

実測による躯体蓄熱空調システム性能指標の統計的算出法

藤田 尚志 小宮 英孝
 平山 昌宏
 (本社 設備設計第2部)

Statistical Method for Calculating Performance Indices of Building Thermal Mass Storage System by Field Measurement

Hisashi Fujita Hidetaka Komiya
 Masahiro Hirayama

Abstract

In assessing the performance of an air-conditioning system with building thermal mass storage, it is necessary to compare operations with and without thermal storage. Conditions vary day by day during a field measurement. Therefore, the comparison must allow for differences in the conditions, and its accuracy is questionable. As a solution to this problem, we propose a statistical method for calculating performance indices, i.e. a method with regression analysis for the constants of assumed equations relative to heat and temperature. Application of this method to a field measurement shows that (1) charging ratio, (2) effectiveness of building thermal mass storage and (3) shifted thermal energy approximated (1) 0.8 to 1.0, (2) 0.6 to 1.0 and (3) 400 to 500 kJ/m² respectively. These ratios were almost constant, i.e. (1) approx. 0.9, (2) approx. 0.7, for days when the slab temperature returned to that of the day before.

概要

躯体蓄熱空調システムの性能を評価する時、蓄熱運転の有無による比較が不可欠だが、実測では条件の再現が難しいため、蓄熱以外の条件ができるだけ近い日の測定結果を比較する従来の方法では比較の精度は不明であった。この問題に対し、性能指標を実測データから統計的に算出する手法を考案した。具体的には、仮定した熱量や温度に関する式の各係数を回帰分析により求める。この手法を実測データに適用した結果、蓄熱投入熱量比率=約0.8~1.0、躯体蓄熱効率=約0.6~1.0、夜間移行量=約400~500 kJ/m²が得られた。スラブの温度が前日の温度に戻る日に限定すると、蓄熱投入熱量比率=約0.9、躯体蓄熱効率=約0.7とばらつきが少なくなった。

1. はじめに

近年、床スラブ等の建物躯体に蓄熱する空調システム(躯体蓄熱空調システム)が注目を集めており、その性能を明らかにするために実験や実測が行われている。実測では実際の使用状況を観察できる利点はあるものの、性能を定量的に評価しようとする条件の再現が難しいという問題点がある。躯体蓄熱空調システムの性能評価では、蓄熱運転の有無による比較が不可欠ゆえ、外気温等の条件ができるだけ近い日の測定結果を比較する方法が採られてきたが、性能に影響する条件は多く、比較の精度は不明であった。

これらの問題に鑑み、実測データから躯体蓄熱空調システムの性能指標(躯体蓄熱効率等)を統計的に算出する手法を考案した。これは熱負荷等に関する式を仮定し、各係数を実測データから回帰分析によって求めるものである。石野ら¹⁾は「等価重み係数法」として、熱負荷計算式の係数を実測値から逆算して求める手法を提案した。今回仮定した式は、これに躯体蓄熱量を表す項を組

み入れる等の改良を施している。

この統計的算出法を、実際に稼働している躯体蓄熱空調システムに適用した結果を報告する。

2. 用語の定義

「蓄熱投入熱量比率 s_s 」は、躯体蓄熱運転によって躯体に蓄えられた熱量を、そのために費やされた空調機顕熱負荷(積算値)で除した比率であり、次式で定義される。(各記号の説明はTable 1参照)

$$s_s = Q_s / Q_h \quad (1)$$

躯体蓄熱効果の指標となる「躯体蓄熱効率 f_f 」は、非蓄熱日と躯体蓄熱日を比べ、昼間の空調機顕熱負荷(積算値)の減少分を、躯体蓄熱用の空調機顕熱負荷(積算値)で除した比率であり、次式で定義される。

