自然室温時における室内温熱環境の統計的解析

実験用実大アトリウム内の温熱環境解析 その2

STATISTICAL ANALYSIS OF INDOOR THERMAL ENVIRONMENT
FOR NATURAL CONVECTION CASES

Study of thermal environment in real-scale atrium (Part 2)

平松 徹也*, 原田 剛**, 加藤 信介***, 村上周三****, 吉野 博*****

*Tetsuya HIRAMATSU, Takeshi HARADA, Shinsuke KATO,
Shuzo MURAKAMI and Hiroshi YOSHINO*

We have studied thermal environment in real-scale atrium.

The heat budget of the room air and each surface of the indoor walls are examined from the measured temperature and so on. The room temperature is analyzed with the macro model. The following conclusion are obtained.

- (1) The error of total heat budgeted was about 5 percent of the total solar incident, so that the data obtained here are very effective to verify the mathematical analysis.
- (2) The heat gain from the structural frames is a very important factor for designing the atrium's indoor environment.

KEYWORDS : *Atrium, Thermal environment, Long term measurement, Heat budget analysis*

アトリウム、温熱環境、長期実測、熱収支分析

1. はじめに

種々の明確な境界条件のもとで、実験用実大アトリウムの室内温熱環境を長期にわたり実測し、その性状に関し統計的解析を行った。本研究の目的は第1にアトリウム室内環境の設計上重要な因子について系統的、かつ定量的に検討し、今後のアトリウム空間内の環境計画の基礎資料として整備することである。また、第2に数値解析手法の検証に用いる精度の高い測定値のデータベースを整備することである。

前報¹⁾では、空調・換気の無い自然室温の状態、構成部材を種々変更した時の日射取得、及び室内温熱環境について報告した。本報では、これら自然室温時の実験結果の熱収支を統計的に検討し、更に簡易モデルによる温度分布計算を実施し、構成部材が温熱環境に与える影響について定量的な解析を行った。また、熱収支分析・温度計算に使用される熱伝達係数の感度分析も行ったので、併せて報告する。次報では空調時、自然換気時の室内温熱環境の分析結果について報告する予定である。なお、国際共同研究 IEA Annex26 委員会では本報告の測定結果を用い、各国の研究グループの温熱環境の数値解析手法を比較検証している²⁾。本研究で得られた結果はこれらの数値解析結果を検証する際に特に重要となる。

2. 実験

実験用実大アトリウムの仕様、測定条件、測定項目の詳細については前報に示した¹⁾。本報ではその概要を示す。

2.1. 測定条件

図1に示す間口7.0m×奥行き4.3m×高さ4.5mの実大規模の実験用アトリウムを用い、自然室温時の室内の温熱環境測定を実施した。実験条件の概要を表1に示す。表のようにガラス種類、北壁・床の色、屋根の有無などを变化させ、これら構成部材が室内温熱環境に与える影響を検討した。CASE 1,2,4,5 は東西南、屋根の4面

図1 アトリウム実験棟の外観

本論文は参考文献3),4)の内容に新たな解析と考察を加えてまとめたものである。

* 旭硝子株式会社硝子建材事業本部 主任技師・工博

** 旭硝子株式会社硝子建材事業本部技術開発部 主幹技師

*** 東京大学生産技術研究所 助教授・工博

**** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

***** 東北大学工学部建築学科 教授・工博

Flat Glass & Construction Materials General Div., Asahi Glass Co., Ltd., Dr. Eng. Principal Engineer, Technology & Development Div., Flat Glass & Construction Materials General Div., Asahi Glass Co., Ltd.

Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

表1 測定時期と実験条件

	CASE 1	CASE 2		CASE 3		CASE 4	CASE 5
		(a)	(b)	(a)	(b)		
測定時期	'94 2	'94 4,8,9	'94 4	'94 5,8	'94 5	'94 11~'95 1	'95 8
測定日数(晴天日)	3(1)	9(4)	6(2)	8(2)	6(4)	11(7)	10(6)
東西南壁(ガラス)	ガラスA(※1)					ガラスB(※2)	
北壁(※3)、床(※4)の色	黒	白					黒
屋根	ガラスA			遮光屋根(※5)		ガラスB	
レンガ(※6)	無		有	無		有	無
気密性(※7)	14	9		7		3	3

※1. 複入板ガラス(6.8mm厚)＋熱線反射フィルム

: 日射透過率:0.37, 日射吸収率(屋外側入射):0.33

※2. 熱線反射ガラス(12mm厚): 日射透過率:0.16, 日射吸収率(屋外側入射):0.69

※3. 合板(10mm厚)＋断熱材(100mm) 日射吸収率:0.96(黒), 0.15(白)

※4. 合板(5.5mm厚)＋断熱材(50mm) 日射吸収率:0.96(黒), 0.15(白)

※5. ガラスAの上に空気層2cmを介し、合板(12mm厚)＋断熱材(100mm厚)＋合板(12mm厚)を設置

※6. 厚さ6cm、面積17m²のレンガ(日射吸収率:0.70)を床に敷き詰めた。

※7. 床面積あたりの隙間相当面積(c m²/m²)

表2 室内鉄骨、サッシの分布

*右表は室を上中下3ブロックに分けた時の分布(サッシ屋外側は除く)

	表面積 (m ²)	容積 (m ³)	熱容量 (MJ/℃)		表面積 (m ²)	容積 (m ³)	熱容量 (MJ/℃)
サッシ(屋外)	-	0.05	0.2	上段	52	0.24	0.8
サッシ(屋内)	17	0.07	0.2	中段	10	0.09	0.3
柱	24	0.20	0.7	下段	10	0.16	0.5
梁	24	0.15	0.5	計	72	0.49	1.6
トラバース装置	7	0.07	0.2				
計	72	0.54	1.8				

