

# 目標空気搬送効率に基づく変風量空調システムの給気温度リセット制御の改善

## Improvement of Supply Air Temperature Reset Control by Targeting ATF for VAV Systems

小野 永吉 小川 健次<sup>1)</sup>

### 要 約

変風量空調システム（VAV システム）は個別制御と省エネを両立するための空気搬送システムであるが、必要以上の風量を供給し、空気搬送効率（ATF）の低下を招いているケースも少なくない。我が国においては、各変風量ユニット（VAV）が演算する要求風量に基づいて給気温度リセット制御を行う方法が一般的であり、要求風量と予め設定した閾値の大小に応じて給気温度設定値を修正する。本研究では、従来固定値で運用されるこの閾値（境界風量）を目標 ATF に基づき適切に設定する方法を提案し、システムシミュレーションによりその有効性を検証した。複数の VAV 制御ゾーンに対して、1) 一様に負荷を与えた場合、2) 偏在する負荷を与えた場合（室温設定値の異なるゾーンがある場合）、でその効果を検証した結果、従来制御に対するファン電力削減効果は最大で約 50%であることを明らかにし、改善策の有効性を示した。

### 目 次

- I. はじめに
- II. VAV 空調システムの制御ロジック
- III. シミュレーションによる効果検証
- IV. おわりに

で一般的に用いられている VAV 空調システムの制御ロジックをベースとして、目標とする空気搬送効率（Air Transport Factor, ATF）に基づき給気温度リセット制御を行うロジックを新たに提案し、システムシミュレーションによりその有効性を検証した結果について述べる。

### I. はじめに

現在一般的に用いられている変風量（Variable Air Volume, VAV）空調システムは複数の空調ゾーンの室温制御性とファン動力の省エネを両立することを目指して設計されているが、実際の運用では省エネ性能が十分に発揮されていないケースが多く発生している。その大きな原因は、現状の制御ロジックが、無数に存在する給気温度と給気風量の組み合わせから最適な組み合わせを選択するようになっていないためである。VAV 空調システムの給気温度リセット制御や最小風量の最適化についてはこれまでに多数の研究がなされている。例えば、モデル予測制御やニューラルネットワークを用いる方法等が提案されているが<sup>1)~4)</sup>、いずれも高度な最適化手法を用いているが故に複雑なアルゴリズムであり、実適用に当たってのハードルが高い。そこで本報では、我が国

### II. VAV 空調システムの制御ロジック

#### 1. 日本における一般的な制御ロジック

冷房運転を例に日本で用いられている一般的な VAV 制御ロジックについて説明する。Fig.1 に対象とする VAV システムの系統図を示す。VAV およびファンの風量は以下のとおり制御を行う。VAV は室内空気温度を検知する温度センサおよびその温度設定値に基づいてダンパ開度を調整し、居室への給気風量を制御する。VAV には最小風量および最大風量が設けられており、その風量範囲内でダンパ開度を制御する。VAV はダンパ開度および室内温度と設定値の偏差等から要求風量を演算する。ファン回転数はファン風量が全 VAV の要求風量の合計値となるように制御する。

一方、複数の VAV が設置されている室への給気温度（Supply Air Temperature, SAT）は以下のとおり制御を行う。

1) 建築設計本部 Architectural Design Division

**キーワード** : VAV 空調システム, 給気温度リセット制御, 空気搬送効率 (ATF), システムシミュレーション

**Keywords**: variable air volume air-conditioning system, supply air temperature reset control, air transport factor, system simulation

まず、Fig.2 に示すように VAV 毎に風量の大きさに基づきステータスを判断する。その際、風量の閾値として最大風量、最小風量およびその中間値（ここでは境界風量 Boundary Air Flow Rate, BAF と呼ぶ）を用いる。次に各 VAV の風量がどの区間に位置するかを集計した結果から、Table 1（冷房運転時の設定テーブル例）に示す給気温度変更テーブルに基づき、給気温度を設定刻み幅で上昇あるいは低下させる。このように給気温度を変更し室への熱量供給能力を変化させることを給気温度リセット制御と呼ぶ。

