

風力発電機ナセルに作用する平均風力ならびにピーク風圧に関する研究 WIND FORCES AND PEAK WIND PRESSURE DISTRIBUTIONS ON WIND TURBINE NACELLE

野田 博¹⁾ 嶋田 健司²⁾ 石原 孟³⁾
Hiroshi NODA¹⁾, Kenji SHIMADA²⁾ and Takeshi ISHIHARA³⁾

ABSTRACT

Total mean wind forces and local peak pressures on wind turbine nacelles were measured in the wind tunnel experiment in order to account for wind load on nacelle and panel loads on its enclosure more accurately. Based on the measurements, empirical formulae for the force coefficients and distribution of peak pressure coefficients are proposed for safety assessment. Mean drag coefficient in GL Guideline 2003 seem to be conservative than proposed values, however, pressure coefficients recommended in the guideline appears to be considerably underestimated compared with results in this study. Especially, the values of negative peak pressure coefficients, whose distributions are kind of similar to that on roof in BSLJ and in AIJ recommendations, are larger than those in these code and recommendations.

Key Words: Wind turbine, Nacelle enclosure, Wind tunnel experiment, TVL method

1. はじめに

近年, 地球温暖化対策として再生可能エネルギーのひとつである風力エネルギーが着目されている。わが国においてもここ数年で急激に導入がなされている。一方で風車タワーの崩壊, 基礎部の破壊, あるいはナセルカバーの飛散といった台風等の強風による深刻な被害が多数報告されている。例えば, 2003 年 9 月に沖縄県宮古島を直撃した台風 14 号による複数の風車タワーの倒壊等の被災報告¹⁾は記憶に新しい。これら被害の原因は稀な強風であったことはもちろんではあるが, 風車の耐風設計に用いる風車各部位の空気力特性が十分把握されていないことも一因と考えられる。特に風車ナセルに作用する空気力特性に関する資料は殆どない。唯一 2003 年に改定されたドイツ Germanischer Lloyd Guidelines²⁾(以下, GL2003)において平均抗力係数が示されており, その値は負圧で-1.0 から -1.2 である(再現期間 50 年の平均風速での換算値)。また風車の設置に際しては設置者が建築基準法³⁾に則り安全性の確認を行うが, 建築基準法による抗力係数の値は 1.2 が用いられる。しかし, これらは地表面に設置された建築物を対象とした風力係数であり, 風車ナセルのようなタワー上に設置された場合にはこれらの値が妥当であるかどうか検証されていない。このような状況のため, 風車のより合理的な耐風設計法^{4),5)}が望まれると共にその設計法に対応する風車各部の風力係数に関する詳細な調査が必要と思われる。本研究では, 風車のタワー部ならびに基礎部分の耐風設計あるいはマンハッチのようなナセルの局所外装材の耐風設計に資することを目的として, 風洞実験により風車ナセルの平均空気力ならびにピーク風圧を測定した。また実験結果に基づいて風車ナセルの耐風設計用平均抗力係数, 平均揚力係数ならびにピーク風圧係数分布を新たに示した。

¹⁾ 三井住友建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (〒277-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

²⁾ 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員 (〒135-8530 江東区越中島 3-4-17)

³⁾ 東京大学 大学院工学研究科 総合研究機構 助教授 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

2. 実験概要

風洞実験は三井住友建設技術研究所の乱流境界層風洞(測定断面 幅 2.6m×高さ 2.0m)にて行った。風洞実験では、ナセル全体に作用する風力を測定する風力測定実験と、ナセル表面に作用するピーク風圧係数を測定する風圧実験を行った。実験気流は一樣流(乱れ強さ約 0.3%)ならびにべき指数 0.2, 実験模型のナセル高さにおける乱れ強さ 13%の境界層乱流である。なお、実験模型のナセルの高さは実機の縮尺倍(縮尺: 1/50)とは同じにはせず、実機のナセル高さにおける乱れ強さとはほぼ等しくなる高さとして、風洞床面から 0.4m に設定した。

