

パワーショベルによる斜面掘削作業時における抵抗力解析

Analysis on the Resistive Forces acting on the Bucket of Power Shovel in the Excavating Task of Piled Fragment Rocks

高橋 弘^{*}・齋藤 泰^{**}

Hiroshi TAKAHASHI, and Yutaka SAITO

^{*}正会員 工博 東北大学大学院教授 環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 20)^{**}東北大学大学院工学研究科地球工学専攻博士前期課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)

In order to carry out the automatic excavation of piled fragment rocks and soils by using the power shovel, it is necessary to estimate the theoretical resistive forces acting on the bucket of the power shovel. In this study, the model of resistive forces acting on the bucket was theoretically developed. Furthermore, the resistive forces acting on the bucket were measured and compared with the calculated ones. It was confirmed that the model of resistive forces proposed in this study was almost reasonable. By using the theoretical model of the resistive forces, several calculations were carried out. It was found that the resistive forces can be estimated by using the medium diameter of particles even if the particles size distribution is not uniform.

Key Words: resistive force, power shovel, automatic excavation

1. はじめに

資源開発や土木・建設業等の分野、あるいは災害復旧現場における各種作業は、ほとんど全てが機械化されている。しかしながら、これらの分野における作業環境は、一般に作業にとって過酷であり、危険を伴うことが多いことから、若年の作業者が減少しており、労働力不足が問題となりつつある。また、資源開発においては、今後、未利用の資源・エネルギーの確保を目的として作業現場が大深度あるいは高温・多湿の一種の極限環境下¹⁾へと推移していくことが予想される。そのため、作業者の安全確保を目的として、作業機械のロボット化・無人化に大きな期待が寄せられている²⁾³⁾。

ところで、資源開発現場や土木・建設現場等で広く用いられている掘削・積み込み機械としてホイールローダやパワーショベルがある。これらの機械による掘削作業を自動化する場合、①破碎堆積物の認識、②破碎堆積物の位置計測、③破碎堆積物の形状および堆積量の推定、④掘削作業計画の構築、⑤掘削作業の実行および破碎堆積物内部の状況判断といった一連の作業を自動化する必要がある。①～④の作業に関しては視覚情報が有用であると言われており、画像処理を用いた破碎堆積物の認識⁴⁾⁵⁾や作業計画の構築⁶⁾などが既に検討されている。

一方、実際に掘削機械により破碎堆積物の自動掘削を行う場合、破碎堆積物内部の状況判断は、作業の安全性を確保する上で非常に重要な要素であり、これを的確に行うためには、力覚機能の有効利用が必要不可欠である。つまり機械は、「作業が順調に進んでいるかどうか」、「バケットには土砂・鉱石が十分入っているか」、「バケットが大塊等に衝突し、危険な状態にないか」などを自動的に判断する必要がある。このためには作業が順調に進んでいる時の理論的掘削抵抗力を予め把握しておき、さらに機械に力覚センサを搭載して掘削作業時にバケットに作用する抵抗力を常に計測し、両者を比較することにより作業状況を判断することが必要である。

さて、上述したように、土砂・鉱石等の掘削および積み込み作業に使用される機械は、ほとんどの場合、ホイールローダかパワーショベルのどちらかである。これまでに、ホイールローダのバケットに作用する抵抗力について検討した例⁷⁾⁸⁾はいくつか見受けられるが、パワーショベルによる破碎堆積物掘削作業の自動化に関する研究はあまり行われていないことから、前報⁹⁾では、まず初めに破碎堆積物の水平面を掘削する際の掘削抵抗力について検討した。しかし、パワーショベルを用いた掘削作業では、ショベルは堆積物の上に位置し、斜面掘削を行うのが一般的である。

そこで本研究では、パワーショベルによる斜面掘削作業時にバケットに作用する抵抗力を定式化することにより、掘削作業の自動化に資することを目的とする。

2. 掘削抵抗力に関する理論的考察

2.1 破碎堆積物変形過程のモデリング

本節では、斜面掘削作業時のバケットに作用する抵抗力を導出するために、破碎堆積物内部の変形過程およびバケットとの位置関係のモデリングを試みる。また、後で行う計算を簡単にするために、以下に示す仮定に基づいてモデリングを行う。

- ① 作業現場における熟練オペレータの作業の観察により、バケットの軌道は図-1のような円軌道とする。

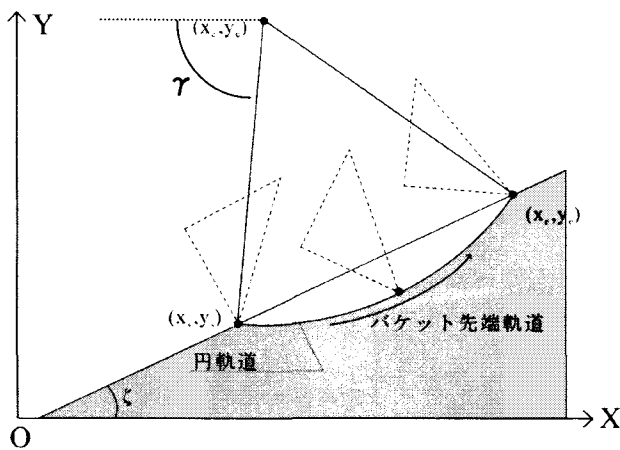


図-1 バケットの移動軌跡

- ② 実際の現象は3次元であるが、パワーショベルによる掘削作業時のバケットの運動は、一般に2次元で記述されることが多いことから、平面の奥行き方向については一様な状態にあるものとし、バケットの運動を横から見る形で、2次元平面においてモデリングを行い、抵抗力を計算する際には、バケット幅を考慮に入れる。
- ③ バケットの移動に伴って生じる破断面の形状は、実際には曲面となることも考えられるが、これらを全て平面で近似して表すことにする。
- ④ 破碎堆積物は、ほぼ同じ大きさの碎石の集合とし、それらの間には粘着力はないものとする。
- ⑤ バケットの厚さは、破碎堆積物の大きさに比べて無視できるものとする。
- ⑥ バケットの移動に伴う破碎堆積物の圧縮はないものとする。
- ⑦ 「バケットの面積」と「バケットの移動によってすくい取られた面積」が同じになるようにバケットの移動軌跡を生成する。

