原著論文

SPEA2を用いた既存学校建築リノベーションの設計支援システムに関する研究†

林 将利 *1・永井 拓生 *2・新谷 真人 *3

本論文では、既存学校建築のリノベーション設計支援システムを提案する。既存学校建築の多くは、耐震性の問題と建築計画上の機能的な問題を有している。これらの問題を同時に解決するため、多目的遺伝的アルゴリズムを用いた設計支援システムを提案する。本手法の対象として、実在する既存学校建築と地域や児童数などの背景を考慮し、(i) 余裕教室を利用した躯体維持モデル、(ii) 既存校舎を利用した躯体増築モデル、(iii) 廃校施設を利用した躯体減築モデルの3種類を設定する。これらのモデルに対しそれぞれ耐震性および計画的な要求を考慮したリノベーションの最適化問題を定式化し、既存学校建築のリノベーション要求に適合する複数の設計可能な解を提示することを目的とする。

キーワード：設計支援、多目的最適化、学校建築、リノベーション

1. 序

我が国では戦後、当時不足する学校建築の整備が急がれた。そのため画一的ではあるが「片廊下一文字型」RC造の学校建築が普及し(図1)、現在もその多くが継続的に使用されている[1]。一方、近年において新設された学校建築は、多様な学習形式に対応すべく、教室以外にもオープンスペース(以下OS)等を設けることで画一的な形態からの脱却を図る傾向にある[1]。現代の学校建築計画の実例として、戸田市立芦原小学校では特別教室を配した2階の階高を通常より1m高い4mとし、加えて外部との境界をほとんどガラスとすることで従来の均質的な学校建築から脱却した開放的な内部空間と不均質な表層を形成している(図2)。

しかし、1981年以前に設計された耐震性が問題となる学校建築については、多くの場合、耐震性能の向上のみを目的とした耐震改修がなされ、現代要求される学校機能には対応できていないとも言えない。また、少子高齢化が進む中、生徒数減少による余裕教室や廃校の発生という問題も生じている。こうした状況下で、今後リノベーションによる学校建築ストックの社

図1 「片廊下一文字型」の学校建築校舎外観

図2 戸田市立芦原小学校校舎外観

会的資産価値向上は責務とされる。

そこで本研究では、最適化手法として多目的遺伝的アルゴリズム(Multi-Objective Genetic Algorithm: 以下MOGA)を用い、耐震性能に加え建築計画を考慮したリノベーションの設計支援システムを提案する。また本手法の適用例として、実在する既存小学校をモデルとし、リノベーションの設計可能解として提示する。

近年の建築計画系分野においては、視覚的形態が人間の行動や心理に及ぼす影響を客観的に評価し、計画に反映させようという研究がなされてきている[2]。このような計画的な要求の評価方法が確立されれば、耐震性の向上のみを目指した「耐震改修」だけでなく、機能の更新と計画的な要求を満足させる「リノベーション」をシステム化して扱うことが可能と考えられる。

† A Study on Supporting System for Regeneration of Existing School Buildings by SPEA2

Masatoshi HAYASHI, Takuo NAGAI and Masato ARAYA

*1 早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻
Department of Architecture, Waseda University

*2 滋賀県立大学環境科学部 助教
Assistant Prof., The Univ. of Shiga Prefecture

*3 早稲田大学理工学術院 特任教授
Prof., Faculty of Science & Engineering, Waseda Univ.

図3 S小学校基準階平面図

表1 S小学校のIs値

	x 方向	y 方向
1 階	0.39	0.48
2 階	0.53	0.66
3 階	0.98	1.20

図4 S小学校構造アイソメ図

2. リノベーションモデルの設定

本論文では、典型的な「片廊下一文字型」の学校建築であるRC造地上3階建のY市立S小学校(図3)をモデルとし、学校建築への要求の変化を考慮した3種類のリノベーションモデルに対しての条件設定を行う。S小学校の東側旧校舎は西側新校舎とエキスパンションジョイントで構造的に分離されており(図4)、老朽化も進行している。また北側の柱は垂壁、腰壁により極短柱となっていることも問題点として挙げられる。そこで、S小学校の東側旧校舎に対して既存の柱・梁・スラブを活用したリノベーションを行う。なお、耐震壁は自由に新設することができるとする。

