

第 22 回 国土技術開発賞 創意開発技術賞 受賞

ハイブリッド・サイフォン排水装置

サイフォンと水中ポンプで高揚程で大容量な排水装置

〔受賞者〕 株式会社山辰組

まぶち かずみ まぶち つよし

〔本稿執筆者〕 馬渕 和三, 馬渕 剛

以下に、第 22 回 国土技術開発賞で創意開発技術賞を受賞した「ハイブリッド・サイフォン排水装置」を紹介します。

1. はじめに

燃料消費と温室効果ガスの排出量を 10,000 分の 7 に軽減した、本ハイブリッド・サイフォン排水装置（以下、「ハイブリッド・サイフォン」という）は、2020 年 11 月に開催された G 20 サミットで日本が表明した「2050 年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロとする、カーボンニュートラルの実現」の国際公約に向け、排水及び送水技術を通じて大きく貢献することが期待できる。

本装置開発のきっかけは、平成 21 年の国土交通省の「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方について（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。」の提言を受け、当社で開発した。

ハイブリッド・サイフォンは、その後も改良を重ね、多様な現場条件にも対応可能な排水及び送水装置（以下、「排水装置」という）として大きく進化させることができた。

2. 従来の排水装置は、電気か燃料で駆動するしかなかったという課題

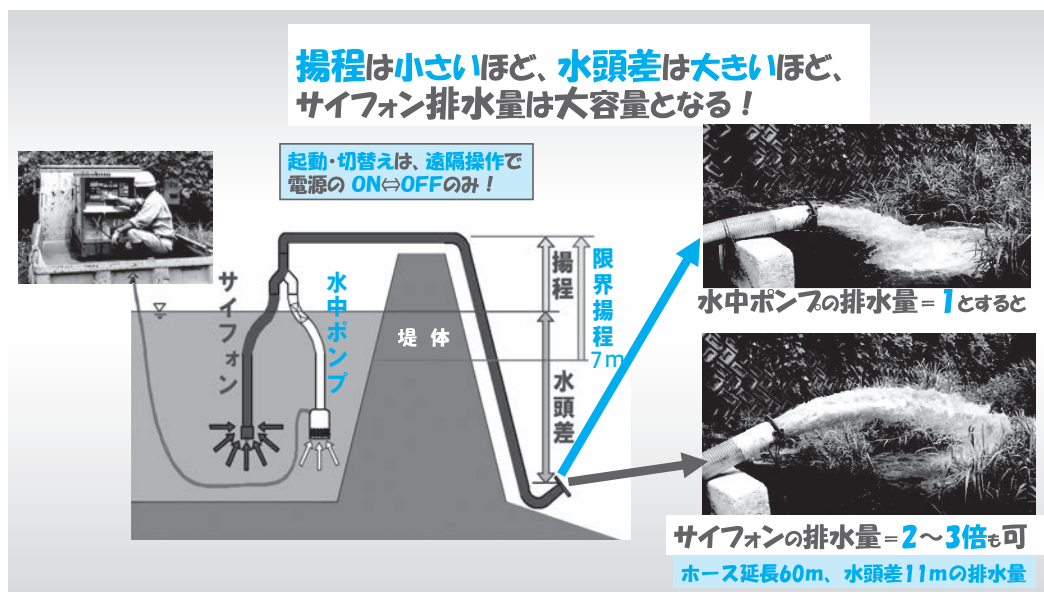
従来より排水作業を行う際に使用する装置は、動力による排水装置しかなかったため、電気か燃料の消費が不可欠であり、稼働中は燃料補給を繰り返し、大量の燃料消費に伴い地球温暖化の一因とされる温室効果ガスの排出は避けることができなかった。

