

## 劇場内の温熱空気環境に関する研究

## 3次元CFDによる夏期の空気温度形成解析

Study on Indoor Climate of a Theater

3-D CFD Analysis on Contribution Ratio of Indoor Air Temperature of a Theater in Summer

村 上 周 三\*・加 藤 信 介\*\*・孔 鉄 男\*\*\*

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Chol Nam KONG

## 1. 序

プロセニウムアーチ部により客席部と舞台の2つの大空間が接続する大劇場の温熱空気環境をCFD (Computational Fluid Dynamics) により解析する<sup>文1)文2)</sup>。本報では、CFDによる温熱空気環境の解析結果に空気温度形成解析<sup>文3)</sup>を適用することで温熱環境改善のための必要空調負荷増分の予測・その有効性の検証を行った結果について報告する。

## 2. 対象空間と空調方式

図1. 主舞台29m×24.5m, 高さ30.5m, フライタワ部最高高さ38m, 上・下手側舞台20m×23.6m, 奥舞台22.5m×20.8m, 客席数1800席から成る。室内容積比は、舞台:客席=5:3である<sup>注1)</sup>。空調方式は単一ダクト方式で、空調系統は①主舞台上部・下部, ②フライタワ, ③側・奥舞台, ④オーケストラピット, ⑤客席前部, ⑥客席後部・第1バルコニー, ⑦第2・第3バルコニーの7系統に分かれる。それぞれの系統は独自運転が可能である。

## 3. 計算概要

標準k-ε型2方程式モデルに基づく3次元数値解析<sup>注2)</sup>。格子点は104×74×46=354,016。夏期の冷房基本パターンであるケース1及び⑤客席前部吹出温度を低くしたケース2, 3での解析結果を示す(表1)。フライタワ照明発熱の輻射伝達熱は主舞台床での熱流として与え、舞台外壁面では相当外気温を与え対流熱伝達率を仮定し境界条件とする。風速の壁面境界条件は一般化対数則<sup>注3)</sup>。

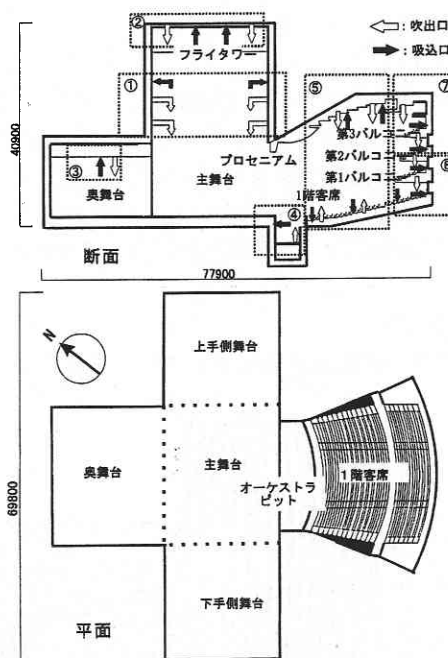


図1 対象空間と空調方式

表1 計算条件

空調系統	人体・照明負荷 (kW)	風量 (m³/h)	吹出温度(°C)		
			ケース1	ケース2	ケース3
①主舞台上部・下部	107.0	29,000	15.0	15.0	15.0
②フライタワ	187.1	43,000	16.2	16.2	16.2
③側・奥舞台	24.3	17,400	19.0	19.0	19.0
④オーケストラピット	11.8	8,000	21.6	21.6	21.6
⑤客席前部	30.0	52,000	24.3	23.2	21.5
⑥客席後部 第1バルコニー	32.5	29,000	22.7	22.7	22.7
⑦第2, 3バルコニー	30.1	33,000	23.3	23.3	23.3

備考1)室温設定は、フライタワ30°C、その他26°C。備考2)舞台外壁には貫流負荷がある。外壁面積は約3,400m²、K値0.82W/m²・°C、相当外気温は、屋根面45.3°C、その他壁面は方位に応じ31~34°C。

\*東京大学生産技術研究所 計測技術開発センター

\*\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*\*高砂熱学工業(株)

