

平成21年 6月22日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18510025

研究課題名（和文） 沿道汚染高解像度シミュレータの開発

研究課題名（英文） Development of a high-resolution simulator for roadside pollution

研究代表者

安田 龍介 (YASUDA Ryusuke)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50244661

研究成果の概要：沿道大気汚染予測において路上の走行車両が引き起こす風が汚染物質の拡散に及ぼす影響を明らかにするため、車両走行を陽に表現できる高解像度の数値流体力学モデルを開発した。種々の通行パターンについて非定常拡散場の計算を行った結果、走行車両によって平均流に上昇/下降流が加わることで、速度変動はこれらの2倍程度であること、初期拡散幅の大きさは横風の風速に依存すること等が明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	300,000	2,800,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学，環境影響評価・環境政策

キーワード：大気圏影響評価，沿道汚染，初期拡散，車両走行風，数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

幹線道路周囲の高濃度汚染は都市環境問題の重要課題の一つである。現時点で高濃度が頻りに観測される区域では、汚染物質の拡散促進を意図した道路形態の変更や光触媒や土壤脱硝等を利用した大気汚染浄化技術の導入など、即効性のある直接的な対応策の適用が検討されている。

沿道汚染に対する各種濃度低減策の効果を予測・評価する際、数値流体モデルが近年多く利用されている。中でも計算負荷が比較的小さい  $k-\epsilon$  型乱流モデルを組み込んだレイノルズ平均型モデル (RANS モデル) は大気

環境アセスメントにおける事実上の実用モデルとして認知されている。しかし、この種の数値流体モデルを沿道汚染シミュレーションに適用する場合、道路を走行する車両が流れ場および路上の排気ガス拡散（以下、「初期拡散」）に与える影響をどのように取り扱えばよいか明らかでない。当該道路を含む周辺領域全体の気流解析のような局所解析では、車両の走行に伴い発生する風（以下、「車両走行風」）が大きく作用すると考えられるが、既往の研究論文や調査報告では、大気拡散公式に基づく旧来の線煙源モデルと同じく車両走行レーンを一様な線煙源として扱

った上で、車両走行風は考慮していない、との断り書きがなされることが多く、車両走行風を無視したことによる影響について言及されていないこともある。これは、車両が連続的に通過する道路内の気流を測定することが困難であり、路面内の気流特性や拡散への影響についてまとまった知見がほとんどないことに原因があると思われる。したがって、沿道大気汚染の現況解析を行う際に、また、その改善策の有効性について事前に予測・評価を行う上で、まず車両走行風の特性とその拡散への影響を明らかにすることが重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、個々の車両の走行を陽に表現することが可能な沿道汚染の高解像度数値シミュレータを開発することを目的とした。さらに、このシミュレータにより、種々の交通パターンについて系統的に気流場と汚染物質拡散の数値実験を行うことにより、車両走行風が初期拡散に与える影響の基礎データを取得するとともに、得られた結果に基づきアセスメントで用いられる実用モデルへの応用について検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 現地調査と基礎データの整備

基礎資料収集のため道路形状や交通状況の実態調査を行った。また、沿道における車両走行風のオーダーを調べるため路側帯における乱流測定を試みた。さらに、堺市およびその周辺部について、レーザ計測による地表面形状の数値データを入手すると共に、大阪府下の大気環境測定局の観測データを収集・整理し、データベース化した。

### (2) 高解像度数値シミュレータの開発

数値流体モデルの一つである Large Eddy Simulation (LES) モデルを基礎とした高解像度数値シミュレータの開発を行った。LES モデルは計算負荷が大きい実用計算には不向きであるが、乱流についてモデル化された部分が少ないため非定常乱流場をリアルに表現することが可能であり、野外実験や風洞実験とよく一致した結果が得られることが知られている。本研究では、この LES モデルに移動物体周りの流れの計算機能を組み込み、車両の走行を陽的に表現することで、走行車両が誘起する道路内の乱流を直接表現するシミュレーションモデルを開発した。

また、流れと汚染物質拡散の連成計算を行うため、非定常乱流場における拡散計算モデルの開発を行った。拡散計算では負濃度を生じないスキームを用いる必要があると同時に、物質の厳密な保存性が必要とされる。移動境界値問題の計算においてこれらの要件を満足する計算手法の開発を行った。

