

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420616

研究課題名(和文)市街地風環境の組織的非定常変動を再現可能な実用的RANS解析手法の構築

研究課題名(英文)Implementation of the RANS-based CFD method reproducing organized unsteady flow fluctuation in wind environment around buildings

研究代表者

富永 禎秀(Tominaga, Yoshihide)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：00278079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：現在一般的であるRANS(レイノルズ平均を施した運動方程式を解く乱流のモデル化方法)の定常解析では再現できない、建物周辺の渦放出等に伴う組織的な変動を、非定常解析(Unsteady RANS; URANS)によって再現することによって弱風領域の予測精度の向上を目指した。複数の流れ場・拡散場を対象に、定常解析(Steady-RANS; SRANS)及び実験結果との比較に基づく性能評価を行った。の輸送方程式に付加項を組み込むことで、周期的な変動を再現することに成功した。その結果、URANSの適用により建物後方の循環流や乱流エネルギー、濃度分布の予測精度が大きく向上することを確認した。

研究成果の概要(英文)：The performance of the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) turbulence modeling of the flow field around an isolated building was examined. The unsteady fluctuation behind the building was successfully reproduced by URANS computation. The URANS computation successfully contributed to the reproduction of a certain part of the large-scale unsteady flow patterns around the building, and enabled more accurate prediction of the velocity distributions behind the building compared to the steady-RANS (SRANS) computation. The URANS simulations also yielded larger estimates of the concentration diffusions behind the buildings than SRANS and improved the accuracy of the estimation of the mean concentration.

研究分野：工学

キーワード：市街地風環境 非定常変動 CFD RANS

1. 研究開始当初の背景

建築・都市環境工学における建物周辺や市街地気流の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析は、研究だけでなく実務の設計にも盛んに用いられるようになってきた。申請者のこれまでの研究によって、特に強風時の建物周辺の平均流れ場の予測に関しては、乱流モデルや各種境界条件と予測精度の関係が明らかとなっており、これらの成果は、ガイドラインとして整理され、実務及び研究に広く参照されている。

上記の強風時を想定したガイドラインにおいては、RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) モデルの定常解析が前提とされてきた。RANS は流体の基礎方程式にレイノルズ平均を施したもので、一般に定常状態を前提として時間微分項をゼロとし、計算を簡略化する。この手法は、そのロバスト性の高さから様々な工学的な流れに適用されている。一方、弱風領域 (後方循環領域などの建物等の影響によって風が減速する領域) の予測精度に関しては、RANS の定常解析では、建物後方の循環領域が過大に評価されることが、申請者らによって指摘されている。

申請者は、このような建物背後領域の弱風領域や建物近傍の拡散場の予測精度に、建物周辺で形成される渦放出等に伴う流れの組織的な (Organized) 非定常構造の再現性が大きく影響していることを明らかにした。このような流れの組織的な非定常性は、乱流モデルでモデル化されている変動とは本質的に別のものであり (図 1 参照) 一般に用いられるような RANS の定常解析では再現できず、LES (Large Eddy Simulation) 等の非定常計算によらざるを得ないとされてきた。またこのような組織的な流れ構造はストリートキャニオン上部での intermittent な渦交換等においても見られる (図 2 参照)。申請者は、最近、科学研究費等の助成を受け、単体建物周辺やストリートキャニオンの汚染質拡散場における LES と定常 RANS 解析の比較を行い、このような組織的な非定常変動の再現が、拡散場の予測精度にも大きな影響を及ぼすことを明らかにしている。

しかしながら、周知の通り LES は流体の基礎方程式に対して空間フィルタを施すものであり、本質的に格子解像度への依存性が高く、信頼性の高い結果を得るためには、計算負荷が非常に大きいという問題がある (一般的に定常 RANS の数十倍)。また非定常に変動する流入境界条件を与える必要がある等、その適切な利用には、より多くの経験や知識を要する。よって数多くのケーススタディが必要とされ、また素早いレスポンスタイムが要求されるような環境工学分野における実務的な課題で LES を利用することは、近い将来においても困難であると予想される。

この課題に対する一つの回答として、RANS を非定常 (Unsteady) に解く方法 (以

降 URANS) が考えられる。URANS は、RANS において時間微分項を残したまま非定常解析を行うものであり、LES に比べて計算負荷の増大や格子依存性の問題を回避しつつ、建物周辺気流において重要な組織的な非定常変動を再現可能な解析手法である。特に換気・通風や汚染質拡散などの建築環境工学における弱風問題への URANS の利用可能性は極めて高いと期待される。

