

# 水中バックホウを利用した 水中作業の無人化に関する取り組み

田中 敏成

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その整備や点検、維持・補修は水中での作業となり、それらはいまだ潜水士等の人力に大きく依存している。このような水中作業を一層安全で効率的に行う技術の確立が急がれているが、水中では濁りなどにより対象物の視認が困難であり、これらの解決は容易でない。

そこで筆者らは水中バックホウが受ける接触情報を利用し、「手応え」と接触点座標の「CG表示」により、光学映像に頼らない遠隔操作システムを提案し、捨石均し作業への適用を試みた。また、現在ではその応用として、水中構造物の点検作業への適用も試みている。本稿ではこれら一連の取り組みについて紹介する。

キーワード：水中バックホウ、水中遠隔操作、捨石マウンド、均し作業、鋼管杭、点検作業、非接触

## 1. はじめに

防波堤、大水深岸壁、廃棄物埋立護岸、海上空港の整備だけでなく、水中施設の点検・診断、維持・補修作業なども今後作業量が増大することが想定されている。これらにかかる水中部での作業はますます要請が高まるものと考えられ、これらを安全かつ効率的に実施することが求められている。このことから従前よりこれらの作業への機械力の導入が強く要請されてきた。

しかしながら、施設の大部分は水中に位置することから、海上から水中部の施設を直接的に見ながら作業を実施することが困難であるだけでなく、機械力を導入し単に水中TVカメラ等を用いて遠隔で作業を行おうとしても濁りや浮遊物質による散乱光によって作業対象物の視認が極めて困難な状況にある。このように、水中での作業環境は陸上のそれとは大きく異なるものであり、作業の無人化や遠隔操作化は容易でないことから、いまだ潜水士が多くの水中作業を担っている。

また水中では、視界の悪さや潮流などの海象条件によって作業能率が低下するだけでなく、多くの船舶が行き交う港内での作業である場合も多く、危険の察知や回避が必ずしも容易ではない。また、長時間の潜水作業は水圧による肉体への負担が大きいことから、その労働条件は陸上に比べて過酷な点も多い。すなわち、水中ではひとたび事故が起これば潜水士の生命に関わ

る事故になりかねないことから、効率性や安全性の確保が困難な水中作業にこそ無人化は有用であろう。

そこで港湾空港技術研究所では、各種水中作業の無人化について研究を行ってきた。本稿では港湾工事にかかる水中作業の無人化について、水中バックホウを利用した筆者の所属するグループの一連の取り組みについて紹介する。

## 2. 触覚情報を用いた遠隔操作による均し作業

### (1) 遠隔操作システム

#### (a) 相似形入力操作

本システムの操作方式には Master-Slave 方式を採用した。これはロボットと同じ形状の操作装置を用いし、オペレータがその先端を動かせば、その各関節の角度がそのまま作業ロボットの各関節の指令値となることから、バックホウではオペレータの手首から先の動きとバケットの動きを連動させ、直感的で平易な遠隔操作を実現した。また、操作装置は相似形であるが、把持部をスティック状にし、ペンを持つように操作することで操作性と可動範囲を確保した。

なお、インタフェースの相似スケールは腕の可動範囲と操作精度から水中実機の20分の1とした。また、一般に遠隔操作では Slave にかかる負荷をフィードバックすることで操作性が向上することから、この相似形インタフェースには反力提示機構を組み込んだ。

