

低層型温度成層空調システムの開発

金井 泰人 滝澤 勇輝

概 要

工場では、外気流入や内部発熱の影響により夏季の暑熱環境が問題となっている。本研究では、作業領域のみを効率的に冷却する部分空調方式として、低層型温度成層空調システムを開発した。本システムは、ローパーティションで区画した空間へ床面付近から冷気を供給して低温層を形成するとともに、ファンにより冷気を作業域へ搬送することを特徴とする。実験の結果、10m×20mの区画空間において、低層部の空気温度を空調領域外と比較して約10℃低減できることを示した。また、ファンの活用により作業員周辺の約4 m×1.5mの範囲において、標準新有効温度（SET*）を平均約5℃、最大7.2℃低減できることを確認した。これらの結果から、本システムは低層部に形成した冷気を効率的に利用することで、作業空間全体では足元付近の冷却を行いながら、作業員周辺の温熱快適性を向上できる部分空調方式として有効であることを示した。

Development of a Low-Level Stratified Air Conditioning System

Abstract

In factories, factors such as outdoor air infiltration and internal heat generation—poses a significant issue in the hot environment during summer. In this study, we developed a low-level stratified air-conditioning system as a form of localized air conditioning designed to efficiently cool the work area only. This system is characterized by supplying cool air near floor level into a space divided by low partitions to create a cool air layer, while simultaneously using fans to transport that cool air to specific work zones. Experimental results demonstrated that, within a 10 m × 20 m partitioned space, the air temperature in the lower zone could be reduced by approximately 10 °C compared to the area outside the air-conditioned zone. Furthermore, the use of fans was confirmed to reduce the Standard New Effective Temperature (SET*) by an average of approximately 5°C—and up to 7.2°C—within a 4 m × 1.5 m area surrounding the worker. These results indicate that the system is an effective localized air-conditioning method; by efficiently utilizing the cool air layer formed at low levels, it cools the area near the feet while simultaneously improving thermal comfort for the worker.

キーワード：温度成層空調、部分空調、大空間、生産
施設、省エネルギー、温熱快適性

§1. はじめに

近年、製造現場における暑熱環境の改善は、作業者の安全確保および生産性維持の観点から重要性を増している。多くの工場では、シャッター開放による外気流入、高発熱設備による内部発熱、汚染物質排気に伴う大量換気が同時に生じることで、夏季には深刻な高温環境が形成される。しかし、建屋全体を空調するには大規模な設備投資に加え、断熱・遮熱改修が必要となるため、費用対効果の面から導入が困難な場合が多い。

従来の暑熱対策として広く用いられてきたスポット空調は、吹出し近傍では冷却効果が得られるものの、作業者が移動すると効果が低下するため、広い作業動線を有する工場では十分な温熱環境の維持が難しい。また、建屋全体を空調する方式では、内部発熱や外乱気流によって冷気が攪拌されやすく、作業域に冷気が滞留しにくいことに加え、空調負荷の増大によるエネルギー消費の増加が課題となる。

このような背景から、工場における広範囲作業域の温熱環境改善には、外乱の影響を受けにくく、必要な領域のみを効率的に冷却できる新たな部分空調方式が求められている。そこで、作業領域のみを効率的に冷却する部分空調方式として、低層型温度成層空調システムを開発した。

本システムは、ローパーティションにより作業領域を区画し、床面近傍への冷気供給によって高さ約1m程度までの低温層を形成するとともに、作業者近傍に設置したファンにより低温層の冷気を作業域へ搬送することを特徴とする。これにより、人が存在しない領域では足元付近のみを冷却しつつ、作業者周辺のみ頭部高さ付近まで冷却する効率的な部分空調を実現す



図1 システム構成写真

る。

本報では、フジタ技術センター・1Fヤードに構築した実験システムを対象として、低層温度成層の形成性能および作業域における温熱快適性改善効果を評価し、本システムの有効性を検証した。

§2. システム概要

本研究で構築した低層型温度成層空調システムの写真を図1に示す。実験空間は10m×20mの範囲を対象とし、その外周を高さ約1.5mのローパーティションで囲った。パーティション内部の対角位置に2台の空調機を配置し、各空調機からφ550mmのフレキシブルダクトを用いて冷気を供給した。吹出し口は床面に配置し、冷気を水平方向へ吹出す構成とした。

本システムでは、床面近傍に冷気を供給することで、低層部に冷気層を形成する構成とした。また、ローパーティションにより作業領域を区画することで、外乱気流の影響を抑制するとともに、冷気の流出を低減した。

