

大劇場の温熱環境に関する模型実験

——舞台と客席の温度・気流分布の性状——

Scale Model Test on Indoor Climate of Opera Theatre

——Air Distribution at Heating and Cooling in Stage and Seat Area——

村 上 周 三*・加 藤 信 介**・田 中 幸 彦***
 鈴 木 啓 泰****・崔 棟 皓**・近 本 智 行**

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Yukihiro TANAKA,
 Hiroyasu SUZUKI, Dong-Ho CHOI and Tomoyuki CHIKAMOTO

1. 序

計画中の劇場⁽¹⁾の客席および舞台の温熱空気環境を縮尺模型実験により検討する。最大負荷時の温熱環境性状のほか、舞台部と客席部の空間のつながりに着目して空調条件の変化が温熱環境に与える影響に関して検討する⁽²⁾。

2. 予備調査結果

実験に先立ち、海外のオペラ劇場2件、国内多目的ホール3件のホール管理者に空調に関する聞き取り調査を実施した⁽²⁾。その結果、

- ①いずれの場合も舞台部は年間を通じて、ほぼ毎日使用され、空調されている。
- ②舞台部と客席部で温度・風量のバランスが崩れると、空気の相互循環が生じる。特に緞帳を下ろした場合、両者の圧力差によりこれがはらむ等の不都合がしばしば生じる。
- ③特に海外の2例では、「舞台部空調には送風ファンの回転数制御、ダンパー開度調整による吹出し風速、室内圧調整は必須」との助言を受ける。
- ④舞台部の気流速度が大きすぎると、釣り幕の波打ち、釣り物の揺れ、譜面の乱れ、飛散等が生じる。客席部のみならず舞台部でのドラフト防止が肝要となる。
- ⑤空調騒音に対する苦情はかなり厳格である。

3. 劇場モデル・空調条件 (図1, 表1)

舞台、客席部とも空調。舞台上部フライ部のみ空調目標を緩和。客席部は空調風量が多く吹出し温度差小、冷房負荷の9割は内部発熱。

4. 相 似 則

流れ場・温度場の相似条件は以下の2つを考慮する。

- ①十分に発達した乱流場での相似条件：吹出口の Ar 数

記号 Ar : アルキメデス数 ($gL\beta\Delta\theta/U^2$)

g : 重力加速度(m/s²) L : 代表長さ(m)

β : 温度膨張率(deg⁻¹) $\Delta\theta$: 代表温度差(deg)

n : 縮率 (模型/実物)

添字 l : 長さ u : 風速 WH : 発熱量 θ : 温度差

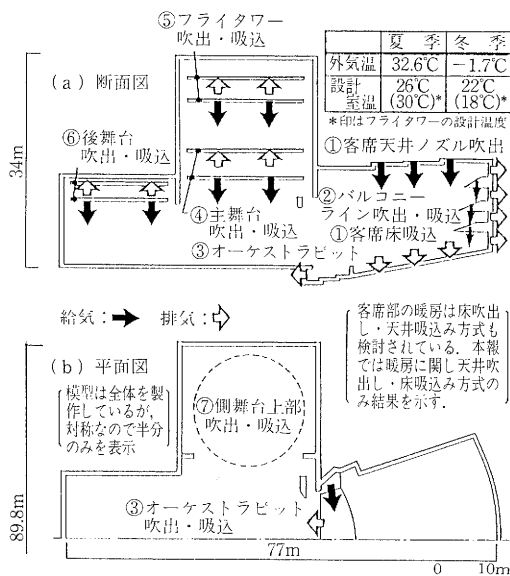


図1 劇場モデルの概要

表1 空調条件

空調系統	送風量 (m ³ /h)	吹出し温度差* (°C)			
		冷房最大負荷時	暖房最大負荷時	冬季冷房負荷時	
客席	① 客席 前部	52,000	-2.2	0.7	-1.9
	1階 後部	10,200	-2.9	0.2	-3.0
	② 客席後部	20,000	-3.0	0.1	-3.2
	第1バルコニー	17,000	-2.9	0.1	-3.2
舞台	第2バルコニー	16,300	-2.5	0.9	-1.7
	③ オークストラピット	8,000	-4.6	1.0	-3.4
	④ 主舞台	49,000	-9.6	1.4	-9.4
	⑤ フライタワー	30,000	-15.0	9.6	-7.8
	⑥ 後舞台	11,000	-8.2	4.8	-3.9
⑦ 側舞台	上手	7,000	-2.4	15.0	12.4
	下手	2,500	-6.7	9.7	1.2

