

模擬発生源とチャンバーを用いたホルムアルデヒド放散速度の 測定および病理検査室の実環境測定による検証

佐伯 寅彦^{*1,2}

穴井 俊博^{*1}

小林 徳和^{*1}

湯 懐 鵬^{*1}

鍵 直 樹^{*2}

医療機関等で行われる病理検査では臓器や組織をホルマリンで固定するため、作業時にホルムアルデヒドが発生する。そのため、病理検査室ではホルムアルデヒドの室内への拡散を抑制する局所排気装置等の措置が必要であるが、十分に機能していない場合も多い。ホルムアルデヒド曝露対策を適切に計画するには作業時に発生するホルムアルデヒドの量を把握する必要があるが、これを理論的に求めることは困難である。筆者らは病理検査室の換気設計に必要な基礎データを得るため、ホルマリン固定した豚精肉およびホルマリン液面からのホルムアルデヒド放散速度をチャンバー試験にて測定した。また、実作業中の病理検査室で室内ホルムアルデヒド濃度の実測を行い、作業場所1か所あたりからのホルムアルデヒド放散速度を算出した。チャンバー試験の結果、豚精肉とホルマリン液面のいずれもその放散速度は設置後40分間は時間による変化はなく、またいずれも温度依存性が確認された。また、実作業中の測定結果より切り出し等の作業での放散速度は作業場所1か所あたり139 mg/h～203 mg/h、ホルマリン槽の開放を伴う作業はこれに加えてホルマリン液面からの放散速度を加算した値となり、作業場所の数とホルマリン槽の開口部面積が分かればホルムアルデヒドの放散量を見積もることができることが分かった。

1. 緒言

医療機関等で行われる病理検査では、手術で摘出した臓器や組織などの検体から標本を作る際、検体をホルマリンに浸漬して固定することが一般的である。ホルマリン液面、および固定後の検体からはホルムアルデヒドが発生するため、病理医や検査技師などの作業者はホルムアルデヒドに曝露し健康リスクが増加する恐れがある^{1),2)}。そのため、作業環境におけるホルムアルデヒドの許容濃度は様々な機関により時間加重平均値で概ね0.02 ppm～0.75 ppmの範囲で定められている³⁾。日本国内においては労働安全衛生法を中核とした法体系によりホルムアルデヒドは特定化学物質障害予防規則で定める第二類物質とされ、管理濃度は0.1 ppm (20℃において約125 µg/m³)と定められている⁴⁾。ホルムアルデヒド曝露を防ぐためには、発生源付近に発散抑制措置を導入して作業者の呼吸域や室内への拡散を防いだり、全体換気により濃度を

低減する必要がある。発散抑制措置には局所排気装置やプッシュプル型換気装置などがあるが、検体を取り扱う作業、特に切り出し作業は病理医と技師が対面となるケースが多くドラフトチャンバーが適用しづらいため、開放式プッシュプル型換気装置が多く採用されている⁵⁾。しかし、開放式プッシュプル型換気装置に検体を設置していてもまな板などで換気口が覆われていたり、排気ダクトが折れ曲がっていたり、あるいは電源が入っていないなどの理由で有効な排気能力を発揮していない場合がある^{6),7)}。甲田ら⁸⁾は病理検査における作業内容とホルムアルデヒド曝露の関連性について調査し、臓器水洗や写真撮影などの作業では襟元での曝露濃度が1.5～2.5 ppmとなることや、開放型プッシュプル型換気装置を導入しても短時間曝露濃度は0.2 ppmを超えることを報告した。一方でHigashikuboら⁹⁾の調査では発散抑制措置が導入されていないにも関わらずホルムアルデヒド濃度が低く保たれている病理検査室も存在する。

このように、病理検査室では単純に発散抑制措置を配

^{*1} 新菱冷熱工業株式会社

^{*2} 東京工業大学

置するだけでは不十分な場合もあれば、全体換気で十分に濃度を低減できる場合もある。この原因として、病理検査室の換気設備について明確な基準が存在せず、病院設備設計ガイドライン¹⁰⁾も病理検査室の空調環境に関しては「十分な換気を行わなければならない」との記述にとどまり定量的な指針は示されていないことが挙げられる。曝露濃度の低減は重要な課題であるが、一方で過剰な対策を導入すると運転音による作業性の悪化や排気量の増大による温熱環境の悪化、空調負荷の増加につながる。換気により有害物質の濃度低減を図る場合、単位時間あたりに放散される有害物質の量（放散速度）と換気により取り除かれる有害物質の量が平衡に達した際に、その濃度が許容される濃度を下回るように換気量を計画する。そのため、適切な捕集効率を持つ発散抑制措置の選定および全体換気を含めた換気量を計画するためには、まず作業にともなうホルムアルデヒドの放散速度を把握する必要がある。

労働衛生の分野ではこれまで有害ガスの揮発量や蒸発速度の理論的な推定が試みられ、多くの数理モデルが考案されてきた^{11), 12), 13), 14)}。しかし、これらのモデルは常温で液体の有機溶剤純物質の液溜まりからの揮発量に関するものである。一方、病理検査室で用いるホルマリンのような水溶液からの有害ガスの発生については、モデル化が試みられた例¹⁵⁾はあるが実環境と比較した十分な検討はなされていない。さらに、病理検査室での主たる発生源は液溜まりではなく、検体に含浸したホルマリンがその表面から揮発すると考えられるが、液溜まりからの放散速度と検体からの放散速度にどの程度の乖離が生じるかは明らかでない。

実験によるホルムアルデヒドの放散速度の把握については、小形チャンバー法による建材からの放散速度の測定^{16, 17)}、大形チャンバー法による木製家具からの放散量¹⁸⁾など、シックハウス症候群対策の観点から多くの研究がなされている。しかし、病理検査で取り扱う検体からのホルムアルデヒド放散速度については明らかになっていない。建材からのホルムアルデヒド放散速度を測定する場合、国内ではJIS A 1901¹⁹⁾に定める小形チャンバー法が用いられるが、チャンバーの換気回数について 0.5 ± 0.05 回/h を標準とすることや、温度を原則として $28 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ とすることなどが定められており、換気回数が一般的に5回/h以上である病理検査室の模擬発生源の測定には適さないと考えられる。そのため、試験方法についても検討の必要がある。