2.1 風力測定実験

実験に先立ち既存風力発電機のナセルの形状タイプをメーカーパンフレット等により調査した。その結果ナセル形状はi)矩形型, ii)球形型, iii)円筒型, iv)円盤型の4種類に大別され、本研究ではこのうち普及した数量の観点から、矩形型、球形型の2つのタイプを検討対象とした。風力測定実験に用いた模型を図-1に示す。ナセルのサイズは調査結果を参考に矩形型では $L/D=2.0, 2.5, 3.0$ の3通り、球形型では $a/b=2.0, 2.5$ の2通りとした。模型の内部を図-1(c)に示す。ナセル部分とロードセルは支持棒を介して連結されている。支持棒は風車タワーと等しい直径の外皮で覆い直接風が当たらないよう配慮することでナセル部分に作用する空気力のみを測定できるようにした。

球形型ナセルでは、Buresti⁶⁾や丸川ら⁷⁾による円柱の実験にならない、模型表面に表面粗度をつけることで可能なか

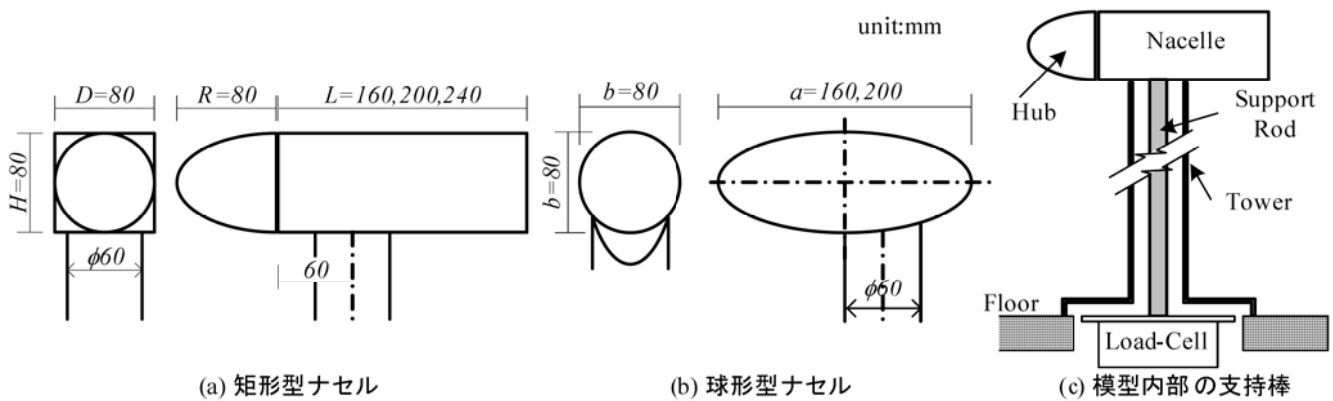
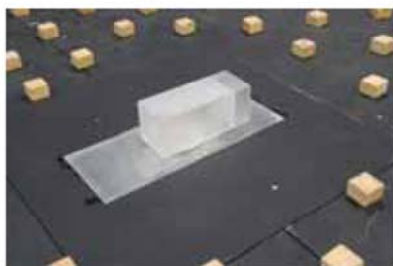
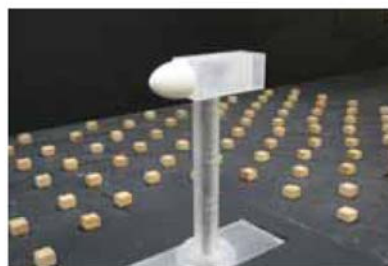


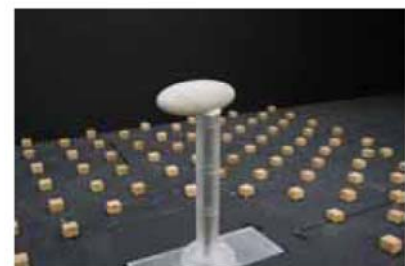
図-1 風力実験模型



(a) Case1 ($L/D=2.5$)



(b) Case4 ($L/D=2.5$)



(c) Case12
($L/D=2.5$, w/ surface roughness)

写真-1 風力実験状況

表-1 風力実験の実験ケース

(a) 矩形型ナセル(rect. type)

Case No.	Nacelle Position	Hub	Inflow turbulence	Length Ratio
Case 1	On the Ground	w/o	w/	L/D=2.5
Case 2	Top of Tower		w/	Intensity =13% at nacelle height
Case 3		L/D=2.5		
Case 4		L/D=3.0		
Case 5		w/o		L/D=2.0
Case 6				L/D=2.5
Case 7			L/D=3.0	
Case 8				

