

リスク回避型経路誘導の普及が ネットワーク交通流に及ぼす影響： 東京23区を対象とした分析

眞貝 憲史¹・馬 江山²・山田 薫³・福田 大輔⁴・

¹学生会員 東京工業大学大学院修士課程 総合理工学研究科人間環境システム専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)

E-mail: n.shinkai@plan.cv.titech.ac.jp

²非会員 東京工業大学産学官連携研究員 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)

E-mail: ma.js@plan.cv.titech.ac.jp

³非会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒151-0071 渋谷区本町 3-12-1)

E-mail: yamada-kr@oriconsul.com

⁴正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)

E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

渋滞交通情報をほぼリアルタイムに受信し提供するカーナビの普及により、円滑な交通流の達成と利便性の高い経路誘導を行うことができるようになることが期待されている。しかし、このようなサービスの普及により現在の渋滞情報を元にした単純な経路誘導ではさらなる渋滞や交通流の悪化を引き起こす可能性がある。この問題に対して不確実な状況下では潜在的な最短時間経路が複数存在しうる Hyperpath の概念によるリスク回避型経路誘導の適応可能性が考えられる。本研究ではこのリスク回避型経路誘導の普及が交通ネットワークによりどのような影響を与えるのかをシミュレーションにより分析する。シミュレーションにおいては、東京都23区一般道の道路ネットワークへ適用する。また、総交通量並びにリスク回避型経路誘導に従う車両の混入率を変化させることで、交通ネットワークに与える速達性や時間信頼性への影響の比較を行う。

Key Words: 動的交通流配分, リスク回避型経路誘導

1. 本研究の背景と目的

(1) 本研究の背景

近年、情報通信技術の進歩に伴い、ほぼリアルタイムに渋滞情報を提供し、それを受信することができるカーナビゲーション（以下、カーナビ）機器が普及してきたことにより、より円滑な交通流が達成され、利便性の高い経路誘導が可能となった。1996年にサービスが始まったVICSを始めとする公的機関によるものだけでなく、各自動車会社等が独自にカーナビ機器やプローブカーからのプローブデータを利用して現在の道路の情報を収集し、それを経路誘導へ役立てている。

しかし、これらの情報を元に渋滞が発生している経路を回避するように経路誘導を行い、その結果に従う自動車が増加したときにさらなる問題を発生させる原因になる可能性が考えられる。例えば、収集した交通情報（旅行時間情報等）が利用者に交通情報として提供されるまでの間に発生するタイムラグによる情報の不正確性（時間的不正確性）、VICS等で交通情報が得られている区間とそうでない区間が混在していることによる情報の不正確性（空間的不正確性）、そしてそれ

らの帰結としての特定経路への交通量の集中による不確実性の拡大 (Knock-on effect) 等が挙げられる。ここで、Knock-on effect とは、リアルタイムの交通情報に従って経路変更を行った結果、同様に経路変更を行った利用者が特定の区間に集中するために発生する混雑を指す。リアルタイムの情報を利用した経路誘導に従う利用者は将来的に増加・高普及すると考えられており、この問題はより深刻化することが懸念される。カーナビの利用者にとっては到着時刻の信頼性は大きな関心事であり、Knock-on effect 等による到着時刻の大幅な遅れは利用者の効用を低下させると考えられる¹⁾。

交通ネットワークにおける Knock-on effect による混雑を緩和するための方法の一つとして、本研究ではリスク回避型経路誘導に着目する。とりわけ本研究では、Bell²⁾、Bell et al.³⁾、Ma et al.⁴⁾、Yamada et al.⁵⁾ 等で提案されている Hyperpath の概念に基づいたリスク回避型経路誘導方式を取り扱う。ここで Hyperpath とは、統計的な旅行時間情報が各リンクにおいて得られているという、旅行時間に関する不確実性の下で潜在的に最短時間経路となり得る経路群を指す。Hyperpath は元々は公共交通の分野において Spiess and Florian⁶⁾ によっ

