

## 確保理論再考 (2)

—実際のロープ特性を考慮した確保理論のための準備—

北村 憲彦 (愛知県山岳連盟 (春日井山岳会))

### 1. はじめに

ロープさえあれば、あのときの滑落で命を落とすことはなかったかもしれない。しかしどんなに後悔しても、失った友人は帰ってこない。悲痛な事故を未然に防ぐために、ロープによる確保技術、そしてロープを結び合う習慣は不可欠である。パートナーで行う登山と言えるものはすべてロープワークを前提にしていると言っても過言ではない。そのような登山で欠かせないロープは引張に強く、しなやかであり、最近はますます、エネルギー吸収性能も向上し、軽量化も進んでいる。ロープの弾性的な性質は衝撃荷重の緩和に大きな役割を果たしている。墜落のエネルギーを受け止める様子を説明する理論は、確保技術の正しい理解のためにも必要であるし、より優れたロープや確保器具の開発にも必要である。

従来の古典的な確保理論<sup>1)</sup>では解析を簡単にするためにロープ係数を一定とした。この考え方は見通しもよく、直感的にも分かりやすく、大要を把握するためには便利である。この理論は若干の修正 (登山研修VOL.17参照) によって大墜落の場合にまで適用範囲を拡大することが可能になった<sup>2)</sup>。確保の現場で起こっている概要を理解するために役立つ理論になったといえる。そうなると、次には例えば荷重測定器などが持ち込めない場面や一般の確保の練習場面でも、どのくらいの力が掛かっているのか予測したくなるのが人情というものである。ところが、これまでのよう

な初等的な確保理論では半定量的な傾向を言うことができて、荷重の値そのものを議論したり、算定するには、いささか問題がある。一番の問題はいわゆるロープ係数である。このロープ係数次第で算定荷重は変わってしまうからである。実際のロープでは張力が増すとロープの剛性も増すので、従来理論でいうロープ係数はないのであるが、あえて言えば、張力が増すと相当するロープ係数が大きくなる。したがって、従来の理論から荷重を算定するためには、どうしてもそれらしい適当なロープ係数の値を決めなくてはならない。肝心のところが怪しいわけで、補足する必要がある。今回は実際のロープの弾性的な特性をどのように取り扱うのかということを中心に考え方を整理し、実際的な制動確保理論を構築する準備を行った。

### 2. 張力の増加にともなうロープ係数の変化

新品の直径約9mmの登山用ロープから長さ50cmを切り出し、準静的にゆっくり (毎秒1mm) 引張った。図1に試験の結果、得られたロープの伸び率と張力との関係を示す。従来の理論では見通しをよくするために図1のような曲線的な増加でなく、直線的な増加と考えて、理論上の取り扱いを簡単にした。ただし、直線近似から張力を逆算するためには、適当なロープ係数を決めてやらなくてはならない。得られた結果に合わせて、今回の練習の条件ではロープ係数は1000kgf、いや2000kgfだというチューニングをするのが現状である。こ

