

懸垂下降の安全性をさらに高めたい 2

OWCC 中川和道 20250619

クライミングを楽しむには、懸垂下降の事故を防ぐことが重要だ。前回の論考をもとに今回は、(1)制動力の適正値はいくらか？(2)適正な速度はいくらか？(3)支点にかかる力の適正な大きさは？などの問題を考えて行く。まず前提となる設定を行う。

(i)運動学考察の前提

体重(=質量) m のクライマーが、図1の懸垂支点Sから時刻 $t=0$ で懸垂下降を開始した。開始時刻での位置は $x=0$ 、速度は $v=0$ 。クライマーは下降器でロープに制動力 f (まずは時間的に一定と仮定)を加えつつ下降していく。この時のクライマーの運動(時刻 t での位置を $x(t)$ 、速度 $v(t)$)、懸垂支点Sにかかる力 $F_s(t)$ を考える。ベクトル量である位置、速度、加速度、支点にかかる力の符号は、下向きを正にとる。重力加速度を g 、ロープの全長を H とする。場合(ii)(iii)を以下のとおり設定し、分けて考察する。

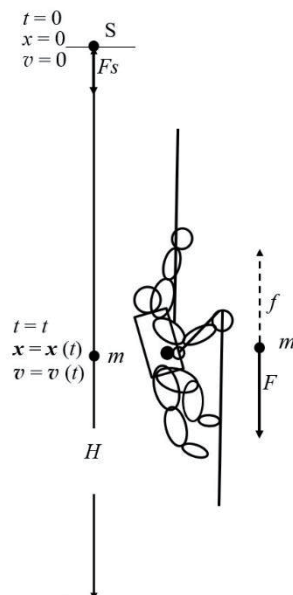


図1. 懸垂下降の動力学1

(ii)手を放して自由落下をしているとき

m にはたらく力 F は $F=mg$ なので、運動方程式は $m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = mg$ [式1]。[式1]を変形すると、 $\frac{d^2x(t)}{dt^2} = g$ となり、図1の状況下で、クライマーが受ける加速度 $\frac{d^2x(t)}{dt^2}$ は重力加速 g であり、(2)その大きさは体重 m によらないことが分かる。

[式1]を積分し、 $v(0)=0$ を用いて、 $v(t)=gt+v(0)=gt$ [式2]を得る。

[式2]から、速度 v もまた体重 m によらないことが分かる。すなわち、軽い「羽」と重い「ハンマー」とは(空気抵抗がなければ)同じ速度で落下し、同時に着地する。この時、懸垂支点にかかる力は、 $F_s=mg$ である。

(iii)下降器を用いて制動力 f (時間的に一定)を上向きに加えつつ 懸垂下降しているとき

m にはたらく力は $mg-f$ なので、運動方程式は $m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = mg-f$ [式3]である。これを書きかえて、 $m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = m(g - \frac{f}{m}) = mg'$ [式3']。ここで $g' = (g - \frac{f}{m})$ は、制動力 f を重力と反対の上向きに加えることによって、重力加速度が g から見かけの重力加速度 g' に減少したことをあらわし、[式3']を変形した式 $\frac{d^2x(t)}{dt^2} = g'$ からは、クライマーの加速度 $\frac{d^2x(t)}{dt^2}$ は、自由落下の場合の g から、 g' に減少すると考える。質量 m が減少すると記述する行き方もあるが、 m はローレンツ不変量なので、ここでは g が変化するという思考経路をとる。

(ii)と同様の考察から、 $v(t)=g't$ [式4]を得る。この時、懸垂支点にかかる力は、 $F_s=mg'$ である。

(iv)実際の数値で考えてみる

では、これらの式に実際の数値を入れて、イメージを考えてみよう。事例ごとに問題を立てながらその解決を目指して進もう。

自問1 我々は、降下速度 v が何 m/s になったら危険と判断して懸垂中に停止するか？

懸垂の様子を思い出してみよう。始点Sでは下降器のまさつ力をぐっと強め、当然ながら、速度 $v=0$ で出発する。握力をゆるめて下降器のまさつ力を小さくすると、滑り出す。握力一定だと、速度はどんどん速くなる。これ以上速くなると危ない、と判断したら、ストップをかける。この限界の速度はどのくらいだろう？中川の場合は、秒速3 m/s くらいだ。これ以上速いと、着地の時や降下中も思いがけなく何かにぶつかったときにうまく対処できなくなる。それが、中川はこわいのだ。

このことを数値で検討しよう。位置 x を 0m からロープの標準的な長さ 50m まで変化させ、その位置 $x(t)$ まで達する(落ちる)時刻 t と、その位置での速度 $v(t)$ を、 $t = \sqrt{2x(t)g'}$ 、 $v(t) = g't$ によって計算した。その結果を表 1 に示す。