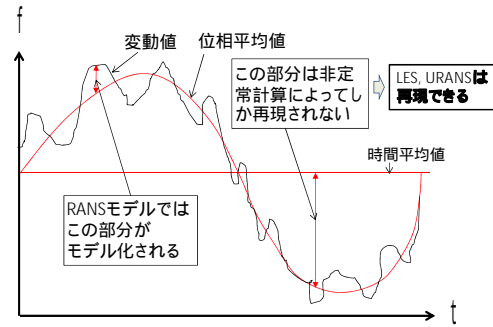


図 1 建物周辺の乱流変動と周期的変動の概念

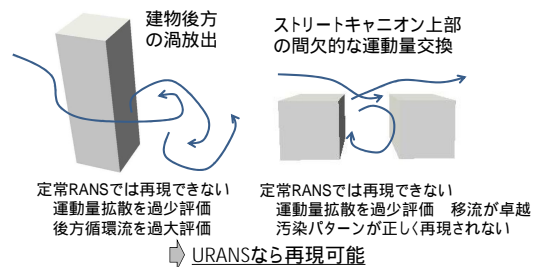


図 2 組織的非定常性が平均流れ場・拡散場に影響を及ぼす例

2. 研究の目的

本研究では、換気・通風や汚染質の拡散予測において特に重要となる市街地の弱風環境を、少ない計算負荷で精度よく予測する CFD 解析手法を確立する。現在、一般的である RANS (レイノルズ平均を施した運動方程式を解く乱流のモデル化方法) の定常解析では再現できない、建物周辺の渦放出等に伴う組織的な変動を非定常解析 (Unsteady RANS; URANS) によって再現することによって弱風領域の予測精度の向上を図る。この目的のために、平均流が有する組織的な非定常変動から小スケールの乱流変動へのエネルギー輸送を組み込んだ新たな乱流モデルに基づく URANS 解析の精度を検証するとともに、他の解析手法に対する優位性と適用性評価を行う。

3. 研究の方法

上記の実験結果や既往の研究をベースに、カルマン渦のような組織的な非定常構造と小スケールの乱流変動の相関を考慮する新たな乱流モデルを構築する。前述の通り、一般的な定常 RANS 計算で用いられる乱流モデ

ル（例えば標準 k-モデル、RNG k-モデル等）を用いて非定常計算を行っても、建物周辺の非定常性の変動は再現されない場合が多い。この問題の主たる原因は、平均流が有する比較的大きなスケールの組織的非定常変動が有する運動エネルギーから小スケールの乱流エネルギーへ行われるべきエネルギー輸送が、乱流モデルにおいて適切に表現されていない（あるいはモデル係数がそのような流れの非定常性を考慮して決定されていない）ためである。Younis and Zhou (2006)は、この効果を次式のような乱流エネルギー散逸率の輸送方程式に付加項として組み込むことによって表現し、2次元角柱の URANS 解析においてその有効性を示している。

$$C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} \left(1 + C_t \frac{k}{\varepsilon} \frac{1}{Q+k} \left| \frac{\partial(Q+k)}{\partial t} \right| \right)$$

k : 乱流エネルギー

Q : 平均流の運動エネルギー

本研究では、上記のモデルを付加した RNG k-モデル及び3次元 URANS に適用実績のある SST モデルを用いて、建物周辺の組織的非定常構造を再現可能な RANS 型乱流モデルを精査する。

対象は、1:1:2 角柱周り流れ場及び立方体建物モデル周辺の汚染質拡散場の2ケースとする。

4. 研究成果

(1) 1:1:2 角柱流れ周辺の流れ場

解析手法、条件

日本建築学会のベンチマークテストでも採用されている 1:1:2 のアスペクト比を有する直方体の建物モデルを対象とした。

ANSYS Fluent 14.5 を使用して実施した。乱流モデルは、組織的非定常変動が有する運動エネルギーから乱流エネルギーへ行われるべきエネルギー輸送を表現する付加項³⁾を RNG k-モデルの方程式に組み込んだ。なおこの付加項は、定常計算では 0 となり、通常の RNG k-モデルとなる。