表3 蓄熱計算に用いた各部位に熱容量(kJ/℃・m²)

	床	北壁	ガラス
CASE1,2(a),3(a)	3.9	8.5	20.6
CASE2(b),3(b)	40.9	8.5	20.6
CASE4~5	3.9	8.5	30.1

をガラスとした基本的な実験ケースである。ここではガラス、及び壁・床材料の光学特性の影響を検討した。ガラスの日射透過率はCASE 1,2 では0.37、CASE 4,5 では0.16である。北壁・床の色はCASE 1,5 では黒色、CASE 2,4 では白色である。

CASE 3は室内への入射日射を低減するため、屋根ガラス上に遮光断熱板を設置した実験ケースである。屋根以外の構成部材はCASE2と同様とした。

またCASE 2、CASE 3では熱容量の影響を検討するため、床面に厚さ6cm、面積17m²のレンガを敷いた実験ケースも実施した(CASE2-(b)、CASE3-(B))。

2.2. 測定項目

気象条件として①水平面全天、天空日射量、②外気温、隣室・床下温度、③外気風向風速を測定した。室内温熱環境に関し、④室温(27点)、⑤壁表面温度(42点)、⑥ガラス面透過日射量、⑦北壁面中央部の鉛直面入射日射量、⑧室内鉄骨表面温度(3点)を測定した。日射量測定には精密全天日射計(英弘精機社製)、気温、表面温度測定には線径0.2mmのT型熱電対を用いた。

3. 一般的な熱伝達係数を用いた熱収支分析

実測結果を用い、室内熱収支性状を分析した。解析の際、熱伝達係数は建築設計分野で一般的に使用されるものを用い、室内鉄骨・サッシの取り扱いに関しても、単純化を試みた。目的は実測の妥当性の確認、すなわち数値解析手法の検証用データとして、実測結果が有効であるか、否かの検証である。熱伝達係数の与え方、種々現象の単純化の方法は、アトリウム温熱環境を数値解析する際の参考資料になると思われる。また本章の解析結果を用い、4.3.節では構成部材による熱収支特性の違いを検討する。

3.1. 解析に用いた熱伝達係数

計算に用いた室内側対流熱伝達係数、屋外総合熱伝達係数はそれぞれ、Wilkes、Rowleyによる実験値⁵⁾で次式で表される。

・室内側対流熱伝達係数

(単位 W/m²・K、 Δt は壁・空気温度差)

$$\alpha_{ci} = \begin{cases} 3.5 + 4.7 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t + 3.5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta t^2 & (\text{鉛直面}) \\ 5.8 + 2.7 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t + 7.6 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2 & (\text{水平面上昇流}) \\ 2.2 & (\text{水平面下降流}) \end{cases} \quad (1)$$

・屋外総合熱伝達係数(単位 W/m²・K、 V_{out} は外気風速)

$$\alpha_{out} = 9.3 + 35 \cdot V_{out} \quad (2)$$

屋外総合熱伝達係数は(2)式のように外気風速に依存するが、本解析では、全測定時の平均風速2.3m/sに対応する17.4 W/m²・Kに固定して検討した。

3.2. 室内鉄骨、サッシの取り扱い

当アトリウムでは、ガラス表面積の約1割をサッシ(鉄製窓枠)が占め、屋内には柱、梁、気流測定用トラバース装置など、容積約0.5 m³(アトリウム気積の0.4%)、表面積約72 m²の鉄骨がある。表2に室内鉄骨、サッシの分布状況の概要を示す。

室内鉄骨・サッシは、特に日射が当たる状況で、以下の3点において室内温熱環境に影響を与えられ、これらの影響に対する本研究の取り扱いを併せて示す。

(1)ガラス面、北壁・床面の日射取得量への影響

柱、梁は各ガラス面の近傍に配置されており、そのガラス面への投影面積は各ガラス面積の約25%にあたる。本研究では、室内への入射光はサッシ、柱、梁により25%遮蔽され、ガラスの室内側反射率も見かけ上25%低減すると仮定した(鉄骨の日射反射率を無視)。ガラス面の吸収日射量は、ガラス(面積分率0.9)とサッシ(面積分率0.1、日射吸収率0.9)の吸収日射量の和として評価した。日射量計算方法は前報¹⁾に示した通りである。計算において、直達光、拡散光の寄与に分け、ガラス光学特性の入射角依存性を考慮し、室内の完全相互拡散反射を仮定している^{※1}。

(2)放射場への影響、室内空気加熱への影響

日中、日射により加熱された鉄骨は、放射場へ影響を与え、室内空気を加熱する。各壁面(東西南、屋根ガラス、北壁、床)の長波放射取得計算^{※2}では、鉄骨、サッシの影響を無視した。室内鉄骨から空気への対流熱伝達量は、表2のように鉄骨表面積を上中下ブロックにそれぞれ52、10、10 m²振り分け、その寄与を評価した。鉄骨表面の対流熱伝達係数はWilkesの実験式((1)式鉛直面)を適用した。鉄骨の表面温度は、天井近くの3測定点の平均値を用いた。

(3)室の蓄熱への影響

室内鉄骨のうち、柱、梁、気流測定用トラバース装置はポリスチレンボードにより、北壁、床とは断熱されているため、サッシの熱容量のみをガラス面(東西南、屋根)の熱容量に加算し、壁体の蓄熱を評価した。柱、梁、トラバース装置の蓄熱の影響に関しては本報では直接評価しない。その蓄熱の効果は、室内空気への対流熱伝達により、室内空気温度の日射変動に対するタイムラグとして現れる。計算に用いた各壁の熱容量を表3に示す。

