

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2006～2008
 課題番号： 18360234
 研究課題名(和文) 都市キャノピー3次元流れ計測システムの開発と乱流相似理論への応用
 研究課題名(英文) Development of outdoor PIV system and its application to urban boundary-layer
 研究代表者 神田 学 (KANDA MANABU)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：90234161

研究成果の概要：

(1) PIV法の適用による都市キャノピー流れ計測

キャノピー内外の詳細な流れ場の情報を得るため、超音波風速計による多点計測に代わる高時空間解像度の流れ計測法としてPIV法(Particle Image Velocimetry)を屋外都市模型実験に適用した。PIV法は室内実験において進化してきた流れ計測法であり、室内実験においては既にホットワイヤーやレーザー流速計に代わる乱流研究の主役になりつつある。大気場に適用されたのは平坦裸地における1例のみ(Hommema et al., 2003)であり、屋外の適用は今回が初めてであった。太陽光によるS/N比の問題およびレーザーの操作性の問題を克服するために、(a)安価な高出力レーザーシートの採用、(b)ノズル部の特殊加工による安定したトレーサーの供給、の工夫により、高時空間分解能の流れ計測を実現した。

(2) 大規模乱流構造の解明とフラッシング現象の発見

上空風向・上空大気安定度・局所的加熱の影響を上記観測システムによって詳細に検討した。特に、都市上空の大規模乱流構造(建物スケールの10倍～20倍程度)の通過に対応して、都市街区内の空気が間欠的かつ大規模に上空大気を持ち上げられる極めて特徴的な現象の存在が確認され、これを、「フラッシング現象」と命名した。鉛直壁面の加熱実験からは、同じ熱負荷条件でも、加熱壁が風下・風上のいずれかによって有意に、運動流・熱の輸送量が変化することが示された。

(3) 数値計算法のモデル開発・検証用データベースの提供

PIVによる流れ場の詳細なデータベースは、乱流相似理論だけでなく数値計算モデルの検証用データベースとしても高い利用価値が期待される。具体的には、鉛直壁に沿う微細な上下降流(クリーピングフロー)の存在の有無、局所加熱・冷却による循環流の変形、鉛直壁における適切な熱・運動量境界条件検討、などに資する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,000,000	0	8,000,000
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	2,160,000	17,360,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 土木工学・水工学

キーワード： 乱流構造、可視化、屋外計測、都市、高解像度、長時間

1. 研究開始当初の背景

都市域が気環境に及ぼす影響は、ヒートアイランドや集中豪雨の増加などで既に顕在化しており、現象そのものについては詳しく調べられているが、定量的予測には至っていない。その最大の原因は、現象の引き金となる都市キャノピー層から接地境界層への水・エネルギー・物質の乱流輸送過程がきちんと把握されていないことによる。そこで申請者らは、ここ数年、(1) 観測タワーによる乱流フラックスの直接計測 (Moriwaki and Kanda, 2004)、(2) 大気—都市キャノピーの乱流を統一的に解析する LES の開発 (Kanda et al., 2004)、(3) 屋外における都市のモデル実験 (Kanda et al., 2005)、を3本柱として研究を行ってきた。その結果、密集住宅街における乱流フラックスの時間・季節挙動を明らかにし、既存の乱流相似理論が都市境界層では一部破綻することを指摘するなど、世界に先駆ける成果を得た。その一連の過程で、複雑な幾何形状を有する都市特有の知見として、キャノピー内の日向・日陰分布に対応した局所加熱・冷却によって生じる微細な3次元乱流が、都市—大気の乱流輸送過程および乱流相似理論の破綻に大きく影響していることがわかってきた。すなわち、都市境界層特有の乱流輸送過程を、乱流相似関数を用いて適切に表現するには、平坦場・森林とは異なり、キャノピー内の微細流れの影響を考慮しなければならないことがわかってきたのである。そのためには、乱流輸送量 (=フラックス) の観測に加え、キャノピー内の微細な3次元流れの同期計測が必須である。しかしながら、既存の超音波風速計などの計測手法はキャノピー内の狭空間においては適用が困難であり、3次元流れ場情報の欠如が乱流相似理論の研究の進展に大きなネックとなっている。