実環境の調査による既往研究としては、作業者の健康リスクを評価する観点から、作業環境濃度や個人曝露濃

度について前述の甲田ら⁸⁾をはじめ複数の報告がされているが、いずれも作業内容や換気設備の詳細は不明で、放散速度を推定することは困難である。また、病理検査と同様にホルマリンにより処理した体組織からホルムアルデヒドが発生する作業場に解剖実習室があり、大道ら²⁰⁾による個人曝露濃度の測定や、戸田ら²¹⁾による遺体1体あたりのホルムアルデヒド放散速度の推定などが報告されている。しかし、解剖実習では1体の大きな検体を数か月にわたって扱うが病理検査では次々に新たな検体を用いることや、作業台と解剖台では形状や室内配置が異なること、解剖実習では全身を扱うが病理検査は組織を小さく切り出すといった違いがあるため、病理検査室の換気システムを計画するためのホルムアルデヒド放散速度は別途調査する必要がある。

本研究では、病理検査室の換気計画に必要な基礎的データを得るため、ホルマリン固定した豚精肉およびホルマリンを満たした開放容器を模擬発生源としたチャンバー試験を行い、それぞれの模擬発生源について単位面積当たりのホルムアルデヒド放散速度を測定して検体と液溜まりでの放散速度の相違や経時変化の有無、温度との関係を確認した。また、実作業中の病理検査室でホルムアルデヒド濃度測定を行い、作業場所1か所あたりからのホルムアルデヒド放散速度を算出した。さらに、チャンバー試験で得られた放散速度を実作業での測定で得られた放散速度と比較し、実測により得られた作業場所1か所あたりの放散速度を病理検査室の換気設備の計画のために一般化できるかについて検討した。

2. 方法

2.1 チャンバー試験による模擬発生源からのホルムアルデヒド放散速度の測定

病理検査における検体の固定は、組織が固定液によくさらされた状態で十分な時間浸漬することで行われる。ほとんどの病理検査室において標準の固定液として使用されているのは10%中性緩衝ホルムアルデヒド液であり、またほとんどの組織は12~18時間あれば適切に固定される²²⁾。その後、検体は病変部を露出するための切り出し、標本のサンプリングのための切り出し、検体によっては染色や脱灰などの数種の工程を経て標本化されるが、切り出し方は検体のタイプや病変の質に左右されるため、切り出し作業を実験室で再現することは困難である。また、検体の大きさについてもごく小さな切除生検材料から肝全摘出材料や片肺全摘除材料といった大きなものまで様々であり、標準的な検体を設定することは困難である。本研究では検体表面からの放散の挙動を確認するた

め、豚精肉を市販の10%中性緩衝ホルムアルデヒド液(キシダ化学株式会社製)に24時間以上浸漬したものを模擬検体として4個作成し、この模擬発生源を静置した際の放散速度を測定した。豚精肉は市販の国産豚ロース肉をあらかじめ25×100×5mm(まな板上に静置時の見かけの表面積約25cm²)に切断した後に浸漬した。また、液溜まりとして10%中性緩衝ホルムアルデヒド液を液面高さ20mmまで満たしたアルミ製容器(外形寸法:312×241×35mm,液面積約752cm²,以下ホルマリン液面)を6個作成し、同様に放散速度を測定した。

本研究では、Fig. 1に示す実験装置のチャンバー内に模擬発生源を1個静置して通風し、チャンバー上流および下流のホルムアルデヒド濃度を測定した。実験装置は500mm×500mm×500mmの鋼製チャンバー、φ150mmの金属ケーシングを備えた整流機能付・定置式複合ピトー管センサ、φ150mmの風量調整ダンパおよびそれらを接続するφ150mmの丸形ダクトで構成し、ファンを介して屋外に排気した。チャンバー内の平均面風速を病理検査室で多く用いられるプッシュプル型換気装置の風速に合わせ0.2m/sとするため、排気量は180m³/hとした。チャンバーの通風部は整流のため上流下流とも開口率50%のパンチングメタルを設置した。ホルムアルデヒド濃度は、発生源上流としてチャンバー外の空気を、発生源下流として実験装置ダクト中に設けた測定口よりダクト内空気を1.5L/min×10min=15L捕集し、2,4-ジニトロフェニルヒドラジン(DNPH)固相吸着-溶媒抽出

—高速液体クロマトグラフ法により分析した。捕集に際してサンプリングポンプは柴田科学株式会社製MP-E300N II, 捕集管は柴田科学株式会社製DNPHアクティブガスチューブSFを使用し、分析は公定法に従いアセトニトリル(キシダ化学株式会社製)5mLで抽出した後、高速液体クロマトグラフ(Agilent製HPLCシステム1290 Infinity II, 使用カラム:Supelco製Ascentis Express RP-Amide 粒子径2.7μm, 内径2.1mm, 長さ100mm)を用いて行った。模擬発生源からの放散速度の時間経過を確認するため、サンプリングは模擬発生源を静置してから0分~10分, 15分~25分, 30分~40分にそれぞれ行った。温度は実験室全体の空調設備を用いて約10℃~30℃に調整し、チャンバー付近の温度を測定してこれをチャンバー本体およびチャンバー内に流入する空気の温度とした。

模擬発生源からの単位面積あたりの放散速度は以下の式(1)により求めた。

$$ER_{unit\ area} = \frac{(C_{outflow} - C_{inflow}) \cdot Q_{chamber}}{A} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

ここで、 $ER_{unit\ area}$ [mg/h・cm²]は模擬発生源からの単位面積あたりの放散速度、 $C_{outflow}$ [μg/m³]は発生源下流のホルムアルデヒド濃度、 C_{inflow} [μg/m³]は発生源上流のホルムアルデヒド濃度、 $Q_{chamber}$ [m³/h]は実験装置の排気量、 A [cm²]は豚精肉の見かけの表面積またはホルマリン液面積である。

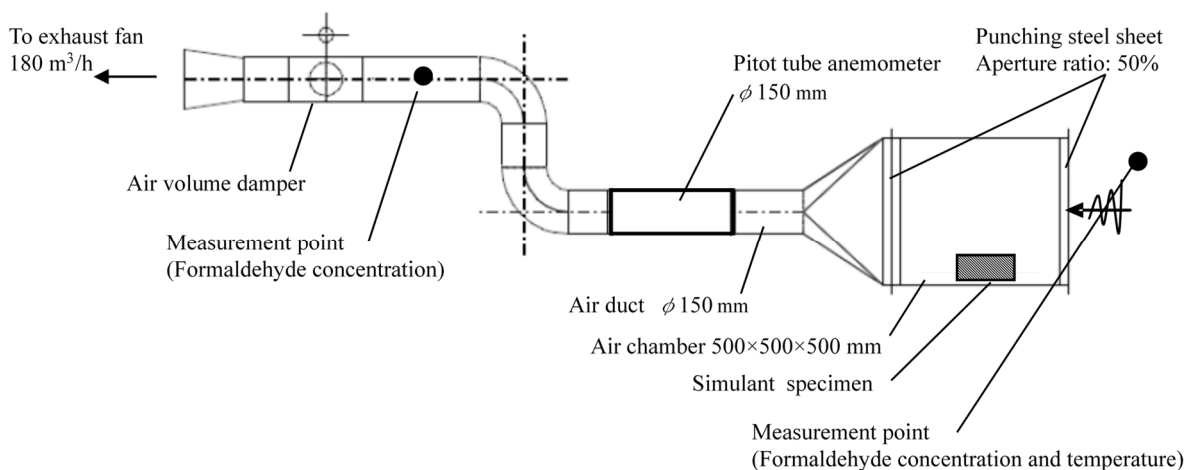


Fig.1 Schematic diagram of the exhausting test chamber for evaluating formaldehyde emission rate.

