

波と流れの共存場に設置された円柱に作用する
揚力変動と発生渦の関係

京都大学工学部 正員 岩垣 雄一
京都大学工学部 正員 浅野 敏之
愛知 県 庁 正員 〇山田 哲夫

1. まえがき 著者らは、円柱に波と流れが同時に作用する場合に発生する揚力の特性について、揚力の変動周波数と波の周波数との関係に共存場特有の性質が現われることを実験的に明らかにした。¹⁾ また共存場における揚力係数の特性と、それを支配するパラメータについての検討も行った。²⁾ 本研究はこうした実験からの知見をもとに、円柱周辺の集中渦の挙動をモデル化することにより、共存場の揚力変動の機構を明らかにしようとするものである。

2. 揚力の変動周波数の解析 非定常ブラジウス公式により、円柱に作用する揚力 F_L は主流の流速 V と、渦の位置・循環から次式で計算される。

$$F_L = -\sum_{k=1}^m \rho (V - u_k + u_{ki}) \Gamma_k - \rho \sum_{k=1}^m \alpha_{ki} \frac{\partial \Gamma_k}{\partial t} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 u_k , u_{ki} は渦およびその鏡像渦の移動速度、 Γ_k は渦の持つ循環、 α_{ki} は鏡像渦の座標である。揚力の変動周波数を議論する際には F_L の符号の変化だけを考えればよいため、渦の成長・減衰および移動を無視し、離脱する1個の渦だけを考察することにした。この仮定の下では(1)式は次式のようなクッター・ジューコフスキーの定理と同型の式となる。

$$F_L = -\rho V \Gamma \quad \text{--- (2)} \quad \text{振動流中の渦の離脱個数について、原本³⁾は定常流の知見を拡張した考察を行っている。すなわち定常流において尾数のない範囲でストローハル数}$$

$St = f_v \cdot D / V$ --- (3) (f_v : 渦の離脱周波数, D : 円柱径, V : 定常流速) が0.2となることから、振動流においても水粒子の流下距離が円柱径の5倍を越えると1対の渦が発生すると考えた。本研究では、この考えを共存場に適用する。さて、共存場では流れが加わるにより、円柱に対して水粒子の運動が非対称となるため、離脱する渦の数も円柱の両側で異なることになる。渦が離脱するごとにケルビンの循環定理より、円柱まわりには同じ大きさで逆符号の循環量が付加される。流れの流速 V が波の水粒子速度振幅 u_m より小さい場合 ($|V| \leq u_m$) には、円柱の相方の側で離脱する渦の個数を n_1 と n_2 とすると、循環 Γ は波の1周期中に $(n_1 + n_2)$ 回その符号を変え、主流 V は2回符号を変える。それに対して、 $|V| \geq u_m$ の場合には、水粒子の運動は常に1方向で、1周期中の渦放出を1回とすると、循環は1回符号を変え、主流 V は符号を変えない。おいて V と Γ の積で得られる揚力の周波数 f_L は次式で与えられる。

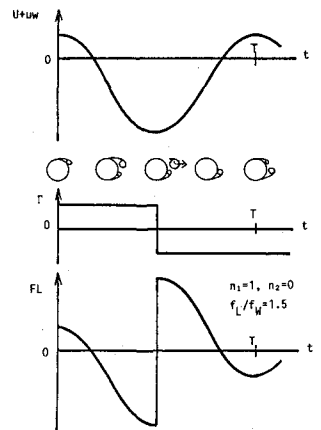


図1 揚力変動周波数の算出モデル

Iwagaki Yutshi, Asano Toshiyuki, O Yamada Tetsuo

$$\frac{f_L}{f_W} = \begin{cases} (n_1 + n_2 + 2)/2 & (|V| \leq U_m) \text{ ---- (4)} \\ n/2 & (|V| > U_m) \text{ ---- (5)} \end{cases}$$

波動のみの場合には $n_1 = n_2$ であり、(4)式から計算される f_L/f_W は常に整数となるが、共存場では半奇数の場合が出てくる。図-2 は f_L/f_W についての実験結果と、このモデルによる計算結果とを比較したものである。この簡単なモデルでも、実験結果を良く説明することがわかる。

$$\text{Casym} = U_m / (U_m + |V|) \text{ ---- (6)}$$

3. 揚力の時間変動の解析 (1)式に基づいて

揚力の時間変動を渦の挙動から明らかにすることを試みた。渦の挙動を可視化するため、おがくずとアルミニウム粉を混ぜ合したものを水面に散布し、ビデオカメラ、モータードライブカメラで流況を撮影した。その結果は現在解析中であるが、渦が円柱付近にあるときその移動速度が小さく、離脱する時点で主流流速に等しくなることから、渦の移動速度として渦が1の1周期間に1個放出される場合に対して次式を仮定した。

$$U_k = (U + U_m \cos \sigma t) \exp \{-\beta(4\pi - \sigma t^*)\} \text{ ---- (7)}$$

