

アトリウムの温熱環境の実測

大きなトップライトをもつ場合

鯉 渕 健 造^{*1} 小 林 信 行^{*2} 田 中 幸 彦^{*3}

FIELD MEASUREMENTS OF THERMAL ENVIRONMENT IN ATRIUM WITH A LARGE TOP-LIGHT

Kenzo KOIBUCHI Nobuyuki KOBAYASHI Yukihiro TANAKA

Thermal environment in the atrium with a large movable top-light have been studied by measuring the temperature distributions and PMV for various air-conditioning conditions. These field measurements were conducted in summer, autumn and winter. In winter, the influence of the cold air penetration from the entrance on temperature condition were also examined.

The temperature in the atrium was strongly influenced by the solar radiation in every season and the stagnant air layer with high temperature arose in the upper part of the atrium, especially in summer. When the top-light roof was opened, the stagnant thermal layer was removed and relatively comfortable condition was achieved in the atrium. Under the normal air-conditioning, thermal environment conditions in the occupied zone were shown as "relatively warm" in summer, "neutral" in autumn and "neutral" in winter by the measurement of PMV.

In winter, the air temperature in the occupied zone dropped by 7 to 8 °C due to the cold air penetrated from the entrance while five people were passing through the entrance doors. Six minutes was nearly required to recover the level of the former comfortable indoor temperature.

1. 序

ここ数年、アトリウムを設ける建築物が多数見られる。その建物の利用者は、アトリウム空間に対して“明るい” “開放的である”等の印象を持ち、比較的良いイメージ持っているようである^{1) 2) 3)}。

ほとんどのアトリウムのトップライトはガラス面で構成されているため、特に夏季において、日中、上層部での温度が急上昇し、アトリウム上下の温度差が大きくなること、空調負荷が増えること等の問題が多数あげられる。

今回、開閉可能な大きなトップライトを有する

アトリウム空間内の温熱環境について夏季、秋季、冬季にわたり実測調査を行ったので、その結果と冬季の玄関開閉（人が玄関を出入りする場合）によるアトリウム空間の温熱環境への影響についての結果を報告する。

2. 測定建物概要

(1)対象建物 写真1に建物外観を示す。対象建物は東京都府中市に建つ、地上11階、地下2階の宿泊室226室と各種研修設備を有する研修所である。図1に1階平面及び1階測定点、図2に南北断面及び鉛直温度分布測定点を示す。また写真2、3

*1 本学建築学科，助手

*2 本学建築学科，教授

*3 (株)フジタ技術研究所

1995年10月9日受理

に建物内部の状況を示す。アトリウムは建物1階から11階まで吹き抜けており、高さ47.1mで、長径42m、短径28.8mの楕円形である。屋根はトップライトになっており、厚さ10mmの網入り飛散防止フィルム貼り付け普通ガラスで中央部分が開閉可能である。また、1階には高さ3m程の木が6本植えられており、6.5m×16mの池がある。

(2)空調設備 図3に1階吹出し、吸込み口及び床暖房配置を示す。アトリウムに対する空調は単一ダクト方式であり、また5～10階の廊下に対しては天井に吹出口を設け、別系統の空調を行っている。更にアトリウム1階には温水床暖房（面積約826m²）を設置している。温水は地域冷暖房施設より供給され、その流量制御により温度調整をしている。

