

# 室内における浮遊粉じん測定器の関係性に関する研究

## A study on the relationship of characteristics of air-borne dust measurement equipment for architectural rooms

J06022-6 大野 智章

### Abstract

Presently, Act on Maintenance of Sanitation in Buildings regulates air-borne dust below 0.15mg/m<sup>3</sup> concerning about less than 10µm in diameter by mass concentration. On the meanwhile the measurement equipments are getting nearby their measurement limits. Furthermore, management criteria and management method is being put on the review. On this study, recommendation of precise measurement of air-borne dust is considered. We have measured the specific 16 buildings by plural equipments.

As a result, we have had the knowledge of particle density by particle size from the mass concentration and the number concentration. Furthermore, we made clear of relative characteristics of air-borne dust measurement equipment with the use of particle density estimated by particle size.

Keywords 浮遊粉じん (air-borne dust) 測定器 (measurement equipment) 粒子密度 (particle density)  
 粒径別個数濃度 (the number concentration) 質量濃度 (mass concentration) 粒径範囲 (diameter range)

### 1. 背景・目的

現在、浮遊粉じんに関する管理のあり方が見直されつつある。我が国の室内環境の管理基準である「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（通称、建築物衛生法）」においては、粒径 10µm 以下の浮遊粒じんが 0.15 mg/m<sup>3</sup> 以下と質量濃度によって定められている。しかし、浮遊粒じんは様々な成分の混合物であり、粒径によって特性が大きく異なることから、粒径別個数濃度に関する知見が不可欠である。粒径 2.5µm 以下の浮遊粒子状物質（PM2.5）と呼称される呼吸器疾患等の健康影響との関係性も認められるところとなり、米国では環境基準が改定されている。さらに PM1.0、PM0.1 といったより粒径の小さい粒子に関する管理も提唱されるようになってきている。また、室内の浮遊粉じん濃度は、建築物衛生法が定められた 1970 年代に比べ大幅に減少しており、不適率で見ても昭和 50 年代初頭には 6 割前後と高い不適率を示していたが、近年では 1% 程度に止まっている<sup>1)</sup>。現行法に対応した測定器では、測定が困難になりつつあり、測定範囲に関しても今後検討する必要があると考えられる。

本研究は、今後の建築物の環境衛生管理のあり方、特に浮遊粉じんの精密測定のあり方に関する提言を目的とする。

具体的には、まず主な測定機器の相対的な関係性を把握する。建築物衛生法において標準測定法とされている質量濃度測定器の LV（ローボリューム・エアサンプラー）や一般的に用いられている DDC（デジタル粉じん計）、ハンディタイプで安価であるため、今後主流になると考えられている個数濃度測定器の LPC（レーザーパーティクルカウンター）など、粉じんの測定機器は多種あるが、各々測定原理や特性が異なり器差を生じる。これまでも測定機器間の器差は指摘され、よく知られるところとなっているが、主な測定機器の相対的な関係性を把握したものはほとんど

