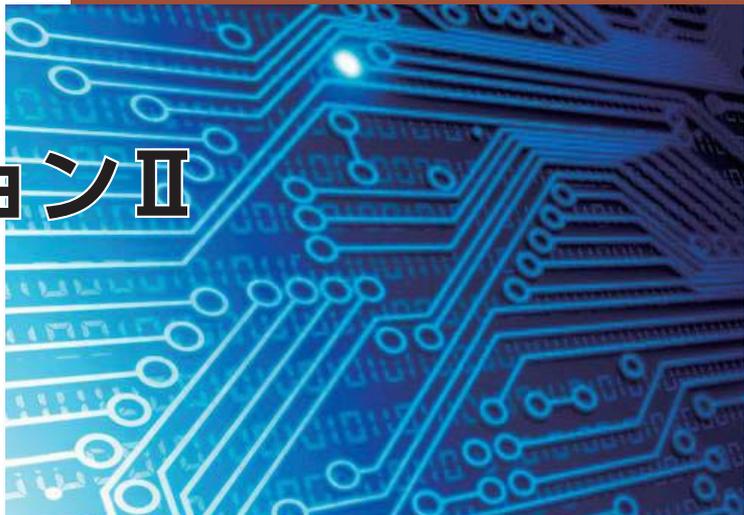


都市計画 シミュレーションⅡ

株式会社グローバルセキュリティー

主席技師 蛇島 伸吾
岡村 治彦
小栗 正之



はじめに

本シリーズ第2回では「都市計画シミュレータ (LSS : LandScape Simulator)」の高速動作のシミュレータの構造、シミュレータ内のデータの持ち方等を解説するとともに、シミュレーションシナリオを作成するスクリプトについて述べた。

本稿では、社会が高齢化へ向かう中、高齢者ドライバーの増加や、運転アシスト車ⁱ⁾・自動運転車の普及が対象地域にどのような影響を及ぼすのか、また新しいモビリティ (スローモビリティ、ナローモビリティ等) の導入により、人の動きにはどのような変化が起きるのか等の問いに対して、シミュレーションは予測や検証に対して大きな武器になるという観点から、LSS を交通流シミュレーションに応用した例を示し、また適応したいシミュレーション環境を整備するために必要なツールの紹介を行う。

シミュレーションモデル

(1) マルチエージェントシステム

交通流シミュレーションでは、車両、行人、自転車等の移動体を LSS 上のエンティティとする。図1に示すように各エンティティは簡単

なインテリジェンスをもち、個々の判断によって次の動作 (移動) を行う。このようなソフトウェアの単位をエージェントと呼び、複数の各エージェントが相互に影響しながら全体の交通流を形成していくシステムをマルチエージェントシステムと呼ぶ。

LSS は各エージェントが参加する場を提供し、その場の上で各エージェントは「前方の車

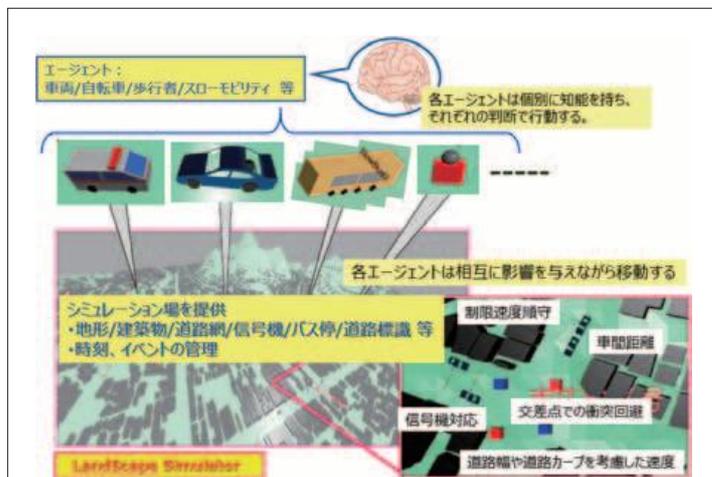


図1 都市計画シミュレータ (LSS : LandScape Simulator) の動作概念

LSS では、シミュレータが提供する場に登場したエージェントが互いに影響を及ぼしつつ独自の行動を行うことで、系全体で現れる現象を調べる。

i) 運転アシスト車とは、センサが人を検知して自動停止したり、前方の車に追従して走行するような支援機能を有する車のことである。

両との車間距離を取る」「急カーブや右左折で減速する」「赤信号で止まる」等の動作を行う。各エージェントは自分の判断手順に従って行動するが、シミュレーション全体を見ると、特定の場所で渋滞が発生したり、特定の場所で事故が多発したりするようなマクロ的現象を発生させることができる¹⁾。

