

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

石田 啓* ・川崎秀明** ・渡部敏男***
高地 健**** ・大貝秀司***** ・楳田真也*****

開水路の流水からエネルギーを抽出する新型水車を考案し, 模型実験により導流板による水寄せ装置を併用して, 元の流水エネルギーの 60% 以上を抽出できることを実証した. 本水車の外形はダリウス型揚力水車に近いが, 平板状の羽が流水により揺動して水車トルクを発生する抗力水車であるため, 製作が容易であり, 波浪のような往復流にも使用できる. 次に, 羽の仰角の変化に伴う流況変化を数値解析で求め, 羽への作用流体力の理論解析を行なった. 最後に, 信濃川妙見堰魚道呼び水水路に設置した現地用の本水車をリニアクランク式空気圧縮機と接続し, 河川水中へ空気注入を行い, 魚類の呼び寄せと水浄化に利用しようという事業を紹介する.

1. はじめに

人類存続のための新世紀の重要な課題は, 食料の確保, エネルギーの安定供給および地球環境保全であるといわれているが, 食糧増産や環境保全に実効を上げるためにも, エネルギー生産量の増加が不可欠であり, 特に環境負荷の少ないクリーンエネルギーの開発が重要である.

現在, 全世界の 1 次エネルギー生産の 90% 以上が化石燃料に依存するが, これは炭酸ガス問題が不可避であると共に, 予想可採年数が 100 年程度と短い. 一方, 原子力発電は事故への危機感が増大し, ダム水力発電は自然破壊の象徴と見なされる現状では, これらの増強は容易でない(大前, 1999). そこで自然エネルギーを利用するソーラー発電や風力発電の開発が始まったが, エネルギー密度が 1 kW/m^2 と小さい太陽光利用や適度に強い風の安定確保が困難な風力発電は, 国内では小規模にならざるを得ない. その中で, 水力発電の復活の重要性が指摘され始めたことは注目に値する(西沢・上埜, 2000).

このような状況を踏まえ, 本研究では, 安定した河川流や長い海岸線に作用する海岸波浪などの流水エネルギーの利用の実用化を目指し, 河川流および波浪の両方に使用できる新型水車を開発したが, まずその特性を検証する必要があるため, 模型の水車を用いた開水路実験および数値解析による検討を行なう. 次いで, 信濃川妙見堰の魚道呼び水用の水路(幅 1 m で流速 5~10 m/s) に設置する現地用の水車を製造し, この水車の回転力により空気圧縮機を駆動し, 製造した圧縮空気を河川へ注入して, 魚類の呼び寄せと河川水の水質浄化を試みる.

水車を羽(ブレード)に働く流体力により分類すると, 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生じる揚力で回転させる揚力水車

とに大別される. 抗力水車は, 羽への逆流領域の発生が問題となり, クロスフロー水車はこれを克服しているが,

精密な導流装置が不可欠である(福富・中瀬ら, 1986).

揚力水車の代表的なものであるダリウス水車(高松・古川ら, 1984)では, 周速(水車外縁回転速度)が流速の数倍という高速回転が得られる反面, 振動耐久性が悪く, かつ翼型羽が高価となる. 本研究で開発した新型水車は, 回転力の発生機構は抗力型であるが, 流水中での羽の仰角は常に小さく, 回転状態は揚力水車に近いため, 両者の長所を合わせ持つ水車になることが期待される.

