

油圧ショベルによる土中岩石の自動掘削のための岩石パラメータ推定

Estimation of Rock Parameters for Automatic Excavation of Subsurface Rocks by Hydraulic Excavator

○学 窪田 瞭 (東京大) 正 谷島 諒丞 (東京大)
正 永谷 圭司 (東京大) 正 安 琪 (東京大)
正 山下 淳 (東京大) 正 浅間 一 (東京大)

Ryo KUBOTA, The University of Tokyo, kubota@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Ryosuke YAJIMA, The University of Tokyo

Keiji NAGATANI, The University of Tokyo

Qi AN, The University of Tokyo

Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo

Hajime ASAMA, The University of Tokyo

The automation of construction machine is deemed necessary due to the lack of labor and low productivity in construction industry. In this paper, we aimed to estimate the parameters of an underground rock for automatic excavation of subsurface rock by hydraulic excavator. Using physics model, we proposed method for estimating the rock's weight and depth by pushing the rock or lifting the rock. We also proposed a method for collision detection with rock sides during horizontal pulling motion and estimation of a rock's weight during scooping motion. We conducted experiments of these estimations and detection with a manipulator. The result showed that estimation by pushing the rock was more accurate than lifting the rock. Also, we found that collision detection and estimation during scooping show good results.

Key Words: Construction robot, Excavator, Automatic excavation, Parameter estimation

1 序論

建設業では労働力の不足、労働生産性の低さ等の問題があり[1]、建設機械の自動化による作業の省人化・効率化が求められている。本研究では、油圧ショベルによる自動掘削を行う上で問題となる土中に埋まった岩石に着目する。掘削作業中に一定以上の大きさの岩石が埋まっている場合に、岩石を無視し掘削作業を行うとバケットに過剰な負担がかかり事故や故障につながる。そのため岩石が埋まっている際には岩石を掘り出してから土砂の掘削を行う。ただし、岩石が重い場合には機体が傾く危険があるため、岩石を削岩する必要がある。また、岩石を掘り出す際には岩石がどれほど深く埋まっているかによってどの深さまでバケットを挿入するかを判断を行う。

このように岩石を掘り出す際には岩石の重さ・深さなど視覚情報では確認できないパラメータを推定する必要がある。先行研究では、重さや深さといった岩石のパラメータは事前に分かっている前提で掘削を行っており[2][3]、埋まっている部分のパラメータが未知の岩石を扱った研究はない。そこで、本研究では土中に埋まった岩石の自動掘削を目指すにあたり、岩石のパラメータ推定を行う。

本研究では、バケットに力覚センサを取り付け、岩石の自動掘削計画に必要なパラメータ推定の手法を提案し、実機による実験により、提案手法の有効性を確認する。

2 自動掘削計画と必要な推定

2.1 問題設定

本研究では扱う機体は油圧ショベル1台とし、ブーム関節、アーム関節、バケット関節の3自由度を制御する。地表面の掘削中に岩石が土砂に埋まっている状況を想定し、岩石を掘削する際には機体に大きな負担がかからないよう1個ずつ掘削する。そのため土砂の地表面は平面、岩石は1個とし、また簡潔にするためにその岩石・土砂は機体から見て奥行き方向に一樣な形状、埋め方を

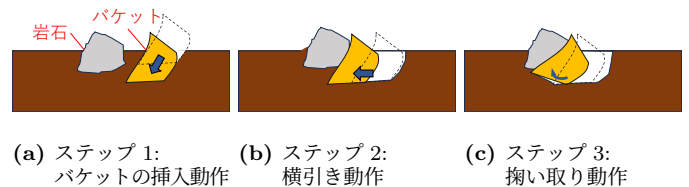


Fig.1: The procedure for excavating rocks

2.2 自動掘削計画

岩石を掘り出す方法はいくつかあり、岩石の大きさ(重さ)に基づいて掘削方法を変える。この研究ではオペレータが行っている図1に示すような方法で岩石を掘削する[3]。岩石を掘り出す前には岩石の位置、岩石の重さ、岩石が埋まっている深さのパラメータを事前に推定する必要がある。この事前の推定方法として本研究では、岩石の押し出しによる推定と岩石の持ち上げによる推定の手法を提案する。また図1に示すような岩石をバケットに収めて掬い取る掘削方法の際、バケットの先端を岩石の下まで横引き動作により動かしてから掬い取り動作を行う。バケットの深さが足りない場合、岩石の側面に接触し、岩石を引きずり掘り出すことができない。よってこの横引き動作中に岩石の側面にぶつかっていないかの判定の手法を提案する。また掬い取り動作中に想定したより岩石が重い可能性があるため、ここでも岩石の重さの推定手法も提案する。これらをまとめると図2に示すような自動掘削計画になる。この計画を想定し、本研究では次の3つの推定と1つの判定を行う。

