

平成 28 年 12 月 6 日現在

機関番号：34406

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630266

研究課題名(和文) Simulation-drivenに基づく建物形状最適化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the building shape optimization based on simulation-driven.

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：随伴変数法を用いた逆解析をCFD解析に適用することで、比較的短時間の中で、現状の設計案の物理面での性能を向上させることが可能であると考えられる。本研究では、設計における随伴変数法を用いた逆解析の効果的な適用方法について開拓し、新たな設計手法として提案することを目的として、以下の4点につき検討した。

(1) 建物形状の最適変形システムの構築、(2) 通風性能向上を目的とした建物形状の最適化、(3) 通風性能向上を目的とした空堀形状の最適化、(4) 歩行域における強風低減を目的とした建物形状の最適化

研究成果の概要(英文)：The inverse analysis using the adjoint variable method(AVM) by applying the CFD analysis, in a relatively short period of time, it may be possible to improve the physical performance of the design proposal. In this study, to develop the effective application of the inverse analysis using the adjoint variable method is aimed

The following four points were studied. (1) Construction of the Optimization system of building shape. (2) Optimization of building shape for the purpose of ventilation performance improvement. (3) Optimization of dry area shape for the purpose of ventilation performance improvement (4) Optimization of the building shape for the purpose of the strong wind reduction in walking area

研究分野：建築環境工学

キーワード：形状最適化 随伴変数法 逆解析 ボリュームスタディ CFD解析 通風性状

1. 研究開始当初の背景

随伴変数法を用いた逆解析を CFD 解析に適用することで、比較的短時間の中で、現状の設計案の物理面での性能を向上させることが可能であると考えられる。しかしながら、随伴変数法が建築環境工学の分野の CFD 解析に導入されてからは浅く、桃瀬・池島らによる室内の空調設計<sup>1)</sup>など以外の設計への適用例は、筆者らの研究<sup>2)</sup>などを除いては、まだ少ない。

1) 桃瀬一成, 池島薫: 感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発 (変分法に基づく感度解析), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.403-406, 2006.9

2) 河野 良坪, 眞下 茜, 中川 純, 挾間 貴雅: 環境工学分野における随伴変数法の適用に関する研究 (第4報) 街区設計における通風性状の向上を目的とした逆解析設計手法の提案, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.109-112-406, 2014.9

2. 研究の目的

本研究では、設計における随伴変数法を用いた逆解析の効果的な適用方法について開拓し、新たな設計手法として提案することを目的として、以下の4点につき検討する。

- (1) 建物形状の最適変形システムの構築
- (2) 通風性能向上を目的とした建物形状の最適化
- (3) 通風性能向上を目的とした空堀形状の最適化
- (4) 歩行域における強風低減を目的とした建物形状の最適化

本研究の共通事項として、CFD 解析・逆解析共に構造格子を用いる。

3. 研究の方法

(1) 建物形状の最適変形システムの構築

本検討では翼形状の最適化の概念を建築の設計に応用して、環境性能の面から建物の全体形状を半自動的に最適化するシステムの開発を目的とする。

① 最適変形システムの概要

CFD 順解析および逆解析と CAD の変形機構を連携したシステムの提案を行う。システムは一部は手動であるものの、風の流れに合わせて、半自動的に建物形状を変形させる。形状変形には、CAD ツールの Rhinoceros (Robert McNeel & Associates 社) 上で動作するプラグインである Grasshopper を使用する。CFD 解析及び逆解析には、FlowDesigner10 Enterprise 版 (㈱アドバンスドナレッジ研究所) を使用する。提案手法の形状最適化手順のフローを図1に示す。まず、CFD 解析を実施して現状の流れ場を確認した後に、逆解析を実施して形状感度を算出する。形状感度は解析対象 (建物等) の表面のメッシュ毎に算出される。次に Excel 上で、変形対象とする面についてのみ感度データを抽出した上で、適当にグルーピングし、グループ化毎に感度の面積加重平均値を算出する。Grasshopper には感度に比例係数を乗じた値だけ建物形

