

数値流体解析による角柱の変動空気力特性

長崎大学工学部 正 会 員 河村進一

1. はじめに

乱れた風の力による構造物の対風挙動は、パフェティングあるいはガスト応答と呼ばれ、風の乱れによる変動空気力が構造物に作用すると考えて不規則振動論に基づいて解析される。この解析を行う場合、構造部材に作用する非定常空気力が必要となるが、従来、これらの変動空気力は、主として風洞実験によって得られる空気力が利用されてきた。本研究では、数値流体解析を利用してガスト空気力に相当する変動空気力を評価することを試みた。

2. 準定常理論による変動空気力

乱れた風の中に置かれた物体の平均流方向の振動を考える場合、風速 $U(t)$ を平均値成分 U_0 と変動成分 $u(t)$ に分けて表し、物体の振動速度を \dot{x} とすると、物体に作用する相対速度 $U_0 + u(t) - \dot{x}$ を用いて、平均流方向の空気力 $F_x(t)$ を準定常的に表し、2次以上の微小項を無視すると、次式が得られる。

$$F_x(t) = F_D + f_D(t) + f_x(t), \quad F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D U_0^2, \quad f_D(t) = 2F_D u(t)/U_0, \quad f_x(t) = -2F_D \dot{x}(t)/U_0 \quad (1)$$

となる。ここで F_D : 定常抗力, $f_D(t)$: 風速変動による変動抗力, $f_x(t)$: 準定常的に作用させた非定常抗力, ρ : 空気密度, A : 物体の平均流方向の投影面積, C_D : 抗力係数, である。この中で振動に寄与するのは, $f_D(t)$ と $f_x(t)$ であるが, $f_x(t)$ は物体の変位速度比例成分となるので, 応答解析においては, 振動による付加減衰(空力減衰)として扱われる。また, $f_D(t)$ 伝達関数 $X_D(fd/U_0)$ を導入して,

$$f_D(t) = 2F_D X_D(fd/U_0)u(t)/U_0 \quad (2)$$

とし, これを不規則外力として構造物に作用させる。変動空気力のスペクトルは,

$$S_{f_D}(f) = 4F_D^2 |X_D(fd/U_0)|^2 S_{uu}(f)/U_0^2 \quad (3)$$

となり, 風速変動のスペクトルから変動空気力のスペクトルが計算でき, 周波数領域での応答解析を行うことが可能となる。流れと直角方向の変動空気力については, 次式のようなになる。

$$S_{f_L}(f) = 4F_D^2 \left| X_L^u(fd/U_0) \right|^2 \frac{S_{uu}(f)}{U_0^2} + \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 A \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right)_{\alpha=0} \right)^2 \left| X_L^v(fd/U_0) \right|^2 \frac{S_{vv}(f)}{U_0^2} \quad (4)$$

右辺第1項は, 平均流方向の風速変動 $S_{uu}(f)$ による変動揚力, 第2項は平均流と直角方向の風速変動 $S_{vv}(f)$ による揚力変動である。厳密には, さらに平均流方向と平均流直角方向の風速変動のクロススペクトル $S_{uv}(f)$ による項が現れるが省略している。式(4), (5)の $|X_D(fd/U_0)|^2$ 等は空力アドミッタンスであり, 通常, 風洞実験結果から与えられる。

3. 数値流体解析による変動空気力の推定

通常, 乱流中での構造物の振動応答を数値流体解析で行おうとすると, 計算時間が膨大になる。また, 乱流のパラメータを与えることも容易ではない。本研究では, 任意形状の物体の変動空気力を推定する簡便な方法を提案するものである。すなわち, 静止した物体を風速変動を含んだ流れの中に置き, その変動空気力を直接

キーワード: 数値流体解析, 変動空気力, ガスト応答, 角柱

連絡先: 〒852-8521 長崎市文教町 1-14 TEL 095-847-1111 内線 2715 FAX 095-848-3624

計算して、その結果から変動空気力のスペクトル特性を推定する。実際には、風速変動のスペクトルから風速変動の時系列データをつくり、平均流方向の風速変動による変動空気力と、平均流直角方向の風速変動による変動空気力をそれぞれ計算し、式(3)、式(4)に相当する変動空気力のスペクトルを推定する。

