



Title	変风量空調システムの投票式送風温度設定法
Author(s)	陳, 向陽; 神村, 一幸
Description	第6回衛生工学シンポジウム (平成10年11月5日 (木) -6日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 計画・システム . P3-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 6, 77-82
Issue Date	1998-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7325
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-3-1_p77-82.pdf



3-1

変風量空調システムの投票式送風温度設定法

陳 向陽 (山武ビルシステム株式会社) 神村一幸 (同左)

1. はじめに

空調システムは定風量システムから変風量システム(Variable Air Volume system、以下 VAV)に発展してきた。これに伴い、空調システムの自動制御も単一の室温制御から、送風量制御或いは送(還)風静圧制御、送風温度制御を含めた複合室温制御まで発展した。VAV 端末風量制御装置(以下 VAV 端末)ごとに室温制御ができる制御性、および部分負荷時の空調機(Air Handling Unit、以下 AHU)の送風機の回転数制御による省エネルギー性などのメリットにより、変風量空調システムは広まってきた。最近では、既設の定風量空調システムのリニューアル工事に、VAV に改修することも数多く見られた。

しかし、VAV の高い環境制御及び省エネルギー性能に対して、それに適する制御方法が要求されている。最適送風量制御或いは最適送(還)風静圧制御(ファン回転数制御)、最適送風温度制御、最適室内空気質制御など多数の制御が VAV 制御に導入され、VAV の室温制御は複合化され、複雑になった。VAV の複合室温制御により、制御動作の相互干渉が発生することもある。送風量制御と送風温度制御は相殺する、或いは相乗する可能性があるため、不適切な制御方法は VAV の高い制御性能を損なうことになる。本文では送風量制御と送風温度制御の関連を付けた、新たな送風温度制御方式である投票式送風温度制御を述べる。

2. 従来制御の問題点¹⁾

いままでの VAV 送風温度制御は、ある VAV 端末の送風量が制御範囲を越えた場合に、AHU の送風温度を一定の変化率で変化させる方法を使ってきた。以下、この送風温度制御方法を従来制御という。例えば、冷房モードでは、1 台でも VAV 端末の送風量が最大風量制限を越えたら、 $0.1^{\circ}\text{C}/20\text{min}$ の変化率で

送風温度を下げる。1 台でも VAV 端末の送風量が最小風量制限を越えたら、 $0.5^{\circ}\text{C}/20\text{min}$ の変化率で送風温度を上げる。すべての VAV 端末の送風量が最小風量制限も最大風量制限も越えていない場合、送風温度変化率をゼロ、或いは $0.1^{\circ}\text{C}/20\text{min}$ の緩い降下率にする。20 分間の送風温度リセットインターバルを設ける目的は送風量制御の相互干渉を抑えることである。

従来制御では、まず問題になるのは空調運転開始時の送風温度設定値をどのように決めるかという点である。間欠空調では、空調運転停止時間帯に、室内温度は変化する。その変化の幅は室外気象条件によって異なる。室外気象が毎日異なるともいえ、空調立ち上がりの予熱量に応じて AHU の送風温度のスタート値を毎日変更する必要がある。適切なスタート値を選ぶために、このプロセスは負荷予測をしなければならない。負荷予測ツールを装備していない VAV 空調システムでは、オペレータによってスタート値を与えるしかない。不適切なスタート値を与えれば、空調システムの立ち上がりを遅くさせ、予熱プロセスが空調時間帯に延びることもある。

問題点の二は、従来制御が各 VAV 端末の冷暖要求に対して単純に処理するしかできないことである。同時に 1 台の VAV 端末が最大風量制限を越え、1 台の VAV が最小風量制限を越えた場合、従来制御はどちらか片方要求を満足させ、もう一方の要求を無視するか、両方を無視して、3 台目の VAV 端末が風量制限を越えるまで待つとかの単純処理しかできない。無視された端末の室内温熱環境はますます悪化する。

問題点の三は、従来制御が固定の送風温度変化率を用いることである。室内負荷の変化が大きい空調システムでは、室温制御を大きな空調負荷変化に追従できるまで送風温度変

化率を大きくすれば、室温のハンチングを引き起こすことになる。逆に、安定な室温制御を得るために送風温度変化率を小さくすれば、空調負荷の変化が大きいときに追従できないことがある。追従性と安定性のバランスを取るために、長時間にわたって送風温度変化率を調整しなければならない。しかし、それでも満足な結果を得られないことが多い。