状を変形する処理を予め組み込み、感度 (面積加重平均値) を Grasshopper に読み込ませることで、半自動的な形状変形の実効が可能となった。以降、CFD 解析と逆解析、形状変形を繰り返すことで、建物形状が順次最適化されることとなる。

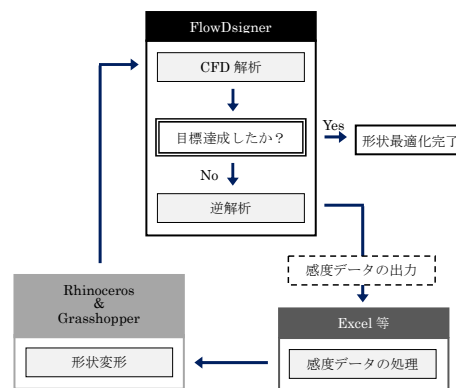


図1 建物の形状最適化システムのフロー

(2) 通風性能向上を目的とした建物形状の最適化

① CFD 解析および逆解析の概要

密集市街地の街区を想定した単純形状の建物モデルを使用する (図2 参照)。この建物モデルは幅 4 m × 奥行 12 m × 高さ 8 m の住宅を 10 戸配置した形である (図7-①参照)。斜面の再現精度を高めるべく格子分割数を約 3,000 万に増加している。解析条件は表1、2 参照。評価領域は建物間の道路部分とし、目標風速は 10 m/s とする。本来は CFD 解析・逆解析と形状変形を目的達成するか、変形の許容範囲を超えるまで繰り返すが、今回は最適変形システムの有効性の確認を目的とするため、繰り返し回数を 2 回とする。

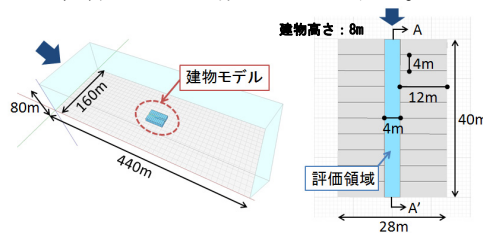


図2 解析モデル (全体図)

表1 共通解析条件

乱流モデル	標準 k-ε モデル	流入境界	べき乗測
離散化	有限体積法	流出境界	自由流出
アルゴリズム	SIMPLEC 法	天空面、側面	Free Slip
移流項差分スキーム	一次風上	地表面	一般化対数則
格子	構造格子		

表2 解析条件

解析領域	440 m × 160 m × 80 m
外部風	1.7 m/s 基準高さ 10 m
格子数	約 3,000 万
目標値 (風速)	10 m/s

(3) 通風性能向上を目的とした空堀形状の最適化

すべての建物は凸形状と凹形状の組み合わせでできている。したがって、凹形状の形状最適化が可能となれば、3 節の凸形状の形

状最適設計法を組み合わせることで、どのような形状の障害物に対しても形状を最適化することが可能であるだろう。本節では、凹形状である空堀について通風性状向上を目的とした形状最適化を試みる。

ここでは、空堀の通風性状向上を目的とした形状最適化手法として、(2)での検討と同様に形状感度を用いる方法を提案する。

#### ① CFD解析および逆解析の概要

本節では提案手法の有効性を検証する。(2)での検討により、構造格子において変形後の斜面を再現するには、かなり多くの格子数が必要となる。ここでは一方向ネスティングを用い、比較的少なめの格子数で解析を実施した。一方向ネスティング使用時の逆解析での活用例については、既報<sup>2)</sup>で示す。

解析モデルを図3に、解析条件を表1、表3に示す。解析モデルは10 m×10 m×10 mの空堀とする(以降、基本モデル)。この解析モデルに5.0 m/s、一様流の風を与える。評価領域は空堀全体とし、目標値は外部風と同じ5.0 m/sとする。この条件で空堀内の風速を上げるためには、どの部分を膨らませる、または削るべきかを探る。

