

## 分かり易い確保理論（基礎編）

松本憲親（岳僚山の会）

北村憲彦（春日井山岳会）

### 1. はじめに

確保理論がむずかしいとの意見を多く聞く。数式を見ると拒絶反応を起こすからと言われるが、解説の仕方に問題が多い場合も有る。数式を余り使わずに初心者へ確保理論の理解を求めるには、かなりの工夫が必要だろう。本稿は講習の一助となるようにと書いたものである。

### 2. 確保の定義

登山における確保とは、広義には転・滑落を予防する行為と転・滑落を停止する行為で、狭義には登山用ロープを用いたそれと言われることが多い。

登はん領域の「3点支持」は、「3点確保」と呼ばれることもあり、広義の確保に入る。

氷雪上でアックスを使いながら行動する時は、広義の確保を行っていることになり、滑落してセルフアレストするのも広義の確保となる。滑落した人をグリセードで追い抜いて抱きとめたことや滑落者を下で待ち受けて、雪面に打ち込んだアックスを使って停止させたことなどがあるが、これらも広義の確保である。二足歩行の雪渓上でロープを固定して使うときは、狭義の確保になる。山岳救助や登はんてロープを使う場合は、狭義の確保が行われる。

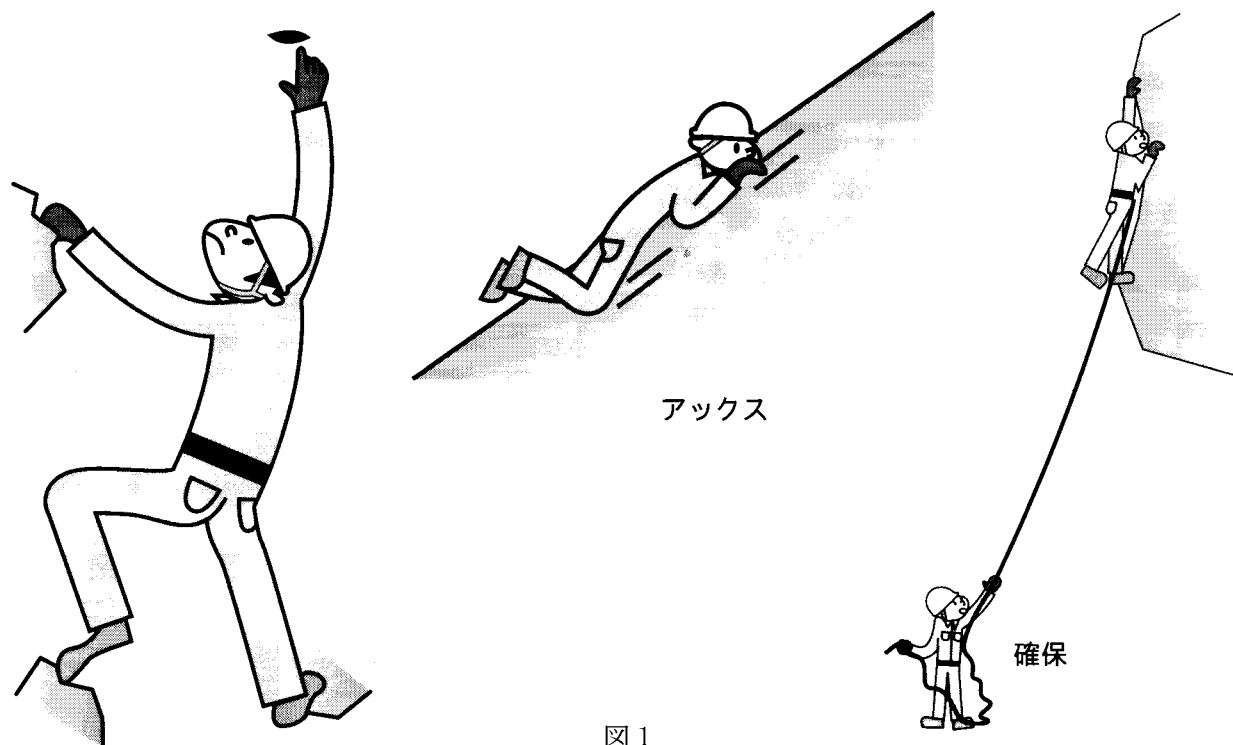


図1

## 1. 登山に関する調査研究

### 3. 転滑落停止力学の概念的理解

転・滑落を停止させるには、予防するより比較的大きな「仕事」を要する。すなわち、墜落で発生したエネルギーを打ち消すだけの仕事が、どこかで行われる。

ここで言う「仕事」は物理の専門用語で、「労働力」や「お仕事」と言う意味ではない。「仕事」は、力と距離の積で表す。もし同じ「仕事」なら、弱いブレーキ力なら長い距離になり、強いブレーキなら短い距離で停止することで確保が成立する。

アックスによる滑落停止（セルフアレスト）なら、身体と冰雪の摩擦を別にすれば、アックスが冰雪を切る抵抗と、切った長さの積が、滑落者の運動エネルギーと一致した所で停止する。

