東海大学紀要工学部
Vol. 60, No. 1, 2020, pp. 67-73
DOI: 10.18995/24343633.60-1.67

# 小規模水力発電と波力発電を普及させるための提案

小笠原　悠*1　山本　吉道*2

# Proposal for Popularizing Hydropower and Wave Power

by

Yu OGASAWARA*1 and Yoshimichi YAMAMOTO*2

(Received on Mar. 30, 2020 and accepted on June.19, 2020)

**Abstract**

Since the Fukushima nuclear accident in 2011, the expansion of renewable energy has become an important issue. By promoting renewable energy, it is possible to generate eco-friendly power without resorting to importing fossil fuels or nuclear power. Therefore, we have focused on hydropower and wave power as renewable energies, and have researched the current situation and potential. Moreover, as coastal erosion has worsened around the world, we have examined the use of renewable energy for transporting sediment from depositing areas to eroding areas at a river and at a coast.

This paper summarizes the current situation and potential of micro-hydropower and wave power, and proposes a concrete plan for these power generation facilities for the comprehensive management of sediment from rivers to the coast using sand bypasses, which will enable renewable energy to expand naturally.

***Keywords***: Renewable energy, Micro-hydropower, Wave power, Comprehensive sediment management, Sand bypass

## 1. はじめに

2011 年福島原発事故以降，国民の多くが原子力発電を否定した結果，火力発電のウェートが著しく高まった．そして，大量に石炭・石油を輸入しているが，これは我が国の貿易収支を 2011 年以前の黒字から赤字へ転落させ，温暖化ガスの増加に繋がった．さらに，化石燃料は近い将来涸渇する可能性が高いことも考えるならば，再生可能エネルギーの拡大が重要な課題となってくる．我が国は，今後のエネルギー政策の中心基軸として，再生可能エネルギーの大幅な普及を目指すべきであろう．

経済産業省資源エネルギー庁データ「電力調査統計 [1)]」によれば，2018 年度の国内発電電力量に占める再生可能エネルギー比率は 17.5%．そのうち，7.5%は水力発電によるもので，太陽光発電が 6.7%，風力発電が 0.7%，バイオマスが 2.4%，地熱発電が 0.2%となっており，これらの中では，水力発電と太陽光発電が主力となっていることが分かる．

太陽光発電は，太陽電池の大量生産によるコスト低下に基づく売電収益増が見込めるなどのメリットがあるが，天候（曇りや雨）により発電量がばら付く，また夜間に発電が出来ないなどのデメリットがある．風力発電もまた天候により左右される．風力発電は大きな風車を風の力で回転させ，その運動エネルギーを電気に変換するため，発電量は風速に左右され，設置する適地も限られてくる．バイオマス発電は，輸入資源に直接的に頼ることなく，発電用資源の安定供給が可能であるが，一般的に発電コストが高くなり易く,エネルギー変換効率が低い．地熱発電は調査と建設のコストが高い．加えて，開発候補地が法規制の対象となっている可能性が高く，火山のある地域は危険も多い．さらに有毒ガスを無毒化する必要があるため，他の再生可能エネルギーに比べコストが高くなる．

ダムによる水力発電は他の再生可能エネルギーに比べ，維持コストが低く，$CO_2$ 排出のない自然エネルギーであること，エネルギー変換効率が高く，しかも天候に左右されにくいことから，安定した電力供給が可能であるなどのメリットから，主力の再生可能エネルギーとなっている．ただし，ダムの建設適地が無くなってきたので，河川の流れを利用した水車発電を普及させることで今後さらなる発電量増加を目指したい．

波力発電は波エネルギーを電力に変換するもので，島国である日本では波エネルギーを得やすいというメリットがある．太平洋側ではほぼ一年間通して波が打ち寄せ，日本海でも夏場を除けば波が発生し続けている．しかし巨大な波から小さな波まで安定して発電させることは困難であるなどの問題を解決する必要がある．

全国各地で再生可能エネルギーの取り組みが盛んとなっているが，本研究では，このうち水力発電の中でも小規模水力発電（ここでは，出力 1,000 ㎾以下の水力発電），および波力発電に焦点を当て，現状と今後の可能性について考察する．

*1　東海大学，大学院工学研究科，建築土木工学専攻
*2　工学部，土木工学科

さらに，再生可能エネルギーが普及しにくい共通の理由は，新しい技術開発が必要になる場合が多いことと，大量発注がない限り生産コストが高くなることなどがある．それゆえ，水力発電と波力発電を普及させるための起爆剤として，これらの発電力を全国の河川から海岸にかけての総合土砂管理のために，堆積域から侵食域（自然に生じた場合は“浸食”，人工的に生じた場合は“侵食”を使う）への土砂輸送に使うことを企画・検討する．