また、モデル自体を簡略化して、(流入・流出共に)空堀の上部のすぐ傍に風速の速度固定境界を設けた解析も併せて実施した(図4参照)。空堀に見立てた10m角の室の上部に10 m×5 mの流入出パネル(ディリクレ型境界)を設置している。吹き出し、吸い込み風速は5.0 m/sとする(表3参照)。

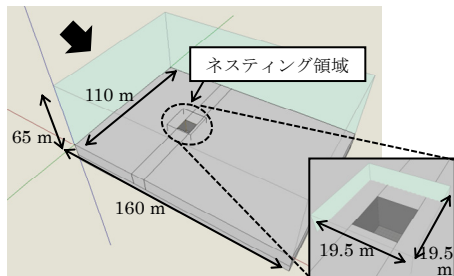


図3 解析モデル(一方向ネスティング使用)

表3 解析条件

共通の解析条件	
風速	5.0 m/s 一様流
目標値	5.0 m/s
ネスティング使用	
解析領域(全体)	160 m×110 m×65 m
解析領域(ネスティング時)	19.5 m×19.5 m×19.75 m
格子数(全体)	約 2,700 万
格子数(ネスティング時)	約 200 万
流入出パネル	
解析領域	10 m×10 m×15 m
格子数	約 100 万

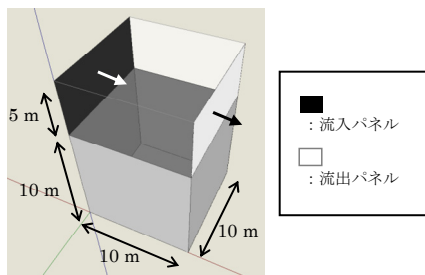


図4 解析モデル(流入出パネル)

(4) 歩行域における強風低減を目的とした建物形状の最適化

CFD解析により現状の風速分布を算出した後に、逆解析により所定の箇所の風速を弱めるために有効な形状感度を算出し隅切り箇所を特定する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 建物形状の最適変形システムの構築

###### ① 逆解析の概要

建物内への通風を確保するためには、窓面における風速がある程度高くなければ建物内部への風の流入は見込めない。そこで街区の前面道路部分を評価領域とし、領域内のスカラー風速を大きくすることを目的とした逆解析を行う。逆解析で算出される形状感度の分布から、通風に最適な建物形状を決定する。使用した建物の形状は図5参照。道路を挟む2壁面のみの変形に限定し、変形方向はセットバック(面を押し側)に限定する。膨らませるべきプラスの感度が出る箇所は「感度=0」とみなし変形を実施しない。

###### ② 形状感度データの処理

本報で使用した街区の初期形状は直交系に沿う直方体である。しかし、1度変形すると直交格子に沿わない斜面が生じる。CADで斜面であっても、解析上は階段状の段差であり、段差の前後は段差を解消させるべく高い感度が算出され易い為、段差の前後2セルの感度データは平均値の算出に使用しない。また、建物(群)両端の角部の感度はそれぞれ隣接する面の感度から線形補完した値を使用する(図5参照)。

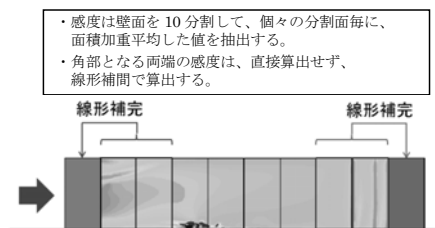


図5 角部感度の補間(建物立面図)

(2) 通風性能向上を目的とした建物形状の最適化

(1)で構築した最適設計システムを用いて、単純形状のモデルを対象に通風を目的とした建物形状の最適化を行う。

###### ① 建物形状モデルへのシステムの適用

逆解析の結果、風上側にマイナスの感度がみられることから、風上側の形状を重点的に削るべきであると考えられる(図6参照)。この感度データを基に最適変形システムを用いて、形状変形したモデル(以降、第1変形モデル)が図7-②である。