2.2 実作業中のホルムアルデヒド濃度測定およびホルムアルデヒド放散速度の算出

病理検査室の実作業で発生するホルムアルデヒドの放散速度を算出するため、3 か所の病院の協力を得て作業中の病理検査室のホルムアルデヒド濃度を測定した。なお、A 病院では病理検査室の他に隣接する標本整理室でもホルマリンを取り扱っていたため、あわせて測定を行った。測定した施設はいずれも法令で義務付けられている作業環境測定の結果が第3 管理区分（気中有害物質の濃度の平均が管理濃度を超え、作業環境管理が適切でない状態）と評価されており、発散抑制措置が十分に機

能していないと推定されていた。各室の測定点は室内の平均的な濃度を得るため、作業環境測定基準に定める A 測定に準じて床面より高さ 1.5 m の点で各室 5 点を測定した。Table 1 に各室の床面積、換気量および測定時の主な作業内容と作業場所の数を示す。Fig. 2 に A 病院標本整理室の平面図および換気設備の位置を示す。A 病院標本整理室では流し台にホルマリン槽が設けられており、ホルマリン槽の 1 か所（開口面積 520 mm×380 mm）を開放して検体の浸漬が行われていた。局所排気装置は設置されておらず、浸漬中は個人用保護具（防毒マスク）を着用して作業が行われていた。Fig. 3 に A 病院病理検

Table 1 Description of the pathological examination and specimen rooms: floor area, ventilation volume, and formaldehyde generation source.

	Floor area [m ²]	Ventilation air volume [m ³ /h]	Generation source of formaldehyde and number of work point
Hospital-A (specimen room)	43	620	Fixation on the formalin bath (Opened formalin surface dimension: 520 × 380 mm)
Hospital-A (pathology laboratory)	99	3,000	Dissection in 6 places
			Dissection in 6 places
			Dissection and photographing in 6 places
Hospital-B	15	790	Dissection and photographing in 5 places
			Dissection and photographing in 5 places
			Dissection and photographing in 2 places
Hospital-C	19	750	Dissection in 2 places

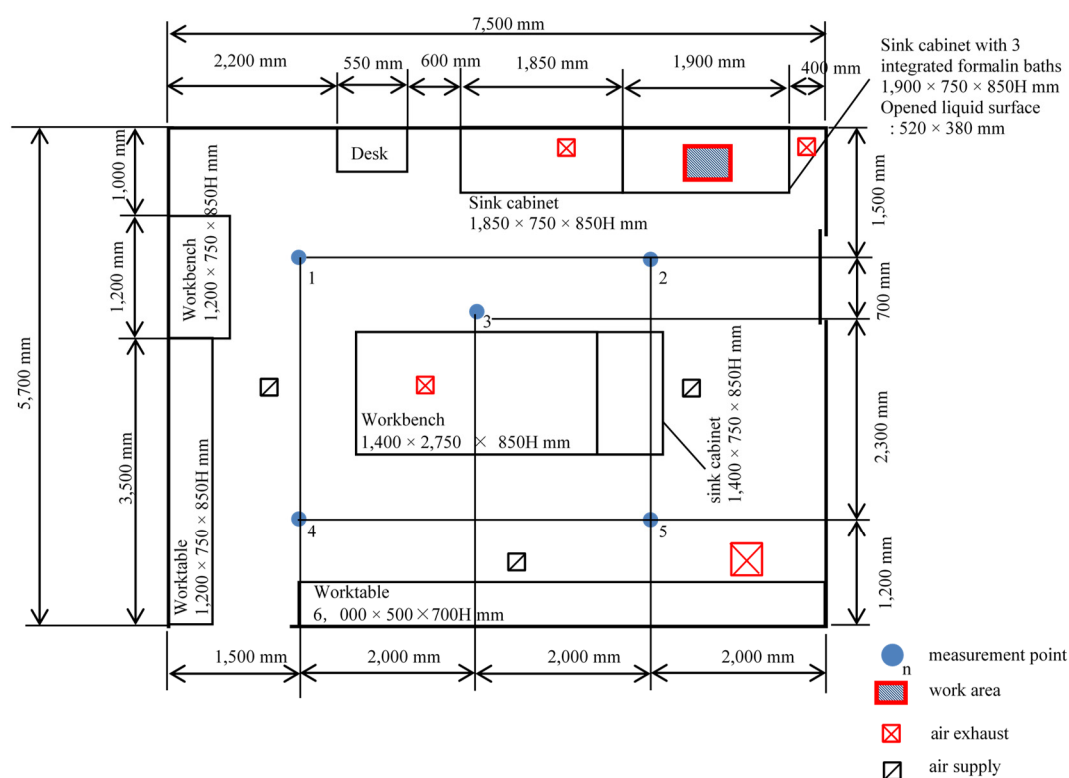


Fig. 2 Location of measurement points for formaldehyde, work points, and installed ventilation devices in the specimen room of the Hospital A.

