

ZEH および非 ZEH 環境における在宅人数推定を利用した HVAC スケジューリング制御の効用に関する考察

○伊東 龍平 (富山大学) 中山 俊太 (東京科学大学) Nguyen Tam (富山大学)
平田 研二 (富山大学) 畑中 健志 (東京科学大学)

Energy Consumption Optimization of HVAC Systems based on Home Occupancy Estimation in ZEH and non-ZEH environments

*Ryohey Ito (University of Toyama), Shunta Nakayama (Institute of Science Tokyo),
Tam W. Nguyen (University of Toyama), Kenji Hirata (University of Toyama),
Takashi Hatanaka (Institute of Science Tokyo)

Abstract: This paper presents the development of a heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) control environment that incorporates home occupancy schedules. The simulation integrates two key components: a previously developed net-Zero Energy House (ZEH) simulation and a home occupancy estimation based on the energy consumption and household data. By employing a switching control that activates HVAC input only when the occupants are present, the system achieves a more realistic energy consumption profile compared to earlier models. Using a ZEH model and weather data from the Kitakyushu Jono district, originating from a real-world ZEH demonstration project, the effectiveness of this schedule-based switching control is evaluated. Additionally, the energy-saving performance between ZEH and non-ZEH houses is compared, highlighting the insulation benefits of ZEH.

Keywords: net-Zero Energy House, HVAC Systems, Simulator Development

1 はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて net-Zero Energy House (ZEH) が注目されており、様々な分野で研究が進められている [5-7]. ZEH とは一年間の発電量が消費電力量を上回るように設計された住宅のことである [4, 12, 15]. ZEH の消費電力削減効果を評価する上で、建築工学に則った ZEH 材質と建物モデルを用いて、実際の人間の生活スケジュールに基づいた電力消費をシミュレーション上で確認できるようにすることは有益である.

著者らは、室内温度環境計算ツールである EnergyPlus [8] と MATLAB/Simulink を連携し、建物における空調制御シミュレーション環境を構築した. また本稿では人間の生活スケジュールを考慮し、在宅時のみに HVAC(暖房・換気・空調) システム が動作状態となるような状況での検証を実施した.

本稿では、文献 [1] における ZEH シミュレーション環境と文献 [2] における実消費電力データを用いた在宅人数推定をもちいて、ZEH における「常に動作状態の場合」と「在室状況に応じたスイッチング制御により動作状態を切り替える場合」での節電効果について、シミュレーションにより比較検証をおこなう. また、建物の断熱性能が異なる ZEH/非 ZEH 間での消費電力削減効果を算出し、こまめな節電の有用性や ZEH の断熱性能を評価する.

2 シミュレーション環境

本節では、シミュレーション環境と在宅人数推定の概要について説明する. また、推定した在宅人数スケジュールと EnergyPlus の設定定義ファイルである idf ファイルとの統合についても説明する.

2.1 ZEH シミュレーション環境

本項では、ZEH シミュレーション環境の大枠について説明する. ワークフローを Fig. 1 に示し、文献 [1] からの追加事項を中心に説明する.

文献 [1] では、CAD ソフトウェアである SketchUp をもちいて、対象とする住宅の 3D モデルを作成した. SketchUp と EnergyPlus 間の相互インターフェースである Openstudio をもちいて、材質および温度環境に関する設定ファイルを作成し、EPLaunch IDF Editor にて材質パラメータの調整をおこなった. そのうち MLE+(Matlab/Simulink EnergyPlus)Toolbox の EnergyPlus ブロックを用いて MATLAB/Simulink 上で PI 制御シミュレーションを行った [9-11]. 詳細については、文献 [1] を参照されたい.

