

不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その3)
 Purging Flow Rate 検討用精密模型を用いた室内気流測定

正会員 ○鈴木信夫 (静岡ガス (株))
 同 加藤信介 (東大生産技術研究所)
 同 小林 光 (大成建設 (株))

学生会員 伊藤一秀 (東京大学大学院)
 正会員 村上周三 (東大生産技術研究所)
 学生会員 林 立也 (東京大学大学院)

1. 序

前報^{文1,2)}では、居住域の汚染質平均濃度を評価するための指標として Purging Flow Rate (以降 PFR) の概念を導入すると共に、室内の気流性状の変化が居住域の PFR に与える影響を検討する目的で精密室内気流模型実験を行い、その結果を報告した。精密室内気流模型実験は数値計算との対応を考慮し、2次元の流れ場を形成することを意図したが、吹出噴流・誘引域、特に対向壁との衝突域などの範囲で風速分布に3次元性が見られることを報告した。本報では、この問題について更に検討を加えて新たに測定し、室内各断面で2次元性の高い風速分布を得ることに成功した。

2. Purging Flow Rate

居住域の空気質はその汚染質濃度で直接評価される。換気設計では一般に汚染質発生をコントロールして汚染質濃度の制御を計ることは難しく、居住域の換気量、換気効率を制御することにより空気質を制御することになる。より直接的な制御手段である換気性状を評価するという観点から居住域の有効な換気量を表す PFR が居住域の汚染質濃度と並んで居住域の換気性状を示す有用な指標となる。

完全混合を仮定する室内で発生する汚染質の室内濃度は換気量で定まる。これに対応して、不完全混合室内における評価対象領域の平均濃度を定める換気量 (PFR^{文3-5)}、排出換気量を考えることができる。PFR とは、解析対象として局所的に設定された領域内 (PFR の評価対象領域: 室内に仮想的に設定される小又は中の閉空間) に対する実質的な換気空気の入流量 (又は排出量) を示すもので、以下のように定義される。

$$PFR = \frac{q}{C} \quad (1)$$

PFR: 対象領域の Purging Flow Rate [m³/s],
 q : 対象領域内の汚染質発生率 [m³/s],^{注1)}
 C : 対象領域内の汚染質の平均濃度 [-]

PFR 評価対象領域の大きさ・位置及び汚染質発生位置によりその値が変化する。PFR 評価対象領域の汚染質平均濃度は、その領域で発生した汚染質

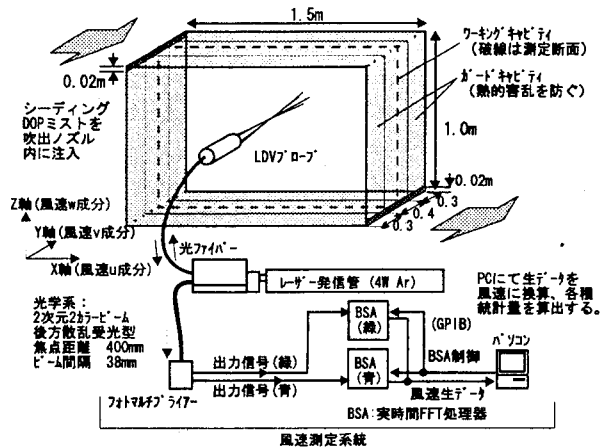


図1 居室模型の構成と LDV システム

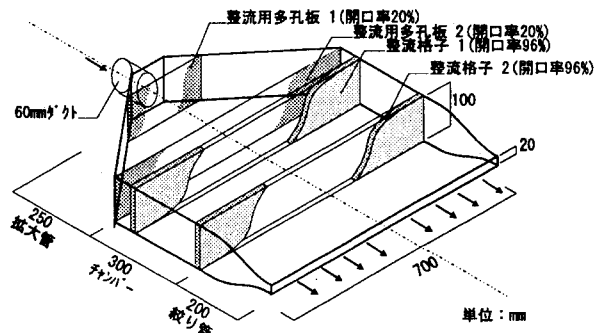


図2 吹出ノズル

の平均滞在時間に比例する^{文6,7) 注1)}。即ち PFR は評価対象領域で発生した汚染質がどの程度その領域に滞在するか、また一度その領域から流出しても再び室内気流により対象領域に還流してくる割合はどの程度かを示す汚染質の排出効率を示す指標になっている。本研究では評価対象領域を室内の居住域空間とし、居住域の PFR の性状を検討対象とする。居住域の PFR が与えられれば汚染質の居住域平均濃度はその発生量から直ちに算出される。

3. 実験概要

(1) 実験目的 PFR の解析は本報注 1. で示すよう

Study on Evaluation of Ventilation Effectiveness of Occupied Space in Room (part3)
 Precise Model Experiment of Airflow in Room for Analyzing PFR

SUZUKI NOBUO et al.