問題点の四は、送風量制御とリンクしていないことである。送風量制御の相互干渉を抑えるために、送風温度リセットのインターバルも一つの調整パラメータにしなければならない。しかし、送風温度リセットインターバルと送風温度リセット幅は強く関連するもので、両方の最適化は難しい。

3.投票式送風温度設定

(1)式の室温制御の熱収支方程式²⁾により、室温制御には室温に影響を与えるのは送風量 L だけでなく、送風温度 t_s だけでなく、AHUからの熱量 $L \cdot c \cdot (t_s - t)$ であることが分かる。

$$C \frac{dt}{d\tau} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + L \cdot c \cdot (t_s - t) \quad (1)$$

ここで、 C ：制御空間の熱容量[kJ/K]； t ：室温[°C]； τ ：時間[s]； Q_1 ：室内（人体、照明、設備）顕熱負荷[kW]； Q_2 ：壁体、窓から対流熱負荷[kW]； Q_3 ：隙間風熱負荷[kW]； L ：VAV送風量[m³/s]； c ：空気の比熱[kJ/m³K]； t_s ：送風温度[°C]。

故に、VAVの室温制御では、同一の空調域へ投入する顕熱量 $L \cdot c \cdot (t_s - t)$ に対して、送風温度 t_s は唯一のものではなく、送風量 L と組み合わせてその熱量を提供する。そのため、送風温度 t_s は送風量の変化範囲に伴って一つの連続範囲になり、数字で表現すれば、無限個がある。AHUの送風温度はVAV端末の風量制限によって定められた温度範囲にあれば、このVAV端末の空調負荷に対する処理能力は保証される。この範囲を送風温度の許容範囲という。全システムの各VAV端末に対して、もし共通の許容範囲があれば、送風温度はこの範囲に設定しなければならない。もし

共通の許容範囲がなければ、各VAV端末が送風温度の許容範囲を投票し、投票結果によって送風温度を決定することが考えられる。

これが投票式送風温度制御の基本考え方である。これにより、まず従来制御の問題点の二が解決される。投票結果の処理によって送風温度を決めるので、従来制御のような二者択一の単純処理を避けることができる。次に、従来制御の問題点の三が解決される。投票式は所要送風温度が明確にわかっているので、速やかな送風温度変更ができるし、緩やかな送風温度変更もできる。投票式の送風温度変化率が可変であるという特性によって、平均室温を空調運転開始時の送風温度のスタート温度にすることができる。送風温度を平均室温からスタートすることは、システムが最小負荷からスタート、各VAV端末が不適切な風量になっても各制御単位に対する影響が最小であると考えた結果である。投票式は速やかに送風温度を変更できるので、短時間に送風温度設定値を平均室温から適切な送風温度設定値まで変更できる。このため、投票式は従来制御と異なって負荷予測が要らない。これで、従来制御の問題点の一も解決される。投票範囲は各VAV端末の送風量に基づいて算出したものなので、投票式送風温度制御は送風量制御とリンクしている。ゆえに、従来制御の上記四つの問題点が全て投票式によって解決された。

3.1 許容範囲

あるVAV端末に対する送風温度の許容範囲は、その端末の現在風量により、所要端末顕熱負荷を処理できる送風温度範囲である。

所要端末顕熱負荷は(2)式で算出する。

$$Q = L \cdot c \cdot \Delta t + \Delta Q \quad (2)$$

ここで、 Q ：現在空調負荷[kW]； ΔQ ：ペナルティ[kW]； Δt ：送風温度差[°C]。

$$\Delta t = t_s - t \quad (3)$$

室温は設定値の許容誤差範囲内の場合、ペナルティ ΔQ がゼロ。そのときの $L \cdot c \cdot \Delta t$ はちょうど現在空調負荷と考えられる。冷暖房室

