

# トレーサガスをを用いたオフィスビルにおける物質輸送現象の実測 Measurement of Mass Transfer Phenomenon using Tracer Gas in Office Building

学生会員 ○刁 芸婷 (東京大学) 正 会 員 樋山 恭助 (東京大学)  
学生会員 金 鐘訓 (東京大学) 正 会 員 高橋 岳生 (東京大学)  
正 会 員 加藤 信介 (東京大学)

Yunting DIAO<sup>\*1</sup> Kyosuke HIYAMA<sup>\*1</sup> Jonghun KIM<sup>\*1</sup> Takeo TAKAHASHI<sup>\*1</sup> Shinsuke KATO<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>The University of Tokyo

In terms of health management of occupants, it is important to analyze the ventilation efficiency in room; how efficient the ventilation system is for exhaust of dispersed hazardous substance. We carried out the measurements using tracer gas method to analyze the ventilation efficiency. The measurements were carried out twice; in summer and in winter, to analyze the sensitivity on measurement results caused by season.

## はじめに

室内において汚染物質が発生した場合、その除去効率を設計段階において確認することは、居住者の健康リスクの管理にあたり重要である。物質の輸送・拡散現象は、多分に 3 次元的な様相をみせ、特に大空間においてはこの傾向が大きい。そのため、設計段階における検討では、3次元 CFD 解析が広く使われるようになってきている<sup>1)</sup>。

3次元 CFD 解析を利用する場合、その解析に用いられる解析コードは信頼性があるものでなければならない。そのため、解析したい現象に対する代表的な事例を設定し、その解析コードによる計算結果を、同一条件における実測結果と比較することで、その信頼性を検証することがよく行われる。しかしながら、境界条件が明確に定義される数値解析では、同一の境界条件を入力として同一の出力が再現可能な一方で、その検証データとなる実測値は、数値解析の境界条件に反映が難しい多くの諸要素を内包した実測条件のもと行われるため、1 回の実測値により物理現象を代表出来るとは言い難い。

本研究では、物質の輸送・拡散現象を対象として、屋内外の温度差が反転する夏季と冬季の 2 回、同じ内容でトレーサガスの拡散実験を行い、屋内外の温度差等の要素が実測結果にもたらす感度を調査した。

## 1. 実測対象

東京都千代田区にある延べ床面積約 20,000m<sup>2</sup>、地下 1 階、地上 14 階の中層オフィスビルを実測の対象とする。構造種別は地下 1 階が SRC 造、1~14 階は S 造である。

本論文で報告するトレーサガス実験は、1 階エントランス空間および 2 階のロビー空間を対象として実施した。この両空間は、1 階エントランス空間の吹き抜けを介し連続しており、他の空間とは防火戸や自動扉により切断

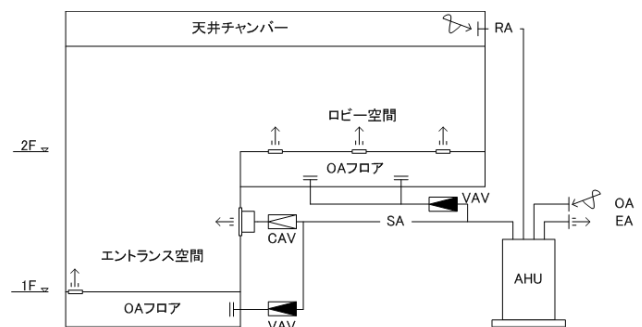


図-1 空調システムの概略図

されている。単一の空調機により空調されているため、どちらかの空間でトレーサガスを発生させた場合、吹き抜けおよび空調機を介して他の空間にトレーサガスが輸送される。なお、空調設備には VAV ユニットによる変风量制御、および CO<sub>2</sub> センサーによる外気導入量制御が付随している。本空調設備システムの概略を図-1 に示す。

