

3. ハイブリッド・サイフォン排水装置

燃料消費を大幅に軽減し、高揚程を達成！

株式会社山辰組

○ 馬渕 剛

馬渕 和三

1. はじめに

国土交通省の「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」で、「ポンプ排水に要する大量の燃料消費を軽減することが可能な手法として、大容量排水技術（サイフォン等）についても開発・検討を進め、実用化の際にはその適用範囲を明確化すべきである。」を受け、弊社で開発した「呼び水式・サイフォン排水装置」は、平成24年度の本シンポジウムにおいてポスターセッション審査委員特別賞に選考していただいた。その後も改良を重ね、多様な現場条件にも対応可能なサイフォン排水装置として大きく進化させ、平成28年3月には国土交通省次世代社会インフラ用ロボット技術に認定していただいた。その後も幾つかのサイフォン新技術を開発し進化させたのでその成果と特長について報告する。

2. 「呼び水式・サイフォン排水装置」と「水中ポンプ」の組み合わせでサイフォン新技術が誕生！

提言後に開発した「呼び水式・サイフォン排水装置（図-1）（以下、「呼び水・サイフォン」と記す）」は、起動時には貯水タンクに貯めた水の水圧でサイフォン作用を起動する技術であり、電源を全く使用しなくてもΦ200mmまでのサイフォン排水作業を行える画期的な新技術として大きな特長があった。ただし、使用できる条件は、①貯水タンクを配置する位置はサイフォン配管の最高部から下流側に配置する。②そのタンクから上流側のホース延長が下流側のホース延長の2分の1以下であること。などであった。

「呼び水・サイフォン」を地形に高低差がある砂防工事の現場で使用しようとするとき、貯水タンクを設置する場所の制限を受ける場合がある。つまり、構築するダム本堤の上流側に釜場を設けて、ダムを迂回して排水するサイフォンホースを設置しようとした場合、構造物の下流側は高低差が大きく勾配が急なため貯水タンクを設置する場所が確保できない、また、（図-1）のように本堤の下流側に設置した場合でも、吸水口から貯水タ

ンクまでのホース延長の2倍以上の延長の排水ホースを貯水タンクから下流部へ延長する必要があった。さらに、構造物の上流側に貯水タンクを設けた場合、貯水タンクの水圧だけではダムの高さ（揚程）を乗り越えてサイフォンホース内を満水状態で流すことができないためサイフォン作用が起動しない場面が発生した。これは多様な地形条件が想定される天然ダムでの対応にも同様な場面が当てはまるのではないかとの課題に突き当たったのである。

そこで、このように多様な地形条件にも対応が可能な「呼び水・サイフォン」とするため研究を重ねた。つまり、「呼び水・サイフォン」は、電源を全く使用しないことを前提に開発し、サイフォン排水ホースへ注水する方法として水中ポンプの代わりに貯水タンクの水の水圧を利用した装置であった。この貯水タンクの機能の限界、つまり「タンク内の水面より高く水を上げて圧送することはできない。」を解決するため、従来の水中ポンプを貯

