

論文

大学キャンパスにおける 空調機器自動制御システムの構築

市川 直樹 坂倉 正浩 田原 淳平 福田 拓磨 諏訪 敬祐

今日、人口の増大や産業活動の急速な拡大に伴い大量の二酸化炭素が排出されており、その中でも空調によるエネルギー消費量は大きな割合を占めている。横浜キャンパスのFEIS ホールでは、教室の構造、人の分布状況などが原因となり、教室内の温度差が発生し、快適性が損なわれているという課題がある。そこで一般ビル用の省エネ空調機器自動制御システムである BACflex システムを FEIS ホールに適用することで上記のような問題点の改善、また無駄なエネルギーの消費を抑えることを研究の目的とする。本研究では、BACflex システムのネットワーク基盤の構築及び温度データの取得を行い、現在の FEIS ホールにおける空調環境の課題を明らかにした。また、このシステムを利用して省エネの環境意識を高めるための提案を行っている。

キーワード：FEIS ホール、空調機器自動制御システム、BACflex システム、M-SYSTEM

1 はじめに

1.1 研究の背景

今日、私たち人間の地球規模の活動に伴う化石燃料の消費および森林破壊などが地球における CO2 濃度を急速に増加させている。CO2 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。また、温室効果ガスの中で最も大きな排出量を占めているのは CO2 である。つまり、現在の地球にとって、この CO2 排出量を減少させることが重要な課題となっている。

部門別 CO2 排出量では、産業や運輸部門では低減傾向にあるが、民生家庭・業務部門では、漸増傾向にある。また、民生業務部門のエネルギー消費量構成においては、空調エネルギーが 40%~50% 程度の比率を占めていることから空調エネルギー消費量の削減が重要になってきている。

横浜キャンパス FEIS ホールの空調運転状況は、教室の構造や人の分布状況などによって、同じ教室内でもステ

BACflex.GCR計測制御ネットワークのトポロジーと必要機材

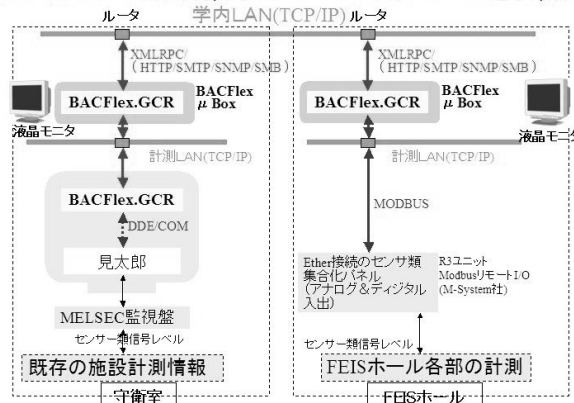


図1 BACflex システムのネットワーク接続例

ージに近い前部と出入り口のある後部ではかなりの温度差がある。特に、後部は場合により人が密集するため、かなり温度が高くなり、勉強をする環境としては集中できる環境とは言い難い。このような問題を解決するために、株式会社山武から提供された、空調機器自動制御システム BACflex のプラットフォームおよびソフトウェアを大学キャンパス内に取り入れて、現在の FEIS ホールの空調運転状況を見直し、また省エネルギー化ができないかを検討した。図1にネットワーク接続例を示す。

本研究では、図1右側部分の FEIS ホールにおけるネットワーク構築を行う。図1左側部分は横浜キャンパス1号館守衛室におけるネットワーク構成である。守衛室は、キャンパス全体の空調機器のデータ管理（電力量などを監視）を行う機器を設置している部屋で、将来的にはここにも BACflex システムを導入し、学内の省エネシステ

ICHIKAWA Naoki
 武蔵工業大学 環境情報学部 情報メディア学科 2008 年度卒業生
 SAKAKURA Masahiro
 東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 4 年生
 TAHARA Junpei
 東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 4 年生
 FUKUDA Takuma
 東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 4 年生
 SUWA Keisuke
 東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 教授

