

流況振動を用いた小型水力発電に関する実験と数値計算

秋田大学 学生会員 ○朝倉 暉

秋田大学 正会員 高橋 智幸

1. はじめに

流体中に物体を置くことによってカルマン渦列と呼ばれる渦列が発生する。このとき、物体は渦の剥離によって反力を得るため、渦列による振動現象が発生する。ここに圧電セラミックを組み込むことで、運動エネルギーを電気エネルギーに変換する小型の水力発電装置が実現できる。本研究では、カルマン渦列の発生に深く関わる物体形状に着目しながら、数値計算、実験の両点から発電性能を高めるための検討を行っていく。

2. カルマン渦列と物体形状

2.1 カルマン渦列とは

流れの剥離が生じる断面物体に対して $50 < Re < 10^5$ 程度の範囲において物体後流で周期的に放出される渦列であり、渦周波数 f_v は流速 U と物体幅 B を用いて以下の式で示される。

$$f_v = St \frac{U}{B}$$

ここで St (Strouhal 数) は物体形状と Re の関数として実験的に求められる定数である。代表的なものとして、円形は $10^2 < Re < 10^7$ で $St \approx 0.21$ である。本研究では St を物体形状の評価指針として使用する。

2.2 物体形状のモデル

物体形状と St の関係を調べる際に、流れの剥離が生じる形状においてカルマン渦列は発生することから、楕円形といった剥離位置が見極めにくい形状を利用することは望ましくない。そのため、**図-2** に示す五角形状のモデルを使用し、 B_f で流れが剥離すると仮定して検討を行っていく。物体は流れ方向にも振動するが、流れによって受ける抗力が渦の剥離によって得る反力よりも大きく、圧電セラミックでは発電しにくいいため、流れ方向の振動を省いている。

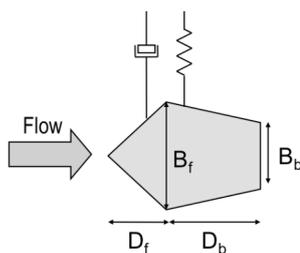


図-1 モデル概念図

3. 数値計算

3.1 計算方法

流れ場に関する支配方程式として2次元における NS 方程式、物体を振動させる方程式として1自由度系の運動方程式を使用する。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u - u_g) \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (u - u_g) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

計算は差分法による MAC 法を使用する。時間微分は前進差分、空間微分は中央差分、非線形項は風上差分の3次精度で差分化している。NS 方程式は境界移動に対応させているが、物体を固定した場合の計算も行い、比較を行う。

3.2 計算条件

図-1 に示したとおり、モデルの可変パラメータは4種類あるが、流れの剥離した後に渦が発生すること、カルマン渦列の渦周波数が物体幅 B に反比例することから、 $B=B_f$ として $B_f=3.0[\text{cm}]$ に固定して計算を行っている。 B_b 、 D_f 、 D_b に関しては、 0.5cm 間隔でそれぞれ $0.5 \sim 5.0[\text{cm}]$ として計算を行っている。流速 $U=25.0[\text{cm/s}]$ 、時間刻み幅 $\Delta t=0.001[\text{s}]$ 、総ステップ数 20000 としている。格子数は長さ方向に 128、周期方向には物体表面上で $\Delta s=0.20[\text{cm}]$ となるように設定している。

運動方程式に使用したばね定数等の物性値は、いくつかのモデル形状において振動実験を行い、そこから求めた物性値から近似式を作成して計算を行っている。

3.3 計算結果

図-3、**4** はモデルを固定した場合と振動させた場合の $D_f=0.5[\text{cm}]$ と $5.0[\text{cm}]$ での B_b と D_b における St の等高線となっている。 D_f が大きくなるほど St 数は増大する傾向にあった。 B_b と D_b については、どちらも小さい方が St が高い傾向にあったが、物体を振動させた場合の方が D_b の影響を受けやすく、これは物体長が大きいほど剥離以降の流れに影響を与えやすいためだと考えられる。**図-5** ではモデルの振動する加速度を示しているが、 D_f が大きいほど減少する傾向にあり、 $D_f=5.0\text{cm}$ になるとほとんど振動しなかった。

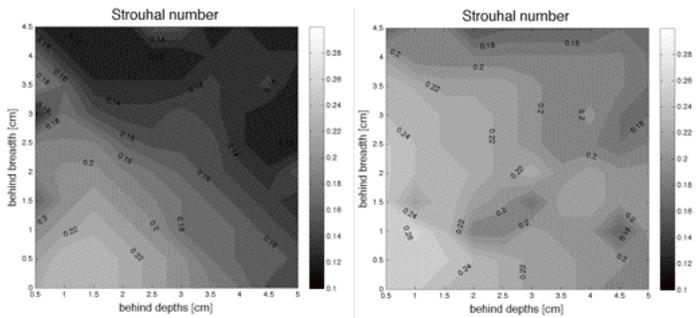


図 3-1 $D=0.5$ [cm]の St 数 (固定)

図 3-2 $D=5.0$ [cm]の St 数 (固定)

