

令和 5 年 4 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02314

研究課題名(和文)都市環境リスク評価のためのCFD+MAS統合シミュレーション新学理の構築

研究課題名(英文) Establishing a new concept of comprehensive simulation science dovetailing CFD and MAS for evaluating urban environment and potential risks

研究代表者

谷本 潤 (Tanimoto, Jun)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：60227238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：物体移動のダイナミクスを自己駆動粒子シミュレーションMAS (Multi Agent Simulation) でモデル化し、その影響を下流の流体解析CFD (Computed Fluid Dynamics) に接続するMAS-CFDジョイントシミュレーション手法を開発を目指し、都市キャノピー内の移動自動車による汚染物拡散、室内閉鎖空間の感染症リスク評価への応用を念頭に、MASおよびCFD夫々の基盤モデルを整備し、[CFD+MASジョイント・シミュレーション新学理への跨橋構築]もって、「Simulation」の概念に革新をもたらす。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境リスク評価には、今日、シミュレーション技術としてのCFDを抜きには語れない。一方で、都市内の交通流や閉鎖空間内での人の流動が、乱流シア生成による混合促進(あるいは阻害)を招き、スカラー拡散に決定的影響を与える。本研究により、自己駆動エージェント(車や人など)がもたらす動的影響を組み込んだ乱流場の予測手法：CFD-MASシミュレーション技法の基盤技術を構築したことは、ジョイント・シミュレーション新学理への展開を図るうえで大きな学術的インパクトがある。また、都市キャノピー内の汚染物拡散、閉鎖空間内の感染リスク評価の高精度に資する本フレームは社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In order to build a brand-new concept; CFD+MAS Joint Simulation, we successfully delivered the fundamental template (or say, prototype) in which a framework of Self-driven Particle Simulation system, that is called Multi Agent Simulation (MAS), is dovetailed with a CFD (Computer Fluid Dynamics) simulation. More precisely, a MAS follows the kernel of LES, which is one of the resolvable CFD systems to chase a time-evolution of continuum physical properties such as the concentration of pollutants, virions and others. In view of applications, we paved the fundamental theories and simulation core for i) quantifying the turbulence mixing effect in an urban canopy enhanced by shear supply by moving vehicles, and ii) risk assessment in a closed built environment in which susceptible individuals and infectious (and infected) individuals co-exist who are both treated as 'moving' pedestrians. In conclusion, we are able to a good inception to be extended to new discipline; 'Simulationology'.

研究分野：社会物理学

キーワード：CFD MAS ジョイントシミュレーション Cellular Automata 都市キャノピー 乱流混合 感染リスク 新興感染症

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

排ガス起因のNOx, SOx等は都市キャノピー内歩行者の健康被害を惹起する。インフルエンザをはじめとする季節性感染症の流行は、飛沫感染により、満員電車や集客施設など不特定多数が集合する都市環境上の結節点を通じて、大規模パンデミックに繋がる可能性がある。斯様の環境リスク評価には、今日、シミュレーション技術としてのCFD (Computed Fluid Dynamics) を抜きには語れない。一方で、上記した問題にあつては、都市内の交通流や閉鎖空間内での人の流動が、乱流シア一生成による混合促進(あるいは阻害)を招き、スカラー拡散に決定的影響を与えることは想像に難くない。しかし、既往の流体科学の枠組みでは、これら自己駆動エージェント(車や人など)がもたらす動的影響を組み込んだ乱流場の予測手法は未だ確立されていない。ところで、MAS (Multi Agent Simulation) は90年代の複雑系物理学の黎明期を経て、統計物理学などのサイエンスの分野で導入され、近年は複雑系システムを扱う社会物理学での展開が進んでいる。例えば、MASの一種であるCellular Automaton (CA)を適用した交通流解析、渋滞発生機構の解明など、現下、MASによる自己駆動粒子の解析手法はその適用の裾野を広げつつある。CFDとMASはこれまで異なるシミュレーション技術として独自の進化を遂げてきたが、それは夫々が扱う時空間スケールが圧倒的に乖離している上にモデル化の基本的考え方が相反する方向性(要素還元的; Top-down か⇔構成論的; Bottom-up か)をもっている点に与っている。CFDとMASの両者を併用(統合ではない)した試みとしては、建築分野の火災時避難があり、土木工学分野では東日本大震災以降、津波からの待避シミュレーションが注目され、実際に即した応用が進んでいる。が、これらはCFDとMASのカップリングとは云い難くOff-line接合と云うべき枠組みである。なぜなら、CFD→MASの接合では、先行する細かい時空間スケールのCFDの結果を吐き出し、間引いた時間間隔の境界条件として後続するMASに受け渡せばよいから、上流側CFDと下流側MASの時空間スケール乖離を埋める必要はない。より詳細なスケールで計算が進行するCFDがより粗いMASを律速することはない。津波被害からの待避シミュレーションの例で云えば、迫り来る津波を時々刻々CFDで予測し、上昇水位から待避経路になり得ない領域を特定、それを個々のエージェントが採る退避軌跡に反映させればよい。この逆順のシミュレーション体系は、CFD→MASと異なり、上流側に粗いMASがあり、下流にあるCFDを律速してしまう。走行する車両や流動する人を例にとれば、流体側にとってみるとこれらは不規則に移動する壁体の境界面として扱わなければならない。更に、走行車両の例では移動車両が排ガスのスカラーソースとなり、その排出量は走行状態に依存する。非定常CFDであるLESを適用手法とするなら、その時間分解能は 10^{-3} 秒のオーダーであり、MASの高々1秒オーダーのスケールと大きな乖離があるから、効率的な補間アルゴリズムによって接合することなしに破綻なく時間積分を進めることはできない。斯様の原理上の制約から、これまでMAS→CFDの接合モデルは試みられてこなかった(図1)。

