

交通流計算の高速化を目指した シミュレータ TRIPS の開発

早川敬一郎[†] 北岡広宣[†] 森博子[†]

車両の旅行時間はリンク流入時点の車両密度から推定できることに着目して、交通施策を評価する計算を高速に実行できるイベント駆動型の交通流シミュレータ TRIPS (TRaffic Issues Prediction Simulator)を開発した。交通工学研究会交通シミュレーションクリアリングハウスの基準に基づいて基本検証項目を満たすことを確認し、豊田市の朝の通勤時間帯を対象とした実ネットワークにおけるシミュレーションを行ったところ、交通量と旅行時間に関して従来のシミュレーションと同等の結果を非常に短時間で計算可能であることを確認した。

Development of a High-speed Traffic Simulator Named TRIPS

Keiichiro Hayakawa[†], Hironobu Kitaoka[†] and Hiroko Mori[†]

Vehicle's travel time is estimated by the density at the time they flow into links. On the basis of this idea, we developed an event-driven traffic simulator named TRIPS (TRaffic Issues Prediction Simulator), which can calculate metropolitan traffic flow firstly. We verified its performance according to the JSTE(Japan Society of Traffic Engineers) standard verification process. And we applied it to a real network, morning commuting hours in Toyota City. We confirmed that TRIPS enables us to calculate large scale networks in very short time, and that its reproducibility is agree well with a conventional simulator.

1. はじめに

近年、自動車の普及に伴って交通渋滞の問題が顕著になっている。それに対して、交通情報の提供による経路案内や、ロードプライシング、パーク&ライドなどの TDM 施策が実施されているが、これらの技術や施策を実施した際の効果を実道路で事前評価することは困難であることが多い。そのため、従来から交通流シミュレータを用いた交通施策の評価が行われている¹⁾。我々も、広域交通流シミュレータ NETSTREAM (NETwork Simulator for TRaffic Efficiency And Mobility)を開発し²⁾³⁾、交通情報提供による渋滞低減効果などの評価を行ってきた。

しかし、日々の通勤における渋滞を解消するような施策の検討にあたっては、施策の導入後の過渡期を経て均衡状態に達するまでの様子を事前に検討する必要があり、大規模な計算を繰り返し行う必要があるため、計算時間の短縮が大きな課題となる。従来から存在する交通流シミュレータ^{2)~5)}は、タイムステップの概念を用いてシミュレーションを実行している。これは、例えば 1 秒といったような基準時間をタイムステップとして設定し、ネットワーク上の全ての車両の動きをタイムステップ毎に追っていく手法である。この手法によると、計算時間を短縮するためにはタイムステップを大きくとる必要が生じるので、リンク（道路）への流入順序など渋滞に大きな影響を及ぼす部分を正確に計算することが難しくなる。一方で、交通シミュレーションを使わずに、需要の均衡配分などの数学的手法を用いて渋滞解消施策を評価することも考えられるが⁶⁾、現在、このような手法において現実的なネットワークにおける渋滞流をうまく取り扱っている研究例は存在しない。

我々は、このような課題に対応するため、従来のシミュレータと比較して大幅に計算コストを削減することを目指すイベント駆動型の交通シミュレータ TRIPS (TRaffic Issues Prediction Simulator)を開発した。開発したシミュレータは、車両のリンク旅行時間がリンクに流入した時点における車両密度から推定できることに着目して、イベント駆動型の計算を行うことで計算コストの削減を図っている。以下、第 2 章で TRIPS の原理や実装手法について述べ、第 3 章で TRIPS が交通工学の基本検証項目の結果および豊田市の実ネットワークに適用した結果について述べる。

2. TRIPS の開発

一般に、交通シミュレータは、図 1 に示すように、ネットワークデータ、信号データ、OD データなどの入力データの読み込み機能と、経路探索機能や車両挙動計算機能などの計算機能、そして、現在の状態を表示する描画機能からなる。ここで、ネッ

[†] (株) 豊田中央研究所
Toyota Central R&D Labs., Inc.

