

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630238

研究課題名(和文)建築物と設備機器の最適配置に基づく屋上の省エネデザイン手法

研究課題名(英文)Energy savings design method based on appropriate arrangement of building elements and equipments

研究代表者

甲谷 寿史(Kotani, Hisashi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20243173

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):屋上の省エネデザインを最終目的とし、省エネの観点から大きな問題となっている屋上設置の空調機のショートサーキット現象を対象とした検討を行った。塔屋や目隠し壁等の建物要素がショートサーキットの程度に及ぼす影響を、風洞実験及び計算流体力学(CFD)解析により明らかにした。また、風工学研究として汎用的成果を得るために、原理的に建物自身によって形成される屋上の剥離流の特性を解明することが必須との考えから、空間・時間的に高解像度の風速測定実験を行い、スペクトル分析を用いて屋上で卓越する渦のスケールを解明した。

研究成果の概要(英文):So called 'short circuit problem' of the air-conditioning unit located at a building rooftop was studied because it is the important problem from the energy savings points of vies. This study might be a foundation of the energy savings design method of the rooftop. Influences of a penthouse and blind walls as building elements on this short circuit phenomenon was investigated by means of wind tunnel experiments and the computational fluid dynamics (CFD). The high spatial and time resolution measurements of the air velocity around the building rooftop were conducted as well. The dominant scales of the eddy inside the separated flow at the building rooftop were analyzed by the spectrum analysis because the characteristics of the separation flow has to revealed from a viewpoint of a general-purpose wind environmental research.

研究分野：工学、建築環境・設備

キーワード：屋上 ショートサーキット 渦スケール PIV CFD

1. 研究開始当初の背景

屋上設置物は、建物計画の都合や機器設置・搬入の都合のみで空きスペースに配置計画がなされていると言っても過言ではなく、その合理的な配置計画に資するデータすら存在しない。屋上の風環境に関しては、古くから建築構造の観点から風圧に関する検討や、煙突排気の拡散などの問題が扱われ、特に1990年前後に持田灯・村上周三によって、屋上設置の煙突からの排気拡散について研究が進められてきたが、対象は建物への排気付着と建物外への拡散性状で、建物自身の剥離による屋上風環境にまで言及していない。1990年代以降のCFD解析の発展に伴い、乱流モデルの検討に建物剥離性状（再付着距離等）が検討されたものの、数少ない形状の建物の検討が行われたのみである。空調室外機の設置による効率低下は、羽山広文・倉淵隆らによる、鉛直方向設置の空調室外機の排気ショートカット問題の研究が見られるのみである。研究代表者のグループは、中小規模ビルにおける自然換気利用のために、屋上設置する自然換気用排気口・排気装置の最適配置・形状に関する研究に着手しており、その一環として建物形状を系統的に変化させた上での屋上面風圧係数分布を把握した。また、塔屋と空調室外機との配置計画に関する研究にも着手した。これら背景に鑑み、屋上における種々の建築設備を対象とした総合的な省エネデザインを目指して、建物剥離域内の屋上の風環境のマイクロな視点からアプローチすることとなった。

また、建築要素や建築設備により複雑形状となっている建物屋上内風環境の把握を行うことは、剥離域内に複雑な形状の物体を有する流れ場の把握であり、流体力学の分野の知見を工学的に応用する風工学分野の研究としては、非常に新しいチャレンジ性を有する研究対象である。この複雑流れ場のCFD解析での適切な乱流モデルの選択を行うための指針に結びつけられる。

2. 研究の目的

屋上の省エネデザインを最終目的とし、省エネの観点から大きな問題となっている屋上設置の空調機のショートサーキット現象を対象とし、以下3点を目的とした検討を行う。ショートサーキットを引き起こす原因は屋上気流場の乱流性状そのものにあるため、その複雑な気流場自体の把握を高精度の実験にて把握する。近年、非接触の高精度風速測定法として実用化されているPIV(Particle Image Velocimetry)を用いたもので、関連分野ではこのレベルの測定は行われたことがないものであり、この測定自身が特筆すべきもので、種々の解析のベンチマークとして用いることができるレベルにある。併せて、この剥離流を再現しうるCFD解析の乱流モデルに関する検討を行う。次いで、塔屋（ペントハウス）や目隠し壁等の建築要