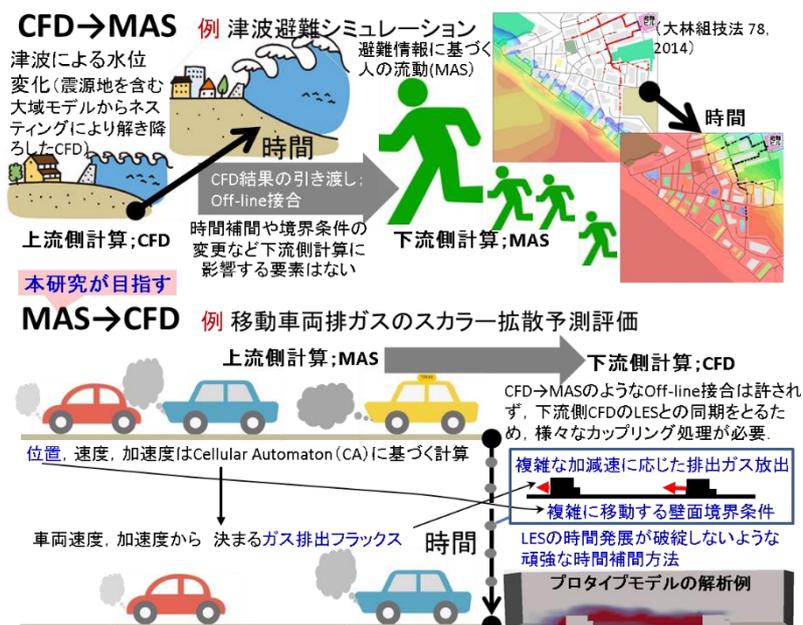


図1 MAS→CFD ジョイントシミュレーションの概念

これまでMAS→CFDの接合モデルは試みられてこなかった(図1)。

2. 研究の目的

本研究では、車両流動と人の流動軌跡を再現するCAモデルの開発を通じた複雑系MASアプローチと、CFDに支えられた都市気候学の双方の既往知見を統合し、CAとLESに焦点を当て、これらを実験実測に基づく検証プロセスを経てチューニング、適切な補間アルゴリズムを仲介して接合することでMAS→CFDのジョイントシミュレーション技法を構築した。具体的には、(i)加減速しながら移動する車両が機械シア一生成を通じて都市キャノピー内の乱流混合に及ぼす動的影響を高精度予測するMAS→CFD・交通流モデルを開発する。都市キャノピー内の車両排ガス等の汚染物拡散の高解像度予測大系を構築、(ii)電車車両等の閉鎖空間内にトラップされた高密度人員が出口扉から退去するエピソードに注目し、歩行者が乱流混合に及ぼす動的影響を高精度予測するMAS→CFD・歩行者モデルを開

