

湖水観測水中ロボット「淡探」の開発

—自律型水中ロボット(AUV)の仕様と運用成果報告—

熊谷 道夫・浦

環・榊原 孝志・佐々木 学

三井造船は、琵琶湖研究所、国土交通省近畿整備建設局及び東京大学と共同で、淡水湖の調査観測を行うことのできる自律型水中ロボット「琵琶湖湖水観測水中ロボット『淡探』」を開発した。

本ロボットは、水中顕微鏡、TVカメラ、水質調査用各種センサ及び深淺測量用のソナーのほか、支援母船との間の音響や無線を用いたデータ伝送装置を備えている。また、リチウムイオン2次電池を動力源として長時間の水中連続運航を可能としている。

2000年9月の琵琶湖での運用では、自律制御機能を用いて設定したコースの12時間夜間連続観測を実施し、搭載している各種センサにより有意なデータを得た。

キーワード：水中ロボット、湖水観測、リチウムイオン2次電池、温度躍層、水質データ、水中顕微鏡

1. はじめに

三井造船株式会社は、琵琶湖研究所、国土交通省近畿地方整備局及び東京大学と共同で、淡水湖の調査観測を行うことのできる自律型水中ロボット「琵琶湖湖水観測水中ロボット『淡探』」を開発した。

「淡探」は、水中顕微鏡、TVカメラ、水質調査用各種センサ及び深淺測量用のソナーのほか、支援母船との間の音響やSS(Spectrum Spread: スペクトル拡散型)無線を用いたデータ伝送装置、動力源としてリチウムイオン2次電池、など新鋭の機器を備えている。

2000年度は、滋賀県琵琶湖研究所の運行観測スケジュールに従って既に4回の「淡探」の運用試験を実施し、運行の習熟とデータの収集を実施した。2000年9月の琵琶湖での運用では、自律制御機能を用いて設定したコースの12時間夜間連続観測を実施し所期の自律制御性能を確認するとともに、搭載している各種センサにより有意なデータを得た。

本書では、「淡探」の仕様、性能を紹介するとともに、2000年9月の運用結果の一部を紹介する。

2. 「淡探」の特徴

琵琶湖研究所の双胴型調査船「はっけん号」へ

の搭載・ハンドリング能力から、外形寸法重量が制限されるため、水中ロボットの制御用のCPUなどを収納する耐圧容器それ自体を浮力として利用する方式を採用して、小型軽量化を実現している。また、耐圧容器の外部に装備される機器類は、アンテナや一部のセンサで水中に露出する必要があるもの以外は、耐圧容器の下部に取付けたアルミフレーム構造の内部に収納し、その外側をほぼ中正浮力のポリエチレン材でカバーして機器の保護を行うと共に、流体抵抗の低減を図って所期の性能諸元を満たしている。

3. 「淡探」の性能諸元

「淡探」は、琵琶湖研究所の調査船「はっけん号」を母船として運用するもので、以下の性能諸元を有する。

- 最大使用深度：100 m (150 m 設計深度)
- 使用周囲温度：大気 -10～+40℃
：水温 -2～+32℃
- 寸 法：長さ 2 m, 幅 0.75 m,
高さ 0.75 m
- 質 量：水中 中正浮力+0 kg
空中 180 kg
- 前進最大速度：2 ノット
- 航 続 距 離：20 km
- 緊急バラスト：2 kg
- 電 源：リチウムイオン2次電池

- ・制 御 CPU：汎用小型 CPU

4. 構 成 (図一 参照)

「淡探」は水中ロボット本体につけられた愛称で、実際の湖水観測水中ロボット「淡探」の全体システムは、水中を航走する自律型水中ロボット本体「淡探」のほかに、支援母船に搭載される船上装置（船上制御装置、CPU 1（操縦用）、CPU 2（データ収録用）など）および保守点検用の架台や電池充電器等以下の装置で構成される（以後、一般的な記述では、「淡探」は「水中ロボット」と一般名称で記述した。）。

船上装置の CPU 2 以外は、通常時は琵琶湖研究所の保管場所に格納されており、使用時に研究所の観測船「はっけん号」を支援母船として必要機器を搭載して運用されるものである（CPU 2

