

〔論文〕

恒温室内の温度・湿度同時制御における 省電力方法の検討

木村 優介*¹・白石 元*²・隈部 晃*²・平野 貞三*³

Consideration of electrical power saving for temperature
and humidity laboratory facility.

Yusuke KIMURA, Hajime SHIRAISHI, Akira KUMABE and Teizo HIRANO

Abstract

In recent years, air conditioning systems have made progress in the field of electrical power saving. On the other hand, specific systems like temperature and humidity coregulation control, have made little to no progress. This system mainly uses PID control in addition to an undercooling method.

First, we make a model based on the air conditioning driving data and confirm the simulation. Next, we confirm the electrical power savings by using fuzzy control.

Keywords : Constant temperature and humidity control, Power consumption prediction

1. 緒言

近年、一般空調機においては省電力化が進められている。しかし、環境実験室で求められる温度・湿度同時制御をおこなうような特殊なシステムにおいては、未だその効率化は進んでいない。現在の温度湿度同時制御系の空調機システムにおいて主流となっているのは過冷却+再熱PID制御である。この方法は世に出て約30年が経過してはいるが、現在でもほとんどの恒温恒湿制御で採用されている。今回、より効率のよい制御システムの開発のため、空調機運転時のデータを基に各モデルを作成し、シミュレーションによりその効果を確認した。また、過冷却によるエネルギーの消費量を減らすために冷凍機の出力を制御したところ、ある程度の省エネ化を確認できた。

2. 運転シミュレーション

2-1 空調機毎のオープン特性

温度制御シミュレーションを行うにあたり、各空調機（加熱機、冷凍機、加湿機、除湿機）の実機によるオープン特性試験を行った。Fig 1、Fig 2 に例として加熱機、冷凍機の実機運転における測定データを示す。各空調機の運転時における温度・湿度の変化およびその際の消費電力を測定した。

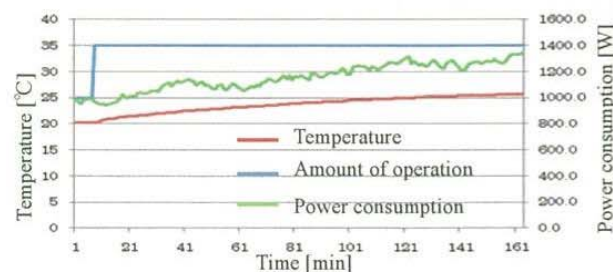


Fig. 1 Measurement data of heating

*¹ 大学院エネルギーシステム工学専攻
平成22年11月26日受理

*² 機械システム工学科

*³ 教育創造工学科

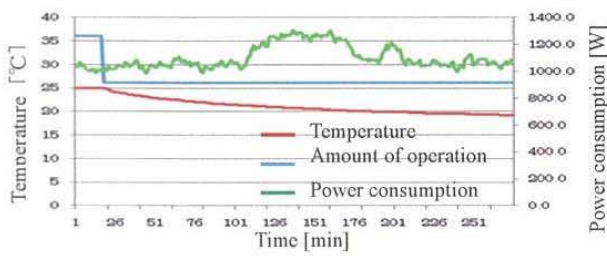


Fig. 2 Measurement data of cooling

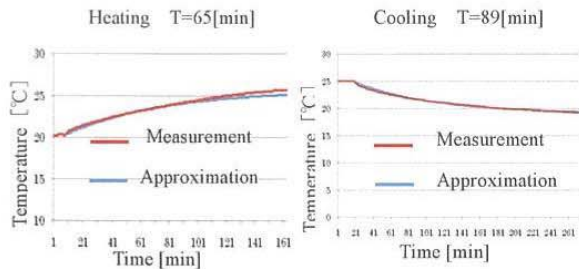


Fig. 3 Comparison of data between model and measurement (Temperature)

