

<論文>

簡易冷房手法による大学講堂の夏期温熱環境改善に関する検討

本 間 義 規

1. はじめに

1.1 大学施設と省エネルギー化

温暖化対策として建築物の省エネルギー適合義務化が進められ、現在は300 m²以上の建築物は省エネ基準に適合する義務を負っている¹⁾。学校建築も決して蚊帳の外ではなく、例えば文部科学省のスーパーエコスクール実証事業や大学等における実験・研究に関する省エネルギー実証事業など、国の施策としても教育機関に対して多様なアプローチがなされている。小中高校建築のエネルギー消費は1日の利用時間および年間の使用日数が短いため、一般の事務所ビルに比べると3分の1程度であり、そのことが逆に省エネ性能向上を阻害する要因となっている。不十分な暖房設備や不適切な換気対応により、結果として学校建築物衛生基準を満たしていない学校も少なくなく、稀にシックスクールを生じさせる要因にもなっている^{2,3)}。

一方、大学建築は、キャンパス内に異なる用途の施設を有し、その活動時間も長いことが特徴であり、小中高校までの教育施設とは性格を異にする。例えば、大規模な実験施設を有する研究大学では、改正省エネ法における第1種エネルギー管理指定工場などに該当する事例も多い。

こうした背景も踏まえ、高等教育機関・研究機関として他業種よりもエネルギーコンシャスであるべきとの理由から、省エネルギーに関する取組を情報発信している大学も少なくない。例えば、大学キャンパスを持続可能な社会を実現するための実証実験の場と位置付け、①大学施設の持続可能な性能、②キャンパスの全体計画と目標設定、③教育・研究・施設のインテグレーションの3つのWGを設置して活動する国際的な取り組みも行われている⁴⁾。

1.2 大学講堂の空間特性

劇場や講堂は、普通教室に比べて使用頻度が少ない反面、利用する際は多数の利用者が半日もしくは終日の間、高密度に利用する空間となる⁵⁾。また、在席者密度が高いため、通常のオフィスビルに比べるとその空調負荷は極めて大きい。冬期暖房、夏期冷房に際しては、使用しない期間・時間帯の初期温度コントロールが重要である。湿気に関しては、冬期は環境調整上の課題とならないが、夏期は利用者からの発生水分を適切に排出もしくは除去することが求められ

る。すなわち、平時はできるだけ温湿度変動の生じないような設備設計・運用を行い、利用時は在室者の負荷を適切に除去することが基本で、そのうえで、大空間の空気熱容量・湿気容量の活用を計画することが省エネルギー上求められる。

劇場・講堂は音響を重視すべき空間でもある⁶⁾。空調設備のファンノイズやダクト騒音の低減等の工夫は空調設備設計と同時に計画することが求められ、建築設備設計およびその運用に際して配慮すべき点が少なくない。

宮城学院女子大学の講堂はステージに音響反響板を備えた1154席の中規模ホール（延べ面積：2236.58 m²）である。しかし、37年前の竣工のため、冷房設備がなく（中央管理式空調設備ではなく集中暖房設備のみ）、夏期の施設利用は温熱環境的に快適といえる状況にはない。

1.3 研究の目的

本研究は、本学1年前期必修授業「音楽の世界」合唱発表会で使用する大学講堂の簡易冷房化の検討過程について報告し、その装置を利用した発表会時の温熱環境の状況を明らかにすることを目的とする。

2. 簡易冷房装置に関する検討

2.1 冷凍ペットボトルを用いた簡易冷房

大学講堂の冷房負荷は設備的に処理することが一般的だが、そうした設備がない場合は、簡易的な工夫が必要となる。「音楽の世界」発表会は7月中旬に実施することから、熱中症等が懸念されたため、当初、簡易涼房手法として氷柱等の利用が一般教育部から提案された。このアイデアをベースに、建築環境学研究室学生らと検討し、調達が簡単で融解水処理が容易な冷凍ペットボトルへと発展してきている。これはいわゆる氷蓄熱システムであり、欧米においても極めて短時間に冷房負担の集中する建物・設備（催し所、教会、乳製品加工工場など）用の空調設備の小型化を目的として利用されてきたという経緯があり⁷⁾、日本でも1980年代から同様の施設を中心に実用化されている。多数の事例があるが、例えば、実験的に行っている小規模建物用氷蓄熱空調システムの例では、熱損失係数3.08 W/(m²・K)、隙間相当面積C=4.54 cm²/m²の建物（延べ面積108 m²）に冷房蓄熱容量95 MJ（融解潜熱換算で氷283 kg相当）のシステムを用いて、書店、酒屋、食堂、事務所、美容室といった負荷特性と空調時間の運転パターンで実測した報告がある^{8~10)}。非蓄熱システムと比べて20~30%程度の電力負荷平準化効果が確認されている。

