

# HYPERPATH に基づく Day-to-Day ダイナミクスモデルの構築

米良 昂大<sup>1</sup>・嶋本 寛<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 宮崎大学修士課程 大学院工学研究科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

hh12053@student.miyazaki-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 宮崎大学准教授 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

shimamoto@cc.miyazaki-u.ac.jp

従来の研究における day-to-day ダイナミクスは経路交通量を更新するものであるが、解の唯一性が保証されず、重複率の高い経路が存在する場合は非現実的な結果になりうるという二つの問題が存在した。これらの問題を考慮したモデルを He らが提案しているが経路選択については確定的である。そこで本研究では hyperpath の概念を導入することで利用者の移動途中の経路変更を考慮したモデルへと拡張を行った。提案したモデルの定式化及び均衡点の特性を述べたのちに、提案したモデルを仮想ネットワークへ適用した結果、モデルに用いたパラメータは物理的な意味を有しており、パラメータがいかなる値においても link flow evolution は収束へ至ることを確認した。またモデルの計算結果の妥当性も確認することができた。

**Key Words:** day-to-day dynamics, hyperpath, traffic assignment model, traffic evolution

## 1. はじめに

交通ネットワーク分析において、Wardrop の第 1 原則に従う（確定的）利用者均衡配分を端緒として数多くの利用者均衡配分モデルが提案されており、実務的にも将来の交通量推計や道路の便益評価にも利用者均衡配分モデルが用いられるなど、その果たす役割が大きくなっている。均衡配分モデルは、想定する利用者の有する情報や経路選択規範によって様々なバリエーションが存在するが、共通する点は誰ひとりとして経路変更する動機を持たない均衡条件下における交通量を算出するものである。しかし、特にリンク途絶等によりネットワークの一部の状況が変化した直後においては、利用者はネットワークに関する十分な情報を持ち合わせていないため、不均衡の状態から日々学習を繰り返しながら経路選択を行うと想定される。したがって、リンク途絶や新規道路開通の影響・効果を評価する上でも均衡状態を動学化し、均衡状態に至るまでの利用者の日々の経路選択をモデル化することが重要である。

日々の交通量の変化を分析できるよう、均衡問題を動学化したモデルは、day-to-day ダイナミクスとして少なからず研究蓄積が存在する。Smith<sup>1)</sup>は、マクロレベルの利用者がコストの高い経路からコストの低い経路にコスト差に比例して経路変更を行うと仮定したダイナミクス

を考えたとき、このダイナミクスは確定的利用者均衡解に収束することを解析的に示しており、いわゆる Smith Dynamics として知られている。これ以外にも、マクロレベルの利用者が別のダイナミクスに従うと仮定した day-to-day モデルが確定的利用者均衡解に収束するか検討した研究も存在し<sup>2) 3)</sup>、近年では確率的なリンク容量の低下を考慮した day-to-day ダイナミクスモデル<sup>4)</sup>等も提案されている。さらに、中山<sup>5)</sup>はミクロレベルの利用者がベイズの定理に従ってある経路が最小旅行時間となる主観的確率を日々更新し、旅行時間が最小となる（と信じる）経路を選択していくというダイナミクスは、確定的利用者均衡配分に収束することを示している。

ここまで述べた day-to-day ダイナミクスモデルは経路交通量を更新するものであるが、He ら<sup>6)</sup>は確定的利用者均衡解に収束する経路ベースの Day-to-day ダイナミクスモデルは、唯一に解が定まらない経路交通量を変数とするため、i) 得られた解の唯一性が保証されない、ii) 重複率の高い経路が存在する場合に非現実的な結果となる、という 2 つの問題点を明らかにしている。その上で、彼らはリンクベースの day-to-day ダイナミクスモデルを提案し、さらに提案したダイナミクスモデルの均衡解は確定的利用者均衡解に一致することを解析的に示している。Han ら<sup>7)</sup>は、He ら<sup>6)</sup>が提案したリンクベース day-to-day ダイナミクスモデルの安定性について解析的に分析

するとともに、非対称なリンクコストを考慮できるようなモデル拡張を行っている。さらに、He ら<sup>8)</sup>は突発的な橋の崩落による day-to-day 交通量のダイナミクスを記述するため、前述したリンクベースのダイナミクスモデルに利用者が当日経験した旅行時間をもとに翌日の旅行時間を予測して経路選択するというプロセスを組み入れた prediction-correction model を提案している。

