空調自動制御システム機能維持における経済性評価手法に関する研究

STUDY ON THE EVALUATION TECHNIQUE OF ECONOMIC VALUE IN MAINTENANCE OF AIR-CONDITIONING AUTOMATIC-CONTROL SYSTEM

原 英嗣^{*1}, 渡邊直樹^{*2}, 川井康平^{*3}, 尾島俊雄^{*4}

*Eiji HARA, Naoki WATANABE, Kohe KAWAI
and Toshio OJIMA*

The maintenance of equipments of the buildings is important for making high-quality building as social capital up. However in the present condition, in order that economic value of the maintenance may not be evaluated, an efficiency maintenance is not performed in almost buildings, especially, the maintenance of air-conditioning automatic-control system. In this thesis, the economic value in maintenance of air-conditioning automatic-control system is evaluated from the theory that the maintenance effect is equivalent to the amount of a loss due to the poor performance of economic value of comfortable air-conditioning system and the effect of the energy-saving by the automatic-control system. Finally, economical evaluation of maintenance of an automatic-control system is simulated.

Keywords: office building, equipment, maintenance, automatic-control system, evaluation technique of economic value

事務所建築、建築設備、保全、自動制御システム、経済性評価

1. はじめに

保全とは、対象設備の初期性能を維持する為の行為である。初期性能を維持することは、一般的に長寿命につながりエネルギー消費量も抑えられる。しかし建築設備の保全状況調査より、エレベーター、冷凍機、ボイラなど、大型設備や法定点検が義務づけられている設備は予防保全型が多く、それ以外の設備は、事後保全型もしくは放置型が多い¹⁾。これは保全行為に費用が掛かり経済性に劣ると捉えられていることが主な理由と考える。特に対象機器が小さくなる程顕著であり、その代表的な設備として空調自動制御システムがある。

ここで空調自動制御システムに関し、中央監視装置も含めた累積保全費の推計を行った。調査データは、自動制御機器メーカーの1990年から2000年までの用途別建物297棟に関する保全費履歴である。推計方法は、稼動年数 n 年目における各用途別建物の保全費 M_n を各用途別建物の延べ床面積の合計値 S_n で除した値 MT_n を算出する。稼動年数は、簡易的に竣工年からの年数とする。以下に算出式を示す。

$$S_n = \sum S_j, M_n = \sum M_j, MT_n = \sum \frac{M_j}{S_j}$$

S_j : 稼動年数 j 年目に保全データを保有する建物の総延べ床面積

M_j : 稼動年数 n 年目の建物 j における保全費

図1に用途別建物の延べ床面積 1 m^2 当たりの累積保全費推計値を示す。図1より、稼動年数15年目において、警察・郵便局の $2,045\text{ 円/m}^2$ 、老人ホームの $1,989\text{ 円/m}^2$ 、病院・保健所の $1,838\text{ 円/m}^2$ と高く、全体平均は 999 円/m^2 、事務所では 875 円/m^2 と平均よりも低い。

空調対象者が弱者である老人ホーム、病院・保健所の保全費が高く、一般的な人が利用している事務所の保全費が低い。自動制御機器の単位面積当たりの設置数は、メーカーへのヒアリングより病院で約 0.014 点/m^2 、事務所では約 0.010 点/m^2 であ

図1 用途別建物の自動制御機器の推定累積保全費

^{*1} 国士舘大学工学部建築デザイン工学科 講師・工博

^{*2} 早稲田大学大学院理工学研究科建築学 修士課程

^{*3} ㈱ザイマックス 工修

^{*4} 早稲田大学理工学部建築学科 教授・工博

Asst. Prof., Dept. of Architecture, Kokushikan University, Dr. Eng.

Architecture, Graduate School of Science and Engineering, Waseda University
Zymax Co., Ltd., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

る。自動制御機器の故障率が建物用途により変化しないと仮定すると、自動制御機器の故障による空調設備への影響が空調対象者の許容範囲内に収まる場合には保全が行われず、事務所ビルにおいて故障が放置され、潜在化していることを示唆している。

快適空気調和における空調自動制御システムの目的は、室内にいる人間の大多数がほぼ満足できるような室内環境を維持し、また空気調和設備の動作を効率的に行なうことによりエネルギー消費量を抑制することである。

そこで本研究では、空調自動制御システムの運用時における経済的価値を定量化し、システム機能維持の経済性評価手法を提案する。はじめに、空調自動制御システムの潜在化故障によるシステム性能劣化率の算出手法を提案する。次に、快適空調システムの正常運転確保の価値を定量化し、空調自動制御システムによる省エネルギー効果の算出手法を示す。最後に事務所ビルにおけるケーススタディを行い、空調自動制御システムの機能維持における経済性評価を行う。

2. 空調自動制御システムの価値算出概念

図1より自動制御システムの性能に影響を与える故障には、自動制御システムの警報や、利用者の日常巡回点検(外観確認)により発見される故障(顕在化故障)と自動制御機器の据付・作動状況の目視確認や、データ確認し異常が発見できるような故障(潜在化故障)の2つのパターンがある。顕在化故障は故障が発見されやすい為、故障から発見までの時間が比較的短期間であるが、潜在化故障は使用時間の経過と共に故障が蓄積され、快適空調システム全体の性能に影響を与えることを意味する。特に潜在化故障は、図1の結果が示すように、発見されたとしても人為的に全てが修繕されるとは限らないため、経年とともに蓄積され、結果としてシステムの性能を劣化させる。

