

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360224

研究課題名(和文)都市域建物を対象としたCFDに基づく耐風設計のイノベーション

研究課題名(英文)Innovation of wind-resistant design based on CFD technology for buildings in cities

研究代表者

田村 哲郎(TAMURA, TETSURO)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：90251660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円、(間接経費) 3,330,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい理念に基づく耐風設計法の具体的な手段としてのCFDに着目し、CFDならではの特徴を活かした新しい耐風設計法を構築することをめざした。研究項目は、まずは、CFD技術を活用して、実際の建築物を対象にCFDでの風荷重予測精度と設計上必要な精度の関係を明らかにした。続いて、台風などの気象イベントを想定しながら、都市域での局所的な強風域を評価することで耐風設計用風速データを提示した。建設地点の周囲の環境を配慮し、LESによる建物への強風作用の詳細解析から、CFDに基づく耐風設計を実施する上での各種境界処理などに関する必要技術を開発・提供した。

研究成果の概要(英文)：This study, focusing on the CFD technology as a comprehensive tool based on the creative and original concept, have aimed at providing the new method for wind resistant design for buildings and structures. The research items are firstly to apply the CFD method to the design of actual buildings and to elucidate the relation between the predictive accuracy of the wind loading and the requirement correct level for the wind resistant design. Also, assuming the meteorological event with regard to the typhoon, we give the high wind velocity data for wind resistant design by estimating the high wind local area in city. Finally considering the circumference environment of the construction site, this study provides important techniques concerning various boundary conditions or treatments for performing the wind resistant design based on the CFD as a result of the detailed LES (Large eddy simulation) analysis of high wind impact on buildings.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：国際情報交換 流体計算 LES 実在都市 耐風設計 風力・風圧 振動応答 設計風速

1. 研究開始当初の背景

Computational Fluid Dynamics(CFD)とは、数値流体解析あるいは流体計算ともよばれ、流体力学の基礎方程式に対し、コンピュータを用いて風の流れあるいは風によって物体に作用する力を近似計算により算定する技術のことである。建築分野において、構造問題、環境問題に適用されてきたが、一般に風の流れに比べ、風の力に関する予測が難しい傾向があること、および安全性に関わる問題においては要求精度が高いという理由から、CFDの実用化という視点からは、現時点では、ビル風の環境評価など、一部の環境問題に限られてきた。しかし近年、以下の点での解析精度の向上に伴い、自然風と同様な乱流状態にある流れの中に置かれた比較的複雑な形状を有する建築物に作用する風圧力・風力、およびその結果生じる振動の応答を予測するための技術的な基盤が整い、CFDは、建物の耐風設計などの構造問題においても活用される段階に到達しつつある。

- a) 風がもつ、風の息などの乱れを考慮した解析ができるようになってきた。
- b) 複雑な剥離流れ、非定常性の強い渦などが予測できる乱流モデルが生み出されてきた。
- c) 建築物の任意の形状に対して、離散精度の悪化を避けた計算が可能となってきた。

また日本建築学会風荷重小委員会では、建築物に作用する風ならびに風力に対し、CFDを建物の風荷重算定のための応用技術として確立することを目的として、2005年には流体計算技術に関するガイドブックを上梓し、設計者、技術者を対象に建築物の耐風設計への最新のCFD技術を解説している。この種の技術は、コンピュータによる予測であることから、風洞のような大きな装置を持たなくても各々の建築物の形状に応じた風荷重評価が可能であり、風洞実験では評価が難しい複雑地形まわりの風速評価を実現できるなど、耐風設計を円滑に進めるために有効なものである。ただし、コンピュータの低価格化や市販ソフトの普及により、その技術の使用が簡単になる一方、専門家によらない計算結果が一人歩きするといったことも指摘され、両刃の剣的な問題が懸念される。最近、風力エネルギー施設塔状部での耐風設計において、基準法で規定されている地形影響での風速の割り増しをかなり細かい有効精度での評価がCFDで実施され、工作物でのこうした実績は建物のCFD設計への影響が避けられず、妥当性の吟味は急務の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、もはやその実務への導入が間近となっている流体計算技術(CFD)を用いた建物の耐風設計に対して、提示された設計の結果の安全性を確保するため、CFDの計算精度を保証するための課題とその解決法