2. 新型水車の構造

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

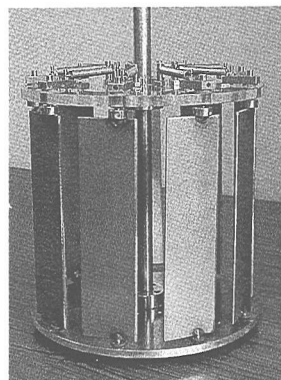


写真-1 模型の新型水車

* 正会員 工博 金沢大学教授 土木建設工学科

** 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 ダム研究室長

*** 北陸地方整備局 信濃川工事事務所 機械課長

**** 正会員 エル・ダブリュ・ジェイ(株)代表取締役

***** エル・ダブリュ・ジェイ(株)常務取締役

***** 正会員 工博 金沢大学助手 土木建設工学科

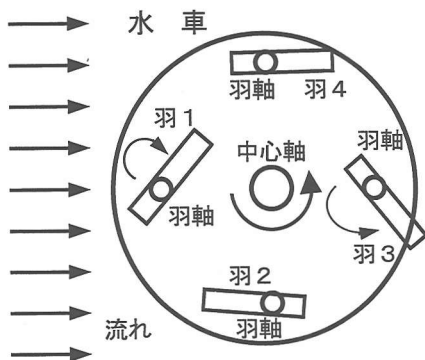


図-1 水車の羽の揺動回転による水車の回転

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揺動回転し、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 ($\theta=0^\circ$) の羽 1 および背面 ($\theta=180^\circ$) 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 ($\theta=90^\circ$) および羽 4 ($\theta=270^\circ$) 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、 $\theta=90^\circ$ および 270° でトルクは極大になる。クロスフロー水車では、 $\theta=0^\circ \sim 180^\circ$ でトルクを生じ、逆流域の $\theta=180^\circ \sim 360^\circ$ 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。

3. 模型実験

3.1 実験装置

金沢大学工学部河洞実験室に設置されている長さ 12 m, 幅 40 cm, 深さ 30 cm, 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、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 $h=11$ cm で流速 $V=50$ cm/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 13 cm に絞った結果、縮流部の水深は $h=16.5$ cm に、流速は $V=110$ cm/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

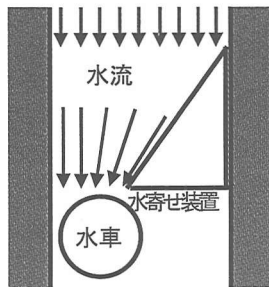


図-2 縮流導水装置

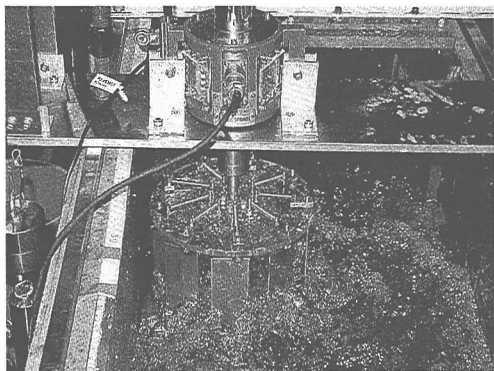


写真-2 模型水車の実験状況

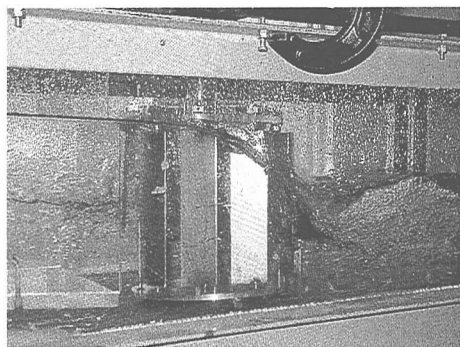


写真-3 回転する水車周辺の水位変化

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。

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、

$$P = \rho g Q \cdot V^2 / 2g = \rho A V^3 / 2 \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに、 ρ 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、 $\rho=1,000$ kg/m³, $A=0.11$ m $\times$ 0.4 m, $V=0.5$ m/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 $P=0.3\sim0.8$ w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 $h=19$ cmと大きくなり、流速は $V=82$ cm/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。

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

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 $\phi=1$ mmのステンレス製ワイヤーに吊り下げた錘を、断続的に増加させた時の周速度を計測したが、 $M=0$ の無負荷時の周速度 U は 0.9 m/sとなり、水車を設置する前の縮流部の流速 $V=1.1$ m/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 $M=0.06$ kgf・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 $n=40$ r.p.m.(周速 $U=0.42$ m/s)付近で、

