

論文

空調環境可視化システムを用いた 教室環境の改善と省エネ評価

鳥山 詩織 石渡 智子 村松 映美 諏訪 敬祐

二酸化炭素とは、温室効果ガスの一つで、地球温暖化に及ぼす影響がもっとも大きいとされている。現在の地球にとって、この二酸化炭素排出量を減少させることが重要な課題である。東京都市大学横浜キャンパスは、ISO14001 取得や環境に配慮した様々な施設を有するエコキャンパスが特徴である。しかし、このエコキャンパスが故に、利用者にとって不快な環境を強いているのも事実であり、調和と理解を得るために環境の様々なデータを「見える化（可視化）」することが重要である。そのため、我々は空調という面から教室環境の様々なデータを取得できるネットワークを基盤とした空調環境可視化システムを構築し、Web 上で閲覧できるようにした。また、省エネルギー化の目安となる電力量と CO2 排出量を定量的な数値として可視化し、教室内の快適温度を明らかにするとともに、空調機器の制御方法を提案した。空調を適切に使用することにより、大幅な省電力化を実現した。

キーワード：可視化, 空調環境, 快適温度, 省エネ

1 はじめに

1.1 研究の背景

近年の地球環境は人間の安心な社会生活を脅かすほどの問題に発展している。その大きな問題の一つとして地球環境の悪化が挙げられる。これは、二酸化炭素などに代表される温室効果ガスによってもたらされる現象であり、人為的な活動に起因している。二酸化炭素濃度が高くなれば、地球の平均気温も上昇する。気温が上昇すると、今まで以上に猛暑の夏をすごさなければならなくなる。地球規模で見ると、海面が上昇し数多くの島が沈んでしまうことになる。現在も北極や南極の氷が溶けだし水位は上昇している。そのために海拔の低い国ではすでに被害が出ているところもあり、地球規模で大きく影響し、世界に異常気象をもたらしている。

京都議定書では6種類の温室効果ガスの排出量の削減を求めている。その中で日本は、他の国と比べ温室効果ガスの中でも二酸化炭素の割合が約 95%と高いことが特徴であり、日本での温室効果ガスを削減するためには二酸化炭素を削減することが最も重要である。

京都議定書の対象となっている温室効果ガスの排出量の割合（2009年）を図1に示す。

図2は燃料種別内訳である。私たちの日常生活においても、家庭などから排出される二酸化炭素のうち、照明や家電製品からの二酸化炭素排出量が全体の 40%を占めている。このため、こまめに電気を消すなど無駄なエネルギー消費をいかに抑えるかが最も重要である。

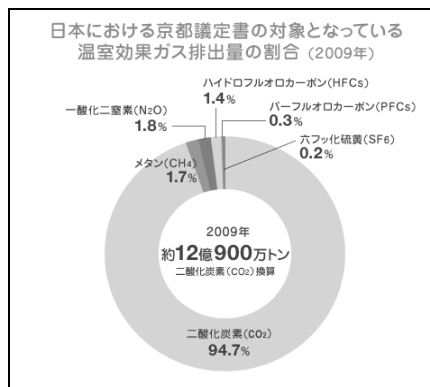


図1 温室効果ガス排出量の割合（2009年）^[1]

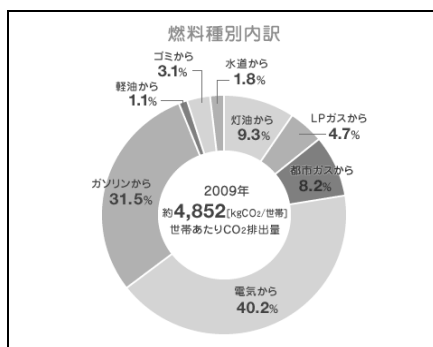


図2 燃料種別内訳^[1]

TORIYAMA Shiori
東京都市大学環境情報学部情報メディア学科 2011 年度卒業生
ISHIWATA Satoko
東京都市大学環境情報学部情報メディア学科 2011 年度卒業生
MURAMATSU Terumi
東京都市大学環境情報学部情報メディア学科 2011 年度卒業生
SUWA Keisuke
東京都市大学環境情報学部教授

我々学生の身近な大学構内では、大教室の過剰な空調稼働が目立っていた。本学の大教室においては温度設定を変更することが不可能であり、空調のON/OFFの操作のみ可能な環境にある。このような環境下では、夏なのに寒すぎることや冬なのに暑すぎる状況が生じ、学生や教員にとって講義に集中することができない環境にある。

2010年夏季の冷房設定がされた32A教室で行ったアンケートの申告を図3に示す。夏なのに「やや涼しい」から「寒い」までの1から3の申告3つの合計が約7割を占めている。

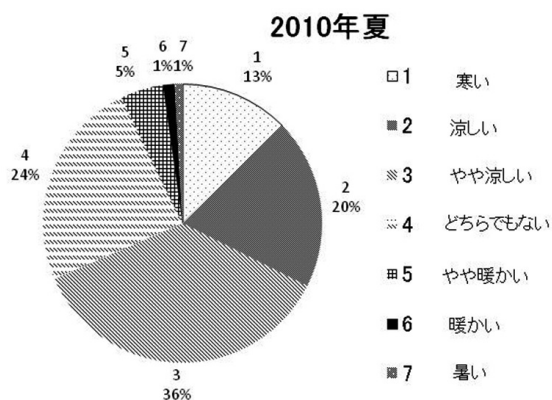


図3 2010年夏季の32A教室の申告

1. 2 研究の目的

本研究では、空調環境に関するアンケート調査を分析することにより温湿度と快適性の関係を把握し、快適温度を算出する。それを可視化することにより、快適環境を維持しながら省エネ活動への意識向上を図り、空調機器の消費電力量の削減を行うことを目的としている。