は、他の解析目的にも使用するため「はっけん号」に常設されている）。

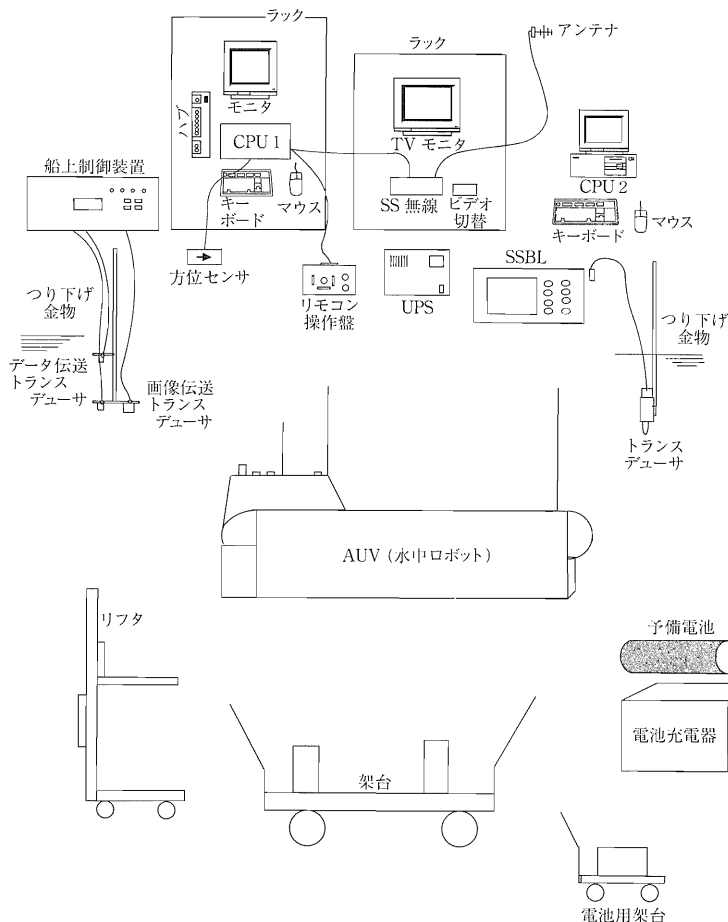
① 船上制御装置

支援母船と水中のロボット本体との間で音響による通信を行うための通信制御装置で、VME-3 U ラックに搭載された CPU と I/O とからなる。構造は、支援母船への積みおろしの簡便性を考慮して吊下げ取手付きとしている。

② CPU 1 ラック

支援母船への積みおろしを考慮して、搬送用の取手付きアルミラックにパソコンや関連装置を組込んだもので「淡探」の状態表示及び制御、画面上からのリモコン制御のほかリモコン盤からの制御を行う。また、ラック内部に HUB を搭載しており、前述の船上制御装置や後述の CPU 2 などネットワークで接続される。

③ モニタラック



図一 全体構成図

CPU 1 と同様にアルミラックに TV モニタを組込んだもので船上制御装置からの画像情報や水中ロボットが浮上した時の SS 無線通信装置を介した画像情報を表示する。

④ CPU 2

支援母船に固定設置された水中ロボットの取得データ表示解析用パソコンシステムであり、CPU1 ラックの HUB を介してデータの授受を行い水中ロボットの航行ルート設定、航跡表示や取込んだ顕微鏡画像の表示、解析を行う。

⑤ 無停電電源装置

制御装置、CPU 1 ラック及びモニタラックに電源を供給する無停電電源装置で停電などで電源が喪失した場合、内部電池で短時間のバックアップ給電を行う。

⑥ SSBL (Super Short Base Line の略)

音響による水中ロボットの位置検知装置であり、水中に吊下げた送受波器で呼出し信号を発令し、水中ロボットに搭載したトランスポンダからの応答信号を受信して送受波器からの X、Y、Z 方向の水中ロボットまでの距離を特定・表示する。

⑦ 格納架台

水中ロボットを搭載、格納、運搬するための台車。

⑧ リフト

水中ロボットの保守点検時に水中ロボットを吊上げるための手動フォークリフト。

⑨ 電池用台車

電池交換時に電池を搬送設置するための台車。

⑩ 電池充電器

予備電池を充電するための充電装置で、通常は琵琶湖研究所に設置して運用される。

5. 水中機器搭載機器 (図-2 参照)

