

secondary pump プログラム  
計算ツール仕様書

## 目次

1. プログラムの機能.....	1
2. 参考とする資料.....	1
3. 計算手順.....	2
3.1. 全体.....	2
3.2. 計算値による「流量率－消費電力を求めるための係数」の関係式の計算.....	3
3.2.1. 無次元の特性曲線の係数の推定.....	4
3.2.2. 回転速度の計算.....	5
3.3. 実測値による「流量率－消費電力を求めるための係数」の関係式の計算.....	6
3.4. 入力データ.....	7
3.4.1. 建物および2次冷温水配管システムの名称.....	7
3.4.2. ポンプ特性.....	7
3.4.3. ポンプ仕様.....	10
3.4.4. ポンプ設計.....	10
3.4.5. 計算設定.....	10
3.4.6. 実測値.....	10
4. 計算値による「流量率－消費電力を求めるための係数」の関係式の計算.....	11
4.1. 無次元の特性曲線の係数の推定.....	11
4.1.1. サンプルングデータの単位換算.....	11
4.1.2. サンプルングデータ数の確認と判断.....	12
4.1.3. サンプルングデータの無次元化.....	12
4.1.4. 係数の推定.....	13
4.1.5. 形状の確認と判断.....	14
4.2. 「流量率－消費電力を求めるための係数」の関係式の3次式係数.....	15
4.2.1. 設計最大流量.....	15
4.2.2. ポンプ増段閾値流量.....	15
4.2.3. ポンプ電動機定格出力合計.....	15
4.2.4. 2次側流量と必要往還差圧の関係式.....	16
4.2.5. 2次側流量率とポンプ軸動力比の関係式.....	16
4.3. 計算結果の確認.....	24
5. 実測値による「流量率－消費電力を求めるための係数」の関係式の計算.....	25
5.1. 「流量率－消費電力を求めるための係数」の関係式の3次式係数.....	25
6. 任意評定用書式データの作成.....	26
7. 関係式の比較.....	26

## 1. プログラムの機能

本プログラムは、VWV システムにおいて使用されるポンプシステムを対象として、「非住宅建築物に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム」の入力用 3 次式係数を取得することを目的として実測値および計算値による 2 パターンを計算し、その結果を任意評定用書式として出力する。

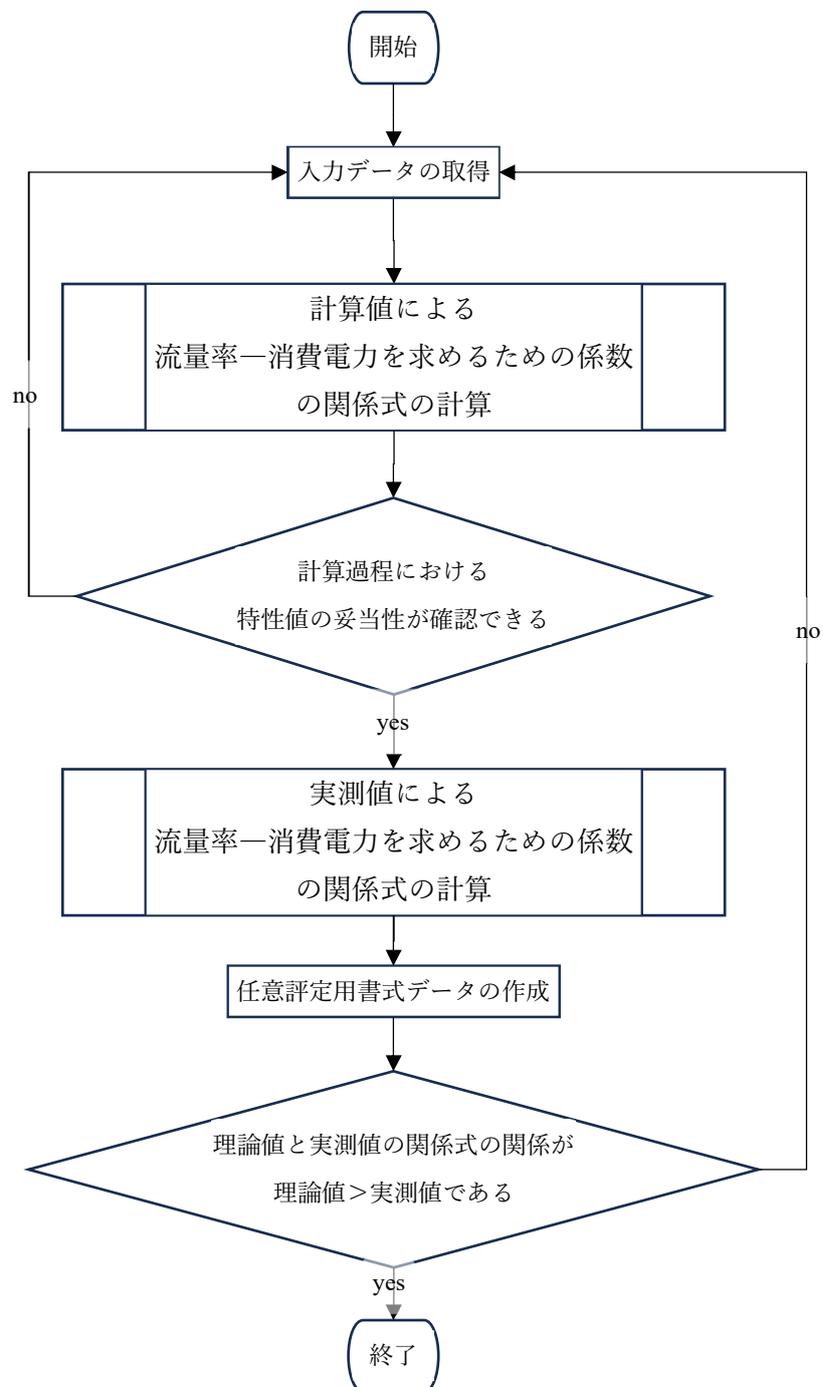
実測値による結果は「非住宅建築物に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム」の入力値として、製品仕様からの計算による結果は、実際の VWV システムが製品仕様の範囲内で使用されているかの検証用として、それぞれ利用される。

