

実在都市における中立大気境界層内の乱流組織構造

Turbulence Coherent Structures of the Neutral Atmospheric Boundary Layer over an Actual Urban Area

吉田敏哉・竹見哲也

Toshiya YOSHIDA and Tetsuya TAKEMI

Synopsis

Turbulence coherent structures over an actual urban area, Kyoto, under a neutrally stratified condition is investigated by conducting large-eddy simulations (LESs). To validate the LES, we compare LES results with observational data at Ujigawa Open Laboratory included in the computational region. The vertical profiles of mean velocity and the streamwise velocity power spectra in the LES are qualitatively consistent with the observations. The instantaneous velocity field in the horizontal plane shows that low and high momentum regions elongated in the streamwise direction exist over an actual urban area. In addition, the field indicates low and high momentum regions with ejection and sweep, respectively. Conditionally averaged velocity field shows counter-rotating vortex pair. The instantaneous spanwise velocity component field in the vertical plane also indicates the vortex pair. These characteristics are similar to results from turbulent flows both over block arrays and over a smooth surface.

キーワード: 乱流組織構造, 大気境界層, ラージ・エディ・シミュレーション,
都市気象学

Keywords: turbulence coherent structures, atmospheric boundary layer, Large-eddy simulation, urban meteorology

1. はじめに

地球大気には、地球規模、総観規模といった大規模変動から、中規模の擾乱に伴う変動や微細規模の変動まで、様々な時空間スケールの変動が存在している。地球大気の最下層にあたる大気境界層では、地表面の摩擦の影響を受けた境界層が発達していることにより、微細規模の変動にあたる乱流が支配的な層となっている。そして、境界層内の乱流では、特徴的なスケールやパターンを持つ組織的な構造が形成されることが知られている。

熱的効果により生成される乱流を無視できる中立成層時の大気境界層では、主流方向に沿って流れの低速域と高速域が筋状に伸びるストリーク構造が存在することが知られている。この組織構造は運動量

フラックスや風速変動に大きく寄与することが明らかにされている (Fang et al., 2015)。一様かつ平坦な地表面上でのストリーク構造については、高解像度の観測によりその3次元的な特徴が明らかにされ、実験室スケールの乱流境界層内での組織構造と同様の特徴を有していることが示された (Hutchins et al., 2012)。しかし、現実の地表面は地形の起伏や植生、人工構造物等によって平坦一様とは言えないことがほとんどである。特に都市域に見られる構造物は境界層厚さに対して無視できないほどの高さを持ち、個々の高さのバラつきが非常に大きいため、乱流組織構造に強く影響することが示唆される。そこで、構造物上の流れ場に対する理解の第一歩として、先行研究では立方体状のブロックを規則的に並べた簡略化した都市モデルによる研究が行われてきた。Kanda et al.

(2004)は数値実験により、ブロック上空にストリーク構造が存在することを示し、ストリーク構造は都市域においても存在することを示した。しかし、ブロックを用いた都市モデルと実在都市ではその形状が大きく異なるため、ブロックを用いた都市モデルのみの研究では不十分であると考えられる。

近年、計算資源の発展により数 m単位という高解像度の数値シミュレーションが実現しており、実在都市の個々の建物を正しく解像した数値実験が可能となっている。これは、複雑な都市構造物上の流れ場を詳細に解析できることを意味する。そこで本研究では、実在都市を対象として乱流を陽に計算することが可能なLarge-eddy simulation(LES)を行い、実在都市における乱流組織構造の特徴を明らかにすることを目的とした。

解析の対象は京都市とした。計算領域には京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーが含まれている。ここでは超音波風速計とドップラーライダーによる乱流観測が行われた(堀口, 2014)。そこで、LESの整合性を検証するために、これらの観測データとLESの比較も行った。

2. 数値モデルと観測データ

2.1 LESモデル

本研究では中立成層大気を対象としている。よって、基礎方程式は以下で表されるフィルター操作された非圧縮流体の連続の式とナビエ・ストークス方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{D}_{ij}) + f_i \quad (2)$$

