

ASP型省CO₂サービスと学習型熱源最適化制御

CO₂ Reduction Solutions via ASP and Adaptive Optimization for Variable Water Temperature

株式会社 山武	近田 智洋 Tomohiro Konda	株式会社 山武	西口 純也 Junya Nishiguchi
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	平田 眞基 Masaki Hirata	株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	太宰 龍太 Ryota Dazai
株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	中村 瑞 Mizu Nakamura	株式会社 山武 ビルシステムカンパニー	小野寺 博 Hiroshi Onodera

キーワード

Web-Inflex, SaaS/ASP, 省エネ / 省 CO₂, 送水温度最適制御, 学習

改正省エネ法への対応に向けて、大規模な設備投資不要で簡単に導入できる省エネ / 省 CO₂ アプリケーション Web-Inflex™ を SaaS/ASP 型サービスで提供している。本稿では、この Web-Inflex の概要について述べる。特に、Web-Inflex のアプリケーションの1つである、熱源の送水温度最適制御アプリケーション『学習型 VWT 制御』について紹介する。また、本アプリケーションのフィールド試験の結果も合わせて報告する。なお、フィールド試験において、約 9% の省エネ効果が得られた。

As a means for compliance with revised energy conservation legislation, we provide Web-Inflex™, an energy-saving and CO₂-reduction application which can be introduced easily without capital investment, via SaaS/ASP. This paper gives an overview of Web-Inflex, focusing especially on "Adaptive VWT control," a Web-Inflex application that optimizes variable water temperature in heat sources. This paper also reports the results of a field test of this Adaptive VWT Control in which it brought about energy savings of approximately 9%.

1. はじめに

国際的な CO₂ 排出規制に対する関心の高まりから、建物の省エネルギーに対する社会的要求が強まっている。

日本においては、2010年4月の省エネ法の改正により、これまでの工場・事業所ごとのエネルギー管理から、企業全体の管理に変わり、エネルギー管理統括者のもと、企業全体としてエネルギー管理体制を推進することが義務付けられた。各企業は、企業全体（本社、工場、営業所、店舗など）の燃料、熱、電気の年間エネルギー使用量を把握し、原油換算で1,500kl以上あれば、そのエネルギー量を届け出て、特定事業者の指定を受ける必要がある。

そのため、これまで原油換算 1,500kl 未満で省エネ法

の対象外であった事業所も、企業全体で1,500kl以上の場合は、省エネ法の対象となり、積極的な省エネへの取り組みが必要となっている。

省エネの取り組みは、これまでの工場・事業所ごとの取り組みから、企業全体の取り組みに変わるため、それらの状況の変化に対応できる、新たな省エネサービスが求められている。

これまでも企業全体のエネルギー管理を行なうための総量管理のサービス「CO₂ マネジメントシステム」など多くの省エネ / 省 CO₂ のサービスを提供してきたが、このような社会状況の下、さらに省エネ / 省 CO₂ を実現する ASP^{*1} による空調制御サービス「Web-Inflex」を開発し、販売を開始した。

Web-Inflex は、SaaS^{※2}/ASP 型のサービスであり、設備投資はほとんどなく簡単に導入することができる。

本稿では、Web-Inflex の概要説明と熱源の送水温度最適制御アプリケーション(学習型 VWT 制御)について、性能評価も含めて紹介を行なう。

- ※ 1 ASP : Application Service Provider
特定及び不特定ユーザが必要とするシステム機能を、ネットワークを通じて提供するサービス、あるいは、そうしたサービスを提供するビジネスモデル。
- ※ 2 SaaS : Software as a Service
ソフトウェアの機能のうち、ユーザが必要とするものだけをサービスとして配布し、利用できるようにしたソフトウェアの配布形態。

2. Web-Inflex とは

Web-Inflex とは、顧客ビルと当社のサーバーを専用回線で結び、各種設定の変更や、各種設備の起動/停止及び間欠運転などの自動制御を遠隔から実施することで、遠隔から建物空調設備の省エネ/省CO₂を実現する SaaS/ASP 型の空調制御サービスである(図1)。