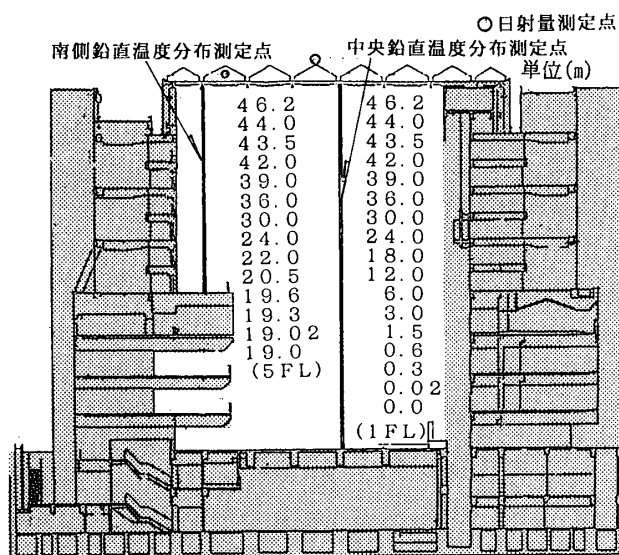


図2 南北断面及び鉛直温度分布測定点

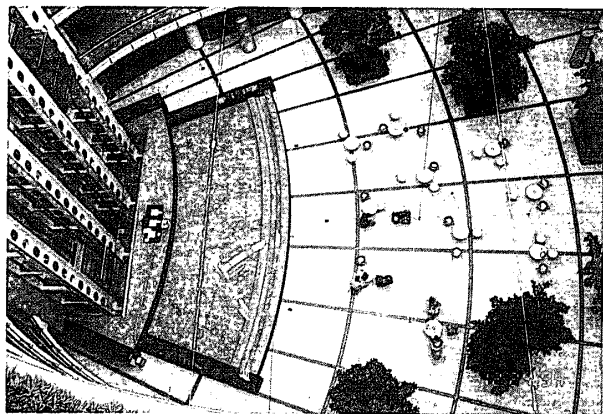


写真2 建物内部の様子（上から1階を見る）

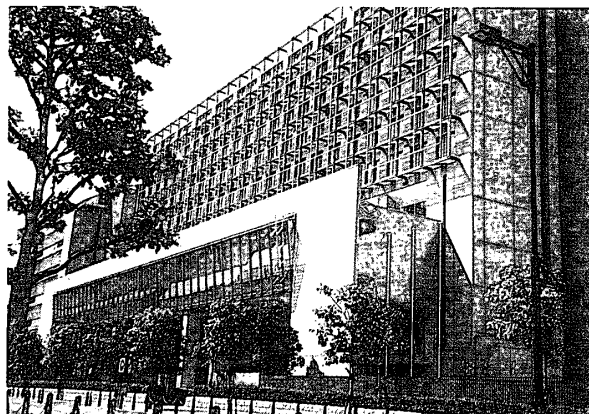


写真1 建物外観

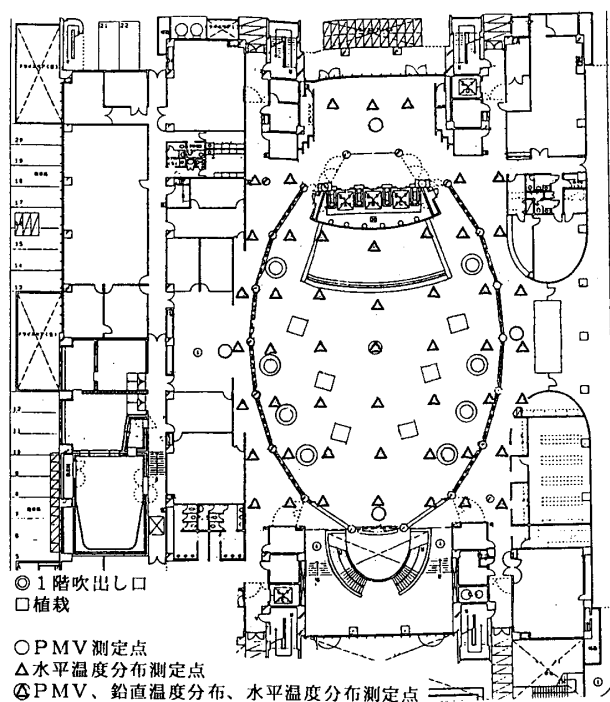


図1 1階平面及び1階測定点

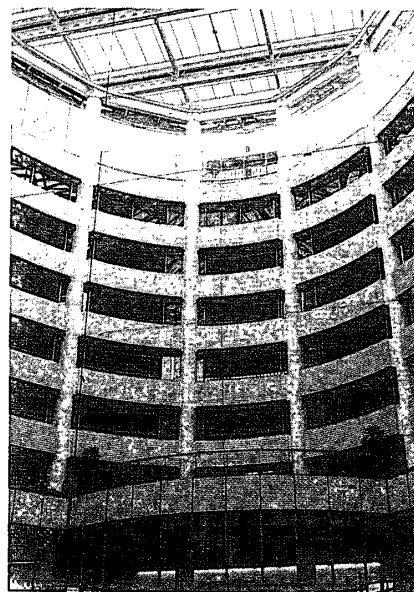


写真3 建物内部の様子

3. 実測概要

(1)測定期間 夏季1994年8月14～17日、秋季11月5～6日、冬季12月24～28日である。(2)測定項目、測定方法及び測定機器 表1に測定項目、測定方法及び測定機器を示す。(3)測定点 図1に鉛直温度

分布、1階水平温度分布、1階PMV測定点を、図2に鉛直温度分布測定点（高さ、位置）、日射量測定点を示す。その他表1に示す測定点数で行った。

(4)測定条件 表2に測定期間の諸条件を示す。

表1 測定項目、測定方法及び測定機器

測定項目	測定機器	測定点数	記録方法
室内温度	熱電対	鉛直2箇所:31点 水平1F:49点、水平5、9F:各48点 トップライト内:2点、屋上:1点	多点式データロガー、パソコン
表面温度	放射温度計	1F床面:8点、東西南壁面:30点 トップライトガラス面:1点	移動記録
	熱電対	1F床面:1点	
室内温湿度	簡易温湿度計	1F:5点、5、9F:各4点 トップライト内:1点	移動記録
PMV	室内環境7ライザ	1F:5点、5、9F:各4点	移動記録
照度 (内部)	デジタル照度計	1F:5点、5、9F:各4点	移動記録
照度 (外部)	屋外用照度計	屋上:1点	多点式データロガー
気流	無浮力バルーン	回数:成り行き	目視観測
外部風向風速	3杯風向風速計	屋上:2点	ハブカセット記録
吹出口風量	熱式風速計	1階吹出口:8本(1本につき9点)	移動測定
日射量	夏季 全天精密日射計 秋季、冬季 簡易日射計	トップライト内:1点、屋上:1点 屋上:1点	多点式データロガー、パソコン
外気温湿度	夏季 HMP132Y 秋季 簡易温湿度計 冬季 通風筒付 乾湿球温度計	屋上:1点	多点式データロガー
換気量	夏季 熱式風速計 秋季 多点式風速計 冬季 熱式風速計	1F北側エレベーターホール前扉:4点 1F北側エレベーターホール前扉:16点 5F研修室エントランス内:1点	デジタルコダック 多点式データロガー 移動測定
玄関温度分布	冬季 熱電対	玄関(内側):2箇所(1本7点)	多点式データロガー
玄関風向風速	冬季 超音波風速計	玄関(内側):1点	
1階池付近の環境	簡易温湿度計 熱電対	池水面上:1点 池(水中):1点	多点式データロガー

