

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	非構造格子系LESによる高層建築物の風荷重評価に関する研究
Title(English)	A Study on Wind Load Estimation of High-rise Buildings by Unstructured Grid LES
著者(和文)	吉川優
Author(English)	Masaru Yoshikawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10197号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:田村 哲郎,山中 浩明,坂田 弘安,浅輪 貴史,佐藤 大樹,喜々津 仁密
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10197号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 27 年度 学位論文

非構造格子系 LES による
高層建築物の風荷重評価に関する研究

東京工業大学大学院

総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

吉川 優

目次

第1章 序論

1-1	研究の背景	2
1-2	既往研究と本研究の位置づけ	6
1-3	研究の目的	9
1-4	論文の構成	9

第2章 解析手法

2-1	緒言	16
2-2	乱流解析法	18
2-3	非構造格子系の導入	21
2-4	格子生成手法	23
2-5	流入境界条件	25
2-6	その他の境界条件	28
2-7	第2章結論	29

第3章 3次元角柱の変動風圧評価

3-1	緒言	32
3-2	計算対象	34
3-3	比較用の風洞実験概要	34
3-4	計算モデルの構築	37
3-5	計算結果	
3-5-1	全測定点に関する実験値と計算値の相関	43
3-5-2	風圧係数の空間分布に関する実験値と計算値の比較	45
3-6	第3章結論	48

第4章 高層建築物の変動風圧に対する周辺建築物の影響

4-1	緒言	52
4-2	風洞実験におけるピーク負圧の増加事例	
4-2-1	建物モデル	54
4-2-2	風洞実験概要	54
4-3	解析手法	
4-3-1	乱流解析手法	56
4-3-2	流入変動風	56
4-4	角柱2棟を対象とする非構造格子系 LES	
4-4-1	計算領域	57
4-4-2	計算モデルの構築	58
4-4-3	計算結果	62
4-4-4	ピーク外圧の増加現象に関する考察	66
4-5	建物形状によるピーク負圧の低減効果	
4-5-1	建物モデル	75
4-5-2	計算結果	75
4-5-3	建物周囲の流れ場	75
4-6	第4章結論	79

第5章 複雑形状を構成する建築物外装部材の風荷重評価

5-1	緒言	82
5-2	風洞実験との比較に基づく非構造格子系 LES の精度検証	
5-2-1	建物モデル	84
5-2-2	流入変動風	85
5-2-3	計算モデル	86
5-2-4	計算値と実験値の比較	87
5-3	実寸フィンモデルへの展開	
5-3-1	フィン寸法を実寸に縮小した建物モデルの計算	89
5-3-2	端部フィンの有無による影響	98
5-4	風向による風力係数分布の変化	
5-4-1	計算ケース	100
5-4-2	計算結果	101
5-5	第5章結論	107

第6章 実市街地における高層建築物モデルの風荷重評価

6-1	緒言	110
6-2	研究対象とする実市街地	
6-2-1	市街地形状	112
6-2-2	計算風向	112
6-3	流入変動風	114
6-4	実市街地モデルの計算	
6-4-1	計算領域	115
6-4-2	風向1を対象とした格子解像度に関する検討	115
6-4-3	風向2を対象とした計算	121
6-4-4	各風向ケースの計算結果および実験値との比較	123
6-4-5	風向2におけるピーク負圧発生に関する考察	125
6-5	第6章結論	130

第7章 複雑化する高層建築物および市街地への適用

7-1	緒言	134
7-2	市街地形態の経年変化による高層建物の風圧分布特性への影響	136
7-3	複雑形状を有する高層建物への適用	
7-3-1	高層部に独立壁を有する高層建物	139
7-3-2	外壁面に鉛直フィンを有する高層建物	144
7-4	第7章結論	154

第8章 結論

8-1	本研究で得られた結論	158
8-2	今後の展望	161

付録1	角柱モデルの層風力および一般化風力	163
付録2	本研究における計算環境	165
付録3	標準計算モデルの提案	166

本研究に関連する発表論文	169
--------------	-----

謝辞	171
----	-----

第 1 章

序論

1-1 研究の背景

建築物は一般に、地震、強風、雪、津波といった自然外乱に対して安全性を維持できるよう設計することが義務づけられている。建物用途や建物規模、あるいは建設地に応じて着目すべき外乱は異なるが、特に高層建築物は強風の影響を受けやすいため、台風や大型低気圧に伴う暴風に対し適切な耐風設計を行うことは建物機能のみならず都市防災の観点においてもきわめて重要である。

高層建築物を対象とする耐風設計においては、対象と目的に応じて主に3段階の設計用風荷重が評価されており、それぞれ表1.1のように強風レベルが定められている。ここで、表中に示す設計風速値は、高層建築物の軒高における10分間平均風速である。

これらのうち「居住性用風荷重」と「構造骨組用風荷重」については、主に構造設計に反映される風外力であり、建築物全体に作用する変動風力を外力として動的応答が求められ、前者に対しては最大応答加速度に基づく知覚確率が、後者に対しては応答変位・部材応力に基づく安全性が評価対象となる。一方、「外装材用風荷重」は建築物の外殻を構成する各種部材が局所的な風圧力に対して破損・飛散しないよう定められるものであり、外装部材耐力および下地材や躯体への接合耐力がこれを下回ることがないよう適切に設計されなければならない。

表 1.1 耐風設計における風荷重種別

風荷重種別	風速		
	小 ←		→ 大
	居住性用風荷重	外装材用風荷重	構造骨組用風荷重
設計対象	構造, 制振等	窓ガラス, カーテンウォール, 屋根葺材, 庇, その他外装付属部材	構造, 免震, 制振等
目的	比較的日常生活レベルの強風時において、居住者の風振動知覚による住環境障害を防止する。	稀に発生する強風に対し、各種外装部材の破損・破壊・飛散を防止する	L1: 稀に発生する暴風に対し、構造耐力上主要な部分の損傷を防止する。 L2: 極めて稀に発生する暴風に対し、建築物の倒壊・崩壊を防止する。
設計風速 統計的性質	日最大風速の 1年再現期待値	年最大風速の 50～100年再現期待値	L1: 年最大風速の50年（以上）再現期待値 L2: 年最大風速の500年（以上）再現期待値
超高層建築物 を例とした場合の 設計風速値の目安	約20m/s程度	約40m/s程度	L1: 約40m/s程度 L2: 約50m/s程度

台風や大型低気圧の通過時における実際の強風被害事例をみると、その多くは外装材被害である。居住性については、物理的被害でなく居住者の振動知覚（船酔現象）あるいは視覚や聴覚（二次部材の軋み音）によるものであるため、その事象を定量的に評価することが困難であるとともに被害が顕在化されにくい。構造骨組については、煙突・タワー等の塔状構造物を除き、高層建築物の構造設計においては多くの場合に設計用風荷重は地震荷重を下回るため、暴風に対してはより高い安全性が担保されたものとなっている。実際に暴風に対して高層建築物が倒壊した事例はこれまでにない。

強風被害事例が外装材で多く発生している要因として、設計用風荷重評価に要求される風圧力の予測精度に関する問題が挙げられる。外装材の耐風設計は、建築物の外殻を構成する（外気に曝される）個々の部材に対して行われるものであることから、本来、部材全ての設置位置に作用する風圧力を評価する必要がある。しかしながら、比較的大規模な建築物では外装部材は数千点にのぼり、個々の部材に対して変動風圧力を精度よく予測することは現状不可能であることから、限られた情報から推定せざるを得ない。また、現行の設計体系における外装材設計用風圧力は、部位ごとに複雑に時刻歴変動する風圧力の瞬間最大値（正圧側ピーク値および負圧側ピーク値）に相当するものであるが、これを精度よく予測することは容易でない。すなわち、建物壁面各所に作用する変動風圧場は、対象建物周囲の乱流構造によって特徴づけられるものであり、これは建築物自体の形状のみならず、周辺市街地の状況、さらには当該エリアに吹く自然風の特性により影響を受けるためである。

既往の耐風設計法においては、設計用風荷重評価手法として、規基準値を参照する手法と実験的手法の2通りに分類される。規基準とは、主に建築基準法に準拠した風荷重評価法であり、その他主な補足的技術資料として学会資料（日本建築学会の建築物荷重指針・同解説、外装材設計マニュアル等）が挙げられる。これらは、一般の設計者が簡易な計算に基づいて構造骨組用・外装材用の各設計用風荷重を算出できるものであるが、過去の研究的知見に基づいて一般化・汎用化された規基準値はその適用範囲に限界があり、複雑な建物形状や周辺状況の影響を適切に反映することができない。一方、実験手法とは、建築物および市街地の模型を用いた風洞実験による計測値を設計用風荷重評価に用いるものである（図 1.1）。耐風設計を目的とする場合は主に多点風圧実験（図 1.2）が採用され（構造骨組のみの場合は空気力実験の場合もある）、対象建物模型の表面において離散的に変動風圧が計測される。風洞実験は数十年に渡る技術的蓄積においてその手法が確立されており、案件ごとに作成された模型を用いて実験が行われるため、現状最も予測精度の高い風荷重評価法として認知されている。しかしながら、模型実験の物理的制約からいくつかの課題も指摘されている。まず、数百分の一という模型縮尺率において、模型の製作精度および計測分解能に限界がある。模型の製作精度に関しては、計測対象建物については大まかな外形は再現されるものの、微細な形状（バルコニーやルーバー等）は簡略化されると

ともに、周辺市街地の再現範囲は風洞装置規模から決定され、数百 m 程度に止まる場合が多い。計測分解能については、多点風圧実験の場合、模型表面の風圧測定穴から風洞床下の圧力センサーに至る導圧チューブを納める（多くの場合、模型内部に格納される）必要上、測定点数や対象部材に制約がある。高層建物模型の場合、一般に 200~400 点程度の同時多点計測が行われるが、特定高さ・特定壁面における計測点数は数点程度であり、実物大換算で数 m~10m 間隔の解像度で変動風圧力が得られることになる。実際の外装ユニットの割付幅を 1~2m 程度とすれば空間分解能としては不足であるとともに、外壁に付設される独立部材については十分な計測は実質的に不可能であるといえる。また、風洞実験の根本的な技術的課題として、得られる情報量の問題が挙げられる。実験では、計測対象とされる特定の物理量のみが出力されることから、たとえば特殊な変動圧力場が検出された際に、同時に周囲の風速場を得て要因となる乱流構造を推定することができない。変動風速場の計測を行う場合においても、建物周囲においては 3 次元的な渦構造が非定常に形成されることから、複雑な乱流構造を精度よく検出するのは実験的に困難である。さらに、風洞実験に要する時間的・費用的コストは実務的に大きな課題とされている。実際に風洞実験はその適用対象が一部の大規模なプロジェクトに限定され、形状スタディや設計変更に対して柔軟に対応することができない。

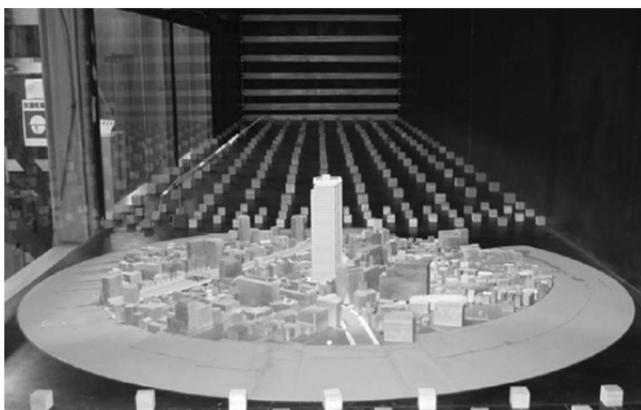


図 1.1 風洞実験模型の例

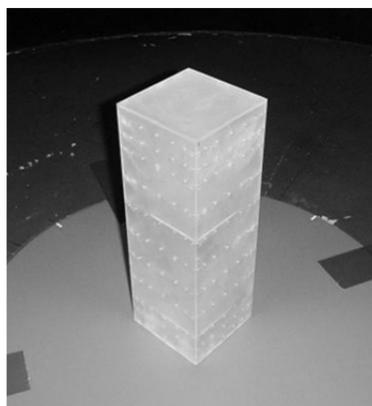


図 1.2 風圧実験模型

一方、近年の計算工学技術の発展および計算機性能の向上により、上記の技術的課題を解決できる新たな風荷重評価法として CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体計算) が期待されている。モデル形状に物理的制約を受けない点、風速・風圧といった各物理量に関して任意の空間で抽出・描画できる点において、既往の風荷重評価法の課題を解決できるだけでなく、流体力学的により高度な現象把握に基づいて耐風設計が可能となる。

CFD は現在多くの工学分野に広く普及しており、研究・実務に積極的に利用されている。建築分野においては、 $k-\epsilon$ 系モデルをはじめとするレイノルズ平均型乱流モデル (RANS モデル) を用いた定常計算が、室内環境やビル風、ヒートアイランド現象といった特に環境分野を中心として広く実施されている。RANS モデルは、比較的小さい計算負荷で流れ場の定常解が効率よく得られる点を特長として一般に普及したが、その適用は流れに関する時間平均場が要求される問題に限られている。一方、建築物の耐風設計における設計用風荷重評価においては、建築物に作用する風圧力の時刻歴変動データが要求され、乱流境界層中における 3 次元物体まわりの非定常流れ場を精度よく求める必要がある。特に、自然風を模擬した接近流や、建物近傍における剥離・再付着流れを形成する様々なスケールの渦構造の再現が重要であり、工学的利用においては Large Eddy Simulation (LES) が有効である。LES は高い時空間分解能が要求されることから RANS モデルに比べて計算負荷が大きく、過去においてはチャンネル流れや 2 次元物体まわりの流れ等を対象とした基礎研究に用いられることが主であったが、近年の計算機能力の飛躍的な向上によって、3 次元物体や実市街地のような複雑形状に対しても適用が進み、建築物の耐風設計における応用が期待されている。

1-2 既往研究と本研究の位置づけ

1-2-1 角柱に作用する風圧力に関する既往研究

建築物の耐風設計において風荷重を適切に評価するためには、建築物に作用する風圧力を精度よく予測する必要がある。Bluff body（表面で流れが剥離する物体）に作用する風圧力の組織的変動に関する初期の研究は、2次元角柱を対象とした実験的研究（風圧計測）が主であり、Vickeryら⁵⁾は層流・乱流の各条件下において風圧計測を実施し、強い周期的揚力変動について変動揚力係数およびSt数を示している。石崎ら⁶⁾は迎角の影響について詳細に計測を行い、風向に応じた流れ場の変化と風圧変動とを関連づけて考察している。その後、計測対象が高層建築物を想定した3次元物体へ展開されてゆくとともに、風圧計測技術や可視化技術の発展に伴って、変動風圧場を決定づける渦の空間構造が明らかにされてゆく。谷池ら⁷⁾は、乱流境界層中の3次元角柱を対象として風圧計測および可視化を行い、後流域に放出される渦構造に関してその強さ、空間特性、アスペクト比による影響について明らかにした。奥田ら^{8)~11)}は、高層建築物モデル側面の局所負圧について、渦の発生から放出までの過程と関連づけて考察し、風向角 0° で下層部に生成される逆円錐渦、およびグランシングアングルで上端部に生成される定在型円錐渦について報告するとともに、自然風中の中間供試体の計測結果からそれらの存在を確認している。

1-2-2 耐風設計体系の確立

現在の建築物の耐風設計体系は、主に風速評価、風圧・風力評価、風応答評価から構成されており、風観測および風洞実験に基づく既往の研究成果による寄与が大きい。特に風圧・風力評価については、対象物の形状に対する依存性が高いことから、局所風圧の多点同時計測技術の向上とともに多様な建築物・工作物の実験結果が整理され、現行の規基準において風力係数・風圧係数として設計値が示されている^{1)~2)}。

耐風設計実務において案件ごとに個別に実施される風洞実験についても、問題や対象に応じた実験方法（空気力実験、風圧実験、空力振動実験 等）ならびに計測方法、分析方法が確立されている¹²⁾。

1-2-3 数値解析的研究(1)構造格子系

一方、数値解析的研究に関して、高層建築物の耐風設計、特に変動風圧評価に係る既往の研究の歴史的変遷をみると、一様流中の2次元物体まわりの計算に始まり、3次元物体への展開、流入変動風の導入、局所風圧評価への適用性検討、複雑形状モデルへの応用、といった発展の経緯がある。

Tamuraら¹³⁾は、一様流中における2次元角柱まわりの非定常流れを三次精度風上差分による流体計算で再現している。抗力係数・揚力係数・St数に関する実験値との比較を行い、2次元物体に対してもその周囲の乱流構造を推定する上で3次元計算が必要となることを

示している。野津ら¹⁴⁾は、計算対象を地面上に建つ3次元角柱、すなわち高層建物モデルへと発展させた。低Re数範囲に限られてはいるものの、角柱アスペクト比による後流構造の変化や、層風力係数の分布特性について報告している。建物モデルの空力特性に対する接近乱流の影響に関しては、流入境界条件として要求される流入変動風の作成法についていくつかの手法が提案されており、丸山ら¹⁵⁾近藤ら¹⁶⁾が確率論的作成法を、片岡ら¹⁷⁾Nozawaら¹⁸⁾が準周期境界を用いる生成法を提案している。

高層建物モデル（乱流境界層中における3次元角柱）を対象として局所的な風圧分布について検証された事例については、Nozawaら¹⁹⁾は1：1：4角柱の風圧分布を対象としてネスティング格子を用いたLESを実施している。風向および検証領域は限られているが、実験値との比較に基づいて風圧分布に関する計算精度を吟味している。Kataokaら²⁰⁾および片岡ら²¹⁾は、外装材用風荷重評価を目的とし、マルチブロック型の一般座標系格子を用いて1：1：3角柱のLESを4風向について実施している。風洞実験結果との比較により全壁面の風圧分布に関する精度検証を行っているが、変動風圧係数および負側ピーク風圧係数については課題を残している。

風荷重評価のためのLESが複雑形状へ適用された事例としては、小野ら²²⁾が実市街地・実建物モデルの計算を行っている。重合格子を用いて計算モデルの合理化が図られており、耐風設計実務への適用性を示している。しかしながら、構造骨組用風荷重評価を目的としたものであるため、一般化風力および応答に関する検討に止まり、局所的な風圧分布には言及されていない。

上記の研究はいずれも構造格子系を用いた計算事例である。構造格子とは、計算格子の空間配列に規則性を有するものであり、差分精度の高精度化が可能である他、必要メモリや演算アルゴリズムに関する合理性から多くの研究実績を残してきた。近年の研究では、壁面近傍に格子を集中させる技術が計算精度の向上に寄与しているものの、変動風圧場を精度よく解くためには部位ごとに異なるスケールで形成される複雑な乱流構造を解像する必要があり、格子解像度の局所高解像度化において限界がある。

1-2-4 数値解析的研究(2)非構造格子系

前項に対し、近年、多くの工学分野においてCFD計算モデルに非構造格子系が導入され、計算の効率化および高精度化が図られている。非構造格子系とは格子配列に規則性を持たない格子系であり、モデル形状や空間解像度に対する高い自由度を有していることから、過大な計算負荷を伴うことなく多様な流れ場に効果的に適応できる。

CFDにおける非構造格子系モデルの歴史的背景をみると、McDonald(1971)²³⁾による2次元モデル（三角形メッシュ975要素）が原点である（FVMの原点ともされている、ただし2DのためFinite Area Method）。計算対象はガスタービン翼まわりの流れの計算であることから、非構造格子は工学的利用を目的とした離散化手法として初めて提案されたものであることがわかる。その後、Holmesら²⁵⁾による三角形の再分割による局所高解像度化や、テトラへ

の拡張による 3D モデルへの発展 (Kallinderis ら²⁶⁾, Biswas²⁷⁾ら) の経緯はあるものの、解像すべき渦スケール範囲が広い建築風工学においては LES 計算モデルへの適用に至らなかった。その要因としては、離散点の不規則性に伴う差分精度の問題として微細な変動を表現できないこと、要素形態の自由度により必要メモリ量が過大であること、変数配列に起因して演算効率が低いことが挙げられる。近年では、均質な要素形状を維持できるオートメッシュアルゴリズムの開発と、節点中心法におけるコントロールボリュームの界面定義手法の発展が異形メッシュの課題を克服し、さらに大規模計算技術 (特に領域分割法による並列計算) の進歩が工学利用を促進させ、特に機械系分野において市販コードやオープンソースコードを中心として普及が進んでいる。

建築分野においては、RANS モデルによる定常計算では非構造格子系が一般に利用されているものの、格子分解能や差分スキームの影響を鋭敏に受ける LES では非構造格子が採用された事例は少ない。既往の研究としては、Phuc ら²⁸⁾がセットバック型建物の風圧分布を求めているが、建物単体モデルとしては要素数が過大であり、モデル構築法として非構造格子の特長を活かすには検討の余地があるものと思われる。野津ら²⁹⁾は実市街地 (実建物) を対象とした計算結果を報告しており、概ね良好な結果が示されているものの、使用された要素形態 (プリズム要素) については、その基本的な精度が不明であるとともに、メッシュ生成に関する合理性を吟味すべきであると考えられる。Tamura, Nozu, Kishida ら^{30)~33)}は、高層建物が多く存在する実市街地モデルを対象とした LES を実施し、実建物に作用する風圧分布や周辺建物群による乱流特性について報告している。計算モデルに関し、従来の構造格子系から非構造格子系とのハイブリッドモデルに至る一連の工夫により、モデル構築の合理化と予測精度の向上が図られているものの、建物隅角部のような特異点において風圧変動の再現性に課題を残している。要因としては、格子解像度の問題だけでなく格子生成法に起因するモデル形状の変形や格子形状の質の低下が考えられ、計算モデルの構築法に関する課題であるといえる。

以上を踏まえ、非構造格子系について適用事例が十分でない現状においてその妥当性を示す上では、計算モデルにより高い普遍性や一般性が求められる。本研究は、非構造格子系の中で最もシンプルな要素形態を扱い、シンプルなモデルで基本精度を検証するとともに、実用性に着目して複雑モデルへの適用性を吟味するものとする。

1-3 研究の目的

本研究では、高層建築物を対象とし、LES 計算モデルにテトラ非構造格子系を導入することにより、新たな CFD 風荷重評価法を確立することを目的とする。非構造格子系 LES の技術的課題を解決するために必要な各種問題に対して、適切なモデル構築法を提示するとともに計算精度を検証し、本手法の妥当性・適用性を吟味する。また、耐風設計上重要となる特殊な風荷重現象に対し、本手法の特長を活かして要因となる乱流構造を調べ、その発生機構を明らかにする。

なお本研究では、高層建築物の外壁面において局所的に作用する変動風圧力に着目しており、これは耐風設計の風荷重種別としては外装材用風荷重に相当するものである。構造骨組用風荷重は建物全体に作用する変動風力を用いて応答解析が行われるが、当該風力データは一般に外壁面の局所風圧を面積分することで得ることができる（風洞実験も同様）。建物全体系の変動風力は建物スケールの乱流構造から特徴づけられる一方、局所的な変動風圧場はより小スケールの局所的な渦構造の影響も同時に受けることから、より高い分解能で乱流構造を解像しなければならない。以上より、局所風圧についてその変動特性まで再現することができれば、原理的に構造骨組用風荷重評価にも適用可能であるため、本研究は風荷重評価全般に資する知見を構築するものと位置づけられる。

1-4 論文の構成

本研究における技術的課題、それに対応する研究項目と論文各章の構成を図 1.3 に示す。

本論文では、まず乱流解析法および計算格子生成法についてその詳細を第 2 章に示す。本研究で導入するテトラ非構造格子は、複雑な物体形状を完全に保持できるだけでなく、流れ場に応じて要求される解像度に対して要素形状の質を維持しながら高い自由度で離散化できるため、複雑な乱流場を効果的に解像できる。さらに本章では、自然風を模擬した流入境界条件の効果的な作成法を提案し、その有効性を検証する。

第 3 章では、建築物に作用する変動風圧について基本的な計算精度を精査することを目的とし、乱流境界層中における 3 次元角柱の計算を行う。比較対象として複数の異なる風洞実験データを使用することにより、実験値の潜在的なばらつきに対する計算結果の対応関係を明らかにし、変動風圧評価に関する本手法の妥当性を示す。

次に、近年の市街地再開発において高層建築物が近接して建てられる傾向を考慮し、風荷重評価における周辺建物の影響に着目する。第 4 章では、対象建物の風上側に同規模の高層建物が隣接する状況を想定し、位置関係と風向に応じて局所負圧が増加する現象を本計算法により再現する。これは、規基準値を上回る風圧力であるとともに、実際にも十分想定され得る状況であることから耐風設計上重要な事象である。本章では、当該現象の発

生メカニズムを明らかにするとともに、建物隅角部形状に着目した対策法とその効果を示す。

また、建物自体の形状に関する近年の傾向として、ファサードの多様化によりその外形が複雑化している。特に外壁面に付設される部材の多くは、風洞実験の困難さ故に、今後の耐風設計において LES に依存することが予想される。第 5 章では、環境配慮型外装形式として適用案件が増加している鉛直フィン部材（遮光ルーバー）を対象とする。本計算法は、微細な形状を伴う建物モデルにも対応可能であることを示し、当該部材の設計用風荷重に関する新たな知見を提示するとともに、建物基部で発生する特殊な流れ場について考察を加える。

前章までの知見に基づき、計算対象を実市街地および実建物モデルに発展させる。対象エリアは都心の高密度市街地であり、実建物群により形成されるサイト特有の複雑乱流場を求める。第 6 章では、2004 年時が再現された風洞実験結果を比較対象として、市街地の中心部に建つ超高層建築物の変動風圧の再現性を検証する。建物周囲の乱流構造と変動風圧場の関係性に基づき適切な計算モデル構築法を示す他、風上高層建物の影響により発生する強い負圧現象に関してそのメカニズムを調べ、第 4 章との関連性を述べる。

第 7 章では、前章のエリアを対象とし、近年の再開発によって著しく高密度化・複雑化した市街地形態に本手法を適用する。ここではまず現況（2014 年時）モデルの計算を行い、前章の対象建物の風圧分布に関する経年変化の様子を調べる。さらに、この 10 年間に於いて新築された超高層建築物から、一般の知見では風荷重評価が困難な複雑形態を有するものを対象として風圧分布特性を調べる。ひとつは上層階に独立壁面を有するものであり、形状に起因して発生する局所的な風圧分布を示すと同時に、その要因となる流れの構造について考察を加える。他方は実際に鉛直フィンを実装した高層建物であり、フィンに作用する変動風力について第 5 章の知見と比較する他、一般外壁面の風圧特性に関して表面の細部形状の再現性がおよぼす影響を明らかにし、LES 風荷重評価の有意性を示す。

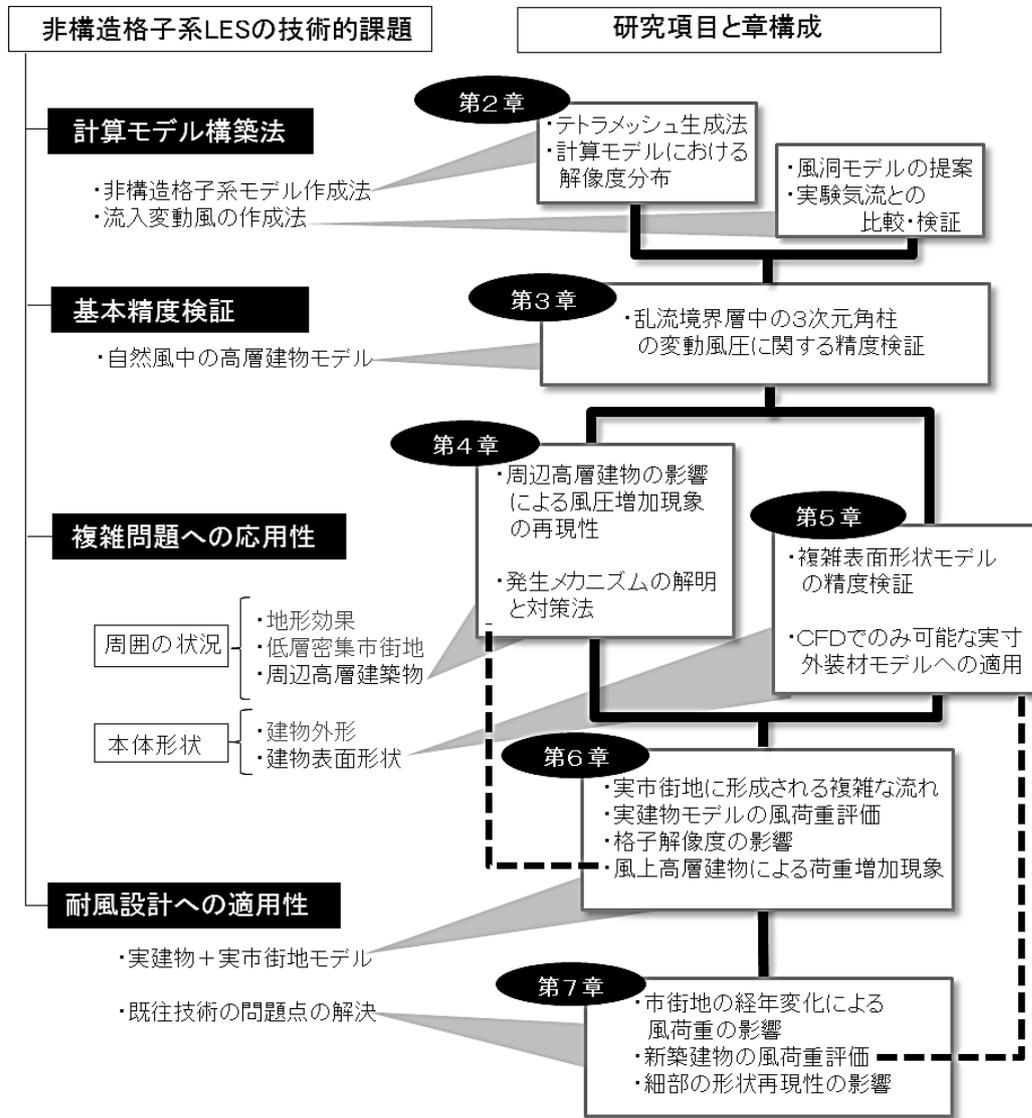


図 1.3 研究項目と章構成

参考文献

- 1) 建築基準法 告示第 1454 号, 第 1458 号, 第 1461 号, 建設省
- 2) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2015
- 3) 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 日本建築学会, 2004
- 4) 免震建築物の耐風設計指針, 日本免震構造協会, 2012
- 5) B. J. Vickery : Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, *Journal of Fluid Mechanics*, 25, 1966
- 6) 石崎撥雄, 河井宏允 : 正四角柱の表面に作用する風圧変動について, 京大防災研究所年報第 16 号 B, 1973
- 7) 谷池義人, 奥田泰雄 : 3 次元角柱周りの渦構造 (その 1・放出渦の強さ), 風工学シンポジウム, 1990
- 8) 奥田泰雄, 谷池義人 : 3 次元角柱周りの渦構造 (その 2・側面上に形成される渦), 風工学シンポジウム, 1990
- 9) 奥田泰雄, 谷池義人 : 3 次元角柱側面上に形成される逆円錐状渦, 風工学シンポジウム, 1992
- 10) Y. Okuda and Y. Taniike : Conical vortices over side face of a three-dimensional square prism, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50, 1993
- 11) 奥田泰雄, 桂順治, 川村純夫 : 自然風中に置かれた 3 次元角柱に加わる風圧力, 風工学シンポジウム, 1994
- 12) 実務者のための風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, 2008
- 13) T. Tamura and K. Kuwahara : Numerical study of aerodynamic behavior of a square cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 33, 1990
- 14) 野津剛, 田村哲郎 : 高精度・保存的流体計算法の耐風問題への適用性について (その 2 地面上の 3 次元角柱まわりの渦構造と空力特性), 日本建築学会構造系論文集, 第 503 号, 1998
- 15) 丸山敬, 丸山勇祐, W. ロディ, 平岡久司 : 人工的に発生させた流入気流を用いた LES による乱流境界層の計算, 第 14 回風工学シンポジウム, 1996
- 16) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三 : 生成された流入変動風に基づく等方性乱流の LES 計算, 第 14 回風工学シンポジウム, 1996
- 17) 片岡浩人, 水野稔 : 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 523 号, pp. 71-77, 1999. 9

- 18) Nozawa, K. and Tamura, T. : Large eddy simulation of the flow around a low-rise building in a rough-wall turbulent boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, pp.1151-1162, 2002.10
- 19) Nozawa, K. and Tamura, T. : Feasibility study of LES on predicting wind loads on a high-rise building, *ICWE11*, 2003.6
- 20) Kataoka, H. and Tamura, T. : Numerical prediction of the peak pressure distributions on square cylinder by LES, *ICWE13*, 2011.7
- 21) 片岡浩人, 吉川優, 田村哲郎 : LES による高層建物外壁の外装材風荷重の検討, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009.12
- 22) 小野佳之, 片岡浩人 : LES の市街地に建つ超高層ビルの風応答評価への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009
- 23) P. W. McDonald : The Computation of Transonic Flow Through Two-Dimensional Gas Turbine Cascades, *ASME*, 71-GT-89, 1971
- 24) A. Jameson and D. Mavriplis : Finite Volume Solution of the Two-Dimensional Euler Equations on a Regular Triangular Mesh, *AIAA*, 1986
- 25) D. G. Holmes and S. D. Connell : Solution of the 2D Navier-Stokes Equations on Unstructured Adaptive Grids, *AIAA*, 1989
- 26) Y. Kallinderis and P. Vijayan : Adaptive Refinement-Coarsening Scheme for Three-Dimensional Unstructured Meshes, *AIAA*, 1993
- 27) Rupak Biswas and Roger C. Strawn : A New Procedure for Dynamic Adaption of Three-Dimensional Unstructured Grids, *Applied Numerical Mathematics* 13 , 1994
- 28) Phuc, P. V., Kikuchi, H., Hibi, K. and Tamura, Y. : Peak Wind Pressure Distributions on Buildings with a Setback, *ICWE13*, 2011.7
- 29) 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜 : 中層市街地に建つ高層建物の LES による壁面風圧評価, 第 21 回風工学シンポジウム, pp.293-298, 2010.12
- 30) Tamura, T. , Okuda, Y. , Kishida, T. , Nakamura, O. , Miyashita, K. , Katsumura, A. and Tamari, M. : LES for aerodynamic characteristics of a tall building inside a dense city district , *CWE2010* , pp1-8 , 2010,05
- 31) Tamura, T. and Nozu, T. : Introduction of unstructured-grid system on LES for wind pressure estimation on a building in cities , *BBAA7* , pp1-8 , 2012.09
- 32) 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 , 第 22 回風工学シンポジウム , pp293-298 , 2012.12
- 33) Nozu, T. , Tamura, T. , Kishida, T. and Katsumura, A. : Mesh-adaptive LES for wind load estimation of tall building in a city , *CWE2014* , pp1-8 , 2014.06

第 2 章

解析手法

2-1 諸言

乱流解析手法については、旧来より目的と用途に応じて様々な数理モデルが提案・利用されてきた。工学分野においては主に、支配方程式となる Navier-Stokes 式に対して時間平均化フィルタを施す RANS (Raynolds Averaged Naveir Stokes) モデルと、格子解像度に対応した空間フィルタを施す LES (Large Eddy Simulation) が代表的な解析法 (広義での乱流モデル) として挙げられる。LES とは、計算格子を空間フィルタとし、フィルタサイズ以上の渦構造を直接解像するとともに、それ以下の渦構造についてはモデル化して間接的に扱う解析法である。乱流構造の非定常解を直接得ることが可能であることから、建築物周囲の圧力場に関する時刻歴変動を求めることができ、設計用風荷重評価への適用が期待されている。

しかしながら、LES はその本来の特性として格子依存性が非常に高いことから、計算格子の質や解像度に対して鋭敏であり、建築物まわりに形成される乱流構造の非定常性を精度よく再現するためには格子系に十分な配慮を要する。特に外装材設計用風荷重評価に用いられるピーク風圧 (圧力変動の正圧側および負圧側の瞬間最大値) については、建物スケールに比べてきわめて小スケールの渦構造の挙動から決定されることがあるため、対象とする乱流構造さらにはそれを特徴づける建築物や市街地のモデル形態に応じて、十分な解像度分布による適切なモデル構築が必須となる。

本研究で採用する非構造格子系については、モデル構築における自由度の高さから将来的に高い実用性が期待できるものの、LES 計算モデルとして変動圧力場を予測するためのモデル構築法について吟味された例はこれまでにない。

また、建築分野特有の LES 適用上の技術的課題として、流入境界条件の構築法が挙げられる。屋外気流解析においては、建物 (群) を包絡するように配置された仮想境界面で構成された閉空間内が計算領域となり、流入境界面において自然風を模擬した風速場が設定される。ここで自然風とは、風速変動に関する高さ方向分布が工学的に規定されたものであり、地表面粗度 (市街地密度等) に応じて区分 I ~ V に分類されている。RANS モデル (定常計算) における流入境界条件では、風速変動の統計値を一定値として規定するのみであるが、LES による非定常計算では時々刻々変動する風速値を時刻ステップごとに与える必要がある。すなわち、上記の自然風特性を満足する時刻歴変動風速場を別途生成した上で、流入境界面の全節点に時刻ステップごとに情報を与え、対象とする建物モデルの接近流を再現しなければならない (図 2.1)。

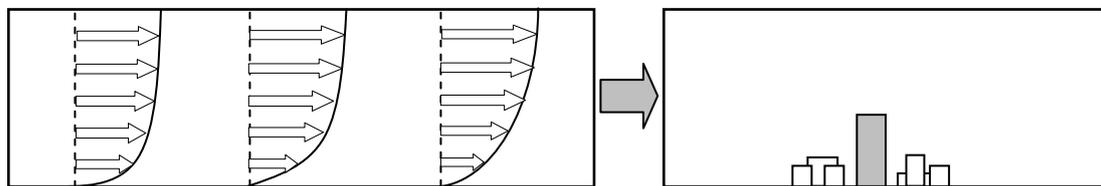


図 2.1 流入変動風の生成と主計算領域の流入境界条件

本章では、LES に基づく乱流解析法を示した上で、非構造格子系の概要とその生成法を示す。また、非構造格子系の特長を生かした流入変動風の生成法を新たに提案し、その妥当性を示す。

2-2 乱流解析法

支配方程式は非圧縮性の Navier Stokes 方程式（運動量保存）および連続の式（質量保存）である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

LES では基礎方程式に対して空間フィルタリングを施す。

支配方程式に対する空間フィルタリングは、以下の定義に基づく。

$$\bar{u}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x - \xi) u(\xi, t) d\xi$$

ここで、 G はフィルタ関数である。本研究では次式に示すトップハットフィルタを用いる。

$$G(x - \xi) = \frac{1}{\Delta} \quad \left(|x - \xi| \leq \frac{\Delta}{2} \right), \quad G(x - \xi) = 0 \quad \left(|x - \xi| \geq \frac{\Delta}{2} \right)$$

ここで、 Δ はグリッドスケールのフィルタサイズである（その詳細は後述する）。

瞬間速度 u にフィルタが掛けられた \bar{u} は GS（グリッドスケール）成分とよばれる。

フィルタリング条件として

$$\overline{\bar{u} + u} = \bar{u} + \bar{u}, \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} \quad (\text{ただし } s = x, t)$$

に従うと次式が得られる（密度は定数とし基準化する）

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

ここで τ_{ij} は、フィルタリングにより新たに現れる未知数であり、SGS（サブグリッドスケール、フィルタサイズ以下の渦構造）応力とよばれる。SGS の乱れによる GS の流れ場へ

の影響は、 τ_{ij} を通して GS 運動方程式に組込まれる。

$\overline{u_i u_j}$ は直接的に求められないことから以下のように分解する。

$$\overline{u_i u_j} = \overline{\overline{u_i} \overline{u_j}} + \overline{\overline{u_i} u'_j} + \overline{\overline{u_j} u'_i} + \overline{u'_i u'_j}$$

ここで、 $u'_i = u_i - \overline{u_i}$ の関係に基づく。

すると τ_{ij} は以下のように表される。

$$\tau_{ij} = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij}$$

$$L_{ij} = \overline{\overline{u_i} \overline{u_j}} - \overline{\overline{u_i} u_j}$$

$$C_{ij} = \overline{\overline{u_i} u'_j} + \overline{\overline{u_j} u'_i}$$

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$$

上記各項は Leonard 項, Cross 項, Reynolds 項とよばれる。

本研究では, SGS モデルに Smagorinsky モデルを採用する. 本モデルでは上記 Leonard 項と Cross 項は互いに打ち消しあう効果があることから, τ_{ij} は Reynolds 項のみで代表さ

れると仮定する. ここで, 乱流粘性係数 ν_{SGS} を導入すると τ_{ij} は次のように表される.

$$\tau_{ij} \approx R_{ij} = 2\nu_{SGS} \overline{S_{ij}}$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 |\overline{S}|$$

$$|\overline{S}| = \sqrt{2\overline{S_{ij} S_{ij}}}$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right)$$

ここで, $\overline{S_{ij}}$ はひずみ速度テンソルである. モデル定数 c_s は 0.15 とした. なお, Δ はフィルタ幅であり, 一般に計算格子寸法に相当する.

空間の離散化精度については、移流項および拡散項に対し、2次精度中心差分法を適用する。

時間項については、次の3点近似の2次精度陰解法を適用する。

$$\phi^{n+1} = \frac{4}{3}\phi^n - \frac{1}{3}\phi^{n-1} + \frac{2}{3}\Delta t f(t^{n+1}, \phi^{n+1})$$

Smagorinsky モデルで要求される減衰関数については、Van Driest 型関数を固体境界の隣接要素に適用する。

2-3 非構造格子系の導入

従来より用いられてきた構造格子系は、簡易な格子生成および差分近似の高次精度化が可能であり、建築物の変動風圧評価においては一般座標系や境界適合格子、重合格子といった工夫によって多くの計算事例および研究実績が示されてきた（図 2.2 上段）。しかしながら、格子配列の制約が伴うため、局所的な高解像度化を行うと扁平な要素や解像度の過剰な領域等が発生してしまうこと、また物体近傍から若干離れた領域で解像度が低下し、建物周囲の乱流構造の再現において重量なせん断層の挙動を捉えられなくなるのが懸念される。

これに対し、計算空間の格子分割において規則性を持たないものは非構造格子系とよばれる（図 2.2 下段）。非構造格子系では、要素形状・配列ともに制約がなく、空間離散化の自由度がきわめて高い。非構造格子系で用いられる要素形状の例を図 2.3 に示す。これらの要素を用いることで物体形状を完全に保持できることから、実建物・実市街地といった複雑形状に比較的容易に対応でき、将来的に高い実用性を期待できる。また、空間解像度の自由度が高いことも特長のひとつであり、局所的に高い分解能が要求される領域に対しても他の空間に影響をおよぼすことなく格子を配置できる。

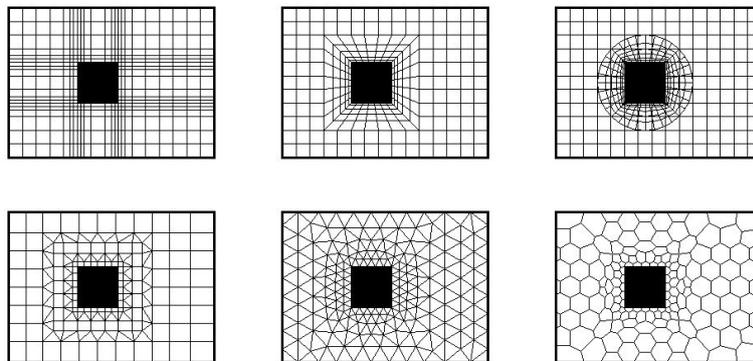


図 2.2 格子系の例（上段：構造格子， 下段：非構造格子）

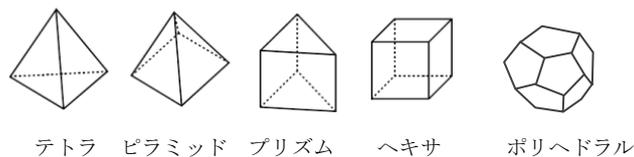
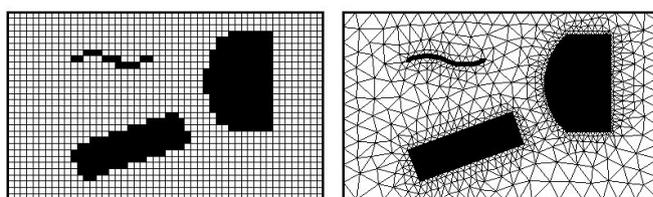


図 2.3 非構造格子系で用いられる要素形状の例

本研究では、主に四面体（テトラ）要素による非構造格子系を使用する。テトラ要素は3次元空間を構成する最小単位であり、非構造格子系においては最も単純な形態のひとつである。任意の物体形状（境界形状）に対して空間を離散化する事例について、構造格子とテトラ非構造格子を比較したものを図2.4に示す。構造格子では、曲面や斜面を有する境界形状に対して凹凸が現れてしまうのに対し、テトラ非構造格子ではこれら形状が完全に維持されているとともに、物体遠方から近傍に至る解像度の変化が連続的であることがわかる。計算モデルとして要求される格子解像度に関して両者の総要素数を比較すると、建物単体モデル（第3章参照）に関して構造格子系はテトラ非構造格子系の約3倍、実市街地を対象とした複雑モデル（第6章参照）では約数十倍の格子数が課されることが予想され、特に将来的な実用性の観点からも非構造格子系が合理的であると判断される。以上より、テトラ非構造格子系は、多様な形状を有する建築物・都市に対して周囲の空間を離散化する手法として、汎用性・実用性に優れた格子形態と位置付けることができる。



構造格子（直交格子） 非構造格子（テトラ要素）

図2.4 任意形状に対する適合性の比較

2-4 格子生成手法

非構造格子系の生成法としては、一般に、オートメッシュ（格子自動生成）が採用される。テトラ要素に対しては、オクトツリー法やデローニ法等いくつかのオートメッシュ・アルゴリズムが存在する。本研究ではアドバンシングフロント法を採用するものとし、その格子生成プロセスを以下に示す（図 2.5）。

まず、計算空間内の密度分布を六面体群により設定する。これは八分木（octant）構造とよばれ、空間的の六面体配列に対し、局所的により高い分解能を与える領域に対して六面体の解像度を段階的に上げてゆく（3次元的に8つの六面体に分割してゆく）。

オートメッシュの第一プロセスとして、まず計算空間内の各境界面上において、面に接する六面体群の寸法に応じて2次元格子が生成される。各境界面は接する六面体の代表寸法に対応した三角形によるポリゴン構造に変換され（一般の STL フォーマットと同様）、これは計算格子生成の起点となる（表面メッシュとよばれる）。第二ステップでは、それら各表面メッシュから計算領域内部に向かって、六面体群の密度分布に応じたテトラ（四面体の体積メッシュ）要素が生成される。第三ステップでは、建物壁面や地上面といった、固体境界面において、境界面と平行な面を有する要素が複数層挿入される（図 2.6）。これらは境界層要素とよばれ、本モデルのようにテトラ要素を用いる場合、要素形状としてはプリズム（薄い三角柱）となる。具体的には、各表面メッシュを構成する三角形から領域内部に掃引するよう生成されるものであり、これら境界層要素によって壁面平行成分の流速ベクトルが規定できることから計算精度の向上に寄与するものである。最終ステップでは、計算空間内を離散化した各テトラ要素およびプリズム要素に対して平滑化が行われる。アスペクト比が大きいテトラ要素を排除するとともに、より等方的なテトラ（正四面体）群となるよう各体積要素が整えられる。

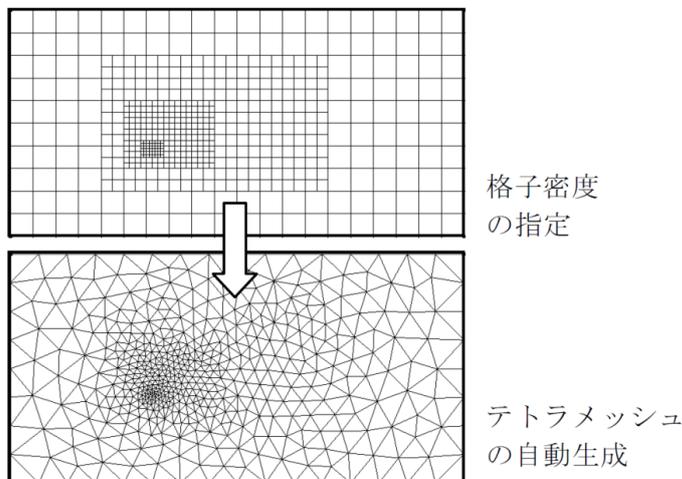


図 2.5 非構造格子の生成プロセス

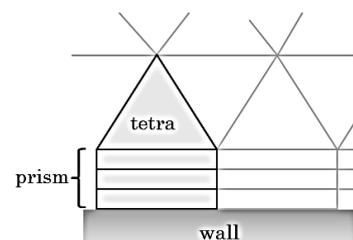


図 2.6 境界層要素の挿入

本計算で採用する有限体積法 (FVM) では、流速および圧力の各物理量の定義点に対し、そのまわりに形成される検査体積 (コントロールボリューム) ごとに保存則が適用される。ここで生成されたテトラ非構造格子系においては、図 2.7 に示すようにテトラ節点に物理量を配置するものとし、コントロールボリュームは節点まわりに多面体として形成する (図 2.7(a))。ここで、同じ格子形態を有するモデルであっても、コントロールボリュームの定義方法によって解の精度および安定性は異なる。

コントロールボリューム界面は、節点間の midpoint、テトラを形成する各三角形の重心、およびテトラの重心から形成される (図 2.7(b))。変数が配置されるテトラ節点 (コントロールボリューム中心) に対して、それに接続されるテトラ 1 要素につき内部に四角形の界面が 3 面定義される。したがって、各コントロールボリュームは、当該節点に集まるテトラの数 \times 3 面の四角形により構成され、約 60~80 の面からなる多面体となる。各界面流速は、テトラ節点の各値から求まる midpoint あるいは重心の値を介して線形補間される。

グリッドスケールのフィルタ幅 Δ は、上記コントロールボリュームの体積 V を用いて、次式で定義される。

$$\Delta = V^{1/3}$$

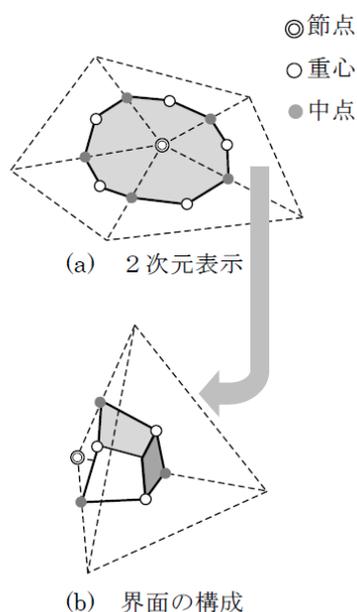


図 2.7 コントロールボリューム

2-5 流入境界条件

LES で屋外流れを計算する際には、流入境界条件として自然風特性を模擬した時刻歴変動風の流入境界条件が要求される。流入変動風の作成法には、準周期境界を用いる手法^{1),2)}や模擬風速波形による統計的手法³⁾、実験値を使用する手法⁴⁾等、様々な方法がこれまでに提案されている。いずれも、特定のプロファイルを有する境界層乱流場を数値的に再現するための手法であるが、目標値への適合方法において過大な計算量や数値的操作を要する点や、周波数領域の再現性に関して必ずしも工学的に適用し易いものではない。本研究では、モデル構築の自由度に関する非構造格子系の利点を活かすとともに、建築風工学分野での汎用性に着目し、風洞モデルによる新たな流入変動風の作成法を提案する⁵⁾。

本研究で流入変動風の作成に用いたモデル形状を図 2.8 に示す。本計算は、流入変動風を作成かつ保存することを目的とするものであり、建築物等を含む主計算とは独立に（事前に）実施される。本手法は、風洞実験時の気流作成法、すなわち風洞内に所定の気流条件を満たす変動風速場を作成する実験的手法に倣うものであり、物理的な粗度あるいは抵抗要素をモデル形状として組み込むことにより、数値的操作を行うことなく直接的に乱流境界層を再現するものである。具体的には、本モデルに一様流を流入させた後、平均風速勾配に応じて速度欠損を与えるスパイヤの他、床面上のラフネスブロック上を吹走させ、乱流境界層を発達させる。流出境界近傍において仮想断面を設け、プロファイルを検証するとともに、面内の全節点において時刻歴変動風速データを保存する。保存された流入変動風データは、建物形状を含む主計算モデルの計算実施時に時刻ステップごとに参照され、その流入境界条件として付与される。

