

# トリップチェーンを考慮した 観光周遊行動モデルに関する研究

清水 春来<sup>1</sup>・加藤 哲平<sup>2</sup>・内田 賢悦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生員 北海道大学大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: h-shimizu\_123@eis.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>学生員 北海道大学大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: iepet@eis.hokudai.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、トリップチェーンを考慮した観光周遊行動モデルを提案する。広域観光周遊においては、1日の観光行動全体を通して効用を最大化することが想定されるため、その行動軌跡であるトリップチェーンに基づいたアプローチの重要性は高い。トリップチェーン列挙時の組合せ爆発を緩和するため、時間制約及び目的地選択行動の要因を考慮することで、低負荷なトリップチェーン生成アルゴリズムの構築を目指す。また、生成されたトリップチェーンを対象として最適時間配分を求めるため、効用関数の形を特定したうえで効用最大化問題の定式化を行う。最後に、テストネットワークによる数値計算例を示し、本モデルの有効性を確認する。

**Key Words :** , *tourist excursion behavior model, trip chain, time allocation, utility theory*

## 1. はじめに

近年、インバウンドの増加に伴い、観光産業への注目が高まっている。訪日外国人旅行者数及びその旅行消費額は年々増加しており、2016年には、年間約2400万人、約3.7兆円に到達した<sup>1)</sup>。2017年に入っても、増加は衰えておらず、今後も旅行市場の拡大が見込まれている。これを受けて政府は、広域観光周遊ルート形成促進事業を行っている。この事業には、広域に点在する観光資源を相互に結び付け、相乗的に魅力を創出することで、観光客の回遊性を向上させるとともに、滞在期間の増加を促すという狙いがある。広域観光の適切なルート計画を立案するにあたって、観光客の周遊行動を把握および分析し、その結果を活用することが重要である。

観光行動モデルに関する既往研究では、Nested Logit Model を用いて逐次的な意思決定をモデル化するものが多い。例えば、荒木ら<sup>2)</sup>は、中心市街地の歩行者回遊行動に着目し、移動距離に対する抵抗や施設、街路構成の魅力度を導入した訪問店舗選択モデルを構築した。溝上ら<sup>3)</sup>は、観光目的地選択と合わせて、各観光地における滞在時間選択に Weibull 分布を仮定した Duration Model と

して表現し、時間軸に沿った連続的な目的地選択行動モデルを構築した。観光地間の移動距離が長い広域観光周遊では、移動時間の不確実性を考慮した上でスケジュールを組むことが想定されるが、これらの研究でそうした行動は考慮されていない。

Fosgerau ら<sup>4)</sup>は、遅着・早着時間の限界効用を考慮した、移動時間の不確実性下における出発時間決定モデル (scheduling preferences model) を提案した。このモデルを旅行者の観光周遊行動に適用するためには、トリップチェーン (trip chain, 以下 TC とする) を考慮可能な枠組みに拡張する必要がある。

そこで本研究では、観光客の TC に着目し、TC 全体を通して効用を最大化する観光行動モデルを提案する。このモデルでは、観光客の周遊地と滞在時間の選択行動が表現される。

本研究の構成は以下の通りである。第2章では、観光周遊行動を TC を用いて表現する。第3章では、効用関数を仮定して、TC 生成アルゴリズムの構築を行う。第4章では、最適滞在時間配分モデルを構築する。第5章では、構築したモデルをテストネットワークに適用した数値計算例を示す。

## 2. トリップチェーン(TC)の定義

### (1) 記号

$S_i$  :  $i$  番目に訪れる観光地ノード ( $1 \leq i \leq |N|$ )

$S_o$  : 出発地ノード

$S_d$  : 目的地ノード

$t_{i,j}$  :  $S_i$  から  $S_j$  への移動時間

$d_i$  :  $S_i$  における滞在時間

$T_d$  : 可処分時間

$N$  : TC に含まれるノード集合,  $N = \{S_1, S_2, \dots, S_{|N|}\}$

### (2) TCを用いた観光周遊行動の表現

観光客は出発地ノード  $S_o$  を出発して、移動時間  $t_{o,1}$  をかけて観光地ノード (以下、ノードとする)  $S_1$  に到着する。  $S_1$  に滞在時間  $d_1$  だけ滞り、次のノード  $S_2$  に向けて出発する。この手順を繰り返して、可処分時間  $T_d$  の中で、  $|N|$  個のノードを巡って、目的地ノード  $S_d$  に到着する。この一連の観光周遊行動は、TC によって表現可能となる (図-1)。