$$f_f = (Q_d' - Q_d) / Q_h \quad (2)$$

「夜間移行量」は、非蓄熱日と躯体蓄熱日を比べ、昼間の空調機顕熱負荷(積算値)の減少分を、空調面積で除

した値,すなわち $((Q_d' - Q_d) / A)$ である。

3. 統計的算出法の提案

3.1 躯体蓄熱効率を算出する時の問題点と対応

実測結果から躯体蓄熱効率を算出する時,次の点の問題となる。

1) 実測では条件の再現が難しく,躯体蓄熱日と非蓄熱日とで,外気温・日射量・室使用状況等の条件を同一にできない。

2) スラブ内で温度分布があるため,スラブの限られた位置で温度を測定しても,一般的にはそれが対応するスラブ域の平均温度にはならない。

3) 躯体蓄熱に有効な躯体範囲を特定するのが難しい。また躯体以外の什器等も蓄熱に効果があるが,その効果の定量化が困難である。

4) 1日周期でスラブの温度が元に戻らない場合が多く,その差異が空調機負荷に影響する。

上記の問題点の影響をなるべく少なくするため,次の方法を採用(以下の番号は,上記問題点の番号に対応)。

1) 躯体蓄熱日と非蓄熱日とを同条件で比較するために,複数日の測定データから統計的に傾向を推定する。

2) 躯体全体の蓄熱量が,スラブ内平均温度測定値に比例すると仮定し,比例定数を未知とする。

3) 上記2)の方法でカバーできる。

4) 実測を同一設定条件で最低1週間連続で行い1日周期の定常状態に近づけると共に,設定条件を変更した初日の測定データを上記1)の統計処理から除外する。さらに1日ごとに算出された結果を平均することで,周期定常に近い値が得られると考えられる。

3.2 統計的算出法

1日を空調時間帯(8~18時)と非空調時間帯(前日の18時~当日の8時)に分け,それぞれの時間帯で熱収支式を

つくる。躯体蓄熱時間帯の代わりに非空調時間帯を採用することで,解析上,次の利点がある。

1) 躯体蓄熱運転時間の長さ依存しない。

2) 空調時間帯と連続する。

対象室内における熱収支に影響する主な変数を探り上げ,それらが,次式で示す直線比例的な効果を持つことを仮定する。

$$Q_d - Q_x = C_{d1} \cdot (T_{c2} - T_{c1}) + C_{d2} \cdot T_d \cdot t_d + C_{d3} \cdot I_d + Q_{rd} \quad (3)$$

$$Q_n = C_{n1} \cdot (T_{c1} - T_{c0}) + C_{n2} \cdot T_n \cdot t_n + Q_{rn} \quad (4)$$

$$T_{rn} = C_{n4} \cdot Q_n + C_{n5} \cdot T_n \cdot t_n + T_{rs} \quad (5)$$

式(3)は空調時間帯(添字d)の熱収支,式(4)は非空調時間帯(添字n)の熱収支を表す。式(3),式(4)共,右辺第1項はスラブの温度変化による熱授受を表し,躯体蓄放熱そのものである。ここでは右辺第1項のスラブ内平均温度を,蓄熱に有効な物質の代表温度と見なしている。蓄熱に有効な物質には,梁はもちろんのこと,什器類も含み,「躯体全体」と称する。従って式(3)の C_{d1} ,式(4)の C_{n1} は,それらを含んだ上での係数である。スラブ内平均温度の典型的な時間変化をFig.1に示す。周期定常状態を想定しているので,前日18時と当日18時の温度が等しい。

式(3),式(4)の右辺第2項は,室内~外気の温度差に関係する熱量を表す。式(3)の右辺第3項は,日射に関係する熱量であり,式(4)では,非空調時間帯に日射の影響は無視できるとして対応する項はない。

式(5)の右辺第2項の係数 C_{n5} は,室の断熱性能に比例,熱容量に反比例すると予想する。式(5)の定数項 T_{rs} は,ほぼ空調時間帯の設定室温になると推測する。式(5)の左辺 T_{rn} が非空調時間帯の平均値であるので,係数 C_{n4} , C_{n5} 共,平均化の操作を含んだ値である。

