

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04463

研究課題名(和文) 3次元森林解析技術を発展させた日本庭園植栽の動的な空間特性の研究

研究課題名(英文) A Study on the Dynamic Spatial Quality of Japanese Garden Planting through the 3D Laser Survey and Analysis

研究代表者

三谷 徹 (Mitani, Toru)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：20285240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日本庭園の植栽が作り出す空間特性を解明するものである。これまで、日本庭園の動的な特性を記述することができなかったが、本研究は、3次元点群データ解析を応用することにより、日本庭園空間を一連の揺らぎの複合体として記述した。(1) 伝統的な剪定技術「透かし」が、庭園植栽空間全体として立体的な階層変化を作り出していること、(2) この階層性が、庭園の特異点ごとに異なる景観特性を作り出していること、(3) 複層的な枝葉の重なりを表現する段彩レイヤーは10レイヤーの表現が最適表現であること、(4) 微風による枝葉の動きは、庭園の中で揺らぎの空間分布として構成されていることの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究は、日本庭園の空間特性をその動的な現象のあり方から解明するものであり、この視点からは、建築学が扱う静的な空間形態研究と対極にある。しかし、ポスト近代以降の空間論はまさに空間や環境の動的特性の重要性に着眼する動きであり、日本庭園が持つ空間の揺らぎ現象を定量的に理解したことは、新しい空間デザイン研究の視点を導く基礎的な知見となる。

社会的意義：日本庭園の植栽が持つ繊細で揺らぎのある空間は、これまで伝統的な透かし剪定により実現されている。しかしこの技術は、いまだ口伝による技術の継承に頼っており、本研究が解明した形態変化としての客観的知見は、技術の継承に合理的な裏付けを与えることになる。

研究成果の概要(英文)：This research aims to elucidate the unique spatial characteristics created by the planting of Japanese gardens. Until now, it has not been possible to describe the dynamic characteristics of Japanese gardens, but in this study, by applying three-dimensional point cloud data analysis, we describe the Japanese garden space as a complex of fluctuations. Belows are observed; (1) The traditional pruning technique 'Sukashi-trimming' creates a particular hierarchy in the entire garden planting space, (2) Visual images corresponding to this hierarchy are observed at the particular points in the garden space, (3) Notating by 10 layers of colors is the most appropriate representation of the planting space in Jpapanese garden, (4) Capturing the movement of branches and leaves caused by the breeze makes it possible to observe the structure of fluctuations within the garden space. We obtained the result of discovering the spatial configuration of fluctuations in the garden.

研究分野：ランドスケープアーキテクチャ

キーワード：日本庭園 庭園植栽 情報 点群データ 揺らぎ 空間デザイン

## 1 研究開始当初の背景

庭園の空間は建築の空間と異なり、季節や年月ごとの変化、あるいは風によるそよぎなど様々な時間スケールにおける微小な変化を伴っていることが特徴である。本研究ではこれを空間の動態的特性と呼ぶ。しかし従来の庭園空間研究は、地割の様式研究に着目した静的な形態研究が主であり、動的な変化を扱ったものがなかった。その大きな要因が庭園の主要素でもある植栽空間が、単純な幾何学では表象困難であり、分析もできない複雑さを持っていたからである。しかし本研究は、近年、森林科学の分野で発達した点群データによる樹木解析の手法を応用することで、庭園の空間研究の分野に新たな手法を展開できるのではないかと考え、試行的な基礎研究を目指した。

## 2 研究の目的

特に日本庭園は、伝統的管理技術「透かし剪定」が作り出す植栽空間の動態的な特性に特徴があり、そのあり様を客観的に記述することが重要である。本研究は京都において伝統的管理がなされている名園を対象として点群データを取得し、その解析から「透かし剪定」が作り出す植栽空間の動態的な特性を定量的にあぶり出し、空間特性として記述することを目的としている。

## 3 研究の方法

### (1) 対象庭園

空間分析の結果が普遍的な価値を持つためには、分析対象とする植栽空間が、偶発的な結果ではなく意図を持ってデザインされている植栽である必要がある。本研究では、寺社が保有管理している、あるいは名勝庭園に指定されているなど歴史的な評価が明確な、京都東山地区の庭園を対象とする。本研究成果報告では主に、「くろ谷金戒光明寺の庭」、「東本願寺境内渉成園」、「南禅寺境内大寧軒庭園」、「南禅寺本堂飛泉の庭」が対象である。これらの庭園では、日本独自の「透かし剪定」を軸とする伝統的管理が継続的に施されることで良好な植栽空間が維持されている。また、庭師との連携で、定期的に行われる管理による植栽空間の形態変化も追跡研究できる。

