

サイフォンと水中ポンプの機能を併用した排水システムの開発

ハイブリッド・山辰サイフォン排水システム

馬 淵 和 三

サイフォン排水作業において上流側釜場の水面と、配管の最も高くなる管頂部との差＝揚程が7mより大きくなりすぎると、管頂部の負圧により気化現象が発生し始め、やがて流れが分断してサイフォン作用が停止することを実験により確認している。また、水中ポンプによる排水作業を行う際にも水中ポンプの限界揚程を超えると排水量は0m³/minとなる。本「ハイブリッド・山辰サイフォン・排水装置」(以下「本システム」という)は、サイフォンと水中ポンプの排水機能を単独または併用して使用する事で、双方のこれまでの限界を大きく超えた排水能力を発揮するシステムとして開発した。

本稿では国土交通省の次世代インフラ用ロボット開発・導入技術に応募し実証実験を受けたので、その内容を報告する。

キーワード：水中ポンプ、サイフォン、ワイ・ガッチャン、限界揚程、ポンプアシスト、クーキオス・ボール、残留空気

1. はじめに

国土交通省が推進する次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の1つの部門である災害応急復旧部門の技術として、予てより同省より開発の必要性を提言さ

れていた、天然ダムの新型大容量サイフォン排水システム(図-1)を開発してきており実用化に至ったため、これに応募した。

○実証実験日：平成27年12月10日

○場所：奈良県十津川村栗平地区天然ダム

「ハイブリッド・山辰サイフォン」の基本配管と各部材の名称と効果

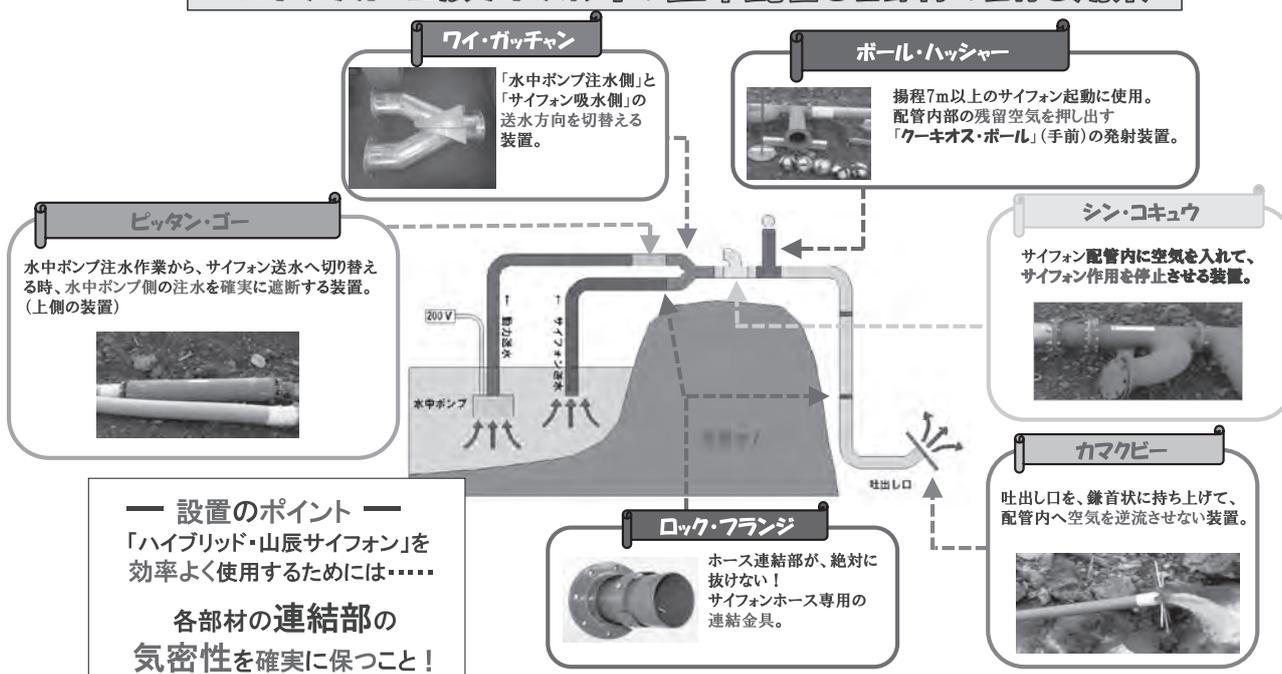


図-1 本システムの基本配管と各部材の名称と効果

2. 実験の目的

本システムは「サイフォン」と「水中ポンプ」の排水機能を兼ね備えたシステムである。天然ダムの湛水池の水位の増減に伴い揚程が変化したが、過去の実験により揚程7mを超えると管頂部に負圧による気化現象が発生することを確認しているためサイフォンの限界揚程は7mを基準として(図-2)、排水ホースの流れを次の(1)(2)のように使い分ける。

