

非住宅建築用 ZEB 設計サポートツールの開発 ーZEB 達成条件から建築省エネ指標を逆算「ZEBOpt」ー

1. 背景

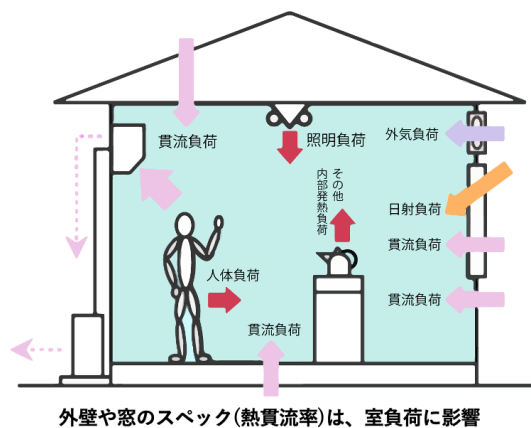
世界の CO₂ 排出量の約 40%が建設業由来と報告されている。対策として、ZEB (Net Zero Energy Building) という年間のエネルギー消費量の収支ゼロを目指した建築物を増築することが世界で推進されており、内閣府公開の脱炭素ロードマップにおいても殆どすべての地域シナリオに ZEB は明記されている。ZEB 実現には、大幅な省エネルギーが必要で、先進的な建築設計によるエネルギー負荷の抑制などが重要となる。

ZEB の評価には、基本設計の段階で行政ツールの WEBPRO による建築省エネ指標の計算が必要となる。算出には複雑な建築仕様を Excel ファイルにまとめる必要があり、算出後に基準値を満たしていなければデザインを再検討した上で改めて作成するという煩雑さを抱えている。また、2024 年から大規模非住宅建築の基準値が引き上げられ、翌年の 2025 年には 300m² 以下の小規模建築も適合対象となる。以上から、人の経験に基づいた従来の設計方法では、エネルギー・コストの観点での最適化は時間がかかり、厳格化する新基準を満たすのも難しいという性急な課題が生じている。

2. 目的

ZEB 建築の設計評価に係る課題を解決し、カーボンニュートラルの実現に貢献することを目的とする。建築省エネ指標の 1 つである BPI (Building Palstar Index) は、外壁や窓といった外皮基準の指標 PAL* により算出される年間熱負荷の基準(建物の断熱性)を示す。図 1 のように、設計時に選択される外壁や窓のスペックが室負荷に影響し、その値により BPI 算出に必要な冷暖房負荷が決定するため、外皮建材の組合せをエネルギーとコストの観点で最適化することが ZEB の実現につながる。また、建材の組合せにおいて素材や色の相性も考慮する必要があるため、量子アニーリング技術を用いることで効率的解くことができると考えた。

以上から ZEB 達成条件から外観デザイン（建材の種類と面積の組合せ）を逆算する事のできる設計サポートツールを開発し、設計者が求める熱性能を満たしつつも外皮の建材コストを抑えられるデザイン検討を、全国の非住宅建築を対象に可能にすることを目指す。



$$BPI = 0.0036 \left\{ \sum_{d=1}^{365} \sum_{r=1}^{N_{room}} (|C_{d,r}| + |H_{d,r}|) \right\} / \underbrace{\sum_{i=1}^{N_{room}} \bar{A}_{room,r}}_{\text{設計PAL}^*} / \text{基準PAL}^*$$

設計PAL* : 年間熱負荷の設計値 [MJ/(m²・year)]
 基準PAL* : 各省エネ地域区分の各建物モデルで基準値が定義
 $C_{d,r}$: 日付 d における室 r の冷房負荷 [Wh/day]
 $H_{d,r}$: 日付 d における室 r の暖房負荷 [Wh/day]
 N_{room} : 外皮を有する室数
 $\bar{A}_{room,r}$: 室 r の外皮から5 mのゾーンの面積 [m²]

