

ピラミッドで石を持ち上げる仕事は、律速ではない

— 二百三十万個の石を **146.6 m** の高さまで積む位置エネルギーは **2.0666×10^{12} J**、二十年で割ると平均 **3274.3759 W** — 人に直せば **127.57** 人分にしかない — 傾斜路の摩擦仕事は持ち上げの **3** 倍で、この比は **μ/s** という閉じた式になる — [論文362]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan | 山岸勇輝ラボ

2026年9月

— *From thinking to syncing.* —

要旨

ピラミッドの謎は「どうやって石を持ち上げたか」として語られる。本稿が問うのは持ち上げる仕事がどれだけかである——答えは驚くほど小さく、そこは律速ではない。新しい定理も法則も主張しない。第一に、石 **2.3×10^6** 個・一個 **2500 kg** で総質量は **5.75×10^9 kg** である（第2節）。第二に、角錐の重心は底から **$H/4 = 36.65$ m** にあり、位置エネルギーは **2.0666×10^{12} J** となる（第2節）。第三に、これが本稿の芯である。二十年で割ると平均 **3274.3759 W**、人に直せば **127.57** 人分にすぎない（第3節）。第四に、勾配 **0.10** の傾斜路を摩擦係数 **0.3** で引くと、摩擦仕事は持ち上げの **3.0000** 倍になる（第4節）。第五に、この比は **μ/s** という閉じた式で、ピラミッドの大きさに一切よらない（第4節）。第六に、分離子は「保存力の仕事か、経路に依存する仕事か」である（第5節）。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——位置エネルギー・角錐の重心・摩擦仕事はすべて既知である。考古学を作らない——建設方法（直線傾斜路・螺旋傾斜路・内部傾斜路）のどれが使われたかは判定しない。名前を挙げるにとどめる。年代を論じない——建設期間の推定そのものは主題ではない。二十年は仮定として明示して使う。労働を論じない——労働者の身分・食糧・組織は主題ではない。石材を扱わない——採石・整形・運搬の技術は主題ではない。仕事の大きさだけを比べる。構造を扱わない——石材の応力や安定性は主題ではない。既刊との関係：論文357は最大の電力と最大の効率が別の点にあることを示した——そこでも「どこが効くか」が問題だった。ここでは「どこが律速か」である。論文359はジャイロ効果の桁が足りないことを示した——そこでは説明が桁で落ちた。ここでは問題そのものが桁で落ちる。論文300は同根か別根かが判定できることを示した——持ち上げる仕事と引きずる仕事は、その基準で別根である。論文354は物差しの取り違えが発散を生むことを示した——ここでは問いの取り違えが「謎」を生んでいる。加えたのは、総位置エネルギーを数に出したこと、平均仕事率を人数に換算して127.57人を出したこと、摩擦仕事との比が μ/s という閉じた式になることを示したこと、重心を $H/2$ と誤ると厳密に2倍になることで式が効いていることを確かめたこと、分離子を「保存力か経路依存か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：石の数 $N = 2.3 \times 10^6$ 、一個の質量 $m = 2500 \text{ kg}$ 、高さ $H = 146.6 \text{ m}$ とする。

$$M = Nm, \quad E = Mg\frac{H}{4}, \quad \bar{P} = \frac{E}{T}$$

角錐の重心が底から $H/4$ にあることを使う。 T は建設期間である。

観察 1.1

重心は $H/2$ ではない。角錐は上ほど細いから、質量は下に偏る——一様な角錐の重心は底から $H/4$ である。

観察 1.2

持ち上げる仕事は経路によらない。重力は保存力だから、どんな道を通っても $Mg\Delta h$ である——傾斜路でも垂直でも同じ。

観察 1.3

摩擦の仕事はそうではない。道が長ければ長いほど増える——この違いが第4節の中身である。

問い：石を持ち上げる仕事は、どれだけか。

2. 位置エネルギーは 2.0666×10^{12} J である

計算 2.1：総質量と位置エネルギー（本稿で計算）。

量	値
石の数	2.3×10^6 個
一個の質量	2500 kg
総質量 M	5.7500×10^9 kg
重心の高さ $H/4$	36.6500 m
位置エネルギー E	2.0666×10^{12} J

観察 2.2

2.0666×10^{12} J は大きな数に見える。574063.58 kWh、TNT に直せば 493.9362 トン——単位を変えると印象が変わる。だから時間で割る。

観察 2.3

574063.58 kWh は、100 W の電球を 654.9 年つけっぱなしにした量である。 5.7406×10^6 時間——二十年かけて積む仕事の総量が、この程度である。

