

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18898

研究課題名（和文）機械学習と強化学習を用いた鋼構造物の優良解の特徴分析と最適化

研究課題名（英文）Machine learning and reinforcement learning for feature analysis of decent solution and optimization of steel structures

研究代表者

大崎 純（Ohsaki, Makoto）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：40176855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：建築の鋼構造骨組を対象として、優れた構造性能を有する設計の特徴を、機械学習によって抽出する手法を開発した。その手法を用いて得られた部材の配置や断面性能の関係などのメタレベルの知識を用いることにより、優れた設計を少ない計算量で得ることができる手法を提案した。さらに、構造設計における逐次設計変更のプロセスをマルコフ決定過程としてモデル化し、強化学習を用いて学習することにより、さまざまな設計条件を満たす設計を求めることができるエージェントを開発した。また、機械学習の分野で有用とされている最適化手法が、ある種の最適設計に対して既存の手法よりも有用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模建築鋼構造骨組の優れた力学的性能につながる部材配置や部材断面の特徴量を、機械学習の手法であるサポートベクターマシンで求める手法を提案し、その手法を用いて、静的地震荷重に対する応答を最小化する問題に対する近似最適解を、少ない計算量で得られることを示した。また、構造設計において部材断面を逐次変更するプロセスをマルコフ決定過程としてモデル化し、強化学習を用いて最適方策を求めることにより、さまざまな実際の条件を考慮した構造設計を行うエージェントを開発した。さらに、交互方向乗数法や次元削減などの機械学習で用いられる手法に基づいて、扱いにくい最適設計問題に対して優れた近似解を得る手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：A machine learning method has been developed for extracting the features related to decent mechanical performances of steel building frames. Using the proposed method, meta-level knowledges are obtained for locations and cross-sectional properties of members, and decent designs are found with small computational cost. Furthermore, the sequential process of design update is modeled as a Markov decision process and an agent is trained using reinforcement learning. As a result, an agent is developed to find designs that satisfies various design requirements. It has also been shown that the optimization method often used machine learning has better performances for a certain type of optimum design problem than the conventional methods.

研究分野：建築構造

キーワード：構造最適化 機械学習 強化学習 鋼構造骨組

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 鋼構造物の構造設計では、まず耐震・制震・免震などの構造形式を定めて、次に各部材の断面を仮定し、規基準によって定められている方法によって仮定した設計の安全性を検証する。単純な形状の重層構造では、経験のある構造設計者によって構造形式や仮定断面を定めることは困難ではない。しかし、非整形の構造や大空間構造などの特殊構造では、設計条件を満たす解(構造形式や断面形状)を仮定すること自体が難しく、さらに優れた解を求めることは困難である。
- (2) 最近になって、最適化手法が建築のさまざまな分野で利用されている。一方で、人工知能の基盤技術である機械学習は、画像解析やテキスト処理で近年実用的な成果をあげている。しかし、深層学習に代表されるような方法は、大量の学習データを必要とするため、建築構造の設計と最適化に直ちに適用することはできない。また、機械学習の成否は特徴量の定義に大きく依存するにも関わらず、優良な構造設計の特徴量の定義については、これまで研究されていない。少ないデータでの学習手法を開発することは、データ科学がさらに多くの領域に広がるために極めて重要である。
- (3) 強化学習は、ゲームやロボットの制御などの分野で実用的成果を挙げている。しかし、建築分野において、大規模な空間構造のように、優良解が有する特徴のモデル化が困難な構造を逐次改良によって設計するプロセスを、マルコフ決定過程としてモデル化して強化学習によって学習するための研究は存在しない。
- (4) 機械学習の分野では、大規模な最適化問題を解く必要性から、従来は最適設計やその他の最適化の分野でほとんど用いられていなかった最適化手法の有用性が明らかになっている。そのような最適化手法に基づけば、組合せ性などの扱いが難しい性質をもつ最適設計問題に対して、大規模な問題でも優れた解を得る手法が開発できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

「機械学習を用いた優良解の特徴分析」と「強化学習を用いた構造設計プロセスの最適化」に関する以下の目的を達成して、鋼構造物の近似最適解を効率よく求める方法を提案し、構造最適化の上位に位置するメタレベルの最適化手法を構築する。

- (1) 優れた構造性能を有する鋼構造骨組の特徴を、機械学習により抽出する。さらに、ブレース配置の特徴、部材相互の断面性能の関係などのメタレベルの知識を用いることにより、接合部の詳細などの施工時の制約も考慮して、近似最適解を容易に得ることができる手法を開発する。構造最適化の過程で機械学習を利用することによって、許容解を限定し、初期解の効率的な生成と最適化過程での構造解析回数の低減が可能となる。
- (2) 逐次設計変更による構造設計のプロセスをマルコフ決定過程としてモデル化し、強化学習を用いて最適方策を求めることにより、設計基準を満たす解を求めることが困難であるような問題に対して有効な手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 機械学習を用いた優良解の特徴分析

