

確率的な経路選択行動による交通量変動の分析

An analysis on the variability of the traffic network caused by stochastic route choice behaviors *

北村清州**・山本俊行***・三輪富生****

By Seishu KITAMURA**・Toshiyuki YAMAMOTO***・Tomio MIWA****

1. はじめに

交通現象と変動は切り離して考えることのできないものである。通勤・通学のように、日々繰り返される同一地点間のトリップにおいても、周辺の交通状況に応じて走行経路を変更しているドライバーが存在する。個々のドライバーがほんの少し出発時刻を変更したことが、ネットワークの交通状況を変化させる可能性は十分に考えられる。我々は日常生活において、移り変わる交通状況をごく自然に考慮しながら行動しているのである。

交通現象の変動に関する既存の研究は、北村¹⁾に詳しく紹介されている。北村によれば、交通流の調査であれアンケート調査であれ、観測方法やデータ処理を工夫することにより「不安定」な変動を除去し、「安定」した値が得られて初めてそれを解析するという立場が一般的であったことを挙げ、さらに、仮に「安定」した関係が抽出されたとしても、実際の現象がそのような関係式の周りにどれほどばらついていのかを解析することなくして、現象の理解をすることは不可能であるとしている。

本研究では、ネットワーク上の交通状態に着目し、交通量変動の大きさを定量的に表現可能なモデルの開発、及び交通量変動要因と変動の大きさの変化について分析を行う。ネットワーク上の交通状態については、確率的利用者均衡配分に代表される、さまざまな交通量配分について研究がなされてきた²⁾。確率的利用者均衡配分により算出される交通量は、「確率的」の名に反し、ネットワーク上に存在するであろう「平均的な」交通量であ

る。これに対し、実際の道路交通量が変動していることは明らかであり、交通量配分より得られる平均交通量と同程度の交通量を示す日もあれば、100台、200台といった規模で異なる交通量を示す日も存在するはずである。ほんの2、30台交通量が変化したことにより、渋滞が引き起こされる可能性も十分に考えることができる。

交通量や旅行時間の変動を定量的に捉えることは道路交通サービスの向上を考える上で非常に重要であり、交通量や旅行時間の安定性評価や、ドライバーへの旅行時間提供などさまざまな場面で有用であると考えられる。

2. 本研究で取り扱う交通量配分モデル

(1) 交通量変動を考慮したネットワーク均衡

確率的利用者均衡の概念により導かれる交通量が、「確定的な」唯一の均衡交通量である問題の解決策として Cascetta³⁾は、交通量の経時的変動を表現可能な均衡交通量配分モデルを提案している。ドライバーが1時点（例えば1日前）の旅行時間の記憶のみをもとに経路選択を行うとすれば、あるドライバー j が時刻 t に経路 i を選択する確率は以下の式で表される。

$$\Pr(R_j(t) = i | r(t-1)) = \frac{\exp\{-\theta C(i | r(t-1))\}}{\sum_{k \in I_j} \exp\{-\theta C(k | r(t-1))\}}$$

ここで、

$R(t) = \{R_1(t), R_2(t), \dots\} = \{\text{Route } 2, \text{Route } 1, \dots\}$:

ドライバーの経路選択ベクトル

$C(i | r(t-1))$: 過去に選択された経路ベクトル $r(t-1)$ に基づく旅行時間

θ : スケールパラメータ

上式に基づき配分モデルが唯一の均衡解を持つための十分条件は、利用可能なすべての経路選択確率が0でないことである。このとき、任意の初期経路選択ベクトル $R(0)$ が与えられ十分な時間が経過すれば、マルコフ連鎖の理論より $\Pr(R(t))$ が唯一の均衡確率分布に落ち着くことが保証され、 $R(t)$ はマルコフ連鎖となる。つまり、過去の選択経路ベクトル $r(t-1)$ に従い配分計算

*キーワード：交通量変動，配分交通，ネットワーク交通流，経路選択

**正員，修(工)，(財)計量計画研究所

(東京都新宿区市ヶ谷本村町2-9，
TEL03-3268-9947，FAX03-5229-8081)