これは理論が不十分である現段階では、最善の処置である。ある墜落場面を限定して、その範囲における平均ロープ係数とか相当ロープ係数という意味であれば、有効である。

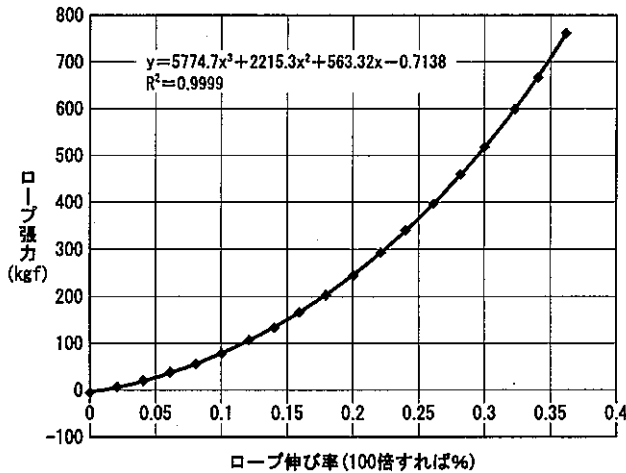


図1 ロープ伸び率と引張り荷重の関係

図1中の式で $x$ が横軸のロープ伸び率で、 $y$ は縦軸の引張荷重である。図1によると、引張り荷重（ロープ張力）が大きい場合にさらに荷重を増やそうとしても、伸び率はそれほど大きくなるらない。他の登山用ロープも似たような引張り特性だとすれば、実際のロープは張力が高くなるほど、伸びにくくなるといえる。言い換えれば、伸びるにつれロープ係数が次第に大きくなることに相当する。従来理論と同様に実際のロープの伸びと荷重の関係が簡単な数式で表せれば、解析に便利である。そこで、図1のデータにフィットする多項式を探したところ、伸び率の三次式で荷重を表すことができた。

$$T = 5774.7\varepsilon^3 + 2215.3\varepsilon^2 + 563.32\varepsilon \quad (1)$$

ここで、張力を $T$ (kgf)、伸び率 $\varepsilon$ とする。ただし、 $\varepsilon = (L - L_0) / L_0$ で、自然長 $L_0$ 、引張られている最中の長さ $L$ 、張力によるロープの伸び $L - L_0$ である。したがって、荷重がかかるとロープは $L / L_0 = \varepsilon + 1$ 倍伸びたことになる。実験点と近似式との相関性を示す $R^2$ 値がほぼ1であるから、式(1)で

今回使用したロープの引張り特性はよく近似できているといえる。(注意: たまたま三次式で表わせただけで、取り扱う上で便利かどうかは議論の余地はある。) さて、式(1)中の定数項 $-0.7138$ kgfは墜落者の体重に比べても小さい力と考え、ここでは無視する。そうすれば、ロープの性質を表す係数は4個から3個に減らすことができる。直線的な荷重-伸び関係のロープなら、ロープ係数 $K$ だけ1個で特性を表せた。それに比べれば、3個でも多いともいえるが、ひとまずこの近似で議論を進める。

### 3. ロープの弾性だけ墜落のエネルギーを吸収する場合

ランニングビレーを一つもとらない者が墜落をする場合を考える。墜落者は途中の壁にも、確保者の立っているテラスにもぶつからずに理想的に(?)空中を自由落下していくものとする。確保者がロープを完全に固定していたならば、ロープの弾性だけで墜落者のエネルギーを吸収することになる。次第に増加していく張力に応じて少しずつ伸びが増加していく。ここで伸び $L - L_0 = z$ とおけば、張力 $T$ のなす仕事は $\int T dz$ で、ロープが蓄える弾性エネルギーである。図1で言えば、ロープが伸びた分と荷重伸び線図で囲まれる部分の面積が、その弾性エネルギーに相当する。小さなロープ係数で大墜落まで解析しようとする、弾性エネルギーの見積もりを過小評価することになる。その逆も起こりうる。

一方、墜落者が持っている位置エネルギーを評価する。見かけの墜落高さ（張力が生じない墜落高さ）とロープが伸びる分も落ちることになるから、実際の墜落高さは $h + x$ である。ここで $h$ はロープに張力がない状態で墜落した距離で、 $x$ はロープに張力 $T$ が生じた時点での伸びている長さで

ある。式(1)を用いて、墜落による位置エネルギーと張力により蓄えられた弾性エネルギーが等しいと考えれば、関係は次のようになる。今回はただし、 $a=5774.7$ ,  $b=2215.3$ ,  $c=563.32$ である。

$$W(x+h) = \int T dx = \int \left\{ a \left( \frac{x}{L_0} \right)^3 + b \left( \frac{x}{L_0} \right)^2 + c \left( \frac{x}{L_0} \right) \right\} dx$$

$$W \left( \frac{x}{L_0} + \frac{h}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \int \left\{ a \left( \frac{x}{L_0} \right)^3 + b \left( \frac{x}{L_0} \right)^2 + c \left( \frac{x}{L_0} \right) \right\} dx$$

$$= \frac{a}{4} \left( \frac{x}{L_0} \right)^4 + \frac{b}{3} \left( \frac{x}{L_0} \right)^3 + \frac{c}{2} \left( \frac{x}{L_0} \right)^2$$

$$0 = \frac{a}{4} \left( \frac{x}{L_0} \right)^4 + \frac{b}{3} \left( \frac{x}{L_0} \right)^3 + \frac{c}{2} \left( \frac{x}{L_0} \right)^2 - W \left( \frac{x}{L_0} \right) - W \left( \frac{h}{L_0} \right)$$