だから、比較的柔らかい雪で滑落停止する際、アックスのピック側で制動しようとして、停止しきれないことがあるが、足で雪面を搔いたり、抵抗の大きなブレードの使用に切替えて「仕事」を増やせば短い距離でも止まれることになる。

グラウンドフォールでは、硬い地面での停止と、積もった雪や水上での停止とでは、人体が受ける最大衝撃力が異なる。前者では比較的大きな衝撃力で停止するが、後者では人体は比較的弱い衝撃力を受けて停止する。

人が空中を1m落ちて平らな岩に真横になって叩きつけられたときを想定して、その人が受ける衝撃にどんなファクターが影響するのかを考えてみる。

岩は、ほとんど変形しないと言っても良いので、この人は、身体の変形で墜落前の「位置エネルギー： $mgH$ ； $m$ は体重（kg）、 $g$ は重力加速度、 $H$ は高さ（メートル）」を吸収することになる。

人体を円柱状に置き換えて考える。

岩に激突した時、この円柱が楕円柱形に変形してから、元の円柱状に戻ったと仮定するなら、中心線が下がって衝撃を吸収したと考え得る。これが「仕事」である。

この大きさは衝撃力（ $F$ ）×距離 $h$ で表わされる。 $h$ が小なら $F$ は大となる。

この体重70kgの人の落下距離は1mだが、落ちはじめから停止までに移動した最大距離（高さ）は $1+h$ （m）だから、「位置エネルギー」は $70g(1+h)$ （J）で、これが「仕事」と等しい。 $E$ の値は比較的小さいので、衝撃力は大きくなり、死の危険があることになる（図2）。

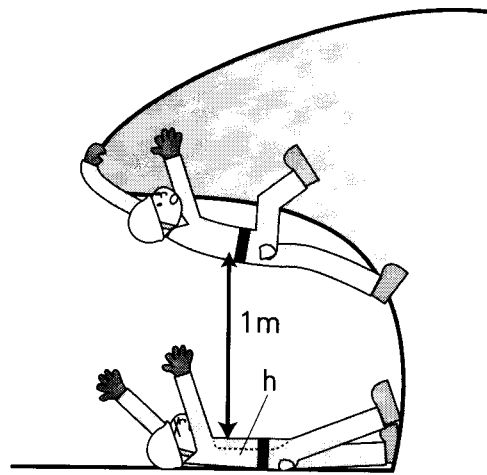


図2 グラウンドフォール

上手く飛び降りて足から着地したなら0.8mほど重心移動することが出来る。このとき、最大脚力を発揮しながらスクワットするなら無傷で済ませられるだろう。

体重70kgの人体が、深く積もった雪の上に1m墜落して、均一な抵抗を受けながら1m埋まって停止したとして、上例のような身体の変形を考えないとするなら、落下距離は1mだが、落ちはじめから停止までの距離（高さ）は2mで、「位置エネルギー」は $70 \times 2g = 1372$ （J）。これが $F$ の力（雪を押しつける力）で1m動かす「仕事」