## 2. 参考とする資料

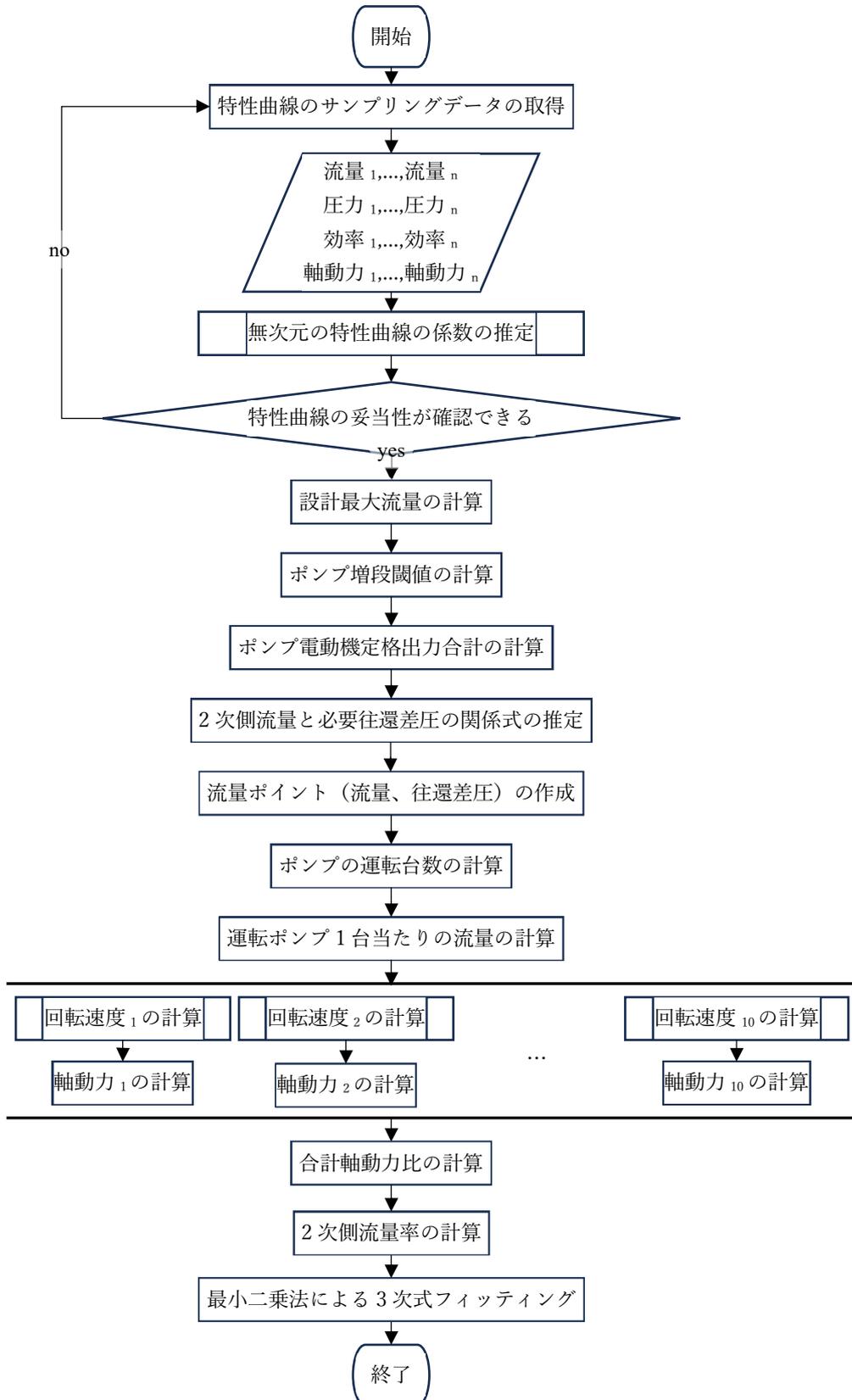
- 1) FPT1 法による変流量二次ポンプシステムの省エネルギー設計・調整・試験方法に関する技術解説書、建築環境省エネルギー機構、2023 年 ※以下、「技術解説書」と略す。
- 2) ACSESC<sub>x</sub> 利用マニュアル (D12\_機器編 (水搬送) マニュアル)、2023 年  
(<http://www.bsca.or.jp/tools-library/116/>)
- 3) JIS B 8301:2018 遠心ポンプ、斜流ポンプ、軸流ポンプ ー試験方法

