

ダム貯水池の堆砂性状のモニタリング技術開発

独立行政法人 水資源機構 総合技術センター

1. はじめに

日本には約3,000基のダムが存在する。このうち、水資源機構では治水機能を含む多目的ダム25基、利水ダム13基を管理している。それぞれのダムでは、計画上の貯水容量ならびに取水施設の機能を維持するために、貯水池内の堆砂を除去するなどできる限りの土砂管理に努めているが、特に、大規模出水の際には、土砂とともに流木やゴミ等も大量に流入し、これらが湖内に埋没することもあり、堆砂除去時の障害となるほか、水質への影響、ゲート設備の開閉障害にもつながるなどの課題が顕在化している。

国連の調査報告によれば、世界各地の大規模ダムでは、建設当初の総貯水容量の13%から19%が堆砂により失われており、2050年までの推計では23%から28%に達すると警鐘を鳴らしている。この減少量は約1兆6,500億 m^3 、実にインド、中国、インドネシア、フランス、カナダの年間水使用量の合計に相当すると報告されている。(United Nations University Institute for Water, Environment and Health : Trapped Sediment Robbing World's Large Dams of Vital Water Storage Capacity; ~26% Loss by 2050 Foreseenより抜粋)

ダム貯水池における効果的かつ効率的な堆砂対策に資する技術の開発は、日本のみならず世界中のダム貯水池における堆砂の課題や水とエネルギー問題に係る諸課題の解決に資するものと期待される。

2. 社会的背景

我が国における少子高齢化に伴う労働生産人口の急速な減少により、近い将来、建設業界においても労働力不足は極めて深刻な状況に陥ることが

懸念される。この問題を解決するため、産学官挙げて、ICT等を活用した様々な技術が開発されている。デジタルツインなど最先端のデジタル技術を建設工事と融合することで建設現場の遠隔化・自動化を図る等の研究開発・実装も進んでいる。これら研究開発の多くは主として民間大手建設会社と関連する複数の関係企業で行われており、国全体に定着するところまで至っていない。地場の建設会社等では、測量や点検等の技術を除き、新しい技術を積極的に導入する経営的な体力がなく、また、ロボット等による無人自動計測・施工技術も、一部の業種において飛躍的に実装が進んでいるものの、そのような技術が真に求められる現場、例えば、人力による施工が危険で実施困難な現場の作業への実装には未だに多くの課題が残っていると言わざるを得ない。ダム貯水池の堆砂除去工事などは、定期的・緊急的に実施しなければならない工事であるが、多くの時間と手間を要する重機等による細かな作業を伴うため、遠隔化・自動化技術を導入するところまで至っていないのが実情である。

3. SIPにおける研究開発

ダム貯水池の堆砂対策として、水資源機構では、令和5年度から、戦略的イノベーション創造プログラム（略称：SIP）に参画して、以下のとおり、ダムの堆砂除去に係る研究開発を関係機関とともに進めている。

- ①課題名：「スマートインフラマネジメントシステムの構築」
- ②サブ課題名：サブ課題A「革新的な建設生産プロセスの構築」
- ③研究開発テーマ：a-2「人力で実施困難な箇所のロボット等による無人自動計測・施工技術開発」

SIPとは、内閣府総合科学技術・イノベーション会議が司令塔機能を発揮して府省の枠や旧来の分野を超えたマネジメントにより、科学技術イノベーションを実現することを目的として創設された国家プロジェクトである。国民にとって真に解決すべき社会的課題や、日本経済再生に寄与できるような世界を先導する課題に取り組むもので、令和5年度からは第3期に移行し、計14課題に対して各課題を強力にリードするプログラムディレクターを中心に産学官連携を図り、基礎研究から実用化・事業化、すなわち出口までを見据えた一貫通貫の研究開発を推進している。

