

AI ネットワークシステムを活用した最適化コントロールに関する研究 見える化と分散・統合制御によるエネルギー利用の最適化

○馬郡 文平*1 野城 智也*2 迫 博司*3
藤井 逸人*4 安田 大樹*3

キーワード：ZEB, ZEH, モニタリング, 見える化, 最適化制御, 省エネルギー

1. はじめに(背景)

わが国のエネルギー消費が年々増し(図1参照)、東日本大震災の教訓より、効率的で、かつ今まで以上に安全で信頼性の高いエネルギー利用が益々求められている。

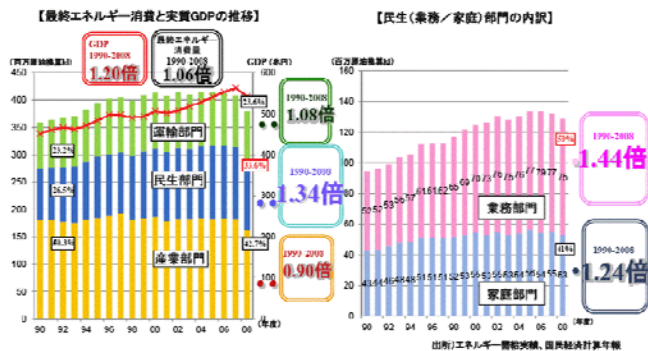


図1 エネルギー消費の動向

さらに、エネルギー価格上昇は世界的な課題であり、安価で安定的なエネルギー供給・利用(エネルギーセキュリティの課題)への対策が望まれる。

2. エネルギーの統合的マネジメントを行い、住宅・建築分野でデマンドサイドの機器システムを効率的運用することが必要(目的)

エネルギー使用の効率化やエネルギー価格上昇への対策として、最も経済的で実現可能な方法として、以下のような項目を対策として筆者らは以下の統合的な実施を提案する。①需要側エネルギー使用量の詳細な把握による統合的なエネルギーマネジメント、②需要側の住宅、建築、設備等の効率的な運用、③創エネルギー(再生可能エネルギー)の最適な組み合わせと利用、④エネルギー貯蔵及び平準化利用の最適化、⑤多種のエネルギーの組合せ利用。⑥エネルギー融通等。統合的なエネルギーマネジメントを行うことで、エネルギー需要を最適化し創・省エネルギーを実施することである。

3. 需要側のエネルギー収支を把握するための理想的な計測ポイントについて

3.1 統合的なエネルギーマネジメントに不可欠なこと

統合的なエネルギーマネジメントに必要なことは、エネ

ルギー収支を把握することであり、そのために理想的な計測ポイントの筆者の考え方を(図3)に示す。

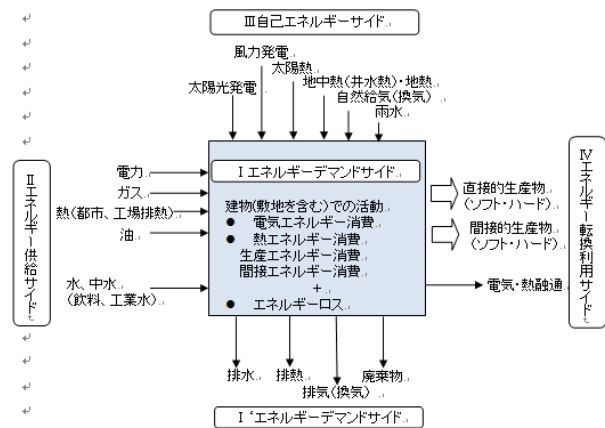


図3 建物に関連するエネルギー利用の関係

図中の中心の色塗りの部分は、敷地を含む建物の物理的境界線であり、建物に関わるステークホルダーのマネジメント可能な範囲である。左側から建物に入る矢印は、建物を運用するのに必要とされる買電などのエネルギー事業者が提供する人工的なエネルギー、上からの矢印は、主なサイトで利用可能な自然エネルギー。右方向への矢印は建物で生産される有益なハード・ソフトの産物であり、「直接的産物」例えば工場で生産される製品などを示し、オフィスにおける知的生産物やデータセンターなどの情報サービスの生産も含む。「間接的産物」はその生産に間接的に必要なもの、他の建築サイトとの関連する「エネルギー融通」を示す。下方向の矢印は、有効に消費されず、廃棄されているエネルギーとした。

