

# CFD 解析による受動喫煙性状の検討

## CFD Analysis on Passive Smoking

林 立也\*・加藤 信介\*\*・村上 周三\*・曾 潔\*\*\*  
 Tatsuya HAYASHI, Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI, Jie ZENG

### 1. 序

タバコ煙は室内空気の汚染源の主要なものの一つである。タバコ煙の健康へのリスクは広く認められており、特に室内で非喫煙者が喫煙者のタバコ煙を吸引する受動喫煙は社会的にも大きな問題となっている。本研究は、この非喫煙者の受動喫煙性状を室内気流の詳細な CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) シミュレーションに基づき解析するものである。一般に非喫煙者が吸引するタバコ煙の濃度は、室内の微妙な気流性状や喫煙者との位置関係で大きく異なる。すなわち、受動喫煙現象を詳細に評価するには、人体の熱放散による周辺上昇流や喫煙者の呼気による流れなどを再現する人体モデルを組み込んだ室内気流シミュレーションが必要となる。本報では、発熱し、呼気を吐出する人体モデルを配置した室内において、タバコ煙の拡散性状を、呼気の呼出風速、人体距離、換気・空調方式などを変えて解析し、このタバコ煙が隣接する非喫煙者呼吸域に与える影響を検討する。

### 2. 計算概要

#### 2.1 解析対象

喫煙者及び受動喫煙者の2人が互いに対面している室内空間を想定する。左側の人体(以後喫煙者)が喫煙し、隣接する右側の人体(以後受動喫煙者)の呼吸域に与える影響を考察する。室内空調方式は、冷たい新鮮空気を床面近くに低速で供給し、天井面近くで排出する置換換気冷房方式(図1)と、同じ室内、換気量で、強制的に攪拌流を生じさせて、室内の空気を比較的均一に混合させる室内混合冷房方式(図2)の2通りを検討する。なお、両換気・空調方式で熱負荷は同一とする。

#### 2.2 解析 CASE

解析ケースを表1に示す。喫煙者と受動喫煙者の人体間距離に関し、1.3 m と 0.6 m の2通りを検討する。前者は通常のオフィスにおける事務作業の人体間距離を想定しており、後者は会話や会議などの比較的密着した距離を想定している。なお、置換換気方式の場合は、喫煙者の呼出煙吐出に関しても呼出速度を低速の場合(0.5 m/s)と通常の場合(4.0 m/s)の2通り、検討する。この際の呼気の吹出流量が同一になるよう、開口面積を調節している。これら各 CASE において、

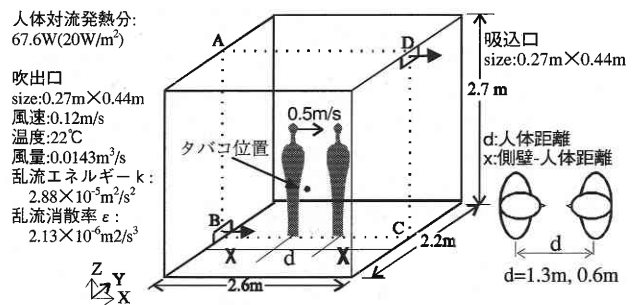


図1 解析対象(置換気冷房方式)

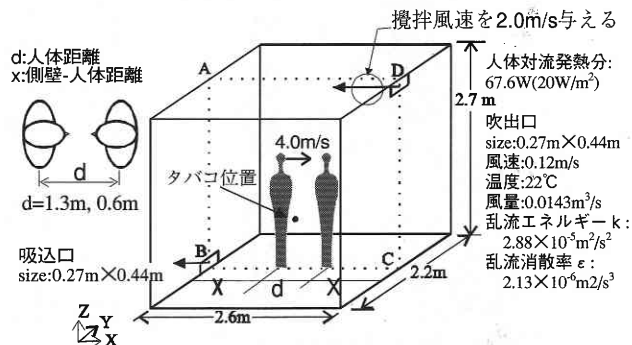


図2 解析対象(室内混合冷房方式: Case 3-1, 3-2)