## 3. 計算手順

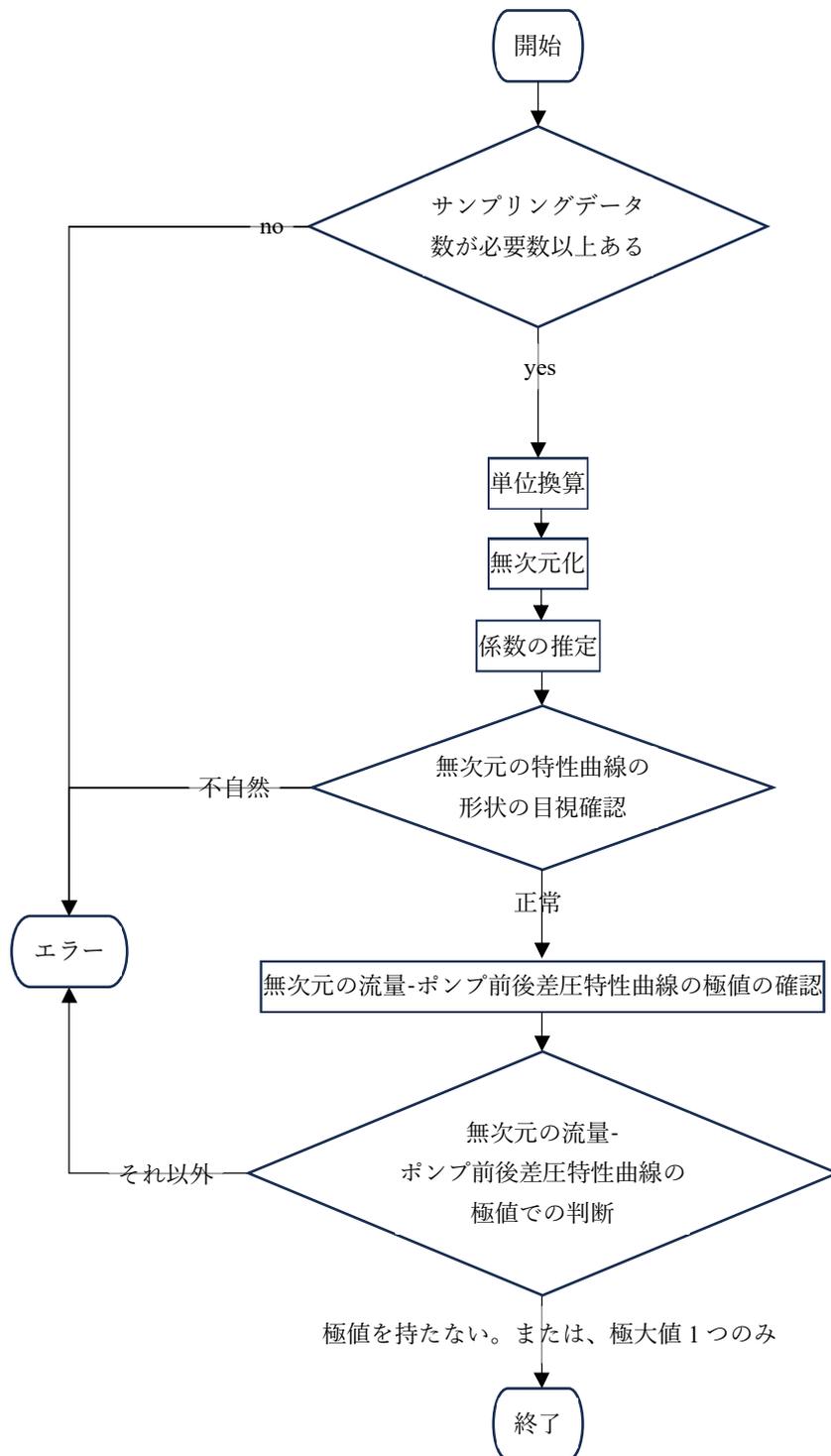
## 3.1. 全体



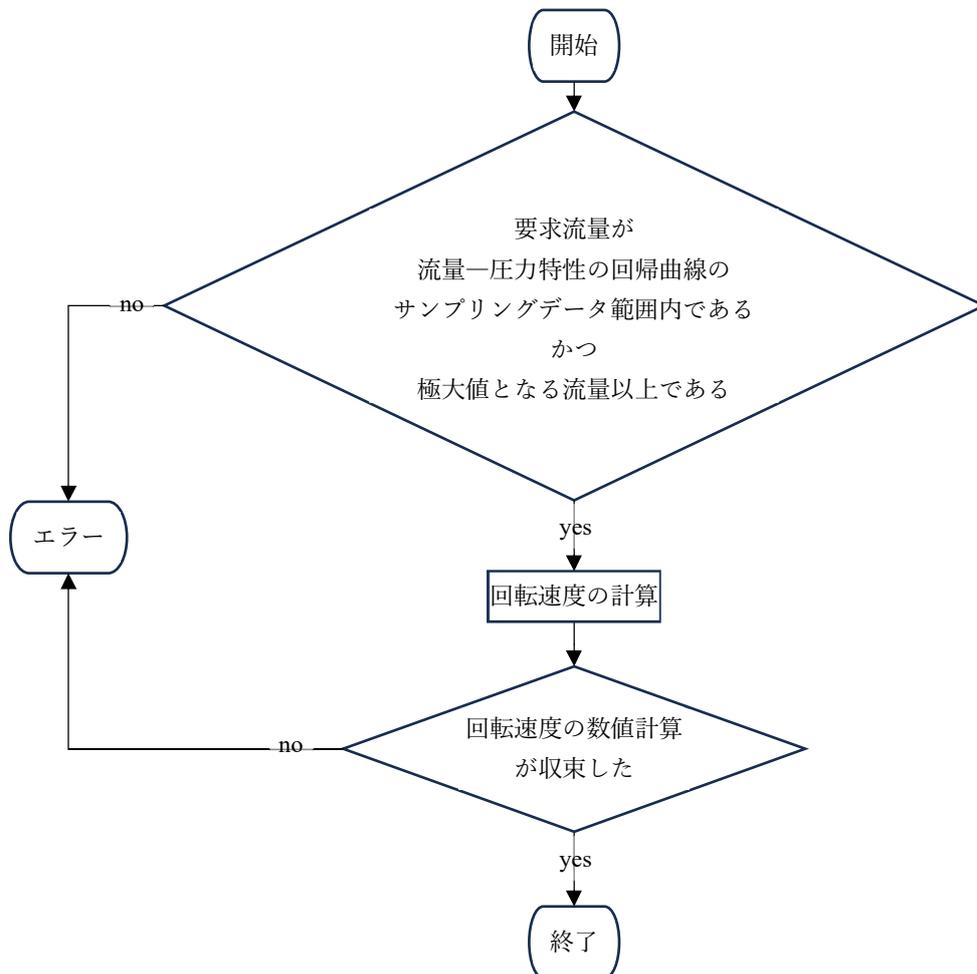
## 3.2. 計算値による「流量率—消費電力を求めるための係数」の関係式の計算



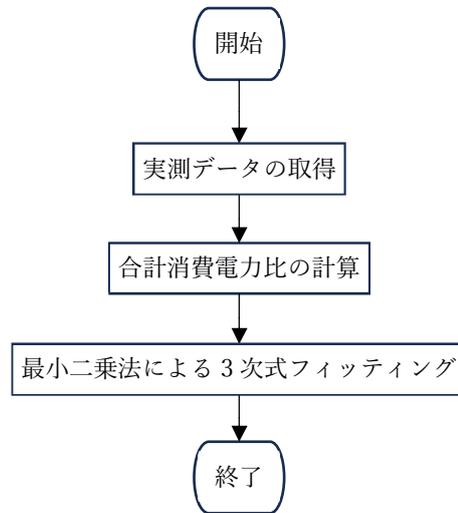
## 3.2.1. 無次元の特性曲線の係数の推定



## 3.2.2. 回転速度の計算



## 3.3. 実測値による「流量率—消費電力を求めるための係数」の関係式の計算



### 3.4. 入力データ

#### 3.4.1. 建物および2次冷温水配管システムの名称

- ・ 建物名称
- ・ 所在地
- ・ 2次冷温水配管システムの名称

#### 3.4.2. ポンプ特性

- ・ ポンプ特性曲線のサンプリングデータ (3セット)
- ・ サンプリングデータのセット番号
- ・ サンプリングデータの単位番号

##### 3.4.2.1. ポンプ特性曲線のサンプリングデータの取得

特性曲線のサンプリングデータはメーカーから提供を受けるか、本プログラムの利用者がサンプリングを行う。

この作業は本プログラムの利用者が予め行う準備であり、プログラムのアルゴリズムには関係しない。

##### 3.4.2.1.1. サンプリングデータの書式

特性曲線のサンプリングデータは以下の書式で csv ファイルとして保存する。行番号1のデータタイトルは本エクセルプログラムでは参照しないので任意の文字列に置き換えてもよい。

流量—ポンプ前後差圧特性曲線の流量サンプリングデータは、「流量、圧力」の順で1セットとして記録する。流量—軸動力特性曲線の流量サンプリングデータは、「流量、軸動力」の順で1セットとして記録する。流量—ポンプ効率特性曲線の流量サンプリングデータ、「流量、ポンプ効率」の順で1セットとして記録する。

これらの特性の配置順は問わないが、どのセット番号に該当するかをプログラム入力用に控えておく。

サンプリングデータの必要数は20以上である。

表 1 特性曲線のサンプリングデータの書式 (CSV ファイル形式)

		セット番号					
		1		2		3	
		列番号					
		1	2	3	4	5	6
行 番 号	1(データタイトル)	流量	特性 1	流量	特性 2	流量	特性 3
	2(データ)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)
	3(データ)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)
	...	...	...	...	...	...	...
	20(データ)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)	(数値)
	...	...	...	...	...	...	...

## 3.4.2.1.2. 特性曲線のサンプリング方法

特性曲線からデータをサンプリングしてデータを得るにはデジタイザーを使用する。  
サンプリング範囲は製品仕様書の特性曲線の全体を対象とする。

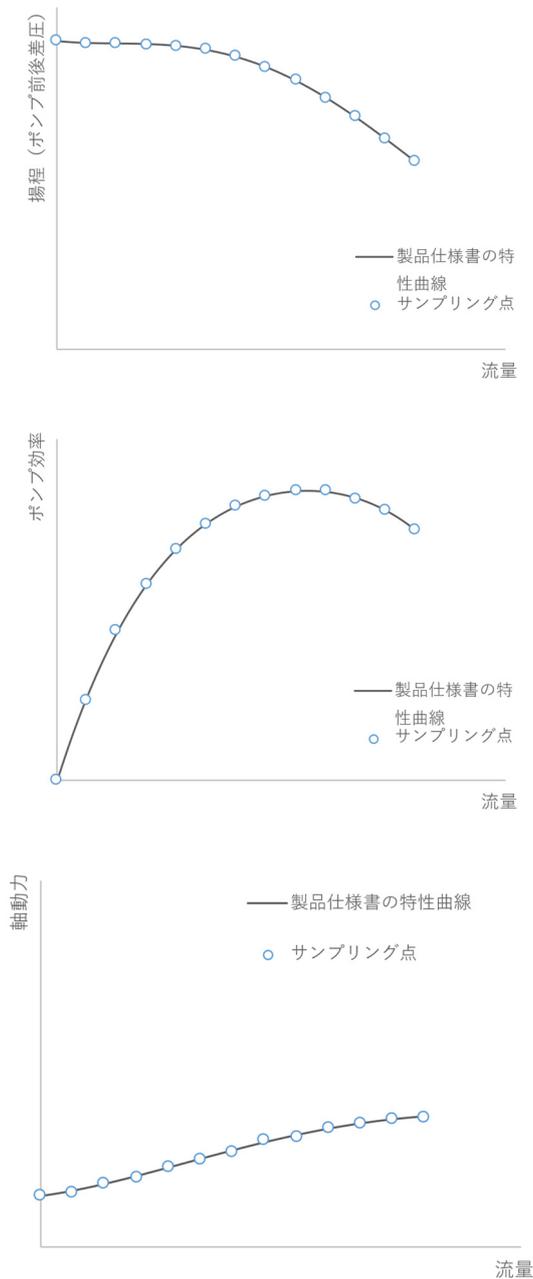


図 1 特性曲線のサンプリングの例

## 3.4.3. ポンプ仕様

- ・ 回転数の単位番号
- ・ 定格流量  $M_r$  [指定された単位]
- ・ 定格揚程（運転点の揚程＝ポンプ前後差圧） [指定された単位]
- ・ 電動機定格出力（軸動力）  $SP_r$  [指定された単位]
- ・ 商用電源周波数 [Hz]

