

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

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

高橋 弘^{*}・水上 喬二郎^{**}・齋藤 泰^{**}

Hiroshi TAKAHASHI, Koujiro MINAKAMI and Yutaka SAITO

^{*}正会員 工博 東北大学大学院助教授 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 04)^{**}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 crushed 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, visualization experiment of the crushed rocks due to the movement of the bucket was carried out. By using the results of visualization experiment, the resistive forces acting on the bucket were theoretically derived. 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 here was almost reasonable although the improvement of the model is still necessary.

Key Words: resistive force, power shovel, automatic excavation, crushed rocks

1. はじめに

現在、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、作業者にとって過酷になることが多々あり、危険を伴うことも少なくないことから、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および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。これらの作業に関して、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⁾に関してはいくつかの研究例が見られるが、破碎堆積物掘削作業の自動化に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

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り、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。

ところで、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。車体の大きさがほぼ同程度の場合、ホイールローダのバケット容量はパワーショベルのバケット容量に比べて大きい。そのため、破碎堆積物が多量で全体の積み込み量が多い石灰石鉱山等では主としてホイールローダが用いられている。一方、ホイールローダと異なり、パワーショベルには、移動せずに旋回のみで積み込み作業を行うことができるという利点がある。そのため、堆積量が比較的少量で全体の積み込み量が少ない場合には、パワーショベルの方が積み込み効率が高く、採石場等では主としてパ

ワーショベルが用いられている。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時の抵抗力について検討した研究はほとんど見受けられない。

そこで本研究では、パワーショベルによる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. 破碎堆積物内部の変形過程の可視化

パワーショベルによる掘削作業時にバケットに作用する抵抗力を理論的に考察するためには、バケットの移動に伴う破碎堆積物内部の変形過程の把握が非常に重要であり、特に破断面の位置の推定が重要である。土質力学の分野では、斜面の安定解析や構造物にかかる土圧を評価するために、破断面の位置推定に関する研究が数多く行われている⁹⁾。しかしながら、バケットが破碎堆積物を掘削する際の破碎堆積物内部における破断面の位置は明らかにされていない。それゆえ、破碎堆積物内部の変形過程のモデリングに先立ち、掘削作業時に破碎堆積物がどのように変化するかを実験的に確認することを目的として、トレーサー粒子を用いた可視化実験を行った。

図-1 に実験に用いた装置の概略と X-Y 座標系を示す。前面に透明な塩化ビニール板を用いた図のような木製の容器を作製し、その中に平均粒径約 3mm の安山岩碎石を破碎堆積物として平らに敷き詰めた。このとき可視化のために、全碎石粒子の数%を白色に着色し、トレーサー粒子とした。また、図-2 に示すような片側側面を取り外した状態の木製のバケット模型を作製し、マニピュレータの先端に取り付けた。スケールは実機の約 1/10 とした。

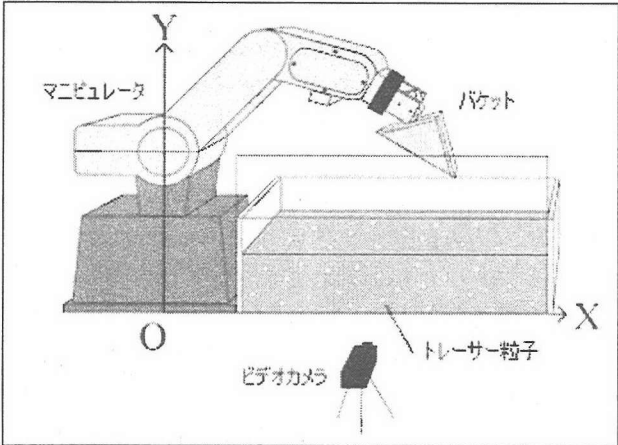


図-1 可視化実験装置の概略

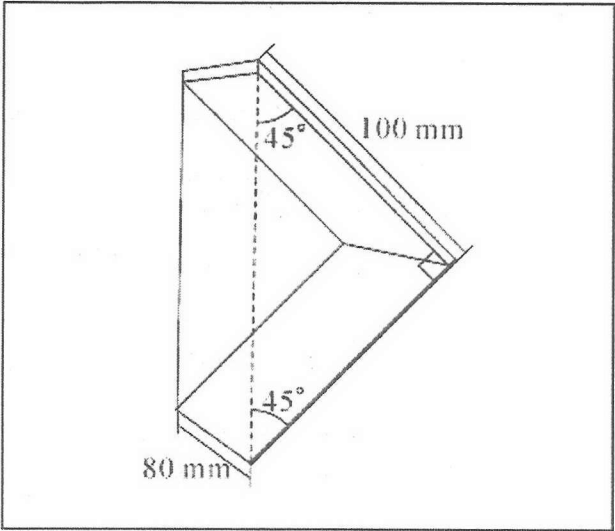


図-2 可視化実験に用いたバケットの概略

可視化実験では、産業用ロボットであるマニピュレータをパワーショベルに見立て、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ることによって、掘削作業を行った。これらの装置の側面から碎石粒子の挙動を塩化ビニール板を通してビデオカメラにより撮影した。その後、X-Y コーディネータを用いてトレーサー粒子の移動軌跡を追跡した。

