

建築・都市空間における 受動喫煙に関する研究

市街地における受動喫煙のリスク解析

新潟大学大学院自然科学研究科環境科学専攻
社会基盤・建築学コース(建築系)

指導教員 井上 悠一郎
赤林 伸一 教授

1 研究目的

2 タバコ煙のPIV測定及び喫煙する人体モデルの検討

3 市街地における受動喫煙のリスク解析

4 結論

近年我が国では、平成14年の東京都千代田区における『安全で快適な千代田区的生活環境の整備に関する条例』を皮切りとした地方自治体における路上喫煙禁止条例の制定、平成30年の東京都受動喫煙防止条例の制定、令和2年4月に全面施行される改正健康増進法による屋内での原則禁煙など、たばこの健康への影響に対する関心が高まっている。

これら条例及び法令により防止を目指している受動喫煙は、1981年に平山雄医学博士が発表した、『Non-smoking wives of heavy smokers have a higher risk of lung cancer: a study from Japan』(通称：平山論文)によって世界で最初にその可能性が示された。この論文では、喫煙者の夫を持つ非喫煙者の妻は肺癌による死亡リスクが高くなり、また夫の喫煙本数が多いほど高リスクになると報告されている。この論文が発表されて以来、受動喫煙に関する研究が各国で取り組まれ、受動喫煙は多くの疾病において罹患のリスクを上昇させるということが確実視あるいは示唆されると医学系研究では報告されている。

これら医学系研究においては、主としてコホート研究という手法がとられている。コホート研究とは、研究対象とする疾病に現時点で罹患していない被験者集団のうち、その疾病の原因として疑われる要素を有する群 (曝露群) と有さない群 (非曝露群) とを、介入※¹を行わずに一定期間に渡って追跡観察し、両群における疾病の罹患率などを比較することでその因果関係を推定する研究手法である。

※1 介入とは、治療、診断、生活指導などの健康に影響を与える行為を指す。

コホート研究の手法がとられた受動喫煙に関する医学系研究では、タバコ煙に曝露する生活によって特定の疾病に対して罹患率が上昇するなどといった健康への影響の有無とその程度を統計的・定性的に評価することが可能である。しかしながら、タバコ煙中に200種類以上含まれるとされる有害物質についてのそれぞれの恕限度※²は殆ど解明されておらず、タバコ煙にどれだけ曝露するとどれだけ健康への影響が生じるかは明らかとなっていない。従って、受動喫煙による健康被害を防止するという目的で定量的にタバコ煙への曝露を制限することは現状困難であり、たばこ規制は指定された場所のみでの喫煙許可や、指定地域において路上での喫煙を禁止するという策がとられる傾向にある。

※² 恕限度とは、人の健康などに悪影響を及ぼさない上限の値である。

日本たばこ産業株式会社の発表によると、平成30年5月現在の我が国における喫煙人口(推計値)は男女計1880万人にのぼり、喫煙率は男性27.8%女性8.7%計17.9%である。喫煙人口は年々減少しているが、未だ喫煙が一部少数によってされる行為とは言い難い。喫煙者と非喫煙者が共存可能な社会とするためには、その規制の方法については学術的な知見から十分に検討されるべきである。また非喫煙者の健康被害を防止するためにも効果的な対策が必要である。そのためにはタバコ煙の拡散性状を解析し、受動喫煙のリスクについて検討することが重要である。

現在我が国では、道路上での喫煙が全面禁止されている地域があるのに対して、屋内では喫煙室や喫煙スペースでの喫煙が認められている場合も多い。我が国の受動喫煙防止に関する条例及び法令は、屋外での喫煙に対して厳しく規制をしながら、屋内での喫煙に対しては比較的緩やかであるといえる。

環境工学的な視点で、発生する汚染質の拡散・希釈について考察すると、屋内空間に比較して巨大な屋外空間における自然風の拡散作用は極めて大きく、屋内と比較して有害物質の濃度が恕限度を超える可能性は相対的に低くなると予想される。しかしながらこのような法案が提案・可決されることは、受動喫煙に関する環境工学的な研究が乏しく、タバコ煙の拡散性状について十分な知見が蓄積させておらず、本来必要な健康被害の生じる受動喫煙のリスクについての議論、検討が満足にされなかったためだと考えられる。

本研究は、建築・都市空間において受動喫煙がおこるリスクを明らかとすることで、今後の受動喫煙防止政策の策定や喫煙所の適切な設置場所の選定などに関する基礎的な資料を整備することを目的とする。

- 1 研究目的
- 2 タバコ煙のPIV測定及び喫煙する人体モデルの検討
- 3 市街地における受動喫煙のリスク解析
- 4 結論

受動喫煙のリスク解析を行うために、RANS解析に用いる喫煙者モデルの作成が必要である。そのため呼出煙及び副流煙のPIV測定及びRANS解析に使用する喫煙者モデルの作成を行い、喫煙者モデルを対象とした呼出気流及びたばこ単体モデルからの上昇流の解析を行い、PIV測定結果と比較検討する。

呼出煙の測定は2.7[m]×4.5[m]×2.4[m]の実験室内において、喫煙者と非喫煙者を1.3[m]^{文1)}離れて向かい合わせ、実際に喫煙させて行う。測定断面は、喫煙者及び非喫煙者の正中線上とする。

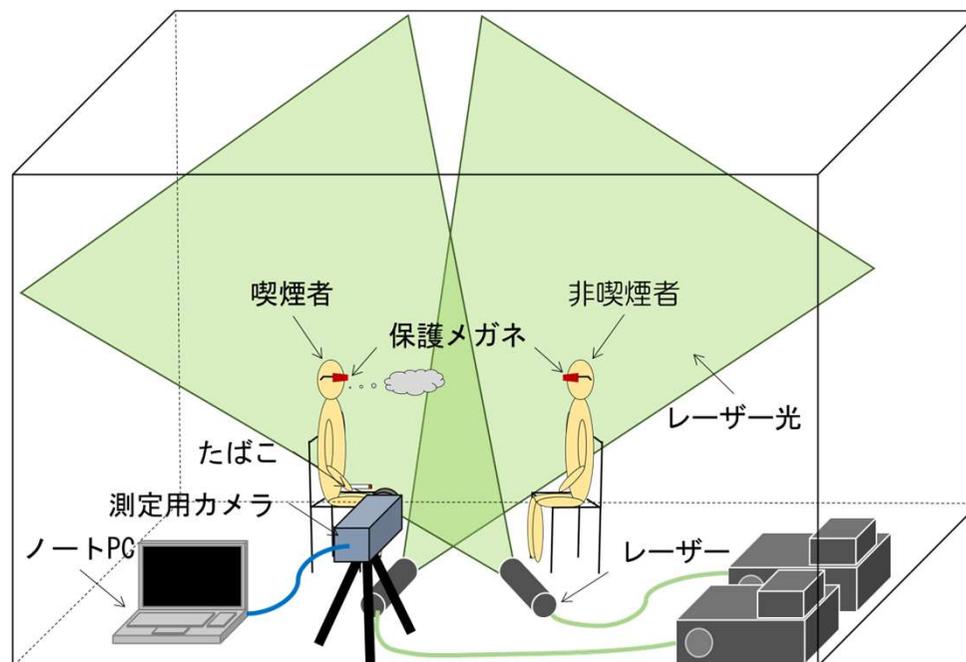


図1 呼出煙のPIV測定の概要

文1) 林ら「CFD解析による受動喫煙性状の検討」生産研究51(1) 1999年1月

副流煙の測定は、同じ実験室内において、点火したたばこを三脚に固定して行う。測定断面はたばこ中心の鉛直断面とする。なお、可視化において特にシーディングはせず、発生するタバコ煙をトレーサとして測定を行う。