2. 研究の目的

(1) PIV 法の適用による都市キャノピー流れ計測

キャノピー内外の詳細な流れ場の情報を得るため、超音波風速計による多点計測に代わる高時空間解像度の流れ計測法として PIV 法 (Particle Image Velocimetry) を都市住宅街に適用する。PIV 法は室内実験において進化してきた流れ計測法であり、室内実験においては既にホットワイヤーやレーザー流速計に代わる乱流研究の主役になりつつある。大気場に適用されたのは平坦裸地における

1 例のみ (Hommema et al., 2003) であり、都市への適用は今回が初めてである。都市への適用にあたって、太陽光による S/N 比の問題およびレーザーの操作性の問題を克服するために、(a) 安価な高出力レーザーシートの採用、(b) ノズル部の特殊加工による安定したトレーサーの供給の工夫により、高時空間分解能の流れ計測を実現する。

(2) 乱流フラックスとの同期観測による修正乱流相似関数への集約

上記流れ場の観測を、タワーによる乱流フラックス観測と同期して行うことにより、最終的に都市境界層における乱流輸送過程の修正相似理論式に結果を集約する。具体的には、不安定・安定時におけるフラックス輸送の特徴的イベントに対応した詳細な都市キャノピー内外の3次元乱流場、の条件付き抽出を行う。それらのデータを基に、上空風向・上空大気安定度・局所的加熱冷却面をパラメータとした非中立時乱流輸送理論の修正モデルを提案する。3次元キャノピー流れの現象解明だけでなく、このような乱流相似関数の修正式として集約させることにより、従来のモンイン・オブコフ相似則に代わる地表面物理境界条件として各種水文気象モデルにおいて利用されることが期待される。既にフラックスタワーシステムを現有・運用している点は大きな有利点である。

(3) 数値計算手法のモデル開発・検証用データベースの提供

3次元流れ場の詳細なデータベースは、乱流相似理論だけでなく数値計算モデルの検証用データベースとしても高い利用価値が期待される。具体的には、鉛直壁に沿う微細な上下降流 (クリーピングフロー) の存在の有無、局所加熱・冷却による循環流の変形、鉛直壁における適切な熱・運動量境界条件検討、などに資する。

3. 研究の方法

世界で類例の無い準実スケール屋外都市模型実験施設を用いて、都市キャノピー内外の詳細な3次元流れ場の情報を得るため、超音波風速計による多点計測に代わる高時空間解像度の流れ計測法として PIV 法 (Particle Image Velocimetry) を屋外に適用できるシステムを実現した。

屋外 PIV システムの構築にあたって、太陽光による S/N 比の問題およびレーザーの操作性の問題を克服するために、(a) 安価な高出力レーザーシートの採用、(b) ノズル部の特殊加工による安定したトレーサーの供給、(c) 長

時間・高解像度の高速画像処理のための特殊 RAID 装置、の3つの工夫をこらし、屋外における高時空間分解能の準3次元流れ計測を実現した。小型軽量な完全空冷式の1W高出力型LD励起YAGレーザーと、高解像度カメラ、膨大な画像データを高速保存可能な特殊 RAID 装置などから構成される気流可視化装置(加藤光研)を開発し、乱流計測に必要な1時間以上の連続計測システムを構築した。シーディング発生装置としては直径10ミクロンの微粒子を用いた既成のドライスモークを利用し、小孔群を有する円管に直結して、風上側からラインソースとして与えた。その際、流量コントロールにより風向・風速変動に対しても最適なシーディング供給が行えるようにした。また得られた画像情報からPIV解析ソフトを用いて、2次元風速や乱流統計量の同定を行えるようにした。2年目はデータ取得率を大幅に向上させるため、ハード・ソフトの両面から改良を加えた。ハード面では、シーディング装置を2次元化すると同時に、キャノピー内部の表面からもスモークが供給されるようにしたこと、ソフト面では、ベクトル解析のしきい値などをチューニングすることによりピークロックを回避した。これにより、超音波風速計との詳細な比較により、その精度向上が検証された。また、屋内実験でレーザー流速計を用いて得られている乱流統計量の各種空間分布と比較を行い屋内乱流との類似点・相違点を明らかにした。さらに、人為的に壁面をヒーターで熱する局所加熱実験、PIV計測で得られた発見を検証すべくLESモデルを用いた詳細な数値検証実験も併用し、現象の解明とモデル化を行った。