(2) 個別のエージェントの構造

各エージェントの処理は図2に示すように、環境から他のオブジェクトを検出する「センサ部」、検出したオブジェクトの位置関係等を認識する「認知処理部」、認識した状況から次の行動を決定する「行動決定処理部」、決定した行動からアクセルやブレーキを操作する「アクチュエータ部」に分けられ、エージェントの行為が「環境シミュレーション場」に反映される。各エージェントは「環境シミュレーション場」でお互いのエージェント間の相互作用、あるいは気象や路面状況等の車両を取り巻く環境の影響を受ける。1回のイベント処理内で、これら一連の処理を1サイクル行う。ここでエージェントのインテリジェンスとして動作するのは「行動決定処理部」である。

さて、エージェントへのインテリジェンスの与え方を考えた場合、通常は図3に示すようにif条件ごとに合致する処理を定義し、想定した条件に従った処理を行う処理構造が浮かぶ。このような考え方でインテリジェンスを与える場合には、漏れのない条件の抽出・条件判断の順序の検討が必要であり、論理によっては条件の階層化（ネスト）による複雑化を招くこともある。一方で人間の行為を考えると、脳内の領域がそれぞれ異なった役割をもち、並列で動作し、その中で顕在化した行動が最終的な人間の行動となる²⁾。

本シミュレーションにおけるエージェントは、このような人間の脳の働きにヒントを得て、階層化したエージェント構造とした。車両1台／歩行者1人は、それぞれ一つのエージェ

ントであるが、さらに車両の運転手（あるいは歩行者）の脳内で、異なった役割をもつ領域を一つのサブエージェントと見なす。この様子を図4に示す。このなかでサブエージェントを、脳の皮質内でひっそりと（無意識下で）仕事をしている小人という意味で、愛称としてコロポックル（korpokkurⁱⁱ⁾）と呼ぶことにする。

脳内のコロポックルはそれぞれ認識した状況

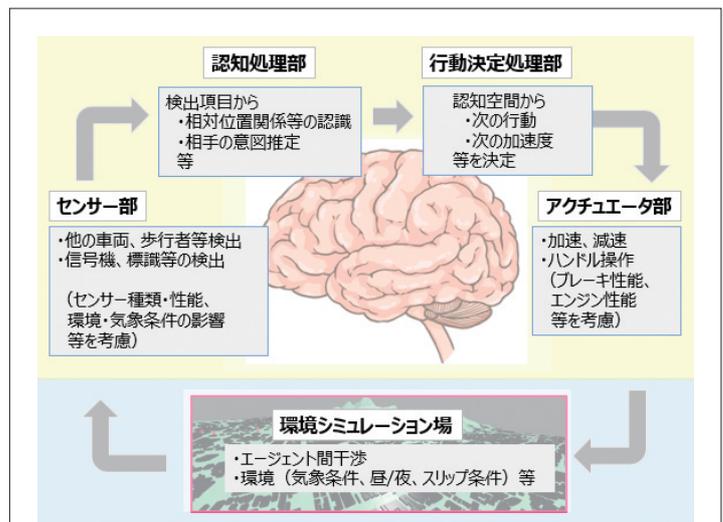


図2 エージェントの処理サイクル

エージェントはセンサからの入力を認知し、その認知情報に基づいて決定した行動を、アクチュエータを通じて実行する。エージェントの行動は環境に反映される。

```

If (条件 : A) {
  If (条件 : A1) {
    条件A1に対応する処理
  } else if (条件 : A2) {
    if( 条件 : A2a ) {
      条件A2aに対応する処理
    }
  }
} else if (条件 : B) {
} else if (条件 : C) {
}