バケットの移動軌跡については、実際の掘削現場において実機による掘削作業をビデオ撮影し、バケットの移動軌跡を観察した結果、円軌道を示すことが多いことから、本実験では、図-3 に示すようにバケット先端の軌道を円軌道とし、「バケットの面積」と「バケット先端の軌道と破碎堆積物の地表線とで囲まれた面積」がほぼ等しくなるようにバケット移動軌跡の関数形を定めた。なお、図中の破線は掘削開始点、掘削中間点および掘削終了点におけるバケットの位置・姿勢を示している。なお、図中の γ は、円軌道の中心とバケット先端を結ぶ線が水平方向となす角度である。

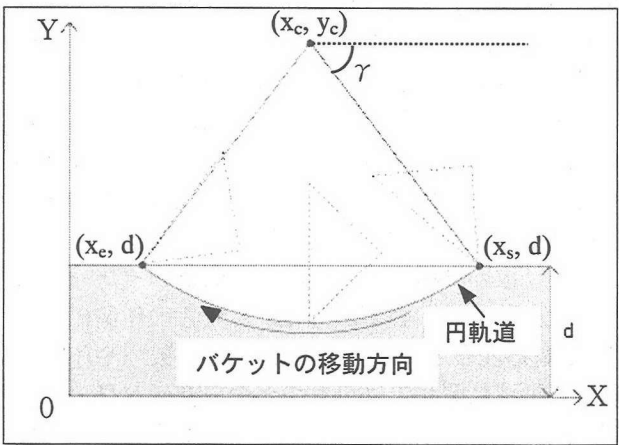


図-3 バケットの移動軌跡

実験結果を図-4に示す。これはバケットの移動に伴うトレーサー粒子の移動軌跡を示したものである。座標系は図-1に示した通りであり、原点はコンピュータの足元となっている。なお、掘削は図の-X方向に向かって行っている。図中の太破線は、バケット先端の軌跡を示している。破線より上の粒子は、バケットの移動とともに移動していることが分かる。これに対して、破線下部の掘削の影響のない部分では、粒子はほとんど動いていないことが分かる。この結果より、最終的な破断面は、図中の太実線のように推定される。また、掘削前半においては、バケット先端軌道と破断面がほぼ一致するが、掘削後半においては、バケット内部に取り込まれた粒子により、破碎堆積物内部の粒子が前方に押しやられるため、破断面が-X方向にずれていることが分かる。

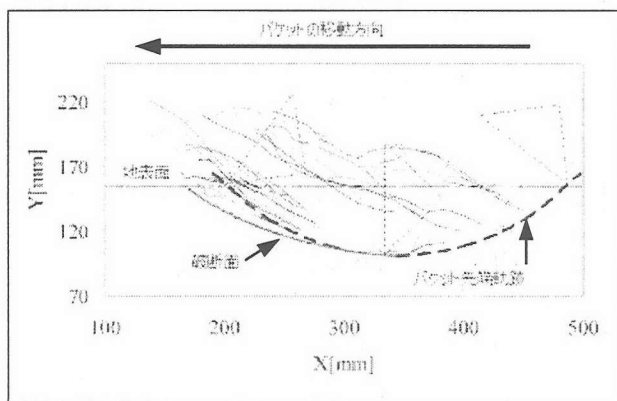


図-4 トレーサー粒子の移動軌跡

3. 掘削抵抗力に関する理論的考察

3.1 破碎堆積物変形過程のモデリング

本節では、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、上述した可視化実験の結果を基に、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。なお、本研究では、簡単のため破碎堆積物が水平に敷き詰められた状態を扱い、斜面における掘削については、今後の課題とする。さらに、以下に示す仮定に基づいてモデリングを行う。

① 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する。図-1のように、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。

- ② バケットの移動に伴って生じる破断面の形は、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
- ③ 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。
- ④ 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。
- ⑤ 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。

バケットと破碎堆積物との関係を図-5 および図-6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。また、掘削抵抗力は、バケットの移動軌跡の影響を受けるが、ここでは可視化実験と同様に、 $x=x_s$ でバケットが貫入し、 $x=x_c$ でバケットが破碎堆積物から出る円軌道を考える。