ムの研究を行う予定である。

1. 2 研究の目的

本研究では、BACFlex システムの基礎となるネットワーク基盤の構築及び、今後の FEIS ホールにおける省エネと環境教育の啓発に貢献できる空調システムの提案を行う。

今回は、図1に示したネットワークトポロジーの右側部分である FEIS ホールを中心に実験を行う。実験により FEIS ホールにおける温度分布のデータを取得する。また、学生の環境意識の向上を図る方法について提案する。

2 空調機器自動制御システム (BACFlex システム)

2. 1 BACFlex の概要

BACFlex とは the Building Automation & Control Flexible platform の略語で、汎用性の高いビル空調機器自動制御プラットフォームのことである。

BACFlex は、ネットワークを介してビルエネルギー管理システム BEMS (Building and Energy Management System) のあらゆる応用ソフトウェアとフィールドの計測機器を連携して、システムを稼働させる。また、BEMS の応用ソフトウェア同士もネットワークを介して連携し、システム走行させる。このようなシステムの枠組みが 2. 3 で説明する BACFlex のタスクモデルである。

これらの BACFlex のタスクモデルを組み込んだコンピュータをネットワーク接続し、システム稼働させる効果的な計算装置の例を図2、図3に示す。



図2 πBox 前面図



図3 πBox 背面図

図2、図3の BACFlex の計算装置をπBox と呼ぶ。これは低コスト型で、通常の I/O コントローラの数 1000 倍の体感能力を持っており、汎用の PC プロセッサベースでディスクレス構成になっている。また、πBox は、IP ネットワークの同一ドメイン、及び、異なるドメインを跨ぎ、複数の計算網を構成する。この計算網は、相互に連携し、並走するシステムになっている。

BACFlex は、誰でも使えて、誰でも創れる BEMS を実現することで、BEMS の新しい共通プラットフォームとなる汎

用的な枠組みとして開発された。この枠組みにより、様々な企業で開発された制御や運用のプログラムを、既存の BAS や ACS と BEMS 上で容易に連携動作させ、制御や運用の最適化を可能とした。また、計算負荷が大きい最適化制御アプリケーションを BEMS 上でそのまま動作できるようにした。

2. 2 BACFlex のシステム構成

図4に BACFlex のシステム構成を示す。



図4 BACFlex システム構成

システム機能は、BACFlex コントローラ単位に区分され、USER (Universal System for the Environmental Resolving: TRNSYS や GAMS シミュレーションなどの大規模アプリケーションの実行)、FAST (Field Acquisition Service Task: 各種制御、運転支援情報の受け渡し)、NAC (Network Adaptive Controller: 運転支援、VAV ネットワーク制御等の各種制御プログラムの作成と実行)、ICE (I-CONT Emulator: 実存 BEMS と同じ仮想 BEMS をつくり、各種プログラムの現場適用前・後の動作確認と評価を行う) から構成され、BACnet (BEMS の標準オープンプロトコル) や INTRANet に接続される。

2. 3 BACFlex のタスクモデル

BACFlex のタスクモデルは、いつでも、どこでも、だれにでも使えて、BEMS のネットワークにプラグインする形で利用できる。建物運用時の CO2 削減と省エネのために、システム最適化・統合化を行おうとする様々なソフトウェアを、BEMS の新しいタスクとして自由に組み込む。

システムの劣化したタスクは、より新しいタスクへ自由に交換することができる。このシステムの枠組みを、ネットワークを介して供給する。

BACFlex のタスクモデルでの連携通信機能は、BEMS のフィールドの外側から、ネットワーク経由で、BEMS フィールドの内側にある計測機器や設備にアクセスする。計画目標から、それらの機器や設備に対して、ネットワーク経由で制御を行うシステム構造となっている。図5に BACFlex のタスクモデルを示す。