本手法では、モデル形状として広範囲に渡り小規模かつ多様な物体を配置するため、形状適合性およびそれらに対する局所的な高解像度が要求され、非構造格子系の優位性を活

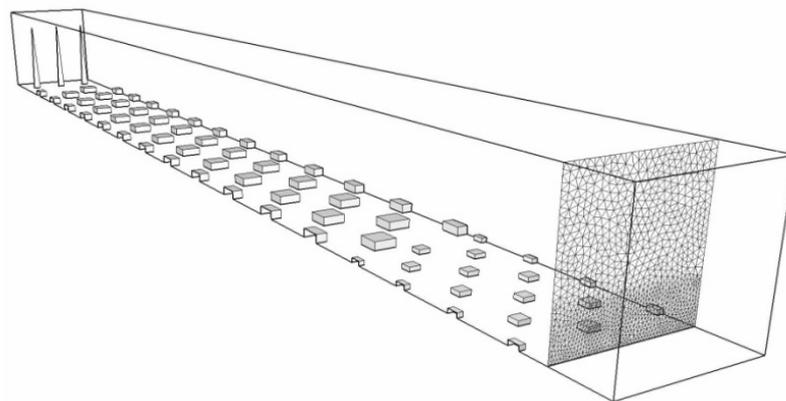


図 2.8 流入変動風作成モデル

かすことができる。また、流入変動風を生成する上で、一般の風洞気流作成法と同様に各抵抗要素の役割が明確であるため、目標プロファイルへのチューニングを効果的に行うことができる。

流入変動風作成モデルにおける計算格子は、前述の手法で生成したテトラ要素を主とする非構造格子系である。風洞天井付近から床面付近へ、更にスパイヤ・ラフネスブロック近傍に向かって連続的に空間解像度を向上させた上で、固体境界においては境界層要素（プリズム要素）が挿入されている（図 2.9）。本モデルの格子規模は、節点数約 88 万、要素数約 422 万である。一般にテトラ要素で構成された格子系では、節点数と要素数に約 5 倍程度の差が生じることになる（コントロールボリュームの数は節点数に対応する）。本モデルにおける流入境界条件は一様流（流速固定値）であり、スパイヤ通過後ラフネスブロック上を吹走させて乱流境界層を発達させる。流出境界の手前において、図 2.8 に示すように主流方向に垂直な仮想境界を設け、プロファイルを確認後、同面内の全節点において時刻歴変動風速を保存する。同境界面における平均風速および乱れの強さのプロファイルを図 2.10 に示す。同図には検証用の風洞実験における風洞気流のプロファイルも併せて示す。ここで検証に用いた風洞気流は、次章に示す単体角柱モデルのためのものであり、実験値のばらつきを考慮して 3 種の風洞実験（A～C）で作成された気流と比較している。同図より、計算および各実験のプロファイルは概ね一致しており、気流条件はほぼ同一であるといえる。ここで、プロファイルを確認した仮想境界位置での変動風は、建物モデルを含む主計算において流入境界条件として与えられるため、当該建物位置よりも風上側の風速分布に相当する（実験気流の計測位置も同様）。

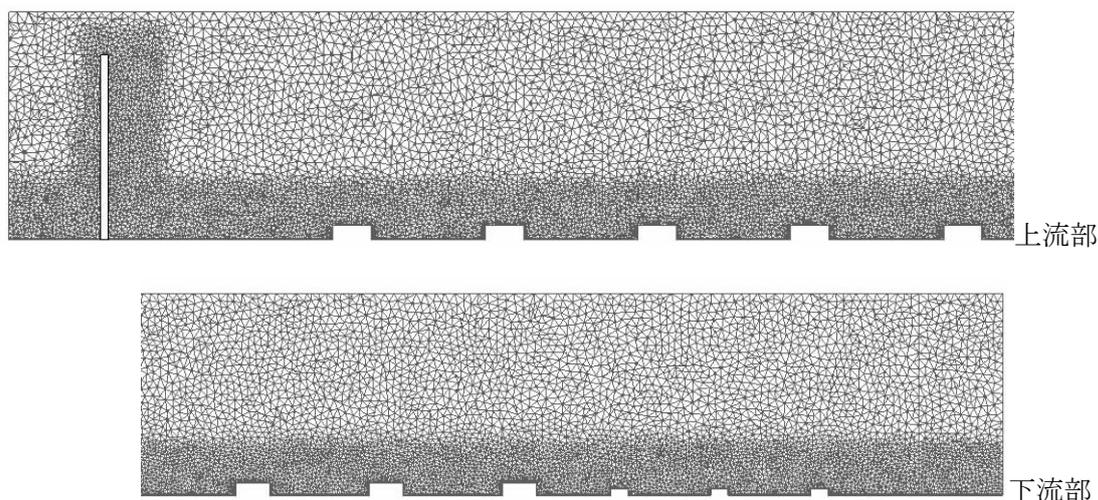


図 2.9 変動流入風作成モデルの計算格子

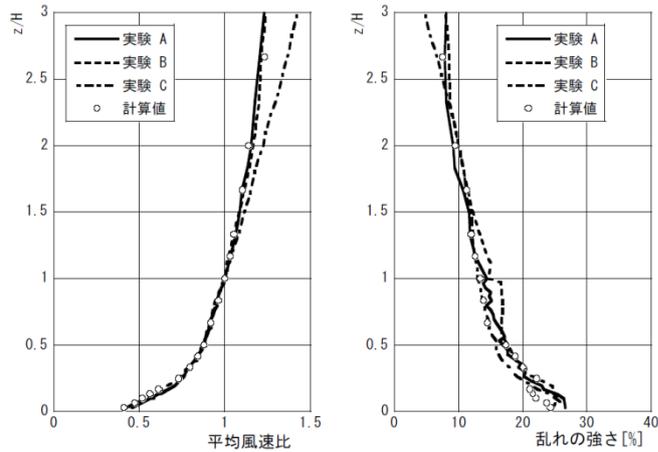


図 2.10 変動風抽出面におけるプロファイル比較

本モデルで作成・保存された流入変動風は、次章における主計算の流入境界条件として使用される。ここで、主計算領域の流入境界面においては、その節点配置が流入変動風を保存した仮想断面の節点配置と一致しないことから、読み込み時に線形補間を行うため変動風特性が適切に伝達されているか確認する必要がある。また主計算では流入境界から角柱モデルに至る距離において粗度の無い滑面上を吹走することになり（風洞実験でも同様）、滑面区間を吹走する際に床面近傍でその特性が変化することが想定される。その際、変化の度合いが風洞実験と対応することも計算の精度検証をする上では重要である。

ここでは、作成した流入変動風に対して滑面上を吹走させた際のプロファイルの変化の様子を調べるため、予備計算として、角柱のない計算モデルを用いて検証した。図 2.11 に、滑面上を吹走（次章の角柱幅 B に対して $8B$ ）させた際に変化したプロファイルを示す。流入変動風保存位置（角柱風上位置）のプロファイル（図 2.10）と比べて、床面近傍において平均風速については速度回復が、乱れの強さについては減少傾向がみられ、計算は実験と同程度のプロファイルの変化が起こることを確認した。

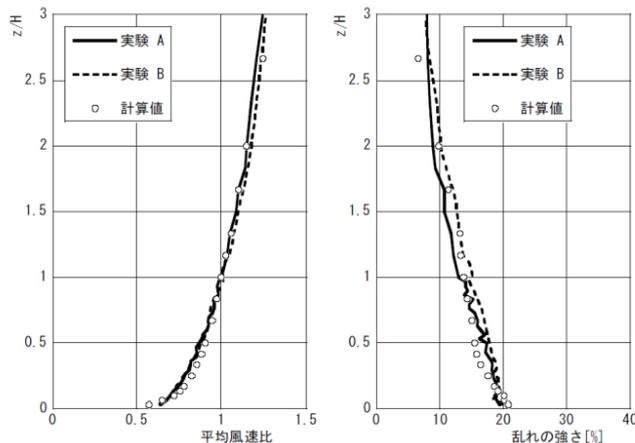


図 2.11 滑面吹走後（角柱位置）におけるプロファイル比較

ここで、滑面を吹走させたモデルの計算格子は、次章の角柱モデルの風上領域における空間分解能とした。すなわち、流入変動風を作成・保存した空間分解能に比べ、流入直後により高い解像度の領域を吹走している。角柱代表高さ H における変動風速のパワースペクトルについて、流入変動風保存位置と、滑面吹走後の位置とで比較したものを図 2.12 に示す。ともにカルマン型の周波数特性を概ね模擬できている他、LES の格子サイズに応じて減衰する高周波数領域について若干の変化がみられる。滑面吹走モデルの解像度向上に伴って渦のエネルギーカスケードが起り、高周波数領域まで分布がひろがっていることがわかる。

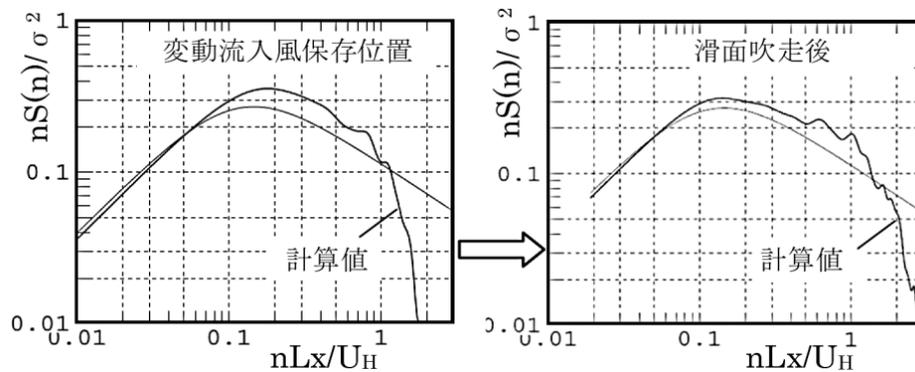


図 2.12 変動風速のパワースペクトルの変化

2-6 その他の境界条件

その他の境界条件を以下に示す。

- ・ 流出境界 : 圧力差0の圧力境界
- ・ 上空境界 : フリースリップ
- ・ 側方境界 : フリースリップ
- ・ 地面境界 : 壁関数 (Werner-Wengle 型 3層モデル)
- ・ 壁面境界 : 壁関数 (Werner-Wengle 型 3層モデル)

2-7 第2章結論

- (1) 非構造格子系に基づくメッシュ生成は、物体形状の適合性および局所的な空間解像度分布の点で効果的であり、建築物や市街地といった複雑形状への応用に期待できる。
- (2) LES の流入境界条件（流入変動風）の作成法として、風洞を模擬する手法を提案した。本手法は非構造格子系を適用する上で効果的であり、生成された境界層乱流のみならず、滑面を吹走する際の床面近傍における変化も含めて風洞気流を適切に再現できることが確認された。

参考文献

- 1) 片岡浩人, 水野稔: 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 523 号, pp. 71-77, 1999. 9
- 2) Nozawa, K. and Tamura, T. : Large eddy simulation of the flow around a low-rise building in a rough-wall turbulent boundary layer, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 90, pp. 1151-1162, 2002. 10
- 3) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三: 生成された流入変動風を用いた乱流境界層の LES, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp. 47-54, 1999. 9
- 4) Maruyama, Y., Tamura, T., Okuda, Y. and Ohashi, M. : LES of turbulent boundary layer for inflow generation using stereo PIV measurement data, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 104-106, pp. 379-388, 2012. 5-7
- 5) 吉川優: 非構造格子を用いた LES による変動風圧評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 155~156, 2010. 9

第 3 章

3 次元角柱の変動風圧評価

3-1 諸言

建築物の耐風設計における風荷重評価に LES を適用するためには、乱流境界層中における 3 次元物体まわりの時刻歴変動流れ場を精度よく求める必要がある。特に、自然風を模擬した接近流や、建物近傍における剥離・再付着流れを形成する様々なスケールの渦構造の再現が重要であり、それらの挙動によって特徴づけられる建物壁面の局所的な変動圧力場に関して十分に計算精度を吟味しなければならない。

LES による構造物の風力評価に関してはこれまでに多くの報告があるが、建築物（乱流境界層中における 3 次元物体）を対象として局所的な風圧分布について検証された事例は比較的少ない。野澤ら¹⁾は 1 : 1 : 4 角柱の風圧分布を対象としてネスティング格子を用いた LES を実施し、局所風圧について検証を行っている。壁面正対風向における計算結果に基づき、一部で発生した実験値との差について、風上面の平均風圧係数および変動風圧係数については接近流の乱れのスケールの影響、背面および側面のピーク風圧係数についてはアンサンブル回数による影響を指摘しているが、風向および検証領域が限られており、全体的な風圧分布が明らかでない。片岡ら^{2),3)}は外装材用風荷重評価を目的とし、マルチブロック型の一般座標系格子を用いて 1 : 1 : 3 角柱の LES を 4 風向について実施し、風洞実験結果との比較により局所風圧に関する精度検証を行っている。平均風圧係数および正側ピーク風圧係数については実験値と良い対応を示したものの、変動風圧係数および負側ピーク風圧係数についてはばらつきが大きく、角柱隅角部近傍の解像度および準周期境界に起因する接近流の周波数特性の影響がその原因として指摘されている。

これらはいずれも構造格子系を用いた計算事例であり、建物壁面に格子を集中させる技術が計算精度の向上に寄与している。一方非構造格子系モデルに関しては、複雑モデルに直接適用された事例はいくつかあるものの^{4),5)}、3次元角柱の風圧分布に関する計算事例はこれまでになく、変動圧力場に関する基本的な予測精度は詳細に検証されていない。非構造格子系モデルに関する適用事例が十分でない現状においてその妥当性を示す上では、計算モデルにより高い普遍性や一般性が求められる。すなわち、接近流や風向角の影響が物体周囲の流れのパターンに直接的に作用するようなシンプルなモデル（形状や格子）を用いて基本的な精度を吟味することが重要であると考えられる。

本章では、変動圧力場に関する非構造格子系の基本性能を検証するとともにその適切な使用法を提示する。計算対象は、高層建築物を想定した最もシンプルな例として、幅：奥行：高さ = 1 : 1 : 3 の角柱とする。計算法の妥当性を検討する上で、形状に関する複雑さを排除するため、角柱単体での計算とする。計算格子はテトラ要素を主とする非構造格子系である。対象とする風向は、壁面正対する 0° 、対称的に斜めに入射される 45° の他、グランディングアングルの近傍角度として 15° の計 3 風向とし、風向角が圧力分布に与える影響について再現性を確認する。

なお、計算精度の検証にあたっては同角柱を対象とした風圧実験結果を以下のように取り扱う。実験結果を比較対象とする際に重要なのは、実験条件と計算条件とを極力一致させること、また同条件下におけるばらつきの評価である。例えば、同一条件下（同一模型）で複数機関により実施された実験結果にばらつきが生じる事例⁶⁾も報告されている。ここでは計算の比較対象として、気流条件や測定点等について一致させた風洞実験結果を3種類使用する。角柱単体のようなモデルにおいては、形状がシンプルであるが故に僅かな条件の差によってせん断層の挙動が鋭敏に変化することが考えられる。したがって本章では、変動風圧の予測精度に関して合理的な検証を行うために複数の実験結果との比較を行う。

3-2 計算対象

本章では、高層建築物モデルとして、幅(B):奥行(D):高さ(H)=1:1:3で隅角部が直角の3次元角柱単体を採用する。前章に示した流入変動風を接近流とし、角柱まわりの非定常流れを非構造格子系LESで求め、壁面各所に作用する風圧分布について検討する。

3-3 比較用の風洞実験概要

LESの計算精度の検証には、風洞実験値を使用する。上記角柱の模型を用いた多点風圧実験により壁面各所の変動風圧力を計測し、風圧係数の比較を実施する(図3.1, 図3.2)。風圧実験では図3.3に示す各点を風圧測定点とした(28点/層×11層=計308点)。LESにおいても実験模型と同じ座標で変動風圧力をサンプリングする必要があるが、計算節点座標は実験と必ずしも一致しないため、同座標に対して周囲の変数定義点から補間して値を得るものとする。

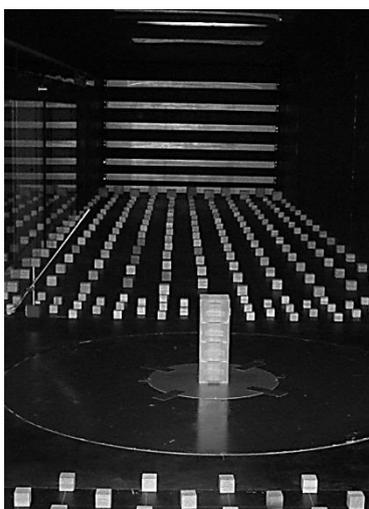


図 3.1 3次元角柱の風洞実験

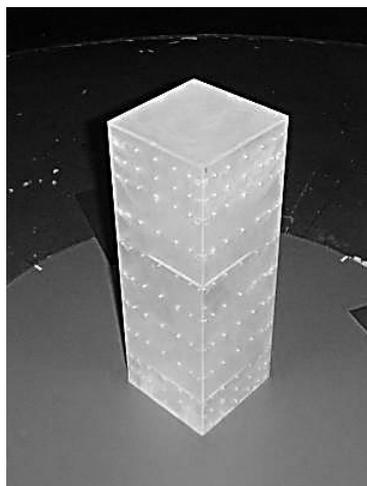


図 3.2 風圧実験模型

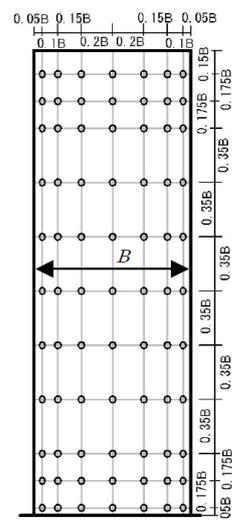


図 3.3 測定点配置

精度検証用の風洞実験値については、単一の結果を真値として使用せず、表3.1に示す3種類の風洞実験結果を使用する。これは、特にシンプルなモデルに関して微小な条件の差異が結果に鋭敏に反映される可能性が高く、実験同志であってもばらつきが少なからず発生することを考慮するためである。計算精度不足で現象が捉えられていないのか、あるいは評価上のばらつきの範囲であるのかを総合的に判断する上ではきわめて有効であるが、既往の研究において3次元角柱の計算精度を検証する際に複数の実験値と比較された事例

はない。

各実験は、角柱の幅および奥行が 30m、高さ 90m の高層建物を対象とし、実大頂部風速を 41.9m/s と仮定した上で、それぞれ異なる実験手法で実施している。使用風洞は実験 A・B と実験 C とで異なる。実験気流は各実験ともに地表面粗度区分Ⅲのプロファイル为目标とし、実験 A および実験 B では乱流格子およびラフネスブロックで、実験 C ではスパイヤ、バリヤおよびラフネスブロックで作成している。角柱代表高さにおける実験風速は、実験 A、B、C でそれぞれ約 11.7m/s、11.3m/s、9.7m/s である。各実験気流のプロファイルを図 3.4 に示す。同図には、これらを再現するべく生成された LES 流入変動風（第 2 章参照、計算による瞬間風速場を図 3.5 に示す）の値も併せて示している。各プロファイルは角柱高さ H の 1.5 倍の高さまで一致していることから、概ね同一の気流条件下で比較できると考えられる。

模型縮尺率は実験 A および実験 C の 1/300（模型高さ 300mm）に対し、実験 B は 1/350（模型高さ 257.1mm）である。実験で得られた風圧力は代表高さにおける速度圧で基準化して風圧係数とし、各実験ごとに換算された実大 1 秒相当の移動平均化処理を行った上で実大 10 分波形ごとの統計値をアンサンブル平均している。アンサンブル平均回数は、実験 A で 4 回、実験 B で 5 回、実験 C で 7 回である。各実験の位置付けは、実験 A と実験 B は模型縮尺率（模型寸法）に伴う差として、実験 A と実験 C は風洞気流作成手法や測定系に伴う差として、それぞれ同じ建築物（および風圧場）を対象としながらも結果に差を生じる可能性が潜在的に含まれている。なお、ここで使用する模型は各実験で異なるものであるが、模型壁面における風圧測定点配置（図 3.3）は同一としていることから、全ての測定点に対して計算値と直接比較が可能である。

表 3.1 風洞実験一覧

実験	風洞	1:1:3角柱寸法			縮尺率
		B[mm]	D[mm]	H[mm]	
実験A	風洞①	100.0	100.0	300.0	1/300
実験B	風洞①	85.7	85.7	257.1	1/350
実験C	風洞②	100.0	100.0	300.0	1/300

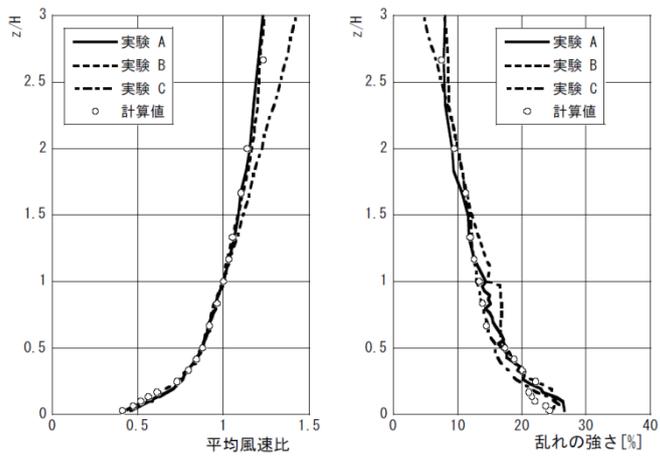


図 3.4 各実験気流のプロファイル (再掲)

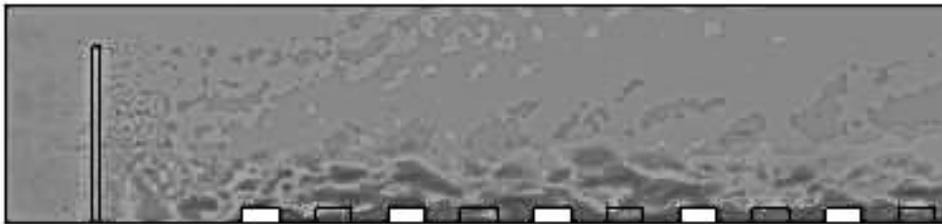


図 3.5 LES 流入変動風の作成

3-4 計算モデルの構築

角柱を含む主計算領域に関し、適切なモデル構築法を検討する。角柱に作用する変動風圧を再現するためには、周囲の乱流構造を正しく捉える必要があり、角柱まわりの各所に形成される様々な流れや渦構造を適切に解像する格子分解能が要求される。

角柱周囲の乱流構造に関する概要図を図 3.6 に示す。主に、自然風の乱れを含む接近流、角柱隅角部における流れの剥離、側方における剥離せん断層の挙動と角柱後端での干渉、後流域における巻込やカルマン渦の放出、といった乱流場がそれぞれの領域で形成される。計算モデルを構築する上では、各領域で発生するこれらの渦構造を解像するための十分な格子の確保が必要となる。以上を考慮し、ここでは相対的な解像度分布を図 3.7 のよう定める。角柱の変動圧力場に直接影響しない上空領域を最も低解像度とし、平面的に角柱に向かって連続的に解像度を上げ、角柱隅角部で最も高解像度となるよう格子解像度を設定する。ここで、構造格子系では格子配列の規則性に伴う格子配分の制約が生じるが、非構造格子系では各要素形状の質を損なうことなく局所的に解像度を調整し、適切な解像度を確保することが可能である。



図 3.6 角柱周囲の乱流構造に関する概要図

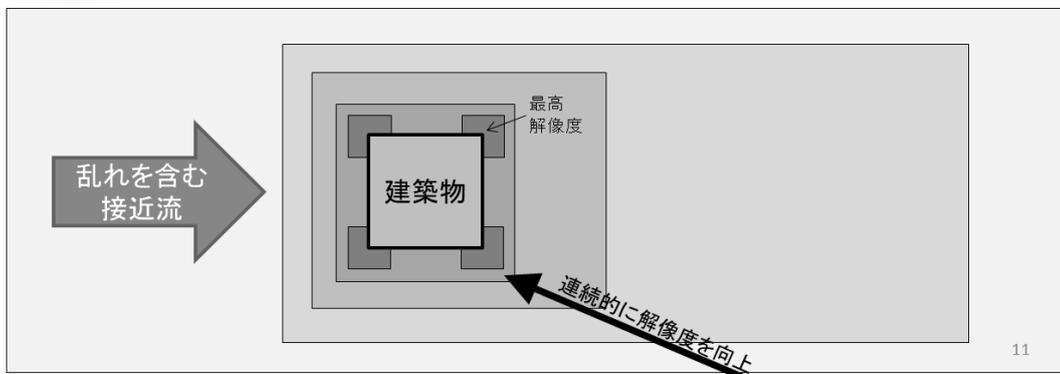


図 3.7 角柱周囲の乱流構造に対応した格子解像度分布の概要図

計算モデル構築に際し、格子解像度を具体的に定めるための予備解析を実施する。パラメータは図 3.7 において最高解像度とする角柱隅角部の格子解像度であり、単体角柱に作用する風圧の再現精度すなわち実験値との相関が、格子解像度によってどのように変化するかを調べる。風荷重評価への適用性の観点から局所的な風圧変動に着目し、平均値・変動値（標準偏差）それぞれについて、全壁面 308 点の多点風圧計測結果（3-3）と比較する。特に変動成分については、角柱周囲における乱流構造の動的な効果が影響することから、現象の再現性において格子解像度に鋭敏であることが想定される。

計算条件を以下に示す。計算領域規模は、角柱代表幅 B として、幅 $20B$ 、奥行き $30B$ 、高さ $15B$ とした。流入境界には前述の流入変動風を与え、流入境界から $8B$ の距離に角柱モデルを配置した。レイノルズ数 Re は 7×10^4 で実験と概ね一致している。無次元時間刻み $\Delta t' (= \Delta t U_H / B)$ は 0.03 であり、計算風向は角柱正対風向 (0°) である。計算において、風洞実験同様の測定点で変動圧力をサンプリングし、流入風速に基づく速度圧で基準化することにより風圧係数を求める。格子生成に関しては前章に示した手法に準拠するものとし、最も低解像度のケースは隅角部で $B/16$ 、高解像度のケースは $B/64$ である。図 3.8 は高解像度ケースの計算結果に基づく風速・圧力の瞬間場である。ここでは解像度を 4 段階に変化させ、各モデルの平均風圧係数・変動風圧係数に対して実験値と比較した結果を図 3.9 に示す。最も低解像度のケースでは、計算が発散し解を得ることができなかった（本ケースは RANS モデルによる定常計算用の解像度を目安としている）。 $B/32$ のケースでは解が得られたものの、特に変動値においてばらつきが大きい。解像度を上げるにしたがい計算値と実験値の相関が高まる様子が同図から確認され、隅角部を $B/64$ とした高解像度ケースは平均風圧係数・変動風圧係数ともに良好な対応がみられる。

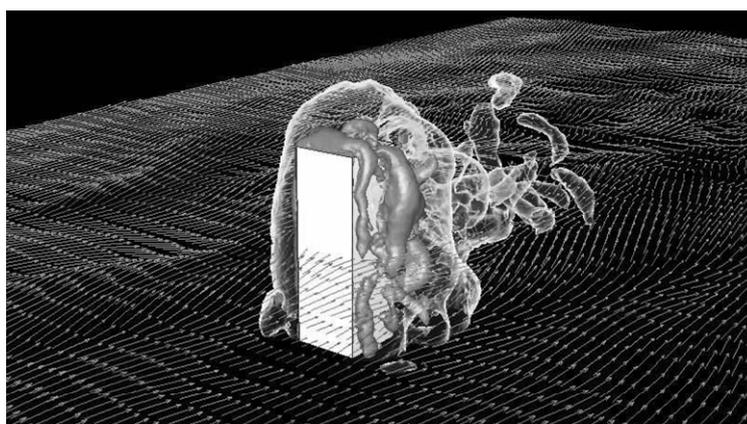


図 3.8 角柱周囲の瞬間流れ場（ベクトル分布）と瞬間圧力場（負圧等値面）

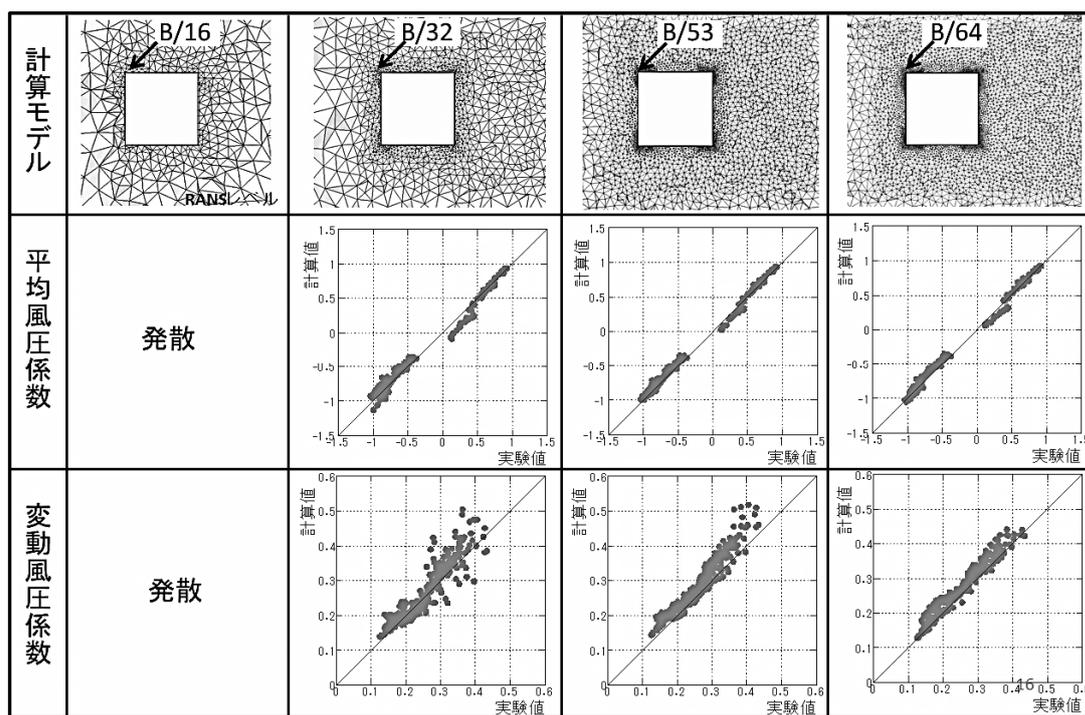
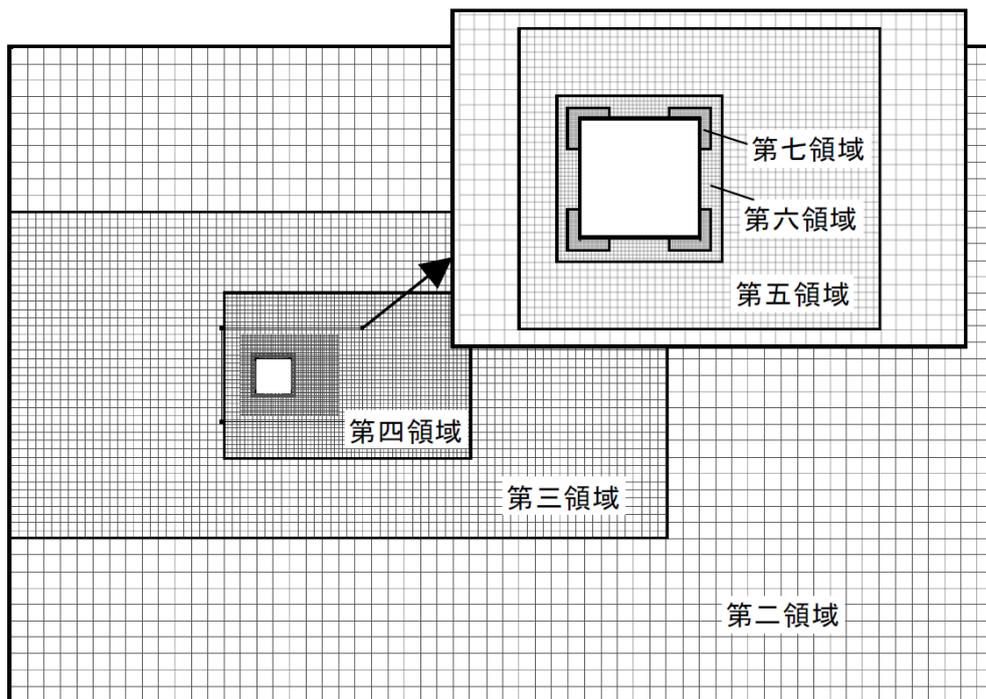
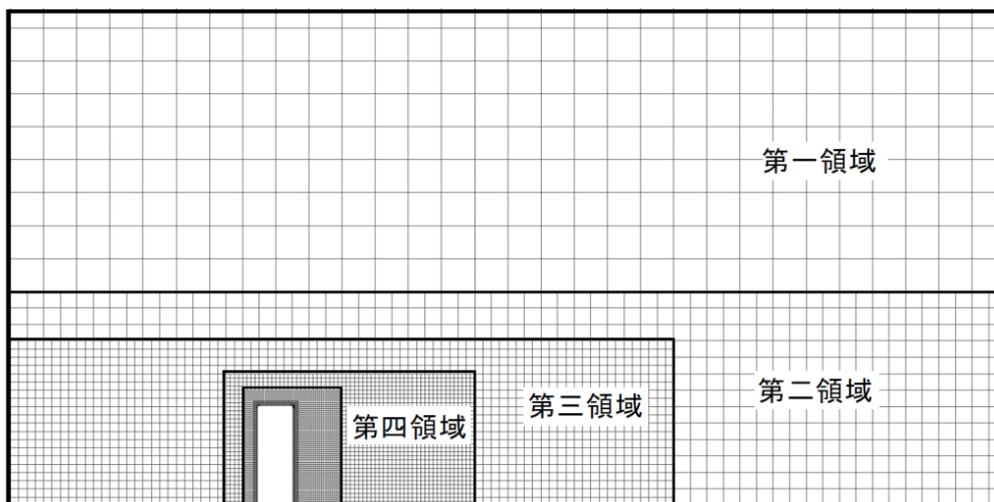


図 3.9 格子解像度に関する感度解析結果

以上の結果を踏まえ、3次元角柱の変動風圧を求めるための計算モデル構築法を以下のように定める。まず、空間解像度の設定に用いた立方体群の断面を図 3.10 に示す。最も解像度の低い領域は上空領域（立方体代表寸法= B ）であり、これを第一領域とする。そこから段階的に角柱に向かって分解能を上げてゆく。第二領域は床から $6.5B$ の高さの範囲であり、立方体代表寸法= $B/2$ となる。第一および第二領域の分解能は、流入変動風作成モデルの抽出断面における分解能に対応している。第三領域は、幅 $10B$ の範囲において流入面から角柱後流領域に至る $20B$ の範囲とし、立方体代表寸法= $B/4$ となる。変動流入風は流入直後から解像度が向上するため、渦のエネルギーカスケードが起こり、より高い周波数領域まで分解されてゆくことが想定される。第四領域以降は、角柱によって生成される様々な渦構造を解像することを目的として設定した。すなわち、流れの剥離・再付着による渦生成やせん断層の挙動、また後流における渦干渉や渦列を考慮し、特に側方・後方に対して広い範囲で十分な分解能を確保できるよう留意した。最も解像度の高い第七領域は角柱隅角部であり、立方体代表寸法= $B/64$ である。生成された格子系の水平断面図および鉛直断面図を図 3.11 に示す。空間解像度の境界近傍においても概ね連続的に要素が配置されており、明確な不連続面や要素の質の低下はみられない。

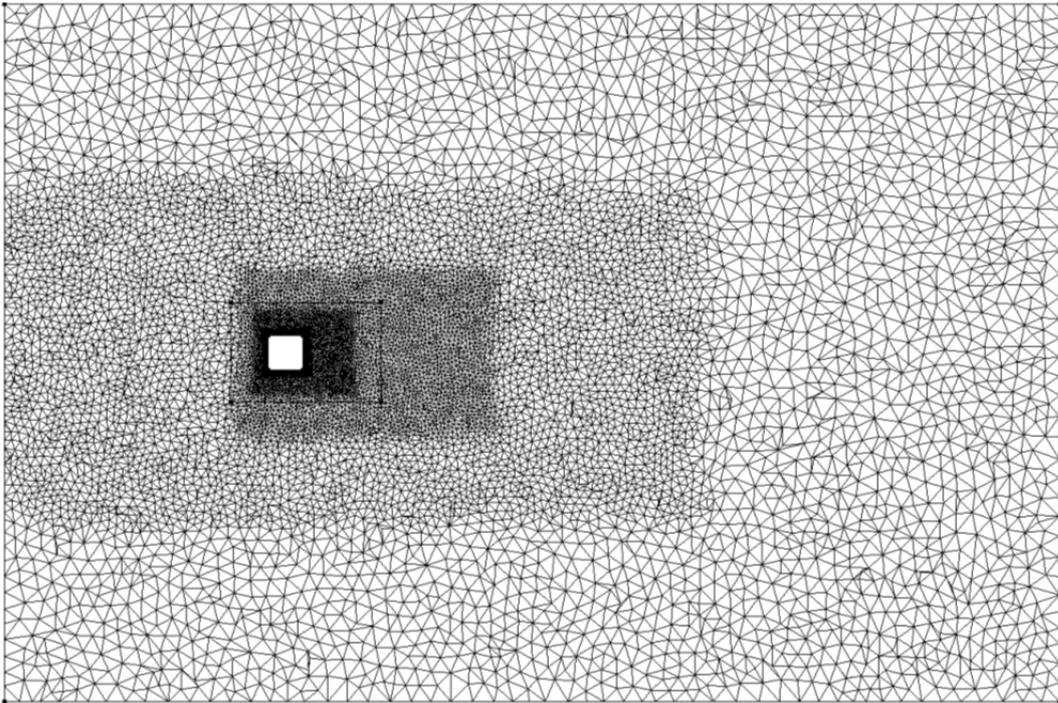


(a) 水平断面

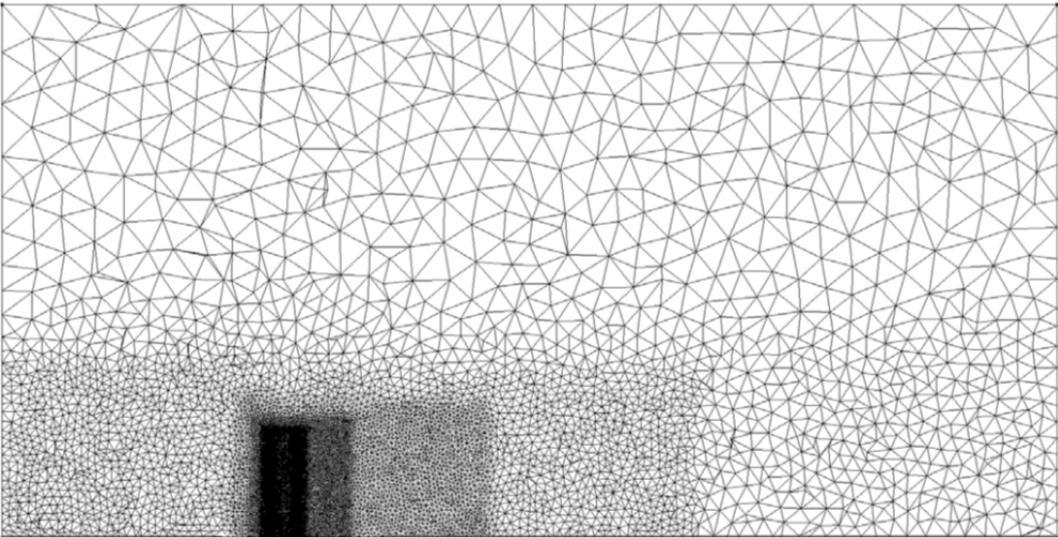


(b) 鉛直断面

図 3.10 格子解像度の設定



水平断面



鉛直断面

図 3.11 角柱計算モデルの非構造格子

本章では、計算風向として、壁面正対する 0° 、対称的に斜めに入射される 45° の他、グラッシングアングルの近傍角度として 15° の計3ケースについて検証する。計算モデルは各風向ごとに独立に作成する。その際、空間解像度を設定するにあたり、第一～第五領域については各風向で共通とし、第六および第七領域については角柱壁面の角度に沿うよう作成した(図3.12)。各風向ケースともに固体境界には境界層要素としてプリズム要素が挿入されており、角柱壁面および床面の表面メッシュを基準として要素が生成されている。ここでは、角柱壁面に対して厚さ $1/250B$ の要素を、床面(角柱近傍)に対して厚さ $1/100B$ の要素を、床面(角柱遠方)に対して厚さ $1/50B$ の要素を、それぞれ計算領域内側に向かって1.1倍のストレッチで3層設けている。本モデルのメッシュ数は風向によって若干異なり、要素数で約330万～360万、節点数で約66万～72万である。

計算条件については、レイノルズ数 Re は 7×10^4 で実験と概ね一致している。無次元時間刻み $\Delta t' (= \Delta t U_H / B)$ は 0.03 である。

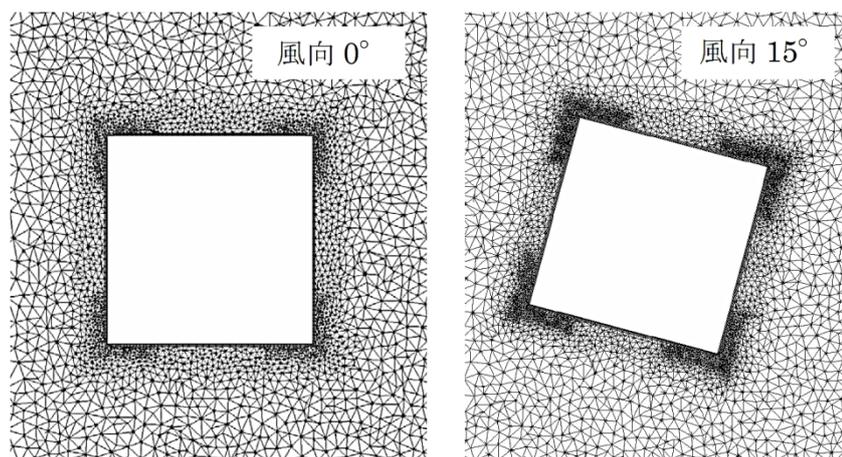


図 3.12 計算格子の拡大図(風向変化)

3-5 計算結果

以上の手法で実施された計算結果について、3-3に示した各風洞実験結果と比較することにより、角柱表面の変動風圧力に対する計算精度を検証する。計算結果の処理については実験と同様とし、本計算では実大10分波形×5波によるアンサンブル平均を行っている。

3-5-1 全測定点に関する実験値と計算値の相関

図3.13は、実験における全ての風圧測定点(308点)について、平均風圧係数、変動風圧係数、正圧側ピーク風圧係数、負圧側ピーク風圧係数の、実験値と計算値の相関図を示したものである。各図は、本研究で比較対象とした3種の実験値それぞれとの相関を併記している。各図によりその分布傾向には差がみられるが、全体的には高い相関が示されており概ね実験との対応はよいと判断される。同じ1:1:3角柱モデルを対象とした既往の報告^{2),3)}と比較すると本結果はより良い対応を示している。その理由として、変動流入風の作成に風洞モデルを用いたことで接近流の周波数特性に改善がみられた点、また、角柱周囲の空間解像度について特に壁面から若干離れた領域で比較的高い解像度が維持されているために剥離せん断層の挙動をより正しく捉えられているものと判断される(図3.14)。各図の分布傾向に関し、風向に対しては特に顕著な差はみられず、各風向でそれぞれに生じる流れの現象に対して本計算手法が有効であることがわかる。各風圧係数については、平均風圧係数は約10%、変動風圧係数は約20%、正圧側ピーク風圧係数は約20%、負圧側ピーク風圧係数は約30%の範囲に大部分の点が含まれている。変動成分については実験値間においてもわずかに差がみられており、計算値との相関は比較対象とする実験によっても若干異なっている。

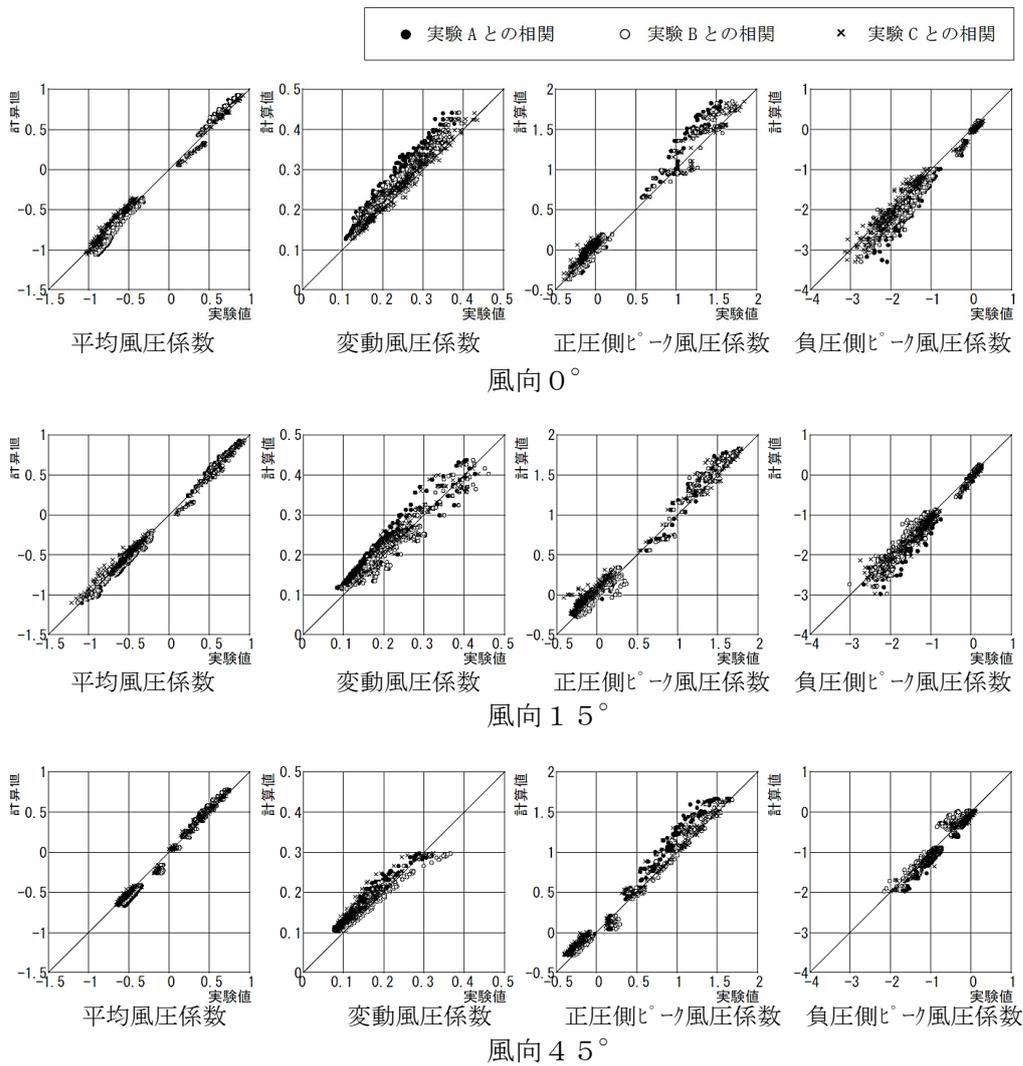


図 3.13 実験値と計算値の相関図

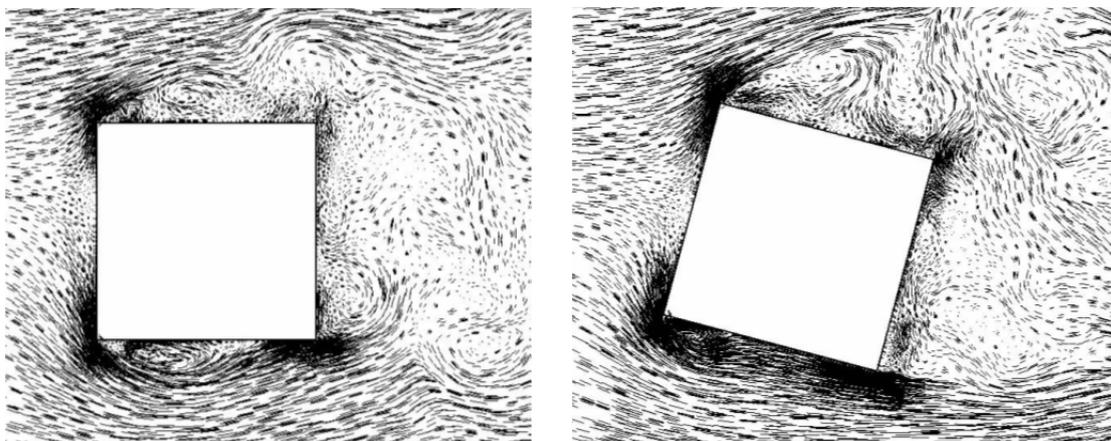


図 3.14 計算結果に基づく瞬間流れ場

3-5-2 風圧係数の空間分布に関する実験値と計算値の比較

風圧係数の空間分布について計算値と実験値とを比較したものを図 3.15 に示す。本図は各風向および風圧係数ごとに2つの分布図で構成されており、上段は高さ $0.72H$ における水平断面分布、下段は高さ $0.25H$ における水平断面分布である。同図より、風圧係数の全体的な分布性状は概ね一致しており、角柱まわりに形成される変動圧力場が計算でほぼ再現できているものと評価できる。しかしながら、空間ごとに細部を検証すると、部位や風向によって計算値と実験値の間に若干差がある領域がみられる。具体的に挙げると、まず負圧場に関しては、風向 0° 側面 ($x/B=1\sim 2, 3\sim 4$) における変動風圧係数および負圧側ピーク風圧係数、風向 15° 側面 ($x/B=1\sim 2$) における変動風圧係数および負圧側ピーク風圧係数において各値に差がみられるが、これらはいずれも剥離直後の渦生成に伴う局所的な負圧領域で生じている。他の負圧領域については概ね一致しており、顕著な差はみられない。また、正圧場に関しては、風向 0° 風上面 ($x/B=0\sim 1$) における正圧側ピーク風圧係数および高さ $0.25H$ の変動風圧係数、風向 45° 風上面 ($x/B=0\sim 2$) における変動風圧係数および正圧側ピーク風圧係数において各値に差がみられ、これらは接近流が直接作用する面に相当する。

上記の各部位においては、計算値と実験値に差が生じているだけでなく、ほとんどの場合、実験値の間でもその絶対値に差がみられる。各実験値における絶対値の差については、変動風圧係数で最大 0.05 程度、正圧側ピーク風圧係数で最大 0.3 程度、負圧側ピーク風圧係数で最大 0.5 程度である。実験値間の差をばらつきとした場合、計算値は概ね各ばらつきの範囲内にあるか、あるいは絶対値に対して包絡する形となっている。これらの原因については、計測精度やアンサンブル回数による評価上のばらつきによるものや、わずかな条件の違いに起因する流れ場の物理的な差によるもの等が考えられる。例えば、風向 0° 側面の変動風圧係数については、 $x/B=1\sim 2$ の領域と $x/B=3\sim 4$ の領域は対称形であるものの実験値の分布に差が表れていることから、実験における計測・評価上のばらつきと判断される。また風向 15° 側面 ($x/B=1\sim 2$) 高さ $0.72H$ の変動風圧係数についてはピーク位置の空間的なずれがみられることから、風向角に微小な差が生じている可能性があり、これは同風向のピーク風圧の形成に影響を与えていることも考えられる。正圧場に関しては、接近流の特性が一致していれば変動成分も含めて一致するはずであるが、本結果から考察すると、その一致度と結果における差異の発生との関係を吟味する必要がある。図 3.4 に示した気流のプロファイルのわずかな差以外に、自然風を模擬する手法自体に起因する乱流構造の差が潜在的に含まれる可能性が考えられる。すなわち、風洞気流は一般に、スパイヤや乱流格子、バリヤ、ラフネスブロックといった物理的な抵抗要素で強制的に勾配流を生成するものであり、完全に平衡な境界層乱流場を形成するものではない。本研究の計算に使用した変動流入風の作成手法においても同様である。したがって、計算と実験の両者、

さらには実験同志であっても、接近流の乱流構造を厳密に一致させることは平衡性の成立が十分でないため困難であり、それらの差が風上領域の変動風圧場の差として現れている可能性が推察される。また、その乱流構造の差は、角柱周囲の剥離せん断層の挙動にも影響を及ぼすことが考えられ、側面の負圧場に関するばらつきや、非対称性の原因となっているものと推定される。

