

# 火力発電所の温熱環境に配慮した排気ファンの省エネルギー制御に関する研究

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻 建築環境工学研究室  
 学籍番号：1200078 氏名：高橋文佳  
 指導教員：田島昌樹

発電所 排気ファン  
 風向 風速

温熱環境  
 風圧係数

## 1. はじめに

発電所では、発電タービン稼働時に最も熱が発生し、主に換気によって熱除去されることで運用されている。本研究で対象とした火力発電所では、機器発熱をルーフファンや自然換気により排熱しており、室内を発電機器が安全に稼働できる温度で維持している。現在、発電時には全てのファンを稼働させていることが多く、ファン稼働台数を制御し風量低減を図ることで、エネルギーの削減が可能である<sup>[1]</sup>と考えられる。そこで本研究では、室内温熱環境の維持とファン稼働にかかるエネルギー量の削減を目的として、測定値と理論換気風量の整理を行うことで、室内空気温度の推定式を導出し、ファンの運用制御について検討を行った。

## 2. 研究概要

対象建物の温熱環境把握を目的として、2018年度および2019年度に温熱環境の測定を行った。測定概要を表1、発電施設で記録されている実績値の項目を表2に示す。また対象建物の断面概要を図1に示す。対象建物は3階建になっており、2階と3階の床にはグレーチング、南北面の壁にはガラリおよび屋上にはルーフファンが12台設置されている。また発電機器の安全な稼働を考慮して、機器直近の空気温度が40℃以下で運用できるよう設計条件が課されている。

2018年度の測定結果から、換気風量は自然風による影響を最も受けやすいことが推測されたため、2019年度では発電施設で記録された風向および風速の実績値を加え、発電時のファン稼働台数を12台から8台、6台および0台に制限する期間を設けた。

また対象建物は外部風の影響が大きい立地にあり、絶えず変動する風に影響される換気風量の把握を正確に行うことは困難である。そこで換気回路網計算<sup>[2]</sup>を用いて室内外温度差や外部風、ファン稼働台数を考慮した換気風量推定式を作成した。推定した換気風量、外気温度および発電電力量を用いて重回帰分析を行い、室内温度推定式を導出した。またファン稼働台数の制御を行うことで換気に要するエネルギーの削減について検討を行った。

## 3. 温熱環境測定結果

### 3.1 空気温度

2018年度の測定で、空気温度が最高値を記録した点を室内代表点とした。室内代表点および外気の各月の空気温度を図2および図3に示す。

図2および図3より、外気、室内代表点の平均温度は共に2018年度に比べて2019年度が常に高い傾向を示した。またファン稼働台数について、8台稼働時に測定を行った10月や

全台停止時に測定を行った11月および12月の最高温度は40℃を下回る結果となった。

### 3.2 絶対湿度

外気と室内代表点の絶対湿度の差は、全期間において

表1 測定概要

測定項目	空気温度、相対湿度	
測定期間	2018/9/11~2019/1/31	2019/8/1~2019/12/26
測定点数	96	35
測定間隔	10分	

表2 実績値項目

項目	風速、風向、発電電力量 ルーフファン電力量
間隔	10分(発電電力量のみ1時間)

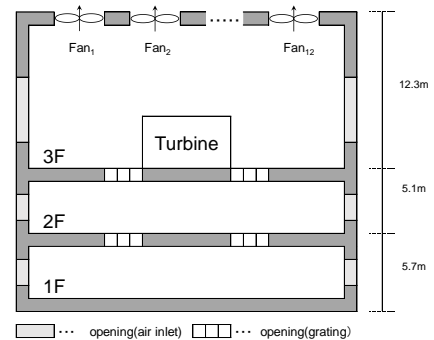


図1 対象とした火力発電所断面概要

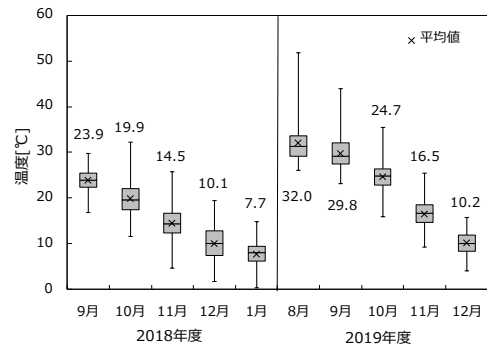


図2 外気温度

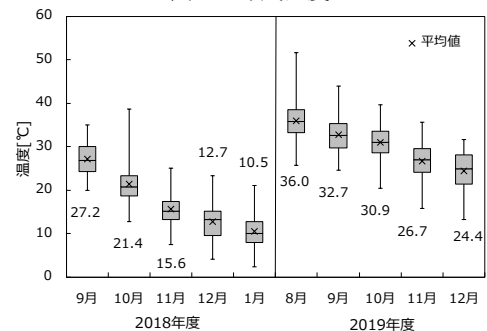


図3 空気温度 (室内代表点)



