

4. 登山用具研究

アルペン理論に於ける物理的単位 新国際単位系(SI)

鈴木 恵 滋

1 一般事項

安全理論、雪崩、気象条件、材料などに関する研究のように、アルペンにおける様々な分野の知識の理論的基礎は、物理的計測や式によってのみ多角的にとらえ展望することができる。そのためには必要な単位や表現方法の基礎知識が不可欠となる。

物理量に関して不確定要素や変更がすでに部分的に存在していたところに、新しい国際単位系法が更に混乱を助長している。

1969年7月2日に交付された「計量単位」に関する法律及び1970年6月26日の施行規則に基づく新しい量の導入猶予期間が切れ、1977年1月1日より登山に関する物理的根拠もこの単位により説明されることとなった。

2 新国際単位系

単位法は、「度量衡に関する一般会議」で採択された「国際単位系」(略称SI)にその根拠を持つ。これは産業及び行政上使用される単位を規定したものであり、これにより自然科学や技術で使われる単位の一般的統一と整理が最終的に可能となった。

導入による当初の困難はあったものの、この系にはつぎのような長所がある。

- ・唯一の系に属する単位のみが使用されている。それにより、同じ量のものに対し、異なった単位が用いられることがなくなった。
- ・単位系の構造により、物理量がより明確に展望できるようになり、単位を使用する上で著しく作業負担の軽減が図られるようになった。

7つのSI基本単位から派生した形で、その他の必要な単位が導きだされている。

SI基本単位：	m	メートル	長さ
	kg	キログラム	質量
	s	セカンド	時間
	A	アンペア	電流
	K	ケルビン	温度
	cd	カンデラ	光度
	mol	モル	原子量

更に、原子物理単位があるが、ここでは言及しない。

at, atm, Torr, mmHg, grd, kp, PS, kcalといった単位は、猶予期間を過ぎた1977年1月1日以

降使用は認められていない。

3 量, 単位, 数値

物理量というのは, 物理物体・事象・状態の測定可能な性質を表す。例; 長さ, 質量, 速度, エネルギー温度。

実際の計算では, このような量は, 数値を単位の組み合わせにより構成される。方程式を与える場合には, 各々の量を単位がアルファベットの短縮形で表される。基本量は次のように選択された。まず, 基本量をなるものは互いに独立していること。更に, 基本量以外のこの系全ての量が, 基本量を掛けたり割ったり(微分・積分を含む)することにより組立単位として創出できること。組立単位は, 基本量を変形したり指数の形で表した物理量のことを言う。単位表示も同様である。例; 速度=道のり÷時間, $v = s/t$, この時の単位はm/sに相当する。

いくつかのSI組立単位は, 特殊な単位表示を持つ。例; ニュートン (N), ジュール (J), ワット (W)。数値は問題となっている物理量が, その単位の何倍あるいは何分のいくらであるかを示す。

ある物理量において, 数値と共に方向も意味をもつときには, ベクトルとして示される(例; 力 \vec{F})。しかし, ベクトルの単位はあくまで数値であり, 従って動きや方向は考慮しない。ベクトル計算は現在使われている普通のアルペン理論では無い。

より分かりやすく実用的に表現できるよう, 量が非常に大きい場合や小さい場合には, 単位の倍数や十進法が使用される。

例; $12000\text{N} = 12\text{kN}$ キロニュートン
 $2275\text{Hz} = 2.275\text{kHz}$ キロヘルツ
 $1.013\text{bar} = 1013\text{mbar}$ ミリバール

国際的に一般に使用されている整数乗倍・接頭語・記号

$10^{-9} = 0.000000001$	ナノ	n
$10^{-6} = 0.000001$	マイクロ	μ
$10^{-3} = 0.001$	ミリ	m
$10^{-2} = 0.01$	センチ	c
$10^{-1} = 0.1$	デシ	d
$10^1 = 10$	デカ	da
$10^2 = 100$	ヘクト	h
$10^3 = 1000$	キロ	k
$10^6 = 1000000$	メガ	M
$10^9 = 1000000000$	ギガ	G

