

分散ファンによる最適風量制御空調システム「OCTPUS®」の開発

Development of Optimal Controlled Air Supply System with Fan Powered Terminal Unit

下 泰 蔵 飯 嶋 二裕美 大 西 直 紀¹⁾ 小 野 永 吉

要 約

建築物に対して要求される省エネルギー性能はますます高まっており、中でも空調空気搬送設備は建物消費エネルギー全体の13%程度を占める設備として、より高度なシステムの検討が必要である。近年、一般的なオフィスにて導入されている変風量制御（以下、VAV）ユニットを用いた空調システムは、使われ方が不確定な貸室などで広く導入されている一方で、低負荷時や負荷偏在時に給気風量を絞りきれず、エネルギー損失が発生している。そこで、VAV方式に変わる新しい空調空気搬送システムとして、分散配置されたファン付き風量制御装置を用いた最適風量制御空調システム「OCTPUS®」を開発した。本報告では、開発システムの、開発段階におけるシミュレーションでの効果予測について述べる。

目 次

- I. はじめに
- II. 従来 VAV 方式における課題
- III. 開発システム概要
- IV. シミュレーション概要
- V. おわりに

I. はじめに

建築物に対して要求される省エネルギー性能はますます高まっている。中でも空調空気搬送設備は建物消費エネルギー全体の13%程度を占める¹⁾設備として、より高度なシステムの検討が必要である。近年、一般的なオフィスで導入されている変風量制御（以下、VAV）ユニットを用いた空調システムは、使われ方が不確定な貸室などで広く導入されている一方で、低負荷時や負荷偏在時に給気風量が絞りきれず、エネルギー損失が発生している。そこで新しい空気搬送システムとして、分散ファンによる最適風量制御空調システムを開発した。本報では、開発システムの概要ならびに開発段階におけるシミュレーションでの効果予測について述べる。

II. 従来 VAV 方式における課題

1. 空調負荷と空気搬送消費エネルギーの関係

従来の大規模事務所ビルの単一ダクト方式において省エネルギーを意図した空調制御として、VAVユニットを用いた変風量制御が最も一般的である。室内熱負荷に対して、送風量が比例して制御され、空調機の消費電力がその3乗に比例して減少することが理想的である。一方で、実際の運用状態は上記のような理想的な状態ではない事例が見られる。基準階の空調方式を単一ダクト VAV 方式とした某事務所ビルの代表年（2019年）を例として、冷水供給熱量と基準階 AHU のファン消費電力量合計値の発生頻度の関係を Fig.1 に示す。図の濃淡は、発生頻度を示しており、色が濃いほど発生頻度が高い。冷水供給熱量が0.75GJ/h（設計値の30%）以下の低負荷時の発生頻度が大半を占めるが、その際に空調機ファンの消費電力は25~30kWh程度で高止まりしており、変風量制御による省エネルギー効果が見られない。このような事象は一般的にも見られ VAV 方式の課題と認識されている²⁾。

1) 建築設計本部 Architectural Design Division

キーワード : 省エネルギー, 空調システム, 空気搬送, 変風量制御

Keywords : energy efficiency & conservation, air handling system, air supply variable air volume control

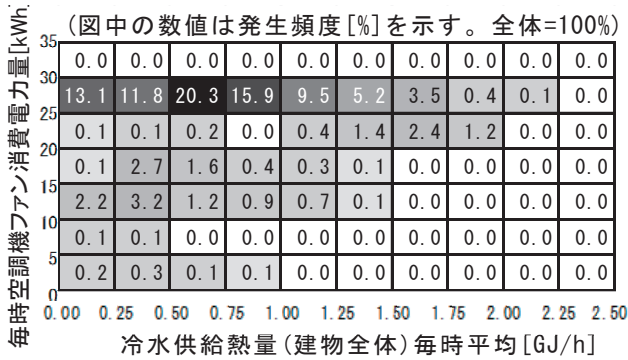


Fig.1 冷水供給熱量と空調機ファン消費電力の関係
(Relationship between Chilled Water Supply Heat Rate and Pneumatic Conveying Energy Consumption)