素デザインが、空調機のショートサーキットに及ぼす影響について、実験とCFDにより検討するとともに、マイクロな視点での空調機周辺気流の検討を行う。最後の展開として、屋上設置の設備機器の、例えば乱流エネルギーの詳細な空間分布まで高精度で再現する必要はなく、平均風速の空間分布と大きな気流場の時間変動が再現できること、例えば剥離領域の再付着点距離が再現できれば良いとの姿勢で、その再現において支配的な乱流の空間・時間スケールを把握することを目的とした検討を行う。例えば再付着点距離への影響が小さい周波数（渦のスケール）成分をカットする等で、LES(Large Eddy Simulation)によるCFDを実用的な計算負荷で使用できるレベルまで簡易化する検討を行う。この検討は、高精度測定で得られた結果を風工学研究分野の新たな展開へ用いることも目的としている。

3. 研究の方法

(1)PIVによる屋上剥離流の把握と乱流スペクトルに関する詳細検討

①詳細風洞実験

既往研究で風圧や平均気流場のデータを有する単純矩形建物とペントハウスを設置した矩形建物の屋上気流場を対象として、接地境界層下で縮小模型を用いた風洞実験を行い、非接触で高精度測定を行うことが出来る時系列PIV測定による屋上剥離気流の平均風速および乱流統計量を把握した。

②PIVの精度検討

時系列PIV測定と併せて、非接触測定であるLDV(Laser Doppler Velocimetry)およびI型熱線風速計での風速測定を行い、精度検討を行った。

③実験による乱流スペクトルの検討

高精度の時系列PIV測定で得た乱流スペクトルに関する種々の検討を行った。

(2)CFDによる空調室外機のショートサーキット率の検討及び実験による精度検討

①CFDによるショートサーキット率の検討

標準k-εモデルを用いたCFD解析により、目隠し壁及びペントハウスが空調室外機のショートサーキットに与える影響に関して検討した。

②風洞実験によるデータ蓄積

塔屋（ペントハウス）と目隠し壁の有無の組み合わせ条件での風洞実験により、データ蓄積を行った。

③CFDにおける乱流モデルの検討と精度検討

低Re数型k-εモデルやSST-k-ωモデル等、数種の乱流モデルの検討と実験値との比較による精度検討を行った

(3)屋上剥離流の時間・空間スケールに関する検討

実験結果に種々の空間・時間フィルタを適用することで、空調機周辺の乱流の時

間・空間スケールを検討した。

4. 研究成果

3章の各項目についての成果例を示す。詳細は発表論文を参照されたい。

(1)PIV による屋上剥離流の把握と乱流スペクトルに関する詳細検討

①詳細風洞実験

図1に示す風洞実験を行い、例えば塔屋有無条件の矩形建物)について、図2に示す高空間分解能の二次元平均風速分布、1kHzでの乱流統計量を得た。

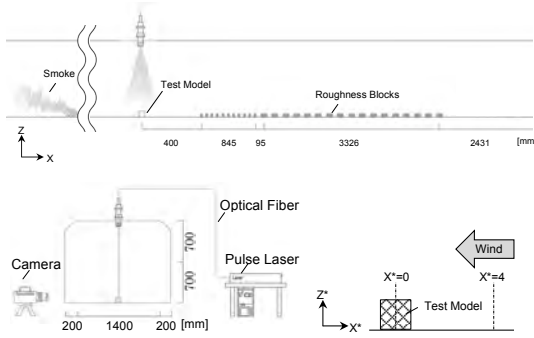


図1 風洞実験概要

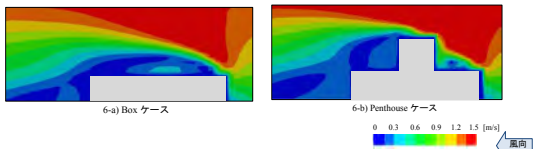


図2 二次元平均風速分布

②PIVの精度検討

図3と図4に、平均風速と乱流エネルギーの鉛直方向プロファイルについて、検査領域を2ケース設定したPIVの結果とI型熱線風速計の結果例を示す(座標と測定値は図1参照)。全ての結果は非常に良く一致し、高精度の測定結果を得た。

また、後述するスペクトル解析より、PIVでは解析アルゴリズムにより高周波域での誤ベクトル算出由来の誤差が大きくなる可能性があり、再帰的相互相関手法を用いると十分な精度を保つこともわかった。また、種々のトレーサ発生方法を検討して、その差異を確認すると共に、PIVで十分な精度を保つための視野サイズ等の確認等も行った。なお、LDVでの1次元測定はPIVの2次元測定と異なり、トレーサの発生手法に試行錯誤的な工夫が必要であることも分かった。