「呼び水式・サイフォン排水装置」の実験設備図

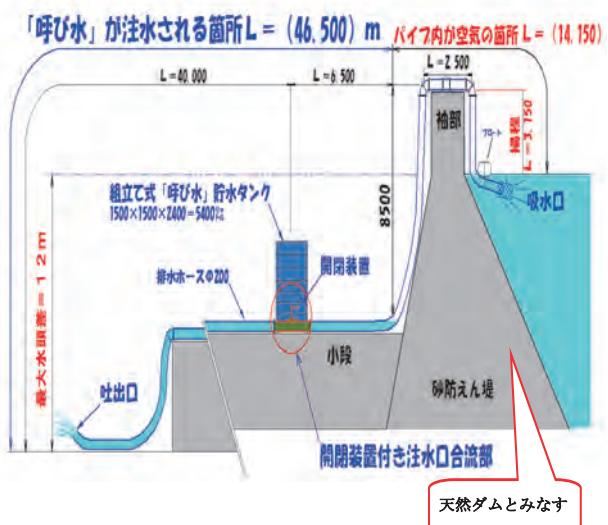


図-1 呼び水式・サイフォン排水装置の配置図

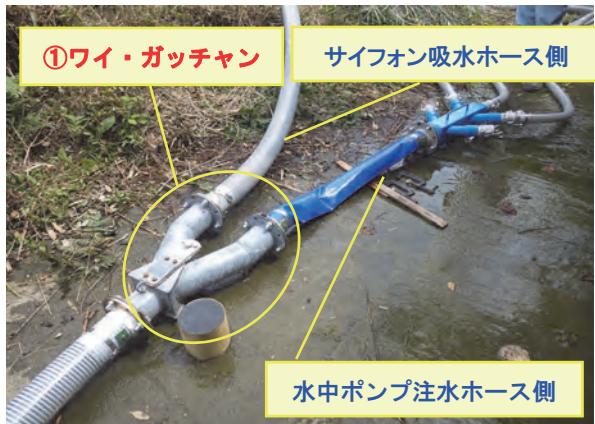


図-2 「①ワイ・ガッチャン」と各種連結部材

水タンクに替えて採用することとした。

水中ポンプはサイフォン起動時に1分～2分間だけサイフォン排水ホースへの注水作業に電気を使用することとなるが、この「呼び水・サイフォン機能」と「水中ポンプ」の高揚程への送水機能との組み合わせにより、多様な地形条件にもいっそう対応可能なサイフォン排水装置として進化することができた。この2種類の送水機能を活かした新たなサイフォン排水技術を「ハイブリッド・サイフォン」排水装置と命名した。

3. 新技術：「ハイブリッド・サイフォン」排水装置について

「ハイブリッド・サイフォン排水装置(以下、「ハイブリッド・S」と記す)」のサイフォン起動方法は、応急復旧作業の際、従来の技術でサイフォン起動を行う際の大きな課題のひとつ「吸水口や吐出し口を設置した水辺や急な斜面など危険な場所での人力開閉作業」を省略することができた。具体的に従来のサイフォン起動技術では、以下の起動手順を必要とした。①上下流部の吸水口と吐出し口の開閉装置を閉じる。②サイフォンホース延長上の最高部に開口部を設け、水中ポンプなどを使用してそこからホース内へ注水する。③吸水側及び吐出し側へ徐々に注水されると水位の上昇に伴い空気は押し上げられて最高部の開口部から排気される。④ホース内が満水になら最高部の開口部を閉じる。⑤上下流側の開閉装置を人力作業で開ける。⑥サイフォン作用が起動する。という手順をとっていた。この工程の中で、①と⑤の特に豪雨など異常気象時の作業員による危険な開閉作業を無くした。

「ハイブリッド・S」の吸水口と吐出し口の開閉作業を無くすには常時開口状態の技術とするため、サイフォン排水ホースの途中に水中ポンプ側とサイフォン吸水側の流れに任意に方向を切り替える機能を備えたY字状の注水合流部材「ワイ・ガッチ

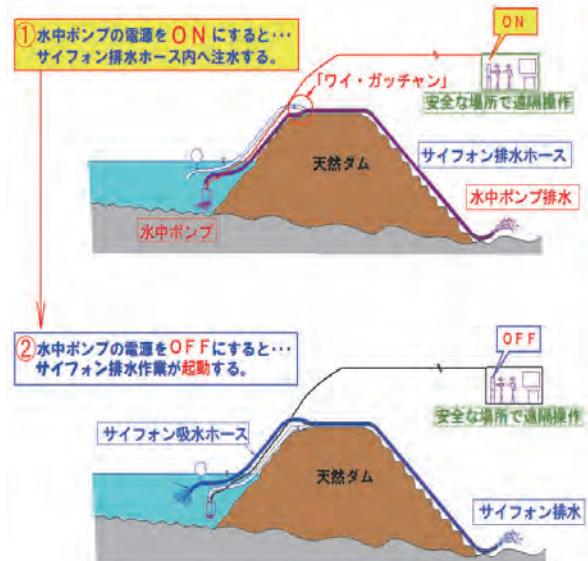


図-3 「ハイブリッド・S」の起動図

ヤン」を開発して配置した。Y字状の二股(2口)側を上流(淡水池側)に向け、二股の一方にサイフォン吸水ホースを連結。他方に水中ポンプ注水ホースを連結。Y字状の1口側を下流(吐出側)に向けてサイフォン排水ホースを連結する(図-2)。

