

特 集 3
研 究 解 説

対流・放射連成解析による大規模アトリウム空間の温熱環境解析

—高さ 130m のオープンタイプアトリウム内の放射・対流連成シミュレーション—

Flow and Temperature Fields in Large-scale Atrium Analysed by Means of
Coupled Simulation of Radiative and Convective Heat Transport

村 上 周 三*・加 藤 信 介**・勝 屋 訓***
羽 生 太****・曾 潔**

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Satoshi SYOYA, Futoshi HANYU and Jie ZENG

ガラス外皮を持つ大空間における温熱環境は、空間自体の複雑な形態に加え日射、対流、伝導、再放射等の各要素が絡み合って複雑なシステムを形成している。詳細な日射熱取得シミュレーション、及び放射・対流熱輸送シミュレーションを総合した室内の温熱環境シミュレーションはこの様な複雑環境場を予測・解析する有効な手段となる。吹き抜け部の高さが 130m に達するオープンタイプアトリウム内の温熱環境を詳細な日射熱取得シミュレーション、放射対流熱輸送シミュレーションにより解析した。その結果、夏期は吹抜部頂部に高温の熱溜りが生ずるが、頂部換気によりこの熱溜りを排気することが可能であること、冬期は、吹抜部への熱流の不均一から強い循環流が生じること等が確認された。

1. 序

大規模なビルでは、エントランスホールや付属するアトリウムの外皮にガラスが多く用いられる。これらガラスに囲まれた大空間は、透過日射の影響を強く受けることが多い。さらに、高い天井高に伴い、空間内の室内気流は、強い浮力の影響を受ける。この様なガラス外皮を持つ大空間における温熱環境は、空間自体の複雑な形態に加え日射、対流、伝導、再放射等の各要素が絡み合って複雑なシステムを形成している。詳細な日射熱取得シミュレーション、および放射・対流熱輸送シミュレーションを総合した室内の温熱環境シミュレーションはこの様な複雑環境場を予測・解析する有効な手段となる。本報では、詳細な日射熱取得シミュレーション結果に基づいて、吹抜部の高さが 130m に達するオープンタイプアトリウム内の温熱環境を、放射、流れ場、温度場の総合的なシミュレーションで解析した例を示す。

2. CFD 解析の目的

吹き抜け部に面する居室、通路の境界をガラス壁等で区切らず空気の流れを許すオープンタイプのアトリウ

ム空間の場合、吹き抜け部は一般に充分空調されないため、これに接する居室、通路部の温熱環境が十分に制御されない懸念が生じる。特に、夏期は吹き抜け部に大きな上下温度分布が生じ、空間上部の居室はこの影響を強く受ける可能性がある。また、冬期のアトリウム空間においては、ガラス面で大量の熱損失が生じる一方、日射による大きな熱取得も生じる。このため、空間内には大きな温度分布が生じ、それにより吹き抜け部に予想し難い循環流やガラス面沿いに強いコールドドラフトが生じることが懸念される。本研究では $k-\epsilon 2$ 方程式モデルに基づく数値シミュレーションによりこれらについて、検討する。

3. アトリウム空間の概要 (図 1, 2)

解析対象は、事務所ビル^{注1)} (地下 2 階、地上 30 階建、延床面積 65,500m²) の中央に位置する東西面がガラス壁のオープンアトリウム (約 30.0m (幅) × 約 14.0m (奥行) × 約 130.0m (高さ)) である。南北の事務スペースを連結するブリッジは、アトリウムに対して完全にオープンであり、居住域として十分な空調がなされているか否か検討する必要がある。EV ホールは高さ 2.4m のガラス間仕切りにてアトリウムと隔てられている。ただし、ガラス上部は解放されており、アトリウム吹き抜け部の影響を受ける。東西壁は全面ガラスで日射遮蔽はなく、晴天時には強い日射を受ける。そのため、日射による熱取得がアトリウム空間の温熱環境に与える影響について十分に検討をし