表 1 調査施設及び測定データ

| 建物  | 所在地 | 調査日                      | 空調方式               | LPC | WPS             | PCIS | DDC | LV |
|-----|-----|--------------------------|--------------------|-----|-----------------|------|-----|----|
| A   | 東京  | 2006.08.29               | AHU(CAV)           | ○   |                 |      | ○   | ○  |
|     |     | 2007.07.23               | FCU                | ○   |                 |      | ○   | ○  |
| B   | 東京  | 2006.09.04               | AHU(CAV)           | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| C   | 東京  | 2006.09.06               | AHU(CAV)<br>AC     | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| D   | 東京  | 2006.09.13               | AHU(CAV)<br>FCU    | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| E   | 東京  | 2006.09.15               | AHU(CAV)<br>FCU    | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| F   | 東京  | 2006.09.22               | AHU(CAV)<br>AC FAN | ○   |                 |      | ○   | ○  |
| G   | 東京  | 2006.09.25               | AHU<br>AC          | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| H   | 東京  | 2006.09.29               | AHU(CAV)<br>AC FAN | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| I   | 東京  | 2006.10.03               | AHU<br>AC FAN      | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| J   | 東京  | 2006.10.10               | AHU(CAV)           | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| K   | 東京  | 2006.10.13               | AHU(CAV)           | ○   | ○               |      | ○   |    |
| L   | 東京  | 2006.10.16               | AHU(CAV)<br>HEX    | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| M   | 東京  | 2006.10.20               | AC<br>FCU          | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| N   | 東京  | 2006.10.23               | AHU(VAV)<br>FCU    | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| O   | 神奈川 | 2006.10.27               | AHU(VAV)<br>FCU    | ○   | ○               |      | ○   | ○  |
| P-1 | 東京  | 2007.07.30 <sup>*1</sup> | FCU                | ○   | ○               | ○    |     |    |
|     |     | 2009.05.25 <sup>*1</sup> | OHU                | ○   | ○               | ○    | ○   |    |
|     |     | 2009.06.01 <sup>*1</sup> | FAN                | ○   | ○               | ○    | ○   |    |
| P-2 | 東京  | 2009.08.17 <sup>*1</sup> | PAC                |     | ○               | ○    |     |    |
|     |     | 2009.09.01 <sup>*1</sup> | OHU(CAV)           |     | ○ <sup>*2</sup> | ○    |     |    |
|     |     | 2009.09.15 <sup>*1</sup> | FAN                |     | ○               | ○    |     |    |

...密度の算出に用いたデータ

\*1 記載日を初日として平日5日間測定 \*2 三方弁を用いて1回3分×2回の間欠測定

ない。新たな測定・管理のあり方を適切に提言するには、これを把握することが不可欠である。さらに実務においても、業務を効率的に行うための有効な資料と成り得、基準の改正時においては参考になると考える。

また、現行の基準の下で個数濃度測定器を用いることを試みる場合、個数濃度測定器で測定した結果を質量濃度に

換算し、環境管理基準と比較することが妥当と思われる。これまで明確な知見がなかったため、どの粒径範囲においても密度を一様に  $1.0\text{g/cm}^3$  と仮定するか、経験則で  $1.3\text{g/cm}^3$  程度と仮定する程度であったため、精度はあまり良くなかった。より精度の高い換算を可能にするには、粒径範囲毎の密度の知見を得ることが不可欠である。また、粉じん濃度に対する考え方として、“重量”、“面積(表面積)”、“個数”などがあるが、いずれにしてもこれらを換算するためには“密度”の知見が必要である。

そこで、現実使用されている空間で実測を行い、その結果及びこれまでに当研究室で蓄積してきた既往の研究のデータを用いて、主な測定機器の相対的な関係性を把握する。その上で今後の測定・管理のあり方を提言する。

## 2. 実測調査概要

本研究で用いる測定データの調査施設及び測定データを表1に、測定機器及び項目を表2に示す。測定施設は、専ら事務所の用途として用いられる建物を対象とし、平日の空調稼働時に1日8時間の測定を行っている。

## 3. 粒径別粒子密度の検証

### 3.1 WPS-PCIS 粒径別密度の検証

個数濃度測定器と質量濃度測定器との関係性を把握するには、個数濃度を質量濃度に変換して比較する必要があることは前述した通りである。今回はより精度の高い換算を目指し、粒径範囲毎に密度を算出した。測定には粒径区分の多い測定器を選び、個数濃度は73粒径区分であるWPS(ワイドレンジ・パーティクル・スペクトロメーター)、質量濃度は5粒径区分であるPCIS(シウタスカスケードインパクター)を使用した。算出したWPS-PCIS粒径別密度の一例及び室内、屋外の各平均粒径別密度をそれぞれ表3、4、5及び図1、2、3、4に示す。なお、PCISの各段におけるカットオフ特性も考慮している。