### (2) データの取得方法

上記の4庭園において、夏季・冬季の点群データ、植栽管理の前後のデータ、4種類のデータを取得した。使用機器は、従来簡易型レーザー測量器 SICK LMS511 と、高解像度レーザー測量器 Leica Scan Station P20 である。本研究は、様々な時間スケール、空間スケールにおける動態変化を計測するため、両機種の特性を活かした使い分けを行った。

### (3) データの解析方法の開発

本研究は、森林環境分野での点群データ解析技術（Voxel 化とその統計処理）をベースとしながらも、庭園植栽に応用するにあたっての最適な解析手法を模索した。森林分野では、研究の目的が、緑量の把握や緑量分布の把握である。一方本研究は、伝統的な庭園管理が作り出す繊細な枝葉の形態の把握が目的となる。このために得られた点群データを、森林環境分野の数値化手法のまま用いることはせず、以下の研究成果ごとに示すように、それぞれの解析にふさわしい Voxel 化（レーザー測量で得られた点群の誤差修正や重複修正を行い、実際の緑量と点群密度の呼応性能を高めるプロセス）の最適化を探るなど独自の数値設定を行った。

### (4) 解析結果の表現方法の研究

既往の点群データを用いる研究の多くは、点群を用いて庭園植栽の実風景の再現性を求めるものや、ある時点での庭園形態のアーカイブデータの作成に力点が置かれるも



図1 透かし剪定管理が施されている対象庭園の例（くろ谷金戒光明寺）

が多い。本研究は、植栽そのもの（樹木配置や枝葉の姿）ではなく、植物の枝葉の風による動き、剪定による透かしなど、その形態の動態的变化を追跡するものであり、その様子を空間分布として記述し、観察することに独自性がある。

## 4 研究成果

R3~5 年度を通じた複数回の対象庭園計測と点群データのデジタル解析の可能性を探る中から、日本庭園の植栽空間における以下の4つの動態的特性を対象にした研究が可能となり、成果を学会等に発表した。

### (1) 「透かし」剪定による植栽形態の変化の定量的追跡と特徴の記述

京都の名勝庭園は、その文化的価値を、伝統的な管理技術を担う庭園管理職人（庭師）の感性にその多くを負っている。特に「透かし」の技法は、樹木の成長をコントロールしながら樹形を整えるという創造的な庭園空間デザインを担っている。しかしその空間造形も、既往の文献では感覚的な鑑賞表記にとどまっておき、「透かし」の技術の継承も、ほぼ職人の親方から弟子への模範継承か口伝伝達に留まっている。この技術継承の文化的価値からも、透かし剪定により、どのような枝葉の形態変更が行われているのかを追跡するのが本研究（1）である。

- ① 現地計測：南禅寺大寧軒庭園を対象地として、植彌加藤造園の剪定が入る前と後に、庭園全体のレーザー測量を行い、その点群データの変化を追った（SICK LMS511 測量）。
- ② 点群データの編集と解析：本研究では、森林解析で確立されている点群の Voxel 化数値（0.125m）を用い、庭園全体の Voxel 点群を作成する。この全体データから、主屋前芝生広場 GL ±0 の基準から高さ 1.5m を下限に、厚さ 1.0m の平面スライスを高さ 16.5m まで 15 スライス作成する。それを GIS ソフトウェアの ArcMap で読み込み、縦横 1.0m の格子状インデックス図とする。それを樹木グリッドマスと定義し、剪定前後で比較する（図 2）。