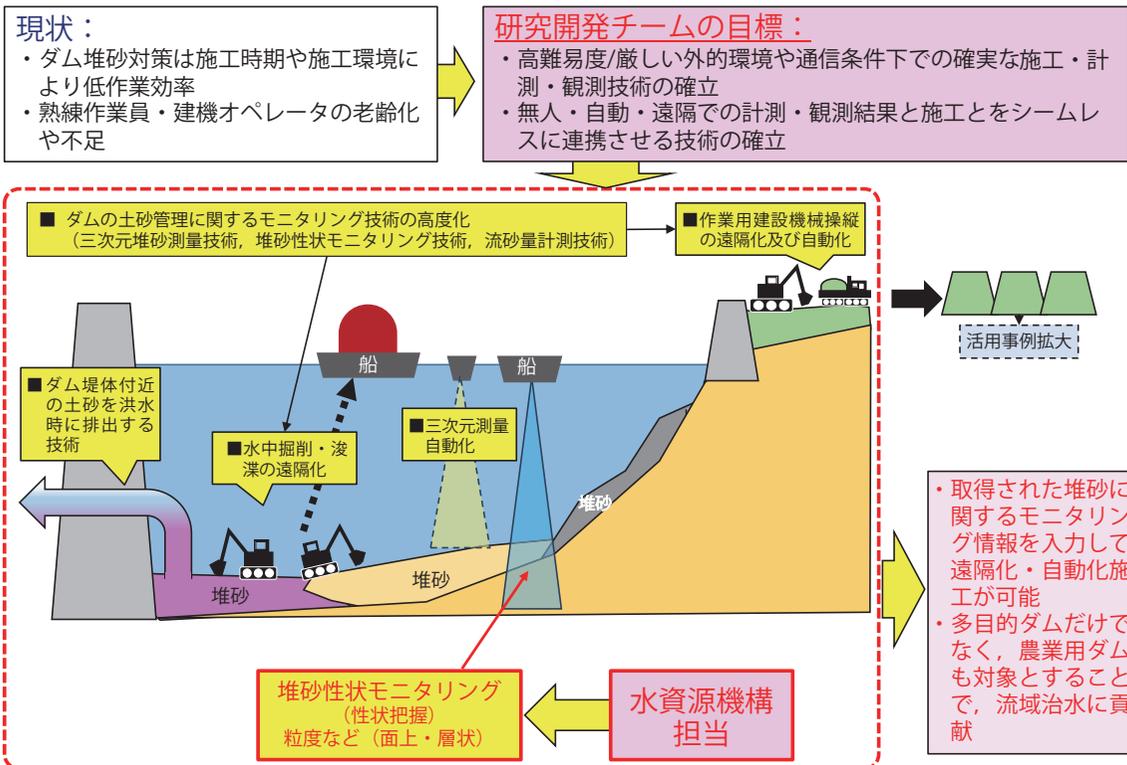
(<https://www.pwri.go.jp/jpn/research/sip/index.html>より引用)

ダム貯水池における堆砂対策として現在実施されている主なものは、陸上あるいは水中での重機による掘削や、土砂バイパス、ゲートを用いたフラッシング・スルーリングなどである。このうち土砂バイパスやフラッシング・スルーリングは大

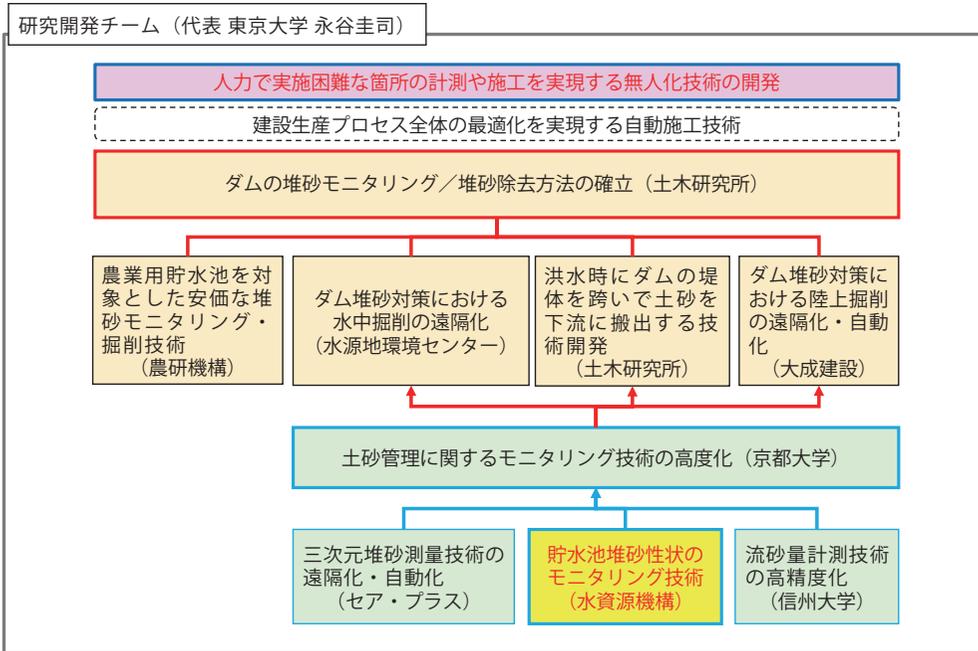
規模な施設や高度な運用が必要であり、多くのダムでは機械掘削が主な対策となっている。