* 東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

** 東京大学生産技術研究所 第 5 部

*** 大気社 (元東京大学研究員)

**** トーヨーコ理研設計本部 (受託研究員)

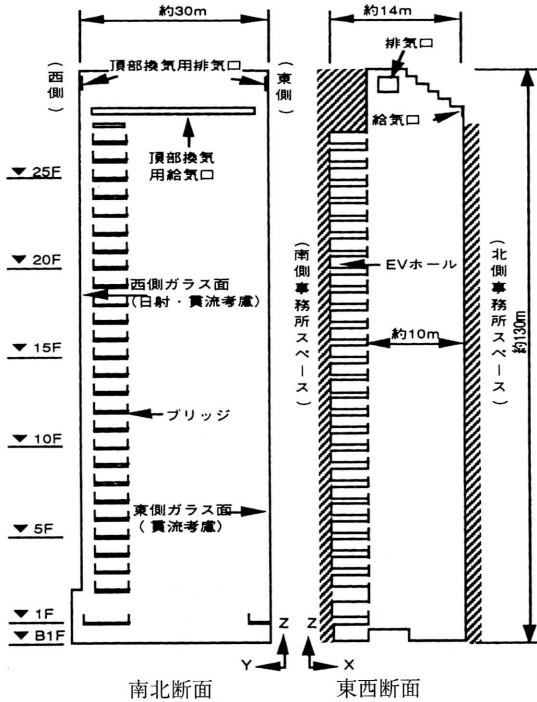


図1 アトリウム概要図

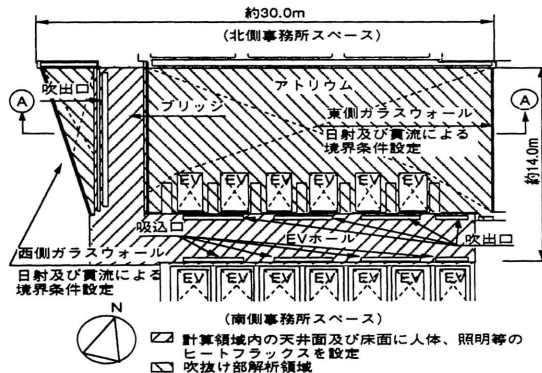


図2 境界領域概要(平面)

ておく必要がある。

4. 計算概要

4.1 計算内容(表1)

計算条件として、日射の有無、および外気温をパラメータとして夏期に関して4ケース、冬期に関して3ケース計算を行う。本報では紙面の都合で、夏期の頂部換気効果が現れた^{注2)}CASE 1およびCASE 2、冬期の日射の影響が示されたCASE 5およびCASE 6についての結果を報告し、他のCASE 3, 4, 7の解析結果は省略する。

4.2 境界条件(図2, 3, 4, 表2)

日射熱取得は別報²⁾で示した日射熱取得シミュレーション

表1 計算条件

	季節	外気温(°C)	吹出温度(°C)		日射	頂部換気
			EVホール	ブリッジ部		
CASE 1	夏期	27.0	17.0	17.0	あり	なし
CASE 2	夏期	27.0	17.0	17.0	あり	あり
CASE 3	夏期	33.4	17.0	17.0	あり	なし
CASE 4	夏期	33.4	17.0	17.0	あり	あり
CASE 5	冬期	3.3	30.0	30.0	なし	なし
CASE 6	冬期	0.0	30.0	30.0	あり	なし
CASE 7	冬期	19.0	19.3	19.3	なし	なし

ンおよび日射計算ソフト^{注3)}により、夏期7月21日、冬期1月21日の各15時の条件で計算する。境界条件としては、この日射熱受熱と設計で設定した内部負荷を室温一様仮定に基づいて、長波長放射、壁体伝導、対流熱伝達の連成計算により天井面、壁面、床面の各対流熱伝達量を求め、境界面の熱流束として設定する^{注4)}(図3参照)。境界条件の詳細を表2および図3に示す。吹き出し、吸い込み風量、吹出温度等の条件は図4に示す。

4.3 解法

計算は、標準 k-ε モデル (ε の浮力生産項: Viollet モデル) を用いた。メッシュ数は、50 (幅) × 32 (奥行) × 220 (高さ) = 352,000。

5. 結果および考察

5.1 CASE 1 (夏期, 頂部換気なし)

(1) 気流性状(図5)

全体的に東側ガラス面は下降流、西側ガラス面およびブリッジのアトリウム側に上昇流が生じている。これはこの時刻に、東側は日射の影響がないのに対し、西側はブリッジ部の日射熱取得、照明発熱等の発熱により温度が上昇し、上昇流が生じるものと考えられる。

(2) 温度分布(図6, 7)

空間の上層部と下層部に最高6.0°Cの温度差が、また26階以上には、かなり強い熱溜まりが観察される。アトリウムは全体を通して、設定温度から1~2°C高い28°C~29°Cになっている。ブリッジ部はEVホール(半分閉鎖され日射負荷も少ない)に比べて、2~3°C高い温度を示す。これは、西側ガラス面から入射した日射が直接ブリッジの床面にあたり、かなりの熱がブリッジ空間部に与えられたためである。すなわちブリッジ部とEVホールでは、吹出温度・風量等の制御を分離して行うことが必要となる。また、上層階におけるブリッジ部の温度分布詳細を図7に示す。上層部のブリッジは熱溜まりの影響を考慮し

