

# ビル省エネルギー支援サービスのための 高度情報処理応用技術の開発

## Development of Intelligent Data Analysis Technology for Solution Services for Saving Energy in Buildings

株式会社 山武

久下谷 任祥  
Hideaki Kugaya

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

太宰 龍太  
Ryouta Dazai

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

松本 邦裕  
Kunihiro Matsumoto

株式会社 山武

梶田 長生  
Chosei Kaseda

### キーワード

省エネルギー支援サービス, データ分析技術, 運転条件最適化技術, 省エネルギー量推計技術

建物の空調消費エネルギーを削減するため、PDCAサイクルをまわしながら省エネルギー支援をするソリューションビジネスに注目が集まっている。このビジネスを促進するため、当社研究部門の保有技術である最適化技術、予測・推定技術を応用して、省エネルギー計画立案・効果見積もり(Plan)及び効果検証(Check)を支援する技術を開発した。ここでは、開発した技術及び適用事例を報告する。

Increasing attention has been focused on solution businesses that assist in saving energy and run through the PDCA cycle for reducing the air-conditioning energy consumption in buildings. To further advance these businesses, we have developed technology for assisting in the energy-saving plan preparation and result estimate (Plan) and result verification (Check) by using optimization technology and forecasting and estimation technology held by our research division. This paper presents this developed technology and examples of its application.

## 1. はじめに

国際的なCO<sub>2</sub>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。

省エネ法では、エネルギー使用量が原油に換算して1,500kl以上の建物では毎年1%以上の省エネルギーを達成する活動を義務付けている。この目標を達成するため、事業者は継続的な検討を進める必要があるが、効果的に進めるためには、省エネルギー対策・法対応など、専門的知識が必要となる。建物によっては、専門員を配置できないことも多いため、山武では、省エネルギー活動のアウトソーシングサービス(省エネルギー支援サービス)を提供している。このような省エネルギー活動においては、運転履歴データを分析する技術やノウハウが重要となることが多い。

本稿では、省エネルギー支援サービスに欠かせないデータ分析技術として、筆者らが開発した運転条件最適化技術<sup>(1)</sup>及び省エネルギー量推計技術<sup>(2),(3)</sup>について報告する。

