PID パラメータの設定不全が空調システム性能に 与える影響の検証と最適調整法の提案

STUDY ON THE INFLUENCES OF SETTING DISORDER OF PID PARAMETERS AND THE OPTIMIZATION STRATEGY OF THE PARAMETERS

國吉 敬司*, 赤司 泰義**

Keiji KUNİYOSHI and Yasunori AKASHI

This paper addresses the effects of fault and optimization of PID parameters in building air-conditioning systems. On setting disorder of PID parameters, the influence was made clear through experiments. It produced hunting at valve and increased ON/OFF frequency of the chiller larger than the difference of electricity consumption and the room's temperature fluctuation, etc. So we can say it is considered that the setting disorder is not noticed, even if only the room's temperature and electricity consumption are watched. On the optimization of PID parameters, optimum adjusting strategy using Genetic Algorithm (GA) was proposed. The strategy simultaneously searches PID parameters of VVW 2-way valve and VAV units. We verified the usefulness of the strategy.

Keywords: Air-conditioning system, Simulation, Automatic control, Optimum operation

空調システム, シミュレーション, 自動制御, 最適運用

1 はじめに

建物の空調システムには種々の制御が取り入れられているが, その中でもPID制御は構造が比較的簡易であることや現場でのパラメータ調整が可能であるといった点からフィードバック制御の一つとして広く採用されている。しかしながら, そのパラメータ調整は技術者の経験を必要とし, その作業は試行錯誤的な行為に頼らなければならない, 多くの時間や手間を要する。また, 現場でパラメータの調整作業を行う場合, 一度空調システムを止める必要があるなど空調システム運用の観点において不都合が生じるため, その作業は竣工間際に行われることが多い。このような建物では十分に適正なPIDパラメータが入力されないまま施主に引き渡されることも考えられる。PIDパラメータの設定不全は気づきにくく, 不適正な値の入力された建物では温度や圧力などを設定値に制御できなくなるだけでなく, バルブやダンパの振動に起因する機器の劣化に繋がる危険性がある。

既往の研究^{1), 2)}ではシミュレーションによる最適PIDパラメータの調整方法について検討されている。シミュレーションにより最適値を見つけることは, 空調システムを停止させて調整作業を行う必要性がないことや, 経験や勘だけに頼らずに済むということから空調システム運用上, メリットが大きい。これまでの研究ではある特定の一つの箇所におけるPIDパラメータ調整法の検討を行っているが, 実際の空調システムでは複数の箇所においてPID制御が行われており, それぞれの制御が複雑に影響し合う。ある特定の一つの箇所において適正であると想定したPIDパラメータを入力しても, シ

ステム全体を動かしたときにそのパラメータが必ずしも最適であるという確証はない。そこで複数箇所におけるPIDパラメータを同時に調整する必要がある。

本研究では建物の適正な運用管理という観点から, 空調システムにおけるPIDパラメータの設定不全と最適化が空調システム性能に与える影響の検証を行う。PIDパラメータの設定不全に関しては, 実験を通じてその影響の把握を行う。PIDパラメータの最適化に関しては, 生物の遺伝や進化のメカニズムを模擬した遺伝的アルゴリズム (GA) を用いたシミュレーションによる最適調整法を提案し, これまでは計算時間の問題などから困難であった複数箇所におけるPIDパラメータの同時調整の可能性について検討を行う。

実験および計算に用いた対象はHVAC&R実験解析システムで, 当システムは建築一般に広く導入されている空調システム (エアハンドリングユニット (AHU) を使用した中央供給方式) を備えており, 制御方式や制御パラメータを実験メニューに応じて自由に変更することで, 不適切な運用管理や不具合を意図的に発生させることが可能である。

2 PID制御

PID制御は, 偏差に比例した出力を出す比例動作 (Proportional control action), 偏差の時間積分に比例した出力を出す積分動作 (Integral control action), 偏差の時間的変化率に比例した出力を出す微分動作 (Derivative control action) から構成され

* ㈱日建設 修士 (工学)
(当時 九州大学 大学院生)

** 九州大学大学院人間環境学研究院 助教授・博士 (工学)

NIKKEN SEKKEI Ltd., M. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu Univ., Dr. Eng.