を明らかにすることである。ただし、対象とする設計例としては都市域に建設される高層建物とし、申請者が保有する観測データを中心に、不足データに対しては風洞実験で補足しながら、計算結果との比較検討を進め、実用に資するCFDを構築することをめざす。さらに、CFDを用いた場合に従来の耐風設計では行えなかった、気象学におけるモデルとの融合など、新しい概念に基づく強風と応答の推定方法を導入し、新規性・合理性を有するCFD耐風設計技術を革新的に発展させるため、強風時建物挙動をピーク値も含め基礎的視点からまとめる。

3. 研究の方法

日本建築学会の風荷重小委員会においては、ほぼ10年毎に風荷重指針の改訂を進めてきているが、現在、これまで起きた強風災害の実態を踏まえて、より高い安全性を確保するため、耐風設計法に新しい理念を持ち込もうとしている。本研究では、その具体的な手段として流体計算法(CFD)に着目し、CFDの耐風設計への活用を実現する上で要求される計算精度を明らかにするとともに、CFDならではの計算技術を活かした新しい概念をもつ耐風設計法を構築することをめざす。

こうした設計法を導入し、普及させるための要件としては、CFDの専門家によるCFD技術の更なる向上と展開、設計などの実務者による実用化に向けての道筋の整備とCFD使用性の充実、具体的にCFD設計を実施できる若手の育成などが挙げられ、それを念頭に置きながら、広く構造設計者、技術者が適切に使えるよう、CFDの課題を抽出し、その解決策を模索することで、耐風設計技術の高度化を進める。CFDを用いた場合、市街地内に存在する建築物に強風を作用させ、その時の建築物の挙動を推定することができるため、従来のガスト影響係数の考え方に必ずしも捉われる必要はない。その時の構造物の応答のピーク値を、ある程度の試行数の強風・突風気象イベントに対して、確率的に意味を持たせて決定することができれば、曲げ、ねじれなどの多様な荷重に対する構造部材の応力度も評価され、そのまま耐風設計を実現することも可能となる。

また、対象とする建築構造物の周辺における状況(あるいは風向の変化)によっても、風作用は大きく変化するものと考えられ、そういった周辺市街地の形態変化への対応もCFDの融通性は高い。実際、都市域などにおいては、東京丸の内地区をみれば、ここ数年間の建物群の様相の変貌も大きく、その経年変化も配慮した耐風設計も肝要であるものと判断されるし、接近してくる風の特性も上流側での建物の配置状況あるいは地形の起伏によって決定されることを考えると、風作用を具体的に取り込むことが容易なCFDに基づく新しい耐風設計法は大いに期待される。以上を踏まえ、研究の実施方法は以下の通りとなる。これまでの豊富な経験をもつLES計算

を実施し、結果の分析から、耐風設計技術を発展させる。また、実用化のため、簡易モデルの提示と既存計算コードの改良を実施し、大規模計算を実行し、保有する観測資料の対応関係を吟味する。PIV実験と観測資料に基づく検証用データの提示の他、強風被害の実態認識から提案した耐風設計法の妥当性を検討し、実務上の経験を活かしたCFDを実施し、また建物の試設計から、CFD設計法の課題を抽出する。



4. 研究成果

(1)平成 22 年度

平成22年度に得られた成果は以下の通りである。

風荷重評価を実施する上でのCFD技術の課題に関する整理・検討

角柱状建物を対象としたLESを実施し、ピーク風圧の値には流入変動風のパワースペクトル形状、特に低周波数成分が影響する事を示した。従って流入境界で準周期境界条件を用いる場合には、ドライバー長さ起因する低周波数域への影響への対策が必要である。また、RANSの結果からLESの流入境界条件を作成する方法についても検討を行った。