2 空調環境可視化システム

2. 1 空調環境可視化システムとは

本システムは、東京都市大学環境情報学部横浜キャンパスの3号館32A教室とFEISホールの大教室におんどとり（ティアンドディ社製）のセンサを設置し、教室内の温度・湿度・空調機器の消費電力量データを随時取得するシステムである。取得したデータはMySQLというデータベースに蓄積されており、いつでも閲覧可能である。このシステムは、東京都市大学環境情報学部諏訪研究室の平成21年度卒業生が構築したものである。システム構成を図4に示す^{[2][3]}。

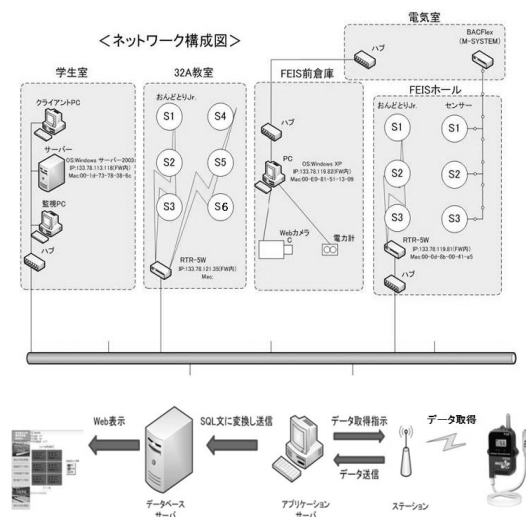


図4 システム構成

3 快適温度

3. 1 従来の指数^[4]

従来の空調環境可視化システムでは、建築環境工学における快適温度を適用している。快適温度は中立温度ともいい、その温度の前後2度の範囲で「快適」と感じられる温度を指す。この快適温度は回帰法やGriffiths法で求めることができる。これらはいずれもアンケートによる温冷感の申告と室温で求められる。通常は回帰法によって求めるのが理想とされるが、データ不足や、活動レベルや生理的適応によって温冷感が温熱環境により左右されるため、回帰係数を0.5に仮定したGriffiths法で求めるのが妥当とされる。

Griffiths法の式は

$$T_c = T_i + (4 - C) / 0.5$$

(T_c :快適温度(°C), T_i :室温(°C), C :申告値)

である。

また、この方法のほかに移動平均外気温から快適温度を算出する方法もある。移動平均外気温については以下に記述する。

3. 2 移動平均外気温^[6]

移動平均外気温とは、過去の時間的変化に従って重みづけした外気温の移動平均のことである。移動平均とは統計学の一つの求め方であり、連続する複数の時間における平均を算出し、時間をずらしながら繰り返して計算することで変化の傾向を求めることである。要するに、今までの変化の傾向によって当日の平均気温を求めるのである。当然、一日が終わらなければその日の平均気温は分からないのだが、移動平均外気温は過去の温度変化の傾向によってその日の移動平均外気温が計算されれば、翌日の移動平均外気温を求めることができる。この数値は前日の平均気温を考慮した温度であるので、翌

日の平均気温を算出することができる。

移動平均外気温の式は

$$T_{rm} = (1-\alpha) \times \text{前日の平均外気温} + \alpha \times \text{前日の } T_{rm}$$

(T_{rm} :移動平均外気温(°C))

α は0から1の定数であり、移動平均の外気温に対応する反応速度を定義したものである。 α の値としては0.8が推奨されている。ヨーロッパや英国ではこの数値が適切であることが明らかになっている。この値は、被験者が外気温の変化に完全に適応するためにかかる時間が約一週間であることを表している。

移動平均外気温を算出すれば、その日の移動平均外気温とその時の外気温で快適温度を算出することができる。

3.3 湿度も考慮した新たな指数の提案

従来の指数では、温度を重視しており結果的に湿度は一定であるとした。四季に応じて変化する湿度も考慮して快適温度を算出する式を求めれば通年利用することが可能である。そのため、従来の温度による回帰法やGriffiths法に加え湿度による回帰も行い、それらを重回帰分析することにより、湿度も考慮した式を導き出すことができる。

本研究では、室内の温度と湿度を考慮した快適温度を明らかにする。

3.4 アンケート調査

アンケートを行うことにより、算出した快適温度が最適であるか、空調の操作を行うことで学生の不快感を減らすことができるのかを検証する。夏のデータとして6月、冬のデータとして10月にアンケートを実施した。

4 分析結果

分析結果を表1と表2に示す。表1は、従来の快適温度の算出法である室温を利用した回帰法①とGriffiths法と移動平均外気温を利用した回帰法②で、6月と10月の生データ(全部のデータ)とグループ(教室別などで分けたもの)とで導き出したデータをまとめている。表2は、湿度を利用した回帰法で求めたデータである。