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

u_i は各速度成分、 ρ は空気密度、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 D_{ij} はひずみ速度テンソルである。 τ_{ij} はサブグリッドスケール(SGS:subgrid scale)の流れ場の効果を表しており、残余の応力と呼ぶ。本研究では τ_{ij} のモデル化にSmagorinskyモデル(Smagorinsky 1963)を使用した。モデル化の際に使用する任意定数 C_s (Smagorinsky定数)は、 $C_s = 0.14$ とした。体積力 f_i は建物の効果を表すためにナビエ・ストークス方程式に加えている。本研究では建物の効果を外力として表すことで、陽的に建物を表現した。 f_i はfeedback forcing(Goldstein et al. 1993)の手法を用いて決定している。これらの設定や離散化手法は基本的にNakayama et al. (2011)に従う。

次に境界条件について述べる。流入部には別計算領域(ドライバー部)で作成した乱流状態の流れ場をタイムステップ毎に与えている。スパン方向には周期境界条件、上端にはfree-slip条件、下端には対数則の壁関数モデル、流出部には移流型条件を用いた。

計算領域の大きさは主流方向11.0 km、スパン方向2.0km、鉛直方向1.05 kmとした。ここで、本研究では主流方向を南北方向、スパン方向を東西方向とする。Fig. 1に計算領域の建物高さ分布を示す。建物の3次元的な空間分布を表現するために、国際航業株式会社による3次元空間データRAMS-eを使用している。水平方向には4 m、鉛直方向には下端で1 m、上端で16 mとなるような不等間隔の格子幅を用いた。格子数は約 1.4×10^8 である。積分時間は7200 sで、最後の30分間の計算結果を統計量算出に使用した。

2.2 観測データ

本研究で使用した大気乱流の観測データは京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー(北緯 34.9° 、東経 135.7°)で行われた。観測には超音波風速計(カイジョー製DA-600)とドップラーライダー(Leosphere社製WINDCUBE WLS7)を使用している(Fig. 2)。超音波風速計は観測鉄塔の高度25 mと40 mに設置し、時間分解能0.1秒で風速3成分と気温を観測する。ドップラーライダーは高度40 mから200

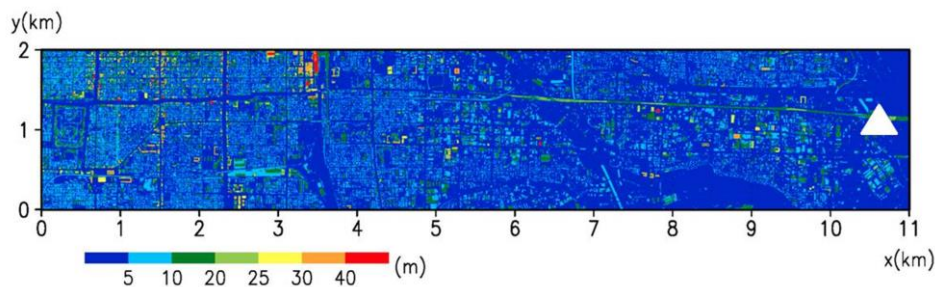


Fig. 1 The elevation field of the buildings height in a computational region. The white triangle shows the observation point. Note that left is north.

mまで20 m間隔で視線方向風速を観測する。視線方向風速から風速3成分は導出される。時間分解能は1秒である。観測は2013年5月31日から2013年7月23日の期間に行われた。

