

住まいと人体

— 工学的視点から —

村上周三¹⁾

1) 東京大学生産技術研究所

I. 住まいと環境

1. 居住環境と室内汚染

暖冷房の導入、高断熱・高气密化、新建材の利用などで居住環境は、以前に比べて大いに改善された。しかし、利便性・快適性向上の反面、副作用とでもいべき新たな環境問題を抱えることになった。代表的なものの1つがシック・ビルディングに関連した室内の空気汚染問題である。

従来、室内空気質に関して問題とされていた点は、開放型燃焼器具の不完全燃焼に起因する一酸化炭素中毒に代表される高濃度短期暴露の中毒事故、及び環境煙草煙等に起因する高濃度浮遊粉塵等が主なものであった。しかし、近年、室内の空気汚染の中で特に問題になっているのが、ホルムアルデヒドや VOCs 等の揮発性有機化合物による微量化学物質汚染で、アレルギー疾患や化学物質過敏症患者増加の原因とされている。化学物質による空気汚染は、欧米各国でも大きな問題として広く取り上げられている。日本でもここ数年健康住宅の研究をはじめ、産・官・学がこの問題の解決に取り組んでいるが、欧米各国に比べ研究の立ち遅れは否定できない。日本固有の住宅事情、室内生活習慣などの理由により、今後、この問題はますます深刻化することが懸念される。

このような状況に鑑みて、室内化学物質汚染を解明するための研究が、科学技術庁から科学技術振興調整費の助成を得て、日本建築学会を中心にスタートした。これは、建築のみならず、化学、医学、社会科学分野の研究者も含んだ学際的な共

同研究となっている。本稿では室内化学物質汚染の背景や実状、対策等について概説する。

2. 人間は大量の物質を呼吸により吸引している

人間は飲食をはじめとして、様々な行為を通じて物質を体内に摂取する。注目すべきは、呼吸により室内空気から取り入れる物質の割合が全体の6割近くを占め、他に比べて圧倒的に多いことである。従って、室内空気の汚染の進行はそのまま体内に摂取される汚染物質量の増加につながることになる。即ち、我々が健康で安全な生活を営む上で空気が清浄であることは、基本的人権と言って良いほど重要なことなのである。

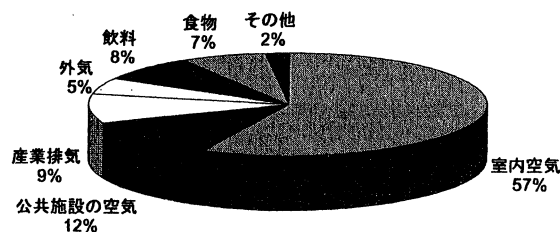


図1 人体の物質摂取量 (重量比)

3. 我々は空気環境にもっと神経質になるべきである

我々は濁った水を飲むことには強い拒絶反応を示すが、濁った空気を吸引することにはそれほど強い拒絶反応を示さない。清浄な水を確保することが人間生活にとって不可欠であるように、清浄な空気を確保することも人間としての基本的な要求である。

空気の性状やその動きは一般に目に見えないので、我々は空気環境の悪化についつい不注意になりがちである。飲料水の場合なら、我々はペットボトルを携行して汚染に対するある程度の防御手段を選ぶことができるが、空気の場合には、このような対策を講じることは不可能である。屋内空気、屋外空気を問わず、清浄な空気を確保することは、前述のように基本的人権の1つであると考え、学術研究、行政等各方面において、空気環境改善のための活動を推進すべきであると考え。

4. 室内の化学物質汚染進行の背景、現状と将来動向

建物内の空気中の化学物質濃度増加の主なる原因としては次のような点を指摘することが出来る。

- 1) 化学産業が発展して、化学物質を多用した利用しやすい新材が普及したこと
- 2) 建築生産において省労働力や熟練労働者不足のため、工法が変化し接着剤が多用されるようになったこと
- 3) 天然建材の枯渇に伴って人工建材が増加し、化学物質使用を増大させる社会的、地球資源的、経済的圧力があること
- 4) 暖冷房エネルギー削減のため、建物の気密性を向上させ換気による暖冷房負荷を低減させたこと

今後、地球温暖化防止、炭酸ガス排出抑制との兼ね合いで、換気量を削減する傾向はますます強まるものと思われる。従って人体の健康と衛生を確保するためには、室内化学物質の放出量をなるべく少なくし、少ない換気量の下でも生活者が吸引する化学物質量を一定レベル以下に維持することができる環境を実現することが絶対に必要な条件となる。

今後とも、建材や日常の生活材の材料として、化学物質を何らかの形で利用していくことは避けられないことである。現在、日常的な暮らしや産業の中で使用される化学物質は7万種類以上に上り、更に毎年数千種類の化学物質が増加し続けていると言われる。今日の生活は、化学物質なしでは成立しないと言っても過言ではない。建設省、通商産業省、厚生省、環境庁等は、個別或いは合

同でこの問題に対する対策の検討を始めたが、問題への対応が緊急性を必要とされたため、部分的に当面の措置として対症療法的対応になることも避けられなかった。室内化学物質汚染の発生構造や発生量に関する基礎研究、さらにはその室内拡散に関する基礎的研究情報は非常に不足しており、関連する情報データベースも未整備である。

不足する基礎的研究情報を補い、各省庁で行われている個別的対応研究の成果を統合し、住まい手、住宅・建築生産者などの専門業者並びにこれを監督する行政が、容易に室内汚染の把握と対策を行うことを可能とするシステムの開発が急がれる。最重点課題は住宅・建築の利用者である生活者自身が自らの室内環境の安全と健康度を日常的に容易に評価できるシステムを開発し、対応措置をとることが出来るようにすることである。生活者自身の汚染防止行動が、結果として室内空気質の改善ばかりでなく、地球環境問題、経済社会的状況とも整合する方策となるシステムの構築を目指すべきである。

5. 室内環境の構成に関連する外的要因、内的要因

室内環境の構成にはさまざまな外的要因が関連している。この状況を図2(a)に示す。例えば、石油危機や地球環境問題は省エネを促し、これが建物の高気密化をもたらす要因となり、その結果室内空気の汚染問題が深刻化するに至った。或いは科学技術の進歩の結果、新しい化学材料が建築生産の場にもたらされた。一方、熟練工の不足やローコスト化の要請、化学材料を利用した接着工法の普及を促進し、結果として深刻な化学物質による室内空気汚染をもたらすに至った。

また、図2(b)に示すように、室内物理環境は多くの要因で構成されており、それらが重層的に関連している。室内環境には、空気環境、熱環境、音環境など、さまざまな構成要素が存在する。良好な室内環境を計画しようとする場合、各構成要素からさまざまな要求が出され、結果的に、互いに相反する要求条件が現れることがしばしば発生する。例えば、絨毯の使用は音環境には望ましいが、空気環境的には望ましくないというような

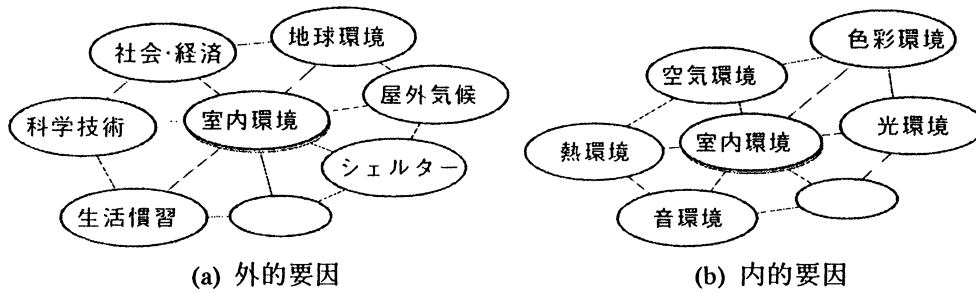


図2 室内環境の構成に関わる要因

ケースである。

このように空気環境は、それ自身が多くの構成要素を含み、またその形成には様々な外的要因が関連するので、良好な室内環境形成の為には多面的な配慮が必要となる。

6. 建築工事と室内での化学物質汚染源

一口に化学物質と言っても、実際には多数の化合物が存在し、その化学的性質は個々の化学物質毎に大きく異なる。室内で1ppb以上の濃度で検出された化学物質は250種を越えた、という報告も見られる。通常の室内環境においても20~30種類の化合物は容易に検出される。