(2)

この四次方程式を満足するような伸び率 $x/L_0$ を求めることにする。ここでは、任意の $x/L_0$ を式(2)の4行目の式の右辺に適当に代入して、右辺が $1/100000$ の桁で0に近い値になるという目標で $x/L_0$ を探索した。表1に実行例を示す。

表1における墜落者の重さは60kgf（体重や着ているもの、装備などの合計）で、ロープの特性は先ほどの式(1)である。表1のG列に落下率を最大2.00として0.02刻みごとに小さくして、0になるまでを計算範囲とした。H列にはその結果得られた張力(kgf)を示している。(計算の方法は本論から外れるが、参考のために本稿の最後に付録として記した。) 上記の計算結果を図2のような

表1 墜落者重量が60kgfで直径9mmロープの弾性のみの確保  
(確保者からロープは流出しない)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1					$a=5774.7$			
2					$b=2215.3$			
3					$c=563.32$			
4								
5	W	h	x	L0	x/L0	$f = \int T(x) dx - W(H+x)$	h/L0	T
6	60	10	2.0791	5	0.4158	-0.000006	2	1033
7	60	9.9	2.0729	5	0.4146	-0.000006	1.98	1026
8	60	9.8	2.0667	5	0.4133	-0.000006	1.96	1019
9	60	9.7	2.0604	5	0.4121	-0.000006	1.94	1013

グラフにした。

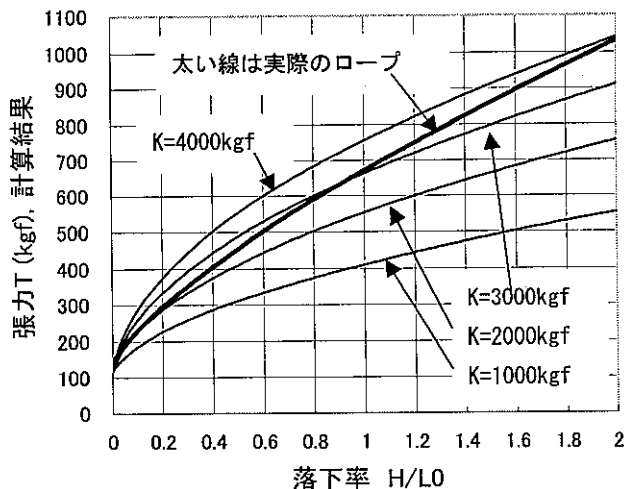


図2 カラビナとの接触がないような墜落で、新品のφ9mmロープを使用した場合の落下率と張力との計算結果

図2にはK一定の従来の計算結果も載せた。落下率が大きくなったときに張力が大きくなり、今回の計算結果との違いも無視できない。落下率がある狭い範囲に限って、近似的に従来理論を用いることは実用上便利である。しかし、広い範囲でロープ係数一定のまま扱うには図2の結果を見る限り、無理な感じがする。感覚的には、大きな張力が発生するような墜落の場合には、ロープは従来の予想よりも硬い緩衝材になっていると思ったほうがよい。やはり、実際的な墜落の力を計算するためには、図1のような曲線的な荷重伸び線図を採用したほうがよさそうである。

また、ロープの特性値を求めるために低速での引張試験結果を用いた。できれば、実際の墜落速度で引張試験をしてロープの特性値を出せばいいと思う。測ってみなければ分からないが、墜落の速度(すなわち)引張速度によってロープの引張特性は異なるのが自然だからである。もし、ゆっくり引張ったデータと墜落速度で引張ったデータとの間にそれほど大きな違いがないならば、手軽にデータの取れる方法で構わない。し