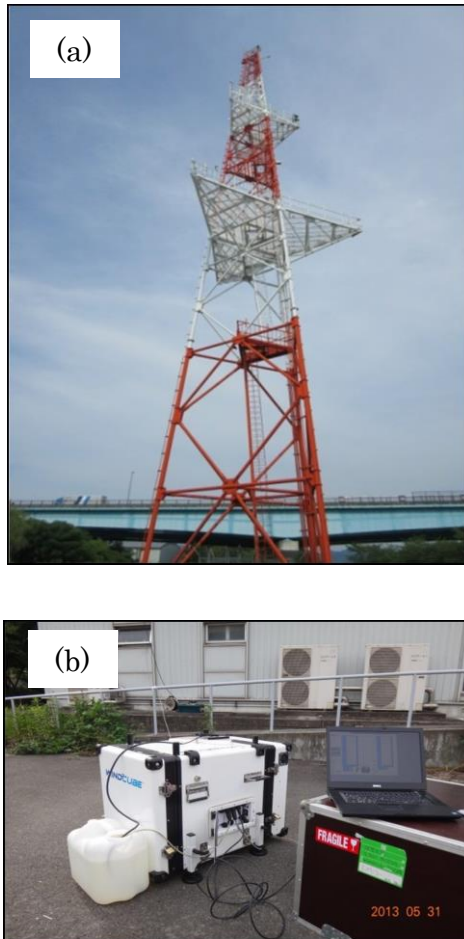


Fig. 2 Meteorological instruments:(a)The observation tower and the sonic anemometers, (b) the Doppler lidar.

3. 結果

3.1 観測との比較

観測データとLESの比較を行うために観測データの中からLESと同条件のデータを抽出する必要がある。そのため、以下の条件を用いてデータの選別を行った。

i). 風向の選別

LESでは周流風向を北風にしている。そこで、観測データから、16方位に分類した10分平均風向を求め、この10分平均風向が3回連続で北になる期間を抽出した。

ii). 大気安定度の選別

LESでは中立成層大気を対象としている。そこで、大気安定度の指標 z/L を用いて、中立時のデータの選別を行った。 z/L は以下の式で表される。

$$\frac{z}{L} = -\frac{(g/\bar{T})\overline{w'T'}}{u_*^3/kz} \quad (5)$$

z は高度, L はモニンオブコフの長さ, g は重力加速度, \bar{T} は平均気温, $\overline{w'T'}$ は顕熱フラックス, $u_* (= \sqrt{-\overline{u'w'}})$ は摩擦速度, k はカルマン定数である。また, $\bar{\quad}$ は時間平均, $'$ は時間平均からの偏差を表す。 z/L は乱流に対する力学的な作用と熱的な作用の比に関連しており, $z/L = 0$ の時, 大気安定度は中立成層とみなされる。本研究では $|z/L| < 0.05$ のとき中立成層として取り扱った(Roth, 2000)。

これらの条件を満たすデータは観測期間内で4ケース検出された。そのうちの1ケースについてLESとの比較を行った。

Fig. 3(a)に平均風速の鉛直プロファイルの比較を示す。図の縦軸, 横軸ともに対数軸となっている。

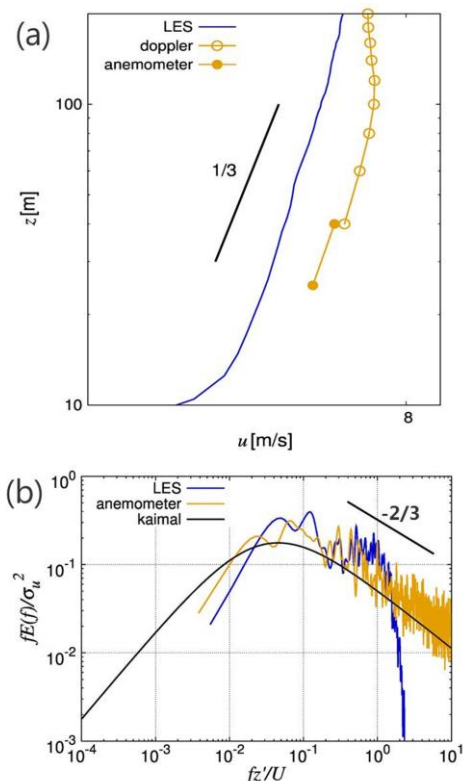


Fig. 3 Comparisons between observations and LES: (a)vertical profiles of mean velocity, (b)power spectra of the streamwise velocity component.

