小型チャンバーにおける気流速度と水蒸気換算物質伝達率との関係 MASS TRANSFER COEFFICIENT IN SMALL CHAMBER WITH AIR FLOW CONTROL UNIT

金 勲*, 田 辺 新 一**
Hoon KIM and Shin-ichi TANABE

Using the newly developed airflow control unit (ACU), chamber performance was examined through measuring the air velocity (v_a) near the specimen surface and mass transfer coefficient (MTC). v_a and its distribution depending on fan revolutions were examined over nine points at a distance of 10mm from the specimen surface. MTC was investigated by tests with using filter papers and water vapor in the chamber installed with ACU. For MTC tests, seven conditions of fan revolution were set at less than 700rpm, and loading factor 0.11 m^2/m^3 was adopted to avoid saturating of humidity in the chamber instead of 2.2 m^2/m^3 of usual emission test. As the results, v_a distributions were even and in a small deviation. When v_a ranges from 0.10 to 0.27 m/s, tested MTC were in 17.4 to 22.0m/h, while the values of JIS and previous studies in much lower levels. Chamber-tested MTCs should be much lower than those of theoretical calculation, because the given Q/A would make the potential of mass transfer decreased at the chamber test but theoretical calculation have the assumption of infinite Q. There, theoretical MTC depending on v_a were recalculated using the properties of dry and wet air. CFD simulations provided that steady state appeared at over $L=0.44 \text{ m}^2/\text{m}^3$ at $v_a = 0.1\text{m/s}$ and the MCT was 15.3m/h, which was close to the result of the chamber test at 300 rpm (much less than 0.1m/s), because the limited ventilation rate in the chamber test restrained the vapor transfer and consequently MTC. It was cleared that tested MTC always showed the higher values than JIS and theoretical ones, and could become close to other ones by compensation considering the velocity boundary layer and the loading factor.

Keywords : Mass transfer coefficient, Air Velocity, Loading Factor, Air flow control, Small chamber
物質伝達率, 気流速度, 試料負荷率, 気流制御, 小型チャンバー

1. はじめに

建材からの化学物質放散測定のためのチャンバー法はチャンバー内に清浄空気を供給して換気を行いながら放散量を測定するため、室内に設置された建材の周辺環境により近い条件下で試験を行うことができる。国内では、建材から放散される化学物質の放散量測定に JIS A 1901「小形チャンバー法」^{注1)}に準拠した 20L 小型チャンバーが多く使われている。

建材から放散される化学物質は建材内部から表面に拡散移動し、表面から周辺空気に移動してゆく。放散物質の建材表面から周辺空気への移動しやすさを物質伝達率²⁾と表し、JIS A 1901 では水蒸気換算物質伝達率 9~18m/h (気流速度 0.1~0.3m/s 相当) を推奨している。チャンバー法の国際規格である ISO 16000-9³⁾では水蒸気換算物質伝達率ではなく、試料表面から 10mm 離れた地点における気流速度として 0.1~0.3m/s を定義している。

20L 小型チャンバーを用いた放散試験では通常、換気回数 0.5 回/h を採用しており、その際チャンバー内で気流制御を行わない場合は 4m/h 以下⁴⁾⁵⁾⁶⁾と報告されている。JIS では水蒸気換算物質伝達率を確保することを推奨しているが実験方法は示されていない。

一方、吸着分解性能を持つ機能性建材の開発と使用が増加していることから、低減建材の濃度低減性能を評価する JIS A 1905 (2007 年 2

月)⁷⁾及び JIS A 1906 (2008 年 2 月)⁸⁾「小形チャンバー法による室内空気汚染濃度低減材の低減性能試験法—JIS A 1905 ; ホルムアルデヒド、JIS A 1906 ; ホルムアルデヒドを除いたカルボニル化合物及び VOCs」が制定された。

吸着建材は気中の汚染物質分子が建材表面に衝突・吸着されて効果が現れるもので、濃度低減性能は空気分子と建材表面との接触率、すなわち濃度境界層性状に大きく影響を受ける。そのため、JIS A 1905・1906 では JIS A 1901「小形チャンバー法」より厳格な物質伝達率範囲を定めている。20L 小型チャンバーにおいてもより均一な表面気流性状及び信頼性高い物質伝達率の制御が必要となる。

物質伝達率の違いが吸着建材の濃度低減性能に与える比較試験は安宅・加藤ら⁹⁾によって報告されている。また、朱・加藤ら¹⁰⁾は実験と CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を通じ、デカン・トルエンなど 5 種類の VOC に対して境界層型小形 Test Chamber を用いた気流速度と物質伝達率との関係を調べている。

水蒸気換算物質伝達率に関しては村上・加藤・伊藤ら⁴⁾¹¹⁾、田辺・田中ら⁶⁾¹²⁾によって報告されているが、試料表面付近における実際の気流速度と物質伝達率との相関を調べた研究は行われていない。

* 早稲田大学理工学術院理工学研究所
学術院講師・博士(工学)
** 早稲田大学理工学術院建築学科 教授・工博

Lecturer, Department of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.
Prof., Department of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

