

# 円柱状構造物に作用するピーク風圧係数の確率分布特性

## Approximate probability distribution for peak pressure coefficients on circular cylinder

学籍番号 47-46828  
氏名 曾我 大輔 (Soga, Daisuke)  
指導教員 神田 順 教授

### 1. 研究の概要

本論文は、乱流中に置かれた有限頂円柱の側面に作用する風圧の特性に関する実験的な研究について述べるものである。側面における外装材の設計には、ピーク風圧の期待値が用いられてきた。建築物荷重指針・同解説(2004)<sup>1)</sup>のピーク風圧係数も同様の考え方で設定されている。しかし、ピーク風圧係数は本来ばらつきを持った確率量であり、その期待値だけではピーク風圧の確率分布特性が反映されない。そこで、現在は多くの場合において、個別に風洞実験を行い、設計用風荷重を定めている。しかし、それに費やされる時間と経費を考えると現実的ではない。

一方で、1998年6月に建築基準法が改正され、設計体系は性能設計の時代になり、建物の限界状態を把握した上で、設計者が確保したい安全性能を定め、適切な信頼度のもとに合理的な風荷重が与えられる設計体系が望まれる。したがって、各々の建物に要求される性能の変化に応じて適切な信頼度の性能設計時代に相応しいピークファクターを把握する必要となる。以上の観点から、本研究では、乱流中に置かれた有限頂円柱に作用する風圧平均、変動風圧、歪度、尖度、ピーク風圧を風洞実験によって測定し、ピークファクターに関して確率密度分布のすそ野(設計荷重の決定に関わる高風圧領域)の形状について歪度、尖度で表現し、その性質を把握する。また、パワースペクトル及びコ・コヒーレンスの評価と併せてピーク風圧の確率分布特性を統計的に把握することを目的としている。(図1)

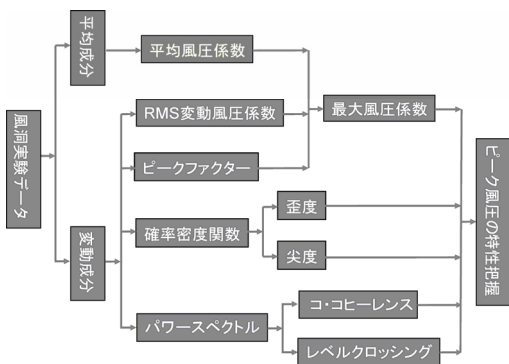


図1 研究フローチャート

### 2. 柱状構造物に関する風洞実験の概要

柱状に作用する風圧力に関する風洞実験は、風環境シミュレーター(室内閉鎖回流式エッフェル型)において行った。実験気流は地表面粗度区分IVに相当する乱流境界層流でべき指数  $\alpha=0.29$  である。また、実験風速は模型頂部で  $6.7\text{m/sec}$  とした。実験模型は  $D = 113\text{mm}$ ,  $H = 400\text{mm}$  の剛模型で外周側面上に  $15^\circ$ ,  $4\text{cm}$  ピッチに風上の最上部から各層 24 点 $\times$ 10 層で計 240 点の風圧測定孔( $1.3\text{mm}\phi$ )が設けられている。測定条件はサンプリング周波数  $1000\text{Hz}$ 、データ数は  $8160$  個 (10 分データ相当) $\times$ 1200 ブロックで行い、得られた時刻歴データは模型頂部の高さ  $H$  での速度圧で基準化し、外圧係数  $C_p$  として表している。模型縮尺率は  $1/400$ 、時間の縮尺率を  $1/70$ 、風速の縮尺率は  $1/5.7$  となっている。(図2)

また、統計値は角柱との比較によって把握する。比較データは Choi et al.<sup>2)</sup>による。模型の概要は  $D = 100\text{mm}$ ,  $B = 100\text{mm}$ ,  $H = 400\text{mm}$  となっている。(図3)

### 3. 実験結果

実験によって得られた時刻歴データに基づき、詳細な平均外圧係数  $C_p(\text{ave})$ , rms 変動外圧係数  $C_p(\text{rms})$ , 歪度 (skewness)  $S$ , 尖度 (kurtosis)  $K$ , 最大・最小ピーク外圧係数  $C_p(\text{max,min})$ , 正、負側における最大ピークファクター  $g_p(\text{max,min})$  を下記の式によって求め、実験データとした。実験データ解析結果の分布を図4~11に示す。