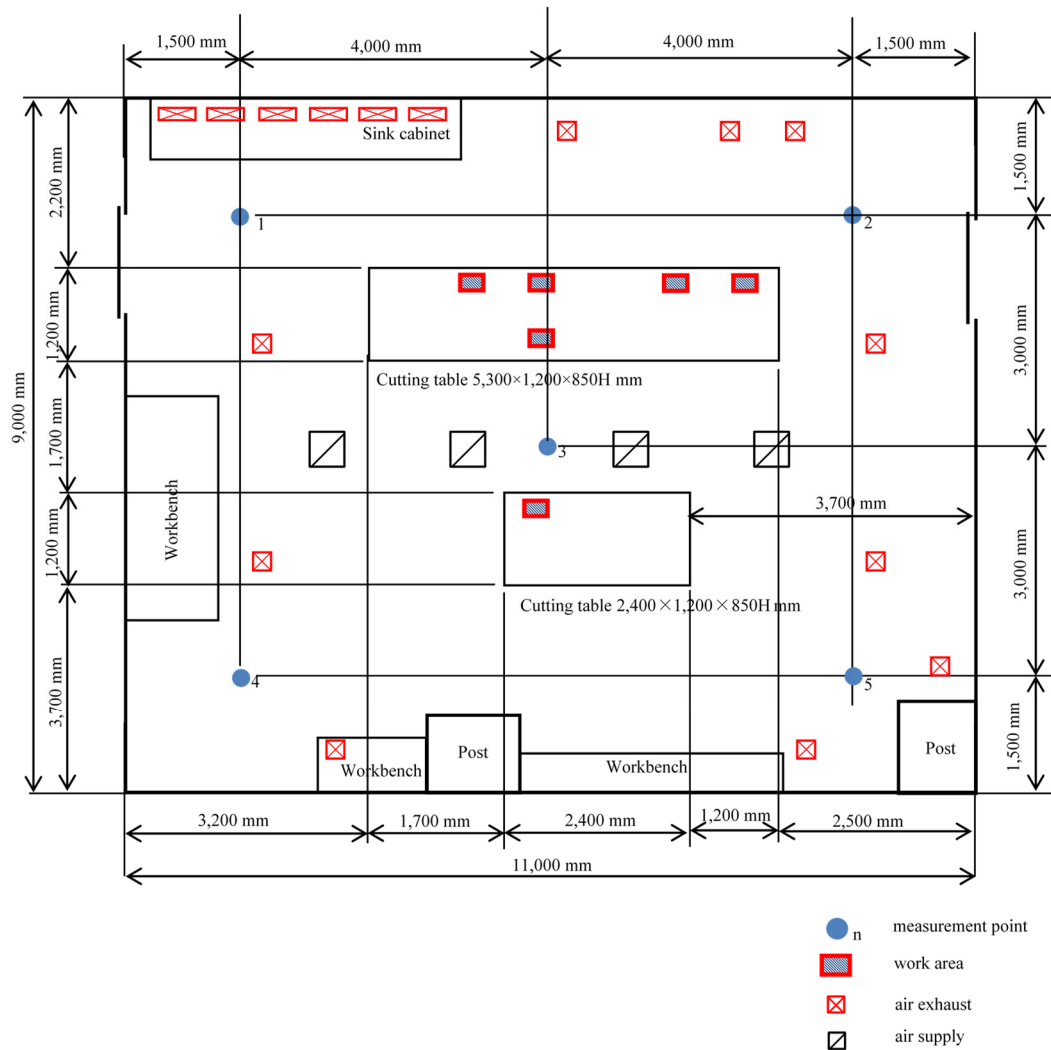


Fig. 3 Location of measurement points for formaldehyde, work points, and installed ventilation devices in the pathology laboratory of Hospital A.

査室の平面図および換気設備の位置を示す。A 病院病理検査室では図の左上に配置されていた流し台に局所排気として吸込口が設けられていたが、測定時は 1 回目・2 回目とも室中央の局所排気装置の設けられていない切り出し作業台でのみ作業が行われており、作業場所の数は 6 か所であった。Fig. 4 に B 病院病理検査室の平面図および給気口の位置を示す。B 病院では図中の右側が作り付けの切り出し作業台となっており、作業台側の壁面に Fig. 5 に示すとおり吸込口が設けられていた。作業場所の数は測定 1 回目は 6 か所、測定 2 回目は 5 か所、測定 3 回目は 2 か所であった。Fig. 6 に C 病院病理検査室の平面図および換気設備の位置を示す。C 病院では室中央に切り出し台が設置され、室全体の換気量 $750 \text{ m}^3/\text{h}$ のうち $300 \text{ m}^3/\text{h}$ が切り出し台の長手方向の縁部に設けたスリット状の吸込み口から局所排気として排気されていた。ホルムアルデヒド濃度の測定は前節で記載したチャン

バー試験と同様に行った。作業場所 1 か所あたりの放散速度は以下の式(2)により求めた。

$$ER_{\text{work point}} = \frac{(C_{\text{indoor}} - C_{\text{outdoor}}) \cdot Q_{\text{laboratory}}}{n} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

ここで、 $ER_{\text{work point}}$ [mg/h]は作業場所 1 か所あたりの平均放散速度、 C_{indoor} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]は室内の平均ホルムアルデヒド濃度、 C_{outdoor} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]は室外から供給される空気ホルムアルデヒド濃度、 $Q_{\text{laboratory}}$ [m^3/h]は室全体の換気量、 n は測定時の作業場所の数である。ここでは室内壁や機材表面への吸脱着が平衡状態に達しているとし、室内のホルムアルデヒド濃度は各測定点の結果を算術平均した値とした。本研究ではいずれの施設も室内への給気は屋外空気を温調したものが大部分であり、大気環境中のホルムアルデヒド濃度は室内濃度と比較して十分に小さいと考えられたため C_{outdoor} は $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ とし算出した。