* 設計室温との差

*東京大学生産技術研究所 付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
 ***東京大学生産技術研究所 元民間等共同研究員 (フジタ工業(株)技研)
 ****東京大学生産技術研究所 元大学院学生 (榎大林組)

研究速報

の一致。

②熱流の境界条件に関する相似条件：空調投入（あるいは除去）熱量と貫流熱内部発熱の比の一致。

これらより次式^{2),3)}に基づいて実験条件を定める。

$$n_u^2 = n_g \cdot n_e \quad (1)$$

$$n_{WH} = n_g \cdot n_u \cdot n_i^2 \quad (2)$$

5. 実験概要

5.1 模型概要

劇場全体を模型化し、縮尺は1/25（写真1）とする。空調系統は吹出20、吸込18、合計38系統に分けて再現する。風量は各系統ごとにオフィス流量計により測定し、バルブにより調整する。吹出し温度は冷温風ユニットと系統ごとの電気ヒータの併用により調整する。熱負荷は

内部発熱を電気ヒータで、貫流熱は模型外皮熱抵抗を保温材料で代表させて保温厚を調整して再現している。

5.2 実験条件

実験条件を表2に示す。

5.3 測定方法

温度はCC熱電対（JIS T型）で196点、風速は温度補償付サーミスタ風速計で52点を測定する。気流性状はスモークテストを用い目視により観察する。

6. 実験結果

6.1 CASE-1（冷房最大負荷時、図2）

床面高さ1mの水平断面では客席・舞台ともおおむね26±1℃の範囲の温度を示し、居住域では全体的に均一

表2 実験条件（吹出し条件等は表1に基づく）^{*1}

実験CASE	吹出し条件		負荷(Mcal/h)		観感
	客席	舞台	客席	舞台	
CASE-1	冷房		111(設計値)	323(設計値)	有
CASE-2	暖房		18(設計値)	118(設計値)	
CASE-3	冬季冷房		83(設計値)	208(設計値)	
CASE-4	冷房 ^{*3}	換気 ^{*4}	111	323	無
CASE-5		冷房			
CASE-6	冷房 ^{*3}	換気	162(50%減)	323	有
CASE-7		冷房			
CASE-8			56(50%減)	323	無

- * 1 CASE-1,2,3は本来の空調計画に基づく実験
CASE-4,5フライ、舞台部の空調能力を削減した場合の影響を調べたもの
CASE-6,7,8は故意に空調バランスを崩してドラフトを調べたもの
- * 2 主舞台、側舞台、後舞台
- * 3 CASE-1と同条件
- * 4 CASE-1と同風量を設計室温+1℃で供給

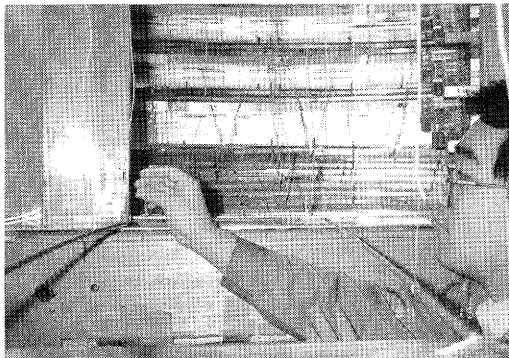


写真1 模型内観（後舞台より主舞台・客席方向を見る）

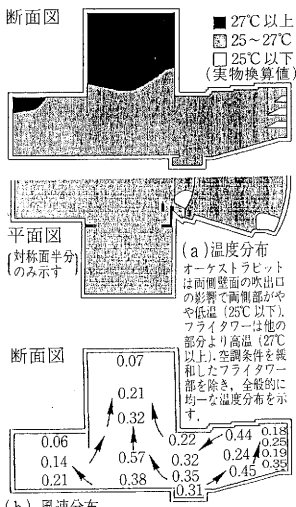


図2 CASE-1(冷房最大負荷時)