1. 事前推定 1: 岩石の押し出しによる推定
2. 事前推定 2: 岩石の持ち上げによる推定
3. 岩石の側面との衝突判定
4. 掬い取り動作による推定

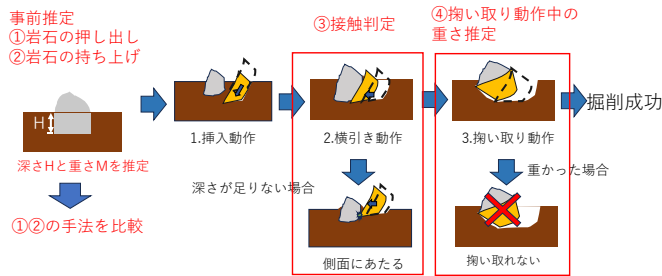


Fig.2: 自動掘削計画

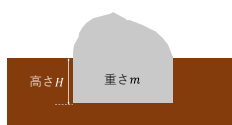


Fig.3: Approximated shape and parameters of a rock

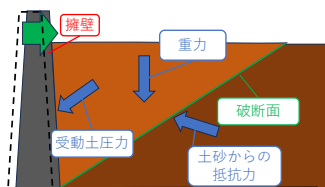


Fig.4: Model for Coulomb earth pressure theory

3 岩石パラメータ推定手法

3.1 推定する岩石のパラメータ

本研究では岩石の埋まっている部分を直方体と近似できるような岩石の形状、姿勢の場合を取り扱う。その際、底面は水平になっているとし、直方体の幅、奥行きは岩石の地表面との交差面と同じとする。そのため図3に示すような岩石の深さ H 、岩石の重さ m の推定を行う。

3.2 提案手法の概要

本研究では、バケットにかかる力から逆算し岩石のパラメータを推定する。そこでバケットにかかる力の主な成分の1つである受動土圧力を求める際にクーロン土圧理論を用いて計算する [4]。受動土圧力とは岩石やバケットが図4の擁壁のように土砂を押した際にかかる土砂からの反力である。擁壁に押された土砂はせん断応力により擁壁の下端から破断面が生じ、図4のように破断面・擁壁・地表面に囲まれた土砂が1つの物体のように動くと考え。この土砂には擁壁からの受動土圧力・破断面より下部分の土砂からの抵抗力・重力の力のつり合いが生じるので、このつり合いから受動土圧力を計算する。クーロン土圧理論ではこの破断面が平面であるとし、任意の角度である破断面の角度が受動土圧力を最小するように決定すると考え、受動土圧力を計算する。この研究では、このクーロン土圧理論を応用し、バケットが岩石に対し様々な動作を行っているときのバケットにかかる力を計算する。その計算を用いてバケットの付け根につけた力覚センサか

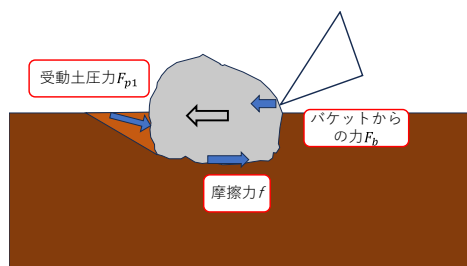


Fig.5: Method 1:Parameter estimation by pushing

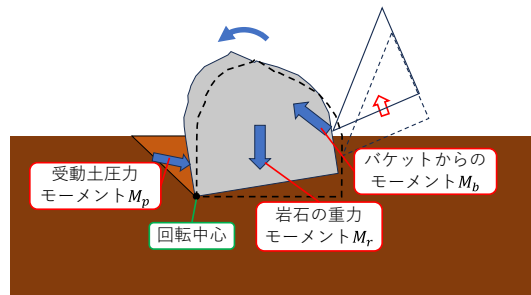
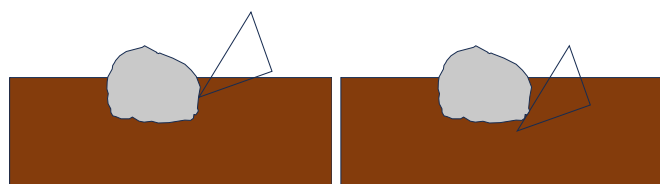