先進国では，社会・経済活動を高める為，ダムや港を形成する防波堤を各所に建設したが，これらは土砂の下流への移動を阻害し，下流側の深刻な侵食（国土交通省によると毎年160haの砂浜が消失[2]）を招いてしまった．ダム湖や港への土砂堆積を放置すれば，土砂がやがて溢れ出し，下手側へ供給されるようになるが，現実には，ダムや港の機能を維持するために，土砂浚渫を実施するので,この侵食問題は永遠に続くことになる.それゆえ，溜まると困る場所に溜まった土砂を下手侵食部へ人工的に移動させて，河川から海への総合土砂管理することが望まれる．この土砂輸送の動力源として，水力発電と波力発電を積極的に活用することで，これらの普及につなげることを提案する．

## 2. 小規模水力発電の現状と可能性

### 2.1 小規模水力発電の現状

小規模水力発電の定義は,厳密には統一されておらず,新エネルギー・産業技術総合開発機構の「マイクロ水力発電導入ガイドブック」[3]では出力 10,000 ㎾～1,000 ㎾を小水力，出力 1,000 ㎾～100 ㎾をミニ水力，出力 100 ㎾以下をマイクロ水力と分類している．しかし，本研究では,出力 1000 ㎾以下の場合を小規模水力発電と呼ぶことにする．

小規模水力発電では，ダム建設を前提とせず，自然環境と調和した持続可能な循環型の電源を目指す．経済産業省資源エネルギー庁の平成 30 年のデータ[4]によれば，日本には 1,000kW 以下の小規模水力発電所が 579 地点，1 時間当たり総電力量で約 1,460GW あり，その中には農協や土地改良区が運営しているものもある．小規模水力発電の設備が FIT 制度（再生可能エネルギーの固定買取制度：平成 24 年 7 月～）の対象となり，中小規模の水力発電の導入が徐々に進み，今後新しい産業分野として成長していく見込みである．しかし，小規模水力発電を設置する際に水利権の問題を解決する必要があり，最大出力 20kW 以上では電気事業法による規制も受ける．これらの規制は大きな負担になっており，小規模水力発電の普及によって，外国からの燃料輸入依存度を低下させるためにも,制度の簡素化や一層の規制緩和が必要である．

### 2.2 水車による発電可能量

水車による発電量 $P$[㎾]は式(1)から，管水路の流速 $v$[m/s]は式(2)から求まる．

$$P = gQh_e \times \eta \tag{1}$$

$$v = \sqrt{2gh \Big/ \left\{1 + f\left(l/d\right)\right\}} \tag{2}$$

ここに，$g$ は重力加速度[m/s²]，$Q$ は給水の流量[m³/s]，$h_e$ は損失を考慮した有効落差[m]，$\eta$ は効率，$h$ は落差，$f$ は摩擦損失係数，$l$ は管水路の長さ，$d$ は管水路の内径である．

式(1)から，給水の流量と有効落差が大きいほど，水力発電量は大きくなるが，この様な観点から発電効率の良いダムを新たに造れる適地がほぼ無くなったので，Fig.1 に示すように，渇水期でも安定的な流量（1m³/s 程度以上）を期待できる 1 級河川と大規模な 2 級河川で，平均地盤勾配が 1/25～1/20（水平距離 100m 間で 4m～5m の高低差を想定）を容易に確保できる扇状地帯を主な建設地と考え，河川の両側に一か所ずつ，2 か所に小規模発電（水車発電）施設を設置することを考える．また，河川の横断面積を低減させないために，管水路で給水を100ｍ程度引き込み，4～5m の落差を確保して水車に作用させる．この給水は水車に作用させた後，利水権上の問題を避けるために，管水路で河川まで戻す（排水路長 50m 程度）ことを考える．

今，流量 1m³/s 以上，落差 4～5m，河川から水車までの給水距離 100m，管水路内径 0.6m，流速 4m/s 以上（管の摩擦損失係数を 0.02 と仮定して，式(2)から算出），効率 0.7 と設定し，式(1)へ代入すれば，水車発電 2 か所の発電量は 15 ㎾以上になる．1 時間当りの発電量は 54,000 ㎾以上，1 年間の有効稼働日数を 300 日と仮定すれば，1 年間当りの発電量は約 390GW（=54,000 ㎾×24h×300day）以上となる．なお，第 4 章で詳しく述べるが，この発電量で 18 万 m³ 以上の土砂を輸送できる．