表1 計算 CASE

Case No.	空調方式	呼出風速	人体距離
1-1	置換換気方式 (Displacement ventilation)	0.5m/s	1.3m
1-2			0.6m
2-1		4.0m/s	1.3m
2-2			0.6m
3-1	室内混合方式	4.0m/s	1.3m
3-2			0.6m

呼出煙と副流煙それぞれの室内拡散と受動喫煙性状を検討する。呼吸は非定常現象であるが、ここではモデル化して喫煙者の呼気のみを、喫煙者口位置から、中央断面(ABCD断面)内で、水平方向に温度 32°C<sup>文1)</sup> で呼出すると仮定して、定常状態を解析する。

\*東京大学生産技術研究所 第5部  
 \*\*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター  
 \*\*\*National Research of Council Canada

## 研究速報

## 2.3 計算条件

Case 1-1, 1-2 は Launder-Sharma 型の低 Reynolds 数型  $k-\epsilon$  モデル (3次元) を用いて解析し, 他は標準  $k-\epsilon$  モデル (3次元) を用いて解析する<sup>注1)</sup>. 境界条件に関し, 後者の場合, 壁面の速度に関しては Log-Law 型の壁関数を用いている. 温度に関してはすべての解析で人体表面に対流熱伝達量 ( $20 \text{ W/m}^2$ ) を与え, その他の壁面は断熱としている. 副流煙発生源として指先に挟まれたタバコを想定し, その高さ (以後指先高) は床より  $0.9 \text{ m}$  とした. タバコの燃焼発熱量は  $4.3 \text{ W}$  としている<sup>文2)</sup>. その他計算の詳細は別報文<sup>3)</sup> 参照.

## 3. 計算結果

## 3.1 流れ場

3.1.1 Case 1-1, 1-2 (図3 (1), 図4 (1)) 室全体はほぼ静穏であるのに対し, 人体近傍においては人体生理発熱による上昇流が顕著に生じており, 人体頭頂部で最大  $0.25 \text{ m/s}$  となる. しかし, この人体距離ではそれぞれの上昇流が合成されるような相互影響は見られない<sup>文4)</sup>. 喫煙者指先近傍では, 煙草の発熱による上昇流が生じ, 最大  $0.34 \text{ m/s}$  となる. この上昇流は人体生理発熱による上昇流と合流し, 上部に向かう. 喫煙者の呼出速度が  $0.5 \text{ m/s}$  程度では人体上昇流の影響を強く受け, 水平方向には余り拡散しない.

3.1.2 Case 2-1, 2-2 (図3 (2), 図4 (2)) 流れ場は室全体, 人体のまわりにおいて, Case 1-1, 1-2 と同様である. 喫煙者呼吸域近傍では生理発熱による上昇流, タバコ発熱による上昇流, 口位置からの呼出による気流が混在して複雑な流れとなっている. 呼出風速が低速 ( $0.5 \text{ m/s}$ : Case 1-1, 1-2)

の場合, 水平方向にはほとんど拡散しなかったのに対し, 呼出風速が  $4.0 \text{ m/s}$  の Case 2-1, 2-2 の場合, 呼出流は上昇流を破って水平方向に拡散する. しかし, 呼出流の温度が周辺の空気温度より高いことから, 呼出気流はやや斜め上方へと向かい, 人体間距離が  $1.3 \text{ m}$  である Case 2-1 の場合, 呼出気流は直接に受動喫煙者には衝突しない.

3.1.3 Case 3-1, 3-2 (図3 (3), 図4 (3)) 空調吹出口付近に与えた攪拌流により, 室内に大きな循環流が形成される. 人体周辺には体表面に沿う上昇流が観察される. この循環流と人体の上昇流の影響により, 人体距離に関わらず, 呼出流は吹き出されてすぐ, 上部に向かい, 天井面付近で室内大循環流と合流する.