て提唱された概念であるが、近年、道路交通、特に動的経路誘導の場面においてその適用の可能性が模索されている。その具体的なカーナビへの適用方法は Ma⁷⁾ で考案されている。一方、Hyperpath に基づく経路誘導アルゴリズムの普及が道路ネットワークへ与える影響に関する研究は少ない。そのような中で、Yamada et al.⁵⁾ は、混雑の程度やリスク回避型経路誘導 (Hyperpath) の混入率の変化が、ネットワーク交通流に与える影響について、簡易ネットワークを用いて検証した。その結果、特に混雑が激しい状況において、リスク回避型経路誘導に従う車両の割合が増加するに従って平均旅行時間の減少が見られる一方、混雑が少ない状況では、最短経路誘導との有意な差異は見られないことを確認した。また、最短時間経路に従う車両の平均旅行時間は激しい日変動を持つのに対し、リスク回避型経路誘導に従う車両の平均旅行時間は日変動が小さいことも示唆されている。

(2) 本研究の目的

以上のような背景のもと、本研究では、Yamada et al.⁵⁾ の研究を現実のネットワークに拡張して検証することにより、Hyperpath に基づく経路誘導アルゴリズムが実際の道路交通ネットワークに与える影響を評価することを目的とする。分析の手法としては、Yamada et al.⁵⁾ 同様に、ミクロ交通流シミュレーションによる動的経路配分 (DTA: Dynamic Traffic Assignment) を用いて動的な交通シミュレーションを行う。その際、Hyperpath を利用するカーナビに従う車両の普及率とそれが交通ネットワークに与える影響を評価するために、Hyperpath 利用車両並びに既存のカーナビで多く採用されている Time-dependent Dijkstra⁸⁾ に従う車両の混入比率を変化させてシミュレーションを行う。評価の指標としては、総旅行時間、各利用者の旅行時間の変化、分散型ネットワーク利用の程度、定時性、混雑の度合い等を用いる。

2. Hyperpath に基づく経路誘導アルゴリズムの概要

(1) Hyperpath の基本概念

公共交通の分野で、乗車時間に加えて各ノードにおける待ち時間を含めた期待旅行時間を考え、それを最小化する経路が複数存在する経路群として与えられることがあるという Chriqui and Robillard⁹⁾ の指摘から、Spiess and Florian⁶⁾ が Hyperpath を利用した最適戦略を提案している。公共交通では運行の頻度が定められており、ノードに到着した旅行者は最初にノードに到着した車両に乗ることが仮定されている。したがっ

て、次の車両が到着するまでの時間が期待待ち時間となる。ここで提案された Hyperpath の問題は Dijkstra 法に似たアルゴリズムを用いて経路群を求めており、以下のような線形最適化問題として表される。

$$\min. \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{i \in I} \omega_i \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{a \in A_i^+} v_a - \sum_{a \in A_i^-} v_a = g_i, i \in I \quad (2)$$

$$v_a \leq f_a \omega_i, a \in A_i^+, i \in I \quad (3)$$

$$v_a \geq 0, a \in A \quad (4)$$

ここで、各変数は次のように示すとおりである。

A : リンク集合

I : ノード集合

H : ハイパーパスリンク集合

A_i^+ : ノード i を起点とするリンクセット

A_i^- : ノード i を終点とするリンクセット

d_a : リンク a における最大遅れ時間

f_a : リンク a の運行頻度

f_i : ノード i を起点とするリンクセットの運行頻度

p_a : リンク a が利用される確率

c_a : 遅れがない場合のリンク a の旅行時間

u_i : ノード i から s への最大遅れを最小化する経路旅行時間

w_i : ノード i において遅られる最大遅れ

h_i : ノード i における r に対するポテンシャル

y_i : ノード i の頻度

N : 十分大きな値

r : 起点ノード

s : 終点ノード

Bell²⁾ は道路交通の分野で Hyperpath の適用可能性について検討を行った。公共交通のリンク a での運行頻度 f_a を道路リンク a の潜在的な最大遅れ時間 d_a として解釈し、旅行時間の不確実性を統計的な最大遅れ時間として表現した。このモデルにおいて、旅行者は最大遅れ時間を最小にする経路群から経路選択を行うことから、リスク回避性向があるといえる。

