

熱源システム運転の効率化に貢献する クラウドサービスの開発

Improvement of Heat Source System Efficiency Using a Cloud Service

アズビル株式会社
ITソリューション本部

小柳 隆
Takashi Koyanagi

アズビル株式会社
ITソリューション本部

古賀 圭
Kei Koga

アズビル株式会社
ITソリューション本部

鹿島 亨
Toru Kashima

アズビル株式会社
ITソリューション本部

鈴山 晃弘
Akihiro Suzuyama

アズビル株式会社
ITソリューション本部

村田 裕志
Hiroshi Murata

アズビル株式会社
ITソリューション本部

太田 延樹
Nobuki Ota

キーワード
クラウドサービス, 熱源システム, 需要予測, 数値最適化

建物・工場の管理業務を支援する、「クラウドサービス」のメニューの1つとして、熱源最適運用支援を開発し、サービス提供を開始した。本機能は、熱源システムを運転管理する設備オペレータの日常業務を支援することを目的としている。本稿では、需要予測機能、熱源最適運用支援機能、台数制御コントローラ連携機能、コメント機能などを紹介する。また、本サービスにおける最適化演算の処理内容、および利用している技術について概要を説明する。

As one part of our cloud service menu in support of building and factory administration, we have developed and offer a service providing optimal heat source operation. The service is designed to assist the daily work of the facility operators who control the heat source system. We describe various functions for demand forecasting, optimization of heat source operation, cloud-linked control of the number of operating heat source units, addition of comments to items on the screen, and more. In addition, we provide a brief overview of the optimization calculations and technology that we utilize.

1. はじめに

地球温暖化によるとされる海面の上昇や異常気象、生態系の変化などの問題はもはや無視できないものとして、地球レベルでの温室効果ガスの削減、省エネルギーが求められ、産業部門(工場等)や業務部門(オフィスビル等)に対する環境規制は年々厳しくなっている。

また、東日本大震災以降、災害発生時の電力供給確保(BCP)ニーズの高まり等のため、自家発電設備、特に熱電併給設備(CGS:Cogeneration System)が熱源システムに多く導入されている。CGSは内燃機関で発電し、その際に発生する熱を多様な設備で有効活用するものであるが、需要負荷の変動やエネルギー単価の変動に応じて、コスト削減・省エネルギー・高効率運転となるように各設備の運転計

画をたてることが課題となっている。

これらの課題を解決する技術として、「需要予測」と数値計画法に基づく「最適化」が注目されている。

熱源システムの運転計画に「最適化」を適用する事例には従来から取り組んできた⁽¹⁾。しかし、実用的な演算時間で最適解が得られるように問題を定式化するには専門的で高度な知識が必要だったため、汎く普及するには至っていなかった。近年のハードウェアの高速化、最適化問題を解くアルゴリズムの高速化により⁽²⁾、上記の課題(演算時間、問題の定式化)は解決されつつある。

一方で、近年の情報通信技術の発達や通信インフラの整備により、従来は利用者が手元のPCで利用していたアプリケーションやデータをインターネット経由のサービスとして、利用者に提供するクラウドサービスが日常生活のあら

ゆるところ急速に普及してきている。

このような状況のなかで、大規模化・複雑化した熱源システムに対する最適運用を支援するクラウドサービス「熱源最適運用支援(OP)」を開発しサービスを開始した。

本稿では、この「熱源最適運用支援(OP)」について紹介する。

2. クラウドサービスの概要

アズビルのクラウドサービスは、ビルオーナーや設備オペレータ、居住者などビルにかかわる様々なユーザーに対してインターネットを経由してサービスを提供している。本稿で紹介する熱源最適運用支援(OP)だけでなく、エネルギー管理(EM)、設備保全管理(BM)、テナントサービス(TS)などのサービスメニューを用意しており、顧客は必要なメニューを組み合わせる利用することができる(表1)。