使用した空調機の定格冷房能力は25.0kW、風量は80m³/minである(図2、表1)。区画空間全体に低温層を形成するための冷気供給源として使用した。さらに、パーティション内部には産業用ファン(図3)を配置し、床面付近に形成された低温層の冷気を作業域高さまで搬送する構成とした。これにより、作業者周辺では頭部高さ付近まで冷気を到達させることが可能となる。

以上の構成により、本システムは低層部に形成した冷気層とファンによる吹上げ気流を組み合わせ、作業空間全体では足元付近の冷却を行いながら、作業者周辺では頭部高さまでの冷却を実現する部分空調システムとして構築した。



図2 空調機外形



図3 産業用ファン

表1 空調機仕様

定格冷房標準能力	kW	25.0
定格冷房標準消費電力	kW	8.24
冷房運転電流	A	25.9
冷房運転力率	%	92%
SHF	-	0.82
風量	m³/min	80
		(機外静圧0Pa時130)

§3. 温度性状の検証

3.1 温度性状の実験概要

本実験では、低層型温度成層空調システムによる低層温度成層の形成状況および冷気の水平拡散特性を把握し、本システムによる広範囲冷却の有効性を評価することを目的として、フジタ技術センター・1Fヤード内に構築した試験区画において温度計測を実施した。空調機は計測開始約5時間前から運転し、空間温度が概ね定常状態に達した後に移動測定を行った。計測位置を図4、計測条件を表2に示す。

温度計測にはT&D製RTR500Bシリーズを用い、鉛直方向は床面から2.0mまでを0.25m間隔で設定した。(床面(FL+0m)は表面温度ではなく床近傍の空気温度を示す。)また、平面方向には2m間隔で測定点を配置し、空間温度分布を測定した。

評価項目は、①鉛直方向の温度分布による低層温度成層の形成状況、②空調領域内外の温度差による冷却効果、③平面温度分布による冷気の水平拡散特性とした。これらの計測結果から、本システムによる低層温度成層の形成性能および広範囲冷却の有効性を評価した。

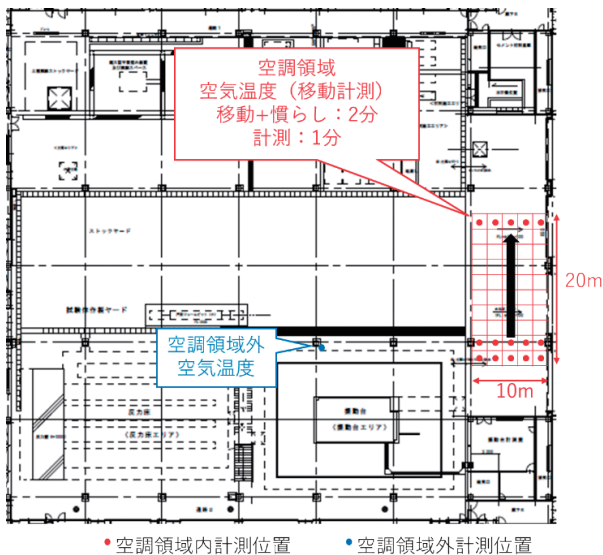


図4 温度性状の実験の計測位置

表2 温度性状の実験概要

実験場所	技術センター・ヤード内
実験日時	2025年9月12日 15:25~15:55
計測項目	空気温度（移動計測）
計測機器	株式会社 T&D 製 RTR500B シリーズ
計測高さ	0.00 m ~ 2.00 m (0.25 m間隔、計9点)
計測位置（平面）	2 m × 2 m の格子状に50点 (5 × 10) 配置
測定点総数	平面 50 点 × 高さ 9 点 = 450 点

3.2 温度性状の実験結果

図5に鉛直方向の温度分布を示す。平均値は各高さにおける50測定点の平均温度を表す。FL+0~0.5mの低層部では、空調領域外と比較して10℃以上の温度低下が見られた。さらに、空調吹出し近傍の直接冷気が流入する位置では最大約11℃の温度低下が確認された。一方、空調の影響が比較的小さい中央部においても8℃以上の温度低下が見られた。また、FL+0.75m付近から温度が急激に上昇しており、低層部とその上部との間に明瞭な温度成層が形成されていることが示された。

図6に空調領域外との温度差による平面温度分布を示す。FL+0mでは、吹出し口近傍で10℃以上の温度低下が見られたほか、中央部においても8℃以上の温度低下が確認され、冷気が区画空間全体へ広がっていることが示された。また、FL+1.25mでは空調に対向するパーティション近傍において、中心部よりも大きな温度低下が確認された。このことから、床面付近を