図3に示すように、一般住宅を建設する際にはバケツ2杯分に相当する多量の接着剤が使用され

ることが多い。接着剤、特に合成ゴム系溶剤系接着剤及び酢酸ビニル樹脂系接着剤には大量のVOCs (Volatile Organic Compounds; 揮発性有機化合物) が含まれる。木材保存剤、白蟻駆除剤、殺菌剤等の薬剤には有機リン系及びピレスロイド系の化学物質が含まれ、壁材・床材等にはDOP、DEPといった可塑剤が含まれる。更には居住者自身によって持ち込まれる様々な生活用品や居住者自身から化学物質が放散される場合もある。

また表1に代表的な室内空気汚染の原因となる化学物質を含む可能性のある建材、施工材の例を示す。このように建材、施工材から化学物質が放散されることは自明の事であるが、その発生量や許容される室内濃度に関して明確な規準が定められていないものが多い。合板についてはJAS規格、及び繊維板、パーティクルボードについてはJIS規格がホルムアルデヒド放散量の等級を規定している。壁装材料協会によるISM規格のように業界レベルの自主基準が運用されている例もあるが、まだまだ例外的であるのが現状である。

7. 室内環境と化学物質汚染の影響因子

図4に示すように、室内には様々な汚染発生源がある。発生した汚染質は室内気流によって輸送され、最終的に吸入口から排出される。最も大切なことは、室内の人間が吸引する汚染質量を最小化することである。室内環境計画、換気計画は、この観点に留意してなされるべきである。

図4に示された化学物質空気汚染に関連する各種の要因を関連する項目毎に詳細に

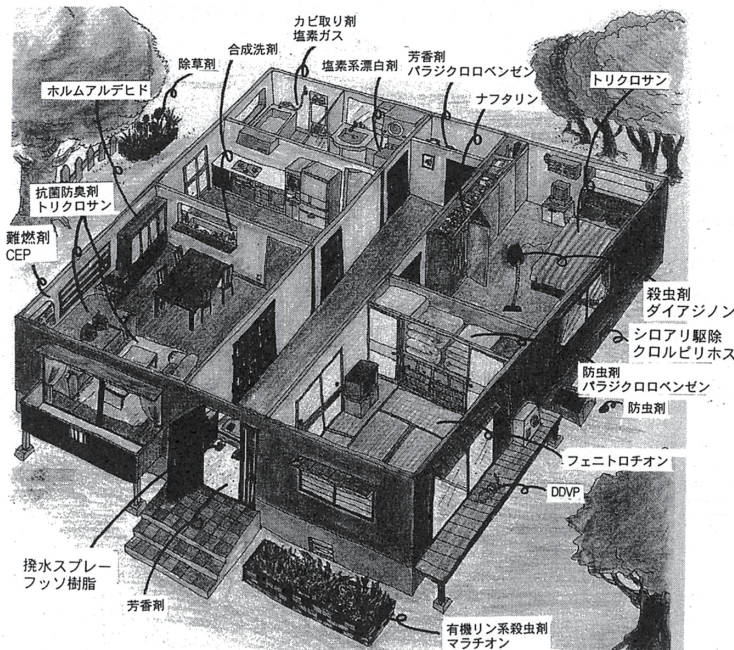


図3 室内での化学物質汚染源の例

表1 代表的な化学物質を含む可能性のある建材、施工材の例

建材、施工材等	含有可能性のある化学物質
ビニールクロス(塩化ビニル製品)	可塑剤(DOP, DEP, DBP, DMP等)
複合フローリング材	ホルムアルデヒド
合板、パーティクルボード	ホルムアルデヒド
集成材、化粧合板	ホルムアルデヒド
木材保存剤(加圧注入)	有機リン系、ピレスロイド系(トルエン、キシレン)
木材保存剤(表面処理)	有機リン系、ピレスロイド系(トルエン、キシレン)
油性ペイント	キシレン
木工用接着剤	可塑剤
エポキシ樹脂系接着剤	キシレン、可塑剤

代表的な可塑剤には、DOP(フタル酸ジオクチル)、DEP(フタル酸ジエチル)、DBP(フタル酸ジブチル)、DMP(フタル酸ジメチル)等がある。

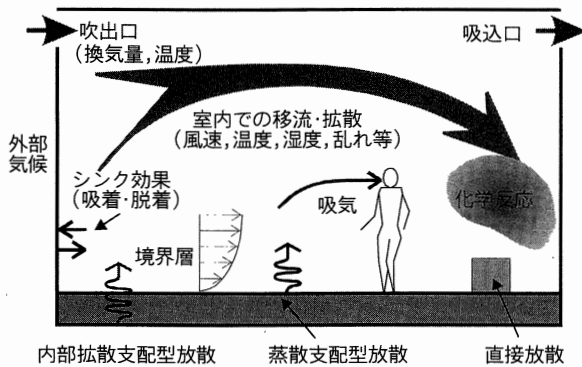


図4 室内での化学物質汚染の影響因子

整理し、研究の方向を大系化したものを図5に示す。

化学物質による室内空気汚染は、

- 1) 建材、燃焼器具等の化学物質発生源からの室内への放散過程
- 2) 室内空気中における化学変化
- 3) 室内での吸着・脱着過程
- 4) 室内における移流・拡散
- 5) 室内からの換気による排出
- 6) 人体呼気、吸気の性状

等の様々なものが関連する。これらを連成して総合的に解析しなければ、人体が最終的に吸い込む化学物質の濃度を正確に知ることは出来ない。

8. 化学物質汚染の防除対策

室内の化学物質濃度を低減させる方法を要約して言えば、

- 1) 発生量を減少させる。
- 2) 換気を励行する。

の2つの方法に尽きると言ってもよい。この2つの対策は単純に見えるが、これを日常生活の中で実行に移し成果を挙げるのは容易なことではない。我々は、この2つの対策の実効が上がるよう、さまざまな角度から努力を傾注すべきである。この2つの基本的対策に加えて、入居時、新築時等を考えると次の様な対策も挙げられる。但しこれらの手法には研究レベルにあるものもあり、その効