さて、そうした氷ペットボトルのシステムを講堂内に設置するには、冷房負荷に見合った容量算定と設置スペースの確保、また、冷風を適切に空間内に分布させるための搬送・攪拌用機

械ファン設備が必要である。合唱発表会という授業特性として、騒音を発生する大掛かりな送風装置は使うことができないことから、30～40 dB 程度の静音ファンを用いることを前提として、冷凍ペットボトルを用いた簡易冷房装置を製作した。具体的には、冷凍したペットボトルを多数準備し、その蓄冷熱を利用して冷房負荷処理と除湿を行うシステムの構築である。

2.2 冷凍ペットボトル冷房装置の試作

冷凍ペットボトル冷房装置は2つのパターンで行った。一つは、写真1に示すように簡易ケーシングにペットボトルを積み上げ、これに扇風機を吹き当てて客席後方部の倉庫に設置し吹き降ろす方法である（これを簡易ケーシング型ペットボトル冷房装置とする）。1つの簡易ケーシング装置には500 ml ペットボトル約150本が1つのケーシングに設置することが可能で、この装置を3基（合計約450本）設置し、風速約8 m/s（扇風機前50 cm）の扇風機で送風した。密度差による冷却下降流が生じるが、プロペラファンでは静圧が小さいためその気流速は小さく、客席上部（保護者席）までしか効果が及ばない（これは昨年度確認済みである）。2つめは、より静圧の確保できる電動ファンを用いて、効率的に除湿した冷風を送風できる装置である。市販品では適する製品がないため、今年度は送風ファンを用いる冷房装置を自作することとし、低コストかつ送風量の大きなファン（三菱製ストレートシロッコファン給気型消音タイプBFU-40SSU、定格風量400 m³/h）を3基取り付け装置とした（写真2、送風機利用ペットボトル冷房装置とする）。この装置は1段に100本程度の冷凍ペットボトルが収納でき、平行に3段（各々の段に1つのファンが吹き付けるかたちとなっている）。設置時間は発表会開始時間30分前とし、休憩時間（15:10～20）に新しいペットボトルに換装している。