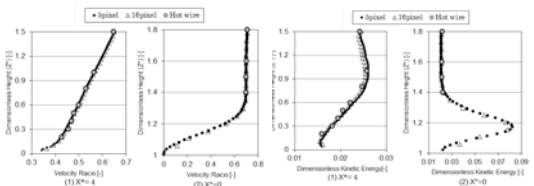


図3 平均風速

図4 乱流エネルギー

③実験による乱流スペクトルの検討

高精度の時系列PIVから乱流スペクトルを

算出できる。結果例は(3)で示すが、②と同様の各測定法での精度検討も行き、良い一致を見た。

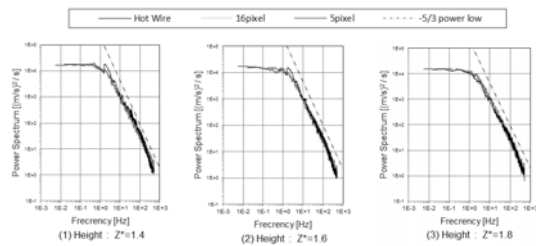


図5 3測定点でのパワースペクトル

(2)CFDによる空調室外機のショートサーキット率の検討及び実験による精度検討

①CFDによるショートサーキット率の検討

標準k-εモデルを用いたCFD解析により、目隠し壁及びペントハウスが空調室外機のショートサーキットに与える影響に関して検討した。図6に解析ケースの例、図7に空調室外機の設置概要、図8に温度分布の解析結果、図9に既往研究で提案した空調機の吹出し温度と吸い込み温度を用いたショートサーキット率(Short Circuit Ratio: SCR)を算出した例を示す。

既往実験との比較を行った結果、標準k-εモデルでは定性的な分布傾向を再現できるものの、定量的には20%近くの差が見られることが分かった。定性的な傾向として、ペントハウス後流に発生する低風速域により、ショートサーキット率が大きくなること、屋上4周に目隠し壁を設置することで屋上全体の剥離性状が変化し、ケースによってはショートサーキット率が小さくなることあることが分かった。

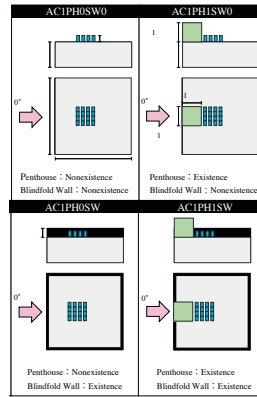


図6 解析ケース

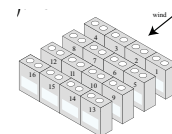


図7 空調室外機

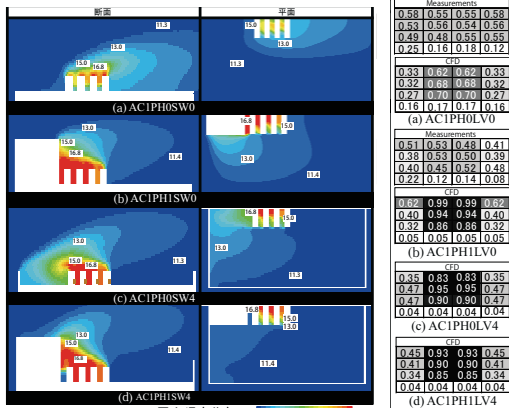


図 8 CFD による温度分布 図 9 SCR 分布

②風洞実験によるデータ蓄積

時系列 PIV 測定と併せて、既往研究で風圧や平均気流場のデータを有する単純矩形建物、塔屋を設置した矩形建物、空調室外機を設置した矩形建物の屋上気流場を対象として、2種の縮小模型において屋上及び空調室外機周辺気流性状を把握し、省エネデザインに資するデータ蓄積を行った。塔屋と目隠し壁の有無の組み合わせにより、空調室外機周辺気流場が大きく変化することを確認した。

③CFD の精度検討と乱流モデルの検討

低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデルや SST- $k-\omega$ モデル等、提案されている数種の乱流モデルでの検討を行ったが、精度の飛躍的な向上は見られなかった。よって、建物剥離領域の再現精度は高く無いと言われながらも実用性の高い標準 $k-\epsilon$ モデルを用いることを前提として、低風速となる空調室外機周辺気流の再現精度向上のため、壁関数の改良やメッシュ品質が気流性状に及ぼす影響を検討した。その後、ペントハウスと目隠し壁の有無をパラメータとした CFD 解析を行い、図 10 及び図 11 に例を示す通り、風洞実験との比較によりによる精度検証を行った。結果、実用的な精度での平均風速場の一致を見た。