式(4)の右辺第1項が躯体全体の蓄熱量を表すので,軀

Table 1 記号の説明
Nomenclature

添字の説明 ' : 躯体蓄熱を行わなかった場合($Q_n = 0$)を表す d : 空調時間帯 n : 非空調時間帯	Q_d : 空調時間帯の室内顕熱負荷(外皮関連以外,冷房負荷を+,隣室との熱貫流を含む) [MJ] Q_n : 非空調時間帯の室内顕熱負荷(外皮関連以外,冷房負荷を+,隣室との熱貫流を含む) [MJ] Q_s : 躯体蓄熱時間帯の躯体全体の蓄熱量(冷蓄熱すなわち躯体冷却を+) [MJ] Q_x : 空調時間帯の全熱交換器による顕熱負荷(冷房負荷を+) [MJ] T_{c0} : 前日の空調終了時(18時)のスラブ内平均温度(13点または9点平均) [] T_{c1} : 空調開始時(8時) (= 躯体蓄熱終了時)のスラブ内平均温度(13点または9点平均) [] T_{c2} : 空調終了時(18時)のスラブ内平均温度(13点または9点平均) []	T_{c3} : 躯体蓄熱運転開始時のスラブ内平均温度(13点または9点平均) [] T_o : 対応する時間帯の時間平均の外気温度 [] T_{rn} : 非空調時間帯(18~8時)の時間平均の室温 [] T_{rs} : 温度定数(空調時間帯の設定室温に近いと想定される) [] t_d : 空調運転時間 [h] (= 10h) t_n : 非空調時間 [h] (= 14h) T_d : 空調時間帯における外気温と室温との平均温度差 [K](外気温が高い時に+) T_n : 非空調時間帯における外気温と室温との平均温度差(外気温が高い時に+) f : 躯体蓄熱効率 [-] s : 蓄熱投入熱量比率 [-]
A : 空調面積 [m ²] C_{d1}, C_{n1} : 比例定数 [MJ/K] C_{d2}, C_{n2} : 比例定数 [MJ/(K·h)] C_{d3} : 比例定数 [MJ/(MJ/m ²)] C_{n4} : 比例定数 [K/MJ] C_{n5} : 比例定数 [1/h] I_d : 空調時間帯における積算全日射量 [MJ/m ²] Q_d : 空調時間帯の空調機顕熱負荷(積算値,空気冷却を+) [MJ] Q_n : 非空調時間帯の躯体蓄熱用の空調機顕熱負荷(積算値,空気冷却を+) [MJ]		

複合ピトー管式である。ダクト開放端部において熱線風速計から求めた風量値を基準とし、風量計からのデータを比例補正した。また全天日射量を屋上で測定した。すべての測定データは、データロガーにより1分間隔で自動収録された。実測期間は1999年8月1日～9月26日である。

4.3 実測の設定条件

実測期間中、約1週間ごとに躯体蓄熱運転時間の設定を0, 3, 5時間と変えることで、回帰分析に有用なデータ収集を狙った。

9階会議室では空調・照明共、休日でも平日と同じ発停スケジュールを続けた。夏期休暇(8月7日～15日)中、昼間でも上階の空調運転が停止のまま上階の室温が高かった。このため、それ以降、上階の空調運転を休日でも平日と同じスケジュールで発停するようセットした。

吹出し風量は、躯体蓄熱運転時に約1400m³/h、空調運転時に約2000m³/hであった。また躯体蓄熱運転時の吹出し気流温度は約13℃一定であった。

4.4 スラブ熱量変化の定義

「スラブ内平均温度」と「スラブ熱量変化」を測定位置～ごとに次式で定義する(Fig.3の断面図参照)。

・スラブ内平均温度[℃] ((A点の温度)+(B点の温度)+(C点の温度)+ 0.5×((O点の温度)+(D点の温度)))/4

・スラブ熱量変化[J/m²] ((対象時間帯終了時のスラブ内平均温度)-(対象時間帯開始時のスラブ内平均温度))×2200[kg/m³]×880[J/(kg・K)]×0.15[m³/m²]

躯体蓄熱時間帯の「スラブ熱量変化」の絶対値が「躯体蓄熱量」である。また測定位置～の13位置、または～の9位置のスラブ平均温度の単純平均値をそれぞれ「13点平均」、「9点平均」と記す。

4.5 実測結果

8月20日(躯体蓄熱運転3～8時)を代表日とした。

4.5.1 日平均外気温 8月上旬には日平均外気温が30℃を超えた。8月中旬には30℃をやや下回るが、下旬には30℃程度に上がった。9月に再び低くなり、24～30℃であった。

4.5.2 空調時間帯平均の室温 26℃が室温目標値である。8月10日に室温設定を上げ、その日以降、ほぼ25～26℃に保たれた。

4.5.3 代表日の躯体蓄熱量 Fig.4に示すように、測定位置～と比較すると、躯体蓄熱用吹出口に近い測定位置～の躯体蓄熱量が圧倒的に大きい。かなり差があって次に測定位置～と続き、測定位置～にはほとんど蓄熱されていない。