2. 低負荷時における給気温度制御

VAV方式での室温制御としては、冷房時を例にとると給気温度を低い温度で安定させ、室温と設定温度の偏差により各VAVユニットの給気風量を比例制御するのが理想である。要求風量が下限設定値以下になると供給熱量が過剰になり室温が低下するため「給気温度リセット制御」により給気温度を上昇させることがある。実際に、上記某事務所ビルの階毎の冷房時の空調機ファン消費電力量と給気温度平均値の関係 (Fig.2) のように、消費電力量が大きい、すなわち給気風量が大きい状態でも給気温度が高い状態が多く発生しており、給気温度リセット制御が動作している。これが低・中負荷時における空気搬送エネルギーを高止まりさせている要因と考えられる。このような給気温度が高い状態が継続すると、除湿能力不足による室内湿度の上昇についても懸念される。

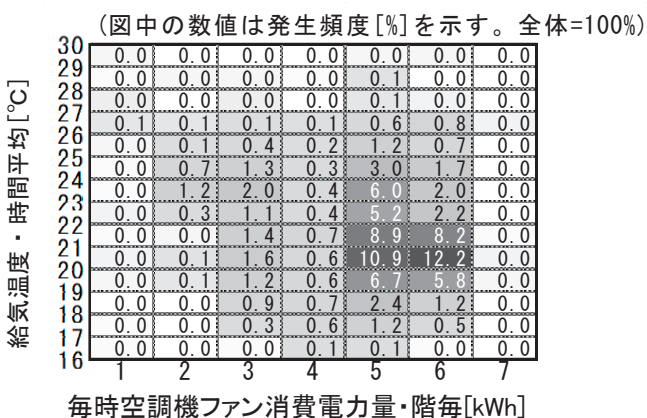


Fig.2 給気温度と空気ファン消費電力の関係 (某ビル実績)
(Relationship between Supply Air Temperature and Air Supply Power)

3. 低・中負荷時の給気温度リセット制御の発生要因

空調機の給気下限風量は、一般的には設計風量の30%と設定されていることが多い。これは、給気ファンモータのインバータ周波数の下限値や、設計風量に対する各VAVユニットの制御などを考慮して設定されている。しかしながら、1.で述べたとおり、年間を通した実運用では負荷が30%以下となる低負荷時の発生頻度が大きいため、低負荷時に給気温度リセット制御が多く発生する。また、一台の空調機系統が、負荷の偏在する複数のVAVゾーンを受け持つため、中負荷時には要求風量が小さいゾーンの室温が設定温度から逸脱しないように給気温度リセット制御が発生し、ほかのゾーンの要求風量を増大させていると考えられる。さらにその際、AHUファンは要求風量が多いゾーンに合わせてシステム全体の必要圧力を負担して給気するため、要求風量が小さいゾーンでは余剰な圧力はVAVユニットのダンパにて減圧することで調整している。そのため、システム全体としては、VAVの減圧分のエネルギーを浪費していることになる。

III. 開発システム概要

前項で述べた従来VAV方式の課題は共通して、要求風量が小さい低負荷ゾーンに対して、小風量領域での制御ができないことが根源的な原因となっている。そこで、低負荷時・負荷偏在時における空調搬送消費エネルギーを削減することを目的として、下記のような空調システムを開発した。

1. 全体システム構成

本開発システムは、空調機(Air Handling Unit, 以下 AHU)とその系統下に分散して設置される複数台のファン付風量制御装置(FPU: Fan Powered Unit)、それらを繋ぐ連携制御システムで構成される(Fig.3)。AHUは国内の大型事務所ビルで汎用的に用いられている10,000[m³/h]程度のコンパクト型AHUを対象とし、1台で500m²程度のオフィスの空調を負担するものを想定した。FPU1台あたりの制御ゾーンは50~100m²程度と想定し、100~1200[m³/h]と幅広い風量範囲の制御に対応できる機器を開発した。

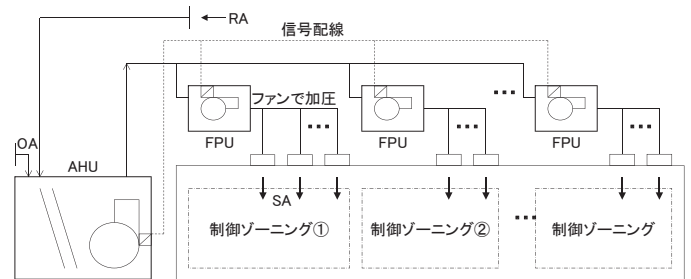


Fig.3 開発システムの概念図
(Conceptual Diagram of the Development System)

