

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 9 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686083

研究課題名(和文)三次元レーザーキャナを用いた都市空間における対流熱伝達率分布の可視化手法の開発

研究課題名(英文)Development of visualization method for convective heat transfer coefficient distribution in urban spaces using 3-D laser scanner

研究代表者

浅輪 貴史 (Asawa, Takashi)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50361796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,200,000円、(間接経費) 4,860,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近赤外レーザーを用いた3次元レーザーキャナと濾紙蒸発法を組み合わせることで、都市空間において遠隔から対象物の対流熱伝達率分布を可視化する手法を開発した。まず、濾紙の含水率とレーザー反射強度との関係について定式化したうえで、水分ポテンシャルおよびレイス則を導入することで対流熱伝達率を算出する方法を提案した。次に、単純形状を有する小規模建物に本手法を適用し、可視化手法の有用性と適用範囲を確認した。最後に、ベランダ等の複雑形状を有する実在建物に本手法を適用し、対流熱伝達率の分布特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study developed a visualization method for convective heat transfer coefficient (CHTC) distribution in urban spaces using a 3-D laser scanner and filter paper evaporation method. The relationship between the water content of filter paper and laser reflection intensity was quantified, and the method to estimate CHTC was proposed using water potential and the Lewis equation. The proposed method was applied to a small building with simple geometry, and the applicability and limitation of the method were confirmed. Lastly, the method was applied to a large-scale building with complex geometry, and the characteristics of CHTC distribution were clarified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：リモートセンシング 対流熱伝達率 建物

1. 研究開始当初の背景

建物外表面における対流熱伝達率は、建物と周辺大気との熱収支を明らかにするうえで重要な要素であり、都市や建築の熱環境シミュレーションにおいても主要なパラメータとなる。これまで、建物外表面における対流熱伝達率を明らかにする試みは国内外で数多く行われてきており研究成果の蓄積がなされてきているが、直接計測できないという困難さもあり、限られた点でのみの算定に留まってきた。その中で、比較的精度良く対流熱伝達率を推定できる方法として、水分伝達と熱伝達とのアナロジーを利用した濾紙蒸発法がある。

筆者らは、この濾紙面の含水状態をリモートセンシングにより遠隔から計測できれば、面分布としての対流熱伝達率分布が比較的容易に得られるのではないかと着想した。

2. 研究の目的

本研究では、リモートセンシングの一つである三次元レーザースキャナに着目し、濾紙蒸発法と組み合わせることで、建物外表面における対流熱伝達率分布を可視化する手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

まずは、三次元レーザースキャナと濾紙蒸発法を用いた対流熱伝達率の算出方法を理論的に構築したうえで、実験を通して算定式の定式化を行う。次に、単純形状を有する小規模建物に本手法を適用し、可視化手法の有用性と適用範囲を確認する。最後に、実在建物に本手法を適用し、対流熱伝達率の分布特性を明らかにする。

4. 研究成果

4-(1) 算定方法とその理論

濾紙蒸発法は、建物外表面に湿潤濾紙を貼付し、その蒸発速度から水分伝達率を求め、さらに伝熱理論で定義されるルイスの関係により対流熱伝達率を算定することができる。従来は、濾紙の蒸発速度は秤量法によって計測されていた。一方、物質の含水状態のリモートセンシングによる計測法としては、近赤外域の水の吸収波長帯を用いる近赤外水分計が挙げられる。ただし、近赤外水分計では、近距離での計測に留まってしまう。筆者らが注目する三次元レーザースキャナは、数百 m の測定距離性能を有するアクティブリモートセンシングであり、発射したレーザーパルスの反射値を取得することで、その反射位置情報と反射強度を高精度に取得することができる (図 1)。この反射強度は、反射パルスのエネルギーのピーク値であり、本研究では乾燥濾紙面の値を 1 として基準化する。本研究で使用する三次元レーザースキャナは、1550nm の近赤外線を使用しており、図 2 に示す通り水の吸収波長帯に含まれるため、近赤外水分計と同様に、反射強度値から対象物の含水状態が計測できると考えた。