## 2. 省エネルギー支援サービス

省エネルギー支援サービスとは、継続的な省エネ効果が得られるように、PDCAサイクルを効果的にまわすサービスである。

サービスは以下の流れとなっており、中長期計画書・定期報告書・管理標準など、省エネ法対応業務支援も行っている。

### ・Plan (計画立案)

→ 建物の状況調査, データ収集・解析を行い, 最適な運用改善, 設備投資を計画する

### ・Do (対策の実行)

→ 投資対効果などを加味しながら, 最適な時期に対策を実施する

### ・Check (効果検証)

→ 実施した対策の効果を評価する

### ・Action (改善の実施)

→ 評価結果を考慮し, 適切な改善を実施する

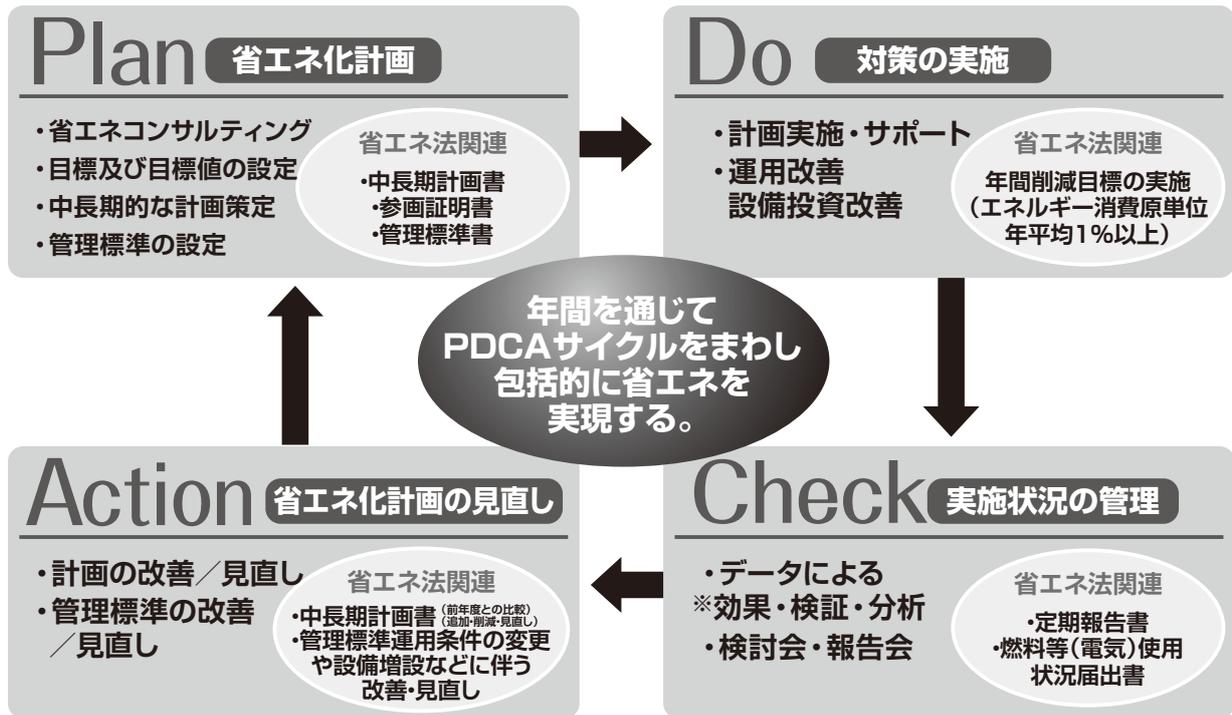


図1 省エネルギー支援サービス

この継続的なマネジメントサイクルにより、建物オーナーは、アウトソーシングによる人件費削減だけでなく、運用改善によるエネルギー削減メリットも享受できる。

### 3. 高度情報処理応用技術

PDCAの中で、特に計画立案(P)と効果検証(C)は、設備や機器のノウハウだけでなく、データに基づく定量的な効果の見積もり・評価を必要とする。しかし、建物の設備は数多くの機器が複雑に関係しあうシステムであるため、分析に必要なデータは、複雑な挙動を示すと同時に、気象条件や建物利用状況の影響も受けるため、単純な分析だけでは対応できないことも多い。

そこで、筆者らは計画立案と効果検証のデータ分析技術をさらに高度化し、分析方法を標準化するために、当社研究部門の保有するアルゴリズムを活用し、運転条件最適化技術(Plan)及び省エネルギー量推計技術(Check)を開発した。

#### 3.1 運転条件最適化技術

省エネ活動における省エネ計画の立案(Plan)に利用できる解析技術として、運転条件最適化技術を開発した。この技術は、最適な風量設定値の算出や空調機の最適起動<sup>(4)</sup>など、最適化が求められる様々な対象について、適用することが可能である。本稿では、熱源の送水温度の最適化に適用した事例を用いて、本技術を説明する。

冷凍機は、通常7℃程度の冷水を作り出しているが、より高い温度で送水すれば、運転効率であるCOPが向上し機器単体としては省エネルギーとなる。一方、熱源システム全体としては、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、冷水の供給量が増加し、搬送動力が増加する。このように冷凍機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。さらに、外気温や負荷熱量などの他要因も熱源システムの効率に影響を与えるため、熱源単体の最適な設定値が、全体の最適値とは限らない。

そのため、上記、トレードオフの関係や、複雑な因果関係、機器の制約条件などを考慮して、エネルギーが最小となる最適な設定値を求める必要がある。

##### 3.1.1 これまでの課題

これまで、運転条件最適化技術としては、機器仕様に基づくモデルや運転履歴データを使用したモデルを利用してシミュレーションを行い、条件を最適化する技術などが提案されている。このような技術を利用する場合には、モデル構築という作業が必要となるが、通常、熱源システムでは、多くの機器が、複雑に関係しているため、モデル構築の作業量が膨大となるという課題がある。また、経年劣化、運用変更に合わせて、再度モデル構築する必要があるなど、継続的なエンジニアリングが求められる。

