

Modified Stochastic Cell Transmission Model を用いた交通シミュレーションの実装

徳田 渉^{1,a)} 金森 亮^{1,b)} 伊藤 孝行^{1,c)}

概要：交通渋滞による時間損失削減は大きな交通課題であり、交通シミュレーションにて施策評価がなされている。交通シミュレーションの流体近似モデルには、Cell Transmission Model (CTM) や Stochastic Cell Transmission Model (SCTM) などが提案されている。しかし、CTM は道路の需要と供給の不確実性を実現できず、SCTM は一般道路のような複雑なネットワークに対して適用が困難である。本研究では、道路の需要と供給の不確実性を実現し、一般道路に適用できる Modified Stochastic Cell Transmission Model (MSCTM) の提案をおこなった。また、MSCTM の再現性を検証するため、CTM との比較実験をおこなった。実験結果から、実測値に近い精度でシミュレートできるとわかった。

1. はじめに

わが国において、交通渋滞によるドライバーの時間損失が問題となっている。自動車利用の最適化と効率化に対して交通運用政策を実施する場合、交通流がどのように変化するかを事前に評価するために交通シミュレーションが用いられている。交通シミュレーションは渋滞の発生、伝播、および発散の表現が可能であり、交通事業者は交通シミュレーションを用いることで、考案した交通運用政策による渋滞や周辺環境への影響を容易に予測することができる。そのため、シミュレータの開発を適切に行うことが重要となる。

本研究では一般道路のネットワークの混雑状況を把握するため、流体近似モデルに着目する。流体近似モデルの代表例として、Cell Transmission Model (CTM) と Stochastic Cell Transmission Model (SCTM) が挙げられる。しかし、CTM と SCTM には問題点が存在する。CTM は道路の需要と供給の不確実性を考慮しておらず、精度の良い道路状況の予測が困難である。SCTM は単純なネットワークにのみ適用可能であり、大規模で複雑なネットワークに対して適用が困難である。さらに、SCTM は複数の車両の起終点が存在するネットワークに対して適用が困難である。

本研究では、車両の起終点が複数存在する複雑なネットワークに対して適用が可能であり、道路の需要と供給の不確

実性を実現できる Modified Stochastic Cell Transmission Model (MSCTM) の提案をおこなう。MSCTM の精度の検証として、道路の需要と供給の不確実性を実現できる SCTM との比較をおこなう。SCTM との比較において、先行研究の実験と同様の設定で実験をおこなう。実験の結果から、MSCTM が SCTM と同様に精度良く交通状況を再現できるかを検証する。また、一般道路に対して適用が可能である CTM と比較実験をおこない、MSCTM の再現性について検証をおこなう。実験では各車両の所要時間とある地点の 10 分間の交通量について、実測値との平均二乗誤差を算出する。

2. 既存の流体近似モデル

2.1 Cell Transmission Model

CTM は、Carlos F. Daganzo により 1994 年に提唱されたモデルである [1][2]。CTM は流体近似モデルであり、車両の流れを流体として扱う。CTM の大きな特徴として、道路ネットワークのリンクをセルという 1 つの固まりとして表現する点が挙げられる。セルには複数の車両を収容することが可能であり、セルの状況を観察することによって道路状況を把握することができる。セルの長さは道路の長さに対応しており、セルの長さに応じて収容できる車両台数が決定される。各車両は複数のセルを通過しながら目的地を目指すこととなる。

車両の移動台数を決定するには、移動元のセルと移動先のセルの状態を考慮しなければならない。セルの状態を示すパラメータは、LWR モデルに基づいている。LWR モデルとは、道路の交通流率と交通密度の関係を定める交通流

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology
a) tokuda.sho@itolab.nitech.ac.jp
b) kanamori.ryo@nittech.ac.jp
c) ito.takayuki@nittech.ac.jp

モデルである。各セルは LWR モデルにしたがって、経時的に交通密度から交通流率を定める。

CTM の問題点として、道路の需要と供給の不確実性を実現しておらず、現実の道路交通ネットワークの状況と比べて、シミュレーションの精度が低くなる点が挙げられる。道路の需要の不確実性には、ある時間には道路が混雑するが、時間が経過すると道路が閑散とするといった、時間による需要の変動などが存在する。道路の供給の不確実性には、道路工事などによる道路規制が発生し、車両が通過できる道路の容量が減少するといった、道路容量の減少による供給の変動などが存在する。