6月と10月で信頼性を表す相関係数 r の値が高いものを採用し、表1から6月の快適温度は25.5°C、10月は23.5°Cであることが分かった。

これらと表2のデータとを6月、10月について重回帰分析する。その結果を表3に示す。

これらの結果より、6月の快適温度は

$$\text{快適温度} = (13.0845 - 0.049214 \times \text{湿度} + 4) / 0.539422 \quad (1)$$

である。

10月の快適温度は

表1 快適温度算出法

6月		方法	式	快適温度	n	r
生データ	回帰法①		$C=0.5829Ti-11.003$	25.7	791	0.17
	griffiths法		$Tc=Ti+(4-C)/0.5$	25.5	791	
	回帰法②		$Tc=T_{rm}+8$		791	1
グループ	回帰法①		$C=0.6955Ti-13.728$	25.5	424	0.3675
	griffiths法		$Tc=Ti+(4-C)/0.5$	24.9	424	
	回帰法②		$Tc=T_{rm}+8$		424	1
10月		方法	式	快適温度	n	r
生データ	回帰法①		$C=0.3342Ti-3.8409$	23.5	1309	0.0342
	griffiths法		$Tc=Ti+(4-C)/0.5$	23.9	1309	
	回帰法②		$Tc=-0.0116T_{rm}+20.445$		1309	0.0009
グループ	回帰法①		$C=0.2468Ti-1.7732$	23.4	425	0.0297
	griffiths法		$Tc=Ti+(4-C)/0.5$	24.1	425	
	回帰法②		$Tc=-0.0094T_{rm}+20.241$		425	0.0241

【C:申告値,Tc:快適温度(°C),Ti:室温(°C),T_{rm}:移動平均外気温(°C),n:度数,r:相関係数】

表2 湿度感の算出

	方法	式
6月	回帰法	$C=0.0053rhi+4.8034$
10月	回帰法	$C=0.0286rhi+2.7912$

【C:申告値, rhi:湿度(%)】

表3 重回帰分析結果

6月	回帰統計	10月	回帰統計
重相関 R	0.43678	重相関 R	0.18684
重決定 R ²	0.19078	重決定 R ²	0.03491
補正 R ²	0.18872	補正 R ²	0.03340
標準誤差	1.77156	標準誤差	1.39792
観測数	791	観測数	1286
	係数		係数
切片	-13.08454	切片	-4.24852
ti	0.53942	ti	0.33788
rhi	0.04921	rhi	0.00710

$$\text{快適温度} = (4.24852 - 0.007098 \times \text{湿度} + 4) / 0.337875 \quad (2)$$

である。

湿度の部分に実験の平均値である6月は66%と10月は44%を代入すると、6月の快適温度は25.6°C=26°C、10月の快適温度は23.4°C=23°Cとなった。

次章では、教卓設置モニターについて説明する。

5 教卓設置モニター

5.1 教卓設置モニターシステム構成

データ取得の流れと教卓設置モニターの利用の流れを図5に示す。まずアプリケーションサーバは、ステーションにデータ取得の依頼をすると、ステーションは、センサに向かってデータ送信の指示を出す。ステーションはセンサから送られてきたデータをアプリケーションサーバに返す。アプリケーションサーバは返ってきたデータをデータベースサーバに蓄積する。そして、PHPを使ってデータベースにアクセスして、必要なデータを教卓設置モニターに表示する。表示された画面を教員が見て、空調操作をする。

5.2 教卓設置モニターの画面作成

本研究では、教室の教卓に置かれた表示装置の室内環境表示画面の作成を行う。温湿度センサで取得したデータを用いて教室内の平均温度（折れ線グラフ表示）、教室内の平均湿度（数値表示）、空調の操作方法（空調のON/OFF指示）を表示する。室内環境を表示する対象教室はFEISホール及び32A教室である。この2つの教室の教卓上にモニターを設置する。表示プログラム作成のための使用言語はHTML, PHP, JavaScriptである。

教卓設置モニターの画面のフローチャートを図6, 図7に示す。季節ごとにフローチャートが分かれているのは、空調の温度設定が変わるためである。まずデータベースサーバに接続し、5分おきに温度・湿度データを取得する。湿度データを使って室内の快適温度を算出する。式(1), 式(2)が快適温度の算出式である。教室内の湿度も考慮

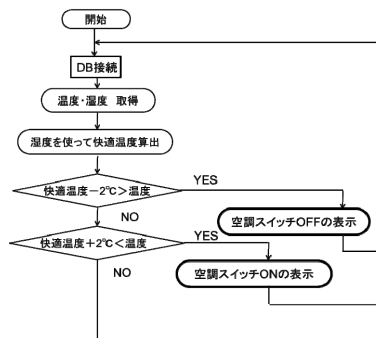


図6 室内環境画面表示フローチャート(夏)

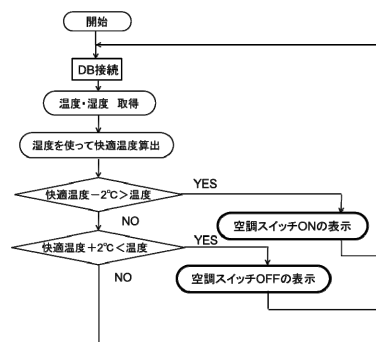


図7 室内環境画面表示フローチャート(冬)

