

兵庫県立芸術文化センターの空気調和設備

Air Conditioning System of Hyogo Performing Arts Center

(株)日建設計 設備設計部

NIKKEN SEKKEI Ltd., M&E ENGINEERING DIVISION

橋本直樹

Naoki HASHIMOTO

キーワード： コンサートホール (concert hall) パーソナル空調 (personal air conditioning)
快適性 (comfort) 温冷感 (thermal sensation) 省エネルギー (energy saving)

1. はじめに

阪神・淡路大震災からの心の復興、文化の復興のシンボルとして、兵庫県立芸術文化センターは計画された。多彩な文化創造活動を通じて県民文化の振興拠点となることや、舞台芸術の創造と交流を国内外に発信する拠点となることをめざしている。

芸術監督・芸術顧問に各界の第一人者を迎え、専属のオーケストラを有するという充実した布陣で、2005年10月22日の柿落とし公演から順調に動き始めている。

2. 計画概要

2.1 建築概要

兵庫県立芸術文化センターは、西宮北口駅(阪急電鉄)南側再開発の核施設として整備された、3つのホールを備える文化施設である。

駅を出た観客は、プレキャストコンクリートの柱が連なる空中歩廊を通り、メインエントランス、共通ロビーを経て、大・中・小各ホールへ至る。ホールが近づくにつれ、もうすぐ始まるイベントへの期待感が高まる仕掛けになっている。

また、トップライトや中庭、テラスを配し、自然光を効果的に取り込む計画としている。



図 2.1 正面外観

表 2.1 建築概要

建築主	兵庫県
所在地	兵庫県西宮市高松町 2-22
敷地面積	13,227.00m ²
建築面積	10,530.53m ²
延床面積	33,680.36m ²
構造	鉄骨鉄筋コンクリート造・鉄筋コンクリート造 (一部鉄骨造、プレキャストコンクリート造)
階数	地下 1 階、地上 6 階、塔屋 1 階
高さ	最高高：37,700mm 軒高：36,900mm
設計	兵庫県県土整備部まちづくり局営繕課・設備課 (株)日建設計 (音響設計協力：永田音響設計 舞台設計協力：空間創造研究所)

■大ホール

クラシックコンサートを主体とした、2,001席のホールである。(オーケストラピットの客席使用時は2,141席)

4面舞台を持ち、オペラハウスとしての機能も備えている。

自走式の音響反射板を供えており、舞台を仕切ることで、コンサートホールとしてふさわしい残響時間(満席時2.0秒)を確保できる。

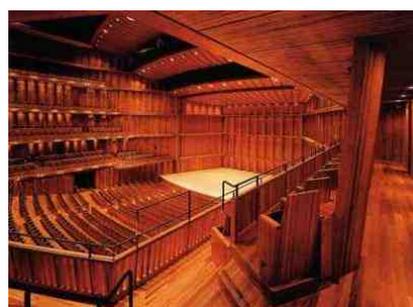


図 2.2 大ホール

■中ホール

演劇を中心に、ミュージカルや伝統芸能にも対応できる 800 席のホールである

演劇を中心としたホールとして、多種多様な舞台セットにも対応できるように主舞台全面を組立式構造による舞台床システムとしている。

客席空間は舞台と客席の一体感に配慮した形状とし、かつ肉声の台詞が通りやすい残響時間（満席時 0.9 秒）としている。



図 2.3 中ホール

■小ホール

室内楽に適した 400 席のホールである。

小編成のクラシック音楽やリサイタルを主とし、舞台が客席を取り囲むアリーナ形式となっている。360° 柔らかな曲面形状の壁・天井からの拡散反射で、自然の音に包まれるような効果も期待できる。満席時の残響時間は 1.5 秒である。



図 2.4 小ホール

2.2 空調設備概要

■空調計画の基本方針

兵庫県立芸術文化センターでは、県民に親しみを持って受け入れられる公共建築として、環境への配慮を重視し、快適性、安全性、省エネルギー性の向上に努めることを基本方針とした。

劇場建築の特徴として、イベント時と非イベント時の空調負荷や使用水量の差の激しさがあげられる。これに効率よく対応することが設備計画のポイントとなった。

また、天井高 20m を超える大空間での快適かつ効率的な空調、静寂に耳をすますクラシックコンサートに適した静粛性の確保なども解決しなければならない課題であった。

さらに、屋外からホールへ至るまでに、エントランス・共通ロビー・ホワイエの 3 つの異なる空間を通過することに着目し、移動に伴う環境変化の観点から省エネルギーにつなげることを検討した。