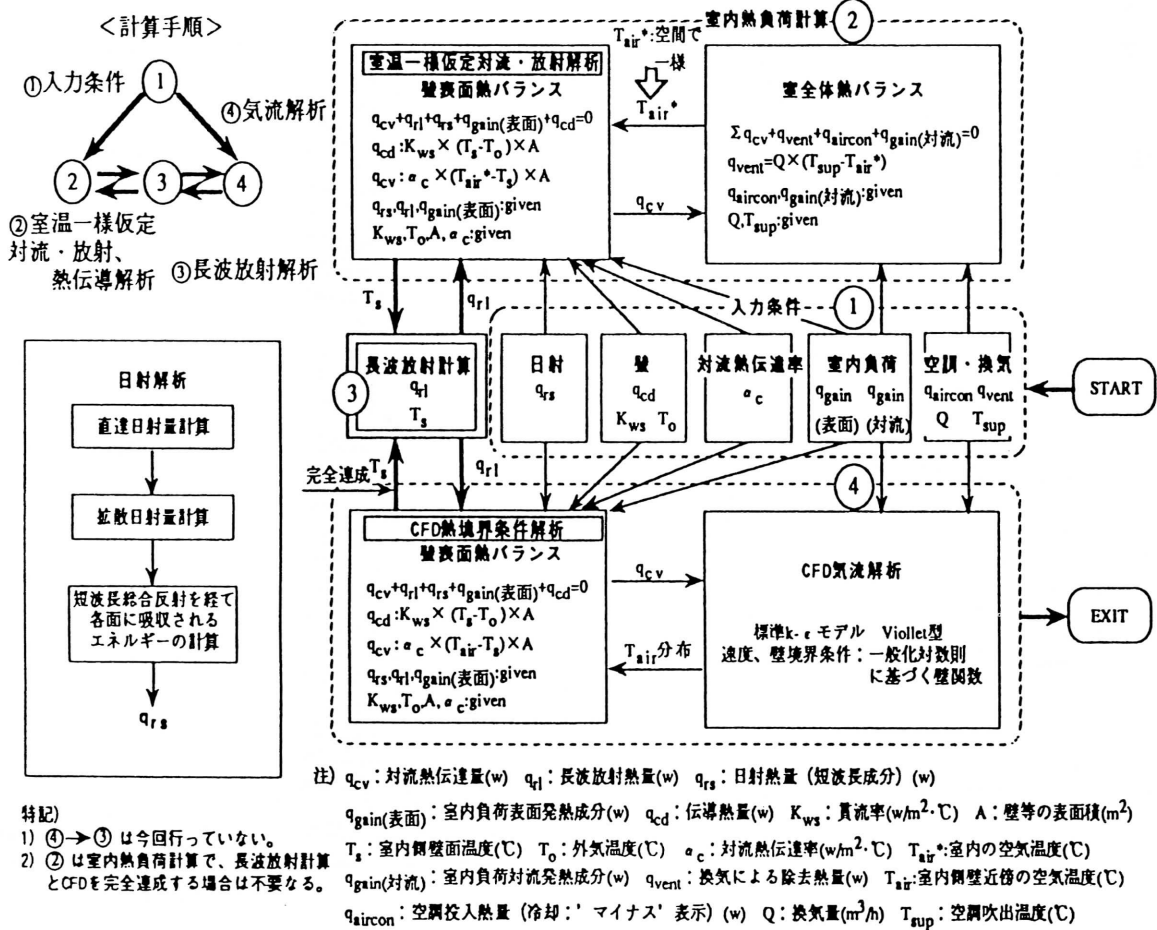
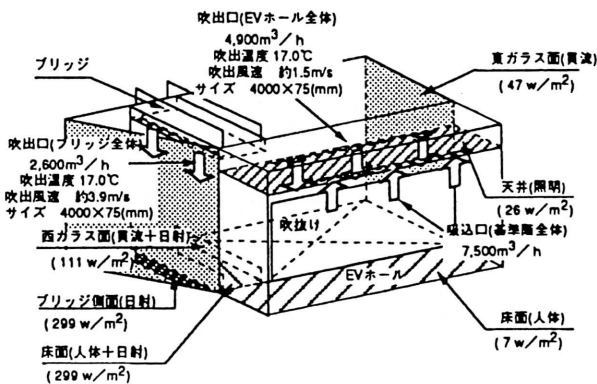


図3 計算解析フロー



夏期の場合
(図中の数字は冷房時の負荷を示す)
図4 境界条件概要図
(基準階、南西側から見た図)

表2 境界条件

吹出	風速 U_{in} : 吹出し風速(吹出し面一様)約 2m/s 温度 $\theta_{in} = 17.0^\circ\text{C}$ (夏期), 30.0°C (冬期) θ_{in} : 吹出し温度 乱れ $k = 0.002U_{in}^2$ k : 乱流エネルギー (m^2/s^2) $\epsilon = k_{in}^{3/2} / (0.3l_{in})$ ϵ : k の乱流散逸率 (m^2/s^3) l_{in} : 吹出口相当直径 (m)
吸込	k, ϵ, θ 等のスカラー量はフリースリップ
壁面	(速度)一般化対数則を用いた 対流熱伝達率固定 ($a_c = 7\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$) (温度)東西ガラス壁面は外気温を与条件として与えた

シュが床面近くで、充分細かくないこともこの影響が強調されて表れている1つの原因と推測される。

5.2 CASE 2 (夏期, 頂部換気あり)

(1) 気流性状 (図8)

基本的な気流の性状は、CASE 1と同様に東側ガラス面で下降流、西側ガラス面での上昇流が確認される。しかし、

て送風量を 20% 増しているにもかかわらず、設定温度に対し 1~2°C 高くなっている。なお、ブリッジ床面から 50~60cm 付近が 37~41°C と高温になっている。これは基本的には大きい日射熱取得のためであるが、解析メッ

