

# X10言語を用いた超並列大規模交通流シミュレーション

鈴木 豊太郎 小野寺 民也 今道 貴司 加藤 整 井手 剛

## X10-based Massive Parallel Large-Scale Traffic Flow Simulation

Toyotaro Suzumura, Tamiya Onodera, Takashi Imamichi, Sei Kato and Tsuyoshi Ide

都市におけるさまざまなあらゆるリソースの動きを最適化することは、渋滞や災害などで機能不全に陥った場合でも、費やされている膨大な無駄をなくすという意味で、人類全体に対する貢献と言える。本論文では、従来のエージェント・シミュレーションの計算負荷の課題を突破するために、新たな並列分散プログラミング言語 X10 を用いて大規模なエージェント・シミュレーション実行処理系を提案する。また、その処理系上で交通シミュレーションを実装し、日本全国の道路ネットワークや世界の 100 以上の都市の道路網を用いて、1千規模級の超並列分散環境上でシミュレーションを行い、極めて大規模なシミュレーションを超高速に実現できることを示す。

Optimizing city transportation for smarter cities has a major impact on the quality of life in urban areas, in terms of economic advantages and lowering of the environmental load. In many cities, transport authorities are facing common challenges such as worsening congestion, insufficiencies in transport infrastructure, increasing carbon emissions and growing customer needs. To tackle these challenges, it is vital to have fine-grained and large-scale agent simulations for the design of smarter cities. In this paper, we propose a large-scale traffic simulation platform built on top of X10, a new distributed and parallel programming language. The experimental results demonstrate linear scalable performance in simulations of the large-scale traffic flow on the entire Japanese road network and a hundred other global cities through processing using thousands of CPU cores.

**Key Words & Phrases** : X10, 高度道路交通システム, 大規模シミュレーション, スーパーコンピュータ  
X10, Intelligent Transportation Systems, Large-scale simulation, Supercomputer

### 1. はじめに

都市における人・車の動き、物流、エネルギーなど、あらゆるリソースの動きを最適化することは、情報基盤整備という意味で巨大なビジネス機会を与えることはもちろん、渋滞や災害などで機能不全に陥った都市を正常化し、費やされている膨大な無駄をなくすという意味で、人類全体に対する貢献といえるだろう。IBM 基礎研究部門 (IBM Research) では、特にその中で重要な研究テーマとして都市における交通流の最適化を取り上げている。

動的な交通流、すなわち時間的に変動する交通流のモデリング自体は 1970 年代から活発に研究されている歴史ある分野である。主要なアプローチはおおむね 2 つある。

- 時系列予測技術に基づくアプローチ
- シミュレーションに基づくアプローチ

歴史的には、ほぼすべての研究は前者に集中してきたが、2000 年以降、計算機リソースが充実してくるにつれ、相対的に後者のアプローチがその比重を増してきた。その最大の理由として、シミュレーションは、例えば、「ある時刻において、この道路が通行止めになったら、その後の交通流はどのように時間的に変化するだろう」とか、あるいは「ここの信号の動作制御パラメータを変更したらどうなるだろう」といったシナリオ分析の機能を提供できることである。これは最適な都市設計のための必須要件である。

IBM 東京基礎研究所では、数年前からエージェント・モデリング技術を用いた交通流シミュレータ IBM Mega Traffic Simulator (Megaffic) の研究を行ってきた。エージェント・シミュレーションは、上記の通り柔軟なシナリオ分析を可能にするが、その代償として計算コストが非常に高いという欠点があり、都市レベルで詳細な交通流シミュレーションを行うのは従来不可能とされてきた。

本論文においては、従来のエージェント・シミュレーションの計算負荷の課題を突破するために、X10 言語による並列分散処理のアプローチを提案する。本論文の構

提出日:2011年11月25日 再提出日:2011年12月13日

成は以下の通りである。第 2 節では, Megaffic 全体の構成を述べ, Megaffic の最大の特徴である交通系の数理モデリングのコンポーネントを紹介する。第 3 節では, X10 言語を用いたエージェント・シミュレーション基盤である XAXIS の概要と XAXIS ベースの交通シミュレーション基盤を説明し, 第 4 節では TSUBAME 2.0 を用いた実験結果を紹介する。最後に, 本論文のまとめについて述べる。