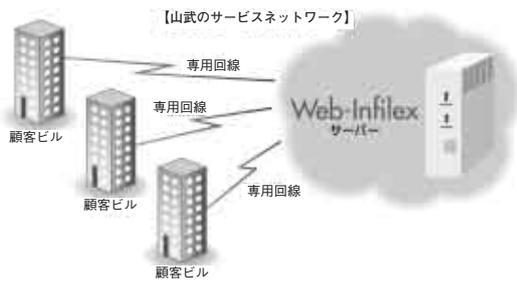


図 1. Web-Inflex 構成

(1) Web-Inflex の特徴

- ・顧客ビルに専用回線で接続し、遠隔から建物空調設備の省エネ/省CO₂を実現できる。
- ・導入は短工期で済むため、設備稼働に支障が少ない。
- ・SaaS/ASP 型であるため、大規模な設備投資なく手軽に低コストで導入できる。
- ・建物単体または、事業者単位(複数建物)でCO₂排出上限値制御に活用できる。

(2) Web-Inflex アプリケーション

2010年4月にリリースした Web-Inflex のアプリケーションは、CO₂リミット制御、学習型 VWT 制御の2つである。今後、さらに省エネ/省CO₂のアプリケーションを追加し、提供していく予定である。次にこれらのアプリケーションについて、概要を紹介する。

・CO₂リミット制御(図2,3)

事業者が設定した目標値に合わせて、建物におけるCO₂排出量を抑えるサービスであり、CO₂の実績値が目標値を超過すると予測した場合は、設備を制御してCO₂を抑制する。

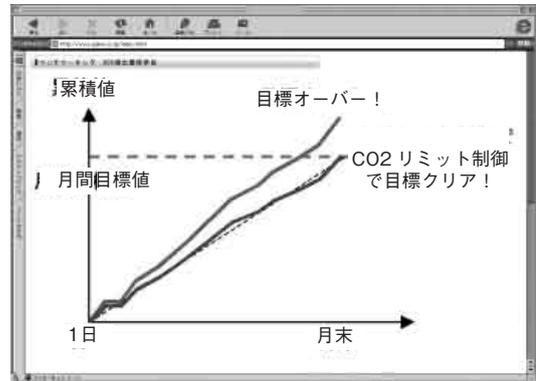


図 2. CO₂リミット制御イメージ

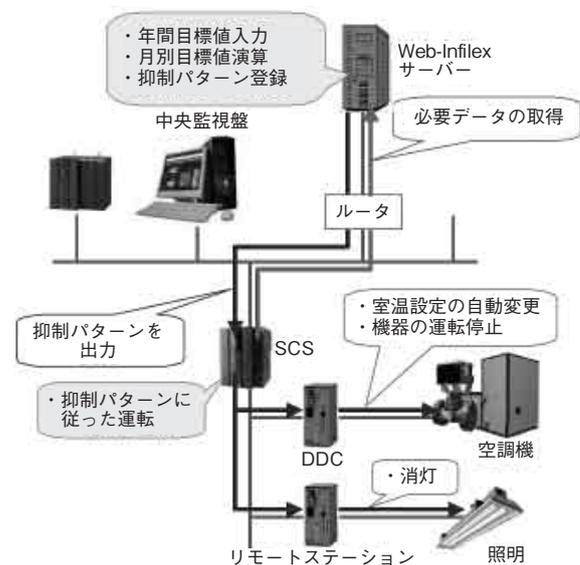


図 3. CO₂リミット制御構成図

・学習型 VWT^{※3} 制御(図4)

熱源の最適化運転を自動的に行なうアプリケーションであり、運転データから作成した最適化モデルにより、熱源の出口温度を最適に制御する。学習機能を備えており、設備の経年劣化や運用変更にも柔軟に対応できる。

- ※ 3 VWT : Variable Water Temperature
送水温度最適設定制御

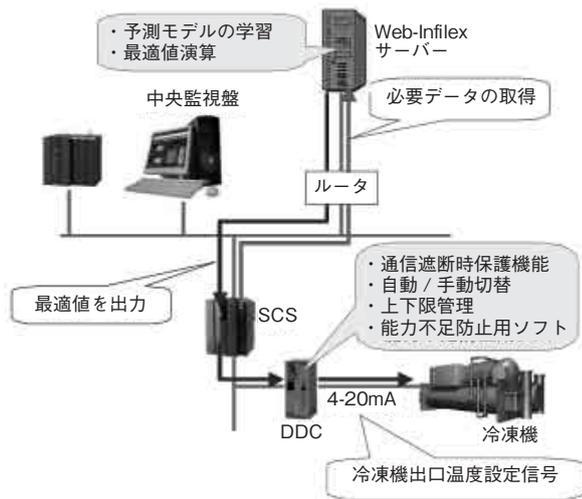


図4. 学習型 VWT 制御構成図

3. 送水温度最適設定制御 (VWT 制御)