```

条件(if)のネスト

漏れのない条件分岐(if _ else)の列挙

条件判別、条件にたいする処理の順序

図3 “if_else” の条件ルールからなるインテリジェンスの形成

ii) アイヌの伝承に登場する小人である。彼らは背丈が低く、動きがすばやく、漁に巧みであったといわれている。

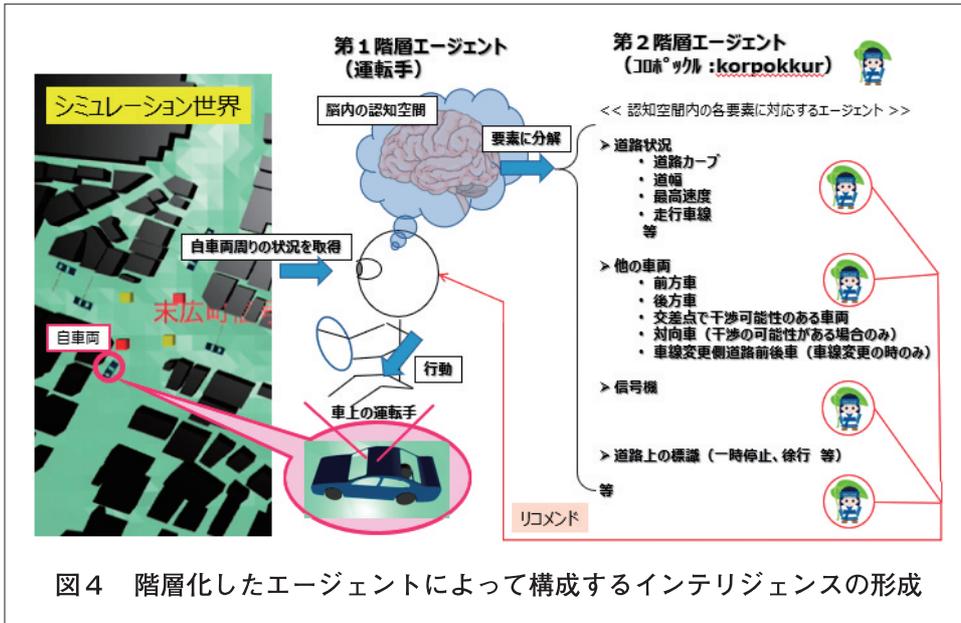


図4 階層化したエージェントによって構成するインテリジェンスの形成

は各車線に区切られ、原則として自動車は定義された「車線」という「一次元空間」を移動している。車線変更・交差点での右左折等は、別の車線という「異なる一次元空間」への移動と考えられる。またスピードの出し過ぎによるカーブ飛び出し等の現象も、自分の存在する「一次元空間」からの物理的遠心力による強制離脱と考えることができる。つまり、コロポックル

の中から、自分の担当する項目（以降、認知要素と呼ぶことにする）に対して次の行動をリコメンド値として出力する。各コロポックルは自らが担当する認知要素以外は認識せず、また他のコロポックルの判断に影響されることもない。すなわち完全に独立した存在であり、計算の順序を考慮する必要もなく並列な処理を行うことができる。各コロポックルが出したリコメンド値は、最終的に上位のエージェントである運転手の中から最適リコメンド値を採用し、アクセル・ブレーキ操作等を行う。

としては自分が存在する「一次元空間」上の加速・減速と、「異なる一次元空間」への移動可否の判断を重点的に行えば良いことになる。このようにコロポックルを生成することで、複雑な機能をより簡潔に定義できる。

運転手の脳内のコロポックルには、表1に示すようなコロポックルを準備することで各種の運転機能を実現している。これらのコロポックルの出したリコメンド値は正もしくは負の加速度のみであり、運転手は何かあれば減速（または停止）することが一番安全な行動と考えて、

(3) エージェントが移動する空間

運転手の操作を考えると、一番重要な操作は、加速・減速操作（アクセルペダルを踏む、ブレーキペダルを踏む）およびハンドル操作であろう。ここで運動場・駐車場等の自由空間を移動する場合には、車両の移動は2次元方向に自由に移動することが可能である。一方で現実の市街地路上走行を考えた場合、道路

