

アンカーの構築

松本憲親（岳僚山の会）

「登山研修」Vol.14(1999)および山岳雑誌「岳人」誌上連載「登山技術新論」9(651号, 2001年9月)においてアンカーの複数の支点間の均等荷重の難しさについて触れた。同様の記述は最新の救助技術解説書「CMC ROPE RESCUE MANUAL」第3版(1998)にも見られる。均等荷重の難しさは複数の支点を連結するスリング類に伸びがあることと、スリング類が構成する角度に由来する。ボールベアリング入りのプーリーを使い、摩擦を極めて小さくできれば、問題は少なくなるだろう。この点については別の機会に論ずる。現実にはスリングとカラビナだけでアンカーが構築されており、ナイロンロウプとカラビナの場合は接触角 πR で1.7倍の力の差が生じなければ滑らないことが分かっている。ウエビングの場合も同様と考えられる。アンカーに力が掛からない間はスライディングノット上のカラビナを自由に動かせるが、そのカラビナが一旦加重されると、いずれかの支点が加重方向に動かぬ限りカラビナとスリングは滑らない。一般的に、各支点間スリングの長さ、スリングの成す角度および伸び率によって各支点間に荷重差が生ずる(図1)。

各支点の強度と荷重差がたまたま上手くかみ合うことがあるが、理論を理解していないのならそれは幸運に過ぎない。1999年には筆者の知る限りでは3件のアンカー破壊による墜落事故が起こっている。そ

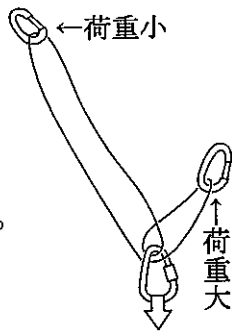


図1 スライディングノット

のうちの1件では2人パーティーの2人とも死亡した(剣岳)。縦リスに打ったピトンの強度は最高で300~500kgFと言われている(フックピトンを除く)。支点の設置、選定に加えて各支点間の荷重差の調整はクライマーの必修科目となり得るだろう。上記論文中でアンカーの要件SRENEの内容を詳しく述べたのでここでは繰り返さない。なお、以下の議論中のスリング類の伸びは理想的弾性体の伸びに等しい、すなわち、伸びが荷重値に正比例すると仮定した。

理論の部

1. アンカーの各支点の荷重差

複数の支点間の荷重差を種々のモデルで計算してみた(図2-16)。図中、タイインポイントの結び目はフィギュアオブエイトノットが普通だが、変形蝶結びは荷重後も簡単に解けるので筆者は多用する。なお、ウエビングやコードが短い場合は要の位置にクローヴヒッチしたカラビナを掛けてタイインポイントとする。使用するスリングはシングルコードが700kgFの荷重で50%あるいは16%の伸びを示す2種類のロウストレッチコードのいずれかを使用するものと仮定し、結び目が滑ることを無視して計算した。なお、現実には結び目はアンカーの要の位置にもって来て、結び目の滑りが荷重のアンバランスを招来しないようにする。あるいは、あらかじめ強く荷重して結び目が滑らぬようにしておく。シングルループの掛かったカラビナに荷重した場合の伸び率は1本のコードあるいはウ

エビングの伸び率の2分の1,すなわち700kgFで25%あるいは8%に近似するとして、以後この値を使用する。

複数支点到荷重分散する場合は、伸びの少ないスリングの掛かった支点到多く荷重される。例えば、水平位置にある2個の支点到それぞれ別種のスリングを掛けて荷重分散するとき、長さが同じで伸び率が違うなら荷重は伸び率の小さいほうに大きく掛かる。1種類のスリングで長さが違うものを使うなら、短いほうに大きな荷重が掛かる。いずれの場合も荷重の掛かり始めからスリングが伸び始め、各支点到への荷重のベクトル変換値合計が力点への荷重値と等しくなるまで伸びる。

(縦配列の支点到群)

縦のクラックに支点到を求めた時や縦に打ったボルト、アイススクルー、スノーバーや縦の位置に生えたブッシュを連結する場合などで、連結した方向に荷重がかかる場合はスリングの成す角度が小なので、伸び率の等しいスリングを使う限り、各支点到—力点の相対距離だけが問題となり、スリングの伸び率の大小に関係しない(図2—4)。