4.5.4 測定位置～におけるスラブ熱量変化 測定位置～におけるスラブ上面・下面の通過熱量(熱流計測定

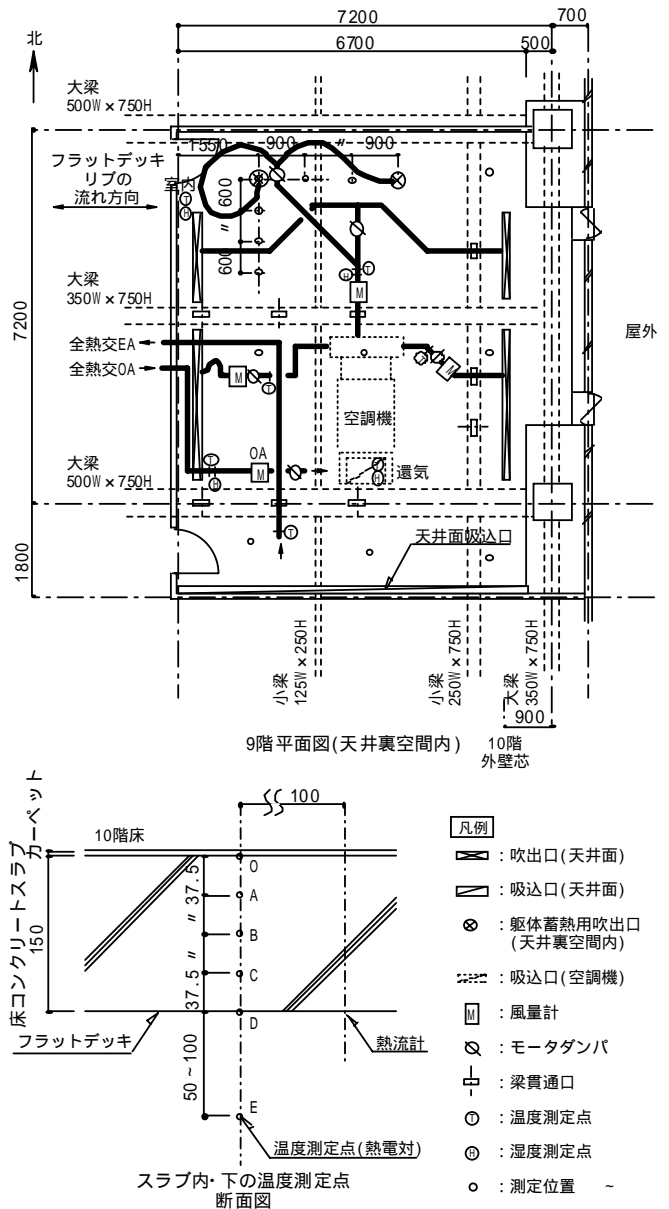


Fig.3 実測対象室の空調設備および測定点の平面・断面図
Plan and Section of Air-Conditioning Installation and Measuring Locations

Table 2 測定位置～におけるスラブ上面・下面の通過熱量とスラブ熱量変化
Heat Transferred through Upper/Lower Surface of Slab and Change in Heat Stored in Slab at Measuring Location

躯体蓄熱運転時間 時間帯	3時間 (5～8時)		5時間 (3～8時)	
	躯体蓄熱時間帯	空調時間帯	躯体蓄熱時間帯	空調時間帯
スラブ上面の 通過熱量 [kJ/m ²]	50～140 (平均 100)	140～790 (平均 420)	280～360 (平均 320)	160～730 (平均 450)
スラブ熱量変化 [kJ/m ²]	-1620～-1380 (平均 -1490)	920～1320 (平均 1120)	-1900～-1670 (平均 -1780)	1190～1580 (平均 1290)
スラブ下面の 通過熱量 [kJ/m ²]	-1300～-1110 (平均 -1210)	330～670 (平均 500)	-1720～-1500 (平均 -1630)	500～850 (平均 640)

Table 3 測定位置～における空調
時間帯の放熱量比率
Discharge Ratios at Measuring
Location during Daytime