## 2. 交通流シミュレータ Megaffic

従来, 交通施策の評価には利用者均衡配分モデルといった静的なモデルが利用されてきた [1] [2]。しかし, このような交通需要を各リンクに割り当てるアプローチでは, 各リンク交通量や, 交差点での飽和度を配分原理により計算でき, 日交通量予測能力には優れているが, 渋滞の発生, 解消や, 時間帯ごとに変化する交通需要, 信号の動作制御など, 交通施策評価に重要となるダイナミクスを評価することができない。渋滞現象といったような時間, 空間的に変動する動的な交通流を分析するには, 道路ネットワーク上の交通流を形成する車両のダイナミクスを表現する必要がある。ここでは, Megaffic においてこれらダイナミクスを表現するためにどのように運転者がモデル化され, それがいかに交通流分析につながっているかを見ていく。

### 2.1 Megaffic の概要

交通施策評価に必須となる動的な交通流を表現し, 効果的な交通施策評価を実現するために, われわれは図 1 に示す要素技術を基にした交通流シミュレータ Megaffic を開発している。Megaffic は, 交通流のモデル化にマルチエージェント・システムを採用し, 各車両が自律的なエージェントとしてモデル化されている。マルチエージェント・システムは, 1980 年代において分散人工知能を背景に登場したシステムで, 分散協調問題解決や複雑系シミュレーションに採用されているシステムである。ここでは, このマルチエージェント・システムを採用することにより, エージェント同士の相互作用の結果として, 交通流が創発され, マクロな交通流が個々の運転者に影響を及ぼすというフィードバックが生まれることで時間, 空間的に変動する動的な交通流を扱えるようになることを期待する。

このようなアプローチを採用した際には以下の 3 点が問題となる。すなわち,

1) 前述の動的な交通流のダイナミクスを表現する精緻

- な運転行動モデルをいかにして構築するか?
- 2) 都市の交通施策の What-if 解析 (仮定を変えて結果を評価する解析手法) を行うために, いかに高速なマルチエージェント・シミュレーションを実施するか?
- 3) 微視的な交通流シミュレータを用いた交通施策評価のために効率的なグラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI) は?

これら 3 つの課題を解決するために, 図 1 に示した数理モデリング技術, シミュレーション基盤, 可視化基盤の 3 つの要素技術を開発している。

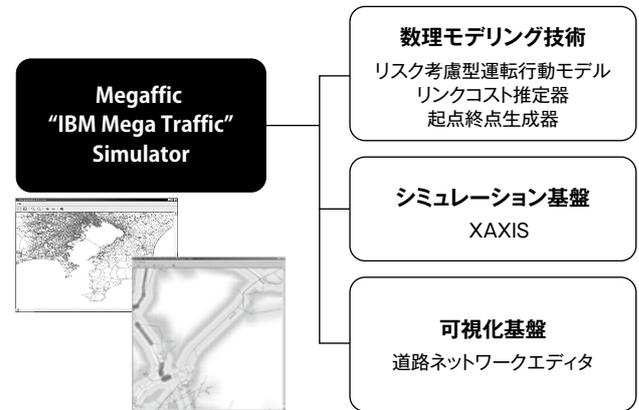


図 1. Megaffic の構成. 図左下は道路ネットワーク・エディター

これまでの運転者の運転行動モデル構築, 特に経路選択モデルの構築においては, 線形の期待効用関数を定義し, 右左折回数, 料金, 旅行時間, 距離などといった各効用の重みを設定し, 現況を再現するのに最適な重みパラメータを設定するという方法が用いられてきた。このようなキャリブレーションを行うには繰り返しシミュレーションを実施する必要があることから非効率的であり, また得られた重みの理解にも繋がらない。そこでわれわれのアプローチでは, これらパラメータを自動的に設定する方法として, 車両の位置情報のデータであるプローブカー・データを分析, 各リンクのコスト分布を推定し, さらにこのリンク・コスト分布を基に, リスクを考慮した運転行動モデルのパラメータを自動的に抽出する方法を採用している。