2. 研究背景と目的

チャンパーの放散試験においては物質伝達率が重要である。薄膜を形成する塗布材は蒸散支配型材料と呼ばれ、物質伝達率に放散速度が受ける影響は大きい。合板、MDF、ボード類などの内部拡散支配型材料は建材内部での物質移動抵抗が大きい。材料表面の物質伝達率に影響される度合いは大きくない。しかし、気中の化学物質を吸着して気中濃度を低減させる吸着低減建材に関しては材料表面と空気中の化学物質分子の接触確率によって吸着効率（低減性能）が変化するため、物質伝達率が重要な変数となる。

そのため JIS A 1905/1906「吸着低減性能試験法」では $15 \pm 3 \text{ m/h}$ （気流速度換算 $0.25 \pm 0.05 \text{ m/s}$ 相当）と JIS A 1901 の放散試験法より厳格な物質伝達率範囲を定めている。

既往研究によると、気流制御を行わない 20L 小型チャンパーに対して、村上ら⁴⁾は CFD 解析を行った結果 4 m/h 以下、田辺ら⁶⁾のチャンパー試験結果からは $3.1 \sim 4.7 \text{ m/h}$ とされている。また、境界層型チャンパーを用いた伊藤ら¹¹⁾の研究ではチャンパー中心位置（試料表面から 30 mm 離隔）における気流速度 0.1 m/s 時に 15.7 m/h 、水平型気流制御ユニットを用いた田中ら¹²⁾の試験では推定気流速度 0.2 m/s で $15.2 \sim 16.0 \text{ m/h}$ を報告している。Zhang らの整流型チャンパーを用いた水面からの蒸発量測定試験¹³⁾では、水面温度を測定していないため推定ではあるが、 25 mm 離隔点における気流速度 0.1 m/s で物質伝達率 $9.7 \sim 10.7 \text{ m/h}$ と算定される。

JIS で定める物質伝達率を制御し、推奨範囲を満足させるためには気流制御用補助器具を導入する必要がある。その際には試料表面全体に均一な気流分布を形成することも重要である。そのため、筆者らは 20L 小型チャンパー内の試料表面に均一な気流条件を形成させると共に物質伝達率の制御ができる縦型気流制御ユニット（以下、ユニット）を開発・改良してきた¹⁴⁾¹⁵⁾。

本研究では気流速度及び試料負荷率と物質伝達率との関係を明らかにすることを目的とした。具体的には気流制御ユニット使用時の試料表面気流速度測定及び水蒸気を用いた物質伝達率試験を行い、物質伝達性能を調べた。また、水蒸気を用いた物質伝達率試験では試料負荷率によっては相対湿度が $100\% \text{ RH}$ に近くなるため試料負荷率を低下させた。しかし、同じ空間容積と換気量に対して試料負荷率が低くなると物質放散ポテンシャルが高くなり、実際のチャンパー試験条件とは異なることが考えられたため、CFD を用いた数値解析を通じ、試験値と気流速度から算定した理論値及び数値解析結果を比較検討した。

3. 気流制御ユニット

本研究で用いた縦型気流制御ユニットの写真及び概要図を図 1 に示す。20L チャンパー内に設置できる程度のユニット大きさでは気流経路が短く整流気流を作ることが難しい。チャンパー内に攪拌ファンのみを設置しても物質伝達率を変えることはできるが、試料表面周辺の気流分布を一様にするのが難しい。新型ユニットでは吸引式ファンを使用し、また気流通過経路を複数回曲げることでファンによる気流の直接的な影響を少なくすると共に緩衝部（気流経路）を長くすることで試料表面周辺に整流に近い気流が形成できるようにした。また、ユニット上部（空気導入部）には金属製のメッシュが設けられている。ユニット下部には SUS とテフロン製で作られたファンが設置され、

ユニットの側面にシールボックス 2 個（試料負荷率 $L=2.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ；以下本文中で単位省略）を装着し、チャンパーに投入する。シールボックスに設置された試料の表面はユニット内で形成される一定な気流に曝露される。

写真①：シールボックス、ユニットフレーム、吸引ファン
写真②：組立てたユニットのチャンパー内設置風景

図 1 縦型気流制御ユニット

4. 試料表面付近の気流速度測定試験

4.1 実験概要

気流速度測定点及び気流速度測定風景を図 2 に、気流速度測定の試験条件を表 1 に示す。ユニットにシールボックスを装着し、アクリル製の 20L 可視化チャンパーに投入した。気流速度はユニットに装着されたファンをマグネティックスターラーの回転数を調節することで制御した。スターラー回転数とファン回転数のずれに関しては非接触型デジタル回転計（RM2000、カスタム社）を用いて測定し、殆ど誤差がないことを確認した。気流速度測定には白金素子風速計（SIBATA ISA90、 $0.05 \text{ m/s} \sim 2.99 \text{ m/s}$ で表示分解能 0.01 m/s ）を用いた。試料はユニットの両側に設置できるがチャンパー及びユニットの形状は左右対称であることから片側のみの測定とした。試料表面を 9 領域に分割して、気流速度は試料表面から 10 mm の位置において 60 秒間平均値を測定した。9 点測定を 1 測定周期とし、同一回転数条件

図 2 気流速度測定点及び測定試験風景

表 1 気流速度測定試験 試験条件

チャンパー	アクリル製 20L 可視化チャンパー
換気量	167ml/min (0.5 回/h)
温湿度	成り行き
測定ポイント	3 点 × 3 点 (縦 × 横)
気流速度測定位置	試料表面から 10mm 離隔
ファン回転数	450・500・600・700rpm
測定間隔	60 秒間平均風速 (n=3)
風速計	SIBATA 微風速計 ISA90

