

研究助成実施報告書

助成実施年度	2016 年度（平成 28 年度）
研究課題（タイトル）	数値流体力学（CFD）とマルチエージェントシミュレーション（MAS）の融合モデルによる都市キャノピー内の交通流動のシアー生成が汚染物質拡散に及ぼす影響の定量評価に関する研究
研究者名※	谷本 潤
所属組織※	九州大学 総合理工学研究院 教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	100 万円
概要	車両ダイナミクスが都市キャノピー内の運動量，排気ガス等のスカラー拡散に及ぼす影響を高精度に予測評価するために，交通流を自己駆動多粒子系として扱うセルオートマタを基礎とするマルチエージェントシミュレーション（Multi Agent Simulation; MAS）と高精度で時間発展を追跡出来る CFD として有効な Large Eddy Simulation（LES）とを有機的に統合した数値予測プラットフォームを構築した。構築したフレームワークを適用し，周期境界系多車線系交通流を対象に，交通密度の多寡が，stop-and-go 波の生成により惹起される渋滞のローカルな排気ガス拡散性状に及ぼす影響をアニメーションとして再現することに成功した。
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

1. 研究の目的

(注) 必要なページ数をご使用ください。

車両ダイナミクスが都市キャノピー内の運動量、排気ガス等のスカラー拡散に及ぼす影響を高精度に予測評価するために、交通流を自己駆動多粒子系として扱うセルオートマタを基礎とするマルチエージェントシミュレーション (Multi Agent Simulation; MAS) と高精度で時間発展を追跡出来る CFD として有効な Large Eddy Simulation (LES) とを有機的に統合した数値予測プラットフォームを構築し、統計物理学と都市気候学との新たな融合領域を開拓する。

健康で安全な生活空間の創成という観点から都市環境の高精度予測技術への社会的関心がとみに高まり、軌一して研究トレンドも活況を呈している。アジア型メガシティでは高層建物の集積により閉鎖的な都市キャノピーが出現する一方で、急激な経済発展により都市インフラの整備が追従できず急激な車社会へと移行したため都市中心部における大渋滞が常態化している。排気ガスなどパッシブスカラーの拡散が都市キャノピーにより阻害され、加えて、渋滞による多数の車両が汚染物質ソースとして存在する都市キャノピー内の空気質が局所的に著しく悪化していることは想像に難くない。一方で自由走行する車両や車線変更は機械的シアー生成により乱れを付加するので、都市キャノピー内の流れ場に一定の乱流混合を増進させる効果が期待できるだろう。近年の都市気候学では、都市キャノピー特有の乱流生成機構に注目し、都市キャノピーが都市境界層下端で運動量・熱・スカラー輸送に及ぼす素過程の解明に向けた研究が分野横断で重層的に行われており、都市キャノピーの乱れ生成機構がこれまで参照してきた植物キャノピーのそれとは構造的に全く異なる像容を有すること等が次第に明らかにされつつある。予測評価ツールとしての CFD (Computed Fluid Dynamics) はもはや定着した技術となっており、従来の RANS モデルに比して高精度かつ流れ場の時間発展 (非定常性) を扱える Large Eddy Simulation (LES) は、研究レベルにおいて都市キャノピーを解析する尤も現実的で信頼性の高い枠組みとなっている。一方、交通流のシミュレーションは、伝統的には土木計画学を中心にマクロな流体モデルを基礎に研究が進み、都市全体の渋滞を再現するシミュレータを開発すると云った工学的要請に応じてきた。近年、マクロモデルに対するマイクロモデルであるセルオートマタ (Cellular Automaton, CA) の基本モデル (rule-184) が 1 次元の NS 方程式に相当する Burgers 方程式と数学的には等価であることが証され、加えて、計算機性能の向上、自己駆動多粒子系の非線形力学システムへの科学的興味の後押しして、統計物理学の分野で車線変更や個々の車両粒子の個性に応じた特性を柔軟に再現出来る (つまり実現象の再現性が担保された) CA モデルの開発が大きな関心と呼んでいる。

本研究提案では、現下、異なる学術分野の前線で夫々、研究が進展している 2 つの予測評価体系を有機的に統合した新たな数値予測プラットフォームを構築することを目指している。

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

車両ダイナミクスが都市キャノピー内の運動量、排気ガス等のスカラー拡散に及ぼす影響を高精度に予測評価するために、交通流を自己駆動多粒子系として扱うセルオートマタを基礎とするマルチエージェントシミュレーション (Multi Agent Simulation; MAS) と高精度で時間発展を追跡出来る CFD として有効な Large Eddy Simulation (LES) とを有機的に統合した数値予測プラットフォームを構築し、統計物理学と都市気候学との新たな融合領域を開拓する。具体的に、本研究では、現下、異なる学術分野の前線で夫々、研究が進展している 2 つの予測評価体系を有機的に統合した新たな数値予測プラットフォームを構築することを目指している。乱流効果が卓越する都市キャノピー内の流れ場をオイラー (マクロ) 的視点からモデル化している LES と交通流をラグランジュ (マイクロ) 的視点からモデル化している CA について、時間スケールの整合性を考慮しながら all-in-one の予測評価フレームを理論構成する。開発した枠組みを現実問題に適用し、都市キャノピー内の局所的空気環境悪化に関する科学的知見を蓄積する。