Model-1 (図5,6)

比較的小規模な改修を前提としたモデルである。生徒数が減少している地域を想定し、必要教室数の減少により生じた余裕教室を有効利用することを機能的な目的におき、その空間をOSとして活用する。耐震補強は耐震壁配置を変更することによって行い、建物内部に耐震壁を配置するが、OSや教室の開口を塞ぐことがないような配置計画とする。

図5 Model-1の構造アイソメ図

図6 Model-1の基準階平面図

図7 Model-2の構造アイソメ図

図8 Model-2の基準階平面図

Model-2 (図7,8)

増築を含む、中規模な改修を前提としたモデルである。生徒数に大きな変化がなく、今後もそれほどの変化が見込まれない都心地域を想定し、増築による空間拡大を行うことでOSを設置する。増築部は校庭に面した側に各階2教室分配置し、地震力の伝達が行えるよう既存躯体と接続して耐震補強に活用する。既存躯体に設置される耐震壁の量を減らすことで、より自由な空間構成を目指し、また画一的な「片廊下一文字型」からの変化が期待される。

Model-3 (図9,10)

建物規模の縮小や柱の撤去等を含む、大規模な改修を前提としたモデルである。廃校となった学校施設を地域のコミュニティーセンターへと用途変更を行う。一部の屋根・床スラブの削除により建物重量が低減されるため、構造の補強を最小限に抑えることができ

図9 Model-3の構造アイソメ図

図10 Model-3の基準階平面図

る。また、不要な柱の撤去等もあわせて行うことで、既存の学校建築のグリッドでは実現できない空間構成も可能である。

3. リノベーション設計支援システムの提案

3.1 設計支援システム概要

現状の耐震改修の設計の流れは、耐震診断・補強目標の設定がなされた後、耐震補強案が示され、その案に建築計画上の問題がないか判断する、という流れが一般的である。すなわち、建築の空間や機能については2次的な扱いとなっており、耐震補強が優先された設計システムとなっていると言える。

しかし、学校建築には耐震性能以外にも様々な要求があり、生徒数の長期的な増減、教育システムの革新の可能性も考慮した長期的視座に根ざした計画を行わなければ、結局は現状の学校建築が抱える問題を将来に引き伸ばしているに過ぎない。よって、工期・コストの問題を解決しながらも耐震性と並列に現代の教育に適するように建築空間の質を向上させる必要がある。

以上のようなリノベーションを実現するためには、複数の項目を並列に評価することができるシステムが必要である。そこで、本論文ではMOGAの解法としてPareto最適解集合の探索性能が特に優れているSPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) [3]を用いた設計支援システムを提案する。本システムはリノベーション基本計画段階での設計支援を想定し、開口を有した耐震壁の選択及び配置と構造躯体の増減を設計変数として最適化計算を行い設計可能解として提示する。

3.2 多目的最適化問題の定式化

目的関数

Is 値をもとに算出する耐震性能指標 f_1 と建築計画上の評価値として定義する空間性能指標 f_2 を考慮し、次式の多目的最適化問題を考える。

$$\text{minimize } f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) = \frac{1}{\frac{1}{n \cdot m} \sum_i^n \sum_j^m Is_{ij}} \\ f_2(x, y) = \frac{1}{F \cdot \gamma} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x, y は設計変数ベクトル、 Is_{ij} は i 階 j 方向の Is 値、 F は開口率パラメータ、 γ はペナルティ関数を表す。 Is 値は第2次診断法[4]に基づき計算を行った。目的関数においては Is 値の各階・各方向の平均値を採用しており、本論文はそのばらつきを評価対象としない。

制約条件

Is 値が0.7未満であるモデルは、算定した Is 値を半減させることで、目的関数としての評価値を低減する。

また、各モデルの教室配置や動線計画、階段室の場所によって、あらかじめ耐震壁の設置箇所を制限する。教室の必要開口面積である床面積の1/5以上を確保できていないモデルに関しては再モデル化を行う。