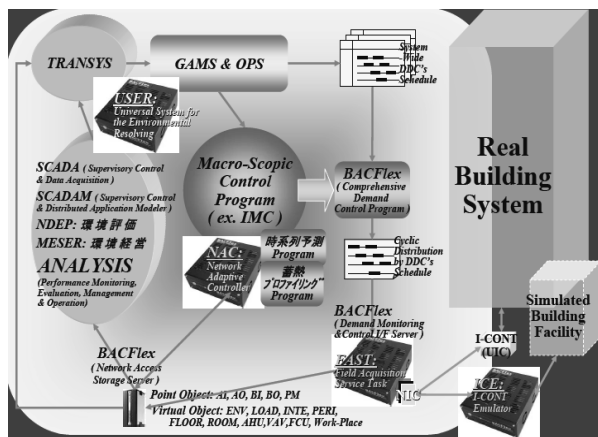


図5 BACFlex のタスクモデル

図5では、様々なアプリケーションプログラムが、 π Box を用いて実装されている。最適化制御プログラムや分析プログラムの計算結果は、BACFlex のネットワークを介した連携通信機能によって BEMS オープンプロトコルを経由して空調コントローラに接続され、制御や運転に使われる。

3 M-SYSTEM リモート I/O 機器とセンサ

3.1 M-SYSTEM リモート I/O 機器

リモート I/O はセンサのデータを変換する機器である。また、さまざまな場所で複数の PC でセンサのデータを見たいというときに、PC まで配線をしようとする、何本も配線を行わねばならない。また、配線工事費が増大する。センサの信号線をこの M-SYSTEM リモート I/O 機器に一括して接続し、LAN とネットワーク接続することで、Ethernet に接続した PC はどこにいてもデータを見ることができるようになる。今回の実験では、温度データの取得を行うために M-SYSTEM のリモート I/O 機器 R3 シリーズを使用する。R3 シリーズは、フィールドの測定点数が多く、かつ分散化されたアプリケーションに適した組み合わせが自由（多チャンネル）な、リモート I/O 機器

である。図6に今回使用するリモート I/O 機器においてアナログ入力カード、通信カード、電源カードなどの各種カードを実装した様子を示す。



図6 M-SYSTEM リモート I/O 機器類の各種カードの実装の様子

3.2 温湿度センサ

使用するセンサは、図7のように電子式の室内型温度センサ、湿度センサである。センサの温度検出素子は Pt100 白金測温抵抗体を使用している。湿度検出素子は高分子容量式湿度検出素子を使用した高精度・高信頼度なセンサである。温度の計測範囲は 0~60 度、湿度は 0~100%RH (15~35 度) となっている。本研究では、温度センサだけを使用する。



図7 温湿度センサの概観

4 機器設置と設定

4.1 温度センサの設置

事前に、FEIS ホールと FEIS ホール機械室の間において、センサとリモート I/O を接続するためのケーブルを敷設した。また、FEIS ホール機械室の中に Ethernet 経由でデータを送受信するための Ethernet ケーブルを敷設した。

図8にFEISホールの温度センサ1～3の位置、図9に実際に構築したネットワーク構成を示す。機械室にはFEISホールの3つのセンサの信号線が配線されている。図8に示した数字は、センサから機械室にきている信号線に割り振ってある番号と一致する。FEISホールのステージ反対側の出入りに近い方のセンサから順番に1, 2, 3の番号を割り振った。