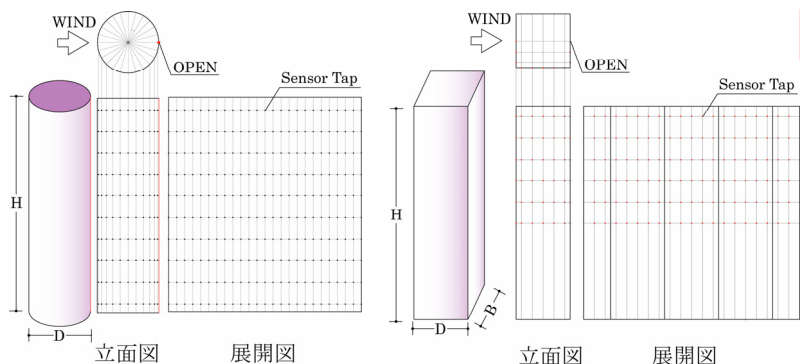


図2 実験模型概要図(円柱)

図3 比較実験模型概要図(角柱)

風圧係数の平均値：

$$Cp(ave) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Cp$$

風圧係数のRMS値：

$$Cp(rms) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Cp - Cp(ave)\}^2}$$

風圧係数の最大・最小ピーク値：

$$Cp(max, min) = \max(Cp), \min(Cp)$$

正側・負側の最大ピークファクター：

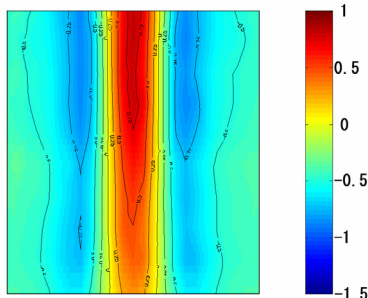
$$g(max, min) = \frac{Cp(max, min) - Cp(ave)}{Cp(rms)}$$

歪度(skewness)

$$S = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(Cp) \cdot \{Cp - Cp(ave)\}^3 \Delta Cp}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} f(Cp) \cdot (Cp - Cp(ave))^2 \Delta Cp \right\}^{3/2}}$$

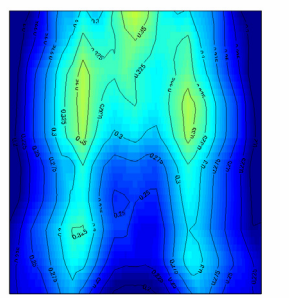
尖度(kurtosis)

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(Cp) \cdot \{Cp - Cp(ave)\}^4 \Delta Cp}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(Cp) \cdot \{Cp - Cp(ave)\}^2 \Delta Cp \right]^2} - 3$$



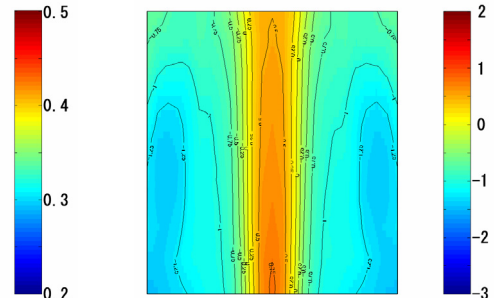
wind pressure coefficients:Average

図4 Contour of  $Cp(ave)$



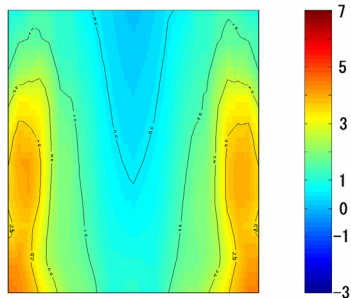
wind pressure coefficients:r.m.s.

図5 Contour of  $Cp(rms)$



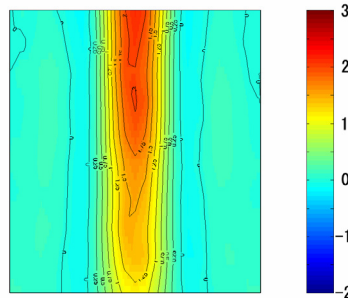
wind pressure coefficients:skewness

図6 Contour of  $S$



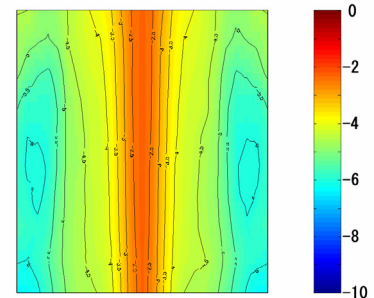
wind pressure coefficients:kurtosis

図7 Contour of  $K$



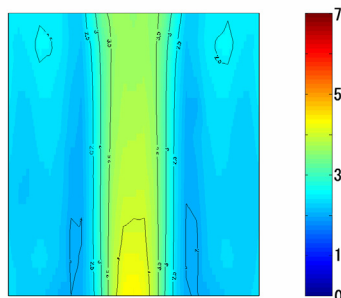
wind pressure coefficients:Max

図8 Contour of  $Cp(max)$



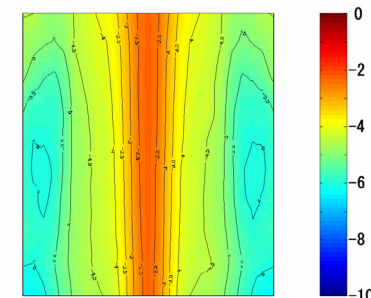
wind pressure coefficients:peak factor (min)

