

ビル空調システムにおける VAV ユニットの故障発見を支援するシステムの検討

松尾 和樹¹ 乃村 能成¹ 久保田 常人² 権藤 建一³

概要：高層ビルの空調システムをビル空調システムと呼ぶ。ビル空調システムで用いられる装置の1つに VAV (Variable Air Volume) ユニットがある。VAV ユニットは、各部屋に複数個設置され、部屋に給気する空気の量を変更することで温度制御を行う装置である。VAV ユニットの故障は、設定温度と室温のずれを生じさせ、電力量や冷温水量等が増加し、動力費が上がる等の問題が発生する。このため、VAV ユニットの故障を可能な限り早く発見し、保守管理を行う必要がある。VAV ユニットは、超高層ビルでは数千個設置されているため、人力ですべての VAV ユニットの監視し、故障やその予兆を発見することは困難である。そこで本稿では、すべての VAV ユニットの継続的に監視し、故障の発見を支援するシステムについて検討を行う。

キーワード：空調システム, 故障検知

1. はじめに

多くの高層ビルの空調制御は、セントラル空調と呼ばれる方式を導入している。セントラル空調では、各部屋に設置されている VAV (Variable Air Volume) ユニット (以下 VAV) を制御することで空調を行っている。VAV は、各部屋に複数個ずつ設置され、部屋に給気する空気の量を変更することで部屋の温度制御を行う装置である。VAV が故障すると、風量制御が正常に行えず、設定温度と室温のずれが生じる。設定温度と室温のずれが生じた場合、電力量や冷温水量等が増加し、動力費が上がる等の問題が起きる。このため、VAV を継続的に監視する必要がある。

ビル空調システムでは、VAV のセンサから動作の状態を示す計測データがリアルタイムに収集されている。ビル空調システムの監視室では、これらの計測データを監視しているが、計測データを見ても直接故障を発見できる訳ではなく、ビル空調システムに関する知識を持った人員による値の解釈を必要とする。例えば、実際のビル空調システムでは、VAV に関するアラートを通知する仕組みがあるが、

そのアラートが必ずしも故障を示すとは限らず、継続的な監視や季節による変動等を加味してはじめて故障を発見できる場合も多い。このように VAV の継続的な監視は、故障を発見するために重要であるが、超高層ビルの空調システムでは、VAV が数千個設置されていることもあり、すべての VAV を人力で監視するには高いコストがかかる。

以上をふまえて、我々は、VAV の継続的な監視を実現するためにあたって2つの目的を設定した。1つは、人力では困難な全 VAV の継続的監視を計算機で実現することである。これにより、故障アラートまでの時間短縮や VAV の故障の予兆を知ることが可能となる。

もう1つの目的は、計算機には困難な人力での故障診断の効率化である。先述のように VAV の故障発見には、ビル空調システムに関する知識による判断が必要となる。このような知識を活かすためには、計算機にその知識を蓄積する仕組みが必要である。これにより、故障発見につながる新たな知見を得ることができる。

本稿では、上記の2つの目的を実現するため、ビル空調システムにおける VAV の故障発見を支援するシステムの検討を行った。システムは、大別して2つの機能を持つ。1つは、日々の計測データに基づいて故障が疑われる VAV を自動で通知し、ユーザにランキング形式で提示する機能である。もう1つは、計測データの可視化機能である。複数の VAV の計測データを期間を絞って可視化することで

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Okayama University

² 森ビル 株式会社
MORI BUILDING Co., Ltd.

³ 株式会社 ヘルヴェチア
Helvetia Inc.

他の VAV との比較や過去のデータとの比較を容易にする。

以降では、2 章でビル空調システムと VAV の概要について述べる。次に、3 章で VAV の故障発見における課題、実際の不具合報告の事例を示し、継続的に VAV 監視を行う目的について述べる。その後、4 章で課題を解決するための対処を述べる。最後に、5 章で対処を実現するためのシステムの設計を述べる。

2. ビル空調システム

2.1 ビル空調システムとは

2.1.1 セントラル空調の概要

建物の空調には、個別空調とセントラル空調がある [1]。個別空調は、フロアごとまたは部屋ごとに熱源を設置する方式である。一方、セントラル空調は、熱源を 1 カ所に集中して設置する方式である。超高層ビルの場合、個別空調では 1 フロアの熱源の数が増えてしまう。このため、超高層ビルの多くは、セントラル空調を導入している。セントラル空調の利点は以下の 2 つである。

