既存工業化住宅を用いた改修型 ゼロ・エネルギーハウスの提案

PROPOSAL OF RENOVATION TO ZERO ENERGY HOUSE (ZEH) FROM AN EXISTING INDUSTRIALIZED HOUSE

中川 純 — * 1 常岡優吾 — * 2
 山口真吾 — * 2 大木玲奈 — * 2
 菅野颯馬 — * 2 野元彬久 — * 2
 丸山由香 — * 3 荒木菜那 — * 4
 山品太輝 — * 5 池原靖史 — * 6
 渡辺直哉 — * 7 小林達宏 — * 7
 田辺新一 — * 8 秋元孝之 — * 9
 林 泰弘 — * 10 若尾真治 — * 10

Jun NAKAGAWA — * 1 Yugo TSUNEOKA — * 2
 Shingo YAMAGUCHI — * 2 Reina OKI — * 2
 Soma SUGANO — * 2 Akihisa NOMOTO — * 2
 Yuka MARUYAMA — * 3 Nana ARAKI — * 4
 Daiki YAMASHINA — * 5 Yasushi IKEHARA — * 6
 Naoya WATANABE — * 7 Tatsuhiko KOBAYASHI — * 7
 Shin-ichi TANABE — * 8 Takashi AKIMOTO — * 9
 Yasuhiro HAYASHI — * 10 Shinji WAKAO — * 10

キーワード：

改修型 ZEH, エネマネハウス, 自家消費, 温熱環境, IoT

Keywords:

Renovated ZEH, Enemane-House, Self consumption, Thermal environment, IoT

Saving energy in the residential is required under the influence of global warming and electricity shortage caused by natural disaster in Japan. For the purpose of promoting zero energy house, “ENEMANE HOUSE 2017”, a competition of Zero-Energy House was held. This paper shows the overview of the building and equipment planning, and also the evaluation of thermal environment and energy in the zero energy house which the consortium of Waseda University and Shibaura Institute of Technology proposed in the competition. This zero energy house demonstrates a method of renovation of housing using low-insulated outer wall of an existing industrialized house. The aim of the facility planning was not only the compatibility of energy-saving and comfort but also the increase in self-consumption of surplus power.

1. はじめに

日本の住宅ストック数は全世帯数を上回り、空き家問題などが顕在化している。日本の総住宅数に対する空き家率は 2013 年時点で 13.5%⁶⁾ に達し、全国で 103 万戸⁷⁾ が利活用可能と推計されている。また、ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH) の標準化や導入の動機付け等を目標とした施策が進められる一方で、過剰となっている住宅ストックに対する改修型 ZEH の普及目標は定められていない。

さらに、ZEH への太陽光発電 (PV) 等の再生可能エネルギー導入促進により発生した余剰電力の逆潮流が、都市配電網の電圧上昇・周波数調整に問題を生じさせることが懸念されている。加えて、2019 年以降固定価格買取制度の順次終了により売電価格が下落し余剰電力の積極的な自家消費が経済的に優位になることが見込まれている。

以上の背景から、有用なストックとして残る既存工業化住宅に対し、既存ならではの魅力を活かしつつ、現代の環境ニーズに適合した環境性能を付与する改修手法の知見獲得が求められる。さらに、自然エネルギーの有効活用や、デマンドレスポンス (DR) など都市規模

表 1 本実証住宅の概要

建設地	大阪府大阪市	
構造	鉄骨造	
階数	地上2階	
建築面積	66.03 m ²	
延べ床面積 [m ²]	全体	79.11
	1F	63.31
	2F	15.8
階高 [m]	リビング	4.37
	1F居室	2.2
	2F居室	2.2

のエネルギーマネジメントへ対応していくことが求められている。本報では、一般社団法人環境共創イニシアチブが主催する「エネマネハウス 2017」の一環として建築された実証住宅の報告を行う。

今回は大阪府大阪市で開催され、2017 年 10 月～11 月に 15 日間で実証住宅を施工、11 月に実測、12 月に一般展示を行った。

2. 実証住宅設計概要

表 1 に本実証住宅の概要を示す。本実証住宅は築 40 年の 2 階建て鉄骨造の工業化住宅を想定した改修案であり、①既存住宅の躯体の

本稿は既発表論文 1～5 をまとめ、加筆したものである。

¹⁾ 早稲田大学大学院建築学専攻 博士課程・修士 (工学)
 (〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1)

²⁾ 早稲田大学大学院建築学専攻 修士課程

³⁾ ㈱日本設計 (元早稲田大学大学院)

⁴⁾ 芝浦工業大学大学院理工学研究科 修士課程

⁵⁾ ㈱佐藤総合計画 (元芝浦工業大学大学院)

⁶⁾ 池原靖史建築設計事務所

⁷⁾ 旭化成ホームズ㈱

⁸⁾ 早稲田大学創造理工学部建築学科 教授・工博

⁹⁾ 芝浦工業大学建築学部建築学科 教授・工博

¹⁰⁾ 早稲田大学先進理工学部電気・情報生命工学科 教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Waseda Univ., M. Eng.

