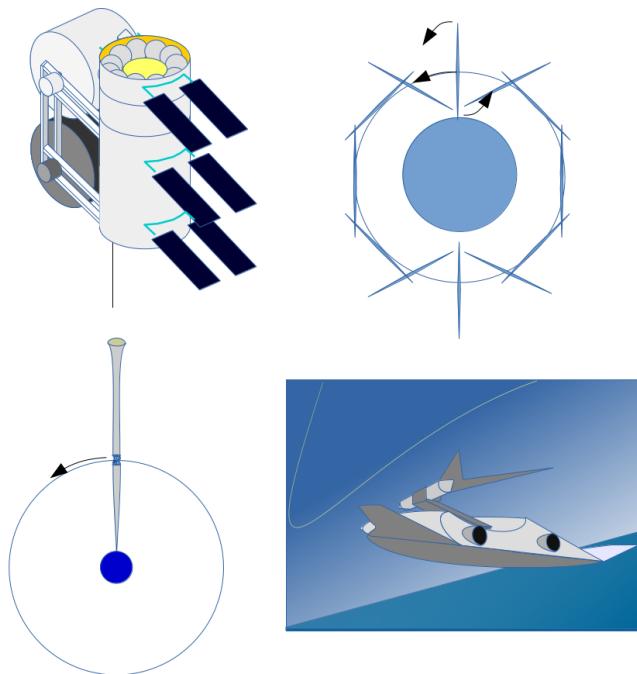


# 宇宙への架け橋

～数式で遙か彼方へ向かう演習書～

VER.20230813



秘密結社オープンフォース

# 本書の狙い

## 宇宙に行こう

表1. 幾多の人々が天界を既に駆けています。共通の言語、数学によって。時代、政治、思想が異なっても、同じ世界に行くことができます。いつの日か、異なる星に住む人たちと話をする時、同じように数学による意思疎通が図られるでしょう。

### 本書において

ブラックボックスとなるべくなくします。

公式ができる限り導き出すようにします。自分の手でいちから計算していきます。

### 有効数字は3桁

計算の結果は有効数字内に四捨五入します。また、計算の途中で導き出した数字も同様に扱います。単位系はMKS単位系を使います。

### 解答

演習の解答は、全ての答えを載せていません。過程や必要なデータは巻末資料やWebで検索したりして調べてみてください。回答そのものを記した場合は、計算過程は記しません。回答そのものを記載していない場合は、回答に結びつく資料を書いています。

# 目次

- 本書の狙い
  - 宇宙に行こう
  - 本書において
    - ブラックボックスをなるべくなくします。
    - 有効数字は3桁
    - 解答
- 目次
- 演習編
  - 人類に必要な空間
    - 回答？
  - 増えすぎた人口
    - 回答？
  - 軌道発電衛星
    - 回答？
  - 宇宙へのコスト
    - 回答？
  - 宇宙に行く条件は？
    - 回答？
  - 第一宇宙速度をすべて位置エネルギーに変換すると？
    - 回答？
  - 國際宇宙ステーションはどれだけの速さ？
    - 回答？
  - 國際宇宙ステーションの位置エネルギーと運動エネルギーの割合は？
    - 回答？
  - 第二宇宙速度を求めよう！
    - 回答？
  - 第三宇宙速度を求めよう！
    - 回答？
  - 第二宇宙速度に加速するには？
    - 回答？
  - 第三宇宙速度に加速するには？
    - 回答？
  - 第一宇宙速度に加速するには？
    - 回答？
  - 重力損失を考える
    - 回答？
  - 宇宙へのコスト
    - 軌道エレベーターに必要なエネルギー
    - 軌道エレベーターの建設コスト
    - 軌道エレベータはどこが無理か？
      - 回答？
    - エレベーターの強度を求める
    - 材料の強度
    - 塔を作る
    - 引張強さ
    - カーボンナノチューブ開発の現在
    - 破断長 680km 材料で
    - ブートストラップ
    - 100兆円
    - 宇宙に行くための難関
    - 静止軌道を目指さない
    - 極超音速スカイフック
      - 高度10000km
      - 地表から5000km
    - 非同期軌道スカイフック
    - 超高空でドッキング
    - ロータベータ
    - まとめ
  - 提案編
  - 資料篇
    - 基本的な数値
      - 重力加速度
      - 地球の赤道半径
      - 地球の軌道半径
    - 平均軌道速度

- 1年
  - 光の速度
  - 万有引力定数
  - 地球の質量
  - 太陽の質量
  - 静止軌道高度
- コミックマーケット102版あとがき

## 演習編

### 人類に必要な空間

立って半畳、寝て一畳という言葉があります。一畳というのは  $85 \times 170 \sim 100 \times 200\text{cm}$  ですが、計算しやすく  $1m \times 2m$  とします。世界中の人口70億人として、一人あたり2平方メートルに入れるとすると、どのくらいの面積が必要でしょうか。

1. 四国ぐらい
2. グリーンランドくらい
3. オーストラリア大陸ぐらい

回答？

- 佐渡ヶ島  $18,780\text{km}^2$
- グリーンランド  $2,170,000\text{km}^2$
- オーストラリア大陸  $7,690,000\text{km}^2$

さて、70億人分のスペースは  $140\text{億}\text{m}^2$  ですが・・・？

### 増えすぎた人口

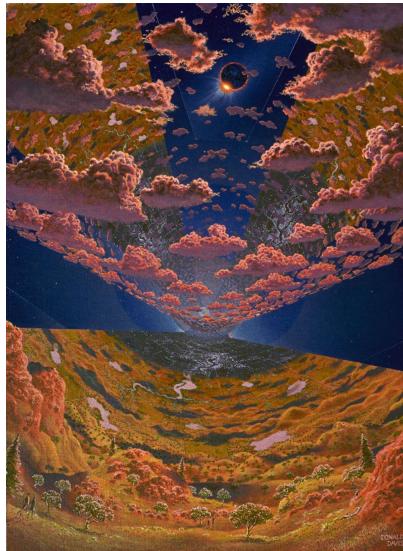
「機動戦士ガンダム」では、宇宙世紀という年号が使われています。UC0079というように、Universal Century を略して使われていて、宇宙移民が始まった年を宇宙世紀元年という設定になっています。

UC0000,人口が90億人。UC0050,人口110億のうち、90億が宇宙へ。

"地球の周りには巨大なスペース・コロニーが数百基浮かび、人々はその円筒の内壁を人口の大地とした。その人類の第二の故郷で、人々は子を産み、育て、そして死んでいった。"

— 機動戦士ガンダム(劇場版) オープニング

さて、スペースコロニーは直径4マイル × 長さ20マイル で3枚の地上面を持ちます（オニール・島3号案）。kmに直すと直径6.4 km、長さ32 kmです。



スペースコロニーが数百機ということで、仮に500機としましょう。そのうち、90億人が500機に住むとすると、人口密度はどれほどになるでしょうか。計算してみましょう。

回答？

先の図のように、円筒の側面の半分は窓なので、陸の面積 S は

$$(3.14 \times 6.4 \times 32 / 2) = 322[\text{km}^2]$$

で人口は一基あたり

$$9.0 \times 10^9 / 5.0 \times 10^2 = 1.8 \times 10^7 [\text{人}]$$

、すなわち 1800 万人です。とすると人口密度は

$$1.8 \times 10^7 / 3.2 \times 10^2 = [ ] [\text{人}/\text{km}^2]$$

参考：東京都の人口密度は面積が  $2194\text{km}^2$  で2022年末頃の人口は 1400万( $= 1.4 \times 10^7$ )人 程度で 人口密度は・・・

$$1.4 \times 10^7 / 2.2 \times 10^3 = [ ] [\text{人}/\text{km}^2]$$

ちなみに、50年間で70億人が宇宙に移民するとなると、1日あたり38万人宇宙に行かないといけません。羽田空港の利用者が1日17~19万人。2015年度の渋谷駅1日平均秋葉原駅の利用者が372,234なので、宇宙港がひとつだけならそのくらいの賑わいになりますね！