ここで算出した $\Delta T_E$ と実効室内外温度差による換気風量 $Q_E$ は(式6)で表す<sup>[5]</sup>ことができる。(式6)の両辺対数を取ると(式7)となる。また、(式8)のように $\Delta T_E$ を変数とした一次式の形にすると回帰直線から $n$ と $Q_0$ が求まり、(式9)となる。

$$Q_E = Q_0 \Delta T_E^{\frac{1}{n}} \quad (式6)$$

$$\log Q_E = \log Q_0 \left( \Delta T_E^{\frac{1}{n}} \right) \quad (式7)$$

$$\log Q_E = \log Q_0 + \frac{1}{n} \log \Delta T_E \quad (式8)$$

$$Q_E = 56250.1 \times \Delta T_E^{0.518} \quad (式9)$$

ここで、

$Q_E$  : 実効室内外温度差による換気風量[m<sup>3</sup>/h]

$Q_0$  :  $\Delta T_E = 1$ の時の換気風量[m<sup>3</sup>/h]

ファンが稼働した条件の換気風量 $Q$ はファン圧力と自然換気による圧力の関係で実現される風量の場合分けが必要である。実効室内外温度差による圧力がファン圧力より大きい場合は $Q_E$ とファン風量の和となり、小さい場合はファン風量と等しくなるため(式10)で表せる。ファン稼働台数が増加するとファンによる室内外圧力差も増加するため、 $\Delta T_E'$ も増加する。求めた $Q$ とVentSimにより算出した理論風量を図7に示す。

$$Q = \begin{cases} Q_E + Q_F \times N_F & (\Delta T_E > \Delta T_E') \\ Q_F \times N_F & (\Delta T_E \leq \Delta T_E') \end{cases} \quad (式10)$$

ここで

$Q$  : 実効室内外温度差と機械換気による換気風量[m<sup>3</sup>/h]

$Q_F$  : ファン1台の換気風量[m<sup>3</sup>/h]

$N_F$  : ファンの稼働台数[台]

$\Delta T_E'$  : ファン圧力とバランスする実効室内外温度差[K]

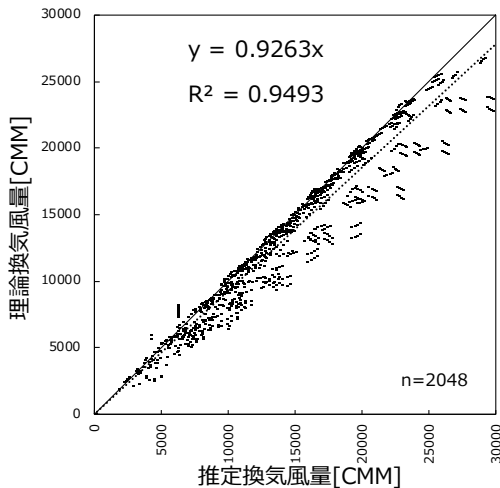


図7 実効室内外温度差を用いた換気風量の推定

### 手法Ⅱ 風向別の換気風量推定式

対象建物の開口は単純開口なので、温度差による換気風量、風力、ファンによる換気風量はそれぞれ加算できると考え、(式11)を設定する。各項の偏回帰係数を同定するため換気回路網計算によって算出した理論換気風量を用いて重回帰分析を行った。(式12)に示す場合分けを行い、ファンを含め

た風向別の換気風量とVentSimで求めた理論風量を図8に示す。手法Ⅰと手法Ⅱを比較した結果、手法Ⅱの決定係数の方が大きかったため、手法Ⅱを採用する。

$$Q_D = a_1 \sqrt{\Delta T} + a_2 v + a_3 Q_F \quad (式11)$$

$$Q = \begin{cases} Q_D & (Q_D > Q_F) \\ Q_F & (Q_D \leq Q_F) \end{cases} \quad (式12)$$

ここで

$Q_D$  : ファンを含めた風向別の換気風量[m<sup>3</sup>/h]

