



ピラミッドの運搬を 物理的に解析する

厚木高校 2年G組 β -6班

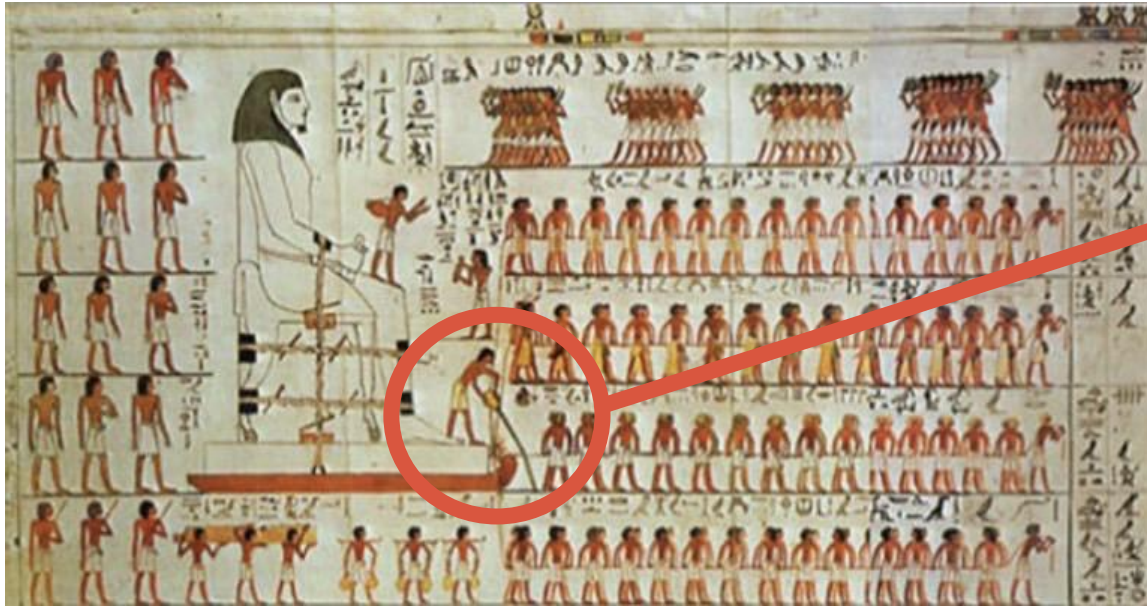
クフ王のピラミッド¹

- ・世界遺産に認定
- ・約4500年前に建造
- ・ギザ台地に位置する



図1 クフ王のピラミッドの写真

最大の謎は”運搬方法”²



当時の人々は
砂の摩擦を減らすため
運搬するときに
水を撒いていたといわ
れている(最有力説)

図2
エジプト中期王朝の王の巨像をソリに乗せて引っ張る奴隷の絵
(ジェイホテプ墓で発見)