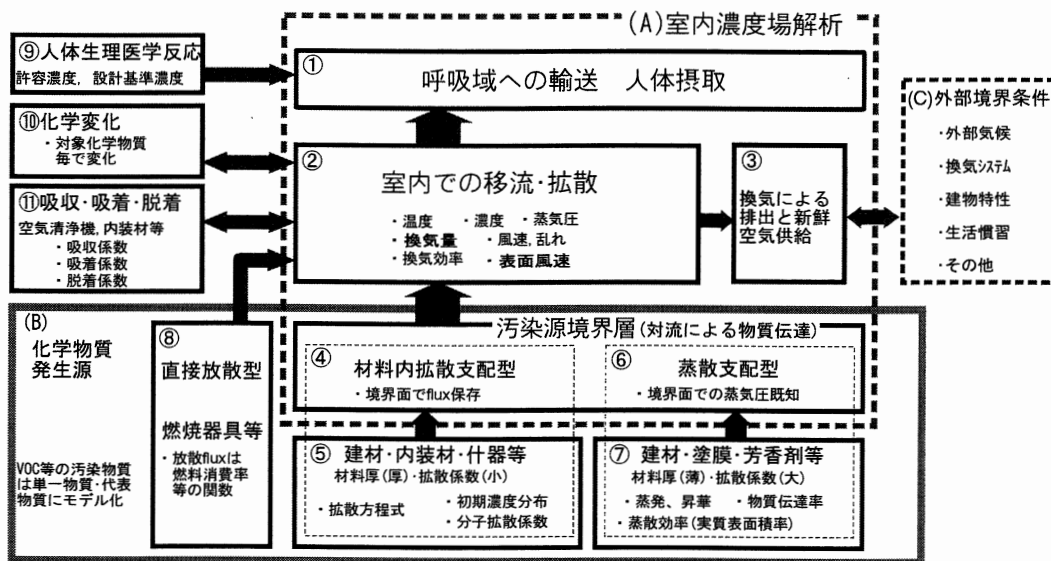


図5 室内での化学物質汚染の影響因子(詳細)

果の更なる検討が期待されている。

①Flush-out:

換気量の一時的増大による室内洗浄を、通常の換気による汚染質除去である **Purging** と区別して **Flush-out** と呼ぶ。内部拡散支配型の放散過程(建材内の有効拡散係数のオーダーが空気中の分子拡散のオーダーと比較して十分に小さい建材)では放散速度が材料内部の拡散速度に支配されるため、**Flush-out** がどの程度効果的であるか未知の部分が多い。一般的には建材からの放散量が表面気流の性状の影響を殆ど受けないため、**Flush-out** を行った場合には換気量の増大分だけ室の濃度が低減するが、**Flush-out** を停止後、少し時間が経過すると室の濃度レベルは **Flush-out** を行う前の濃度レベルに戻ってしまうことが多い。蒸散支配型の放散現象(建材内での化学物質輸送抵抗が小さい建材)では、気流速度などの増大による物質伝達係数の増大が放散速度の増加に有効に寄与するので、**Flush-out** を実行するとその後の放散量減少が期待できる。即ち、ペンキ塗り立ての状態では、換気量を増大させて **Flush-out** を行うことにより、その後の室の濃度レベルの低減が期待できる。

②Bake-out:

材料中の化学物質有効拡散係数や材料表面における化学物質の蒸気圧は温度依存性が高い。両者はともに高温にすることにより大幅にその値を増加させることが可能である。**Bake-out** は、材料や空気温度の上昇により、拡散係数、蒸気圧を増加させて短期的に化学物質を気中放散させる。内部拡散支配型の化学物質放散では材料内拡散係数の増加により放散量が増加する。数値解析によれば、室温を23℃から30℃に上昇させることで放散量が約2倍となる事例研究もある。蒸散支配型化学物質放散では材料表面での蒸気圧の増加が放散量の増加に寄与するため、同様に、**Bake-out** を行うことで放散量が増加し、**Bake-out** 後の室の濃度レベルの低減が期待できる。

③化学物質の吸着・分解:

室内に発生した化学物質を吸着し分解する材料や機器システムを導入することで、室内で一時的

に高濃度となることを防止し、影響を抑制することが可能となる。近年になり、化学物質の吸着・分解による除去を謳った空気清浄機や塗料、シート等が市販されている。これらの浄化能力・除去性能に関しては、製造者側の資料が存在するものの、標準的な性能確認試験方法に基づく学術的な検討は殆ど行われていない。化学物質除去の性能を有する空気清浄機の性能確認試験方法に関しては、社団法人・日本空気清浄協会が協会規格を策定し始めている。我々が行った数値解析による事例研究によれば、10g/m³の割合で吸着剤としての活性炭を室内壁面に設置した場合、室のVOC濃度レベルが吸着剤を設置しない場合に比べ約1/2に低減するという結果が得られている。吸着剤や吸着分解剤は原理的には有効な化学物質除去法であることは明確であるが、実際の生活現場においてどの程度の効果があるかについては、より詳細な検討が必要である。

II. 人体の周辺微気象

1. はじめに

一般に人間は室内居住域で生活し、更には呼吸域周辺の空気を呼吸している。即ち化学物質を含む空気が人体に与える影響を予測・評価するためには、居住域・呼吸域等の人体周辺における化学物質汚染濃度を正確に予測することが必要不可欠となる。本節ではCFD(計算流体力学)の手法を用いた人体周辺微気象シミュレーションによる居住域・呼吸域における濃度分布の予測例、並びにサーマルマネキンを用いた吸気勢力範囲等の測定例を示す。

2. 人体周辺の微気象

人間は恒温動物であり、常に代謝により熱を産生し、外部環境に放出している。その熱輸送の経路の1つとして対流熱放散があり、この熱放散により人体は自らの周辺に微気象を形成する。図6に数値解析、実人体、サーマルマネキン肩部における熱上昇流の可視化の図を示す。この図からわかるように、人体は自らの周囲に特有の環境を形成している。静穏な室内における静止立位状態の人体周辺の流れ場をCFD(計算流体力学)によ

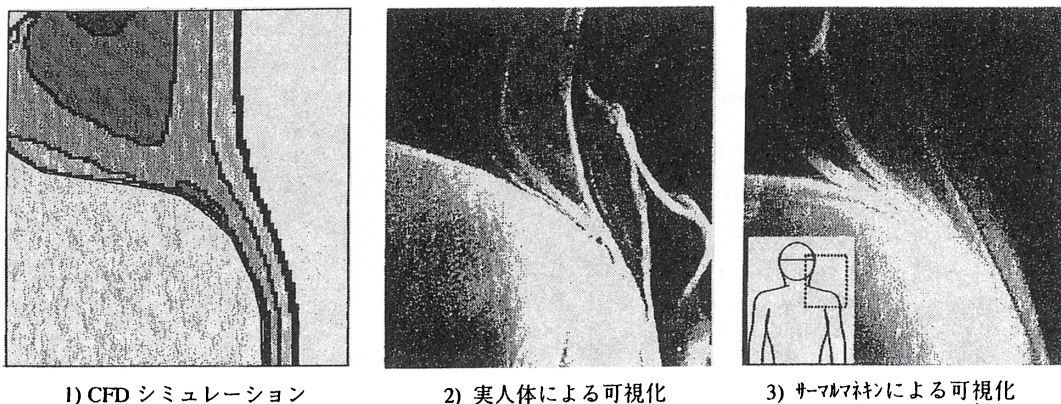


図6 人体肩部の可視化

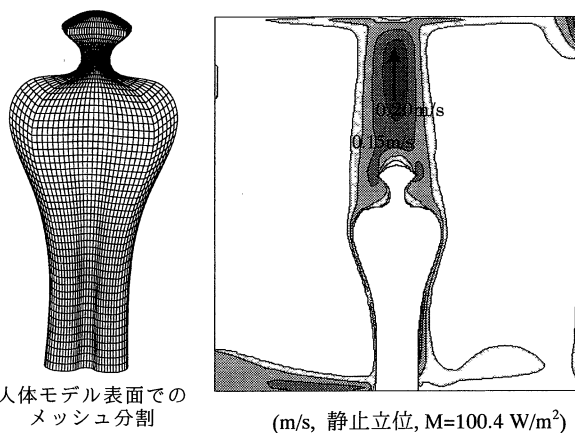
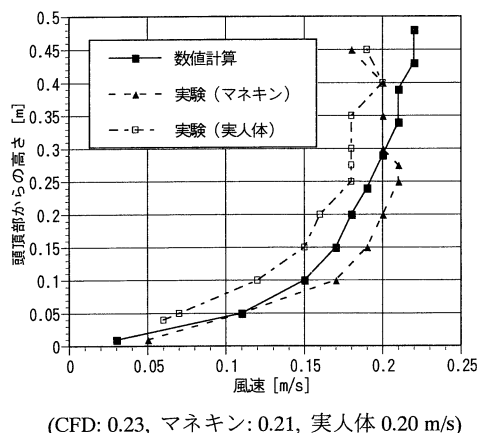


