研究報告

円筒形構造物の風荷重に関する風洞実験

Wind-tunnel Study of Wind Loads on Circular Cylindrical Structures

植松 康^{*1}

具 忠謨^{*2}

Yasushi UEMATSU, KOO Choong Mo

SUMMARY

Wind loads for designing thin circular cylindrical structures, such as oil-storage tanks and silos, have been studied in a turbulent boundary layer, aiming at accumulating information for the revision of the *AIJ Recommendation for Storage Tanks and Their Supports* (1996). Wind pressure distribution on the roof, in the case of enclosed structures, was measured, the results of which are compared with the specifications of the *AIJ Recommendations for Loads on Buildings* (2004). The effects of open top on the pressure distributions on the external and internal wall surfaces are also investigated. Furthermore, the characteristics of instantaneous pressure distributions on the external surface are discussed by using a conditional sampling technique and the POD (Proper Orthogonal Decomposition) analysis.

Key words: external pressure, internal pressure, circular cylindrical structure, open-top, wind tunnel experiment, conditional sampling, POD analysis

1. はじめに

現在、日本建築学会・容器構造委員会では、「容器構造設計指針・同解説」¹⁾の改訂作業が進められている。この指針の中で、風荷重の算定は基本的には日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説」²⁾(以後、「荷重指針」という)によるものとしている。しかし、容器構造についてみると、風荷重算定に必要な風力係数・風圧係数が荷重指針の中には十分に与えられていない。例えば、円形平面をもつ構造物の屋根面の外圧係数は、アスペクト比 H/D が 1 以下の場合しか与え

られていない。しかし、サイロでは H/D が 3 程度のものが多い。また、内圧係数は、閉鎖型建築物に対してのみ与えられており、オイルタンクでよく用いられるオープントップの場合は規定されていない。

そこで、本研究では容器構造の耐風設計に有用な情報を得るため、風圧分布に関する基礎的な風洞実験を行った。ここでは構造骨組用風荷重に着目し、主として平均風圧係数を扱う。曲面構造の場合、風力の特性がレイノルズ数 Re に依存するが、ここでは極超臨界域³⁾を対象とする。

*1 東北大学未来科学技術共同研究センター 教授

Professor, New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University

*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生

Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Tohoku University

(原稿受理年月日: 2007 年 8 月 20 日, 採用決定: 2007 年 11 月 28 日)

2. 実験方法

実験は東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻のエッフェル型境界層風洞で行った。実験気流はベキ指数 $\alpha \approx 0.22$ の境界層乱流であり、高さ $z=100\text{mm}$ での乱れの強さとスケールは、それぞれ 0.15 および約 20cm である (Fig.1 および Fig.2 参照)。オイルタンクやサイロ等の容器構造物は一般に海岸地帯や田園地帯に建設されることが多いと考えられるが、ここでは、乱れの強さを大きくすることで流れの遷移の促進を図った³⁾。その結果として、ベキ指数 α はターゲット (0.15 程度) よりやや大きな値となっている。

Fig. 1 Profile of the wind tunnel flow

Fig. 2 Reduced power spectrum of the wind speed

実験は2シリーズよりなり、それぞれ用いた模型の寸法(直径 D 、高さ H 、肉厚)は以下の通りである。

- ・シリーズ1: $D=100\text{mm}$, $H/D=0.5\sim 3.0$, 肉厚 3mm
- ・シリーズ2: $D=216\text{mm}$, $H/D=0.5, 1.0$, 肉厚 5mm

模型はいずれも市販の鋼管を加工して作製したものである。シリーズ1での着目点は、屋根面風圧と内圧分布に及ぼすアスペクト比 H/D の影響である。 $H/D=3$ までを扱うこととし、実験気流の境界層厚さや風洞のブロックageを考慮し、 $D=100\text{mm}$ とした。この場合、十分高いレイノルズ数が得られず、極超臨界域に達しない可能性があるため、表面に40番の紙やすりを貼り、流れの遷移を促進した。参考文献4)より、相対表面粗度は $k_s/D \approx 5.1 \times 10^{-3}$ と見積もられる。ここに、 k_s は equivalent sand grain roughness⁵⁾を表す。屋根面風圧や内圧は、屋根端部での剥離流の影響を強く受けるため、表面粗度の影響は小さいと考えられる。