写真1 簡易ケーシング型冷凍ペットボトル冷房装置

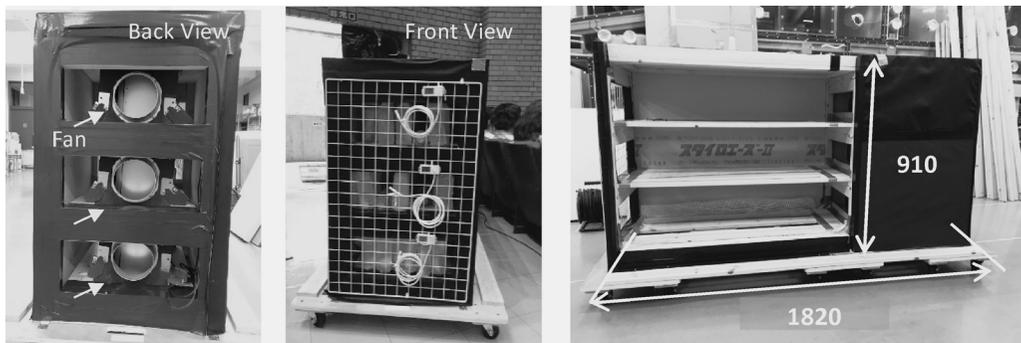


写真2 送風機利用冷凍ペットボトル冷房装置

2.3 冷凍ペットボトル（500 ml）単体の冷却能力

冷凍ペットボトルの冷房能力を測定する。実験は、ペットボトル表面にT型熱電対を貼り付け、家庭用冷凍庫（公称マイナス18℃）に入れて冷凍し、それを取り出して、自然対流状態でペットボトル表面温度変化（飽和状態を仮定）と周囲空気温湿度を測定、また結露量を電子天秤で測定した。結露量時間変化と絶対湿度差とから湿気伝達率を算出、ルイス関係より対流熱伝達率を算出したところ、表面对流熱伝達率は $4.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度であることがわかった。次に、空気温度とペットボトルとの表面温度の差と算定した表面对流熱伝達率およびペットボトルの表面積とから冷却能力を算定した。結果を図1に示す。実験結果より、1800秒（30分）経過時まで徐々に冷却能力は減少し、それ以降はほぼ一定の冷却能力となる。すなわち1800秒以降は、ペットボトル表面近傍の水が融解している状態であることがわかる。また、冷凍庫等で500ミリリットルのペットボトルに水を入れて凍結させると、マイナス18℃の水約450gができる（500mlの水を凍結させると体積膨張により破壊するため、容量に対し約90%の水しか入れられない）。氷比熱を $2.06 \text{ kJ}/\text{kgK}$ としてマイナス18℃の状態の水が最終的に室温平衡になったとすると、水ペットボトル1本の冷熱量は200kJ程度と見積もられる。一定の冷却能力を保つためには、表面熱伝達率のコントロール、すなわち風速（風量）の設計が重要となる。

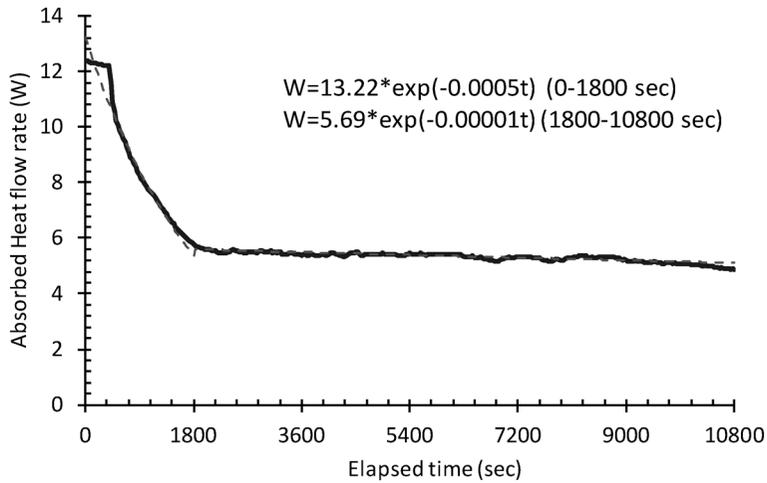


図1 ペットボトル1本分の冷却能力

2.4 送風機利用冷凍ペットボトル冷房装置の効果

図2に送風機利用冷凍ペットボトル冷房装置（写真2）の流入口・吹出口の温度経時変化を、図3に給気口・吹出口の絶対湿度揭示変化を示す。流入口温度は28～31℃程度であり、それがペットボトル冷房装置内を経由して下段で18～21℃、中・上段で23～25℃程度の吹出温度になっていることがわかる。