## 3.4.4. ポンプ設計

- ・ 設計負荷温度差  $\Delta T_R$  [°C]
- ・ 設計最大流量時の往還差圧設定値  $dP_{total,sp,max}$  [kPa]
- ・ 末端差圧設定（流量 0 時の往還差圧設定）  $dP_{total,sp,min}$  [kPa]
- ・ 予備機を除く 2 次ポンプ台数  $n_r$  [台]
- ・ ポンプ増段閾値 [%]
- ・ 回転数比（定格回転数に対する比）の最大値 [%]
- ・ 回転数比（定格回転数に対する比）の最小値 [%]

## 3.4.5. 計算設定

- ・ 軸動力を求める際に利用する特性式を選択

## 3.4.6. 実測値

- ・ 2 次側流量  $M_{PV,measured}$  [m<sup>3</sup>/h]
- ・ 2 次側流量率  $R_{M_{PV,measured}}$  [-]
- ・ 末端差圧 [kPa]
- ・ 往還差圧  $dP_{total,sp,measured}$  [kPa]
- ・ 1 次ポンプ運転台数 [台]
- ・ 2 次ポンプ運転台数  $n_{measured}$  [台]
- ・ 2 次ポンプ周波数 [Hz]
- ・ 2 次ポンプ消費電力  $SP_{i,all,measured}$  [W]

## 4. 計算値による「流量率—消費電力を求めるための係数」の関係式の計算

## 4.1. 無次元の特性曲線の係数の推定

## 4.1.1. サンプルングデータの単位換算

サンプルングデータの単位と本エクセルプログラムで使用する単位が異なる場合には、サンプルングデータの単位を換算する。

$$m = \begin{cases} m_{\text{smp}} \times \rho \times 3600^{-1}, & \text{m}^3/\text{h} \text{ の場合} \\ m_{\text{smp}} \times \rho \times 60^{-1}, & \text{m}^3/\text{min} \text{ の場合} \\ m_{\text{smp}} \times \rho \times 10^{-3} \times 3600^{-1}, & \text{L/h} \text{ の場合} \\ m_{\text{smp}} \times \rho \times 10^{-3} \times 60^{-1}, & \text{L/min} \text{ の場合} \end{cases}$$

数式 1

$$dP = \begin{cases} dP_{\text{smp}} \times 10^{-3}, & \text{Pa} \text{ の場合} \\ dP_{\text{smp}} \times 9806.65 \times 10^{-6}, & \text{mmH}_2\text{O} \text{ の場合} \\ dP_{\text{smp}} \times 9.80665, & \text{m} \text{ の場合} \end{cases}$$

数式 2

$$\eta = \eta_{\text{smp}} \times 10^{-2}, \quad \% \text{ の場合}$$

数式 3

$$W = W_{\text{smp}} \times 10^{-3}, \quad \text{W} \text{ の場合}$$

数式 4

$m$	:流量	(kg/s)
$dP$	:ポンプ前後差圧	(kPa)
$\eta$	:ポンプ効率	(-)
$W$	:軸動力	(kW)
$\rho$	:水の密度 (=1,000)	(kg/m <sup>3</sup> )
$m_{\text{smp}}$	:サンプルングデータの流量	(データに依存)
$dP_{\text{smp}}$	:サンプルングデータのポンプ前後差圧	(データに依存)
$\eta_{\text{smp}}$	:サンプルングデータのポンプ効率	(データに依存)
$W_{\text{smp}}$	:サンプルングデータの軸動力	(データに依存)

## 4.1.2. サンプルングデータ数の確認と判断

サンプルングデータ数が最低限必要な数 $n_{smp}$ 以上であることを確認する。

## 4.1.3. サンプルングデータの無次元化

流量 $m$ 、ポンプ前後差圧 $dP$ 、および軸動力 $W$ の単位を以下の式で無次元化し、無次元の流量 $C_f$ 、無次元のポンプ前後差圧 $C_h$ 、および無次元の軸動力 $C_w$ を求める。

水の密度 $\rho$ は  $1000 \text{ kg/m}^3$  の定数とする。

ポンプの羽の直径 $D$ はどのポンプであっても  $0.3 \text{ m}$  の定数とする。

$$C_f = \frac{m}{\rho N_r D^3}$$

数式 5

$$C_h = \frac{10^3 dP}{\rho N_r^2 D^2}$$

数式 6

$$C_w = \frac{W}{\rho N_r^3 D^5}$$

数式 7

$C_f$	:無次元の流量	(-)
$C_h$	:無次元のポンプ前後差圧	(-)
$C_w$	:無次元の軸動力	(-)
$\rho$	:水の密度 (=1,000)	( $\text{kg/m}^3$ )
$N_r$	:定格回転速度	(rps)
$D$	:ポンプの羽の直径 (=0.3)	(m)

## 4.1.4. 係数の推定

単位換算を行ったサンプリングデータを用いて無次元の流量 $C_f$ の4次多項式による最小二乗回帰を行い、係数を推定する。

## 4.1.4.1. ポンプ前後差圧特性

$$C_h = \alpha_1 C_f^4 + \alpha_2 C_f^3 + \alpha_3 C_f^2 + \alpha_4 C_f + \alpha_5$$

数式 8

$\alpha_n$  :無次元の流量－ポンプ前後差圧特性曲線の係数 (-)

## 4.1.4.1.1. 極値の有無の確認

推定した無次元の流量－ポンプ前後差圧特性曲線が極値を持つか確認する。

## 4.1.4.1.2. 極値の数の制限と判断

極値を持つ場合は、極大値の候補が1点のみである場合を除き、計算対象外となり計算エラーとする。

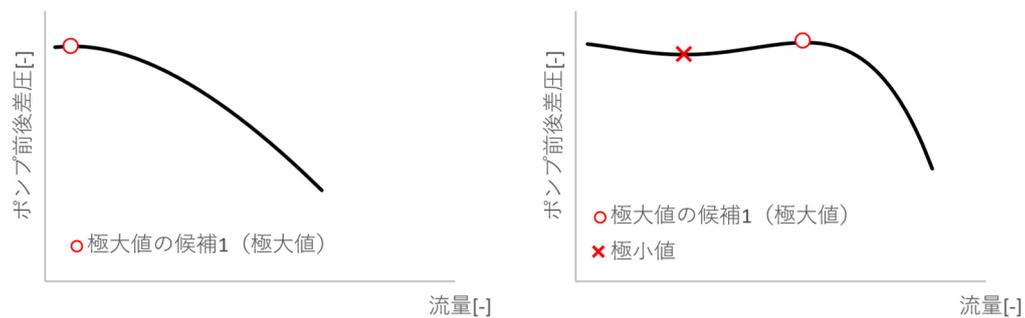


図 2 極大値の候補が1点のみの例 (計算対象)