一方で、税法上、快適空調システムの経済的価値は、快適空調システムを製造するのに費やした費用と等価であるが、その経済的価値は時間とともに償却していき、最終的には残存価値のみとなる。この経済的価値は、システムのハード的経済価値と言え、システム機能が停止してもハード的価値は残る。しかし、保全の目的が初期性能を維持する行為であることから、機能維持の経済的価値は、快適空調システムの正常運転によって生じる価値を考える必要がある。つまり、空調自動制御システムの機能維持は、快適空調システムの正常運転確保による価値と省エネルギー機能による光熱費削減効果を生じることになる。

空調自動制御システムの性能劣化は、経年と共に加速度的に進行する。機能維持は性能劣化を初期性能まで向上させる行為であるので、性能劣化による快適空調システムの正常動作によって生じる価値損失を回避させる行為と考えられる。よって機能維持の価値は、機能維持の無い場合に発生しうる性能劣化による価値損失の累積値と等価であると言える。空調自動制御システムの機能維持における経済的価値を算出する為には、機能維持の無い場合に発生しうる快適空調システムの正常運転確保による価値の損失と省エネルギー機能による光熱費削減効果の損失を定量化する必要がある。

3. 自動制御システム劣化率の算定手法

3. 1 故障時に発生する現象の実態調査

自動制御機器の故障時に発生する現象として、室内環境への影響がある。室内環境への影響は、快適空調システムの機能的損失となる。自動制御機器単体の不具合により、直接的、間接的に室内環境に影響を及ぼす確率を影響度とする。ここで、自動制御機器メーカーの保全サービスマンを対象に機器故障時の各機能への影響度についてヒアリングアンケート調査を行った。結果、故障事例234件のうち、空調自動制御機器に関するものは75件であった。各故障事例において、自動制御機器の故障時における「室内環境への影響」が確実にあると考えられる場合のみ「あり」とし、有無を判断できない場合は「なし」に含んでいる。

以上の調査結果から、各機器の故障事例数を分母とし、そのうち室内側に影響が現れた機器個数を分子とした割合を影響度 α とする。各機器の影響度を表1に示す。影響度は、湿度センサが0.75と高く、多くの機器において0.5を超えていることが明らかとなった。

表1 各自動制御機器の故障による室内環境への影響の有無

機 器	室内環境への影響		合計	影響度 α
	あり	なし		
温度センサ	9	4	13	0.69
湿度センサ	3	1	4	0.75
CO ₂ アナライザ	1	1	2	0.50
流量計	1	2	3	0.33
ダンパ	1	1	2	0.50
インバータ	2	2	4	0.50
弁	23	9	32	0.72
調節器	7	8	15	0.47

3. 2 各機器の不信頼度の算出

各自動制御機器の不信頼度について信頼性関数である、累積ハザード・ワイブル分布関数を用いて算出する。

ワイブル分布の式を以下に示す。

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$$

$F(t)$: 不信頼度、 η : 尺度パラメータ、 m : 形状パラメータ

不信頼度算出に用いたデータは、各機器についての点検履歴及び緊急保全履歴である。点検履歴は、メンテナンスの専門家が自動制御機器の据付・作動状況を目視確認や、データ確認し異常を発見した履歴であり、潜在化故障履歴である。それに対し、緊急保全履歴とは、建物管理者の日常点検や、建物利用者からの情報により発見された故障で、即時に修繕が求められる故障であり顕在化故障履歴である。

本分析で用いた建物概要を表2に示す。調査対象ビルは、1984年から1996年に竣工した17棟の事務所ビルであり、調査対象の機器点数は24,023点である。不信頼度の算出は、点検履歴と緊急保全履歴を用いた。また、自動制御機器を非修理系として分析を行った。分析によって得られる関数 $F(t)$ は、全ての故障発生数(累積)の全機器数に対する割合の経時変化(以下、故障発生に関する不信頼度)を意味する。

室内・空調機系の自動制御機器の形状パラメータ m と尺度パラメータ η 及びMTTFの算出結果を図2に示す。また、熱源廻り系統の自動制御機器の形状パラメータ m と尺度パラメータ η

及びMTTFの算出結果を図3に示す。

図2より、検出部では、温度センサーのMTTFが59.7年と長く、次いで湿度センサーの41.8年となる。CO₂アナライザは15.4年とMTTFが最も短い。調節器は、デジタル式が最も長く33.5年となる。操作器ではダンパが38.7年、弁は22.9年である。全体として、検出部全体が35.5年と最も長く、操作器が23.6年と最も短い。

図3より、熱源廻り系統のMTTFは、変換器が長く59.4年である。次いで温度センサーの52.4年となっている。また、流量計が17.6年と熱源廻り系統の中では、故障しやすいことがわかる。室内・空調機系統と比較して、温度センサーは約5年短い。また検出部全体では、約7年短い。調節器は、電子、デジタル式ともに室内・空調機系統よりも短い、全体では、33.4年と約5年長い。変換器も同様の傾向にあり、約25年長い。操作器は、弁が31.9年と室内・空調機系統に比べ約9年長い。全体でも34.7年と約11年長い。

図4に自動制御機器全体の故障発生に関する不信頼度を示す。

図4より、不信頼度が高いのは操作器であり、MTTFは24年と短く、また稼動20年目において不信頼度は0.32となっている。次いで調節器が高くMTTFは28.3年となっているが、稼動20年目までは、検出部の方が不信頼度が高く、稼動20年目において、検出部、調節器はそれぞれ、0.21と0.20となっている。変換器の不信頼度は低く、MTTFは37.7年であり、稼動20年目において0.10となる。