2. 静圧分担

本開発システムおよび従来 VAV 方式の AHU ファンから各吹出口までのダクト経路内の圧力分布を吹出口近傍の室内側の圧力を基準として Fig.4 に示す。本開発システムでは、各 FPU ゾーンに共通する必要圧力は AHU ファンで加圧し、不足する圧力を FPU にて極力負担することで、II で述べた従来 VAV 方式のように余剰圧力の減圧をすることなく、各 FPU ゾーンの風量を制御することができ、システム全体としての空気搬送エネルギーを削減することができると考えた。

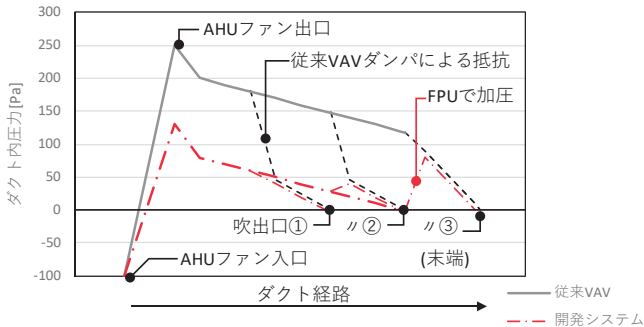


Fig.4 ダクト内圧力分布
(Pressure Distribution in Ducts)

3. 風量制御システム

(1) 基本的な風量制御フロー

開発システムの基本制御フローを Fig.5 に示す。従来 VAV 方式と要求風量の算出過程は同じだが、AHU と FPU がその圧力を分担することが特徴である。

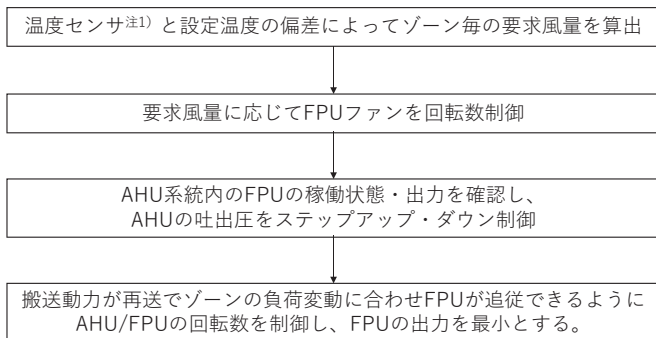


Fig.5 風量制御フロー

(Flowchart of Airflow Control)

注 1) 在室密度検知センサ等の他のセンサと組み合わせることも可能。

(2) 最小風量制御

1 ゾーンでも負荷が 30%以下となるような低負荷時には、システム全体の必要給気風量が低下し、ダクト系統の圧力損失も低減するため、AHU ファンの回転数が小さい領域での制御となり風量が安定しないことが懸念された。そこで、低

負荷時には AHU ファンを停止し、システムの必要全圧を FPU のみで負担する制御方式を開発した。これにより、制御下限風量を設計風量の 5~10%とすることが可能となり、前章で述べた従来 VAV 方式の課題の多くを解決することができる。

IV. シミュレーション概要

本章ではシステム開発時に実施したモデル建物における効果予測について報告する。

1. 解析対象と解析方法

Fig.6 に本計算における建物平面図を示す。首都圏の大規模ビルの事務室 (480m²) を対象とし、風量制御ゾーンing ならびに定格風量を設定した。空調機はインテリア空調機とペリメータ空調機に分かれているものとし、本シミュレーションではインテリア空間のみを再現した。

本計算では、当社開発のエネルギーネットワーク計画ツール ENe-ST (エネスト: Energy Network Simulation Tool) ²⁾ を使用して従来 VAV 方式及び開発したシステムのシミュレーションを行った。ENe-ST は、空調システムの計画支援を行うために開発したツールであり、室モデルと空調制御ロジックを連成することで、空調機・VAV 制御を反映した計算が可能となる。室モデルは、TRNSYS の TYPE56 を使用した。