(b) 球形型ナセル(globe type)

Case No.	surface roughness	Inflow turbulence	Length Ratio
Case 9	w/o	w/ Intensity =13% at nacelle height	a/b=2.0
Case 10			a/b=2.5
Case 11	w/		a/b=2.0
Case 12			a/b=2.5
Case 13	w/o	w/o	a/b=2.0
Case 14			a/b=2.5
Case 15	w/		a/b=2.0
Case 16			a/b=2.5

ざり実機に近い剥離状況を作り出すことによりレイノルズ数の不一致の緩和を行った。表面粗度にはゴム製メッシュを用いた。Buresti⁶⁾や丸川ら⁷⁾によれば、表面粗度の大きさや密度によってその効果は異なる。本実験では、粗度の平均密度が 10～30%のときに境界層が発達しやすいという大熊ら⁸⁾の実験結果を参考に、閉塞率約 23%(線形約 1mm, 間隔約 8mm)のメッシュを表面粗度として用いた。

風向角 θ ならびに風力の定義を図-2 に示す。実験風向はハブに正対する風向を 0° とした $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で、計測は 5° ピッチに行った。測定は時間刻み $\Delta t=10\text{ms}$ によって行い、データ個数 $N=30,000$ 個の平均により平均風

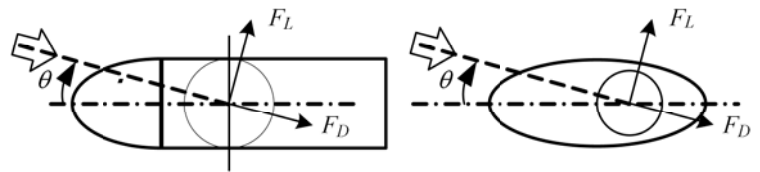


図-2 風力ならびに風向角の定義

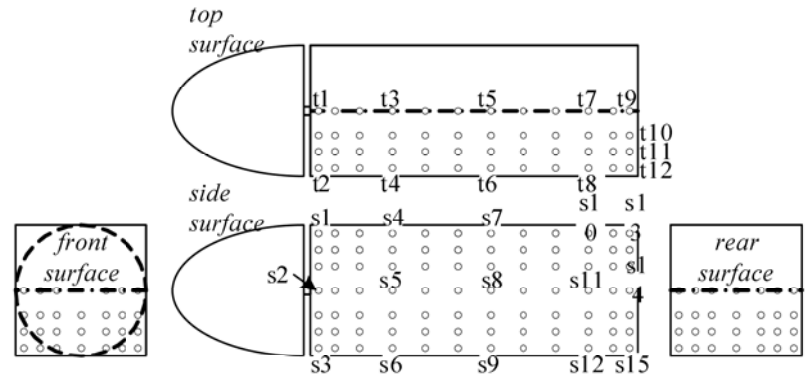


図-3 風圧測定点

力係数を算定した。なお、実機ではナセル空気力にはブレードの影響が及ぶが、本研究ではこの影響は考慮しない。実験では建築基準法による風力係数との比較も考慮し、ナセルが地上面に設置された場合についても実施した。またハブの影響を考察するためハブ無しの場合も測定した。実験状況の一例を写真-1 に、実験ケースを表-1 にそれぞれ示す。

2.2 風圧測定実験

ピーク風圧の測定は $L/D=2.5$ の矩形型ナセルについてのみ境界層乱流中で実施した。実験風速はナセル高さで 14m/s 、実験風向は、 $0^\circ \sim 355^\circ$ の範囲の 5° ピッチとした。測定点は図-3 に示す 187 点とした。実験では時間刻み $\Delta t=2.5\text{ms}$ 、データ個数 $N=8192$ 個を 1 サンプルとし、10 サンプルの測定を行った。測定上の制約から、1 サンプルの測定時間は、設計風速を 50m/s (再現期間 50 年を想定)とした場合実時間で約 300 秒であり、600 秒に満たない。この点を考慮に入れ、ピーク風圧の評価は以下の手順に従い算出した。