る。PID制御の基本式は式1で表され、比例ゲイン K_p 、積分時間 T_I 、微分時間 T_D の3つのパラメータの大きさによってそれぞれの動作の強さが決定される。PID制御ではこれらのパラメータのバランスが重要である。

本論では実システムと同様に微分動作を停止したPI動作を扱っているが、総称してPID制御、PIDパラメータとしている。

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right] \quad \text{式1}$$

ここで、 $u(t)$: 制御出力、 K_p : 比例ゲイン、 T_I : 積分時間、 T_D : 微分時間、 $e(t)$: 制御偏差 ($e(t) = SV(t) - PV(t)$)、 $SV(t)$: 制御量の設定値、 $PV(t)$: 制御量の測定値

3 HVAC&R 実験解析システム

今回実験および計算の対象としたHVAC&R実験解析システムは、一次側の空冷ヒートポンプチャラー1台と一次ポンプ1台、二次側のエアハンドリングユニット1台と二次ポンプ1台から構成される。

HVAC&R実験解析システムの概要、機器一覧、空調システム図を表1、表2、図1に示す。冷房時、熱源機は熱源出口水温が設定温度より5K以上高くなると運転が開始され、3K以上低くなると停止されるON/OFF制御運転が行われる。暖房時は5K以上低くなると運転が開始され、3K以上高くなると運転が停止される。通常、熱源出口温度は冷房時7℃、暖房時45℃と設定して運転を行う。冷温水弁では、給気温度が設定温度になるようにPI

表1 HVAC&R実験解析システム概要

所在地	福岡県春日市春日公園 6-1 九州大学筑紫キャンパス
用途	実験棟
建築面積	35.84m ²
延床面積	107.53m ²
階数	地下1階、地上2階
高さ	軒高6.15m、1階階高2.70m
構造	壁式鉄筋コンクリートパネル造(階段室は木造)

図1 空調システム図

表3 実験時の設定値

	暖房	冷房
室温 [℃]	20.0	27.0
給気温度 [℃]	35.0	16.0
AHU 前配管内圧力 [kPa]	160.0	70.0
熱源出口温度 [℃]	45.0	7.0

制御によって開度が制御され、流量が調整される。バイパス弁では、AHU 前の配管内圧力が設定圧力になるようにPI制御が行われる。1階・2階・地階に設けられたVAVユニットは、各階の室温が設定温度となるようにPI制御によってダンパ開度を制御し、風量を調整する。加湿に関しては1階室内湿度による加湿器のON/OFF制御を行う。

4 PIDパラメータの設定不全が空調システム性能に与える影響の検証

4.1 実験概要

PIDパラメータの設定不全が空調システム性能に与える影響の検証を行うため、2005年3月と同年9月にHVAC&R実験解析システムを用いて実験を行った。実験では冷温水弁のPIDパラメータに不適正なPIDパラメータ（比例ゲイン・積分時間）を入力して運転したときを不適正時として、適正な値を入力して運転したとき（適正時）と比較した。2005年3月21日の0:30～1:30（適正時）、同日1:40～2:40（不適正時）において暖房運転の実験を、同年9月15日13:30～14:30（適正時）、9月16

表2 機器一覧

名称	機器仕様	
エアハンドリングユニット	冷却能力	10.5 kW
	加熱能力	10.5 kW
	冷温水流量	1.86 m ³ /h
	定格風量	2000 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
給気ファン	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
送気ファン	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
	定格消費電力	1.5 kW
	定格風量	1800 m ³ /h
加湿器	気化式	
	有効気化量	2.0 kg/h
	冷却能力	12.5 kW
	加熱能力	15.0 kW
	定格消費電力：冷却時	5.0 kW
	定格消費電力：加熱時	5.2 kW
空冷ヒートポンプチャラー	ライン型	
	冷温水流量	2.7 m ³ /h
	定格消費電力	0.4 kW
	ライン型	
	冷温水流量	2.4 m ³ /h
	定格消費電力	0.4 kW
一次ポンプ	ライン型	
	冷温水流量	2.4 m ³ /h
二次ポンプ	ライン型	
	冷温水流量	2.4 m ³ /h
往ヘッダー	寸法	φ65×L800
	寸法	φ65×L800