Fig.6: Method 2:Parameter estimation by lifting



(a) 接触判定: 接触あり (b) 接触判定: 接触なし

Fig.7: Method 3:Contact detection

ら計測する力の値から逆算し岩石のパラメータ推定を行う。

3.3 推定手法と導出

3.3.1 手法 1: 岩石の押し出しによる事前推定

岩石を押した際に岩石にかかる主な力は岩石が動くことで土砂が押し返すことによって生じる受動土圧力 F_{p1} と岩石の底面にかかる摩擦力 f とバケットからの力 F_b である (図5)。

クーロン土圧理論に基づき受動土圧力、摩擦力は次の式のように表される。

$$F_{p1} = \frac{1}{2} \gamma H^2 b' \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta' \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta') \sin \phi}{\cos \delta'}} \right)^2}, \quad (1)$$

$$f \simeq \mu mg, \quad (2)$$

ただし、 γ は土砂の単位体積当たりの重力、 b' は岩石の幅、 ϕ は土砂の内部摩擦角、 δ' は土砂と岩石の摩擦角、 μ は土砂、岩石の摩擦角、 g は重力加速度であり、すべて土砂、岩石の性質によって定まる既知の値である。

バケットにかかる反力は以上の式で定まる受動土圧力 F_p と摩擦力 f と釣り合うようになり、土砂・岩石の性質が分かっている場合、その大きさは岩石の重さ・深さのみに依存する。したがって、岩石を押したときにバケットに取り付けたセンサの力から逆算することにより岩石の深さと重さを推定することが可能である。

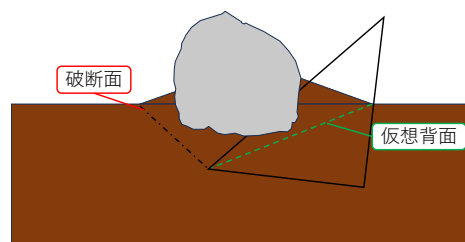
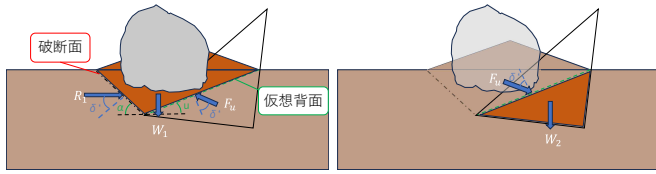


Fig.8: Method 4:Parameter Estimation during scooping



(a) 破断面と仮想背面に囲まれる土 (b) 仮想背面とバケットに囲まれる土砂

Fig.9: Physical model for method 4

3.3.2 手法 2: 岩石の持ち上げによる事前推定

岩石を持ち上げた際に岩石は図 6 のようにバケットとは反対側の側面の下端を中心として回転し、回転中心に関するモーメントがつり合う。この場合岩石にかかる主なモーメントは側面にかかる受動土圧力によるモーメント M_p 、岩石の重力によるモーメント M_r 、バケットからのモーメント M_b である。

側面が回転する際には高さごとの摩擦角は一定でない [6]。よって受動土圧力による次の式のように定まる。

$$M_p = \int_0^H b' p(z)(H - z) \cos \delta dz. \quad (3)$$

この式における $p(z)$ は深さ z における土砂の圧力であり、次のように定まる。

$$p(z) = \gamma \frac{\cos^2 \phi_w}{\cos \delta_w (1 - \sqrt{\sin(\phi_w - \delta_w) \sin \phi_w \cot \delta_w})^2} z, \quad (4)$$