●: CASE 1, ○: CASE 2, ×: CASE 3, △: CASE 4, ▲: CASE 5 *CASE 番号は表1と同じ

図2. 各室内壁面の熱収支(蓄熱、鉄骨の影響を考慮)

3.3. 各室内壁面における熱収支

室内各壁面(東西南、天井、北壁、床)の熱平衡は、室内表面 i への流入熱量を正とすると、次式で示される(簡便のため壁体内温度は一樣と仮定^{注3})。

$$C_{wi} \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} = I_i + J_i + \alpha_{ci} \cdot (T_{in} - T_{si}) + K_i \cdot (T_{out} - T_{si}) \quad (3)$$

但し、 C_{wi} : 面 i の単位面積当たりの比熱、 T_{wi} : 壁体の温度、 I_i : 吸収日射量、 J_i : 室内長波放射取得(入射量から放射量を差し引いたもの)、 α_{ci} : 室内側対流伝達係数、 T_{in} : 室温、 T_{si} : 表面温度、 T_{out} : 隣室温^{注4}または外気温、 K_i : 熱貫流率から、室内側総合熱伝達の寄与を除いたもの、添字 i : 壁面番号

(3)式中、室内温熱環境形成の主要素である吸収日射量を左辺に置き、他の項を右辺に置き、書き改めると(4)式ようになる。各部位の温度変化が小さく、蓄熱項の影響も小さいと考えられる13:00、14:00の測定値を選び、表1に示す全ての実験結果を(4)式に当てはめ、収支を検討した^{注5、注6}。

$$I_i = \alpha_{ci} \cdot (T_{si} - T_{in}) + K_i \cdot (T_{si} - T_{out}) - J_i + C_{wi} \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} \quad (4)$$

計算において、各壁体の蓄熱量は、壁体温度 T_{wi} として表面温度 T_{si} を用い、対象時間前後15分の温度変化量から求めた。

検討結果を図2に示す。横軸が(4)式左辺: 吸収日射量、縦軸が(4)式右辺: 対流、貫流、放射、蓄熱の寄与の和に対応している。図中には、(4)式右辺を目的変数に、左辺を説明変数とし、定数項を0とした回帰分析結果も併せて示した(屋根面の結果では、外気風速が3.5m/s以上の結果、床面の結果では床面にレンガを敷きつめたCASE2,3-(b)の結果を除いて回帰分析した)。

屋根面、南ガラス面については回帰係数は約1.1、寄与率は0.9以上あり、測定値の(4)式への適合度は概ね良い。屋根面に関する結果では、外気風速が大きい実験ケースで、(4)式右辺の過小評価が認められる。これは屋外総合熱伝達係数の過小評価に起因するものと思われる。北壁面、床面では日射吸収率の高いCASE1の傾きが小さく、(4)式左辺(横軸)の過大評価、もしくは右辺(縦軸)の過小評価の傾向が観察される。また、床面ではレンガを敷いたCASE2,3-(b)は特に適合度が悪い。

●: CASE 1, ○: CASE 2, ×: CASE 3, △: CASE 4, ▲: CASE 5

図3 室全体の熱収支(13:00、14:00)

図4. 室内空気熱収支に対する鉄骨からの発熱、漏気の寄与

図5. 室内空気における熱収支

* 図4、5共に、●: CASE 1, ○: CASE 2, ×: CASE 3, △: CASE 4, ▲: CASE 5 (CASE 番号は表1と同じ)

次に(5)式に示すように、(4)式を各面(東西南、屋根、北壁、床の6面)について足し合わせ、室全体内表面の熱収支を検討した。

$$\sum_i I_i \cdot S_i = \sum_i S_i \left\{ \alpha_{ci} \cdot (T_{si} - T_{in}) + K_i \cdot (T_{si} - T_{out}) + C_{wi} \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} \right\} \quad (5)$$

図3に(5)式左辺(各面の日射吸収量の合計)を横軸に、右辺(各面の対流、貫流、及び蓄熱の合計)を縦軸とした分析結果を示す。図のように、外気風速が大きいときは(5)式右辺の過小評価の傾向が認められるが、これらの測定データを除けば、回帰係数は1.06、寄与率は0.94、(5)式左辺と右辺の二乗平均誤差(RMSE; Root Mean Square Error)は約2800Wであり、快晴時では約5%程度である。室全体では熱収支を概ね満たす測定・解析結果となっていることを確認した。

3.4. 室内空気における熱収支

室内空気の熱平衡は、室内空気への流入熱量を正とすると、次式で示される。

$$C_a V_a \cdot \frac{dT_{in}}{dt} = \sum_i \alpha_{ci} \cdot (T_{si} - T_{in}) \cdot S_i + Q_G - Q_L \quad (6)$$

但し、 S_i : 各壁面の面積、 C_a : 空気熱容量、 V_a : アトリウムの体積、 Q_G : 暖房による取得熱量、日射により加熱された室内鉄骨からの取得熱量など、 Q_L : 自然換気、漏気、冷房などによる失熱量

(6)式を空気から壁への対流伝熱量に対する他要素のバランス式: (7)式に書き換え、表1に示す全実験について、13:00、14:00の測定値を当てはめ、室内空気の熱収支を検討した^{注7}。

$$\sum_i \alpha_{ci} \cdot (T_{in} - T_{si}) \cdot S_i = Q_G - Q_L - C_a V_a \cdot \frac{dT_{in}}{dt} \quad (7)$$

