

## ホイールローダの自動化

大 隅 久

本報文では、ホイールローダによる土砂の自動すくい取り制御方法の確立を目指した取組みを紹介する。ホイールローダで土砂の自動すくい取りを行うには、ホイールローダの持つ制御性能だけでなく、土砂の力学的なモデルが必要となる。この二つを考慮することで、ホイールローダの能力を最大限に活かしたすくい取り方法を確立することができる。

本報文では、土砂モデルとして、すくい取り時にホイールローダのバケット先端部にかかる土砂からの反力をモデル化し、できるだけ短時間に効率良く土砂をすくい取るための制御アルゴリズムを提案する。更に、土砂の基礎実験により、提案した土砂モデルの妥当性を検証する。

キーワード：ホイールローダ，土砂すくい取り，バケット，軌道生成，自律制御，操作力，土圧

### 1. はじめに

ホイールローダは土砂のダンプへの積込み機器として高い機動性を有し、土木現場や採石場、災害復旧現場などで広く用いられている。このホイールローダを自動化することができれば、コストの削減、災害危険区域の復旧作業における二次災害の防止や早期復旧に寄与することができる。すでに無人化施工<sup>1)</sup>として、雲仙普賢岳の災害現場の復旧作業や砂防ダム工事などで、バックホウやダンプトラックの遠隔操縦が行われている。

また、鉱山での碎石の積込み、運搬を自動化したものなどがある。ただし、土砂のすくい取りから積込みについてのプロセスにはオペレータが介在しており、完全な自動化には至っていない。

ホイールローダの自動運転、ダンプトラックの無人走行により、土砂の掘削から積込みまでの一連の作業の自動化を実システムで実現したものとして大島ら<sup>2)</sup>のシステムがある。このシステムでは土砂モデルを生成せず、経験的にすくい取りのための動作を生成しているため、すくい取り効率については今後の課題とされている。

筆者らもホイールローダを利用した土砂すくい取りの自律システムの開発研究に取り組んでいる<sup>3)</sup>。「山祇プロジェクト」と名づけられたプロジェクトにおいて、参画した各研究機関、大学がそれぞれ土砂形状認識、

ホイールローダのナビゲーション、土砂のすくい取り、システム化を担当し、研究開発が行われている。中でも土砂のすくい取りは、対象物となる土砂の特性が複雑であるため、土砂形状認識やナビゲーションと比べて難しく、自動化の妨げとなっている。

土砂のすくい取りを効率良く自動で行うには、ホイールローダの持つ性能と土砂の性質の関係を知らなければならないと考えられる。皿田<sup>4)</sup>、張ら<sup>5)</sup>はバケット軌道を斜面に平行に設定し、これに沿ってバケットを制御することで土砂をすくい取る手法を提案している。しかし、この軌道がどのような意味を持つのかは明確でない。

土砂のモデルに関しては、これまでに Hemami<sup>6)</sup>、高橋ら<sup>7)</sup>の提案モデルがある。Hemami は、ローダがバケットを土砂の山に挿入した時に、土砂が発生する反力を五つの成分に分解し、それぞれの成分を近似的に算出している。張らはこのモデルを基にしたより詳細な解を算出している。ただし、いずれも完全なものではない。一方、高橋らは、土砂の粒子一つずつを球形に近似し、これらの挙動をマクロ的に表現することで反力を求めている。このモデルは実際の計測結果とかなり近いが、ローダを制御するためのモデルとしては複雑で利用しづらい。

そこで本報文では、Hemami の分類と同様、土質力学を基にバケットが土砂から受ける反力を五つの成分に分解する。そして、この土砂モデルを利用してホイールローダによる自動すくい取り制御法を提案する。