本稿では、在宅人数推定 [2] をもちいて、人の生活スケジュールをシミュレーションに追加する. まず、実消費電力データと世帯人数データから 30 分ごとの在宅人数データを作成し、推定した各時間帯における家全体の人数を 4 部屋に確率的に割り振る. その後、各部

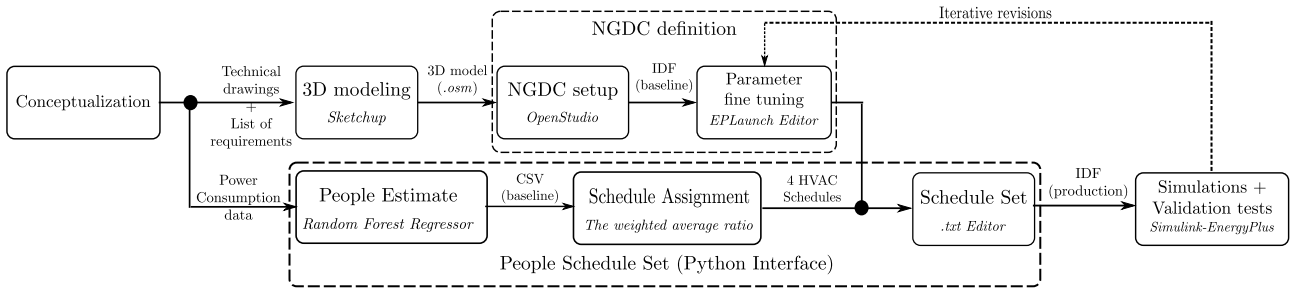


Fig. 1: Simulation Workflow

屋のスケジュールを idf ファイルの People 項目にテキスト形式で書き込む。

2.2 在宅人数推定

本項では、シミュレータの構築に必要な人間活動の推定について述べる。詳細については、文献 [2] を参照されたい。

ZEH の実証実験が行われている福岡県北九州市城野地区の戸建て 140 軒の実データをもちいて、在宅人数の推定をおこなう。2021 年 4 月から 2022 年 3 月までの実消費電力データが 30 分刻みで存在し、世帯人数データもアンケートで 102 軒分が既知であるため、これらを説明変数として在宅人数推定を行う。

時刻 t における在宅人数の推定値を $P(t)$ とし、時刻 t を含む日の前後一週間での平均最大消費電力 $C_u(t)$ 、平均最小消費電力 $C_l(t)$ の計算を行う。このとき、人間の活動時間内の消費電力量と在宅人数に正の相関があると仮定して、 $P(t)$ を以下のように計算する。

$$P(t) = \frac{C(t) - C_l(t)}{C_u(t) - C_l(t)} P_u \quad (1)$$

ここで $C(t)$ は時刻 t の消費電力量、 P_u は世帯人数の真値あるいは推定値である。式 (1) によって得られた $P(t)$ に対し整数値となるように四捨五入を行い、 $P(t)(< 0) = 0$ 及び $P(t)(> P_u) = P_u$ を適用する。

2.3 人の生活スケジュールの適用

本項では、前節で作成した 30 分ごとの在宅人数スケジュールを Energyplus の .idf ファイルに書き込む手順を説明する。今回使用するモデルには図面 (Fig. 2) に示した通り 4 つの HVAC システムがあるため、家全体の在宅人数を各部屋の在室スケジュールに割り当てる必要がある。ここでは、各部屋の使用確率を用いて各部屋の人数割り当てをおこなう。具体的には各部屋の面積比 (実データ) と利用比 (ユーザーが設定) をもちい

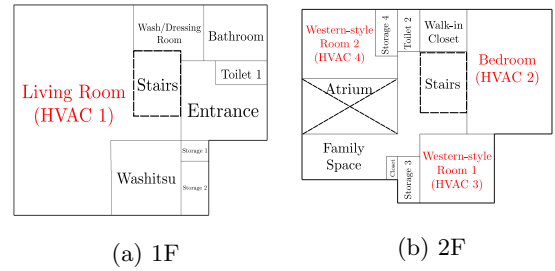


Fig. 2: Drawing

(HVAC = Heating, ventilation, and air conditioning)

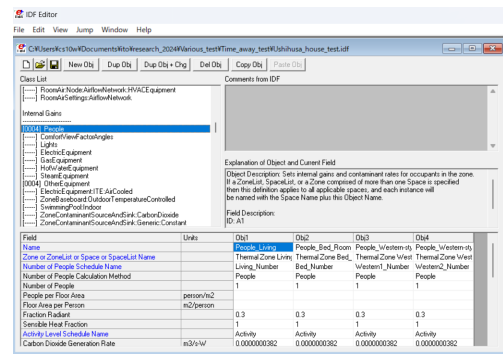


Fig. 3: People Field (EPLaunch IDF Editor)

て、面積比 : 利用比 = 2 : 8 の加重平均比率から使用確率を算出している。また、利用比については日中と深夜で大きく異なると考えられ、時間帯ごとにそれぞれ利用比を設定している (Table 1)。