ここまで述べた day-to-day ダイナミクスモデルにおいて、利用者は出発時に 1 つの経路を確定的に選択し、一旦選択した経路を目的地まで変更をしないと仮定しているが、特にリンク途絶等によりネットワークが変化した後においては、利用者は移動途中で経路変更を行うなど確率的な経路選択を行っていると考えられる。Bell<sup>9)</sup>は、各リンクの最大遅れ時間を想定する「悲観的な」利用者の期待コストを最小にする経路選択行動を、頻度ベースの公共交通における乗客配分モデルで用いられる hyperpath の選択問題として記述することにより、確率的なものとして表現している。さらに、Ma ら<sup>10)</sup>は、最適な hyperpath の選択問題とネットワーク GEV モデルを組み合わせた経路選択モデルを構築している。ただし、これらの研究では 1 日の経路選択の記述にとどまっている。

以上より、本研究では day-to-day ダイナミクスモデルにおいて利用者の移動途中の経路変更も考慮できるようにすることを目的として、各リンクの最大遅れ時間に基づき経路選択を行う「悲観的な」利用者の経路選択行動を day-to-day ダイナミクスに拡張する。さらに、拡張するモデルの収束特性等について考察する。

本論文の構成は以下の通りである。まず第 1 章では研究の背景と目的を述べるとともに、関連する既往研究を整理した。第 2 章で本研究で動学化するベースとなる hyperpath に基づく経路選択モデル (Bell<sup>9)</sup>) の概要を説明する。第 3 章において本研究で構築するダイナミクスモデルの定式化し、モデル特性について解析するとともに解法アルゴリズムについて説明する。第 4 章において、本研究で構築するモデルを仮想ネットワークに適用する。最後に、第 5 章で本研究の成果と今後の課題について述べる。

## 2. Hyperpath に基づく経路選択モデルの概要

本章では、本研究のベースとなる hyperpath に基づく経路選択モデルの概要を、Bell<sup>9)</sup>をもとに説明する。

### (1) モデルの前提条件

本章で説明するモデルの前提条件は以下の通りである。

- ・ 各リンクのサービス水準を表す最大遅れ時間が存在し、信頼性の高い (低い) リンクの最大遅れ時間は小さい (大きい)。

- ・ 「悲観的な」利用者を想定し、最大遅れ時間を最小にする経路群 (hyperpath) を選択する。

### (2) 記号表記

本章で用いる記号とその意味は以下の通りである。

|         |                       |
|---------|-----------------------|
| $A$     | : リンク集合               |
| $I$     | : ノード集合               |
| $A_i^+$ | : ノード $i$ から流出するリンク集合 |
| $A_i^-$ | : ノード $i$ に流入するリンク集合  |
| $d_a$   | : リンク $a$ の最大遅れ時間     |
| $p_a$   | : リンク $a$ の選択確率       |
| $c_a$   | : リンク $a$ の自由流旅行時間    |
| $Cap_a$ | : リンク $a$ のリンク容量      |
| $w_i$   | : ノード $i$ における最大遅れ時間  |

### (3) 経路選択モデルの定式化

ある OD ペア  $rs$  間の hyperpath の選択確率は、以下の線形計画問題により求めることができる。

$$\min_{p,w} \left( \sum_{a \in A} c_a p_a + \sum_{i \in I} w_i \right) \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{a \in A_i^+} p_a - \sum_{a \in A_i^-} p_a = g_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$p_a d_a \leq w_i, \quad \forall a \in A_i^+, i \in I \quad (3)$$

$$p_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (4)$$

ここに、 $g_i$  は  $i = r$  のときに 1 を、 $i = s$  のときに -1 を、それ以外のときには 0 をとる変数である。このとき、あるノードにおける hyperpath の分岐確率は、最大遅れ時間  $d_a$  に反比例することが知られている。

式(1)から式(4)の解法アルゴリズムは Spiess and Florian<sup>11)</sup>により示されており、さらに Bell<sup>9)</sup>は Astar アルゴリズムをベースに効率化したアルゴリズムを提案している。

### (4) 利用者均衡状態の定義

Bell<sup>9)</sup>のモデルは、各リンクの最大遅れ時間を所与のもとの利用者の経路選択行動を記述しており、また交通需要を考慮していないため利用者均衡状態は定義されていない。本節では全利用者が「悲観的な」経路選択を行うという条件のもと、利用者均衡状態を定義する。

