

# 自動車間の動的経路割当メカニズムに基づく 渋滞緩和システムの設計とシミュレーション

伊藤 孝行<sup>1,a)</sup> 田中 雅章<sup>1,b)</sup> ラフィック ヘドゥフィ<sup>1,c)</sup> 鳥居 義高<sup>1,d)</sup> 徳田 渉<sup>1,e)</sup> 金森 亮<sup>1,f)</sup>

概要：本稿では、情報通信研究機構の委託研究として行うマルチエージェントアルゴリズムに基づく渋滞緩和メカニズムの実世界応用アプリと大規模シミュレーションについての設計と研究構想について述べる。自動車台数の増加に伴い、ますます渋滞が発生する頻度が増加している。VICSによる道路交通情報はリアルタイムに提供されているが、基本的には過去の情報によるため、結局は運転者が同じルートを選択し、新たな渋滞が発生し、災害時などは危険な状況にもなり得る。本研究では、マルチエージェントアルゴリズムを応用することで近未来交通予測の基盤アルゴリズムを実現し将来的な渋滞がおこらないような運転ルートの効率的な割当を可能にする。具体的には、まず(1)(アルゴリズム設計)マルチエージェントに基づく近未来交通予測の基盤アルゴリズムを研究開発する。そして、(2)(シミュレーションによる理想状況下での評価)大規模なシミュレーションによってその有効性を示す。さらに(3)(M2Mを活用した応用アプリの実装と実証)M2M技術を活用した試作アプリケーションを用いた実証実験によりその実現可能性を示し実ビジネス運用に向けた課題を抽出する

TAKAYUKI ITO<sup>1,a)</sup> MASAAKI TANAKA<sup>1,b)</sup> RAFIK HADFI<sup>1,c)</sup> YOSHITAKA TORII<sup>1,d)</sup> SHO TOKUDA<sup>1,e)</sup>  
RYO KANAMORI<sup>1,f)</sup>

## 1. はじめに

本稿では、情報通信研究機構の委託研究として行うマルチエージェントアルゴリズムに基づく渋滞緩和メカニズムの実世界応用アプリと大規模シミュレーションについての設計と研究構想について述べる。図1に本研究のビジョンのアウトラインを示す。本研究では、(1)交通に関して、実世界からの様々なセンサーから情報を収集する。(2)収集した情報をもとに、大規模シミュレーションを行う。ここでは、マルチエージェントアルゴリズムを用いることで、未来の渋滞予測を行う。さらに、渋滞予測に基づいて、現在行うべき経路の再割り当てを行い、ガイダンス情報とする。そして、(3)ガイダンス情報や予測情報を実世界に提

供する。全体としてスマートな交通システムの実現を目指す。



図1 本研究のビジョン

本研究では、マルチエージェントアルゴリズム [9], [10],

<sup>1</sup> 名古屋工業大学  
Gokiso, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan  
<sup>1f</sup> 現在、名古屋大学  
Presently with Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603,  
Japan  
a) ito.takayuki@nitech.ac.jp  
b) tanaka.masaaki@itolab.nitech.ac.jp  
c) rafik@itolab.nitech.ac.jp  
d) torii.yoshitaka@itolab.nitech.ac.jp  
e) tokuda.sho@itolab.nitech.ac.jp  
f) kanamori.ryo@nagoya-u.jp

[11] による近未来交通予測に基づく M 2 M 技術基盤を活用した次世代交通支援システムを実現する。具体的には、まず (1) (アルゴリズム設計) マルチエージェントに基づく近未来交通予測の基盤アルゴリズムを研究開発する。そして、(2) (シミュレーションによる理想状況下での評価) 大規模なシミュレーションによってその有効性を示す。さらに (3) (M 2 M を活用した現実的な実証実験) M 2 M 技術を活用した試作アプリケーションを用いた実証実験によりその実現可能性を示し実ビジネス運用に向けた課題を抽出する。本研究により、渋滞の絶対量が減ることによって低炭素社会、道路インフラ整備費削減、いらいらによる事故を減らすことができる。そして、将来のスマートシティの交通システムの中核技術としての技術発展とビジネス展開を目指す。

