

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 11日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360283

研究課題名（和文）減速する鉛直プロファイル・振れた風向を考慮した都市街区による海風冷熱消費構造

研究課題名（英文）Analysis of cooling effect of sea breeze on urban areas considering vertical wind profiles

研究代表者

義江 龍一郎（YOSHIE RYUICHIRO）

東京工芸大学工学部・教授

研究者番号：60386901

研究成果の概要（和文）：

- ・GISに基づいて地表面粗度を設定して領域気象モデルに与える方法を開発した。この方法を用いることで正確に風速の鉛直分布を再現できることを観測結果との比較により明らかとした。次にこの方法を用いて夏季3年分の計算を実施し、クラスター分析によって代表的な風速・温度の鉛直分布を抽出した。
- ・この鉛直分布を考慮してLESの流入変動風（風速変動と温度変動の両者）を生成する2つの手法を開発するとともに、都市街区内の熱と汚染物質拡散に対するLESの高い予測精度を風洞実験との比較により検証した。
- ・都市街区による海風冷熱の消費を解析するために必要となる都市表面から大気への対流熱伝達率を、都市形態やRe数等をパラメータとして一般化する関数式を作成した。

研究成果の概要（英文）：

- ・A method to appropriately classify land-use categories and to give roughness length to the WRF calculation based on GIS data was developed. The vertical profiles of wind velocity calculated by WRF using GIS data agreed very well with those of the observation data. The profiles in summer were classified into some representative patterns by using cluster analysis.
- ・Two methods for generating inflow turbulence (both velocity and temperature fluctuations) were examined for Large Eddy Simulation (LES). The applicability of the LES to gas and thermal dispersion in urban street canyons was validated by comparing with wind tunnel experiments.
- ・Convective heat transfer coefficients (CHTC) from various urban canopy surfaces to air were investigated by CFD simulations and wind tunnel experiments. The CHTC were generalized with respect to the urban parameters and Reynolds number.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 5,400,000 | 1,620,000 | 7,020,000 |
| 2010年度 | 5,700,000 | 1,710,000 | 7,410,000 |
| 2011年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 総計 | 12,800,000 | 3,840,000 | 16,640,000 |

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：CFD、ヒートアイランド、メソスケールモデル、鉛直プロファイル、風の道

1. 研究開始当初の背景

(1) 海陸風により減速する風速の鉛直分布

従来の都市の風環境予測では、風向は一定で指数分布や対数則に基づく風速の鉛直分布（高さとともに風速が増加していく分布）が仮定され、これを境界条件とした風洞実験や数値流体解析が行われてきた。しかし、東京の夏季の海風循環を考えれば明らかとおり、日中は地上レベルで海風が吹き、上空では反対方向に風が吹いている（図1）。この場合、風向が反転する高さに向かって風速は減速していく。したがって、高さと共に増速する境界層の中に建物群が埋もれているという前提は、高層ビルが建ち並ぶ東京などの大都市では成り立たない可能性がある。

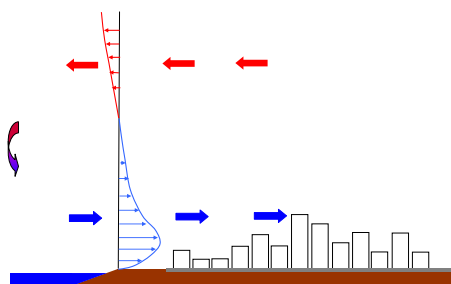


図1 夏季の海陸風と反転する風向

(2) 都市街区内の弱風域を対象とした非等温流れ場の Large Eddy Simulation

ビル風のような強風域を対象とした数値流体解析（Computational Fluid Dynamics: 以下 CFD）は比較的精度が高い。一方、都市のヒートアイランドは、非等温の現象であり、弱風の場合により深刻となる。弱風の場合は温度変化に伴う浮力の影響も無視できなくなる。こうした問題に対して、これまで一般的に用いられてきた RANS モデルは予精度が悪いことが指摘されており、Large Eddy Simulation（以下、LES）の実用化が期待されている。しかし LES の境界条件として必要となる流入変動風（風速変動と温度変動の両者）の生成方法は十分検討されていないし、都市街区内弱風域での熱拡散、汚染物質拡散に対する LES の予測精度については、未だ十分な検証がなされていない。