因みに，一つの大河川で堆積・浸食問題になっている一年間の土砂量は 5 万 m³～30 万 m³ である．

さらに，この程度の大河川は全国で 100 か所以上あるので，全国で可能な水車発電量としては，年間で 39,000GW 以上を期待できる．

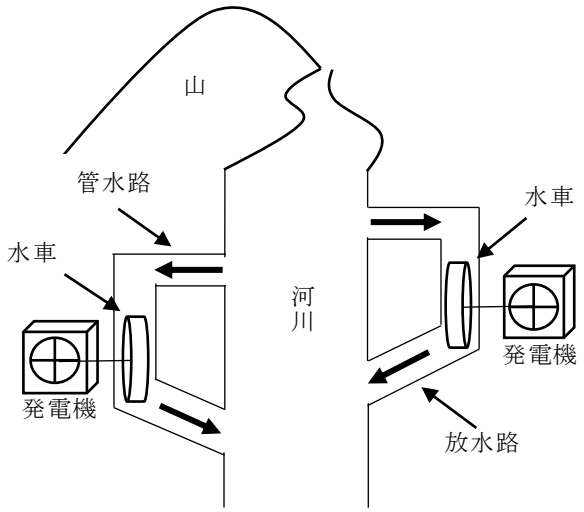



Fig. 1 Illustration of how to supply water from a river to a hydroelectric power plant with a water wheel.

### 2.3 発電施設の建設費と運営修繕費

前節の条件下で建設費と 50 年間の運営修繕費を求めると以下のようになる．

管水路，支保工，電線，架台については，メーカーのホームページにある単価を参考値とし，工事費については建設物価の数字を用いた．発電装置については、発電量が同程度の山梨県都留市，家中川小水力発電所「元気くん 2 号[5)]」の費用を参考とした．

（1）水車発電 2 か所の建設費（単位万円）
①水車代：1,500（一か所）
②発電機代：4,000（〃）
③上屋等施設費：2,000（〃）
④ 2 か所の建設費：15,000｛=（①＋②＋③）×2｝

（2）給水・排水管と送電線の建設費（単位万円）
⑤管設置費単価：40（万円/m）
⑥延長 150m での管建設費：12,000｛(⑤×150m）×2｝
⑦電線設置費単価：2.5（万円/m）
⑧延長 1,000m での管建設費：5,000｛(⑦×1000m）×2｝

（3）50 年間の運営修繕費（単位万円）
⑨人件・光熱雑費：800（一か所）
⑩修繕費：760（一か所，耐久材は建設費の 2%，水車と発電機は購入費の 10%）

以上の（1）～（3）より，2 か所の建設費と 50 年間の運営修繕費は，約 18.8 億円と見積もられる．

## 3. 波力発電の現状と可能性

### 3.1 波力発電の現状

波力発電とは，波による運動エネルギーを発電機によって電気エネルギーに変換する発電法の総称であり，波による海水運動（上下，前後，および，回転）を直接的にタービンやクランク軸に作用させて運動エネルギーを取り込む直接駆動式発電法と，波の運動エネルギーで起こした風や海水の流れでタービンを回す間接駆動式発電法がある．

波エネルギーは，場所や時間によって変動するため，地形や水深などの条件から最適な発電方式を採用することが大切である．太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーに比べ，天候に左右されにくい特徴があり，空気よりも比重の重い水の運動エネルギーを利用するため，効率よくエネルギーを変換できれば，これまで以上の発電量が見込める．

2019 年にドイツの NEMOS 社が開発した波による浮体の動揺を利用した新たな波力発電機[6)]が注目されている．従来の方式と異なり設置が容易で費用が安く，工期も短縮可能である．また，環境に合わせてサイズの調整ができるため，無駄を最小限に抑え，効率を最大化できる．現在も研究が進められており，エネルギー変換効率を 70%まで上げることを目標に開発が進められている．このような優れた発電機の開発がさらに進み普及すれば，大電力の低コスト発電が可能となる．

### 3.2 波力による発電可能量

波力による幅 1m 当りの発電量 $Po$[kW/m]の定義は，式(3)で示される．

$$P_o = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2\right) \times c_g \times \eta \tag{3}$$