4. 登山用具研究

$v = s/t$ というように、分数にスラッシュを使うことは、不明確さを避けるためにカッコ付きで用いるのであれば、同じ行で2回以上使うことも許される。しかしできれば、分数は水平の線を使うか、負の指数を使うほうがよい。例； $P = \frac{F \cdot s}{t}$ の単位は $\frac{Nm}{s}$ あるいは Nms^{-1} 。

4 力学上の主要な関係

テーマを扱う上で意味のある、物理量・基本単位及びその下の単位分類を以下に列挙する。

(1) 基本量： 長さ l 単位 1 m

(ある特定の波長から設定された、国際統一に基づく長さで、パリに保管されている「メートル原器」に等しい)

$$1 \text{ m} = 10 \text{ dm} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm} \dots$$

$$10^3 \text{ m} = 1 \text{ km} ; \text{キロメートル}$$

$$10^6 \text{ m} = 1 \text{ Mm} ; \text{メガメートル}$$

$$10^9 \text{ m} = 1 \text{ Gm} ; \text{ギガメートル}$$

この組立量：

面積 A 単位 1 m²

$$1 \text{ m}^2 = 100 \text{ dm}^2 = 10000 \text{ cm}^2 = 1000000 \text{ mm}^2$$

容積 V 単位 1 m³

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 = 1000000 \text{ cm}^3 (10^6 \text{ cm}^3) = 1000000000 \text{ mm}^3 (= 10^9 \text{ mm}^3)$$

(2) 基本量： 質量 m 単位 1 kg (国際キログラム原器の質量)

この単位を、重量と混同してはならない。質量の重さは場所によって異なるが、質量は場所に無関係な「実体質量」である。

例：ピトンハンマーは海拔標準地では、高い山の上であろうと、ある惑星の上であろうと、同じ質量を持つ (質量 $m = 0.650 \text{ kg}$)。これに対してその重量は、地球の中心から離れば離れるほど小さく、ある惑星の質量が小さいほど小さくなる。

ここまでの量から、次のような量が派生する。

密度 ζ 定義： $\zeta = \frac{m}{V}$ 単位： $1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

例；万年雪の厚さ $= 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ 即ち、1 m²の万年雪は約600kgの質量を持つ。

(3) 基本量： 時間 t 単位；1 s (秒)

(セシウム原子の電子圏で起こる電磁振動の定数倍)。従来は一平均太陽日の [60×60×24] 分の1とされた (不正確)。

$$60 \text{ s (秒)} = 1 \text{ min (分)}, 60 \text{ min (分)} = 1 \text{ h (時間)}, 1 \text{ h (時間)} = 3600 \text{ s (秒)}$$

以上に挙げた基本量から最もよく使用される単位が派生している。

速度 v 定義： $v = \frac{s}{t} = \text{道のり} \div \text{かかった時間}$ 単位： $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (メートル毎秒)

4. 登山用具研究

この単位は、 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ と変形もされる。

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}} = \frac{1\text{m}}{3.6\text{s}} \approx 0.28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

あるいは、反対に： $1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{3600\text{km}}{1000\text{h}} = 3.6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

数値の比較では、 $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ の方が $1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ より大きな速度を表す。

加速 a 定義： $a = \frac{v}{t} = \text{増加速度} \div \text{時間単位}$ 単位： $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (メートル毎秒毎秒)

例；標準地(およそドイツの緯度)での自由落下加速 $a_N = 9.81 = g$ (しばしば使用される略号)

赤道 $a_{\text{eq}} = 9.78$

南/北極 $a_{\text{pol}} = 9.83$

月 $a_M = \frac{1}{6} g = 1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

力 F 定義： $F = m \cdot a$ (F=英語のforce) 単位： $1 \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

この単位はN (ニュートン) と略される。

1 ニュートンは、質量1kgの物体に作用したとき 1m/s^2 の加速度を生じさせる力である。

ニュートンという新しい力の単位を導入することにより、ある物体の重力と質量の数値は全く異なるものとなった。その結果これまでしばしば起こっていた取り違えがかなり避けられるようになった。

例；ピトンハンマーはその地点でも質量は $m = 0.630\text{kg}$

その重力は標準地では $F_G = 6.18\text{N}$ ($\approx 6.3\text{N}$)

その重力は赤道では $F_G = 6.16\text{N}$ ($\approx 6.3\text{N}$)