閉鎖型の場合、屋根面中心線上に15個の圧力測定孔(0.6mm ϕ)が、また、オープントップの場合、内壁に1本の経線に沿って4個($H/D=0.5$)~13個($H/D=3$)の圧力測定孔が設けられており、円筒モデルを10° 間隔で回転させることで屋根面風圧および内圧(オープントップの場合のみ)の分布を求めた。測定はいずれも平均風圧のみである。

一方、シリーズ2では外圧分布に着目する。極超臨界域での外圧分布は円柱表面の影響を強く受けるが、Macdonaldら⁶⁾は、乱れの大きな境界層乱流中に置かれた滑らかなタンクモデルの場合、 Re 数が 1×10^5 程度以上であれば極超臨界域流れが得られるとしている。そこで、ここでは直径が比較的大きい円柱($D=216\text{mm}$)を用いることとした。オイルタンクを主対象とし、 H/D は0.5と1.0の2種類である。なお、表面は滑らかである。圧力測定孔は、高さ $z=(2/3)H$ の外周に沿って $\theta=-90^\circ \sim +90^\circ$ の範囲は10° ピッチ、それ以外は15° ピッチ、計30個設けられており、多点風圧計を用い、サンプリング周波数 400Hz で全点同時測定した。圧力測定孔と圧力変換器は内径 1.4mm、長さ 80cm のビニールチューブで結ばれている。チュービング補正は、予め測定した計測システムの伝達関数を用い、周波数領域で行った。ここでは、風洞実験における幾何学的縮尺率を $\lambda_L \approx 1/200$ と仮定する。頂部高さでの実験風速 U_H は、基本風速 $U_0 \approx 35\text{m/s}$ 、地表面粗度区分IIとして計算される実風速に対して縮尺率が $\lambda_V \approx 1/3$ になるように設定する(但し、4.1において Re の影響を検討する場合は除く)。この場合、時間の縮尺率は $\lambda_T \approx 1/60$ に相当する。1回の測定における各チャンネルのデータ数は4,096個であり、記録

長はフルスケールでほぼ 10 分に相当する。同一条件で 5 回測定を行い、結果はいずれも、5 回の測定結果のアンサンブル平均で評価する。ブロック比は最大でも 3.3% であるから、実験結果に対する補正は特に行わない。

いずれのシリーズでも、基準風速 U_{ref} および基準静圧は模型上の高さ 600mm に設置されたピトー管で測定した。また、風圧係数(外圧係数 C_{pe} , 内圧係数 C_{pi})はいずれも模型頂部高さ H での速度圧 q_H で定義する。

3. 屋根面風圧と内圧に関する結果(シリーズ 1)

3.1 実験風速の設定

円筒構造物まわりの流れの Re 数による遷移は一般に平均抗力係数 $\bar{C}_D$ の Re 数による変化から判断される²⁾。しかし、 $\bar{C}_D$ と平均背面圧係数 $\bar{C}_{pb}$ は概ね 1 対 1 の対応関係があることから、 $\bar{C}_{pb}$ の変化からも判断できる^{3), 4)}。そこで、先ず円筒の中心高さ($z = H/2$)における $\bar{C}_{pb}$ の風速 U_{ref} による変化を調べた。結果の例を Fig. 3 に示す。いずれの H/D に対しても、 U_{ref} が 12~13m/s 程度を超えると $\bar{C}_{pb}$ の値は U_{ref} によらずほぼ一定となる。二次元円柱の結果とのアナロジーより、このような風速域では極超臨界域に達していると考えられる。以上の検討より、本シリーズでは、 $U_{ref} \approx 18$ m/s で測定を行うこととした。