いま、遅れ時間をリンクフローの関数として BPR 関数の第 2 項を用いて以下のように表すことを考える。

$$\hat{d}_a(v_a) = c_a \lambda \left( \frac{v_a}{Cap_a} \right)^\mu, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

ただし、 $v_a$  はリンク  $a$  の交通量であり、 $\lambda$ ,  $\mu$  は BPR 関数におけるパラメータである。なお、式(5)は De Cea and Fernandez<sup>12)</sup>が乗客配分モデルにおいて車内混雑の影響を表現するために導入した「有効頻度」と同様の考え方である。彼らは有効頻度を考慮した乗客配分問題を利用者均衡問題として定式化しており、本研究でも同様の枠組み

で悲観的な利用者による経路選択の結果としての利用者均衡状態の交通量 $v_a^*$ を定義可能であり、また $\hat{d}_a(v_a^*)$ は均衡状態に達したときに実現する遅れ時間と見なすことができる。

### 3. 本研究で構築するモデルの定式化と特性解析

本章では、本研究で構築する day-to-day ダイナミクスモデルの定式化を行う。さらに、ダイナミクスモデルの均衡点が前章で定義した利用者均衡状態と一致することを示すとともに、解法アルゴリズムについて説明する。

#### (1) モデルの前提条件

2 章で設定した前提条件に加えて、本研究では以下の前提条件を仮定する。

- ・ ネットワーク上に「悲観的な」経路選択を行う同質な利用者のみ存在する。
- ・ 交通需要は既知であり、日によって変化しない。
- ・ すべての利用者は、走行前日のすべてのリンクの最大リンク遅れ時間を知ることができる。
- ・ すべての利用者は、初日に認知する最大リンク遅れ時間に基づき経路選択を行うが、翌日以降は前日に実現した最大リンク遅れ時間に基づき最大リンク遅れ時間および利用経路を更新する。
- ・ 初日に認知する各リンクの最大リンク遅れ時間は、すべての利用者について同一である。

なお、本研究では day-to-day のダイナミクスのみを考慮し、within-day のダイナミクスは考慮しないとする。

#### (2) 記号表記

前章で定義した記号に加えて、本章で導入する記号の意味は以下の通りである。

- $x_a^{rs}(t)$  :  $t$  日目, OD ペア  $rs$  間におけるリンク  $a$  の交通量
- $y_a^{rs}(t)$  :  $t$  日目, OD ペア  $rs$  間におけるリンク  $a$  の交通量の目標値
- $d_a(t)$  :  $t$  日目に利用者が認知するリンク  $a$  の最大遅れ時間
- $q_{rs}$  : OD ペア  $rs$  間の交通量
- $\Omega$  : OD ペアの集合
- $H$  : Hyperpath の集合

#### (3) Day-to-day ダイナミクスの定式化

本研究では、He ら<sup>9)</sup>と同様に式(6)に示すダイナミクスによりフローが更新されるとする。

$$x_a^{rs}(t+1) - x_a^{rs}(t) = \alpha(y_a^{rs}(t) - x_a^{rs}(t)) \quad (6)$$

なお、He ら<sup>9)</sup>のモデルではリンク交通量に関するダイナミクスを表しているが、本研究では hyperpath 交通量に関するダイナミクスである点が異なっている。また、利

用者の認知遅れ時間も式(7)により更新されるとする。

$$d_a(t+1) - d_a(t) = \beta(\hat{d}_a(v_a(t)) - d_a(t)) \quad (7)$$

ただし、 $\hat{d}_a(v_a(t))$ は式(5)により定義される $t$ 日目に実現したリンク遅れ時間であり、 $v_a(t) = \sum_{rs \in \Omega} x_a^{rs}(t)$ である。また、 $0 < \alpha \leq 1$ ,  $0 < \beta \leq 1$ はリンクフローならびに認知される最大遅れ時間の変化割合を表すパラメータである。式(6)における $y_a^{rs}(t) - x_a^{rs}(t)$ は day-to-day ダイナミクスにおける変化する方向を表しており、 $t$ 日目における交通量の目標値である $y_a^{rs}(t)$ は、 $t$ 日目におけるリンク交通量 $\mathbf{x}(t)$ と認知リンク遅れ時間 $\mathbf{d}(t)$ が所与のもと、以下の最小化問題を解くことにより求める。

