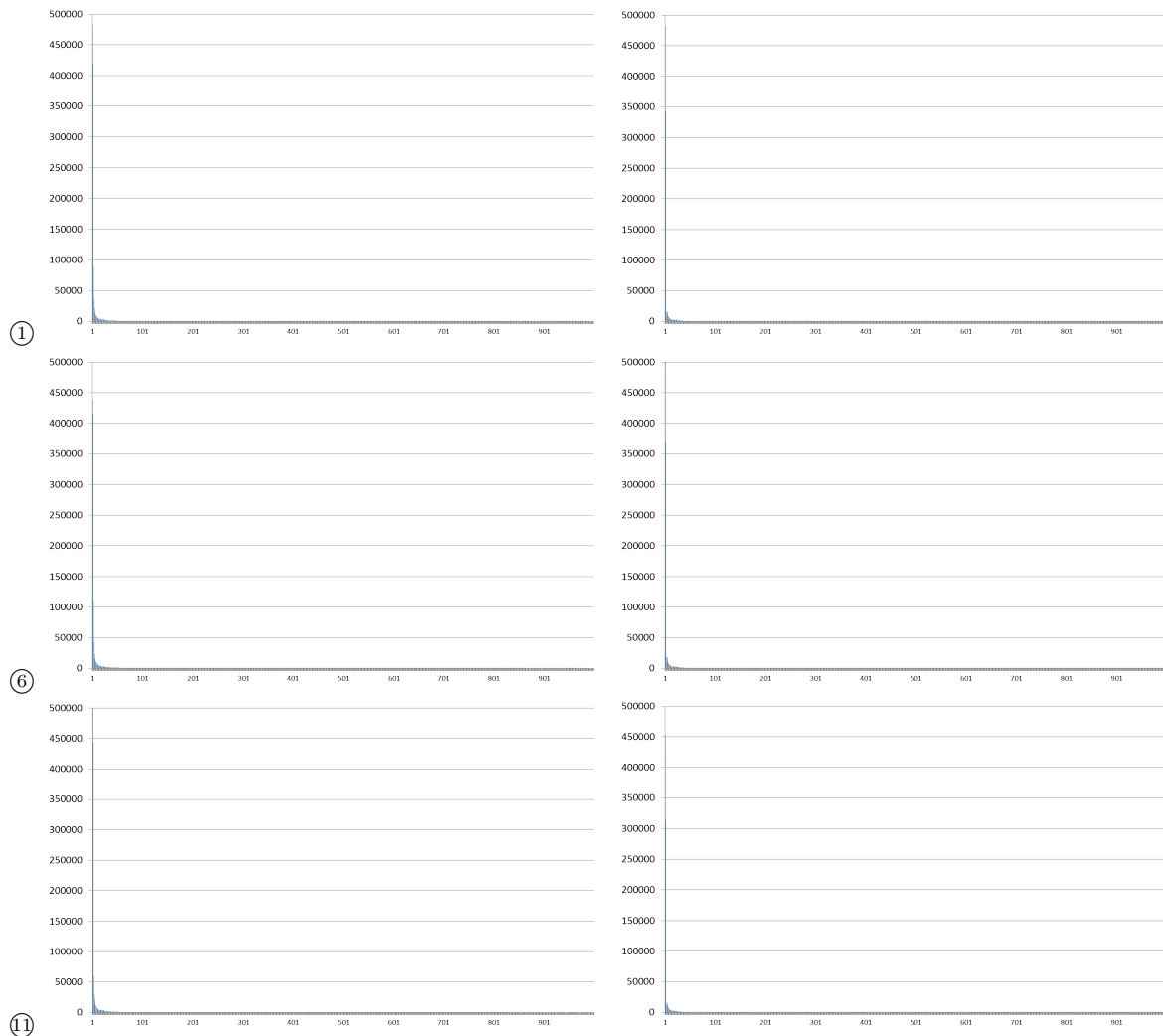


図 43. 環境依存型心理の心理変更の間の回数 (左列：1～1000step，右列：1001～2000step)

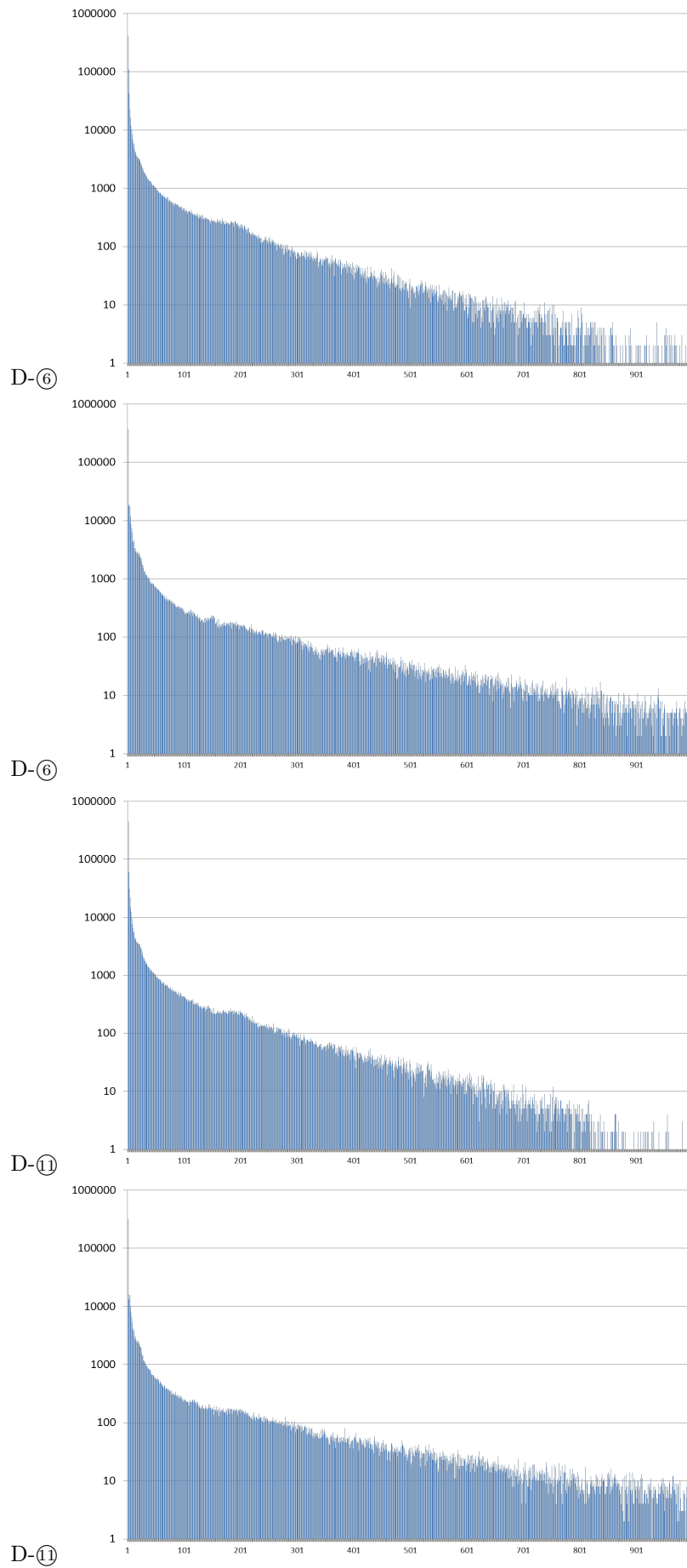


図 44. 図 43 の対数目盛によるグラフ (奇数行 : 1~1000step, 偶数行 : 1001~2000step)