3.2 統合的なエネルギーマネジメントの評価手法

建物の中で消費されるエネルギーを「Iエネルギーデマンドサイド」、次に「建物に入るまでのエネルギーを「IIエネルギー供給サイド」、独立電源や自然エネルギーを「III自己エネルギーサイド」、生産物と建物から外部に供給される電気・熱などを電気・熱融通を含むことにし、「IVエネルギー転換利用サイド」と呼ぶ。総合的なエネルギー利用の最適化やエネルギー利用効率を目指す場合、まずは、入出力の関係を総合的かつ定量的に把握すべき

である。「I エネルギーデマンドサイド」では、典型的で比較的類似している建物と比較して、年間エネルギー使用量が小さいかどうか重要であり、経済的には、最大需要量を小さくしてエネルギーをより平準化して利用しているかどうか関係する。特に生産物の把握に関しては、定量的な比較は困難であるが、生産物の大小「IV エネルギー転換利用サイド」のエネルギー総量に対して「I エネルギーデマンドサイド」のエネルギー総量を比較すれば、生産に対するエネルギー効率を比較することは可能である。一方、「III 自己エネルギーサイド」のエネルギー総量が、「I エネルギーデマンドサイド」のエネルギー総量の何パーセントになるかによって、創エネルギーや自然エネルギー利用の効果を比較可能である。また、II + III がエネルギーの入力側であり、I のエネルギーロスと I 'の排エネルギーが負の出力となるので、この比率を示すことでエネルギーの無駄の割合を把握することができる。上記のエネルギー収支を把握できることがエネルギー最適化には理想的である。本研究では、「I エネルギーデマンドサイド」において、(図3)の関係性を理解し、簡便に、かつ正確にエネルギーの無駄を把握し、削減する方法を検討することに重点を置いた。

4. 省エネルギー・エネルギー効率を上げるためのセンサ技術(センサの設置方法の考え方と設置事例)

将来的には建物に関する情報利用の進捗に伴い、ますますセンサ技術も経済的で多様化することが想定できる。

4.1 「センサ技術のあり方」、「センサの建築への埋め込み方」、「センサ情報連携」について

求められるセンサは以下のような特性を保持している必要がある。

表1 次世代に求められるセンサ技術

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ● オープンなプロトコルの採用 (センサ自体の通信プロトコルを含む) ● 簡易な汎用ネットワークの利用 ● 計測値の多様な利用 ● 確実なデータ送信 ● センサ情報 (個人情報他) のセキュリティー ● センサ追加変更の設置の利便性・施工性 ● センサ自体を感じさせない (見えないセンサ) ● 取得情報の外部への提供 (オープン化) |
|--|

4.2 採用しているセンサ

筆者らは、概ね2つの方向でセンサ利用の研究開発・実プロジェクトへの実装を行っている。一つは①経済的で汎用的なセンサの活用とその組合せ (汎用ネットワークの活用を含む)、もう一つは、②計測結果を用いて制御を行うための分析や情報解像度の高い高度な技術を持つセンサの活用である。仕組みが簡易なセンサでも、様々な組合せで新たな利用が可能であり、高度なセンサは、ユーザーに対して今までにない情報の利用を可能とする。

4.3 どのようにセンサを建築に埋め込むことを想定しているか? どのような検討が必要か? (実施事例その1)

(写真1)は、大樹町の寒冷地実験住宅^(注1)窓面に設置された単純な温度センサである。窓の温度情報と共に室内の温湿度、放射状況等を連続計測し、現在、寒冷地での住宅の温熱性能や快適性等の応用試験を実施している。この事例では、既往の住宅で実施されているものと同様のセンサやモニタリングシステムにより1分間隔で継続的な計測が実施される。関係者にはWebを通じてデータベースに蓄積された情報(室内外環境、建築断熱性能、窓性能、放射空調性能、耐震性能他)の閲覧が可能である。(図4)



