

# **室内暴露と換気の変動に 関する調査**

産業技術総合研究所  
化学物質リスク管理研究センター

篠原 直秀

# 室内暴露のリスク評価

## ～ 課題と本ワークショップでの話題～

現状の室内暴露のリスク評価における課題

- ・ 対策の検討方法  
(換気, 発生源対策の必要性の検討)
- ・ 単回の調査を元にした分布の修正  
(集団としてのリスクの判定のため)



本ワークショップにおける話題

- ・ 居住空間における有効な換気測定法について
- ・ 実測調査結果から得られたリスク評価に有益な情報

(様々な物質の室内濃度測定法については, 既存の報告も多いため, 本ワークショップでは触れない)

# 本日の内容

## 居住空間における換気回数測定法

- ・ 換気回数測定の課題と目的
- ・ 換気回数測定方法と定量範囲, 精度等
- ・ 換気回数結果例

## 室内調査

- ・ 室内調査の目的
- ・ 室内調査結果(室内濃度・換気率)
- ・ 室内濃度と換気率の日間変動と分布の補正
- ・ 測定のタイミングと頻度について

## 室内の対策検討手法

- ・ 対策検討の流れ
- ・ 放散量測定法

# 換気回数測定法

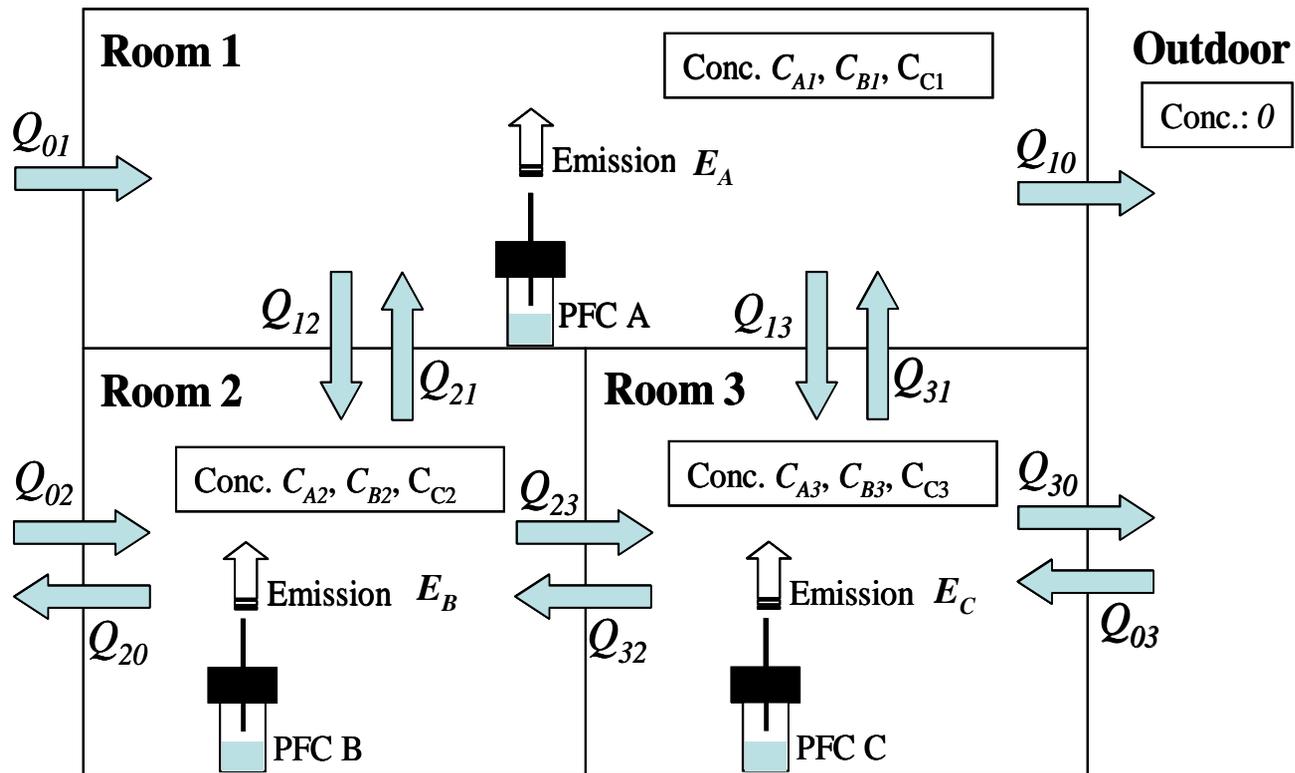
## 課題

- ・ 既往の報告における換気測定の多くは、部屋間の空気交換量と外気導入量とを区別できず、換気システムの改善や発生源の対策につながらず。
- ・ CO<sub>2</sub>濃度減衰法や気密度測定法は現場で大掛かりな機器を必要としており、多数の測定に不向き。
- ・ 簡易かつ安価で、安定した放散を示すトレーサーガス発生源がない。

## 目的

- ・ 定常発生法を使用した換気回数測定法を確立する。  
(部屋間の空気交換量と外気導入量が区別可能)  
(VOC類と同時捕集・分析が可能)
- ・ 安定した放散を示すトレーサーガス源を開発する。

# 換気回数測定方法



各部屋で、異なるトレーサーガスを一定速度で放散させる  
約24時間後からそれぞれの室内でPFC類をVOCと同時捕集  
捕集したガスをGC-MSで分析、室内濃度 $C$ を算出  
トレーサーガスの減少重量から放散量 $E$ を算出  
室内濃度 $C$ と放散量 $E$ から空気の移動量 $Q$ を求める。  
(12のマスバランス式から算出)

# 換気回数測定方法 ~ 試薬, 分析 ~

トレーサーガス: 3種類のPFC類

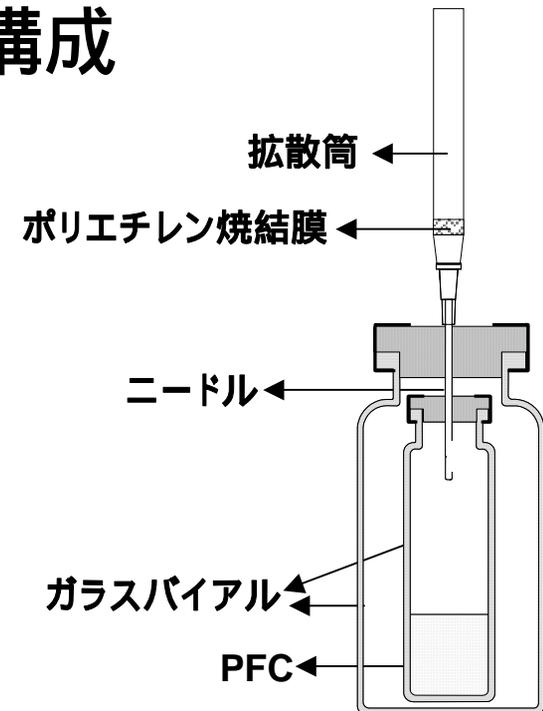
ヘキサフルオロベンゼン,  
オクタフルオロトルエン,  
パーフルオロアリルベンゼン

PFC放散源: 二重のガラスバイアル,  
ポリエチレン焼結膜, 針で構成  
部屋の四隅高さ2mに設置

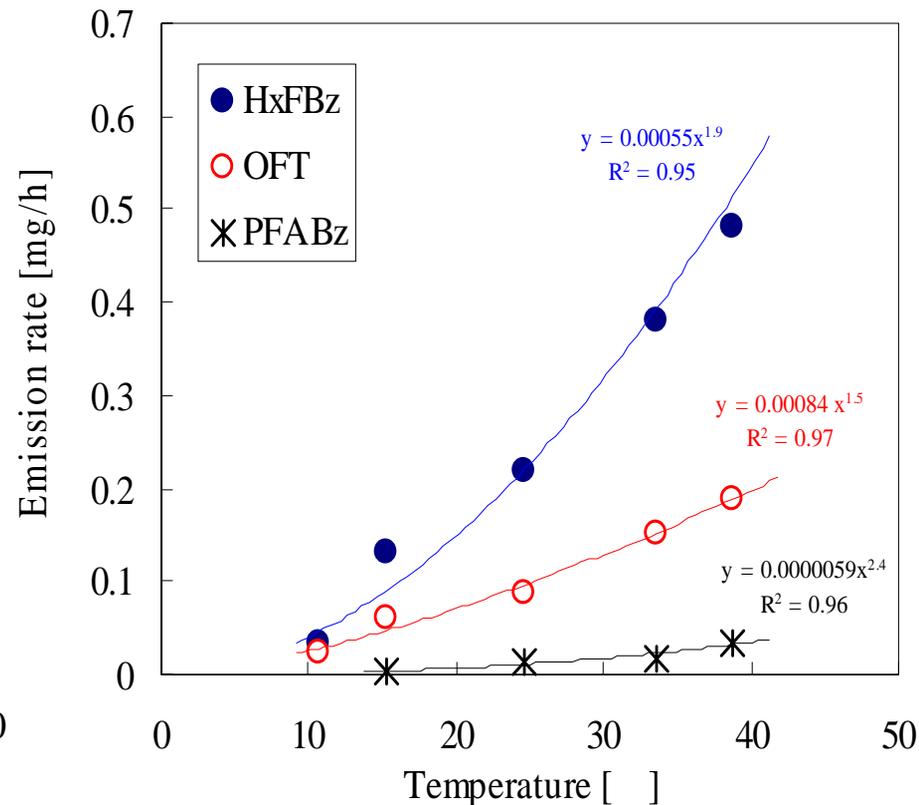
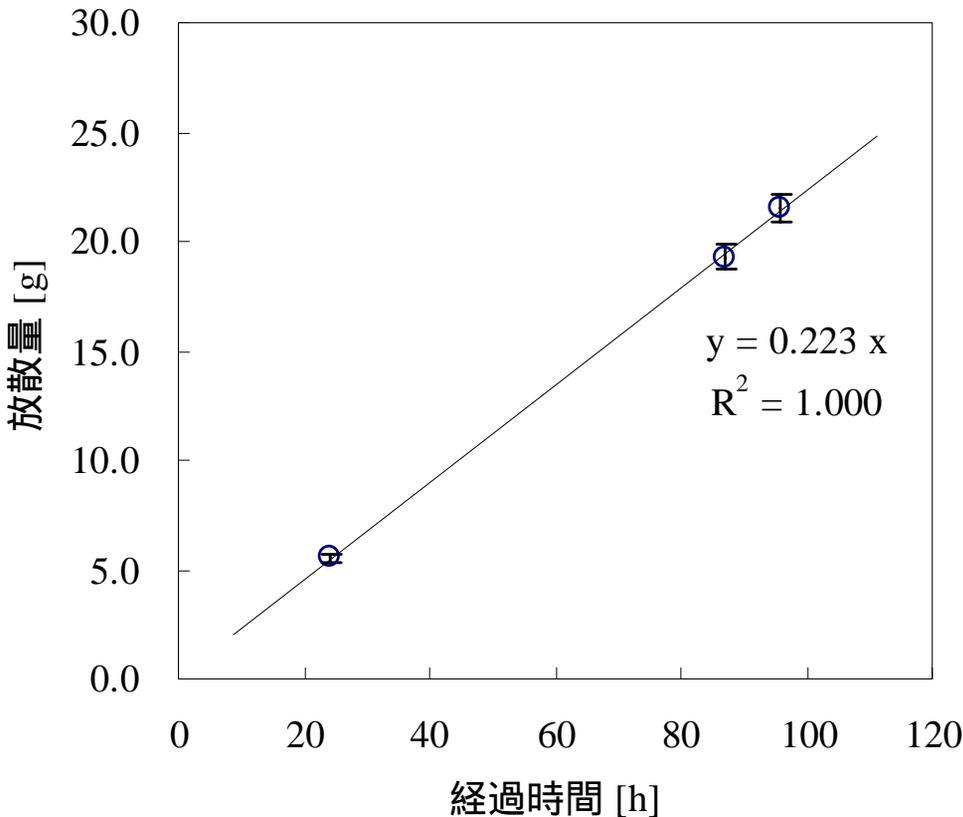
サンプラー: VOC-SD (Supelco Ltd.)