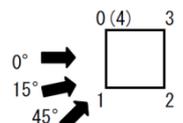
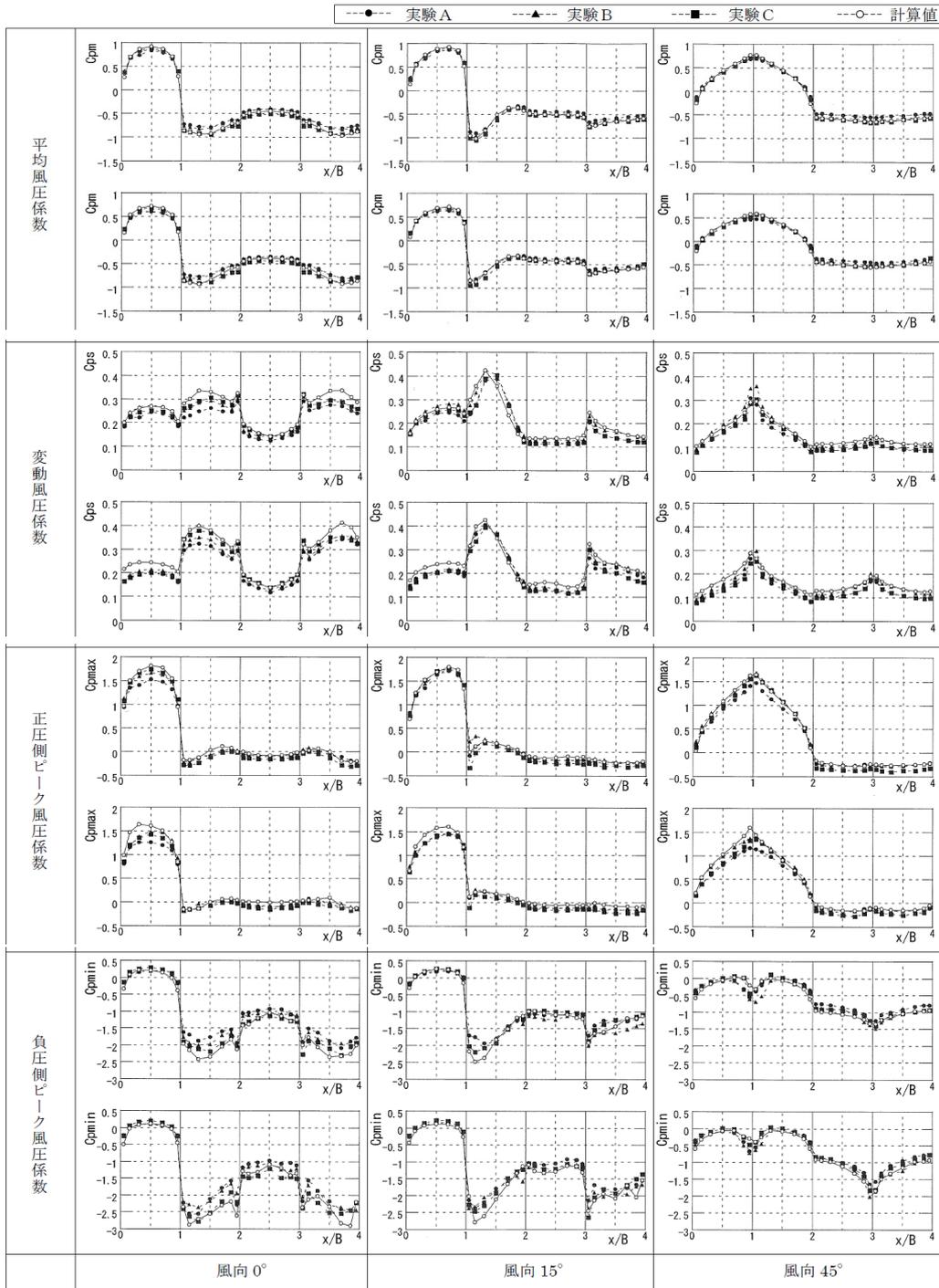


図 3.15 風圧係数の空間分布に関する実験値と計算値の比較
 (上段：高さ 0.72H, 下段：高さ 0.25H)

3-6 第3章結論

非構造格子系 LES の基本的な精度検証を目的として3次元角柱の計算を行い、壁面における変動風圧力を評価した。適切なモデル構築法を定めるとともに、別途実施された複数の風洞実験結果との比較により計算精度を検証し、以下の結論を得た。

- (1) 3次元角柱の変動風圧を精度よく求めるためのモデル構築法を定めるため、格子解像度に関する感度解析を行った。角柱遠方から隅角部に向かって連続的に格子解像度を向上させるものとし、隅角部で $B/64$ の格子解像度が必要である。
- (2) 角柱壁面 308 点における風圧係数について、計算値と実験値との相関を調べたところ、全体的に高い相関を得た。変動成分については実験値間でも若干の差があるが、ピーク値を含めて計算値は実験値と良く対応し、本計算手法の有効性が示された。
- (3) 風圧係数の空間分布について実験値と計算値を比較したところ、計算値は全体的にその分布性状を再現できており、また流れ場から特徴づけられる風圧分布も十分な精度を有することから、各風向で角柱まわりに形成される変動流れ場についても本計算手法が妥当であるものと推定される。局所的に計算値と実験値に差が生ずる領域においては、実験値においてもその絶対値に差を生じる傾向があるが、計算結果は概ね実験のばらつきの範囲内あるいは絶対値を包絡する形となった。
- (4) 精度検証用の3種の風洞実験結果について、モデル形状および測定点配置の他、接近流（主流方向成分）のプロファイルに関する条件を概ね一致させたにも関わらず、部位によっては実験値の間に差が生じることがわかった。シンプルなモデルの場合、変動風圧特性は接近流や物体自体の剥離流の影響を鋭敏に受けやすいため、計測・評価上のばらつきの他、接近流に関する上記以外の乱流特性、またそれによる剥離せん断層への作用等、多様な原因が考えられる。したがって、単純形状のモデルに対して計算精度を吟味する上では、複数の実験値に基づき部位に応じたばらつきを考慮して検証することが望ましい。
- (5) 流入変動風の再現性と物体周囲の適切な格子分解能は、変動風圧場の計算に必須であることが確認された。本章で示した非構造格子系 LES の計算モデル構築法および計算手法は両者に対して有効であり、シンプルなモデルに対して適切な結果が得られることが示された。

参考文献

- 1) Nozawa, K. and Tamura, T. : Feasibility study of LES on predicting wind loads on a high-rise building, ICWE11, 2003. 6
- 2) Kataoka, H. and Tamura, T. : Numerical prediction of the peak pressure distributions on square cylinder by LES, ICWE13, 2011. 7
- 3) 片岡浩人, 吉川優, 田村哲郎 : LESによる高層建物外壁の外装材風荷重の検討, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009. 12
- 4) Phuc, P. V., Kikuchi, H., Hibi, K. and Tamura, Y. : Peak Wind Pressure Distributions on Buildings with a Setback, ICWE13, 2011. 7
- 5) 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜 : 中層市街地に建つ高層建物のLESによる壁面風圧評価, 第21回風工学シンポジウム, pp. 293-298, 2010. 12
- 6) 寺崎浩, 勝村章, 植松康, 大竹和夫, 奥田泰雄, 菊池浩利, 野田博, 益山由佳, 山本学, 吉田昭仁 : 屋根および軒の風力係数とガスト影響係数, 日本風工学会誌, 第36巻第4号, pp. 343~361, 2011. 10
- 7) 片岡浩人, 水野稔 : 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, 第523号, pp. 71-77, 1999. 9
- 8) Nozawa, K. and Tamura, T. : Large eddy simulation of the flow around a low-rise building in a rough-wall turbulent boundary layer, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 90, pp. 1151-1162, 2002. 10
- 9) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三 : 生成された流入変動風を用いた乱流境界層のLES, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp. 47-54, 1999. 9
- 10) Maruyama, Y., Tamura, T., Okuda, Y. and Ohashi, M. : LES of turbulent boundary layer for inflow generation using stereo PIV measurement data, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 104-106, pp. 379-388, 2012. 5-7
- 11) 吉川優 : 非構造格子を用いたLESによる変動風圧評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 155~156, 2010. 9

第 4 章

高層建築物の変動風圧に対する 周辺建築物の影響

4-1 緒言

近年、都市部を中心として高層建築物が高密度に計画・建設される事例が増えており、建築物の耐風設計に際して周辺建物の影響を考慮する重要性が高まっている。高層建築物の設計用風荷重を評価する上で、特に風上側に同規模の建築物が存在する場合には、単独に建つ場合に比べて空力特性や応答特性が大きく変化することが既往の研究からも明らかにされており、Bailey ら¹⁾、谷池ら^{2),3)}をはじめとして実験的研究に基づく多くの成果が報告されている。近年においては、主に外装材の設計用風荷重評価を目的とした実験事例もみられ、複雑に分布する局所的な風圧変動特性も示されるようになった。

寺崎・中村⁴⁾は高層建築物のピーク外圧に着目し、多数の風圧実験に基づいて風上側建物の影響を明らかにしている。特に、ピーク外圧の発生位置を明示している点、また風上建物規模や相対角度の影響について述べている点が特徴であるとともに、建物壁面の領域ごとに最大値が示されていることから設計資料として有益である。同文献では、高層建物上端部において顕著に大きいピーク外圧（負圧）が発生することが明らかにされている。ピーク外圧の増加現象は、外装材の耐風設計上極めて重要であり、風荷重評価において適切に考慮されなければならない。しかしながら、風洞実験では外圧変動に関与する流れ場を精度よく計測するのは困難であるために、ピーク外圧を増加させる流れのメカニズムについては吟味されていない。

一方、LES による風荷重評価に関し、周辺建物の影響を扱った計算事例では、小野ら⁵⁾が近接する2棟の実建物形状を対象として構造格子（重合格子）を用いた計算結果を報告しており、空気力係数について良好な計算精度が確認されている。しかしながら、一般座標系の制約に伴って特殊な境界処理が施されており、計算モデル構築法としては汎用的でないと考えられる。

周辺建物の影響を受ける高層建築物を対象とした LES においては、計算モデルを適切に構築することが重要となる。すなわち、複数の建物モデルに対する形状再現性を確保しつつ、各建物周囲で発生する複雑な乱流場を十分に解像できるような適切な格子配置が求められる。

前章では、3次元角柱に作用する変動風圧を LES で求め、複数の実験値との比較に基づきその計算精度を検証するとともに非構造格子の有効性を示した。ここで使用されたテトラ要素による非構造格子系は、モデル構築における自由度の高さ故に上記の課題を解決でき、複雑モデルに対しても効果的に精度のよい解を得られると考えられる。

本章では、風上建物の影響を受ける高層建物の変動風圧を対象として、非構造格子系 LES を実施する。特に実務的な観点から、モデルの複雑さに起因して設計用風圧力が増加するケースを重要と捉え、ピーク外圧が顕著に増加する事象を対象として本計算法の妥当性を

吟味する。まず、適切な計算モデル構築を目的とし、建物間の格子解像度に着目してその影響を調べる。次に、風上建物によって顕著にピーク外圧が増加する事例 2 ケースを対象として非構造格子系 LES を実施し、実験値との比較により計算精度を検証する。さらに計算結果を用いて流れの可視化を行い、ピーク外圧の増加メカニズムを流れ場に関連づけて考察する。最後に、建物形状によるピーク外圧の低減効果について検討する。

4-2 風洞実験におけるピーク外圧の増加事例

4-2-1 建物モデル

本研究対象の高層建物モデルは、幅(B):奥行(D):高さ(H)=1:1:4の3次元角柱2棟とする。風上側建物を隣接建物とし、変動風圧を求める対象建物は風下側建物とする。風下側建物の建物寸法は $B=D=50\text{m}$ 、 $H=200\text{m}$ を想定し、頂部設計風速は $U_H=49.1\text{m/s}$ とした。風上側建物については、風下側建物と同規模の場合および $1.5B \times 1.5D \times 1.5H$ の場合の計2ケースとした。

4-2-2 風洞実験概要

本研究で行う非構造格子系LESの精度検証を目的として、寺崎ら⁴⁾による風洞実験を参照する。本実験は、上記の高層建物モデルに関して模型縮尺率1/500とした多点風圧実験である。実験写真を図4.1に、風圧測定点配置を図4.2に示す。実験気流は地表面粗度区分Ⅲとし、実験風速は11.5m/sである。実験では、対象建物の風上側に隣接建物モデルが一棟配置され、建物寸法、建物間距離、実験風向等をパラメータとして対象建物壁面における変動風圧(476点)が計測された。計測された変動風圧力は、代表高さ H における基準速度圧を用いて風圧係数に変換され、実大1秒相当の移動平均化処理が施された上で実大10分間波形ごとの風圧係数に対して6回のアンサンブル平均によって各種風圧係数が求められている。

実験結果より、図4.3に示す2ケースにおいて対象建物の側面端部(最上測定層)で非常に強い負圧側ピーク外圧係数の発生が確認された。一方は、風上側建物が対象建物と同規模で建物間距離 $(\Delta x, \Delta y)=(2B, 2B)$ の条件であり、これをケースAとする。他方は、風上側建物が対象建物の1.5倍の寸法を有し、建物間距離 $(\Delta x, \Delta y)=(1.5B, 3B)$ の条件であり、これをケースBとする。両ケースともに、風向角は壁面正対方向から 25° であり、負圧側ピーク外圧係数として-4.2を超える。これは、同建物モデル単体時における実験結果の約1.6倍に相当するとともに、設計値として各種規基準に示されている値(-3.0)よりも大きいことから、耐風設計上考慮すべき現象である。本章ではまず、これらのケースを対象として非構造格子系LESの再現性を検証する。

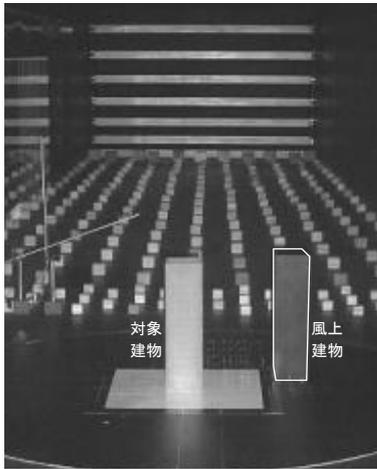


図 4.1 風洞実験

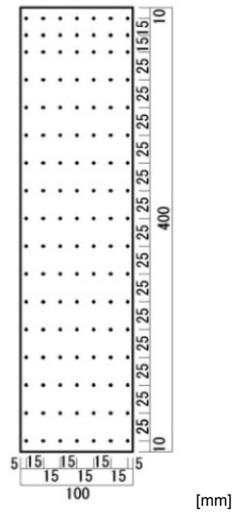


図 4.2 風圧測定点

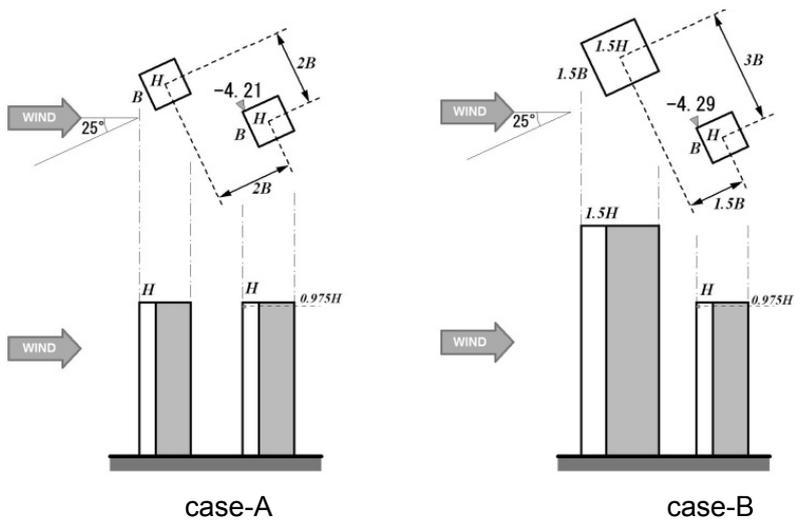


図 4.3 強いピーク負圧が発生した実験条件

4-3 解析手法

4-3-1 乱流解析手法

解析法は第2章に準拠するものとする。計算格子は前章同様のテトラ要素を主とする非構造格子系である。

4-3-2 流入変動風

流入境界条件として要求される流入変動風は、図4.4に示すモデルを用いて作成した。本計算は、第2章同様、モデル形状として設置されたスパイヤおよびラフネスブロックにより境界層乱流を発達させ、流出境界近傍の仮想断面における全節点で時刻歴変動風速を保存するものである。本手法により作成された流入変動風のプロファイル（平均風速および乱れの強さの高さ方向分布）を図4.5に、パワースペクトル密度を図4.6に示す。各図には精度検証用の風洞実験における風洞気流の値も併せて示す。各図より、計算および実験の気流条件は概ね同一であるといえる。

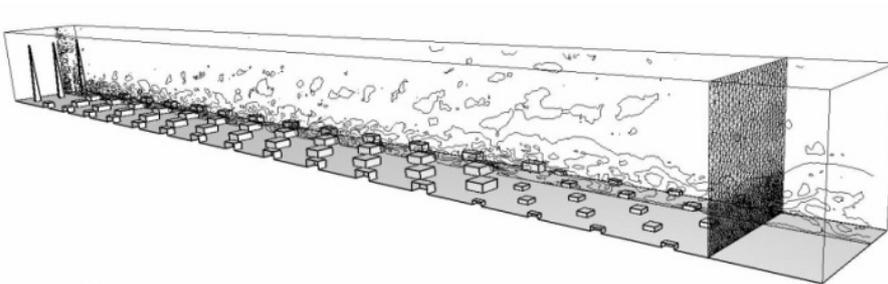


図4.4 流入変動風作成モデル

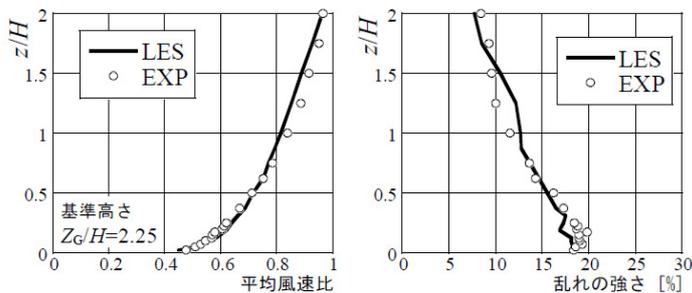


図4.5 流入変動風のプロファイル

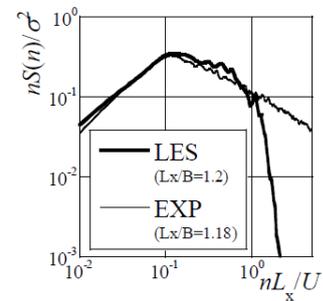


図4.6 流入変動風のパワースペクトル

4-4 角柱2棟を対象とする非構造格子系 LES

4-4-1 計算領域

4-2に示すケースAおよびケースBを対象として非構造格子系 LES を実施する。解析領域（ケースA）を図4.7に示す。領域規模は、幅 $20B$ 、奥行 $30B$ 、高さ $15B$ である。流入境界から対象建物までの距離は $8B$ 、風上建物までの距離は $5.4B$ である。流入境界面には、前節に示す変動流入風を時間刻みごとに与える。建物モデルは主流方向に対して 25° の角度を有するとともに、各ケースの実験条件と一致するよう作成・配置する。

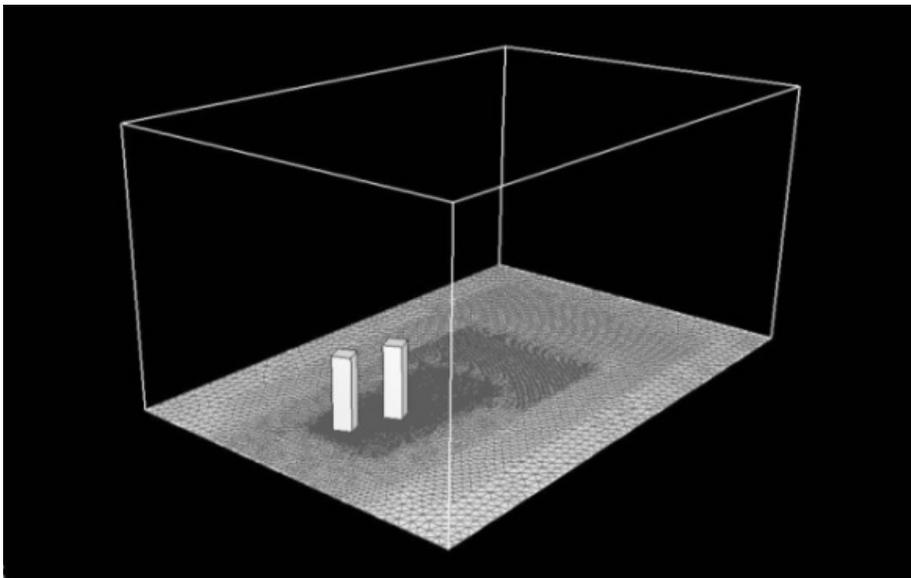


図 4.7 計算領域

4-4-2 計算モデルの構築

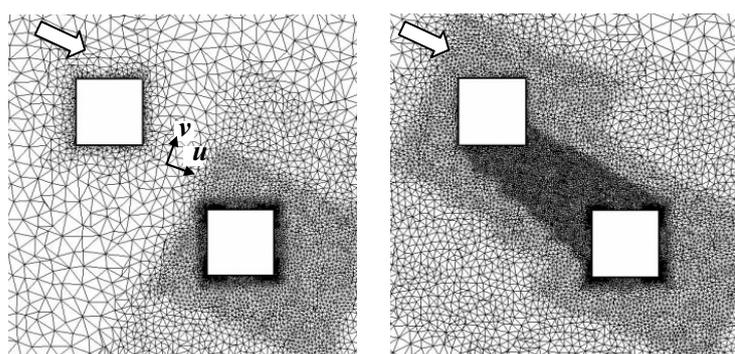
計算対象が建物モデル単体の場合、一般的な計算格子の作成法として、遠方から建物表面に向けて格子解像度を上げ、特に剥離点となる隅角部近傍で高解像度となるよう配慮される。一方、モデルに周辺建物が存在する場合には、周辺建物近傍において比較的低い解像度を割り当てることで計算の効率化が図られることが多い。しかしながら、周辺建物を含むモデルにおける計算格子の影響については未だ明らかにされておらず、適切な解を得るための計算モデル構築法を検討する必要がある。特に本研究対象のように、風上側に位置する建築物が直接的に対象建物に影響をおよぼすことが想定される場合には、建物間の空間における解像度が重要となることが考えられる。ここではまず、ケースAを対象として特に建物間の格子解像度の影響について調べ、周辺建物の影響を適切に評価するためのモデル構築法を示す。図 4.8 は、建物間において格子解像度の異なる2種類の計算モデルを示している。格子の生成手法は第2章同様であり、各領域ごとに与えられたセルの基準寸法に準じて表面メッシュから内部にテトラ要素が自動生成されるものである。両モデルとも、風下側の対象建物モデル周囲については適切に考慮されており、第3章の角柱（単体）の事例に準拠した解像度で構成されている（隅角部のテトラ基準寸法 $B/64$ 、壁面上境界層要素はプリズム厚 $B/250 \times 3$ 層）。風上側の建物モデルについては、風下側の対象建物より若干解像度が低いものの、その表面上では両モデルで同様の解像度が与えられている（テトラ基準寸法 $B/32$ 、境界層要素厚 $B/167 \times 3$ 層）。図 4.8 (a)のモデルの位置づけは、風下側の対象建物にのみ適切な格子を配置し、風上側建物はその形状再現のみ考慮した場合に相当する。一方、図 4.8 (b)のモデルでは、風上側建物の周囲においても空間的に十分な範囲で流れ場を解像するとともに、風下建物隅角部のピーク外圧発生に関与する流れを考慮し、建物間の空間における乱流構造を十分に捉えられるよう格子解像度が確保されている（基準寸法 $B/32$ ）。両モデルにおいて建物間の空間における格子解像度の差は、テトラ要素の基準寸法で約8倍である。

これらの計算モデルによる計算結果として、図 4.9 に瞬間渦度の水平分布を示す。風下側の対象建物周囲においては同様の格子解像度であるために概ね等しく乱流構造が解像されているが、一方、建物間の空間においては格子解像度による差が顕著に現れており、風上側建物からの剥離せん断層が風下の対象建物隅角部に作用する過程においてモデル(b)では十分に細かい乱流構造として再現されている。図 4.10 は、建物間の中点における変動風速の各 u, v 成分（図 4.8 (a)参照）のパワースペクトルを比較したものである。当該領域において低解像度のモデル(a)は、格子幅に基づくフィルタリング効果により高周波数域において大きく減衰し、特に v 成分についてはエネルギーピークが捉えられていない。図 4.11 は、風下側の対象建物の上端部においてピーク負圧が増加する点の外圧係数に関するパワースペクトルを実験値と比較したものである。高解像度のモデル(b)は、高周波数域に至るまで実験値をよく再現しており、外圧変動を決定づける渦構造を精度よく予測していることが確認できる。当該位置は両モデルともに高解像度領域に含まれているため、モデル(a)

においても高周波数成分に若干の回復傾向がみられるものの、実験値との比較から周波数特性の再現性は十分でない。

以上より、当該モデルに関して適切な計算モデル構築を行うためには、対象建物のみならず周辺建物に起因する流れの影響を考慮して格子解像度を定める必要がある。特に非構造格子系を用いる場合は、モデル構築の自由度が高い反面、物体形状の再現性にのみ着目すると空間的な格子解像度が不足することが危惧されるため、再現すべき流れのパターンを十分に考慮して格子を生成するよう配慮が必要である。

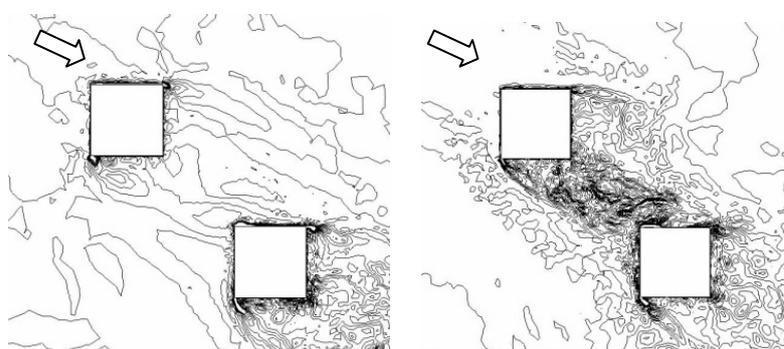
本章では、ケースAに対して図4.8 (b)に示した計算モデルを採用する。ケースAの格子全体図（水平断面）を図4.12に、対象建物の表面メッシュ（ケースA・B共通）を図4.13に示す。ケースBの計算格子については、上記の知見を踏まえ、風上側建物周囲においても空間的に十分な解像度を保持させるとともに、風上側建物からの剥離せん断層が対象建物隅角部に作用する領域を考慮し、建物間で同様の格子解像度とした（図4.14）。本モデルの総要素数は、ケースAで約740万、ケースBで約810万である。



(a)建物間低解像度

(b)建物間高解像度

図4.8 計算格子



(a)建物間低解像度

(b)建物間高解像度

図4.9 瞬間渦度分布

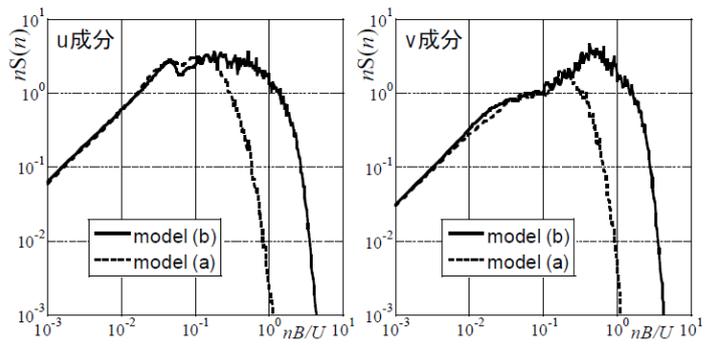


図 4.10 変動風速のパワースペクトル

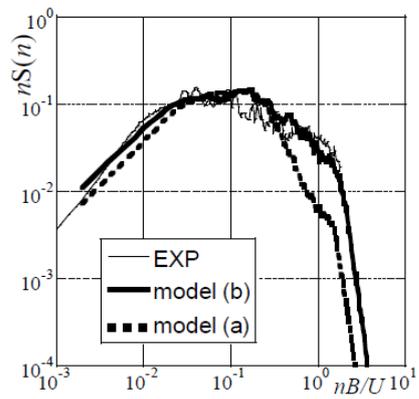


図 4.11 風圧係数のパワースペクトル

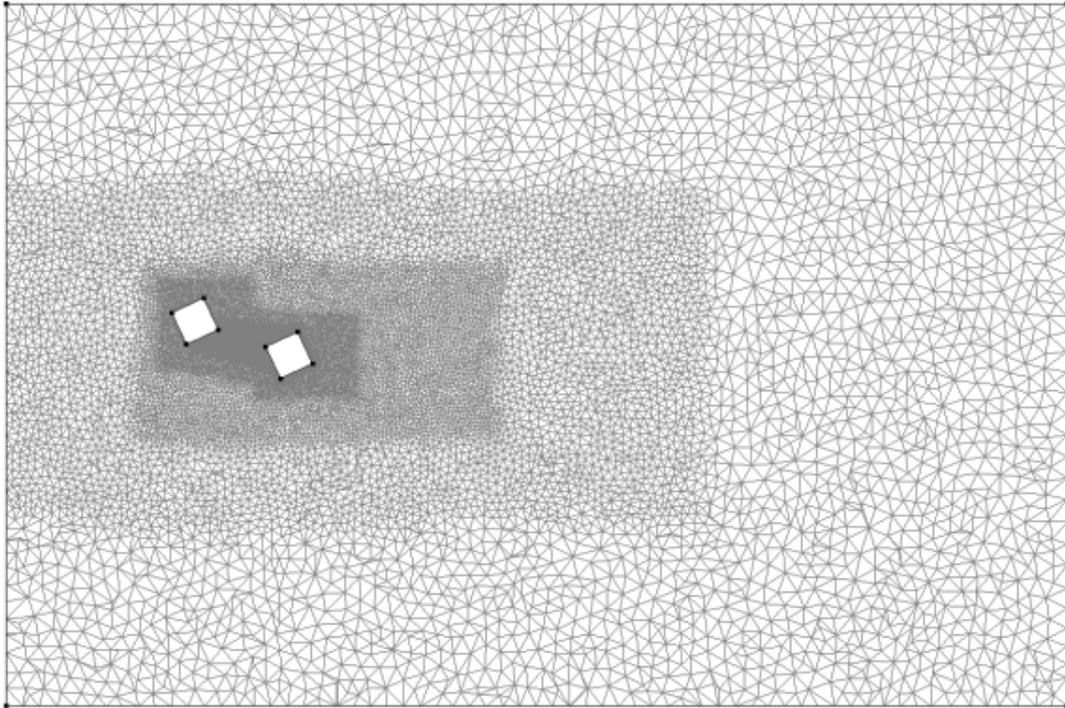


図 4.12 計算格子 (case-A)

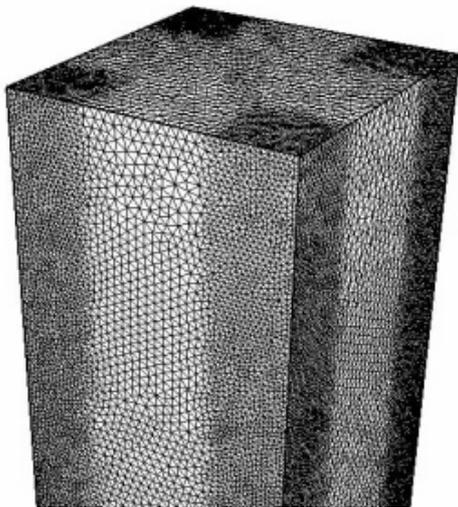


図 4.13 表面メッシュ

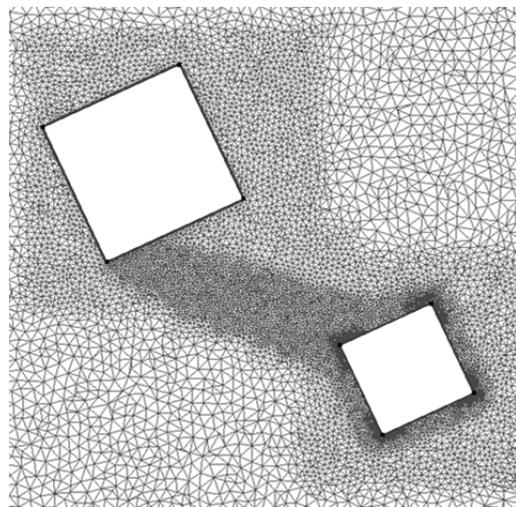
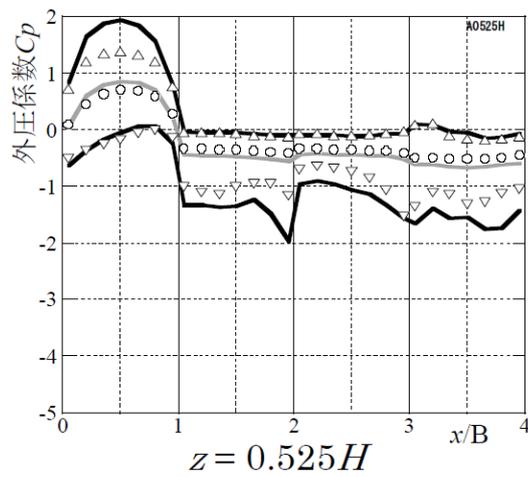
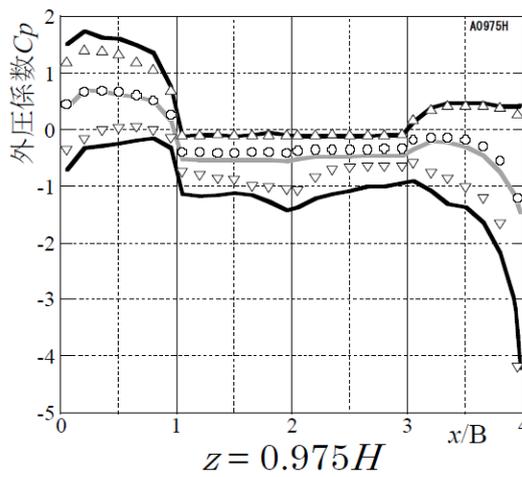
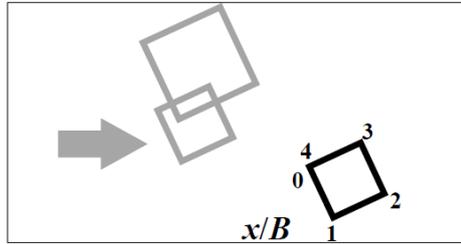
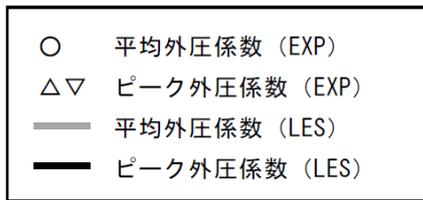


図 4.14 計算格子 (case-B)

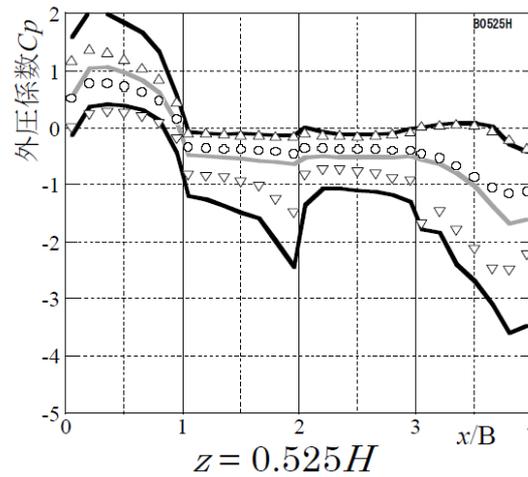
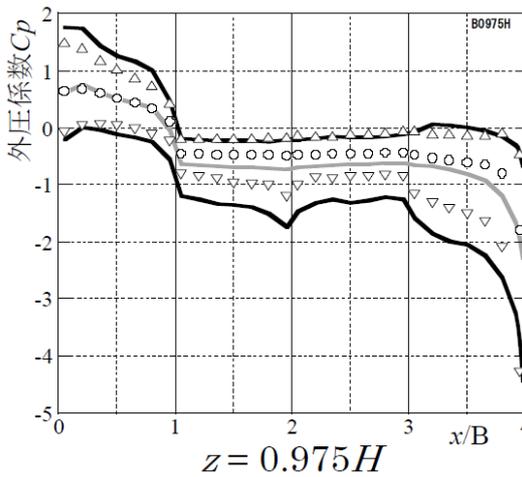
4-4-3 計算結果

前節に示した計算モデルによる非構造格子系 LES の結果について風洞実験結果との比較を行う。計算結果の処理については風洞実験と同様とし、変動風圧波形に対して実大 1 秒相当の移動平均を施し、実大 10 分間相当の波形ごとに各種外圧係数を求めてアンサンブル平均を行った。アンサンブル平均回数は、実験・計算ともに 6 回である。ここで、計算結果から外圧係数を算定する際の速度圧は、流入変動風の対象建物代表高さ H における平均風速から求めた。

図 4.15 は、対象建物側面において非常に強いピーク負圧が発生した測定高さ ($0.975H$) および中間高さ近傍 ($0.525H$) の水平断面における平均外圧係数およびピーク外圧係数（正側および負側）の分布を示している。実験値と計算値を比較すると、まず強い負圧側ピーク外圧係数が計測された点 ($z=0.975H$, $x/B=4$ 付近) については、ケース A で実験値-4.21 に対して計算値-4.21, ケース B で実験値-4.29 に対して計算値-4.42 であり、本研究で着目している局所的な圧力現象が良好な精度で再現されている。一方、他の領域における外圧分布については、定性的にみれば実験値と計算値で概ね同様の分布形状となっているものの、定量的には最大で約 40%程度ピーク外圧係数に差がみられ、各種条件が同様でありながら前章の単体角柱の事例と比較してその差が若干大きい。前章においては複数の実験値との比較に基づき計測・評価上のばらつきや接近流特性の影響について述べたが、本モデルにおいては対象建物に対する接近流自体に風上建物の影響が含まれるために、現象のばらつきや計測・評価誤差が蓄積されていることが要因として考えられる。図 4.16 は、風向 25° におけるケース A と単独角柱（風下建物のみ）の実験値について、各 10 分波形におけるピーク外圧係数のばらつきを示したものである。風上建物の影響を受けるケース A では、特に絶対値の大きい領域（風上面の正圧側ピーク値、側面・背面の負圧側ピーク値）でそのばらつき幅が単独角柱よりも大きく、対象建物まわりの圧力場の非定常性が強められていることが想定される。さらに、ばらつき幅の大きい数箇所について 10 分間ピーク値の時刻歴を図 4.17 に示す。同図より、単独角柱に比べて本モデルでは実験・計算ともにばらつき幅が大きいことがわかる。計算値のばらつき傾向については、まず強いピーク負圧の点 ($x/B=3.95$) ではばらつき幅が実験値とほぼ一致しており、個々のピーク現象も良好に予測されていることが確認できる。他の部位では、実験値のばらつき幅に対し計算値の多くがその近傍に分布するためピーク現象は概ね再現されていると推測されるものの、部位により顕著に絶対値の大きいピーク値の発生が確認される場合がある。これは結果的にアンサンブル平均値（図 4.15）を絶対値で大きく評価する要因となっているが、現象としての発生可能性については評価が困難であり、実験も含めたピーク評価法の課題であると考えられる。

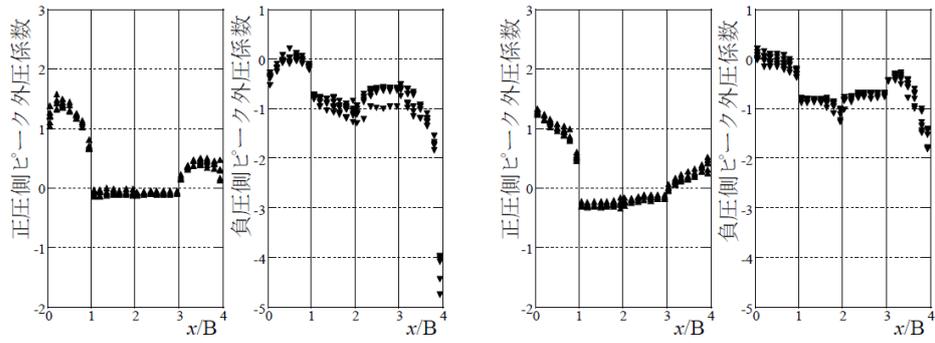


(1) ケース A



(2) ケース B

図 4.15 外圧係数の水平分布



(1) ケース A

(2) 単独角柱

図 4.16 ピーク外圧係数（実験値）のばらつき

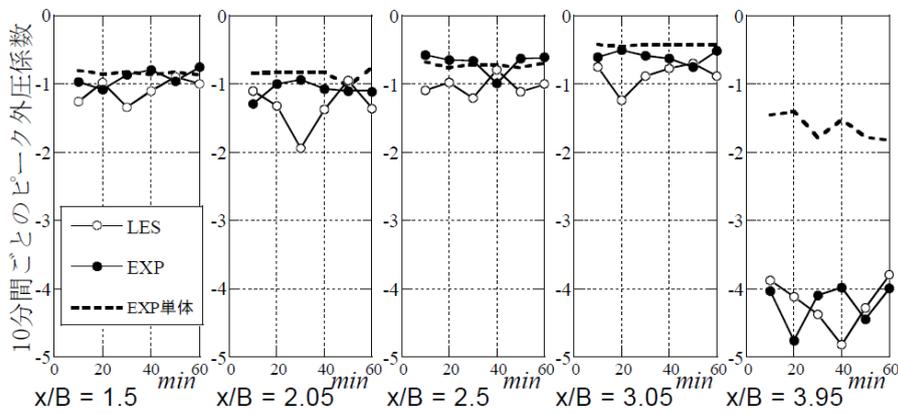


図 4.17 ピーク外圧係数の時刻歴変化

図 4.18 は、ケース A において強いピーク負圧の発生点を含む側面を対象とした各外圧係数の面分布であり、実験値と計算値を併せて示している。同図より、当該壁面の各外圧係数について、実験値と計算値は同様の分布傾向を示していることがわかる。分布特性としては、平均外圧係数・変動外圧係数ともに隅角部の限られた領域で負圧が強められていること、また本研究で着目しているピーク負圧の極端な増加現象は上端部のごく僅かな領域でのみ発生していることが確認できる。

以上の検証結果より、本計算結果に基づく外圧分布は、部分的な実験値との誤差やばらつきについて一部課題が残るものの、実験値の傾向を概ね十分な精度で捉えられており、本事象のような特殊な圧力場に対して本計算法および計算モデルは妥当であると判断される。

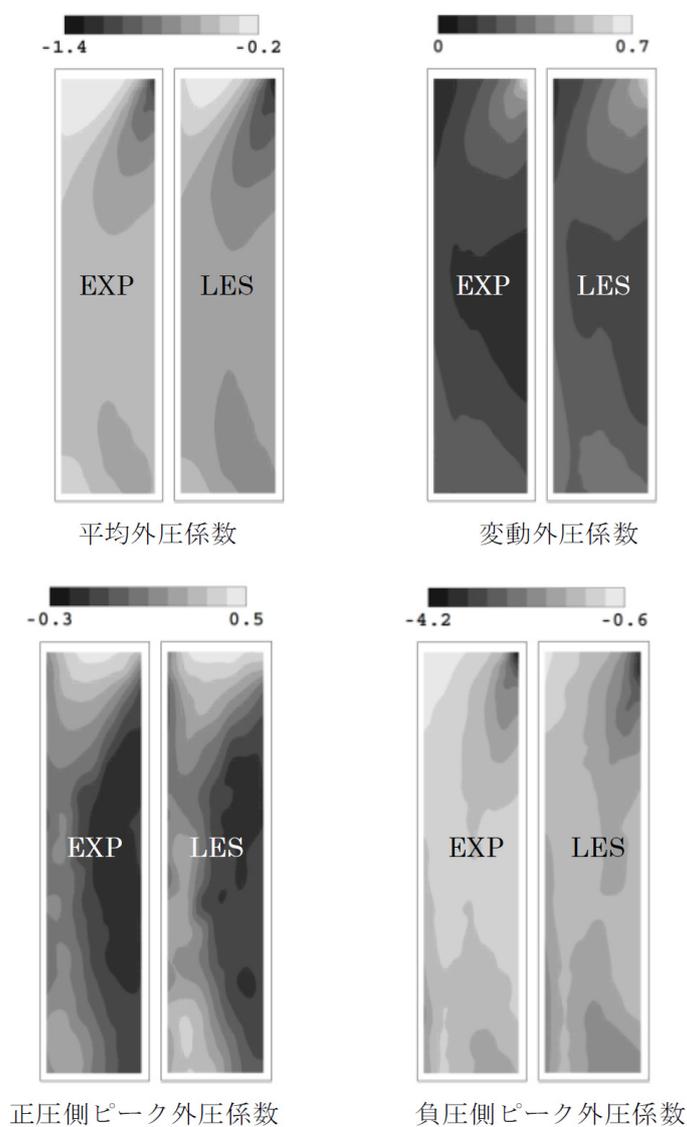


図 4.18 外圧係数の面分布 (case-A)

4-4-4 ピーク外圧の増加現象に関する考察

建物表面における外圧分布がその周囲の流れ場から特徴づけられることを考慮すると、本計算結果は対象建物まわりの非定常流れを十分に再現していると判断される。ここでは、計算結果に基づいて建物モデル周囲の流れを可視化し、ピーク負圧の増加現象と関連づけて考察する。

(1) 条件付き平均流れ場

対象建物の側面上端部におけるピーク負圧の発生現象を調べることを目的として、条件付き平均流れ場を求める。サンプリング条件はケースA・B共通とし、ピーク負圧の発生点における外圧係数の瞬間値で-4.0以下とした(図4.15に示した負圧側ピーク外圧係数の約95%に相当する)。図4.19に、ケースAのピーク負圧発生点における外圧係数の10分間波形(1サンプル)およびサンプリングレベルを示す。同図より、強いピーク負圧は間欠的に生じていることがわかる。各ケースそれぞれについて、非定常計算結果の中から条件に一致する瞬間流れ場のみ抽出し、それらを平均化することで、ピーク負圧の発生現象に関与する流れ場をより明瞭に検証できる。

図4.20および図4.21は、ケースA・Bそれぞれについて条件付き平均流れ場を可視化したものである。各図において、(a)は最上層高さ(0.975H)すなわちピーク負圧発生高さ、(b)は中間高さ近傍(0.525H)の水平断面であり、右図は対象建物隅角部の拡大図を示している。

図4.20(a)より、ケースA(0.975H)では風上建物隅角部からの剥離せん断層が対象建物隅角部に向かって伸びており、対象建物側面に沿うよう流下する流れ場がみられる。この時、対象建物の隅角部においてきわめて局所的に剥離・再付着が起こり、微細な渦構造が現れている。この領域はピーク負圧発生位置に対応していることから、当該現象に関与する渦構造であると考えられる。

一方、図4.20(b)(ケースA,0.525H)では、風上建物の後流域に大きいスケールの渦構造が現れるとともに、流れが建物間で強く拘束されているため、剥離せん断層は大きく蛇行している。対象建物からの剥離流れは風上建物後流域に強く巻き込まれ、対象建物側面の渦構造は壁面から離れた位置に存在している。

ケースB(図4.21)については、(a)(b)それぞれの高さにおいて比較的類似した流れ場が形成されている。すなわち、風上建物後流域には明瞭な渦構造が形成されるとともに、風上建物からの剥離せん断層は風下の対象建物側面を沿うよう流れている。対象建物隅角部では、図4.20(a)と同様に局所的な渦構造が現れるが、図4.21(b)に示される渦構造は、図4.21(a)のものよりも再付着点が風下側に移動していることから引き延ばされた形状として現れている。これは、風上建物からの剥離せん断層の位置が各高さでわずかに異なってい

るためであると推察される。すなわち，ケースAの場合と同様に，図4.21 (b)でも流れの拘束による巻き込みが若干生じるが，ケースBの建物配置はケースAに比べて，風向に対して建物間の抵抗が比較的少ないために強い巻き込みは起こらず，側面において再付着による渦構造が形成されると考えられる。

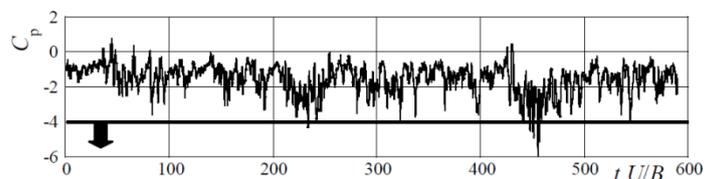
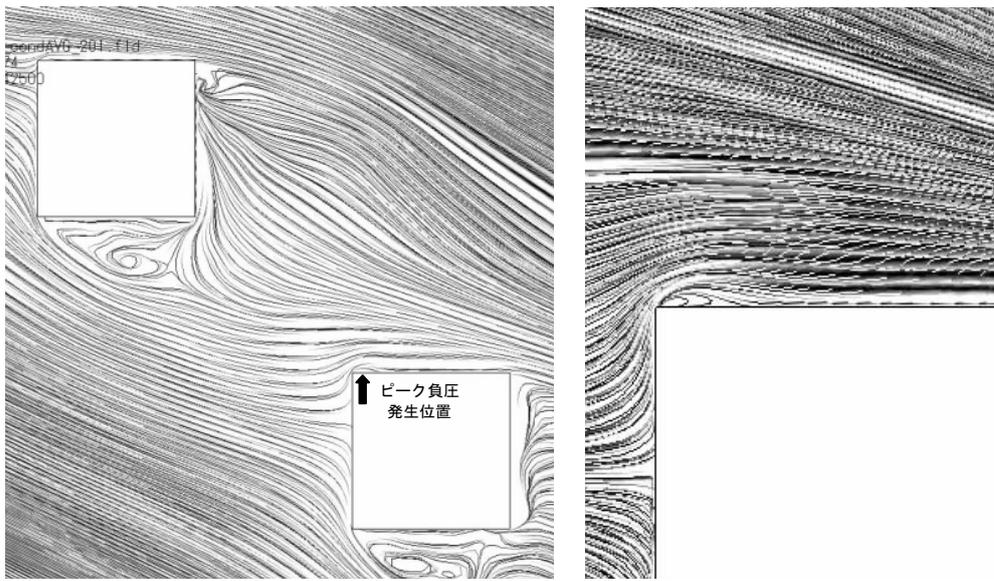
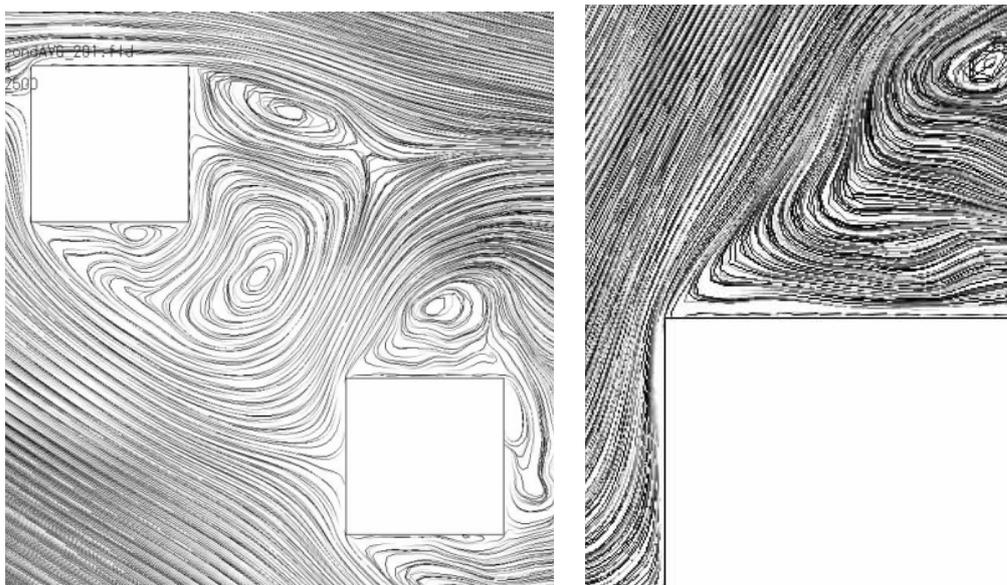