図7 人体モデルのメッシュ分割とスカラー風速分布



(CFD: 0.23, マネキン: 0.21, 実人体 0.20 m/s)

図8 人体頭上中心軸上の風速分布

り解析した結果を図7に示す。この様な静穏な環境では、人体の作り出す生理発熱による上昇流は室内の大きな空気駆動力となっており、風速は頭頂部より少し上の位置で最大風速約23cm/sに達している。この現象は図8に示すようにサーマルマネキンや実人体を用いた実験によっても確認されており、CFD解析の結果は定量的にも定性的にもよく実現象を再現している。

このCFD手法は、様々な状況に対しての解析を可能としており、その一例として図9に各環境下に曝される人体の対流熱伝達率の人体表面での分布を示す。ここでは、対流熱伝達に関する結果のみを示すが、更にこれに放射計算・湿気輸送計算、人体の生理モデル等を連成計算すれば、人体の全熱放散性状を詳細に解析することができ、また人体が曝される室内環境も厳密に予測すること

ができる。

3. 人体の汚染質誘引性状

前節では人体周辺の微気象の形成に関して述べたが、特に図7に示したような静穏な室内環境においては、この上昇流が人体が実際に吸引する空気大きな影響を与える。即ち人体は、自分の口周辺の空気も吸引しているが、上昇流により下の方から運ばれてくる空気も吸引している。CFDによる解析によれば、人体の吸引する空気のうち、約1/3が口の周辺、2/3が下から運ばれた空気である。特に床面付近に汚染源が存在する場合(図10及び図11)、人体は輸送されてきた汚染濃度の高い空気を呼吸している。化学物質等の汚染質は床付近で発生することが多いので、この問題は空気環境計画、極めて大切である。このような人体の吸引空気の解析にはCFD技術が非常に有効で

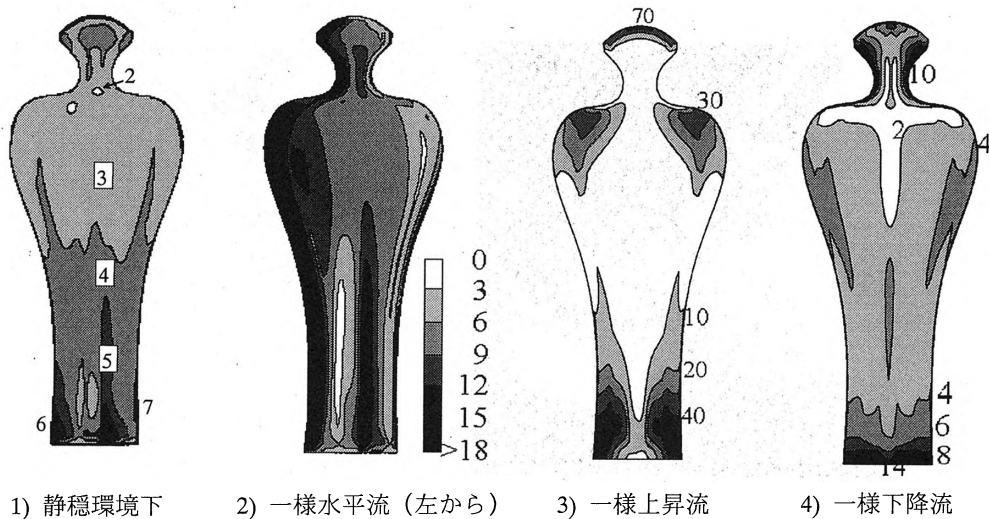


図9 各種環境下での人体表面对流熱伝達率分布 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

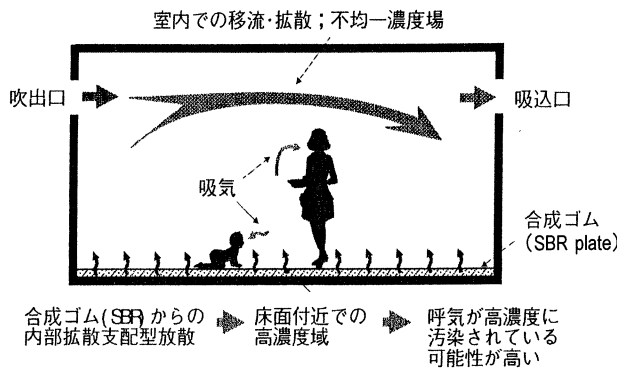


図10 床面からの汚染質放散と呼吸域濃度

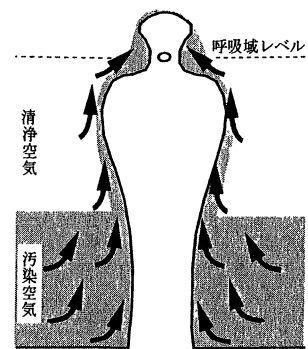


図11 汚染質誘因の模式図

あり、人体熱上昇流により下層の空気が人体呼吸位置に誘引される効果を評価する尺度として吸気の誘引効率等が提案されている。

4. サーマルマネキンを用いた人体周辺流れ場の可視化

サーマルマネキンを用いて呼吸域周辺流れ場の可視化を行った結果を示す。風速測定は PIV システムを用いている。本稿では2時刻の画像の相互相関を取り、移動量に対応する相関係数のピークを検出する事により風速ベクトルを算出するパターン相関法を用いて流れ性状の解析を行っている。

サーマルマネキンの呼吸量を定常吸い込み (case 1、図13)、定常吹き出し (case 2、図15)、実際の呼吸現象に対応した非定常呼吸状態 (case 3、図16) の3通りに制御し、同じ領域にて風速

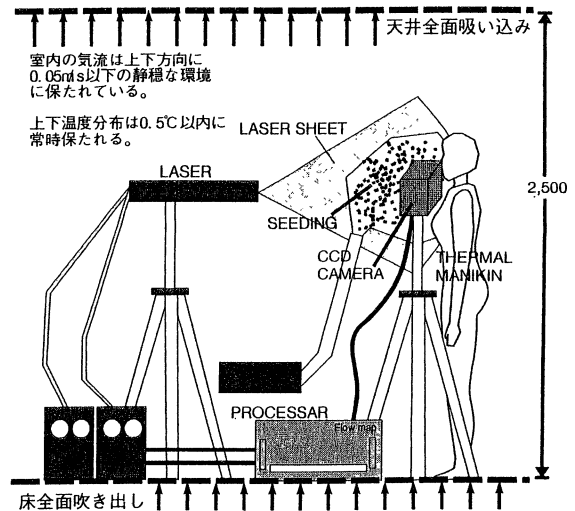


図12 PIVによる風速測定システム

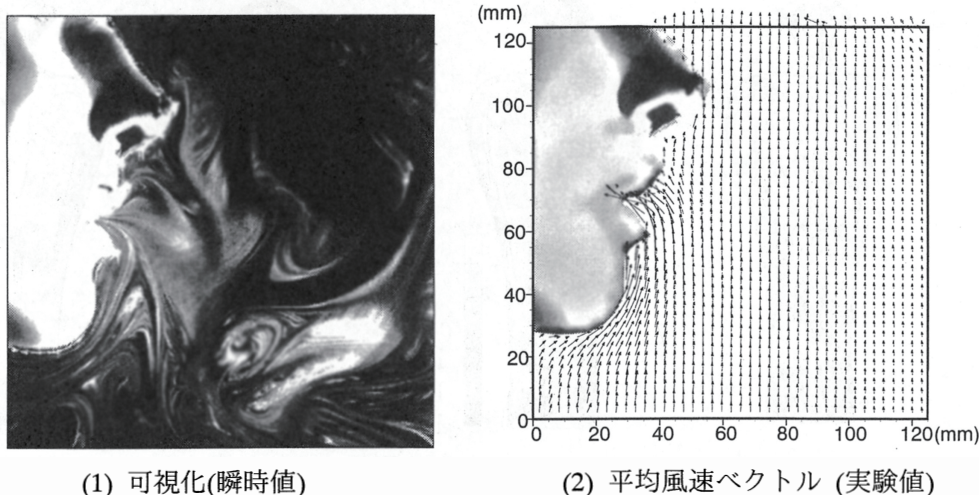


図13 定常吸込時の気流計測 (case 1)

