

ファンコイル方式で空調された階段型大教室の温熱環境調査

入 江 謙 治^{*1} 大 場 正 昭^{*2} 菊 池 世 欧 啓^{*3}

Indoor Climate Measurement of a Large Auditorium with Stairs Air-conditioned by Fan Coil Unit Systems

Kenji IRIE, Masaaki OHBA, Seohiro KIKUCHI

Large auditoriums with stairs produce inhomogeneous vertical temperature profiles, which cause uncomfortable thermal condition in the occupant zone. The indoor thermal environment about an auditorium with a space of 1950m³ were investigated to evaluate the indoor climate in summer and winter. From field measurements, the following conclusions were obtained. In winter, air temperature at the ceiling level was 13 centigrade higher than that at the floor level. Also, the temperature at the entrance level, equivalent to 35 centigrade, was 7.7 centigrade higher than that at the level of teacher's desk. Therefore, the thermal comfort in winter was evaluated too warm by the PMV measurement. This large temperature differences occurred due to the stagnant warm air in the ceiling zone and the cold stream flowing down from the blackboard to the floor. It was concluded that mixing fans capable of recirculating the stagnant air had to be operated to eliminate the inhomogeneous temperature differences. In summer, homogeneous temperature distribution was obtained vertically and horizontally. The thermal environment was evaluated slightly cool.

1. 序

教室は着席状態で長時間在室するため、特に良好かつ均一な室内温熱環境が望まれる。しかし、大教室はその性格上、ほとんどの場合、階段教室として計画されるため、特に暖房時において上下温度差が生じやすいなどの環境的検討課題が多い。本研究では快適な温熱環境が得られる空調方式を設備設計することを目的として、実状把握のため冷房時及び暖房時における温熱環境調査を実施したので報告する^{1)~3)}。

2. 調査建物の概要

調査対象建物は本学の階段型大教室である。写

真-1に測定機器設置時の教室状況を示す。

(1) 教室概要 室内空間は高さ 5.25m、幅、奥行き共に 20m の八角形で、天井、床共に段差のある階段教室である。面積は約 370m²、室容積は約 1950m³、収容人数はおよそ 250 人を有する。

(2) 空調設備 図-1 に空調、換気設備機器の室内設置状況を示す。空調方式はファンコイルユニット方式でペリメーターゾーンの床面に 12 台設置されている。各ユニットの寸法は 1.9^Lm × 0.23^Wm × 0.64^Hm で、吹き出し面積は 0.16m²。熱源は冷温水発生器 (川崎重工 OWN-60A) で、冷房能力 181.44 × 10³Kcal/h(60USRT)、暖房能力は 165.6 × 10³Kcal/h、冷水出口温度 7℃、冷却水入

^{*1} 本学建築学科、助手

^{*2} 本学建築学科、教授

^{*3} 川本工業(株)R & D 本部開発課

1998 年 9 月 16 日 受理

口温度 32℃、温水出口温度 60℃である。室温制御は室内後方出入口付近に設置されたサーモスタットにより冷房時 23℃、暖房時 21℃に設定されていた。天井には室内空気を循環させるためのファンの吹き出し口、吸い込み口が4ヶ所ずつ、壁面上部には換気扇が8台設置されていた。

3. 実測概要

3.1 測定期間

1997年12月8日～13日の冬季と、1998年7月3日～11日の夏季について実測を行った。

3.2 測定方法

多点式データロガーの入力点数が30点のため、測定は3種類に分類し、それぞれファンコイルユニット吹き出し温度、室内平面温度分布及び鉛直温度分布を主として測定した。表-1に測定項目、測定機器及び記録方法の一例を示す。

(1) 温度 図-2に平面測定点を示す。温度測定は授業中も行うため、入室、退室時の学生の動線を考慮し、床から1.2mの高さに12点設置した。図-3に鉛直測定点を示す。鉛直測定点は室前方(A点)、室中央(B点)、室後方(C点)の3ヶ所にそれぞれ、冬季実測時の室前方(A点)、室後方(C点)を除いて、床面、天井面を含む鉛直方向に8点設置し測定を行った。外気温は教室南側で、地面から1.2mの高さで測定した。ファンコイルユニット吹き出し温度は、各々のファンコイルユニット吹き出し口中央で測定した。温度測定には熱電対を用い、筒状のアルミで覆い放射の影響をカットした。データは10分毎にサーモダック(多点式データロガー)、ノートパソコンを用いて記録した。

(2) 湿度 室内湿度の測定は床面から高さ1.2mの室前方(A点)、室中央(B点)、室後方(C点)で60分毎にPMV測定器により行った。外気湿度は外気温測定点と同じ教室南側で、アスマン乾湿計により冬季実測では30分毎、夏季実測では60分毎に測定した。