## 3.2 呼出煙濃度分布 (図5, 6, 表-2)

3.2.1 Case 1-1 喫煙者の呼出煙濃度 (口元濃度を  $100\%$  とする) の空間分布を示す. 喫煙者の口から呼出された煙は人体生理発熱により上部空間に輸送される. 上部空間に移流した煙は室内上部の吸込口方向に運ばれる. いずれの人体も生理発熱による上昇流が下部から新鮮な空気を誘引し, 呼吸域を保護している. 受動喫煙者の呼吸域 (口から半径  $5 \text{ cm}$  内と仮定<sup>注2)</sup>) 平均濃度は室内平均濃度  $1.0\%$  に比べ多少高く,  $1.3\%$  となる<sup>注3)</sup>.

3.2.2 Case 1-2 喫煙者から呼出された煙は上部に上昇し, 受動喫煙者側に下降しない. そのため, 人体距離が短いにも関わらず受動喫煙者呼吸域平均濃度は  $0.4\%$  と Case 1-1 よりも低くなる.

3.2.3 Case 2-1 喫煙者口からの呼出煙は, 人体発熱による上昇流に守られた受動喫煙者上部に達し, 呼吸域には到達し

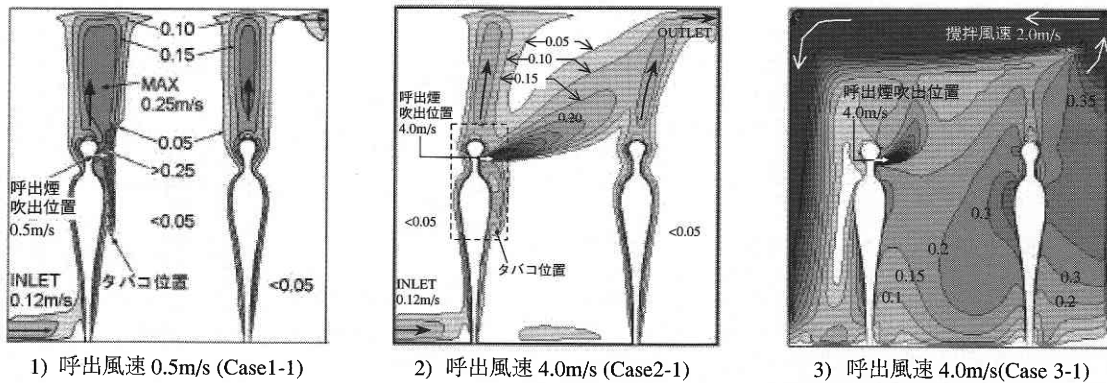


図3 スカラー風速分布 (人体距離 1.3 m)

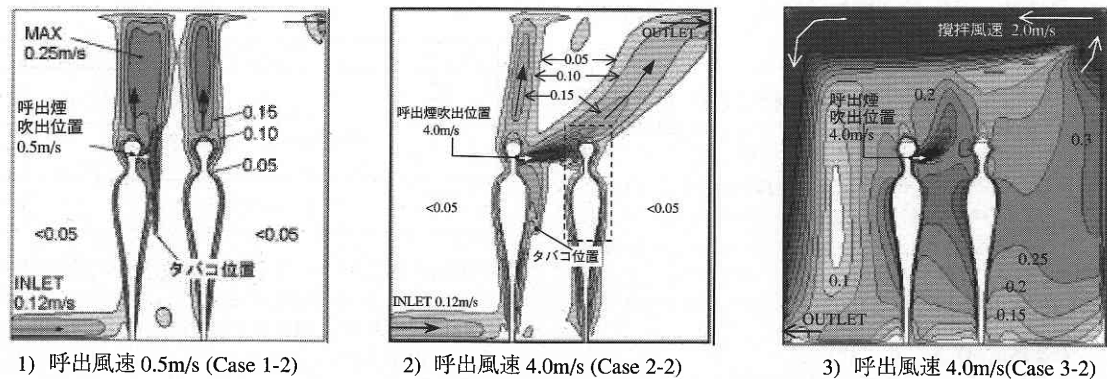


図4 スカラー風速分布 (人体距離 0.6 m)