トワークデータとは、都市の道路の属性や交差点の接続関係をあらわしたデータであり、OD データとは、同一の出発地および目的地を持つ車両が一定時間あたりに発生する台数を出発地と目的地のペア毎に一覧にしたデータである。TRIPS の開発に当たっては、車両挙動計算機能の高速化を目指した。以下、2.1 で TRIPS における車両挙動計算アルゴリズムの概要を述べ、2.2 で旅行時間計算アルゴリズムを、2.3 でそのアルゴリズムの実装手法を述べる。

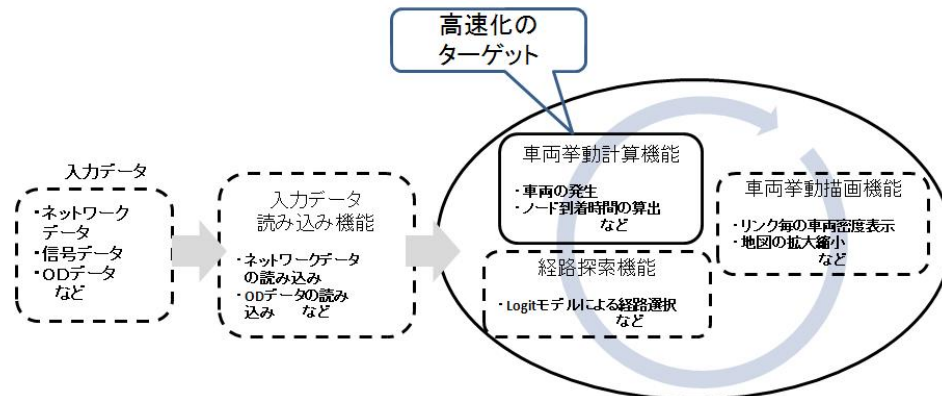


図 1 シミュレータの構成

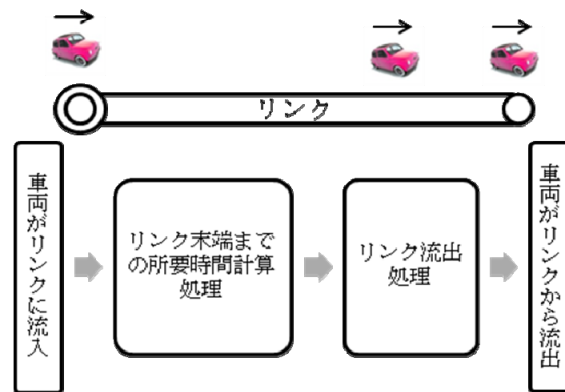


図 2 TRIPS における車両挙動計算ブロック

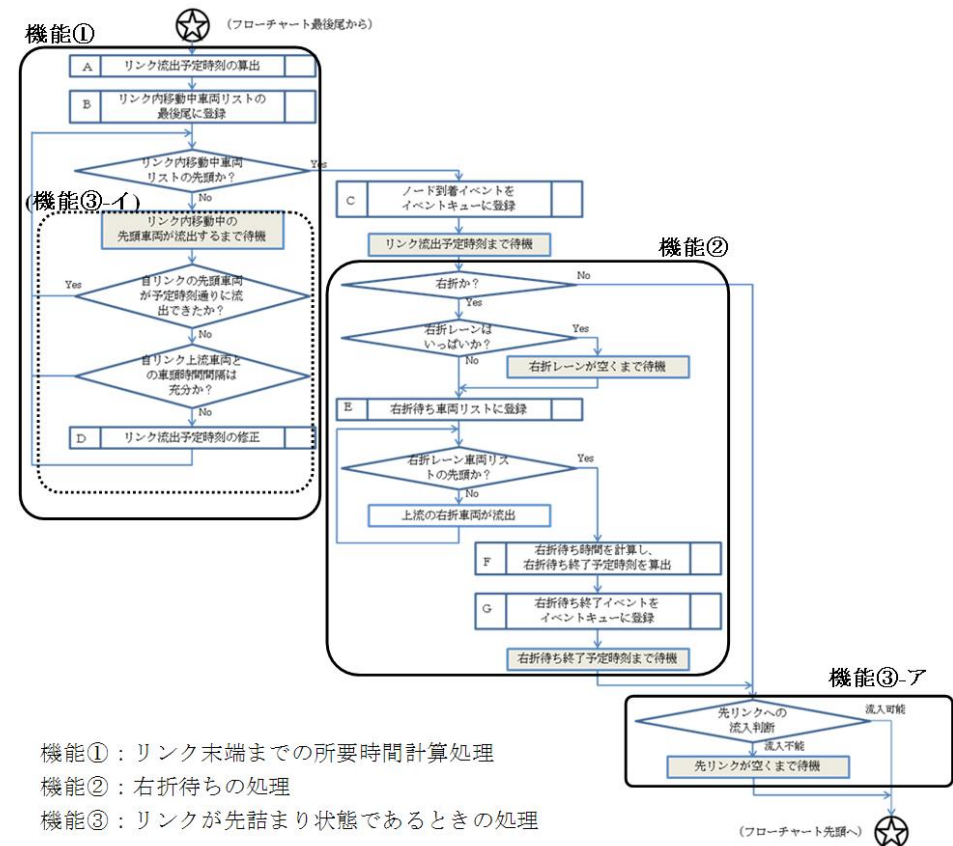


図 3 旅行時間算出処理のフローチャート

2.1 TRIPS における車両挙動計算アルゴリズムの概要

TRIPS においては、車両挙動計算を高速化するため、車両のリンク流出予定時刻をなるべく少ない計算回数で求めることを目指した。リンクから流出できる交通量が一定であれば、車両がリンクに流入した時点の計算のみで車両のリンク流出時刻を求めることができる。しかし、車両がリンクから右折で流出する場合は対向直進交通量によって、また、車両の進行方向の下流リンクが先詰まりしている場合は、下流リンクの状態によって流出交通量が変化するため、車両がリンク末端に到着した時点で待ち

時間を計算することが望ましい。このことから、TRIPS における車両挙動計算は、図 2 に示す機能ブロックで構成した。まず、リンク流入時に車両密度に基づいてリンク末端までの所要時間を計算し、その後、車両がリンク末端へ到着した時点でリンク流出の処理を行う。右折もしくは先詰まりの状況がある場合は、右折もしくは先詰まりの状況に対して、それぞれの所要時間を計算する処理である。これらの処理に関するフローチャートを図 3 に示す。図に示す機能①がリンク末端までの所要時間の計算処理であり、機能②および③が、リンク流出処理である。以下、2.2 において、機能①～③の中で行う旅行時間計算手法について説明し、2.3 において、イベント駆動型シミュレーションの原理と、機能①～③の実装手法について説明する。