### (3) 数値実験

開発した数値シミュレータにより車線数、車種、一般風の強さを変化させて気流と汚染物質拡散のシミュレーションを実行し、車両走行風とそれが初期拡散に与える影響の基礎的特性を調べた。

得られた知見をもとに、これまでの沿道大気環境アセスメントで行われてきた予測手法との整合性について評価を行った。LES モデルにより連続的な車両走行を陽に表現し、それが誘起する道路内の乱流と汚染物質の拡散を直接数値的に求める試みはほとんど例がない。自動車メーカー等では個々の車両の空力特性を調べるために、車両周りの流れの詳細なシミュレーションが多く行われている。しかしながら本研究で解析の対象とするのは車両が連続的に通過する道路空間における流れと拡散であり、単体車両の周りの流れを対象とした計算とは本質的に異なるものである。

### (4) 実用モデルの検討

近年提案された RANS モデルによる沿道気流計算手法を対象に、数値シミュレータで得られた結果との比較を行うことにより、沿道大気汚染濃度予測の実用モデル構築に向けた検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 車両走行風の野外計測

堺市および周辺部の道路について幾何形状、周囲建物状況の現地調査を行った。また、周囲建物による乱れが少ないこと、通過する個々の車両とそれにより生じた乱れとの対応関係が付けやすいこと等の観点からテストケースの解析対象道路を選定し、路側帯において乱流観測を実施すると共に、スピードガンによる走行速度測定とビデオ撮影を行った。対象道路は幅 3.1 m、2 車線対面通行であり、道路端から 55 cm、高さ 150 cm に超音波風速計を設置し 100 Hz でサンプリングを行った。通過車両は乗用車と大型車（ダンプカー）が主であり、車速は乗用車が 40 km/h、大型車は 20 km/h 台が多かった。

測定結果の一例として鉛直風速変動の時系列を図 1 に示す。矢印の D と C は、それぞれ大型車および乗用車の通過時点を表している。地表面のごく近くに超音波風速計を設置することができず測定高さが乗用車の車高より概ね上となるため乗用車の通過に伴う変動は識別できないが、大型車両については通過後から数秒の間に最大 1.5 m/s 程度の大きな風速変動が見られる。水平風速の変動については、バックグラウンドとなる一般風の変動との区別は困難であった。

### (2) 数値シミュレータの構築

LES モデルに基づく数値流体力学コードを

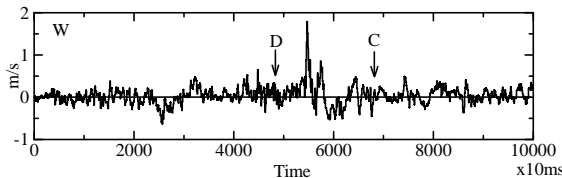


図1 車両走行風の測定結果(鉛直風速, Dは大型車, Cは乗用車の通過時点を示す)

作成した。基礎方程式は、連続の式、運動方程式、汚染物質混合比の保存式である。排気に伴う浮力の影響については初期拡散段階では小さいと見なしうることから、エネルギー方程式は含めていない。SGS (Sub-grid scale) 渦動粘性係数の算出には標準Smagorinskyモデルを使用している。汚染物質の計算におけるSGS渦拡散係数は、乱流Schmidt数を一定とし、渦動粘性係数に比例するとした。

離散化は有限体積法に基づき行った。空間の離散化については、移流項以外は2次精度中心差分法を用いた。運動方程式の移流項は4次中心差分法またはQUICKスキームの選択、汚染物質の移流計算には負濃度が生じず数値拡散の小さいWalcekスキームを採用した。時間の離散化は2次のAdams-Bashforthスキームとし、圧力解法にはSMAC法を用いた。

計算格子に不等間隔直交格子系を採用しているため車両は直方体ブロックの集合体として表現される。車両走行を陽に扱うためにSliding mesh法を採用した。これは、計算領域を走行車線領域とそれ以外の領域とに区分し、走行車線領域の計算格子を車速で移動させるものである(図2)。走行車線領域の地表面には車両と反対方向の速度を与えることで固定床を表現している。