- ⑧ 「バケットの移動によってすくい取られた面積」が「バケットの移動によって隆起した面積」となるように破碎堆積物の変形過程をモデル化する。

バケットと破碎堆積物との関係を図-2 および図-3のようにモデリングする。バケットの位置はバケット先端の点 (x_t, y_t) で表し、バケットの姿勢は図の角度 α で定義する。

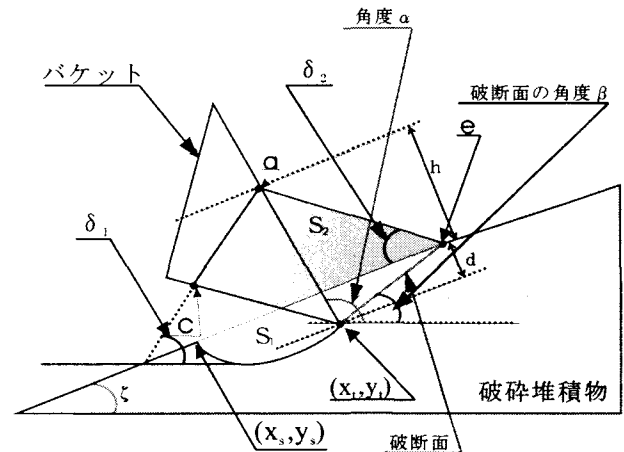


図-2 破碎堆積物の変形過程のモデル化(掘削前半)

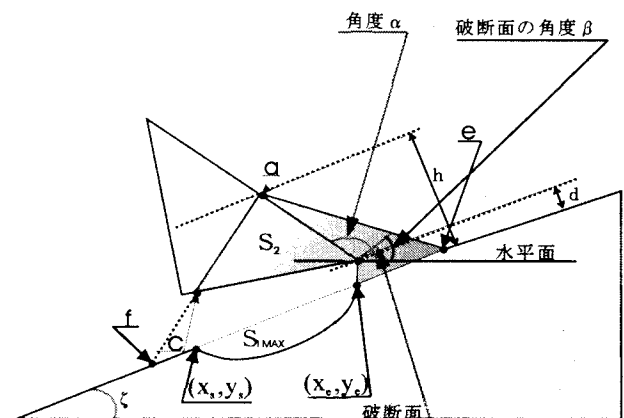


図-3 破碎堆積物の変形過程のモデル化(掘削後半)

破碎堆積物内部は掘削開始とともに、すくい取った破碎堆積物とバケット底面との間に受働土圧が発生することになる。また、破碎堆積物は破断面によって「バケットの移動に伴って移動、変形する部分」と「バケットの移動にかかわらず、破碎堆積物が移動しない部分」の2つに分けることができる。仮定した円軌道は、 $x=x_s$ でバケットが破碎堆積物内に貫入し、 $x=x_e$ でバケットが破碎堆積物から出るとする。なお、バケットの移動に伴い、破碎堆積物が盛り上がることになるため、⑧で述べたように、「バケットの移動により、元の破碎堆積物からすくい取られた部分の面積」と「盛り上がった破碎堆積物の面積」

が等しくなるように隆起した面積を決定する。なお、面積の決定は以下に行った。すなわち、後述する模型実験における粒子挙動の観察結果を基に、バケット側面刃先上に頂点のある三角形とし、底辺の先端は「破断面が地表にでる点（図中の e 点）」および、「バケット底面上の点（図中の c 点）」にあると仮定して盛り上がった破碎堆積物の高さを決定した。なお、図中の角度 δ_1 は破碎堆積物の安息角とし、 δ_2 は破断面が地表に出る点（図中の e 点）と盛り上がった破碎堆積物の頂点（図中の a 点）および破碎堆積物表面とで構成される角度である。

2.2 掘削抵抗力モデルの導出

ホイールローダやロードホールダンプのバケットに作用する抵抗力に関する従来の研究^{7)~10)}を参考にすると、抵抗力を構成する要素として、以下に示すような 4 つの力が考えられる。

F_1 : 受働土圧による抵抗力（バケット底面と破碎堆積物との摩擦抵抗力を含む）

F_2 : バケット側面と破碎堆積物との摩擦抵抗力

F_3 : 切削抵抗力

F_4 : すくい取られた破碎堆積物に働く重力

後述するように、受働土圧を求める際に、すくい取られた破碎堆積物に働く重力を加味しているため、 F_1 の計算に自動的に F_4 も含まれる。従って、 F_4 を独立に計算する必要はない。 F_3 は、バケット底面および側面の刃先に作用する抵抗力であるが、これは、例えば平板を土中に貫入させる時のような受働土圧が作用しない状態でも平板の先端に作用する抵抗力であり、 F_1 と分離して個別に計算する必要がある。

本研究では、上記のバケットに作用する抵抗力を分解し、それぞれ水平方向成分 F_x と鉛直方向成分 F_y として次式のように算出する。

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} \quad (1)$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} \quad (2)$$

上述した F_4 は、(2)式中の F_{1y} に含まれている。

なお、掘削抵抗力の各要素を求めるときには、後述する実験との比較を容易にするためおよび計算過程を簡易化するために、まずはバケット底面中心に対する垂直成分 F_b およびバケット背面に対する垂直成分 F_s を求めてから、バケット姿勢を考慮して次式により F_x と F_y を求めることにする。

$$F_x = F_s \cos(\pi - \omega - \alpha) + F_b \sin(\pi - \omega - \alpha) \quad (3)$$

$$F_y = -F_s \sin(\pi - \omega - \alpha) + F_b \cos(\pi - \omega - \alpha) \quad (4)$$

ただし、 α はバケット姿勢角、 ω は図-4 に示すように、バケット側面の先端の角度である。以下に各抵

抗力の詳細を述べるが、本モデルは基本的には前報で示したモデルを斜面掘削にまで適用できるように拡張したものである。従って、大半の記述は前報と同様であるが、ここでは理解を容易にするために割愛せず、斜面掘削のモデルの詳細を述べることにする。