解析結果

URANS モデルによって得られた建物モデル周辺の風速 V の時間変動を図 3 に示す。建物後方では渦放出に伴う風速水平方向成分の周期的な変動が明瞭に観察される。振幅は実験に比べて小さいものの、その周期はほぼ一致している。また圧力の等値面の時間変化を図 4 に示す。

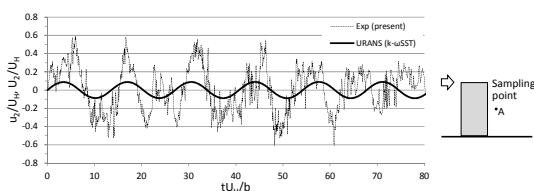


図 3 建物モデル周辺の風速 V の時間変動

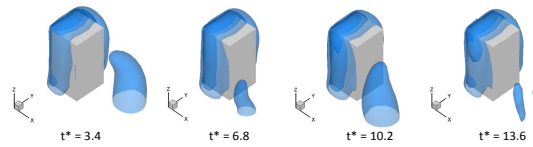


図 4 圧力の等値面の時間変化

次に流線、乱流エネルギー k の分布における SRANS と URANS の比較を示す。URANS では後方循環流が SRANS に比べて小さくなっており、これは実験に近づく傾向である。これは、図 6 に示すように建物後方の循環流領域で、運動量拡散が大きくなり、循環流が後方に延びることを阻害したためと考えられる。この乱流エネルギーの増加は、URANS における周期的な変動の再現によってもたらされたものである。

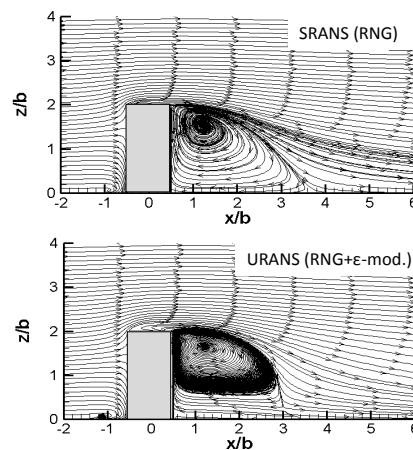


図 5 平均流線の SRANS と URANS の比較

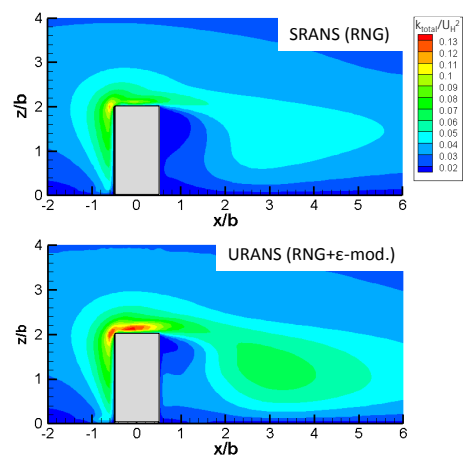


図 6 乱流エネルギー k の SRANS と URANS の比較

SRANS と URANS の各測定点における主流方向風速、乱流エネルギー k の実験との相関図を図 7 に示す。URANS の結果では、全体に相関係数が向上していることが確認できる。