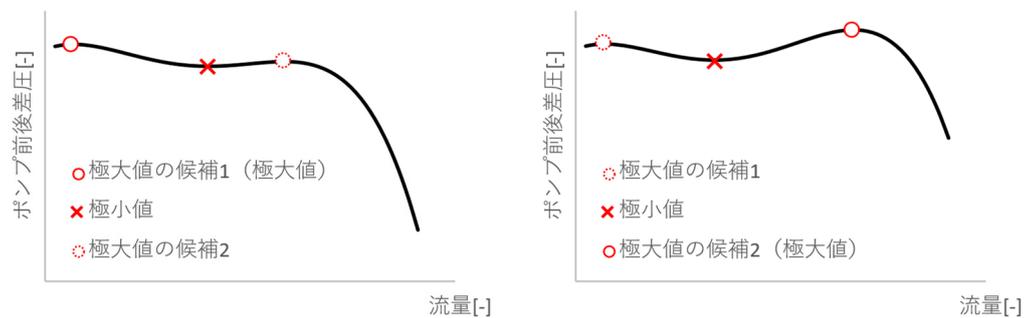


図 3 極大値の候補が2点の例 (計算対象外となりエラー)

## 4.1.4.2. ポンプ効率特性

$$\eta = \beta_1 C_f^4 + \beta_2 C_f^3 + \beta_3 C_f^2 + \beta_4 C_f + \beta_5$$

数式 9

$\eta$  : ポンプ効率 (-)  
 $\beta_n$  : 無次元の流量 - ポンプ効率特性曲線の係数 (-)

## 4.1.4.3. 軸動力特性

$$C_w = \gamma_1 C_f^4 + \gamma_2 C_f^3 + \gamma_3 C_f^2 + \gamma_4 C_f + \gamma_5$$

数式 10

$\gamma_n$  : 無次元の流量 - 軸動力特性曲線の係数 (-)

## 4.1.5. 形状の確認と判断

作成した特性曲線とサンプルデータの位置関係をグラフに描画し、その関係性が不自然でないことを目視で確認をする。サンプル点と特性曲線が乖離するような不自然な場合には、サンプリングデータの取得からやり直す。

## 4.2. 「流量率—消費電力を求めるための係数」の関係式の3次式係数

## 4.2.1. 設計最大流量

設計値最大流量は以下の式より求める。

$$M_R = M_r \times n_r$$

数式 11

$M_R$	:設計値最大流量	(m <sup>3</sup> /h)
$M_r$	:定格流量	(m <sup>3</sup> /h)
$n_r$	:予備機を除く2次ポンプ台数	(台)

## 4.2.2. ポンプ増段閾値流量

ポンプ増段閾値流量は以下の式より求める。

$$M_{TH} = \frac{M_r}{n_r} \times \frac{R_{TH}}{100}$$

数式 12

$M_{TH}$	:ポンプ増段閾値流量	(m <sup>3</sup> /h)
$R_{TH}$	:ポンプ増段閾値	(%)

## 4.2.3. ポンプ電動機定格出力合計

ポンプ電動機定格出力合計は以下の式より求める。

$$SP_{r,all} = SP_r \times n_r$$

数式 13

$SP_{r,all}$	: ポンプ電動機定格出力合計	(kW)
$SP_r$	: 電動機定格出力(軸動力)	(kW)

## 4.2.4. 2次側流量と必要往還差圧の関係式

2次側流量と必要往還差圧の関係式は、流量0及び設計最大流量時の2点間を直線で結んだ1次式とする。1式の傾き $a$ はExcel関数のSlope関数で、切片 $b$ はIntercept関数で求める。

$$dP_{total,sp} = a \cdot M_{pv} + b$$

数式 14

$dP_{total,sp}$	:必要往還差圧	(kPa)
$M_{pv}$	:2次側流量	(m <sup>3</sup> /h)

## 4.2.5. 2次側流量率とポンプ軸動力比の関係式

2次側流量率とポンプ軸動力比の関係式は、各流量ポイント(10点)の2次側流量率とポンプ軸動力比から、最小二乗法によって3次式にフィッティングした係数を計算する。

$$R_{SPi,all} = a \cdot R_{MPV}^3 + b \cdot R_{MPV}^2 + c \cdot R_{MPV} + d$$

数式 15

$R_{SPi,all}$	:合計軸動力比	(-)
$R_{MPV}$	:2次側流量率	(-)

ここで、合計軸動力比は以下の式より求める。

$$R_{SPi,all} = \frac{SP_{i,all}}{SP_{r,all}}$$

数式 16

$$SP_{i,all} = SP_{i,per1} \times n$$

数式 17

$SP_{i,all}$	:合計軸動力	(kW)
$SP_{i,per1}$	:運転ポンプ1台当たりの軸動力	(kW/台)
$n$	:ポンプ運転台数	(台)

ここで、2次側流量率は以下の式より求める。

$$R_{MPV} = \frac{M_{PV}}{M_r \times n_r}$$

数式 18

$R_{MPV}$  :2 次側流量率 (m<sup>3</sup>/h)

#### 4.2.5.1. 流量ポイント

2 次ポンプシステムの軸動力と回転数を計算する二次側流量ポイントは、設計最大流量を 10 分割とする。

$$M_{calc,i} = i \times \frac{M_R}{10}$$

数式 19

$M_{calc,i}$  :計算する i 番目の二次流量ポイント (i=1~10) (m<sup>3</sup>/h)

#### 4.2.5.2. 流量ポイント時の往還差圧値

流量ポイントの往還差圧は、2 次側流量と必要往還差圧の関係式 (数式 14) で求める。

#### 4.2.5.3. ポンプ運転台数

ポンプ運転台数は以下の式より求める。ポンプ運転台数の暫定値は Roundup 関数を用いて整数値とし、暫定値が予備機を除く 2 次ポンプ台数を上回る場合は、予備機を除く 2 次ポンプ台数とする。

$$n = \begin{cases} n_r, & n' > n_r \\ n', & \text{それ以外} \end{cases}$$

数式 20

$$n' = \text{ROUNDUP}\left(\frac{M_{calc,i}}{M_{TH}}, 0\right)$$

数式 21

$n'$  :ポンプ運転台数の暫定値 (台)

## 4.2.5.4. 運転ポンプ 1 台当たりの流量

運転ポンプ 1 台当たりの流量は以下より求める。流量値をポンプの運転台数で除して、ポンプ 1 台当たりの流量を計算する。

$$M_{calc,i,per1} = \frac{M_{calc,i}}{n}$$

数式 22

$M_{calc,i,per1}$  : 運転ポンプ 1 台当たりの流量 (m<sup>3</sup>/h)

## 4.2.5.5. 回転速度

流量ポイント時の往還差圧値を要求差圧 $dP_c$ 、運転ポンプ 1 台当たりの流量を要求流量 $m_c$ とした時の回転速度 $N_c$ を二分法による数値計算で求める。

## 4.2.5.5.1. 要求流量の制限と判断

無次元の要求流量 $C_{f,c}$ が計算対象の無次元の流量範囲内 $C_{f,min} \leq C_{f,c} \leq C_{f,max}$ では無い場合は、計算対象外となり計算エラーとする。

$$C_{f,c} = \frac{m_c}{\rho N_r D^3}$$

数式 23

$$C_{f,min,smpl} = \frac{m_{min,smpl}}{\rho N_r D^3}$$

数式 24

$$C_{f,max,smpl} = \frac{m_{max,smpl}}{\rho N_r D^3}$$

数式 25

$$C_{f,min} = \begin{cases} C_{f,p}, & \text{極大値がある場合} \\ C_{f,min,smpl}, & \text{極大値がない場合} \end{cases}$$