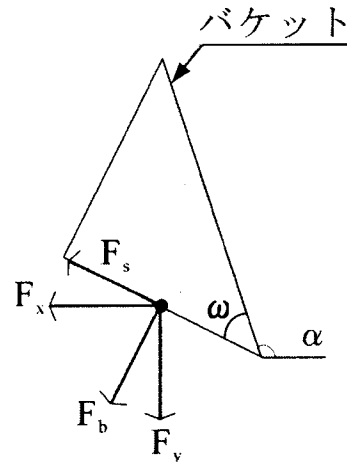


図-4 掘削抵抗力算出の概念図

1) 受働土圧による抵抗力

受働土圧による抵抗力 F_1 については、土質力学の分野において、一般に構造物の設計等に用いられているクーロンの土圧理論を適用する。土圧は構造物が静止している状態における土圧（静止土圧）、構造物が土から離れる方向に変位し、土が緩む状態における土圧（主働土圧）、構造物が土の方に向かって変位し、土が密になろうとする状態における土圧（受働土圧）の 3 つに分類され、それぞれについて理論式が与えられている¹³⁾。

本研究では、クーロンの土圧理論を適用する。クーロンの土圧理論とは、擁壁と擁壁の下端から土中に生じた破断面との間に挟まれる楔形の土部分が擁壁の変位によって上方に抜け上がろうとする時に作用する力のことで、楔形の部分には、土部分の自重 W_p 、擁壁が土に及ぼす力 F_p 、破断面を介して楔形の土部分と接する下側の土部分による抵抗力 R_p の 3 つの力が作用している。破断面の角度 β を任意に与えることによって、 W_p の大きさ、 F_p と R_p の方向が決定され、3 力の水平方向および鉛直方向の釣り合いを解くことにより、それぞれの力が求められる。ここで、破断面の角度 β は F_p が最小値となるように決定される。例えば、角度 β の値を種々に変化させて F_p を計算し、 F_p が最小値を示す角度 β を求めればよい。ただし、 F_p の傾斜角 ψ はバケットと破碎堆積物との摩擦角であり、バケットと破碎堆積物との摩擦係数 μ との関係は次式で表される。

$$\mu = \tan \psi \quad (5)$$

また、 R_p の傾斜角 ϕ は破碎堆積物の内部摩擦角(粒子間摩擦角)である。

モデルに上述したクーロンの土圧理論を適用すると、バケットの移動に伴い、バケットに作用する力は図-5 に示すようになる。水平方向および鉛直方向について、これらの力の釣り合いを解くことにより、次式が求められる。

$$F_p = -\frac{W_p \sin(\beta + \phi)}{\sin(\beta + \phi + \psi - \omega - \alpha)} \quad (6)$$

$$W_p = \rho(1 - \varepsilon) S_p b \quad (7)$$

ここに、 β は破断面の位置を表す角度、 ρ は破碎堆積物の密度、 ε は破碎堆積物の空隙率、 S_p は破断面とバケット底面と囲まれた部分の面積、 b はバケットの幅である。

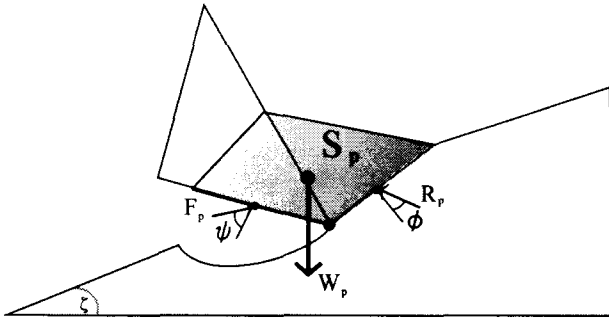


図-5 受働土圧時に作用する力

次に、次章の実験結果と比較検討するために、 F_p のバケット背面に対する鉛直方向成分およびバケット底面に対する鉛直方向成分を次式で与える。

$$F_{ps} = F_p \sin \psi \quad (8)$$

$$F_{pb} = F_p \cos \psi \quad (9)$$

以上より、受働土圧による抵抗力の水平方向成分 F_{1x} および鉛直方向成分 F_{1y} は次式で表される。

$$F_{1x} = F_{ps} \cos(\pi - \omega - \alpha) + F_{pb} \sin(\pi - \omega - \alpha) \quad (10)$$

$$F_{1y} = -F_{ps} \sin(\pi - \omega - \alpha) + F_{pb} \cos(\pi - \omega - \alpha) \quad (11)$$

2) 摩擦抵抗力

バケット側面と破碎堆積物との摩擦による抵抗力については、破碎堆積物の自重によってバケット側面が受ける静圧、バケットが圧力を受けている面積およびバケットと破碎堆積物との摩擦係数によって決まり、破碎堆積物を構成している粒子の密度および空隙率を用いて求められる。

図-6 および図-7 はバケット内側および外側の摩擦抵抗力に関する模式図である。図より、バケット内側の摩擦抵抗力 F_{fi} およびバケット外側の摩擦抵抗力 F_{fo} は、次式のように表される。

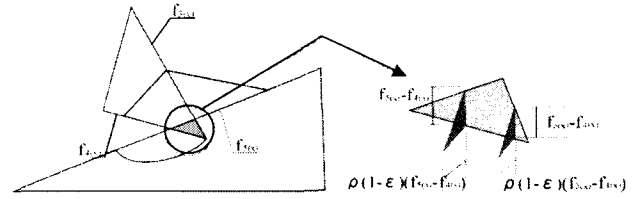


図-6 摩擦抵抗力の模式図

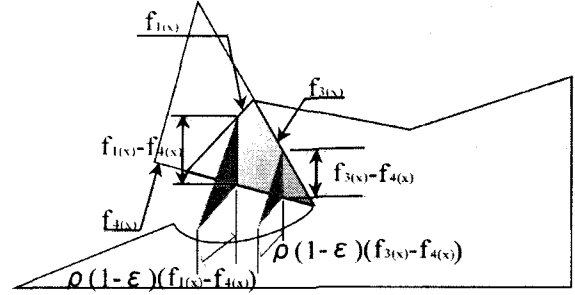


図-7 摩擦抵抗力の模式図

$$F_{fi} = 2 \left[\int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \{f_{3(x)} - f_{4(x)}\}^2 dx + \int_{x_{i+1}}^{x_{i+2}} \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \{f_{5(x)} - f_{4(x)}\}^2 dx \right] \quad (12)$$

$$F_{fo} = 2 \left[\int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \{f_{3(x)} - f_{4(x)}\}^2 dx + \int_{x_{i+1}}^{x_{i+2}} \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \{f_{1(x)} - f_{4(x)}\}^2 dx \right] \quad (13)$$