***正員，博(工)，名古屋大学大学院工学研究科

(名古屋市千種区不老町，
TEL052-789-4636，FAX052-789-3738)

****学生員，修(工)，名古屋大学大学院環境学研究科

(名古屋市千種区不老町，
TEL052-789-3729，FAX052-789-3738)

を繰り返すことにより、均衡分布からの経路選択ベクトル $R(t)$ のサンプリングが可能となる。

(2) ドライバー間の相互作用と交通量変動を考慮したネットワーク均衡

Cascetta のモデルの考え方では、ある時点 t における同一 OD ペアのドライバーは、全員が同じ確率で経路を選択すると仮定されており、同時発生するドライバー間の経路選択の相互作用を考慮することができない。これに対し Hazelton⁶⁾ は、ネットワーク上に同時発生するドライバーの相互作用を考慮した交通量変動の再現を可能とする、マルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMC）による交通量配分モデルを提案している。

n 人のドライバーが存在するネットワークについて、ある時点 t における経路選択ベクトルを $R'(t)$ とする。 $R'(1)$ は任意の初期状態 $R'(0)$ から 1 番目のドライバーが経路変更をすることにより得られる。同様に、 $R'(2)$ は $R'(1)$ から 2 番目のドライバーが経路変更をすることにより、 $R'(n+1)$ は $R'(n)$ から再度 1 番目のドライバーが経路変更をすることにより得られるとする。 $R'(t)$ のための経路選択確率は $R'_{-i}(t-1)$ の経路選択結果に基づく旅行時間より得られるとする。ここで、 $R'_{-i}(t-1)$ は i 番目の要素を除いた経路選択ベクトルである。つまり、各ドライバーの経路選択は、自分以外のすべてのドライバーの経路選択結果に基づく旅行時間より行われるとすれば、ある時点 t における、ドライバー $(t \bmod n)$ が経路 i を選択する確率はロジットモデルを用いて以下の式により表現できる。

$$\Pr(R'_{t \bmod n}(t) = i | R'_{-i \bmod n}(t-1)) = \frac{\exp\{-\theta C(i | R'_{-i \bmod n}(t-1))\}}{\sum_{k \in I_i} \exp\{-\theta C(k | R'_{-i \bmod n}(t-1))\}}$$

ここで、

$C(i | R'_{-i \bmod n}(t-1))$: ドライバー $(t \bmod n)$ を除いた経路選択ベクトルに基づく旅行時間

この選択確率に基づく配分計算を n 回繰り返し、 n 人のドライバーが 1 度経路選択を行えばネットワーク上のすべてのドライバーが経路選択を行った状態とみなすことができる。つまり選択確率に基づき配分計算を繰り返し、定常分布に到達したマルコフ連鎖からサンプリングを行うことにより、自分以外のすべてのドライバーの経路選択を考慮した条件付の確率的利用者均衡状態における経路選択ベクトル $R(t)$ を得ることが可能となる。

(3) MCMCによる交通量配分シミュレーション

前節において説明したMCMCによる交通量配分モデ

ルの動作を確認するためOD2経路のネットワークによるシミュレーションを行い、ドライバー間の相互作用を考慮した場合と考慮しない場合のリンク交通量変動の比較を行う。配分ネットワークを図1に、シミュレーションの設定を表1に示す。リンクコスト関数は以下に示す修正BPR関数を使用する。

$$T_i = l \times t \left[1 + 2.62 \left(\frac{x}{C} \right)^5 \right]$$

ここで、

T_i : リンク i の一般化費用 (min)

l : リンク長 (km)

t : 自由走行時の単位旅行時間 (min/km)

x : 交通量 (台)

C : 交通容量 (台/時)

ネットワーク上の2つの経路は同一の設定のため、各経路の経路選択確率はそれぞれ1/2となる。MCMCによるシミュレーション結果を図2に示す。

図より、リンク交通量が 1 リンクあたりの期待配分交通量 4000 台の周辺にばらついていることが確認できる。ドライバー間の相互作用を考慮した場合には考慮しない場合に比べて交通量変動が少ないことが分かる。相互作用を考慮した場合と比較し、考慮しない場合には非常に大きな交通量のばらつきを示していることから、交