表 2.2 空調設備概要

熱源	ガス焚吸収冷温水機 (1,260kW×2 台)、 空冷ヒートポンプチラー (360kW×1 台) と水蓄熱槽 (600m ³) を併用
配管系統	冷水・温水 4 管式、2 管式
空調方式	単一ダクト方式 (ホール等)、 単一ダクト+ファンコイルユニット (ホワイエ等) パッケージ空気調和機+ 全熱交換ユニット (楽屋、事務室等) 自然換気 (ホワイエ)

■床吹き出し空調を採用して

ホール大空間を効率よく空調

各ホールの観客席では、図 2.5 に示す床吹き出し方式を主に採用している。

ホールは天井の高い大空間だが、観客がいるのは床から高さ 2m 程度の、ほんの一部である。この観客のいる部分のみを効果的に空調するため、床から吹き出し、天井から吸い込む空調方式とした。

この方式ではホール全体の空気をかき混ぜないため、たとえば 1 階席のみなど大空間の中の一部に限って効率よく空調できる。また、運転開始時の立上りが早く、換気効率も高い空調方式である。



床吹き出し口
パンチングメタル製
75m³/h 席

図 2.5 採用した床吹き出し口の仕様

床吹き出し方式の吹き出し温度差は、天井吹き出しの場合と同じ 10℃程度であり、風量は同等である。

床吹き出し方式では冷房時の吹き出し温度は 22℃程度で、天井吹き出し方式の 16℃程度よりも高く、冷水を高い温度まで利用できる。したがって冷水行き還り温度差を大きくとりやすく、水蓄熱との相性が良い空調方式である。

■急峻なピーク負荷に合理的に対応する

熱源設備計画

芸術文化センターの空調負荷は、真夏に 3 つのホールを同時使用した場合にピークを迎える。

ただし、このピーク負荷にあわせた容量の熱源機器を設けても全負荷で運転できる時間は短く、非効率である。

そこで地下ピットに水蓄熱槽（600m³ 11.5GJ）を設け、前日の夜間にあらかじめ冷水または温水を貯めておけるシステムとした。

これにより熱源機器の容量を小さくし、稼働率を上げることができる。また蓄熱調整契約による安価な電力料金を適用できる。

冷水・温水は行き還り温度差を大きく設計し（ $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ ）、低負荷時には水量を絞って運転することで、搬送エネルギーを削減している。水蓄熱槽は温度差 6℃とし、熱源にはアンモニア冷媒の空気熱源ヒートポンプチャラーを採用した。

搬送動力を削減するため、2 次側および冷却水は変流量とした。

なお、楽屋や管理諸室はパッケージエアコン（冷暖同時運転型）による個別分散方式としている。

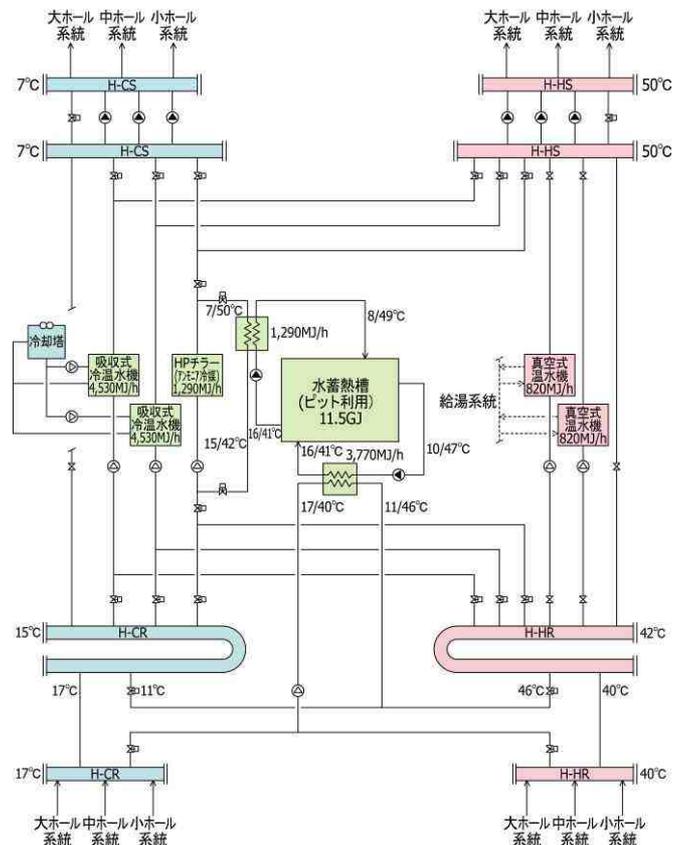


図 2.6 熱源系統図

■音響反射板の内側も空調する

大ホールには可動式の音響反射板が装備され、コンサート時の音響効果に貢献している。この音響反射板はオペラ利用時には舞台最後方に収納されている。

コンサート時には舞台前方へ自走し設置されるが、演奏者が音響反射板に囲われ、舞台に設けた空調設備とも仕切られてしまう。そこで、移動後の音響反射板にダクトを接続し、そこから演奏者のための空調ができるようにした。(図 2.7～9)