(7)式中、 Q_G 、 Q_L として、それぞれ、日射により高温となっている室内鉄骨からの対流伝熱による取得熱量、及び漏気による失熱量を考えた^{注8}。漏気量は、前報¹⁾で示した気密性測定値を用い、一室

モデル回路網法⁶⁾により漏気量の見積もりを行った。この計算では室を上下5分割し、隙間は各ブロック壁面の中心に集中して存在すると仮定した。漏気失熱量は「各ブロックにおける侵入空気量と室内外温度差の積の合計」と定義した。典型的な漏気量の計算例(無風時、室内外温度差 20℃)を表4に示す。室内鉄骨からの対流伝熱による取得熱量の計算方法は前述した通りである。室内空気蓄熱量は、対象とする時間の前後15分の平均室温の変化量から評価した。

図4は、(7)式左辺：壁面への対流伝熱量合計と鉄骨からの伝熱量、及び漏気失熱の関係を示したものである。図より、鉄骨からの対流伝熱量と壁面への伝熱量合計値は量的には一致しないものの、かなり強い相関を持つことがわかる。これは、床面等の加熱面の面積と同等以上の表面積を有する室内鉄骨が、室内空気加熱の主要因であることを示唆する。個々の実験ケースに着目すると、室内への透過日射量が小さいCASE3、4、5(遮光屋根、または熱線反射ガラスを利用)で、鉄骨からの対流伝熱量が小さくなっていることが確認できる。一方、漏気失熱量も壁面への伝熱量合計値と有意な相関を持っている(鉄骨の寄与:0.46/漏気の寄与:-0.1)。回帰係数を比較すると、以上に示した計算条件下では漏気失熱量は鉄骨からの発熱量の約25%と評価される。

図5に、(7)式左辺：壁面への対流伝熱量合計を横軸に、右辺：鉄骨からの伝熱量、漏気、蓄熱の寄与の合計を縦軸にした分析結果を示す。また、(7)式右辺に関し、左辺を説明変数とした単回帰分析結果を図中に併せて示した。図のように寄与率は0.74であるが、回帰係数は0.36と小さく、測定値の(7)式への適合度は良いとは言えず、壁面への対流伝熱量の過大評価、もしくは鉄骨発熱、漏気失熱、蓄熱の寄与の和の過小評価の傾向が表れた。特に気密性の悪いCASE1は、その傾向が強い。但し、(7)式各項のオーダーは数kW程度であり、ガラス・壁面での吸収日射量・貫流熱量と比較すると、かなり小さな値であり、室全体の熱収支への影響は小さいと思われる(図3、図11参照)。

以上のように、一般的な熱伝達係数を適用することで、測定値は熱

収支をほぼ満足し、実測の妥当性を確認した。また、本研究で得られた測定結果は種々の明確な境界条件、すなわち天候、季節、アトリウム環境の設計上重要な代表的因子を系統的に包含しており、数値解析手法の検証用データとして有効と思われる。

4. 構成部材が室内温度環境に与える影響

アトリウム環境設計において重要となる各種のアトリウム構成部材が自然室温時の室内熱環境、熱輸送特性に与える影響を解析する。

4.1. 簡易計算モデルによる、室内鉄骨の影響の検討

前節では、室内の熱収支に関与する種々の影響因子について検討し、日射により熱せられた室内鉄骨からの対流伝熱が、室内空気加熱の主要素であることを示した。ここでは表1に示す全ての実験(13:00、14:00の測定値)に関し、戸河里らのブロックモデルを適用し⁷⁾、注9、日射、外気温、隣室温度測定値より、室内空気温度・内壁表面温度の分布の計算を行い、実測結果と比較した。解析にあたり、(a)鉄骨からの対流伝熱の影響、及び(b)鉄骨、サッシの日射取得への影響を検討した。考え方は3章と同様である。この2種の因子を考慮した計算結果を図6に示す。計算値を目的変数、測定値を説明変数とした単回帰分析の結果、及び測定値と計算値の二乗平均誤差(以下RMSE)を図中に示す(北壁面では、CASE2-(b)、3-(b)を除いて回帰分析を行った)。図中()内の数字は鉄骨からの対流伝熱を無視した場合のRMSEである。

回帰分析により得られた回帰係数は0.97から1.03、寄与率は0.90以上であり、上記の2因子を考慮することで、室内温度分布が概ね正確に予測可能となることが検証された。鉄骨表面積の約7割が存在する上段ブロックの空気温度では、鉄骨からの対流伝熱を無視した場合のRMSEは5.1℃と大きい値をとるが、それを考慮することでRMSEは2℃と最も小さくなる。上段ブロックでは鉄骨からの対流伝熱の影響が特に強く現れているものと考えられる。床表面温度では、レンガを敷き詰めた場合(CASE2-(b)、3-(b))の温度推算精度が悪く、蓄熱効果を考慮する必要があると思われる。

○:CASE 1, ○:CASE 2, ×:CASE 3, △:CASE 4, △:CASE 5(CASE 番号は表1と同じ)

図6 簡易モデルによる温度計算結果(鉄骨からの対流伝熱、鉄骨の日射遮蔽を考慮。13:00、14:00の結果。)

*図中σは測定値と計算値の二乗平均誤差:RMSE、()内は鉄骨からの対流伝熱を無視した場合のσ

*図中 () 内の数字は実験ケース番号: 表1参照
図8 構成部材と平均室温、グローブ温度の関係

図9 一般建築用ガラス (単板) の光学特性

表4-1 気象条件 ('95 4/22 13:00)