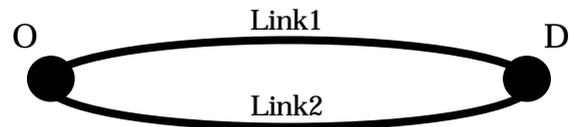


図1 配分ネットワーク

表1 シミュレーションの基本設定

リンク長	各 5km
リンク交通容量	各 4000 台/時
OD 交通量	8000 台/時
計算回数	80000000 回
スケールパラメータ:	0.5

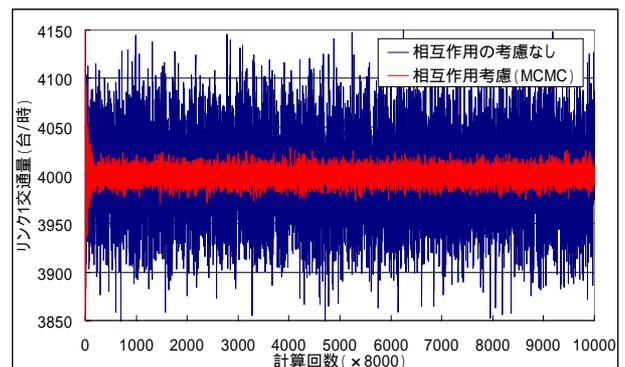


図2 相互作用の有無と交通量変動

通量変動を考慮する場合はドライバー間の相互作用を考慮しないと変動を過大に評価してしまう恐れがあると考えられる。

また今回のシミュレーションでは、計算回数が 300 (×8000) 回ごろからリンク交通量のばらつきが落ち着いている (定常分布に達している) ことが確認できる。本研究では、シミュレーションを繰り返し十分定常分布に達したと考えられる状態からサンプリングし、交通量の変動を算出するものとする。

3. 交通量変動に関する基礎的な要因とその影響

本章では、MCMC による交通量配分モデルにより、シミュレーション条件が変化した場合の交通量変動の大きさの変化について分析を行う。図 1 に示した 10D2 経路のネットワークにおいて、OD 交通量、リンク交通量、経路長、およびスケールパラメータを変化させ (動かす値以外は基準値に固定)、交通量変動の大きさの変化について考察を行う。表 2 に分析中で変化させる値とその範囲を示す。

図 3, 4 に OD 交通量別の交通量標準偏差、旅行時間標準偏差を示す。図より、OD 交通量が増加するほどリ

ンク交通量の変動は小さくなっており、旅行時間の変動は大きくなっている。このことから、OD 交通量が増加し道路が混雑した場合、交通量自体の変動量は小さくなる負の相互作用が働くのに対し、旅行時間の変動は大きくなるのが分かる。なお、その他の変動要因については、紙面の都合から、交通量変動を大きくする要因と、それぞれの場合の変動の大きさを表 3 にまとめる。

4. 実ネットワーク適用に向けた交通量変動の分析

ここまでの分析は、従来の静的な交通量配分と同様に「ある時間帯あたりの断面交通量」を対象として行ってきた。しかし現実のドライバーはある時刻にトリップを開始しているはずであり、当然ネットワーク上の交通量も時々刻々と変化しているはずである。そこで本節では、交通量変動を詳細に捉えるため、出発時刻選択を考慮した動的な交通量配分による交通量変動の分析を行う。

ネットワークの設定は図 1 および表 1 に従うものとし、朝ピーク 8:00~9:00 の 1 時間を想定して配分を行う。動的モデルの配分時間間隔は 2 分とする。従って動的な交通量配分におけるドライバーは、30 (時間帯) × 2 (経路) = 60 の選択肢から 1 つを選択するものとす

表 2 変化させるシミュレーション条件とその範囲

	下限値		基準値		上限値
OD 交通量 (台/時)	4000	~	8000	~	16000
リンク交通容量 (台/時)	2000	~	4000	~	8000
経路長 (km)	1	~	5	~	10
スケールパラメータ: θ (1/min)	0.01	~	0.5	~	1