尚、PMV値の計算はclo値は夏季:0.8、秋季:1.0、冬季:1.2とし、met値は各季節とも1.4を用いた。

表2 測定期間の条件

日付(8月)		14日	15日	16日	17日	
夏	天気	晴	晴	晴	晴	
	空調機運転	7:09～ 18:30	7:59～ 18:35			
	空調設定温度	26.5℃	26.5℃			
	トップライト開放		10:30～ 16:30	10:35～ 16:45		
季	1階北側扉開放			16:35～ 16:45		
	日付(11月)		5日	6日		
	天気	曇のち晴	雨			
	空調機運転					
季	空調設定温度					
	トップライト開放	09:00～ 16:11				
	1階北側扉開放	10:00～ 15:00				
	日付(12月)		24日	25日	26日	27日
冬	天気	晴	晴	晴のち曇	曇のち晴	曇時々雨
	空調機運転			終日		
	空調設定温度			20.0℃		
	季	床暖房運転			終日	
床暖房設定温度				35.0℃		

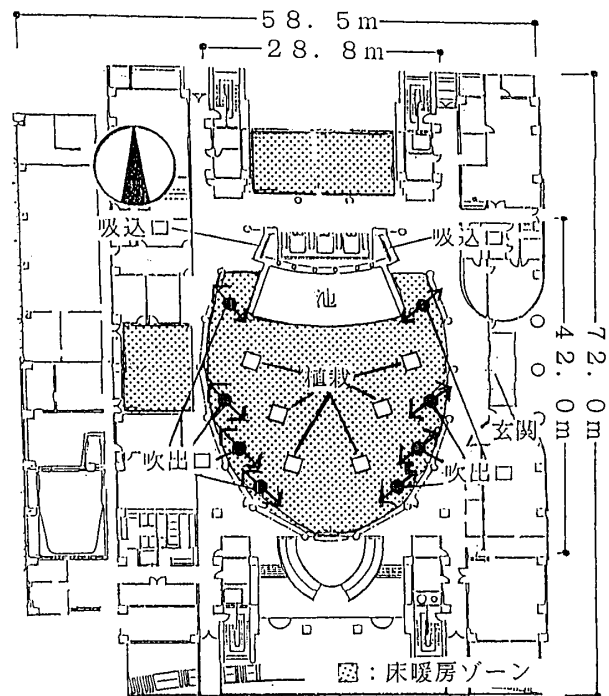


図3 1階吹出し、吸込み口及び床暖房配置

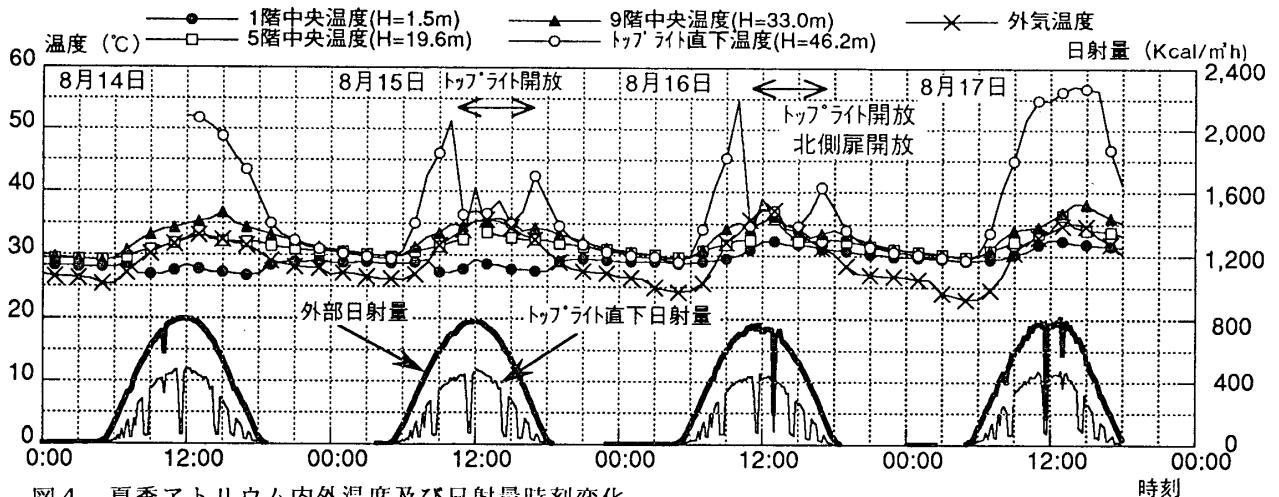


図4 夏季アトリウム内外温度及び日射量時刻変化

4. 結果概要

(1) 夏季 図4に夏季アトリウム内外温度・日射量の時刻変化を示す。1階空調機冷房運転を行った8月14日の1階の温度は、日中、26.8～27.8℃で、設定温度26.5℃に近い。5、9階の温度は、日中上昇して33～36℃になることと比べて安定している。トップライト直下温度は12:00に52.1℃を示し、アトリウム上部は熱溜まりとなっている。

8月15日は、トップライト閉鎖時は、トップライト直下温度は日射を受けるに伴って上昇し、51.3℃に達するが、トップライトを開放すると、直下の温度は36.3℃まで下降し、その後は外気温度に近い温度変化を示す。1階の温度は概ね27℃～29℃を示している。9階の温度は、トップライト開放中はほぼ外気温度に近い温度変化を示す。

図5にトップライト、1階北側扉を開放した(通風実験を行った)8月16日における上空風速及び通風量の時刻変化を示す。開放時間帯の平均通風量は約864m³/min (51840m³/h)で、換気回数では、約1回/hである。このときの温度状況(図4)は、トップライト、1階北側扉開放により、トップライト直下温度は54.6℃から34.7℃まで下降している。その後、トップライト直下温度、5階、9階温度は、外気温度とほぼ同様の温度変化を示す。トップライト閉鎖によってトップライト直下温度は上昇し40.7℃を示している。1階の温度は日中、約33℃となり、その後徐々に下がっている。