Fig. 3 Variation of mean base-pressure coefficient $\bar{C}_{pb}$ with wind velocity U_{ref} at a reference point ($z_{ref} = 60$ cm)

3.2 屋根面風圧分布

Fig. 4 は屋根面上の平均外圧係数 $\bar{C}_{pe}$ のコンター図を示す。また、風向に平行な中心線上の分布を Fig. 5 に示す。ここに、 x は前縁からの距離を表す。これらの結果より、流れの剥離により前縁で大きな負圧を示すが、最大値を与える位置は H/D の増大に伴い風下

Fig. 4 Distribution of wind pressure coefficient C_{pe} on the roof

Fig. 5 Distribution of mean wind pressure coefficient $\bar{C}_{pe}$ along the centerline of the roof

側にシフトする。

荷重指針では、Fig. 6 に示すように、屋根面領域を $R_a(0 \leq x < D/8)$, $R_b(D/8 \leq x < D/4)$, $R_c(D/4 \leq x < 3D/4)$, $R_d(3D/4 \leq x \leq D)$ の 4 領域に分け、それぞれに対する外圧係数を規定している。しかし、規定値は $H/D \leq 1$ の範囲しか与えられていない。そこで、本実験結果を用い、既往の研究⁷⁾と同様、中心線上の分布を空間平均して 4 領域の値を求めた。結果を既往の実験結果⁷⁾および荷重指針値と共に Fig. 7 に示す。

Fig. 6 Definition of the four areas (R_a to R_d) on the roof

本実験結果と既往の実験結果は概ね整合しているが、最も風上側の領域 R_a では、本実験結果は既往の実験値よりやや小さい。一方、風下の領域 R_d では、

(a)Area R_a

(b)Area R_b

(c)Area R_c

(d)Area R_d

Fig. 7 Area-averaged wind pressure coefficients for the four areas R_a to R_d .

逆に本実験値の方がやや大きめである。このような違いは、実験気流の乱れ特性の違いによるものと考えられる。すなわち、既往の実験の方が、気流の乱れがやや大きく、剥離流の再付着がいくらか早まったためと考えられる。

3.3 内圧分布

Fig. 8 は、 $H/D = 0.5$ でオープントップの場合について、平均内圧係数 $\bar{C}_{pi}$ のコンター図(展開図)を示す。既往の研究⁸⁾($H/D = 0.25$)に比べて $\bar{C}_{pi}$ の変化は小さい。 $H/D \geq 1$ ではさらに小さくなり、内壁全体でほぼ一定値を示した。そこで、内壁面全体の平均値を計算し、 H/D に対してプロットすると Fig. 9 のようである(●印)。 H/D の増大に伴い $|C_{pi}|$ が増大する。これは、閉鎖型の場合に屋根面負圧が H/D の増大に伴い大きくなることに対応していると考えられる。そこで、Fig. 4 に示した $\bar{C}_{pe}$ 分布の屋根面全体での空間平均値を計算し、Fig. 9 に併せてプロットした(Δ 印)。内圧係数の平均値と同様の変化を示す。定量的にみると、両者の比(内圧/屋根面外圧)は 1.05~1.15 の範囲にある。このような結果より、閉鎖型構造物の屋根面外圧分布からオープントップの場合の内圧係数を推定することが可能であると考えられる。

Fig. 8 Distribution of internal pressure coefficient $\bar{C}_{pi}$ ($H/D = 0.5$)

Fig. 9 Averaged value of $\bar{C}_{pi}$ over the whole internal area and averaged value of $\bar{C}_{pe}$ over the whole roof area

4 外圧の周方向分布に関する結果(シリーズ2)