図 4.19 外圧係数の時刻歴波形およびサンプリング条件

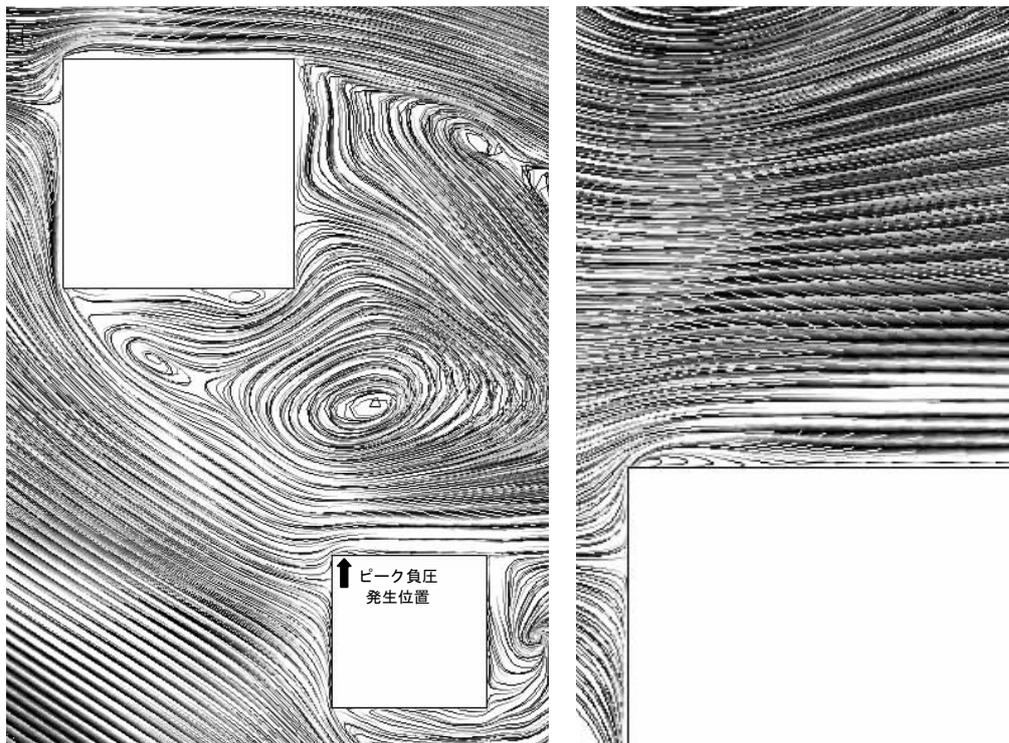


(a) $z=0.975H$

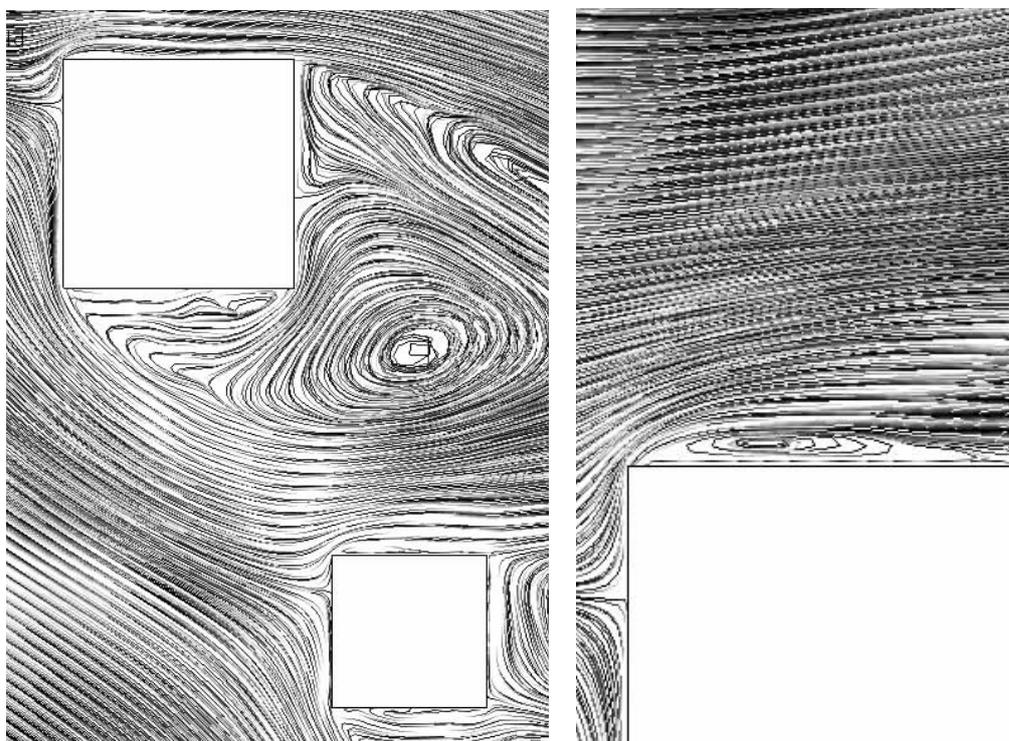


(b) $z=0.525H$

図 4.20 条件付き平均流れ場 (case-A)



(a) $z=0.975H$



(b) $z=0.525H$

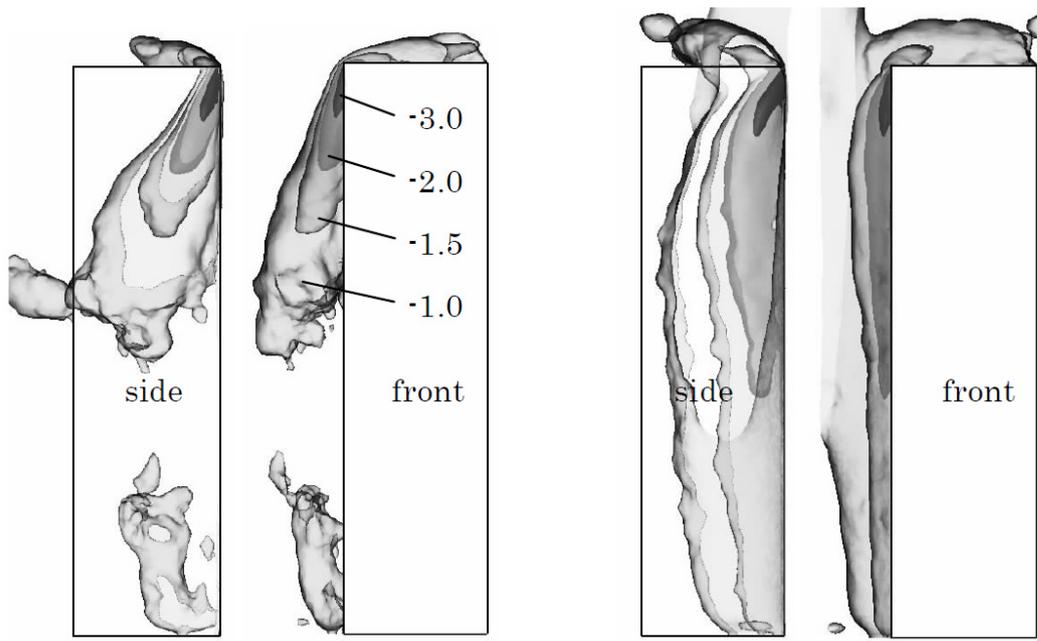
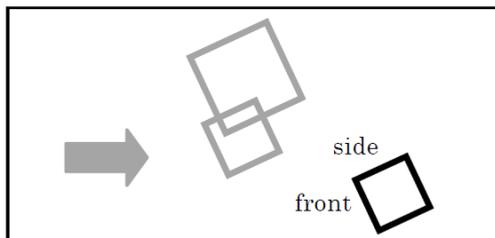
図 4.21 条件付き平均流れ場 (case-B)

(2) 負圧場の空間分布

前項に示した条件付き平均流れ場の計算結果を用いて、負圧場の空間分布を調べる。図 4.22 は、対象建物の表面近傍における風圧係数が-1.0, -1.5, -2.0, -3.0 に相当する圧力等値面を示している。各ケースともに側面上端部を起点とした強い負圧領域が確認され、円錐渦が形成されていることがわかる（当該領域にはピーク負圧発生位置が含まれている）。風圧係数-2.0 以上の等値面においてはケースによる違いが顕著に現れており、ケース A では渦構造が壁面から離れているのに対し、ケース B では壁面に付着するよう分布している。これは、前項で流れ場を示したように、建物間における流れの巻き込みの強さに起因して、対象建物からの剥離渦の位置が両ケースで異なるためである。結果的にケース B では、比較的強い負圧領域が下方まで広がるものとなる。これは、外圧係数の水平分布特性として図 4.15(2) ($0.525H$, $x/B=4$ 付近) から確認できる。

3次元角柱の側面上端部における円錐渦の形成については、既往の研究においても小野ら¹¹⁾が一般座標を用いた LES で明らかにしている。単独角柱（アスペクト比 4）のピーク負圧を考察するものであるため本研究対象とモデルは異なるが、条件付き平均流れの計算に基づきグランシングアングル（風向 15° ）で同様の円錐渦構造が角柱上端部に発生することが示されている。本章における接近流の風向角は 25° であるが、対象建物に作用する風向は風上建物からの剥離流れの影響を受けていること（図 4.23 に時間平均流線を示す）、また同文献における円錐渦の発生機構に関して風向変動の関与が示されていることを考慮すると、本対象建物モデルにおいて形成される円錐渦は単独角柱で起こる現象と類似している可能性がある。ここでは、角柱上端部の円錐渦発生に関する現象を比較するため、単独角柱（アスペクト比 4）の計算結果についても検証する。図 4.24 に単独角柱を対象とする計算モデルを示す。接近流は 4-3-2 に示した変動流入風を使用し、風向は 15° とした。

本モデルを用いて非定常計算を行い、角柱の変動外圧を求めたところ、側面上端部に同様のピーク負圧が発生することが確認された（図 4.25）。ケース A・B と同様の分析手法で負圧側ピーク外圧係数の統計値を算定したところ、当該部位において-3.01 であった。これに対し、外圧係数の瞬間値で 95% に相当する-2.86 以下の条件を課して条件付き平均場を求める。図 4.26 は、図 4.22 同様に可視化した圧力等値面である。図 4.22 と比較すると、風圧係数-3.0 に相当する等値面はほとんど現れておらず、全体的に弱い負圧場となっている。ただし、側面上端部を起点とする負圧分布形状より、同様の円錐渦が形成されていることがわかる。したがって、本対象のケース A・B と単独角柱ケースとは、風向角は異なるものの、同様の位置において円錐渦が形成され局所的にピーク負圧が強められる点で類似性が確認された。



(1) case-A

(2) case-B

図 4.22 負圧等値面

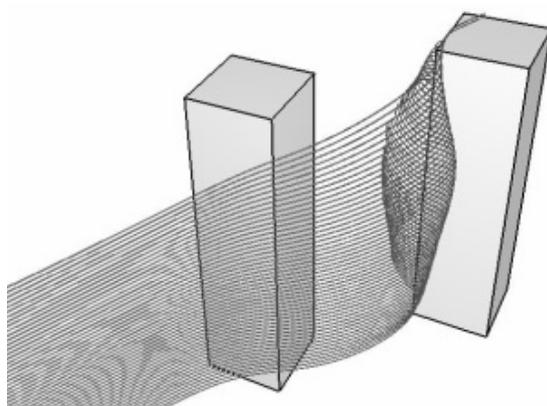


図 4.23 平均流れ場に基づく流線

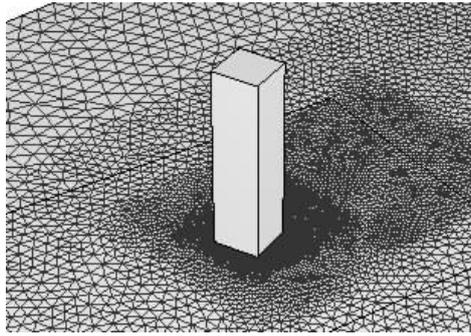


図 4.24 単体角柱の計算モデル

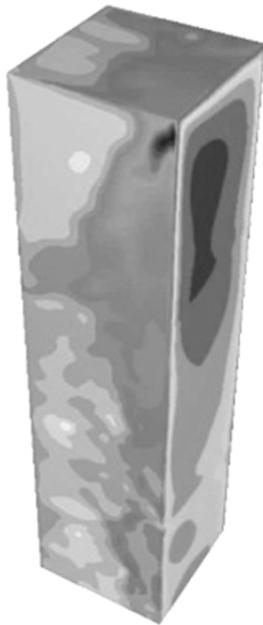


図 4.25 単体角柱の瞬間圧力分布

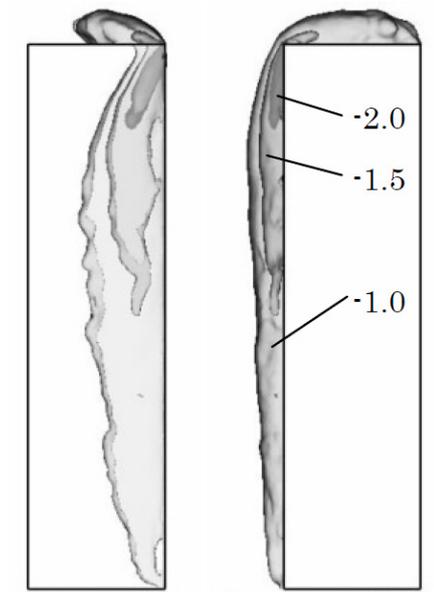


図 4.26 単体角柱の負圧等値面

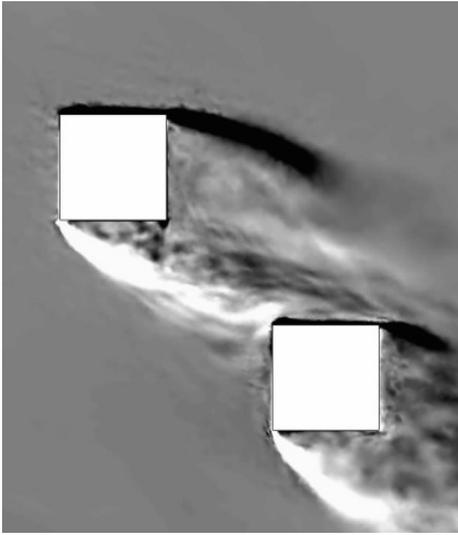
(3) 渦度場に基づく考察

以上より、対象建物の側面上端部において発生するピーク負圧は、単独角柱のグランシングアングル時と同様に円錐渦の形成によるものであることが示された。しかしながら、ピーク負圧レベルが両者で約 1.4 倍程度差があることから、風上建物の影響を受ける場合にはモデル特有の現象が介在しているものと思われる。

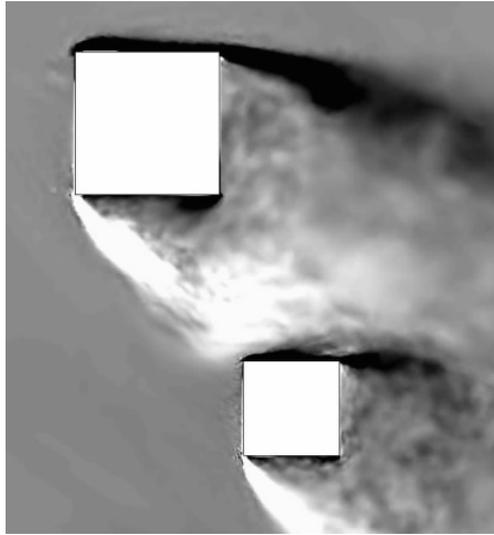
図 4.27 は、条件付き平均流れの計算結果に基づく渦度（鉛直軸成分）の分布であり、ケース A・B それぞれについてピーク負圧発生高さ（ $0.975H$ ）における水平断面分布を示している。同様に図 4.28 は単独角柱の結果であり、それぞれ同スケールで示している。

ケース A・B については、風上建物からの剥離せん断層による渦度場（白：正值）が対象建物隅角部に向かって伸びていると同時に、対象建物隅角部から渦度場（黒：負値）が側面上を沿うよう分布している。図 4.20(a) および図 4.21(a) において、風上建物から剥離し対象建物側面に沿う流れ場について示したが、その流れのプロセスにおいて、対象建物隅角部を起点として渦度の回転方向が逆転している様子が図 4.27 から確認できる。図 4.28 より、単独角柱の場合は接近流に明瞭な渦度分布はみられないが、側面を沿う渦度分布は図 4.27 と同様に現れている。図 4.29 は、対象建物の側面端部（円錐渦の発生領域）におけるケース A・B、および単独角柱の渦度分布を示している。同図より、当該領域においてケース A・B では単独角柱の場合よりも渦度が強められていることがわかる。これは、各ケースの対象建物隅角部に形成される円錐渦（渦度回転方向：負）に対する、風上建物からの剥離せん断層（渦度回転方向：正）の作用に起因するものと考えられる。正の渦度場を形成する剥離せん断層が対象建物隅角部を通過する際に、せん断層外縁部の局所的に増加した流速成分が円錐渦の回転を促進させ、その循環が強められているものと考察される。これにより、ケース A・B では単独角柱に比べて強い円錐渦が形成され、より大きいピーク負圧が発生しているものと推測される。

以上より、風上側に同規模以上の建物が存在し、その位置関係と風向に応じて剥離流れが角柱建物の隅角部に直接作用する場合（図 4.20(a)、図 4.21(a)）には、グランシングアングルにおける単独角柱と同様の円錐渦が形成されるだけでなく、風上からの剥離流れがその円錐渦をさらに強め、非常に大きいピーク負圧を発生させる可能性があることが示された。



Case-A



case-B

図 4.27 渦度分布

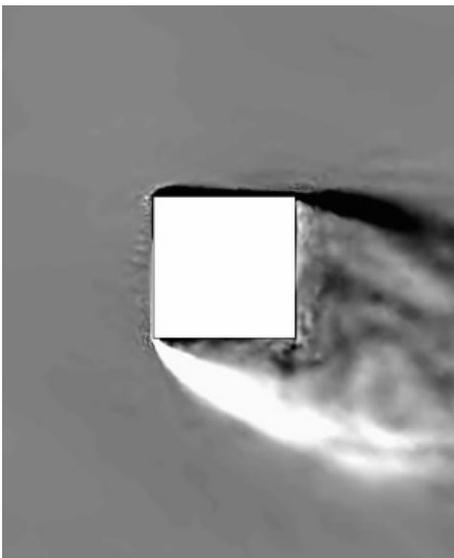


図 4.28 単体角柱の渦度分布

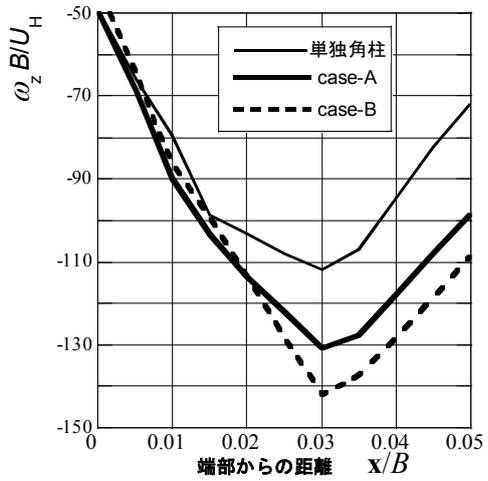


図 4.29 隅角部における渦度分布

4-5 建物形状によるピーク負圧の低減効果

4-5-1 建物モデル

角柱形状を有する高層建築物において、隅切、隅欠、隅丸といった隅角部形状は、空力的対策のひとつとして一般に用いられており、隅角部における剥離流れを制御することで抗力・揚力を低減できることが知られている。本章におけるピーク負圧の増加現象に対しても、隅角部の局所的な剥離・再付着流れを抑制することで上端部の円錐渦を緩和できれば、風上建物の影響下においてもピーク負圧の低減効果を見込むことができる。ここでは風下側の対象建物の隅角部について $1/10B$ の隅欠を施し、その効果を調べる。

隅欠を施した建物モデルをケースCとし、図 4.30 に示す。風上建物に関する寸法および位置関係はケースAと同様である。隅角部の格子解像度については、隅欠内の渦構造の再現が重要である。ここでは隅欠寸法を考慮した上で、隅欠部を含む隅角部近傍においてケースAと同等の解像度（境界層要素も同様）とした。総要素数は約 934 万である。前節に示した手法と同様の計算法および評価法に基づき、本モデルで変動風圧評価を実施する。

4-5-2 計算結果

ケースCの計算に基づく外圧係数分布について、ケースAと比較し図 4.31 に示す。同図は、ケースAにおいて強いピーク負圧が発生した測定高さ ($0.975H$) および中間高さ近傍 ($0.525H$) の水平断面における平均外圧係数およびピーク外圧係数（正側および負側）の分布を示している。ケースAにおけるピーク負圧の発生位置近傍 ($0.975H$, $x/B=4$ 付近) において、ケースCでは約 2.58 までピーク負圧が低減されている。これは、隅角部のピーク外圧係数としては単独角柱の値に近く、隅欠形状が有効であるといえる。

4-5-3 建物周囲の流れ場

ケースCにおいても、前章同様にピーク外圧係数の 95% に相当する条件付き平均場を求める (-2.45 以下)。高さ $0.975H$ における建物周囲の流れ場を図 4.32 に示す。風上建物からの剥離流れは、ケースAと同様に対象建物側面に沿うよう作用している。対象建物の隅角部に着目すると、隅欠両端部（風上面端部から側面端部）において剥離・再付着による明瞭な渦構造がみられる。側面端部において再剥離がみられるが、剥離角度は浅く、ケースAほど明瞭な渦構造は現れていない。

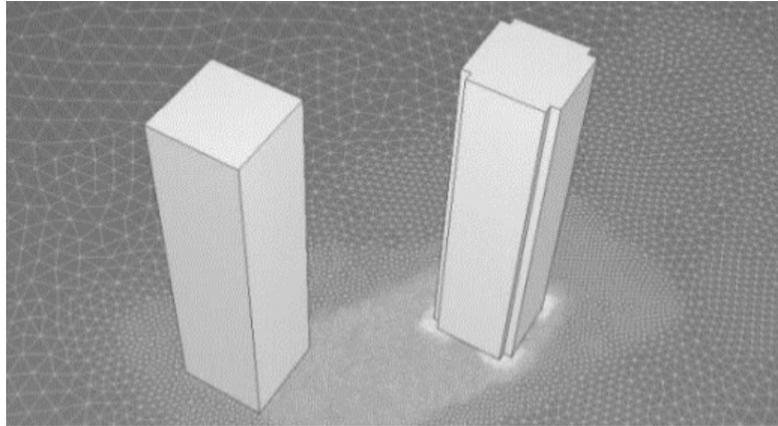


図 4.30 隅欠形状を有する建物モデル (case-C)

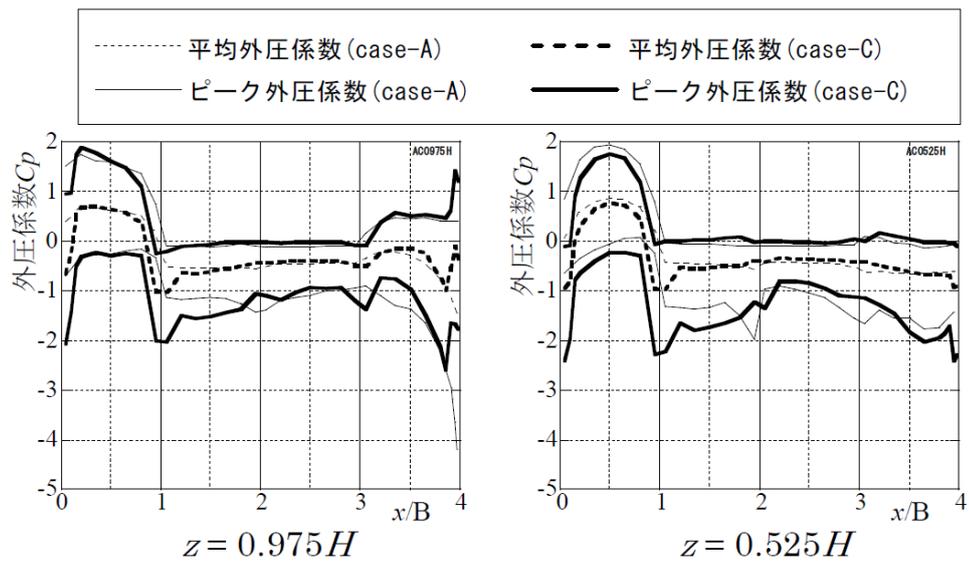


図 4.31 外圧係数の水平分布

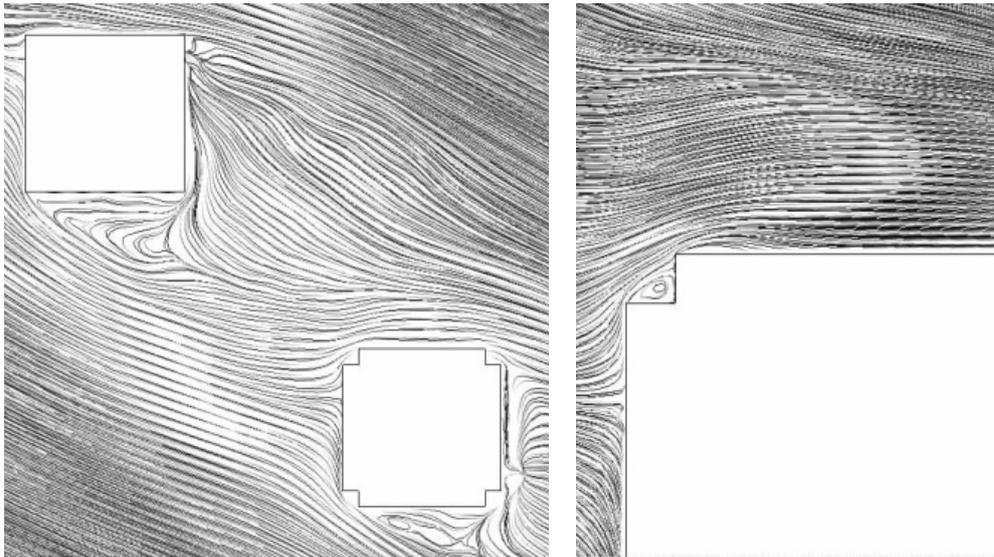


図 4.32 条件付き平均流れ場 (case-C)

図 4.33 に圧力等値面を示す。円錐渦の形成は、隅欠部に対して側面端部側（再剥離点）が起点となるよう移動しており、圧力の大きさは単独角柱の場合（図 4.26）と同程度であることがわかる。ただし、分布形状については、ケースCでも中央高さ付近において流れの巻き込みが生じているために、ケースAに類似したものとなっている。

側面端部における渦度分布を図 4.34 に示す。ケースCでは側面端部の剥離性状が変化していることからピーク位置が他ケースと若干異なるが、その大きさは単独角柱の場合と同程度であり、ケースAよりも低減されていることが確認できる。

以上より、隅角部が隅欠形状を有する場合、局所的な渦形成の抑制に効果があり、風上建物の影響下においてもピーク負圧が極端に増加することはなく、耐風設計上有効であると考えられる。

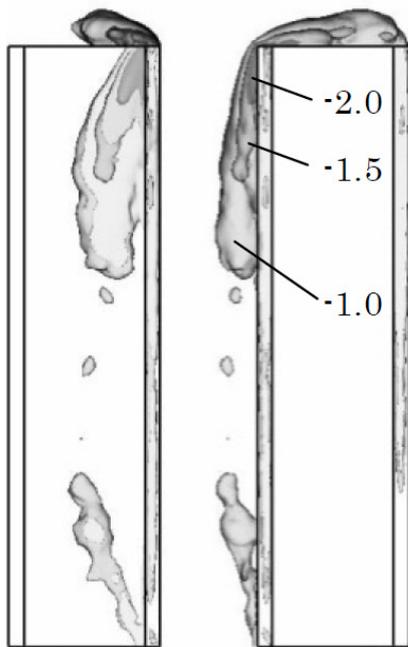


図 4.33 負圧等値面

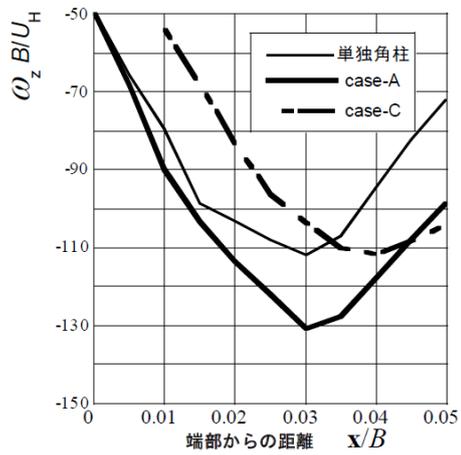


図 4.34 隅角部における渦度分布

4-6 第4章結論

風上建物の影響を受け、高層建物の局所負圧が増加する現象を対象として非構造格子系 LES を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で使用する非構造格子系は、複雑形状への適合性だけでなく、局所的な渦の発生位置や剥離せん断層の可動範囲を考慮した上で適切な格子解像度を合理的に計算モデルに反映させることができるため、非定常計算モデルの構築法として有効である。
- (2) 計算モデルを適切に構築するため、特に建物間の空間における格子解像度の影響について調べた。格子解像度は変動風速の高周波数成分の再現性に影響をおよぼすため、周辺建物が直接影響する建物モデルの場合は、対象建物周囲のみ解像度を確保しても不十分であり、周辺建物間で生じる流れやその影響範囲を想定した上で格子解像度およびその空間分布を決定する必要がある。
- (3) 顕著にピーク負圧が増加する事例（2ケース）について LES の計算結果と風洞実験結果との比較を行った。計算結果に基づく外圧分布は、実験値の分布性状を概ね再現できており、本計算法の妥当性が示された。
- (4) 条件付きサンプリングに基づく平均流れ場の計算結果に基づいて、建物周囲の流れ場を調べたところ、ピーク負圧が発生する建物上端部付近では、風上建物から剥離したせん断層が対象建物側面部を沿うように流れることがわかった。またその際、対象建物隅角部においてきわめて局所的な渦構造が確認された。
- (5) 負圧場に関する圧力等値面の空間分布より、対象建物側面において上端部を起点とする円錐渦の形成が確認された。
- (6) 角柱上端部の円錐渦によるピーク負圧は、単独角柱モデル（グランシングアングル時）においてもその発生が確認された。ただし、風上建物の影響を受ける場合に比べてその負圧レベルは小さい。
- (7) 対象建物上端部付近における渦度の分布性状を調べた。風上建物からの剥離流れが対象建物隅角部に直接的に作用することにより隅角部の円錐渦の循環が強められ、当該部位においてより大きいピーク負圧が生じるものと推察される。
- (8) 風下側の対象建物に関し、隅欠によるピーク負圧の低減効果を調べた。隅欠形状により渦形成の抑制が確認され、当該部位のピーク負圧が単独角柱と同程度の値まで低減されることが確認された。
- (9) 非構造格子系 LES は、周辺建物の影響を受けて局所風圧が増加するような特殊な事象についても適用可能であり、その発生メカニズムを調べる上でも有効である。

参考文献

- 1) Bailey, P. A. and Kwok, K. C. S. : Interference excitation of twin tall buildings , J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. , Vol.21 , pp.323-338 , 1985.12
- 2) 谷池義人 , 稲岡秀樹 : 連立する高層建物の境界層流中での相互作用 , 第 9 回風工学シンポジウム , pp139-144 , 1986.12
- 3) 谷池義人 : 乱流境界層流中における直方体建物の相互作用 , 第 10 回風工学シンポジウム , pp247-252 , 1988.12
- 4) 寺崎浩 , 中村良平 : 風上側の建物が高層建物の外装材用風荷重に与える影響 , 第 21 回風工学シンポジウム , pp299-304 , 2010.12
- 5) 小野佳之 , 片岡浩人 : LES の高層ビル群の風応答評価への適用 - 近接する建物の取り扱い - , 日本建築学会大会学術講演梗概集 , 構造 I , pp197-198 , 2010.09
- 6) Tamura, T. , Okuda, Y. , Kishida, T. , Nakamura, O. , Miyashita, K. , Katsumura, A. and Tamari, M. : LES for aerodynamic characteristics of a tall building inside a dense city district , CWE2010 , pp1-8 , 2010.05
- 7) Tamura, T. and Nozu, T. : Introduction of unstructured-grid system on LES for wind pressure estimation on a building in cities , BBAA7 , pp1-8 , 2012.09
- 8) 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 , 第 22 回風工学シンポジウム , pp293-298 , 2012.12
- 9) Nozu, T. , Tamura, T. , Kishida, T. and Katsumura, A. : Mesh-adaptive LES for wind load estimation of tall building in a city , CWE2014 , pp1-8 , 2014.06
- 10) 吉川優 , 田村哲郎 : 非構造格子系 LES による 3 次元角柱の変動風圧評価 , 日本建築学会構造系論文集 , 第 78 巻 , 第 687 号 , pp913-921 , 2013.05
- 11) 小野佳之 , 田村哲郎 : 三次元角柱側面に発生する局部負圧に関する LES , 日本建築学会構造系論文集 , 第 78 巻 , 第 694 号 , pp2065-2072 , 2013.12

第5章

複雑形状を構成する建築物外装部材の 風荷重評価

5-1 緒言

近年、環境配慮の観点から様々な省エネ技術が建築物に導入されており、外壁面における環境技術のひとつとして鉛直フィンの設置が挙げられる。これは主に遮光のための外装付属部材であり、特にオフィスビルの空調負荷低減を目的として採用事例が増加している。

鉛直フィン部材は、建築計画的・構造的要請から一般に数十 mm×数百 mm 程度の断面寸法を有する板状部材であり、外壁面上において鉛直に向け水平方向に一定間隔で設置される。近年では超高層建築物においても採用事例が多くみられ、各部材は外気に曝されていることから耐風設計が要求されるが、設計用風荷重を精度よく予測するのは容易でない。鉛直フィン部材は一般に主要壁面に対して広範囲に設置されるが、設計用風荷重評価のためのピーク風力係数に関して一般外壁面（ガラス等）用の値を準用できない。すなわち、フィン部材に作用する風力はフィン表裏における外圧同士の差圧から算定されるため、建物周囲の流れとフィン部材周囲の流れの両者から形成される複雑な圧力場から決定づけられる。壁面中央部付近に設置されるフィンについては、その表裏で顕著な圧力差が生じる可能性は低いが、一方で建物隅角部に設置されるフィン部材については、建築物の風上面と側面の両方の圧力場の影響を受けることから、フィン表裏にそれぞれ正圧と負圧が同時に作用することが想定される。その場合、差圧から求められる風荷重は一般外壁面の荷重を超えることが危惧されることから、適切な風荷重評価に基づく耐風設計が求められる。

寺崎・吉川¹⁾は、角柱建物に設置される鉛直フィンの風荷重評価を目的として風洞実験を実施し、端部フィンにおいて大きい風力係数が発生することを確認した。その後、中村ら²⁾、菊池ら³⁾も同様の結果を報告している。また、小野ら⁴⁾は建物形状による影響も示した上でフィンに作用するピーク風力係数の設計値を提案している。

しかしながら、一般に高層建築物に対して数百分の一の模型寸法で実施される風洞実験では、上記の部材寸法に基づいてフィンの形状を表現すること、さらにはフィン表裏の変動圧力を計測することは困難であるため、当該部材の風荷重評価については模型実験の適用範囲外であるといえる。したがって、既往の実験的研究で使用された模型形状は、風圧計測を目的として建物に対する各フィンの相対寸法を便宜的に拡大したものと推測される。実際の超高層建築物とフィン寸法との関係を考慮すれば、幾何学的相似則が一致していないことになるため、部材寸法の影響について課題を残している。

一方、今後の建築物の耐風設計において LES により変動風圧を評価する際、数値計算モデルは、実験における模型製作や計測系といった物理的制約を受けないため、鉛直フィンのように微細な凹凸形状を有する複雑モデルに対しても変動風圧場を得ることができ、幾何学的相似則を満たした上で当該部材の風荷重評価を期待できる。

前章までにおいて、本手法に基づくテトラ非構造格子系 LES は、高層建物モデルに対してピーク値を含め変動風圧を精度よく再現可能であることが確認された。前章では、複雑モデルとして風上側建物の影響をうけた特殊な圧力場についても本手法の適用性を示したが、モデルの複雑さについては、隣接建物に関する問題のみならず、建物自体の形状の複雑さに対しても妥当性を吟味する必要がある。特に、建物表面における付属部材オーダーの形状も含むモデルに対しては、実験の困難さ故に LES への依存度が高くなることが想定されるため、実際の耐風設計への適用性を調べることは重要である。

本章では、高層建築物に設置される鉛直フィン部材の風荷重評価を目的として、非構造格子系 LES を実施する。まず、当該部材で表面形状が複雑化した高層建物モデルに対し本計算法の妥当性を調べるため、風洞実験と同様のモデルの計算を行い、実験値との比較から予測精度の検証を行う。次に、同様の高層建物モデルに対してフィン寸法を実寸に合わせ、小さいフィン部材の設置数を増加させた計算を行い、部材寸法による効果を検討するとともにフィン周囲の流れ場・圧力場について考察を加える。当該モデルは、風洞実験では実施困難な実寸フィンモデルとして位置づけられ、今後の LES 耐風設計に有用な知見を与えるものである。さらに、実務的な視点に基づき、実寸フィンモデルにおいて端部フィンがないケース、また風向を変化させたケースについて計算を行い、風力変動に関する影響を調べる。最後に、低層部において確認された特殊な事象について、流れ場の可視化に基づく考察を加える。

5-2 風洞実験との比較に基づく非構造格子系 LES の精度検証

5-2-1 建物モデル

対象とする高層建物モデルは、幅 (B) : 奥行 (D) : 高さ (H) = 1 : 1 : 3 の 3 次元角柱 (単体) であり、各外壁面には鉛直フィンが設置されている。建物寸法は $B=D=40\text{m}$, $H=120\text{m}$, 設計風速は頂部高さにおいて $U_H=44\text{m/s}$ を想定している。LES の計算精度検証用の風洞実験は、寺崎ら¹⁾による模型縮尺率 1/400 とした多点風圧実験 (図 5.1) であり、各フィンの表裏における変動風圧を同時計測している。ここで、風圧測定のための導圧チューブおよびタップのおさまりの制約から、実験模型におけるフィン形状は、断面 $1.6\text{mm} \times 6.6\text{mm}$ ($B/62.5 \times B/15.2$), スパン 16.4mm ($B/6.1$), 数量は 7 点/壁面, となっている。対象が高層建物であることを考慮すると、建物寸法に対するフィン形状の寸法比は過大であり、実際の数倍程度で形状が再現されていることになる。また、フィン部材表裏で同じ高さの風圧計測は不可能であることから測定点を僅かにずらしている点、測定面の裏側に導圧チューブが部分的に露出してしまう点等、形状再現性や計測条件に関して厳密性を欠く点があるが、当該モデルのみならず外装部に付設される部材の風圧計測に対しては模型実験の制約上やむを得ないものとして当該仕様が採用されている。

一方、数値計算においては上記の物理的制約を受けることはないため、複雑かつ微細な形状に対しても変動圧力場を予測でき、適切に設計用風荷重を評価できることが期待される。しかしながら、当該形状部材を対象とした解析事例がないことから、まず計算精度の検証に基づいてその妥当性を吟味する必要がある。ここでは、風洞実験に対する再現性を確認することで LES の妥当性を検証するものとし、実験模型と同様の形状を用いて計算モデルを作成する (図 5.1)。

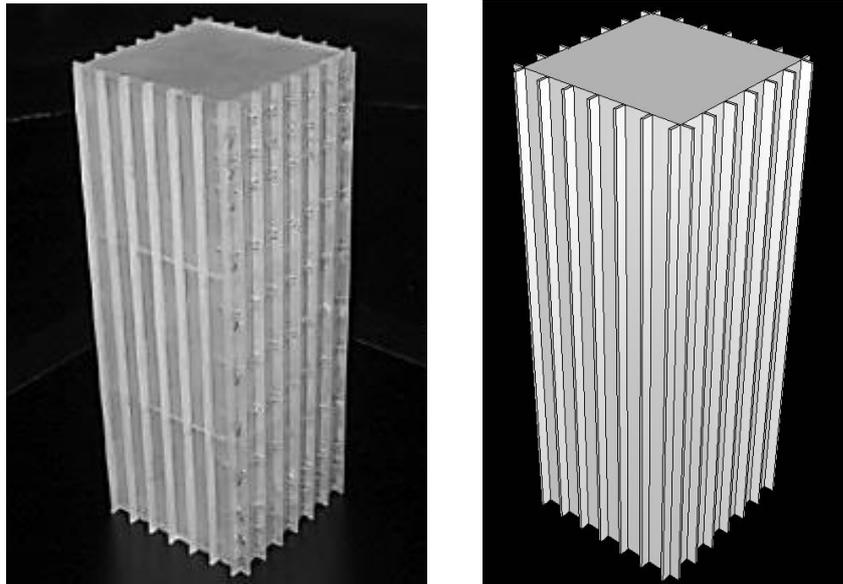


図 5.1 実験模型写真と計算モデル形状

5-2-2 流入変動風

流入境界条件として使用する流入変動風は、図 5.2 に示すモデルを用いて作成した。本計算は、第 2 章に示した手法に基づき、モデル形状として設置されたスパイヤおよびラフネスブロックにより境界層乱流を発達させ、流出境界近傍の仮想断面における全節点で時刻歴変動風速を保存するものである。本手法により作成された流入変動風のプロファイル（平均風速および乱れの強さの高さ方向分布）を図 5.3 に示す。各図には精度検証用の風洞実験における風洞気流の値も併せて示す。各図より、計算結果は実験気流を概ね再現していると判断できる。

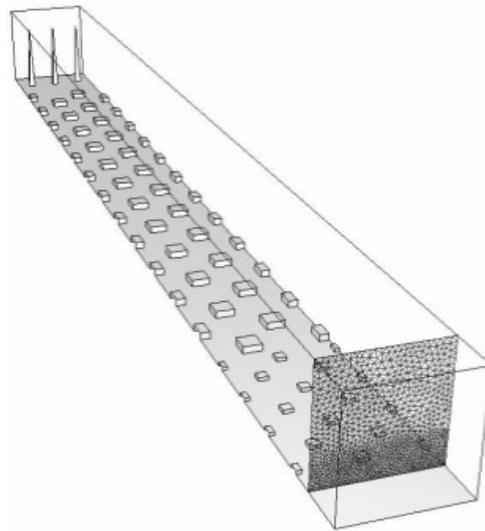


図 5.2 流入変動風作成モデル

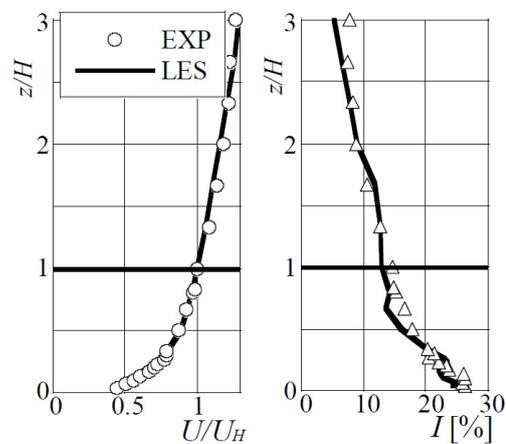


図 5.3 流入変動風プロファイル

5-2-3 計算モデル

計算領域を図 5.4 に示す。領域規模は、主流方向 $30B$ 、主流直交方向 $20B$ 、高さ $15B$ である。流入境界には、前述の流入変動風を時間刻みごとに与える。計算風向は壁面正対風向とし、特に端部において大きい風力の発生が想定される風上面のフィンに着目する。非構造格子系計算モデルを図 5.5 に示す。格子解像度分布は、第 3 章に示した単体角柱モデルをベースとし、複雑形状を伴う建物表面近傍において解像度をさらに向上させるものとする。具体的には、第 3 章の単体角柱における最高解像度 ($B/64$) を本モデル外周のフィン群を覆うよう配置し、さらに最大風力の作用が予想される端部フィン近傍の解像度を $B/128$ とした。総要素数は約 616 万、 Re 数は 7×10^4 である。

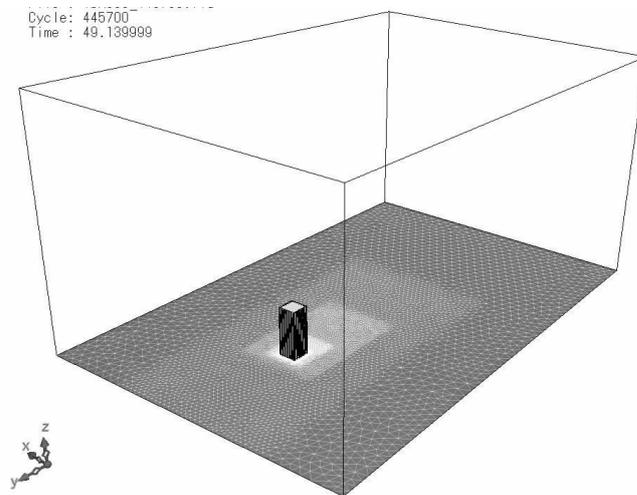


図 5.4 計算領域

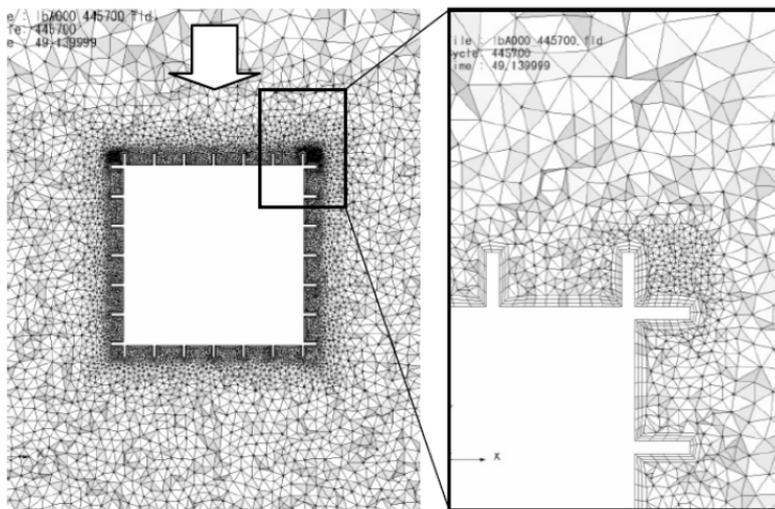


図 5.5 計算格子

5-2-4 計算値と実験値の比較

フィンに作用する変動風力に関し、計算結果と実験値との比較を行う。フィンに作用する風力係数は、その表裏における圧力差を時刻歴で求め、建物高さにおける速度圧で基準化することにより算定する。得られた風力波形は、実時間 0.3 秒相当の移動平均化を施した上で、10 分間相当波形ごとに統計値を算定し、アンサンブル平均を行った。アンサンブル平均回数は、実験 10 回、計算 7 回である。

図 5.6 に、風上面におけるフィンの風力係数（7 枚×高さ方向 11 層、計 77 点）に関する計算値と実験値との相関図を示す。同図より、実験値と計算値は良い相関を示していることから、鉛直フィンによる複雑な表面形状を有する建物モデルにおいても変動圧力場を概ね精度良く予測できることがわかる。風力係数の分布に着目すると、その絶対値が大きい領域と小さい領域に顕著に分かれている。絶対値が大きい領域は壁面両端部のフィンに相当するため、当該フィンにのみ大きい風力が作用することがわかる。図 5.7 に風上面の各高さにおける風力係数の水平分布を示す。同図より、両端部のフィンのみ顕著に大きい風力が作用しており、その他中央部のフィンはピーク値でも約 1.0 以下である。計算値は若干過大評価する傾向もあるが、全体的な分布傾向は捉えられていると判断できる。以上より本手法は、建物表面で複雑形状を形成する鉛直フィン部材群に対しその風力変動を十分な精度で予測可能であることが示された。

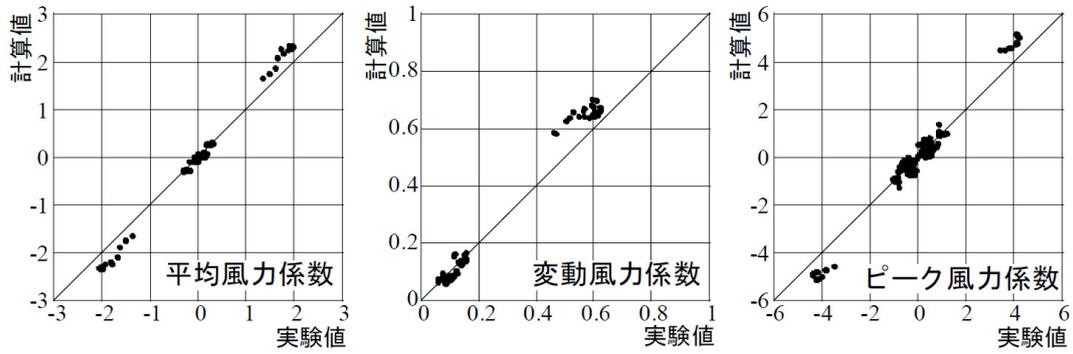


図 5.6 風力係数に関する実験値と計算値の相関図

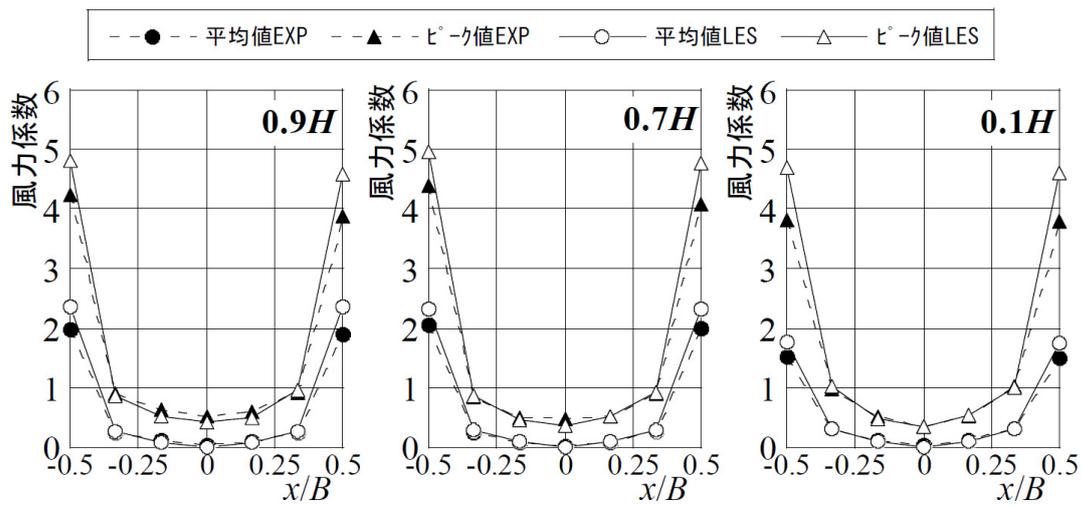


図 5.7 風力係数の水平分布

5-3 実寸フィンモデルへの展開

5-3-1 フィン寸法を実寸に縮小した建物モデルの計算

(1) モデル形状

実際の高層建築物においては、前節のフィン形状に比べ極めて寸法が小さくかつ多数のフィンが設置されるため、実験的予測が困難である一方、流体計算（特にモデル構築の自由度が高い本手法）が有効な手法となる。ここでは、前節の結果に基づき当該形状モデルに本手法が適用可能であることを踏まえ、実際の寸法および数量を反映した建物モデルを用いて計算を実施する。前節で風洞実験を再現したモデル（以下、EXPモデルとする）と、実寸相当のフィンを実装したモデル（以下、モデルAとする）とを比較し、フィンに作用する風力や周辺流れ場に対する寸法効果の影響を調べる。モデルAの形状を図5.8に、フィン形状に関する両モデルの比較を表5.1に示す。同表に示すように、両モデルにおいてフィン断面およびフィン間距離に関する形状比（ t/h 、 h/L ）は同一とした。モデルAでは壁面あたりのフィン枚数は25枚であり、フィン寸法はEXPモデルの約1/4に相当する。計算風向は前節同様、壁面正対風向とする。

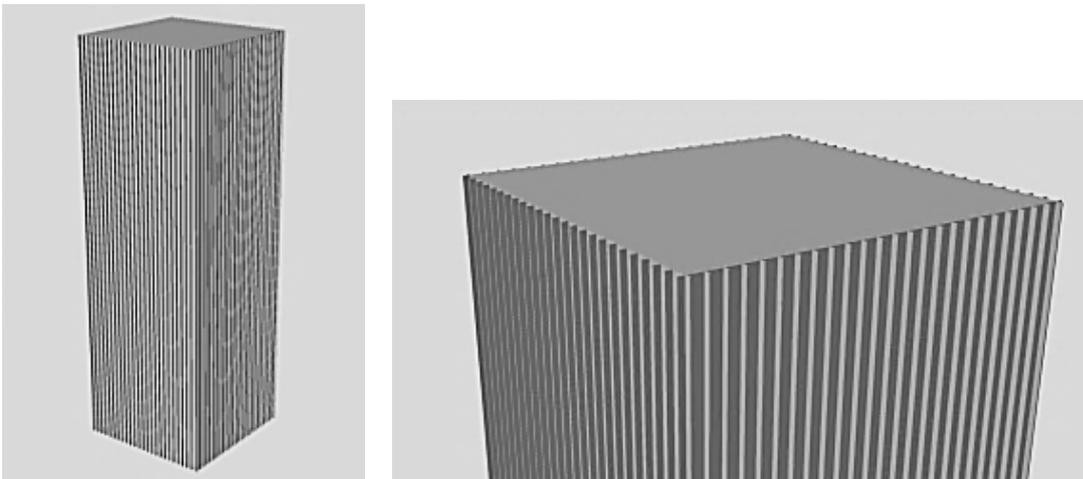
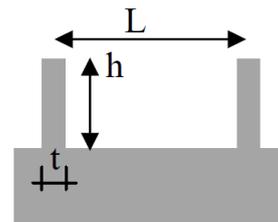


図 5.8 実寸フィンモデルの形状

表 5.1 フィン形状の比較

	EXPモデル	ケースA
フィン厚さ t [t/B]	1.6mm [1/62.5]	0.4mm [1/250]
フィン高さ h [h/B]	6.6mm [1/15.2]	1.67mm [1/59.9]
フィンスパン L [L/B]	16.4mm [1/6.1]	4.15mm [1/24.1]
t/h	1/4.1	1/4.1
h/L	1/2.5	1/2.5



(2) 計算格子

格子解像度は渦構造の分解能を決定づけるため、解像すべき流れのパターンや乱流構造に応じて適切に定める必要がある。特に本建物モデルのように部材周囲の微細な変動圧力場に注目する場合、建物近傍の格子解像度については形状再現性のみならずそれらに起因する乱流構造を再現可能な格子解像度が要求される。

