

1. 実証実験の目的

今夏の電力使用制限令の発令に伴う新国立劇場の節電対策として、その電力需要の50%弱を占める空調設備の節電対策は喫緊の課題である。

本施設の空調熱源は地域冷暖房施設(DHC)からの冷水・蒸気供給のため、室内温度の設定変更は効果的な節電手段とならない。また、節電実施時期まで2ヶ月程度の期間しかないため、省エネ機器への更新による節電対策も不可能である。従って、今回の空調設備節電対策は、各空調機の運転停止を主たる対策とし、電力使用量の増加に伴って、劇場運営に影響の少ない系統から順次停止していく方法をとる必要がある。

しかしながら、特に劇場部の空調停止はエアバランスの乱れや温度差の発生によるドラフトの発生など、公演遂行上の問題を発生するおそれがあるため、実証実験を行い問題点がないことを確認しなければならない。

本実験は、実際の公演状況に近似した環境のもと、あらかじめ設定した各節電レベルの運転を行い、各所において温湿度計測、風速計測、気流の目視確認などの測定を行い、また各空調系統の停止が及ぼす室内環境の変化を確認し、空調停止の可否を判定することを目的とする。

2. 実験条件の設定

(1) 節電レベル設定に当たっての基本方針

節電レベルの設定に当たっては、以下の基本方針のもとに順位付けを行う。

- ① 公演内容のクオリティは確保する。
- ② 観客エリアのアメニティは可能な限り確保する。
- ③ 劇場の機能障害となるベース電力(サーバー室の24H空調など)は節電停止設備には含まない。

(2) 節電レベルの仮設定

空調設備節電計画の検討や実験に当たって、節電レベルを以下のように仮設定した。目標値は最大 250KW程度であるが、検討・実験の結果、運転停止に問題がある系統も発生することを考慮したほか、基本方針に反するものの長期的な省エネ対策として調査すべき系統も含めて最大400KW強の運転停止状況を調査した。

- ① **Level-1** 約 100kWの節電を図る。
停止する主な空調系統 [舞台部] フライタワー系統、奈落系統
[楽屋部] 衣装保管庫、楽器庫
[管理部] 楽屋食堂
[ロビー] 共通ロビー下部
- ② **Level-2** Level-1に加えて約 100KW、合計で約 200KWの節電を図る。
停止する主な空調系統 [技術] 組立場、画工場
[リハ] ロビー、付属諸室等
[楽屋部] 楽屋ロビー等
[ロビー] オペラプロムナード、エントランスロビー
- ③ **Level-3** Level-2に加えて約 100KW、合計で約 300KWの節電を図る。
停止する主な空調系統 [舞台部] 側舞台(下手・上手・奥)系統
[リハ] 会議室・事務室等
[管理部] 事務室、防災センター、レストラン等
[ロビー] 共通ロビー上部
- ④ **Level-4** Level-3に加えて約 100KW、合計で約 400KWの節電を図る。
停止する主な空調系統 [劇場部] ホワイエ、技術諸室

3. 実験条件スケジュールと測定方法

5月9日から5月12日のオペラ劇場、中劇場のメンテナンス日を利用して、これらの実証実験を行った。

(1) 実証実験スケジュール

5月 9日(月) 実験準備 オペラ劇場、中劇場内で測定位置等の確認および測定装置の試験、中央監視盤の設定調整および計測点の連続出力の確認調整。

5月10日(火) オペラ劇場実験

9:00～11:00 公演時通常運転 (10:00 客席照明、舞台照明点灯)
11:00～13:00 Level-1 運転
13:00～15:00 Level-2 運転 (組立場空調停止を含む)
15:00～17:00 Level-3 運転
17:00～19:00 Level-4 運転 (ホワイエ空調停止を含む)

5月11日(水) 中劇場実験

9:00～11:00 公演時通常運転 (10:00 客席照明、舞台照明点灯)
11:00～13:00 Level-1 運転 (ロビー空調停止を含む)
13:00～15:00 Level-2 運転
15:00～17:00 Level-3 運転
17:00～19:00 Level-4 運転 (ホワイエ空調停止を含む)

(その他共通)

衣装保管庫、楽器庫などの空調停止時の温度変化も計測する。
客席部の空調時間短縮(終演前空調停止)の可能性調査。
ホワイエの間欠空調運転(公演時間中の空調停止)の可能性調査。
実証実験中の電力使用量や温湿度計測点の連続計量。