同様に、各機器の緊急保全履歴を用いて顕在化する故障発生数(累積)の全機器数に対する割合の経時変化の関数 $M(t)$ (以下、顕在化故障に関する不信頼度)を算出した。

3.3 自動制御システムの性能劣化率の算出手法の提案

自動制御システムは、温度制御やCO₂制御といった機能から構成され、各機能は、温度センサーや操作器といった機器で構成される。時刻 t における空調システムの正常運転確保の価値損失及び省エネルギー効果損失は、機能単位で発生し、自動制御システムを構成する全機能数のうち不具合が発生した機能数の割合に比例すると考えられる。よって本研究において自動制御システムの性能劣化率 $P_c(t)$ は、時刻 t における機能維持を行わなかった場合のシステム中に存在する機能の累積不具合発生数の割合と定義できる。また各機能の空調システムの正常運転確保と省エネルギー効果への影響は、明確に分離することは出来ず、等価の影響を与えていると考えられる。

自動制御システムの性能劣化率を算出するには、各機能の時刻 t における信頼度 $S_h(t)$ を算出する必要がある。表1より自動制御機器の故障の全てが機能に影響を与えているとは限らない。また、顕在化故障は、故障発見時から修繕時までの時間が短いことから、機能へ影響を与える要因とはならない。よって、機能に影響を与えない潜在化故障の機器および正常に作動している機器数(累積)の全機器数に対する割合の経時変化(以下、機能に影響を与える潜在化故障に関する信頼度)関数 $R_i(t)$ は、3.2節で算出した各機器の故障発生に関する不信頼度 $F(t)$ と顕在化故障に関する不信頼度 $M(t)$ より、 $F(t)$ か

表2 調査対象建物概要

故障率算出対象ビル	竣工年	延床面積(m ²)	自動制御機器点数
Aビル	1984年 3月	8,060	2,608
Bビル	1984年 6月	51,941	1,956
Cビル	1985年 11月	11,480	393
Dビル	1987年 3月	18,147	919
Eビル	1987年 10月	8,000	78
Fビル	1987年 10月		650
Gビル	1988年 6月	5,000	305
Hビル	1987年 10月	34,326	1,507
Iビル	1989年 3月	50,925	1,667
Jビル	1991年 6月	10,000	284
Kビル	1991年 5月	14,333	78
Lビル	1987年 2月		109
Mビル	1991年 6月	9,982	200
Nビル	1995年 4月	119,000	205
Oビル	1996年 2月	54,679	1,592
Pビル	1995年 1月	239,000	9,885
Qビル	1992年 5月	35,000	1,587

図2 室内・空調機系自動制御機器のMTTF算出結果

図3 熱源廻り系統自動制御機器のMTTF

図4 自動制御機器全体の故障発生に関する不信頼度

ら $M(t)$ を減算し、また機器の故障は必ずしも機能への影響があるとは限らないことから、この結果に影響度 α を掛けた値を1から引いたものとなる。各機器の機能に影響を与える潜在化故障に関する信頼度関数 $R_i(t)$ の算出式を以下に示す。

$$R_i(t) = 1 - \{F(t) - M(t)\}\alpha \quad \dots(1)$$

各機能の時刻 t における信頼度 $S_h(t)$ は、その機能を構成する機器が直列系をなすという立場をとり、機能に影響を与える潜在化故障に関する信頼度関数 $R_i(t)$ を用いて以下の式で表せる。

$$S_h(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \dots(2)$$

時刻 t における自動制御システムの性能 $P(t)$ をシステムを構成する全機能数のうち正常に作動している機能数の割合と定義する。よって、時刻 t における自動制御システムの性能 $P(t)$ は、(1)式と(2)式より各機能の信頼度 $S_h(t)$ を算出し、この $S_h(t)$ の和とシステム全体の機能数 m より、(3)式を用いて算出する。

$$P(t) = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m S_h(t) \quad \dots(3)$$

よって、時刻 t におけるシステム性能劣化率 $P_c(t)$ は、(4)式となる。

$$P_c(t) = 1 - P(t) \quad \dots(4)$$

4. 快適空調システムの正常運転確保の経済性評価

4. 1 仮想市場評価法(CVM)概要

本研究において利用者の要求を考慮した快適空調システムの正常運転確保の価値を評価するために、賃貸事務所ビルの利用者に対しCVM(仮想市場評価法:Contingent Valuation Method)を用いたアンケート調査を行った。この手法は、主に自然環境の経済的価値を評価し、環境保全に役立てる目的で多く利用されているものである。

人間を取り巻く環境・サービスの価値を経済的に評価する手法は、計量経済学の分野でさまざまな手法が考案されているが、調査手法の分類として大きく顕示選好法と表明選好法に分けられる。

快適空調システムの正常運転確保の価値評価において、顕示選好法による評価は工事費や建物価格などを参考に算定することにより比較的容易に行うことができる。しかし、利用者の要求を反映した評価を行うため、本研究では表明選好法による調査を行うこととした。以下にCVMの特徴と利点をまとめる。

- I 既存のデータの有無とは関係なく、理論上あらゆる財の評価に適用可能である。
- II 非利用価値の評価が可能である。
- III 評価額は受益者のWTP(支払意思額)から集計されたものなので、回答者の合意点を表している可能性がある。