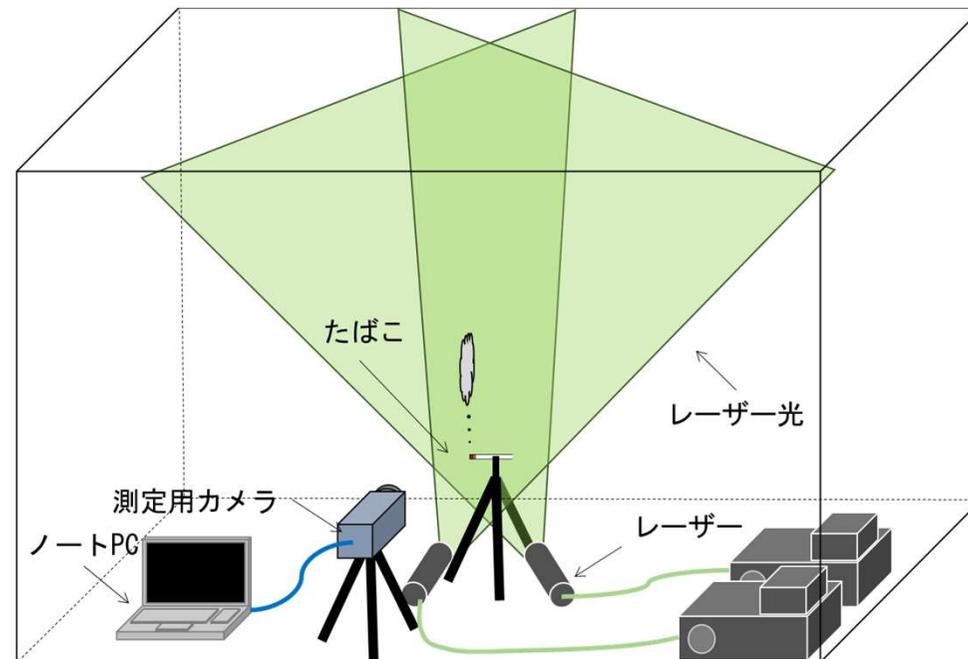


図 副流煙のPIV測定の概要

喫煙者及び非喫煙者はレーザー光が直接照射されるため、**保護メガネを着用**する。保護メガネはスペクタクル形（サイドシールドあり）の一眼形、532nmのレーザー光に対応した赤色レンズの**完全吸収型**である。なお、本実験は新潟大学倫理委員会の承認を得ている（承認番号：2019-0039）。

表 1 実験機器の概要

	呼出煙	副流煙
測定断面	鉛直断面	
画像サイズ[pixel]	1024×1024	
キャリブレーション値 [mm/pixel]	1.19	1.47
測定対象領域[mm]	1200×1200	1500×1500
測定時間[s]	16	30
測定間隔[ms]([fps])	8 (125)	
検査領域[pixel]	32×32	20×20
探査領域[pixel]	±20	±10

表 2 PIV測定パラメータ

Camera	ハイスピードカメラ	Photron FASTCAM SA3
Laser	DPGL-3W	LD励起Ld:YAG/YVO4レーザー 波長:532[nm] 出力:3[W]×2台
SoftWare	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver.3.3.8
	PIV解析	Flow-Expert ver.1.2.13.0

人体モデルは我が国の標準的な成人男性を想定する。体表面温度は $33.7[^\circ\text{C}]$ ^{文2)}、対流熱伝達率は $3[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ^{文2)}とする。たばこは右手で腰の高さ($z=0.9[\text{m}]$)に保持している状態^{※3}とする。

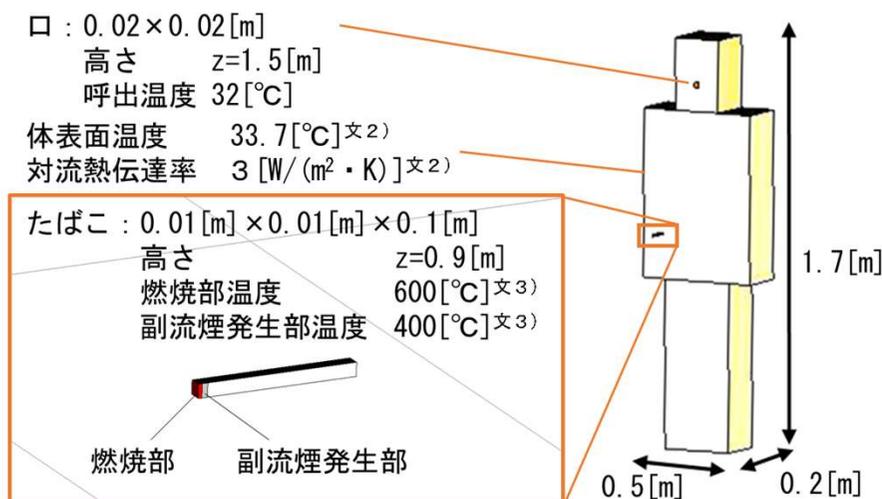


図2 喫煙者モデルの概要

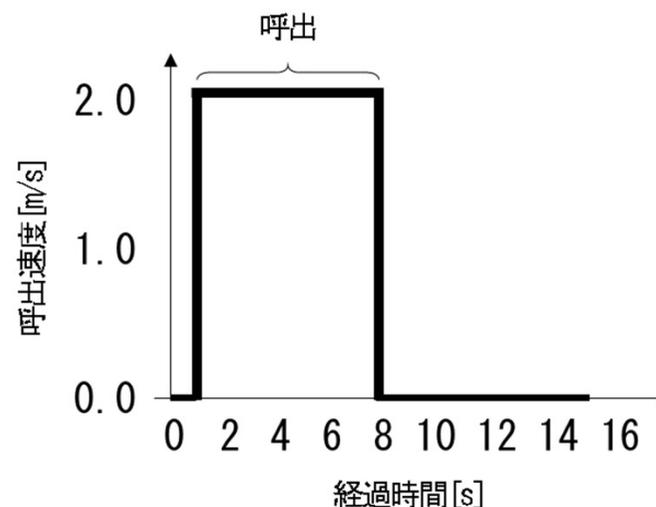


図3 呼出の発生スケジュール

文2) 曾ら「人体表面の対流熱伝達率に関するCFD解析」第8回数値流体力学シンポジウム 1994年12月

※3 喫煙者の前方 $0.1[\text{m}]$ 、身体中心より右 $0.1[\text{m}]$ 、地上 $0.9[\text{m}]$ にたばこを配置する。

また、呼出煙の発生源となる口を高さ $z=1.5$ [m]、正中線上に配置する。呼出温度は 32 [°C]、たばこ単体モデルの燃焼部温度は 600 [°C]^{文3)}、副流煙発生部温度は 400 [°C]^{文3)}とする。

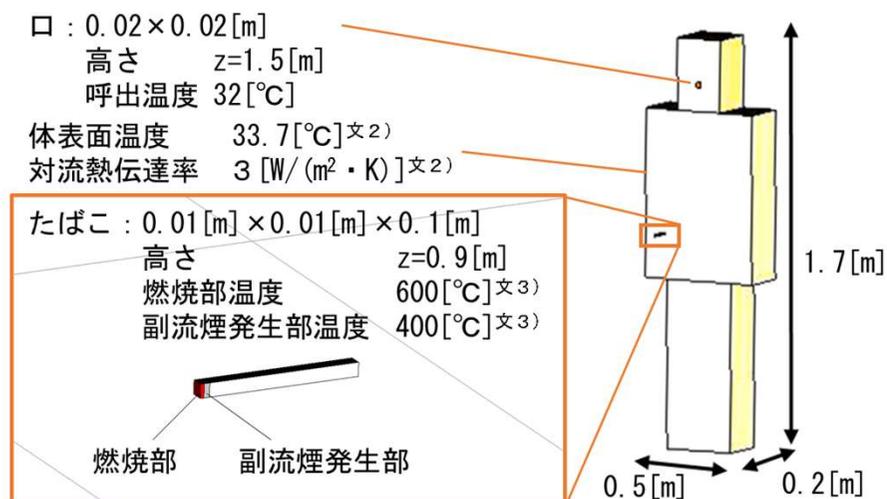


図2 喫煙者モデルの概要

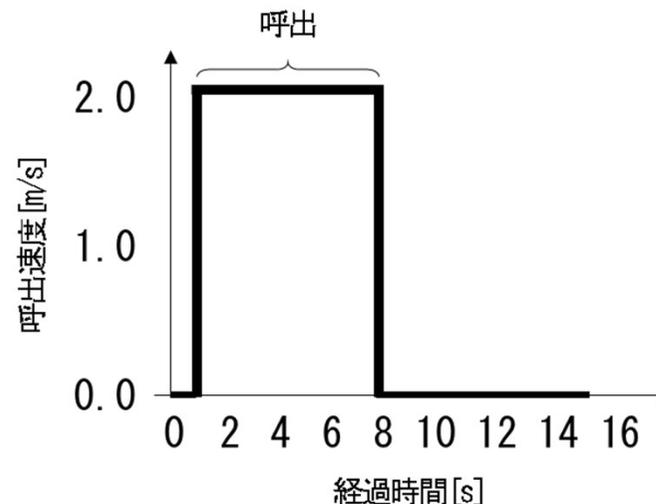


図3 呼出の発生スケジュール

文3) 大久保千代次「受動喫煙の物理化学」公衆衛生誌41(2) 1992年

RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM Ver. 13を使用する。解析領域は呼出解析モデルで5 [m] × 5 [m] × 5 [m]、たばこ上昇流解析モデルで2.5 [m] × 2.5 [m] × 2.5 [m]とし、流入境界条件は0.01 [m/s]とする。また、雰囲気気温度は実験時の室温に合わせ25 [°C]とする。