図 2.7 コンサート時の舞台空調（大ホール）



図 2.8 自走式音響反射板への空調ダクト接続

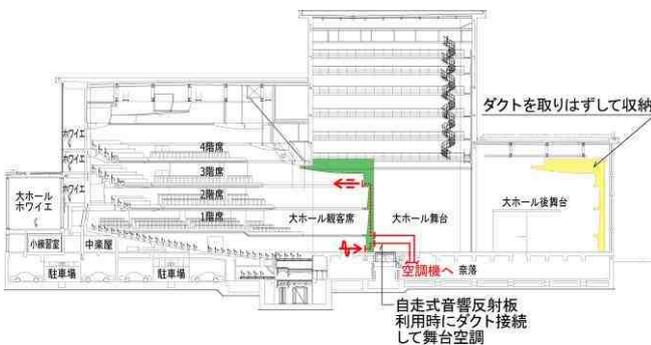


図 2.9 自走式音響反射板への空調ダクト接続の仕組み

■コンサートに適した静粛性の確保

静かな環境で芸術を楽しめるよう、各ホールでは許容騒音値が設定されている。(大ホール：NC-15～20 中ホール：NC-20～25 小ホール：NC-15～20)

ホール系統の空調ダクトには消音器（セル型）を設け、ファン騒音のホールへの侵入を防いでいる。また、ダクトには鉛や特殊制振遮音材を貼り、騒音の放射や侵入を防いでいる。

各ホールの床下サプライチャンバー内の吹き出し口や、天井リターンチャンバー内の吸い込み口には、穴を開けたガラスウールボードで製作したボックスを採用した。(図 2.10) このボックスは、風量の均一化および調整（穴の数で調整）と消音を兼ねている。



図 2.10 穴あきガラスウールボードボックス（風量の調整と消音の機能を兼ねている）

3. 実績と検証

3.1 ホール大空間を快適かつ効果的に空調する

3.1.1 床吹き出し口の検討と検証

■実物大模型による床吹き出し口の検討

ホールは天井の高い大空間であるため、床吹き出し方式を採用するメリットは多い。ただし吹き出し気流によるドラフト感や、冷房時の冷気の足元への滞留は、不快感につながる可能性がある。

そこで図 3.1 に示す客席の実物大模型を用いて、吹き出し気流を観察・測定し、快適性を確保できることを確認した。

図 3.2 に人体周りの温度分布、気流分布の実験結果を示す。ISO-7730 では人体周りの上下温度分布として 3℃以内、気流速として 0.25m/s 以下が推奨されている。今回採用した吹き出し口では温度差は 1℃以内、気流速は 0.20m/s であり、推奨値を満足していることを確認した。



図 3.1 客席の実物大模型

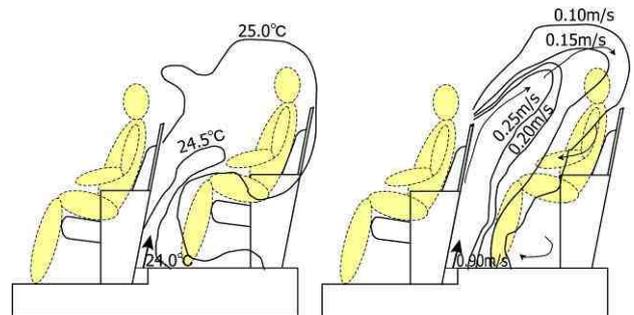


図 3.2

実物大模型による温度分布・風速分布の実験結果

■座席まわりの温度分布・気流分布の実測

完成後に実測した結果、夏季・冬季とも、人体まわりの上下温度差は小さく、気流速も 0.15m/s 以下であることを確認した。(図 3.3,4)

3.1.2 床下チャンバーの隙間測定

本空調システムでは床下チャンバーを利用するため、躯体からの空気の漏れが少ないことが特に重要である。そこで実測に先立ち、大ホール床下チャンバーの隙間面積を測定した。

床吹き出し口を養生テープで塞いだ上で空調機の給気ファンのみを運転し、風量とホール内外の差圧を測定した。(図 3.5)