測定を行った結果を示す。

可視化画像を見ると、口周辺の気流はやや乱れているが、60秒の平均値であるベクトル図では測定領域全体で安定した流れとなっている。人体周辺の上昇流域外では、室内空調の影響で上向きに0.05m/s程度の微風速となっているが、マネキン周辺ではマネキンからの対流熱放散に伴う浮力上昇流がマネキン表面に沿いながら呼吸域へと流

れ込んでいく様子が明瞭に観察される。口で定常的に吸気しているため、口位置水平面では口近傍で口方向へと向かうベクトルが見られるが、口位置水平面から上部の空間にはその様なベクトルは観察されない。口元での最大風速は0.24m/sとなっている。図14に数値解析と実験結果の比較を示す。数値解析による人体呼吸域の風速分布結果とこのPIV風速計による測定結果を、口位置を中心とした円筒座標系に変換し、口位置から半径5cmの円周上における半径方向成分の風速を比較する。値はそれぞれの結果を口許最大風速で無次元化した値として示す。CFDの結果とPIVによる実験の結果はこの円周上においては大変良く対応している。

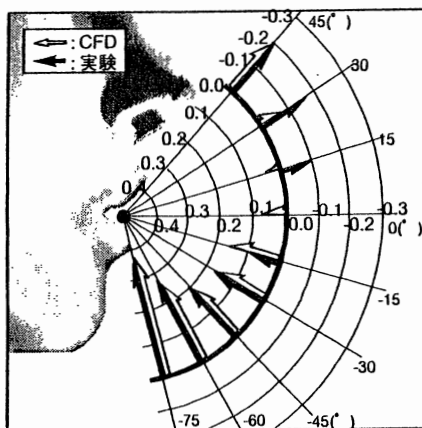


図14 数値解析と実験結果の比較

数値解析による人体呼吸域の風速分布結果とこのPIV風速計による測定結果を、口位置を中心とした円筒座標系に変換し、口位置から半径5cmの円周上における半径方向成分の風速を比較する。

値はそれぞれの結果を口許最大風速で無次元化した値として示す。

口元最大風速 CFD : 0.22m/s
 実験 : 0.24m/s

定常吹出の case 2 は case 1 の場合と同様に、人体周辺の上昇流域外では安定した微風速の上昇流が観察されるが、マネキン口からの吹き出しの影響により、口位置水平面より上部では斜め上方へ進む流れが観察される。マネキン口元では、マネキンの発熱により下部からマネキンに沿って上昇してきた流れが、吹き出しの影響で急激に水平方向へ拡散していく様子が顕著に再現されている。口元における最大風速は1.05m/sとなる。

実際の人体の呼吸現象に近いケースとして、呼気と吸気が交互に起こる状態を再現して測定を行った (case 3)。呼吸の間隔は6.0s で一回の呼

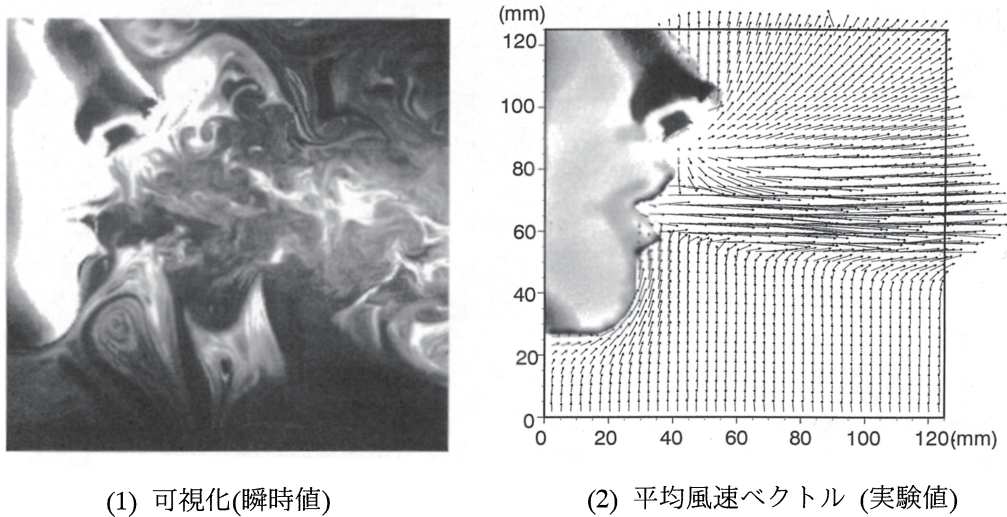


図15 定常吹出時の気流計測 (case 2)

気と吸気を行うと仮定した (10回/min)。本報ではサーマルマネキンの呼吸現象が吹き出しから吸い込みへと遷移していく過程の瞬時測定値として、吹き出し開始から1.6秒後の時刻 t' から0.4s間隔で6枚の図を示す。図16(1)~(4)までが吹き出し状態で、図6(5), (6)が吸い込み状態である。吹き出し状態のベクトル図を見ると、どの時間帯

においても吹き出し噴流による流れは上下蛇行し大きく乱れている (図16(1)~(4))。しかし、吸い込み状態の場合は、吹き出し噴流の影響が空間に残っているものの (図14(5))、全体としては比較的安定した流れ性状となっており、特に図16(6)は定常吸い込み時のベクトル図と良く対応した分布となっている。人体が立位状態の場合、吸気に