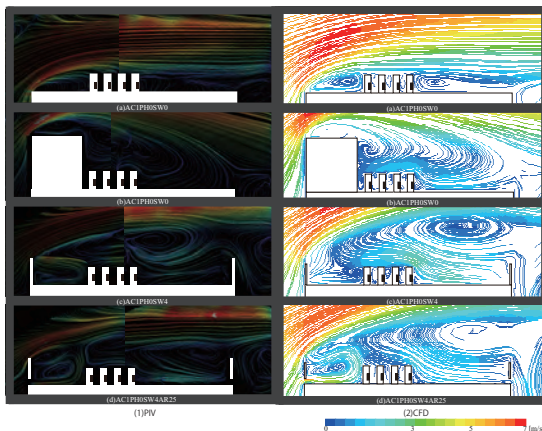


図 10 流線の比較 (左: 実験、右: CFD)

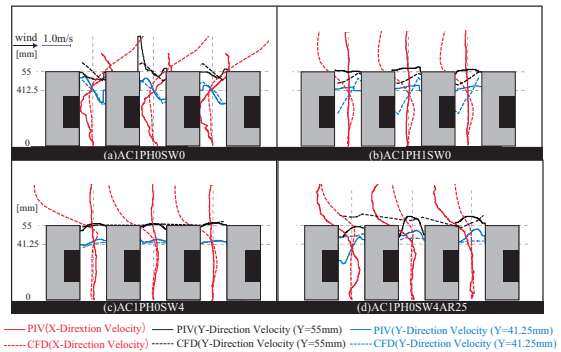


図 11 空調機周辺風速分布の比較

(3) 屋上剥離流の時間・空間スケールに関する検討

種々の時間・空間のフィルタが屋上剥離流の乱流エネルギーや再付着点の出現頻度等に与える影響を検討し、すなわち剥離流の卓越スケールの分析を行った。図 12 に実験ケースを、図 13 に各測定点でのパワースペクトル分布例を示す。例えば、波長との関係であるこの図で、低波長側（高周波数）でローカットフィルタを適用し、フィルタ無適用の結果と比較することで、乱流の高周波成分がどの程度寄与しているかを検討するとともに、剥離流の卓越空間スケールを探ることができる。図 14 に各フィルタ適用後の乱流強度分布を示す。フィルタ幅 0.25mm までは同様の結果であり、0.5, 1mm と大きな空間フィルタを適用すると、その差異が大きくなるのが分かった。図 15 は再付着点距離の累積出現確率による分析であり、同様に 0.5mm 以上のフィルタで再付着点の出現位置を再現できていないことが分かる。これらの卓越スケールを解明したことで、LES による CFD 解析における計算負荷を低減できる粗メッシュ利用の可能性を見出した。なお、同様に周波数とパワースペクトルとの関係から時間フィルタの適用に関する検討も行った。

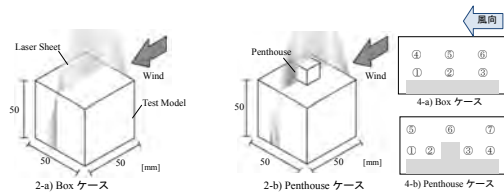


図 12 実験ケース

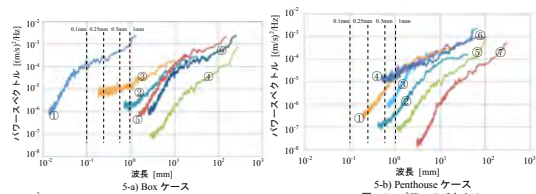


図 13 各測定点でのパワースペクトル

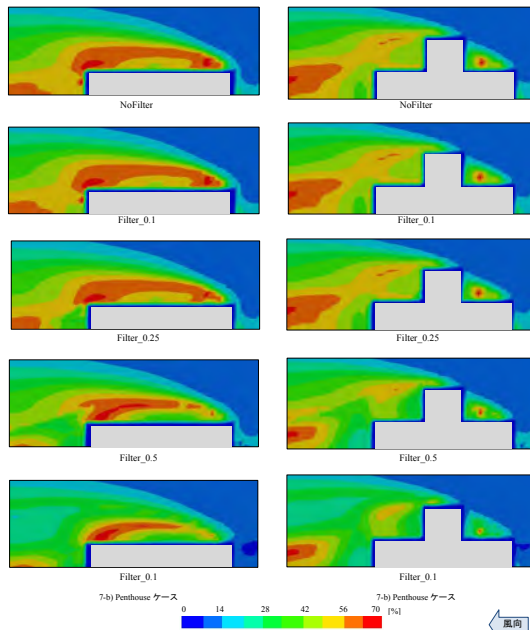


図 14 各フィルタ条件での乱流強度分布

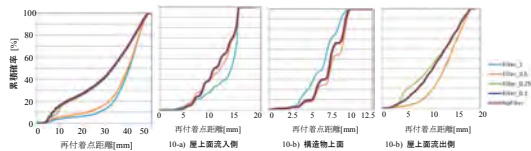


図 15 各測定点での再付着点距離の累積出現確率

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 0 件)

