第1章 揺動羽水車の新規開発とその特性

1.はじめに

水力発電所などの管水路に取り付けられるタービンなどを除き,一般の開水路に設置する水車を 分類する場合,水車の羽(ブレード)に働く流体力の種類により,流水が羽面に当たる力で回転す る抗力水車と,羽を翼型などにすることにより発生する揚力でもって回転させる揚力水車とに大別 することが出来る.

従来,発電所や農業用などに広く使用されている水車の多くは抗力型であり,比較的大きな流体 力を抽出できる反面,水車全体を水没させる場合は羽への逆流領域が発生し,水車が回転し難くな る.このため農業用地などで見かける横軸水車は,逆流抵抗を生じる場所には流水力が生じないよ うにして水車の一部にだけ順方向流体力が作用するように,水車の大半を空中に出す方法がとられ ている.しかし水車が全没する場合であっても,逆流領域にカバーを施して逆回転力の発生を防ぐ 構造の水車が考案されており,これをクロスフロー型水車と呼ぶことがあるが,この水車は精密な 導流装置が不可欠である²⁾.

揚力水車の代表的なものであるダリウス水車は,一旦回転し始めると周速(水車外縁の回転速度) が流速の数倍という高速回転が得られ,また流れの方向性への制限を受けない構造機構であるため, 水車よりも風車として発展することも期待されるが,反面,振動耐久性が悪くかつ翼型羽が高価と なる欠点があり,現在では水車としてはあまり実用化されていないようである³⁾.

これらのことを踏まえ,本開発研究では,河川などの開水路に設置することにより,簡単に流水 エネルギーを抽出することができる水車として,ここに揺動水車と命名する新型の水車の開発を行 う.本水車は,抗力水車の範疇に入るが,縦軸型と横軸型のどちらにでも設置することが可能であ り,また流れの方向性にかかわらず同一方向回転力が得られる.さらに従来のクロスフロー型に必 要な精密な逆流域カバーは必ずしも必要ではなく,比較的ラフな状態の流れの場にも設置可能であ る.このことから,本水車は河川などの流水エネルギーを抽出すると共に,河川堤防水衝部や越流 堰の水叩き部分などの防御施設を備える機能を併せ持つ可能性を秘めた新しい形の水車になること が考えられる.

2.水車の構造

本水車は,設置する流体場の状況に応じて,垂直軸回りに回転する縦軸水車としても,また水平 軸回りに回転する横軸水車としても使用できる便利な構造になっているが,ここでは縦軸水車とし ての特性を検討する.

写真 - 1 に模型実験に用いた水車を示す.この模型は,中心軸の回りに,羽を40°間隔で配置した9枚羽の場合であるが,各羽は羽に固定された羽軸回りに,両方向に数十度の回転が可能なよう

になっており, さらに羽の回転角に応じて復元力が生じるように, 羽軸と水車フランジ部との間に 引っ張りバネが取り付けられている.

模型水車の寸法は,直径 20 cm,高さ 22 cm,羽幅 4.5 cm,羽の鉛直方向長さ 17 cm,中心軸と羽 軸の間隔は 9 cm である.この羽が流体力を受けて水車の回転力を生み出す機構を図-1 に示す 4 枚 羽の場合で説明すると,羽軸は羽幅の中央から偏心した位置(本模型では羽幅を1:2 に内分する 位置)に取り付けられているため,羽は流体力を受けると,バネ反力と釣り合うところまで羽軸回 りに搖動回転し,そのため羽に直角に作用する流体力の作用線が水車中心からズレを生じ,その結 果,水車軸回りのトルクが発生する.羽の回転角が図-1のようになった場合は,流れの前面(=0°)の羽1および背面(=180°)の羽3の位置において大きな回転トルクが与えられる反面, 水車側面の羽2(=90°)および羽4(=270°)の位置ではトルクは殆ど生じない.因みにダ リウス水車では,=90°および 270°でトルクは極大になる.クロスフロー水車では,=0°~ 180°でトルクを生じ,逆流域の=180°~360°では,逆回転トルクが生じないように,流水が入 り込まない構造になっている.



