

学校施設における室内空気質対策事例

市原英樹・永井香織・愛甲寿朗^{*1}・甲賀由紀子^{*2}

Keywords: volatile organic compounds, emission rate, building materials, small chamber

揮発性有機化合物, 放散量, 住宅建材, 小型チャンバー

1. 序

シックハウス問題は、厚生労働省から「優先的に取り組まれる物質として14種類の物質の指針値」が発表されるなど、ますますホルムアルデヒドやVOC（揮発性有機化合物）の放散には厳しくなっている。厚生労働省は、室内空気質指針値の適用範囲を、住居だけではなくオフィスビル、病院、学校など、あらゆる建物に対して適用するとしている。

学校施設においては、平成14年2月5日に文部科学省より「学校環境衛生の基準の一部改訂」として、各学校、各都道府県知事、各都道府県教育委員会などに通達を行い、平成14年4月1日より施行されている。それによると、検査ホルムアルデヒドとトルエンは必須で、キシレンとパラジクロロベンゼンについては必要と認める場合としている。

本報は、学校施設の、内装材として天然材料（天然木材）や水性塗料などを選定し、室内空気質対策に取り組んだ物件（A学校）と、天然材料は使用していないが、揮発性有機化合物の放散が少ない材料を極力選定し、特にホルムアルデヒドの放散が少ない材料を選定して、室内空気質対策に取り組んだ物件（B学校）について報告する。具体的には、床・壁・天井材からの放散量と、施工中の濃度推移を把握することで、濃度上昇の要因、発生源の特定などに注目して行い、施工中にどの程度になるかを把握した。

2. 建物の概要

2.1 A学校の概要

建物概要を表-1に、建物の内装仕様を表-2に、完成時

表-1 A学校の概要

Plan of school A	
主要用途	小学校
構造	RC造, 地上2階, 一部1階
延べ床面積	3400 m ²
竣工	2000年9月

表-2 A学校の内装仕様

Specification of school A	
部位	使用材料
天井	下地 : 石膏ボード
	表面材 : 水性塗料 (一部岩綿吸音板)
壁	下地 : 石膏ボード
	表面材 : 水性塗料
腰壁	下地 : 根太組み
	接着剤 : 根太用接着剤
	表面材 : 杉縁甲板 (無塗装)
床	下地 : 根太組み
	接着剤 : 根太用接着剤
	表面材 : 檜縁甲板 (無塗装)



写真-1 A学校の内装状況

Interior Materials of school A

*1 東京支店

*2 千葉支店

の室内風景を写真-1 に示す。A 学校は、主要内装材に天然木材（無塗装）を使用しているが、それ以外に塗料、接着剤および家具などの備品についても揮発性有機化合物の放散が極力少ないものを選定している。

また教室には、熱交換型換気設備を設置しており、濃度が高い場合は、換気により濃度を低減する設備を備えている。

2.2 B 建物概要

建物概要を表-3 に、建物の内装仕様を表-4 に、完成時の室内風景を写真-2 に示す。B 学校は、主要内装材に一般的に内装材として使用されるフローリング、塗料、シナ合板、岩綿吸音板などを使用しているが、ホルムアルデヒドを中心とした、ある程度の材料選定を行うことで、低減対策を行うと共に換気設備を設置することで、濃度を低減できるように設備を備えている。内装材以外に塗料、接着剤および家具などの備品については、とくに揮発性有機化合物の放散対策は行っていない。

3. 測定内容

A 学校の材料からのホルムアルデヒド、VOC 放散量の測定は、表-2 に示す主要部位の床材（檜縁甲板）、腰壁材（杉縁甲板）および天井材と壁材（水性塗料）の3種類とした。水性塗料の測定は、実際と同じ仕様で石膏ボードに塗布した試験体で行った。

B 学校のホルムアルデヒド、VOC 放散量の測定は、表-4 に示す主要部位の表面材4種類について実施した。壁材は、実際と同様に石膏ボードにビニールクロスを貼ったもの、腰壁材は、ロッカーと同じシナ合板に水性塗料を塗布した試験体を使用した。

施工中の教室内の放散量測定は、A 物件が内装工事前、天井施工後、床下地施工後、床施工後、ロッカー取付後、完成時に行い、完成後1ヶ月後についても行った。B 物件は、内装工事前、天井・壁下地後、壁クロス施工後、床施工後、ロッカー取り付け後、完成時、の6段階について行った。