観測とLESでは風速の大きさや境界層の厚さが異なるため定量的な比較はできない。しかし、高度100 m以下でそれぞれの傾きは1/3乗の傾きに沿っていることが分かる。大気境界層内の風速鉛直プロファイルは経験的に高度のべき乗に比例することが知られており、都市域のべき指数は1/4から1/3程度とされている。よって、LESは観測結果を定性的によく再現できていることが分かり、また、都市構造物が流れ場に与える影響を再現できていると言える。

Fig. 3(b)は主流方向風速成分のパワースペクトルを示している。図の黒線はカンザスの実験(Kaimal et al. 1972) で得られた接地境界層内の代表的なスペクトル分布である。SGSモデルや解像度の影響により、LESのパワースペクトルは高周波域で急激に減少していることが分かる。しかし、全体的に観測結果や代表的なスペクトル分布を再現しており、乱流のスペクトルに現れる慣性小領域での $-5/3$ 乗則（ここでは規格化により $-2/3$ 乗）も確認できる。

以上から、本研究で使用したLESモデルは観測結果と整合性の高いモデルであることが示された。

3.2 空間構造

ここでは、本研究で得られた流れ場を平板上やブロック上で見られるストリーク構造の特徴と比較することで、都市構造物上の組織構造の性質を明らかにすることを試みる。ストリーク構造の特徴は、(1)流速の低速領域と高速領域が主流方向に筋状に並ぶ、(2)瞬間場の運動量フラックス $u'w'$ は、低速領域では $ejection(u' < 0, w' > 0)$ 、高速領域では $sweep(u' > 0, w' < 0)$ となる、(3)低速領域および高速領域は両脇に逆方向に回転する対の渦を伴う（ヘアピン渦）、が挙げられる。

Fig.4(a)は計算領域下流（南北3 km・東西2 km）、高度40 mでの主流風速成分の時間平均からの偏差である。青色の領域は平均値から20%低速の領域、赤色の領域は平均値から20%高速の領域を示す。図から、筋状に伸びた構造が確認できる。また、Fig.4(b)はFig.4(a)と同時刻、同領域での $ejection$ と $sweep$ を図示したものである。 $ejection$ と $sweep$ は同符号であるため、そのままでは識別できない。そこで、Park et al. (2015)で用いられた $sgn(w') \cdot \max(0, -u'w')$ を利用した。これにより、 $ejection$ を正、 $sweep$ を負の値として区別できる。Fig. 4 (b)では $0.2m^2s^{-2}$ より大きい場合を赤色($ejection$)、 $-0.2m^2s^{-2}$ より小さい場合を青色($sweep$)としている。Fig.4(a), (b)より、 $ejection$ は低速領域に、 $sweep$ は高速領域に現れることが分かる。これらの対応関係はストリーク構造の特徴と一致している。

次に条件付き平均した流れ場 (conditionally

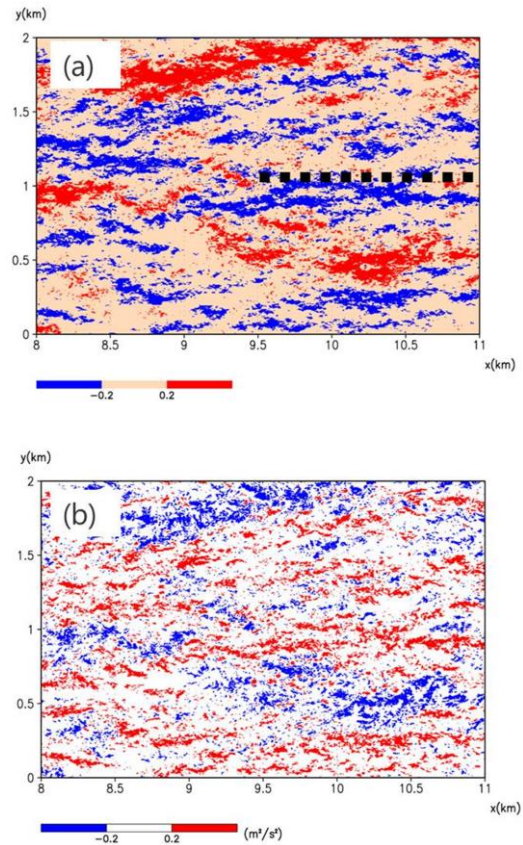


Fig. 4 Instantaneous fields in the x-y plane of the downstream region at $z = 40$ m: (a) the streamwise velocity fluctuation, (b) $sgn(w') \cdot \max(0, -u'w')$. The dash line shows the position of x-z plane in Fig.6.