躯体蓄熱運転時間 時間帯	3時間	5時間
スラブ上面からの 放熱量比率	9～51% (平均 28%)	9～39% (平均 25%)
空調時間帯のスラ ブ熱量変化比率	57～94% (平均 76%)	66～91% (平均 73%)
スラブ下面からの 放熱量比率	21～48% (平均 33%)	28～49% (平均 36%)

値から算出) とスラブ熱量変化を, 躯体蓄熱運転時間ごとにTable 2に示す。これらは, 休日も平日と同様に上階を空調した8月17日以降のデータから求めた。通過熱量ではスラブへの熱流入を+とした。スラブ内で水平方向の熱移動を無視できるとすると, スラブ上面・下面の通過熱量の合計がスラブ熱量変化に等しくなるはずだが, 表中の値は必ずしもそうになっていない。熱収支が合わないのは測定誤差, および設定したスラブ容積比熱の誤差が主因と考える。

当該日の躯体蓄熱量を100%とした時の, 空調時間帯の放熱量の比率を, スラブ上面・下面およびスラブ熱量変化についてTable 3に示す。躯体蓄熱3時間運転と5時間運転で, あまり差がない。空調時間帯に躯体蓄熱量の7~8割が放熱し, 上階・下階へはそれぞれ躯体蓄熱量の約2~3割・約3~4割が放熱した。

5. 統計的算出法の適用

3.2節で説明した統計的算出法を, 実測データに適用した。まず式(3)~式(5)の各係数を実測データから回帰分析により求める。それには, 室内顕熱負荷 Q_{rd} , Q_{rn} が一定となる条件を選ぶ必要がある。会議室という室用途の性格上, 平日の空調時間帯の室内顕熱負荷は日により変動すると予想されるが, 休日には室内顕熱負荷 Q_{rd} がほぼ一定と推定できるので, 休日のデータを使って式(3)の回帰分析を行えば, 比例定数 $C_{d1} \sim C_{d3}$ と定数 Q_d が求められる。非空調時間帯には平日・休日にかかわらず, 室

内顕熱負荷 Q_n がほぼ一定と想定でき, そのときのデータを用いて式(4)と式(5)を回帰分析すれば, 同様に $C_{n1} \sim C_{n5}$ と定数 Q_n , T_{rs} が得られる。

休日も上階を平日と同様に空調した8月17日以降の測定データを回帰分析に用いた。但し, 設定条件を変更した初日と, 種々の事情で空調運転制御が設定と異なった日のデータを外した。

スラブ内平均温度(13点平均)のデータを用いての回帰分析から, 次式が得られた。

$$Q_d - Q_x = -12.9 \cdot (T_{c2} - T_{c1}) + 0.388 \cdot T_d \cdot t_d - 0.418 \cdot I_d + 43.6 \quad (a)$$

$$Q_n = -26.2 \cdot (T_{c1} - T_{c0}) + 0.369 \cdot T_n \cdot t_n + 12.6 \quad (b)$$

$$T_{rn} = -0.0244 \cdot Q_n + 0.00742 \cdot T_n \cdot t_n + 26.6 \quad (c)$$

またスラブ内平均温度(9点平均)のデータを代わりに用いると, 次式が得られた(式(f)は式(c)と同じ)。

$$Q_d - Q_x = -14.5 \cdot (T_{c2} - T_{c1}) + 0.421 \cdot T_d \cdot t_d - 0.421 \cdot I_d + 43.7 \quad (d)$$

$$Q_n = -27.4 \cdot (T_{c1} - T_{c0}) + 0.396 \cdot T_n \cdot t_n + 11.5 \quad (e)$$

$$T_{rn} = -0.0244 \cdot Q_n + 0.00742 \cdot T_n \cdot t_n + 26.6 \quad (f)$$

式(a)と式(b)の右辺第1項の係数にはスラブ熱容量が関係する。参考値として, スラブ熱容量は $20.6 \text{ MJ/K} (= \text{スラブ面積} 71.1 \text{ m}^2 \times \text{厚さ} 0.15 \text{ m} \times 2200 \text{ kg/m}^3 \times 880 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 10^{-6} \text{ MJ/J})$ である。非空調時間帯の式(b)の係数に対し, 空調時間帯の式(a)の係数が約半分であるのは, 躯体蓄熱の内, 半分近くが空調時間帯にスラブ下面から出て対象室の空調機顕熱負荷削減に寄与するという実測結果と対応する。