次に、EPLaunch IDF Editor をもちいて、在室スケジュールを idf ファイルに反映する。今回は HVAC システムのある 4 部屋のみ人に人が存在するようにし、人の熱量は常に 100W で保つようにする。EPLaunch IDF Editor の GUI 画面を Fig. 3 に示す。

3 シミュレーション結果

本節では、改良したシミュレーション環境をもちいて、スケジュール適用による節電効果を比較・検証する。また、モデルの材質を変更して ZEH/非 ZEH 間で

Table 1: Assignment probability

Room Class	Area ratio [%]	Usage ratio [%]		Assignment [%]	
		day[7:00 ~ 22:00]	night[22:00 ~ 7:00]	day	night
Living	51.45	60	10	58.29	18.29
Bed_Room	24.16	10	50	12.832	44.832
Western_Room_1	11.72	15	20	14.344	18.344
Western_Room_2	12.67	15	20	14.534	18.534

の消費電力比較から ZEH の断熱性能も評価する。モデルには実際の城野地区の ZEH 住宅の情報を持ち、天候データ(気温、湿度など)には城野地区(2022/01/01 ~ 2022/12/31)のものを用いる [13]。また、月毎に設定できる地表面温度には 2021 年に観測された北九州市のデータを用いる [14]。

3.1 スケジュール適用時の節電効果

本項では、各部屋の在室人数スケジュールを適用し、シミュレーションする。また、異なる在室人数スケジュールを 10 個用意して、冬(1月)と夏(8月)のそれぞれにおいて、一か月シミュレーションを行い、“No_schedule”、“Adapt_schedule”、“No_control”の3つのケースについて温湿度・入力軌道をプロットし、スケジュール適用による節電効果を比較検証する。ここで“No_schedule”は常に動作状態の場合、“Adapt_schedule”は在室状況に応じてスイッチング制御を行った場合、“No_control”は制御入力が行われない自由応答の場合である。

各部屋の平均節電率を Table 2 に示す。また、シミュレーション結果の一例として、冬(1/2 ~ 1/4)を Fig. 4、夏(8/2 ~ 8/4)を Fig. 5 に示す。温湿度プロット(上図)の桃色で示した箇所は人が在室している時間帯を示しており、入力プロット(下図)には推定した在室人数を緑色の実線でプロットしている。

冬・夏どちらの場合でも人の在室状況に応じて入力のスイッチングが行われ、入力時には速やかに快適な室温を達成していることが確認できる。Table 2 より、リビングとその他3部屋で節電率に大きく差があることがわかる。これは Table 1 と Fig. 2 より、リビングのみ1階かつ面積が大きいことから、階数もしくは面積の大小が HVAC の動作状態に影響すると考えられる。

3.2 ZEH/非 ZEH 断熱性能比較

本項では、前項での生活スケジュールを適用した場合に加え、ZEH と非 ZEH の2パターンの材質での消費電力削減率を比較し、ZEH の断熱性能を評価する。

ZEH/非 ZEH の材質には文献 [1] と同様のものを持ち、ZEH 住宅には U_a 値 = 0.446 < 0.46 で Heat20 G2 ZEH 基準値を満たす材質、非 ZEH 住宅には U_a 値 = 1.16 > 0.87 で平成 28 年まで定められていた高断熱住宅基準も満たさない材質とする。なお、外皮平均熱貫流率 U_a 値 [W/(m²K)] は ZEH 設計ガイドラインである HEAT20 における断熱性能評価値である [3,4,12,15]。

異なる在室人数スケジュール 10 個において、冬(1月)と夏(8月)それぞれ一か月シミュレーションを行い、“nonZEH(非 ZEH)”、“ZEH”の2つのケースについて温湿度・入力軌道をプロットし、材質の違いによる消費電力削減率を比較検証する。各部屋の平均消費電力削減率を Table 3 に示す。また、シミュレーション結果の一例として、冬(1/2 ~ 1/4)を Fig. 6、夏(8/2 ~ 8/4)を Fig. 7 に示す。

非 ZEH のものと比較し、全体的に ZEH の方が外気温による影響が小さく、スイッチングの際の立ち上がり入力も小さく抑えられている。また、Table 3 より、快適な室温を 25 °C とした場合には、全体的に冬の方が消費電力は大きくなるのがわかる。また、部屋間での削減率の差に傾向はあまり見られなかった。