次に第1変形モデルに対して、再びCFD順解析と逆解析を行う。結果をみると風上側にマイナスの感度がみられるため、風上側の形状をさらに削る(図省略)。変形したモデル(以降、第2変形モデル)が図7-③である。

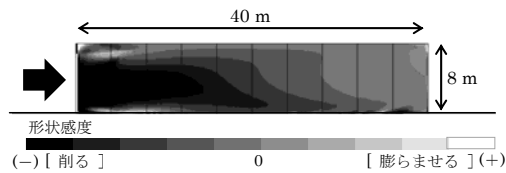


図6 形状感度分布 (基本モデル)

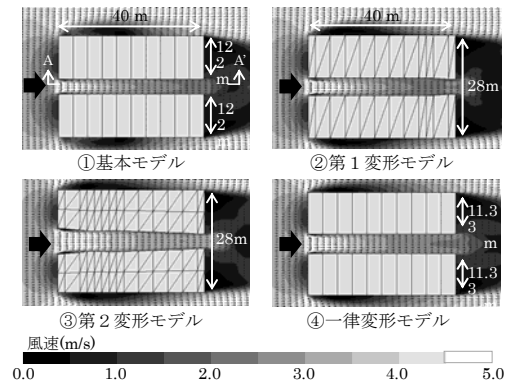


図7 風速分布図 (高さ: 4.0 m)

表4 評価領域内の平均風速

	①基本モデル	②第1変形モデル	③第2変形モデル	④一律変形モデル
平均風速 (m/s)	0.860	0.872	1.039	0.918
①との比率 (倍)	1.000	1.014	1.208	1.068

## ② 各ケースの比較検証

①で、現状よりも通風性状の向上を期待できる形状モデル案を算出した。このモデル案を含む以下の4ケースについてCFD解析を行い、評価領域の平均風速の比較を行う。

- ①基本モデル                      ②第1変形モデル
- ③第2変形モデル                ④一律変形モデル

④は③と体積が同じとなるように、①を約0.7 m セットバックさせたモデルである (図7-④参照)。

CFD解析による検証結果を図7、表4に示す。①を基準に比較すると、②は1.014倍、③では1.208倍、④で1.068倍の風速の増加となった。同じ変形量でも逆解析を利用して変形したモデルの風速の方が高くなり (③>④)、提案手法の有効性を確認できた。

## (3) 通風性能向上を目的とした空堀形状の最適化

### ①ネスティングを使用する場合の逆解析の検証

ネスティングを使用時の形状感度結果を見ると、底面風上側ではマイナスの感度が、底面風下側ではプラスの感度が生じている (図8-①参照)。底面風上側の形状を削り、風下側は盛り上げるべきことが伺える。

次に逆解析の検証として、この感度分布を基に形状を変化させたモデル (以降、逆解析通りモデル) と感度分布と逆の変形をさせたモデル (以降、逆解析と逆モデル) を用意し、それぞれにCFD解析を行う。解析結果を図9、表5に示す。

評価領域内の平均風速を見ると、逆解析通りモデル (図9-b)) は逆解析と逆モデル (図

9-c)) よりも風速は高い。しかし、逆解析通りモデルは約2%、逆解析と逆モデルは約12%、基本モデル (図9-a)) よりも風速が低下する結果となった。

空堀底面の変形量を変えて様々な解析を行ったが、変形なしの場合に対してわずかに変形させた場合 (底面を水平に対して0.25 m傾かせる) で、0.1~0.0m/s程度の範囲で風速差がみられた。本報では構造格子を使用しているため、斜面は階段状に再現される。そのため、階段が少しでも形成された際に微小な剥離気流や数値粘性の影響が過剰となり、流れ場が変化したこと起因するものと思われる。