整形な中層鋼構造骨組に対して、多数の優良解(最適解に近い解)をランダムに生成して学習用データベースを作成する。最適化のための目的関数は応答量の最大値とし、最適化手法は局所探索法に基づく離散的方法とする。サポートベクターマシン(SVM)を用いて、優良解と非優良解(評価の低い解)の特徴をそれぞれ学習する。その際、骨組のサイズに依存しない特徴を学習して、メタレベルの知識を得る。その知識を用いて、最適化の過程においてスクリーニングされた最適解の候補のみを解析することによって、近似最適解を得るための計算量を低減できることを示す。

#### (2) 強化学習を用いた構造設計プロセスの最適化

トラスの部材配置を最適化する問題を対象とし、逐次改良によって最適解を求める過程をマルコフ決定過程としてモデル化し、強化学習を用いて最適方策を求める手法を提案する。その方法を拡張し、鋼構造骨組の設計プロセスを、設計を逐次改良する過程としてモデル化する。さらに、強化学習を用いて近似最適解に到達するための最適方策を求めて、優良な設計を求めることができるエージェントを開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) 鋼構造骨組のブレース配置の性能予測と最適化

図1のような12層鋼構造平面建築骨組に対して、水平方向静的地震力が作用したとき、梁・柱・ブレースの応力を最小化するようなブレース配置を求める問題を考える。耐震補強の過程を想定し、自重と積載荷重による鉛直方向荷重は考慮しない。図2に示すような5種類(ブレースなしも含む)を配置するものとし、各層のブレース数は2以下とする。また、各層の層間変形角に上限値を与える。

許容解をランダムに10000個生成し、その上位1000個を優良解(近似最適解)、下位1000個

を非優良解（非最適解）として、サポートベクターマシン（SVM）を用いて学習した結果、極めて少ない偽陽性（False positive）および偽陰性（False negative）の割合で学習することができた。また、RBF カーネルを用いた場合について、優良解に多く見られる（高いスコアにつながる）特徴量を抽出するための手法を提案し、線形カーネルを用いた場合と比較して、その精度を確認した。さらに、12 層骨組で学習した結果を 24 層骨組に適用するため、特徴量の線形変換式を作成し、その係数を最適化問題によって解いて同定する手法を提案した。

24 層骨組の最大応力を最小化するブレース配置を図 3 に示す。ここで、最適化には、1 つターゲット層のブレース配置を列挙して最適配置を求め、ターゲット層を逐次移動して全体の最適配置を求める手法を用いた。その際、機械学習結果によって優良解と判定された配置のみに対して構造解析を行うことにより、学習時間も含めて計算量を大きく低減できることを示した。