3. ハイブリッド・サイフォンが課題を解決

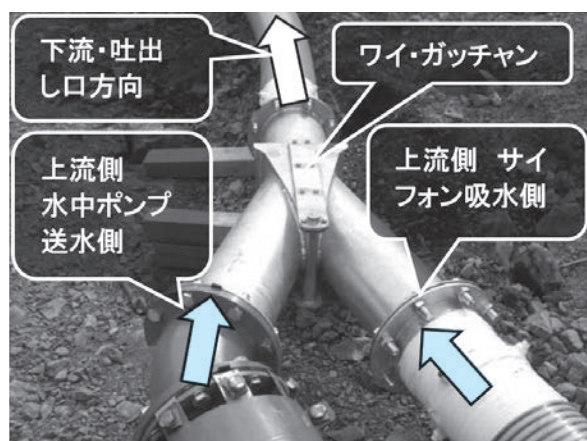
ハイブリッド・サイフォンは、サイフォンと水中ポンプの排水機能を単独または併用することで、双方の限界を大きく超えた排水能力を発揮できる装置である。

本技術は、従来の電気や燃料で駆動する技術とは異なり、サイフォンの原理により稼働する排水装置として開発し、いくつかの特長を備えた。まずは、課題であった電気や燃料の消費量を軽減して燃料補給作業と温室効果ガスの排出を大幅に削減した。併せて、従来のサイフォン排水装置では成し得なかった起動方法や限界揚程を超えた高揚程かつ大容量なサイフォン排水装置を実現した（図－1）。

起動に伴う人力作業は、水中ポンプの電源スイッチを遠隔操作により ON ⇄ OFF するのみとし



図－1 電気も燃料も使用せず水中ポンプより大容量な送水作業を行う



写真－1 流れ方向切り替え装置「ワイ・ガッチャン」と各ホースとの連結状態

たが、この技術はハイブリッド・サイフォンの吸水口と吐出し口を常時開口した構造としたことで成し得た。常時開口構造とするために、上流部のサイフォン送水ホースの途中に、水中ポンプ注水側とサイフォン吸水側との流れの方向切り替え弁を備えたY字状の注水合流部材「ワイ・ガッチャン」を開発して配置した（写真－1）。

(1) ハイブリッド・サイフォンのサイフォン起動方法

- ① 水中ポンプの電源を遠隔操作により ON にして起動し、注水合流部材ワイ・ガッチャンを

通してサイフォン送水ホース本管内へ注水を行う。

- ② 注水によりサイフォン送水ホース本管内の空気を吐出し口から押し出すと、送水ホース本管内が満水状態での流れとなる。
- ③ 水中ポンプの電源を OFF にして注水を停止する。
- ④ 水中ポンプの流れが停止すると、ワイ・ガッチャンの働きにより自動的にサイフォン吸水ホースからの吸水作用に切り替わり、サイフォン排水機能が起動する（図－1）。

(2) 口径φ200 mm のハイブリッド・サイフォンの設置作業の向上について

ハイブリッド・サイフォンの送水ホースの口径は、φ100～200 mm となっている。口径が大きく大容量の送水能力のあるφ200 mm ハイブリッド・サイフォンの組み立て作業は、各部材の重さを考慮すると人力作業も可能ではあるが、車両や重機が進入できる場所での設置には重機を併用した方が作業効率を大きく高めることができる。

- (3) 口径φ100 mm サイフォンは、道がなくても人が通れるスペースがあれば運搬・設置が可能
φ100 mm ハイブリッド・サイフォンの全ての

部材は、人力運搬が可能な重さの範囲内で構成した。道路がなくても樹林を縫って人が通れるスペースがあれば人力で運搬・設置できるため、天然ダムや老朽化したため池などで事前放流する場合など、排水（放流）作業を実施する活用範囲を大きく広げることができた（写真－2、3）。

また、後述するが、上流部の湛水面と下流部の吐出し口との水頭差が10 m 程度確保できれば、同じ口径の水中ポンプの2～3 倍の排水作業を行うことができるなど、1 台のハイブリッド・サイフォンで2～3 台分の多条配管と同様の排水作業を電気や燃料を使用しない無動力で稼働できるメリットは非常に大きい。