本研究開発では、ダム貯水池の堆砂除去工事を行う際に、人の進入が困難な現場での作業員の死傷事故低減とともに、ダム貯水池における計測や施工の無人化技術の確立を目指している。具体的には、以下の研究題目に取り組む(図-1)。

- ①ダム堆砂対策における作業用建設機械操縦の遠隔化及び自動化
- ②ダム堆砂対策における水中掘削・浚渫の遠隔化
- ③ダム堤体付近の土砂を洪水時に下流に排出する技術
- ④農業用ダムを対象とした低コスト堆砂モニタリング・遠隔浚渫技術
- ⑤ダムの土砂管理に関するモニタリング技術の高度化
(三次元堆砂測量技術, 堆砂性状モニタリング技術, 流砂量計測技術)



【図-1 ダムの堆砂モニタリング・堆砂除去方法の遠隔化・自動化技術の開発】



【図-2 共同研究開発機関の体制】

組織構成は、図-2に示すとおりであり、各機関の専門性を活かした役割分担と協働によるプロジェクトとなっている。水資源機構は貯水池堆砂性状のモニタリング技術の開発を担当している。

4. 堆砂性状モニタリング技術の開発

土砂管理に関するモニタリング技術の高度化（京都大学が総括）については、以下の4つのテーマを設定している。

- ①ピンポイント・クラウド型堆砂測量システムの開発（京都大学）
- ②三次元堆砂測量技術の遠隔化・自動化（セア・プラス）
- ③貯水池堆砂性状のモニタリング技術（水資源機構）
- ④流砂量計測技術の高精度化（信州大学）

このうち①は、ダム堤体直上の放流管入口部のような局所型（ピンポイント）の堆砂位変化について洪水時を含めて連続的に計測し、データをクラウドに送って遠隔監視できるようにするものである。また④は、土砂バイパストンネルのような

開水路を流れる流砂量を、水路側面に設置した電極板を用いて非接触で計測する手法の開発である。

②と③が貯水池内の堆砂の量的・質的把握の高度化技術であり、ダム貯水池の堆砂除去工事にも密接に関係するモニタリング技術である。従前、堆砂掘削に当たっては、堆砂測量結果や限られたボーリング調査結果による概略の性状を把握している状況で施工計画を立案し、堆砂除去工事に着手している。そのため、施工開始後に、堆砂の性状や分布状況が想定と異なることが多く、更に堆砂内部の埋没している沈木等の異物により使用する建設機械等や施工計画等が変更となり、工期・コストが増大するケースがあった。これらの課題を解決するために、本研究開発では従来よりも広範囲で三次元的な堆砂形状・性状の情報を、施工前に限らず施工中にもリアルタイムに提供することで、効率的な除去工事を実現するものである。

このうち②は、従来、有人船を用いて行われている深浅測量作業を、プログラミングされた無人船を用いた測量に置き換えることにより堆砂測量のスマート化（省力化、低コスト化）を目指すものである。

一方、水資源機構が担当する③は、主に非接触の探査技術を活用して、ダム貯水池内にカオスの状態で堆砂している粘土・シルト・砂・礫等が、どこにどのような状態で存在しどのくらいの量があるかを三次元的に正確に把握することで、堆砂除去工事における遠隔化・自動化施工を可能とするための基礎データとするとともに、経年的かつ効率的な堆砂除去計画の立案に資することを目指している。また、これにより、掘削機械等の最適配置が可能となり、工事に係る費用の削減と効率的な堆砂除去や、施工時の安全性の向上が期待できる。