$$\min_{\mathbf{y}, \mathbf{w}} \sum_{rs \in \Omega} \left[ \lambda \left\{ \sum_{a \in A} c_a y_a^{rs}(t) + \sum_{i \in I} w_i^{rs} \right\} + (1 - \lambda) D(\mathbf{x}^{rs}(t), \mathbf{y}^{rs}(t)) \right] \quad (8)$$

subject to

$$\sum_{a \in A_i^+} y_a^{rs}(t) - \sum_{a \in A_i^-} y_a^{rs}(t) = \hat{g}_i, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$y_a^{rs}(t) d_a(t) \leq w_i^{rs}, \quad \forall a \in A_i^+, i \in I, rs \in \Omega \quad (10)$$

$$y_a^{rs}(t) \geq 0, \quad \forall a \in A, rs \in \Omega \quad (11)$$

ここに、 $\hat{g}_i$ は $i = r$ のときに $q_{rs}$ を、 $i = s$ のときに $-q_{rs}$ を、それ以外のときには0をとる変数である。また、 $0 < \lambda < 1$ である。式(8)の第1項は、OD ペアごとに hyperpath 交通量を未知変数として計算される、期待最小 hyperpath コストをすべての OD ペアについて足し合わせたものである。また、式(8)の第2項における $D(\mathbf{x}^{rs}(t), \mathbf{y}^{rs}(t))$ は目標交通量 $\mathbf{y}^{rs}(t)$ と現時点の交通量 $\mathbf{x}^{rs}(t)$ の間の距離を表しており、本研究では以下のように表す。

$$D(\mathbf{x}^{rs}(t), \mathbf{y}^{rs}(t)) = \sum_{a \in A} (y_a^{rs}(t) - x_a^{rs}(t))^2 \quad (12)$$

#### (4) モデルの均衡点の特性解析

本節では、式(6), (7), (8), (12)で記述されるダイナミクスモデルの均衡点(が存在する場合)は、第2章で定義した利用者均衡の点と一致することを示す。

まず、式(8)は以下の2つの最適化問題の解を重み付け合計したものと見なすことができる。

$$\min_{\mathbf{y}(t) \in H} \sum_{rs \in \Omega} \left\{ \sum_{a \in A} c_a y_a^{rs}(t) + \sum_{i \in I} \max_{a \in A_i^+} (y_a^{rs}(t) d_a(t)) \right\} \quad (13)$$

$$\min_{\mathbf{y}(t) \in H} \sum_{rs \in \Omega} \{ D(\mathbf{x}^{rs}(t), \mathbf{y}^{rs}(t)) \} \quad (14)$$

ただし、式(13)は式(8)の第1項と同値であるが、 $d_a(t)$ の関数でもあることを明示的に示すために、式(8)の第1項と式(10)と組み合わせて表現している。このとき、以下

の補題 1 が成立する。

### 補題 1

所与の  $\mathbf{x}(t)$  および  $\mathbf{x}(t)$  から更新される  $\mathbf{d}(t)$  に対して、以下の 2 つの命題は同値である。

$P_1$  : hyperpath フロー  $\mathbf{y}(t)$  は式(13)の解である。

$Q_1$  :  $\mathbf{y}(t)$  は全 OD 需要を最小コストの hyperpath に配分された結果のフローである。

#### 【証明】

認知リンク遅れ時間  $\mathbf{d}(t)$  が所与であるので、ある OD ペアの hyperpath 交通量は他の OD ペアの経路選択に影響を及ぼさない。したがって、式(13)は OD ペアごとに最小コスト hyperpath に需要を配分する問題に帰着できるため、補題 1 は証明される。

Q.E.D.

補題 1 から、補題 2 を導くことができる。

### 補題 2

以下の 2 つの命題は同値である。

$P_2$  :  $\mathbf{x}(t)$  は利用者均衡状態を満たす hyperpath フローである。

$Q_2$  :  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)$  は所与の  $\mathbf{x}(t)$  および  $\mathbf{x}(t)$  から更新される  $\mathbf{d}(t)$  に対して、式(13)の解である。

#### 【証明】

まず、命題  $P_2$  が成立していると仮定する。このとき、遅れ時間が所与であれば利用者均衡状態の定義から最小コスト hyperpath に全 OD 需要が流れているはずである。この事実と、補題 1 から、 $P_2 \Rightarrow Q_2$  は成り立つ。

次に、命題  $Q_2$  が成立していると仮定する。このとき、補題 1 より、 $\mathbf{x}(t) (= \mathbf{y}(t))$  は  $\mathbf{x}(t)$  から更新されるリンク遅れ時間が所与のとき、最小コスト hyperpath に全 OD 需要を配分した結果の交通量を表しているが、これは交通量  $\mathbf{x}(t)$  が利用者均衡状態を満たしていることに他ならない。したがって、 $Q_2 \Rightarrow P_2$  は成り立つ。

以上より、補題 2 は証明された。

Q.E.D.