4.1 平均およびピーク外圧係数分布

様々な風速下での高さ $z = (2/3)H$ における平均外圧係数の周方向分布を Fig. 10 に示す。これはオープントップの結果であるが、閉鎖型の場合もほぼ同じ結果が得られた。従って、屋根の有無は外圧分布に大きな影響を及ぼさないと考えられる。Fig. 10 によれば、本実験の範囲では、平均外圧係数分布の風速による変化は小さく、 U_H と D で定義されたレイノルズ数 Re がほぼ 1.3×10^5 より大きい範囲では、 $\bar{C}_{pe}$ 分布は Re 数にほとんど依存しなくなる。これは、Macdonald ら⁶⁾が示した境界層乱流中に置かれたタンクモデルに対して流れが極超臨界域に達する Re 数とほぼ同じである。 H/D が大きくなると、側面の最大負圧が大きくなるが、背面圧はそれほど変わらない。

次に、最大・最小ピーク外圧係数の周方向分布を平均外圧係数分布とともに Fig. 11 に示す。なお、ピーク値は、5 回の測定結果のアンサンブル平均であるが、

(a) $H/D = 0.5$

(b) $H/D = 1.0$

Fig. 10 Circumferential distribution of mean wind pressure coefficient $\bar{C}_{pe}$ at $z = 2/3H$ for open-top tanks

時刻歴波形に対して移動平均等の操作は行っていない。閉鎖型に関する既往の実験結果^{6),9)}と同様、ピーク外圧係数分布は平均外圧係数を上下にシフトさせた分布となっている。なお、本報告中に実験データは示されていないが、平均外圧係数と同様、屋根の有無はピーク外圧係数分布にほとんど影響を及ぼさないことが分った。これらの結果より、時々刻々の C_{pe} 分布は、最大および最小ピーク外圧係数分布の間をとり、時間によって大きく変化することが分る。

(a) $H/D = 0.5$

(b) $H/D = 1.0$

Fig. 11 Circumferential distributions of the mean and peak wind pressure coefficients at $z = 2/3H$ for open-top tanks

$\theta \approx 0^\circ$ の風上正圧領域に着目すると、変動外圧係数のピーク値(最大および最小ピーク外圧係数と平均外圧との差)の大きさは、正側の方が負側より大きい。この傾向は、既往の実験結果⁹⁾も考慮すれば、 H/D が小さいほど顕著になるといえる。これは変動風圧の確率密度関数が正側に歪んでいることを意味し、 H/D が小さいほど風洞床面の影響が強く現れた結果であると考えられる。

準定常仮定によれば、 $\theta=0^\circ$ における最大ピーク外圧係数 $\hat{C}_{pe}$ は近似的に次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\hat{C}_{pe} = (1 + gI_u)^2 \bar{C}_{pe} \quad (1)$$

ここに、 I_u は風圧測定高さでの乱れの強さ、 g は風速変動のピークファクターである。 $H/D=0.5$ および 1.0 に対して、 I_u 、 $\bar{C}_{pe}$ 、 $\hat{C}_{pe}$ の実験値を(1)式に代入して g を計算すると、以下のようである。

$H/D=1.0$: $g=3.1$ (オープントップ), 3.2 (屋根付)

$H/D=0.5$: $g=3.6$ (オープントップ), 3.8 (屋根付)
屋根の有無の影響は小さい。また、 $H/D=0.5$ の場合の方が大きい。これも風洞床面の影響と思われる。

