

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月20日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760446

研究課題名（和文）

パッシブデザインのための屋内外を連成した光・熱環境の設計支援ツールの開発

研究課題名（英文）

Development of a passive design support tool for indoor and outdoor space based on light and thermal environmental simulation

研究代表者

中大窪 千晶（NAKAOKUBO KAZUAKI）

佐賀大学・工学系研究科・准教授

研究者番号：30515143

研究成果の概要（和文）：

自然エネルギーを利用した建物の設計を支援するために、室内の昼光照度や表面温度分布が算出できるツールの開発を行った。屋外の地物などの影響を考慮した光環境・熱環境の数値解析アルゴリズムの開発や樹木の日射遮蔽モデルの作成を行い、計算アルゴリズムを構築した。その上で、一般の建築設計者が設計行為の延長で使用できるように、3D-CADを用いたプリ・ポスト処理の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

A passive design support tool considering indoor and outdoor light and thermal environment using numerical simulation was developed. The study results are as follows. (1) Computational algorithms for the prediction of indoor and outdoor light and thermal environment were developed. (2) The tree model for solar shading was developed. (3) The simulation models were integrated with 3D-CAD system and pre-processing method were constructed for practical use.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：建築環境・設備

科研費の分科・細目：建築学 建築環境・設備

キーワード：建築環境・設備、環境調和型都市基盤設備・建築、シミュレーション、パッシブデザイン、熱・光環境

1. 研究開始当初の背景

持続可能なまちづくりや建物の省エネルギーを進めて行く上で、自然エネルギーを活用した建築計画・設計が求められている。特に、建築設計では、計画地の立地気候特性

を配慮しながら、太陽エネルギーなどの自然エネルギーを取り入れ、快適な熱環境や光環境などを構築していくパッシブデザイン等の設計手法が、見直されてきている。

パッシブデザインの効果を定量的に評価

しようという試みは、測定や数値解析を用いて数多くなされている一方で、パッシブデザインの設計支援を行うという試みは、データベースの整理などがなされているものの、数値解析を用いた定量的な評価まで行える研究はあまり見られない。特に、太陽エネルギーに関しては、昼光利用に特化したものは存在するものの、昼光と熱の両者を定量的に評価し、可視化し設計に役立てるような試みはなされていない。

2. 研究の目的

本研究では、昼光利用や太陽放射の熱利用の観点から、屋内外の形態や材料を考慮した上で、パッシブデザインを定量的に評価できる設計支援ツールの開発を行う。具体的な研究項目は、以下の4点に分けられる。

- (1) 屋外の影響を考慮した昼光利用を評価するための計算アルゴリズムを開発
- (2) 屋外の建物や樹木などが屋内へもたらす影響を評価できる、屋内と屋外の連成を行った放射解析、熱伝導解析が行える計算アルゴリズムの開発
- (3) パッシブデザイン手法等の放射解析や伝熱解析のためのモデル化
- (4) 設計者自身が自然エネルギーを利用したデザインを定量的に評価しながら進めていくための3D-CADを用いたプリ・ポスト処理方法の開発

(1)、(2)では、開発するツールの基本となる計算アルゴリズムの構築を行い、(3)では、パッシブデザインを行う上で重要な樹木のモデル化を進める。最後に、(4)において、(1)~(3)で得られた成果を統合し、3D-CAD上で操作ができるようにプリ・ポスト処理を開発することで、設計支援ツールを構築する。

3. 研究の方法

上記研究項目(1)~(4)の研究の方法は以下の通りである。

- (1)屋外の影響を考慮した昼光利用を評価するための計算アルゴリズムを開発
研究代表者が開発に携わっている、3D-CAD対応熱環境シミュレータ(以下、既往のツール)の放射計算アルゴリズムをもとに、昼光による光環境を評価するための計算アルゴリズムの開発を行う。具体的には、以下の3点を開発する。
 - ① 屋外の形状を考慮した日射解析アルゴリズムの開発
 - ② 光環境を定量的に評価するための計算条件の検討
 - ③ 光環境の定量的な評価指標の算出
- (2)屋外の建物や樹木などが屋内へもたらす影響を評価できる、屋内と屋外の連成を行った放射解析、熱伝導解析が行える計算ア