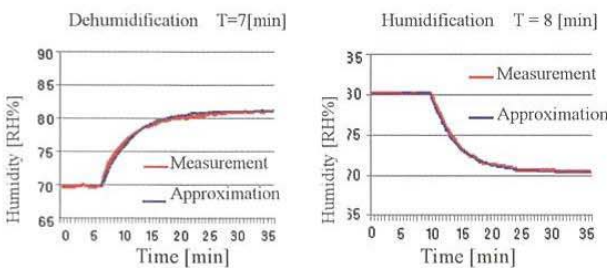


Fig. 4 Comparison of data between model and measurement (Humidity)

上記データを基に、式(1)にあるような一次遅れによるモデルを作成し、実データとの比較を行った。その結果を Fig 3、Fig 4 に示す。各グラフ内における T の値はそれぞれの時定数である。なお、今回の一時遅れにおける無駄時間要素は、全体の制定時間に対し微小なため使用していない。実データとの多少の誤差が見られるが、ほぼ一致しているように見られる。これらを制御対象の特性として利用可能だと思われる。

$$G(s) = \frac{1}{1 + T_s} \quad (1)$$

2-2 温度の PI、I-P 制御シミュレーション

前述のモデルをもとに、従来の空調機で使用されている PI 制御系および安定性が良いと言われている I-P 制御系のステップ入力に対する応答シミュレーションを行った。その際のブロック線図を

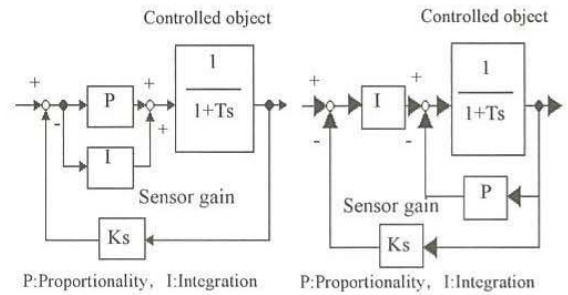


Fig. 5 PI block diagram

Fig. 6 I-P block diagram

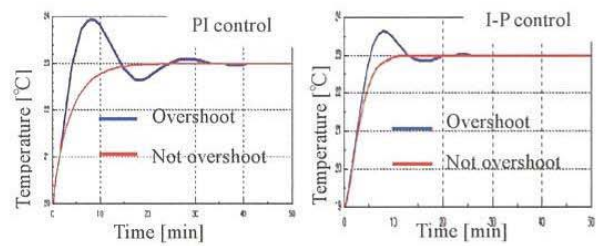


Fig. 7 Step response of PI and I-P control

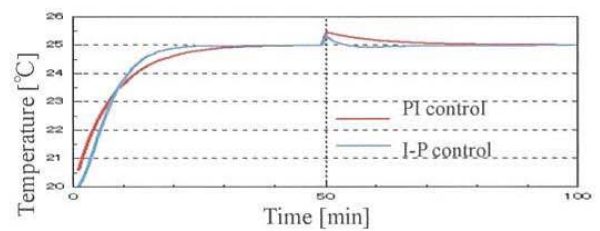


Fig. 8 The response to the disturbance of PI and I-P control

Fig. 5、Fig. 6 に示す。どちらも P (比例) および I (積分) の項が調整可能である。また、Controlled object 部には各空調機のモデルが入る。

しかし、温度上昇時と下降時で特製の異なる機器を使用するため、計算時には加熱と冷凍の2つの特性を切り替える必要があった。

Fig. 7 は2つの特性を切り替えながら行った温度の PI および I-P 制御シミュレーションの結果である。また Fig. 8 は、ほぼ同じ時間で安定するように調整した PI 制御、I-P 制御それぞれに対して外乱を与えた際の応答の比較である。シミュレーション開始後どちらもほぼ安定したところに外乱としてプラス0.5°Cの急激な温度変化を与えた。これらのシミュレーションから、I-P 制御の安定性や調整範囲の広さが確認できた。