隙間面積を $A[m^2]$ 、流量係数を α 、空気の比重を ρ とすると、換気量は

$$Q[m^3/h] = 3600 \times \alpha A \times (2\Delta p / \rho)^{1/n}$$

と表せる。 $\alpha=0.5$ 、 $\rho=1.2$ とすると、図 3.5 は、

$$Q[m^3/h] = 3600 \times 0.34 \alpha \times (2\Delta p / \rho)^{1/1}$$

と表せる。隙間面積は $0.34m^2$ で、ホール 1 階席の床面積 $800m^2$ と比較して十分に小さいことを確認した。

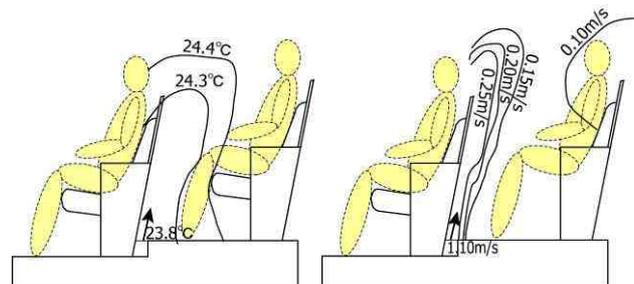


図 3.3 座席まわりの温度分布・気流分布（夏季）

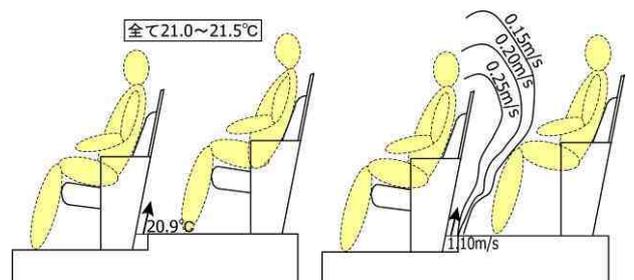


図 3.4 座席まわりの温度分布・気流分布（冬季）

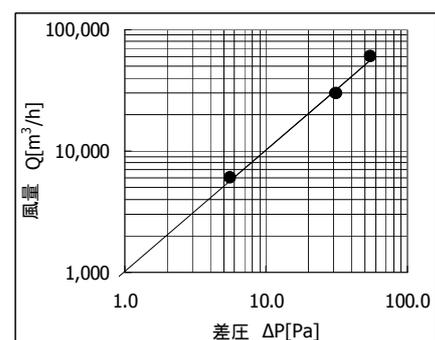


図 3.5 隙間測定結果

3.1.3 快適性アンケート

竣工引渡し前に、大ホールに観客を入れてテストコンサートが行われた。この機会を利用し、観客へ空調に関するアンケート調査を実施した。
(2005年5月14日 15:00～18:00に実施 1500人来場)

アンケート結果を図 3.6 に示す。有効回答数は 71 であった。

快適性は普通～快適と答えた人が 92%、温冷感 は 7 段階のうち中庸の 3 段階を答えた人が 89%、気流感は感じなかった人・少し感じた人の合計が 82%であり、おおむね良好な結果が得られた。

ただし、温冷感で「寒かった」、気流感で「強く感じた」との回答もあったことから、現地を詳細に確認したところ、床吹き出し口に風量のばらつきが確認された。そこで、座席ごとの風量を再調整した。