本研究では、都市キャノピー内外の dispersion 予測の枠組みとして LES を適用する。LES は、大径渦は解像し、subgrid スケール渦はモデル化を適用することで、乱流場の時間発展を再現する CFD である。CA モデルに関しては、申請者らが開発した Revised S-FNS Model (Kokubo, S., Tanimoto, J., & Hagishima, A. (2011). A new Cellular Automata Model including a decelerating damping effect to

reproduce Kerner's three-phase theory. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 390(4), 561-568.) を適用する。同モデルは、自己駆動多粒子系としての車両流動を(1)慣性の効果 (Slow-to-Start) , (2)ドライバーによる前方見通し効果 (Quick start) , (3)random brake をその確率特性を含めて再現するモデルである。また、同モデルは、車線変更、割り込み、割り込み阻止の spite 行為、さらにはメタ安定相から自由相に転移する臨界状態で観察される synchronized 流を再現する等々、現実の交通流動を精度よく再現することが確認されている。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

(1) LES に Revised S-FNS Model による CA をカップリングした数値予測プラットフォームの理論構成

7.5m×500 セルの周期境界 1 車線系のドメインを CA モデルの解析対象とした。LES の解析領域はこの 1 周 3.75km のうち 10 セル 75m を取り出し、2.5 もしくは 5 秒間のエピソードを解析する。CA⇒CFD カスケード処理に際して、まず CA により各車両粒子の位置、速度、加速度の時間発展を解析し、これを CFD の各時間ステップにおける解析格子データに反映させるとともに、速度と加速度により決まる炭化水素 (HC) や CO, CO₂, NO_x や SO_x などの汚染物質排出フラックスを VT-micro 法 (Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2002). Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. Journal of Transportation Engineering, 128(2), 182-190) により推定して車両後部に設定したマフラー部から 1m/s の定速で排出することで汚染物スカラーソースを考慮する。CA の時間発展は 1 秒、LES のそれは 10⁻³ もしくは 2×10⁻³ 秒であるため、カップリングのデータ引き渡しには、CA モデルの時間方向 2 データを内挿補完する処理を施す。なお、LES 側の時間発展間隔は、CA 側のそれ (1 秒) を所与の条件とし、Courant 数の制約条件を満たす、もっとも経済的な (許される計算機資源内で最も大きなドメインで最も長時間の解析が実用的時間内に終了する) 時間発展間隔とした。

表 1 に Revised S-NFS モデルを、表 2 にその解析条件を、表 3 に LES による計算条件をまとめて示す。

表 1 適用した Revised S-NFS モデル

- (1) $v_i^{(1)} = \min \{V_{max}, v_i^{(0)} + 1\}$ (if $d_i \geq D \vee v_i^{(0)} \leq v_{i+1}^{(0)}$) (加速)
- (2) $v_i^{(2)} = \min \{v_i^{(1)}, x_{i+s_i}^{(t-1)} - x_i^{(t-1)} - s_i\}$ (if $rand() \leq q$) (スロースタート)
if $rand() \leq r$ then $s_i = S$ else $s_i = 1$
- (3) $v_i^{(3)} = \min \{v_i^{(2)}, x_{i+s_i}^t - x_i^t - s_i\}$ (前方車両の見通し)
- (4) $v_i^{(4)} = \max \{0, v_i^{(3)} - 1\}$ (if $rand() < 1 - p_i$) (ランダムブレーキ)
(if $d_i > D$)
 $p_i = P_1$ (if $d_i < D$)
 $p_i = P_2$ for $v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)}$, $p_i = P_3$ for $v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(0)}$, $p_i = P_4$ for $v_i^{(0)} > v_{i+1}^{(0)}$
- (5) $v_i^{(5)} = \min \{v_i^{(4)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1\}$ (衝突回避)
- (6) $x_i^{(t+1)} = x_i^t + v_i^{(5)}$ (位置の更新)

x_i^t : 時刻 t に於ける車両 i の位置
 $v_i^{(0)}$: $x_i^t - x_i^{t-1}$ によって定義される時刻 $t-1$ に於ける $v_i^{(5)}$

(1)-(6)は漸化式表記した各ルール。

表 2 Revised S-NFS モデルの解析条件

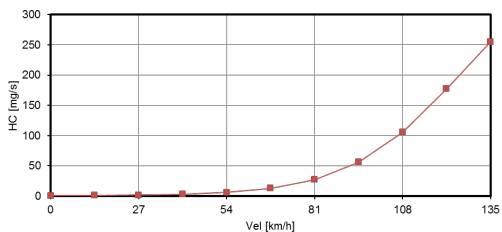
セル数	500[個]
1セルの長さ	7.5[m]
解析領域の境界条件(500~1番目のセル間の境界条件) 周期境界条件	
車両エージェントの最大速度	5セル[m/s] (37.5[m/s])
スロースタート確率q(ルール(2)に関連)	0.99
見通し確率r(ルール(2),(3)に関連)	0.99
見通し台数S(ルール(3)に関連)	2[台]
遠近判定距離D(ルール(4)に関連)	15[セル](112.5[m/s])
ブレーキ確率 p_i (ルール(4)に関連)	
p1=0.99(前方車両との車間距離が小さく、追いついている時)	
p2=0.02(前方車両との車間距離が小さく、同じ速度で走行している時)	
p3=0.01(前方車両との車間距離が小さく、速度差により離されている時)	
p4=0.001(前方車両との車間距離が大きく、速度差により離されている時)	