「ハイブリッド・S」の設置が完了したら、水中ポンプの電源のON⇒OFFの操作だけで「水中ポンプ単独送水作業」⇒「サイフォン単独排水作業」⇒「サイフォン排水作業+水中ポンプ排水作業」の切り替えが安全な場所から遠隔操作により行うことができるようになった(図-3)。

「ハイブリッド・S」のサイフォン起動方法は、①遠隔操作により電源をONにして水中ポンプを稼働して注水合流部材「ワイ・ガッチャン」を通してサイフォン排水ホース内へ注水を行う(図-3上)。②サイフォン排水ホース内の空気を吐出側から押し出すとサイフォン排水ホース内が満水状態の流れとなったら(図-3上)。③水中ポンプの電源をOFFにして注水を停止する。④サイフォン吸水ホースからの吸水作用が開始しサイフォン排水作用が始まる(図-3下)。上流側の吸水口と下流側の吐き出し口を常時開口状態としたことで、豪雨など悪天候の中で淡水池の水辺や急な斜面に配置した吸水口や吐出し口で行う人力開閉作業を不要とした。

3.1 「ハイブリッド・S」の口径と作業性について

「ハイブリッド・S」の排水ホースの口径はΦ100mm～Φ200mmとなっている。大容量排水能力のあるΦ200mmハイブリッド・Sは、各部材の重さを考慮すると人力だけでは作業効率が伸びないため、運搬や設置作業には重機の併用が作業効率を向上さ



図-4 $\Phi 100\text{ mm}$ 「ハイブリッド・S」の各部材は
全て人力運搬が可能な部材で構成した。

せる。そのため、車両や重機が進入できる場所での大容量排水作業に適しているという特長がある。

また、 $\Phi 100\text{ mm}$ ハイブリッド・Sの各部材は、進入路が無い場合の、人力運搬が可能な重さの範囲で構成することを前提として開発したため、河道閉塞により生じた「天然ダム」や、老朽化した「ため池」などで、車両や重機が近づけない場所であっても、樹林を縫って人が通れるスペースさえ有れば、全ての機材を人力で運搬して排水作業を可能とした大きな特長を備えた技術となった（図-4）。

3.2 100Vの電源で起動できる「ハイブリッド・S」ならではの「クーキオス・ボール」起動工法

排水作業に使用する従来の $\Phi 100\text{ mm} \sim \Phi 200\text{ mm}$ 以上の水中ポンプ（重量約90kg～230kg）の稼働には200Vの電源を必要とするため、大型発電機（重量200kg以上）の搬入が可能な運搬路が確保できなければ排水作業を行うことができなかつた。

「ハイブリッド・S」 $\Phi 100\text{ mm} \sim \Phi 200\text{ mm}$ では、サイフォン作用の起動にあたり、 $\Phi 50\text{ mm}$ の水中ポンプ1台（重量約10kg）と100Vのポータブル発電機（重量約13kg）を使用して大口径のサイフォン作用を起動可能とするため「クーキオス・ボール」工法を新たに開発した（図-5）。

小口径の水中ポンプで大口径のサイフォン排水作用を起動する新技術「クーキオス・ボール」工法は、注水前に「ワイ・ガッチャン」の下流側のサイフォン排水ホース内に「クーキオス・ボール」を装填する。装填後にはサイフォン排水ホースの内断

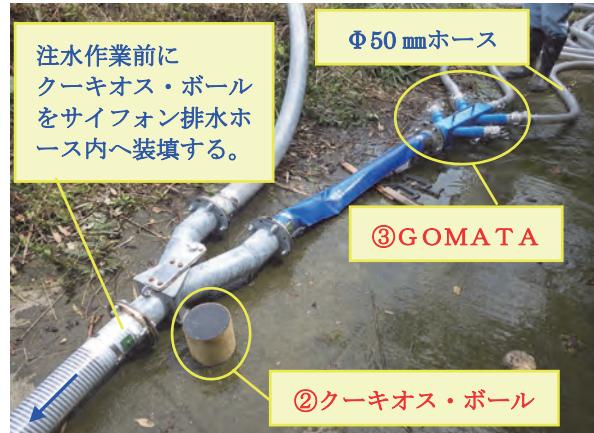


図-5 「②クーキオス・ボール」と「③GOMATA」

面一杯の大きさとなるため、 $\Phi 50\text{ mm}$ の水中ポンプから注水される水圧を受け止めた「クーキオス・ボール」は下流側へ押し進められる。この際、「クーキオス・ボール」の上流側は満水状態の水圧に押され、下流側は空洞部で抵抗がないため下流方向へボールが容易に移動する。