サイフォン限界揚程高の測定実験結果

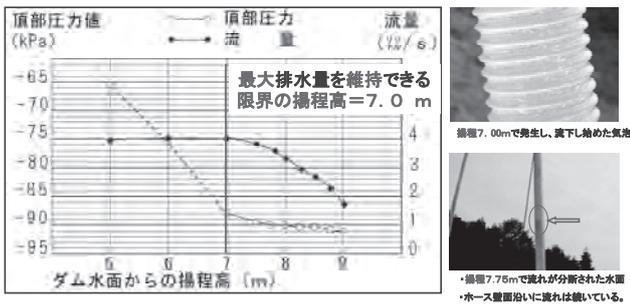


図-2 限界揚程7mを求めた実験結果

(1) 揚程7m以下の場合

水中ポンプにより送水を始め、排水ホース内が満水状態で流れるようになったら電源を停止しサイフォン排水に切り替えて低燃費で低コストな排水作業を実施する(図-3)。

本システムの起動図

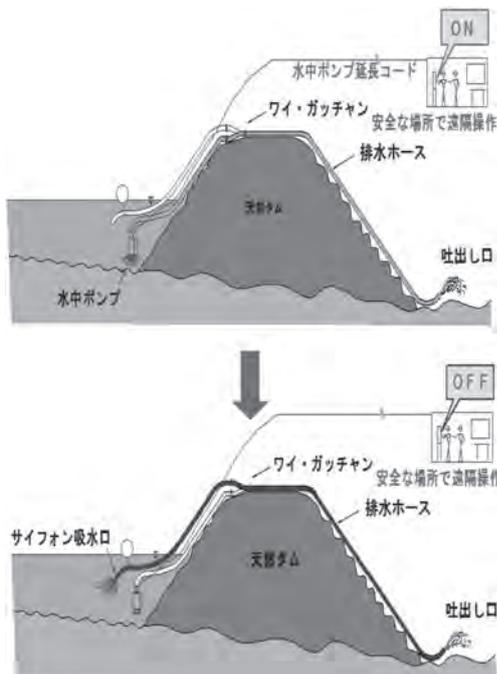


図-3 本システムの起動の仕組み

(2) 揚程7m以上の場合

サイフォン排水に水中ポンプの補助送水(以下、ポンプアシストと称す)を併用することで、それぞれ単独で排水作業を稼働させるより限界揚程や排水能力が大きく増大する特長を実験により確認する。また、本システム(図-3:特許取得済)の水中ポンプとサイフォンの流れの切り替え操作と合流操作が排水装置から離れた箇所にある発電機の電源スイッチのON⇔OFFの遠隔操作により確実にを行うことができることを確認することを目的とした。

3. 使用した主な部材

①ワイ・ガッチャン(図-1, 写真-1)

1基:「水中ポンプ」と「サイフォン」のそれぞれ単独の流れや、2つの流れを合流させて排水作業を行う際に、それぞれの流れの方向の切替えと合流作用を確実にを行うために開発した、流れの方向を切替える装置(特許装置)。



写真-1 ワイ・ガッチャン

②防塵カゴ付き水中ポンプ(写真-2)

φ200mmKRS-8S 1台



写真-2 防塵カゴ付水中ポンプ



写真一3 ロックフランジ付 排水ホース



写真一4 ロックフランジ

③排水ホース (写真一3)

φ 200 mm (緊結金具ロック・フランジ (写真一4) 付きサクシオンホース・20 m × 14 本=延長 280 m

④発電機：120 kVA1 台 (遠隔操作用)