に変わったと考えると、人体の受ける力 (F) の大きさはさほど大きくない。

バンジージャンプで、理論を知らず安全を考えてかシングルロープをダブルロープで使って跳び降りたジャンパーが衝撃で死んだ話がある (伝聞)。

以上の例から、位置エネルギーを上手く吸収するのが確保の要点であることが、類推できたであろう。

クライミング時、ロープを着けた墜落者が空中落下し、確保時のロープの流出無しに空中に停止したとするなら (弾性確保)、主としてロープの伸びによる「仕事」とロープとカラビナおよび確保器の摩擦による「仕事」の和が、墜落してからロープの伸びが止まるまでの高さに対応する「位置エネルギー」に等しくなる (図4)。すなわち、弾性確保では、ロープの伸び易さが衝撃力の大きさを決める。衝撃値の計算式は後述する。

今日の登攀用ロープは、伸び易いことが特徴の1つになっている。ただし、どこまでも伸び易い

のが良いのではなく、適度の伸びが重要なのだが、上限のみが定められていて、80kgfでの伸び率は、上限の10%に近いものがある。1970年代のロープは、これが3%程度だったと思われる。セカンドが登攀開始してすぐにスリップしたところ、グラウンドフォールして足を痛めて搬送されたことが最近あったが、解析してみると、これが起こり易いことがわかった。ということは、新人のセカンドを確保するときは決してロープを緩めてはならない。むしろ引き上げているくらいの気持ちでロープを張っていないとわからないことがわかる。新人二人を同時にフォローさせるときは、それが困難だから、無理せずに一人の新人と組んで、その一人のセカンドをダブルロープで確保してやれば、全くの一本より伸びにくいようにして、支えてやれる。