(3) 都市街区による海風冷熱の消費

汐留問題を契機として、都市の風の道が注目を集めている。我々は街区の風通しを良くし夏季の気温を低下させるためには、建物群の形態によって鉛直方向の移流・乱流拡散を促進し、熱や汚染物質を効率的に上空に排出することが極めて有効であることを見出し、これを「鉛直方向の風の道」と名づけた。しかし、その街区で海風の持つ冷熱を消費してしまえば、風下の地域では海風の恩恵が減少してしまう可能性がある。海風の持つ冷熱はどの地域でどの程度消費されているのであ

ろうか。またどの地域で消費するのが合理的なのだろうか。これらの問いに答える方法を検討する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 領域気象モデルによる風速鉛直プロファイルや風速発生頻度の予測精度の検証

研究に用いる領域気象モデルの風の予測精度を観測結果との比較によりまず明らかとする。予測精度を改善する方法も検討する。

(2) 夏季メソスケール解析による鉛直プロファイルの分類とその発生頻度の調査

領域気象モデルを用いて関東地方を対象とした夏季の解析を実施し、風速・温度の鉛直プロファイルを分類し、そのそれぞれのパターンの発生頻度を明らかにする。

(3) 都市街区内の弱風域を対象とした非等温流れ場の Large Eddy Simulation (LES)

この種の問題への実用化が期待されている LES に必要となる流入変動風（風速変動と温度変動の両者）の生成方法を開発する。この方法で、上記メソスケール解析により求めた弱風時の代表的風速・温度プロファイルを再現し、これを流入境界条件とした都市街区内弱風域での熱拡散・汚染物質拡散に関する LES 解析を実施し、風洞実験との比較によりその予測精度を明らかとする。

(4) 都市街区による海風冷熱の消費

都市街区の形態（建蔽率、容積率、建物高さのばらつき等）が、都市街区により消費される冷熱量にどのような影響を及ぼすかを調査し、それをメソスケールモデルに組み込む。このモデルを用いて都市街区による海風冷熱の消費構造を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 領域気象モデルによる風速鉛直プロファイルや風速発生頻度の予測精度の検証

世界標準となりつつある領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) を用いて、関東地方を対象とした年間メソスケール解析を実施する。ドップラーソーダやドップライダーによる風観測結果との比較により、風速鉛直プロファイルや風速発生頻度の予測精度の検証を行う。またこの予測精度を確保するには、地表面粗度を適切に与えることが重要と考えられるため、GIS データに基づいて土地利用分類を行い地表面粗度を設定する方法を開発する。

(2) 夏季メソスケール解析による鉛直プロファイルの分類とその発生頻度の調査

WRF を用いて関東地方を対象とした夏季3年分のメソスケール解析を行う。得られた風速と温度の鉛直分布のデータをクラスター分析によって分類し、典型的な夏季のパターンを抽出する。またそれぞれのパターン

の発生頻度を求める。

(3) 都市街区内の弱風域を対象とした非等温流れ場の LES

LES に必要となる流入変動風（風速変動と温度変動の両者）の生成方法を開発する。生成方法としては、流れ方向に広い解析領域を確保し長い助走区間によって乱流境界層を発達させていく方法と、狭い解析領域で周期境界条件によって乱流を発達させる方法が考えられる。その両者の方法について風洞実験との比較により妥当性を確認する。次にその方法で、上記メソスケール解析により求めた夏季弱風時の典型的な風速・温度プロファイルを再現し、これを流入境界条件とした都市街区内弱風域での熱拡散・汚染物質拡散に関する LES 解析を実施する。また温度成層風洞ならびに我々が開発した風速・温度・濃度の同時測定システムを用いて精密な風洞実験を実施する。LES 解析結果を風洞実験結果と比較し、その予測精度を明らかにする。

