

## 特集 IT と建設の機械化

## 地上型三次元レーザースキャナーを用いた地形計測システム

佐田 達典・大津 慎一

レーザースキャナーとはレーザーを走査して地表面の三次元情報を計測する装置であり、広範囲を高精度かつ高密度に計測することができる。従来、航空測量で使用されてきたが、近年、地上型三次元レーザースキャナーが登場したことから、建設工事関連の計測を目的に地形計測システムを開発した。特に土量計測への適用を目標に本装置の特性を生かした計測作業とデータ処理の方法を検討した。

10 ha のサーチャージ盛土量計測に適用した結果、従来の約半分の時間で計測作業を実施できた。また、データ処理成果として、従来測量では得られない稠密な形状計測を基にした土量計算が可能になった。

キーワード：土工，土量計測，レーザースキャナー，CAD，VRML，GPS，IT

## 1. はじめに

レーザースキャナーとはレーザーを走査（スキャン）して地表面の三次元情報を計測する装置であり、レーザーによる距離測定とスキャニングの角度測定を組合わせて、広範囲を高精度かつ高密度に計測することができる。

この技術は、航空機に搭載されて地形を高密度に測量する航空測量の一手法として導入されたが、近年、地上据え置き型レーザースキャナーが登場してきた。本報文では、地上型三次元レーザースキャナーを用いた地形計測について報告する。

## 2. 計測機器の機能と特徴

## (1) 機器仕様

今回使用した計測機器はリーグル社製の LMS-Z 210 レーザーミラースキャナーである。本機は、レーザー器械軸を原点とする三次元空間座標

系における表面イメージングシステムであり、近赤外線領域（レーザー波長  $0.9\mu\text{m}$ ）の半導体レーザーを使用している（表—1 参照）。

表—1 LMS-Z 210 機器仕様

項目	仕様
測定距離	2~350 m (ターゲット反射率 80%以上) 2~150 m (反射率 20%以上)
測定精度	±2.5 cm (最大±10 cm)
レーザーパルス繰返し周波数	最大 28,000 Hz 平均 20,000 Hz
レーザー波長	0.9 μm (近赤外線領域)
ラインスキャン角範囲	80度
ラインスキャン速度	標準 20 scan/sec 1 scan/sec~最大 36 scan/sec
フレームスキャン角範囲	0度~最大 330度
フレームスキャン速度	標準 5度/sec 1度/sec~最大 15度/sec
計測時間	標準 90秒 (80度×330度範囲)

測定は、3面のポリゴンミラーによりレーザーを一定の角度間隔に連続射出させ、飛行時間および周波数から計測対象物までの距離を計測する。距離とレーザー放射の角度（垂直角，水平角）から三次元座標値を算出する。計測範囲は器械軸か

ら垂直方向±40度、水平方向330度の空間範囲であり、距離は本体から2~350mの範囲である。

位置測定精度は、±2.5cm(標準偏差)であり、計測ピッチは最高で0.08gon(0.072度;1gon=0.9度)である。

## (2) 操作と取得データ

レーザースキャナーは、写真-1に見るようにスキャナー機器本体、制御するPC、接続ケーブル、機器用のバッテリーで構成される。スキャナーの制御とデータ取得はPCを機器に接続して行う。計測時は縦方向にスキャンしながら、水平方向に回転してレーザーの射出と反射光の受光を行う機構となっている(図-1参照)。計測時間は、垂直方向80度、水平方向330度の計測を約90秒(標準)で行える。