²⁾ Graduate Student, Waseda Univ.

³⁾ Nihon Sekkei Inc. (Former Graduate Student, Waseda Univ.)

⁴⁾ Graduate Student, Shibaura Institute of Technology

⁵⁾ Axs Satow Inc. (Former Graduate Student, Shibaura Institute of Technology)

⁶⁾ Ikehara Architect and Associates

⁷⁾ Asahi Kasei Homes Corporation

⁸⁾ Prof., Waseda Univ., Dr. Eng.

⁹⁾ Prof., Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

¹⁰⁾ Prof., Waseda Univ., Dr. Eng.

活用、②ZEH のデザインの幅の拡張、③自然エネルギーを有効活用、④DR に対応したエネルギー運用の実現を目指した設計を行った。なお、設計期間、施工期間が短いことから、実際には既存住宅を改修するのではなく、改修後を想定した住宅を新築した。

3. 建築計画

1) 平面構成 ZEH のデザインを拡張するため、本実証住宅では ZEH の基準を満たす高断熱の新設壁を、既存の低断熱壁の内外を縫うように配置した。既存の低断熱壁は、通常の改修工事では熱的に不利になるため前面に出ることはないが、本計画では既存低断熱壁を、自然エネルギーを取り込むために最大限利用することを考えた。異なる機能を持った平面を重ねることによって、住宅内に高断熱壁に囲まれた高断熱な居住空間と、入れ子によって生まれた低断熱の緩衝空間が生まれる。この緩衝空間は「ロジア」と名付けられ、住空間と屋外との緩衝空間として、住宅が社会に接続するための空間として機能するだけでなく、季節に合わせた環境調整の機能も担っている。また、既存低断熱壁を残しつつ、新設壁を内外に配置する本手法により、デザインやプランニングの自由度を獲得することで、多様化するライフスタイルへ対応する。設備機器は更新の簡略化を目的に北東側の増築部と東側の屋外設備置場に集約した。

2) 立面構成 南・西立面はロジアを構成する既存低断熱壁が現れることで既存住宅の外観を継承した。さらに、従来の ZEH では採用されることのなかった大開口の単板ガラスのスチールサッシを用いることで、ZEH デザインに挑戦したファサードとなっている。

3) 断面構成 既存の躯体よりも高い位置に高断熱の新設躯体を挿入し、低断熱のボリュームと高断熱の新設ボリュームの間に屋根裏通気層を設けた。

4. 環境計画

4.1 各所における部位別構成材

図 3 に部位別構成材の配置、表 2 に各所における部位別性能値を示す。既存低断熱ラインは既存住宅を想定し、外皮の壁と天井は既存 ALC パネルの現し、窓は単板ガラスのスチールサッシとし、既存住宅の表情を残した。新設高断熱ラインは 4 種類の壁構成、2 種類の屋根構成、樹脂複合サッシと Low-E トリプルガラスの窓により外皮平均熱貫流率 (UA 値) $0.35 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ を実現した。特に、ロジアとリビング間の新設壁は、真空断熱材、シート型潜熱蓄熱材、高性能フェノールフォームを用いることで、高い断熱性能 (熱貫流率 $0.05 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ (実測値)) と蓄熱性能を担保しながら、壁厚 105 mm を実現した。

4.2 ロジア

図 4 にロジアおよび屋根裏通気層の季節毎の運用ダイヤグラム、図 5 に南ロジア内観を示す。居住者が季節や時間に応じてロジアの内外の窓を開閉することで冷暖房負荷を削減する。夏季は屋外側の窓を開放し、屋根を庇とすることで居室内への直達光を防ぐ。中間期は内外の窓を開放し、居室内に自然通風による採涼効果をもたらす。冬季は内外の窓を閉め、熱的な緩衝空間とし室内からの熱損失を抑制する。また、日射熱の取得に有効な単板ガラスの大開口によってロジア内の温度が居室よりも高くなった際には、居室側の窓を開放しロジア内の暖気を室内へと流入させ、暖房負荷を削減する。