(4) 都市街区による海風冷熱の消費

「研究開始当初の背景」で述べた課題に答える手段のひとつとして、都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケール解析が挙げられる。都市街区が消費する海風の冷熱量は、都市表面から大気に伝わる対流熱伝達量と言い換えることができる。この対流熱伝達量は都市街区の形態（建蔽率、容積率、建物高さのばらつき等）に依存するはずであるが、既存の都市キャノピーモデルにはその影響が陽に考慮されていない。それを明らかにするために、まず風洞実験により都市形態が対流熱伝達率に及ぼす影響を把握する。ただし風洞実験では測定できる範囲に限られている上、求めた対流熱伝達率を実物のスケールに換算することができない。そこで低 Re 数モデルを用いた CFD 解析の対流熱伝達予測精度を上記風洞実験との比較により確認した上で、CFD を用いて都市表面から大気への対流熱伝達率を調べる。これらの調査結果をまとめ、都市形態、レイノルズ数、大気安定度をパラメータとし、これらの関数として対流熱伝達率を一般的に表す関数式を作成する。この関数式を WRF の都市キャノピーモデルに組み込む。さらにこのモデルが組みこまれたメソスケール解析により、都市街区による海風冷熱の消費構造を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 領域気象モデルによる風速鉛直プロファイルや風速発生頻度の予測精度の検証

風速鉛直プロファイルを再現するには地表面粗度を適切に与えることが重要と考えられる。しかし WRF のデフォルトの土地利用情報 USGS (United States Geological Survey) は、都市の粗密高低に関わらず、都

市を 1 種類で表現している。そこで我々は GIS (Geographic Information System) を用いてより実際の状況に則った土地利用分類を行い、さらに都市を 3 形態に分類して地表面粗度を与える方法を開発した。WRF にこの地表面粗度を与えて、関東地方における解析を行い、大気境界層研究会がドップラーソーダによって観測したデータとの比較を行った。WRF による風速の鉛直プロファイルの再現精度を統計的に検討するために、まずデータを風向ごとに分類し、クラスター分析によって鉛直プロファイルの形状に近いデータ同士のグループを作り解析値と観測値を比較するという独創的な手法を用いた。その検討結果を以下に記述する。

まず、図 2 と図 3 はそれぞれ、WRF によって計算された地上 300m での風向と風速の発生頻度を観測値と比較したものである。Case1 とは WRF のデフォルトである USGS の土地利用分類と地表面パラメータを用いた計算結果、Case2 とは GIS に基づく土地利用分類と地表面パラメータを用いた計算結果である。これらの図からわかるように、WRF によって計算された風向と風速の発生頻度は観測結果と極めてよく一致している。Case1 と Case2 の計算結果間には顕著な差は見られず、地上 300m という上空の風に対しては、地表面粗度の設定方法はあまり大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。

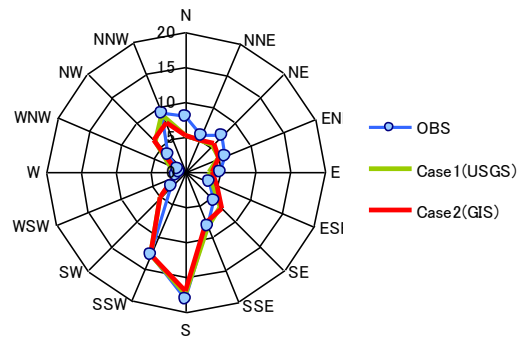


図 2 風向の発生頻度（地上 300m）

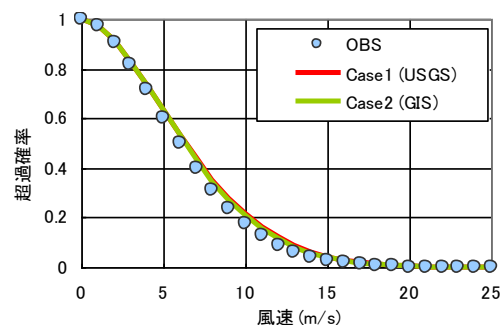


図 3 風速の発生頻度（地上 300m）

次に図 4 には、クラスター分析により分類された風速の鉛直プロファイルのうち代表例を示す。Case1 と Case2 を比較すると、GIS を使用した Case2 (右図) の方が、デフォルト