4.2 条件付きサンプリング

オイルタンク壁面に作用する風力は外圧と内圧の差で与えられる。従って、特にオープントップの場合のように大きな負の内圧が作用する場合には、風上側の比較的広い範囲で正の風力が作用し、壁面の座屈発生の可能性がある。また、風圧は時間的にも空間的にも変動しているから、瞬間的には正の外圧の範囲が平均外圧係数の範囲より大きくなる可能性もある。内圧の変化は比較的小さいので、座屈など壁面の挙動を論じる場合には外圧が重要になる。そこで、そのような瞬間的な外圧分布の特性を把握するため、条件付きサンプリングを行った。すなわち、風上側のある参照点 θ_{ref} で最大ピーク外圧係数が生じる瞬間の外圧係数分布を求めた。結果の例をFig. 12に示す。図には5回の測定結果がプロットされているが、正圧分布を見ると測定間のばらつきは小さい。各ケースについて、最大ピーク外圧係数(θ_{ref} で発生するとは限らない)並びに瞬間的な C_{pe} 分布における正圧範囲 $\Delta\hat{\theta}_p$ に関する実験結果をTable 1に纏めて示す。ここに、 $\theta_{ref}=0^\circ$ の値は5回の測定結果のアンサンブル平均であるが、 $\theta_{ref} \neq 0^\circ$ の値は、 $\theta=0^\circ$ に関して対称な2点(例えば、 $\theta=10^\circ$ と -10°)に対する10個の結果のアンサンブル平均である。平均外圧に対する正圧範囲 $\Delta\bar{\theta}_p$ は、 H/D および屋根の有無に拘らず、 $\Delta\bar{\theta}_p \approx 73^\circ$ である(Fig. 10参照)。最大平均外圧係数は $\theta=0^\circ$ で生じ、 $H/D=0.5$ の場合約 0.68 、 $H/D=1.0$ の場合約 0.76 である。それに対して、条件付きサンプリングの結果はTable 1に示す通りである。 $\Delta\hat{\theta}_p$ についてみると、平均外圧係

(a) $H/D = 0.5$

(b) $H/D = 1.0$

Fig. 12 Instantaneous pressure distribution along the circumference at $z = 2/3H$ for open-top tanks (conditional sampling for $\theta_{ref} = 0^\circ$)

Table 1 Positive pressure area $\Delta\hat{\theta}_p$ and the maximum peak pressure coefficient $\hat{C}_{pe}$ (conditional sampling)

H/D	屋根	$\theta_{ref} (^\circ)$	$\hat{C}_{pe}$	$\Delta\hat{\theta}_p (^\circ)$
0.5	有	0	1.70	55.9
		10	1.61	60.6
		20	1.47	63.7
	無	0	1.70	58.0
		10	1.63	60.7
		20	1.49	62.5
1.0	有	0	1.89	62.3
		10	1.80	59.4
		20	1.64	60.7
	無	0	1.90	58.1
		10	1.83	59.0
		20	1.63	61.1

数分布に対する値 $\Delta\bar{\theta}_p$ よりいくらか小さめである。従って、風上側で正のピーク外圧係数が発生する瞬間の正圧域は $\bar{C}_{pe}$ 分布のそれより多少狭い。 θ_{ref} を大きくすると $\Delta\bar{\theta}_p$ は増大する傾向を示すが、最大ピーク外圧係数の大きさは小さくなる(特に、 $\theta_{ref} = 20^\circ$ の場合)。また、屋根の有無はこれらの結果に対してほとんど影響を与えないようである。

4.3 POD 解析

風圧場の組織構造を把握するため、円周上の外圧データに対して POD 解析を行った。圧力測定点間隔が全周にわたって一定ではないため、荷重負担面積を考慮した¹¹⁾。オープントップタンクに対する結果を Fig. 13 および Fig. 14 に示す。屋根付きの場合もほぼ同様の結果が得られた。1 次モード $\phi_1(\theta)$ は Fig. 10 に示した $\bar{C}_{pe}$ 分布に似た形状をしており、寄与率は 40% 程度である ($H/D = 0.5$ の場合の方がいくらか小さい)。2 次モード $\phi_2(\theta)$ は $d\bar{C}_{pe}/d\theta$ 分布に近い形状を示しており、寄与率は 20% 程度である ($H/D = 0.5$ の場合の方がいくらか大きい)。2 次モードまでの累積寄与率はいずれも 60% 程度である。同様の性状は、Macdonald¹²⁾ や Uematsu et al.¹³⁾ によっても示されている。このような結果は、円筒壁面上の外圧が準定常的であることを示している。すなわち、準定常仮定に基づけば、各瞬間 t における外圧係数の分布 $C_{pe}(\theta, t)$ は次式で与えられる¹³⁾。

$$C_{pe}(\theta, t) = \bar{C}_{pe}(\theta) + 2 \frac{u(t)}{U} \bar{C}_{pe}(\theta) + \frac{v(t)}{U} \frac{d\bar{C}_{pe}(\theta)}{d\theta} \quad (2)$$