にて3周期測定を原則とした。但し、測定値が0.1m/sより大きく下回る条件若しくは0.3m/sを大きく上回る条件では1回測定とした。

4.2 実験結果

測定結果から得られたファン回転数と面平均気流速度との関係を図3に、9点における気流速度分布（各点平均値）を表2に示す。

回転数と気流速度には正の直線による相関が見られた。9点における表面付近気流速度偏差は回転数450、500、600、700rpm条件においてRSD%は13、11、7、8%となった。低い回転数条件において標準偏差が大きくなったが、これは微風速での計測精度のためである。面平均気流速度は、回転数450rpmで気流速度0.10m/s、700rpmで0.27m/sであり、ISO16000-9及びJIS A 1901で指定する気流速度を満足するには450～725rpm、JIS A 1905/1906を満足するには580～725rpmが必要となる。気流速度0.1～0.3m/sにおけるRe数（計算式及び物性値条件は「5.1 物質伝達率」参照）は732～2195となる。以上の結果からユニットは気流速度分布の少ない均一な表面気流を形成することができると考えられる。

図3 ファン回転数と面平均気流速度

表2 9点における気流速度分布（3回測定の平均値）[m/s]

条 件	450 rpm			500 rpm		
測定点	1	2	3	1	2	3
A	0.11	0.12	0.09	0.16	0.16	0.12
B	0.11	0.11	0.09	0.15	0.15	0.12
C	0.09	0.11	0.09	0.13	0.15	0.13
条 件	600 rpm			700 rpm		
測定点	1	2	3	1	2	3
A	0.25	0.23	0.22	0.30	0.30	0.26
B	0.22	0.25	0.22	0.26	0.29	0.26
C	0.22	0.23	0.23	0.25	0.28	0.25

5. 物質伝達率測定試験

5.1 物質伝達率

物質伝達率は以下の式（1）～（3）から算出する²⁾⁶⁾。

$$k_x = k_c \times \rho \quad \text{..... (1)}$$

$$M_{\text{evp}} = A \times k_x \times (x_w - x_a) \quad \text{..... (2)}$$

A：試料面積 [m²]

M_{evp}：蒸発量 [kg/h]

k_c：蒸気濃度基準物質伝達率 [m/h]

k_x：絶対湿度基準物質伝達率 [kg/m²h(kg/kg(DA))]

x_a：雰囲気空気の絶対湿度 [kg/kg(DA)]

x_w：濾紙表面温度と等しい温度の飽和空気の絶対湿度 [kg/kg(DA)]

ρ：空気の密度 [kg(DA)/m³]

蒸発量 M_{evp} は、チャンバーの出口空気・入口空気の絶対湿度差から式（3）により求めることができる。

$$M_{\text{evp}} = \frac{Q \times (x_{\text{out}} - x_{\text{in}})}{v} \quad \text{..... (3)}$$

Q：換気量 [m³/h]

v：比容積 [m³/kg(DA)]

x_{in}：チャンバー入口空気の絶対湿度 [kg/kg(DA)]

x_{out}：チャンバー出口空気の絶対湿度 [kg/kg(DA)]

水蒸気物質伝達率及び周辺空気の気流速度の関係を推定することが可能である。以下の式（4）～（7）により、無次元数のシュミット数(Sc)、シャーウッド数(Sh)、レイノルズ数(Re)を求め、濾紙表面付近の気流速度を推定する。拡散係数及び動粘性係数は物質伝達率試験結果、チャンバー内空気温湿度が29℃、80%RH前後となったためその温湿度条件における値を用いることとした。

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \text{... (4)} \quad Sh = \frac{k_c \times l}{D} \quad \text{... (5)}$$

$$Re = \frac{u \times l}{\nu} \quad \text{... (6)} \quad Sh = 0.664 \times Re^{1/2} \times Sc^{1/3} \quad \text{... (7)}$$

D：水蒸気の拡散係数 [m²/h]（29℃、1atmの時は0.095 m²/h）

Sc：シュミット数 [-] Sh：シャーウッド数 [-]

Re：レイノルズ数 [-] u：風速 [m/h]

l：代表長さ [m]（試料長さ0.147mを用いた）

ν：動粘性係数 [m²/h]（29℃、80%RH湿り空気3.64×10⁻² m²/h）

5.2 試験概要

表3に物質伝達率試験条件を、図4に物質伝達率測定試験風景を示す。試験対象物質としては蒸留水（水蒸気）を、放散基材として濾紙（第2種）を用いた。

表3 物質伝達率測定試験条件	
チャンバー	20L 小型チャンバー
供給空気温湿度	28±1℃、20±1%RH
換気回数	0.5±0.05 回/h
濾紙	第2種（6枚重ね）
濾紙露出面積	0.002m ² （試料負荷率L=0.11m ² /m ³ ）
Fan 回転数 [rpm] (気流速度 m/s)	0(<0.1), 300(<0.1), 400(<0.1), 450(0.1), 500(0.14), 600(0.23), 700(0.27)
測定点	温度 給気口、チャンバー内、濾紙表面
	湿度 給気口、チャンバー内
解析データ範囲	実験開始8時間後から60分間
温度測定	T型熱電対 KEYENCEGR3000 データロガー
湿度測定	高分子容量式湿度検出素子 (HTY7843、山武社製) YAMATAKE SDC15 データコレクター