最後に、以下の補題 3 を考えよう。

### 補題 3

所与の  $\mathbf{x}(t)$  および  $\mathbf{x}(t)$  から更新される  $\mathbf{d}(t)$  に対して、以下の 2 つの命題は同値である。

$P_3$  :  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)$  は式(8)の解である。

$Q_3$  :  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)$  は式(13)の解である。

#### 【証明】

He ら<sup>9)</sup>の Lemma 3 の証明と同様に示すことができる。

Q.E.D.

補題 2 と補題 3 を組み合わせることにより、以下に示す定理 1 が成り立ち、本研究で構築するモデルの均衡点は利用者均衡の点と一致することが示される。

### 定理 1

以下の 2 つの命題は同値である。

$P_4$  :  $\mathbf{x}(t)$  は式(6), (7), (8)~(12)で記述されるダイナミクスモデルの均衡点である。

$Q_4$  :  $\mathbf{x}(t)$  は利用者均衡状態を満たす hyperpath フローである。

### (5) 解法アルゴリズム

本研究で構築した day-to-day ダイナミクスモデルの計算フローは以下の通りである。

#### Step 1 初期値設定

$t = 1$  とする。利用者が認知する最大遅れ時間  $\mathbf{d}(t)$  を与える。 $\mathbf{d}(t)$  を所与としたときの hyperpath フロー  $\mathbf{x}(t)$  を求める。 $t = t + 1$  とする。

#### Step 2 day-to-day ダイナミクスの計算

式(6), (7), (8)~(11)および式(12)で記述されるダイナミクスにより、hyperpath フローならびに認知遅れ時間を更新する。

#### Step 3 終了判定

$t = T$  (計算対象の最終日) であれば計算を終了し、そうでなければ  $t = t + 1$  として Step 2 に戻る。

なお、Step 2 において式(8)から式(11)で記述される最小化問題を解き、hyperpath フローの目標値  $\mathbf{y}(t)$  を求める必要がある。式(8)における第 1 項は OD ペアごとに分離可能であり、また  $D(\mathbf{x}^{rs}(t), \mathbf{y}^{rs}(t))$  を式(12)のように定義しているので、明らかに第 2 項も OD ペアごとに分離可能である。また、式(9)から式(11)の制約条件も明らかに OD ペアごとに分離可能であるので、式(8)から式(11)で記述される最小化問題は OD ペアごとに分離可能となる。ただし、式(8)は Bellman の最適性の原理が成立しないため、内点法を用いて直接的に最適化問題を解くことにより  $t$  日目における交通量の目標値である  $\mathbf{y}_a^{rs}(t)$  を求める。

## 4. ケーススタディ

### (1) ケース設定

本章では、構築したモデルを図-1 に示す仮想ネットワークに適用することにより、収束性等の特性を数値的に



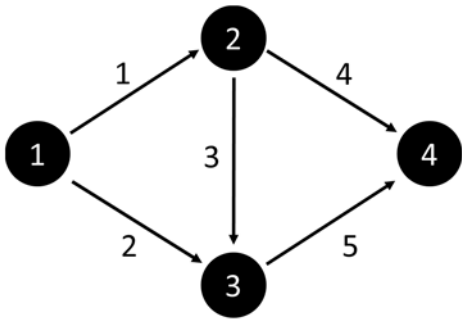
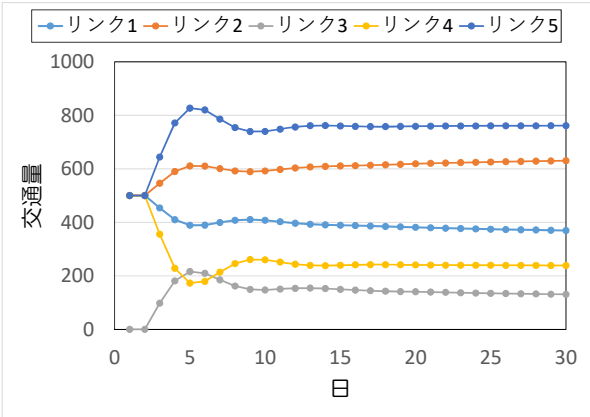
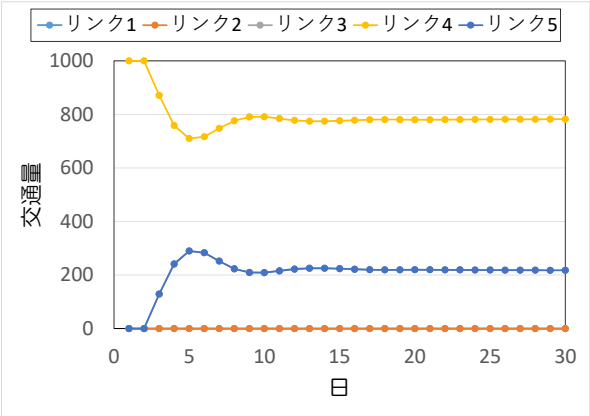