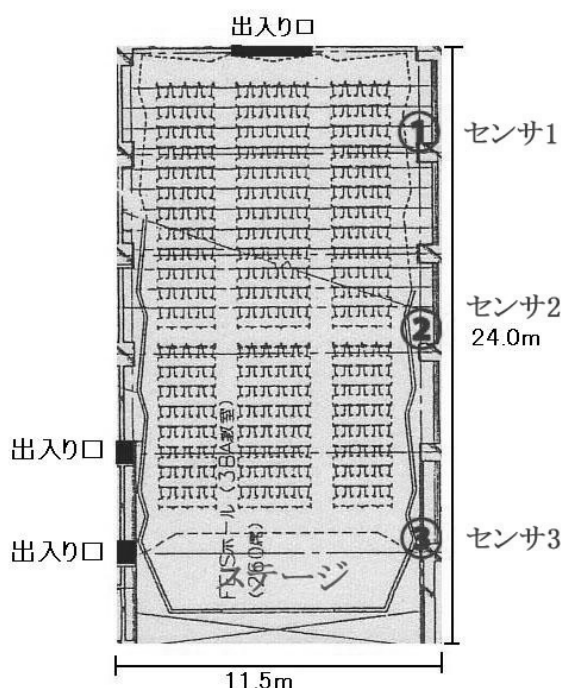


図8 FEISホールの温度センサ設置位置

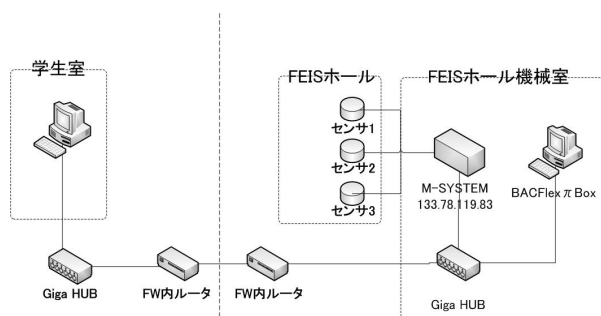


図9 ネットワーク構成

5 プログラム構成

5.1 使用言語

M-SYSTEM 機器のデータ取得を行うためのプログラム言語には Python を使用した。Python とは、オブジェクト指向スクリプト言語である。文字列、リスト、タプル、ディクショナリといった高水準のデータ型や、オブジェクト指向機能、モジュール機能、例外処理など高度な機能をサポートしている。

5.2 Modbus/TCP プロトコルの概要

本研究では、M-SYSTEM 機器と通信を行うために、Modbus/TCP プロトコルを使用する。Modbus/TCP は、Modbus プロトコルを TCP/IP に拡張したプロトコルである。TCP/IP を使用しているため、インターネット環境でもメッセージのやりとりができる。Modbus/TCP では、クライアント・サーバモデルで通信を行う。また、複数クライアント、複数サーバのサポートが可能である。TCP 経由で Modbus/TCP 通信を行う場合は、ポート番号が決まっており、ポート番号 502 を使用することになっている。

5.3 プログラム内容

サンプルプログラムの「modbus_client.py」は、M-SYSTEM 機器との通信を行い、センサデータを取得するプログラムとなっている。プログラム内の関数「ReadInputRegistersRequest(address=0, count=3)」は、「count=3」の部分で3つのセンサデータを読み込んでいる。また、変数「res.registers」に温度データを格納している。この変数を画面表示することで、温度データを表示する。

サンプルプログラム「modbus_client.py」は、温度データを 10 秒ごとにコマンドプロンプト上に表示するだけなので、改良を行った。具体的には、現在の時刻の取得、センサデータをログファイルとして csv 形式で保存、ログファイルのグラフ化の機能を追加した。

現在の時刻情報を取得することで、何時の時点のデータかを把握することができる。「datetime」モジュールをインポートし、現在の時刻の取得を行っている。

csv ファイルの作成は、関数 MAKECSV を作成し、取得したデータを出力として csv ファイルに保存するようにした。これにより、プログラムを起動しているだけで、自動的にログが記録される。

6 実験結果・考察

6.1 Ethernet 経由でのセンサデータの表示

Ethernet 経由で FEIS ホールに取り付けた温度センサのデータを取得する。プログラムを起動すると、図 10

の画面が表示される。FEIS ホールにおける時刻と温度センサの3つの値が表示されていることがわかる。図10の最後の行の数値は4桁で表示されているが、これを1/100した値が温度である。

```
DEBUG:modbus.library:Running transaction 63
#####
# 2009年1月8日 13時29分現在のFEISホールの温度
#####
DEBUG:modbus.library:Running transaction 64
input registers: [2023, 2110, 2056]
```