Bell²⁾ によって示された Hyperpath のアルゴリズムは以下のように定式化される。遅れはリンクではなくノードにおいて表現され、ノードでの最大遅れ時間を足し合わせたものを最小化することが目的である。

$$\min_{p,w} \sum_{a \in A} c_a p_a + \sum_{i \in I} w_i \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{a \in A_i^+} p_a - \sum_{a \in A_i^-} p_a = g_i \quad i \in I \quad (6)$$

$$p_a d_a \leq w_i \quad a \in A_i^+, i \in I \quad (7)$$

$$p_a \geq 0 \quad a \in A \quad (8)$$

また、Bell et al.³⁾ では先のアルゴリズムを、到着ノードから Hyperpath のリンクセットを探索していた

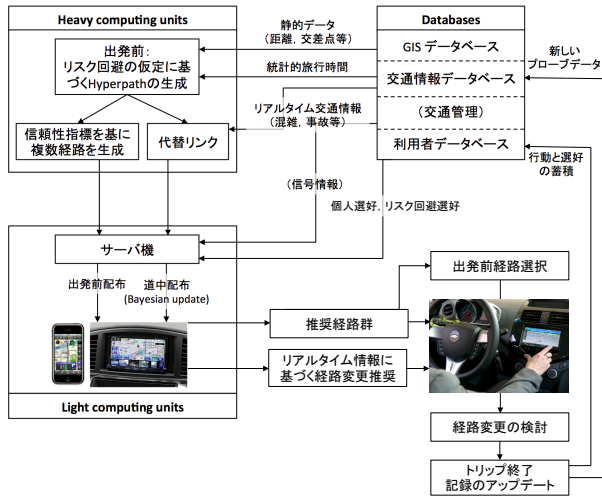


図-1 Hyperpath に基づく経路誘導の構造

ものから、出発ノードから探索する方法へ変更した。これは、出発ノード r の時点で到着ノード s への期待旅行時間を表現できないことによる。下線部がその変更点である。

$$\min_{p,w} \sum_{a \in A} p_a \underline{c}_a(u_i) + \sum_{j \in I} \underline{w}_j \quad (9)$$

subject to

$$\sum_{a \in A_j^+} p_a - \sum_{a \in A_j^-} p_a = \underline{b}_j \quad j \in I \quad (10)$$

$$p_a \underline{d}_a(u_i) \leq \underline{w}_j \quad \forall a \in A_j^+, j \in I \quad (11)$$

$$p_a \geq 0 \quad a \in A \quad (12)$$

(2) Hyperpath に基づく経路誘導の実装

Ma⁷⁾ では Hyperpath を用いた経路誘導の実装について、図-1 のように示している。利用者の行動等から得られた旅行時間は蓄積されて時間毎の Hyperpath の生成に用いられる。利用者へは推奨経路群として Hyperpath に基づいた経路群が提示される。

経路群から単一経路を推奨する方法として、次の様な方法が考えられる。

1. 複数経路を提示し、利用者が判断する方法
 2. 確率的に経路群から一つのルートへ誘導する方法
 3. 信頼性指標が最高となるルートへ誘導する方法
 4. Short-sight link-to-link 誘導
 5. Far-sight link-to-link 誘導
 6. Short-sight & Far-sight link-to-link 誘導
 7. 動的 Hyperpath による誘導
- 1 は最も単純な方法であり、利用者自身がそれぞれの情報や選好に従ってルートを選択する。2 は確率的にラン

ダムに一つのルートへ誘導する。3 では各リンクの旅行時間と最大遅れ時間より信頼性指標を定義し、その値が最高となるルートへ誘導する。4, 5, 6 は経路群からリアルタイム交通情報を用いて誘導する経路を決定する。4 は誘導する経路を決定するノード (Decision ノード) の付近の交通情報のみを考慮し、旅行時間が最短となる経路へ誘導する。5 はそれぞれの Decision ノードで目的地までの期待旅行時間を算出し、それが最短となる経路へ誘導する。6 では 4, 5 の方法を組み合わせて評価関数を設定し、経路選択を行う。7 の方法は各時間帯では Hyperpath が異なることを考え、各 Decision ノードに到着する度にその時間帯の Hyperpath を適用する。そのルートから単一ルートを選択する方法は 1-6 のいずれかの方法による。これらの方法は一般には方法 1 から 7 に向かうごとに計算負荷が大きくなり、実装の難易度が高くなる。本研究のシミュレーションでは方法 2 を適用する。つまり、経路群から確率的に一つの経路を選択し、各 Agent の経路として用いることにする。