このようなアプローチによってモデル化された高度に数理的な運転行動モデルを採用することのトレードオフとして, 都市全体の道路ネットワークでの交通流をシミュレーションするには, 各エージェントの意思決定に要する計算コストがかかってしまう。そこでわれわれは, このエージェントの意思決定を行う汎用の基盤を並列分散プログラミング言語 X10 言語を用いて開発した。これによりマル

チエージェント・シミュレーションのランタイムだけではなく、ユーザーはこの開発基盤を用いて、震災時の避難行動や、人口市場といったマルチエージェント・シミュレータを効率的に開発することができるようになる。

3つ目の技術要素は可視化技術である。微視的な交通流シミュレーションでは、都市全体の全車両の時間ごとの位置が計算されるが、都市の道路設計者にはこれら膨大なシミュレーション結果が提示されていても意味をなさず、効率的な道路施策評価のためには、適切な GUI を提供する必要がある。そのために、まず交通シミュレーションの結果として得られた車両の時系列的な動きを可視化するツールを提供する。また、道路ネットワーク・エディター（図1左下）は、計算機上で道路や交差点といった道路ネットワークを形成するオブジェクトを編集することが可能になるソフトウェアであり、これにより新たに高速道路を設けた場合、交差点の信号現示パラメータを変更した場合などの What-if 解析を実現している。

### 3. 大規模エージェント・シミュレーション実行基盤 XAXIS

XAXIS (X10-based Agents eXecutive Infrastructure for Simulation) とは並列プログラミング言語 X10 [3][4] で実装された大規模エージェント・シミュレーションの実行処理基盤である。初めに並列プログラミング言語 X10 の概要を述べ、次に X10 上に構築された大規模エージェント・シミュレーション実行基盤 XAXIS の概要を述べる。

#### 3.1 並列プログラミング言語 X10 の概要

X10 は、IBM Research が開発している新しい並列分散プログラミング言語であり、マルチコア、アクセラレーターなどから構成される異機種混合環境の分散システムにおいて、高性能なアプリケーションを生産性高く開発することを可能にする新たなプログラミング言語である。多数の実行コアを備えた実行環境では、その並列性やメモリー構成をプログラマーにどのようにみせるかの選択が重要となるが、X10 では PGAS (Partitioned Global Address Space) と呼ばれる、複数のプレース (Places) に分割されたグローバルなアドレス空間を提供する。プレースは、メモリーの局所性を抽象化したもので、典型的には1つの計算機に対応する。各プレースの中では、軽量なスレッドに相当する非同期な実行な主体としてアクティビティーを動的に生成することができる。アクティビティーは、`async` 文という構文を用いて生成する

ことができ、`at` 文を用いて他のプレースにアクティビティーを移動することができる。従来、各ノードがマルチコアから構成され、ネットワークで結合された大規模な計算機でシミュレーションを実現するには、ノード間のメッセージング機構には MPI (Messaging Passing Interface)、1ノード内のスレッド並列には OpenMP、POSIX スレッドなどのプログラミング・モデルを用いるが、X10 の「プレース」や「アクティビティー」の概念を用いることによって、統一的なプログラミング・モデルを用いて生産性高く大規模な計算機クラスター上での実行処理系を構築することが可能になる。

#### 3.2 XAXIS のアーキテクチャー

X10 を用いて実装された大規模シミュレーションの実行基盤 XAXIS のを 図2 に示す。シミュレーションのエージェント処理は、各プレースで X10 のアクティビティーによって非同期に実行され、各プレースに存在するエージェントの管理は、エージェント・マネージャーが行う。他のプレースに存在するエージェントとの通信を行う際には、エージェントの識別子を元に、エージェント・マネージャーが担当するプレースを決め、通信メッセージを送る。この通信メッセージはユーザーからは隠ぺいされており、シミュレーション開発者はエージェントのロジックの実装に専念すればよい。また、X10 を用いて開発された XAXIS では分散計算機における通信メッセージは明示的に行うことなく、`at` という構文を用いることによって、他のプレースに存在するエージェント・マネージャーのメソッドを呼び出すことによって、メッセージの送受信を行うことができる。非同期スレッドを実現するアクティビティーと `at` の構文を用いたプレース間の通信機構を用いることで、シミュレーション実行環境自体を簡便に実装することが可能になる。