下流側の吐き出し口に至り「クーキオス・ボール」が吐き出されたとき、サイフォン排水ホース内に満水状態で充填されていた水は位置エネルギーにより吐出し口側に流下する。この現象に連動して湛水池側では湛水を吸水ホースからストローで吸うような作用でサイフォン排水ホース内へ吸い込んでサイフォン作用が起動することとなる。 $\Phi 50\text{ mm}$ 水中ポンプ1台で「クーキオス・ボール」を使用して $\Phi 200\text{ mm}$ ハイブリッド・Sを稼働させることも実証済みである。

$\Phi 100\text{ mm}$ 以上の排水作業であっても、準備する電源は100Vのポータブル発電機1台とそれで稼働する $\Phi 50\text{ mm}$ 水中ポンプという画期的なサイフォン起動方法による排水技術となったのである。

ハイブリッド・Sのサイフォン起動時間を短くしたい場合は、 $\Phi 50\text{ mm}$ の水中ポンプを複数台合流させて注水することで解決できる。複数の流れを合流させる部材「GOMATA（ゴマタ）」を新たに開発した。 $\Phi 50\text{ mm}$ 水中ポンプ最大5台分の流れを合流させて注水することができる。サイフォンを起動させる時間を早くするという機能を備えた。

これらの起動方法によりサイフォン作用を稼働させる場合に、「揚程7m」を境にしてその後のサイフォン稼働方法を切り替えることとなる。

3.3 サイフォン単独排水作業の「限界揚程7m」を目安とし「ハイブリッド・S」を使い分ける

サイフォンの揚程に限界の高さが理論上はあるが、サイフォン排水装置の実用性を高めるため、実際の限界揚程を求める実験を行った（図-6）。



図-6 サイフォンの限界揚程確認実験

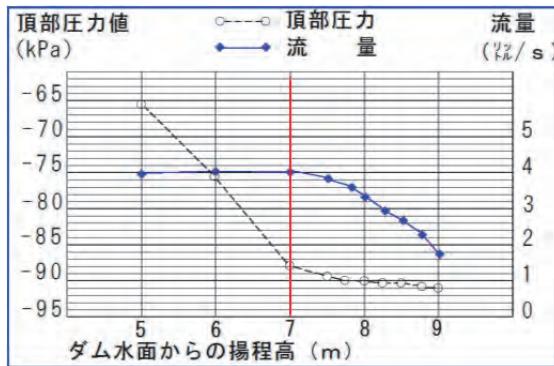


図-7 サイフォン作用の限界揚程高測定実験結果

(図-7) はその実験の結果である。流量の変化を見ると、揚程 7m までは一定で変化はないが、揚程 7m を超えると流量が減少傾向となっている。安定したサイフォン作用の範囲として「限界揚程を 7m」としてハイブリッド・S を使い分けることとした。

この実験により、ハイブリッド・S は、①「揚程 7m 以下」の場合であればサイフォン単独による排水作業を行う。②「揚程が 7m 以上」の場合は「サイフォン」と「水中ポンプによるアシスト送水作用」の 2 種類の機能を併用することとする。これにより、サイフォン単独よりも、水中ポンプ単独よりも「限界揚程」と「排水量」が大きく上回る機能が生まれ、まさにハイブリッドなサイフォン排水装置として開発することができた。