表3 LESによる解析条件

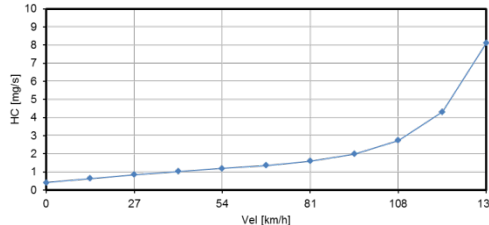
解析領域サイズ	75 (x) × 5 (y) × 5 (z) [m]
格子数	300 (x) × 20 (y) × 20 (z)
格子間隔 (解析領域全体)	0.25 (Δx) × 0.25 (Δy) × 0.25 (Δz) [m]
格子間隔 (車両周辺)	0.0625 (Δx) × 0.0625 (Δy) × 0.0625 (Δz) [m]
時間間隔	自由相1/2000[s] 渋滞相1・2 1/1000[s]
速度境界条件 上端:自由流出条件 下端:壁関数(二層モデル) スパン方向:壁関数(二層モデル) 主流方向:自由流入/流出条件 車両表面:No-slip条件 車両速度:ディリクレ条件(MASの結果を代入)	
スカラー境界条件 上端:勾配0 下端:勾配0 スパン方向:勾配0 主流方向:勾配0 車両排気口:ディリクレ条件 スカラー排出速度:1[m/s] (排出量はMASの結果を代入)	
解析領域内初期風速:0[m/s] 初期スカラー濃度:0[kg/m ³]	

図1にはVT-micro法によるHC排出フラックスを3加速度別に速度の関数として示す。図中の横軸が示す車両速度はRevised S-NFSモデルによる最高速度135km/hを離散化した5ステップに応じて取っている。加速度ゼロのパネル(b)はアイドリング時を含む等速運動における排出フラックスを意味する。

(a) acceleration; +0.9[m/s²]



(b) acceleration; 0[m/s²]



(c) acceleration; -0.9[m/s²]

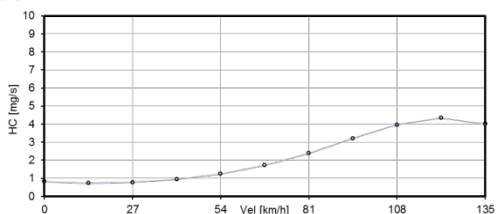


図1 VT-micro法によるHC排出フラックス ; (a)加速時, (b)等速運動時, (c)減速時.

図 2 には LES により解析する CA ドメインの一部領域を示す。

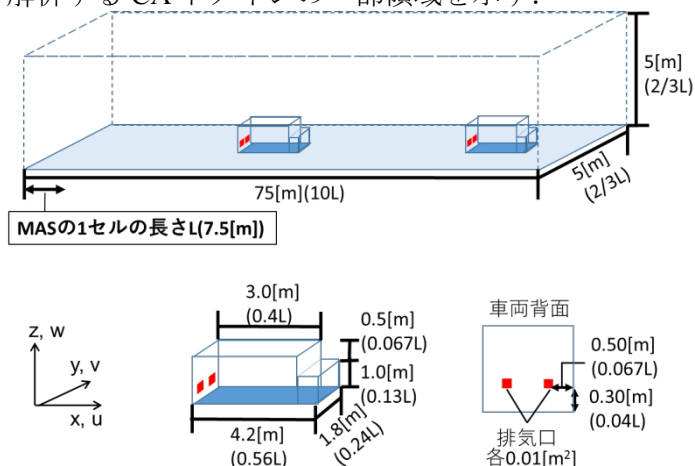


図 2 LES による解析ドメインと流体体積を排除して移動する壁の集積体として扱う車両と汚染物排出口の位置。

(2) 都市内の交通流のデテールが都市キャノピー内の局所的空気質に付与する影響の定量化

先述の理論構成したカップリングモデルにより都市キャノピー内のスカラー拡散を解析した。

図 3 は Revised S-NFS モデルによる解析結果であり、交通密度 0.1 および 0.4 の場合の時空図を示している。

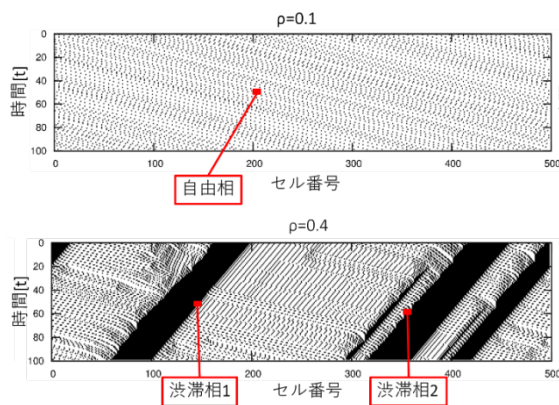


図 3 MAS による解析結果

密度 0.1 は、所謂、free-flow (自由) 相と云われる流れ場であり、全車両は最高速度で流動している。対して、密度 0.4 は、jam (渋滞) 相と云われる流れ場で、部分的に、所謂、stop-and-go wave (黒い帯状の領域 (停止した車列を意味する) が流れ方向とは逆向き (セル番号が若い方向) に推移している様子が確認できる) が発生し、渋滞が形成される直前には、synchronized 流が生起し徐々に流速が低下していく様子 (前記の黒い帯状領域が生じる直前の時間に流れ上流位置で流速が徐々に低下している様子が確認できる) が再現されている。

以下では、図中に示した 3 つの ■ で示した時空範囲 (長さ 75m, 自由相については 2.5 秒, 渋滞相については 5 秒) を抽出し、HC のスカラー拡散を LES により解析する。なお、以下では夫々を自由相 1, 渋滞相 1, 渋滞相 2 とする。渋滞相 1 は渋滞の車列先頭部分が時間とともに解消されていくエピソード, 渋滞相 2 は車列の後端部に次々に新規車両がアプローチし渋滞が流れ逆向きに伝搬していくエピソードを代表している。