表1 運転ドライバーの代表的なコロポックルの一例

コロポックル種類	役割
ナビゲーター	目的地へ移動する際の交差点右左折判断、交差点接近判断を行う。
● 車間距離制御	前方自動車との車間距離を保つ。 「OVモデル」(最適速度模型: Optimal Velocity Model)
● カーブ減速	急カーブ、右左折時の曲がり具合に応じた事前減速、道幅に応じた減速を行う。
● 信号機制御	信号機の色による停止、進行の制御を行う。
● 交差点制御	
● 対向車・交差車に対する衝突回避	自分と相手の優先度を考慮し、衝突を回避するための減速、停車を行う。
● 交差点先の混雑	交差点を抜けた先の道路が混んでいたら、交差点進入を行わない。
◎ 走行車線の横切り	
◎ 車線変更判断	車線変更の必要・不要の判断を行う。 変更側車線を走行中の車両への接触がなければ、車線を変更する。
● 各種道路標識等対応	
● 一時停止	一時停止を行う。
● 徐行	徐行速度で走行する。
● …… 以後各種標識 ……	…… 各種標識に対応した速度制御 ……
● 車種別等による対応	
● バス停	バス停に停車し、乗客の乗降時間分停車を継続する。
● …… 以後各車種 ……	…… 各車種に対応した速度制御 ……

各リコメンド値の中から最も小さい値を採用する（加速と減速ならば減速を、緩やかな減速と急な減速ならば急な減速を採用する）。ここで、一番基本的な加速減速の計算は、(1)式に示すOV (Optimal Velocity) モデルである³⁾。

$$A = a \cdot \{U(D) - V\} \quad (1)$$

(凡例)

A : 加速度、 a : 係数、
 U : 非線形な単調増加関数（ここでは、 \tanh を使用）、

D : 車間距離、 V : 速度

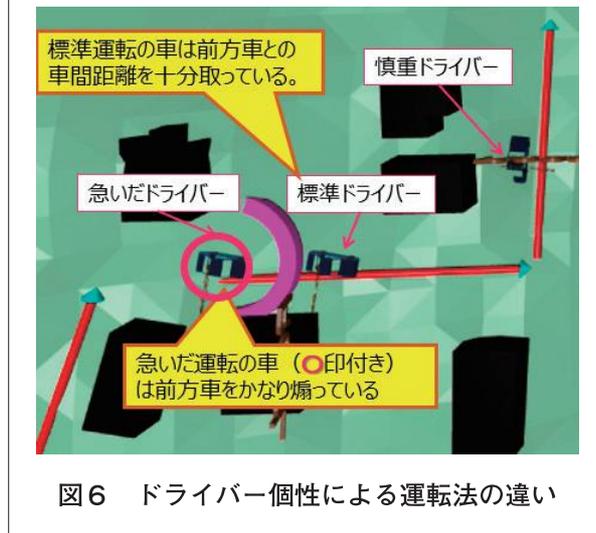
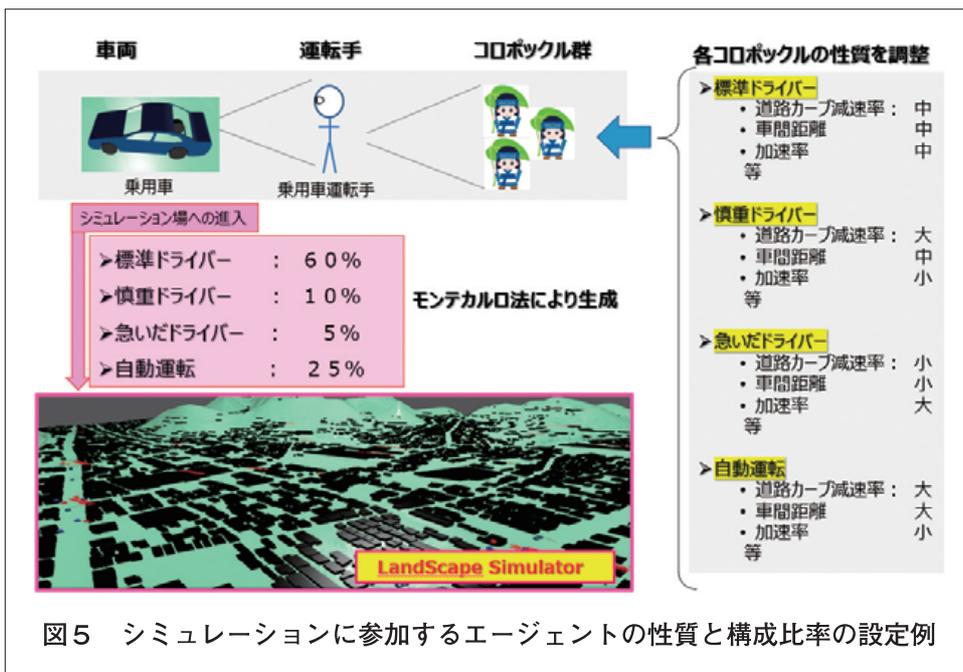
式の前半部： $U(D)$ はドライバーの加速特性を表し、車間距離が大きくなると加速を行う（ただし、加速度は無限に大きくはならないので、いずれ加速度の増加はゼロとなる）。一方、式の後半部で V を減じるのは、速度が大きくなると減速したくなる特性を示している。従って、式前半の「加速」と式後半の「減速」が同じとなった時点で車両は一定速度での運転となる。