## 軌道発電衛星

先の計算は洒落にならなかったですね。人口爆発分をスペースコロニーで吸収するというのはちょっと非現実っぽいです。とはいっても、宇宙には月や火星もありますね。また人口を吸収しなくても資源やエネルギーのために宇宙を目指す理由もあります。ここで、宇宙からエネルギーを貢うとして、 $10\text{km} \times 10\text{km}$  の軌道発電衛星を考えます。太陽定数を  $2\text{kw/m}^2$  として、効率10%で地上に送電できるとして、1テラワットを貢うためには太陽発電衛星がどれだけ必要でしょう。

2019年の世界のエネルギー消費量は、169億toe (toe:原油換算トン) でした<sup>[\*1]</sup>。将来200億toe として、その10%を貢うとすれば、太陽発電衛星はどれだけ必要でしょうか。

太陽発電衛星の質量を、1平方メートルあたり、100g(グラム) だとします。 $10\text{km} \times 10\text{km}$  の太陽発電衛星の質量はどれだけになるでしょう。

[\*1]: 令和2年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2021)

回答？

$1\text{toe} = 42\text{GJ}$  となります。1GJ は  $278\text{kwh}$  となるので、

200億toe を1年で均すと26.6テラワットになります。

$10\text{km} \times 10\text{km}$  の太陽発電衛星の質量は、10000t。

## 宇宙へのコスト

H2Aだと、ブースター4基で4.6トンを打ち上げられ、コスト120億円。現在開発中のH3ロケットだと、打ち上げ能力6.5トンで打ち上げ費用は約50億円（最小構成時）。

1万トンを打ち上げるにはいくらかかるでしょう？

日本の電力会社の最大発電量力は、2019年度で16500万KW<sup>[\*2]</sup>。全部を太陽発電衛星にすると何トンになるでしょうか？？

[\*2]: 電気事業のデータベース (INFOBASE 2020) 電気事業連合会

回答？

日本のお金として、2021年度一般会計予算は約106.6兆円。2020年度の原油輸入額は42.39×10億ドル<sup>[\*3]</sup>。

割に合うでしょうか？

[\*3]: 令和2年(2020)資源・エネルギー統計年報(石油) 経済産業省

## 宇宙に行く条件は？

まず、宇宙太陽発電衛星を建設するためには、太陽発電衛星を最低でも人工衛星にしなければなりません。さもなければエネルギーを失って地上に墜落するか、地球重力を振り切って惑星間宇宙に脱出ってしまいます。一度人工衛星になれば、エネルギーはほとんど失わずに地球上の軌道に位置することができます。人工衛星になる最低条件は、地球の大気圏外で第一宇宙速度で周回することです。

第一宇宙速度を求めましょう。

$$a = r\omega^2$$

の角速度と加速度の公式にrは地球半径、gは重力加速度、ωは角速度としてあてはめて以下のようになります。

$$g = r\omega^2$$

角速度ωと速度vの変換は

$$r\omega = v$$

となります。さて、ロケットで大気圏外に行くのではなく、ジェット機で大気圏上層まで加速して、最後にちょっとだけ大気圏外で加速するようにしたらどうでしょう？

第一宇宙速度の

マッハに直すどのくらいでしょうか。音速は340m/sとなります。

回答？

飛行機がジャンボジェットだとマッハ0.9ですね。軍用機だともっと出せます。F-15などの戦闘機だとマッハ2.5が最高速度ですが、この速度は1分程度しか出せません。持続的に出すとなるとXB-70などだとマッハ3程度出せるようになります。

## 第一宇宙速度をすべて位置エネルギーに変換すると？

位置エネルギーの公式は  $mgh$  となります。運動エネルギーは  $\frac{1}{2}mv^2$  となります。

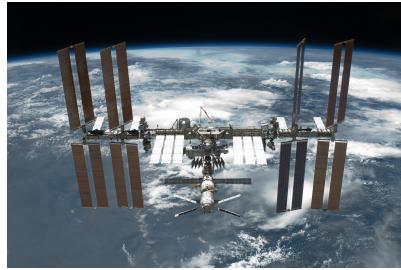
回答？

$\frac{1}{2}mv^2$  ということで、単純に  $v = 7.9 \text{ km/s}$  をこの式にあてはめます。位置エネルギーに変換するには重力加速度  $g$  で割ります。そうすると、 $6.24 \times 10^7 \text{ m}$ 。地球の半径が  $6.36 \times 10^6 \text{ m}$  ので、地球の直径の5倍程度の高さになります。

しかしながら、このくらいだと重力が異なってきます。これだけ離れると重力が弱くなるので、実際にはもっと高い位置に相当することになります。

## 国際宇宙ステーションはどれだけの速さ？

さきほど、第一宇宙速度を求めましたが実際の人工衛星もそのとおりでしょうか？国際宇宙ステーションは高度400km程度の軌道です。



回答？

さきほど、第一宇宙速度を求めたときに  $r = 6.38 \times 10^6 \text{ m}$  でしたが、400km 上空ということで  $r$  は  $6.38 \times 10^6 + 4 \times 10^5 \text{ m}$  となります。計算すると、第一宇宙速度より増えるでしょうか？減るでしょうか？

## 国際宇宙ステーションの位置エネルギーと運動エネルギーの割合は？

先ほど計算した速度エネルギーと、400km の高さの位置エネルギーはどれだけ違うか計算してみましょう。位置エネルギーの計算は重力が高度によって変化しますが今回は地表から変化せずとして近似します。

回答？

運動エネルギーは上の演習で求めた  $7.7 \text{ km/s}$  を使い、

$$\frac{1}{2}m(7.7 \times 10^3)^2$$

。これと 位置エネルギーとして  $mgh$ ,  $h$  は 400km として計算したものを比較します。

## 第二宇宙速度を求める！

地上から真上に初速  $v$  で打ち上げた物体は、頂点で止まってその後落ちてきます。初速  $v$  をどんどん大きくすると、頂点はどんどん高くなります。初速  $v$  がある大きさ  $v_2$  以上になると、もう落ちてこなくなってしまいます。その  $v_2$  を求めましょう。なお、ここでは真上に打ち上げた場合としてますが、真横に発射しても、 $v_2$  より大きな速度だと地球周回軌道から離れてしまいます。

回答？

頂点の位置エネルギー  $E$  を求めれば、初速が求まります。

$$E = 1/2mv^2$$

しかし、頂点は無限遠ですね。なのでここでは点電荷の位置エネルギーの式

$$U = k(Qq/r)$$

を思い出して、それを応用します。点電荷の位置エネルギーは無限遠から距離  $r$  まで近づいた時に蓄えられたエネルギーなので、以下の式で地球から無限遠から地球半径  $R$  まで近づいたとしてエネルギーが求まります。

$$E = G(Mm/R)$$

それから、地球質量  $M$  と万有引力定数  $G$  をあてはめ、上の式にあてはめて初速が求まります。

## 第三宇宙速度を求める！

第二宇宙速度より大きな初速で打ち上げた物体は、宇宙の彼方に行ってしまうのではなく、太陽の回りを廻るようになります。更に初速を大きくしていき、ある速度  $v_3$  を超えると、太陽の引力を脱して今度こそ宇宙の彼方にいってしまいます。その  $v_3$  を求めましょう。