破碎堆積物内部は掘削前半（バケット姿勢角 $\alpha \leq \pi/4$ [rad.]）においては図-5のように考えられ、地表面が少し盛り上がる。掘削後半（バケット姿勢角 $\alpha \geq \pi/4$ [rad.]）では図-6のように考えられ、バケット内部が粒子で満たされることによって受働土圧が急激に大きくなり、地表面の盛り上がり角度も安息角に近くなる。

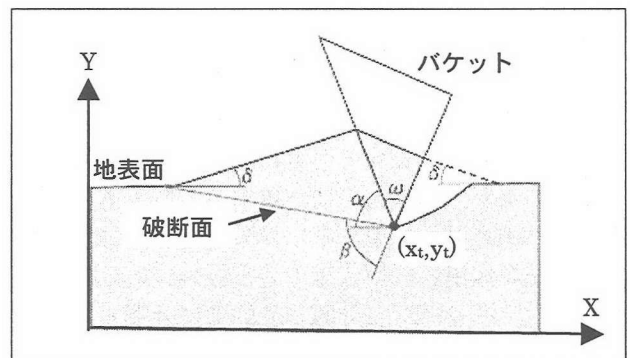


図-5 破碎堆積物の変形過程のモデル化(掘削前半)

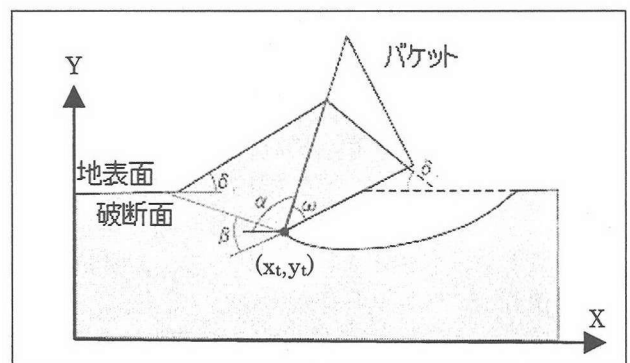


図-6 破碎堆積物の変形過程のモデル化(掘削後半)

破碎堆積物は、バケットと破断面で囲まれた「バケットの移動に伴い移動する部分」と破断面下部の「移動しない部分」の2つに分けられる。なお図中の角度 δ は、可視化実験の結果を基に、バケット姿勢角 α とともに上昇し、 $\alpha=90$ [deg.]で破碎堆積物の安息角 δ_r となるようにし、それ以降は一定($\delta=\delta_r$)となるように仮定した。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、「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、盛り上がった破碎堆積物の高さを決定した。

3.2 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)(8)(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

ただし、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ので、 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、次章で述べるように、抵抗力測定実験では、図-7に示す M_s 点および M_b に重量既知の重りを乗せて力覚センサの較正を行っているので、抵抗力の計測は便宜上、バケット背面の中心($M_s(m_{sx}, m_{sy})$)に作用するバケット背面に対する鉛直方向成分 F_s およびバケット底面の中心($M_b(m_{bx}, m_{by})$)に作用するバケット底面に対する鉛直方向成分 F_b を計測し、バケットの姿勢角を用いて、これらの値を水平

成分および鉛直成分に分解している。そこで、ここでは実験値と直接比較検討することができるように、抵抗力をその2成分に分けて考え、バケット背面に対する鉛直方向成分についてはバケットの背面の中心に、バケット底面に対する鉛直方向成分についてはバケットの底面の中心に作用する抵抗力を算出する。つまり、実際の計算では図-7に示す F_s および F_b をモデルに従って求め、次式より F_x および F_y を算出する。

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

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

ただし、 α はバケット姿勢角、 ω は図-6に示すように、バケット側面の先端の角度である。

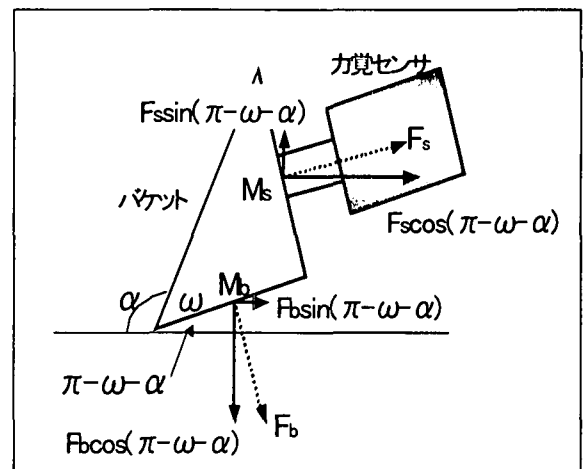


図-7 掘削抵抗力の水平および鉛直成分の算出

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。

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、図-8に示すように、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を求めるものである。この時、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。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。