これには、実機の約10分の1のスケールモデルであるミニチュアホイールローダ<sup>やまづみ</sup>山祇3号(図-1)を利用する。

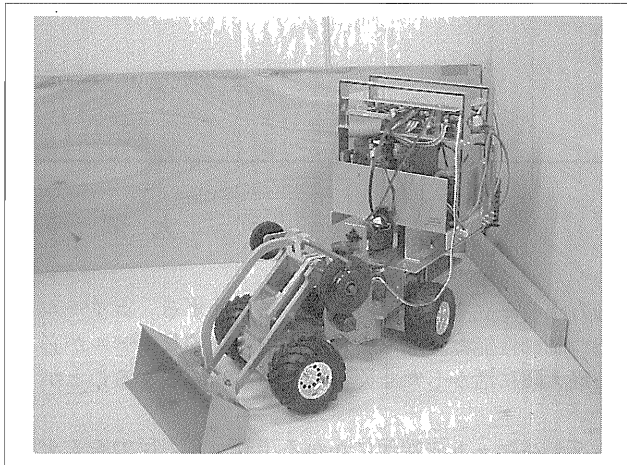


図-1 ミニチュアホイールローダ(山祇3号)

まず、すくい取りの際にかかる反力を基に、土砂の最大反力包絡線モデルを提案する。次に、この提案モデルを利用して、できるだけ短時間に多量の土砂をバケットですくい取るための制御方法を提案する。

## 2. 土砂に作用する反力の成分

### (1) 土砂からの反力成分<sup>8)</sup>

図-2は土砂をすくい取る際、バケットにかかる土砂からの反力を五つの成分に分類したものである。

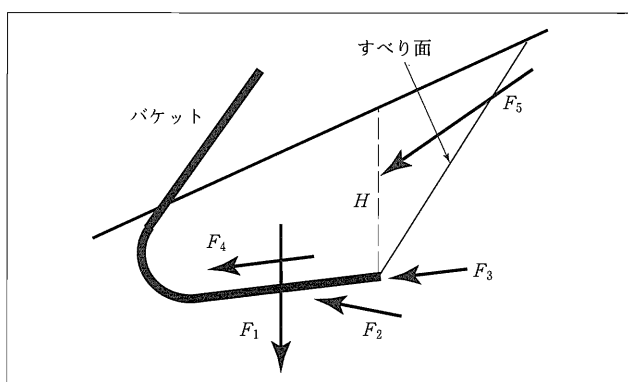


図-2 バケットにかかる反力の種類

$F_1$ はバケット内の堆積物重量、 $F_2$ はバケット底面がバケットより下側の土砂から受ける反力、 $F_3$ はバケット前縁の切刃が土砂を切開きながら前進するための貫入抵抗力、 $F_4$ はバケットと土砂の間に働く摩擦力、 $F_5$ はバケット上方にある堆積物から受ける力となる。なお、 $H$ はバケット先端とその真上の斜面上の点との距離である。

$F_1$ は、もしバケット先端が水平に挿入されたとすれば、 $H$ の2次関数となる。 $F_2$ は、バケット先端部が水平方向に挿入されている間は、バケット上部から底板にかかる垂直抗力と釣合った値となる。そして、バケットが土砂をすくい取るために上方に動き出した後には、バケット底面が土砂から離れるためゼロとなる。つまり、 $F_2$ はバケット運動を決定するための要因としては考える必要がない。 $F_3$ は、深さ $H$ の土中の圧力に比例すると考えることができれば $H$ の1次式となる。 $F_4$ は、バケット底板にかかる垂直抗力に比例する。この垂直抗力は $H$ の2次式となることから、 $F_4$ も $H$ の2次式となる。 $F_5$ は斜面上方の土砂から受ける反力で、通常一意的に定めることができない。ただし、ある二つの条件の下では算出することができ、それぞれ主働土圧、受働土圧と呼ばれる。

主働土圧とは、斜面をある面(これを擁壁という)で支えるとき、斜面が崩れ落ちないために面に必要な最小の圧力のことである。一方、受働土圧とは、擁壁で斜面の土砂を斜面上方に押上げるために擁壁に必要な最小の圧力のことである。土砂をバケットですくい取るには、バケットを斜面上方に押上げる必要があるため、本モデルでは $F_5$ として受働土圧を考える。

