

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04470

研究課題名(和文)CFD解析用・高速進化型遺伝的アルゴリズムを用いた最適化

研究課題名(英文)Optimization using fast evolutionary type genetic algorithm for CFD analysis

研究代表者

河野 良坪 (KONO, Ryohei)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90572222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CFD解析を評価関数として扱うGAについて、従来の「交叉」の代わりに随伴変数法を適用する方法を提案する。一度の解析で全ての設計変数の勾配を計算可能な随伴変数法から、風速が目標値に近づく可能性の高い遺伝子配列(設計変数)を創り、各世代の最良な遺伝子配列より更に優秀になる遺伝子配列を常に競争相手として採用することで、従来のGAよりも少ない世代数での最適解到達を試みた。以下の2点について提案手法を適用した。併せて、随伴変数法に関する基礎的検討も実施した。

- ・「屋外における強風低減を目的とした障害物配置の最適化」
- ・「屋内における通風性能向上を目的とした開口部配置の最適化」

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数のGAロジックを試行した結果、設計変数の変化に対する物理量変化(勾配)の比を算出可能な随伴変数法を用いて交叉解を生成した場合には、最適解到達世代数が減少して探索効率が向上した点を示したことに学術的意義がある。併せて、随伴変数法は現状の解に近い局所的最適解を導く手法であるが、GAの一部として用いることで大局的最適解の導出に寄与することが可能となる点にも学術的意義がある。また、GAの高速化が可能となることで、実設計においても従来では考えられないケース数の計算を実行した場合と同等の最適解の算出が可能となり、新たな「Computational Design」の実現が可能となる点に社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, a method is proposed to apply the adjointed variable method instead of the conventional "crossover" for GA that treats CFD analysis as an evaluation function. From the adjointed variable method that can calculate the gradients of all design variables in one analysis, a gene sequence (design variable) with a high possibility is created. By always adopting a gene sequence that will be even better than the best gene sequence of each generation as a competitor, it is tried to reach the optimum solution with a smaller number of generations than conventional GA. The proposed method was applied to the following two points. At the same time, a basic study on the contingent variable method is also conducted.

1. "Optimization of obstacle placement for the purpose of reducing strong winds outdoors"
- ・ "Optimization of opening arrangement for the purpose of improving ventilation performance indoors"

研究分野：建築環境工学

キーワード：遺伝的アルゴリズム CFD 随伴変数法 逆解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

最適化手法の代表として、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm 以下、GA）が挙げられる。生物の進化過程になぞらえ、環境適応度（＝評価関数の値）が低い遺伝子配列（＝設計変数）は淘汰され、環境適応度の高い遺伝子配列が生き残るアルゴリズムである。建築環境工学の分野でも GA は活用されるが、評価関数に風の流れを予測する CFD（Computational Fluid Dynamics）解析を用いた研究は少ない。CFD 解析は風の流れや温度分布を立体的に捉えることが可能で、設計との親和性も良く、実物件での活用例も多く見られる。しかし、CFD 解析は 1 ケースの計算に要する時間が他の解析に比べて長い為、多数の解析を扱う GA における活用が困難であり、既往の研究でも数百ケースの解析実行が限度であった。最適化における計算時間の軽減は、今後 GA を実設計に適用する上で大きな課題といえる。

この課題に対して、研究代表者らが着目している項目の一つに「アルゴリズムの高速化」が挙げられる。一般に GA では性能が高かった遺伝子配列をベースとして、優秀な配列が生き残る「選択」、優秀な配列同士を掛け合わせた「交叉」、優秀な配列の一部をランダムに変化させた「突然変異」により次世代の遺伝子が決定される。つまり、優秀な配列からの交差や突然変異により生まれた配列が新たな競争相手として出現する。しかし、「交叉」の結果、新たに創られた遺伝子配列がより優秀になるとは限らない。CFD 解析を評価関数とする GA に適した「交叉」に代わるアルゴリズムを何とするかが本研究の問いである。