表 1. 懸垂下降の動力学 2

	制動力ゼロで 自由落下 $g' = g$		ロープを体重力の 3 割で制動 $g' = 0.7g$		ロープを体重力の 5 割で制動 $g' = 0.5g$		ロープを体重力の 8 割で制動 $g' = 0.2g$		力いっぱい握っ て静止 $g' = 0$	
位置 x/m	時刻 $t/秒$	速度 $v/(m/s)$	時刻 $t/秒$	速度 $v/(m/s)$	時刻 $t/秒$	速度 $v/(m/s)$	時刻 $t/秒$	速度 $v/(m/s)$	時刻 $t/秒$	速度 $v/(m/s)$
0.5	0.3	3.1	0.4	2.6	0.5	2.2	0.7	1.4	∞	0
0.7	0.4	3.7	0.5	3.1	0.5	2.6	0.8	1.7		
1	0.5	4.4	0.5	3.7	0.6	3.1	1.0	2.0		
2	0.6	6.3	0.8	5.2	0.9	4.4	1.4	2.8		
2.5	0.7	7.0	0.9	5.9	1.0	4.9	1.6	3.1		
5	1.0	9.9	1.2	8.3	1.4	7.0	2.3	4.4		
10	1.4	14.0	1.7	11.7	2.0	9.9	3.2	6.3		
20	2.0	19.8	2.4	16.6	2.9	14.0	4.5	8.9		
30	2.5	24.2	3.0	20.3	3.5	17.1	5.5	10.8		
50	3.2	31.3	3.8	26.2	4.5	22.1	7.1	14.0		

表 1 をもとに、以下の考察を行った。

(1) 時間一定の制動力では何がおきるか？ 答：速度が大きくなりすぎて危険：握ったり緩めたりが必須

上記(iii)のとおり、制動力 f を大きくすれば見かけの重力を減じることができる。見かけの重力減は支点にかかる力の低減を意味するから、安全性は向上する。では、他の角度から見ても安全だろうか？

表 1 から、見かけの重力を 70% に、50% に、20% に減じたそれぞれの場合について、実際に体験する速度を見てみよう。降下位置 10m での速度は、80% の場合 11.7m/s と、とてつもなく早い。危険だ。中川は採用できない。50% の場合は 9.9 m/s、20% の場合でも 6.3 m/s と、やはり危険の域を出ない。これらの検討から**時間一定の制動力では速度が出すぎて危険、やるべきでない**との結論となった。

解決策は、握ったり緩めたりして速度を調整すること(下記の図 2)である。

(1') 見かけの重力を減じる必要に迫られたときどうするか？ アルパインクライミングでは短時間での危機脱出のため軟弱な支点を使ってでも素早い懸垂下降を行うか or 軟弱な支点を補強する時間をかけて安全を確保するか、どちらかの判断を迫られる場面がある。雷雨中の行動がその一例だ。滝谷で中川もやられた。脱出の素早さによる安全確保か、多少の時間を要する支点補強による安全確保か、トレードオフを迫られる。そんな時、支点にかかる見かけ重力を 20% に減らすような小さな制動をかけつつ懸垂下降したらどうなるか？ を表 1 から考察してみた。すると、a) この一定の制動力のまま 10m 降下した時点での速度は何と、秒速 6.3m。これは危ない。中川は、6.3m/s なんて、とても採用できない。皆さんは、これ、やりますか？ 中川の対案は、下記(2)だ。

(2) 秒速何 m/s で停止かか？「握る緩める」を繰り返すと、動力学はどうなるか？

中川が制御可能な速度は、秒速約 3m/s だと思う。

この速度に達するまでの時間を表 1 から読み取ると、見かけ重力 30%(少し制動をかけた場合)では 0.7m で 0.5 秒、見かけ重力 50% では 1m で 0.6 秒、見かけ重力 30% では 2.5m で 3.1 秒。この距離ごと時間ごとに、制動力を強めてほとんど停止させる必要がある。ほとんど停止させたあとは再び制動力を緩めて下降を再開する。すなわち、位置 $x(t)$ と速度 $v(t)$ をグラフに描くと、図 2 のように、握ったり緩めたりが必須となる。実際に、仲間たちはこれを行っている。

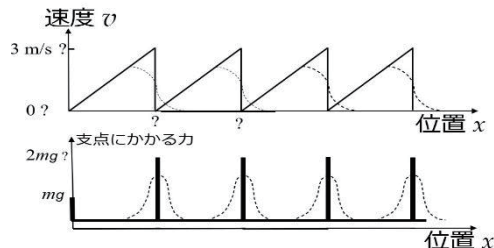


図 2. 懸垂下降の動力学 3

さて、まだまだ問題だらけだ。実験もつよく望まれる。考察の続きは、次号で・・・

(次号につづく)