

LES による正方形角柱の変動空気力の空間相関評価に関する検討

Numerical Investigation on spacial correlation of fluctuating forces of square cylinder

- 伊藤 靖晃, 清水建設, 東京都江東区越中島 3-4-17, E-mail: yasuaki.ito@shimz.co.jp
白土 博通, 京都大学, 京都市西京区京都大学桂 C1-3, E-mail: shirato.hiromichi.8u@kyoto-u.ac.jp
野澤 剛二郎, 清水建設, 東京都江東区越中島 3-4-17, E-mail: nozawa@shimz.co.jp

Yasuaki Ito, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima Koto-ku Tokyo

Hiromichi Shirato, Kyoto University, C1-3 Kyoto Daigaku-Katsura Nishikyo-ku Kyoto

Kojiro Nozawa, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima Koto-ku Tokyo

Space correlation of wind force is one of the most important factors to predict the gust response of structures. The applicability of LES analysis to evaluate the space correlations of wind forces in isotropic turbulence is investigated in this study by comparing against Vickery's experimental results. The space correlations could be evaluated appropriately by LES and the minimum requirement of spanwise grid size to evaluate space correlations of wind forces is $D/20$ in the usual isotropic turbulence. The space correlation of wind forces are much larger than that of fluctuating wind. Karman vortex have an important role to decide the space correlations of wind forces in cross sections of completely separated flow type.

1. はじめに

乱流中で構造物に作用する空気力を適切に評価するためには, 変動風速と変動空気力の伝達関数である空力アドミッタンスの評価とともに, 変動空気力の空間相関を適切に評価することが必要である. しかしながら, 変動空気力の空間相関については十分なデータが蓄積されておらず, 本州四国連絡橋耐風設計便覧・同解説 (2001) では変動風速の空間相関と変動空気力の相関が等しいという仮定に基づいてガスト応答解析手法が示されている. 一方, Larose ら^(1, 2)は扁平六角断面を対象に変動空気力のスパン方向相関の測定を行い, 変動空気力の相関が変動風速の相関よりも高くなることを確認している. このため, 扁平六角断面以外の各種断面について変動空気力の空間相関の定量的な評価を行うこと, および空間相関が高くなるメカニズムの解明は重要な課題である.

空間相関が高くなるメカニズムの解明には, 構造物周りの変動圧力および変動空気力の時空間的変動が重要な要素となるため LES は非常に有用な手法であると言える. 変動空気力の空間相関を LES により評価した事例としては野澤⁽³⁾や黒田⁽⁴⁾らの研究があるが, いずれも一様流を対象としたものである. そこで本研究では, 等方性乱流場における正方形角柱を対象に LES 解析を行い, 等方性乱流場における変動空気力の空間相関評価に対する LES の適用性および解析条件について検討を行った.

2. 解析概要

本研究では, 変動空気力の空間相関評価に対する LES の適用性を検討するため, 等方性乱流場における正方形角柱を対象に LES 解析を実施し, 変動圧力差の空間相関

について Vickery⁽⁵⁾の実験結果と比較を行った. 用いた解析手法の概要を以下に示す.

2.1 流入変動風

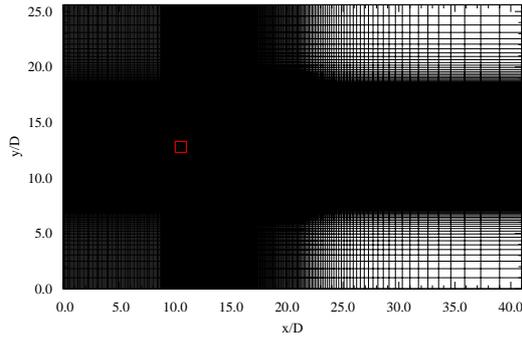
流入変動風は波数空間の 3 次元エネルギースペクトルに基づく飯塚ら⁽⁶⁾の手法により作成した. 本研究では飯塚らの研究と同様, 式 (1) に示す Karman 型 3 次元エネルギースペクトルを対象とし, 波数空間上で連続条件⁽⁶⁾⁽⁷⁾を課した後, フーリエ逆変換をして流入変動風を作成した.