抽出: 1 mlの二硫化炭素により抽出

分析: GC-MS (HP6890-HP5973,  
Hewlett Packard Co.)により分析



# トレーサーガスの放散速度



- ・ 一定温度条件下では、どの放散量も非常に安定  
(CV: 3.0%~3.1% (N=20))
- ・ 温度依存性大 温度による補正の必要性

# 換気回数測定のQA & QC

~ 定量下限値, 回収率, CO<sub>2</sub>濃度減衰法との比較 ~

	LOD [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	LOQ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Recovery rates [%]	Sampling rates [mL/min]
HxFBz	0.670	2.01	40% $\pm$ 3%	0.670
OFB	0.491	1.47	72% $\pm$ 5%	0.491
PFABz	0.577	1.73	84% $\pm$ 6%	0.577

Air exchange rate [/hour]

PFT

CO<sub>2</sub>

HxFBz 1.04  $\pm$  0.02

OFB 0.95  $\pm$  0.03

PFABz 1.38  $\pm$  0.12

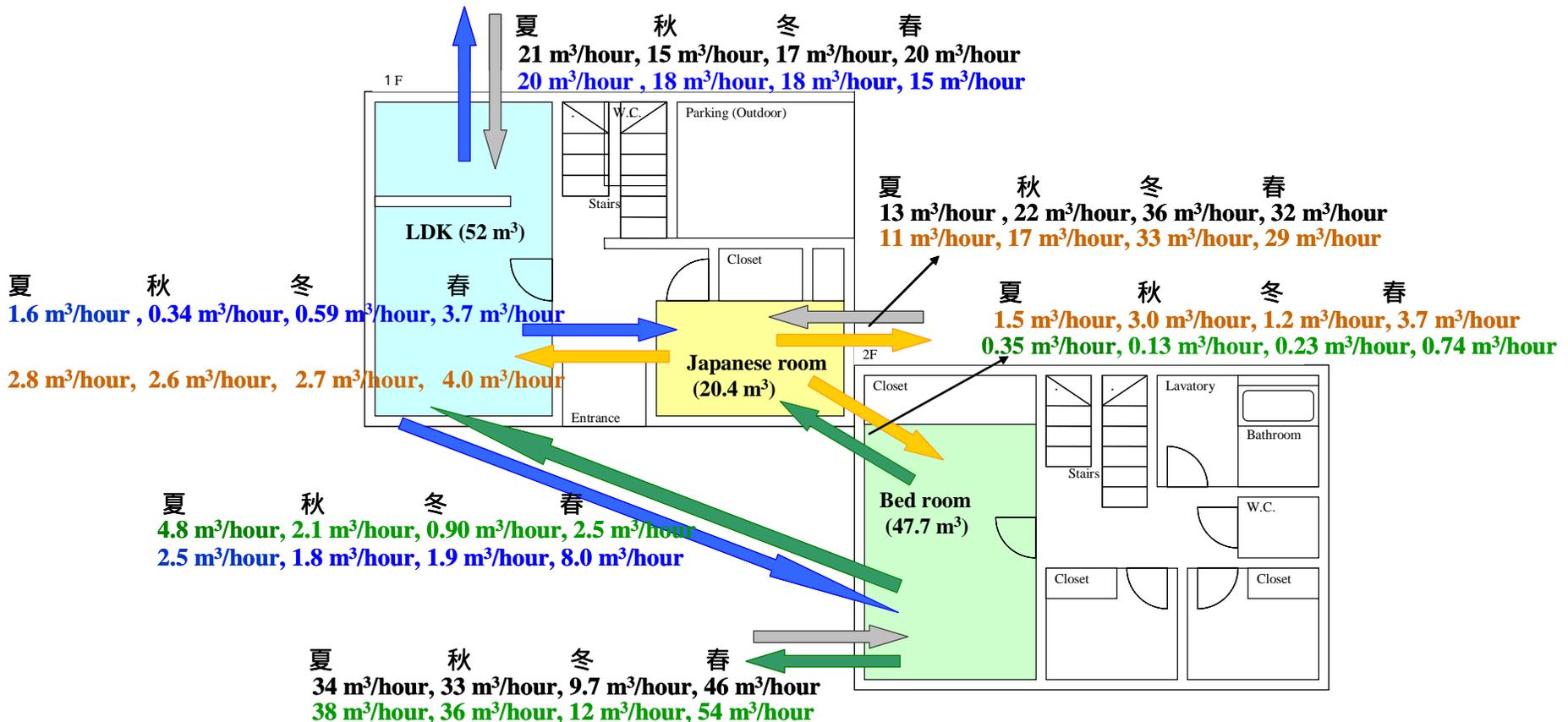
0.96

回収率は低い  
ばらつきが小さい  
補正に使用

- ・ 24時間平均換気測定に対して, 十分な性能を確認
- ・ また, CO<sub>2</sub>濃度減衰法と結果がよく一致

# 空気交換量測定結果 ~一例~

ある家で得られた，部屋間・室内外の空気交換量結果を一例として以下に示す．



# 室内調査

## 課題

- ・ 既往の調査結果は、慢性暴露の分布と異なる
- ・ 一日調査した濃度がどの程度信頼できるか不明
- ・ 室内濃度が高いときの対策検討手段が明確でない



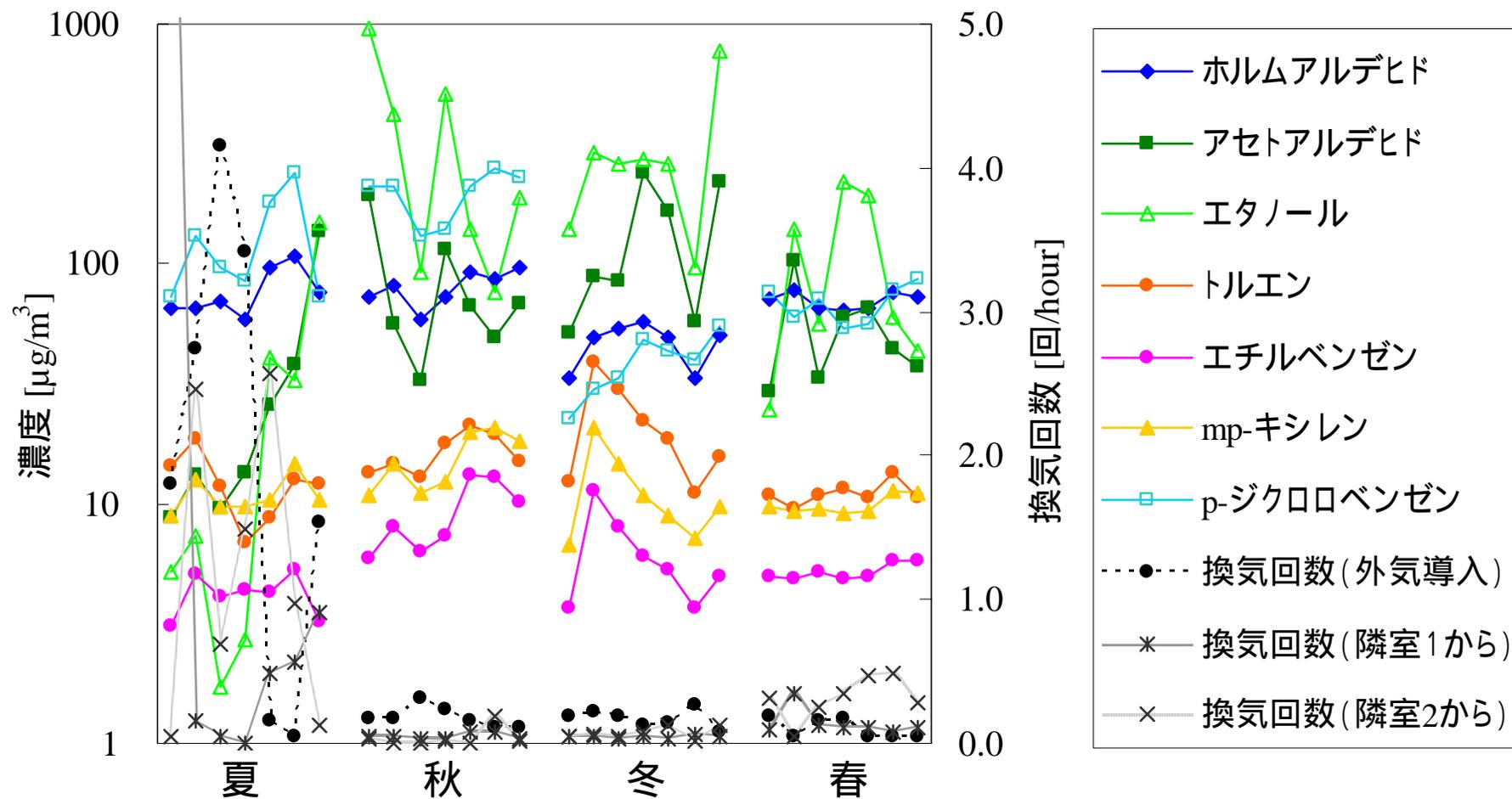
## 目的

- ・ 長期平均濃度の分布の導出のための係数として、家庭内変動 ( $GSD_f$ ) を得る
- ・ 高い確率で年平均値に近い値を得られるサンプリングのタイミングを明らかにする。
- ・ 対策をどのように検討してゆけばよいかを提案、実測調査結果を元にシミュレートする。

# 室内調査 ~方法~

- ・ 対象 …… 家の構造, 家族構成, 生活スタイルの異なる26軒
  - ・ 建物の種類 (鉄筋コンクリート, 木造)
  - ・ 築年数 ((新築), 築1年 ~ 築10年, 築10年以上)
  - ・ 家族人数 (1人, 2人, 3人以上)
  - ・ 平日の昼間の在宅者 (いる, いない)
  - ・ 喫煙者の有無
- ・ 測定項目 …… VOC濃度、カルボニル濃度、換気率、温湿度  
(39物質) (4物質)  
の24時間平均値を7日間連続測定
- ・ 測定地点 …… 3部屋および屋外
- ・ 期間 …… 夏季 (2005年 8, 9月), 秋季 (2005年 10, 11月),  
冬季 (2006年 1, 2月), 春季 (2006年 5, 6月)