4 終わりに

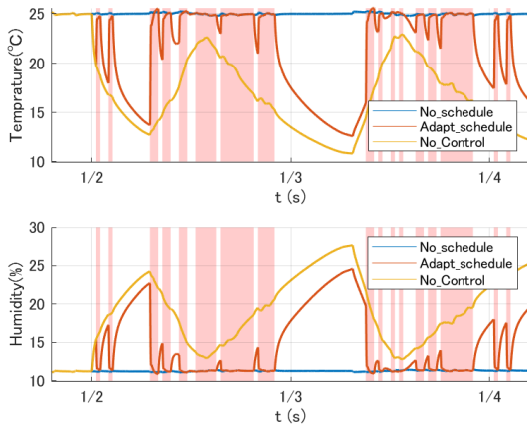
本稿では、構築した ZEH のシミュレーション環境に対し、人の生活スケジュールを適用した HVAC システムの室温制御について検証した。まず、人の生活スケジュールを作成するために 30 分ごとの実消費電力データから人数推定をおこなった。次に、部屋の面積比と利用比から部屋ごとの在室スケジュールを作成し、EnergyPlus 設定定義ファイルである idf ファイルに反映した。最後に改良した ZEH シミュレーション環境を用いて、人の生活スケジュールを適用した場合の節電率と、ZEH/非 ZEH の材質の違いによる消費電力削減率を比較した。「在室状況に応じてスイッチング制御をおこなった場合」は「常に動作状態の場合」に比べて大きな節電効果が確認できた。また、材質の違いによる比較に関しても ZEH 住宅は非 ZEH 住宅に比べて十分な削減効果が確認できた。

Table 2: Average Power Consumption of 10 trials(Schedule Set Comparison)

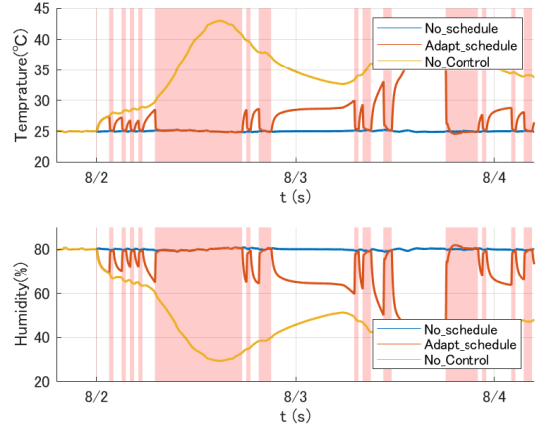
Season	Winter(January)		Summer(August)	
	No Schedule Energy [kwh]	Adapt Schedule Energy [kwh] (Saving)	No Schedule Energy [kwh]	Adapt Schedule Energy [kwh] (Saving)
Living	456.5	288.3 (36.9%)	421.9	337.4 (20.0%)
Bed_Room	228.2	103.3 (54.8%)	213.1	120.1 (43.7%)
Western_Room_1	114.7	45.3 (60.5%)	138.3	77.8 (43.7%)
Western_Room_2	92.9	44.7 (51.9%)	158.7	98.9 (37.7%)

Table 3: Average Power Consumption of 10 trials(Material Comparison)

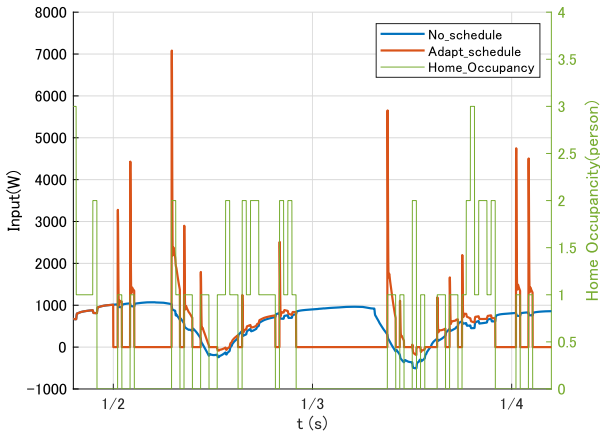
Season	Winter(January)		Summer(August)	
	NZEH Energy [kWh]	ZEH Energy [kWh] (Saving)	NZEH Energy [kWh]	ZEH Energy [kWh] (Saving)
Living	609.1	288.3 (52.7%)	474.2	337.4 (28.8%)
Bed_Room	205.6	103.3 (49.8%)	140.9	120.1 (14.8%)
Western_Room_1	89.0	45.3 (49.2%)	93.5	77.8 (16.8%)
Western_Room_2	76.6	44.7 (41.7%)	131.5	98.9 (24.8%)