$$E(k) = \frac{8}{\pi} u_0^2 \frac{1}{k} \frac{(k/k_0)^4}{[1 + (k/k_0)^2]^3} \quad (1)$$

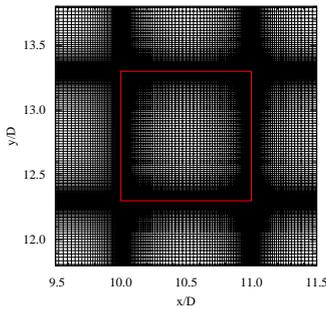
ここで, $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}$, u_0 : 乱流強度, k_0 : 代表波数, k_i : 波数ベクトルの i 成分である. k_0 は乱れのスケール Λ の逆数に対応する代表波数で, 本解析では飯塚らの研究に倣い $k_0\Lambda = 0.318\pi$ とした. 流入変動風作成時の格子の刻み幅はいずれの方向も $0.05D$ とした. 本研究では Vickery の実験で用いられた $L_x^u/D = 1.33$ の気流を対象とし, 気流作成時の解析領域は主流方向に $102.4D$, 鉛直およびスパン方向に $51.2D$ とした. なお, 角柱を対象とした LES 解析では作成した気流の一部を使用し, 境界面は slip 条件とした.

2.2 解析手法

流れの支配方程式は非圧縮性の Navier-Stokes 方程式と連続式であり, 計算アルゴリズムは fractional step 法を用いた. 時間積分は対流項に 2 次精度アダムス - バッシュフォース法, 粘性項に 2 次精度クランク - ニコルソン法を用いた. 空間の離散化は 2 次精度の中心差分とし, 乱流モデルには標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.13$) を



(a) Overall view



(b) Enlarged view

Fig. 1: Example of grid

用いた．流入境界条件は上述の波数空間の3次元エネルギースペクトルに基づく手法により作成した変動風速の時系列を与え，流出境界条件は移流型境界条件，壁面は non-slip 条件，スパン方向および鉛直方向は slip 条件を用いた．圧力は流入，流出，壁面とも勾配0の Neumann 境界条件とした． Re 数は 22,000，無次元時間刻み Δt は 5.0×10^{-4} もしくは 1.0×10^{-3} とした．

2.3 解析格子

等方性乱流場での角柱周りの流れ場を解析する場合には，角柱周りの流れ場に有意な影響を与えるスケールの渦を維持する必要があり，一様流とは異なり角柱上流でも十分な解像度を有する必要がある．また，スパン方向の空間相関について検討を行う場合には，スパン方向にも十分な解析領域および解像度を確保する必要がある．スパン方向の格子幅 δz および解析領域 L_z については，Tamura ら⁽⁸⁾により最低条件として $\delta z/D \leq 0.1$ ， $z/D \geq 1.0$ が示されている．本研究ではスパン方向の格子幅を Tamura らの提案する $D/10$ ，および $D/20$ とした2ケースについて，同一の気流を用いて解析を行い，格子幅の影響について検討を行った．なお，等方性乱流場では鉛直方向の乱れのスケールはスパン方向と同程度であるため，鉛直方向の格子幅はスパン方向と同一とした．一方，主流方