墜落者を停止させる時に、ロープが制動されながら流出したときは制動確保で、ロープが伸びる時の「仕事」と、制動力と流出分 (高さ) の積で

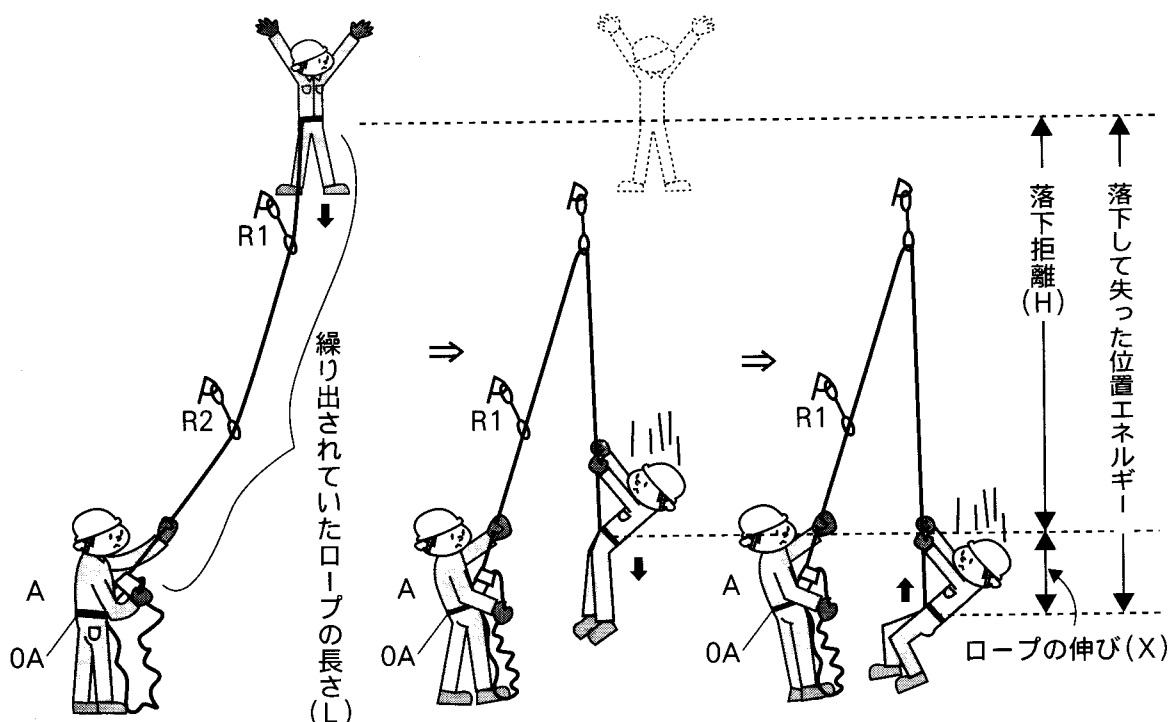


図3

## 1. 登山に関する調査研究

あらゆる「仕事」と、ロープとカラビナおよび確保器との摩擦での「仕事」が、総仕事となる。当然墜落者の位置エネルギーは、ロープ流出分（伸びを含む）増えるが、制動による衝撃緩和が著しいので、墜落者の保護や支点・アンカー保護の観点から重視される。ただし、ロープ流出によりテラスや岩棚、出っ張り、地面に激突する場合は、ロープ流出が制限ないし禁止される。

Wexlerは摩擦を計算に入れない制動確保の式を1950年に発表し<sup>1</sup>、日本でも広く知られており、実用もされている。最近行なった摩擦を加味した計算式での計算結果と大きくは変わらないので、今後も、おおよその値を計算で知るのに利用できる<sup>2</sup>。

先頭登攀者が墜落したのを制動確保する具体的な方法やWexlerの制動確保の衝撃値の計算式は、後述する。

### 4. 重大なアンカーの設置《ベクトルによる荷重の増加と均等荷重など》

水平に張ったフィクストロープ使用時に、軽く緊張したロープの中間で静かにぶら下がるとき、ロープには、体重に相当する張力を超える張力が発生する。これはベクトルによって理解できる。荷重が増加するに従ってロープは伸びて、ロープ張力と角度により増幅した墜落者の重量に相当する力が、バランスするまで伸びて停止する。上記80kgfでの伸び率（ワーキングエロンゲーション）＝7%の登はん用シングルロープで、このフィクストロープを張ったとしたなら、体重80kgの人の場合にロープは9%程度伸びて、ロープ角度は約130度となり、支点とロープに95kgf程度の荷重が掛かることになるが、スリップしていきなりロープに荷重すると、最大荷重値はこの2倍を超えると予想される。

### アンカーに掛かる力

角度による力の増幅例を上述したが、アンカーを構築する際に複数支点をスリング等でまとめて使用することが、普通に行われる。

アンカーの要（かなめ、パワーポイント）と各支点を連結するスリングに比較的大きな角度が生ずると、支点とスリングに比較的大きな力が掛かる。

支点が2個の場合は、2方向のスリングの成す角度（ $\theta$ ）を60度以内に押さえることが国内では推奨されているが、米国では45度以内を推奨する文献がある。これもベクトルで理解でき、簡単な計算式で算出できる。

パワーポイントに掛かる力をWとすれば、0.5Wを $\cos 0.5\theta$ で除して、それぞれの支点に掛かる荷重値を求める。

計算が得意な人でも三角関数を使う暗算が出来るのは、極めて稀だろう。だから、角度に対応するおおよその値を暗記しておくのが良い。

0度	—0.500W
30度	—0.518W（約4%増）
45度	—0.541W（約8%増）
60度	—0.577W（約15%増）
90度	—0.707W（約41%増）
120度	—1.000W（100%増）
130度	—1.180W（約1.2倍）
140度	—1.460W（約1.5倍）
150度	—1.930W（約1.9倍）
160度	—2.880W（約2.9倍）
170度	—5.740W（約5.7倍）