ルゴリズムの開発

屋外の熱放射環境を予測するための設計支援ツールである既往のツールを拡張し、庇や材料の配置等のパッシブデザインが室内の熱環境の予測が可能となるように、以下の2点について開発を行う。

- ① 屋外の形態を考慮した放射解析アルゴリズムの開発
- ② 熱伝導解析の境界条件の設定と多次元熱伝導解析への拡張の可能性の検討

(3)パッシブデザイン手法等の放射解析や伝熱解析のためのモデル化

太陽エネルギーを活用したパッシブデザインでは、庇や材料の配置等に加えて、落葉樹が重要なデザイン要素となる。落葉樹は、夏季の強烈な日射を防ぎ、落葉した冬季には、日射を室内へ導きなど、日射を調整することができる。その一方、昼光利用の観点からは、日射を遮蔽しすぎると、十分に昼光が活用できないというトレードオフの関係にもなる。そこで、特に樹木の日射遮蔽効果に着目し、日射遮蔽モデルの構築を進める。

具体的には、以下の手順でモデル化を進めた。

- ① 樹木の生長を考慮した単木樹の樹形データを複数作成(樹種ごとに30本程度)し、数値解析により、樹木の日射透過率を算出する。
- ② 得られた複数の樹木の日射透過率を樹種毎に分析し、樹種ごとの日射透過率やその分布について特徴を把握する。得られた特徴から樹木のモデル化を行う。

(4)設計者自身が自然エネルギーを利用したデザインを定量的に評価しながら進めていくための3D-CADを用いたプリ・ポスト処理方法の開発

(1)~(3)までの成果を統合するとともに、設計者がパッシブデザインを行う際に、設計の延長で定量的な予測評価が行えるように、3D-CADをベースとしたプリ・ポスト処理を構築する。これは、既往のツールが持つプリ・ポスト処理を拡張しながら、以下の内容について開発を進める。

- ① アルゴリズムの統合とデータベースの整備
- ② 設計行為の延長で入力が可能となるプリ処理の開発
- ③ パッシブデザインを行う上で必要となる指標の可視化

4. 研究成果

研究項目(1)~(4)の研究成果は以下の通りである。

- (1) 屋外の影響を考慮した昼光利用を評価するための計算アルゴリズムを開発

① 屋外の形状を考慮した日射解析アルゴリズムの開発

図1に、本ツールの日射解析の概要を示す。日射解析は、光環境、熱環境の解析において共に同じ要素について解析を行うため、併記している。

直射光（直達日射）を計算する際には、レイトレーシング法を用い、天空光（天空日射）や反射光（反射日射）を計算する際には、マルチレイトレーシングを用いて計算を行っている。屋外、室内における多重反射も考慮しており、ライトシェルフなどのパッシブ手法の評価も可能としている。この結果、屋外、室内における各面（壁や床、天井、屋根など）の照度、光束発散度が算出され、後述する各評価指標の算出が可能となる。

② 光環境を定量的に評価するための計算条件の検討

光環境の評価を考えた場合、熱環境に比べて空間内の放射の反射の影響が大きくなる。そこで、空間分解や反射回数などの各種計算パラメータと計算精度の検討を行い、解析条件を決定した。

空間分解能は、屋外、室内の形状の再現精度を決めるものであり、放射解析に大きな影響を与える。空間分解が小さくなると、計算精度が上がる一方で、計算負荷が大きくなる。そこで、周囲を建物に囲まれ庇が取り付けられている部屋を対象に、空間分解能を変化させ、天空率を算出し、計算精度と計算負荷のバランスがとれる分解能を計算パラメータとして決定した。本検討では空間分解能 2cm を最も精度の良いものとし、それより大きな分解にした場合のものと比較した。その結果、空間分解能を 5cm の場合が、計算精度と計算負荷の観点から最適であると判断し、採用した。

また、反射回数についても、同様に反射回数と計算精度について検討を行った。昼光利用がより積極的に行われる半屋外空間を対象

に、反射回数を 20 回としてもものを、精度を決める際の基準とし、その値と反射回数を 2 回から増やしていった場合の値を比較し、反射回数を決定した。評価指標としては、壁面、地面での照度を用いた。その結果、照度として 10lx 以下となった 8 回反射を反射回数として決定した。