砂質土壌の水保持特性に関する実験³

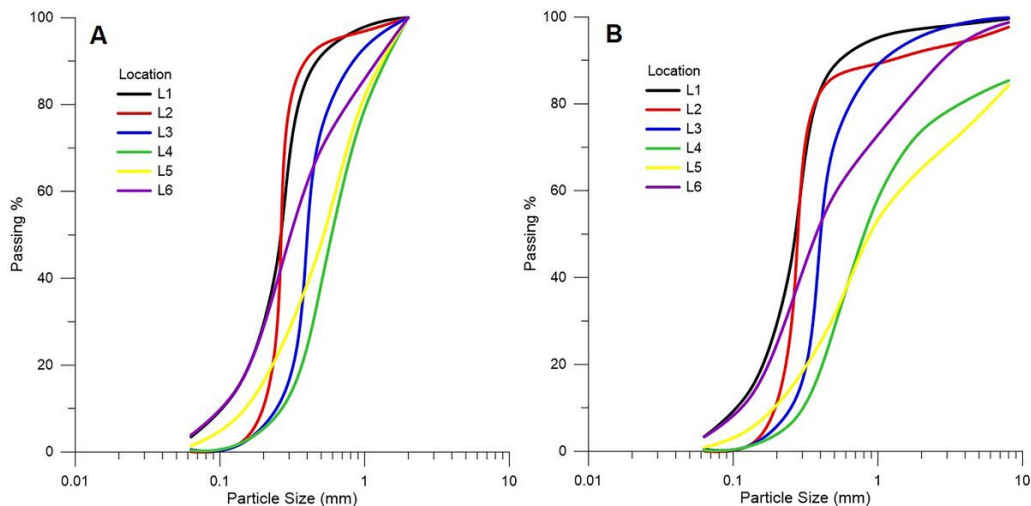


図3 砂径と水の透過率のグラフ

縦軸: 水の通過率 (浸透率) 横軸: 粒径
A: 砂利が含まれない B: 砂利が含まれる

「初期水分含有量」と「最終水分含有量」がある
＝砂に含まれる水の量には
限度がある

砂利分率がそれぞれ異なる
L1~5で最終的な水の浸透率
に差がでている
＝砂の粒の大きさ・種類に
よって水分含有量が変わる

目的

最小の摩擦力で石材を運搬するときに必要な水量を推測する

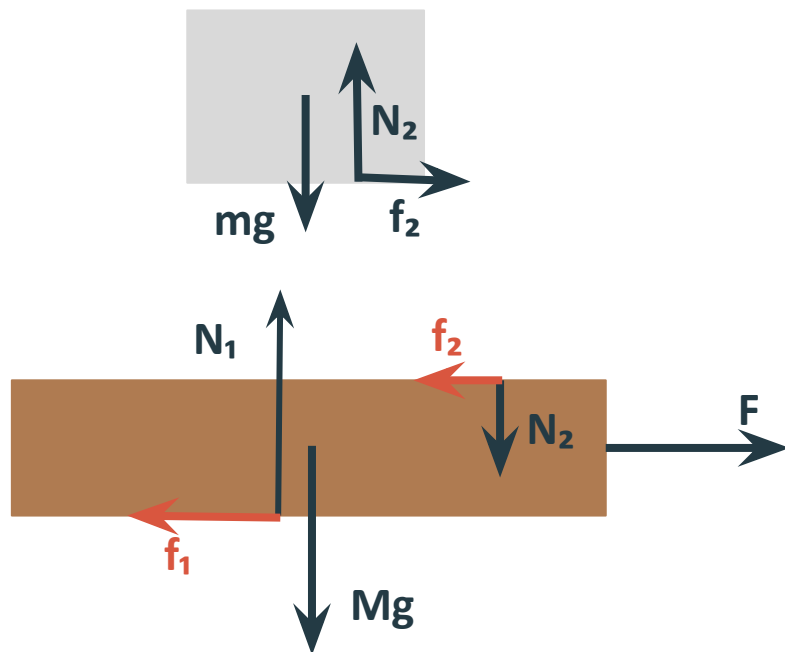
┌──────────────────────────────────┐
└ 当時のピラミッド建造の過酷さ
└ 当時の人々の知恵の偉大さ
└──────────────────────────────────┘

を物理の視点から究明する

※本実験は仮定条件下の挙動を検討することを目的としており、実際に観測された事象を直接反映するものではない

実験の留意

本実験の摩擦の定義



F =加える力 (N)