VAV 空調システムの運用においてファン動力の増加を招いている要因は VAV の最小風量設定と給気温度の高止まりの 2 点である。例えば、Table 1 のテーブルを用いる場合、VAV 風量が最小風量に達すると、コントローラは当該 VAV の空調対象ゾーンが冷え過ぎ状態であると判断し、給気温度設定値を引き上げる。その後、全ての VAV 風量が目標ゾーンあるいは中間ゾーンに達してその状態で安定すると、給気温度およびファン風量は一定となる。境界風量は経験的に固定の値で設定されており、運用状態に応じて変更されることはない。境界風量が比較的大きい値で設定されている場合、目標ゾーンの範囲が拡大し、VAV の風量ステータスが Table 1 における Status No.5 に該当しやすい状態となり、給気温度設定値が安定しやすくなる。結果、省エネの観点から給気温度を下げた方が好ましい場合であっても給気温度が高止まりし、VAV 風量は最小風量に対して余裕のある値で運用され、風量増加によるファン消費電力の増加を招いている。反対に境界風量が比較的小さい値で設定されている場合、VAV の風量ステータスが Status No.4 に該当しやすい状態となり、給気温度は短い時間周期で上昇と低下を繰り返す、適切な制御がなされなくなってしまう。通常、境界風量は大きめの値（例えば最大風量と最小風量の中間値）で設定されることが多く、ファン消費電力の削減が課題となっている。

2. 目標 ATF に基づく給気温度リセット制御

新たに提案する制御ロジックでは、VAV 風量ステータスを判断するために用いる境界風量を、空気搬送効率 ATF に応じてリアルタイムで変化させることで、省エネ性と制御性の両立を図る。ここで、空気搬送効率 ATF は式（1）により演算される。

$$ATF = Q_{coil} / E_{fan} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、ATF: 空気搬送効率 ATF [-],  $E_{fan}$ : ファン消費電力 [kW],  $Q_{coil}$ : コイル冷却負荷 [kW]

また、ファン消費電力はファン風量を用いて式（2）のように近似できる。

$$E_{fan} = f(V_{fan}) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $V_{fan}$ : ファン風量 [m<sup>3</sup>/h]

関数  $f(x)$  は  $x$  の多項式等で表現できる。空気搬送効率向上のために ATF をある値以上で運用したい場合、目標とするファン風量は式（3）で演算できる。

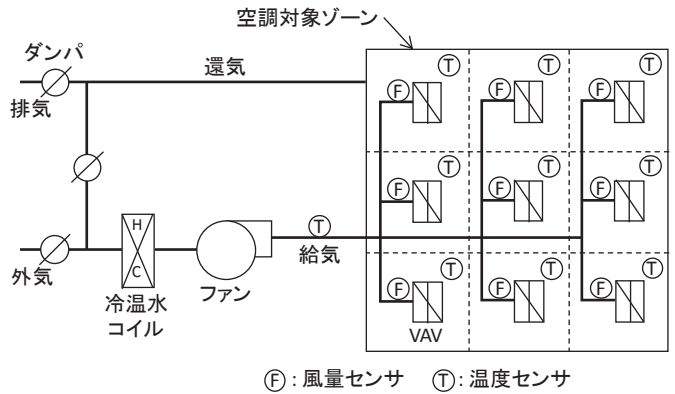


Fig.1 検討対象の VAV システム (Schematic of the VAV System)

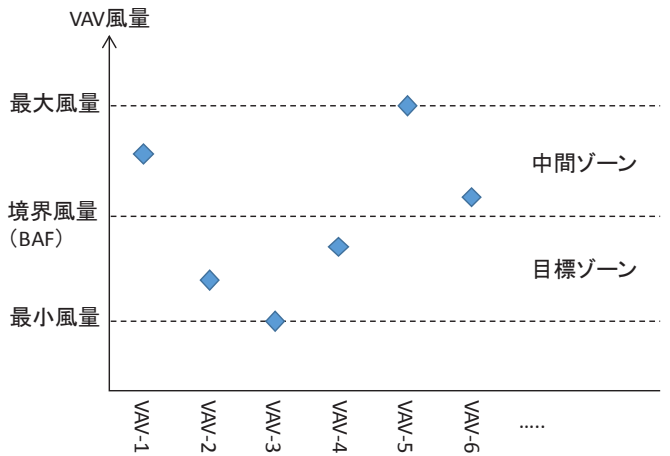


Fig.2 VAV 風量ステータス (Status of VAV Air Flow Rate)