スリングの長さに差が生じる場合がある。この場合は、パワーポイントに荷重したときにそれぞれ

れのスリング長さに逆比例する各支点の荷重差が生じる。

この荷重差を少なくして均等荷重に近づけることを、真のイクオライズ (equalize) と言うべきで、方法がいくつかある。

- ① パワーポイントと各支点との距離を大きくするとそれぞれの距離比が小となり、均等加重に近づく (図4)。真下方向に荷重が掛かるなら、水平位置に近づけて2個の支点を作り、比較的長めのスリングを用いる時は、均等荷重と同時に各支点に掛かる力を最小にできる。

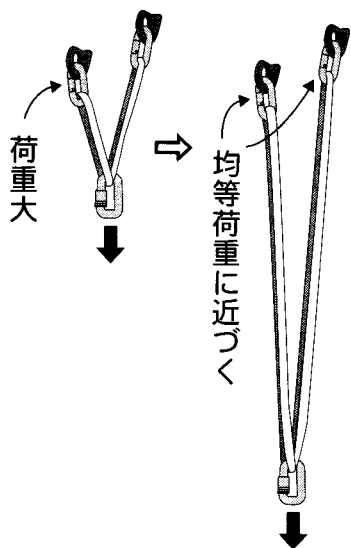


図4

- ② 上の場合にスリングのパワーポイント部をスライディングノット (流動分散) にしておいて、正確な加重方向に少し荷重したまま (例えば100kgf) パワーポイントのカラビナに、荷重方向に対する横方向の小さな振幅の揺さぶりを数回かけて、スリングとカラビナの滑りを起こすと荷重が均等に近づくので、そのままパワーポイント部のスリングを細めの長いスリングで強く編み上げてから本格的な荷重に移る。このスリングの編み上げは、本格的な荷重で支点の部分的破壊が生じても

パワーポイントの荷重方向への移動 (イクステンション) が起こらぬようにするもので、山岳救助の場合に用いられる。ダイニーマ素材の良く滑るスリングを用いる場合は、よほど丁寧に編み上げないと、支点破壊時にパワーポイントでスリングが滑る。このとき、荷重の増加が起こることが多い。

パワーポイントが荷重方向へ動かぬことをノウイクステンション (no-extension) と呼ぶ。登はんではスライディングノットの上をフィギュアエイトノットで結んでしまう方法があり、単なるスライディングノットでは危険だとされている。

- ③ 2 支点が上下の位置にある場合は、コードレットを用いて、パワーポイントからそれぞれの支点までの距離が2:1となり、かつ長いほうのストランド数が短い方のストランド数の2倍になるように調節すると均等荷重に近づく。スリングを連結して用いる場合は、伸び率が同一のものを使用する (図5)。

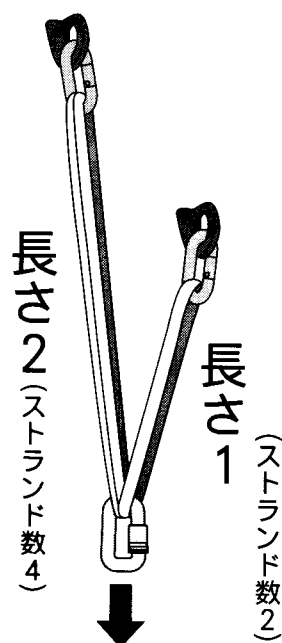


図5

<sup>1</sup> A.Wexler,A.A.J.,1950,379.