図 1 リビング内観

1 階平面図

図 2 北西側外観

断面図

図 3 部位別構成材の配置

表 2 各所における部位別性能値

部位名 (厚みmm)		熱貫流率 [W/(m ² ・K)]		部位名 (厚みmm)		熱貫流率 [W/(m ² ・K)]	
新設	真空断熱壁 (105mm)	設計値	0.07	新設	新設天井 (120.5mm)	設計値	0.17
		実測値	0.05	既存	既存屋根 (120mm)		2.27
新設	集成材壁 (255mm)	設計値	0.15	既存	低断熱窓	設計値	6.51
新設	水回り外壁 (252mm)		0.18	新設	高断熱窓		1.29
既存	既存低断熱壁		1.85	新設	床 (457mm)		0.16

図 4 ロジアおよび屋根裏通気層の季節毎の運用ダイヤグラム

図 5 南ロジア内観

図 6 可動式水平膜

4.3 屋根裏通気層

屋根裏通気層には開閉可能な窓が取り付けられており、夏季や中間期は窓を開放することで、屋根面で受熱した日射熱を通気により排除し、室内の熱負荷を減少させる。冬季は窓を閉じることで室内の熱の損失を防ぐ中空の断熱層となる。

4.4 可動式水平膜

図 6 に可動式水平膜を示す。可動式水平膜はリビング上の鉄骨梁に沿って張られるポリエステル製ロールスクリーンであり、高い遮熱効果を持つ。ブラインド等と異なり室外への眺望を確保しつつ、直射日射を均一に透過・拡散させる。2階居室を使用しない場合は、水平膜を張りリビングの空調領域を縮小させ、空調効率を向上させる。

5. 設備計画

本実証住宅における設備計画では、省エネルギー性と快適性に加え、自然エネルギーによる創エネルギーを効率よく活用すること、DR に対応するために電力需給を調整可能とすることを旨とした。

5.1 導入設備

空調には高効率エアコン（定格冷房能力 2.2 kW、定格暖房能力 2.5 kW）を用いた。通常の壁面への設置に加え、床下に吹き出すように設置した床下チャンバー空調の計画も行った。換気設備は全熱交換器を用いた。照明設備は LED 照明を用い、時間帯や作業に応じた適切な照度設定と自動消灯を可能とし電力消費量の削減を図った。

5.2 創蓄連携システム

図 7 に創蓄連携設備の構成を示す。本実証住宅は PV パネル・太陽熱集熱パネルによる創エネルギー設備と、蓄電池・貯湯タンクによる蓄エネルギー設備を導入した。創エネルギー設備で生成したエネルギーの消費先や貯蓄先を、ECHONET-Lite を用いた HEMS により制御する創蓄連携システムを構築した。日射量予測を利用し、PV パネルによる発電の余剰電力を蓄電池の充電とヒートポンプ給湯器（HP 給湯器）の給湯に用いることで、住宅内での自家消費・電力負荷の平準化の実現と、将来的な DR への対応が可能なシステムを計画した。

1) 電気設備 表 3 に太陽光発電モジュール・蓄電池の仕様を示す。合計 3.5 kW の PV パネルを年間で最も発電効率が高い 31° で建物南側地上に設置した。

2) 給湯設備 表 4 に太陽熱集熱器・HP 給湯器の仕様を示す。本実証住宅では太陽熱集熱器と HP 給湯器を併用した集熱併用給湯システムを提案した。集熱器貯湯タンクを HP 給湯器の貯湯タンクの市水流入口に接続し HP 給湯器の稼働時間短縮を図った。

3) 日射量予測を用いた機器制御手法 表 5 に日射量予測手法概要を示す。日射量予測手法⁸⁾を用いた日射量予測値を受け、発電量に換算し HP 給湯器と蓄電池のスケジュール制御を行った。過去の日射量と気象データの実測値が紐づけられたデータベースから、39 時間先までの気象予測データを用いて全日射量の予測を行った。発電量は、斜面日射量を推定後、モジュール変換効率とパネル面積から算出した^{3) 4)}。予測された当日および翌日の発電量を元に、HP 給湯器の稼働開始時刻と、稼働時間、蓄電池の充電量の制御を行った。HP 給湯器の稼働開始時刻は PV 発電によって HP 給湯器の電力消費を賄える時間とし、稼働時間は発電量が多い晴天日には長く、発電量の少ない天候不順日は短くなるようにした。蓄電池は充電時間を調整することで、充電量を変化させ余剰電力の逆潮流量の平準化を目指した。