図-1 想定した仮想ネットワーク



(a) OD ペア(1,4)



(b) OD ペア(2,4)

図-2 ODペアごとのリンク交通量のダイナミクス

確認する。すべてのリンクにおける自由流旅行時間，容量，最大認知遅れ時間の初期値はそれぞれ 20，400，40 と設定し，OD ペア 1・4 間，2・4 間にそれぞれ 1000 台の交通需要を設定した。

(2) ベースケースにおける均衡解への収束過程

まず， $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 0.5$ ， $\lambda = 0.85$ をベースケースとして，リンク遅れ時間と OD ペア別のリンク交通量のダイナミクスを分析し，構築したモデルが均衡解へ収束しているか確認する。

図-2 に OD ペアごとのリンク交通量のダイナミクスを示す。また，図-3 に各リンクの認知遅れ時間のダイナミクス

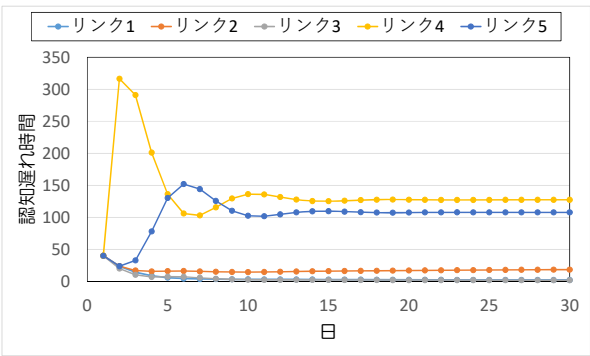


図- 3 各リンクの認知遅れ時間のダイナミクス

表-1 遅れ時間の認知値と実現値の比較 (30 日目)

| リンク ID | 認知遅れ時間 | 遅れ時間の実現値 |
|--------|--------|----------|
| 1      | 2.21   | 2.19     |
| 2      | 18.39  | 18.50    |
| 3      | 1.75   | 1.73     |
| 4      | 127.34 | 127.34   |
| 5      | 107.65 | 107.65   |

表-2 OD ペア(2,4)間における 30 日目の hyperpath コストの比較

| Hyperpath | 2→4   | 2→3→4 | 2→4 or 2→3→4 |
|-----------|-------|-------|--------------|
| コスト       | 147.3 | 149.5 | 146.0        |

クスを示す。図-2 を見ると，OD ペア(1,4)，(2,4)ともに 5 日目において過度に変動している。これは図-3 を見てもわかるように 2 日目から 4 日目頃にかけてリンク 4 の認知遅れ時間が大きく増加し，利用者はこれをもとに経路選択を行ったためであると考えられる。しかし，日数が経過するとともに，両 OD ペアのリンク交通量ともある値に収束しているといえる。

表-1 に遅れ時間の認知値と実現値の比較を示す。遅れ時間の実現値は，式(5)に 30 日目のリンク交通量を代入して算出したものである。これを見ると，すべてのリンクにおいて認知遅れ時間の認知値と実現値が十分に近いことから，30 日目において均衡解に近づいているといえる。表-2 に，30 日目における OD ペア(2,4)間に存在する全 hyperpath のコストを示す。例えば，「2→4 or 2→3→4」の hyperpath コストは，

$$\left\{ \frac{1}{127.34} \times 20 + \frac{1}{1.75} \times (40 + 107.65) \right\} / \left( \frac{1}{127.34} + \frac{1}{1.75} \right)$$