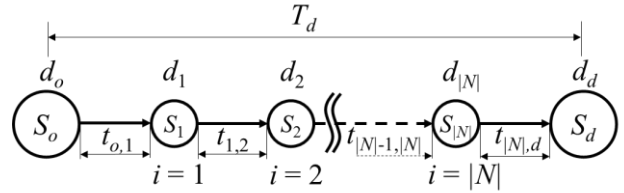


図-1 TCによる観光周遊行動の表現

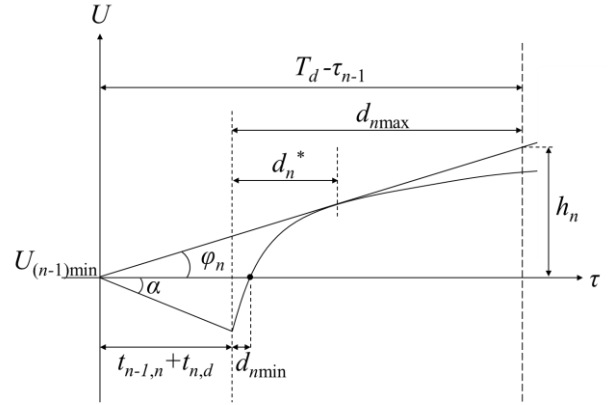


図-2 アルゴリズムの概念図

## 3. TC生成アルゴリズムの構築

### (1) アルゴリズムの必要性

あるノード集合がある場合、それらのノードから最適なTCを生成する最も単純な方法として、可能なすべてのTCを列挙し、その中から最適なTCを探す完全列挙法がある。しかしこの方法では、ノード数が増大すると検討対象となるTC数は爆発的に増加するため、計算コストが非常に大きくなる。そこで本研究では、多数のノードを対象とした分析にも適用可能な、計算コストの小さいTC生成アルゴリズムを構築する。

### (2) 記号

$u_n(d_n)$  :  $S_n$  における滞在時間  $d_n$  による効用関数

$d_{nmax}$  :  $S_n$  における最大滞在可能時間

$\phi_n$  :  $S_n$  における滞在による最大の限界効用

$d_n^*$  :  $S_n$  における滞在による限界効用が  $\phi_n$  となるときにの滞在時間

$U_{nmin}$  : 次の滞在( $n+1$ )で満たされるべき最低効用

$d_{nmin}$  :  $S_n$  における最低滞在時間

### (3) 仮定

本研究では、アルゴリズムの生成に際して、観光客の効用に関する以下の条件を仮定する。

- ・ 移動は観光地に滞在するための派生需要であり、観光客に不効用をもたらす。
- ・ 滞在時間の限界効用は正であり、滞在時間が長くなるほど逓減する。つまり、以下の条件を満たす。

$$\frac{du_n}{dd_n} > 0, \quad \frac{d^2u_n}{dd_n^2} < 0 \quad (1)$$

### (4) アルゴリズムの概要

TC生成アルゴリズムの概要を図-2を用いて説明しよう。横軸に出発からの時刻  $\tau$ 、縦軸に観光客の総効用  $U$  をとる。今、 $S_{n+1}$  を時刻  $\tau_{n+1}$  に出発して  $S_n$  に向かう場合を考える。この時、 $S_{n+1}$  を出発してから  $S_d$  へする到着までに残された可処分時間は  $T_d - \tau_{n+1}$  で表される。図-2では、効用を表す効用曲線を1つしか示していないが、実際には選択可能なノードの数だけ存在する。観光客は、①現在いる  $S_{n+1}$  から次の選択可能なノード  $S_n$  までの移動時間  $t_{n+1,n}$ 、②  $S_n$  から目的地ノード  $S_d$  までの移動時間  $t_{n,d}$ 、③  $S_n$  での滞在で得られる効用  $u_n$ 、④  $S_n$  での最大滞在可能時間  $d_{nmax}$  を考慮して、次の観光地ノードを選択する。