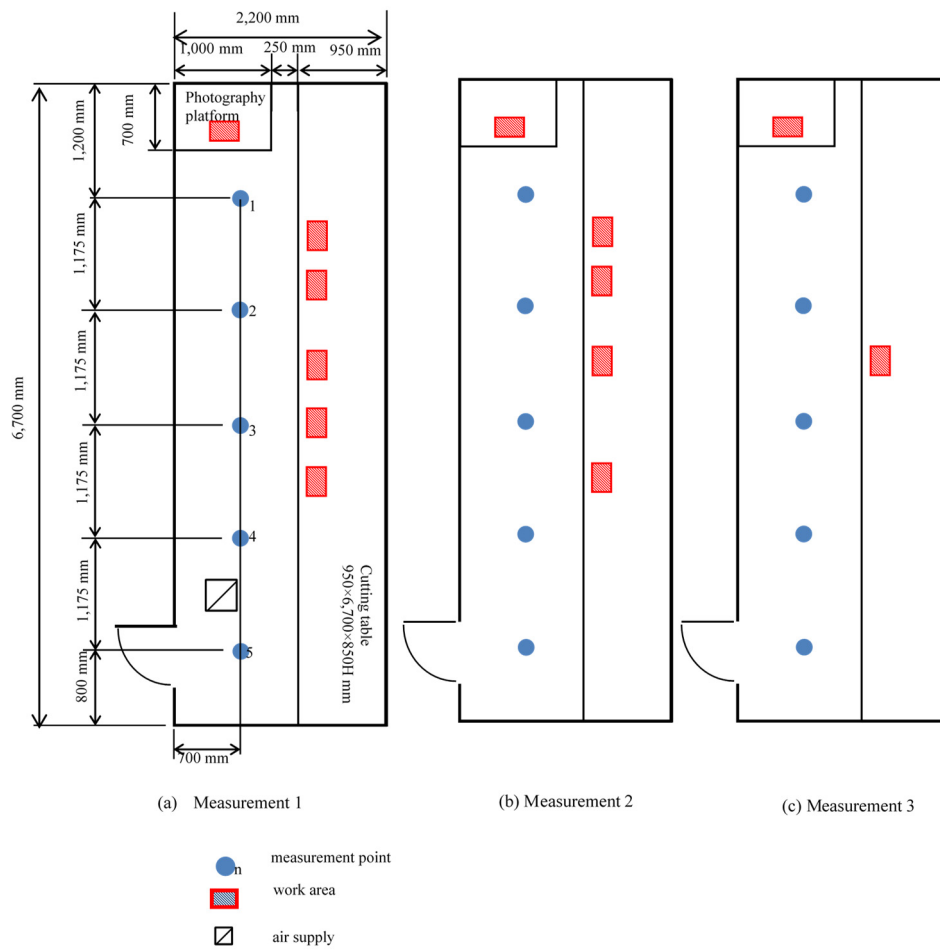


Fig. 4 Location of measurement points for formaldehyde, work points, and installed ventilation devices in the pathology laboratory of Hospital B.

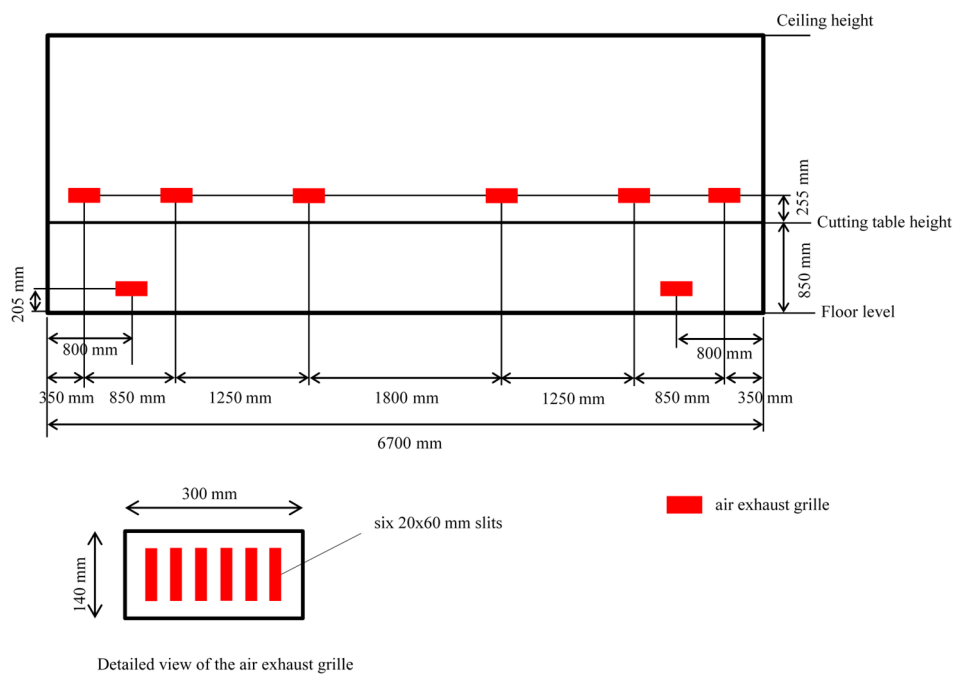


Fig. 5 Placement of wall-mounted air exhaust in the pathology laboratory of Hospital B.

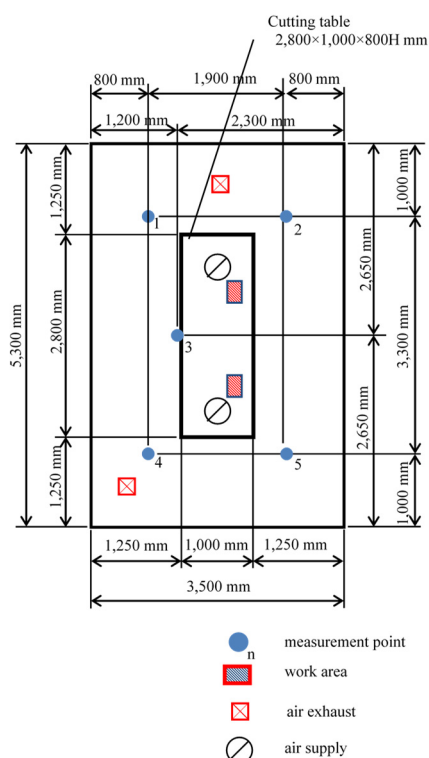


Fig. 6 Location of measurement points for formaldehyde, work points, and installed ventilation devices in the pathology laboratory of Hospital C.

3. 結果と考察

3.1 チャンバー試験による模擬発生源からの放散速度

Table 2 に各模擬発生源測定時の室温、発生源上流および下流のホルムアルデヒド濃度、模擬発生源 1 個あたりおよび単位面積あたりの放散速度を示す。発生源上流のホルムアルデヒド濃度は $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.003 ppm \sim 0.009 ppm) と大気中の濃度と同程度であることが確認された。発生源下流濃度は豚精肉では $46.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 80.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03 ppm \sim 0.06 ppm), ホルマリン液面では $431 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 1,730 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.35 ppm \sim 1.39 ppm) の範囲となった。個数単位あたりの放散速度は豚精肉では $7.3 \text{ mg}/\text{unit} \cdot \text{h} \sim 13.5 \text{ mg}/\text{unit} \cdot \text{h}$, ホルマリン液面では $76.7 \text{ mg}/\text{unit} \cdot \text{h} \sim 310 \text{ mg}/\text{unit} \cdot \text{h}$ となった。模擬発生源 1 個あたりの放散速度はホルマリン液面が大きい、これは発生

源の面積が豚精肉の 25 cm^2 に対しホルマリン液面は 752 cm^2 と大きいと考えられる。単位面積あたりの放散速度は豚精肉で $0.29 \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \sim 0.54 \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$, ホルマリン液面で $0.18 \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \sim 0.42 \text{ mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ となった。放散速度の経時変化については、模擬発生源 b-1 ではサンプリング 1 回目が低くその後上昇する傾向が見られたが、その他の発生源についてはサンプリングのタイミングによる差は確認されなかった。模擬発生源 b-1 の 1 回目 (0 分 \sim 10 分) のサンプリング時の平均室温は 23.0°C であり、サンプリング 2 回目 (28.3°C) および 3 回目 (28.7°C) と比較して 5°C 以上低いため、この放散速度の変動の原因は経時変化ではなく温度の影響と考えられる。