4. 2 調査方法および調査票

CVMの特徴をふまえ、本調査の調査対象および評価対象の特徴から、以下のような方法で調査票を作成することとした。

図5 CVMアンケート 支払意思額金額提示設定

表3 各建物の有効回答数

調査場所	有効回答数	主な空調設備
Rビル	5人	ビル用マルチパッケージエアコン
Sビル	33人	セントラル(吸収式冷水温水発生機)
Tビル	27人	地域冷暖房、FCU
Uビル	117人	セントラル(吸収式冷水温水発生機)
合計	182人	

・質問方式:二段階二肢選択方式(ダブルバウンド)

・支払い手段:空調サービス保険(年額:円/年・人)

回答者に、回答時点で空調が停止し翌日まで復旧しなかった状態を想像してもらう。入居しているビルが、そのような事態が発生しないようにするための空調サービス保険に加入するとした場合に、その保険にいくら支払ってもよいか(支払意思額)を調査する。よって、本調査で得られた支払意思額は、利用者の快適空気調和システムが正常運転することによって得られる利益に対する価値と捉えられ、快適空気調和システムの正常運転確保の価値と等価である。また統計処理の精度を向上し、限られたサンプル数からより適切な結果を得るため、ダブルバウンドによって提示する金額のパターンを3種類用意した。提示金額を図5に示す。

4. 3 CVM調査結果

仮想市場評価法による支払意思額の算定は、市販のソフトウェア²⁾による。二段階二肢選択方式を用いた調査票により、アンケート調査を行った。調査期間は、2003年6月から9月である。調査方式は訪問留置方式を採用した。

各建物の有効回答数を表3に示す。集計は、これらすべての建物からの調査票をすべて合計して集計した支払意思額の他に、個々の建物ごとの支払意思額も算定した。本来、仮想市場評価法による支払意思額は、調査対象場所を限定して行われるのが普通であるが、今回は単一の建物内で有効な回答数を得ることが困難であるため、複数の建物からの結果を合計して集計するものとした。

ただし、個々の建物における支払意思額はサンプル数が限定されており、集計に際して有効と考えられる水準に達していないため、信頼度は高くないものと考えられることを付記する。特にRビルにおいて、回答数が少ないために単独では集計が不可能であった。全体およびそれぞれの調査対象建物における支払意思額を図6に示す。

建物ごとの集計結果をみると、アンケートを行った建物による支払意思額の違いはそれほど小さくなく、建物側の要因により

図6 支払意志額の推定結果

結果に大きな誤差は生じていないと考えられる。よって、全体の回答をまとめて集計した支払意志額は、同一の建物から得られた回答ではないが、建物固有の条件による大きな結果の格差を含んでおらず、支払意志額として採用して差し支えないと考えられる。

仮想市場評価法における支払意志額は、通常下限推定値を代表して支払意志額とするのが一般的である。これは、支払意志額の過大評価を防ぐためである。今回も下限推定値を採用し、空調システムの正常運転確保の経済的価値は、1026.15円/人月と算定された。

単位面積あたりの価値を求めるため、一般的なオフィスビルにおける単位面積あたりの在室人数を設定する。(社)日本ビルディング協会の調査³⁾によるオフィスワーカー一人あたりの床面積調査結果より、多少地域による差が見られるが、全国の平均値と東京の平均値に関してはそれほど差がないことから、全国での平均値を採用し、一人あたりの床面積は13㎡であるとする。以上より、単位面積あたりの空調システムの正常運転確保の経済的価値は、78.93円/㎡月となる。

4.4 自動制御システムの性能劣化による空調システムの正常運転確保の価値損失の算出手法

4.3節のCVMの結果による空調システムの正常運転確保の価値は、1日の空調停止状態を回避する価値である。機能に影響を与える自動制御機器の故障の蓄積によって、空調システムは正常運転状態と空調停止状態の中間の状態で運転されることになる。本研究では、CVMの結果を単位時間当たりの空調システムの正常運転確保の価値と捉える。自動制御システム

の性能劣化による空調システムの正常と停止の中間状態運転は、正常運転確保の価値を部分的に損失させていることになる。この部分的な価値損失は、自動制御システムの劣化率 $P_c(t)$ に比例すると定義する。よって、CVMの結果による単位時間当たりの空調システムの正常運転確保の価値を V_1 とすると、時刻 t における自動制御システムの性能劣化による空調システムの正常運転確保の価値損失 LV_1 は、(4)式を用いて以下の式より算出できる。

$$LV_1 = V_1 \cdot P_c(t) \cdots (5)$$

5. 省エネルギー機能による経済性評価

5.1 省エネルギー効果算出手法

自動制御システムによる省エネルギー効果は、外気冷房制御、CO₂制御、VAV制御、熱源搬送ポンプインバータ制御、最適起動停止制御とする。各制御項目における省エネルギー効果の算出は、基本的にこれらの制御項目の導入前と導入後の差である。これら5項目の省エネルギー効果の算出式を表4に示す。

外気冷房制御による省エネルギー効果は、主に中間期(室内に対して外気エンタルピーが低いとき)において、設計外気量よりも多くの外気を導入することにより、空調機冷水負荷を削減し、年間冷熱製造量を低減させる。ただし冬期においては、加湿負荷の増大があるため導入外気の下限值があり、推奨値では10℃とされる。