### ② 流入出パネルを使用する場合の逆解析の検証

流入出パネルを使用する場合の形状感度結果を図8-②に示す。形状感度分布を見ると、1) ネスティング使用時の場合と同様の感度分布が得られた (図8-②参照)。

この結果を基に形状変形させ、CFD解析を行う (図10、表5参照)。その結果を比較すると、逆解析通りモデル (図10-b)) は基本モデル (図10-a)) より約5%風速が高くなった。一方、逆解析と逆モデル (図10-c)) は基本モデルの風速に比べて、風速が約14%弱くなる結果となった。概ね、逆解析の有効性が確認できた。

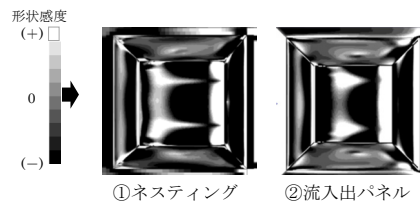


図8 形状感度分布 (空堀真上から俯瞰)

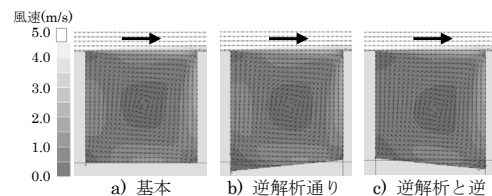


図9 風速分布 (ネスティング、鉛直中心断面)

表5 評価領域内の平均風速

解析ケース	評価領域内の平均風速(m/s)		
	基本モデル	逆解析通りモデル	逆解析と逆モデル
ネスティング	0.91	0.89	0.80
流入出パネル	1.11	1.16	0.96

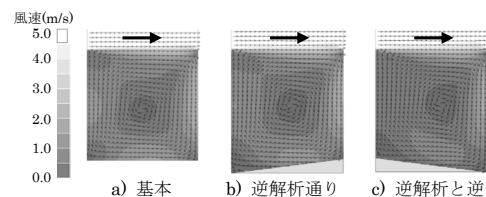


図10 風速分布 (流入出パネル、鉛直中心断面)

### (4) 歩行域における強風低減を目的とした建物形状の最適化



①. 建物正面から風が吹く場合

解析条件を表 6、表 7 解析領域を解析領域を図 11、建物モデルを図 12 左に示す。形状感度の結果(図 13)から負の感度が現れる箇所に隅切りを施した解析モデル(図 12 右)を作成し、評価領域内風速の比較を行う。なお、変形前後のモデルの体積は等しくした。変形後のモデルは評価領域内風速が 0.98m/s となり変形前と比べて約 13%抑制された(図 14)。建物後流の流線について変形前後で比較しても、下降気流が減少している様子が伺える。

②斜めから風が吹く場合(正面風に対して水平に 45° 斜め)

解析条件を表 3、解析領域を図 16 示す。構造格子を使用しており、斜めからの気流に対しては解析領域を広くする必要が生じた。建物や近傍の格子解像度をある程度確保する為、まず全体領域を CFD 解析で解き(図 17)、次に、CFD 解析結果の一部を速度固定の境界条件として格子密度を高めた局所領域に受け渡す一方方向ネスティングを使用した。ネスティング内部の CFD 解析を実施した後に逆解析を行い、3 節と同じ形状の建物(図 18 左)に関して評価領域内風速の低減を図る。逆解析結果(図 19)から解析モデルを変形し(図 18 右)、変形前後で評価領域内風速の比較を行った。変形後では評価領域内風速は少し低下したが、建物後流の解析結果は不自然な結果となった(図 20)。CFD 解析の収束の方向としては一つの帰結であると思われるが、ネスティング領域の取り方について課題が残る。

解析領域	520m×520m×400m	外気風	3.0m/s (0.25 乗則)
ネスティング領域	78m×78m×99m	目標値	0m/s
格子数 (ネスト領域内/外)	約 1000 万 / 約 500 万		

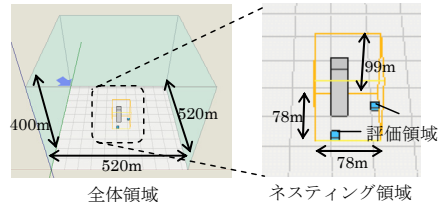


図 16 解析領域

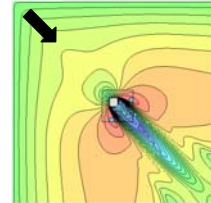


図 17 全体領域内  
風速分布 (Z=2.5m)