4. 設置状況

サクシオンホースや各部材の総延長は約 290 m。釜場の水位と最下流の吐出し口の水頭差は 11 m。ラフタークレーンにより管頂部を段階的に上下に移動させて揚程 7 m を基準として変化させ、流れの切り替え作用や流量などの計測を行う。流量測定には超音波流速計により揚程の変化に伴う流量の変化を正確に記録して実験を行った (写真一5)。



写真一5 天然ダムでの実証実験の状況

5. 実験一:遠隔操作による「ワイ・ガッチャン」の「流れ」の切り替え機能を検証

湛水池の水位の変化に伴う揚程の変化を造るため、排水ホースの管頂部をラフタークレーンで上下に変化させ状況を変えた。サイフォンの限界揚程高さ 7 m を基準とし、「サイフォン排水」と「サイフォン+ポンプアシスト」の流れを切り替える。災害発生地での作業を想定しており、天然ダムの二次崩落が予想される場合においても安全に作業ができるよう遠隔操作での電源スイッチの ON ⇄ OFF によるハイブリッドな排水装置として技術的に確立しているかを確認するため以下の①~②の手順で実験を行った。

- ①揚程 7 m で実験。電源を ON して水中ポンプ排水を開始。排水ホース内の残留空気を水中ポンプの圧送水により吐出し口へ吐出し、ホース内全体がほぼ満水で流下するまで水中ポンプ排水作業を続ける (約 3 分)。
- ②排水ホース内がほぼ満水状態で流下する状態になったら水中ポンプの電源を OFF にする。

(1) 実験一の結果：ワイ・ガッチャンの「流れ」の確実な切り替え機能を確認した

前記②で水中ポンプを停止すると、ピッタン・ゴー (図一1) が大気圧に押されて確実に通水断面を閉じるため、排水ホース内の水の逆流を防ぐ。排水ホースの管頂部より下流側に注水されている水は位置エネルギーにより吐出し口へ流下しようとする。その流下するエネルギーの吸引力により「サイフォン吸水口」からストローでジュースを吸うように湛水池の水の吸水を始める。このサイフォン吸水口から吸水された水の流れが、ワイ・ガッチャン内で水中ポンプの通水に代わって「サイフォン排水」側の作業に確実に切り替わることが確認できた。サイフォンによる吐出し量は、φ 200 mm 水中ポンプの目安となる排水量 4 m³/min と同程度以上であった (写真一6)。



写真一6 サイフォン排水状況

6. 実験-2：遠隔操作での「サイフォン」排水と「サイフォン+ポンプアシスト」排水の切り替え機能を検証

天然ダムでの作業員の安全確保のため、切り替え作業は遠隔操作による水中ポンプの電源の ON ⇄ OFF による操作とした。揚程 7 m 以下でサイフォン排水を開始。排水の継続により湛水池の水位が低下して揚程が 7 m 以上になると、排水ホースの管頂部に気化現象に伴う流れの分断が生ずるため、これを防止する機能を以下の実験で検証した。

- ①揚程 7 m でサイフォン排水作業をしている状態で排水ホースの管頂部を吊り上げて揚程 7 m 以上に変化させる。
- ②管頂部の気化現象防止に電源 ON で水中ポンプのアシスト送水を開始。ワイ・ガッチャンによりサイフォン送水に水中ポンプからのアシスト送水を合流できる機能を確認する。
- ③再び揚程が 7 m 以下になると電源 OFF で「サイフォン側」単独の作業に切り替わる機能を確認する。

(1) 実験-2 の結果：遠隔操作での電源 ON ⇄ OFF による、流れの切り替え機能を確認した

揚程 7 m を基準として湛水池の水位の変化に伴う揚程の変化に対し、安全な場所から遠隔操作による水中ポンプの電源の ON ⇄ OFF のみで、サイフォン単独と水中ポンプのアシスト送水併用の切替えが容易に実施できることを確認した。

7. 実験-3：クーキオス・ボール（残留空気押し出し部材）による排水機能の向上を検証

排水ホース内の残留空気の押し出し部材「クーキオス・ボール（写真-7 下・球状体）」を開発した。予めそれを装填しておいた「ボール・ハッシャー（写真-7 上・筒状体）」から排水ホース内へ発射して、送水ホース内の残留空気を押し出した場合の、揚程と排水量の増大効果を検証した。