Walcekスキームは、解の単調性を保証し負濃度の発生を防ぐため比較的複雑な計算手順で構成されているが、未だSliding mesh法に適用された例はない。本研究では、WalcekスキームをSliding meshに適用するにあたり、計算の中間段階で仮想格子を設定しコントロールボリュームの再編を行うことで、移動格子と固定格子の界面においてコントロールボリューム間の濃度フラックスの授受が厳密に行われるようにするなど、計算方式の拡張を行った(図3)。

また、本モデルでは不等間隔格子を採用しているため、Sliding meshでは解像度が異なる計算格子がすれ違うことになるため、この要因に関する感度解析も行った。その結果、格子サイズが4倍以内であれば誤差が小さく抑えられることが示された(図4)。開発した数値シミュレータは計算負荷が大きいため、領域分割法を採用しLinuxクラスターを用いた並列計算が可能なようシステム構築を行った。

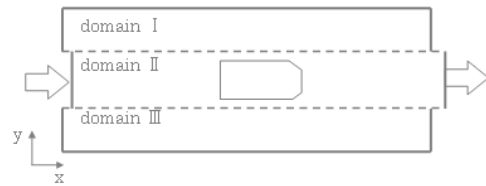


図2 Sliding mesh法の概念図

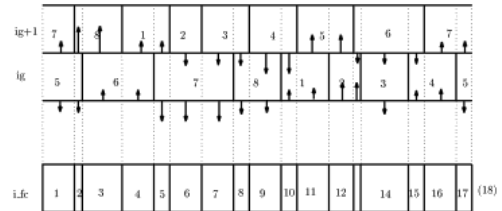


図3 中間格子を用いたコントロールボリュームの再編(上段:移動格子と固定格子, 下段:中間格子, 矢印は濃度フラックスを表す)

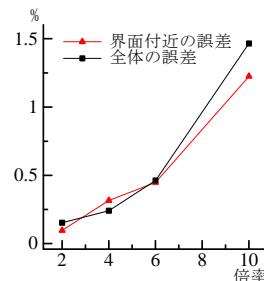


図4 隣接する格子間隔の比と誤差の関係(主流方向平均速度)

### (3) 車両走行風の数値実験

沿道汚染高解像度シミュレータの基本モデルを用い、乗用車が連続的に直線道路を片側通行あるいは対面通行する場合について、瞬間速度場と瞬間濃度場を再現し、それを時空間平均することにより、路面を含む平均場の流速・乱流強度・乱流エネルギーの各分布求めた。また、横風風速が変化した場合について汚染物質の拡散計算を行い、道路内および風下側における濃度拡散幅に与える影響を調べた。計算格子の最小幅は、車線方向、スパン方向、鉛直方向にそれぞれ0.12 m, 0.07 m, 0.05 mであり、車速( $U_c$ )は40 km/h、車両は3秒間隔で通過するものとした。図5に計算格子、図6に計算された瞬間濃度場の一例を示す。

得られた主な知見を以下に記す。

#### ①横風がない場合

片側通行の場合是一对の後曳き渦が明瞭に見られる。また、下降流が車両通過域の上部から内部にかけて存在し地表面近くでスパン方向に転向する。2車線対面通行のケースでは、各車線上の下降流に加え、センターライン上では各車線からのスパン方向流れの衝突によって上昇流が形成される。平均流のパタ

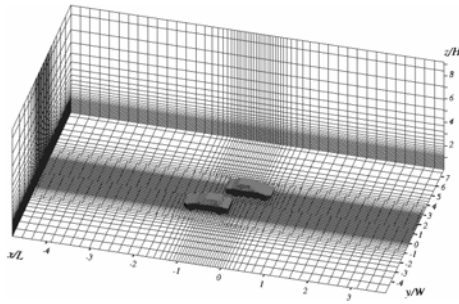


図5 計算格子と車両モデル (乗用車)

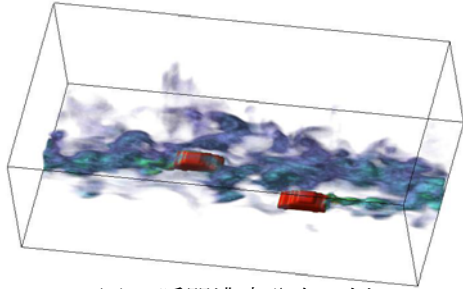


図6 瞬間濃度分布の例 (乗用車, 対面通行, 横風あり)

