様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ６ 月 １９ 日現在

機関番号：３２６２３
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2013
課題番号：２３７６０５５６
研究課題名（和文）咳による感染症リスクを低減させる建築・設備に関する研究

研究課題名（英文）Reduction of infectious risk due to coughed air in hospital

研究代表者
堤　仁美（TSUTSUMI, Hitomi）

昭和女子大学・生活科学部・講師

研究者番号：００４０９６９０
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,400,000円、（間接経費）　　1,020,000円

研究成果の概要（和文）：新型インフルエンザをはじめとした感染症の流行の際には、患者を診察する医療従事者への感染が大きな問題となる。本研究では、医療福祉施設において、感染症患者の咳による医療従事者に対する感染リスクを低減する建築・設備の提案に向け、模擬咳気流発生装置開発、感染対策手法の感染リスク低減評価、CFDによる気流解析、診察・診療行為の動作範囲測定、医療福祉施設における感染リスクの評価方法の提案を行った。

研究成果の概要（英文）：The healthcare workers would be exposed to high risk conditions of infection in the medical examination room during the treatment. A simulated cough generator was developed for this study. The experiments were conducted in a full-scale test room simulated as a medical examination room under the 17 conditions varying the manikin positions, airflow patterns using a push-pull ventilation system, and other conditions. Coughed air was simulated using CFD. Risk assessment formula was proposed considering the concentration of contaminated air and human behavior.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：咳　感染症　リスク低減　建築・設備

１．研究開始当初の背景

新型インフルエンザをはじめとした感染症の流行の際には、患者を診察する医療従事者への感染が大きな問題となる。医療従事者は、診察・治療のため患者付近の汚染濃度の高い領域に曝露される。特に患者の咳やくしゃみによるウイルスの飛散は医療従事者にとって大きな脅威である。また、このような場合には、診療体制にも支障が出ることが予想されており、安全性が確保された感染対策診療施設を必要数確保するためにも、感染への対策が急務となっている。

２．研究の目的

本研究では、医療福祉施設における感染症リスクを低減する建築・設備の実現に向け、模擬咳気流発生装置開発、感染リスク低減要素技術、診察・診療行為の動作範囲測定、CFD による気流流体解析、医療福祉施設における感染症リスクの評価方法の提案を行う。

３．研究の方法

本研究では、以下のような項目について実験・解析等を行った。詳細な研究内容・研究成果は、次項（4　研究成果）を参照されたい。

(1)模擬咳気流発生装置開発
(2)感染対策手法の感染リスク低減評価
(3)CFD による気流解析
(4)診察・診療行為の動作範囲測定
(5)感染リスクの評価方法の提案

４．研究成果

（１）模擬咳気流発生装置の開発

実際の患者の咳によるウイルスの飛散・感染を再現性を持って模擬するため、模擬咳気流発生装置を開発した。図 1 に模擬咳気流発生装置の概略図を示す。模擬咳気流発生装置の噴出ガスにはトレーサーガスとして、測定方法が簡便である二酸化炭素（100%濃度）を使用した。バッファータンク内での気体圧力と二酸化炭素噴出時間を調整することで咳を模擬する。

また、模擬咳気流発生装置で実際の咳気流を模擬できるよう、咳流量、噴出気流速度、気流性状などについて擬咳気流と人間の咳とを比較するための測定を行った。模擬咳気流発生装置の設定値が　P=0.5Mpa、⊿*t*=0.2s、1 回あたりの模擬咳噴出流量が約 524mL となった。

図 2 に模擬咳気流と人の咳の可視化実験結果を示す。0.3s　程度で噴出を終えているという点、噴出後 0.1s 程度で 30cm 前方に達しているという点、時間経過とともに広範囲に拡大しながら進行していく点が被験者の咳気流と類似していた。被験者全体の咳気流噴出速度の平均値は 27.6m/s であった。模擬咳気流発生装置の設定値における模擬咳気流の流速は 33.6m/s であった。