写真1 大樹町の寒冷地実験住宅(MEMU)外観と窓面に設置された温度センサ

住宅のエネルギー・モニタリングで工夫をしている点は、①全体のエネルギー収支が判定できること、実験住宅では、温水で放射暖房を行っているため温水の往返温度を計測し、その差分と流量から熱量を計測している。給湯と空調を分離して循環熱量を計測できなければ熱利用の内容把握が難しい。②エネルギー性能と快適性の関係を重視、室内の温湿度など快適性を把握しつつ、快適でかつ、省エネルギーになっているかを計測している。実際の計測では、放射温度、気流、上限温度差なども追加で計測して快適性を評価している。単にエネルギー量を計測するだけでなく、室内環境や外部環境との関係でデータを評価することが重要であると考えている。

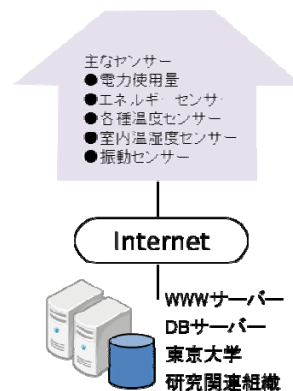


図4 見える化システム概念図

4.4 ZEBにおける最適制御の意義(実施事例その2)

駒場の教養学部建築された「理想の教育棟」ZEBの事例を紹介する。我が国においては、2030年までに、新築ビルのゼロ・エネルギー・ビル化を目指している。外観を(写真2)に示す。建築面積:942.48 m²、延床面積:4,477.76 m²、構造:S、RC造、階数:地上5階、地下1階、主な用途:スタジオ型の教育施設を中心にホール、

会議・会合スペース。現在の平均的な建物（一次エネルギー使用量 2030MJ/m²/年）と比較して、エネルギー使用量を概ね 70～80%程度削減を目指し、残りのエネルギー需要を将来開発が進む見込みの発電効率UPによる創エネルギーにより賄う計画である。



写真 2 理想の教育棟(ゼロ・エネルギー・ビル)

本建物では、教育棟を「ゼロ・エネルギー・ビル」^(注2)として成立させるよう様々な環境技術が導入された。(図5参照)

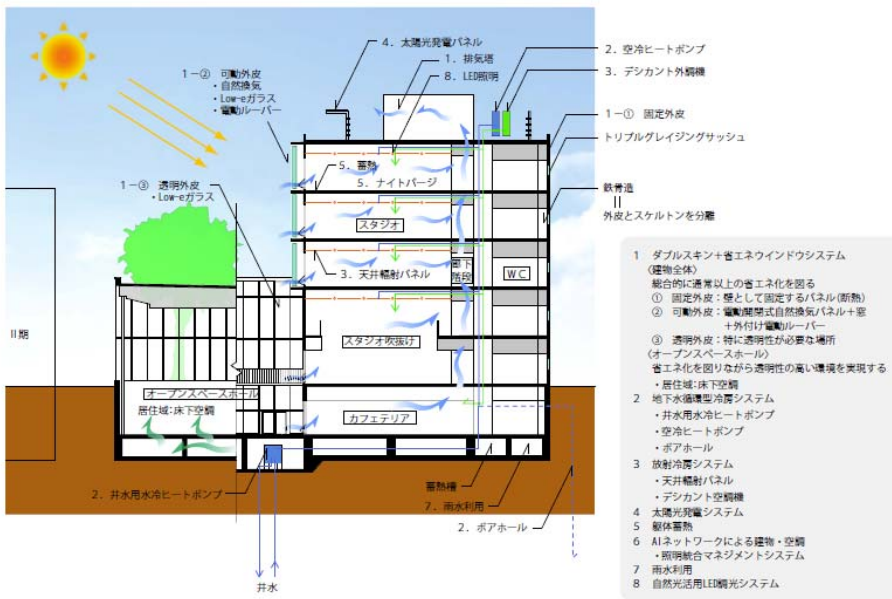


図 5 理想の教育棟 ZEB に導入された環境技術

これらの環境技術をうまく活用するためには、個別の機器を有効に利用するだけでなく、最適に組み合わせ、自然エネルギーをできるだけ利用すること（最適制御）が求められている。「AI ネットワークによる建物・空調・照明の統合マネジメントシステム」の導入し、人を助けながら効率的に無人でエネルギーマネジメントを行い、快適性や利便性とバランスを情報でコントロールする。(文献1) 照明・空調・換気・地熱・散水・使い勝手の見える化及びコントロールを行い、省エネルギーのための部分最適及び全体最適を行うシステム(文献2, 3, 4)を導入した。(図6参照) AI ネットワークは、外部のデータベースによる最適運用制御と見える化 ASP、建物におけるローカル制御で構成されている。