写真①：蒸留水に含浸させた濾紙6枚を重ねて設置。試料面積147mm×147mmのうち1/10は濾紙、残りは樹脂製プレートとなる。

写真②：シールボックス2つをユニットに装着、濾紙は片方のみ設置。

写真③：マグネティックスターラーの上にチャンバーを設置。

図4 物質伝達率測定試験風景

表 4 物質伝達率試験測定結果

項目	気流速度	給気		排気			濾紙表面		蒸発量	密度	物質伝達率
		温度	絶対湿度	温度	相対湿度	絶対湿度	温度	絶対湿度			
単位	[m/s]	℃	g/kg(DA)	℃	%RH	g/kg(DA)	℃	g/kg(DA)	g/h	kg(DA)/m ³	m/h
0 rpm	—	28.3	4.74	27.5	71.7	16.52	26.0	21.37	0.135	1.175	11.5
300rpm	—	27.9	4.63	29.1	75.0	19.01	27.7	23.64	0.163	1.169	14.6
400rpm	—	28.3	4.73	28.9	76.7	19.27	27.5	23.24	0.165	1.169	17.3
450rpm	0.10	27.8	4.68	29.1	76.6	19.45	27.6	23.46	0.168	1.169	17.4
500rpm①	0.14	28.3	4.73	29.1	77.3	19.61	27.4	23.15	0.169	1.169	19.8*
500rpm②		27.8	4.61	29.1	76.8	19.56	27.7	23.60	0.169	1.169	17.4*
550rpm	—	28.0	4.65	29.3	77.4	19.91	27.8	23.66	0.173	1.168	19.2
600rpm	0.23	28.4	4.77	29.1	78.1	19.85	27.5	23.31	0.171	1.169	20.5
700rpm	0.27	28.3	4.74	29.0	79.3	20.07	27.5	23.36	0.174	1.169	22.0

※ 500rpm 条件については、2 回試験の平均値 18.6m/h を用いた。

0.5 回/h のチャンバー内が安定するまでは少なくとも 5～8 時間以上かかることから 8 時間以上水蒸気放出を持続させるために水に含浸させた濾紙を 6 枚重ねて設置した。水を用いるチャンバー試験においては、チャンバー内空気が飽和しないことや、湿度センサーの精度保証上 90%RH を超えないよう、試験期間中適切な湿度範囲を維持する必要がある。そのため、本試験では放散面積を調整し、試料負荷率 0.11（建材放散試験では試料負荷率 2.2 を用いることが多い）に設定した。

物質伝達率の算出にはチャンバー内空気の相対湿度を参照し $x_a = x_{out}$ とした。チャンバー内換気回数は 0.5 回/h（167ml/min）、供給空気の相対湿度 20%RH に設定し 0.1%RH 単位で自動制御を行った。測定項目としては供給空気の温湿度、チャンバー内空気の温湿度及び濾紙表面の温度である。濾紙表面の相対湿度は飽和状態（100%RH）と仮定した。

5.3 試験結果

表 4 に気流速度に対する物質伝達率試験の結果を示す。また、JIS で説明する気流速度と物質伝達率（以下、JIS 値）の関係と試験値との比較を図 5 に示す。

湿度測定は 1 分間隔で、温度測定は 10 秒間隔で連続計測を行い、算定にはチャンバー内水蒸気濃度が定常状態に到達し、安定した 8 時間～9 時間の間の 1 時間分のデータを平均して用いた。供給空気の相対湿度は設定値 20%RH に対し、測定値は平均 20.5%RH であった。

一般的な建材放散試験条件である「ユニット無し条件（0 rpm）」で物質伝達率は 11.5 m/h と、JIS A 1901 で推奨している物質伝達率 9～18m/h を満足する値となり、この条件で 4 m/h 以下とする既往研究結果より大きな値を示した。300～450rpm（気流速度 0.1m/s 以下）条件において、JIS A 1905/1906 で推奨している 15±3m/h 範囲を満足する結果となった。JIS 及び ISO ではこの物質伝達率範囲に相当する気流速度を 0.25±0.05m/s と説明しているが、今回の試験ではより低い気流速度でこの範囲となった。450～700rpm（気流速度 0.10～0.27m/s）条件において試験値は 17.4～22.0m/h、試験値から算定した 0.3m/s 時の物質伝達率は 22.4m/h となった。

今回の測定では試料負荷率が低かったことから、通常試験で用いられている L=2.2 条件では物質伝達率が今回の試験より小さくなると予想される。この点に関しては 6 項にて数値解析による検討を行う。

6. 気流制御ユニットの数値流体解析

20L 小型チャンバー内のユニットに装着した試料の表面付近の気流速度、物質伝達率を測定した結果を基に CFD による数値解析を行った。解析には STREAM ver. 7（クレイドル社）を用いた。

6.1 モデル概要

図 6 にモデルの基本構成を、表 5 に解析条件を示す。シールボックス部分を除く各部材の厚みは 1mm、解析領域は 20L 小型チャンバーと同サイズとした。解析には層流モデルを用い、解析項目は流れ、熱、絶対湿度とし、非定常解析を行った。

領域の側面下部から領域内に空気が流入し、チャンバー内の空気が吸い込みファンによってユニット上部からユニット内に導入される。ファンによる吐き出し気流でチャンバー内で繰り返し攪拌され、0.5 回/h の換気分が領域上部の排気口から排出される。供給空気温度とチャンバー内空気はともにチャンバー試験基準条件である 28℃に設定した。制限条件としてチャンバー内相対湿度は 100%RH 以下とした。