2. 解析条件

Table 1 に計算にて入力した計算条件を示す。内部発熱は、各ゾーンに照明・機器・人体発熱を Fig.7 に示すスケジュールにて与えた。隙間換気は換気回数を 0.1 回/h 一定として入力している。空調時間は 7:00~21:00 とし、空調運転時間の外気風量は 30m³/(h・人)として人体発熱と同様のスケジュールで与えている。室内温度は季節でそれぞれ設定を分けて与えており、各ゾーンに VAV ユニットの定格風量を設定している。ゾーン毎の運転スケジュール、単位面積当たりの負荷は同じものとして与えている。対象空間をインテリア空間のみとしているため、結果として冬期においても冷房負荷が発生している。このため、空調機仕様は冷却能力のみを記載している。

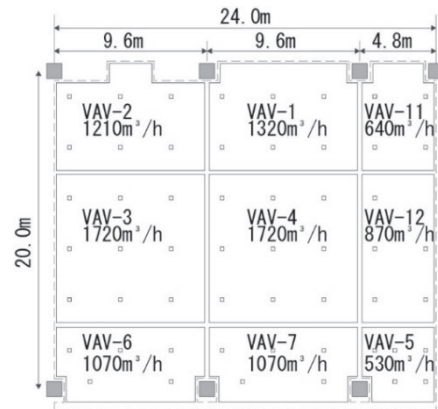


Fig.6 対象空間・VAV ゾーンing
(Target Space and VAV Zoning)

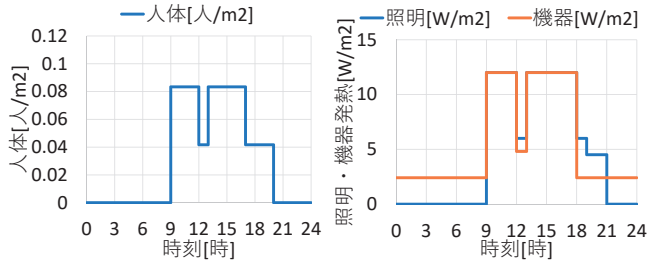


Fig.7 内部発熱スケジュール
(Internal Heating Schedule)

Table 1 計算条件
(Calculation Conditions)

計算期間	年間
計算間隔	1分
気象条件	拡張 AMeDAS データ 標準年 東京 1991-2000年
設定室温	夏期 26℃ 中間期 24℃ 冬期 22℃
空調機仕様	10,150m ³ /h (外気 2,600m ³ /h) コイル冷却能力 68.1kW 給気下限温度 14℃

3. 検討ケース

Table 2 に本計算の検討ケースを示す。本計算では、開発システムの導入効果として、一般的に定格風量の 30%と設定されている空調機ならびに VAV ユニットの下限風量を引き下げ、さらに下限風量相当での運転時間を極力長くするために、給気温度を低く設定することが可能な給気温度リセットロジックを考案し、設定した。

4. 給気温度リセット概要

Fig.8 に本計算における風量制御と VAV・FPU ステータスを示す。本計算では、VAV 及び FPU の風量帯を 4 つのステータスに分類した (Table 3)。冷房を例に挙げると、設定室温に対して過剰に冷房した状態 (設定室温 > 室温の時) の冷房過剰、室温が設定に対して高く最大風量で給気をしている冷房不足、下限風量と定格風量の間を適正冷房、冷房適正化と設定した。適正冷房と冷房適正化は Table 2 にて設定した境界風量を基準に判断している。

各 VAV・FPU は風量制御の結果、4 つのいずれかのステータスを持ち、すべての VAV・FPU ステータスを集計し、空調機としてのトータルステータスを判断し、給気温度の変更を行う (Table 4)。開発システムの場合、下限風量、境界風量の引き下げのほか、トータルステータスの判定基準ならびに給気温度リセット基準を変更することで、給気温度を低く維持するロジックとした。

Table 2 検討ケースと制御概要
(List of Case Study)