図2のように下向きに効く支点到2個が近接して設置され、比較的長いスリング(ループの伸

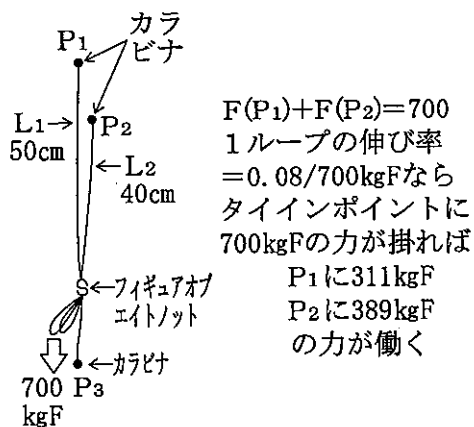


図2

び率：8%/700kgF)で連結した場合で、タイインポイントに700kgFの加重が下向きに掛かった場合は(以下の例はすべて同様)、最上部の支点到に311kgF、中間部の支点到に389kgFの荷重が掛かる計算となり、それほど大きな荷重差は生じない。図3の例では図2の場合と同じく伸び率8%/700kgFのスリングを使っている。この例はスリングの長さ比べ支点到間の距離が大きい場合で、加重差はより大きくなる(計算では上部支点到：117kgF、下部支点到：583kgF)。

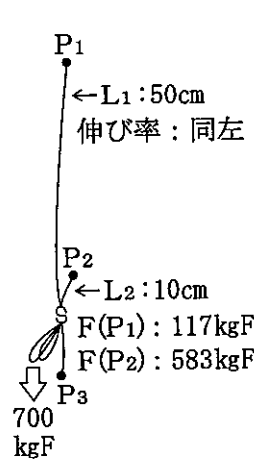


図3

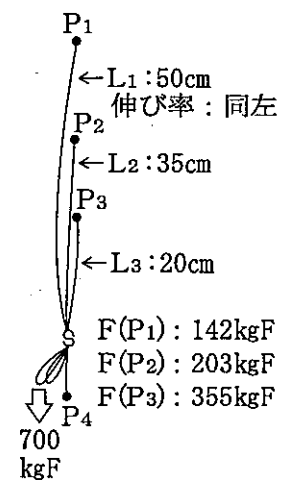


図4

図4の例では図2の場合と同じく伸び率8%/700kgFのスリングを使っている。上部3支点到が分散している場合で、最上部支点到に142kgF、上部第2支点到に203kgF、上部第3支点到に355kgFの荷重が掛かる計算となる。

(横配列の支点到群)

3個以上の支点到が水平位置にある場合は、荷重計算に三角関数を使い複雑になるが、上部支点到が2個の場合はまだ簡単だ。これらの場合はスリングの伸び率により荷重値が変わってくる。

図5は上部支点到が水平位置に2個あり、荷重前スリングのなす角度が30度の場合を示す。

各支点到を連結するウエビング(あるいはアクセサリーコード)の1ループの伸び率を8%/700

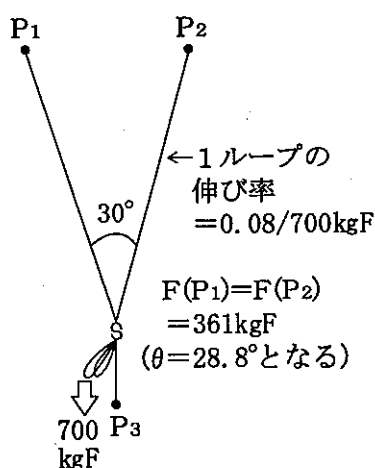


図 5

kgFとし、タイインポイントに700kgF荷重時の各支点への荷重はそれぞれ361kgFとなる。ただし、伸び率を25%/700kgFとすれば、360kgFであり、全く伸びないスリング(予め荷重して伸びを0にしたワイヤー)なら362kgFとなる。このようにスリングのなす角度が小さい場合は各支点への荷重合計は力点への加重値を大きく上回らない。日本ではこの角度を60度以下にするのが良いと言われているが、45度以下、できれば30度以下とすべきである。しかし実際の登攀では短いスリングで大きな力が発生する無理をしている例が多く見られる。

