

エネルギーシミュレーションのための機器 特性データベースの構築に関する研究

第1報——搬送機器のデータベース概要と感度解析

品川 浩一^{*1} 村上 周三^{*2}
石野 久彌^{*3} 柳井 崇^{*4}
阿部 裕司^{*5}

省エネルギー手法の一つであるインバータ制御は、近年、汎用的に使用されるようになり、その評価として冷凍機やパッケージ空調機においては、APF や IPLV などの部分負荷時の特性を含んだ機器効率表示がカタログに記載され、稼動状態を考慮した省エネルギー性能が評価・認知されてきている。本研究では、搬送機器を、搬送部分（ポンプおよび送風機）・電動機・インバータの各々のデータベースとして分離し整理することで、部位別の新規機種・高性能化・JIS 改定に対応し易いデータベースの構築を目指した。本データベースによって、シロッコファンやプラグファンの定格性能といった機器種別の差異だけではなく、吐出圧一定制御や推定末端圧制御などの省エネルギー制御についても計算可能である。

キーワード：シミュレーション・BEST・搬送機器・機器特性

はじめに

インバータ利用や制御の高度化による高効率機器への対応は、低炭素化社会へのニーズに対するエネルギーシミュレーションが果たすべき重要なシズとなっている。また、実際の空調負荷は、最大熱負荷で決定した空調熱源機器容量に比べてかなり低負荷な時間が多く、部分負荷における運転時間が長くなっている。加えて、近年導入が進んできた人感センサーによる座席単位の不在時消灯や、パーソナル空調、CO₂ 制御などの空調負荷を削減する制御を効率よく行うためには、空調機器の部分負荷運転時の制御性の良さや効率化がより重要となる。社会的にも空調機器性能の評価には定格時の COP 評価だけではなく、APF や IPLV など、部分負荷時の機器特性を含んだ効率表示を行い、稼動状態に配慮した年間の省エネルギー性能を評価して

いる。

本研究では搬送機器特性に関して、そのニーズ及び機器のモデル化の考え方とこれらモデルで用いる機器特性データの分類、全体フレームについて検討を行っている。搬送部・電動機・インバータには各々の JIS 規格があり、一体開発や製造はまれで、メーカーの異なる製品の組み合わせが大半である。つまり、機器特性を部位別に分離し、入出力項目をルール化したデータベースは、部位別・機種別の高効率化や新規規格化などの追加・変更・更新に対応し易く、拡張性があるといえる。また、こうした機器・制御の新規性にすばやく対応できるデータベースが、エネルギーシミュレーションの陳腐化を防ぐ上で重要である。

本研究の機器特性（定格性能・部分負荷特性・動特性）は、統計的モデル（ある条件・範囲内での実測や計算結果に対する近似特性式化）と物理的モデル（物理的な法則に従い数式化）

注 本提案特性は BEST1406 (BEST:Building Energy Simulation Tool)⁴⁾ に導入されており、平成 25 年度基準の省エネルギー届出計算においても使用されている。

^{*1} (株)日本設計 環境・設備設計群 正会員
^{*2} 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構 特別会員
^{*3} 首都大学東京 名誉教授 SHASE 技術フェロー
^{*4} (株)日本設計 環境・設備設計群 SHASE 技術フェロー
^{*5} (株)竹中工務店 東京本店 設計部設備 正会員

によってデータベース化した。¹⁻³⁾ 本研究では、中央熱源方式における搬送機器（ポンプ・送風機）について、データベースの構築と機種構成、機器モデルと特性式の概要、および、システムの差異による消費電力等への影響における感度解析結果について報告する。

1.では、搬送機器に関する既往のシミュレーションツールおよび研究の概要と本研究で提案する方式を比較する。2.では、本研究で提案する搬送機器データベースの機器特性の構成と、搬送部を除く計算方法を示す。3.では、ポンプの機器特性データベースとその感度解析結果を、4.では、送風機の機器特性データベースとその感度解析結果を示す。

1. 既往のシミュレーションツール・研究の概要と課題

建物全体のエネルギーシミュレーションツールである、BECS⁵⁾ (HASP/ACSS⁶⁾・LCEM⁷⁾・TRNSYS⁸⁾・ENERGY PLUS⁹⁾

および本研究で提案する搬送機器に関して、機器特性の概要および特性式の特徴の比較を表-1に示す。

他のシミュレーションツールにおける搬送機器特性は、変流量・変風量制御で使用している電動機やインバータ(以降 INV)らを内包した機器特性としている。設備設計で広く利用されてきた平成11年省エネルギー基準計算であるBECSの機器特性は、定格流量に対する負荷率と制御方式によって消費電力や発熱量を算出している。また、三毛らによる渦巻きポンプの特性近似式¹⁰⁾は、特定メーカーにおける特性近似式であり、電動機やインバータについては、両者を含めた総合的効率で特性を再現しているが、①電動機出力が大きくなるにつれて効率が向上する点、②電動機種別によって定格効率が異なる点、③電動機種別によって部分負荷特性が異なる点、は再現されていない。