ノード間の移動では、移動時間による不効用を得る。本研究では、移動時間に比例する不効用を想定しており、その比例定数を  $\alpha$  で表す。  $S_{n+1}$  から  $S_n$  まで移動する際に、  $S_n$  までの移動時間  $t_{n+1,n}$  だけでなく、  $S_n$  から最終目的地ノード  $S_d$  へ移動するのに必要な時間  $t_{n,d}$  も考える。つまり、  $S_n$  へ移動するとき最低でも経験する移動時間  $t_{n+1,n} + t_{n,d}$  を考えて行動する。したがって、可処分時間  $T_d - \tau_{n+1}$  から、  $t_{n+1,n} + t_{n,d}$  を引いた時間が、  $S_n$  における最大可能滞在時間  $d_{nmax}$  となる。

$S_n$  に到着すると、そこでの滞在時間に応じて効用を得る。したがって、  $S_n$  を選択したときには滞在時間に応じた効用から移動による不効用を引いた効用を得ることになる。本節で考えているケースでは、  $S_n$  を選択したときに  $u_n(d_n) - \alpha(t_{n+1,n} + t_{n,d})$  だけ効用が得られる。  $S_{n+1}$  出発時の効

用を基準として、 $S_n$  を選択したときに得られる限界効用の最大値は  $\varphi_n$  で与えられる。図では、縦軸と横軸の交点( $S_{n-1}$  出発時の効用)を通る効用曲線の接線と横軸のなす角で  $\varphi_n$  が与えられている。ちなみに、 $S_n$  へ移動するときに最低でも経験する移動時間  $t_{n-1,n}+t_{n,d}$  からこの接点までの時間を  $d_n^*$  とする。最大限界効用  $\varphi_n$  に可処分時間  $T_d$   $\tau_{n-1}$  をかけることで与えられる値  $h_n$  を  $S_n$  を選択するかどうかの指標値として用いる。提案するアルゴリズムでは、この指標値  $h_n$  を、全ての選択可能なノードについて求め、最大となるノードを選択する。また、次のノードを選択したときの最大可能滞在時間が負の値を取る時に探索を終了する。

(5) アルゴリズムの定式化

$S_n$  を選択した後に、 $S_{n-1}$  で得ていた効用  $U_{(n-1)\min}$  と同一の効用を得るために必要な最低滞在時間  $d_{n\min}$  は、以下の方程式の解で与えられる。

$$\alpha(t_{n-1,n} + t_{n,d}) + u_n(d_{n\min}) = 0 \quad (n \geq 1) \quad (2)$$

$d_{n\min}$  を用いると、 $S_n$  における最大滞在可能時間  $d_{n\max}$  が以下の式で与えられる。

$$\begin{cases} d_{1\max} = T_d - t_{o,1} - t_{1,d} & (\text{if } n=1) \\ d_{n\max} = d_{(n-1)\max} + t_{n-1,d} - d_{(n-1)\min} - t_{n-1,n} - t_{n,d} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $d_{n\max} > 0$  である。

また、最大限界効用と限界効用の関係より、以下の方程式が成り立つ。

$$\begin{cases} \varphi_n = \frac{\alpha(t_{n-1,n} + t_{n,d}) + u_n(d_{n\max})}{t_{n-1,n} + t_{n,d} + d_{n\max}} & (\text{if } d_n^* > d_{n\max}) \\ \varphi_n = \frac{\alpha(t_{n-1,n} + t_{n,d}) + u_n(d_n^*)}{t_{n-1,n} + t_{n,d} + d_n^*} = \frac{du_n}{dd_n} \Big|_{d_n=d_n^*} & (\text{if } d_n^* \leq d_{n\max}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)を  $d_n^*$  について解き、解を再び式(4)に代入することで最大限界効用  $\varphi_n$  が得られる。この値を用いることで、ノード選択の基準となる変数  $h_n$  が以下の式から求める。

$$h_n = \varphi_n(d_{n\max} + t_{n-1,n} + t_{n,d}) \quad (5)$$

ここで、選択可能なノードのうち、 $h_n$  が最大となるノードを選択する。

$S_n$  に到達した時点で得られる効用  $U_{n\min}$  は、式(6)で与えられる。

$$\begin{cases} U_{o\min} = 0 & (n=0) \\ U_{n\min} = U_{(n-1)\min} + \alpha t_{n-1,n} + u_n(d_{n\min}) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

