

ガス交換ユニットを用いた拡散換気システムの性能検証

Performance Verification of Diffusion Ventilation System using Gas Exchange Unit

学生会員 ○ 石垣 祐里奈 (北海道大学) 正会員 羽山 広文 (北海道大学)
 正会員 森 太郎 (北海道大学) 非会員 石橋 晃 (北海道大学)
 非会員 松田 順治 (飛栄建設㈱)

Yurina ISHIGAKI*¹ Hirofumi HAYAMA*¹ Taro MORI*¹ Akira ISHIBASHI*¹ Junji MATSUDA*²
^{*1} Hokkaido University ^{*2} Hiei Kensetsu Co.

In a conventional clean room, an extremely large amount of labor and cost are required to realize an advanced clean environment. In this study, we focused on Clean Unit System Platform (CUSP), which was developed as an air cleaning technology that can be introduced at a lower cost, and verified the performance of a diffusion ventilation system using a gas exchange unit through experiments. Although it is necessary to find a more efficient operation method for practical use, but the diffusion ventilation system is considered to be very useful as a but quite sustainable clean system.

1. はじめに

現代文明の発達に伴い、人間活動において清浄環境の実現が求められる場も爆発的に増加した。半導体など電子工業部品の製造過程はもちろん、医療現場における手術室や治療室、加えて薬品や食品を扱う工場など、あらゆる場で需要に応じたクリーン環境が構築されている。しかし、従来型のクリーンルーム技術は重厚長大であるとも言え、特に高度な清浄環境の実現には非常に大きな設備と費用が必要となる。そこで、より低コストにて導入可能なクリーンシステムの開発・推進は、各産業における清浄環境実現手法に幅を与えるとともに、今まで実現しえなかったレベルでのクリーンルーム運用を可能とする。近年、話題になることも多い感染症予防や、花粉やPM2.5等の空気中微粒子への対策など、より手軽な清浄環境が応用できる場面は多いだろう。

本研究は、石橋ら¹⁾により空気清浄技術として開発されたクリーンユニットシステムプラットフォーム(以下CUSP)において、ガス交換ユニットを利用した拡散換気システムについて性能検証を行い、清浄環境実現に関する新たな知見を提供することを目的とする。

2. CUSPシステム概要¹⁾²⁾

2.1 CUSP (Clean Unit System Platform)

図1aに示す通り、在来型のクリーンルームでは、送風能力のあるファンと塵埃除去フィルターの結合した系であるファンフィルターユニット(以下FFU)を外界と室内の界面に位置させることが殆どである。外気をろ過して

清浄空気を室内に送り込み、室内で発生した塵埃・菌を排出する。このシステムでは、FFUのフィルターは室内空気が清浄化された後も依然同じレートで目詰まりを続け、定期的な交換が必要となる。ここで、石橋らが新たに提案したCUSPでは、図1bに示す通り、用いるFFUの吐出エア全量をその給気側へ戻し、内外で気体のマスとしてのやり取りがない孤立・閉鎖系のシステムを取る。そのため、室の清浄化後はフィルターをほとんど目詰まりさせることなくシステムを運用することが可能となる。しかし、このときCUSP系においては換気がなされないため、内外境界面の一部にガス交換能力を有する膜(Gas Exchange Membrane：以下GEM)よりなる隔壁を形成し、濃度拡散による室内ガス分子濃度制御(拡散換気)を行う。また、このシステムでは室内と外界が基本的に等圧となる。

2.2 ガス交換ユニット (Gas Exchange Unit : GEU)

拡散換気に際して、前項で述べたGEMを多数枚集積し、各膜面の両側を内気と外気が層状に流れるようにした一体物(Gas Exchange Unit : 以下GEU)を用いることも有効である。GEUにおける外気と内気は、互いに交じり合わないよう、通気スペースの異なる層を通過しており、その構造イメージを図3に示す。