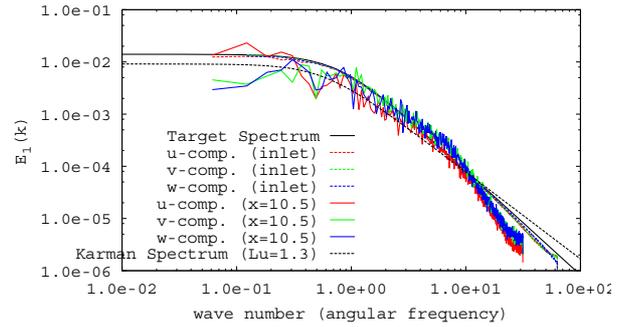


Fig. 2: Power spectrum of fluctuating wind

向の乱れのスケールはスパン方向の2倍程度であるため，主流方向の格子幅はスパン方向の2倍とした．主流方向および鉛直方向の解析領域はそれぞれ $41.0D$ ， $25.6D$ であり，流入境界から角柱前縁までの距離は $10.0D$ とした．

角柱表面の最小格子サイズは $D/250$ で，角柱周りの格子の差異による影響を除くため，いずれのケースでも角柱周りは同一の格子を用いた．用いた解析格子の一例として，スパン方向格子幅 $D/20$ のケースの解析格子を Fig.1 に示す．

3. 解析結果

3.1 流入変動風

本研究では Vickery⁽⁵⁾の実験で用いられた気流(主流方向乱れ強度 $I_u = 10.0\%$ ，乱れのスケール $L_u^x/D = 1.33$ を目標として流入変動風を作成した．波数空間で生成し流入境界条件として与えた気流のスペクトル，および生成された気流を流入条件として角柱の存在しない条件で別途行った解析による角柱中心位置 ($x/D = 10.5$ ， $y/D = 12.8$) における気流のスペクトルを Fig.2 に示す．ただし，流入境界条件として用いた気流から求めたスペクトルは各成分の流下方向の風速変動から算出しているのに対し，角柱中心における気流のスペクトルは角柱中心における気流の時系列波形から算出したものである．なお，Fig.2 には式 (1) の3次元エネルギースペクトルから算出した1次元エネルギースペクトル(式 (2))も併せて示した．また，いずれの物理量も代表値 (U ， D) を用いて無次元化した値を示している．

$$E_1(k_1) = \frac{2}{\pi} u_0^2 \frac{1/k_0}{1 + (k_1/k_0)^2} \quad (2)$$

流入境界条件として与えた気流のスペクトルは，式 (2) のスペクトルと比較して乱れ強度や乱れのスケールに大きな変化はなく，いずれの成分もよく一致している．一方，角柱中心におけるスペクトルでは LES のフィルターにより高周波数域のスペクトル強度が低下していること

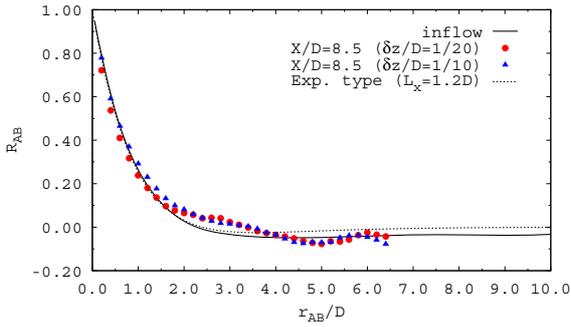


Fig. 3: Space correlations of generated and analyzed wind

もに、コルモゴロフの $-5/3$ 乗則に従った勾配に変化し、ESDU74031のスペクトルと概ね一致したスペクトルに変化している。ESDU74031のスペクトルから算出した主流方向の乱れのスケールは $L_u^x/D = 1.3$ 、乱れ強度は10.5%であり、流入境界条件と比較して乱れのスケールは大きく変化せず、乱れ強度は低下しているものの目標値とは概ね一致している。