ここに σ は渦の周波数、 t^* は渦が発生してから時間、 β は移動速度の遷移の速さを示すパラメータでここでは3.2とした。循環 Γ は円柱表面に存在する境界層内で形成される渦度から次式で近似的に評価する。

$$\Gamma(t) = \alpha \int_0^{t^*} U_B^2 dt \approx \alpha \int_0^{t^*} (U + U_m \cos \sigma t)^2 dt \text{ ---- (8)}$$

U_B は境界層外縁の水粒子速度であるが、簡単に U と流れの合速度とする。また最も簡単なモデルとして、(1)式の鏡像渦の効果、循環の増減・減衰の効果を見捨ると、結局揚力は次式で表現される。

$$F_L(t) = -\rho \sum_{k=1}^2 \langle U(t) - U_k(t) \rangle \Gamma_k(t) \text{ ---- (9)}$$

図-4 (a)(b) はそれぞれ $|V| \leq U_m$ 、 $|V| > U_m$ の場合の揚力変動(モーメント表示)の実測値と(9)式による計算値を比較したものである。図から両者の変動の形状は良く似ており、また揚力の大きさも計算値は実測値に近い値となっている。

(参考文献)

- 1) 浅野 光垣・永井：第37回 年講，1982。
- 2) 浅野 光垣・山田：第38回 年講，1983。
- 3) 永本 菊池：第26回 海講，1979。

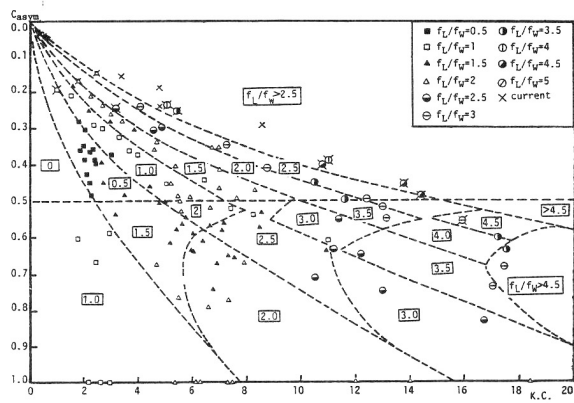


図-2 f_L/f_W に関する実験値と計算値の比較

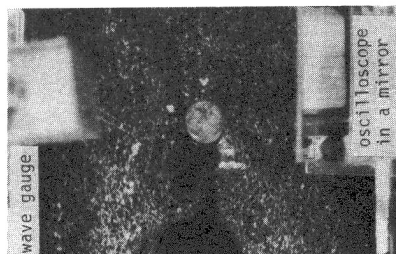


図-3 可視化実験

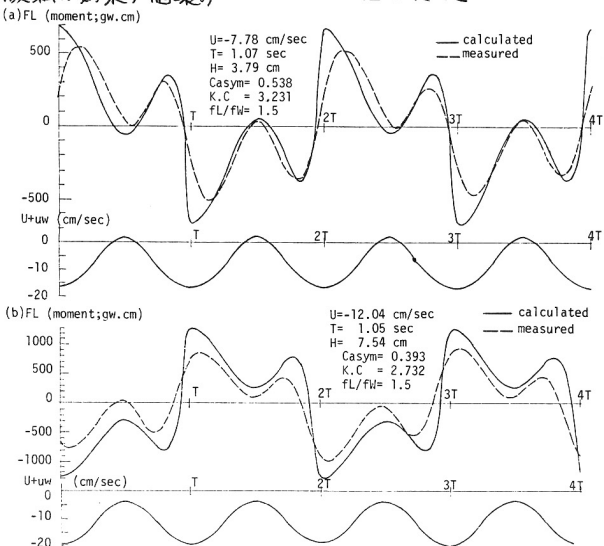


図-4 揚力(モーメント表示)の時間変動に関する実験値とモデルによる計算値の比較