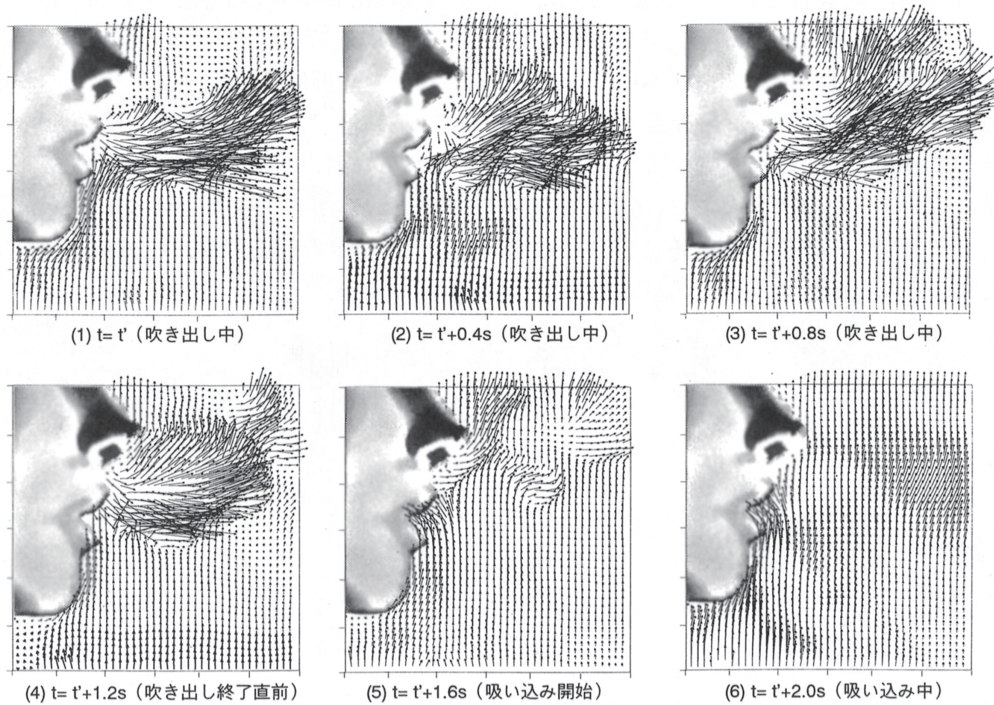


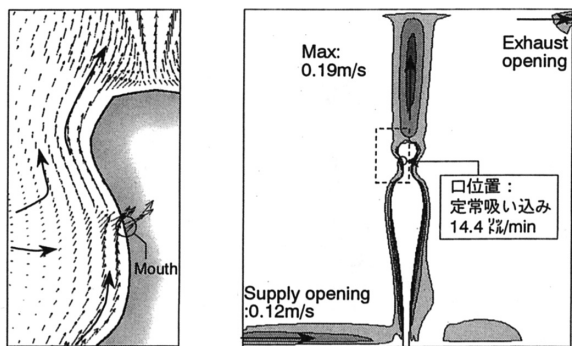
図16 非定常呼吸時の気流計測

より吸い込まれる空気は、吹き出し、吸い込みが繰り返されるこのケースにおいても、定常吸い込み時のそれとほぼ同じ場所の空気であることが示されている。

5. 人体周辺微気象シミュレーションによる汚染物質拡散場の解析

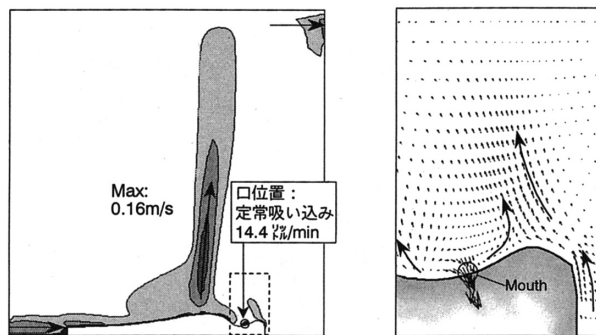
人間1名が在室する静穏に空調される室内空間を想定し、空調方式として冷たい新鮮空気を床面近くに低速で供給し、室内熱負荷により加熱された空気が天井面近くで排出される置換換気冷房方式 (Displacement ventilation) を採用した場合の人体周辺の流れ場の性状及び呼吸勢力範囲を解析した結果を示す。特に立位状態 (Case 1)、臥位状態 (Case 2) の人体に関して検討する。立位状態の人体は室中央部において、吹出口に向かって立ち、臥位状態の人体は吹出口の影響が呼吸域に直接影響しないよう、吹出口側に足を向け仰向けに寝ている状態を想定した。呼吸は非定常現象であるが、今回は定常現象を仮定し吸気時のみの解析を行った。吸気量は人体口位置で、定常的に14.4ℓ/minとした。

図17に立位状態 (Case 1) の流れ場の解析結果を示す。流れ場は室全体としては静穏である。しかし、人体のまわりにはその生理発熱による上昇流が生じている。人体口位置では定常的な吸気による比較的速い速度 (0.22m/s 程度) が観察される。又、呼吸域には生理発熱による上昇流により室下部からの空気が流入しており、人体はその上昇空気を吸引している性状が明瞭に観察される。温度に関しては、置換換気空調方式の特徴で



(1) 風速ベクトル分布 (2) スカラー風速分布

図17 立位時風速分布



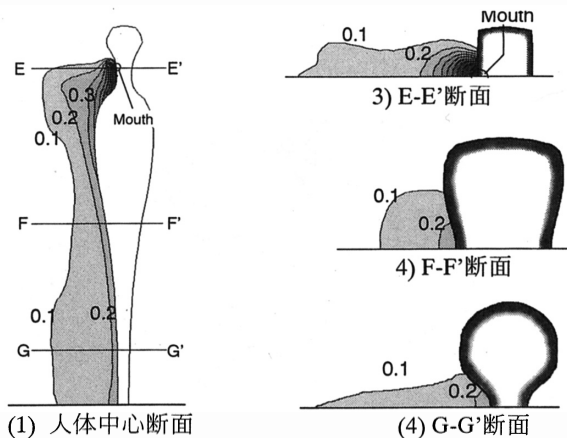
(1) スカラー風速分布風速 (2)ベクトル分布

図18 臥位時風速分布

ある温度成層が室内全体に形成される。

図18に臥位状態 (case 2) の流れ場の解析結果を示す。流れ場は立位時と同様に、室全体としては静穏であるが、人体近傍では、生理発熱による浮力上昇流が人体に沿いながら人体中心部 (胸近傍) に収束し、その上部に上昇流が生じている。人体中心での上昇流は最大で0.16m/s 程度となっており、立位時よりはやや小さい。呼吸域では、吸気による流れと、床面から上昇してくる流れとが混在し、やや複雑な流れとなっている。温度分布は立位時と同様に成層化する様子が見られるが、発熱体である人体が床面に臥せているため、人体周辺で急激な垂直方向への温度勾配が見られ、室上部はほぼ均一な分布となっている。

続いて、人体の吸気勢力範囲を解析した結果を示す。図19に立位状態 (case 1) の解析結果を示す。人体が吸引する空気の領域を示す吸気勢力範囲は人体の口を空調の吸込口の1つに見立て、



(1) 人体中心断面 (2) F-F'断面 (3) E-E'断面 (4) G-G'断面

図19 立位時の吸気勢力範囲

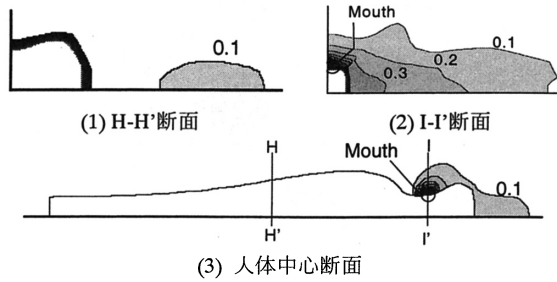


図20 臥位時の吸気勢力範囲

SVE5 (Scale for ventilation efficiency 5: 吸込口の勢力範囲) として算出した。これは各地点の空気がどの程度口に吸引されるかを示す割合の等値線を示している。人体が立位状態の場合、呼吸による吸気の勢力範囲は口位置から下部に広がり高い値を示す。これは、生理発熱に誘引される人体近傍の上昇流が、下部の空気を呼吸域へと誘引し、人体がその空気を主に吸引していることを示す。また、人体口位置での水平断面 (E-E' 断面) に示されるように、吸気の勢力範囲は人体正面方向のみに分布しており、顔の側面や後方の空気は全く吸引されない。

図20に臥位状態 (Case 2) の解析結果を示す。吸気勢力範囲は室中央断面 (ABCD 断面) では、口位置周辺から頭方向に高い値を示し、室上部や体中心方向からの吸引はない。頭方向で値が高いのは、吹出気流が頭の後方にウェイクを形成し、人体頭上側の空気が人体口方向へと回り込んでいるためと思われる。一方、体中心方向の値が低いのは、口位置から体中心側の空気が、ベクトル風速分布にも示されるように、体中心方向へと収束していくためであると思われる。人体口位置での垂直断面 (I-I' 断面) では、吸気の勢力範囲が比較的横方向に広く分布しており、人体が床面近傍の空気を口元位置に誘引している様子がよく観察される。