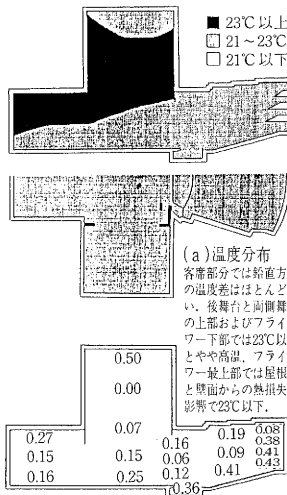


図3 CASE-2(暖房最大負荷時)

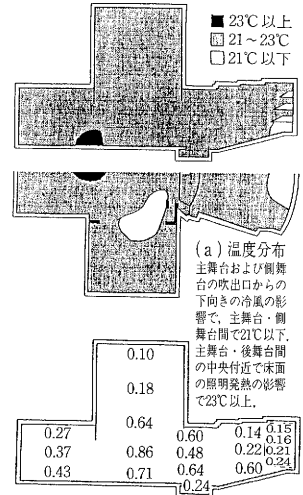


図4 CASE-3(冬季冷房時)

研 究 速 報

で快適な温度分布となっている。舞台脇吹出口からの下向きの冷風は周辺空気を誘引しながら床面に達し、舞台中央に収束しフライ部へ向かい上昇する。客席部では冷房時、天井ノズル吹出し気流は隣接する対の吹出し気流と合成され床面に到達する。ノズル間隔の広い場所では、上昇流が生じる。

6.2 CASE-2 (暖房最大負荷時, 図3)

居住域ではすべて $22 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲の温度を示し、全体に均一で快適な温度分布となる。

6.3 CASE-3 (冬季冷房負荷時, 図4)

居住域はおおむね $22 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲の温度を示し、全体的に均一で快適な温度分布となる。

6.4 CASE-4 (フライタワーの空調条件緩和, 図5)

冷房最大負荷時のフライタワー部の空調条件を緩和し吹出し温度 27°C とした場合、フライタワー部だけでなく主舞台や後舞台にも高温域(27°C 以上)が広がり、客席前部の温度も上昇していた。舞台部の暖気はプロセニウム上部より客席に流出し床面近傍では客席から舞台へ向かう気流が生じる。

6.5 CASE-5 (舞台全体の空調条件緩和, 図6)

フライタワーだけでなく舞台全体の空調条件をCASE-4同様に緩和した場合、舞台だけでなく客席全体にわたり広く高温域(27°C 以上)が広がる。舞台部の暖気はプロセニウム上部より客席に流出し床面近傍では客席から舞台に向かう気流が生じる。

6.6 CASE-6 (舞台内部発熱負荷: 50%削減, 緞帳有, 図7)

吹出し条件は冷房最大負荷時(CASE-1)と全く同様とし、舞台部内部発熱を50%減らす。また舞台部と客席を緞帳(布製, 熱抵抗は実物より小さいと考えられる)により気流的には仕切る。この結果、舞台は全体的に 25°C 以下の低温となる。また、客席部はほとんど $26 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲の温度となる。舞台部の低温は緞帳を通して客席前部にも及ぶ。

6.7 CASE-7 (舞台内部発熱負荷: 50%削減, 緞帳無, 図8)

CASE-6と同条件で舞台・客席間の緞帳を取り除いた場合、客席と舞台の間の温度差による交互換気が生じ舞台部の低温の空気が客席部に侵入するため、CASE-6に比べ客席の更に広い部分で低温となる。入れ替わりに客席部の空気が舞台に侵入するために舞台部の温度がCASE-6と比べ約 1°C 上昇し後舞台で 25°C 以上を示す部分も生じる。