2. 研究の目的

CFD 解析を評価関数として扱う GA について、従来の「交叉」の代わりに随伴変数法を適用する方法を提案する。一度の解析で全ての設計変数の勾配を計算可能な随伴変数法から、風速が目標値に近づく可能性の高い遺伝子配列（設計変数：計算ケースに相当）を創り、各世代の最優秀な遺伝子配列より更に優秀になる遺伝子配列を常に競争相手として採用することで、従来の GA よりも少ない世代数での最適解到達を試みる。CFD 及び逆解析には株式会社アドバンスドナレッジ研究所製 FlowDesigner を使用する。本研究における GA の具体的な検討対象を以下に示す。

- (1) 「屋外における強風低減を目的とした障害物配置の最適化」
 - (2) 「屋内における通風性能向上を目的とした開口部配置の最適化」
- また、交叉に用いる随伴変数法に関する基礎的検討として以下について検討する。
- (3) 「室内換気効率の向上を目的とした逆解析による流入流出面の最適配置」
(本報告では頁数の制約により割愛する。)

3. 研究の方法

- (1) 「屋外における強風低減を目的とした障害物配置の最適化」

風速低減を目的とした 2 つの障害物の最適配置を対象に、交叉を用いた提案型 GA の探査効率の向上を目標とした基礎的検討を行う。解析条件を表 1 に示す。

・GA の探査効率の検証

逆解析に従い 2 つの障害物を移動させた結果、元々離れていた障害物同士が接する場合（或いはその逆）には、気流場が大きく変化する可能性がある。逆解析は現状から少し変化させた場合での解を予測するため、気流が大きく変化する場合には、予測精度低下が起り得る。

本報では 1.0m 角障害物（1.0m×1.0m×2.0m）と常に障害物間が離れる 0.5m 角障害物（0.5m×0.5m×2.0m）の最適配置について、移動幅を 1.0m と 0.5m とした場合を GA で探査し、逆解析を用いた提案型 GA の探査効率を検証する。

① 解析概要（解析領域を図 1 に示す。）

解析領域（28.0m×21.0m×20.0m）中央風上側寄りの評価領域（1.0m×1.0m×1.0m）内風速を低減させるための 2 つの障害物の最適配置を GA で検討する。計算時間の都合で障害物が移動可能なグリッド（1.0m 角 or 0.5m 角）領域を中央部（5.0m×5.0m）に限定する。障害物はいずれか 2 グリッドに設置される。1 つ目の障害物（障害物 A）が X 方向に○番目、Y 方向に△番目、2 つ目の障害物（障害物 B）が X 方向に□番目、Y 方向に×番目に在る場合を [X○-Y△_X□-Y×] と表記する。評価領域は [X4-Y4] に設置される。評価領域に設置されるケースと障害物同士が重なるケースは除き、移動幅 0.5m では総個体数 2,336 ケース、移動幅 1.0m では総個体数 276 ケースの探査を比較対象とする。

② 逆解析の効果の検討

提案型 GA では評価領域の風速を下げることを目標とした逆解析を実施し、算出された位置感度に従い障害物を移動させて、交叉解を生成する。逆解析前の個体と逆解析で算出された位置感度に従い移動させた個体とを比べ、評価領域内風速が低減した個体を「効果あり」とする。

1.0m 角障害物・移動幅 0.5m とした場合を例示すると、片方のみ移動では「効果あり：60%、効果なし：17%、移動対象外：23%」、両方移動では「効果あり：47%、効果なし 12%、移動対象外：41%」となった。効果ありの全体割合は効果なしの割合より十分に高い。