取得するデータは対象物各点までの距離、角度(垂直、水平)、反射強度、RGB色情報であり、1

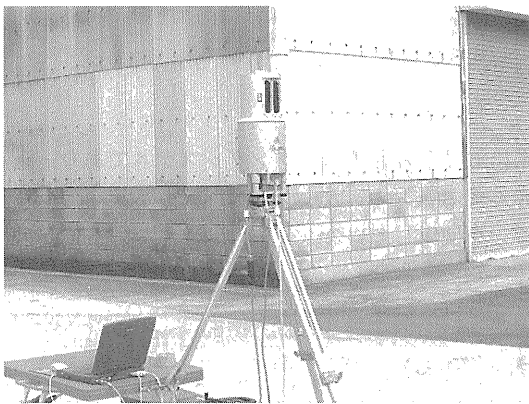


写真-1 LMS-Z 210

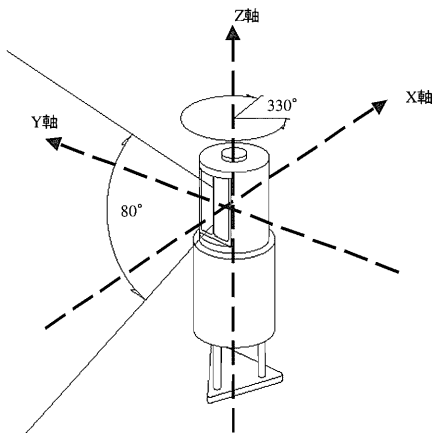


図-1 LMS-Z 210の動作機構

回のスキャン毎にPCに記録される。

これらのデータは3種類の画像(距離画像、反射強度画像、RGB色画像)で表示される。写真-2は反射強度画像の例である。各画像には1ピクセル毎に三次元データが存在するので取得画面上で相対距離を測ることもできる。

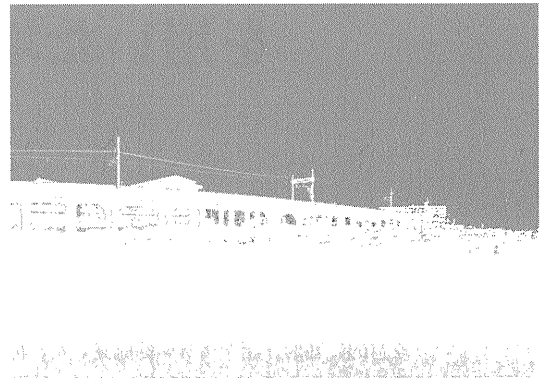


写真-2 レーザー反射強度画像例

## (3) レーザースキャナー取得データの特徴

レーザースキャナーにより取得したデータは、膨大な点の三次元位置データであり、点の集合により形状を再現している。光波測距儀を用いたトータルステーション(TS)などによる観測に比べ、取得した1点1点の精度は落ちるが、対象物の面形状を再現するにあたり、膨大な点の集合を平均して形状を捉えれば精度は向上する。

一方、スキャナー本体からの距離に応じてレーザーの照射密度は変化する。例えば、解像度が0.08gonの場合、本体から10mの位置では直壁に1.2cm間隔で照射する。50mでは6.3cm、100mでは12.6cmとなる。

## (4) 従来の計測法との比較

### (a) トータルステーション(TS)

トータルステーション(TS)ではターゲットを計測点に設置し、1点1点を直接計測していくが、レーザースキャナーでは連続してレーザー光を一定の角度間隔で照射して、物体により反射された光のみを計測している。したがって、ランダム計測であり、特定の点を指定して計測することはできない。

### (b) RTK-GPS

リアルタイムキネマティックGPS(RTK-

GPS)ではTSと同様、アンテナを設置して1点1点を計測するが、連続計測モードではアンテナを移動しながら地表面の三次元データをランダムに収集できる。しかし、アンテナの接触している位置しか計測できない。これに対してレーザースキャナーは非接触での計測であり、2~350 mの範囲で障害物により陰になる部分以外全てを計測できる。ただし、低反射の材質や水面のように全反射を起こす部分は計測できない。

### (c) 三次元写真解析

写真解析では2枚の写真からステレオ解析により三次元形状(座標)を再現するが、レーザースキャナーでは最初から三次元データとして表面モデルを取得できる。また、写真解析の場合、座標が既知の基準点を設置し、写真に写し込む必要があるが、レーザースキャナーでは座標変換を用いる必要がなければ、基準点を設置しなくてもよい。

## 3. 精度検証実験

### (1) 実験方法

LMS-Z 210の測定精度は仕様上では±2.5 cmであるが、これは1点毎の精度である。しかし、実際には対象面に複数のレーザーが照射されるので、それらの観測値を平均することによって精度の向上が期待される。そこで、次の実験を行った。

レーザースキャナーを地面から2 mとなる高さに固定し水平に設置する。反射シートを貼付けた半径25 cm, 17.5 cm, 13 cm, 7.5 cmの4種類の円盤状ターゲットをレーザースキャナーから水平距離約10 mの位置に設置し、スキャナーの計測ピッチを変えてスキャンする。計測ピッチは0.12 gon, 0.16 gon, 0.20 gonの3段階とする(1gon=0.9度)。また、レーザー機械軸と同一座標系において、TSを用いて円盤の中心点を測定し最確値とする。