その重力は月では $F_G = 1\text{N}$

新単位法では、産業上は、「質量」を意味する「重量」という名称を使用することを認めているので、将来、重量といったときには質量(物質質量)を指し、ある物体の重力と理解してはならない。

かつて力の単位はポンドあるいはキロポンドであった。1キロポンドは、標準地で質量1キログラムが地球の引力により受ける力であった。即ち、

$$1 \text{kp} = 1 \text{kg} \cdot 9.81 \text{m/s}^2 = 9.81 \text{kgm/s}^2 = 9.81 \text{N}$$

あるいは、 $1 \text{kp} = 10\text{N}$ 、 $1 \text{N} = 1/9.8 \cdot \text{kp} = 0.102\text{kp}$

あるいは、 $1 \text{N} = 1/10 \cdot \text{kp}$ 。

力を計量する場合には大抵、許容誤差はかなり大きく、出された近似値で換算には全く十分である。

例；ザイル一本の最大衝撃 $12\text{kN} = 1200\text{Kkp}$

4. 登山用具研究

圧力 p 定義： $p = F/A = \text{力} \div \text{面積単位}$ 単位： $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ (パスカル)

大きい単位： $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

例：海拔の標準気圧：1013ミリバール (at, atm, 1 Torr, 1 mWS, 1 mmHgは既に使用が禁止されている)。

仕事 W 定義： $W = \vec{F} \cdot \vec{l}$ 単位： $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$ (ジュール)

(カベクトル \vec{F} の値と、力の作用を受けて戻される道のりベクトル \vec{l} の値から産出される。その際、力要素は、道のりの方向に働く。)

従来使用されていた単位： $1 \text{ kpm} = 9.81 \text{ Nm} = 10 \text{ Nm} = 10 \text{ J}$

反対： $1 \text{ Nm} = 1/9.81 \text{ kpm} = 1/10 \text{ kpm}$

物理作用は種々の形態で現れる。例えば、

引き上げ作用： $W_k = m \cdot g \cdot h$

加速作用： $W_a = 1/2 mv^2$

張作用： $W_{\text{spann}} = 2/1 Ds^2$ (D=弾力定数)

摩擦作用： $W_R = \mu \cdot F_N$ (μ =摩擦係数, F_N =標準力; 摩擦面を垂直に押す力)

変形作用。 **エネルギー W** (Wは英語Workeの頭文字)

エネルギーとは、ある物理系の中に蓄えられている仕事能力のストックをいう。

エネルギーと仕事は同様の物理量であるので、いずれも同じ単位で測定されることができる。場合に依じて工学では特に、張エネルギーも計算される位置エネルギー(潜在エネルギー)と、運動エネルギーを区別する。エネルギー保存の法則によれば、いかなるエネルギー変換でもエネルギーは減少せず、その形態が変わるだけである。例; 登山者が落下すると、位置エネルギーはまず運動エネルギーの形で、最終的に大部分は(ザイルの中の)張エネルギーと摩擦エネルギー(動態ザイルブレーキ)の形に変換される。

パワー P 定義： $P = W/t = F \cdot l/t = \text{遂行された仕事} \div \text{それに要した時間}$

単位： $1 \text{ Nm/s} = 1 \cdot 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$ (ワット)

かつては力を表示するのにもっぱらkpがNの変わりに使用されたので、当時はパワーに対する単位は1 kpm/s (あるいはmkp/s)であった。

$1 \cdot \text{kpm/s} = 9.81 \cdot \text{Nm/s} = 9.81 \text{ W} = 10 \text{ W}$

反対： $1 \text{ W} = 1/9.81 \cdot \text{kpm/s} \approx 1/10 \cdot \text{kpm/s}$

同様に今まで使用されていたパワー単位1 PS (馬力)も、もはや使われない。

$1 \text{ PS} = 75 \text{ kpm/s} = 75 \cdot 9.81 \cdot \text{Nm/s} = 736 \text{ W}$

$1 \text{ PS} \approx 3/4 \text{ kW}$ 反対： $1 \text{ kW} = 4/3 \text{ PS}$

従って、基本単位を用いると、パワーは次のように略される。 $1 \text{ W} = 1 \cdot \text{kgm}^2/\text{s}^3$

4. 登山用具研究

仕事は次のように略される。 $1 \text{ J} = 1 \cdot \text{kgm}^2/\text{s}^2$

該当する定義より、仕事に関して、もう一つ略号が導かれる。

$W = P \cdot t$ であるから： $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ (ワット秒)