表 1 解析条件

解析領域	28m(X)×21m(Y)×20m(Z)	
境界条件	流入境界	べき乗則 ($\alpha = 0.2$)
		風速: 2m 高さにおいて 2m/s
	流出境界	風向: 西
		自由流出
側面	地物表面: 一般化対数則	
	天空面: Free slip	
格子	構造格子	
不足緩和	1,363,200 (X:160, Y:120, Z:71)	
乱流モデル	0.9 [-]	
離散化	修正 L-K モデル	
アルゴリズム	有限体積法	
移流項差分スキーム	SIMPLEC	
収束判定	CFD 解析	QUICK
		10^{-5} から 10^{-6} の範囲 (全て計算回数 500 回)
		逆解析 10^{-5}
逆解析条件	評価領域内の目標値	0m/s に近づける

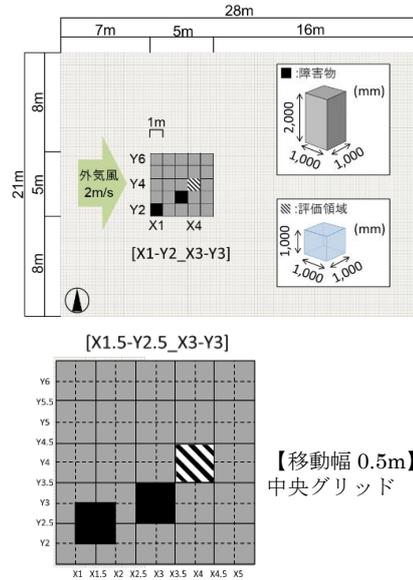


図 1 解析領域 (平面図) 【移動幅 1.0m】

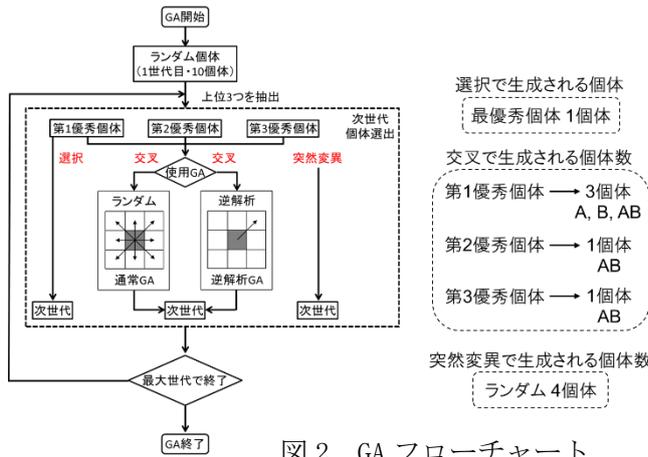


図 2 GA フローチャート

③ GA の概要 (フローを図 2 に示す。)

GA では 1 世代の個体数を 10 とする。初期個体についてはランダムに決定する。その個体の中から第 3 優秀個体までを選択し、それぞれの交叉を生成する。(交叉は本来、GA の交叉は 2 個体を組み合わせるが、本検討では、優秀な個体を少し変化させる簡易的な扱いとしている。) 第 1 優秀個体からは、両方の障害物を移動させた場合と障害物 A のみを移動させた場合、障害物 B のみを移動させた場合の 3 パターン

の交叉を生成させる。第 2 優秀個体及び第 3 優秀個体からは A, B 両方の障害物を移動させた場合の 1 パターンずつを生成させる。次世代では現世代の第 1 優秀解を継承された個体 (1 個体) と上述の交叉で生成される個体 (5 パターン)、突然変異として生成されるランダム個体 (4 パターン) の計 10 個体が競争相手となる。なお、交叉で生成されたケースが使用済みの場合は障害物の周囲 8 方向のうち未使用のケースがランダムに生成される。移動幅 0.5m の場合を例とすると、最大世代数は 259 世代 (余り 4 個体) となり、最適解は 0.5m 角障害物で [X2-Y4_X3-Y4.5]、[X3-Y3.5_X2-Y4]、1.0m 角障害物で [X3-Y3.5_X1.5-Y4.5]、[X1.5-Y3.5_X3-Y4.5] となった。