表1 サービスメニュー一覧

コンテンツ	提供価値	主要機能	主要ユーザー
EM エネルギー管理	省エネ見える化	・消費傾向分析 ・総量目標管理 ・サイネージ ・エキスパート機能	プロパティ マネージャ (ビルオーナー会社)
TS テナントサービス	快適性 利便性	・照明/機器発停 ・空調設定 ・申告空調制御	居住者 (テナント)
BM 設備保全管理	LCC低減	・設備保全管理 ・中長期保全計画 ・点検支援	設備オペレータ (ビル管理会社)
OP 最適運用	省エネ/省CO2 省コスト	・需要予測 ・最適運転シミュレーション ・COP管理	設備オペレータ
DR デマンドレスポンス	電力需給連携	・DR管理機能 ・節電制御	—

クラウドサービスというシステム形態のメリットは、下記の3点が挙げられる。

(1) 利便性の向上

- ・アクセス場所や端末を選ばないため、ユーザーの利用形態に柔軟に対応できる
- ・常に最新のアプリケーションや情報を利用できる
- ・高性能・大容量サーバで処理するため、高度な制御や分析が可能である

(2) システム管理品質の向上

- ・システム管理の専門家が一括して運用するため管理品質の向上が見込める
- ・データセンターを利用することで、耐災害性やセキュリティ対策が高いレベルで確保できる

(3) コスト削減

- ・サーバ等の情報機器や高価なアプリケーションを保有する必要がなく、初期投資をかけずにサービスを利用できる
- ・ハードウェアの維持管理コストを大幅に削減することが可能

このように、クラウドサービスは、その利用形態により、利用者に様々なメリットを提供することができる。

3. 熱源最適運用支援(OP)

熱源最適運用支援(OP)では、予測された需要量に対して、ある最小化目的に沿った熱源の「最適運転計画」を立案する(図1)。なお、最小化目的としては、コスト最小化やCO₂排出量最小化等を選択可能である。

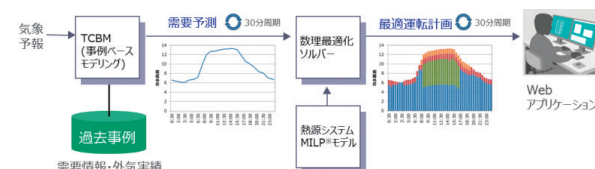


図1 熱源最適計画 処理概要

3.1 需要予測機能

本機能では、冷温水や電気、ガスなどの使用量を最大7日先まで予測可能である。予測には、当社保有技術である位相事例ベースモデリング(Topological Case-Based Modeling:TCBMTM)^{注1}を使用している。予測の入力データには、気象予報データや建物運用カレンダーに加えて、当社中央監視装置savic-netTMで設定されている「空調機の運転スケジュール情報」も利用することができる。また、指数平滑法に基づく予測値の自動補正や、予測値の手動修正機能も備えている。

図2に需要予測画面を示す。薄い色の棒グラフが予測結果、左側の濃い色の棒グラフが実績値を示している。

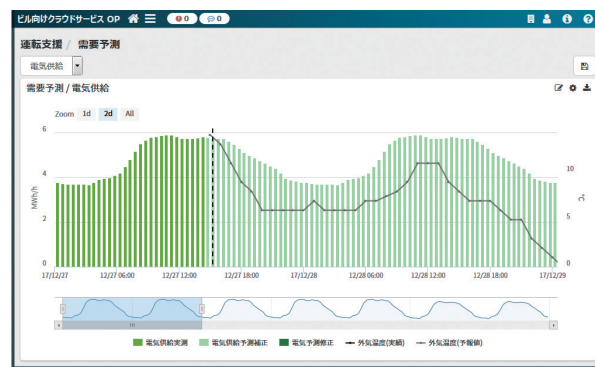


図2 需要予測画面

3.2 熱源最適運用支援機能

熱源の「最適運転計画」は、熱源システム運用を混合整数線形計画問題(Mixed Integer Linear Program:MILP)としてモデル化し、数値最適化ソルバーにより最適解を求めることで得られる。主な特長を以下に挙げる。