6.8 CASE-8 (客席内部発熱負荷: 50%削減, 緞帳無, 図9)

舞台部は通常の冷房最大負荷時の熱負荷条件とし客席部の発熱を50%減らし、客席・舞台間には緞帳を設置しない場合、客席の大部分は 25°C 以下の低温となる。また、気流パターンの図は舞台中央断面を示しているので表れないが、舞台前縁部の床面近傍では客席から舞台に向かって気流が流れ込んでおり、その影響で主舞台の周辺から側舞台にかけても低温となる。

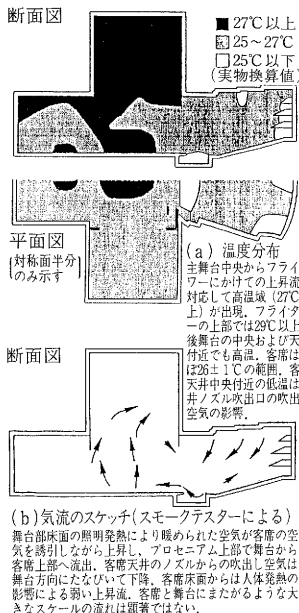


図5 CASE-4 (冷房最大負荷, フライは換気のみ)

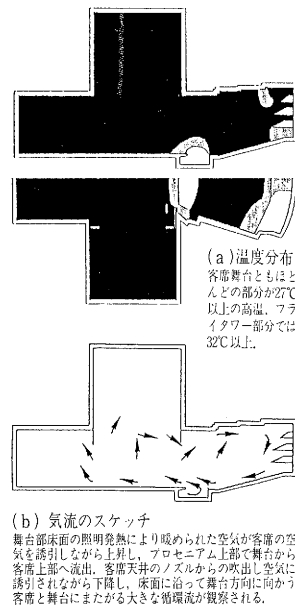
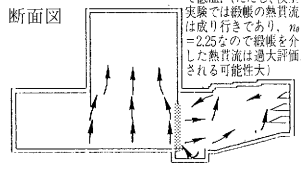
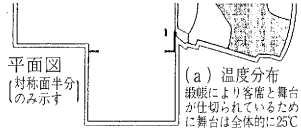
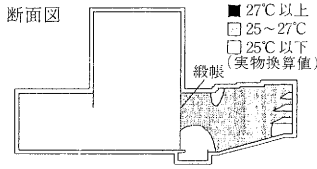


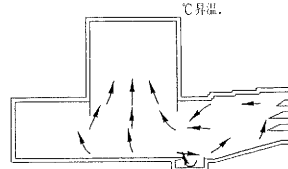
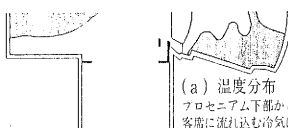
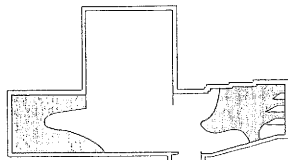
図6 CASE-5(冷房最大負荷, 舞台全体が換気のみ)



(a) 温度分布
 緞帳により客席と舞台が仕切られているために舞台は全体的に25°C以下の低温。客席は大部分が26±1°Cの範囲。客席前部は緞帳を通して舞台部の影響を受けて低温。(ただし、観劇実況では観劇の熱気流は成り行きであり、 $q_{ra} = 2.25$ なので緞帳を介した熱貫流は過大評価される可能性大)

(b) 気流のスケッチ
 舞台部の発熱を50%削減しても舞台中央は強い上昇流。主舞台部は下向きの吹出噴流に誘引される下降流。舞台と客席は緞帳で遮断されているので舞台前部は緞帳に添った上昇流。客席部では人体の発熱の影響で後部へ向かって緩やかに上昇。