(3) PMV 床面から高さ1.2mの室前方(A点)、室中央(B点)、室後方(C点)でPMV測定器により測定した。作業量の met 値は1.0、着衣量の clo 値は冬季1.0、夏季0.4に設定した。

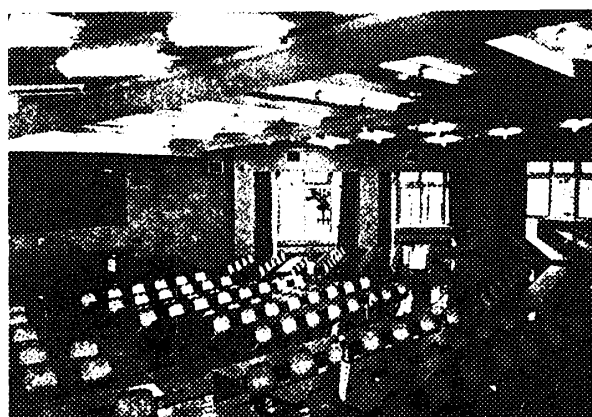


写真-1 測定教室の状況

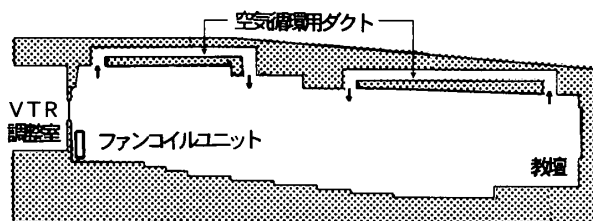
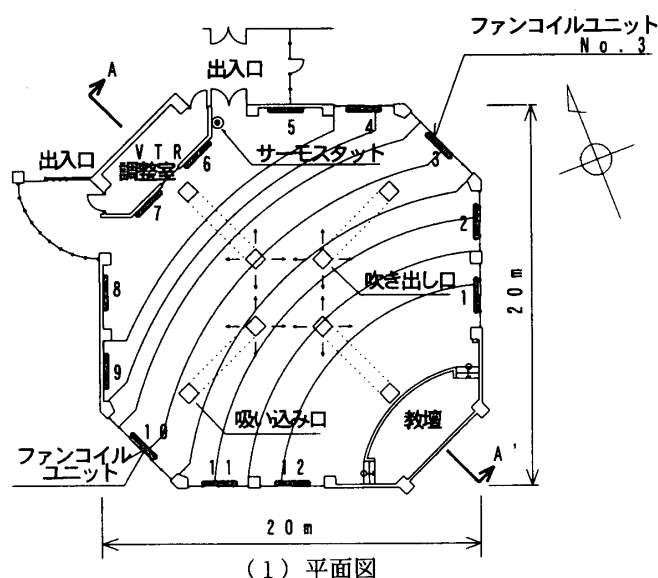


図-1 空調、換気設備機器の室内設置状況

表-1 測定項目、測定機器及び記録方法

測定項目	測定機器	測定点	記録方法	測定時間
温度	熱電対	平面温度分布	6点	自動
		鉛直温度分布	1カ所6点 (夏季8点)	自動
		吹き出し温度	12点	自動
		外気温度	1点	自動
湿度	PMV測定器	室内湿度	1点	手動
	アスマン乾湿計	外気湿度	1点	手動
	PMV測定器	PMV	3点	手動
日射量	全天精密日射計	1点	自動	10分毎
気流	吹出し風速	7ヶ所・風速計	3.6点	手動

(4) 日射量 隣接建物の影による影響を考慮し、当該建物屋上中央部で全天精密日射計により測定を行った。データは 10 分毎にサーモダック(多点式データロガー)、ノートパソコンを用いて記録した。

(5) 気流 ファンコイルユニット吹き出し口、室内空気循環用ファンの吸い込み口で測定した。測定方法は吹き出し口、吸い込み口面積をそれぞれ均等に 3 分割、9 分割してアネモマスター風速計により測定した。

3.3 測定条件

表-2 に測定条件を示す。

(1) 冬季実測 1997 年 12 月 8 日～13 日の期間測定した。このうち 10 日と 12 日は授業による学生の出入りがある中で測定を行った。10 日は 9:20～16:30 まで授業が行われ、在室者の意志で窓の開閉が行われた。PMV 測定は通常、在室者のいない状態で行ったが、12 日の 12:30 のみ約 50 人の学生がいる中で測定を行った。