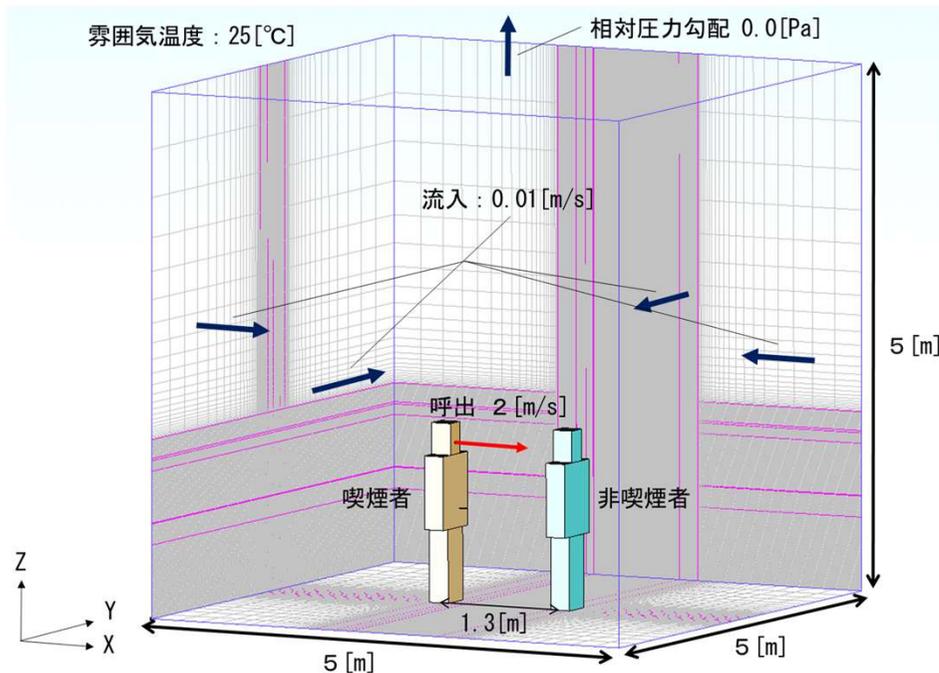


図4 呼出気流解析の概要

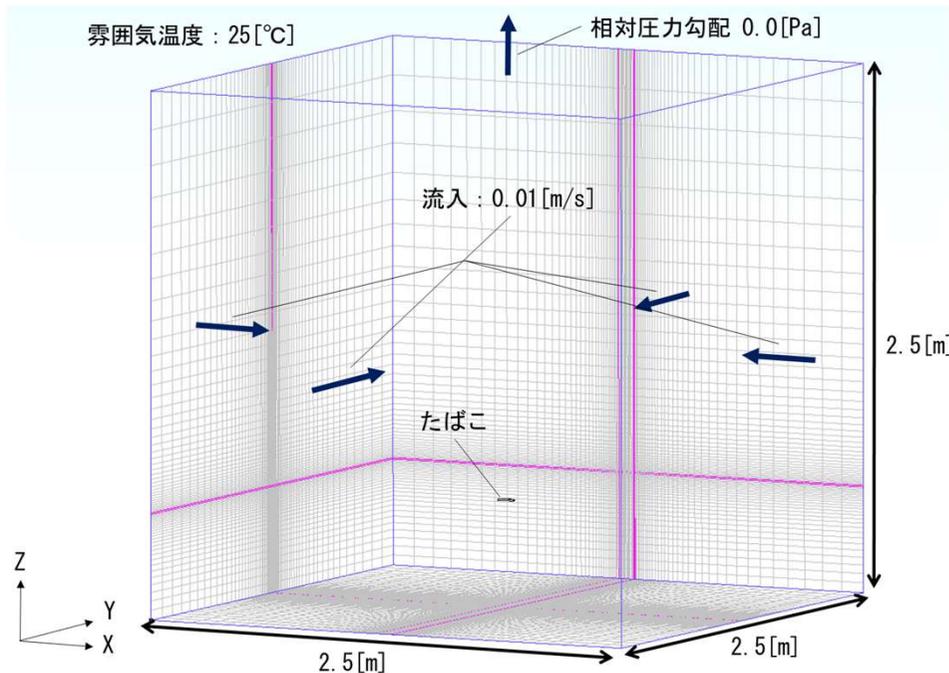


図5 たばこによる上昇流モデルの概要

発生した呼出煙は、大きく乱れながら緩やかに上昇し、非喫煙者頭部付近に到達する。非喫煙者の頭部付近に広く拡散し、一部呼吸域付近への到達も見られる。

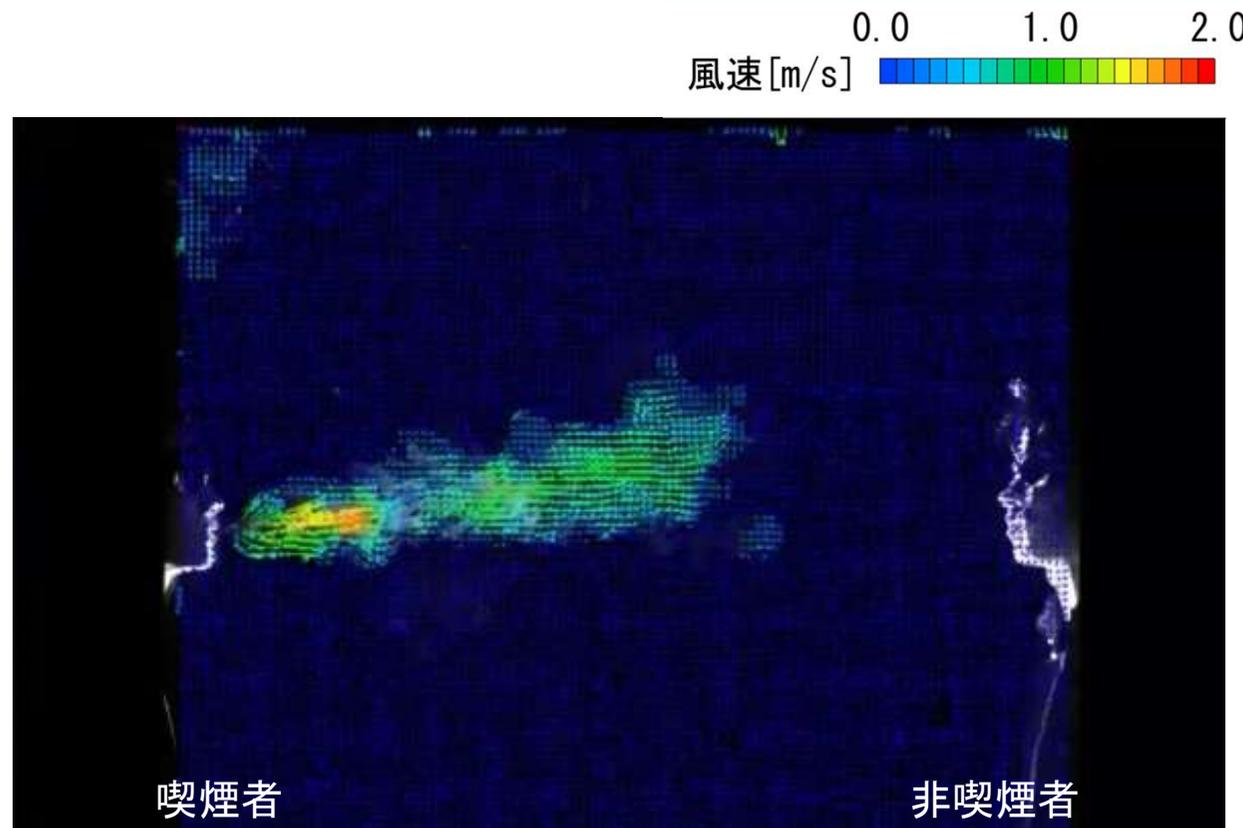


図 呼出煙のPIV測定結果

発生した呼出気流は、PIV測定と比較して乱れが少なく、やや速く上昇し、非喫煙者の頭上へと流れる。非喫煙者付近への拡散は見られない。

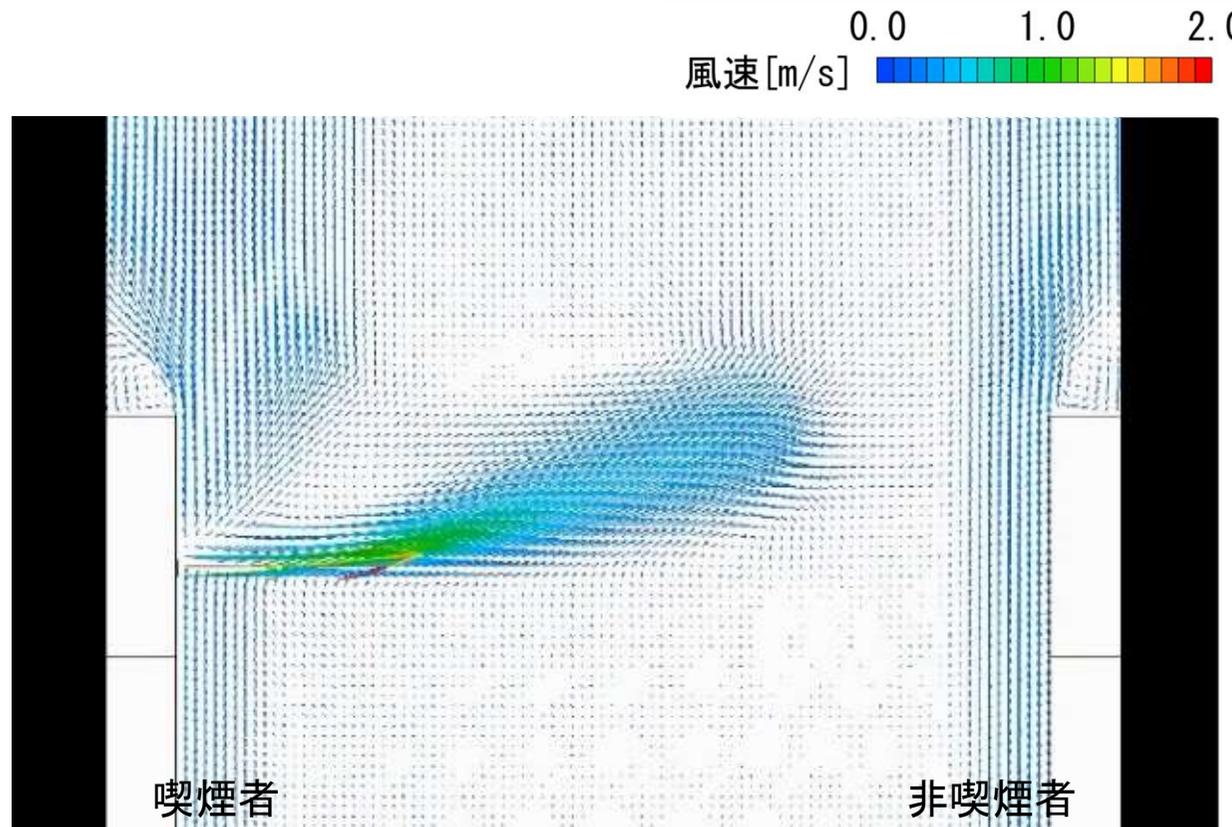