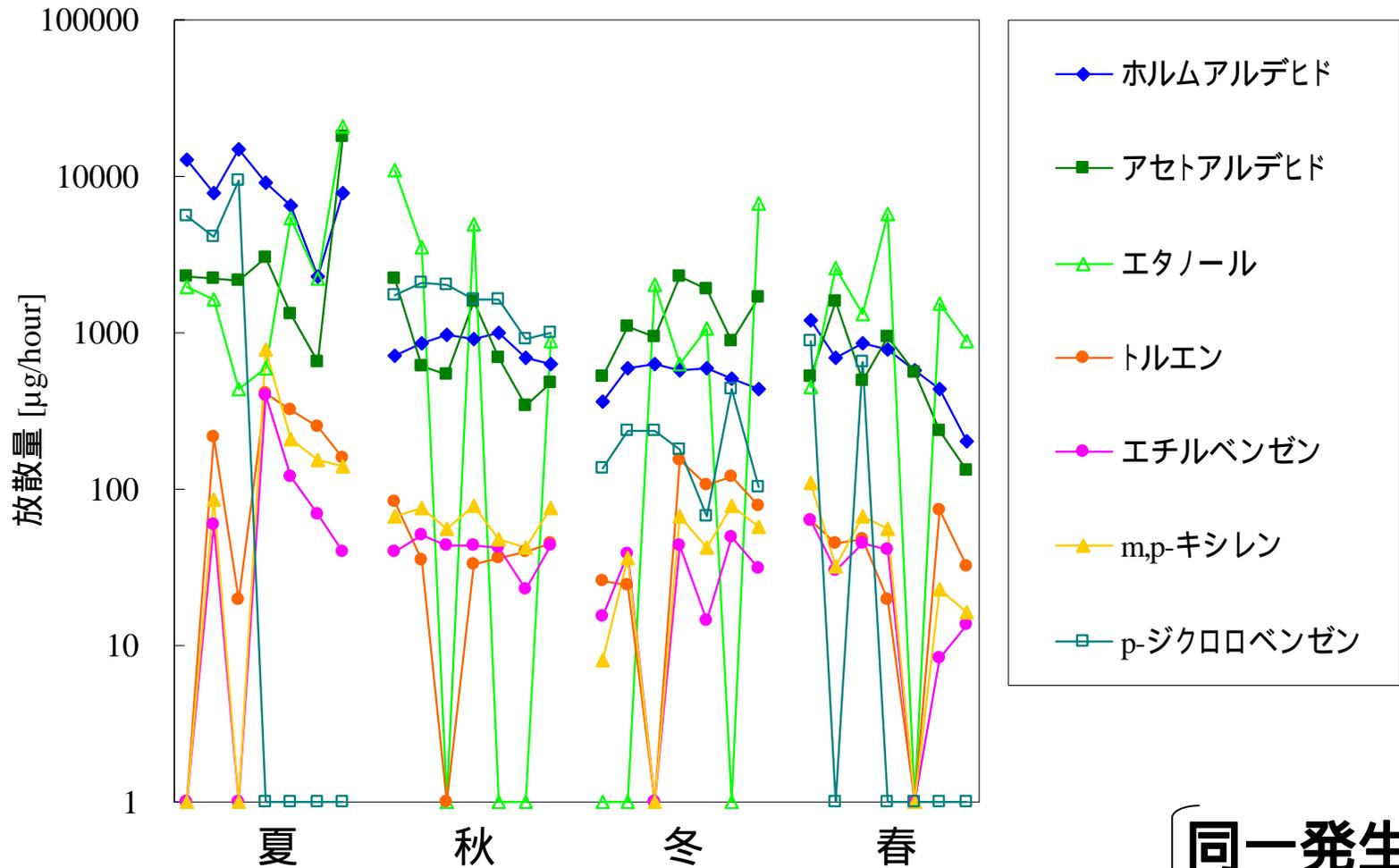
# 室内調査 ~結果一例-室内濃度・換気回数~



全ての物質と換気回数・・・逆相関 ⇒ 換気の有効性

# 室内調査 ~結果一例- 放散量~

(ここでの放散量には, 反応による生成や消失, 吸脱着も含まれる)

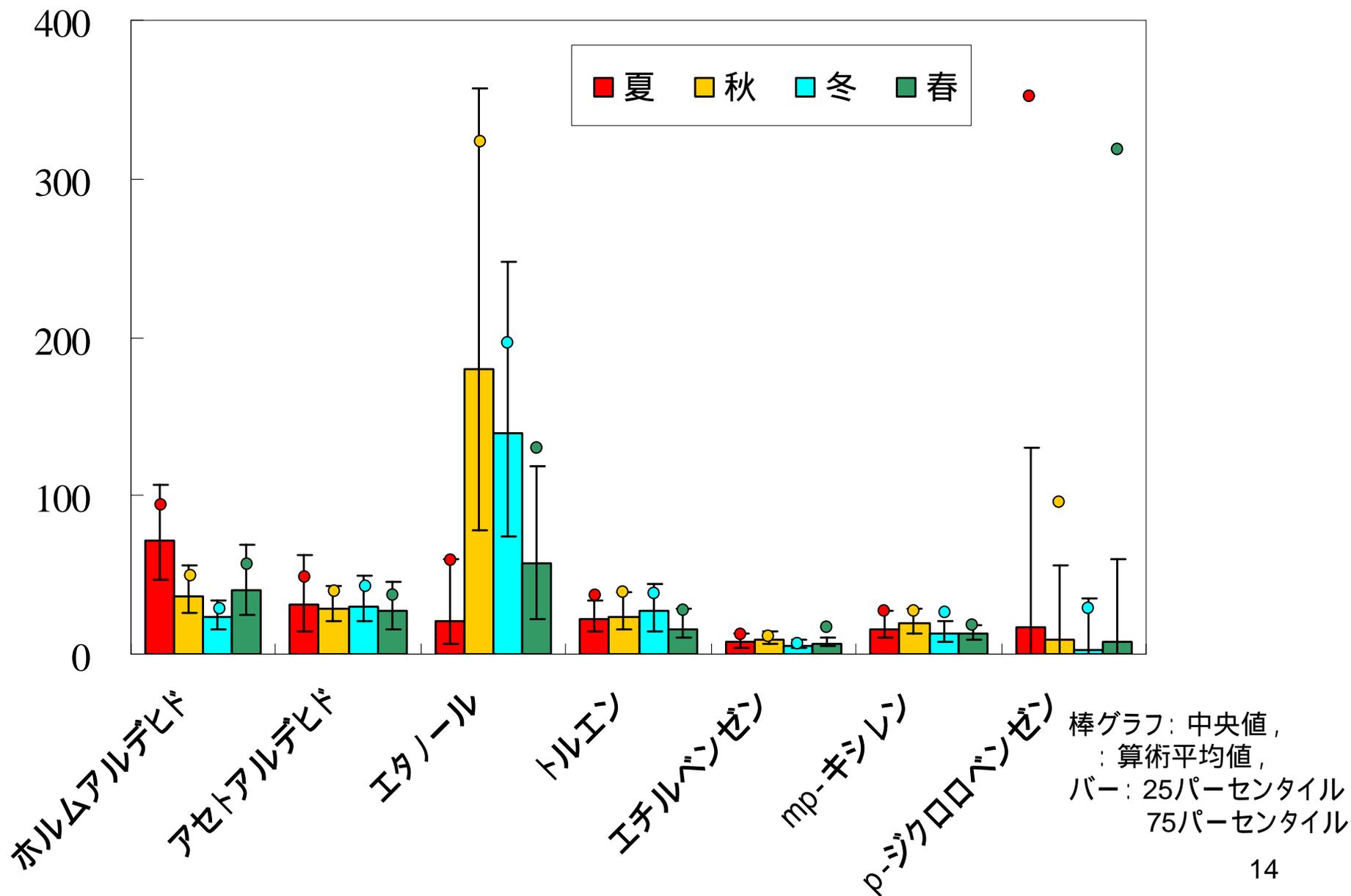


トルエン・キシレン・エチルベンゼン  
エタノール・アセトアルデヒド

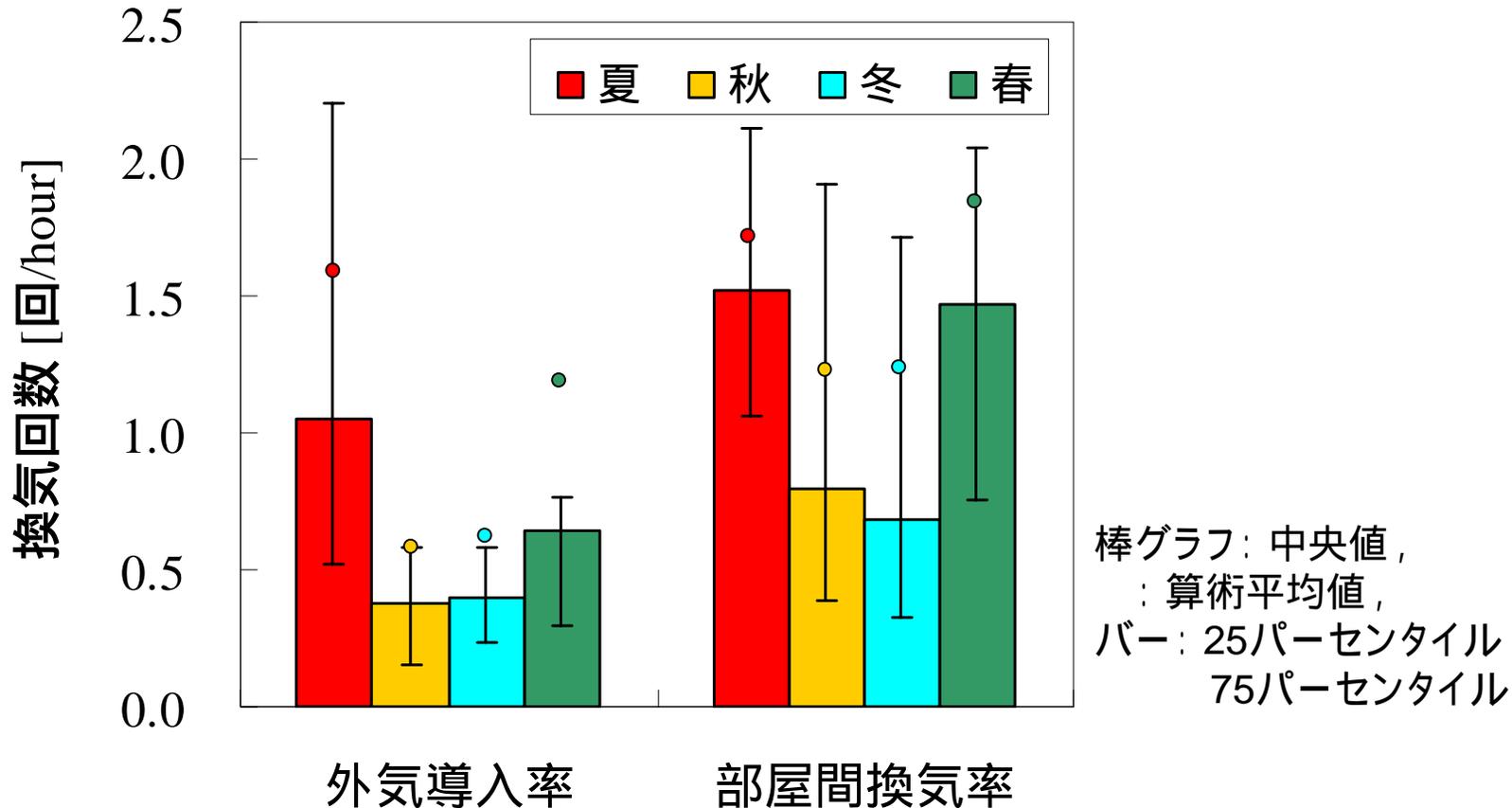
傾向が類似

同一発生源?  
反応生成?