風量制御方法	下限風量	境界風量	給気温度ロジック
従来 VAV	30%	60%	従来制御
FPU	10%	30%	給気温度低め制御

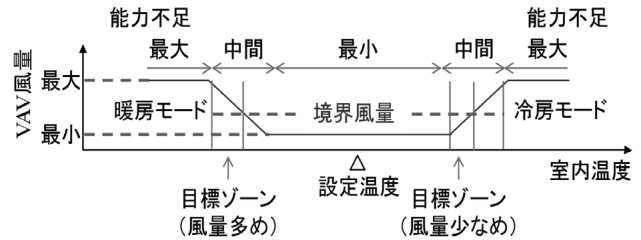


Fig.8 風量制御における VAV/FPU ステータス
(VAV/FPU Status in Airflow Control)

Table 3 VAV/FPU ステータス (冷房の場合)
(VAV/FPU Status)

給気風量の状態	VAV・FPU ステータス
最小風量=給気風量	冷房過剰
最小風量 < 給気風量 < 境界風量	適正冷房
境界風量 ≤ 給気風量 < 最大風量	冷房適正化
最大風量=給気風量	冷房不足

Table 4 トータルステータス (例)
(Total Status)

トータルステータス	給気温度リセット
冷房不足	給気温度引き下げ
冷房適正化	給気温度引き下げ
適正冷房	給気温度維持
最小風量	給気温度引き上げ
冷房過剰	給気温度引き上げ

5. ファン電力計算手順及び方法

本節では、今回の計算にて用いた空調機ならびに FPU ファンの消費電力の計算手順を示す。各機器の電力は以下のように計算する。

- VAV・FPU の設計風量ならびに設定したダクト経路に基づき、各ダクトの抵抗係数を設定する。
- 設定した抵抗係数をもとにシミュレーションによって得られた各 VAV・FPU の給気風量を入力条件に各 VAV、FPU が要求する静圧を計算する。このとき VAV 以降の定格時の静圧は 100Pa 一定として与える。
- 従来 VAV 方式の場合は、各ダクト径路のうち最大静圧のものを AHU の負担静圧とする (Fig.9, 式(1))。

- ・開発システムの場合, AHU は最も負担静圧の小さい FPU の静圧がゼロになるように静圧を負担する。(式(2)(3)).
- ・メーカー提供の運転データよりファン電力を算出する。

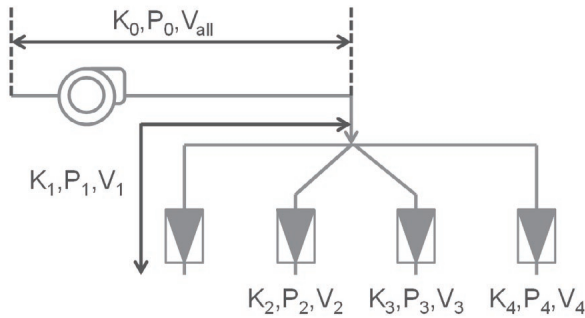


Fig. 9 静圧計算イメージ

(Image of Static Pressure Calculation)

従来 VAV 方式の場合

$$\Delta P = K_0 V_{all}^2 + \max\{K_1 V_1^2, K_2 V_2^2, \dots, K_n V_n^2\} \quad \dots(1)$$

開発システムの場合

$$\Delta P_{AHU} = K_0 V_{all}^2 + \min\{K_1 V_1^2, K_2 V_2^2, \dots, K_n V_n^2\} \quad \dots(2)$$

$$\Delta P_{FPU_k} = K_k V_k^2 - \min\{K_1 V_1^2, K_2 V_2^2, \dots, K_n V_n^2\} \quad \dots(3)$$

凡例

ΔP : 各機器の負担する静圧[Pa]

K : 各径路のダクト抵抗係数[Pa/(kg/s)²]

V : ダクト通過風量[kg/s]

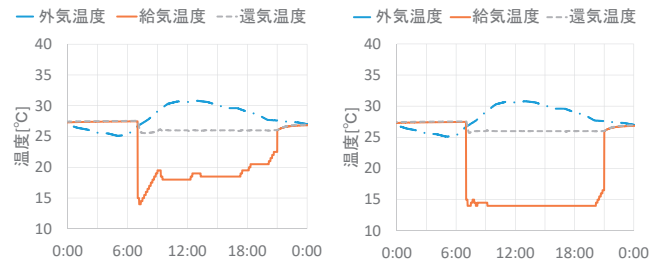
K_0 : 還気,AHU 機内の抵抗係数[Pa/(kg/s)²]