図 4 は自由相 1 の速度 (スカラー速度) の(a)断面分布と(b)平面分布の時間推移を示す。また、図 5 は同様に示したスカラー濃度分布の時間推移である。最高速度で走行する車両の後流に、所謂、wake が生成され、このシアア起源の乱流生成が混合を促進するものの、マフラーからの汚染物質拡散が大きく、高濃度の領域を形成していることが再現されている。現況、計算機資源上の制約により、エピソード初期に走行車両が顕れ、過去にその場所を通過した車両からの汚染物排出は考慮していない。すなわち、コンターの濃度時空間分布は、は解析ドメインに解析時間スタートとともに出現した車両からの汚染物だけを表示しているために、両サイドは自由流境界の扱いをしているものの、時間を追うごとにドメイン内の汚染物濃度が上昇していく特性を示している。

図 6, 7 および図 8, 9 は渋滞相 1 および渋滞相 2 について図 4, 5 と同様にスカラー速度, 汚染物質濃度

の時空間分布を示した結果である。渋滞相 1 では、アイドリング状態にある車列の背後近傍に高濃度領域が形成され、渋滞の解放が先頭車両から進むにつれ、それが解消されていく様子が再現できている。また、渋滞相 2 では、渋滞車列後端に加わる車両の排出汚染物質が走行時 wake の尾を引きつつも、停止とともにその場所で徐々に高濃度となっていく様子が再現されている。

以上で報じた解析結果（アニメーション）は、本研究による MAS⇒CFD カップリング解析によりはじめて可能となった。

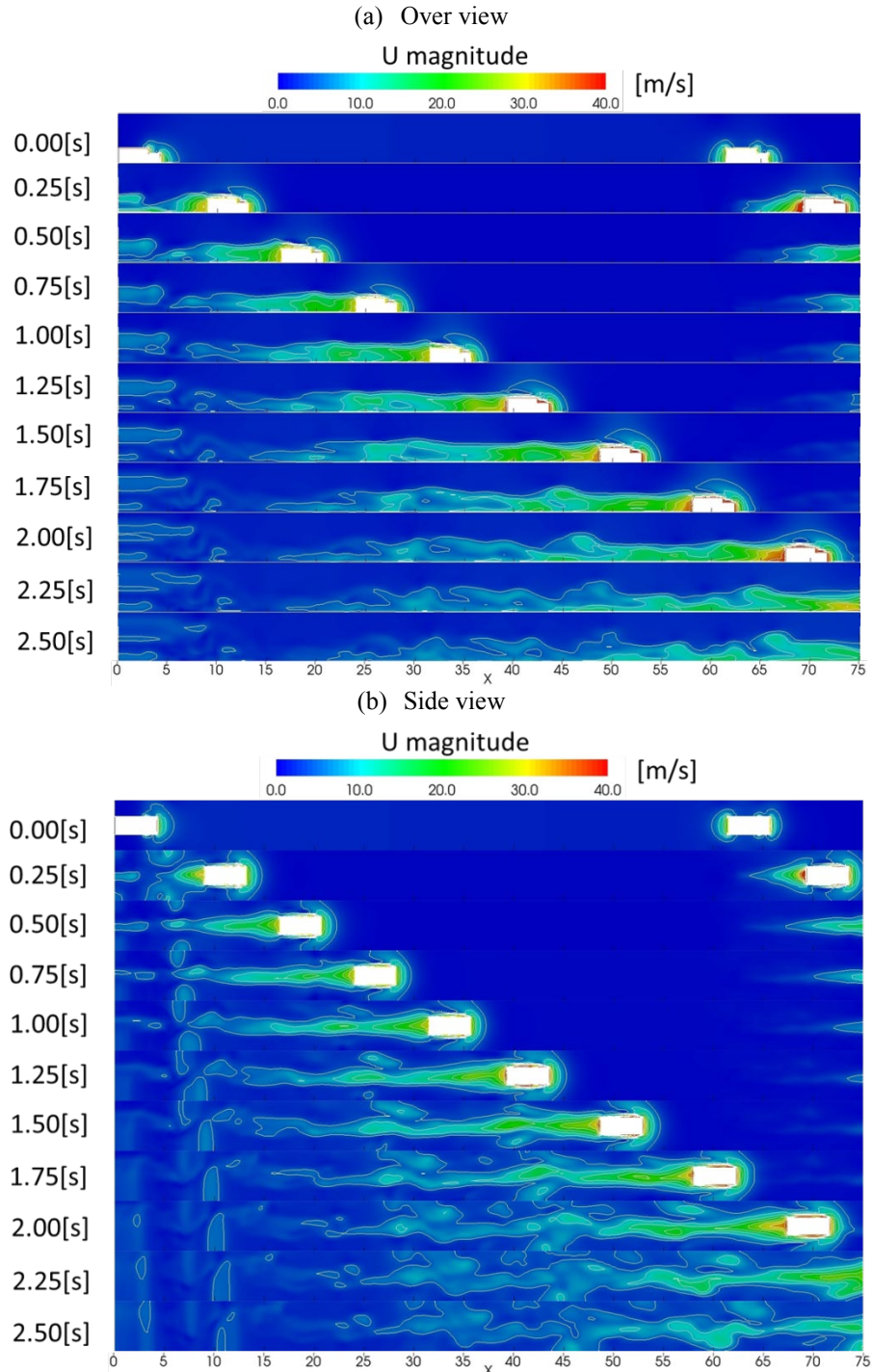
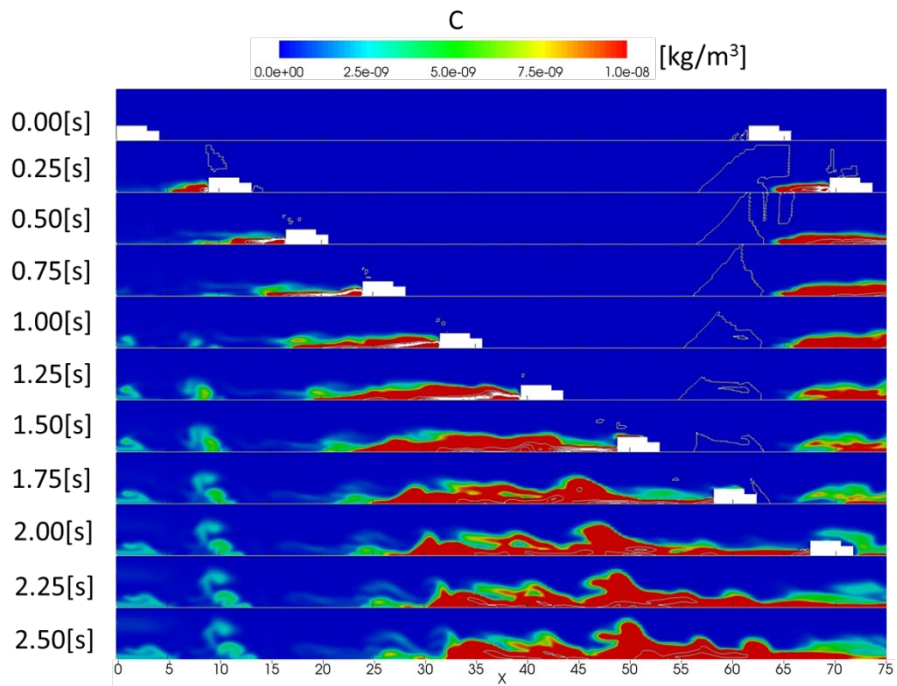