主働土圧、受働土圧共に、その大きさは擁壁の高さの2次関数として表すことができる。ただし、受働土圧の2次の係数は主働土圧の係数と比較して遥かに大きな値をとる。

### (2) すくい取りのフェーズと反力モデル

さて、以上に五つの成分のそれぞれを定式化したがる、この五つがいつも反力としてバケットにかかるわけではない。

図-3はバケットが土砂に挿入されてからすくい取りを行うまでの通常の動作手順を示したものである。手順は三つのフェーズに分けることができる。

(a)はバケットを水平に土砂に挿入するフェーズ、(b)はバケットにチルトを掛け、できるだけ土砂をすくい取るフェーズ、

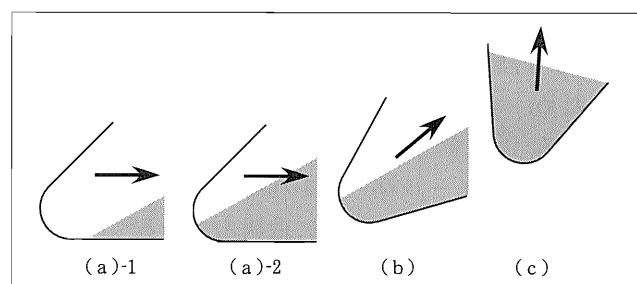


図-3 すくい取りにおける三つのフェーズ

(c) はバケツに入った土砂を持上げ、土砂から抜取るフェーズ、である。

これら三つのフェーズでは、それぞれ考慮しなくてはならない反力成分が異なってくる。

(a)-1では、土砂重量  $F_1$  や  $F_5$  の垂直成分がバケツ底面からの反力  $F_2$  と釣合うため、バケツを挿入する際には計測されず、貫入抵抗力  $F_3$  と摩擦力  $F_4$  のみが反力となる。

バケツの根元部分に土砂が届いた後の (a)-2 では、バケツを前進させるには土砂を挿入方向に押し上げる必要がある。このため、 $F_5$  は受動土圧となり、更に反力としてバケツに直接掛かってくる。 $F_5$  は他の成分と比べて非常に大きいため、土砂がバケツの根元に達すると間もなくバケツは前進ができなくなる。

この状態でバケツを後方に傾けると（チルトをかける）、擁壁が斜面下方向に倒されるので、受動土圧が解消され、土砂がバケツ内に崩れ込んでくる。よって反力が一時的に小さくなり、再び前進が可能となる。できるだけたくさんの土砂をすくい取ることを目指すので、再度バケツを前進させ、再び受動土圧が大きくなるとチルトをかける。これを繰り返すことで、バケツは斜め上方に移動する。このときに生成されるバケツ軌道は、動作可能な範囲で最も水平移動の多い軌道となるので、最短で最大の土砂をすくい取ることのできる軌道とみなすことができる。

### 3. 土砂モデル検証実験

2章2節で示したフェーズにおいて考察した反力が正しいかどうかを検証するため、基礎実験を行った。検証実験の装置の概要図を図-4に示す。

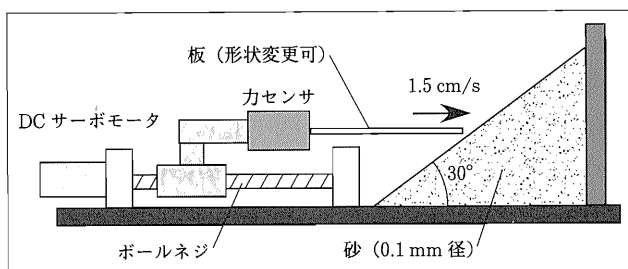


図-4 挿入実験装置

バケツ先端を模擬した板を 1.5 cm/s で砂の斜面に水平に挿入し、その反力を力センサで測定した。土砂には粒子径平均が 0.1 mm の砂を用いた。斜面は約 30 度である。