式(a)と式(b)の右辺第2項の係数は主に, 室の断熱性能と対応し, 式(a), 式(b)共, 同程度の値である。

式(a)~式(f)による再現性をチェックするため, 計算値を測定値と照合した。結果をFig.5に示す。再現性は妥当と考える。

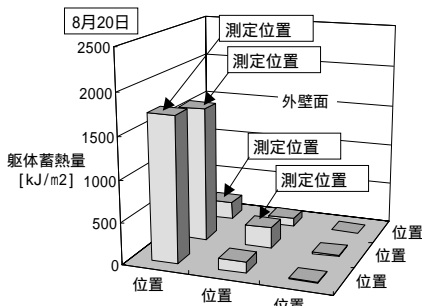


Fig.4 代表日の躯体蓄熱
Charged Energy in Slab of Representative Day

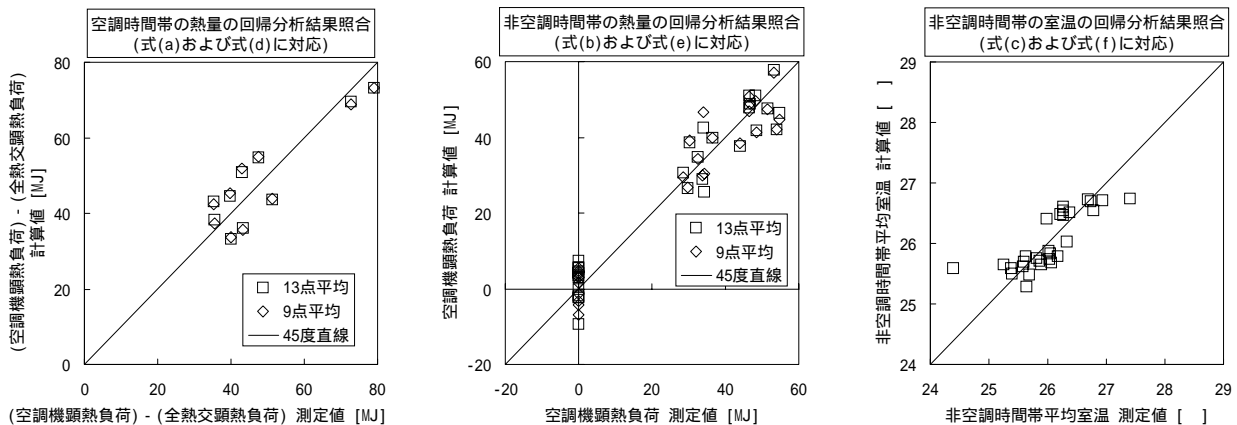


Fig.5 回帰分析結果と測定結果の照合
Comparison between Measurement and Calculation through Regression Analysis