室内においては図2に示す様に  $0.50\text{--}1.00\mu\text{m}$  の範囲を谷とし、 $<0.25\mu\text{m}$  及び  $1.00\text{--}2.50\mu\text{m}$  の範囲にピークを持つ傾向を示し、屋外については  $0.50\text{--}1.00\mu\text{m}$  の範囲を谷としたV字型となる傾向を示した。また、 $<0.25\mu\text{m}$  の範囲においては室内の平均に比べ屋外の平均値の方が小さい値を示し、 $2.50\mu\text{m}$  の範囲においては屋外の平均値が非常に大きかった。さらに全体では同じ値を示した。

$2.50\mu\text{m}$  の範囲において屋外の平均値が非常に大きかったことに関しては、PCISによる測定結果に由来するものと考えられる。PCISの測定結果では、室内に関しては右肩下りのグラフ形状を示したのに対して、外気に関してはV字型のグラフ形状を示していた。PCISの粒径範囲では  $2.50\mu\text{m}$  の上限が明確ではないため、大粒径で重い粒子が混入する可能性がある。しかし、WPSでは上限が  $10\mu\text{m}$  までと明確に存在する。室内の空気は空調機を介して流入したものであり、空調機にあるフィルタで除塵されている。特に、大きい粒径範囲の粉じんは除塵されやすく、質量としても表れやすい。そのため、外気を捕集したPCISとWPS

表2 測定機器及び項目

| 測定項目    | 測定器  | 測定原理     | 測定範囲                                    | 測定時間   |
|---------|------|----------|---|--|
| 質量濃度    | LV   | ろ紙捕集     | $10[\mu\text{m}]$ 以下                    | 8[h/day]   |
|         | DDC  | 光散乱      | $0.001\sim 10.00[\text{mg}/\text{m}^3]$ | 1回1分の連続測定  |
| 粒径別質量濃度 | PCIS | インパクタ    | $0.25[\mu\text{m}]$ 以上                  | $8[\text{h}/\text{day}]\times 5[\text{day}]$<br>計40[h] |
| 粒径別個数濃度 | WPS  | 電気移動度光散乱 | $10\sim 10000[\text{nm}]$               | 1回3分の連続測定  |
|         | LPC  | 光散乱      | $0.3\sim 10.0[\mu\text{m}]$             | 1回1分の連続測定  |

表3 粒径別質量濃度及び密度(室内 09.06.01-05)

| 粒径範囲<br>[ $\mu\text{m}$ ] | 質量濃度 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] |          |         | $\rho = \text{PCIS}/\text{WPS} [\text{g}/\text{cm}^3]$ |          |
|---------------------------|---------------------------------|----------|---------|--|----------|
|                           | WPS                             |          | PCIS    | Cutoff考慮   | Cutoffなし |
|                           | Cutoff考慮                        | Cutoffなし |         |  |          |
| $<0.25$                   | 0.00171                         | 0.00150  | 0.00579 | 3.37630  | 3.85270  |
| 0.25-0.50                 | 0.00187                         | 0.00250  | 0.00171 | 0.91707  | 0.68516  |
| 0.50-1.00                 | 0.00074                         | 0.00034  | 0.00074 | 1.00541  | 2.15635  |
| 1.00-2.50                 | 0.00019                         | 0.00011  | 0.00051 | 2.69027  | 4.60113  |
| 2.50<                     | 0.00099                         | 0.00104  | 0.00037 | 0.37590  | 0.35720  |
| total                     | 0.00549                         | 0.00549  | 0.00912 | 1.66030  | 1.66030  |

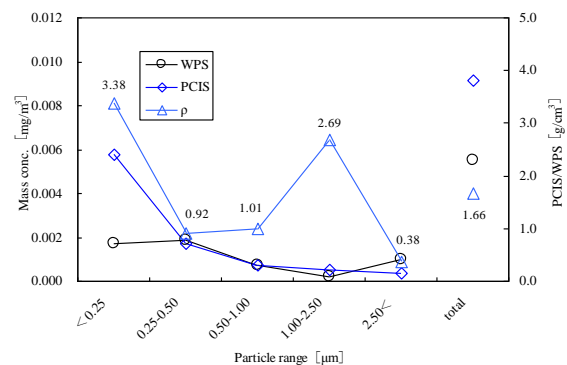


図1 WPS-PCIS 粒径別密度(室内 09.06.01-05)