図 5 気流速度に対する物質伝達率試験の結果

図 6 モデルの基本構成

表5 CFD数値解析設定条件

	内 容	備 考
流れ解析	層流	非定常解析
壁境界	no-slip	
他の解析要素	温度、絶対湿度	但し、100%RH を上限値とする
メッシュ分割	X, Y, Z : 5.0mm	
解析サイクル	30 秒×600 サイクル	
水蒸気拡散係数	$2.56 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$	
濾紙面湿度	24.0g/kg(DA)	28°C、100%RH
供給空気	167ml/min、4.7g/kg(DA)	28°C、20%RH
熱境界	濾紙、排気口、給気口	熱伝導あり

6.2 チャンバー内気流性状解析結果

図7にユニット内及びチャンパー内気流性状解析結果を示す。また、ユニット内解析結果には試料表面10mm離隔面上の9分割点における気流速度分布を示した。ユニット内部及び建材表面付近に整流気流が形成された。9点の気流速度は0.08～0.1m/s（平均：0.09m/s、RSD%：8%）であり、表面風速測定試験における450rpm条件（平均：0.1m/s、RSD%：13%）に近い気流性状が再現された。

左図：試料表面10mm地点における気流速度分布
右図：試料表面からユニット中心までの気流速度分布

図7 ユニット内及びチャンパー内気流性状

6.3 物質伝達率算出結果

表6に定常状態におけるチャンパー内湿度及び物質伝達率算出結果を、図8に試料負荷率と物質伝達率の関係を示す。

L=0.11条件において85%RH(20.24g/kg(DA))、物質伝達率は19.5m/hと試験値より12%高い結果となった。試験値の550～600rpm（気流速度0.18～0.23m/s）条件に相当する値である。試料負荷率が大きくなるにつれ物質伝達率は漸減してL=0.44からはほぼ定常になり約15.3m/hに収束した。これは、限られた換気量に対して放散面積が増加したことで、水蒸気飽和点（100%RH）に近づき、換気量によって蒸発量が支配されるためと考えられる。

L=0.44～2.2条件の物質伝達率平均（L=0.44は片面解析値、他の条件では両面解析結果値を用いた）は15.3m/hで、L=0.11条件の19.5m/hより27%、L=0.22条件の16.0m/hよりは5%低い。L=0.11、気流速度0.1m/s（450rpm）条件の試験結果17.4m/hよりは12%低かった。

7. 考察

式(4)～(7)で求める理論値は試料面積に対する換気量比(Q/A)の影響を受けないため試験値より高く算出されると予想されたが、L=0.11、気流速度0.1m/s条件における試験値（17.4m/h）や数値解析

結果（19.5m/h）に比べてJIS値（9.0m/h）が低くなっている。境界層型チャンパーと純水を用いた伊藤ら¹¹⁾の研究ではチャンパー中心位置（試料表面から30mm離隔）における気流速度0.1m/s時に15.7m/h、田中ら¹²⁾は水平型の気流制御ユニットと純水に含浸させた濾紙（L=0.11）を用いた物質伝達率試験において、気流制御ユニット内風速を約0.2m/sと推定された時に得られた物質伝達率を15.2～16.0m/hと報告している。一方、本試験では0.1m/s気流下で17.4m/h、0.2m/sで物質伝達率は20.2m/hと算定され、いずれも既往研究より高い。本研究との相違点は両既往研究ともに水平型の気流制御装置を用いたこと、伊藤らは液面を放散面として重量測定により放散量を測定した点、田中らは含浸濾紙を放散材に用いたが気流速度の測定を行わず風量から推定していたため試料表面付近の気流速度が明確ではない点である。また、0.5回/h換気で気流制御を行わない条件において、村上ら⁴⁾のCFDによる物質伝達率解析では2～3m/h、田辺ら⁹⁾の濾紙を用いた物質伝達率試験では3.1～4.7m/h（平均4.0m/h）と報告している。本試験ではユニット無し条件で11.5m/hと既往研究とは大きな

表6 各試料負荷率条件における物質伝達率算出結果

試料負荷率 [m ² /m ³]		絶対湿度 [g/kg(DA)]	蒸発量 [g/h]	物質伝達率 [m/h]
0.055	片面	18.83 (79%RH)	0.161	25.8
0.11	片面	20.24 (85%RH)	0.177	19.5
0.22	片面	21.52 (90%RH)	0.191	16.0
0.44	片面	22.64 (94%RH)	0.203	15.5
0.73	片面	23.16 (96%RH)	0.209	14.8
	両面	23.20 (96%RH)	0.209	15.5
0.88	片面	23.26 (97%RH)	0.210	14.8
	両面	23.30 (97%RH)	0.210	15.6
1.10	片面	23.37 (97%RH)	0.211	13.4
	両面	23.42 (97%RH)	0.212	14.4
1.76	両面	23.64 (98%RH)	0.214	15.4
2.20	両面	23.73 (99%RH)	0.215	15.5

図8 試料負荷率と物質伝達率の関係

図9 気流速度と物質伝達率の関係

差が出ている。また、数値解析結果でも 0.1m/s 条件で 15.3m/h に収束し、JIS 値 9m/h より高い値になる。これらの結果から、ユニット無し条件でも今まで提案されてきた「4m/h 以下」よりは高いことが考えられた。

