弾性運動体の曲げ剛性による非定常流体力特性

Characteristics of Dynamic Forces due to Bending Stiffness of a Moving Elastic Body

○学 永田哲志 (九工大院) 正 瀧脇正樹 (九工大)
正 田中和博 (九工大)

Tetsushi NAGATA, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka 820-8502
Masaki FUCHIWAKI, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka 820-8502
Kazuhiro TANAKA, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka 820-8502

A number of studies of flow fields around unsteady moving airfoils have examined. In particular, flow fields around flexible moving bodies attracted a great deal of attention and their elastic advantages for flow fields have gradually been clarified. However, further research and discussion of the elastic effect for flow fields are needed because of difficulties of treatment of bending stiffness, EI , which is determined by cube of a material thickness and stiffness corresponds to the resistance to cross-sectional deformation. Therefore, it is important to clarify the effects of bending stiffness to the flow field and dynamic forces. In the present paper, we simulate the fluid structure interaction simulation of flow field around an elastic moving body. The purpose of this study is to clarify the effect of bending stiffness to the characteristics of dynamic force acting on the elastic moving body.

Key Words: Elastic moving body, Bending stiffness, Characteristics of dynamic force, Fluid structure interaction

1. 緒言

非定常運動体まわりの流れ場およびその流体力特性は、これまでに、剛体および弾性体を対象に明らかにされている。剛体翼においては、単独のヒービング(並進)運動およびピッチング(回転)運動、また、これらが組み合った運動において、その迎え角とはく離渦が、流体力特性に密接に関係することが明らかにされている。特に、組み合わせの運動は、それらの位相差による運動パターンの自由度が高く、最適な条件(位相差 $\pi/2$)が存在することも明らかにされている⁽¹⁾。

最近では、弾性翼まわりの流れ場も明らかにされており、特に、ヒービング運動する弾性翼は、自身の弾性変形により、受動的なピッチング運動が可能であり、単純な運動によって、剛体翼の組み合わせ運動と同様の流体力を得ることが可能であることが明らかにされ⁽²⁾、弾性変形の流れ場への優位性が明らかにされつつある。さらに、弾性運動体は、その硬さにより、多くの運動パターン(位相差)を実現出来るだけでなく、外力(流体力、慣性力)および内部力が釣り合うように弾性変形するため、それによる適切な流れが周囲に形成される。

弾性変形の流れ場および流体力への影響については、Heathcote⁽³⁾およびMurray⁽⁴⁾によりそれぞれ弾性翼の厚みおよびその剛性の効果が明らかにされている。彼らは、強い循環および流体力を得るためには、弾性体の適度な硬さが重要であると指摘しており、曲げに対する抵抗値で定義される曲げ剛性を設定パラメータとしている。しかしながら、流体としては、弾性体の変形による移動境界流れの問題になることから、曲げ剛性の特性をさらに詳細に明らかにする必要がある。すなわち、曲げ剛性とその流れ場との関係を示すことで、曲げ剛性を支配パラメータとして考慮した流れ場とそれに働く非定常流体力特性を明らかにできる。

これまでに、弾性運動体まわりの流れ場は、実験・数値解析により報告されているものの、流体構造連成問題であるために、存在する未知数は多く、現象も複雑である。特に、曲げ剛性 K および St 数の関係とその流れ場の詳細は十分に明らかにされておらず、それらの関係を明らかにするためには数値解析が有用である。

本研究では、ヒービング運動する弾性体まわりの流れ場の流体構造連成解析により、その非定常流体力特性を明らかにする。特に、曲げ剛性および St 数の流体力との関係より、流体力特性を決定する支配パラメータを明らかにする。

Fig. 1 Elastic test bodies

Fig. 2 Heaving motion configuration of the elastic airfoil

2. 解析条件

2-1 弾性運動体 弾性運動体は、翼弦長 $c=60[\text{mm}]$ の NACA0010 および平板を用いた(図 1(a)および(b)). これらは、その形状だけでなく、その最大厚みもそれぞれ $h=6.0$ および $1.5[\text{mm}]$ と異なるため、断面二次モーメントが異なる。翼前縁 1/4 弦長にヒービング運動 $y=asin\omega t$ を与え、そのヒービング振幅 a および後縁の最大振幅 b を図 2 に示す。また、ストロハル数 St および曲げ剛性 K を式(1)および(2)に定義する。 f, V_0, E, I_G, ρ_f および A はそれぞれ運動周波数[1/s], 主流速度[m/s], ヤング率[Pa], 断面二次モーメント[m^4] ($I_G=lh_g^3/12, l$: 翼スパン長さ, h_g : 重心位置の厚み), 流体の密度[kg/m^3] および代表面積[m^2]である。本研究では、 $0.10 < St < 1.00$ および $2.0 \times 10^{-4} < K < 2.0 \times 10^3$ を対象とし、ゲルからプラスチックの剛性を考慮している。翼弦基準レイノルズ数は、 $Re=10^3$ である。

$$St = \frac{2bf}{V_0} \quad (1) \quad K = \frac{EI_G}{0.5\rho_f V_0^2 A c^2} \quad (2)$$