表4 実験に用いたPIDパラメータ

	暖房		冷房	
	適正時	不適正時	適正時	不適正時
比例ゲイン K_c [-]	1	20	10	100
積分時間 T_i [sec.]	30	30	90	90

日 13:30 ~ 14:30 (不適正時) において冷房運転の実験を行った。実験時の各種設定値、用いた冷温水弁のPIDパラメータを表3、表4に示す。なお、2005年9月の実験では、同年3月の実験時と同条件で実験を行うため、給・還気ファンインバータと地階・2階のVAVユニットは制御から外し、地階・2階のVAVユニットダンパは常に全開として実験を行った(当時、ファンインバータと地階・2階のVAVユニットは未設置)。また、実験中、加湿器は運転を行わない。

4.2 実験結果

実験結果を図2(暖房運転)、図3(冷房運転)に示す。設置して

いる熱源機の特長や建物の熱容量の大きさなどさまざまな要因が絡んでいるものと思われるが、実験期間の熱源機の電力消費量は表5のように両期間ともに不適正時の方が小さい値となった。また、冷温水弁・バイパス弁にハンチングが生じているものの、VAVユニッ

表5 熱源機電力消費量

	適正時 [Wh]	不適正時 [Wh]
暖房	3,391	3,061
冷房	3,111	2,649

図2 実験結果(暖房運転)

図3 実験結果(冷房運転)

トには適正なPIDパラメータが入力されているため室温は設定値を維持できている。また、熱源機の細かい間隔でのON/OFF運転により、冷房時には給気温度の制御性が向上するといった現象も見られた(図3(c))。しかし、冷温水弁に不適正なパラメータを入力したことで、暖房時・冷房時ともに冷温水弁にハンチングが生じ、その影響は冷温水弁だけでなく、バイパス弁にも及んだ。その結果、AHU前の配管内圧力が設定値近傍で大きく振動した。暖房時は給気温度にも大きな振動が生じた。熱源機の消費電力の推移を見ると熱源機のON/OFF回数が適正時に比べて約2倍に増加していることを確認できる。このような熱源機のON/OFF回数増加やパルプのハンチングは、機器の劣化に大きな影響をもたらす。だが、今回の実験結果のように室温が設定温度を維持できていたり、熱源機の電力消費量があまり変化せず、さらには減少するといったことが実際の空調システム運用上生じていると、設定不全に気付かないまま運用してしまう危険性が高いといえる。

5 PIDパラメータの最適調整法の提案

5.1 遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適調整法

5.1.1 GAによる最適調整法

4章ではPIDパラメータの設定不全の実験を行い、PIDパラメータの設定不全が空調システム性能に与える影響について明らかにしてきたが、本章ではシミュレーションを用いたPIDパラメータの最適調整法を提案する。図4に本研究で提案したGAによるPIDパラメータの最適調整法のフロー図を示す。

PIDパラメータの調整対象は1階・2階・地階のVAVユニットと冷温水弁とし、これらに初期値として表6に示した範囲でランダムに比例ゲイン・積分時間を与える。この操作を『初期遺伝』とする。このランダムな組み合わせを一つの世代の個体数だけ

(今回は20個体)作成する。この過程で最初に作成された20個体が第一世代である。第一世代20個体のPIDパラメータを入力して空調システムシミュレーションを行い、評価関数によってそれぞれ評価値を計算する。評価値が優れた組み合わせを昇順に並び替え、1番優れた組み合わせを4個体、2番目に優れた組み合わせを3個体、3番目に優れた組み合わせを2個体、残りの4番目から14番目に優れた組み合わせをそれぞれ1個体ずつ残す。この操作を『選択』とする。さらに、『選択』が行われた後の個体に対して『交叉』が行われる。今回は、1階・2階・地階のVAVユニットと冷温水弁の比例ゲイン・積分時間の計8種類のパラメータの中の任意の3箇所において、前述の『選択』が行われた後の1個体目から20個体目の間で数値を入れ替え、この行為を『交叉』とした。『交叉』を行った後、あらかじめ設定した確率(突然変異率[※])で、各々の個体が持っている8種のパラメータをそれぞれ表6の範囲内でランダムな数値に変化させる。この動作を『突然変異』とする。

こうして作成された第二世代の20個体を用いてさらに空調シス

図4 GAによる最適調整法 フロー図

表6 探索範囲

	比例ゲイン[-]	積分時間[sec.]
VAVユニット(1階・2階・地階)	0.001~0.200 [0.001 step]	2~200 [2sec. step]
冷温水弁	0.0002~0.1000 [0.0002 step]	2~200 [2sec. step]

