

大阪府立工業高等専門学校 正員 岡南博夫
京都大学 工学部 正員 白石成人
京都大学 工学部 正員 松本 勝

1. よえがき: 風洞実験によって実構造物の各種空力現象に及ぼす乱れの効果を推定する場合には, 風洞気流と自然風との間に存在する相似則の問題点を始めとして不明な点が多く, 今後の研究に待つところが多いものと考えられる。宮田・宮崎・山田および中村・友成⁽¹⁾は, 風洞実験的に充腹構造断面周囲の圧力分布を測定し, 定常空気力およびギャロッピングなどに及ぼす乱れの効果に関する考察を行っている。このような従来の研究によれば, 充腹構造断面に作用する空気力は, 気流の乱れ成分に大きく影響されることが知られる。本研究は, 準定常的アプローチによって変動風中における構造断面の定常空気力に及ぼす乱れの効果を考察したものである。

2. 変動風中における定常空気力: ここでの定常空気力は, 静止した構造断面に作用する平均力を意味するものとし, 測面と直交する方向のいわゆる横力を対象とする。また, 気流の変動は, 実測された風速変動成分の周期がかなり大きいものまで含まれていることより, 準定常的な考察が可能な程度に比較的ゆるやかなものと考え, その分布は正規分布であり定常性とエルゴード性を有するものと仮定する。

空気力に及ぼす気流の乱れの効果に関して, 乱れのいかなる成分の寄与が支配的であるかといった問題は, 議論されるところであるが, ここでは鉛直方向成分を対象とする。図1に示すように, 構造断面の領域で空間的に平均した鉛直方向変動風速 $\bar{w}$ に起因する相対迎角 α を導入すれば, スパン方向のストリップに作用する空気力は

$$F_y = L \cos(\alpha + \theta) + D \sin(\alpha + \theta) = \rho U^2 b \Delta x C_{Fy}^* \quad \text{--- (1)}$$

$$C_{Fy}^* = \{C_L + C_D \tan(\alpha + \theta)\} \sec(\alpha + \theta) \cdot \cos^2 \alpha \quad \text{--- (2)}$$

となる。ただし, ρ : 空気密度, U : 平均風速, b : 断面半幅, Δx : スパン方向長さ, C_L : 揚力係数, C_D : 抗力係数, である, 一樣流中における空気力係数を5次多項式 $\sum_{n=0}^5 A_n \tan^n \alpha$ と表せば

$$C_{Fy}^* = \sum_{n=0}^5 A_n \tan^n(\theta + \alpha) \cdot \cos^2 \alpha \quad \text{--- (3)}$$

となり, $\tan(\theta + \alpha) = \bar{w}/U + \tan \alpha$ (図1参照) を式(3)に代入して, 図1 風速および空気力の成分
5次までの近似を行えば,

$$C_{Fy}^* = \sum_{n=0}^5 A_n^* \tan^n \alpha, \quad A_n^* = \sum_{r=n}^5 A_r \left[\sum_{m=0}^r (-1)^m \frac{r!}{(n-2m)!(r-n+2m)!} (\bar{w}/U)^{r-n+2m} \right] \quad \text{--- (4)}$$

となる。ここで, C_{Fy}^* の期待値を定常空気力係数 C_{Fy} と考える。式(4)より

$$E[C_{Fy}^*] \equiv C_{Fy} = \sum_{n=0}^5 E[A_n^*] \tan^n \alpha, \quad E[A_n^*] = \sum_{r=n}^5 A_r \left[\sum_{m=0}^r (-1)^m \frac{r!}{(n-2m)!(r-n+2m)!} E[(\bar{w}/U)^{r-n+2m}] \right] \quad \text{--- (5)}$$

となるが, $\bar{w}$ が平均値ゼロの変動成分を表すものであり, 従って $E[(\bar{w}/U)^n]$ は n 次のモーメント m_n を表す。空間的に平均化された $\bar{w}$ が w と同様に正規分布するものと仮定すれば, $\bar{w}/U$ の高次モーメントは,

$$E[(\bar{w}/U)^{2i-1}] = m_{2i-1} = 0, \quad E[(\bar{w}/U)^{2i}] = m_{2i} = (2i-1)!! \bar{\sigma}_a^2, \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad \text{--- (6)}$$

である。ただし, $\bar{\sigma}_a^2 = E[(\bar{w}/U)^2]$, $(2i-1)!! = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2i-1)$ である。従って $E[A_n^*]$ は

$$E[A_n^*] = \sum_{r=n}^5 A_r \left[\sum_{m=0}^r (-1)^m \frac{r!}{(n-2m)!(r-n+2m)!} \left\{ 2 \left(\frac{r-n+2m}{2} \right) - 1 \right\}!! \cdot (\bar{\sigma}_a^2)^{(r-n+2m)/2} \right] \quad \text{--- (7)}$$

となる。ただし, 式(7)において, 式(6)より $r-n+2m$ が奇数の項はゼロとなる。式(5), 式(7)より, 変動風の $\bar{\sigma}_a^2$ が