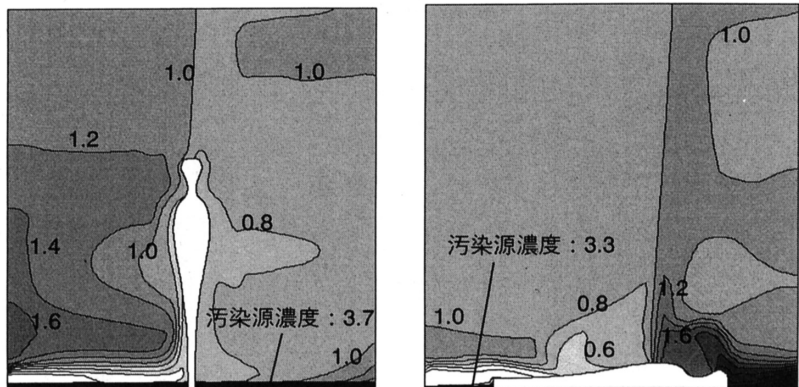
続いて、床面から一様に汚染質が発生する場合の室内濃度分布解析例を示す。

図21(1)に立位状態 (case 1) を、図21(2)に臥位状態 (case 2) を示す。排気口の汚染質濃度 (すなわち室内完全混合濃度) を1.0とした場合の、室内汚染質濃度分布を示す。人体が立位状態の時、吹出口からの新鮮空気は人体足下まで到達し、その後人体の生理発熱による上昇流と共に人体に沿って、上部へと輸送される。このため、人体は室内の他の部分よりもやや清浄な吹出空気を守られている。人体呼吸域平均濃度は0.98となっており、室内の平均濃度 (1.34) よりも、この室内条件ではやや低い値となっている。人体が臥位状態の時、吹出口からの新鮮空気は人体呼吸域に到達せず、人体の体中心位置で生理発熱による上昇流と共に上部方向へと輸送される。吹出口噴流のウェイクが人体頭付近に形成され、床面からの汚染質が滞留して高濃度域が生じている。立位状態の場合と異なり、床から人体高さ位置までに汚染質の濃度成層が形成される。人体呼吸域平均濃度は1.74となっており、室平均濃度 (1.05) や立位状態時のそれよりも高濃度となっている。

図22に人体が臥位状態の場合を対象として、床面の汚染源位置が変化した場合の人体吸気濃度を解析している。即ち汚染源位置が人体吸気汚染質濃度に及ぼす影響を評価するものである。この解析により、人体吸気濃度を低減するためには、どの位置の汚染源対策が有効であるかが明確となる。

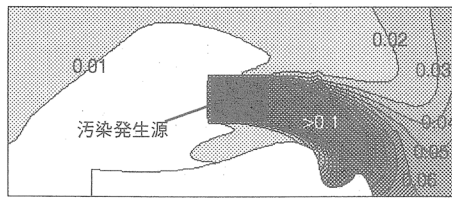
6. 人体吸気汚染影響度指数

人体吸気勢力範囲は、人体が口から吸引する空気の各場所における寄与率と考えられる。この寄

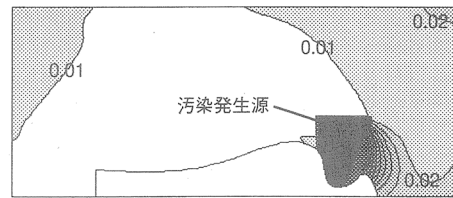


(1) 立位状態 (case1) (2) 臥位状態 (case2)

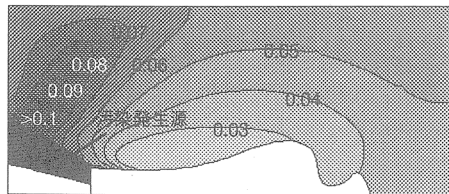
図21 床面一面汚染質発生の場合の室内濃度分布



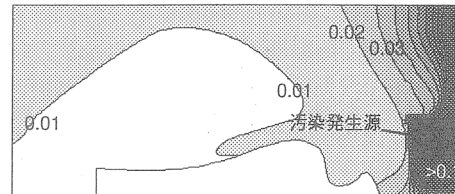
(1) 人体吸気の下流側に汚染源がある場合



(2) 人体顔近傍に汚染源がある場合

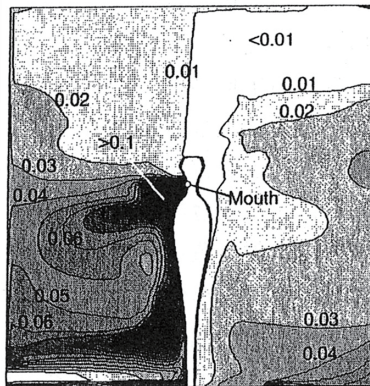


(3) 吹出口近傍に汚染源がある場合

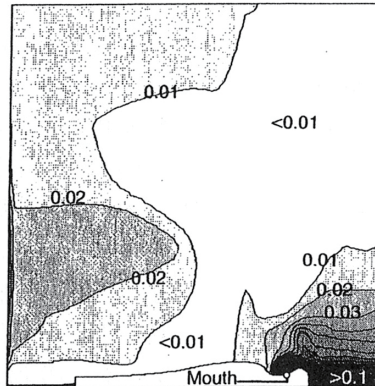


(4) 人体吸気の上流側に汚染源がある場合

図22 汚染質の室内水平濃度分布（臥位状態、床面1cm高さでの断面）



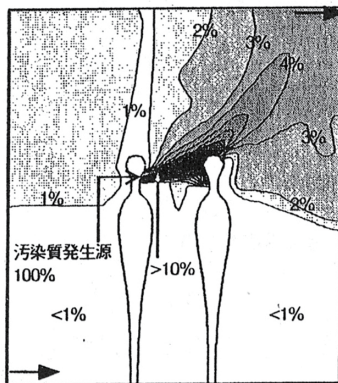
(1) 立位状態 (case1)



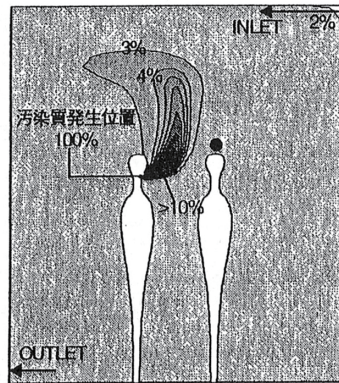
(2) 臥位状態 (case2)

図23 人体吸気汚染影響度指数分布(室中央断面、床面一様汚染質発生)

与率とその点での汚染質濃度の積は、その点の汚染が吸気空気質に与える実質的影響を示すものと考えられる。すなわち、呼気に吸引される割合（寄与率）が小さければたとえ濃度が高くとも人体呼吸空気質に与える影響は小さい。逆に呼気に吸引される割合（寄与率）が大きければ、低濃度でも人体呼吸空気質に与える影響が大きい。ここで、人体吸気の寄与率 SVE5 と排気濃度で無次元化された室内濃度の積を「人体吸気汚染影響度指数」と定義する。



(1) 置換換気方式の場合



(2) 室内混合冷房方式の場合

図24 呼出煙の濃度分布

図23(1)に立位状態 (case 1) の人体吸気汚染影響度指数分布を示す。人体が立位状態の場合、床面から発生した汚染質は人体周辺で大きな濃度勾配を持たない。そのため、人体吸気汚染影響度指数の分布は人体の吸気勢力範囲と類似した分布となり、立位状態の人体は体下部方向の汚染空気を良く吸っていることが示される。また背面側がある程度汚れていても、影響が少ないことが示された。また図23(2)に臥位状態