本研究にて述べる拡散換気の性能検証では、すべての実験において図2に示すGEUを使用した。当該GEUにおけるGEMとして、障子紙に近い性能を持つ不織布を使用している。石橋ら¹⁾の研究より、当該膜における酸

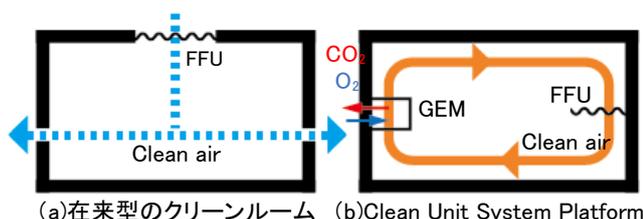


図1 清浄空間の実現手法



図2 GEU外観

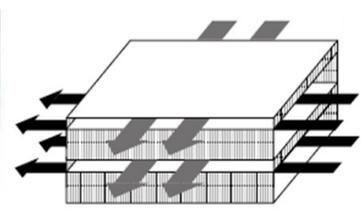


図3 通気経路イメージ図

素分子・二酸化炭素分子の実効拡散定数は各々約 $1.1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 、約 $0.94 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ とされる。

3. 室内清浄度検証実験

3.1 実験手法

システムの性能を検証するため、GEUと室に見立てた冷蔵庫をフレキシブルダクトで接続し、室内清浄度に関する実験を行う。実験装置の概略を図4に示す。以下、便宜上、室に見立てた冷蔵庫を検証室、検証室や実験機器を設置している部屋を実験室と表す。

検証室内の幅と奥行きは1500mm、高さは2100mmである。寸法を図5に示す。検証室内に、FFUの役割を果たす家庭用空気清浄機(12畳用、運転風量 $1.7 \text{m}^3/\text{min}$)とパーティクルカウンターを設置した。GEUに対して、給気側2か所に風量計、排気側2か所に送風機を設置した。パーティクルカウンターでは各粒径(0.3、0.5、 $1.0 \mu\text{m}$)を上限として、空気中の塵埃等微粒子の個数をカウントする。風量を変えて5回の測定を行った(10、15、20、25、 $30 \text{m}^3/\text{h}$)。測定時間は1分間隔で120分、カウント個数の単位は個/ ft^3 とした。

3.2 測定結果

まず、密閉されていない検証室内における測定結果は図6のようになった。縦軸は粒子数を対数で取り、横軸は経過時間を表している。測定開始から5分程度は粒子数が低下したが、それ以降はあまり変化しなかった。続いて、拡散換気を利用して測定した結果のうち、代表して風量 $20 \text{m}^3/\text{h}$ の場合を図7に示す。全ての風量において、測定開始後すぐに室内の粒子数が低下した。測定開始から30分ほど経過した段階で数値が安定し、その後終了まで大きな変化は見られなかった。また、粒径が大き

いほど、空気中の粒子数は少なくなり、 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ を上限とした粒子数ではしばしば個数が0となった。

各風量と粒径において、60分以降の粒子数について平均値・最大値・最小値を示したものを図8に示す。どの粒径においても、風量が大きくなると測定される粒子数も多くなる傾向がみられた。これは、風量が高くなることで検証室内または実験機器から離脱した粒子が飛散しやすくなるためだと考えられる。風量に応じて室内の清浄度に多少のばらつきは見られるが、風量 $20 \text{m}^3/\text{h}$ 以下では米国連邦規格における清浄度クラス100を達成しており、検証室内はクリーンルームとしての運用が可能なレベルであると判断できる。室内の粒子数が比較的多くなる $30 \text{m}^3/\text{h}$ においても、 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子数は最大でも200程度であり、十分な性能を達成していると言える。

4. 換気性能検証実験

本システムでは、室内と室外で気体のやりとりが行われないため、室内の換気について換気量や換気回数といった在来的な評価手法を用いることができない。そのため、本章ではGEUを用いた拡散換気の性能検証を行い、今後の拡散換気運用における指針とする。