Mg =そりに働く重力

mg =重りに働く重力

N_1 =地面からの垂直抗力

N_2 =そりからの垂直抗力

及びその反作用

f_1 =そりと地面の間の最大静止摩擦力

f_2 =そりと重りの間の静止摩擦力

及びその反作用

↓

本実験では f_1+f_2 を摩擦力だと定義して行った

図4 おもりとそりに働く力の関係

実験方法

実験：砂に水を加えたときの摩擦力の大きさを計測する

材料	
珪砂8号の砂	水
そりに乗せるおもり 250g	自作そり ※そりの重さはおもりの重さに
ばねばかり 2個	ロープ
メジャー	霧吹き
段ボール	

条件： 水の蒸発は考慮しない
気温，水温，湿度は統一しない

図5 実験で使用した材料

なぜ珪砂8号を選んだのか⁴



図6 珪砂の号数と粒度

エジプトに広がるのはサハラ砂漠の砂であり、主に石英が風化してできた珪砂が含まれていたとされている

先行研究にもあったように、砂の粒の大きさや種類によって水の含有量は変化するため、なるべく現地の砂と同じ性質を持つ砂を選んだ

実験方法

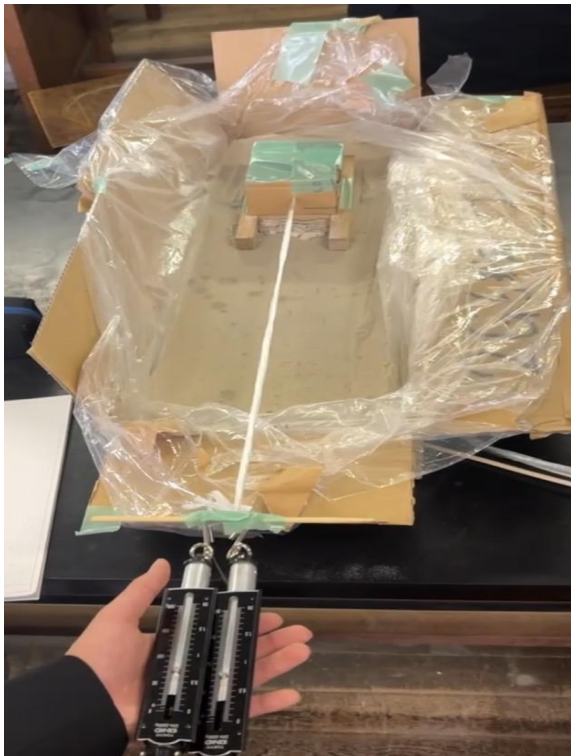


図7 実験の様子の写真

◎手順

1. 水を加えない状態でばねばかりで一定の力でそりを引っ張る
2. ※動き始めた時と動き出して値が一定になっている時のばねばかりの値を測定する
3. 水を霧吹きで20mlずつ加えて同じように値を測定する
4. ばねばかりの値に変化がなくなるまで続ける

※動き始めた時 → 最大静止摩擦

動き出して値が一定になっている時 → 動摩擦

なお、動摩擦を測定する際は 砂が積もらない うちに計測する

実験結果

1回目(気温:19.3°C 湿度:63%)

結果1 加えた水量と動摩擦力・最大静止摩擦力の関係

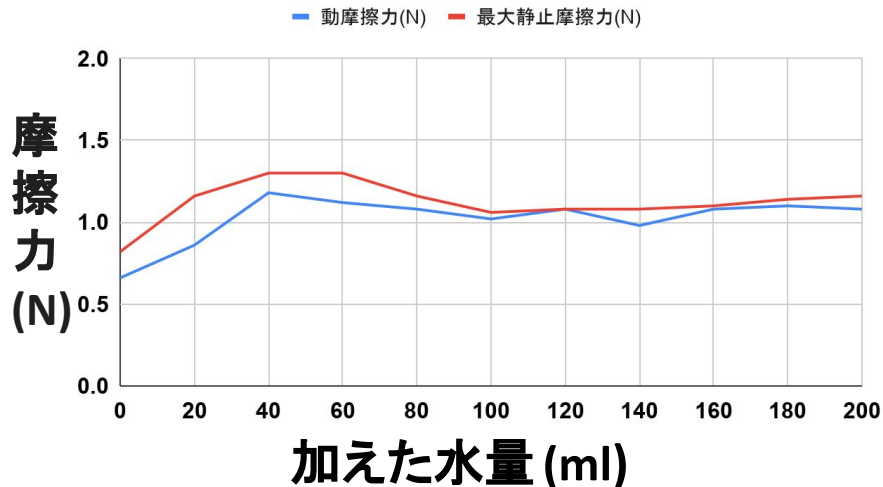


図8: 1回目の実験結果

2回目(気温:21.7°C 湿度:53%)