表4 粒径別質量濃度及び密度(室内 09.09.15-21)

| 粒径範囲<br>[ $\mu\text{m}$ ] | 質量濃度 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] |          |         | $\rho = \text{PCIS}/\text{WPS} [\text{g}/\text{cm}^3]$ |          |
|---------------------------|---------------------------------|----------|---------|--|----------|
|                           | WPS                             |          | PCIS    | Cutoff考慮   | Cutoffなし |
|                           | Cutoff考慮                        | Cutoffなし |         |  |          |
| $<0.25$                   | 0.00115                         | 0.00114  | 0.00444 | 3.86981  | 3.91236  |
| 0.25-0.50                 | 0.00092                         | 0.00107  | 0.00125 | 1.35965  | 1.17298  |
| 0.50-1.00                 | 0.00053                         | 0.00044  | 0.00019 | 0.35017  | 0.42433  |
| 1.00-2.50                 | 0.00026                         | 0.00015  | 0.00069 | 2.68971  | 4.72476  |
| 2.50<                     | 0.00122                         | 0.00129  | ND      | ND   | ND       |
| total                     | 0.00408                         | 0.00408  | 0.00657 | 1.61191  | 1.61191  |

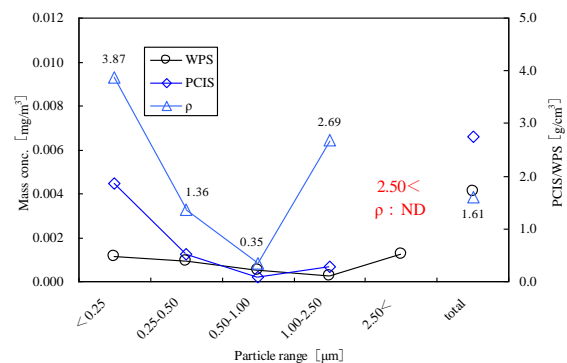


図2 WPS-PCIS 粒径別密度(室内 09.09.15-21)

の測定値の差よりも、室内で捕集したPCISとWPSの測定値の差の方が小さくなり、PCIS質量濃度をWPS質量濃度

で除して密度を算出しているの、外気の密度の方が室内に比べて大きい値を示すことは明らかである。

<0.25 $\mu\text{m}$  の範囲において室内の平均に比べ屋外の平均値の方が小さい値を示した点に関しては、外気測定時における風の影響や、プリンタなどのOA機器からの発塵や紫外線による室内の二次生成粒子等が考えられるが、その原因の特定には至っていない。

ここで、室内に関して空調方式の違いで比較する。僅かではあるが空調方式が“FCU+OHU+換気扇”の室（一例/図1及び表3）の方が、“PAC+OHU（CAV）+換気扇”の室（一例/図2及び表4）よりも再現性が高いように見える。しかしこれは空調方式による差異というより、室の利用状況の違いによるものであると考えられる。室の造りに大差はなく、また専ら事務作業に用いられる室であり、出入りの頻度及び作業者の人数に由来する誤差である可能性が高い。よって、空調方式による差異は見られなかったとして支障はないと考えられる。

### 3. 2 LPC 粒径別密度への換算

LPCと質量濃度測定機器間において個数濃度と質量濃度の関係性を検討していくためには、WPS-PCIS 粒子別密度をLPC 粒径範囲毎の粒子密度に換算する必要がある。

換算にあたって、PCISにおいてはその粒径範囲の下限及び上限が示されていないことが問題となる。下限に関してはPCISの最小粒径範囲がLPCの最小粒径範囲よりも小さい範囲であるために問題とならないが、上限側はLPC 粒径範囲の方が大きく、PCISの粒径範囲を仮定せざるを得ない。そこで今回はPCISの表記に従い、2.5 $\mu\text{m}$ 以上は一概に当該範囲の粒子密度を用いるものとする。これまで、粒子密度は経験上、1.3~1.4 $\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であると考えられてきたことに数値的にも適合することから、妥当な仮定であると考えられる。