発する。停車イベント時の満員電車の真の換気効率の高精度予測、電車人員密度に依存するインフルエンザ感染リスクの定量予測大系構築に向けた足掛かりを得る。

3. 研究の方法

(1) 交通流 CA モデルのチューニング

1D Burgers equation 方程式をベースとする Microscopic モデル, Macroscopic モデルを数学的演繹により導出し, 対応する CA モデルの枠組みを構築する。これを基に申請者が開発してきた Revised S-NFS モデルを福岡都市高速道路および九州道で取得した実交通流データで比較検証することで, 他車線系への拡張および自動運転車両 (Automated Vehicle) にも対応した汎用的 CA モデルを得る。

(2) 数理疫学モデルのチューニング

閉鎖空間内の感染リスクを評価するため CFD に接合する数理疫学モデルを開発する。今日的な社会要請に鑑み, 季節性インフルエンザを模擬する SIR プロセスから COVID-19 感染ダイナミクスを模擬するとされる SEIR, 更には免疫喪失過程を組み入れた SEIRS プロセスを, 感染防止介入 (intervention) 方策すなわちワクチン接種, マスク装着, social-distance 確保による抑止効果ダイナミクスを適切に模擬できるモデルを開発する。

(3) MAS→CFD・交通流モデル構築

既往の CFD 成果を基盤に(1)により得られた知見を突合して, MAS→CFD・交通流モデルのプロトタイプを構築し, 数値実験を行う。

(4) 感染症リスク評価のための MAS→CFD・歩行者モデルに接続可能なプロトタイプ構築

(2)の成果を踏まえ, 統合モデルに組み込むことを前提した, 社会ネットワーク上の数理疫学モデル解析を行い, 感染防止介入方策により惹起される社会ジレンマの数理構造の素過程を明らかにする。

4. 研究成果

(1) MAS→CFD・交通流モデルの特性解析結果

CA モデルを用いた MAS の結果を時空図として図 2 に示す。 $\rho=0.1$ では車両が滞りなく流れる自由相が, $\rho=0.4$ では巨大な stop-and-go wave が発生する渋滞相が再現されている。この結果を基に, 図 2 の赤く示した区間(自由相・渋滞相 1・渋滞相 2)を走行する車両について 5.0 秒間(自由相の場合は 2.5 秒間)の CFD 解析を行った。

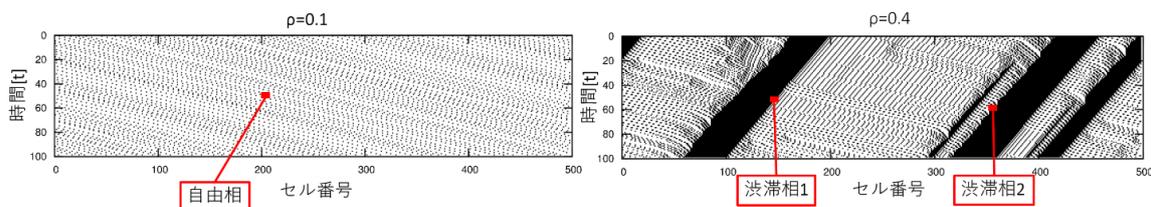


図 2: CA モデルに基づく MAS 結果(時空図)と CFD 解析対象区間

図 3 に渋滞相 1 の CFD 解析によって得られた x-z 断面($y=2.5\text{m}$)と x-y 断面($z=1.0\text{m}$)に於けるスカラー濃度分布の時間変化を示す。x-z 断面より前方車両から排出されたスカラーは車両前方・上方を沿うようにして後方へ拡散していくことが確認できる。また x-y 断面から車両後方ではスカラーの高濃度域と低濃度域が主流方向に交互に存在する事を確認できるが, これは車両後方で生じた局所的な乱流によってスパン方向速度場が影響を受けている事を示唆している。図 4 には図 3 の右下に白線で示した断面における y-z 方向速度場とスカラー濃度場を示す。x=41m の断面からは車両によって誘起された二次渦によって, スパン方向へのスカラー拡散が起こっていることが確認できる。加えて後方の x=31m においても y-z 方向に渦が形成されており, 乱流場が排気ガスの拡散に寄与している事が分かる。これらの結果より走行車両の後方から排出されるスカラーの拡散はスカラーを排出する車両周辺の流れ場に加え, 後方車両に引き起こされる乱流による影響を強く受けることが分かった。