の Case1 (左図) と比べて低い高度で風速が弱くなっており、より観測値に近いことがわかる。すなわち低い高度では地表面粗度の設定方法が解析結果に影響を及ぼすので、GISを用いてこれを適切に与えるべきである。

以上のように、WRF に適切な地表面粗度を与えれば、かなり正確に風速・風向の発生頻度や風速の鉛直プロファイルを再現できることが明らかとなった。

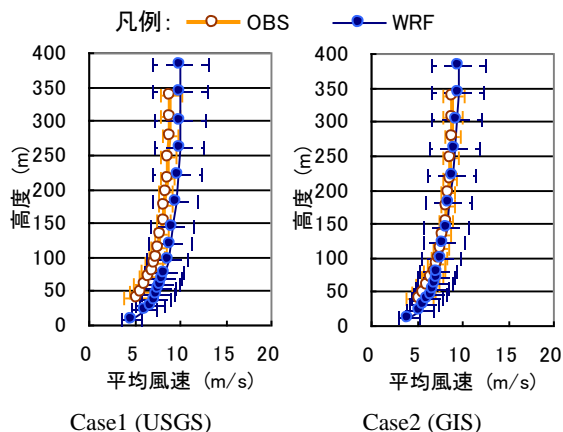


図4 風速の鉛直プロファイル

(2) 夏季メソスケール解析による鉛直プロファイルの分類とその発生頻度の調査

前述のように、WRF による風速の鉛直プロファイルの再現精度が高いことが証明されたため、次に WRF を用いて 2006 年~2008 年の夏季(8 月)の計算を行った。計算結果に対しクラスター分析を行い、いくつかの典型的な風速と温度の鉛直プロファイルを抽出した。その一例を図 5 に示す。風速値が正の場合は南風、負の場合は北風であることを示している。このプロファイルは地上 1500m 以下では南風(海から陸への風)、それより上空では北風(陸から海への風)となっており、典型的な夏季の海風循環の傾向を示している。地表付近から地上 200m 程度まで風速は増加しているが、それより上空では風速は減速していることが確認された。

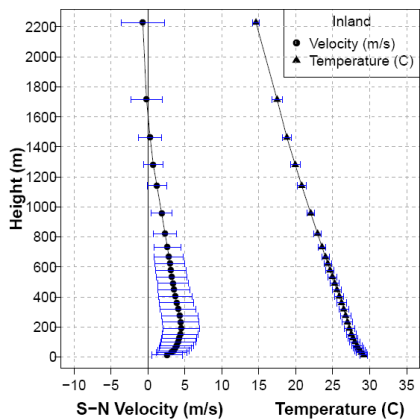


図5 典型的な海風循環のプロファイル

(3) 都市街区内の弱風域を対象とした非等温流れ場の LES

LES に必要となる流入変動風(風速変動と温度変動の両者)の生成方法として、流れ方向に広い解析領域を確保し長い助走区間によって乱流境界層を発達させていく方法(図6の Case-a)と、狭い解析領域で周期境界条件によって乱流を発達させる方法(同 Case-b)の両者を検討した。生成した流入変動風と風洞実験結果との比較を図7に示す。(左から平均風速、乱流エネルギー、平均温度、温度変動の標準偏差)。Case-a, b 両者とも全体的に実験結果をよく再現しており、物理的に正しい流入変動風を生成することができた。