4.1 ガス交換性能の検証

4.1.1 実験手法

前章と同様の実験装置を用いて、ガス交換性能を検証する実験を行う。検証室内に、空気清浄機とガス攪拌用のファンを設置した。また、炭酸ガスを流入させるため、天井部に8本のチューブを設置した。マスフローメーターを用いて炭酸ガスの流量を制御し、GEUの各接続口(A-D部)で二酸化炭素濃度を測定した。図4にも示しているが、当システムではC部から流入した検証室内気と

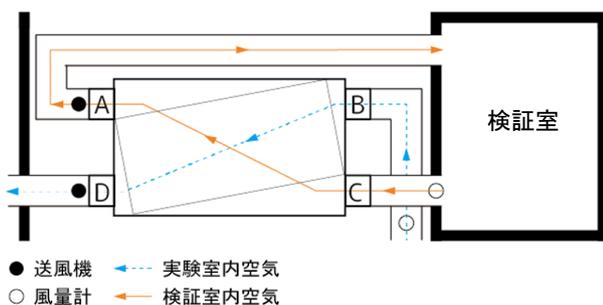


図4 実験装置模式図

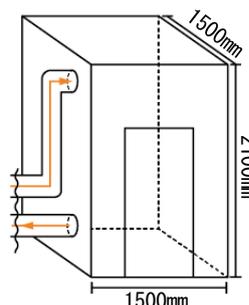


図5 検証室模式図

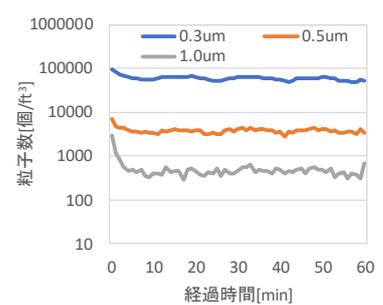


図6 通常時粒子数

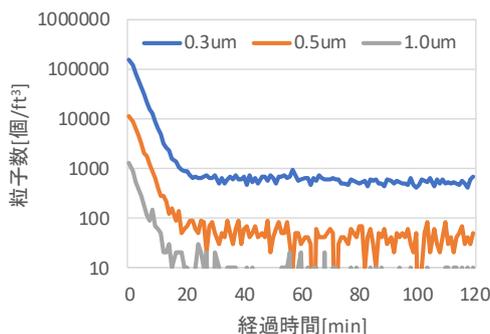


図7 拡散換気利用時粒子数 (風量 $20 \text{m}^3/\text{h}$)

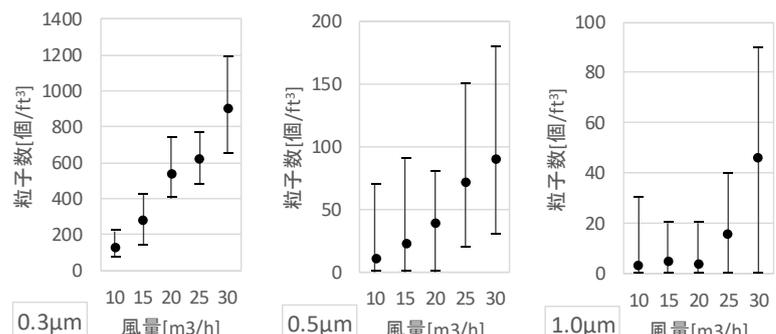


図8 60分以降の粒子数

B部から流入した実験室内空気が物質交換を行う。その後、検証室内の空気はA部を通過し給気として検証室内に戻り、実験室内の空気はD部を通じて外部に排出される。流入させる炭酸ガス濃度は3通り(0.075、0.100、0.125L/min)、風量は5通り(10、15、20、25、30m³/h)を設定し、計15通りの条件下で実験を行った。二酸化炭素濃度の値が定常となるまで1分間隔で測定を行い、150分までのデータを示す。