本稿では、Web-Inflex のアプリケーションのうち、学習型 VWT 制御についての技術的内容を紹介する。

3.1 送水温度設定の課題

熱源は通常7℃程度の冷水を作り出しているが、冷水送水温度の設定を、より高くすれば運転効率(COP)が向上し、熱源単体のエネルギー消費量を減少させることができる。一方では、熱源システム全体としては、冷水送水温度が高くなると、空調機の冷却能力が低下するため、冷水の流量が増加し、搬送動力が増加する。このように熱源のエネルギー消費量と搬送動力はトレードオフの関係となっている(図5)。さらに、外気温や負荷熱量など他の外的要因も熱源システムの効率に影響を与えるため、上記のトレードオフの関係、外的要因の影響、機器の制約条件などを考慮して、熱源システム全体で消費エネルギーが最小となる最適送水温度設定値を求める必要がある。これらの制御をVWT制御という。

実際のビルにVWT制御を適用するには、これらの関係、条件をビルごとに、それぞれ作成する必要があるが、運用方法や機器性能が設計時点とは異なる場合が多く、高度な補正が必要になり、実用面では困難であった。

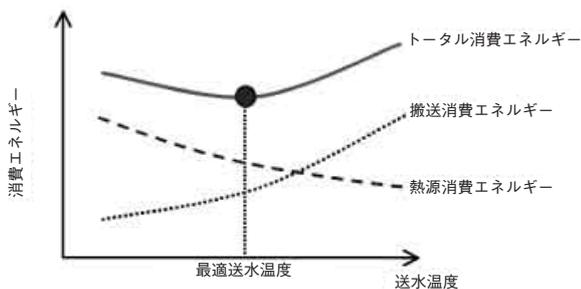


図5. 熱源送水温度と消費エネルギーの関係

3.2 学習型 VWT 制御

この課題に対して、当社保有技術である位相事例ベースモデリング技術(TCBM™:Topological Case-Based Modeling)⁽¹⁾と多次元スプラインによる応答曲面法(RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)⁽²⁾を組み込んだ送水温度最適設定制御(以下、学習型VWT制御)を開発した⁽³⁾(図6)。

TCBMとは、入力データ間と出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作る必要がなく、非線形な入出力関係にも対応することができる。

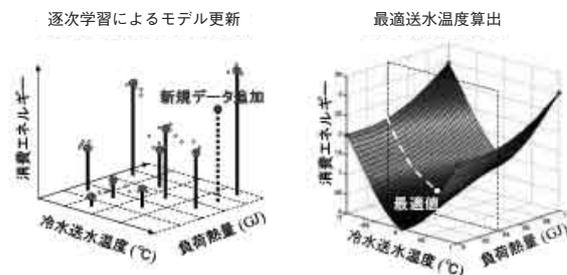


図6. 学習型 VWT 制御の概要

応答曲面法RSM-Sは、少ないデータをもとに最適条件を探索する最適化手法である。RSM-Sは、入出力関係が複雑なシステムにおいて、理想的な実験計画データでなくても、実際に計測された離散的データからすばやく応答曲面モデルを生成でき、かつ再現性のあるモデル構築が可能となる。応答曲面モデルの構築には、式(1)に示す多変数スプラインを利用する。

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n a_i g(d_i) + \sum_{j=1}^p c_j x_j + c_0 \quad \text{式(1)}$$

ここで a_i, c_j は係数、 p は入力変数 x の次元数、 n はデータ数、 d_i はあるデータ i と任意のデータとの入力変数のユークリッド距離、 $g(d_i)$ はグリーン関数である。

式(1)により応答曲面モデルを生成し、これを最適化演算のための目的関数とすることで、実計測データを利用した最適送水温度設定が可能となる。

学習型VWT制御における本技術の枠組みを図7に示す。提案する制御手法では、熱源の制御状態や負荷熱量などを入力変数とし、熱源システム全体の消費エネルギー量を出力変数とするモデルを構築し、このモデルを目的関数としたときの最適化演算を行なうことで、消費エネルギー量が最小となる送水温度設定値を求める。上記モデルは、入力変数と消費エネルギー量のデータを逐次追加することで更新され、入出力関係を学習する。このような手法を採用することで、ビルごとに多様な設備構成に対応し、また機器劣化