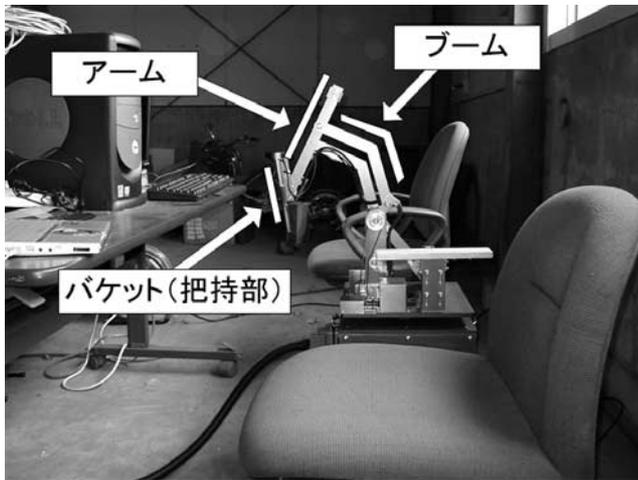


写真-1 相似形入力装置

(b) バイラテラル制御

バイラテラル制御とは、制御の対象を Master の位置と力、Slave の位置と力の4つとし、Master と Slave 間で位置と力それぞれの偏差をゼロとする双方向の制御である。ここでは無負荷時に Master-Slave 間の姿勢変位を抑える「位置対称型バイラテラル制御」を基本に、「力逆送型バイラテラル制御」を Master のバケット関節トルクにのみ適応させ、バケットのトルクに応じてその拘束力のゲインを急激に高めることで接触時の負荷に応じて手応えを変化させた。このような制御方法は比例補償ゲイン及び力伝達ゲインを接触センサの入力に基づいて可変としていることから「可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御」<sup>1)</sup>と呼ばれている。

(c) 接触センサ

本実験機ではバケットにかかるピッチングトルクを計測するための反力センサを製作し取り付けしており、機体本体の改造を少なくするため、バケット軸にとりつけるアタッチメント方式とした。機構的には平面上に引張圧縮型ロードセルを4基配置したものとし、ス

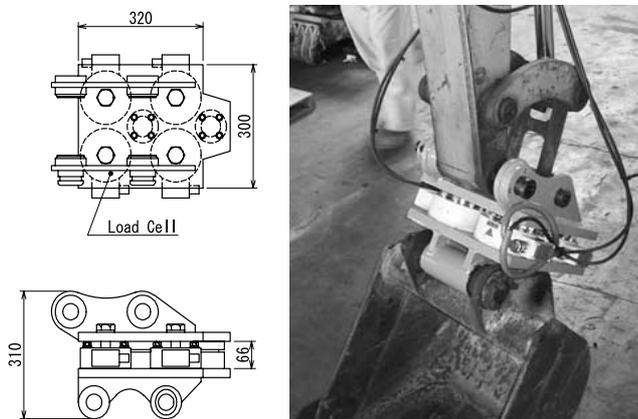


写真-2 アタッチメント式接触センサ

ラスト方向の応力をキャンセルするためのピンを設置している（写真-2）。

(d) Haptic Image

欠落した視覚情報を補完するために力のフィードバックによる力覚情報の提示が有効であることは既に述べた。ここでは各関節角から自機とバケット先端の相対座標を算出することが可能であることから、この相対座標について反力を受けた地点だけを PC 上のモニタにプロットすることで、オペレータにバケットが接触したマウンド高さを提示することとした。この反力プロット画像（CG）は作業中においても視点を変えて俯瞰することができ、作業範囲の高低差なども確認することが可能である。この画像は Haptic Image（触像）の一種であり、このような情報を人間の認識しやすい形に変換し提示<sup>2)</sup>することでオペレータに状況把握をさせ、作業効率の向上を図った（図-1）。

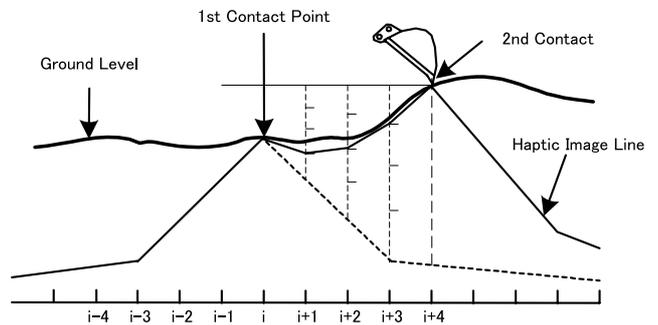


図-1 接触情報による地形認識

(2) 実海域実験機の開発

平成 16 年度に実施工現場における本遠隔操作システムの有効性について実証するための実海域実験機を製作した。本実験機は当研究所と共同研究を行った佐伯建設工業株式会社所有の水中バックホウ「ビッククラブ 3