### (1) 受動土圧の特性の検証

まず、受動土圧が挿入距離の 2 乗で増加するかどうかを検証するため、バケツ先端にあたる板を T 字板として、実験を行った。この実験では、反力として受動土圧  $F_5$  のみが検出されるはずである。結果を図-5に示す。

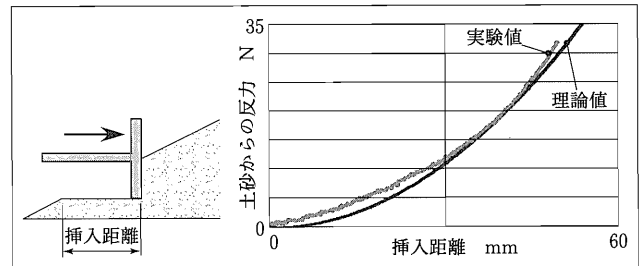


図-5 T字板による反力の測定

実験結果を見ると、実験値は理論値である 2 次曲線ときわめてよく似ており、 $F_5$  が挿入距離の 2 乗に比例することが確認できる。

### (2) 貫入抵抗と摩擦力の検証

次に、平板を図-5と同じ土砂に挿入し、反力を計測した。この実験では、 $F_3$  と  $F_4$  に当る貫入抵抗と摩擦力が計測される。この結果を図-6に示す。

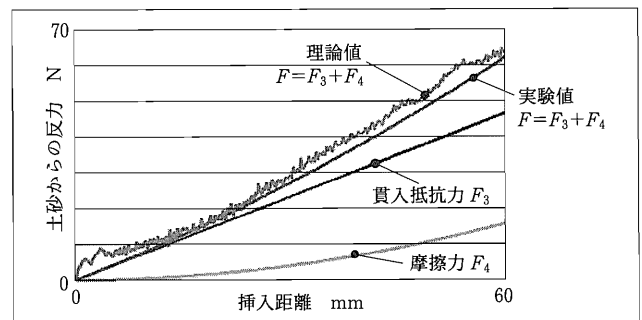


図-6 平板挿入実験 (板厚 3 mm)

実験結果を見ると、実験値  $F$  は 1 次と 2 次の曲線の和 ( $=F_3+F_4$ ) として表され、理論値とほぼ一致している。次に 1 次の項として計測された成分が確かに

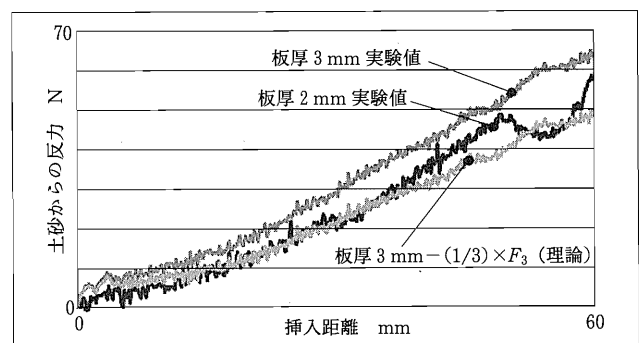


図-7 厚さ 3 mm と 2 mm の平板挿入実験結果の比較

貫入抵抗であるか否かを確認するため、板圧を変えて挿入実験を行った(図-7)。

グラフの水色(図中最下部)は、板圧3mmの実験結果の1次の項のみ値を2/3にしたもので、深緑(図中、真中)は板圧2mmでの実験結果である。両者はほぼ一致しており、1次の項が貫入抵抗を、2次の項が摩擦を表す項であることが確認された。

### (3) バケットの進行と反力の支配成分の検証

最後に、バケットに土砂が挿入されていき、土砂がバケット根元まで届いたときに、受動土圧である $F_s$ が掛かり始めるか否かを確認した。実験の様子を図-8に示す。バケットにはL字の板を用いた。