実際の道路交通ネットワークにおいて需要と供給は不確実な要素である。LWR モデルの交通流率と交通密度の関係と観測データの間に誤差が存在することがわかっている [3]。LWR モデルの交通流率と交通密度の関係における実測値の変動を図 1 に示す。図 1 の緑の点が実測値、赤い線が LWR モデルの交通流率と交通密度の関係を示す基準のグラフである。赤い線の周辺に緑の点が多く存在しており、基準のグラフと比べて実測値の変動が大きいことがわかる。CTM では常に基準のグラフ（図 1 の赤い線）に基づいて道路状況をシミュレートしているが、現実の道路状況では変動が発生している（図 1 の緑の点）。不確実性を無視することにより、現実の道路交通ネットワークとの誤差が発生し、シミュレーションの精度が低くなる。

2.2 Stochastic Cell Transmission Model

SCTM は、A. Sumalee によって 2011 年に提唱されたモデルである [3][4]。SCTM は、CTM を改良したモデルとして開発され、道路の需要と供給の不確実性を実現している。CTM のセルを用いて道路を表現する手法は同じだが、SCTM は 2 のセルを用いて 1 つサブシステムと呼ばれる固まりを構成し、複数のサブシステムを連結させることにより全体のネットワークを構成する。サブシステムの構成を図 2 に示す。サブシステムに付属している矢印について、サブシステムへ向かう矢印は車両の流入、サブシステムか



図 2 サブシステムの構成

ら出ている矢印は車両の流出を示している。

SCTM は、平均が 0 である正規乱数をセルのパラメータに付加することで、図 1 の変動を考慮している。図 1 の変動を考慮することによって、道路の供給の不確実性を実現できる。一方、道路の需要の不確実性について、平均が 0 である正規乱数を、セルに入流する車両台数とセルから流出する車両台数に付加することで実現している。さらに、SCTM は switching-mode モデル [5][6] の概念を利用しており、移動元と移動先の混雑状況に合わせた車両の移動をおこなうことができる。

SCTM の問題点として、車両の移動台数を求める過程での近似計算のコストが高いことが挙げられる。SCTM は、サブシステムのモードの生起確率とモードに対する移動台数に対して、近似処理をおこなうことで車両の移動台数を求める。しかし、近似処理にはコストの高い計算をおこなわなければならない。計算コストは大規模なネットワークへの適用の際には非常に重要な要素であり、計算コストが低ければ低いほど望ましい。また、SCTM は複数の起終点をもつネットワークへ適用することが困難である。Zhong ら [7] は、SCTM を単純なネットワークに適用させた。Zhong らの実験で使用されたネットワークを図 3 に示す。図 3 は、信号のある交差点が一つ存在し、各分岐点において分岐率が設定されており、単方向のみの移動が可能となっている。しかし、一般道路は分岐率を設定することが困難であり、双方向の車両の移動が可能である。また図 3 には、車両の出発地と目的地がそれぞれ一つずつしか存在しない。一般道路の交通状況において、車両の出発地と目的地の組み合わせは複数存在する。SCTM は、車両の起終点が複数存在するネットワークへ適用することが困難である。

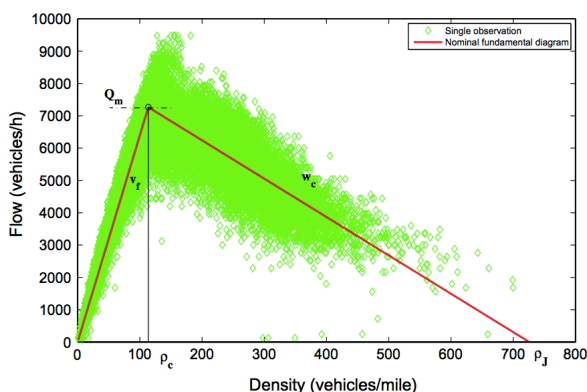


図 1 基準のグラフにおける実測値の変動 [3]

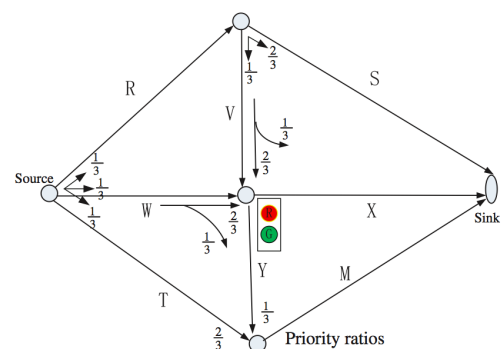


図 3 Zhong ら [7] の実験で使用されたネットワーク

3. Modified Stochastic Cell Transmission Model

3.1 従来モデルとの相違点

Zhong らのおこなった実験 [7] では、非常に単純なネットワークへ SCTM を適用させている。単純なネットワークへの適用が可能であっても、実際の一般道路のような複雑な道路ネットワークへの適用には様々な困難が生じる。一般道路への適用が困難である理由について、以下の 3 点を挙げることができる。