3.4 「サイフォン単独」と「水中ポンプ単独」の排水作業能力の比較実験

(表-1) に示すように、「水中ポンプ単独」と「サイフォン単独」の排水能力の比較実験を行った。 $\Phi 200\text{ mm}$ の水中ポンプの排水機能はメーカーの排水性能曲線を用いた。水中ポンプの場合「揚程 3m が $5.2\text{ m}^3/\text{min}$ で最大排水量」であり、これより揚程が大きくなるにつれて排水量は減少し、限界揚程 18m で排水量 $0\text{ m}^3/\text{min}$ となっている。限界揚程 18m の半分の 9m で $4.0\text{ m}^3/\text{min}$ となり、この数値が一般的に $\Phi 200\text{ mm}$ 水中ポンプの機能として排水計画を行う際の参考数値となっている。

対して $\Phi 200\text{ mm}$ サイフォンの揚程を決める場合、

表-1 水中ポンプとサイフォンの排水量比較表

水中ポンプの特徴		サイフォンの特徴	
揚程3m程度が最大の排水量で、揚程が大きくなると、排水量は減少する。メーカーが公表する限界揚程の異なる水中ポンプの機種は多種ある。		限界揚程7mでサイフォンによる排水作業は停止するが、水頭差が大きくなると排水量が増大する。	
動力送水		揚程 3m の場合	
揚程	排水量	水頭差	排水量
(m)	(m^3/min)	(m)	(m^3/min)
1	-	1	2.2
2	-	2	3.1
3	5.2	3	4.0
4	5.0	4	4.7
5	4.9	5	5.4
6	4.8	6	6.1
7	4.5	7	6.7
8	4.2	8	7.3
9	4.0	9	7.5
10	3.8	10	7.9
11	3.5	11	8.4
12	3.0	12	8.7
13	2.6	(当社実験値)	
14	2.2	(市販ポンプ公表値)	
15	1.7		
16	1.3		
17	0.5		
18	0.0		

水中ポンプの最大排水量 $5.2\text{ m}^3/\text{min}$ の時の揚程が 3m であったため、揚程 3m で固定し水頭差を変化させた。水中ポンプの最大排水量に近いサイフォン排水量としては「水頭差 5m の場合の $5.4\text{ m}^3/\text{min}$ 」であった。

水中ポンプの場合、揚程が大きくなるにつれて排水量が減少するのに対して、サイフォンは水頭差が大きくなるにつれて排水量も増大する。サイフォンの場合、水頭差が 12m の場合 $8.7\text{ m}^3/\text{min}$ と同じサイズの水中ポンプの一般的とされる $4.0\text{ m}^3/\text{min}$ の 2 倍以上の排水能力があり水中ポンプには無いサイフォン機能の特長といえる。

3.5 「サイフォン」、「水中ポンプ」、「ハイブリッド・S」それぞれの排水能力の比較実験

標記それぞれの排水能力を同じ現場条件で確かめた。その結果(表-2)には以下の内容が示されている。サイフォン配管延長 280m、水頭差 11m で実験を行った。

- 【C】に示すように従来の水中ポンプ配管(吐出し口が配管の最高部となる配管)で実施した場合、揚程 12m では水中ポンプの公表値【B】 $3.0\text{ m}^3/\text{min}$ に対し $2.37\text{ m}^3/\text{min}$ と減少している。

表-2 水中ポンプとハイブリッド・S 排水量実測値

計測日 平成27年12月8~10日					
揚程 (m)	サイフォン A	水中ポンプ B	ハイブリッド・S C	サイフォン D	サイフォン E
起動方法 起動時に クーキオス ボール使用 実測値 (m³/min)	水中ポンプ メーカー 公表値 (m³/min)	水中ポンプ 実測値 (m³/min)	サイフォン 配管 起動時に水 中ポンプだ け使用 実測値 (m³/min)	サイフォン 配管 起動時に クーキオス ボール使用 実測値 (m³/min)	サイフォン 配管 起動時に クーキオス ボール使用 実測値 (m³/min)
配管条件 ホース延長 280m 水頭差 11m	ホース延長 80m 揚程高さが 吐出し口	ホース延長 280m 水頭差 11m	ホース延長 280m 水頭差 11m	ホース延長 280m 水頭差 11m	ホース延長 280m 水頭差 11m
1	-	-	-	-	-
2	-	-	5.07	5.29	-
3	5.03	5.2	-	-	-
4	5.05	5.0	4.55	5.28	-
5	4.88	4.9	-	-	-
6	4.94	4.8	4.06	5.25	-
7	4.25	4.5	-	-	-
8	-	4.2	3.52	5.30	-
9	-	4.0	-	-	-
10	-	3.8	2.90	5.17	-
11	-	3.5	-	-	-
12	-	3.0	2.37	4.89	4.85
13	-	2.6	-	-	-
14	-	2.2	1.68	1.89	4.39
15	-	1.7	-	-	-
16	-	1.2	1.33	0.42	3.94
17	-	0.5	-	-	-
18	-	0.0	-	-	-
19	-	0.0	-	-	-
20	-	0.0	-	-	2.40