V_0 : AHU 通過風量[kg/s]

6. シミュレーション結果

本節では,夏期代表日のシミュレーション結果を示す。

Fig.10 に外気・給気・還気温度を, Fig.11 に給気風量を示す。給気温度は,起動時いずれも下限相当となっているものの,従来 VAV 方式はその後給気温度が 20℃ 近くまで上昇している。これにより従来 VAV 方式は日中の給気風量の増加につながっている。これは従来 VAV 方式における境界風量が 60% であり,要求風量が境界風量以下で安定しているためである。一方で,開発システムでは最小風量を引き下げたことで,空調時間帯の給気温度は下限値で推移している。Fig.12 に給気温度と風量の関係を散布図に示す。変風量制御において,給気温度と給気風量比の最も理想的な散布図は,原則として給気温度は風量が最小風量の時に上昇し,風量は給気温度が下限の時に増加するような状態である。従来 VAV 方式の場合,最小風量が大きいことから室温を維持するために給気温度が上昇し,給気温度が高い状態で給気風量が増加するため,分布が広くばらついている。一方で,開発システムでは,給気温度が下限相当の時に風量が増加しており,理想的な運転に



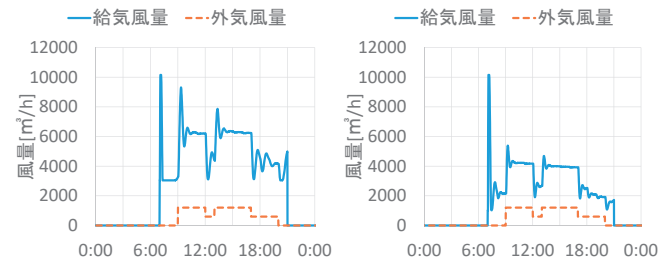
近い。

(a) 従来 VAV 方式

(b) 開発システム

Fig.10 外気温度・給気温度・還気温度 (夏期代表日)

(Outside Air Temperature, Supply Air Temperature, Return Air Temperature)

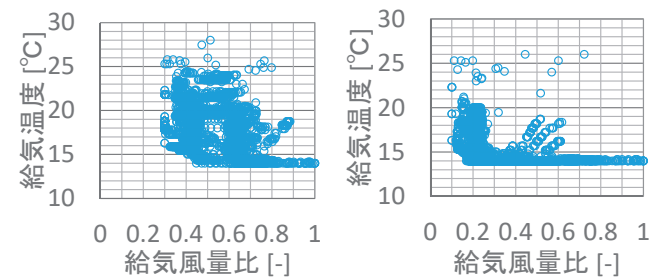


(a) 従来 VAV 方式

(b) 開発システム

Fig. 11 給気風量 (夏期代表日)

(Air Supply Air Volume)



(a) 従来 VAV 方式

(b) 開発システム

Fig. 12 給気温度と給気風量の関係

(Relationship between Supply Air Temperature and Volume)

Fig.13 に年間における給気温度の頻度グラフを示す。従来 VAV 方式では給気温度が 14~20℃ の範囲で幅広く分布するが,開発システムでは 14℃ の発生頻度が多く,給気温度リセットならびに最小風量の低減の効果が確認された。Fig.14 に給気風量の頻度グラフを示す。従来 VAV 方式では 30% と 60~70% の風量比の頻度が高いが,開発システムでは最小風量の引き下げにより風量比 20% 程度の発生頻度が高くなる。Fig.15 に夏期の室内温度発生頻度ならびに室内相対湿度の発生頻度を示す。室内温度はいずれの空調方式でも室内設定温度である 26℃ 程度となっている。一方で,室内の相対湿度は本開発システムでは 50% の発生頻度が多いのに対して,従来 VAV 方式は 60% 以上にも広く分布している。Fig.16 に年間の

ファン電力量と搬送効率を示す。ここで示す搬送効率はファン消費電力に対する冷却，コイルの全熱処理熱量の割合を示す。FPU ファン電力量は本開発システムの合計ファン電力量のうち約 26%を占めている。本開発システムのファン電力量は従来 VAV 方式に比べ 44%削減となり，従来 VAV 方式と比較して高い効率で運転できると予想された。