それに対して、本研究で提案する方式では、送風機（シロッコ・リミットロード・プラグ）・ポンプ（渦巻・多段渦巻・ライ

表-1 ポンプ・送風機の機器特性に関するプログラム間比較

		BECS/CEC/AC (HASP/ACSS ¹¹⁾)	LCEM	TRNSYS	ENERGY PLUS	本研究で提案する方式
ポンプ	モデル概要	流量と入力比の関係を二次式で設定	流量・圧力・ポンプ効率から算出	流量と入力比の関係を多項式で設定	流量・圧力・ポンプ効率から算出	流量・圧力・ポンプ効率から算出
	媒体(ライン)	未対応(水と同じ)	未対応(水と同じ)	未対応(水と同じ)	未対応(水と同じ)	ライン種類毎に粘性に関する近似特性式
	変流量対応	二方弁制御・可変速制御に対応	二方弁制御, 吐出圧一定制御, 最小吐出圧制御に対応	定流量と変流量制御を用意	定流量と変流量制御を用意	二方弁制御, 吐出圧一定制御, 末端圧一定制御, 推定末端圧制御に対応
	圧力の考え方	圧力は考慮していない	定速・変速共にP-Q特性を2次式で近似	圧力は考慮していない	各コンポーネントで圧力損失を計算	定速・変速共, ポンプ種別毎に工業会ヒアリングに基づく近似特性式
	ポンプ効率	定格風量・動力を入力	一定値(ユーザー入力)	未対応	ポンプ回転数, 直径と流体密度による特性式	定格効率・JIS規格 ¹²⁾ に基づく近似特性式 部分負荷特性: 工業会ヒアリングに基づく近似特性式
発熱	入力値×発熱比率(一定)としている	流量・圧力・ポンプ効率から算出	電動機効率・ポンプ効率から算出	流量・圧力・ポンプ効率から算出	流量・圧力・電動機効率・ポンプ効率から算出 媒体・設置空間への発熱を別々に算出	
送風機	モデル概要	流量と入力比の関係を二次式で設定	風量・圧力・送風機効率から算出	流量と入力比の関係を多項式で設定	風量・圧力・送風機効率から算出	風量・圧力・送風機効率から算出 ファン番手の自動選定
	変風量対応	ダンパ制御・サクシオンベーン制御・可変ピッチ制御・可変則制御の4種類	ダンパ制御, 吐出圧一定制御, 最小吐出圧制御に対応	定風量と変風量制御を用意	定風量と変風量制御を用意	ダンパ制御, 吐出圧一定制御, 最小吐出圧制御に対応
	圧力の考え方	圧力は考慮していない	定速・変速共にP-Q特性を2次式で近似	圧力は考慮していない	各コンポーネントで圧力損失を計算	定速・変速共, ファン種別, 番手毎に茶本 ¹³⁾ に基づく近似特性式
	送風機効率	定格風量・動力を入力	一定値(ユーザー入力)	未対応	送風機回転数, 直径と流体密度による特性式	静圧・動圧・全圧効率: ファン種別, 番手ごとに茶本 ¹³⁾ に基づく近似特性式
発熱	入力値×発熱比率(一定)としている	風量・圧力・送風機効率から算出	送風機効率から算出	未対応	風量・圧力・電動機効率・送風機効率から算出 媒体・設置空間への発熱を別々に算出	
電動機	電動機効率	未対応	未対応	未対応	未対応	電動機の自動選定 定格効率: 標準・高効率電動機はJIS規格 ¹⁴⁾ に基づく近似特性式, IPMは工業会ヒアリングに基づく近似特性式 部分負荷特性: 電動機種別ごとに工業会ヒアリングに基づく近似特性式
インバータ	INV効率	未対応	未対応	未対応	未対応	格効率・部分負荷特性共にメーカーヒアリングに基づく近似特性式
備考		ver3.00	ver3.03	ver 17.01	ver8.0.0	

注 ¹¹⁾ HASP/ACSSを基に作成されたBECS/CEC/ACは、機器特性構造は共通であるが、BECS/CEC/ACは最低負荷率が設定されている。

¹²⁾ JIS B 8313 小形渦巻ポンプ

¹³⁾ 国土交通省大臣官房庁舎部・環境課：建築設備設計基準 平成21年版

¹⁴⁾ JISC4210 一般用低圧三相かご形誘導電動機, JISC4212 高効率低圧三相かご形誘導電動機

エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究(第1報)

ン)の種類別の機器特性と、共通の電動機(標準・高効率・埋込磁石構造モータ(以降 IPM: Interior Permanent Magnet Motor))およびINVの機器特性をデータベース化している。よって、国際規格化されている電動機種別の効率や、近年省エネルギー法で行われた電動機のトップランナー基準に関してはデータベースを拡張することで再現可能であり、搬送部や電動機などの更新・追加により様々な搬送機器に拡張できる。これら多様な部位・機種に関してデータベース化しているのも本方式の機器特性のみである。なお、送風機番手別・電動機容量別のデータベースとなっていることから、各種の自動選定を整備するなどユーザー入力に配慮した機器特性データベース構築も本研究で提案する方式の特徴のひとつとなっている。

2. 搬送機器のデータベース

2.1 データベースの概要

従来の搬送機器における特性式に関しては、搬送部(ポンプ・送風機)と電動機、INVを一体化して扱うモデルを用いることが一般的であった。つまり、定格機器性能、制御方法、負荷率から消費電力および発熱量を算出するものが大半を占めていた。本研究では、以下の7点に配慮して、搬送機器特性のデータベース化を行っている。

- 1) 各種搬送部・電動機・インバータを分離し拡張性に配慮
- 2) JIS規格・国交省建築設備設計基準との整合(表-1¹²⁻⁴)
- 3) 共通近似特性式で表した機種別特性に対する係数データベースの作成
- 4) 適用範囲の大きな連続関数による近似特性式作成
- 5) 送風機型番・ポンプ型番・電動機容量の自動選定
- 6) 適用範囲外のルール整理(最大最小の境界点での運転とし、入出力共に固定値)
- 7) 各機器特性についてはメーカーによる特異性をできるだけ排除するため、各種工業会のヒアリングを実施

なお、各種データの近似特性式作成に関しては、表計算ソフトの最小二乗法による近似式計算を利用し、決定係数が大きな近似方法を組み合わせ、機器特性の再現に配慮した。

2.2 提案機器特性の計算フロー

本研究では、搬送機器特性を表現するために、搬送部(ポンプ・ファン)・電動機・INVを別々に定式化し、組み合わせることで、様々な搬送システムの対応を想定している。図-1に提案方式による搬送機器の計算フローを示す。統計的モデルと物理的モデルを組み合わせることにより、機器特性を再現している。

2.3 搬送部のデータベース

ポンプおよび送風機における搬送部の機器特性は、各機種で整理されており、3.以降においてその概要を記す。

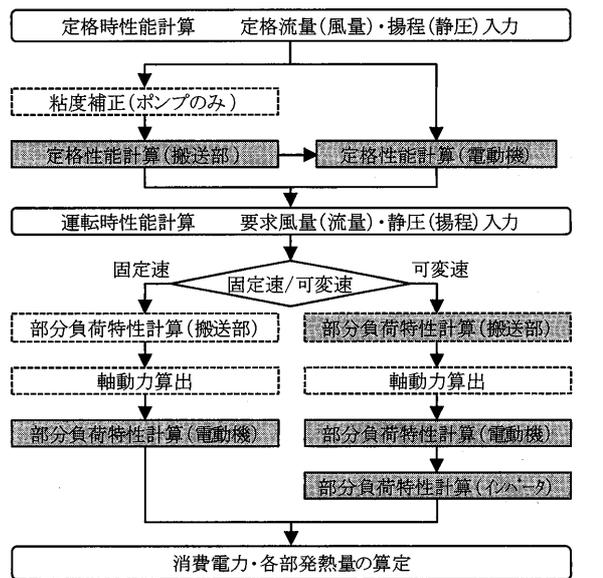
2.4 電動機およびインバータのデータベース

ポンプ・送風機における電動機およびインバータの特性は、共通の近似特性式を用いている。以下にその概要を示す。

(1) 電動機の近似特性式

電動機の定格効率は、JISC4210、JISC4212、および、メーカ

ーヒアリングより、統計的なモデルで近似特性式を作成した。ただし、建物設備用に使用されている電動機は、2または4極が主であるため、6極は対象外とした。また、変速時の効率変化に関する機器特性は、各電動機においてメーカーヒアリングより作成した。表-2に電動機の近似特性式、表-3に電動機の近似特性式係数、図-2に定格・変速時効率における電動機定格出力と効率の関係を示す。定格時効率の各電動機の決定係数は0.9以上あり、標準型・高効率電動機の電動機効率は50~60Hzまでは定格効率と同等だが、それ以下の周波数は電動機定格出力が小さくなるにつれて急激に低下する特性となる。