<sup>2</sup> 登山研修Vol.17,78(2002)

## 1. 登山に関する調査研究

④ 3支点をを用いる時、パワーポイントから各支点の方向が大きく異なる時は、3本のスリング脚が大きく開いている。この場合は往々にして、中央にある支点に大きな力が掛かる。これを均等荷重に近づけるには、①のように長いスリングを使う他、比較的短いスリングで均等荷重に近づける最も簡便な方法は、中央のスリングをわずかに弛ませる方法だが、スリングの種類とたるませる程度の習得には努力を要する。両側方の支点に伸びの少ないクイックドロウを掛け、中央の支点にはカラビナのみを掛けた後比較的伸び易いスリングを用いて3個のカラビナをまとめる方法は、角度とスリングの長さ・種類の組み合わせの習得に努力を要する。

### ⑤ その他<sup>3</sup>

原則的には、各支点は十分に大きな強度を持つものを使用するのであるが、アルパインクライミングでは、往々にして不均一な強度の支点をまとめて使用する場合がある。この場合は、それぞれの支点強度に応じた荷重を分散ができれば、全体として強度の高いアンカーとなる。上述のスリングの長さ、伸び、張り等の勘案やギアの設置位置の工夫で、この荷重分散が可能である<sup>4</sup>。

## 5. 支点（ランナー）の設置、落下率（ $f$ ）

登はんロープで結ばれたパーティーが、隔時登はんしている時に登はん者が墜落して停止する場台の「仕事」を前述したが、ここでは、落下率や登はん者、ロープ、支点に掛かる力の大きさを理解する。

支点は、通常岩や氷に打ち込むあるいは挟み込む部分（プレイスメント）とカラビナ・スリングから成る。岩の突起、岩のトンネル、クラック等

に生えた木、氷柱などの自然物に直接スリングをかけてカラビナでロープにクリップする場合（ナチュラルプロテクション）等の支点があるが、支点を通常では、落下率0.5以下になるように設置する。落下率とは、落下距離（ $H$ ）を、繰り出されたロープの長さ（ $L$ ）で除した値と定義され、落下距離は、落ち始めからロープに衝撃がかかり始めるまでの距離を言う（ロープの伸びによる移動距離を含まない）（図3）。

墜落者の重量、斜面状況、ロープ、確保の方法等が同一なら、衝撃荷重は、落下距離に関係なく落下率により決まる。すなわち、落下率が同じなら1mの落下でも10mの落下でもロープや支点、墜落者に掛かる衝撃は等しい。ただし、結び目が滑ることや墜落者の変形等による衝撃緩和を無視する。

1mの落下でも、10mの落下でも衝撃荷重値が変わらないことは、なかなか理解しにくいことであるが、空中落下を弾性確保する場合で説明してみよう。

バンジージャンプのように腰の高さにあるアンカーにロープを結び、他端を腰のハーネスに結んで飛び降りる場合を想定する。

ロープが完全弾性体だと仮定して（実は完全ではないが、荷重に応じて伸びが増えるので、誤差を無視して、便宜上正比例するとしているのが通例）、1mのロープを500kgfで引くと0.2m伸びるなら、同質のロープ10mを同じ力の500kgfで引くと2m伸びる。

1mの空中墜落をこの1mのロープで受け止めたときの（ $ff=1$ ）ロープの伸びが0.2mなら、「仕事」は $0.5 \times 500 \times 0.2$ （図6）5。同じように10mの空中墜落するときのエネルギーを、10mの同一ロープで受け止めるなら（ $ff=1$ ）2

<sup>3</sup> 登山研修Vol.19,34(2004)

<sup>4</sup> 登山研修Vol.18,52(2003)

<sup>5</sup> 定数0.5は力の大きさが0から始まり最大値に達した値とロープの伸びる距離の積の2分の1が仕事の大きさであることを示している。

m伸びて、衝撃値が500kgfまで増加したところで落下の位置エネルギーに釣り合う。「仕事」は $0.5 \times 500 \times 2$  (図7) 5。仕事比は1:10で、衝撃値は同じ500kgfになる。