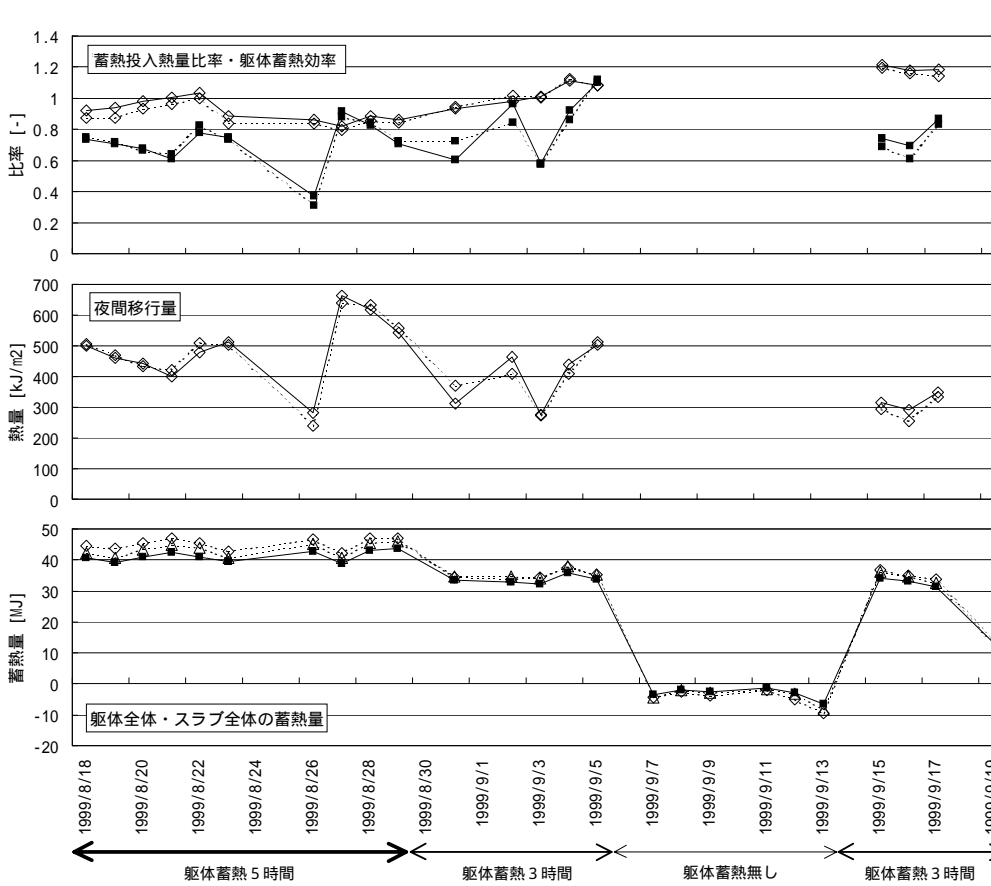


Fig.6 統計的算出法により求めた躯体蓄熱に関わる各効率・熱量
Calculated Effectivenesses and Heat relative to Building Thermal Mass Storage

式(a)～式(f)を用いて、次の効率・熱量を日ごとに算出し、Fig.6に表した。スラブ内平均温度(13点平均)のデータの代わりに9点平均のデータから算出した式(d)～式(f)を用いても、各効率・熱量は大差ないことが図から分かる。このことより、スラブへの蓄熱の状況を反映する位置の温度データが含まれれば、温度測定的位置や数によらずに、各効率・熱量を算出できると考える。

各効率・熱量は次のようにまとめられる。

- 1) 蓄熱投入熱量比率は約0.8～1.0である。
- 2) 躯体蓄熱効率は約0.6～1.0である。
- 3) 夜間移行量は約400～500 kJ/m²である。これをスラブだけの熱量と仮定すると、約1.4～1.7Kの温度差に相当する。

4) 躯体全体の蓄熱量は蓄熱投入熱量比率の分子、すなわち $(C_{n1} \cdot (T_{c1} - T_{c3}))$ で計算できる。これをスラブ全体の蓄熱量の測定値と照合する。スラブ全体の蓄熱量は、測定位置～の躯体蓄熱量に対応面積を掛けて求めた。「計算値」は躯体全体の蓄熱量、「測定値」はスラブ全体の蓄熱量と対象が異なるものの、両者は同程度の値を示す。「測定値」では測定位置、でスラブ熱量変化を過大に捉えている一方、スラブ以外の蓄熱部位を含めていず、両方の要因の効果が相殺した結果、ほぼ等しくなったと推測する。

算出された蓄熱投入熱量比率と躯体蓄熱効率が日によって異なる原因は主に、スラブの温度が1日周期で元に戻らないことにあると考えられる。そこで前日18時と

当日18時のスラブ内平均温度の差が、13点平均、9点平均のいずれでも0.1 K以内という条件に当てはまる8月18, 19, 31日に限ってFig.6を見直すと、蓄熱投入熱量比率は約0.9、躯体蓄熱効率は約0.7と比較的ばらつきの少ない値が得られる。

6. まとめ

実測データを用いた回帰分析によって、仮定した熱量や温度に関する式の各係数を求めることで、躯体蓄熱効率等の性能指標を算出する手法を提示した。得られた式は測定結果をほぼ再現し、この手法の妥当性が確認された。算出された性能指標は、スラブの温度が前日の温度に戻る日に限定すると、蓄熱投入熱量比率 = 約0.9、躯体蓄熱効率 = 約0.7であった。

謝辞

本論文の内容は、中部電力(株)との共同研究で得られた成果の一部である。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石野, 木村: 各種空調熱負荷算法の実測による比較検証の研究, 空気調和・衛生工学, Vol.47, No.9, pp.25～34, (1973.9)