(2) 「換気効率を考慮した開口配置に関する最適解探索効率の向上」

ここでは、比較的格子数が少なく短時間で解析し易い問題を想定する。流入側・流出側となる開口を室の向かい合う壁面に 1 か所ずつ設置して、室平均空気齢 (濃度を室内一様発生とした場合における室平均濃度に相当) の最小化が可能な開口部の最適配置を検討する。逆解析による GA の高速化を試み、最適解探索効率の向上を図る。

① 解析概要 (解析モデルを図 3 に示す。解析条件を表 2 に示す。)

屋内解析とし、4.5m×4.5m×4.5m の室内に 1m×1m の開口 (吹き出しと吸い込みで模擬) を 2 つ設置。流入側を前面開口、流出側を背面開口とする。図 4 のように X 方向、Z 方向に 0.25m 間隔 (1 ピッチ) で移動する。前面開口 (図 4) は最外周を除く 169 か所のいずれかに配置される。背面開口は図 5 の範囲内の計 9 か所のいずれかに配置される。背面開口の移動範囲が中央付近以外に配置される場合には一部で、逆解析の予測精度低下が見られたため本報では移動範囲を制限している。構造格子として原則均等分割とするが、壁面近傍 0.25m まではより細分割した。格子数は 74,088。等温場とし、室全体から濃度を一様発生させ、CFD 解析・逆解析を行う。

室全体を評価領域とし、室平均濃度の最小化を目標とした逆解析により、個々の開口内の全格子面で位置感度のベクトルを算出する。開口毎に合計した位置感度のベクトルの向きを移動方向として決定する。本解析における前面・背面開口配置の組み合わせは、計 1,521 (169×9) 通りである。1 ケースあたりの計算時間は 925 秒 (格子作成 15 秒、CFD 解析 600 秒、逆解析用データ作成 10 秒、逆解析 300 秒) を要する。予め全数解析を行った上で GA の効果を比較検証する。

② 位置感度の効果検証

表 3 に示す範囲について位置感度に従って開口を移動させた場合について、濃度を低減できたかについて検討する。図 6 に示すように背面開口のみを移動させた場合では効果ありが 88%、効果なしが 12% となる。前面開口のみを移動させた場合では効果ありが 66%、効果なしが 34% となり逆解析の効果が高くみられた。

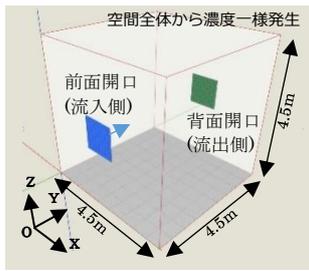


図3 解析モデル

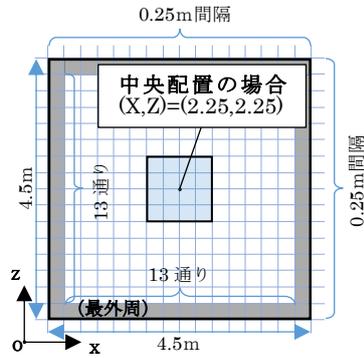


図4 開口配置 (前面開口)

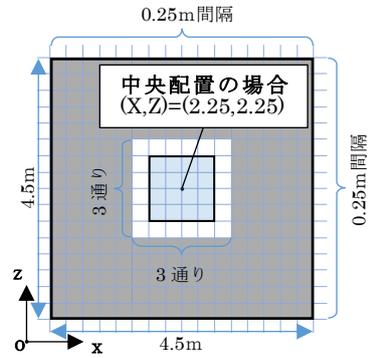


図5 開口配置 (背面開口)

表2 解析条件

乱流モデル	標準 $k-\epsilon$	移流項	Power
アルゴリズム	SIMPLEC	メッシュ	構造格子
解析領域	4.5×4.5×4.5 [m]	開口	1×1 [m]
開口移動幅	0.25 [m]	流速	1.0 [m/s]
発生条件	10 [g / (h m ³)]	目標濃度	0 [ppm]