2.2 旅行時間計算アルゴリズム

2.2.1 リンク末端までの所要時間計算処理

リンク末端までの所要時間計算部分においては、リンクに流入した車両が、リンク末端まで（右折車の場合は右折レーンとの分岐部まで）到着するのにかかる時間を求める。そのうち、図 3 の A で示した部分の処理は、リンク流入時点におけるリンク内の密度に基づいて、下流リンクの先詰まりの影響が無いと仮定した場合のリンク流出予定時刻を求めるものであり、以下で詳細に説明する。下流リンクの先詰まりがある場合については、図 3 の D で示した部分において、リンクの流出予定時刻の修正を行うが、この詳細については 4.3 節にて説明する。

先詰まりの影響が無いと仮定した場合、リンクに流入した車両がリンク末端まで（右折車の場合は右折レーンとの分岐部まで）到着するのにかかる時間は、リンク流入時点でリンク内が混雑状態であるか否かに応じて、異なった計算方法で求められるので、それぞれの場合について以下に説明する。

(1) リンクが混雑状態が無い場合(リンク内の車両が自由流の場合)

リンクが混雑状態が無い場合は、リンク内の車両密度からリンク内の通過速度を求めることにより、リンク末端までの所要時間を求める。

TRIPS では、図 4 に示す K-V 曲線（リンク内の車両密度と旅行速度の関係）および K-Q 曲線（リンク内の車両密度と交通量の関係）を採用している。ここで、 K はリンク内車両密度、 V は旅行速度、 Q は交通量であり、 $K_{\max}$ はリンク内飽和車両密度、 V_f はリンク内に他の車両が一台も存在しないときの自由旅行速度、 $Q_{\max}$ はリンクの交通容量を示している。TRIPS においてリンクが混雑状態が無い、すなわち自由流である場合とは、図 4 の網かけで示した、車両密度 K がリンクの飽和密度