averaged velocity field) を用いた。条件付き平均とは設定した条件を満たす地点を選び出し、その地点を原点として地点周りの流れ場を重ね合わせることで、設定した条件に関係のある特徴を調べることができる手法である。

Fig.5は $u'w' < -1.5m^2s^{-2}$ を条件として、 $ejection$ 、 $sweep$ 別に求めた高度40 mでの条件付き平均した流れ場のxy断面である。ここで、図のベクトルは時間平均からの変動成分を用いて書かれている。Fig.5(a)は $ejection$ 、Fig.5 (b)は $sweep$ の場合を重ねた流れ場を示しており、それぞれ対の渦を伴っていることが分かる。Fig.5(a)の中心部分は低速領域、Fig.5(b)の中心部分は高速領域になっていることから、図に見られる対の渦はヘアピン渦の構造を有していることが分かる。

また、fig.6は v 成分のxz断面を示している。図の位置はFig.4(a)の点線で示した場所である。Fig.6から主流方向に傾いた正と負の領域が交互に存在しており、

正と負の境界に渦線を持つような渦の存在が考えられる．よって，瞬間場からもヘアピン渦の存在が示唆された．この特徴は平板上の大気境界層で行われた観測 (Hutchins et al. 2013) やLES (Fang et al. 2015) の結果と一致しており，都市構造物上と平板上に見られる組織構造は同様な特徴を有している可能性が示された．

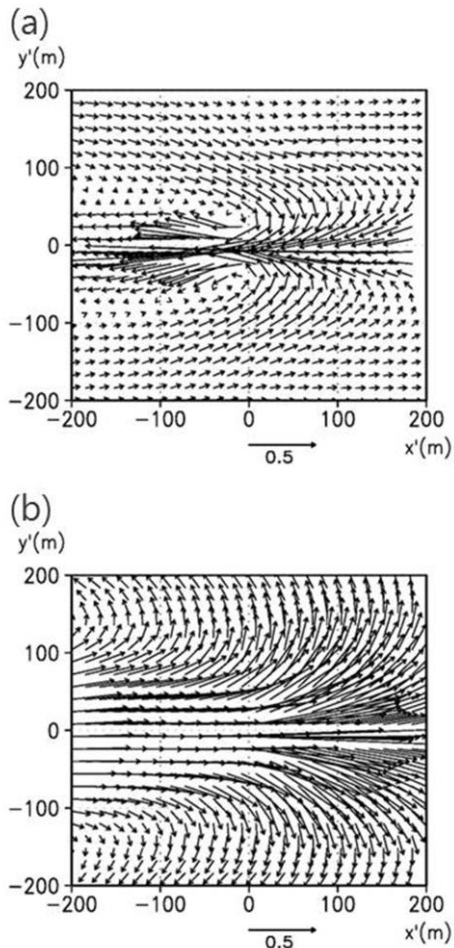


Fig. 5 The velocity vector of conditionally averaged velocity field in the x-y plane at $z = 40$ m.: (a) ejection, (b) sweep.

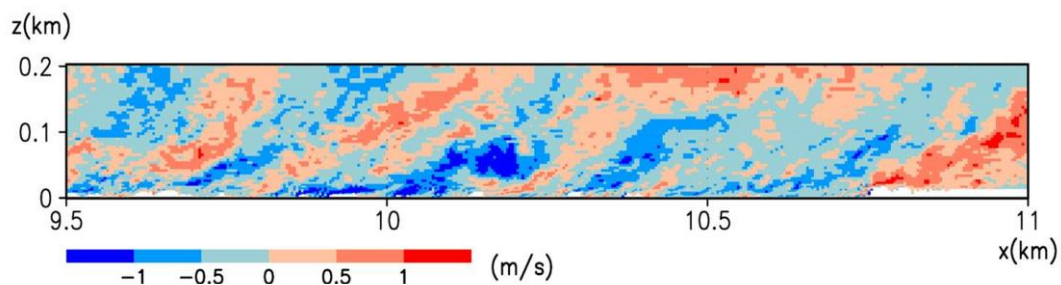


Fig. 6 The instantaneous field of spanwise velocity in the x-z plane at the position of the dash line in Fig.4(a).