##### 3.1.2 RSM-Sによる運転条件最適化技術

筆者らは前述の課題を解決するべく、図2に示した当社研究部門が保有する最適化技術(RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)<sup>(5)</sup>を活用した運転条件最適化技術を開発した。

RSM-Sとは、収集された運転履歴データをもとに応答曲面を生成し、最適条件をシステムティックに導き出す技術である。

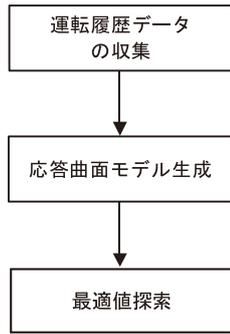


図2 RMS-Sの概要

RSM-Sには、下記のような特徴があり、複雑な振る舞いをするビルの設備データには適用性が高く、設定値最適化における、従来の課題を解決できると考える。

- ・複雑な非線形対象でもモデルを作成できる。
- ・データがばらついていても容易に対応が可能である。
- ・可視化機能が充実している。

ここでは、これまでに蓄積されている運転履歴データをもとに多変数スプラインにより、図3に示すような応答曲面モデルを作成する。RSM-Sでは、多変数スプライン技術を

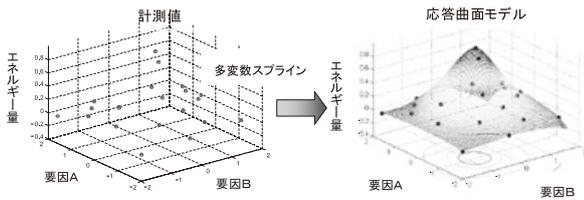


図3 応答曲面モデル

この曲面モデル生成に利用しているため、運転データから滑らかな応答曲面を一意に生成することができ、モデル構築が容易となる。また、応答曲面を可視化できるため、複数の要因とエネルギーの関係を把握することができる。最適値探索では、複雑なトレードオフや制約を考慮したうえで最適値をシステムティックに算出することができる。

### 3.1.3 適用事例

RSM-Sによる設定値最適化技術を適用した事例を以下に紹介する。

建物対象は、延べ床面積15,000m<sup>3</sup>規模のホテル建物である。図4に熱源計装図を示す。

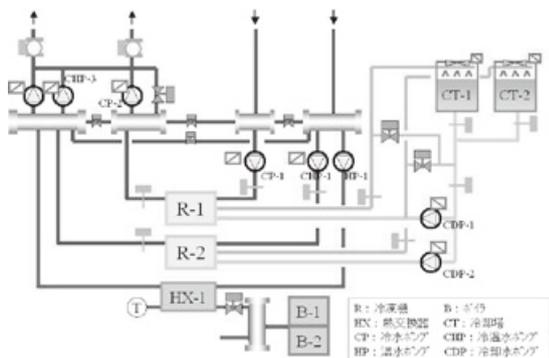


図4 熱源計装図

冷凍機2台のうち、送水温度設定の変更が可能なインバーターボ冷凍機(R-1)を対象として分析を行った。

2008年8月から2009年7月までの1年間のデータを用いて、消費電力量と熱源システムに關係する冷却水温度、送水温度などの運転条件や外的要因との關係を応答曲面としてモデル化した。消費電力量と送水温度、冷却塔出口温度の關係を表す応答曲面を図5に示す。

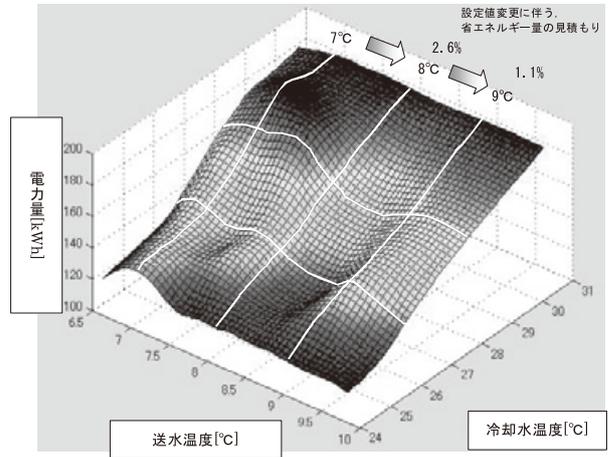


図5 応答曲面

図5より、消費電力量と、送水温度や冷却水温度という複数の要因との関連性を1つの応答曲面として鳥瞰できることが分かる。なお、外気温や負荷熱量などの他の要因との関連性も同様な応答曲面として可視化できる。このように可視化することは、要因の関連性や現象の把握に有効であり、計画立案に役立てることができる。