図5 評価関数の検討(評価関数: 式3)

図6 突然変異率の検討(突然変異率: 5%)

テムシミュレーションを行い、各々の個体に対して評価値を計算する。そしてまた『選択』-『交叉』-『突然変異』を図4のように繰り返しながら世代を更新し、評価の低い個体は消滅し、評価の高い個体が多く残っていく。また突然変異を行うことで、局所的な解(局所解)に陥ることを防ぐアルゴリズムとなっている。

5.1.2 評価関数の検討

GAにおいて評価関数は選択や淘汰が行われる個体の性質を決定づけるため、非常に重要な項目の一つである。そこで、GAの評価関数として表7に示した式2から式7について検討を行った。基本となる評価関数は式2と式3で、式2は設定室温からの偏差のみを評価項目に、式3では設定室温からの偏差に加え給気温度の設定値からの偏差を評価項目としている。式4から式7はこれらを基に各項の重みを変え、偏差に対して敏感に反応するような評価関数を選んだ。今回のケースでは式5や式7のように偏差に対して敏感に反応させると、良好な組み合わせを絞りきることができず、発散に近い現象を起こした。式2を評価関数として用いてGAを行った結果、室温はある程度制御できるものの、給気温度は大きな振動を生じ、ダンバに大きなハンチングを生じた。これらのことから今回のケースでは評価項目として室温と給気温度両方を考慮し、重みはすべて1.0とした式3が妥当な結果と判断した。ただし、建物ごと、空調システムごとで厳密に評価したい項目が異なるため、評価関数はケースに応じて適宜評価項目や重みを変更すべきである。

図5に式3を評価関数としたGAによって得られた評価値が最も小さくなるPIDパラメータの組み合わせを入力して空調システムシミュレーションを行った結果を示す。暖房時の午後に室温の上昇が見られるが、これはHVAC&R実験解析システムの空調システムでは暖房運転中に冷房運転への切り替えができないため、内部発熱や日射の影響を処理できないことが要因にあげられる。そのことを考慮すると、暖房時の午後以外の時間帯は室温・給気温度ともによく制御されていることが確認できる。

5.1.3 突然変異率の検討

GAは突然変異を起こすことで、局所解に陥ることを防ぐ仕組みとなっている。だが、突然変異率が高すぎると発散しやすくなるために最適な値とはかけ離れた値へ向かったり、逆に低すぎると局所解に陥ったまま抜け出すことができないといったことが起こりうる。そこで、GAにおける突然変異率の検討を行った。

検討では1%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%の突然変異率を設定し、それぞれの確率で5回ずつGAを行い、評価値の推移を調べた。1%, 3%, 5%に設定したケースでは世代が増えるごとに徐々に評価値が改善された。10%以上の突然変異率に設定すると、ランダム的な要素が強くなり、世代数と評価値の相関が崩れ、世代数が増えてもあまり優れた組み合わせを見つけることができなかった。

検討の結果、突然変異率は10%未満に設定することが望ましいことが確認された。局所解に陥ることを防ぐといった観点も加えると、突然変異率は5%程度に設定すべきである。図6に突然変異率を5%と設定したときの評価値の推移を示す。

5.2 提案した最適調整法を用いた空調システムシミュレーション

5.2.1 計算方法

提案した最適調整法の有用性を確認するため、同手法によって探索

されたPIDパラメータの組み合わせを入力して空調システムシミュレーションを行う。本節ではまず計算方法の概要について述べる。計算では建物側の熱負荷計算ではHASP/ACLD/8501³⁾の計算時間間隔を1時間から1分まで変更可能に改良したプログラムを用いた。空調システム側は熱源機、コイル、ファン、ポンプ、PID制御をそれぞれモデル化したプログラムを用いた。熱源機、ファン、ポンプについてはカタログなどから得られる能力特性、入力特性、部分負荷特性といった情報を基にモデル化を行っている。コイルに関してはHASP/ACSS/8502⁴⁾のアルゴリズムに準じたモデル化を行っている。PID制御に関してはHVACSIM⁵⁾の考え方を取り入れたモデルを用いた。これらの建物側の計算と空調システム側の計算を統合して、シミュレーションプログラムを構築した。