- 車両の双方向の移動を考慮しなければならない
- 分岐率を設定しなければならない
- 近似計算が複雑である

車両の双方向の移動に関して説明する。一般道路は単方向の移動に限らず、双方向の移動も可能である。しかし、図 3 のネットワークは、ノードからノードへのリンクが単方向にしか存在しないネットワークである。一般道路の交通状況を予測するには、車両の単方向の移動のみならず、双方向の移動について考慮しなければならない。

次に、分岐率の設定について説明する。図 3 のネットワークの各分岐点には分岐率が設定されている。分岐率とは、ある分岐点においてどの経路へ何台の車両を流すのかを示す値である。分岐率を設定することにより、車両を目的地へ到達させることができる。一般道路に対して SCTM を適用させるには、分岐率を求める必要がある。また、図 3 のネットワークには出発地と目的地がそれぞれ 1 つしか存在しない。一般道路において、車両の出発地と目的地の組み合わせは複数存在している。出発地と目的地がそれぞれ 1 つの場合は、分岐率を一意に決めることができるが、出発地と目的地の組み合わせが複数存在する場合は、分岐点での分岐率が出発地と目的地の組み合わせによって異なるので、適切に分岐率を与えることが困難となる。

最後に、近似計算について説明する。SCTM は、車両の移動台数を求める過程で、近似計算をおこなわなければならない。近似計算には積分をする処理が必要であり、ネットワークが大きくなるにつれて計算コストが増加する。一般道路を対象とすると、シミュレーションとして実用的ではなくなることが問題となる。

MSCTM は、以上の 3 つの SCTM の問題点を解消することにより、一般道路の交通状況の予測を可能にしたモデルである。起終点が複数存在し、分岐率が設定されていないネットワークに対して、出発地と目的地に応じて経路選択をおこなう。経路選択をおこなうことにより、分岐率を設定していないネットワークに対して適用できる。さらに、信号の存在する交差点が複数存在し、交差点での双方向の移動を考慮したネットワークに対して適用が可能である。また、車両の移動台数を決定する計算過程において、非常に簡単な計算をおこなうことで計算コストを削減する。

3.2 経路探索

分岐率を設定していないネットワークに適用させるには、分岐点で各車両による経路選択をおこなう必要がある。そこで本研究では、あらかじめ車両の出発地から目的地までの最短経路を求め、車両は求めた最短経路をもとに経路選択をおこなう。最短経路を求めるための経路探索には経路コストが必要となる。本研究では、経路コストをセルの通過所要時間に設定する。経路コストをセルの通過所要時間に設定することによって、混雑した道路のコストが高くなり、混雑した道路を除いた最短経路を求めることができる。セルの通過所要時間は式 (1) で求めることができる。

$$t = \frac{l}{v} \quad (1)$$

式 (1) の t はセルの通過所要時間、 l はセルの長さ、 v はセルに存在する車両の速度を示している。セルに存在する車両の速度については、グリーンシールズ&オルコットの式を用いることによって求めることができる。グリーンシールズ&オルコットの式とは、実測結果をもとに交通密度と速度の関係を示した式である [8]。グリーンシールズ&オルコットの式を式 (2) に示す。

$$v = v_f(1 - \frac{k}{k_j}) \quad (2)$$

式 (2) の v はセルに存在する車両の速度、 v_f は自由速度、 k は交通密度、 k_j は飽和密度を表す。自由速度は、交通密度が 0 であるときの速度を示し、飽和密度は、速度が 0 であるときの交通密度を示している。式 (1) と式 (2) から、交通密度が高く道路が混雑しているときはセルの所要時間が長く、交通密度が低く道路が空いているときはセルの所要時間が短いという関係を示すことができる。したがって、セルの所要時間を経路のコストに設定することにより、混雑した道路の経路コストを高め、混雑した道路を除いた最短経路を求めることができる。

経路探索をおこなう度に混雑した道路を除いた最短経路を探索するには、経路コストの更新をおこなわなければならない。シミュレーションステップごとにセルの交通密度が更新されるので、シミュレーションステップごとに経路コストの更新をおこなう。経路コストを更新し最短経路を探索することによって、経路探索をおこなった時点の混雑している道路を避ける経路を選択できる。経路の最短経路を探索するため、本研究ではダイクストラ法 [9] を用いた。ダイクストラ法とは、最短経路問題を効率的に解くグラフ理論におけるアルゴリズムである。