かし、引張速度で荷重の出方が大きく変わるような場合には、やっかいである。墜落高さによってロープの引張り速度が異なるので、いろいろな引張り速度のデータが必要になる。そのようなロープ特性がメーカーによってどの程度差があるのか、あまり差がないのかデータを知りたいものである。

#### 4. 制動で流出するロープとカラビナとの間の摩擦エネルギー（摩擦仕事）

手元から適当にロープをすべり出しながら制動をかける場合を考える。図3はロープが巻きついているカラビナ周辺の様子を示している。自然長で測って、 $S_0$ だけロープを流して制動したとする。そのロープの流出側（確保者側）を区間2とし、カラビナで屈曲して、墜落者側の区間1に流入していくとする。区間2ではすでに一定の張力 $T_2$ が掛かっているとするとする。区間1の張力 $T_1$ と $T_2$ の関係はこれまで同様 $T_2 = T_1 e^{-\mu \theta_1}$ である。ここで、 $\mu$ はロープとカラビナとの摩擦係数で0.2程度と考える。また、 $\theta_1$ は区間1から区間2にかけての全巻き付け角度（単位はラジアン）とする。ここを適当に分割する。たとえば180度（3.14ラジ

アン）が $\theta_1$ として、36分割すれば、隣同士の分割区間は5度（0.0873ラジアン）になる。区間1とカラビナの境界を0番目として36番目が区間2とカラビナとの境界になる。

はじめロープに張力が掛かっていないときなら、 $S_0$ だけでカラビナを擦過する。実際にはロープは弾性体なので張力に応じて伸びながらカラビナを擦る。カラビナへの入口（区間2とカラビナとの境界）ではロープは $T_2$ によりいくらか伸びている。各点ではカラビナとの接触角度に応じた張力 $T = T_1 e^{-\mu \phi}$ で伸ばされたロープ長さ分が、その $\phi_i$ 地点を通過するときに摩擦仕事をなす。カラビナからの出口（カラビナと区間1との境界）では張力 $T_1$ のために伸ばされた分で擦ることになる。それぞれの点での張力を受けて $S_0$ が何倍になっているかは、図1の縦軸から横軸を順番に読み取り、逐次計算する。もし $i$ 番目の張力を $T[i]$ と決めると、その張力に応じた伸び率が図1から読み取れ、その伸び率を $\epsilon(T[i])$ とする。その時、元 $S_0$ のロープは $\epsilon(T[i]) + 1$ 倍伸びることになるので、 $S_0$ （ $\epsilon(T[i]) + 1$ ）になる。同様に $i+1$ 番目でもと $S_0$ のロープは $S_0$ （ $\epsilon(T[i+1]) + 1$ ）という長さになる。この区間での平均の擦る長さは、

$$(S_0/2) \{ \epsilon(T[i]) + \epsilon(T[i+1]) + 2 \} \quad (3)$$

$i$ 番目と $i+1$ 番目との間の小区間に働く摩擦力は隣り合う地点の張力差であるから、 $i$ 番目と $i+1$ 番目との間の摩擦力を $f$ とすれば、

$$\begin{aligned} -f &= T[i+1] - T[i] \\ &= T_1 \{ \exp(-\mu(i\theta_1/n)) - \exp(-\mu(\theta_1/n)) - 1 \} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、右辺の $-\mu(\theta_1/n)$ が十分小さければ、 $\{ \exp(-\mu(\theta_1/n)) - 1 \} = (-\mu(\theta_1/n))$ とおける。以上を区間0番目から $n$ 番目までの $n$ 個分を合計すれば、ザイルを流して制動したことによる摩擦仕

