

7

# 都市計画のための 交通シミュレーション

## —スマートな都市運営のためのデータ解析と What-if シミュレーション—

■ 水田秀行 <sup>\*1,2</sup> ■ 牟田英正 <sup>\*1</sup> ■ 今道貴司 <sup>\*1</sup>  
<sup>\*1</sup> IBM Research <sup>\*2</sup> JST CREST

### はじめに～都市における課題

都市への人口の集中が急激に進んでいる一方で、人口過密やインフラ整備の遅れによる問題も発生している。これに対応するため、情報通信技術を活用してスマートな都市運営を行うスマートシティの試みも世界各地で行われている。

都市運営において、特に交通は通勤通学や運輸において重要な役割を担っている。そのため、世界各都市において、いかに道路渋滞を解消する施策を実行するのかが緊急の課題となっている。しかしながら、交通規制や道路整備によってどのような影響が表れるか実際の都市において試すには非常に大きなコストと手間を要する。そこで、コンピュータ上の社会シミュレーションを利用することにより、コストや手間を大幅に減らし、より多くのシナリオを試行し、最適な意思決定や最悪のケースに備えることが可能となる。このような、もしある状況になった場合にどのような結果が生じるのか試行を行って解析することを What-if 解析と呼び、意思決定の支援に用いられる。

交通シミュレーションには多数の車の流れを流体のように集団で扱う大規模エリアを対象とするマクロシミュレーションと、個別の車の挙動を詳細に再現する主に小規模エリアを対象とするマイクロシミュレーションとがある。マイクロシミュレーションに含まれるエージェントベースの交通シミュレーションでは、マイクロな車の動きを個別の運転者に対応したエージェントを用いて道路上を各々の判断で動く現

実に似た意思決定を行うため実装や結果の解釈が分かりやすいものとなっている。

本稿では、IBM で開発している都市交通シミュレータについて紹介し、そのケーススタディとして京都とナイロビの交通を対象とした What-if 解析を紹介する。

### 都市交通シミュレーション

都市における複雑で大規模な意思決定のシミュレーションを行うためには、マイクロレベルの判断を行う個々のエージェントをマクロな都市規模においても実時間より速く実行可能な大規模分散環境に対応した基盤が必要となる。そのため、鈴村らが開発した大規模エージェント基盤<sup>1)</sup>を用いて都市交通シミュレータ<sup>2)</sup>を実装した。

実際の都市の道路ネットワークを用いるシミュレーションでは、パーソントリップ調査<sup>☆1</sup>や断面交通量<sup>☆2</sup>からの推測によって与えられるゾーン間の交通需要を表として記録した OD (Origin-Destination) 表を用いて、各車両の始点と終点を決定する。始点と終点の間の経路は、道路長と法定速度から決まる通過時間あるいは運転者の個性によって重み付けされたコストが最小となる経路を、実験開始時あるいは各車両の生成時に与える。

☆1 交通行動に関する実態調査のために無作為に選ばれた世帯に対して行われる交通行動の起点、終点、目的、交通手段、時間帯等に関する詳細なアンケート調査。

☆2 2地点の間に1つの断面を仮定し、計測時間(12時間あるいは24時間)の間にその断面を通過する交通量。対象とされるのは1本の道路のみの交通量から都道府県間の交通量までさまざまである。

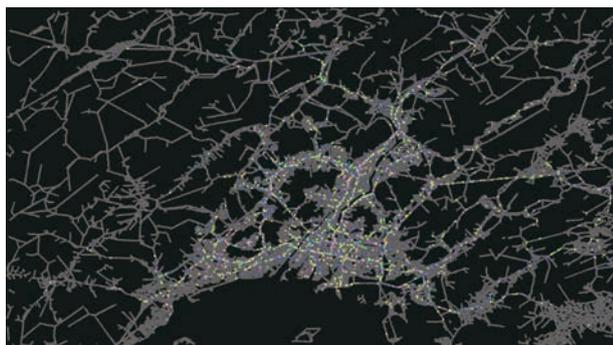


図-1 都市交通シミュレーション（広島市の例）

交通シミュレータは、開始時刻から終了時刻までの間、このように定められた経路を持つ車両エージェントを生成し、1秒ごとの各ステップにおいて、速度とレーンの変更を必要なら行いつつ、すべての交差点と道路上における車両エージェントの位置と状態を更新する。