ここで，$\rho$ は海水の密度，$H$ は入射波高，$c_g$ は波群の速度，$\eta$ は効率である．

そして，入射波高と波群速度に沖波のそれらを用い，効率に $\eta \approx 0.5$ を用いると，次の沖波用の算定式を得る．

$$P_o \approx 0.5 \times H_o^2 \times T \tag{4}$$

ここで，$H_o$ は沖波波高，$T$ は波の周期である．

さらに，入射波高と波群速度に砕波地点でのそれらを用い，砕波の波高水深比に 0.6 を用いると，次の砕波用の算定式を得る．

$$P_o \approx 0.161 \rho g^{1.5} \times H_b^{2.5} \times \eta \tag{5}$$

ここで，$H_b$ は砕波波高である．

国立技術開発法人港湾空港技術研究所の高橋・安達[7)]や片山ら[8)]などが，式(4)を用いて日本全域の沖波による波パワーを見積もっているが，本研究では日本全域での現実的な発電可能量を見積もるため，2018 年度の同研究所の年間平均の砕波波高データを用いて，国土交通省港湾局の波浪観測所のある全ての海岸での発電量を式(5)から求めると，Table 1 のようになった．

本研究で沖の波高を使わなかった理由は，波が沖から岸へ近づくにつれ，その波高は地形の影響を受けて変化するため，発電施設の有る場所での波高は沖波波高とは違っており，実際の発電量も沖波のそれとは異なる．一般に，水深が浅くなるほど波高は大きくなり，砕波する時の波高が最大であり，それより浅くなると波力は一気に弱まる．したがって，砕波位置に発電施設を置くのが効率的である．しかし，実際の波は不規則波であるため，大きすぎる波が作用すると，発電施設は壊れる可能性がある．それゆえ，施設の強度よりも強い全ての波が砕波する水深に，発電施設を設置すべきである．そして，発電量の評価には，平均波高を使って計算すれば，エネルギー平均波高の場合より小さくなるので，発電量を実際より過小評価する．ゆえに，実際の発電量より少なくて当てが外れる事態にはならないと考えられる．

対象海岸の総延長 3,370km 間で 1 時間当りの発電量は約 84,879GW になった．ここで躯体や受波板による波エネルギーの吸収ロス，発電機のエネルギーの変換ロス等を考えて，効率として 40%を掛けると，約 33,952GW となる．さらに，1 年間の有効稼働日数を 300 日と仮定すれば，1 年間当りの発電量は約 $2.44\times10^8$GW（=33,952GW ×24h×300day）となる．

さらに，我が国で実際に稼働している発電効率の良い

波力発電施設の一例として, Fig.2 に示す振り子式発電施設を取り上げ，設置水深 4.0m，振り子幅 3.0m，平均砕波波高 1.2m，さらに，効率 0.4 を設定して，式(5)から波力発電 1 か所の発電量を求めると，13.7 ㎾となる．1 時間当りの発電量は 13.7 ㎾×3600s＝49,320 ㎾，1 年間の稼働日数を 300 日と仮定し,1 年間の発電量を計算すると，約 355GW（=49,320 ㎾×24h×300day）となる．

### 3.3　発電施設の建設費と運営修繕費

上記の振り子式波力発電1か所の建設費と50年間の運営修繕費を求めると以下のようになる．

工事費については建設物価の数字を用いた．

（1）波力発電 1 か所の建設費（単位万円）

①振り子代：1,200

②発電機代：4,000

③基礎上屋費：10,000

④1 か所の建設費：15,200（＝①＋②＋③）

（2）50 年間の運営修繕費（単位万円）

⑤人件・設備費：800

⑥修繕費：720（耐久材は建設費の 2%，振り子と発電機は購入費の 10%）

⑦50 年間の運営修繕費：76,000｛＝（⑤＋⑥）×50｝

以上の（1）～（2）より，1 か所の建設費と 50 年間の運営修繕費は，約 9.1 億円と見積もられる．

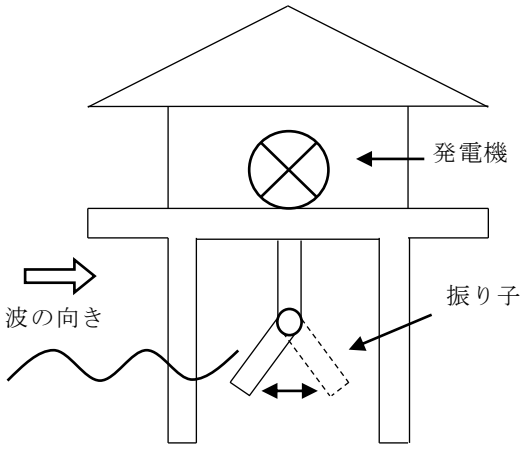



Fig. 2 Illustration of a pendulum style power plant using wave energy

## 4. 経済的な総合土砂管理の提案

### 4.1 総合土砂管理の必要性

国土交通省は，山地，扇状地，平野，河口・海岸の各領域で発生している土砂移動に関する問題に対して，砂防・ダム・河川・海岸の個別領域の問題として対策を行うだけでは解決できない場合に，各領域の個別の対策に留まらず，山地～海岸までの土砂移動場の全体を「流砂系」という概念で捉え，流砂系一貫として，総合的に土砂移動を把握し，土砂移動に関する問題に対して，必要