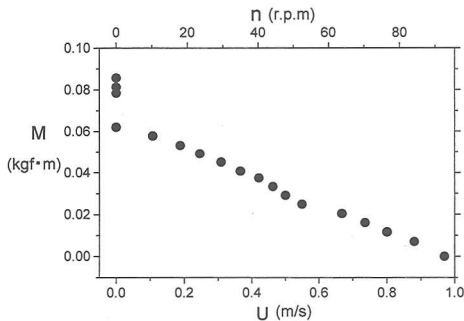


図-3 水車の回転数および周速とトルクの関係

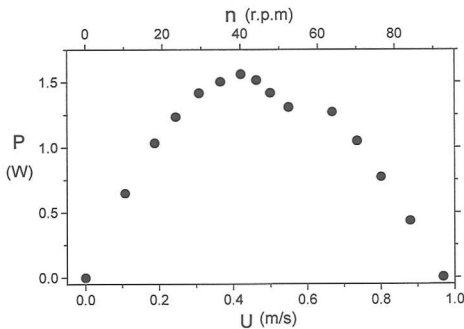


図-4 水車回転数および周速と出力エネルギーの関係

最大出力 $P_{max}=1.52$ wが生じる。 P_{max} を、導水板を置く以前の流水エネルギー 2.43 wと比較すると、本水車のエネルギー抽出率は、

$$\eta=1.52w/2.43w=63\% \dots\dots\dots (3)$$

という大きな値になる。このことは、元の流水の速度では不十分な場合には、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 $U=0.6$ m/s前後で P に不連続性が発生しているが、現在、原因は不明である。

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。

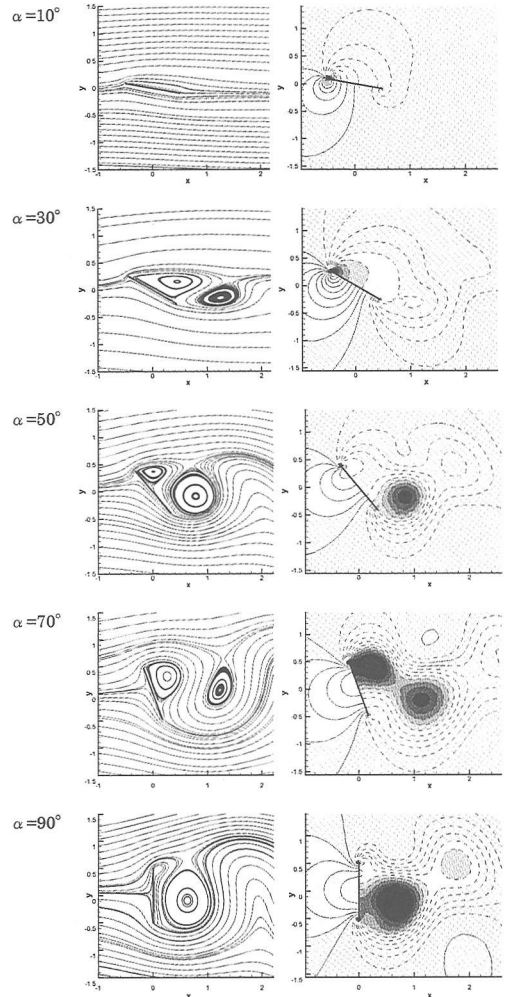
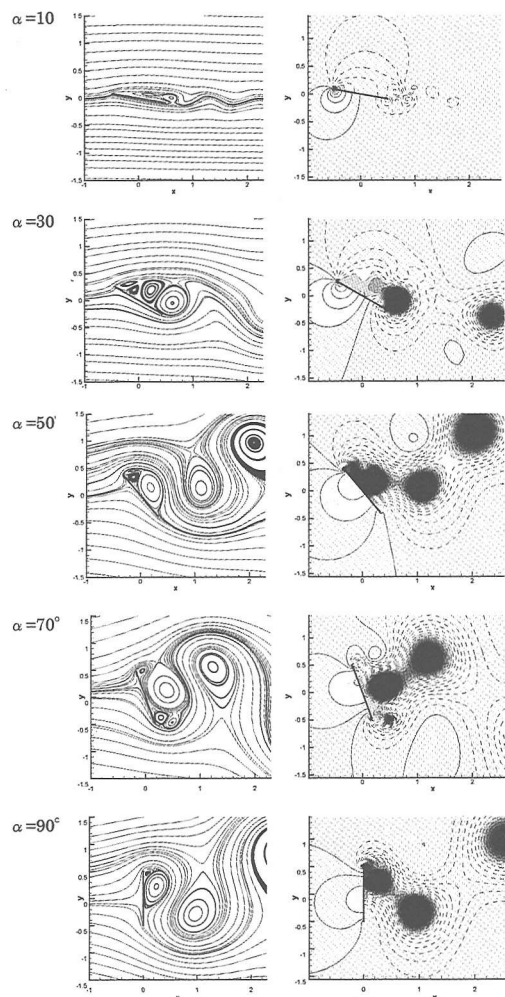