により計算される。表-2 を見ると，3 つの hyperpath コストは非常に近い値をとっているといえる。表-1 で確認したように遅れ時間の認知値と実現値が完全には一致しておらず，30 日目では完全には均衡解に達していないため 3 つの hyperpath コストは一致していないが，均衡解に到達すれば 3 つの hyperpath コストは一致する可能性があるといえる。

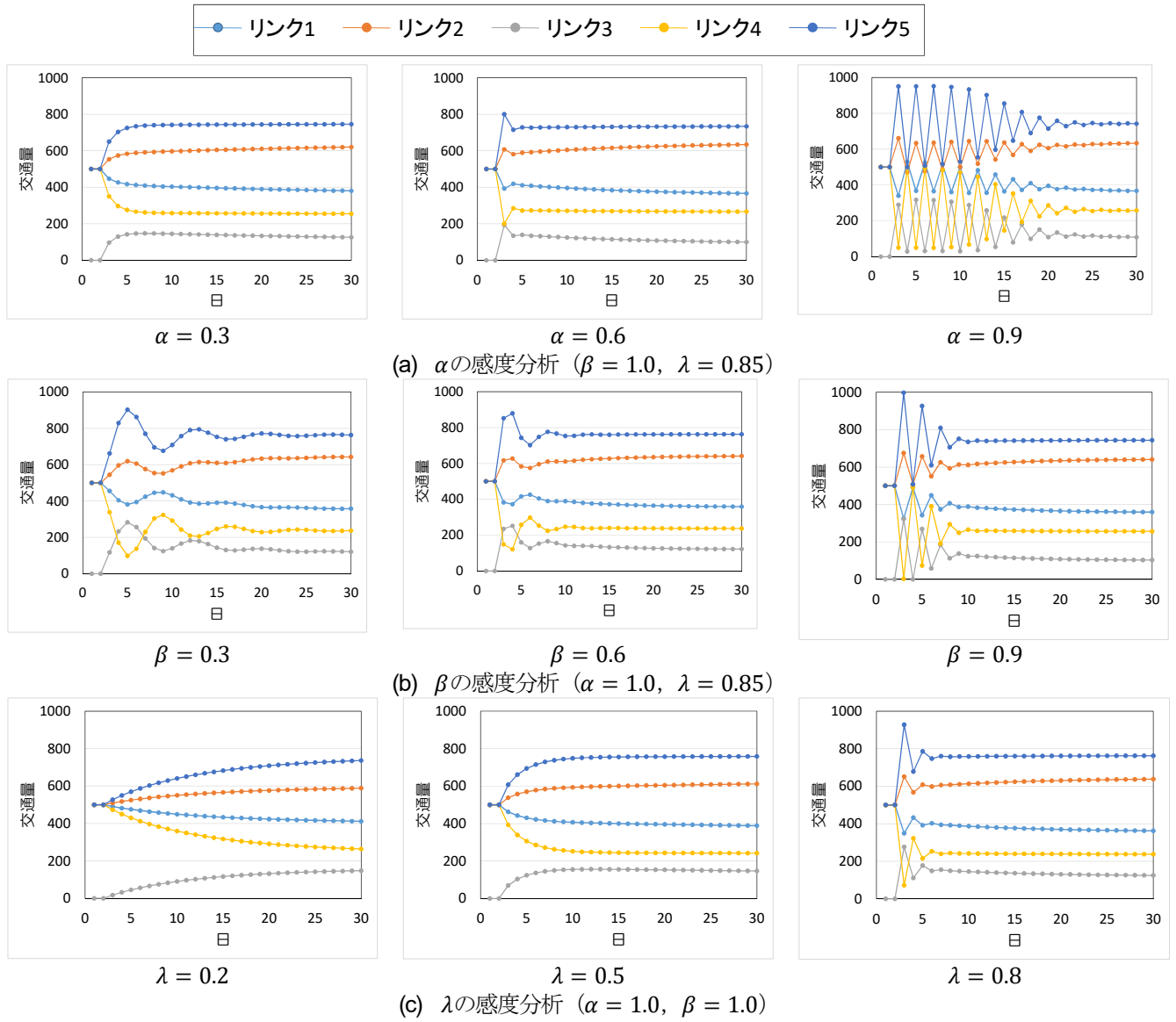


図-3 パラメータの感度分析

### (3) パラメータの感度分析

次に、ダイナミクスに関するパラメータ $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ が計算結果に及ぼす影響について分析する。図-3(a), (b), (c)にそれぞれ $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ のみを変化させたときの、リンク交通量のダイナミクスを示す。