図 呼出のRANS解析結果

副流煙の流速は、煙発生部より約20[cm]上部で最大の約0.35[m/s]となる。煙の発生直後はほぼ直上へ上昇するが、煙発生部より約40[cm]上部で気流に乱れが生じる。

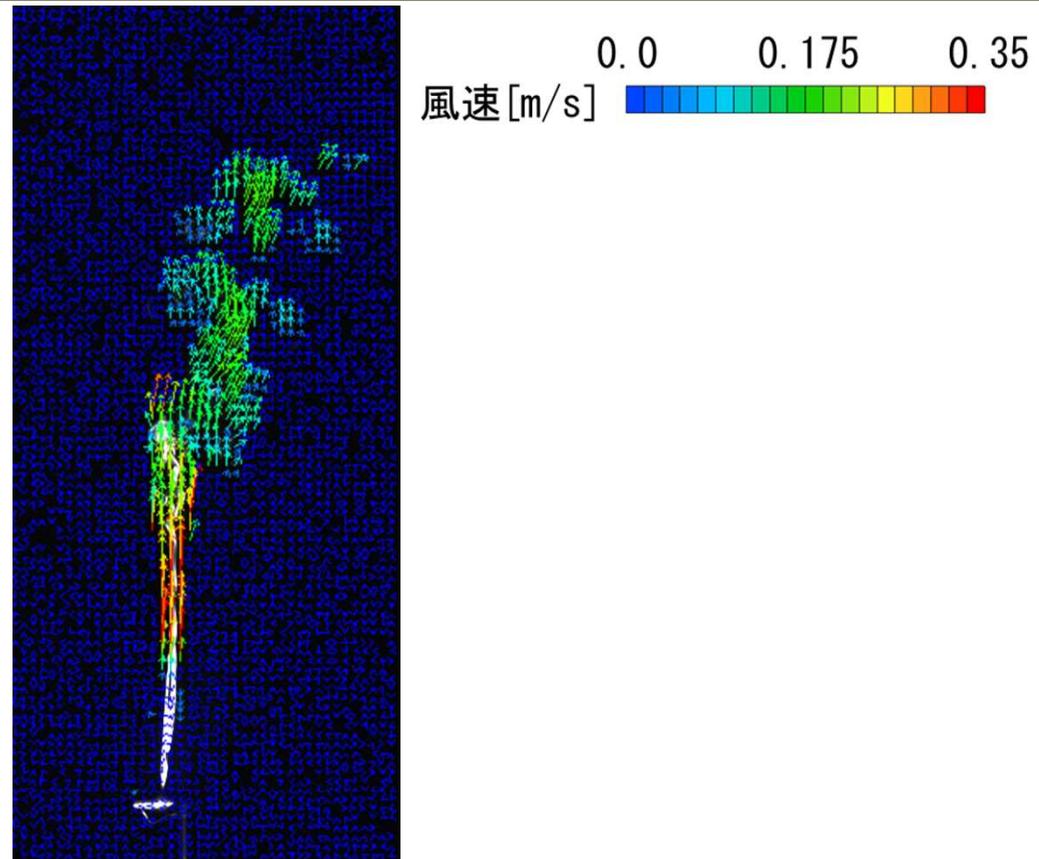


図7 副流煙のPIV測定結果

たばこ単体モデルによる上昇流の流速は、煙発生部より約20[cm]上部で最大の約0.35[m/s]となる。気流は大きく乱れることはなく、ほぼ直上へ上昇する。

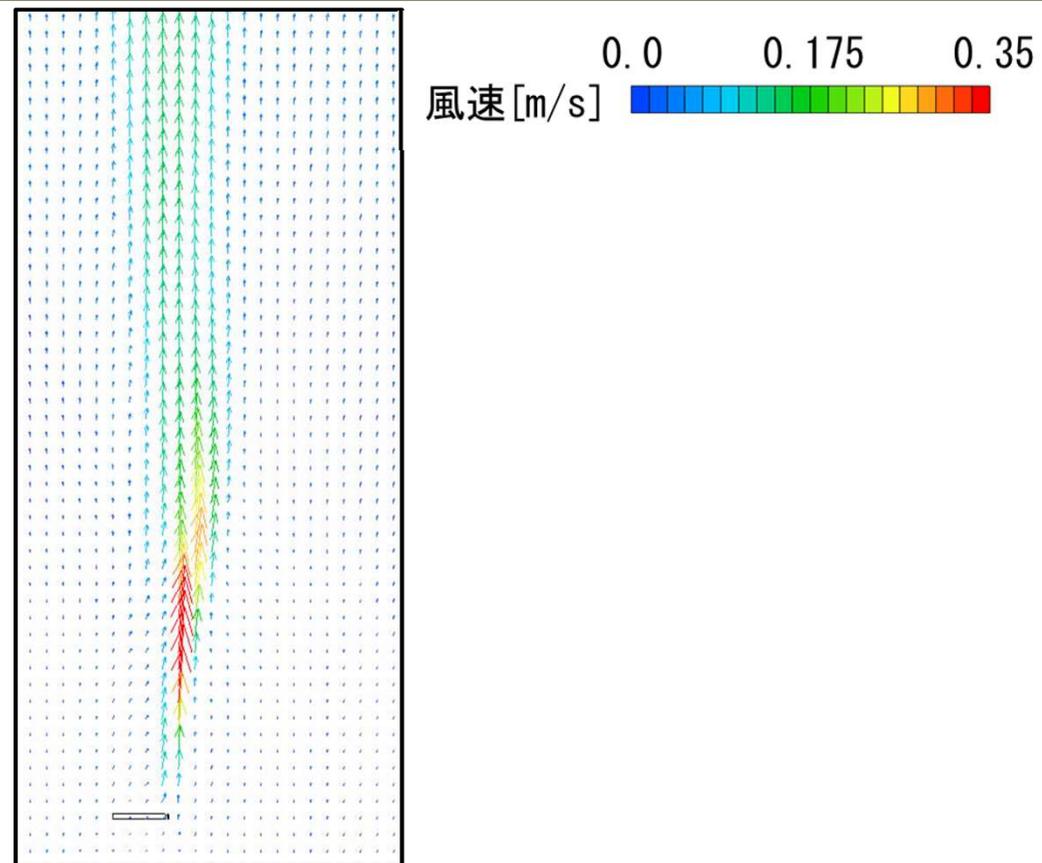
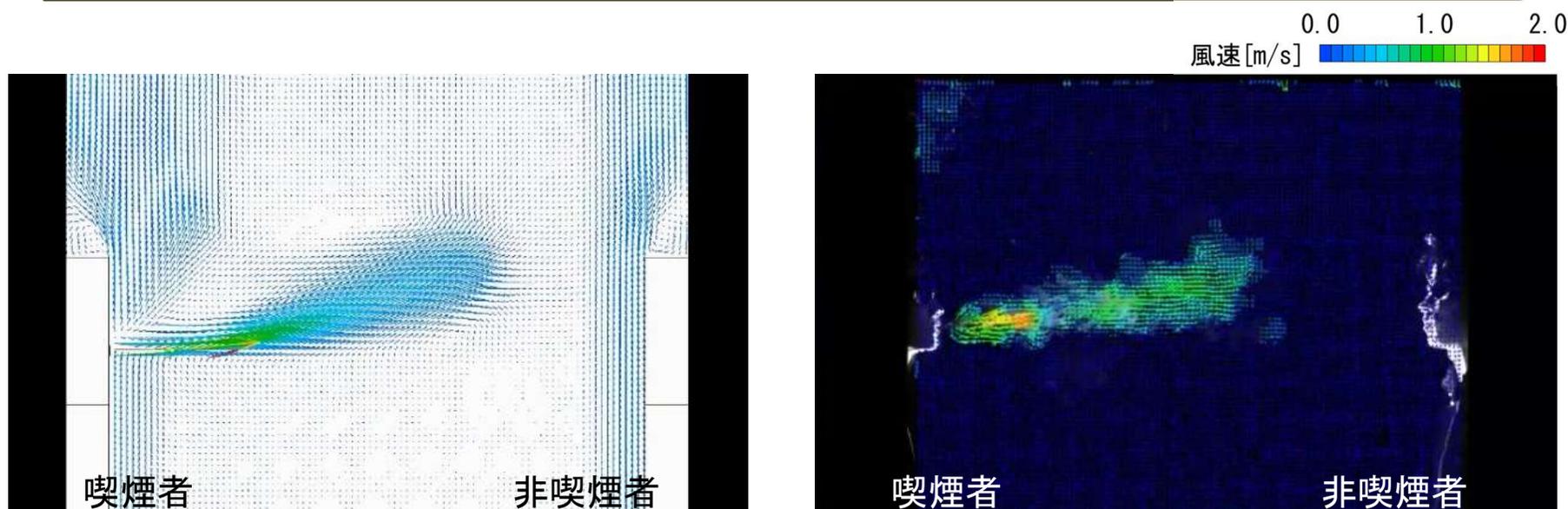