本稿の構成を以下に示す。第 2 章では、研究項目全体を概観する。第 3 章では提案するアルゴリズムについて説明する。第 3 章では、交通シミュレーションとそのコアモデルの一つである MSCTM について概説する。第 4 章では、応用アプリケーションのアーキテクチャについて説明する。第 5 章はまとめである。

## 2. 研究項目について

本研究の目的は、マルチエージェントアルゴリズムによる近未来交通予測に基づく M 2 M 技術基盤を活用した次世代交通支援システムを実現する点である。以下各研究項目について目的を明確にする。

(1) (アルゴリズム設計) 自動車の近未来の位置情報を共有し、交通システム全体として効率的な走行ルートを計算し、各自動車にその走行ルートを提案するための効率的な計算アルゴリズムを設計する。具体的には、近未来交通予測をするために、各自動車のカーナビなどを想定した経路探索機能を利用する。経路探索によって近未来 (例えば 10 分後) の到達場所が分かる。近未来の到達場所をクラウド方式により自動車間で共有する。近未来の到達場所の環境情報 (気象や災害情報) や渋滞状況を予測し、交通システム全体として効率的な経路割当を実行する。

(2) (シミュレーションによる理想的な状況での評価) 本シミュレーションでは、実世界に近いより大規模な設定において、計算機上の理想的な状況での (1) のマルチエージェントアルゴリズムの理想的な性能を検証する。実世界で近未来交通の予測をするためには、交通ネットワーク上の渋滞情報、気象情報、災害情報など様々な情報が必要となる。本研究では、M 2 M (マシン・ツー・マシン) の水平統合を目指しており、渋滞情報に関するセンサー群、他機関の気象情報、災害情報などの各種センサー群と他機関情報を水平統合した環境を想定し、シミュレーション環境を実現する。さらに都市や町の地図など現実の都市交通ネットワークを用いてシミュレーション環境を実現する。目的

は M 2 M の水平統合アーキテクチャを基盤とした (1) のマルチエージェントアルゴリズムの現実世界にも応用できるバランスのよい構築手法の実現である。

(アプリ開発と実証実験) (1) と (2) で示した仕組みがシミュレーションだけでなく、現実的に実現可能であることを示す。すなわち、クラウドのような仕組みをベースにして、情報を共有することを支援しながら、(1) の提案アルゴリズムをその上で動作させることで実現可能性を確認する。

## 3. 未来渋滞予測アルゴリズム

未来交通予測アルゴリズムの全体的な方式・方法を述べる [3], [4], [12]。本アルゴリズムを実装した統合的かつ分散的なシステムを未来交通予測システムと呼ぶ。

現状のプルーブカーなどの技術は、VICS 情報と呼ばれる道路交通情報を共有することでより自動車とドライバーに交通情報を提供することで、より効率的な交通管理を実現しようとしている。ただし、既存の道路交通情報の仕組みはすべて、現在よりは「過去の情報」を扱っている。

本研究開発では、過去の情報だけではなく、各自動車の「少し先の位置情報」を共有することで、さらに一歩進んだ渋滞解消を試みる。近年は、多くの自動車が、スマートフォンなどの通信デバイスを持つことを想定することができる。本方式は、通信デバイスと仲介センターとなるクラウドサーバによって構成される。

以下の (A), (B), および (C) に手順を示す。

(A) 通信デバイスは、ドライバーの意図した経路探索を行うことができ、ドライバーが進むと予想される近未来 (10 分後など) の予想位置はあらかじめ持っている。

(B) 各自動車が未来の予測位置 (予見的スティグマジと呼ぶ) を、仲介センターとなるクラウドサーバに提出する。クラウドサーバは、ハードウェアとして分散していても良い。「スティグマジ」とはマルチエージェントシステム分野で使われる言葉で、間接的共有情報のことをさす。例えば、アリの餌探し行動におけるフェロモンは、アリの群れにおける「スティグマジ」である。

(C) 仲介センターは、予見的スティグマジに基づいて、10 分後の交通状況を計算し、計算結果を未来交通予測情報として各自動車に送り返す。

以上の手順を繰り返すことによって、各自動車は未来の交通状況を共有することができ、既存の過去の情報だけではできない、交通渋滞の緩和が期待できる。

自律的な個体の集まる集団の動的な動きの予測はきわめて困難であることが複雑系の研究で分析されている。特に、未来の混雑予想をした場合、その混雑予想によって、違う混雑が生まれることが実験的にも経験的にもよく知られている。これを「混雑の振動現象」とよび、古くは「エル・ファロルのバーの問題 (El Farol Bar problem)」と呼