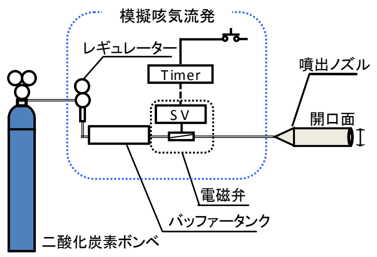

図 1 模擬咳気流発生装置

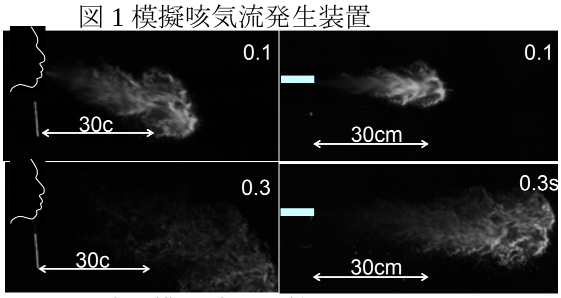

図 2　人の咳と模擬咳の比較

（２）感染対策手法の感染リスク低減評価

診察室を想定した実験室において、各種感染対策を行った条件下で模擬咳気流発生装置を用いて咳気流を発生させ、トレーサーガス濃度測定による感染リスク評価を行った。

図 3 に実験の概要図を示す。本実験は、診察室を模擬した実験室（平均空気温度 25.4℃、平均相対湿度 48%RH、静穏気流）、患者の咳を模擬して模擬咳気流発生装置から放出したトレーサーガスの濃度を、医療従事者（医師、看護師）にみたてたブリージングサーマルマネキンの呼吸域で測定し、各種感染対策との組み合わせによる感染リスク低減効果を検討することを目的とした。

トレーサーガスとして二酸化炭素を用いた。感染対策のための環境制御手法としてプッシュプル装置の設置による気流制御、人体位置の変更、隔壁、マスクに着目した。図　4 に実験条件を示す。

模擬咳気流発生装置を備えた人体模型により患者を模擬し、呼吸機能を持たせたサーマルマネキンにより医師を模擬した。人体模型、サーマルマネキンは共に椅座状態とした。本実験では、咳を噴出する側の人体周りの上昇気流は、咳から出される風速に比べて極めて小さいと考え、人体模型を発熱させないこととした。