空調機運転がなく、トップライト等の開放を行わない8月17日では、アトリウム内温度は、日射を

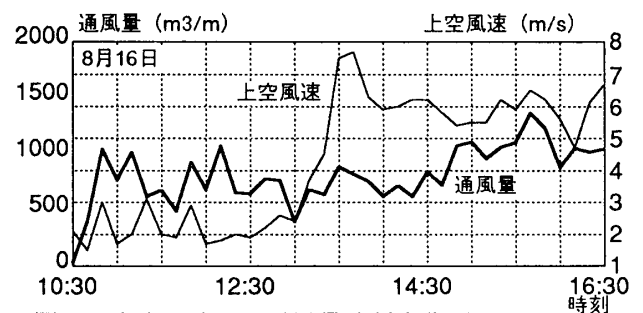


図5 上空風速及び通風量時刻変化(8月16日)

受けると共にトップライト直下を含む各階で上昇傾向にあり、特にトップライト直下温度は、日中、55～57℃となっている。1階では30～33℃、5階では32～35℃を示し外気温度に近い。また、9階では34～38℃で、上層ほど高い温度分布を示し、熱溜まりとなっている。

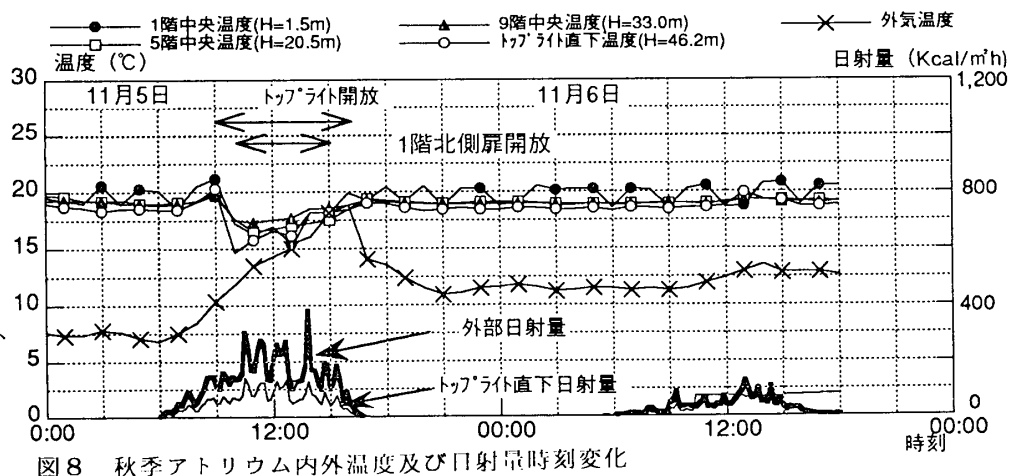
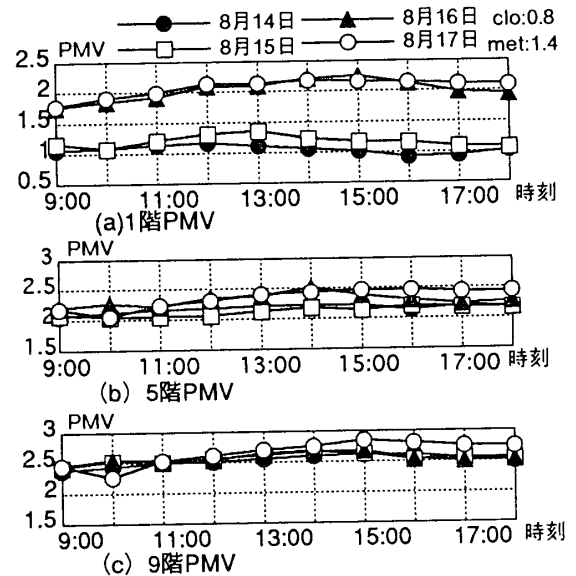
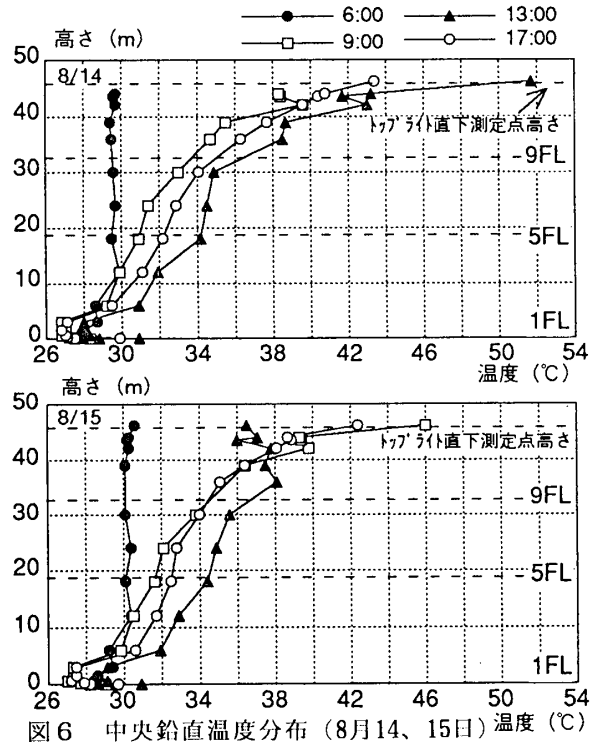
図6に8月14日、15日の中央鉛直温度分布を示す。14日の鉛直温度分布は、日中、上部ほど日射の影響が大きく、温度は高くなり、温度勾配は急である。しかし、高さ3m以下では1階空調機冷房運転の効果で概ね27～28℃である。15日の鉛直温度分布は、トップライトが閉鎖している時間帯では熱溜まりがみられる。トップライト開放時間帯(例: 13:00)では熱溜まりの緩和がなされており、高さ36m以上の測定点での温度勾配は下方の測定点での温度勾配より緩やかになっている。1階空調機冷房運転の影響により、高さ3m以下では、27～29℃である。