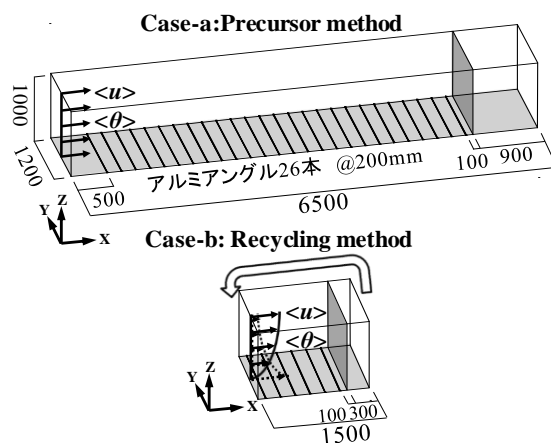


図6 流入変動風の作成方法

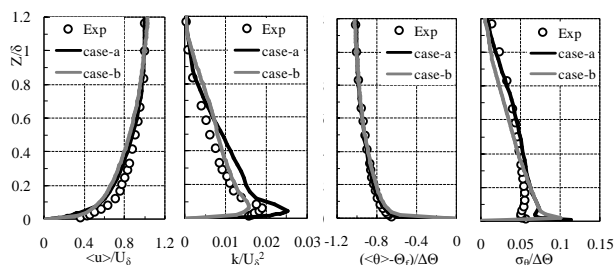


図7 生成した流入変動風と実験との比較

次に生成した流入変動風を用いて、図8に示すような都市街区内弱風域での熱拡散・汚染物質拡散に関する LES 解析と風洞実験を実施した。結果の一例を図9に示す。LES は街区内部の(特に人にとって重要な地表付近の)汚染物質濃度(図は省略するが気温も)を、RANS モデルに比べ格段によく再現している。これは LES がストリートキャニオンの中と上空との間で生ずる間欠的な空気の交換を正確に再現できているためと考えられる。ストリートキャニオンコントロールボリューム境界面での流入・流出空気量、流入・流出汚染物質質量の分析により、LES はストリートキャニオン上界面での乱流拡散による換気量の割合が大きいことが明らかとなった。

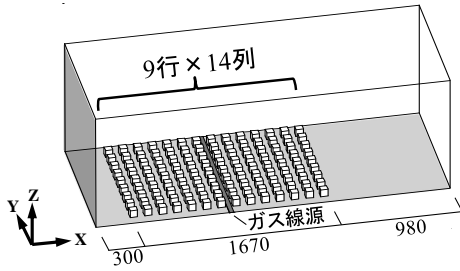


図8 都市街区モデル

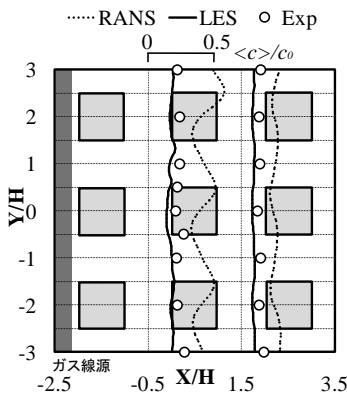


図9 都市街区内の濃度の水平分布

(4) 都市街区による海風冷熱の消費

都市街区が消費する海風の冷熱量は、都市表面から大気に伝わる対流熱伝達量と言い換えることができる。この対流熱伝達量は都市街区の形態に依存するはずであるが、既存の都市キャノピーモデルにはその影響が陽に考慮されてはいない。そこで本研究では、都市表面から大気への対流熱伝達率を都市形態パラメータの関数として一般化し、都市キャノピーモデルに組み込むことを目的とした。その第一段階として、まず風洞実験により都市形態が対流熱伝達量に及ぼす影響を把握した。図10に風洞実験状況の一例を示す。温度成層風洞の床面を加熱し冷たい気流を流して、夏季の不安定乱流境界層を再現している。この境界層流中に都市街区を模擬してアルミブロックを並べている。ブロックの高さや配置密度を6通りに変えて建蔽率や建物高さのばらつきを変化させた。風洞の風上側断面と風下側断面の風速分布と温度分布を測定して各断面通過熱量を算出し、両者の差をとることにより、都市表面全体から空気に伝わるバルクの対流熱伝達量を求めた。