(2) 実証実験測定者

柳澤孝彦+TAK建築研究所
高砂熱学工業
山武

金澤
桂 総括所長、八木 主査、他3名
溝口 主任、他1名

(3) 測定方法

中央監視盤を利用した計測の他、下記の測定機器を利用した計測を行う。

① 温湿度データロガー	「おんどとり」RTR-53 ワイヤレス通信型	20個程度	(別紙参照)
② 気流検査器	AS-1(光明理化学工業)	1台	(別紙参照)
③ 風速計	ケストレル3000(ニールセンケラーマン社)	1台	(別紙参照)

4. 実証実験結果

(1) オペラ劇場

オペラ劇場において、9:00から11:00迄通常の空調運転を行い通常の空調環境を作り出した後、11:00にフライタワー(すのこ)系統空調機[ACU-106 30KW]と奈落系統空調機[ACU-119 5.5KW]を停止した。また、15:00には袖舞台系統空調機[ACU-107 11KW]を停止した。更に、14:00には舞台照明を約300KW程度点灯し、15:30に消灯、16:00に再点灯、17:30に消灯し、各地点の温度変化、気流変化を計測した。

① 舞台部の垂直温度分布調査結果

図-1に示すように、奈落部については実験期間を通じて温度変化は0.5℃未満であった。また、フライタワー部は、すのこから第1ギャラリーまでの各所において、空調停止後照明点灯前までの3時間で約0.5℃上昇(24.5～25℃)、舞台照明点灯後、約1.5時間で各所とも3～4℃上昇(26～27℃)し、すのこや第4ギャラリーでは最終的に27.5℃まで上昇した。しかしながら、いずれの場合も空調停止後7時間の温度上昇は3.5℃以内であった。

② 舞台活動域の平面温度分布調査結果

図-2に示すように、奥舞台・袖舞台のいずれも11時から14時までの温度上昇は、0.5℃未満(24.5～25℃)であった。また、14時の舞台照明点灯、15時の空調停止後には、更に0.5℃程度の温度上昇がみられるが、25.5℃程度で安定した温度状態を保った。

③ 舞台部の気流調査結果

表-1に示すように、各地点・各時刻の風速調査結果は概ね0.1m/s～0.2m/sであり、舞台運営上の問題となる気流は発生していない。12時10分に主舞台前方で0.46m/sの風速を記録しているが、これはこの時間帯に暗転幕を降ろしたことによるものであり、空調停止に起因するものではない。また、風向が時刻によって変化している箇所が見受けられるが、舞台照明の点滅状況に応じた変化と考えられ、風速が極めて小さいために、特に問題とはならないといえる。

表-1 オペラ劇場の気流調査結果

場所	子機番号	10:30			12:10			14:10			16:10			18:00		
		標準	Level1	Level2	Level3	Level4										
		[m/sec]	矢印	方向	[m/sec]	矢印	方向	[m/sec]	矢印	方向	[m/sec]	矢印	方向	[m/sec]	矢印	方向
S1		0.10	↑	真上	0.12	↑	真上	0.14	→	客席	0.11	↓	真下	0.16	↓	真下
O3		0.15	↑	真上	0.15	↑	やや舞台	0.10	↑	真上	0.12	↓	真下	0.12	↓	真下
G1		0.13	↑	真上	0.13	↑	真上	0.11	↑	真上	0.16	↓	真下	0.12	→	上手
舞台下手		0.11	↑	客席側	0.12	↑	やや上手	0.14	↑	真上	0.11	↑	真上			
舞台中央		0.09	→	下手側	0.11	→	下手 真	0.17	→	舞台真	0.21	→	舞台真			
客席中央		0.12	→	舞台	0.15	↑	客席真	0.13	↑	真上	0.15	↑	客席真			
オペット		0.13	→	下手側	0.11	→	下手 客席真	0.11	↑	真上	0.12	↑	やや客席			
幕幕		0.10	↑	真上	0.11	↑	真上	0.11	↑	真上	0.11	↑	真上			
舞台前方		0.11	→	やや下手	0.46	→	舞台	0.14	→	舞台	0.16	→	舞台			
舞台後方		0.26	↑	下手 後方45度	0.16	↑	下手後方	0.15	↑	真上	0.11	↑	真上			
舞台上手		0.15	↑	下手 舞台	0.13	→	下手	0.15	→	下手	0.17	→	客席			