Table 1 冷房運転時における VAV 風量ステータスに基づく給気温度リセット幅の一例 (Example of SAT Setting Change based on Status of VAV Air Flow Rate in Cooling Operation)

Status No.	VAV風量ステータス	給気温度リセット幅
1	最大風量のVAVが1台以上	-1.0 °C
2	最小風量のVAVが1台以上	+0.5 °C
3	最大風量と最小風量のVAVが混在	-1.0 °C
4	すべてのVAVが中間ゾーン	-0.5 °C
5	すべてのVAVが目標または中間ゾーン	変更なし

$$V_{target} = f^{-1}(Q_{coil}/ATF_{target}) \cdot \dots \cdot (3)$$

ここで、 $ATF_{target}$ : 目標 ATF [-],  $V_{target}$ : 目標ファン風量 [ $m^3/h$ ]

関数 $f^{-1}(x)$ は関数 $f(x)$ の逆関数である。よって、関数 $f(x)$ が既知であり、冷却コイルの冷却熱量を計測すれば、目標 ATF に基づく目標ファン風量を演算することができる。この目標ファン風量をリアルタイムで演算し、式(4)に基づき境界風量を設定すれば、目標 ATF に近い状態で運用することが可能となる。

$$V_{boundary} = V_{VAV,r} \cdot V_{target} / V_{fan,r} \cdot \dots \cdot (4)$$

ここで、 $V_{boundary}$ : 境界風量 BAF [ $m^3/h$ ],  $V_{fan,r}$ : ファン定格風量 [ $m^3/h$ ],  $V_{VAV,r}$ : VAV 定格風量 [ $m^3/h$ ]

以上のように、VAV 風量ステータスを判断するために用いる境界風量を、空気搬送効率 ATF に応じてリアルタイムで変化させることで、ATF を向上させファン消費電力を削減することができる。実際の負荷状態に応じて境界風量を変化させるため、居室内温度の制御性に悪影響を与える可能性も小さい。関数 $f(x)$ は単調増加関数であるため、冷却負荷が大きい場合には境界風量も大きくなり、制御範囲を広く取ることができる。

### Ⅲ. シミュレーションによる効果検証

#### 1. 計算条件

シミュレーションにより改善ロジックの省エネ効果を検証する。シミュレーションツールとして、建物の熱負荷シミュレーションを行う TRNSYS と空調システムシミュレーションを行う ENe-ST<sup>5)</sup> を連成して用いる。ENE-ST は MATLAB/Simulink をベースに開発したシミュレーションツールであり、TRNSYS のエクスポート機能を用いて建物モデル Type 56 を Simulink からコールすることができる。以下では主な計算条件について説明する。

##### (1) 建物条件

床面積 480 $m^2$  のオフィス空間と対応する空調システムを対象に年間シミュレーションを行う。建物条件を Table 2 に示す。オフィス空間は 9 つの空調ゾーンに区画されており、各ゾーンに 1 台の VAV を設置する。ゾーン間の空気移動は境界長さに応じて固定値で与えるが、ゾーン 7 のみパーティションで仕切られた空間(会議室)を想定し、空気移動を考慮しない。また、計算を簡易にするため、外壁は設定せず、周囲空間は計算室と同等の空調室とする。

##### (2) 空調システム

機器リストを Table 3 に示す。モデリング範囲は空調機、VAV および制御コントローラのみであり、熱源側の計算は行わない。また、冷温水コイルの計算も省略し、給気温度は設

定値どおりとなることを前提に計算を行う。制御ロジックは室温に基づく VAV 風量の PI 制御、VAV 要求風量に基づく給気風量制御、VAV 要求風量に基づく給気温度リセット制御(10分周期)をモデリングする。シミュレーションの計算時間間隔は1分である。