鍵らの報告によれば、放散速度は初期段階では材料表面での脱着に支配され、放散速度の自然対数と絶対温度の逆数には線形関係が存在する²³⁾。そこで各模擬発生源からの単位面積あたりの放散速度の自然対数を縦軸に、測定時の室温の逆数を横軸にとった図を Fig. 7 に示す。放散速度と室温の関係を、豚精肉とホルマリン液面についてそれぞれ線形近似すると以下の回帰式が導かれる。

$$\ln (ER_{\text{unit area fixed dressed pork}} / A) = -11223/T + 37.163 \quad (3)$$

$$\ln (ER_{\text{unit area 10% formalin}} / A) = -6843.9/T + 21.762 \quad (4)$$

ここで、 $ER_{\text{unit area fixed dressed pork}}$: 豚精肉からの単位面積あたりのホルムアルデヒド放散速度 [$\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$], $ER_{\text{unit area 10% formalin}}$: ホルマリン液面からの単位面積あたりのホルムアルデヒド放散速度 [$\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$], A : 見かけの表面積 [cm^2], T : 室温 [K] である。回帰式(1)および(2)の決定係数はそれぞれ 0.93 と 0.95 といずれも高い相関があり、模擬発生源の見かけの面積と放散量の温度依存性が明らかになった。ただし線形近似した場合の傾きは発生源により異なり、温度が同一の場合、放散速度はホルマリン液面より豚精肉からの方が大きい。これは豚精肉の表面には微細なシワ等の凹凸があるため、見かけの表面積よりも実際の表面積が大きいと推測される。

Table 2 Concentration and emission rate of formaldehyde and temperature in the exhausting test chamber.

	Time interval [min]	Temperature [°C]	C_{inflow}^* [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$C_{outflow}^{**}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Emission rate per unit [mg/unit·h]	Emission rate per unit area [mg/cm ² ·h]
Fixes dressed pork	a-1	0-10	23.3	5.2	80.2	13.5
		15-25	23.7	5.6	79.3	13.3
		30-40	23.7	5.7	77.2	12.9
	a-2	0-10	23.5	5.7	71.0	11.8
		15-25	23.2	6.1	76.1	12.6
		30-40	23.1	5.8	79.8	13.3
	a-3	0-10	19.5	6.3	46.9	7.3
		15-25	19.6	4.8	50.5	8.2
		30-40	19.7	5.1	50.4	8.2
	a-4	0-10	20.9	4.4	50.1	8.2
		15-25	20.9	4.3	54.1	9.0
		30-40	20.9	3.9	55.2	9.2
10% formaldehyde neutral buffer solution in aluminum tray	b-1	0-10	23	4.9	770	138
		15-25	28.3	5.5	1,340	240
		30-40	28.7	6.2	1,490	267
	b-2	0-10	26.7	9.0	1,730	310
		15-25	26.5	10.7	1,590	284
		30-40	26.4	10.5	1,520	272
	b-3	0-10	29.0	6.7	1,610	289
		15-25	29.1	7.4	1,690	303
		30-40	29.3	7.4	1,720	308
	b-4	0-10	25.7	9.1	1,430	256
		15-25	25.8	8.3	1,450	260
		30-40	25.9	8.5	1,510	270
	b-5	0-10	21.9	4.5	1,130	203
		15-25	22.1	4.6	1,090	195
		30-40	22.4	4.1	1,120	201
	b-6	0-10	11.6	4.9	456	81.2
		15-25	12.1	4.7	431	76.7
		30-40	12.4	5.1	447	79.6

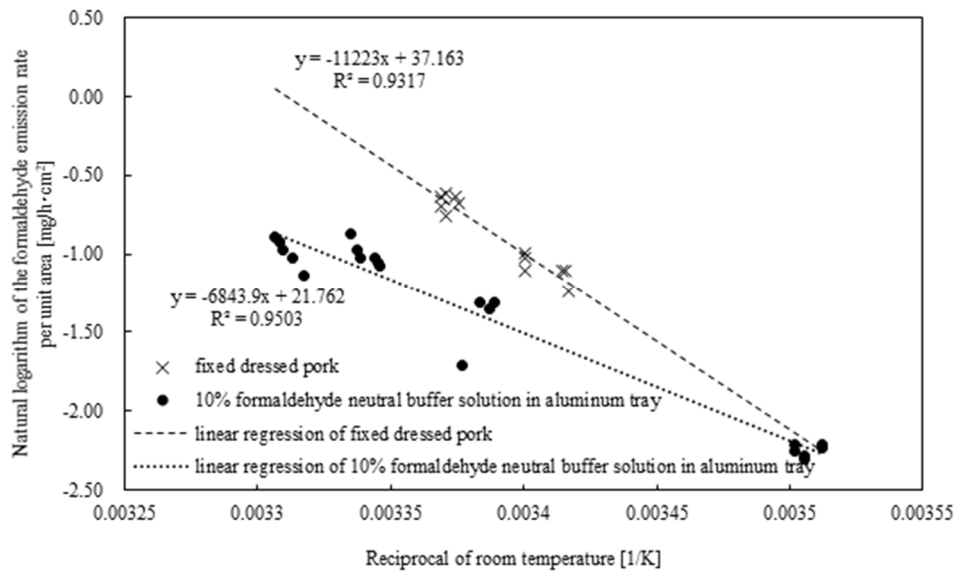
* C_{inflow} indicates the concentration upstream of the formaldehyde emission source.** $C_{outflow}$ indicates the concentration downstream of the formaldehyde emission source.

Fig. 7 Relationship between the natural logarithm of the formaldehyde emission rate and the reciprocal of temperature in the chamber test.