温設定値が異なる場合、設定値の許容誤差範囲は(4)式で定義される。

$$-\varepsilon + t_{sp,h} \leq t \leq \varepsilon + t_{sp,c} \quad (4)$$

ここで、 ε ：制御の許容誤差[°C]； $t_{sp,c}$ ：冷房室温設定値[°C]； $t_{sp,h}$ ：暖房室温設定値[°C]。

ペナルティ ΔQ は、室温が設定値の許容範囲を超えた場合、設定値の許容範囲に戻すための所要熱量である。(5)式で計算する。

$$\Delta Q = C \frac{\Delta pv}{T} \quad (5)$$

ここで、 Δpv ：室温の制御偏差値[°C]； T ：応答時間[s]。

応答時間 T は室温が設定値の許容範囲内に戻るまでの時間である。風量 L に VAV 端末の計測値を用い、 Δt と Δpv とに計測値を使えば、所要末端顕熱負荷 Q が算出できる。VAV 端末の最大送風量 L_{max} に対応する最小送風温度差 Δt_{min} は(6)式で得られる。

$$\Delta t_{min} = \frac{Q}{L_{max} \cdot c} \quad (6)$$

同様に、VAV の最小送風量 L_{min} に対応する最大送風温度差 Δt_{max} も(7)で得られる。

$$\Delta t_{max} = \frac{Q}{L_{min} \cdot c} \quad (7)$$

最大送風温度差と最小送風温度差の間には、許容送風温度範囲が生じる。現在空調領域の室温により、各 VAV 端末に対する許容送風温度範囲が算出される。

冷房モードでは

$$\begin{cases} t_{s,min} = t + \Delta t_{max} \\ t_{s,max} = t + \Delta t_{min} \\ t_{s,min} \leq t_s \leq t_{s,max} \end{cases} \quad (8)$$

暖房モードでは

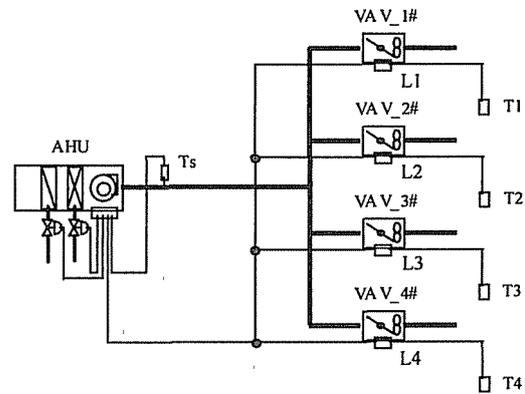
$$\begin{cases} t_{s,min} = t + \Delta t_{min} \\ t_{s,max} = t + \Delta t_{max} \\ t_{s,min} \leq t_s \leq t_{s,max} \end{cases} \quad (9)$$

冷暖房モードは(送風温度 t_s - 室温設定値 t_{sp})により算出され、正が暖房モード、負が冷房モードである。

3.3 投票の重み

各 VAV 端末の送風温度許容範囲の投票を集計するとき、各種の設計意図を実現するため、単純集計でなく各 VAV 端末の投票に重み係数を与える必要がある。

重み係数はその VAV 端末の空調面積比(VAV 端末の空調面積/全系統の空調面積)或いは負荷比(VAV 端末の設計空調負荷/全系統の設計空調負荷)、その VAV 端末空調領域の重要度などによって定められ、全系統の重み係数の和を 1 にする。単純集計の場合には、各 VAV 端末の重み係数は VAV 端末数の逆数である。



T：温度センサ；L：風量センサ

図-1. VAV 空調システムの計装図

図-1 の四つの VAV 端末を有する空調システムでは、ケース 1 として、端末 VAV_1# の送風温度の許容範囲は $20^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 24^{\circ}\text{C}$ 、重み係数は 0.2；VAV_2# の許容範囲は $18^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 23^{\circ}\text{C}$ 、重み係数は 0.3；VAV_3# の許容範囲は $17^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 21^{\circ}\text{C}$ 、重み係数は 0.3；VAV_4# の許容範囲は $18^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 22^{\circ}\text{C}$ 、重み係数は 0.2 である。1°C の分解度で投票結果を表にすれば、投票結果は図-2 のように、 $20^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 21^{\circ}\text{C}$ の範囲での得票率が 100% に達する。この範囲で四つの VAV 端末はすべて許容範囲として投票したので、この範囲は共通許容範囲とも言える。この共通許容範囲に任意の温度を送風温度にしても、各 VAV 端末の現在空調負荷を処理できる。