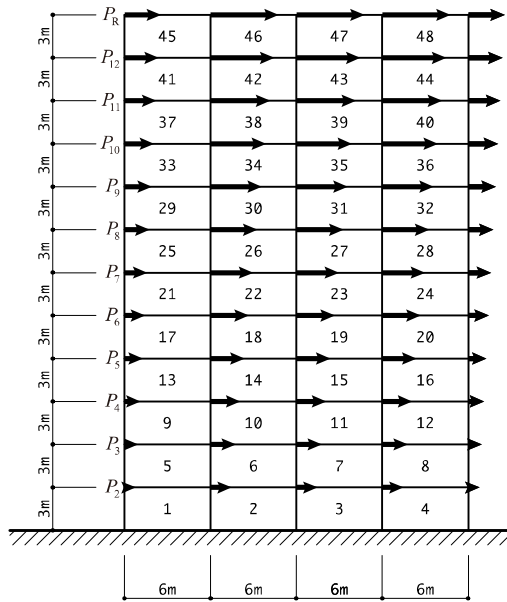


図 1: 12 層 4 スパン骨組

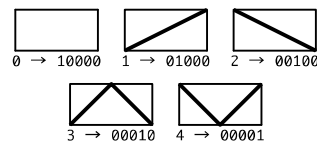


図 2: ブレースの種類

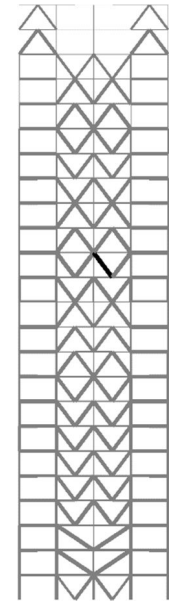


図 3: 24 層骨組の

最適ブレース配置

### (2) パレートランクの機械学習を用いたブレース配置の分析と多目的最適化

鋼構造平面骨組のブレース配置と部材断面を同時に最適化する問題を対象とし、全ブレース体積と最大応力あるいはコンプライアンス（ひずみエネルギーの 2 倍あるいは外力仕事）を考慮した多目的最適化問題において、パレートランクを学習するアルゴリズムを提案した。上記(1)と同様に、10000 個の許容解の中の上位 1000 個（パレートランクが小さい解）を優良解、下位 1000 個を非優良解とし、SVM を用いてそれらを精度良く判別できることを示した。ここで、最適化には NSGA II を用いた。12 層 6 スパンの骨組において、パレート解での全ブレース体積とコンプライアンスの関係を図 4 に示す。また、図 4 の解(a), (b), (c)の断面積分布とブレース配置を図 5(a), (b), (c)にそれぞれ示す。さらに、最適化過程で機械学習の結果を用い、優良解と判定された解のみに対して解析を行うことにより、計算時間を低減できることを示した。

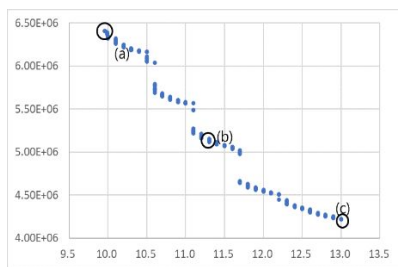


図 4: パレート解集合（横軸: 体積, 縦軸: コンプライアンス）

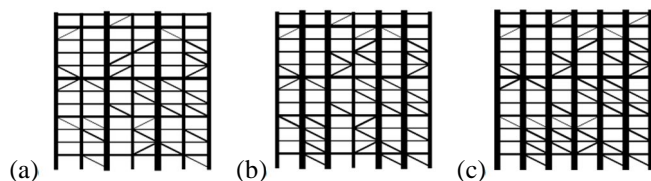


図 5: 解(a), (b), (c)の部材断面積とブレース配置

### (3) グラフ埋込みと強化学習による鋼構造平面骨組の断面設計

鋼構造骨組の梁と柱の断面を逐次改良によって設計する過程を、マルコフ決定過程と考え、部材の特徴量をグラフ埋込みを用いてモデル化し、強化学習の手法の 1 つである Q 学習を用いて最適方策を求めた。図 6 に、部材特徴量のモデル化を模式的に示す。ここで、四角で囲んだ数字は部材種類を示し、部材と節点の数値はそれぞれ最大応力比と柱梁耐力比である。実際の構造設計で与えられる応力、層間変形角、柱梁耐力比に関する制約の下で全部材体積を最小化する問題

を、焼きなまし法によって最適化する過程において、学習結果を用いることによって計算量を低減するとともに、最適解の精度を向上できることを示した。8層3sパン骨組の例を図7に示す。