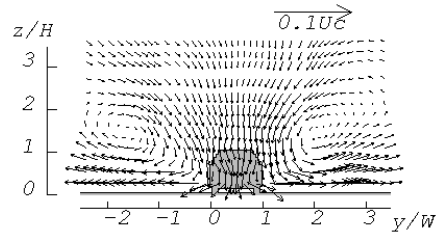
ーンは片側通行と対面通行の間で顕著に異なるが、平均流の大きさはいずれも  $0.05U_c$  未満であり比較的小さい (図7)。

乱流運動エネルギー ( $k$ ) は車両通過域内ではほぼ一様に分布しており、 $k/U_c^2$  の最大値は片側通行の場合は  $0.04$ 、対面通行の場合は  $0.05$  であるが、いずれの場合も車両通過域の外側領域で急激に減少し、通過域端より車幅1台分離れたところでは  $0.002$  にまで減少する。

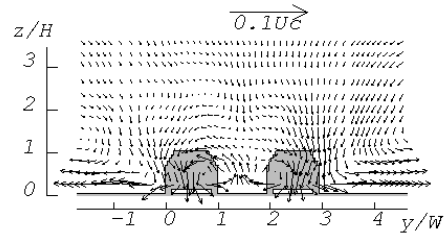
乱流強度 ( $\sigma_v/U_c$ ,  $\sigma_w/U_c$ , ただし  $\sigma_v$  と  $\sigma_w$  はそれぞれスパン方向と鉛直方向の速度標準偏差) のスパン方向プロファイル (図8) を示す。これらのプロファイルの鉛直位置 ( $z/H=0.05$  と  $0.50$ ,  $H$  は車高) はそれらの最大値が観測された高さである。 $\sigma_v$  の最大値は車両通過域の外側底面端に現れている。2車線通行の場合、対向車線を走る車両によりセンターライン近くの  $\sigma_v$  が増強されている。 $\sigma_w$  の最大値が現れる場所は通過域の中心付近である。片側通行と対面通行で乱流強度の最大値はあまり変わらず約  $0.1$  のオーダーである。このような値の変動速度 ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_w \sim 1$  m/s) は平均風速が  $5 \sim 10$  m/s のときに観測される変動に相当するので、道路内において車両走行風が汚染質拡散に及ぼす影響は重要であることが明らかになった。

## ②横風の影響

横風が存在する場合、バックグラウンドの横風に車両を回り込む流れが重畳される。そのため、片側通行の場合、横風がないときは通過域の外側に1対で存在していた後曳き渦が、通過域に1つだけとなる。また、対面通



(a) 片側通行の場合



(b) 対面通行の場合

図7 道路に垂直な断面内の平均速度ベクトル (横風なし)

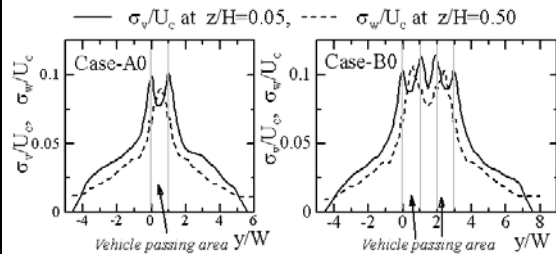


図8 スパン方向の乱流強度分布 (横風なし)

行の場合は渦の中心が横風なしの場合に比べ各通過域の風上側に移動する。

また、横風が存在する場合は、横風なしの場合に比べ通過域の風上側の乱流強度 ( $\sigma_v/U_c$ ,  $\sigma_w/U_c$ ) が顕著に減衰し、一方、風下側では僅かに増加する。通過域内の乱流強度は横風風速 ( $V_a$ ) の増加に伴い僅かに増加するが、その最大値はほぼ  $0.1$  のオーダーである。

## ③道路内の平均濃度

平均濃度については、テールパイプの極近傍を除いて高さと共にほぼ単調に減少する分布となる。既往の予測手法では煙源位置を地表面高さとして扱うことが多いが、本研究の結果より、この近似は妥当であると言える。また、横風風速が増加すると、上方への鉛直拡散や風上への水平拡散に対し水平移流が卓越するため、通過域内の平均濃度 (水平風速で正規化した値) が相対的に高くなることがわかった。これらの平均濃度分布に関する特徴は片側通行と対面通行のいずれにも共通して見られる。