4.5 AIシステムネットワークの仕組み

本開発には、著者らがローソン共同研究で実施しているコンビニエンスストアの複数店舗での省エネルギー制御(文献2)や横浜市公共建築における最適制御による運用改善(文献3)の実績を生かし、ZEB のために改良開発を行った。(図7)は設定した各機器やシステムの運転とエネルギー消費モデルの計測結果を基に予測を加えて改善する仕組みを示す。AI システムは、モニタリングと機器の全てを統合的に最適化し、省エネルギーを可能にする。

エネルギー消費量のミニマム化の制御フローを(図8)に示す。

ZEB 学ぶクン(Millerka & AI System)

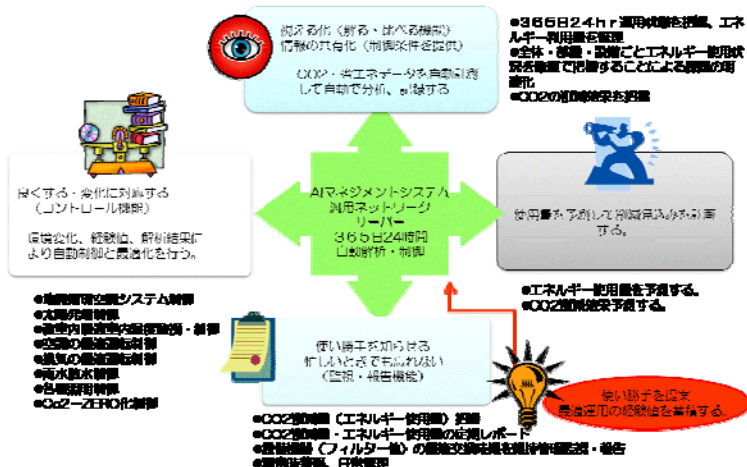


図 6 AIシステムの概念図

1により省エネルギー・アクションが継続的に改善され 2により予測精度が向上する

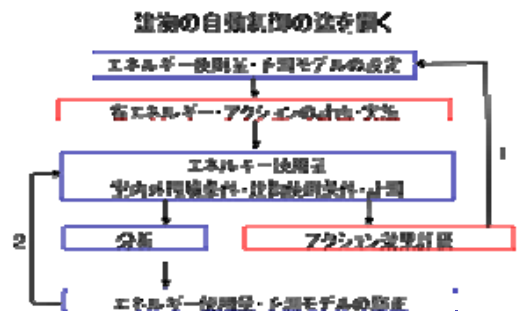
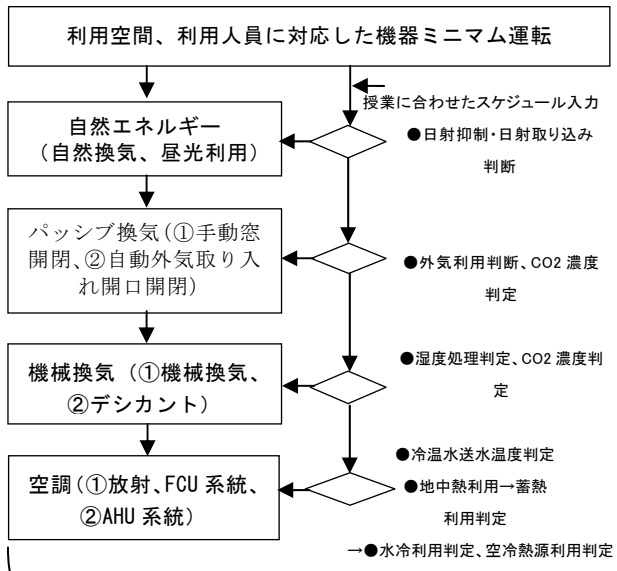