一方、交通シミュレーション Megaffic は Java で記述された エージェント・フレームワーク ZASE (IBM Zonal Agent-based Simulation Environment) [5] 上で元来実装されているため、XAXIS 上で Megaffic を透過的に動作させる必要がある。そのため、ZASE が提供するプログラミング API と同様の API を XAXIS 上でも提供し、エージェント・シミュレーションの実行基盤上のアプリケーションを変更することなく、実行することを可能にしている。

また、X10 言語は、C++ か Java のコードにコンパイルする機構が提供されており、Java コードへの変換機構を用いることで、ZASE 上で記述された既存の Java のエージェント・シミュレーション・コードを XAXIS 上で

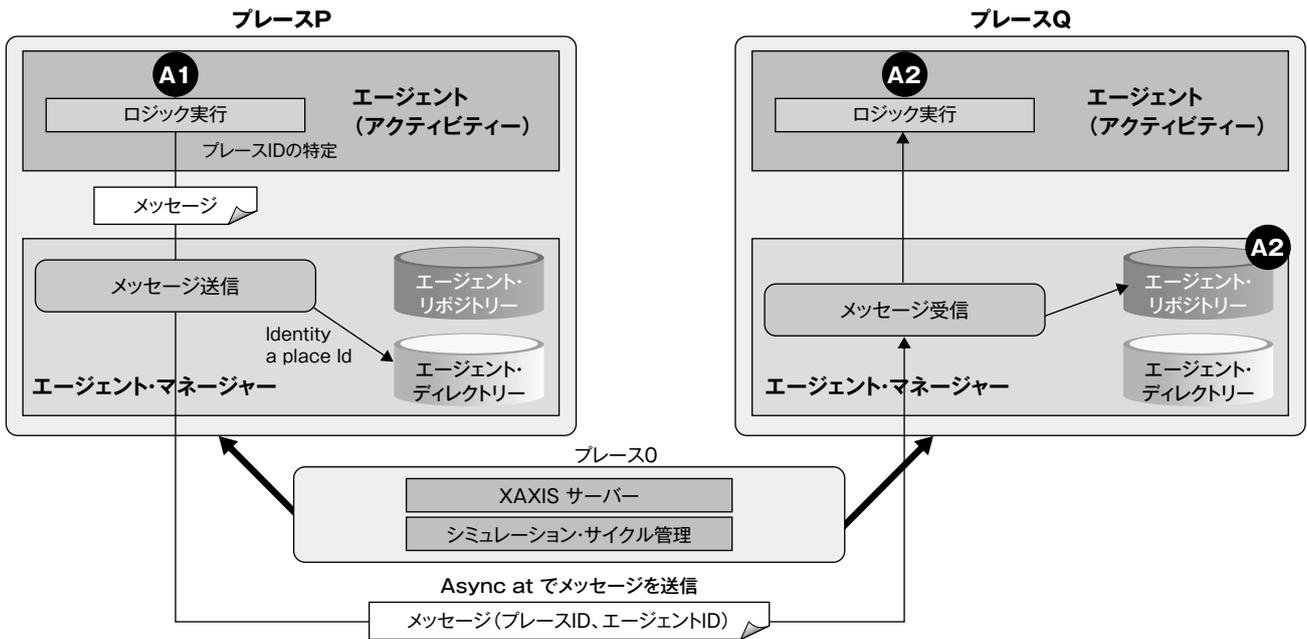


図2. XAXIS のアーキテクチャー

透過的に実行することができることも X10 を採用することの利点の 1 つでもある。

### 3.3 XAXIS 上の交通シミュレーション Megaffic の実装

Java で実装された交通シミュレーション Megaffic を XAXIS 上で実装するにあたり、X10 のアクティビティをどの単位にマッピングするかが重要な判断である。本実装では、車両ではなく交差点自身を X10 のアクティビティにマッピングすることによって実装した。アクティビティとして動作する交差点は、流入する道路に存在する車両（エージェント）の制御（車両の前進、複数車線の移動など）を行う。また、シミュレーションにおける時刻に相当する実行ステップごとに、すべての交差点（X10 のアクティビティ）が担当する車両の処理が完了するまで待機するように同期処理を行う。実装としては、finish という X10 の構文を用いることによって、生成したすべてのアクティビティの処理終了を待ち合わせることができる。

## 4. スーパーコンピューター TSUBAME 2.0 を用いた大規模交通流シミュレーション

東京工業大学・学術国際情報センターにあるスーパーコンピューター TSUBAME 2.0 を用いて XAXIS 上の交通シミュレーションを行い、XAXIS の性能評価を行った。TSUBAME 2.0 は 2011 年 11 月の時点でスーパー