に発生汚染質のラグランジェ拡散過程の解析可能性を有する LES (Large Eddy Simulation) によることが期待される。LES による気流解析の検証となり得る、また実験的な PFR 解析の基礎となる精密な気流実験を行う。解析の便宜のため、できるだけ単純な流れ性状とするために 2 次元の室内気流を対象とし、また居住域の PFR に影響を与える各種要因に対処しうる実験システムとする。

(2) 模型概要 (図 1 参照) 模型は居室をモデル化したもので $X \times Y \times Z = 1.5\text{m} \times 0.3\text{m} \times 1.0\text{m}$ 。模型空間の下部半分を居住域と想定する。Y 方向に均一な 2 次元の流れ場を形成することを意図し、キャビティ幅のスロット状吹出口と吸込口を備える。吹出口、吸込口は共に高さ 20mm のスロット状である。この吹出、吸込口の取り付け位置は変更可能で、様々な換気性状を作ることができる。測定はこの長方形キャビティで行い、これをワーキングキャビティと称する。ワーキングキャビティを熱的にガードするため、その Y 方向両脇に同じ構成のガードキャビティ (但し Y 方向幅 0.2m) を設け、ワーキングキャビティを挟み込む。この構成によって、ワーキングキャビティの Y 方向の境界において、熱の勾配 0 の条件を作成する。また、天井・床・壁 (2 面) の各面は 10 枚のアルミ製通水パネルにより構成されており、温度制御されたブラインを送ることで模型内表面温度^{注2)}を制御する。通水パネルは組み合わせにより 3 系統でブラインが供給される。(一系統当たり 3l/min)

(3) 吹出ノズル (スロット吹出し) Y, Z 方向に均一な風速分布を得ることを目的に図 2 に示す構成とした。(4) 風速測定 本研究では主に 2 次元の LDV (図 1) を用いて風速を測定^{注3)}。データ数は 15000 個以上を確保しているが、サンプリング間隔は不等間隔である。シーディング粒子にはフタル酸ジオクチル (DOP) ミストを用いた^{注4)}。

(5) 測定ケース 吹出口・吸込口の組み合わせにより 3 ケース設定 (図 6)。測定位置はどれもワーキングキャビティ中央断面 (図 3)。また、CASE1 において Y 方向の 2 次元性を調べるため、測定ライン 1~4 の位置で風速測定を行った。(図 3 参照)

(6) 実験条件 吹出風速は約 3m/s で、模型内は等温である。吹出空気及び模型内表面を約 25°C に制御、吹出空気温度、表面温度測定結果のばらつきは最大でも 1°C 程度であった。

4. 実験結果、考察

(1) 吹出噴流の 2 次元性 (図 4(1), (2)) 吹出口の中央高さの風速 u の水平分布を図 4(1) に示す。各測点の風速は、同測線上の平均風速に対し $\pm 1.5\%$ のばらつきに収まり、高い 2 次元性を示す。図 4(2) に吹出口直後の 3 つの異なる位置にお