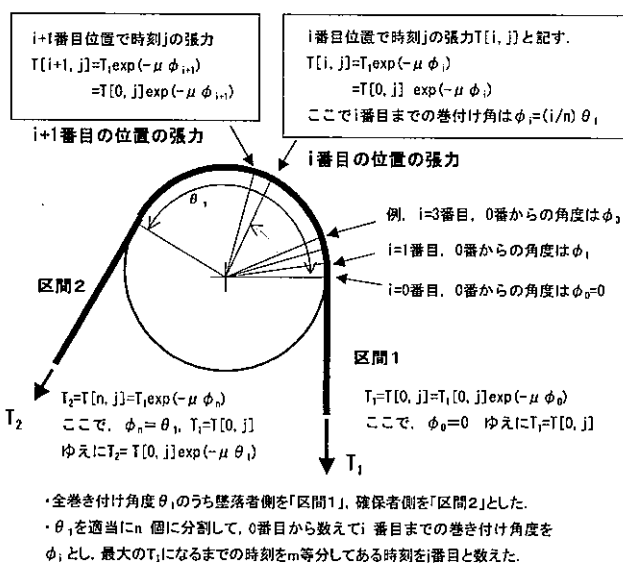


図3 カラビナに巻きついたロープによる摩擦仕事計算のための小区間

事 $E_{fs}$ が求められる。

$$E_{fs} = \sum_{i=0}^n f \cdot \frac{S_0}{2} \{ \varepsilon(T[i]) + \varepsilon(T[i+1]) + 2 \} \quad (5)$$

式5あるいは式4の張力 $T$ は $T = T_1 e^{-\mu \phi}$ で表されるように、 $T_1$ 次第で変わってくるという点に注意しなくてはならない。

### 5. ロープが伸びることでカラビナとの間で消費する摩擦仕事

これは初期段階でロープに張力が発生し始めて、支えている摩擦力と同じくらいまでの引張り力に達するまでの仕事で、いわば過渡的な現象を捉えたものである。固定した弾性確保をしたとき、数回の厳しい墜落でカラビナとロープとの間で発生する摩擦熱でロープ表皮は融けるほどになるので、場合によっては無視できない。

式5より厄介なのは、 $T_1$ が一定でなく、次第に増加していくということである。図1の*i*番目で、ある*j*時刻での $T$ を $T[i, j]$ と書くとする。所定の $T_1$ になるまでの時刻を*m*分割したとして、ある瞬間*j*番目での $T$ や各地点の $T$ を決定できる。例えば、図3で*i*番目と*i+1*番目の間の小区間について考えてみる。

時刻*j*番目のときに、カラビナと確保者側との境目(式では*i* = *n*, つまり*n*番目の地点)での張力を $T_2[j]$ あるいは $T[n, j]$ と記述するなら、区間2での自然長 $L_{2,0}$ が区間2の区間長 $L_2$ になるまで伸びたとすると、区間2からカラビナへ流出した自然長は $L_2 - L_{2,0}$ になる。ところで、区間2でも張力を受けてロープは少し伸びる。図1から相応の伸び率 $\varepsilon(T[n, j])$ を読み取れるので、区間2から流出するときに*n*番目を擦る長さは、

$$(L_2 - L_{2,0})(\varepsilon(T[n, j]) + 1) \quad (6)$$

になる。式(6)の $L_{2,0}$ は張力によって変わる。

伸び率との関係から

$$\begin{aligned} L_2 - L_{2,0} &= \frac{L_2 - L_{2,0}}{L_{2,0}} \cdot L_{2,0} = \varepsilon(T[n, j]) \cdot L_{2,0} \\ \therefore L_{2,0} &= \frac{L_2}{1 + \varepsilon(T[n, j])} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)より、区間2から流出した自然長は、

$$L_2 - L_{2,0} = L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j])} \right) \quad (8)$$

となる。だから区間2とカラビナとの境で擦る長さを $l[n, j]$ と書けば、式(6), (8)より

$$l[n, j] = L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j])} \right) (\varepsilon(T[n, j]) + 1) \quad (9)$$

さらに各地点での擦る長さは式(8)をその地点での張力に応じて伸びている。それを $l[i, j]$ と書けば、式(10)が得られる。これは手元の摩擦力と鈎合う最大張力になるまでの時間を*m*分割し、0番目から*j*番目までの時間で、カラビナ上の地点*i*をロープが擦った長さになる。

$$l[i, j] = L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j])} \right) (\varepsilon(T[i, j]) + 1) \quad (10)$$