(1) 実験-3 の結果：「クーキオス・ボール」の空気押し出し効果を確認

排水ホースは災害により荒れた地形に応じて上下左右に不規則に設置される。この状態で特に流速が遅くなると、幾つかの管頂部となる箇所には空気が残留して通水断面を狭くする現象が発生するため排水量が少なくなる。実験では揚程 18 m で排水量 $0.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の能

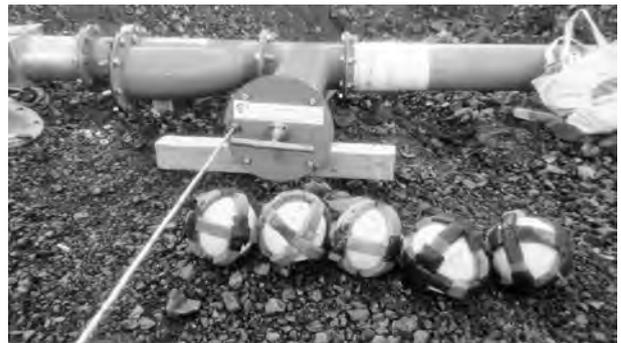


写真-7 ボール・ハッシャー（上・筒状体）
クーキオス・ボール（下・球状体）

力の水中ポンプを使用した。2 m 下げた揚程 16 m でのメーカー公表排水能力は $1.20 \text{ m}^3/\text{min}$ であるが、現地での実測はその 1/3 の $0.42 \text{ m}^3/\text{min}$ であった。この流れ内にクーキオス・ボールを発射。クーキオス・ボールが進むスピードは非常に遅いが、ボールの上流側の満水状態の水圧に押されて下流方向へ進み、ボールの下流側では排水ホース内の残留空気を受け止めて下流方向へ確実に押しながらか進むため、通過後のホース内は全断面が満水状態となり流れる（写真-8）。



写真-8 クーキオス・ボールの移動

この残留空気押し出し効果により、従来のサイフォンと水中ポンプの限界揚程や排水量も大幅に増大することが確認された。特に高揚程の場合において顕著な結果が得られた。前述したが、揚程 16 m での実験ではクーキオス・ボール投入前の排水量は実測で $0.42 \text{ m}^3/\text{min}$ であったが、この流れの中にクーキオス・ボールを発射して排水ホース内の残留空気を吐出し口から押し出すと、満水状態で流れ始め、サイフォン機能と水中ポンプ機能が相乗効果で高まり約 $3.94 \text{ m}^3/\text{min}$ の排水量を確認することができた（図-4）。クーキオス・ボール投入前の排水量 $0.42 \text{ m}^3/\text{min}$ の約 9.4 倍となった。