3. シミュレーションの概要

(1) MATSim の概要

本研究では DTA のツールとして、エージェントベースの交通シミュレータ MATSim (<http://www.matsim.org/>) を利用する。MATSim では各 Agent の行動計画を持たせることができ、1 日単位で繰り返し計算を行うことで前日の交通状況を受けて翌日の経路、出発時刻、活動時間を変えることができる。また、このシミュレータはエージェントベースであることから、各 Agent の動きを観測することも可能である。

入力データとして、道路ネットワークと OD 需要をそれぞれ network.xml と plans.xml として作成する。network.xml にはネットワークの形状や各リンクの容量などの属性を記録している。plans.xml は各 Agent の 1 日の行動計画 (出発地・目的地の座標、出発時刻、到着時刻等) が記述されている。これらの入力データを用いて DTA の Network Loading を行い、その結果を日ごとに events.xml へ出力する。このファイルには各 Agent が実際に走行した経路やリンクの旅行時間が記録されており、より詳細な分析が可能となっている。Hyperpath に必要なリンクの最大遅れ時間はこの events.xml を解析することで、時間帯別に算出することができる。また、Network Loading の際に各時間ごとで旅行時間やリンクの利用状況などの情報の蓄積が行われる。それらの情報を利用して翌日の最短経路による経路誘導が行われる。

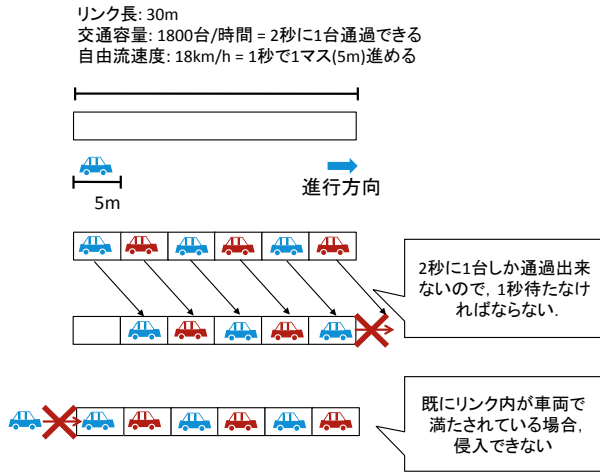


図-2 MATSim 上の混雑の記述

MATSim には時間帯別に最短経路を探索する手段 (Router) として、Time dependent Dijkstra, Fast Dijkstra, AStarLandmarks などのいくつかのアルゴリズムが用意されている。plans の更新の方法は先に述べたアルゴリズムで行う ReRoute や既に存在している plan から特定のルールで選択を行う方法 (BestPlanSelector, ExpBestPlanSelector など) がある。

MATSim 上では混雑は交通容量に基づくリンク通過量の制限と車両の占有長さによるリンク侵入可否の簡単なルールで混雑を記述している。図-2 に示すように、リンク長 30m, 容量 1,800veh/h, 車両占有長 5m の場合、リンクを出入りすることができるのは交通容量から 2 秒に 1 回であり、1 度にリンクに侵入できる車両は 6 台であるため、既にこのリンク上に 6 台の車両が存在するときはこのリンクに新しい車両が進入することができない。

(2) MATSim への Hyperpath の実装

交通シミュレーションの実行に先立ち、本研究では以下の前提条件を定める。

1. 全ての車両に Hyperpath(HP) か最短経路 (Shortest Path:SP) のいずれかに基づくカーナビが設置されている
2. 利用者はカーナビの誘導に完全に準拠して経路選択を行う
3. リアルタイム交通情報は利用できない
4. カーナビによる経路誘導は出発前に行われ、移動中に変更はない
5. HP に基づく経路誘導は、統計的な旅行時間データにのみ依存する
6. HP で用いる統計的な旅行時間データはシミュレーション中に更新されない