図 7 予測精度を計測的に向上させる仕組み

(図8)では、建物利用者人員や在室状況を詳細に把握

して、設備システムを効率よく運転する場合の判定、できるだけ自然エネルギーを活用するパッシブ空調を実現するように段階的にエネルギー効率を判定しながら、設備を稼働する。外部環境によって、空調が不要な場合はできるだけ空調をしないで過ごす。窓も開閉式の窓であり、教室（スタジオ）ないに設置された開閉表示やタッチパネルの表示で窓を開閉するタイミングを知らせる仕組みも利用している。



AIシステムによる搬送動力、熱源エネルギー、空調、換気エネルギーの最小使用量判定。システム全体 COP 判定

図8 エネルギー消費量ミニマム化の最適制御フロー

4.6 AI ネットワークシステムの活用事例

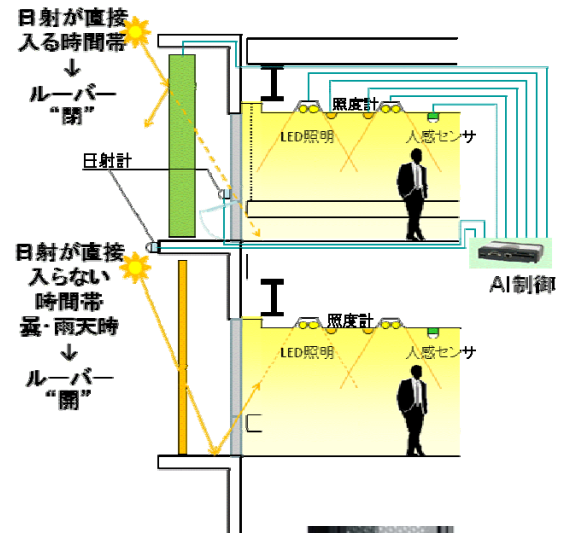
ダブルスキンは、可動ルーバーと自然換気システムの組合によって、昼光制御と自然換気、日射制御・断熱確保を内外環境の変化に応じて制御し、同時に空調エネルギーのミニマム化ともバランスする。(表2)(図9) 季節昼夜、全ての動作でエネルギー消費量を最小化(自然エネルギー利用最大利用)にように計測結果を確認しつつ継続的な最適化制御を実施する。

表2 ダブルスキン・照明・放射・室内環境制御の内容

- 日射計により晴れ/曇りを判定。
- 曇りや雨の日にはルーバーを開けて自然光をスタジオに取り込む。
- 夏期：晴天の場合は、スタジオに直射日光が入らない時間帯はルーバーを開く。
- 冬期：AMは、積極的に日射を取り込み、日射が入らない時間帯は、遮蔽して室内暖房中暖房エネルギーを削減。
- 在室状況を確認し、人感センサーで人を感知したエリアの照明を点灯。
- 不在時間帯は適宜消灯制御
- 放射空調時でルーバーが開の時は、自然光が最大になるようにルーバー角度を日射に合わせて調整。
- 照度計により必要十分な照度にLED照明を調光。(0~100%)

4.7 AI ネットワークシステムによる ZEB マネジメント (応用事例)

ZEBを実現するためのAIネットワークシステムの主な機能を(表3)に示す。さまざまな運転パターンを学習させることにより、外部からの専門家によるコミッションとチューニング(経験値)が可能でさらに、AIネットワークシステムにより自動計測結果に基づいた自動調整機能(省エネルギーの記憶)が専門家に代って最適化を継続的に実施する。