## 2. 実測概要

内外温度差が反転する夏季 (2008 年 8 月 4~7 日) と冬季 (2009 年 2 月 13~17 日) にトレーサガス実験を行った。実験方法はパーフルオロカーボン (PFC) をトレーサガスとした手法<sup>2)</sup>を用いている。特定位置における短期的な汚染質発生を想定し、隣接空間に設置した測定位置における汚染質濃度の時系列を調査する Case1 (図-2)、特定位置における連続した汚染質発生を想定し、測定位置における濃度上昇を調査する Case2 (図-3)、汚染質発生位置における汚染質を希釈・排除するのに有効な換気空気の流入量 (Purging Flow Rate) を調査する Case3 (図-4)、実測中における空調機からの外気導入量を調査する Case4 の計 4 種のトレーサガス実験を行った。

### 2.1 Case1 (短期間のガス放散に対する濃度推移)

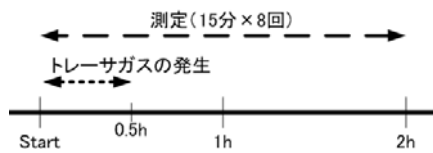


図-2 Case1 の時系列

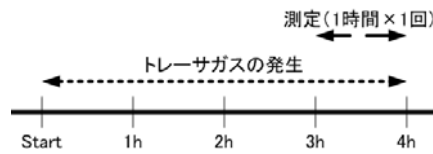


図-3 Case2 の時系列

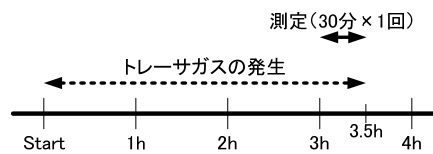


図-4 Case3 の時系列

### (1) トレーサガスの発生方法

1 階のエントランス空間にトレーサガス発生源（ドーザー）を設置し、夏季(8/7)・冬季(2/16)ともに 30 分間トレーサガスを発生させた。ドーザーは 1ml のメスフラスコにパーフルオロカーボン（液体）を充てんしたものを使用した。トレーサガスの発生速度を一定にするために、恒温槽（TAITEC 製 EHB）でパーフルオロカーボンを一定温度に保つほか、DC12V の PC ファンをを設置したケーシングで覆うことでドーザー位置の風速を一定に保つ。パーフルオロカーボンには Perfluoro methyl cyclohexan(PMCH, C7F14, 分子量 350)を用い、高温槽の設定温度は 40°C とした。

### (2) トレーサガスのサンプリング方法

2 階のロビー空間に測定点を設定し、トレーサガス発生後 2 時間にわたるトレーサガス濃度の推移を測定した。図-2 にトレーサガスの発生とサンプリングの時系列を示す。サンプリングはサンプリングポンプを使用したアクティブサンプリングとし、サンプリング時間中にポンプに接続したカーボンモレキュラーシープ (Carboxen1000)100mg とグラファイトカーボン(Carbotrap B)100mg の 2 層の吸着管にトレーサガスを吸着させることでその濃度を測定した。サンプリング間隔は吸着管を交換することで調整する。本実測においては、2 時間を 15 分毎に 8 分割した測定を行うことで、濃度推移の時系列を測定した。ロビーにおいて着座による打合せを行うことを想定し、居住者の座位における代表的呼吸域レベルとなる床上 110cm をサンプリング高さとした。

## 2.2 Case2（連続ガス放散に対する濃度上昇）

### (1) トレーサガスの発生方法

夏季(8/6)に 2.1 節(1)と同様の手法で 1 階のエントランス空間に 4 時間程度トレーサガスを発生させた。

### (2) トレーサガスのサンプリング方法

2.1 節(2)と同様に 2 階のロビー空間の濃度測定を行っ

た。測定時間は、測定空間の濃度を平衡状態とするため、トレーサガス発生から約 3 時間後、1 時間のサンプリングを 1 回行った。図-3 にトレーサガスの発生とサンプリングの時系列を示す。