V. おわりに

従来の一ダクト VAV 方式における搬送効率の低下の原因であった，給気温度の高止まり，VAV ダンパ部における静圧損失を解決するために，分散ファンによる空調制御システムを開発した。また，分散ファンによる最適風量制御システムの導入による夏期の室内温熱環境，年間の運転状態の分析を行い，温熱環境を快適に保ちつつも，ファン電力量を削減することができることをシミュレーションにて示した。

参考文献

- 1) 財省エネルギーセンターパンフレット，オフィスビルの省エネルギー，2009.
- 2) 建築研究資料第 177 号，業務用空調・給湯システムの制御による省エネルギー効果の実証的評価，2016.11.
- 3) 三原ら：電力負荷平準化のための効率的な運用方法と経済性に関する研究，第 1 報・解析手法の精度検証と電力負荷平準化技術の効果検討，空気調和・衛生工学会論文集，Vol.40，No.224，2015.11.
- 3) 大西ら：分散ファンによる最適風量制御空調システムの開発(第 1 報) 開発システムの概要，空気調和衛生工学会(神戸) .

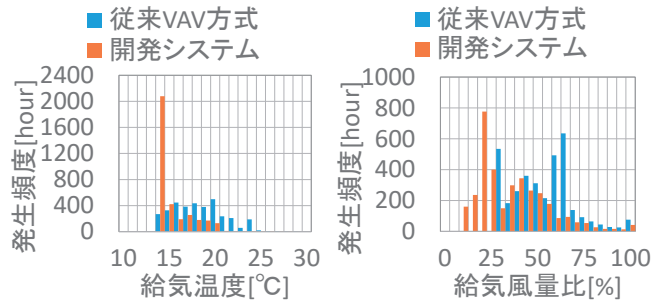


Fig.13 給気温度頻度 Fig.14 給気風量比

(Supply Air Temperature Frequency) (Supply Air Volume Ratio Frequency)

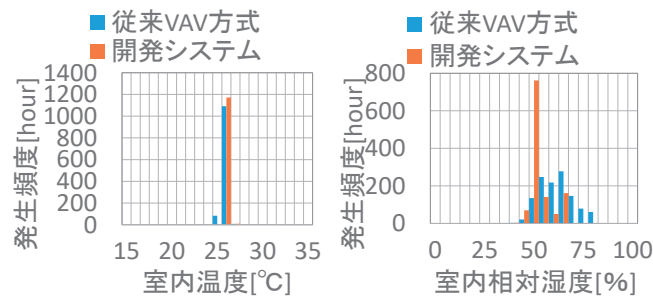


Fig. 15 室内温湿度の発生頻度

(Frequency of Occurrence of Indoor Temperature and Humidity)

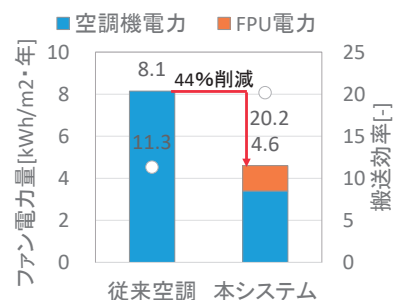


Fig.16 年間ファン電力量と搬送効率

(Annual Fan Power Consumption and Conveying Efficiency)

Development of Optimal Controlled Air Supply System with Fan Powered Terminal Unit

Taizo Shimo, Fuyumi Ijima, Naoki Onishi¹⁾ and Eikichi Ono

Energy conservation performance requirements for buildings are increasing, and among them, air conditioning and air conveying systems, which account for about 13% of the total building energy consumption, need to be considered for more advanced systems. Recently, air conditioning systems using variable air volume control (hereinafter referred to as “VAV”) units, which have been introduced in general offices, have been widely used in rental rooms where usage is uncertain. However, the air supply air volume cannot be fully throttled at low loads or when the load is unevenly distributed, resulting in energy loss. Therefore, we developed an air conditioning system with optimal airflow control using airflow controllers with dispersed fans. In this report, we give an outline of the developed system and describe the prediction of the amount of energy reduction in the development stage.