- ・各サンプル時系列にTVL法⁹⁾から求まる平均化時間に相当する移動平均処理を行い、評価時間が実時間スケールで 300 秒相当のピーク値を抽出する。
- ・任意に選んだ 2 サンプルの内から大きい方のピーク値を採用し、このようにして求めた 5 つのピーク値の平均により評価時間 600 秒のピーク値の期待値を求める。
- ・以上の操作を各風向に関して行い、全実験風向中の最大値をピーク風圧係数とする。

2.3 ピーク風圧係数の評価時間

ピーク風圧係数の評価時間としてTVL法による平均化時間を用いた。TVL法によれば代表幅を l 、平均風速を U_H とすれば平均化時間 T_c は (1) 式で求められる。ここで、風圧変動のルートコヒーレンスの decay constant k は (2) 式の 2 点間の空間相関より求められる。

$$T_c = k \cdot l / U_H \quad (1)$$

$$\sqrt{\text{coh}(n)} = \exp\left(-k \cdot \frac{n \cdot dx}{U_H}\right) \quad (2)$$

ここに dx : 2 点間距離である。紙面の都合上図には示さないが、一般に高層建築物の外装材では $k=4 \sim 8$ が用いられることが多いようであるが、本実験での変動風圧の 2 点間ルートコヒーレンスは、 $k=4$ とすると概ね (2) 式で包含される。従って本研究では $k=4$ としても安全側の評価を与えることが確認できたので、この値を用いることにした。代表幅としてはナセルマンハッチを想定し $l=1\text{m}$ とした。また、建築物荷重指針¹⁰⁾において 1m 以下では局部風圧の規模効果はないということも考慮した。設計風速を 50m/s とすると、約 1m の面積に同時に作用することと等価となる 1 点の風圧時

系列の平均化時間 T_c は 0.08 秒(模型スケールで $T_c=5.7\text{ms}$)となる。この平均化時間に対応させるため移動平均化個数は $T_c/\Delta t$ より 2 個とした。

3. 平均風力係数

3. 1 球形型ナセル模型の表面粗度の影響

球形型ナセルにおける表面粗度の効果の一例として、一様流中における $a/b=2.5$ の平均抗力係数 C_D と平均揚力係数 C_L を図-4 に示す。ここで、 C_D, C_L の定義は下記の通りである。

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho U^2 A}, \quad C_L = \frac{F_L}{1/2\rho U^2 A} \quad (3)$$

ここに、 F_D :平均抗力, F_L :平均揚力, ρ :空気密度, U :ナセル高さにおける風速, A :代表面積で、矩形ナセルの場合、 $A=\pi DH/4+LH$ (ただし、図-5 のみ $A=LH$)、球形型ナセルの場合、 $A=\pi ab/4$ とする。

表面粗度の有無による C_D, C_L の差異は小さく、表面粗度がある場合に C_D は僅かに大きく、 C_L は僅かに小さくなる。この傾向は気流や模型形状が異なる場合でも同じである。また図示しないが風速を 5m/s, 10m/s, 15m/sと変化させた場合の C_D, C_L の値は表面粗度の有無に係わらず風速が高くなるに従い僅かに値が大きくなるが極端に変化する現象はみられなかった。特に風速 10m/sと 15m/sでは殆ど差はなく、本実験風速の範囲内ではレイノルズ数の影響は確認できなかった。

3. 2 地面・ハブの影響

地面上ハブ無し(case1), タワー上ハブ無し(Case2), ならびにタワー上ハブ有り(Case4)の C_D, C_L を図-5 に示す。ここで、図-5 中の C_D, C_L は $A=LH$ で定義した値である。タワー上ハブ無しの場合(Case2), C_D は $\theta=90^\circ$ で最大 1.2 となり、建築基準法やGL2003 の値に近い。ハブ有りの場合(Case4), $\theta=90^\circ$ に対して非対称となり $\theta=80^\circ$ で最大 1.4となる。またハブの影響は最大で約 23%の増加($\theta=75^\circ$)となる。逆に $\theta=45^\circ$ 以下ではハブの影響により C_D は小さくなる。ナセルがタワー上にある場合(Case2), 地面上にある場合(Case1)に比べ C_D は最大 50%程度大きくなる。 C_L に関しては、ハブ有りの場合(Case4) $\theta=0\sim 90^\circ$ でハブ無しの場合(Case2)に比較してほぼ倍になっておりハブの影響は C_D より C_L のほうが大きいことが分かる。