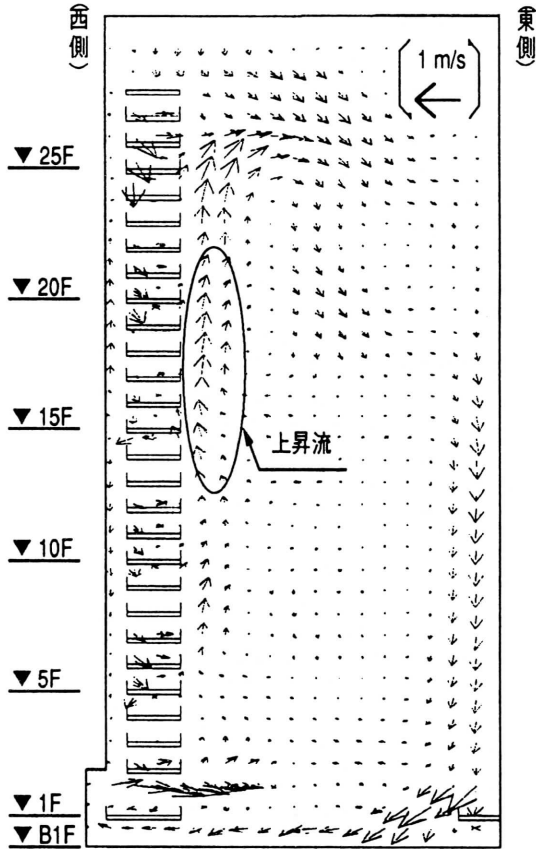


図5 CASE 1 速度分布 (A-A 断面)

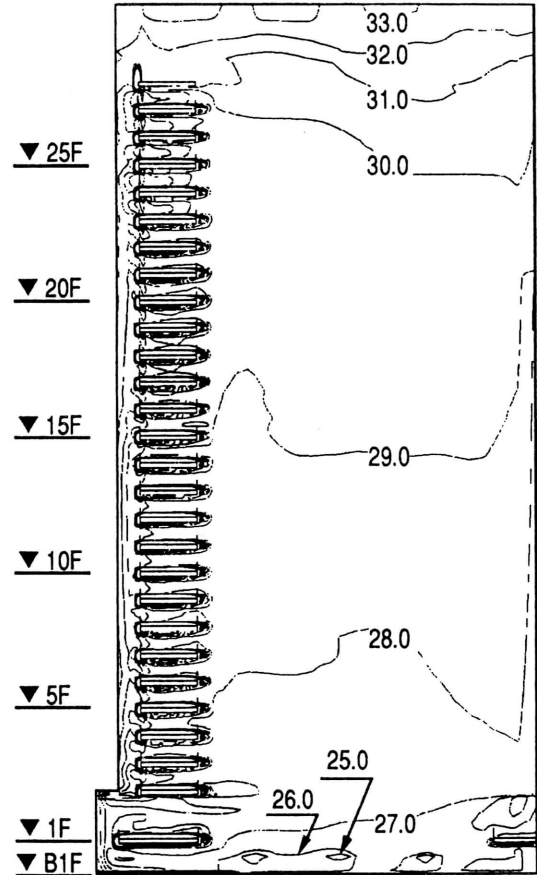


図6 CASE 1 温度分布 (A-A 断面)

27階以上のブリッジ周辺に上昇気流が見られる。これは頂部換気によって上層部の熱溜まりが吸引されて消滅し、ブリッジ周辺に日射熱取得に伴う上昇流が生ずるためと推測される。

(2) 温度分布 (図9)

29.0°C以下の領域(15階以下)は、殆どCASE 1と同様の温度分布を示している。しかし、30.0°Cの等温線は27階以上に移り、CASE 1のときに見られた26階以上の強い熱溜まりは観察されない。

5.3 CASE 1とCASE 2の比較 (図10)

アトリウム吹き抜け部の鉛直温度分布を図10に示す。換気を行わないCASE 1は105mあたりから前述の急な温度勾配が確認される。これに対し頂部換気を行ったCASE 2は、最頂部を除き90mあたりからの温度上昇が認められない。CASE 1とCASE 2ではアトリウム最上部で2°Cの差が見られる。すなわち、外気温度があまり高くなければ外気の導入は、上層部の熱溜まりを緩和させ、アトリウム内(特に熱溜まりの形成される上層部)の環境を改善することが確認された。

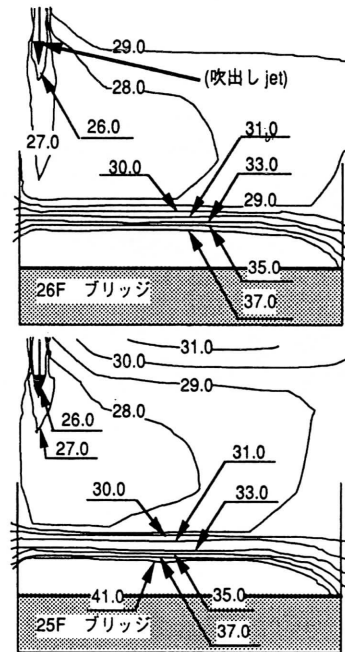


図7 CASE 1ブリッジ部の温度分布詳細 (A-A 断面)