注 [] 統計的モデル [] 物理的モデル [] 統計+物理的モデル
図-1 搬送機器の計算フロー

表-2 電動機およびインバータの近似特性式

●電動機定格効率($EF_{M,N}$)の算出¹

$$EF_{M,N} = EF_{M,N1} \ln(RP_{M,N}/10^3) + EF_{M,N2} (RP_{M,N}/10^3)^{EF_{M,N3}} + EF_{M,N4} \dots (1-a)$$

●電動機変速時効率(EF_M)の算出²

$$RSR_M = FE/FE_N$$

$$EF_M = EF_{M,N} \{ EF_{M1} \exp(EF_{M2} RP_{M,N}/10^3) \ln(RSR_M) + 1 \} \dots (1-b)$$

●インバータ変速時効率(EF_{INV})の算出²

$$EF_{INV,N} = 0.95 (\leq 0.4kW), 0.96 (\leq 0.75kW), 0.97 (\geq 1.5kW)$$

$$EF_{INV} = EF_{INV,N} \{ 0.058 (RP_{M,N}/10^3)^{-0.11} \ln(RSR_M) + 1 \} \dots (1-c)$$

【記号】 $EF_{M,N}$: 定格電動機効率 [-], $RP_{M,N}$: 電動機定格出力 [W], $EF_{M,N1-4}$: 電動機定格効率算定補正係数 [-], RSR_M : 電動機回転速度率 [-], FE : 運転インバータ周波数 [Hz], FE_N : 電源周波数 [Hz], EF_M : 変速時電動機効率 [-], EF_{M1-2} : 変速時電動機効率算定補正係数 [-], $EF_{INV,N}$: 定格インバータ効率 [-], EF_{INV} : 変速時インバータ効率 [-]

注 ¹ 標準型電動機の37kW以上は、電動機定格効率を0.87とする。
² 75kW以上は、INVによる効率低下の割合は一定。

表-3 電動機の近似特性式係数

		標準型	高効率	IPM
電動機の 定格効率	$EF_{M,N1}$	0.3295	0.2588	0.04872
	$EF_{M,N2}$	-2.986	-5.407	-1.784
	$EF_{M,N3}$	0.0826	0.0387	0.0176
	$EF_{M,N4}$	3.697	6.210	2.676
電動機の 変速時効率	EF_{M1}	0.20	0.20	0.10
	EF_{M2}	-0.02	-0.025	-0.02

(2) インバータの近似特性式

インバータ効率の変化に関する近似式は、メーカーヒアリングにより得られた特性データを基に、統計的なモデルで近似特性式を作成した。図-3に電動機回転速度率とインバータ効率の関係を示す。インバータ効率の変化は、電動機効率変化に比べ、電動機定格出力による影響が小さい特性となっている。

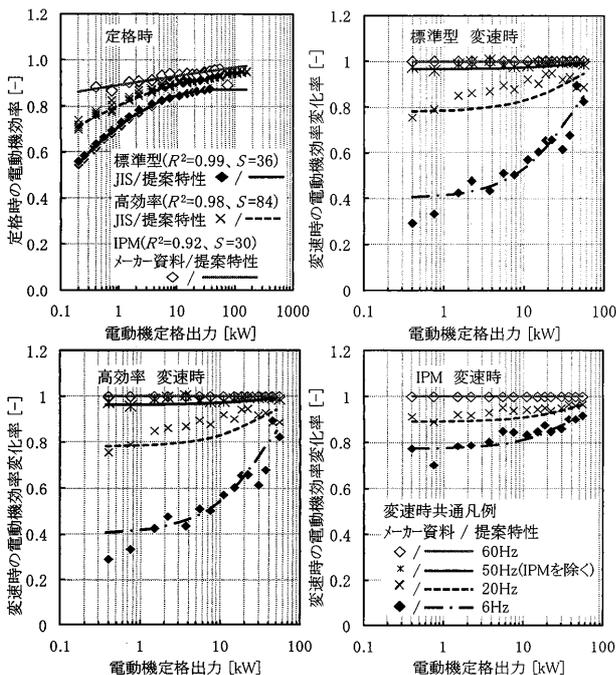
3. ポンプのデータベース

3.1 ポンプ特性式の概要

ポンプ特性式の特徴は以下のとおりである。表-4にポンプ機器特性の特性式、表-5にポンプの近似特性式係数、図-4に定格時ポンプ効率、図-5に負荷率と揚程の関係、図-6に負荷率とポンプ効率の関係を示す。

(1) 定格効率の近似特性式

渦巻・多段渦巻の定格効率はJIS B 8313, ラインの定格効率はメーカーヒアリングから統計的なモデルで作成した。なお、ラインポンプはメーカーによる効率の差異が大きかったが、決定係数が0.5を超え、かつその分布の中心を取る特性式であるため、平均的な機器特性を再現しているものとした。



注 R²は決定係数を, Sはサンプル数を示す。
 図-2 定格・変速時における電動機定格出力と電動機効率の関係

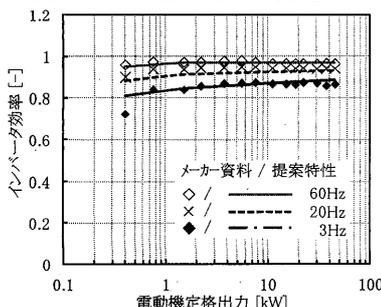


図-3 定格・変速時における電動機定格出力とインバータ効率の関係

表-4 ポンプ機器特性の特性式

- ポンプ定格効率(EF_{P,N})の算出

$$EF_{P,N} = STF_P \{ EF_{P,N1} \ln(60GW_{P,N}/10^6) + EF_{P,N2}/(60GW_{P,N}/10^6) + EF_{P,N3} \} + 0.86$$
 (エチレングリコール系ライン: KV=17)
 STF_P = 1 (水: KV = 1.3)(2)-a
- 電動機定格出力(RP_{M,N})の算出

$$SP_{P,N} = 0.163 \{ SG(60GW_{P,N}/10^6)(HW_{P,N}/9.8 \times 10^3) \} / EF_{P,N}$$
(2)-c