ない。呼出煙は受動喫煙者周辺の上昇流と共に、空調吸い込み口から速やかに排出され<sup>5)</sup>、受動喫煙者呼吸域平均濃度は0.5%と低くなる。

**3.2.4 Case 2-2** 喫煙者口からの呼出煙は、喫煙者周囲の上昇流の影響を余り受けず、直接受動喫煙者頭部に到達する。この時の受動喫煙者呼吸域平均濃度は、室内平均濃度0.9%に比べ極めて高く、約7.1%となる。

**3.2.5 Case 3-1** 喫煙者口からの呼出煙は、人体間の室内循環流と人体周囲の上昇流により上部空間に移流され、Case 2-1, 2-2の様な水平方向への拡散は見られない。このため、呼出煙は受動喫煙者呼吸域に直接影響は及ぼさない。しかし、室内がよく混合されているため、呼出煙は室全域で2.4%と比較的均一となる。受動喫煙者呼吸域平均濃度は2.7%とやや大きい。

**3.2.6 Case 3-2** Case 3-1と同様に、人体距離が0.6mと短くなった場合も、呼出煙は室の循環流の影響を大きく受け、受動喫煙者呼吸域に直接的な影響を及ぼさない。そのため、受動喫煙者呼吸域平均濃度も2.8%とCase 3-1とほぼ同程度となる。

**3.3 副流煙濃度分布 (図7, 8, 表-2)**

**3.3.1 Case 1-1** 喫煙者指先高から発生したタバコ煙は自身の発熱と人体生理発熱により人体に沿って上部に向かう。この場合、喫煙者呼吸域周辺は高濃度となるが、呼吸域は自らの熱上昇流に保護され、その平均濃度は汚染源濃度の0.6%となっている。受動喫煙者呼吸域濃度は0.5%と喫煙者よりもやや小さくなっている。

**3.3.2 Case 1-2** Case 1-1と同様に上昇流の影響を強く受け、

煙は上部へと輸送されるが、煙は人体間に滞留せず、喫煙者呼吸域濃度は0.5%、受動喫煙者呼吸域濃度は0.3%と、ほぼ室内平均濃度程度となり共にCase 1-1よりも低い値をとる。

**3.3.3 Case 2-1** 副流煙はCase 1-1, 1-2と同様にタバコ自身の発熱と人体生理発熱により人体に沿って上方に向かう。このため、喫煙者呼吸域付近は高濃度となり、室内平均濃度0.4%より高くなり2.1%となる。しかし、4m/sの呼出気流により、この上昇してきた副流煙は喫煙者口位置高さで急速に水平方向に移流・拡散する。このため、副流煙は受動喫煙者呼吸域に直接到達せず、受動喫煙者呼吸域平均濃度は0.8%となる。

**3.3.4 Case 2-2** 喫煙者呼吸域濃度はCase 2-1よりやや高く、2.2%となる。受動喫煙者呼吸域は副流煙の影響を比較的直接的に受けるため、呼吸域平均で1.8%となり、室内平均濃度0.5%の3~4倍となり、受動喫煙が顕著となる。

**3.3.5 Case 3-1** 副流煙は呼出煙の場合と同様に室全体へ一様に分布する。しかし、喫煙者は自らの上昇流と、室内の循環流により、自らの呼吸域に煙を誘引し、室内平均濃度1.4%の2.7倍の3.8%と大きな影響を受ける。受動喫煙者呼吸域平均濃度も室内平均濃度より高く1.7%となる。