##### (3) 計算ケース

計算ケースを Table 4 に示す。境界風量、VAV 最小風量、ファン最小風量と VAV-6(会議室用)の室温設定値をパラメータとして全 8 ケースの計算を行った。Case A-1 および Case B-1 で設定している各風量設定値(パーセンテージ)は一般的に用いられている値である。最小風量は室内空気質環境の維持や、VAV 風量センサの測定範囲などを考慮して定められており、実際には安易に引き下げることができない。ここで

Table 2 建物条件  
(Building Specification)

項目	内容
立地	東京
建物用途	事務所
床面積	480 $m^2$
内部発熱	照明 12 W/ $m^2$ , 機器 12 W/ $m^2$ , 人体 0.083 人/ $m^2$
空調運転時間	7:00 - 21:00
室温設定	6月~9月: 26 °C, 12月~3月: 22 °C, その他: 24 °C

Table 3 空調機器の仕様  
(AC Equipment Specification)

機器名称	仕様
ファン	風量: 給気 10,100 $m^3/h$ , 外気 2,600 $m^3/h$ 全静圧: 1,100 Pa, モータ入力: 5.5 kW
VAV-1	空調面積 62 $m^2$ , 風量 1,300 $m^3/h$
VAV-2	空調面積 57 $m^2$ , 風量 1,200 $m^3/h$
VAV-3	空調面積 81 $m^2$ , 風量 1,700 $m^3/h$
VAV-4	空調面積 81 $m^2$ , 風量 1,700 $m^3/h$
VAV-5	空調面積 25 $m^2$ , 風量 500 $m^3/h$
VAV-6	空調面積 51 $m^2$ , 風量 1,100 $m^3/h$
VAV-7	空調面積 51 $m^2$ , 風量 1,100 $m^3/h$
VAV-8	空調面積 30 $m^2$ , 風量 600 $m^3/h$
VAV-9	空調面積 41 $m^2$ , 風量 900 $m^3/h$

Table 4 計算ケース  
(Simulation Cases)

Case No.	境界風量 BAF	VAV 最小風量	ファン 最小風量	VAV-6の 室温設定	
Case A-1	70%	40%	40%	Table 2の とおり	
Case A-2	提案ロジック により演算				
Case A-3					20%
Case A-4					20%
Case B-1	70%	40%	40%	上記 + 1.0 °C	
Case B-2	提案ロジック により演算				
Case B-3					20%
Case B-4					20%

はその影響を検証するため具体的な方策は考えずに単純に検討パラメータとして変更している。ただし、今回の計算では外気導入量は在室人員に応じて変風量制御を行っているため、最小風量20%の条件においても外気導入量不足の時間は発生しなかった。提案ロジックにおけるATF目標値は15（演算時の分子はコイル負荷＝室負荷＋外気負荷）とした。Case B シリーズは室温設定値が不均一な場合を想定しており、不均一な設定値がVAV制御へ与える影響について考察する。なお、最大風量はいずれのケースにおいても定格風量に対して100%と設定した。

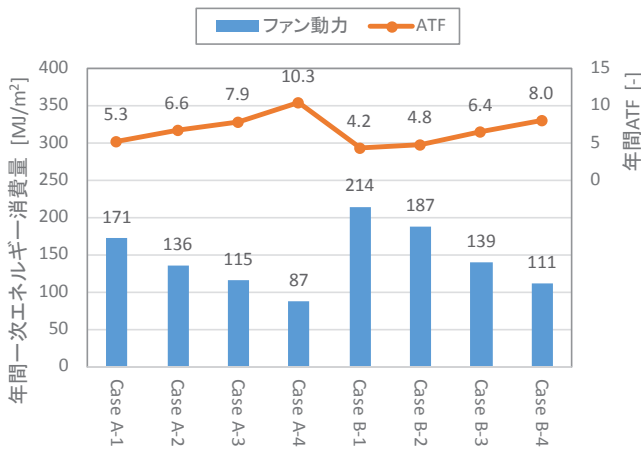


Fig.3 年間ファン動力とATF  
(Annual Fan Power Consumption and ATF)