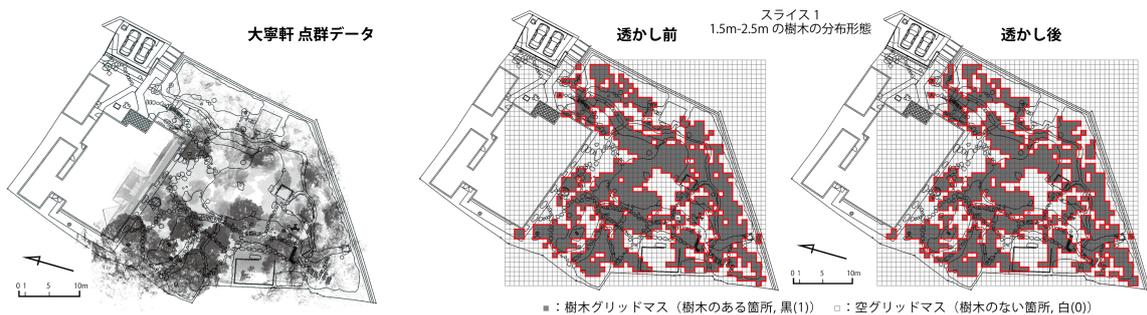


図 2 大寧軒庭園の点群データと、透かし剪定前後の樹木量の変化

③ 解析の結果：透かしにより樹木の形態がどのように変化しているか概観すると、当然のことながらその前後で全てのスライスにおいて透かし後の樹木量が減少している。一方特徴的なのは、各スライスで単に樹木量が減少するだけでなく、分布の複雑度が増すなどの多孔化の特徴が認識できるので、これを指標化するため、「外周延長率

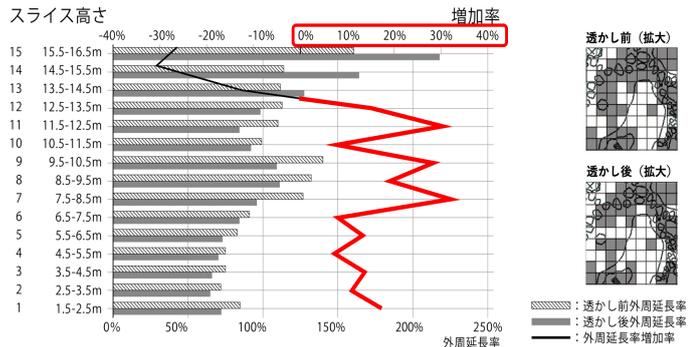


図 3 透かしによる「外周延長率=外周延長/樹木量」の変化

ころ、明瞭な特徴が得られた。外周延長率は、樹木量が減少するにもかかわらず、地上 1.5m-13.5m の全域で増加している。さらにその増加率が、上下方向 1m の厚さごとに綺麗に増減を繰り返していることも把握された（図 3）。この研究 1 により、これまで庭師が口伝継承してきた透かし剪定には、空間全体で見たときに立体的な階層性の傾向があることが初めて認識された。

### (2) 「透かし」剪定がもたらす庭園景観の奥行き感の変化

研究 1 において「透かし」剪定によって空間内での枝葉の分布がどのように変化し、どのような形態的特徴を持つのが明らかになった。それではそれが実際、庭園内で植栽空間を見回したときに、庭園景観としてはどのような効果をもたらすのか、どのような空間知覚の変化が「透き」の空間を感じさせるのかを検証したのが、研究（2）である。

① 点群データの 360 度パノラマ図への変換：研究（1）と同様の Voxel 化を施した点群を、画像を上下左右角度 2° の解像度で各ピクセルに観測点からの視距離がデータとして含まれる形式「360 度パノラマ図」として書き出す。その剪定前後の様子が図 4 の左上二つである。各ピクセルにある Voxel は、視点からの距離情報を持っているために、剪定前後で比較することにより視距離がどれだけ変化したか計測することができる（図 4 左下）。

② 360 度パノラマ図内における視距離変化の解析：ここで剪定による奥行きの変化を表す数値として、「視距離変化効果=（剪定前視距離-剪定後視距離）/剪定前視距離の二乗」とし、これを「360 度パノラマ図」の中に配置して観察する。剪定前視距離の二乗で徐すのは、近いところでの視距離変化がより強く認識されることを反映するためである。

③ 解析の結果：庭園の9箇所で見距離変化効果を確認すると、明確に3つのパターンが現れる。図5にあるように、視野の一部で見距離が集中して伸びる高変化集中型、視野全体にわたって見距離変化が分散する中変化分散型、島状に変化が固まる中変化分散型である。これが庭園の園路沿い、池沿い、園路交差上など庭園内の特異地点と呼応して配置されていることも確認できた。