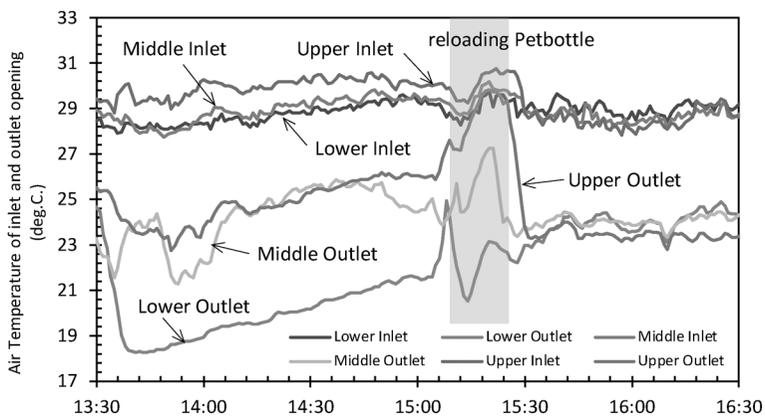


図2 送風機利用冷凍ペットボトル冷房装置の入口・出口温度推移

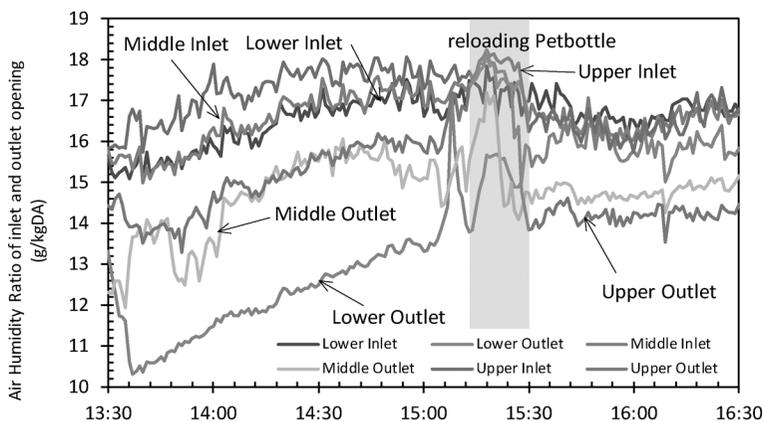


図3 送風機利用冷凍ペットボトル冷房装置の入口・出口絶対湿度推移

吹出部分の平均風速は上部 2.1 m/s、中部 2.7 m/s、下部 1.08 m/s であり、開口面積から吹出風量を推定すると各々 381 m³/h、489 m³/h、196 m³/h（有効開口率 0.7 を仮定）となる。この風量の違いは、おもに冷凍ペットボトルの充填方法の違いに伴う圧力損失の差であると推定される。

2.5 レンタル冷房装置の冷却効果

2017 年度の音楽の世界では、本研究で行う対応とは別に、大学側が可搬式ハイブリットクーラーを準備した。カタログ値によると冷房能力は 58.1 kW、圧縮機出力が 15 kW であることから、定格で COP=3.87 の製品である。また除湿能力はカタログ値で 46 リットル/h とあるが、これは取り入れ外気の除湿であって講堂からの除湿量ではない点は注意を要する。レンタル冷房装置の実測結果を図 4 に示す。カタログ上の風量は 1.2 m³/s であり、これを写真 3 のように外部に設置した状態でジャバラダクトにより講堂両脇の入口より供給している。講堂両脇からの吹き出し風速は左側 6.0 m/s、右側 9.3 m/s であり、ダクト長の長い左側吹出の風速が小さくなっていることがわかる。これは明らかにジャバラダクトの圧力損失の影響である。ジャバラ口径が 300φ であるので、単純に定格風量に対して左側 35%、右側 54% となり、この風量から算定すると平均能力で合計 12.6 kW と推定され、COP は 1 を切る事がわかる。



写真3 レンタルドライクーラー

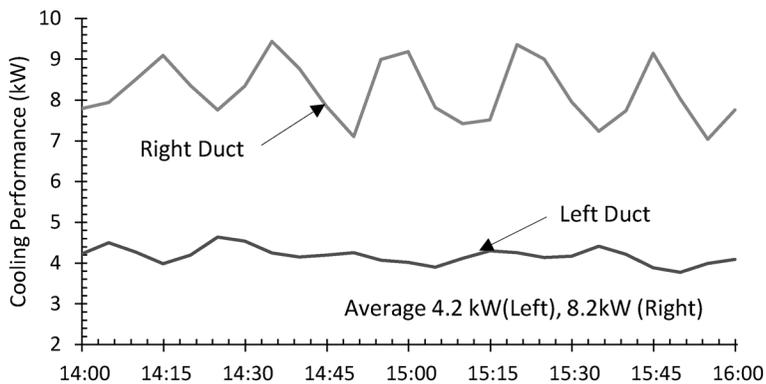


図4 レンタルドライクーラーの実質冷房能力の推定

2.6 人体由来の空調負荷の試算

合唱発表会当日の収容人員は学生、保護者および教職員でほぼ満席であった。この状態における人体由来の空調負荷を試算する。人体発熱および水分発生量は文献¹¹⁾に示される値から近似式を作成し、室内平均温度から算出した。在室者数を1150人と仮定して14～16時の2時間において算出した人体発熱総量 (kW) および人体水分発生総量 (kg/h) を図5、6に示す。人体由来の空調負荷は、顕熱で平均35.7kW、潜熱(水分発生量)で129.6kg/hである。高温になるほど発汗による潜熱分が増加するので、室温を低下させる対策とともに、除湿対策にも力点を置く必要がある。