**3.3.6 Case 3-2** Case 3-1とほぼ同様の性状を示し、室内平均濃度1.5%に対し、喫煙者呼吸域平均濃度は3.8%、受動喫煙者呼吸域平均濃度は1.7%となる。

**4. 結 論**

(1) 受動喫煙性状を検討するために、喫煙者のタバコ煙呼

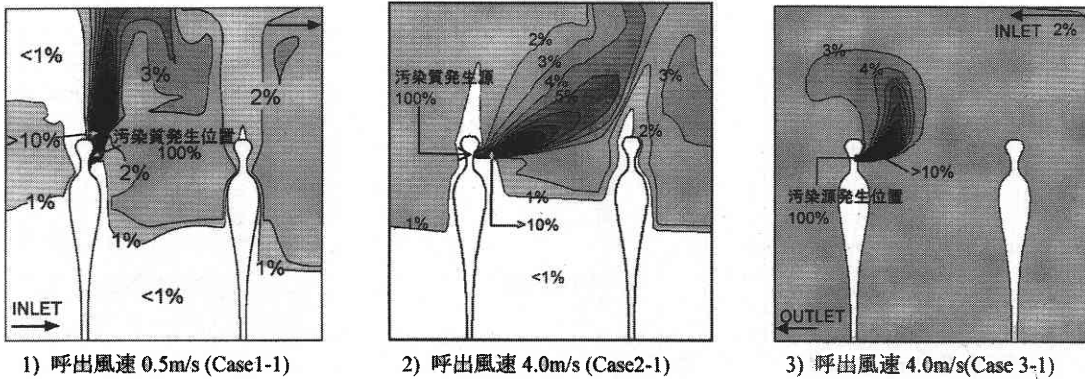


図5 呼出煙濃度分布 (人体距離 1.3 m)

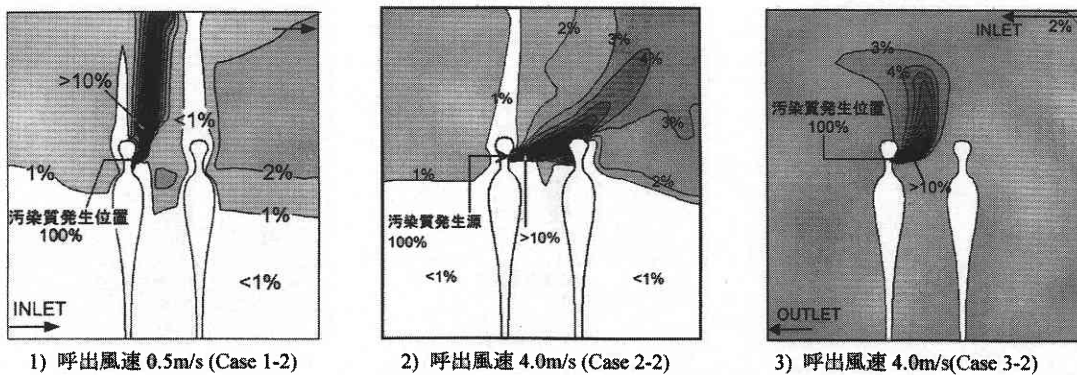


図6 呼出煙濃度分布 (人体距離 0.6 m)

研 究 速 報

出速度、空調方式、人体距離などをパラメーターとして、喫煙者からのタバコ煙が受動喫煙者呼吸域に与える影響をCFD解析により検討した。

- (2) 置換換気方式の静穏室内において、喫煙者のタバコ煙呼出風速が低速 (0.5 m/s) である場合、タバコ煙は人体上昇流の影響を強く受け、水平方向には余り拡散しない。これに対して、呼出風速が高速 (4.0 m/s) である場合、その呼出噴流は人体上昇流を破壊して、受動喫煙者呼吸域周辺に大きな影響を及ぼす
- (3) 室内混合換気方式の室内において、呼出煙・副流煙はともに、室内に一様に分布し、受動喫煙者に直接的な影響は余り生じないようにも見える。しかしそれでも、タバコ煙の受動喫煙者呼吸域濃度は室平均値よりは多少高くなる。

(1998年11月19日受理)

表2 各領域のタバコ煙濃度

	呼出煙			副流煙		
	呼吸域平均濃度		室内平均濃度	呼吸域平均濃度		室内平均濃度
	喫煙者	受動喫煙者		喫煙者	受動喫煙者	
1-1	100%	1.3%	1.0%	0.6%	0.5%	0.4%
1-2	100%	0.4%	1.0%	0.5%	0.3%	0.5%
2-1	100%	0.5%	1.0%	2.1%	0.8%	0.4%
2-2	100%	7.1%	0.9%	2.2%	1.8%	0.5%
3-1	100%	2.7%	2.4%	3.8%	1.7%	1.4%
3-2	100%	2.8%	2.4%	3.8%	1.7%	1.5%