(2) 夏季実測 1998 年 7 月 3 日～11 日の期間測定を行った。自動計測が可能な、日射量、温度については、午前 5:00 より測定を開始した。

4. 冬季実測結果及び考察

(1) 日射量と外気温 図-4 に 12 月 13 日の日射量と外気温の時間変化を示す。日射量は 11:30 に最大値 $457 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ を示し、16:50 以降は $0 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ まで減少した。14:00～14:10 の間におよそ $200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ に及ぶ顕著な減少がみられるが、これは他の測定日のデータと比較した結果、周辺建物の影による影響ではなく、天候によるものだと考えられる。外気温度は測定開始時 8:30 には 6.1°C を示し、時間の経過と共に上昇して、13:20 には最大値 14.6°C を示した。その後、減少傾向を示し 18:00 には 6.6°C まで減少した。

(2) 湿度分布 図-5 に湿度の時間変化を示す。外気湿度は測定開始時から 11:00 までは、45% 前後の値を示したが、13:00～16:00 の間は 30% 前後の低い値を示した。しかし、その後徐々に上昇し 18:00 には 45% を示した。11:30 に 69% と高

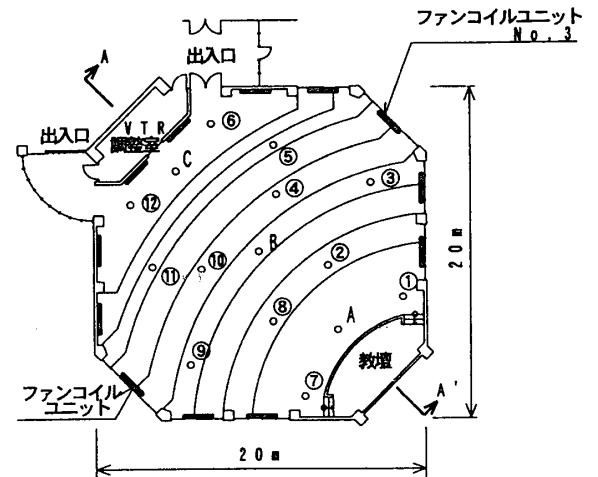


図-2 床上 1.2m の温度測定点

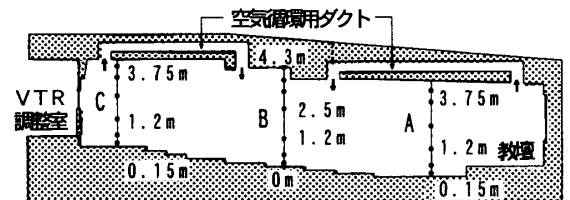


図-3 鉛直の温度測定点 (A-A'断面)

表-2 測定条件

(1) 冬季実測 (1997年)

日付	12月10日 (木)	12月12日 (金)	12月13日 (土)
天気	晴れ	晴れ	晴れ
空調機運転時間	8:45～18:00	8:45～18:00	8:45～18:00
測定時間	8:30～18:00	8:30～18:00	8:30～18:00
在室人数	1限 30人 2限 158人 3限 92人 4限 89人	1限 58人 2限 80人	0人

(2) 夏季実測 (1998年)

日付	7月9日 (木)	7月10日 (金)	7月11日 (土)
天気	晴れ	雨のち晴れ	晴れ
空調機運転時間	8:50～18:00	8:50～18:00	8:50～18:00
測定時間	8:30～18:00	8:30～18:00	8:30～18:00
在室人数	2限 130人	1～2限 60人	0人

授業時間 1時限：9:20～10:50、2時限：11:00～12:30

3時限：13:20～14:50、4時限：15:00～16:30

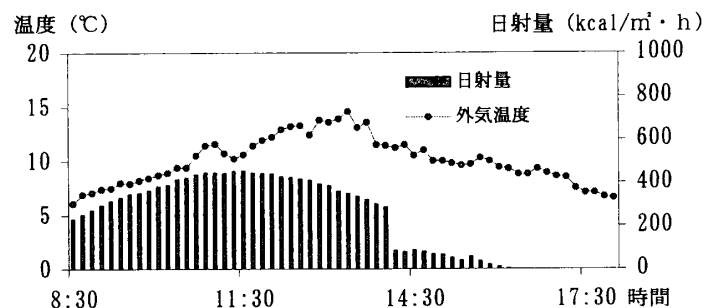


図-4 12月13日の日射量と外気温の時間変化

い値を示しているが、これは湿球温度計感温部のガーゼに与えた水分が少なかったことによる測定誤差と考えられる。室内湿度は、測定開始時の8:30に比べ空調運転開始後、僅かに減少したが25%~28%とほぼ安定した分布を示した。