5.2.2 計算条件

空調時間帯は8:00~18:00で、暖房運転と冷房運転の代表日として2月4日と8月4日を対象に計算を行った。計算時間間隔は建物側、空調システム側どちらも1分である。計算に用いた設定値、内部発熱条件は表8、表9に示す。気象データには拡張アメダス気象データの標準年データ(福岡)⁶⁾を用いた。制御については実システム同様に冷水水弁による給気温度制御、1階・2階・地階VAVユニットによる給気風量制御を行う。熱源機の圧縮機運転台数は実機同様常に1台とし、部分負荷率、電力消費率は1.0として計算を行う。また運転方式も実システムを模したON/OFF制御運転を行う。加湿器による湿度制御、給・還気ファンインバータ制御は行わないものとする。実システムで取り入れられているバイパス弁による配管内圧力制御については再現していない。

また、5.1.2節、5.1.3節の検討の結果より、最適調整法に用いる評価関数は式3を、突然変異率は5%を採用した。

表7 検討した評価関数

$VALUE = RIAT - RIATSP + R2AT - R2ATSP + ROAT - ROATSP $	式2
$VALUE = RIAT - RIATSP + R2AT - R2ATSP + ROAT - ROATSP + FIATO - FIATOSP $	式3
$VALUE = RIAT - RIATSP ^2 + R2AT - R2ATSP ^2 + ROAT - ROATSP ^2 + FIATO - FIATOSP ^2$	式4
$VALUE = RIAT - RIATSP ^3 + R2AT - R2ATSP ^3 + ROAT - ROATSP ^3 + FIATO - FIATOSP ^3$	式5
$VALUE = RIAT - RIATSP ^2 + R2AT - R2ATSP ^2 + ROAT - ROATSP ^2$	式6
$VALUE = RIAT - RIATSP ^2 + R2AT - R2ATSP ^2 + ROAT - ROATSP ^2 + FIATO - FIATOSP ^2$	式7

ここで、VALUE:各時刻における評価値, RIAT:1階室温[℃], RIATSP:1階設定室温[℃], R2AT:2階室温[℃], R2ATSP:2階設定室温[℃], ROAT:地階室温[℃], ROATSP:地階設定室温[℃], FIATO:給気温度[℃], FIATOSP:設定給気温度[℃]

表8 計算時の設定値

	暖房	冷房
室温 [℃]	22.0	26.0
給気温度 [℃]	35.0	16.0
熱源出口温度 [℃]	45.0	7.0

表9 計算時の内部発熱

		地階	1階	2階
照明 [W]	顕熱	343	845	845
人体 [W]	顕熱	217	217	217
	潜熱	252	252	252
室内機器 [W]	顕熱	0	120	120

図7 計算結果(不適正時)

表10 提案した最適調整法により探索されたPIDパラメータ

冷温水弁	暖房		冷房	
	比例ゲイン[-]	積分時間[sec.]	比例ゲイン[-]	積分時間[sec.]
1階VAVユニット	0.0012	24	0.0404	16
2階VAVユニット	0.085	10	0.050	24
地階VAVユニット	0.044	8	0.018	8
	0.070	38	0.042	16

5.2.3 計算結果

5.1節で提案した最適調整法により20個体-700世代計算を行い、結果として得られた評価値が最も優れた(評価値が最も小さくなる)PIDパラメータの組み合わせを表10に示す。探索されたPIDパラメータ(表10)を入力して空調システムシミュレーションを行った。不適正な値を入力して計算した結果を図7(不適正時)に、提案した手法により探索された値を入力して計算した結果を図8(適正時)に示す。冷温水弁と各階のVAVユニットに適正なPIDパラメータが入力されたことで、暖房時・冷房時ともに二次ポンプ流量と給気風量が適正に調整され、給気温度と室温が設定温度近傍でよく制御されている。このことから、空調システムで採用されているPID制御のPIDパラメータを複数箇所同時に探索する方法として、GAを用いた同手法の有用性を確認することができた。