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

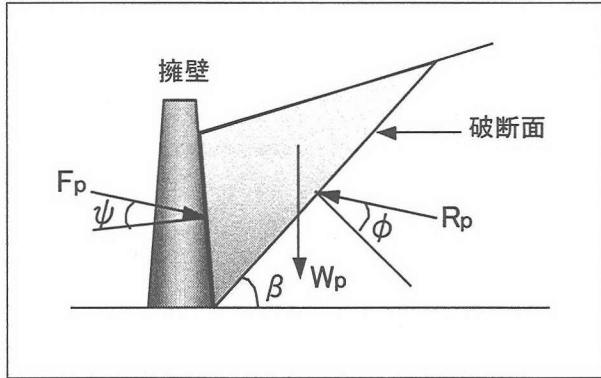


図-8 クーロンの受働土圧時に作用する力

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。

図-6 に示した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-9 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。

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

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

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で囲まれた部分の面積、 b はバケットの幅である。

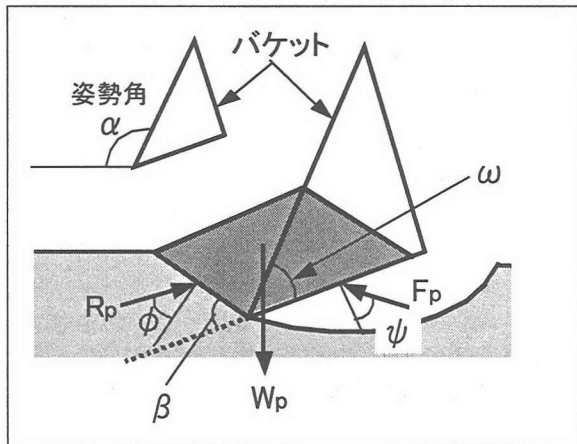


図-9 受働土圧時に作用する力

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。

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

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

ここで、 F_p はバケット底面上で先端から $1/3$ の点 $P_1(p_{1x}, p_{1y})$ に作用すると仮定し、歪ゲージまわりのモーメントの釣り合いから、次式が求められる。

$$F_{1s} = F_{ps} \quad (10)$$

$$F_{1b} = \frac{l_{1s}}{l} F_{ps} + \frac{l_{1b}}{l} F_{pb} \quad (11)$$

ただし、 l 、 l_{1s} および l_{1b} は、図-10 に示す通りである。よって、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。

$$F_{1x} = F_{1s} \cos(\pi - \omega - \alpha) + F_{1b} \sin(\pi - \omega - \alpha) \quad (12)$$

$$F_{1y} = -F_{1s} \sin(\pi - \omega - \alpha) + F_{1b} \cos(\pi - \omega - \alpha) \quad (13)$$

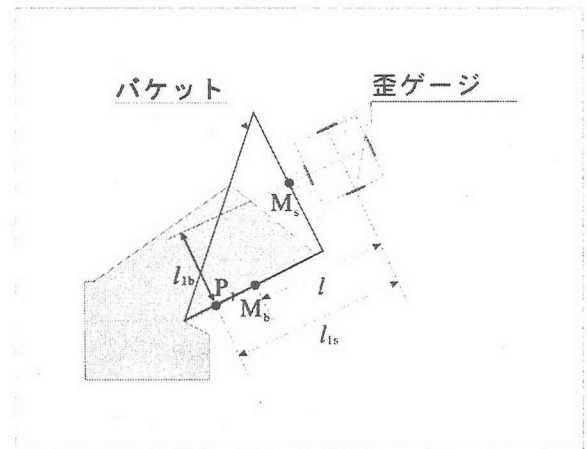


図-10 歪ゲージと作用点との関係

2) 摩擦抵抗力

ホイールローダによる掘削作業時にバケットに作用する抵抗力に関する従来の研究によると、全抵抗力に占める摩擦抵抗力の割合は非常に小さく、数%程度である。パワーショベルによる掘削でも同様と考えられるため、ここでは摩擦抵抗力は非常に小さいと仮定し無視することにする。

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指す。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図-11 に示すような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、考慮には入っていない。