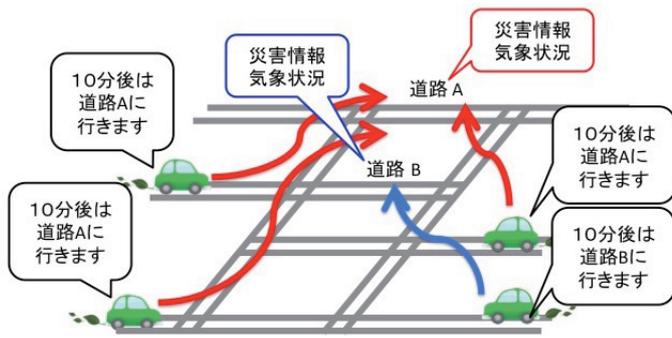


図 2 10分後の予測の提出

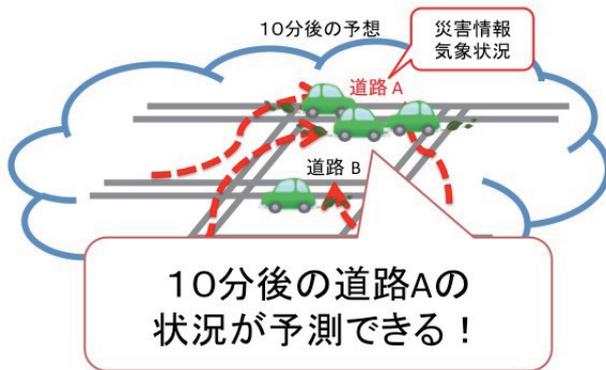


図 3 10分後の渋滞予測

経路を変えてもらう!【自動交渉機構】

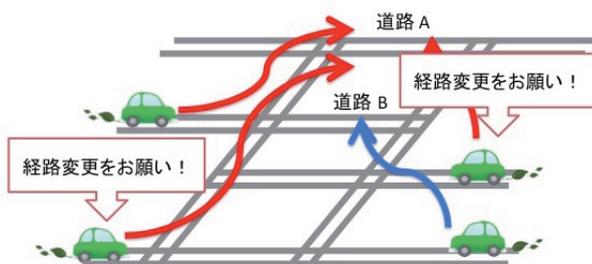


図 4 10分後の渋滞に基づいて経路変更の提案

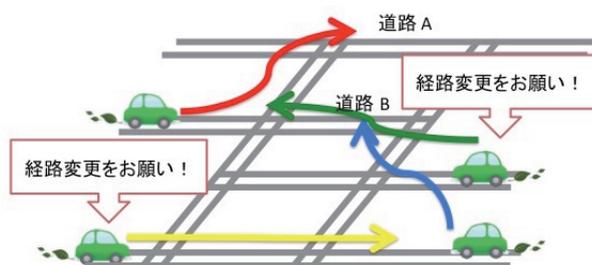


図 5 経路変更によって渋滞緩和

ばれ、最近マイノリティゲームや混雑ゲームなどゲーム理論的に分析されることも多い。

我々の先攻研究においても上記の混雑の振動現象が起りえることが分かっている。すなわち、本システムでは、各自動車は未来の交通状況を申告し、共有する。しかし、その未来交通状況と混雑を知ること、当初の申告とは異

なる経路を選択してしまうのである。これが、再び異なる混雑を引き起こす。

本研究では、未来交通予測システムにおいて、上記の振動現象をさけるために、自動車間の交渉機構を提案している。すなわち、自動車とそのドライバーにとっての経路の価値を定義することで、価値に基づいて、経路割当を行う仕組みである。

## 4. マルチエージェント交通シミュレータ

### 4.1 概要

マルチエージェントによる未来交通予測アルゴリズムを大規模なシミュレーションによって検証する。近未来の交通情報と動的に変化する経路コストを適切に処理する事により交通システム全体の効率が高まり、渋滞が緩和される事を検証する。特に、理想的な状況において提案アルゴリズムがどこまで性能を発揮できるかを確認する。