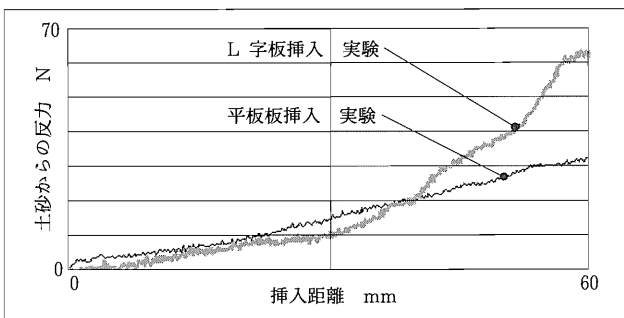


図-8 L字板挿入実験

挿入が始まった後、初めは平板挿入と同じ反力を示すが、土砂がL字の根元に到達し、L字の垂直部分にぶつかってしばらくすると、反力が急激に大きくなっていくことがわかる。土砂が根元に到達した後にL字板を押込もうとすると、斜面を崩していかないと進むことができない。斜面を上方に押し上げるには、受動土圧が必要となることから、この点を境に受動土圧がかり出し、反力が急激に大きくなったものと考えられる。

実際のホイールローダのバケットは根元部分が円弧を描いているが、円弧を描いたバケットを用いた基礎実験においても、同様にある点を境に反力が急激に大きくなるのが観察されている。

## 4. すくい取り軌道の生成アルゴリズム

### (1) すくい取り軌道設計の方針

本研究では、1回のすくい取りで、できるだけ多量の土砂をすくい取ることを目的とする。それを満たすためには、バケットを進行方向にできるだけ進め、バケットが満杯になった所で持上げればよい。ところが、バケットが満杯になった状態では反力が大きくなりすぎバケットを持上げることが不可能となったり、バケッ

トを満杯にする以前に反力の大きさがバケットの最大出力を超えてしまう事態が考えられる。このような状況に対処するために、バケットが発生することのできる最大の操作力と土砂からの反力の関係を調べ、バケットを動かす方向をリアルタイムに決定していく方法を提案する。

### (2) バケットの操作力

ホイールローダのバケット-アーム機構は油圧シリンダ駆動のアーム部と油圧シリンダ駆動のバケットリンク部から構成されている。これらはリンクとフリージョイントにより閉リンクを構成している。実験機のバケット駆動部も平行リンク機構となっており、根元には駆動2関節が設置されている。ただし、アクチュエータにはDCサーボモータを利用している。

図-9は、バケットの2次元平面における運動学モデルである。車輪移動部は直動アクチュエータとしてモデル化している。 $r$ は車輪半径である。このモデルにおいて、 $\theta_1$ を回転させるとバケットは並進移動のみを行い、 $\theta_2$ を回転させるとバケット根元の第4関節を中心とした回転(チルト)のみが発生する。

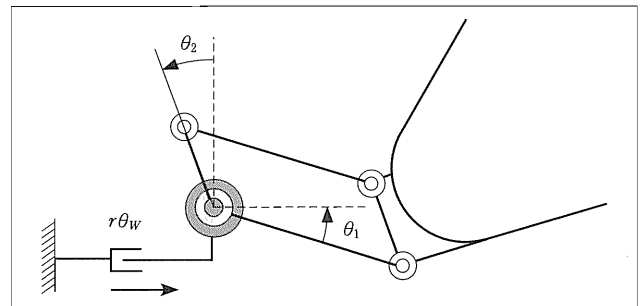


図-9 実験機のバケット-アーム駆動モデル

次に、土砂からの反力とバケットが発生できる力を、バケット進行方向であるバケット先端座標系の第1象限内において求め、その大小関係を比較することにより、バケット進行方向を決定する。まずはモータの最大発生トルクによって、バケット先端部で発生できる力の範囲を求める。これを図示したものが図-10である。図の矢印の長さが、その方向に発生することの