$$RP_{M,N} = SP_{P,N} \times K$$
(2)-d
- 消費電力(EP_M)の算出(固定速の場合)

$$LF_P = GW_P / GW_{P,N}$$
(2)-e

$$HW_P = HW_{P,N} (\sum_{k=1}^3 HF_{P(k)} \times LF_P^{k-1})$$
(2)-f

$$EF_P = EF_{P,N} (\sum_{k=1}^3 EF_{P(k)} \times LF_P^{k-1})$$
(2)-g

$$SP_P = 0.163 \{ SG(60GW_P/10^6)(HW_P/9.8 \times 10^3) \} / EF_P$$
(2)-h

$$EP_M = SP_P / EF_{M,N}$$
(2)-i
- 消費電力(EP_M)の算出(可変速の場合)

$$\frac{HW_P}{HW_{P,N} (\sum_{k=1}^3 HF_{P(k)} \times LF_P^{k-1})} = \left(\frac{FE}{FE_N} \right)^2$$
(2)-j

$$LF_P = GW_P / \{ GW_{P,N} (FE/FE_N) \}$$
(2)-k

$$EF_P = EF_{P,N} (\sum_{k=1}^3 EF_{P(k)} \times LF_P^{k-1})$$
(2)-l

$$SP_P = 0.163 \{ SG(60GW_P/10^6)(HW_P/9.8 \times 10^3) \} / EF_P$$
(2)-m

$$EP_M = SP_P / (EF_M \times EF_{INV})$$
(2)-n
- 発熱量の算出

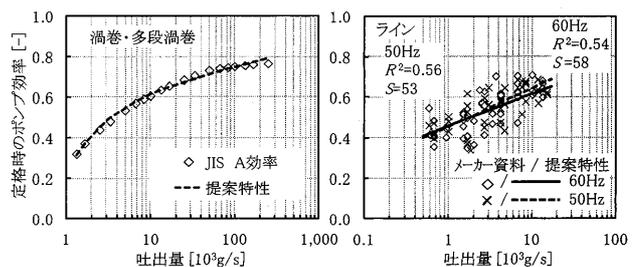
$$Q_R = (EP_M - SP_P) + 0.5SP_P(1 - EF_P)$$
(2)-o

$$Q_W = 0.5SP_P(1 - EF_P)$$
(2)-p

【記号】EF_{P,N}: 定格ポンプ効率 [-], EF_{P,N1-3}: 定格ポンプ効率算定補正係数 [-], STF_P: 粘度補正係数 [-], GW_{P,N}: 定格流量 [g/s], KV: 動粘度 [cST], RP_{M,N}: 電動機定格出力 [W], SP_{P,N}: 定格軸動力 [W], SG: 比重 [kg/L], HW_{P,N}: 定格揚程 [Pa], K: 電動機選定補正係数 [-], EP_M: 消費電力 [W], LF_P: ポンプ負荷率 [-], HF_{P1-3}: 揚程算定補正係数 [-], EF_{P1-3}: ポンプ効率算定補正係数 [-], GW_P: 運転流量 [g/s], HW_P: 運転揚程 [Pa], EF_P: 運転ポンプ効率 [-], SP_P: 運転軸動力 [W], EF_{M,N}: 定格時電動機効率 [-], FE_N: 電源周波数 [Hz], FE: 運転インバータ周波数 [Hz], EF_M: 変速時電動機効率 [-], EF_{INV}: インバータ効率 [-], Q_R: 媒体への発熱量 [W], Q_W: 周囲空間への発熱量 [W]

表-5 ポンプの近似特性式係数

		渦巻	多段渦巻	ライン 50Hz	ライン 60Hz
ポンプ定格効率	EF _{P,N3}		0.046	0.082	0.069
	EF _{P,N2}		-0.019	0	0
	EF _{P,N1}		0.667	0.685	0.652
ポンプ効率変化	EF _{P3}	-0.6235	-0.8042	-0.4230	-0.2581
	EF _{P2}	1.4631	1.7145	0.2151	-0.0184
	EF _{P1}	0.1648	0.0909	1.2086	1.2780
ポンプ揚程変化	HF _{P3}	-0.2546	-0.3568	-0.08467	-0.7779
	HF _{P2}	0.0784	0.1871	1.7919	1.7004
	HF _{P1}	1.1751	1.1658	0.0562	0.0793



注 R²は決定係数を, Sはサンプル数を示す。
 図-4 定格時ポンプ効率

エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究(第1報)

(2) 搬送媒体(水・ブライン)による補正に関する特性式
ポンプの定格時性能は清水を基準としており、比重量・粘度に対して物理的なモデルによる補正を作成した。

(3) 機種別のP-Qおよび効率変化の特性式

渦巻・多段渦巻ポンプ・ラインポンプの負荷率変化によるP-Q特性、効率変化特性を統計的なモデルで作成し、稼動状態・多様な変流量制御による感度が物理モデルとして計算可能なデータベースとした。P-Q特性は0.7程度の決定係数であり、効率変化特性は0.9以上の決定係数であるため、平均的な機器特性を再現しているものとした。

3.2 BECS/CEC/ACとの比較

提案特性とBECS/CEC/ACとの比較をおこなった。計算上の諸条件を表-6に、計算結果を図-7に示す。ただし、配管の圧力損失は、水量の二乗に比例するものとした。

流量と消費電力の関係は同じ傾向を示している。又、変流量制御においてはポンプの制御方法が、消費電力の削減に大きく影

響することも再現されている。

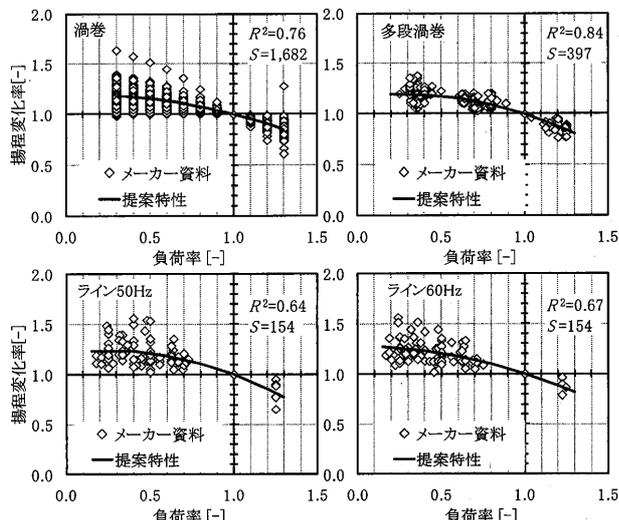
3.3 計算モデルの感度解析と考察

近年竣工テナントオフィスビルの冷水負荷の実測負荷の頻度分布を基に、2次ポンプの年間シミュレーションを行い、年間消費電力・発熱量の感度分析を行った。計算上の諸条件を図-8に、計算結果を図-9に示す。