4. 測定方法

材料からのホルムアルデヒド、VOC 放散量の測定は、小型チャンバー実験装置（ADPAC）を使用した。表-5 にチャンバー実験による測定条件を示し、表-6 に材料からの放散量を測定する場合と施工中の濃度測定する場合のホルムアルデヒド・VOC 捕集条件を示す。

捕集は、DNPH Silica 捕集管「Sep-Pak (shot type)」

表-3 B 学校の概要

Plan of school B	
主要用途	幼稚園
構造	RC 造, 地上2階, 一部1階
延べ床面積	344.45 m ²
竣工	2000年11月

表-4 B 学校の内装仕様

Specification of school B	
部位	使用材料
天井	下地 : 石膏ボード
	接着剤 : 岩綿吸音板用接着剤
	表面材 : 岩綿吸音板
壁	下地 : 石膏ボード
	接着剤 : 壁紙用接着剤
	表面材 : ビニールクロス
腰壁	下地 : シナ合板 (Fc0)
	表面材 : 水性塗料+ホルムアルデヒド吸着剤
床	下地 : 合板 (Fc0)
	接着剤 : 床材用接着剤
	表面材 : 竹フローリング



写真-2 B 学校の施工完了時の状況

Interior Materials of school B

表-5 チャンバー実験装置の条件

Sampling method of a small chamber	
チャンバー容積	200
材料負荷	2.2 m ² /m ³
温度	35±2°C
相対湿度	50±3%
換気回数	0.5 回/h

を使用し、固相吸着-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ分析装置 (HPLC) にて行った。VOC 放出量の測定は、TENAX TA 捕集管を使用し、固相吸着-加熱脱着-ガスクロマトグラフ質量分析装置 (GC/MS) にて行った。VOC で検出された各物質および全揮発性有機化合物 (TVOC) は、1 m³中の大気中に含まれる VOC (μg/m³; トルエン換算値) で示し、検出された VOC の総量を TVOC (総揮発性有機化合物) として、TVOC (μg/m³; トルエン換算値) で示す。

教室での測定条件は、測定日の前日 17:30~18:00 頃に自然換気を 30 分間程度行い、その後、約 16 時間密閉し、翌朝 10:00 頃より捕集を行った。換気設備の運転は行わない状態で測定した。但し、B 物件の完成後では、気温が低かったためエアコンで温度を 25°C 一定とした。

5. 測定結果

5.1 使用材料の放出速度測定結果

材料から放出するホルムアルデヒド・トルエン・キシレン・パラジクロロベンゼン・エチルベンゼン・スチレン・TVOC 放出速度測定結果を A 学校については表-7 に、B 学校については表-8 に示す。

A 学校のホルムアルデヒドの放出速度測定結果は、檜縁甲板が 43.0 μg/m²h、杉縁甲板 11.8 μg/m²h、水性塗料 8.0 μg/m²h であった。檜縁甲板から放出するホルムアルデヒドが他の材料より多いことがわかる。また、杉縁甲板と水性塗料からも檜縁甲板ほどではないが、放出することがわかる。一般的に天然系木質材料からはホルムアルデヒドは発生しないと考えられているが、今回の測定結果より樹種によっては放出することがわかった。トルエン・キシレン・パラジクロロベンゼン・エチルベンゼン・スチレンは、微量か検出限界以下とほとんど放出されないことがわかった。TVOC の放出速度は、檜縁甲板が最も多く 3526.1 μg/m²h で、杉縁甲板は 635.5 μg/m²h で、水性塗料は 111.0 μg/m²h であった。檜と杉の TVOC が高いのは、天然物質が多量に放出されているためと考えられる。また、檜と杉などの天然物資でも、特定物質の検出が認められ、逆に水性塗料のほうが、特定物質の放出量は少ないかまたは未検出である。

B 学校のホルムアルデヒドの放出速度測定結果は、腰壁材 32.9 μg/m²h、床材 56.9 μg/m²h、クロス壁材 7.2 μg/m²h、天井材 10.3 μg/m²h であった。床材の放出速度が他の材料よりも高い。腰壁材は、シナ合板を使用しているため、ホルムアルデヒド濃度が高くなることを推定

表-6 捕集条件

	ホルムアルデヒド		VOC	
	材料測定 の条件	実測 の条件	材料測定 の条件	実測 の条件
流量(ml/min.)	150	500	150	150
時間(分)	120	30	20	20
吸引量(ℓ)	18	15	3	3

表-7 A 学校の各 VOC の放出速度測定結果 (μg/m²h)