図 3 に対流熱伝達率算定の模式図を、図 4 に算定フローを示す。水分伝達率の算出には、水分移動の駆動力となる濾紙面と大気の水ポテンシャルを用いる。濾紙面の水分ポテンシャルは、不飽和水分ポテンシャルと飽和水分ポテンシャルにより決定されるが、前者に関しては、濾紙の含水状態に依存するためレーザースキャナの反射強度から同定し、後者に関しては、濾紙の温度に依存するため赤外線放射カメラによる放射温度の計測値から同定する。すなわち、いずれも遠隔から求めることができるため、濾紙の貼付が可能な場所であれば理論的には適用可能な手法である。濾紙の蒸発速度も、反射強度変化から求めたうえで、図 4 の式により水分伝達率及び対流熱伝達率を算出する。濾紙を壁面に貼付するため、実際の壁面とは表面温度及び自然対流場は異なる。そこで本手法では、強制対流場の対流熱伝達率を取得することを目的とする。次節にて、これら理論に基づく各関係式を実験により導出するとともに、適用

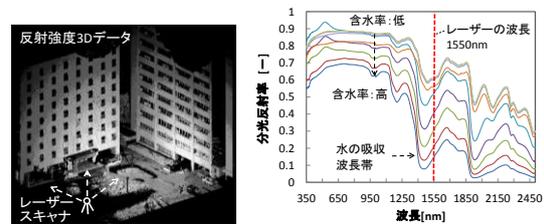


図1 レーザースキャナ 図2 濾紙の分光反射率

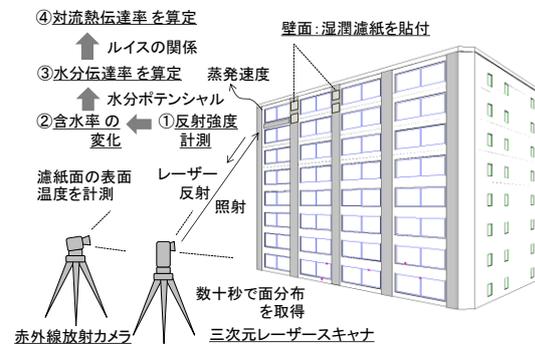


図3 計測の模式図

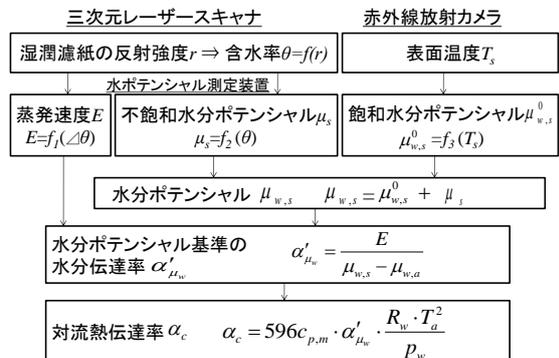


図4 対流熱伝達率の算定フロー

可能範囲を確認する。

4-(2) 定式化の実験方法

定式化のための検討項目について確認するために、屋内実験を実施した。図5に、濾紙の含水率と反射強度の関係を明らかにするための実験装置を示す。濾紙周縁部からのエッジ効果の影響を受けないよう、成田らの実験結果をもとに、400mm四方の濾紙の中央部100mmを試料の濾紙とした。この試料は、周辺の濾紙とは境界層を乱さないよう約1mmの隙間で離れてプレートに貼付されており、その重量を電子天秤にて計測することで含水率の時間変化を取得した。それと同時に、5mの距離からレーザースキャナにより濾紙面の反射強度を計測した。試料面には、約1mm間隔でレーザーが照射され、計約1万点の反射強度値が得られている。その平均値を試料の反射強度とした。また、濾紙の含水率に応じた反射強度の入射角依存性を調べるため、0°から85°まで入射角を変化させ、乾燥過程において濾紙重量と反射強度を取得した。計測間隔は5分間であり、計測と計測の間は、蒸発を促すため送風を行っている。

その他、同様の装置を用いて、赤外線放射カメラによる濾紙面の放射温度と、熱電対で測定した実際の表面温度との関係を、入射角及び含水率を変化させて調べた。濾紙の不飽和水分ポテンシャルについては、水ポテンシャル測定装置(WP4C, DECAGON社)を用いて計測した。