レーザースキャナーの測定データから、反射強度の違いを利用してターゲットに照射した点のみを抽出する。該当点の情報から斜距離と水平角と垂直角の平均値を計算し、これをXYZの三次元座標に変換する。その結果をTSでの測定結果と比較した。

### (2) 実験結果

表-2にターゲットの大きさ別の照射点数を示す。また、表-3では半径7.5 cmのターゲットについてレーザーの測定データ(ターゲットに当たった点)を平均して求めた点の座標とTSで測定した中心点座標の比較を示す。各々で求めた点の座標差(斜距離)は、1.5 cm以内となり、平均処理によって位置測定精度の向上することが確認できた。

表-2 ターゲット照射点数の比較

解像度 半径	0.12 gon			0.16 gon		0.20 gon	
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
25 cm	141	135	143	82	81	48	52
17.5 cm	64	69	66	39	38	24	23
13 cm	37	35	35	21	24	14	15
7.5 cm	13	13	11	8	7	5	4

表-3 平均処理座標とTS座標との比較

計測番号	点 座 標 (m)			TSとレーザースキャナーとの差 (m)			
	X	Y	Z	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	斜距離
TS	-9.951	-0.628	-1.051	0.000	0.000	0.000	0.000
0.12 gon No. 1	-9.953	-0.635	-1.047	-0.002	-0.007	0.004	0.008
0.12 gon No. 2	-9.948	-0.629	-1.045	0.003	-0.001	0.006	0.007
0.12 gon No. 3	-9.951	-0.633	-1.046	0.000	-0.005	0.005	0.007
0.16 gon No. 1	-9.948	-0.636	-1.045	0.003	-0.008	0.006	0.010
0.16 gon No. 2	-9.937	-0.633	-1.046	0.014	-0.005	0.005	0.015
0.20 gon No. 1	-9.954	-0.628	-1.047	-0.003	0.000	0.004	0.005
0.20 gon No. 2	-9.961	-0.638	-1.048	-0.010	-0.010	0.003	0.014

## 4. 地形計測システム

以上の検討を踏まえ、三次元レーザースキャナーを用いて地形計測システムを開発した。本システムは、現地での計測システムとデータ処理システムとで構成される。各システムの概要は以下のとおりである。

### (1) 計測システム

計測システムはレーザースキャナー本体とそれを固定する三脚、PC、バッテリーで構成される。

画像を合成する、あるいは公共座標系での処理を必要とする場合には、反射ターゲットを用いる。

### (a) 計測地点の選定

計測するエリア全体の踏査とエリアの図面から、計測範囲、障害物の有無、計測エリアの形状(高低差)、計測対象物の種類、作業する足場の状態、車両の乗入れの可否、基準点位置等を確認し、レーザースキャナー計測地点を決定する。計測地点の選定に際しては、レーザースキャナーからの距離と照射密度から設置間隔を決定する。

### (b) 地形形状による計測方法の違い

崖面、山、造成地など、計測するエリアの形状によって計測方法は異なる。たとえば、計測対象範囲が、大きな高低差を持つ場合、全体を見渡せる計測地点を選定すると効果的な計測作業ができる。反対に、高低差をほとんど持たない平地のような場合、全エリアにわたって満遍なくデータが取得できるような地点を選定しなければならない。計測地点の配置によっては、形状取得データが不足する部分が発生し、精密な形状再現は困難になる場合がある。

### (c) 基準点の計測

レーザー計測1箇所あたり、反射ターゲットを3箇所設置する。反射ターゲットはスキャナー周辺5m前後に設置する。レーザースキャナーによる計測時にこの3つの反射ターゲットを写し込む。また、TSで反射ターゲットの中心位置の座標値を計測する。このとき、レーザースキャナーは、水平に設置することを条件とする。後述するデータ処理時にレーザースキャナーとTSで計測した座標値を元に座標変換を行う。