図 1: 建物における熱の流れ・BPI 計算式

3. ソフトウェア開発内容

ZEB 達成条件から外観デザインを逆算する事のできる、省エネ建築設計サポートツール「ZEBOpt(ゼブオプト)」の作成に取り組んだ。既往研究を参照に、外観のデザインパターンを建材の種類と使用面積の組合せに落とし込み、省エネかつコストの抑えた建材の組合せを探索する最適化問題を設定した。採択時の目標通り、量子アニーリングソルバーを用いて最適解を探索する API の開発を完了した。そして、API の入出力を試す事ができるデモサイトと、公開予定の Web サービスの UI も作成した。



図 2: プロダクトロゴ

プロジェクトの進め方として、ターゲットである建築設計者を中心に、検討中の WEB サービスの UI を見せながらヒアリングを実施することで要件定義を行った。

D-Wave 及び Fixstars Amplify AE での実験を経て決定した最適化式構成を図 3 に示す。各建材（外壁・屋根・窓材）の種類と選択される面積を変数として、建材コストと BPI の多目的最適化を実施した。

指標開発者である国総研の宮田征門氏に、複雑かつソースが少ない BPI 計算式の、書き起こしと計算式の妥当性検証にご協力いただいた。今回の目的関数の 1 つである BPI の計算式は、多数の分岐と絶対値の要素を含んでいたため、サロゲート関数で定義することで量子アニーリングでの実装を行った。

より実用的な組合せに近づけるため、設計者及び材料研究者の方へのヒアリングを実施することで、建材同士の色と素材の相性に関する準目的関数を定義した。設計者へのヒアリングにより、一般的に違和感のある色の組み合わせに対してペナルティを設

定した。また、材料研究者へのヒアリングにより、素材の性質上結露発生などの不便を誘発する組合せを避けるための準目的関数も設定した。

そして、東西南北屋根の 5 方位に位置する壁・屋根・窓面積が、選択された建材面積の総和と等しくなることを制約条件とした。

最適化式構成

目的関数：

- ・ 外皮にかかる建材総コストとBPI

準目的関数：

- ・ 外壁・屋根材と窓材の色の相性
- ・ 建材の素材の相性

制約条件：

- ・ 設定した建物の各方位(東・西・南・北・屋根)の壁と屋根の面積が選択した建材の面積の総和に等しい
- ・ 設定した建物の各方位の窓面積が選択した建材の面積の総和に等しい

建材の種類と面積が変数

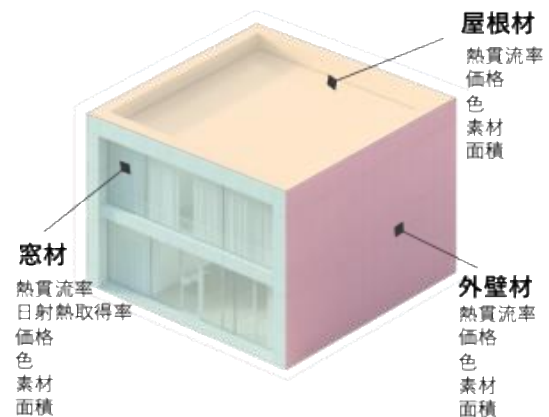


図 3: 最適化式構成と変数概要

D-Wave solver を用いた多目的最適化の結果を図 4 に示す。

左図の実験では、多目的最適化の目的関数である BPI の重みを連続的に変更させた時の、建材コストと BPI の推移を記録した。実験にあたって、建材の代表的な物性値と価格情報をもとにモックデータを作成し、変数として使用した。その結果、全ての設定条件において、各方位の面積制約は守られた上で、最適化結果を確認することができた。

右図の実験では、色の相性に関する準目的関数の重みを連続的に変化させた時の、建材コストと BPI の推移を記録した。その結果、重みの変化に応じて、建材コストと BPI は一定のまま、選択される建材の色の変化を確認することができ、より実用的な最適化結果を得ることができた。