4. 研究成果

屋内実験でレーザー流速計を用いて得られている乱流統計量の各種空間分布と比較した結果、屋外環境では、屋内では見られない大規模な組織的乱流構造の存在により、キャノピー内と上空の間で大規模かつ間欠的な空気交換が発生することが発見された。また、中立時と壁面加熱時の流れ場およびフラックスを、本課題で開発した屋外PIV計測を用いて詳細に比較検討することにより、フルード数のようなバルクな安定度パラメータを同じとしても、加熱される壁面の相対的位置の違いにより、キャノピー層内の流れ場及び上空大気へのフラックスが変化する事が明瞭に見いだされた。

上記のPIV計測で得られた発見を検証すべく、LESモデルを用いた詳細な数値検証実験を行った。その結果、加熱位置による乱流場への影響が再現された。

街路空間から上空への物質輸送が、上空の

大規模乱流構造と関連している事、局所加熱の影響が上空へのフラックスにも影響を及ぼすこと、それらが既存乱流理論と矛盾せず、その拡張で扱える事が判明した。

以上、要するに、

(1) PIV法の適用による都市キャノピー流れ計測システムの開発

キャノピー内外の詳細な流れ場の情報を得るため、超音波風速計による多点計測に代わる高時空間解像度の流れ計測法としてPIV法(Particle Image Velocimetry)を屋外都市模型実験に適用した。PIV法は室内実験において進化してきた流れ計測法であり、室内実験においては既にホットワイヤーやレーザー流速計に代わる乱流研究の主役になりつつある。大気場に適用されたのは平坦裸地における1例のみ(Hommema et al., 2003)であり、屋外の適用は今回が初めてであった。太陽光によるS/N比の問題およびレーザーの操作性の問題を克服するために、(a)安価な高出力レーザーシートの採用、(b)ノズル部の特殊加工による安定したトレーサーの供給、の工夫により、高時空間分解能の流れ計測を実現した。

(2) 大規模乱流構造の解明とフラッシング現象の発見

上空風向・上空大気安定度・局所的加熱の影響を上記観測システムによって詳細に検討した。特に、都市上空の大規模乱流構造(建物スケールの10倍~20倍程度)の通過に対応して、都市街区内の空気が間欠的かつ大規模に上空大気に持ち上げられる極めて特徴的な現象の存在が確認され、これを、「フラッシング現象」と命名した。鉛直壁面の加熱実験からは、同じ熱負荷条件でも、加熱壁が風下・風上のいずれかによって有意に、運動流・熱の輸送量が変化することが示された。

(3) 数値計算手法のモデル開発・検証用データベースの提供

PIVによる流れ場の詳細なデータベースは、乱流相似理論だけでなく数値計算モデルの検証用データベースとしても高い利用価値が期待される。具体的には、鉛直壁に沿う微細な上下降流(クリーピングフロー)の存在の有無、局所加熱・冷却による循環流の変形、鉛直壁における適切な熱・運動量境界条件検討、などに資する。

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10件)

- ① 神田 学, 稲垣厚至: 屋外都市スケールモデル実験COSMOのねらいと成果, 日本風工学会誌, 査読有り, 第33巻, 4号 (in

press)