交通状況を更新し、経路探索をおこなうまでの動作について例を示す。はじめに各リンクのコストを求めるため、セルに存在する車両台数とセルの長さからセルの交通密度 k を求める。式 (3) を用いることで交通密度を求める。

$$k = \frac{n}{l} \quad (3)$$

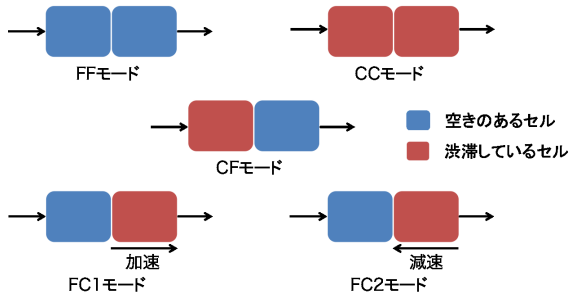


図 4 5つのモードの表現

式 (3) の k はセルの交通密度, n はセルに存在する車両台数, l はセルの長さを示している. 次に式 (2) から速度 v を求める. 飽和密度 k_j と自由速度 v_f は, あらかじめ各セルに設定されている. 求めた速度から式 (1) を用いてセルの通過所要時間を求め, 経路コストに設定する. そして, ダイクストラ法で出発地から目的地までコストが最小となる経路を求める. 求めた最短経路を車両に持たせることで, 車両は持っている経路をもとに経路選択をおこない目的地を目指す.

MSCTM は, あらかじめ経路探索をおこない, 各車両は経路探索の結果にしたがって出発地から目的地へ移動する. 目的地が決まっている車両の移動に関して, 多くのドライバーは最短の経路を選択するものとし, 渋滞している道路を発見した場合には, 渋滞を避ける経路を選択すると仮定する.

3.3 モードの生起確率

移動台数を求める際の近似計算に用いられる, モードの生起確率の算出方法について説明する. モードとは, 隣り合った2つのセル, つまりサブシステムの混雑状況を示す考え方である. モードには以下の5つの種類が存在する. FF (Free flow-Free flow) モード, CC (Congestion-Congestion) モード, CF (Congestion-Free flow) モード, FC1 (Free flow-Congestion1) モード, および FC2 (Free flow-Congestion2) モードがある. 図4の青い四角が容量に空きのあるセル, 赤い四角が容量に空きがあまりなく渋滞しているセルを表している. FF モードは上流セルと下流セルがともに空きが存在する場合である. CC モードは上流セルと下流セルがともに渋滞している場合である. CF モードは上流のセルが混雑しており下流のセルに空きが存在する場合である. FC モードは上流のセルに空きが存在しており下流のセルが混雑している場合である. FC モードはさらに2種類に分類することができる. FC1 モードは渋滞している下流セルに存在する車両が加速している場合である. FC2 モードは渋滞している下流セルに存在する車両が減速している場合である.

サブシステムのモードは, サブシステムに属している2つのセルの交通密度とパラメータによって決まる. しか

し, パラメータには乱数が付加されていることから, モードは一意に決定されない. したがって, 各サブシステムについて各モードの生起確率を導くことができる. FF モードの生起確率, CC モードの生起確率, CF モードの生起確率, および FC モードの生起確率の計算式をそれぞれ式 (4), 式 (5), 式 (6), および式 (7) に示す.

$$P_{FF} = Pr(\rho_u < \rho_{c,1} \cap \rho_d < \rho_{c,2}) \quad (4)$$

$$P_{CC} = Pr(\rho_u \geq \rho_{c,1} \cap \rho_d \geq \rho_{c,2}) \quad (5)$$

$$P_{CF} = Pr(\rho_u \geq \rho_{c,1} \cap \rho_d < \rho_{c,2}) \quad (6)$$

$$P_{FC} = 1 - (P_{FF} + P_{CC} + P_{CF}) \quad (7)$$

式の ρ_u と ρ_d は, サブシステムの上流セルの交通密度と下流セルの交通密度を示している. また, $\rho_{c,1}$ と $\rho_{c,2}$ はそれぞれセルのパラメータであり, サブシステムの上流セルの渋滞密度と下流セルの渋滞密度を示している. 本研究では, 条件式に当てはまる乱数が付加された $\rho_{c,1}$ と $\rho_{c,2}$ のパターン数を乱数の合計数で除算し正規化することにより, 各モードの生起確率を算出する. 例えば, FF モードの生起確率を算出する際は, 条件 $(\rho_u < \rho_{c,1} \cap \rho_d < \rho_{c,2})$ に当てはまる $\rho_{c,1}$ と $\rho_{c,2}$ のパターン数をパターンの合計数で除算する. FC1 モードと FC2 モードの生起確率の算出の方法は他のモードと少し異なる. FC1 モードの生起確率を式 (8), FC2 モードの生起確率を式 (9) に示す.