また、水中ポンプの排水限界揚程 18 m を超えて揚程を 20 m まで上げて排水量を計測した結果、水中ポ

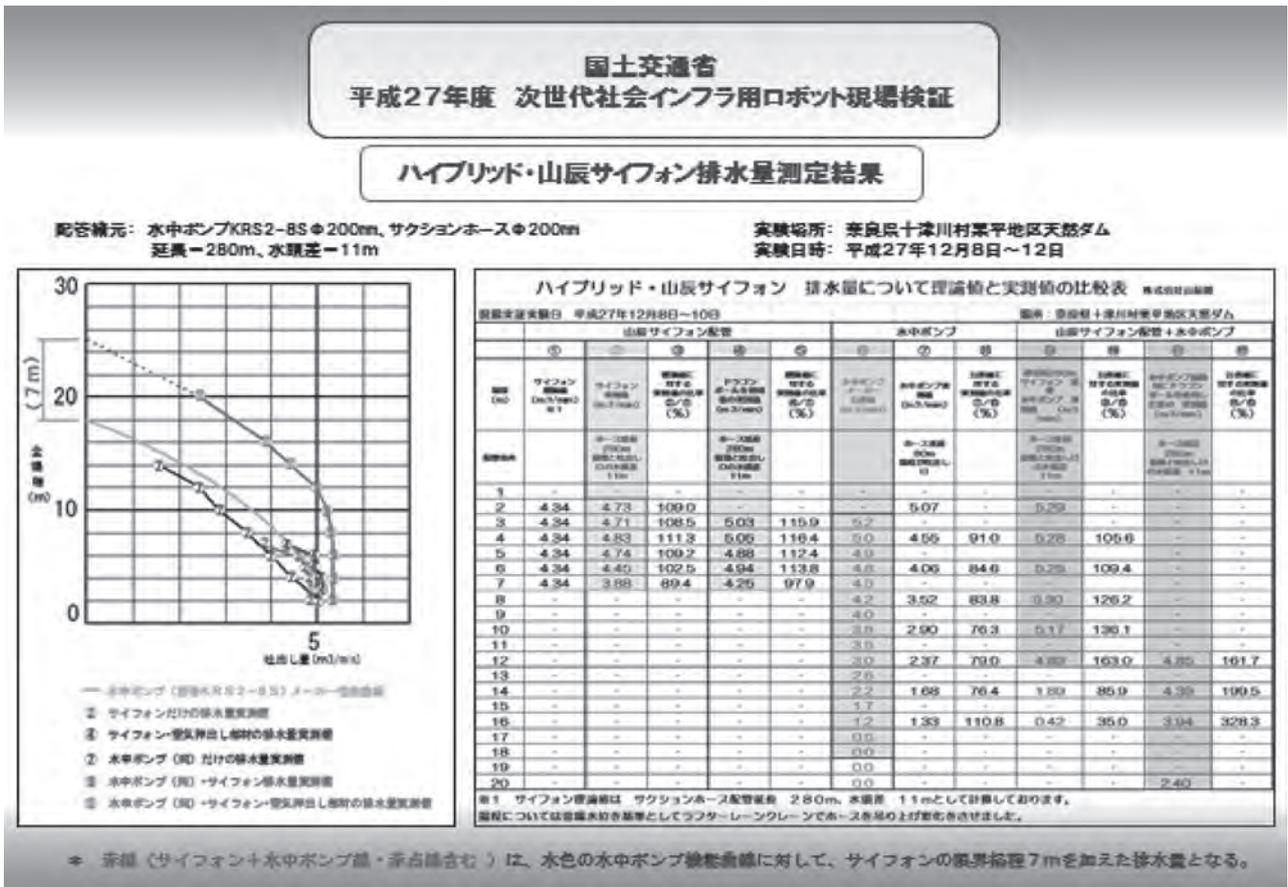


図-4 実証実験における排水量測定結果

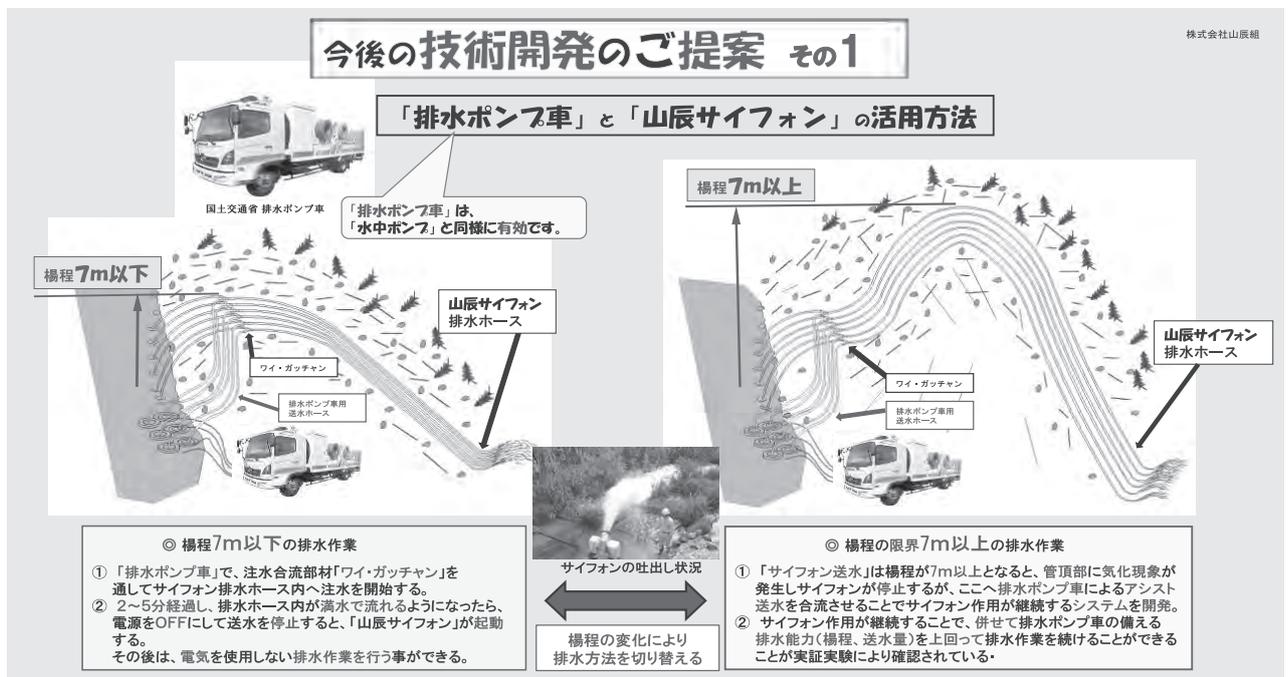


図-5 提案1: 災害排水ポンプ車とのハイブリッド化

ンプでもサイフォンでも排水できないはずの高さであるが、約2.40 m³/minの排水量を確認することができ、本システムのサイフォン+ポンプアシスト排水装置の機能の有効性を確認することができた(図-4)。

8. 今後の技術開発への提案

今回の実験では送水機器として水中ポンプを使用したが、災害排水ポンプ車が寄りつけることができる場

今後の技術開発のご提案 その2



ヘリコプターにより、より安全に、迅速に、運搬・据付ける技術開発の可能性に向けて。

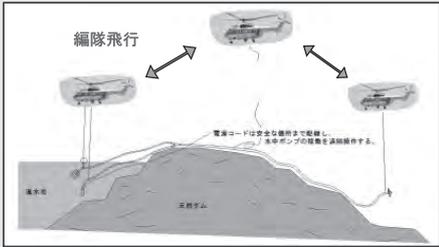
株式会社山辰組


① ドローンによる、天然ダムの測量データに基づき、「ハイブリッド・山辰サイフォン」を、近くの安全な場所で、必要な大きさに組立てる。

② 安全な場所でサイフォン装置を組立てる。



③ 防災ヘリコプターにより運搬し、天然ダムに設置する。



ヘリでの運搬重量(参考)

水中ポンプφ200mm 1台	= 250kg
排水ホースφ200mm 約7kg/m×300m	= 2100kg
250kg+2100kg	= 2350kg

サイフォンによる排水状況



④ 起動は、遠隔操作で、水中ポンプの電源をON⇔OFFするだけ。

☆☆ヘリコプター併用作業のメリット☆☆

- サイフォン装置の、搬入・組立てに、車両や重機が使えるので、作業が迅速になる。