に自動的に対応することができる。

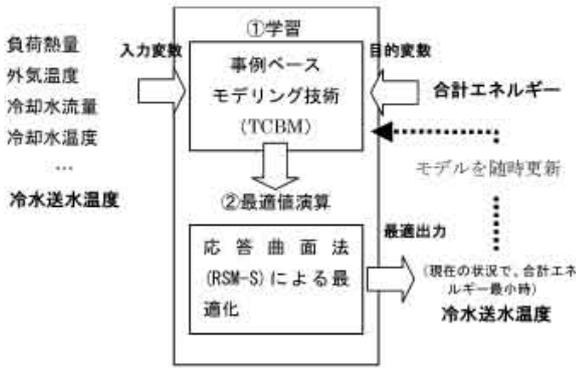


図7. 学習型 VWT 制御の枠組み

4. 適用事例

4.1 対象建物の概要

対象施設は、延床面積約 14,000m² のホテル建物に、本制御を導入し、プロトタイプシステムによる実証試験を実施した。なお、実証試験では冷熱源の主力機であるインバーターボ冷凍機(R-1)のみを送水温度の設定変更の対象とした。

表1に建物概要、図8に熱源計装図を示す。

所在地	静岡県
用途	ホテル
延床面積	約 14,000 [m ²]
熱源設備	インバーターボ冷凍機：冷房 250 USRT 冷温水発生器：冷房 240 USRT 暖房 773 kW 熱交換器：暖房 313 kW 小型貫流ボイラ×2台：752 kW
空調方式	セントラル方式（ツーポンプシステム） 空調機（宴会場・レストラン） 外調機 + FCU（客室）

表1. 建物概要

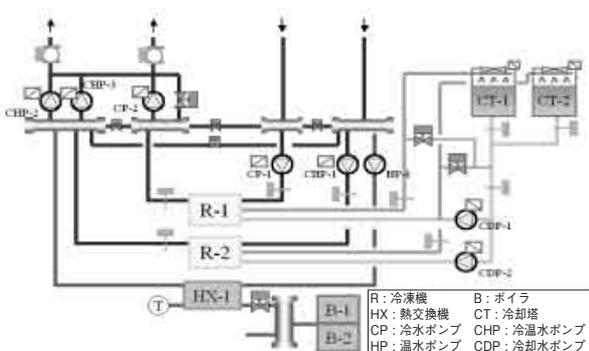


図8. 熱源計装図

4.2 モデル入力変数

学習型 VWT 制御に使用するモデル入力変数、目的変数を表2に示す。入力変数は、熱源システムの計装から全消費エネルギー量と関連が高いポイントを候補とし、その中から相関分析やクラスター分析などの統計的解析により最終的な入力変数を特定した。

入力変数	目的変数
① 負荷熱量	全消費エネルギー量
② 冷却水温度	(= 冷凍機消費電力
③ 冷却水ポンプ INV 出力	+ 冷水ポンプ消費電力
④ 外気温度	+ 冷却水ポンプ消費電力
⑤ 冷凍機送水温度	+ 冷却塔ファン消費電力)

表2. 学習型 VWT 制御の変数

4.3 性能評価

本手法の導入効果を調べるために前述のホテルにおいて、オンラインシステムを導入し、性能評価を行った。

(1) 送水温度緩和状況

図9、図10に負荷が平均的な場合と高い場合における本手法導入後の一日毎の送水温度履歴を示す。

図9では、室内側の負荷熱量の変動が小さく、給気温度が安定している午後に、送水温度が緩和(上昇)されている。一方、午前中は室内の負荷熱量が高く、給気温度が一時的に低くなり、空調機で適切な熱交換を行なうために、送水温度を下げている。

また、図10のように、負荷熱量が特に高い場合には、冷凍機の定格に対する負荷率が高く、送水温度の緩和余地がないため、送水温度の設定が7℃近くになっている状況が確認できた。