観察 2.4

重心の取り方が効いている。 $H/2$ と誤れば答は厳密に 2 倍になる——式が効いていることの確認になる。

3. 人に直すと 127.57 人分である

計算 3.1：平均仕事率と、人数への換算（本稿で計算）。

量	値
建設期間（仮定）	20 年 = 6.3115×10^8 秒
平均仕事率 $\bar{P}$	3274.3759 W
人ひとりの作業中出力	75 W
稼働（一日 10 時間・年 300 日）	年平均 25.6674 W
必要な人数	127.57 人

観察 3.2

これが本稿の芯である。127.57 人である——数万人が動員されたと考えられている工事の、持ち上げの部分だけを取り出すと、これしかない。

観察 3.3

つまり「どうやって持ち上げたか」は、謎の中心ではない。仕事の総量が足りている——謎があるとすれば、それは別の場所にある。

観察 3.4

ただし一個あたりの力は別問題である。2500 kg を持ち上げるには 24517 N が要る——総エネルギーが小さいことと、一回の動作が軽いことは別である。仕事率の話と力話を混ぜない。

観察 3.5

論文359 と同じ形である。論文359 ではジャイロ効果が桁で落ちた——ここでは「持ち上げの謎」が桁で落ちる。どちらも、大きさを見ないまま話が続いていた。

4. 摩擦は持ち上げの三倍である

計算 4.1：勾配 $s = 0.10$ の傾斜路を摩擦係数 $\mu = 0.3$ で引く場合（本稿で計算）。

量	値
持ち上げの仕事 E	$2.0666 \times 10^{12} \text{ J}$
摩擦の仕事 E_{fric}	$6.1999 \times 10^{12} \text{ J}$
比	3.0000 倍
閉じた式	μ/s

観察 4.2

比は μ/s に厳密に一致する。 $0.3/0.10 = 3$ ——石の数にも質量にも高さにもよらない。ピラミッドの大きさが消える。

観察 4.3

勾配を緩くすると悪化する。 0.05 にすると摩擦仕事はちょうど 2 倍になる——「楽な坂」は距離が伸びるぶん総仕事を増やす。

観察 4.4

ここに設計の交換がある。勾配を緩くすれば一度に要る力は減るが、総仕事は増える——論文357 で最大電力と最大効率が別の点にあったのと同じ形である。

観察 4.5

摩擦を減らす工夫が効く理由もこれである。 μ を 0.3 から 0.1 にすれば比は 3 から 1 になる——水を撒く・櫓を使う・木を敷くといった工夫は、総仕事を三分の一にする。

観察 4.6

正直に言えば—— $\mu = 0.3$ も $s = 0.10$ も本稿が置いた仮定である。実際の値は分かっていない——言えるのは、比が μ/s で決まり、大きさによらないという構造だけである。

5. 分離子：保存力か、経路依存か

観察 5.1

分離子——その仕事を経路によらないか、経路の長さに比例するか。

	経路への依存	大きさ	減らす方法
持ち上げ（重力）	よらない	$2.0666 \times 10^{12} \text{ J}$	無い（高さで決まる）
引きずり（摩擦）	比例する	$6.1999 \times 10^{12} \text{ J}$	μ を下げる・勾配を立てる

観察 5.2

右端の列が実務の全部である。上の行は減らせない——下の行は減らせる。だから工夫はすべて下の行に向かう。

観察 5.3

論文300の基準で別根である。どちらも単位はジュールで、同じ「仕事」と呼ばれる——だが一方は状態量の差、他方は経路積分である。論文356で P と Q が別だったのと同じ形である。

観察 5.4

分離子は動かせる。垂直に持ち上げれば摩擦の項は消える——そのかわり、一度に要る力が最大になる。どちらを取るかは、人手と道具の制約が決める。

観察 5.5

正直に言えば——127.57 人も 3.0000 倍も、明示した仮定の上での値である。石の数・期間・作業時間を変えれば別の数が出る——動かないのは、持ち上げの仕事が経路によらないことと、摩擦との比が μ/s になることだけである。

観察 5.6

最後に一つ——「どうやって」を問う前に、「どれだけ」を計算するとよい。持ち上げの総量は 127.57 人分しかなく、そこに謎はなかった——大きさを見ないまま問いを立てると、律速でない場所を何十年も掘ることになる。