図7に各階のPMVの時刻変化を示す。14、15日の1階のPMVは0.9～1.4で「やや暖かい」、16、17日のPMVは1.7～2.2で「暖かい」であり、14、15日のPMVの方が16、17日のPMVより小

さいことがわかる。5階でも14、15日のPMVは、16、17日のPMVより小さいが、差は僅かであり、14～17日とも概ね+2.0～2.5で、「暖かい」となっている。9階では14～17日とも+2.2～2.7で「暑い」である。

夏季において、PMV、1階居住域温度等から、1階空調機冷房運転を行った条件である14、15日の温熱環境は、通風を行った16日、空調機運転及び通風を行わない17日に比べ、比較的良好なことがわかる。14、15日を比較すると1階居住域での温度は15日の方が1℃程度、PMVは0.3程度高いが、快適さは「やや暖かい」で大きな違いはない。5、9階のPMVは14、15日とも+2.2、+2.5程度である。トップライトを開放することによって、アトリウム上層部の温度は下がり、熱溜まりの緩和がされている。これらから1階空調機冷房運転を行いトップライトの開放を行う条件がアトリウム内に比較的良好な温熱環境を提供することがわかる。

(2) 秋季 図8に秋季アトリウム内外温度及び日射量の時刻変化を、図9に上空風及び通風量の時刻変化(11月5日)を示す。トップライト、1階北側扉を開放した(通風実験を行った)11月5日の平均通風量は約3238m³/min(194280m³/h)、換気回数は約3.8回/hで、上空風速は平均2.3m/s、風向は北北西である。この時の温度状況(図8)は、トップライトを開放するとトップライト直下温度は20.3℃から14.6℃に下降し、1、5、9階の温度も下降し、16～17℃となる。外気温度、及び1、5、9階の温度は時刻の経過とともに上昇している。1階北側扉閉鎖後約1時間経過した後、トップライトを閉鎖するとトップライト直下温度は1.8℃上昇し19.0℃になっている。空調機運転及び通風を行わない条件の11月6日では、5、9階の温度は、約18℃でほぼ安定している。これは、たまたま日射量が少なかったためと考えられる。また、1階の温度



は5,9階の温度より 2°C 程度高い 20°C を示している。図10に11月5日、6日の中央鉛直温度分布を示す。5日の、トップライト開放後の温度分布は、開放前に比べトップライト直下温度は約 6°C 、高さ44m以下では約 3°C 下がった。1階北側扉開放後、10:00~13:00の高さ25m以上の温度分布は、ほぼ同じであるが、高さ22m以下の温度は各時刻でばらつき、15~ 17°C となり、温度勾配は大きくなっている。6日の鉛直温度分布は、上部ほど温度は低く、高さ5m以下は $18.5\sim 20.0^{\circ}\text{C}$ 、高さ38m以上では $18.5\sim 19^{\circ}\text{C}$ であり、上下温度差は小さい。図11に各階のPMVの時刻変化を示す。1階では、5日のPMVは1階北側扉開放により外気が侵入した為、10:00~16:00に $-0.6\sim -1.4$ で「やや涼しい」~「涼しい」となっているが、6日では、 $0.0\sim -0.5$ であり、「どちらでもない」~「やや涼しい」の中間程度である。5,9階は、各条件ともほぼ $-0.5\sim -0.0$ で「やや涼しい」~「どちらでもない」の範囲である。

秋季にトップライト及び1階北側扉の開放により、空間上部でも下部でも温度は下降し、 $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ を示し(図10)、その結果、1階におけるPMVは「涼しい」状態である。空調及び通風をしない条件では、5,9階の温度は 18°C 程度でほぼ安定しており、1階の温度は5,9階の温度に比べ 2°C 程度高くなっている。また、PMVは各階で $-0.5\sim 0.0$ で「どちらでもない」~「やや涼しい」で、ほぼ安定している。

(3) 冬季 図12に冬季晴天時(12月24日)及び曇天時(12月26日)におけるアトリウム内外温度及び日射量の時刻変化を示す。晴天時の12月24日では、日中トップライト直下温度は 31.2°C を示し、熱溜まりとなっている。1階の温度は日中約 22°C で安定し、9階の温度は $22\sim 23^{\circ}\text{C}$ を示し、トップライト直下温度との差は $8\sim 9^{\circ}\text{C}$ である。5階の温度は日中約 21°C で1,9階の温度と比べ 1°C 程度低い。19:00以降は1,5,9階ともほぼ同じ温度変化を示す。曇天時の12月26日では、外部日射量が約300

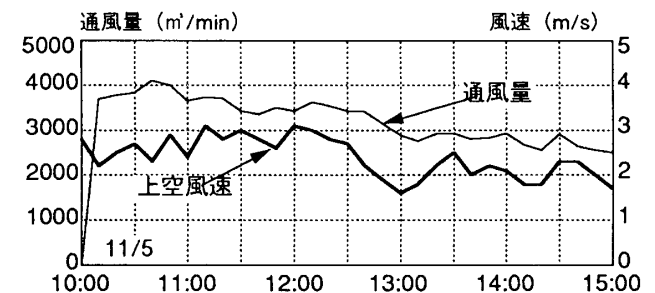


図9 上空風速及び通風量時刻変化(11月5日)時刻

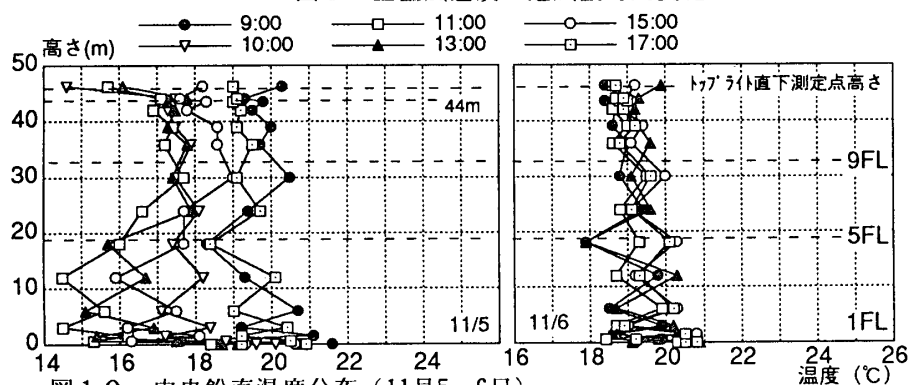


図10 中央鉛直温度分布(11月5,6日)