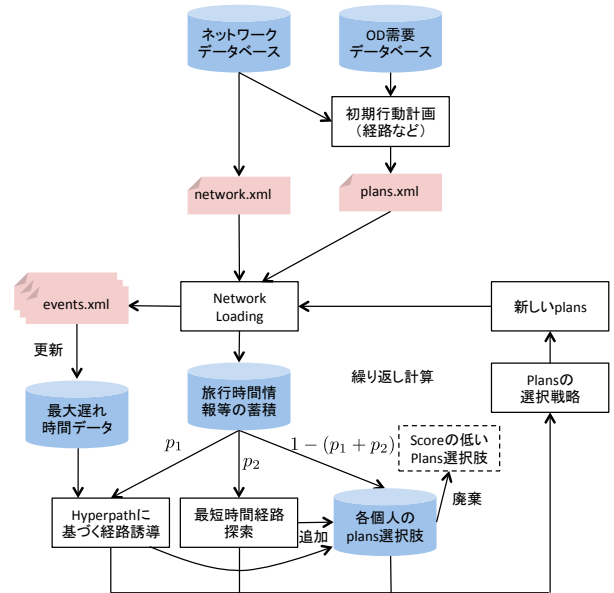


図-3 Hyperpath モジュールを利用した MATSim の構造

7. 最短経路に基づく経路誘導は前日の交通状況を考慮した最短時間経路を推奨する
8. 各 Agent は前日と同じ経路誘導アルゴリズムを利用するとは限らない

本研究では、経路誘導のアルゴリズムの差異が交通ネットワークに与える影響を考えるため、前提 1, 2 を設けている。また、現段階ではリアルタイムの交通情報による経路変更をシミュレータ内で再現できていないため、前提 3, 4 を設けている。Hyperpath に基づく経路誘導は統計的な旅行時間データを基にして行い (前提 5)、シミュレーション中はそれを更新せずに普遍的なものとして与える (前提 6)。さらに、各 Agent が利用する経路誘導アルゴリズムは日ごとに一定の比率になるように確率的に決定される。したがって、各 Agent がシミュレーションの期間を通じてどちらのアルゴリズムを利用するかは決められていない (前提 8)。

Hyperpath モジュールを導入した MATSim でのシミュレーションの流れはおおよそ図-3 に示すとおりである。Hyperpath の経路選択モジュールは MATSim の外部モジュールとして実装し、plans.xml のルート選択の戦略として利用する。このモジュールを利用するかどうかは確率的に決定され、利用しない場合は最短経路探索に基づく経路誘導に従う。そして、Hyperpath を利用する確率を変化させることで道路ネットワーク上で Hyperpath を用いた経路誘導に従う利用者の比率を変化させることができる。事前準備として、統計的な旅行時間を得るために Hyperpath を利用しない状態で数日分のシミュレーションを行い、ある程度均衡がなされていると考えられる状態で各リンクの旅行時間を得

表-1 シミュレーション・交通量 (PT 調査) の基本設定

項目	要素
調査エリア	東京都, 神奈川県, 千葉県, 埼玉県, 茨城県南部
計基ゾーン数	601
OD ペア数	17,166
総トリップ数	2,306,892

表-2 シミュレーション・ネットワークの基本設定

項目	要素
シミュレーションエリア	東京都, 神奈川県, 千葉県, 埼玉県, 茨城県南部
シミュレーション時間	午前 5 時～午前 10 時
Agent 数	223,105
ネットワークノード数	82,542
ネットワークリンク数	187,748