*サイフォン配管延長 280m、水頭差11m。

- ② これと比較して【D】はサイフォン配管の効果により水中ポンプで起動して $4.89 \text{ m}^3/\text{min}$ と公表値【B】 $3.0 \text{ m}^3/\text{min}$ を 1.63 倍上回っている。
- ③ 揚程 12m で【E】では起動時に「クーキオス・ボール」を使用して起動した場合も $4.85 \text{ m}^3/\text{min}$ と公表値 $3.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の 1.62 倍の排水量である。
- ④ その後、揚程が 12m を超えて大きくなると【C】の水中ポンプ配管の場合は水中ポンプの公表値【B】以下に排水量が減少していく。
- ⑤ サイフォン配管で起動時に「クーキオス・ボール」使用した起動方法【E】では、揚程 12m を超えると、各揚程で水中ポンプ配管の実測値【C】と水中ポンプのみの起動の排水量【D】を大きく上回った排水量が確認できる。
- ⑥ 数値が揃っている揚程 16m で解析すると、【D】のサイフォン配管で水中ポンプのみの起動による場合、ホース延長が 280m と長いことも一因しているかもしれないが $0.42 \text{ m}^3/\text{min}$ と公表値よりかなり少ない排水量を確認した。

⑦ 同じ揚程 16m でも、「クーキオス・ボール」を使用した【E】の場合は $3.94 \text{ m}^3/\text{min}$ である。【D】とは配管条件も同じであるが、違いは水中ポンプ始動時に「クーキオス・ボール」を使用しているか否かであり「クーキオス・ボール」で排水ホース内の残留空気を 100%近く押し出すことが、その後の揚程が 12m 以上に大きくなった場合に、サイフォン作用の減少が少なくして、水中ポンプと併用した排水作業を続けることが可能となるという違いに表れてくると考える。

この高揚程の各種実験結果から、【E】のように「クーキオス・ボール」を使用して起動する方法を選定した場合、【C】、【D】と同じように水中ポンプ稼働に燃料消費を伴うが、揚程 16m では【C】、【D】の 3.0 倍～9.4 倍の排水量が確認されるなど、例えば「天然ダム」や「ため池」で揚程が 7m 以下でハイブリッド・S を「クーキオス・ボール」を使用してサイフォン起動を行った場合、排水作業が進むにつれて水位が低下すると、サイフォンの限界揚程 7m を超える高揚程となる。その場合、電源を ON にして水中ポンプを稼働し【E】の排水工法に切り替えることとなる。水中ポンプを稼働すると、これに掛かる燃料消費量は【B】、【C】、【D】と同じであるが【E】の場合「クーキオス・ボール」を使用して起動したことで水中ポンプ 1 台で揚程 16m の場合で水中ポンプ 3.0 台～9.4 台分の排水量が確認できた。

「燃料消費の軽減」、「大容量排水」、「高揚程」を達成することができる排水装置及び工法となった（これら新技術は特許並びに特許申請中である）。

4. 「災害対策用排水ポンプ車」と「ハイブリッド・S」の組み合わせ工法について

国土交通省中部技術事務所所有の災害対策用排水ポンプ車に搭載してある水中ポンプを使用してサイフォン排水実験を行った（図-9）。前述した 3.5 の実証実験地（奈良県十津川村栗平地区天然ダム）での配管として延長 280m、水頭差 11m を復元して行った。