図9 Contour of  $Cp(min)$



wind pressure coefficients:peak factor (max)

図10 Contour of  $g(max)$



wind pressure coefficients:peak factor (min)

図11 Contour of  $g(min)$

#### 4. 正角柱構造物との比較による統計値考察

円柱と角柱の統計値周方向分布を図12~19に示す。平均風圧では、剥離点では正角柱構造物の負圧が大きくなっている。これは、正角柱の剥離点が角で固定されているためである。それ以外では円柱構造物と正角柱構造物の平均風圧係数は同様の傾向を示している。r.m.s.変動風圧では円柱は風上から風下にかけてなだらかに減少しているの

に対して、角柱は剥離点以降の側面でrms変動風圧係数が大きくなっている。これは剥離点における渦放出があるため、乱れの大きな流れの影響を強く受けている事を示す。歪度では側面後方及び風下面において円柱は風下面が偏りが無いのに対して、角柱は側面後方の方が偏りがある。尖度では角柱の剥離点、及び風下面でピークがあるのに対し、円柱では側面後方においてピーク値を出している

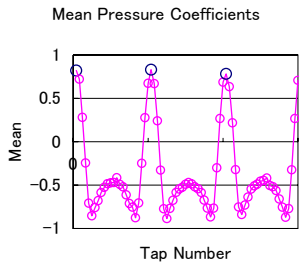


図 12：平均風圧係数【円柱】

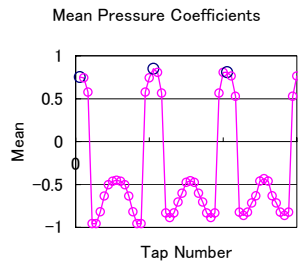


図 13：平均風圧係数【角柱】

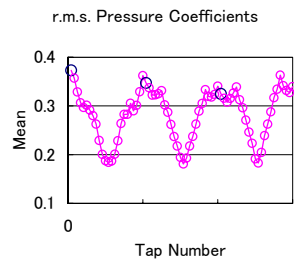


図 14：r.m.s.風圧係数【円柱】

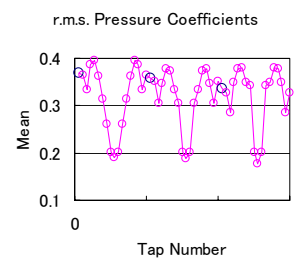


図 15：r.m.s.風圧係数【角柱】

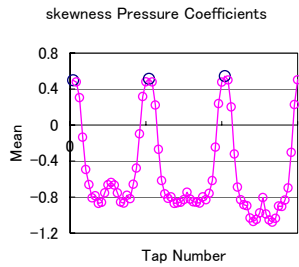


図 16：歪度(skewness)【円柱】

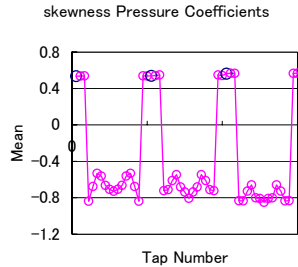


図 17：歪度(skewness)【角柱】

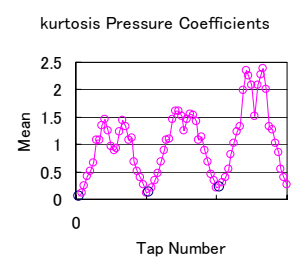


図 18：尖度(kurtosis)【円柱】

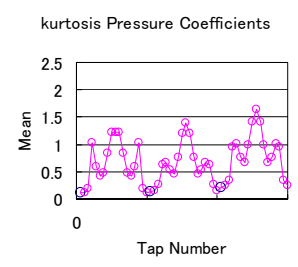


図 19：尖度(kurtosis)【角柱】

## 5. ピークファクター

ピークファクターの非超過確率を図 20、図 21 に示す。風上の正側の最大ピークファクターより側面前方から風下にかけてのピークファクターの方が非正規性の強い事が見て取れる。