(1) 熱源設備が 1 カ所に集中しているため、スペースの節約が可能である

(2) 湿度管理が可能である

一方、欠点は以下の 2 つである。

(1) 空間で空調負荷が大きく異なると適切な温度制御が不可能である

(2) 熱源システムが必要となり局所的な個別運転が不可能である

本稿では、このような超高層ビルに多く見られる空調システムをビル空調システムと呼ぶ。

2.1.2 可変風量方式の概要

2.1.1 項で示したようにビル空調システムでは、セントラル空調で空調を行っている。セントラル空調の空調方式には、定風量方式と可変風量方式がある。本稿では、可変風量方式に着目する。可変風量方式では、フロアごとや部屋ごとに設置された VAV によって供給する風量を調節して温度を一定に保つ [2]。セントラル空調で可変風量方式を導入している建物の空調は、図 1 のような構造を持つ。セントラル空調では、図 1 に示すように熱源が 1 カ所に設置されている。熱源は、各フロアに設置された空調機に冷水または温水を供給する。空調機は、供給された冷水または温水を用いて各部屋に供給する空気温度を調節する。その後、部屋ごとに設置された VAV を用いて室内に流れる空気の供給量を調節することで室温の制御を行う。このため、VAV は室温の制御に大きく影響する。

2.2 VAV

VAV は、可変風量方式で用いられる装置であり、室内

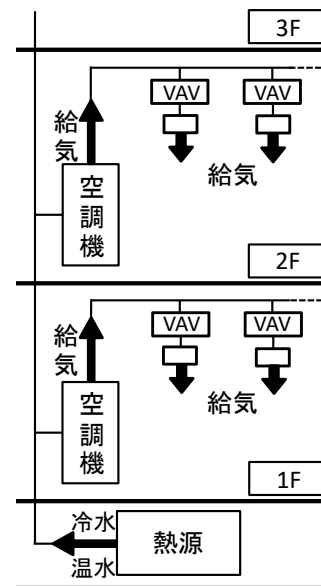


図 1 セントラル空調における可変風量方式の構造

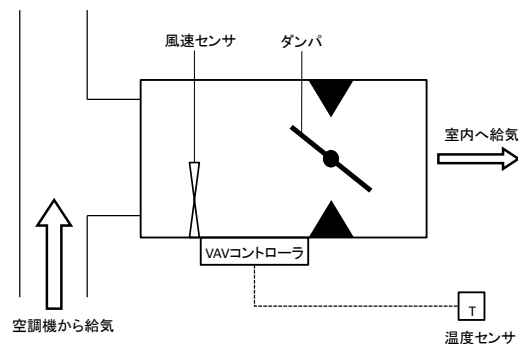


図 2 VAV の構造

に流れる空気量を制御する。VAV の構造を図 2 に示す。VAV は、空調機から受けた給気をダンパにより風量調節し、室内に供給する。風速センサと温度センサは、VAV コントローラが制御を行うために用いられる。VAV コントローラは、センサと接続することで室内温度を設定値に維持するように風量制御を行う [3]。

3. 計測データを用いた継続的な VAV 監視

3.1 VAV の故障発見における課題

VAV の故障は、設定温度と室内温度の間にずれを生じさせ、電力量や冷温水量等が増加し、動力費が上がる問題を引き起こす。しかし、多数の VAV からなる現在のビル空調システムでは、個別の VAV の不具合を早期に発見するのは難しい。なぜならば、VAV は、経年劣化やダンパ付近へのゴミの蓄積等によって徐々に本来の性能を発揮しなくなるからである。また、個別の VAV が劣化したとしても付近の VAV によって室温制御自体に問題がないこともある。つまり、明らかな故障で突然動作しなくなるようなケースを除けば、一般に VAV の故障発見には、長期に渡って収集した VAV の動作状態から判断されるべきもの