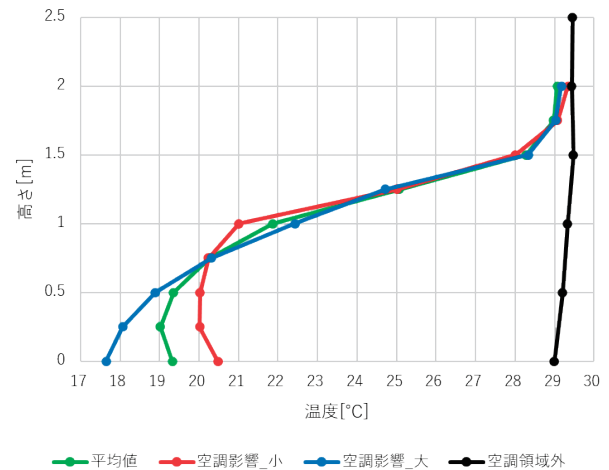


図5 温度性状の実験の上下温度分布

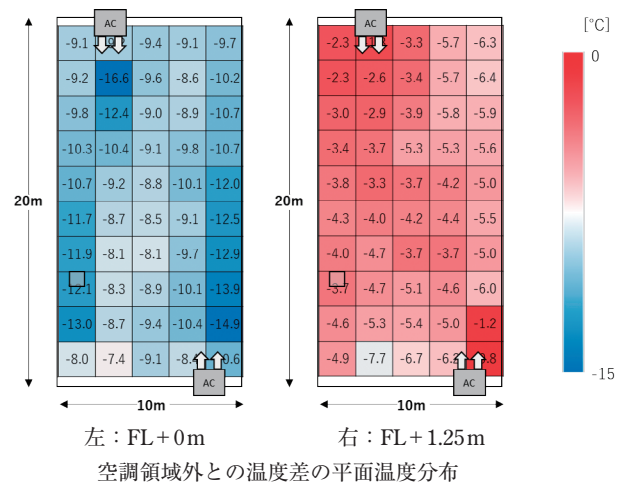


図6 温度性状の実験

水平方向に移動した冷気が対向するパーティションに衝突し、その一部が鉛直方向へ上昇したものと考えられる。

以上より、本システムは10m×20mの区画空間において低層温度成層を形成し、低層部の空気温度を空調領域外と比較して約10℃低減できることを確認した。

§ 4. ファン使用時の快適性向上効果の検証

4.1 ファン使用時の快適性向上効果の実験概要

本実験では、低層型温度成層空調システムによって形成された低温層の冷気を産業用ファンにより作業域高さまで搬送した際の温熱快適性向上効果を評価することを目的とした。

実験はフジタ技術センター・1Fヤード内の試験区画において実施した。空調機は空気温度を十分に安定化させるため、計測開始約3時間前から運転した。計測位置を図7、計測条件を表3に示す。

計測項目は空気温度、相対湿度、風速およびグローブ温度とした。ファンによる快適性改善効果を評価するため、計測高さは作業者頭部付近を想定したFL+1.5mとし、平面方向には1.0m×0.25m間隔で計60点の測定点を配置した。

温熱快適性の評価にはSET*¹⁾を用いた。SET*は計測値を基に、代謝量1.2met、着衣量0.6cloとして算出した。また、空調領域外についても同様の計測を実施し、快適性向上効果を比較した。

4.2 ファン使用時の快適性向上効果の実験結果

図8～10に、FL+1.5mにおける空気温度、風速お

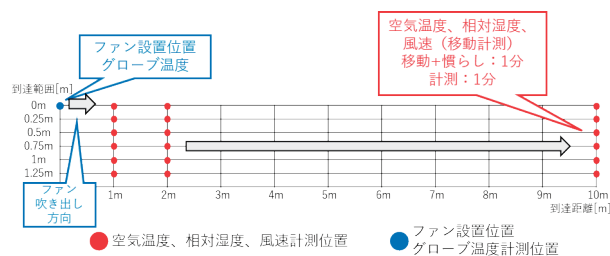


図7 ファン使用時の快適性向上効果の実験計測位置 (FL + 1.5m)

表3 ファン使用時の快適性向上効果の実験概要

実験場所	技術センター・ヤード内
実験日時	2025年9月24日 13:40～14:25
計測項目	移動計測：空気温度、相対湿度、風速 固定計測：グローブ温度
計測機器	株式会社 T&D 製 RTR500B シリーズ
計測高さ	1.5m
計測位置（平面）	1m × 0.25 m の格子状に60点（6 × 10）配置

よびSET*の分布を示す。なお、結果はファン吹出し方向に対して線対称として整理した。空調領域外の環境条件は、空気温度28.1℃、SET*27.9℃であった。一方、ファンが冷気を吸い込む床面付近の温度は19.1℃であり、低層部には十分な低温層が形成されていた。