そこで、試験結果に基づき、気流速度に対する物質伝達率を理論式 (4) ～ (7) により推定した。チャンパー内空気温度 29℃、動粘性係数は乾き空気及び 80%RH 湿り空気の物性値^{16) 注2)}を用い、代表長さを試料長さ 0.147m とした。試験値、JIS 値と共に 29℃条件で乾き空気と湿り空気の物性値から求めた理論値を図 9 に示した。境界層考慮とは気流速度測定位置 10mm が速度境界層内に存在する場合、代表気流速度から考える物質伝達率より大きく測定されることから、試験時の気流速度を代表気流速度と見なして推定した値である。後述するが、気流速度 0.19m/s 以下では境界層内速度となるため理論値曲線から得られた回帰式を用いて 0.19m/s 以下を代表気流速度と見なして試験値を再推定した。また、境界層及び試料負荷率を考慮して試験値から再推定したものを試験値補正として図 9 にプロットした。これは CFD 解析結果、L=0.11 条件は L=0.44 以上より物質伝達率が 27% 大きくなったことから境界層考慮値にその誤差率を適用したものである。

濾紙表面からの水蒸気発生は周辺空気が飽和に近づけば、両者間の絶対湿度差は小さくなる (式 (2))。そのため、小型チャンパーのように限られた容積と換気量下では空气中湿度が高くなり温湿度の小さな測定誤差でも物質伝達率に与える影響が大きくなる。精度の高い測定を行うには、チャンパー内湿度をなるべく低く維持することが重要である。数値解析から L=0.44 以上で定常値に近い結果が得られているため、試験の際にも L=0.44 以上を用いることが望ましいが、L=0.22 でも大きな差はない結果となっている。但し、今回は供給空気の相対湿度 20%RH と低い条件で試験を行ったが、L=0.11 でもチャンパー内空気の相対湿度 70～80%RH を計測したためより高い湿度の空気を利用する場合は飽和に注意する必要がある。

表 6 と図 8 で示す数値解析による試料負荷率と物質伝達率との関係で片面設置と両面設置に差が生じた。同じ試料負荷率であれば放散面を 2 分割して両側に設置した方が物質伝達効率が高くなる。解析からは L=0.73～1.1 で両面設置条件の物質伝達率が 5～8% 高く、放散面積が大きくなるにつれ設置方法の影響も大きくなった。チャンパー内で十分な混合が行われる前の空気が再度放散面付近に供給されていることが原因である。建材放散試験の際には気流制御ユニットを使用せず試験を行うのが一般的であり、空気はチャンパー内をゆっくりと循環するため、このような不均一混合が生じる可能性を排除できない。但し、殆どの放散試験が L=2.2 の両面設置条件で行われているため、物質濃度の偏りの影響は少なくなると考えられる。

Lewis の関係^{17) 注3)}から、0.1m/s～0.27m/s 条件における物質伝達率試験値 17.4～22.0m/h は熱伝達率 5.8～7.4W/(m²・K)、試験値から算定した 0.3m/s 時の物質伝達率 22.4m/h は 7.5W/(m²・K) となり、一般的な室内表面における熱伝達率 2～7W/(m²・K) に近い値であり、空気温度 29℃・80%RH 湿り空気の平面上層流による理論対流熱伝達率 2.9～4.7W/(m²・K) よりも多少高い値であった。ユニット無し (0rpm) 条件の物質伝達率試験値 11.5m/h (熱伝達率換算 3.9 W/(m²・K)) は、垂直平面の自然対流における 2.2 W/(m²・K)¹⁸⁾ より多少大きい、既往の CFD 解析から予測されてきた物質伝達率 4m/h 以下、熱伝達率 1.4W/(m²・K) より大きい。ファンが設置されていないチャンパー内は 0.5 回/h の換気

が行われても強制対流とは見なせない微弱な気流形成であると仮定すると自然対流分が主に作用する。特に水平ではなく垂直に設置された濾紙面での蒸発冷却による温度低下は濾紙周辺にドラフトを生じさせ、物質伝達を促進する要因となることが試験値が大きくなる原因の一つと考えられる。無論、数値流体解析でも濾紙表面温度が空気温度と同じと仮定すると表面温度が高くなる分蒸発量も増加する。0.1m/s 条件の試験結果を参照すると、空気温度 29℃で濾紙表面温度 1.5℃低下条件と両者等温条件で物質伝達率を等しくするためには等温条件における水分蒸発量は非等温条件 (1.5℃差) の蒸発量の約 1.6 倍にならない。

他には空気の動粘性係数が考えられる。乾き空気と 80%RH の湿り空気の動粘性係数は約 60% 違うため、式 (4) ～ (7) を用いて算出する物質伝達率は 7～8% 程度乾き空気の方が小さくなる。