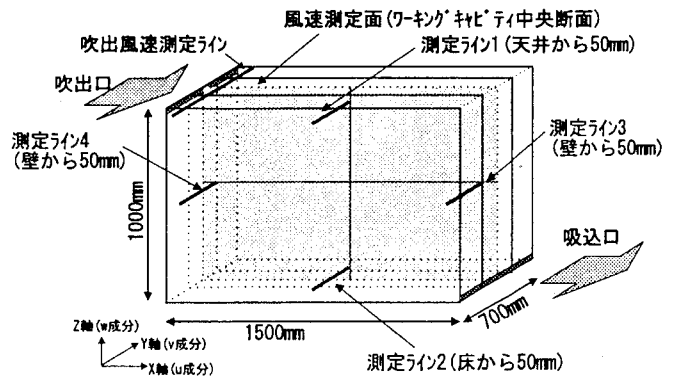


図 3 風速測定ライン

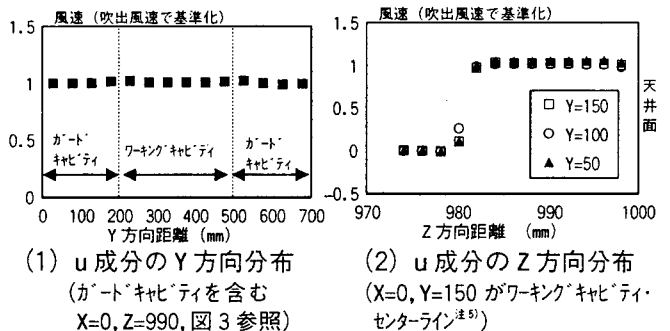


図 4 吹出噴流吹出口面における 2 次元性の検討

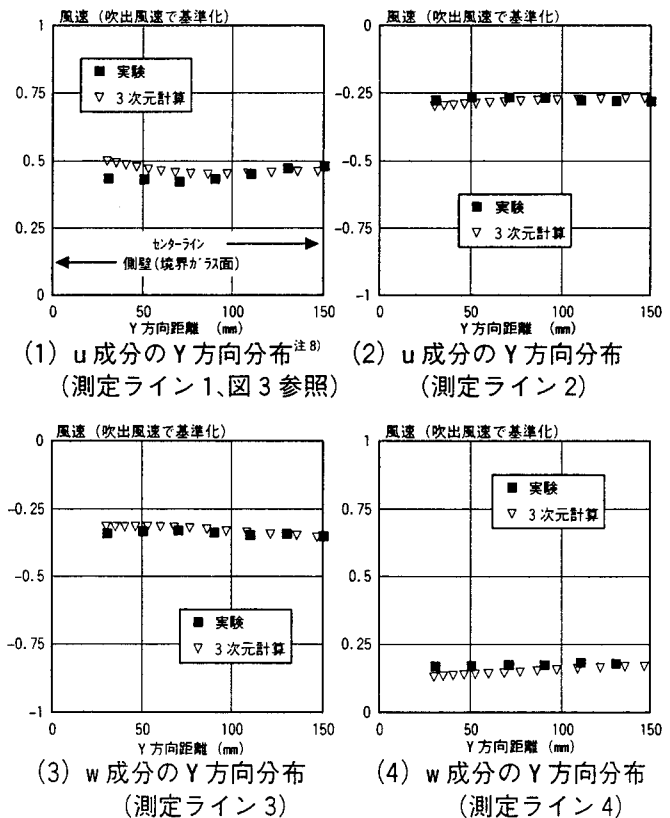


図 5 噴流誘引・衝突域及び循環域における流れの 2 次元性の検討

る風速 u の Z 方向分布を示す。3 つの Z 方向分布は互いに非常に良く一致し、吹出口面で高い 2 次元性を示すことを確認した。(2) 流れの 2 次元性

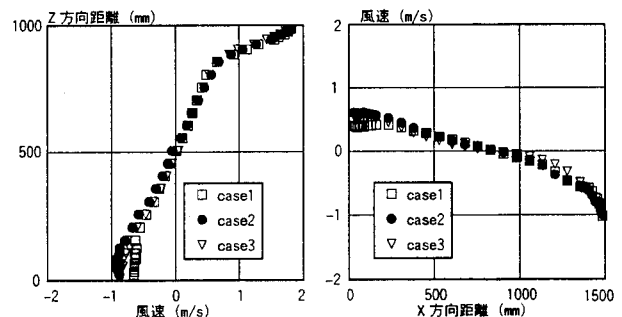
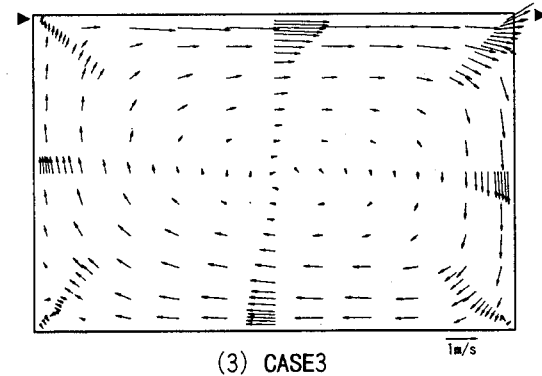
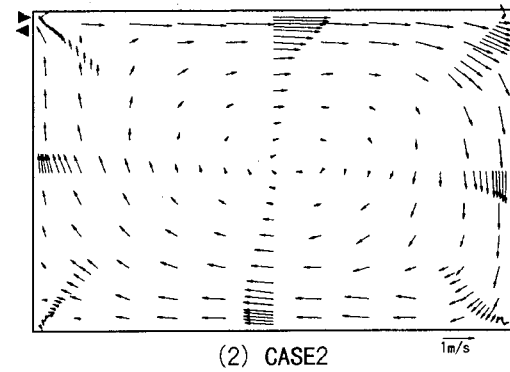
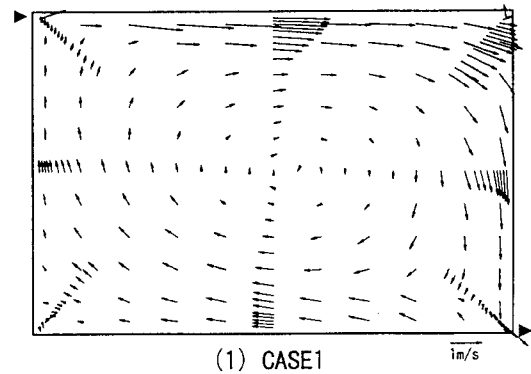
元性の検討 前報では吹出噴流誘引流の風速分布が2次元性を示さず、3次元性状を示すことを報告した^{注6)}。今回吹出口噴流誘引流の2次元性に関しさらに検討を加えた結果、模型内ワーキングキャビティとガードキャビティの気密性が流れの性状に影響することを確認した^{注7)}。図5に各測定ラインのY方向風速分布を示すが、2次元性は前回に比べ著しく改善した結果を示す。

(3) 数値シミュレーション予測との比較 (図5)

標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた3次元解析を行い、解析結果^{注8)}を実験結果と比較した。数値解析結果も厳密な2次元性は示さず、流れは3次元性状を多少示す。一般的に風速分布は実験と計算は大変良く一致するが、壁面近傍ではやや差異が見られる(図5(1),(2))。吹出口対向壁面及び吹出側の壁面($Z=500$ 、各壁面から50mm)のY方向風速分布は均一な風速分布となった(図5(3),(4))。