図8に空気温度分布を示す。ファンによって低層部の冷気が作業域高さまで搬送され、吹出し方向に約7m先まで温度低下が認められた。特にファン近傍では温度低下が顕著であり、概ね4m×1.5mの範囲において空調領域外と比較して約5℃の温度低下が見られた。また、最も効果の大きい位置では空気温度22.5℃となり、空調領域外と比較して5.6℃低下した。

図9に風速分布を示す。空気温度の低下が確認された領域では、風速が0.5～1.7m/sの範囲となっており、平均風速は0.88m/s、最大風速は1.69m/sであった。このことから、低層部に形成された冷気層の冷気がファンによって効率的に作業域へ搬送されていることが示された。

図10にSET*分布を示す。空気温度の低下と風速の増加が認められた領域では、SET*も同様に低下しており、約4m×1.5mの範囲において空調領域外と比較して約5℃程度の低減が見られた。また、最も効果

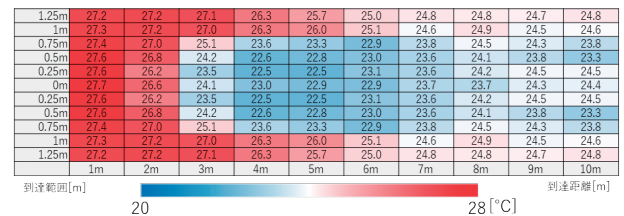


図8 ファン使用時の快適性向上効果の実験 空気温度

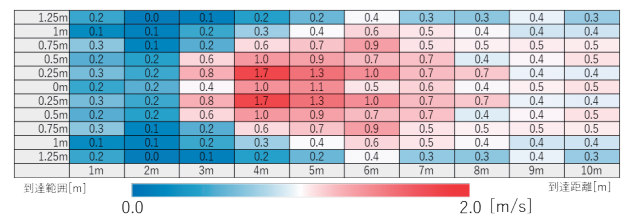


図9 ファン使用時の快適性向上効果の実験 風速

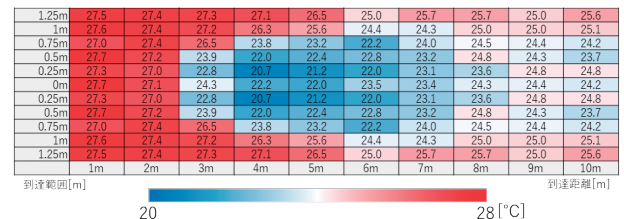


図10 ファン使用時の快適性向上効果の実験 SET*

の大きい位置ではSET*は20.7℃となり、空調領域外と比較して7.2℃低下した。

以上より、低層型温度成層空調システムによって形成した低温層の冷気をファンにより作業域高さまで搬送することで、作業者周辺の約4 m×1.5mの範囲において温熱環境を大きく向上できることが示された。特に、最も効果の高い位置では空気温度が5.6℃、SET*が7.2℃低下しており、低層部に滞留した冷気を有効に利用することで、作業者周辺の温熱快適性を効率的に改善できることが示された。

§5. まとめ

本報告では、低層型温度成層空調システムを構築し、低層温度成層の形成性能およびファンによる温熱快適性向上効果を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ローパーティションによる区画および床面付近への冷気供給により、10m×20mの区画空間において低層温度成層を形成できることを確認した。低層部（FL+0～0.5m）では空調領域外と比較して約10℃の温度低下が見られ、冷気が区画空間全体に広がることを確認した。
- (2) 鉛直温度分布ではFL+0.75m付近から温度が急激に上昇しており、低層部とその上部との間に明瞭な温度成層が形成された。また、平面温度分布から、床面付近を移動した冷気の一部がパーティション近傍で上昇する挙動が確認された。
- (3) 低層部に形成された冷気を産業用ファンによって作業域高さまで搬送することで、約4 m×1.5mの範囲において温熱快適性を向上できることを確認した。最も効果の大きい位置では、空気温度が空調領域外と比較して5.6℃低下し、SET*は7.2℃低減した。

以上より、本システムは低層部に形成した冷気を効率的に利用することで、作業空間全体では足元付近の冷却を行いながら、作業者周辺では温熱快適性を向上できる部分空調方式として有効である可能性が示された。

参 考 文 献

- 1) ASHRAE Fundamentals 2021 CHAPTER 9 Thermal Comfort, 2021

ひとこと

本研究では、低層部に形成した冷気を有効利用する新たな部分空調方式を検証した。今後は実工場での適用を進め、作業環境改善と省エネルギー化の両立に貢献する技術として発展させていきたい。



金井 泰人