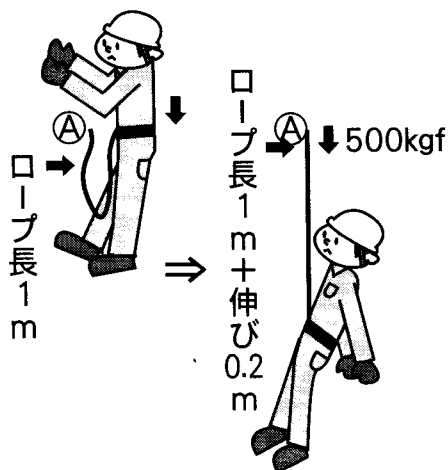


図6

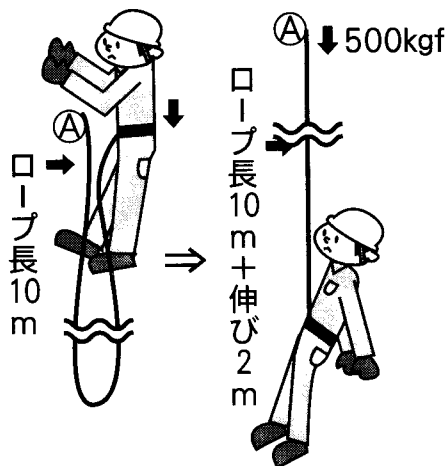


図7

弾性確保では、落下物の重量とロープの「伸びにくさ」の係数(k)が同じなら落下距離と落下エネルギーを吸収するロープの長さの比(落下率、fall factor, f f)が、衝撃値を決める。

支点の強度は、様々に通常500kgfを超えるものが使用され、多くは1000kgfを超えるものであるが、ピトン(ハーケン)、チョック(ナッツ)、SLCD(スプリング付カム類)、岩など登はん対象に直接接触している部分の設置方法は、熟練を要する。上述の自然物を使用する場合も同様である。強度の小さいものの例を挙げれば、縦リス(クラ

ック)に打たれたピトンは例外を除いて、最大支持力は300~500kgfで、マイクロナッツのそれは200~500kgfである。全ての登はん具の使用法に習熟し、強度や支持力を理解していなければならない。

### 支点設置位置の具体的な指針

登はん開始地点では、確保者の腰の辺り(テラスから1mの高さ)に確保器があるとして、登はん者は、手の届く範囲(足元から2mの範囲)に1個目の支点(①)を設けてから登って行き、①が腰まで来たときに2個目の支点(②)を設置する。②が膝まで来た時に3個目の支点(③)を設ける。③が足先まで来た時4個目の支点(④)を設ける。④が足下50cmまで来た時5個目の支点(⑤)を設ける。すなわち、1個目から5個目までの間隔は、それぞれ1m、1.5m、2m、2.5mの間隔になる。その後は、5m登るごとに新たな支点を設ければどこで墜落しても落下率は0.5以下になる。

なお、この場合、5%のロープの弛みを計算に入れて、手繰り落ちが無いものとしての計算結果である。各ピッチの登はん終了までに、確保時に流出すべき残りのロープが4m程度は、必要な点に注意。

### 6. 弾性確保の式

ここでは、mは落下物の質量(kg)、Wは重量(kg重)で、 $W = mg$ (ただしここでgは重力加速度)を表す。すなわち、Wは質量mに働く重力であるが、体重=80kgは、質量80kgの身体に働く重力と置き換えて大きな誤差はない。また、長さの単位はメートル(m)を用いる。

質量mの登はん者が墜落すれば、長さL(m)のロープに荷重がさきり始めてから荷重は増大し、最大荷重・Pからは減少し、また荷重が増

## 1. 登山に関する調査研究

加しては減少する。この振幅が漸減した末に墜落者は停止する。

墜落し始めから停止までロープの繰り出しがない場合は、弾性確保である。このときの墜落者の失った「位置エネルギー」の最大値は、墜落位置からロープが伸び始めるまでの高さH (m) = 落下距離と、最大の伸びを示した位置までの伸びの長さX (m) の和に相当する (H+X) と、墜落者の質量mおよびgの積 “mg (H+X) (J:ジュール)” で表わされる。このエネルギーは、ロープをXだけ伸ばす「仕事量」: 0.5PX (J) と等しい (ここでもロープを完全弾性体とする) (図4)。このとき使われたロープは、予め試験で求められたロープ係数:  $k = PL/X$  として扱うのが簡単である。