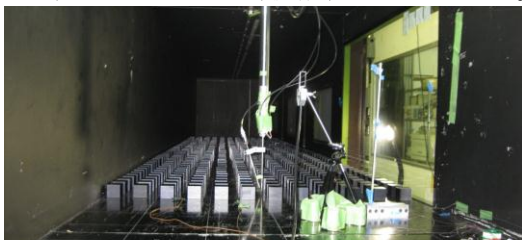
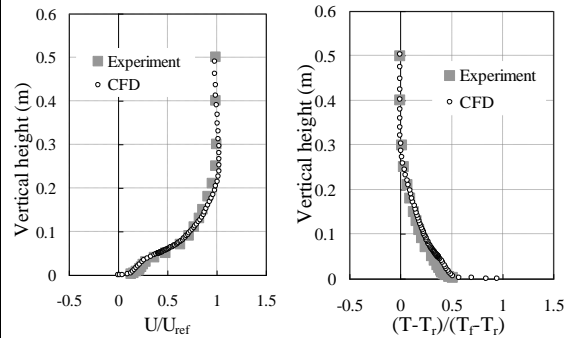


図10 風洞実験状況

ただし風洞実験では個々の建物表面から空気への対流熱伝達率を測定することは困難であり、求めた対流熱伝達率を実物のスケールに換算することもできない。そこで低Re数モデルを用いたCFD解析の対流熱伝達予測精度を上記風洞実験との比較により確認した上で、CFDを用いて対流熱伝達率を調べることとした。図11、図12にはCFD解析結果と風洞実験結果との比較の一例を示す。両者は非常によく一致しており、以後CFDを用いて個々の建物表面から空気への対流熱伝達率を詳細に調べることにした。



(a) 風速分布

(b) 温度分布

図11 CFD解析結果と風洞実験結果の比較

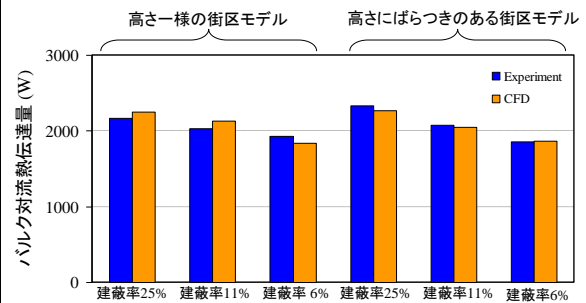


図12 バルク対流熱伝達量の比較

図13にCFD解析により求めた各壁面からの対流熱伝達率(CHTC)の一例を示す。壁によって対流熱伝達率は大きく異なること、風の吹走距離に伴って対流伝達率は徐々に減少していくことがわかる。

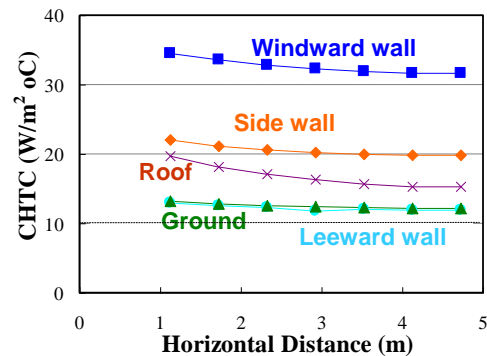


図13 各壁面からの対流熱伝達率

都市街区形態、レイノルズ数、大気安定度を 32 通りに変化させて CFD 解析を行い、これらパラメータの関数として対流熱伝達率を一般的に表す関数式を提案した。例えば風上面に対する提案式は以下のとおりである。