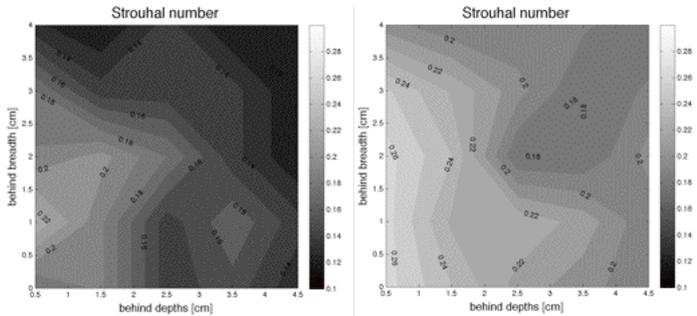


図 4-1 $D=0.5$ [cm]の St 数 (振動)

図 4-2 $D=5.0$ [cm]の St 数 (振動)

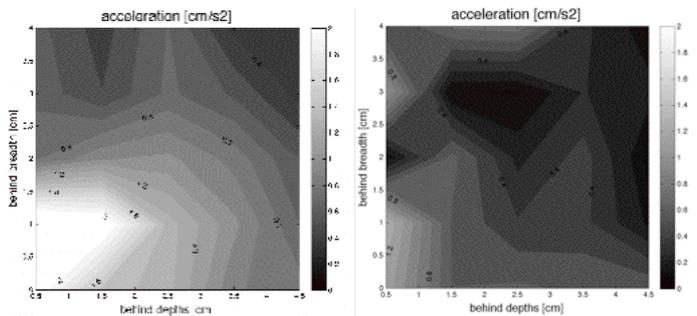


図 5-1 $D=0.5$ [cm]の加速度 (振動)

図 5-2 $D=5.0$ [cm]の加速度 (振動)

4. 水理実験

4.1 実験方法

計算で使用したモデル形状を実験装置の断面形状として使用する。長さ $L=15$ [cm]、浸水深さ $H=10$ [cm]の五角形状柱を。流速 $U=25$ cm/s の定常流中に設置することでカルマン渦列を発生させ、柱上端を圧電セラミックと固定し、圧電セラミックをたわませることで発電を行う。実験は 3.2. 計算条件で前述した振動実験を行った際に使用した形状と、それを元に計算を行った 3.3 計算結果から振動性の良かった形状について実験を行っている。

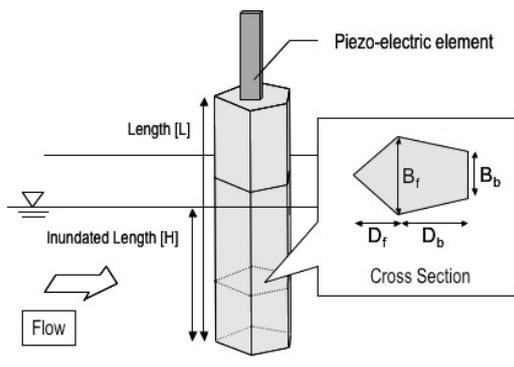


図-6 実験装置側面図

4.2 実験結果

No.1~8 が振動実験を行った際に使用した形状であり、計算結果を元に発電性が高いと評価したものが No.9~10 となっている。 St から判断する限り実験結果と計算結果に大きな差異はないが、No.4 などの D_b の大きい形状については、実験、計算共に渦の発生が不安定であったため、結果に差が生じている。発電性を見てみると、3.3 計算結果に示した加速度との関連性は必ずしも高いとはいえないが、高加速度、高電圧では比例関係にあるといえる。

表-1 実験結果と計算値との差異

No	E_f [cm]	D_f [cm]	D_b [cm]	B_b [cm]	$St_{計算}$	$St_{実験}$	加速度 [cm/s ²]	電圧 [V]
1	3.0	1.5	1.5	1.0	0.22	0.22	0.99	0.18
2	3.0	1.5	1.5	2.0	0.22	0.20	1.00	0.16
3	3.0	1.5	3.0	1.0	0.14	0.14	0.55	0.31
4	3.0	1.5	3.0	2.0	0.09	0.14	0.32	0.04
5	3.0	3.0	1.5	1.0	0.24	0.23	1.35	0.45
6	3.0	3.0	1.5	2.0	0.24	0.24	0.87	0.08
7	3.0	3.0	3.0	1.0	0.13	0.15	0.34	0.14
8	3.0	3.0	3.0	2.0	0.11	0.13	0.18	0.09
9	3.0	0.5	1.0	1.0	0.22	0.25	2.07	0.66
10	3.0	2.0	1.0	0.0	0.26	0.26	0.97	0.49

5. おわりに

流れが剥離した以降のモデル形状が長くなると、渦の発生が不安定となり、実験と計算で差異を生む原因となった。しかしながら、それらは往々にして発電効率が低いことが多く、水理学的な問題としては興味深い、本研究としては副次的な問題と考えることとする。

振動による St への影響を考えた場合、物体の振動が小さい場合には、物体は渦列による強制振動に近い振動現象を行うため、固定した場合とそうでない場合で St はほとんど変わらなかった。しかし、物体の振動が大きくなると、物体振動と渦発生との相互作用が大きくなり、渦励振と呼ばれる現象が発生する。これによって St は大きく変動し、振幅が大きい程 St 数が減少する傾向にあった。

これらを踏まえると、発電性の高いモデルとして、渦発生への安定性はもとより、低振幅、高周期の振動系を実現する形状が望ましいと考えられる。今回は剥離以降の形状の短い形状を採用したが、それに加え、振動柱の固有振動数と渦周波数を一致させることで共振を発生させることができれば、発電効率を更に高めることができると考えられる。