上記の例より、同一の各 VAV 端末の送風温度許容範囲に対して、各 VAV 端末の重み

が異なれば、投票で得られた最高得票範囲は異なることがわかる。これは投票式の一つの重要な特徴である。従来制御の各 VAV 端末の空調面積、空調負荷、重要度に関わらず、各 VAV 端末を同等に取り扱うことに比べ、投票式のこの特徴はより柔軟的に送風温度設定値を処理できるようになる。

3.4 送風温度の決定

送風温度の許容範囲に対する投票は、全空調系統の各 VAV 端末に対する共通の許容範囲が得られれば、この共通の許容範囲に送風温度を選ぶ。共通許容範囲が得られなければ、投票式は意志決定により送風温度を決定することができる。意志決定は制御プログラムによって自動で行うこととオペレータによって手動で行うことができる。

図-1の VAV 系統の端末 VAV_4#の許容範囲が $22^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 25^{\circ}\text{C}$ になったことをケース 2 にすれば、四つの VAV 端末を同時に満足させる送風温度の許容範囲が得られない。

決定方法の一は最高得票範囲を選択することである。この方法によれば、ケース 2 では $20^{\circ}\text{C} \leq t_s \leq 21^{\circ}\text{C}$ の範囲が選ばれる。この決定により、端末 VAV_1#、2#、3#の空調能力は確保できるが、端末 VAV_4#の空調能力は確保できないので、VAV_4#の空調領域の空気温度は設定値から離れる可能性がある。最高得票範囲が広い場合、省エネルギーの送風量を最小にする設定法、及び室内空気質を重視する送風量を最大にする設定法、制御の安定を重視する最高得票範囲中心を選ぶ設定法など送風温度を設定する方法は幾つかある。

決定方法の二は加重平均法である。変風量システム全体での室温制御偏差を最小にするために、各端末の許容範囲の加重平均をして、送風温度を決定する方法は加重平均法という。ケース 2 では、加重平均の結果は図-3 のように、送風温度設定値を含む範囲が最高得票範囲ではなく、次高得票範囲でもなく、この二つ範囲の中間範囲であることになる。

このように、各種の決定処理方法を取り扱うことにより、投票式は設計者、管理者にい

ろいろの選択肢を与える。

3.5 AHU 立ち上がる時の送風温度

AHU の立ち上がる時、送風量がゼロであるので、そのときの送風温度許容範囲が算出できない。投票式は、このときの送風温度制御を特殊処理する。AHU が立ち上がる時、外気を取り入れずに、冷水と温水を共に AHU に提供しなければ、AHU は現在室温で送風することになる。送風温度が室温と同じなので、AHU のファン回転数制御、VAV 端末の送風量制御はどのように動作しても、室内環境に対する悪影響は一切ない。そのため、AHU のファン回転数制御と VAV 端末の送風量制御の立ち上がりに対して制限を与える必要は一切無い。AHU のファン運転開始後、即ち送風量がゼロではなかったら、投票式送風温度制御が立ち上がる。言い換えれば、送風温度制御の開始はファン運転開始より少し遅れてスタートする。

3.6 室温応答遅れの処理

(1)式の室温制御の熱収支方程式により、室温が安定する、すなわち $dt=0$ という条件だけで、現在端末顕熱負荷 $L \cdot c \cdot (t_s - t)$ は現在空調負荷 $(Q_1 + Q_2 + Q_3)$ とちょうど相殺する。室温が変動するとき、投票式では室温変化の遅れを考慮する必要がある。特に、AHU の加湿動作などの原因で送風温度が急激に変化することがある。その場合、送風温度制御の安定化が必要である。

安定化方法の一は、端末顕熱負荷の平均化である。それで、所要端末顕熱負荷は(10)式で算出する。

$$Q = \frac{c}{\Delta T} \int_{-\Delta T}^0 (L \cdot \Delta t) d\tau + \Delta Q \quad (10)$$

ここで、 ΔT : 平均化時間 [s]

平均化時間 ΔT はステップ温度変化に対する室温の応答時間(一般的には、最終値の 90% までの室温応答時間は 10~15 分間である。)より長ければ、安定的な送風温度制御を得ることができる。しかし、安定な送風温度制御を得ると共に、送風温度制御も鈍くなる。送風温度制御の安定性と追従性に対する調整は、