外気温: 23°C
水平面全天日射量: 850W/m ²
水平面天空日射量: 175W/m ²
隣室温度: 23°C、床下温度: 22°C

表4-2 北壁、床の光学特性

	日射吸収率	放射率
1	0.2	0.9
2	0.6	0.9
3	1.0	0.9

表4-3 ガラスの光学特性^{a)}

品種 (品種数)	日射透過率	日射吸収率 (屋外側)	放射率 (室内側)	日射熱取得率
フロート (1種)	0.69	0.24	0.84	0.78
熱線吸収 (3)	0.39~0.42	0.53~0.59	0.84	0.57~0.60
熱線反射 (4)	0.39~0.55	0.22~0.40	0.84	0.43~0.60
高性能熱線反射 (13)	0.06~0.30	0.61~0.77	0.31~0.67	0.30~0.49

*計算においては、室内側の入射光に対する日射吸収率も考慮した。

以上より、室内鉄骨からの対流伝熱が、室内温度分布に大きな影響を与えることは明らかである。本報告では室内鉄骨温度を未知数とする温度計算を行っていないが、アトリウムの温熱環境設計には、室内鉄骨のように日射により局所的に加熱された部位からの対流伝熱量の正確な見積もりが必要と考えられる。

4.2. ガラス・壁の光学物性の影響

前報で示したように、アトリウム温熱環境はガラス、室内壁の双方の光学特性の影響を受ける。前報の測定結果を図8に整理した。図中、縦軸k値¹⁾は東西南、屋根の4面に入射する全日射量に対する外気温基準の温度上昇率である。横軸は使用ガラスの日射透過率/日射吸収率を示している。壁床の色が黒色の場合、日射透過率の低いガラスBを用いることで、室温・グローブ温度ともに低下することが認められる。一方、壁床の色が白色の場合、日射透過率の低いガラスBを用いることでグローブ温度は低下するが、室温は低下しない。室内温熱環境はガラス、内壁体双方の光学物性の影響を受けることが明らかである。

本節では、構成部材の光学特性とアトリウム温熱環境の関係を更に詳しく検討するために、当実験用アトリウムを対象としたケーススタディを行った。東西南、屋根を厚さ 12mm の単板ガラスとし、他の構成は表1と同様とした。検討条件を表4に示す。表4中の北壁・床品種3種、ガラス品種21の組み合わせ (3×21: 計63

(1) 日射透過率と室温、グローブ温度

(2) 日射熱取得率と室温、グローブ温度

ガラス品種	北壁・床の日射吸収率		
	0.2	0.6	1.0
フロート、熱線吸収	□	■	■
熱線反射	○	●	●
高性能熱線反射	△	▲	▲

図10 一般建築用ガラスを対象としたケーススタディの結果

種) に関して、簡易計算モデル (前節参照) を用い、室内平均温度、及びグローブ温度^{注10} (室中央、高さ1m) を求めた。

参考までに図9に一般建築ガラス (単板) の光学特性を示す。図のように、光学特性により建築用ガラス (単板) は3種のグループ、1)フロートガラス・熱線吸収ガラス、2)熱線反射ガラス、3)高性能熱線反射ガラスに分類可能である。

検討結果を図10に示す。室温とグローブ温度について、ガラス特性 (日射透過率、日射熱取得率) との関係としてまとめた。

- ① 上述の光学特性の異なる3種のガラス間で、室温、グローブ温度共に傾向が異なることが認められた。
- ② 室温はガラスの日射透過率・日射熱取得率だけで決まらず、室内壁の光学特性の影響を強く受ける。また、ガラスの日射熱取得率、日射透過率が大きくなるほど、室内壁の光学特性による室温の差異は大きくなる。一般建築と比較して、当アトリウムではガラス面積が大きいので、室内の相互反射の影響、室内から屋外への再放射 (ガラスを通じる) の影響が強く現れたものと考えられる。
- ③ グローブ温度はガラス種別により多少の差異はあるが、日射熱取得率との相関は強く、室内壁の光学特性にはほとんど依存しない。これはグローブ温度は室内への透過日射光 (特に直達光) の影響を強く受けるためと思われる。ガラス面積が大きい空間では日射熱取得率は体感温度の判定に適したパラメータと思われる。

4.3. 各壁面における熱授受特性と温熱環境

3章で得られた解析結果をもとに、構成部材による各壁面の熱授受特性の違いを明らかにし、構成部材が室内温度性状に与える影響を考察する。同様の解析をCFD、放射連成で解析する際、本結果は特に重要な検証項目となる。表5は快晴時の13:00における全入

射日射量に対する、各面の対流、貫流、長波放射伝熱量を示したものである。ここでは、簡略化のためにアトリウムを構成する6面を“屋根・南ガラス”、“北壁・床”、“東西ガラス”の3グループに分けまとめた。図11は全ての実験CASEについて、各面それぞれの全入射日射量に対する貫流、長波放射、対流による伝熱量の分配状況をまとめたものである。図中 k 値¹⁾は各壁面の温度上昇率（全入射日射量に対する外気温基準の温度上昇率： 10^{-4}C/W ）である。

表5に示されるように、各壁面、室全体（各壁面の寄与の和）における収支分析の残差は、全入射日射量に対し $\pm 10\%$ 以内である。

図11に示す室内の熱授受に着目すると、いずれのCASEについても、吸収日射量の大部分が、ガラス面からの貫流熱で室外に放熱されている。しかし下記のように、構成部材の種類により、各伝達熱量の配分、熱流の方向は異なり、室内温度性状もそれに応じ異なったものになっている。