コンピューターのランキングでは Top500 では世界 5 位、Graph500 では世界 3 位となるわが国を代表とするスーパーコンピューターの 1 つである。TSUBAME 2.0 全体は 1442 ノードから構成され、1 ノードは Intel Westmere-EP 2.93GHz のプロセッサとメモリーが 52GB 搭載されている。

### 4.1 日本全国道路ネットワーク

大規模交通流シミュレーションの実験データとして用いる道路網としては、99 万 3,731 交差点、255 万 2,160 本の道路（交差点と交差点を結ぶリンク）から構成される日本全国の道路ネットワークを用いる。道路ネットワークは、道路網を 128 個分のメッシュに分割した 1 次元メッシュと、1 次元メッシュ・コードをさらに分割した 2 次元分メッシュから構成される。また、各交差点の識別子は、13 桁から構成され、上 4 桁が 1 次元メッシュ・コード、次の 2 桁が 2 次元メッシュ・コード、下 7 桁が 2 次元メッシュ内の各交差点に固有な値となる。

### 4.2 1 ノードにおける実行時間の算定

TSUBAME 2.0 は、1 ノードあたり 52 GB のメモリーが搭載されており、日本全体の道路ネットワークでもオンメモリー上に格納することができる。よって、まず、1 ノード（ハイパー・スレッドありで 24 CPU コア）を用いて 24 スレッドでシミュレーションを行い、1 ノードにおける実行性能を測定した。システムの純粋な性能を測定

するため、各車両がどのような始点から終点を通ったか（トリップと呼ぶ）が含まれる実データは用いず、(a) 始点・終点ともに2次メッシュ・コード内に存在するトリップ、(b) 1次メッシュ・コードは同一で2次メッシュ・コードが異なるトリップ、(c) 始点・終点が別々の1次メッシュ・コードに存在するトリップ、という3パターンのトリップを人工的に生成した。これらはそれぞれ、近距離、中距離、長距離に分類されるトリップであるが、実行時間に大幅な性能差はなかった。

次に1ノードを用いて1日分のシミュレーションを実行するための合計見積もり時間を算定するため、ステップ数(1,000から20,000)、トリップ数(1万-20万)を変化させて実行時間を求めた。これらの結果を用いて回帰分析を実行したところ、実行時間とステップ数、トリップ数の関係を求めたところ、実行時間(秒)は、 $0.0197 \text{ (ステップ数)} + 1.342 \text{ (トリップ数)} - 350$ という関係が求められた。この回帰式により24時間分のシミュレーション86,400ステップ、トリップ数を1ステップあたり50トリップとすると、1ノードを用いて24時間分のシミュレーションに55.83時間かかることになる。