図-5 レイノルズ数 $Re=100$ の羽の周りの流況

図-6 レイノルズ数 $Re=1000$ の羽の周りの流況

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 $Re = VD/\nu$ がそれぞれ100および1000の場合であり、計算には V, D, ν 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、さらに十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 $V=10\sim 100$ cm/s の範囲に相当する。

図-5の左列の流線図より、仰角 α 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、さらに圧力値の高圧から低圧への変化を、明度の高低で示したが、圧力は羽前面で高く（明度は高く）、また羽背面で低く（明度は低く）なることが分る。

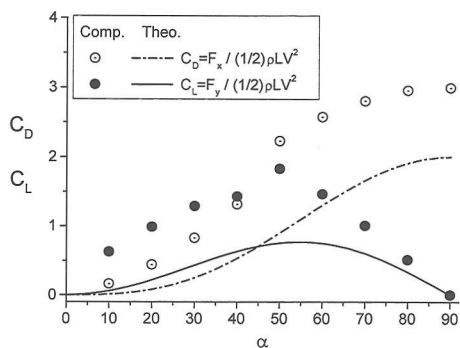
図-6は、図-5に比べて、流速の増加による後流域の乱れの増加傾向がうかがえるが、特に渦の発生個数が増加し、 $\alpha=50^\circ$ 以上では、カルマン渦列が顕著に表れる。本計算では、図-5および図-6共に、渦中心部の圧力水頭は $p/\rho g = -V^2/2g$ 程度まで低下し、これは実際の現象としての渦中心部での水面の窪みと大気吸込を説明しているが、 $p/\rho g = -V^2/2g \approx -10.3$ m 即ち $V=14$ m/s まではキャビテーションは発生しないことが分る。

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 α 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 F_x および流れに直角方向力 F_y 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 $(1/2)\rho L V^2$ 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、 α の増加に伴い増加するが、 L の代りに流れの遮蔽幅 $L\sin\alpha$ を使うと、 $\alpha=50^\circ\sim 90^\circ$ では $C_D\approx 3$ 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。

C_L は、黒丸で示したの計算値および実線で示した運動量理論値共に、 $\alpha=50^\circ\sim 60^\circ$ 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。

図-7 羽に働く抗力と揚力 ($Re=1000$)