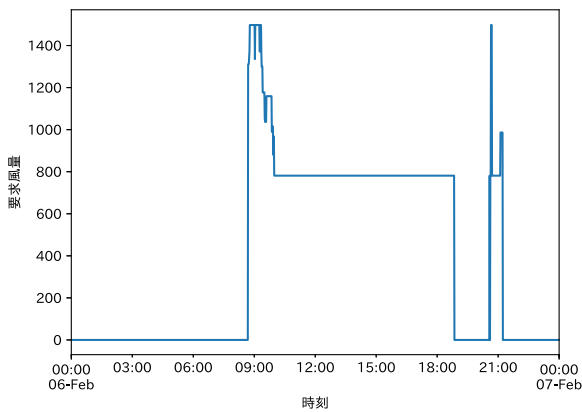


図 3 不具合が報告された VAV の要求風量

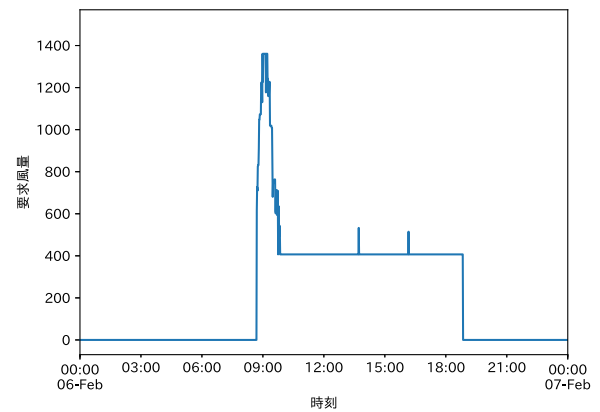


図 5 正常な VAV の要求風量

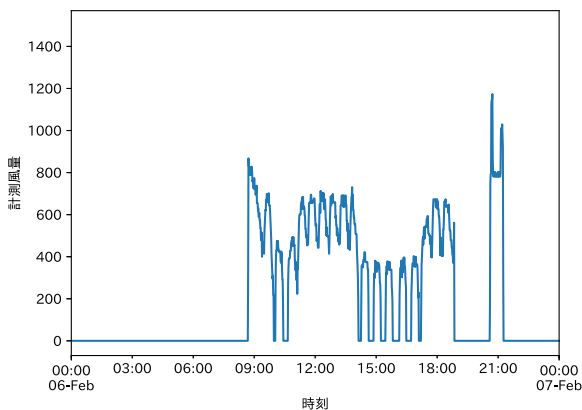


図 4 不具合が報告された VAV の計測風量

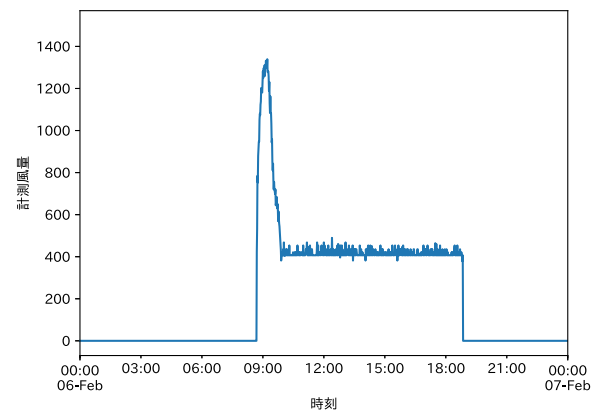


図 6 正常な VAV の計測風量

である。しかしながら、こうした判断を機械的に行うことは難しく、現状においては、予防的に VAV を取り換えたり、専門知識を持った人間が経験から不具合を判断したりしている。

3.2 VAV の不具合報告の事例

実際に不具合が報告された VAV の事例を述べる。不具合が報告された VAV の要求風量と計測風量を図 3、図 4 に示す。要求風量とは、VAV が空調システムに要求する風量であり、計測風量は、VAV 内を流れる風量である。なお、図 3、図 4 は、最初に不具合対応を行った 2019 年 2 月 6 日の計測データを可視化したものを示している。次に、不具合が報告されていない正常な VAV の要求風量と計測風量を図 5、図 6 に示す。

正常な VAV では図 5、図 6 のように要求風量に対して計測風量が同程度に出ている。一方、不具合が報告された VAV では、図 3、図 4 のように計測風量が要求風量と大きく異なっている。不具合が報告された VAV において計測データを過去にさかのぼって調査したところ、このような傾向は 2018 年の 11 月ごろからしばしば確認された。つまり、この事例では、不具合の発生から発見まで 3 カ月程度要している。このため、不具合の発生から発見までの期間を短くするための継続的な監視を行う必要がある。また、