数式 26

$$C_{f,max} = C_{f,max,smpl}$$

数式 27

$C_{f,c}$	:無次元の要求流量	(-)
$C_{f,min,smpl}$	:流量－圧力特性サンプルデータの最小無次元流量	(-)
$m_{min,smpl}$	:流量－圧力特性サンプルデータの最小流量	(kg/s)
$C_{f,max,smpl}$	:流量－圧力特性サンプルデータの最大無次元流量	(-)
$m_{max,smpl}$	:流量－圧力特性サンプルデータの最大流量	(kg/s)
$C_{f,min}$	:計算対象範囲の最小無次元流量	(-)
$C_{f,p}$	:極大値の無次元の流量	(-)
$C_{f,max}$	:計算対象範囲の最大無次元流量	(-)

## 4.2.5.5.2. 最小回転速度

最小回転速度 $N_{min}$ は定格回転速度 $N_r$ に定格回転速度に対する最小回転速度の比 $R_{N,min}$ を乗じて求める。

$$N_{min} = N_r \times R_{N,min}$$

数式 28

$N_{min}$	:最小回転速度	(rps)
$R_{N,min}$	:定格回転速度に対する最小回転速度の比	(-)

## 4.2.5.5.3. 最大回転速度

最大回転速度 $N_{max}$ は定格回転速度 $N_r$ に定格回転速度に対する最大回転速度の比 $R_{N,max}$ を乗じて求める。

$$N_{max} = N_r \times R_{N,max}$$

数式 29

$N_{max}$	:最大回転速度	(rps)
$R_{N,max}$	:定格回転速度に対する最大回転速度の比	(-)

## 4.2.5.5.4. 回転速度

要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時の回転速度 $N_c$ を以下の式を最小回転速度 $N_{min}$ から最大回転速度までの範囲 $N_{min} \leq N \leq N_{max}$ において二分法による数値計算で求める。繰り返し最大回数は $n_{iteration,max}$ 回、許容誤差は $\epsilon$ とする。

ただし、繰り返し最大回数内で許容誤差を満たさない場合、又は、 $f(N_{min}) \cdot f(N_{max}) > 0$  の場合は計算対象外となり計算エラーとする。

$$f(N) = \frac{\rho D^2 \alpha_5}{10^3} N^4 + \frac{\alpha_4 m_c}{10^3 D} N^3 + \left( \frac{\alpha_3 m_c^2}{10^3 \rho D^4} - dP_c \right) N^2 + \frac{\alpha_2 m_c^3}{10^3 \rho^2 D^7} N + \frac{\alpha_1 m_c^4}{10^3 \rho^3 D^{10}}$$

数式 30

また、 $f(N_{min}) = 0$ 、 $f(N_{max}) = 0$  の場合はその回転速度 $N_{min}$ 、 $N_{max}$ が解となるが、両方とも成立する場合には計算対象外とし計算エラーとする。

繰り返し最大回数 $n_{iteration,max}$ 、許容誤差 $\epsilon$ は、利用者が入力する値ではないが、プログラム上に変数として用意しておく。それぞれの初期値は $n_{iteration,max} = 10^3$ 、 $\epsilon = 10^{-3}$ とする。

## 4.2.5.6. 運転ポンプ1台当たりの軸動力

## 4.2.5.6.1. 無次元の流量一軸動力特性曲線を利用する場合

要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時の軸動力 $W_c$ は、無次元の流量一軸動力特性曲線を用いて回転速度 $N_c$ における無次元の軸動力 $C_w$ を求め、その値を次元化して求める。

$$C_{f,c} = \frac{m_c}{\rho N_c D^3}$$

数式 31

$$C_{w,c} = \gamma_1 C_{f,c}^4 + \gamma_2 C_{f,c}^3 + \gamma_3 C_{f,c}^2 + \gamma_4 C_{f,c} + \gamma_5$$

数式 32

$$C_{w,c} = \frac{W_c}{\rho N_c^3 D^5}$$

数式 33

$$SP_{i,per1} = W_c = \rho N_c^3 D^5 \cdot C_{w,c}$$

数式 34

$N_c$  : 要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時の回転速度 (rps)

$W_c$  : 要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時の軸動力 (kW)

## 4.2.5.6.2. 無次元の流量一ポンプ効率特性曲線を利用する場合

要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時の軸動力 $W_c$ は、無次元の流量一ポンプ効率特性曲線を用いて回転速度 $N_c$ におけるポンプ効率 $\eta_c$ を求め、ポンプ効率 $\eta_c$ と水の密度 $\rho$ の積算値で要求差圧 $dP_c$ と要求流量 $m_c$ の積算値を除して求める。

$$C_{f,c} = \frac{m_c}{\rho N_c D^3}$$

数式 35

$$\eta_c = \beta_1 C_{f,c}^4 + \beta_2 C_{f,c}^3 + \beta_3 C_{f,c}^2 + \beta_4 C_{f,c} + \beta_5$$

数式 36

$$SP_{i,per1} = W_c = \frac{m_c \cdot dP_c}{\rho \eta_c}$$

数式 37

$\eta_c$  : 要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時のポンプ効率 (-)

## 4.2.5.7. 消費電力【参考値】

※消費電力を求める手順は以下となるが、本プログラムの出力値とはならない。

消費電力 $E$ は軸動力 $W$ にインバータの効率 $\eta_I$ と電動機の効率 $\eta_M$ を適用して求める。インバータの効率 $\eta_I$ は0.9とする。

$$E = W \cdot \eta_I \cdot \eta_M$$

数式 38

$\eta_I$  :インバータの効率 (=0.9) (-)  
 $\eta_M$  :電動機の効率 (-)

電動機の効率 $\eta_M$ は、メーカーにより電動機の定格効率の試験値が提供されている場合には、その値を用いてもよい。定格効率が無く効率クラスが判っている場合には、IE3 モーター（プレミアムモーター）は、JIS C 4034-30:2011 で規定された公称効率（該当するモーターの定格出力の範囲の下限の公称効率。商用周波数及び極数毎に規定されている値）とする。IE3 モーター以外である場合には、該当する効率クラスの値を適用する。効率クラスが不明な場合にはIE1（標準効率）の値を適用する。

表3—標準効率（IE1）50 Hz の公称効率

定格出力 $P_N$ kW	極数		
	2	4	6
0.75	72.1	72.1	70.0
1.1	75.0	75.0	72.9
1.5	77.2	77.2	75.2
2.2	79.7	79.7	77.7
3	81.5	81.5	79.7
4	83.1	83.1	81.4
5.5	84.7	84.7	83.1
7.5	86.0	86.0	84.7
11	87.6	87.6	86.4
15	88.7	88.7	87.7
18.5	89.3	89.3	88.6
22	89.9	89.9	89.2
30	90.7	90.7	90.2
37	91.2	91.2	90.8
45	91.7	91.7	91.4
55	92.1	92.1	91.9
75	92.7	92.7	92.6
90	93.0	93.0	92.9
110	93.3	93.3	93.3
132	93.5	93.5	93.5
160	93.8	93.8	93.8
200~375	94.0	94.0	94.0