図 6 は上部に水平に等間隔で3 支点を、下部

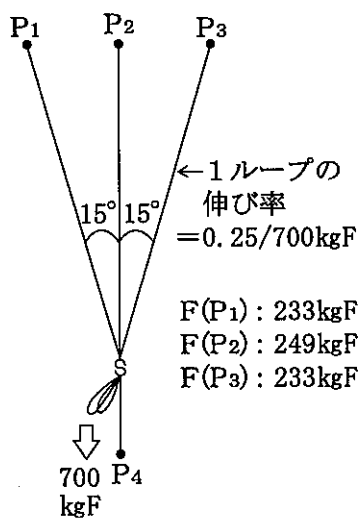


図 6

にオポジショナルアンカーを配置し、上部支点の外側の2個に繋がるスリングのなす角が30度となるように1本のコードレットでスリンギングしたもので(1ループの伸び率: 25%/700kgF, 以下の例は全てこのコードレットのみを使用するものとする), タイインポイントに下向きに700kgFの力が掛かったときは, 上部中心の支点に249kgF, 上部外側の2個の支点にそれぞれ等しい233kgFの力が掛かる。計算方法はタイインポイントに掛かった力の3分の1を超える任意の値の力が上部中心の支点に掛かり、「残りの力の2分の1」ずつの力のベクトル変換値が上部外側の支点にそれぞれ掛かるとする。中心のスリンググループは想定した荷重値に応じた伸びを示し, 両側のスリンググループもこれに応じて伸長すると仮定する。この伸長に応じた荷重値を計算し, 上記「残りの力の2分の1」との差が0となるのが求める荷重値である。詳しい計算法を注に示した。

図 7 は上部外側のスリングのなす角が45度の場合を示す。この場合上部中心の支点に269kgF, 上部外側の2個の支点それぞれに231kgFの力がかかることになる。

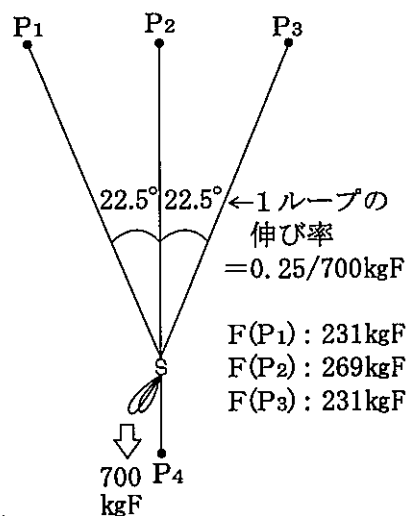


図 7

図8は同様に、60度、298kgF、227kgFを示し、
図9は同様に、90度、394kgF、203kgFを示す。

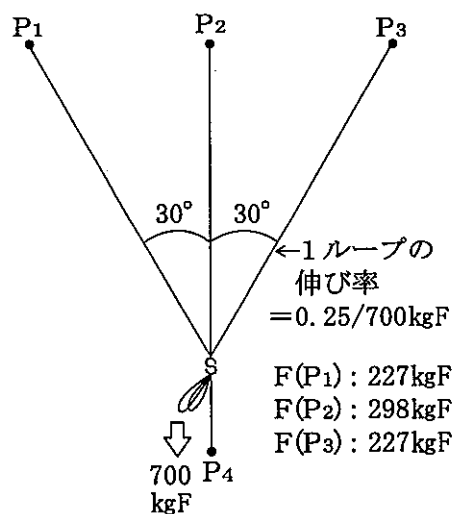


図8

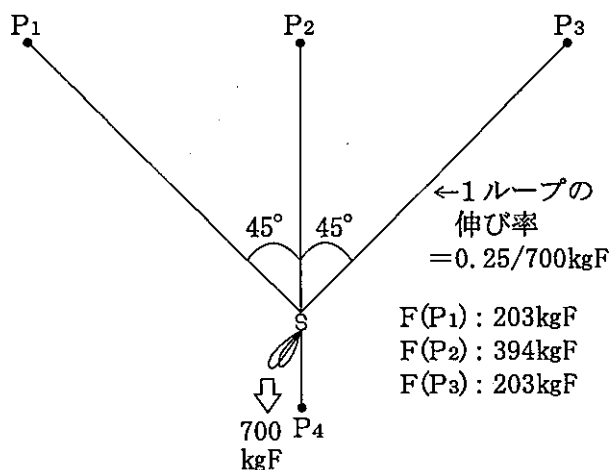


図9

以上のようにスリングのなす角度が大きくなれば、各支点の加重合計が大きくなると同時に支点間の加重差が大きくなる。これが支点破壊からアンカー全体の破壊に繋がる。

2. アンカー支点間の荷重差の調整

アンカーを構成する複数支点間の荷重差の調整には2方法がある。一つは荷重差を小さくする方法で、他は各支点の強度に荷重差を適合させることである。アンカーの要素SRENEのSはsolidを意味し、支点が非常に強固であることを含んでいる。しかし、現実にはあまり良く