る。その結果得られた各リンクの最大遅れ時間を利用し、経路群を生成して確率的に一つのルートを与える。

(3) シミュレーションデータの概要

本研究でのシミュレーションでは、入力データとして OSM(Open Street Map) より生成した東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県、茨城県の道路のネットワークデータと平成 20 年に行われた首都圏パーソントリップ調査 (PT 調査) の結果から得られた自動車の通勤トリップ数を利用する。道路ネットワークデータは図-4 に示すように高速道路を除いた市区町村道レベルまでの一般道のネットワークを作成し、利用した。PT 調査の計画基本ゾーン (計基ゾーン) 数、OD ペア、総トリップ数は表-1 に示すとおりである。今回のシミュレーションでは、計算機のメモリの都合で Agent 数をトリップ数の 10% 程度に設定し、それに合わせて各リンクの容量も 10% 程度とした。また、シミュレーションの設定の都合で出発地と到着地が同じゾーンとなる Agent は除外している。

各 Agent の出発地と到着地は PT 調査における、小ゾーンを数個まとめた計画基本ゾーンのセントロイドに設定する。シミュレーションは朝の混雑時間帯の交通流に着目し、1 日分を午前 5 時から午前 10 時までとしてシミュレーションを行う。各 Agent の出発時間は午前 7 時にピークのある正規分布として与えた。シミュレーションの基本データは表-2 に示す。

4. 分析の方針

分析の方法として、Hyperpath に基づく経路誘導に従う車両の比率を 0%, 20%, 50%, 80%, 100% と変化さ

せ、それぞれのケースにおいて平均旅行時間、総旅行時間とその分散、混雑リンク数などの分析する。それを通して、リスク回避型経路誘導の普及に伴う道路ネットワーク全体の旅行時間信頼性に関わる影響の比較を行う。図-5 に現在進めているシミュレーションの様子を示す。現在分析を進めている段階であるため、その結果は発表の当日に示したい。

参考文献

- 1) Park, K., Bell, M., Kaparias, I., Bogenberger, K.: 2007. Learning user preferences of route choice behaviour for adaptive route guidance. IET Intelligent Transport Systems, 1 (2), pp.159–166.
- 2) Bell, M. G.: 2009. Hyperstar: A multi-path A-star algorithm for risk averse vehicle navigation. Transportation Research Part B: Methodological, 43 (1), pp.97–107.
- 3) Bell, M. G.: Trozzi, V., Hosseinloo, S. H., Gentile, G., Fonzone, A.: 2012. Time-dependent hyperstar algorithm for robust vehicle navigation. Transportation Research Part A: Policy and Practice; 46 (5), 790–800.
- 4) Ma, J., Fukuda, D., Schmoeker, J.-D.: 2013. Faster hyperpath generating algorithms for vehicle navigation. Transportmetrica A: Transport Science, 9 (10), pp.925–948.
- 5) Yamada, K., Ma, J., Fukuda, D.: 2013. Simulation Analysis of the market diffusion effects of risk-averse route guidance on network traffic. Procedia Computer Science, 19, pp.874–881.
- 6) Spiess, H., Florian, M.: 1989. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. Transportation Research Part B: Methodological, 23 (2), pp.83–102.
- 7) Ma, J.: 2012. Hyperpath-based Strategic Route Guidance Considering Travel Time Uncertainty. Ph.D. Dissertation, Tokyo Institute of Technology.
- 8) Delling, D., Wagner, D.: 2009. Time-dependent route planning. In Ahuja, R., Mohring, R., Zaroliagis, C. (Eds.), Robust and Online Large-Scale Optimization. Springer, pp.207–230.
- 9) Chriqui, C., Robillard, P.: 1975. Common bus lines. Transportation Science, 9 (2), pp.115–121.