消費電力や発熱量の変化は、電動機種による影響に比べ制御方式による影響が強く、電動機の高効率化+適切な制御の導入が省エネルギーにつながる。

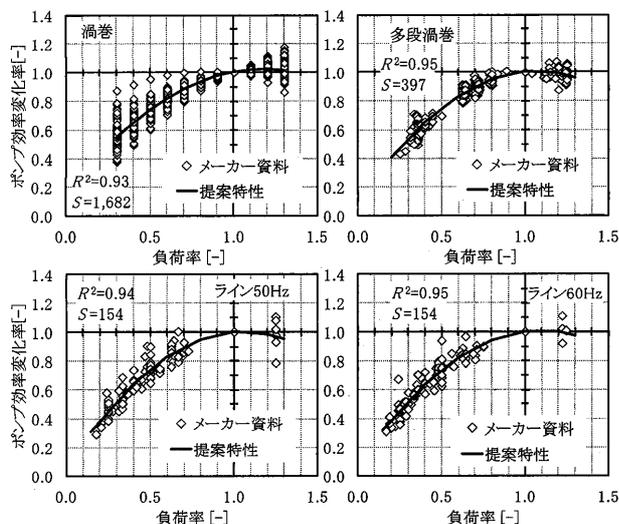
3.4 変流量制御モデルにおける特性式の感度解析

図-10に示す末端差圧一定変流量システムにおいて、系の総



注 R²は決定係数を、Sはサンプル数を示す。

図-5 負荷率と揚程の関係



注 R²は決定係数を、Sはサンプル数を示す。

図-6 負荷率とポンプ効率の関係

表-6 計算条件

ポンプ (渦巻)	定格流量	[l/min]	1,000	
	定格揚程	[m]	25	
	ポンプ効率	[%]	64.8	
電動機	固定速/INV制御	[kW]	7.5	
	定格時電動機効率	[%]	83.4/88.6/92.6	
	標準/高効率/IPM			
制御設 定値	インバータ制御範囲	[Hz]	15~50	
	最小流量	[l/min]	200	
		吐出圧一定	[kPa]	294
		末端差圧一定	[kPa]	100

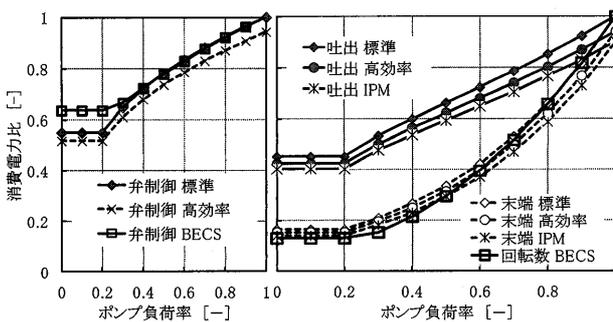


図-7 BECS との比較結果

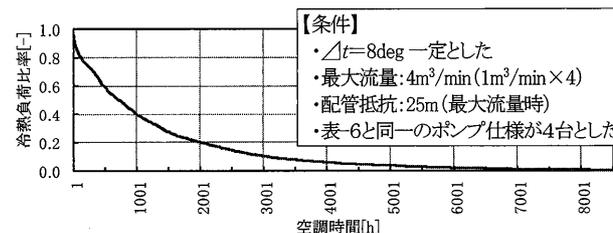
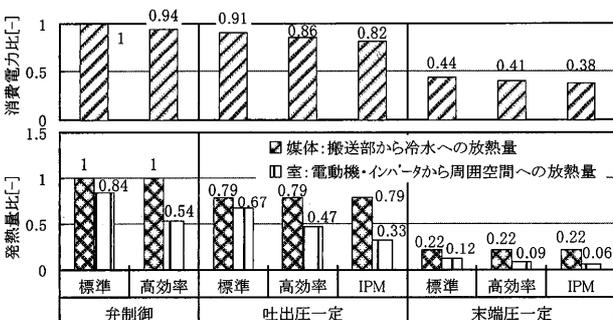


図-8 冷熱負荷の年間デュレーションカーブ



注 発熱量比とは、弁制御・標準電動機の媒体への放熱量を基準(=1.0)としたときの比率

図-9 制御方法と消費電力量比率・発熱量比率の比較

圧力損失の変化が消費電力に与える影響を、提案特性を用いた感度解析を行った。試算した結果を図-11 に示す。ただし、配管の圧力損失は、水量の二乗に比例するものとした。ここで、従来の圧力損失バランスを考慮しない流量基準計算は、CASE3 に相当する。

CASE3 に対してその他の CASE では圧力損失にそれぞれ約 ±10%の差があり、その影響が消費電力の試算結果にも反映されている。既往のプログラムでは算出できなかった圧力損失バランスの影響を算出可能である。

4 送風機

4.1 送風機データベースの概要

送風機データベースの特徴は以下のとおりである。

(1) 機器選定の特性式

提案特性は送風機機種別・型番別に記述されるため、送風機型番の選定が必要となる。ユーザーの入力を簡略化するため、統計的なモデルによる選定手順もデータベースに組み込むこととした。表-7 に送風機機器特性の近似特性式を、図-12~14 に送風機種別の型番選定範囲を示す。なお、選定手順とは、国土交通省の建築設備設計基準等に示される、設備設計時に一般的に使用される方法である。

(2) 定格運転時の特性式

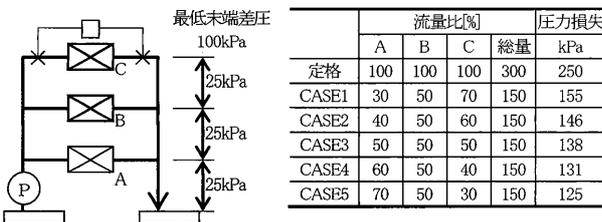
シロッコおよびリミットロード送風機は JIS 規格、プラグファン

ンはメーカーヒアリング結果を番手毎に、動圧・全圧効率を統計的なモデルで作成した。図-15 にシロッコ・リミットロード送風機の動圧を示す。なお、プラグファンは動圧をほとんど発生しないため、静圧=全圧となっている。図-16~18 に送風機種別の全圧効率を示す。