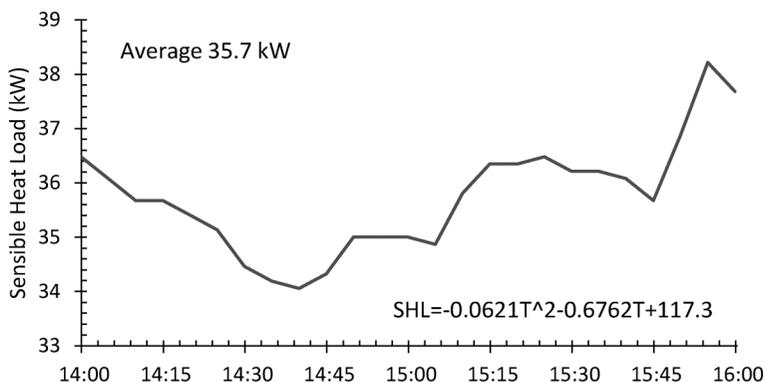


図5 講堂滞在者からの人体発生熱量の推定

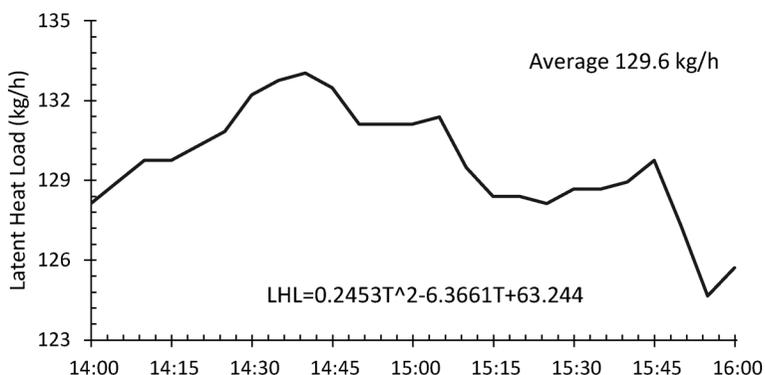


図6 講堂滞在者からの人体水分発生量の推定

3. 実測結果

3.1 講堂内の長期温度変動および発表会当日の温熱環境

音楽の世界での合同発表会は2017年7月15日であったため、発表会前の2週間および後1週間の計3週間の温湿度実測を行った。測定点は図7に示す通りである。

また、ナイトパーズによる躯体蓄冷を期待して、夜間エアハンドリング装置運転（平日夜18時30分より翌朝7時30分まで）を6月28日より行っている。実測の結果、昨年度よりも外気温が高く、実測した期間内では7月15日をピークとする気象状況であった（図8）。夜間の温度低下も20℃を下回る日が少なく、ナイトパーズについても大きな効果が得られない結果となった。当日の気象庁観測の外気温および水平面全天日射量から換算した水平面SAT温度を図9に示す。2017年は前年と比較して外気温および日射量が多く、日中ピークで70℃に達しており、「音楽の世界」2年目は昨年よりも過酷な暑熱環境にあったことがわかる。