「淡探」搭載機器は、琵琶湖研究所仕様のオリジナル装備のほか、国土交通省仕様装備を設備しており、所期のペイロード相当の設備をすべて搭載したもとなっている。

① 電源

リチウムイオン 2 次電池を組み電池とし約 4 kWh の大容量を実現している。組み電池は、専用の耐圧容器に格納したものを 2 台 (常用 1 台、

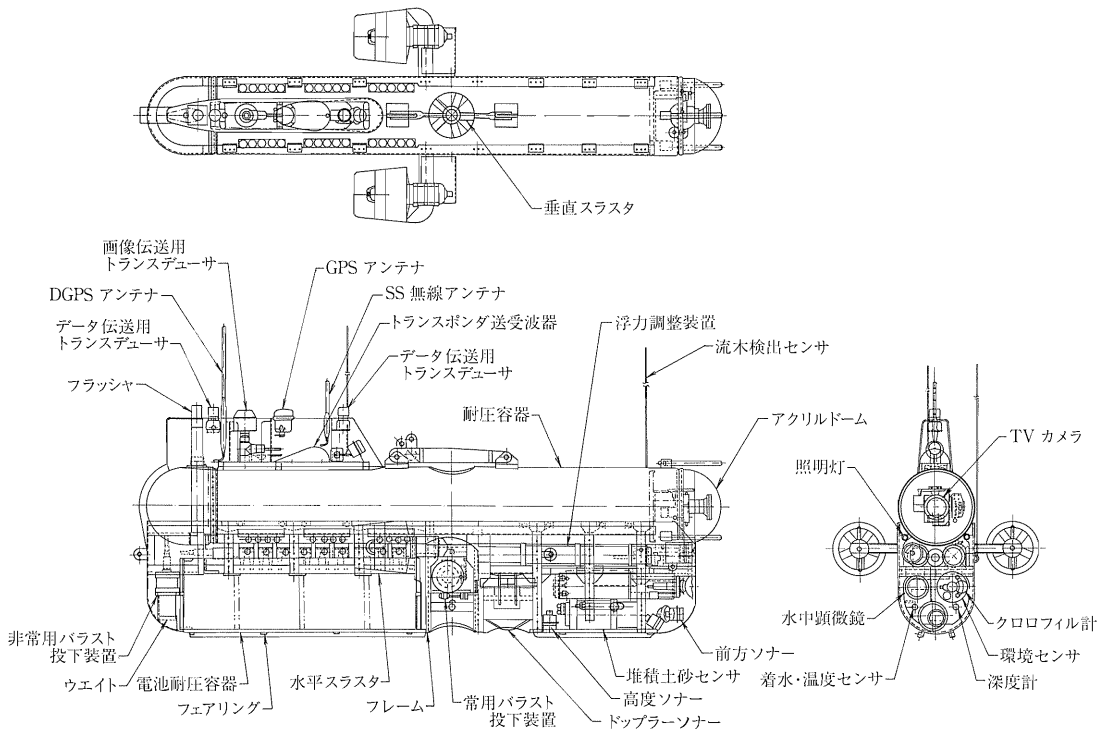


図-2 「淡探」外形図

予備1台)備え、交互運用が可能なシステムとしている。

各電池ユニットは保護監視回路が付加されており、単電池の故障時には自動的にユニットごとの切離しができるシステムとして冗長度を向上させている。

② 推進装置

三井造船製の高信頼性の三井 HPT スラスタ(400 W 級, ノズル付き)を、前後進用に左右舷に1基ずつ、上昇下降用に中央に1基装備しており、前後進、水平旋回、上昇下降の3自由度・3次元の移動を実現している。

③ ロボット本体構造

円筒型の耐圧容器に CPU 及び各種処理装置を格納しており、前面にアクリルドームを配し内部には観察用カメラを内蔵している。この耐圧容器自体が浮力体となって外部フレームや各センサなどの全体を中正浮力化しているため、このクラスの水中ロボットとしては格段の小型化を実現している。

④ 浮力調整器

水中の中正浮力調整用に開発したもので、ピストンにより調整器内部の水を排出し浮力を変化させることができる。水中ロボット質量の0.1%以上の質量を調整できるように、約150 ccの浮力調整器を2台備えている。