(3) ファンコイルユニットの運転状況 図-6にファンコイルユニット No.3 の吹き出し温度と室内温度の時間変化を示す。測定開始直後の8:30では、ファンコイル吹き出し温度は、ほぼ室温と同じ15℃前後であったが、空調運転開始後、温度は上昇し、9:50には51℃まで達した。そして約40分間の運転休止後、約20分間の運転、40分間の休止を繰り返した。室内温度は空調運転に連動して変動を繰り返した。ファンコイルユニットの運転、休止に伴う温度変動は、室後方(C点)で最も大きく生じた。

(4) 吹き出し風速 ファンコイルユニットは、弱、中、強の3段階に風速を設定できた。各ファンコイルユニットの吹き出し風速をアネモマスター風速計により測定した。各ファンコイルユニットの吹き出し風速を平均化した結果、弱設定時1.36m/s、中設定時2.08m/s、強設定時3.06m/sであった。天井面に設置された室内空気循環用ファンの吸い込み風速の平均値は1.80m/sであった。

(5) 平面温度分布 図-7に空調運転停止時(13:30)の平面温度分布を示す。床高さが高くなる教壇側から室後方出入口へ向かい徐々に高い温度を示した。室最高温度は室後方の⑫点で26.3℃、室最低温度は教壇側の⑦点で24.0℃で、室内温度差は最大2.3℃生じた。図-8に測定時間中最大の温度差が生じた空調運転時(14:00)の平面温度分布を示す。空調停止時に比べ教壇側から室後方出入口へ向かい顕著な温度上昇を示したが、室中央部分では、ほぼ左右に均等な温度分布がみられた。室最高温度は室後方のC点で34.7℃、室最低温度は室教壇側の①、⑦点で27℃であった。室最大温度差は7.7℃生じた。

(6) 鉛直温度分布 図-9に室中央(B点)の鉛直温度分布を示す。空調運転前(8:40)は床面を除き、15℃前後でほぼ一様な分布を示した。空調運転開始直後は、高さ1.2m以上の測定点で顕著

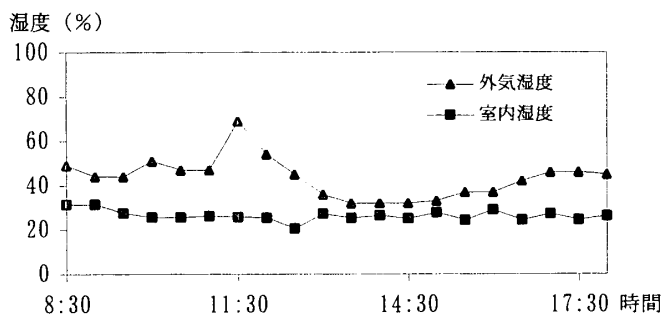


図-5 12月13日の湿度の時間変化

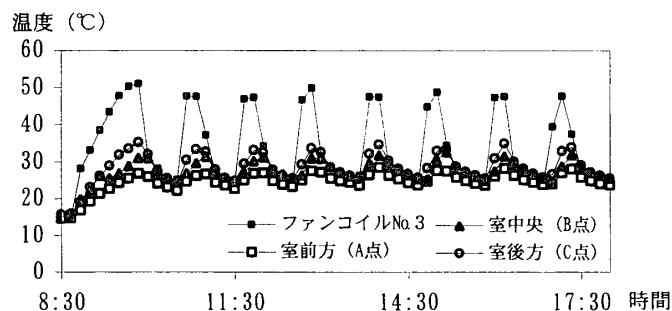


図-6 12月13日ファンコイルユニット No.3 の吹き出し温度と室内温度の時間変化

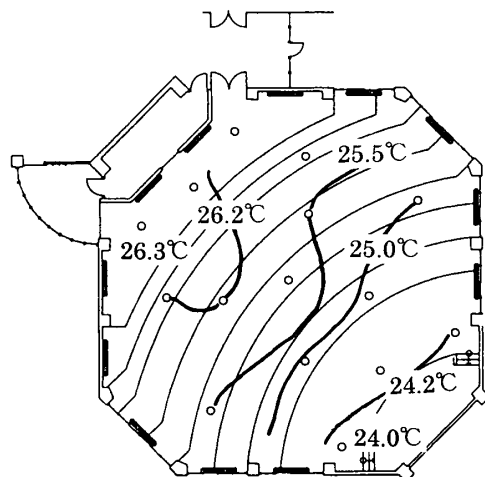


図-7 ファンコイルユニット停止時の平面温度分布 (12月13日13:30の床上1.2m)