している。

算出された快適温度の±2度を快適範囲とする。室内温度が快適温度を2度下回った場合、夏は空調スイッチOFFを、冬は空調スイッチONを表示する。2度上回った場合、夏は空調スイッチONを、冬は空調スイッチOFFを表示する。

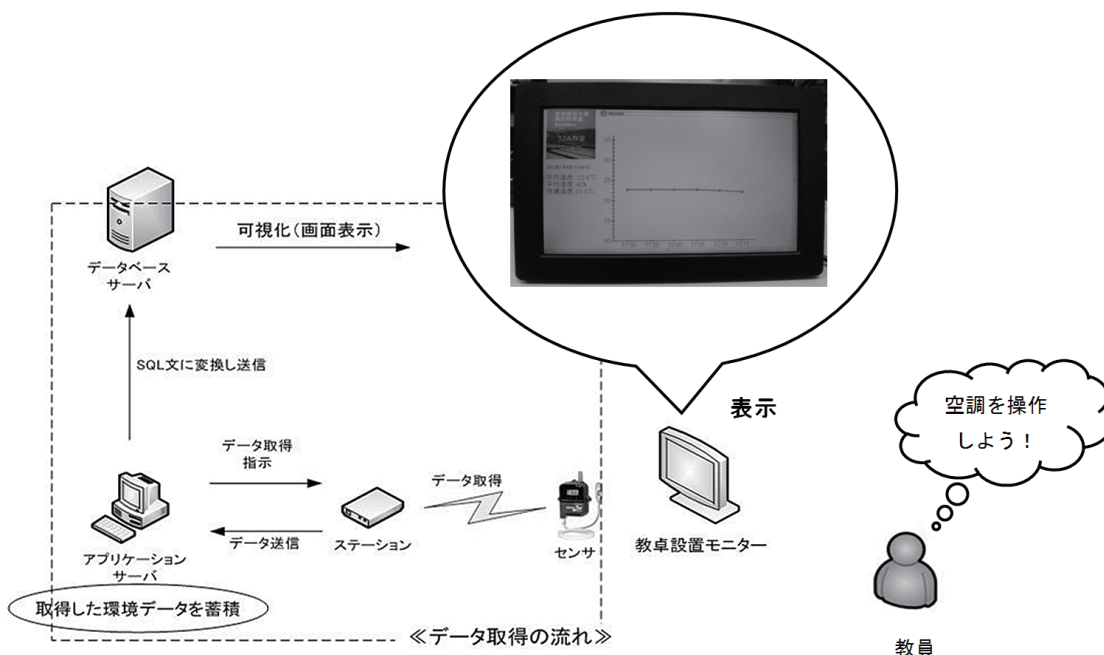


図5 データ取得の流れと教卓設置モニターの利用の流れ

5.3 グラフ表示の流れ

データベースに接続して、グラフを表示するまでの流れを説明する。システムの流れをアクティビティ図で図8に示す。使用言語は主に PHP と JavaScript である。PHP ではデータベースに接続し、温度と湿度を取得する。取得した湿度から快適温度を算出し平均温度、平均湿度、快適温度を表示する。その後 JavaScript で座標と時間を表示する。そして、画像の準備や画像の座標移動を行うための準備を行い取得した平均温度に対応する座標に画像を表示する。300秒後再びこのシステムを動作させる。

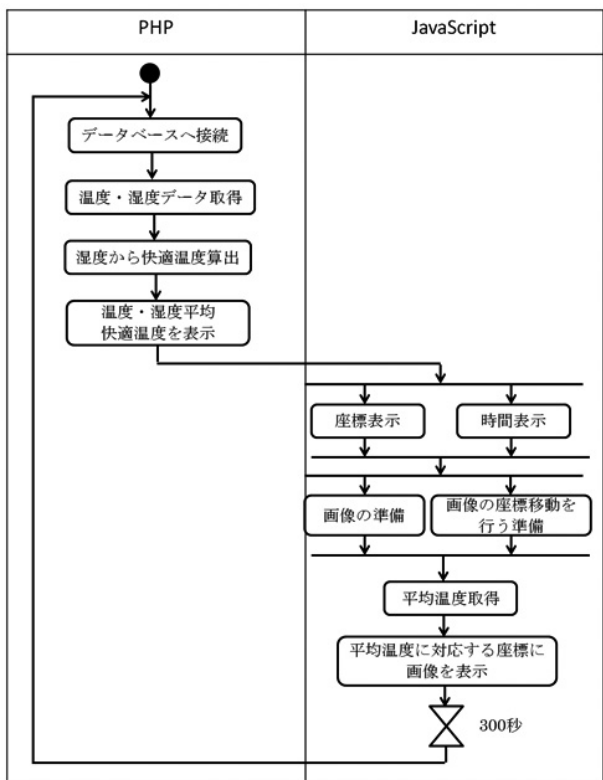


図8 グラフ表示のアクティビティ図

32A 教室教卓設置モニター画面表示を図9に、32A 教室教卓設置モニター設置写真を図10に示す。平均温度、平均湿度、快適温度を表示し、教室内の平均温度を折れ線グラフで表示した。6分割表示では空調の操作方法が分からなかったが、今回6か所の平均温度をグラフ化し、空調の操作方法(空調のON/OFF指示)を表示させたため、一目で教室の状況と空調の操作方法が分かるようにできた。この画面に表示される教室内のデータをもとに講義を行う教員が、正しいタイミングで空調操作を行うことが可能となった。