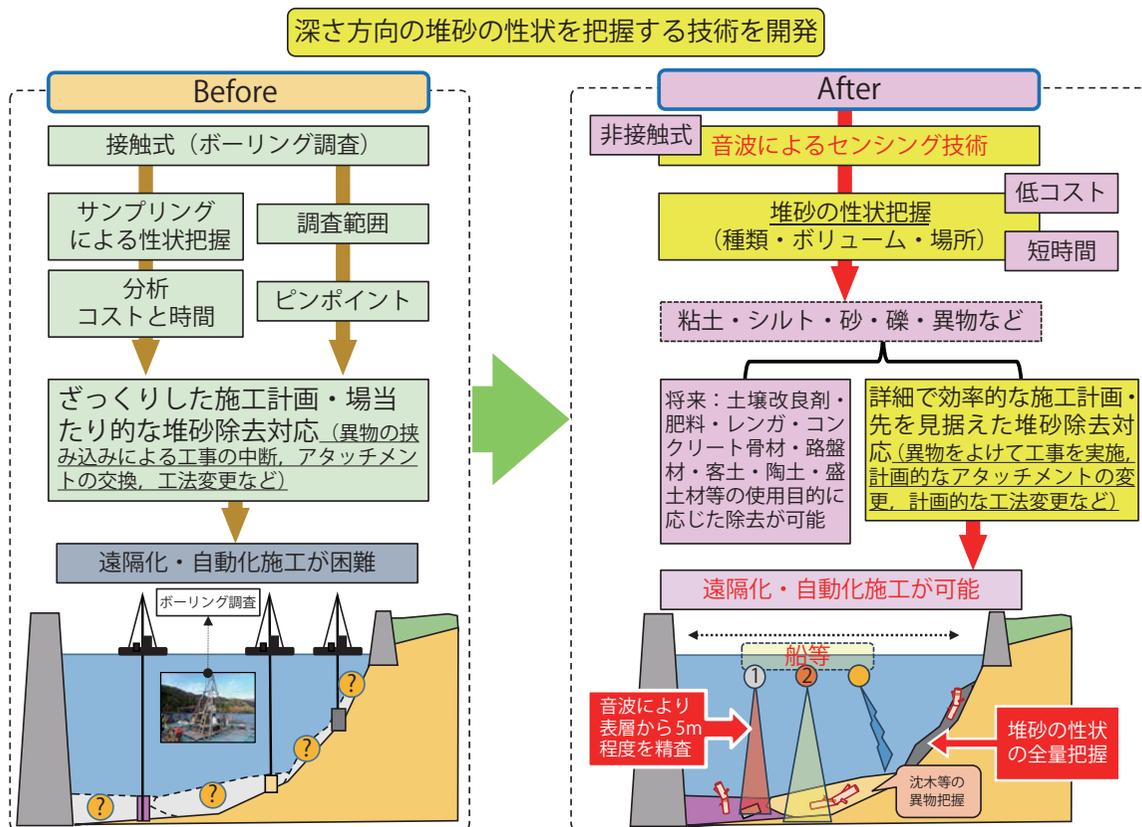
5. 研究開発内容

上述の目標を実現するために、本研究開発では、主に海洋調査等で活用が進められているサブボトムプロファイラー（SBP）をダムの湖底の調

査に適用することとした（図-3）。

SBPは、海底の堆積物の調査、地質構造の解明、資源の探査などに活用されている。この装置は、海底に向けて音響信号を放射し、その反射波を捉えることで、地層の厚さ、粒度等の特性を識別する。地層の性状により音響インピーダンスが異なるため、反射波の強度やタイミングに変化が生じる。受信した反射波のデータを解析し、地層の厚さ、地質の連続性、不連続面などを特定する。データは、通常、垂直方向の断面図として表示される。

今回使用したSBPは、Innomar社製のSES-2000 Standardで、パラメトリック方式の音波を活用した地層探査装置である。100kHzの音波に異なる周波数の音波を干渉させて2次周波数を発生させ、この方法で指向角の狭い、高分解能な音波探査が可能になるとされている。実際の計測の際には、このほかに正確な計測場所を把握するため