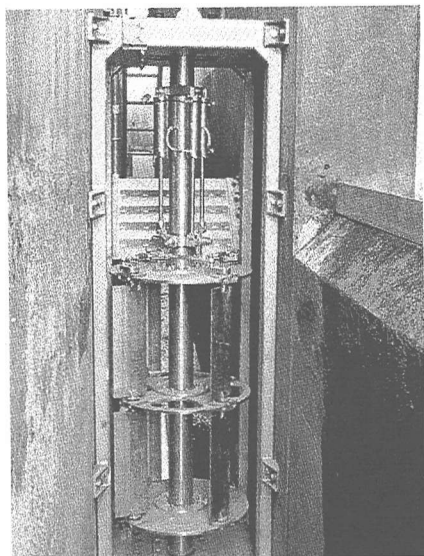


写真-4 現地用の本水車の設置

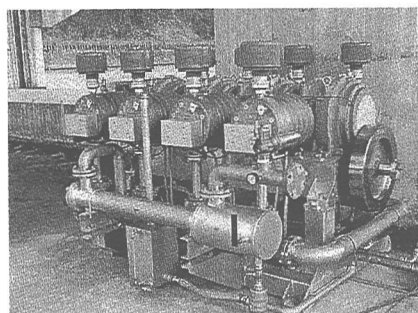


写真-5 設置したリニアクラック空気圧縮機

水車トルクの推算には、流体力と共に、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。しかし腕長の算出は容易ではなく、現段階では、発生トルクの分布状況は不明確である。

5. 妙見堰に設置した水車と圧縮空気製造機

信濃川にある妙見堰の左右両岸に魚道が設置されており、この魚道への魚類の呼び寄せを目的として、河川流中に乱流域を創出するために高速流を放流する“魚道呼び水水路”が設けられている。そこで、さらに魚の呼び寄せ効果を高めるために、この水路に現地用の本水車を製作・設置し、この水車動力でもって圧縮空気を製造して、その圧縮空気を河川流中へ注入する試みを開始した。

水路は、深さが約 5.3 m、水路幅が 1 m、水深が約 1~2 m で、流速は、季節変動が激しいが、約 5~10 m/s の範囲にあるため、流水のエネルギーは、式 (1) より、 $P=$

125~1000 kw にあると予測される。

現地設置した本水車を写真-4 に示す。水車は、幅 1 m で高さ 3.4 m の鋼材枠に、幅 18 cm の羽を 90°間隔に 4 枚配置したが、羽長の中央に補強用のフランジを入れて 2 段重ねにしたため、見かけ上、長さ 66 cm の羽が 8 枚になる。羽軸間の直径は 74 cm である。羽軸のパネは、圧縮空気で駆動制御できるよう、空気パネを用いた。

写真-5 は、設置したリニアクラック使用のレシプロ式空気圧縮機であるが、ピストンクラックが直線運動するため、気筒内に潤滑油は不用で、製造空気は油分を含まず、生物環境に適する機器である (石田・高地・大貝, 2000)。本機は、自然エネルギーの変動に追従できるように、圧縮空気制御による 8 気筒自動 8 段階切り替え型になっており、同構造の 10 気筒の圧縮機 2 台が、既に沖縄の北部ダムの湖水浄化用に使用されている。本水車システムは、2002 年 3 月末から試験運用に入っており、取水口スクリーンと水寄せ等の改良を加えている。

6. 結 語

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ろう。

本水車は海岸波浪用にも使用可能であるが、さらに風車への応用が可能であり、幅広い利用が期待される。

最後に、本研究の実行に際し、助力を賜った国土交通省北陸整備局信濃川工事事務所関係諸氏および当時金沢大学工学部学生の板谷城宏君に、深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 石田 啓・高地 健・大貝秀司 (2000): 波力水車とリニアクラック気筒による海中エアレーション装置の開発, 海洋開発論文集, Vol. 16, pp. 105-110.
- 大前 巖 (1999): 二酸化炭素と地球環境, 中央新書, pp. 138-149.
- 高松康生・古川明徳・大熊九州男・下釜康彦 (1984): グ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.
- 西澤潤一・上埜貴 (2000): 人類は 80 年で滅亡する, 東洋経済新報社, 378 p.
- 福富純一郎・中瀬敬之・山下弘之・蓮井伸二 (1986): 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.