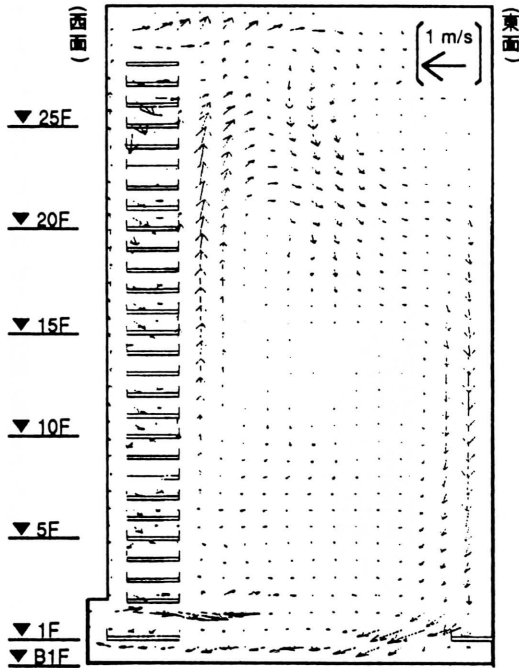


図8 CASE 2 速度分布 (A-A 断面)

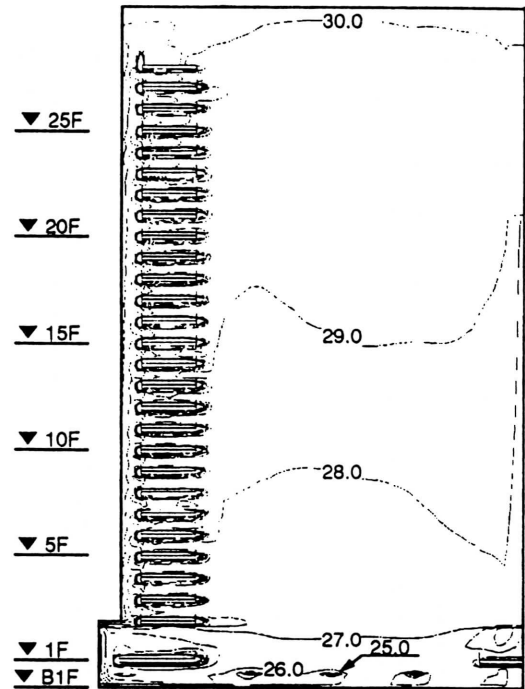


図9 CASE 2 温度分布 (A-A 断面)

5.4 CASE 5 (冬期, 日射有)

(1) 気流性状 (図 11)

アトリウム全体にわたる大循環流が生じる。これは、外気との間で貫流による熱損失のある東側ガラス面近くで下降流が生じ、日射による熱取得と内部発熱のある西側ブリッジ周辺で上昇流が生じているためである。このようにアトリウム空間内で熱的境界条件に大きな差異があることから、時計回りの強い大循環流が生じ、その結果、東側1階ブリッジ部にやや強い吹き下ろし気流が生じている。

(2) 温度分布 (図 12)

冬期のアトリウム空間内は上層部ほど温度が高くなっており、温度勾配の緩やかな温度成層を形成している。東側低層部には日射も内部発熱もなく、ガラス面に沿う領域は、相対的に低い温度を示している。逆に西側ブリッジ周辺は日射による熱取得および内部発熱によって温度が高くなっている。等温線はアトリウム中央付近で右下がりになっているが、これは大循環流に伴って上昇流のある側では下層の低温の空気が誘引され、下降流のある側では上層の高温の空気が運ばれることによるものである。東側1階ブリッジ部に吹き下ろす下降流の温度はおよそ23°Cであり、それほど低くない。

(3) 居住域 (ブリッジ部) (図 13)

ブリッジ周辺の温度はおよそ27°Cでやや高めの値を示している。これは吹き出し風量および温度について、暖房運転における最大のものを設定しているためである。したがって、暖房運転中の居住域 (ブリッジ) 部の温熱環境は

