



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Factors Affecting the Quality of Life Based on a Closed Air-flow System [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	周, 子凌
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16189号
Issue Date	2024-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94058
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ziling_Zhou_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 周 子 凌

学 位 論 文 題 名

Study on Factors Affecting the Quality of Life Based on a Closed Air-flow System
(クローズドエアフローシステムに基づく生活の質に作用する要因に関する研究)

本研究は、閉鎖空間におけるクリーンユニットシステムプラットフォーム（CUSP）の理論解析および実験的検証を通じて、空気中の微粒子やガス分子の管理に関する物理的メカニズムを説明することを目的とする。CUSP は、従来の開放型空気清浄システムに代わり、完全な閉鎖系を採用し、外部環境からの汚染物質を排除しながら、室内空気を再循環させることで清浄度を向上させることができる。このシステムの物理的特性は、空気流動、ガス拡散、フィードバック制御といった基本的な物理法則に基づいて設計されている。

まず、CUSP の基本的な物理メカニズムは、空気中の微粒子や微生物の密度を時間の経過とともに指数関数的に減少させるフィードバック制御を含んでいる。従来の開放型空気清浄システムでは、外部から新しい空気を取り込む際に外部の微粒子や汚染物質も同時に侵入してしまうため、完全な清浄状態を維持することが難しかった。それに対して、CUSP では閉鎖系を構築し、内部空間の空気のみを循環させることで、外部からの汚染物質の侵入を防ぎ、室内の微粒子数を段階的に減少させる。このプロセスは、粒子密度の時間発展を記述する微分方程式を用いて解析されており、空間の容積とフィルタユニットの空気流量に依存する時間定数によって制御される。

具体的には、理論モデルでは、粒子密度 $n(t)$ が時間とともに指数関数的に減少し、最終的に清浄度が ISO クラス 4 (US FED STD 209E Class 10) に到達することが示された。この減少過程は、室内空気の再循環により実現され、粒子数が最初の $1/10$ に減少するまでの時間は約 10 分と計算されている。また、このフィードバック制御の際には、粒子フィルタの効率 γ も重要な要素となり、フィルタが空気中の粒子を効果的に捕集する能力を持つ限り、閉鎖系の内部では微粒子数が時間とともに大幅に減少する。

T-CUSP（テント型クリーンユニットシステム）を使用し、微粒子除去能力を検証した。FFU（ファンフィルタユニット）を使用して室内の空気を再循環させ、約 10 分間で微粒子数が $1/10$ に減少することが確認された。さらに、PM0.3、PM1、PM2.5 のような異なる粒子サイズにおいても同様の減少傾向が観察され、CUSP システムが幅広い粒子サイズに対応できることが実証された。特に、SARS-CoV-2 などのウイルス粒子のサイズ範囲においても高い除去効率が確認され、感染症対策としての有効性が示された。

次に、ガス交換システムの物理的プロセスについても理論解析を行った。CUSP では、機械的な換気システムに代わり、ガス交換膜（GEM）を使用して分子拡散によるガス交換を実現している。このプロセスは Fick の拡散法則に基づいており、膜の厚さ L 、表面積 A 、および拡散係数 D に依存する拡散速度によって制御される。理論的には、室内の酸素濃度や二酸化炭素濃度の

時間変化を記述する微分方程式を導出し、ガス交換膜を通じたガス分子の拡散速度が計算された。特に、酸素分子の拡散係数が実験的に評価され、ガス交換膜を通じた酸素の輸送速度が従来の機械換気システムに匹敵することが確認された。

応用については、ナップボックスと呼ばれる小型の CUSP ユニットを用いて、室内のガス濃度変動と睡眠評価を行った。ナップボックス内では、分子拡散によるガス交換が行われ、二酸化炭素濃度と酸素濃度が安定した範囲に保たれた。この実験では、被験者がナップボックス内で睡眠を取る際の空気質の変動が測定され、特に二酸化炭素濃度の低下が深い睡眠に関連していることが示された。また、空気中の微粒子数の減少も睡眠の質に影響を与え、清浄な環境が身体的および精神的な回復を促進することが確認された。

CUSP はまた、従来の開放型システムに比べてエネルギー効率が低い点でも優れている。従来の機械換気システムでは、外部から新鮮な空気を取り込むためにエネルギー消費が大きく、そのため空気の加熱や冷却も必要とされる。それに対して、CUSP では閉鎖系の空間内で空気を再循環させ、ガス交換を分子拡散により行うことで、エネルギー消費を大幅に削減することができる。実験的にも、FFU の消費電力とガス交換膜の効率を比較し、従来のシステムに比べて消費エネルギーが大幅に低減されることが示された。

今後の研究においては、CUSP のさらなる最適化が求められる。特に、ガス交換膜の材質や構造を改良することで、より高効率なガス交換を実現し、システム全体の性能を向上させることが可能である。また、CUSP の応用範囲を拡大し、医療分野だけでなく、日常生活や産業分野での利用も視野に入れた開発が進められるべきである。閉鎖空間における物理的プロセスの解明と応用は、今後の空気質管理技術において重要な役割を果たすことが期待される。

本研究の成果は、閉鎖空間における空気質の管理およびガス交換の物理的メカニズムに関する新たな知見を提供し、特に感染症対策や清浄空間の構築において実用的な応用が可能であることを示した。CUSP は、物理法則に基づく高度な制御技術を通じて、エネルギー効率と清浄度の両立を実現しており、今後の空気質管理技術の発展に寄与することが期待される。