効いていないピトンや浅く打ち込んだ細いボルト、細いブッシュ、細い砂時計、小さなチョック、小さいSLCDやチューニングの悪いSLCDなど強固と言えない支点の利用は多い。これらの支点には小さな荷重が相応しい。全ての支点と同様の強度なら、全ての支点に均等荷重する必要があるが、強固な支点とそうでない支点を同時に使用する場合は、強固な支点には大きな荷重を、強固と言えない支点には小さな荷重が掛かるように調整する必要がある。その場合にあって均等過重で臨むなら支点の数を増やす必要がある。

(荷重差を小さくする方法)

- A. 支点を近接させることで荷重差を小さくできる。図2, 5, 6がその例である。支点の近接とはスリングの長さとの比率を意味しているのであって、支点間の距離が大きい場合は長いスリングを使わねばならない。また、近接してボルトを埋設する場合は0.2 m程の距離を保つべきである。
- B. 支点間の距離が大きい場合はスリングの長さに限度もあり、カラビナあるいは伸びの少ないスリングの併用によって荷重差を調整できる。図10-16にその例を示す。

図10, 11は図6の調整型である。図10は図6の上部外側の2支点にそれぞれカラビナを1個ずつ連結して $P_1E = P_2E = P_3E$ となるようにしたもので、同様の力点への荷重時の支点間の荷重差は16kgFに減じている。

図11は図6の上部外側のカラビナに、もう1個のカラビナを追加するとき、スタティックスリングを数ループに巻いたものを、カラビナとカラビナの連結に使う、さらに中央のスリングループが相対的に長くなるように調節した