## 2.3 Case3（Purging Flow Rate）

### (1) トレーサガスの発生方法

冬季(2/13)に 2.1 節(1)と同様の手法で 1 階のエントランス空間に 4 時間程度トレーサガスを発生させた。

### (2) トレーサガスのサンプリング方法

2.1 節(2)と同様の手法でトレーサガス発生点直上（サンプリング高さ：90cm）の濃度測定を行い、トレーサガス発生位置のガスの希釈強度としての Purging Flow Rate（以下、PFR）を測定した。PFR とは局所領域で実質的に汚染質を希釈、排除するのに有効な換気空気の入流量、即ち汚染質の排出効率を示すものであり、本報告では、以下の式(1)で定義するものとする。

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

PFR: Purging Flow Rate [m<sup>3</sup>/h]

k: トレーサガス発生量 [g/h]

C: 対象領域の代表濃度 [g/m<sup>3</sup>]

本実測では、トレーサガス発生点直上に設置した測定点が、発生位置周辺の領域の濃度を代表するものと仮定する。測定時間は、測定空間の濃度を平衡状態とするため、トレーサガス発生から約 3 時間後、30 分間のサンプリングを 1 回行った。図-4 にトレーサガスの発生とサンプリングの時系列を示す。

## 2.4 Case4（空調外気導入量）

実測期間中、同じくパーフルオロカーボンをトレーサガスとした手法により実測対象空間を空調する空調機への外気導入量を測定した。トレーサガスには Perfluoro dimethyl cyclo hexan (PDCH, C8F16, 分子量 400)を用い、外気取入れ口（OA ガラリ）の位置で発生させ、OA ダクト内の測定濃度を以下のザイデル式（式 2）に代入することで計算する。

$$p - p_0 = \frac{k}{Q} \quad (2)$$

p: 測定濃度 [g/m<sup>3</sup>]

p<sub>0</sub>: 外気のバックグラウンド濃度[g/m<sup>3</sup>] (=0)

Q: 空調の外気導入量 [m<sup>3</sup>/h]

平均濃度の測定は、上述のロビー空間と同様にサンプリングポンプを用いたアクティブサンプリングとした。ザイデル式に代入する濃度は平衡状態のものとするため、トレーサガス（PDCH）の発生は、サンプリングより 3 時間程度前から開始している。なお、パーフルオロカーボンの発生に恒温槽は用いていない。本測定は建物内に

表-1 分析条件

分析装置	加熱脱離-ガクロマトグラフ-質量分析計 TDS(Gestel)-GC/MS (Agilent6890-5973N k-002)
脱着条件	夏季: 20°C(3min)-(60°C/min)-250°C(10min), 冬季: 20°C(3min)-(60°C/min)-350°C(10min)
モード	TDS スプリットレス, CIS スプリット 1/100
CIS ライナー	Glass Tube
CIS トラップ温度	-150°C
CIS トラップ条件	夏季: -150°C-(12°C/min)-280°C(5min), 冬季: -150°C-(12°C/min)-350°C(5min)
TDS-CIS トランスファー温度	夏季: 280°C 冬季: 350°C
カラム	DB-624, 0.25mmI.D.×60m, 0.5µm
オープン温度	夏季: 50°C(3min)-(10°C/min)-250°C(10min), 冬季: 40°C(5min)-(3°C/min)-100°C-(10°C/min)-250°C(5min)
検出器	MS(SCAN)
キャリアガス	He 1ml/min

表-2 トレーサガスの発生条件

	実測日	PFC	発生時間	発生総量[mg]	時間あたりのガス発生量[mg/h]
Case1-1	2008/8/7	PMCH	13:00~13:30	173	346
Case1-2	2009/2/16	PMCH	13:30~14:00	162	324
Case2	2008/8/6	PMCH	12:37~16:38	507	126
Case3	2009/2/13	PMCH	10:44~15:03	511	118
Case4-1	2008/8/7	PDCH	10:25~15:15	196	40.6
Case4-2	2008/8/6	PDCH	13:00~17:00	146	36.5
Case4-3	2009/2/16	PDCH	10:21~15:33	110	21
Case4-4	2009/2/13	PDCH	10:30~15:10	83	18