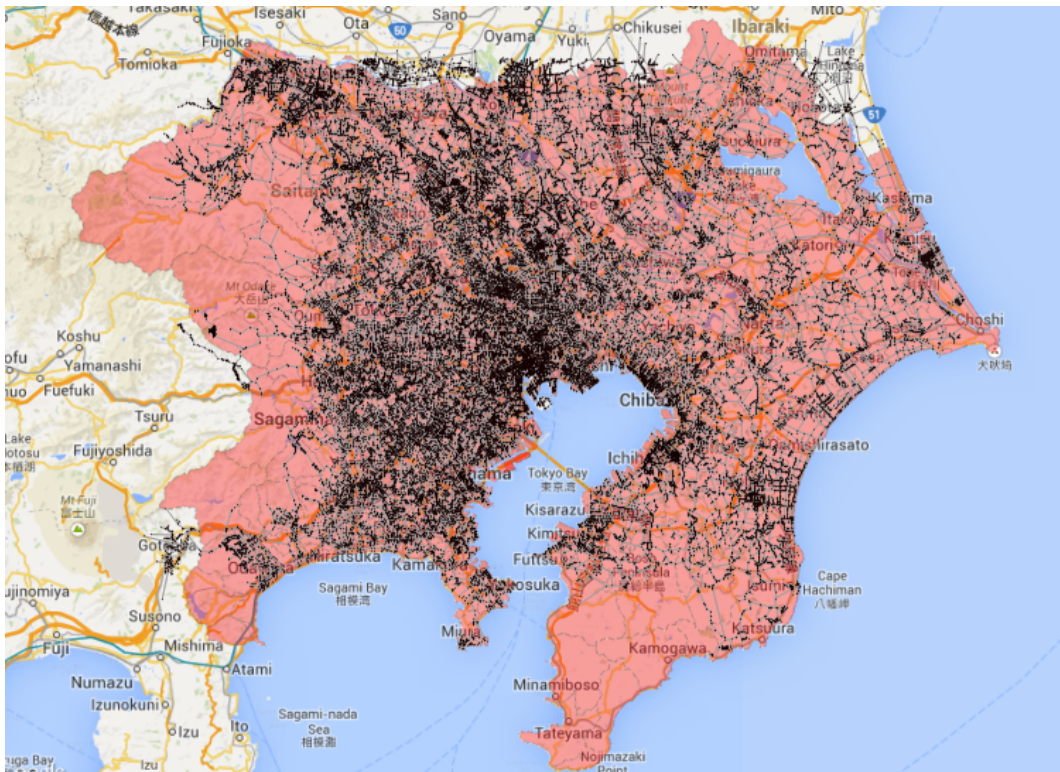


図-4 シミュレーションに用いたネットワークデータ

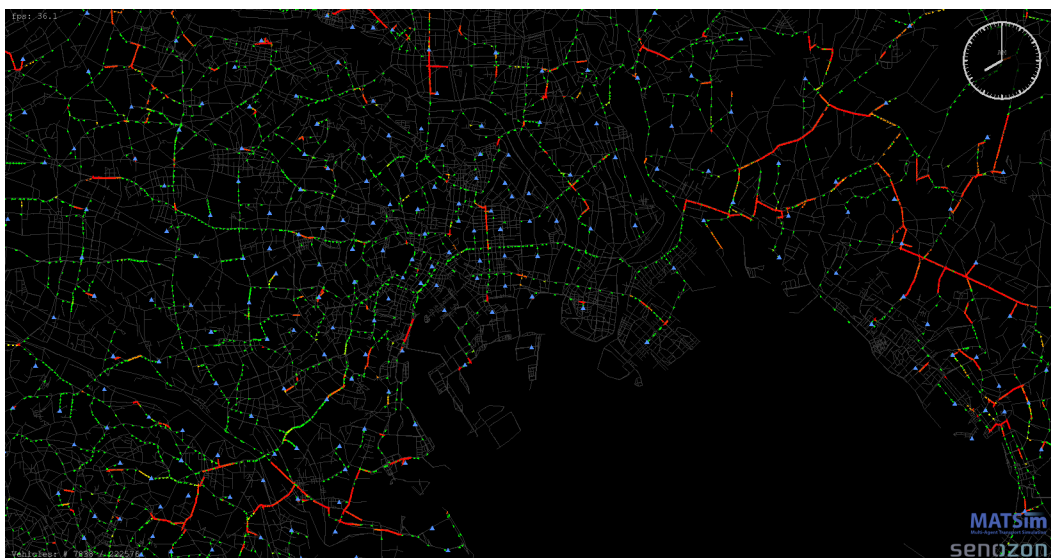


図-5 HP 混入率 0%の場合でのシミュレーション結果