図9 たばこ単体モデルによる上昇流の解析結果

RANS解析によって、呼出気流、たばこによる上昇流ともに概ね実験結果を再現しているが、実験結果と比較すると乱れが小さくなる傾向にある。気流の乱れによる拡散作用が少なくなること、RANS解析では実際と比較して、汚染質濃度が恕限度を超える範囲の最大到達距離が過大評価される可能性がある。



(a) RANS解析結果

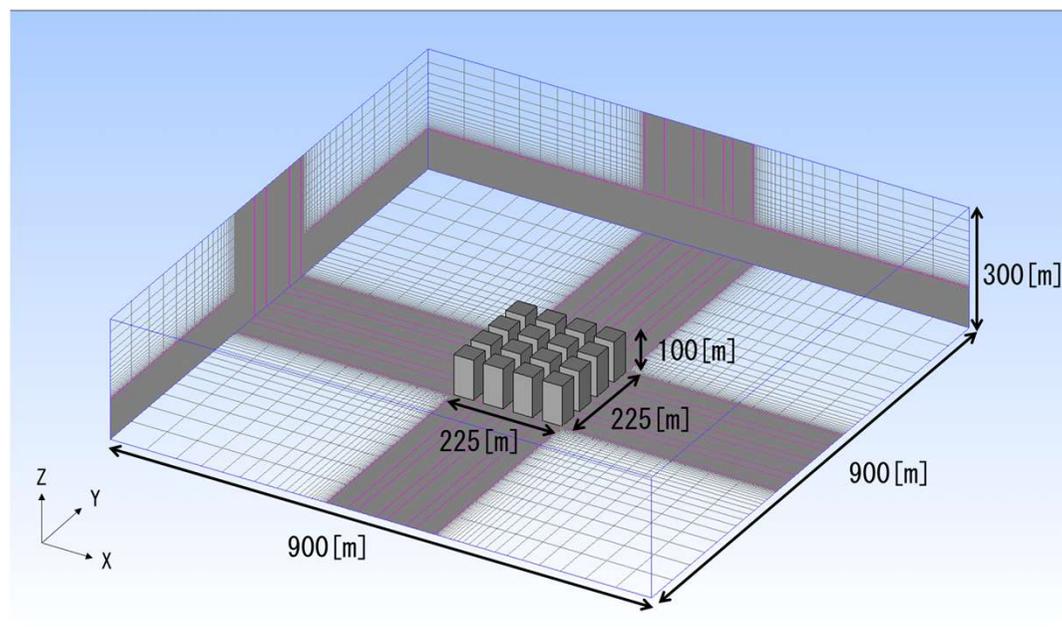
(b) PIV測定結果

呼出のRANS解析結果とPIV測定結果

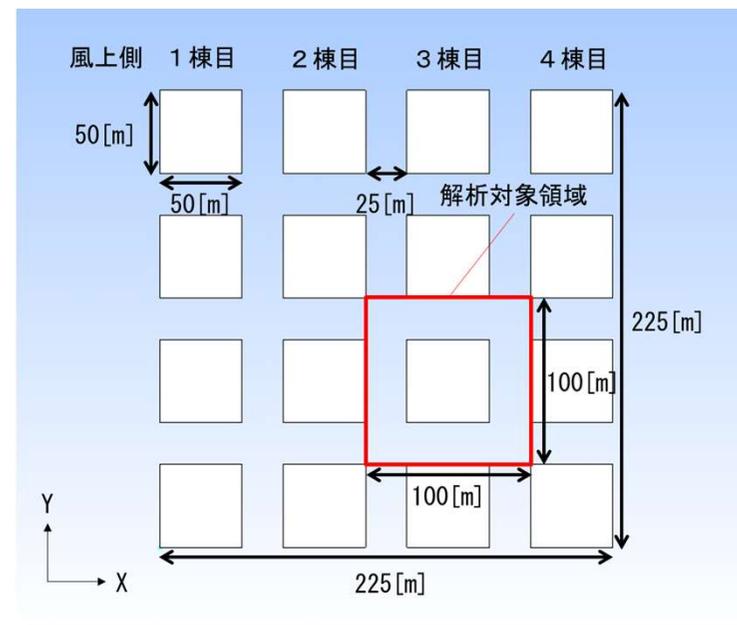
- 1 研究目的
- 2 タバコ煙のPIV測定及び喫煙する人体モデルの検討
- 3 市街地における受動喫煙のリスク解析
- 4 結論

作成した喫煙者モデルを用いて、市街地の路上における受動喫煙のリスク解析を行う。始めに、市街地モデルを対象とした気流分布の解析を行う。次に市街地モデルで解析した気流分布を対象領域の流速ベクトルとして与え、対象領域内の汚染質の濃度分布の解析を行う。また同時に自動車排ガスによる汚染質の濃度分布についても解析を行い、喫煙時によって生じる汚染質濃度分布との相対的な比較を行う。

市街地モデルは、 $50\text{ [m]} \times 50\text{ [m]} \times 100\text{ [m]}$ の建物を 25 [m] 間隔で 4×4 棟配置する。