4. 1. 2 検証と評価

GEUを用いた換気について、ガス交換効率を評価する。通常、換気に際する必要換気量は、室内と屋外のガス濃度を用いて(1)式のように表すことができる。そのため、GEUを用いた拡散換気も同様に、必要換気量 Q_g を(2)式で表した。それぞれ Q_n 、 Q_g の値の比を取り、通常の換気方式を用いた場合の必要換気量を1として、拡散換気の場合の必要換気量の値を(3)式で表すことができる。以下、これを換気効率比と表す。

$$Q_n = \frac{K_c}{C_i - C_0} = \frac{K_c}{C_c - C_B} \quad (1)$$

$$Q_g = \frac{K_c}{C_i - C_{SA}} = \frac{K_c}{C_c - C_A} \quad (2)$$

$$\frac{Q_g}{Q_n} = \frac{C_c - C_B}{C_c - C_A} \quad (3)$$

4. 1. 3 結果

上式に基づき算出した換気効率比を図9に示す。測定値より、十分に数値が安定すると判断した開始50分以降の平均を値として用いている。換気効率比は炭酸ガスの流量に関わらず、風量に応じた変化を示した。値は1.6から3.2の間で推移しており、風量が小さくなるほど効率が向上していることがわかる。風量の変化はGEU内の気流速度の変化に繋がり、GEU内に検証室内気が留まる時間が長いほど拡散による物質交換が行われやすいためと考えられる。

4. 2 熱交換性能の検証

4. 2. 1 実験手法

同様の実験装置を用いて、熱交換性能に関する性能実験を行う。検証室内に、空気清浄機、ファン、発熱用の電気ヒーター、加湿器を設置する。また、GEU本体を厚さ50mmの発泡ポリスチレンで被覆し、GEU自体からの熱損失はないとみなした。検証室内で電気ヒーターによる発熱を行い、GEUの各接続口で温度と湿度を測定した。電気ヒーターと変圧器を接続して電圧を制御し、出力の発熱量を調整した。検証室内では加湿も同時に行い、全熱交換性能を測定した。加湿は実験室湿度より20%以上高い値になることを目安とした。電気ヒーターの発熱量は3通り(100、200、300W)、風量は5通り(10、15、20、25、30m³/h)を設定した。測定時間は1分間隔で

4時間とした。

4. 2. 2 検証と評価

一般的に、熱交換器などにおける顕熱交換効率は(4)式で評価され、本実験においても同式を用いる。熱交換器とGEUは非常に似た構造であると言えるが、熱交換器では室外空気を温めて室内に給気するのに対し、拡散換気では室内空気をそのまま室内に還気する。そのため、本実験においては、温度交換効率の値が高いことは、室内空気がGEUを通過する際の熱損失がより少ないことを表している。

$$\eta_t = \frac{t_0 - t_{SA}}{t_0 - t_{RA}} = \frac{t_B - t_A}{t_B - t_C} \quad (4)$$

また、換気による熱損失は一般的に(5)式で評価される。そのため、今回の膜交換における熱損失を(6)式で表すことができる。

$$Q_{\text{換気}} = cpv(t_{SA} - t_0) = cpv\eta_t(t_{RA} - t_0) \quad (5)$$

$$Q_g = cpv(t_{RA} - t_{SA}) = KA(t_{RA} - t_{SA}) \quad (6)$$

(6)式におけるKAはGEUの総合熱貫流率[W/K]となり、風量による値の変化を見る。同様に、全熱交換に関する効率を求める。計算に使用するエンタルピーの値は、測定した温度・湿度から算出した。顕熱と同様に、全熱に関する交換効率は(7)式で表せる。

$$\eta_h = \frac{h_0 - h_{SA}}{h_0 - h_{RA}} = \frac{h_B - h_A}{h_B - h_C} \quad (7)$$