歩行者の場合には車両と異なり、歩道の道幅内で二次元的に移動できるため、異なるコロボックルの実装を検討中である。

(4) エージェントの個性

LSSではエージェントである運転手は、本シリーズの第2回で述べたスクリプトファイルに記述した内容によって個性をもたせることが可能であり、シミュレーションに参加するそれらのエージェントの構成比率も変更できる。ここで運転手の個性とは内部に存在しているコロボックル個々の特性によって決定される。

図5は例として運転手の個性を「標準ドライバー」「慎重ドライバー」「急いだドライバー」「自動運転車」とし、各運転手の性格を大中小によって設定している（実際には特性を示す関



数の係数値で与えられるが本文では理解しやすくするため、大中小という言葉を使用する)。またシミュレーションに参加するエージェントは「標準ドライバー」:「慎重ドライバー」:「急いだドライバー」:「自動運転車」の比率を、それぞれ60% : 10% : 5% : 25%としている。

図6は、例として図5内の「標準ドライバー」「慎重ドライバー」「急いだドライバー」による運転方法の違いを示している。この例では、①「慎重ドライバー」②「標準ドライバー」③「急いだドライバー」の順に1分間隔で発車させ、数分経過後の様子を示している。図からも分かるように「標準ドライバー」と「急いだドライバー

バー」は「慎重ドライバー」が運転する車両に追いつき、後追い状態となっている。「標準ドライバー」は十分な車間距離を保っているが、「急いだドライバー」が運転する車は、車間距離を詰めて前の車を煽って運転している。

別な例として、図7にシミュレーションに参加するドライバーの性格の構成比を変更させた場合の、狭い道での走行状況を示した。慎重なドライバーが少し増えることで、狭い道が比較的混む結果が得られた。

(5) 複合システムとしてのLSS

現実の世界では、道路上の自家用車だけではなく、バス等の公共交通機関、歩道を歩く歩行者やこれからバスに乗ろうとする乗客、自転車、場合によっては路面電車等が存在する。

さらにグリーンスローモビリティ、ナロウモビリティ等の新交通システムの導入も始まっている⁴⁾。また自動運転用のインフラ設備の整備、MaaS (Mobility as a Service) の普及に伴うレンタカー・シェアサイクル等を組み合わせた公共交通の組み合わせ等の検討が必要となってくる。

LSSでは、図8に示すように、エージェントおよびエージェント内のコロポックルを入れ替えることで、先に述べたいろいろなモビリティが混在する複合的なシミュレーションに柔軟に対応することが可能である。図9に複合的なシミュレーションの例として自動車、列車および列車の乗客を同時にLSS上で動作させた例を示す。自動車は車道を、列車は鉄道軌道上を走る。列車が駅で停車すると、列車から乗客が下車しプラットフォームを歩行する。