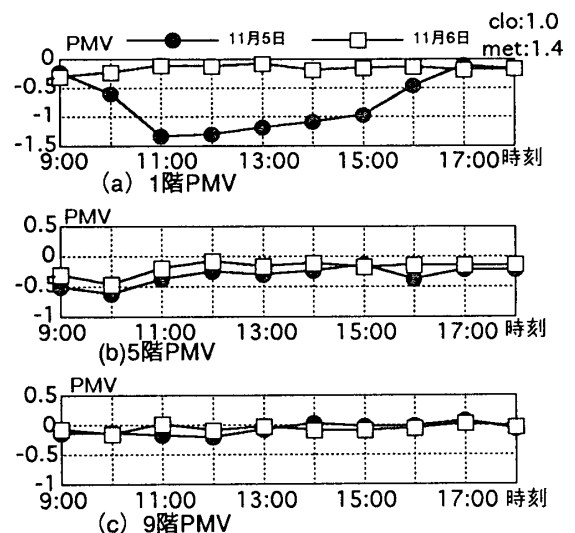


図11 各階のPMV時刻変化

$\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}$ となった10:00のトップライト直下温度は 23.1°C を示し温度上昇がみられるが僅かである。その後、11:00以降は5,9階とほぼ同じ約 20°C となり、約 22°C を示す1階温度と比べると 2°C 程度低い温度となっている。15:00では1,9階、トップライト直下温度とも、ほぼ $18\sim 19^{\circ}\text{C}$ で、14:00より下がっているが、これは後述する玄関開閉実験を行ったための影響が多少表れていると思われる。5階は12:00以降安定した温度変化を示し、 20°C 前後の温度となっている。夜間の1,5,9階及びトップライト直下温度は、 $17\sim 19^{\circ}\text{C}$ を示し、上部ほど低い温度である。図13に、冬季晴天時(12月24