⑤ 観測装置

本ロボット用に特別に開発された小型軽量のズーム機能付きの水中顕微鏡と、水中の各種動植物の棲息環境などを観測するデータ収集用環境センサを搭載している。

- ・水中顕微鏡：1/2 インチ CCD イメージセンサ、最大445倍(14インチモニタ使用時)
LEDフラッシュ照明による30枚/秒の画像取得
- ・環境センサ：クロロフィルα蛍光、深度、電気伝導度、温度、pH、溶存酸素(酸化還元電位)、濁度(光束透過率)

⑥ 各種センサ

水中ロボットの航行・制御・監視用として、次のような機器及びセンサを搭載している。

- ・SSBL (Super Short Base Line 方式の略) 用
トランスポンダ：水中ロボットに搭載した音源(トランスポンダ)位置を母船側のトランスデューサで位置を特定するための水中ロボット位置検知装置
- ・方位センサ：フラックスゲート型の方位センサ、水中ロボットの向き(方位)を検出
- ・姿勢センサ：振動ジャイロ及びサーボ加速度計を用いた3軸の動揺センサ
水中ロボットの傾斜、角速度の検出
- ・堆積土砂センサ：音響ソナーによる湖底面の走査観測装置
- ・前方障害物センサ：音響による障害物の反射音で障害物までの距離演算装置
- ・流木センサ：浮上時の流木など情報障害物監視回避
- ・ドップラーログ：対地、対水、流速プロファイル観測(ADCP)装置
- ・GPS：GPSによる地球座標位置検知装置
- ・DGPS：基地局からの信号によりGPS情報を校正、より高精度の位置検知を行う。
- ・高度計：音響反射による高度距離演算
- ・深度計：絶対圧力計による水圧から深度演算
- ・着水センサ：金電極導通式；水中ロボットが着水状態であることを検出する。
- ・浸水センサ：耐圧容器内漏水検出用センサ
- ・温度センサ：各耐圧容器内温度センサ
- ・電圧電流センサ：各給電電圧、電流センサ

6. 制御運動機能

水中ロボットの運動制御は、前後進、左右旋回、

上下移動の三自由度について2基の水平スラストと1基の垂直スラストで行っている。各自由度の運動を制御するためのスラスト指令出力は、時々刻々の目標移動速度と目標加速度から予測した流体抵抗及び慣性力から得られるフィードフォワード項と、目標移動速度と現在速度の偏差あるいは目標位置と現在位置の偏差を用いたPIDフィードバック項を加えることで算出し、目標経路への追従特性の向上を図っている。

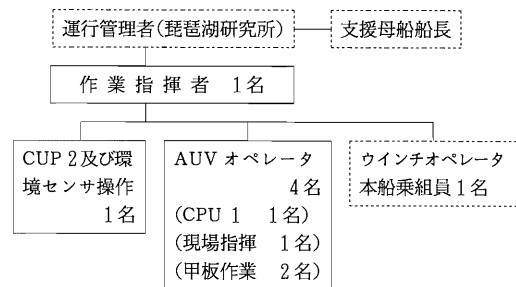
水中ロボットの運動機能として以下の機能を有する。

- 自動潜行：常用バラストを使用して目標深度又は高度までの初期潜行を行う。
- 浮上：垂直スラストを使用して水面までの浮上を行う。
- 位置方位保持：現在位置及び方位の保持を行う。
- 深度／高度制御：目標深度又は高度を指定して保持又は浮上/潜行を行う。
- 温度躍層制御^{*1}：指定した温度の水深を中心に上下移動を行う。
- ウェイポイント制御：移動目標地点（ウェイポイント）を指定することで、その地点までの移動を行う。また、複数のポイントからなる経路データ（ルートデータ）を与え、それらの目標地点への移動を順次行うルートトラッキング制御を行う。
- 画像追尾制御：前方カメラの画面内で指定した目標物が画面の中央にくるようにパンチルタ及びスラストの制御を行う。

注1) 温度躍層制御：湖水などでは、水中に大きな温度躍層（温度変位点）が見られ温度変化にともなって生物の分布等が異なっている。したがって温度変化点を中心に水中ロボットを上下に移動させて各種観察を行う制御。