その他、マルチトレーシングのレイの射出数などについて、同様の検討を行い決定している。

③ 光環境の定量的な評価指標の算出

本ツールでは、上記アルゴリズムを用いて、照度、輝度に加えて、スカラー照度、ベクトル照度の算出を可能としている。スカラー照度、ベクトル照度の算出については、既往の研究による、6 面体の照度計を用いた簡易測定法を参考に、微小 6 面体に入射する照度を求め、各面の照度の平均をスカラー照度、ベクトル和をベクトル照度として平面分布を算出するシステムを開発した。

(2) 屋外の建物や樹木などが屋内へもたらず影響を評価できる、屋内と屋外の連成を行った放射解析、熱伝導解析が行える計算アルゴリズムの開発

屋内の表面温度分布を算出する上で、図1に示したように、屋外からの日射の影響、屋内での長波長放射の授受、空気との対流による熱伝達、外壁からの熱伝導を考慮する必要がある。そこで、既往のツールの計算アルゴリズムを拡張し、室内の表面温度分布が算出可能となる計算アルゴリズムを開発した。

① 屋外の形態を考慮した放射解析アルゴリズムの開発

屋外からの日射の影響に関しては、光環境と同様の放射解析アルゴリズムを用い、多重反射を考慮した上で、室内表面での受熱日射量を算出する。

室内での長波長放射の授受については、開口部はガラスなどがはめられていると仮定

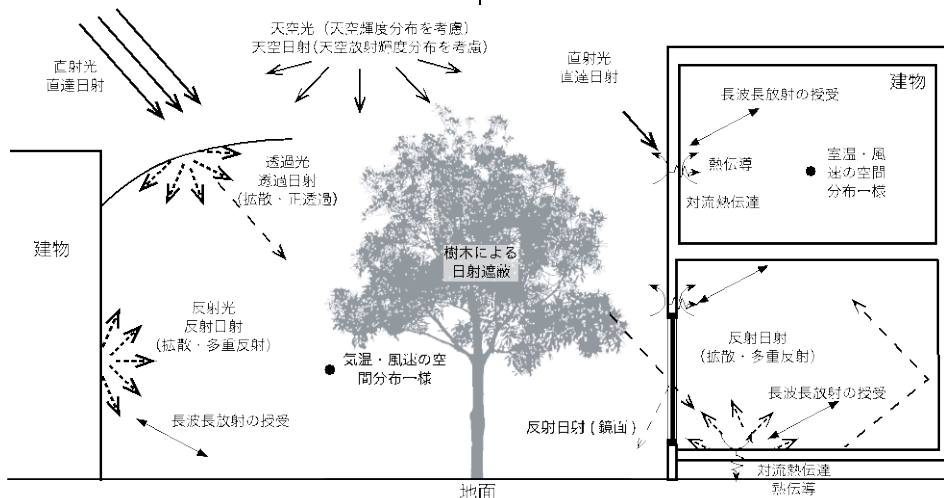


図1 光環境・熱環境の計算アルゴリズムの概要

し、既往のツールの計算アルゴリズムを参考に計算アルゴリズムを構築した。

② 熱伝導解析の境界条件の設定と多次元熱伝導解析への拡張の可能性の検討

熱伝導解析については、①で算出した室内と屋内における各部位の受熱日射量、長波長放射量を内外の境界条件として与える。また、その他の境界条件として必要となる顕熱流量については、外気温、室温と外部風速等をデータベース等から取得し、境界条件として与えている。これらの境界条件から非定常一次元熱伝導方程式を解くことで表面温度が算出される。

パッシブデザインを行う上では、ダイレクトヒートゲインなど蓄熱の影響の定量的な評価ができることが求められる。非定常一次元熱伝導方程式を解くことで、蓄熱の影響は考慮できるが、床や壁の熱が三次元的にどこまで伝わるかなどは考慮することができない。

そこで、本研究では、これら三次元的な熱伝導を取り扱うために、非定常三次元熱伝導方程式の導入について検討を行った。設計支援ツールを目指すため、全ての計算点に対して、三次元熱伝導方程式の導入することは、計算負荷の観点から、困難であると判断し、計算上、導入することが望ましい部分のみ、三次元熱伝導の導入を検討した。計算方法としては、Alternating direction implicit method(ADI法)を用いて計算を行い、精度や計算の安定性などの検討を行った。その結果、単純な境界条件では、解析結果が得られた導入が可能であることは示唆されたが、日射の影響など時々刻々の変化を考慮した場合は、計算が安定せず、境界条件の設定の仕方や計算アルゴリズムの再検討を行う必要があるため、今後の課題とした。