(4) 室内中央断面平均風速分布 (図6) 前回の測定結果(前報^{注1,2)}参照)と比較すると、全体の流れ場においては大きな変化は見られず、各ケースとも右回りの大きな循環が観察され、キャビティ隅角部では、大きな循環とは逆向きの二次渦が観察される(図6(1)~(3)^{注9)}。しかし、2次元性を確保した流れ場では天井下20mmの位置での最高風速が前回測定値と比較し30%程度小さくなり、また床付近では若干風速が増加している。また、u成分のZ方向分布(図6(4))は天井付近では各ケースともほぼ同じ風速分布であるが、床付近ではCASE2の風速が最も大きくCASE1が小さい。w成分のX方向分布(図6(5))は吹出口壁付近ではCASE2の風速が最も大きくCASE1が小さい。吹出口対向壁付近ではCASE3の風速がやや小さくなっている。

(5) ブロック間の流量 (図7) 吹出口から流入する換気流量に対し、模型内でどの程度の循環流量が生じているか、特に模型空間の下部居住域に流入する流量を解析する。このため、キャビティを4つのブロックに分割し、各界面の流量を算出する。ここでは領域③、④(図7)を居住域と想定した。各ブロック間での流量を図7に示す。流量は各測定点の風速を台形則によって積分して求め、これを換気量で基準化した。ブロック間流量の収支は補間誤差、若干の3次元性の影響により表面的には必ずしも質量保存を満たしていない部分もあるが、前回の測定結果に比べ格段に改善した結果となっている(前報^{注1,2)}参照)。また、吹出・吸込を有する領域では当然それに対応した流量変化を伴う。各ケースとも居住域に出入りする流量は吹出空気量1に対し3.3~4.2倍の流量となった。CASE1では居住域に流入する流量3.8に