7. 運用体制

運用は、通常作業指揮者を含めて計6名の作業員（実線部）で以下の体制で実施する。



① 作業指揮者

全体指揮を行うもので運行管理者、船長と連携して運行のスケジュール管理及び運行の続行取止めなどの判断を行う。

② 現場指揮者

現場における作業指揮を行うもので、水中ロボットの性能面からの運行範囲、制限などを熟知して運用時に現場作業員に適切な支持を行う。

③ CPU 1 オペレータ

CPU 1 の制御操作を行うとともに、水中ロボットの状態を監視して随時現場指揮者に報告する。

④ 甲板員

船上で水中ロボットの保守を行うほか、水中ロボットの着水、揚収の作業を行う。

⑤ CPU 2 及び環境センサ操作員

環境センサの着揚収時保守のほか、CPU 2 でのルートデータの作成、取得データの表示、解折、記録操作を行う。

8. 着揚収方法

「淡探」の着水、揚収作業は、図-3 のように実施される（揚収作業は、着手作業の逆操作）。

9. 運用試験結果

2000年9月の琵琶湖での運用では、夜間連続運行にさきがけて個別の自律制御機能の確認を行

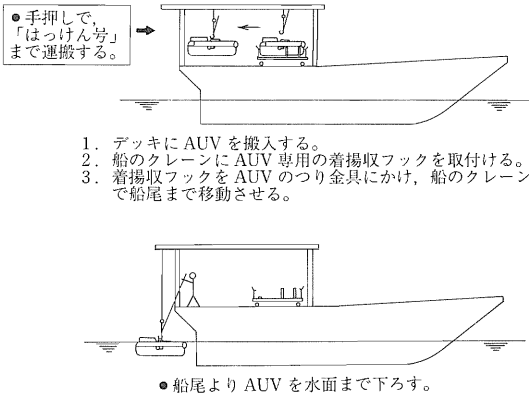


図-3 着揚収方法

い、引続き設定したコースの12時間夜間連続観測を実施した。

以下に示すように、所期の自律制御性能を確認するとともに、搭載している各種センサにより有意なデータを得ることができた。

(1) 自律制御機能確認

夜間自律運行に先駆けて自律ルートトラッキング航行のほか、流木回避、常用バラスト投下、単経路航行制御、高度/深度制御、温度躍層制御、水温計測、速度制御、定高度ルートトラッキング航行制御などの基本機能の動作確認を実施し機能を確認した。以下に各種確認試験のデータの一部を紹介する。

- ①単経路トラッキング制御：図-4 参照
- ②温度躍層制御：図-5 参照
- ③定高度ルートトラッキング制御：図-6 参照

(2) 夜間自律観測運用

夜間観測では、湖底近傍から温度躍層を通過して湖面までの計測を行うように、ウェイポイントを決めてそのポイントをトレースする自律ルートトラッキング機能で高度(深度)を変えた周回コースのトラッキングを実施しその過程での映像、水質のデータを収録した。