- ・予測負荷に基づき、最短30分周期で情報更新
- ・熱源の部分負荷特性を考慮
- ・熱源が能力を発揮するまでにかかる「立ち上がり時間」を考慮
- ・エネルギー単価の季時別時間帯別料金に対応
- ・年間制約条件(年間最低使用量や年間負荷率のような年間累積値に対する契約条件)を考慮

注1 TCBM:入力データ間の類似度合いをもとに、データを事例化するモデリング手法であり、与えられた入力に類似した過去の事例を参照して、必要な出力を導く。こうした事例ベース推論法では、過去に経験した事例ベースの中に入出力関係が内包されているため入出力関係を規定するモデル構造を特別につくる必要がなく、非線形な入出力関係にも対応することができる

3.2.1 ダッシュボード

本システムにログインして、最初に表示されるのがダッシュボード画面である(図3)。ユーザーはダッシュボード画面にて、直近の負荷予測結果や熱源運転計画の概況を直感的に把握することができる。具体的な表示項目については、表2に示す。



図3 クラウドOPダッシュボード画面

表2 タイルごとの表示項目

番号	タイル名称	説明
①	これからの熱源運転	現在時刻以降の熱源運転台数
②	需要予測	現在時刻以降の需要予測
③	気象予報	建物所在地の天気予報
④	電力需要予測	電力需要の実績と予測
⑤	年間予測	年度末における各種指標(コスト、CO2排出量、COPなど)の予測値

3.2.2 熱源運転計画

熱源運転計画画面では、立案した最適運転計画に基づき、今後の各熱源の運転/停止スケジュール、製造エネルギー量を表示する。表示画面には、短期計画と長期計画、2種類ある。

短期計画は直近の最適運転計画を細かく把握するための画面で、最大7日後までの30分データを表示する。なお、吸収式冷凍機など、起動から十分な能力を出力するのに時間がかかる機器の場合、その時間分早く起動させるような運転/停止スケジュールを表示する(図4)。

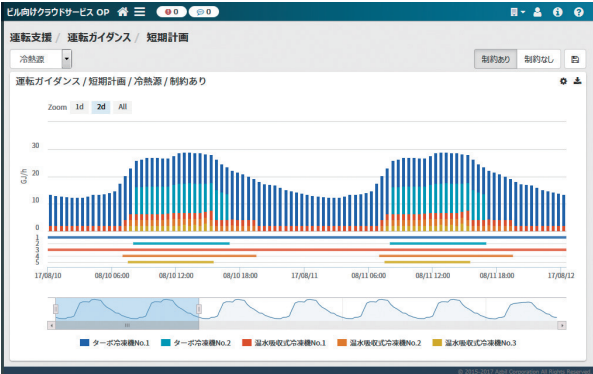


図4 熱源運転計画(短期)

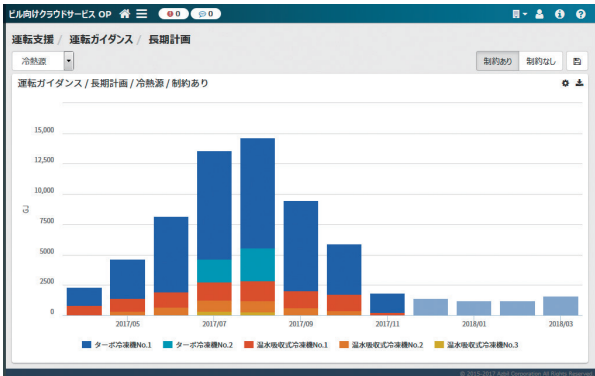


図5 熱源運転計画(長期)