(12)および(13)式中の $f_i(x)(i=1 \sim 5)$ は、図-6 および図-7 において寸法補助線で示される先の直線の関数を示す。1 2 0 F_{fi} および F_{fo} は、バケットの移動軌跡の接線方向に作用するので、 F_{fi} および F_{fo} のバケット背面に対する垂直方向成分およびバケット底面に対する垂直方向成分は次式で与えられる。ただし、 γ は図-1 に示す角度である。

$$F_{fis} = F_{fi} \sin(\alpha + \omega - \gamma)$$

$$F_{fib} = F_{fi} \cos(\alpha + \omega - \gamma)$$

$$F_{fos} = F_{fo} \sin(\alpha + \omega - \gamma)$$

$$F_{fob} = F_{fo} \cos(\alpha + \omega - \gamma) \quad (14)$$

それぞれを足し合わせることで、摩擦抵抗力の水平方向成分 F_{2x} および鉛直方向成分 F_{2y} は次式で表される。

$$F_{2x} = F_{2s} \cos(\pi - \omega - \alpha) + F_{2b} \sin(\pi - \omega - \alpha) \quad (15)$$

$$F_{2y} = -F_{2s} \sin(\pi - \omega - \alpha) + F_{2b} \cos(\pi - \omega - \alpha) \quad (16)$$

3) 切削抵抗力

本研究における切削抵抗力とは、掘削作業時にバケットを対象物である破碎堆積物の中へ突き進めていく時に刃先部分に作用する抵抗力を示す。バケットの移動による粒子の運動は複雑であり、現在の段階では、刃先の形状や作業対象物の種類等、それぞれの場合ごとに実験的に求める必要があるとされている。この切削抵抗力に関与する因子としては、破碎堆積物を構成する粒子の粒子径、破碎堆積物の内部摩擦角、バケット刃先部分の圧力状態等が考えられる。ここでは、これらの因子を考慮して、掘削作業時におけるバケット先端の刃先部分の挙動を推測して単純なモデリングを行い、切削抵抗力の導出を試みる。なお、前述したように、本研究においては、バケットの厚さについては対象物である破碎堆積物の大きさに比べて小さいものと考え、考慮には入れていない。

図-8 にバケット底面先端部分における粒子挙動のモデルを示す。破碎堆積物を構成する粒子を円筒とみなし、その一部分をバケットの刃先で突くことによって、突かれた粒子のみが回転しながら上方に移動し、突かれた粒子に隣接する粒子は回転せずに押されるという挙動を考える。

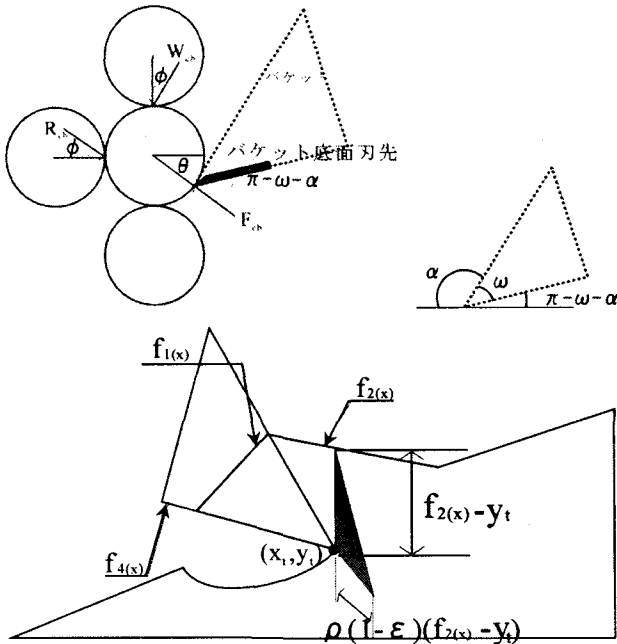


図-8 バケット底面先端部分における粒子挙動

この時粒子に作用する力は、図-8 に示すようにバケット刃先部分が粒子を突く力 F_{cb} 、突かれた粒子の反対側に生じる反力と粒子間の摩擦力の合力 R_{cb} および突かれた粒子の上方からの力と粒子間の摩擦力の合力 W_{cb} の 3 力であると考えることができる。

水平方向および鉛直方向について、この 3 力のつりあいを解くことにより、それぞれの力が次式のように求められる。

$$W_{cb} = \frac{\rho(1-\varepsilon)bd_g \{f_{1(x)} - y_t\}}{\cos \phi} \quad (17)$$

$$F_{cb} = \frac{W_{cb}}{\sin(\theta - \phi)} \quad (18)$$

ここに、 d_g は粒子径である。 F_{cb} の接線方向成分が切削抵抗になるので、バケット底面刃先部分に作用する切削抵抗 F_{bs} は次式のようになる。

$$F_{bs} = F_{cb} \cos(\theta - \gamma + \frac{\pi}{2}) \quad (19)$$

図-8 および(18)式中の θ はバケットの先端が粒子を突く点と粒子の中心を結ぶ線が水平線となす角度であり、未知のパラメータである。これについては、実験的に考察する。

切削抵抗力は、バケット底面の刃先部分だけではなく、バケット側面の刃先部分にも作用している。バケット側面先端部分における粒子の挙動もバケット底面先端部分と同様と考えられる。この時に粒子に作用する力は、図-9 に示すように F_{cs} 、 R_{cs} および W_{cs} の 3 力であり、水平方向および鉛直方向について、3 力のつりあいを解くことにより、それぞれの力が次式のように求められる。

$$W_{cs} = \frac{\int_{a_x}^{x_t} \rho(1-\varepsilon)d_g \{f_{5(x)} - f_{3(x)}\}}{\cos \phi} \quad (20)$$