## (3) データ処理

レーザースキャナーにより取得したデータ量は膨大なため、データの加工・抽出等の後処理作業は、既存の表計算ソフトなどではほとんど処理不可能である。CADにおいても同様に、全データを一度に取扱うのは困難である。既存アプリケーションで、スキャナーのデータを無理なく取扱うことのできる製品は数少ない。そこで、データ処理の効率化を図る方法として、各計測(土量、地形、断面、変位量)に特化した処理手順の検討を行い、各事例に基づいて後処理方法を確立できる

ようにした。

ここでは、土量計算におけるデータ処理の流れを説明する(図-2参照)。

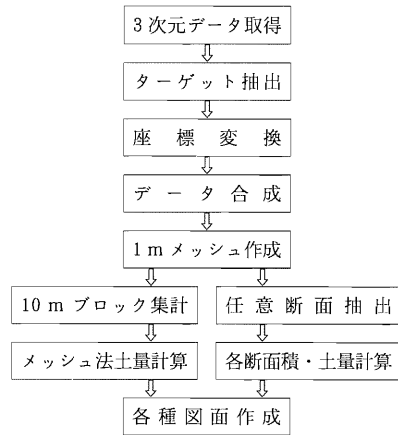


図-2 土量計算処理のフロー

### (a) ターゲット抽出

まず、観測データより、座標変換に使用する反射ターゲットの抽出を行う。抽出は物体の反射強度の違いを利用して、反射強度の高いターゲットデータを抽出し、平均することでターゲット中心位置の最確値を求める。

### (b) 座標変換とデータ合成

レーザースキャナーにより計測したデータを、TSで計測した座標系に変換する。先に抽出したターゲットデータを利用し、座標変換と観測精度の検証を行う。変換方法は、スキャナーを鉛直方向(地表面に対して水平)に設置して行っているため、円柱座標系であり、鉛直方向Z軸の回転、XY面の平行移動及び高さの移動による。座標系が統一されたのち、データ合成を行う(図-3、写

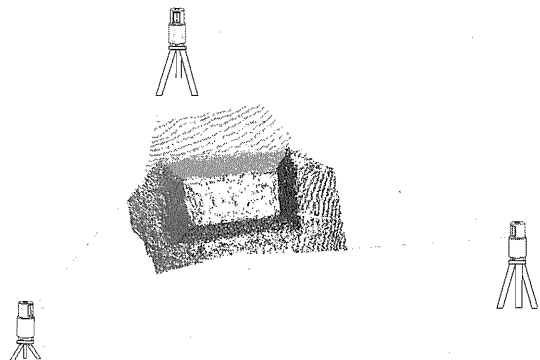


図-3 計測画像の合成

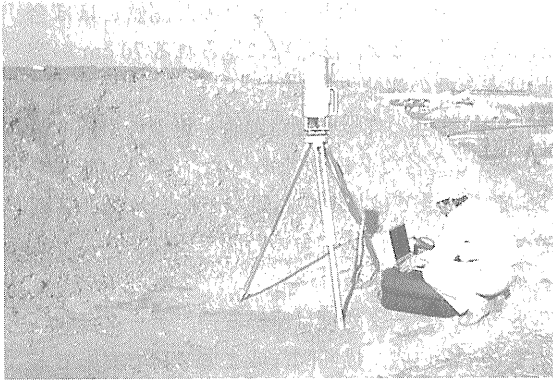


写真-3 計測状況

真一3参照)。

#### (c) 1mメッシュ自動生成

合成されたデータより、障害物などのデータの除去を行った後、1mメッシュの自動生成を行う。現地計測において、1m<sup>2</sup>に1点以上のデータが取得されており、近接の3点より面を定義することで、格子点の高さを自動計算する。

#### (d) 土量計算

上記によって求めた1mメッシュのデータより土量計算を行う。

メッシュ法では、計画図面より、計画高を10mピッチで取得し、1mメッシュの計画高は、比例計算によって内部計算させる。1mメッシュの現況高と計画高より各メッシュの切盛り量を算出する。これを10m×10m(121の格子点)で集計することで、10mメッシュの土量を求める。これによりレーザースキャナーによる地盤高の誤差は平均化される。

## 5. 土量計測への適用

本システムの土量計測への適用例として、「東鷲宮土地区画整理事業造成工事」(埼玉県鷲宮町)のサーチャージ盛土量計測について紹介する。土量を求める方法としては、断面法、メッシュ法、等高線法などがあるが、今回は、メッシュ法と断面法により土量が求められるように、盛土形状の三次元データを取得することにした。