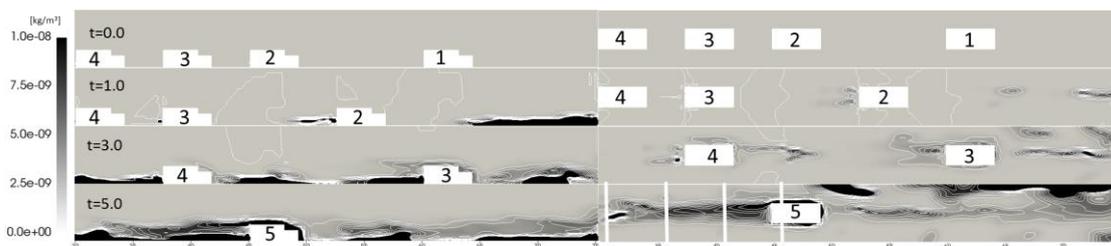


図 3: x-z 断面($y=2.5\text{m}$), x-y 断面($z=1.0\text{m}$)に於けるスカラー濃度分布の時間変化($x=30-75\text{m}$)

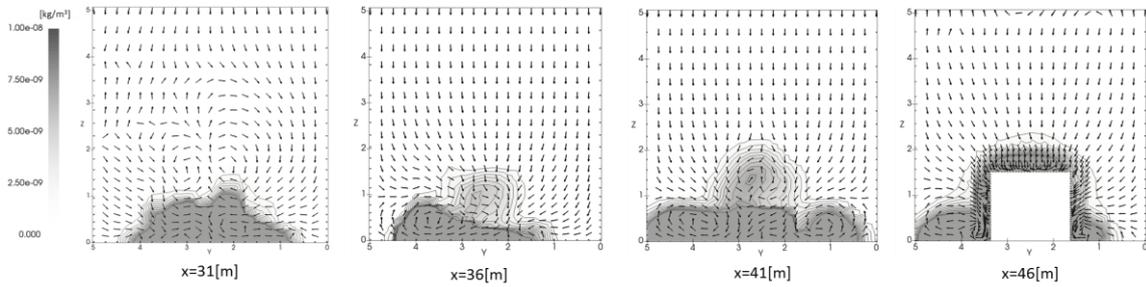


図 4:y-z 平面内速度ベクトル

(2) 感染症リスク評価のための MAS→CFD・歩行者モデルに供する数理疫学モデルの特性解析結果

図 5 に示す数理疫学モデルを新規に開発し、歩行者の物理接触を Scale-free グラフで表記した際の特性解析を行った. 図 6 は within-host プロセスにおける個々エージェントの感染ダイナミクスのステージの違い(確率的にシミュレーションにより乱数により評価されている)が、従来の within-host プロセスを考慮せず between-host 感染伝播しか考慮しないモデルに対して、ピーク感染サイズがいくかに異なるかを示している. パネル(*-i)は後者の従来モデルで、パネル(*-ii)および(*-iii)が前者の時系列である. 全てのアンサンブル時間発展を示している. Within-host プロセスの個々エージェントのダイナミクスステ