③ネスティング領域内風速の左右対称性に関する検討

CFD 解析では対象建物の数倍から数十倍の範囲を確保する必要がある為、格子数が増加し逆解析の計算時間も長くなりがちである。一方方向ネスティングを上手く用いることで、逆解析時の総格子数の低減が可能である。しかし、一方方向ネスティングの境界面の内外では風速、圧力などの物量情報を引き継ぐ格

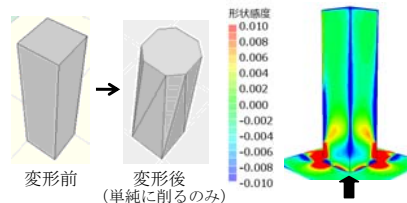


図 18 解析モデル 図 19 形状感度分布 (変形)

表 6 CFD 解析条件 (共通)

乱流モデル	標準 k-ε モデル	天空面、側面	Free Slip
離散化	有限体積法	地物表面	一般化対数則
アルゴリズム	SIMPLEC 法	メッシュ	構造格子
移流項差分スキーム	QUICK	収束判定条件	CFD : 10 <sup>-5</sup> 逆解析 : 10 <sup>-3.5</sup>

表 7 解析条件

解析領域	1500m×180m×400m
外気風	3.0m/s (0.25 乗則)
流出風	自由流出
格子数	約 1000 万
目標値	0m/s

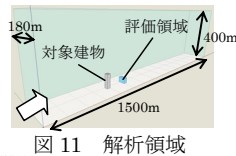


図 11 解析領域

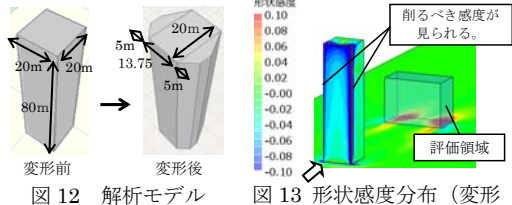


図 12 解析モデル

図 13 形状感度分布 (変形)

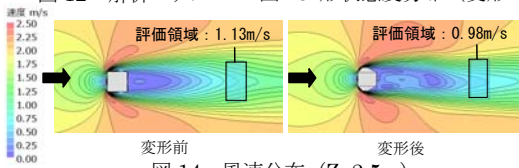


図 14 風速分布 (Z=2.5m)

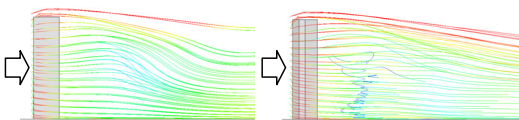


図 15 建物後流の流線比較

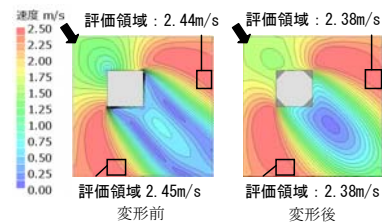


図 20 ネスティング領域内風速分布

子が一致しないため、流入出のバランスが崩れ、ネスティング境界内側の CFD 解析において、風速分布の左右対称性が失われることもある(解析条件は表 8、図は省略)。そこで、解析にはほぼ影響がでないであろう局所的な部分に自由流入出境界を用いることで、流入出バランスに余裕を与えた次第である。結果、CFD 解析、並びに、逆解析の左右対称性を確保することが可能となった(図 21)。

結論

(1) 建物形状の最適変形システムの構築

CFD と CAD を連携した建物形状の半自動化の最適変形システムのプロトタイプを構築した。

## (2) 通風性能向上を目的とした建物形状の最適化

建物間の道路空間の通風性能向上を目的とした形状最適化について、壁面変形の再現性を考慮して格子数 3,000 万 (構造格子) とした解析を実施し、手法の有効性を確認した。