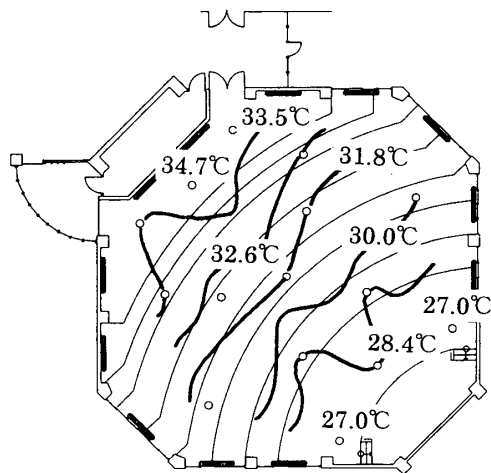


図-8 ファンコイルユニット運転時の平面温度分布 (12月13日14:00の床上1.2m)

な温度上昇がみられ、急激に温度勾配が形成された。9:40の段階では、高さ2.5mの測定点で35.5℃を示し、床面、天井面を除く高さ方向の最大温度差は13℃生じた。その後、ほぼ一定サイクルでの空調運転が行われていたが、空調運転時(15:00)と運転休止時(17:00)では高さ2.5mの測定点において、7.5℃の温度差が生じた。図-10に室前方(A点)の鉛直温度分布を示す。高さ0.5mで時間によらず22~24℃の低い温度分布がみられた。これは天井面に沿って室中央から室前方にゆっくりと流れてきた暖かい空気が、黒板面にぶつかり冷やされて下降する気流と、黒板と壁体の隙間から流れ出す冷たい空気とが合わさって冷気流が形成された。この気流により足下付近の空気が冷却されたためだと考えられる。空調運転時(15:00)と運転休止時(17:00)では高さ2.2mの測定点において、7.0℃の温度差が生じた。図-11に14:00における室前方(A点)と室中央(B点)の鉛直温度分布の比較を示す。室中央(B点)は、高さ0.15m、3.75mの測定点を除き、室前方(A点)に比べ3~4℃の温度差が生じた。

(7) PMVによる室内温熱環境評価 PMVとは快適さを表す指標であり、温熱環境の6要素(空気温度、放射温度、気流、湿度、着衣量、代謝量)から熱平衡を考え、温冷感申告と対応させたもので、寒いから暑いまでを-3~3の7段階で表す。快適範囲としては、不満足者率<10%である-0.5~0.5である。表-3にPMVの温冷感評価指標を、図-12に12月13日のPMVの時間変化を示す。測定は、放射温度の値が安定するまで5分程度の時間を要したので、3点の測定点間で最大10分程度の時間差が生じた。室内温度が空調運転に伴い比較的速い温度変動を示したために、測定点間の温度差がPMV値に十分反映されなかった。各測定点のPMV値は空調運転前およそ-2.0を示したが、空調運転後は上昇した。室前方(A点)では10:00~16:00までは、ほぼ1.0~2.0の範囲で安定していた。快適感としては「やや不快」である。室中央(B点)や室後方(C点)では2.0を越えることもあり快適感「不快」である。