表-7 送風機機器特性の特性式¹⁾

●送風機の番手の算出(条件式を満足する NUM_F を検索)	$PA_{F,N} <> \sum_{k=1}^4 P_{N(k)}(NUM_F)GA_{F,N}^{k-1}$ ……(3)-a
●定格時送風機の動圧($PA_{F,d,N}$)の算出	$PA_{F,d,N} = P_{d0}(NUM_F)GA_{F,N}^2$ (シロッコ・リミットロード) $PA_{F,d,N} = 0$ (プラグ) ……(3)-b
●定格時送風機的全圧効率($EF_{F,N}$)の算出	$PA_{F,t,N} = PA_{F,d,N} + PA_{F,N}$ ……(3)-c $EF_{F,N} = \sum_{k=1}^4 (P_{F(k)}(NUM_F)PA_{F,t,N}^{k-1})$ (シロッコ・プラグ) $EF_{F,N} = P_{F1}(NUM_F)PA_{F,t,N}^{P_{F2}(NUM_F)}$ (リミットロード) ……(3)-d
●電動機定格出力($RP_{M,N}$)の算出	$SP_{F,N} = GA_{F,N} \times PA_{F,t,N} / 1,200 \times EF_{F,N}$ ……(3)-e $RP_{M,N} = SP_{F,N} \times K$ ……(3)-f
●稼動時送風機効率(EF_F)の算出	$PA_{F,d} = P_{d0}(NUM_F)GA_F^2$ ……(3)-g $PA_{F,t} = PA_{F,d} + PA_F$ ……(3)-h $EF_F = \sum_{k=1}^4 (P_{F(k)}(NUM_F)PA_{F,t}^{k-1})$ (シロッコ・プラグ) $EF_F = P_{F1}(NUM_F)PA_{F,t}^{P_{F2}(NUM_F)}$ (リミットロード) ……(3)-i
●消費電力(EP_M)の算出(固定速の場合)	$SP_F = GA_F \times PA_{F,t} / 1,200 \times EF_F$ ……(3)-j $EP_M = SP_F / EF_{M,N}$ ……(3)-k
●消費電力(EP_M)の算出(可変速の場合)	$FE/FE_N = \sqrt[3]{(GA_F \times PA_{F,t}) / (GA_{F,N} \times PA_{F,t,N})}$ ……(3)-l $SP_F = GA_F \times PA_{F,t} / 1,200 \times EF_F$ ……(3)-m $EP_M = SP_F / (EF_M \times EF_{INV})$ ……(3)-n
●発熱量の算出	1)電動機が風道内に無い場合 $Q_R = (EP_M - SP_F) + 0.5SP_F(1 - EF_F)$ ……(3)-o $Q_A = 0.5SP_F(1 - EF_F)$ ……(3)-p 2)電動機が風道内にある場合 $Q_R = 0$ ……(3)-q $Q_A = (EP_M - SP_F) + SP_F(1 - EF_F)$ ……(3)-r

【記号】 NUM_F :送風機番手 [-], $GA_{F,N}$:定格風量 [g/s], $P_{N1-4}(NUM_F)$:送風機番手選定補正係数 [-], $P_{d0}(NUM_F)$:動圧算定補正係数 [-], $PA_{F,N}$:定格機外静圧 [Pa], $PA_{F,d,N}$:定格機外動圧 [Pa], $PA_{F,t,N}$:定格機外全圧 [Pa], $SP_{F,N}$:定格軸動力 [W], $RP_{M,N}$:電動機定格出力 [W], K :電動機選定補正係数 [-], GA_F :運転風量 [g/s], $PA_{F,d}$:運転機外動圧 [-], $PA_{F,t}$:運転機外全圧 [Pa], PA_F :運転機外静圧 [Pa], EF_F :運転全圧効率 [-], SP_F :運転軸動力 [W], $EF_{M,N}$:定各電動機効率 [-], EP_M :電力消費量 [W], EF_M :変速時電動機効率 [-], EF_{INV} :インバータ効率 [-], Q_R :室内への発熱量 [W], Q_A :送風空気への発熱量 [W]



注 図は定格流量時の圧力損失を示す。

図-10 変流量制御モデル

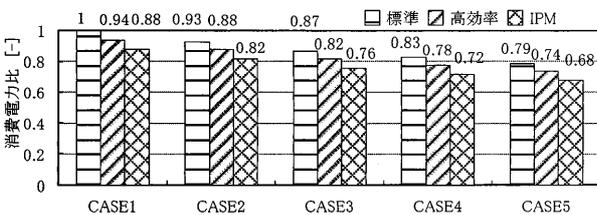
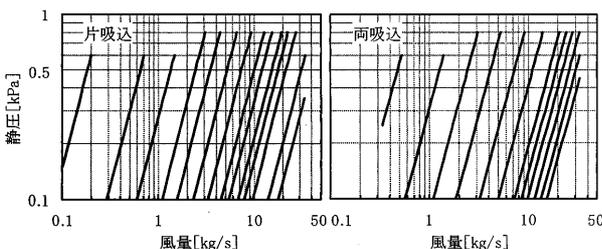
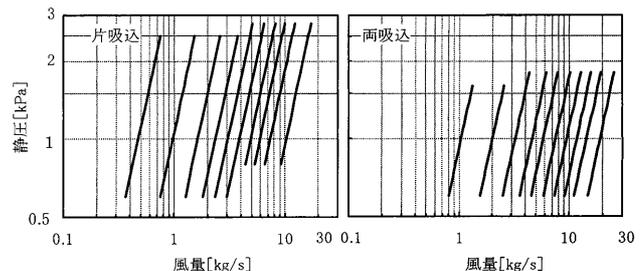


図-11 近似特性式モデルによる検証



注 左から#1, #1 1/2, #2, #2 1/2, #3, #3 1/2, #4, #4 1/2, #5, #5 1/2, #6, #7, #8(片吸込), #9(両吸込)

図-12 シロッコ送風機の型番選定範囲



注 左から#2 上限, #2, #2-1/2, #3, #3-1/2, #4, #4-1/2, #5, #5-1/2, #6

図-13 リミットロード送風機の型番選定範囲

エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究(第1報)