写真-1 模型の新型水車



図 - 1 水車の羽の搖動回転による水車の回転

3.模型実験

3.1 実験装置

金沢大学工学部風洞実験室に設置されている長さ 12m,幅 40cm,深さ 30cm,水路勾配 1/500 の両 面ガラス張りの開水路水槽に,写真-1に示した模型水車を設置し,本水車が一方向流から抽出す るエネルギー率(水車の出力ワット)を測定するため,水車軸に加えるトルクを断続的に変えなが ら,その時の水車の回転数を測定した. 流れは,最大流量の場合でも,水深 h = 11cm で流速 V = 50cm/s と小さいため,図-2 に示すよう な不等辺直角三角形の"水寄せ装置"即ち導水装置を設置し,水路幅を13cm に絞った結果,縮流部 の水深は h = 16.5cm に,流速は V = 110cm/s に増加した.

写真 - 2 は, 縮流部に設置した水車のトルクおよび回転速度を測定しているところであり, 水車 上部に取り付けたトルク計の線形性は比較的良好であった.また, 水車の回転速度は, 非接触型回 転計により検出した.写真 - 3 は, 回転する水車を側面から見たものであり, 水車前面水位は上昇 し, 水車下流側水位は低下している.



図-2 縮流導水装置



写真-2 模型水車の実験状況



写真-3 回転する水車周辺の水位変化

3.2 水車の抽出エネルギー

流水の持つ運動エネルギー率 P (ワット:w)は,

$$P = gQ \cdot V^2 / 2g = AV^3 / 2$$
 (1)

で与えられる.ここに, は流体密度,gは重力加速度,Qは単位時間当たりの流量,Vは流速,A は流積である.式(1)に, =1,000kg/m³, A=0.11m×0.4m, V=0.5m/sを代入すると,本水路 の流水のエネルギー率は P=2.75 wとなる.

このような流水から水車によって抽出できる運動エネルギーは,通常は全エネルギーの10~30% 程度であり,このままでは P=0.3~0.8w 程度が得られるだけであるが,前述した導水板によって 縮流部の流速を増加させることにより,さらに大きなエネルギーを得ることが出来る.

縮流部に水車を設置すると,水車が流水の流下を阻止するため,水車全面での水深はh=19cmと 大きくなり, 流速は V = 82cm/s に減少したが, この状況下で抽出されるエネルギーの測定を行なっ た.

水車によって抽出されるエネルギーP(w)は、水車に働くトルクを M(kgf)とし、水車軸の1 分間当たりの回転数をn(r.p.m.)とすると,次式で与えられる.

$$P = 1.029 M \cdot n$$
 (2)

実験では,水車軸に固定した円盤に半周ぶんだけ巻きつけた =1mm のステンレス製ワイヤーに 吊り下げた錘を断続的に増加させ,トルク M,水車の回転数 n および水車の周速度 U を計測した が,その結果を図-3に示す.M=0の無負荷時の周速度 U は 0.9m/s となり,水車を設置する前 の縮流部の流速 V=1.1m/s と同程度となる.さらにトルクの増加に伴って周速度は直線的に減少す るが,トルクが M=0.06kgf・m になると回転は止まる.この間の水車が発揮するエネルギー率 P を 図-4に示すと ,回転数 n = 40r.p.m.(周速 U = 0.42m/s)付近で ,最大出力 P_{max} = 1.52w が生じる. P_{max}を,導水板を置く以前の流水エネルギー2.43wと比較すると,本水車のエネルギー抽出率は, (3)

= 1.52w/2.43w = 63%



出力エネルギーの関係

という大きな値になる.このことは,元の流水の速度を利用するだけでは不充分な場合には,水車 に当てる流速を速くする必要があり,その結果,元の流水の運動エネルギーの60%以上を回収する ことができることを実証している.

なお U = 0.6m/s 前後で P に不連続性が発生し,別のピークの発生を示唆しているが,現在,詳細 は不明である.

4.羽の回りの流況と羽に働く流体力

本水車は羽の仰角が流体力の変化により変化するため,水車に作用するトルクの数値計算は比較 的難しい.したがって本論文では,公転する水車内で自転する羽に作用する流体力を求めるための 基礎計算として,ナビヤ・ストークス方程式を差分法で数値解析することにより,2次元一様流中 の羽の仰角を順次変化させた時の,羽周辺の流線と等圧線を求め,これらの結果を図-5および図 -6に示す.