あるいは： $1 \text{ J} = 1/1000 \text{ kWs}$

あるいは： $1 \text{ J} = 1/3600 \cdot 1000 \text{ kWh} = 1/3.6 \cdot 10^6 \text{ kWh}$

$= 2.7 \cdot 10^{-7} \text{ kWh}$ (キロワット時)

反対に： $1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$

(4) 基本量： 温度 T 単位： 1 K (ケルビン)

(標準気圧 (1013ミリバール) の下で、絶対零度と、氷が溶解する氷点との間を273.16等分)

ここから次のことが得られる： セ氏温度

絶対零度 0 K = -273.16 °C

氷点 273.16 K (=273K) = 0 °C

水の沸点 373.16 K (=373K) = 100 °C

以上のように、新基本量での氷点と水の沸点との温度差は、セ氏温度と同様に100等分されている。従って、新基本量でもセ氏でも、温度差の表示に当たって数値は等しくなる。そのため、表示にセ氏温度°Cを使用することが公式にも許可されている。

SI基本単位に基づく物理量のスキームは整合性を持っているため、熱エネルギーも (ジュール) で表示される。こうすることにより、例えば位置エネルギーや運動エネルギーを、熱エネルギーに変換しなければならないとき、はっきりとその長所が分かるであろう。従来使用されていたcalやkcalは破棄される。

5 適応例

量が規格化されたのに伴い、技術全分野にわたりそうであるように、アルペン理論でも規格や計算の包括的な切り替えが必要である。以下では、いくつかの例を用いてSI単位で値をまとめてみる。

(1) 捕獲衝撃

UIAA規定によれば、一本のザイルに係わる力は静態安全で最高12kN (キロニュートン) (約1200kp) 許容される。

動態安全では、例えば半・スト投下の安全装置 (落下綱方向は下方) の時で約4 kN (約400kp) である。

(2) 落下エネルギー

まず、基点平面からhの高さにある物体は、位置エネルギー $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$ を持つ。登山者が装備を含めて質量80kgで、中間安全装備のない15mのザイルで登ったとする。転落の後に止まる

4. 登山用具研究

位置では、基点平面（第一考察の時はザイルの伸びは考慮しないとする）が、30m下に移動したことになる： $h=30\text{m}$ 。

$$W_{\text{pot}}=80\text{kg}\cdot 9.81\text{m/s}^2\cdot 30\text{m} (=80\cdot 10\cdot 30\text{kgm}^2/\text{s}^2)$$

$$W_{\text{pot}}=24000\text{J}=24\text{kJ} \text{ (キロジュール)}$$

物体が落下すると、計算された位置エネルギーは、物体が空中にいる時ますます大きくなる運動エネルギーによって段々と取って代わられる（減少する）。落下終了時には、全エネルギーが、運動エネルギーに変換されている。 $W_{\text{kin}}=1/2mv^2$ 。エネルギー保存の法則によれば、エネルギーは減少しないのであるから、摩擦を考慮しないと次の式が成り立つ。 $W_{\text{kin}}=W_{\text{pot}}\rightarrow 1/2mv^2=m\cdot g\cdot h$

$$\text{この方程式を解くと： } v=\sqrt{2gh}\rightarrow v=\sqrt{2\cdot 9.81\text{m/s}^2\cdot 30\text{m}}\rightarrow v=\sqrt{600\text{m}^2/\text{s}^2}\rightarrow v=24\text{m/s}$$

落下時の抵抗を考慮しなければ、これが、ザイルが伸張し始めるまでの、落下終了直前の速度である。

次の局面では、上で計算されたエネルギーがザイルに伝導される。この時、ザイルは伸張し、その弾力性によってエネルギーを吸収する。ザイルが牽引バネだと考えると、バネが伸びきったときには全エネルギーは張エネルギーとして存在することになる。即ち： $W_{\text{pot}}=W_{\text{kin}}=W_{\text{spann}}\rightarrow 24000\text{J}=1/2Ds^2$ （ D =バネ定数。この量を使って、次の方程式によっても選択した力が計算できる。 $F=D\cdot s$ ； D に対する単位は次のようである。 $\text{N/m}=\text{kg/s}^2$ ）