図-9 「災害対策用排水ポンプ車」と「ハイブリッド・S」の組み合わせによる実験状況

汎用のΦ200mm水中ポンプの排水量4.0 m³/minと比較しても排水ポンプ車の水中ポンプは7.5 m³/minと送水量も圧倒的に大きくサイフォン排水ホース内へ注水する速度も作業も速やかに実施できた。サイフォン起動後の排水量については、概ね前述した3.5(表-2)の実験結果に近似している。

同じく排水ポンプ車が河道閉塞により天然ダムの上流に進入できない場合を想定して、ダム下流部に配車することを想定した「ハイブリッド・逆サイフォン」の実験にも成功し、新たな使用方法が開発されるなど「災害用排水ポンプ車」と「ハイブリッド・S」の組み合わせも、本来の「ハイブリッド・S」の機能が十分に發揮できることが確認できた。

5. 「水中ポンプ」と「ハイブリッド・S」

「サイフォン」の「燃料消費量」比率について(表-3)に示すように、ハイブリッド・Sの場合、限界揚程7mまでは安定したサイフォン作用が継続する。燃費は1日2分間ポンプ送水するとして計算。水頭差が4m以上確保できれば、流速により空気を押し出すためポンプ送水は不要で「7」の比率は限りなく小さくなる。従来の水中ポンプの稼働に掛かる燃料消費量を「10,000」の比率とすると、サイフォン作用で稼働する場合は、わずか「7」の比率となり水中ポンプでの燃料消費量が「10,000:7」に軽減する。

表-3 水中ポンプとハイブリッド・Sの燃料消費量と温室効果ガス排出量の比較表

口径=Φ150mm、各1台 2.4時間稼動として

機種	水中ポンプ	ハイブリッド・S
消費量	120ℓ/日	0.083ℓ/日
軽油 消費量	1ヶ月 3,600 6ヶ月 21,600 12ヶ月 43,200	2.5 ℓ 15.0 ℓ 30.0
ドラム缶	1ヶ月 18 6ヶ月 108 12ヶ月 216	0.013 本 0.078 本 0.156
金額	1ヶ月 450,000 6ヶ月 2,700,000 12ヶ月 5,400,000	311 円 1,875 円 3,750
二酸化炭素排出	排出量 1ヶ月 9.500 6ヶ月 57.100 12ヶ月 114.200	2.644kg-CO ₂ /ℓ ton ton ton ton ton 換算 換算 換算
比率	10.000	7

軽油単価を125円/ℓで計算。

6. 老朽化した「防災重点ため池」の「事前放流」、「低水位管理」にも役立つ「ハイブリッド・S」

農林水産省は6月11日、自然災害で人的被害が生じる恐れがある「防災重点ため池」を新たな基

準で再選定した結果、5月末時点で63,722カ所が対象となったと発表した。これまでの約11,000カ所から大幅に拡大し、農業用ため池の総数(166,638カ所)の4割弱を占めた。決壊を防ぐ補強や緊急連絡体制の整備といった対策を優先的に進める。

(2019.6.12付け日本経済新聞より)とあるように、ため池の防災意識が高まっている。

「ため池を改修したいが、取水施設が老朽化して、水を放流できない。」「湛水している水を抜くためには水中ポンプや発電機が必要だが搬入する道がない。」「水中ポンプ排水では膨大な燃料費を覚悟しなければならない。」などの課題に対して「ハイブリッド・S」を検討のもと、実際に現地へΦ100mmハイブリッド・Sを人力運搬で搬入して放流した実績がある(図-4)・(図-5)・(図-10)。延長100m、水頭差11m、放流量2.2m³/minと同口径の水中ポンプの2倍以上の成果を上げ、燃料費は起動時の1分間だけであった。今後とも、燃料消費を軽減した「ハイブリッド・S」を、排水装置として多様な現場条件に対応可能な技術として伸ばしていくたい。



図-10 進入路が無い老朽化した「ため池」でのΦ100ハイブリッド・S放流状況

謝辞: 呼び水・サイフォンから進化した「ハイブリッド・S」の技術が「災害対策用排水ポンプ車」との組み合わせにも有効であるとの実証実験を実施していただき、成果を挙げられたことに対して、国土交通省中部技術事務所、越美山系砂防事務所、岐阜県など多大なご理解とご協力を賜りました関係機関の皆様に心から謝意を表します。