交通シミュレータはすでに既存のシミュレータがいくつかある。例えば、オープンソースのものでは SUMO や MATSim があげられる。また商用のシミュレータも数多く存在する。本研究では、車両の動きを再現するコアモデルを、いくつか用意し、さまざまな応用に適切な形でシミュレーションを可能にする。現状では、単純なセルラオートマタモデル、統計的流体モデルを改良した MSCTM (Modified Stochastic Cell Transmission Model)、個々の車両の振る舞いまでを定義できるようなマルチエージェントモデルなどを用いる。以下では、MSCTM について概説する。

### 4.2 SCTM と MSCTM

高精度な流体近似モデルとして、Stochastic Cell Transmission Model (SCTM) が近年提案されている。SCTM は道路交通における不確実性を実現することが可能であり、精度の良いシミュレーションをおこなうことができる。現状では、SCTM は高速道路のような単純なネットワークにのみ適用されている。適用されているネットワークの各分岐点には分岐率が簡易的に設定されており、SCTM は分岐率によって車両の経路を決定している。一般的に出発地と目的地が存在するネットワークに対して分岐率を設定することは困難である。また、分岐率によって車両の経路を選択することによって、現実の道路状況との誤差が大きくなる。

本研究では、SCTM を一般道路に適用できるよう拡張した Modified Stochastic Cell Transmission Model (MSCTM) を提案する。車両ごとに経路を探索し、各車両の出発地と目的地に応じて車両の経路選択をおこなう。さらに、SCTM では一般道路の交差点が連続する地点を上手く表現できないが、どのような一般道路でも表現できるネットワークの表現方法を提案する。MSCTM の再現性の検証として、吉

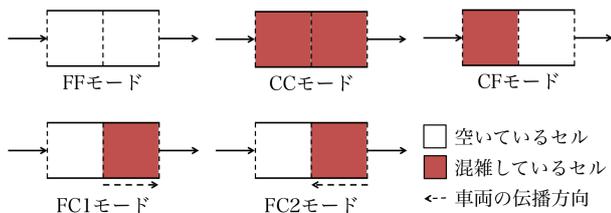


図 6 サブシステムにおける 5 つのモード

祥寺・三鷹の一般道路のネットワークを使用し、各車両の所要時間について実測値と推定値の比較をおこなう。

### 4.3 Stochastic Cell Transmission Model

SCTM は Sumalee ら [7][6] によって 2011 年に提唱されたモデルである。SCTM はセルを用いて道路を表現しており、2 つのセルを用いて 1 つの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。

SCTM は switching-mode モデル [5] 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。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概念である。モードには 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) モードの 5 つの種類が存在する。サブシステムにおける 5 つのモードについて図 6 に示す。図 6 の白いセルが車両が少なく空いているセル、赤いセルが車両が多く混雑しているセルを表している。

SCTM はネットワークに設定された分岐率により車両を移動させることが問題である。Zhong ら [8] は、SCTM を単純なネットワークに適用させた。Zhong が使用されたネットワークを図 7 に示す。図 7 は、各分岐点において分岐率が設定されており、車両の出発地と目的地がそれぞれ一つしか存在しない。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する。しかし、出発地と目的地が複数存在するネットワークに対して分岐率を設定することは困難である。また、分岐率はシミュレーションのために簡易的に設定された値であり、実際の道路状況を予測する際に誤差が生じる。

また、SCTM では一般道路の連続する交差点が表現できない。Zhong らの実験で使用されたネットワーク (図 7) は、単一の交差点を表現している。Zhong らのネットワークの表現方法で連続する交差点を表現するとセルの重複が生じる。セルの重複とは 1 つのセルが複数のサブシステムに割当てられている状況を表す。セルの重複が生じると車両の移動が上手くおこなうことができない。一般道路には複数の連続する交差点があると想定されるので、一般道路を表現するためにはネットワークの表現方法の変更が必要