(3) パッシブデザイン手法等の放射解析や伝熱解析のためのモデル化

本研究では、樹陰内のできる木漏れ日の割合を木漏れ日率と定義する。図2に、木漏れ日率の算出方法を示す。CGで作成した落葉樹の樹陰の投影図を、レイトレーシング法を用いて作成し、得られた投影図をもとに、樹陰部の総面積と木漏れ日の面積の比を木漏れ日率として算出した。この値と樹木の葉や枝に係わる形態的な要素との関係を分析した。

図3は、夏季における樹種毎の太陽高度と木漏れ日率の関係である。これにより、樹種や太陽高度(時刻)によって、木漏れ日率が大きく異なることがわかる。その上で、樹木の形態に係わる要素と木漏れ日率の関係を見たところ、これまでの研究で指摘されたLAIだけでは、木漏れ日率を表すことは困難であり、枝や幹の影響を考慮した分析が必要

であることが明らかとなった。その結果を踏まえ、葉、枝、幹の影響を考慮するために仮想的に地面から光線を射出し、その光線に衝突した回数と木漏れ日率との関係を検討した(図4)。葉、枝、幹の影響を考慮した結果、夏季、冬季共に木漏れ日率を表す上で有用で

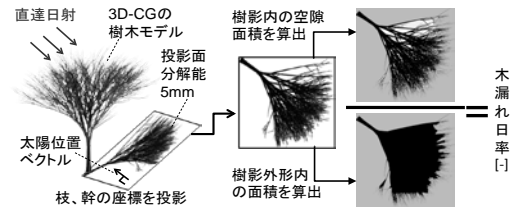


図2 木漏れ日率の算出の概要

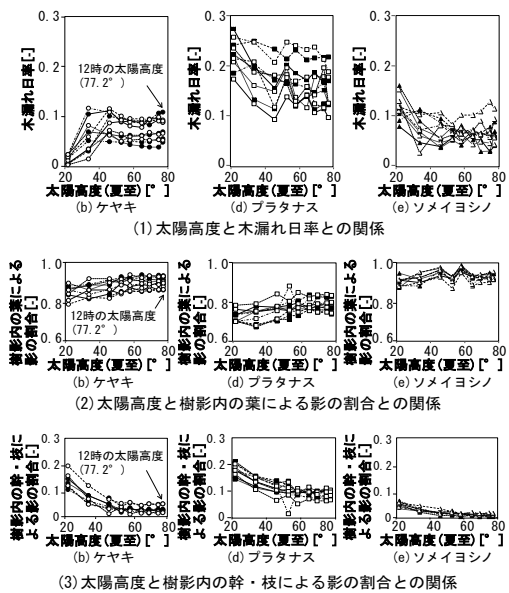


図3 樹種の違いによる木漏れ日率と太陽高度の関係

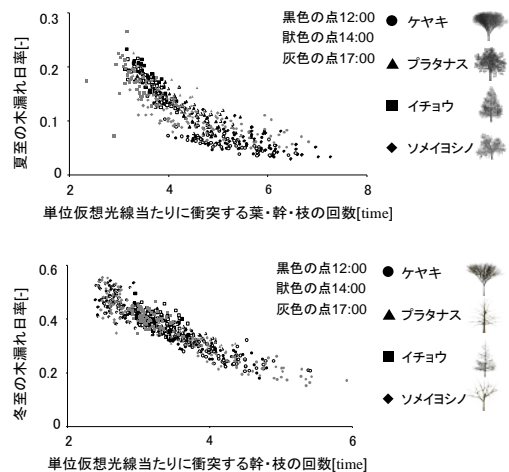


図4 仮想光線が幹・枝に衝突する回数と木漏れ日率(上:夏季、下:冬季)