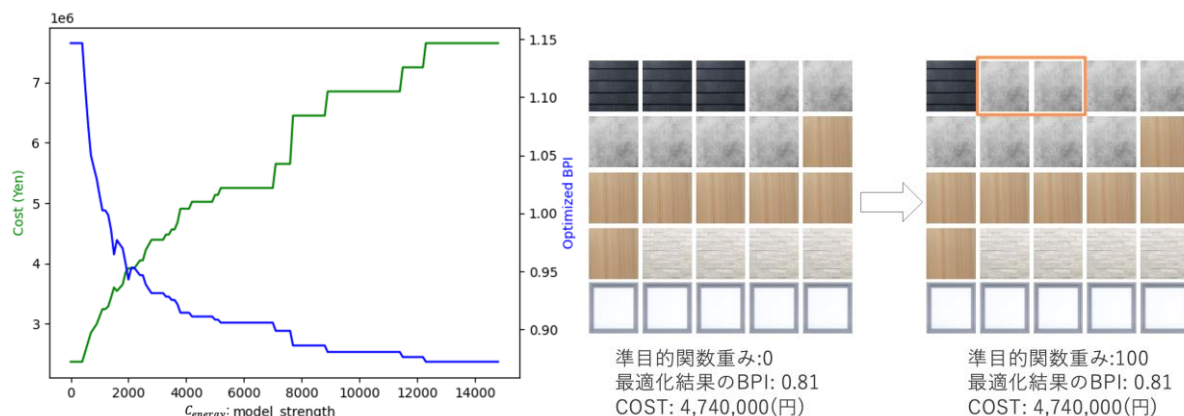


図 4: D-Wave solver を用いた多目的最適化の結果

作成した API の入出力結果を図 5 に示す。設計者へのヒアリングで得られた要望を反映させた将来的な Web サービスの UI(図 6)も作成した。

都道府県	愛知県
市町村	名古屋市
建物名	テスト
建物タイプ	事務所モデル
建物高さ (m)	5
建物横幅 (m)	10
建物奥行き (m)	10
各方位の開口率(%)	20
最適化を実行する	

建物設定値：総外壁面積240, 総窓面積60
計算結果：総外壁面積240.0, 総窓面積60.0
計算結果：選んだ材料の面積の総和300.0
テストの 愛知県 / 名古屋市 における値は BPI: 0.72, その時の外皮総費用は3759480円です。

北面 南面 西面 東面 屋根

	name	area	u_value	shgc	price	color
1	outer-wall-1	10	1.4	0	12,852	black
2	outer-wall-1	10	1.4	0	12,852	black
3	outer-wall-1	10	1.4	0	12,852	black
4	outer-wall-1	10	1.4	0	12,852	black
0	window-4	10	1.6	0.3	11,250	blue

図 5: 非住宅建築用設計サポートツールの API デモ

設計者の方へのヒアリングにて、入出力項目を随時検討中

The UI displays a '4 解析結果 RESULT' section with four cards showing BPI values (0.68, 0.79, 0.59, 0.79) and associated costs. Below this is a 'Material mix' section with a 'Combination' diagram and a 'Cost' gauge showing a total of ¥3020万円. The 'Material mix' section includes images of various materials like '外壁 40u' and '外壁 60u'.

ユーザーの入力データ

必須入力項目
省エネ評価地域区分
建物タイプ
建物高さ
建物横幅
建物奥行き
建物階数

任意入力項目
各方位の開口率
予算
BPI値
外壁の希望色
窓の希望色

出力項目

建材組合せ・建築省エネ指標(BPI)・外皮コスト
● 指定建材・最安値・BPI最も低い・ハイクラス
バランス・リクエストカラー・類似建材

追加予定機能

● BEI評価、ZEB事例共有機能、建築総コスト予測

使用する建材のデータ

外壁・屋根材
名称
単位面積あたりの価格
熱貫流率
色
素材名

窓材
名称
単位面積あたりの価格
熱貫流率
日射熱取得率
色
素材名

図 6: Web サービスの UI と利用予定のデータ一覧

4. 新規性・優位性

ZEB 設計ツールの市場状況を図 7 に示す。指標計算の自動化に加え、建材の組合せ検討に対応したツールは現状ないため、新規性の高い提案だと考える。

優位性は2点あり、まず、人の経験よりも広範囲な省エネ・コスト検討に基づいて外観デザインを行うことができる。また、デザイン検討と認証計算を同時に行うことができるため、指標計算のための手動入力での既存労力を削減し、今後の基準引き上げによる現場負荷にも対応できる。