CO₂制御も同様に、室内のCO₂濃度がある基準を超えない範囲で外気導入量を削減する制御である。これにより、外気負荷を最小限に抑えることが可能になる。

VAV制御は、給気温度を変化させる代わりに、給気風量を変化させることによって、室内に対する供給熱量を変化させ、室内負荷を処理する。このため、負荷が小さいときには搬送動力を大幅に削減することができる。

熱源搬送ポンプインバータ制御は、熱源の搬送用ポンプにインバータを導入し、電源の周波数を変化させることにより、吐出圧制御を行う。これにより、バイパス流量に費やされる軸動力が減少し、省エネルギーを図ることが可能になる。

最適起動停止制御は、対象部屋の温度状況に応じた最適な

表4 自動制御システムによる省エネルギー効果

省エネルギー制御項目	省エネルギー効果	算出式
外気冷房制御	外気利用により、熱源製造熱量の削減した量	$SE = \Delta e \cdot OA \cdot q \cdot 10^3 \cdots (i)$ SE: 削減熱量(MJ) Δe : エンタルピー差(kJ/kg) OA: 外気風量の増加分(m ³ /h) q: 比重(20℃における空気の比重は1.17(kg/m ³))
CO ₂ 制御	外気と遠気のエンタルピー差を削減効果とし、削減される外気量から削減される熱量を算出する	$SE = \Delta e \cdot OA \cdot q \cdot 10^3 \cdots (ii)$ SE: 削減熱量(MJ) Δe : 外気と遠気のエンタルピー差(kJ/kg) OA: 外気風量の増加分(m ³ /h) q: 比重(20℃における空気の比重は1.17(kg/m ³))
VAV制御	室内負荷率から、ファンのINV周波数を算出しファンの定格をかけて電力量を算出する。これをINV出力100%時の電力量との差がVAV制御による削減効果とする。	$SE = HI \cdot kW \cdot \lambda \cdots (iii)$ SE: 削減電力量(kWh) HI: ある負荷での運転時間 KW: ファンの定格値 λ : 削減電力比
熱源搬送ポンプインバータ制御	室内負荷率から、ポンプのINV周波数を算出しポンプの定格をかけて電力量を算出する。これをINV出力100%時の電力量との差が本制御による削減効果とする。	$SE = HI \cdot kW \cdot \lambda \cdots (iv)$ SE: 削減電力量(kWh) HI: ある負荷での運転時間(h) KW: ポンプの定格値(kW) λ : 削減電力比
最適起動停止制御	最適起動停止制御を行う場合と行わない場合の削減時間にファンの定格電力量を積算する。	$SE = \frac{(H_m - H_n)}{60} \cdot kW \cdots (v)$ SE: 削減電力量(kWh) H _m : 最適起動制御無しの場合の前倒し起動時間(分) H _n : 最適起動制御有りの場合の起動時間(分) KW: AHUの定格電力(kW)

時刻に空調機を起動する制御である。これにより、空調機の起動前倒し時間を最小にし、ファン動力を削減することができる。

5. 2 自動制御システムの性能劣化による省エネルギー効果損失の算出手法

自動制御システムの性能劣化による省エネルギー効果の損失は、各機能の不具合による省エネルギー効果への影響を等価とした場合、自動制御システムの性能劣化率 $P_c(t)$ に比例する。よって、5.1節で算出された効果を V_2 とし、時刻 t における自動制御システムの性能劣化による省エネルギー効果損失を L_{V2} とすると、 L_{V2} は以下の式より算出される。

$$LV_2 = V_2 \cdot Pc(t) \cdots (6)$$

6. 機能維持の経済性評価ケーススタディ

本ケーススタディ対象の建物概要を表5、自動制御機器点数及び不信頼度関数等各種設定値を表6に示す。ケーススタディ対象は、約3千 m^2 の事務所用仮想ビルである。本ケーススタディを通じて、自動制御システムの機能維持の経済性評価を行なう。また、ケーススタディ対象のモデルビルは、実在するビルと仕様を同じくしている。この実在するビルには、外気冷房制御、VAV制御、CO₂制御、熱源搬送ポンプインバータ制御、最適起動停止制御が機能として設定されており、本ケーススタディの省エネルギー効果の算出には、本ビルの2002年における計測データを用いて算出する。

6. 1 自動制御システムの性能劣化率の算出

本ケーススタディにおける制御機器点数は、熱源、空調合わせて498点ある。機能数は、309機能である。機能数及び構成例を表7に示す。

制御機器1点が複数の機能を受け持っているため、1機能当りの平均機器点数は、6.05点となる。(1)式より各機器の信頼

表5 ケーススタディ概要

項目	概要
名称	モデルビル (立地: 東京都内)
階数	9階
空調設備	AHU(変風量)-VAV方式 基準階 1フロア 空調2系統 (AHU2台) AHU1(最小周波数: 70%) VAV4台 給気ファン: 2.2kW、還気ファン: 1.5kW AHU2(最小周波数: 40%) VAV4台 給気ファン: 2.2kW、還気ファン: 1.5kW
熱源設備	空冷HP、水蓄熱 搬送ポンプ概要 熱源1次ポンプ 最低周波数 40% 熱源2次ポンプ 熱交換器容量 386.8MJ/h
延床面積	1階部分 337.79 m^2 基準階(2~9階) 321.41 m^2 ×8=2571.28 m^2 建物全体 2909.07 m^2