# 室内調査 ~測定結果- 室内濃度~



# 室内調査 ~測定結果- 換気回数~

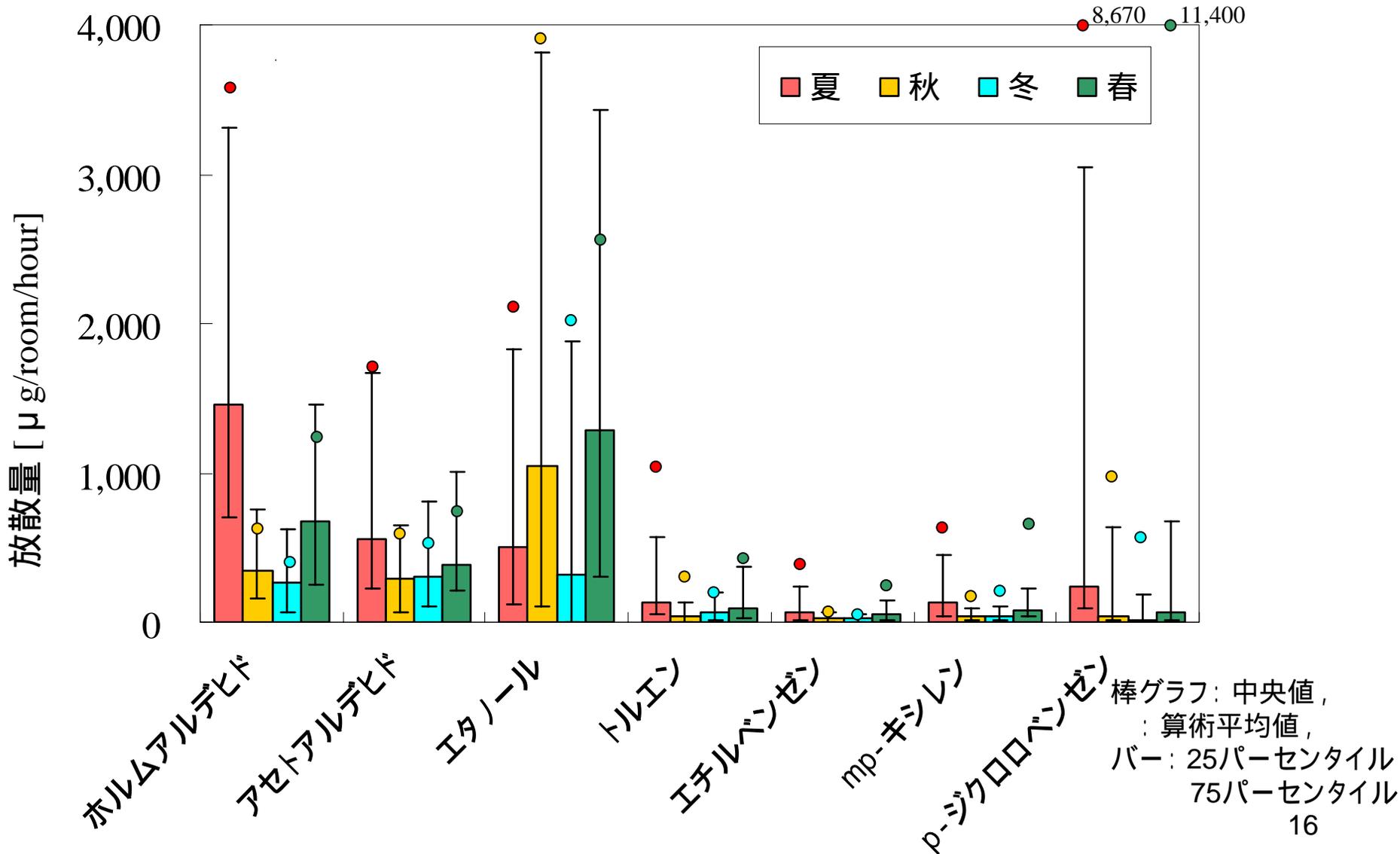


季節によって換気回数が大きく異なる  
(夏には秋冬の約2倍)

➡ 測定時期を考慮して換気回数を測定すべき

# 室内調査 ~計算結果- 放散量~

(ここでの放散量には, 反応による生成や消失, 吸脱着も含まれる)



# 長期平均濃度の分布

既往の調査の日平均濃度の家庭間変動 ( $GSD_{Cday}$ ) から家庭内変動 ( $GSD_f$ ) (日間変動, 部屋間変動) を差し引くことにより長期平均濃度の家庭間変動 ( $GSD_{Clong}$ ) を得る.

日平均濃度の幾何平均値 ( $GM_{Cday}$ ) を年平均値として算術平均に換算すると, 長期平均濃度の幾何平均値 ( $GM_{Clong}$ ) を得る. (蒲生の発表参照)

$$GM_{Clong} = GM_{Cday} \times \exp \frac{(\ln(GSD_f))^2}{2}$$

$$(\ln(GSD_{Clong}))^2 = (\ln(GSD_{Cday}))^2 - (\ln(GSD_f))^2$$



- ・ 実測結果から,  $GSD_f$  を得る.
- ・ 既往の調査結果を元に, 長期平均濃度分布を得る. <sup>17</sup>

# 家庭内変動 ( $GSD_f$ )の結果

## 日間変動 (幾何標準偏差)

日間変動	夏 (N=80)	秋 (N=74)	春 (N=74)	冬 (N=74)	四季 (N=74)
ホルムアルデヒド	1.24 (1.09-1.54)	1.15 (1.09-1.34)	1.21 (1.12-1.45)	1.16 (1.07-1.41)	<b>1.61 (1.32-2.37)</b>
アセトアルデヒド	1.38 (1.12-1.91)	1.28 (1.09-2.09)	1.25 (1.12-1.82)	1.34 (1.11-1.83)	<b>1.57 (1.37-2.79)</b>
エタノール	1.97 (1.29-12.7)	1.70 (1.34-9.32)	1.47 (1.14-2.62)	2.17 (1.24-18.6)	<b>3.78 (1.84-24.5)</b>
トルエン	1.38 (1.11-1.92)	1.54 (1.25-2.03)	1.61 (1.23-2.38)	1.43 (1.12-1.72)	<b>1.66 (1.45-3.01)</b>
エチルベンゼン	1.34 (1.14-1.99)	1.40 (1.17-2.17)	1.51 (1.18-2.35)	1.26 (1.10-1.88)	<b>1.71 (1.44-3.25)</b>
m,p-キシレン	1.30 (1.11-1.83)	1.37 (1.15-1.89)	1.48 (1.10-1.70)	1.25 (1.13-1.65)	<b>1.73 (1.37-2.70)</b>
p-ジクロロベンゼン	1.30 (1.10-1.86)	1.29 (1.10-1.71)	1.30 (1.00-2.07)	1.27 (1.00-2.10)	<b>3.09 (1.81-6.04)</b>

中央値 (5%ile—95%ile)

## 家庭内変動 (幾何標準偏差) ( $GSD_f$ )

家庭内変動	夏 (N=26)	秋 (N=24)	春 (N=24)	冬 (N=24)	四季 (N=24)
ホルムアルデヒド	1.29 (1.12-1.58)	1.21 (1.13-2.00)	1.29 (1.15-3.05)	1.24 (1.15-1.50)	<b>1.67 (1.40-2.79)</b>
アセトアルデヒド	1.41 (1.14-1.85)	1.32 (1.14-4.07)	1.38 (1.16-2.04)	1.37 (1.15-1.79)	<b>1.57 (1.43-2.81)</b>
エタノール	2.52 (1.41-15.0)	2.22 (1.47-7.09)	1.89 (1.24-6.13)	2.81 (1.40-13.0)	<b>4.05 (2.18-15.5)</b>
トルエン	1.48 (1.21-1.89)	1.54 (1.28-3.83)	1.62 (1.28-2.25)	1.43 (1.19-1.70)	<b>1.69 (1.49-2.63)</b>
エチルベンゼン	1.39 (1.17-2.09)	1.44 (1.20-2.61)	1.51 (1.21-2.26)	1.32 (1.17-1.93)	<b>1.82 (1.48-3.19)</b>
m,p-キシレン	1.36 (1.14-2.70)	1.41 (1.20-2.92)	1.49 (1.24-2.40)	1.30 (1.19-1.70)	<b>1.77 (1.44-2.76)</b>
p-ジクロロベンゼン	1.45 (1.28-3.21)	1.43 (1.25-2.38)	1.66 (1.03-2.74)	1.37 (1.02-2.69)	<b>3.07 (1.88-6.64)</b>

中央値 (5%ile—95%ile)

# 家庭間変動, 季節間変動の結果

## 家庭間変動 (幾何標準偏差) ( $GSD_{Clong}$ )

家庭間変動	夏	秋	春	冬	四季
ホルムアルデヒド	2.04	2.00	1.69	1.99	<b>1.91</b>
アセトアルデヒド	2.73	1.70	1.86	2.24	<b>1.92</b>
エタノール	3.18	2.26	2.15	2.69	<b>1.97</b>
トルエン	2.12	1.91	1.94	1.94	<b>1.84</b>
エチルベンゼン	2.20	1.71	1.81	2.82	<b>2.12</b>
m,p-キシレン	2.27	1.79	2.20	1.81	<b>1.82</b>
p-ジクロロベンゼン	7.79	7.41	10.2	15.4	<b>8.38</b>

## 季節間変動 (幾何標準偏差)

季節間変動	(N=24)
ホルムアルデヒド	1.69 (1.25-2.25)
アセトアルデヒド	1.50 (1.21-2.32)
エタノール	2.61 (1.58-6.05)
トルエン	1.40 (1.24-1.95)
エチルベンゼン	1.45 (1.18-3.63)
m,p-キシレン	1.56 (1.19-2.28)
p-ジクロロベンゼン	3.24 (1.76-7.04)