## 4. 結果・考察

## 4.1 基本パターンでの温熱環境 (ケース 1, 図 2, 3, 4)

## (a) 風速分布

主舞台・フライタワー中央部で上昇し、上手・下手側舞台の壁面で下降するかなり強い循環流が形成される。この主舞台上昇流の一部がプロセニウム上部から客席空間上部に流れ込み、相互換気が生じる。流入気流は天井に沿った空間の奥まで流れた後、バルコニー鼻先で下降、1階客席で主舞台に向かって逆流する流れ (0.3m/s 程度) を形成する。客席の天井吹出口 (2,000mm×250mm, 1.2m/s) を含む断面 (図は省略) では、吹出噴流が循環流に押しまげられ循環流とともに流れる。

## (b) 温度分布

舞台から客席空間への流入気流は27~27.5℃、客席から主舞台への気流は27℃程度。1階客席では全般的に多少高めであり、吹出冷気を含んだ循環流の到達がはやい客席奥で26.5℃。下流となる舞台付近で27℃程度。フライタワーでは循環流により照明負荷が下方へ移流拡散され28℃程度。

## (c) 水平温度分布

1階客席の南西壁面側で多少高め、主舞台では中央で

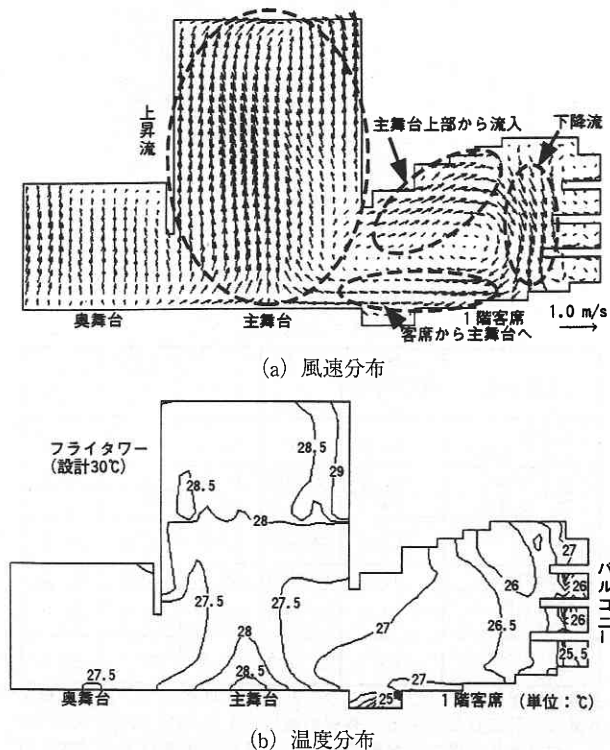


図2 A断面解析結果 (ケース1)

28.5℃程度。

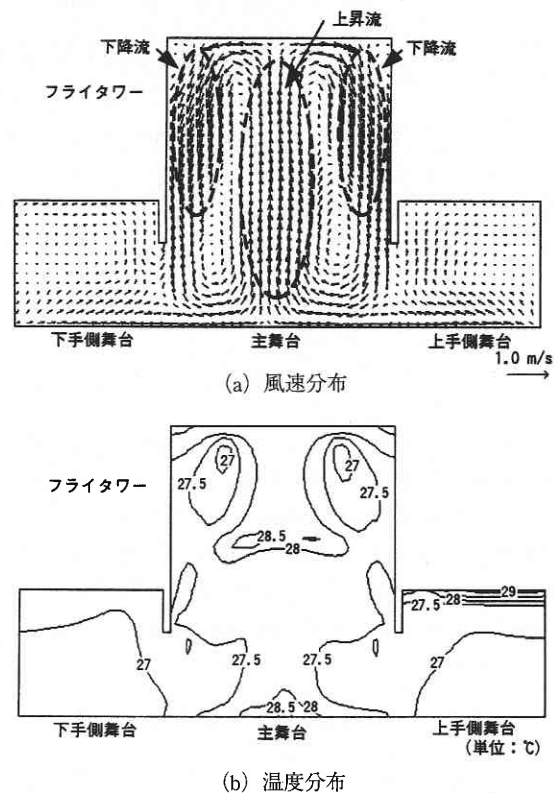


図3 B断面解析結果 (ケース1)