また、空調機の吹き出し温度や立ち上げ時間などを見直した。

3.1.4 省エネルギー効果

■床吹き出し方式の省エネルギー効果

実測・CFD により、床吹き出しとすることで、冷房時には居住域とホール大空間上部の温度が高いまま運用でき、冷房負荷を削減できることを確認した。

2006年7月から2007年6月までの空調運転実績および外気・日射条件より計算し、大ホールで年間 23GJ の冷房負荷を削減できたことを確認した。

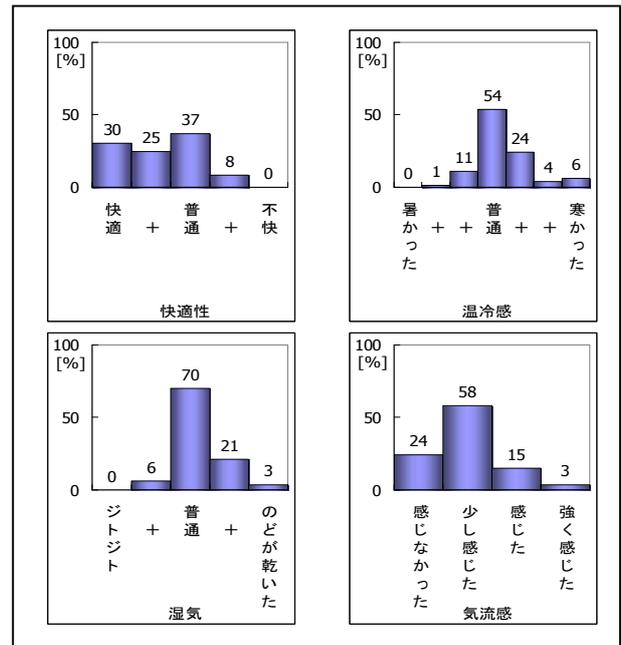


図 3.6 大ホールの快適性に関するアンケート結果

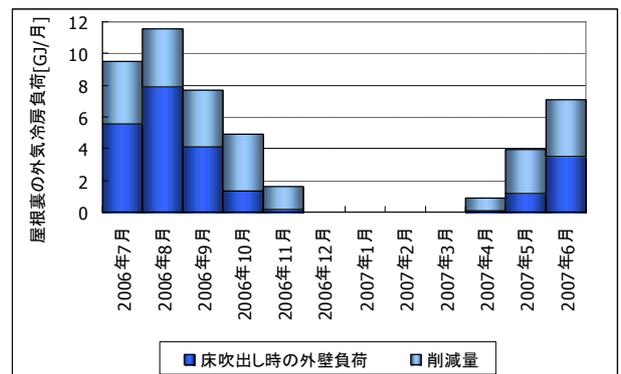


図 3.7 床吹き出しによる省エネルギー効果

■ホール外気量 CO₂ 濃度制御の省エネルギー効果

ホール観客席は人員密度が高く、満席時には約 1 人/m² となる。従って必要外気量も多く、空調ピーク負荷に占める外気負荷の割合は約 70% である。

ただしホールの利用形態は多様であり、満席とはならないイベントもあり、外気量を絞って運用できると、省エネルギー上効果的である。

そこで、空調系統ごとに CO₂ 濃度を計測し、必要量だけ外気を供給できるシステムとしている。

発表されている 2006 年 7 月から 2007 年 3 月までの大ホールの入場者数をもとに計算すると、CO₂ 濃度制御で削減することにより、冷房負荷は 249GJ、暖房負荷は 236GJ 削減されたことを確認した。

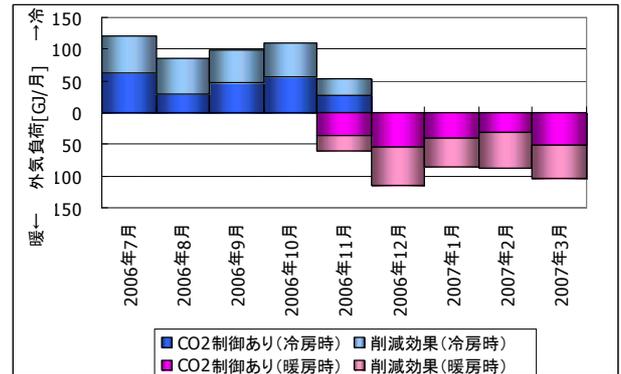


図 3.8 CO₂ 濃度制御による省エネルギー効果 (大・中・小ホールの合計)

■リターンファンを空調機と分離して

排気ルートを短縮

半分以上の座席がある 1 階席は床吹き出し方式とし、吸い込み口は最上部の天井に設けている。(図 3.9)

満席時にはリターン風量の約 80% が排気となる。そこで、リターンファンは天井レベルに設置し、排気は空調機まで戻さず短い経路で屋外へ導き、ファン動力を削減している。