$K_{\max}$ の半分より小さい場合を指す。この状態のとき、車両は K-V 曲線によって求められた速度 V でリンク内を通過することができる。TRIPS における K-V 曲線は線形関係であるため、車両密度が K のときの旅行速度 V は、リンクの飽和密度を $K_{\max}$ 、車両が全く存在しない場合の自由流速度を V_f として、下の式(4-1)にて求められる。

$$V = V_f - \frac{V_f}{K_{\max}} K \quad \cdots \text{式 (4-1)}$$

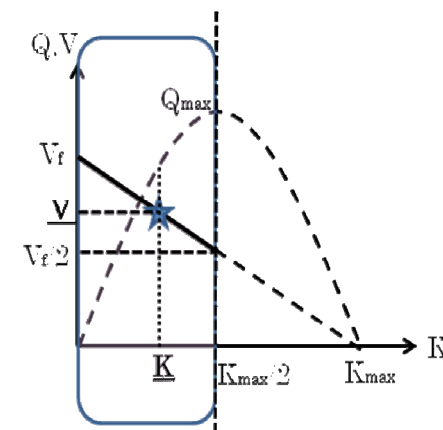


図 4 K-Q 曲線および K-V 曲線

このとき、リンク旅行時間 T はリンク長を L として、次式(4-2)によって求められる。

$$T = \frac{L}{V} + t_{sig} \quad \cdots \text{式 (4-2)}$$

ここで、 t_{sig} は、信号待ち時間の期待値であり、信号の周期を T_{period} 、赤信号の時間を T_{red} として、

$$t_{sig} = \frac{T_{red}^2}{2T_{period}} \quad \cdots \text{式 (4-3)}$$

で表わされる．ただし，信号が無いリンクにおいては， $t_{sig} = 0$ である．

以上が，自由流の場合の旅行時間の算出手法である．

(2) リンクが混雑状態の場合(リンク内の車両が渋滞流の場合)

車両密度 K がリンクの飽和密度 K_{max} の半分より大きい場合，リンクは渋滞流となる．リンクが渋滞流の場合，車両はリンク内で先行車のリンク流出待ち行列に追いつき，先行車に続いてリンクを流出することになる．そのため，車両がリンクに流入してから流出するまでの旅行時間は，リンク流出側の容量と，リンク流出待ち行列を作っている先行車の数によって決定できる．

今，リンク流出側信号の青現示時間の割合を ρ とすると，リンクから流出する

車両の車頭間隔時間 $t_{interval}$ は，

$$t_{interval} = \frac{1}{\rho Q_{max}} \quad \cdots \text{式(4-4)}$$

となるため，リンクに流入した時点でリンク内に先行車両が n 台存在する場合，

リンク旅行時間 T は次式によって求められる．

$$T = \frac{n}{\rho Q_{max}} \quad \cdots \text{式(4-5)}$$

2.2.2 右折待ち時間の計算

図 3 の F で示した部分においては，右折待ち時間の計算を行う．この計算は，車両が右折レーンの先頭に到着した時点で行われるものである．右折待ち時間は，右折時点における対向直進交通量から右折容量および右折車の直進換算係数を求めることにより算出する．具体的な手順を以下に示す．

まず，右折時点における対向直進交通量から次式に示す交通工学研究会による右折容量の算定式⁷⁾に基づいて右折容量を求める．

$$S_R = 1800f(SG - qC)/(S - q)C + 3600K/C \quad \cdots \text{式(4-6)}$$

S_R … 右折専用車線の交通容量[台/時]

S … 対向直進流入部の飽和交通流率 [台/有効青 1 時間]

q … 対向直進流入部の交通量 [台/時]

C … サイクル長 [秒]

G … 有効青時間 [秒]

K … 信号の変わり目で捌ける台数[台/サイクル]

f … 次の式(4-7)の関係で与えられるギャップアクセプタンス確率

$$f = \begin{cases} 1.00 & (q = 0) & 0.81 & (q = 200) \\ 0.65 & (q = 400) & 0.54 & (q = 600) \\ 0.45 & (q = 800) & 0.37 & (q = 1000) \\ 0.0 & (q > 1000) \end{cases} \quad \cdots \text{式(4-7)}$$

(ただし，中間の q の値については補完する．)

次に以下の式(4-8)によって右折車の直進車換算係数 E_{RT} を求める．

$$E_{RT} = \frac{1.1}{f(SG - qC)/G(S - q) + 2K/G} \quad \cdots \text{式(4-8)}$$

そして，以下の式(4-9)によって右折待ち時間 T_r を求める．

$$T_r = t_i(E_{RT} - 1.0) \quad \cdots \text{式(4-9)}$$

ここで， t_i とは，リンクの右折方向の飽和流出容量の逆数である．

2.2.3 リンクが先詰まり状態であるときの処理

図 3 の D,H で示した部分においては，下流リンクの先詰まりに対する処理を行う．リンクの先頭車両が流出予定時刻になったにもかかわらず，下流リンクが飽和

していてリンクから流出できないとき、当該車両は、下流リンクが流入可能になるまで待機する必要がある、その後続車両はリンク容量制限を満たすために各々の流出予定時刻を変更する。