3.2 実作業中のホルムアルデヒド濃度と放散速度、およびチャンバー試験との比較

各室の測定点ごとの濃度測定結果を Table 3 に示す。

A 病院標本整理室のホルムアルデヒド濃度は $830 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $1,880 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.67 ppm～1.50 ppm) となった。A 病院病理検査室の測定では 2 回の測定とも作業は 6 か所、同じ場所で行われ、ホルムアルデヒド濃度は 1 回目が $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.20 ppm～0.26 ppm), 2 回目は $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $490 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.21 ppm～0.39 ppm) となった。B 病院では 1 回目の測定では 6 か所で作業が行われホルムアルデヒド濃度は $640 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $1,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.51 ppm～1.28 ppm), 2 回目の測定では 5 か所で作業が行われ $520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $1,660 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.42 ppm～1.33 ppm), 3 回目の測定では 2 か所で作業が行われ $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $480 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.18 ppm～0.38 ppm) となった。C 病院では 2 か所の作業がいずれもスリット状の吸込口を有する切り出し台で行われていたが、 $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ～ $730 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.21 ppm～0.59 ppm) となった。いずれの施設でも大気中の濃度や管理濃度の 0.1 ppm と比較すると高い濃度であることから局所排気装置は機能していないと考えられるため、各測定点の濃度の算術平均値を室平均濃度 C_{indoor} , および室外から供給される空気のホルムアルデヒド濃度 C_{indoor} を $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ として式 (2)に従い放散速度を算出した。

Table 4 に各測定での室平均濃度、室全体の放散速度、作業場所の数および作業場所 1 か所あたりの平均放散速度を示す。作業場所 1 か所あたりの平均放散速度は、A 病院標本整理室で $769 \text{ mg}/\text{h}$, A 病院の病理検査室およびその他の病院の病理検査室では $139 \text{ mg}/\text{h}$ ～ $203 \text{ mg}/\text{h}$ となった。A 病院標本整理室ではホルマリン槽を開放して作業していたため、検体からの発生に加えてホルマリン液面からも発生があり、他の室に比較して放散速度が大きくなったと考えられる。ホルマリン槽の開放を伴わない切り出し作業が行われていたその他の室では、室内濃度は異なるが 1 か所あたりの放散速度は大きく変わらないことが確認された。

実測により得られた切り出し作業 1 か所あたりの放散速度 $139 \text{ mg}/\text{h}$ ～ $203 \text{ mg}/\text{h}$ は、チャンバー試験で得られた豚精肉では温度 25°C のとき 237 cm^2 ～ 328 cm^2 にあたる。検体の大きさや表面積は臓器の種類により異なるが、切り出し作業は検体の混同やコンタミネーションを防ぐため通常は作業者 1 人につき 1 つの検体をまな板上に乗せて取り扱う。そのため、作業場所 1 か所あたりの発生源はまな板に載せて余裕のある大きさの検体と考えられる。まな板の大きさに統一された規格は存在しないが、一般的には短辺 20 cm ～ 25 cm , 長辺 30 cm ～ 40 cm 程度の製品が使用されており、豚精肉 237 cm^2 ～ 328 cm^2 は一般的

Table 3 Concentration of formaldehyde in the pathology laboratories and the specimen room.

Measurement point	Formaldehyde concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]						
	Hospital-A (specimen room)	Hospital-A (pathology laboratory)		Hospital-B		Hospital-C	
1	830	310	370	1,600	1,660	480	260
2	1,440	320	490	1,500	1,650	420	390
3	1,880	290	380	1,380	1,050	360	730
4	970	250	260	940	730	280	650
5	1,070	250	370	640	520	230	670
Arithmetic average (SD)	1,240 (379)	280 (29)	370 (73)	1,210 (364)	1,120 (467)	350 (91)	540 (182)

Table 4 Emission rate and the mean value of formaldehyde in the pathology laboratories and the specimen room.

	Mean concentration for formaldehyde [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]*	Total emission [mg/h]	Number of work point	Emission rate per work point [mg/h]
Hospital-A (specimen room)*	1,240 (0.99)	769	1**	769
Hospital-A (pathology laboratory)	280 (0.22)	840	6	140
	370 (0.30)	1,110	6	185
	1,210 (0.97)	956	6	159
Hospital-B	1,120 (0.90)	885	5	177
	350	277	2	139
Hospital-C	540	405	2	203

* The numbers noted in parenthesis show the concentration of formaldehyde in ppm (v/v).

** Formalin tank was opened during the work: surface area of $520 \times 380 \text{ mm}$

なまな板に乗せられる大きさである。チャンバー試験から得られた豚精肉の放散速度との比較、ならびに個々の実測結果により得られた切り出し作業1か所あたりの放散速度が一定の範囲に収まっていることから、切り出し作業では作業箇所数から作業時の放散量を見積もることが可能であるといえる。

また、A病院標本整理室の測定時はホルマリン槽の開口部(520×380 mm, 面積1,976 cm²)1か所が開放され、ホルマリンに浸漬し固定した検体の水洗いの作業が行われていた。ホルマリン槽開口部からの単位面積あたりの放散速度が10%中性緩衝ホルムアルデヒド液を満たした模擬発生源と同等であると仮定すると、液面からの放散速度は室温25°Cのとき式(4)より600 mg/hとなり、実測値の769 mg/hはこの放散速度より169 mg/h大きい。測定時は検体をホルマリン槽から取り出して作業を行っていたため、ホルマリン液面からの発生に加えて検体からの発生があったと考えられる。A病院での切り出し作業での1か所あたりの放散速度は140 mg/hおよび185 mg/h、平均値は163 mg/hであり、液面からの放散速度と実測値の差に概ね一致する。このことから、浸漬後の水洗い作業からの放散速度は切り出し作業からの放散速度と同等と捉えられる。ホルマリン槽からの放散速度はチャンバー試験により得られたホルマリン液面からの単位面積あたりの放散速度と温度依存性の関係式を用いて決定できるため、これに切り出し作業による放散量を加えることで浸漬・水洗い作業時の放散量を見積もることが可能である。

4. 結論

病理検査室の換気設備を適切に設計するための基礎データとして、ホルマリン固定した検体からのホルムアルデヒド放散速度やその経時変化、作業場所1か所あたりの放散速度の把握が必要である。筆者らはホルマリン固定した豚精肉および10%中性緩衝ホルムアルデヒド液を満たした容器を模擬発生源とし、ホルムアルデヒド放散速度をチャンバーで測定した。また、実作業中の病理検査室においてホルムアルデヒド濃度を測定して作業場所1か所あたりのホルムアルデヒド放散速度を算出した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ホルマリン固定した豚精肉および10%中性緩衝ホルムアルデヒド液からの放散速度は、室温の変化がない状態では静置後40分間は経時変化がなく安定していることが確認された。単位面積あたりの放散速度の自然対数は室温の逆数と線形な関係があること