表-3 サンプルング条件と測定濃度

	実測日	サンプルング時間	濃度[mg/m <sup>3</sup> ]
Case1-1	2008/8/7	13:00~13:15	17
		13:15~13:30	31
		13:30~13:45	41
		13:45~14:00	42
		14:00~14:15	31
		14:15~14:30	21
		14:30~14:45	15
		14:45~15:00	14
Case1-2	2009/2/16	13:35~13:45	<
		13:45~14:00	28
		14:00~14:15	37
		14:15~14:30	23
		14:30~14:45	14
		14:45~15:00	9
		15:00~15:15	<
Case2	2008/8/6	15:30~16:30	50
Case3	2009/2/13	14:00~14:30	125
Case4-1	2008/8/7	13:00~15:00	10.5
Case4-2	2008/8/6	15:30~16:30	7.5
Case4-3	2008/2/16	13:30~14:30	14
Case4-4	2008/2/13	14:00~15:00	4

流入したトレーサガスを希釈することに有効に働く外気量(新鮮外気量)を測定することを目的とするため、式(2)における外気のバックグラウンド濃度は0として計算する。

## 2.5 空間間差圧

温度差換気による縦動線の空気輸送の経路と強度を調査するため、エントランス空間と、防火戸を介して接続

表-4 エントランス空間一階段室間の差圧

日	測定時間	平均値 [Pa]
2008/8/6	15:30~16:30	-0.20
2008/8/7	13:00~15:00	-0.31
2009/2/13	14:00~15:00	-0.26
2009/2/16	No data	

表-5 空調外気導入量

日	測定時間	外気導入量[m <sup>3</sup> ]
2008/8/6	15:30~16:30	4900
2008/8/7	13:00~15:00	3900
2009/2/13	14:00~15:00	4500
2009/2/16	13:30~14:30	1500

する階段室との差圧を測定した。測定には、微差圧変換器(MKS製 Type670BD21)とデータロガー(Keyence製 NR-2000)を使用した。測定間隔は5Hzである。

## 2.6 分析方法

サンプルングした吸着管は加熱脱離後、GC/MSにより分析した。表-1にGC/MSの分析条件を示す。なお、本分析における定量下限値は絶対量が21ngであり、検出下限値は定量下限値の3/10である。

## 3. 実測結果

表-2にトレーサガスの発生条件を、表-3に各吸着管の測定条件と検出結果からのサンプルング空気の計算濃度を示す。なお、表中<は定量下限値(本分析法で目的物質の定量が信頼性ある最小値)未満であることを示す。表-4にエントランス空間と階段室との差圧を示す。ここで、数値が+の場合、階段室側が正圧となっていることを示し、-の場合は、階段室側が負圧となっていること

表-6 実測時の室温および外気温度

日付	時間	1階室温[°C]	2階室温[°C]	空調給気温度[°C]	外気温度[°C]	内外温度差*1[°C]
2008/8/6	14時	24.8	26.6	12	34	8.3
2008/8/7	14時	25	26.7	11.9	32.9	7.05
2009/2/13	14時	19.2	20.6	35	12.2	-7.7
2009/2/16	14時	21	21.9	32.9	14	-7.45

\*1:ここで、内外温度差=外気温度-(1階室温+2階室温)/2とする。

を示す。表-5に実測時の空調外気導入量を示す。CO2センサーによる外気導入量制御の結果、各実測日程で外気導入量が増えていると考えられる。各実測日程表-6に実測時の対象建物の管理システムにより記録されている1,2階の室温と空調給気温度、および気象庁で発表されている東京(緯度35度41.4分、経度139度45.6分、標高6.1m)の外気温度を示す。当然ながら、夏季では内外温度は屋外が高くなり、冬季では室内が高くなっている。しかしながら、夏季・冬季を通して階段室側が負圧(表-4)となっており、内外温度差の反転による階段室を縦動線とした空気輸送経路に大きな変化はないと推測される。この現象は、内外温度差による換気駆動力よりも、各階における空調の給排気のバランスが、階段室に対する空気の流出入を決定しているためと考えられる。