図 9 で回帰曲線は「試験値」が「理論値及び JIS 値」とは異なる傾向を示しており、試験値は気流速度の増加による物質伝達率の増加が理論値より緩やかである。気流速度 0.1～0.3m/s で物質伝達率理論値は 80%RH 湿り空気 11.8～20.5m/h、乾き空気 11.0～19.0m/h と JIS 値より若干大きくなったが、試験値はこれらより依然と高い。この時、湿り空気による速度境界層厚さ (99%)¹⁷⁾ は試料中間地点で 14mm～8mm、試料終端で 19～11mm 程度となり、試料中間で表面上 10mm 地点が境界層内となる代表気流速度は約 0.19m/s である。つまり、試料表面から 10mm 地点における気流速度測定値 0.19m/s 以下は境界層内の値となり、図 9 でも 0.2m/s を境にこれによるものと考えられる試験値と理論値との差が開き、0.1m/s では試験値が理論値より 47% 大きい、0.27m/s では 13% 大きいだけで境界層の影響が小さくなったことで差も縮まると考えられる。試験値から境界層内気流速度ではなく代表気流速度 0.1m/s に対する物質伝達率を理論値との相関から推定すると 15.3m/h となる (図 9 の凡例「境界層考慮」)。境界層を考慮しても JIS の 9m/h、Zhang ら 9.7～10.7m/h、理論値 11.8m/h よりは大い。ISO16000-9 では試料表面から 10mm 離隔した地点で気流速度を測定するようにしているが、これは 0.19m/s 以下では測定点が速度境界層内に入ってしまうため代表気流速度とは言えず、代表気流速度 0.1～0.3m/s に対応させた物質伝達率 9～18m/h は低風速域で整合しないことに注意しなければならない。

上述内容から、境界層及び試料負荷率を考慮して試験値から再推定すると (図 9 の「試験値補正」)、0.1～0.3m/s における物質伝達率は 12.0～17.5m/h と JIS 値より低風速域では多少高いが、気流速度の増加と共に同等な値となった。

8. まとめ

本研究では小型チャンパーにおける気流速度及び試料負荷率と物質伝達率との関係を調べた。小型チャンパー内の物質伝達率を制御するための気流制御ユニットを開発し、ユニットの気流制御性能測定実験として試料表面付近における気流速度及び気流分布測定を行った。蒸留水を用いた物質伝達率試験では試料負荷率 L=0.11 に固定し気流速度を変化させた。更に、数値解析を通じて試料負荷率と物質伝達率との関係を調べた。その結果を以下に纏める。

1) 気流制御ユニットのファン回転数と試料表面付近の気流速度に正の直線による相関が得られ、回転数 450～725rpm で気流速度 0.1～0.3m/s と算定された。試料表面上における気流速度分布の偏差が少な

く整流に近い気流が形成された。

2) 物質伝達率試験の結果、気流速度 0.10～0.27m/s 条件において試験値は 17.4～22.0m/h (0.3m/s では 22.4m/h と算定) となった。「ユニット無し条件」における物質伝達率試験値は 11.5 m/h で、気流速度 0.1m/s 以下でも、JIS A 1905/1906 で推奨している 15±3m/h 範囲を満足し、JIS 値及び理論値より高い結果となった。

3) L=0.11 の同じ試料負荷率条件下で物質伝達率は数値解析値、試験値、理論値の順に低くなった。

4) 数値解析結果 L=0.44 以上で定常に等しい値となり、L=0.44～2.2 条件の物質伝達率平均は 15.3m/h であった。L=0.22 で 16m/h と定常平均値との差は 5%、L=0.11 では 19.5m/h と 27%の差があった。試料負荷率 L=0.11 を用いると飽和のおそれが少なく試験が容易になるが、試料負荷率が低いため通常チャンバー試験における物質伝達率との差が大きく、補正が必要である。一方、L=0.22 を用いると飽和の心配も少ない上、物質伝達率の定常値との差も小さくなる結果となった。

5) 数値解析結果、試料の両面設置が片面設置より物質伝達率が5～8%増加した。

6) 気流速度0.1m/s～0.27m/sにおける物質伝達率試験値17.4～22.0m/hは熱伝達率5.8～7.4W/(m²・K) (0.3m/s時の算定値22.4m/hは7.5 W/(m²・K)) と一般的な室内表面における熱伝達率2～7w/(m²・K)に近い値となった。また、ユニット無し条件の11.5m/h、熱伝達率3.9 W/(m²・K)は、既往研究の物質伝達率4m/h以下、熱伝達率1.4W/(m²・K)より大きな値を示した。

7) 気流速度測定値0.19m/s以下では境界層厚が10mm以上であるため、低風速になるほど物質伝達率の試験値と理論値との差が大きくなる。そのため、ISO16000-9で定義する試料表面から10mm隔離した地点での気流速度0.1～0.3m/sとJISで定める代表気流速度0.1～0.3m/sにおける物質伝達率は0.1～0.19m/sの低風速域で整合しなくなる。

8) 低風速域では気流速度測定点が境界層内に入ることと試験試料負荷率が小さかったことを考慮して再推定した結果、気流速度0.1～0.3m/sにおける物質伝達率は12.0～17.5m/hとなり、理論値及びJIS値に近い値となった。

9) ISOで示す気流速度条件はJISで定める物質伝達率範囲を満足することができるが、JISの物質伝達率は低風速域ではISOの気流速度に整合しない結果となった。また、本試験で使用した20L程度の小型チャンバーのように換気量が少なく狭小空間で空気循環がある場合は一般的なチャンバー試験条件下で物質伝達率評価試験を行うのは難しい。実際のチャンバー試験より求めることができるよう試験条件を明確にした上で物質伝達率を提案する必要がある。