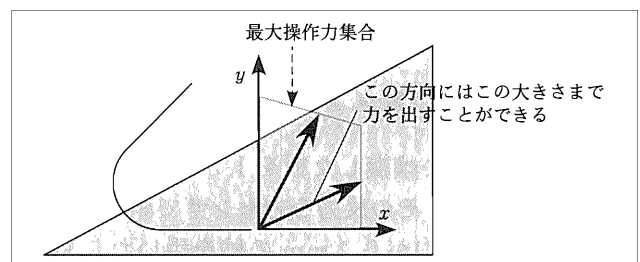


図-10 操作力集合

できる最大の力の大きさを表している。なお、今回のバケット構造においては、発生可能力の範囲はバケット先端での発生トルクに依存せずに定まる。

### (3) 最大反力包絡線

次に、バケットをある方向に動かそうとするときに、それに応じて土砂からバケット先端部にかかる反力を求める。

バケットをある方向に動かそうとする場合、バケットの動作に回転を考慮するかどうかで、進行方向が同じでも反力の大きさが異なる。ただし、本研究では、バケットをできるだけ水平方向に動かそうとし、反力がバケット発生力を上回った場合にバケットを傾ける、という方法を採用する。よって、バケットを水平方向に動かすことを前提に反力を考える。

図-2で示した反力成分を基に、バケットが進行しようとした時にバケット先端に発生する土砂からの反力を図-10と同様の方法で示したものが図-11である。

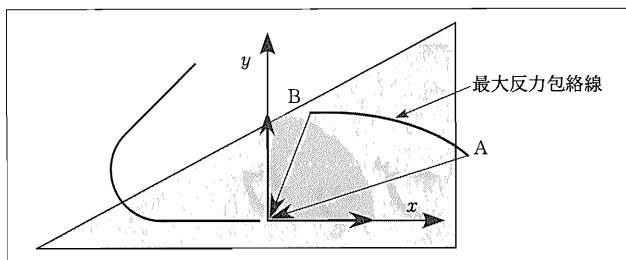


図-11 最大反力包絡線

この曲線は、バケットを $x$ 軸に対して $0\sim 90^\circ$ 方向に動かそうとした時に土砂からバケットにかかる反力の集合であり、本報文では最大反力包絡線と呼ぶ。

バケットを水平に動かそうとすると、反力は図中のA点方向からかかってくる。また真上に動かそうとするとB点方向からかかる。このようにほとんどの方向において、反力はバケット進行方向とは異なる方向から加わって来ることがわかる。これは

- バケット内土砂を持上げなくてはならないこと、
  - 進行方向上部土砂からの反力 $F_0$ に打勝ちながらバケットを動かさなくてはならないこと、
- などに起因する。

### (4) すくい取りアルゴリズム

最大包絡線と操作力集合の関係を利用し、すくい取りアルゴリズムを提案する。

図-12において、バケットを $x$ 軸方向に動かそうとしたとき、バケットは土砂からA点に対応した反

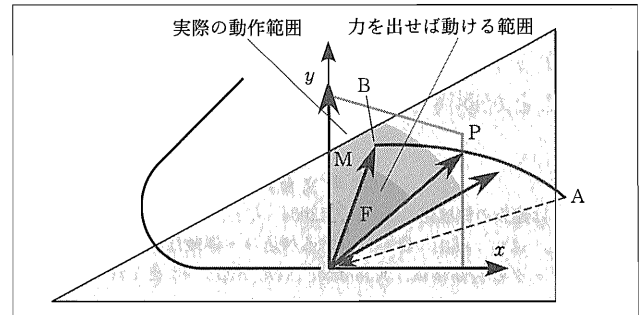


図-12 バケットの発生力と進行方向の関係

力を受ける。この反力は、ホイールローダの操作力より大きいため、実際にはこの方向にバケットを動かすことができない。バケットを実際に動かせるのは、土砂からの反力よりホイールローダの操作力が大きい方向である。つまり、バケット先端部を移動できる点は、点Pよりも上方に向けて力を掛けた場合であり、範囲 $F$ となる。ただし $F$ は、バケット先端部が動く範囲ではない。これは、モータによりバケット先端部に変位を発生させた際に、先端で発生する変位の方向と、その変位に対応して発生する反力の方向が異なるからである。よって、範囲 $F$ の方向に力をかけると、実際にバケットが動く範囲はそれとは異なる範囲 $M$ となる。