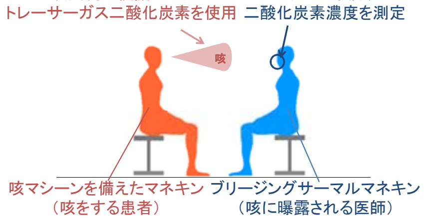

図 3　実験概要

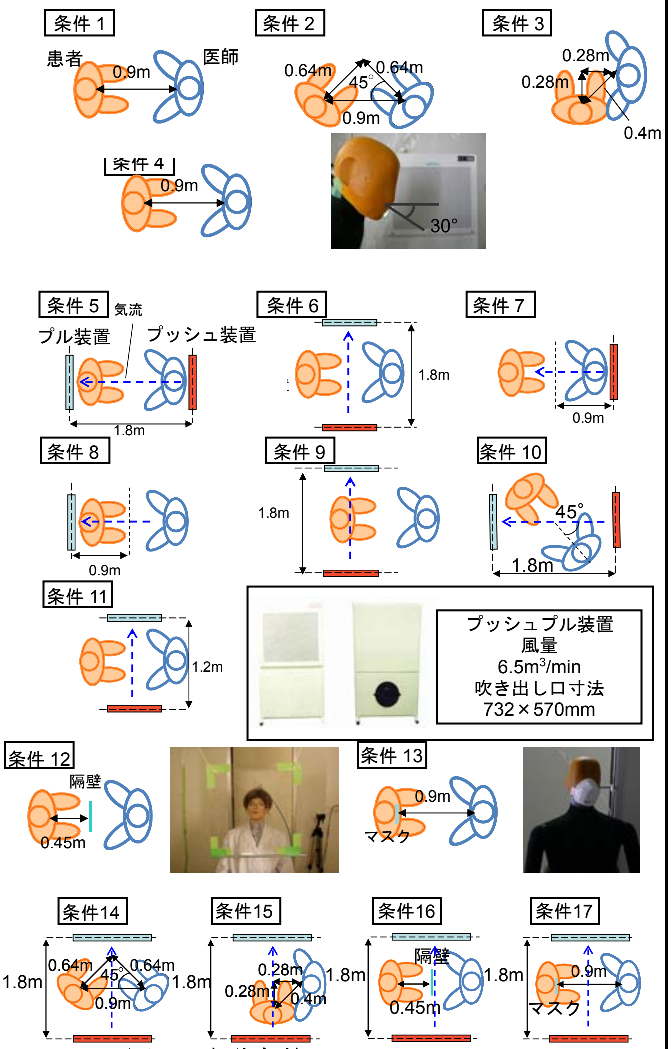

図 4　実験条件

医師の呼吸域の二酸化炭素濃度変化量の積算値と咳気流により放出された二酸化炭素の捕集効率の二つを考慮に入れた感染リスク評価を行った。積算値は、二酸化炭素濃度の測定値に測定秒数を乗じて算出した。また、咳気流として噴出された二酸化炭素をプル装置で捕集する割合を「捕集効率」と定義した。

本実験条件の感染リスクを表現するために、縦軸を捕集効率、横軸を積算値とした感染リスク評価図を作成した。図 5 に積算値と捕集効率による感染リスク評価を示す。条件 1 の何も対策を行っていない状態が最も感染リスクが高いと評価される。本実験で感染リスクの低減効果が一番高いと評価される条件は、積算値と捕集効率の 2 つの項目の結果において一番高い効果を得られた横方向からのプッシュプル気流の条件 11 となった。人体の位置関係やマスク、隔壁の使用のみでも医師の呼吸域の曝露濃度は大幅に低減できるが、室内に咳気流からの二酸化炭素が拡散し多く残ってしまうことから、本研究の評価では必ずしも感染リスクの低減効果が高いとは言えない。また、プッシュ装置とプル装置を併用した条件 5 とプッシュ装置のみの条件 7 を比較すると、積算値はほぼ等しいが、捕集効率の観点から、条件 5 のほうが感染リスク低減効果が高いと評価できる。プッシュプル装置の配置や患者と医師の位置関係によって曝露される二酸化炭素濃度が大きく変化することから、患者や医師の呼吸域を考慮に入れた診察室の空調計画が重要であると言える。

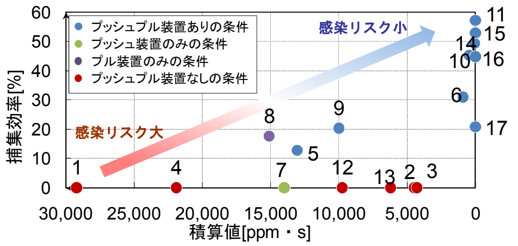

図 5　感染リスク評価図

（3）CFD による気流解析

他条件検証が可能な実験の再現モデルの作成、模擬咳気流発生装置から噴出された二酸化炭素をトレーサーガスとする咳気流の挙動の詳細な把握を目的として、（2）で示した実験を再現する数値流体解析（CFD）を行った。CFD モデルの作成には、三次元流体解析システム SCRYU/Tetra Ver.8（ソフトウェアクレイドル）を用いた。

図 6 に対象モデル空間、表 1 に解析の設定条件を示す。対象モデルは前項で示した実験室を模擬した。定常解析により室内の温度・気流分布、空気の流出入等の定常を算出した後、患者を模擬したモデルの口から二酸化炭素の咳気流を噴出させる非定常解析を行った。

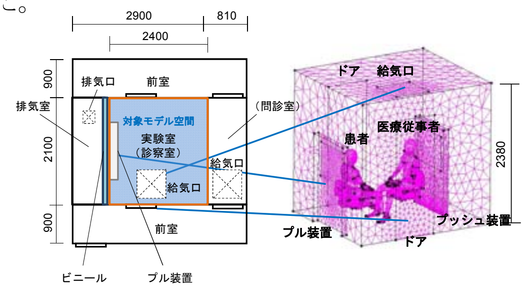

図 6 解析モデル空間

表 1 解析設定条件

	項目	設定
解析モデル	解析条件	定常解析 ＋非定常解析
	解析要素	流れ、温度、拡散
	乱流モデル	MPAKN 線形 低レイノルズ k-ε
	メッシュ数	1.2×10^{6}
空間	部屋寸法	2.4×2.2×2.4m
	室内温度	26.5℃
咳	口腔面積	1.3cm^2
	咳流量	4.7×10^{-2}kg/s
	咳温度	26.5℃
	咳継続時間	0.20s
	物性値	二酸化炭素
プッシュプル装置	吹出し寸法	732×570mm
	風量	1.3×10^{-1}kg/s