Table 1 Power generation per hour at each coast.

| 地　名 | 砕破波高(m) | 発電量 (㎾ xhr) | 距離 (km) | 総発電量 (GWxhr) |
|---|---|---|---|---|
| 北海道 | | | | |
| 留萌 | 1.232 | 30,927 | 400 | 12,371 |
| 瀬棚 | 1.276 | 33,763 | 222 | 7,495 |
| 紋別(南) | — | | | |
| 苫小牧 | 0.836 | 11,731 | 310 | 3,637 |
| 小計 | | | 932 | 23,503 |
| 日本海側 | | | | |
| 深浦 | — | | | |
| 酒田 | 1.298 | 35,237 | 310 | 10,923 |
| 新潟沖 | 1.023 | 19,431 | 150 | 2,915 |
| 輪島 | 1.232 | 30,927 | 60 | 1,856 |
| 金沢 | 1.144 | 25,697 | 130 | 3,341 |
| 鳥取 | 1.078 | 22,149 | 170 | 3,765 |
| 浜田 | 1.177 | 27,590 | 175 | 4,828 |
| 藍島(九州) | 0.682 | 7,051 | 95 | 670 |
| 小計 | | | 1090 | 28,298 |
| 太平洋側 | | | | |
| 志布志湾(九州) | 0.682 | 7,051 | 50 | 353 |
| 室津(四国) | 0.847 | 12,121 | 130 | 1,576 |
| 神戸 | 0.308 | 966 | 33 | 32 |
| 潮岬 | 1.276 | 33,763 | 215 | 7,259 |
| 波浮 | — | | | |
| 鹿島 | 1.397 | 42,345 | 95 | 4,023 |
| 小名浜 | 1.232 | 30,927 | 180 | 5,567 |
| 仙台新港 | 0.935 | 15,518 | 190 | 2,948 |
| 釜石 | 0.88 | 13,336 | 120 | 1,600 |
| 八戸 | 1.21 | 29,565 | 160 | 4,730 |
| 小計 | | | 1173 | 28,088 |
| 本州＋四国＋九州の合計 | | | | 79,889 |
| 沖縄 | | | | |
| 名瀬 | 1.221 | 30,241 | 100 | 3,024 |
| 那覇 | 0.946 | 15,979 | 30 | 479 |
| 中城湾 | 1.265 | 33,040 | 45 | 1,487 |
| 小計 | | | 175 | 4,990 |
| 総合計 | | | | 84,879 |

な対策を講じるように努めている[9].

ダム湖における堆砂は，貯水有効容量の減少や放流に伴う濁水期間の長期化につながり，ダムとしての機能を妨げるだけでなく，結果として海岸侵食を加速させる原因となるため，人工的に排出すべきであろう．

また．扇状地では，河川の流速が急に弱まり，河床が高くなる．蛇行流路の外湾部では，流速が速まり，河床が低くなる．例えば，昭和 57 年 8 月の台風 10 号の影響で，早川町稲又谷地区（富士川水系早川）では，河床が 5～6m 上昇し橋梁が埋没した[9]．それゆえ，これらの河床変動は洪水災害低減の観点から抑制することが望ましい．

さらに，海岸の砂浜は，天然の消波施設であり，海岸災害から陸域の人命や財産を守る機能を有するので，海岸侵食が起きると安全性を大幅に損なうことになる．

したがって，総合的な土砂管理を行うことが必要不可欠である．国土交通省では，現在，国土形成計画，海岸基本計画等の各種計画において，総合土砂管理が重要な施策として位置付けられており，各所で関係機関と連携し取り組んでいる．

### 4.2　水車発電を利用した土砂管理

河川に設置した水車発電を，河川の土砂管理に利用する場合の検討結果を以下に記す．

1 河川に於いて，堆積域の土砂を浸食域へ移動させるべき場所は複数個所あるのが普通で，ここでは平均的な 3 か所を想定する．そして，水車発電の電力を用いて，堆積部の土砂を水も含めたスラリー状で，水中ポンプを用いて吸引し，浸食域にて排出する．吸引・排出には，複数の可動装置付きポンプを用い，これの 3 か所分を 1 ユニットと考える．