# 長期平均濃度の導出(トルエンの場合)

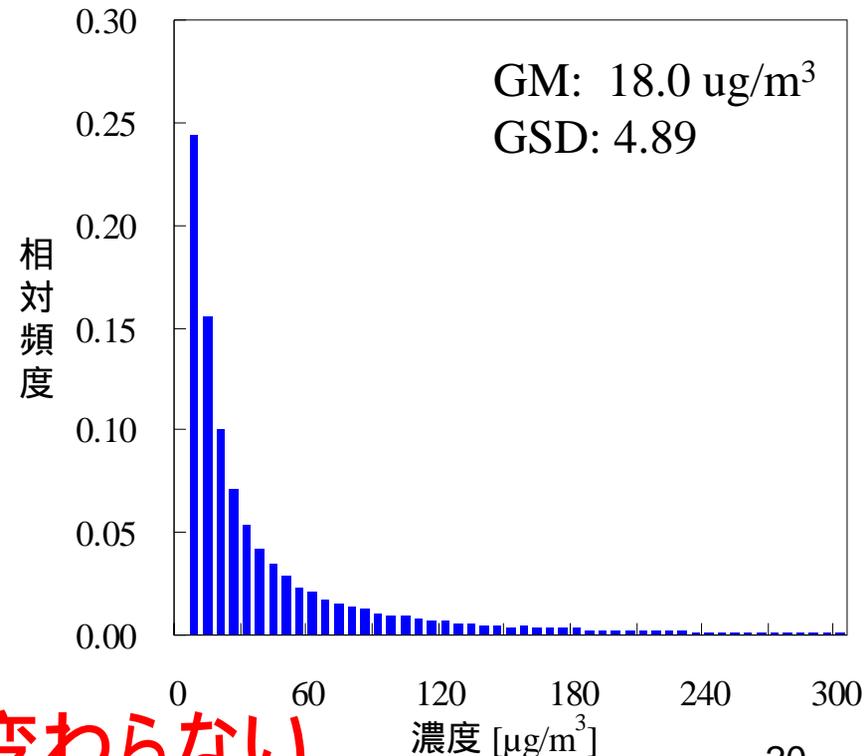
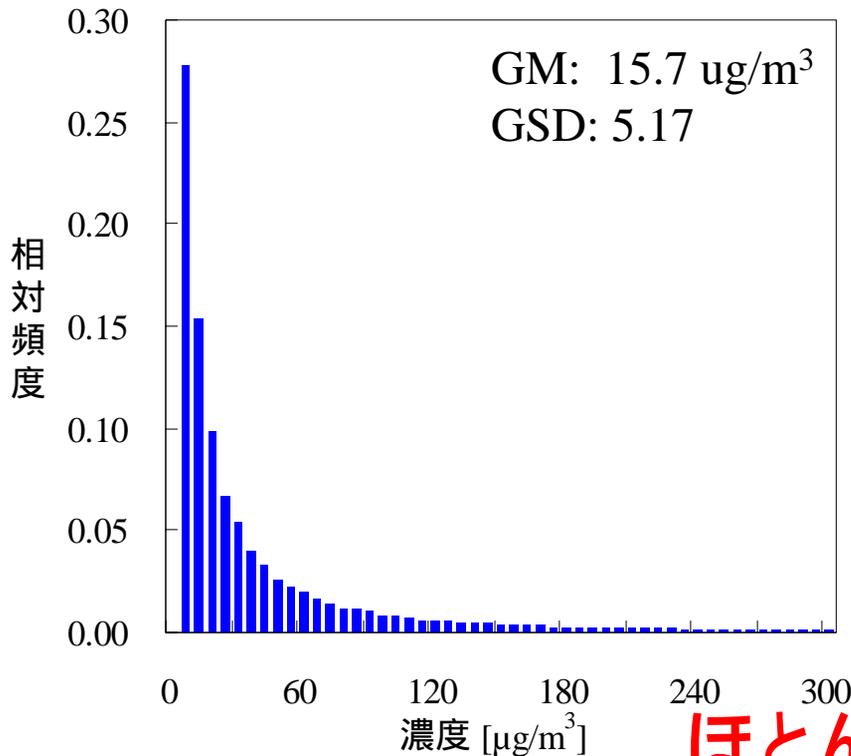
日平均濃度分布  
(モニタリングデータ)



長期平均濃度  
( $GSD_f$ による計算)

参照値超過割合

4.4% ← 参照値 : 260  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → 4.7%  
0.071% ← 参照値 : 2900  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → 0.055%



ほとんど変わらない

# 長期平均濃度の導出 (p-ジクロロベンゼンの場合)

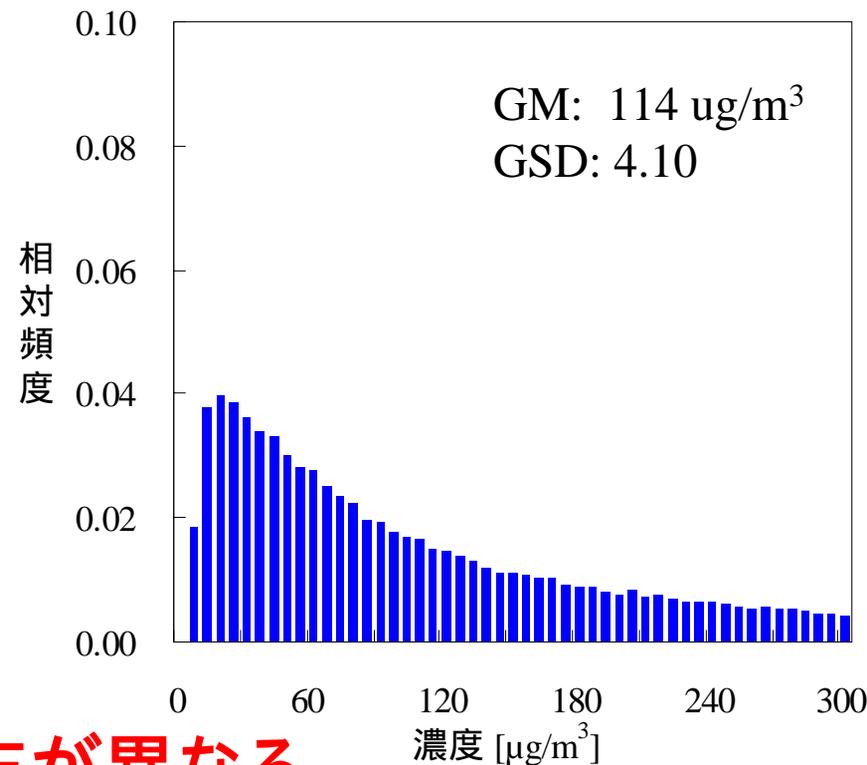
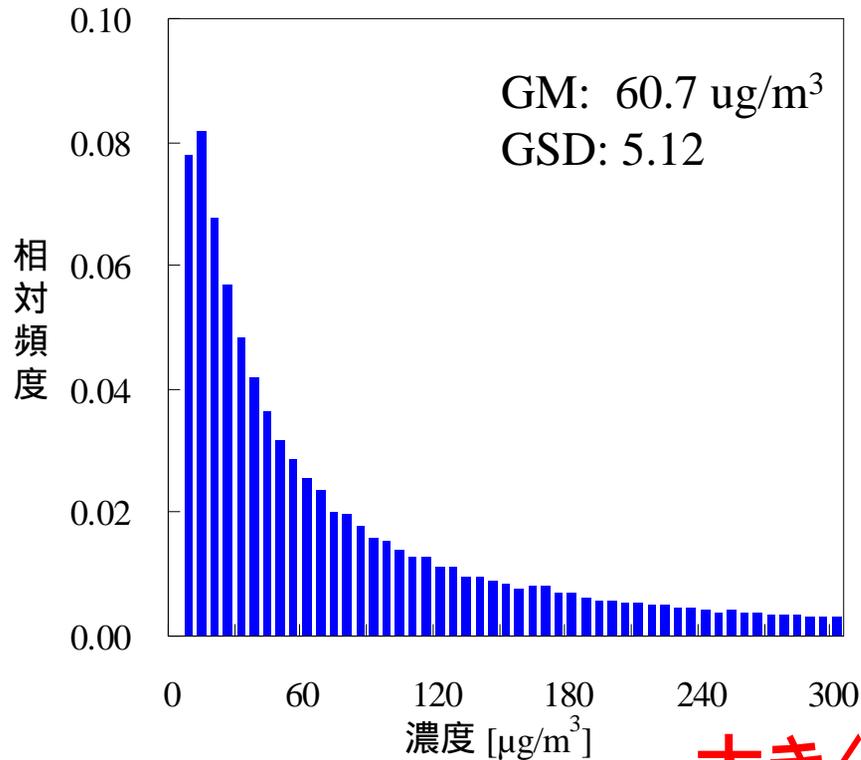
日平均濃度分布  
(モニタリングデータ)



長期平均濃度  
( $GSD_f$ による計算)

参照値超過割合

20.0% ← 参照値 : 260  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → 29.9%  
5.6% ← 参照値 : 2900  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → 8.4%



大きく分布が異なる

# サンプリングの仕方(タイミング) による誤差

## 課題

日間変動  $\longrightarrow$  ある調査日の濃度  $\neq$  実際の年平均濃度

## 目的

どのような調査(サンプリング)をれば,より年平均値に近い値を得られる可能性が高くなるかを明らかにする.

## 方法

- ・ 28日間の平均値 = 年平均値の分布と仮定.
- ・ モンテカルロシミュレーション(100,000回)により,本調査のデータから,サンプリングの仕方に応じて無作為にデータを採取.