設計変数

モデルの表層を成す桁行方向(Y1, Y3)の耐震壁は要素ごとに3ビットを与え、無開口耐震壁の有無、及び

図11 設計変数のコード化

桁行方向 (Y1, Y3)				桁行方向 (Y2)	
000		100		00	
001		101		01	
010		110		10	
011		111		11	

図12 桁行方向の耐震壁の形状

開口形状の異なる6種類の有開口耐震壁を設計変数とする。動線の確保が必要となる教室一廊下間の桁行方向(Y2)では要素ごとに2ビットを与え、ドア開口を設けた耐震壁の有無及び開口形状の異なる2種類の有開口耐震壁を設計変数とする(図11, 12)。また、教室一教室間となる張間方向の耐震壁は要素ごとに1ビットを与え、無開口耐震壁の有無を設計変数とする。

耐震壁の配置位置

1階の西側から桁行方向・張間方向の順に壁番号を与え、番号順に指定したビットずつ設計変数をコード化することで耐震壁の配置位置を決定していく(図13)。

増築部の配置位置

増築部は1学年3クラス+オープンスペースを1つのユニットとし、その増築位置を設計変数として各階ごとに最適化する。増築部分の配置として3通り(西側増築部)×2通り(東側増築部)の計6通りが考えられるため、各階3ビットずつ設計変数として与える。

減築部の配置位置

減築部はまず3階部分から4500×7000mmを9スパン撤去する。撤去した9スパンからさらに2階部分を2スパン撤去する。ゾーニングが簡易に計画できるよう3階部分の減築位置、2階部分の減築位置にはあらかじめ制約を与え、各階ともに7通りの減築位置が考

図15 減築部の配置位置

えられる。よって、各階3ビットずつ設計変数として与える。3階部分の減築位置をCASE-3とした際の2階部分の減築位置7通りを以下に示す。減築がなされた天井スラブはテラスとして利用可能とし、内外部の空間にバリエーションを持たせることを目的とする。

3.3 空間性能の評価方法

空間性能指標の定式化

空間性能指標においては、施主や設計者の判断に基づき任意に選択・設定が可能である。本論文においては、耐震性能指標と対をなす値となるよう、耐震壁の開口面積と配置数を相互に組み込んだ評価値および開口形状を定量的に扱ったペナルティ関数を設定する。

次式では建物の開口量を増大させるとともに、開口を有する耐震壁も一定量確保し得よう定式化を行い、開口率パラメータ F として評価することとした。

$$F = \frac{A_O}{A_W} \times \left(1 - \frac{P_W}{m \cdot n} \right) \quad (2)$$

ここで、 A_O は開口面積、 A_W は外壁の総面積、 P_W は耐震壁の配置数、 m は耐震壁の配置可能位置数、 n は建物階数を表す。

ペナルティ関数

児童生徒が指向する教室空間の実現を目指し、開口

図13 桁行方向の耐震壁配置位置 (Model-1)

図14 増築部の配置位置

図16 魚眼レンズによる撮影

形状を定量化したペナルティ関数を導入する。西野ら[5]は人の視野角に近いと言われる魚眼レンズ(図16)を使用し、その見え方を検証することで空間性能の定量化を行っている。様々な場所において視野角内の開口量を測定し、その変化が大きい箇所(変質点)に生徒が集まるとされており、生徒が指向する教室空間の実現には変質点の配置が重要であるとされている。本論文ではこの調査を参考として、リノベーション最適化問題の目的関数に組み込むことを試みる。

立面的に表れる耐震壁の開口部の形状を定量化し、変質点の創生として異なる開口形状を有する耐震壁の不均質な配置をペナルティ関数に変換することで空間性能指標として扱う。

ペナルティ関数とは、ある情報やデータを持つ個体が設計者の要求性能を満たしていない場合に目的関数に罰則を与える値であり、目的関数を直接低減あるいは増大させることによって、望ましくない個体を淘汰することを目的としたものである。