ここでの ϕ_w , δ_w はそれぞれ深さ z における局所的な土砂の内部摩擦角、岩石と土砂の摩擦角であり、土砂、岩石の性質及び深さ z によって定まる。

また岩石の重力によるモーメントは岩石の重さに依存する。

以上より土砂・岩石の性質が分かっているときバケットにかかるモーメントは岩石の重さ・深さのみに依存するので、センサの値から逆算することにより岩石の深さと重さを推定することができる。

3.3.3 手法 3: 岩石の側面との接触判定

事前の推定により、岩石の重さと深さは分かっているとす。この判定は岩石の側面と接触したときの理論値・接触していないときの理論値と計測された値を比較することで行う。それぞれの理論値について説明する。図 7(a) のように接触した時の理論値はバケットが岩石を押すときの理論値と同じであるため 3.3.1 項で説明したような値と同じになる。

図 7(b) のように岩石が接触しないとき、バケットにかかる主な力は岩石の重さ分を含んだ土砂の受動土圧力 F_{p3} とバケットの先端が土砂を突き進むときにかかる切削抵抗力 F_{cb3} である。受動土圧力はクーロンの土圧定理を用いて次のようになる。

$$F_{p3} = \frac{1}{2} \gamma H^2 b \frac{\sin^2(w' + \phi)}{\sin^2 w' \sin(w - \delta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(w - w' - \phi - \delta) \sin \phi}{\sin(w - \delta) \sin w'}}\right)^2}, \quad (5)$$

ただし、 b はバケットの幅、 δ はバケットと土砂の摩擦角、 w はバケットの姿勢角、 w' は次の式で定められる値である。

$$\cot w' = \cot w - \frac{2d}{H} - \frac{2(\gamma_r V - \gamma(V - V'))}{\gamma H^2 b}, \quad (6)$$

ここで、 d はバケットの水平移動距離、 γ_r は岩石の単位体積当たりの重力、 V は岩石の体積、 V' は岩石の見えている部分の体積である。岩石の体積は岩石の重さを岩石の密度で割ったものであるため、この力の値は岩石の重さに依存する。

また、切削抵抗力 F_{cb} は次のように定まる。

$$F_{cb} = \frac{W_{cb}}{\sin(\theta - \psi)} = \frac{\gamma b d_g (f_1(x) - y_t)}{\sin(\theta - \psi) \cos \psi}. \quad (7)$$

この式の $f_1(x)$ と y_t はバケット先端の上部分にある土砂の高さとバケットの高さであり、 θ はバケット先端が土砂の粒子に力を加える方向である。この θ の値は土砂の安息角より 2-3 度大きい値であることが実験的に求められている [5]。これらは地表面から盛り上がった土砂の量がバケットが水平移動した際にバケットがすくった土砂の量と同じになることから計算する。よって切削抵抗力は土砂の性質等で決まる。

以上からバケットにかかる力の理論値は重さが事前に推定されているならば定まる。それぞれの理論値と計測された値を比較し、どちらがより近い値を取っているかにより接触判定を行う。

3.3.4 手法 4: 掘り取り動作による推定

バケット底面が十分深い位置にいる際、掘り取り動作中にバケットにかかる主な力は受動土圧力 F_{p4} とバケット切削抵抗力 F_{cb4} である。

受動土圧力を求めるにあたって、仮想背面の考え方をを用いて導出する [7]。図 8 のようにバケット先端と、バケットと地表面の交差点を通る仮想背面を想定する。バケットが土砂を押すことにより、バケット先端から地表面に向かい破断面が生じる。この破断面と仮想背面に囲まれる土砂の力のつり合いと仮想背面とバケットに囲まれる土砂それぞれの力のつり合いからバケットにかかる受動土圧力を求める。

破断面と仮想背面に囲まれる土砂に関してまず説明する。仮想背面と水平方向の角度を u としこの仮想背面に F_u がかかるとする (図 9(a))。この土砂部分に対して次のような力のつり合いが成り立つ。

$$\text{水平方向: } R_1 \sin(\alpha + \delta') = F_u \sin(u + \delta'), \quad (8)$$

$$\text{垂直方向: } W_1 = R_1 \cos(\alpha + \delta') + F_u \cos(u + \delta'), \quad (9)$$