$$P_{FC1} = P_{FC} Pr(v_{f,1}\rho_u \leq w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_d)) \quad (8)$$

$$P_{FC2} = P_{FC} Pr(v_{f,1}\rho_u > w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_d)) \quad (9)$$

$v_{f,1}$ はサブシステムの上流セルの自由速度, $w_{c,2}$ はサブシステムの下流セルの渋滞時における減速波の速度, $\rho_{J,2}$ はサブシステムの下流セルの渋滞密度を示しており, それぞれセルのパラメータである. FC1 モードと FC2 モードの分類についても, 条件式に当てはまる $v_{f,1}$, $w_{c,2}$, および $\rho_{J,2}$ のパターン数を乱数の合計数で除算することにより算出する.

3.4 近似計算の簡略化

車両の移動台数の近似計算について説明する. 各サブシステムの車両の移動台数はモードごとに異なる. また, サブシステムのモードは一意に決定されない. したがって, モードの生起確率と車両の移動台数に対して近似をおこなう必要がある. 本研究で提案する MSCTM は, SCTM と別の近似計算で車両台数を決定する.

サブシステム間の車両の移動に関しては, 移動元のサブシステムと移動先のサブシステムの混雑状況について考慮しなければならない. まず, サブシステムの下流セルから移動する車両台数 S を決定するため, 移動元のサブシステムのモードの生起確率について考慮する. S を決定するパターンは2種類存在する. サブシステムのモードが FF

モードまたは CF モードである場合は S を $v_{f,1}\rho_1$ 台, CC モードまたは FC モードである場合は S を Q_1 台に設定する. $v_{f,1}$ は移動元のサブシステムの下流セルの自由速度, ρ_1 は移動元のサブシステムの下流セルの交通密度, Q_1 は移動元のサブシステムの下流セルの交通流率を示している. 次に, 移動先のサブシステムのモードの生起確率を考慮して, 最終的にどれだけの車両の移動させるかを決定する. 移動先の混雑状況と移動元の車両の移動台数 S を考慮すると, 次の 4 つのパターンに分類することができる.

- (1) 移動先のモードが FF モードまたは FC モードであり, かつ S が Q_2 以下である場合は S 台移動する
- (2) 移動先のモードが FF モードまたは FC モードであり, かつ S が Q_2 より大きい場合は Q_2 台移動する
- (3) 移動先のモードが CC モードまたは CF モードであり, かつ S が $w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_2)$ 以下である場合は S 台移動する
- (4) 移動先のモードが CC モードまたは CF モードであり, かつ S が $w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_2)$ より大きい場合は $w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_2)$ 台移動する

Q_2 は移動先のサブシステムの上流セルの交通流率, $w_{c,2}$ は移動先のサブシステムの上流セルの渋滞時の減速波の速度, $\rho_{J,2}$ は移動先のサブシステムの上流セルの渋滞密度, ρ_2 は移動先のサブシステムの上流セルの交通密度を示す. それぞれ 4 つのパターンの生起確率を式 (10), 式 (11), 式 (12), および式 (13) に示す.

$$P_1 = (P_{FF} + P_{FC})Pr(S \leq Q_2) \quad (10)$$

$$P_2 = (P_{FF} + P_{FC})Pr(S > Q_2) \quad (11)$$

$$P_3 = (P_{CC} + P_{CF})Pr(S \leq w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_2)) \quad (12)$$

$$P_4 = (P_{CC} + P_{CF})Pr(S > w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_2)) \quad (13)$$

P_1, P_2, P_3 , および P_4 はそれぞれのパターンの生起確率を示す. パターンの生起確率を全体的に評価することで, 最終的にどれだけの車両を移動させるかを決定することができる. 本研究では, 式 (14) によって最終的に移動する車両台数を決定した.

$$S' = P_1S + P_2Q_2 + P_3S + P_4w_{c,2}(\rho_{J,2} - \rho_2) \quad (14)$$

S' は移動させる車両台数を示している. 比較的簡易な計算をおこなうことで計算コストの削減を図っている. SCTM では, 確率分布の近似によって最終的に移動させる車両の台数を求めている [10] が, 複雑な処理をおこなっており計算コストが高い. 本研究では, 一般道路に近い広域なネットワークの適用を想定している. したがって, 比較的簡易な計算をおこなうことで計算コストの削減を図っている.