図 5.9 は、テトラ非構造格子系を自動生成する際に予め与える解像度分布を示している。EXP モデルでは、最高解像度は風上面両端部のフィン近傍に配置されており、その基準寸法は $B/128$ である。これはフィン高さ h に対し $h/8.5$ の格子解像度に相当する。一方、モデル A においては建築物に対するフィンの相対寸法が小さいことから、同様の格子系を配置するとフィン近傍の格子解像度不足（約 $h/2$ ）により精度の悪化あるいは計算の発散が危惧される。建物全体規模から特徴づけられる乱流スケールとフィンに起因する乱流スケールに大きな乖離があることを考慮すると、モデル A の格子解像度分布は建物近傍において極めて高い分解能が要求される。ここでは、テトラ非構造格子系の特長である局所的な高解像度化により、フィン形状に起因する乱流構造を極力同じ解像度で再現するよう計算モデル構築を試みた。すなわち、風上面端部のフィン近傍において、フィンスケールの渦構造を EXP モデル同様に解像するべく $h/8.5$ を目標とした ($B/512$)。図 5.10 に計算格子の比較図を示す。端部フィン形状を同等となるよう表示した拡大図は、絶対寸法が大きく異なるものであるが、フィン近傍で概ね同等の分解能が与えられていることがわかる。モデル A の総要素数は約 2173 万である。

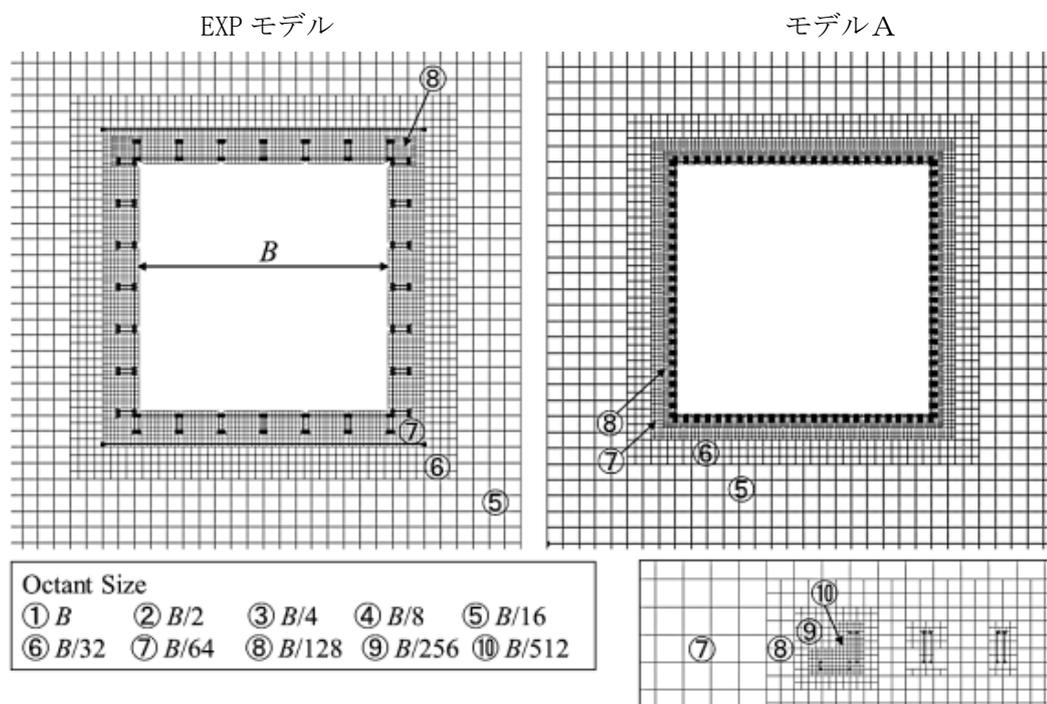
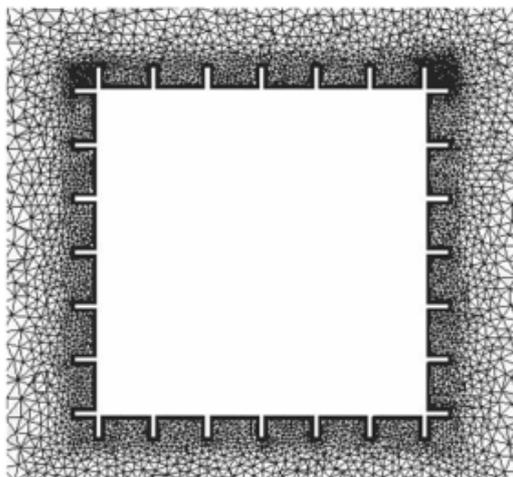
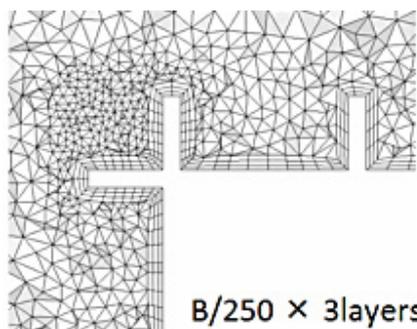
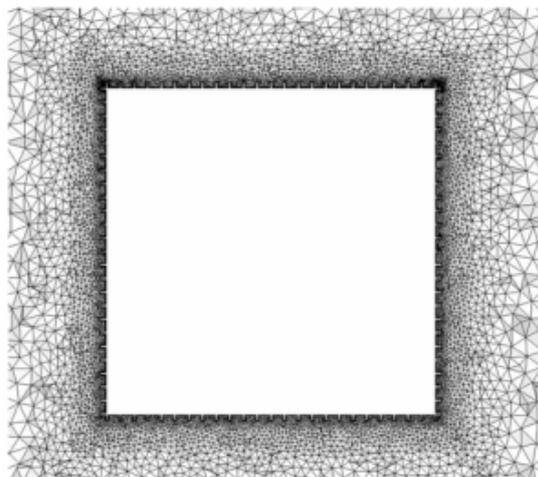


図 5.9 格子生成のための解像度分布

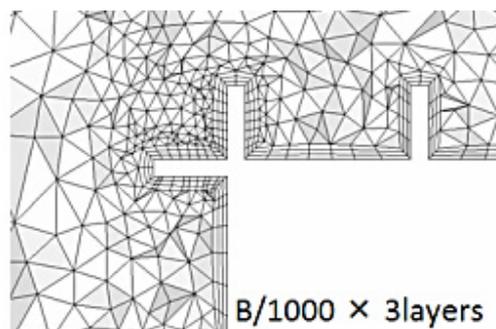
EXP モデル



モデルA



$B/250 \times 3\text{layers}$



$B/1000 \times 3\text{layers}$

図 5.10 計算格子

(3) 計算結果

モデルAの計算結果に基づく風上フィンの風力係数分布について、EXPモデルと比較を行う。平均風力係数の水平分布を図5.11(a)に、ピーク風力係数の水平分布を図5.11(b)に示す。端部のフィンのみ大きい風力が作用する点について両者は共通している。端部から2番目のフィンに関しては、両者で建物壁面に対する絶対位置が異なるものの、概ね同等の値となった。全体的にモデルAはEXPモデルに比べ風力係数値が小さくなる傾向がみられる。

端部のフィン表面における風圧係数およびそれら差圧から算定される風力係数について、フィン上の分布特性を調べる。図5.12は、建物壁面からフィン先端に至る3点の風圧係数および風力係数分布を示しており、両モデルの平均値および変動値について各高さで比較している。フィン上3点の分布形状をみると、この範囲では大きく変化していないこと、また全体的にEXPモデルの各値は絶対値でモデルAを上回る傾向があることが確認できる。

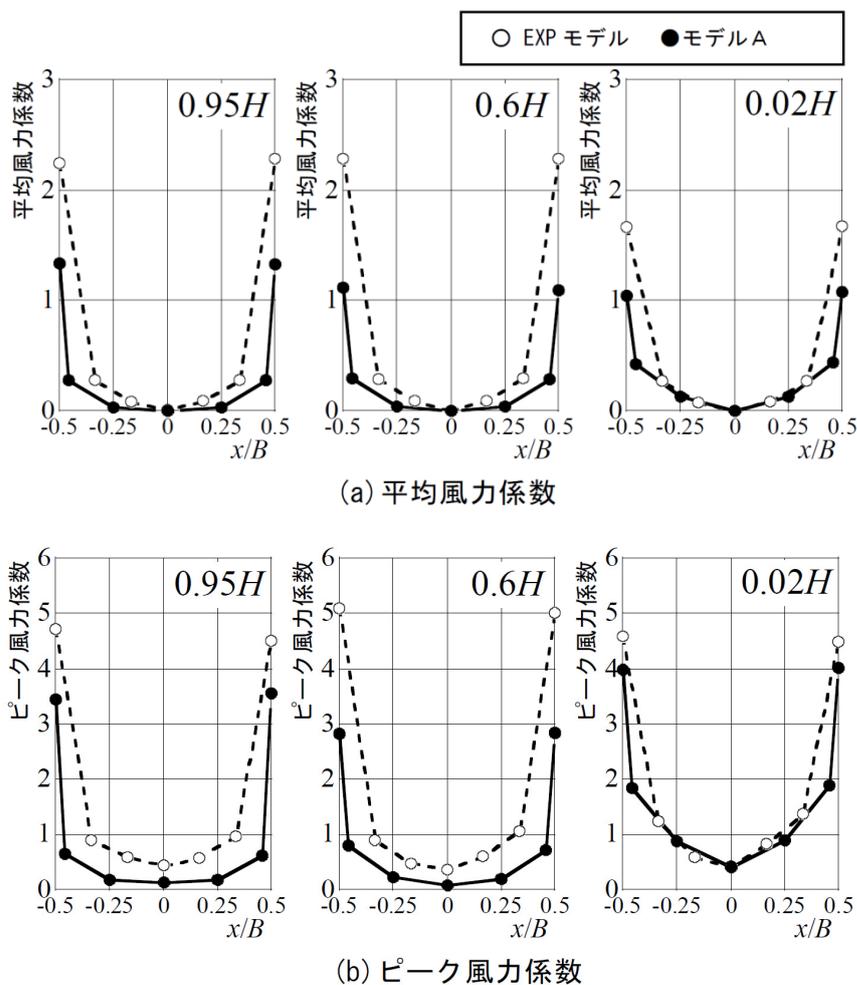


図 5.11 風力係数の水平分布

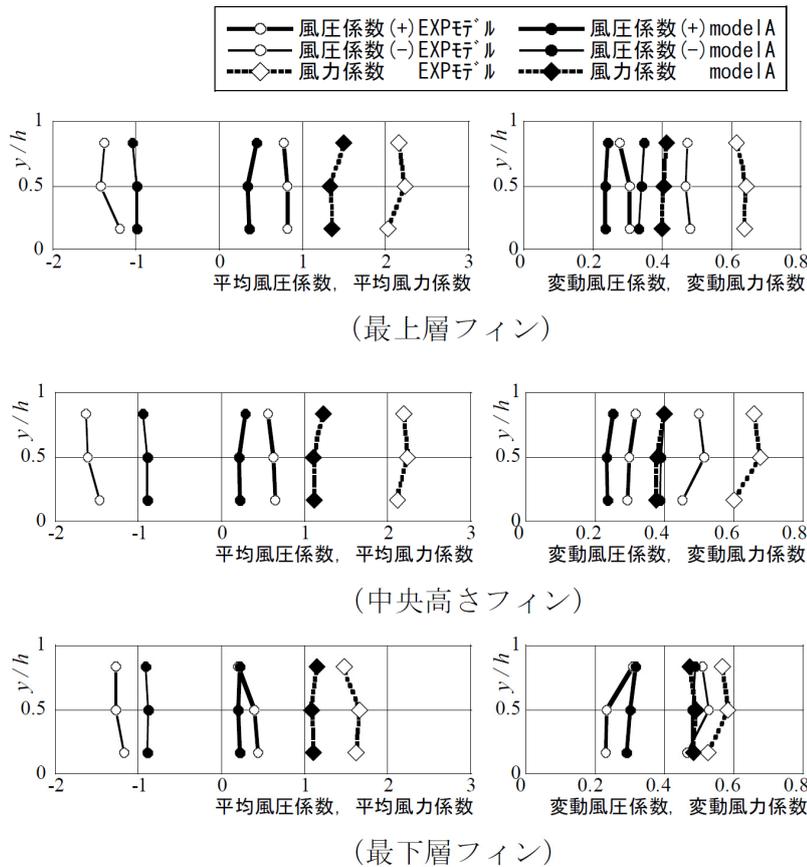
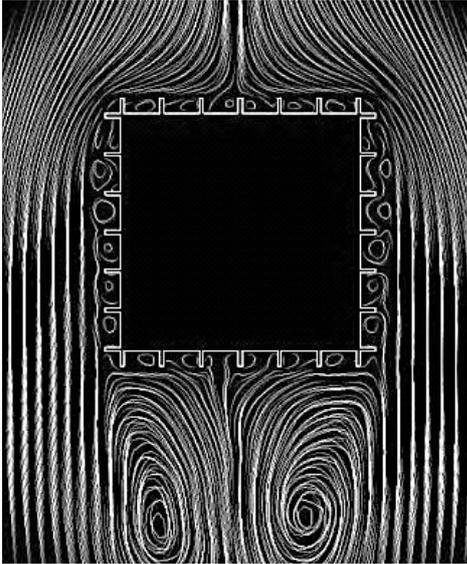


図 5.12 端部フィン上における風圧係数および風力係数分布

(4) 流れ場の比較

EXP モデルとモデル A について、周囲の流れ場を比較する。図 5.13 は実大 10 分間相当の平均流れ場に基づいて、高さ $0.5H$ における流れ場を比較している。建物レベルでの水平断面を比較すると、建物側方の流れに顕著な差がみられる。EXP モデルでは建物側面上のフィン間においてそれぞれ循環構造が形成されており、その外側を主流方向に流れる様子がみられる。一方モデル A では、建物側面近傍において一般的な角柱モデルでみられるような建物スケールでの剥離渦が形成されている。隅角部フィンの拡大図からは、建物風上面におけるフィン近傍の流れにも差がみられる。両ケースともに、各フィン背後の渦構造が確認できるが、EXP モデルではフィン先端からの剥離流れがその背後のフィンの上流面に作用しているのに対し、モデル A ではフィン間を満たす渦構造上を沿うよう建物壁面に平行に流れている。モデル A 風上面で側方に向かった流れは、端部フィン先端を起点として大きく剥離し、建物側面における大スケールの循環を形成するとともに側面フィン間においてもフィンのスケールでの渦構造が形成されている。

EXP モデル



モデルA

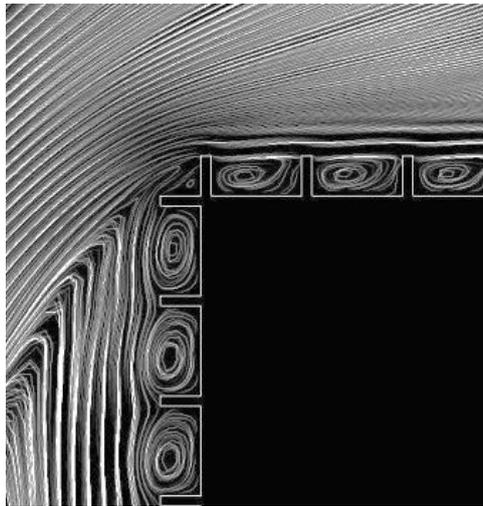
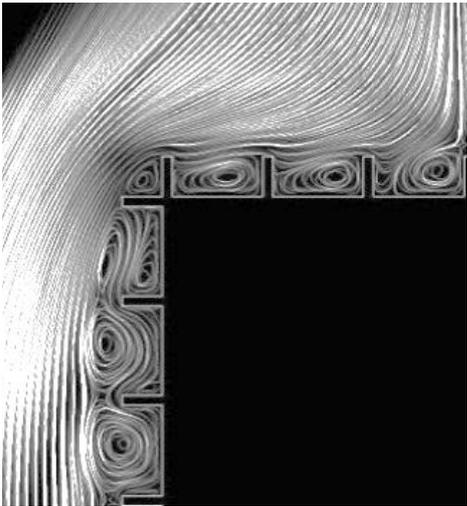
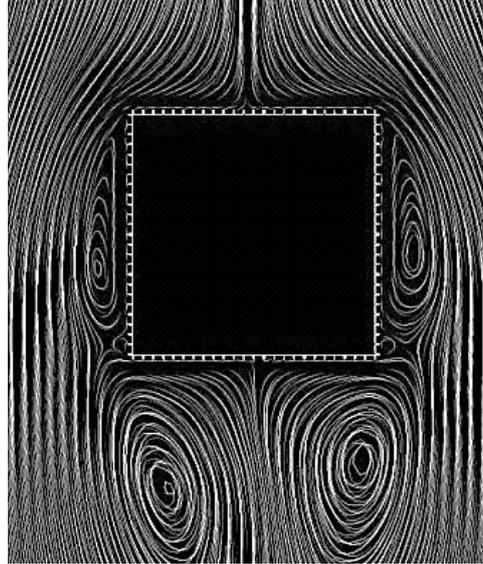


図 5.13 建物およびフィン周囲の流れ場

建物隅角部におけるフィン近傍の風速分布を図 5.14 に示す。同図は、EXP モデル、モデル A それぞれに対し、フィン間 3 箇所における風速（壁面平行成分）の平均値 V および標準偏差 v' を代表高さの平均風速 U_H で基準化し、それらの壁面垂直方向分布を示している。両ケースを比較すると特に平均風速勾配に顕著な差が現れており、フィン間の渦構造に伴う逆流域やフィン先端 ($y/B = 0.066$ [EXP モデル], 0.0167 [モデル A]) 近傍の増速域の分布が大きく異なっている。特に測線③は、EXP モデルでは隅角部フィン-側面第一フィン間の渦構造の外側に相当するため (図 5.13) 同測線内で逆流成分はみられないが、モデル A では建物側面の剥離渦形成に伴う逆流成分がみられるとともにフィン先端近傍の局所的な増速が強調されている。

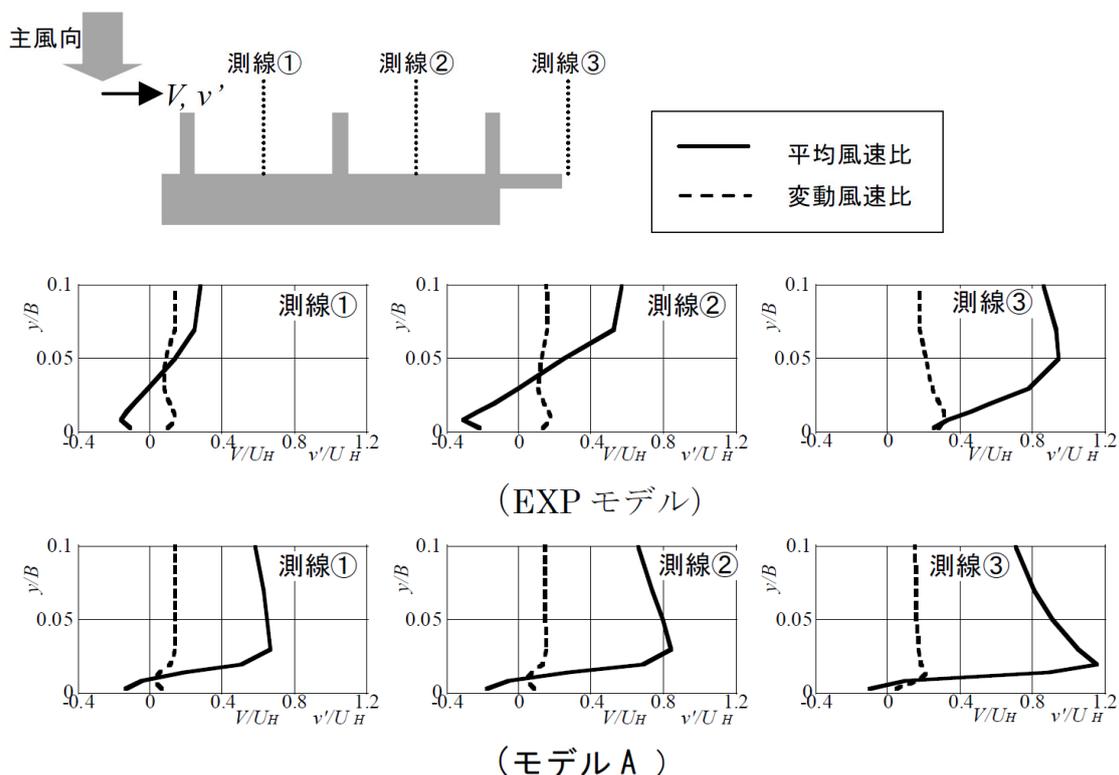


図 5.14 建物隅角部におけるフィン間の風速分布

次に、フィンに作用する風圧および風力の変動特性について調べる。図 5.15 は、EXP モデル・モデルAの端部フィンに作用する変動風圧（正圧側・負圧側）およびそれらの差圧に基づく変動風力の時刻歴波形の一部を示している。同図より、全体的に各波形の絶対値は EXP モデルの方が大きいものとなっている。風力係数 C_f の波形において各ピークが発生している時刻での風圧波形に着目すると、EXP モデルでは正圧側・負圧側ともにピーク値がほぼ同じ時刻に現れる傾向があり、それらの差（絶対値の和）として大きい風力値が構成されている。これは、上流側のフィンからの剥離流が作用することによる正圧増加とフィン端部の剥離による背面の負圧増加の同時作用が要因として考えられるため、EXP モデルではフィン近傍の局所的な流れが支配的になっているものと推測される。一方、モデルAでは、正圧側と負圧側の相関が明瞭には見られず、風力係数のピーク値は負圧側の変動による寄与が大きいこと、また EXP モデルよりピークの出現頻度が低いことがわかる。

図 5.16 は、両者の風圧変動（負圧側）のパワースペクトルを示している。比較的広帯域の変動特性を有する EXP モデルに比べ、モデルAでは明瞭なピーク振動数が確認できる。当該スペクトルピークは建物スケールにおける St 数に概ね一致し、それに対応する周期で主要な時刻歴ピークが図 5.15 からも確認できる。一方 EXP モデルでは St 数前後の周波数成分が加わっており、局所的な乱流構造による高周波数成分の他、当該部位において上流側フィンからの剥離流が関与することを考慮すると、建物全体としての風上面の圧力変動すなわち接近流による低周波数成分のパワーが現れているものと推察される。以上のことから、端部フィンの変動風力に関しては、モデルAは EXP モデルに比べ建物全体からの剥離渦によって形成される大局的な乱流構造が主体的に影響していると判断される。

以上より、断面形状比 (t/h) スパン比 (h/L) が同一のフィン形状であっても、建築物に対する相対寸法が異なることによりフィン近傍および建物周囲の流れ場は大きく異なること、さらにそれらの乱流構造の差は、耐風設計上重要となる端部フィンにおいて風圧・風力の変動特性にも影響を及ぼすことが確認された。実寸相当のフィンが付設される建物モデルでは、その周囲において建物スケールの大局的な乱流構造が支配的となることから、フィンの設計用風荷重評価のみならず、当該フィンが設置された建物全体の空力特性を予測する上でも、その微細な幾何学形状を再現する必要があること、また当該形状モデルを扱う上で本手法が有効であることが示された。

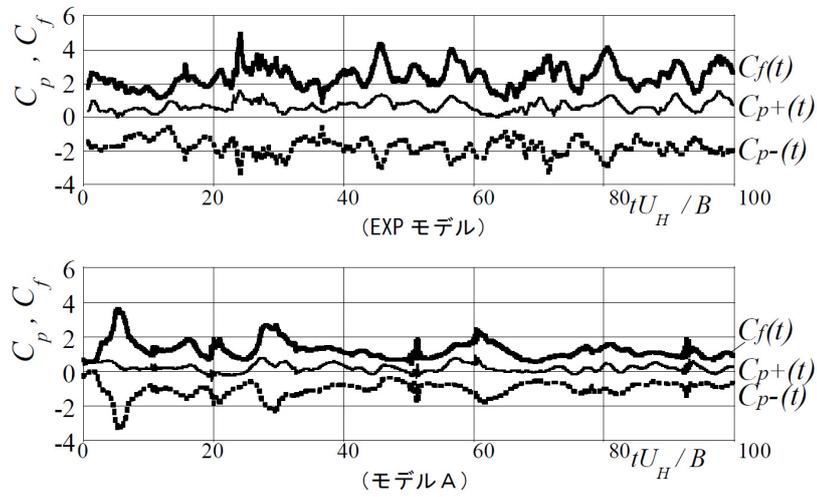


図 5.15 端部フィンにおける風圧係数および風力係数の時刻歴波形

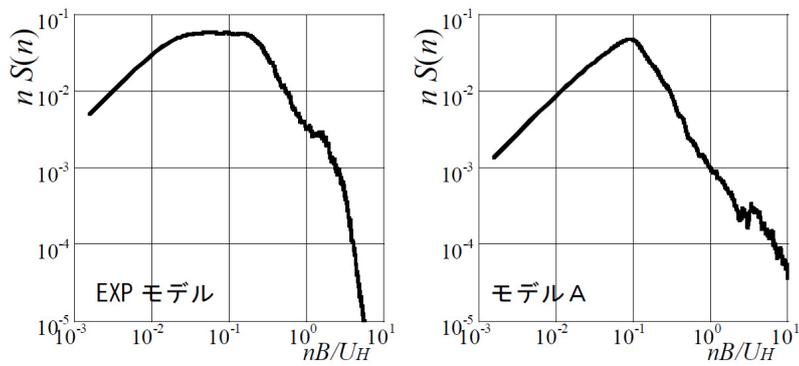


図 5.16 負圧変動のパワースペクトル

5-3-2 端部フィンの有無による影響

(1) 端部フィンのない建物モデル

実際に鉛直フィンが設置される建築物においては、建築計画上あるいは外装材のおさまり上、端部フィンが無いケースも多くみられる。前項までの知見では壁面端部のフィンにおいて大きい風力が作用することが確認されたが、当該フィンが無い場合において他のフィンに作用する風力の変化を調べる。モデル形状を図 5.17 に示し、これをモデルBとする。本モデルはモデルAにおける隅角部4箇所、計8点のフィンを取り除いたものであり、他の形状・フィン配置については同様である。

(2) 計算格子

モデルBに関する計算格子の一部を図 5.17 に示す。基本的な格子分布はモデルAに倣うものとするが、隅角部における最高解像度範囲はモデルBの端部フィン（モデルAの端部から2点目に相当）近傍に配置する。総要素数は約 2010 万である。計算風向は全節同様、壁面正対風向とする。

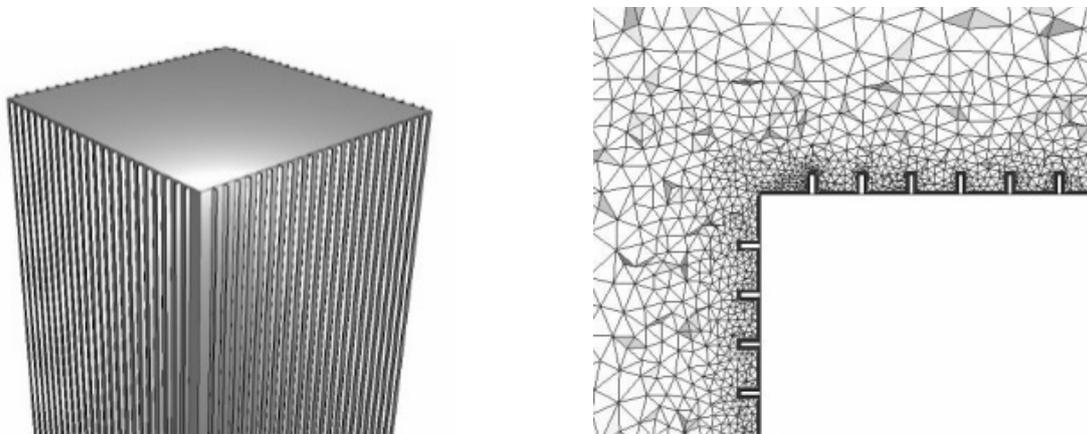


図 5.17 端部フィンのないケースの計算モデル

(3) 計算結果

モデルBの建物風上面のフィンに作用するピーク風力係数について、その水平分布をモデルAと比較して図 5.18 に示す。モデルBの端部のフィンについては、モデルAと水平位置は異なるものの、他の部位に比べ顕著に大きい風力が確認され、両者で同様の分布傾向となることがわかる。ただし、各高さにおいてその値は低減されている。端部から2番目以降のフィンについてはモデルAと概ね同等であり、ピーク風力係数は小さいことが確認された。

モデルBにおける平均流れ場を図 5.19 に示す。モデルA同様、建物側面には建物スケールの剥離渦が確認された。隅角部に着目すると、モデルBの端部フィン近傍では、フィン先端からの剥離流は建物風上面に再付着しており、建物側方の剥離渦が建物隅角部を起点としている点でモデルAとは異なっている。したがって、モデルBの端部フィンでは風下面の負圧が大きくなり、ピーク風力が低減されるものと考えられる。

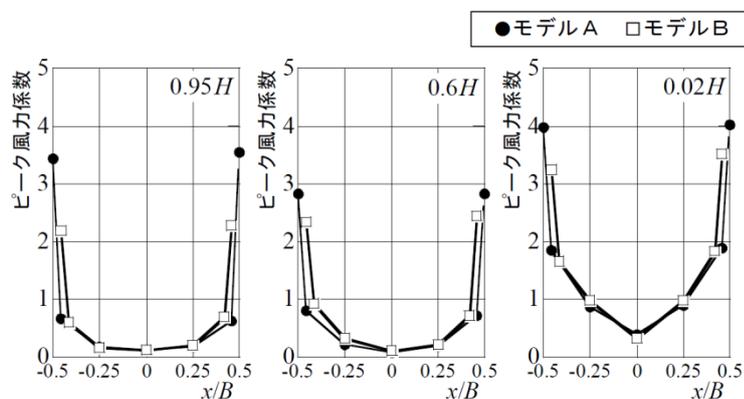


図 5.18 ピーク風力係数の水平分布

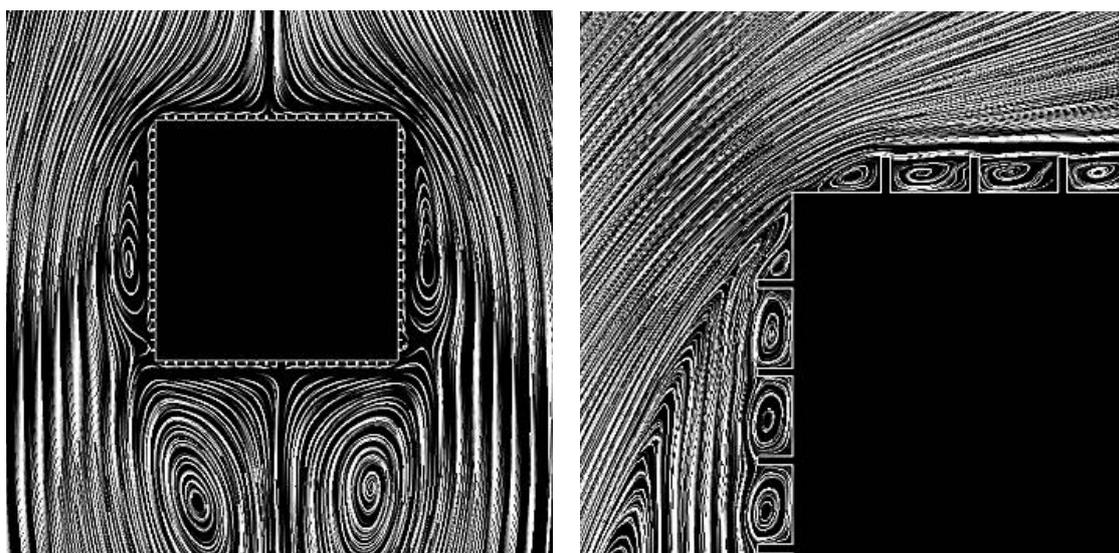


図 5.19 モデルB周囲の流れ場

5-4 風向による風力係数分布の変化

5-4-1 計算ケース

耐風設計においては一般に、風向の変化による影響を調べる必要がある。ここでは、モデルAおよびモデルBを対象として風向による風力係数分布の変化の様子を調べる。計算風向を図 5.20 に示す。

風向角 0° を壁面正対風向とし、角柱に対するグランシングルアンクル相当の風向角として 15° , さらに風向角 45° を対象とした計算を行う。風向角 45° における計算格子を図 5.21 に示す。各風向に応じて、大きい風力が想定されるフィン近傍に最高解像度領域 (図 5.9 ⑩) を、風下側に後流再現領域 (図 5.9⑤) を配置している。

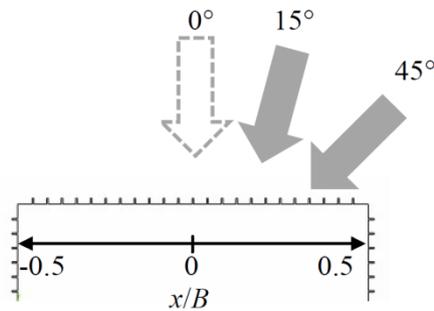


図 5.20 計算風向

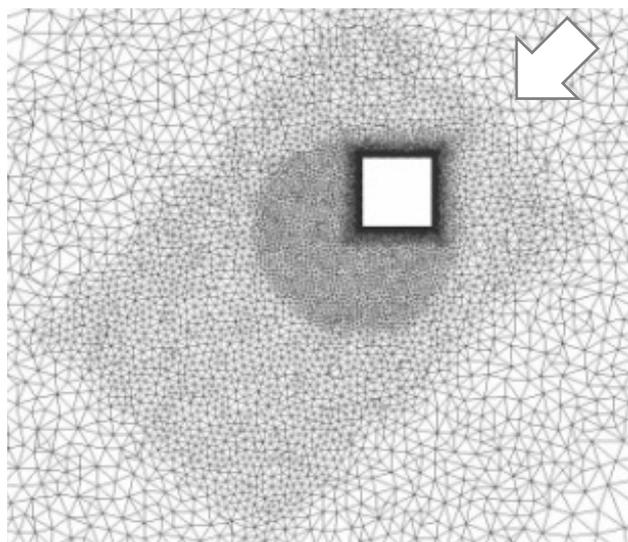


図 5.21 風向 45° の計算格子

5-4-2 計算結果

モデルAおよびモデルBそれぞれについて、風向角 15° および 45° における平均風力係数分布とピーク風力係数分布を併せて図 5.22 に示す。

同図より、モデルA風向角 15° において、風上側フィン上部で顕著に大きいピーク風力係数（約 4.5）が確認された。小野ら⁹⁾は、境界層乱流中の角柱前縁上部において風向 15°（グランシングアングル）で円錐渦によるピーク負圧の発生を報告している。本モデルは角柱表面にフィンが設置されている点で同文献とは条件が異なるものの、前節の知見より実寸フィンモデルでは側面において角柱相当の剥離渦が形成されることを考慮すると、本ケースにおいても同文献と同様に円錐渦による局所負圧が関与している可能性が考えられる。当該部位における変動風力および変動風圧の時刻歴を図 5.23 に示す。同図より、変動風力のピーク形成は負圧側の変動風圧が支配的であることが確認できる。これを踏まえ、ピーク風力発生時の瞬間圧力場（ $C_p = -2.5, -3.0, -4.0$ の等値面）を図 5.24 に示す。建物上端部近傍において、全体的には角柱の事例にも類似した円錐状の負圧場が形成されているが、風圧係数 -3.0 および -4.0 の低圧部については、側面第一フィン上端から建物側面に広がる領域と、隅角部フィン間（当該フィン⇔側面第一フィン）を鉛直に広がる領域とに分かれて分布している（当該フィンのピーク風力形成は後者に起因している）。したがって、当該フィン上部のピーク風力は、円錐渦に伴う局所負圧場に対し、フィン形状による分断効果が組合わされて形成されたものと推察される。なお当該圧力場は建物上部の限られた領域で発生している。したがって、同フィンの中央高さ付近（ $0.6H$ ）でも発生している大きいピーク風力については別の機構によるものと考えられる。一方モデルBでは、建物側面で同様の局所負圧場が形成されている可能性もあるが、端部フィンは建物隅角部から離れた位置に設置されているためこの影響を受けず、大きい風力が発生しないものと考えられる。

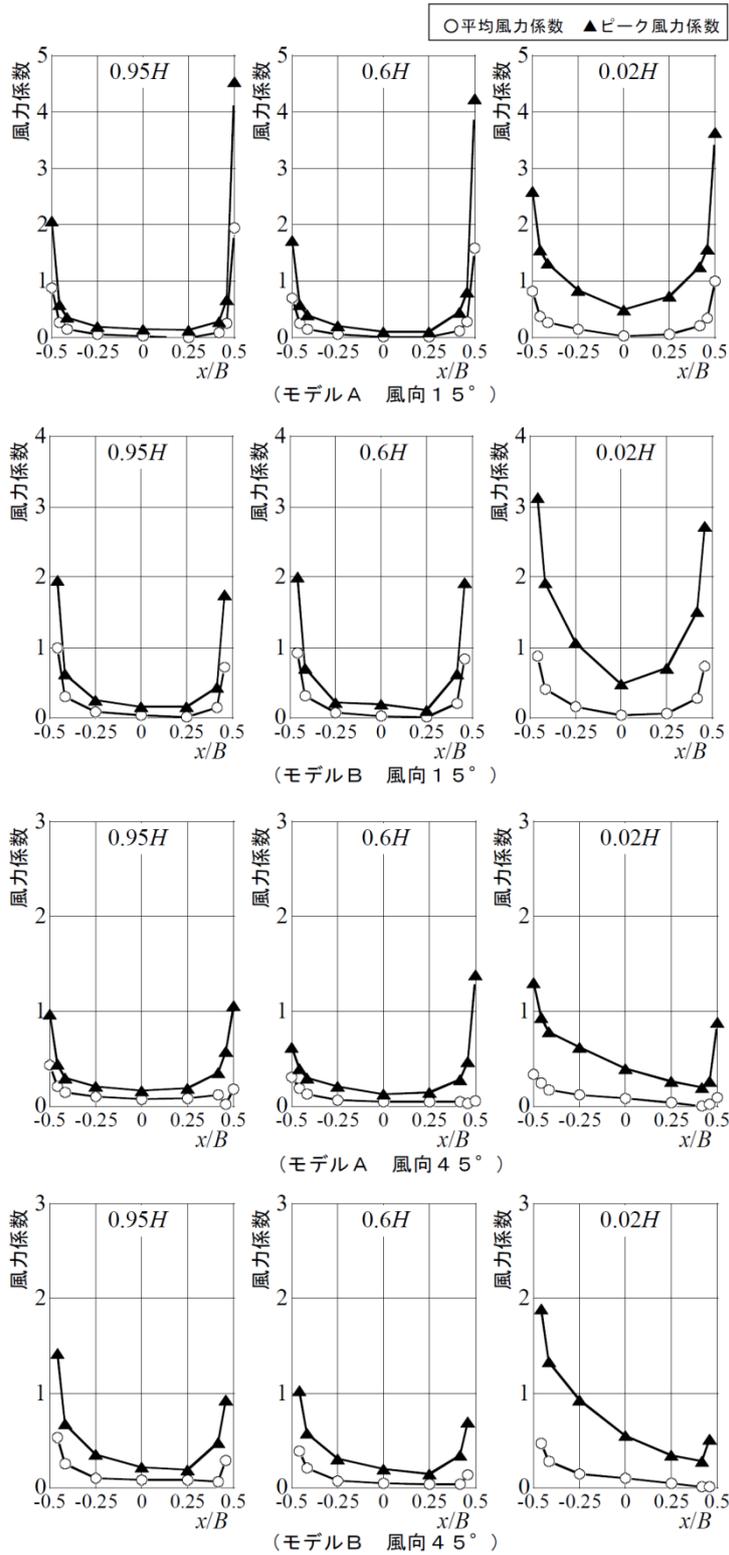


図 5.22 風力係数の水平分布

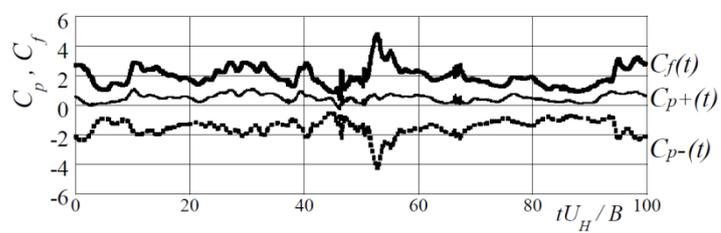


図 5.23 端部フィンにおける風圧係数および風力係数の時刻歴波形

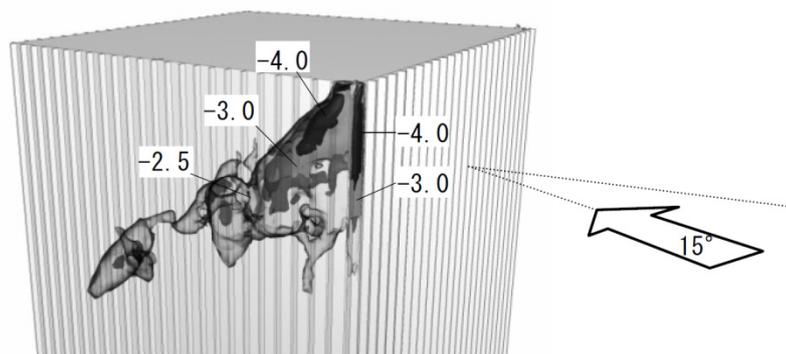


図 5.24 負圧場の等値面

風向角 45° においては、全体的に大きい風力は発生しておらず、ピーク風力係数は 2.0 以下である。モデル A と B を比較した際、高さ $0.6H$ で定性的な差がみられ、モデル A の風上端部のフィンに比較的大きいピーク風力が発生している。その要因として、モデル A では風上側隅角部の 2 つのフィンによって接近流を受け止める形状となることから、正圧の増加が寄与している可能性が考えられる。

また、風向角 15° 45° とともに低層部で広範囲に渡り比較的大きいピーク風力が発生しており、この傾向については風向角 0° (図 5.18) の場合も同様である。ここでは、建物風上面の低層部に着目し、当該領域の乱流構造に対するフィン形状の関与について考察する。図 5.25 は、風上面近傍における平均流れ場の計算結果について、本モデルと、フィンがない同形状の単純角柱モデルとを比較したものである。それぞれ風上壁面から $B/50$ の距離における面内の流線および風速 (絶対値) コンターを示しており、両モデルで流入変動風は同一のものを使用している。同図より、フィンの有無により停留点の高さが異なること、フィン付モデルにおいて地上付近に特殊な流れが生じていることがわかる。図 5.26 は、フィン付モデルの風上壁面近傍から発生させた流線図である。地上付近において水平方向に広がる明瞭な渦構造が確認され、これらは図 5.25 に示される分布形状と対応しているとともに、低層部における強いピーク風力発生に関与しているものと推測できる。この渦構造の形成を考察するため、風上面付近の中心鉛直断面における風速場を調べる。図 5.27 は、風向角 0° における風速比 (鉛直 W 成分) のコンター図である。同図より、停留点以下の壁面近傍においては、フィン付モデルでは水平方向が拘束されているため下降成分が加速している。

図 5.28 は同断面内の流れを示している。正対風向時に角柱風上側の地上付近では逆流に伴う循環構造が一般に形成される (馬蹄形渦) が、フィン付モデルでは上記の下降流増速によってその渦構造が強められている様子が確認できる。これに起因して、接近流が押し上げられ停留点が高昇するとともに、地上付近の壁面近傍では馬蹄形渦の 2 次渦が強調され、それが水平方向に流下する過程でフィン形状の抵抗により渦生成が促進されていると考えられる。結果的に、図 5.26 に示されるように水平方向に延びる渦構造が形成され、低層部フィンの風力変動を増加させる要因となっていることが推察される。

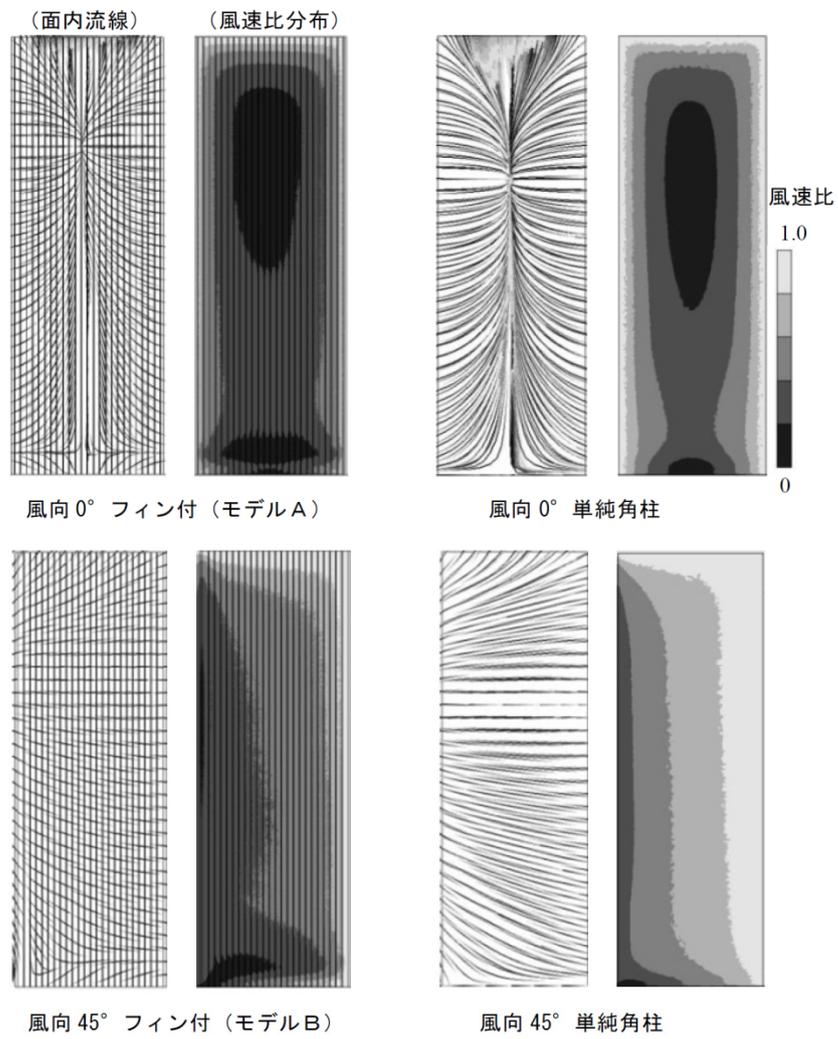


図 5.25 風上面近傍における平均風速分布

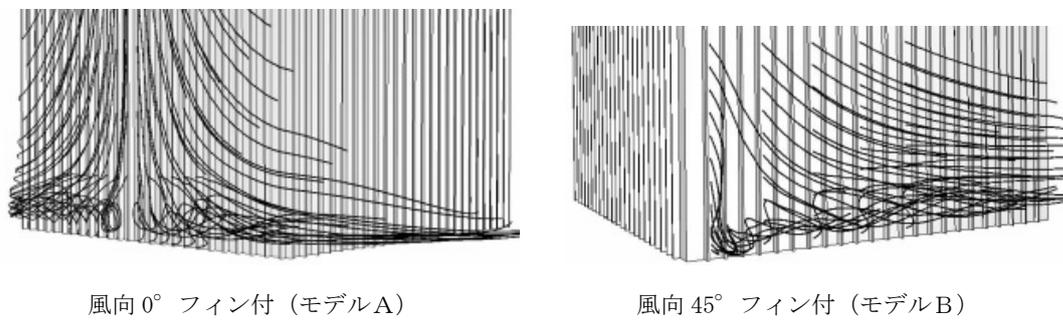
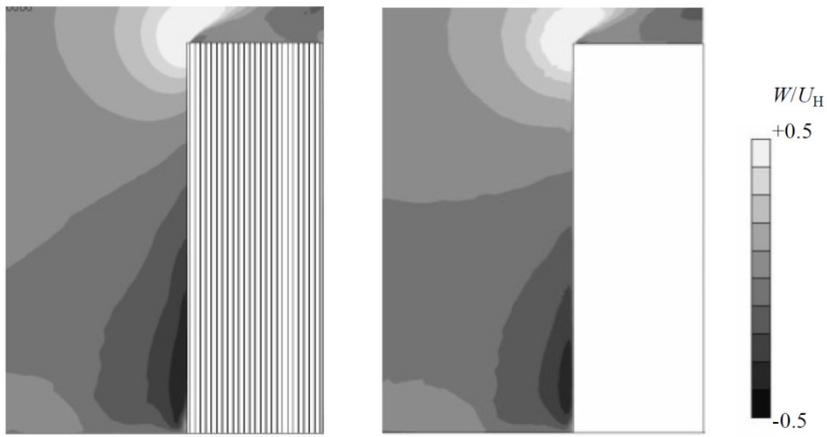


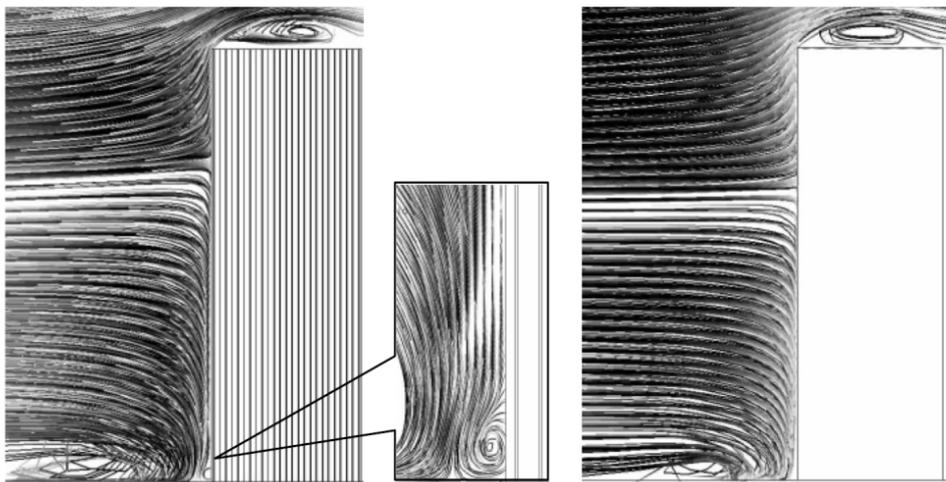
図 5.26 地上付近に発生する渦構造



フィン付（モデルA）

単純角柱

図 5.27 中央断面における風速分布（鉛直成分）



フィン付（モデルA）

拡大図

単純角柱

図 5.28 中央断面における流れのパターン

5-5 第5章結論

高層建物壁面に設置された鉛直フィンを対象としてテトラ非構造格子系 LES を実施した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 複雑表面形状を有する高層建物モデルとして、鉛直フィンを多数実装する3次元角柱を対象として非構造格子系 LES を実施した。フィンに作用する変動風力に着目し、便宜的にフィンが拡大された風洞実験と同様のモデル形状を用いて精度検証を実施したところ、概ね良い対応関係が得られ、当該形状モデルに対する本手法の妥当性が示された。
- 2) 鉛直フィンの寸法を実寸大とし、微細な表面形状を伴う高層建物モデルについて計算を行った（モデルA）。フィンに作用する風力の分布傾向については EXP モデルと同様に端部で最大となるが、全体的にモデルAではEXPモデルより風力値が低減される傾向がみられた。
- 3) 建物周囲の流れ場やフィンに作用する風圧・風力の変動特性について EXP モデルとモデルAを比較すると顕著な差がみられ、モデルAでは建物全体からの剥離渦によって形成される大局的な乱流構造が支配的となることが確認された。フィンのモデル化によってもたらされる建物周囲の流れ場および圧力場のパターンの差は、結果的にフィンのみならず建物自体に作用する風力の形成にも大きく影響をおよぼすものと考えられることから、耐風設計において外装付属部材の寸法は正しく再現されなければならない。その際、物理的制約を伴う風洞実験に比べCFDは有効な手段であり、特に格子解像度の空間的自由度が高い本手法は効果的である。
- 4) 実務的観点から、端部のフィンがない場合のモデル（モデルB）を対象として同様にフィンの風力を算定した。定性的な傾向はモデルA同様端部で最大となるが、風力値としては低減される。端部から2点目～中央部についてはモデルAと概ね一致する。
- 5) フィンの風力分布について風向角による影響を調べた。建物隅角部にフィンを有するモデルAでは、風向角 15° において風上フィンで大きい風力が発生する。これは、グランシングアングルにおいて側面上端部に形成される円錐渦に、フィンの形状効果が組み合わされて発生したものと推察される。
- 6) 全体的に風上面低層部で大きいピーク風力が確認された。その要因としては、フィンの形状効果によって下降流が加速し、地上面近傍の馬蹄形渦が強められ、壁面上でその2次渦が強調されたためであると考えられる。
- 7) テトラ要素を主とする非構造格子系に基づく本手法は、微細な形状を伴う複雑モデルについても効果的にLES計算モデルを構築することができるため、建物外装部に付設される部材に対する風荷重評価技術として有効である。