図 4 (a) x-z 断面($y=2.5\text{m}$), (b)x-y 断面($z=1.0\text{m}$)における速度場($u^2+v^2+w^2$)^{1/2} の時間推移。自由相 1。

(a) Over view



(b) Side view

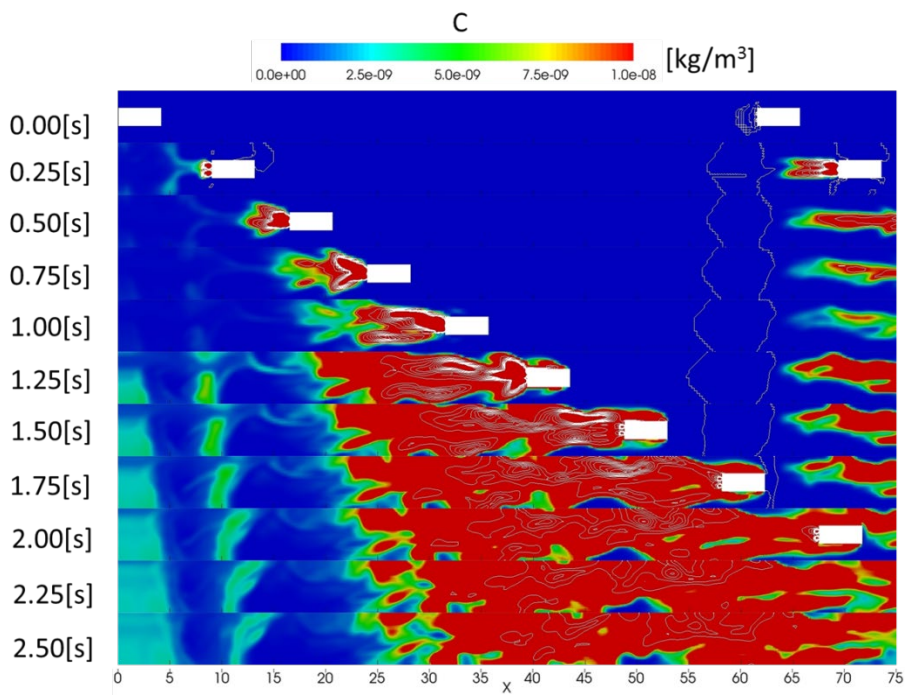


図5 図4同様に示したスカラー濃度.