3.5 サブシステムの割当て

セルに分割されたネットワークに対してサブシステムを

割当ての際, セルに重複して割り当ててはならない. セルに対して複数のサブシステムを割り当てると, 車両の移動に関して問題が発生し, シミュレーションとして成り立たなくなる. Zhong ら [7] のおこなった実験では, 交差点を表現するために 4 つのサブシステムを用いており, 交差点の中心を挟んで向かい合ったネットワークに対してサブシステムを割り当てている. しかし, 交差点が連続するネットワークにおいて, Zhong らの割当て方法でサブシステムを割り当てると重複が発生する. 本研究では, 交差点が複数存在する一般道路のシミュレーションを想定しているので, より細かくサブシステムを割り当てなければならない. そこで 1 本のリンクに 1 つのサブシステムを割り当てると, つまり 1 本のリンクを 2 つのセルで表現することで重複を解消する. 例として, 連続する交差点へのサブシステムの割当てを図 5 に示す. 左側の図が MSCTM によるサブシステムの割当て, 右側の図が SCTM によるサブシステムの割当てを示している. 各ネットワークのセルの色がそれぞれ異なっているが, 同じ色のセルは同じサブシステムが割り当てられていることを示す. 図から, MSCTM によるサブシステムの割当てでは, 重複が存在しないことがわかる.

4. シミュレーション実験と比較

4.1 提案モデルの精度の検証

MSCTM の精度の検証として, シミュレーションの条件を Zhong ら [7] のおこなった実験と同様の設定で実験をおこなう. 実験の結果から, MSCTM が SCTM と同様に精度良く交通状況を再現できるかを検証する. Zhong らのおこなった実験と同様の結果が得られた場合, MSCTM は SCTM と同様に精度良くシミュレーションをおこなえるものとする.

4.1.1 精度の検証実験の設定

Zhong ら [7] のおこなった実験では, 図 3 に示すネットワークを使用しており, 分岐率が分岐点に設定されている. リンクは全て 1 マイルに設定される. リンクは 2 つのセルで表現されており, 2 つのセルにサブシステムが割り当てられる. シミュレーションのステップ時間, パラメータに付加する正規乱数の分散, および信号現示の 1 サイクルの時間はそれぞれ 5 秒, 5%, および 2 分である. ネット

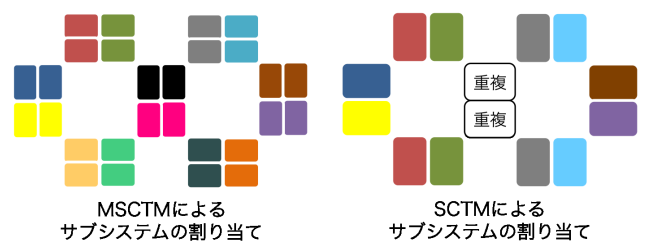


図 5 SCTM と MSCTM による連続する交差点に対するサブシステムの割当て

ワークに車両を配置するタイミングは、0分から20分の間に2000台、20分から40分の間に7000台、40分から60分の間に0台の車両を流す。本研究の精度の検証実験のため、Zhong らのおこなった実験と同様の設定でシミュレーションをおこなう。MSCTMを用いたシミュレーションの出力結果から、セルの密度の変化について、Zhong らのおこなった実験の結果と比較する。

4.1.2 精度の検証実験の結果

本研究での精度の検証実験によって得られた、図3のリンクRにおけるセルの交通密度の変化の結果について図6に示す。さらに、Zhong らのおこなった研究によって得られた、図3のリンクRにおける、セルの交通密度の変化の結果について図7に示す。図6と図7はともに、横軸にシミュレーション時間、縦軸にセルの交通密度を示している。図6と図7を比較すると、互いに類似していることがわかる。

本研究での精度の検証実験の結果から、MSCTMのシミュレーションの精度の高さはSCTMを近似できていることがわかった。

4.2 提案モデルの再現性の検証

次に、吉祥寺と三鷹のベンチマークデータセット[11]を用いて、MSCTMの車両の所要時間と道路の交通量の再現性の検証のため、CTMとの比較をおこなう。比較の際に実測値との平均二乗誤差を用いることで、どちらがより実際の道路ネットワークの状況に近いのかを比較する。

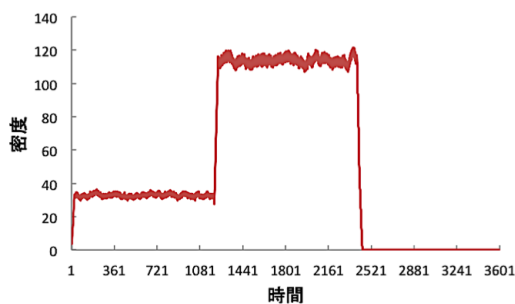


図6 本研究の精度検証実験におけるセルの交通密度の変化

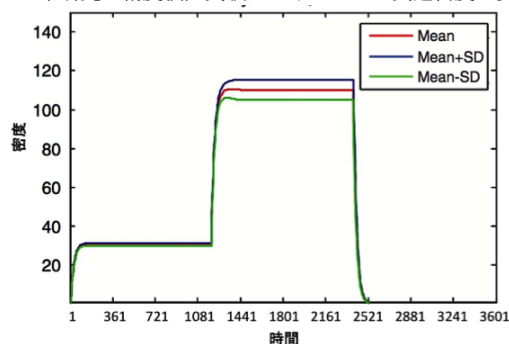


図7 Zhong らの実験におけるセルの交通密度の変化 [7]