$a_1$  : 風向毎の $\sqrt{\Delta T}$ にかかる偏回帰係数

$a_2$  : 風向毎の $v$ にかかる偏回帰係数

$a_3$  : 風向毎の $Q_F$ にかかる偏回帰係数

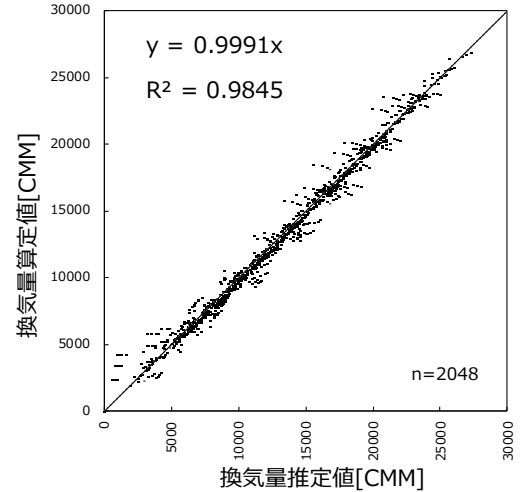


図8 風向毎の換気風量推定

### 4.3 室内代表点温度の推定式の導出

#### 1) 換気風量を変数とした熱量平衡式の作成

室内代表点温度推定式の作成を目的として、外部から流入する熱量、外部へ流出する熱量および発電を主とする室内発熱による熱量の総和は定常的には0となることから、発電所内の熱量平衡式は(式13)で表される。

#### 2) 熱量平衡式に基づく室内代表点温度推定式の導出

本研究では発電量の実績間隔である1時間値を用いた。室内についての項を左辺に移行すると、(式14)のようになる。(式14)の比エンタルピーを空気温度と絶対湿度で表すと(式15)になる。ここで他項と比して微小な値である $1.846\theta_i$ と $1.846\theta_o$ を省略し、 $\theta_i$ についてまとめると、(式16)となる。また測定結果より、室内外の絶対湿度の差は微小であるから $(x_o - x_i) \approx 0$ であり(式17)が成り立つ。これより、室内代表点温度の推定には換気風量の推定が必要であることが分かる。

$$0 = a_g q_g + G(h_o - h_i) \quad (式13)$$

$$Gh_i = a_g q_g + Gh_o \quad (式14)$$

$$G\{1.005\theta_i + x_i(2501.1 + 1.846\theta_i)\} = a_g q_g + G\{1.005\theta_o + x_o(2501.1 + 1.846\theta_o)\} \quad (式15)$$

$$\theta_i = \frac{a_g}{1.005} \cdot \frac{q_g}{G} + \frac{1}{1.005} \{1.005\theta_o + 2501.1(x_o - x_i)\} \quad (式16)$$

$$\theta_i = \frac{a_g}{1.005} \cdot \frac{q_g}{G} + \theta_o \quad (式17)$$

ここで、

- $a_g$  : 発電電力量が熱量に変わる割合[%]
- $q_g$  : 発電電力量[Wh]
- $G$  : 換気風量[kg/h]
- $h_o$  : 外気の比エンタルピー[kJ/kg(DA)]
- $h_i$  : 室内代表点の比エンタルピー[kJ/kg(DA)]
- $\theta_o$  : 外気の空気温度[°C]
- $\theta_i$  : 室内代表点の空気温度[°C]
- $x_o$  : 外気の絶対湿度[kg/kg(DA)]
- $x_i$  : 室内代表点の絶対湿度[kg/kg(DA)]

#### 4.4 室内代表点温度の推定式

##### 1) 室内代表点温度推定式の偏回帰係数の同定

対象建物の3階の換気量を(式12)を用いて算出した。算出した換気風量、発電電力量および外気温度を説明変数とし、室内代表点温度推定式の係数を重回帰分析から同定した。瞬間的に変化する外部風向や風速のデータを使用したことや設定した風圧係数が対象建物独自の値でないことなどを考慮し、標準正規分布における平均値の $\pm 2\sigma$ より外の点を外れ値とし、元のデータの $\pm 1\sigma$ 分だけデータを抽出<sup>[6]</sup>し傾向を把握した。最終的に得た重回帰式を(式18)、各説明変数の偏回帰係数および標準偏回帰係数を表5に示す。

##### 2) 室内代表点温度推定式の精度確認

測定値と重回帰式から算出した室内代表点温度推定値の比較を図9に示す。(式18)は室内代表点温度が発電電力量の増加または外気温度の上昇で高くなり、換気風量の増加で低くなることを示しており、物理的な正負を満たす形となった。

$$\theta_i = 0.02 \frac{q_g}{G} + 1.13\theta_o \quad (式18)$$

表5 各説明変数の標準偏回帰係数

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数
$q_g/G$	0.02	0.42
$\theta_o$	1.13	0.81