(8) 在室者の影響 図-13に12月10日の

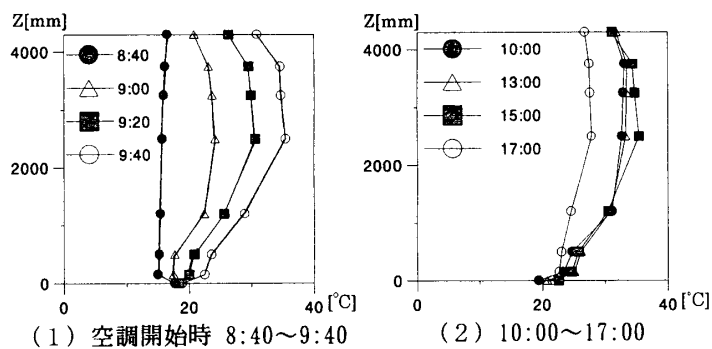


図-9 12月13日の室中央(B点)の鉛直温度分布

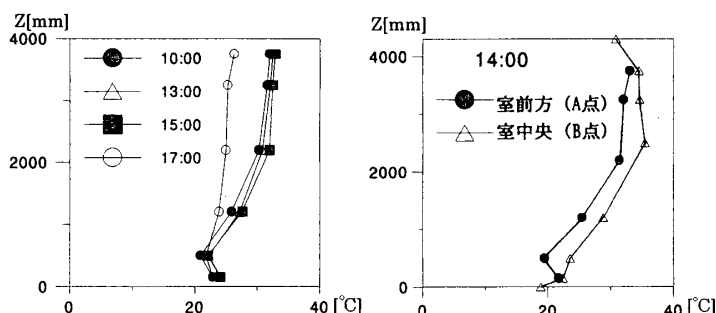


図-10 室前方(A点)の鉛直温度分布

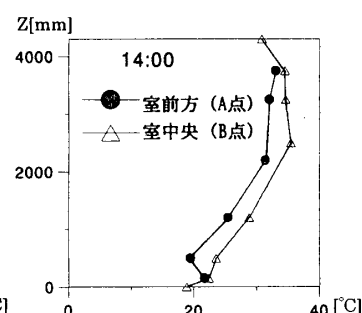


図-11 室前方(A点)と室中央(B点)の鉛直温度分布の比較

表-3 PMVの温冷感評価指標

PMV	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
温冷感	暑い	暖かい	やや暖かい	どちらでもない	やや涼しい	涼しい	寒い
				不快 ←		快適	不快

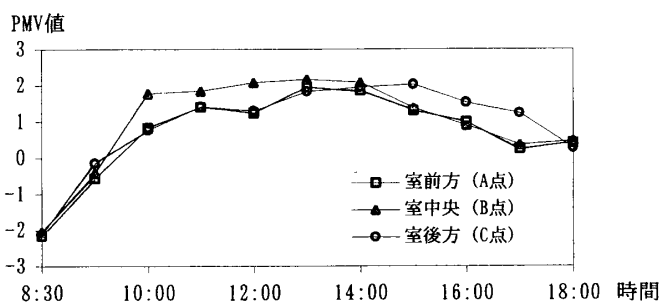


図-12 12月13日のPMVの時間変化

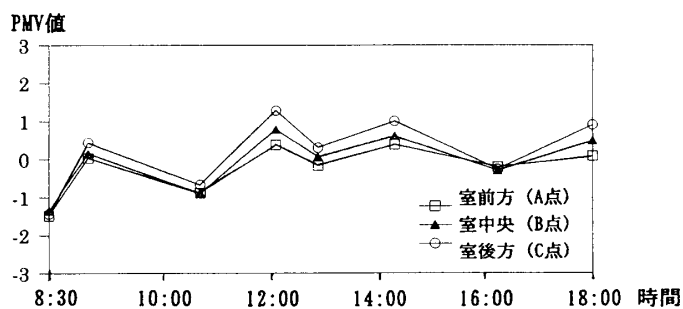


図-13 12月10日のPMVの時間変化

PMV の時間変化を示す。9:20～16:30 まで授業が行われたため、授業開始前と授業終了直後に測定を行った。在室者は室内環境を窓の開閉などにより調整し、PMV 値は-1～1 の範囲の分布を示した。不在時の環境に比べ改善が見られたが、今回の測定では室内温度や湿度に及ぼす在室者の影響を定量的にとらえることはできなかった。

5. 夏季実測結果及び考察

(1) 日射量と外気温 図-14 に 7 月 9 日の日射量と外気温の時間変化を示す。日射量は、午前中 10:00 の $748 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 、午後 13:40 の $860 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ をピークとして分布を形成し、18:50 には、ほぼ 0 まで減少した。外気温は 10:00 の 35.8°C を最高として、 $24^\circ\text{C} \sim 36^\circ\text{C}$ の範囲で緩やかな分布を示した。

(2) ファンコイルの運転状況 図-15 にファンコイルユニット No.3 の吹き出し温度と室内温度の時間変化を示す。空調運転前の 8:40 では、室内温度は測定点によらず 29°C 前後を示した。8:50 の空調運転開始後、ファンコイルユニット吹き出し温度は 9:30 に 12.5°C まで下降し、その後、 $12^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ の間で変動を繰り返した。冷房運転では吹き出し温度の変動が少ないことから、室後方(C点)では 27°C 前後、室前方(A点)、室中央(B点)は 24°C 前後で安定していた。

(3) 鉛直温度分布 図-16 に空調開始時における鉛直温度分布を示す。室中央(B点)において、空調運転前の 8:40 では床、天井面を除き高さ方向の温度差は最大 2.4°C であったが、運転開始後は高さ 1.2m 以下の測定点で顕著な温度の下降がみられ、9:40 における高さ方向の温度差は最大 4.7°C 生じた。室後方(C点)では、空調運転前の 8:40 では高さ方向の温度差は最大 1.8°C であったが、運転開始後は高さ 0.5m 以下の測定点で顕著な温度の下降がみられ、9:40 における高さ方向の温度差は最大 5.9°C 生じた。図-17 に 10:00～16:00 の室中央(B点)、室後方(C点)における鉛直温度分布を示す。室中央(B点)、室後方(C点)共に、空調の運転、休止によらず、ほぼ同じ分布を示した。図-18 に 14:00 における鉛直温度分布の比較を示