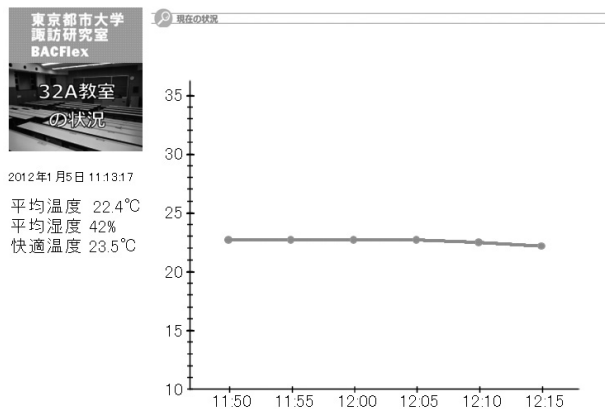


図9 32A 教室教卓設置モニター画面表示

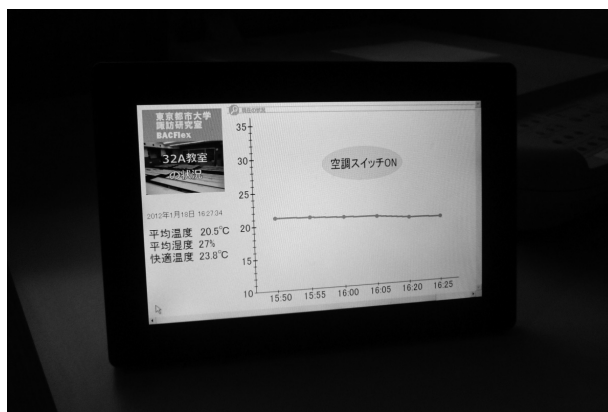


図10 32A 教室教卓設置モニター写真

6 空調機器の消費電力量の削減

6.1 実験内容

大教室での空調操作は場所によって効き方が異なったりするため難しい。また、学生がどのように感じ、どのように空調を操作してほしいと思っているのか教員はわからず授業を中断し生徒の意見を聞き空調を操作する場面を見かけることがある。

このように、教室環境を把握し、授業を中断しなくても空調操作ができるよう常に教室環境を空調環境可視化システムによって監視し、分析を行い、どのように空調操作をするべきかを明らかにする。

実験は2011年6～7月、10～12月に行った。6、7、10月は空調が冷房だったため夏季とし、11～12月は空調が暖房だったため冬季とする。

6.2 空調制御方法

昨年度の卒業生である綾部櫻子氏と著者の一人の鳥山詩織氏の研究結果で算出された快適温度を参考に同じ研究室の3名(鳥山、石渡、村松)により空調の制御方法を明らかにした。フローチャート内で使用されている「T」は温度(Temperature)である。今回、フローチャート内で

使用している 25℃とは昨年度の綾部櫻子氏と鳥山詩織氏の研究で行ったアンケートをもとに算出した快適温度である。次に温度が 27℃以上や 23℃以下で判断している理由として、快適温度が 2℃前後以内であることが許容範囲とされているため、2℃以上の差があるかないかで判断を行っている。制御を行う教室は 32A 教室、FEIS ホールであり、夏季と冬季で分け、図 11、図 12、図 13、図 14 に示す。