表3 GA 探索範囲

		範囲
開口範囲	前面開口	全範囲 X=0.75~3.75 Z=0.75~3.75
	背面開口	中央付近 X=2.0~2.5 Z=2.0~2.5
組合せ総数		169×9 =1,521

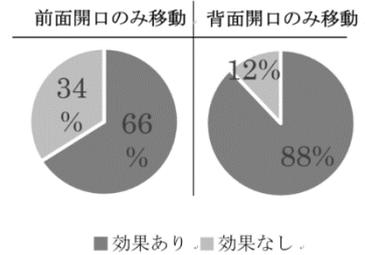


図6 位置感度の効果

③ 逆解析を用いた GA の高速化に関する検討

試行する GA のロジックを表 4 に示す。1 世代の個体数は 10 個体。各々の開口位置を遺伝子 (設計変数) とする。GA プログラムについて、GA1-5 を例に説明する。フローチャートを図 7 に示す。初期個体についてはランダムに決定する。その中から、第 1 優秀個体を選択。また第一優秀個体の開口の片方を第 2 優秀個体の片方と置き換えた 2 つの交叉解と、逆解析から 2 つの「逆解析解」を生成する。既に使われた個体が生成された場合には、その個体の周辺個体 (移動させる予定の開口を 1 ピッチだけ上下左右斜めに移動させた位置) から生成する。残り 5 つの個体は突然変異としてランダムに生成される。以上の 10 個体が次世代における評価対象となる。最適解 (既知) が算出された世代でプログラムが停止する。

表4 GA ロジック

	第一優秀個体	交叉解	逆解析解	突然変異	第二優秀個体周辺	第三優秀個体周辺	1世代の個体数
GA1-1	0	0	0	10	0	0	10
GA1-2	1	2	0	7	0	0	10
GA1-3	1	0	2	7	0	0	10
GA1-4	1	0	3	6	0	0	10
GA1-5	1	2	2	5	0	0	10
GA1-6	1	2	2	1	2	2	10

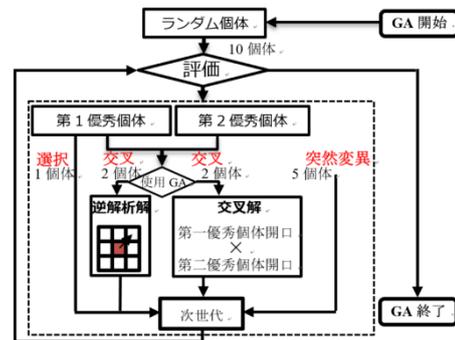


図7 GA フローチャート(GA1-5)

4. 研究成果

(1) 「屋外における強風低減を目的とした障害物配置の最適化」

① GA 結果の比較

簡易 GA と提案型 GA を各 1,000 回実施し平均した最適解到達世代数を表 5、表 6 に示す。

移動幅 1.0m・0.5m の場合について、1.0m 角障害物の最適解到達世代数を比較すると、いずれも提案型 GA が簡易 GA より世代数が低減した。低減率は移動幅 0.5m では 17.3%、移動幅 1.0m では 6.7% となり、移動幅を狭くすることで GA の探索効率を向上できたと考えられる。

障害物サイズの差に着目すると、移動幅 0.5m の場合、簡易 GA・提案型 GA とともに、0.5m 角障害物では 1.0m 角障害物の場合より最適解到達世代数が大きい。この原因を考察する。移動幅 0.5m の場合につき、0.5m 角・1.0m 角障害物の第 1・第 2 最適解の障害物配置を図 8 に示す。簡易 GA・提案型 GA いずれも、最適解に至るまでに [X3-Y4_X2-Y5] が生成される。[X3-Y4_X2-Y5] は 0.5m 角障害物での第 2 最適解である。本検討 (移動幅 0.5m) における 1.0m 角障害物の第 1、第 2 最適解となる配置は隣接している。一方、0.5m 角障害物では離れており、第 2 最適解は第 1 最適解から離れた位置にある局所最適解といえる。交叉解は簡易 GA の場合、周囲 8 方向からランダムに選ぶ。提案型 GA の場合、位置感度が示した方向を選ぶ。移動先のケースが使用済みの場合、簡易 GA と同様に周囲 8 方向からランダムに選ぶ。