(4) u成分のZ方向分布 (X=750, Z=0~1000mm) (5) w成分のX方向分布 (Z=500, X=0~1500mm)

図6 室内中央断面風速分布

比べ、居住域を循環する流量は3.4と小さくなる。CASE2では居住域を循環する流量と室上部を循環する流量がほぼ対応する。CASE3では居住域に流入する流量は保存されるが室上部で生じている循環流量に比べ小さくなっている。ブロック

間流量と PFR の関係については続報で考察する。また流量の領域間収支に着目すると CASE1 の水平方向収支は 1.3 であるが、吸込流量 1 を考慮すると流量収支は 0.3 とほぼバランスする。垂直方向収支は 0.4 である。CASE2 は領域②→③間の流量が他の領域間流量に比べ小さくなっている。CASE3 は CASE1 と同様の傾向である。各ケースとも吹出口対向壁側、つまり領域②→③間での流量が小さくなっている。これは、測定法上の問題とも考えられる。今後更に検討したい^{注11)}。

5. 結論

(1) 2 次元の流れ場を得るための検討を加えた結果、充分 2 次元的な流れ場を得ることに成功した。(2) 2 次元性を確保した流れ場で風速を測定した結果、各領域間の流量バランスは前回測定結果に比べ格段に改善した。(3) 換気流量に対する模型室内の各領域の循環流量は各ケースとも 3~4 倍となった。(4) 天井面付着噴流の性状は吸込口位置の変化により影響を受けないが、居住域の循環流量は顕著に変わり、居住域の換気性状に影響を与える可能性が示唆された。

[謝辞] 本研究にあたり、Sandberg 氏、Blay 氏にご助言を頂いた。記して謝意を表す。

[注] 注 1: PFR は対象領域内の汚染質発生方法を問題としない。汚染質発生量は純粋にその場所で発生したものの他に、他の場所で発生し移流により流入する量を考えることができる。但し移流による汚染質を発生量と考える場合、対象領域で一度流入して排出された後、再び流入する汚染質は滞在時間の延長に寄与するもので発生に寄与するものではないので除外することになる。汚染質の滞在時間や還流確率を通常の実験や RANS モデルによる CFD で解析することは困難である。精密な模型実験との比較により信頼性を確保された LES による解析が有効になる。注 2: 各パネルについては供給水温度 25.6℃、霧困気温度 46.2℃の条件で表面温度を測定した結果、最大温度差は 1℃以内となった。測定には赤外線放射温度計を使用。注 3: 測定はトラバース装置により LDV7[®]ローブを位置決め精度 0.1mm で移動させて行う。注 4: DOP ミストの発生には IPDゾル発生装置を用いた。注 5: Y=150mm はワキングキャビティ中央断面となる。測定はこの中央断面の他、50mm づつがートキャビティ側にシフトした断面で測定。なお、Z=0 は床面、Z=1000 は天井となる。注 6: 前回の測定ではキャビティ内流れ場のうち、吹出噴流の衝突域において 3 次元の流れ場となった。ただし、床面、吹出対向面・吹出口面近傍における風速分布はおおむね 2 次元性であることを確認している。注 7: ワキングキャビティとがートキャビティ間には模型構造上若干の隙間が生ずる。噴流の誘引域及び衝突域ではこの隙間が流れの 2 次元性状に多少の影響を与えることが観察された。ワキングキャビティにがートキャビティに対し微小(0.3mmAq 程度)圧力を加えることにより流れの 2 次元性が向上した。今回の実験模型では全体の αA (隙間面積) = 0.0011m²程度であった。また、ワキングキャビティとがートキャビティ間のガラス面は、気密性を確保するためにゴムパッキンにより仕切られているが、完全な状態であるとは言い切れない(スモークスターによる可視化ではキャビティ間の漏れはほとんど観察されない)。今後ワキングキャビティとがートキャビティ間の気密性と流れの 2 次元性の問題に関してはより詳細な検討を行う予定である。以降の風速測定はワキングキャビティ静圧を調整し 2 次元性を確保した状態でやっている。隙間面積は次の式より算出。

$$\alpha A = \frac{Q}{\sqrt{2g/\rho \cdot \Delta P}}$$

αA : 隙間面積(実効面積) Q : 換気量 m³/s
 g : 重力加速度 m/s² ρ : 空気密度 kg/m³
 ΔP : 模型内外差圧 N/m²
 但し、 αA は $\Delta P = 10N/m^2$ の場合で評価