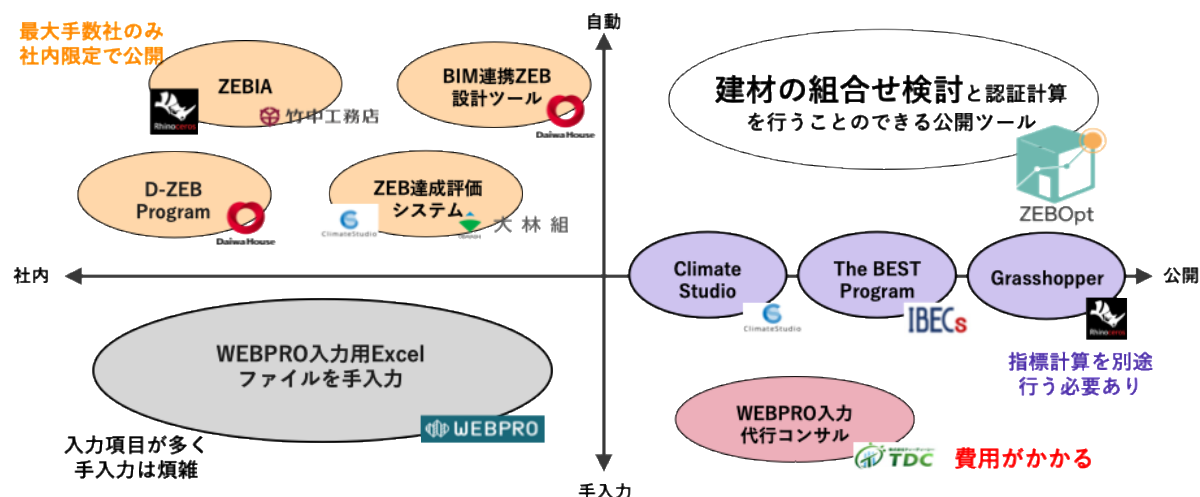


図 7: ZEB 設計ツール市場概要

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

今後の展開にあたってのターゲットは、自社ツールを持たない企業、特に基準引き上げにより新たに評価対象となる床面積 300 m²以下の小規模非住宅建築を設計している企業を予定している。

現状、一部企業を除いた多くの企業において、省エネ指標算出のために必要な複雑な建物仕様ファイルの手作業での入力、または入力代行サービスの利用が行われている。そして、今後新基準への対応に迫られる設計者が更に増えることを踏まえても、ZEBOpt を公開することは、カーボンニュートラル社会実現への貢献に留まらず、図 8 で示すように、建設業界の省人・省力の観点においてもインパクトがあると考える。

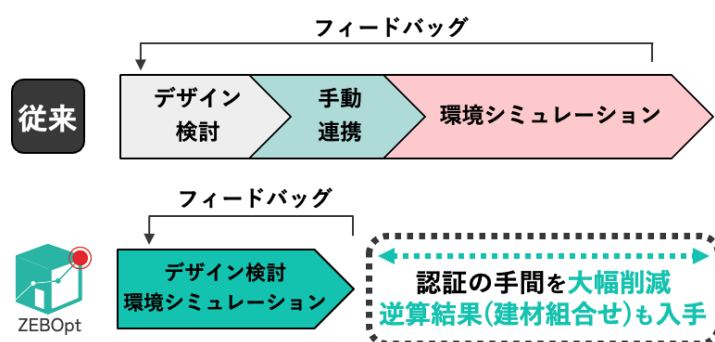


図 8: ZEBOpt の優位性



参照: デモ QR

6. 氏名（所属）

豊田章一郎（日本マイクロソフト株式会社）

豊田鈴（株式会社メルカリ）