解析対象は断面辺長 B の正方形角柱とし、図-1 に示すように解析領域を直径 $60B$ の円形とし、O型境界適合格子上(128×64点)で二次元数値流体解析を行った。基礎方程式は Navier-Stokes の式と圧力に関する Poisson 方程式であり、流速と圧力を同一点に配置するレギュラーメッシュ上で差分法により離散化した。時間積分には Euler の陽解法を用い、対流項は3次風上差分のK-Kスキーム、その他の空間項は2次中心差分により近似した。使用したプログラムは、著者らが開発したものである¹⁾。風速変動を表現するために、格子を空間ではなく角柱に固定して格子全体を移動させ、境界条件として角柱表面に滑りなしの条件、遠方境界には風速変動による相対速度を与えた。解析におけるレイノルズ数は $Re=1.3 \times 10^4$ とし、無次元時間 $tU_0/B=200$ まで、時間積分間隔 1.0×10^{-3} にして行った、変動空気力は、各時間ステップにおいて表面圧力を積分することによって計算し、その評価は $tU_0/B=100 \sim 200$ の結果を用いて行った。

4. 解析結果および考察

流れ方向および流れ直角方向の乱れ強さをそれぞれ $I_u=10\%$ 、 $I_v=5\%$ とした場合の、正方形角柱の抗力および揚力のスペクトルを図-2、図-3に示す。全体的に、抗力の変動は揚力の変動に比べて小さくなっている。また、抗力、揚力ともに、無次元振動数 0.1 付近にストローハル数成分と考えられるピークが確認できる。特に揚力変動のスペクトルではそのピークが顕著に現れ、揚力変動の特徴を良く捉えているといえる。このことから、ストローハル数成分の空気力の影響が現れる断面形状を持つ物体の変動空気力が容易に求められる。以上の結果より、本研究で提案した手法に基づいて変動空気力の評価が風洞実験を用いなくても、数値流体解析を用いることである程度推定できることを示していると考えられる。

【参考文献】

1) 河村進一、久保喜延、山口栄輝：前縁隅角部に曲率を有する断面の空力特性に関する風洞実験および数値流体解析，土木学会論文集，No.619 / I-47, pp.67-74, 1999.

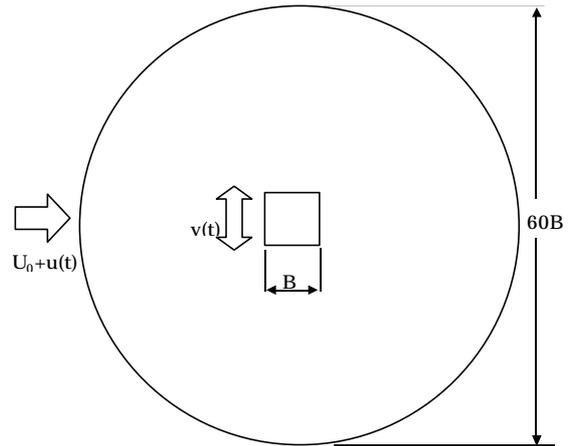


図-1 解析領域

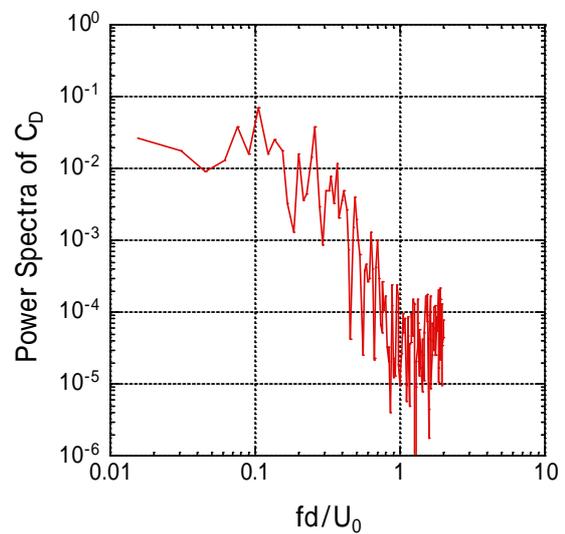


図-2 抗力変動のスペクトル

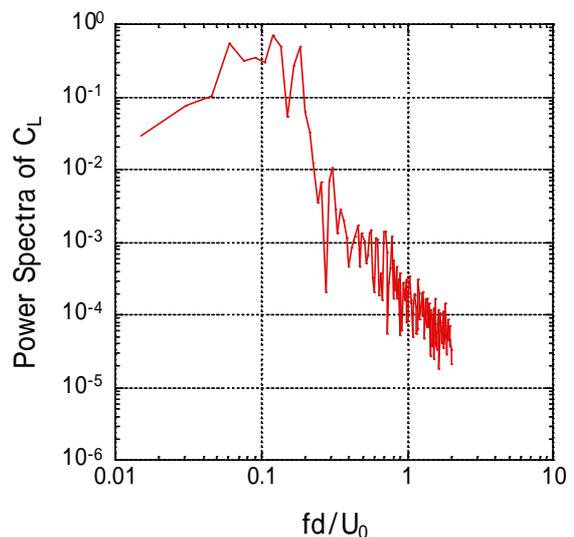


図-3 揚力変動のスペクトル