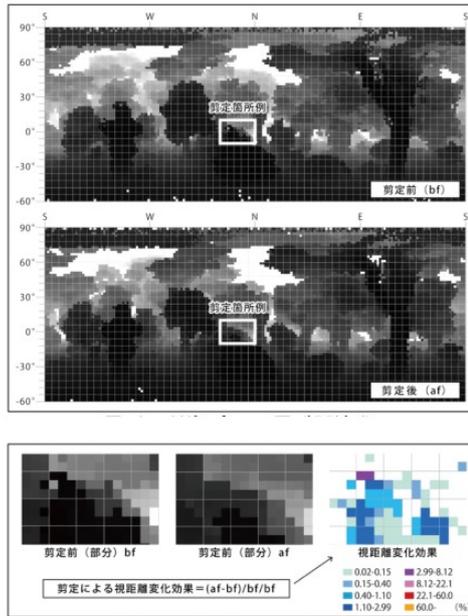


図4 剪定前後の見距離変化効果の計測

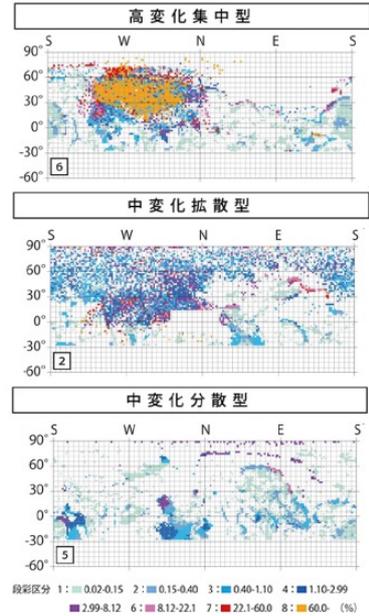


図5 見距離変化効果の分布  
パノラマ図の3類型(3)

### (3) 枝葉の複層的な重なりを記述するレイヤー段採図の最適化

これまで、多くの建築家、ランドスケープアーキテクトが、樹木の重なりを立面図や断面図に描き出してきたが、それは直観的な「表現」であり、空間形態を伝達する「記譜」とはなっていない。この研究では、庭園内の歩みを進めるごとに変化する枝葉の重なり変化がもたらす複層的な奥行き感が、庭園の客観的な根拠を持つ断面図として「記譜」できないかを試みた。この複層的な奥行き感は、近景と遠方の枝葉の視野内におけるずれから生ずるものであり、それを点群データを用いて解析し、定量的検知が得られれば客観的記譜となる。

① 対象庭園と点群データの取得：本テーマにふさわしい庭園として、十分な奥行きがあり、全域に透かし剪定管理が施されているくろ谷金戒光明寺を対象に、全域を覆う複数データを合成しデータを準備した (Leica Scan Station P20 測量)。

② レイヤー点群の作成：点群は3次的に分布しその遠近は連続である。それをそのまま立面図としても奥行き表現とはならない。そこで、点群を複数のレイヤーに分割し、白～黒の無彩色段彩図として表記する方法を取る (図6左下図)。

③ 左右視点位置の差から生じる奥行き知覚のズレを分析：視点を身体移動一步にあたる 0.6m 左右に移動した時の、植栽空間の見距離分布のズレを計測する。(図6上部中央)

④ レイヤー点群のレイヤー枚数最適値の結果：上記(3)の左右の見距離のズレを、(2)の複数のレイヤー点群に対し計測する (レイヤー数 2~20)。当然レイヤーが多いほど、オリジナルの点群に近い結果となる

が、一方図6左下のような段採図で人が認識できる色数は、既往研究で10-12段採とされている。そこで、異なる枚数のレイヤー点群の見距離のズレの誤差を確認したところ、誤差値についてもレイヤー数10前後を誤差急増の臨界点と判断できた (図6右下)。以上の結果から、庭園植栽空間のレイヤー段採図は、10レイヤーが、奥行き知覚を客観的に反映するに最適な表現図として結論された。