ここに U は当該高さでの平均風速、 $u(t)$ および $v(t)$ は風向方向および風向直角方向の風速変動成分を表す。変動成分の第 1 項目と第 2 項目がそれぞれ POD 解析における 1 次および 2 次モードに対応していると解釈される。一方、3 次モードと 4 次モードの寄与率は 10% 程度である。3 次以上の高次モードは、アスペクト比や屋根の有無によって異なる。1 次や 2 次モードと異なり、分布形の物理的解釈は難しい。

以上は、従来よく言われてきた準定常仮定に基づく解釈であるが、ここでは POD 解析の結果をより詳しく検討してみる。Fig. 15 は $H/D=0.5$ 、オープントップの場合について、1 次モード $\phi_1(\theta)$ と平均外圧係数分布

$\bar{C}_{pe}(\theta)$ 並びに 4.2 節に示した条件付きサンプリングの結果 ($\theta_{ref} = 0^\circ$ 、5 回の測定結果のアンサンブル平均) を比較したものである。ただし、いずれも $\theta = 0^\circ$ の値で基準化されている。同様に、Fig. 16 は 2 次モード $\phi_2(\theta)$ と $d\bar{C}_{pe}/d\theta$ の分布を比較したものである。ただし、 $\theta = 30^\circ$ の値で基準化されている。これらの結果によれば、風上側の $\theta = \pm 60^\circ$ 程度までの範囲では、 $\phi_1(\theta)$

Fig. 13 Normalized eigenvalues of pressure for open-top tanks.

(a) $H/D = 0.5$

(b) $H/D = 1.0$

Fig. 14 Normalized eigenvectors of pressure for open-top tanks.

は $\bar{C}_{pe}$ 分布に、 $\phi_1(\theta)$ は $d\bar{C}_{pe}/d\theta$ 分布にほぼ等しい。すなわち、この範囲では風圧変動に対して準定常仮定がほぼ成り立つといえる。しかし、 $|\theta| > 60^\circ$ の範囲では、両者の違いが大きい。これは、構造物による気流の歪みや流れの剥離の影響によると考えられる。また、Fig. 15 によれば、 $\phi_1(\theta)$ は全体的に条件付きサンプリングの結果とよく一致しており、側面や背面での大きさは平均外圧係数よりかなり小さい。

Fig. 15 Comparison of $\phi_1(\theta)$ with the $\bar{C}_{pe}$ distribution and the instantaneous pressure distribution at the instant when the maximum peak pressure at $\theta = 0^\circ$ occurs ($H/D = 0.5$, open-top)

Fig. 16 Comparison of $\phi_1(\theta)$ with the $d\bar{C}_{pe}/d\theta$ distribution ($H/D = 0.5$, open-top)

5 おわり

本研究では、オイルタンク等容器構造の風荷重算定に当り、荷重指針で不足している風圧係数に関する情報、特に屋根面風圧や内圧に関するデータを蓄積するため、簡単な模型を用いて風洞実験を行った。

乱れの比較的大きな境界層乱流中に置かれたアス

ペクト比の小さい円筒形構造物の場合、レイノルズ数が概ね 1.3×10^5 より大きい場合には所謂「極超臨界流れ」が得られることを確認した。

本報告では、先ずアスペクト比 $H/D = 0.5 \sim 3$ の範囲での屋根面上の平均風圧係数分布並びにオープントップの場合の内圧係数分布を示した。屋根面風圧については、 $H/D \leq 1$ に対する荷重指針値と概ね整合していることが確認された。また、内圧については、本研究で扱った $H/D = 0.5 \sim 3$ の範囲ではほぼ一様に分布しており、その空間平均値は、閉鎖型構造物の屋根面に作用する平均外圧係数の空間平均値にほぼ等しいことが示された。