あることが明らかになった。

次に、樹陰内部の木漏れ日の分布について分析を行った。樹陰の中を一定の距離に分割し、樹陰内部の木漏れ日率の分布の分析を行った。その結果、円錐型で木漏れ日率が大きいイチョウは、幹を中心として水平方向かつ等間隔に分岐する構造の影響により、太陽高度が低くなると木漏れ日が樹影全体に分布した。卵形のプラタナスは、幹を中心に様々な方向へ分岐する構造が起因し、太陽高度にほぼ依存せず、樹冠中央から外周にかけて木漏れ日の分布が増加する傾向がみられた。盃型のケヤキは、上方へ伸びる分岐構造により、樹冠の上層と枝の密集部分で木漏れ日が多くなることが確認された。

本ツールでは、この結果を基に、明確な特徴が現れた樹種に対して、夏季と冬季の落葉樹について、木漏れ日率を日射透過率として、数値解析を行えるようにした。また、今後の課題として、剪定された樹木や中間期など樹形が大きく異なる場合でも、日射透過率を再現できる、より汎用的な樹木モデルの構築を行う。

- (4) 設計者自身が然エネルギーを利用したデザインを定量的に評価しながら進めていくための 3D-CAD を用いたプリ・ポスト処理方法の開発

①アルゴリズムの統合とデータベースの整備

前述のように、光環境と熱環境の解析を行う上で、日射解析など基本的には同様の計算アルゴリズムを用いる部分が存在する。そのため、設計支援ツールとして、計算量の削減

を行うために、計算アルゴリズムの精査、統合を行い、より短時間で結果が算出できるようにした。

また、光環境と熱環境のトレードオフの関係の評価するために同様の気象データで計算できることが必要である。そこで、光環境の解析を行う際は、気象のデータベースに日射量をもとに発光効率を乗じることで、光・熱環境共に同じ条件で計算することを可能としている。

②設計行為の延長で入力が可能となるプリ処理の開発

計算上必要となる形状や材料に関する情報はオブジェクト指向の 3D-CAD を用いて、計算対象となる部屋の形状情報を従来の CAD の操作で作成し、新たに作成した入力メニューより、部屋の壁、床、屋根の材料の入力が可能となるプリ処理を開発した。対象となる部屋と同時に、既往のツールのプリ処理で作成する建物の形状や周辺の建物、樹木等の情報も付加することで計算するための CAD モデルが作成される。

次に、作成された CAD モデルから自動的にメッシュモデル（空間分解の 5cm）を作成する必要がある。メッシュモデルの作成の基本アルゴリズムは既往のツールのものを使用している。その上で、作成されたメッシュモデル上で、建物の形状データと部屋の形状データが重なる部分を自動的に探し出し、熱伝導方程式を解く際の屋外側、室内側の境界条件の整合性が合うように処理するアルゴリズムを開発した。

③パッシブデザインを行う上で必要となる指標の可視化

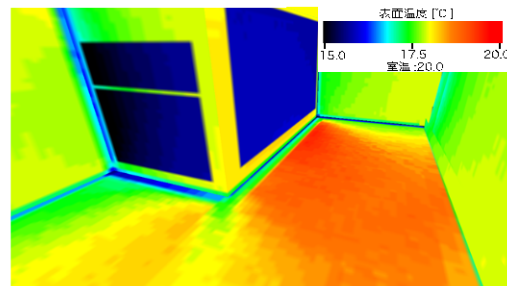
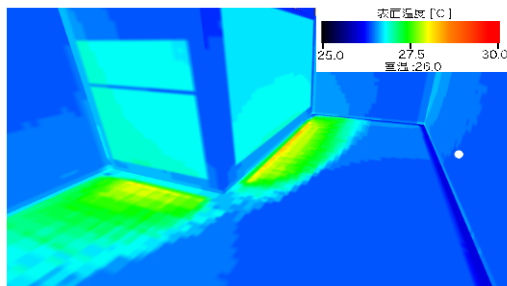