表5 GA解析結果(移動幅1.0m)

	最適解到達世代数 0.5m角障害物	最適解到達世代数 1.0m角障害物
簡易GA	5.02	4.87
提案型GA	5.61	4.54

簡易GAから提案型GAへの変化: 0.5m角障害物は11.8%増加、1.0m角障害物は6.7%低減。

表6 GA解析結果(移動幅0.5m)

	最適解到達世代数 0.5m角障害物	最適解到達世代数 1.0m角障害物
簡易GA	33.70	23.59
提案型GA	26.39	19.50

簡易GAから提案型GAへの変化: 0.5m角障害物は21.6%低減、1.0m角障害物は17.3%低減。

1.0m角障害物では第2最適解である[X1-Y3.5_X2.5-Y4.5]及び[X2.5-Y3.5_X1-Y4.5]が生成された場合、交叉により第1最適解が生成される可能性がある。一方で、0.5m角障害物では第2最適解である[X2-Y3_X3-Y4]及び[X3-Y4_X2-Y5]が生成された場合、第2最適解より風速を低減可能となる障害物配置は第1最適解のみである。第2最適解の障害物配置からは突然変異で第1最適解が生成されない限り、周辺8方向の移動先が使用済みとなるまで探索し続ける。このことが0.5m角障害物の場合では1.0m角障害物の場合よりも最適解到達世代数が増加した原因と考えられる。

② まとめ

風速低減を目的とした2つの障害物の最適配置についてのGA探索効率に関する基礎的検討を行った。逆解析(位置感度)から生成した交叉解は探索効率の改善に有効である。障害物の移動幅を狭くした場合には、提案型GAの方が簡易GAより最適解到達世代数が少ない結果となった。現状の交叉ロジックでは、局所最適解から直接に第1最適解は生成されない点が効率低下の原因と考えられる。

(2)「屋内における通風性能向上を目的とした開口部配置の最適化」

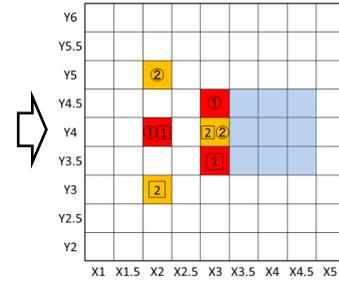
① 結果および考察

表7、表8にGAロジックの上位5位以内到達世代数と最適解到達世代数を示す。到達世代数はGAを100回試行した平均値を用いる。図9に1位から5位までの優秀個体の開口位置を示す。本試行では対称形となる個体は8つずつ存在するが、同一のものとして扱う。

GA1-1は全個体を突然変異とする。(GA未使用)GA1-2は第1優秀個体が次世代個体として選択されると共に、全面、背面開口いずれかを移動させて交叉解を2つ生成するが、逆解析による個体生成は行わない。GA1-3はGA1-2の2つの交叉解を逆解析解に置き換えている。GA1-3はGA1-2と比較し上位5位以内の到達世代数で28.3%、最適解到達世代数で37.5%減少した。逆解析によるGA探索効率の改善が可能であると考えられる。GA1-4は前面開口と背面開口の両方の移動を加えて、逆解析解を3つとしたが、GA1-3からの改善は見られない。GA1-5は交叉解2つと逆解析解2つを併用している。上位5位以内の到達世代数にほとんど変化が見られないが、最適解到達世代数は9.7%低減できGA1-3よりも少し探索効率が向上している。GA1-6はGA1-3の一世代10個体のままとして第2・3優秀個体から前面・背面の周辺個体を2つずつ生成している。最適解到達世代数が29.3%低減でき、大きく改善された。第1優秀個体以外からも解を生成することで、局所最適解に陥り探索効率が低下することを回避する可能性がある。