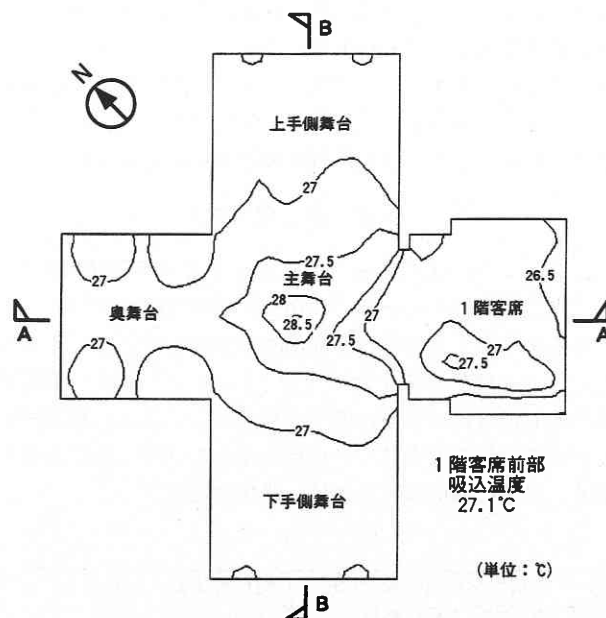


図4 水平温度分布 (ケース1, 舞台床面+1 m)

## 4.2 熱収支解析による改善策 (ケース 2, 表 2, 図 5)

ケース 1 の解析結果では, 1 階客席で高めの温度となったため, この改善を検討する. ケース 1 の解析より得られた貫流熱を含む系統別熱負荷と, 同吸込温度から算出した系統別空調負荷を, 両者の収支とともに, 表 2 に示す. この収支解析結果と, ケース 2 の気流性状の特徴である主舞台・フライタワーでの循環流, 舞台・客席間相互換気とを勘案すれば, フライタワー部での発熱負荷が主舞台上部・下部および客席前部に移流拡散し, そこでの処理すべき負荷が増加したと解釈できる. この場合, 客席前部系統での温熱環境改善には, フライタワーからの流入熱量 18.6kW と同量の空調投入熱量の増量を行えばよいことになる. 図 5 に客席前部系統のみ吹出温度を 1.1°C 低くした場合 (18.6kW の冷熱量増) での解析結果を示す. 1 階客席居住域の温度 (吸込温度) は 26.7°C であり, やや改善されたが充分ではない. これは, 設定した冷熱の増量では, 相互換気等による他ゾーンから当該居住域への流入熱負荷増分を処理しきれないこと, すなわち増分冷熱量の全てが居住域環境改善に寄与したわけではないことによる. 気流・温度分布の解析結果のみで実空調機負荷を予測することは困難である. なお, 吹出温度変更に関わらず気流性状に殆ど変化はない (図は省略).

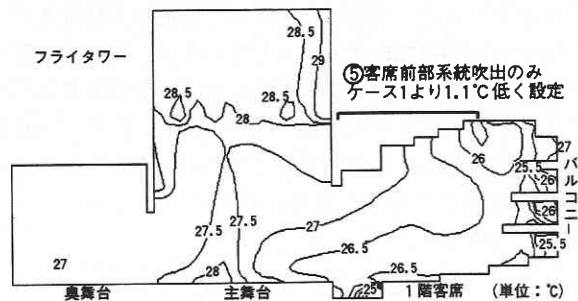
## 4.3 空気温度形成解析と改善策 (ケース 3, 表 3, 図 6, 7)