ただし α は破断面と水平方向の角度、 R_1 は破断面より下の土砂からかかる摩擦角、 δ' は岩石-土砂間の摩擦角、 W_1 は土砂の自重であり岩石の重さ分も含む。クーロン土圧理論に基づき任意の角度である破断面の角度 α は F_u を最小にするように決定させる。そのときの最小の値を $F_{\min}$ とする。

次に仮想背面とバケットに囲まれる土砂の力のつり合いを考える (図 9(b))。バケットにかかる力としては仮想背面からかかる力 $F_{\min}$ と仮想背面とバケットに囲まれた土砂の自重 W_2 がある。これらの力が力覚センサの x , z 方向にかかる力 F_x, F_z としては次のようになる。

$$F_x = F_{\min} \sin(w - \pi) + W_2 \sin(u + \delta + w - \pi), \quad (10)$$

$$F_z = F_{\min} \cos(w - \pi) + W_2 \cos(u + \delta + w - \pi). \quad (11)$$

切削抵抗力は土砂に性質によって定まり、受動土圧力は岩石の体積すなわち重さに依存するため力覚センサの値から逆算することにより岩石の重さを推定することができる。

4 パラメータ推定の実験結果

4.1 実験内容

本研究では、図 10 のような実験環境を用いた。油圧ショベルの代わりに Xarm5 Lite を使用し、油圧ショベルの動作を行った。土砂は豊浦珪砂を用い、力覚センサは Leptrino の 6 軸力覚センサ FFS055YS102U6 を用いた。

実験 1・2 では 3.3 節で述べた推定手法 1・2 によって推定された岩石の深さ及び重さと実際の値をそれぞれ比較した。実験 3 では推定手法 3 により岩石側面との接触判定が実際の接触の有無と一致するかを確認した。実験 4 ではバケットの底面が埋まっている範囲内での時間軸に対する計測値と推定手法 4 によって求めた理論値をグラフから比較した。

4.2 実験結果

実験 1 では 1390 g, 801 g, 704 g の岩石を異なる深さで埋め推定を行った。その結果は表 1 に示すようになった。深さ・重さの平均相対誤差 |(推定値) - (実測値)|/(実測値) はそれぞれ深さが 10.8%, 重さが 9.1% となった。

次に実験 2 では 1397 g の岩石に対し深さ 3 cm, 4 cm, 5 cm での実験を行い、表 2 のような結果になった。平均相対誤差は深さが 44 %, 重さが 23 % となり実験 1 の手法と比較し推定の精度は低かった。

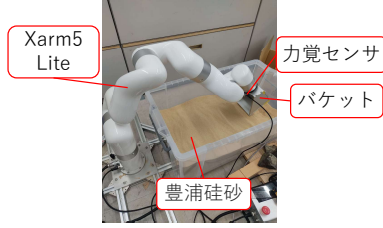


Fig.10: Experimental environment

Table 1: Results of experiment 1

実際の深さ [cm]	推定深さ [cm]	実際の重さ [g]	推定重さ [g]
3	3.18	1390	1438.95
4	4.24	1390	1470.53
5	4.88	1390	1409.20
4	3.42	801	855.95
5	5.02	801	890.06
6	6.90	801	968.52
4	5.24	704	826.44
5	5.95	704	724.25
6	6.16	704	586.58

実験 3 では 1397 g の岩石を 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm の深さで埋めた。2 cm, 3 cm, 4 cm のときには岩石との接触が起き、5 cm の時には接触が確認されなかった。結果は表 3 のようになり、それぞれの深さにおいて計測値と理論値の差が小さい方と実際の接触の有無が一致することが確認できた。

実験 4 では図 11 (オレンジ：計測値, 青：理論値) のように岩なし, 539 g, 801 g の岩石に対して掘り取り動作を行った。それぞれの場合において理論値の有効範囲内 (赤線の範囲) で理論値と計測値が近いことが確認できた。