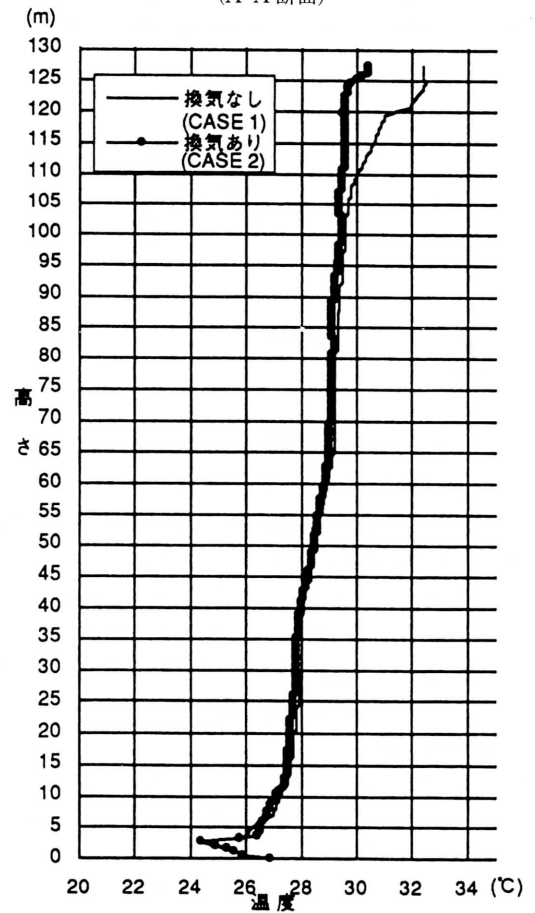


図10 鉛直温度分布 (中心断面)

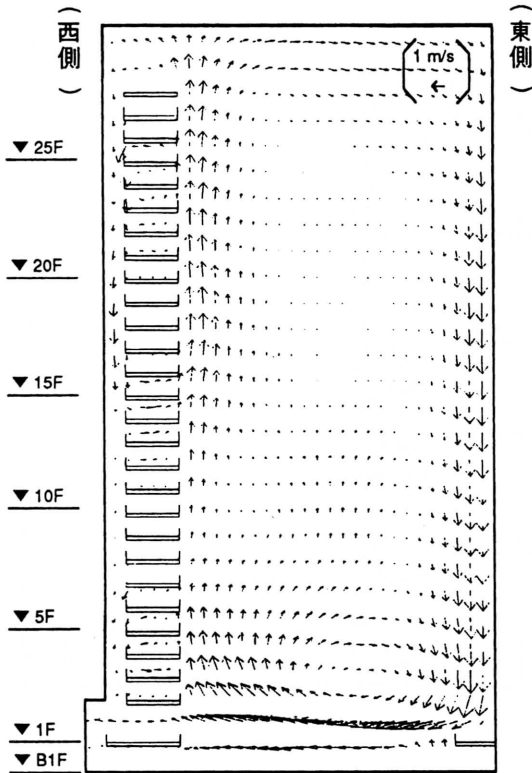


図11 CASE 5 速度分布 (A-A 断面)

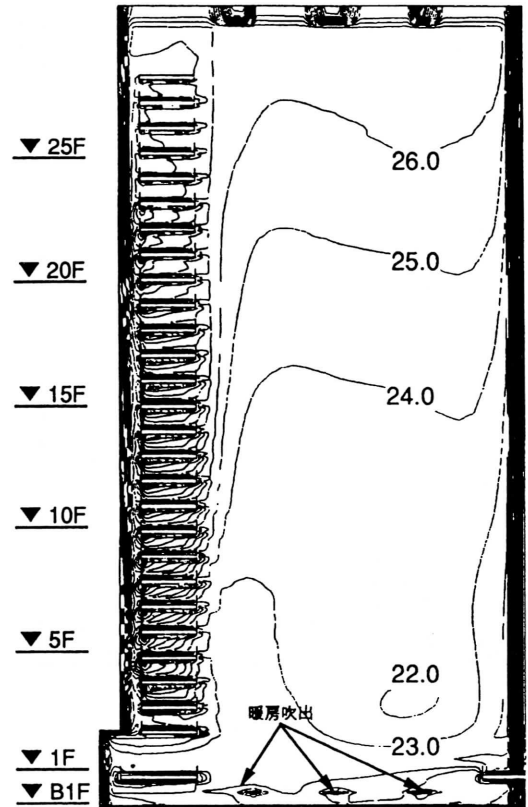


図12 CASE 5 温度分布 (A-A 断面)

良好に保たれると思われる。また、西側ブリッジの周囲のアトリウム吹き抜け部には上昇流が存在するが、居住域には流入しておらず、ブリッジ部の温熱環境には、ほとんど影響していない。

5.5 CASE 6 (冬期, 日射無)

(1) 気流性状 (図 14)

吹き抜け部の西側ブリッジ部側に上昇流が、東側ガラス面側には下降流が生じ、空間全体的には循環流が生ずる。東側1階ガラス面付近には、強い下降流が存在する。しかし、西側ブリッジ付近の上昇流は上層部では減衰して、23階付近で水平流となり、アトリウム頂部までは到達しない。西側ブリッジ部に日射による熱取得のあるCASE 5ではCASE 6に比べ、アトリウム吹き抜け部にさらに強い循環流は形成された。CASE 6では西側ブリッジ部での日射熱取得がないため、この循環流はあまり強くなっていない。

(2) 温度分布 (図 15)

東側低層部ではガラス面に沿った領域に低温部分が存在する。しかし、アトリウム空間全体としては、ほぼ均一な温度分布となり、明瞭な温度成層は形成されない。これは、吹き抜け部の大循環によりよく攪拌されること及び日射熱取得がないため、アトリウム空間内における境界条件の空間的なアンバランスが小さくなったためである。