2.3 イベント駆動型シミュレーションの動作アルゴリズム

従来の交通シミュレーションは決まったタイムステップを持っており、タイムステップ毎に信号や車両の状況のシミュレーションを行う方式を取っていた。そのため、1台の車両がリンクを通過する際にも毎タイムステップ時刻毎に車両位置の計算を繰り返し、多くの計算を行う必要があった。今回提案するイベント駆動型のシミュレータ TRIPS においては、前節で示した旅行時間計算を行うことにより、車両のリンク流出予定時刻や右折待ち終了予定時刻などイベントが発生する時刻のみに計算を行う。

2.3.1 イベントキュー

従来のタイムステップ型のシミュレーションにおいては、時間の進行は時刻同期型のタイマーが担っていた。一方、提案するイベント駆動型シミュレーションにおいて時間の進行を担うのは、イベントキューである。イベントキューの中には、これから起こるイベントが、発生時刻の早い順にソートされて置かれている。シミュレーションにおいては、その時点でイベントキュー内の先頭にあるイベントを実行する。イベントの実行内容によっては、新たなイベントが生成される。新たに生成されたイベントは、イベントキューの中の適当な位置に置かれ、発生を待つことになる。こうして、次に起こるべきイベントを順次処理していくことによって、シミュレーション時刻を進めていく。図 3 のフローチャートにおいて、C および G で示した処理は、それぞれノード到着イベントや、右折待ち終了イベントをイベントキューの適切な位置に置くことを示している。

2.3.2 リンク内車両リストと右折待ち車両リスト

2.3.1 で示したように、TRIPS においては、車両の動きなどの全ての動作がイベントによって記述されている。そのため、多数の実行待ちイベントが発生することになるが、リンク内の車両については、FIFO(First-in First-Out : 先入れ先出し)の原則が適用されることに着目し、図 5 に示すように、実行待ちイベントをメインのイベントキューとリンク内車両リストの二次元構造にて管理することを考えた。なお、右折待ち車両についてはリンク内での FIFO 原則から外れるため、右折待ち車両リストを作成し、リンク内車両リストと同様に管理した。リンク内車両リストについては、図 3 のフローチャートの B で示した処理によって車両が追加され、先頭の車両から随時イベントキューに投入される。右折待ち車両リストについても、同様に図 3 のフローチャートの E で示した処理によって車両が追加され、先頭の車両から随時イベントキューに投入される。

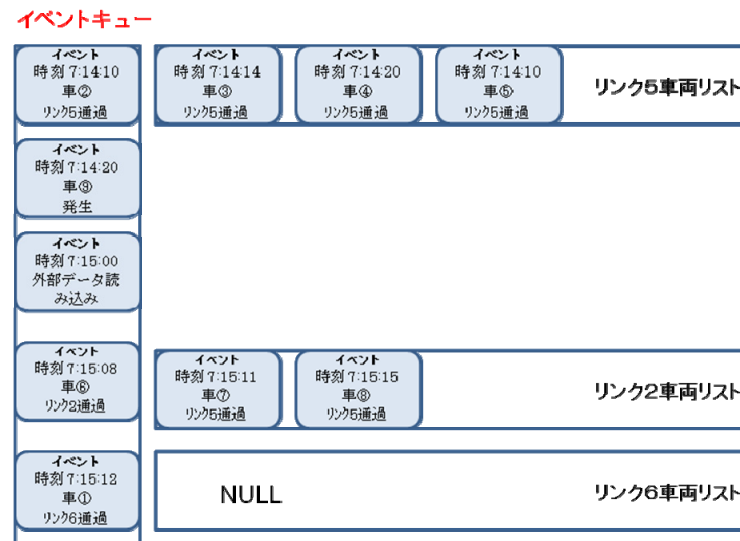


図 5 イベント管理の二次元構造

3. TRIPS の検証

第 2 章に述べたアルゴリズムおよび実装手法によって開発した交通流シミュレータ TRIPS について、基本性能の検証を行い、豊田市における実ネットワークに適用した。ここでは、3.1 で TRIPS の基本性能の検証について述べ、3.2 で実ネットワークに適用した結果について述べる。