換算結果を、表6及び図4に示す。LPC 粒径別個数濃度を質量濃度へ換算する場合は、表6に示す結果を用いる。

## 4. 主な測定機器間の相対的関係の検証

検討を行う測定機器は、表2に示す通りである。

### 4. 1 個数濃度での比較

個数濃度測定機器であるLPCとWPSの粒径別個数濃度の平均値の比較を表7及び図5に示す。WPSの粒径範囲は0.01-10 $\mu\text{m}$ で幅広い粒径範囲の測定が可能である。LPCの粒径範囲は0.3-10 $\mu\text{m}$ とWPSに比べると狭いが、先述の理由より個数濃度測定器として一般的に用いられている。今回は粒径区分の対象範囲を粒径範囲の狭いLPCの各粒径範囲に合わせて比較する。

粒径の小さい範囲からみていくと、0.3-0.5 $\mu\text{m}$ で1.31、0.5-0.7 $\mu\text{m}$ で1.51、0.7-1.0 $\mu\text{m}$ で2.04とWPSの方が高い値を示している。しかし、1.0-2.0 $\mu\text{m}$ では0.95と非常に近い値を示し、2.0-5.0 $\mu\text{m}$ で0.48、5.0-10.0 $\mu\text{m}$ で0.34と粒径が大きくなるにつれてLPCの方が高い値を示す結果となった。

表5 室内及び屋外のWPS-PCIS 平均粒径別密度

| 対象 | 粒径範囲 [ $\mu\text{m}$ ] |           |           |           |         | total   |
|----|------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
|    | <0.25                  | 0.25-0.50 | 0.50-1.00 | 1.00-2.50 | 2.50<   |         |
| 室内 | 3.42068                | 1.38186   | 1.24350   | 2.65795   | 1.36485 | 2.06713 |
| 屋外 | 2.86842                | 1.45591   | 0.57586   | 2.25703   | 3.25173 | 2.06926 |

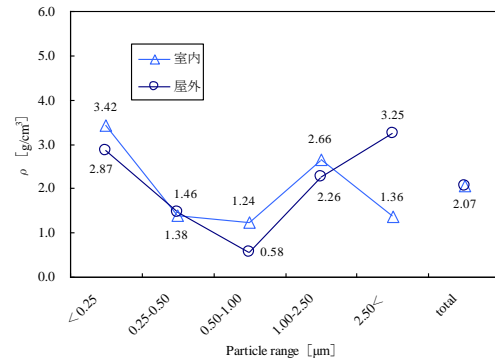


図3 室内及び屋外の平均WPS-PCIS 粒径別密度

表6 LPC 粒径別密度

| 対象 | 粒径範囲 [ $\mu\text{m}$ ] |           |           |           |           |           |
|----|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|    | 0.30-0.50              | 0.50-0.70 | 0.70-1.00 | 1.00-2.00 | 2.00-5.00 | 5.00-10.0 |
| 室内 | 1.38186                | 1.24350   | 1.24350   | 2.65795   | 1.67976   | 1.36485   |

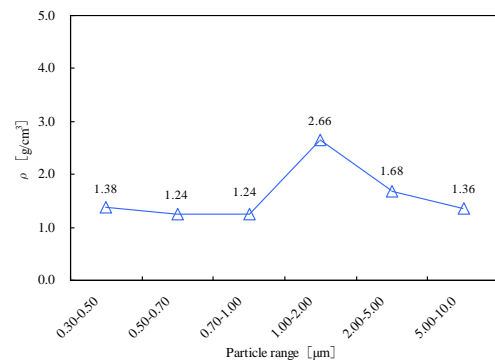


図4 LPC 粒径別密度

表7 粒径別個数濃度比較

| 粒径範囲 [ $\mu\text{m}$ ]          | 0.3-0.5                    | 0.5-0.7  | 0.7-1.0  | 1.0-2.0  | 2.0-5.0  | 5.0-10.0 |
|---------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 粒径別個数濃度 <sup>*)</sup>           | LPC 1.42E+08               | 1.52E+07 | 1.92E+06 | 4.59E+05 | 2.42E+05 | 5.75E+04 |
| (dN/dLogDp) [#m <sup>-3</sup> ] | WPS <sup>*)</sup> 1.83E+08 | 2.40E+07 | 3.87E+06 | 3.75E+05 | 1.13E+05 | 1.74E+04 |
| WPS/LPC [-]                     | 1.31                       | 1.51     | 2.04     | 0.95     | 0.48     | 0.34     |