4.2.1 再現性の検証実験の設定

本研究では、一般道路に対するMSCTMの再現性を検証するため、吉祥寺と三鷹のネットワークを用いて実験をおこなう。吉祥寺と三鷹のネットワークを図8に示す。各リンクは時間が経過しても、事故などで通行止めになることはなく、ある時間のみ一方通行になるといった道路変化は発生しないものとする。また、車両の移動経路について、目的地が決まっている多くのドライバーは最短の経路を選択するものとし、渋滞している道路を発見した場合には、渋滞を避ける経路を選択すると仮定する。シミュレーションは130分間を想定し、約18000台の車両をネットワークに流す。各パラメータに付加する正規乱数は各パラメータの値の10%を採用しており、100パターンの正規乱数をパラメータに付加する。

再現性の検証実験では、MSCTMとCTMの2つのシミュレーションを用いる。シミュレーションの出力結果として、各車両の出発地から目的地への所要時間と各セルの10分間の交通量が得られる。各車両の所要時間から、同一の出発地点と目的地点を持つ車両の所要時間の平均値を算出し、算出した平均値について実測値とMSCTMとCTMのシミュレーションから得られた値を比較する。また、あるセルにおける10分間の交通量についても、得られた交通量と実測値を比較する。また、実測値との平均二乗誤差を算出し、実測値とシミュレーションから得られた推定値との誤差を比較する。

4.2.2 再現性の検証実験の結果

各車両の所要時間について、MSCTMとCTMのシミュレーションの結果をそれぞれ示す。MSCTMとCTMのシミュレーションから得られた各車両の所要時間の推定値と実測値の散布図を図9に示す。図9の横軸に実測値、縦軸に推定値を示しており、赤い点がMSCTM、青い点がCTMの推定値を示している。グラフの黒い直線は45度の直線であり、黒い直線に点が近いほど、推定値と実測値の距離が近いことを示す。散布図から、MSCTMのほうが実測値に相対的に近いことがわかる。また、MSCTMとCTMの推定値に対して、実測値との平均二乗誤差を算出

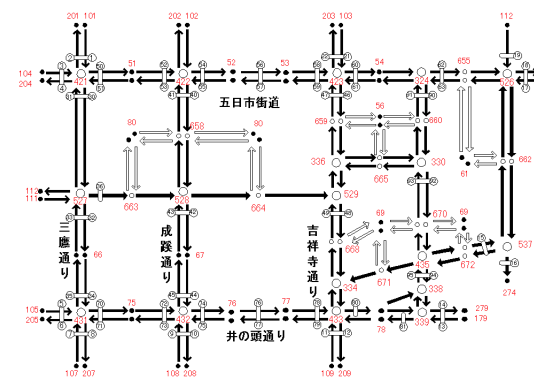


図8 吉祥寺・三鷹のネットワーク

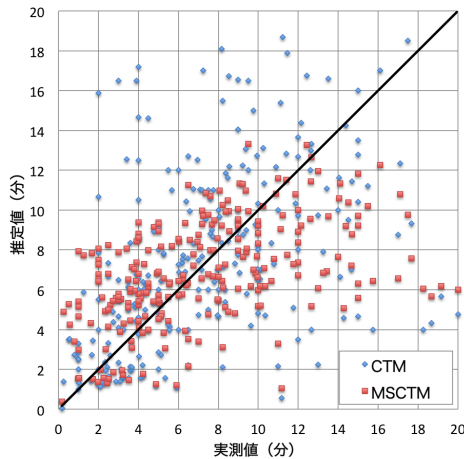


図 9 各車両の所要時間の推定値と実測値

した。算出した結果、MSCTM が約 3.8、CTM が約 4.6 となり、MSCTM のほうが誤差が少ないことがわかった。

次にあるセルにおける 10 分間の交通量について、MSCTM と CTM のシミュレーション結果を示す。今回の実験では、ネットワーク上の中央付近のセルについて 10 分間の交通量の結果を調査する。ネットワークの端部は出発地や目的地となる地点が多く存在しており、出発地や目的地付近では、交通量について車両の出発時間に影響しやすい。本研究では 10 分間ごとの車両の移動データのみを用いるので、なるべく車両の出発時間に影響されないネットワークの中央付近を調査する。