ルーバーに設置された温度センサ



図9 可動ルーバーとLED照明・放射空調・換気制御図

表3 AIネットワークシステムを活用した統合的なエネルギー最適化制御とマネジメントの仕組み

	AI ネットワークシステムの主な役割
視える化	<ul style="list-style-type: none"> ●ステークホルダーへの視える化(ユーザー、運営管理者、設計・研究者) ●365日24時間年間を通年でのエネルギー消費のミニマム化への監視・報告機能 ●統計分析を活用したコミッション機能
統合・最適制御(環境変化に対応する。)	<ul style="list-style-type: none"> ●個別機器及び設備システムの最適化制御(高効率運転、COPの最大化) ●各種制御の最適な組合せ最適化 ●自然エネルギーの最大利用 ●運用エネルギーの最小化 ●機器・システム運転時間のミニマム化 ●管理者(遠隔無人制御+AIによる自動化制御)
室内環境制御(室内の環境を最適化する。)	<ul style="list-style-type: none"> ●室内快適性とエネルギー消費量バランス ●自然光利用と照明・空調エネルギー消費量バランス ●窓開けに自然換気の活用 ●躯体蓄熱(ナイトページ)の活用 ●在室人員モニターによる最適化制御

機器やシステムは最高のCOPで運転できるように建物利用条件を学習し、継続的に効率を向上する。実績^(注3)注4)を基に専門エンジニアリングサービス企業^(注5)と協力して開発された。さまざまなプロジェクトで同様のシステムと「見える化」サービスを導入している。

5. 利用しているセンサや収集される情報について

筆者らが利用しているセンサは、可能な限り汎用性が高く、長期に設置しつづけることを想定している。情報に関しては、すべてセンサも最低1分間隔の情報を取得している。すべてのデータはサーバに一元管理されバックアップを取りつつ、我々研究者及び協力企業の専門家によって活用される。同時に関係者はWebやインターネットを通じてデータにアクセス可能である。各センサやコントローラ等のシステムの一部はすでにエンジニアリングサービスを通じて実用化されている。今後はさらに、さまざまなセンサとのオープン環境を構築して接続してゆく考えである。本年の7月には、BEMSとHEMSの次世代AIネットワークシステムに活用する汎用通信機能持ちローカル制御を行うインテリジェントコントローラや汎用通信を活用したセンサ類を研究協力企業等と市場に提供し、さらに建物の総合的エネルギー性能に関する情報や分析結果を共有可能なオープンなプラットフォームの提供を検討している。

6. おわりに(結論と今後の課題)

6.1 センサ、システム、情報のオープン化への課題

今後、さまざまな技術をオープン環境(汎用通信を利用したネットワーク)に対応させてゆくことが重要である。建物のエネルギー分野においては、様々なセンサ機能の共有化により、さらなる節電、省エネルギー、エネルギー平準化、創エネルギーが図れるものと考えている。

6.2 最適化コントロールの今後の課題

センサを活用した最適化コントロールに関しては、未開発な領域も多く、建築分野の情報利用では、まだまだ活用範囲は小さい。さらに、今後、エネルギーの自由化、デマンドレスポンスなどの契約の多用化、2030年を目指したZEHやZEBの普及を実現するためには、様々な空間・用途でセンサを活用し、省エネルギー、創エネルギーのための制御や関連情報利用が有効であると考えられる。要素技術やシステムを構成する周辺機器や通信の小型化、低価格化、法制度等が整うことにより、さらに建物のユーザー、組織、社会にとって有効な情報利用が図れることを望む。

6.3 震災で当該技術が果たした役割

筆者らが研究開発したAIネットワークシステムは、東日本大震災以降の節電や省エネルギー、電力平準化に対しても大きな成果を上げている。横浜市の金沢区の5施設

ではピークを平均で約27%の削減が実施できた。(文献5) 東京大学生産技術研究所(駒場IIキャンパス)や理想の教育棟ZEB他においても同等の成果を確認でき節電や電力ピークカットの役目を果たした。研究協力企業においては、様々な建築用途の建物において、電力消費量を平均で▲10~15%削減が可能である。今後も、AIネットワークシステムによる省エネルギーシステムの実証試験を兼ねた社会実装による最適制御による効果を向上させたい。