4. 2. 3 結果

顕熱交換効率・全熱交換効率の値を表したものをそれぞれ図10・11に示す。十分に数値が安定している区間として、200分以降の区間で平均を取り、代表値とした。どちらの効率についても、多少のばらつきはあるが、検証室内発熱量に関わらず風量に応じて変化を示している。また、200W以上の値に比べて100Wの測定結果にはばらつきが目立つ。これは、100Wの場合では室内発熱量が小さく、検証室内温度が実験室と比較して2~4℃程度しか上昇しないことが原因と考えられる。

また、総合熱貫流率KAをGEUの膜面積で除した値を図12に示す。こちらも同様に100Wにおける値のばらつきはあるが、どの結果においても室内発熱量に関わらず風量に応じて変化を示している。

5. クリーンルーム運用について

実際にクリーンルームを運用する場合、空調による高額なランニングコストが導入への障壁となることは多い。その要因として、清浄度を維持するための換気回数の増加やフィルターによる圧力損失などが挙げられる。本項では、換気回数を目安やフィルターの性能について表1・2のように仮定し、その運用コストについて簡易的に概算を行う。ここでは、高性能フィルター使用時の送風機動力Eを(8)式を用いて求める。

$$E = \frac{P_t Q}{\eta_f} \tag{8}$$

上式に基づき運用コストを計算した結果のパターンを表3に示す。送風機総合効率 η_f を0.4と仮定したとき、面積20m²、高さ3mかつ清浄度1,000を目標とした室における送風機動力を求めると、その値は約1.6kWとなり、運用コストは約35万円/年(5703円/m³年)となった。送風機動力は室容積と換気回数の値に基づいて決まるため、図13のように表せる。加えて、ここで求めた送風機動力は、そのままクリーンルーム内の冷房負荷となるため、調温設備として冷凍機等の設置・運用も必要になる。SCOPを3と仮定した冷凍機を設置した場合の年間運用コストとして、図14に示す。

一方で、CUSP系の運用においては、室内外が等圧となり、フィルターを室内外の界面に設置することによる圧力損失が生じないこと、またそもそもFFUとして家庭用程度の空気清浄機が利用可能なことにより、これらのコストをほぼ無視した通常の空調方式とほとんど変わらない形での運用が可能となる。

6. 総括

(1)CUSP系における拡散換気システムを用いた清浄環境の実現は、室内清浄度の観点から見て十分に実用に耐えうると判断できる。また、運用コスト削減という点においても、非常に有用な手法と言える。

(2)換気性能について実測値を見ると、現段階でも運用は可能だが、ガス交換と熱交換において最適な風量の値が逆転しているなどの点もあり、今後GEU自体にもさらに改善の余地があると考えられる。

(3)今後、詳細なモデル等を作成し、実用に近い条件で計算を行うことで、より効率的な拡散換気システムの運用手法を導くことができると考えられる。

【謝辞】

本研究の一部は科学研究費助成事業、基盤研究(B)(課題番号:18H01591)による。

【参考文献】

- 1)石橋晃ら:孤立・閉鎖系環境クリーンユニットシステムプラットフォーム,第35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,pp35-41
- 2)石橋晃ら:空気清浄技術「CUSP」<新型太陽電池作製プラットフォームから居住空間応用展開まで>,建築設備と配管工事2015年2月号,pp66-73

【記号表】

Q_h	通常換気時必要換気量[m ³ /h]	Q_{ge}	GEU使用時必要換気量[m ³ /h]
K_c	二酸化炭素発生量[m ³ /h]	G_i	検証室内ガス濃度[-]
C_0	屋外(実験室内)ガス濃度[-]	C_{SA}	検証室給気ガス濃度[-]
C_{A-D}	GEU各部測定ガス濃度[-]	η_r	温度交換効率[-]
t_0	屋外(実験室内)温度[°C]	t_{SA}	検証室給気温度[°C]
t_{RA}	検証室還気温度[°C]	t_{A-D}	GEU各部測定温度[°C]
c	空気比熱[kgK]	ρ	空気比重[kg/m ³]
V	換気量[m ³ /h]	A	膜面積[m ²]
η_h	全熱交換効率[-]	h_0	屋外(実験室内)エンタルピー[°C]
h_{SA}	検証室給気エンタルピー[°C]	h_{RA}	検証室還気エンタルピー[°C]
h_{A-D}	GEU各部測定エンタルピー[°C]	E	送風機動力[W]
P_f	圧力損失[Pa]	Q	風量[m ³ /sec]
η_f	送風機総合効率[-]		