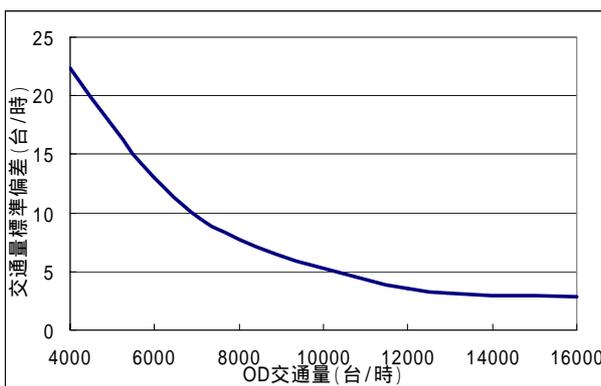


図 3 OD 交通量 - 交通量標準偏差

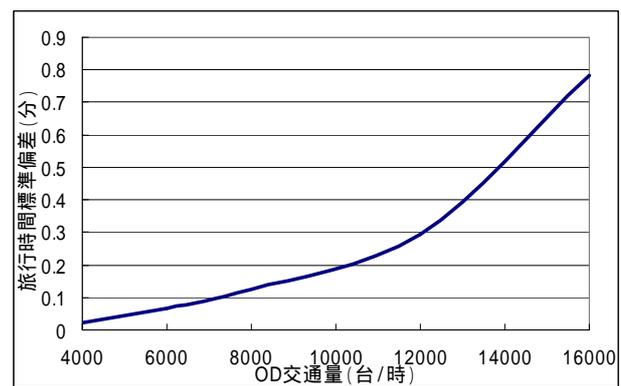


図 4 OD 交通量 - 旅行時間標準偏差

表 3 交通量変動増加要因と変動の大きさ

交通量変動を大きくする要因	変化させた値	標準偏差 (台/時)	変動係数 (%)
	すべて基準値	7.58	0.19
OD 交通量の減少	OD 交通量: 4000 台/時	比較不可能	1.12
交通容量の増加	交通容量: 8000 台/時	31.45	0.79
近距離の経路選択 (OD 間距離 小)	経路長: 1km	16.2	0.41
コスト認知誤差の増加	スケールパラメータ: 0.1	16.3	0.41

る．また，動的配分モデルにおける各リンクの旅行時間は，リンクパフォーマンス関数を使わず，(累積台数) - (時間)の関係から求めるものとする．また，各ドライバーの効用（一般化費用）は，到着余裕時間・遅刻時間と走行時のストレスを考慮し，以下のように定義する．

$$V(R_i, t_s) = -\alpha T(R_i, t_s) - C(R_i, t_s)$$

$$C(R_i, t_s) = \begin{cases} \beta(t_d - t_a(t_s)) : t_d \geq t_a(t_s) \\ \gamma(t_a(t_s) - t_d) : t_d < t_a(t_s) \end{cases}$$

ここで，

$V(R_i, t_s)$: 時刻 t_s に出発し経路 R_i を選択したドライバーの総効用

$C(R_i, t_s)$: 時刻 t_s に出発し経路 R_i を選択したドライバーの早着（遅刻）に関する効用

α, β, γ : 旅行時間，早着，遅刻に関するパラメータ
 ドライバーは効用を最大にするよう出発時刻，経路の選択をしようと考えるため，ドライバーの行動は，下位段階を経路選択，上位段階を出発時刻選択とする Nested Logit 型により記述されると仮定する⁶⁾．(図5) また，全てのドライバーの到着目標時刻は9時に設定し，所要時間に関するパラメータを $\alpha=0.1$ ， $\beta=0.1$ ， $\gamma=0.5$ ，スケールパラメータを $\theta_1=1$ ， $\theta_2=0.1$ とする．