（4）100 V のポータブル発電機で起動できるハイブリッド・サイフォンならではの起動方法

従来は、 $\phi 100 \sim 200$ mm の水中ポンプ（重量約 90 ～ 230 kg）の稼働には 200 V の電源を必要とするため、大型発電機（重量 200 kg 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った。

$\phi 100$ mm ハイブリッド・サイフォンでは、起動にあたり、100 V のポータブル発電機（約 13 kg）で $\phi 50$ mm の水中ポンプ 1 台（約 10 kg）を稼働して、その水中ポンプより大きな口径のサイフォンを起動可能とするために、新技術「クーキオス・ボール工法」を開発した（写真－4）。

$\phi 50$ mm の水中ポンプで $\phi 100$ mm のサイフォン排水装置を起動するには、

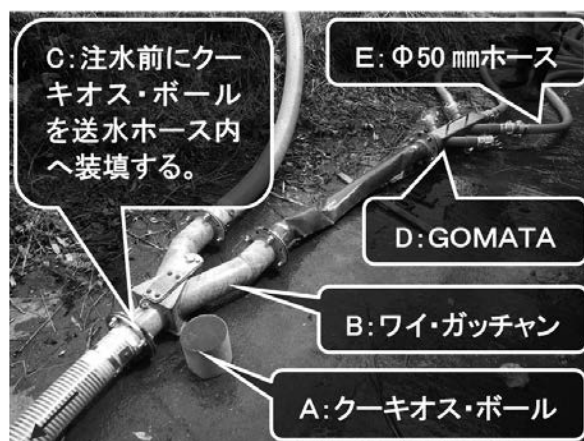
- ① 「A：クーキオス・ボール」を予め「B：ワイ・ガッチャン」の「C：下流側のサイフォン送水ホース本管内に装填」する。装填後には、クーキオス・ボールはサイフォン送水ホースの内断面いっぱいの大きさとなる。
- ② 送水ホース内のクーキオス・ボールは、 $\phi 50$ mm の水中ポンプからの注水による水压を受けて下流側へ押し進められる。この際、クーキオス・ボールの上流側は満水状態の水压に押され、下流側は空洞部で抵抗がないため、下流方向へボールが速やかに移動する。



写真－2 道がなくても人力運搬可能



写真－3 $\phi 100$ mm は全ての部材が人力運搬可能



写真－4 「クーキオス・ボール工法」起動方法

- ③ クーキオス・ボールが下流側の吐出し口から吐出した後、そのまま 20 ～ 30 秒ほど動力送水が続いてから水中ポンプを停止させる。
- ④ ワイ・ガッチャンの働きにより自動的にサイフォン排水作業に切り替わる。

こうした手順により、 $\phi 100$ mm 以上の送水装置であっても、準備する電源は 100 V のポータブル発電機 1 台と $\phi 50$ 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。また、 $\phi 50$ mm 水中ポンプ 1 台でクーキオス・ボールを使用して、 $\phi 200$ mm ハ

イブリッド・サイフォンを起動させることも実証済みである。

ハイブリッド・サイフォンのサイフォンを起動するまでの時間を短くしたい場合には、 $\phi 50$ mm の水中ポンプに連結した「E： $\phi 50$ mm ホース」を複数台装着し、合流させて注水することで解決できるように、5 台まで合流させる部材「D：GOMATA（ゴマタ）」を開発した。この部材でクーキオス・ボールの移動が速くなるため、サイフォンを短時間で起動することができる。

(5) サイフォンの限界揚程 7 m を境として、ハイブリッド・サイフォンを使い分ける

サイフォンの揚程には理論上 10 m 程度の限界の高さがあるが、実際のサイフォン排水作業計画を立案する際には、サイフォンによる揚程の範囲を把握しておく必要があるため、実験により実際