	ホルムアルデヒド	トルエン	キシレン	パラジクロロベンゼン	エチルベンゼン	スチレン	TVOC
檜縁甲板	43.0	5.1	7.0	1.6	8.9	N.D.	3526.1
杉縁甲板	11.8	1.3	0.9	N.D.	2.3	N.D.	635.5
水性塗料	8.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	111.0

表-8 B 学校の各 VOC の放出速度測定結果 (μg/m²h)

	ホルムアルデヒド	トルエン	キシレン	パラジクロロベンゼン	エチルベンゼン	スチレン	TVOC
床材	56.9	51.4	1467.6	N.D.	313.9	N.D.	627.6
壁材	7.2	2.3	5.1	6.2	3.3	N.D.	57.3
腰壁材	32.9	N.D.	7.1	N.D.	9.2	2.0	5062.9
天井材	10.3	2.8	1.53	N.D.	1.2	2.0	35.0

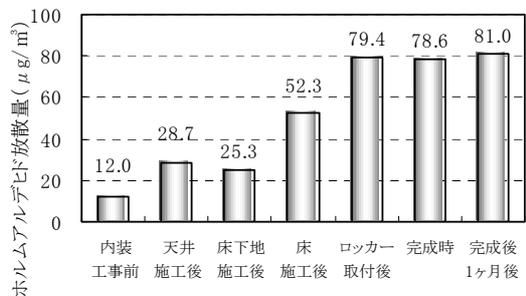


図-1 A 学校のホルムアルデヒド放出量推移
Formaldehyde Concentration of school A

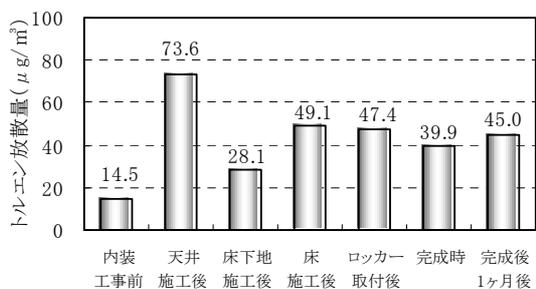


図-2 A 学校のトルエン放出量推移
Toluene Concentration of school A

し、表面塗装材に吸着材を混入した。本試験により、吸着剤がホルムアルデヒド放散量低減に効果があることがわかった。

TVOC の放散速度は、腰壁材が $5062.9 \mu\text{g}/\text{m}^2 \text{h}$ 、床材が $627.6 \mu\text{g}/\text{m}^2 \text{h}$ 、クロス壁材が $57.3 \mu\text{g}/\text{m}^2 \text{h}$ 、天井材が $35.0 \mu\text{g}/\text{m}^2 \text{h}$ となった。TVOC の放散速度では、腰壁が一番高い値であった。腰壁に使用した塗装材は有機溶剤を含まないものを選定し吸着剤を混入したが、TVOC については、効果が認められず、表-8 に示すようにトルエンとキシレンは低い値であるが、TVOC が高い値となった。一方、床材については、キシレンとエチルベンゼンが高い値を示し TVOC に影響した。

5.2 A 物件の濃度推移測定結果

ホルムアルデヒド、トルエン、キシレン、パラジクロロベンゼン、エチルベンゼン、スチレン、TVOC の濃度推移を図-1~7 に示す。ホルムアルデヒド放散量は、内装工事前が $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であったのに対し、顕著に上昇を示した工事内容は天井施工後の $28.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、床施工後の $52.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ロッカー取付後の $79.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。完成時はロッカー取付後とほぼ同じ $78.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と、厚生労働省のホルムアルデヒド放散量の指針値 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ をクリアした。

トルエンの濃度推移は、内装工事前が $14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であったのに対し、天井施工後に $73.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と放散量は急激に上昇し、その後床下地施工後には、 $28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ まで減少し、放散量はその後も同程度で推移し完成時には $39.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。キシレンの濃度推移は、床下地施工後に多少上昇しているものの完成時では $11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に低い値であった。パラジクロロベンゼンの濃度推移は、天井施工後まで放散量は検出されているが、それ以降は全て未検出であった。エチルベンゼンの濃度推移は、施工中においてはどの工事でも $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下と非常に低い値であった。完成後 1 ヶ月の放散量は $16.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に低い値であった。スチレンの濃度推移は、内装工事前から床施工後までは未検出であったが、ロッカー取付後には $7.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 検出され、完成時には $37.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 検出された。完成後 1 ヶ月後では $13.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と完成時より減少した。