- ② 瀧本浩史, 佐藤 歩, 小野村史穂, 神田 学: PIV を用いた乱流計測—屋外模型都市と室内模型都市の相互比較—, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **53**, 2009 年, 241-246
- ③ 佐藤 歩, 瀧本浩史, 道岡武信, 神田 学: 建物キャニオン内の気流と拡散に関する屋外都市スケールモデル実験, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **53**, 2009 年, 247-252
- ④ 章 晋, Letzel MARCUS, 稲垣厚至, 瀧本浩史, 神田 学: LES による都市大気境界層の大規模乱流構造階層性に関する研究, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **53**, 2009 年, 259-264
- ⑤ 森泉 孝信, 河合 徹, 稲垣厚至, 神田 学: 屋外都市模型による建物高さの非一様性が大気に及ぼす影響の検討, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **52**, 2008 年, 307-312
- ⑥ 丸山綾子, 稲垣厚至, 神田 学: 大気接地境界層乱流における内部・外部スケールの乱流構造特性, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **52**, 2008 年, 235-258
- ⑦ 瀧本浩史, 森脇 亮, 津國眞明, 神田 学: 屋外都市スケールモデルにおける PIV 計測, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **52**, 2008 年, 259-264
- ⑧ した LES による大気境界層の乱流相似則に関する研究, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **52**, 2008 年, 313-318
- ⑨ 小田 僚子, 神田 学, 森脇 亮: 直接測定に基づく東京湾海表面温度が都市の気温へ及ぼす影響, 土木学会水工学論文集, 査読有り, **52**, 2008 年, 283-288
- ⑩ 神田 学, 稲垣厚至: 都市境界層における乱流相似則と組織構造, 日本流体力学会論文機関紙「ながれ」, 査読有り, **26**, 2007 年, 361-368

[学会発表] (計 11 件)

- ① 小林賢司, 瀧本浩史, 神田 学: PIV 計測及び温度変動解析による屋外模型都市上の乱流構造に関する研究, 水文・水資源学会 2008 年度研究発表会要旨集,

2008. 8. 26-28, 東京

- ② Takimoto, H., Moriwaki, R., Tsukuni, M., Kobayashi, K., and Kanda, M.: PIV Application to Turbulence Statistics within and above an Outdoor Urban Scale Model, The 4th International Conference on Advances in Wind and Structures, 29-31 May 2008, Jeju, South Korea
- ③ 瀧本浩史, 森脇亮, 小林賢司, 神田 学: 屋外模型都市における PIV を用いた乱流計測, 日本気象学会 2008 年度春季大会, 2008. 5. 20 横浜
- ④ 森脇 亮, 津國眞明, 神田 学: 屋外模型都市における PIV を用いた乱流計測, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007. 9. 12-14 東広島
- ⑤ Inagaki, A., and Kanda, M.: Evaluation of the inner-scaling similarity of turbulence over urban-like roughness derived from an outdoor scale model experiment, Seventh Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 10-13 September 2007, San Diego, CA
- ⑥ 神田 学: 都市境界層における乱流相似則と組織構造, 日本流体力学会年会 2007 2007. 8. 6-8, 東京 (特別講演)
- ⑦ 稲垣厚至, 神田 学: 屋外都市模型上における接地境界層乱流特性, 日本流体力学会年会, 2007. 8. 6-8, 東京
- ⑧ 森脇 亮, 神田 学, 津國眞明: PIV を用いた屋外都市スケールモデルでの乱流計測, 日本流体力学会年会, 2007. 8. 6-8, 東京
- ⑨ 稲垣厚至, 森泉孝信, 神田 学: 都市型凹凸地表面上空における乱流統計量の粗度スケール依存性, 水文・水資源学会 2007 年度研究発表会 2007. 7. 25-27, 名古屋
- ⑩ 神田 学: 都市域における乱流観測の現状と展望, 第 53 回風に関するシンポジウム, 2007. 6. 21, 東京 (基調講演)
- ⑪ 津國眞明, 森脇 亮, 神田 学: 屋外模型都市における PIV を用いた乱流計測, 日本気象学会 2007 年度春季大会, 2007. 5. 13-16 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 学 (KANDA MANABU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：90234161

(2) 研究分担者

(平成 18 年度、平成 19 年度 分担)

森脇 亮 (MORIWAKI RYO)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10302952

(3) 連携研究者

なし