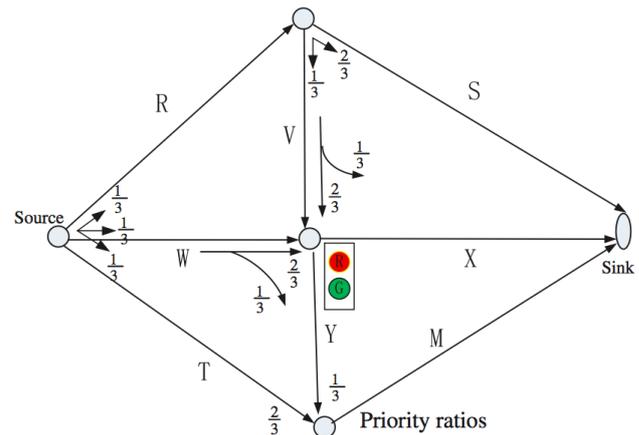


図 7 Zhong ら [8] の実験で使用されたネットワーク

となる。

### 4.4 Modified Stochastic Cell Transmission Model

【経路探索による車両の経路選択】分岐率を設定していないネットワークに適用させるためには、分岐点で各車両による経路選択をおこなう必要がある。MSCTM 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。経路探索の経路コストはセルの所要時間を設定する。経路コストをセルの所要時間に設定することで、混雑した道路のコストは増加し、混雑した道路を除いた最短経路を探索することができる。セルの所要時間を式 (1) に示す。

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

式 (1) の  $t(k)$  はセルの所要時間、 $l$  はセルの長さ、 $v(k)$  はセルの交通流の速度を示す。セルの平均速度は、グリーンシールズ&オルコットの式 [2] を用いて求める。グリーンシールズ&オルコットの式を式 (2) に示す。

$$v(k) = v_f(k) \left( 1 - \frac{\rho(k)}{\rho_J(k)} \right) \quad (2)$$

式 (2) の  $v(k)$  はセルの交通流の速度、 $v_f(k)$  は自由流の速度、 $\rho(k)$  は交通密度、 $\rho_J(k)$  は飽和密度を表す。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。よって、セルの所要時間を経路コストに設定することで混雑した道路を除いた最短経路を探索できる。本研究では道路の最短経路を探索するためにダイクストラ法 [1] を用いる。

経路探索の結果にしたがって車両を移動させるため、ある程度車両の挙動を追跡しなければならない。そこで、出発地と目的地の組み合わせごとに車両エージェントを作成する。各車両エージェントはネットワークに配置される際に、経路探索によって得られた経路を渡される。車両エー

ジェントは分岐点で、自分のもっている経路をもとに経路を選択する。

#### 4.5 一般道路の表現

Zhong ら [8] のおこなった実験では、交差点を表現するため、交差点の中心を挟んで向かい合った2つのセルに対してサブシステムを割り当てる。しかし、図8に示すような、交差点が連続するネットワークに対して Zhong らの手法でサブシステムを割り当てるとセルの重複が発生する。セルの重複とは、1つのセルに対して複数のサブシステムが割り当てられる状態を示す。SCTM で表現した連続する交差点を図9に示す。図9では、同じ色のセルが同じサブシステムに割り当てられていることを示しており、青色と茶色のサブシステム、黄色と紫色のサブシステムでセルの重複が発生している。セルの重複がネットワーク上に存在すると、サブシステム間の車両の移動に関して問題が発生し、正しい車両の移動が表現できない。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、セルの重複が存在しないサブシステムの割り当てをおこなう必要がある。セルの重複を防ぐためには道路をより細かく分割し、サブシステムを割り当てる必要がある。

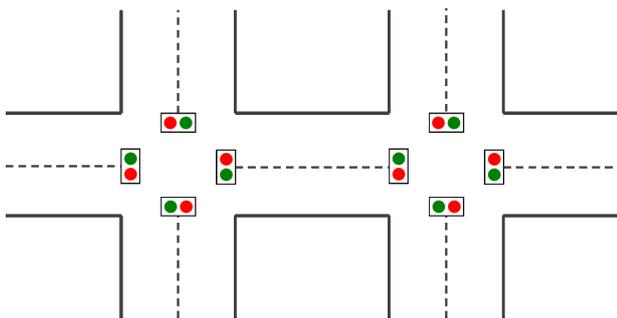


図8 交差点が連続するネットワーク

そこで MSCTM では、1本のリンクに1つのサブシステムを割り当てる、つまり1本のリンクを2つのセルで表現することでセルの重複を解消する。MSCTM で表現した交差点が連続するネットワークを図10に示す。図10から、MSCTM によるサブシステムの割り当て方法では、セルの重複が存在しないことがわかる。