上に示したように、簡易的にはロープ係数kは、従来ロープの破断試験での最大荷重値を、そのときのロープの伸び率で除した値である。例えば、試験ロープが2000 kgfで破断したときのロープ伸び率が57%だったら、2000を0.57で除した3509 kgf がkの値となる (国際標準単位では、 $3509 \times 9.8 = 34388$  (N) = 約34 kN)。

以上から式を展開すると、最大荷重 (衝撃値) Pは、以下のように表せる。

$$P = mg + mg \sqrt{1 + \frac{2k}{mg} \cdot \frac{H}{L}} \quad (\text{N})$$

あるいは

$$P = W + W \sqrt{1 + \frac{2k}{W} \cdot \frac{H}{L}} \quad (\text{kgf})$$

の公式が得られる<sup>6</sup>。

UIAAは、登山用ロープの強度や衝撃値、伸び率の測定法を定めている。この場合の落下率は1.786 (口調で覚えるなら、「ヒトリデナヤム」) で、中間支点がカラビナなので、この測定による

衝撃荷重 (ロープタグに記載されている) からkを導くことができる。このkを用いて実際の登山時の墜落の衝撃荷重を推定すれば、大きく誤まることはないと考えられる。

### 7. 制動確保

先頭登山者が墜落したのを制動確保する具体的な方法は、墜落距離の半分の長さのロープが流出するように制動を調節することであり、より具体的には、スロット型制動器を使うシングルロープでの制動なら、一般的には、12~15kgfでロープが流れ出る程度に制動側ロープを握る。米国ではこれが20kgfとなっているのを読んだことがあるが、体重差であろうか、それとも制動距離を短くするためであろう。

ダブルロープの場合も制動の仕方は同様だが、ロープが細いので、ロープを握る強さは、シングルロープの場合よりかなり強めねばならない。

制動確保の効果は、衝撃緩和である。上述の標準的な制動調節で、墜落距離の2分の1程度のロープが制動下に流出する。このとき、衝撃荷重値は、弾性確保時の4分の1程度に低下する。

登山開始直後の墜落は、落下率が大きくなりがちなので、制動確保が禁忌な場合もあるからロープを流出させないでロックすることも出来ねばならない。そのためにも確保には皮手袋が必要で、いつも使う手袋で自在なロープ操作に習熟することが求められる。

Wexlerの制動確保の式: (m) はメートルでの長さを意味し、mは落下物の質量(kg)、Wは重量(kg重)で $W = mg$ 、ただしここでgは重力加速度を表す。また、ここでも簡単のためにロープ係数kは一定とする。

<sup>6</sup> 登山研修Vol.13,33(1998)



体重W (kg重) あるいは質量m (kg) の先頭登はん者がH (m) 落ちてから、繰り出されていたL (m) のロープが伸び始め、X (m) 伸びてから制動しながらS (m) ロープが流出して停止したなら、リーダーの失った位置エネルギー  $mg(H+X+S)$  は、ロープを伸ばすエネルギーと制動したエネルギーの和  $0.5PX+PS$  に等しいから弾性確保の式の場合と同様に、式を展開して次式を得る<sup>1,5,6</sup>。

$$P = mg - k \cdot \frac{S}{L} + mg \sqrt{1 + \frac{2k}{mg} \cdot \frac{H}{L} + \left( \frac{k}{mg} \cdot \frac{S}{L} \right)^2} \quad (\text{N})$$

あるいは

$$P = W - k \cdot \frac{S}{L} + W \sqrt{1 + \frac{2k}{W} \cdot \frac{H}{L} + \left( \frac{k}{W} \cdot \frac{S}{L} \right)^2} \quad (\text{N})$$

ここではWexlerの近似を紹介した。しかしWexlerの近似では、当初の伸びXによる弾性エネルギーで見積もっているため、実際より過小であり、逆にSが過大になるという点が問題である。力学的には、Lの代わりにL+Sを用いるのが正しい。