図-1に広島県広島市の道路ネットワークを用いてシミュレーションを行っているスナップショットを示す。この道路ネットワークには、40,619の交差点と121,543の道路リンクが定義されており、1時間あたり約24,000台の車両が生成される。道路上のドットは各車両を示しており、区別のためランダムに色を割り当てている。

交通シミュレータの結果が現実をどれだけ再現しているか検証するために、観測データとして交通センサス<sup>☆3</sup>で得られた道路交通量を用いて比較した。OD表は2005年に都市圏で実施されたパーソントリップ調査のデータから作成した。

広島市の道路ネットワーク上の交通を24時間に渡ってシミュレートしたところ、およそ200点における観測交通量とシミュレーションで得られた交通量との相関係数は0.72となった<sup>3)</sup>。これは、数%のサンプル調査による都市圏パーソントリップ調査を入力とする都市交通シミュレーションの分野では十分な再現性と言える。図-2に観測交通量とシミュレーションで得られた交通量をそれぞれ正規化し対数プロットしたものを示す。

以降の章では、本システムを用いた日本および世界の都市の道路ネットワークにおける交通シミュレ

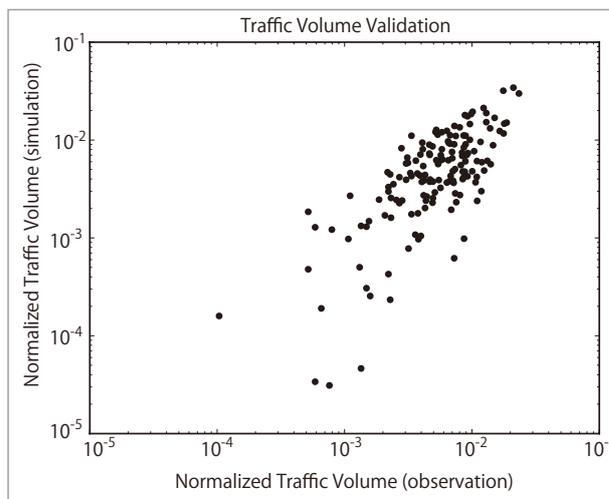


図-2 観測交通量とシミュレーション結果の比較

ーションのケーススタディを紹介する。

## 観光地における臨時バスの運用計画

ここでは、交通シミュレーションの応用として、シミュレーションを用いた意思決定支援の例を紹介する。この交通シミュレーションは、京都の祇園祭宵山におけるさまざまなパターンの臨時バスの運用や交通規制のシミュレーションのケーススタディである。このシステムは実際に京都府京都市で稼働しているものではなく、交通シミュレーションを意思決定に活かす例として提案するものである。ここでは、祇園祭宵山からの見物客の帰宅需要を統計をもとに生成し、このような帰宅客に最も効率良く対応できる臨時バスの増発パターンや、バスの通行を円滑にしつつ一般車両の渋滞を最小限にとどめる交通規制のパレート最適解<sup>☆4</sup>を提示する。このようなパレート最適解を得るために、増発する臨時バスや交通規制の対象道路といったシミュレーションの条件を遺伝子にエンコードした個体を複数生成し、遺伝的アルゴリズムを用いて探索を行う。個体の環境適合度評価では、遺伝子にエンコードされた臨時バ

☆3 交通政策の検討に用いるため国土交通省や地方自治体によって5年に一度行われる道路や公共交通機関の利用実態調査。

☆4 多目的最適化において、お互いに競合する複数の目的関数がある場合に、これらの目的関数を同時に改善することが不可能な、優劣がつけられない解の集合。

スの増発パターンや交通規制を反映したシナリオで交通シミュレーションを行い、その結果を KPI<sup>☆5</sup>として評価に用いる。

このシミュレーションを行うために、通常の一般車両と区別できるバス専用の車両 ID を設け、一般車両とバスとでそれぞれ異なる OD 生成を行った。一般車両の OD 生成においては、京都市交通事業白書をもとに京都市内各エリア間での交通量を設定し、これをもとに各エリア内にランダムに設定した出発地点、ゴール地点を結ぶルートで各車両のトリップ<sup>☆6</sup>が生成される。ただし、山鉾が立ち並ぶ京都市中心部への進入を制限する交通規制や、バスの運行を優先させるための交通規制（バス専用道路）があり、これらを満たす範囲でのルート設定が行われる。一方でバスの OD 生成においては、バス路線図をもとに時刻表通りに各路線の出発地点にトリップを発生させ、巡回ルートを走るようにトリップを生成するが、これは必ずしも時刻表通りに各バス停に到着することを保障するものではない。臨時バスはこのような各バス路線の決められた巡回ルート上に、時刻表にない時間にトリップを加えることで発生させる。このように生成された OD を用いて、さまざまな臨時バスの増発パターンやバス専用道路の設定を含む複数のシナリオで交通シミュレーションを行う。シミュレーション結果は以下の3つの KPI によって評価される。