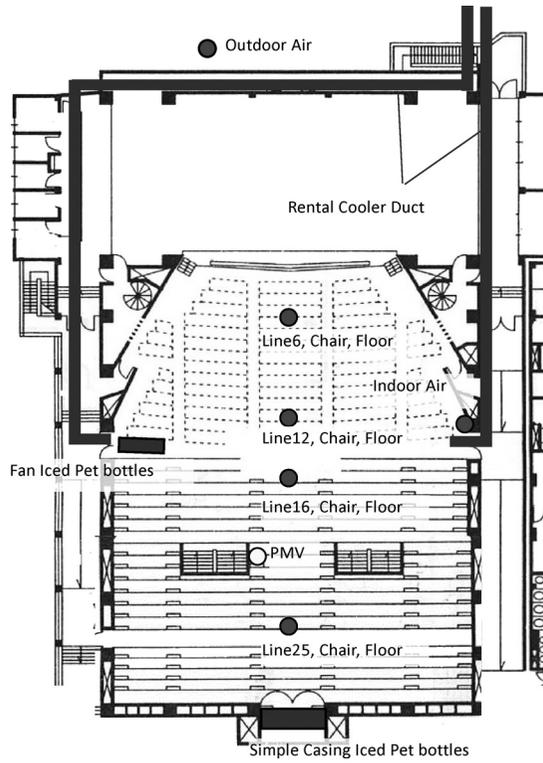


図7 PMV・温湿度測定点および簡易冷凍ペットボトル冷房装置，レンタルクーラーダクトの配置

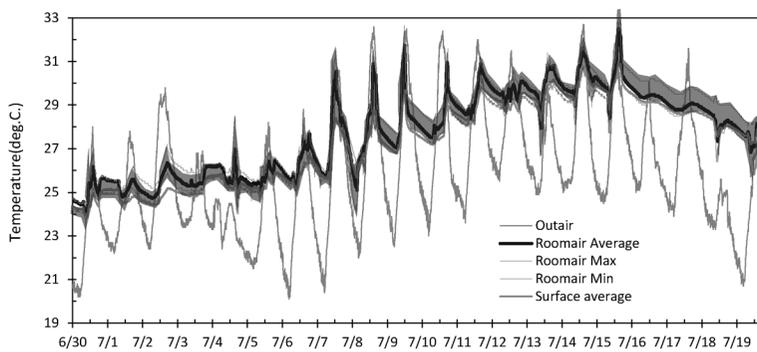


図8 講堂内各部の温度変動(2017/6/30-7/20)

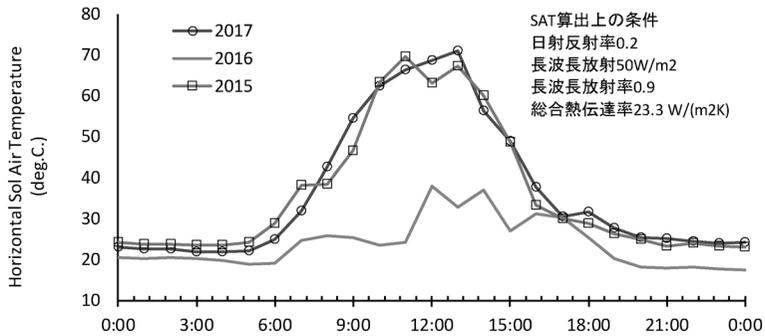


図9 3か年分の7/15の水平面SAT温度比較（2015～2017）

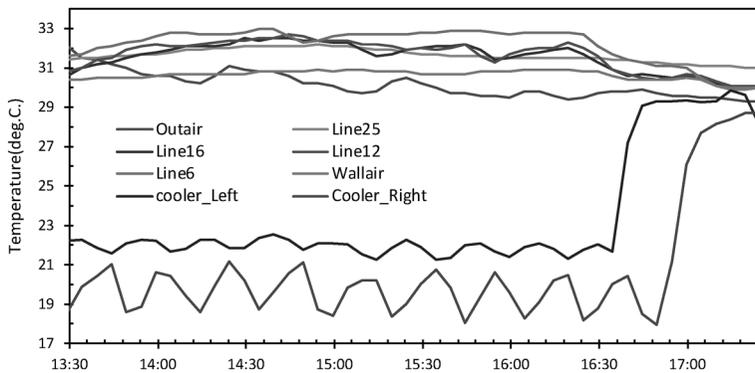


図10 合唱会開催時の各部温度変動（2017/07/15）

3.2 講堂内のPMVおよびPPD

図11、12に大学講堂内における予測平均温冷感申告（PMV：Predicted Mean Vote, ± 3 のスケール、0が中立状態を表す）¹²⁾ および予測不満足者率（PPD：Predicted Percentage of Dissatisfied, 5～100%）¹²⁾の経時変化を示す。着衣量および代謝量は入力条件であり、実際に観客によって着衣量が異なるため、算定は0.4 clo～0.6 cloの範囲で算定を行っている。データを見てみると、発表会がスタートした14時30分から急激にPMV値、PPD値が上昇し、10分後くらいには既にPMV=2.0～2.3, PPD=80～90%（暑い～とても暑い）に達している。16時にPMVおよびPPDが急激に低下しているが、休憩時間に排煙窓開放と両脇の出入り口を開放したからであり、これら排熱の効果が確認できる。しかし、発表会再開と同時にドアを閉鎖することによって、再び開放前と同様のPMV、PPDレベルにまで回復している。