6. 点呼と結び

1. 総質量 $5.7500 \times 10^9 \text{ kg}$ (計算 2.1) : 2.3×10^6 個 $\times 2500 \text{ kg}$ 。
2. 重心は底から 36.65 m (観察 1.1) : $H/2$ ではなく $H/4$ 。
3. 位置エネルギー $2.0666 \times 10^{12} \text{ J}$ (計算 2.1) : 574063.58 kWh 。
4. 平均 3274.3759 W (計算 3.1) : 二十年で割って。
5. 127.57 人分 (計算 3.1) : 持ち上げだけなら。
6. 一個には 24517 N が要る (観察 3.4) : 総量と一回分は別。
7. 摩擦は $6.1999 \times 10^{12} \text{ J}$ (計算 4.1) : 持ち上げの 3.0000 倍。
8. 比は μ/s (観察 4.2) : 大きさによらない。
9. 勾配を半分にすると摩擦は 2 倍 (観察 4.3) : 楽な坂は総仕事を増やす。
10. 重心を $H/2$ と誤ると厳密に 2 倍 (観察 2.4) : 式が効いている。

結び：ピラミッドの謎は「どうやって石を持ち上げたか」として語られる——だがその前に、持ち上げる仕事はどれだけかを計算しておくとい。石 2.3×10^6 個・一個 2500 kg で総質量は $5.75 \times 10^9 \text{ kg}$ ——角錐の重心は上ほど細いため底から $H/2$ ではなく $H/4 = 36.65 \text{ m}$ にあり、位置エネルギーは $2.0666 \times 10^{12} \text{ J}$ 、

574063.58 kWh になる。重心を $H/2$ と誤れば答は厳密に 2 倍になる。そして二十年で割ると、平均 **3274.3759 W** にしかない——作業中 **75 W**・一日 10 時間・年 300 日で働く人の年平均出力は **25.6674 W** だから、持ち上げだけなら **127.57** 人分で足りる。数万人が動員されたと考えられている工事の、持ち上げの部分だけを取り出すと、これしかない。ただし総エネルギーが小さいことと一回の動作が軽いことは別で、**2500 kg** を持ち上げるには **24517 N** が要る。律速は引きずるほうにある——勾配 **0.10** の傾斜路を摩擦係数 **0.3** で引けば摩擦仕事は **6.1999×10^{12} J**、持ち上げの **3.0000** 倍である。しかもこの比は μ/s に厳密に一致し、石の数にも質量にも高さにもよらない。ピラミッドの大きさが消える。勾配を **0.05** に緩くすれば摩擦仕事はちょうど 2 倍になり、「楽な坂」は距離が伸びるぶん総仕事を増やす。逆に μ を **0.3** から **0.1** にすれば比は **3** から **1** になり、水を撒く・橇を使う・木を敷くといった工夫が総仕事を三分の一にする。分けているものは一つ——その仕事を経路によらないか、経路の長さに比例するか。持ち上げの仕事は高さで決まり減らせないが、摩擦の仕事は減らせる。だから工夫はすべて後者に向かう。どちらも単位はジュールで同じ「仕事」と呼ばれるが、一方は状態量の差、他方は経路積分であって、論文300の基準で別根である。正直に言えば—— $\mu = 0.3$ も $s = 0.10$ も期間 20 年も本稿が置いた仮定であり、実際の値は分かっていない。動かないのは、持ち上げの仕事が経路によらないことと、摩擦との比が μ/s になることだけである。最後に一つ——「どうやって」を問う前に、「どれだけ」を計算するとよい。持ち上げの総量は **127.57** 人分しかなく、そこに謎はなかった。大きさを見ないまま問いを立てると、律速でない場所を何十年も掘ることになる。

参考文献

1. Lehner, M. (1997). *The Complete Pyramids*. London: Thames & Hudson.
 2. Arnold, D. (1991). *Building in Egypt: Pharaonic Stone Masonry*. Oxford: Oxford University Press.
 3. Fall, A., Weber, B., Pakpour, M., Lenoir, N., Shahidzadeh, N., Fiscina, J., Wagner, C., Bonn, D. (2014). Sliding Friction on Wet and Dry Sand. *Physical Review Letters*.
 4. Wier, S. K. (1996). Insight from Geometry and Physics into the Construction of Egyptian Old Kingdom Pyramids. *Cambridge Archaeological Journal*.
 5. Astrand, P.-O., Rodahl, K. (1986). *Textbook of Work Physiology* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
 6. 山岸勇輝 (2026). 『第三百回の点呼——同根か別根かは判定できる』[論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
 7. 山岸勇輝 (2026). 『長さは、曲線を測る量ではなくなることがある』[論文354]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22696977
 8. 山岸勇輝 (2026). 『電流は流れているのに、仕事をしていない』[論文356]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697124
 9. 山岸勇輝 (2026). 『最大の電力と最大の効率、同じ点にない』[論文357]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697180
 10. 山岸勇輝 (2026). 『自転車不倒の理由に、ジャイロ効果は桁が足りない』[論文359]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697293
-