注 8: 計算及び解析条件は前報^{1,2)}と同様。(表 1 参照)。また、図中において Y=150mm はワキングキャビティ中央、Y=0mm はがートキャビティとの境界が床面である。3 次元計算では壁面近傍では風速が 0 に近づくがここではこれに対応する測定をしていないので壁近傍の分布は省略する。測定において境界が床面近傍(Y=0~30)ではレーザーの反射光の影響で測定が出来なかった。注 9: 何れのケースも吹出風速: 3.00m/s 注 10: 値は換気量(吹出風速)で基準化 注 11: ワキングキャビティとがートキャビティ間の気密性が完全には確保されていないことも原因の一つと考えられる。【参考文献】 1) 小林光、村上周三、加藤信介、伊藤一秀: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究(その 1)、Purging Flow Rate 検討用精密室内気流模型実験、建築学会年次大会、1996.9 2) 伊藤一秀、村上周三、加藤信介、小林光: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究(その 2)、流れ場・濃度場の予備 CFD 解析と居住域 PFR の検討、建築学会年次大会、1996.9 3) Standard Method of Measuring Air Change Efficiency: ASHRAE SPC129P Second Public Review, 1995.2 4) Sandberg and Sjoberg: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, 18, pp. 181-197, 1983 5) M.Sandberg "Ventilation Effectiveness and Purging Flow Rate" ISRAE ASHRAE pp-17, 1992.7 6) 村上周三、加藤信介: 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法 換気効率の評価モデルに関する研究、空調調和・衛生工学会論文集、No. 32, 1986.10 7) 小林光、村上周三、加藤信介: 不完全混合室内における局所領域に換気効率の同定に関する研究(その 1)、室内における空調吹出口と排気口の勢力範囲の同定、建築学会年次大会、1992.8

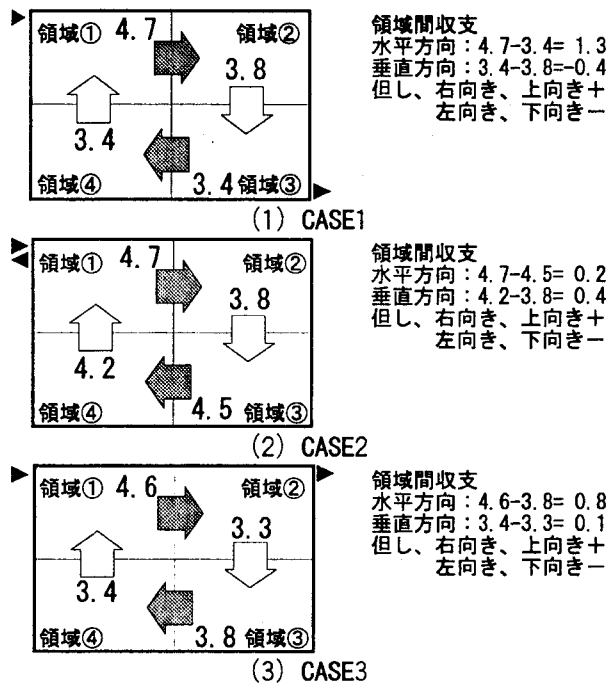


図 7 ブロック間流量^{注10)}

表 1 CFD 解析条件 (標準 k-ε モデルによる 3 次元解析)

解析ケース	CASE1
メッシュ分割	77(X)×24(Y)×69(Z)
流入境界	$U_{in}=3m/s$, $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.0115)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\epsilon} \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$, 吹出し気流の乱れは実験結果と一致、 $l_{in}=0.002857m$ =(吹出しスリット幅の 1/7)
流出境界	$U_{out}=\text{mass flow boundary}$, k_{out} , ϵ_{out} はフリーリップ
壁面	速度は一般化対数則、キャビティ中央断面は対称面
その他	Y 方向は空間の対称性を考慮し、半分の領域のみ解析