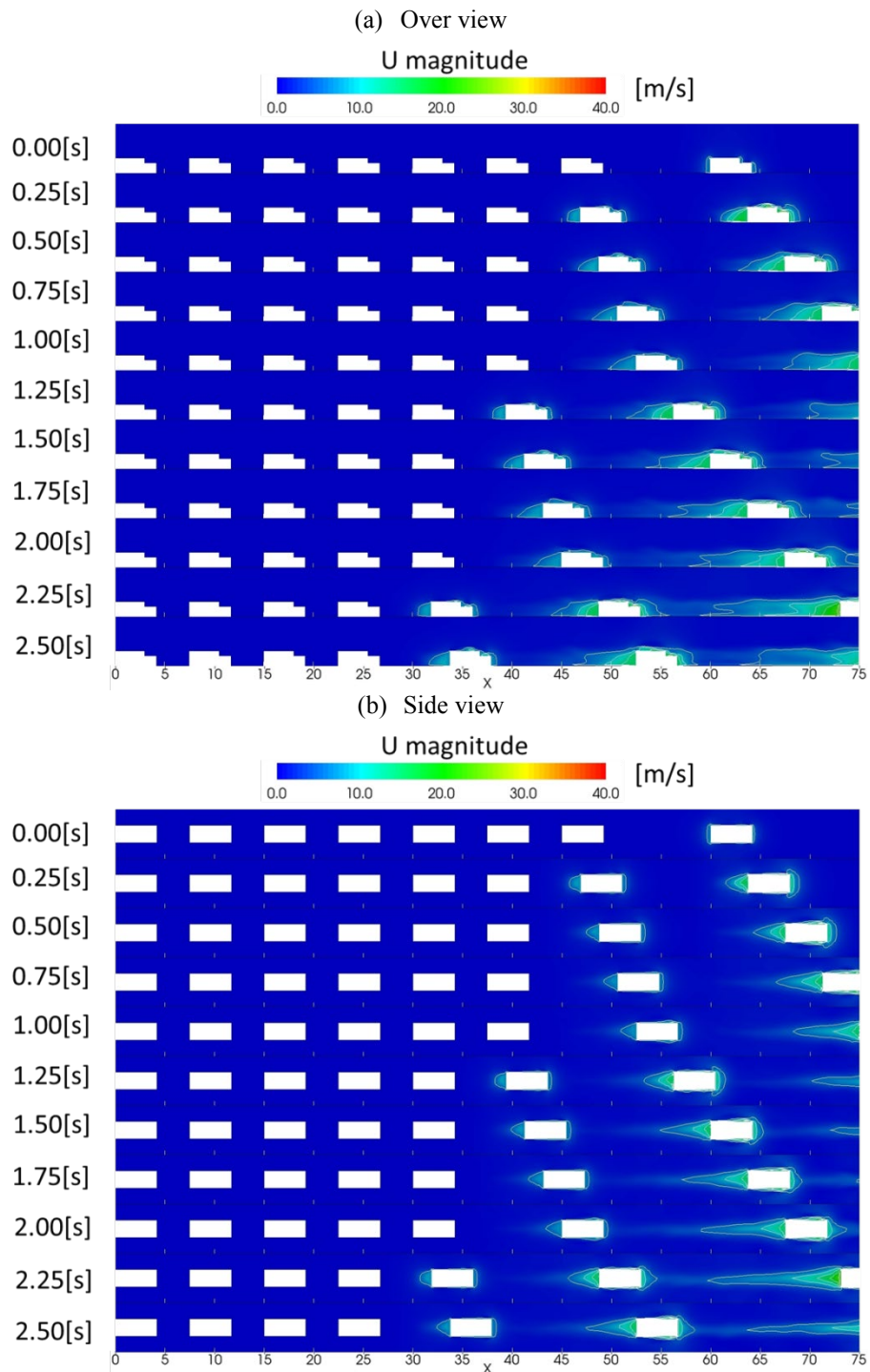
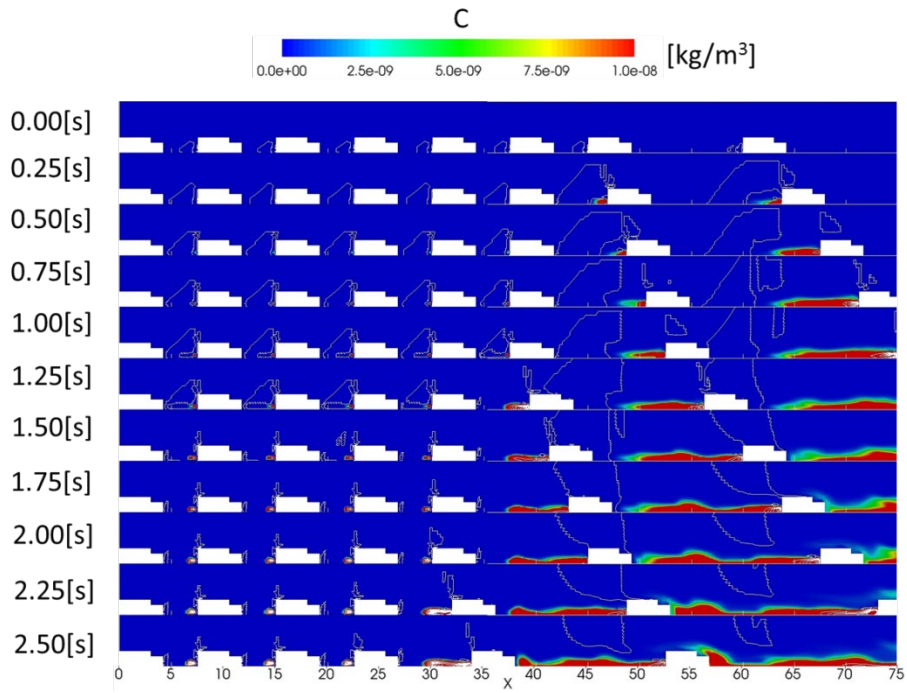


図6 (a) x-z 断面($y=2.5\text{m}$), (b)x-y 断面($z=1.0\text{m}$)における速度場 $(u^2+v^2+w^2)^{1/2}$ の時間推移. 渋滞相 1.