さらに、オイルタンクを主対象とし、外圧の周方向分布についても検討した。測定した範囲内では、屋根の有無は外圧分布特性に大きな影響を与えないことが示された。条件付きサンプリングより、風上側に見られる瞬間的な正圧分布の広がりや平均風圧のそれよりいくらか狭いことが示された。また、負圧分布は測定(run)間で大きく異なるが、正圧分布はあまり変わらない。今後、座屈解析を含め、詳細な応答解析に基づき、設計用外圧分布を議論する必要がある。さらに、内圧変動とその荷重効果や外圧と内圧の相関を明らかにし、より合理的な設計用風荷重評価方法を確立する必要がある。これについては今後の課題とする。

最後に、外圧の POD 解析を行い、風圧分布の時間的・空間的変動特性を解釈する一助とした。その結果、風上側 $\pm 60^\circ$ 程度までの範囲内の風圧変動は準定常的特徴を有することが示された。1 次モードの寄与が大きく、そのモード形は $\theta = 0^\circ$ で最大ピーク外圧が生じるときの瞬間的な外圧係数分布に概ね一致する。

構造骨組用風荷重は、風圧の動的荷重効果(例えば、壁面に働く応力度や座屈耐力)に基づいて評価されなければならない。今後、応力解析や座屈解析も併せて行い、設計用風荷重モデルを提案していく予定である。

謝 辞

本研究を進めるに当り、日本建築学会・容器構造委員会(主査: 鹿島建設(株)技術研究所・内藤幸雄氏)より貴重な意見やアドバイスを頂いた。ここに記し、感謝の意を表する。

参考文献

1. 日本建築学会：容器構造設計設計指針・同解説，1996.
2. 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004.
3. 植松 康：二次元円柱まわりの流れの分類と臨界レイノルズ数について，日本風工学会誌，No. 43，1990，pp.35-43.
4. 植松 康，山田大彦，菊池雅之：表面粗さのある二次元円柱まわりの流れの特性－赤外線映像装置による観察－，日本風工学会誌，No. 43，1990，pp. 9-21.
5. R.I. Basu: Aerodynamic forces on structures of circular cross-section – Part 1. Model-scale data obtained under two-dimensional conditions in low-turbulence streams, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 21, 1985, pp. 273-294.
6. P.A. Macdonald, K.C.S. Kwok, J.D. Holmes: Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 31, 1988, pp.165-187.
7. 野口満美，植松 康：球形ドームの構造骨組および外装材設計用外圧係数，日本風工学会誌，No.95，2003，pp.181-182.
8. R.J. Holroyd: On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds (Part 1), Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 12, 1983, pp.329-352.
9. 阪田一郎，木谷 勝：乱流境界層に直立する有限高さ円柱の流力特性(変動風圧の確率密度)，日本機械学会論文集(B 編)，51 巻 462 号，1985，pp.445-451.
10. 植松 康，飯泉江梨，セオドル スタトポラス：独立上屋の風荷重に関する研究：その1 外装材用ピーク風力係数，日本風工学会論文報告集，第30巻，第4号，2005，pp. 91-102.
11. 谷口徹郎，谷池義人，西村宏昭：負担面積と時間遅れを考慮したドーム屋根面圧に関する POD 解析，第14回風工学シンポジウム論文集，1996，pp.323-328.
12. P.A. Macdonald, K.C.S. Kwok, J.D. Holmes: Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 34, 1990, pp.77-95.
13. Y. Uematsu, M. Yamada, A. Inoue and T. Hongo: Wind loads and wind-induced dynamic behavior of a single-layer latticed dome, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.66, 1997, pp.227-248.