今回の各 VOC の濃度推移では、放散量をトルエン換算値として算出したため、厚生労働省から発表されている指針値と正確に比較はできないが、どの施工状態でも指針値を上回ることはないと推定される。また、完成後 1 ヶ月の実際に教室を使用している状態でも、顕著に放散量が上昇する物質はなく、非常に低いレベルであった。図-11 に TVOC の濃度推移を示す。TVOC は、 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

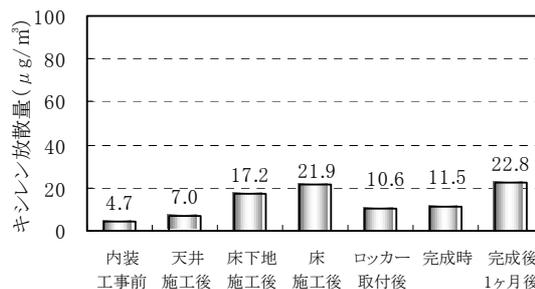


図-3 A 学校のキシレン放散量推移
Xylene Concentration of school A

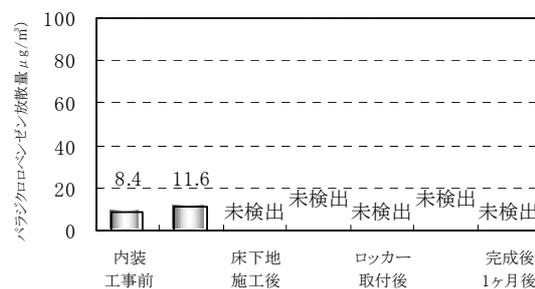


図-4 A 学校のパラジクロロベンゼン放散量推移
P-dichloro benzene Concentration of school A

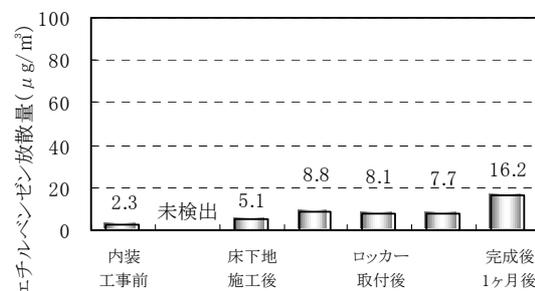


図-5 A 学校のエチルベンゼン放散量推移
Ethyl benzene Concentration of school A

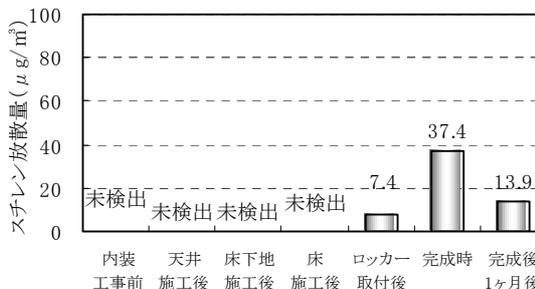


図-6 A 学校のスチレン放散量推移
Styrene Concentration of school A

以上検出された物質の合計とした。内装工事前は、 $260.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であったのに対し、天井施工後は $5790.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と急激に TVOC 放散量が上昇している。これは、塗装を施したことによる上昇と考えられる。床下地施工後になると、 $3123.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と天井施工後と比較すると半分程度まで減少している。床施工後には、 $9500.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と床下地施工後より約3倍放散量が上昇している。このことは、床および腰壁の仕上げ材料である檜および杉から放散される天然成分が9割以上であったためと考えられる。ロッカー取付時には半分程度まで減少しているが、測定当日、他の作業を行ったため、密閉時間が16時間確保できなかったため、減少してしまった。完成時の TVOC 放散量は、 $8621.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と床施工後とほとんど変わらない放散量であった。床や腰壁から発生する天然成分の放散量は急激には減少しないことがわかる。完成後1ヶ月の放散量は、 $4692.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と完成後から約半分程度まで減少している。これは、完成時の測定時における温度・相対湿度より、低いことも放散量の減少要因と考えられるが、天然成分も少しずつではあるが減少していると考えられる。TVOCの放散量は、完成時で $8621.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値であった。厚生労働省の目標暫定値は $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であるが、天然材料を使用して施工した場合でも、TVOCとしては非常に高い値を示すことがわかった。