[学会発表] (計 11 件)

- ①藤原理紗, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山中俊夫, 相良和伸: 建物屋上における空調室外機のショートサーキットに関する研究 (その5) 塔屋及び目隠し壁が室外機周辺気流場に与える影響、空気調和・衛生工学会近畿支部、2014.3.11、大阪大学
- ②藤原理紗, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山中俊夫, 相良和伸: 屋上設置物の配置計画のための屋上近傍気流場に関する研究 (その5) 塔屋及び目隠し壁が空調室外機周辺気流場に与える影響、日本建築学会近畿支部研究報告会、2014.6.21、大阪工業技術専門学校
- ③藤原理紗, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山中俊夫, 相良和伸: 建物屋上における空調室外機のショートサーキットに関する研究 (その6) 乱流モデル及び壁関数の検討、空気調和・衛生工学会大会、2014.9.3、秋田大学
- ④山田慎一, 甲谷寿史, 桃井良尚, 西村浩一, 藤原理紗: 構造物屋上設置建物における時間平均型乱流モデルの評価、空気調和・衛生工学会大会、2014.9.3、秋田大学
- ⑤藤原理紗, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山中俊夫,

相良和伸: 屋上設置物の配置計画のための屋上近傍気流場に関する研究(その6)CFD解析による室外機周辺気流の性状把握、日本建築学会大会、2014.9.12、神戸大学

⑥菅原彬子, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山中俊夫, 相良和伸, 藤原理紗: 建物屋上における空調室外機のショートサーキットに関する研究 (その6) PIV測定による室外機周辺気流の把握、空気調和・衛生工学会近畿支部、2015.3.10、大阪大学

⑦藤原理紗, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山中俊夫, 相良和伸, 菅原彬子: 建物屋上における空調室外機のショートサーキットに関する研究 (その7) CFDによる室外機周辺気流場の詳細解析、空気調和・衛生工学会近畿支部、2015.3.10、大阪大学

⑧菅原彬子, 甲谷寿史, 桃井良尚, 山田慎一: 構造物周りで生じる剥離流に関する基礎的研究(その1)時系列PIVにおける解析手法に関する検討、日本建築学会大会、2015.9.4、東海大学

⑨山田慎一, 甲谷寿史, 桃井良尚, 西村浩一: 構造物周りで生じる剥離流に関する基礎的研究(その2)剥離流に影響を与える周波数成分の検討、日本建築学会大会、2015.9.4、東海大学

⑩山田慎一, 甲谷寿史, 桃井良尚, 西村浩一: 構造物周りで生じる剥離流の流速変動の空間スケールに関する研究、空気調和・衛生工学会大会、2015.9.16、大阪大学

⑪Akiko SUGAHARA, Hisashi KOTANI,

Yoshihisa MOMOI, Toshio YAMANAKA,

Kazunobu SAGARA: PIV measurement and CFD

analysis of airflow around building roof with

various building installations, Proc. Ventilation

2015, 2015.10.27, 同濟大学 (中国)

[その他]

<http://www.arch.eng.osaka-u.ac.jp/~labo4/> に発表論文リストを掲載

w.arch.eng.osaka-u.ac.jp/~labo4/ に発表論文リストを掲載

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲谷 寿史 (KOTANI, Hisashi)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20243173

(2) 研究分担者

相良 和伸 (SAGARA, Kazunobu)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30109285

桃井 良尚 (MOMOI, Yoshihisa)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40506870

(3) 研究協力者

山中 俊夫 (YAMANAKA, Toshio)

大阪大学・教授

山田 慎一 (YAMADA, Shin-ichi)

大阪大学・大学院生

藤原 理紗 (FUJIWARA, Risa)

大阪大学・大学院生 (2013-2014 年度参画)

菅原 彬子 (SUGAHARA, Akiko)

大阪大学・学部生 (2014-2015 年度参画)

西村 浩一 (NISHIMURA, Koichi)

大阪ガス株式会社エネルギー技術研究所