無理なく達成できる揚程として 5m，土砂移動距離には標準的な 700m，輸送管の内径には入手しやすい上限値の 0.6m，摩擦損失係数には標準的な 0.02，スラリー比重には無理のない 1.2，そして，効率には標準的な 0.7 を設定すれば，流速 1.27m/s，流量 0.36m³/s となり，1 ユニットの 1 時間当りの吸引･排出電力は 343,230 ㎾となる．

1 か所当りの移動させるべき土砂量を 6 万 m³ と設定すれば，1 河川での移動土砂量は 18 万 m³（1 河川で問題となる土砂量 5 万 m³～30 万 m³ の平均値を想定）であり，上記の吸引・排出条件の場合，18 万 m³ の土砂を全て移動させるために要する日数は約 29 日となる．

それゆえ，この 29 日分の吸引･排出用電力は 238.9GW（≒343,230 ㎾×24h×29day）となり，これは前出の水車発電 2 か所の年間発電可能量“約 390GW 以上”に比べて少ないので，十分に賄えることが分かる．

次に，Fig. 3 を参考に，ポンプ吸引・排出 1 ユニットの建設費と 50 年間の運営・修繕費の費用計算を行うと，以下のようになる．

（1）吸引・排出 1 ユニットの建設費（単位万円）
①距離：700m（一か所）
②管設置費単価：50（〃）
③吸引・排出ポンプ代（6 台程度）：1,500（〃）
④吸引・排出可動装置代（二組）：4,000（〃）
吸引・排出ポンプを固定すると，吸引箇所で大きな穴が，排出箇所で山が出来る．これを防ぐため，Fig. 4 に示すように，電気モーターで移動可能な装置を設置する．
⑤管理小屋等建設費：2,000（〃）
⑥吸引・排出 1 ユニットの建設費：127,500
{=（①×②＋③＋④＋⑤）×3}

（2）50 年間の運営修繕費（単位万円）
⑦人件・設備費：800（一か所）
⑧修繕費：1,290（一か所，耐久材は建設費の 2%，ポンプと可動装置は設置費の 10%）
⑨50 年間の運営修繕費：313,500｛(⑦＋⑧）×50×3｝

（1）～（2）より，50 年間でポンプ吸引・排出 1 ユニットにかかる費用は，約 44.1 億円と見積もられる．

一方，土砂の移動を従来の方式（バックホーで土砂を削り取り，ダンプに積み込み，浸食域へ運ぶ）で行う場合，工費は次のようになる．

1 河川での土砂量 18 万 m³ を 10t ダンプで運ぶ場合，およそ 1 万回の往復が必要となる．1 日に 8 時間稼働で移動距離 700m に対して 8 往復できると仮定し，ダンプトラック＋運転手＋バックホー＋操縦士の工費を 13 万円/日として計算すると，1 年間にかかる費用は 16,250 万円（=10000÷8×13 万円）となる．50 年間では，約 81.3 億円（=16250 万円/年×50 年）となる．

この工費を，水車発電施設 2 か所とポンプ吸引・排出 1 ユニットの建設・運営修繕費約 62.9 億円（=18.8 億円＋44.1 億円）と比較すれば，水車発電を利用した土砂管理の方が，十分に安く，かつ，環境保全上も有利である．

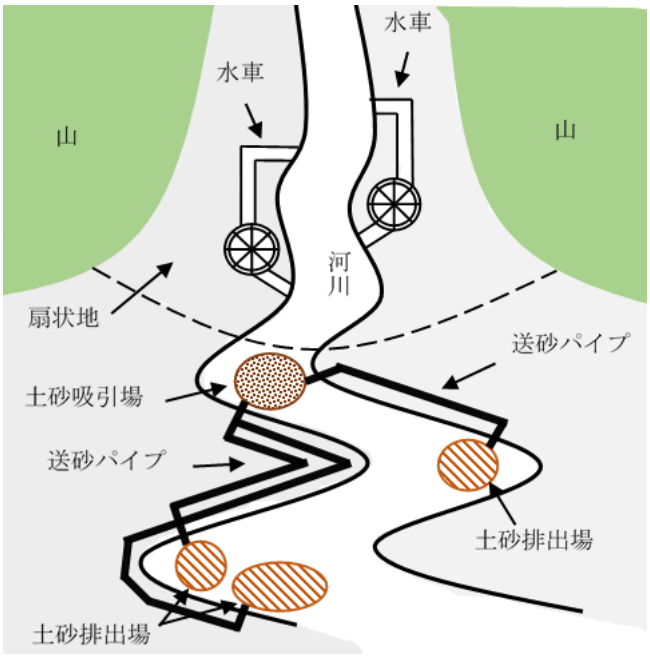



Fig. 3 Illustration of a sand bypass system in a river.