また、このモデルを用いることで、設備の制約と状況に応じた最適な送水温度を求めることができる。さらに、送水温度を変更した場合のエネルギー消費量のシミュレーションが行え、それぞれの送水温度設定変更時における省エネルギー量を見積もることができる。

図5の事例では、送水温度を7°Cから8°Cや9°Cに緩和することで、年間の省エネルギー量効果がそれぞれ、2.6%、1.1%となることが分かった。

### 3.2 省エネルギー量推計技術

省エネ活動における省エネ効果検証(Check)に利用できる解析技術として、省エネルギー量推計技術を開発した。これまで、省エネルギー量を定量化する手法として、エネルギー消費量の過去の実績との比較や、機器ごとの定格に基づく推計などが行われている。これらの手法は、簡易的な省エネルギー効果の推計には有用である。しかしながら、図6に示したように、エネルギー消費量は、気象条件や利用状況によって大きな影響を受けるため、これが省エネルギー効果を評価する上での誤差となる。そのため、精度良く、改修、改善前後の省エネルギー量の評価を行うには、外部要因の影響を考慮した評価が必要である。

そこで、この課題に対応するために、当社研究開発部門が保有する技術である推定技術(TCBM:Topological Case-Based Modeling)<sup>6)</sup>を用いた省エネルギー量推計技術を開発した。

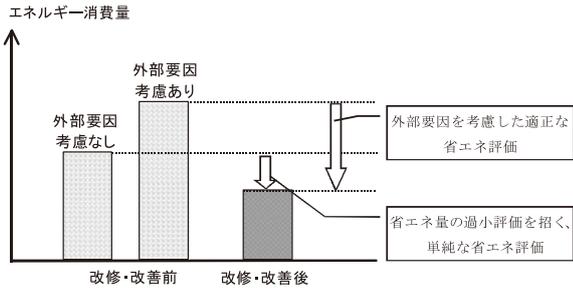


図6 外部要因による省エネルギー推計量の違い

### 3.2.1 外部要因を考慮した省エネルギー量の定量化

エネルギー消費量は、外的要因の影響を受けるため、省エネルギー効果の客観的評価には、改修、改善前後の条件を一致させる必要がある。外的要因の条件を考慮した省エネルギー量定量化を次の手順で行う。

#### (1) 改修前の消費エネルギー特性のモデル化

建物のエネルギー消費を、外部要因を入力、エネルギー消費量を出力としたシステムとして捉え、その入力関係(消費エネルギー特性)を、運転履歴データをもとにモデル化する。

これにより、任意の外的要因の組合せに対するエネルギー消費量を推計することができる。

#### (2) 省エネルギー量の計算

下式にて、外的要因について考慮した省エネ量を推計する。

$$(\text{省エネルギー量推計値}) = (\text{改修前推計値}) - (\text{改修後実績値})$$

改修前推計値とは、改修による改善がなされていないと仮定した場合に、建物が消費するであろうエネルギー量である。改修前推計値は、(1)で求めた消費エネルギー特性のモデルに、改修後の外的要因を含めた実績値を入力し求める。

### 3.2.2 従来手法の課題

建物のエネルギー消費量と、空調負荷に影響を与える外気温度の間には相関関係があると言われているが、実際の運転履歴データとしては、図7のように非線形な分布を示すことが多い。