表4—標準効率（IE1）60 Hz の公称効率

定格出力 $P_N$ kW	極数		
	2	4	6
0.75	77.0	78.0	73.0
1.1	78.5	79.0	75.0
1.5	81.0	81.5	77.0
2.2	81.5	83.0	78.5
3.7	84.5	85.0	83.5
5.5	86.0	87.0	85.0
7.5	87.5	87.5	86.0
11	87.5	88.5	89.0
15	88.5	89.5	89.5
18.5	89.5	90.5	90.2
22	89.5	91.0	91.0
30	90.2	91.7	91.7
37	91.5	92.4	91.7
45	91.7	93.0	91.7
55	92.4	93.0	92.1
75	93.0	93.2	93.0
90	93.0	93.2	93.0
110	93.0	93.5	94.1
150	94.1	94.5	94.1
185~375	94.1	94.5	94.1

表 5—高効率 (IE2) 50 Hz の公称効率

定格出力 $P_N$ kW	極数		
	2	4	6
0.75	77.4	79.6	75.9
1.1	79.6	81.4	78.1
1.5	81.3	82.8	79.8
2.2	83.2	84.3	81.8
3	84.6	85.5	83.3
4	85.8	86.6	84.6
5.5	87.0	87.7	86.0
7.5	88.1	88.7	87.2
11	89.4	89.8	88.7
15	90.3	90.6	89.7
18.5	90.9	91.2	90.4
22	91.3	91.6	90.9
30	92.0	92.3	91.7
37	92.5	92.7	92.2
45	92.9	93.1	92.7
55	93.2	93.5	93.1
75	93.8	94.0	93.7
90	94.1	94.2	94.0
110	94.3	94.5	94.3
132	94.6	94.7	94.6
160	94.8	94.9	94.8
200~375	95.0	95.1	95.0

表 6—高効率 (IE2) 60 Hz の公称効率

定格出力 $P_N$ kW	極数		
	2	4	6
0.75	75.5 <sup>a)</sup>	82.5	80.0
1.1	82.5	84.0	85.5
1.5	84.0	84.0	86.5
2.2	85.5	87.5	87.5
3.7	87.5	87.5	87.5
5.5	88.5	89.5	89.5
7.5	89.5	89.5	89.5
11	90.2	91.0	90.2
15	90.2	91.0	90.2
18.5	91.0	92.4	91.7
22	91.0	92.4	91.7
30	91.7	93.0	93.0
37	92.4	93.0	93.0
45	93.0	93.6	93.6
55	93.0	94.1	93.6
75	93.6	94.5	94.1
90	94.5	94.5	94.1
110	94.5	95.0	95.0
150	95.0	95.0	95.0
185~375	95.4	95.4 <sup>b)</sup>	95.0

注<sup>a)</sup> この値は、NEMA MG1 の値を用いている。  
 注<sup>b)</sup> NEMA で規定する効率によれば、公称効率は 185 kW に対して 95.0%であり、375 kW に対して 95.8%である。

表 7—プレミアム効率 (IE3) 50 Hz の公称効率

定格出力 $P_N$ kW	極数		
	2	4	6
0.75	80.7	82.5	78.9
1.1	82.7	84.1	81.0
1.5	84.2	85.3	82.5
2.2	85.9	86.7	84.3
3	87.1	87.7	85.6
4	88.1	88.6	86.8
5.5	89.2	89.6	88.0
7.5	90.1	90.4	89.1
11	91.2	91.4	90.3
15	91.9	92.1	91.2
18.5	92.4	92.6	91.7
22	92.7	93.0	92.2
30	93.3	93.6	92.9
37	93.7	93.9	93.3
45	94.0	94.2	93.7
55	94.3	94.6	94.1
75	94.7	95.0	94.6
90	95.0	95.2	94.9
110	95.2	95.4	95.1
132	95.4	95.6	95.4
160	95.6	95.8	95.6
200~375	95.8	96.0	95.8

表 8—プレミアム効率 (IE3) 60 Hz の公称効率

定格出力 $P_N$ kW	極数		
	2	4	6
0.75	77.0 <sup>a)</sup>	85.5	82.5
1.1	84.0	86.5	87.5
1.5	85.5	86.5	88.5
2.2	86.5	89.5	89.5
3.7	88.5	89.5	89.5
5.5	89.5	91.7	91.0
7.5	90.2	91.7	91.0
11	91.0	92.4	91.7
15	91.0	93.0	91.7
18.5	91.7	93.6	93.0
22	91.7	93.6	93.0
30	92.4	94.1	94.1
37	93.0	94.5	94.1
45	93.6	95.0	94.5
55	93.6	95.4	94.5
75	94.1	95.4	95.0
90	95.0	95.4	95.0
110	95.0	95.8	95.8
150	95.4	96.2	95.8
185~375	95.8	96.2	95.8

注<sup>a)</sup> この値は、NEMA MG1 の値を用いている。

#### 4.3. 計算結果の確認

要求差圧 $dP_c$ 、要求流量 $m_c$ 時の軸動力 $W_c$ を無次元化し、無次元の流量—軸動力特性の回帰曲線上に存在するか目視で確認する。

## 5. 実測値による「流量率—消費電力を求めるための係数」の関係式の計算

## 5.1. 「流量率—消費電力を求めるための係数」の関係式の3次式係数

2次側流量率とポンプ消費電力比の関係式は、実測ポイント（11点）の2次側流量率とポンプ消費電力比から、最小二乗法によって3次式にフィッティングした係数を計算する。

$$R_{SPi,all,measured} = a \cdot R_{MPV,measured}^3 + b \cdot R_{MPV,measured}^2 + c \cdot R_{MPV,measured} + d$$

数式 39

$R_{SPi,all,measured}$	:合計消費電力比（実測値）	(-)
$R_{MPV,measured}$	:2次側流量率（実測値）	(-)

ここで、合計軸動力比は以下の式より求める。

$$R_{SPi,all,measured} = \frac{SP_{i,all,measured}}{SP_{r,all}}$$

数式 40

$SP_{i,all,measured}$	:合計消費電力	(kW)
-----------------------	---------	------

## 6. 任意評定用書式データの作成

得られた結果をもとに任意評定用の書式データを作成する。本プログラムでは「任意評定用結果出力」シートが該当する。

## 7. 関係式の比較

任評定用書式データで示された「流量率－消費電力を求めるための係数」のグラフにおいて「実測値」の特性曲線が「計算値」を下回っていることを確認する。

以上

## 付録1 回転速度を求めるための式の変形過程

回転速度 $N$ についてのポンプ特性を考えるために

$$C_h = \frac{10^3}{\rho N^2 D^2} dP$$

$$C_h = EdP$$

$$\left( E = \frac{10^3}{\rho N^2 D^2} = 10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2} \right)$$

$$C_f = \frac{m}{\rho N D^3}$$

$$C_f = Fm$$

$$\left( F = \frac{1}{\rho N D^3} = \rho^{-1} N^{-1} D^{-3} \right)$$

を無次元の流量—ポンプ前後差圧特性曲線に代入して、 $N$ についてまとめる。

$$C_h = \alpha_1 C_f^4 + \alpha_2 C_f^3 + \alpha_3 C_f^2 + \alpha_4 C_f + \alpha_5$$

$$EdP = \alpha_1 (Fm)^4 + \alpha_2 (Fm)^3 + \alpha_3 (Fm)^2 + \alpha_4 Fm + \alpha_5$$

$$EdP = \alpha_1 F^4 m^4 + \alpha_2 F^3 m^3 + \alpha_3 F^2 m^2 + \alpha_4 Fm + \alpha_5$$