また、交差点の信号制御に関して、本研究では青信号と赤信号のみを考慮する。信号現示が青である場合、車両は右折、左折、および直進することを許可される。信号現示が赤である場合、車両は右折、左折、および直進することを禁止される。

#### 5. 応用アプリケーションの実装

未来交通予測アルゴリズムと M 2 M の水平統合アーキテクチャが現実的に実現可能であることを示すことを目標とする。本実証実験のためのクラウドとスマートフォンア

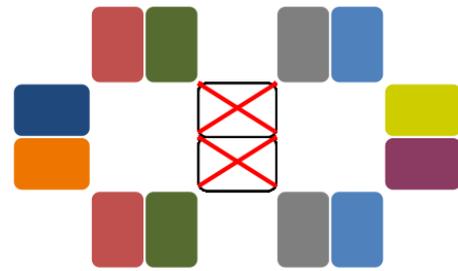


図9 SCTM によるサブシステムの割り当て手法

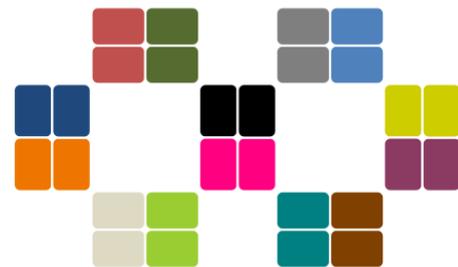


図10 MSCTM によるサブシステムの割り当て手法

プリのプロトタイプを作製する。そして、実稼働が可能なソフトウェアシステムとして、クラウドサーバとスマートフォンアプリを実装する。特定のエリアにおいて実証実験を行い、利用者が実際に本サービスを動かすことができ、利便性が向上することを検証する。

図11に現状のアーキテクチャを示す。クラウドサーバには、Google App Engine(GAE)を利用することで、生産性を保ちながら開発を進める。本アーキテクチャは、図11の(1)、(2)、(3)、および(4)の4つの部分から構成される。

(1)は、外部の天気データを取得するためのアーキテクチャを示している。ここでは、データベースに対して polling をすることで、逐一データを収集する方式を想定している。天気データだけでなく、その他の様々な外部データを取得可能である。

(2)は、Google の Weather Service を利用するパートである。Google の Weather Service に特化したアーキテクチャとなっている。

(3) ユーザインターフェースとしてのスマートフォンアプリとウェブアプリを示している。とくに、Cloud Endpoints を利用することで、(1)のコアのサーバの各種機能をスケラブルに API として利用することを想定している。スマホのアプリはまずは Android 上への実装を行っている。MA Traffic Management モジュールによって、本研究で提案しているアルゴリズムを実現している。

(4)がメインのパートになっている。様々なセンサーデバイスから、Cloud Endpoint を通して情報を収集する仕組みである。これらのデータを統合・分析するためのフローを定義している。