図10 センサデータの表示画面

次に、授業があった2009年1月13日火曜日の温度データを24時間計測したグラフを図11に示す。表1にはデータを取得した日の授業の時間割を示す。

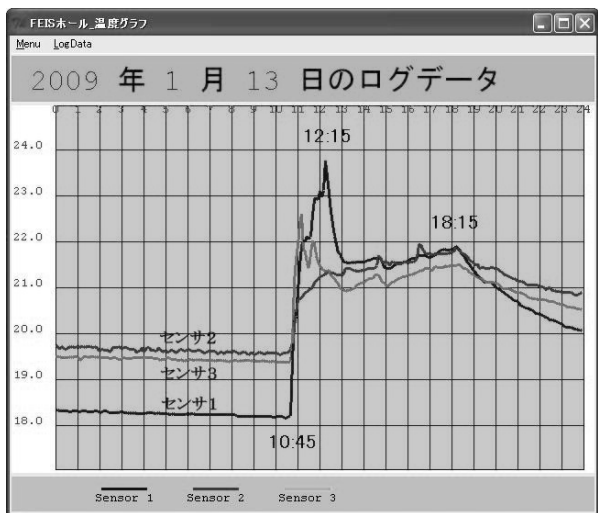


図11 温度グラフ（授業有り）

表1 2009年1月13日（火）の授業時間割

	授業科目
1時限 (9:00~10:30)	
2時限 (10:45~12:15)	生態系アセスメント
3時限 (13:15~14:45)	コンピュータシステム
4時限 (15:00~16:30)	コンピュータシステム
5時限 (16:45~18:15)	法と市民

図11より、授業が始まる前の温度データは3つとも20度以下と、ほぼ一定の温度推移を保っており、その中でもセンサ1が18度台と一番温度が低かった。そして、授業が始まった10時45分あたりから温度が急激に高くなっており、授業が終わった12時15分あたりから温度が下がっている。その後も、授業が5時限まで続き、授業がすべて終わった18時15分頃からは、徐々に温度が下がっている。

次に、授業がない日の温度データのグラフを図12に示す。

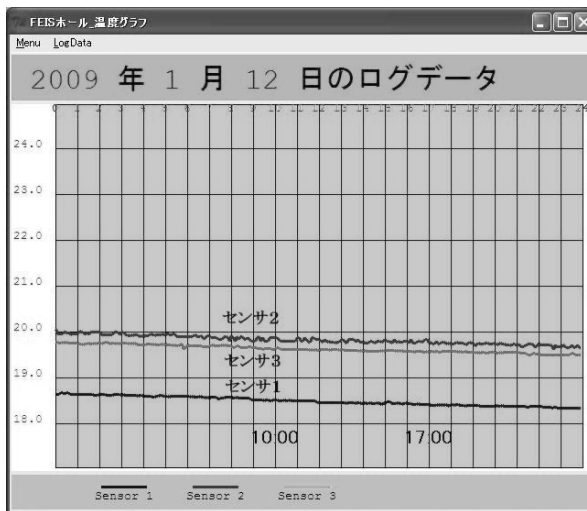


図12 温度グラフ（授業無し）

図12からセンサ2のデータが常に一番温度が高くなっており、センサの3つとも20度以下を保っている。また、センサ1は3つのセンサの中で一番温度が低く、18度台を保っていた。温度変化は授業有りのグラフと比べ、ほとんど変化はなかった。

6.3 考察

図11の温度グラフ（授業有り）より、2時限（10:45～12:15）の授業が始まることによって、FEISホールの室内温度が高くなっていることがわかる。これは人が密集することと、空調のスイッチを入れることの2つの要因によって温度が上昇していると考えられる。また、授業が終了した18時15分に、急激に温度が下がっていることがわかる。これは、外気が室内に流入することによって、室内温度に影響を与えていると考えられる。データを取得した日が冬なので、外気温が低いことから、出入りに近いセンサ1は、授業が終わったと同時に温度の下げ幅が大きくなっている。

図12の温度グラフ（授業無し）より、センサ1は常に3つのセンサの中で温度が一番低いことがわかる。続いて、センサ3、センサ2と温度が高い。このことから、出入りに近いと、外気温の影響を受けやすいためセンサ1の温度が一番低くなっていると考えられる。次に図8の左側出入りに近いセンサ3が低く、センサ2は出入り口から一番距離があるため外気温の影響を受けにくいと考えられる。また、授業無しのグラフは、授業有りのグラフと比べると、温度変化がほとんどない。これは、人の出入りや空調の入切りが無いためである。