3. 3 気流の乱れによる影響

気流の乱れの影響の一例として、矩形型ナセル $L/D=2.5$, 球形型ナセル $a/b=2.5$ 表面粗度ありの場合の C_D, C_L を図-6 に示す。 C_L に関しては、矩形型ナセル, 球形型ナセルとも気流の乱れによる差異はほとんどなく、乱流中と一

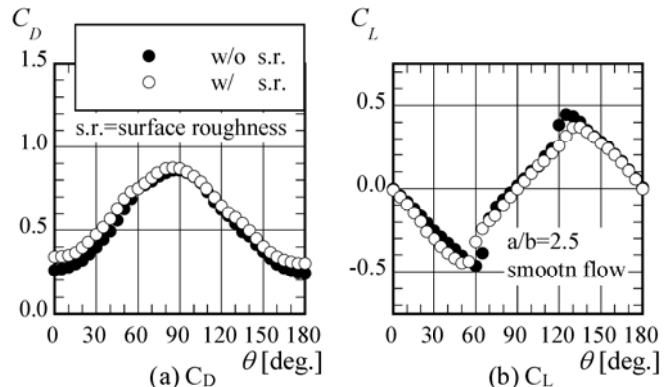


図-4 抗力係数と揚力係数(表面粗度の効果)

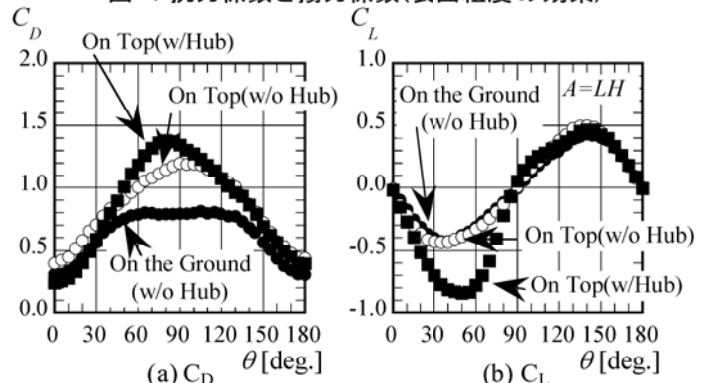


図-5 抗力係数と揚力係数(ハブと地表面の効果)

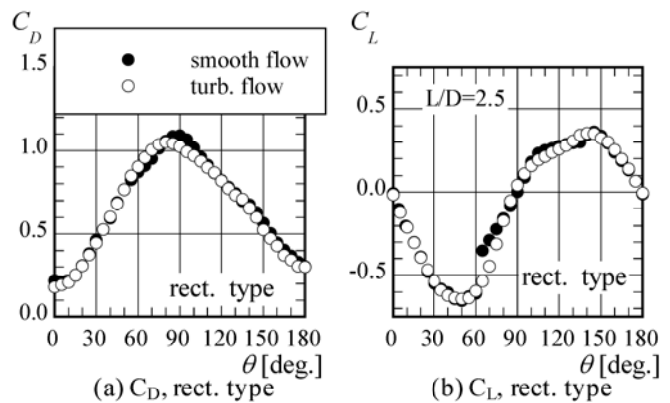


図-6 抗力係数と揚力係数(乱れによる効果)

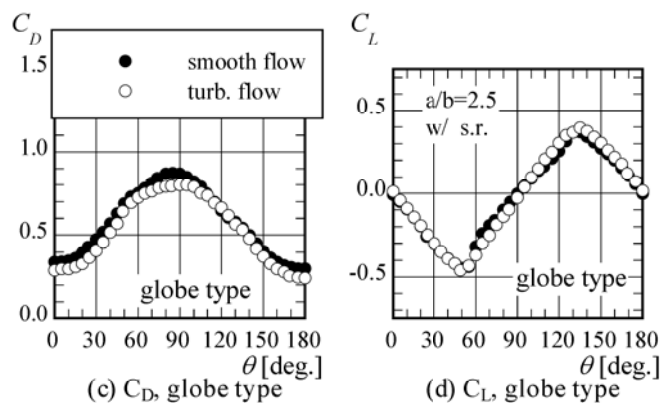


図-6 抗力係数と揚力係数(乱れによる効果)