今回は2月4日と8月4日を対象に計算を行い適正なPIDパラメー

タの探索を行ったが、空調システムは種々の条件下で運転が行われ、また設定値の変更が行われることもある。しかしPIDパラメータは、実際の運用上では冷房時、暖房時と2パターンで入力されていることが多い。各種設定値の変更が行われたり、外界条件が変化するようにときに、常に同一のパラメータを入力していると制御性が悪化する。設定値を変更した場合はその都度、また通常運転時でも可能であるなら一日ごと、最低でも一週間毎に最適値が更新されることが望ましい。

6 おわりに

本研究では、PIDパラメータの設定不全が空調システム性能に与える影響の把握と最適調整法の提案を行った。

設定不全の影響の把握に関しては、冷温水弁のPIDパラメータに不適正な値を入力して空調システムを運転したときと、適正な値を入力して運転を行ったときの比較を行った。冷温水弁のPIDパラメータ設定不全は、その影響は冷温水弁のみにとどまらず、バイパス弁においても大きなハンチングを生じさせ、その結果、配管内圧力や給気温度などで振動を引き起こすことを確認した。また、熱源機の消費電力の推移を見ると、熱源機のON/OFF回数が約2倍に増加したことも確認した。このような配管内圧力のハンチングや熱源機のON/OFF回数の増加は危機の寿命の劣化に繋がるものと考えられるが、

図8 計算結果(適正時)

一方で実験の結果のように室温変動や電力消費量など比較的入手しやすいデータには影響が現れにくいこともありえ、このような場合設定不全に気づかないまま運用してしまう危険性があるといえる。

PIDパラメータの最適調整法に関しては、生物の遺伝や進化のメカニズムを模擬した遺伝的アルゴリズム(GA)の理論を用いた手法を提案した。これにより、これまでは計算時間の問題などから困難であった複数箇所におけるPIDパラメータの同時調整を行うことができるようになった。冷温水弁と1階・2階・地階のVAVユニットの計4箇所のPIDパラメータを同時に探索し、同手法によって探索されたPIDパラメータを入力して空調システムシミュレーションを行った結果、室温・給気温度ともに設定温度近傍でよく制御できていることが確認され、同手法の有用性を確かめることができた。

今回は実験によりPIDパラメータの設定不全が空調システム性能に与える影響を明らかにし、シミュレーションによるGAを用いた最適調整法について提案を行ってきた。シミュレーションでは建物側、空調システム側の計算をともに1分間隔で計算を行っているものの、空調システム側の制御系を含めた挙動を厳密に再現するにはさらに秒間隔でのシミュレーションが必要となる。今回有用性の確かめられた同手法によって探索したPIDパラメータをそのまま実装することが可能となるように、シミュレーション精度を向上させることが今後の課題である。

謝辞

本研究は九州大学21世紀COEプログラム「循環型住空間システムの構築」(拠点リーダー:川瀬 博)によるものです。記して謝意を表します。

注)突然変異率:

GAでは『選択』『交叉』を繰り返すことでより優れた個体が次世代、次々世代、・・・と残されていくが、一方で『選択』『交叉』を繰り返すだけではある特定の性格を持った個体へと偏っていく危険性がある。自然界では、遺伝子(個体)が持っている染色体を突然変異させることにより、このような危険性を回避している。この確率が高すぎると優れたものまで突然変異を起こし、結果的に次世代へ悪影響をもたらす。低すぎると遺伝子情報が偏ってしまう。このような遺伝子を突然変異させる確率のことを突然変異率と呼ぶ。本研究では個体の持っているパラメータの数値をランダムに変化させる確率のことを突然変異率とした。

参考文献

- 1) 丹羽英治, 他: VAV 空調システムにおける制御パラメータの設定不全がシステムの動特性に及ぼす影響とその最適調整法に関する研究, 日本建築学会計画論文集, 第477号, pp.19-28, 1995.11
- 2) 前原勝樹, 他: 空調システムの制御パラメータの最適化に関する研究 その5 シミュレーションを用いたVAVシステムのPIDチューニング, 日本建築学会2005年度大会(近畿) 学術講演梗概集, pp.1347-1348, 2005.9
- 3) 建築設備技術者協会: HASP/ACLD/8501 解説, 1986.2
- 4) 建築設備技術者協会: HASP/ACSS/8502 解説, 1986.2
- 5) 空調調和・衛生工学会コミッショニング委員会WG: HVACSIM+(J) 利用者マニュアル, 1998.4
- 6) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 1999.12

(2006年5月9日原稿受理, 2006年9月12日採用決定)