これらの結果と考察から、FEISホールの室内温度変化の要因となっているものは、

- ・人が密集することによる室内温度の上昇
- ・空調のスイッチの入切りによる室内温度の変化
- ・外気の流入（扉の開放）、遮断（扉の閉鎖）による室内温度の変化と考えられる。

以上のことから、温度が一定以上になったらディスプレイ上に表示を行うことで、快適な状態を保つようにすることが提案される。具体的には、平均温度が高くなったら、空調をいれるように指示したり、温度の低い区域を表示して移動してもらうようにしたりする。このような表示を行うことによって、FEIS ホールの運転状況を見直すことができ、一人一人が環境に対する意識を高められるようになる。

7 おわりに

7.1 まとめ

本研究では、FEIS ホールにおいて、FEIS ホール内と機械室間の配線、温度センサの新規の設置及び M-SYSTEM の設置等やデバイス類の設置・設定により大学キャンパス内の空調機器自動制御システムの構築を進めることができた。また、サンプルプログラムを元にプログラミングを行い、新規に設置したセンサのデータを Ethernet 経由で取得することができた。

温度データの取得により、現在の FEIS ホールにおける温度の推移を観測することができた。データ取得の結果から、FEIS ホールの温度変化に影響を与える要因として、人が密集することによる室内温度の上昇、空調のスイッチの入切りによる室内温度の変化、外気の流入、遮断による室内温度の変化の3つが明らかになった。今後は、これらの要因を考慮し、システムの構築を進めることで、FEIS ホールにおける空調システムの省エネ化と快適性の向上を実現していく予定である。

7.2 今後の課題

本研究では、FEIS ホールの温度データは一定期間しか取得できなかった。正確なデータを集計するためには、長い期間をかけてデータを取得しなければならない。また、FEIS ホールにおける人の分布が、温度にどのような影響を与えているのかを詳しく調べる必要がある。今後は、長期間、データの収集を行い、その結果から FEIS ホールにおける空調の問題点を詳細に明らかにしていくことが望まれる。また、本研究では、温度センサを3箇所しか設置しなかったが、湿度センサを新規に設置することで、温度と湿度から不快指数を計算することができる。そして不快指数の計算結果や室内温度を表示し、この表示を見て学生がスイッチを入切りすることで、教室内の快適な環境を保つようなシステムの構築が可能である。

また、ディスプレイで部屋の温度分布の表示を行うことで、温度が高い場所に人が密集しないように喚起したり、現在の空調使用によって消費されている CO₂ 量の表示を行ったりすることで、学生の環境意識が高められるようになる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導をいただいた国立環境研究所の杵嶋修三氏、知識工学部熊谷敏教授に心より御礼の言葉を申し上げます。また、FEIS ホール、機械室においての作業に協力してくださった総務課佐々木暢俊係長、奥田和也氏、コアセンターの大野昭彦氏にも深い感謝の意を表します。また、知識工学部熊谷研究室の及川孝太氏、中川謙一氏、福重由美氏に深謝します。

参考文献

- [1] 神村一幸, 杵嶋修三, 藤沼康実, 吉田友紀子, 内海康雄, BEMS(ビルエネルギーマネジメントシステム)導入による省エネの可能性, シンポジウム「建築から見た今後の温暖化対策シナリオとは?」, pp. 48-51, 2007. 03
- [2] 神村一幸, 杵嶋修三, 平卯太郎, 内海康雄, 吉田友紀子, 藤沼康実, CO₂ 排出量削減のための空調機器の自動制御システム開発に関する研究(第8報) 開発した新しいBEMSの概要, 平成19年度空気調和・衛生工学会大会学術講演会講演論文集, pp. 617-620, 2007. 09
- [3] 杵嶋修三, 神村一幸, 内海康雄, 吉田友紀子, 藤沼康実, CO₂ 排出量削減のための空調機器の自動制御システム開発に関する研究(第10報) BACFlexについて, 平成19年度空気調和・衛生工学会大会学術講演会講演論文集, pp. 625-628, 2007. 09