これらの結果より、負荷熱量などの環境要因に応じて、冷凍機の送水温度が適切に設定され、動作していることを確認できた。

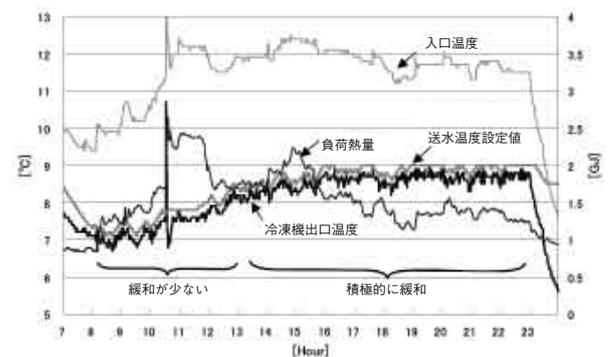


図9. 最適送水温度例 (平均的な負荷の場合)

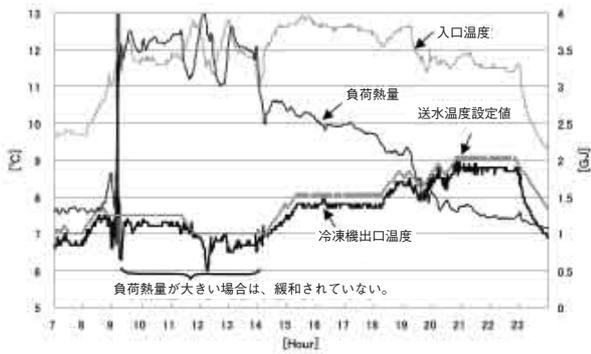


図 10. 最適送水温度例 (負荷が高い場合)

(2) 学習効果

新設の熱源システムへ学習型 VWT 制御を導入する場合を想定し、モデル作成に使用する過去データが少ない状況における学習機能の効果を評価した。

事例ベースモデリングの消費電力量の推定精度が高いほど、熱源システムの特性を反映できており、最適値演算においても、送水温度の算出精度が高くなる。そのため、学習効果の評価は、学習型 VWT 制御導入前の短期間のデータで作成した事例ベースモデル(初期モデル)とデータを逐次的に追加し学習した事例ベースモデル(学習モデル)の消費電力量の推定精度を比較することで行った。

評価の手順は、以下の通りである。

- 過去の運転データから初期モデルを作成
モデル期間：07/10/5～07/10/18, 08/4/22～08/6/19
- 初期モデルをシステムに実装し、学習機能ありでシステムを稼働 (学習モデル)
- リアルタイムに学習モデルで推定した消費電力量と初期モデル(学習なし)のまま推定した消費電力量をそれぞれ算出
- 上記で算出した消費電力量と実際の消費電力量を比較
システム稼働後の精度の分析(二乗平均平方和誤差)の結果を図 11 に示す。

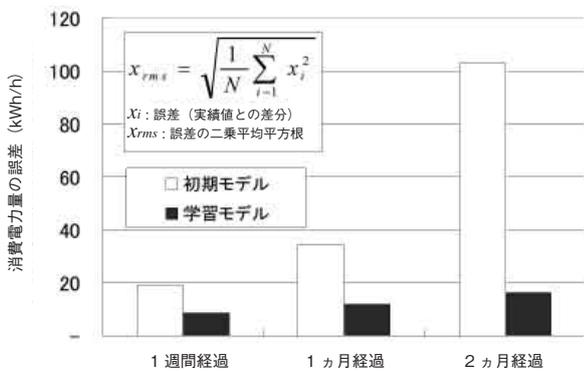


図 11. 学習モデルと初期モデルの精度比較

導入直後は、モデルの作成に使用したデータの期間

と評価時期が近い場合、初期モデル、学習モデルともに、消費電力用を20[kWh/h]の誤差範囲で精度良く推定しているが、期間が経過すると初期モデルは、誤差が大きくなっている。また、学習モデルは、期間が経過しても導入当初と比較し、ほぼ同程度の精度を保持している。この評価結果から、モデルの学習機能により、経時変化に対応でき、導入当初の性能を維持できることがわかる。

(3) 省エネルギー効果

学習型 VWT 制御の省エネルギー効果を算出した。条件は以下の通りである。

- 初期モデルデータ期間：2009/6/1～6/10
- 評価期間
導入前：2008/6/13～7/27
導入後：2009/6/13～8/20

図 12 に、外気エンタルピに対する、本システム導入前(08/6/13～08/7/27)と導入後(09/6/13～09/8/20)の消費電力量を示す。外気エンタルピが同じ条件の場合において、本制御導入後の消費電力量が下回っていることが確認できる。図 13 に示す省エネルギー効果は、導入前の実績値を導入後の外気エンタルピで回帰式により補正した値と、導入後の実績とを比較することで求めた。具体的には、導入前の消費電力量の特性を回帰式により同定し、導入後の外気エンタルピを入力することで、ベースラインの消費電力量を算出し、導入後の実績と比較した。この結果、導入前後で約9%の消費電力量の削減効果を確認できた。