結果2 加えた水量と動摩擦力・最大静止摩擦力の関係

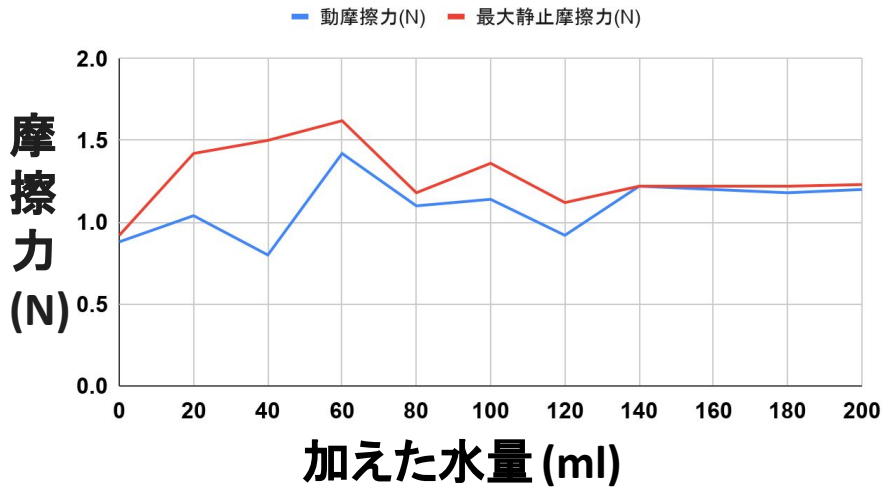


図9: 2回目の実験結果

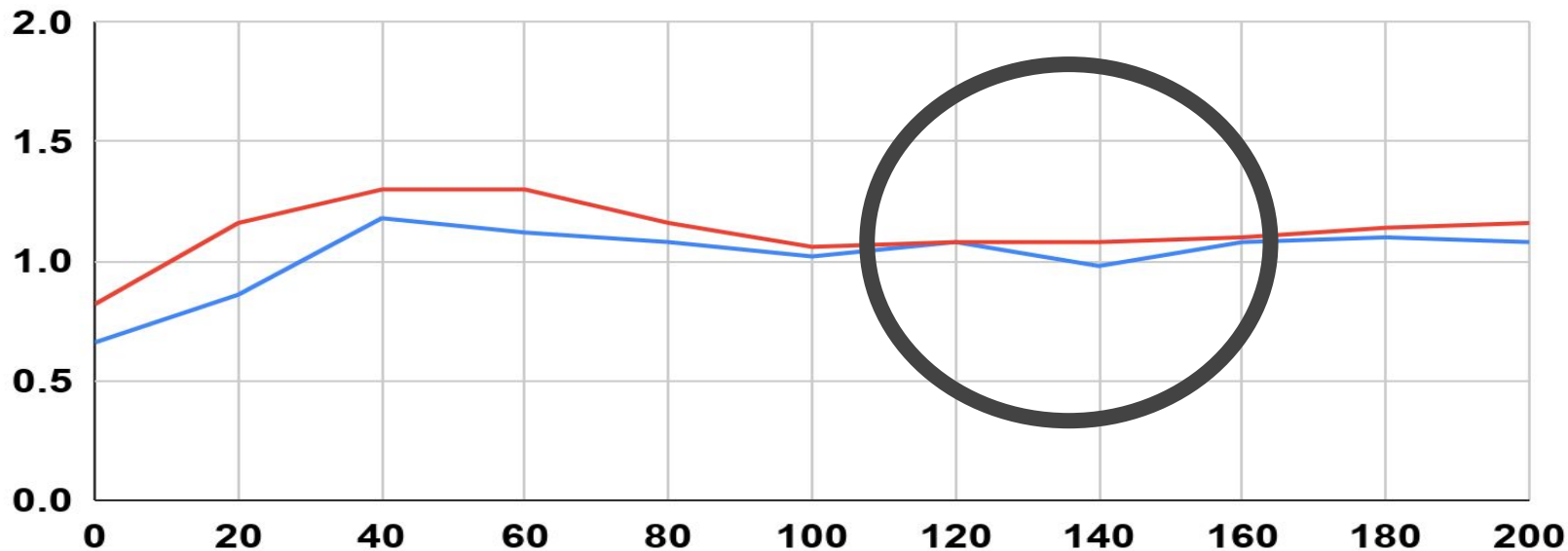
実験結果

図8：1回目の実験結果の拡大図

結果1 加えた水量と動摩擦力・最大静止摩擦力の関係

— 動摩擦力(N) — 最大静止摩擦力(N)