様流中との C_L の値はほぼ同じである。 C_D に関しては乱流中の C_D のほうが一様流中の C_D よりも僅かに小さい値となる。翼型のような流線型物体に作用する C_D は、前面の正圧が支配的なため、乱れの効果により乱流中のほうが一様流中よりも大きな値となる。しかし鈍頭物体の場合、乱れの影響により剥離渦が小さくなり背面の負圧が減少し、その結果 C_D が小さくなる¹¹⁾。風車ナセルは矩形型、球形型とも流れの剥離が生じているため乱流中の C_D のほうが小さくなる。

3.4 ナセル長さの影響

矩形型、球形型のナセル長さを変化させた場合の C_D, C_L を図-7に示す。 C_D, C_L をナセル横($\theta=90^\circ$)の投影面積で定義すると矩形型ナセル、球形型ナセル共に長さによるばらつきは小さく、(4)式～(7)式のように近似するとこの範囲のナセルをほぼ包括して表すことができる。

$$\text{矩形型ナセル} \quad C_D(\theta) = -0.36 \cos(1.9\theta) - 0.06 \cos(2.8\theta) + 0.74 \quad (4)$$

$$C_L(\theta) = \{-0.7 \sin(2\theta) + 0.06 \sin(2.3\theta)\} \cdot \{1.2 + 0.1 \cos(4\theta)\} \cdot \cos(0.38\theta) \quad (5)$$

$$\text{球形型ナセル} \quad C_D(\theta) = -0.21 \cos(2.1\theta) + 0.67 \quad (6)$$

$$C_L(\theta) = \{-0.5 \sin(2\theta) + 0.06 \sin(0.5\theta)\} \cdot \{1.2 + 0.1 \cos(4\theta)\} \cdot \cos(0.35\theta) \quad (7)$$

4. ピーク風圧係数分布

矩形型ナセルに作用する正負のピーク風圧係数分布 $\hat{C}_{pe}$ を図-8に示す。正の $\hat{C}_{pe}$ (図-8(a))は上面で0.4～0.6、それ以外の垂直な面では概ね1.6～2.2の値で、各面とも部位による局所的な大きな値はみられない。一方、負の $\hat{C}_{pe}$ (図-8(b))は、前面のハブで覆われている部位は比較的小さいが、側面ならびに後面では四隅付近で大きな負圧が生じそれぞれ-3.4～-4.0、-3.0の値となる。側面の前面寄り隅角部の大きな負圧は風向角 55° で、後面寄り隅角部は風向角 195° とそれぞれ前面ならびに後面に正対する風向から少し風下側となる場合に生じている。上面でも前面寄り隅角部と後面付近で大きな負圧が生じ、特にハブの影響のない後面付近では-5.8と大きな負圧が生じている。この大きな負圧は風向角 215° 付近で生じており、円錐渦による局所的な負圧と考えられる。

風車ナセルの外装材設計用風荷重は唯一GL2003に規定されているのみである。GL2003で規定されている風力係数を図-9に示す。GL2003では瞬間最大風速で定義された風圧係数が定められているが、図-9に示す値は、再現期間50年の瞬間最大風速と平均風速の比をGL2003では1.4としていることを利用して、平均風速に基づく $\hat{C}_{pe}$ に換算して示してある。図-9より、GL2003の換算 $\hat{C}_{pe}$ は正圧で1.6、負圧で-1.2となり、本実験で得られた $\hat{C}_{pe}$ に比べかなり小さいことが分かる。

建築基準法・建設省告示1458号ならびに建築物荷重指針における壁面の正圧の $\hat{C}_{pe}$ はそれぞれ2.3、2.0(高さ60m、地表面粗度区分IIIの場合)である。これらの値と本実験結果(図-8(a))を比較すると概ねよい対応をしていることが分かる。また図示しないが正の $\hat{C}_{pe}$ は最大平均風圧係数 $\bar{C}_{pe}$ の分布に類似している。これら結果より、風車ナセルにおける正圧の $\hat{C}_{pe}$ は建築物荷重指針の考え方と同様に乱れ強さを考慮して(8)式のように表す。