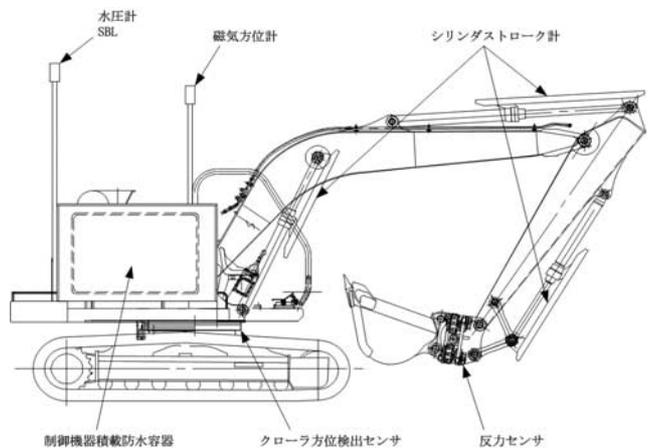
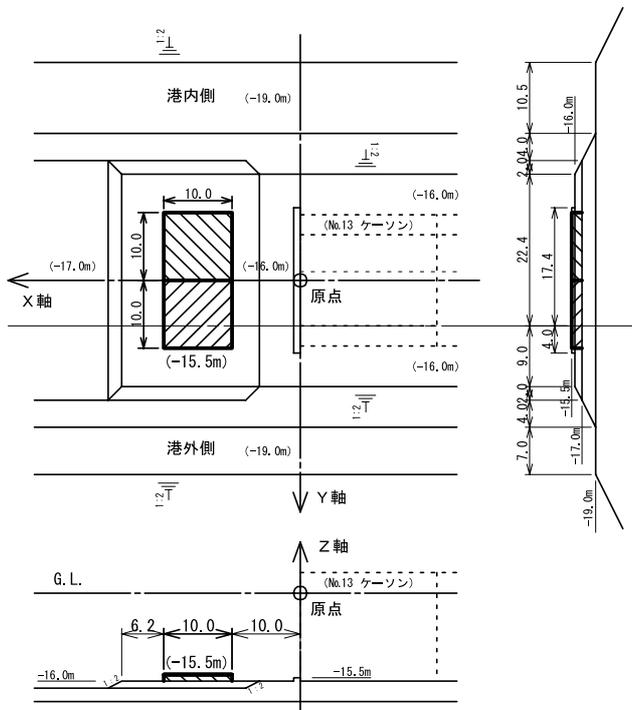


図-2 実海域実験機

号（以下 BC3）」をベースマシンとした。水中バックホウ BC3 の全景を図—2 に示す。ここではバックホウの水深を水圧計で計測することとしたが、潮位による影響はデータベースにその時間の潮位を入力することで補正することとした。

### (3) 実海域実験

実験は長崎県長崎市神ノ島沖防波堤の -16.5 m 捨石マウンド上で行った。海象条件は休止日を除いて波高 50 cm 以下、透視度 5 m、潮流 0 ~ 0.3 ノットの非常に穏やかな条件であった。捨石の大きさは 5 ~ 100 kg / 個、評価範囲は 10 m × 10 m とし、対象とする作業は ± 30 cm の捨石荒均し作業とした。図—3 に実験評価範囲を示す。また、写真—3 にバックホ



図—3 実験評価範囲

ウ投入状況を示す。

オペレータは TV カメラを用いず、前述の CG のみの情報で作業を行い、必要な高さまで掘削して作業範囲外に捨てる動作を基本的な動作として繰り返した。また、データベースに入力されている設計高さで接触した高さを比較することで、オペレータは丁張りに頼らずに均し作業を実施した。

### (4) 実験結果

今回の実験における均し面積は 32 m<sup>2</sup> であり、実験時間の制約から目標である 100 m<sup>2</sup> には達しなかった。作業後に撮影したマウンドの状況を写真—5 に示す。作業前は約 80 cm 程度の不陸が存在していたが、作業後にはほぼ平面に均すことができた。

遠隔操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると + 17 cm であり、その標準偏差は ± 8.1 cm であった。また施工管理基準 ± 30 cm を超えた点が 2 箇所あったが、目標高さより下回った点は 1 箇所であった。半数以上の測量点において + 10 cm ~ + 20 cm の間に収まっていた。写真—4 に遠隔操作の様子を示す。