摩
擦
力
(N)



加えた水量 (ml)

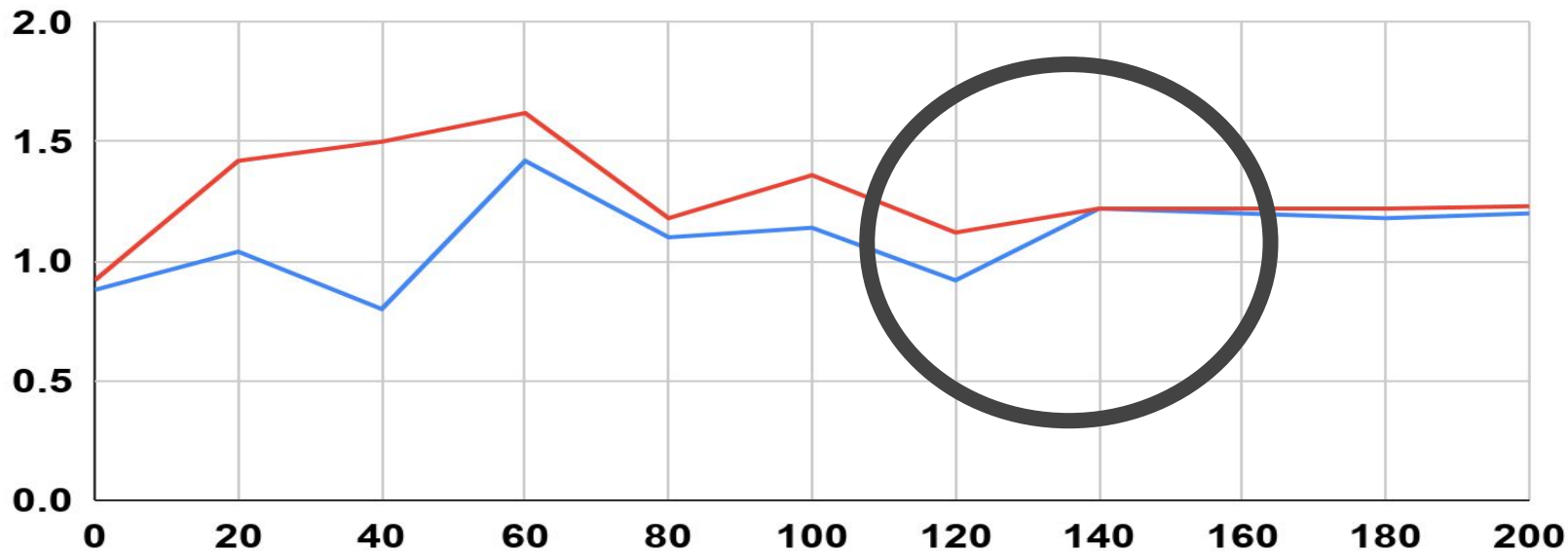
実験結果

図9：1回目の実験結果の拡大図

結果2 加えた水量と動摩擦力・最大静止摩擦力の関係

— 動摩擦力(N) — 最大静止摩擦力(N)

摩
擦
力
(N)



加えた水量 (ml)