$$\hat{C}_{pe} = \bar{C}_{pe}(1 + 7I_H) \quad (8)$$

ここに、 $\hat{C}_{pe}$:ピーク風圧係数、 $\bar{C}_{pe}$:平均風圧係数、 I_H :ナセル高さにおける乱れ強さである。

図-10に建設省告示ならびに建築物荷重指針の負圧の $\hat{C}_{pe}$ をそれぞれ示す。本実験で得られたナ

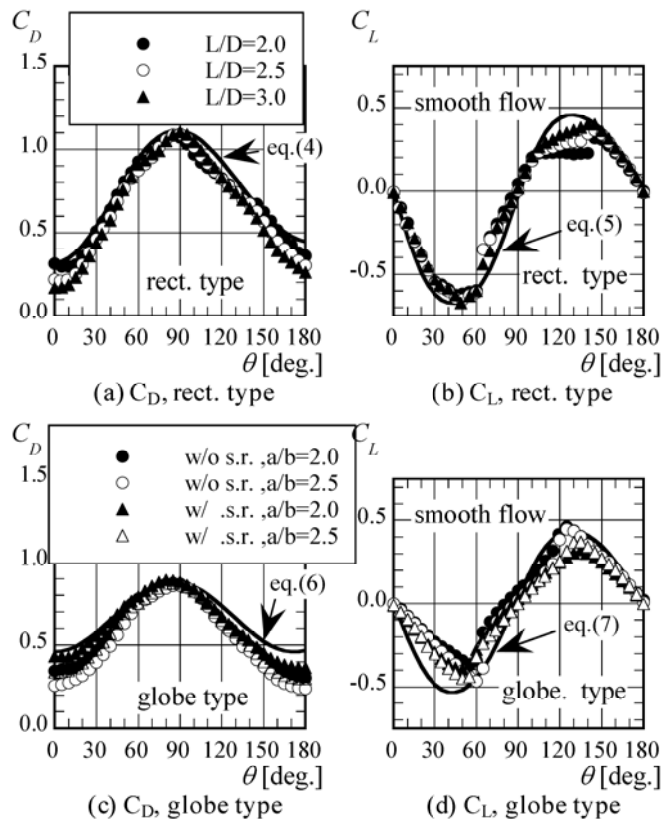
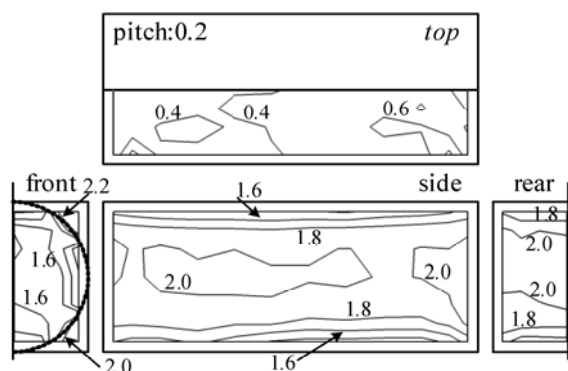
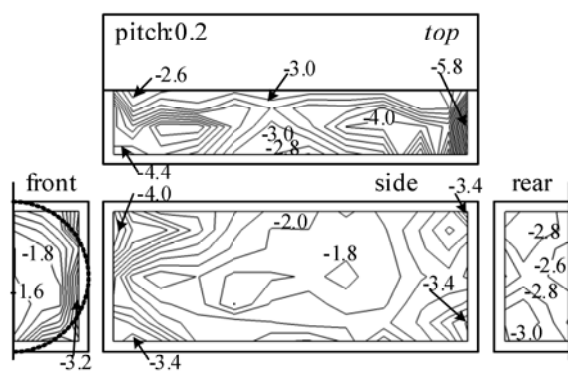


図-7 抗力係数と揚力係数(ナセル長さの影響)



(a) Positive peak pressure



(a) Negative peak pressure

図-8 最大ピーク風圧係数分布

セル部に作用する負圧の $\hat{c}_{pe}$ は隅角部で大きな値となる建設省告示あるいは建築物荷重指針の屋根面の分布に比較的類似している。これらを考慮してナセル部における外装材設計用風荷重の正の分布と負の $\hat{c}_{pe}$ 分布を模式的に示すと図-11 となる。