この平均化時間 ΔT を調整することになる。

投票式では、室温が(4)式の室温制御の許容誤差範囲内であれば、送風温度が少し変化しても室温をこの範囲から逸脱させることがないので、一途に安定性を追求する必要がない。また、室温が室温制御の許容誤差範囲を越えれば、ペナルティ項 ΔQ が掛けられるので、むしろ追従性を強調する方が室温制御に対して有利である。

安定化方法の二は、送風温度差 Δt の算出は前記の(3)式の代わりに(11)式を用いる。

$$\Delta t = t_{s,sp} - t \quad (11)$$

ここで、 $t_{s,sp}$ ：送風温度設定値[°C]。

AHUの送風温度制御が速やかに応答するので、加湿などの送風温度を変化させる外乱が短時間に取り除かれる。故に、近似的に、送風温度 t が送風温度設定値 $t_{s,sp}$ と等しいと考えられる。

4 制御プロセスの可視化

いままでの自動制御は設定値と計測値しか表示できなかった。しかし、制御では、より多い情報を知りたいため、制御プロセスの可視化は一つの課題になっている。

前節のケース1、ケース2の投票結果と送風温度の決定結果など制御情報を数字で一つの画面で表示することは困難であり、かつ明快ではない。そのため、投票式の送風温度制御プロセスの可視化により、下記のように一つの画像画面で多数のメッセージを読みやすく表すことができる。

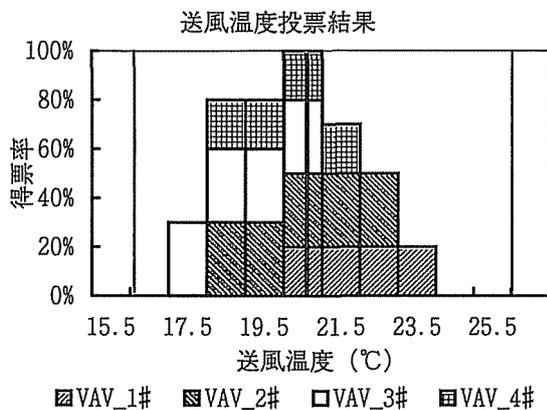


図-2. 共通許容範囲ある投票結果

図-2はケース1の投票の決定結果と現在運転状態を示すグラフである。図の色分けが各VAV端末の投票範囲を示し、各投票刻みの棒の高さが得票率、棒の各色分けの高さが各VAV端末の重みを示している。また、両端にある縦線が送風温度の上下限を示し、中央の縦線は送風温度設定値を示している。

VAVシステムの端末数が多いほど、可視化の効果は大きい。特に、一つの建物に多数のVAVシステムがある場合、一系統の情報を表と数字で中央監視盤の一つの画面に全て示しきれないことに対して、可視化は一系統の情報を一グラフで全てを示すことができ、さらに中央監視盤の一つの画面には多数のVAVシステムの可視化グラフを示すこともできる。故に、自動制御の中央監視盤の監視では、制御プロセスの可視化を実現することは非常に重要なことである。

図-3はケース2の投票の結果と現在運転状態を示すグラフである。この図は送風温度が最高得票範囲ではなく、次高得票範囲でもなく、この二つ範囲の中間に設定されたという意志決定の結果を明快に示している。

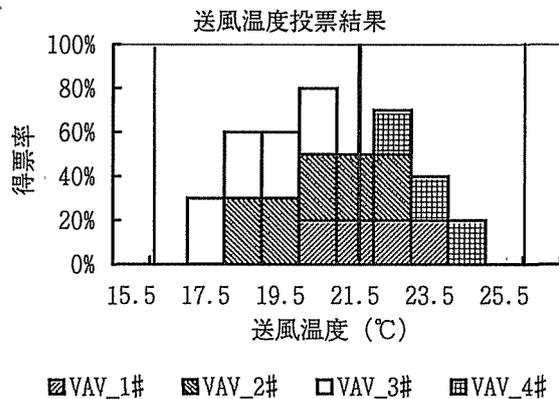


図-3. 共通許容範囲ない投票結果

図-4のような広共通許容範囲のケースが実際には多い。このグラフはこのVAVシステムが現時点に空調負荷の一致性、送風温度の許容範囲の広さ、送風温度変更の余裕を明快に示している。このように、可視化のグラフはVAVシステムの負荷状態、安定性、満足度など表と数字で表し難い指標を示すことができる。