波数空間で生成された主流方向変動風速と、各解析格子を用いた場合の角柱上流($x/D = 8.5$)における主流方向変動風速のspan方向の相関係数を次式に示す一様乱流の横方向相関係数^(9, 10)($L_u^x/D = 1.2$)と併せてFig.3に示す。

$$g(r) = \left(1 - \frac{r}{2L_x}\right) e^{-r/L_x} \quad (3)$$

波数空間の変動風速から算出した空間相関係数は式(3)の相関係数と比較すると、2点間距離が小さい場合にはよく一致し、大きい場合には若干の差異が見られ0より小さい値に漸近した。相関係数が0以下に漸近したのは、限られた波数空間内で気流を生成するためその空間より大きなスケールの渦は再現できないことが原因であり、2点間距離が大きな領域での相関を正しく再現するためには、乱れのスケールに比べて十分広い領域において気流を生成する必要がある。角柱上流の変動風速から求めた相関では、格子の影響は小さく、2点間距離が小さい領域において格子幅が大きい方が相関が若干高くなる傾向が見られたが、概ね一致する結果となった。式(3)や波数空間で算出した相関係数と比較すると2点間距離が大きい領域で若干の差異が見られるものの、概ね一致する結果となり、変動風速の相関を適切に再現していると言える。

3.2 角柱に作用する空気力

正方形角柱の空気力係数および表面圧力についてLee⁽¹¹⁾の実験結果および小野ら⁽¹²⁾の解析結果と比較検証を行った。LESのデータサンプリングは0.1無次元時

Tab. 1: Comparison of wind force coefficients with past research

case	$\delta z/D$	I_u	C_D	\tilde{C}_D	\tilde{C}_L	St
LES	1/20	11.0	1.8	0.15	0.55	0.12
	1/10	11.0	1.9	0.15	0.66	0.12
Exp (Lee)	-	8.0	1.79	0.16	0.95	0.124
	-	13.0	1.53	0.19	0.58	0.119
LES (小野)	1/15	10.0	1.89	0.14	1.05	0.134
	12.0	1.84	0.17	1.06	0.132	
	13.0	1.79	0.20	0.90	0.120	

間で行い、十分な時間経過後の約150無次元時間のデータを取得した。Leeらの実験結果によれば正方形角柱の St 数は0.12であることから、カルマン渦約18周期分のデータに相当する。乱流中での統計量評価にはデータ数が不足しているが、時空間的な平均により風圧係数の評価を行った。なお、空間平均にはspan方向境界面の影響が確認された境界面から $2D$ の領域は除いたデータを用いた。

本研究で算出した平均および変動空気力係数および St 数をLeeの実験結果および小野らの解析結果と併せてTab.1に示す。変動揚力係数以外にはspan方向格子幅による明確な差異は確認されず、変動揚力係数は格子幅が小さい方が小さな値となった。既往の研究結果と比較すると、平均および変動抗力係数、 St 数は概ね同程度であり、変動揚力係数はLeeの実験結果とは同程度であるが、小野らの解析結果と比べると小さな値となった。

角柱表面の平均風圧係数および変動風圧係数の分布をLeeの実験結果と併せてFig.4,5に示す。平均風圧係数は、角柱前面では解析格子に関わらず実験結果とよく一致した。角柱側面では絶対値が若干大きいものの、 $I_u=8.0\%$ の実験結果と概ね一致する結果となった。また、角柱側面では解析格子による依存性も見られ、格子幅が大きいと後縁付近における圧力回復が小さいことが確認された。角柱背面では格子幅が大きいと背圧係数の絶対値が若干大きくなる傾向が見られた。

変動風圧係数は実験結果と比べて角柱前面での値を過大評価する結果となった。別途行った一様流中の解析では前面の変動圧力は実験と同程度となったため、等方性乱流を用いた流入境界条件の影響により非物理的な圧力変動が生じているものと考えられるが、詳細な原因については今後の検討課題である。側面および背面については解析格子による差異が確認され、格子幅が大きいほど変動圧力が大きくなる結果となった。角柱周りの格子はspan方向を除いて同一であるため壁面境界条件の影響