写真—4 遠隔操作状況



写真—3 投入状況



写真—5 作業後のマウンド状況

### 3. 水中構造物の点検作業への適用の取り組み

#### (1) 水中マニピュレータの提案

以上のように、マウンド築造工事において触像を用いた水中バックホウの遠隔操作システムの有効性を示した。しかしながら、港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その整備や点検・診断、維持・補修の多くは水中での作業となり、これらも現状では潜水士に依存している。そこで、水中作業における機械化の次の段階として、水中バックホウの遠隔操作に関する成果を基に、維持補修を目的とした重作業用マニピュレータとして利用することを提案している。

元来、バックホウは様々なアタッチメントを取り付けることで、種々の作業に対応可能な汎用作業機械である。水中での当該作業においてもその汎用性が期待できることから、フォークグラブを用いた水中ハンドリングマニピュレータを研究している。

#### (a) 油圧作業機械の追従性向上

均し作業では問題とならなかったが、操作時の追従性低下の大きな要因は、ブームシリンダ伸長時と縮長時にその特性が大きく異なることであると考えられる。つまり、シリンダの発生力と摩擦力が平衡状態にある範囲が操作の不感帯となるだけでなく、ブームシリンダの伸長時にはその摩擦力に加えてバックホウフロント部の重量が負荷となってさらにその動きを阻害し、逆に縮長時にはその重量がブームシリンダの動きを補助することとなり、伸縮の違いで特性に差異が生じている。さらに、フロント部自体の重量は不変であるものの、その姿勢の変化によって重心位置が変化し、シリンダに掛かる負荷も変化してしまう。よって、位置偏差のフィードバックによる比例制御でバルブ開度を決定するだけでは、特に操作レバーの中立付近での細かな制御が困難であった。

そこで、フロント部の重心位置をパラメータとした重力補償マップを用意し、それを動作開始電圧値とし

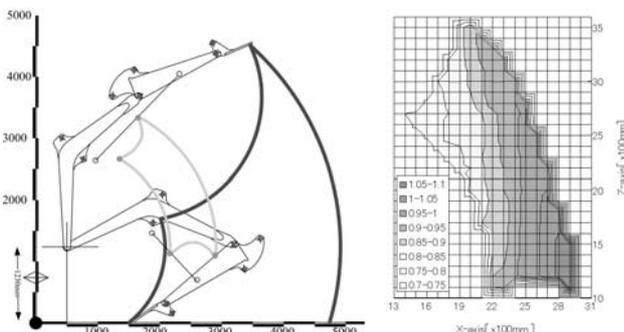


図-4 重心可動範囲・補償マップ

てブームシリンダを制御することで、エンドエフェクタの追従性と直線運動の精度を向上させた(図-4)。

#### (b) 維持補修作業用インタフェース

先に開発した相似形インタフェースでは長時間の操作に課題があった。また、ペンを持つように握るため、維持補修作業に必要なフォークグラブなどの複雑な操作が困難と考えられる。そこで、ジョイスティックを横置きとし、その操作角度をエンドエフェクタの速度指令とする水中ハンドリングマニピュレータの操作システムを構築している。この入力方式と前項の補償アルゴリズムを組み合わせることで、マニピュレータの先端座標を直感的に、かつ任意の方向に対して容易に直線的な軌道を取ることが可能である(写真-6, 7)。