④ 観客ゾーン・来館者ゾーンの温湿度・気流調査結果

図-2に示すように、客席部は設定値 26℃に対し測定開始時に約24℃の状態であり、客席照明やシーリングライトの影響で時間の経過とともに緩やかな温度上昇が見受けられるが、最終的に25℃の状態に安定した。また、気流状態についても、表-1に示すように0.15m/s以下で安定しており、各系統の空調停止の影響は見受けられなかった。

ホワイエゾーンは、図-3に示すように、13:00～15:00のホワイエ系統空調機運転停止時もほとんど温度変化は見受けられずに 24.5℃～25.5℃の間で推移し、設定値26℃以内の状態を保った。これは外気温度がほぼ 27℃で推移したことにより、壁体・ガラス面の伝熱・日射負荷が比較的小さかった影響が大きいと考えられる。

公開空地も11:00～、13:00～、15:00～と順次空調機の停止を行ったが、センサーを取り付けたエントランスロビーおよび共通ロビー下部の温度は±0.5℃の範囲内で推移し、空調停止の影響は全くなかった。

⑤ 技術諸室・舞台設備機器室の温度調査結果

調光電源室やフロントサイド投光室は、空調機の停止とともに1時間で約2～3℃の上昇が計測された。また、舞台照明点灯後は、調光電源室で1時間に約3℃、フロントサイド投光室で7℃近くの上昇がみられた。シーリング投光室が、空調機停止とともに30分たらずで40℃近くまで上昇したことも併せて、機器室関係の空調停止は不可能だといえる。

また、調光操作室などの技術諸室も、空調停止後1時間で3℃以上の温度上昇が計測されており、機器類の保護、作業環境の悪化を考慮すると、空調停止は困難であると考えられる。

(2) 中劇場

5月12日の中劇場における実証実験も、オペラ劇場と同様、9:00から11:00迄通常の空調運転を行い通常の空調環境を作り出した後、11:00にフライタワー(すのこ)系統空調機[ACU-106 30KW]と奈落系統空調機[ACU-119 5.5KW]を

停止した。また、15:00には袖舞台系統空調機[ACU-107 11KW]を停止した。更に、11:00から舞台照明を約150KW程度点灯し、18:00まで7時間の連続点灯を行い、各地点の温度変化、気流変化を計測した。

① 舞台部の垂直温度分布調査結果

図-4に示すように、奈落部については実験期間を通じて温度変化は0.5℃未満であった。また、フライタワー部は、すのこから第1ギャラリーまでの各所において、11:00に空調停止・照明点灯した後、ゆるやかに温度上昇を続けたが、18:00の時点で、25.5～27.5℃であり、舞台活動域温度差を考慮しても、問題となる温度域までは上昇しなかった。

② 舞台活動域の平面温度分布調査結果

図-5に示すように、奥舞台・袖舞台のいずれも11時から15時までの温度上昇は、1.0℃(24～25℃)であった。また、15時の空調停止後も温度変化はみられず、ほぼ25℃で安定した温熱環境を保った。

③ 舞台部の気流調査結果

表-2に示すように、各地点・各時刻の風速調査結果は概ね0.1m/s～0.3m/sであり、舞台運営上の問題となる気流は発生していない。風向も若干の変化は見受けられるが、風速が極めて小さいために、特に問題とはならないといえる。

表-1 中劇場の気流調査結果

場所	子機番号	10:25			11:25			13:32			14:05 幕下がり			18:00		
		速度 [m/sec]	矢印	方向	速度 [m/sec]	矢印	方向	速度 [m/sec]	矢印	方向	速度 [m/sec]	矢印	方向	速度 [m/sec]	矢印	方向
S1	11	0.10	↑	真上	0.14	→	下手	0.10	↓	真下	0.13	↓	真下	0.11	→	下手
Q3	8	0.11	↑	真上	0.12	↑	真上	0.10	↑	真上	0.11	↑	真上	0.11	↑	真上
Q1	4	0.10	↑	真上	0.19	↓	真下	0.19	→	上手	0.19	↓	真下	0.19	→	上手
舞台下手	14	0.15	→	下手	0.14	↑	真上	0.10	↑	真上	0.14	→	舞台奥	0.13	→	上手
舞台中央	13	0.26	→	舞台奥	0.12	↑	真上	0.24	→	舞台奥	0.20	↑	舞台奥上手	0.27	↑	やや真上
客席中央	5	0.20	↑	真上	0.28	↑	真上	0.16	↑	下手	0.29	↑	客席奥	0.13	↑	やや真上
オペピット	12	0.23	→	舞台下手	0.13	↑	真上	0.07	↑	真上	0.23	↑	やや上手	0.15	↑	やや真上
舞台前方		0.15	↑	真上	0.09	↑	下手	0.26	↑	真上	0.26	↑	真上	0.22	↑	真上
舞台後方	15	0.09	→	舞台奥	0.12	↑	真上	0.11	→	舞台奥	0.14	↑	真上	0.15	↑	やや上手
楽屋	17	0.11	↑	真上	0.12	↑	真上	0.12	↑	真上	0.12	↑	真上	0.12	↑	真上