[KPI-1：各停留所の待ち行列の長さ]

帰宅需要をもとに各停留所のキューに乗客が増え続け、交通シミュレーション上でバス到着時にこのキューからバスの空容量分の乗客が減る。バスの到着が遅れるとキューが長くなり、キューの最大長が KPI として評価の対象となる。

[KPI-2：全路線バスの平均遅延時間]

交通シミュレーション上でのバスの運行記録と実際の時刻表との比較を行い、遅延時間を求める。このような遅延時間を全路線の全停留所について計算し、その平均を KPI とする。

[KPI-3：市内全域の渋滞距離]

一般車両を含むトラフィックによって交通シミュ

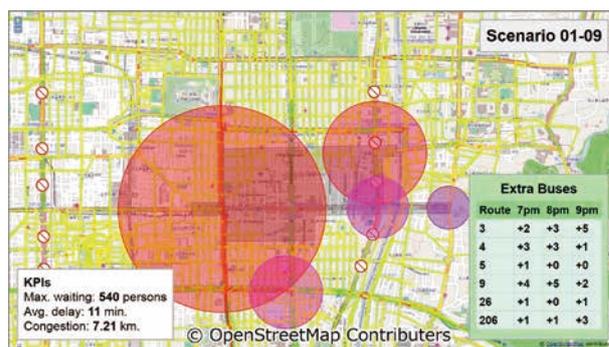


図-3 シミュレーション条件と結果の視覚化

レーション上で起こった渋滞（20km/h 以下での走行を渋滞とみなす）の距離を市内全域で計算し、これを KPI とする。

図-3 は1つのシナリオにおいてシミュレーション条件とシミュレーション結果を視覚化したものである。シミュレーションにおいて、10,681 の道路リンク上を動く5万台前後の車両トリップを発生させた。地図データには OpenStreetMap を利用している\*。各バス路線について臨時バスの時間帯別増発台数が右下の表に示され、バス専用道路に設定された道路には地図上で進入禁止アイコンが表示される（シミュレーション条件）。祇園祭会場周辺の主要なバス停における待ち行列の長さが円の大きさと表され、各道路の渋滞度が緑から赤にヒートマップで表される（シミュレーション結果）。このシナリオの良し悪しを判断するための KPI は左下に数値としても表示される。

これら3つの KPI のパレート最適解に近い解を得るために遺伝的アルゴリズムによる探索を行った。図-4 はランダムな遺伝子により生成した第一世代32シナリオの一部である。これら32シナリオについて交通シミュレーションを行い、その結果から得られた KPI のうち各停留所の待ち行列の長さ

☆5 Key Performance Indicators の略。ここでは、シミュレーション結果の優劣を計る指標として用いられる。目的関数と同義。

☆6 交通シミュレーションにおいて、車両や人などが出発地から目的地まで移動する行動。

\* 本稿中、“©OpenStreetMap Contributors” が付された図-3～図-5の地図画像と道路図、および、図-7、図-8の道路のヒートマップは、CC-BY-SA または ODbL の条件で提供されたデータ、または当該データに基づいて作成されたものです。