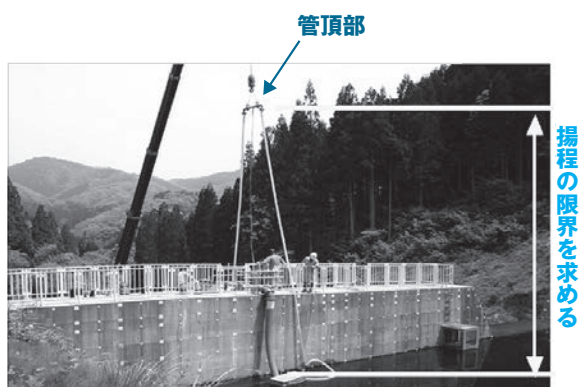


写真-5 サイフォンの限界揚程確認実験

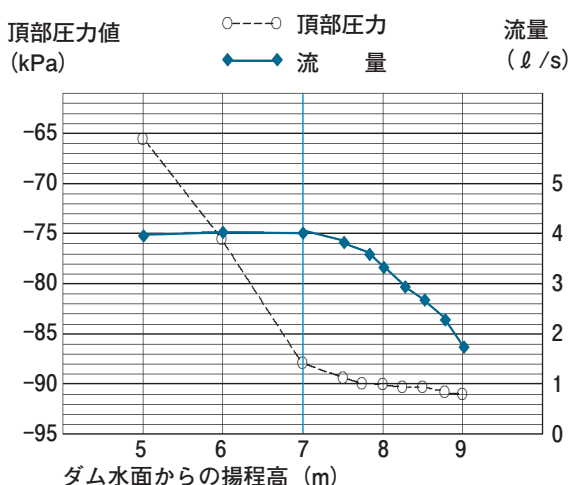


図-2 サイフォンの限界揚程測定実験結果

の限界揚程を検証した。写真-5、図-2は、その実験の状況と結果である。

流量の変化を見ると、揚程 7 m までは変化はないが、揚程 7 m を超えると流量が大きく減少する傾向となることから、安定したサイフォン作用を前提とするために限界揚程を 7 m とし、7 m 以下と 7 m 以上でハイブリッド・サイフォンを使い分ける工法を開発した。

実験により、ハイブリッド・サイフォンは、

- ① 揚程 7 m 以下であればサイフォン単独による送水作業を行うことができる（稼働時の燃費はゼロ）。
- ② 揚程 7 m 以上となる場合は、ホース管内の水が管頂部で上流側と下流側に分かれて流下しようとするため、管内に負圧による気化現象で空洞が発生してサイフォン作用が停止する。しかし、上流側の湛水部へ流下しようとする水を水中ポンプによるアシスト送水で押し上げると、空洞部が充填されてサイフォン作用が持続することを発見した。

その相乗効果により、サイフォン単独や水中ポンプ単独よりも高揚程で大容量な排水機能が発揮されることも実験により確立した。まさに、ハイブリッドなサイフォン排水装置を開発することができた。

(6) サイフォン単独と水中ポンプ単独の排水能力の比較実験

表-1 に示すように、サイフォン単独 A と水中ポンプ単独 C の場合の排水能力の比較実験を行った。 $\phi 200$ mm の水中ポンプの送水機能は、メーカーの送水性能曲線を用いた。配管延長は 280 m である。

水中ポンプの場合、メーカー公表値 B では揚程 3 m の $5.2 \text{ m}^3/\text{min}$ が最大排水量であり、揚程が大きくなるにつれて排水量は減少し、水中ポンプの限界揚程 18 m で送水量 $0 \text{ m}^3/\text{min}$ となっている。また、限界揚程 18 m の半分である 9 m では $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$ となり、この数値が一般的に $\phi 200$ mm 水中ポンプの排水機能として排水計画