4.3 考察

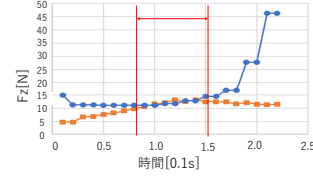
岩石の重さ・深さの推定手法である岩石の押し出しによる推定 (実験 1) は岩石の持ち上げによる推定 (実験 2) に比べて誤差が小さいことが確認できた。実験 2 の誤差の原因としては回転中心の誤差などが考えられる。本研究では、側面の下端に回転中心があるとしたが、実際は下端より上側が回転中心となっていると考えられる。実験 1 の相対誤差の結果は 10% ほどであり、事前推定の誤差としては十分である。しかし、実験 1 の推定の際にバケットにかかる力は実験 2 の推定の際にかかる力より大きく (実験 1 では 15 N ~ 20 N, 実験 2 では 5 N ~ 10 N), 実際の建設機械の規模になると 1 kN 以上の違いが出る可能性がある。そのため実験 1 に関して必要な力を減らすまたは、実験 2 の推定手法の精度を上げるといった対処をする必要がある。実験 3 に関しては事前に測定した岩石の重さを使用しているため判定することができたが、事前推定の精度にも影響されることが懸念させる。実験 4 に関してはより有効範囲内で理論値と計測値に近いことがグラフから確認できたが、数値的に解析する必要もある。

5 結論

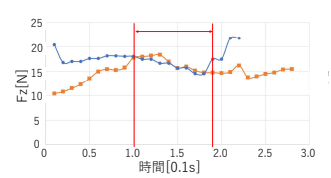
これまでの研究では、土中に埋まっている岩石などの土中埋没物を油圧ショベルにより掘り出す研究は行われていなかった。本研究では、油圧ショベルによる土中岩石の自動掘削を目指し、その掘削動作計画で必要となる岩石のパラメータを推定した。土中に埋まっているため岩石の部分に関するパラメータの推定を行うため、埋まっている部分の形状をモデル化し、岩石の深さと重さの推定を行った。具体的には、岩石を掘り出す前の事前確認のために、岩石を押し出しによる推定手法と持ち上げによる推定手法

Table 3: Results of experiment 3

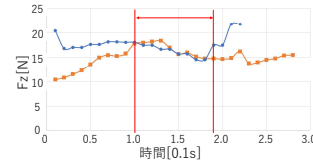
深さ [cm]	接触なし-計測値の差	接触あり-計測値の差	接触の有無
2	2.75	5.20	接触なし
3	2.00	3.60	接触なし
4	0.83	2.27	接触なし
5	4.50	3.15	接触あり



(a) 岩なし



(b) 539g



(c) 801g

Fig.11: Results of experiment 4

を提案した。また、岩石の側面との衝突判定手法と掘り取り動作中の重さの推定手法も提案した。これらの推定に必要な反力の導出方法の提案も行った。そしてこれらの手法を実機による実験で検証し、有効性を確認した。

今後は事前推定の手法に関してより精度を良くし、かつバケットにかかる力が小さい手法を構築し、実機の油圧ショベルに適用できるか確認を行う必要がある。

参考文献

- [1] 国土交通省：“建設業の働き方改革の現状と課題”，<https://www.kensetsu-kikin.or.jp/news/57a42379796b2a6c1d23286d40ea5b611f163364.pdf>, 最終閲覧日：2024 年 2 月 25 日。
- [2] 土田 航平, 大隈 久, 皿田 慈：“ホイールローダによる大塊掘り取り時の反力解析”，建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 16, pp. 2-11, 2016.
- [3] 不二原 拓也, 岡田 直人, 大隈 久, 皿田 滋：“ホイールローダの掘り取り作業時に発生する土砂反力推定”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, No. 11-5, 2011.
- [4] E Motta: “Generalized Coulomb active-earth pressure for distanced surcharge”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 120, Issue 6, pp. 1072-1079, 1994.
- [5] 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.
- [6] M Chang: “Lateral earth pressures behind rotating walls”, Canadian Geotechnical Journal, Vol 34, No. 4, pp. 498-509, 2011.
- [7] 坂井 晃：“逆 T 型擁壁の地震時における土圧計算法”，土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 69, No. 2, 226-238, 2013.

Table 2: Results of experiment 2

実際の深さ [cm]	推定深さ [cm]	実際の重さ [g]	推定重さ [g]
3	2.18	1397	1218.14
4	5.83	1397	1708.27
5	7.98	1397	1874.98