回答？

先の式を使い、

$$E = G(M_s m / R_s)$$

ここで、 $M_s$ は太陽質量、 $R_s$ は地球の軌道半径です。これを使って速度を求めると、 $42.1\text{km/s}$ となります。しかしながら地球の公転速度が $29.8\text{km/s}$ あるので、それをうまくつかうと地球の公転軌道からは $12.3\text{km/s}$ の速度があればいいことになります。ただし、地球の地上からは第二宇宙速度分のエネルギーが必要なので、それを足さなければいけません。それを足すと、 $16.7\text{km/s}$ となります。あれ？ 何故、 $12.3 + 11.2 = 23.5\text{km/s}$ じゃないのでしょうか？？

## 第二宇宙速度に加速するには？

第一宇宙速度で地表スレスレを周回している状態から、第二宇宙速度に加速するには $7.9\text{km/s}$ から $11.2\text{km/s}$ に $3.3\text{km/s}$ 分を加速する必要があります。加速にはいろいろな方法がありますが、ここではオーソドックスにロケット噴射を行おうとします。ロケット噴射は質量のある物体を噴射してその反作用で推進します。高校物理の範疇での簡単なモデルを考えます。2kgの物体のうち、ペイロードが1kg、プロペラントが1kgとします。通常プロペラントは熱や電気力などを使い、気体やプラズマの状態で連続的に噴出します。しかしながら極端に簡略化して、プロペラントは剛体の固体で、それを一回で噴出して反動力で推進するとしましょう。例えば、プロペラント 1kg を $1\text{m/s}$ の加速を与えて後方に一気に噴出すると、ペイロードは前方に $1\text{m/s}$ 分の加速を得ます。一方、プロペラント 100g を $19\text{m/s}$ の力積を与えて後方に一気に噴出すると、ペイロード 1kg とプロペラント 0.9kg は $1\text{m/s}$ 分の加速を得ます。

使用プロペラント質量	使用プロペラント加速	ペイロード+残プロペラント質量	ペイロード+残プロペラント加速
1kg	-1m/s	1kg	1m/s
100g	-19m/s	1.9kg	1m/s
10g	-199m/s	1.99kg	1m/s
1g	-1999m/s	1.999kg	1m/s
100mg	-19999m/s	1.9999kg	1m/s
10mg	-199999m/s	1.99999kg	1m/s
1mg	-1999999m/s	1.999999kg	1m/s
0.1mg	-19999999m/s	1.9999999kg	1m/s

表2. これ以上だとプロペラントが光速度に近づいて相対論効果が発生してきますのでひとまずここまでにしておきます。

当然ながら、プロペラントの加速が大きければ大きいほど少量のプロペラントで済み、効率がいいですね。

さて、プロペラントをこのように加速するにはどのようにすればいいのでしょうか？

方法	上限	上限値の由来
圧縮空気	340m/s	標準状態の空気の音速
化学燃焼1	786m/s	炭素-酸素の燃焼温度のCO <sub>2</sub> 分子速度
化学燃焼2	1230m/s	水素-酸素の燃焼温度のH <sub>2</sub> O分子速度
化学燃焼3	3700m/s	水素-酸素の燃焼温度のH <sub>2</sub> 分子速度
ばねなどの機械的加速	6000m/s	鋼鉄の縦波速度

表3. プロペラント加速方法その1

ここで、ロケットの性能指標によく使われる「比推力」という概念を導入します。「比推力」はプロペラント噴出速度を重力加速度 g で割った値です。

方法	上限	上限値の由来	比推力
圧縮空気	340m/s	標準状態の空気の音速	35
化学燃焼1	786m/s	炭素-酸素の燃焼温度のCO <sub>2</sub> 分子速度	80
化学燃焼2	1230m/s	水素-酸素の燃焼温度のH <sub>2</sub> O分子速度	126
化学燃焼3	3700m/s	水素-酸素の燃焼温度のH <sub>2</sub> 分子速度	378
ばねなどの機械的加速	6000m/s	鋼鉄の縦波速度	612

表4. プロペラント加速方法その2

方法	上限	上限値の由来	比推力
アーク推進1	637m/s	水銀をアーク加熱で3000°Cにした分子速度	65
アーク推進2	3410m/s	リチウムをアーク加熱で3000°Cにした分子速度	347
レーザー熱推進1	2200m/s	アルミニウムをレーザー加熱で5000°Cにした分子速度	224
イオン推進1	149000m/s	10価キセノンプラズマを 1.5kV 加速	15200
イオン推進2	200000m/s	1価マグネシウムプラズマを 5kV 加速	20400
イオン推進3	1110000m/s	3価リチウムプラズマを 15kV 加速	113000

表5. プロペラント加速方法その3

方法	上限	上限値の由来	比推力
原子力推進1	600000m/s	重水素-ヘリウム3ペレットの核融合直後の重水素原子核速度	61200
原子力推進2	26800000m/s	ダイダロス計画第2段における核融合推進	2730000

表6. 上記のプロペラント加速は単純計算で、実際にはノズルで增速したり、変換損失があったりしていろんな左右要素が在ります。そうであっても加速に使えるプロペラントは良さそうなものが多くありますよね。どれを使っても、第一宇宙速度から第二宇宙速度に到達するのはそんなに難しくは無さそうです。

では例として、液体酸素-液体水素ロケットを使って第一宇宙速度に達している宇宙船を第二宇宙速度に增速することを考えてみましょう。

水素-酸素の質量比を3:1ぐらいにして完全燃焼から水素を過剰とし、燃焼排気速度を熱運動による速度をノズルで增速して約4,000 m/sとします。

先の簡単な想定では、プロペラントを固体の塊としていっぺんに排出する方法で考えていましたが、実際には気体などを連続的に噴出することになります。その場合、連続的に噴出して最終の速度と残り質量がいくらになるかというの公式があります。

ツォルコフスキイの公式で、

$$\Delta V = w \ln \frac{m_0}{m_T}$$

で、增速分  $\Delta V$ 、排気速度  $w$ 、初期質量  $m_0$ 、噴射後の残り質量  $m_T$  となります。

この式にあてはめてみましょう。

回答？

ツォルコフスキイの公式で、

$$\Delta V = w \ln \frac{m_0}{m_T}$$

で、增速分  $\Delta V = 3.3 \text{ km/s}$ 、排気速度  $w = 4000 \text{ m/s}$  をあてはめて変形、

$$\frac{m_0}{m_T} = \exp \frac{\Delta V}{w}$$

を求めてみましょう。これで求まるのは、1kgのペイロードを第2宇宙速度に增速するためのプロペラントを含んだ增速前の全体質量です。

1kgの何倍のプロペラントが必要でしょうか。

### 第三宇宙速度に加速するには？

惑星軌道から、太陽系脱出速度にするために  $11.2 \text{ km/s}$  から  $16.7 \text{ km/s}$  の差分  $5.5 \text{ km/s}$  を加速するにも第二宇宙速度を得るためにしきみをつかうとそんなに難しくは無さそうです。実はそれだけではなく、惑星軌道からだと月や惑星の引力を使うスイングバイ、太陽風を使うソーラーセイルなどの方法も使うことができ、速度を得るための選択肢が広がります。