① CASE 1は黒色の北壁・床面に吸収日射量が多く分配され、ガラス面が冷却面として働くため、他の条件と比較して長波放射による熱の授受が活発である。また、CASE 2,5でも量が少ないが、北壁・床面から他壁面に向かう長波放射熱伝達が認められる。逆に、CASE4の屋根・南ガラス面は吸収日射量が多く配分され、白色の北壁・床面より高温となるため、屋根・南ガラス面から他壁面に向かう長波放射熱伝達が認められる。

② CASE1とCASE2を比較すると、屋根、南面の吸収日射量は同等であるが、CASE1では高温壁である北壁面からの長波放射熱、室空気からの対流伝熱を更に受けるため、屋根、南面の温度上昇率はCASE2より高くなる。

③ CASE4、5の総吸収日射量はほぼ等しいが、CASE4はCASE5に比較してガラス面の吸収日射量は多く、北壁面の吸収日射量は少なく配分されている。その結果、CASE4では屋根・南ガラス面温度 $>$ 室温 $>$ 北壁・床面温度、CASE5では屋根・南ガラス面温度 $<$ 室温 $<$ 北壁・床面温度となっている。また放射伝熱、対流伝熱の向きもそれに対応して、CASE4では屋根・南ガラス面から北壁・床に向い、CASE5では逆に北壁・床から屋根・南ガラス面に向っている。

④ 北壁・床面から室内空気への対流伝熱量は、北壁・床面の吸収日射量の小さいCASE2,4では小さく、吸収日射量の大きいCASE1,5では大きい。その結果、前者では北壁・床面温度と室温の差は小さく、後者では北壁・床面温度が室温と比較してかなり大きな値をとる。

⑤ 室内鉄骨からの対流伝熱が室内空気加熱の主要素となっていることは既に示したが、遮光屋根を設けたCASE3、日射透過率の低いガラスを用いたCASE4,5では、鉄骨への入射光が低減されるために、鉄骨からの対流伝熱がCASE1,2と比較して小さいことが認められる。

*図中の数字は全入射日射量に対する、各伝熱量の分配率(%)
図11 各壁面における各伝熱量の分配率と温度上昇率 ($k:10^{-4}\text{C/W}$)

表5 各壁面における各伝熱量の分配率 (%)

*流入を正、流出を負とする。全入射日射量を100%としている。

		吸収日射量	貫流	対流伝熱	長波放射	蓄熱	残差
CASE 1 '94 2/18	屋根、南	32.6	-51.5	5.1	3.1	0.3	-10.4
	東、西	8.8	-21.1	5.5	3.3	-1.4	-4.8
	北壁・床	20.6	-1.4	-6.2	-6.4	0.5	7.0
	合計	62.0	-74.0	4.4	0.0	0.6	-8.2
	(鉄骨)			-2.1			
CASE 2 '94 8/27	屋根、南	33.1	-41.8	3.9	1.2	-0.2	-3.9
	東、西	11.9	-18.5	3.6	1.7	-1.6	-2.8
	北壁・床	5.5	-1.1	-0.7	-2.9	-0.2	0.6
	合計	50.5	-61.4	6.8	0.0	-2.1	-6.1
	(鉄骨)			-3.0			
CASE 3 '94 5/22	屋根、南	8.9	-10.0	0.2	-0.1	-0.9	-2.0
	東、西	11.5	-12.0	0.5	0.1	-1.4	-1.3
	北壁・床	2.5	-0.5	0.2	0.0	-0.5	1.7
	合計	22.8	-22.5	0.8	0.0	-2.7	-1.6
	(鉄骨)			-0.1			
CASE 4 '95 1/25	屋根、南	58.9	-61.2	-0.7	-2.6	1.9	-3.7
	東、西	20.2	-22.4	2.7	2.0	-3.0	-0.5
	北壁・床	2.5	-0.8	0.0	-0.6	-0.2	0.9
	合計	81.6	-84.4	2.0	0.0	-1.3	-3.3
	(鉄骨)			-0.7			
CASE 5 '95 8/15	屋根、南	51.5	-56.4	1.0	0.2	3.1	2.3
	東、西	19.1	-23.0	3.0	3.7	-2.6	0.3
	北壁・床	8.4	-1.5	-3.6	-3.9	0.2	-0.3
	合計	82.0	-80.9	0.4	0.0	0.7	2.2
	(鉄骨)			-1.1			

5. 熱収支分析、温度計算における熱的パラメータの影響

図12に示すように、静穏空気中に置かれた発熱面、冷却面での自然対流に伴う対流伝達係数の実験式はいくつか提案されているが^{5),9)}、それぞれ大きく異なる値をとる。3、4章で用いた

Wilekesの実験式は比較的大板(80cm×240cm)の実験によるもので、室内実験模型(3m×3m×3m)を用いた小林の値と比較的近い値をとり、これらの値は垂直面、水平面上昇流では他より大きめである(垂直面に関しては図を省略)。

ここでは、表6に示すように、室内側対流熱伝達係数、屋外総合熱伝達係数を変化させて、熱収支分析、温度計算を行い、その影響を検討した。表中CASE Cが本報告3、4章で使用した熱伝達係数の組み合わせである。図13に3、4章同様、回帰分析により求めた回帰係数、寄与率を示す。図13-(1)は(4)式、または(7)式の右辺を目的変数に、左辺を説明変数とし、回帰分析した結果、図13-(2)は温度計算値を目的変数、温度測定値を説明変数とし、回帰分析した結果である。

図中A、B、C、Dは屋外総合熱伝達係数を $17.4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ に固定し、室内対流熱伝達係数を変化させた結果である。E、C、Fは室内対流熱伝達係数にWilekesの実験式を適用し、屋外総合熱伝達係数を $11\sim 23\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ の範囲で変化させた結果である。