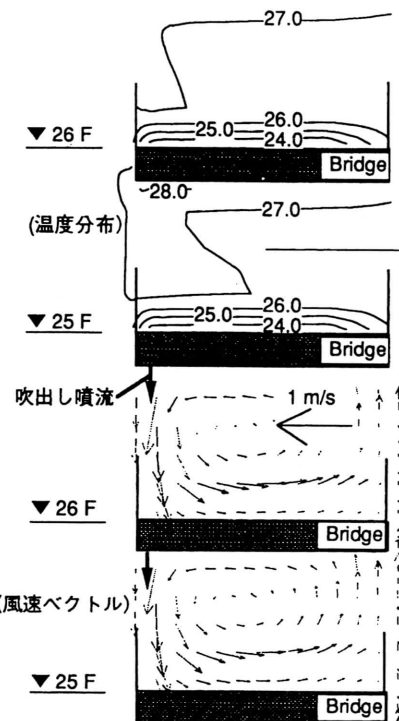


図13 CASE 5 ブリッジ部詳細 (A-A 断面)

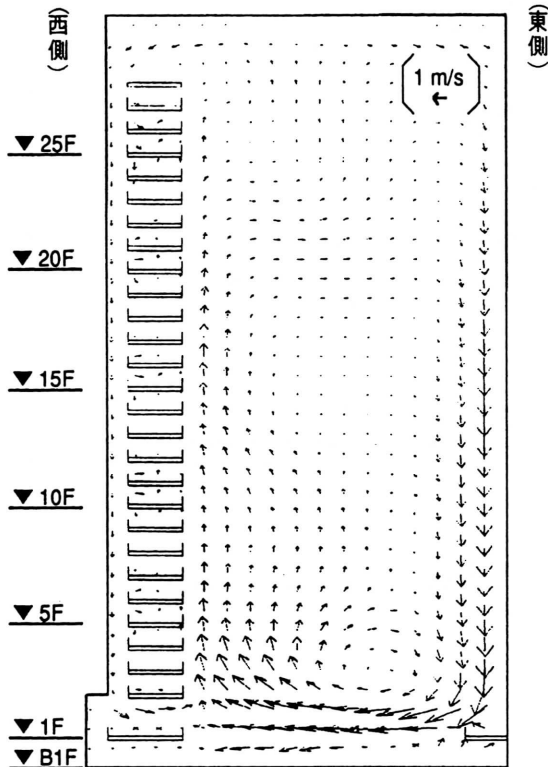


図14 CASE 6 速度分布
(A-A 断面)

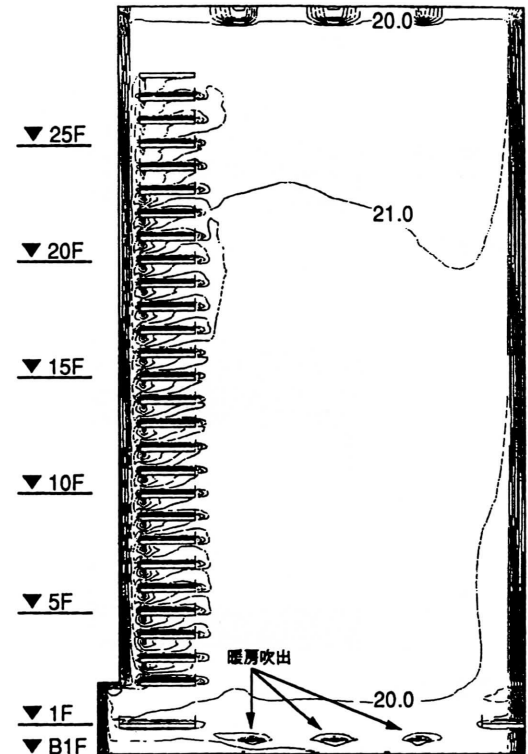


図15 CASE 6 温度分布
(A-A 断面)

(3) 居住域 (ブリッジ部) (図 16, 図 17)

西側の各ブリッジ内では、吹出 airflow に誘引される循環流がブリッジ横断面全体にわたってロール状に生じている。このため、アトリウム吹き抜け部からの気流の流入が妨げられ、居住域は比較的アトリウム吹き抜け部の影響を受けにくくなっている。

温度分布についても居住域は 19°C 以上となり、温熱環境は比較的良好に保たれている。しかし、図 17 に示すように、東側 1 階ブリッジ部付近には、強い下降流が存在する。この空気温度は、およそ 20°C でありそれほど低い温度ではない。しかし、流速が大きいため、その影響は無視できないものと考えられる。

6. 結 論

日射熱取得、閉鎖空間内の放射・対流熱輸送シミュレーションを統合した室内の温熱環境シミュレーションにより、高さ 130m のアトリウム吹き抜け空間を解析した。その結果、以下の知見を得た。