道路に垂直な断面における平均濃度分布の鉛直2次モーメントを鉛直拡散幅と見なせば、テールパイプの直近を除き、横風流下距離に

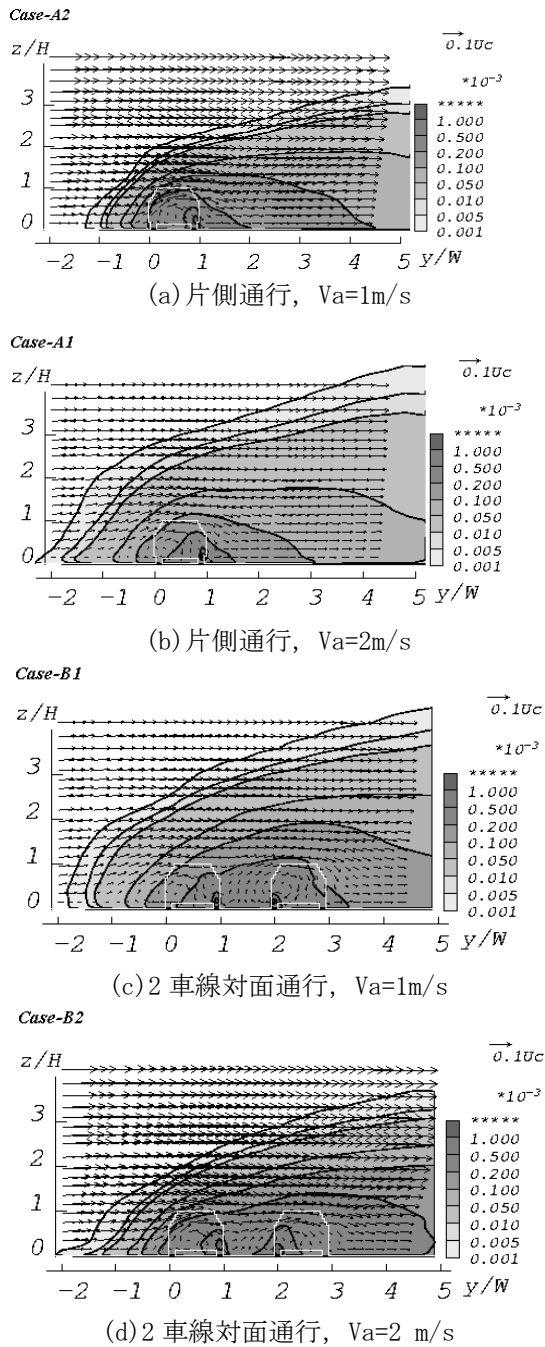


図9 道路に垂直な断面内の平均速度ベクトルと平均濃度分布

伴う鉛直拡散幅の成長率は片側通行と2車線対面通行であまり異なることがわかった(図9)。これは、2車線通行の場合、排ガスの鉛直拡散は主に風上側車線を走行する車両が誘起する乱流によって支配されることを示している。

#### ④従来手法との整合性

沿道の大気環境アセスメントでしばしば用いられている線煙源拡散モデルでは鉛直拡散パラメータにPasquill-Giffordチャートが多く用いられている。数値シミュレータで算

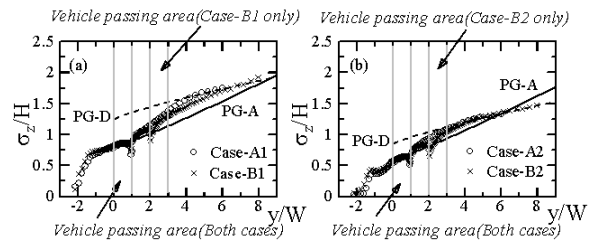


図10 鉛直拡散幅と横風風下距離の関係 (Case-A1;片側通行・Va=1m/s, -B1;対面通行・Va=1m/s, Case-A2;片側通行・Va=2m/s, -B2;対面通行・Va=2m/s,)