図 7 に床上 1.1m の咳気流として噴出された二酸化炭素濃度分布の経時変化を示す。条件 1、5 においては、噴出された二酸化炭素は医師へ直進し、噴出から 1s 前後で医師の顔に直撃した。条件 6 では、二酸化炭素はプル装置へ吸い込まれるように進行を逸らし、医師の口元まで到達しなかった。プッシュプル装置を使用した条件 5、6 では医師の頭部付近での二酸化炭素濃度の減少が装置を使用していない条件 1 よりも早かった。プッシュプルにより捕集されたためと考えられる。しかし、二酸化炭素がプル装置に吸い込まれる過程で、医師の頭部付近で二酸化炭素の濃度が高い部分があり、感染リスクが高まる可能性がある。また、二酸化炭素がプッシュプル気流域から一度外れてしまうと、プル装置に吸い込まれず、室内に長時間留まる可能性が考えられる。

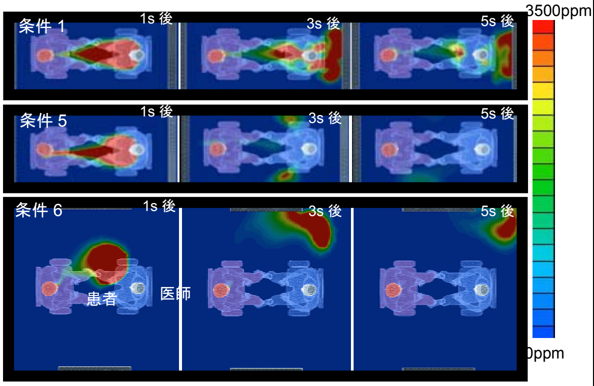

図 7　二酸化炭素濃度分布

(4) 診察・診療行為の動作範囲測定

前項のCFD解析結果より、室内気流の調整などにより、患者からの咳気流の挙動を変えることができることを示した。しかし、依然として汚染物質濃度の高い咳が医師の近くを横切っており、感染リスク評価のためには人の動きを考慮する必要があると考えられた。

そこで発熱外来診察室における診察中の医師、看護師、患者の動作解析を行った。医師、看護師、患者にマーカーをつけ診察行為をし、その様子をビデオカメラで撮影し、3 次元ビデオ動作解析システムにて解析を行った。男性医師3 名、女性看護師1 名が実測に参加した。患者役の被験者は男性7 名、女性1 名とした。軽度、中度、重度の3 つの症状を想定し、順番に被験者に演じさせた。医師1 名当たり50 分間診察を行った。患者 1 名当たりの診察の時間は、普段の診察と同程度の時間となるように医師の判断とし、診察が終わったら次の患者を呼び、診察を開始した。50 分間の診察が終了したら、次の医師に交代し、3 名で計150 分の診察を行った。

図8に診察中の動作軌跡測定結果より作成した医師、患者、看護師の頭頂部の存在割合の平面分布を示す。解析範囲を一辺300mm の正方形で格子状に分割し、全診察時間中に各格子のなかに頭頂部のマーカーがある時間割合を求めた。軽度の場合は、医師及び患者は一定のところにとどまっていることが分かる。一方、看護師は診察室内を広範囲に動き回っていた。医師の感染リスク低減のためには局所的な換気が有効であると考えられるが、看護師の感染リスク低減のためには全体換気のことも考える必要がある。重度のときには、看護師だけでなく医師も広範囲に動き回っていた。一方、患者の動きが極めて限定的であり、感染源が一定の場所にとどまっていることが分かった。