3.1 基本性能の検証

開発したイベント駆動型シミュレータの基本性能を確認するため、(社)交通工学研究会の交通シミュレーションクリアリングハウスによる Verification マニュアル⁸⁾を参考に、車両発生部、リンク容量、および飽和流率の動作に関する検証を行った。

3.1.1 車両の発生

車両の発生について検証すべき項目としては、発生のスケジューリング、および発生車両のリンクへの投入の 2 項目が考えられる。発生のスケジューリングとは、ある時間帯に決まった台数の車両が発生するときにその発生間隔や発生順序などを決定するものであり、TRIPS の開発に当たってこのアルゴリズムについては NETSTREAM と機能の共通化を行った。当該機能については、既に NETSTREAM

において機能の検証を済ませており、要求性能を満たしていることを確認している。一方、発生車両のリンクへの投入に関しては、今回 TRIPS の実装に合わせて新規に開発を行った部分であるので、以下にその検証について述べる。

まず、図 6 に示すように、リンク容量 1800[台/時間]のリンクに、500[台/時間]の交通需要を与えて 1 時間のシミュレーションを実行したところ、リンク終端の交通量は図 7 のようになった。交通量は 500[台/時間]の傾きの理論直線と一致しており、発生リンクに余裕がある場合に車両の発生が正確にシミュレーションできていることが確認できる。また、同じリンクに、図 8 に示すように、最初の 30 分間に 2400[台/時間]、続く 30 分間に 0[台/時間]の需要を与えて 1 時間のシミュレーションを実行したところ、リンク終端の交通量は図 9 のようになった。リンクの交通量は、リンク容量と等しい 1800[台/時間]の割合で、設定した需要が全て発生し終わるまで継続しており、車両の発生に関して問題なく動作していることを確認した。



図 6 車両発生を検証条件（非混雑時）

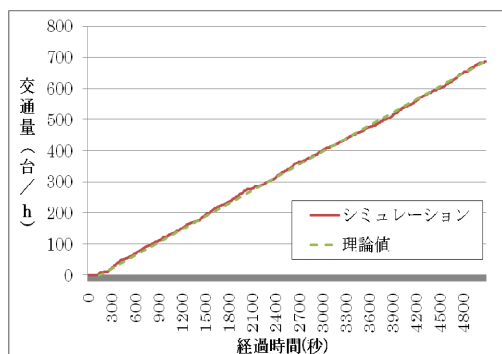


図 7 車両発生を検証結果（非混雑時）

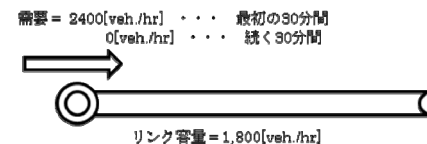


図 8 車両発生を検証条件（混雑時）

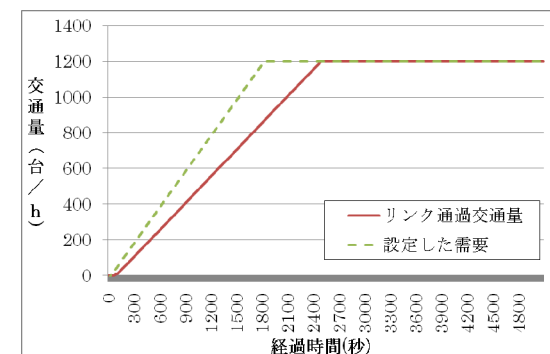


図 9 車両発生を検証結果（混雑時）

3.1.2 ボトルネック容量

図 10 に示すように、需要 1,500[台/時間]に対して、ボトルネック容量が 800, 1000, 1200[台/時間]の場合のボトルネック流出交通流を確認した。ボトルネック容量が 1200[台/時間]の場合の結果を図 11 に示す。ボトルネック流出曲線は、傾き 1200[台/時間]の直線と一致しており、ボトルネック容量が達成されていることが確認できる。ボトルネック容量が 800, 1000[台/時間]の場合についても、同様に確認を行った。