出した車両通過域内における鉛直拡散幅はA(強不安定)より大きいものの、横風後流域ではD(中立)の勾配に漸近していることから、横風風下方向における鉛直拡散幅の発達傾向は両者で一致することがわかった。一方、初期拡散を考慮するために設定される初期拡散幅については車高程度の固定値がよく用いられるが、本研究の計算結果では、横風風速に依存する傾向が見られた。

以上、数値シミュレータの計算により明らかになった流れ場と拡散場の特徴は、車両走行風のモデル化や実用モデルの開発を行う際の指針となると共に、ベンチマークとして利用することができる。

#### (4)実用モデルの検討

近年提案された車両走行風のパラメタリゼーションモデルをRANSモデルに付加することにより、沿道汚染高解像度シミュレータと同じ条件で計算を行った。その結果、車両走行方向に垂直な断面内の流れについては、静穏時に見られる車両通過域の上空から道路面への下降流や地表面付近における路面中央から路側への水平流といったシミュレータで見られる流れ場の特徴は再現されることがわかった(図11)。しかしながら、既往の野外観測や本研究のシミュレータの計算で見られる後曳き渦が生じないこと、主流方向の平均流速はシミュレータの結果に比べ過大評価、主

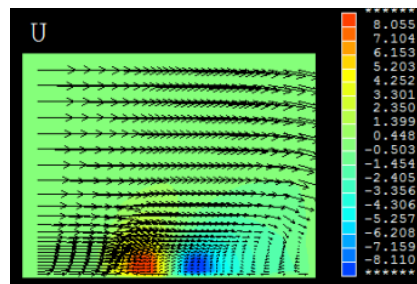


図11 道路に垂直な断面内の平均速度ベクトルと道路方向の速度分布(2車線対面通行, Va=1m/s)

流に垂直方向の平均流速は過小評価される傾向があること、対面通行の場合の乱流エネルギーのピークがシミュレータで見られる車両通過域端ではなくセンターライン上に生じること、等の差異が見られた。また、汚染質拡散については、濃度分布形状はシミュレータの結果と定性的には一致するが、鉛直拡散幅が過大評価される傾向が認められた。

#### (5) 今後の課題

車両走行風の特性把握に関しては、今後も更に多くの交通形態や車種、道路構造について高解像度シミュレータによる事例解析を行うと共に、シミュレータの精度検証のための路上における乱流計測手法の開発、本研究では扱っていない大気安定度や車体からの放熱の影響等を加味した風洞実験を実施等により、そのモデル化方法やパラメータ設定について検討を重ねていくことが望まれる。

また、実用モデル向け走行風パラメタリゼーションを用いた際に見られた問題は、準周期的な渦放出が再現できないといった  $k-\epsilon$  型乱流モデル自体の特性や車線上を車体が間欠的に通過することの表現方法に起因する可能性がある。今後これらの点を中心にパラメタリゼーションの改良を行う必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① R. Yasuda, T. Miyajima, A. Yoshida, Numerical simulation of turbulent dispersion on a two-way facing traffic road, International J. Environ. Pollut., in press, 査読有り

② R. Yasuda, T. Miyajima, A. Yoshida, Numerical simulation of turbulent dispersion on a two-way facing traffic road, Proceedings of 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purpose, Vol. 1, 192-196, 2007, 査読無し

[学会発表] (計 4 件)

① 中川文里, 安田龍介, 吉田篤正, 大阪地域における光化学大気汚染に関する数値解析. 空気調和・衛生工学会近畿支部講演会, 2009/3/18, 大阪

② R. Yasuda, T. Miyajima, A. Yoshida, Numerical simulation of turbulent dispersion on a two-way facing traffic

road, 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purpose, 2007/7/2, Cambridge, UK

③ 安田龍介, 宮嶋壮至, 吉田篤正, LESによる対面通行道路内の拡散解析, 第 47 回大気環境学会年会, 1F1336, 2006/9/19, 東京

④ 安田龍介, 宮嶋壮至, 吉田篤正, 車両走行が道路周囲の汚染質拡散に及ぼす影響, 第 16 回環境工学部門総合シンポジウム, 286-289, 2006/7/12, 東京

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

安田 龍介 (YASUDA RYUSUKE)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：50244661

##### (2) 研究分担者

吉田 篤正 (YOSHIDA ATSUMASA)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60174918