求められれば、一様流中における静的空気力係数を修正した形で変動風中の空気力係数が与えられる。

3. 空間補正係数: 前節において、準定常的に空間平均した鉛直方向変動風速を導入した。 C_F を求める段階では、 $\bar{w}$ の分散値 $\bar{w}^2$ が必要であり、直接 w から風速変動の空間特性を考慮して $\bar{w}^2$ を求める。この場合若干問題点を有するが、構造物のガスト応答を評価する際に Davenport が導入した空間相関を利用して $\bar{w}^2$ を求める。基準点の鉛直方向変動風速のパワースペクトル密度として Karman の式を利用し、Davenport による空間相関係数を導入すれば、 $\bar{w}^2$ は次式で表される。

$$\bar{w}^2 = \bar{w}_w^2 \cdot (\sigma_w / U)^2 \quad \text{----- (8)}$$

ただし、 $\bar{w}_w$ は基準点の鉛直方向変動風速の標準偏差、 $\bar{w}^2$ は空間補正係数であり次式で表される無次元化した乱れのスケールの関数である。

$$\bar{w}^2(L) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1 + 19.12(\bar{L}k)^2}{\{1 + 7.172(\bar{L}k)^2\}^2 \{0.49k^2 \left[\frac{2\pi^2}{k} r - 1 + \exp\left(-\frac{2}{\pi} r\right) \right]\}^2} dk \quad \text{----- (10)}$$

ただし、 $\bar{L} = L/2b$ (L : 乱れの積分スケール)、 $r = b w U$ である。
図2は空間補正係数 $\bar{w}^2$ を示すが、乱れのスケールが大きくなるに従って $\bar{w}^2$ の $\bar{L}$ に関する変化率が小さくなり $\bar{w}^2$ の値が $\bar{L}$ の変化に敏感でなくなることを示している。このことに関連して、式(5)、(7)、(9)より C_F に関しても同様のことがいえるものと考えられる。なお、同図には、Dryden のスペクトル、および高度方向に変化する形で表示された Panofsky-Mc Cormick のスペクトルから求めた $\bar{w}^2$ を同時に示した。

4. 計算結果および実験結果との比較: 図3は、文献(1)、(2)の矩形断面(1:1、1:2)を対象とした実験結果を利用して、本研究で得られた結果の評価を行ったものである。まず、一様流中の実験値を利用して最小二乗法により空気力係数の近似多項式を求め、その結果と $\bar{w}^2$ から C_F を求めた。なお C_F は y の正の向きに正とする。現時点では、迎角の大きい領域まで一致する一様流中の空気力係数の精度良い近似式が求められておらず、ここでは、図3に示すように、1:1、1:2の結果ともに一様流中における空気力係数として、迎角の小さい領域で実験結果と比較的一致し、迎角の大きい領域で大きく異なる Eq.1 と、迎角の大きい領域で傾向が一致する Eq.2 との2式を利用して C_F を求めた。その結果、変動風中の実験結果は両式から求めた結果の中間的な傾向を示しているようである。

変動風中の空気力係数を精度良く推定するためには、一様流中の空気力係数を迎角のかなり大きい領域まで一致するような多項式近似が要求される。また、大スケールの元腹断面を有する構造物に乱れを含む接近流が作用する場合には、構造物の存在によって乱れ特性が変化することが考えられ、ここで求めた C_F の適用範囲に対する検討を行うことなどが今後の課題であろう。

最後に、データ整理、数値計算などの協力を受けた大阪府立工業高等専門学校校役師樋口 治氏に感謝の意を表するとともに、昭和57年度文部省科学研究費(奨励A)の補助を受けたことを併記し感謝の意を表する。

参考文献: (1) 宮田利雄、宮崎正男、山田内、第26回構造工学シンポジウム論文集、1980、pp.85-96。(2) 中村泰治、友成義正、風工学シンポジウム論文集、1980、pp.344-349。(3) Laneville A and G.V. Parkinson, Proceedings of the Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Japan, 1971, pp.787-797.

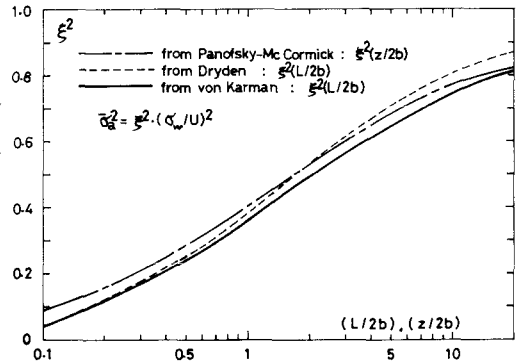
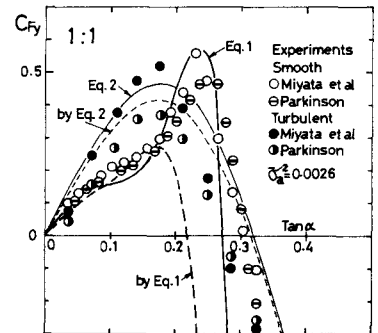
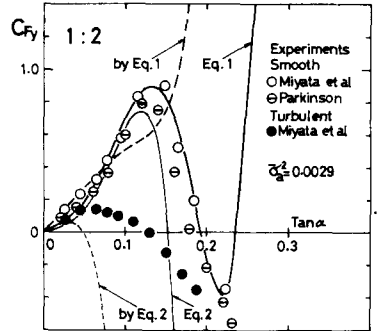


図2 空間補正係数



r	1	3	5	7	9	11
Eq.1 Ar	269	-168	6270	-59900	0	0
Eq.2 Ar	402	-46.0	48.4	302	-889	874



r	1	3	5	7	9	11
Eq.1 Ar	2.10	854	-41800	464000	0	0
Eq.2 Ar	1.14	689	14600	-4.80E6	1.94E8	-3.05E9

図3 静的空気力(横力)係数