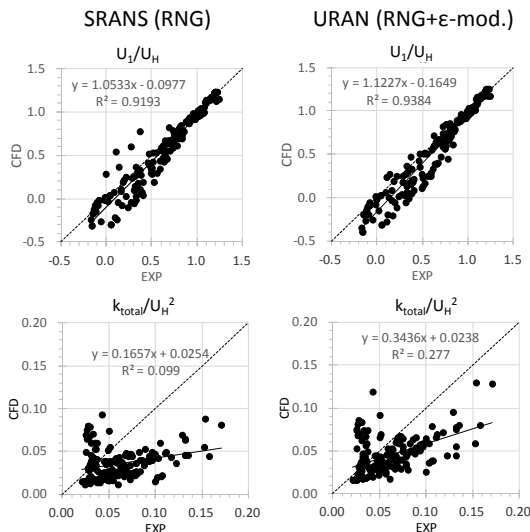


図7 SRANS と URANS の実験結果との相関

(2) 立方体建物モデル周辺の流れ場・拡散場
解析条件

立方体建物モデルに位置の異なる3つの排出口を設けた3ケースを対象とした(図8)。

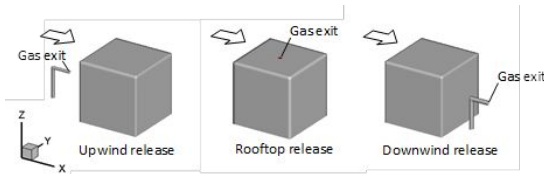


図8 解析ケースの概要

ANSYS Fluent 14.5 を使用して実施した。解析条件の詳細は既報⁵⁾を参照されたい。乱流モデルは、1:1:2 角柱流れ周辺の流れ場と同様とした。

解析結果

URANS の結果は、RANS 方程式より算出される諸量をさらに時間平均をとることで、平均値を算出した。

平均主流風速 U 及び乱流エネルギー k の実験との比較を図9に示す。また URANS の場合の排出口に近い3点の中心断面における風速水平成分 V の時間変動を図10に示す。明瞭な周期的な変動が再現されている。図9の全体的な実験との対応は、既報と同様であるが、既往の研究結果とは傾向が異なり、 U や k における URANS と SRANS の差は小さい。URANS では、周期的な変動が再現されることにより発生する周期成分の k (k_p : U_i の時間変動から算出) と 方程式の付加項の影響により減少する k (k_t : 乱流成分) が相殺された結果、total の k ($= k_t + k_p$) の変化は小さかったものと考えられる。

以下の Validation Metric による評価結果を表1に示す。風上排出では、URANS と SRANS の差は小さい。これは風速の時間的変動が小さい建物前方から排出点された濃度は、馬蹄渦によって建物後方に殆ど巻き込まれることなく風下に移流されるため、建物後方の風

速変動の影響を受けにくいと考えられる。濃度分布等は省略する。屋上排出では、Table 1 の指標では SRANS、URANS とともに予測精度は3つの排出ケースで最も高い。URANS では全ての指標で改善がみられる。図11に無次元濃度の相関図を示す。近似式の勾配が1に近づいており、実験との対応は向上している。図12の濃度分布を見ても、特に風下側で水平方向の拡散が大きくなり、実験との対応が向上する。風下排出では、Table 1 の指標の URANS と SRANS の違いは、3つのケースで最も大きい。図13を見ると、SRANS の濃度の過大評価が URANS では大幅に改善されている。図14の濃度分布を見ても、URANS は特に風下側の濃度分布が実験結果とよく一致している。図15に濃度の等値面を示す。SRANS の方が流れ方向に引き伸ばされた形状をしており、両者の拡散性状が大きく異なることが確認できる。

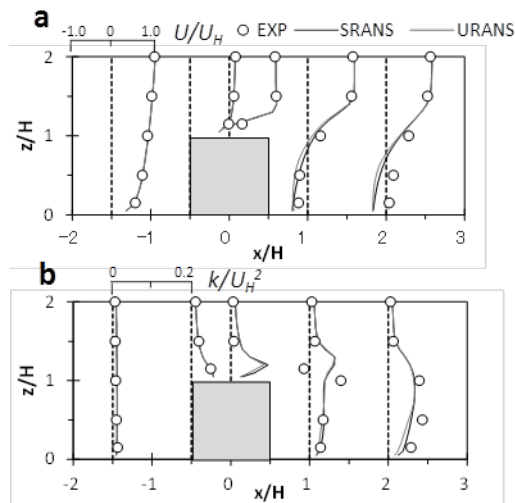


図9 風速 U 及び乱流エネルギー k の鉛直分布 (排出無)

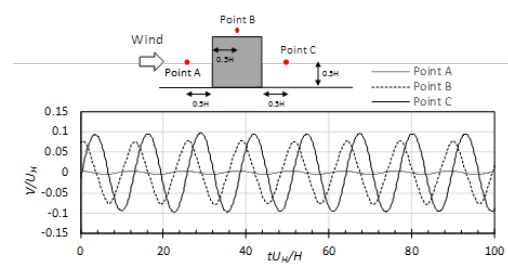


図10 排出口位置における風速 V の時系列変化

表1 評価指標(Validation metrics)による比較

Cases	SRANS			URANS		
	FAC2	FB	NMSE	FAC2	FB	NMSE
Upwind release	0.70	0.06	2.56	0.63	0.09	2.13
Rooftop release	0.76	-0.28	0.84	0.81	-0.14	0.82
Downwind release	0.49	-0.43	1.25	0.48	0.03	0.83