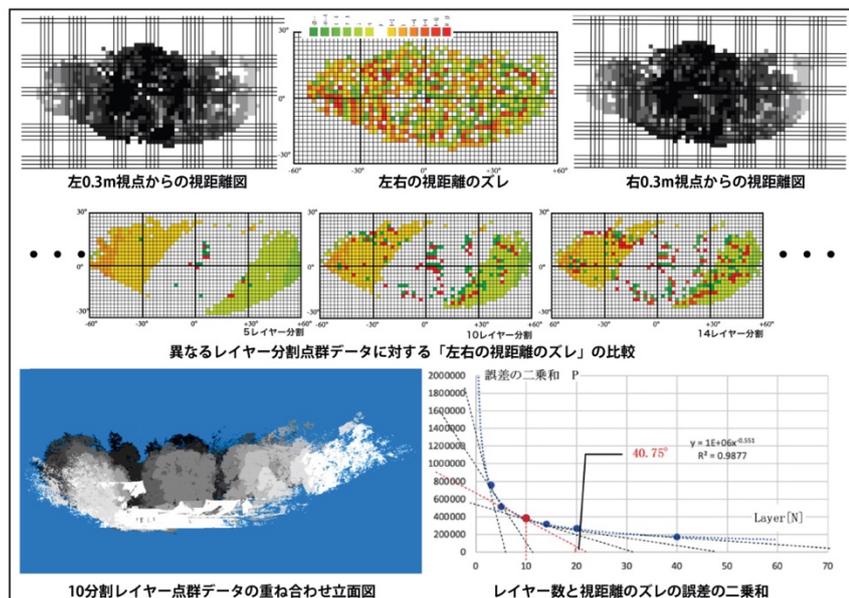


図6 レイヤー分割した点群の植栽空間断面図表示法の分析

#### (4) 風による揺らぎ分布からみる庭園植栽空間の分析

日本庭園の植栽空間が持つ特質として、古来評価されてきた審美性に、透かしの手入れがもたらす楓など亜高木の風による揺らぎがある。日本庭園に独特な柔らかい木漏れ日もその動きに特徴がある。これまでこのような微細な動的現象は研究対象になりにくかったが、本研究の点群データ解析によって、初めて風による揺らぎがどのような構成で空間に配置されているかを突き止めることができた。

① 風による揺らぎ検出手法「タイムラグデータ」の開発：風による動きはこれまで点群データ取得で測量誤差として扱われてきたが、本研究はそれに着目する。誤差はレーザーが全空間に同時に照射できないタイムラグがあるために生じる。そこで、本研究では、あえて楓の枝葉の一部に対し3.5分/回の3回(t1, t2, t3)計測を行い、それを合成する。その結果、幹等の不動部は点群が一致、枝葉末端ほど3回の計測データに誤差のあることが突き止められた(図7)。

② Voxelの最適化：風による動きを解析するためには、従来のVoxel指標が妥当か判断がつかない。そこでt1, t2, t3計測の点群のズレが、最も大きく検出されるVoxelサイズの最適値を分析する。一つのVoxelにt1~t3すべての時点で点群の在否に変動のないVoxelを不動Voxel、t1~t3いずれかの時点で点群の在否に変動のあったVoxelを変動Voxelとし、変動Voxel数/不動Voxel数を「揺らぎ比率」として分析したところ、0.05~0.125m近辺が最も変動比率を反映するVoxelサイズとして検出された(図8)

③ 庭園空間における揺らぎ構成の空間分析：以上で確立した解析手法を用い、楓のそよぎが美しいと評価されている名勝庭園「渉成園丹楓溪」を分析する。空間を1mグリッドの立体マスに分割し、各マス内の「揺らぎ比率」を求め「揺らぎ強度分布」を求め「揺らぎ強度分布」として表記したのが図9である。

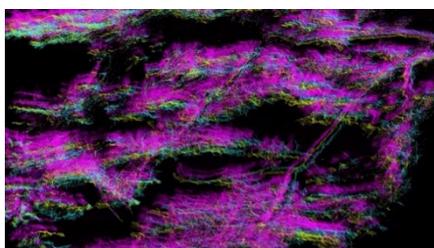


図7 点群による風の揺らぎ検出

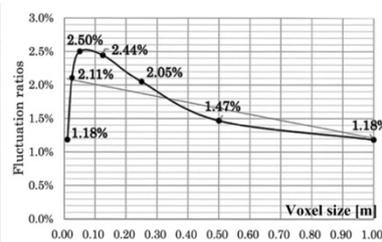


図8 Voxelサイズと揺らぎ比率

④ これまで渉成園丹楓溪は単に溪流沿いの楓の群植としての図面表記しかなかったが、「揺らぎ強度分布」図は、興味深い結果を示した。揺らぎ強度の多い領域が、丹楓溪を貫通する園路沿いに集中して現れている、またその強度が、風による揺らぎが大きいと思われた池の端よりも大きいことである。すなわち、楓が風にそよぐ効果は、巧妙に園内を歩く人を包み込むように分布しており、その周辺はむしろ動きが少なく、丹楓溪での揺らぎの印象が大きくなるようにデザインされている。これは庭師による積年の透かし管理の結果と思われるが、その対応関係は今後の研究が待たれる。