スイングバイやソーラーセイルは地球軌道でも使用できますが、利用シーンは惑星軌道上で使うほうが使いでが良くなります。

### 第一宇宙速度に加速するには？

第二、第三宇宙速度に達するのが簡単とすると、第一宇宙速度に達するのも簡単でしょうか！？第一宇宙速度から第二宇宙速度に達するために、 $3.3 \text{ km/s}$  の加速のために液体酸素-液体水素ロケットを使ってペイロードの1.28倍の燃料が必要でした。今回は $7.9 \text{ km/s}$  の加速ですから1.28倍の2倍強のプロペラントがあればいいでしょうか？計算してみましょう！

~~略~~

$$\frac{m_0}{m_T} = \exp \frac{\Delta V}{w} = \exp \frac{7.9 \times 10^3}{4000} = 7.2$$

となります。つまり、1kgのペイロードに7.2kg-1kgで6.2kgのプロペラントが必要ということですね。あれ、結構プロペラントが必要になりますね。

では、比推力の大きいキセノンイオン推進エンジンを使ったらどうでしょう！

方法	上限	上限値の由来	比推力
イオン推進1	149000m/s	10価キセノンプラズマを1.5kV 加速	15200

表7. 計算してみると、

$$\frac{m_0}{m_T} = \exp \frac{\Delta V}{w} = \exp \frac{7.9 \times 10^3}{149000} = 1.05$$

つまり、1kgの質量を軌道に上げるのに、50gのプロペラントしか使わないということです。イイですね！・・・いやいや、そうはいきません。実際にはイオン推進エンジンなどは、エンジン自体の質量がかなりあり、それに比べて推力はホンの少ししか出ません。無重力状態で少しづつ加速する、すなわち軌道上から第二宇宙速度や第三宇宙速度を獲得するのに適したエンジンです。地上の速度ゼロ状態から第一宇宙速度に達するまでは、垂直打ち上げの場合ロケットの推力で発生した加速度から地球の重力が差し引かれてしまうので、とにかく加速度を  $g$  の何倍も稼がなければなりません。そのためにはエンジン全体の重量、プロペラントの重量、ペイロードの重量に比べ数倍以上の加速度を得ることが必要となります。

方法	上限	上限値の由来	比推力
圧縮空気	340m/s	標準状態の空気の音速	35
化学燃焼1	786m/s	炭素-酸素の燃焼温度のCO <sub>2</sub> 分子速度	80
化学燃焼2	1230m/s	水素-酸素の燃焼温度のH <sub>2</sub> O分子速度	126
化学燃焼3	3700m/s	水素-酸素の燃焼温度のH <sub>2</sub> 分子速度	378

表8. 実は、ここで比推力の小さい化学燃焼が必要になってきます。分子量の大きなプロペラントは、速度が小さくても運動量が大きくなります。

では、例えば同じ3000°Cに加熱された CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub> では 786 m/s と 3700 m/s の違いがありますが、これを運動量に直すとどれだけの違いが出るでしょうか？

回答？

CO<sub>2</sub> の分子量は 44 です。H<sub>2</sub>の分子量は2ですね。同じ1kg のガスを 3000°C に熱しても、786 m/s と 3700 m/s の違いがあり5倍の違いがあります。しかしながら 分子量が22倍違うので、分子量をかけ合わせると、推進力はXX倍CO<sub>2</sub>の方が勝ることになります。

## 重力損失を考える

人間が耐えられるGは5G程度までと言われています。スペースシャトルは3G程度の加速で打ち上げられます。仮に3Gで打ち上げるとなると、ロケットの推進エンジンは4G加速分の推力が必要となります。

さて、3G加速で垂直に上昇したとしたら、81秒で高度100kmまで到達します。秒速2.4kmにしか達していませんが、ここでエンジン推力がゼロだとしても、弾道飛行で500秒ほど大気圏外に位置できます。この500秒の間に横向きに7.9km/sの加速ができるようになればいいです。そのためには1~1.5G加速程度で十分事足ります。

では、このように打ち上げをする場合、どれだけのプロペラントが必要になるでしょうか？

回答？

500秒の間に横向きに7.9km/s の加速、その前に

81秒で重力に反対向きに3G加速ということは、エンジンにとっては4G加速のための推力を81秒出しているということになります。無重力でもし4G加速を81秒行ったとすると3.2km/sの加速を得ます。その後、横向きに7.9km/s の加速が必要になるので合計 11.1km/s の加速が必要となります。ツォルコフスキイの公式で、先程の液体酸素・液体水素エンジンを使うと考えると、

$$\frac{m_0}{m_T} = \exp \frac{\Delta V}{w} = \exp \frac{11.1 \times 10^3}{4000} = \dots$$

これはつまらないですね！ もう、第一宇宙速度を得るためにもうほとんどプロペラントになってしまいますね！

## 宇宙へのコスト

先の計算で、化学燃焼式ロケットだと第一宇宙速度を得るためにいっぱいいっぱいということがわかりました。100トンのロケットで、プロペラントが90%以上を占めていて、エンジン、フェアリングなどを除く純粋なペイロードは5% 未満です。更に静止軌道にに乗ったり第2、第3宇宙速度に乗るとペイロードは1%未満となるでしょう。もっと比推力の大きいエンジンは、ほとんどが大気圏外でなければ使えません。唯一重水素-ヘリウム3ペレットの核融合ケットが大気圏外で使えそうですが、実用化には程遠そうです。これだと宇宙へ行くコストは全く安くなりそうにありません。もっと、抜本的なコストダウンの方法はないでしょうか。

## 軌道エレベーターに必要なエネルギー

ここで、軌道エレベータを考えてみます。静止軌道から地上にエレベーターを通してます。静止軌道は24時間で地球を回る軌道なので、地上に通じたエレベーターは地球上の赤道のある地点に固定できます。静止軌道に昇るエレベーターは、軌道エレベーターの例えばリニアモーターで引き上げます。それに使うエネルギーは、エレベーターの下りで発電できます。損失を考慮に入れなければ、昇る質量と下る質量が同じならエネルギー零で運用ができます。実際には損失がありますが、軌道上にありある太陽エネルギーを容易に利用できるでしょう。

これだと、建設してしまえば宇宙に行くコストはかなり安くなるのではないかでしょうか。

## 軌道エレベーターの建設コスト

一説には10兆円ということが言われています。しかしながらそれは技術の裏付けがあるものではなく、素材自体まだ人類には手にしていないものです。10兆円と試算があったとしても、建設に乗り出すことができない以上絵に書いた餅と言わざるを得ません。

## 軌道エレベータはどこが無理か？

静止軌道と地上を結ぶ構築物に耐える強度の材料が存在しないことです。

まず、静止軌道の高さがどれだけか計算してみましょう。

回答？

角速度と加速度の公式

$$a = r\omega^2$$

で角速度 $\omega$ が $2\pi/day$ ,  $r$ が軌道半径、 $a$ は重力加速度としてあてはめます。重力加速度は地球から離れているので $r$ が増えると減少し以下のようにになります。

$$a = g\left(\frac{r_e}{r}\right)^2$$

ここで、 $r_e$  が地球半径です。

式を当てはめて、

$$r\omega^2 = g\left(\frac{r_e}{r}\right)^2$$

ここから変形して

$$r = \sqrt[3]{g\left(\frac{r_e}{\omega}\right)^2} = \sqrt[3]{9.8\left(\frac{6.38 \times 10^3}{7.2 \times 10^{-4}}\right)^2} = \dots$$