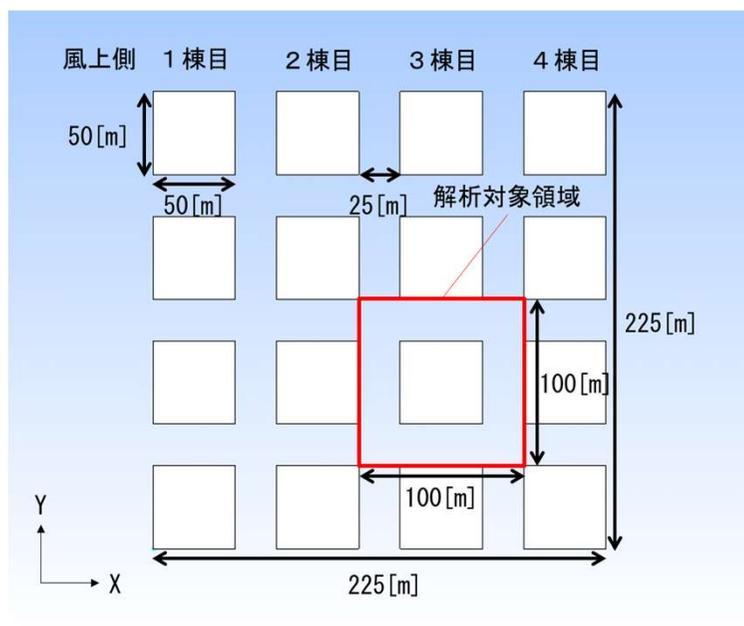
(a) 解析領域全体のパース



(b) 市街地全体の平面

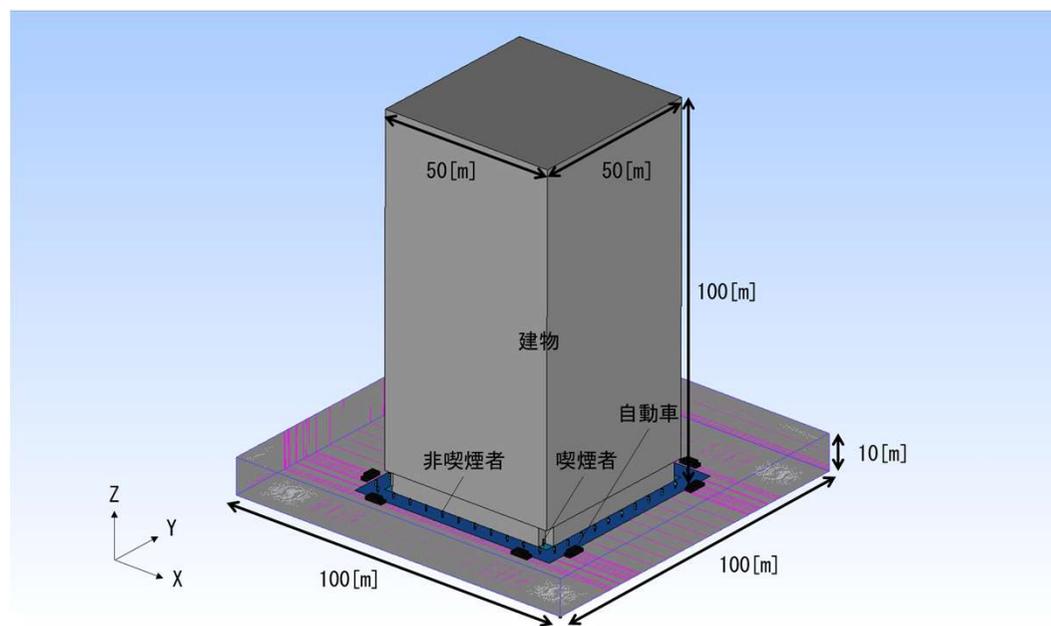
図10 市街地モデルの概要

市街地モデルの風上側から3棟目の建物とその周辺の道路を含む100[m] × 100[m] × 10[m]を解析対象領域とする。



(b) 市街地全体の平面

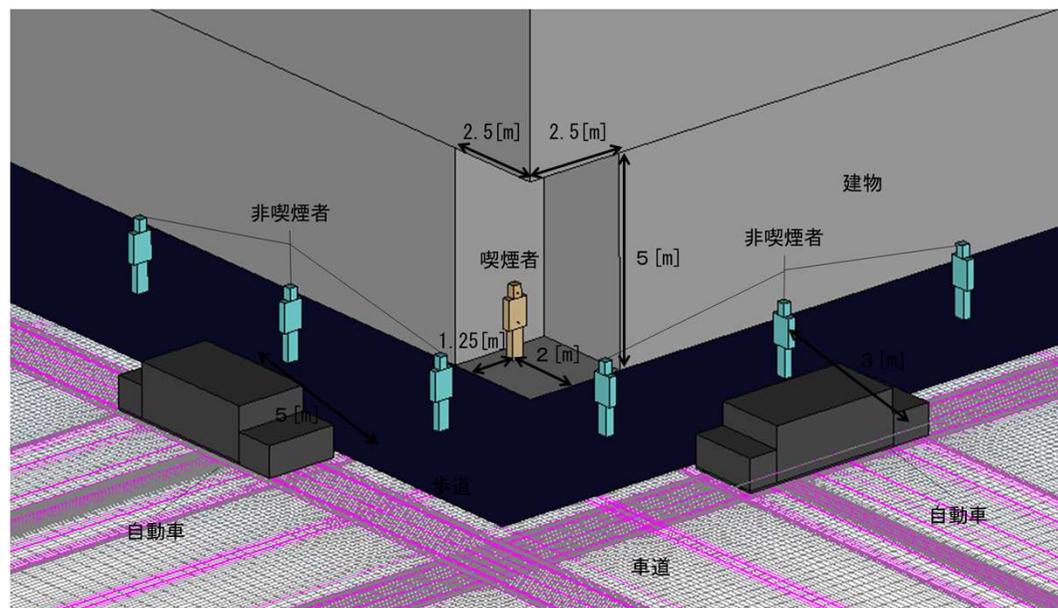
図10 市街地モデルの概要



(a) 解析領域建物全体のパース

図11 建物近傍での喫煙モデルの概要

建物の四隅には2.5[m] × 2.5[m] × 5[m]のスペースを設け、その建物敷地内に喫煙者モデルをそれぞれ1人ずつ計4人配置する。建物敷地の周囲3[m]を歩道とし、歩道中央に5[m]間隔で非喫煙者として人体モデルを配置する。車道には歩道から0.5[m]の位置に自動車モデルを計8台配置する。



(b) 解析領域建物近傍のパース

図11 建物近傍での喫煙モデルの概要

自動車モデルは排気量2,000[cc]のセダン型のガソリンエンジン車とする。アイドリング時のエンジン発熱量は5.3[kW]^{文4)}、排ガス温度は85[°C]とする。

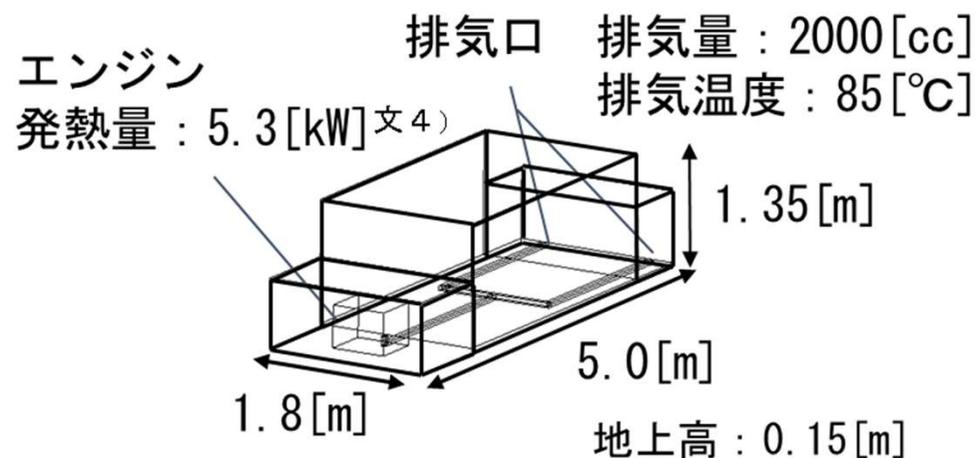


図12 自動車モデルの概要

汚染質の恕限度※²は、一酸化炭素が10 [ppm]^{文8)}、粒子状物質が0.15 [mg/m³]^{文8)}とする。

表4 汚染質の発生量

		一酸化炭素	粒子状物質
喫煙者モデル	呼出煙	13.7 [mg/本] ^{文5)}	4 [mg/本] ^{文6)*4}
	副流煙	36.6 [mg/本] ^{文5)}	6 [mg/本] ^{文6)*4}
自動車モデル	排ガス	2.875 [mg/s] ^{文7)*5}	0.0125 [mg/s] ^{文7)*5}

文5) 村松茂登彦 「紙巻きたばこの自然燃焼における移動現象に関する研究」 専売中研報 1981年

文6) 木村ら「喫煙による室内空気汚染とその対策」 労働科学 1990年

文7) 国土交通省 「新車に対する排ガス規制について」 平成17年

文8) 厚生労働省「職場における喫煙対策のためのガイドライン」平成15年

※2 恕限度とは、人の健康などに悪影響を及ぼさない上限の値である。

※4 たばこから発生する粒子状物質の総量10 [mg/本]のうち、呼出煙と副流煙の割合は、文5)の実験データの参考に、呼出煙より4 [mg/本]、副流煙より6 [mg/本]とする。