長期計画は、年間の大まかな熱源運転方法を把握するための画面で、年度末までの1カ月データを表示する(図5)。

3.2.3 システムCOP管理

システムCOP管理画面では、熱源システムの運転効率(Coefficient of Performance: COP)の実績値、および予測値を表示する(図6)。表示画面には、30分データ、月データ、年間累積データの3種類がある(図6は年間累積データ)。

システムCOPの予測値は、需要予測値および最適運転計画から演算できる熱源消費エネルギー量から算出している。これにより、時間帯ごと、月ごと、あるいは年間のシステムCOP値の推移をあらかじめ把握可能となるので、効率改善策の検討に役立てることができる。

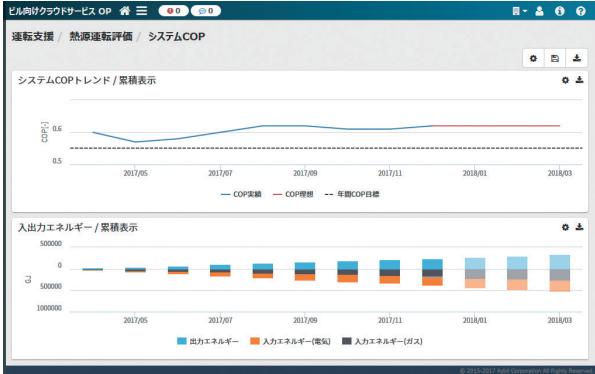


図6 システムCOP確認画面(年間累積データ)

3.2.4 エネルギー契約達成状況

図7は、立案した最適運転計画がガス契約を満足しているか確認できる画面である。

ガス契約では一般的に、年間最低使用量、最大需要期使用量の上限値、年間負荷率の下限値など、ガスの使用量に対して複数の条件が設定されている。

可視化画面では、ガスの使用量を、12月~3月(最大需要期)と4~11月(非最大需要期)との期間別に、別の軸に配置することで、複数あるガス契約を同一のグラフ内に表現している。グラフ上に、ガス使用量実績、および運転計画におけるガス使用量の計画値をプロットすることで、ガス契約の達成見込みを確認できる。

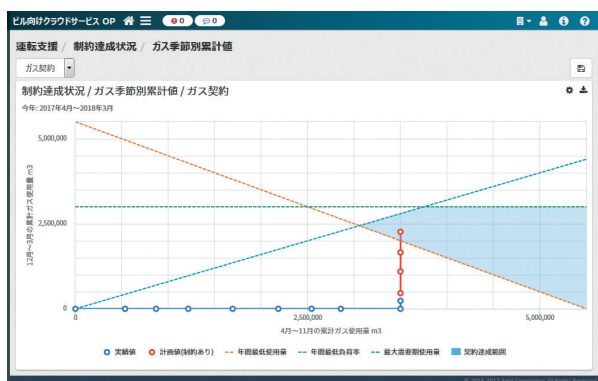


図7 ガス契約の達成状況確認画面

3.2.5 ユーザー設定画面

最新の契約情報で運転計画を立案するために、Webアプリケーション画面にてユーザーが単価や燃料調整費を設定することができる(図8)。



図8 エネルギー契約設定画面

熱源は故障やメンテナンスで運転できない場合がある。ユーザーが、Webアプリケーション画面で熱源を停止したい時間帯を設定することができる(図9)。最適化演算処理では、除外設定を考慮して計画を立案する。なお、除外設定は、BAシステムの除外情報も自動反映可能である。