$$F_{cs} = \frac{2W_{cs}}{\sin(\theta - \phi)} \quad (21)$$

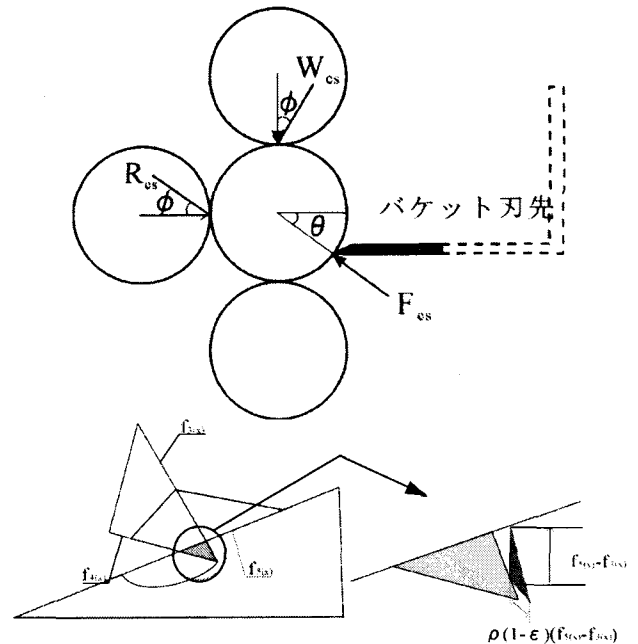


図-9 バケット底面先端部分における粒子挙動

F_{cs} の余弦成分の接線方向成分が切削抵抗になるので、バケット側面刃先部分に作用する切削抵抗 F_{ss} は次式ようになる。

$$F_{ss} = F_{cs} \cos \theta \cos(\gamma - \frac{\pi}{2}) \quad (22)$$

次章の実験結果と比較検討するために、 F_{bs} および F_{ss} のバケット背面に対する鉛直方向成分およびバケット底面に対する鉛直方向成分が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_{bss} &= F_{bs} \sin(\alpha + \omega - \gamma) \\ F_{bsb} &= F_{bs} \cos(\alpha + \omega - \gamma) \\ F_{sss} &= F_{ss} \sin(\alpha + \omega - \gamma) \\ F_{ssb} &= F_{ss} \cos(\alpha + \omega - \gamma) \end{aligned} \quad (22)$$

それぞれを足し合わせることで、切削抵抗力の水平方向成分 F_{3x} および鉛直方向成分 F_{3y} が次式で表される。

$$F_{3x} = F_{3s} \cos(\pi - \omega - \alpha) + F_{3b} \sin(\pi - \omega - \alpha) \quad (23)$$

$$F_{3y} = -F_{3s} \sin(\pi - \omega - \alpha) + F_{3b} \cos(\pi - \omega - \alpha) \quad (24)$$

以上の諸式により求められた各値を(1)および(2)式に代入することにより、バケットに作用する抵抗力が計算される。

3. 掘削抵抗力に関する実験的考察

図-10 に実験装置の概略を示す。4自由度のマニピュレータを用い、その先端に力覚センサおよびバケット模型を取り付けた。バケットはアルミ製で、スケールは実機の約 1/10 である。抵抗力測定に用いる力覚センサとしては、市販の 6 軸フォース・トルクセンサを用い、図に示す位置に取り付けた。このセンサからの信号をデジタル入出力ボードを通してパーソナルコンピュータに取り込み、掘削抵抗力を計測した。なお、このフォーストルクセンサは内蔵されているひずみゲージからの信号を較正することにより、センサの取り付け位置に作用する力およびモーメントを測定できるようになっている。

実験では、木製の容器の中に、後述する 2 種類の碎石試料を所定の傾斜角になるように敷き詰め、破碎堆積物を形成した。本実験では、破碎堆積物の傾斜角を 2 種類(20[deg.], 40[deg.])に変化させて実験を行った。実験では、パーソナルコンピュータによりマニピュレータを作動させ、バケット先端を円軌道で移動させた。

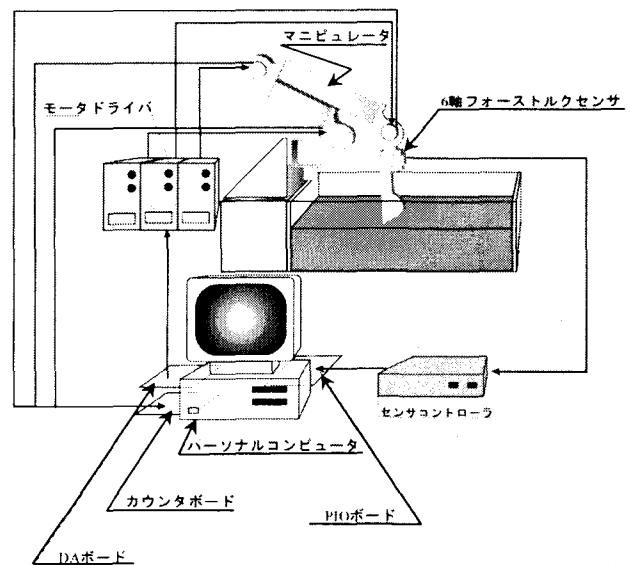


図-10 実験装置の概略

表-1 粒子の物性値

粒子径 [mm]	1.24	2.91
密度 [kg/m ³]	2450	2690
空隙率 [-]	0.52	0.50
バケット-粒子間摩擦係数[-]	0.44	0.52
安息角 [deg.]	42	44
内部摩擦角 [deg.]	37	39
バケット一杯分の破碎堆積物重量 [g]	176.4	193.7

碎石試料としては、平均粒子径の異なる 2 種類の安山岩碎石粒子を用いた。上述したように岩盤を発破により起砕して生成される破碎堆積物は最粗充填の状態にあると考えられるので、実験では表-1 に示す粒子を容器の中に静かに流し込んで容器を粒子で充填し、その後、所定の傾斜角になるように表面をならして模擬地盤とした。なお、表-1 に示した各値は実際に測定を行って求めた値である。密度は、数個の粒子の重量を測定した後、水の入ったメスフラスコの中に粒子を投入してその体積を測定することにより求めた。また、投入した粒子を球と仮定し、1 個当たりの体積より求めた球の直径、すなわち球等価直径を粒子の平均粒子径とした。空隙率については、容積が既知である容器を粒子で満たし、その粒子の重量を測定し、容器の容積と粒子の密度との関係より求めた。バケットと粒子との摩擦係数は、バケットと同じ材質であるアルミ製の板の上に底の抜けた箱型の枠を置き、その中に粒子を満たし、この枠を水平に引いたときの力を測定して、枠の中の粒子の重量との関係より算出した。なお、粒子間の内部摩擦角の測定は、装置の形状や寸法、測定方法によって値にばらつきが出ると言われている。著者