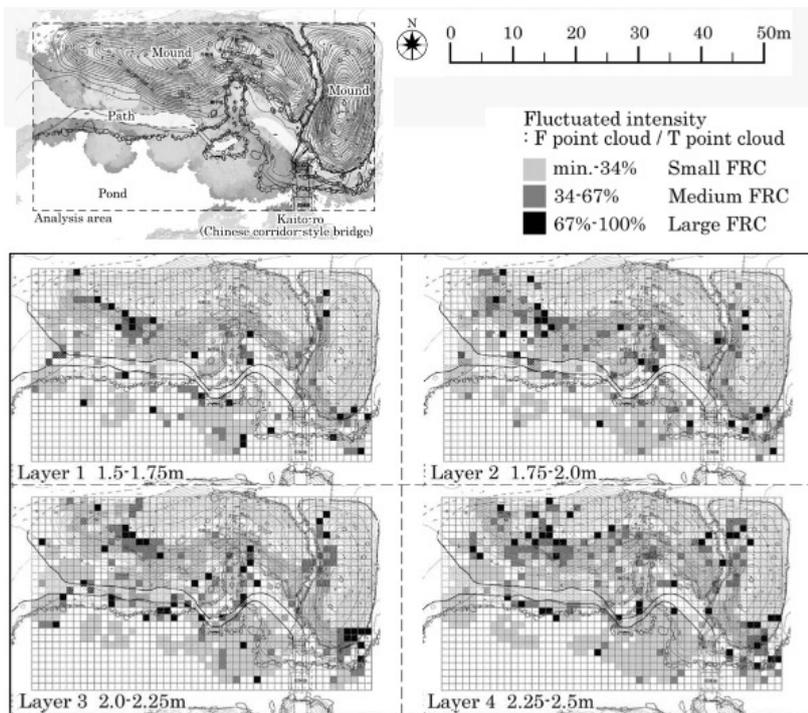


図9 渉成園丹楓溪アイレベル周辺の風による揺らぎの分布

#### (5) 研究成果のまとめ

点群データの解析手法を応用することで、これまで検出の難しかった日本庭園に特徴的な植栽空間の動的変化を記述し、また空間デザインとして評価するアプローチを試みることができた。本科研課題期間では、透かし剪定による年次単位の植栽形態変動、風による秒単位の形態変動など、複数のタイムスケールでの動的現象を記述している。これに落葉など季節スケールの分析を加えると、日本庭園を複数時間軸上の動的空間として分析する可能性が期待でき、伝統的な管理技術と日本庭園デザインに関する新しい研究分野を展開してゆく可能性を示せた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 矢作 岳, 加藤 顕, 加藤 友規, 三谷 徹	4. 巻 Vol.84, No.05
2. 論文標題 3次元点群データを活用した日本庭園における透かし剪定による樹木形態変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ランドスケープ研究	6. 最初と最後の頁 531-534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5632/jila.84.531	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 矢作 岳, 加藤 顕, 加藤 友規, 三谷 徹	4. 巻 Vol.85, No.5
2. 論文標題 3次元点群データを用いた日本庭園の透かし剪定による視距離変化の特徴の解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ランドスケープ研究	6. 最初と最後の頁 517-520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5632/jila.85.517	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 Gaku Yahagi, Akira Kato, Tomoki Kato, Toru Mitani	4. 巻 Vol.2023, No.2
2. 論文標題 A Study of Spatial Fluctuation of Plant Foliage in a Traditional Japanese Garden: Shosei-en through 3D Point Cloud Data Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Information Science	6. 最初と最後の頁 21-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11492/ceispapersen.2023.2_21	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 矢作 岳, 加藤 顕, 加藤 友規, 三谷 徹
2. 発表標題 3次元点群データを活用した日本庭園における透かし剪定による樹木形態変化
3. 学会等名 日本造園学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢作岳・加藤顕・加藤友規・三谷徹
2. 発表標題 3次元点群データを用いた日本庭園の透かし剪定によるし距離変化の特徴の解析
3. 学会等名 日本造園学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢作岳
2. 発表標題 3次元点群データ解析による伝統的日本庭園：渉成園の植栽ゆらぎ空間の特徴
3. 学会等名 2023年度日本造園学会全国大会 第1セッション環境把握技術の適用
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 池田靖史 他 編	4. 発行年 2023年
2. 出版社 学芸出版社	5. 総ページ数 287
3. 書名 情報と建築学 / デジタルで見る日本庭園	

〔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	加藤 顕  (Kato Akira)  (70543437)	千葉大学・大学院園芸学研究院・准教授   (12501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	加藤 友規  (Kato Tomoki)  (90852765)	京都芸術大学・芸術学部・教授     (34319)	

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