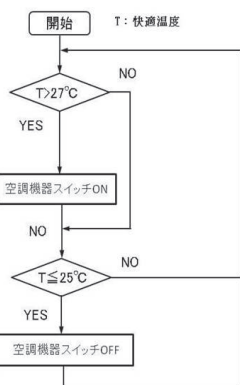


図 11 32A 教室夏季の空調制御フロー

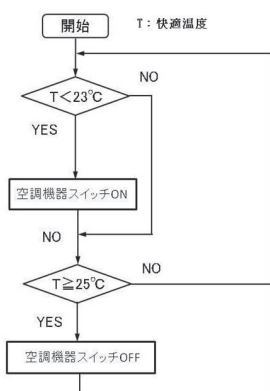


図 12 32A 教室冬季の空調制御フロー

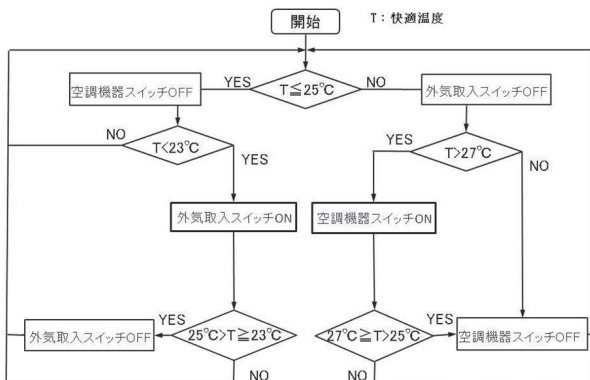


図 13 FEIS ホール夏季の空調制御フロー

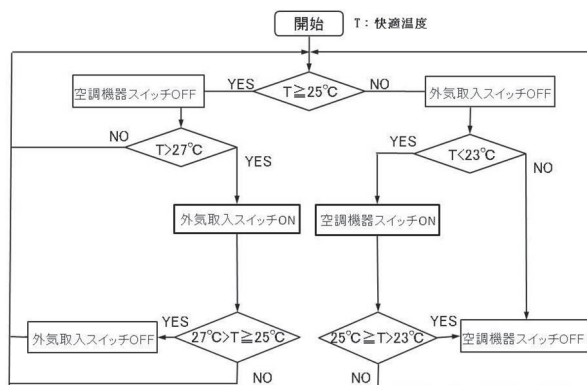


図 14 FEIS ホール冬季の空調制御フロー

6. 3 消費電力削減効果

図 15 は 32A の教室温度(夏季)と図 16 は 32A 教室空調機器消費電力量(夏季)を示す。快適温度範囲内のときは空調を ON にし、範囲外の場合は空調を OFF にすることで電力量を削減することができた。32A 教室の夏季の空調は効きやすく大幅に削減することができた。空調制御のあるときと無いときを比較すると最大で 48%の消費電力量の削減を実現した。

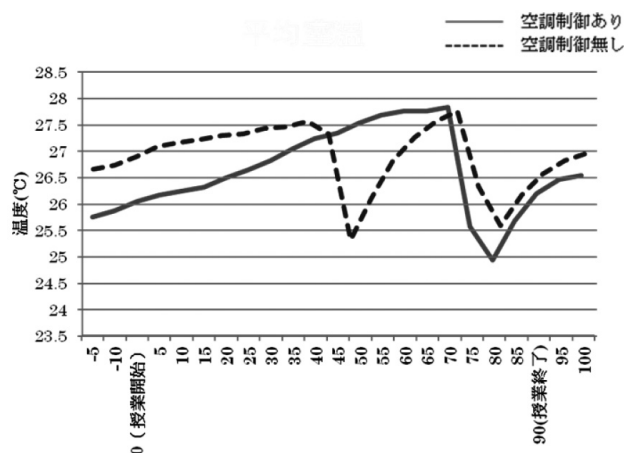


図 15 32A 教室温度(夏季)

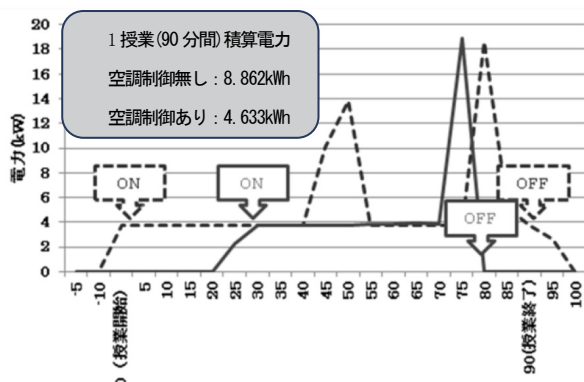


図 16 32A 教室空調機器消費電力量(夏季)

図17は32A教室温度(冬季)を図18は32A教室空調機器消費電力量(冬季)を示す。

授業開始時に快適温度範囲内でないため空調をONにし、温度が快適温度内になったときに空調をOFFにすることで電力量を削減することができた。空調を制御する前には、温度が上昇しないにも関わらず空調をONのままにしていたのでその分電力を削減することができた。空調の制御があるときと無いときを比較すると32A冬季は最大で約28%の消費電力量の削減を実現した。

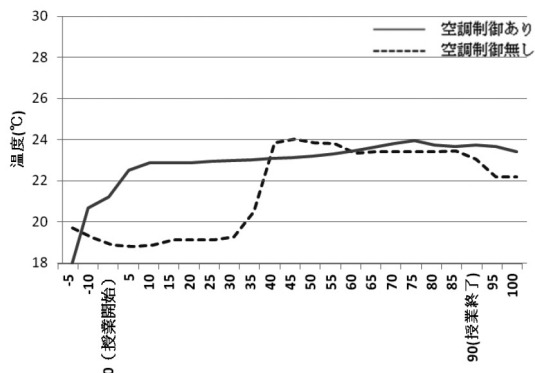


図17 32A教室温度(冬季)

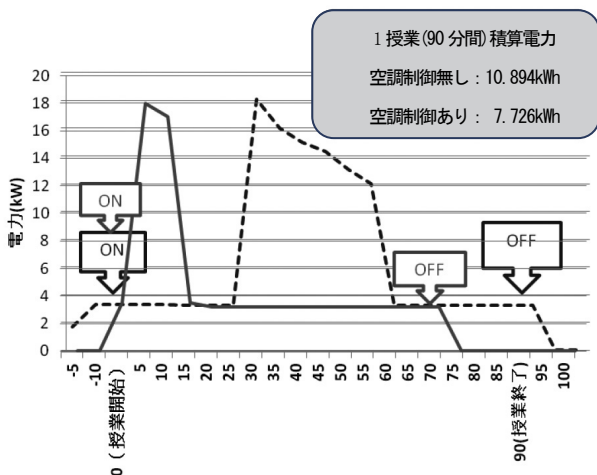


図18 32A教室空調機器消費電力量(冬季)