### (1) 計測の内容

今回の適用に関して、計測のポイントをまとめ

ると次のようになる。

- ① 計測範囲は約10ha(おおよそ400m×250m)あるので、既存のメッシュ法(10mメッシュ)による土量計測と同等の成果が得られるようにした。
- ② 1回の取得データ数が約10万点程度になるようにスキャナーの解像度を設定した。
- ③ 重機は数台入っていたものの、大きな障害物はあまり無かったので、スキャナーの設置位置の間隔を約60~80mにして、16箇所の設置位置を決定した。設置間隔は、レーザー点数予測式<sup>1)</sup>から決定し、データ取得間隔の粗い部分を他の計測により補えるように配慮した。
- ④ 現地形状に合わせて設置位置を7箇所補充し、計23箇所(うち2箇所は同じ場所から方向を変えて計測)から計測を行うことにした。これによって100m<sup>2</sup>当たり、データ密度が粗い場所でも200~300点程度の点数が取得できる。また、現地地形を再現するには、全範囲に万遍なくデータを必要とする。
- ⑤ 計測した23箇所からのデータを合成し(図-4参照)、1mメッシュの点数(約10万点)にすること(図-5参照)で全体を平均化し、形状を再現した。図-6に全体区域合成図を示す。

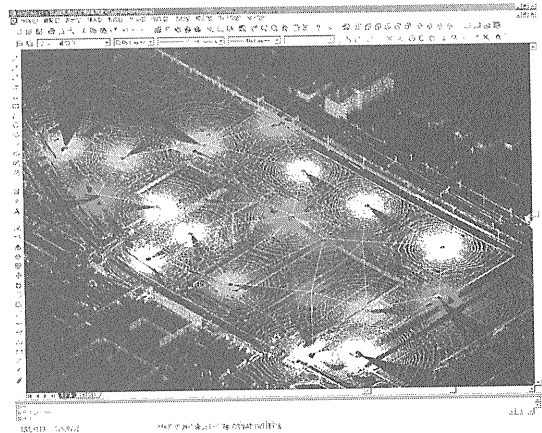


図-4 計測データ合成図

### (2) 計測精度と作業時間

図-8はレーザースキャナーによる生データとRTK-GPSによる計測結果を重ね合わせた結果

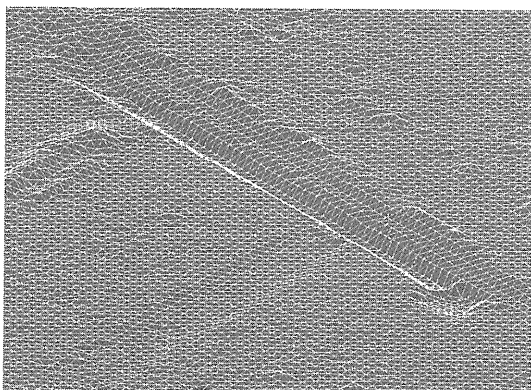


図-5 1mメッシュ図

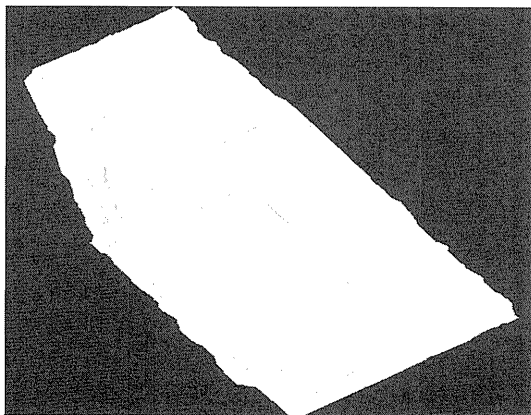


図-6 全体区域合成図

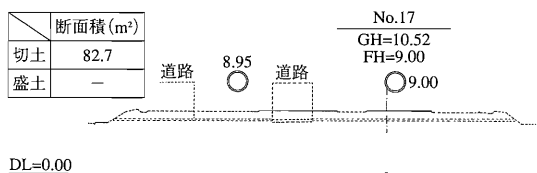


図-7 横断面図例

断面図(法面部分)の比較

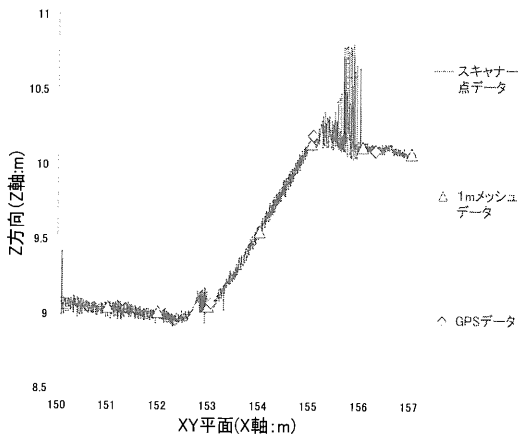


図-8 レーザースキャナーとRTK-GPSのデータ比較

の一例である<sup>2)</sup>。RTK-GPSでの計測値とほぼ合致している。なお、法肩部に見られる70cmの突起は安全柵の部分である。

また、今回の作業時間は踏査・選点の事前準備を含めて2名で2日間であった。RTK-GPSやTSでの測量では基線の設定などを含めて4日は要することから、約半分の時間で実施できたこととなる。

さらに、データ処理は座標変換、データ合成、メッシュ図作成、横断面図作成まで2日で実施できた。図-5から図-7の成果品はTSやRTK-GPSのデータからは出力できない高密度の成果となっている。