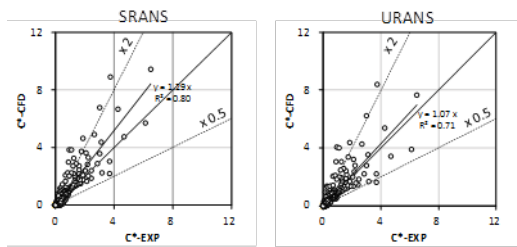


図 11 無次元濃度の実験と CFD の相関 (屋上排出)

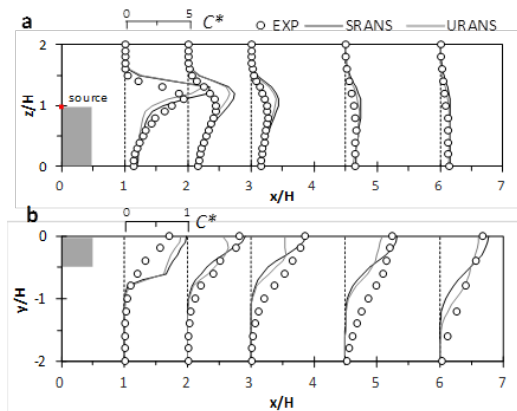


図 12 濃度分布の比較 (屋上排出)

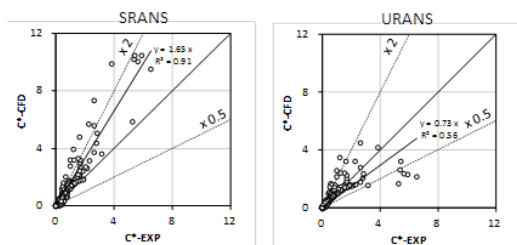


図 13 無次元濃度の実験と CFD の相関 (風下排出)

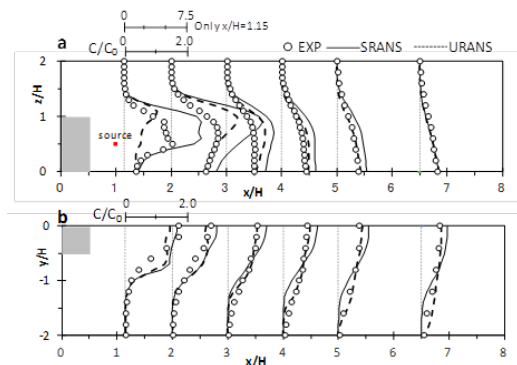


図 14 濃度分布の比較 (風下排出)

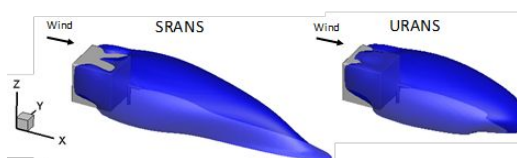


図 15 濃度の等値面 ($C^*=1$) の比較 (風下排出)

(3) まとめ

1:1:2 角柱周りの流れ場、立方体建物モデ

ル周辺の流れ場・拡散場を対象として URANS の解析を行い、SRANS 及び実験結果と比較した。付加項を RNG k- モデルの方程式に組み込むことで、建物周辺の非定常変動を再現することができた。URANS では、平均風速や k の分布において、全体的に実験との対応が向上した。さらに濃度分布には比較的大きな違いが見られ、特に風下 Wake 内で汚染質が排出された場合、SRANS に比べて、比較的大きな精度向上が見られた。

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 2 件)

(1) Tominaga, Y., Akabayashi, S., Kitahara, T., Arinami, Y., 2015. Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations, Building and Environment, 査読有, vol. 84, 204-213.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.012>

(2) Tominaga, Y., Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 査読有, vol. 142, 2015, pp. 93-103.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.013>

〔学会発表〕(計 2 件)

1) 富永禎秀, CFD に基づく市街地の汚染質・熱拡散の予測手法に関する研究: 非定常 RANS 解析の汚染質拡散への適用, 日本建築学会大会(九州) 学術講演会, 福岡大学, 2016年8月24日~26日

2) Tominaga, Y., T. Stathopoulos, CFD simulations of near-field dispersion around isolated cubical buildings: Evaluation of URANS, 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA V), Northeastern University, Boston, Massachusetts, USA, 2016.6.7 ~ 6.11

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ytomi.net/tomilab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富永 禎秀 (TOMINAGA YOSHIHIDE)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号: 00278079