参考文献

- 1) 寺崎浩 , 吉川優 : 高層建物の外壁に取り付けられた縦型リブの設計用風力係数について, 日本風工学会誌, 第 38 巻, 第 2 号, pp191-192, 2013.04
 - 2) 中村良平 , 寺崎浩 , 吉川優 : 高層建物の外壁に取り付けられた縦型リブの風力係数の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp143-144, 2013.08
 - 3) 菊池浩利 , 田村幸雄: 外装壁面のフィンに作用するピーク風力係数の特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp141-142, 2013.08
 - 4) 小野梓 , 菊池浩利 , 田村幸雄: 外装壁面のフィンに作用するピーク風力係数の特性, 第 23 回風工学シンポジウム, pp427-432, 2014.12
 - 5) 吉川優 , 田村哲郎 : 非構造格子系 LES による 3 次元角柱の変動風圧評価 , 日本建築学会構造系論文集 , 第 78 巻 , 第 687 号 , pp913-921 , 2013.05
 - 6) Yoshikawa, M. and Tamura, T. : LES of Fluctuating Pressures on a High-rise Building Influenced by Windward Building , APCWE8 , pp1-10 , 2013.12
 - 7) 吉川優 , 田村哲郎 : 風上建物の影響を受ける高層建築物の変動風圧に関する LES , 日本建築学会構造系論文集 , 第 80 巻 , 第 713 号 , pp991-1000 , 2015.07
 - 8) Yoshikawa, M. , Tamura, T. : CFD Wind-resistant Design of Tall Building in Actual Urban Area Using Unstructured-grid LES, IABSE, pp1-8, 2015.05
- 小野佳之 , 田村哲郎 : 三次元角柱側面に発生する局部負圧に関する LES, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 694 号, pp2065-2072 , 2013.12

第 6 章

実市街地における高層建築物モデルの 風荷重評価

6-1 緒言

都市部に計画される高層建築物の多くは、中高層建物で構成される街区がその周囲に存在するため、設計用風荷重の評価に際して周辺市街地の影響を適切に考慮する必要がある。特に近年では、オフィスビルだけでなくタワーマンション等、超高層建築物が近接して建てられる事例が増えている。そのような場合、対象建物の接近流に関しては周囲の高層建物群が形成するサイト特有の乱流構造が支配的となる。したがって、周辺建物の規模や位置関係から特徴づけられる流れ場を正しく捉えた上で設計用風荷重を評価する必要がある。

実務的観点に基づく LES 風荷重評価の技術的課題として、実建物や実市街地で想定される複雑なモデル形態への適用性を精査しなければならない。モデル形態の複雑さについては、耐風設計を行う対象建物自体の複雑さと、その周辺領域の複雑さに分類される。前者に関しては、建物全体の空力特性を評価するための各種外形への適用性だけでなく、壁面・屋根面に個別に設置される外装部材（ルーバー、庇等）に対しても LES 耐風設計が期待されるが、これらについては第5章の結果によって、本手法の妥当性が示されている。後者については、対象建物に対する接近流特性を決定づける要素として、周辺市街地形状や局所地形が挙げられる。これらに関しては、建設サイトに応じて多様なパターンが想定されるが、都市部における高層建物を評価対象とする場合には、中高層建物で構成される周辺街区の事例が重要であると考えられる。

Tamura, Nozu, Kishida ら^{1)~4)}は、高層建物が多く存在する実市街地モデルを対象とした LES を実施し、実建物に作用する風圧分布や周辺建物群による乱流特性について報告している。計算モデルに関し、従来の構造格子系から非構造格子系 (OpenFOAM) とのハイブリッドモデルに至る一連の工夫により、モデル構築の合理化と予測精度の向上が図られているが、建物隅角部のような特異点において外圧の変動値およびピーク値の再現性が十分でない場合が発生する。要因としては、当該領域の格子解像度の問題だけでなく、特に壁面近傍における格子生成法の問題が挙げられる。すなわち、SnappyHex (OpenFOAM で用意されている格子生成ソフト) による壁面境界処理においては、モデル形状の変形や格子形状の質の低下が生じやすいため、隅角部近傍における乱流構造を捉えきれないことが推測される。これは結果的に変動圧力場に対する計算モデルの作成法に関する課題であるといえる。

上記を踏まえ、実市街地における実建物の風荷重評価を目的とした LES 計算モデルに求められる条件を整理すると、形状再現性と格子配置の2点が挙げられる。前者は、計算モデルの境界形状に関する再現精度であり、対象建物のみならず周辺街区を構成する建物群の形状は、流れ場の再現性に直接影響をおよぼすことが想定される。後者については、サイト特有の流れ場に対して、領域ごとの要求精度、すなわち解像すべき乱流スケールに応

じた格子解像度を適切に配置すること、また解像度の変化領域や境界近傍において要素形状の質を低下させないことが重要となる。上記2点はそれぞれ独立条件ではなく、相互に依存あるいは干渉する性質を有する。形状再現性と格子配置のバランスが適切でない場合、計算自体が発散する、あるいは実際と異なる流れ場が形成されることが危惧される。特にモデル形状自体が格子生成法に依存する場合には、計算精度が悪化する可能性が高く注意を要する。

本研究ではこれまでに、3次元角柱の風圧変動、またそれに対する隣接角柱の影響、さらには外装部材による複雑表面形状モデルを対象として非構造格子系 LES を実施し、角柱周囲や後流域の乱流構造、さらにそれらが圧力場に与える影響を適切に捉えられることを確認するとともに、ピーク値を含め変動風圧を精度よく再現可能であることを示した。テトラ要素を用いた計算モデル構築の合理性と、精度検証結果に基づく妥当性を考慮すると、実建物・実市街地のようにきわめて複雑なモデル形態に対しても本手法は有効であることが想定される。特に本手法は、一般的な非構造格子系の特長（形状や格子に関する自由度）のみならず、格子形状の質の低下や格子寸法の急変を伴うことなく効果的に空間を離散化できる他、テトラ節点まわりに数十面体で構成されるコントロールボリュームは空間的な複雑乱流場に、壁面境界に合理的に挿入されるプリズム要素は物体表面上の流れに、それぞれ適した格子系を形成できるため、流れ場全体に高い精度が期待できる。以上より、LES 計算モデルに求められる形状再現性および格子配置に関する条件を十分に満たすことができるため、本手法は実建物・実市街地モデルに対しても変動圧力場を精度よく予測可能な計算モデルを構築できると考えられる。

本章では、高層建築物が多数存在する実市街地を対象とし、その中心部に建つ超高層建築物の変動風圧を非構造格子系 LES により求める。ここでは、実建物の風荷重評価を適切に行うための計算モデルを提示するとともに実験結果との比較により計算精度を検証し、さらに耐風設計上考慮すべき特殊な現象についてその機構を明らかにする。計算モデルに関しては、対象建物のみならず周辺建物全ての形状が精度よく再現される他、個々の建築物に対して解像度・要素形状ともに十分な格子系を与え、市街地に形成される複雑な流れ場を精緻に再現する。ここでは、接近流特性の異なる2風向に対して対象建物の変動風圧を求め、実験値との比較に基づいて CFD 耐風設計法の妥当性を明らかにするとともに、可視化に基づいて風圧分布と周囲の乱流構造との関連性を考察する。計算風向のひとつは対象建物の接近流に対して周囲の高層建物が間接的に関与するケースであり、変動風圧の再現精度に対する格子解像度の影響について示す。他方の計算風向は、別の風上側高層建物の後流が対象建物に直接作用するケースであり、対象建物隅角部に形成される特殊な外圧分布についてその再現性を検証する他、流れの可視化に基づいてその発生機構を考察する。

6-2 研究対象とする実市街地

6-2-1 市街地形状

本章では、多くの高層建築物が建つ高密度市街地を計算対象とする。モデル全景を図 6.1 に示す。市街地の形状データは、個々の建築物が精度よく再現された汎用 3D 地図データに基づいて作成された上で、比較用風洞実験の模型状況（縮尺率 1/500）に合うよう形状を一部修正して使用している（現況に対して約 10 年前の市街地状況に相当する）。市街地範囲は 1.2km×0.9km である。中心に位置する超高層建築物を本研究における対象建物と位置づける。対象建物寸法は、代表高さ $H=180\text{m}$ 、代表幅 $B=70\text{m}$ である。対象建物周囲の状況を図 6.2 に示す。

6-2-2 計算風向

計算風向は、図 6.1 に示す 2 風向とする。風向 1 は SSW に相当し、風向 2 は対象建物南面の正対風向から 25° の風向角に相当する。それぞれの風向における対象建物と周辺街区、特に周囲の高層建物との位置関係を考慮すると、接近流特性の違いから対象建物周囲には全く異なる圧力場が形成されることが予想される。風向 1 では、境界層乱流型の流入変動風が対象建物に到達する過程において、高層建物 A が接近流構造に、隣接する高層建物 B が対象建物側方の乱流構造に影響することが推測される。したがって、対象建物の風圧分布に対して、接近する境界層乱流あるいは自らが生成する乱流構造を变形させる等、周辺の高層建物が間接的に影響を及ぼす条件であると予想される。一方風向 2 では、対象建物は高層建物 C および D の背後に位置している。対象建物の風圧分布は、それら高層建物からの渦の離脱を伴った後流構造から決定づけられることが推測されるため、周辺建物が直接的に影響する条件であると考えられる。以上の 2 風向は、同じ市街地でありながら対象建物の変動風圧を決定づける流れのプロセスが異なっている。中高層市街地における高層建物の風荷重評価に際し、これらの条件は周辺街区（特に高層建物）が関与する代表的な事象であると推察されるため、当該モデル形態に対する計算の妥当性に対して重要な知見を提示するものである。

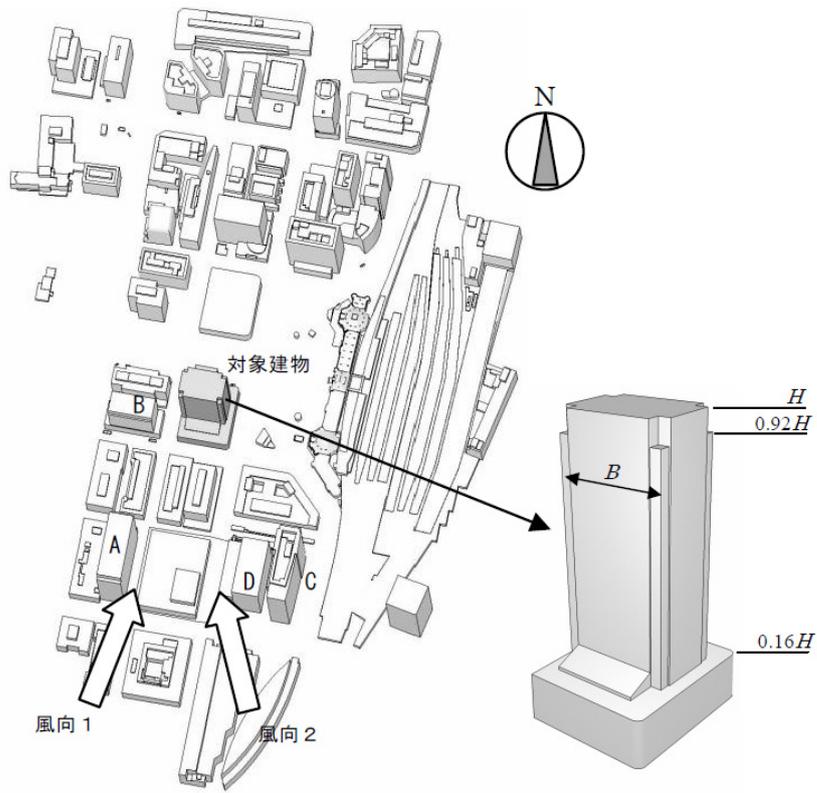


図 6.1 実市街地モデル

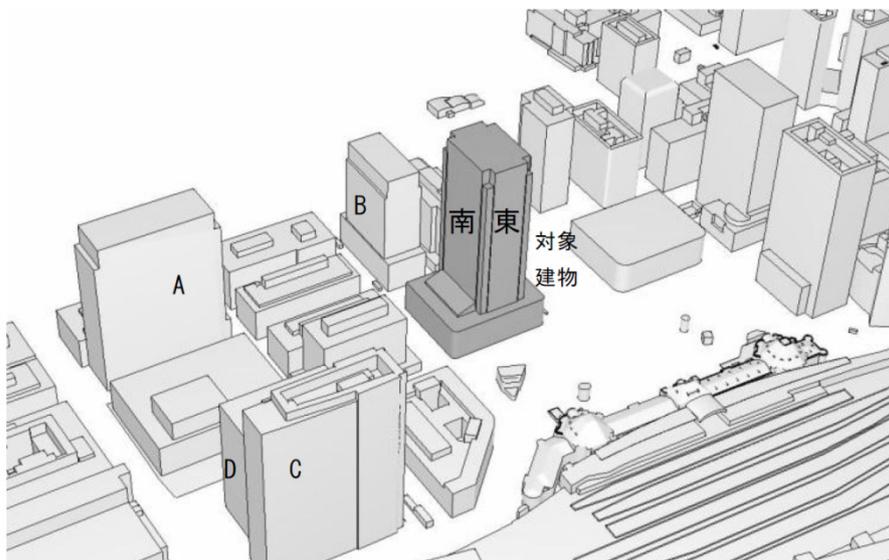


図 6.2 対象建物の周辺状況

6-3 流入変動風

建築物の変動風圧評価のための LES において、流入境界条件として要求される流入変動風は、図 6.3 に示すモデルを用いて作成した。本計算は、第 2 章に示した手法に準ずるものであるが、前章までのモデルと比較して本章で扱うモデルでは主計算領域の水平規模が大きいことを考慮し、主流直交方向の領域規模を約 2 倍に拡大している。本手法により作成された流入変動風のプロファイル（平均風速および乱れの強さの高さ方向分布）およびパワースペクトル密度を図 6.4 に示す。各図には精度検証用の風洞実験における風洞気流の値も併せて示す。各図より、計算結果は実験気流を概ね再現していると判断できる。

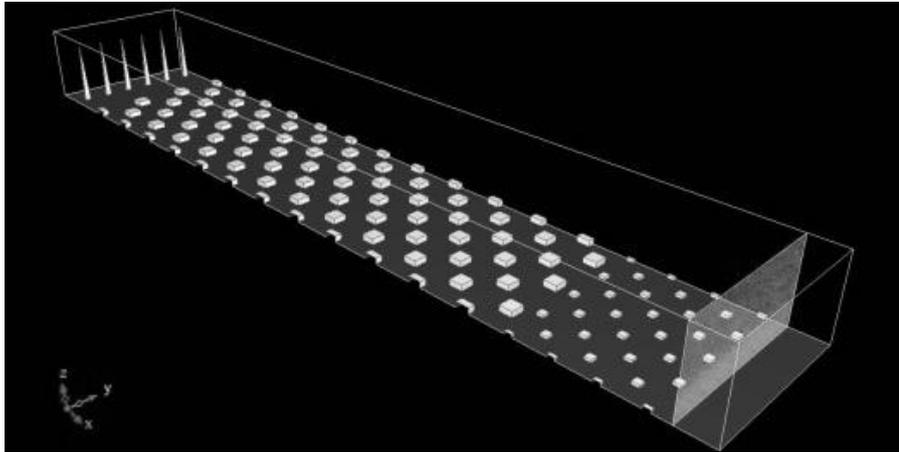


図 6.3 流入変動風作成モデル

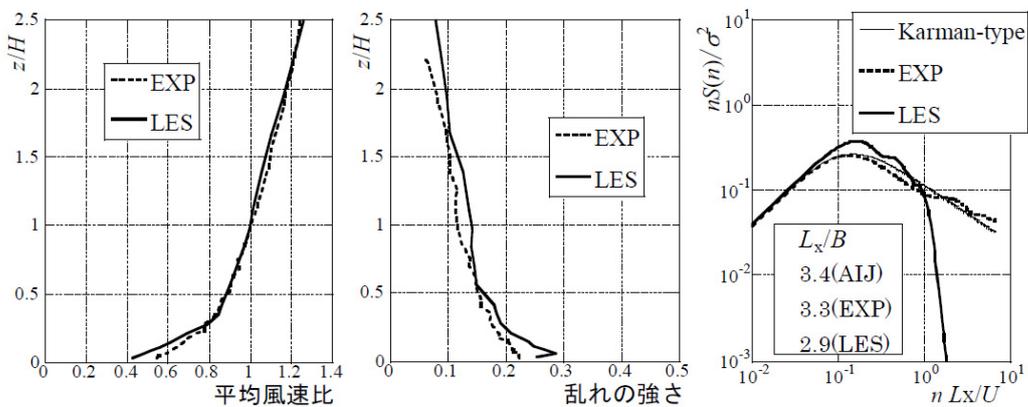


図 6.4 流入変動風のプロファイルおよびパワースペクトル

6-4 実市街地モデルの計算

6-4-1 計算領域

計算領域を図 6.5 に示す。領域規模は、幅 2.4km×奥行 4.0km×高さ 1.2km である。流入境界面においては、前節に示す変動流入風を時間刻みごとに与える。計算モデルは風向ごとに作成するものとし、本計算領域に対して市街地モデル形状が各計算風向に合致するよう配置する。

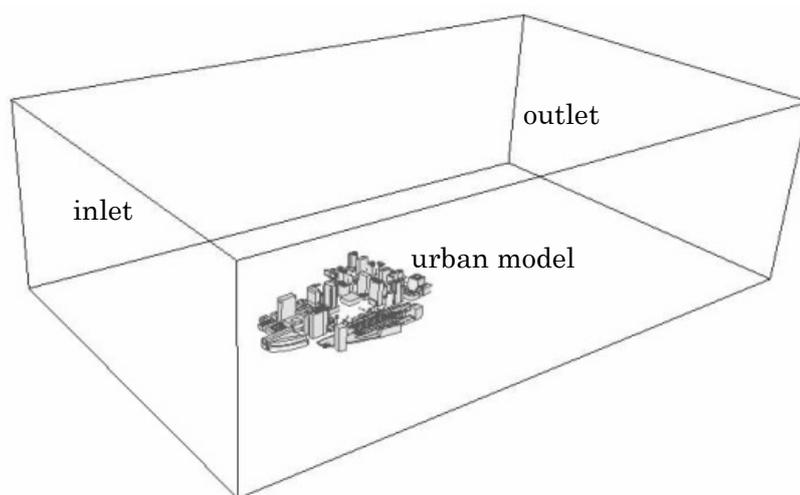


図 6.5 計算領域

6-4-2 風向 1 を対象とした格子解像度に関する検討

一般に計算モデルが建物単体の場合、対象建物形状を再現した上で、遠方から対象建物に向け計算格子の解像度を上げるよう作成される。一方、計算モデルに周辺建物が含まれる場合は、個々の周辺建物には比較的低い形状再現性と格子解像度を与えることで計算の効率化が図られることが多い。しかしながら、変動圧力場を予測する上で周辺建物に関する計算モデルの影響は明らかでなく、適切な解を得るためのモデル構築法を調べる必要がある。特に非構造格子系を用いる場合には、予測精度が不十分であってもその自由度の高さ故にモデル生成が可能である事が多いため注意を要する。本章では、実市街地モデルに対する形状再現性と格子配置について以下のように設定している。

まず、市街地を形成する個々の建物形状については、実験模型を再現するため一部修正したものを除き、汎用 3D 地図データに基づいてモデル形状が作成されている。したがって、対象建物・周辺建物を区別することなく概ね全ての建物外形が精度よく再現されているとともに、それらを構成する全境界面において表面メッシュが固定されることから格子生成法の影響を受けることなく形状が完全に維持される。実務的観点からは、遠方建物や低層

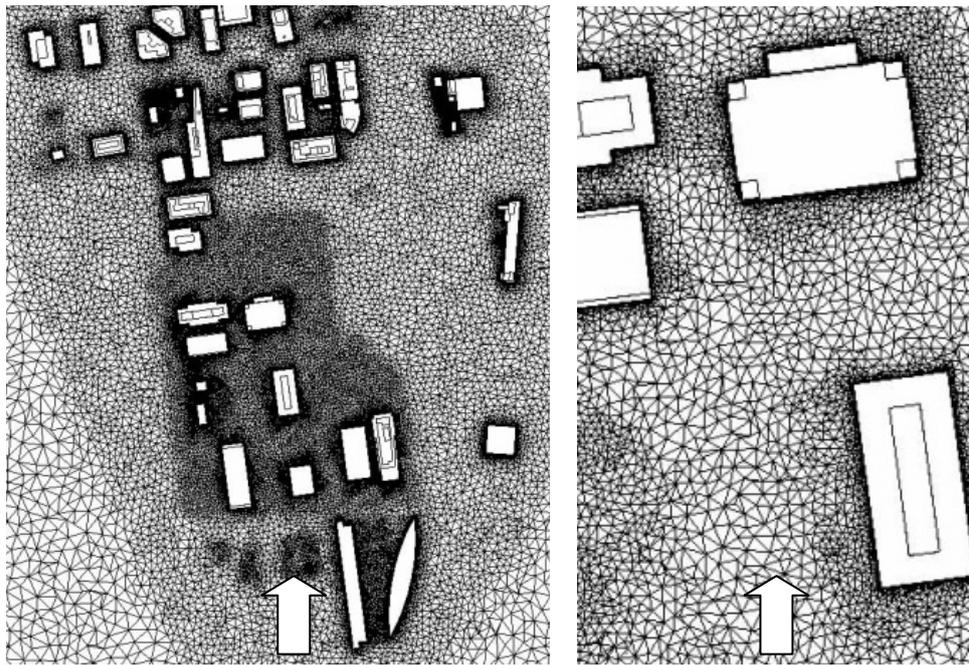
密集街区等に対し形状を単純化することも可能であると考えられるが、その影響に関する検討は今後の課題とする。

格子配置に関しては、本手法に基づくテトラ非構造格子の採用により、要素形状の質は全領域に渡り維持されている。本研究では、全ての建物近傍に対して十分な解像度を与えると同時に、対象建物の周囲に対しては遠方に比べ相対的に解像度が高くなるよう配慮する。ここでは、風向1を対象として対象建物の変動外圧を精度よく再現する上で要求される格子解像度について検討する。

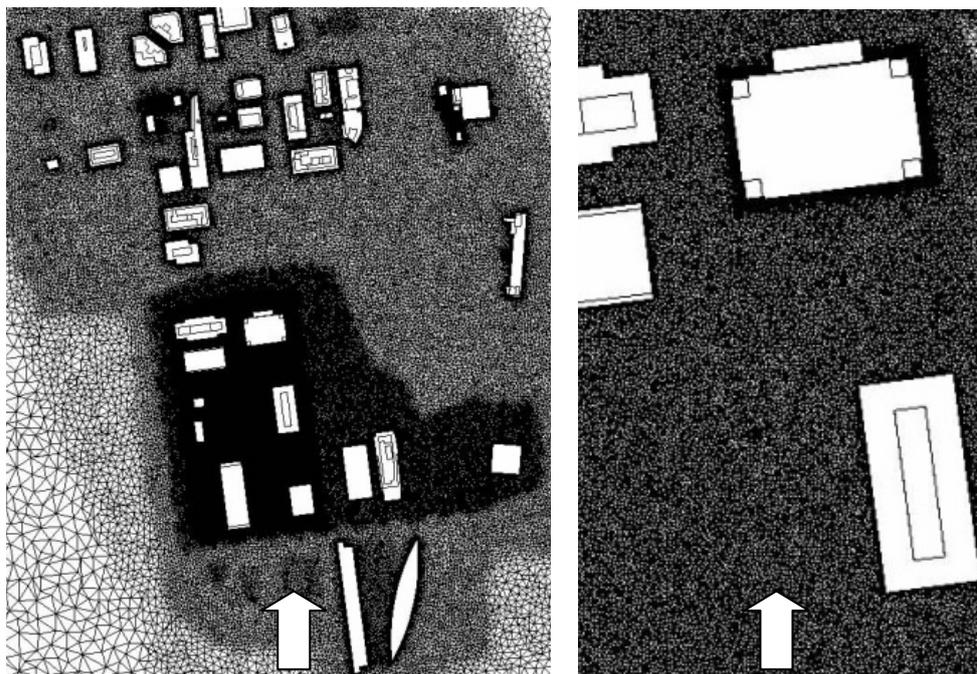
(1) 計算格子

風向1を対象として格子解像度の異なる2ケースの計算を行い、対象建物の風圧分布に与える影響について調べる。図6.6は、対象建物および周辺市街地における格子解像度の異なる2ケースの計算モデルを示している。ここで、計算格子の生成手法は第2章同様であり、計算空間の領域ごとに与えられた基準寸法に基づいて表面メッシュから内部にテトラ要素が自動生成されるものである。

ケース(a)は、対象建物近傍で $B/90$ (境界層要素厚 $B/350 \times 3$ 層)、対象建物への影響が考えられる周辺建物領域 (側方 $1 \sim 2B$, 風上約 $5B$) で $B/11$ 以上 (各建物に向かい連続的に解像度向上) の解像度を有する格子系である。本モデルは、対象建物の周囲や後流域に関し角柱単体としての要求解像度 (第3章) を満たした上で、さらに各建物の複雑形状を保持するため壁面近傍の解像度を向上させているものの、周辺建物による影響 (建物間の乱流構造の再現性) は考慮されていない。一方、ケース(b)では、対象建物周囲の建物群の影響が適切に反映されるよう、上記の周辺建物領域においてケース(a)の約4倍に相当する $B/45$ 以上の高解像度が確保されている (壁面近傍では約2倍の $B/180$, 境界層要素 $B/470$)。総要素数はケース(a)で約3500万、ケース(b)で約7200万である。計算における Re 数は 8.8×10^4 ($U_H=9.5\text{m/s}$, $B=0.14\text{m}$, $\nu=1.5 \times 10^{-5}$) であり、実験 (8×10^4) と概ね同等である。計算の無次元時間刻みは $\Delta t \cdot U/B=0.007$ であり、計算開始から定常状態に達した後、無次元時間 $t \cdot U/B=136 \sim 1360$ の範囲でサンプリングを行った (総計算ステップ数は20万)。



case (a)



case (b)

図 6.6 風向1の計算格子

(2) 格子解像度による計算結果への影響

格子解像度による計算結果への影響として、図 6.7 に実大高さ 100m 相当 ($0.56H$) の水平断面における瞬間渦度分布を示す。同図より、風上側高層建物 A の後流構造が対象建物の接近流に影響していることがわかるが、特に高解像度のケース(b)では、その渦構造がより細かく解像されている様子が確認できる。

対象建物の風圧分布性状に関して両ケースを比較したものを図 6.8 に示す。同図は、高さ $0.8H$ および $0.37H$ における平均外圧係数 C_p および変動外圧係数 C_p' の水平分布を示したものであり、別途実施された風洞実験³⁾による結果を併せて示している。ここで、計算値の外圧係数に関しては、当該高さにおける変動圧力を、代表高さにおける流入変動風の平均風速を用いた速度圧で基準化し算出している。平均外圧係数 C_p 変動外圧係数 C_p' ともにケース(a)(b)の計算結果は概ね実験値と対応しているが、高さ $0.8H$ における西面（対象建物側面に相当）の変動外圧係数 C_p' については計算ケースによる差が顕在化しており、高解像度のケース(b)でその予測精度が改善されていることが確認できる。低解像度のケース(a)では、南西端部から剥離した直後の領域に大きい変動外圧のピークが出現しているが、実験値では当該領域の変動は抑えられており、ケース(b)でも同様の傾向で実験値が再現されている。

一般に建物風上面では、接近流の影響を直接受けて風圧分布が決定づけられる。風上領域における渦構造の分解能が異なっている（図 6.7）にもかかわらず、対象建物南面の外圧係数分布について計算ケースによる差が生じなかった理由としては、同面に直接作用する接近流特性によるものと推測される。図 6.9 は、対象建物の中心から、風上側に $2B$ および $1B$ の座標における平均風速および変動風速の高さ方向分布を示している。対象建物風上面に対しては、流入した境界層乱流に風上側の低層建物群および高層建物の影響が付加された接近流が作用するが、その接近流プロファイルに関して各ケースによる差がほとんどみられないことが同図から確認でき、風上面における圧力変動が影響を受けなかったためと考えられる。

一方、高さ $0.8H$ の西面では計算ケースにより変動外圧係数に差がみられ、特にその分布形状が大きく異なっていることから、圧力分布を特徴づける流れ場に差が生じている可能性が高い。当該部位では、低解像度のケース(a)は風上端部近傍で圧力変動を過大評価し、実験値やケース(b)とは異なるピークを形成している。変動外圧係数に関する剥離直後のピーク発生に関しては、 $0.37H$ では実験値・計算値ともに同様の傾向がみられる。その要因としては、西側の隣接高層建物 B（建物高さ $0.65H$ ）によって剥離せん断層の可動範囲が狭められるとともに壁面側に拘束されていることが考えられる。高さ $0.8H$ は建物 B より若干高い位置であるため、せん断層の挙動が解放され端部のピークは低減することが想定されるものの、ケース(a)は空間解像度の不足から明瞭な渦構造を維持し、当該高さにおいても低い部位の傾向が残存しているものと推測される。図 6.10 は、高さ $0.8H$ 西面の風上側端部における外圧係数の時刻歴波形の一部を、図 6.11 はパワースペクトルを示している。

ケース(a)は、(b)に比べ長周期成分の卓越した圧力変動であることが両図から確認できる。当該高さにおける瞬間渦度分布（図 6.12）からも、微細な渦構造を伴ったせん断層を再現しているケース(b)に比べ、(a)はより低い部位（図 6.7）にも類似した大きいスケールの渦を放出しており、剥離直後における長周期の強い圧力変動を生じさせているものと推測される。

以上より本モデルでは、対象建物に直接作用する接近流構造について格子解像度の影響はみられないものの、外圧分布を決定づける周囲の流れ場、特に剥離せん断層の挙動に対しては格子解像度の影響を受けることが確認されたため、周辺建物を含めた十分に広い範囲で高い解像度を確保する必要があることが示された。

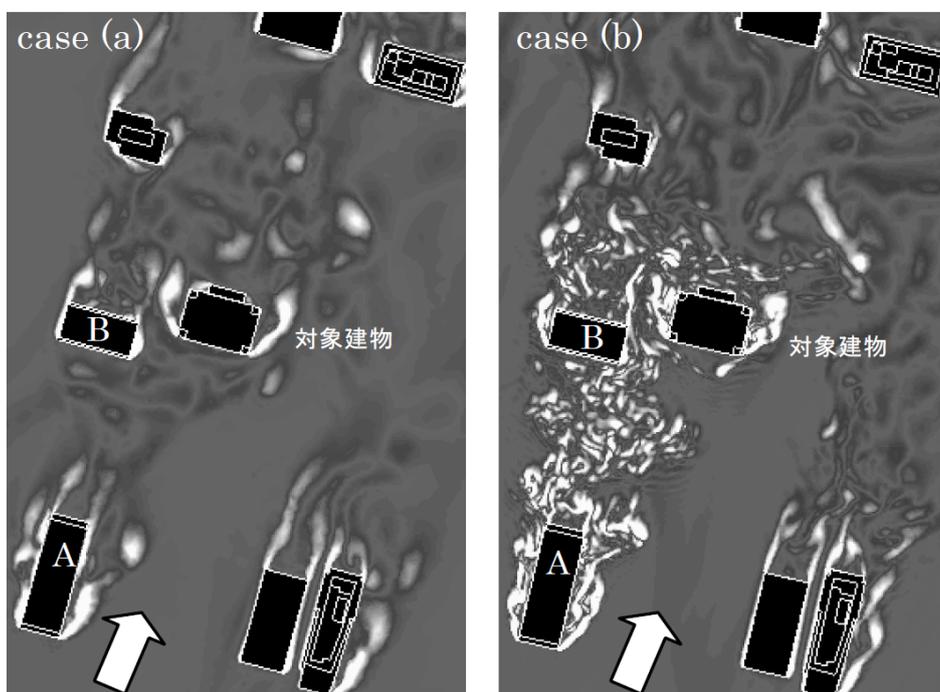


図 6.7 瞬間渦度分布

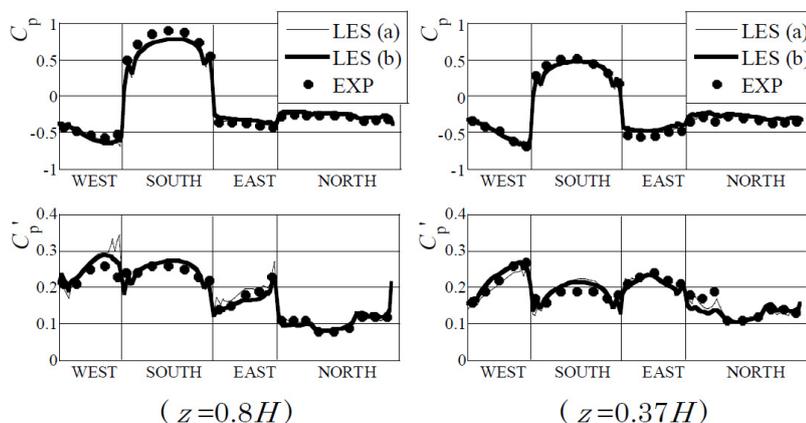


図 6.8 風圧係数の水平分布

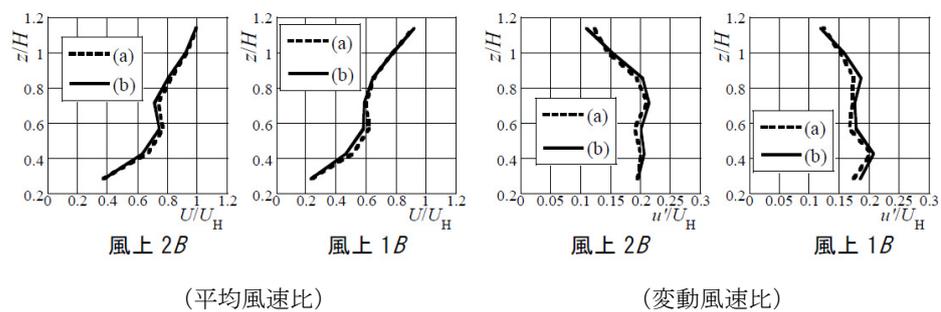


図 6.9 接近流プロファイル

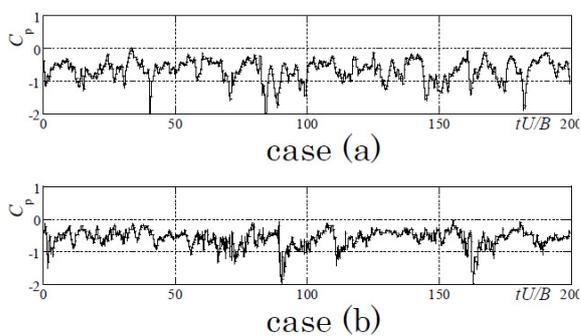


図 6.10 外圧係数の時刻歴波形 (西面端部, 0.8H)

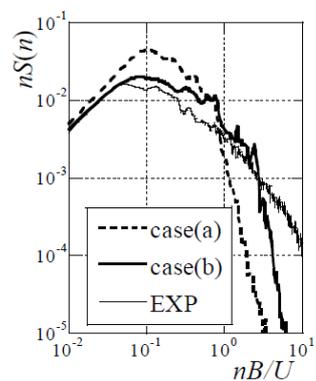


図 6.11 外圧係数のパワースペクトル

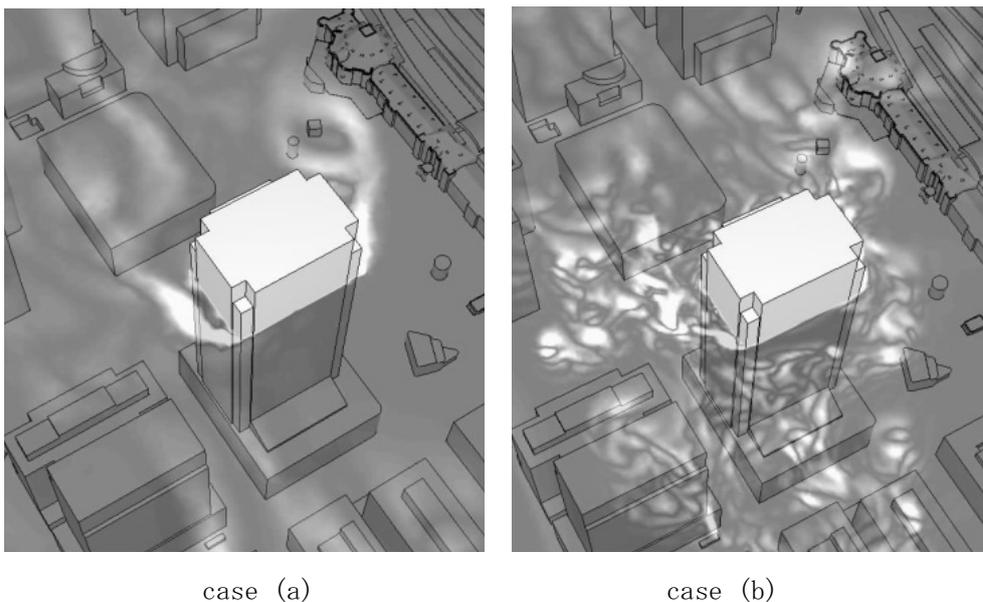


図 6.12 瞬間渦度分布

6-4-3 風向2を対象とした計算

(1) 計算格子

風向2を対象とする計算モデルの構築にあたっては、前項の知見に基づき周辺建物の影響を適切に再現できるよう配慮する。特に本風向では、風上側高層建物 C,D からの渦の離脱に伴い非定常性の強い後流構造が対象建物に直接作用することが考えられるため、それを精度よく再現できるよう周辺建物領域（側方 $0.5\sim 1B$ 、風上約 $5.5B$ ）に $B/45$ 以上の高解像度を確保する（図6.13）。

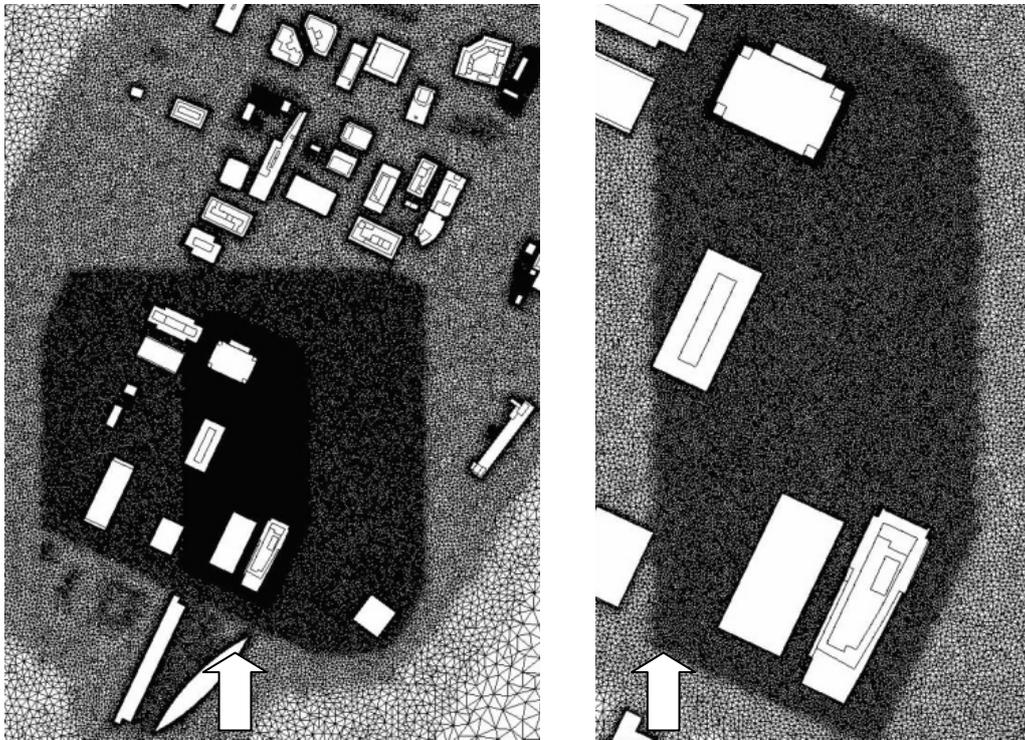


図 6.13 風向2の計算格子

(2) 計算結果

風向2の計算結果として、瞬間渦度分布を図6.14に示す。同図より、風上側の高層建物CおよびDの後流構造が対象建物に直接影響をおよぼしている様子が確認できる。

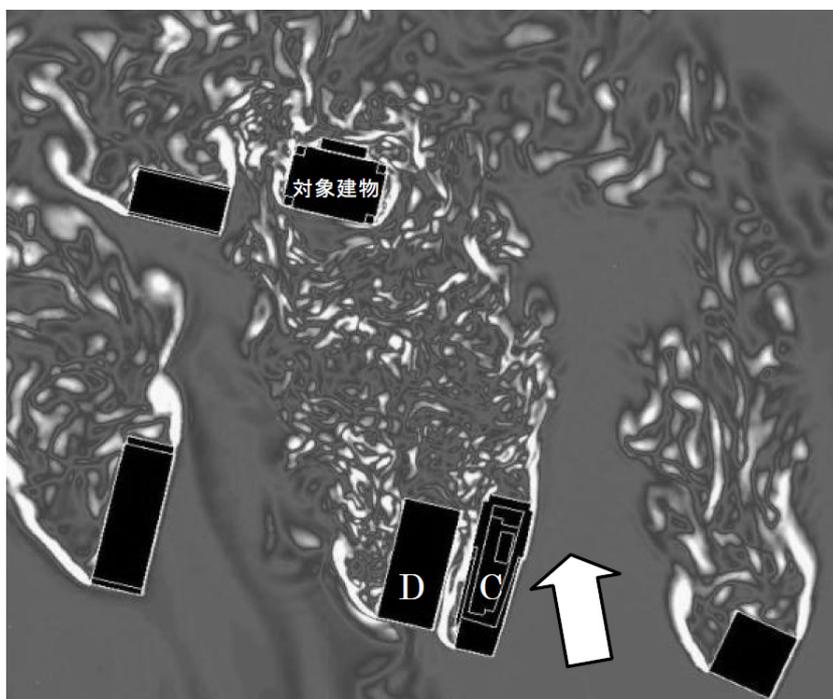


図 6.14 瞬間渦度分布

6-4-4 各風向ケースの計算結果および実験値との比較

風向1および風向2の各ケースに関し、対象建物の各外圧係数(平均値 C_p , 変動値 C_p' , 正圧側ピーク値 C_{p_max} および負圧側ピーク値 C_{p_min})の水平分布について計算値と実験値とを比較したものを図6.15に示す。風向1に対する計算モデルとしてはケース(b)を採用する(C_p および C_p' は再掲)。

各外圧係数値は、実験と同様に、変動風圧波形に対して実大0.35秒相当の移動平均を施し、実大10分相当の波形ごとに各種外圧係数を求めてアンサンブル平均化したものである。アンサンブル平均回数は、実験10回に対し計算3回である。

同図より、各ケースとも実験値と計算値は全体的に良く対応していることが確認できる。定量的には差が生じている部位もみられるが、市街地モデルの複雑さに起因する形状再現精度や現象のばらつき、また圧力場に関する非定常性の強さ η を考慮すれば概ね良好な精度で変動圧力場が捉えられているものと判断できる。特に、風向2においては、高さ $z=0.91H$ の南東隅角部において顕著に絶対値の大きいピーク負圧が発生する点が特徴的であり、実験値-4.02に対して計算値-3.96と良好な精度で再現されている。

以上より、実市街地における高層建物に対し、周辺高層建物が間接的に影響するケース(風向1)および直接的に影響するケース(風向2)ともに外圧分布が精度よく再現されることが確認され、実市街地・実建物モデルに対して本手法による風荷重評価の妥当性が示された。

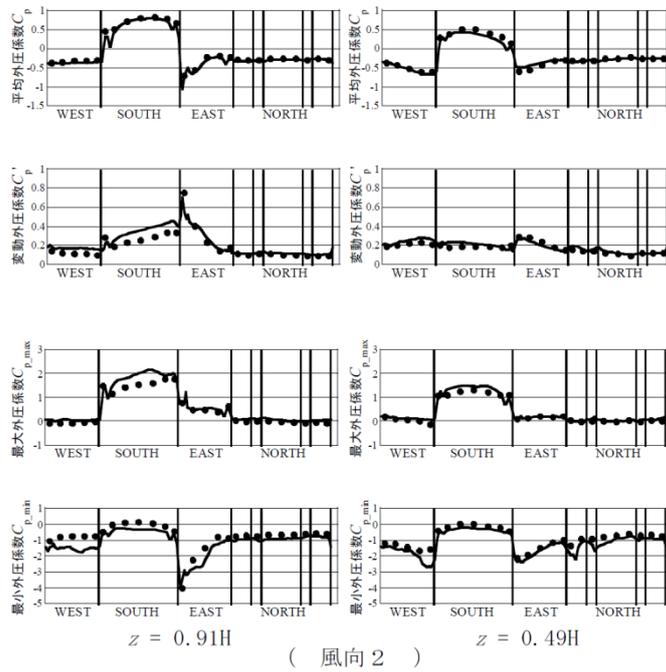
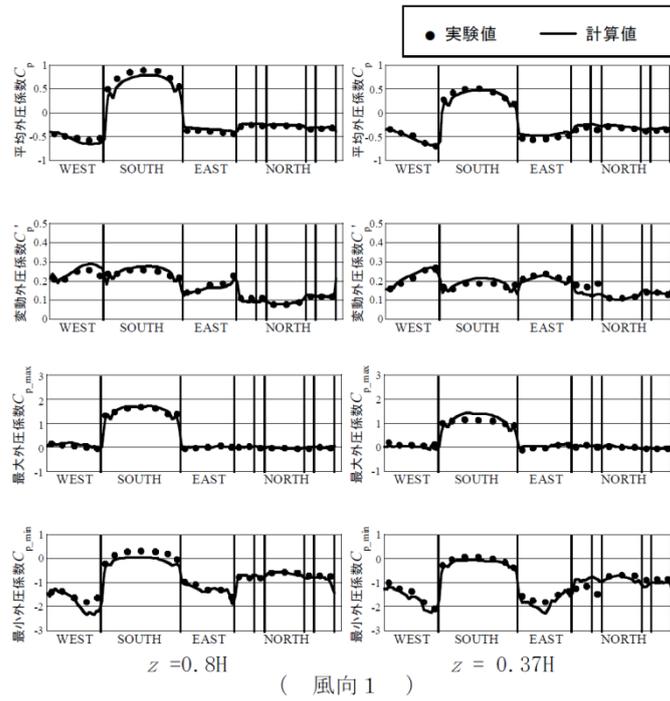


図 6.15 外圧係数の水平分布

6-4-5 風向2におけるピーク負圧発生に関する考察

対象建物壁面における外圧分布が周囲の乱流構造から特徴づけられることを考慮すると、本計算結果は、周辺市街地の影響も含めて対象建物まわりの非定常流れを十分に再現していると判断される。本節では、風向2の計算において対象建物の隅角部で発生したピーク負圧に着目する。本ケースで出現したピーク外圧係数の値は、各種規基準に示される値(-3.0)を上回ることから、耐風設計上重要視すべき事象であると考えられる。ここでは、本ケースを対象として、周囲の流れ場および圧力場の可視化に基づきその発生メカニズムを考察する。

(1) 角柱2棟のケースとの類似性およびピーク負圧発生位置

風向2のケースは、以下の各項目において第4章(高層建物モデル2棟)^{6),7)}に示された条件および結果と共通することから、角柱2棟のケース(風上角柱の影響により風下角柱の隅角部におけるピーク負圧が増加する事例)との類似性が確認される。

- ・対象建物と風上側高層建物(本ケースCおよびDに相当)とが相対的に斜めの位置関係にある。
- ・対象建物の壁面正対方向から25°の風向角においてピーク負圧の増加現象が発生する。
- ・当該風向では、対象建物に対し風上側高層建物の後流が直接作用する。
- ・対象建物(風下建物)側面隅角部で-4を超える強いピーク負圧が発生する。

第4章では、アスペクト比4の3次元角柱2棟を対象とし、風洞実験で計測された風下建物隅角部の強いピーク負圧発生が本計算手法により再現されるとともに、風上側高層建物からの剥離せん断層が当該部位に作用することが可視化によって確認され、圧力分布・渦度分布からその発生メカニズムが考察されている。強いピーク負圧の発生位置と風上建物および風向に関する平面的な位置関係は、第4章と本モデルで高い類似性がみられるが、ピーク負圧の発生高さについては、第4章では角柱側面上端部であったのに対し、本モデルでは若干低い部位に相当する(本モデルの側面上端部では約-1.8程度)。ここで、対象建物の外形をみると、対象建物の上端部付近は約B/10の隅欠形状となっている。ピーク負圧の発生高さ以下では微小な2段隅欠であり、外形としては概ね角柱形状であるといえる。以上より、本ケースのように高さに応じて隅角部形状が変化する場合、ピーク負圧の発生位置としては建物上端部でなく直角の隅角部形状を有する最上層であることが推察される。

(2) 条件付き平均流れ場の可視化に基づく考察

対象建物の矩形平面部最上層で発生したピーク負圧について、条件付き平均流れ場を求める。サンプリング条件はピーク負圧発生点における外圧係数の瞬間値で-3.76以下とした（負圧側ピーク外圧係数-3.96の95%に相当する）。図 6.16 に、当該部位の外圧係数の10分間波形（1サンプル）およびサンプリングレベルを示す。同図より、強いピーク負圧は間欠的に生じていることがわかる。条件に一致する瞬間流れ場のみを抽出・平均化することにより、当該現象に関与する流れ場をより明瞭に検証することが可能となる。ここでは、条件付き平均流れ場の可視化に基づいて当該部位のピーク負圧に関する発生機構を調べる。

図 6.17 は、ピーク負圧の発生高さ（ $z=0.91H$ ）の水平断面における条件付き平均流れ場を可視化したものである。風上側の高層建物からの剥離せん断層が対象建物隅角部に向かって伸びている様子が見える。この時、対象建物隅角部に着目すると（図 6.18）側面隅角部において局所的な剥離・再付着に伴う微細な渦構造が現れており、ピーク負圧発生位置に相当することから当該現象に関与する渦構造であると考えられる。

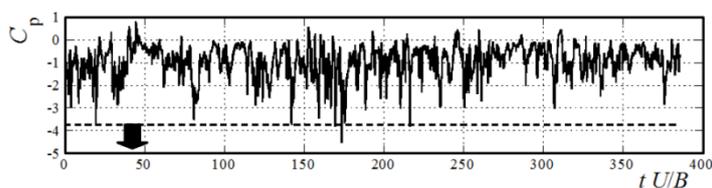


図 6.16 外圧係数時刻歴およびサンプリングレベル

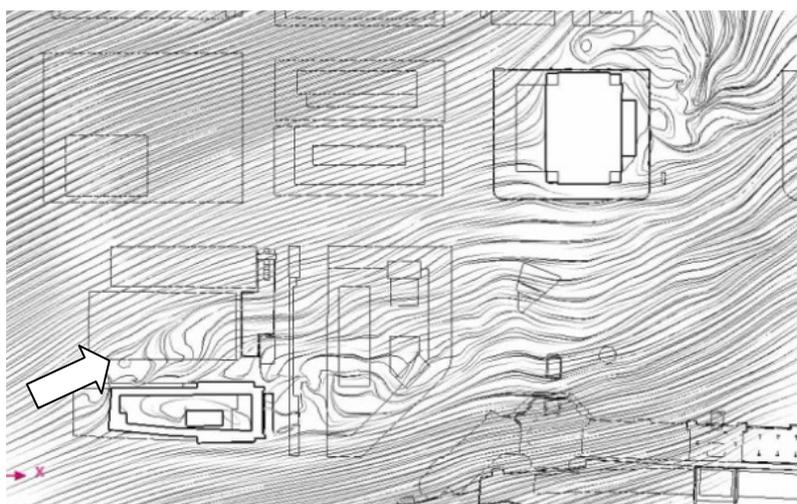


図 6.17 条件付き平均流れ場

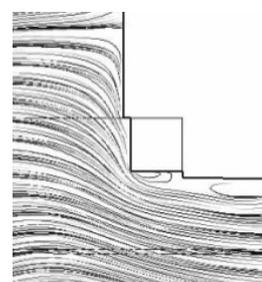


図 6.18 隅角部の渦構造

同計算結果に基づいて対象建物まわりの圧力場を調べる。図 6. 19 は対象建物表面における外圧分布であり、矩形平面部最上層近傍に発生する負圧領域がきわめて局所的な分布を有することが確認できる。図 6. 20 は外圧係数が-1.0, -2.0, -3.0 に相当する圧力等値面を示している。対象建物東面において、強い負圧領域は矩形平面部の上端を起点として空間的に分布する様子が確認され、円錐渦が形成されていることがわかる。小野ら⁸⁾は、3次元角柱（単体）を対象として、グランシングアングル（正対風向からわずかな角度を有する風向、同文献では15度）で角柱上端部に円錐渦構造が発生することを報告している。しかしながら、その際のピーク負圧の絶対値は-2.0~-2.5程度であり、本ケースや角柱2棟のケースと比べて負圧レベルが顕著に異なることを考慮すると、風上側高層建物の影響を受ける場合に特有の事象が介在することが推測される。

ピーク負圧の発生高さ（ $z=0.91H$ ）における渦度（鉛直軸成分）分布を図 6. 21 に示す。対象建物東面隅角部の円錐渦発生位置における渦度場（白：正值）に対し、逆回転成分の渦度場（黒：負値）が接している様子が確認でき、この負値を有する渦度場は風上高層建物Cの隅角部からの剥離流れに起因していることが本図から確認される。強いピーク負圧の発生は、当該部位の円錐渦が強められることに起因するものと想定されることから、風上高層建物からの剥離流れによる渦度場（円錐渦に対し逆回転成分）の作用によって円錐渦の循環が強められることが要因として推察される。