実用化のための既存計算コードの改良

LES簡易モデルと計算負荷低減技術の提示
LESとレイノルズ型アサンブルモデルのハイブリッドモデルを用いる簡易モデルについて検討した。このモデルでは地物や建物表面の凹凸をメッシュで再現する必要がなくなり、解析負荷が低減する。高さ5m相当の樹木で覆われた地表を吹送する強風を本モデルで再現し、風速プロファイルや乱流特性を再現した。さらに、気象モデルを用いたLESへの流入変動風生成方法の基礎的な検討を実施し、LESへ流入したときの乱流特性の変化について検討した。

各種乱流境界層の流速変動場に関する乱流特性の把握

都市域や、樹木に覆われた地覆に対する乱流境界層の非定常解析を実施し、その乱れ強さやレイノルズ応力プロファイルなどの乱流特性量について整理した。

都市地表被覆状況による粗度レベル評価と都市キャノピー内の風の空間構造の把握

GISデータを用いて建物形状を再現したLES計算から、建物高さにばらつきがある市街地では、最高建物高さと同粗度密度の高さ方向の分布が、ベキ指数に影響を与えている事を示した。

大気境界層下での密集都市域の強風に関する高精度LESの実施

高層建築物が密集している都市域での強風の時空間構造を、高解像度の都市モデルを作成の上、高精度のLESを実施し、計算結果を分析して解明した。

(2)平成 23 年度

平成23年度は、キャノピー内風特性の観測データを整理し、LES(Large Eddy Simulation)計算値との比較から計算精度を確認するとともに、周辺市街地の複雑形態に対する風の特性を解明した。

風観測データの整理と気象モデル予測値との対応の吟味

風観測データを整理し、気象モデルWRFあるいはWRF-LESによる予測値との対応から、気象モデルの接地境界層における予測精度の限界と、LESの必要性を確認した。また、WRF-LESの解析結果から建築スケールのLESへ接続する方法を検討した。

他の計算モデルから得た鉛直プロファイルを用いる流入変動風の生成法の提案

広域の市街地を対象としたRANS、もしくは気象モデルによって得られた風速ならびに乱流統計量の鉛直分布に見合った流入変動風を、LESの流入境界として与える方法について検討した。ここではSEM(Synthetic-Eddy Method)とDFSEM(Divergence-Free SEM)に着目し、平板上の境界層乱流、ならびに市街地内気流を対象とした解析により、同手法が有効である事を示した。

各種乱流境界層のPIVデータに基づく流入風の設定と地形の影響評価

PIVデータベースに基づき、各種地表被覆状態に対するCFDのための流入風を作成した。境界層タイプの乱流構造を検証するために、その基本モデルである地形の影響評価を行った。

種々の粗度レベル上およびキャノピー内の風の空間構造の把握

広域の実市街地を対象としたLESを実施し、市街地建物と上空の気流分布との関係を求めた。LESの結果は観測結果で検証した。建物高さにばらつきがある市街地では、Raupachらが定義した粗度密度では上空に形成される均風速鉛直プロファイルのベキ指数を十分に再現する事はできない。市街地建物の最高高さや高さのばらつき、さらに高さ方向の分布を考慮する事でベキ指数が再現可能である事を示した。

周辺市街地の形態変化と風の特性的変化のLES計算に基づく把握

東京丸の内地区を対象にここ10年間の市街地の形態変化を把握し、それぞれの形態でのLESを実施し、風の特性への影響を解明した。

(3)平成 24 年度

気象モデルに基づく演繹型流入変動風の生成と観測データとの比較

気象モデル(Wrf + wrf-LES)から得られ

た風速・気温の鉛直プロファイルを条件として、気象スケールと建築スケールでのエネルギー移行まで考慮したLESで大気境界層型流入変動風を生成し、スペクトル成分の特性まで比較することで変動風としての妥当性を検証した。

都市キャノピー内部の建築構造物に作用する風圧力・風力のLES解析

都市キャノピー内の対象建築構造物に作用する風圧力・風力をLESで推定し、キャノピー内での建築構造物の曲げあるいはねじれ成分に対応する外力の詳細を位相関係も含めて明らかにした。