日) 及び曇天時(12月26日)における中央鉛

直温度分布を示す。24日について、床表面温度は床暖房の効果が表れ、30~31℃を示す。

9:00、17:00の温度分布の勾配は比較的緩やかであるが、17:00では上部ほど温度は低い。

日中日射量が増え、ト

ップライト直下温度は上昇し、

熱溜まりとなり、温度分布の

勾配も急になっている。9:00

の高さ36mの温度は同時刻の

上下温度と比べて高くなっているが、これは日射が当たっているためだと思われる。26

日では、各時刻ともほぼア

トリウム上層ほど温度は低く、

全体的に温度勾配は緩やかで、約18~22℃の温度

分布になっている。床表面温度は約29℃を示して

いる。図14に、24日、26日の各階のPMVの時刻

変化を示す。全体的に24日の方が26日より高い

PMVを示しているが、1階では0~+0.5で、「ど

ちらでもない」、5、9階は-0.4~+0.2で「ど

ちらでもない」となっており、どちらの日も良好な状

態である。

冬季、空調機暖房運転及び床暖房運転を併用す

る条件において、晴天時は、トップライト直下の

温度が30℃前後を示し、アトリウム上層部に熱溜

まりが生じている。日中のPMVは、1階は-0.1~

+0.4程度では「どちらでもない」、5、9階は

-0.3~+0.2で1階と同様「どちらでもない」である。

曇天時では、アトリウム上層部ほど温度は低い傾

向にあり、上下温度差は1.5℃程度である。また、

温度変化幅は上部で1.5℃程度、下部では3.0℃程

度と下部ほど大きい。PMVは各階で-0.3~

+0.5程度で「どちらでもない」である。これらの

ことから、空調機暖房運転と床暖房運転を併用す

る条件は、晴天、曇天によらず比較的良好な温熱環

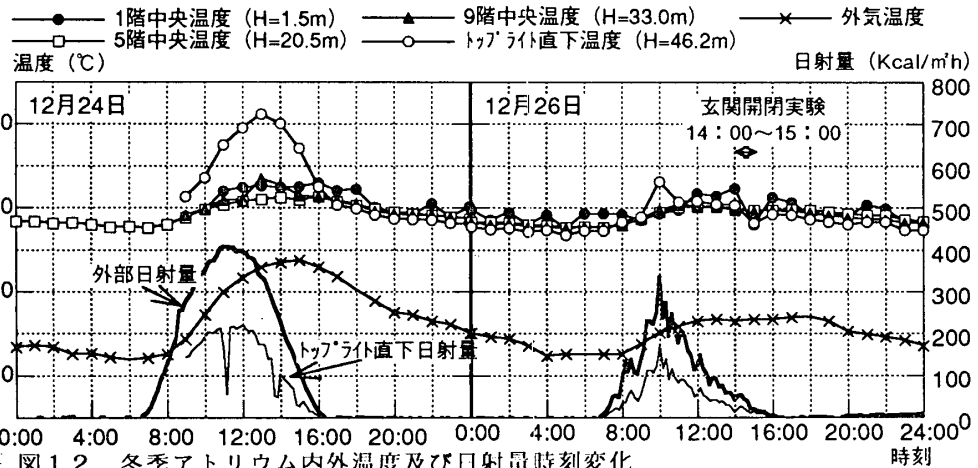


図1-2 冬季アトリウム内外温度及び日射量時刻変化

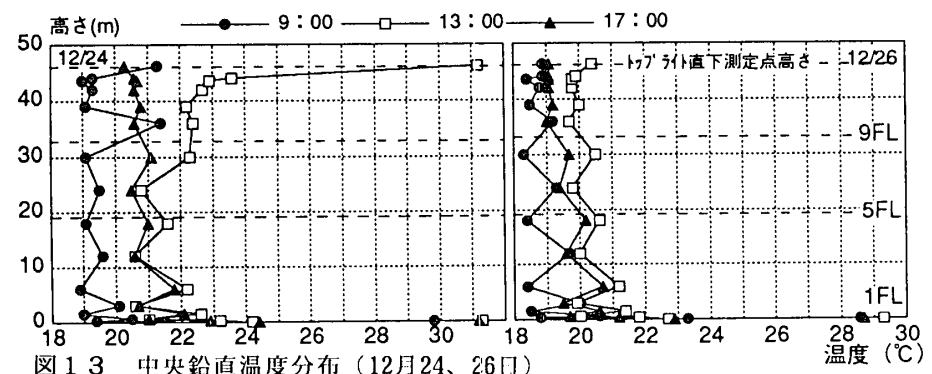


図1-3 中央鉛直温度分布(12月24、26日)

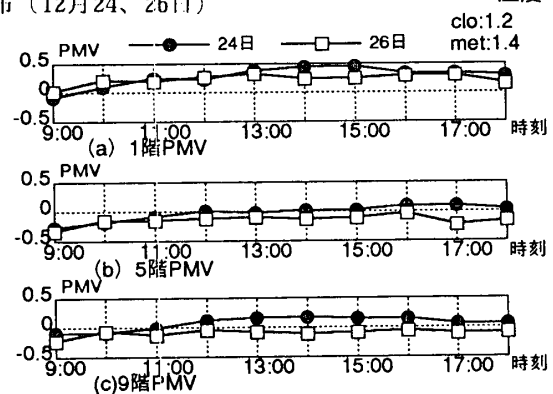


図1-4 各階のPMV時刻変化

境を提供している。

(4) 冬季の玄関扉開閉によるアトリウム温熱環境への影響

玄関扉開閉実験を12月26日の14:00~15:00にかけて約1時間行った。図15に玄関扉開閉実験時の玄関周辺の測定点を示す。風除室の扉は屋外側に2カ所、屋内側に2カ所ある。実験には北側の屋内側及び屋外側の扉、各1カ所を使用した。表3に実験時の通過人数及び玄関扉が同時に開いていた時間を示す。また、この実験の実施中のアトリウム内外温度及び日射量の時刻変化は図12に示してある。実験を行った測定日は日射量が少な

く、10:00～14:00の1階は約22℃、5、9階及びトップライト直下温度は約20℃、外気温度は12時以降6～7℃で安定している。実験後、15:00のアトリウム内温度は、14:00に比べ、1階温度は3℃程度、9階、トップライト直下温度は1℃程度下がり、5階温度には変化はない。図16に実験No.5～No.7を行った時間帯の玄関近くのA点における侵入外気風速、温度及び上空風速の時刻変化

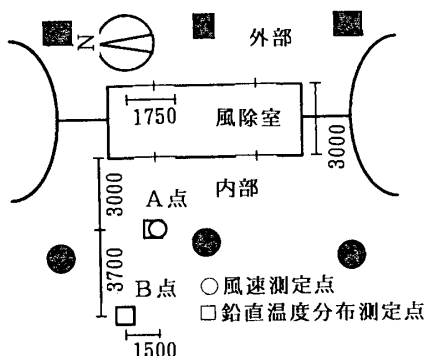


図15 玄関開閉実験時の玄関周辺の測定点

表3 実験時の通過人数及び玄関扉同時開放時間

実験 No.	通過人数	玄関扉同時開放時間
1	1人	0秒
2	1人	3秒
3	1人	4秒
4	2人	5秒
5	5人	11秒
6	5人	10秒
7	強制	18秒

化を示す。A点での風速は玄関扉が同時に開放されると大きくなり、それと共にA点での温度は侵入外気の影響により低下している。この温度低下はA点での床からの高さが低いほど大きく、床上30cmでは実験No.5～No.7において7～8℃になる（床上15cmにおいては、これよりやや大きい）。この場合、床上1.2mや2.0mにおいても2～4℃程度の温度低下が見られる。一方、実験No.1～No.3（通過人数1人）や実験No.4（通過人数2人）の場合には、床上30cmで約4℃の温度の低下が見られるが、これより高い位置での温度低下は顕著ではない。また、10秒程度の扉の開放があるとA点の温度は侵入外気の影響により7～8℃低下し、扉が開放されてから元の空調温度に戻るには約6分程度を要すると見るこ