2-3 相対湿度のシミュレーション

今回、湿度の表示はすべて相対湿度を用いている。

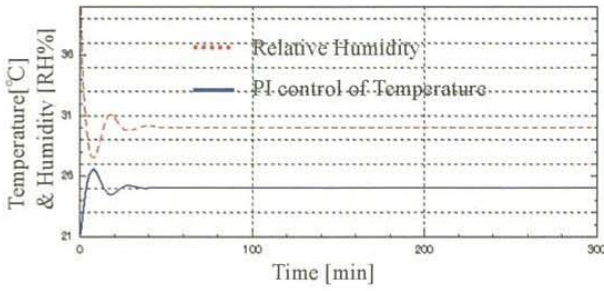


Fig. 9 Simulation of humidity

そのため温度の変化に伴い変化する。この変化を式(2)に示す近似式を用いて、次のような手順を用いて近似を行い、温度の制御シミュレーション時における湿度の相対的な変化を確認した。

$$a = 217 \times (E/Tk) \quad (2)$$

$$E = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T_c}{T_c + 237.3}}$$

a : Volumetric humidity[g/m³]

Tk : Temperature[K]

E : Saturated vapor pressure[hPa]

Tc : Temperature[°C]

計算手順

- ① 上式に初期気温を代入し飽和水蒸気量を求める。
- ② ①×初期湿度[RH%]で絶対湿度[%]を求める。
- ③ 変化後の気温を求め、式(2)より変化後の飽和水蒸気量を求める。
- ④ ②÷③より変化後の相対湿度の近似を求める。

上記方法を用いて、温度をPI制御により変化させた際の相対湿度の変化の近似を行った。そのグラフをFig. 9に示す。なお、空気中の絶対的な水蒸気量は増減しないものとしてシミュレーションを行っている。

2-4 消費電力の予測

各空調機(加熱機、冷凍機、加湿機、除湿機)の消費電力予測を、重回帰分析を用いて検討した。様々な要因の組み合わせを変えて検討した結果、式(3)~(6)にあるそれぞれの回帰式にて、もっとも有効な値を得た。この式において、 X_1 は現在の温度、 X_2 は湿度、 X_3 は機器への入力信号、 X_4 は測定時における外気温であり、これらから Y の消費電力の近似値を求める。Fig. 10~13に各空調機における実機運転時における消費電力の変化と回帰式による近似との比較を示す。なお、各グラフ内の R の値はそれぞれ

の相関係数を表している。

$$Y = 1021 + 43.26X_1 - 2.804X_3 - 30.34X_4 \quad (3)$$

X_1 : Temperature

X_3 : Amount of operations

X_4 : Outside temperature

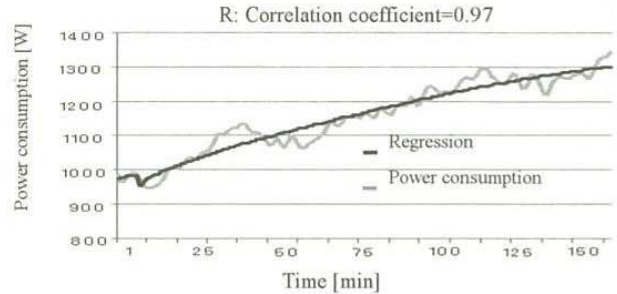


Fig. 10 Power consumption prediction (Heating)

$$Y = 7996 - 116.8X_1 + 10.84X_3 - 184.6X_4 \quad (3)$$

X_1 : Temperature

X_3 : Amount of operations

X_4 : Outside temperature

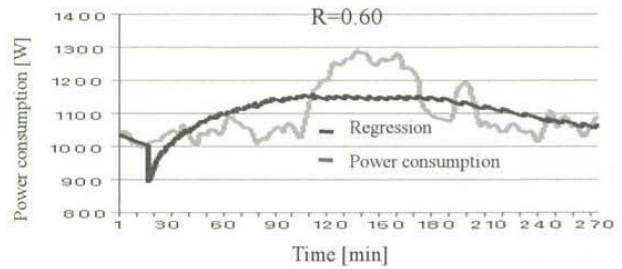


Fig. 11 Power consumption prediction (Cooling)