空力関連実験データとの比較によるLES計算モデルの計算条件の検討と提示

複雑な形態を有する建築物に作用する風圧、風力の風洞実験および非構造格子重合LESを実施し、空力関連のデータを高精度に得るためのLESの計算領域とその境界条件、格子解像度などの計算条件を整理した。

高層建物密集域での高層建物の振動応答LES解析と観測データとの検証

高層建物密集域での都市キャノピー内高層建物を対象に、特定の観測日に対応する流入変動風を用いることで、LES計算を実施し、観測された各種振動応答データの再現性に関する計算精度を検証した。

LESに基づく実建物を対象とした風荷重評価

LESに基づく実建物を対象とした風荷重評価を実施し、新しい概念の耐風設計としてCFDを用いる場合の妥当性および要求精度を検討した。

(4)平成25年度

耐風設計へCFD技術をより発展的に導入することをめざし、気象モデルを活用した極大風の推定を行った。しかしながら、建物への風作用については、建物に接近する風の基本的な特性を明らかにすることが重要でありながら、これまで必ずしも十分な観測データが得られていない。今後は新しい技術を活用することで耐風設計用の鉛直風速分布を再評価し、またそのばらつきも考慮することでより確かな風荷重評価をめざすことが重要であることが明らかになった。

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21件)

T. NOZU、T. TAMURA、T. KISHIDA、A. KATSUMUR、Combined model of structured and unstructured-grid system for wind pressure estimation of a tall building、6th European and African Conference on Wind Engineering、査読有、2013、CD-ROM、pp.1-4

岸田岳士、田村哲郎、野津剛、勝村章、奥田泰雄、溜正俊、LESによる建築物の

風荷重評価の実用化、

検討 風洞実験結果および観測結果との比較、第22回風工学シンポジウム論文集、査読有、2012、CD-ROM、pp.293-298

T. TAMURA、T. NOZU、Introduction of unstructured-grid system on LES for wind pressure estimation on a building in cities、Proceedings of Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA7)、査読有、2012、CD-ROM、pp.1-10

M. YOSHIKAWA、T. TAMURA、LES for wind load estimation by unstructured grid system、Proceedings of Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA7)、査読有、2012、CD-ROM、pp.1-6

Y. ONO、T. TAMURA、LES of local severe suction on side face of a three-dimensional square cylinder、Proceedings of Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA7)、査読有、2012、CD-ROM、pp.1-10

K. NOZAWA、T. TAMURA、Coupling method of WRF-LES and LES based on scale similarity model、Proceedings of Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA7)、査読有、2012、CD-ROM、pp.1-8

Y. MARUYAMA、T. TAMURA、Y. OKUDA、M. OHASHI、LES of Fluctuating Wind Pressure on a 3D Square Cylinder for PIV-based inflow turbulence、Proceedings of Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA7)、査読有、2012、CD-ROM、pp.1-8

Y. MARUYAMA、T. TAMURA、Y. OKUDA、M. OHASHI、LES of turbulent boundary layer for inflow generation using stereo PIV measurement data、Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics、査読有、Vol.104-106、2012、pp.373-388

DOI: 10.1016/j.jweia.2012.03.013

T. NOZU、T. TAMURA、LES of turbulent wind and gas dispersion in a city、Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics、査読有、Vol.104-106、2012、pp.492-499、

DOI: 10.1016/j.jweia.2012.02.024

片岡浩人、田村哲郎、LESによる実在市街地上空風の鉛直分布と地表面粗度との関係に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol.7、No.678、2012、pp.1203-1210、CD-ROM

片岡浩人、田村哲郎、RANS/LESハイブリッド計算法による市街地気流の予測 その3 実市街地を対象とした計算、な

がれ、査読有、Vol. 31、No. 6、2012、pp.509-512

片岡浩人、田村哲郎、RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流の予測その2 連続条件を満たした合成渦法 (DFSEM) を用いた流入変動風の作成、ながれ、査読有、Vol. 31、2012、No. 2、pp.181-186

H.KATAOKA、T. TAMURA、Numerical prediction of the peak pressure distributions on square cylinder by LES、13th International Conference on Wind Engineering、査読有、2011、CD-ROM、pp.1-8