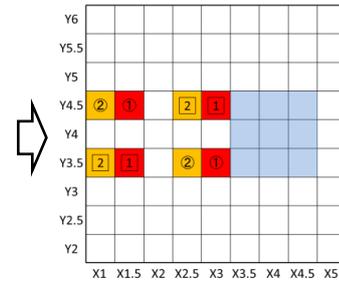
② まとめ

逆解析によるGAの高速化について複数のGAロジックを試行した。逆解析から算出された位置感度をもとにした交叉解の生成は、GAの探索効率改善に有効であることが確認できた。今後は逆解析の精度改善を図る予定である。



(a) 0.5m角障害物

① ①: 第1最適解配置



(b) 1.0m角障害物

② ②: 第2最適解配置

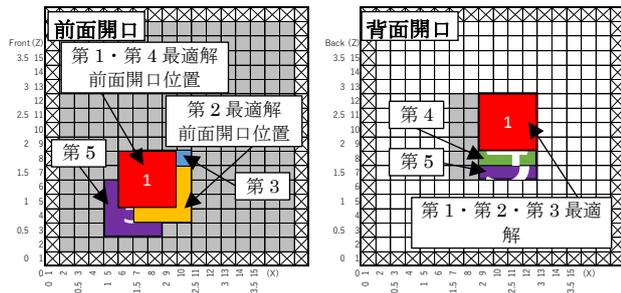
図8 第1~2最適解配置

表7 上位5位以内到達世代数

	範囲2
GA1-1	3.78
GA1-2	28.3% 3.71
GA1-3	2.66
GA1-4	6.0% 2.62 0.4%
GA1-5	2.65
GA1-6	2.5

表8 最適解到達世代数

	範囲2
GA1-1	16.68
GA1-2	37.5% 12.44
GA1-3	7.78
GA1-4	29.3% 7.66 9.7%
GA1-5	7.02
GA1-6	5.5



※いずれも図3風上側からみたもので、左下がX=0,Z=0となる。

図9 第1~5最適解配置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤貴紀、福本拓人、河野良坪、桃井良尚、中川 純、池島薫、桃瀬一成
2. 発表標題 室内換気効率の向上を目的とした流入流出面の最適配置
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村厚太、福本拓人、河野良坪、桃井良尚、中川純、池島薫、桃瀬一成
2. 発表標題 逆解析を用いた高速進化型遺伝的アルゴリズムの開発 換気効率を考慮した開口配置に関する最適解探索効率の向上
3. 学会等名 日本建築学会大会[関東]
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤貴紀、福本拓人、河野良坪、桃井良尚、中川純、池島薫、桃瀬一成
2. 発表標題 室内換気効率の向上を目的とした 逆解析による 流入流出面の最適配置
3. 学会等名 日本建築学会大会[関東]
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野 良坪、長谷川 翔也、杉山 侑司、中川 純、桃井 良尚
2. 発表標題 逆解析を用いた高速進化型遺伝的アルゴリズムの開発 風速低減を目的とした2つの障害物配置のGA探索効率に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井森 亮太、長谷川 翔也、河野 良坪、杉山 侑司、中川 純、桃井 良尚
2. 発表標題 逆解析を用いた高速進化型遺伝的アルゴリズムの開発 風速低減を目的とした2つの障害物配置 G A 探査効率に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会[北陸]
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 翔也、河野 良坪、中川 純、桃井 良尚
2. 発表標題 逆解析を用いた建物形状の自動最適化 (第1報) ファサード近傍 の風速向上に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会[北陸]
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	桃井 良尚 (MOMOI Yoshihisa) (40506870)	福井大学・学術研究院工学系部門・講師 (13401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中川 純 (NAKAGAWA Jun) (60875293)	早稲田大学・理工学術院・講師 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------