しかし、登山ザイルは実際には理想的な牽引バネの性質を示さない。落下の際にエネルギーの一部は、結び目で吸収される（結び目作用）。落下する登山者は、そのまま落ちる重りとは違った状況を示すので、ここでもエネルギーが吸収される。これらを考慮してザイルに係るエネルギーを $W_{\text{seil(ザイル)}}$ とすると、次の式が成り立つ。 $W_{\text{pot}}=W_{\text{kin}}=W_{\text{seil(ザイル)}}$ （但し、静態安全の場合）。

動態安全の場合には、制動がかからない落下の末期に運動エネルギーは、部分的に制動力（工学的安全装置）で吸収され、またある部分のエネルギーはザイル自身が吸収（上述のように）しながら「ゆっくりと」減少していくにすぎない。 $W_{\text{kin}}=W_{\text{Reibung(摩擦)}}+W_{\text{Seil}}$

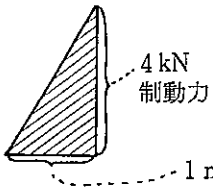
$$\text{摩擦分は、次のように計算される。： } W_{\text{Reibung(摩擦)}}=\text{制動力}\cdot\text{制動道のり}=F_R\cdot l$$

制動力（ F_R ）は、制動や動態の役を果たす安全環にかかる最大力（捕獲衝撃）を意味する。制動道のりは、制動現象ができるだけ一定に起こる時間内に繰り出すザイルの長さである（ザイル繰り出し）。

制動力（ F_R ）が4kNあると、ザイルは約7%伸びるので、15mのザイルでは約1.0m伸びる（捕獲衝撃伸びは約21%）。

このときの W_{seil} は概算で次のようになる：

4. 登山用具研究



$$W_{\text{Seil}} = 1/2 \cdot 4 \text{ kN} \cdot 1 \text{ m} = 2 \text{ kNm} = 2 \text{ kJ}$$

これは、左図の斜線の部分で表されている。

従って上述の落下の場合、ザイルによって2kJのエネルギーが吸収され、摩擦作用分としては22kJ残っていることになる。

$$W_{\text{Reibung(摩擦)}} = F_R \cdot l \quad (F_R \text{は } 4 \text{ kN})$$

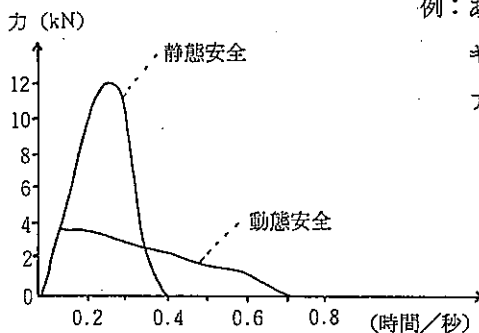
$$22 \text{ kJ} = 4 \text{ kN} \cdot l \rightarrow l = 22 \text{ kJ} / 4 \text{ kN} = 5.5 \text{ m}$$

即ち、ザイルが5.5m繰り出された後には、かかったエネルギーは全て「出し尽くされて」いる。実際にはエネルギーは主として熱エネルギーに転換されている。

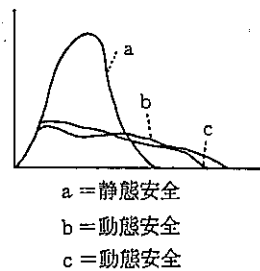
6 グラフによる表示

多くの物理的現象というのは整然とした式でまとめたり、多数の計測を行っても、概念が非常につかみにくい。そこで、そのような関係を視覚的に捉えるために、図で表示をする（座標を使ったグラフ）。

簡単なグラフではいつも、2つの物質量を関係付けて表示する。その場合、片方の量は独立した量で与えられ、もう一方の量は前者の値に依存した量で与えられる。独立した量は普通は横軸に、依存した量は縦軸にとられる。各々の軸には、ある一定の長さに対して意味のある数値を与える。