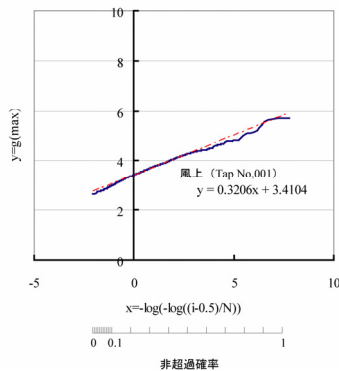


図 20：正側の最大ピークファクター非超過確率（1層目）

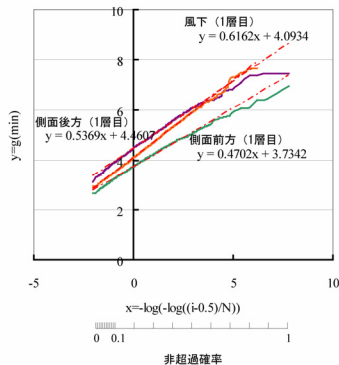


図 21：負側の最大ピークファクター非超過確率（1層目）

理論式ではピークファクターは定常ガウス過程であることが要求される。理論式は下記に示す。

$$g(\max, \min) = \sqrt{2\ln(v)T} + \frac{0.57723}{\sqrt{2\ln(v)T}}$$

$$v = \sqrt{\int_0^\infty n^2 Sp(n)dn / \int_0^\infty Sp(n)dn}$$

$Sp(n)$ ：変動係数のパワースペクトル

$v$ ：レベルクロッシング数

しかし、上記に見る様にピークファクターは非正規性を持つ値であるため、実験値と理論式によって求められる値とでは最大 35%もの差がある。その時、歪度(skewness)  $S$ 、尖度(kurtosis)  $K$  との関係を図 22、図 23 に示す。この様にピークファクターは歪度(skewness)  $S$ 、尖度(kurtosis)  $K$  と線形の関係が見て取れる。そこで歪度 (skewness) を指標とする変数  $x_s$ 、及び尖度 (kurtosis) を指標とする変数  $x_k$  とし、 $Eq./ Measured$  を 1 とする関数を  $p(x)$  とした時、次の様に表す事が出来る。

$$p(x) = (ax_k + b)(cx_s + d)$$

$$a = 0.25, b = 0.98, c = -0.024, d = 1.01$$

$a, b$  は尖度 (kurtosis) による線形近似によって求められ、 $c, d$  はその結果を歪度 (skewness) で線形近似したものである。よって歪度 (skewness) 及び尖度 (kurtosis) を考慮したピークファクターは次式となる。