図 3、図 4 のように可視化を行って初めて得られる気づきもある。

3.3 継続的な VAV 監視の目的

3.1 節で述べた課題を基に以下の目的を設定する。

(目的 1) 人力では困難な全 VAV を対象とした継続的な監視を計算機で実現

全 VAV を継続的に監視することにより、故障に関するアラートを出すまでの時間を短縮できる。また、VAV の故障の予兆段階からメンテナンス時期の計画を立てやすくなり、メンテナンス要員の配置効率化を期待できる。

(目的 2) 計算機には困難な人力での故障診断の効率化

VAV の故障発見には計測データの継続的監視だけでなく、ビル空調システムに関する知識に照らした判断が必要となる。人が持つ暗黙の知見を活かすためには、計算機にその知見を蓄積する仕組みが必要である。具体的には、計測データを人間が故障診断しやすい形に可視化した上で計算機が人間に故障の判断を仰ぎ、その結果を計算機の故障アラートのアルゴリズムにフィードバックするような一連のワークフローとそれを支援するシステムを構築することである。また、こうしたシステムによってビル管理の専門家が故障発見

に繋がる新たな知見を得るための試行錯誤も支援できると考える。

4. VAV の故障発見の支援

4.1 概要

3.3 節の目的を実現するために以下の対処を行う。

(対処 1) 長期に渡る計測データを用いて故障が疑われる VAV を絞り込む

計測データから、故障が疑われる VAV を絞り込み通知することで人による VAV の故障判定を支援する。具体的には、表 1 に示した計測データを用いて各 VAV の評価値を計算し、故障が疑われる VAV を評価アルゴリズムによって評価し、ある値を下回る VAV を故障の疑いがある VAV として検出する。VAV を評価することで全 VAV を対象とした継続的な監視を実現する。また、評価に基づき VAV を絞り込むことで人による故障判断の効率化をはかる。

(対処 2) 複数の VAV の計測データを異なる期間で比較表示して可視化

故障発見を目的とした可視化手法として、複数の VAV の計測データを異なる期間で比較表示して可視化する。複数の VAV の計測データを異なる期間で比較表示することで他の VAV との比較、過去の計測データとの比較ができる。

(対処 3) VAV の評価に対するフィードバック

ビル空調システムの管理者は、可視化を行って得られた気づきを基に VAV の評価に対するフィードバックを行う。これにより、人間の持つ知見を再利用可能な形で蓄積できる。

4.2 ビル空調システムの計測データ

ビル空調システムには、多くの機器が存在し、互いに依存して空調を行っている。このため、ビル空調システムではセンサや計算機からデータが収集され、多くのデータのやりとりが行われている。本稿では、実際に運用されている超高層ビルのデータを用いる。センサや計算機を用いてビル空調システム内で監視を行っているポイントを計測ポイントと呼ぶ。計測ポイントは、センサや計算機から取得したデータを持ち、それを計測データと呼ぶ。各計測ポイントでは、1 分間隔で計測が行われている。このため、各計測ポイントは 1 日あたり 1,440 件の計測データを持つ。本研究で用いるデータにおいては、1 日あたり 1,000 万件以上の計測データが収集されている。

4.3 VAV の計測データ

本研究で用いるデータにおける、VAV の計測データとその概要を表 1 に示す。

3.2 節に示した事例のように VAV の故障は計測データに

表 1 VAV の計測データ一覧

通番	計測データ	概要
1	発停	稼働を 0 か 1 で示す
2	室内温度計測値	室内温度の計測値
3	計測風量	VAV 内を流れる空気量
4	要求風量	空調システムに要求する風量
5	要求風量比率	要求風量/給気可能な風量
6	ダンパ開度	VAV 内のダンパの開度
7	室内温度実効設定値	室内温度の設定値

影響する。このため、表 1 に示す計測データを継続的に監視することにより、故障の早期発見に繋がると考えられる。

4.4 長期に渡る計測データを用いて故障が疑われる VAV を絞り込む

4.4.1 VAV の評価

故障が疑われる VAV を絞り込むため、VAV がどの程度正常に動作しているか評価を行う。そこで VAV の計測データから動作に関する評価値を計算し、故障が疑われる VAV を絞り込む指標とする。評価値は、ビル空調システムの管理者が自由に決められるものとする。

