

II-336 球体に作用する揚力に関する一考察

名古屋大学工学部 正員 岩田好一郎  
 名古屋大学大学院 学生員 水谷 法美  
 名古屋鉄道 正員 葛西 信三

1. はじめに：一般に構造物に作用する波力を議論する場合、波力を波進行方向成分、鉛直方向成分のように、成分に分解して取り扱うことが多い。二次元流速場である波動場に球体のような三次元物体が置かれた場合、両成分ともに直方向力と揚力の和として与えられる。このため、このような波力の特性を明らかにするためには、揚力の特性を知る必要がある。本論は、重複波の腹と節の位置に置かれた没水球体に作用する揚力を計測し、その特性を示すとともに、新たな揚力の表示式を提示して、その妥当性について検討しようとするものである。

2. 水理実験：実験は、片面ガラス張りの二次元鋼製水槽(図-1参照)で行なわれた。重複波は、水槽の端に木製の反射板を設置することにより作られた。実験条件は、静水深を56cmと一定とし、入射波の周期を2種類(T=1.0, 1.45秒)、波高を2種類(H=2.8~5.1cm)変化させた。球を重複波の腹と節の両位置に設置した。そしてその球の設置位置を深さ方向に4地点(z=-5, -10, -20, -40cm)変化させ、x, y, z方向の波力 $F_x, F_y, F_z$ とx, z方向の流速u, wを計測した。また、腹と節の位置での水位も計測した。なお、実験に使用した球は、直径(D)が6.35cmの合成樹脂製であり、Cantileverによりモーメントから力を逆算した。本論では、uによる揚力とwによる揚力の特性を比較することに重点を置き、腹の位置での揚力 $F_x$ ( $F_{xA}$ とする)、節の位置での揚力 $F_z$ ( $F_{zN}$ とする)を主に取り扱うこととする。なお座標系は図-1に示す。

3. 実験結果とその考察：図-2に典型的な波力の時間波形例を、また、図-3に波力の振幅スペクトル例を示す。これらの図から、 $F_{xA}$ と $F_{zN}$ を比較すると、その卓越周期に大きな差異が認められる。すなわち、 $F_{xA}$ の卓越周期は入射波の周期Tに一致しているのに対し、 $F_{zN}$ の卓越周期はT/2となっている。水平円柱に作用する揚力について、K.C.数( $u_m T/D$ , 添字mは最大値を示す)が大きくなると、揚力の卓越振動周波数が、2倍、3倍周波数と高くなることが報告されている<sup>1)</sup>が、節の位置、腹の位置ともに、K.C.数はほぼ同じ程度の値であり、節の位置でのみ、倍周波数の渦の放出があると考えるのも問題の残るところである。したがって、 $F_{xA}$ と $F_{zN}$ は発生機構が異なると考えられよう。 $F_{xA}$ は、従来から言われているように球表面での流線の乱れや剥離による圧力の非対称分布に基づくものと考えられるが、 $F_{zN}$ は、uの鉛直方向分布が勾配を持つことにより生ずる球上下での圧力の非対称性に起因するのではないかと考えられる。本論では、これをGradient Effectと呼ぶことにする。このGradient Effectは、つぎのように考えることができる。節の位置におけるuは、鉛直方向に双曲線的にその値は変化する。しかし、球の中心付近で流速は直線的に変化すると仮定すれば、球の中心の水

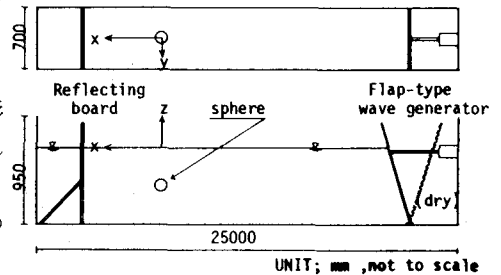
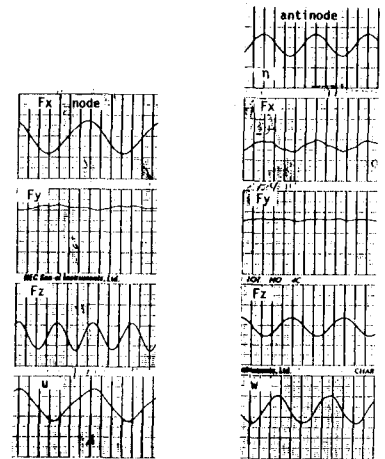


図-1 実験水槽の概略



(a) 節の位置

(b) 腹の位置

図-2 波力の時間波形の一例

深での流速を  $u$  とし、球の上側, 下側の流速  $u_u, u_\ell$  は、次のように表わすことができる。(図-4 参照)

$$u_u = u + u' \quad (1) \quad u_\ell = u - u' \quad (2)$$

ただし,  $u' = \frac{\partial u}{\partial z} \times \frac{D}{2}$  (3)