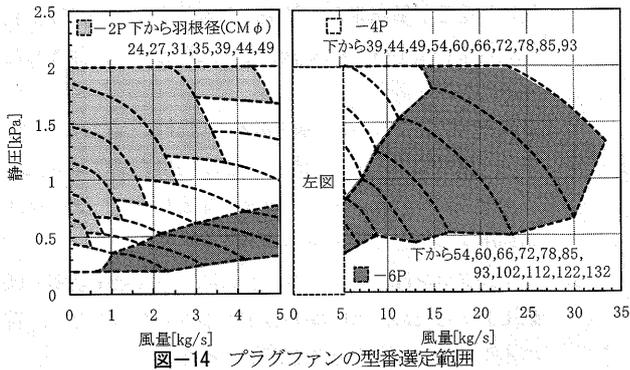
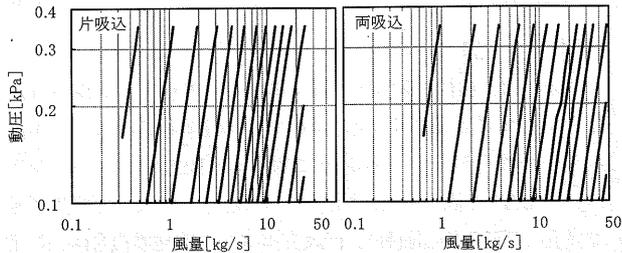
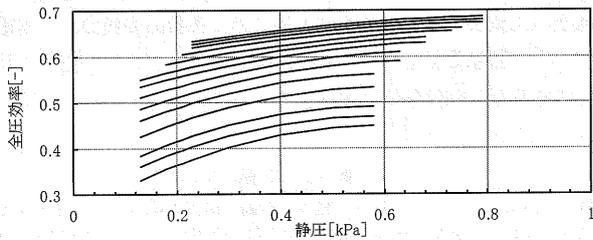


図-14 プラグファンの型番選定範囲



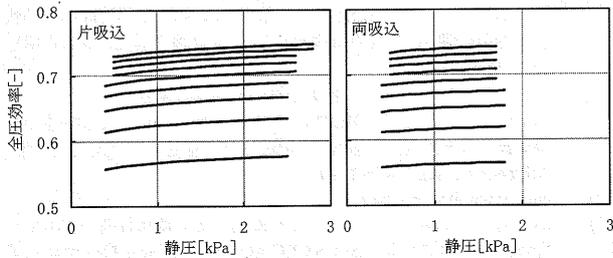
注 左から#1, #1 1/2, #2, #2 1/2, #3, #3 1/2, #4, #4 1/2, #5, #5 1/2, #6, #7, #8(片吸込), #9(片吸込)

図-15 シロッコ・リミットロード送風機の動圧



注 下から#1, #1 1/2, #2, #2 1/2, #3, #3 1/2, #4, #4 1/2, #5, #5 1/2, #6, #7, #8(片吸込), #9(片吸込)

図-16 シロッコ送風機の全圧効率



注 下から#1, #1 1/2, #2, #2 1/2, #3, #3 1/2, #4, #4 1/2, #5, #5 1/2, #6

図-17 リミットロード送風機の全圧効率

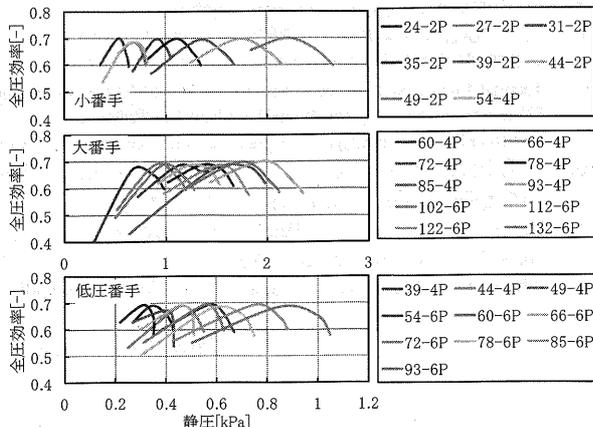


図-18 プラグファンの全圧効率

(3) 機種別の全圧変化の特性式

負荷率変化による全圧変化を軸動力が回転数の3乗に比例するとした物理的なモデル(式(3)-1)で作成し、稼動状態・多様な変風量制御による感度が計算可能なデータベースとした。

4.2 BECS/CEC/AC との比較

提案特性と BECS/CEC/AC との比較をおこなった。計算上の諸条件を表-8に、計算結果として BECS との比較結果、およびシロッコファンとプラグファンの比較結果を図-19に示す。

この計算モデルにおいて、末端 VAV 圧力補償制御とは、VAV 入口の一定静圧を確保しつつ、送風機の吐出圧を下げたて運転することを示し、この場合ダクト系圧力損失は風量の二乗に比例するものとした。

BECS の回転数制御と提案特性による末端 VAV 圧力補償制御の特性は、ほぼ同じ傾向を示している。さらに提案特性では、電動機種別やインバータ制御種別による違いが再現可能となっており、インバータ変風量制御においては制御方法が、消費電力の削減に大きく影響することも再現されている。

プラグファンはシロッコファンに比べ全圧効率が高いことに加え、静圧に対し動圧は十分小さい値となることから、定格風量時において消費電力の差が大きくなっている原因と考えられる。

また、風量が80%以下において、プラグファンの吐出圧一定制御に比べシロッコファンの末端圧力補償制御のほうが、省エネルギー効果が高くなっている。

4.3 変風量制御モデルにおける感度解析

図-20、表-9に示す変風量システムについて、風量が不均一となった場合の圧力損失の影響を、提案特性を用いた場合の感度解析を行った。各 CASE の消費電力の計算結果を図-21に示

表-8 計算条件

形式	両吸込シロッコ		プラグファン
ファン	設計風量(A)	[m³/h]	15,000
	設計機外静圧	[Pa]	600
	ファン効率(全圧)	[%]	59 69
	定格出力	[kW]	7.5 5.5
電動機	効率	[%]	83/89/93 82/88/92
	標準/高効率/IPM		
制御設定値	インバータ制御範囲	[Hz]	20 ~ 50
	最小風量(Aの30%)	[m³/h]	4,500
	末端 VAV 入口圧力補償	[Pa]	100

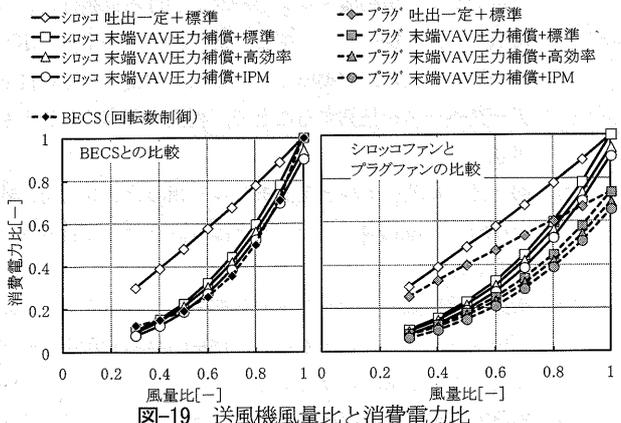


図-19 送風機風量比と消費電力比

す。なおインバータの制御方式については前項 4.2 に示した末端 VAV 圧力補償制御としている。CASE1 と 2 では風量比は同じであるが、制御方式が異なる。また CASE2 と 3 では制御方式および送風機送風量は同じであるが、風量比が異なる。制御方式により省エネルギー性能が異なること、送風量が同じであっても風量比の違いによるダクト内における圧力勾配の違いを反映できる制御方式とすることにより、より省エネルギー性能が高まることが再現されている。