(a) Over view



(b) Side view

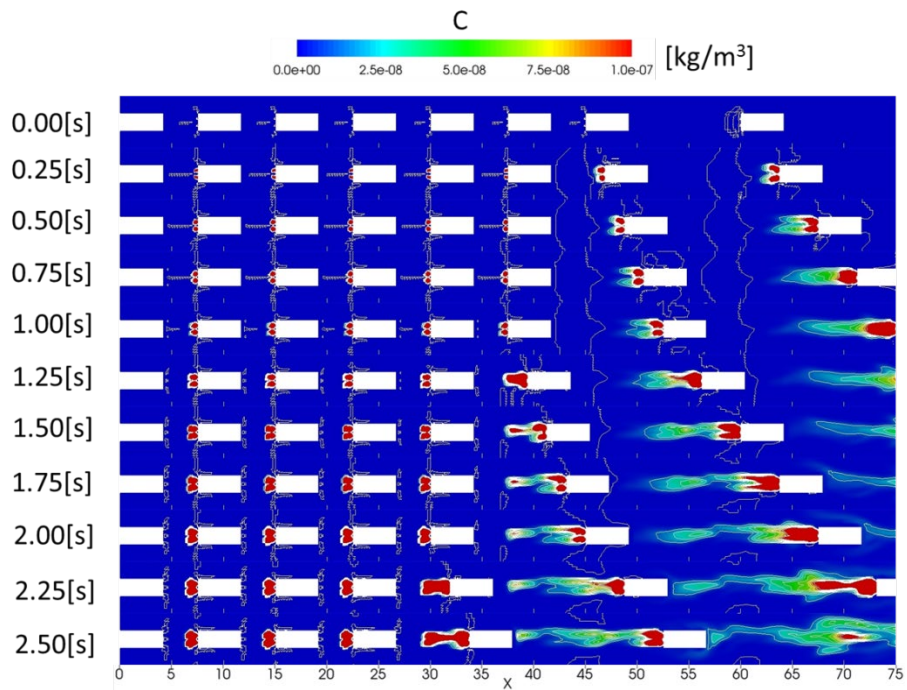


図7 図6同様に示したスカラー濃度.

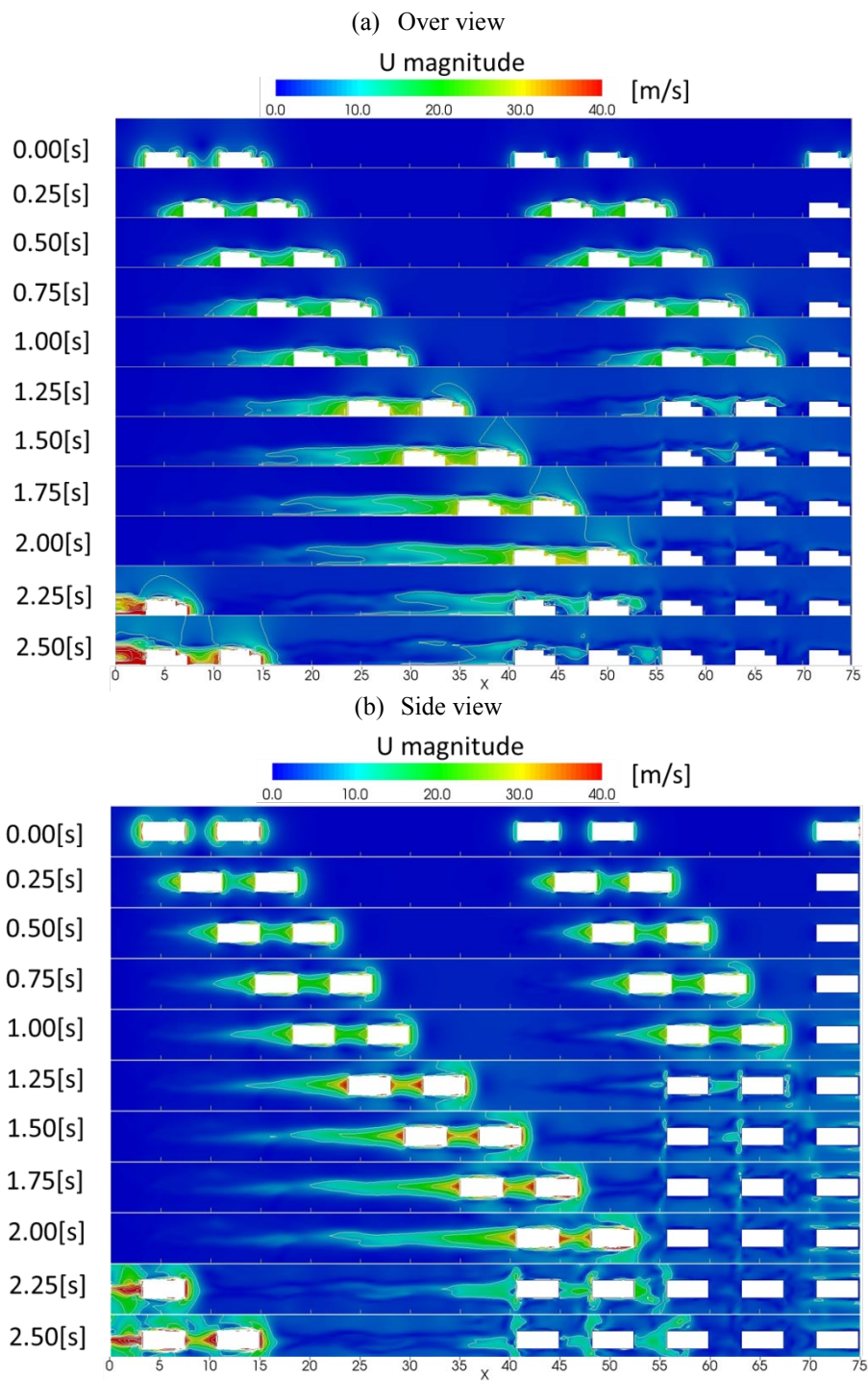


図 8 (a) x-z 断面($y=2.5\text{m}$), (b)x-y 断面($z=1.0\text{ m}$)における速度場 $(u^2+v^2+w^2)^{1/2}$ の時間推移. 渋滞相 2.