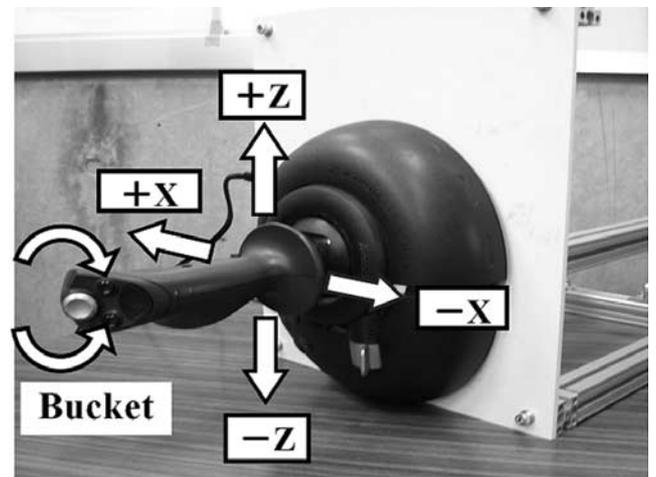


写真-6 入力インタフェース



写真-7 ハンドリング状況

#### (2) 非接触型鋼管肉厚測定アタッチメントの開発

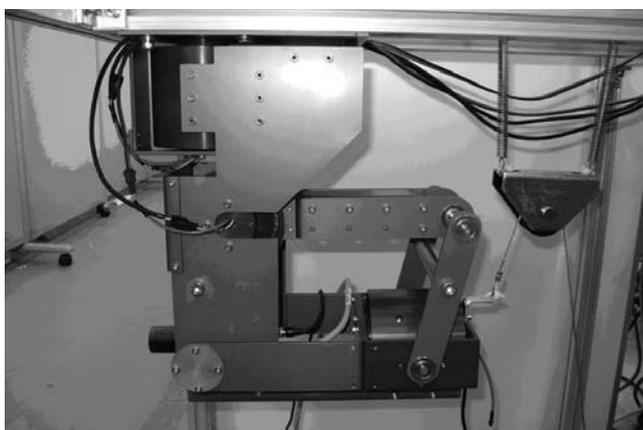
港湾施設の維持補修作業への水中バックホウ適用の試みの一つとして、鋼管杭の肉厚測定に取り組んでいる。現状では接触式の超音波肉厚計を使用していることから、潜水士のケレンによる附着生物除去作業が不可欠であるが、ここでは遠隔操作型水中バックホウと

新たな点検用センサを用いることで、水中部の無人かつ非接触（ケレン作業無し）での実施を目指している。

#### (a) 点検用センサの搭載機構

点検時の点検対象物との相対姿勢は、水中バックホウがいかなる姿勢を取ろうとも、常に適正に保持されなければならない。しかしながら、その先端部が世界座標系において取りうる姿勢は、地盤の傾斜を含めると3自由度であるが、バックホウ自体が制御する姿勢はその機械座標系における2自由度のみである。

そこで、センサ搭載部単独でロール、ピッチ、ヨーの3自由度の姿勢制御が可能なセンサ搭載機構をアタッチメントとして開発している（写真—8）。



写真—8 防水型センサ搭載機構の試験機（側面より）

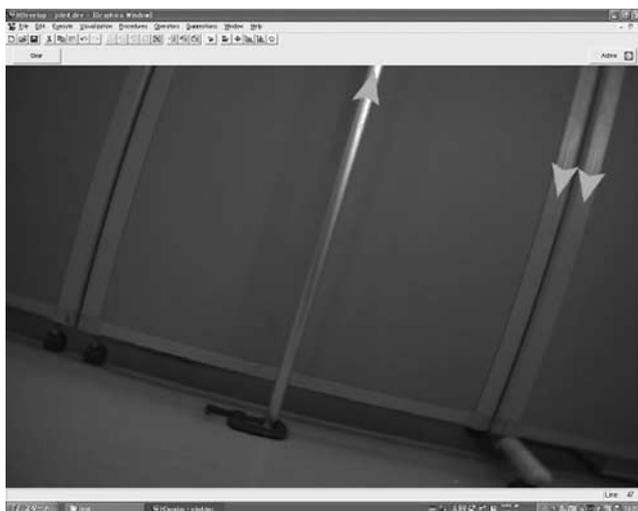
点検用センサは、点検対象物との相対姿勢を一定に保つことに加え、その間の距離を任意に制御するために、本機構の下部に前後方向に可動する直動機構とともに設置する予定である。点検用センサは超音波方式を用いるが、この装置から発せられる超音波はある距離で強い収束を伴う。不要な反射波を除去し、点検対象からの強い反射のみを得るためには、その収束点に点検部位を位置させる必要があることから、直動機構によってセンサを前後に走査しながら測定するものである。

#### (b) 近接画像の利用

マニピュレータの先端に設置されるセンサ搭載機構は、シリアルリンクの累積誤差を吸収する役割もある。このセンサ搭載機構には点検用センサに加えてカメラを設置し、本機構の姿勢制御やセンサ位置の微調整等の低次な制御はこのカメラによって取得される近接画像に基づいて自動で行うことを目指している。

すなわち、リアルタイムに取得され、濁りの影響が少ないであろう点検対象物の近接画像を利用して、点検対象物とセンサ搭載機構の相対位置と姿勢を適切に保持・制御することが可能な、ビジュアルサーボ系を