評価

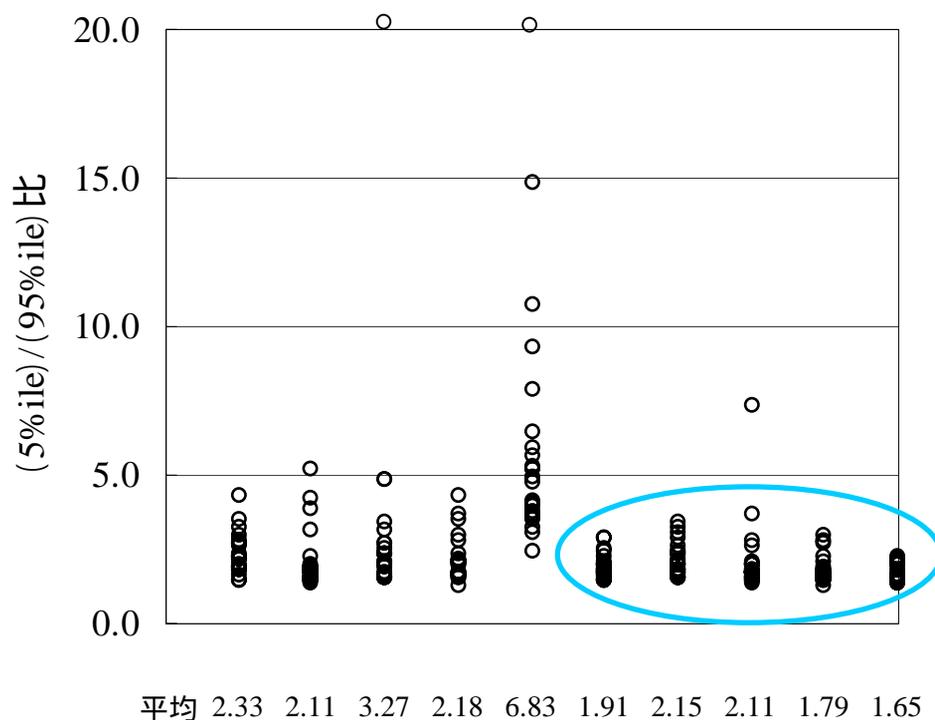
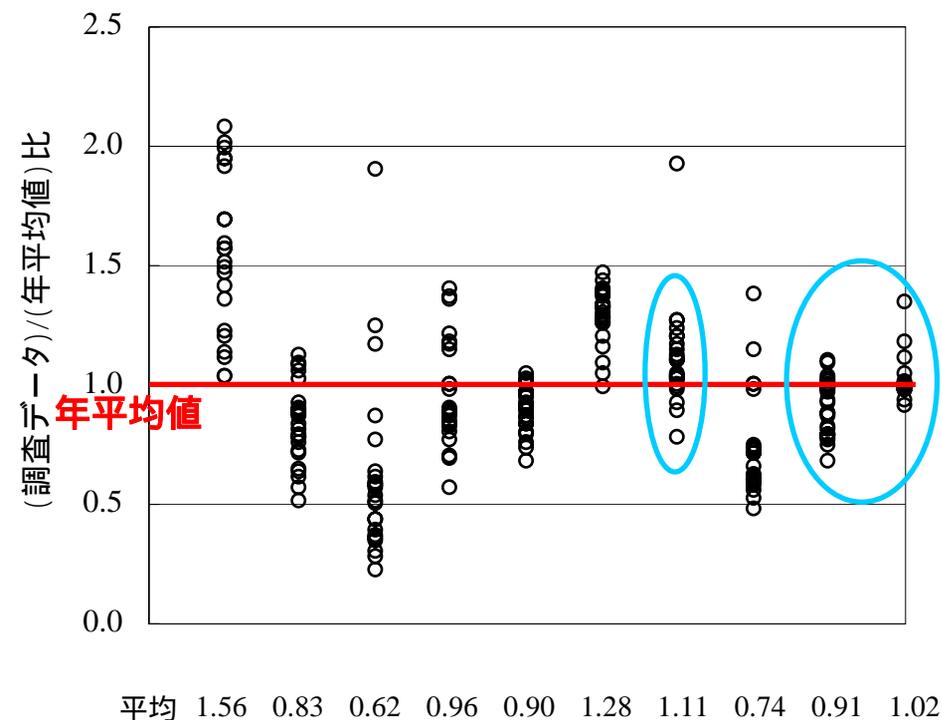
- ・ 作成したデータの平均値(100,000回)と年平均値の比較
- ・ 作成したデータのばらつき(SD)

# 室内濃度分布のずれ(ホルムアルデヒドの例)

調査方法: 夏に一日調査, 秋に一日調査, 冬に一日調査, 春に一日調査, 一年に一日調査, 夏と春に一日ずつ調査(計二日の平均値), 夏と冬に一日ずつ調査(計二日の平均値), 秋と冬に一日ずつ調査(計二日の平均値), 秋と春に一日ずつ調査(計二日の平均値), 各季節に一日ずつ調査(計四日の平均値)

各住宅における調査結果の中央値と年平均値の比

各住宅における調査結果の値のばらつき((95%ile)/(5%ile)比)

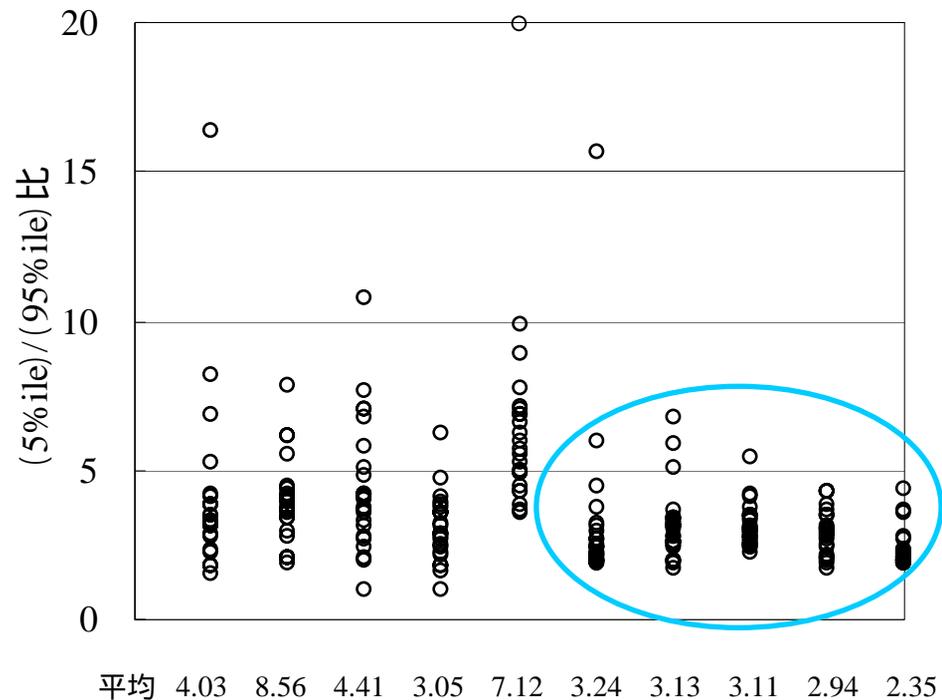
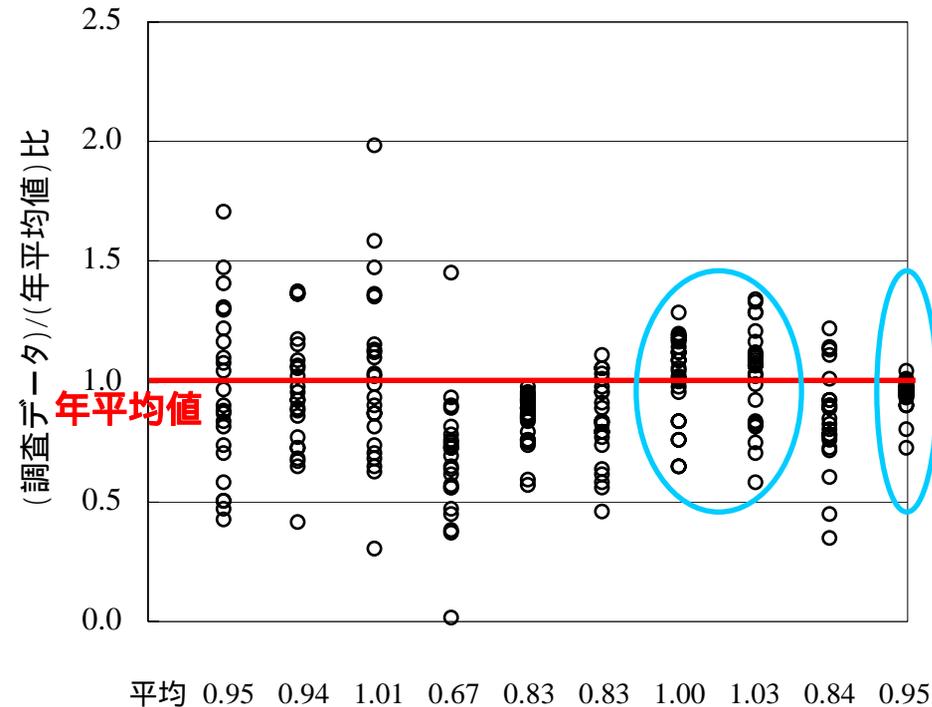


# 室内濃度分布のずれ(トルエンの例)

調査方法: 夏に一日調査, 秋に一日調査, 冬に一日調査, 春に一日調査, 一年に一日調査, 夏と春に一日ずつ調査(計二日の平均値), 夏と冬に一日ずつ調査(計二日の平均値), 秋と冬に一日ずつ調査(計二日の平均値), 秋と春に一日ずつ調査(計二日の平均値), 各季節に一日ずつ調査(計四日の平均値)

各住宅における調査結果の中央値と年平均値の比

各住宅における調査結果の値のばらつき((95%ile)/(5%ile)比)

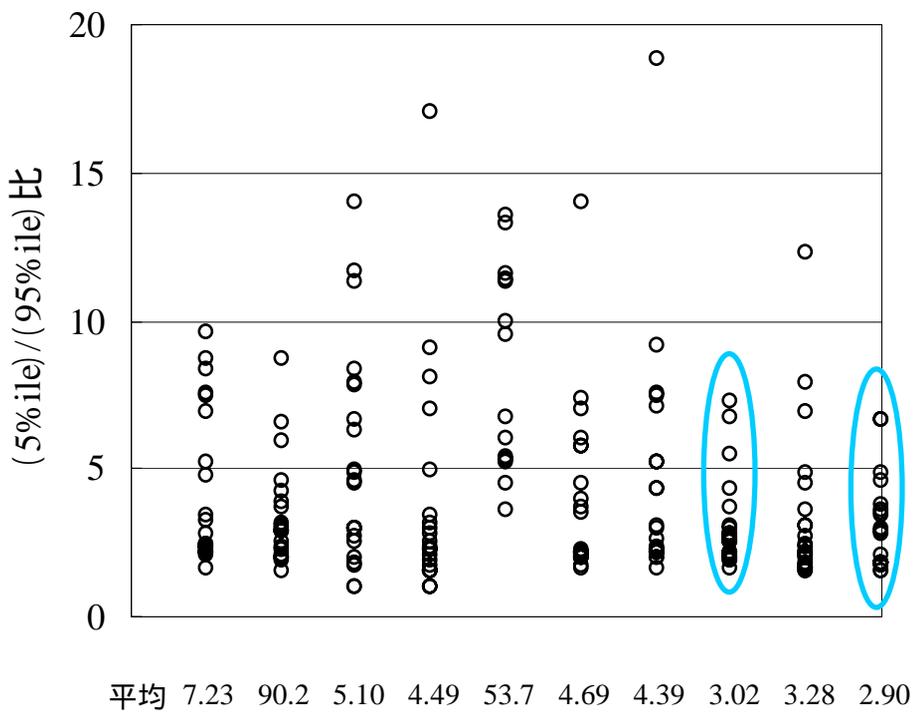
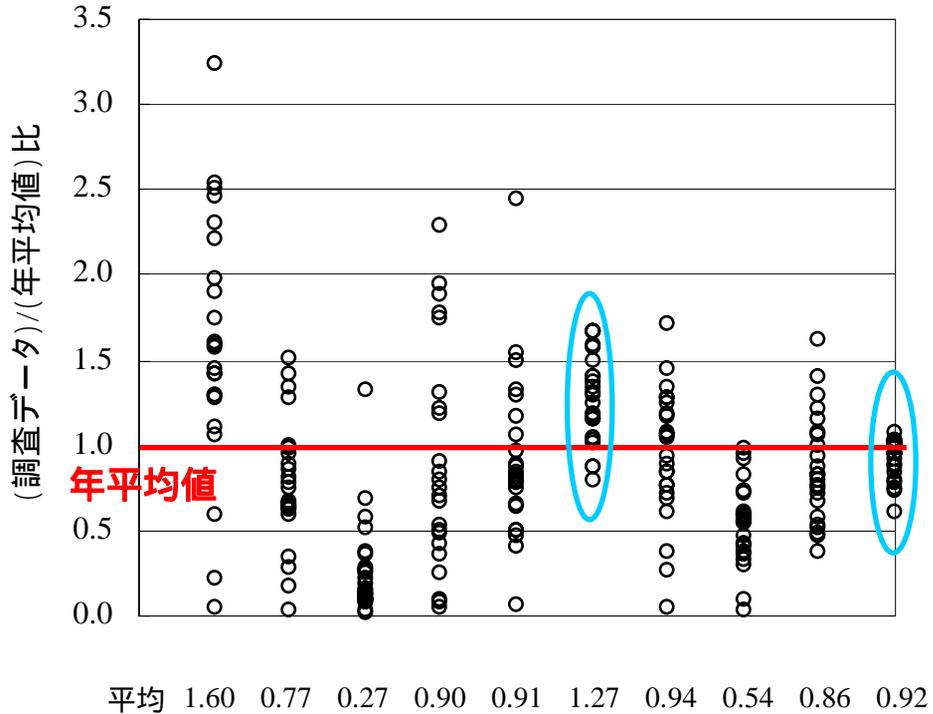