表－1 水中ポンプとハイブリッド・サイフォンの送水量確認実験実測値

実証実験日 平成 27 年 12 月 8 ～ 10 日					
	サイフォン	水中ポンプ		ハイブリッド・サイフォン	
	A	B	C	D	E
起動方法	起動時にクーキオス・ボールを使用	水中ポンプメーカー公表値	水中ポンプ実測値 吐出し口が配管	サイフォン配管で水中ポンプ単独送水	起動時にクーキオス・ボールを使用 (水中ポンプ併用)
延長	280 m	—	80 m	280 m	280 m
水頭差	11 m	—	—	11 m	11 m
揚程	排水量単位 = m ³ /min				
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

を行う際の参考数値となっている。以上のように、水中ポンプでは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が増大する。

一方、サイフォンでは、配管延長 60 m、揚程 3 m、水頭差 12 m の場合で 8.7 m³/min の排水量を計測し、同じサイズの水中ポンプで一般的とされる 4.0 m³/min の 2 倍以上の排水量を確認した。配管延長、揚程、水頭差によりサイフォン機能の特徴が現れてくる。

(7) サイフォン単独、水中ポンプ単独、ハイブリッド・サイフォン+水中ポンプの排水能力比較

(6)と同じ現場条件で、A、C、D、E のそれぞ

れの排水能力を実験により確かめた。サイフォン配管延長 280 m、水頭差 11 m で実験し、その結果が表－1 に示されている。

- ① 表中 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 12 m では公表値 B : 3.0 m³/min に対し C : 2.37 m³/min と減少した。
- ② 同じ揚程 12 m で、D はサイフォン配管であるため、その効果により 4.89 m³/min と公表値 B : 3.0 m³/min を 1.63 倍上回った。
- ③ 同じく E では、4.85 m³/min と公表値 B : 3.0 m³/min の 1.62 倍の送水量であった。
- ④ 揚程が 12 m を超えて大きくなると、C の場合は送水量が公表値 B 以下に減少している。
- ⑤ 起動方法 E では、揚程 12 m を超えると各揚程で起動方法 C と起動方法 D を大きく上回った排水量が確認できた。
- ⑥ 数値が揃っている揚程 16 m で解析すると、D の場合、ホース延長が 280 m と長いことも起因しているかもしれないが、0.42 m³/min と公表値 B よりかなり少ない排水量を確認した。
- ⑦ しかし、同じ揚程 16 m でも、起動方法 E の場合は 3.94 m³/min であった。D とは配管条件も同じであるが、違いは水中ポンプ起動時にクーキオス・ボールを使用しているか否かであり、クーキオス・ボールで送水ホース内の残留空気を 100% 近く押し出すことにより、配管内を満水でサイフォン排水できる機能が確認できた。

この結果に基づくと、例えば天然ダムやため池での揚程が 7 m 以下で、ハイブリッド・サイフォンをクーキオス・ボールを使用して起動を行った場合、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が 7 m を超える高さとなる。その場合、水中ポンプの電源を ON にして E の水中ポンプアシスト排水工法に切り替える。

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 ではクーキオス・ボールを使用してサイフォン起動したことで、揚程 16 m の場合、水中ポンプ 1 台の併用送

水で水中ポンプ単独の3倍以上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」を達成できるサイフォン送水装置及び工法となったこれらサイフォン排水新技術は、特許装置並びに特許工法を取得している。

4. 水中ポンプ単独とサイフォン単独の燃料消費量と温室効果ガス排出量の比較

サイフォン作用の場合、限界揚程7mまではほとんど燃料消費を伴わない。表-2に示すように、従来工法である水中ポンプの稼働に要した燃料消費量を10,000ℓとすると、ハイブリッド・サイフォンではわずか7ℓの比率となり、燃料消費量が10,000:7に軽減するメリットがある。

仮に、燃焼により10,000tの温室効果ガスを排出していた現場がハイブリッド・サイフォンを使用すると、わずか7tの排出量に軽減できることとなる。燃料を消費しないということは、燃料補給の手間も省くことができる上、現場のコストも縮減できることとなる。