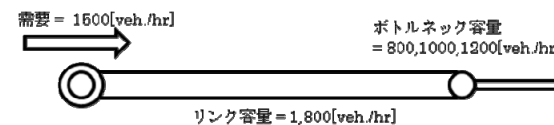


図 10 ボトルネック容量の検証条件

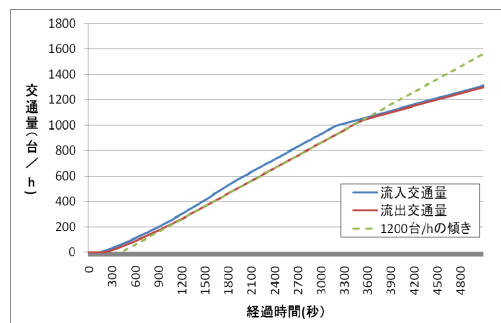


図 11 ボトルネック容量の検証結果

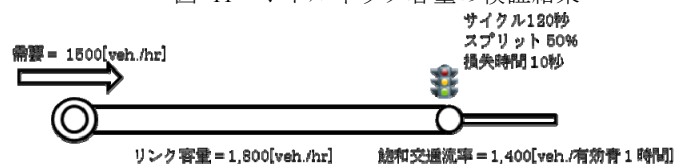


図 12 飽和交通流率の検証条件

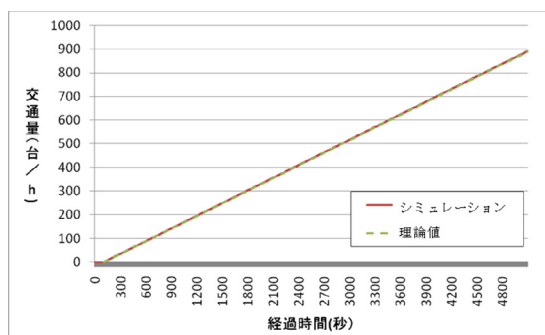


図 13 飽和交通流率の検証結果

3.1.3 リンク下流端の飽和交通流率

図 12 に示すように、飽和交通流率 1400[台/有効青 1 時間]であるリンクの下流端に、サイクル長 120[秒]、スプリット 50[%]、損失時間 10[秒]の信号を設置し、リンク流出交通量を確認した結果、図 13 のようになった。この状態は飽和状態であり、流出交

通量の傾きが飽和交通流率と青時間割合の積に一致していることが確認できた。

3.2 実ネットワークへの適用

開発したイベント駆動型シミュレータを用いて、豊田市中心部（南北約 16km×東西約 20km，リンク数 4839，ノード数 2264）の平日朝通勤時間帯(6:00AM～10:00AM)の交通シミュレーションを行い，我々が従来利用していた交通流シミュレータ NETSTREAM による計算結果との比較を行った。入力したデータは，豊田市の道路データや信号データなどのネットワークデータと，朝通勤時間帯における OD データであり，これらは両シミュレーションとも共通のものを用いた。この時間内に発生する車両の総台数は，139871 台である。TRIPS におけるシミュレーション実行時の画面を図 14 に示す。

3.2.1 シミュレーション結果の比較

TRIPS と NETSTREAM で，それぞれ，ネットワーク上の全リンクにおける 30 分毎の交通量と旅行時間を集計し，その比較を行った。その一例として，午前 7 時 30 分の交通量と旅行時間の計算結果を図 15 および図 16 に示す。全時間帯における計算において，両シミュレータの計算結果の相関係数は，交通量に関して 0.99，旅行時間に関して 0.90 となり，ほぼ同等の結果が得られていると考えられる。