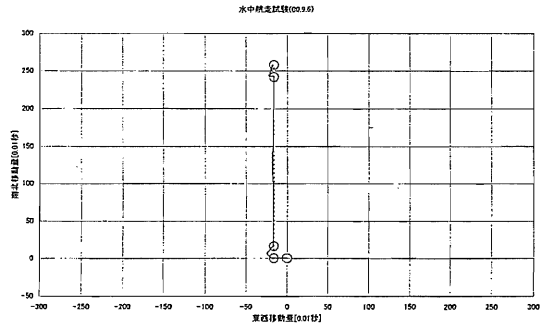


図-4 単経路トラッキング航跡図
設定したポイントに真直ぐに移動している。

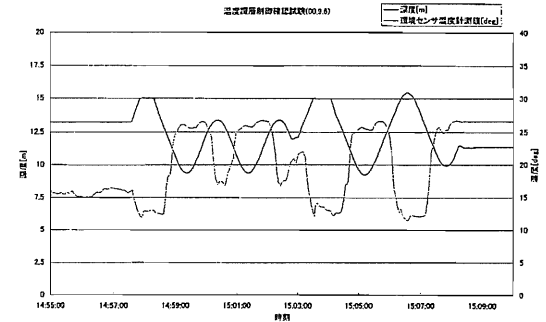


図-5 温度躍層制御時データグラフ
躍層制御を深度中心、温度中心と切替えている。やや温度に検出遅れがあるが良く追従している

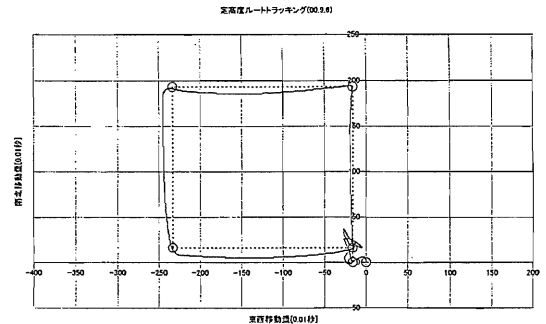


図-6 定高度ルートトラッキング航跡図
潮流により少し流されているがポイントはうまく通過している。

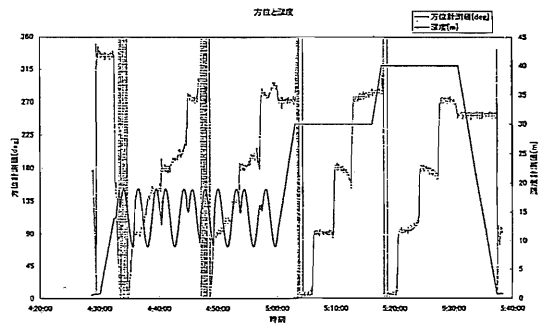


図-7 周回ルートトラッキング制御時データグラフ
方位の変化、躍層制御がうまく動作している。

周回コースでは、設定深度を中心とした躍層制御を含め、高度、深度による航行制御、位置保持制御等の複合動作を行っている。

- ①周回ルートトラッキング制御：図一7 参照
(自律運行試験)

10. ダム湖等淡水湖沼での運用

ダム湖等比較的狭い淡水湖沼での運用では、水面の水中ロボットの正確な座標位置を知ることが重要となるが、ダム湖の形状は千差万別であり、GPS 又は DGPS 等の座標位置検出装置の活用が不可欠となると考えられる。

現在の「淡探」の装備には、GPS のデータが十分得られる場合でも、単独測位の場合は、誤差精度が数 m から数十 m となることが考えられるため、精度向上のための DGPS 機能を装備しており、陸上の基地局からの補正データを受信することで高精度の運用を実現できる。

しかし、GPS のディファレンシャル信号を送信する UHF 無線機、データ伝送用の SS 無線機は、周波数が高いため直進電波となり、ダム湖での運用では目視できる数百メートルの範囲が有効範囲となると考えられる。さらに、湾曲したダム湖などでは湖岸の樹木などが無線の障害となり、さらに運用範囲が狭まる可能性がある。

したがって、ダム湖等での運用に際しては、複数の GPS 基準局の設定、ディファレンシャル信号の広範囲伝達やデータ伝送の中継局の設置などの計測の工夫が必要となる。

ダム湖に沿ったダム湖管理のデータハイウェイなどのインフラストラクチャ整備時に GPS など位置特定システムの組み込みが行われることで将来的には水中ロボット等による全自動計測システムの運用が可能になるものと考えられる。

11. おわりに

平成 12 年度は、琵琶湖湖水観測水中ロボットの運用調整訓練を行っており、既に 4 回の試験運航が実施された。これらの運航により、ユーザー側のオペレータの習熟訓練を行うと同時に、運転ノウハウの習得、装置などを実施している。

「淡探」のような AUV は、無索であるため、その用途が無限に広がる可能性を秘めているが、小型大容量の電源、水中での高速大容量通信、水中での座標位置検出などの技術的なハードルがあるため、AUV がすべて有索の ROV に取って代わるのはまだ先の話であり、AUV と ROV の特性に応じた使い分けとともに、双方の機能を併せ持つ複合型などの形態を経て最終的には無索の AUV が主役となってゆくと考えられる。いずれにしても、更なる水中ロボットの技術革新を目指して努力して行きたい。

最後に、研究開発から試験、運用までご指導、ご協力をいただいた琵琶湖湖水観測水中ロボット技術検討委員会の関係者各位及び支援母船「はっけん号」の乗務員の方々のご支援、ご協力に対して、この場を借りて深く謝意を表します。

【筆者紹介】

熊谷 道夫 (くまがい みちお)
滋賀県琵琶湖研究所
総括研究員
理学博士

浦 環 (うら たまき)
東京大学教授
生産技術研究所海中工学研究センター長
工学博士

榊原 孝志 (さかきばら たかし)
国土交通省近畿地方近畿地方整備局
淀川ダム統合管理事務所
建設専門官

佐々木 学 (ささき まなぶ)
三井造船株式会社
機械システム事業本部
メカトロシステム事業部