5. 老朽化した防災重点ため池の事前放流・低水位管理にも活用

農林水産省は2019年6月、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カ所が対象になったと発表した。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年6月12日付日本経済新聞より)」とあるように、ため池の防災意識が高まってきている。

そのような中、「取水施設が老朽化しているので、水を放流できない」、「水中ポンプや発電機を運搬する道がない」、「膨大な燃料代が掛かる」などの課題に対して、実際に三重県と京都府のため池でφ100mmハイブリッド・サイフォンを人力で搬入して(写真-2)、大幅なコスト縮減と環境負荷の軽減の成果を上げることができた(写真-6, 7)。

表-2 水中ポンプとハイブリッド・サイフォンの燃料消費量と温室効果ガス排出量の比較表

(どちらもφ150mmを使用)

機 種		従来工法 水中ポンプ	新工法 ハイブリッド・サイフォン
	消費量	120ℓ/日(24時間)	0.083ℓ/日(24時間)
軽油消費量	1ヵ月	3,600	2.5
	6ヵ月	21,600	15.0
	12ヵ月	43,200	30.0
燃料代	1ヵ月	450,000	311
	6ヵ月	2,700,000	1,875
	12ヵ月	5,400,000	3,750
二酸化炭素排出量	排出量	2,644 kg-CO ₂ /ℓ	2,644 kg-CO ₂ /ℓ
	1ヵ月	9.500	0.007
	6ヵ月	57.100	0.042
	12ヵ月	114.200	0.084
比 率		10,000	7

○軽油単価を125円/ℓで計算。

○ホース内に溜まった空気を押し出すため、1日1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、毎日1分間のポンプ送水は不要。



写真-6 電気を使用しないで放流をし続ける

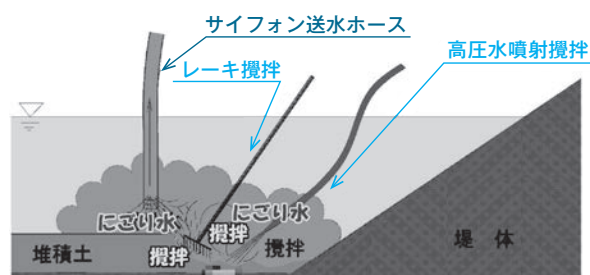


写真-7 広大なため池でも、φ100mmサイフォン1台を使用して24時間で25mプール8面分以上を放流した

6. ハイブリッド・サイフォンが備える排砂機能を、ため池のかいぼり作業に活用

ハイブリッド・サイフォンの排砂機能を、ため池のかいぼり：堆積土（腐葉土）の除去作業への活用にも提案させていただいている。高圧水により、攪拌した泥水状態の腐葉土をにぎり水として放流する方法である（図－3）。重労働である堆積土の人力運搬作業に替えて行うもので、腐葉土の放流は里海の生態系保全の栄養源として歓迎されている。また、かいぼり作業で堆積土を除去できるため、国土強靱化対策の豪雨時の貯水量の確保に位置付けられている。

2020年の熊本の豪雨被災地では、洪水により発電所の取水施設の沈砂槽へ流入した堆積土をφ100mmハイブリッド・サイフォンを使用して2カ所で排砂していただいた。



図－3 排砂機能をため池の「かいぼり」に活用

7. おわりに

ハイブリッド・サイフォンにより、ため池やダムでの災害の発生を未然に防ぐための事前放流や低水位管理、天然ダムの排水作業や、河川砂防工事などの一般土木工事にも、異常気象の一因とされる温室効果ガスの排出を抑えた排水（放流）作業が可能となった。ハイブリッド・サイフォンを活用していただくことで、建設業を通じて「2050年カーボンニュートラル」に向け、地球規模の社会貢献をしていると、家族に胸を張って言えるという充実感も込み上げてくる。

謝辞：「ハイブリッド・サイフォン」の開発実験にあたり、国土交通省、岐阜県などの関係者の皆さまには多大なご理解とご協力を賜りましたことに厚く御礼申し上げます。