注

- 1) 基礎とする乱流モデルの違いにより解析格子も変えている。しかし、乱流モデルの差異による、人体周辺 (人体表面より15 cm 以内) の上昇流量等に対する解析結果の差異は小さく、解析手法の違いによる差異は小さいものと考えられる。
- 2) 人間の呼吸域の範囲に関しては不明な点が多い。口から0.5 m/s で吹出した場合、それに対応してどの辺りの空気を吸入しているのかは今後解析する。
- 3) 呼出煙は、CO濃度に換算して発生源において107 ppm、副流煙は発生源において2,500 ppmとなっている文6)。

参 考 文 献

- 1) Carl Erik Hyldgaard; Humans as a source of heat and air pollution, Roomvent' 94 Poland, p. 413-433.
- 2) 松村：紙巻きタバコの自然燃焼における移動現象に関する研究, 専攻中研報, pp.9-77. 1981.
- 3) 曾, 村上, 加藤：人体表面の対流熱伝達に関するCFD解析, 第8回数値流体力学シンポジウム, pp. 189-192. 1994. 12.
- 4) 加藤信介, 曾 潔, 村上周三：静穏環境下における立体人体周囲の汚染物質濃度分布に関するCFD解析数値サーマルマネキンに関する研究 (その2) 日本建築学会計画系論文集, No. 509, 21-26, 1998. 7.
- 5) 林, 村上, 加藤, 曾：受動喫煙の研究 (その2) 建築学会関東支部研究発表会梗概集, 1998. 3.

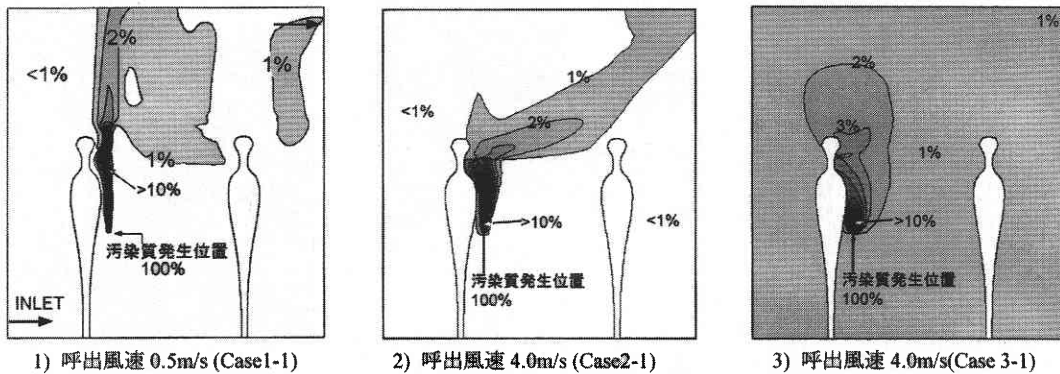


図7 副流煙濃度分布 (人体距離1.3 m)

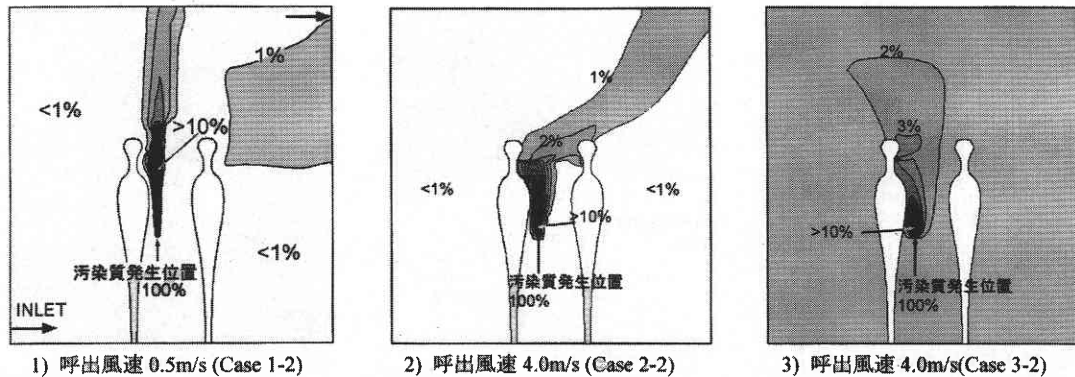


図8 副流煙濃度分布 (人体距離0.6 m)