ここでは、例として 3.2 節の事例で故障診断に有用であった要求風量と計測風量を用いた評価値を提案する。

$$\text{評価値} = \left| 1 - \frac{\text{計測風量}}{\text{要求風量}} \right| \times 100[\%] \quad (1)$$

式 (1) は、要求風量に対する計測風量の比を求めることで VAV がどれだけ要求に沿った風量を出しているかを求めている。また、要求風量に対して計測風量が過剰である場合も異常であると考えられるため、評価値は 100[%] からの偏差の絶対値としている。つまり、式 (1) の評価値が高いほど VAV が要求通りに動作していないことを示す。

4.5 複数の VAV の計測データを異なる期間で比較表示して可視化

従来の可視化システムでは、故障発見を目的とした計測データの可視化が十分でないことが課題であった。可視化による気づきを得るため、複数の VAV の計測データを異なる期間で比較表示して可視化する。これにより、以下の 2 つの利点がある。

(1) 周辺の VAV との比較が可能

周辺の VAV との比較を行うことで他の VAV と異なる動作をしている VAV を発見できる。これにより、他の VAV と異なる動作をしている VAV が故障しているかを検討できる。また、故障した VAV とその周辺の VAV を比較することで VAV の故障が計測データにどのような影響を与えるかを推測できる。

(2) 過去の計測データとの比較が可能

過去の計測データを可視化することで故障した VAV

の計測データに事前にどのような兆候が現れるかを推測できる。

また、ビル空調システムの管理者は、VAV の評価に対してフィードバックを行い、VAV の評価に対する評価アルゴリズムあるいは閾値を設定する。これにより、アイデアの試行錯誤が容易に繰り返し行え、故障に関する新たな知見を得ることが期待できる。

5. システムの設計

5.1 VAV の故障発見を支援するシステムの構成と処理流れ

5.1.1 システムの構成

VAV の故障発見を支援するシステムの構成を図 7 に示す。VAV の故障発見を支援するシステムは以下の要素で構成される。

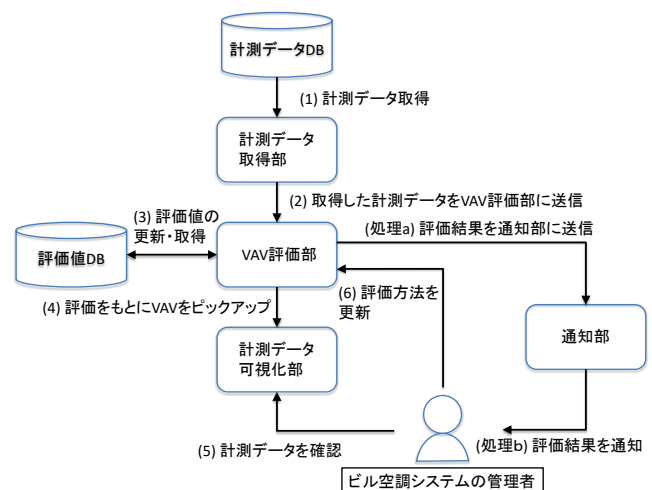


図 7 VAV の故障発見を支援するシステム

計測データ DB

計測データが保存されているデータベースである。計測データ DB はビル空調システムに属している。

計測データ取得部

計測データ DB からデータを取得する。

VAV 評価部

計測データを基に VAV の評価を行う。評価の方法は、ビル空調システムの管理者が設定する。また、評価の結果を基に故障が疑われる VAV をピックアップする。これにより、4.4 節の対処を実現する。

評価値 DB

VAV 評価部によって計算された各 VAV の評価値を保存するデータベースである。

計測データ可視化部

VAV 評価部によりピックアップされた VAV を提示、および計測データの可視化を行う。これにより、故障発見を目的とした計測データの可視化を行い、4.5 節の対処を実現する。計測データ可視化部は、図 8 に示すユーザインタフェースを想定している。図 8 のインタフェースでは、フロアと計測データを選択し、図 8 下部のカレンダーより日付を選択することで計測データの可視化を行う。