# 室内濃度分布のずれ (p-ジクロロベンゼンの例)

調査方法： 夏に一日調査， 秋に一日調査， 冬に一日調査，  
 春に一日調査， 一年に一日調査， 夏と春に一日ずつ調査（計二  
 日の平均値）， 夏と冬に一日ずつ調査（計二日の平均値）， 秋と冬  
 に一日ずつ調査（計二日の平均値）， 秋と春に一日ずつ調査（計二日  
 の平均値）， **各季節に一日ずつ調査（計四日の平均値）**

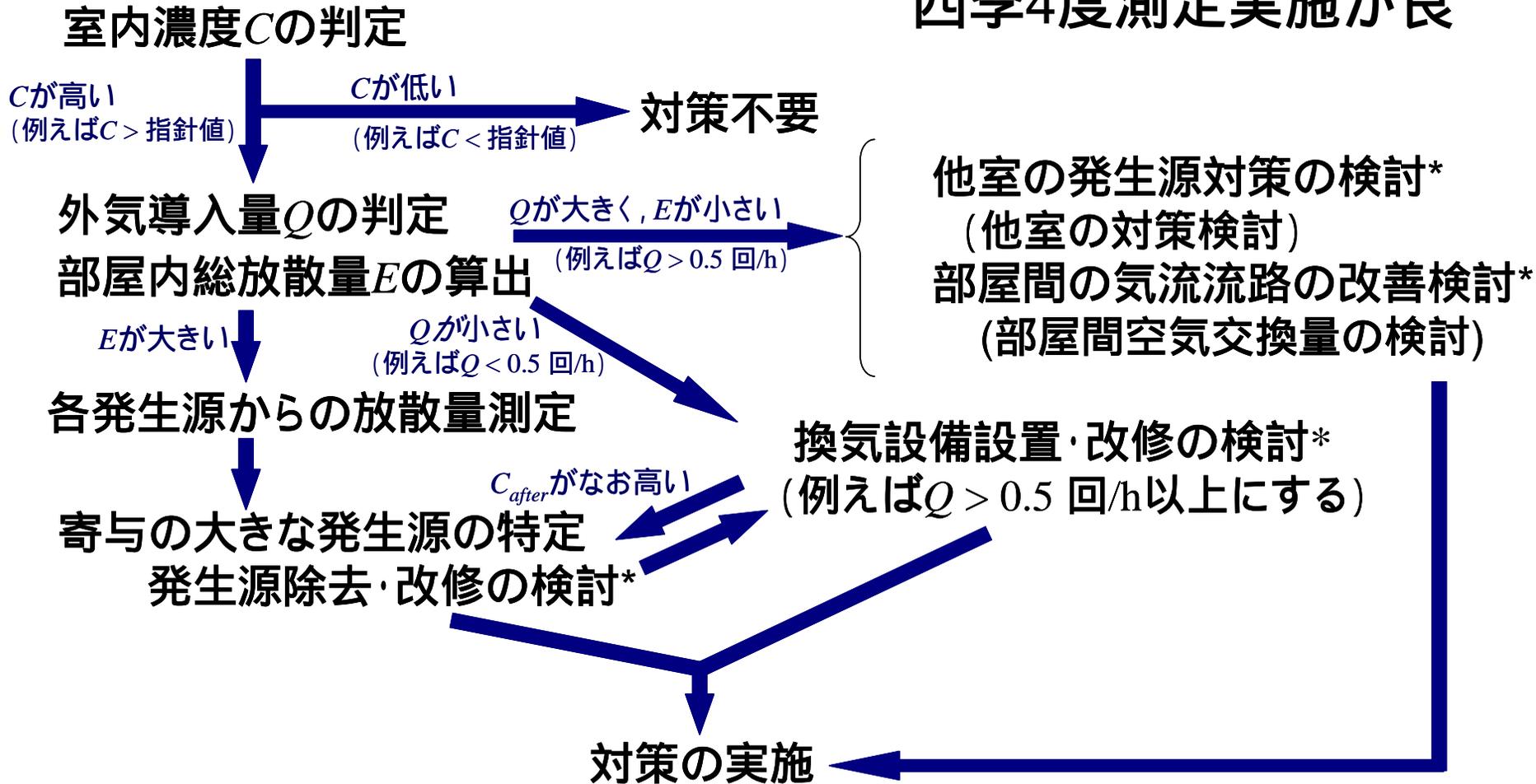
各住宅における調査結果の中央値  
と年平均値の比

各住宅における調査結果の値の  
ばらつき ((95%ile)/(5%ile)比)



# 住宅における室内測定後の対策の検討

室内測定(濃度, 換気)の実施: 夏と冬の二度測定 or 四季4度測定実施が良



\* では, 対策後の推定総放散量 $E_{after}$  や推定外気導入量 $Q_{after}$ , 推定隣室濃度等 から対策後の推定室内濃度 $C_{after}$ を算出し, 対策が十分だと判断できるまで検討を繰り返す。 26

# 室内の対策検討の流れ ~ F邸リビングの例

## 室内濃度 $C$ (週平均) の判定 (夏と冬の測定)

[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	夏	冬	平均	備考(年平均)
ホルムアルデヒド	140	27.4	84	64
アセトアルデヒド	71.8	30.4	51	44

対策要検討

## 外気導入量 $Q$ [回/h] (週平均) の判定

[回/h]	夏	冬	平均	備考(年平均)
外気導入量	0.40	0.32	0.36	0.35

換気量増が望ましい

## 放散量 $E$ (週平均) の判定

[ $\mu\text{g}/\text{h}/\text{部屋}$ ]	夏	冬	平均	備考(年平均)
ホルムアルデヒド	3038	469	1754	1269
アセトアルデヒド	1371	479	925	781

例えば, 壁4面が放散の8割を占めていると仮定 (実際は, 放散量試験実施)

[ $\mu\text{g}/\text{h}/\text{m}^2$ ]	夏	冬	平均	備考(年平均)
ホルムアルデヒド	50	7.8	29	21
アセトアルデヒド	23	8.0	15	13

F 相当  
27  
の放散量

# 室内の対策検討の流れ ~ F邸リビングの例

## 室内濃度 $C$ (対策前)

[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	夏	冬	平均
ホルムアルデヒド	140	27.4	84
アセトアルデヒド	71.8	30.4	51



換気設備 (18  $\text{m}^3/\text{h}$ ) の設置の検討 (平均0.7 回/hの換気)

[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	夏	冬	平均
ホルムアルデヒド	79	13	46
アセトアルデヒド	40	14	27

対策として十分

発生源 (壁面) 材をF (5  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) に取り替える

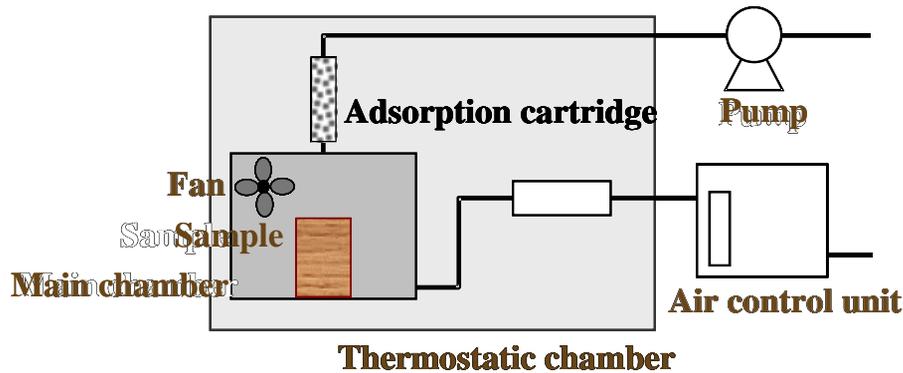
[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	夏	冬	平均
ホルムアルデヒド	49	19	34

対策として十分

後は, コスト等を比べて選択

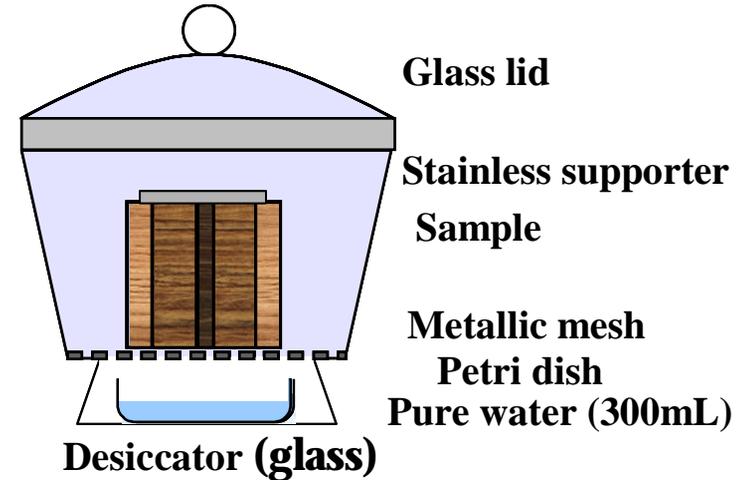
# 既往の化学物質放散量の測定法

## Emission Chamber Method



- ・長所  
温湿度が調節可能・精確
- ・短所  
実験室においてのみ測定可能  
装置が大掛かり

## Desiccator Method



- ・長所  
簡易・様々なデータがある
- ・短所  
実験室においてのみ測定可能  
(実際の環境と大きく異なる条件)  
水溶性の化学物質のみ適用可



既築の住宅における発生量測定は不可能

# 実室内の各放散源からの放散量測定

## PFS (Passive Flux Sampler)

ガラス製もしくはステンレス製のシャーレ状の形状  
(内径: 20 ~ 40 mm程度)  
(厚さ: 5 ~ 30 mm程度)