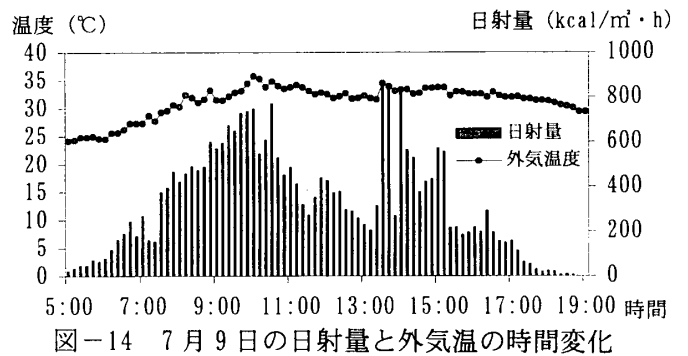


図-14 7月9日の日射量と外気温の時間変化

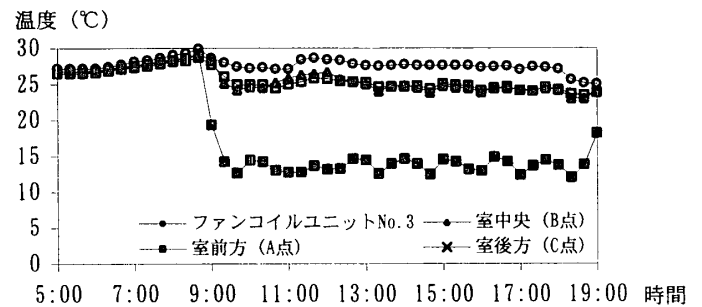


図-15 7月9日ファンコイルユニット No. 3 の吹き出し温度と室内温度の時間変化

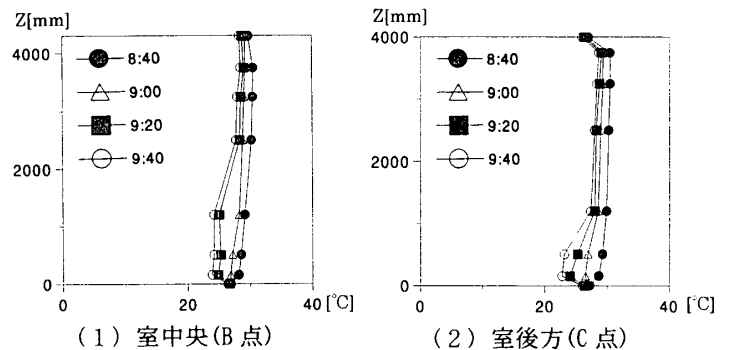


図-16 7月9日の空調開始時における鉛直温度分布

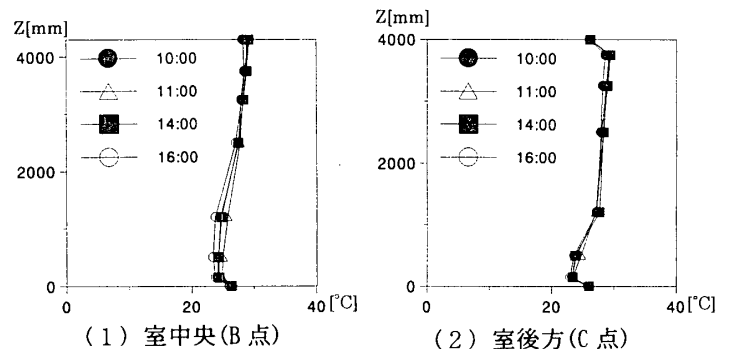


図-17 7月9日の10:00～16:00における鉛直温度分布

す。室前方(A点)は床、天井面を除く高さ方向の温度差が小さく、最大 3°C であった。室中央(B点)では、高さ 1.2m まではほぼ室前方(A点)と同じ分布を示したが、それより上方では室前方(A点)に比べやや高い温度を示し、高さ方向の最大温度差は 4.5°C 生じた。室後方点(C点)では 1.2m 以上で高い温度を示し、高さ 1.2m における室前方(A点)、室中央(B点)との温度差はおよそ 3°C であった。高さ方向の最大温度差は 6°C 生じた。

(4) 湿度分布 図-19に7月11日の湿度の時間変化を示す。外気湿度は16:00まで75%前後の値を示したが、17:00以降上昇し、18:00には87%を示した。室内湿度は10:00に60%まで減少したが、その後は65%前後の値を示した。

(5) 平面温度分布 図-20に15:00の水平温度分布を示す。ファンコイルユニットがペリメーターゾーンに設置されているため、室内中央部でやや温度が高くなっている。しかし冬季に比べて温度差は少なく、最大で 0.8°C 生じた。