図-5にCase1における測定濃度を時間あたりのトレーサガス発生量で除した値 $p^*$ (式3)の時系列と、Case2における測定濃度を同じくトレーサガス発生量で除した値を示す。

$$p^* = \frac{p}{k} \quad (3)$$

夏季の実測結果は冬季と比較し、ピークの時間が遅れる、ピーク濃度が高く出る傾向がみられる。

次に各季における測定位置の局所的な換気時間を求める。ここで換気時間は、式(4)により定義する。式(4)を変形して得られる式(5)の $p$ に濃度測定データを用い、最小二乗法により求める。なお、ピークが観測されたデータの次データ以降から公比一定で濃度減衰していると仮定し、換気時間の算出には、ピークが観測されたデータの次以降のデータのみを用いる。

$$\frac{p}{p_1} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

$$\log_e p = \log_e p_1 - \frac{1}{\tau} t \quad (5)$$

$\tau$ :換気時間(時定数) [h]

$t$ :経過時間 [h]

$p_1$ :初期濃度 [g/m<sup>3</sup>]

結果、夏季は0.9h、冬季は0.5hとなり、冬季が夏季と比較し濃度の希釈速度が速いことが分かる。対象空間の

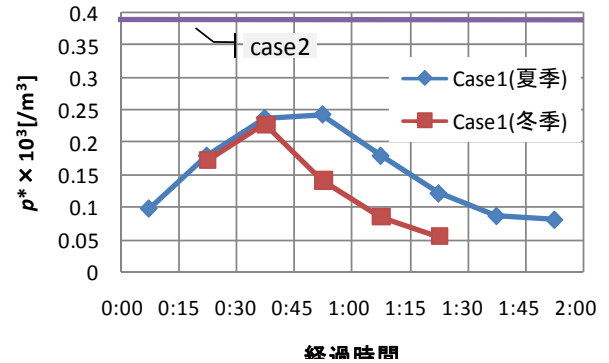


図-5 測定濃度の時系列

容積は約3,000m<sup>3</sup>であることから、表-5の空調外気導入量を用いて空調による換気時間を計算すると、夏季は0.8h、冬季は2hとなる。このことより、冬季には測定位置のトレーサガスを希釈するために有効な自然換気が働いていたことが考察される。またこの自然換気の結果、表-5に示される2月16日の空調外気導入量が抑制されたことが推測される。

なお、冬季におけるトレーサガス発生位置における $PF$ は950m<sup>3</sup>/hであった。

#### 4. まとめ

- 1) 物質の輸送現象を対象として、屋内外の温度差が反転する夏季と冬季の2回、同じ条件においてトレーサガスの拡散実験を行った。
- 2) 実験においては、空調外気導入量、エントランスと階段室間の差圧、およびトレーサガス発生位置のPurging Flow Rateも測定した。
- 3) 夏季においては、冬季と比較しトレーサガスのピークの時間が遅れる、ピーク濃度が高く出る傾向がみられた。
- 4) 各季の測定位置における換気時間を調べた結果、冬季には濃度減衰に影響を及ぼす自然換気が働いていたことが推測される。

#### 謝辞

本研究は、文部科学省の安全・安心科学技術プロジェクト「有害危険物質の拡散被害予測減災対策研究」(研究代表 加藤信介)の一環として実施しました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1)近藤紗登美, 鶴飼修, 浜野明千宏, 吉岡逸夫, 加藤信介: 屋内での化学剤テロを想定したガス拡散予測シミュレーション, 第24回生研TSFDシンポジウム講演論文集(2009) pp18-19
- 2)空気調和衛生工学会規格: トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法(2004)