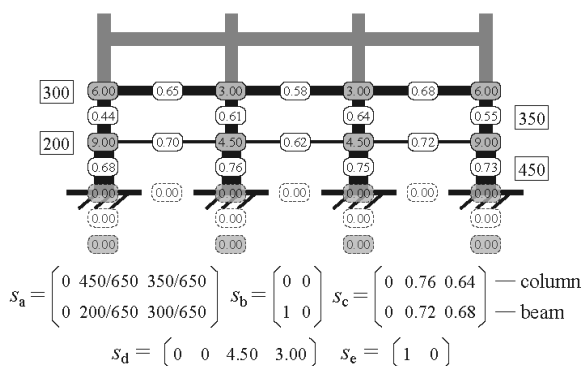


図6: 特徴量ベクトルの模式図

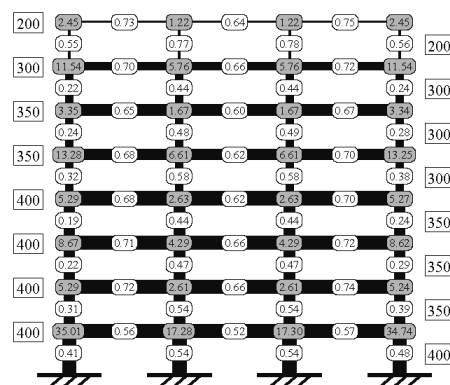


図7: 8層3スパン骨組の最適解

#### (4) グラフ埋め込みと強化学学習による平面トラスのトポロジー最適化

グラフ埋め込みを用いてトラスの接続関係をモデル化し、部材の特徴量を用いたQ学習によって、優良なトラスのトポロジーを学習する手法を開発した。図8は、隣接する部材の情報から特定部材の特徴量ベクトルを更新する過程を模式的に表している。訓練済みエージェントは、応力と変位の制約を満たしつつ部材を除去することができ、任意の規模・位相・境界条件を有するトラスに適用可能である。図9に、6x6の格子状トラスの最適化過程を示す。2つの荷重それぞれに対する応力の制約の下で、部材体積を最小化している。ここで、存在しない部材には応力制約が存在しないので、この問題は極めて非線形性が強い問題である。図7の最後から1つ前の解が最適解であり、最適化アルゴリズムを用いずに大域最適解が得られている。

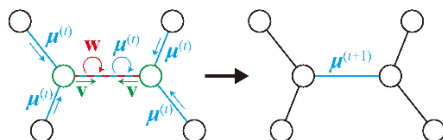


図8: グラフ埋め込みを用いた学習過程の模式図

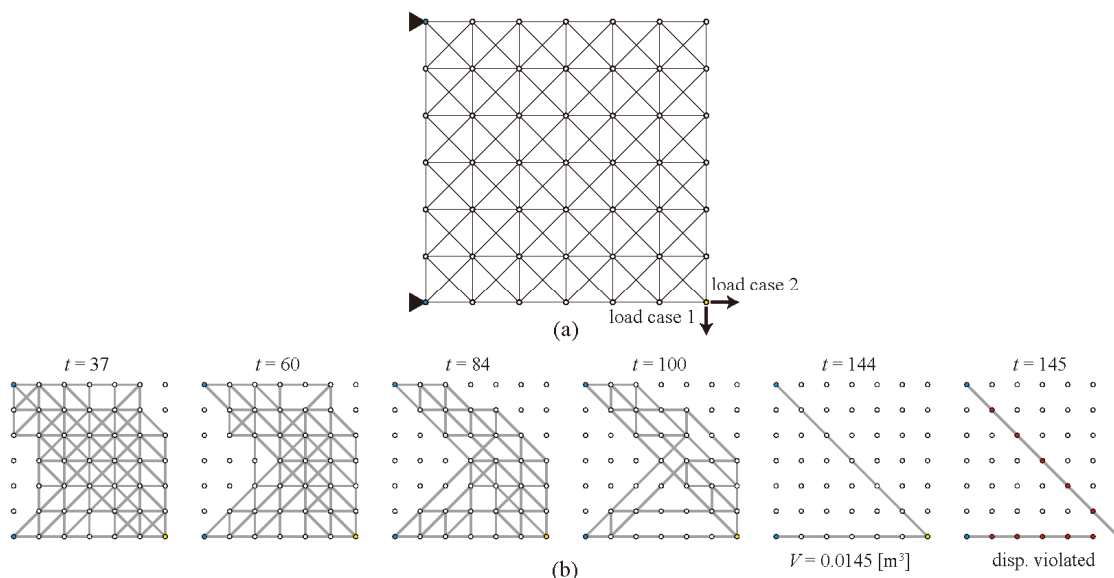


図9: 6x6格子トラスの支持条件、载荷条件と最適化の過程

#### (5) 機械学習で用いられる諸手法を援用した最適設計法

機械学習で用いられているいくつかの手法に着目し、これまでは解くことが困難であった最適設計問題に対する解法を開発した。

具体的には、機械学習で生じる最適化問題を解く手法の一つとして多用されている、交互方向

乗数法に注目した。この手法は、凸最適化問題を解く方法の一つとして古典的なものであるが、機械学習で生じる大規模な凸最適化問題の解法として再び注目されるようになり、次に非凸型の最適化問題の発見的解法としてもその有用性が認識されるようになった。そこで、本研究課題では、単一の部材断面をもつ鋼構造物の最適設計問題に対して交互方向乗数法に基づく発見的解法を開発した。部材の規格化は設計において重要であるが、この最適設計問題は組合せ的な性質をもつ難しい問題であるため、厳密解法は存在するものの規模の小さな問題しか解くことができなかった。これに対して、交互方向乗数法に基づく提案手法では、大規模な問題でも小さい計算コストで質の良い解を得られることを、計算機実験により明らかにした。

次に、機械学習において、高次元のデータを扱う際によく用いられる、次元削減に注目した。この手法では、データ点は、高次元の空間全体に存在するのではなく空間内の低次元多様体上に存在しているような場合に、その低次元多様体を求めることでデータがもつ本質的な情報を抽出する。一方で、信頼性最適設計の分野では、不確かなパラメータのデータが得られているがその確率分布が不明または不確かである場合に対して、データを元に構造物の信頼性が満たされる確率を保証するという、データ駆動型の手法が存在する。本研究課題では、このデータ駆動型の信頼性最適設計法に対する次元削減の手法を開発し、これにより従来よりも質の良い設計解が得られることを計算機実験により明らかにした。