小野 佳之、田村哲郎、片岡 浩人、楕円形状構造物に作用する極大負圧に関する LES 解析、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol.75、No. 652、2011、pp.1081-1087

D. SATO、K. KASAI、T. TAMURA、Prediction method to wind-induced peak response of building with viscoelastic dampers by considering its frequency dependency、13th International Conf. on Wind Engineering、査読有、2011、USB memory、pp.1-8

Y. ITO、K. NOZAWA、T. WAKAHARA、Numerical simulation of turbulent properties for gust response prediction of bridges、13th International Conf. on Wind Engineering、査読有、2011、USB memory、pp.1-8

H.KATAOKA、T. TAMURA、Numerical prediction of the peak pressure distributions on square cylinder by LES、13th International Conf. on Wind Engineering、査読有、2011、USB memory、pp.1-8

K.NOZAWA、T.TAMURA、LES one-way coupling of nested grids using scale similarity model、Proc. of the 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena、査読有、2011、USB memory、pp.1-6

T.TAMURA、Y. OKUDA、T. KISHIDA、他4名、LES for aerodynamic characteristics of a tall building inside a dense city district、International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)、査読有、2010、USB memory、pp.1-8

T.TAMURA、Application of LES-based model to wind engineering -Implementation of meteorological effects (Invited)、The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering、査読有、2010、CD-ROM、pp.1-26

21 K. NOZAWA、T. TAMURA、Coupling method

of meso-scale model and LES based on scale similarity model、The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering、査読有、2010、CD-ROM、pp.1-6

〔学会発表〕(計9件)

片岡浩人、田村哲郎、RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流の予測、第25回数値流体力学シンポジウム、2011.12.19、大阪

T. TAMURA、K. NOZAWA、One-way coupling of nested grids in WRF-LES and local LES of turbulent boundary layer、64th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics、2011.11.21、Baltimore、USA

片岡浩人、田村哲郎、合成渦法を用いた流入変動風の生成、日本流体力学学会年会、2011.9.9、東京

田村哲郎、野津剛、都市域建築物まわりの乱流計算の高精度化、日本流体力学学会年会、2011.9.9、東京

片岡浩人、田村哲郎、RANS/LES ハイブリッド計算法による市街地気流の予測その1合成渦法(SEM)を用いた流入変動風の作成、日本建築学会大会、2011.8.24、東京

片岡浩人、田村哲郎、LES結果による実市街地上空気流鉛直分布への粗度パラメータの影響評価、日本風工学年会、2011.5.24、大阪

片岡浩人、田村哲郎、LESによる市街地上空鉛直気流分布の予測、第24回数値流体力学シンポジウム、2010.12.20、横浜
K. NOZAWA、T. TAMURA、LES one-way coupling of nested grids using scale similarity model、63th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics、2010.11.23、Long-Beach、USA

野澤剛二郎、田村哲郎、MM5とLESのスケール相似則によるカップリング、土木学会第65回年次学術講演会、2010.9.1、札幌

〔その他〕

ホームページ等

<http://at.depe.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 哲郎 (TAMURA, Tetsuro)
東京工業大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号：90251660

(2) 研究分担者

野澤 剛二郎 (NOZAWA, Kojiro)
清水建設株式会社技術研究所・総合解析技術センター・研究員
研究者番号：10574030

平成 22 年 4 月から平成 25 年 3 月まで担当

片岡 浩人 (KATAOKA, Hiroto)
株式会社大林組技術研究所・環境技術部・
上席研究員
研究者番号：4 0 3 9 3 5 9 0

野津 剛 (NOZU, Tsuyoshi)
清水建設株式会社技術研究所・総合解析セ
ンター・研究員
研究者番号：1 0 6 0 1 0 2 3
平成 24 年 4 月から参加

(3)連携研究者

奥田 泰雄 (OKUDA Yasuo)
独立行政法人建築研究所・構造研究グルー
プ・上席研究員
研究者番号：7 0 2 0 1 9 9 4

(4)研究協力者

岸田 岳士 (KISHIDA Takeshi)
風工学研究所・研究員