客席前部 (空調系統⑤) での居住域における温熱環境改善に必要な空調機負荷の増分を評価する場合, 当該及び他のゾーンから当該居住域へ流入する負荷温熱量・空調冷熱量の構成を評価することが必要となる. フライタワー照明負荷・空調冷熱がどのように全領域に拡散するかを検討した例を図 6 に示す. 照明負荷の結果では, 客席前部の居住域温度 (吸込温度) は 27.7°C であるので, 当該ゾーン空調風量 (52,000m<sup>3</sup>/h) の 1.7°C 上昇分の温熱量 28.7kW が照明負荷から流れ込むことがわかる. 一方, フライタワー

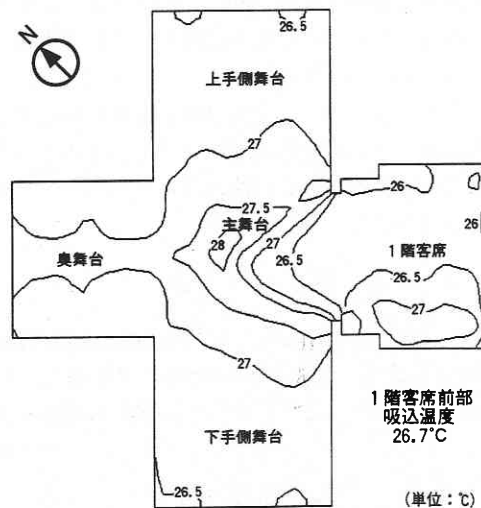
表 2 ケース 1 の熱収支解析

単位: kW

空調系統	熱負荷	空調負荷	収支
①主舞台上部・下部	107.0	116.7	+ 9.7
②フライタワー	199.3	162.2	-37.1
③側・奥舞台	39.1	44.2	+ 5.1
④オーケストピット	11.8	12.7	+ 0.9
⑤客席前部	30.0	49.2	+18.6
⑥客席後部 第 1 バルコニー	32.5	28.2	- 4.3
⑦第 2, 3 バルコニー	30.1	36.4	+ 6.3

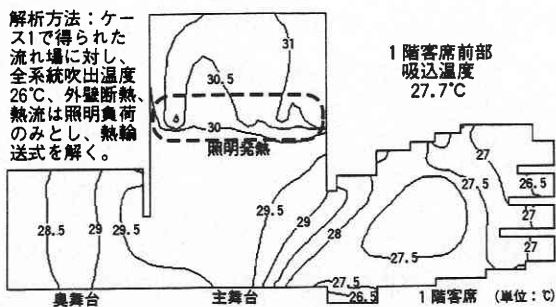


(a) 断面温度分布

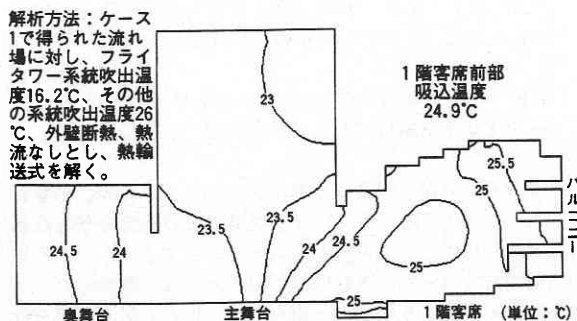


(b) 水平温度分布

図 5 ケース 2 の解析結果



(a) フライタワー照明負荷の寄与



(b) フライタワー空調冷熱の寄与

図 6 ケース 1 の空気温度形成解析

## 研 究 速 報

空調冷熱による客席前部吸込温度は24.9℃であり、19.3kWの冷熱流入となる。従って、フライタワーからは差し引き9.4kWの温熱量が流入する。同様の解析を他系統に関しても行った結果を表3に示す。①主舞台上部・下部および②フライタワーからの流入熱量収支（相互換気による客席前部への流入熱量）は温熱1.7kW（-7.7+9.4）であり、意外に少量である。特徴的であるのは、客席前部空調吹出による冷熱流入が11.5kW（投入冷熱の38%）と小さいことである。吹出冷気の多くが居住域には流入せず、他のゾーンへ移流拡散することを意味する。従って、客席前部への流入超過温熱量18.6kWを客席前部空調で処理するためには48.9kWの冷熱増（ケース1に比べ吹出温度2.8℃低下）が必要と予測される<sup>注4)</sup>。この吹出温度での解析結果を図7に示す。客席前部で26.2℃であり、十分な改善が達成される。