4. まとめ

本研究では，実在都市における中立成層時の乱流組織構造について，LESを用いた解析を行った．また，LESモデルの精度を検証するために，観測データとの比較も行った．

対象とした京都市の計算領域に含まれる京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーで行われた乱流観測データとLESを比較した結果，LESにおける平均風速のべき指数は観測データに近い値をもつことが確認できた．これは，LESは定性的には観測結果を良く再現できていることを示している．また，主流方向成分のパワースペクトルにおいても，LESの結果は高周波域を除き観測や代表的な乱流スペクトルとよく一致している．そして，慣性小領域に見られる $-5/3$ 乗則を再現できていることから，本研究で使用したLESモデルは乱流組織構造を解析する上で十分な精度を持っていることが確認できた．

本研究の結果と平板上やブロック上で見られるストリーク構造の特徴を比較することで，都市構造物上の組織構造の性質を調べた．まず，主流成分の時間平均からの偏差のスナップショットから，低速領域と高速領域が主流方向に向かって筋状に伸びている構造を確認できた．また，瞬間場の運動量フラックスにおけるejectionとsweepがそれぞれ低速領域と高速領域に現れることを示した．さらに，条件付き平均した流れ場から，低速領域および高速領域の両脇には逆方向に回転する対の渦，すなわちヘアピン渦が存在することを示した．また， xz 断面内の v 成分のスナップショットからも同様な特徴が見られたことから瞬間場からもヘアピン渦の存在が示唆された．

以上から，ブロック上や平板上に見られるストリーク構造と同じ特徴が都市構造物上の流れ場に対して示すことができた．今後はより定量的に構造物と組織構造の関係を明らかにするために，高度や水平位置別に構造物が流れ場に与える影響を調べる予定である．

謝 辞

本研究を行うにあたり，日本原子力研究開発機構の中山浩成博士にはLESモデルに関する多くのアドバイスをいただきました。グラスゴー大学のVanderbauwhede博士にはLESモデルの並列コードを提供していただきました。京都大学防災研究所暴風雨気象環境研究分野の堀口光章助教授には宇治川オープンラボラトリーでの観測データの提供及び解析に関するアドバイスをいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 堀口光章 (2014) : 都市近郊における大気境界層の観測—不安定時の乱流構造—, 京都大学防災研究所年報, 第57号 B, pp. 239-247
- Fang, J. and Porté-Agel, F. (2015): Large-eddy simulation of very-large-scale motions in the neutrally stratified atmospheric boundary layer, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.155, No. 3, pp. 397–416.
- Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L. (1993): Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, *J. Comput. Phys.*, Vol. 105, No. 2, pp. 354–366.
- Hutchins, N., Chauhan, K., Marusic, I., Monty, J. and Klewicki, J. (2012): Towards reconciling the large-scale structure of turbulent boundary layers in the atmosphere and laboratory, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol. 145, No. 2, pp. 273–306.
- Kanda, M., Moriwaki, R. and Kasamatsu, F. (2004): Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol. 112, No. 2, pp. 343–368.
- Nakayama, H., Takemi, T. and Nagai, H. (2011): Les analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Vol. 50, No. 8, pp. 1692–1712.
- Park, S.-B., Baik, J.-J. and Han, B.-S. (2015): Large-eddy simulation of turbulent flow in a densely built-up urban area, *Environ. Fluid Mech.*, Vol. 15, No. 2, pp. 235–250.
- Roth, M. (2000): Review of atmospheric turbulence over cities, *Q. J. R. Meteorol.*, Vol. 126, No. 564, pp. 941–990.

(論文受理日 : 2016年6月13日)