出発時刻選択の有無による断面交通量の変化を図6に，時刻別の車両存在台数を図7に示す．図6より出発時刻選択を考慮した場合，しない場合に比べ1時間あたりの断面交通量の変動が大きくなることから，選択を動的に考えたほうが現実的な交通量変動を理解するために有効であると考えられる．また，時刻別のリンク車両存在台数を示した図7を見ると，車両発生が集中する時刻や存在車両数が多い時刻ほど変動が大きくなっている．例えば変動の大きい8:30では，標準偏差が220.41台を示しており，この時刻の存在車両数2000台に対して1000台程度の規模でばらついている．このことから，より細かい1時間で見ると交通量変動が大きいことが分かる．

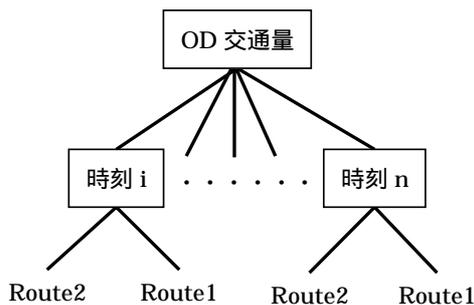


図5 出発時刻・経路選択ツリー

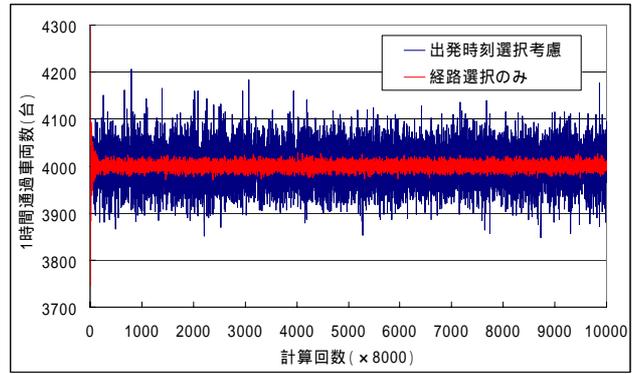


図6 出発時刻選択の有無と1時間交通量の変動

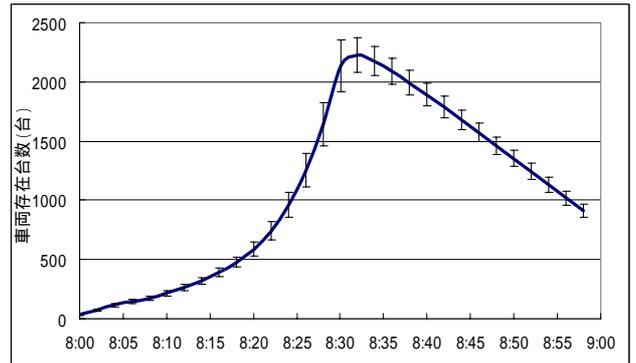


図7 時刻別車両存在台数

4. おわりに

本研究では，ドライバーの確率的な選択行動に基づくネットワーク上の交通量変動再現が可能な均衡交通量配分モデルを用い，ネットワーク状態が変化した場合の交通量変動の大きさの変化について分析を行った．分析の結果から，詳細なタイムスパンで分析した場合ほど，大きな交通量変動が観測されることなど，道路ネットワーク上の交通量変動の理解に向けた有用な知見を得た．

筆者らはこのほかにも MCMC による交通量配分モデルを用い，ドライバーの異質性を考慮した場合の交通量変動の変化についての分析や，複数交通機関を考慮した需要変動型交通量配分モデルへの拡張なども行っており，それらは別の機会に報告したい．実際の道路ネットワークにおける交通量変動の再現などは今後の課題である．

参考文献

- 1) 北村隆一：変動についての試行的考察，土木計画学研究・講演集，No.26 (CD-ROM)，2002．
- 2) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析，1998．
- 3) Cascetta, E. : A stochastic process approach to the analysis of temporal dynamics in transportation networks, Transportation Research 23B, pp1-17, 1989．
- 4) Hazelton, M.L. et al. : Stationary states in stochastic process models of traffic assignment: A Markov Chain Monte Carlo Approach, Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.341-357, 1996．
- 5) 飯田恭敬ほか：通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法，土木計画学研究・論文集，No9, pp.93-100, 1991．