$$Nu_x = 11.9 + 0.82Re_x^{0.62} - 62.4\lambda_p + 4.0H_r + 0.15Ri$$
 ここで、 Nu_x は局所ヌッセルト数（対流熱伝達率を表す無次元数） Re_x はレイノルズ数、 λ_p は建蔽率、 H_r は建物高さのばらつき、 Ri はリチャードソン数である。図 14 には提案式による局所ヌッセルト数 Nu_x と CFD 解析による Nu_x との対応を示す。両者はよく一致しており、提案式の妥当性が確認された。また提案式は無次元パラメータを用いて表されているため、あらゆるスケールでの対流熱伝達率を求めることができる。この提案式を WRF の都市キャノピーモデルに組み込み、都市による海風消費構造を解析し、その結果を分析するのが最終目標である。この残された課題を継続して実施していく予定である。

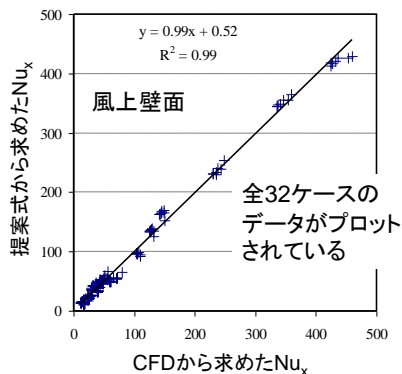


図 14 提案式と CFD から求めた Nu_x の対応

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 5 件）

- ① Guoyi Jiang, Ryuichiro Yoshie, Taichi Shirasawa, Xinyang Jin, Inflow turbulence generation for large eddy simulation in non-isothermal boundary layers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, DOI: 10.1016/j.jweia.2012.02.030, 査読有
- ② Sivaraja Subramania Pillai, Ryuichiro Yoshie, Experimental and numerical studies on convective heat transfer from various urban canopy configurations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, DOI:10.1016/j.jweia.2012.03.010, 査読有
- ③ R.Yoshie, J.Guoyi, T.Shirasawa, J.Chung, CFD simulations of gas dispersion around high-rise building in non-isothermal boundary

layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.99, 2010, pp.279-288,

DOI:10.1016/j.jweia.2011.01.006, 査読有

- ④ J.Chung, R.Yoshie, S. Subramania Pillai, Classification of Vertical Profiles of Wind Velocity and Temperature in Tokyo Area using WRF Results and Cluster Analysis, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, 2010, pp.61-66, https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosymp/21/0/21_0_61/_article/-char/ja/ 査読有
- ⑤ Ryuichiro Yoshie, Masaaki Oba, Present Situation of Outdoor Wind Environmental Issues in Japan, *Global Environmental Research*, Vol.13, 2009, 179-188, 査読有

〔学会発表〕（計 3 1 件）

- ① Masanori Mochizuki, Ryuichiro Yoshie, Comparison between WRF calculations and observations of vertical profiles of wind velocity, *PHYSMOD2011*, 2011.8.23, Hamburg, Germany
- ② Koudai Katada, Ryuichiro Yoshie, Guoyi Jiang, Simultaneous measurement of velocity and temperature in unstable turbulent boundary layer and numerical analysis by LES, *PHYSMOD2011*, 2011.8.23, Hamburg, Germany
- ③ Tingting Hu, Ryuichiro Yoshie, Effects of building arrangement on ventilation performance in newly-built urban area, 13th International Conference on Wind Engineering, 2011.7.15, Amsterdam, Netherlands
- ④ 義江龍一郎, S.Pillai, 都市形態が大気への対流熱伝達に及ぼす影響に関する風洞実験と低 Re 数モデルによる CFD 解析、第 24 回数値流体力学シンポジウム、2010.12.20、東京

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arch.t-kougei.ac.jp/yoshie/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

義江 龍一郎 (YOSHIE RYUICHIRO)
 東京工芸大学・工学部・教授
 研究者番号：60386901

(2) 研究分担者

白澤 多一 (SHIRASAWA TAICHI)
 大妻女子大学・社会情報学部・助教
 研究者番号：40423420