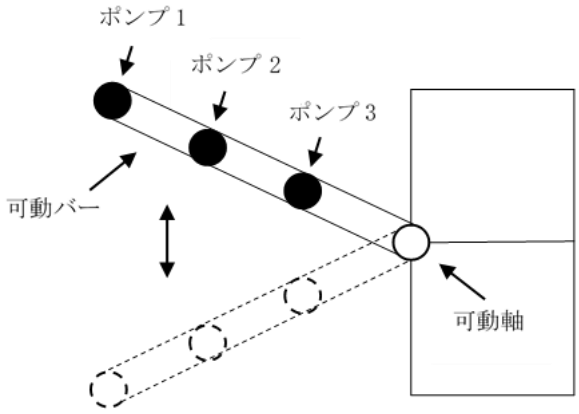



Fig. 4 Image of a movable facility with three pumps.

### 4.3 波力発電を利用した土砂管理

海岸に設置した波力発電を，海岸の土砂管理に利用する場合の検討結果を以下に記す．

1 海岸に於いて，堆積域の土砂を侵食域へ移動させるべき箇所が 1 か所とは限らないので，2 か所想定する．そして，波力発電の電力を用いて，堆積部の土砂を水も含めたスラリー状で，水中ポンプを用いて吸引し，侵食域にて排出する．吸引・排出には，複数の可動装置付きポンプを用い，これの 2 か所分を 1 ユニットと考える．

無理のない落差として 2m，標準的な輸送距離として 400m，輸送管の内径には入手しやすい上限値の 0.6m，摩擦損失係数には標準的な 0.02，スラリー比重には無理のない 1.2, そして, 効率には標準的な 0.7 を設定すれば，流速 1.27m/s，流量 0.36m³/s となり，1 ユニットの 1 時間当りの吸引・排出電力は，228,820 ㎾となる．

1 か所当りの移動させるべき土砂量を 9 万 m³ と設定すれば，1 海岸での移動土砂量は 18 万 m³（1 海岸で問題となる土砂量も 5 万 m³～30 万 m³）であり，上記の吸引・排出条件の場合，18 万 m³ の土砂を全て移動させるために要する日数は約 29 日となる．

それゆえ，この 29 日分の吸引・排出用電力は 159.3GW（≒228,820 ㎾×24h×29day）となり，これは前出の波力発電 1 か所の年間発電可能量約 355GW 以下なので，十分に賄えることが分かる．

次に，Fig. 5 を参考に，ポンプ吸引・排出 1 ユニットの建設費と 50 年間の運営・修繕費の費用計算を行うと，以下のようになる．

（1）吸引・排出 1 ユニットの建設費（単位万円）
①距離：400m（一か所）
②管路工事単価：50（〃）
③吸引・排出ポンプ代（6 台程度）：1,500（〃）
④吸引・排出可動装置代（二組）：4,000（〃）
⑤上屋等建設費：2000（〃）
⑥吸引・排出 1 ユニットの建設費：55,000
{=（①×②＋③＋④＋⑤）×2}

（2）50 年間の運営修繕費（単位万円）
⑦人件・設備費：800（一か所）
⑧修繕費：990（一か所，耐久材は建設費の 2%，ポンプと可動装置は設置費の 10%）
⑨50 年間の運営修繕費：179,000｛(⑦＋⑧）×50×2｝

（1）～（2）より，50 年間でポンプ吸引・排出 1 ユニットにかかる費用は，約 23.4 億円と見積もられる．

一方，土砂の移動を従来の方式（バックホーで土砂を削り取り，ダンプに積み込み，侵食域へ運ぶ）で行う場合，工費は次のようになる．

1 海岸での土砂量 18 万 m³を 10t ダンプで運ぶ場合，およそ 1 万回の往復が必要となる．1 日に 8 時間稼働で移動距離 400m に対して 10 往復できると仮定し，ダンプトラック＋運転手＋バックホー＋操縦士の工費を 13 万円/日として計算すると，1 年間にかかる費用は，13,000 万円（=10,000÷10×13 万円）となる．50 年間では，約 65.0 億円（=13,000 万円×50 年）となる．

また，海岸侵食対策工法として有名な離岸堤群工法で対応する場合を考える．対策の必要な海岸延長と離岸堤一基の長さに，標準的な 2,000m と 100m を考えれば，離岸堤の設置数は，一基ごとに 50m の開口部を設けて 13 基となる．1 基当たりの建設費と修繕比率を，日本国で平均的な 45,000 万円と 3%とすれば, 50 年間の総費用は，約 146.3 億円｛=（45,000 万円×（1＋0.03×50 年）×13 基｝となる．