2-2 数値解析手法 本研究では、ANSYS/ANSYS-CFX を用いた数値解析を行う⁽⁵⁾。NACA0010 および平板の要素数はそれぞれ 1 万および 5,000 要素である。構造の支配方程式は構成方程式を用い、弾性体の変形の非線形性を考慮する。流体部は、十分広い解析領域を定義し、NACA0010 および平板の

格子数はそれぞれ 20 万および 10 万格子である。流体の支配方程式は、連続の式および Navier-Stokes 方程式である。本研究では、流体の諸量を弾性体の曲げ剛性 K により除すことで、単位曲げ剛性の流れ場への効果を明らかにする。

3. 結果および考察

3-1 K および St 数により変化する弾性運動体に働く推進力 ヒービング運動する弾性運動体に働く非定常推進力の一周期の平均値を図 3 に示す。横軸および縦軸はそれぞれ曲げ剛性 K および推進力係数 C_T を K で除した値 C_T/K を示す。 C_T/K は、単位曲げ剛性あたりに弾性運動体が得る推進力である。●、◆および▲はそれぞれ $St=0.45, 0.64$ および 0.90 における NACA0010 の数値解析結果であり、○、◇および△は平板の結果である。

弾性運動体に働く推進力は、形状および厚みに関わらず、 K の増加に反比例して低下することがわかる。また、 St 数によってその傾きは異なる。特に、 $K=10^0$ および $St=0.90$ の平板において、推進力は最も大きい。これは、低い K かつ高い St 数では、運動体が大きく弾性変形するために、翼後方の渦列が上下に広く配列され、増速流を誘起するためであり、単位曲げ剛性では、弾性変形が大きいほど、それに働く推進力は大きくなることがわかった。しかしながら、 St 数により異なる推進力特性を示すこともわかった。

3-2 St^2/K による弾性運動体に働く推進力 図 3 より、推進力 C_T/K が K に反比例することおよび振動物体に働く推進力が St^2 に比例すること⁽⁶⁾を考慮し、 St^2/K を定義した。これは、曲げの抵抗に対する運動の程度を示す。図 4 は、 $St^2/K=6 \times 10^{-2}$ における弾性翼に働く推進力の時間変化を示す。横軸および縦軸はそれぞれ周期 t/T および C_T/K である。実線、破線および点線はそれぞれ $K=2.2, 7.2$ および 22.4 における NACA0010 の結果である。

いずれの弾性翼において、異なる K であるものの、同様の推進力を得ており、その最小値および最大値も同程度となることがわかる。 $K=2.2$ および 7.2 の推進力が $K=22.4$ に比べてわずかに遅れているのは、翼後縁の弾性変形の位相差の違いによるものである。しかしながら、その弾性変形の大きさに依らず、 St^2/K が同じであれば、その曲げ剛性あたりに得られる推進力は同じになることもわかった。

3-3 ヒービング運動する弾性体の推進力の平均値 ヒービング運動する弾性体の非定常推進力の一周期の平均値を図 5 に示す。横軸および縦軸はそれぞれ St^2/K および C_T/K であり、いずれの軸も弾性体の運動(St 数)およびそれに働く推進力 C_T に曲げ剛性の解釈が加えられている。中実および中空はそれぞれ NACA0010 および平板の結果である。

図 5 より、弾性運動体に働く推進力は、その形状および厚みに関わらず、 St^2/K に強く依存することがわかる。特に、 St^2/K が小さい条件(高い K)では、弾性変形が小さいために、それにより得られる推進力は小さくなる。その一方で、 St^2/K が大きい条件(低い K)では、自身の大きな弾性変形により、大きな推進力を得ることが可能である。すなわち、硬さの度合いにより、その弾性体の存在する領域が定められ、 St 数によって得られる推進力が決定する。以上より、 St 数および推進力 C_T の関係⁽³⁾⁽⁴⁾に K を考慮することで、弾性運動体の推進力は、 St 数および K によって決定し、 St^2/K が推進力特性を決定する上で重要であることがわかった。

4. 結言

ヒービング運動する弾性体に働く非定常推進力は、形状・厚みに関わらず、曲げ剛性 K に依存し、単位曲げ剛性では、 St 数によりその特性は異なる。しかしながら、 St 数および推進力 C_T に K を考慮することで、弾性体に働く推進力は、 St^2/K に強く依存することから、それが推進力特性を決定する支配的なパラメータになると言える。

Fig. 3 Averaged dynamic thrust varied with Bending stiffness and Strouhal number acting on the elastic heaving NACA0010 and flat plate

Fig. 4 Unsteady dynamic thrust acting on the elastic heaving NACA0010 at $St^2/K = 6 \times 10^{-2}$

Fig. 5 Averaged dynamic thrust acting on the elastic heaving NACA0010 and flat plate

引用文献

- (1) K. Isogai, et al, *AIAA*, Vol. 37, 10(1999), pp. 1145-1151.
- (2) J. Tang, et al, *37th AIAA Conf.* 25-28, June(2007), Miami.
- (3) S. Heathcote, et al, *AIAA*, Vol. 45, 5(2007), pp. 1066-1079.
- (4) M. M. Murray, *Ph.D. Dissertation*, Duke University(2000).
- (5) T. Nagata, et al, *ICJWSF*, 27-30, Sep.(2010), Cincinnati.
- (6) I. E. Garrik, *NACA Report No.* 567(1936), pp. 419-427.