【参考文献】

- 1) 多主体による開発設計プロセスに関する研究~ゼロ・エネルギー・ビル設計に関するケーススタディ~, 建築学会生産シンポジウム2011, 論文番号(no.F-3), (P133-138)馬郡文平、野城智也、信太洋行、迫博司、安田大樹、藤井逸人
- 2) 既存建物のエネルギー・モニタリングによるCO2排出量削減可能性に関する研究, 建築学会生産シンポジウム2010 論文番号(no.G-3), (P145-150) 迫博司、馬郡文平、野城智也、藤井逸人、水谷義和
- 3) AIコントロールを活用した小型複数店舗における統合的エネルギーマネジメントに関する研究~24時間小型店舗(コンビニエンスストア)の統合エネルギーマネジメント実証試験~, 建築学会生産シンポジウム2010, 論文番号(no.G-1), (P133-138)馬郡文平、野城智也、深田裕康、松谷裕行、入江紀子、藤井逸人、武井由貴、水谷義和
- 4) 大学キャンパスにおけるゼロ・エネルギー・ビルディングの取組み(その6)AIネットワークによる建物・空調・照明の統合マネジメントシステムの開発と基本機能の検証, 日本建築学会大会2012年, 馬郡, 野城, 大岡, 迫, 信太, 樋山, 安田, 李
- 5) 複数施設における統合エネルギーマネジメントに関する研究~横浜市金沢区温暖化対策事業における統合エネルギーマネジメント及び最適化制御に関するケーススタディー~建築学会生産シンポジウム2011, 馬郡文平、野城智成他

(注1) 公益財団法人LIXIL住生活財団 環境技術研究機構に建設された寒冷地実験住宅。設計: 隈研吾設計都市建築設計事務所、モニタリング企画・設計・設置 東京大学生産技術研究所 野城研究室

(注2) ゼロ・エネルギー・ビルとは、「建築物における一次エネルギー消費量を、建築物・設備の省エネ性能の向上、エネルギーの面的利用、オンサイトでの再生可能エネルギーの活用等により削減し、年間での一次エネルギー消費量が正味(ネット: プラスマイナスの合計)でゼロ又は概ねゼロとなる建築物」(「ZEBの実現と展開に関する研究会」報告書より)

(注3) 野城研究室監修、協力研究企業により開発された見える化システム(学ぶクン)とAIコントロールによるエネルギーの最適化、継続的にゼロ・エネルギーを目指すシステムをいう。

(注4) 野城研におけるエネルギーマネジメントの主な実績; 2001年~エネルギー使用量の見える化(東京大学生産技術研究所B棟~F棟、愛知万博日本館他)、共同研究パートナーがベンチャー企業(現在、株式会社エービル)を設立。2005年~見える化技術を活用した継続的・能動的省エネルギー活動の展開、ハウステンボスの省エネルギー、(2007~継続中)横浜市泉区総合庁舎、磯子区、金沢地区センター他公共建築物の温暖化対策事業ほか。平成20年度よりローンと東京大学生産技術研究所野城研究室ではCO2削減に関する店舗構築に関して共同研究を実施している。(平成23年度現在も継続中)

(注5) 協力研究企業: 株式会社エービル、朝日機器株式会社ほか

- *1 東京大学生産技術研究所 特任講師 修士(工学)
- *2 東京大学生産技術研究所 教授 博士(工学)
- *3 東京大学生産技術研究所 共同研究員
- *4 (株)エービル 成長知能本部 取締役本部長

A Study of Optimized Control for using AI Network System

Optimized energy use by using developed visualization and Independent & Integrated control

○Bumpei MAGORI*¹ Tomonari YASHIRO*² Hiroshi SAKO*³
Hayato FUJII*⁴ Daiki YASUDA*⁵

Keywords : ZEB, ZEH, Monitoring, Visualization, Optimized Control , Energy Conservation

Summary:

This Study reports optimized energy control system, scope of energy demand control, and the algorithm which has been developed by using AI (artificial intelligence) Network System. This system has remote automatic control mechanism which realizes energy-saving and controlling peak energy demand by using Internet.

Even when energy manager and staff are absent the local facility, AI Network System can be able to automatic check, audit every device, select better operate pattern and status by comparing real time energy use. The developed system is carried out automatically aiming at energy minimum.

This developed system has already been installed the many facilities by using energy monitoring system and AI Network System. We have already recognized the effects for saving energy use, peak cut for electric power demand, and hi-energy efficiency devise control. This report introduces case studies of ZEH visualization project and ZEB project optimized control, and the parts of these effects.

*1 Project Lecturer, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, M.Eng.

*2 Professor, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr.Eng.

*3 Research fellow, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*4 Alter Building Japan Co., Ltd.