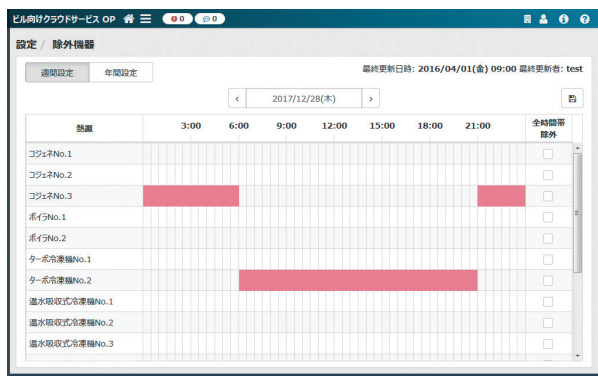


図9 熱源除外スケジュール設定画面

3.3 台数制御連携機能

クラウド側で画面表示している最適運転計画を現地の台数制御に反映可能である。クラウド側と自動制御の役割分担の考え方は、クラウド側では最適運転計画に基づいた制御パラメータを決定し、自動制御側は決定された制御パラメータに基づいて、需要側の変動に対応する。

3.4 コメント機能

グラフ上の任意の位置をクリックすることで、その場所にコメントを作成可能である。作成されたコメントはグラフ上にアイコンとして表示されるとともに(図10)、一覧表に表示することもできる(図11)。一覧表には検索機能があり、作成時期、該当グラフ、作成者、コメント内容等の条件で絞り込むことができる。

コメント機能は建物内外のユーザー間のコミュニケーションツールとしての活用が期待される。

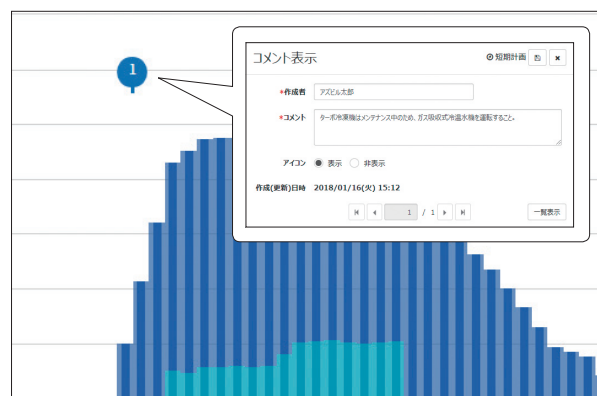


図10 グラフ上のコメント作成



図11 コメント一覧の表示

3.5 スマートガイダンス機能

あらかじめシステムにガイダンス内容および表示条件を登録しておくことで、条件式が成立した場合に、自動的にグラフ上にガイダンス内容に関連付けられたアイコンを表示させることができる(図12)。

本機能は、過去実績値を用いた判定のみならず、将来の予測値や計画値を用いてガイダンスを出せることが特長である。具体的には、需要予測値の上限監視、熱源の運転停止操作ガイダンスの事前通知、管理指標の達成状況の把握等への利用が考えられる。



図12 グラフ上のスマートガイダンス表示

ど(いずれも補機動力も考慮可能)、エネルギーは蒸気、ガス、電気、冷熱、温熱、石油等をモデル化可能である。図13に対象設備構成の一例を示す。

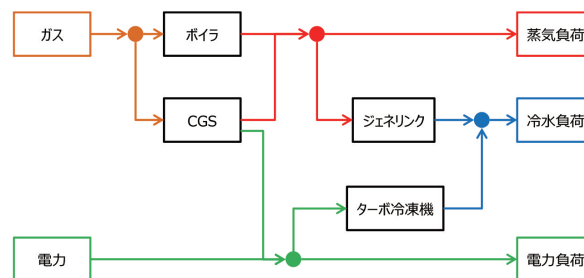


図13 設備機器・エネルギーの接続関係の例

4. 最適化演算処理について

本章では、本サービスにおける最適化演算の処理内容、および利用している技術について概要を紹介する。

4.1 最適化演算処理の概要

まず、最適化演算時の基本的な処理内容について説明する。最適化演算では、最適な運転計画、すなわち各操作変数(各予測対象日および代表日の各時刻における各設備の稼働/停止を表す0-1整数変数、および入出力熱量を表す連続変数)の値をMILPを用いて算出する。