開口形状を表す指標として、開口面積と開口周長の相互を評価した円形度 C (Circularity) を(3)式で算定し、それらの変動係数(Coefficient of variation: COV) をペナルティ関数 γ として(4)式から求めることで開口形状のばらつきを評価する。円形度とは、図形が真円のとき最大値1をとり、細長い場合や複数に分かれている場合は0に近づくパラメータであり、この逆数を複雑度と呼ぶ。

$$C = \frac{4\pi A_o}{L_o^2} \quad (3)$$

$$\gamma = COV(C) \quad (4)$$

ここで、 A_o は耐震壁の開口面積、 L_o は耐震壁の開口周長を表す。開口形状を定量化するにあたり用いた円形度について、以下に具体例を示す(図17)。直径2の円の面積は π であり、同面積の正方形の1辺の長さを x とすれば $x \approx 1.77$ となり、正方形の周長は $4x \approx 7.09$ となる。一方、円の周長は $2\pi \approx 6.28$ であり、矩形の中で最も周長の短い正方形の円形度は $C \approx 0.785$ となる。また、矩形を細長くしたり、複数に分裂させた

図17 円形度の具体例

図18 4つの例題に対するペナルティ関数

りした形状に対しての値を以下に示すと、円形度は0に近づくことがわかる。このように、同面積であっても周長の異なる形状を的確に判断できる指標である。

ペナルティ関数の確認例題

以上に定義したペナルティ関数と、実際の立面形状との関係について例題を示す。対象となる学校建築の南面に対して4つのモデルを想定し、ペナルティ関数の値を算出した(図18)。モデル1とモデル2、3を比較すると後者のペナルティ関数が高い。また、耐震壁配置・開口形状ともに複雑な形状を有しているモデル4のペナルティ関数が一番高い値を示している。

4. リノベーションモデルの性能評価

4.1 概要

以上に述べたリノベーション設計支援システムをModel-1～Model-3に適用した結果を以下に示す。図19はModel-1のPareto解の形状を示している。それぞれにおいてNo.1は耐震性能の評価値に、No.3は空間性能指標の評価値に特化した解の例であり、またNo.2では両者の評価値が平均的な解を例示している。

4.2 適用結果

適用結果を見ると、意匠上の目的関数およびペナルティ関数を組み込んだ事で異なる複数の設計解が得られ、モデルの形状にかなり影響していることがわかる。設計案が複数提示される本システムは、リノベ

表2 MOGAパラメータ

個体数	Population	100
世代数	Generation	100
交叉率	Probability of Crossover	1
突然変異率	Mutation rate	0.02

表3 Model-1の適用結果

	No.1	No.2	No.3
	x方向 y方向	x方向 y方向	x方向 y方向
Is 値	1階 1.20 1.08	1階 0.97 1.08	1階 0.81 1.08
	2階 1.20 1.12	2階 1.18 1.12	2階 0.98 1.12
	3階 1.20 1.08	3階 1.19 1.08	3階 1.04 1.14
f_2	0.030	0.023	0.021

図19 Model-1のPareto解

表4 Model-2の適用結果

	No.1	No.2	No.3
	x方向 y方向	x方向 y方向	x方向 y方向
Is 値	1階 1.19 1.16	1階 0.75 0.98	1階 0.70 0.82
	2階 1.19 1.19	2階 1.13 1.15	2階 0.80 1.08
	3階 1.19 1.18	3階 1.19 1.16	3階 1.18 1.16
f_2	0.033	0.024	0.022

表5 Model-3の適用結果

	No.1	No.2	No.3
	x方向 y方向	x方向 y方向	x方向 y方向
Is 値	1階 1.11 1.06	1階 0.81 1.06	1階 0.71 0.85
	2階 1.20 1.14	2階 0.95 1.19	2階 0.80 1.00
	3階 1.16 1.11	3階 1.18 1.11	3階 1.12 1.11
f_2	0.025	0.022	0.020

図20 Model-1の設計可能解

図 21 Model-2 の設計可能解

図 22 Model-3 の設計可能解

ションの基本設計段階における設計者側の選択の幅を広げることにつながる。また目的関数として組み込む数値を適宜変更すれば、エスキスツールとしても有用である。

5. 結語

本論文では、耐震性能向上に特化した現状の学校建築の改修における問題点と空間機能への要求を整理した。次に耐震性能としてIs値、空間性能としては開口

の量と形状を目的関数として組み込んだ最適化問題の定式化を行い、リノベーション設計支援システムの提案を行った。最後に、実在する小学校建築をモデルとして支援システムの適用例を提示した。