となり、求まった値から6430kmを引くと静止軌道高度になります。

これはかなりの長さになりますね！

## エレベーターの強度を求める

まず、この図のようにエレベータは設置できるかどうか考えてみましょう。

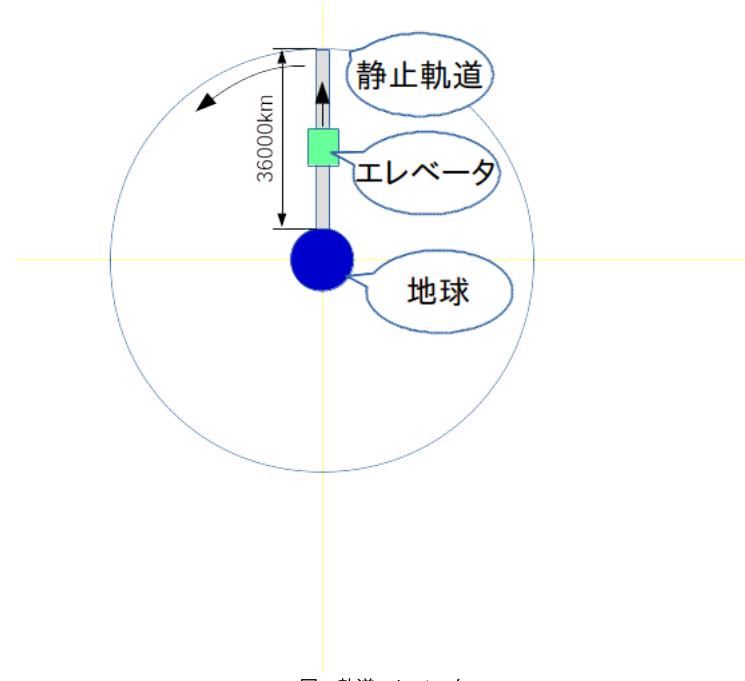


図1. 軌道エレベータ

地球から、36000km の高さの大きなビルディングを建設するのですね。

この場合、エレベーターの下部分の材料が、上の階を支えられる圧縮強度があることが必要になります。

## 材料の強度

地上建造物の材料でよく使われているものの強度を調べてみました。

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	圧縮 強度 (MPa)	引張 強度 (MPa)		出典
490 級 鋼 材	(7.9)	490- 625	625-	JIS G 3112
木 材	0.53	41	1300	強度データは直交異方性材料としての木材の弾性および強度 沢田稔 材料12巻 (1963) 121号よりアカマツデータから計算
コ ン クリ ー ト	2.3	30	10	強度データは国土交通省北海道開発局 <a href="https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g70000001ly2-att/splaat0000003vaf.pdf">https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g70000001ly2-att/splaat0000003vaf.pdf</a>
鉄 筋 コ ン クリ ー ト	2.245	220	220	強度データは 第2章 コンクリートと鉄筋の性質 畠中 重光 <a href="https://mie-u.repo.nii.ac.jp/index.php?action=repository_action_common_download&amp;item_id=10134&amp;item_no=1&amp;attribute_id=17&amp;file_no=1&amp;page_id=13&amp;block_id=21">https://mie-u.repo.nii.ac.jp/index.php?action=repository_action_common_download&amp;item_id=10134&amp;item_no=1&amp;attribute_id=17&amp;file_no=1&amp;page_id=13&amp;block_id=21</a>

表9. より SD300 鉄筋使用のデータ |超強度繊維補強コンクリート|2.45|150|7|<sup>[^7]</sup>株式会社エスイーESCON超強度繊維補強コンクリート|

## 塔を作る



図2. Alt text

これから、どれだけの高さの塔が作れるか考えてみます。単純に、どれだけの高さまで自重に耐えられるかどうかを

(圧縮強度) / (密度重力加速度1000) で計算し、これを「材料高」(h)とします。この1000は、密度をMKS単位系に直すためのものです。

材料高(m)	
490級鋼材	6330-8070
木材	0.53
コンクリート	1330
鉄筋コンクリート	10000
超高強度繊維補強コンクリート	6250

表10. 最も成績の良いものでも 10km 程度になってしまいますね。

ここで計算した形状は棒のようなまっすぐなものなので、根元を太くして強度を上げるとどうでしょうか。単純に直線錐形状とするだけでも、3倍の高さを稼ぐことができます。より最適化した形状としては、頂上から対数的に断面積が大きくなる形状となります。この形状は均一な重力場を想定するものですが、厳密には高さが高くなるに従って重力が弱くなり、遠心力が働くので対数形状よりもっと高く伸びたようになります。しかしながらここで計算する対象はまだ数十km程度なので、均一な重力場で近似して差し支えありません。そして、対数的に末広がりの形とすることで圧縮強度が小さくても高さの制限は無くなります。とはいえるかどうかは別問題です。仮に1kmごとに2倍の断面積を持つ形状で考えてみましょう。頂上で1平方メートルの断面積を持つものは48km下ると根元が地球半径を超えてしまいます。

では、鉄筋コンクリートで作成した場合は、どうなるでしょうか?

頂上で1平方メートルに圧縮限界の荷重がかかった鉄筋コンクリートの場合、 $h/\rho$  の高さごとに  $e$  倍の断面積となります。  $h=10000$ ,  $\rho$  が2.245なので4.45kmごとに2.72倍となる・・・

仮に、頂上が0.01平方メートルで48400トンの荷重限界として、890kmの高さで断面積が4850000平方メートルとなります。円柱とすると、根元は直径2.4kmの円柱となります。ここらへんが限界でしょうか。

一般的には高度100km以上を宇宙としていますから、宇宙には十分到達できていることになります。しかしながら静止軌道である地表からの高度36000kmに比べると0.3%程度しか無く、全然ダメですね。

464MPa の強さを持つコンクリートもありますが、

「世界最高強度を達成するPFC（無孔性コンクリート）の開発」 <https://www.taiheiyo-cement.co.jp/rd/pfc/outline/index.html>

このくらいでは焼け石に水で、抜本的なところから考え直しが必要です。

## 引張強さ

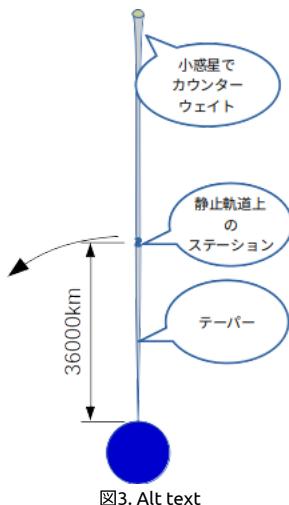
今まで積み上げで塔を作る計算をしました。しかしながら材料の強度としては、引張強度が大きな材料を探すのが賢明です。

出典は Wikipedia 日本語版「比強度」ページ中の「比強度・破断長の値」 2023年8月10日

<https://ja.wikipedia.org/wiki/比強度>

物質	引っ張り強度(MPa)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	比強度(kN·m/kg)	破断長(km)
コンクリート	10	2.30	4.35	0.44
ステンレス鋼304	505	8.00	63.1	6.4
オーク材	60	0.69	86.95	8.86
アルミニウム合金	600	2.70	222	22.65
Scifer steel wire	5500	7.87	698	71.2
ガラス繊維	3400	2.60	1307	133
ケブラー	3620	1.44	2514	256
炭素繊維束 T1100G	7000	1.79	3911	399
カーボンナノチューブ (不確実)	62000	0.037-1.34	46268-N/A	4716-N/A

表11. 引張強度は圧縮強度と比べて数十倍以上の値の物質を使うことができます。引張材料を使う場合、宇宙軌道からテザーをぶら下げる形になります。



先程は、どれだけの高さに圧縮材料が耐えられるかを  $(\text{圧縮強度}) / (\text{比重重力加速度} \times 1000)$  で計算しましたが、同様に引張材料の強度はどれだけの長さの自重に耐えられるかを

$(\text{引張強度}) / (\text{比重重力加速度} \times 1000)$

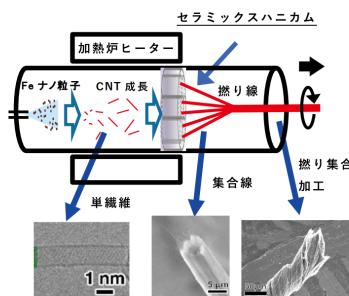
で計算します。

これを「材料高」に対して「破断長」とし、同じ  $h$  の記号で表すことにします。

均一な重力場では、破断長が  $36000 \text{ km}$  あれば静止軌道まで届くことになります。しかしながら先に説明したように、高さが高くなるに従って重力が弱くなり、遠心力が働くので実際には破断長は  $4960 \text{ km}$  あれば静止軌道まで届くことになります。

しかしながら、表の破断長はカーボンナノチューブぐらいしかないです。カーボンナノチューブの実現可能性はどのくらいでしょうか???