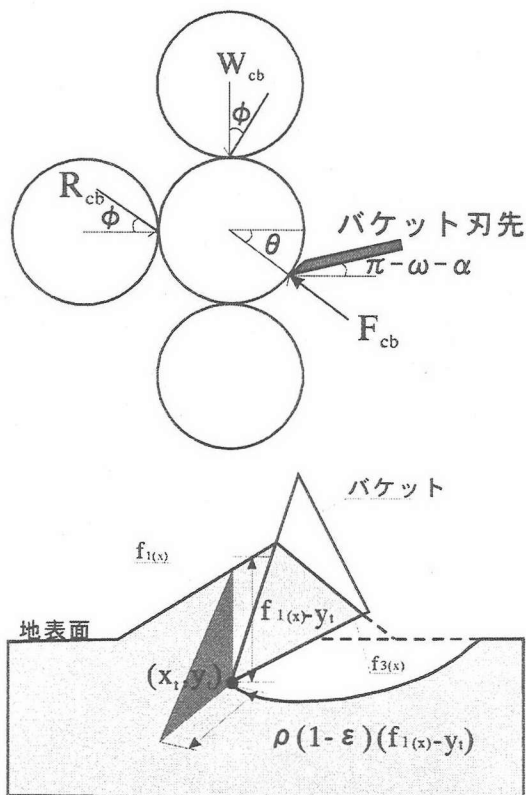


図-11 刃先部分の粒子に作用する力

粒子に作用する力は、図-11 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。

$$W_{cb} = \frac{\rho(1-\varepsilon)bd_g \{f_{1(x)} - y_t\}}{\cos \phi} \quad (14)$$

$$F_{cb} = \frac{W_{cb}}{\sin(\theta - \phi)} \quad (15)$$

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。

$$F_{bs} = F_{cb} \cos(\theta - \gamma + \frac{\pi}{2}) \quad (16)$$

図-11 および(15)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。

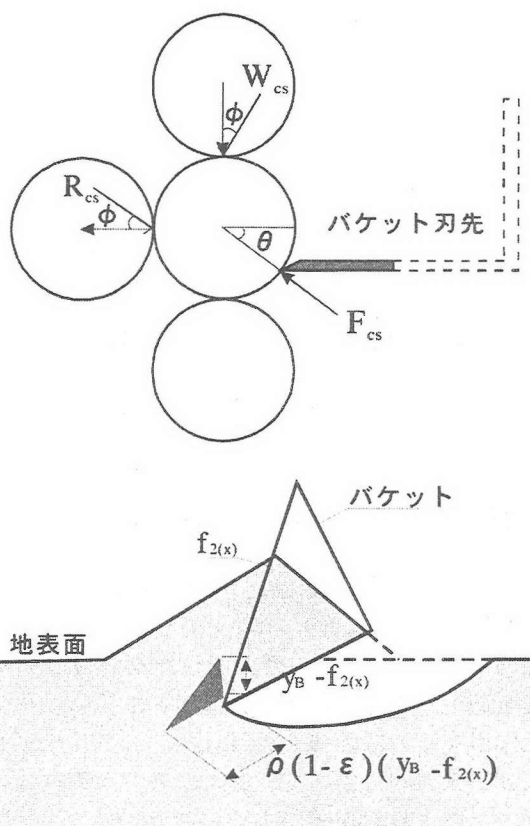


図-12 バケット側面刃先部分の粒子に作用する力

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-12 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。ただし、 x_t および x_g は、それぞれバケット先端のX座標およびバケット側面($=f_2(x)$)が地表面と交わるX座標である。

$$W_{cs} = \frac{\int_{x_t}^{x_g} \rho(1-\varepsilon)d_g \{y_B - f_{2(x)}\}}{\cos \phi} \quad (17)$$

$$F_{cs} = \frac{2W_{cs}}{\sin(\theta - \phi)} \quad (18)$$

ここに、 y_B は地表面の高さである。 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} は次式のようになる。

$$F_{ss} = F_{cs} \cos \theta \cos(\gamma - \frac{\pi}{2}) \quad (19)$$

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。ただし、 γ は図-3 に示す角度である。

$$F_{bss} = F_{bs} \sin(\alpha + \omega - \gamma) \quad (20)$$

$$F_{bsm} = F_{bs} \cos(\alpha + \omega - \gamma) \quad (21)$$

$$F_{sss} = F_{ss} \sin(\alpha + \omega - \gamma) \quad (22)$$

$$F_{ssm} = F_{ss} \cos(\alpha + \omega - \gamma) \quad (23)$$

ここで、 F_{bs} および F_{ss} はそれぞれのバケット先端の点(x_t, y_t)およびバケット側面刃先部分と破碎堆積物の接線の下から 1/3 の点 $P_{3s}(p_{3sx}, p_{3sy})$ に作用すると仮定し、歪ゲージまわりのモーメントの釣り合いから、次式が求められる。

$$F_{3s} = F_{bss} + F_{sss} \quad (24)$$

$$F_{3b} = \frac{l_{3bs}}{l} F_{bss} + \frac{l_{3bb}}{l} F_{bsm} + \frac{l_{3ss}}{l} F_{sss} + \frac{l_{3sb}}{l} F_{ssm} \quad (25)$$