これにより、ファン動力は年間 57GJ 削減されたことを計算により確認した。

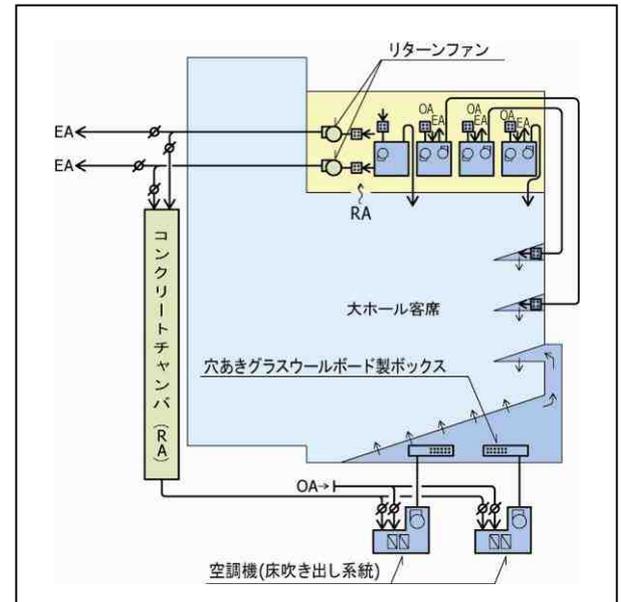


図 3.9 大ホールのエアフロー

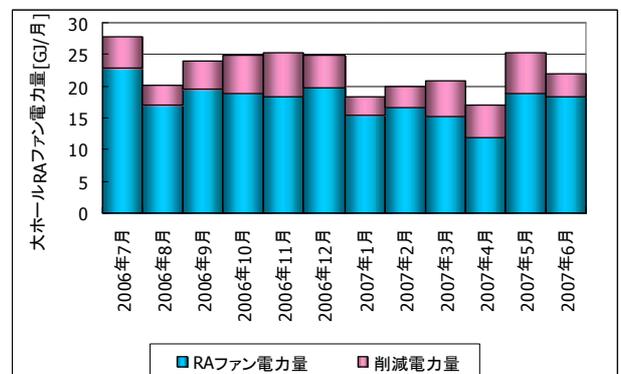


図 3.10

排気ファン上部設置による省エネルギー効果

3.2 屋外からホールまでの空間構成に呼応した空調計画

3.2.1 移動と環境変化を考慮した快適性に関する検討

■ホールへ至るまでに3つの空間を通過

ホールを訪れる観客は、屋外からエントランス・共通ロビー・ホワイエの3つの異なる空間を通過してホールへ至る。これらの空間は異なる熱環境となっており、観客はその変化を知覚し、温熱感として認識している。

この移動に伴う周辺環境の変化、温冷感の非定常性を調査し、観客の移動快適感を考慮した空調制御の実施、及び実測による検証を行った。この結果、快適性の向上と省エネルギーを両立させることができた。

■検討概要

実測時期・測定位置（図 3.11）

実測は2006年8月22日～25日に実施した。駅から大ホールへ至る移動経路に伴い測定位置を設定した。

測定項目

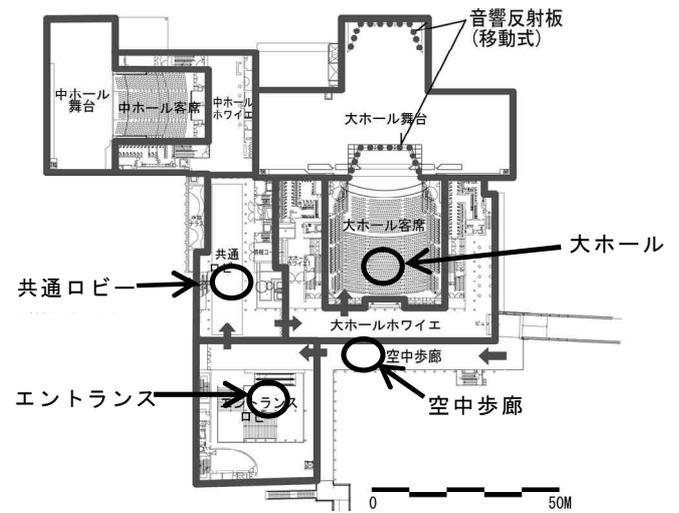
移動計測装置を用いて、被験者が感じる周辺環境を移動しながら計測し、人体計測装置を用いて被験者の体温、皮膚温度を計測した。温冷感調査は、事前・中間・終了直前それぞれのアンケートを実施した注1)。大ホール到着後、脳血流計により血流における組織酸素化指標（TOI）注2)等を測定し、生理反応を確認した。（図 3.12）

測定ケース（表 3.1）

経路空間の環境を徐々に変化させる「順応」ケース（Case 1）、経路途中で大きな環境変化を与える「コールドショック」ケース（Case 2,3）を実施した。駅からの歩行を想定し、各ケースとも屋外の空中歩廊で10分間歩行した後、表2に示す滞在時間で各所に着座し、大ホールへと移動し30分間着座した。共通ロビーは温暖（28℃）、エントランスは冷却（22℃）空間とし、滞在時間を変化させて測定を行った。

被験者概要

被験者は健康な男性（21～23歳）4名とした。着衣量は夏期のコンサートホールに適した服装0.7clo（薄手の長袖シャツ、長ズボン）に統一した。



空中歩廊→エントランス→共通ロビー
→大ホールホワイエ→大ホール

図 3.11 大ホールへの経路



図 3.12 脳血流計

表 3.1 測定ケース（図中の数字は滞在時間[分]）

Case	概略	空中歩廊 32℃	エントランス 22℃	共通ロビー 28℃	大ホール 26℃
Case 1	順応	10	—	10	30
Case 2	コールド	10	30	—	30
Case 3	ショック	10	1	—	30

■実測結果

Case1 (順応 30 分) と Case2 (ショック 30 分) の比較

Case1 はホールでの温冷感は涼しい側の傾向が見られるのに反し(図 3.13(1))、Case2 では暖かい側の傾向が見られる(図 3.13(2))。またホールで着座後、Case1 では快適感が高まり(図 3.13(1))、Case2 ではあまり大きな変化はなく、また決して高い値ではない(図 3.13(2))。温冷感申告の値から被験者はホールで暖かさを感じていて、その結果、快適感が伸び悩んでいると思われる。