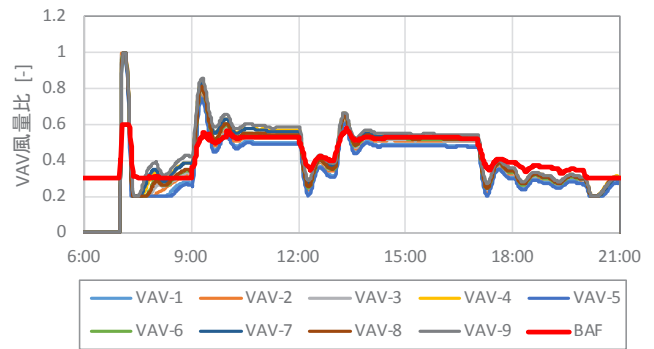
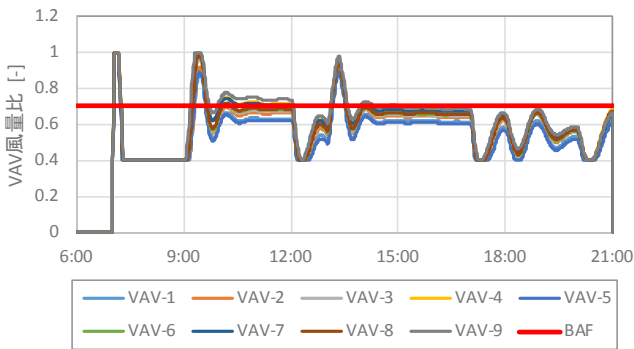


Fig.4 代表日7月25日のVAV風量比と境界風量比（左: Case A-1, 右: Case A-4）  
(Ratio of VAV Air Flow Rate and Boundary Air Flow Rate on 25th-July, Left: Case A-1, Right: Case A-4)

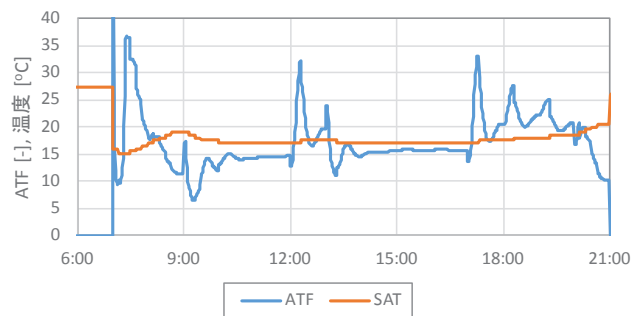
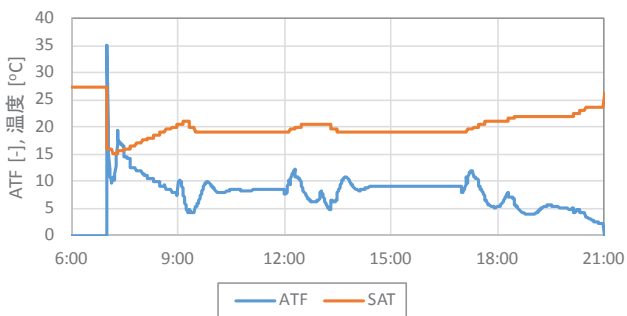


Fig.5 代表日7月25日のATFと給気温度SAT（左: Case A-1, 右: Case A-4）  
(ATF and Supply Air Temperature on 25th-July, Left: Case A-1, Right: Case A-4)

## 2. 計算結果

ファン電力消費量およびATFの年間集計値をFig.3に示す。基準となるCase A-1の年間ファン電力量171 MJ/m<sup>2</sup>は日本のオフィスビルの統計値と同等の値<sup>6)</sup>である。なお、室温の計算値は以降のグラフで示していないが、空調運転中はほぼ設定値で維持できていることを確認している。

### (1) Case A シリーズ: 室温設定値が均一な場合

Fig.3より、提案ロジック単独（Case A-2）ではCase A-1に対して20.9%の省エネであるが、最小風量の引き下げを併せて行うことでCase A-4では49.5%の省エネとなった。この結果から、ATFに基づく境界風量の変更は有効であるが、最小風量設定が大きい場合には風量制御範囲が狭まるため、その効果を十分に発揮できないことが判る。