#### 5 ファン稼働台数の削減

上記検討より室内代表点温度を発電電力量、換気風量および外気温度で算出することが可能になった。室内代表点温度を設計条件の上限である40°C(= $\theta_{i\max}$ )となる時の必要最小換気風量 $G_c$ とし、(式18)を $G_c$ について整理すると(式19)のようになる。計算ファン換気風量から得られる必要ファン台数を(式20)で示す。

また図10に月別の実績および計算ファン稼働率を示す。ここでファン稼働率は全台稼働時を100%として、1ヶ月当たりのファンの稼働状況を示したものである。各月でファン稼働台数の削減が可能であり、最大で約62.4%削減できる。2019年度においてファン全台停止運転を行った12月は計算ファン稼働率も0%となったため、ファン稼働台数を削減しても設計条件である40°C以下で運用できることを確認した。

$$G_c = \frac{0.02q_g}{\theta_{i\max} - 1.13\theta_o} \quad (式19)$$

$$N_{Fc} = \frac{G_c - G_{\theta_{i\max}}}{G_F} \quad (式20)$$

ここで、

- $G_c$  : 必要最小換気風量[kg/h]
- $\theta_{i\max}$  : 設計条件の上限温度(=40)[°C]
- $N_{Fc}$  : 必要ファン台数[台]
- $G_{\theta_{i\max}}$  :  $\theta_{i\max}$ 時の実効室内外温度差による換気風量[kg/h]
- $G_F$  : ファン1台の換気風量[kg/h]

#### 6 まとめ

本研究では、室内環境の維持と省エネルギーの両立を図るために換気設備の台数制御について検討し、換気風量の推定および、室内代表点温度の推定を行った。

正確な測定が困難である換気風量については、換気回路網計算を行うことで室内外温度差、風向、風速、ファン稼働台数を含めた換気風量推定式を作成した。算定した換気風量と外気温度、発電電力量を用いて熱量算定式から室内代表点温度の推定式を作成した。重回帰分析の結果から室内代表点温度推定式の係数を同定し、室内代表点温度の上限値40°Cとなる時の必要最小換気風量を求めた。必要最小換気量を得るために必要なファン台数を算出し計算ファン稼働率とすることで実績ファン稼働率と比較し、ファン台数を削減できることを確認した。

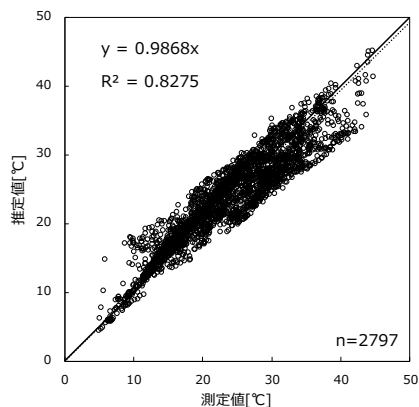


図9 室内代表点温度の推定値

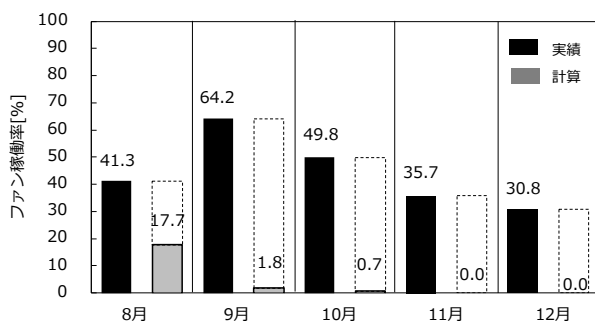


図10 月別ファン稼働率

#### <参考文献>

- [1]藤井他：大空間を対象とした効率的な換気空調システムに関する実践研究(その1) 研究目的と岩盤冷却効果を利用した設備の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p1265-1266, 2018. 7 [2]株式会社建築環境ソリューションズ：換気回路網シミュレーション VentSim ver2.1.5 [3]エース建築環境工学II-熱・湿気・換気-, p159, 2013. 2 [4]田島他：温度差利用型戸建住宅用ハイブリッド換気システムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(第4報), p702-703, 2005 [5]最新 建築環境工学(改訂4版), p201, 2017. 2 [6]ロバート統計-外れ値への対処の仕方-, p41, 2017. 7