## 5. ま と め

①設計条件に基づくCFD解析より得られた居住域温度を参考に居住域をカバーする吹出温度を単純に変化させて解析を行っても、やや改善が認められる程度で十分な改善を得ることができない。②温熱環境を改善し得る空調機負荷の予測には、空気温度形成解析の活用が極めて有効である。これらの検討結果はその後の現場実測や実際の空調運転計画に活用された。

## 謝 辞

本研究の企画・実施においては建設省関東地方建設局、並びに(株)TAK 建築・都市計画研究所の関係各位より全面的なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

(1997年5月29日受理)

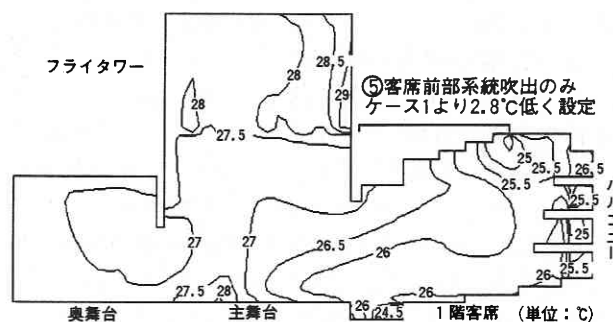
## 参 考 文 献

- 1) 孔, 村上, 加藤: 劇場内の温熱空気環境に関する研究 (その1) 建築学会大会, 平成9年9月
- 2) 高橋, 村上, 加藤, 大岡, 新: 劇場内の温熱空気環境に関する研究 (その2), (その3) 建築学会大会, 平成9年9月
- 3) 小林, 村上, 加藤: 温熱環境形成寄与率に関する研究 (その1) 空気調和, 衛生工学会大会, 平成5年10月

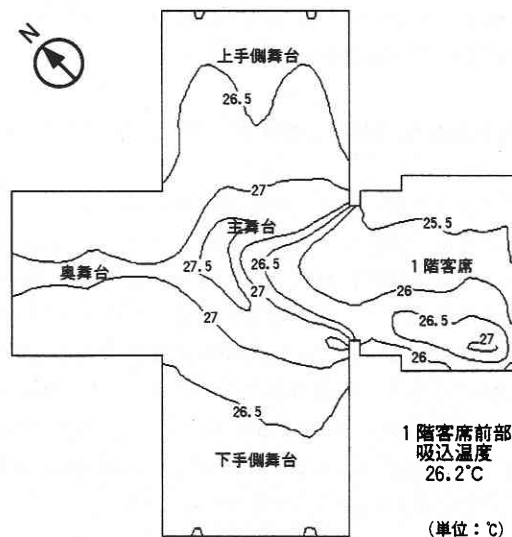
表3 ケース1の空気温度形成解析  
(客席前部居住域)

単位: kW

空調系統	客席前部居住域への流入熱量		
	人体・照明	空調	収支
①主舞台上部・下部	+21.2	-28.9	-7.7
②フライタワー	+28.7	-19.3	+9.4
③④側・奥舞台 オーケストラピット	+4.0		+4.0
⑤客席前部	+19.0	-11.5	+7.5
⑥⑦客席後部 第1、2、3バルコニー	+5.4		+5.4
全空調系統での流入熱量収支			+18.6



(a) 断面温度分布



(b) 水平温度分布

図7 ケース3の解析結果

注1) 平成9年3月竣工の新国立劇場大劇場。注2) 本CFD解析はStream Ver 2.8を使用。注3) 天井吹出噴流の速度分布の性状が既往の実験式による分布性状となるべく一致するよう、事前に各種の予備検討を行った。それに基づいて本計算を開始した。注4) ケース2の解析より同様の予測も可能。但し、気流計算を行うため空気温度形成解析に比べ20倍以上の計算時間を要する。