【図-3】水資源機構が担当する堆砂性状を把握するための技術開発

のGNSS (DSM232 Trimble社製) や、船の揺れを補正するための慣性GNSSジャイロ (POS MV Applanix社製) 等も併せて計測を実施し、最終的な解析に活用する。GNSSと慣性GNSSジャイロは浚渫工事等に一般的に用いられている機器である。計測後は、音波データを三次元情報として加工する。今後は、計測加工したデータを用いて堆砂除去工事の遠隔化・自動化を推進するための具体的なデータフォーマットや受け渡し方法について、関係機関と協議して決定していく。

6. 現地調査

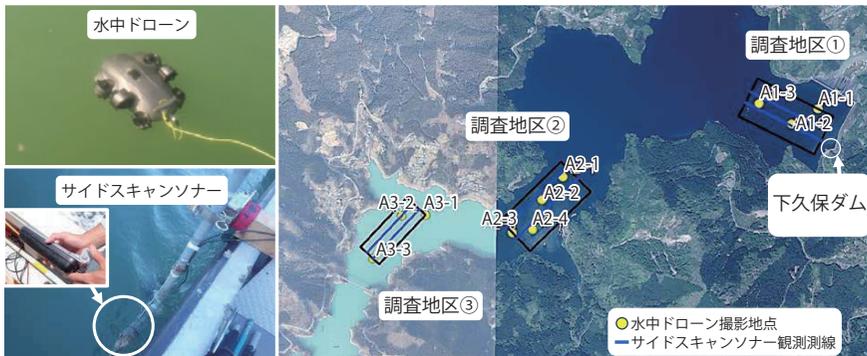
令和5年12月に、SBPによる深さ方向の堆砂の状況調査を実施する前に、予備調査として、堆砂

の表層の状況を水中ドローンとサイドスキャンソナーにより確認した (図-4, 図-5)。この予備調査は、表層の土砂の性状を大まかに把握し、SBPによる調査結果を検証するものである。

予備調査結果を踏まえ、SBPによる堆砂性状調査を実施した。SES-2000の100kHz音波は、水底表面で反射し、4~15kHzは軟泥層を抜けて硬い層で反射することにより地層の性状を把握できる。ただし、深さ方向の土砂性状の可視化はできるが、反射信号の解釈には専門知識が必要となる。また、使用する周波数によって探査できる深度が異なり、低周波ほど深く探査はできるが解像度は低下する、と一般的には解されている。SBPで把握されるのは、音響インピーダンスの異なる土質の境界であるため、シルトや砂礫などの土質

【予備調査：湖底の表層調査】

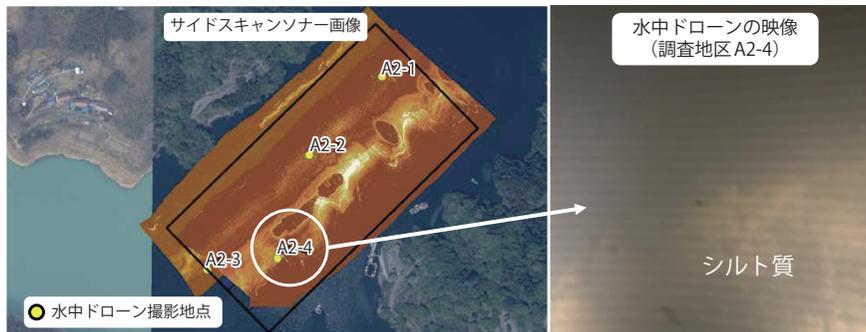
- ・水中ドローンによる、湖底面の性状の映像取得
- ・サイドスキャンソナーによる、湖底面の音響画像の取得



※出典：国土地理院撮影の空中写真

【図-4 湖底の表層調査位置図】

水中ドローンが湖底面に近づくと、微細粒子の巻き上がりが発生。湖底面は比重の軽いシルト質に覆われている。



※出典：国土地理院撮影の空中写真

【図-5 予備調査結果】

そのものは判定できない。そのため柱状採泥や既往の堆積物性状調査結果から、土質境界の上下層がどのような土質であるかを確認する必要がある。令和6年1月の調査においては、計9箇所で柱状採泥を実施した。今後、土質境界がSBPの計測結果と一致することを確認するとともに、土質毎に含水率、粒度組成、単位体積重量を室内分析して、精度の高い性状を解析する予定である。