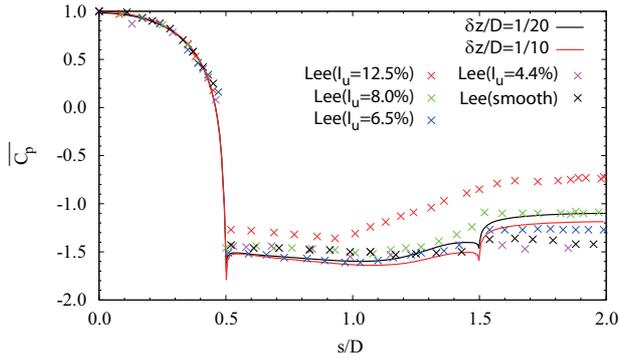


Fig. 4: Distribution of mean wind pressure coefficients

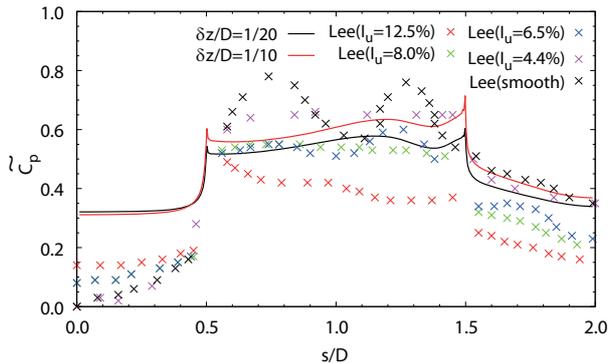


Fig. 5: Distribution of fluctuating wind pressure coefficients

はなく、前縁で形成される渦のスパン方向の差異および接近流の高周波数領域に含まれる小スケール渦成分により変動圧力に差が生じたと考えられる。

3.3 変動圧力差のスパン方向相関

角柱の中心 ($x/D = 10.5$) における上下面の変動圧力差のスパン方向の相関係数を Vickery⁽⁵⁾ の実験結果および角柱上流 ($x/D = 8.5$) での変動風速 (主流成分) の相関係数と併せて Fig.6 に示す。スパン方向の格子幅が $D/20$ のケースでは 2 点間距離が小さい場合には実験結果と比べてやや過大評価、大きい場合にはやや過小評価となったものの概ね実験結果と一致した。一方、スパン方向の格子幅が $D/10$ のケースでは格子幅の影響が明確に表れ、2 点間距離が小さい領域では格子幅が $D/20$ のケースと同程度となるものの、 $r_{AB}/D \geq 4.0$ 程度の 2 点間距離が大きい領域では相関を明らかに過大評価する結果となり、実験結果とは定性的にも異なる傾向が見られた。正方形角柱のような完全剥離型断面ではカルマン渦が形成されるが、カルマン渦の位相がスパン方向に同一であれば相関は高くなる。スパン方向の格子幅が大きい場合には 3 次元的な渦構造が形成されにくいいため、小さい場合と比較して 2 次元的な流れ場が形成されやすく、相関が大きくなったものと考えられるが、詳細な原因について

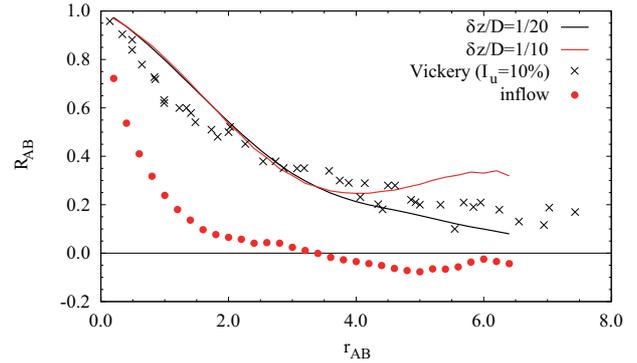


Fig. 6: Space correlation coefficients of fluctuating pressure difference

は今後の検討を要する。カルマン渦の位相は時間とともに変化すると考えられるため、評価時間をさらに長くすれば格子幅が $D/10$ のケースでも相関を適切に評価できる可能性もあるが、格子幅が $D/20$ のケースでは同一の気流、同一の評価時間で相関係数の適切な評価が可能であり、一般的に実験で用いられる条件の等方性乱流場において変動圧力差のスパン方向相関係数を評価するためにはスパン方向の格子幅を $D/20$ とすることが必要であると言える。