## (3) 通風性能向上を目的とした空堀形状の最適化

通風性能向上を目的とした空堀形状の最適化を行い、逆解析の有効性について検証した。構造格子を使用する為に斜面が階段形状となるが故の影響により、一部、変形前後で評価領域内風速が低下したものと見られる結果もあるが、一定の有効性が見られた。

## (4) 歩行域における強風低減を目的とした建物形状の最適化

高層建物のビル風低減について、逆解析による隅切り箇所を決定する手法を提案し、検討を行った。一定の有効性を確認したが、ネスティングを使用する場合におけるネスティング領域の取り方など、今後検討していくべき課題が残る。

表 8 解析条件

解析領域	520m×520m×400m
ネスティング領域	260m×260m×200m
外気風	3.0m/s (0.25 乗則)
目標値	0m/s
格子数	約 1000 万
格子数(ネスティング領域)	約 1360 万

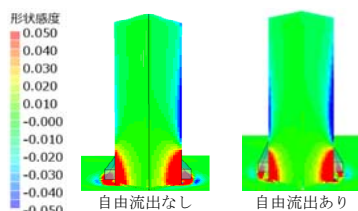


図 21 形状感度分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1) 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 桃瀬一成, 池島 薫, 乾久美子, 「随伴変数法を用いた CFD 逆解析の活用に関する研究 風速低減を目的とした樹木の最適配置に関する設計手法の提案」、日本建築学会環境系論文集 第 80 巻 第 715 号, P. 803-813, 2015 年 9 月 (査読有)

2) 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 桃瀬一成, 池島 薫, 乾久美子, 「冬季の風速低減および夏季の排熱促進を目的とした駅舎内間仕切り壁の最適配置に関する設計手法の提案」、日本建築学会環境系論文集 第 81 巻 第 721 号, P. 307-317, 2016 年 3 月 (査読有)

※上記 2 報については、逆解析の基礎に関わ

る点で、一部、本助成で明らかになった知見を活用している。本助成の直接的成果については、今後、学術論文に投稿予定。

[学会発表] (計 3 件)

1) 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 池島薫, 桃瀬一成, 挾間貴雅, 「逆解析を用いた建物形状の最適変形システムの提案」、日本建築学会大会, No. 40488, P. 1023~1024, 関東, 2015 年 9 月 (口頭発表)

2) 河野良坪, 眞下茜, 中川純, 池島薫, 桃瀬一成, 挾間貴雅, 「環境工学分野における随伴変数法の適用に関する研究 (第 5 報) 逆解析を用いた建物形状の最適変形システムの提案」、空気調和衛生工学会大会, E-65, P. 261~264, 大阪, 2015 年 9 月 (口頭発表)

3) 河野良坪, 中川純, 眞下茜, 挾間貴雅, 「高層建物のビル風低減を目的とした逆解析の適用に関する研究」、日本建築学会大会, No. 41381, 福岡, 2016 年 8 月 (口頭発表)

[図書] (計 1 件)

1) 河野良坪, 建築技術 2016 年 1 月号「連載第 13 回 実務で活用する CFD の現状とこれから 建築設計への逆解析の適用」、P. 44-45

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

(株)アドバンスドナレッジ研究所主催、「2015 ユーザーフォーラム&FlowDesigner13 新バージョン発表会」において、逆解析に関する研究成果をパネル展示。

## 6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

挾間 貴雅 (HASAMA, Takamasa)  
鹿島建設株式会社 (技術研究所)・研究員  
研究者番号：80463602

(4) 研究協力者

眞下 茜 (MAHIMO Akane)  
株式会社梓設計  
中川 純 (NAKAGAWA Jun)  
レビ設計室/早稲田大学・主宰  
池島 薫 (IKEJIMA Kaoru)  
(株)アドバンスドナレッジ研究所・代表取締役  
桃瀬 一成 (MOMOSE Kazunari)  
(株)アドバンスドナレッジ研究所・取締役