とができる。図17に実験No.5を行った前後の1階の温度分布を示す。実験前では、20℃以下の領域が池付近に、またアトリウム北側から、西、南側

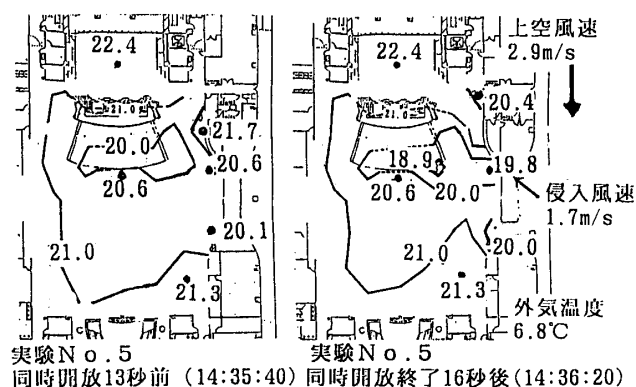


図17 1階水平温度分布

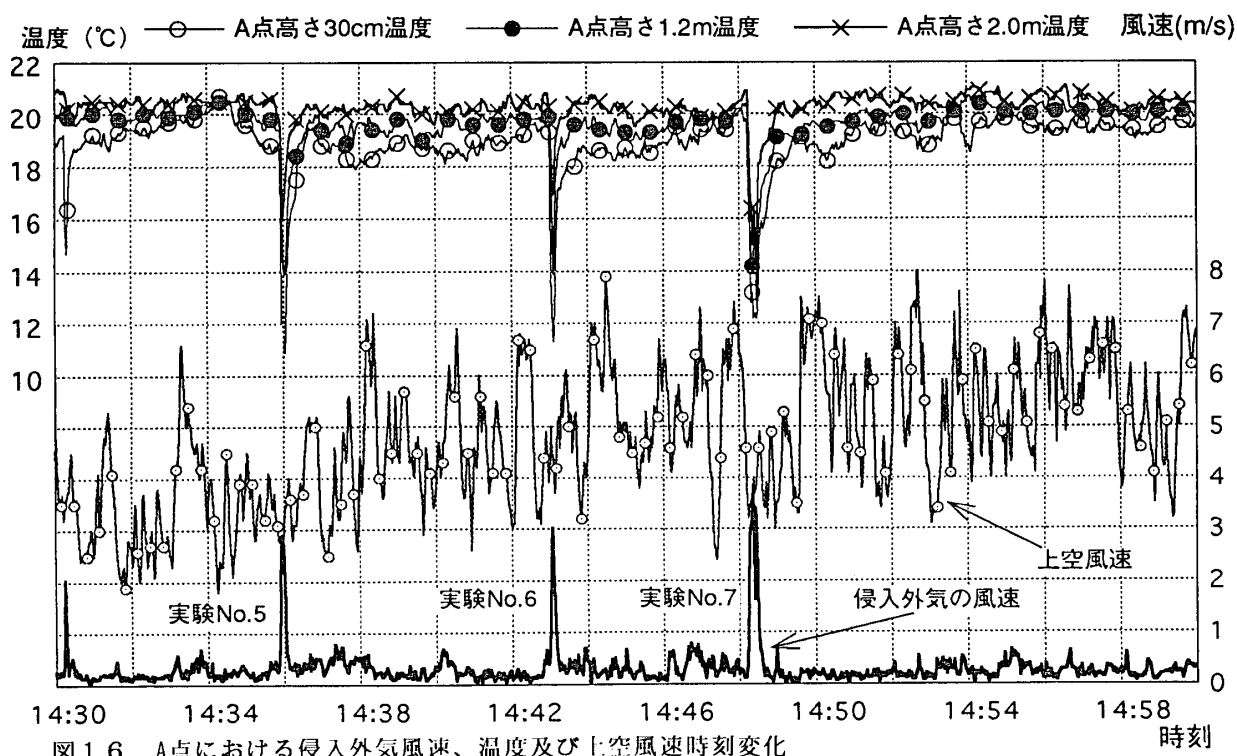


図16 A点における侵入外気風速、温度及び上空風速時刻変化

にかけて21℃以上の領域がみられる。玄関扉を5人通過した後の温度分布は、20℃以下の領域が実験前に比べ広がっている。アトリウム北側から、西、南側にかけてみられる21℃以上の領域は、実験前に比べやや拡大している。1階に対する侵入外気の影響を全般的に見ると、10秒程度の玄関扉の開放は20℃以下の領域を拡大させ、これを回復するには約4分要する。

5. まとめ

1) ここで調査したような大きなトップライトを持つアトリウムでは、日射熱がその中熱環境に及ぼす影響は極めて大きく、特に夏季においては上部空間の温度を上昇させることがわかった。

2) 夏季では1階空調機冷房運転を行い、トップライトを開放すると、1階居住域で比較的良好な中熱環境を示し、アトリウム上部の熱溜まりが緩和される。

3) 秋季ではトップライト及び1階北側扉を開放すると、PMV指標では「涼しい」状況になるが、閉鎖している場合には、「どちらでもない」という評価になった。

4) 冬季に空調機暖房運転及び床暖房運転を行っている場合には、晴天時にはアトリウム上部に熱溜まりが生じるものの、PMV指標では「どちらでもない」という評価になり、晴天、曇天によらず良好な中熱環境が保たれる。

5) 冬季の来訪者の玄関通過による内部温度に対する侵入外気の影響は大きく、特に玄関近くの床付近では扉が10秒程度開放されると温度が約7℃低下する。扉が閉鎖された後に元の空調温度に戻るのに約6分要する。この影響は玄関から20m程度離れた所まで及び、アトリウム1階の温度を約1℃低下させる。

【参考文献】

- 1) 小林、美馬、鯉淵、野々村、田中、野谷、杉山
低層建物におけるアトリウムの中熱環境実測（その1～5）
日本建築学会学術講演梗概集 1993.9
- 2) 小林、美馬、田中、鯉淵、三井、船津、岡本
大きなトップライトを有するアトリウムの中熱環境実測
（その1～4）日本建築学会大会学術講演梗概集 1995.8
- 3) 小林、美馬、菊池、今川、菊池、杉野、伊東
寒冷地におけるアトリウム環境の実測調査（その1～4）
日本建築学会大会学術講演梗概集 1991.9