(1)室内側対流熱伝達係数(α_c)の影響(CASE A,B,C,D)

ガラス面の熱収支では吸収日射量と外側への貫流熱が支配的であるため、熱収支の適合度においても、温度推算精度においても、 α_c の影響は小さく、回帰係数、寄与率の動きは小さい。一方、北壁面、床面では α_c が大きいほど、熱収支の適合度、温度推算精度ともに向上する。室内空気については、熱収支の適合度は α_c により大きく変化するが、温度推算精度の変化は小さいのが特徴的である。Wilekesの実験式を用いたCASE Cでは、室内空気に対する熱収支の適合度は悪いが、その原因は不明である。加熱面、冷却面の α_c の大小関係が、熱収支式への適合度に強く影響しているものと考えられる。本研究の検討範囲CASE A~Dでは、 α_c の最も大きいCASE D($7\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)を用いたとき、熱収支分析、及び温度計算ともに、最も良好な結果が得られている。

(2)屋外総合熱伝達係数(α_{out})の影響(CASE E,C,F)

熱収支に関しては、ガラス面では α_{out} の影響を強く受け、断熱壁である北壁面、床面ではその影響は非常に小さい。一方、温度推算精度では、全ての部位で、 α_{out} の影響が強く現れ、この値が大きくなるほど、回帰係数は小さく(計算温度)は小さくなる。熱収支の適合度、温度推算精度における回帰分析結果を見ると、3、4章で用いた α_{out} の値($17.4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$:CASE C)は妥当であったと考えられる。

6. 結論

長期にわたる実験用アトリウム室内の温熱環境の実測結果に関し、自然室温状態における室内熱収支、熱輸送性状をアトリウム構成要素の観点から統計的に解析した。測定結果は室内熱収支を充分説明し、CFD(数値流体力学)・放射連成解析を代表とする数値解析手法の検証用データと成り得る。またアトリウム室内の環境分析で重要となる各種構成要素が室内環境に与える影響を定量的に検討した。統計的解析の主要な結果は以下の4点である。

(1)熱収支分析、簡易モデルによる室内温度分布計算の結果、日射により加熱された鉄骨からの対流熱伝達が室内空気加熱の主要素であることが明らかになった。アトリウムの温熱環境設計には、室内鉄骨のように日射により局所的に加熱された部位からの対流

図12 自然対流時における室内側対流熱伝達係数の実験式

表6 感度分析に用いた熱伝達係数の組み合わせ(単位 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)

case	A	B	C	D	E	F
鉛直面	2.3	3.0	3.7	7.0	3.7	3.7
水平(上)	2.3	4.0	6.2	7.0	6.2	6.2
水平(下)	2.3	1.0	2.2	7.0	2.2	2.2
鉄骨の α_c	2.3	3.0	3.9	7.0	3.9	3.9
屋外総合熱伝達係数			17.4		11.6	23.3

*表中、CASE C:Wilekesの実験値(鉄骨の α は鉛直面の式を適用)、CASE B:建築設計資料集成に記載されている推奨値。CASE Cの値は表1の全実験に適用したときの平均値である。

(1)熱収支の検討

(2)温度推算精度の検討

図13 熱収支分析、温度計算における熱的パラメータの影響

*図中横軸A~Fは表6と同じ

伝熱量の正確な見積もりが必要と考えられる。また、遮光部材、低日射透過率ガラスなどの利用で、室内への透過日射量が小さい場合は、鉄骨からの対流伝熱の影響も小さくなる。

(2)アトリウムのようにガラス面積が大きい空間では、室内の相互反射の影響、室内から屋外への再放射(ガラスを通じる)の温熱環境への影響が強く現れる。そのため、室温はガラスの日射透過率・日射熱取得率だけで決まらず、室内壁の光学特性の影響を強く受ける。一方、グローブ温度は室内への透過日射光(特に直達光)の影響を強く受けるため、日射熱取得率との相関は強く、室内壁の光学特性にはほとんど依存しない。

(3)構成部材の種類、配置により、各伝達熱量の配分、熱流の向きは大きく異なったものになり、室内の温熱環境も異なったものとなる。自然室温時のアトリウム温熱環境の制御は、個々の部材だけでなく、室全体としての伝達熱量の配分、熱流の向きを考慮する必要がある。

(4)室内側対流熱伝達係数は室内空気熱収支分析結果へ大きく影響するが、本研究の検討範囲(平均 $2 \sim 7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)では、室内空気温度の計算結果への影響は小さい。この検討範囲では、平均 $7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ を用いたとき、熱収支、温度計算ともに良好な結果が得られた。一方、屋外総合熱伝達係数はガラス面の熱収支に大きく影響し、断熱壁、室内空気熱収支に対する影響は小さいが、温度計算結果に対しては全ての部位について強く影響する。本研究で用いた値、平均風速 2.3 m/s に対応する $17.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ は、ほぼ妥当なものと考えられる。

＜謝辞＞ 本研究を実施するにあたって、IBEC（財）住宅・建築省エネルギー機構内に設置された IEA ANNEX26 対応研究委員会（委員長 村上周三 東大生研教授、大空間における省エネルギー換気研究）に参加する委員各位より、多くの有益なご助言、ご指導を頂いた。ここに記して、感謝の意を表明する。