※5 自動車排ガスからの汚染質発生量は、文7)の規制値をもとに算出する。一酸化炭素の発生量が規制値の1.15 [g/km]の場合、自動車の燃費を10 [km/L]とすると燃料1 [L]あたり11.5 [g/L]となり、アイドリング時における燃料消費15 [ml/min] (0.00025 [L/s])とすると、その発生量は2.875 [mg/s]となる。粒子状物質についても発生量が規制値の0.05 [g/km]の場合、同様に算出すると0.0125 [mg/s]となる。

RANS解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM Ver. 13を使用する。市街地モデルの解析を行う際の基準流入プロファイルは、 $U \propto Z^{1/4}$ (U :流速、 Z :高さ)とし、基準風速は、1.0、3.0、5.0[m/s] (基準高さ10[m])、風向角は0、22.5、45[°]とする。

表5 解析case

case	基準風速[m/s]	風向角[°]
caseA-1	1	0
caseA-2		22.5
caseA-3		45
caseB-1	3	0
caseB-2		22.5
caseB-3		45
caseC-1	5	0
caseC-2		22.5
caseC-3		45

それぞれの汚染質についてcaseA-1(基準風速 1 [m/s]、風向角 0 [°])で比較すると、汚染質発生源が喫煙者の場合、汚染質濃度が恕限度を超える範囲は、**粒子状物質**のほうが**広く**なる。

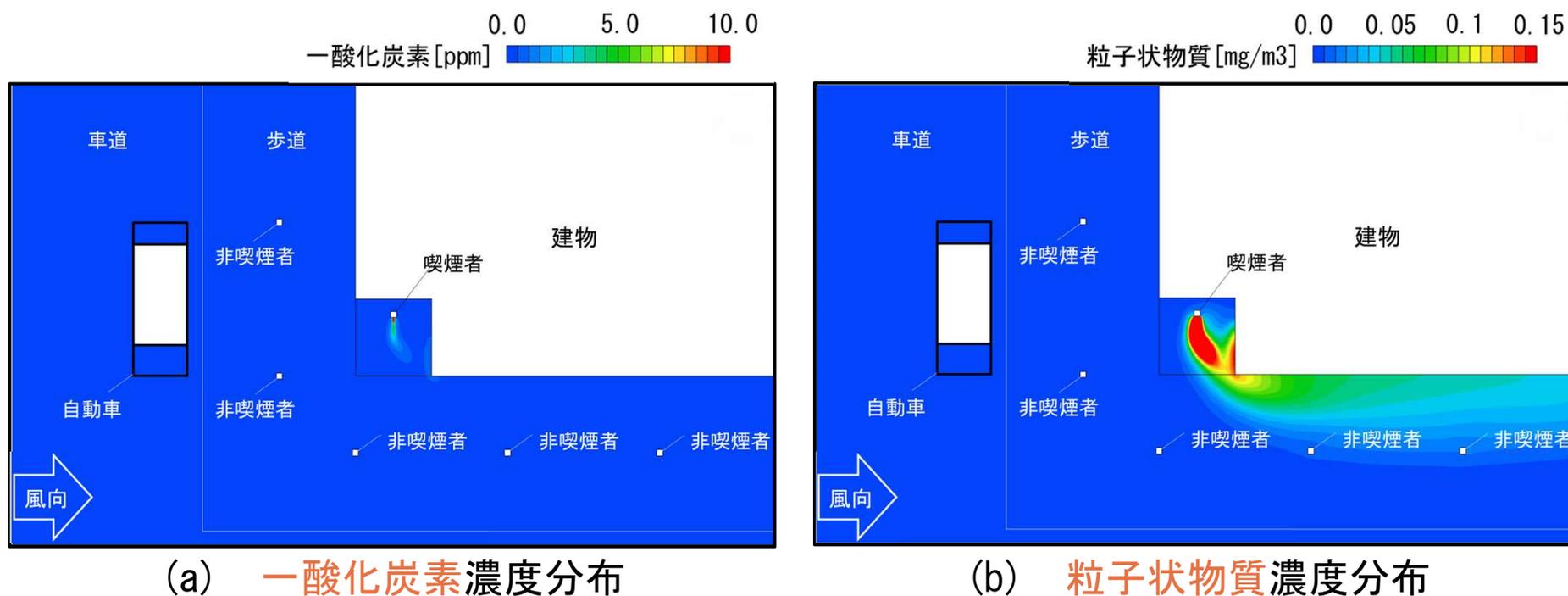
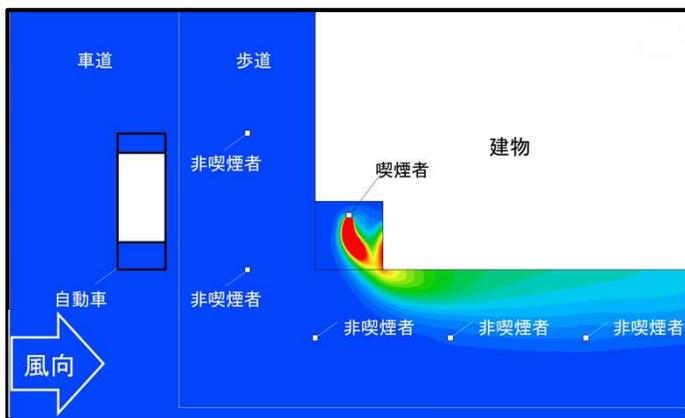
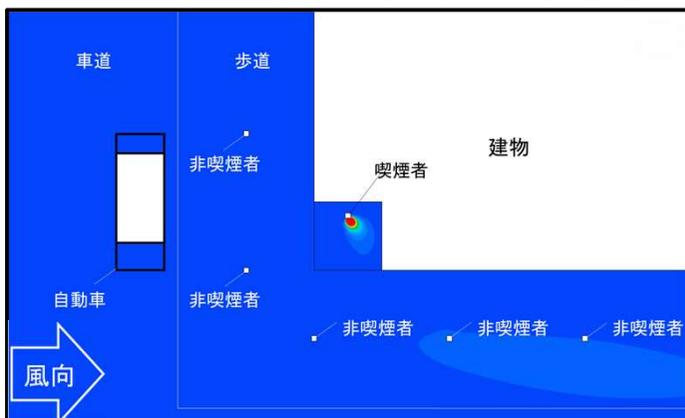


図 caseA-1(基準風速 1 [m/s] 風向角 0 [°])
喫煙による汚染質の濃度分布 (z=1.5 [m] 水平断面)

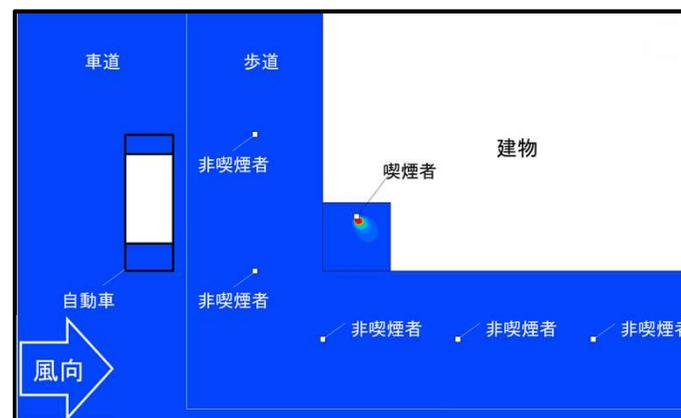
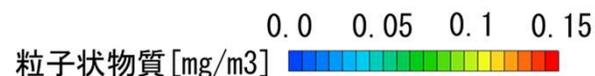
また、基準風速が速くなるほど汚染質濃度が限度を超える範囲は狭くなる。



(a) caseA-1 (基準風速 1 [m/s] 風向角 0 [°])



(b) caseB-1 (基準風速 3 [m/s] 風向角 0 [°])

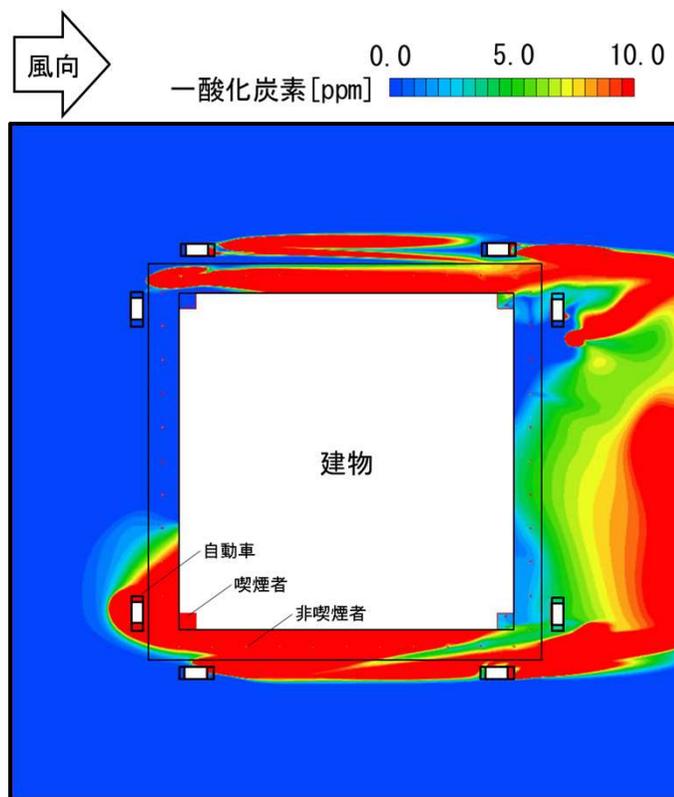


(c) caseC-1 (基準風速 5 [m/s] 風向角 0 [°])