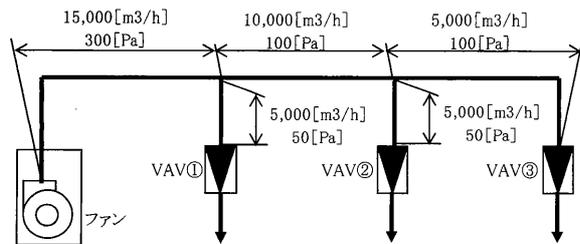


図-20 変風量制御モデル

表-9 変風量制御モデルの検証運転パターン

	風量比[%]				制御方式
	VAV①	VAV②	VAV③	全体	
設計時	100	100	100	100	-
CASE1	50	50	100	67	吐出部主ダクト圧力一定
CASE2	50	50	100	67	末端 VAV 入口圧力補償
CASE3	100	50	50	67	末端 VAV 入口圧力補償

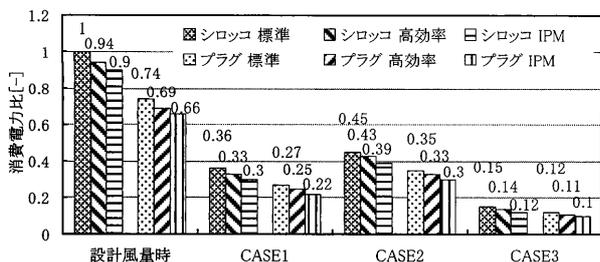


図-21 近似特性式モデルによる検証

まとめ

本研究では、中央熱源方式における搬送機器（ポンプ・送風機）について、搬送部分、電動機、インバータに関する柔軟性・拡張性の高いデータベースを開発した。

- 1) 既往のエネルギーシミュレーションを調査し、搬送機種だけでなく、電動機・インバータにおける拡張性という観点から、搬送モデルを提案した。また、送風機・ポンプの型番の選定、電動機の選定手順、および、定格性能データベースを整備することで、利便性を高めることも考慮した。
- 2) 搬送部は物理モデルと統計モデルを組み合わせて特性式を作成し、電動機・インバータは統計モデルで特性式を作成した。
- 3) 搬送・電動機・インバータの各部分における入出力を本データベースと同じとすれば、将来開発品や新規データに対しても拡張が可能である。
- 4) 本研究で提案した変流量・変風量制御モデルの負荷率変

化に対する計算結果と、従来から省エネルギー計算に利用されている BECS/CEC/AC との比較を行い、提案した方式の感度を評価した。

- 5) 平成 11 年省エネルギー基準計算では計算できなかった、流量・風量変化とその偏在による圧力損失バランスによる消費電力への影響が、本研究で提案したデータベースを利用することで再現可能である。
- 6) ブラグファンは、シロッコファンに比べ高全圧効率・低動圧であるため、電動機の選定が小さくなることで、省エネルギーにつながる事がわかった。

謝 辞

本研究は、(財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画委員会(村上 周三委員長)」および専門版開発委員会(石野 久彌委員長)、行政支援ツール開発委員会(坂本 雄三委員長)、機器特性 SWG(品川浩一主査)の活動成果の一部である。また、各種機器特性データの調査にあたっては、日本冷凍空調工業会、日本産業機械工業会等の各製品委員会、日本電気学会、製品委員会のないものに関してはメーカーの協力を得て実施した。関係各位に謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 品川 浩一ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 52）ポンプ・ファン・空調機器の特性，空気調和・衛生工学会大会論文集，2009(熊本)，pp. 691～694
- 2) 柳井 崇ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 88）機器特性の整備状況と今後の課題，空気調和・衛生工学会大会論文集，2011(名古屋)，pp. 1715～1718
- 3) 品川 浩一ほか：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 109）機器特性の整備状況と定式化手法の検討，空気調和・衛生工学会大会論文集，2012(札幌)，pp. 1387～1390
- 4) <http://www.ibec.or.jp/best/>
- 5) (一財) 建築環境・省エネルギー機構：空気調和設備の省エネルギー計算プログラム BECS/CEC/AC for Windows 操作マニュアル，ver3.00
- 6) 日本建築設備士協会：空調システム標準シミュレーションプログラム HASP/ACSS/8502 プログラム解説書
- 7) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課：LCESM ツール ver3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム，2014.2
- 8) Thermal Energy System Specialists, LLC：TRNSYS17 a TRNSient System Simulation Program Volume4 Mathematical Reference
- 9) ENERGYPLUS™：EnergyPlus Engineering Reference, October 1, 2013
- 10) 三毛正仁，ほか：渦巻ポンプの特性近似式の提案，空気調和・衛生工学会論文集，pp.19～26，2007 年
- 11) BEST コンソーシアム：BEST-P 機器特性マニュアル，pp.5-27～5-68，pp.6-22～52，2014 年
<http://www.ibec.or.jp/best/program/m_131_kikitoukusei.pdf>

(平成 27.7.9 原稿受付)

Study on Database Construction of Equipment Characteristics of Air Conditioning for Energy Simulation

Part1—Database and Sensitivity Analysis of the Conveyance Apparatus

by Koichi SHINAGAWA *1, Shuzo MURAKAMI *2, Hisaya ISHINO *3, Takashi YANAI *4 and Hiroshi ABE *5

Key Words : Simulation, BEST, Conveyance Apparatus, Equipment Characteristics

Synopsis : This paper describes a new common database for the equipment characteristics of conveyance apparatus (pump and fan). This database stores the equipment characteristics (the conveyance part, motor , and inverter) and can calculate 1) the rated performance of each type (i.e., sirocco fan and plug fan) and 2) the effects of the energy-saving control device (i.e., delivery pressure constant control and estimated terminal pressure constant control). Furthermore, this database can be calculated by developing a new common formulation structure for a new type of equipment.

According to the simulation results (for delivery pressure constant

*1 Nihon Sekkei, Inc., Member

*2 Institute for Building Environment and Energy Conservation, Fellow Member

*3 Tokyo Metropolitan University, Fellow Engineer

*4 Nihon Sekkei, Inc., Fellow Engineer

*5 Takenaka Corporation, Member

control and estimated terminal pressure constant control) of this database and BECS/CEC/AC, the energy consumption tendencies are similar.

The energy consumption, which also takes into account the influence of the pressure loss, the balance in the change, and the uneven distribution of the flow rates can be calculated by this database.

Owing to its high efficiency and low dynamic pressure, the plug fan contributes to energy savings in comparison with a sirocco fan.

(Received July 9, 2015)