＜参考文献＞

- 1) 平松徹也、原田剛、加藤信介 他：実験用実大アトリウム内の温熱環境解析 その1 構成部材が自然室温時に室内温熱環境に与える影響に関する検討，日本建築学会計画系論文報告集，No. 498，pp.37～44，1997.8
- 2) Yoshiich Ozeki, Shinsuke Kato, Shuzo Murakami: CFD Analysis on Flow and Temperature Fields in Experimental Real Scale Atrium, Vol. 3, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, pp. 179～186, 1996.7
- 3) 平松徹也、原田剛、他：実験用実大アトリウム内の温熱環境の解析 その1～5，日本建築学会大会学術講演概要集D 1995，空調工学会学術講演会講演論文集 1995～1996
- 4) Tetsuya Hiramatsu, Takeshi Harada, Shinsuke Kato, et. al.: Study on Thermal Environment in Experimental Real Scale Atrium, Vol. 1, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, pp. 523～530, 1996.7.
- 5) 渡辺要徳、建築計画原論、丸善株式会社(1965)、東京
- 6) 吉野博、長友宗重、松本博、他：木造戸建住宅を対象とした自然換気口の予測法に関する検証実験，日本建築学会計画系論文報告集，No.412，pp. 32～41，1990.6.
- 7) 戸河良敏、荒井良延、三浦克弘：大空間における上下温度分布の予測モデル（大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1），日本建築学会計画系論文報告集，No. 427，pp. 9～19，1991.9
- 8) 旭硝子板硝子建材総合カタログ
- 9) 小林定教：建築物の室内側熱伝達特性に関する実験的研究 第2報 換気のない室内における各面の流出入熱と熱伝達特性について，日本建築学会論文報告集，No. 292，pp. 78～86，1980.6
- 10) 片山忠久、堀月義隆、増田正一：放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文集，No. 381，pp. 20～26，1987.11

＜注＞

- 1) 室を上中下3ブロックに分割し、各ブロックの壁面の吸収日射量を幾何学的に求めた。相互拡散反射の寄与はあらかじめ各面間の形態係数を与えておき、ガウス・ザウデル法により計算した。
- 2) 長波放射授受は相互拡散反射と同様、ガウス・ザウデル法により算出。
- 3) (3)式はかなり大雑把な式であるが、温度変化が小さい13:00、14:00の測定データを用いた分析を行っていること、壁体の厚さは薄く板内の温度分布は小さいこと（北壁・床面は断熱施工されているため、表層の合板のみを考えた）を考えると、第1近似として、このような収支式を検討する価値があると思われる。
- 4) 隣室温度は床、北壁に対し、それぞれ床下温度、北側室の温度を用いた（それぞれ、4測定点の平均値）。北側室は空調により約 20°C に制御されている。床下は高さ 1.8 m の空間で、地面付近の4周囲が約 20 cm 空いており、常に換気された状態になっている。
- 5) 室を上中下3ブロックに分け収支を検討した。図2は上中下ブロックの平均値を示している。ブロックの空気温度は基本的にブロック平均温度を用い

たが、床面、天井面の参照温度とする場合のみ、面から 20 cm の位置の測定温度を適用した。各ブロックでの内壁表面温度は測定値の平均値を用いた。

- 6) こうした検討の場合問題となるのが、各パラメータの精度である。温度測定値の精度は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内と考えている（前報¹⁾）。また、吸収日射量の精度はガラス面に対しては $\pm 10\%$ 以内の精度であるが、北壁・床に関しては、計算手法に問題を残し、約 30% 過大評価されている（前報¹⁾）。C、K、Jに関しては、精度の検証を行っていない。Kについては、屋外側総合熱伝達係数が問題になるが、これについては本文中5章で議論した。壁体の熱容量については、1つのモデル化手法の検証と考えて、鉄骨の熱容量も加算した値を用いた。放射計算に関しては鉄骨の影響は無視しており、今後の課題と思われる。
- 7) 室内空気熱収支は、各壁面の熱収支分析同様、室を上中下3ブロックに分け評価した。ブロックの空気温度の考え方は注4）と同様である。
- 8) Q_L の精度については、自然換気時の換気量の測定値を用い検証している。（文献3））。測定値、計算値は良い相関を有するが、計算値は測定値を約2割過剰評価する結果となっている。また Q_G に関しては、鉄骨表面温度は直達日射が当たらない部分の測定値を用いているため（3測定値は約 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内に納まる）、多少小さな値をとっている可能性がある。
- 9) 熱収支計算と同様に上中下3ブロックに分割し、各ブロックの表面温度、空気温度を計算した。但し、蓄熱の効果を無視した定常計算である。熱移動係数CB値は 2 kcal/hr を採用した。
- 10) グローブ温度は下記の熱収支式¹⁰⁾より求めた（付図1参照）。参考までに当実験アトリウムにおける測定値と計算値の比較を付図2に示す。各壁面温度、室温は別途計算を実施した。

$$a \cdot I_{\text{dir}}/4 + \sum \phi_i (a \cdot I_{\text{dif}i} + \varepsilon \cdot IL_i) - J_g = \alpha_g (T_g - T_{\text{in}})$$

T_g : グローブ温度、 T_{in} : 室温

a : グローブ球の日射吸収率(1.0)、 ε : グローブ球の放射率(1.0)

I_{dir} : 直達透過日射光、 $I_{\text{dif}i}$ 、 IL_i : 面の拡散透過日射光、長波放射

J_g : グローブ球からの長波放射、 α_g : グローブ球の対流熱伝達係数

$\alpha_g = 0.147 \cdot [2.0 + 0.3(10000 \cdot V)^{0.566}]$ (V : 雰囲気風速 $= 0.5 \text{ m/s}$ とした)

付図1 グローブ温度計算モデル

●: CASE 1, ○: CASE 2, ×: CASE 3, △: CASE 4, ▲: CASE 5

付図2 グローブ温度の計算結果

(1997年4月7日原稿受理、1997年9月19日採用決定)