今回のすくい取りでは、1回毎のすくい取り量をできるだけ大きくすることを目標とする。よって、バケットはより多くの土砂をすくうことのできる方向、つまり可能な限り $x$ 軸正方向に移動させることとする。つまり、図-12の点Pの方向に力を掛ければよい。これにより実現される動作を連続的に行うことで、最適なすくい取りが実現できるものと思われる。

## 5. 結論及び今後の課題

本報文では、まずホイールローダのバケットを土砂に挿入した時のバケットにかかる反力から、土砂モデルを提案し、土砂の反力成分の数式化を行った。また、考案した反力が正しいかどうかを示すため、数種類のバケット先端を模擬した板を先端に取付け、それぞれ平行挿入実験を行い、導出した式の妥当性の検証を行った。

土砂から受ける反力の大きさとバケットで発生することができる力の大きさを比較し、できるだけ多くの土砂をすくい取ることのできる軌道を生成するためのすくい取りアルゴリズムを提案した。

今後、図-1で示したミニチュアホイールローダを用いたすくい取り実験を行い、提案したアルゴリズム

で得られる最適軌道についての考察を行う。これにより、バケット目標すくい軌道の簡単な生成が可能となることが期待される。

JCMMA

#### 《参考文献》

- 1) 例えば建設の機械化, No. 647, 2004, など.
- 2) 大島, ほか: 鉱山・砕石における積込み・運搬作業の自動化/ホイールローダの自動積載, *Komatsu Tech. Rep.*, 43 巻 1 号, pp. 27-39, 1997.
- 3) 皿田滋, ほか: ホイールローダによる土砂搬送作業の自律化の試み, 第 10 回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 173-178, 2004.
- 4) 皿田滋: ホイールローダによる鉱石堆積物のすくい取り作業計画に関する研究; 資源環境技術総合研究所報告書, No. 21, 1997.
- 5) 張, ほか: バケットマニピュレーションの軌道生成と制御—ホイールローダの知能化に関する研究 (第 2 報)—, *資源と素材*, Vol. 117, pp. 947-954, 2001.

- 6) A. Hemami: Force analysis in the scooping/loading operation of an LHD Loader, *Proc. Mine Mechanization and Automation*, Almgren, Kumar & Vaganas (eds.), pp. 415-424, 1993.
- 7) H. Takahashi *et al.*: Analysis on the Resistive Forces Acting on the Bucket of a Load-Haul-Dump Machine and a Wheel Loader in the Scooping Task, *Advanced Robotics*, Vol. 13, No. 2, pp. 97-114, 1999.
- 8) 河上房義: 土質力学, 森北出版, 1956.

#### 【筆者紹介】

大隅 久 (おおすみ ひさし)  
中央大学理工学部  
精密機械工学科  
教授  
工博



## 建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」(環境庁告示)が平成 8 年度に改正され,平成 11 年 6 月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については,その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等,騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに,建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく,建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と,円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

#### ■掲載内容:

- 総論 (建設工事と公害,現行法令,調査・予測と対策の基本,現地調査)
- 各論 (土木,コンクリート工,シールド・推進工,運搬工,塗装工,地盤処理工,岩石掘削工,鋼構造物工,仮設工,基礎工,構造物とりこわし工,定置機械(空気圧縮機,動発電機),土留工,トンネル工)
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程,建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法,建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説,環境騒音の表示・測定方法(JIS Z 8731),振動レベル測定方法(JIS Z 8735)

■体 裁: B5 判, 340 頁, 表紙上製

■定 価: 会 員 5,880 円 (本体 5,600 円) 送料 600 円

非会員 6,300 円 (本体 6,000 円) 送料 600 円

・「会員」本協会の本部,支部全員及び官公庁,学校等公的機関

## 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