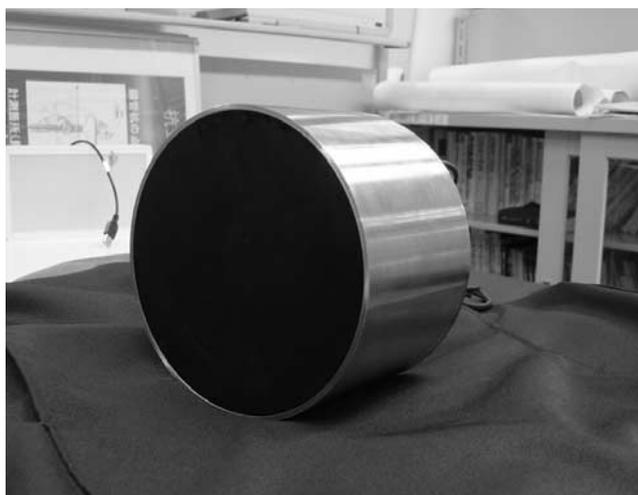
構築しようとするものである（写真—9）。



写真—9 画像計測による柱状構造物姿勢の自動認識  
（「矢印」が認識された柱状構造物の傾斜方向）

#### (c) 点検用センサの試作

チャープ信号によるパルス圧縮を用い、鋼板裏面からの反射波と鋼板内の多重反射波を利用することで、肉厚測定が可能であるが、生物付着状態ではそれらによる音圧の減衰が顕著であるため、より広帯域かつ高出力のチャープ信号を効率的に送信できる音源が必要となった。そこで、中心周波数1 MHz、周波数帯域500 kHz～1.1 MHz、直径 $\phi$ 150 mm、曲率半径300 mmとした収束音源を試作した（写真—10）。



写真—10 鋼管杭肉厚測定用の広帯域収束音源

## 4. まとめ

触覚情報を用いた遠隔操作インタフェースの有効性を実海域における捨石均し作業で検証した。この作業は比較的単純な作業ではあるが、所定の施工精度を要求される重作業であり、作業の重要性、頻度からも最適な作業対象だったと言える。

一方、高度経済成長期に整備された数多くの港湾施設が耐用年数に近づいており、これらを健全な状態で維持・管理し、有効に活用することが求められている。本稿で紹介した筆者の所属するグループの取り組みは、このような要請に対応するものである。 JCMA

### 《参考文献》

- 1) 山田宏尚・武市教児・武藤高義：遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御，日本機械学会論文集（C編）66 [651]，pp.140-147（2000）
- 2) 秋園純一・平林文嗣・山本恭・酒井浩・矢野博明・岩崎正揮：Teleoperation of Construction Machines with Haptic Information for Underwater Applications, International Association for Automation and Robotics in Construction, pp.340-345（2004）

### 【筆者紹介】



田中 敏成（たなか としなり）  
 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
 施工・制御技術部 情報化技術研究室 研究官  
 LCM 研究センター 特任研究官（併任）

## 橋梁架設工事の積算

——平成 19 年度版——

### ■改定内容

- 1) 鋼橋編
  - ・架設桁設備質量算定式の改訂
  - ・施工歩掛の新規及び一部追加掲載（杵据付工（ゴム杵据付工）、歩道橋（側道橋）架設工）
  - ・施工歩掛の改正（鋼橋架設工足場工）
  - ・その他（送出し・降下の数量名称簡素化，工種内容の説明補足，床版足場工簡素化）
- 2) PC 橋編
  - ・機能分離支承の設置歩掛
  - ・外ケーブルによる既設構造物の補強工
  - ・プレキャストセグメント組立工7分割の歩掛
  - ・その他（張出架設柱頭足場工の追記，地覆高欄作業車設備の組立解体歩掛，架設桁アンカ

—数の変更等)

- 3) 橋梁補修補強工事積算の手引き（別冊新刊）

■ B5 版／本編約 1,100 頁（カラー写真入り）  
 別冊約 110 頁 セット

### ■定 価

非会員：8,400 円（本体 8,000 円）  
 会 員：7,140 円（本体 6,800 円）

※別冊のみの販売はありません。

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 600 円

沖縄県 450 円（但し県内に限る）

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>