また本手法をもととすれば、リノベーションを行う際に問題となることが多いコストや工期に対しても、計画学的要求を取り入れつつ、より合理的な設計解を示すことが可能であると思われる。今後は、詳細な学校建築への要求事項の整理、構造的な側面からの建物価値向上の可能性を追求し、より有効な学校建築リノ

バージョンの設計支援システムの開発を行っていきたいと考えている。

参 考 文 献

- [1] 学校再生プロジェクトチーム：学校建築を活かす－学校の再生・改修マニュアル，首都大学東京 21 世紀 COE プログラム，2007.8
- [2] たとえば，脇坂圭一，本江正茂，小野田泰明：生態学的空間記述方法としての遮蔽縁シーンプックの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），E-1，建築計画 I，pp.799-800，2008.7
- [3] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele.: SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. In Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH)

Zurich, 2001.5

- [4] 国土交通省住宅局建築指導課 監修：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，日本建築防災協会，2001.10
- [5] 西野安香，稲垣淳哉，古谷誠章：学校空間研究－オープンペースにおけるクロズドスペースと児童の指向する場との相関－，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），E-1，建築計画 I，pp.403-404，2009.8
(2010 年 12 月 20 日 受付)
(2011 年 3 月 1 日 採録)

[問い合わせ先]

〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1
早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻
林 将利
TEL：03-5286-2894
E-mail：masa.h.407@akane.waseda.jp

著 者 紹 介

はやし まさとし
林 将利 [非会員]

2012 年早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻修士課程修了見込。2012 年卒設計入社予定。在学中は多目的遺伝的アルゴリズムを用いた既存学校建築の耐震改修及び設計支援システムに関する研究に従事。日本建築学会会員。

ながい たくお
永井 拓生 [非会員]

2005 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了，2008 年早稲田大学大学院博士後期課程単位取得退学。2006～2009 年早稲田大学理工学術院建築学科専任助手。2009 年永井構造計画事務所設立。早稲田大学理工学研究所嘱託，東京大学生産技術研究所準博士研究員を兼任。2011 年滋賀県立大学環境科学部助教。永井構造計画事務所設計顧問。修士(工学)。日本建築学会会員。同学会構造委員会シェル空間構造創生小委員会委員。

あらや まさと
新谷 真人 [非会員]

1969 年早稲田大学大学院理工学部研究科建設工学建築構造専修課程修了。1969 年木村俊彦構造設計事務所入社。1971 年卒設計入社。1982 年オーク設計事務所設立，代表取締役エンジニアパートナー。1995 年オーク構造設計設立，オーク構造設計取締役。2000 年東京大学大学院新領域創成科学研究科非常勤講師，慶應義塾大学大学院開放環境研究科非常勤講師，早稲田大学芸術学校非常勤講師。2006 年早稲田大学理工学術院特任教授。著書に「モダンストラクチャの冒険」(共著)，「構造計画」(共著)，「現代建築家シリーズ-木村俊彦」(共著)，「魅せる力学」(共著)，「FACADE ENGINEERING」(共著)，「挑戦する構造」(共著)。日本建築学会会員。日本建築構造技術者協会正会員。

A Study on Supporting System for Regeneration of Existing School Buildings by SPEA2
by

Masatoshi HAYASHI, Takuo NAGAI and Masato ARAYA

Abstract :

In this paper, supporting system for regeneration of existing school buildings is proposed. Many existing school buildings have problems of seismic performance and function. To solve these problems at the same time, it proposes the design supporting system with Multi-Objective Genetic Algorithm. The conditions to solve these problems are presented as follows: (i) the number of student remains, (ii) making extensions to a building for setting up multipurpose rooms, (iii) conversion of school buildings. The problems of seismic performance and function for regeneration are formulated respectively for these models. Finally, it aims to present the solution that can be designed and suit the regeneration demand of the existing school buildings.

Keywords : Supporting System, Multi-Objective Optimization, School Building, Regeneration of Existing Building

Contact Address : **Masatoshi HAYASHI**

Department of Architecture, Wasada University
3-4-1, Ohkubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555, JAPAN
TEL : 03-5286-2894
E-mail : masa.h.407@akane.waseda.jp