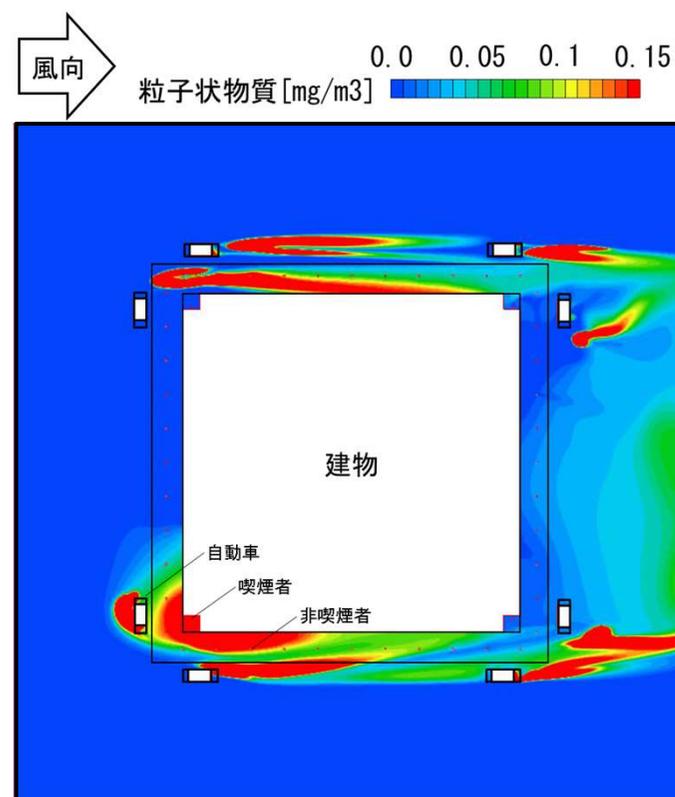
図11 喫煙による粒子状物質の濃度分布 (z=1.5 [m] 水平断面)

いずれの解析caseにおいても、喫煙によって汚染質濃度が成人の呼吸域 ($z=1.5$ [m]) で恕限度を超える範囲は歩道上の非喫煙者に到達していない。市街地の屋外における喫煙で恕限度を超える汚染質に非喫煙者が曝露する可能性は極めて限定的であると考えられる。

汚染質発生源が自動車の場合、汚染質濃度が恕限度を超える範囲は、一酸化炭素のほうが広くなる。



(a) 一酸化炭素濃度分布



(b) 粒子状物質濃度分布

図 caseA-1 (基準風速 1 [m/s] 風向角 0 [°])
自動車排ガスによる汚染質の濃度分布 (z=1.5[m] 水平断面)

また、基準風速が速くなるほど汚染質濃度が限度を超える範囲は狭くなる。

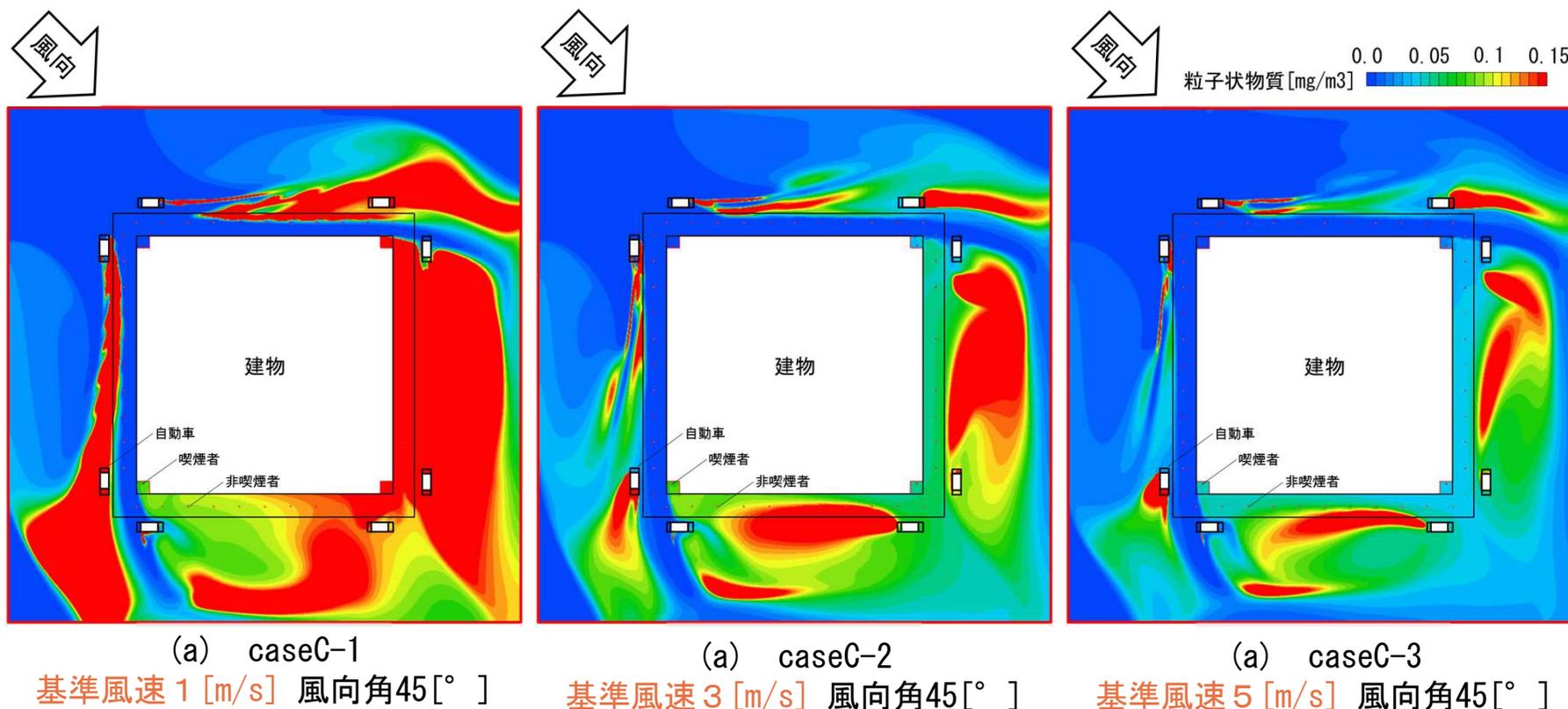


図 自動車排ガスによる一酸化炭素の濃度分布 (z=1.5[m] 水平断面)

ほとんどの解析caseにおいて、自動車排ガスによって汚染物質濃度が成人の呼吸域で恕限度を超える範囲が歩道上に広く分布しており、caseC-3(基準風速 5 [m/s]、風向角 45[°])を除く 8 caseで汚染物質濃度が恕限度を超える範囲が歩道上の非喫煙者に到達する。市街地において自動車排ガスによって恕限度を超える汚染物質に非喫煙者が曝露する可能性は高いと考えられる。

今回の条件でたばこと自動車を比較すると、市街地で自動車排ガスによる健康被害の発生リスクのほうが、たばこのリスクよりも高いと考えられる。

4.1 タバコ煙のPIV測定及び喫煙する人体モデルの検討

- ① RANS解析によって、呼出気流、たばこ上昇流ともに概ね実験結果が再現された。
- ② RANS解析による呼出気流、たばこ上昇流は、PIV測定と比較すると乱れが小さくなる傾向にある。
- ③ RANS解析で、気流の乱れによる拡散作用が少なくなることで、実際と比較して汚染質濃度が恕限度を超える範囲の最大到達距離が過大評価される可能性がある。

4.2 市街地路上における受動喫煙のリスク解析

- ① 基準風速が速いほど汚染質濃度が恕限度を超える範囲は狭くなる傾向にある。
- ② 市街地において、喫煙によって汚染質濃度が恕限度を超える範囲は狭く、受動喫煙が発生するリスクは極めて限定的である。
- ③ 市街地において、自動車排ガスによって汚染質濃度が恕限度を超える範囲は広く、歩行者が恕限度を超える汚染質に曝露するリスクが高い。