これらの工費を，振り子式波力発電 1 か所とポンプ吸引・排出 1 ユニットの建設・運営修繕費約 32.5 億円（=9.1 億円＋23.4 億円）と比較すれば，波力発電を利用した土砂管理の方が，圧倒的に安く，かつ，環境保全上も有利である．

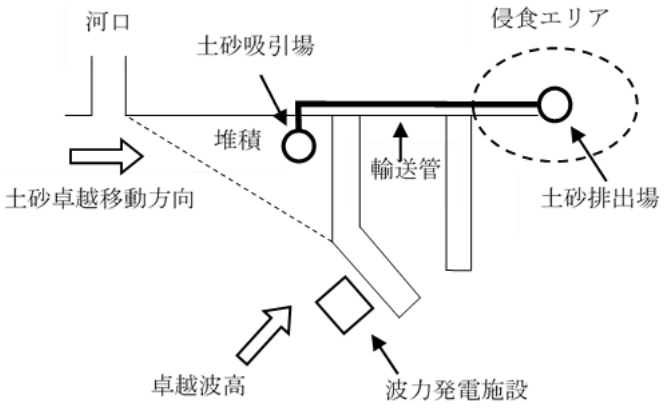



Fig. 5 Illustration of a sand bypass system in a coast.

## 5. まとめ

主要な成果を以下にまとめる．

① 扇状地に設置したコンパクトな水車発電で無理なく 1 年間当り約 390GW 以上の発電量を期待でき，これは 1 河川で 18 万 m³の土砂を管によるスラリー輸送で運ぶために必要な総電力 238.9GW を超えており, 河川の土砂管

理に必要な電力を十分に賄えることを明らかにした．さらに，水車発電施設 2 か所とポンプ吸引・排出 1 ユニットの建設費と 50 年間の運営修繕費約 62.9 億円は，ダンプによる土砂輸送の工費約 81.3 億円と比較して，十分に安く，かつ，環境保全上も有利である．また，全国の河川の扇状地に於いて 100 か所以上で水車発電施設を設置できると考えられるので，1 年間当りの総発電量として 39,000GW 以上を期待できる．

② 海岸に設置した波力発電では，無理なく 1 年間当り約 355GW 以上の発電量を期待でき，これは 1 海岸で土砂輸送に必要な 159.3GW を余裕で賄えるほどの電力が見込めることを明らかにした． さらに，振り子式波力発電 1 か所とポンプ吸引・排出 1 ユニットの建設費と 50 年間の運営修繕費約 32.5 億円は，ダンプによる土砂輸送の工費約 65.0 億円や離岸堤群工法での総費用約 146.3 億円と比較して，圧倒的に安く，かつ，環境保全上も有利である．また，全国の延長 3,370km 間の海岸に波力発電施設を設置した場合，1 年間当りの総発電量として $2.44\times10^{8}$GW 以上を期待でき，今後さらに普及させることで，再生可能エネルギーの拡大に一層貢献できる．

## 参考文献


1） 経済産業省資源エネルギー庁，電力調査統計，2018 年度のデータ，http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/，2020 年 3 月時点で確認．

2） 田中茂信，小荒井衛，深沢満，地形図の比較による全国の海岸線変化，海岸工学論文集第 40 巻，pp.416-420 (1993).

3） 新エネルギー・産業技術総合開発機構，マイクロ水力発電導入ガイドブック(2003).

4） 経済産業省資源エネルギー庁，平成 30 年のデータ，https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/database/energy_japan006/，2020 年 3 月時点で確認．

5） 都留市 HP，家中川小水力市民発電所，建設事業費内訳，https://www.city.tsuru.yamanashi.jp/soshiki/chiikikankyou/kankyouseisaku_t/genkikun/1304.html，2020 年 7 月時点で確認．

6） EMIRA，世界が注目する最新波力発電技術の秘密！，https://emira-t.jp/topics/13287/，2020 年 3 月時点で確認．

7） 高橋重雄・安達崇，日本周辺における波パワーの特性と波力発電，港湾技研資料 No.654, p.18 (1989).

8） 片山裕之，米山治男，下迫健一郎，波力発電適地選定のための日本沿岸における波パワーの評価，土木学会論文集 B3（海洋開発），第 70 巻 2 号, I_73-I_78 (2014).

9） 国土交通省，ダム水源地土砂対策技術研究会，技術講演会資料，総合的な土砂管理について，http://www.doshaken.com/event/images/pdf/H26_presen5.pdf，2020 年 3 月時点で確認．