今、知りたいのは*j*番目の次の時刻*j+1*番目になるときに、地点*i*をどのくらい擦るかである。つまり、時刻が*j*から1ステップ増加する間でのすべり長さを求めると式(11)になる。

$$\begin{aligned} &l[i, j+1] - l[i, j] \\ &= L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j+1])} \right) (\varepsilon(T[i, j+1]) + 1) \\ &\quad - L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j])} \right) (\varepsilon(T[i, j]) + 1) \end{aligned} \quad (11)$$

同様に*i+1*地点を、時刻がワンステップ進むときにロープの伸びがカラビナを擦る長さは、

$$\begin{aligned} &l[i+1, j+1] - l[i+1, j] \\ &= L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j+1])} \right) (\varepsilon(T[i+1, j+1]) + 1) \\ &\quad - L_2 \left( 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon(T[n, j])} \right) (\varepsilon(T[i+1, j]) + 1) \end{aligned} \quad (12)$$

式(11), (12)の平均が*i*と*i+1*との間でロープがカラビナを擦る長さであると考えれば,

$$\frac{1}{2}\{l[i+1, j+1]-l[i+1, j]+l[i, j+1]-l[i, j]\} \quad (13)$$

さて、この擦る長さに対応する摩擦力を求める。時刻*j*での小区間*i*~*i+1*で作用する摩擦力は両地点の張力差であるから、 $T[i, j]-T[i+1, j]$ であり、時刻*j+1*での摩擦力は $T[i, j+1]-T[i+1, j+1]$ 。時間のワンステップ間の摩擦力はこれらの平均値であると考えると、

$$\frac{1}{2}\{T[i, j]-T[i+1, j]+T[i, j+1]-T[i+1, j+1]\} \quad (14)$$

式(13), (14)の積を時間ステップごとに地点*i* = 0 ~ *n*間で合計すれば、最大張力に至る過渡期において、ロープ伸びでカラビナを擦る摩擦仕事が求められ、次のようになる。

$$E_{fe} = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n \frac{1}{4} \{l[i+1, j+1]-l[i+1, j]+l[i, j+1]-l[i, j]\} \times \{T[i, j]-T[i+1, j]+T[i, j+1]-T[i+1, j+1]\} \quad (15)$$

あるいは*i*番目の点だけに着目し、*i+1*と*i-1*との前後の区間の摩擦力を平均して、*i*点でのすべり長さの変化との積から求めることもありえる。いずれにせよ妥当性を評価する必要がある。

## 6. おわりに

ロープのエネルギー吸収性能は向上し、そのロープと組合わせて使う確保器具もいろいろ工夫されている。そのような道具のテクノロジーは進んだが、はたして人間側の確保のセンスを磨くことや確保技術の習得は置き去りにされていないだろうか。道具は買えても、それを使いこなす技術の本質までは買うことはできない。万一の墜落への対処は、その場に及んで瞬間的に体が正しく反応できるかどうかで決まってしまう。何度も何度も練習して体得し、正しい反応を反射にまで高めな

くはならない。そのためには、たとえば古タイヤを用いた模擬練習などで場面を想定して、段階を追い練習をすることが絶対に必要である。それと同時に、指導者としては、確保の本質を理解し、実際を正しく解釈できることも大切である。その解釈を支えるためには実際的な確保理論が必要になる。制動確保の部分の荷重の算定には膨大な計算が必要になり、今回は間に合わず、中途半端に終わってしまった。考え方の整理はできたが、このままでは用をなさない。天気がよくなってからまた登るつもりで、次回にはモデル的なケースを想定して実用に供したい。

## 付録 (今回の計算例)

以下は、確保理論の本論には関係ない。計算するための参考までに記す。

表1 墜落者重量60kgfで直径9mmロープの弾性のみの固定確保

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2					a=	5774.7		
3					b=	2215.3		
4					c=	563.32		
5								
6	W	h	x	L0	x/L0	f=∫T(x)dx-W(H+x)	h/L0	T
7	60	10	2.0791	5	0.4158	-0.000006	2	1033
8	60	9.9	2.0729	5	0.4146	-0.000006	1.98	1026
9	60	9.8	2.0667	5	0.4133	-0.000006	1.96	1019
10	60	9.7	2.0604	5	0.4121	-0.000006	1.94	1013