### 4.3 空間分割による高速化

次に日本道路ネットワークを複数領域に分割することによる高速化を試みた。領域分割にはグラフ・パーティショニング・ツール METIS [6] を用い、各交差点が均等になるように100分割した。1グループ(分割した1領域に相当)をTSUBAME上の1ノードに割り当てる。1グループは、平均で約1万交差点から構成され、合計で100ノード・合計1,200CPUコアを用いて並列分散実行をした。シミュレーションは、ステップ数3,600(1時間に相当)、トリップ数180,000の条件で行った。結果は、図3に示す通りであり、横軸が各グループの識別子を、縦軸が実行時間(秒)を示す。幾つかのグループを除いてほぼすべての領域においては300秒以内にシミュレーションを完了している。グループ全体の平均実行時間は、269.95秒であり、24時間のシミュレーションに換算すると、100ノードを用いて1.73時間で終了することになる。前章で行った1ノードでの実行時間見積もりは58.8時間であるので、33.9倍の高速化が得られている。

METISによる分割の実行結果

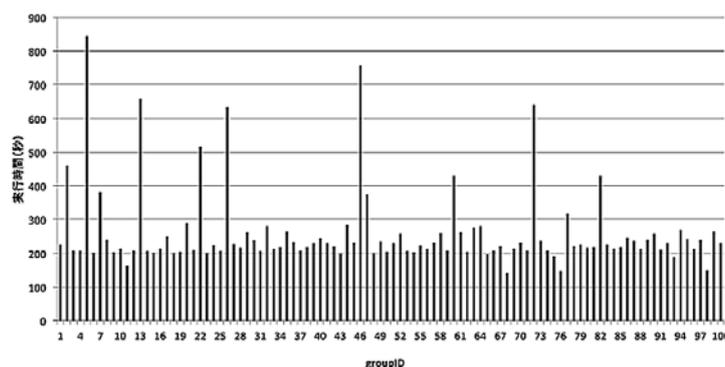


図3. 分割後の各グループの実行時間

大都市圏にあるグループによっては交差点や道路数が他と同様の数に分割したにもかかわらず、実行時間が他と比べて費やしているものが見られる。例えば、グループ5の大阪府全体、グループ12の愛知県名古屋市南東部、グループ46の北海道・札幌市、グループ72の福岡県福岡市などが挙げられる。これらの実行時間の増大は、道路あたりの交通量の密度が高くなり、エージェントとして処理する交差点の負荷が高まるためである。これらの領域に関しては、METISによってさらに分割することにより改善すると考えられる。TSUBAME 2.0では全体で1440ノード(17,280CPU)から構成されるスーパーコンピュータであり、日本全国道路ネットワークの分割の粒度をより細かくすることによって、24時間のシミュレーションを数分以内に終えることも可能となるであろう。

### 4.4 世界各都市の道路網を用いた実験

日本道路ネットワークでだけではなく、Open Street Map [7] と呼ばれる世界の地理情報データを用いて、シンガポール、ロンドン、メキシコ市など世界の主要都市127都市の道路ネットワークに対する同時シミュレ