が明らかになった。また、温度が同一の場合、豚精肉からの単位面積あたりの放散速度はホルマリン液面からの放散速度より大きくなった。

- (2) 実作業中の病理検査室でのホルムアルデヒド濃度測定結果より、病理検査室での切り出し作業では作業場所1か所あたりのホルムアルデヒド放散速度は139 mg/h～203 mg/hと算出され、これは表面積237 cm²～328 cm²の固定した豚精肉からの放散速度に相当した。切り出し作業では作業箇所数から作業時の放散量を見積もることが可能である。
- (3) 実作業中のホルムアルデヒド濃度測定結果より、開口面積1,976 cm²のホルマリン槽の開放を伴う浸漬した検体の水洗い作業では769 mg/hのホルムアルデヒド放散速度が得られた。これはホルマリン槽開口部からの発生と検体からの発生の合計と考えられる。ホルマリン槽からの放散速度はチャンバー試験により得られた温度依存性の関係式を用いて決定でき、また検体からの放散速度は切り出し作業1か所あたりの放散速度と同等と考えられる。このため、検体の水洗い作業においても切り出し作業と同様に、作業場所の数とホルマリン槽の開口面積が分かれば作業時の放散量を見積もることが可能である。

本研究で得られた知見より、病理検査室の換気設備を設計する際、作業場所で発生するホルムアルデヒドの放散速度を決定し、作業者のホルムアルデヒド曝露を防ぐ適切な換気量設計が期待される。

利益相反

本論文に関して、開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) Solange Costa, Carla Costa, Joana Madureira, Vanessa Valdiglesias, Armanda Teixeira-Gomes, Paula Guedes de Pinho, Blanca Laffon, Joao Paulo Teixeira: Occupational exposure to formaldehyde and early biomarkers of cancer risk, immunotoxicity and susceptibility, *Environmental Research*, 179, part A, 108740 (2019).
- 2) Mahdi Jalali, Somayeh Rahimi Moghadam, Mansour Baziar, Ghasem Hesam, Zahra Moradpour & Hamid Reza Zakeri: Occupational exposure to formaldehyde, lifetime cancer probability, and hazard quotient in pathology lab employees in Iran a quantitative risk assessment, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 1878?1888 (2021).
- 3) 松村年郎, 森田孝節: 室内環境汚染物質としてのホルムア

- ルデヒド（その1）－物理・化学的性質，生産，用途，発生源，基準及び健康影響－，室内環境，14，1，35-41（2011）。
- 4) 公益社団法人日本作業環境測定協会：作業環境測定のための労働衛生関係法令 2020-22，公益社団法人日本作業環境測定協会（2020）。
 - 5) 上福元清隆，久保田裕仁：プッシュプル型換気装置の設置事例と設計の留意点，労働衛生工学，60，3-15（2020）。
 - 6) Mehdi Ghasemkhani, Farahnaz Jahanpeyma, Kamal Azam: Formaldehyde Exposure in Some Educational Hospitals of Tehran, *Industrial Health*, 43, 703-707 (2005).
 - 7) Masanori Ogawa, Isamu Kabe, Yasuhiro Terauchi, Shigeru Tanaka: A strategy for the reduction of formaldehyde concentration in a hospital pathology laboratory, *Journal of Occupational Health*, 61, 135-142 (2019).
 - 8) 甲田茂樹，佐々木毅，熊谷信二，吉田仁，吉田俊明：病院の病理検査室で用いるホルムアルデヒドのリスクアセスメント手法の確立とばく露低減対策の効果の検討，労働安全衛生総合研究所特別研究報告，JNIOOSH-SRR-NO.40-4-5，121-126（2010）。
 - 9) Ichiro Higashikubo, Hiroyuki Miyauchi, Satoru Yoshida, Shinsuke Tanaka, Mitsunori Matsuoka, Heihachiro Arito, Akihiro Araki, Hidesuke Shimizu, Haruhiko Sakurai: Assessment of workplace air concentrations of formaldehyde during and before working hours in medical facilities, *Industrial Health*, 55, 2, 192-198 (2017).
 - 10) 一般社団法人日本医療福祉設備協会：病院設備設計ガイドライン（空調設備編）HEAS-02-2013，第4版，一般社団法人日本医療福祉設備協会，p.82（2013）。
 - 11) 田中丈之，永田工，吉田豊彦：溶剤の蒸発速度，色材協会誌，41，8，378-385（1968）。
 - 12) Frands Nielsen, Erik Olsen, Aage Fredenslund: Prediction of isothermal evaporation rates of pure volatile organic compounds in occupational environments - a theoretical approach based on laminar boundary layer theory, *The Annals of Occupational Hygiene*, 39, 4, 497-511 (1995).
 - 13) Anne Lennert, Frands Nielsen, Niels Oluf Breum: Evaluation of evaporation and concentration distribution model - a test chamber study, *The Annals of Occupational Hygiene*, 41, 6, 625-641 (1997).
 - 14) 山田憲一：数値モデルを用いた作業環境における揮発性有機化合物のばく露評価に関する研究，早稲田大学，博士論文（2010）。
 - 15) 坂井 健太郎：高濃度短期暴露リスク評価のための化学物質放散モデルに関する研究，九州大学，修士論文（2019）。
 - 16) 山田 裕巳，上原 浩二，林 基哉，田辺 新一：小型チャンバーを用いたホルムアルデヒド気中濃度予測法の基礎研究，日本建築学会計画系論文集，66，543，57-63（2001）。
 - 17) 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パ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，68，572，47-54（2003）。
 - 18) 鈴木 昌樹，朝倉 靖弘，石井 誠：大形チャンパー法による木製家具からのホルムアルデヒド放散量測定，日本建築学会環境系論文集，72，615，39-44（2007）。
 - 19) 日本規格協会：JIS A 1901:2015 建築材料の揮発性有機化合物（VOC），ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散測定方法—小形チャンパー法，日本規格協会（2015）。
 - 20) 大道公秀，松野義晴，小宮山政敏，深田秀樹，戸高恵美子，太田昌彦，宮宗秀伸，門田朋子，森千里：千葉大学における肉眼解剖実習のホルムアルデヒド濃度に関する一考察，臨床環境医学，14，2，112-118（2005）。
 - 21) 戸田浩之，有川悦朗，佐古かおり，矢込由紀，安藤明子：解剖実習室空气中のホルムアルデヒドの実測，空気調和・衛生工学会論文集，29，95，81-88（2004）。
 - 22) William H. Westra, Ralph H. Hruban, Timothy H. Phelps, Christina Isacson: *Surgical Pathology Dissection: An Illustrated Guide*, 2nd Ed., Springer-Verlag New York, Inc., p.14-21 (2003).
 - 23) 鍵 直樹，田村 一，田中 貴織，藤井 修二：環境温度を考慮に入れた発生ガスフラックスのモデル化：建材における揮発性有機化合物の発生機構，日本建築学会計画系論文集，66，539，45-49（2001）。