表6 自動制御機器点数及び各種設定値

系統	分類	機器	機器点数	F(t)		M(t)		影響度	備考
				m	n	m	n		
室内・空調機	検出部	その他	96	2.407	40.077	1.964	114.399	0.64	検出部全体の値を用いる
		温度センサー	85	2.156	67.454	2.225	116.589	0.69	
		湿度センサー	33	2.395	35.306	2.762	34.350	0.64	
		CO ₂ アナライザ	32	2.244	17.369	1.441	68.617	0.50	
		圧力センサー	4	2.407	40.077	1.964	114.399	0.64	検出部全体の値を用いる
	調節器	その他	1	3.256	31.560	2.568	89.954	0.47	調節器全体の値を用いる
		デジタル	45	3.025	37.453	2.952	60.083	0.47	
	操作機	弁	64	3.122	25.644	2.116	130.514	0.72	
		ダンパ	108	2.853	43.471	3.265	72.938	0.50	
		インバータ	4	3.299	26.327	2.415	103.275	0.50	操作機全体の値を用いる
熱源周り	検出部	その他	1	3.326	31.487	2.222	116.623	0.64	検出部全体の値を用いる
		温度センサー	7	2.251	59.150	2.198	99.814	0.69	
		圧力センサー	1	3.326	31.487	2.222	116.623	0.64	検出部全体の値を用いる
	調節器	デジタル	7	2.014	22.826			0.47	
		弁	5	2.163	36.072	1.201	742.404	0.72	
	操作機	インバータ	4	2.153	39.150	1.198	856.916	0.50	操作機全体の値

度を算出し、(2)式より、各機能における経年による性能劣化を算出する。最後に(4)式より自動制御システムの経年による性能劣化率を算出した。

図7に、自動制御システムの性能劣化率の経年変化を示す。

図よりシステム性能劣化率は、初期性能を1とした場合、稼働15年目に0.66、稼働20年目では0.35となる。

6. 2 空調システムの正常運転確保の価値及び省エネルギー効果の算出

4節のCVMの結果より空調システムの正常運転確保の価値は、78.93円/ m^2 月となり、本ケースでは年間2,755,355円/年となる。

次に自動制御システムによる省エネルギー効果の算定を行なう。本ケーススタディにおける自動制御システムの省エネルギー項目は、外気冷房制御、CO₂制御、VAV制御、熱源搬送ポンプインバータ制御、最適起動停止制御の5項目となる。

まず初めに、実在するビルの1フロアにおける冷房・暖房負荷率の時刻別変動を2002年における計測データより算出した。冷房・暖房負荷率は、1フロアにおける冷熱最大量、温熱最大量を分母とし各時間における冷熱量、温熱量の割合から算出する。算出結果を図8に示す。また、ポンプ負荷を算定する場合、一次ポンプ系統及び二次ポンプ系統における2002年の計測データである各時間の熱交換器における熱交換量より、熱交換器の最大熱交換量を分母としてその割合より算出する。各時間におけるポンプ負荷の算出結果を図9に示す。また電力、冷熱及び温熱の単価設定を表8に示す。

また外気導入量は、1フロアにおける空調機2台の各時間の外気導入ダクト断面積(0.18 m^2 、0.24 m^2)と風速データ、外気ダンパ開度データより推定する。それぞれの算出結果の和を1フロアの外気導入量とする。算出結果を図10に示す。

外気冷房制御の冷熱削減効果及びCO₂制御の冷熱・温熱削減効果の算出を行う。これらの制御は、本制御が導入されない場合の設計外気量に対し、導入量が多ければ外気冷房制御の効果となり、少ない場合はCO₂制御による効果となる。ただし、外気冷房制御の効果の場合、導入外気条件の有効範囲として、外気温度10℃以上及び露点温度13度以下を満たす外気とする。効果は表4の(i)式、(ii)式より、有効範囲にある外気導入(削減)量に外気と室内環境とのエンタルピー差 Δe を掛け熱量となる。設計外気導入量及び室内環境条件を表9に示す。また外気条件は、2002年の東京における計測データを用

表7 自動制御機能数及び構成例

機能項目	機能数	構成例
CO ₂ 制御	90	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
VAV制御	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
湿度制御	72	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
外気冷房制御	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
熱源搬送・設定値変更・スケジュール	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
最適起動停止制御	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
湿度制御	72	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
温水温度制御	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
蓄熱制御	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
熱源搬送ポンプIN/OUT制御	18	1フロア: 1台 2フロア: 1台 3フロア: 1台 4フロア: 1台 5フロア: 1台 6フロア: 1台 7フロア: 1台 8フロア: 1台 9フロア: 1台
合計	309

図7 自動制御システムの性能劣化率の算出

いる。図10の結果より算出した結果、外気冷房による冷熱削減効果は2,233MJ/年・階、CO₂制御による冷熱削減効果は13,280MJ/年・階、温熱削減効果は10,094MJ/年・階となる。本ケーススタディでは、簡易的に各フロアともに同条件であるとし、建物としては、冷熱削減効果139,616MJ/年、温熱削減効果は90,844MJ/年となる。

VAV制御による電力削減効果は、表4(iii)式より、冷房・暖房負荷率からファンのインバータ周波数を算出し、これをインバータ出力100%時の電力量との差がVAV制御による削減効果とする。AHUの給気ファン及び還気ファンの最小周波数をそれぞれ40%、70%とする。また本試算では、消費電力比は冷房・暖房負荷率の2乗に比例するとし、よって削減電力比は、(1-消費電力比)となる。図8より、1フロア当たりの年間削減電力量は11,975kWh/年・階となった。よって、建物当たりの年間削減電力量は107,778kWh/年となる。