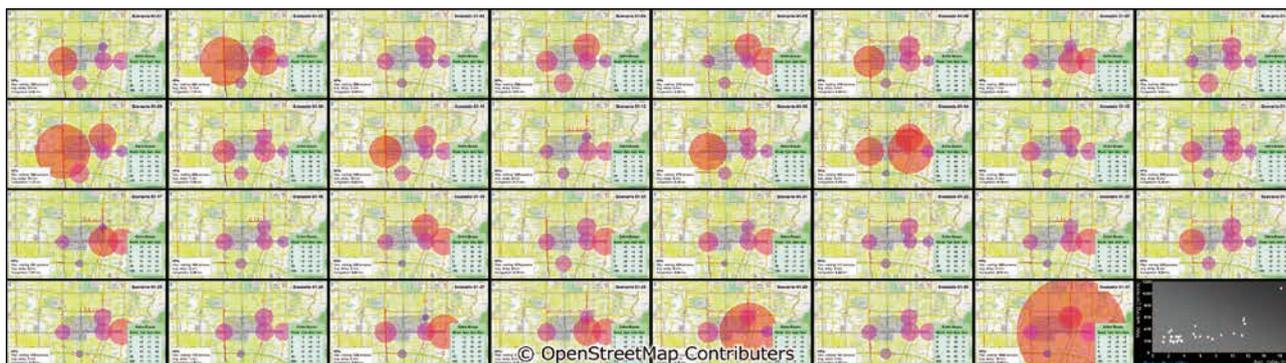


図-4 第一世代シミュレーションシナリオ群と KPI

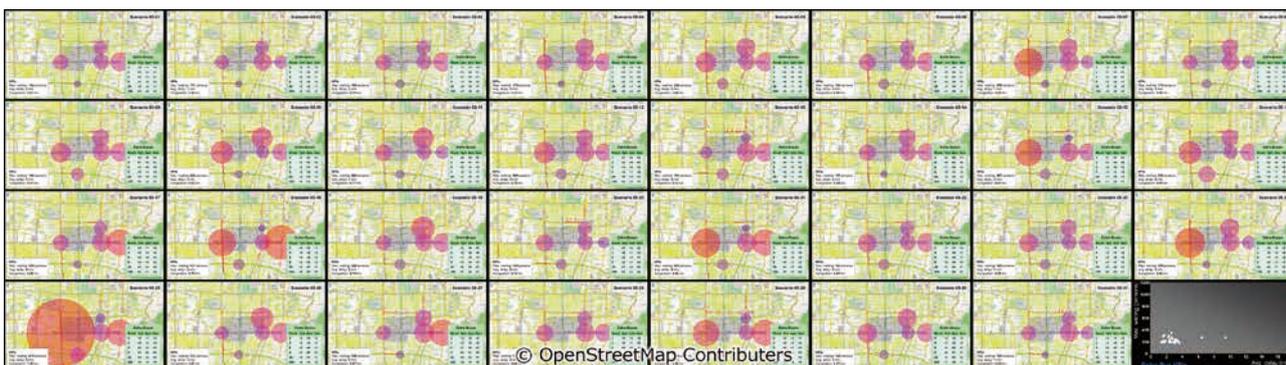


図-5 第五世代シミュレーションシナリオ群と KPI

路線バスの平均遅延時間をプロットしたものが右下のグラフである。

このような第一世代シナリオ群に対して遺伝的アルゴリズムを用いて5世代にわたって進化させたものが図-5である。多くのシナリオでバス待ち行列を表す円が図-4と比べて小さくなり、グラフ上のKPIが改善していることが分かる。このように数世代に渡って交叉、突然変異を重ね、最終的に3つのKPIのバランスのとれたパレート最適解を探索した。

## 制限のある交通情報の解析と What-if シミュレーション

我々が開発している大規模交通シミュレータはGPSデータを分析することで運転者の個性や各道路の移動時間の分布を計算するなどのモジュールを持っているが、一般的にはそれらのデータを入手することは困難である。そこで限られた入力データからでもある程度交通の状況を反映するようなモデルを作成した事例を紹介する。

ケニアの首都ナイロビ市は交通需要が高いものの、道路や公共交通機関が十分そろっていないため交通渋滞が頻繁に発生しており、IBMの調査による通勤不快指数<sup>☆7</sup>は世界で4番目に悪い結果となっている。インターネットサービスプロバイダのAccessKenya社が市内の道路の主要地点36カ所のWebカメラの画像を公開しており、市民は画像を目視することで道路の混雑具合を知ることができる<sup>4)</sup>。我々はこの公開されているWebカメラの画像を用いてナイロビ市内の交通量、つまり車両台数と速度を推定するモデルを開発した。Webカメラの画像は低解像度で車両の形がはっきりとは写らないので、観測画像の中からテンプレート画像と一致する部分を検出するテンプレートマッチングなどの一般的な画像認識の手法を適用することで画像内の車両台数を推定することは困難である。そこで画像内の分析の対象領域を二値化して、その白と黒のピクセルの数の割合から車両台数や混雑具合を推定する手法を開発した<sup>5), 6)</sup>。二値化の際の閾値や車両台数推定