まず、図-3(a)から $\alpha = 0.3$ のときは初期の頃のリンク交通量の変動は小さくなく、 $\alpha = 0.6$ のときも3日目にリンク2, リンク5の交通量がやや大きくなっているものの、初期の頃のリンク交通量の変動は大きくないといえる。しかし、 $\alpha = 0.9$ のときは20日目頃までのリンク交通量の変動が大きいことがわかる。これは、式(6)に示すように $\alpha$ が大きくなるにしたがい、リンク交通量を更新する際に前日のそれを参照しなくなるためであるといえる。また、すべてのケースにおいて、30日目では均衡解に収束していることも確認できる。

次に、図-3(b)から $\beta$ についても、 $\alpha$ と同様に大きくなるにつれて初期の頃のリンク交通量の変動が大きくなる

ことが読み取れる。これは、式(7)に示すように $\beta$ が大きくなるにしたがい、利用者は自身が認知する最大リンク遅れ時間を、前日に実現した遅れ時間により重きを置いて更新するためであるといえる。また、すべてのケースにおいて、30日目では均衡解に収束していることも確認できる。

最後に、図-3(c)から $\lambda$ についても、 $\alpha$ ,  $\beta$ と同様に大きくなるにつれて初期の頃のリンク交通量の変動が大きくなることが読み取れる。また、 $\beta$ と同様に $\lambda$ が大きくなるほど、早く均衡解に収束していることが読み取れる。これは、式(8)に示すように $\lambda$ が大きくなるにしたがい、利用者が当日に認知する交通状況に応じた経路選択により重きを置くためであるといえる。

## 5. おわりに

本研究では, hyperpath に基づく Day-to-Day ダイナミクスモデルの構築を行った. 従来のダイナミクスモデルは経路交通量を更新するものであるが, 本研究では He ら<sup>9)</sup>のモデルを拡張し hyperpath 交通量の更新を行った. モデルの定式化及び均衡点の特性解析を行った後に, 提案したモデルを仮想ネットワークへ適用した結果, 数値的であるが収束性を確認した. またモデルの計算結果の妥当性も確認することができた.

今後の課題として, 本研究で構築したダイナミクスモデルの均衡解が存在することを解析的に示すこと, ならびに大規模なネットワークへの適用が考えられる.

#### 参考文献

- 1) Smith, M.J.: The stability of a dynamic model of traffic assignment – an application of a method of Lyapunov, *Transportation Science* 18(3), 259-304, 1984.
- 2) Fries, T. L., Bernstein, D., Mehta N. J., Tobin, R. L. and Ganjalieca, S: Day-to-day dynamic network disequilibria and idealized traveler information systems, *Operation Research* 42(6), 1120-1136, 1994.
- 3) Zhang, D. and Nagurney, A: On the local and global stability of a travel route choice adjustment process, *Transportation Research Part B*, 30(4), 245-262, 1996.
- 4) Gao, B., Zhang, R., and Lou, X.: Modeling day-to-day flow dynamics on degradable transport network, *PLoS ONE* 11(12), 2016
- 5) 中山晶一郎: 経路選択行動の day-to-day ダイナミクスと交通ネットワーク均衡の形成プロセス, 土木学会論文集 D, 65(1), 1-11, 2009.
- 6) He, X. Guo, X. and Liu, H.: A link-based day-to-day traffic dynamic model, *Transportation Research Part B* 44(4), 597-608, 2010.
- 7) Han, L., and Du, L.: On a link-based day-to-day traffic assignment model, *Transportation Research Part B* 46, 72-84, 2012.
- 8) He, X. and Liu, X.: Modeling the day-to-day traffic evolution process after an unexpected network disruption, *Transportation Research Part B* 46, 50-71, 2012
- 9) Bell, M.G.H: Hypersyar: A multi-path A star algorithm for risk averse vehicle navigation, *Transportation Research Part B* 43, 97-107, 2009.
- 10) Ma, J. and Fukuda, D.: A hyperpath-based network generalized extreme-value model for route choice under uncertainties, *Transportation Research Part C* 59, 19-31, 2015.
- 11) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Research Part B* 23, 83-102, 1989.
- 12) De Cea, J. and Fernandez, E.: Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model, *Transportation Science* 27, 133-147, 1993.

(2017. 7. 31 受付)

## A HYPERPATH-BASED DAY-TO-DAY DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL

Kodai MERA and Hiroshi SHIMAMOTO