熱源搬送ポンプインバータ制御による電力削減効果は、表4(iv)式よりポンプ負荷率からポンプのインバータ周波数を算出し、これをインバータ出力100%時の電力量との差が本制御による削減効果とする。一次ポンプ、二次ポンプの最小周波数をそれぞれ40%、40%とする。また消費電力比は、ポンプ負荷率の2乗に比例するとし、削減電力比は、(1-消費電力比)となる。図9より年間削減電力量は、8,550kWh/年となる。

最後に、最適起動制御による省エネルギー効果の算定を行う。最適起動制御無し前倒し時間H_mは、建物毎の運用によるため設定値を表10に示す。またAHUの給気ファン及び還気ファン動力はそれぞれ2.2kW、1.5kWとする。表4(v)式より、1フロア当たりの年間削減電力量は、496kWh/年・階となった。よって、建物当たりの年間削減電力量は4,464kWh/年となる。

以上より、空調システムの経済的価値及び自動制御システムによる省エネルギー効果について算定した。結果を表11にまとめる。よって、年間の空調システムの正常運転確保の価値及び省エネルギー効果の和は、4,401,422円/年となる。

6. 3 自動制御システムの機能維持の経済的評価

2節より、自動制御システムの機能維持の経済的価値は、自動制御システムの性能劣化による空調システムの正常運転確保の価値及び省エネルギー効果損失の回避額と捉えられる。

よって、(5)式、(6)式より、第6.2節で算出した空調システム

図8 時刻別冷房・暖房負荷率(2002年)

図9 時刻別ポンプ負荷率(2002年)

図10 時刻別外気導入量(2002年)

表8 単価設定

項目	単価
電力	12 円/kWh
冷熱	0.93 円/MJ *
温熱	0.74 円/MJ *

* 空冷HPのCOP(冷熱3.6、温熱4.5)より算出

表9 室内環境設定

項目	室内条件設定
冷房期	温度 26℃ 湿度 50%RH (52.88 kJ/kg)
中間期	温度 24℃ 湿度 50%RH (47.77 kJ/kg)
設計外気量	321.41 m³ × 3CMH/m³ 964.23CMH

表10 最適起動制御時間設定

項目		月												合計
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
最適起動制御無し前倒し時間(分・日)	H _m	45	45	30	30	30	60	60	60	60	30	30	45	525
最適起動制御有り起動時間(分・日)	H _n	40	25	25	0	15	40	60	60	40	10	0	25	340
起動稼働日数(日・月)	D	19	20	22	20	21	22	21	23	20	21	20	21	250
稼働時間(分・月)	(H _m -H _n) × D	95	400	110	600	315	440	0	0	400	420	600	420	3,800

の正常運転確保の価値をV₁、省エネルギー効果をV₂とし、稼働n年目における自動制御システムの性能劣化率をP_c(n)とすると、稼働n年目における自動制御システムの機能維持による経済価値MV(n)は以下の式より算出される。

$$MV(n) = (V_1 + V_2) \times P_c(n) \quad \dots (7)$$

毎年の自動制御システムの機能維持による経済価値MNは、空調システム全体の想定稼働期間の年価として計上できる。

$$MN(k) = \frac{\sum_{j=1}^k MV(j)}{k} \quad \dots(8)$$

k: 空調システムの想定稼働期間(年)

本ケーススタディの場合、空調システムの稼働期間をそれぞれ1年から20年と想定した場合の年間当たりの自動制御システム機能維持の経済価値を図11に示す。通常空調システムの場合、システムの利用期間は、20年前後と考えられ、以下に法定耐用年数までの期間15年間とした場合198円/年・㎡、更新推定期間である20年間とした場合349円/年・㎡となる。

7. まとめ

本研究を以下のようにまとめる。

① はじめに自動制御システムの機能維持の経済性評価についての基本的考え方を示した。そこで、機能維持の経済的価値は、快適空調システムの正常運転確保の価値と省エネルギー効果の経済価値の低下を回避する行為と等価である定義し、自動制御システムの機能維持の経済性評価の算出概念を示した。

② 自動制御機器の故障履歴より、各機器の不信頼度及び、保全サービスマンからのヒアリング調査を通して、機器故障の影響度を調査した。また17棟の事務所ビルの自動制御機器の故障履歴より各機器の不信頼度を算出した。この結果、影響度及び不信頼度より各機能の経年による信頼度算出手法を示し、システム性能劣化率を時刻tにおける機能維持を行わなかった場合のシステム中に存在する機能の累積不具合数の割合と定義し算出式を示した。

③ 快適空調システムの正常運転確保の経済価値として、仮想市場評価法により、事務所ビルの利用者に対し、空調が停止しないための空調サービス保険への支払額を調査した。その結果、78.93円/㎡の値が得られた。また省エネルギー機能による経済性評価として、外気冷房制御、C O 2 制御、V A V 制御、熱源搬送ポンプインバータ制御、最適起動停止制御の自動制御システムによる省エネルギー効果を提案した。

④ 最後に、モデルビルのケーススタディを通じて自動制御システムの機能維持の経済性評価を行った。その結果、機能維持の経済価値は、システム稼働想定期間を15年とした場合、193円/年㎡となり、図1の機能維持を適時行なった場合の費用136円/年㎡より若干高めの値となった。