☆7 <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/35359.wss>



図-6 Web カメラの画像内の赤枠の部分の二値化の結果

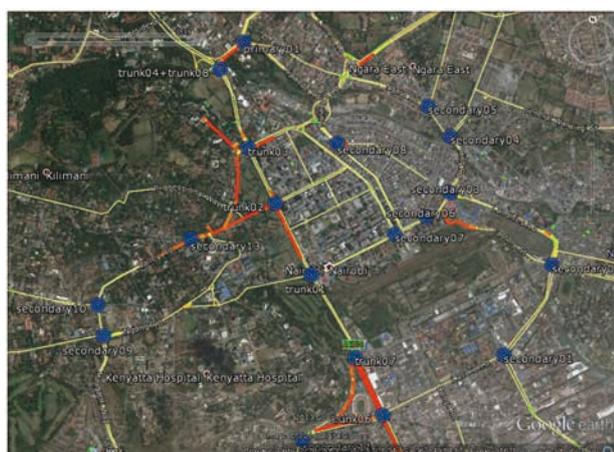
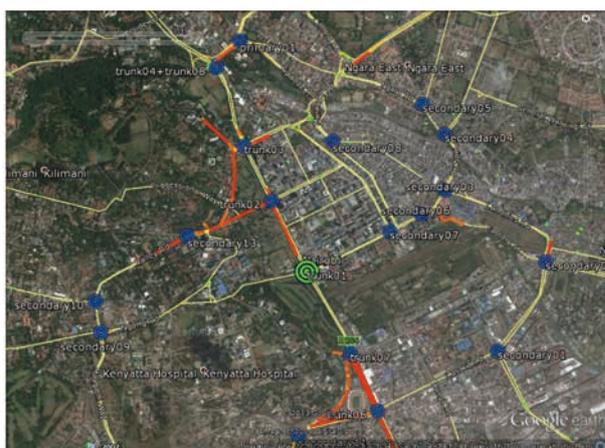


図-7 平均時速 20km 以下になっている道路の平均速度のヒートマップ\*。地図上の青い円がラウンドアバウトを表す

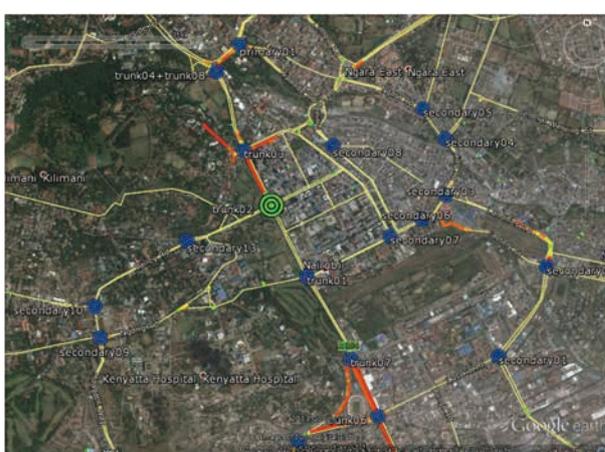


図-8 地図上の緑の円のラウンドアバウトを交差点に交換したときの渋滞の平均時速 20km 以下になっている道路の平均速度のヒートマップ\*

モデルは過去の画像データを用いて計算する。また、Web カメラの画像は数秒ごとに撮影することができるため、連続する画像を用いて車両の平均速度を求める手法も開発した<sup>5), 6)</sup>。図-6の左の画像の二値化を行った結果が図-6の右の画像である。

このモデルを用いてナイロビ市の道路に対してラウンドアバウト（図-6の左の画像のような環状交差点）の影響の調査のための What-if シミュレーションを行った。ナイロビ市内には信号付き交差点の代わりにラウンドアバウトが設置されているが、ラウンドアバウトは交差点に比べて対応できる交通量の容量が少なく、特に幹線道路に設置されているラウンドアバウトが交通渋滞に与える影響が大きいことを我々は予想した。そこでラウンドアバウトを交差点に交換した際にどの程度渋滞が減るか交通シミュレータを用いて調査した。午前のピーク時の交通量データと Web カメラで計測した車両数を基に車