図-5および図-6は,レイノルズ数 Re=VD/ がそれぞれ 100 および 1000 の場合のであり, 計算には V,D, の次元量に数値は与えず,Reの値のみを与えている.乱流モデルは外挿してい ないが,後流渦の流下のために,後流域は非定常となり,かつ複雑に乱れた状態になる.なお,図 は一様流を流し始めてから,後流渦が流下し始め,さらに充分に時間が経過した時の計算結果であ る.平板周辺流の代表長の選定は一義的ではないが,代表長 D を境界層厚のオーダーと見なせば, 本解析結果は,実験時の流速 V=10~100cm/sの範囲に相当する.

図-5の左列の流線図より,仰角 が増加するに連れ,羽の流れへの遮蔽幅が増加するため,羽 背後の後流渦径が大きくなることが分る.それらに対応する右列の等圧線図は,上流部の圧力をゼ ロとし,正圧を実線で,負圧を破線で示し,さらに圧力の絶対値の高圧から低圧への変化を,色の 濃淡で示したが,圧力は羽前面で高く,また羽背面で低くなることが分る.

図 - 6 は,図 - 5 に比べて,流速の増加による後流域の乱れの増加傾向がうかがえるが,特に渦の発生個数が増加し, = 50°以上では,カルマン渦列が顕著に表れる.本計算では,図 - 5 および図 - 6 共に,渦中心部の圧力水頭は p/g=-V²/2g 程度まで低下し,これは実際の現象としての渦中心部での水面の窪みと大気の吸込を説明しているが,p/g=-V²/2g - 10.3m 即ち V 14m/s まではキャビテーションは発生しないことが分る.

図-7には,Re=1000の場合,本計算による羽面上の圧力分布から算出した羽に働く流体力が, 仰角の変化に対し,どのように変化するかを示す.通常,翼理論では,流体力の流れ方向力 Fx および流れに直角方向力 Fy を,それぞれ抗力および揚力と呼ぶため,ここでも,それらを (1/2)

LV² で割ったものを,抗力係数 C_D および揚力係数 C_L と呼ぶが,ここでの揚力は,翼面の流速 増加による圧力低下によって生じる力では無いため,発生原因から見れば抗力である.なお,L は 羽の長さである.図中の白丸の C_Dの計算値は,の増加に伴い増加するが,L の代りに流れの遮 蔽幅 Lsin を使うと, = 50°~90°では,C_D 3とほぼ一定値になる.一点鎖線は,運動量理論 から求めた板に当たる噴流が生じる流体力であり,変化傾向は計算値と同様であるが,後流渦によ る負圧の発生効果が考慮されないため,値は計算値より小さい.CLは,黒丸で示した計算値および 実線で示した運動量理論値共に, = 50°~60°で最大となるが,計算値の方が大きい理由は,抗 力の場合と同様,渦のためである.

流体力が可能になった後は,水車トルクの推算には,水車羽の公転位置と流体力に依存する羽の 仰角から求まる流体力の腕長が必要である.



図 - 5 レイノルズ数 Re = 100 の羽周りの流況

図 - 6 レイノルズ数 Re = 1000の羽周りの流況



図 - 7 羽に働く抗力と揚力(Re=1000)

5.おわりに

本研究により,模型の新型水車と水寄せ装置を併用することにより,開水路流から,元の状態の 流水エネルギーの 60%以上を抽出できることが明らかとなった.したがって,現地においても,適 切な流速増速装置や構造物を工夫すれば,模型実験と同様に,効率良く流水エネルギーを抽出する ことが可能であると期待される.解析面では,羽に働く流体力の解析が可能となったが,今後は, 水車の公転による相対速度の発生を考慮すると共に,流体力の変化による羽の仰角の変化を考慮し た非定常解析の検討が必要である.

なお,本水車は流れの方向にかかわらず同一方向回転を生じるため,流れが往復運動する海岸波 浪用や,流れの方向が変動する堰や滝の直下などの激しい乱流場にも使用可能であり,さらに風車 への応用が可能であるため,今後の幅広い利用が期待される.

参考文献

- 1) 石田 啓・川崎秀明・渡部敏男・高地 健・大貝秀司, 楳田真也:新型水車による流水エネルギー 抽出装置の開発と現地設置,海岸工学論文集,第49巻, pp.711-715, 2002.
- 2)福富純一郎・中瀬敬之・山下弘之・蓮井伸二:クロスフロー水車に関する研究,機械学会論文集(B),
 52巻,pp.401 406,1986.
- 高松康生・古川明徳・大熊九州男・下釜康彦:ダ リウス形横流水車の流体性能に関する研究,機械
 学会論文集(B),50巻,pp.2368-2377,1984.