$$Y = 8268 - 281.0X_1 - 0.3151X_2 + 1.4331X_3 \quad (4)$$

X_1 : Temperature

X_2 : Humidity

X_3 : Amount of operations

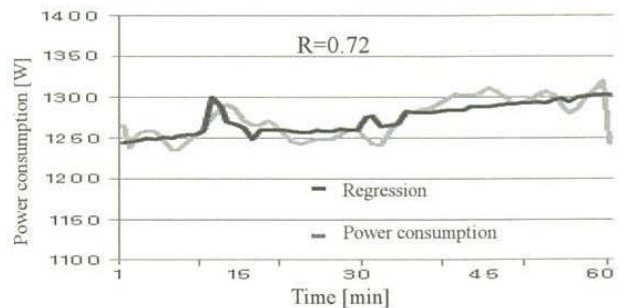


Fig. 12 Power consumption prediction (Humidification)

$$Y = 1821 - 38.15X_1 + 4.648X_2 + 0.7767X_3 \quad (5)$$

X_1 : Temperature
 X_2 : Humidity
 X_3 : Amount of operations

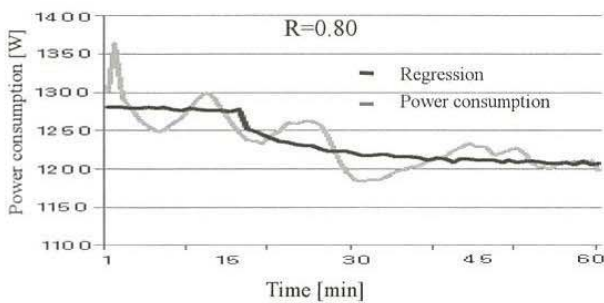


Fig. 13 Power consumption prediction (Dehumidification)

冷凍機の相関係数が $R=0.60$ とやや低い値となっている。それ以外は $R=0.7$ 以上となっており、ある程度の利用が可能であると思われる。

3. 冷却機の実出力制御による省電力化の検討

現在の空調機システムは温度の安定性を優先するために冷凍機を一定出力（通常は最大出力）に保った状態で運転を行っている。そこで、この冷凍機の実出力について、温度の安定性を保ちながら出力制御を行う方法を検討した。

今回は空調機の調整に携わっている熟練者の手動による出力制御とファジィ制御を用いた場合との比較も同時に行った。

Fig. 14 にファジィ制御を設計する上で使用するメンバーシップ関数の例を、Table. 1 にファジィル

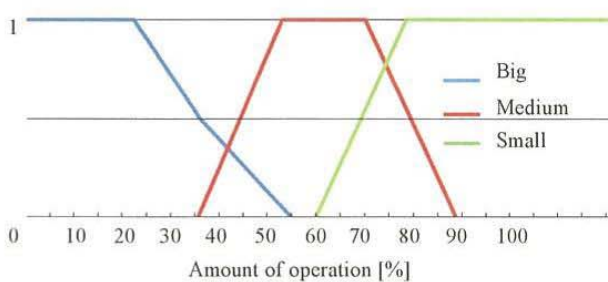


Fig. 14 Membership function (Example)

Table. 1 Example of rule

<p>If X_1 is Small and X_2 is Medium Then X_3 is Big</p> <p>X_1 : Heating X_2 : Cooling X_3 : Amount of operation</p>