ドライバー性格の構成比
慎重ドライバー: 35%, 一般ドライバー: 45%, 急いだドライバー: 20%



ドライバー性格の構成比
慎重ドライバー: 40%, 一般ドライバー: 40%, 急いだドライバー: 20%



図7 ドライバー性質の構成比による道路の混雑状況の変化

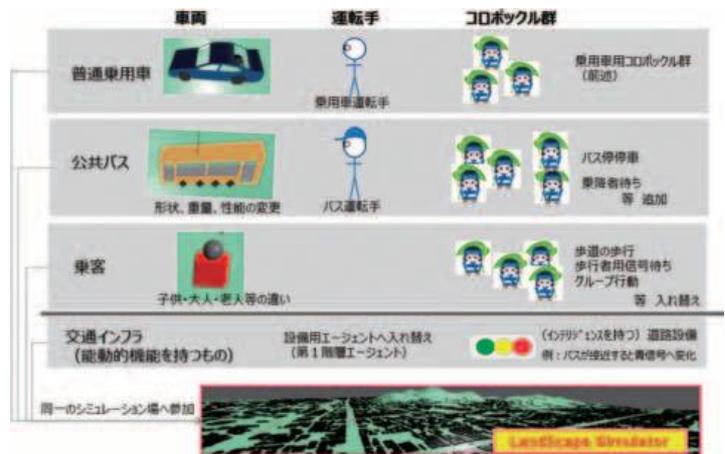


図8 LSSにおける多様なモビリティへの対応方法を示す概念図



図9 LSSにおける多様なモビリティへの対応例

シミュレーション環境整備ツール

これまでシミュレータの概念やそれを応

用した結果について述べてきたが、シミュレーションを実行しようとする場合には、研究の対象の地域での地形・建物・道路情報を整えるために非常に労力がかかる。またシミュレーションした結果を分かりやすく表示することも重要である。そこでLSSでは、シミュレーション環境を整えるためのツール群を提供している。図10にLSS関連のツール群とLSS本体の関係を示す。対象地域の地形・建物情報は国土地理院が公開している情報をダウンロードして「標高値データ切り出しツール」・「建物形状取り込みツール」を用いて必要な地域の切り出しを行い、LSSが読み込める形式に変換する。またシミュレーションの目的に応じてコロボックルの性格を決定する定数、車両の特性や性能はテキストファイルのライブラリとして定義しておく。目的とするシミュレーションを行う場合には、前述の情報をシナリオファイルに追加して記述する。

一方、道路網情報は「道路網整備ツール」によって自作する。道路網としては信号機色の切り替え時間、右左折専用レーンの存在、バス停、

バス停の運行表、道路工事情報等、市販の地図情報では目的とする情報の不足が発生する場合がある。さらにシミュレーションの目的によっては特定の狭い範囲を詳細に整備したいこともある。そこで、さまざまなシミュレーション目的に対応できるように、あえて道路網情報は自作することとした。

道路網情報として一番重要な道路の形状は、道路の道順を構成点列として作成する必要がある。LSSの「道路網整備ツール」を用いると、図11に示すように、画面に表示した地図上で道路をクリックして地図から緯度・経度を取得し、点列として定義することが可能である。

さらにシミュレーション結果はCSV(Comma Separated Value)形式で出力されており、標準的なOS(macOS、Windows、Linux等)ⁱⁱⁱ⁾上で表示することが可能である。LSSに標準で付属する「シミュレーション結果表示ツール」は、図12に示すように全体を俯瞰して地図上に交通流を動画として表示できるとともに、特