らは、粒子について安息角の測定およびせん断試験の結果から内部摩擦角は安息角より約 5[deg.]小さくなることを確認している¹⁰⁾ことから、本研究において、内部摩擦角は安息角より 5° 小さい値とした。安息角の測定については、粒子を満たした容器を徐々に傾けていき、粒子の表面が滑り始めた時の傾斜角を測定することにより求めた。上述した内部摩擦角と安息角の関係は、低応力状態で成り立つ関係であり、一般に成り立つものではない。ただし、岩盤起砕後の破碎堆積物の状態は、最粗充填に近いことから、本研究では上述の関係が成り立つと仮定した。掘削抵抗力の計算には内部摩擦角(いわゆる粒子間摩擦角)が必要不可欠であり、現場での内部摩擦角の計測については今後の課題としたい。また、後述する掘削抵抗力測定実験の結果を無次元化するために、すくい取り対象粒子をバケットに充填した場合の重さも表に併せ示す。

実験結果の一例を図-11ないし図-14に示す。実験では同一条件で5回の計測を行い、結果を重ね合わせている。縦軸は得られた掘削抵抗力をバケット一杯にすくい取り対象の破碎堆積物を入れたときの重さで除した無次元掘削抵抗力を示しており、 F_x は水平方向成分、また F_y は鉛直方向成分を示す。同様に、横軸は掘削開始点から水平方向に進んだ距離をバケット底面の長さ B_l で除して無次元化した値である。なお、比較検討を容易にするために原点を掘削開始点とした。なお、本実験で用いたバケットの底面長さ B_l は 75[mm]である。

図中の実線付き●印は実験値を示し、また太実線は上述した掘削抵抗力モデルより計算される計算値を示している。

実験結果が示す傾向は以下のようなのである。すなわち、水平方向成分に関しては、掘削を開始してからバケット先端が最下点を通るあたりまで上昇し、ある位置で最大を示し、その後バケットが上昇するのに伴って減少し、破碎堆積物からバケットが完全に出たところでほぼ0となっている。鉛直方向成分に関しては、バケットの上昇に伴い掘削抵抗力は増大し、バケット先端が破碎堆積物表面に出たあたりでピークを示し、その後緩やかに減少する。なお、最終的に鉛直方向の掘削抵抗力成分 F_y は、実質すくい取った破碎堆積物の重力のみとなっている。また、破碎堆積物の粒子径が大きくなると、抵抗力が全体として大きくなっている。さらに、破碎堆積物の傾斜角が大きくなるにつれて F_x は減少する傾向があるが、 F_y は逆に大きくなる傾向が確認された。

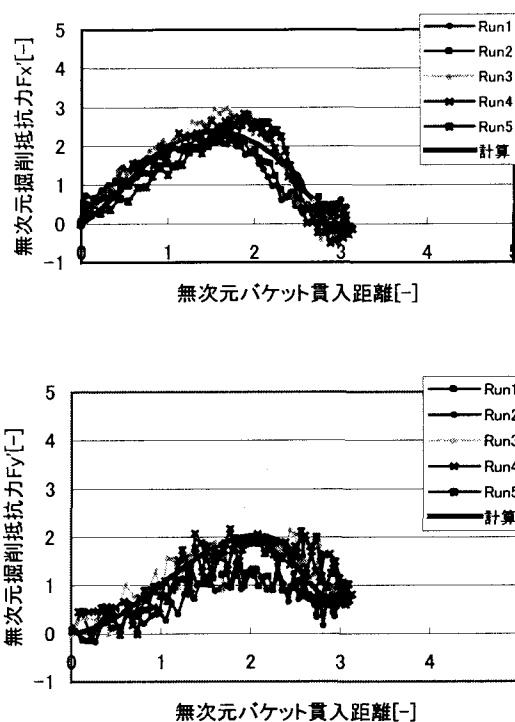


図-11 掘削抵抗力 ($\psi=20[\text{deg.}]$ $d_g=1.24[\text{mm}]$)

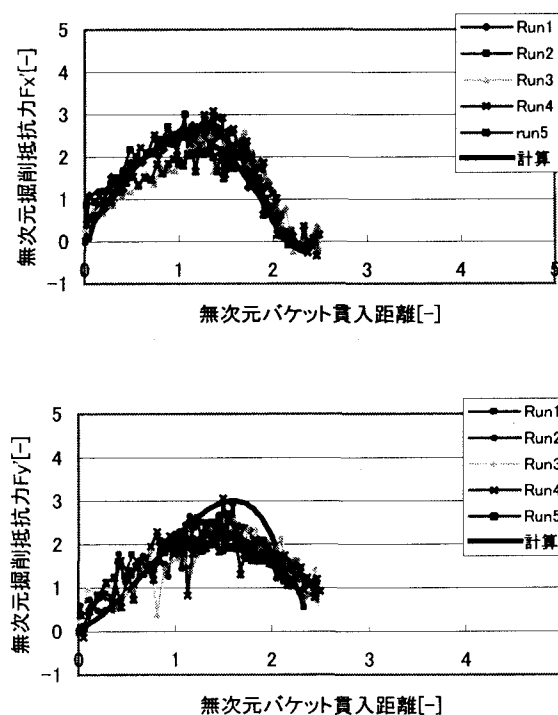


図-12 掘削抵抗力 ($\psi=40[\text{deg.}]$ $d_g=1.24[\text{mm}]$)