4. 変動圧力差のスパン方向相関とカルマン渦

乱流中で構造物に作用する変動空気力は、接近流の乱れにより生じる空気力と構造物で生じる剥離や渦などによる空気力、および構造物の変形により生じる自励的な空気力の 3 つに分類されると考えられる。剥離や渦などにより生じる空気力と構造物の変形により生じる空気力はいずれも一様流中でも生じる空気力であるが、乱流中では一様流中とは剥離性状やスパン方向の相関が異なり、ガスト応答を生じさせる要因となると考えられる。このため、ガスト空気力の空間相関を評価する場合にはこれらを含めた空気力の相関を評価する必要がある。本研究では Vickery の実験と同様、構造物の変形により生じる空気力の効果を除いた空気力 (変動圧力差) の空間相関の評価を行ったが、Fig.6 に示したように角柱で生じるカルマン渦などの影響により、変動風速の空間相関に対して変動空気力の空間相関は非常に大きくなることが確認された。

正方形角柱などの完全剥離型断面では、作用する空気力が後流に形成されるカルマン渦の影響を強く受けるため、変動圧力差のスパン方向相関係数はカルマン渦のスパン方向相関と高い相関を有すると考えられる。スパン方向格子幅が $D/20$ のケースの、ある時刻の角柱上面の無次元圧力 ($10.0 \leq x/D \leq 11.0$) と角柱前後の角柱中心高さ ($y/D = 12.8$) における変動風速の鉛直成分 ($x/D \leq$

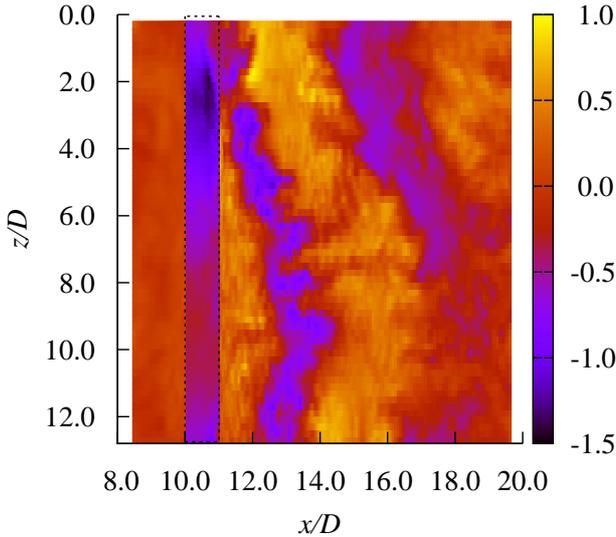


Fig. 7: Distribution of fluctuating pressure of upper surface and fluctuating wind at the center height of square cylinder

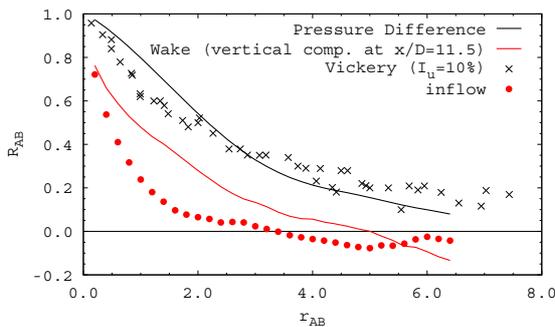


Fig. 8: Space correlation coefficients of fluctuating wind in the wake of square cylinder