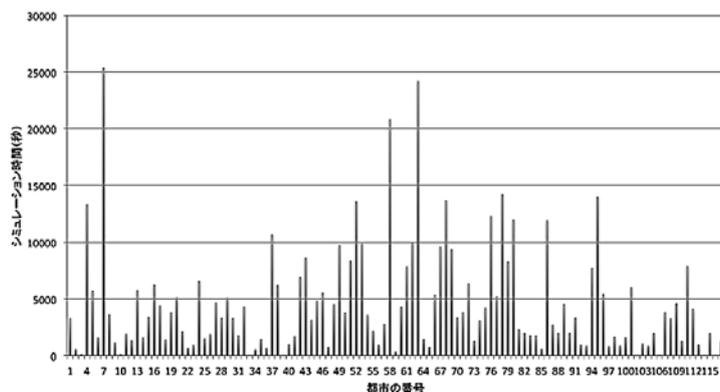


図4. 世界各都市のシミュレーション実行時間

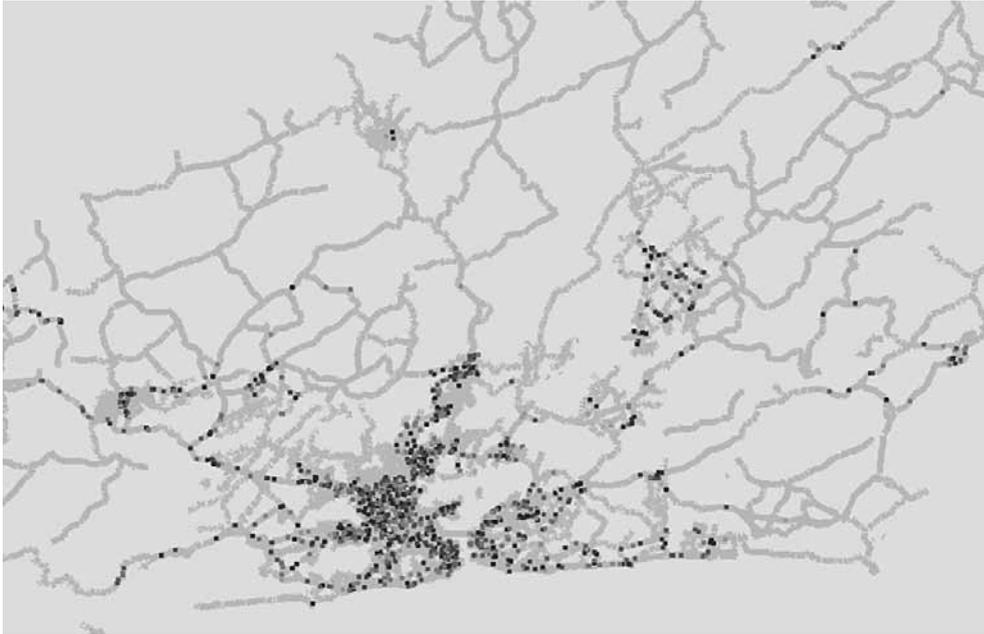


図5. ブラジル・リオデジャネイロ市内のシミュレーションの可視化

シミュレーションも実行した。Open Street Map は、Eclipse Public License の元に提供されるオープンなデータであり、現在ほぼすべての世界地図を入手することができる。実験では、1,524 コア（127 ノード）を用いて各計算ノード上で各都市の交通シミュレーションを同時に行った。本実験ではステップ数 1,000、トリップ数 50,000 を実行した結果を図 4 に示す。横軸は世界の都市番号、縦軸が実行時間を示す。今回の場合は都市の道路ネットワークの規模が異なり、数万から 200 万交差点まで多岐にわたる。小規模の都市では 10 分以内で終了しているが、大規模都市ではより長い時間がかかっていることが分かる。今後、このように長時間かかっている大都市に関しては日本の全国道路ネットワークと同じように領域分割によって高速化することが可能である。また、例として、ブラジル・リオデジャネイロ市内のシミュレーション結果を Megaffic の可視化ツールを用いて、実行した際のスクリーンショットを図 5 に示す。図 5 によって、時間的、空間的な車両の動き方を閲覧することができる。

## 5. まとめと今後の課題

本論文においては、従来のエージェント・シミュレーションの計算負荷増大の問題を突破するために、X10 言語を大規模なシミュレーション実行基盤環境と、日本全国と世界の主要都市の道路ネットワークを用いてスーパーコンピュータ TSUBAME 2.0 を用いた性能評価

の実験結果を述べた。日本全国の道路ネットワークを用いた性能評価の結果、TSUBAME 1 ノードにおいて、24 時間のシミュレーションを実行する場合には 55.83 時間かかるが、100 ノード（1,200 コアによる並列計算）の実行環境を用いることにより 1.73 時間でシミュレーションを終了できることがわかった。エージェント・シミュレーションに関してこのような大規模環境で動作する実行基盤はこれまで存在しないばかりか、本論文で行った大規模実験も初の試みといえる。XAXIS 自体は汎用的なエージェント・シミュレーションであり、今後はビジネスにおける消費者行動、サイバーセキュリティー、分子レベルでの生物シミュレーションにおける活用などさまざまなシミュレーションを包括的に実行することが可能になるであろう。