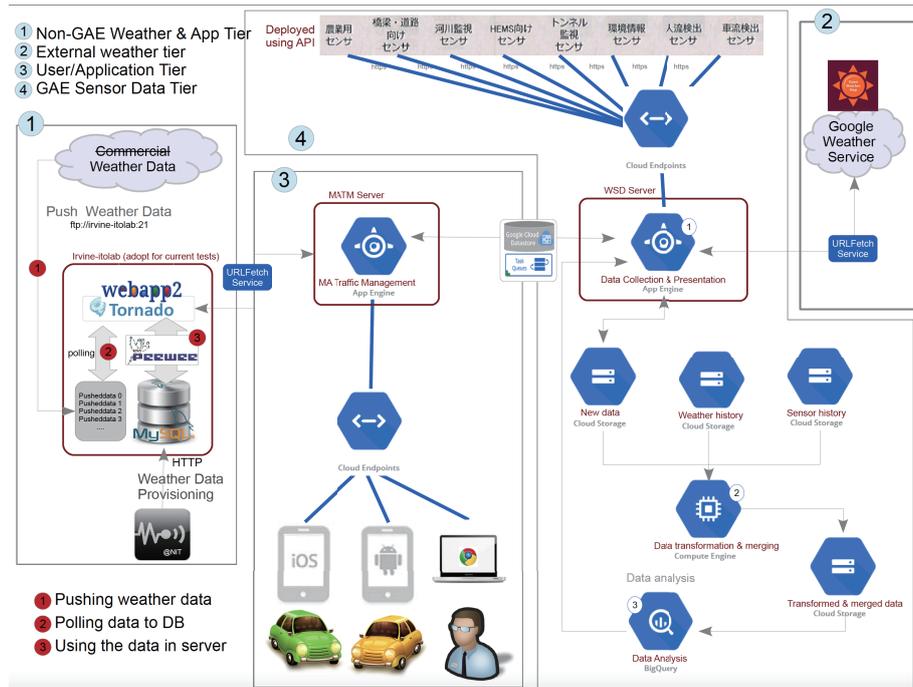


図 11 アプリケーションのアーキテクチャ

## 6. おわりに

本稿では、情報通信研究機構の委託研究として行うマルチエージェントアルゴリズムに基づく渋滞緩和とメカニズムの実世界応用アプリと大規模シミュレーションについての設計と研究構想について述べた。本研究では、近未来交通予測の基盤アルゴリズムを実現し将来的な渋滞がおこらないような運転ルートの効率的な割当を可能にする。具体的には、まず(1)(アルゴリズム設計)マルチエージェントに基づく近未来交通予測の基盤アルゴリズムを研究開発する。そして、(2)(シミュレーションによる理想状況下での評価)大規模なシミュレーションによってその有効性を示す。さらに(3)(M2Mを活用した応用アプリの実装と実証)M2M技術を活用した試作アプリケーションを用いた実証実験によりその実現可能性を示し実ビジネス運用に向けた課題を抽出する。本稿では各研究項目の概要を説明した。

謝辞 本研究は、情報通信研究機構の委託研究によってサポートされており、ここに謝意を示す。

## 参考文献

[1] Dijkstra, E.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269–271 (1959).  
 [2] Greenshields, B.: A study of traffic capacity., *Highway Research Board*, Vol. 14, pp. 448–477 (1935).  
 [3] Kanamori, R., Takahashi, J. and Ito, T.: Evaluation of Anticipatory Stigmergy Strategies for Traffic Management, *Proceedings of IEEE Vehicular Networking Con-*

*ference (VNC)*, pp. 33 – 39 (2012).  
 [4] Kanamori, R., Takahashi, J. and Ito, T.: Evaluation of Traffic Management Strategies with Anticipatory Stigmergy, *Journal of Information Processing* (2014).  
 [5] Muñoz, L., Sun, X., Horowitz, R. and Alvarez, L.: Traffic Density Estimation with the cell transmission model., *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 3750–3755 (2003).  
 [6] Sumalee, A., Pan, T., Zhong, R., Uno, N. and Indrapayong, N.: 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, pp. 263–285 (2013).  
 [7] Sumalee, A., Zhong, R., Pan, T. and Szeto, W.: Stochastic cell transmission model (SCTM): A stochastic dynamic traffic model for traffic state surveillance and assignment, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, pp. 507–553 (2011).  
 [8] Zhong, R., Sumalee, A., Pan, T. and Lam, W.: Stochastic cell transmission model for traffic network with demand and supply uncertainties, *Transportmetrica A: Transport Science*, Vol. 9, pp. 567–602 (2013).  
 [9] 伊藤孝行：マルチエージェントの自動交渉モデルとその応用，*Vol. 22, No. 3*, pp. 147–155 (2010).  
 [10] 伊藤孝行, Chakraborty, S., 大塚孝信, 金森亮, 原圭佑：未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究(2) 電力システムおよびワイヤレスセンサネットワークへの応用，*人工知能学会誌*, Vol. 28, No. 3, pp. 368–379 (2013).  
 [11] 伊藤孝行, 金森亮, Chakraborty, S., 大塚孝信, 原圭佑：未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究(1) 経済パラダイム、交渉エージェント、交通マネージメント，*人工知能学会誌*, Vol. 28, No. 3, pp. 360–367 (2013).  
 [12] 金森亮, 高橋淳, 伊藤孝行：予見的情報に基づく経路割当戦略に関する研究，*電気学会論文誌 C (エージェント特集号)* (2013).