10.0, $11.0 \leq x/D$) のコンターを Fig.7 に示す．角柱後流の $x/D = 11.5$ 付近では, $z/D \leq 4.0$ では鉛直下向きの成分が卓越しているのに対し, $6.0 \leq z/D \leq 12.0$ では鉛直上向きの成分が卓越していることが確認できる．一方, 角柱上面の表面圧力は $z/D \leq 4.0$ では強い負値となっているのに対し, $6.0 \leq z/D \leq 12.0$ では 0 程度となっており, 角柱後流の気流の鉛直成分と角柱の表面圧力は高い相関を有していることが確認できる．角柱後流 ($x/D = 11.5$) の変動風速の鉛直成分のスパン方向相関係数は Fig.8 に示すように変動圧力差の相関係数とは一定の差異を有するものの, 接近流の相関係数と比較すると定量的にも近い値となっており, 変動圧力差の相関はカルマン渦のスパン方向相関の影響を強く受けるものと考えられる．

5. まとめ

本研究では正方形角柱を対象に, 変動空気力のスパン方向空間相関評価に対する LES の適用性, および変動空気力の空間相関に対するカルマン渦の影響について検討を行った．得られた結論を以下にまとめる．

- スパン方向の格子幅を $D/20$ とした場合には, 変動圧力差のスパン方向相関係数は Vickery の実験結果と概ね一致した．
- 一般的に実験で用いられる条件の等方性乱流場において変動空気力の空間相関を適切に評価するためにはスパン方向の格子幅を $D/20$ とすることが必要である．
- 変動圧力差の空間相関は接近流の空間相関と比較して大きく, 後流に形成されるカルマン渦の影響を強く受けることが確認された．

また, 今後の課題として以下の点が挙げられる．

- 角柱前面の変動圧力を過大評価している原因を検討する必要がある．
- 各種断面について変動空気力の空間相関を定量的に評価し, そのメカニズムを解明する必要がある．

謝辞

本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- [1] G.L Larose, H Tanaka, N.J Gimsing, and C Dyrbye. Direct measurements of buffeting wind forces on bridge decks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 809 – 818, 1998.
- [2] Guy L. Larose. The spatial distribution of unsteady loading due to gusts on bridge decks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, No. 12-15, pp. 1431 – 1443, 2003. ENGINEERING SYMPOSIUM To Honour ALAN G. DAVENPORT for his 40 Years of Contributions.
- [3] 野澤剛二郎, 田村哲郎. 角柱まわりの複雑乱流場に対する les 適用法の提案とその課題. 土木学会論文集, Vol. 591, pp. 151-161, 1998-04-21.
- [4] 黒田眞一. 正方形角柱まわりの流れの数値計算. 第 42 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010 論文集, 2011.

- [5] Vickery B. J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream. *J. Fluid Mech.*, Vol. 25, pp. 481–494, 1966.
- [6] 飯塚悟, 村上周三, 持田灯, 李相山. 波数空間の3次元エネルギースペクトルに基づくLESのための流入変動風の生成 (特集:乱流の数値シミュレーション (nst) その13). 生産研究, Vol. 49, No. 1, pp. 27–30, 1997-01.
- [7] ROGALLO R. S. Numerical experiments in homogeneous turbulence. *NASA TM-81315*, 1981.
- [8] T Tamura, T Miyagi, and T Kitagishi. Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 531 – 542, 1998.
- [9] H. L. Dryden, G. B. Schubauer, W. C. Mock, and H. K. Skramstad. Measurements of intensity and scale of wind-tunnel turbulence and their relation to the critical Reynolds number of spheres. *NACA Tech. Rep. 581*, June 1937.
- [10] A. A. R. Townsend. *The Structure of Turbulent Shear Flow (Cambridge Monographs on Mechanics)*. Cambridge University Press, 2 edition, 3 1980.
- [11] B.E. Lee. Effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 69, pp. 263–282, 1975.
- [12] 小野佳之, 田村哲郎. 一般座標系LESの1様乱流中における二次元角柱まわりの流れへの適用性. 日本建築学会構造系論文集, No. 551, pp. 21–28, 2002-01-30.