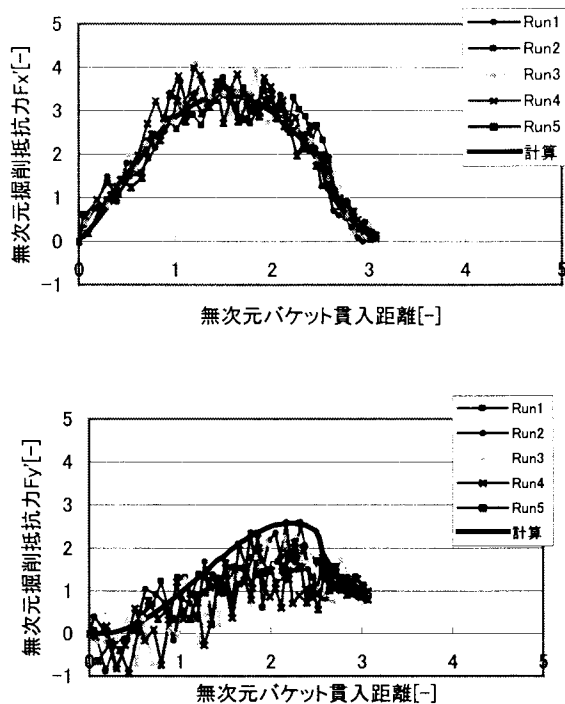


図-13 掘削抵抗力 ($\psi=20[\text{deg.}]$ $d_g=2.91[\text{mm}]$)

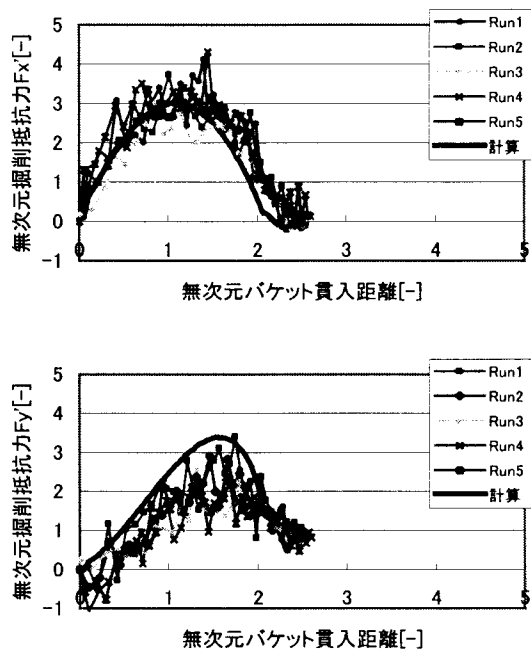


図-14 掘削抵抗力 ($\psi=40[\text{deg.}]$ $d_g=2.91[\text{mm}]$)

表-2 未知のパラメータ θ と内部摩擦角 ϕ との関係

破碎堆積物の 粒子径 $d_g[\text{mm}]$	破碎堆積物の 内部摩擦 角 $\phi[\text{deg.}]$	斜面傾斜角 $\xi[\text{deg.}]$	パラメータ $\theta[\text{deg.}]$
1.24	37	20	38.00
		40	37.62
2.91	39	20	40.10
		40	39.91

ところで、本研究で提案したモデルより掘削抵抗力を計算するためには、切削抵抗力に含まれるパラメータ θ を決定しなければならない。この値を理論的に決定することは困難であるので、従来の研究に従い、実験値になるべく近い値を示す θ を逆算した結果、表-2に示す結果が得られた。従来の研究⁸⁾¹¹⁾では、 θ の値は、粒子の内部摩擦角よりも1~3度大きい値をとると報告されているが、本研究の結果も従来の結果と同様の結果を示していることが分かる。計算値に関しては、鉛直方向については全体的に計算値が実験値をやや上回るという結果になっているが、全体的には実験値と計算値とはほぼ一致しており、本モデルはほぼ妥当であると考えられる。

なお、計算における各要素の割合を求めた結果、 F_1 と F_3 はほぼ1:1の大きさであり、 F_2 の掘削抵抗力全体に占める割合は最大でも10%程度であった。

4. 掘削抵抗力に関する応用的研究

前章において実験に使用した破碎堆積物粒子は、モデルによる計算値と実験値との比較を容易にするため、ほぼ均一の粒径をもつ粒子であった。また、モデルにおける仮定でも対象となる粒子は粒径が一定であるとした。しかし、実際の掘削を考えた場合、破碎堆積物は必ず粒度分布を有する。そこで本節では、掘削対象粒子の粒径に分布がある場合について掘削実験を行い、さらに本モデルに平均粒径を代入して計算した掘削抵抗力との比較検討を試みた。

実験は、粒径のほぼ均一な3種類の粒子を用意し、次にこれらの粒子を一定の割合で混ぜ合わせることで粒径に分布のある破碎堆積物粒子を作成した。今回作成した破碎堆積物粒子は粒径1.24[mm]、2.91[mm]、4.58[mm]の3種類の粒子を、重量比1:1:1で混ぜ合わせた平均粒径2.92[mm]の粒子群である。作成した粒子の物性値を表-3に示す。粒子径と密度については元の粒子の値を用いて重量比の重みで平均した値とし、他の値は実測した値である。次にこの粒子を、前述したように容器の中に静かに充填し、所定の傾斜角になるように表面をならすことで模擬地盤を作成した。

表-3に示した粒子について、破碎堆積物の傾斜角 ξ を20[deg.]、40[deg.]の2段階に変化させて行った掘削実験の結果と、平均粒径を使用して計算した計算値との比較を図-15および図-16に示す。実験結果については、前章と同様に同じ条件で5回行った実験結果を示してあり、グラフの縦軸および横軸はそれぞれ前章の結果と同様に掘削開始位置を原点と

して無次元化してある。また、数値計算で使したパラメータ θ の値を表-4に示す。

表-3 粒度分布のある粒子の物性値

平均粒径 $d_g[mm]$	2.92
密度 $\rho[g/cm^3]$	2.71
空隙率 $\varepsilon[-]$	0.52
バケットと破碎堆積物の摩擦係数 $\mu[-]$	0.50
破碎堆積物の傾斜角 $\zeta[deg.]$	20, 40
安息角 $\phi_r[deg.]$	43
内部摩擦角 $\phi[deg.]$	38
バケット一杯分の破碎堆積物重量 $[gf]$	195.1

表-4 粒度分布のある粒子の物性値

破碎堆積物の平均粒径 径 $d_g[mm]$	破碎堆積物の内部摩擦角 $\phi[deg.]$	斜面傾斜角 $\zeta[deg.]$	パラメータ $\theta[deg.]$
2.92	38	20	38.91
		40	38.92