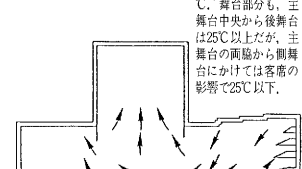
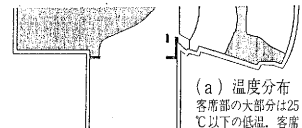
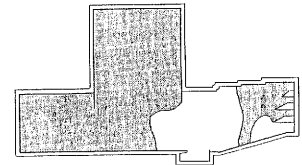
図7 CASE-6 (冷房最大負荷, 舞台発熱50%減, 緞帳有)



(a) 温度分布
 プロセニウム下部から客席に流れ込む冷気により客席中央部まで低温域。舞台部は客席部との交互換気の影響でCASE-6に比べて約1°C昇温。

(b) 気流のスケッチ
 緞帳を取り除いたことによりプロセニウム下部で舞台から客席へ冷気が流出。プロセニウム上部では暖気が逆向きに流れる。客席部はCASE-6同様CASE-5とは逆向きの循環流となる。

図8 CASE-7 (冷房最大負荷, 舞台発熱50%減, 緞帳無)



(a) 温度分布
 客席部の大部分は25°C以下の低温。客席の一部は25°C以上となるが最高でも26.5°C。舞台部分も、主舞台中央から後舞台は25°C以上だが、主舞台の両脇から側舞台にかけては客席の影響で25°C以下。

(b) 気流のスケッチ
 主舞台中央部では他の場合同様上昇流。客席部は噴流部分以外全体的に気流は弱く、明確な循環流は見られない。

図9 CASE-8 (冷房最大負荷, 客席発熱50%減, 緞帳無)

7. 結 論

7.1 聞き取り調査

- ①舞台部は客席部に比べ圧倒的に使用頻度が高く一般にほぼ毎日空調されている。
- ②温度、風量のアンバランスによる客席部、舞台部の空気の相互循環が問題となる。
- ③舞台部、客席部のドラフトの低減が重要となる。

7.2 模型実験結果

CASE-1~3では、

- ①冷房、暖房時のいずれも水平、鉛直方向とも温度分布は比較的僅かである。
- ②冷房時は、舞台、客席の一部で風速の速い部分も生じる。
- ③暖房時は、同風量の吹出しであるが風速の速い部分は生じない。

CASE-4以降は空調条件の一部を変更して空間内の温度バランスを崩した実験を5例行った。

- ④空調バランスが崩れると緞帳などで舞台・客席間が気流的に遮断されていない場合、両者間で温度差による大規模な交互換気が生じる。

注) 全ケースを通じて客席バルコニー下部とオーケストラピット部分はやや低めの温度を示す。これは、模型製作上の困難から断熱が不十分となり、吹出し空気の保冷のためのチャンバに失熱した影響と考えられる。

- ⑤そのため、舞台と客席のどちらか一方で温度の上昇や降下があると他方の空間のかなりの領域に顕著な影響が生じる。

なお本報では舞台部と客席部の温度バランスと温熱環境の連関性について考察したが、両者の風量バランスに関してもその影響は重要である⁹⁾。空調システムの計画に当たってはこれらに関する注意が必要である。

(1989年7月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上, 加藤, 田中, 鈴木, 崔, 近本: 劇場の温熱環境に関する模型実験 (その1, 2), 日本建築学会学術講演梗概集九州) 1989.10.
- 2) S. Kato, S. Murakami, C.N. Kong and H. Nakagawa: Model Experiment on Indoor Climate and Space Air Distribution in Large Scale Room, International Symposium on Scale Modeling 1988
- 3) 村上, 加藤: 大空間の温熱環境に関する模型実験と実物実測の比較, 生産研究, Vol. 36. No. 10, 1984. 10.
- 4) 田中, 村上, 加藤, 佐藤: 天井給排気型クリーンルーム内の気流性状に関する研究 (その5), 空調調和・衛生工学会学術講演論文集, 1987.10.

注1) 第二国立劇場 (基本設計段階), 客席数 約1800席
 注2) National Art Center (Ottawa, CANADA) John F. Kennedy Memorial Center (Washington, D.C., USA) ほか国内3件