球の中心を通る微小幅  $dy$  の鉛直断面まわりの循環  $\Gamma$  は、(3)式の  $u'$  を接線流速とみなすことにより表現できる。したがって、Kutta-Joukowski の式に  $\Gamma$  を代入すれば、この断面に作用する揚力  $dF_L$  は次式で与えられる。

$$dF_L = \rho u \Gamma dy = \rho u u' \pi D dy = \frac{1}{2} \rho \pi D^2 u \frac{\partial u}{\partial z} dy \quad (4)$$

(5) 式は、球の中心を通る微小幅の断面について考えた表現である。球全体に作用する揚力  $F_L$  は、球を微小幅  $dy$  の鉛直断面の集合とみなし、 $D$  を  $y$  の関数として (5) 式を  $y$  方向に積分すれば与えられる。しかし、ここでは便宜上下記に示すように無次元の揚力係数  $C_L$  を定義し、 $F_L$  を次式で表示するものとする。

$$F_L = C_L \rho V u \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5)$$

ここに、 $V$  は球の体積である。この揚力の表示式を使って  $F_{zN}$  について、揚力係数を最小自乗法によって計算した。その結果を図-5 に示す。また、そのときの計算波形と実測波形の比較を図-6 に示す。ただし、(5) 式で計算される揚力は、実測の揚力と同様にその平均値を差し引いたものである。2倍周波数成分が明らかに卓越しているケースのみを対象としたため、水深波長比の大きい場合の値が特に少ないが、揚力係数  $C_L$  は、K.C. 数が小さい方が大きくなるようである。また、水深波長比が大きい方が、揚力係数は小さいことが認められた。Gradient Effect は、速度勾配に起因することから、水深波長比が小さい方が  $C_L$  は小さいことが予想されたが結果はこれに矛盾しており、この点については、今後更に検討を加える必要がある。しかし、図-6 からわかるように、(5) 式を使えば2倍周波数成分の揚力も予測可能であると考えてよきそうである。一方、 $F_{xA}$  については、円柱に対してよく使われている次式

$$F_L = \frac{1}{2} C_L' \rho A w |w| \quad (6)$$

(ここに、 $C_L'$  ; 揚力係数、 $A$  ; 球の投影面積) を採用し、揚力係数  $C_L'$  についても検討を加えた。ここでは図示しないが、その結果  $C_L'$  は、K.C. 数、 $Re$  数 ( $w_m D / \nu$  ;  $\nu$  ; 水の動粘性係数) が大きいほど小さくなることが認められた。

4. おわりに: 重複波の節の位置で発生する揚力  $F_{zN}$  は、実際には、Gradient Effect のみによるものではなく、恐らく  $F_{xA}$  と同様に、流線の乱れ等による揚力も含まれるはずであり、この点についても更に検討する必要がある。また、進行波中に置かれた球体に作用する波力の算定式中でも、このGradient Effect を考慮していく必要があり、この点についても今後検討していく所存である。

参考文献 1) 沢本・柏井: 第27回海講。

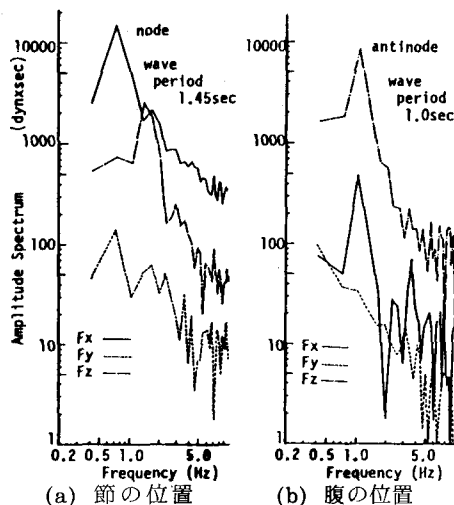


図-3 波力スペクトルの例

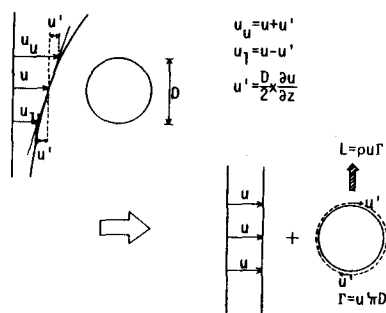


図-4 Gradient Effect

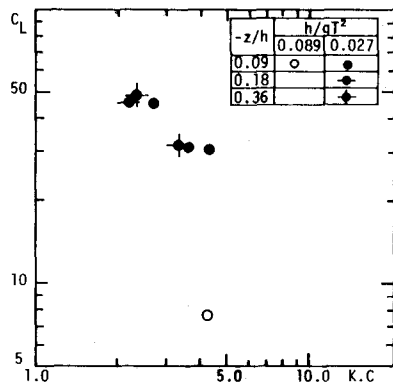


図-5 揚力係数  $C_L$  と K.C. 数の関係

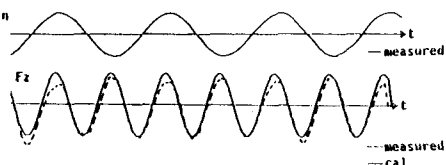


図-6 波力波形の比較の一例