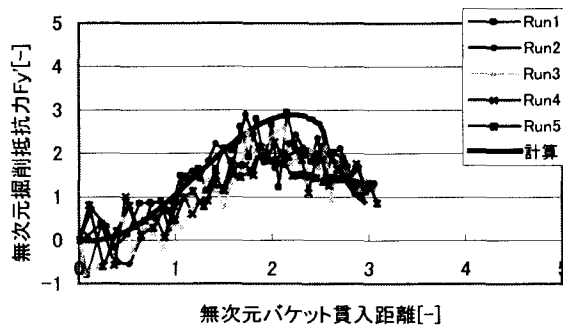
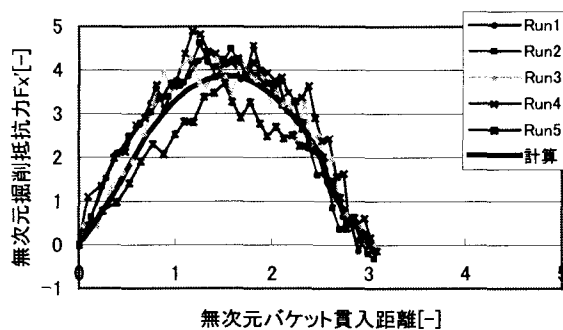


図-15 掘削抵抗力 ($\psi=20[deg.]$)

粒径に分布がある場合でも、数値計算結果と実験結果は良く一致していることが分かる。このことから、粒径が分布しているような場合についても、モデルに代入する粒子径としては平均粒径を使用し、パラメータ θ についても表-4に示すように、粒径が

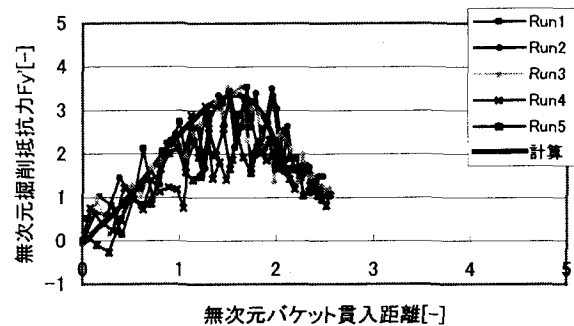
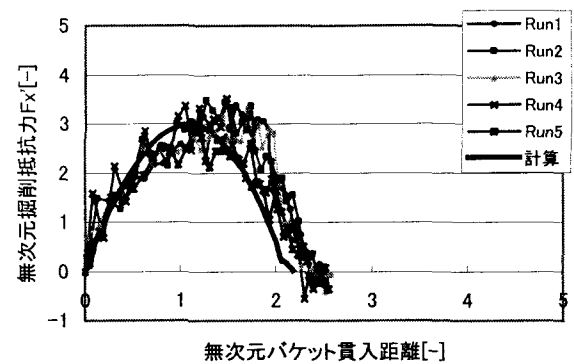


図-16 掘削抵抗力 ($\psi=40[deg.]$)

一定の場合と同様に内部摩擦角より $1[deg.]$ ほど大きな値を用いることで掘削抵抗力推定して、掘削抵抗力を得ることができることが確かめられた。

5. むすび

本研究では、パワーショベルによる掘削作業の自動化を目指し、斜面掘削作業時にバケットに作用する抵抗力を定式化することを目的とした。初めに、バケットの移動に伴う破碎堆積物変形過程をモデル化し、このモデルを用いて、バケットに作用する抵抗力について理論的に考察した。さらに、2種類の碎石粒子を用いて掘削実験を行い、バケットに作用する抵抗力を計測するとともに、計算値と実験値との比較検討を行った。その結果、両者の示す傾向はほぼ一致しており、本モデルはほぼ妥当であることが確認された。また、粒径に分布がある場合でも、その平均粒径を用いることにより、掘削抵抗力をほぼ推定できること、またパラメータ θ についても粒子径が一定の場合と同様に内部摩擦角よりも1程度大きな値を使用して数値計算を行えば、掘削抵抗力を推定できることが確認された。

今後は、バケットの移動軌跡の違いによる掘削抵抗力の変化やパワーショベルなどの掘削機械が如何

に破碎堆積物の物性値を取得するかなどについて検討したいと考えている。

最後に、本研究を行うにあたり東北大学岸野佑次教授には大変有益なるご助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

12)河上 房義：土質力学，pp.141-152，1993，森北出版。

(2004 年 4 月 16 日受付)

参考文献

- 1) 福田 敏男：極限作業ロボット，pp.14-18，1986，McGraw-Hill Book.
- 2) 三宅 謙三郎，須崎 利夫，吉田 弘喜，大島 寛：碎石業における岩石採取作業の自動化技術開発，資源・素材学会誌，Vol.112，No.8，pp.572-580，1996.
- 3) S. Singh: A Survey of Automation in Excavation，資源・素材学会誌，Vol.112，No.8，pp.497-504，1996.
- 4) 高橋 弘，山崎 勝幸：画像と力覚を用いた碎石堆積量の推定と堆積物の3次元形状に基づくすくい取り作業計画，素材物性学会誌，Vol.10，No.2，pp.32-40，1997.
- 5) 高橋 弘，菅澤 努，齋藤 清次：画像処理による破碎堆積物形状認識のためのビジョンシステムに関する研究，資源・素材学会誌，Vol.116，No.9，pp.767-772，2000.
- 6) S. Singh and Reid Simmons: Task Planning for Robotic Excavation，Proc. of the 1992 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems，pp.1284-1291，1992.
- 7) A. Hemami: Force Analysis in the Scooping/Loading Operation of an LHD Loader，Proc. of the 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation，Vol.1，pp.415-424，1993.
- 8) H. Takahashi, M. Hasegawa and E. Nakano: 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.
- 9) 高橋 弘，水上 喬二郎，齋藤 泰：パワーショベルによる破碎堆積物掘削作業時における抵抗力解析，応用力学論文集，Vol.6，pp.603-612，2003.
- 10) A. Hemami and L. Daneshmend: Force Analysis for Automation of the Loading Operation in an LHD-Loader，Proc. of the 1992 IEEE Conference on Robotics and Automation，pp.645-650，1992.
- 11) 高橋 弘，塚本 佳明，中野 栄二：破碎堆積物のすくい取り作業時におけるバケットに作用する抵抗力に関する基礎研究，日本機械学会論文集（C編），Vol.63，No.609，pp.1491-1497，1997.