4-(3) レーザー反射強度と濾紙含水率の関係

図6に入射角0°における濾紙の反射強度と体積含水率との関係を示す。両者には、非線形ではあるが明確な関係が見られる。図7に、濾紙の体積含水率と不飽和水分ポテンシャルの関係を示す。体積含水率が0.2以上では、不飽和水分ポテンシャルは0に近いが、それ以下では急激に減少している。この回帰曲線は、指数関数で表すことができる。

図8には、濾紙の体積含水率毎に、反射強度の入射角依存性を調べた結果を示す。いずれの含水率でも、入射角とともに反射強度が減少する傾向が見られるが、特に含水率が67%以上のデータでは、反射強度が減少する割合が大きい。これは濾紙表面に浮き出た液水によって、鏡面反射性が強くなるためである。64%以下では、含水率0%と同様の傾向を示すため、0~64%の含水率範囲における関係を回帰式として示し、以降の分析では入射角補正のために使用することとする。以上より、理論的にも、また屋内実験からも、対流熱伝達率が反射強度値から算定できることが示された。

4-(4) 建物壁面における含水濾紙面の反射強度分布特性

建物外表面の対流熱伝達率(以下 α_c)分布を算出するための屋外レーザー計測を2012年1月11日に実施した。実験場所は東京工業大学すずかけ台キャンパス内にある二階

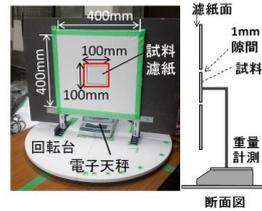


図5 反射強度の実験装置

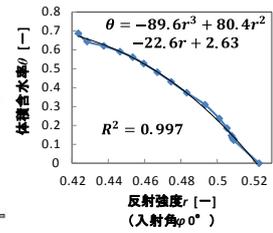


図6 反射強度と含水率

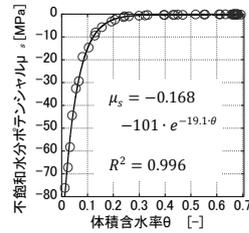


図7 濾紙の体積含水率

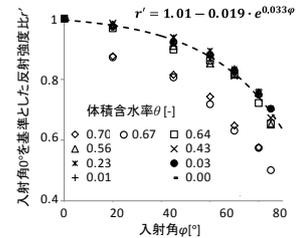


図8 含水率毎の反射強度

と不飽和水分ポテンシャルの入射角依存性

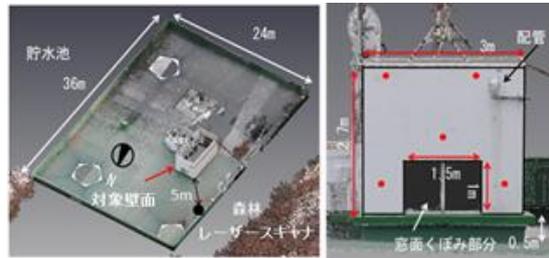


図9 実測対象地と対象壁面(赤点:近傍風速測定)

測定項目	測定装置
反射強度	レーザースキャナ RIEGL社 VZ-400
表面温度	赤外線放射カメラ 感度波長帯 8~13μm
相対湿度	通風筒付乾湿度計
気温	白金抵抗体
上空風速	三次元超音波風速計
近傍風速	無指向型フロー熱式 風速計
水平面全 天日射量	サーモパイル式日射計 測定波長 0.3~2.8μm



図10 測定装置概要

建て建物の屋上である。図9にレーザースキャナの点群データで再現した実測対象地と、対象となる建物屋上の階段室壁面を示す。また図10に測定装置概要を示す。北側と西側の両壁面を同時に計測するため、距離5mに対して両壁面で入射角が同じになる位置にレーザースキャナを設置し、壁面に貼付した複数の濾紙に向けて0.3mradのレーザーを0.02°間隔で照射し、蒸発過程を5分間隔で計測した。濾紙の乾燥までに計3時間を要した。北側壁面に36枚、西側壁面に90枚の湿潤濾紙を貼付した。尚、本手法は濾紙含水率の初期状態には依存しないが、開始時点でできるだけ含水率が揃うよう、貼付作業中は薄いフィルムを密着させて蒸発を防いだ。濾紙は薄いアクリル板に設置し、壁面に貼付した。