図 6 室内の表面温度分布（左：夏季 12 時、右：夏季 20 時）

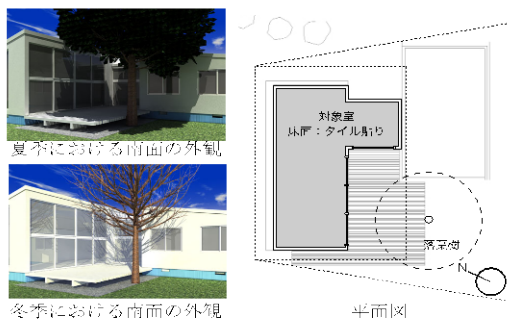


図 5 対象建物の概要

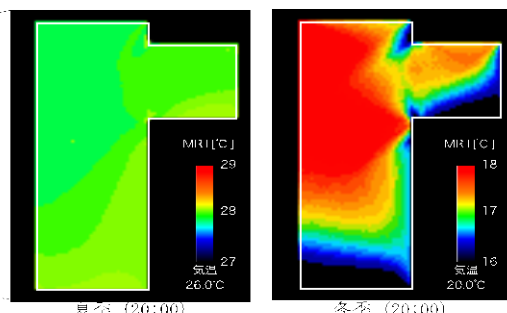


図 7 平均放射温度分布

前述の計算アルゴリズムを用いて、室内の照度分布や表面温度分布を計算し、算出結果を 3D-CAD 上に表示する。計算結果は、テクスチャマッピングの手法を用いており、設計者は、従来の 3D-CAD モデルと同様の操作で、パッシブデザインの効果を確認することができる。また、昼光率や天空率など通常の設計にも活用される指標の出力を可能としている。

本ツールの適用例として、落葉単木樹が植栽された住宅の計算結果を示す。図 5 に示すように対象住宅は床に熱容量の翁材料を用いたダイレクトヒートゲインと呼ばれるパッシブデザインを採用したものである。図 6 に夏季、冬季における夜間の室内の表面温度分布を図 7 に放射の快適性を示す MRT 分布を示す。図に示すように、夏季においては樹木に日射遮蔽により日中の日射を防ぎ、冬季には、日中、落葉した樹木を透過した日射が室内の床面を暖め、そのまま夜間まで、その暖かさが保たれており、熱的に快適な空間が作られていることが確認できる。

研究成果をまとめると以下の通りである。まず、太陽放射の昼光利用、熱利用の定量的に評価ができるような放射伝達アルゴリズムと屋内外の地物の影響を考慮した室内の表面温度分布算出アルゴリズムの開発を行った。さらに、パッシブデザインを行う上で重要な要素の一つである樹木のモデル化に取り組み、夏季と冬季の樹種毎の日射透過率のデータベースを整備した。最後に、設計者が使用できるように、汎用 3D-CAD 上でのプリ・ポスト処理の開発を行った。この結果、専門知識のない設計者でも、設計行為の延長上で昼光利用や太陽熱利用について定量的な評価を行うことが可能となるパッシブデザインのための設計支援ツールを開発した。

今後は、より汎用的なツールを目指すために、3 次元熱伝導解析の導入や剪定などの大きな形状変化に対応できる樹木モデルの構築を行う。

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 3 件)

- ① 熊倉永子, 中大窪千晶, 梅干野晁: CG の樹木モデルを用いた単木落葉樹の木漏れ日の分布に関する数値解析, ランドスケープ研究、ランドスケープ研究, 75 (5), pp. 403~406. 2012. 3
- ② 熊倉永子, 中大窪千晶, 梅干野晁: 夏季と冬季における単木落葉樹の木漏れ日率に関する数値解析, ランドスケープ研究 74(5), pp. 637-640, 2011. 3

- ③ 熊倉永子, 中大窪千晶, 梅干野晁: 木漏れ日に着目した単木落葉樹の日射遮蔽に関する数値解析, ランドスケープ研究 73(5), pp. 573-576, 2010. 3

[学会発表] (計 6 件)

- ① Kazuaki Nakaohkubo, Akira Hoyano: Development of passive design tool using 3D-CAD compatible thermal simulation -Prediction of indoor radiation environment considering solar shading by surrounding trees and buildings -, The 12th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, 2711-2717, 14-16 Nov., 2011
- ② Eiko Kumakura, Kazuaki Nakaohkubo, Akira Hoyano: Numerical analysis of solar shading of a deciduous tree for seasonal change, PLEA2011, pp. 113-117 2011. 7
- ③ Eiko KUMAKURA, Kazuaki NAKAOHKUBO, Akira HOYANO, A Fundamental Study on Solar Shading by Single Tree in Summer by Numerical Analysis using CG Tree Models -Development of a Solar Radiation Environmental Design Support Tool for a Greening Plan-, 8th ISAIA, Kitakyushu, 2010. 11

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中大窪 千晶 (NAKAOKUBO KAZUAKI)

佐賀大学・工学系研究科・准教授

研究者番号: 30515143