(6) PMVによる室内温熱環境評価 図-21にPMVの時間変化を示す。空調運転前は1.0を示したが、空調運転後は下降し10:00以降は $-1 \sim -1.5$ の範囲で安定した分布を示した。快適感としては「やや不快」である。

6. 結語

本学の階段型大教室の温熱環境を夏季と冬季に調査した結果、次のことが判った。

(1) 冬季の階段型大教室の温熱環境は、空調運転の発停による室温変動が激しかった。空調運転時に床レベルと天井レベルの間に、 13°C 以上の大きな上下温度差が生じた。平面的には室後方の床上 1.2m で 35°C 近い温度を示し、教壇側と比べて 7.7°C 高かった。室前方(A点)でのPMV指標は「やや不快」であったが、室中央(B点)、室後方(C点)では「不快」を示した。現状で在室者がいる場合には、窓の開放などの手段により温熱環境の改善が行われていた。

(2) 夏季の階段型大教室の温熱環境は、冬季に比べ上下温度差が小さく、比較的安定していたが現状では室温が低くPMV指標では「やや不快」

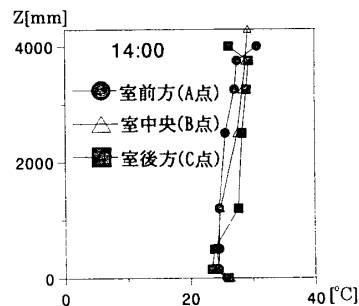


図-18 室前方(A点)、室中央(B点)及び室後方(C点)の鉛直温度分布の比較

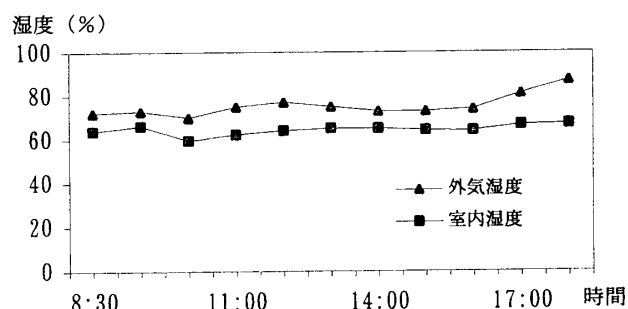


図-19 7月11日の湿度の時間変化

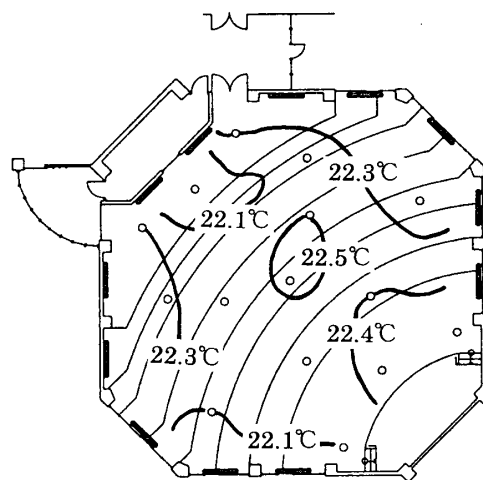


図-20 平面温度分布 (7月11日15:00 床上 1.2m)

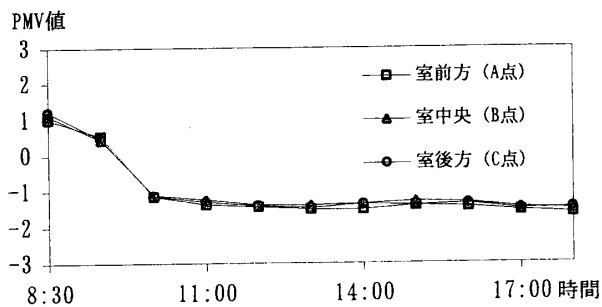


図-21 7月11日のPMVの時間変化

という評価であった。

現在の階段型大教室の温熱環境は好ましい状況とは言えず、今後、測定データを基に数値解析⁴⁾を行い、快適な温熱環境が得られる空調方式を検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 鯉淵, 小林, 田中 : アトリウムの温熱環境の実測、東京工芸大学紀要、18、43-51、1995
- 2) 石野, 郡, 宮崎, 石谷 : オープンアトリウムをもつ建物の温熱環境に関する実測研究 1～8、日本建築学会大会学術講演集、1993
- 3) 鈴木 : ファンコイルユニットによる空気調和の室内空気分布について、労働衛生工学第6号、pp.25～pp.36、1966
- 4) 戸河里, 荒井, 三浦 : 大空間における上下温度分布の予測モデル その1 大空間の空調・熱環境計画手法の研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.427、pp.9～19、1991