- 天然ダムでの、危険を伴う人海戦術での搬入、及び組立て作業を減らすことができる。
- より迅速な応急作業が可能となる。

図一六 提案2：安全な場所で連結して組立て、ヘリコプターで運搬し敷設する施工方法

所であれば、その高性能な能力を有効活用することができるので、災害排水ポンプ車とのハイブリッド化をご提案したい(図一五)。

また、本排水装置の設置については、組立て前に部材毎に直接現地に持ち込む場合もあるが、ドローンなどによる被災地の測量結果に基づき、他の安全な場所で必要な大きさに連結したものをヘリコプター等により天然ダムに運搬して設置する方法の検討も併せてご提案したい(図一六)。

9. おわりに

実証実験の結果、国土交通省により「現場条件(揚程と期間)が適合すれば活用を推薦する」との高い評価をいただき NETIS にも登録していただけた。この技術は災害対応だけでなく一般土木工事にも活用できるため工事現場で活用している。低コスト・大容量サイフォン排水装置として社会に貢献できる技術となるよう取組んで参りたい。

謝辞

本サイフォン技術の開発に当たり、国土交通省越美山系砂防事務所様より山の谷第1砂防堰堤を天然ダムに見立てた開発実験フィールドとしてご提供頂き、先端建設技術センター様とともに技術的に貴重なご意見をお聞かせいただくなど、天然ダムが発生する地形で実験を繰り返せたことで実用化に至ることができました。また、実証実験フィールドとなった栗平地区天然ダムでは災害復旧工事の施工中にもかかわらず、紀伊山地砂防事務所様、大成建設様には大変なご協力を賜りました。お世話になりました皆様へ心より感謝を申し上げます。

JICMA

【筆者紹介】
 馬淵 和三(まぶち かずみ)
 (株)山辰組 代表取締役
 博士(農学)