最適化演算実行の各タイミングで、初期導入時に作成した数理モデルファイル(運転計画の目的と制約条件を、目的関数、制約式として定式化し、最適化ソルバーが読み込める形式で記述したファイル。以下、数理モデル)、ユーザーが画面上で設定したパラメータのデータ(除外設定、エネルギー単価等)、時間の経過とともに変化する実績値データ、予測値データが最適化ソルバーに渡され最適化計算が行われる。

数理モデルは、導入時に、ユーザーから運転計画の目的(省コスト、省CO2、省エネ等)と、制約条件(各設備機器の入出力特性、設備機器・エネルギー購入源・エネルギー供給先の接続関係、運転ルールや各種エネルギーの購入契約等)をヒアリングし、それらを適切に定式化して作成する。

4.2 モデリング技術

上記最適化演算により算出される運転計画が、現場の状況に則した実用的なものとなるためには、数理モデルを十分かつ適切に作り込む必要がある。本節では、本サービスで利用している、数理モデルの作成に関する技術について概要を紹介する。

4.2.1 多様な設備構成への対応

設備構成(各設備機器の入出力特性、設備機器・エネルギー購入源・エネルギー供給先の接続関係)の数理モデル作成にあたっては、定式化方法を抽象化・標準化しているため、多種多様な設備機器・エネルギーを利用している複雑な設備構成の現場にも柔軟に対応可能である。例えば、設備機器は各種冷凍機、ボイラ、コジェネ、蓄熱槽な

また、非線形な部分負荷特性を持つ設備機器についても、区分線形関数を用いて近似的にモデル化可能である。複雑な形状の関数を近似するには、区分の数を多くすればよい。しかし、区分の数が多くなると、解くべきMILPの規模が大きくなり、計算時間の増大を招く。本サービスでは、フィッティング精度と区分数のトレードオフを調整しながら区分線形関数を自動生成する独自技術を利用しており、実用上十分な精度を保ちつつ、計算時間の増大を回避している。

4.2.2 制約条件のモデリング

数理モデルに定式化されるべき制約条件は、4.1で述べたとおり様々なものがある。通常、ヒアリングした制約条件を一度単純な等式・不等式で定式化しただけでは不十分であることが多い(算出される運転計画が実用的でないものとなる)。その主な原因は、暗黙に想定しているものも含め制約条件を洗い出しきれていないことや、各制約条件の遵守の絶対性が定まっていない(できれば遵守したいが、目的をさらに改善したり、競合する制約条件を遵守可能にしたりするために緩和してもよい制約条件がある)ことなどが挙げられる。

したがって、初期導入時の数理モデル作成にあたっては、制約条件の洗い出しと明確化を進めながら、それらを適切に数理モデルに組み込んでいく作業が必要となる。具体的には、数理モデルの編集 → 最適化計算の試行・結果確認 → 分析 の作業サイクルを繰り返す必要があるが、この作業サイクルの効率化が、最終的な数理モデルの品質向上のための1つの課題となる。

これに対し、まず、典型的な制約条件について定式化のテンプレート集を作成することで、数理モデルの編集作業、とくに新規制約条件のモデル化作業を容易にしている。また、このように制約条件の種類をリストアップすることで、どの制約条件を使用しているか、あるいは使用していないかが分かるため、制約条件の洗い出し漏れを低減している。さらに、制約条件の充足状況確認や、分析(目的に対する感度、制約条件同士の競合関係など)、調整(緩和の程度や対象範囲など)が容易にできるよう、定式化方法にも独自の技術を用いている。これらにより、前述の作業サイクルを効率的に回すことができるため、制約条件の

数理モデルを十分に作り込むことが可能となり、現場の状況に則した実用的な熱源運転計画を算出する数理モデルが作成できる。

4.3 年間制約計算の高速化

最適化演算は、エネルギー負荷予測に基づいた熱源最適運転計画を30分ごとに算出する。算出される最適運転計画は、予測対象日数で表される短期間において最適化されているだけでなく、長期間のエネルギー契約(最大1年間)に従っている必要がある。