図19はFEISホール温度(夏季)を図20はFEISホール空調機器消費電力(夏季)を示す。授業開始時は快適温度範囲内であったため空調はOFFにし、27°C前後まで温度が上昇したため空調をONにした。FEISホールの夏季の空調は効きにくいいため、空調をONにしてもあまり温度は低下せず27°C前後であったため授業終了時に空調をOFFにした。27°C前後まで温度が上昇するまで空調をOFFにすることでその分の電力を消費しないので電力の削減につなげることができた。空調の制御があるときと無いときを比較するとFEISホール夏季は最大で約27%の消費電力量の削減を実現した。

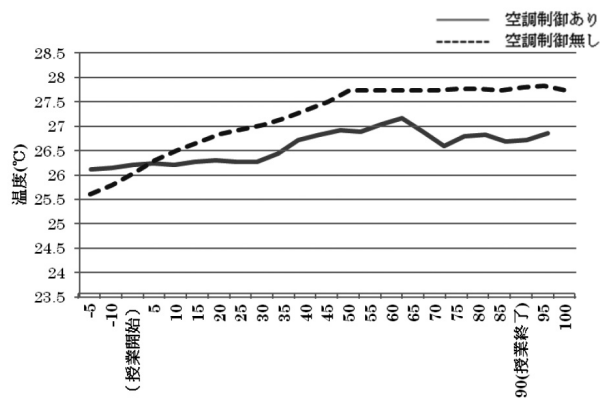


図19 FEISホール温度(夏季)

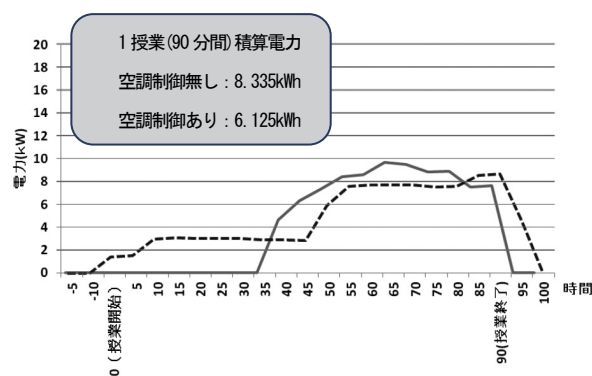


図20 FEISホール空調機器消費電力量(夏季)

図21はFEISホール温度(冬季)を図22はFEISホールの空調機器消費電力(冬季)を示す。

授業開始時、快適温度範囲外であるので空調をONにしFEISホールの冬季の空調は効きやすいため約30分で温度は上昇したため空調をOFFにした。温度が上昇した後、空調をOFFにしたこと、またFEISホールの冬季の空調が効きやすかったため大幅な電力の削減につなげることができた。空調の制御があるときと無いときを比較するとFEISホール冬季は最大で約57%の消費電力量の削減を実現した。

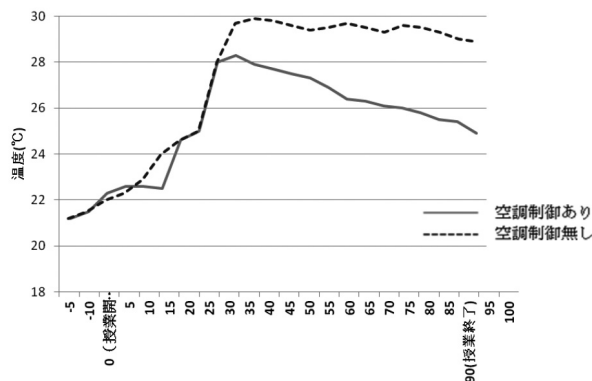


図21 FEISホール温度(冬季)

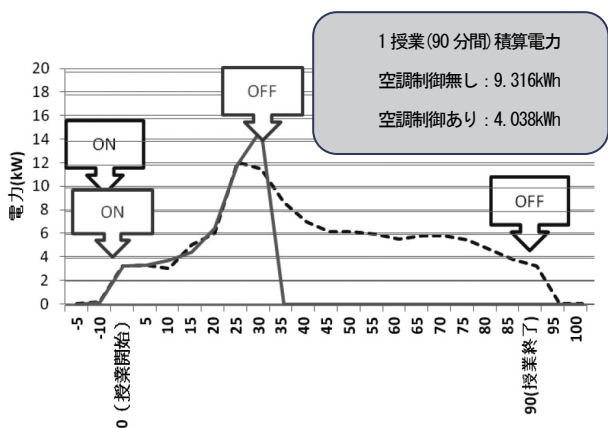


図 22 FEIS ホール教室空調機器消費電力量(冬季)

図 23 は教室・季節ごとの積算電力の比較である。

32A 教室は夏季の空調は効きやすく、冬季の空調も効きやすい。一方、FEIS ホールは夏季の空調は効きにくく、冬季の空調は効きやすいなど教室ごとに空調の運転状況は異なり、この空調の運転状況と快適温度を考慮し空調を操作することにより図 23 のように削減を実現した。