次に  $n=n+1$  とすることで、 $n+1$  番目のノードを選択する問題を考えることができる。

表-1 各種パラメータ

Node	2	3	4	5	6	7	8	$\alpha$
$\beta_i$	0.27	0.24	0.31	0.33	0.30	0.21	0.26	-0.01

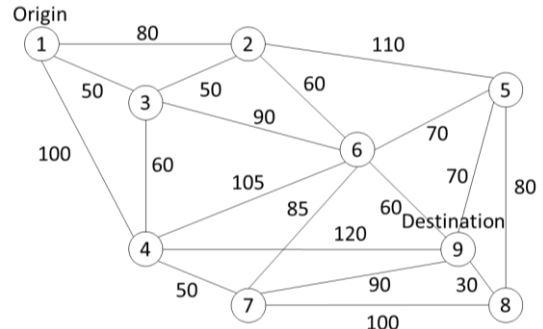


図-3 テストネットワーク

$d_{n\max}$  が非負である限り、式(2)から(6)の計算を繰り返す行い、 $h_n$  が最大となるノードを選択し、式(6)で得られた  $U_{n\min}$  を元に次の試行へ移行する。最終的に生成される TC はアルゴリズムにより抽出されたノードの点列を分解したものである。

4. 滞在時間配分モデルの構築

時間配分問題は、 $S_n$  の滞在時間  $d_n$  に関する効用関数を  $u_n(d_n) = (d_n)^{\beta_n}$  と仮定することで、以下に示す効用最大化問題として定式化できる。ここに、移動時間  $t_{ij}$  は TC 生成過程より既知である。

$$\max U(d_1, \dots, d_{|N|}) = \alpha \left\{ t_{o,1} + t_{|N|,d} + \sum_{k=1}^{|N|-1} t_{k,k+1} \right\} + \sum_{n \in N} d_n^{\beta_n} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } T_d = t_{o,1} + t_{|N|,d} + \sum_{k=1}^{|N|-1} t_{k,k+1} + \sum_{n \in N} d_n \quad (8)$$

$$\alpha < 0, 0 < \beta_i < 1, d_i \geq 0, t_{i,j} \geq 0 \quad (9)$$

ここで、 $\beta_i$  は滞在時間に関するパラメータを表す。

上記の効用最大化問題を部分双対化を用いて解く。ラグランジュ乗数  $\lambda$  を用いると、効用最大化問題のラグランジュ関数は式(10)で与えられる。この時、1 階の最適性条件は式(11)、(12)で与えられる。したがって、式(12)を解くことで各ノードの最適滞在時間  $\hat{d}_n$  が求められる。

$$L = U(d_1, \dots, d_{|N|}) + \lambda \left( T_d - t_{o,1} - t_{|N|,d} - \sum_{k=1}^{|N|-1} t_{k,k+1} - \sum_{n \in N} d_n \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = T_d - t_{o,1} - t_{|N|,d} - \sum_{k=1}^{|N|-1} t_{k,k+1} - \sum_{n \in N} d_n = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial d_n} = \beta_n d_n^{\beta_n - 1} - \lambda = 0 \quad (n = 1, \dots, |N|) \quad (12)$$

### 5. 数値計算例

図-3 に示されるテストネットワークを用いた数値計算例を示す。テストネットワークには 9 つのノードと、19 本のリンクが存在する。図-3 において、各リンクの上部に付された値はリンクの移動時間  $t_i$ (分)を示す。また、可処分時間  $T_d$  は 600 分とし、移動時間と滞在時間による効用に関するパラメータは表-1 のように設定した。