ただし、 l_{3bs} 、 l_{3bb} 、 l_{3ss} および l_{3sb} の説明は紙面の関係上割愛する。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。

$$F_{3x} = F_{3s} \cos(\pi - \omega - \alpha) + F_{3b} \sin(\pi - \omega - \alpha) \quad (26)$$

$$F_{3y} = -F_{3s} \sin(\pi - \omega - \alpha) + F_{3b} \cos(\pi - \omega - \alpha) \quad (27)$$

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。

4. 掘削抵抗力の計測

図-13 に実験装置の概略を示した。可視化実験と同じ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。抵抗力量測定に用いる力覚センサの概略を図-14 に示す。力覚センサには、鉛直方向の表面・裏面にそれぞれ2枚、水平方向の表面・裏面にそれぞれ2枚の計4枚の歪ゲージを貼り付けた。この場合、歪ゲージにより検出される値は曲げモーメントであるため、実験に先立ち、重量が既知である重りを用いて、歪ゲージの較正を行い、較正式を導出した。歪ゲージの較正は、図-15 に示すようにバケットと力覚センサ部分を固定し、バケットの底面および背面の中心に重量既知の重りを乗せ、その時の曲げ歪を計測し、重量÷歪値の較正式を算出した。実験では掘削作業中におけるセンサからの信号(曲げ歪)を計測し、算出した較正式からバケット背面および底面に作用する力を逆算し、

さらにバケットの姿勢角を用いて、水平方向および鉛直方向の抵抗力を算出した。

図-16 に計測装置の概略を示した。歪ゲージからの信号は、ブリッジボックス、動歪計およびA/D変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。

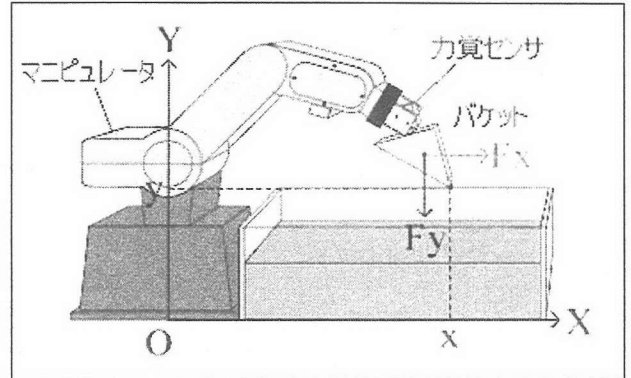


図-13 実験装置の概略

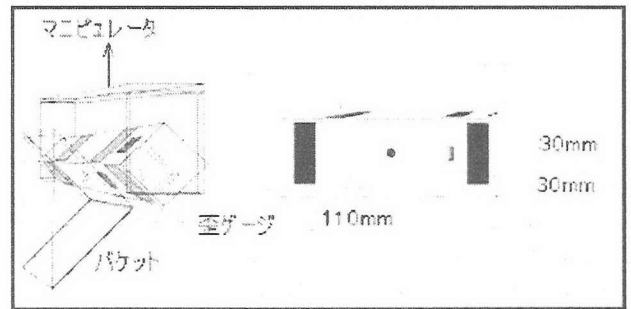


図-14 力覚センサの概略

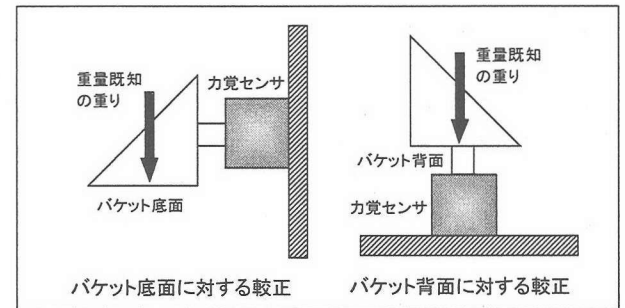


図-15 力覚センサの較正方法

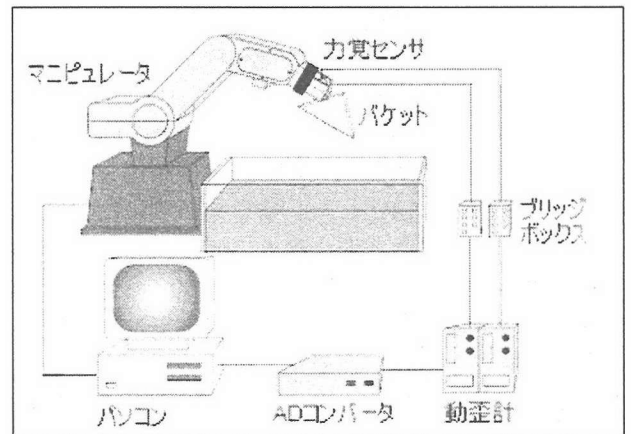


図-16 計測装置の概略

実験は、可視化実験と同じ前面に透明な塩化ビニール板を用いた木製の容器の中に、後述する2種類の碎石試料を敷き詰め、破碎堆積物を形成した。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、可視化実験と同じくバケット先端を円軌道で移動させた。