MSCTM と CTM のシミュレーションから得られたセルの 10 分間の交通量の推定値と実測値のグラフを図 10 に示す。赤い線、青い線、および緑の線はそれぞれ MSCTM の推定値、CTM の推定値、および実測値を示す。図 10 から、CTM と比較して MSCTM のほうが実測値に近いことがわかる。また、MSCTM と CTM の推定値に対して、実測値との平均二乗誤差を算出した結果、MSCTM が約 19.8、CTM が約 32.3 であった。したがって、道路の交通量に関して、MSCTM は実測値との誤差が小さく現実の道路ネットワークを精度良くシミュレートできることがわかる。

各車両の所要時間と 10 分間の交通量の結果から、MSCTM は再現性が高く、実測値に近い精度でシミュレーションを

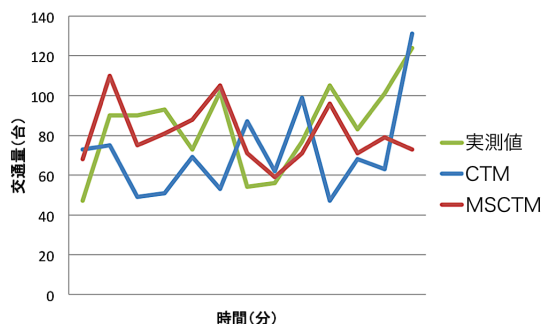


図 10 10 分間の交通量の推定値と実測値

おこなうことができるとわかった。

5. おわりに

本研究では、CTM と SCTM の問題点を解消した MSCTM を提案した。経路探索によって分岐率のない複雑なネットワークに適用させた。また、近似計算を簡略化し、大規模なネットワークに対して適用が可能となった。

交通状況の予測の精度に関して SCTM と比較した。比較の結果、SCTM と同等の精度であることが明らかとなった。また、MSCTM を用いた交通シミュレーションの再現性に関して、各車両の移動時間と任意のセルの 10 分間の交通量を CTM と比較した。比較の結果、精度の良いシミュレーションをおこなうことができるとわかった。

また、MSCTM で用いるパラメータは各セルについて一定の値を設定しているが、各セルについてパラメータを実測値から推定する必要がある、今後の課題である。

参考文献

- [1] Carlos F. Daganzo: "The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory", Transportation Research Part B: Methodological Volume 28, 1994, Pages 269-287.
- [2] Carlos F. Daganzo: "The cell transmission model, Part II: Network traffic", Transportation Research Part B: Methodological Volume 29, 1995, Pages 79-93.
- [3] A. Sumalee, R.X. Zhong, T.L. Pan and W.Y. Szeto: "Stochastic cell transmission model (SCTM): A stochastic dynamic traffic model for traffic state surveillance and assignment", Transportation Research Part B: Methodological Volume 45, Issue 3, 2011, Pages 507-533.
- [4] Agachai Sumalee, Tianlu Pan, Renxin Zhong, Nobuhiro Uno and Nakorn Indra-Payoong: "Dynamic stochastic journey time estimation and reliability analysis using stochastic cell transmission model: Algorithm and case studies", Transportation Research Part C: Emerging Technologies Vol. 35, October 2013, P263-285.
- [5] Laura Munoz, Xiaotian Sun, Roberto Horowitz, Luis Alvarez: "Traffic Density Estimation with the cell transmission model", Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, USA, pp. 3750-3755.
- [6] Xiaotian Sun, Laura Munoz and Roberto Horowitz: "Highway Traffic State Estimation Using Improved Mixture Kalman Filters for Effective Ramp Metering Control", 42th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.6, pp. 6333-6338, 2003.
- [7] R. X. Zhong, A. Sumalee, T. L. Pan and W. H.K. Lam: "Stochastic cell transmission model for traffic network with demand and supply uncertainties", Transportmetrica A: Transport Science, P567-602, 2013.
- [8] 佐佐木綱, 飯田恭敬: "交通工学", 国民科学社 (1992).
- [9] 土木学会: "交通ネットワークの均衡分析 -最新の理論と解放-", 土木学会 (1998).
- [10] S. Fruhwirth-Schnatter: "Finite Mixture and Markov Switching Models", Springer 2006.
- [11] 交通シミュレーションクリアリングハウス: "交通シミュレーションシステム検証用データ公開サイト", <http://www.i-transportlab.jp/bmdata/KichijojiBM/ave-dataset/ave-index.html>.