### カーボンナノチューブ開発の現在



[https://sumitomoelectric.com/jp/sites/japan/files/2021-07/download\\_documents/J199-11.pdf](https://sumitomoelectric.com/jp/sites/japan/files/2021-07/download_documents/J199-11.pdf)

出典：住友電工テクニカルレビュー 第199号 「新規成長法による超高強度カーボンナノチューブ線材」（2021年7月）

撲りを行うことで、 $1\text{m}$  程度のものが得られ、また集合線状態において引張強度が  $10\text{GPa}$  を超えたそうです。

論文にしたがって樹脂を含浸した集合線を考え、仮に引張強度  $10\text{GPa}$  密度を  $1.5$  とすると、

物質	引っ張り強度(MPa)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	比強度(kN·m/kg)	破断長(km)
樹脂含浸CNT集合線	10000	1.5	6670	680

表12. 破断長は  $4960 \text{ km}$  に全く届きませんが「炭素繊維東レ T1100G」に比べ7割アップしています。破断長  $4960 \text{ km}$  を超える材料の開発は全く未知数ぼういう、この程度なら期待しても良さそうです。

### 破断長 $680\text{km}$ 材料で

1975年に発表された、軌道エレベーターの古典的な論文を見つけた。「The orbital tower: a spacecraft launcher using the Earth's rotational energy」

# The orbital tower: a spacecraft launcher using the Earth's rotational energy

JEROME PEARSON

U.S. Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, OH 45433, U.S.A.

(Received 17 September 1974; revised 27 January 1975)

**Abstract**—The theoretical possibility is examined of constructing a tower to connect a geostationary satellite to the ground. The "orbital tower" could be built only by overcoming the three problems of buckling, strength, and dynamic stability. The buckling problem could be solved by building the tower outward from the geostationary point so that it remains balanced in tension and stabilized by the gravity gradient until the lower end touches the Earth and the upper end reaches 144,000 km altitude. The strength problem could be solved by tapering the cross-sectional area of the tower as an exponential function of the gravitational and inertial forces, from a maximum at the geostationary point to a minimum at the ends. The strength requirements are extremely demanding, but the required strength-to-weight ratio is theoretically available in perfect-crystal whiskers of graphite. The dynamic stability is investigated and the tower is found to stable under the vertical forces of lunar tidal excitations and under the lateral forces due to payloads moving along the tower. By recovering the excess energy of returning spacecraft, the tower would be able to launch other spacecraft into geostationary orbit with no power required other than frictional and conversion losses. By extracting energy from the Earth's rotation, the orbital tower would be able to launch spacecraft without rockets from the geostationary orbit to reach all the planets or to escape the solar system.

## Introduction

A SATELLITE in equatorial orbit with a period of 24 hr appears fixed above a point on the equator, and is thus called a geostationary satellite. Since the altitude of this orbit is 35,800 km, a geostationary satellite can provide continuous

図4. Alt text

著者ジェローム・ピアソンは現在も宇宙企業スター・テック社を経営していて、そのWebサイトで読める。<http://star-tech-inc.com/papers/tower/tower.pdf>

パラメータ  $h$  (破断長=特性高) とテーパー比  $A_s/A_0$  の関係は式10で示され、

$$A_s/A_0 = e^{(r_0/h)(1+r_0^3/2r_s^3 - 3r_0/2rs)} = e^{0.776r_0/h}. \quad (10)$$

図5. Alt text

テーパー比は1450となります。

ちなみに、「炭素繊維東レ T1100G」だとテーパー費は245000 となって桁が2桁異なります。

地表で  $10 \times 10^{-3}$  平方メートル すなわち断面積 1平方cm のテザー1本だけの構造で考えてみます。これでも、102トンを持ち上げることができます。静止軌道上では 0.145平方メートルということになります。

テザーの全体重量は 1/1000 となり、20万トン～30万トンとなります。うーん、宇宙に30万トンを輸送!?

先にアンカーとして小惑星を挙げましたが、小惑星が無いとすると

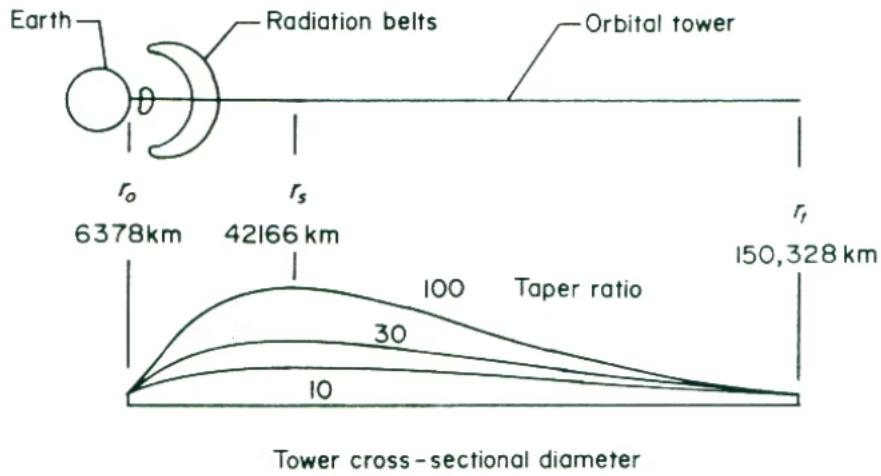


Fig. 4. The orbital tower and its cross-sectional diameter.

図6. Alt text

このように地球中心から150328kmまで延びることになります

$$(150328\text{km}-6378\text{km})10^3 3110^{-4} 1.5*10^3 = 21600 \text{トン}$$

これはテーパー比1で考えましたが、テーパー比率1450だと、全体では1000万トンぐらいになりそうです。

ロケットで持っていくのはだいぶ問題がありますね。

### ブートストラップ

吊橋の建設でエアスピニングという工法があります。吊橋のワイヤを一度にかけるのではなく、まず細いワイヤを1本だけ通し、それを伝って2本目、3本目のワイヤをかけて補強していく方法です。



図7. ゴールデンゲートブリッジのエアスピニング

同様に軌道エレベータも最低限のテザーを地表に降ろし、それを伝って地表から登っていきながら補強するという方法をとることができます。

仮に、最初のテザーが地表で1平方ミリメートルの断面積を持ち、1020kgを持ち上げができるものとすると・・・静止軌道上の断面積は静止軌道上の断面積は14.5平方cmとなります。初期テザーの全重量は200トン～300トン。

### 100兆円

これを安いロケットで打ち上げるとして Falcon Heavy で10回分。打ち上げ費用は15億ドル。打ち上げ費用だけなので、材料費や地表から登っていくクライマーの費用、地表や軌道上の基地を作成する費用、などをこれにプラスしていくことになります。

さて、全体はいくらになるか・・・大林組の試算では、10兆円とあります。この金額は 150GP の強度を持ったものです。安全計数をちゃんと2にしたりします。初期テザー20t にしているので安くなりそうですね。本書では10倍であり、それを考えるとコストも10倍ぐらいにはなりそうです。

### 宇宙に行くための難関

現在の技術だと、ちょっと厳しそうですね。

100兆円だと、Falcon Heavy を400回以上打ち上げることができます。宇宙に2万5千トンを打ち上げることができます。初期投資が大きすぎるかな!