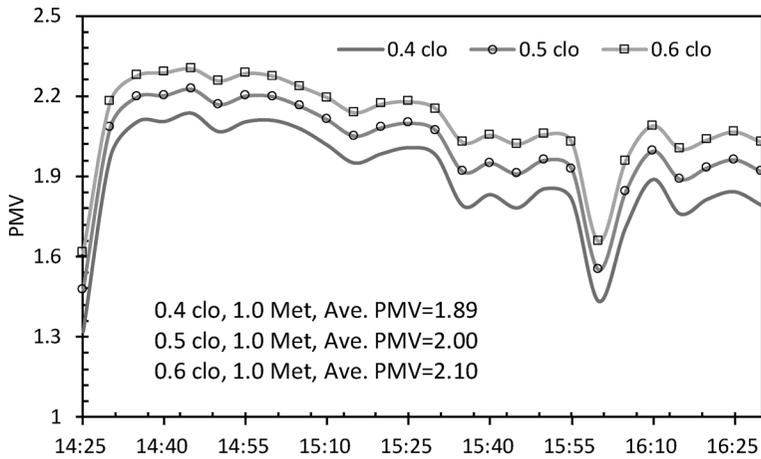


図11 大学講堂内の予測平均温度感申告の推移

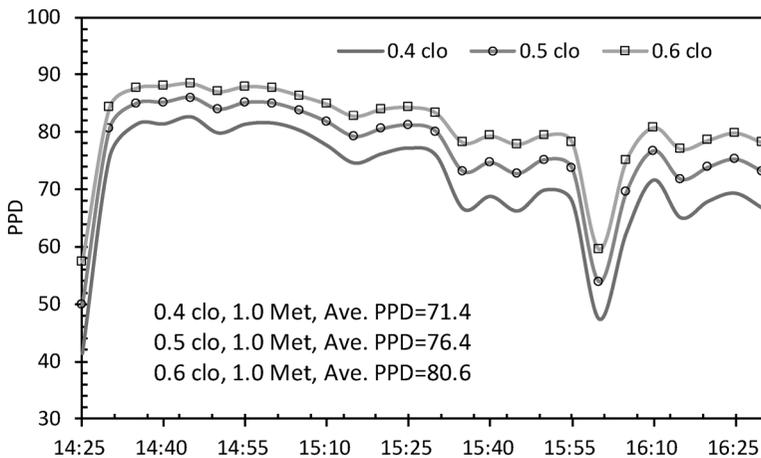


図12 大学講堂内の予測不満足者率の推移

3.3 大学講堂内の湿度環境

図13に合唱会開催時の講堂内の絶対湿度変動を示す。講堂内絶対湿度は人体からの水分発生があるため、外気よりも高くなる。その差は0.65 g/kgDA (14:00~17:00の平均)であり比較的小さい。講堂内の空気湿気容量が大きく影響している。9~14 g/kgDAでノコギリ状に変化しているのはレンタルドライクーラーによるものであり、除湿量はダクト2本分を合わせて2~4 kg/h程度と見積もられる。

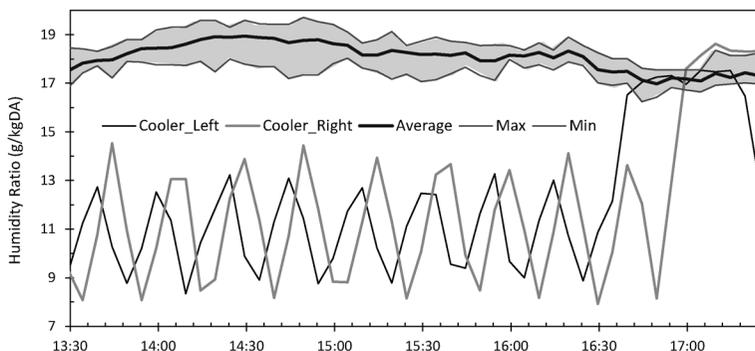


図 13 合唱会開催時の絶対湿度変動（2017/07/15）

4. まとめ

本研究では、本学大学講堂における簡易冷房化手法の検討と、その装置を利用した発表会時の温熱環境の状態を定量的に明らかにした。一般教育部からの依頼により簡易冷房を検討し始めた2016年度に比べると、実施日は外気温度および日射量ともに高く、従って観客が入場する以前より室温湿度が高い状態であったため、室内温熱環境はPMV1.3~2.2、PPD50~90%という環境になった。また、作成した送風機利用冷凍ペットボトル冷房装置、およびレンタルクーラーも、結果的にその能力が不足していたことを定量的に明らかにした。