④ 観客ゾーン・来館者ゾーンの温湿度・気流調査結果

図-5に示すように、客席部は設定値 26℃に対し測定開始時に約23.5℃の状態であり、客席照明やシーリングライトの影響で時間の経過とともに緩やかな温度上昇が見受けられるが、最終的に25℃の状態に安定した。また、気流状態についても、表-1に示すように0.3m/s以下で安定しており、各系統の空調停止の影響は見受けられなかった。

ホワイエゾーンは、図-6に示すように、13:00～15:00のホワイエ系統空調機運転停止時もほとんど温度変化は見受けられずに 23℃前後で推移し、設定値26℃以内の状態を保った。これは外気温度がほぼ 16～17℃と非常に低く、壁体・ガラス面の伝熱・日射負荷が小さかった影響が大きいと考えられる。

公開空地も11:00～、13:00～、15:00～と順次空調機の停止を行ったが、センサーを取り付けた各地点とも 22～23℃で推移し、空調停止の影響は見受けられなかったが、これも外気温度が低温だったことに起因すると考えられる。

⑤ 技術諸室・舞台設備機器室の温度調査結果

音響電源室は、空調停止後30分程度で上限温度の20℃を超過する傾向が見受けられたため、空調機を再起動した。P1階機構制御盤室は、空調停止期間の2時間で約2℃の温度上昇がみられた。シーリング投光室が、空調機停止とともに30分たらずで40℃以上まで上昇したことも併せて、機器室関係の空調停止は不可能だといえる。

5. 考察

① 劇場舞台ゾーン

- ・ フライタワー(すのこ)系統空調機[オペラ:ACU-106 30KW、中:ACU-205 18.5KW]
舞台照明負荷があっても、3～4時間以内ならば、空調停止が可能である。
- ・ 奈落系統空調機[オペラ:ACU-119 5.5KW、中:ACU-215 5.5KW]
事前に安定した温湿度環境としていれば、公演中でも8時間程度の空調停止が可能である。
- ・ 袖舞台系統空調機[オペラ:ACU-107 11KW、中:ACU-206 11KW]
事前に安定した温湿度環境としていれば、公演中でも3時間程度の空調停止が可能である。

② 劇場バックヤードゾーン

- ・ 組立場系統空調機[ACU-108 11KW]
事前に安定した温湿度環境としていれば、公演中でも8時間程度の空調停止が可能である。
- ・ 舞台技術諸室、制御盤室等系統空調機
機器類の発熱があるため、急激に温度上昇する室があり、空調停止は望ましくない。
- ・ 衣装保管庫、楽器庫系統空調機[ACU-118 0.75KW、ACU-123 2.2KW]
事前に安定した温湿度環境としていれば、数時間の空調停止は可能であるが、節電効果は少ない。

③ 来館者ゾーン

- ・ ホワイエ系統空調機[オペラ:ACU-114～117 55.5KW、中:ACU-213,214 60KW]
事前に安定した温湿度環境としていれば、2時間程度ならば空調を停止してもその温度上昇は少ない。
ただし、オペラ劇場は上部と下部で系統が分割されているため、まず下部[ACU-114,115]から停止することが望ましい。また、中劇場は西面がガラスとなっているため、日没前に停止することは極力避けるべきである。
- ・ 公開空地[エントランス:ACU-801 7.5KW、共通ロビー下:ACU-802 15KW、同上:ACU-803 18.5KW、
プロムナード:ACU-804 18.5KW]
事前に安定した温湿度環境としていれば、2時間程度ならば空調を停止してもその温度上昇は少ない。
但し、空調停止を行う場合は、まずエントランス系統、共通ロビー下部系統を停止し、更に節電が必要な場合は、その他の2系統を停止することが望ましい。