以上、本ケースで発生する局所的なピーク負圧の発生現象について、第4章の角柱2棟のケースとの類似性を示すとともに、風上建物からの剥離流れと対象建物隅角部の円錐渦の関連性に基づきその発生メカニズムを考察した。重要な点として、角柱2棟のシンプルなモデルで発生する局所的なピーク負圧現象が実市街地のような複雑モデルにおいても同様のメカニズムで発生すること（図 6. 22）、また本手法を用いることでピーク負圧を再現できるだけでなくその発生機構も明らかにできることが示された。

最後に、当該現象に関する対象建物と風上建物群との関係性について考察する。本ケースでは、高さの異なる2棟の高層建物（C, D）が風上建物として関与している。図 6. 23 は、条件付き平均流れ場に基づく流線図である。同図より、風上建物群からの剥離流れは、2棟で構成される建物外形に起因して複雑な乱流構造を有していることがわかる。対象建物隅角部のピーク負圧発生位置に着目すると、高層建物Cからの剥離流線が当該部位に作用していることが確認されるが、この剥離せん断層の挙動は風上側の高層建物群（CおよびD）によって特徴づけられていると考えられる。したがって、風荷重評価を目的とするLES計算モデルを構築する上では、周辺建物のうち特に直接的な影響をおよぼすことが予想される高層建物については形状を精度よく再現するとともに、対象建物との間の空間において解像度・質ともに十分な格子を与える必要がある。

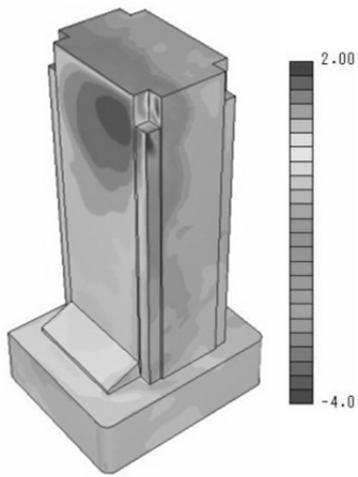


図 6.19 外圧係数の面分布

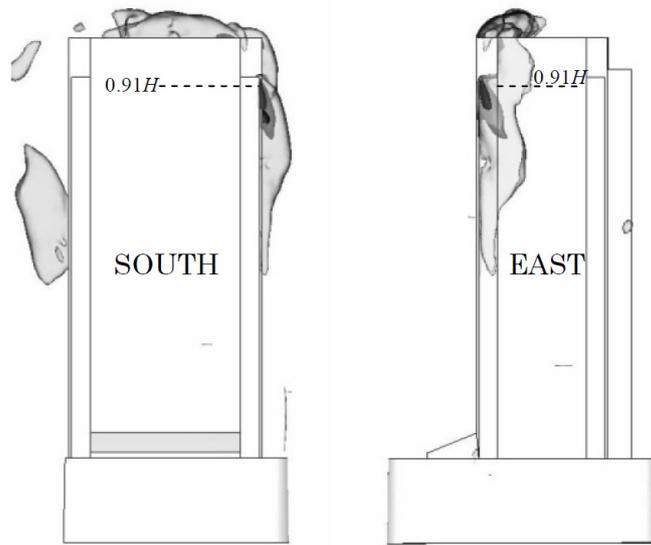


図 6.20 負圧等値面

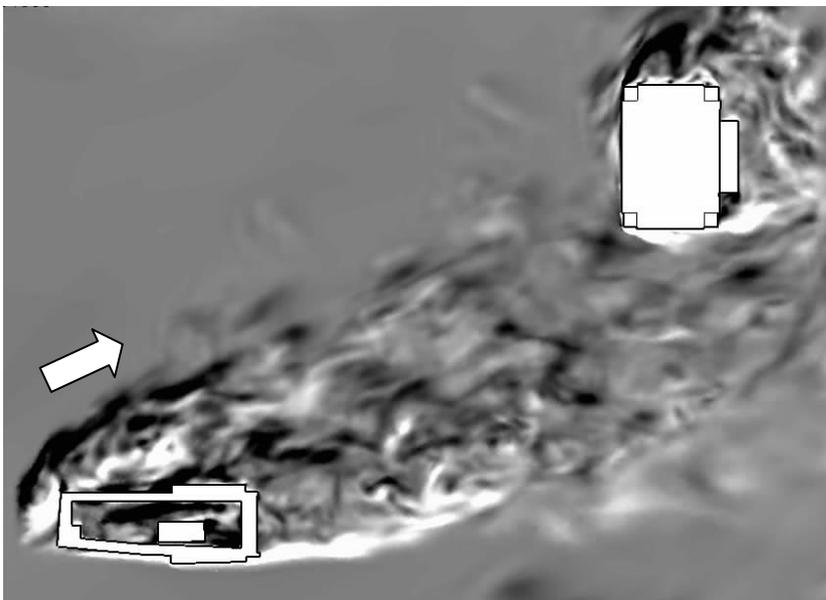
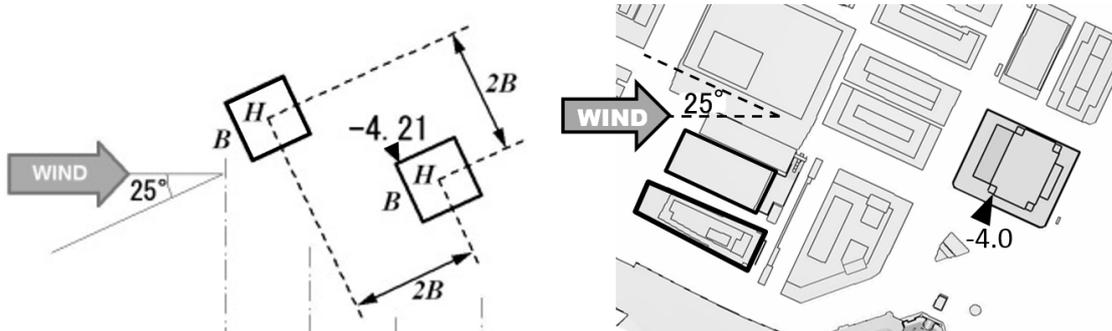


図 6.21 渦度の水平分布



(角柱 2 棟の事例)

(実市街地の事例)

図 6.22 ピーク負圧発生に関する建物配置および風向角の類似性

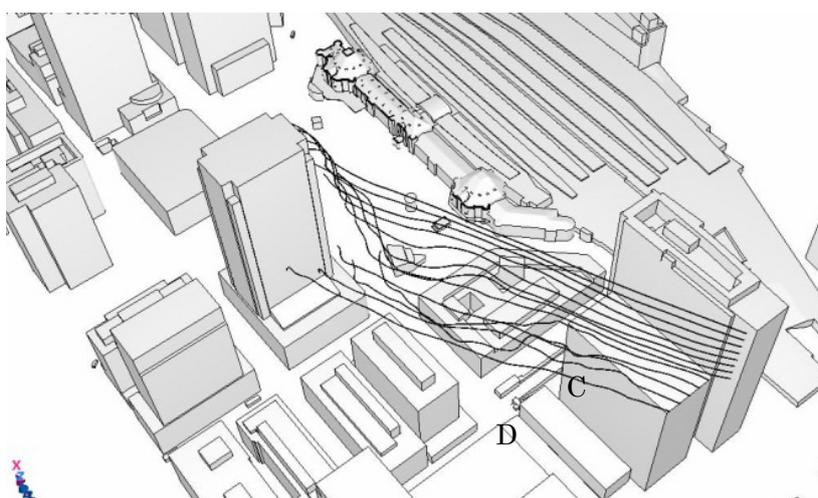


図 6.23 風上建物からの流線

6-5 第6章結論

実市街地における高層建物モデルを対象としてテトラ非構造格子系 LES を実施した。得られた結論を以下に示す。

- 1) テトラ非構造格子系に基づく本手法は、LES 計算モデルに求められる形状再現性および格子配置に関する条件を十分に満たすことができる。特に実市街地のような複雑なモデル形態に対しては、対象建物の風圧分布を決定づける周囲の乱流構造、すなわち周辺街区の影響を受けた接近流や剥離せん断層の挙動を適切に捉えることが重要であり、風向と建物配置に応じて空間的に十分な格子解像度分布を与えることで変動圧力場を精度よく予測可能であることが確認された。
- 2) 風向 SSW（風向 1）を対象とし、格子解像度の異なる 2 ケースについて対象建物の外圧分布を求めた。対象建物の接近流プロファイルは格子解像度による差がみられないことから、風上面の外圧分布についてはその影響が現れなかった。一方、側面の変動外圧係数分布に関しては高解像度モデルによる予測精度の改善がみられたことから、剥離せん断層の挙動を精度よく捉えるためには剥離せん断層の厚さを分解し得る解像度が空間的に必要であることが示された。実市街地モデルに対する要求解像度としては、建物単体時の解像度に加え、対象建物から周辺の高層建物に至る範囲においては高い格子解像度を確保しなければならない。
- 3) 対象建物壁面正対風向から 25° の風向角を有するケース（風向 2）について、風向 1 の格子解像度に準拠するとともに、風上側高層建物からの渦の離脱を伴う後流構造を再現できるよう計算モデルを構築し、対象建物の外圧分布を求めた。計算結果は実験値とよく対応し、特に側面隅角部で発生する強いピーク負圧についても精度よく再現されることから、本計算法の妥当性が示された。
- 4) 風向 2 の計算ケースにおける隅角部の強いピーク負圧について、条件付き平均場の可視化に基づきその発生メカニズムを考察した。当該現象は、矩形平面部の上端に形成される円錐渦によるものであることが確認されるとともに、風上高層建物 C に起因する剥離せん断層の影響によってその循環が促進され、負圧が強められているものと推察される。当該現象は第 4 章で示した事例と類似するものであり、角柱 2 棟のシンプルなモデルで発生するピーク負圧現象が実市街地のような複雑モデルにおいても同様のメカニズムで発生することが明らかとなった。
- 5) 本手法に基づくテトラ非構造格子系 LES は、設計用風荷重評価に適用可能であるとともに、流れの可視化に基づいて特殊な圧力現象を考察できるため、今後の耐風設計に有効に活用できる。

参考文献

- 1) Tamura, T. , Okuda, Y. , Kishida, T. , Nakamura, O. , Miyashita, K. , Katsumura, A. and Tamari, M. : LES for aerodynamic characteristics of a tall building inside a dense city district , CWE2010 , pp1-8 , 2010.05
- 2) Tamura, T. and Nozu, T. : Introduction of unstructured-grid system on LES for wind pressure estimation on a building in cities , BBAA7 , pp1-8 , 2012.09
- 3) 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 , 第 22 回風工学シンポジウム , pp293-298 , 2012.12
- 4) Nozu, T. , Tamura, T. , Kishida, T. and Katsumura, A. : Mesh-adaptive LES for wind load estimation of tall building in a city , CWE2014 , pp1-8 , 2014.06
- 5) 吉川優 , 田村哲郎 : 非構造格子系 LES による 3 次元角柱の変動風圧評価 , 日本建築学会構造系論文集 , 第 78 巻 , 第 687 号 , pp913-921 , 2013.05
- 6) Yoshikawa, M. and Tamura, T. : LES of Fluctuating Pressures on a High-rise Building Influenced by Windward Building , APCWE8 , pp1-10 , 2013.12
- 7) 吉川優 , 田村哲郎 : 風上建物の影響を受ける高層建築物の変動風圧に関する LES , 日本建築学会構造系論文集 , 第 80 巻 , 第 713 号 , pp991-1000 , 2015.07
- 8) 小野佳之 , 田村哲郎 : 三次元角柱側面に発生する局部負圧に関する LES , 日本建築学会構造系論文集 , 第 78 巻 , 第 694 号 , pp2065-2072 , 2013.12

第7章

複雑化する高層建築物および市街地への適用

7-1 緒言

都市機能の更新および土地の高度利用を目的とする市街地再開発では、主に超高層建築物の建設を中心として計画されることから、一部のエリアでは都市の高密度化が進行している。一方、築20年以上経過した高さ100m以上の超高層ビルは国内に150棟以上存在し、今後これらの解体ラッシュが予想される。こうした背景より、都市部においては今後、高層建築物の新築・解体によって市街地の形態が年々変化することが予想され、個々の建築物は様々な周辺状況の変化に対して柔軟に適応してゆかなければならない。

市街地の形態変化による影響に関し、都市防災の観点から考慮すべき点として風況の変化が挙げられる。特に高密度市街地に建つ高層建築物に着目すると、その設計用風荷重を評価する際に、当該建物のみならず周囲の建物群によって形成された乱流構造が支配的となる場合がある。したがって、市街地形態の経年変化は対象建物まわりの変動圧力場を大きく変化させる可能性が高く、設計時の一時点での市街地状況から評価された風荷重は当該建物の供用期間を通して必ずしも安全性を担保できるものではない。

また、高密度市街地を構成する個々の高層建物形状に着目すると、近年では、旧来の矩形柱形状でなく複雑な外形を有するものが増加している。それらの多くは、意匠性や環境性能の向上を目的とした特殊な外装材が採用された建築物である。高層建築物の耐風設計において、平面・立面形状に寄与する建物全体の外形が設計用風荷重に影響をおよぼすことは一般に知られているが、今後は、外装材スケール、すなわち建物表面における部材寸法レベルの複雑形状についても適切な変動風圧評価を行う必要がある。さらにそうした複雑表面形状を有する建築物が高密度市街地に存在する場合には、市街地規模の複雑さと併せて変動圧力場を予測する必要があり、寸法オーダーとして 10^{-1}m （外装部材）～ 10^2m （市街地）の広い範囲で乱流構造を再現しなければならない。

耐風設計における風荷重評価に際しては、風洞実験による風圧・風力計測がこれまで一般に実施されてきた。風洞実験では計測対象の建物模型の周囲に実際の市街地模型が設置され、周辺状況による影響が適切に反映されたデータを得ることが可能であるが、当該エリアにおける周辺建物群の将来的な変化の可能性まで実験条件に考慮されることはない。周辺状況の将来的な変化に対しては、周辺なし（対象建物のみ）の実験値も併せて考慮することで補う事例もあるが、当該条件は必ずしも安全側評価となるものではない。また、建設後の周辺状況の変化に応じて再実験による安全性の確認が行われることもほとんど無い。これは主に、現状の耐風設計体系や風洞実験コストに起因するものであると推察される。

また、建物自体の形状が複雑化する傾向については、風洞実験の技術的課題として顕在化してくるものと予想される。特に、外壁面に付設される部材（ルーバー、庇、目隠パネル、看板等）については、シンプルな建物モデルに基づく研究事例は一部あるものの、実

際の風洞実験においては模型化および十分な風圧測定が困難であり（第5章参照）、設計用風荷重評価は多くの場合十分でない。

これに対し、LESによる設計用風荷重評価では、既往の風洞実験にみられる技術的課題を解決できることが、前章までの知見により明らかになっている。

ここで、実務的観点から、実建物を対象としたLESに関する既往の研究事例をみると、周辺状況に関する複雑さと、対象建物自体の外形に複雑さを有する場合とに大別される。

周辺状況に着目した実市街地モデルの事例としては、Tamura, Nozu, Kishidaら^{1)~4)}が、実市街地モデルのLESにより実建物の風圧分布や周辺建物群による乱流特性について報告している他、フックら⁵⁾は中層密集市街地を対象としてLESを実施しており、市街地再現範囲によって接近流特性が異なること、風洞実験を再現したモデルでは風圧変動について実験値と計算値の対応が良いことを示している。

一方、建物自体の複雑さについては、Phucら⁶⁾がセットバック型の建物モデルを対象としたLESにより、局所的なピーク負圧を再現するとともに、その要因となる渦構造を可視化している。小野ら⁷⁾はバルコニーを模擬した複雑表面形状を有する高層建物モデルを用いてLESを行い、実験との比較を行うとともに流れ場に対するバルコニーの影響を考察している。また榎木ら⁸⁾は、ベランダ手摺壁形状まで再現した中層建物モデルを対象として多風向の解析を行い、複雑形状モデルにおいても風洞実験と同等の実務展開の可能性を示した。

本章では、既往の風荷重評価法の技術的課題や制約を超え、より高度なCFD耐風設計法の確立を目的として、複雑化する建築物・都市を対象として非構造格子系LESの適用性を示す。計算対象は、市街地再開発により著しく形態が変化している実市街地である。同エリアは、前章において本計算法の適用性を検証したものであるが、同モデルは約10年前の市街地状況を再現したものであり、その後現在に至るまでに多くの高層建物が建設され、都市の高密度化が進行している。ここではまず、前章で対象とした高層建物モデル（建物Mとする）に着目し、現況を再現した計算結果と比較することにより、周辺市街地の経年変化がその風圧分布に与える影響について調べる。

また、その際に新たに建設された周辺高層建物の中には、形状の複雑さ故に風洞実験の適用が困難なものが複数存在する。ここでは、建物ボリュームに対し独立壁面を有する高層建物（建物Jとする）および鉛直フィンが付設された高層建物（建物Oとする）に着目する。両建物ともに、十分な模型再現および圧力測定が困難であることから、風洞実験による風荷重評価では不十分であると考えられる。本章では、建物Jにおいて確認された特殊な風圧分布に関して流れ場の可視化に基づき考察を加える他、建物Oの鉛直フィンに作用する変動風力について既往の知見と比較・検討を行う。さらに、建物Oのように微細な寸法の外装付属部材を有する場合には、風洞実験モデルでは一般に部材形状そのものが省略されるが、本手法に基づくLESでは計算モデルとして形状再現が可能である。ここでは、鉛直フィンによる複雑表面形状の再現性が一般外壁面の圧力変動におよぼす影響についても明らかにする。

7-2 市街地形態の経年変化による高層建物の風圧分布特性への影響

第6章で扱った実市街地モデルは代表的なオフィス街であり、旧来より高層建物が多く建てられてきた高密度市街地である。近年ではさらに市街地再開発が進行しており、同エリア内においても10年間で10棟以上の超高層建築物が建てられている。図7.1は、前章のモデル(2004年時)と、現在(2014年時)の市街地状況の変化を示している。同図より、前章で対象建物として風圧分布を検証した建物Mの周囲においても同規模の高層建物が数多く建てられていることが確認できる。前章の結果より、建物Mの風圧分布を特徴づける周囲の乱流構造に対して周辺(特に風上側)高層建物が影響をおよぼすことがわかっていため、同図に示す市街地状況の経年変化は、建物Mの風圧分布を大きく変化させることが想定される。ここでは、2014年時モデルを対象としてLESを実施し、建物Mの風圧分布特性に対して周辺市街地の経年変化がおよぼす影響について調べる。

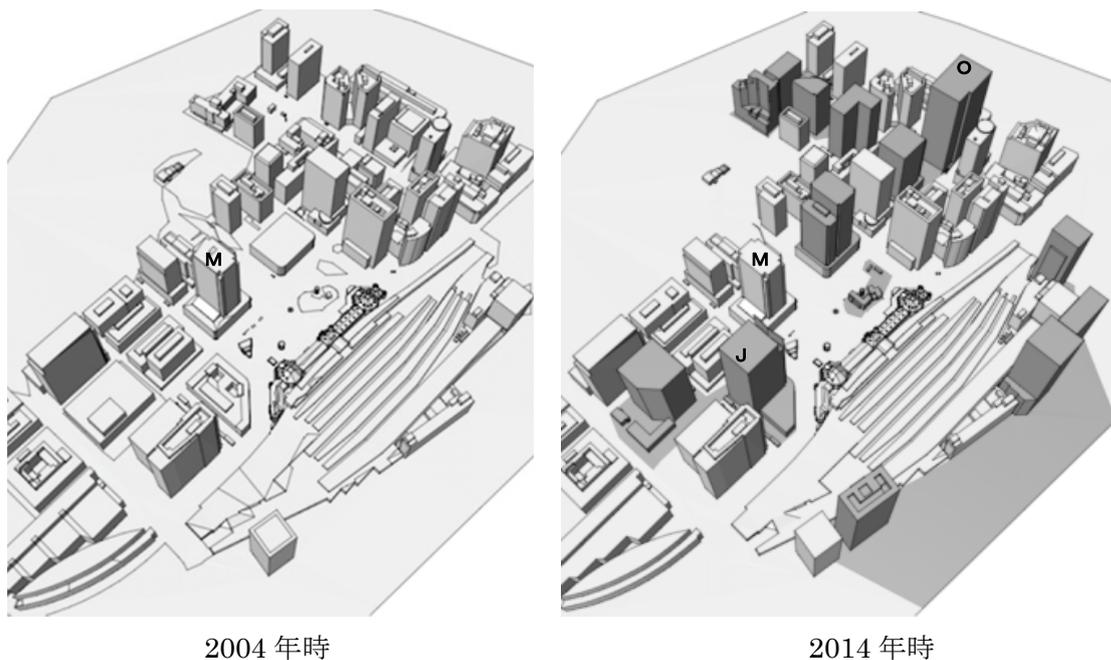


図7.1 市街地形態の経年変化

計算格子の作成法は前章同様であり，風上建物を含む周辺領域は B/45，建物M壁面近傍では B/180 の解像度が確保されている。計算風向については，2004 年時の計算において端部で強いピーク負圧が発生した風向 2（建物Mの南面生体風向から 25°）とする。要素数は約 8300 万である。

図 7.2 は，2014 年時モデルの計算結果に基づく瞬間渦度分布である。当該風向において，新たに建てられた高層建物 J は建物Mの風上側に位置していることがわかる。前章 2004 年時では，さらに風上側に位置していた高層建物 C からの剥離せん断層が建物Mの隅角部に作用し強いピーク負圧を形成していたが，本ケースでは高層建物 C の後流域すなわち当該せん断層の挙動範囲に高層建物 J が建てられたことにより，建物M周囲の乱流構造は大きく変化していることが予想され，2004 年時とは異なる風圧分布が形成されるものと推察される。

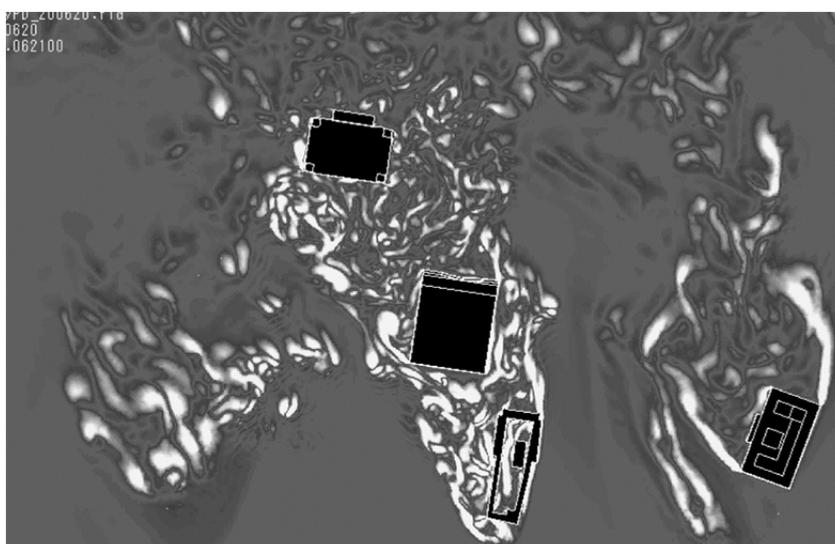
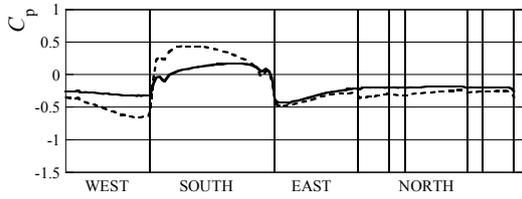


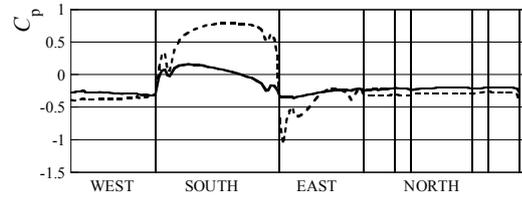
図 7.2 瞬間渦度分布

2014 年時モデルにおける建物Mの風圧分布について，前章の 2004 年時モデルの結果と併せて図 7.3 に示す。図は，建物Mの高さ 89m および 164m における風圧係数（平均風圧係数，変動風圧係数，正圧側ピーク風圧係数，負圧側ピーク風圧係数）の水平分布である。同じ建物でありながら両モデルの結果は全く異なる分布形状を示しており，周辺市街地の経年変化によってもたらされる乱流構造の差は，建物周囲の圧力場を大きく変化させることがわかる。全体的な傾向として，風圧係数の絶対値は 2014 年時モデルの方が小さくなっている。特に，高さ 164m 南東隅角部において 2004 年時モデルで発生していた強いピーク負圧は，2014 年時モデルでは発生しておらず，耐風設計上重要な風圧現象にも大きく影響をおよぼすことが確認された。以上より，周辺市街地の経年変化は建物周囲の圧力場を大きく変化させるため，設計用風荷重評価において適切に考慮すべき条件であることが示された。

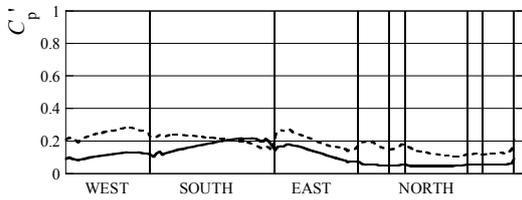
----- 2004 年時モデル ——— 2014 年時モデル



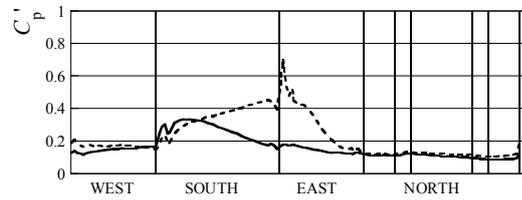
平均風圧係数



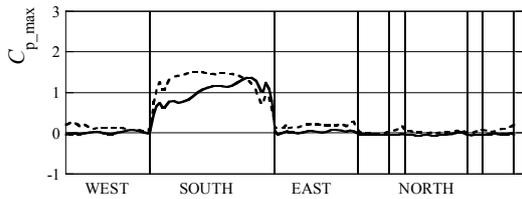
平均風圧係数



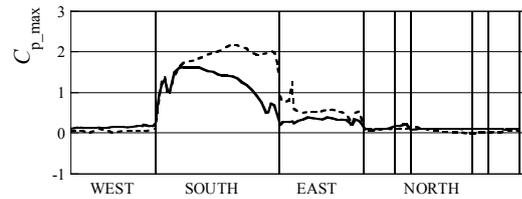
変動風圧係数



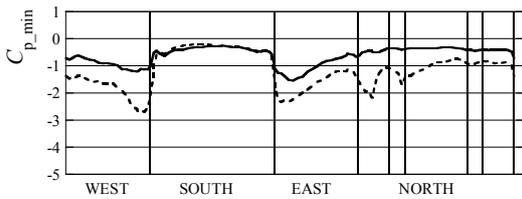
変動風圧係数



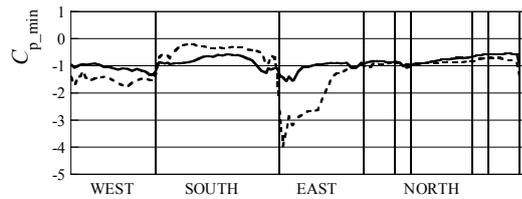
正圧側ピーク風圧係数



正圧側ピーク風圧係数



負圧側ピーク風圧係数



負圧側ピーク風圧係数

(高さ 89m)

(高さ 164m)

図 7.3 建物Mにおける風圧係数分布の経年変化

7-3 複雑形状を有する高層建物への適用

近年建てられる超高層建築物には、これまでにない外形を有するものが多く存在する。それらの多くは、外観の意匠性あるいは環境性能の向上を目的として特殊な外装形式を採用している。特に外装付属部材によって建物形状が複雑化しているものについては、その寸法に起因して模型実験が困難であるため、今後の耐風設計において適切に風荷重評価を行うためにはLESが有効となる。ここでは、当該エリアにおいてこの10年間で新築された実建物のうち、特徴的な複雑外形を有する高層建物2件について計算を実施し、それら形状に起因する特殊な風圧場について検討する。

7-3-1 高層部に独立壁を有する高層建物

(1) 建物形状および計算モデル

建物Jの外観を図7.4に示す。本建物は、建物Mの南側に近接して建てられた超高層建築物（高さ200m）であり、前節において建物Mの風圧分布に影響をおよぼすことが確認された建物のひとつである。同図より、主要壁面（北面）の外形がわずかにV字型の凹形状となっていることがわかるが、基準階平面形状としては概ね矩形（60m×80m）であり、風荷重への影響は小さいものと考えられる。一方、上層階に着目すると、外壁ラインがガラスの独立壁となって最高高さに達していることが確認できる。板状物体はその表裏において正圧・負圧の同時作用により大きい風力が作用すること、当該部位の規模が大きいこと、高層部であるため強風の影響を受けやすいこと等を考慮すると、耐風設計において適切に風荷重評価を行う必要がある。しかしながら、既往の風洞実験法では、限られた風圧測定点を離散的に配置しなければならないことから当該部材の表裏で十分な解像度で計測を実施できないことが危惧される。また板状部材においては導圧チューブを内部に格納することができないため、圧力タップやチューブが模型外形として露出してしまうことから、それら形状が周囲の流れ場に影響をおよぼすことが考えられる。ここでは、2014年時モデルの計算結果から当該建物の変動風圧をサンプリングし、その風圧分布特性を調べる。単一の計算モデルにおいて変動風圧の計測対象を任意に選定できることもCFDの特長のひとつである。建物Jのモデル形状を図7.5に示す。

計算格子は前項と同様のものを使用する（図7.6、図7.7）。建物J近傍に関しては、壁面近傍だけでなく、建物と独立壁との間の空間においても十分な格子解像度となるよう配慮した（図7.8）。



図 7.4 建物 J 外観

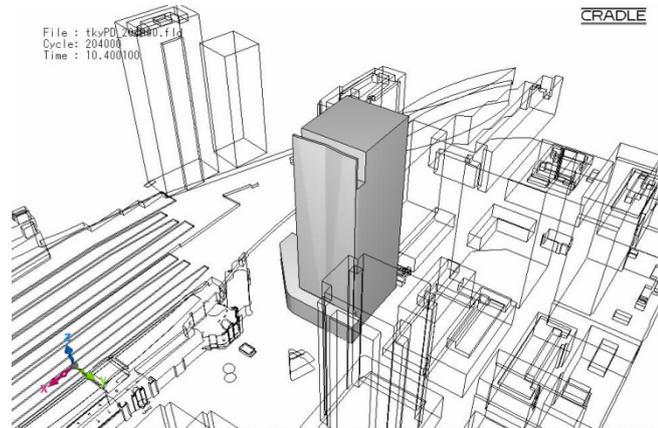


図 7.5 計算モデル形状

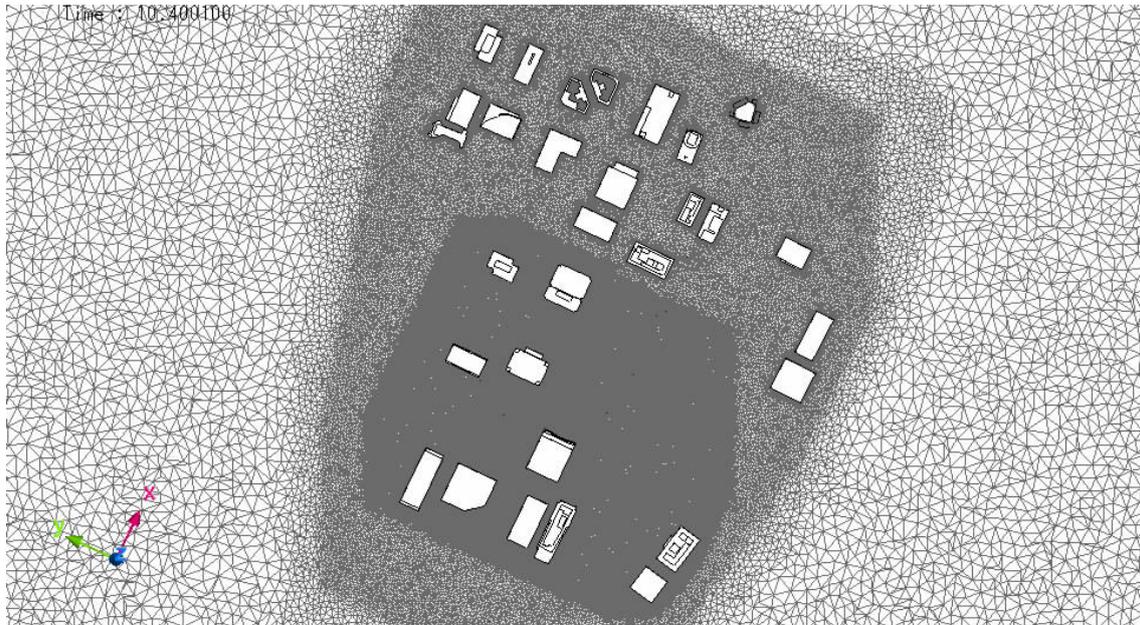


図 7.6 計算格子 (市街地全体)

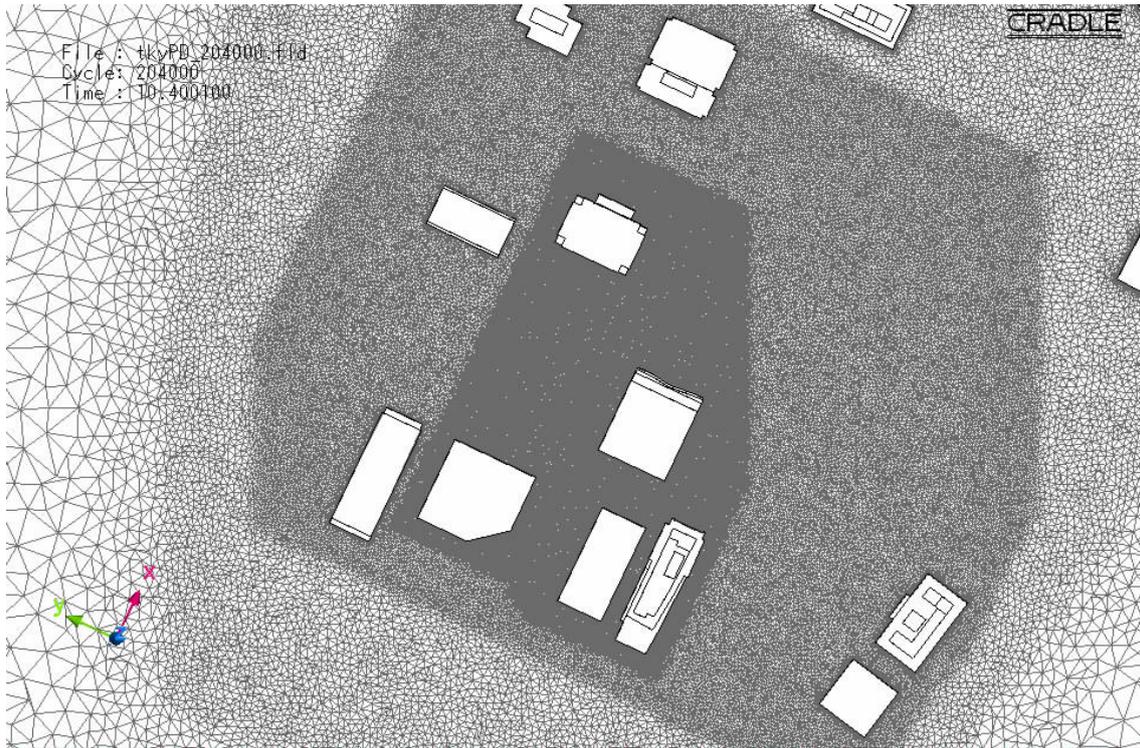


図 7.7 計算格子 (建物 J 周囲)

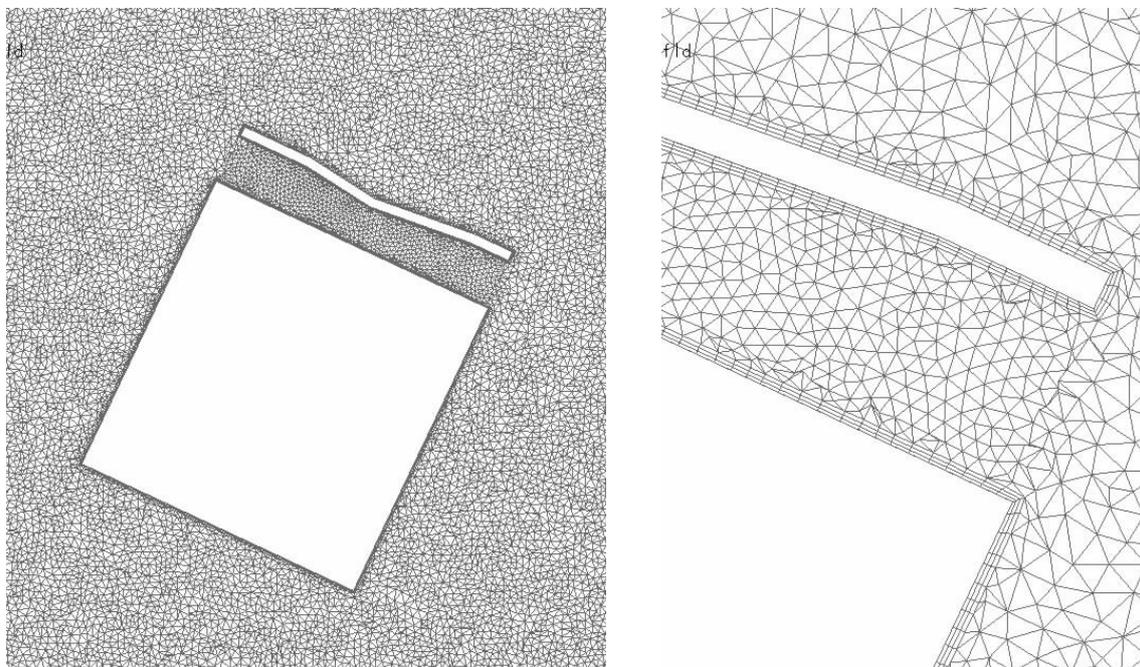


図 7.8 計算格子 (建物 J 近傍)

(2) 計算結果

高さ 190m, 160m, 115, における風圧係数分布を図 7.9 に示す。高さ 190m においては、ガラス独立壁の裏面にも外圧が作用するため、建物部と分けて水平分布を示している。各高さの建物外周における風圧分布については、風向に対して風上面に正圧が、側面・背面に負圧が分布しており、概ね一般の知見から類推できるものである。高さ 160m 以上では、E 面風上側に比較的強いピーク負圧が現れており、前章で示した建物Mの事例に類似した機構が発生している可能性もあるが、その値は概ね単体角柱の値と同程度であり、特別な配慮を要するものではないと考えられる。

一方、独立壁部に着目すると、その裏側端部（東側）においてきわめて局所的なピーク正圧が確認される。一般に、建築物の正圧分布は接近流が風上面に作用することで形成されるため、同高さにおける S 面のように風上面全面に渡って広く分布する傾向がある。

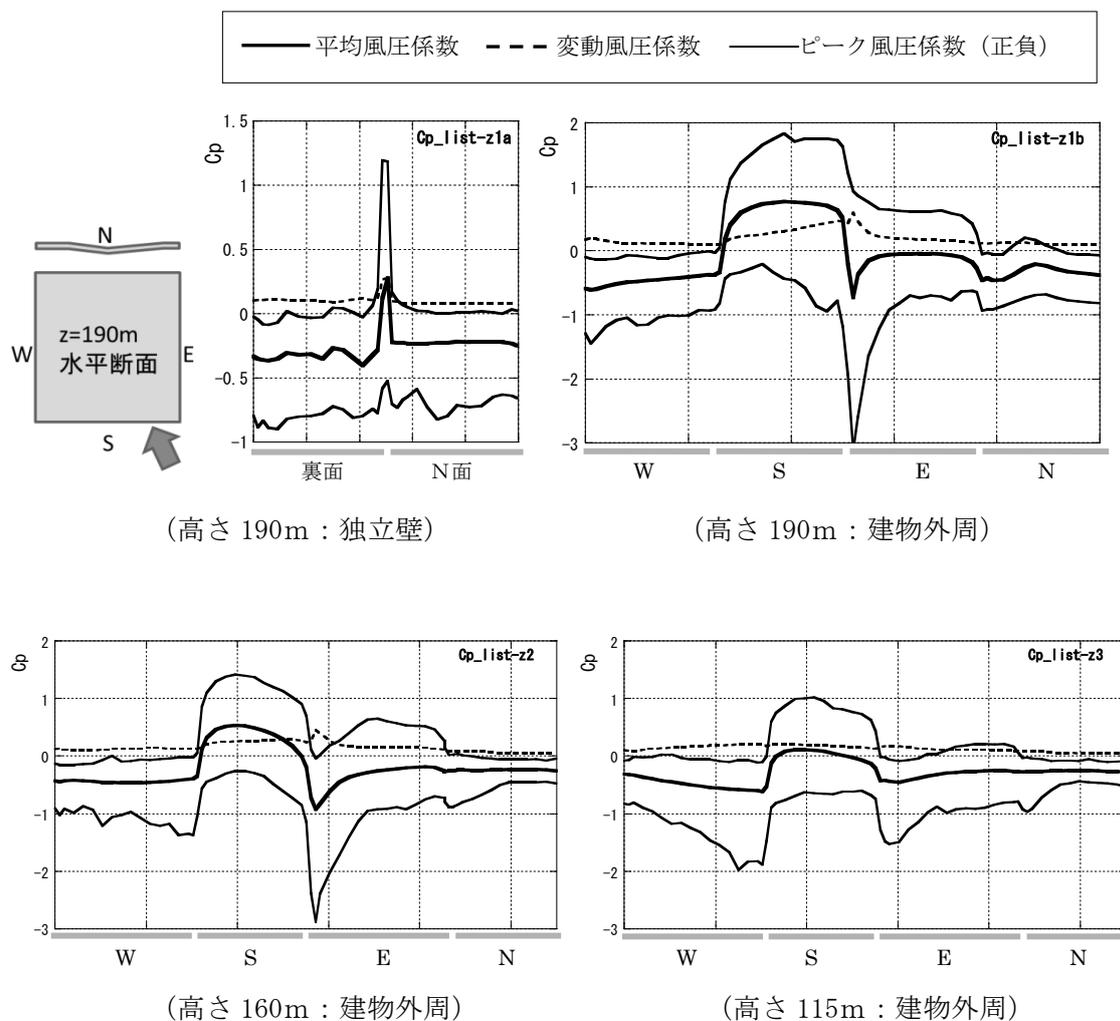


図 7.9 風圧係数の水平分布

当該独立壁は風向に対して風下側に位置するため、局所的に強い正圧部が発生することは一般の知見からは予測できない。また、板状部材において局所的に発生する圧力変動は、前述した通り実験的に計測することが困難である。

(3) 局所正圧に関する考察

ここでは、圧力場および流れ場の可視化に基づいて、独立壁裏面における局所正圧の発生メカニズムを調べる。図 7.10 は壁面における瞬間圧力分布を示している。独立壁裏面端部において、局所的な正圧部（図中：黒）が鉛直方向に分布している様子が確認できる。瞬間流れ場の水平断面を図 7.11 に示す。建物壁面（E 面）上の流れが NE 端部で剥離し、流れの一部が独立壁との間の空間に流入して渦構造を形成していることがわかる。この時、剥離せん断層はその直後の独立壁裏面に衝突する形となることから、当該部位において局所的な正圧場が形成されるものと推測できる。

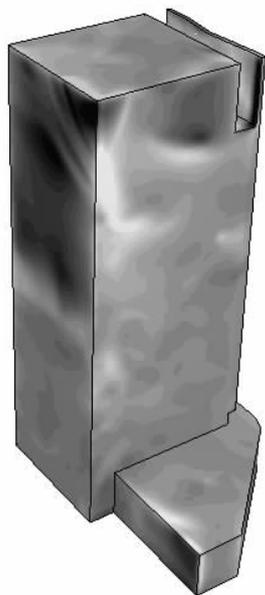


図 7.10 瞬間圧力分布

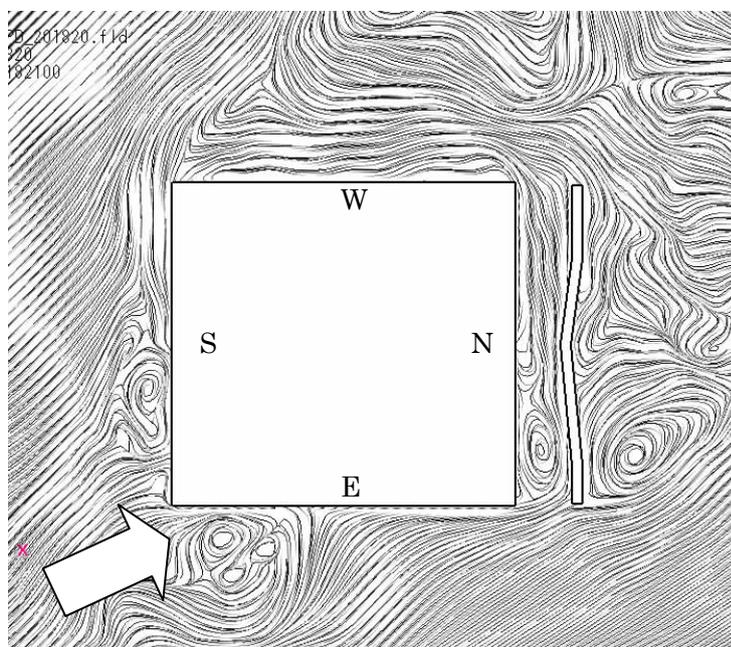


図 7.11 瞬間流れ場

7-3-2 外壁面に鉛直フィンを有する高層建物

(1) 建物形状および計算モデル

建物Oの外観を図 7.12 に示す。本建物は、建物Mや建物Jの北側に位置する高さ 200m の超高層建物であり、48.8m×98.9m の長方形平面を有する矩形柱形状である。ただし、その外壁面全面において、多数の鉛直フィンが配置され、きわめて複雑な表面形状となっている。これら鉛直フィンは、意匠性のみならず、遮光ルーバーとして空調負荷低減に資する環境配慮型外装材として設置されている。各フィンは、90mm×440mm の断面形状を有し、1800mm ピッチで全壁面に設置されている。その総数は 164 点にのぼり、全てが外気に曝されていることから外装材としての耐風性能が要求される。しかしながら、第5章でも述べた通り、これら鉛直フィンは建物自体に比べ相対寸法比がきわめて小さいため、風洞実験においてフィンの設計用風荷重を評価するための圧力計測は不可能である。したがって、これらフィン部材の風荷重評価は実質的に LES でのみ評価可能な対象であると考えられる。なお、当該外装形式は近年では採用事例が多いものの、設計用風荷重に関して一般に参照できる資料はなく、デフォルメされた実験に基づく研究成果や、一般外壁面の値から類推された数値が便宜的に使用されているものと推測される。

ここでは、建物Oに対し、壁面に設置された全ての鉛直フィンを計算モデルとして表現し、フィン表裏の圧力差から求められる変動風力を調べる。計算モデル形状を図 7.13 および図 7.14 に示す。



図 7.12 建物O外観

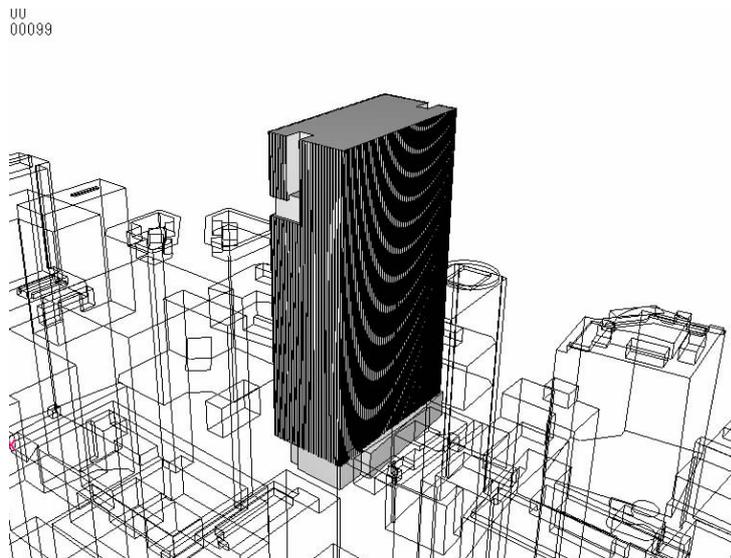


図 7.13 計算モデル形状

フィン形状に関するモデル作成にあたっては、フィン寸法およびフィン配置を完全に再現するものとし、実験で行われるような寸法拡大あるいは形状再現の省略は行わない。計算モデルのフィン拡大図を図 7.15 に示す。同図から確認できる通り、本建物においては隅角部にはフィンは設置されていない。

l.fld

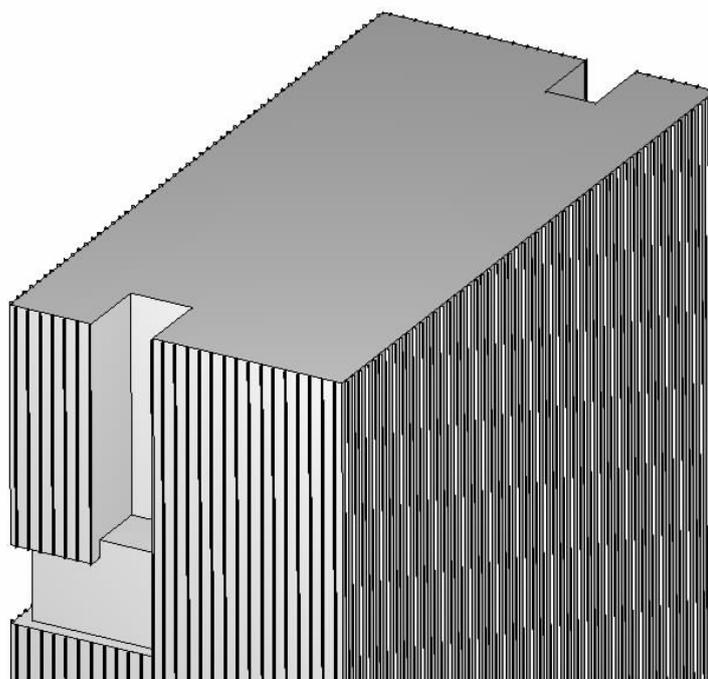


図 7.14 計算モデル形状（建物〇上部）

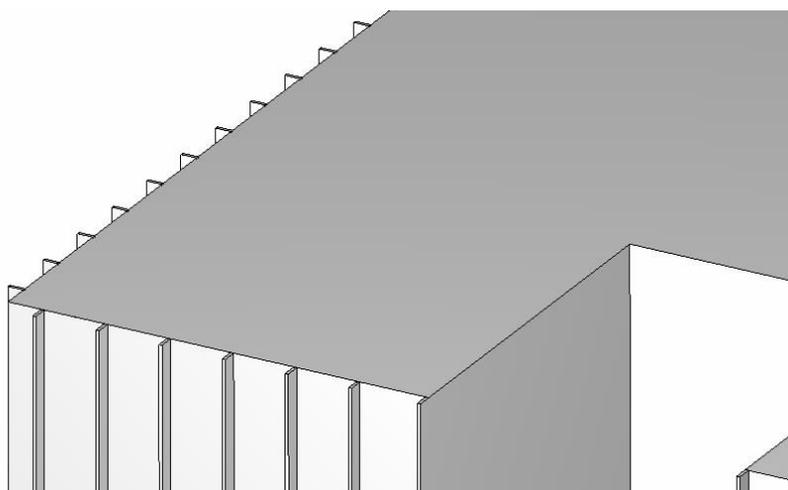


図 7.15 計算モデル形状（フィン部拡大図）

当該建物は、これまで扱った建物Mや建物Jからは北側遠方に位置しているため、計算格子について異なる解像度分布を設定し、計算モデルを再構築する。建物O周辺における計算格子を図7.16に示す。遠方領域から対象建物近傍に向け格子解像度を向上させる手法についてはこれまでに示したモデルと同様であるが、本モデルの場合は対象建物表面に微細なフィン形状を有することから、さらに高い格子解像度が必要となる。建物O近傍の計算格子を図7.17に、フィン近傍の計算格子を図7.18に示す。第5章の知見より、隅角部フィンにおいて大きい風力すなわち圧力差が生じることが確認されているため、本モデルにおいても隅角部フィン近傍において最高解像度となる格子を配置する。ここで、建物代表寸法Bを建物の長辺と短辺の平均とすると、最高解像度は約 $B/1480$ である。これは、前章建物Mの最高解像度と比較すると、約8倍の解像度に相当する。なお、各フィンにも境界層要素としてプリズム要素が挿入されており、その厚さは $B/2950$ （3層）である。