Fig.4およびFig.5にCase A-1, Case A-4の夏期代表日のVAV風量比、境界風量比、ATFおよび給気温度を示す。Case A-1では大部分の時間でVAV風量は60%以上、給気温度は19~20°C程度の高い状態で安定してしまい、ATFは9前後となっている。一方、Case A-4ではリアルタイムのATFに基づいて境界風量を変更しているため、Case A-1に対してVAV風量および給気温度を低い状態で運用できており、大部分の時間でATFは目標値の15前後となっている。

### (2) Case B シリーズ: 室温設定値が不均一な場合

Fig.3より、提案ロジック単独（Case B-2）ではCase B-1に対して12.5%の省エネであるが、最小風量の引き下げを併せ

て行うことで Case B-4 では 48.0%の省エネとなった。Case A と比較して提案ロジック単独の省エネ効果が小さくなるのは、VAV-6 が最小風量付近で運転されるため、実質的な風量制御範囲が狭まってしまうことが原因と考えられる。Fig.6 および Fig.7 に夏期代表日の VAV 風量比、境界風量比、ATF および給気温度を示す。Case B-1 では VAV-6 がほかの VAV よりも小さい風量比で運用されていることが判る。1 台でも最小風量の VAV が存在すると、Table 1 より給気温度が引き上げられてしまうことになる。ただし、最小風量の引き下げを併せて行うことで Case B-4 では Case A-4 と同等の省エネ効果が得られるため、このように室温設定値が不均一な場合においても提案ロジックは有効と考えられる。

#### IV. おわりに

目標 ATF に基づく給気温度リセット制御のロジックを提案し、システムシミュレーションによりその効果を検証した。提案ロジック単独では 12.5~20.9%、最小風量設定値の引き下げを併せて行うことで 48.0~49.5%の省エネ効果が得られることを示した。また、室温設定値の異なる空調ゾーンが存在する場合、VAV 風量の実質的な制御範囲が狭まるためファン電力は増加傾向となるが、この場合においても提案ロジックが有効であることを示した。今後は最小風量設定値の具体的な引き下げ方策等について検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) Chen, X. and Kamimura, K.; Vote Method of Deciding Supply Air Temperature Set Point for VAV Air Conditioning System. ASHRAE Transactions, Vol. 107, PART 1, 2001, pp. 82-92.
- 2) Li, X., Zhao, T., Zhang, J. and Chen, T.; Prediction Control for Indoor Temperature Time-delay Using Elman Neural Network in Variable Air Volume System. Energy and Buildings, Vol. 154, 2017, pp. 545-552.
- 3) Liang, W., Quinte, R., Jia, X. and Sun, J.; MPC Control for Improving Energy Efficiency of a Building Air Handler for Multi-zone VAVs. Building and Environment, Vol. 92, 2015, pp. 256-268.
- 4) Raftery, P., Li, S., Jin, B., Ting, M., Paliaga, G. and Cheng, H.; Evaluation of a Cost-responsive Supply Air Temperature Reset Strategy in an Office Building. Energy and Buildings, Vol. 158, 2018, pp. 356-370.
- 5) Mihara, K., Arai, Y. and Ono, E.; Peak Shaving and Economy for Load Leveling Using Energy Network Simulation Tool. Proceedings of the 14th International Building Performance Simulation Association Conference - Building Simulation, India, 2015, pp. 18-25.
- 6) 一般財団法人省エネルギーセンター；  
[https://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/01.html](https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html)  
(2019年7月22日アクセス)