5.3 B 物件の濃度推移測定結果

ホルムアルデヒド、トルエン、キシレン、パラジクロロベンゼン、エチルベンゼン、スチレン、TVOCの濃度推移を図-8~14に示す。各工事段階におけるホルムアルデヒド濃度は、内装工事前に $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であったが、床施工後に $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ロッカー取付後に $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と床施工時から増加した。腰壁とロッカーは、シナ合板に吸着材を混入した塗装としたため、床施工後と腰壁・ロッカー取り付け後の濃度はほぼ同程度で、吸着材の効果が確認できた。完成時の放散量は、 $59.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ とロッカー取り付け後のおよそ1.5倍の濃度と顕著に増加した。これは、完成時の温度がロッカー取付後に比べ高いため、濃度が高くなったものと思われる。しかし、この値は、厚生労働省のホルムアルデヒド濃度の指針値 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であり、ホルムアルデヒドの濃度制御はできたと考えられる。トルエン濃度は、天井壁下地後で $2191.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ロッカー取付時で $1207.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と濃度が上昇している。それぞれ施工段階で使用された材料には、トルエンを含んでいるものは無い予定であったが、同時に行った作業などで含有していた可能性が高い。キシレン、エチルベンゼンは、濃度はそれほど高くないものの、天井壁下地後と完成時に濃度が上昇している。天井壁下地後

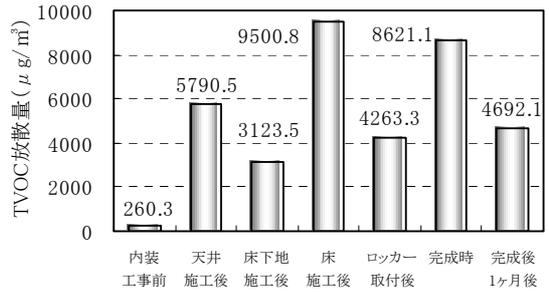


図-7 A 学校の TVOC 放散量推移
TVOC Concentration of school A

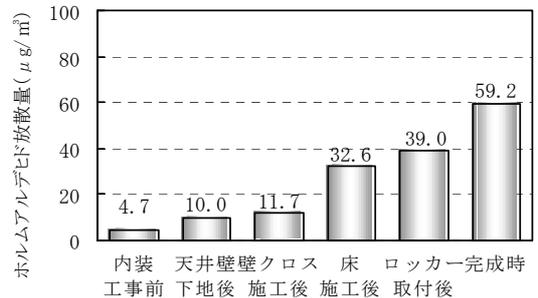


図-8 B 物件のホルムアルデヒド放散量推移
Formaldehyde Concentration of school B

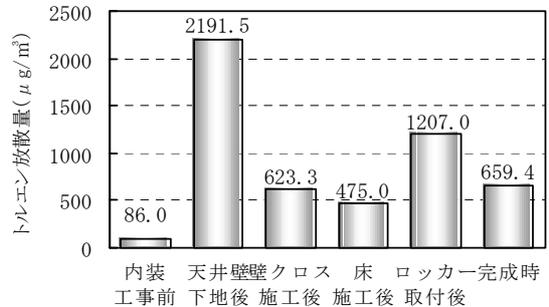


図-9 B 物件のトルエン放散量推移
Toluene Concentration of school B

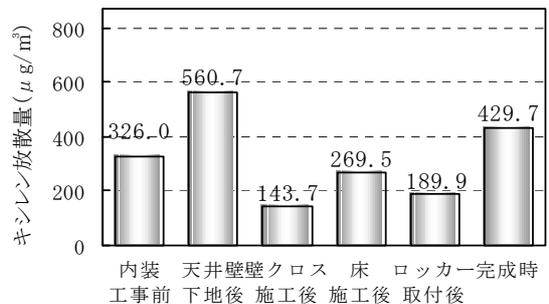


図-10 B 物件のキシレン放散量推移
Xylene Concentration of school B

濃度上昇した要因は、トルエンと同様に他の施工内容によるものと考えられる。パラジクロロベンゼンとスチレンは、施工中に微量ながら検出されたが、ほとんど問題のない濃度であった。TVOC濃度は、全体的に高い値を示した。内装工事前は、コンクリート面のみの空間であるが、TVOC濃度が1562.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高い値であった。これは、施工の関係で、足場などの建築資材が室内に設置されたままであったことなど、室内濃度に影響した要因が存在したと考えられる。天井・壁下地後にTVOC濃度が増加しているのは、トルエンが上昇したことによる。床施工後にTVOC濃度が増加しているが、これは竹床自身から放散した物質ではなく床材の施工に使用した接着剤から放散された物質であることから、接着剤の影響と考えられる。その後の経過でTVOC濃度は減少しているが、完成後のTVOC放散量は、12587.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値となった。床用接着剤の選定はTVOCを押さえるためには重要で有ることがわかった。