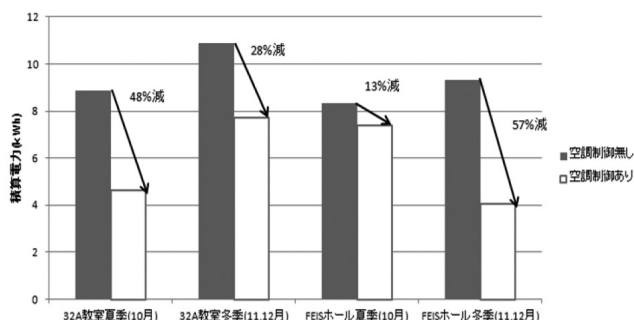


図 23 教室・季節ごとの積算電力比較

7 おわりに

7.1 まとめ

従来の快適温度は 23℃～27℃であったが、本研究で湿度を考慮した教室内の快適温度を算出する式を 6 月と 10 月のデータをもとに導くことができた。

6 月は「 $\text{快適温度} = (13.0845 - 0.049214 \times \text{湿度} + 4) / 0.539422$ 」である。

10 月は「 $\text{快適温度} = (4.24852 - 0.007098 \times \text{湿度} + 4) / 0.337875$ 」である。

快適温度は、平均湿度を代入し求めた結果、6 月が湿度 66% のとき 25.6℃=26℃であり、10 月は湿度が 44% のとき 23.4℃=23℃である。許容範囲のプラスマイナス 2℃を考慮すると、6 月は 26℃±2℃ (=24℃～28℃) , 10 月は 23℃±2℃ (=21℃～25℃) が快適範囲である。

快適範囲に 2℃差があるが、湿度の平均に差がみられたためである。

求められた快適温度をもとに、大教室の空調環境改善のために空調を操作するタイミングを指示する表示画面を作成した。利用者が混乱しないよう、室内の平均温度グラフと空調の操作 (ON/OFF) 方法のシンプルで分かり易い画面表示を意識した。室内の湿度を考慮した快適温度を利用しているため、四季において変化する湿度に対応した表示画面を作成することができた。この結果から、図 23 にあるように最大で 32A 教室夏季は 48%、32A 教室冬季は 28%、FEIS ホール夏季は 27%、FEIS ホール冬季は 57% の空調機器の消費電力量の削減を実現した。図 24 と図 25 のアンケート結果の比較から、空調制御により寒い、涼しい、やや涼しいを申告した学生は 9% 減少した。空調の効き過ぎが解消され教室内が快適な環境に近づいたといえる。

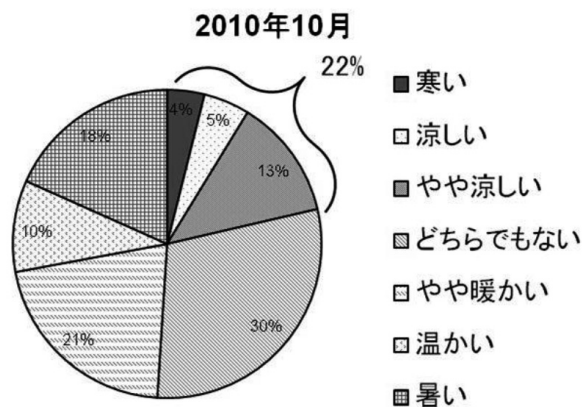


図 24 アンケート結果 (空調制御なし)

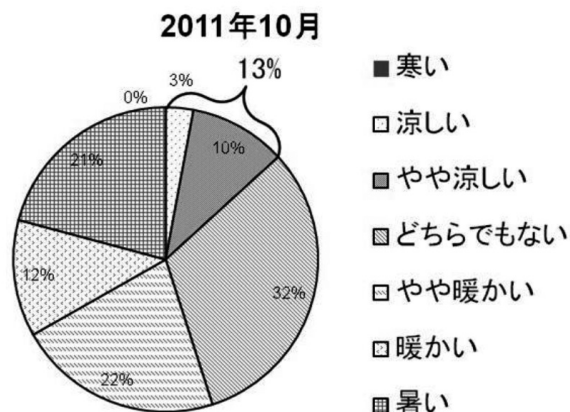


図 25 アンケート結果 (空調制御あり)

謝辞

本研究を進めるにあたり、空調環境システムについて教えてくださった東京都市大学環境情報学部諏訪研究室平成22年度卒業生の綾部櫻子氏、遠藤幸次氏、森口英喜氏、平成21年度卒業生の坂倉正浩氏、田原淳平氏、画面作成のためのプログラミングの指導をいただいた小野澤清人氏、建築環境工学の分野からサポートしていただいた東京都市大学環境情報学部環境情報学科准教授のH.B. リジャル先生に心よりお礼の言葉を申し上げます。

本研究は、平成22年度科学研究費補助金基盤研究(C)の助成金に基づいて実施された。

参考文献

- [1] JCCA 全国地球温暖化防止活動推進センター
<http://www.jcca.org/>
- [2] 坂倉正浩, 空調環境可視化システムにおけるネットワーク構築とWeb表示, 東京都市大学環境情報学部諏訪研究室, 平成21年度卒業論文, 2009年
- [3] 田原淳平, 空調環境可視化システムにおける環境データ計測プログラムとデータベースサーバの構築, 東京都市大学環境情報学部諏訪研究室, 平成21年度卒業論文, 2009年
- [4] 綾部櫻子, 大教室の空調環境改善と環境データ可視化画面作成, 平成22年度東京都市大学環境情報学部諏訪研究室卒業論文, 2010.3
- [5] H.B. リジャル, 吉田治典, 梅宮典子, 住宅におけるネパール人の夏と冬の温熱感覚, 日本建築学会計画系論文集第565号, 1997.12