夏期：

- (1) 最上層部の熱溜まりを緩和させるためには、頂部換気を用いると効果がある。
- (2) ブリッジの温度は EV ホールのそれに比べて 2～3°C 高くなった。ブリッジ部は EV ホールに比べ、アトリ

ウム吹き抜け部に対し完全にオープンとなっている。このような場合吹き出し空気温度、風量等の制御は、EV ホールとブリッジ部で、分離して行われる必要がある。

冬期：

- (3) 冬季における解析の結果から、アトリウム吹き抜け部に開かれたブリッジ部居住域は良好に暖房され、その温熱環境は快適に保たれている。
- (4) 日射のない場合、アトリウム空間全体の大規模な循環流は弱くなっている。
- (5) 東側 1 階ブリッジ部は、ガラス面に沿って生じる下降流の影響を受ける。

謝 辞

解析を行うにあたり、(株)東ガスの大森敏明氏の多大なご協力を得た。さらに、住宅・都市整備公団東京支社都市再開発部市街地設備課並びに市街地設計課、(株)総合設備計画、(株)ヘルム建築・都市・コンサルタント、(株)大気社、大成建設(株)の関係各位からのご協力を得た。ここに記して謝意を表します。(1994年12月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 羽生・村上他, CFD による大規模アトリウム空間の温熱環境解析 (その 5) 空調・衛生工学会学術講演論文集

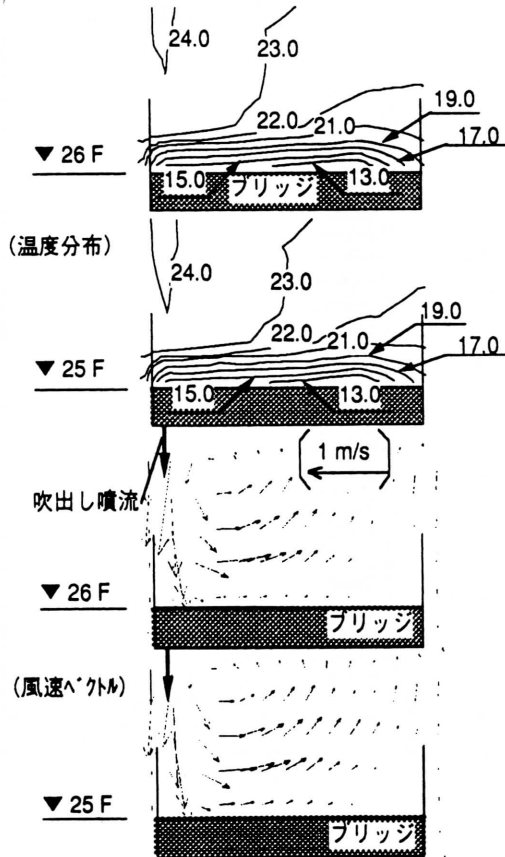


図16 CASE 6
ブリッジ部詳細
(A-A 断面)

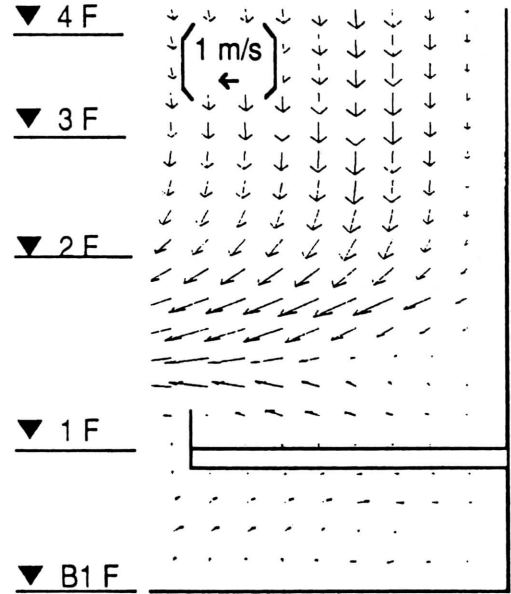


図17 CASE 6 東側1階
ブリッジの気流性状

1994

- 2) 大森・村上他, 屋外・屋内複合解析格子を用いる複雑形状建物の日射・放射総合シミュレーション 空調・衛生工学会学術講演論文集 1994

注1) 対象建物は, 東京都中野区本町2丁目, 中野坂上本町2丁目地区市街地再開発事業による北棟である.

注2) $q_{cd} = K_o(T_o - T_{si})$, $q = \alpha_c(T_i - T_{si})$,

$$q_n = q_s + q_r$$

K_o : 外壁の室内側壁面までの熱貫流率

T_o : 外気温度, T_{si} : 室内壁表面温度

T_i : 室内メッシュ壁面第1セル温度

q_s : 日射及び室内負荷による発熱量

q_r : 赤外線放射熱取得

α_c : 外壁の室内側対流熱伝達率

注3) 大成建設(株)所有の日射計算ソフト SOLAR2 を用いて計算を行った.

注4) 解析は定常を仮定しているが, コンクリート壁等は非定常性を考慮し, 蓄熱負荷を与えている.