本報では物質伝達と対流熱伝達の相异性

を考慮し、日射によって生じる温度差に基づく自然対流の影響をほとんど無視できる北側壁面を対象とし可視化を行う。実験日当日は、強い北風が観測され、風速 5~8m/s の風が頻繁に観測され、常に 2~3m/s の風が吹いていた。また、北側壁面上の計 5 点で、10cm の距離に無指向性のプローブ熱式風速計を設置し、 α_c との関係調べた。

図 11 に北側壁面の反射強度分布の時系列変化を示す。4-(2)の実験と同様に各濾紙の中央部分を試料として α_c の算出に用いる。この分布より、時間の経過とともに壁面の周縁部分で速く蒸発が進み、中央部分と比較して反射強度に分布が現れていることがみてとれる。

壁面各部分で異なる含水状態を把握し壁面の α_c 分布を算出するため、前報で示した関係式を用いて入射角の影響について補正を行った。

4-(5) 建物壁面における対流熱伝達率分布の可視化

壁面に貼り付けたすべての濾紙の反射強度に変化がみられ、また上空風向、風速の条件から α_c 分布の変化が可視化できると予想される時間帯として、実験日の 12 時 47 分から 13 時 47 分までのデータを 15 分間隔で抽出し、 α_c を算出した。

1) 対流熱伝達率分布

算出した対象壁面上の α_c をもとに、スプライン法により内挿補完して作成した α_c 分布を図 12 に示す。同図には上空風速と主風向及び壁面近傍風速を示す。図には $2W/(m^2 \cdot K)$ ごとに黒の等高線を引いた。壁面内の α_c 分布は、壁面周縁部分、特に壁面上部の角部分や窓部のくぼみ部分で高くなっているのが特徴的である。これは成田らの風洞実験における近傍風速分布と類似の傾向を示している。(a)の時間帯は風向が北、(b)、(c)の時間帯は東北東であり、風向が変化しているが、壁面近傍の風速の傾向と α_c の分布は類似している。(d)の時間帯においては上空風速と近傍風速が若干高くなっており、 α_c も全体的に高く算出されている。これは平均風速の影響ばかりでなく、13:32 頃に 30 秒ほど吹き続けた 8m/s 程度の強風を受けた影響に起因するものと考えられる。

2) 各パラメータの時間変化

図 13 に面内の 3 点における 15 分間の平均反射強度、濾紙表面の水分ポテンシャル、蒸発速度、対流熱伝達率の時間変化を示す。時間経過と共に反射強度は増大するが、水分ポテンシャルは大きく変化せず、対流熱伝達率は蒸発速度に大きく影響を受けていることが分かる。

3) 近傍風速との関係

図 9 に示した周縁部 4 点と中心部 1 点について計測を行った近傍風速と α_c との関係を図 14 に示す。全体的な比例関係は見られ一定の相関はあるものの、ばらつきも生じている。その理由としては、壁面付近の風向とエッジからの距離の違いによる速度境界層の発達度