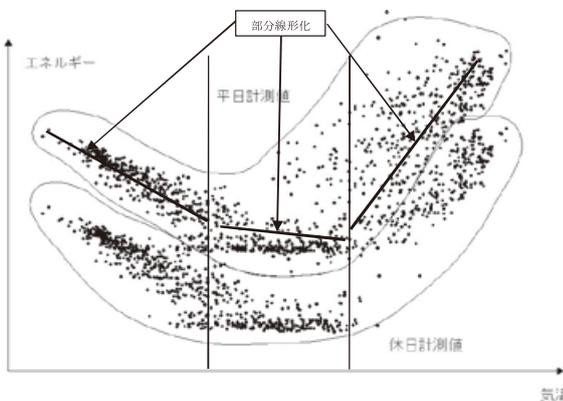


図7 消費エネルギーの部分線形化

従来手法では、エネルギー消費量を外気温度、平日・休日などの、条件で分類し、部分的にそれぞれ別の線形モデ

ルを適用(部分線形化)し、非線形な現象である消費エネルギー特性をモデル化する。

しかしながら、従来手法には、部分線形化のための明確な基準がなく、精度の高いモデル化のためには、試行錯誤が必要となる。これは、作業負荷の増大や、分析者による品質のばらつきの原因となりうる。

そこで、筆者らは省エネルギー量の適切な定量化のため、当社研究開発部門が保有する技術である推定技術(TCBM: Topological Case-Based Modeling)を活用し、省エネルギー推計技術を開発した。

### 3.2.3 新しい定量手法の開発

TCBMは、事例ベース推論の考えを応用したブラックボックス・モデリング技術で、運転履歴データを事例という形でデータベース化し、入力データに対する類似した事例を検索することで出力値を推計することができる(図8)。TCBMには下記のような特徴があり、従来手法の課題を解決できる可能性が高い。

- ・位相数学に基づく指標により予測/推定精度に応じたデータ分割が自動的に行われる。
- ・消費エネルギーとその複数要因の組を事例として扱うので、モデル構造など特別なモデリング技術の習熟を必要とせず容易にモデリング可能。

そこで筆者らは、空調負荷予測や下水流入量予測などで実績のあるTCBMを省エネルギー量の定量化に適用することで、従来技術の課題を解決している。

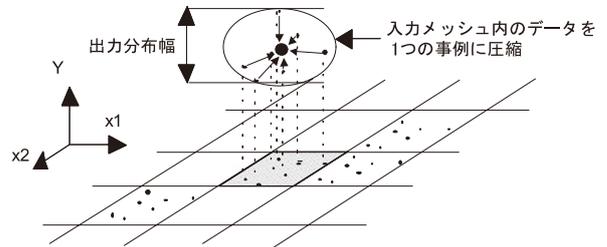


図8 TCBMの概要

TCBMでは、複数の要因をモデルの変数とすることができるため、従来手法で必要な条件分類にもとづく部分線形化を行うことなく、多次元の非線形現象を容易にモデリングできる。図9の例では、曜日を要因とすることで、平日と休日の利用状況の違いをモデリングできていることが分かる。

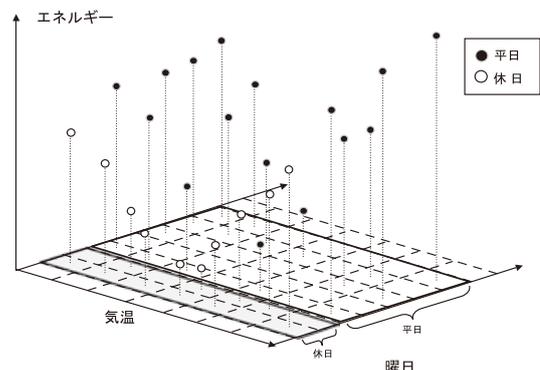


図9 事例化例

### 3.2.4 適用事例

#### (1) 適用対象

部分線形化を用いた従来手法とTCBMを用いた開発手法のモデル化性能を比較するため、実際の建物の運転履歴データを用いた検証を行った。

対象建物は延べ床面積20,000m<sup>2</sup>規模の病院建物であり、熱源には蒸気吸収式冷凍機を使用している。省エネルギー施策として、冷凍機の蒸気消費量とポンプ、及び空調機の電力消費量を削減するために、蒸気吸収式冷凍機の台数制御の最適化を行っている。