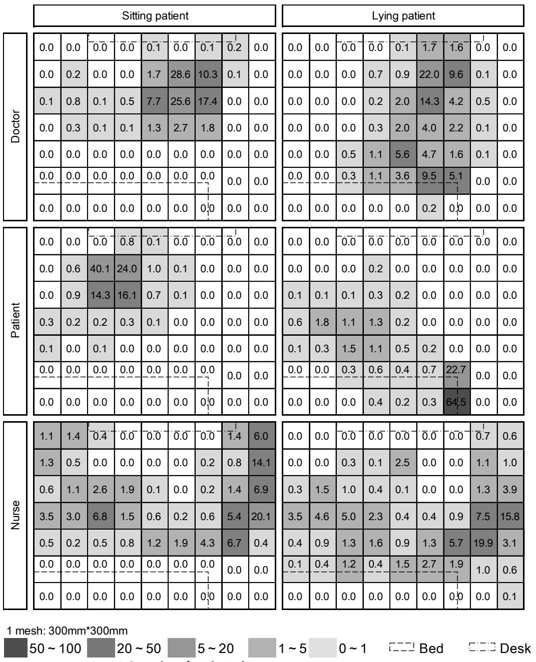

図8　頭頂部存在割合

（5）感染リスクの評価方法の提案

以上の実験・実測結果を踏まえて、感染リスク評価方法の提案を行った。図 9 に診察室を横 m 縦 n の格子に分割した時の咳気流による医療従事者（医師、看護師）の感染リスク R の算出式を示す。分割した格子における感染原因物質の積算値に動作範囲の重みづけをし、換気効率により変化する値によってそれを除した。積算点の高さは、看護師は診察中常に立っていたことから 1.4m で一定とし、医師は、患者を座らせて診察をする時は自席に座り、患者を寝かせて診察をする時には立って診察を行ったので、それぞれ異なる値を用いた。また、換気をすることが有効な場合と直接感染原因物質を浴びないことが重要な場合は、支配的な感染経路によって異なるため、感染経路によって決定される係数 a を換気効率に乗じた。

$$R=\frac{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}\left(E_{dxy}I_{xy(z=h)}+E_{nxy}I_{xy(z=1.40)}\right)}{1+aV}\quad\cdot\cdot\cdot(1)$$

E_{dxy} ：医師の各格子中の存在割合[%]
I_{xy} ：各格子中心の感染原因物質積算値[ppm・s]
z ：積算点の高さ[m]
h ：座らせて診察をする時 $h=1.05$ [m]
寝かせて診察をする時 $h=1.40$ [m]
E_{nxy} ：看護師の各格子中の存在割合[%]
a ：感染症による各感染経路の支配率によって決定する係数
(飛沫感染が支配的ならば $a=0$ に近づく
空気感染が支配的ならば a は大きな値)
V ：換気効率[%]
ただし、I_{xy} は以下条件基づきに算出する
$h=1.05$ の時：
患者席位置から医師席方向水平に咳を模擬し、感染原因物質の放出を行った際の積算値
$h=1.40$ の時：
患者をベッドに寝かせた時の口の位置から、上向きに咳を模擬して感染原因物質の放出を行った際の積算値

図 9 感染リスク評価式

評価法の特性を明らかにすることを目的として、表 2 に示す 5 つの条件の CFD モデルを作成した。構築した CFD モデルの設定を使用して、各種感染対策を行った際の感染原因物質の広がりを算出し、動作範囲の測定の結果を合わせて感染リスク R を求めた。その結果、捕集効率を考慮すること、また、存在割合で重み付けすることで、より重点的に換気するべき範囲を評価できた。

表 2 解析条件

条件	姿勢	プッシュプル	天井換気[回]
1	座	なし	12
2		あり	0
3	寝	なし	0.5
4		あり	0
5		なし	12

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　1 件）
・Hitomi Tsutsumi et al.: Area and Amount of Deposited Cough Droplets Ejected by a Droplet Atomization Manikin, Proc. of 9th International Meeting for Manikins and Modeling, 査読有,Tokyo, 2012

〔学会発表〕（計　３件）
・堤仁美他：医療福祉施設における感染リスク低減に関する研究　その 19、日本建築学会大会学術講演会梗概集、2014 年 9 月 13 日発表、神戸
・田坂愛美、堤仁美他：医療福祉施設における感染リスク低減に関する研究　その 20、日本建築学会大会学術講演会梗概集、2014 年 9 月 13 日発表、神戸
・岡島彩子、堤仁美他：医療・福祉施設における感染制御に関する研究　（第 7 報）、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1079-1082、2011 年 09 月 15 日発表、 名古屋

６．研究組織
(1)研究代表者
堤　仁美　（TSUTSUMI, Hitomi）
昭和女子大学・生活科学部・専任講師
研究者番号：00409690