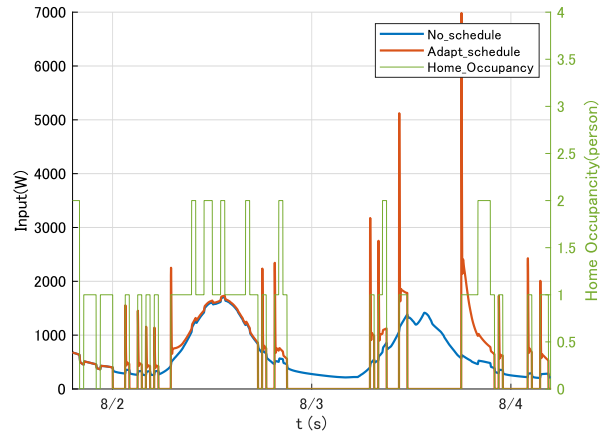
(a) Temp & Humidity (Schedule Set) [JanuaryUp]



(a) Temp & Humidity (Schedule Set) [AugustUp]



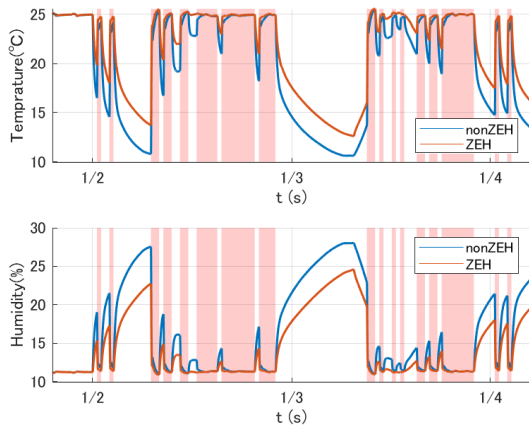
(b) Input (Schedule Set) [JanuaryUp]



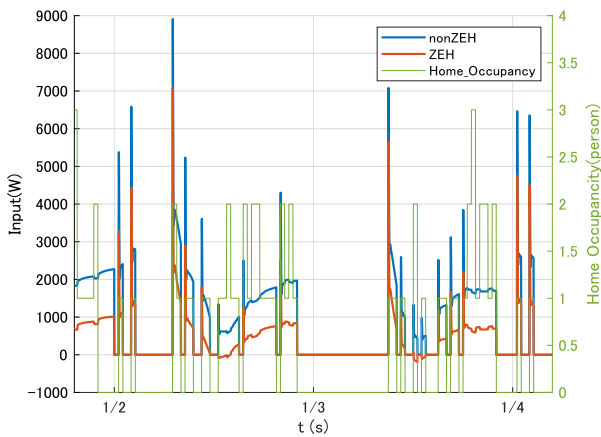
(b) Input (Schedule Set) [AugustUp]

Fig. 4: Schedule Set Comparison in January (Living)

Fig. 5: Schedule Set Comparison in August (Living)

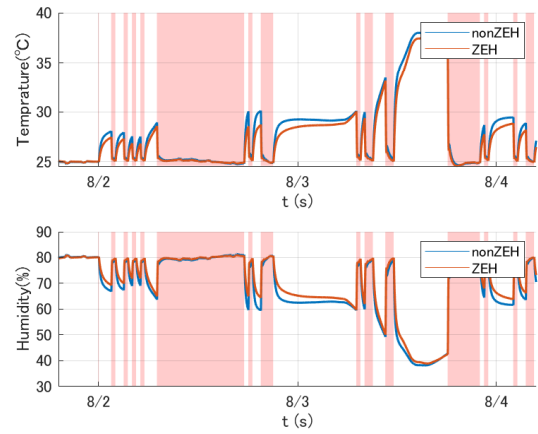


(a) Temp & Humidity (Material test) [JanuaryUp]