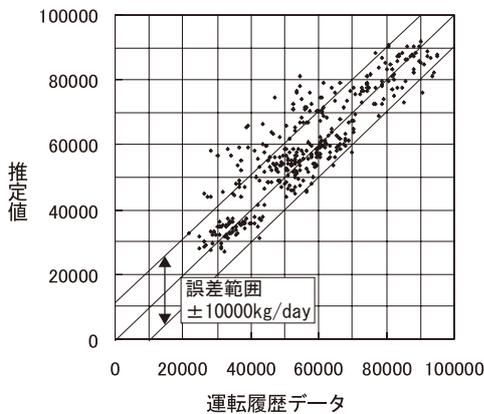
#### (2) モデル作成

従来手法と開発手法のモデル化性能について、評価を行った。ここでは、蒸気消費量のデータを用いて、評価を行った。省エネルギー施策前のデータをモデル作成用データと評価用データのセットに分け、評価用データとモデル推定値との誤差を評価の基準とする。

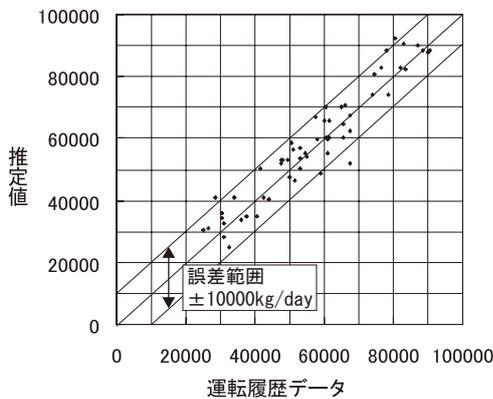
従来手法では、運転履歴データを平日、休日、暖房、冷房の条件によって4つに分類し、この分類ごとに外気温による回帰式を作成した。

開発手法では、外気エンタルピー、外気温度、外気湿度、日照時間、気圧、平日、休日を要因として、TCBMによりモデルを作成した。

従来手法と開発手法について、評価用データとモデル推定値の散布図を図10、精度評価結果を表1に示す。



(a) 従来手法の場合 [kg/day]



(b) 開発手法の場合 [kg/day]

図10 蒸気消費量の推計結果

	従来手法	開発手法
平均絶対誤差 [kg/day]	6214	4441
平均相対誤差 [%]	12.8	9.0

表1 誤差比較(蒸気消費量)

図10を見ると、開発手法の方が、従来手法よりも誤差の全体のばらつきが抑えられていることが分かる。表1の精度評価結果では、従来手法、開発手法の蒸気消費量の推定誤差は、それぞれ12.8%、9.0%であった。

つまり、開発手法は場合分けなど、煩雑で特別な処理を行うことなく、高精度なモデル構築が可能であることが分かる。

## 4. おわりに

本稿では、省エネルギー支援サービスのPDCAにおける、省エネルギー量の見積もり、効果検証を高度化、標準化するために開発した運転条件最適化技術、省エネルギー量推計技術とその実施事例を紹介した。

今後、この技術が、省エネルギー活動のための高度な分析に広く活用され、省エネルギー支援サービスの拡大に貢献していくことを期待する。

運転条件最適化技術については、本稿のようなオフラインの解析だけでなく、オンラインつまり、リアルタイムに適宜、運転条件を最適化するシステムにも活用できる。上記については、現在、国土交通省の平成20年度住宅・建築関連先導技術開発助成事業「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」の一部として、実際のビルにおいて実証試験を実施中である<sup>(7)</sup>。

### 参考文献

- (1) 松本邦裕, 久下谷任祥, 総田長生:制御系解析装置及びプログラム, 特開2007-156881
- (2) 松本邦裕, 久下谷任祥, 総田長生:省エネルギー量推定装置, 方法, 及びプログラム, 特開2007-18322
- (3) 久下谷任祥:外的要因を考慮した省エネルギー量定量手法の開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.687-690(2006)
- (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, Vol.26, No.1, pp.2-9 (2008)
- (5) 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, Vol.21, No.2, pp.32-39 (2003)
- (6) 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, 第41巻, 第5号, pp.345-349 (2002)
- (7) 太宰龍太, 総田長生:冷凍機送水温度最適制御の実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1085-1086 (2009)

### 商標

TCBMは、株式会社 山武の登録商標です。

**著者所属**

久下谷 任祥	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
松本 邦裕	ビルシステムカンパニー 環境ソリューション本部
太宰 龍太	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
総田 長生	研究開発本部 コアテクノロジーセンター