### (3) 付属成果

現地で計測した画像をVRML (Virtual Reality Modeling Language) 形式に変換して、任意の視点から景観を再現することができる。図-9は工事区域とその周辺の景観であり、工事の進捗状況等をより視覚的に説明することに役立つ。

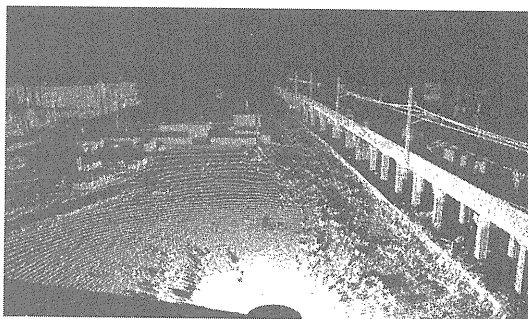


図-9 VRMLによる周辺景観の再現

## 6. おわりに

地上型レーザースキャナーを用いた地形計測はまだ開発が始まったばかりである。本報文では主に、土量計測に関する部分を紹介したが、計測方法からデータ処理方法まで、レーザースキャナーの特性を生かした一貫したシステムを構築することができたと考えている。

膨大なデータ処理を実施した結果、従来に比べ稠密な形状データから土量を算出することが可能となった。今後、成果品である図面作成や土量計算書作成について、更に自動化できるよう検討し

ていく予定である。

さらに、今回適用した地上型レーザースカナーは、非接触で大量の地形データを短時間に収集できる特性から、立入り不能な危険箇所の形状計測、複雑な配管図面の作成、構造物や法面の変位量計測など、他の用途への応用も期待される。今後は、これらの用途に特化した処理方法を確立していく予定である。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 村山盛行, 大津慎一, 佐田達典, 清水哲也: 3次元レーザーミラースキャナーによる形状計測システムの精度検証, 第25回土木情報システムシンポジウム講演集, 2000年10月
- 2) 村山盛行, 大津慎一, 佐田達典, 清水哲也: 地上型レ

ザースカナーによる土量計測システムの開発, 第26回土木情報システムシンポジウム講演集, 2001年10月

#### 【筆者紹介】

佐田 達典 (さだ たつり)  
三井建設株式会社  
技術研究所エンジニアリング研究開発部  
生産情報研究室  
室長



大津 慎一 (おおつ しんいち)  
三井建設株式会社  
技術研究所エンジニアリング研究開発部  
生産情報研究室  
研究員



## // 新刊 //

現場技術者のための

# 建設機械整備用工具ハンドブック

- ・ 建設機械整備用工具約180点の用語解説と約70点の使い方を集録。
- ・ 建設機械の整備に携わる初心者から熟練者まで幅広い方々の参考書として好適。

■ A5判 約120頁

■ 定 価 : 会 員 1,050 円 (消費税込)、送料 420 円  
非会員 1,260 円 (消費税込)、送料 420 円

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