6. まとめ

内装材に天然材料と水性塗料を選定したA学校の場合は、厚生労働省が指針値を設定した特定物質の放散量を完成時に下回ることができた。施工中の濃度推移と材料からの放散量を把握することで、発生源の特定ができた。特にホルムアルデヒドの発生源では天然材料の檜から放散していることがわかった。TVOCの放散量は完成時で8621.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値であったが、発生源は檜や杉などの天然材料から発生していることがわかった。

一般的な材料を選定したB学校の場合は、ホルムアルデヒドについては、材料からの放散量を把握していれば、対策することにより厚生労働省の指針値を完成時にクリアできることがわかった。一方、トルエン、キシレンなどのVOCおよびTVOCについては、材料からの放散量を厳密に制御しなかったため、予想以上に完成時に濃度が高くなってしまった。しかし、材料からの放散量把握したうえでの材料選定、施工段階ごとの放散量を把握などで、今後どのようにVOCを制御していけば良いかは把握できたと考えられる。

参考文献

- 1) 市原英樹, 愛甲寿朗, 永井香織, 洞田浩文, : 学校施設における室内空気質対策事例 (その1 天然材料を使用した場合), 日本建築仕上学会・大会学術講演会, pp. 21-24, 2001
- 2) 永井香織, 市原英樹, 甲賀由紀子, 川島昭治, : 学校施設における室内空気質対策事例 (その1 一般的な材料を使用した場合), 日本建築仕上学会・大会学術講演会, pp. 25-28, 2001

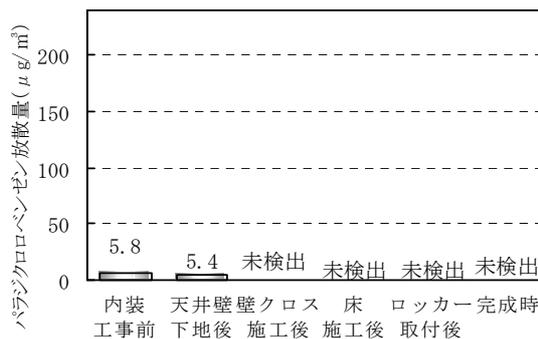


図-11 B物件のパラジクロロベンゼン放散量推移

P-dichloro benzene Concentration of school B

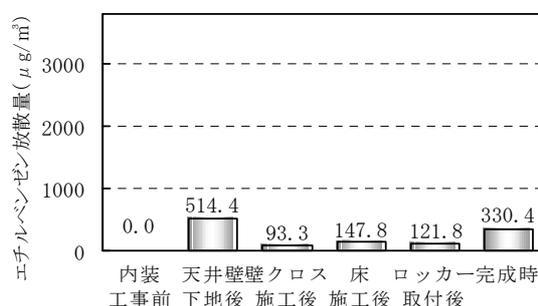


図-12 B物件のエチルベンゼン放散量推移

Ethyl benzene Concentration of school B

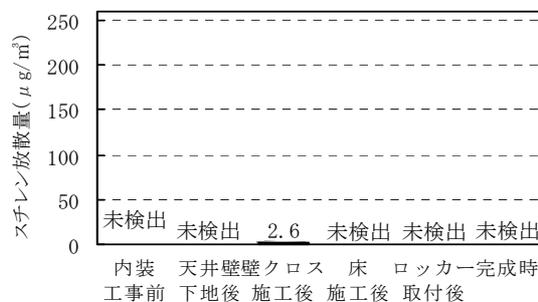


図-13 B物件のスチレン放散量推移

Styrene Concentration of school B

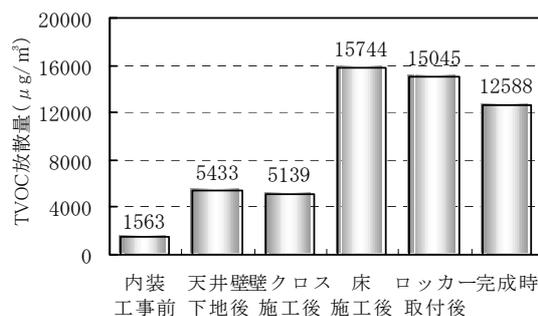


図-14 B物件のTVOC放散量推移

TVOC Concentration of school B