建築環境・設備工学的にみても、潜熱利用という意味で冷凍ペットボトル方式はユニークであるが、1000人を超える空間に適用するには簡易なままでは成立せず、空調設備の一環として適切に計画しないといけないことがわかった。大規模空間の夏期の冷房としては、これに似た建築規模・用途の事例として音楽ホール・映画館等があるが、再熱コイルによる加温を殆ど行わない事例が多く、過剰冷房が問題視されることも少なくない。本学講堂も同様な課題をはらんでおり、その空調設備設計には十分な配慮が求められる。

参考文献

- 1) 国土交通省：建築物省エネルギー法、
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html, 2018/01/20 閲覧
- 2) 被害児童、新たに17人 教室使用中止も 奥州・胆沢一小、シックスクール／岩手県, 朝日新聞, 2012年8月12日
- 3) 健康的な学習環境を維持管理するために -学校における化学物質による健康障害に関する参考資料-, 文部科学省, 平成24年1月
- 4) サステイナブル・キャンパス・ネットワーク ISCN (International Sustainable Campus Network)
<https://www.international-sustainable-campus-network.org/>

- 5) 窪田英樹：劇場冷房のための垂直吹き出し気流の基礎的特性, 室蘭工業大学研究報告・理工編, 9巻, 1号, 15-26, 1976年
- 6) 山本照二：最近建設されたコンサート・リサイタルホール, 87-94, 日本音響学会誌 43巻2号, 1987年
- 7) 福迫尚一郎・稲葉英男：低温環境下の伝熱現象とその応用, 養賢堂, 1996
- 8) 石原修・酒井孝司・馬場敬之：小規模建物用氷蓄熱空調システムの有用性に関する実験的研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集 平成12年(2), 737-740, 2000
- 9) 酒井孝司・石原修・高濱研自・馬場敬之：小規模建物用氷蓄熱空調システムの有用性に関する実験的研究, (その2)：システムの運転効率・蓄熱槽の放熱損失の評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集 平成13年(1), 225-228, 2001
- 10) 高濱研自・石原修・酒井孝司・馬場敬之：小規模建物用氷蓄熱空調システムの有用性に関する実験的研究, (その3)：夏期実験結果とシステム評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集 平成14年(1), 257-260, 2002
- 11) 社団法人空気調和・衛生工学会, 新版快適な温熱環境のメカニズム, 豊かな生活空間をめざして, 丸善株式会社, 平成18年
- 12) ISO7730-2005, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria

謝辞

音楽の世界発表会当日は、一般教育部田中一裕教授、近松健教授、大学院生活文化デザイン専攻2年千葉玲奈氏、生活文化デザイン学科4年佐藤晴菜氏（いずれも当時）に冷凍ペットボトルのセッティングに協力いただいた。また、千葉玲奈氏には、冷凍ペットボトルのアイデア検討に尽力いただいた。ここに記して謝意を表する。

(2018年4月10日受領、2018年5月7日受理)

(Received April 10, 2018; Accepted May 7, 2018)

A Study on Improvement approach of summer thermal environment in university auditorium using simplified cooling device

Yoshinori HONMA

Planning of air conditioning systems of theaters or auditoriums is difficult because the venues are less frequently used than ordinary classrooms, however, when these venues are occupied, a large number of attendees will use the space densely for half a day or longer. In addition, because the density of attendees is high, the cooling load is extremely large compared with that of ordinary office buildings. Therefore, sound planning of theaters / auditoriums should be carefully designed. For example, measures such as reduction of fan noise or duct noise of air conditioning are essential in designing theater / auditorium equipment and its operation.

The auditorium of Miyagi Gakuin Women's University does not have cooling facilities and is not comfortable in a summer thermal environment. Therefore, the situation of the thermal environment at the "Music World" chorus presentation, which was held on July 15th of 2017, was measured and clarified in this study. The simple cooling system using frozen PET bottles (Ice thermal storage system) for music presentation, resulted in the indoor thermal environment PMV of 1.3 to 2.2 and PPD of 50 to 90% . In addition, the frozen PET bottle cooling system using the blower and the rental cooler quantitatively clarified that the cooling capacity was insufficient. These measurement results are expected to be a source of reference for future air conditioning refurbishment.