ルの例を示す。なお、実際に使用するメンバーシップ関数やルールは、空調機の調整に携わっている熟練者の感覚を基に作成する。

ファジィ制御の設計について、今回は簡略推論法を使用した。

試作したメンバーシップ関数とルールを基にしたファジィ制御を作成した。このファジィ制御による冷却機の実出力制御と、熟練者が経験による制御を手動で行った際の消費電力とを比較した。ファジィ制御に関しては15~20分のサンプリング周期で制御を行っている。Fig. 15 にファジィ制御による冷凍機の実出力制御を行った際の消費電力および各機器の実出力の変化を、Fig. 16 に空調機の調整に携わっている熟練者が手動で制御を行った際の結果を示す。

ファジィ制御、手動ともに冷却機の実出力を低下させることで、同時にPI制御されている加熱機や加

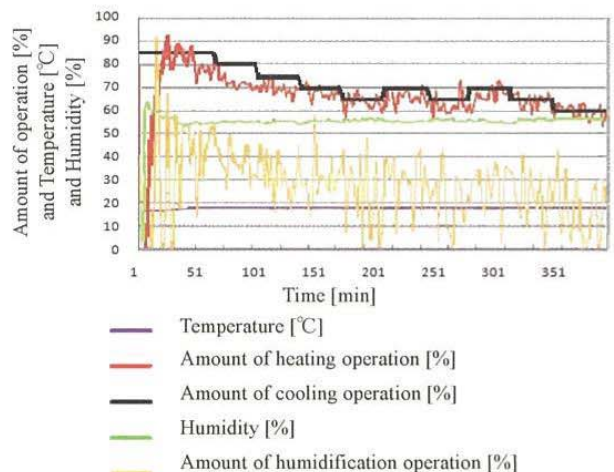


Fig. 15 Experiment result (Fuzzy control)

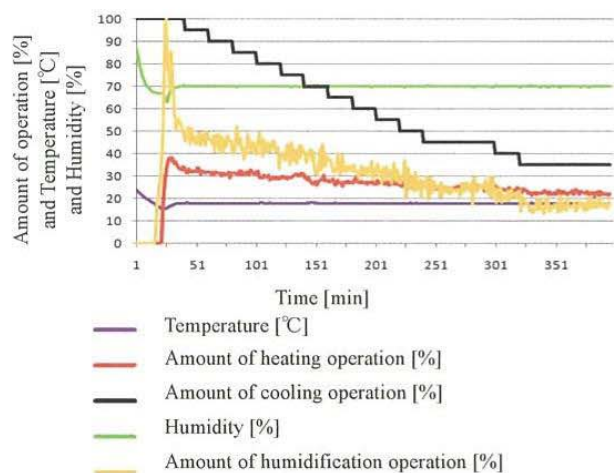


Fig. 16 Experiment result (Manual control)

湿機の出力も低下している。この実験では、手動による調整で30パーセント程度、ファジィ制御で25パーセント程度の消費電力を削減できていることが確認できた。

4. 結 言

今回、恒温室内で用いる各空調機（加熱機、冷凍機、加湿機、除湿機）を1次遅れでモデル化し、実データとの比較を行ったところ、精度よく近似することが可能であった。

温度の制御シミュレーションを行う際に、温度の上昇と下降では使用される機器が異なるが、特性を切り替えることで対応した。また、PI制御およびI-P制御を比較したところ、I-P制御の調整範囲の広さと安定性の良さが確認できた。

ファジィ制御または手動による冷凍機の出力調整

によって省エネ化が可能であることが確認できた。冷凍機の出力低下に伴い加熱機、加湿機の出力も低下するため大きな効果が期待できる。

今後は、ファジィ制御による省電力を手動調整以上の効果にするため、メンバーシップ関数やルールの追加・調整を行う予定である。

参考文献

- (1) 大島康次郎ほか：サーボ機構、1983、オーム社
- (2) 須田信英：PID制御、1997、pp104-106、朝倉書店
- (3) 添田喬ほか：自動制御、1996、日新出版
- (4) 菅野道夫：ファジィ制御、1988、日刊工業新聞社
- (5) 村上周太：ファジィ制御、1993、日刊工業新聞社