<sup>\*)</sup> LPC 粒径範囲に換算

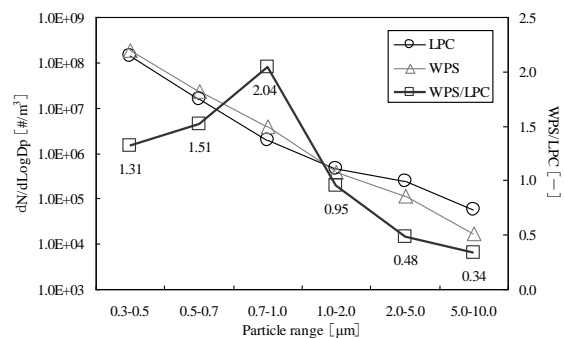


図5 粒径別個数濃度比較

#### 4. 2 質量濃度での比較

質量濃度測定機器である DDC、PCIS、LV の質量濃度、及び個数濃度測定機器を質量濃度に換算したものの比較を表 8、9 及び図 6、7 に示す。前述のとおり LV は建築物衛生法において標準測定法とされているが、測定に長時間を要するため、一般的にはハンディタイプで速やかに濃度評価が行える DDC の使用も認められているため、一般に用いられている。PCIS、個数濃度測定機器については前述したとおりである。なお、個数濃度の質量濃度への換算には今回求めた粒径別密度を用い、LPC に関しては LPC 粒径範囲に換算した粒径別密度を用いることにより、より精度の高い比較を行う。

PCIS の測定時間（1 日 8 時間を 5 日間）に併せて質量濃度を比較した表 8 及び図 6 を見ると、PCIS、DDC、質量濃度に換算した LPC の順で濃度が高い値を示した。なお、この比較に関しては測定データが少ないため、更なる実測を行い、検討をする必要があると考えられる。

建物別に質量濃度を比較した表 9 及び図 7 を見ると、全体の傾向として、4 つの測定機器共に追従性があることがわかる。また Average で比較すると、質量濃度測定器である DDC、LV より、個数濃度を質量濃度に換算した LPC、WPS の方が高い値を示した。標準測定法である LV に比べ、個数濃度測定機器は高い値を示し、質量濃度測定器として一般的に使われている DDC は低い値を示した。

各測定機器間の相対的關係を図 8 に示す。なお、WPS と PCIS については、粒径別密度を求める際に、PCIS の測定値を基準として WPS の測定値を質量濃度に換算した。よってこの 2 つの測定値は一致すると仮定している。また、LPC と WPS については、粒径毎に値が異なるため表 7 を参照されたい。

各測定機器間において器差が生じることは、知られるところとなっていたが、これで器差の値を明らかにすることができた。

#### 5. まとめ及び今後の課題

粒径別粒子密度に関する知見を得ると共に、主な測定機器間の相対的關係を示した。これにより個数濃度測定器を用いても現行法の基準値に対応した測定を行うことが可能となり、各測定機器間でのより精度の高い比較も行えるようになった。

今後の課題としては、様々な用途の建物を対象とした実測、アクティビティとの関係性の把握、測定データの蓄積などが挙げられる。本研究の成果が今後の管理のあり方を検討する上で、参考となることを望む。