表-1 粒子の物性値

粒子径 [mm]	0.94	3.43
密度 [kg/m ³]	2508	2447
空隙率 [—]	0.51	0.49
バケットー粒子間摩擦係数[—]	0.51	0.34
安息角 [deg.]	40	45
内部摩擦角 [deg.]	35	40

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、表面を平坦にならして模型地盤とした。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、100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木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¹¹⁾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。

なお掘削開始点および掘削終了点のバケットの姿勢角(は、 $\alpha_s=42.2[\text{deg.}]$ 、 $\alpha_e=118.9[\text{deg.}]$)である。

実験結果を図-17および図-18に示す。実験では同一条件で5回の計測を行い、5回の平均をもって実験結果とした。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す。また F_1 と F_3 の分担率を明確にするため、 F_1 および F_3 の値を細線で示した。すなわち、 F_1 と F_3 の合計が掘削抵抗力であり、太線を示すことになる。図の縦軸はバケットに作用する抵抗力の水平方向成分 F_x 、鉛直方向成分 F_y を示し、横軸はバケット先端のX座標を示す。なお、掘削は図の-X方向に向かって行っている。

実験結果が示す傾向としては、以下の通りである。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、掘削を開始してからしばらくはバケットの姿勢の関係から上向きの力(すなわち負の値)がかかり、バケット先端が最下点を過ぎたあたりから、下向きの力(すなわち正の値)となり、バケットの上昇に伴いそのまま上昇を続ける。バケットが破碎堆積物から出てからは、バケットとすくい取った破碎堆積物

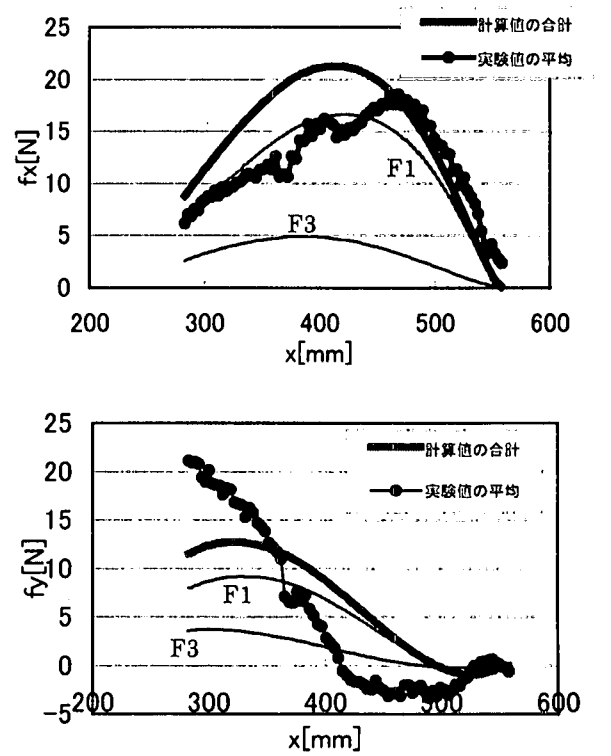


図-17 バケットに作用する掘削抵抗力(粒径小)

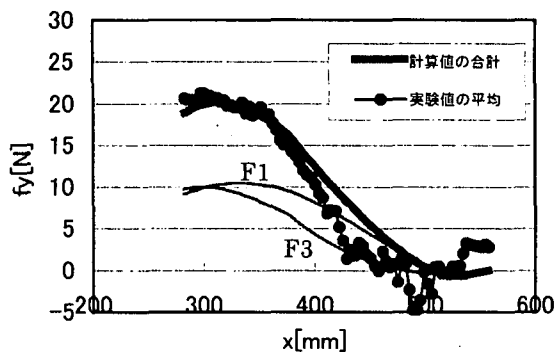
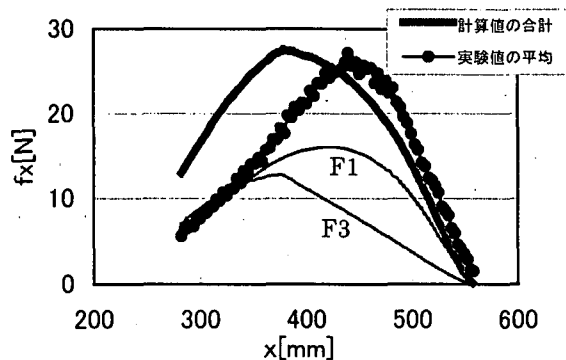