## 静止軌道を目指さない

軌道エレベーターは36万kmもの高度の建造物を作らないといけないのですが、宇宙に行くためにはそれほど高い高度は必要ありません。先に述べたように、第一宇宙速度さえ得てしまえば、そこからトルクの小さくても比推力の大きなエンジンを使ったり、スイングバイを行ったりして工夫の余地はたくさんあります。第一宇宙速度を得るためにには高度100km程度で空気抵抗がある程度無視できる状態にまで昇ることができればいいのであって、高度36万kmを目指さなくても良い方法があるはずです。

静止軌道はGEOと呼ばれます。対して、GEOより一段低い軌道を中軌道(MEO)と呼ばれていて、2,000 kmから36,000 kmまでの軌道を指します。更に低軌道を地球低軌道 (low Earth orbit、LEO) と呼び、地球表面からの高度2,000km以下の軌道を指します。

GEOでなければ、簡単な方法があるでしょうか?

よく議論されているものとして、以下のようなものがあります。

- ・ 極超音速スカイフック
- ・ 非同期軌道スカイフック
- ・ ロータベータ

## 極超音速スカイフック

静止軌道に重心を持つものだと、地表から36000km の高さまで伸ばさないといけません。しかしながら静止軌道にこだわらずに軌道エレベータと同じようなものを作るとすると、もっと条件は緩和されます。

### 高度10000km

例えば地表から10000km のところに重心を持つものだと、重心での重力加速度は

$$a = g\left(\frac{r_e}{r}\right)^2 = 9.81\left(\frac{6.38 \times 10^6}{6.38 \times 10^6 + 1.00 \times 10^7}\right)^2 = 1.49$$

角速度と加速度の公式に当てはめて

$$a = r\omega^2 \cdot 1.49 = (6.38 \times 10^6 + 1.00 \times 10^7)\omega^2 \quad \omega = \sqrt{\frac{3.82}{(6.38 \times 10^6 + 1.00 \times 10^7)}} = \sqrt{2.33 \times 10^{-8}} = 1.52 \times 10^{-4}$$

地表付近の速度は

$$v = r_0\omega = 9.69 \times 10^2$$

地球時点の線速度が $4.63 \times 10^2$ なので差し引き $5.06 \times 10^2$  マッハ1.5程度となります。

一方、重心から10000kmを垂らすことを実現するためには、先程の樹脂含浸CNT集合線を使ってテーパー比500ぐらい。テザー地球側末端が1平方mm の断面積を持つとして、重心位置での太さ500平方mm、テザー全質量は5000トン前後となります。

ちょっと重すぎかな!

### 地表から5000km

のところに重心を持つもので計算し直してみます。

重心での重力加速度は

$$a = g\left(\frac{r_e}{r}\right)^2 = 9.81\left(\frac{6.38 \times 10^6}{6.38 \times 10^6 + 5.00 \times 10^6}\right)^2 = 3.08$$

角速度と加速度の公式に当てはめて

$$a = r\omega^2 \cdot 3.08 = (6.38 \times 10^6 + 5.00 \times 10^6)\omega^2 \quad \omega = \sqrt{\frac{3.08}{(6.38 \times 10^6 + 5.00 \times 10^6)}} = \sqrt{27.0 \times 10^{-8}} = 5.20 \times 10^{-4}$$

地表付近の速度は

$$v = r_0\omega = 3.31 \times 10^3$$

地球の自転を引いて $2.85 \times 10^3$ 、マッハ8.4!

テーパー比300ぐらいで、テザー地球側末端が1平方mm の断面積を持ち 重心で300平方mm テザー全質量は1500トン前後です。

高度10000km だとテザーが重くなりすぎ、高度5000kmだと末端速度が大きすぎました。

## 非同期軌道スカイフック

先の極超音速スカイフックでは、テザーの地球側末端が大気中だと空力加熱を受けるので、100kmよりも上におかないといけません。

高度をもっと低くするためには、末端速度をもっと下げる必要があります。テザーを自転させて地表との相対速度を小さくしてみます。

仮に、200kmの全長のテザーを高度230kmにおき、100秒で1回転するとどうなるでしょう。この程度だと重力は変わらないとして近似してみます。テザー末端の線速度6.28km/sとなり、テザー重心の移動速度7.9km/sとの差1.5km/s、マッハ4から5ぐらいとなります。末端のGは40.2Gとなります。

なのでテザー末端面積を40平方mmとし、テーパー比200ぐらいで、重心で8000平方mm、テザー全体は2000トンぐらいです。

全長が極超音速スカイフックよりずっと短いにもかかわらず、テザー総質量が小さくなっているわけはないことは、遠心力に耐えるためにテザーを太くしないといけないからです。

## 超高空でドッキング

ロケットを使わずに、航空機で発進すればいいのでこのやりかたは安くなるはずではないでしょうか!

超音速・超航空で航空機からカーゴを切り離すシステムには過去に似た実績があります。M-21から発射されるD-21ドローンです。



SR-71のドローン母機バージョンであるM-21から、無人ドローンD-21を約マッハ3で切り離します。しかしながらこのシステムは成功すること無く、事故でM-21の墜落事故も起こして、その後D-21はB-52からの発進に切り替えられました。M-21の元となったSR-71も、運用が高額すぎるということで衛星のみの運用となりました。

このシステムは1960年代のシステムですが、同様のシステムが生まれていないことを考えると超音速での受け渡しはかなり無理がありそうです。

## ロータベータ

先の非同期軌道スカイフックでは、相対速度を下げるためにテザーを自転させましたが、いっぽ相対速度をゼロにしたら超音速機つかわなくとも良くなります。うまくいけば観覧車に乗るみたいにできるかも知れませんね!

資料によては、相対速度をゼロにするものを、非同期軌道スカイフックとして紹介しているものもありますが、本書では自転するものを非同期軌道スカイフック、そのなかで相対速度をゼロにするのをロータベータとして区別します。