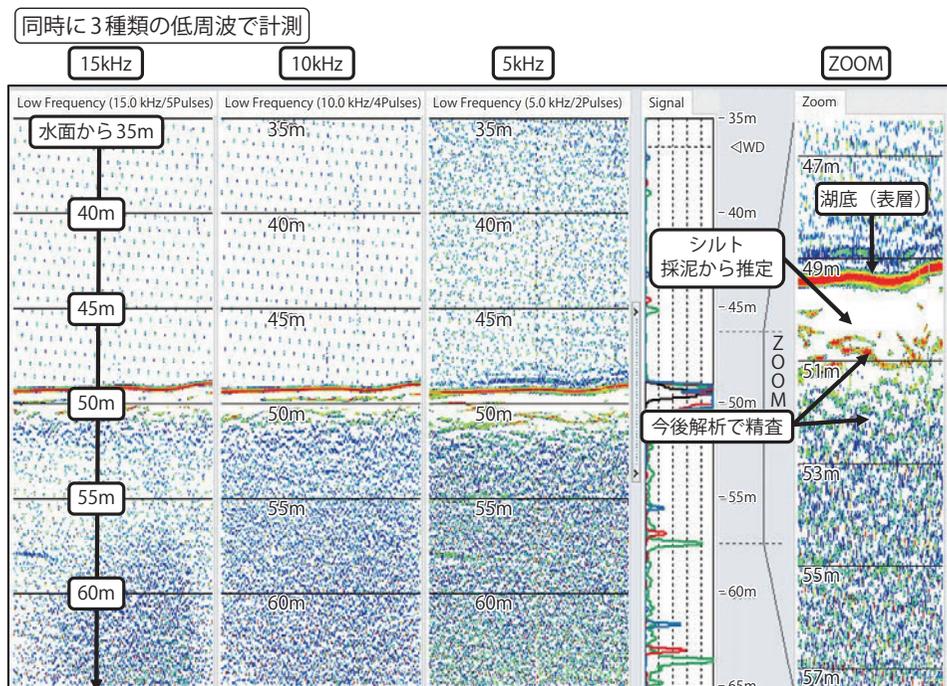
以下に、水資源機構の下久保ダムで実施した調査内容を示す。

(1) 令和6年1月に実施した調査内容

- ① SBPによる、シルト等の比重の小さい軟泥と砂礫のような比重の大きい土砂の鉛直境界や堆積厚の高精度な計測 (写真-1, 図-6)
- ② 簡易採泥装置による採泥 (写真-2)



【写真-1 SBPによる調査状況】



【図-6 リアルタイムに得られるSBPによる地質の断面図】



採泥作業



採泥された試料（写真は主にシルト）

【写真-2 採泥結果】

(2) 調査後の解析

- ①SBPで得られたデータと柱状採泥や既往ボーリング調査結果を比較し、SBP計測データと土質の整合を確認
- ②SBPデータ処理による軟泥層・土砂層等の三次元データ化
SBPは直下の土質構造を測定するため、得られるのは「垂直な断面」での結果となる。各土質の平面・鉛直分布を推定するためにメッシュ状に配置された測線の計測データを処理ソフトにより統合し、三次元化して堆砂量を推定する。
- ③SBPによる、堆砂除去工事の支障となる埋没物（沈木等）の把握
貯水池内に既知の埋没物（沈木やダム施設・係船施設の基礎部等）がある場合、埋没物上もSBPで計測から得られたデータから埋没の深さや埋没物の大きさを把握できるか確認する。
- ④SBPによる計測成果、コスト、所要時間の整理、堆砂状況把握の効率化・合理化の評価を実施

7. 今後の予定

令和5年度は、研究開発の初年度として、既往の堆砂測量結果やボーリング調査結果等のデータがそろっている下久保ダムにおいて堆砂性状調査を実施したが、今後は、堆砂性状が下久保ダムと異なるダムや埋没物（沈木等）に課題があるダム等についても現地調査の実施を検討している。また、堆砂除去工事と連携して、施工計画及び施工中の支援に係る研究開発を実施し、効果的な堆砂除去技術の確立を関係機関とともに目指していく予定である。

●●● 謝辞 ●●●

本技術開発は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）、「スマートインフラマネジメントシステムの構築」（研究推進法人：国立研究開発法人土木研究所）によって実施中のものです。研究開発に当たっては、現地調査等に係る計測・解析等について、いであ株式会社にご協力いただきました。