$S_o$  から  $S_d$  に向かって行う計算を正方向探索 (forward direction search, 以下 FDS とする), 対して  $S_d$  から  $S_o$  に向かって行う計算を逆方向探索 (backward direction search, 以下 BDS) とする。FDS 及び BDS による TC 生成および滞在時間配分の数値計算結果と、完全列挙法 (complete enumeration method, 以下 CEM とする) によって得られた最適 TC を表-2 の 1~3 行目に示す。表-2 より、FDS 及び BDS の計算による TC の効用が、最適 TC の効用よりも小さいことから、単路計算では提案するアルゴリズムによって最適 TC が生成されない場合があることが確認された。

そこで本研究では、FDS と BDS で選択された最適 TC に含まれたリンク、ノードを組み合わせることでいくつかの TC を生成し、それら全ての TC を対象として最適時間配分を行い、効用が最大となる TC を新たな最適 TC とおく両方向探索 (two direction search, 以下 TDS とする) を提案する。以下にその手順を示す。

1. FDS 及び BDS によって生成された、TC に含まれるノードとリンクから有向グラフを作成する。
2.  $S_o$  から  $S_d$  に至る経路を列挙し TC を生成する。

本章で行った数値計算例では、により得られた TC のうち、効用が最大となる TC が、TDS によって得られた最適 TC と一致することが確認された (表-2)。

### 5. まとめ

本研究では、観光周遊行動を TC を用いて表現し、TC 全体の効用を最大化するような観光行動モデルを構築した。最適な TC を発見するために、すべての TC を調べ上げるのは計算コストが非常に大きい。これに対し、滞在時間に対して限界効用が正かつ通減する滞在効用と、移動時間に対して線形の移動不効用、そして出発から最終目的地到着までの時間制約を考慮した TC 生成アルゴリズムを構築した。また、生成された TC を対象として、最適な滞在時間を決定する効用最大化問題の定式化を行った。

数値計算においては、仮想のネットワーク上で TC 生成アルゴリズムおよび滞在時間配分モデルを適用した。計算結果として、TC 生成アルゴリズムを、出発地を始

表-2 数値計算結果 (TC 生成及び最適時間配分)

Type	n	1	2	3	4	5	U
FDS	TC	6	5	8			8,541
	$\hat{d}_n$ (分)	91.6	129.3	59.1			
BDS	TC	6	2	3	4		9,904
	$\hat{d}_n$ (分)	80.2	58.0	42.3	89.6		
CEM	TC	3	2	6	5	8	12,016
	$\hat{d}_n$ (分)	32.5	44.1	60.2	83.4	39.8	
TDS	TC	3	2	6	5	8	12,016
	$\hat{d}_n$ (分)	32.5	44.1	60.2	83.4	39.8	

点として適用したパターン(FDS), 最終目的地を始点として適用したパターン(BDS), すべての TC を列挙したパターン(CEM), FDS と BDS の結果を組み合わせるいくつかの TC を列挙したパターン(TDS)の 4 パターンで最適な TC と滞在時間を求めた。その際、TDS の結果を用いることで CEM と同一の最適 TC が生成されることを確認した。今後は、この手法によって得られる解の妥当性を検討するためのモデルの数学的特性の解明と、モデルの改良が今後の課題である。

### 付録 1

ここでは、提案するアルゴリズムに関する数学的特性を示す。図-2 より、効用曲線と  $S_{n-1}$  に得ていた効用  $U_{n-1, n, d}$  を通る直線の接点及びその接線の傾きに注目すると、式(17-18)を得る。

$$u_n(d_n^*) + \alpha t_{n-1, n, d} = u'_n(d_n^*) (t_{n-1, n, d} + d_n^*) \quad (13)$$

$$\varphi_n = \frac{u_n(d_n^*) + \alpha t_{n-1, n, d}}{t_{n-1, n, d} + d_n^*} \quad (14)$$

ただし、 $t_{n-1, n, d} = t_{n-1, n} + t_{n, d}$  である。

式(13), (14)及び式(1), (9)より以下の特性が示される。

$$\frac{\partial d_n^*}{\partial t_{n-1, n, d}} > 0, \quad \frac{\partial d_n^*}{\partial \alpha} < 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \varphi_n}{\partial t_{n-1, n, d}} < 0, \quad \frac{\partial \varphi_n}{\partial \alpha} > 0 \quad (16)$$