実験結

水量0mlで起きる課題



図10 砂が盛り上がる様子

図8より、水を加えない・あるいは少量加えたのみではその上に砂が盛り上がってしまった

これより、摩擦力は小さいが距離を移動する毎に重くなってしまうため、当時の石の運搬による長距離移動には最適ではないことがわかる

本実験の条件では、砂が盛り上がらず、摩擦力も小さい最適な水量は 120-140mlだということが明らかとなった

考察

①横幅を原寸に換算する

※実際のそりの横幅：140cm 実験のそりの横幅：26.4cm

$$140 \div 26.4 \approx 5.30$$

有効数字2桁とし、5.3倍とする

※ピラミッドに使用された石が
平均して1辺が1mの立方体になる
ことを参考に私たちが仮定した^{5,6}

②実際の移動距離に換算する

※実際のそりの移動距離：300m 実験のそりの移動距離：50cm

$$30,000 \div 50 = 600$$

よって600倍とする

※クフ王の採石場からピラミッド
までの距離^{5,6}

③往復回数を2,300,000回と仮定する⁶

往復回数はピラミッド建設に使用された石の数とする

考察

よって 実験結果の 120-140ml に① ② ③ で求めた数値を掛け合わせると
 $120\text{ml} \times 5.3 \times 600 \times 2,300,000\text{個} = 877,680,000,000\text{ml} \doteq 8.8 \times 10^{11}\text{ml}$
 $140\text{ml} \times 5.3 \times 600 \times 2,300,000\text{個} = 1,023,960,000,000\text{ml} \doteq 1.0 \times 10^{12}\text{ml}$

したがって 最小の摩擦力で石材を運搬する際に必要な水量は

$8.8 \times 10^5\text{kL} \sim 1.0 \times 10^6\text{kL}$

と推測できる

◎補足

一般的な25mの学校用プールは
約422 kLであるとするとおよそ
2,070 ~ 2,400個分に相当する

考察

当時の科学技術や人口を考慮しても
実際にこの水量を運搬して使用するのは非常に難しく不可能に近い

加えて今回の実験はピラミッド建設のほんの一部分を切り取ったもので、
実際にはこの後に石材を積み上げるという更に過酷な作業が残っている

以上の点を踏まえ、この実験を通して、

- ・当時のピラミッド建設はいかに困難だったのか
- ・エジプトにとってのピラミッドの存在意義

が読み取れる

今後の展望

● 当時の状況に近づける

正確に摩擦力を測定するにはそりとおもりの質量を当時に揃える必要がある

しかし当時使用された石は約 1m^3 の体積でおよそ 2.5t もの質量があったため

縮尺実験で再現するのは非常に困難だった ⁵

今後は、圧力条件を実際の石材使用時に近づけるための実験設計や代替的な評価手法を検討する必要がある

● 気象条件と蒸発を考慮する

本実験はあくまで「気温が 20°C前後で水の蒸発が起きない」状態での水量である

しかし実際は

- ・エジプトのギザ地方は夏に気温が 40°Cを上回るような砂漠気候である
- ・建設期間は諸説あるが「採石場とピラミッドの往復に 2時間ほどかかったのではないか」という推測がある⁶

より正確な水量を推測するには

気温や湿度の条件を設定し、水の蒸発を考慮する必要性が非常に高い

今後の展望

● 水量から歴史を推測できる可能性

先に挙げた2点を改善して水量を求めようとするれば
必然的に運搬にかかった時間や労力も実験で求めることができる

現時点で未だ解明されていないクフ王のピラミッド建設における
期間・労力・当時の労働環境・運搬方法などの手がかりになるかもしれない

謝辞

本研究を遂行するにあたり、
名古屋大学 河江肖剰教授にご協力をい
ただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1.世界遺産マニア「 エジプトの世界遺産『クフ王のピラミッド(ギザの大ピラミッド)』とは？内部と高さを含めて世界遺産マニアが解説」
<https://worldheritage-mania.com/constitutional-heritage-great-pyramid-giza/> 2026年1月31日閲覧
2. Archiscape「砂と巨石の運搬方法」 <https://kurarc.exblog.jp/22560479/> 2026年1月31日閲覧
- 3.ResearchGate「Evaluation of Pedotransfer Functions to Estimate Soil Water Retention Curve」
https://www.researchgate.net/figure/Particle-size-distribution-curves-A-without-gravel-and-B-with-gravel-L1-Gdansk_fig2_381915830 2025年6月23日閲覧
- 4.amazon「珪砂【8号】6kg 乾燥砂 目地砂 塗装の下地 滑り止め ジオラマ 工作 」
<https://www.amazon.co.jp/STクラフト-珪砂【8号】6kg/dp/B07MSG6VBL?th=1> 2026年1月31日閲覧
- 5.esquire「ピラミッドは、いったいどうやって建設されたのか？」
<https://www.esquire.com/jp/lifestyle/a189852/lifestyle-news-pyramid17-0703/> 2026年1月31日閲覧
6. Kevin Jackson / Jonathan Stamp (2004) 『大ピラミッドのすべて』創元社出版