図 7.16 計算格子（建物O周辺）

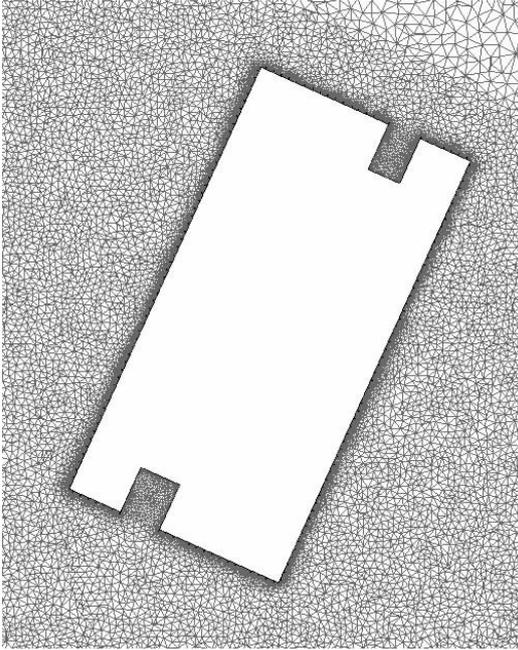


図 7.17 計算格子（建物〇近傍）

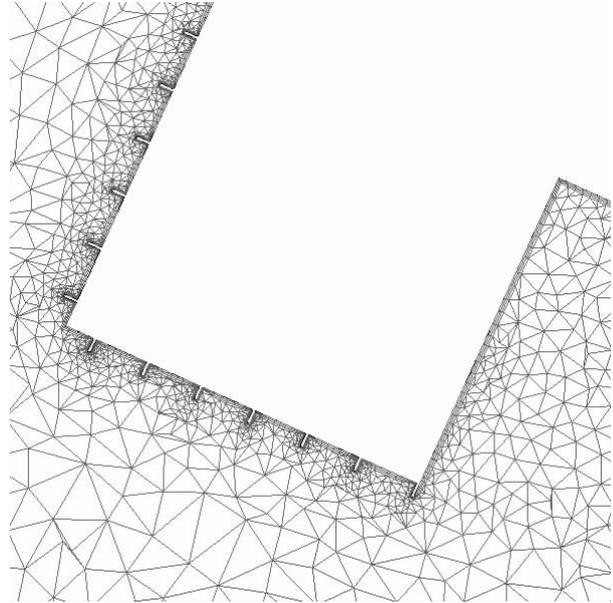


図 7.18 計算格子（隅角部フィン近傍）

(2) 計算結果

計算結果に基づく瞬間流れ場を可視化し、図 7.19 および図 7.20 に示す。ここで各図は、計算結果からベクトルを等間隔で再配置したものである。図 7.19 より、建物周囲の流れ場として、隅角部での剥離や凹部での渦構造が確認できる。

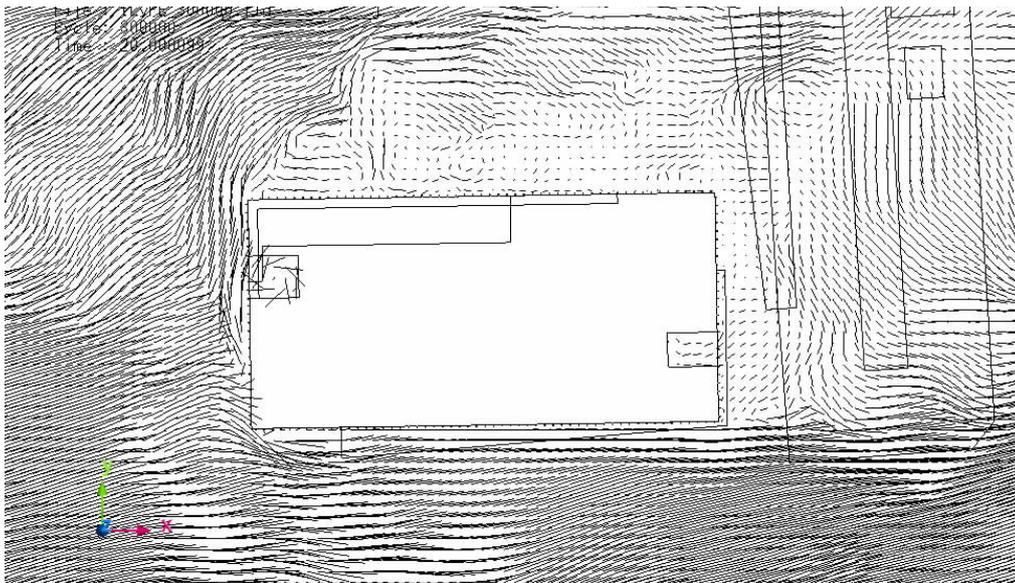


図 7.19 風速ベクトル分布

隅角部を拡大し（図 7.20）フィン近傍の流れに着目すると，建物表面においてフィン間隔に対応した渦構造が現れている。以上より，本計算モデルでは，建物スケールでの大局的な乱流構造とともに外装材スケールの微細な渦構造を解像できていることがわかる。

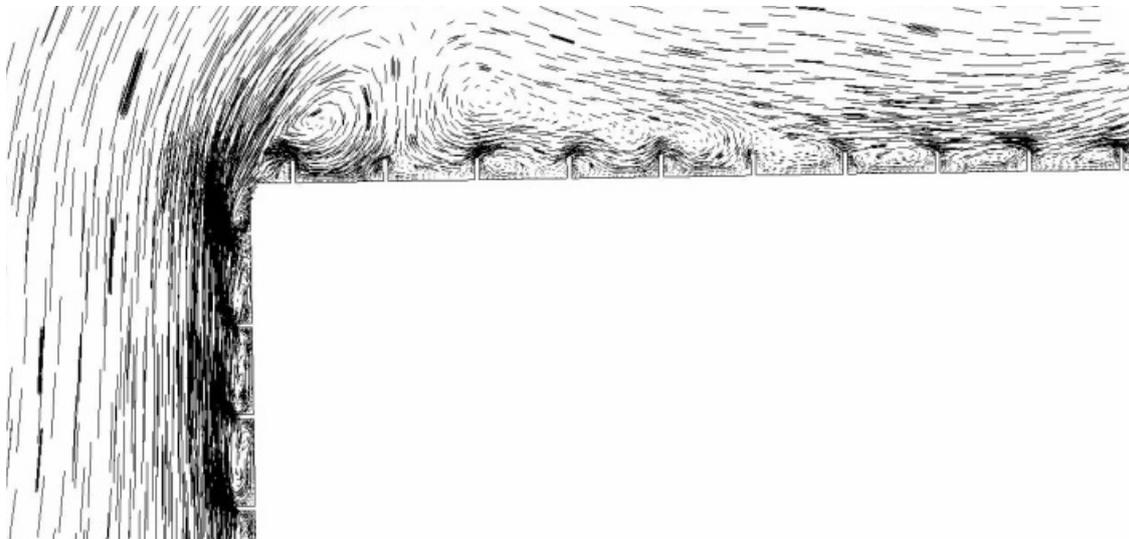


図 7.20 風速ベクトル分布（フィン近傍）

フィン近傍の変動圧力場に基づき，フィンに作用する変動風力を算定する。算定手法は第 5 章と同様とし，表裏の差圧の時刻歴データから風力係数を求める。図 7.21 に，フィンの平均風力係数およびピーク風力係数の水平分布を示す（図中プロットが不連続な領域は，建物形状の凹凸によりフィンが存在していないことを示す）。計算風向に対し風上面（ $x/B=3.4\sim 4$ ）においてその両端部のフィンに作用する風力が大きいことが確認でき，上層部で約 2.5 程度である。これらの結果は，第 5 章（実寸フィンモデル，端部なし，モデル B）の知見にも概ね対応している。傾向の異なる点としては，第 5 章で考察した低層部におけるピーク風力の増加現象が本モデルでは発生していない点が挙げられるが，本モデルでは地上高さまではフィンが設置されていないこと，また風上領域に実市街地が広がっているために第 5 章の単体角柱とは接近流特性が大きく異なっていることが推察される。

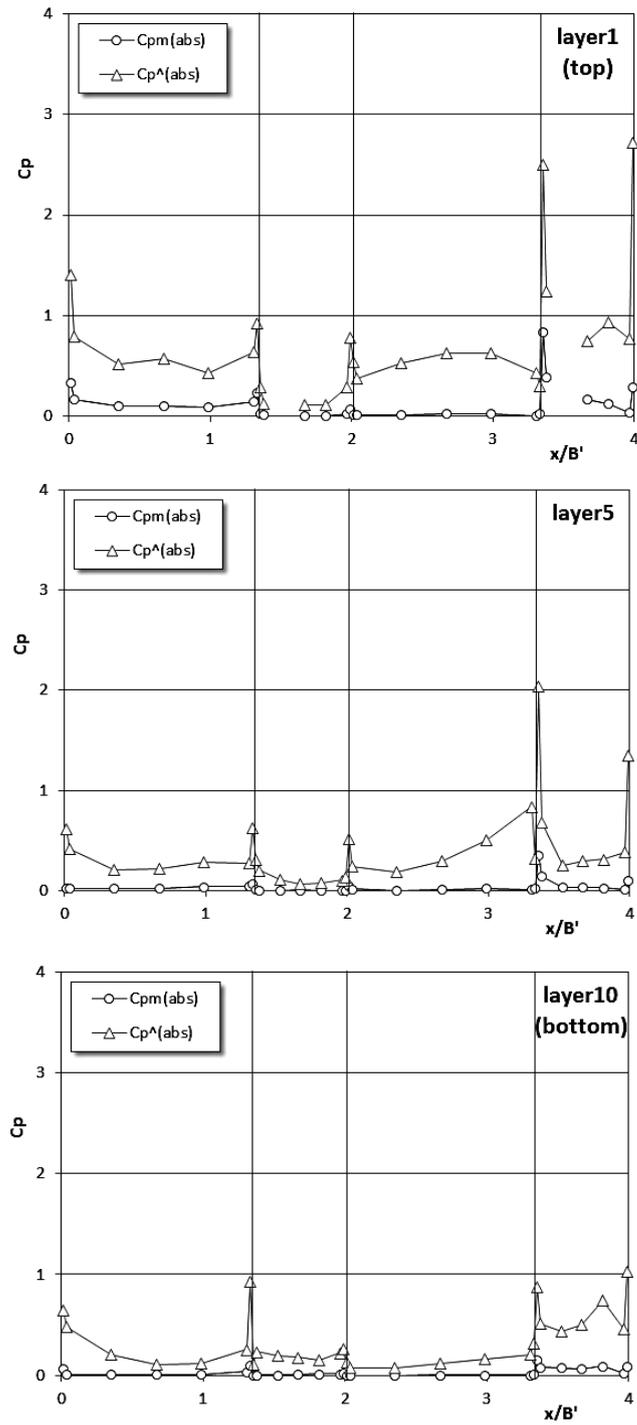


図 7.21 フィンの風力係数に関する水平分布

(3) フィンの形状再現性が風荷重評価におよぼす影響

外壁面に設置される鉛直フィンの設計用風荷重を評価するに際し、第5章からは実寸相当の寸法比（幾何学的相似条件）を満たす必要性と非構造格子系 LES の有効性が示され、本章からは実市街地・実建物モデルの事例に対しその適用性が示された。ここでは、鉛直フィンを実装する建物において、一般外壁面の変動風圧場に着目する。

風洞実験の模型製作、流体計算のモデル作成とともに、建築物の細部形状を構成する部材に関してそれ自体が風荷重評価対象でない場合には、部材そのものを省略あるいは簡略化して表現されることは一般に多く行われている。具体的には、バルコニーの手摺や隔板、ゴンドラレール、屋外階段等が挙げられる。本検討対象のように鉛直フィンを有する建築物についても、窓ガラスやカーテンウォールといった一般外装材の耐風設計のみに重点が置かれると、フィン形状が省略されたモデル（建物外形のみ）で外壁面上の変動外圧が評価される。しかしながら、風荷重評価の非対象部材であっても、その規模・形状・配置によっては近傍の乱流構造に干渉し、結果的に評価対象部材の風荷重に影響をおよぼす可能性がある。

ここでは、建物Oの一般外壁面の変動風圧に対して、鉛直フィンの形状再現性がおよぼす影響について調べる。これまでの知見から、端部フィンの風力が大きい（表裏の圧力差が大きい）ことを考慮すると、その近傍の乱流構造の形成においてフィン形状が主体的に関与していることが予想され、特に隅角部における一般外壁面の風圧変動に対してフィンの有無が影響をおよぼすことが考えられる。以上を踏まえ、計算モデルからフィン形状を削除して各壁面を平面とし、再度計算を実施する。

図 7.22 は隅角部の一般外壁面における風圧係数（平均風圧係数および正圧側・負圧側ピーク風圧係数）の高さ方向分布であり、フィン形状が有るケースと無いケースの計算結果を比較している。各測線は、フィン有りのケースにおいて、各壁面の端部フィンを挟む両側の外壁面上に配置している。フィンの有無による風圧分布の差が最も顕著な点は測線 13 である。フィン有りのケースでは全高さにわたって風圧係数が負圧側に大きくシフトしている。その要因としては、建物スケールでの剥離流れにおいて、その剥離点が変わることが考えられる。フィン無しのケースでは、シンプルな矩形平面であるため、S 面上の流れは建物隅角部（測線 12 と 13 の間）で剥離する。一方フィンが有るケースでは、S 面 W 側端部のフィン先端が剥離点となり（図 7.20 参照）、測線 13 は剥離後の強い負圧領域に含まれるため、大きく圧力低下するものと推察される。風圧レベルは比較的小さいものの、測線 4 においても全高さにわたってピーク負圧が大きくなっており、E 面端部のフィンの有無により同様の現象が発生しているものと考えられる。

以上より、建物表面上の微細な形状の有無は、一般外壁面の風圧変動に対して大きく影響をおよぼす可能性があることが確認された。モデル形状の再現性による風圧変動の差は、当該部位の外装材用風荷重のみならず、建物全体に作用する風力評価にも関与する。した

がって、特に風荷重評価対象の建物モデルに対しては、各外装付属部材が大局的な乱流構造に干渉するか否かを適切に予測した上で表面形状のモデル再現を判断する必要がある。

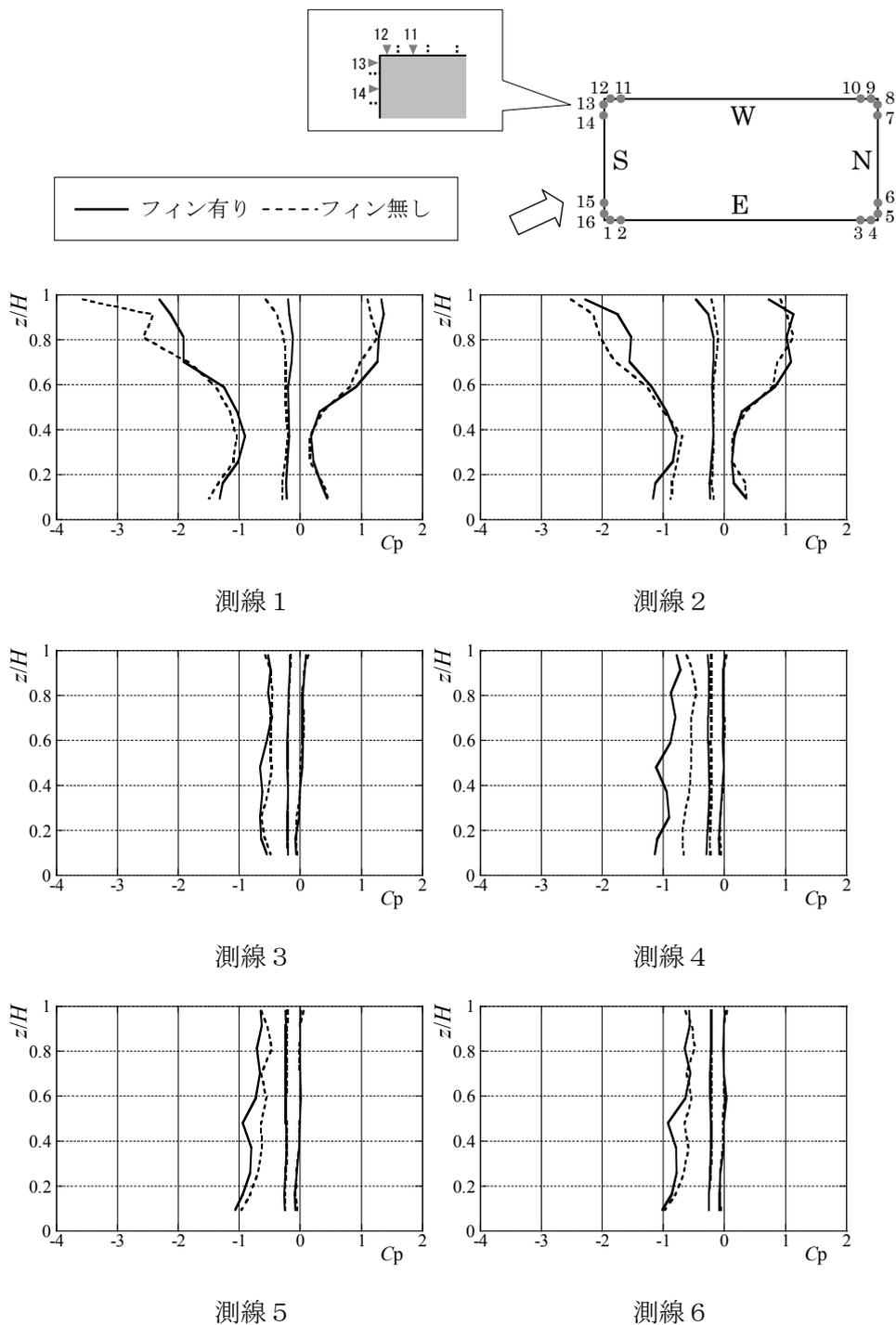


図 7.22 隅角部一般外壁面における風圧係数の高さ方向分布(1)

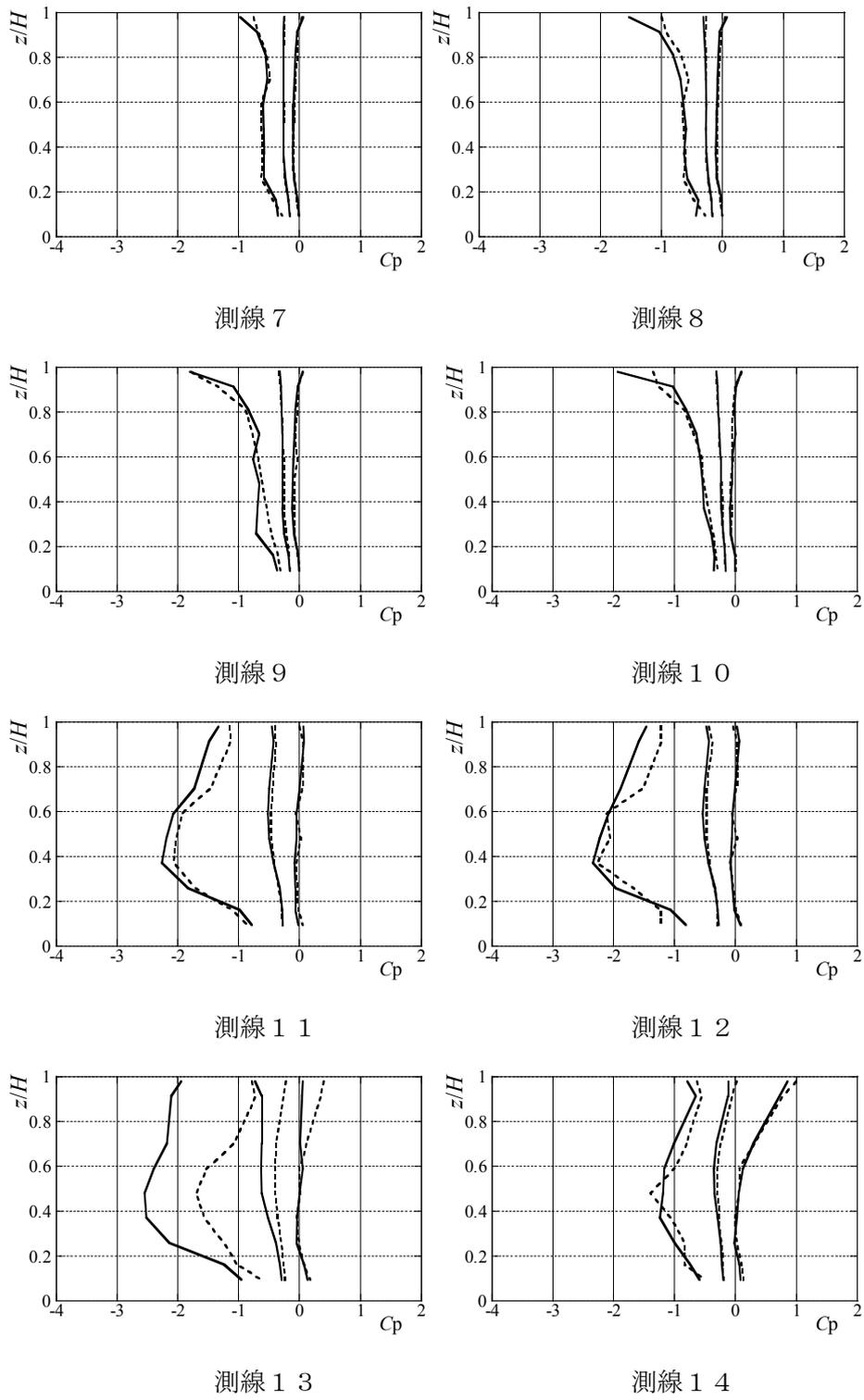


図 7.22 隅角部一般外壁面における風圧係数の高さ方向分布(2)

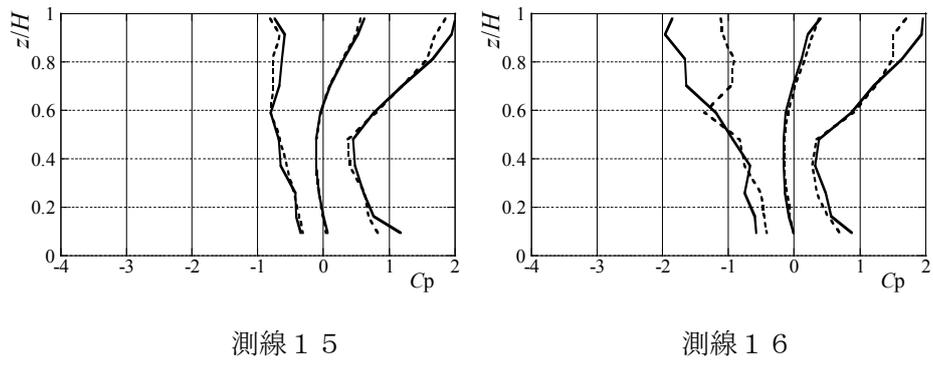


図 7.22 隅角部一般外壁面における風圧係数の高さ方向分布(3)

7-4 第7章結論

複雑化する市街地および建築物を対象とし、非構造格子系 LES を実施した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高密度市街地に建つ高層建物（建物M）を対象とし、周辺市街地の10年間の経年変化が当該建物の風圧分布に与える影響を調べた。2014年時の市街地形状を再現して計算を実施し、前章に示した2004年時モデルの結果と比較したところ、全体的な風圧レベルが低下するとともに、前章で考察した局所的な強いピーク負圧が確認されなくなった。建築物の耐風設計において風荷重評価を行う際には、その周辺において特に高層建物の建設・解体に係る再開発計画に留意し、将来的な風況変化を考慮することが重要である。従来の風洞実験に比べ、流体計算ではモデル形状の変化に対して柔軟に対応できるため、今後の風荷重評価技術として有効に活用してゆくことができる。
- (2) 当該エリアの市街地再開発において実際に建設された高層建物のうち、特殊な外装形式による複雑形状を有する2棟（建物J、建物O）について計算を行い、風圧分布およびそれを特徴づける乱流構造について調べた。実市街地モデルに関する知見（第6章）および複雑形状モデルに関する知見（第5章）に基づいて合理的なモデル構築および計算を実施し、風洞実験では計測が困難な部位の風圧分布や周囲の流れ場を示した。
- (3) 上層部に独立ガラス壁面を有する建物Jの計算結果より、独立壁端部において局所的なピーク正圧の発生が確認された。流れの可視化に基づいてその発生機構を考察したところ、建物隅角部から再剥離した流れが当該部位に直接作用し、局所的な正圧場を形成していることが確認された。
- (4) 外壁面に鉛直フィンを実装する建物Oの計算結果より、各フィン寸法に相当する微細な渦構造まで再現できていることが確認され、フィンに作用する風力係数として第5章（モデルB）の結果に概ね対応していることが確認された。
- (5) 建物壁面上において、外装付属部材による微細な形状の有無は、一般外壁面の風圧変動に対して影響をおよぼす可能性があることが示された。表面形状の再現性による風圧変動の差は、当該部位の外装材用風荷重のみならず、建物全体に作用する風力評価にも関与する可能性があるため、特に風荷重評価対象の建物モデルに対しては、各外装付属部材が大局的な乱流構造（剥離点の位置等）に干渉するか否かを適切に予測した上で形状の再現精度を判断する必要がある。

参考文献

- 1) Tamura, T. , Okuda, Y. , Kishida, T. , Nakamura, O. , Miyashita, K. , Katsumura, A. and Tamari, M. : LES for aerodynamic characteristics of a tall building inside a dense city district , CWE2010 , pp1-8 , 2010.05
- 2) Tamura, T. and Nozu, T. : Introduction of unstructured-grid system on LES for wind pressure estimation on a building in cities , BBAA7 , pp1-8 , 2012.09
- 3) 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 , 第 22 回風工学シンポジウム , pp293-298 , 2012.12
- 4) Nozu, T. , Tamura, T. , Kishida, T. and Katsumura, A. : Mesh-adaptive LES for wind load estimation of tall building in a city , CWE2014 , pp1-8 , 2014.06
- 5) ファム バン フック , 野津剛 , 菊池浩利 , 日比一喜 , 田村幸雄 : LES による実在市街地の風速鉛直分布と建物風圧の検討 , 日本風工学会誌 , 第 40 巻第 2 号 , 2014.05
- 6) Phuc, P. V. , Kikuchi, H. , Hibi, K. and Tamura, Y. : Peak Wind Pressure Distributions on Buildings with a Setback, ICWE13, 2011.7
- 7) 小野佳之, 榎木康太, 田村哲郎 : バルコニーを有する高層建物の風圧特性に関する LES, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013.08
- 8) 榎木康太, 小野佳之 : 非構造格子ソルバによる多風向の LES 解析と検証, 日本風工学会誌, 第 40 巻第 2 号, 2015.04

第 8 章

結論

8-1 本研究で得られた結論

本研究では、非構造格子系 LES による高層建築物の風荷重評価法を確立することを目的とし、解決すべき各種技術的課題に対して適切なモデル構築法を提示するとともに計算精度を検証し、その妥当性を示した。また、耐風設計上重要となる特殊な風圧現象に対して要因となる乱流構造を調べ、その発生メカニズムを明らかにした。

本研究で得られた主な知見を以下に述べる。

第2章では、乱流解析手法を示すとともに、建築物の変動風圧評価のための LES 計算モデルにテトラ非構造格子系を導入する効果およびその生成法を述べた。本研究に用いた格子系は、物体形状の適合性および局所的な空間解像度調整の点で効果的であり、建築物や市街地といった複雑形状への応用に期待できる。また、LES の流入境界条件（流入変動風）の作成法として、風洞モデルによる手法を提案し、風荷重評価用の境界層乱流場を適切に再現できることを確認した。

第3章では、高層建物モデルとして境界層乱流中の3次元角柱（単体）の計算を行い、壁面の変動風圧力に関する基本的な予測精度を検証した。まず、格子解像度に関する感度解析結果から、本研究における計算モデル構築法の基本となる格子解像度を定めた。3風向に対する計算を実施し、別途実施された3種の風洞実験（多点風圧実験）結果と比較した結果、両者は良く対応し、本計算法の妥当性が示された。局所的に計算値と実験値に差が生ずる領域においては実験値間においてもばらつきが生じており、計算結果は概ね実験値のばらつきの範囲内にあることを確認した。シンプルなモデルの場合、変動風圧特性は接近流や物体自体の剥離流の影響を鋭敏に受けやすいため、計測・評価上のばらつきを考慮して複数の実験値を参照して検証することが重要である。

第4章では、風上建物の影響を受けて高層建物の局所負圧が顕著に増加する事例として、3次元角柱2棟の計算を実施した。周辺建物を含む複雑モデルに対して適切なモデル構築法を示した上で、計算結果を実験値と比較し、特殊な風荷重現象に対しても本手法が有効であることを示した。風上建物の存在によって強められるピーク負圧は、建物単体での圧力場に関する一般の知見を大きく上回るものであり、耐風設計上重要な現象と判断されたため、条件付平均場の計算に基づいてそのメカニズムを考察した。その結果、対象建物上端部に円錐渦が形成されること、また風上建物からの剥離流れが当該部位に直接作用し円錐渦の循環を強めていることが明らかとなった。さらに本章では、上記考察結果に基づいてピーク負圧の低減手法を提示した。隅角部を隅欠形状とすることにより渦形成が抑制され、当該ピーク負圧が単体角柱と同程度の値まで低減されることが確認された。

第5章では、建物自体に関する複雑形状問題として、壁面に設置された鉛直フィンに作用する変動風力を求めた。まず、風洞実験において便宜的にフィンが拡大されたモデルを計算で再現し、当該表面形状に対する本手法の妥当性を確認した。次に、フィンと建築物との寸法比を実寸相当とし、微細な表面形状を伴うモデルで計算を行ったところ、全体的にフィンの風力値が低減される傾向がみられた。建物周囲の流れ場やフィンに作用する風圧・風力の変動特性について実験再現モデルと実寸相当モデルを比較すると顕著な差がみられ、実寸相当モデルでは建物全体からの剥離渦によって形成される大局的な乱流構造が支配的となることが確認された。フィンの風力分布について風向角による影響を調べたところ、風向角 15° において風上フィンで大きい風力が発生することが確認され、円錐渦の形成とフィンの形状効果が組合わされることが原因として明らかになった。また、全体的に風上面低層部で大きいピーク風力が確認された。その要因としては、フィンの形状効果によって増速した下降流が、地上面近傍の馬蹄形渦を強め、壁面上でその2次渦が強調されたためであると推察される。

第6章では、前章までの知見に基づいて計算対象を実市街地・実建物モデルに発展させ、接近流特性の異なる2種類の風向に対して高層建物モデルの変動風圧評価を行った。風向1は対象建物の風圧分布に対して風上側高層建物が間接的に影響するケースであり、格子解像度が建物周囲の乱流構造におよぼす影響に着目して風圧分布特性を検討した。建物周囲の格子解像度は、特に剥離せん断層の挙動に影響をおよぼすことが確認されたことから、実市街地の計算モデル構築においては、対象建物から周辺高層建物に至る範囲において高解像度を確保しなければならない。風向2は、対象建物が風上高層建物の後流域に位置するケースであり、側面隅角部で発生する強いピーク負圧を本手法で精度よく再現できることが示された。当該現象の発生メカニズムは、風上高層建物からの剥離せん断層によって円錐渦の循環が促進されるものであり、第4章（角柱2棟の事例）で考察したピーク負圧発生機構と同様の現象が、実市街地のような複雑モデルにおいても発生することが明らかとなった。

第7章では、近年の傾向を踏まえ形態が複雑化する市街地および建築物を対象とし、今後の耐風設計においてより高度な風荷重評価を可能とする技術として本手法の適用性を示した。まず、前章で扱った市街地モデル（2004年時の市街地状況）に対し、現況（2014年時）モデルの計算を実施した。市街地再開発による10年間の変化は対象高層建物の風圧分布に大きく影響をおよぼすことが確認されたため、耐風設計用風荷重評価を行う際には、周囲の建設・解体に係る再開発計画に留意し、将来的な風況変化を考慮することが重要である。また、当該エリアの市街地再開発において新たに建設された高層建物のうち、特殊な外装形式によって複雑な外形となっている2棟について計算を行い、風圧分布を求める

とともにそれを特徴づける乱流構造について調べた。特に、外壁面に鉛直フィンを実装した実建物に関しては、フィンの風力について第5章の知見との対応を確認するとともに、一般外壁面の風圧分布に対して外装付属部材の再現性が及ぼす影響について明らかにした。

以上より、本研究で用いた非構造格子系 LES は、高層建築物の耐風設計において評価すべき様々な風圧現象に対し、計算モデル構築の合理性と十分な予測精度を有することが確認され、流体計算による新たな風荷重評価法として有効であることが示された。特定条件下で発生する特殊な風荷重現象についても精度よく再現できるだけでなく、乱流構造の可視化に基づいてそのメカニズムを考察・解明することができるため、耐風設計実務に役立てられるだけでなく今後の風工学の発展にも寄与する技術として活用されることが期待される。

8-2 今後の展望

非構造格子系 LES は、既往の風荷重評価法における技術的課題を解決できるとともに、実建物モデルに対しても適用可能であることが示されたため、今後実用技術としての展開・普及が期待される。ここでは、本手法の特長をさらに活かして高度な防災技術として発展させてゆくための将来的な展望を述べる。

(1) 高解像度な面情報の活用

外装材設計用風荷重評価で一般に用いられる時刻歴での移動平均化処理（0.5～1s 程度のフィルタリング）は、外装材寸法を考慮して風圧分布の面平均化を行うための工学的処理である。風洞実験では模型上離散的に計測された風圧値に対し当該フィルタリングが施されピーク値が評価されるが、LES では風圧分布に関して面的に高解像度な節点情報を有していることから、外装材単位の面平均値を直接的に求めることができる（例えば BIM の利用による部材単位でのモデル形状作成およびデータ抽出など）。

(2) 実広域市街地の再現による接近流評価

現行の耐風設計体系においては、対象建物の設計風速を算定する際、当該エリアの周辺状況に応じて地表面粗度区分を仮定し、接近流特性としてプロファイルが規定される。風洞実験ではこれをターゲットとして風洞気流が作成されるが、一方 LES では計算空間に物理的制約を伴わないことから、広域市街地モデルの計算に基づいて実状に即した接近流特性を風向別に得ることが可能であり、より実状に即した設計風速評価を行うことができる。

(3) 風応答評価の高度化

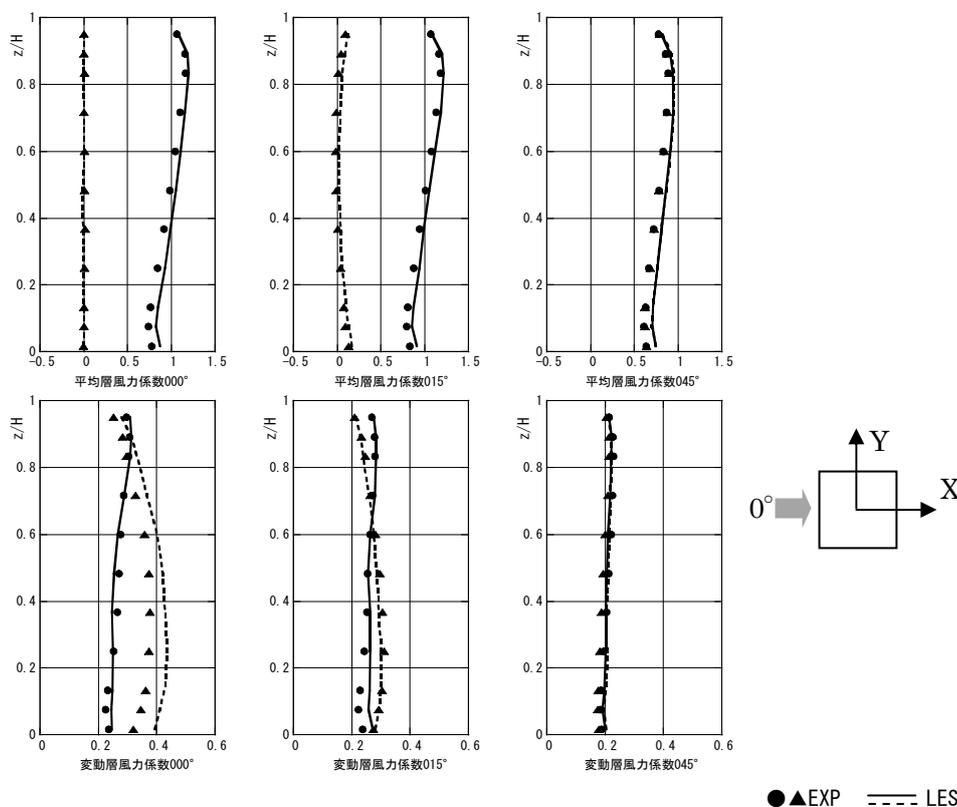
タワー・煙突や大スパン屋根等、大変形を伴う風応答が予測される構造物に対しては、空力不安定振動の発生の有無を確認するため、振動模型を用いた風洞実験（空力振動実験）が実施される。しかしながら、風洞模型で再現できる自由度および模型則に基づく現象再現範囲には限界がある。LES では、節点移動・要素変形によって流体 - 構造連成解析が可能であることが知られており、本手法のように複雑形状への適合性と格子系の自由度を併せることで、より複雑なモードを有する振動物体への対応が可能となるものと考えられる。

付録1 角柱モデルの層風力および一般化風力

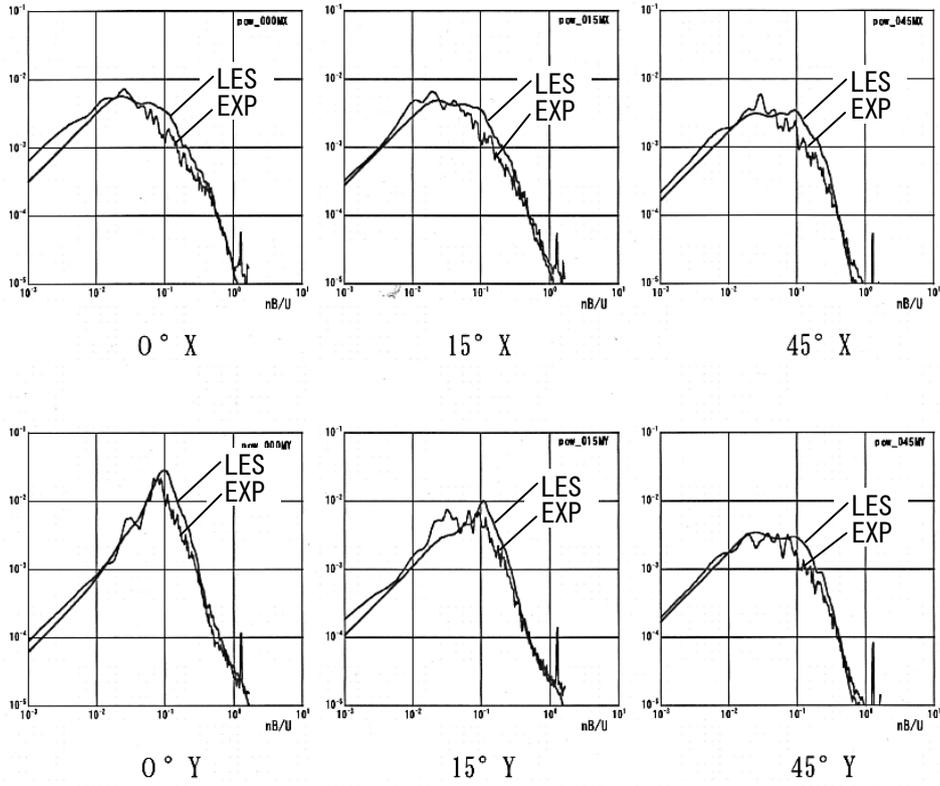
第3章で扱った3次元角柱(単体)モデルに関し、特に構造骨組用風荷重評価に用いられる層風力係数および一般化風力係数について検証を行う。

付図1.1は、層風力係数分布について実験値と計算値を比較したものであり、風向角は第3章同様 0° 15° 45° の3風向である(実験値はAを使用)。層風力の計算に際しては、実験・計算ともにサンプリング点(風圧計測点)の値に対して面積分して求めている。全体的に実験値と計算値は概ね良い対応関係にあるが、風向 0° Y方向(風直角方向)の変動層風力係数については計算値が若干大きく評価している。これは、図3.15(風圧係数の空間分布)の側面における変動風圧係数(0°)からも確認できるように、風圧の計算値が実験値を上回る傾向があることに起因するが、当該範囲においては実験値間にも大きいばらつきが生じている。

付図1.2は、1次直線モードを仮定した一般化風力係数(転倒モーメント係数)のパワースペクトルについて、実験値と計算値を比較したものである。広帯域に渡って両者は良く対応している。



付図1.1 層風力係数の高さ方向分布



付図 1.2 一般化風力係数のパワースペクトル

付録2 本研究における計算環境

実市街地モデル（第6章および第7章）では、数千万要素を超える計算モデル規模であることから、本研究ではHPC環境として東京工業大学のTSUBAMEを利用した。計算法は領域分割法に基づく並列計算であり、使用ノード数は40～85（並列数480～1020に相当）である。計算における評価時間は実時間で約30分であり、計算ステップ数は約20万である。実市街地モデルの計算負荷を付表2.1に示す。

今後の耐風設計にLESを適用する上では計算負荷の低減がひとつの課題となる。本研究においては周辺市街地における個々の建築物も精度よく形状を再現しているが、実用上は形状再現精度を下げる、あるいは街区単位の外形で表現する、といった対応も効果的であると考えられる。

付表2.1 実市街地モデルの計算負荷

対象モデル	解像度レベル	要素数	Node	Core	計算時間/20万step
実市街地	低解像度モデル	3500万	40	480	80H
実市街地	高解像度	7200万	80	960	110H
実市街地+複雑建物	超高解像度モデル	1億3000万	85	1020	230H

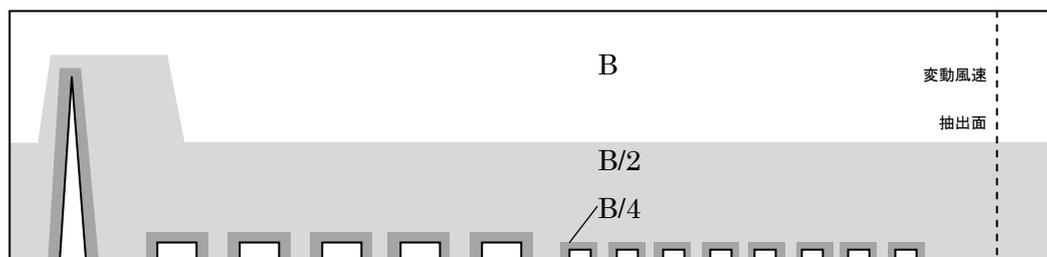
付録3 標準計算モデルの提案

本研究成果に基づき、非構造格子系 LES を用いて設計用風荷重評価を行うための標準計算モデルを以下に提案する。ここでは、対象建物は比較的シンプルな角柱形状を有する高層建築物（代表幅 $B=30\sim 40\text{m}$ 程度とする）とし、周囲数百 m 範囲の市街地も含めた計算モデルに対して、格子解像度およびその領域について示す。なお、局所地形による効果については対象外とする。

(1) 流入変動風作成モデル

建設地周囲の地表面粗度区分に基づいて目標プロファイルを定め、風洞実験における風洞気流作成法に準じて各種抵抗要素を計算モデルに配置する。具体的には、大まかな平均風速勾配を形成するためのスパイヤ、主に床面近傍で乱流化を促進させるラフネスブロック（複数種類を配置）の他、必要に応じてバリヤ等が有効である。格子解像度は、上空領域を低解像度（格子寸法 B 程度）とし、中間高さから抵抗要素の物体表面に向けて連続的に高解像度（格子寸法 $B/4\sim B/8$ 程度）とする。計算領域は、主流直交断面は主計算（市街地を含む）モデルの流入境界面と同等とし、主流方向には $250B$ 以上の吹走距離を確保する。流出境界の上流側 $10B$ 程度の距離で主流方向に直交する仮想断面を設け、当該面内全節点の時刻歴風速波形を保存する。

計算領域に関する留意事項としては、本モデルの主流直交断面と主計算（市街地）モデルの流入境界面の面積に乖離があると、保存された流入変動風を参照する際に連続条件を満たすことができず、全領域にわたって圧力場が発散する可能性がある。また、主流方向長さ（吹走距離）が不足すると、平均風速および乱れ強さのプロファイルが満足できても風速変動の周波数特性として低周波数成分が不足する（大スケールの渦構造が再現できない）ため、注意を要する。



付図 3. 1 流入変動風作成モデル（風洞モデル）

(2) 市街地モデル

対象とする高層建物（代表幅 B ，代表高さ H ）を中心として周囲の市街地をモデル形状として再現する。再現範囲は風洞実験と同等とし，半径 $2H \sim 3H$ 程度とする。格子解像度は，再現すべき乱流構造に応じて領域ごとに定める。

- ・ 上空領域

低解像度領域として B 程度とする。

- ・ 中央高さ以下の領域

流入変動風作成モデルの格子解像度に対応させ， $B/2$ 程度とする。

- ・ 流入境界面～市街地形状を包絡する領域

市街地および対象建物に対する接近流を再現する領域として $B/4$ 程度とする。

流入変動風の解像度が向上し，エネルギーカスケードによってより高周波数域の変動成分が生成される。

- ・ 市街地を包絡する領域

街区や道路など，市街地の外形によって特徴づけられる流れ場を再現する領域として $B/8$ 程度とする。低層市街地において対象建物のみ高層建築物の場合（高層建物単体と見なせる場合），建物後流域のカルマン渦列を再現する領域に相当するため，特に対象建物の後方を広い範囲で当該解像度を確保する。

- ・ 建物近傍(1)

対象建物側方における剥離せん断層の挙動と後方における渦の巻込を再現する領域として $B/16$ 程度とする。周辺建物群に関しては，中低層建物に対しては建物群を覆う範囲でよいと考えられるが，特に高層建物の場合は対象建物と同程度の範囲で当該解像度を確保する。

- ・ 建物近傍(2)

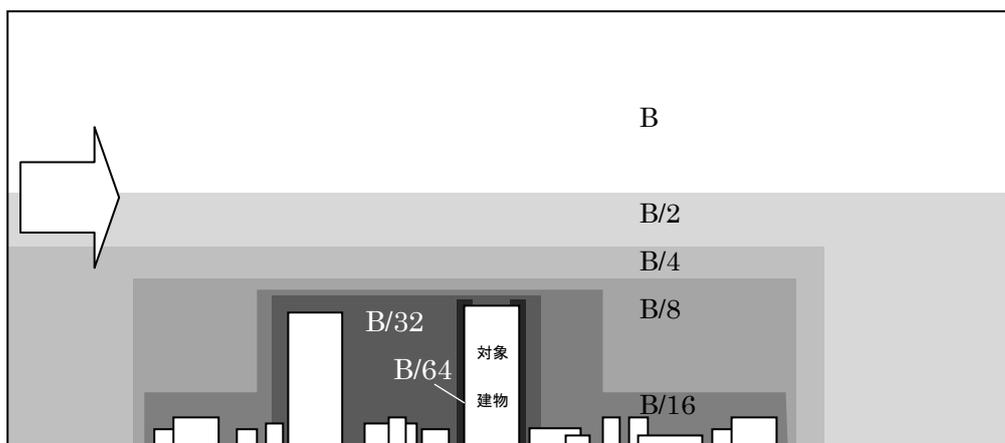
対象建物の壁面近傍を覆う範囲で $B/32$ とし，特に建物形状によって直接的に形成される乱流構造（および剥離せん断層との干渉）を再現する。周辺建物群については，各建物の形状再現精度にもよるが，精緻に再現されている場合は各建物近傍においても本寸法が要求されるものと考えられる。特殊な事例として，対象建物の周囲に同規模の高層建物が存在し，接近流に影響をおよぼすことが想定される場合は，当該周辺建物と対象建物との間の空間において本格寸法を採用する。これは，第4章・第6章に示したように，風上建物からの剥離せん断層の作用による局所的な強い負圧場の発生を適切に再現するためである。

- ・ 建物隅角部

建物隅角部は流れの剥離や後端干渉が起こる部位であり，流体計算上は特異点として大きい圧力勾配が発生するため， $B/64$ 以上の格子解像度とする。

・補足

実際の建築物は複雑な外形を有するものが多いため、特に上記「建物近傍(2)」以上の解像度範囲についてはその形状に応じてより高い解像度を与える必要性が生じるものと推測される（第5章・第7章で扱った鉛直フィンモデル等）。



付図 3.2 建物市街地を含む主計算モデル

本研究に関連する発表論文

【査読付論文】

- 1) 吉川優, 田村哲郎 : 非構造格子系 LES による 3 次元角柱の変動風圧評価
－建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築 (その 1)－
日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻 第 687 号, 913-921, 2013, 05
- 2) 吉川優, 田村哲郎 : 風上建物の影響を受ける高層建築物の変動風圧に関する LES
－建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築 (その 2)－
日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻 第 713 号, 991-1000, 2015, 07
- 3) 吉川優, 田村哲郎 : 高層建物壁面に設置された鉛直フィン部材の風荷重評価
－建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築 (その 3)－
日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻 第 722 号, 665-674, 2016. 04
- 4) 吉川優, 田村哲郎 : 周辺街区が再現された高層建物モデルの LES 風荷重評価
－実市街地を対象とした CFD 耐風設計 (その 1)－
日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻 第 718 号, 1849-1857, 2015. 12

【国際会議】

- 1) Masaru YOSHIKAWA, Tetsuro TAMURA : LES for wind load estimation by unstructured grid system, The 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Sep. 2-6, 2012, Shanghai, China
- 2) Masaru YOSHIKAWA, Tetsuro TAMURA : LES OF FLUCTUATING PRESSURES ON A HIGH-RISE BUILDING INFLUENCED BY WINDWARD BUILDING, The 8th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Dec. 10-14, 2013, Chennai, India
- 3) Masaru Yoshikawa, Tetsuro Tamura : HPC ON WIND-RESISTANT DESIGN OF A TALL BUILDING IN THE CENTER OF LARGE CITY, 1st Joint Workshop on Building / Civil Engineering between Tongji & Tokyo Tech, Aug. 5-7, 2014, Tokyo, Japan
- 4) Masaru YOSHIKAWA, Tetsuro TAMURA : CFD Wind-resistant Design of Tall Building in Actual Urban Area Using Unstructured-grid LES, IABSE Conference, May 13-15, 2015, Nara, Japan

【口頭発表】

- 1) 吉川優：非構造格子を用いた LES による変動風圧評価，日本建築学会大会，2010.07
- 2) 吉川優：市街地における高層建物の LES による変動風圧評価，日本建築学会大会，2011.07
- 3) 吉川優，田村哲郎，寺崎浩：風上建物の影響を受ける高層建物の変動風圧に関する LES，日本建築学会大会，2013.08
- 4) 吉川優，田村哲郎，寺崎浩，中村良平：高層建物外壁のフィンに作用する変動風力に関する LES，日本建築学会大会，2014.07
- 5) 吉川優，田村哲郎：実市街地における高層建築物の変動風圧に関する非構造格子系 LES，第 28 回数値流体力学シンポジウム，2014.12
- 6) 吉川優，田村哲郎：実市街地にみられる高層建物の強いピーク負圧発生に関する考察，日本建築学会大会，2015.07
- 7) 片岡浩人，吉川優，田村哲郎：LES による高層建物外壁の外装材風荷重の検討，第 23 回数値流体力学シンポジウム，2009.12（共著）

【その他】

- 1) 吉川優，相原知子：LES による地上設置型太陽電池アレイの変動風圧評価，日本建築学会大会，2012.09
- 2) 吉川優，田村哲郎，相原知子：地上設置型太陽電池アレイに対する変動風圧の LES 評価，第 26 回数値流体力学シンポジウム，2012 年 12 月

謝辞

本論文は、著者が東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 博士課程在籍時に行った研究成果を纏めたものです。指導教官であります田村哲郎博士には、研究方法から論文執筆に至るまでたいへん丁寧な御指導を賜りました。心より感謝の意を表しますとともに厚く御礼申し上げます。

また、本論文の審査におきまして貴重な御意見・御指摘を賜りました、東京工業大学教授 山中浩明博士、同教授 坂田弘安博士、同准教授 浅輪貴史博士、同准教授 佐藤大樹博士、同連携准教授 喜々津仁密博士に厚く御礼申し上げます。

著者が建築風工学に関わるようになったのは、東京都立大学工学部建築学科 4 年時および修士課程在籍時であります。恩師である山崎真司博士からは、本研究を進めるにあたり多くの励ましを頂きました。ここに改めまして御礼申し上げます。

著者勤務先の大成建設株式会社 技術センターにおきましては、1998 年の入社以来、故・浅見豊博士より建築風工学を広くご指導頂くとともに、坂本成弘博士よりはじめて CFD をご指導頂きました。2012 年に辻田修博士、長島一郎博士より本研究の機会を与えて頂き、研究を進めるにあたっては風チーム 寺崎浩博士、相原知子氏、中村良平氏より多くのご助言・ご助力を頂きました。また、堀越研一博士、小室努博士、森田尚氏からは日ごろより多くの励ましを頂きました。ここに改めまして感謝申し上げます。

日本建築学会における委員会活動 (CFD 耐風設計法 WG) では、本研究分野の専門家の方々よりたいへん貴重なご助言を多数頂きました。委員の皆様には厚く御礼申し上げます。

他にも、本論文を纏めるにあたり非常に多くの方々よりご協力頂きました。ここに改めまして謝意を表しますとともに御礼申し上げます。

最後になりますが、常に温かく、励まし支えてくれた家族 (妻 綾子、長男 柊、長女 紬子) に心から感謝いたします。ありがとうございました。

2016 年 3 月

吉川 優