機械学習と構造設計をつなぐ考え方の1つとして、データ駆動型の計算力学とよばれる諸手法が、近年、提案されてきている。これは、材料構成則のモデル化を行わず、その代わりに材料実験のデータを直接的に利用するという数値シミュレーション法の総称である。そのような手法のうちで現在の主流は、距離最小化法とよばれ、材料実験のデータからのある意味での距離が最小の点をシミュレーションの解として出力するという手法である。距離が最小の点を求めるという観点で、最適化と関連がある。本研究課題では、距離最小化法に対して整数計画に基づく厳密解法を開発し、従来の解法では必ずしも厳密な解が得られないことを明らかにした。また、距離最小化法よりもデータの誤差や外れ値の影響を受けにくい手法として、ロバスト回帰やノンパラメトリック回帰という機械学習の手法に基づいて鋼構造物の静的な応答量を予測する手法を提案した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Kanno	4. 巻 35
2. 論文標題 Simple heuristic for data-driven computational elasticity with material data involving noise and outliers: a local robust regression approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 1085-1101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13160-018-0323-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kanno	4. 巻 8
2. 論文標題 Data-driven computing in elasticity via kernel regression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 361-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.taml.2018.06.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kanno	4. 巻 141
2. 論文標題 Alternating direction method of multipliers as simple heuristic for topology optimization of a truss with uniformed member cross-sections	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical Design (ASME)	6. 最初と最後の頁 11403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4041174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kanno	4. 巻 14
2. 論文標題 Dimensionality reduction enhances data-driven reliability-based design optimizer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 19-00200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kanno	4. 巻 13
2. 論文標題 Mixed-integer programming formulation of a data-driven solver in computational elasticity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optimization Letters	6. 最初と最後の頁 1505-1514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11590-019-01409-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Hayashi and M. Ohsaki	4. 巻 0
2. 論文標題 Reinforcement learning for optimum design of a plane frame under static loads	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering with Computers	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00366-019-00926-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Hayashi and M. Ohsaki	4. 巻 6
2. 論文標題 Reinforcement learning and graph embedding for binary truss topology optimization under stress and displacement constraints	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment, Section: Computational Methods in Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 No. 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbuil.2020.00059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 田村拓也, 大崎 純, 木村俊明, 高木次郎
2. 発表標題 機械学習を用いた鋼構造骨組のブレース配置の性能予測と組合せ最適化
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 動的計画法を用いたラーメン構造の形状最適化
3. 学会等名 第41回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 日本建築学会・情報システム技術委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村俊明, 大崎 純, 田村拓也, 高木次郎
2. 発表標題 機械学習による応答予測を用いた鋼構造ブレース補強骨組の付加応力最小化
3. 学会等名 第41回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 日本建築学会・情報システム技術委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阪口一真, 大崎 純, 木村俊明
2. 発表標題 機械学習を用いた大規模鋼構造骨組のブレース配置の性能予測
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阪口一真, 大崎 純, 木村俊明
2. 発表標題 機械学習を用いた鋼構造骨組の最適ブレース配置の特徴抽出
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 M. Ohsaki, T. Kimura and K. Sakaguchi
2. 発表標題 Machine learning for selection of approximate optimal placement of braces of plane frames under static loads
3. 学会等名 Proc. 13th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSM013) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hayashi and M. Ohsaki
2. 発表標題 Deep-Q network for truss topology optimization with stress constraints
3. 学会等名 IASS Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阪口 一真, 大崎 純, 木村俊明
2. 発表標題 機械学習による小規模ブレース付骨組の特徴分析とそれに基づく大規模骨組の最適化
3. 学会等名 第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩越雄一, 大崎 純, 阪口一真
2. 発表標題 パレートランクの機械学習を用いた鋼構造骨組のブレース配置の分析と多目的最適化
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 グラフ埋め込みと強化学習による鋼構造平面骨組の断面設計
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩越雄一, 大崎 純, 阪口一真
2. 発表標題 パレートランクの機械学習を用いた鋼構造骨組の設計の多目的最適化
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020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	寒野 善博  (Kanno Yoshihiro)  (10378812)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授   (12601)	
研究 分担者	木村 俊明  (Kimura Toshiaki)  (60816057)	名古屋市立大学・芸術工学研究科・講師   (23903)	