5.3 IoT を用いた制御システム

省エネルギーを目的に住宅と設備を制御する際に、制御に住み手が介在し運用法を継続的に、長期的に学習していくシステムとして IoT（Internet of Things）を用いた制御システムを提案した。住み手が温熱環境を五感で知覚し主体的な調整を繰り返す中で居住環境の構築方法を徐々に修得すると考え、全自動化しないことで、人間を媒介したシステムとした。住み手の変化と、それに呼応するように建築も変化し続けられるレジリエントな住環境形成を目指した。

ロジリアの開閉のタイミングに関しては、日中に窓を開ける際は室内とロジリアの温度差に住み手は直感的かつ即時的に感じる事ができるが、窓を閉める際は寒さを感じてからでは既に室温が低下しているため遅い。そのため、ロジリアの窓開閉するべきタイミング

図 7 創蓄連携設備の構成

表 3 太陽光発電モジュール・蓄電池の仕様

設備名	合計最大出力 (kW)	モジュール変換効率	設置角度
太陽光モジュール	3.5	19.5%	南向き 31°
設備名	蓄電容量 (kWh)	入出力定格電力 (kW)	
リチウムイオン蓄電池	5.6	充電	1.5
		放電	2.0

表 4 太陽熱集熱器・HP 給湯器の仕様

設備名	タンク容量 (L)	集熱方式	給湯給水方式	消費電力 (W)	パネル面積
太陽熱集熱器	200	強制循環式	水道直結	制御 集熱運転時 13~75 (可変)	11.7㎡
設備名	タンク容量 (L)	定格能力 (kW)		定格消費電力 (kW)	沸き上げ温度範囲 (°C)
ヒートポンプ給湯器	370	中間期	4.5	0.895	約 65~90°C
		冬季	4.5	1.5

図 8 日射量予測に基づく制御イメージ

表 5 日射量予測手法概要

日射量	予測対象地点	実証住宅（大阪市）	緯度 34.703	経度 135.493
	予測用データ地点	大阪管区気象台	緯度 34.682	経度 135.518
	予測値	全天日射量 [W/m²]	7:00-16:00 の各 1 時間平均値	
	予測入力値	毎日 6:00 の MSM-GPV		
	予測協力	早稲田大学先進理工学研究所 電気・情報生命専攻 若尾真治研究室 Just-in-Time Modeling 信頼区間推定・点推定		
発電量	斜面日射量変換	Erbs モデル 傾斜角 31 度		
	発電量換算	モジュール変換効率 19.5%、パネル面積 17.9㎡

図 9 ロジリア通知システム 概略図

を視覚的、触覚的に居住者に伝え、行動を促進することが求められる。図 9 にロジリア通知システム概略図を示す。マイコンは arduino、温度センサーは HTU21DF を用いた。居室とロジリアに設置したセンサーは iOS 端末と bluetooth で接続した。iOS 端末は天気予報 API から情報を収集し、センシングした値とデータセットを参照することで居室内の空調負荷が最小となる窓の開閉パターンを求めた。晴天の場合、ロジリアと居室の室温の差が 0 になる時刻に通知を行った。

6. 実測結果

1) 実測概要 図 10 に家電負荷・給湯負荷・人体負荷条件、表 6 に温熱環境目標値を示す。温熱環境の実測は 2017 年 11 月 18 日 0:00~11 月 21 日 19:00、2017 年 11 月 24 日 0:00~11 月 28 日 19:00 の 2 期に分

けて「エネマネハウス 2017」の競技対象期間に行われた。9:00～12:00、14:00～18:00 は人体負荷として学生 3 人が在室した。

2) 南ロτζア窓の開閉運用による環境調整効果 図 11 に空気温度の経時変化、図 12 に CO₂ 濃度の経時変化を示す。高断熱域の基準値を超える温度上昇と来客条件による CO₂ 濃度上昇を抑えるために、南ロτζア内が 23℃を超えた 11:00～12:00、14:00～15:00 は南ロτζア内側窓を開放し、高断熱域と南ロτζア内の空気を混合させた。また、27 日 12:00～14:00 の不在時間は窓を閉め、遮熱ブラインドを下げた。これらの環境調整により、高断熱域のオーバーヒートを防ぎ目標温度域内に空気温度を維持した。27 日 14:15 に内外共に窓開けを行った際の空気温度の変動に比べ、南ロτζア内側窓のみ開閉した際の変動が小さかったため、南ロτζアが外部との熱的中間領域として機能し温熱環境調整に有用であることが確認された。