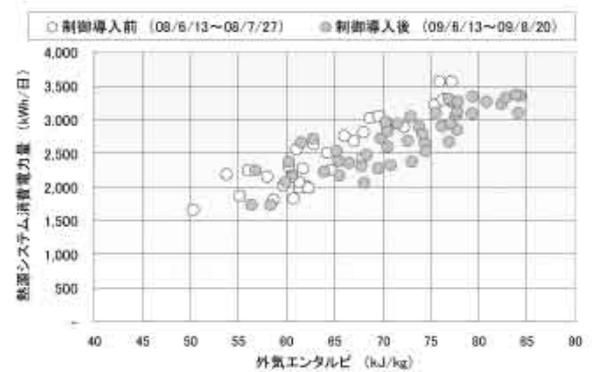


図 12. 消費エネルギー比較

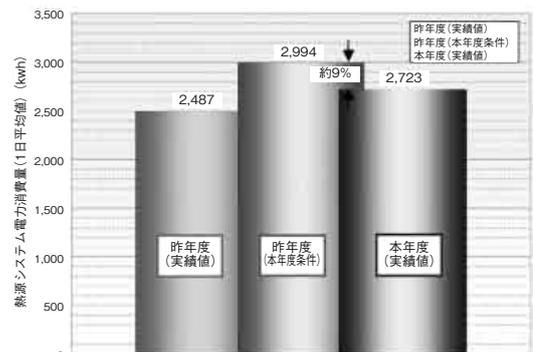


図 13. 省エネルギー効果

5. おわりに

本稿では、SaaS/ASP型省エネ/省CO₂アプリケーションのWeb-Inflexの紹介とそこから学習型VWT制御について概要と適用事例として実際のホテルに対する評価結果を示し、省エネルギー効果を確認した。

外部条件や運用条件の変化への対応については、学習機能により、データを定期的に更新することで、モデル性能が維持されることを確認し、状況変化に対する学習機能の有効性を確認した。

本手法は、熱源システムだけではなく、室内環境の最適化にも広く応用することができるため^{(4)~(7)}、今後は、顧客の省エネ/省CO₂を実現するWeb-Inflexの最適化アプリケーションのラインナップをさらに増やしていく予定である。

学習型VWT制御技術は、国土交通省の平成19年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業「学習機能に基づく省エネ性と快適性の最適化制御技術の開発（応募者：慶應義塾大学，株式会社山武）」の成果の一部である。

<参考文献>

- (1) 筒井宏明，西村順二：時系列履歴データからのデータマイニング，計測と制御（2002），第41巻，第5号，pp.345-349
- (2) 総田長生：設計業務におけるデータ活用技術～山武オリジナル応答曲面法RSM-S～，Savemation Review（2003），Vol.21，No.2，pp.32-39，株式会社山武
- (3) 太宰 龍太，総田 長生：冷凍機送水温度最適制御の実験，建築学会講演論文集（2009.8）
- (4) 上田 悠ほか：学習/多目的最適化機能を組み込んだ快適性と省エネを両立する室内環境制御技術の開発，azbil Technical Review（2008），Vol.，No2，pp.1-9，株式会社山武
- (5) 加藤彰浩ら，学習機能に基づく空調システムの多目的最適制御に関する研究（第1報）制御手法の概要と中間期における検証実験，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）
- (6) 太宰龍太ら，学習機能に基づく空調システムの多目的最適制御に関する研究（第2報）冬期における空調機最適起動実験，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）
- (7) 加藤彰浩ら，学習機能に基づく空調システムの多目的最適制御に関する研究（第3報）給気温度最適化制御のシミュレーション，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2010.9）

<商標>

Web-Inflex は，株式会社山武の商標です。
TCBM は，株式会社山武の商標です。

<著者所属>

近田 智洋	技術開発本部 基幹技術開発部
西口 純也	技術開発本部 基幹技術開発部
太宰 龍太	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
平田 眞基	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
中村 瑞	ビルシステムカンパニー 開発本部
小野寺 博	ビルシステムカンパニー 開発本部