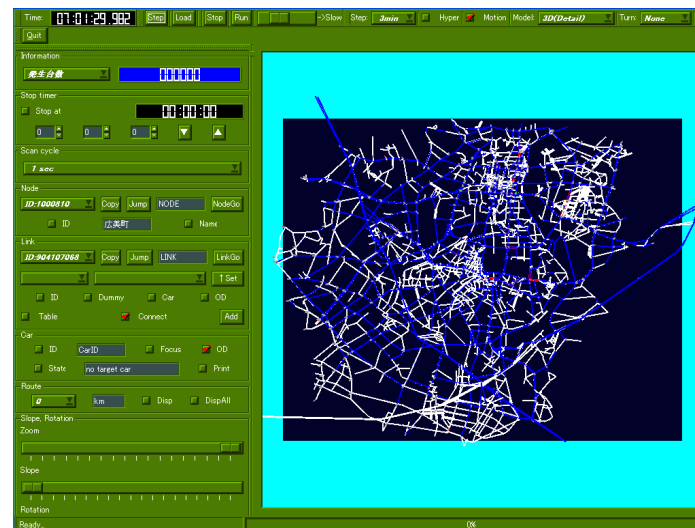


図 14 TRIPS の実行画面

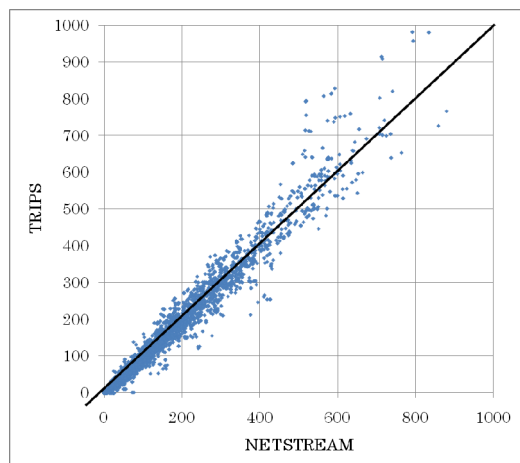


図 15 交通量の比較 (4839 地点)

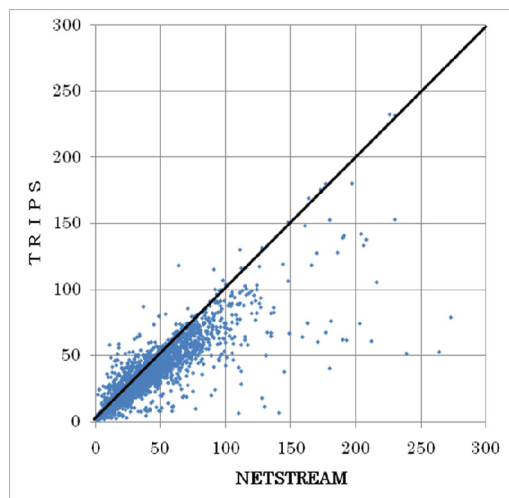


図 16 旅行時間の比較 (4839 リンク)

3.2.2 計算時間

NETSTREAM においては、タイムステップを 1 秒としているため、1 秒毎に全車両の位置を計算しており、今回の計算の間に車両位置を計算した回数は約 1 億 2000 万回に達している。一方で、TRIPS ではイベント駆動型の計算をおこなうが、イベントの発生をリンクの流入時などに限ることにより、今回の計算の間に実行したイベント数は約 450 万回に抑えることができた。その結果、実際に計算にかかった時間については、CPU が Intel Core2 の 2.66GHz、メモリ 3.5GB 搭載のパソコンを用いて、NETSTREAM で 8 分 56 秒に対し、TRIPS は 42 秒となっており、約 1/13 に短縮することができた。

4. まとめ

車両の旅行時間がリンク流入時点における車両密度から推定できることに着目して、タイムステップの概念を用いないイベント駆動型の計算を行うことで計算の高速化を図った、交通流シミュレータ TRIPS を開発し、交通工学の基本検証項目を満たすことを確認した。また、豊田市の朝の通勤時間帯を対象とした実ネットワークにおけるシミュレーションを行ったところ、従来のシミュレータ NETSTREAM の約 13 倍の計算速度で、同等の結果を得ることができた。

謝辞 本研究を行うにあたり、豊田市のネットワーク、交通量データおよび実データをトヨタ自動車株式会社 IT・ITS 企画部池上様よりご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堀口良太：最近の渋滞現象への取り組みと交通シミュレーション開発の動向，電子情報通信学会 ITS 研究会講演集，2004 年 12 月。
- 2) 馬場美也子，棚橋巖，北岡広宣，森博子，寺本英二，“交通流シミュレータ NETSTREAM”，情報処理学会論文誌，vol.46，No.1，pp226-235，Jan 2005。
- 3) H.Mori, H.Kitaoka, and E.Teramoto: "Traffic Simulation for Predicting Traffic Situations at Expo ,2005", R&D Review of Toyota CRDL, Vol.41, No.4, pp.45-51, 2006。
- 4) 株式会社アイ・トランスポート・ラボ：“広域道路網交通流シミュレータ SOUND/4U の概要”，http://www.i-transportlab.jp/products/sound/snd_outline20071101.pdf
- 5) Quadstone Paramics Ltd, <http://www.paramics-online.com/>
- 6) 井料隆雅，吉井稔雄，朝倉康夫，出発時刻選択問題の均衡状態に関する数理的解析.土木工学会論文集, 2005. 779/IV-66: pp. 105-118。
- 7) 交通工学研究会,交通工学ハンドブック(1984),技法堂出版,p226
- 8) 交通シミュレーションクリアリングハウス, <http://www.jste.or.jp/sim/index.html>