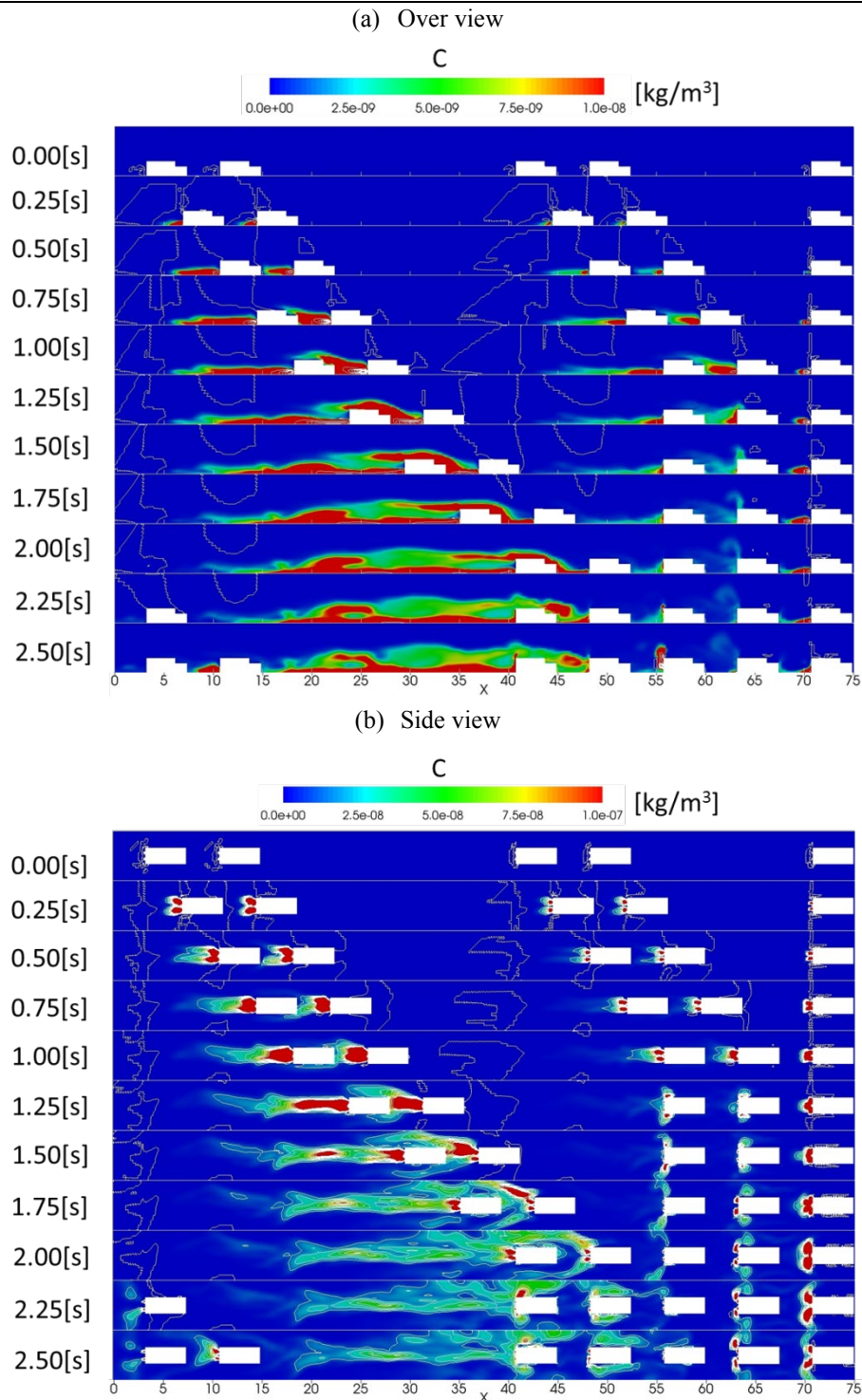


図9 図8同様に示したスカラー濃度.

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究で構築した MAS⇒LES により, LES と CA (Revised S-NFS model) のカップリングに成功した. 予測大系では LES が要求する 10^{-3} 秒オーダーの高い時間分解能が担保されることが最大の特徴であり, これにより時間発展と高空間分解能が実現され, 全体の高い精度が補償される.

本レポートでは, 都市キャノピー内での急停止, 加速など様々なダイナミクスを再現した個々の車両粒子軌跡が再現され, これにより局所的な攪拌, 対する淀みによる局所的高濃化が起きる詳細なエピソードを visual なアニメーションとして表現するポスト処理の枠組みを組み込んだ結

果の一例を示した。

今後の研究展開としては、多重車線系における車線変更による lateral 方向車両ダイナミクスによる乱流シア-生成効果の定量化、車両ダイナミクスによる乱流拡散が都市キャノピー全体の喚起効果に及ぼす影響の定量評価などが上げられる。また、本研究で開発した MAS⇒LES の枠組みは交通流解析に留まらず、満員電車や人混み中での人員流動が汚染物質（毒性ガスやウイルスに汚染された呼気）の拡散に及ぼす影響の定量評価に展開できる可能性がある。

今次の大林財団の研究助成により、都市環境の数値流体解析に MAS+CFD 連成解析という大きな扉を拓くきっかけを得ることが出来た。末尾ながら、財団に中心寄りの謝意を表すると共に、この萌芽を前記の研究展開に繋げるべく今後の努力を約したい。