両を発生させてシミュレーションを行った。ナイロビ市内の主要なラウンドアバウトのうちどれか1つを交差点に交換する際に最も交通渋滞への影響が大きいものを調べた。単純に1カ所だけを改善するだけでは一般的には渋滞を解消することはできないが、それでも中にはある程度渋滞を緩和する場所が見つかった。図-7はナイロビ市内のラウンドアバウトの位置とシミュレーションの結果を表しており、通行する車両の平均時速が 20km/h 以下になった道路の平均時速のヒートマップを表したものである。おおよその目安として赤色が 0km/h、黄色が 10km/h、緑色が 20km/h を表す。一方で図-8は幹線道路のラウンドアバウト1カ所を交差点に交換した場合のシミュレーションの結果を2つ示している。交換したラウンドアバウトは緑色の円で表しており、図-8の上と下では交換したラウンドアバ

ウトが異なっている。図-8の上の結果に比べて下の結果は渋滞の緩和に成功している。これらのシミュレーションでは、シナリオによって異なるが約5,300の道路リンク上を動く約1万8千台の車両トリップを用いた。ある程度交差点の工事の予算が限られた状況であっても、交通シミュレータを用いることで、どのラウンドアバウトを優先的に交差点に交換するべきかを調べることができる。

## スマートな都市運営に向けた大規模社会シミュレーション

人々やさまざまなデバイスがインターネットにより相互接続されることにより、社会の複雑性と広がりがますます増加し続けている。また新興国における急激な発展も顕著になってきている。この状況に対応し、より賢い都市づくりによって、人々の生活をより安心・安全で快適なものとするために、大規模な計算資源を用いたデータ解析と最適化が重要になってくる。

エージェントを用いた社会シミュレーションも、このような複雑なシステムに対する有効なツールとして、実問題への適応が始められている。比較的少数の方程式で表現可能な物理系とは異なり、これまで社会シミュレーションは大規模並列計算とは密接には結びついてこなかった。しかしながら、エージェント内部におけるマイクロ方向の精緻化と巨大な都市を扱うマクロ方向の範囲拡大による膨大な計算を並列分散システムによって実時間で行う必要が認識されはじめている。

ここで紹介した例はまだ限られた事例とデータの

みを用いたものであるが、スマートな都市運営のためには世界各地のさまざまなレベルのデータを解析技術によってモデルに取り込み、多様で精緻な交通挙動を統合的に解析するシステムを構築しなければならない。

### 参考文献

- 1) Suzumura, T., Kato, S., Imamichi, T., Takeuchi, M., Kanezashi, H., Idé, T. and Onodera, T. : X10-based Massive Parallel Large-scale Traffic Flow Simulation, In Proceedings of the 2012 ACM SIGPLAN X10 Workshop (2012).
- 2) Osogami, T., Imamichi, T., Mizuta, H., Morimura, T., Raymond, R., Suzumura, T., Takahashi, R. and Idé, T. : IBM Mega Traffic Simulator, IBM Research Report, RT0947 (2012).
- 3) Osogami, T., Imamichi, T., Mizuta, H., Suzumura, T. and Idé, T. : Toward Simulating Entire Cities with Behavioral Models of Traffic, IBM Journal of Research and Development, Vol.57, No.5 (2013).
- 4) <http://traffic.accesskenya.com/>
- 5) Idé, T., Katsuki, T., Morimura, T. and Morris, R. : Monitoring Entire-city Traffic Using Low-resolution Web Cameras, In Proceedings of the 20th ITS World Congress (2013).
- 6) Katsuki, T., Morimura, T. and Idé, T. : Bayesian Unsupervised Vehicle Counting, IBM Research Report, RT0947 (2013).

(2014年2月24日受付)

#### ■ 水田秀行 (正会員) e28193@jp.ibm.com

1997年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。博士(理学)。同年日本IBM(株)入社。東京基礎研究所でエージェントシミュレーションやサービスサイエンス、スマートシティの研究に従事。

#### ■ 牟田英正 (正会員) hmuta@jp.ibm.com

1991年、日本IBM(株)入社。東京基礎研究所にて、シミュレーションを用いた意思決定支援研究などに従事。2011年、電気通信大学院情報システム学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。

#### ■ 今道貴司 tima@br.ibm.com

2009年京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻博士後期課程修了。博士(情報学)。現在IBM Research - Brazilにて交通流シミュレーションや最適化の研究に従事。