例：ある落下に際し、一本のザイルに係る力を、エネルギー伝動の経過時間と関連させて表すグラフ（ダイアグラム）。

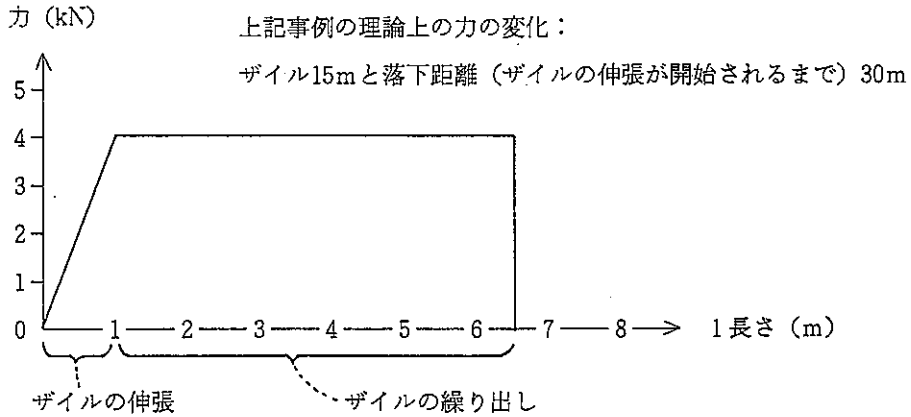


測定結果や、オシオグラフによるグラフにより、それぞれの時間に対応する力が読み取れる。静態安全では約0.1秒後に約11.5kNの最大荷重がかかっていることが一目で分かる。この力はほんの短い時間のみ現れ、その後は急激に減少する。

動態安全の場合には、最大荷重は4kNにしか到達しないが、同じくらいの力が継続して現れる。

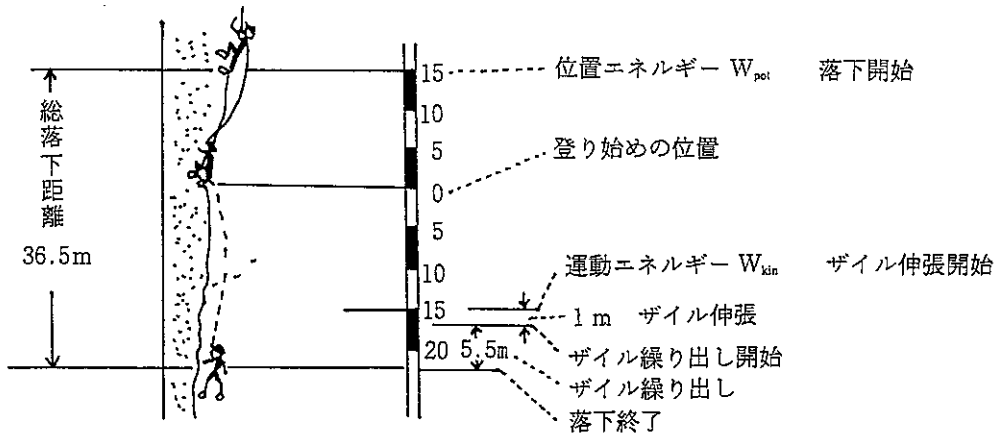
次のグラフは、動態安全でザイルが繰り出す場合の力を示している。

4. 登山用具研究



力が加わると、荷重はまずザイルが伸張するのに比例して増加する。荷重 4 kNに到達すると動態安全が働き、荷重はそれ以上増加せず、同じ力で道のり 1 を先にすすむだけである（動態安全装置の働きによるザイルの繰り出し）。

《 上 記 事 例 の 図 示 》



工学的方法によれば、このようなグラフはさらに理論的な計算を可能にするが、ここでは立ち入らない。

国際単位系に関する概要と物理値の把握の可能性を述べたこの限られたスペースが、登山理論、関連量の関係を理解する手掛かりとなり、この分野の作業や、議論、情報交換に糸口を与えることができればと願うものである。

4. 登山用具研究

この論文はArnold Hasenkopf氏 (DHV ドイツ山岳会指導・安全委員会) により寄稿された。



簡単なことだよ。

リックサックを測る。これがKg。

君がリックサックを背負う、これがニュートン。

リックサックが君の頭に落ちてくる、

そうすると、ジュールというのサ！

(フランス山岳会員)