式(2)で示したような四次方程式を満足するような伸び率*x/L0*求めることになる。ここではExcel 2000に付属の機能を活用して答えを求めた。実行例を表1に示す。1行目のA, B, C...は列番号で、左端の縦列は行番号である。セルE 2に「a =」と書き、それに対応する値をセルF 2に「5774.7」と記入してある。以下同様にセルE 3に「b =」, セルF 3に「2215.3」, セルE 4「c =」,

セルF 4「563.32」を記入した。これらはロープのメーカーや種類で多少異なるであろうから、書き換えて計算ができるようにするためである。6行目には墜落者の重さ（体重＋荷物など） $W$ 、ロープに張力が発生するまでの墜落高さ $h$ 、ロープに張力が発生してからのロープの伸び $x$ 、張力が掛かっているときのロープの長さ（自然長） $L_0$ 、 $x/L_0$ は伸び率で100倍すれば%表示になる。E 7より下の列にはF列の式の中の変数を入れる。E列の値は、とりあえず何でもよいので適当な値を入れておく。セルF 7には、

$$= (\$F\$2 * 0.25 * E7^4) + (\$F\$3 * (1/3) * E7^3) + (\$F\$4 * 0.5 * E7^2) - A7 * (E7 + G7)$$

と書き込んである。「 $\$F\$2$ 」というドル記号をつけてセル番号を記したのは絶対参照のためで、F 7を下方のセルへそのままコピーしても式2の右辺そのまま使える。G列に落下率を表示した。H列にザイルの伸び率に対応する張力を示した。

さて、いろいろな落下率に対して、張力を求めたいので、 $h$ の値が0になるまで0.1刻みごとに列Bを埋める。以上で、繰り返し計算の準備ができた。ここではセルF 7より下の方のセルについて順番にゴールシークを行った。エクセルのメニューバーで「ツール」→「オプション」→「計算方法」の順で開いていく。計算方法を「自動」にチェックし、「反復計算」にもチェックする。最大の反復係数はたとえば1000回程度、変化の最大値は0.00001（このくらいで十分という程度の意味）に設定し、「OK」ボタンを押す。次にメニューバーから「ツール」→「ゴールシーク」を開く。数式セルを「F 7」と入力し、目標値を「0」、変化させるセルを「E 7」にし、「OK」ボタンを押す。直ちに計算は終了し、表1にあるような答え、つまりセルE 7に0.4158、セルF 7には式2の右辺が十分0に近

い値になったことを示すような数字が表示され、ついでにセルH 7に対応する張力の結果が表示される。計算結果によれば、今回の $\phi 9$  mmロープでは、落下率2の時、伸び率は41.6%、張力は1033kgfになると予想される。

この作業を繰り返すのが面倒なら、以下のマクロを組む。ただし、最終行が空欄であった場合にプログラムが停止するようにDo...Loopで囲ってやると便利である。

[マクロの例]

```
Dim 行 As Integer
```

```
行=7
```

```
Do Until Cells(行, 6). Value = ""
```

```
Cells(行, 6). Goal Seek Goal := 0,
```

```
ChangingCell := Cells(行, 6)
```

```
行=行+1
```

```
Loop
```

```
End sub
```

注意) 上の例では2行目の「行=7」というのは計算を開始する行である。3行目の括弧内の(行, 6)の6は右から数えて6列目に数式が入っていることを意味する。エクセルのバージョンによってVBAマクロは動かないことがある。自動記録機能で書いてから、一部分を書き直したほうがよい。上記のようにして、順番に計算した結果を図2のようなグラフにした。

参考文献

- 1) "The Theory of Belaying", Arnold Wexler, 1950, American Alpine Journal, The American Alpine Club, pp.379-405.
- 2) 「確保理論再考—ロープの弾性と器具との摩擦を考慮した確保理論—」北村憲彦, 平成14年3月31日, 登山研修VOL.17-2002, 文部科学省登山研修所, pp.78-90.