図-18 バケットに作用する掘削抵抗力(粒径大)

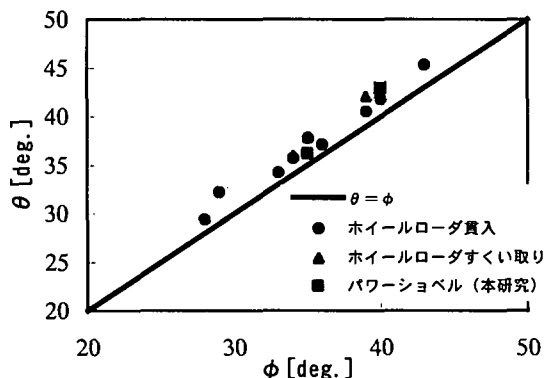


図-19 未知のパラメータ θ と内部摩擦角 ϕ との関係

の重力のみとなる。ただし、本実験では、バケットをマニピュレータに装着した状態で、水平および鉛直方向とも抵抗力を0に合わせているので、鉛直方向については、実質すくい取った破碎堆積物の重力のみとなる。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ことが分かる。

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未知のパラメータ 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⁸⁾¹¹⁾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、図-19に示す結果が得られた。図には、ホイールローダによる掘削作業(バケットの貫

入および上昇)に対する掘削抵抗力モデルより求められた θ の値を併せ示した。従来の研究⁸⁾¹¹⁾では、 θ の値は、粒子の内部摩擦角よりも2~3度大きい値をとると報告されているが、本研究の結果(図中の■印)も従来の結果と同様の結果を示していることが分かる。

計算値が示す傾向であるが、粒子径が0.94mmの場合の F_y にかなりの差が見られるものの、全体的な傾向は実験値が示す傾向とほぼ一致している。水平方向の抵抗力は、掘削の進行と同時に増大し、ピークを示す。ピークを示すX座標の値に差が見られるが、ピーク値はほぼ同程度の値となっている。鉛直方向の抵抗力は、粒子径が3.43mmの場合は、非常によい一致を示しているが、粒子径が0.94mmの場合は差が見られる。この差の明確な原因は不明であるが、バケット位置の計測方法に若干問題があるのではないかと想像される。本実験では、バケットの位置をマニピュレータの関節角から推定しているが、実際には掘削中の抵抗により位置がずれていることも考えられる。本来ならば、マニピュレータの各関節に角度センサを取り付け、角度を直接計測し、バケット位置を直接計測すべきであるが、本研究ではバケット位置の直接計測にまでは至らなかった。従って、バケットの位置・姿勢に誤差が含まれていた可能性もある。今後はバケットの位置・姿勢を直接測定できるように改良するとともに、粒度分布を有する破碎堆積物の掘削実験など、再度実験を行い、掘削抵抗力に関するデータを収集する予定である。

以上のように、実験値と計算値とに一部差が見られるものの、上述したように計算値と実験値の傾向はほぼ一致しており、本研究で提案するモデルは、ほぼ妥当であると考えられる。

なお、第3章での述べた掘削抵抗力のモデルは、バケットの位置と姿勢(バケット角)を与えることにより掘削抵抗力が計算されるようになっている。上述したように、本研究ではバケットの移動軌跡を円弧で仮定したので、バケット先端の移動軌跡が円弧に沿い、またそれに伴いバケット角度も変化するよう計算を行ったが、バケット移動軌跡が円弧と異なる場合でも、バケットの位置(座標)と角度をモデルに代入して計算すればよいので、いずれのバケット移動軌跡でも計算は可能である。バケット移動軌跡によっては、同じ体積量の土砂・破碎堆積物を掘削しても、抵抗力が異なると予想されるので、この影響については、今後、さらに検討して行きたいと考えている。

また本研究では、簡単のため地盤表面が平坦の場合を取り扱ったが、実際の採石場・石灰石鉱山では破碎堆積物は、安息角に近い傾斜角で堆積している

と考えられる。このような傾斜面での掘削については、現在、理論的および実験的に検討中である。

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、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の可視化実験を行い、破碎堆積物の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。

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) 河上 房義: 土質力学, pp. 141-152, 1993, 森北出版.

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.

(2003年4月18日受付)