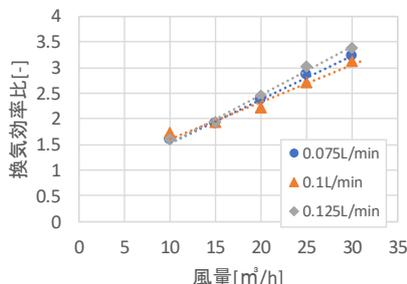


図9 換気効率比

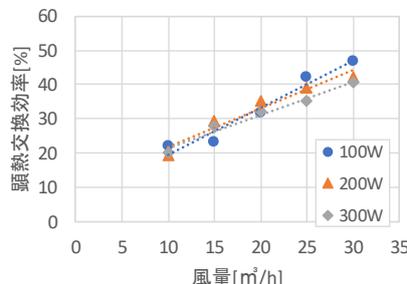


図10 顕熱交換効率

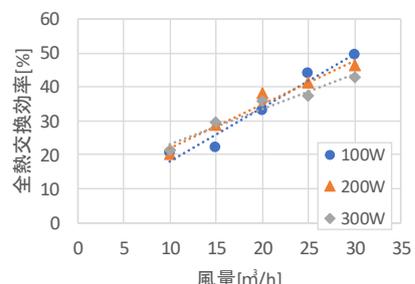


図11 全熱交換効率

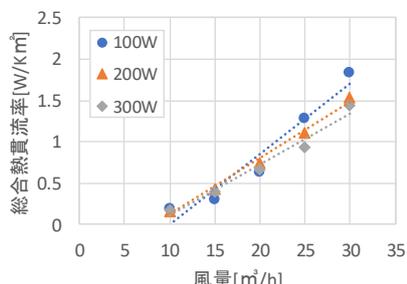


図12 総合熱貫流率

表1 清浄度維持の換気回数目安

清浄度	換気回数[回/h]	USA209E規格[回/h]	平均気流速度[m/sec]
クラス100,000	20~30	20	0.005~0.041
クラス10,000	30~70	75	0.051~0.076
クラス1,000	100~200	150	0.127~0.203
クラス100	200~600	250~400	0.203~0.408

表2 高性能フィルタ性能例

奥行寸法[mm]	風速[m/s]	初期圧力損失[Pa]	捕集効率[%]	対象粒径[μm]
68	1.24	250	99.99	0.3

表3 運用コスト概算結果

室容積[m ³]	60 (20m ² ×3m)	60 (20m ² ×3m)	300 (100m ² ×3m)
目標清浄度[-]	1,000	100	1,000
換気回数目安[回/h]	150	300	150
換気量[m ³ /h]	9000	18000	45000
送風機動力[kW]	1.6	3.1	7.8
電気料金[円/年]	350,400	678,900	1,710,938

※電気料金は25円/kWh、年間8760時間運転した場合を仮定

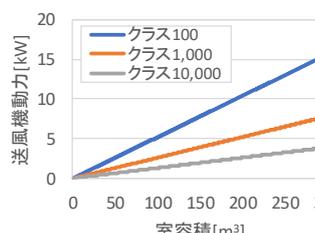


図13 送風機動力

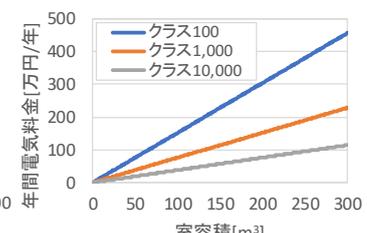


図14 年間電気料金(冷房負荷込)