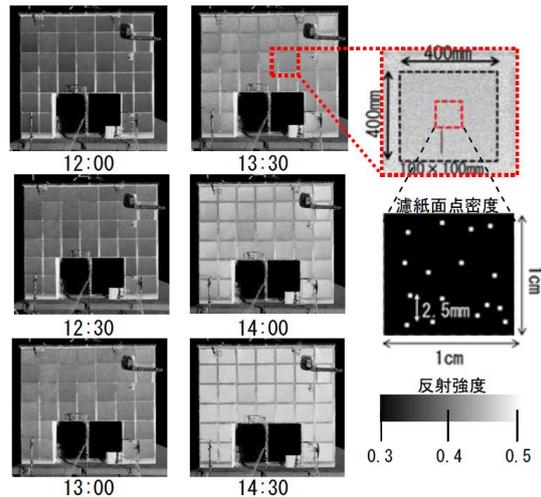


図 11 建物壁面の反射強度分布の時間変化

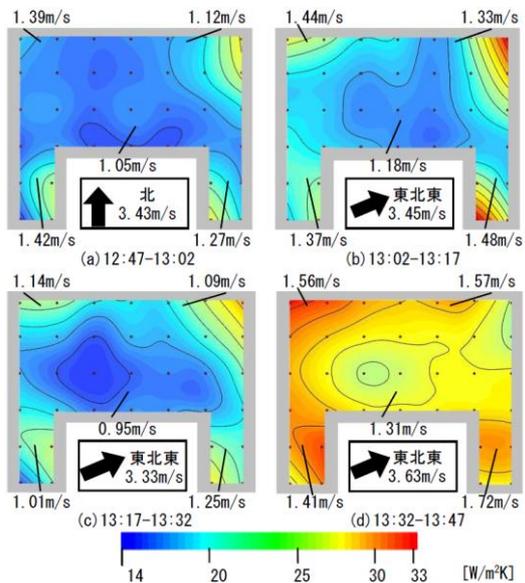


図 12 対流熱伝達率分布の可視化結果

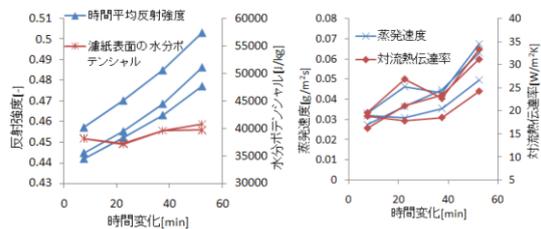


図 13 各パラメータの時間変化

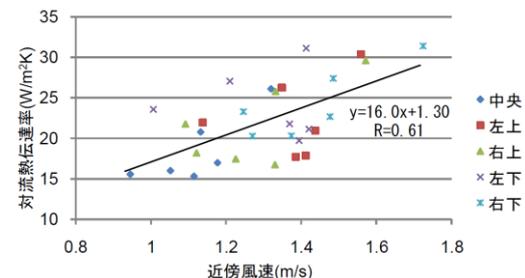


図 14 近傍風速と α_c の関係

合いの差異によるものと考えられる。

以上のように、壁面近傍風速の影響が表れた対流熱伝達率を本手法により可視化可能なことを明らかにした。

4-(6) 実在建物における対流熱伝達率の分布特性

1) 対象建物と計測方法

ベランダ等を有し、且つ規模の大きな小学校校舎を対象に、107枚の含水濾紙を壁面及びベランダに貼付し、その乾燥過程をレーザーสキャナにより計測した。レーザー計測と同時に、赤外線放射カメラにより濾紙の表面温度計測を行った。対象日は、2014年2月27日、28日の両日である。

2) 結果

図15に、建物壁面及びベランダ面を対象としたレーザー計測により得られた点群データを示す。また、図16に、レーザー計測により得られた濾紙面の反射強度と、その乾燥過程から算出された対流熱伝達率を示す。これにより、含水濾紙の観測過程が反射強度値から適切に計量化できており、壁面における対流熱伝達率とその分布特性が明らかとなった。



図15 実在建物におけるレーザー計測結果

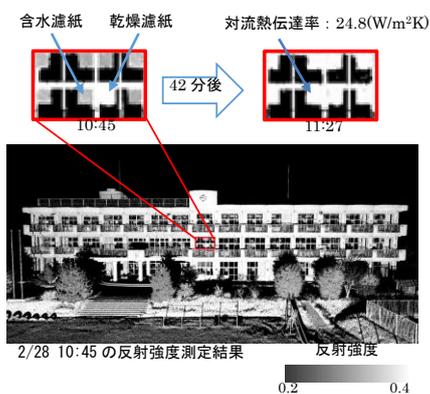


図16 実在建物に貼付した濾紙の反射強度変化と対流熱伝達率

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 0件)

[学会発表] (計 3件)

1) 浅輪貴史、山下広人：三次元レーザースキャナと濾紙蒸発法を用いた建物外表面にお

ける対流熱伝達率分布の可視化 その1 理論と関係式の導出、日本建築学会大会(北海道大学)、2013年8月

2) 山下広人、浅輪貴史：三次元レーザースキャナと濾紙蒸発法を用いた建物外表面における対流熱伝達率分布の可視化 その2 建物壁面を対象とした可視化結果、日本建築学会大会(北海道大学)、2013年8月

3) 山下広人、浅輪貴史：三次元レーザースキャナと濾紙蒸発法を用いた建物外表面における対流熱伝達率分布の可視化実験、日本ヒートアイランド学会全国大会(信州大学)、2013年7月

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
浅輪貴史 (東京工業大学)

研究者番号：50361796
東京工業大学・総合理工学研究科・准教授

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：