iii) OS(Windows、Linux)のツールについては、現在開発中

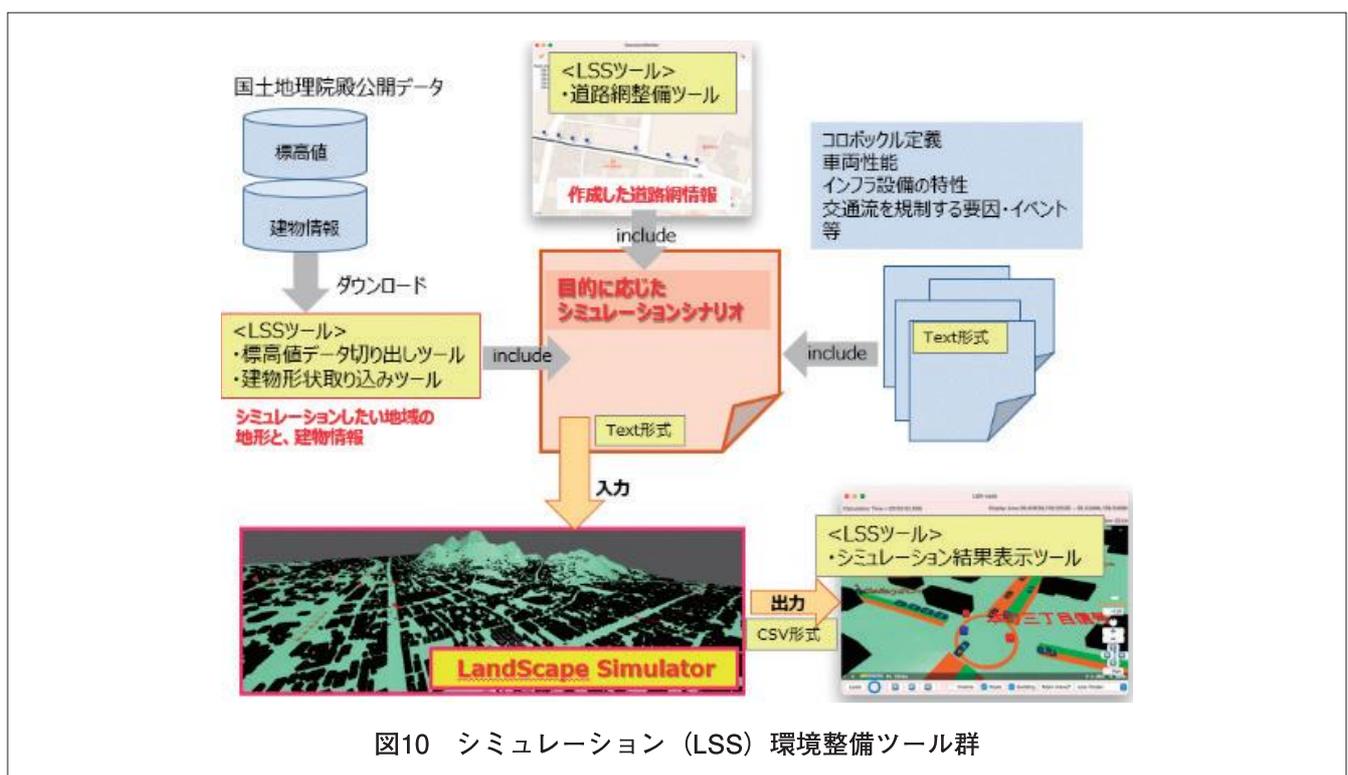


図10 シミュレーション (LSS) 環境整備ツール群



図11 道路網整備ツール



図12 シミュレーション結果表示ツール

定の車両を選択して子画面上に車両の窓から見える風景を表示することが可能である。その表示方向は360°回転することが可能で、例えば事故発生時に対象車両方向を見ることができる。また事故等の注目すべき事象が発生した時点から過去方向への逆再生が可能で、事象発生原因の究明等にも活用できる。

まとめ

本稿では都市計画シミュレータ (LSS) に参加するエージェントの動作原理を説明し、コロポックルというサブエージェントを導入することで、各エージェントの性格や個性を変更可能であること、ならびに特定の性質をもつエージェントの構成比を変更することが可能であること等の特徴を述べた。その例として車両ドライバーの性格や構成比を変更することで、道路

全体の交通流が変化する等の結果が得られることを示した。またシミュレーション環境の整備ツールを利用して、検証したい対象地域のシミュレーション環境を簡単に整備できることを示した。

現在はこれまでの交通システムと、運転アシスト機能や自動運転車両等の新技術が同居している状況にあり、LSSではこれら複合的な事象を扱えるシミュレータとして、

例えば、

- ① 自動運転車だけではなく、自動運転用のインフラ設備の整備による安全性の検証
- ② 新交通システム (ナローモビリティやスローモビリティ等) 導入の効果検証
- ③ 新交通システムの乗客の行動特性 (例えば、乗客年齢層に応じた商店街での買い物、イベント会場での行動等) を考慮したバス停の配置の最適化やイベント時の臨時便の効果等の検証

など多様な事例に対して利用できるエリアを広げられるよう、さまざまな機能を充実させていく予定である。

引用文献

- 1) 竹之上典昭、蛇島伸吾、“都市・車両・鉄道・道路網を総合的に扱える多層マルチエージェントシミュレータについて、” 情報処理学会第83回全国大会、2021.
- 2) 伊藤正雄、佐伯胖、認識し行動する脳—脳科学と認知科学—、東京大学出版会、1988.
- 3) 杉山雄規、交通流の物理 (<特集>交通流)、Physics of Traffic Flow (< Special Reviews > Traffic Flow)、2003.
- 4) 国土交通省、“グリーンスローモビリティ、” [オンライン]. Available: https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000139.html. [アクセス日: 30 6 2021].