式(15)はそれぞれ、移動時間及びその限界不効用の増加によって、最大限界効用を得るまでの滞在時間が長くなることを示している。式(16)はそれぞれ、移動時間及びその限界不効用の増加に対して、最大限界効用が減少することを示している。

## 付録 2

ここでは、第4章で定式化した滞在時間配分モデルのパラメータ推定について述べる。今、ある観光客の最適なTCが観測され、そのTCに含まれる各ノード $S_n$ での滞在時間 $\hat{d}_n$ が与えられているとする。このとき、滞在時間に関するパラメータ $\beta_n$ を推定する。

最適TCを仮定すると、式(12)から式(17)が導かれる。

$$\beta_n (\hat{d}_n)^{\beta_n - 1} = \lambda \quad (n=1, \dots, |N|) \quad (17)$$

適当な $\lambda$ を与えると、式(17)を満たす $\hat{\beta}_n(\lambda)$ が得られる。観測された回遊行動が起こる条件は、式(18)で与えられる。

$$\alpha \left\{ t_{o,1} + t_{|N|,d} + \sum_{k=1}^{|N|-1} t_{k,k+1} \right\} + \sum_{n \in N} (\hat{d}_n)^{\hat{\beta}_n(\lambda)} > 0 \quad (18)$$

また、式(18)で等号が成立する $\lambda_{\min}$ は回遊行動が起こる $\lambda$ の下限値となる(式(19))。

$$\alpha \left\{ t_{o,1} + t_{|N|,d} + \sum_{k=1}^{|N|-1} t_{k,k+1} \right\} + \sum_{n \in N} (\hat{d}_n)^{\hat{\beta}_n(\lambda_{\min})} = 0 \quad (19)$$

$\alpha$ は、時間の限界効用に $-1$ を乗じて得られるパラメータであり、交通行動データから推計可能である。

次に、パラメータ推定の計算例を示す。表-3に仮想の観測データ、 $\lambda$ 及び $\alpha$ の値、表-4に推定されたパラメータ

表-3 仮想観測データと所与のパラメータ

$t_{ij}$	$t_{o,1}$	$t_{1,2}$	$t_{2,3}$	$t_{3,d}$
	25	70	45	30
$d_n$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	
	35	50	75	
$\alpha$	-0.020			
$\lambda$	0.030			

表-4 パラメータ推定結果

$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\lambda_{\min}$
0.328	0.363	0.400	$6.66 \times 10^{-4}$

タを示す。表-4より、滞在時間が大きいノードほど $\beta_n$ が大きいことがわかる。

## 参考文献

- 1) 日本政府観光局(JNTO), 訪日外客統計
- 2) 観光庁, 訪日外国人消費動向調査及び分析
- 3) 荒木雅弘, 溝上章志, 円山琢也: まちなか回遊行動の詳細分析と政策シミュレーションのための予測モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, I\_323-I\_335, 2015.
- 4) 溝上章志, 朝倉康夫, 古市英士, 亀山正博: 観光地魅力度と周遊行動を考慮した観光需要の予測システム, 土木学会論文集 No.639, IV-46, 65-75, 2000.
- 5) Fosgerau, M., Engelson, L., 2011. The value of travel time variance. Transportation Research Part B 45 1-8

(2017.7.31 受付)

## Development of a Tourist Excursion Behavior Model Incorporating Trip Chain

Haruki SHIMIZU, Teppei KATO and Kenetsu UCHIDA

In this study, tourist excursion behavior model incorporating trip chain is proposed. In wide-area tourism, tourists are expected to maximize their utility over the entire travel behavior on a day. Therefore, the approach based on trip chains, which are tourists' behavioral process, has a great significance to the behavior analysis. In order to prevent combinatorial explosion, this study aims to develop a low-cost trip chain generation algorithm by taking account of time constraint and factors of destination choice behavior. Moreover, utility maximization problem is formulated to determine optimal time allocation for pregenerated trip chains. Numerical calculation is carried out to examine the validity of the proposed models.