3) 室内環境評価 実測結果より高断熱域の空気温度は約 94%、相対湿度は約 95%、CO₂ 濃度は約 99%の時間で目標値内を維持し、快適性の高い住空間であることが実証された。

4) エネルギー実測結果 図 13 に代表日の電力利用波形、表 7 に日ごとのエネルギー評価結果を示す。25～26 日は 26 日の発電量が少ないことが予測され、25 日に HP 給湯器の稼働時間を増やした。一方で、同様の条件であった 19～20 日は稼働時間の調整を行わなかった。発電量が少なかった 20 日と 26 日の比較より、稼働時間の調整によって、日中の買電量が大幅に削減され、自給率と日負荷率の向上を確認した。蓄電池の制御に関しては、制御を行った 27 日は、同程度の発電量で制御を行わなかった 19 日に比べ日負荷率が 29%増加した。実測競技上の特別な制御条件を設けた日を含む実測期間日平均が自家消費率 72%、自給率 61%、日負荷率 18%となり、HP 給湯器と蓄電池の制御によりエネルギー的に自立性の高い運用を実現した。

図 14 に日積算電力消費量の実測値と設計値の比較を示す。図 14 では、実測値の日平均データと比較するため、エネルギー消費性能計算プログラムで試算した年間の一次エネルギー消費量の基準値と設計値を 1 日分に換算した。実測値の日平均の省エネ割合は基準値から 86%削減となった。また ZEH 達成率は 106%となった。

7. まとめ

既存住宅の改修型 ZEH として提案された本実証住宅の計画および、性能、実測結果に関する報告を行った。高断熱化や高性能設備、太陽光発電の導入などにより、BEI 値は 0.30 となり、BELS（建築物省エネルギー性能表示制度）の最高等級★5（ファイブスター）を獲得した。また、実測より運用段階での『ZEH』達成を確認した。さらに、今までにはない ZEH デザイン、再生可能エネルギーによる発電量の変動に合わせた設備制御、住み手と共に居住環境の構築方法の学習を行う IoT デバイスの提案など、少し未来の ZEH に対するビジョンを示した。

最後に、本研究成果は、一般社団法人環境共創イニシアチブが実施した「エネマネハウス 2017」により得られた。関係者および協力企業の皆さまに多大なるご協力を得た。ここに記して謝意の意を示す。

参考文献

1) 山口ら：「既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その 1 建築計画の概要」、日本建築学会学術講演梗概集, 2018

図 10 家電負荷・給湯負荷・人体負荷条件
表 6 温熱環境目標値

空気温度	21.2~25.2℃	CO ₂ 濃度	800ppm未満
相対湿度	40~70%	照度	全天天空照度の4%以上(10:00~15:00)

図 11 空気温度の経時変化

図 12 CO₂ 濃度の経時変化

図 13 代表日の電力利用波形 (30 分間隔積算平均値)

表 7 日ごとのエネルギー評価結果										
エネルギー評価指標	第1期				第2期				日平均	
	11/18	11/19	11/20	11/21	11/24	11/25	11/26	11/27		11/28
自家消費率	100%	90%	98%	65%	53%	84%	99%	83%	41%	72%
自給率	13%	90%	22%	81%	84%	64%	42%	89%	64%	61%
日負荷率	37%	26%	25%	18%	38%	14%	54%	55%	18%	18%
PV発電量[kWh]	1.4	13.4	3.5	12.5	16.2	12.3	5.2	14.7	13.9	10.3
消費エネルギー量[kWh]	10.6	13.3	15.4	10.1	10.2	16.1	12.3	13.7	8.8	12.3
平均気温[℃]	10.7	9.5	7.8	8.7	10.1	10.5	10.3	12.7	14.2	10.5

図 14 日積算電力消費量の実測値と設計値の比較

2) 菅野ら：「既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その 2 温熱環境に関する運用計画と冬季実測結果」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2018

3) 常岡ら：「既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その 3 自立的なエネルギー運用を目指した設備・制御計画」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2018

4) 大木ら：「既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その 4 エネルギー運用に関する冬季実測結果」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2018

5) 中川ら：「既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その 5 IoT を用いたエネルギー削減手法の提案」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2018

6) 総務省：2013 年度住宅・土地統計調査, 2013

7) 国土交通省：空き家の現状と論点, 2015

8) 鈴木ら：Just-In-Time Modeling に基づく日射量予測手法の開発, IEEJ Trans. PE, Vol.131, No.11, pp912-919 (2011)

[2018 年 6 月 6 日原稿受理 2018 年 8 月 13 日採用決定]