##### 【参考文献】

- 1) 新版建築物の環境衛生管理編集委員会：新版建築物の環境衛生管理上巻、財団法人ビル管理教育センター、2009.4
- 2) W.E.Wilson：The U.S. Environmental Protection Agency promulgates new standards for fine particles、大気環境学会誌、33、A67-A76、1998
- 3) Chandan Misra et al.：Development and evaluation of a personal cascade impactor、Journal of Aerosol Science、33、2002
- 4) 根本智之：室内浮遊粉じんの個数濃度と質量濃度の関係に関する考察、第 26 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集、2008.4

表 8 質量濃度比較

| 建物   | 測定日              | 質量濃度 [mg/m <sup>3</sup> ] |        |        |
|------|------------------|---------------------------|--------|--------|
|      |                  | LPC                       | DDC    | PCIS   |
| P-1  | 2009.05.25-05.29 | 0.0060                    | 0.0057 | 0.0075 |
| P-1  | 2009.06.01-06.05 | 0.0051                    | 0.0063 | 0.0091 |
| Ave. |                  | 0.0056                    | 0.0060 | 0.0083 |

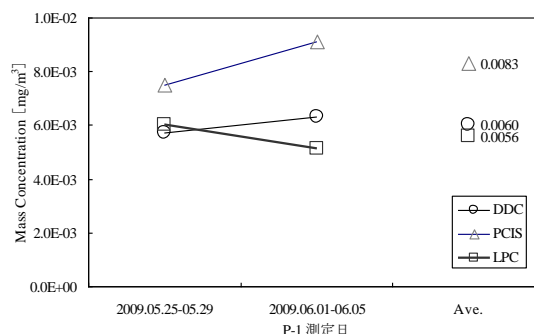


図 6 質量濃度比較

表 9 質量濃度比較

| 建物   | 測定日        | 質量濃度 [mg/m <sup>3</sup> ] |        |        |        |
|------|------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|      |            | LPC                       | WPS    | DDC    | LV     |
| B    | 2006.09.04 | 0.0169                    | 0.0163 | 0.0073 | 0.0121 |
| C    | 2006.09.06 | 0.0093                    | 0.0065 | 0.0030 | 0.0069 |
| D    | 2006.09.13 | 0.0057                    | 0.0097 | 0.0048 | 0.0070 |
| G    | 2006.09.25 | 0.0098                    | 0.0211 | 0.0104 | 0.0090 |
| H    | 2006.09.29 | 0.0102                    | 0.0089 | 0.0050 | 0.0052 |
| I    | 2006.10.03 | 0.0098                    | 0.0138 | 0.0062 | 0.0095 |
| J    | 2006.10.10 | 0.0057                    | 0.0092 | 0.0054 | 0.0045 |
| L    | 2006.10.16 | 0.0083                    | 0.0055 | 0.0067 | 0.0078 |
| M    | 2006.10.20 | 0.0189                    | 0.0339 | 0.0194 | 0.0202 |
| N    | 2006.10.23 | 0.0081                    | 0.0078 | 0.0053 | 0.0086 |
| O    | 2006.10.27 | 0.0042                    | 0.0071 | 0.0055 | 0.0045 |
| Ave. |            | 0.0097                    | 0.0127 | 0.0072 | 0.0087 |

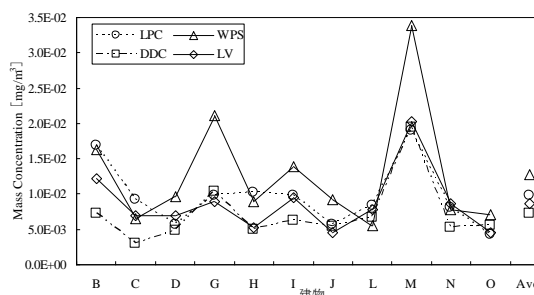


図 7 質量濃度比較

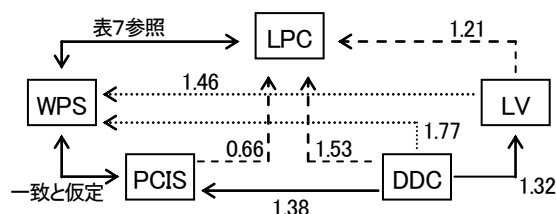


図 8 各測定機器間の相対的關係