TOI 値では Case2 が Case1 を終始上回っている(図 14(1))。Case2 では 30 分間のコールドショックで体が冷え、血流が活発となり、ホール移動後も快適性向上が阻害されたと考えられる。

3.2 Case1 (順応 30 分) と Case3 (ショック 1 分) の比較

温冷感はこの場合も Case3 が Case1 より暖かい側となった。快適感も Case2 よりは快適側だが、ホール着座後に徐々に低減してゆく傾向は変わらない。

TOI 値ではホール着座後しばらくは Case3 と Case1 で同程度の値を示したが、時間が経過するにつれて Case3 の方が高くなる。短い刺激であっても影響が表れていると考えられる。

■まとめ

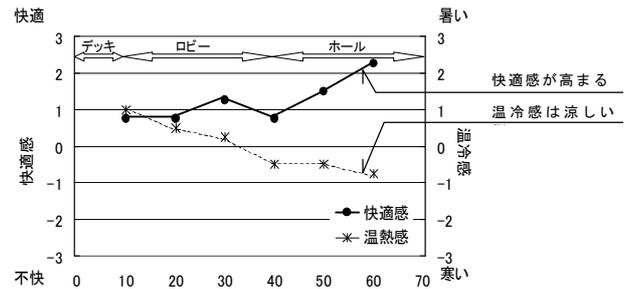
移動しながら感じる周辺環境の変化の違いにより、同じ環境下でも異なる生理反応が生じ、その結果、異なる心理反応が起きることが観察された。

コールドショックを与えた場合は血流を活発化し、ホール到達後も暖かさを感じる結果となった。反面、順応させてゆくことで涼しさを感じやすくなることを観察した。

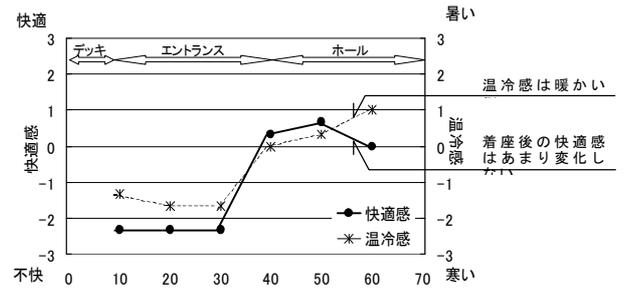
この実験結果をふまえ、共通ロビーの冷房設定を 28℃に緩和し(他の空間は 26℃)、運用の効率化に貢献している。

注 1) 事前アンケートでは、前日からの行動履歴、環境変化に対する感受性を調査し、中間アンケートでは、暑さ・快適感・明るさ・眩しさ・騒音・匂い・落ち着き・温熱環境・空気環境・光環境・その他周辺環境の計 11 項目を±3 までの 7 段階で調査した。また終了直前アンケートでは環境変化に対する自覚症状、快適な場所の選定、着衣調節への意識を調査した。

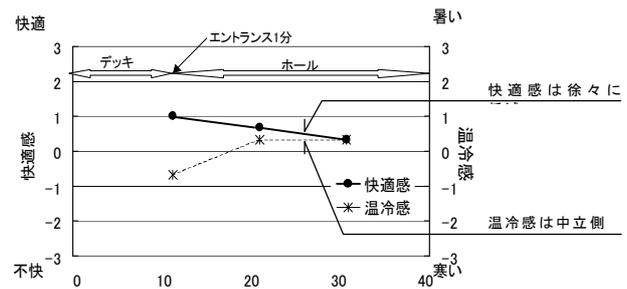
注 2) ヘモグロビンの酸素飽和度を示し血流が活発に働くにつれ高い値を示す。



(1) Case1 (順応 30 分)

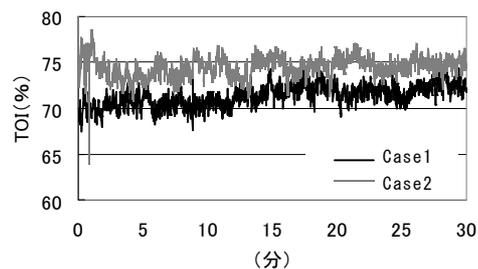


(2) Case2 (ショック 30 分)