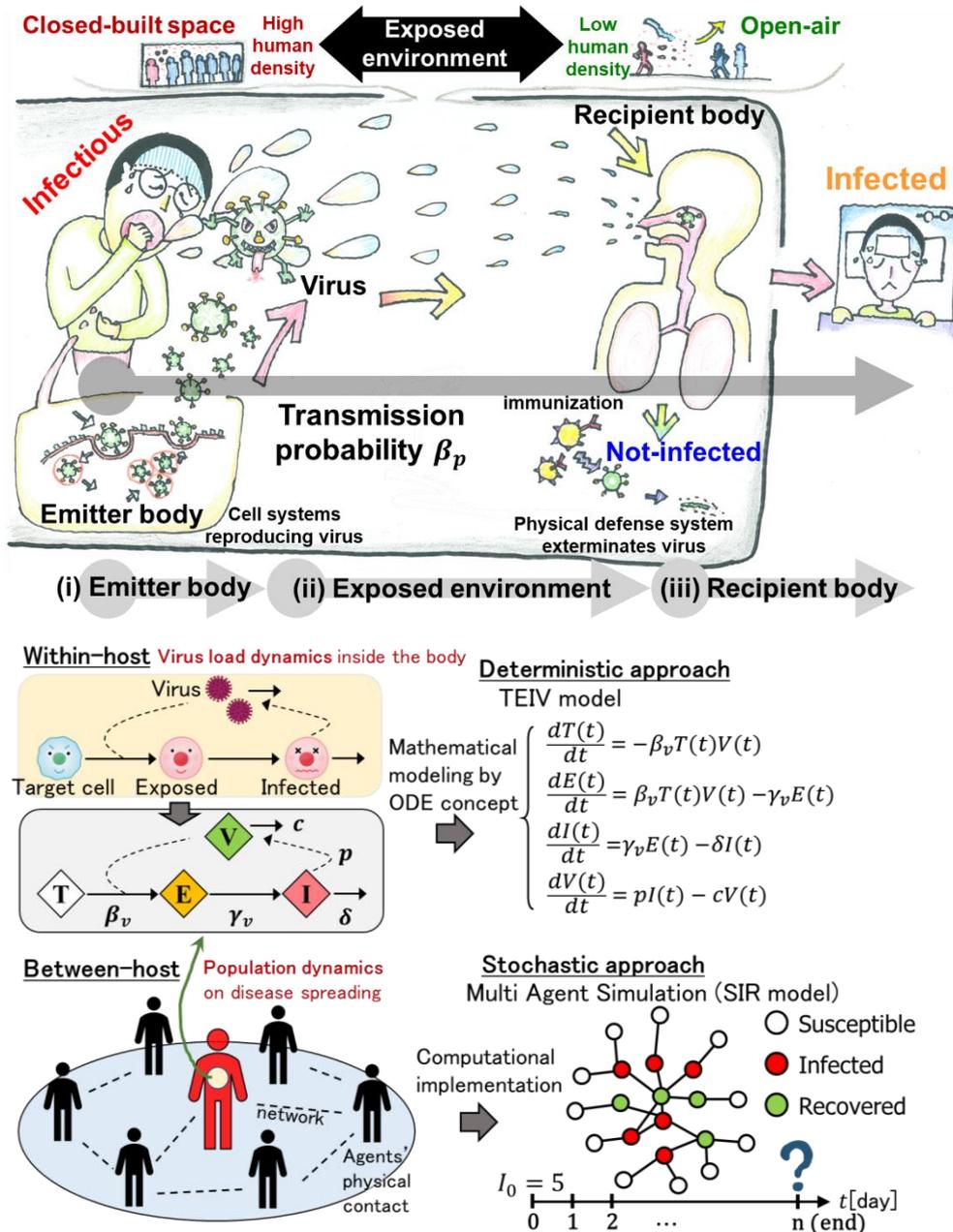


図 5 within-host プロセスと between-host プロセスを加味した感染ダイナミクスモデルの概要

ジを無視することは、大きな誤差となることが明らかである。MAS→CFD・歩行者モデルには、ここで基盤構築した疫学モデルを CFD に接続することが要請される。

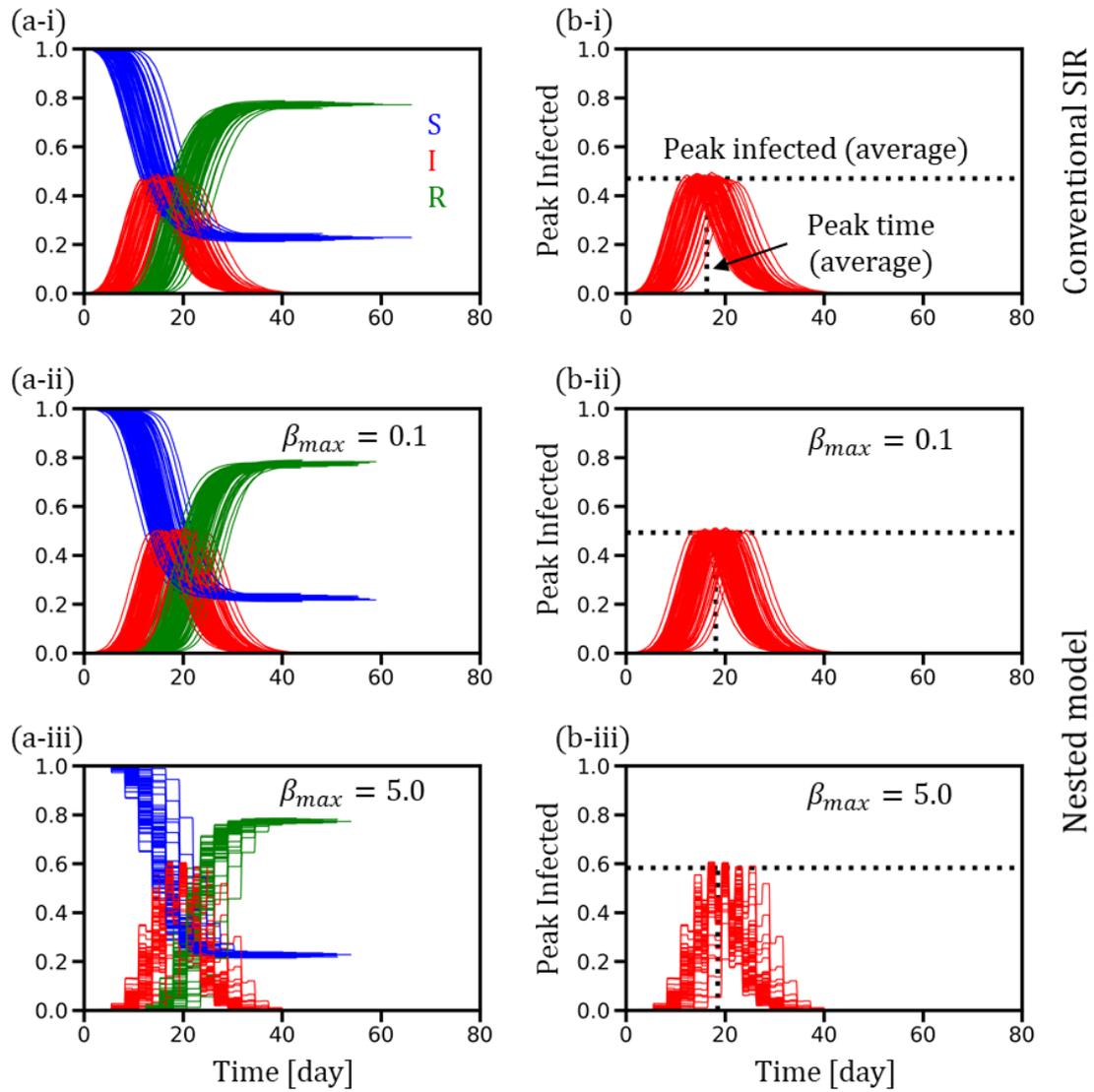


図6 within-host プロセスと between-host プロセスを加味した感染ダイナミクスモデルによるパンデミック時系列の解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirose, C., Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J.	4. 巻 196
2. 論文標題 Indoor airflow and thermal comfort in a cross-ventilated building within an urban-like block array using large-eddy simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 107811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2021.107811	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hossain, Md A., Tanimoto, J.;	4. 巻 106
2. 論文標題 The “backward-looking” effect in the continuum model considering a new backward equilibrium velocity function	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 2061-2072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11071-021-06894-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hossain, Md A., Tanimoto, J.	4. 巻 585
2. 論文標題 A microscopic traffic flow model for sharing information from a vehicle to vehicle by considering system time delay effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physica A	6. 最初と最後の頁 126437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2021.126437	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagata, K., Ikegaya, N., Tanimoto, J.	4. 巻 443
2. 論文標題 Consideration of artificial compressibility for explicit computational fluid dynamics simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110524	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hossain, Md, A., Kabir, K. M. A., Tanimoto, J.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Improved car-following model considering modified backward optimal velocity and velocity difference with backward-looking effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Mathematics and Physics	6. 最初と最後の頁 242-259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/jamp.2021.92018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanimoto, J., Futamata, M., Tanaka, M.	4. 巻 138
2. 論文標題 Automated vehicle control systems need to solve social dilemmas to be disseminated	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2020.109861	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	萩島 理 (Hagishima Aya) (60294980)	九州大学・総合理工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	池谷 直樹 (Ikegaya Naoki) (70628213)	九州大学・総合理工学研究院・准教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------