$$g(measured) = p(x) \cdot g(Eq.)$$

これにより、 $g(measured)$  と  $g(Eq.)$  との誤差は 2% 未満となる。

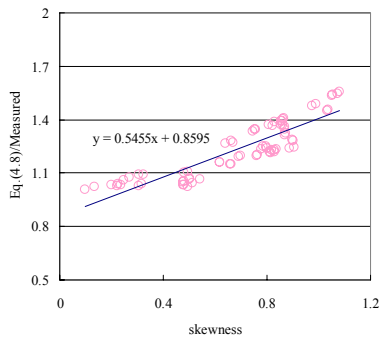


図 22：歪度と理論値/実験値との関係

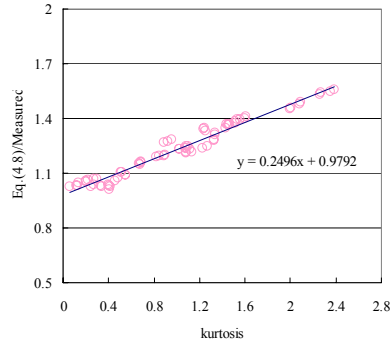


図 23：尖度と理論値/実験値との関係

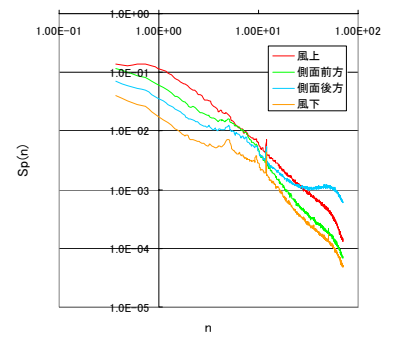


図 24：歪度と理論値/実験値との関係

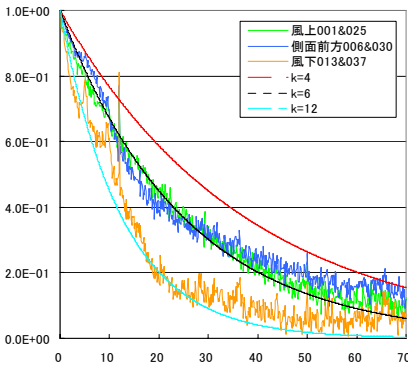


図 23：コ・コヒーレンスにおける軸方向 2 点間の周方向比較

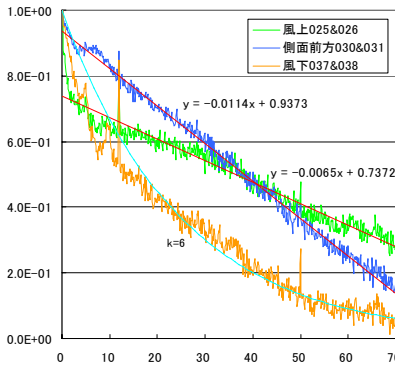


図 24：コ・コヒーレンスにおける軸方向 2 点間の周方向比較

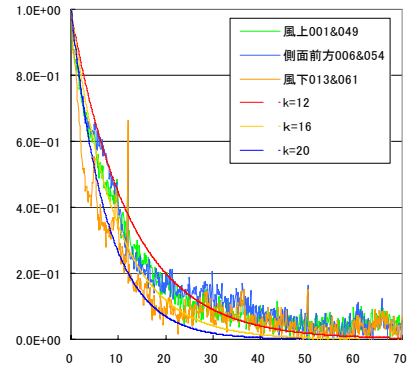


図 25：コ・コヒーレンスにおける軸方向距離 2 倍 2 点間の周方向比較

## 5. パワースペクトル

パワースペクトルの周方向の変動風圧のパワースペクトルを図 24 示す。周方向の風上、側面前方、側面後方、そして風下では、風上は風速のパワースペクトルと同様である。そして側面前方～風下において 8Hz 周辺に wide-band なピークが見られる。これは、渦放出によるものでストローハル数を算出したところ  $S = 0.135$  になる。これは乱流境界層における二次元円柱のストローハル数  $S = 0.2$  と比べても低いものとなっている。また、側面後方では高周波数域の大きくなっている。

## 6. コ・コヒーレンス

構造物の風に対する動的な応答特性を一層明確にするためには、振動数別の相互相関係数、すなわちコ・コヒーレンスが必要となる。

コ・コヒーレンスを近似する理論式として、Davenport、Kanda が提案したものと線形近似の 3 つを使用した。Davenport 及び Kanda の式を下記に示す。

$$C_{12}(n) = \exp\left(-k \frac{n \cdot \Delta r}{U}\right)$$

$k$  : 減衰定数、 $\Delta r$  : 2 点間の距離

$$C_{12}(y_1, y_2, z_1, z_2, n) = \exp\left[-\frac{\sqrt{k_y^2 \cdot (y_2 - y_1)^2 + k_z^2 \cdot (z_2 - z_1)^2}}{\bar{U}(10)} n^*\right]$$

$$n^* = \sqrt{\left(\frac{\bar{U}(10)}{k_2 \cdot L(z)}\right)^2 + n^2} \quad L(z) = 460 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.5}$$

軸方向の 2 点間は Davenport の指数関数近似式で上手くフィッティング出来る。しかし、周方向の 2 点間のコ・コヒーレンスでは、Davenport の指数関数近似式よりも線形近似の方が精度が良くなっている事が見て取れる。

側面前方においては剥離点からの放出渦によって渦放出周波数周辺でコ・コヒーレンスが上昇する。そのため、コ・コヒーレンスは直線的な減少となり線形に近くなる。軸方向において距離が 2 倍になったとき、減衰定数  $k$  は 1.5～2.0 倍程度となっており、Davenport の指数近似式に代入した時、コ・コヒーレンスとしては  $e^{3-4}$  (20 倍～50) 倍の速さで減少していることを示す。

## 7. まとめ

本研究により、乱流中に置かれた有限長円柱の各統計値の特性を把握する事が出来た。ピークファクターにおいては実験値の最大ピークファクターと理論上の最大ピークファクターの比  $Eq./Measured$  が、歪度 (skewness)、及び尖度 (kurtosis) の値と線形関係にあることを示した。そして、理論上の最大ピークファクターを実験値の最大ピークファクターに近似する式を提案した。その精度は 2% 以内に収まる。また、各風圧孔におけるパワースペクトル及び 2 点間のコ・コヒーレンスの性状を把握した。

※ 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)
- 2) Jun Kanda and Hang Choi, Approximate probability for peak pressure coefficients Wind Effects on Building and Urban Environment, ISWEI 2004