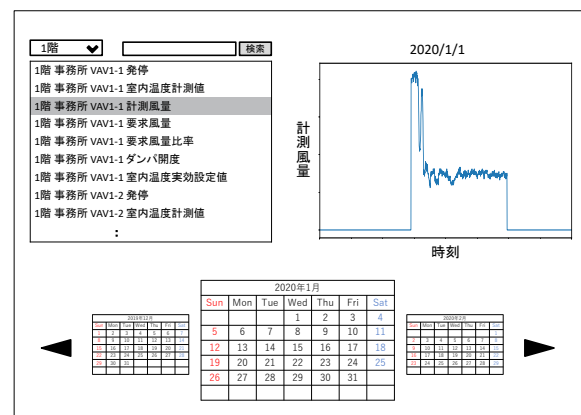


図 8 計測データ可視化部のユーザインタフェース

通知部

評価結果を Daily Report として図 9 のようなメールでビル空調システムの管理者に通知する。図 9 のメールでは、式 (1) を評価値としたときの 1 日あたりの評価値の平均が高い VAV を 10 個示している。

5.1.2 システムの処理流れ

図 7 に示したシステムの処理流れを述べる。

- (1) 計測データ取得部は、計測データ DB から計測データを取得する。
- (2) 計測データ取得部は、取得した計測データを VAV 評



図 9 故障が疑われる VAV のメールによる通知

価部に送信する。

- (3) VAV 評価部は、計測データを基に VAV の評価を行い、評価値 DB を更新する。
- (4) VAV 評価部は、VAV の評価を基に故障が疑われる VAV をピックアップする。その後、ピックアップした

VAV を計測データ可視化部に送信する。

- (5) 計測データ可視化部は、VAV 評価部がピックアップした VAV およびその計測データを提示する。その後、ビル空調システムの管理者は、提示された VAV の情報を基に他の VAV や過去の計測データと比較を行う。
- (6) ビル空調システムの管理者は、VAV の評価を基に評価方法の更新を行う。

また、VAV の評価結果をビル空調システムの管理者に通知するため、定期的に以下の処理を行う。

(処理 a) VAV 評価部は、通知部に VAV の評価結果を送信する。

(処理 b) 通知部は、ビル空調システムの管理者に VAV の評価結果を Daily Report として通知する。

6. 関連研究

設備の異常や故障の予兆を検知する手法として、k-means や LCS による時系列データのクラスタリングが検討されている [4]。文献 [4] では、k-means, 階層的クラスタリング, k-NN, および LSC を用いてセンサから取得した時系列データのクラスタリングを行い、比較検討を行っている。文献 [4] で挙げられているクラスタリング手法を用いて 4.5 節で述べた閾値の設定を行うことが考えられる。

また、LCS を用いた異常検知のシステムが提案されている [5]。文献 [5] では、LCS を用いて計測データの解析を行い、異常の予兆を検知している。

文献 [4]、文献 [5] のように機械学習は異常検知に有用であるため、VAV の評価に機械学習を用いることが考えられる。

7. おわりに

本稿では、VAV の故障発見を支援するシステムについて検討した。まず、ビル空調システムと VAV の概要について述べた。

次に、計測データを用いた継続的な VAV 監視について述べた。VAV の故障発見には問題があることを実際の事例を交えて述べた。そして、これらの問題を基に継続的に VAV 監視を行う 2 つの目的を示した。その後、この目的を実現するための 3 つの対処を述べた。

最後に、VAV の故障発見を支援するシステム設計として構成と処理流れについて述べた。

参考文献

- [1] ORIX: 賃貸オフィス入居前に要確認! 個別空調とセントラル空調それぞれのメリット・デメリット, ORIX (オンライン), 入手先 (<https://www.crossoffice.jp/contents/kuuchou/>) (参照 2020-8-19).
- [2] 田崎 茂, 染谷 博行: 環境共生世代の建築設備の自動制御入門, 日本工業出版 (2018).

- [3] Azbil Corporation: VAV コントローラの概要, Azbil Corporation (オンライン), 入手先 (<https://www.azbil.com/jp/product/building/system/controller/vav-controller/index.html>) (参照 2020-8-19).
- [4] 吉岡哲郎, 佐竹凌太, 前田俊二, 鈴木忠志, 野田統治朗: 設備の異常予兆検知における時系列データを対象にしたクラスタリング手法の比較検討, 精密工学会学術講演会講演論文集, Vol. 2014S, pp. 19–20 (2014).
- [5] 馬場宣明, 渋谷久恵: 空調・冷凍設備の稼働データ解析による予兆保全, 電気設備学会誌, Vol. 38, No. 8, pp. 449–451 (2018).