しかしながら、一般的に、大規模なMILPの最適化は計算負荷が大きいことが知られており、長期間のエネルギー契約を考慮した最適化計算を短時間で行うことは難しい。本サービスでは、様々な技術を駆使して、計算時間の短縮を図っている。

その1つは、MILPを上位問題(年間制約問題)と下位問題(予測対象日数分の最適化問題)に分割した上で、上位問題を解く頻度を減らすことである。

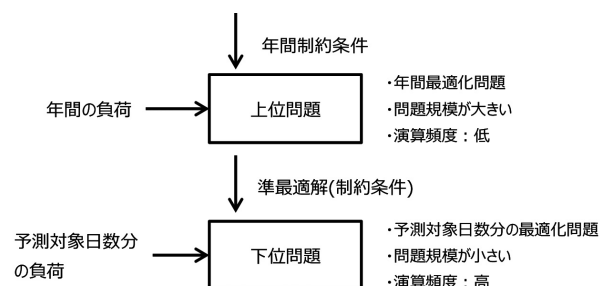


図14 上位問題と下位問題

上位問題(年間制約問題)を解く際には、予測対象日数分のエネルギー負荷予測、その先最大1年分の代表負荷パターン、年間のエネルギー契約、その他すべての制約条件を考慮する。ここで、完全な最適解を求めるには計算時間がかかるため、実用上十分な精度での解を求める「準最適化」を行うことで、計算時間を短縮する。

準最適化とは、例えば、一部の整数変数を緩和した緩和解を求めたり、分枝限定法における上下限のギャップを大きくして実行可能解を算出したりすることを指す⁽³⁾。

一方、下位問題(予測対象日数分の最適化問題)を解く際には、上位問題を解くことにより得られた解を、都度新たな制約条件として問題に組込んだ上で、予測対象日数分のエネルギー負荷予測を考慮した最適化を行う。下位問題の解が、組込まれた新たな制約条件を満たしていれば、年間のエネルギー契約に従うような、予測対象日数分の運転計画が得られることになる。

下位問題は上位問題と比較して問題規模が小さく、短時間で計算可能である。このようにして、問題の規模を小さくしつつも、長期間のエネルギー契約(最大1年間)に従った熱源運転計画を30分ごとに算出することが可能となる。

5. おわりに

クラウドサービスの熱源最適運用支援(OP)を紹介した。

年々高まる環境規制、多種多様な熱源設備の登場、自然エネルギー利用の拡大、BPCを考慮した設備構成、デマンドレスポンスへの対応など、建物・工場の熱源システム運用は、今後さらに複雑化していくと思われる。また、労働人口の減少により、熟練設備オペレータの確保が困難になることが予想されている。したがって、熱源システム運用品質の維持・向上を図るためには、数理最適化技術の有効活用が必要である。

今後は、数理最適化技術を熱源システムのみならず、スケジューリング問題や生産計画など他の分野への応用を検討していきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) 神村, 宮坂, 伊藤, 『空調熱源運用計画シミュレータの開発』, Savemation Review, Vol.11, No.2, 1993
- (2) 梅村, 『組合せ最適化入門 線形計画から整数計画まで』, 言語処理学会第19回年次大会, 2013
- (3) T. Kashima and S. P. Boyd, "Cost optimal operation of thermal energy storage system with real-time prices," 2013 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Nha Trang, 2013, pp. 233-237.

<商標>

TCBMはアズビル株式会社の商標です。
savic-netはアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|-------------------------------------|
| 小柳 隆 | アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部 |
| 鹿島 亨 | アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部 |
| 村田 裕志 | アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部 |
| 古賀 圭 | アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部 |
| 鈴山 晃弘 | アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部 |
| 太田 延樹 | アズビル株式会社
ITソリューション本部ITソリューション開発部 |