(case 2) の人体吸気汚染影響度指数分布を示す。人体が臥位状態の場合、人体の吸気勢力が高い値をとる場所と、床面からの発生した汚染質が高い濃度をとる場所がほとんど同じ場所であるため、人体頭上方向で高い分布を取る。逆にそれ以外の場所ではその値はほぼ0となっている。

7. 煙草煙拡散の数値解析

人体周辺の微気象と空気汚染の問題として重要な他の課題は間接喫煙である。置換換気方式と一般的な混合空調方式の2つの換気方式について、非喫煙者の受動喫煙性状を室内気流の詳細なCFDシミュレーションに基づき解析した例を示す。

図24に呼出煙濃度分布を示す。置換換気冷房方式の場合は喫煙者口から吹き出された呼出煙は、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の呼吸域平均濃度は、室内平均濃度0.9%に比べ極めて高く、約7.1%となる。室内混合冷房方式の場合は呼出煙は室の循環流の影響を大きく受け、受動喫煙者の呼吸域に直接的な影響を及ぼさない。そのため、受動喫煙者の呼吸域平均濃度と室内平均濃度の値は近く、それぞれ2.8%と2.4%である。

図25に副流煙濃度分布を示す。置換換気冷房方式の場合は喫煙者の呼吸域濃度は2.2%となる。受動喫煙者の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。室内混合冷房方式の場合は室内平均濃度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。

以上のように受動喫煙は良好な室内空気環境を画する上で、深刻な問題を提供している。

8. 風が人体に与える影響に関するCFD解析

風が人体に与える力学的影響は、快適で安全な屋外環境の設計において重要な要素である。しかし、これらの現象は大変複雑であるため、従来は風洞などを用いた実験的方法のみに頼り解析が行われてきた。ここでは、CFDを用いて人体周辺の風速分布を求め、屋外において風が人体に与える影響を検討した。

また、人体配置は、接近風速0.25 m/s の条件下で、①接近流に対して1人体が横向きに立っている場合(図26(1))、②接近流に対して2人体が前向きに並んでいる場合(図26(2))の、2通りについて検討する。

図26(1)に、1人体が接近流の中で、風に対して横向きに立っている場合の風速分布を示す。接近流は人体左側面に衝突し、腰の高さで人体に沿って上方へ向かう流れと、下方へ向かう流れとに別れる。風は人体

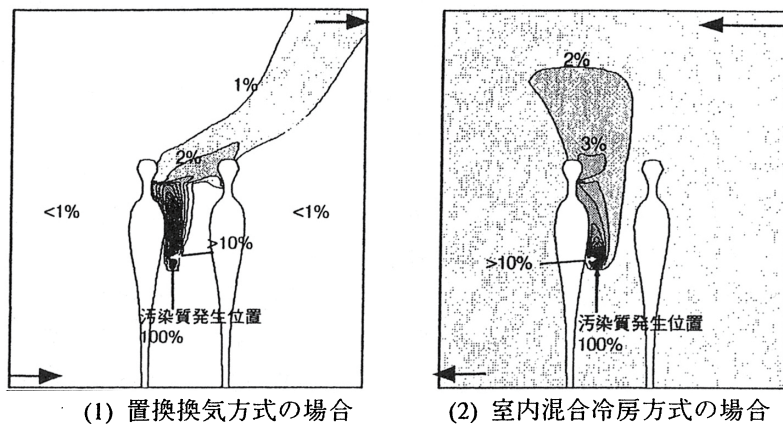


図25 副流煙の濃度分布

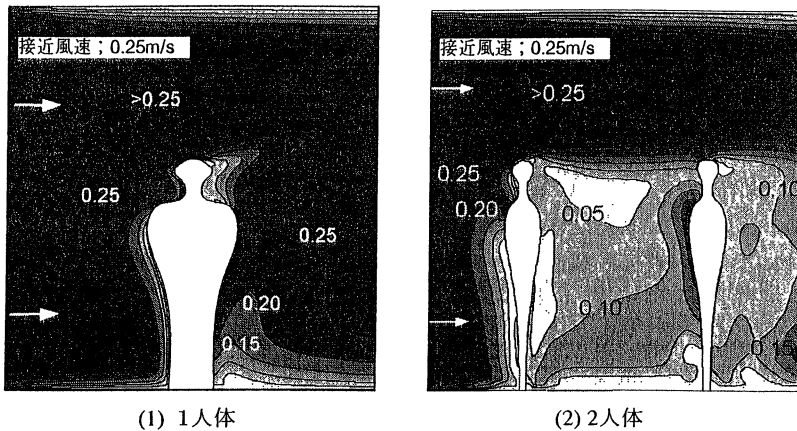


図26 接近流の中に人体が立っている場合のスカラー風速分布(m/s)

の側面に向かって吹きつけるため抵抗は小さく、人体右側面（風下側）では、接近流のウェイクは明確には観察されない。人体の発熱による弱い上昇流が観察され、この上昇流は人体頭部で接近流と合流し、右上方へ向かう流れとなる。

図26(2)に2人体が接近流に対して前向きで前後に並んで立っている場合の風速分布を示す。人体が風に対して前向きに立っているため、人体が風に対して横向きに立っている場合に比べて、左側人体（風上側人体）のウェイクが明瞭に観察される。この影響を受けて、右側人体（風下側人体）周辺の風速はおよそ0.10~0.20m/s程度と弱くなっており、人体に衝突する様なパターンにはなっていない。2人体周辺の流れは共に非常に複雑になっており、人体頭部付近で人体発熱による上昇流は明瞭には観察されない。

Ⅲ. 結語

住まいと建築環境の視点より、化学物質による室内空気汚染の背景、現状とその防除対策に関して概説した。更に、人体スケールの観点より、サーマルマネキンを用いた呼吸域周辺気流の可視化、人体周辺微気象シミュレーションによる呼吸域周辺の汚染物質濃度分布の性状を詳細に解析した結果を報告した。

文献

- 1) 村上周三：室内の化学物質汚染の実態と防除対策 — 基礎から先端まで —、日本学術会議50周年記念、第2回環境工学サロン講演資料、1999
- 2) 田辺新一：室内化学物質汚染。講談社新書、1998
- 3) 日本建築学会、特集：健康建築 — 化学物質室内空気汚染 —、建築雑誌4月号、1998
- 4) WHO, Indoor Air Quality: organic Pollutants, EURO Reports and Studies III, 1987
- 5) 村上周三、他：揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究 その1から8. 日本建築学会年次大会、1999、D-2、pp691-704
- 6) 村上周三、他：揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究 その8から14、空気調和衛生工学会講演論文集、1999、II、pp473-496
- 7) 朱晟偉、村上周三、他：受動喫煙に関する研究（その5）換気方式の違いによる人体呼吸域空気質のCFD解析. 日本建築学会大会学術講演梗概集、1999
- 8) 林立也、加藤信介、他：室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究（その2）姿勢の違いによる吸気勢力範囲のCFD解析. 日本建築学会大会学術講演梗概集、1999
- 9) 高島伸成、加藤信介、他：室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究（その3）PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定：日本建築学会大会学術講演梗概集、1999
- 10) 林立也、加藤信介、他：室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究（その4）姿勢の違いによる吸気勢力範囲に関するCFD解析：空気・調和衛生工学会学術講演梗概集、1999
- 11) 高島伸成、加藤信介、他：室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究（その5）PIV風速計による人体呼吸域周辺の風速測定：空気・調和衛生工学会学術講演梗概集、1999
- 12) Shuzo Murakami, Jie Zeng, et al: CFD analysis of wind environment around a human body. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 83: 393-408, 1999