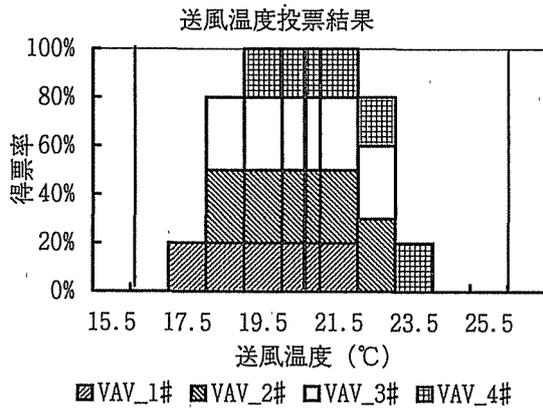


図-4. 広共通許容範囲の投票結果

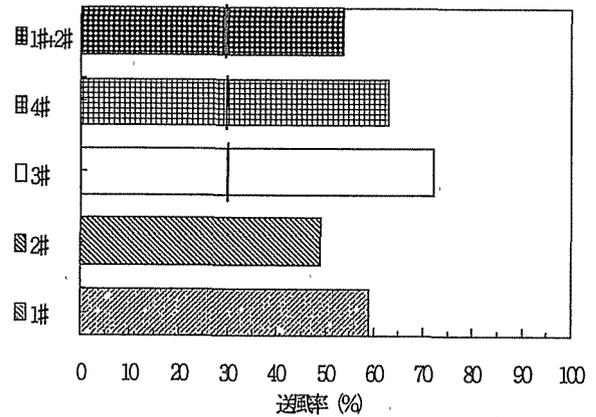


図-5. 各 VAV 端末の送風率

さらに、送風温度許容範囲投票結果図と併用するものとして、送風量制御の可視化も可能である。図-5は図-1のVAVシステムの送風率グラフである。送風率とは、現在送風量と最大送風量の比(現在送風量/最大送風量)である。横軸が送風率、横棒の上にある縦線が最小送風率リミットを示す。

単独のVAV_1#とVAV_2#には最小送風率リミットが設定されてしない。VAV_1#とVAV_2#が同一部屋にあるので、端末毎で個別に最小送風率リミットを設定せず、併せて最小送風率リミットを設定することができる。室内空気温度分布の観点から、各VAV端末に対して最小送風量を設ける必要があるが、室内空気質(IAQ、Indoor Air Quality)の観点から見れば、各VAV端末ではなく、各室に最小送風率を設ければ、IAQが保証される。そうすれば、各VAV端末がもっと大きな送風量制御範囲を得ることができる。もし、負荷の小さいVAV端末に対して、吹出気流に悪影響が出なければ、室ごとに最小送風率を設定して、室内温度分布を小さくすることは合理的である。

5. 終わりに

本研究は変風量(VAV)空調システムの投票式送風温度設定法を提案した。従来制御はAHUの送風温度を一定の変化率で変化させる方法を使ってきた。従来制御は、VAV空調システム起動時の送風温度設定値の決定、適切な送風温度設定値の自動算出、空調システ

ムに同時に送風温度を上げる/下げる要求を提出するVAV端末が同時に出現したとき送風温度設定の対策、送風量制御との連携などの問題点を抱えていた。投票式はこれらの問題点を解決した。更に、投票式は制御目標として、システム全体の室温制御偏差を最小するロジックとシステムの送風量を最小するロジックなど制御ロジックを選択でき、冷/暖房の中立帯に冷温水弁とリンクして冷温水量使用量最小の制御ロジックを取り込むことができるなどメリットを持っている。

制御プロセスの可視化はいままでの空調制御技術になかったものである。本研究が提案したグラフィック表示は投票式の決定結果と影響、各VAV端末の現状と重要度、送風温度設定値の選択範囲など言葉と数値で表現し難い項目を簡素に表現した。

投票式の追従性と安定性、実用性およびその優れた制御性は実システムでの比較実験に証明された(本文は実験内容を省略した)。

《参考文献》

- 1) 蓄熱最適化委員会平成9年度報告書,《蓄熱式空調システムの異常診断・適正制御研究》, 空気調和衛生工学会, 1998年3月
- 2) C.Park, D.R.Clark & G.E.Kelly,《HVACSIM+ Building Systems and Equipment Simulation Program: Building Loads Calculation》, NBSIR 86-3331, U. S. National Bureau of Standards, Feb. 1986