先の非同期軌道スカイフックでは、テザー末端で40Gにもなりましたが、今回は観覧車に乗るように人間が乗れるようにするために、もっと少ない遠心力で考えてみます。

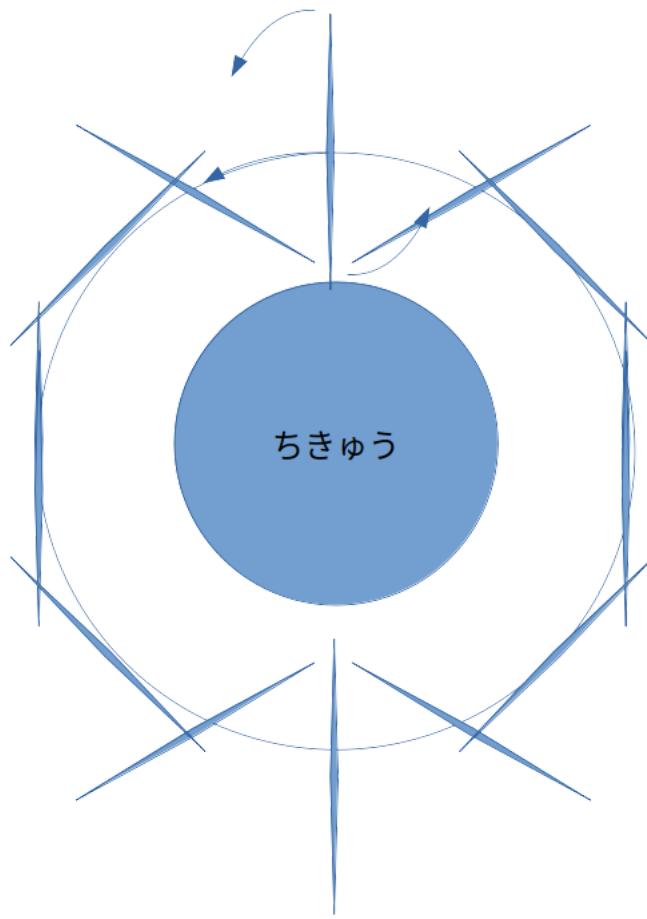


図8. ロータベータ

(ロータベータ) このような、地球の直径と同じだけの長さを持つものを、考えてみます。

重心位置は地上から6380km。重力加速度は  $g_0/4$  で 2.45。公転速度は

$$a = r\omega^2 \cdot 2.45 = (6.38 \times 10^6 + 6.38 \times 10^6)\omega^2 \quad \omega = \sqrt{\frac{2.45}{(6.38 \times 10^6 + 6.38 \times 10^6)}} = \sqrt{19.2 \times 10^{-8}} = 4.38 \times 10^{-4}$$

地表付近の速度は

$$v = r_0\omega = 2.79 \times 10^3$$

地球の自転分を差し引いて  $2.33 \times 10^3$ 。この速度を線速度として自転するとすると、末端0.0868Gの遠心力が働きます。

テザー末端面積を1平方mmとし、テーパー比400ぐらいで、重心で400平方mm、テザー全体で2500トンぐらい。先の魅力ない非同期軌道スカイフックより重たいのですが、それでも飛行機で高速度高空でドッキングするよりも簡単、受けるGも小さいのでその点はかなり魅力的です。

しかしながら軌道エレベータの初期テザーの全体重量は200トン～300トンと比べると重いので、これなら軌道エレベータを作ったほうが良くないかなということになります。

## まとめ

提案手法	軌道高度	自転	地表との相対速度	末端高度	エアスピニング工法
軌道エレベータ	GEO	なし	0	0	OK
極超音速スカイフック	MEO	なし	音速～	100km～	?
非同期軌道スカイフック	LEO	あり	超音速～	20km～	0
ロータベータ	MEO	あり	0	0	?

表13. エアスピニング工法を使えば、初期テザーの質量を小さくすることができますが、軌道エレベータ以外は様々な擾乱をどう評価すれば良いか見通せないため「?」としました。

この表では代表的な試算で比較してみましたが、パラメータのとり方によってはうまいやり方ができるかも知れません。計算を試してみてください。

## 提案編

軌道エレベーターは現在、あるいは射程内に捉えている技術を使って実現はできそうですが、コストがかかりすぎることがわかりました。

LEOに行くには、軌道エレベーターよりも技術的条件のゆるいものとして以下のようなものがあります。

- ロータベータ
- 極超音速スカイフック
- 非同期軌道スカイフック

しかし条件がかなり緩和されるものの破断長はまだまだ超素材が必要です。

ここで、20世紀技術で使える技術として

- 化学ロケット
- 炭素繊維
- 火薬砲
- セラミック耐熱タイル
- 空中ドッキング

こういったもので軌道ウインチ考えてみました。

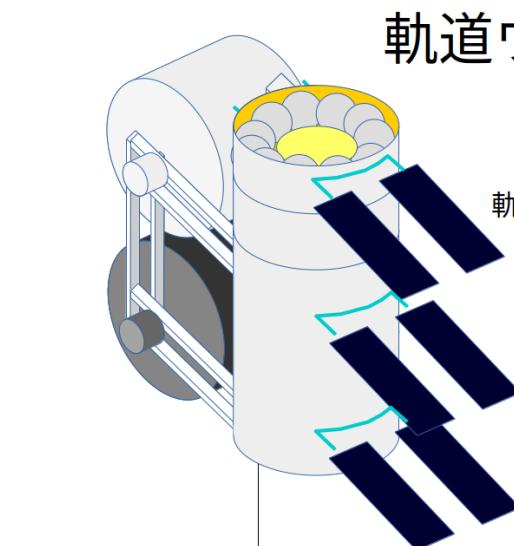
300kmの軌道から軌道ウインチを曳きます。

炭素繊維の破断長250km 垂直に曳かなければ 0.1G 加速だと破断長2500km

案として、以下のように計算を行いました。

- 高度300km軌道上の母艦
- 1km/sでワイヤを打ち出す
- ワイヤ先端の軌道が地上に接する
- 宇宙往還機がドッキング

詳細は次号以降で!



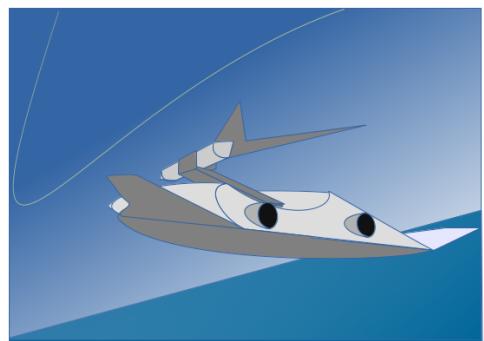
### 軌道ウインチ 母艦

- 高度300kmからテザー(ワイヤー)を地上に下ろす
- テザーは重力で進行方向に加速する
- テザー先端は空気抵抗で減速する

既存の技術で  
実現できる  
軌道エレベータ代替の宇宙開発

### 軌道ウインチ シャトル

- 地上からジェットエンジンで離陸
- 高度10kmでテザーを掴む
- 高度300kmまで引っ張られる



秘密結社オープンフォース 

図9. picture 2

## 資料篇

### 基本的な数値

重力加速度

$$9.81 \text{m/s}^2$$

地球の赤道半径



図10. picture 2

$$6380 \text{km} = 6.38 \times 10^6 \text{m}$$

地球の軌道半径

$$1.50 \times 10^{11} \text{m}$$

### 平均軌道速度

$$29.8 \text{km/s}$$

1年

8760時間

光の速度

$$3.00 \times 10^8 \text{m/s}$$

万有引力定数

$$6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$$

地球の質量

$$5.97 \times 10^{24} \text{kg}$$

太陽の質量

$$1.99 \times 10^{30} \text{kg}$$

静止軌道高度

(地球の中心から)

$$4.22 \times 10^7 \text{km}$$

---

## コミックマーケット102版あとがき

---

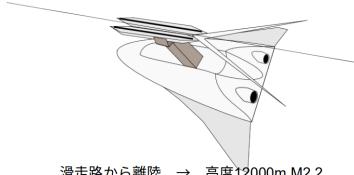
C101版からあまり進めてなくて改訂箇所はほんのちょっとです。前回に引き続き VSCode で執筆、印刷するようにしています。ちょっとだけ執筆システムを改良してページ番号をつけるようにしてみました。

俺たちのたたかいはこれからだ！



## 宇宙往還機

補給機 ベイロード2t 全備重量7t



滑走路から離陸 → 高度12000m M2.2  
テザーキャプチャー → 高度400Km 7.9km/s  
大気圏突入 → 滑走路に帰還

宇宙への架け橋

Ver.20230813

2023年08月13日 初版

著者 秘密結社オープンフォース