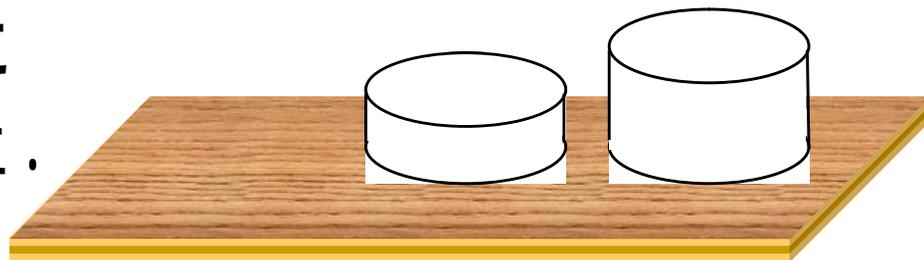


底部に吸着剤を設置

吸着剤: 対象物質に応じて選択

DNPH含浸濾紙やCarbopak B, Chromosorb など

捕集方法: 測定開始直前に  
吸着剤を測定器底部に設置。  
ピンもしくはテープにより発  
生源上に2 ~ 24時間固定。



**現場での多点測定が可能!!!**



# Appendix 放散量と換気回数の関係

室内の化学物質濃度：

$$C_{indoor} = \frac{E}{N \times V} + C_{outdoor}$$

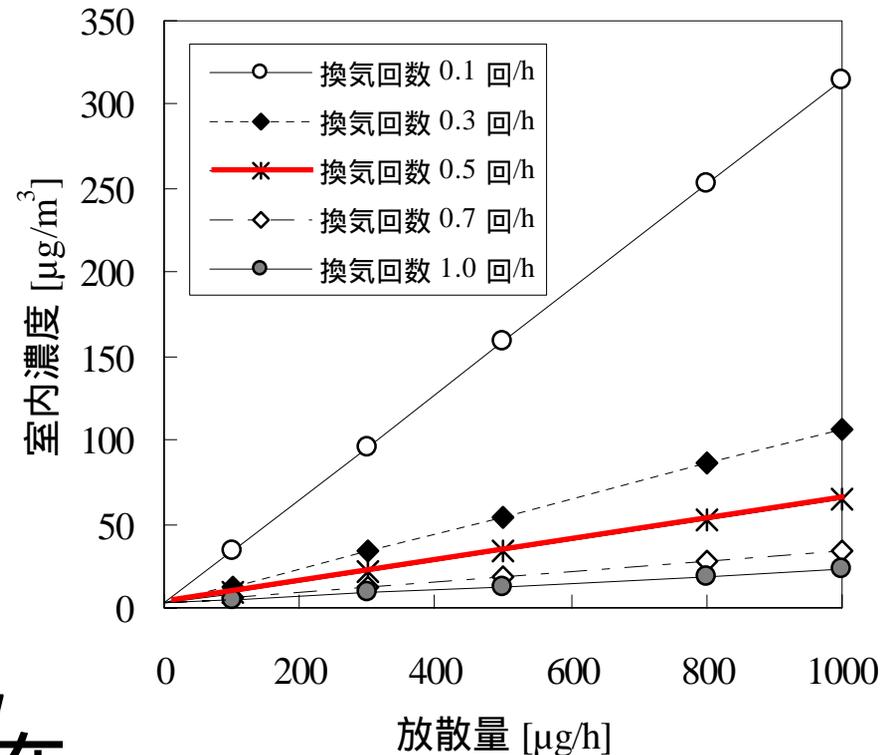
室内における放散量と換気回数によって決まる。

改正建築基準法  
HCHO放散量規制  
換気回数の規制



他物質についても

室内濃度が高い家の中でも、  
換気回数の改善が必要な家と、  
放散量の低減が必要な家が存在



(放散量の低減が必要な物質を把握し、対策を検討)

# Appendix 代表的な換気回数求め方

- ・ **機械換気設備設定風量**：設備の設定風量を部屋体積で割って算出。建築基準法の新築住宅の換気計算に使用。
  - 長所：測定が不要，計算が単純
  - 短所：実際の換気回数と異なる
  - 全部屋トータルでの換気回数しか測れない
- ・ **濃度減衰法**： $\text{CO}_2$ 、 $\text{SF}_6$ 等のトレーサーガスを室内で発生させ、その濃度減衰に指数関数をフィッティングさせて算出
  - 長所：短時間に離散的な換気回数が測定可能
  - 短所：ガスボンベやガスモニター等の装置が必要
  - ガスを撒いた部屋の換気回数しか測れない
- ・ **定常発生法**： $\text{SF}_6$ 、PFC等のトレーサーガスを一定の速度で発生させ、定常濃度の測定から平均的な換気回数を計算
  - 長所：複数室の空気交換率も測定可能
  - 短所：分析が必要，一定速度で放散させるのが困難
- ・ その他：一定濃度法，風量測定，気密度測定等

# Appendix 三室間換気計算マスバランス式

Q>0の条件付で,以下の12式を満たす最適解を求める.

$$C_{A2} \times Q_{12} + C_{A3} \times Q_{31} - C_{A1} \times (Q_{10} + Q_{12} + Q_{13}) = -M_A$$

$$C_{A1} \times Q_{12} + C_{A3} \times Q_{32} - C_{A2} \times (Q_{21} + Q_{23} + Q_{20}) = 0$$

$$C_{A1} \times Q_{13} + C_{A2} \times Q_{23} - C_{A3} \times (Q_{31} + Q_{32} + Q_{30}) = 0$$

$$C_{B1} \times Q_{12} + C_{B3} \times Q_{32} - C_{B2} \times (Q_{20} + Q_{21} + Q_{23}) = -M_B$$

$$C_{B2} \times Q_{21} + C_{B3} \times Q_{31} - C_{B1} \times (Q_{12} + Q_{13} + Q_{10}) = 0$$

$$C_{B1} \times Q_{13} + C_{B2} \times Q_{23} - C_{B3} \times (Q_{31} + Q_{32} + Q_{30}) = 0$$

$$C_{C1} \times Q_{13} + C_{C2} \times Q_{23} - C_{C3} \times (Q_{30} + Q_{31} + Q_{32}) = -M_C$$

$$C_{C2} \times Q_{21} + C_{C3} \times Q_{31} - C_{C1} \times (Q_{12} + Q_{13} + Q_{10}) = 0$$

$$C_{C1} \times Q_{12} + C_{C3} \times Q_{32} - C_{C2} \times (Q_{21} + Q_{23} + Q_{20}) = 0$$

$$Q_{01} - Q_{10} - Q_{12} + Q_{21} - Q_{13} + Q_{31} = 0$$

$$Q_{02} - Q_{20} - Q_{21} + Q_{12} - Q_{23} + Q_{32} = 0$$

$$Q_{03} - Q_{30} - Q_{31} + Q_{13} - Q_{32} + Q_{23} = 0$$

(Q>0) 34

# Appendix ~ 改正建築基準法 ~

平成15年7月，改正建築基準法施行

- ・ホルムアルデヒドに関する建材、換気設備の規制  
(内装仕上げの制限，換気設備設置の義務化，天井裏等の制限)
- ・クロルピリホスの使用禁止

## 改正建築基準法による建築材料の区分

ホルムアルデヒドの放散速度 (チャンバー法) [ $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{hour}$ ]	告示で定める建築材料		内装の 仕上げ制限
	名称	対応する規格	
5以下	規制対象外建材	JAS，JISのF	制限なし
5～20	第3種ホルムアルデヒド 発散建築材料	JAS，JISのF	使用面積 を制限
20～120	第2種ホルムアルデヒド 発散建築材料	JAS，JISのF	
120以上	第1種ホルムアルデヒド 発散建築材料	無等級	使用禁止

(測定条件：温度28℃，相対湿度50%，ホルムアルデヒド濃度指針値以下)

# Appendix ~近年の新築室内濃度の変化~

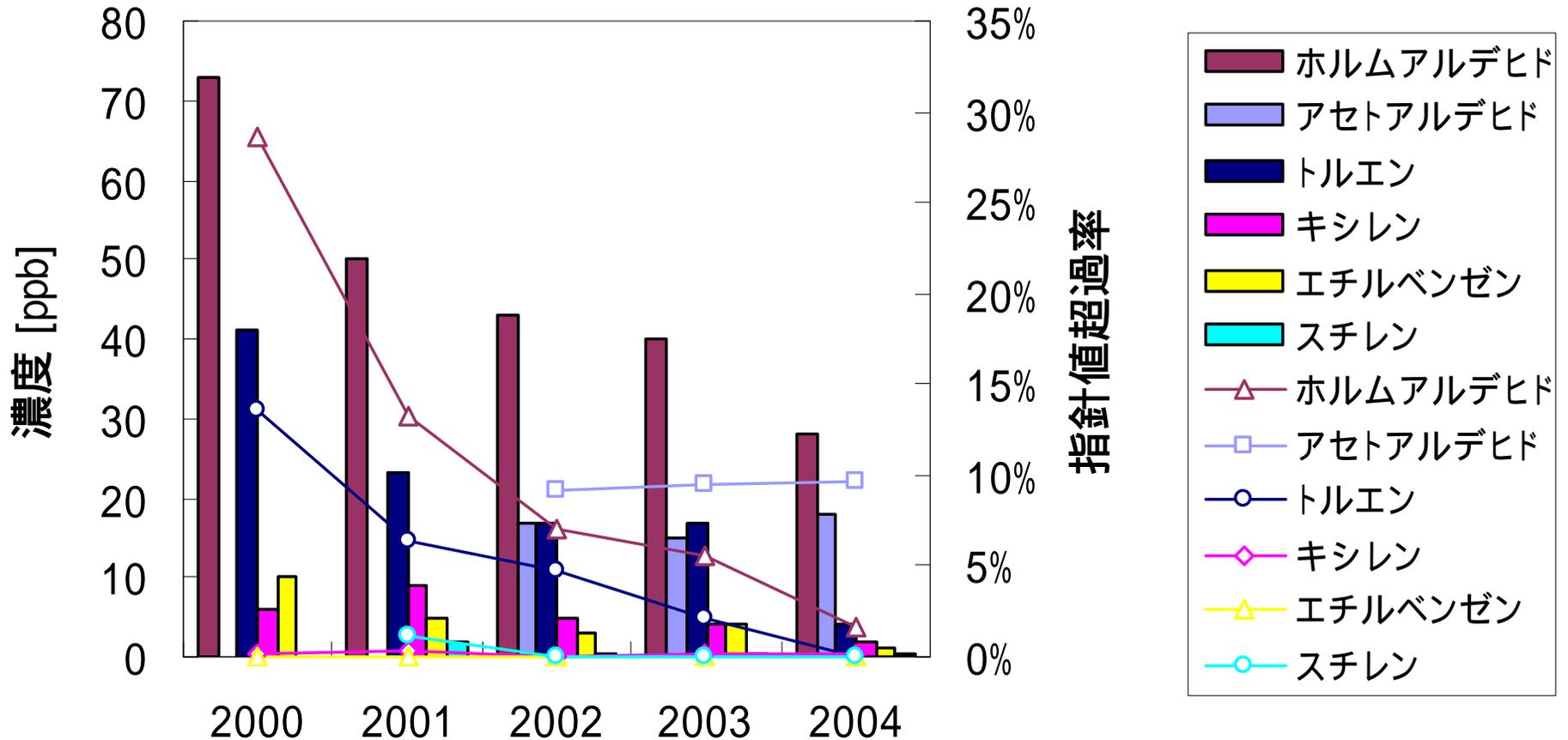


図. 新築住宅の室内濃度 (住宅リフォーム・紛争処理支援センター 2005)

新築住宅における空気質は近年急激に改善  
(特にホルムアルデヒド, トルエン) 36