謝辞

この研究成果は、早稲田大学理工学研究所の「12L20—室内空気質と熱的快適性に関する研究」の成果の一部である。本研究を行うにあたり、鹿島建設株式会社持田恵吾様(元早稲田大学大学院創造理工学研究科修士課程)、(有) ADTEC有賀隆男様、有賀淳也様、元(有) ADTEC横溝透修様には多大なご協力とご助言を頂きました。記して深く謝意を表します。

注

注1) 言葉として小型チャンバーが一般的であるが、JIS規格では「小形」と表記していることから、JIS規格名を言及する際のみ「小形」を使用した。

注2) 空気温度29℃、80%RH湿り空気に対して、動粘性係数1.011×10⁻⁵m²/s、熱伝導率0.01951W/(m・K)、比熱1042.6J/(kg・K)、乾き空気の動粘性係数は1.615×10⁻⁵m²/sを用いた。

注3) 温度が均一な板を対象とした強制対流による熱伝達率は以下の式により求めた。また、Lewis数は1と仮定した。

$$h_c = \frac{Nu \times \lambda}{l}, \quad Nu = 0.664 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}, \quad Pr = \frac{\nu \times \rho \times C_p}{\lambda}, \quad Le = \frac{h_c}{k_c \times \rho \times C_p}$$

Le : Lewis 数 [-] Nu : ヌッセルト数 [-]

Re : レイノルズ数 [-] Pr : プラントル数 [-]

hc : 対流熱伝達率 [W/(m²・K)] kc : 物質伝達率 [m/h]

Cp : 比熱 [J/(kg・K)] l : 代表長さ [m]

ν : 動粘性係数 [m²/h] λ : 熱伝導率 [W/(m・K)]

ρ : 流体密度[kg/m³]

参考文献

- 1) 村上周三、田辺新一：JIS使い方シリーズ シックハウス対策に役立つ小形チャンバー法解説 [JIS A 1901]、日本規格協会、2003
- 2) 日本機械学会：伝熱工学資料 改訂第4版、日本機械学会、pp.42-49、pp.114-117、1986
- 3) ISO 16000-9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing - Emission test chamber method, 2006
- 4) 村上周三、加藤信介、朱清宇、田辺新一、伊藤一秀：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27) 小型チャンバーADPAC内の物質放散性状に関するCFD解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II、pp.811-812、2001.09
- 5) 舟木理香、田辺新一、田中博：建材からのアルデヒド類・VOC放散速度測定用小型チャンバーの性能試験及び異なるチャンバー間におけるホルムアルデヒド放散量の比較、日本建築学会環境系論文集、第572号、pp.47-54、2003.10
- 6) 田辺新一、伴野正幸、舟木理香、田中博：小型チャンバーADPACを用いたアルデヒド類、VOC放散量の測定に関する研究 その3 小型チャンバーADPAC内の物質伝達率に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-II、pp.819-820、2001.09
- 7) JIS A 1905：小形チャンバー法による室内空気汚染濃度低減材の低減性能試験法—第1部：一定ホルムアルデヒド濃度供給法による吸着速度測定—、—第2部：ホルムアルデヒド放散建材を用いた吸着速度測定—、2007.02
- 8) JIS A 1906：小形チャンバー法による室内空気汚染濃度低減材の一定揮発性有機化合物 (VOC)、ホルムアルデヒドを除く他のカルボニル化合物濃度供給法による吸着速度試験、2008.02
- 9) 安宅勇二、加藤信介、伊藤一秀、朱清宇、村上周三：化学反応型パッシブ吸建材の濃度低減効果に関する研究 濃度低減効果測定法の開発と検証 第1報、日本建築学会環境系論文集、第581号、pp.59-64、2004.07
- 10) 朱清宇、加藤信介、村上周三、伊藤一秀：境界層型小型Test Chamberの開発と試験建材表面の化学物質伝達率に関する実験とCFD解析、日本建築学会環境系論文集、第549号、pp.45-66、2001.11
- 11) 伊藤一秀、村上周三、加藤信介、近藤靖史、朱清宇、神卓也：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14) 建材表面気流精密制御Small Test Chamberの開発と物質伝達率の測定、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.493-496、1999.09
- 12) 田中博、木原生雄、中川貴文、舟木理香、田辺新一：小型チャンバーADPACを用いたアルデヒド類、VOC放散量の測定に関する研究 その10 気流制御ユニット内の物質伝達率測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II、pp.933-934、2003.09
- 13) Y. Zhang and F.Haghighat : A small air velocity-controlled test chamber for emission studies, Characterizing sources of indoor air pollution and related sink effects, ASTM STP 1287, pp.23-33, 1996
- 14) 持田恵吾、金勲、田中祐輔、有賀隆男、田辺新一：小型チャンバーADPACを用いたアルデヒド類、VOC放散量の測定に関する研究 その16 新型気流制御ユニットの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II、pp.957-958、2008.08
- 15) 持田恵吾、金勲、有賀隆男、田辺新一：小型チャンバーADPACを用いたアルデヒド類、VOC放散量の測定に関する研究 その18 新型気流制御ユニットの物質伝達性能試験、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-II、pp.877-878、2009.08
- 16) C.Richard Tracy, William R.Welch, Warren P.Porter : Properties of air - A manual for use in biophysical ecology third edition -, University of Wisconsin, 1980
- 17) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 第13版—1 基礎編、pp.216-219、pp.164-166、2001.11
- 18) 木村建一：建築設備基礎理論演習、学献社、p.51、1970.07

(2012年4月10日原稿受理、2012年8月15日採用決定)