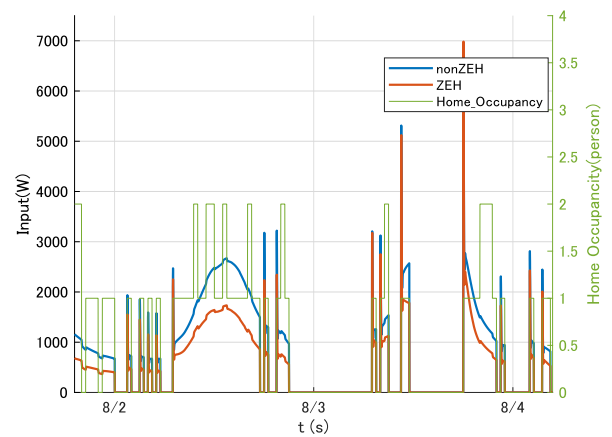


(b) Input (Material test) [JanuaryUp]

Fig. 6: Material Comparison in January (Living)



(a) Temp & Humidity (Material test) [AugustUp]



(b) Input (Material test) [AugustUp]

Fig. 7: Material Comparison in August (Living)

5 謝辞

本稿の成果は、環境省事業で得られた結果に基づく。また、ZEH シミュレーション環境を構築するにあたって図面や材質情報などの資料を提供して下さった牛房義明先生(北九州市立大学)、東宝ホーム様に感謝の意を示す。

参考文献

- [1] Nguyen, 伊東, 李, 平田: 再現可能な検証試験を利用した ZEH シミュレーション環境の標準化に関する研究; SICE 第 11 回制御部門マルチシンポジウム予稿集, 3M7-5 (2024)
- [2] 中山, 田中, 畑中: 消費電力データを活用したスマート照明の節電効果可視化シミュレータの構築; SICE 第 11 回制御部門マルチシンポジウム予稿集, 3M7-6 (2024)

- [3] 上野, 鍵, 白石, 高口, 中野, 望月: しくみがわかる建築環境工学第 2 版, pp. 113–138, 彰国社 (2022)
- [4] 一般社団法人 20 年先を見据えた日本の高断熱住宅研究会: HEAT20 設計ガイドブック 2021 正しい住宅断熱化の作法, pp. 20, 建築技術 (2021)
- [5] J. Kim: Efficient Facility Operation Measures for Zero Energy House to Improve Self-consumption; 早稲田大学大学院創造理工学研究科博士論文 (2020)
- [6] 清水, 立川, 和佐, 畑中, 平田: 計画値同時同量を考慮した地域エネルギー管理システムの実時間分散協調制御; 第 66 回自動制御連合講演会予稿集, 2F1-3 (2023)
- [7] 荒田, 川久保, 岩瀬, 花多山: 非定常 CFD 解析による ZEH 基準相当の高断熱集合住宅における冬季の室内温熱環境の可視化; 日本建築学会技術報告集 28 巻 70 号, pp.1313–1318 (2022)
- [8] D. B. Crawley, et al: “Energyplus: creating a new-generation building energy simulation pro-

- gram”; *Energy and buildings*, vol. 33, no. 4, pp.319–331 (2001)
- [9] W. Bernal, et al: “Mle+: a tool for integrated design and deployment of energy efficient building controls” ; *Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, pp. 123-130 (2012)
- [10] X. Pang, et al: Building energy simulation in real time through an open standard interface; *Energy and Buildings*, Vol. 117, pp. 282-289 (2016)
- [11] X. Pang, et al: The power of diversity: Data-driven robust predictive control for energy-efficient buildings and districts; *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.27, No. 1, pp. 132–145 (2017)
- [12] 城野ゼロ・カーボン先進街区まちづくりガイドライン:
<https://www.city.kitakyushu.lg.jp/files/000133042.pdf>
- [13] Repository of Building Simulation Climate Data From the Creators of the EPW:
<https://climate.onebuilding.org/>
- [14] 地球観測衛星データサイト JAXA-Earth-graphy JPMAP:
<https://www.jpmap-jaxa.jp/jpmap/jp/>
- [15] 国立研究開発法人 建築研究所「平成 28 年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報（住宅）」:
https://www.kenken.go.jp/becc/documents/house/3-3_240401_v22.pdf