5. まとめ

風洞実験により矩形型ナセルならびに球形型ナセルの平均風力を測定し、その性状を調査した。また実験結果から平均抗力係数、平均揚力係数の迎角変化を表す実験式を示した。矩形型ナセルに作用するピーク風圧係数を風洞実験により調査した。正のピーク風圧係数は建設省告示ならびに建築物荷重指針の値とほぼ対応する。負のピーク風圧係数は側面隅角部と上面風下縁でこれらより大きな値を示すことが分かった。内圧係数の設定については今後の課題である。

付記 本研究は土木学会構造工学委員会風力発電設備耐風設計小委員会(委員長:石原 孟)の活動の一環として行ったものである。

参考文献 1)石原孟,山口敦,藤野陽三:2003 年台風による 14 号による風力発電設備の被害とシミュレーションによる強風の推定, 土木学会誌, Vol.88, pp.45-48, 2003.12, 2)Germanischer Lloyd, Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003, 3)建築基準法, 建設省告示 1458 号, 4)ファパンブック, 石原孟, 藤野陽三:風力発電設備の風荷重評価に関する数値的及び理論的研究 その2風向を考慮した風荷重評価式の提案, 日本風工学会誌 vol.20, No.2, pp.259-260, 2005.4, 5)土木学会, 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説, 2008.3 発刊予定, 6)Buresti, G: The effects of surface roughness on the flow regime around circular cylinders, J of Wind Eng. And Ind. Aerodyn. Vol. 8, pp.105-114, 1981, 7)丸川比佐夫, 田村幸雄, 眞田早敏, 中村修: 大型 RC 煙突に作用する揚力と振動応答, 日本風工学会第 19 号, pp.37-52, 1984.4, 8)大熊武司, 丸川比佐夫, 宮下康一: 市街地を対象とした乱流境界層の風洞実験による基礎的研究, 風工学シンポジウム, pp.61-66, 1986.12, 9) Lawson, T.V. : Wind Effects on Tall Building Volume 1, Applied Science Publisher LTD, London, 10)日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説 (2004), 11)野田博, 中山昭彦: 一様流中ならびに一様乱流中における角柱の風圧特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.117-130, 2001.1

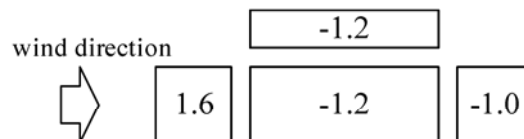


図-9 GL2003 のナセル換算ピーク風圧係数

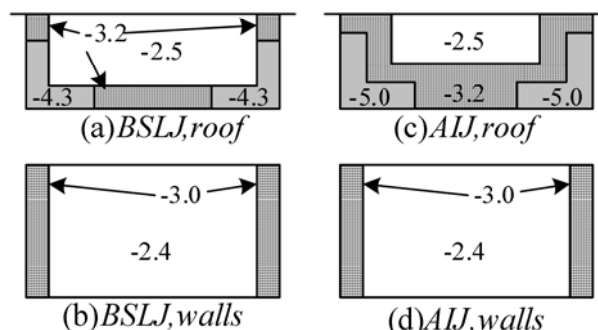
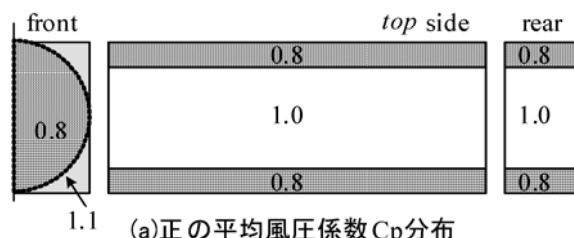
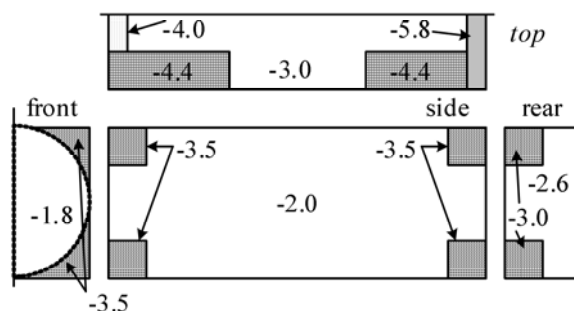


図-10 建設省告示ならびに荷重指針の外装材設計用ピーク外圧係数



(a) 正の平均風圧係数 C_p 分布



(b) 負のピーク風圧係数 C_p 分布

図-11 風圧係数の模式図