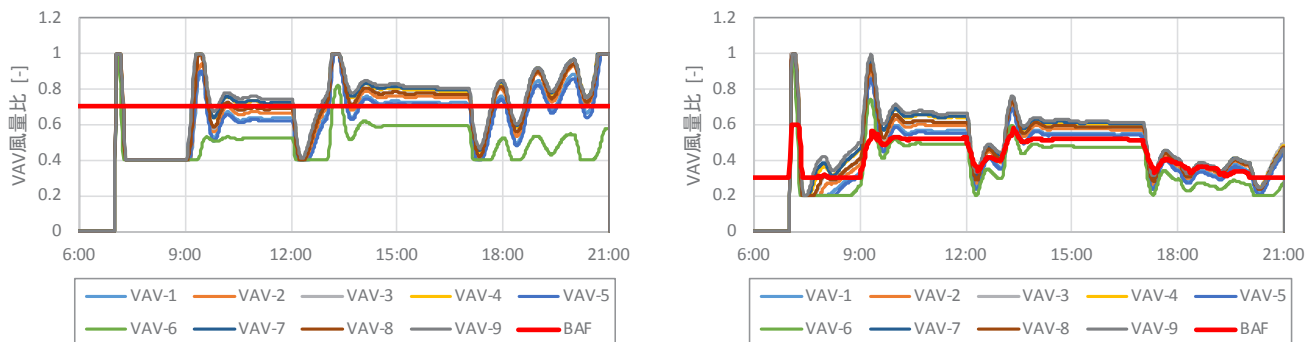


Fig.6 代表日 7 月 25 日の VAV 風量比と境界風量比 (左: Case B-1, 右: Case B-4)  
(Ratio of VAV Air Flow Rate and Boundary Air Flow Rate on 25th-July, Left: Case B-1, Right: Case B-4)

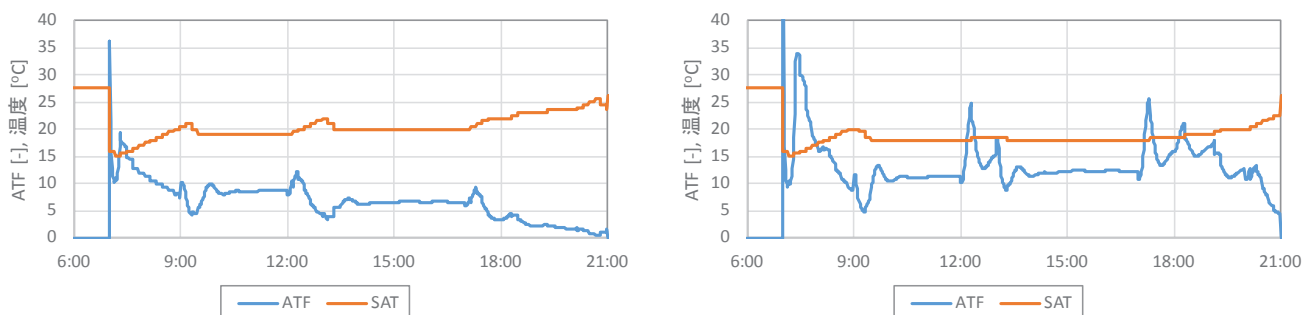


Fig.7 代表日 7 月 25 日の ATF と給気温度 SAT (左: Case B-1, 右: Case B-4)  
(ATF and Supply Air Temperature on 25th-July, Left: Case B-1, Right: Case B-4)

## Improvement of Supply Air Temperature Reset Control by Targeting ATF for VAV Systems

*Eikichi Ono and Kenji Ogawa<sup>1)</sup>*

In Japan, it is common for VAV systems to use supply air temperature reset control based on the required air flow rate for each VAV unit. In the control logic, the status of the VAV air flow rate is determined as “Minimum”, “Adequate”, “Medium”, or “Maximum” by comparison between the required VAV air flow rate and a preset threshold (threshold value between the Medium and Adequate zones), and the reset amount is determined based on the status. In this paper, we propose a method of appropriately setting a variable air flow rate threshold value (boundary air flow rate) by targeting the air transport factor (ATF). The effectiveness of the method was verified by system simulation, including the effect of reducing the minimum air flow rate. The fan power energy conservation of the proposed logic was calculated by modeling an office building with the VAV system (including a fan, VAV units, and controllers), where the space was divided into multiple zones with the same or different set-point temperatures. The simulation results showed that the fan power consumption with the proposed logic is reduced by up to 49.5% compared with the normal control method, which demonstrates the effectiveness of the proposed logic.