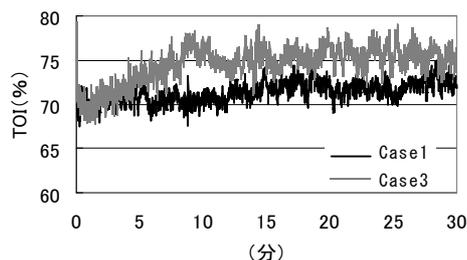


(3) Case3 (ショック 1 分)

図 3.13 快適感・温冷感調査の結果



(1) Case1 (順応 30 分) と 2 (ショック 30 分) の比較



(2) Case1 (順応 30 分) と 3 (ショック 1 分) の比較

図 3.14 TOI 値の結果

おわりに

本計画にあたっては、省エネルギー性に加え、以下の3つが大きなテーマとなった。

- ・ ホール大空間の快適かつ効率的な空調
- ・ イベント時と非イベント時の空調負荷の差の激しさへの効率的な対応
- ・ 静粛性の確保

そのため、ホールでは床吹き出し空調を採用し、快適性および省エネルギー効果を確認した。

また、蓄熱槽を設けて熱源容量を小さくし、風量の均一化と消音を兼ねたボックスを開発した。

さらに、ホールへ至るまでの空間構成に着目し、共通ロビーの室温条件を見直すことで、省エネルギーを実現した。

その他、建物の特性を考えてリターンファンの位置を別置きで計画したほか、冷温水の大温度差利用 ($\Delta t=10^{\circ}\text{C}$)、冷温水や冷却水の変流量制御、外気量の CO_2 濃度制御など、省エネルギーのための様々な手法を採用した。

総合では、空調の消費エネルギーは一時エネルギー換算で31%削減を実現した。

CASBEEは各項目のバランスが良く、Aクラスに相当する。(図4.1)

幸い、集客はすこぶる順調と聞いています。芸術文化センターが創造と交流の発信拠点としての機能を存分に発揮するとともに、この報告が当センターや類似施設のより良い計画や運用に役立てば幸いです。

最後になりましたが、本報告を作成するに当たり、兵庫県県土整備部まちづくり局営繕課・設備課、芸術文化センター、および設備管理のコスモエンジニアリングの皆様にも多大なる御指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 橋本他：大規模屋内スタジアムの空調計画（その1）
 空気調和・衛生工学会大会、pp.1521-1524 1995年10月
 岡垣他：座席吹き出し空調のホールにおける冷房時の温度・気流性状の予測（その1）
 建築学会大会、環境工学II、pp.1093-1094 1998年9月
 近本他：人間の動的快適感を考慮した空調制御法の検討
 建築学会大会 OS、環境工学II、pp.1171-1174 2003年8月
 橋本他：劇場建築の空調性能と室内環境の検討（その1）
 建築学会大会、環境工学II、pp.1391-1392 2006年9月
 山本他：劇場建築の空調性能と室内環境の検討（その2）
 建築学会大会、環境工学II、pp.1393-1394 2006年9月
 橋本他：劇場建築の空調性能と室内環境の検討（その3）
 空気調和・衛生工学会大会、pp.423-426 2006年9月
 山本他：劇場建築の空調性能と室内環境の検討（その4）
 空気調和・衛生工学会大会、pp.427-430 2006年9月
 西村他：快適性を考慮した空調制御に関する研究（その1）
 建築学会大会、環境工学II、pp.515-516 2006年9月
 橋本他：劇場建築の空調性能と室内環境の検討（その5）
 空気調和・衛生工学会近畿支部、pp.105-108 2007年3月
 Chikamoto, T. et al.: "Study on Air-conditioning Control which considers Human Comfort corresponding to Thermal Environment Change from Outdoor to Indoor"
 ROOMVENT2007, Helsinki, 2007.6.13-15
 橋本他：劇場建築の空調性能と室内環境の検討（その6）
 建築学会大会、環境工学II、pp.477-478 2007年9月
 近本：快適性を考慮した空調制御に関する研究（その2）
 建築学会大会、環境工学II、pp.403-404 2007年9月
 近本他：快適性を考慮した空調制御に関する研究（その3）
 空気調和・衛生工学会大会 2007年9月

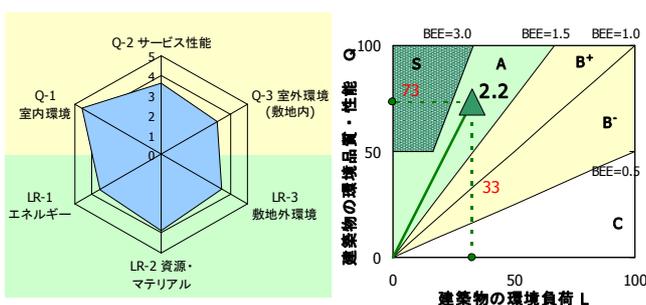


図4.1 CASBEEはAクラス