### 謝辞

この研究は、総務省の地球温暖化対策 ICT イノベーション推進事業 (PREDICT) の助成により行われました。また、本プロジェクトの実装にあたり、東京基礎研究所インフラストラクチャ・ソフトウェア 竹内幹雄氏、河内谷清久仁氏に深謝いたします。

## 参考文献

- [1] Florian, M.: A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, *Transportation Science* 11 (2), pp.166-179, 1977
- [2] Wardrop, J. C. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research," *Proceedings, Institution of Civil Engineers Part 2*, 9, pp. 325-378. 1952
- [3] 河内谷清久仁, マルチコア時代のプログラミング言語「X10」, 情報処理学会学会誌 2011年3月号
- [4] Vijay A. Saraswat, Vivek Sarkar, and Christoph von Praun. 2007. X10: concurrent programming for modern architectures. In *Proceedings of the 12th ACM SIGPLAN symposium on Principles and practice of parallel programming (PPoPP '07)*. ACM, New York, NY, USA, 271-271
- [5] G. Yamamoto, H. Tai, and H. Mizuta, "A Platform for Massive Agent-based Simulation and its Evaluation," *AAMAS 2007*, p.900-902
- [6] Karypis, G. and Kumar, V.: Multilevel k-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol.48, pp.96-129 (1998) .
- [7] Open Street Map, <http://openstreetmap.jp/>



日本アイ・ビー・エム株式会社  
東京基礎研究所  
インフラストラクチャー・ソフトウェア  
スタッフ・リサーチャー

鈴木 豊太郎 Toyotaro Suzumura

### [プロフィール]

2004年, 日本アイ・ビー・エム(株) 東京基礎研究所入社. 専門研究分野は, 大規模データ処理, 高性能計算などの研究に従事. 博士(理学). 2009年4月より, 東京工業大学情報理工学研究所客員准教授と兼務.  
toyo@jp.ibm.com



日本アイ・ビー・エム株式会社  
東京基礎研究所  
インフラストラクチャー・ソフトウェア部長  
シニア・テクニカル・スタッフ・メンバー

小野寺 民也 Tamiya Onodera

### [プロフィール]

1988年, 日本アイ・ビー・エム(株) 入社. 以来同社東京基礎研究所にて, プログラム言語, 大規模分散処理などの研究に従事. 理学博士. ACM Senior Member. 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会, 各会員.  
tonodera@jp.ibm.com



日本アイ・ビー・エム株式会社  
東京基礎研究所  
リサーチャー

今道 貴司 Takashi Imamichi

### [プロフィール]

2010年, 日本IBM 入社. 東京基礎研究所においてオペレーションズ・リサーチや最適化の研究に従事. 博士(情報学). 日本オペレーションズ・リサーチ学会, スケジューリング学会会員.  
imamichi@jp.ibm.com



日本アイ・ビー・エム株式会社  
東京基礎研究所  
リサーチ・スタッフ・メンバー

加藤 整 Sei Kato

### [プロフィール]

2002年, 日本IBM 入社. 以来東京基礎研究所にて, 極値理論によるリスク管理, 数理ファイナンス, マルチエージェント・シミュレーション技術とその交通流解析への応用に係る研究に従事. 日本シミュレーション学会理事. 同学会英文論文誌 Editorial Director, 情報処理学会会員. 博士(数理学).  
seikato@jp.ibm.com



日本アイ・ビー・エム株式会社  
東京基礎研究所  
アドバイザリー・リサーチャー

井手 剛 Tsuyoshi Ide

### [プロフィール]

2000年, 日本IBM 東京基礎研究所に入所, 液晶工学の研究に従事. その後, データマイニングの研究に転じ, 2004年頃から, センサー・データ解析のグループをリード. 主に時系列データの異常解析技術に関する研究に従事. 人工知能学会全国大会優秀賞(2004, 2006年) 他受賞. 博士(理学).  
goodidea@jp.ibm.com