$$EdP = \alpha_1 (\rho^{-1} N^{-1} D^{-3})^4 m^4 + \alpha_2 (\rho^{-1} N^{-1} D^{-3})^3 m^3 + \alpha_3 (\rho^{-1} N^{-1} D^{-3})^2 m^2 + \alpha_4 \rho^{-1} N^{-1} D^{-3} m + \alpha_5$$

$$EdP = \rho^{-4} N^{-4} D^{-12} \alpha_1 m^4 + \rho^{-3} N^{-3} D^{-9} \alpha_2 m^3 + \rho^{-2} N^{-2} D^{-6} \alpha_3 m^2 + \rho^{-1} N^{-1} D^{-3} \alpha_4 m + \alpha_5$$

$$dP = \frac{\rho^{-4} N^{-4} D^{-12}}{E} \alpha_1 m^4 + \frac{\rho^{-3} N^{-3} D^{-9}}{E} \alpha_2 m^3 + \frac{\rho^{-2} N^{-2} D^{-6}}{E} \alpha_3 m^2 + \frac{\rho^{-1} N^{-1} D^{-3}}{E} \alpha_4 m + \frac{1}{E} \alpha_5$$

$$dP = \frac{\rho^{-4} N^{-4} D^{-12}}{10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2}} \alpha_1 m^4 + \frac{\rho^{-3} N^{-3} D^{-9}}{10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2}} \alpha_2 m^3 + \frac{\rho^{-2} N^{-2} D^{-6}}{10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2}} \alpha_3 m^2 + \frac{\rho^{-1} N^{-1} D^{-3}}{10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2}} \alpha_4 m + \frac{1}{10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2}} \alpha_5$$

$$dP = \frac{\rho^{-3} N^{-2} D^{-10}}{10^3} \alpha_1 m^4 + \frac{\rho^{-2} N^{-1} D^{-7}}{10^3} \alpha_2 m^3 + \frac{\rho^{-1} D^{-4}}{10^3} \alpha_3 m^2 + \frac{D^{-1}}{10^3 N^{-1}} \alpha_4 m + \frac{1}{10^3 \rho^{-1} N^{-2} D^{-2}} \alpha_5$$

$$dP = 10^{-3} \rho^{-3} N^{-2} D^{-10} \alpha_1 m^4 + 10^{-3} \rho^{-2} N^{-1} D^{-7} \alpha_2 m^3 + 10^{-3} \rho^{-1} D^{-4} \alpha_3 m^2 + 10^{-3} D^{-1} N \alpha_4 m + 10^{-3} \rho N^2 D^2 \alpha_5$$

$$\begin{aligned}
dP &= 10^{-3}\rho D^2\alpha_5 \cdot N^2 + 10^{-3}D^{-1}\alpha_4 m \cdot N + 10^{-3}\rho^{-2}D^{-7}\alpha_2 m^3 \cdot N^{-1} + 10^{-3}\rho^{-3}D^{-10}\alpha_1 m^4 \\
&\quad \cdot N^{-2} + 10^{-3}\rho^{-1}D^{-4}\alpha_3 m^2 \\
0 &= 10^{-3}\rho D^2\alpha_5 \cdot N^2 + 10^{-3}D^{-1}\alpha_4 m \cdot N + 10^{-3}\rho^{-2}D^{-7}\alpha_2 m^3 \cdot N^{-1} + 10^{-3}\rho^{-3}D^{-10}\alpha_1 m^4 \\
&\quad \cdot N^{-2} + 10^{-3}\rho^{-1}D^{-4}\alpha_3 m^2 - dP
\end{aligned}$$

$$\frac{\rho D^2\alpha_5}{10^3}N^2 + \frac{\alpha_4 m}{10^3 D}N + \frac{\alpha_2 m^3}{10^3 \rho^2 D^7} \cdot \frac{1}{N} + \frac{\alpha_1 m^4}{10^3 \rho^3 D^{10}} \cdot \frac{1}{N^2} + \left( \frac{\alpha_3 m^2}{10^3 \rho D^4} - dP \right) = 0$$

$$f(N) = \frac{\rho D^2\alpha_5}{10^3}N^2 + \frac{\alpha_4 m}{10^3 D}N + \frac{\alpha_2 m^3}{10^3 \rho^2 D^7} \cdot \frac{1}{N} + \frac{\alpha_1 m^4}{10^3 \rho^3 D^{10}} \cdot \frac{1}{N^2} + \left( \frac{\alpha_3 m^2}{10^3 \rho D^4} - dP \right)$$

となる。

または、 $N$ の4次式として見やすくするために両辺に $N^2$ を掛けると

$$\left[ \frac{\rho D^2\alpha_5}{10^3}N^2 + \frac{\alpha_4 m}{10^3 D}N + \frac{\alpha_2 m^3}{10^3 \rho^2 D^7} \cdot \frac{1}{N} + \frac{\alpha_1 m^4}{10^3 \rho^3 D^{10}} \cdot \frac{1}{N^2} + \left( \frac{\alpha_3 m^2}{10^3 \rho D^4} - dP \right) \right] \cdot N^2 = 0 \cdot N^2$$

$$\frac{\rho D^2\alpha_5}{10^3}N^4 + \frac{\alpha_4 m}{10^3 D}N^3 + \frac{\alpha_2 m^3}{10^3 \rho^2 D^7}N + \frac{\alpha_1 m^4}{10^3 \rho^3 D^{10}} + \left( \frac{\alpha_3 m^2}{10^3 \rho D^4} - dP \right)N^2 = 0$$

$$\frac{\rho D^2\alpha_5}{10^3}N^4 + \frac{\alpha_4 m}{10^3 D}N^3 + \left( \frac{\alpha_3 m^2}{10^3 \rho D^4} - dP \right)N^2 + \frac{\alpha_2 m^3}{10^3 \rho^2 D^7}N + \frac{\alpha_1 m^4}{10^3 \rho^3 D^{10}} = 0$$

$$f(N) = \frac{\rho D^2\alpha_5}{10^3}N^4 + \frac{\alpha_4 m}{10^3 D}N^3 + \left( \frac{\alpha_3 m^2}{10^3 \rho D^4} - dP \right)N^2 + \frac{\alpha_2 m^3}{10^3 \rho^2 D^7}N + \frac{\alpha_1 m^4}{10^3 \rho^3 D^{10}}$$

となる。

以上

## 付録2 単位換算係数

項目	単位 (換算前)	換算係数	単位 (換算後)	換算係数の導出式
流量	kg/s	1	kg/s	なし
	m <sup>3</sup> /h	$\frac{10^3}{3600}$		$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3600^{-1} \frac{\text{h}}{\text{s}}$
	m <sup>3</sup> /min	$\frac{10^3}{60}$		$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 60^{-1} \frac{\text{min}}{\text{s}}$
	L/h	$\frac{1}{3600}$		$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{L}} \times 3600^{-1} \frac{\text{h}}{\text{s}}$
	L/min	$\frac{1}{60}$		$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{L}} \times 60^{-1} \frac{\text{min}}{\text{s}}$
	その他	利用者が 入力		なし
$\rho$ : 水の密度 (= 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )				
圧力	kPa	1	kPa	なし
	Pa	$\frac{1}{10^3}$		10 <sup>-3</sup> k
	mmH <sub>2</sub> O	$\frac{9806.65}{10^6}$		$10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \times 9806.65 \frac{\text{Pa}}{\text{mmH}_2\text{O}} \times 10^{-3}\text{k}$
	m ※全揚程	9.80665		$10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 10^{-3}\text{k}$ ※ $\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$
	その他	利用者が 入力		なし
効率	-	1	-	なし
	%	10 <sup>-2</sup>		$\frac{10^{-2}}{\%}$