以上より本研究は、機能維持という費用対効果が見えない行為に対して、経済的価値を算出する一手法を示したと言える。このように、機能維持の経済的価値を示すことは、保全行為の促進に繋がり、良質な建物を社会資本として蓄積させていくためには、重要であると考えられる。

また、今回調査で収集した故障データは、機器種の偏りもあり、システム全体の性能劣化を示せるだけのデータ量ではなく、全ての機器種類の不信頼度の算出には至っていない。また

表 1 1 空調システムの正常運転確保の価値及び省エネルギー効果の算出

項 目	制御名	効果種類	効果算定		合 計
			エネルギー削減量	削減金額	
省エネルギーによる年経済効果	外気冷房制御	冷熱削減	2,233 MWh・年	20,095 円/年	1,646,067 円/年
	C O 2 制御	冷熱削減	13,280 MWh・年	119,521 円/年	
		温熱削減	10,094 MWh・年	90,844 円/年	
	V A V 制御	削減電力量	11,975 kWh/年・棟	107,778 円/年	
	熱源搬送ポンプインバータ制御	削減電力量	8,550 kWh/年・棟	102,595 円/年	
	最適起動停止制御	削減電力量	496 kWh/年・棟	4,464 円/年	
空調システムの正常運転確保の価値					2,755,355 円/年

図 1 1 自動制御システムの機能維持の経済評価

影響度に関しても、ヒアリング人数に限りがあり、統計データとしての信頼性が低いものとする。今後は、これらのデータを日常的に収集することにより、中長期的な故障の予測、効率的なメンテナンス計画などに生かせる基礎的データを構築する必要があると考える。

参考文献

- 1) 原改嗣、尾島俊雄：中規模事務所建築の保全施設と更新時期算定に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第576号、pp95～101、2004. 2
- 2) 『CVM2000』（開発：株式会社地産開発研究所）
- 3) 2002年度アンケート調査：（社）東京ビルディング協会
- 4) 東京大学教養学部統計学教室編：統計学入門、東京大学出版、1991
- 5) 尾島俊雄研究室：建築の光熱水原単位、早稲田大学出版部、1995
- 6) 井比呂市：建築設備ポケットブック、相模原版、2001
- 7) 林健一：環境工学、朝倉社、1996
- 8) 建築設備設計マニュアル 1空調編、（社）建築設備技術者協会、1992
- 9) 牧野修治・野村保雄著：理系学生・技術者のための基礎工学、（株）日科社出版、2000
- 10) 日本空調衛生設備工協会編著：建築設備更新マニュアル、技術院、1987. 11
- 11) 高草本明：空調設備の物理劣化の事後のための保全費用に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、第459号、pp27～36、1994. 5
- 12) 渡辺直樹、小川啓子、川口康平、原改嗣、尾島俊雄：オフィスビルにおける空調自動制御システムの保全の重要性に関する研究、日本建築学会関東支部大会学術講演集、2004. 3
- 13) 松村仁、原改嗣、尾島俊雄：自動制御機器保管費用の建物用途別傾向に関する調査研究、日本建築学会大会学術講演集（東京）、F-1分冊、p1155、2001. 9
- 14) 原改嗣、尾島俊雄：事務所建築における自動制御機器の保全施設に関する研究、日本建築学会大会学術講演集（東京）、F-1分冊、p1121、2001. 9
- 15) 川口恵司、原改嗣、松村仁、高橋俊、尾島俊雄：貸し事務所建築における自動制御機器の保全費用に関する研究、日本建築学会関東支部大会学術講演集、2000. 3
- 16) 石川良光、宮城が千加、田中義弘：空調自動制御設備の定期点検データにおける故障解析（その1 建築保全業務の概要と解析データ）、日本建築学会大会学術講演集（北陸）、pp1541～1542、1992. 8
- 17) 森田幸弘、田中義弘：空調自動制御設備の定期点検データにおける故障解析（その2 施設用途別の定量的解析結果）、日本建築学会大会学術講演集（北陸）、pp1543～1544、1992. 8
- 18) 馬場明成、田中義弘：空調自動制御設備の定期点検データにおける故障解析（その3 竣工1年以内に着目した定量的解析）、日本建築学会大会学術講演集（北陸）、pp1545～1546、1992. 8
- 19) 結城直、石川良光、田中義弘：空調自動制御設備の定期点検データにおける故障解析（その4 経年変化と不良率の検討）、日本建築学会大会学術講演集（北陸）、pp465～466、1993. 9
- 20) 東岩彦、宮城が千加、田中義弘：空調自動制御設備の定期点検データにおける故障解析（その5 不良率の詳細な検討）、日本建築学会大会学術講演集（北陸）、pp467～468、1993. 9
- 21) 鈴木毅、石川良光、東岩彦、一宮啓文、宮城が千加、木下栄蔵：事前/事後点検利用の評価手法とベースのアップロードによる不良率の推定、空気調和・衛生工学会学術講演集論文集（名古屋）、pp1049～1052、1996. 9
- 22) 一宮啓文、渡辺修、東岩彦、鈴木毅、宮城が千加、木下栄蔵：LCCによるリニューアルのコストベネフィット分析手法の拡張、空気調和・衛生工学会学術講演集論文集（名古屋）、pp833～836、1996. 9

(2005年1月10日原稿受理、2005年7月26日採用決定)