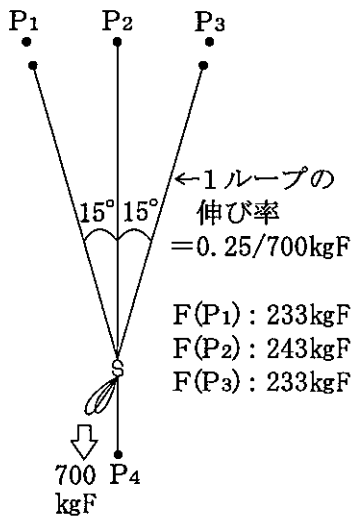


図10

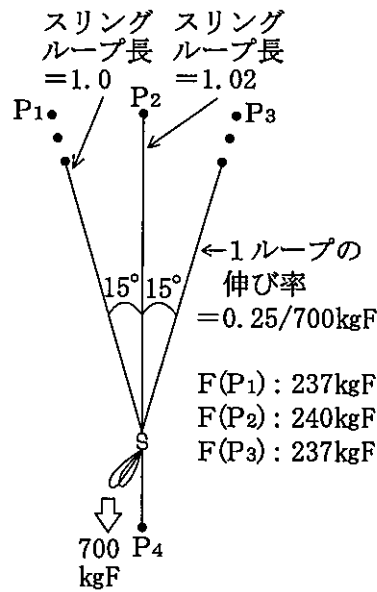


図11

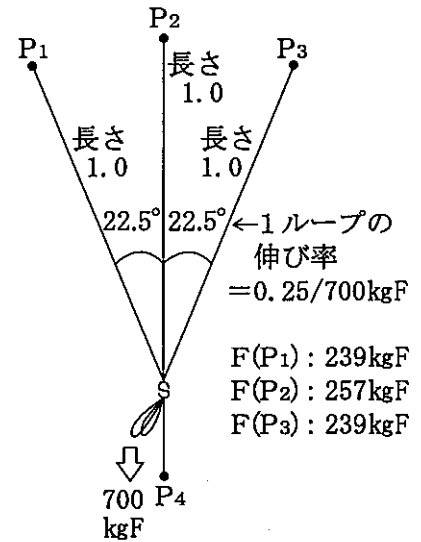


図12

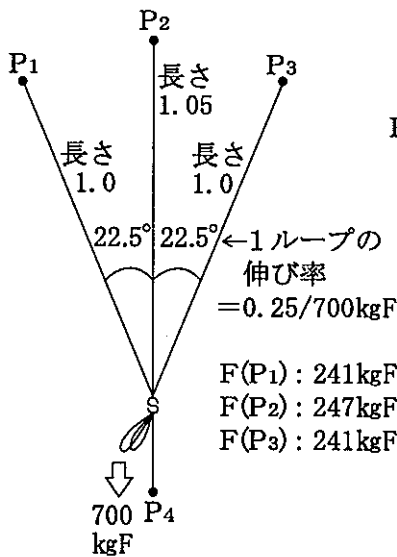


図13

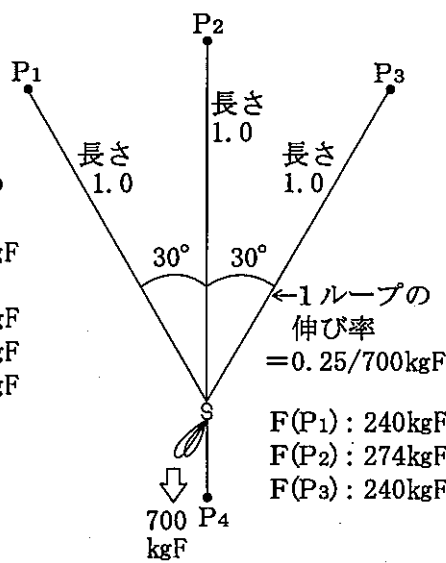


図14

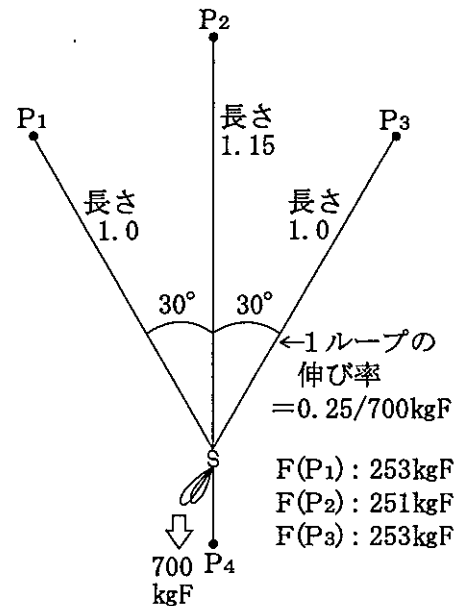


図15

(約2%の差)もので、荷重差は3kgFと小さくなり、誤差範囲であろう。群馬の西山氏は以前から中央の支点到強い力が掛かるので、その支点を遠くに置くべきことを指摘している。

図12は図7の調整型であり、3本のスリンググループが同じ長さになるようにしたもので、荷重差は18kgFに減じる。

図13は中心のスリンググループが相対的に長く

なるように調整したもので(約5%差)、荷重差は6kgFとなる。

図14は図8の調整型で、3本のスリンググループが同じ長さになるように調整すると荷重差は34kgFに減じる。

図15は中心のスリンググループが相対的に長くなるように調整したもので(約15%差)、荷重差は2kgFとなる。

図16は図9の調整型であり、中心のスリング
 ループが相対的に長くなるように調整したも
 ので(約40%増し)、荷重差は9 kgFとなる。

以上のようにスリングループの長さの調整で
 各支点の荷重を平均化することができる。

(支点強度に荷重差を適合させる方法)

前述のように違った強度の複数の支点を用い
 るアンカーの構築が行われることがある。この
 ときのそれぞれの支点の推定強度に応じたスリ
 ングングを図17-22に示した。

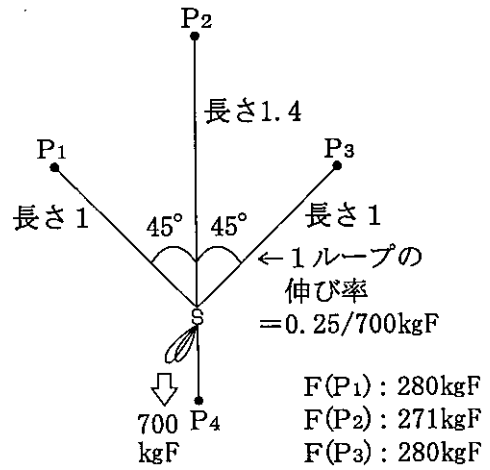
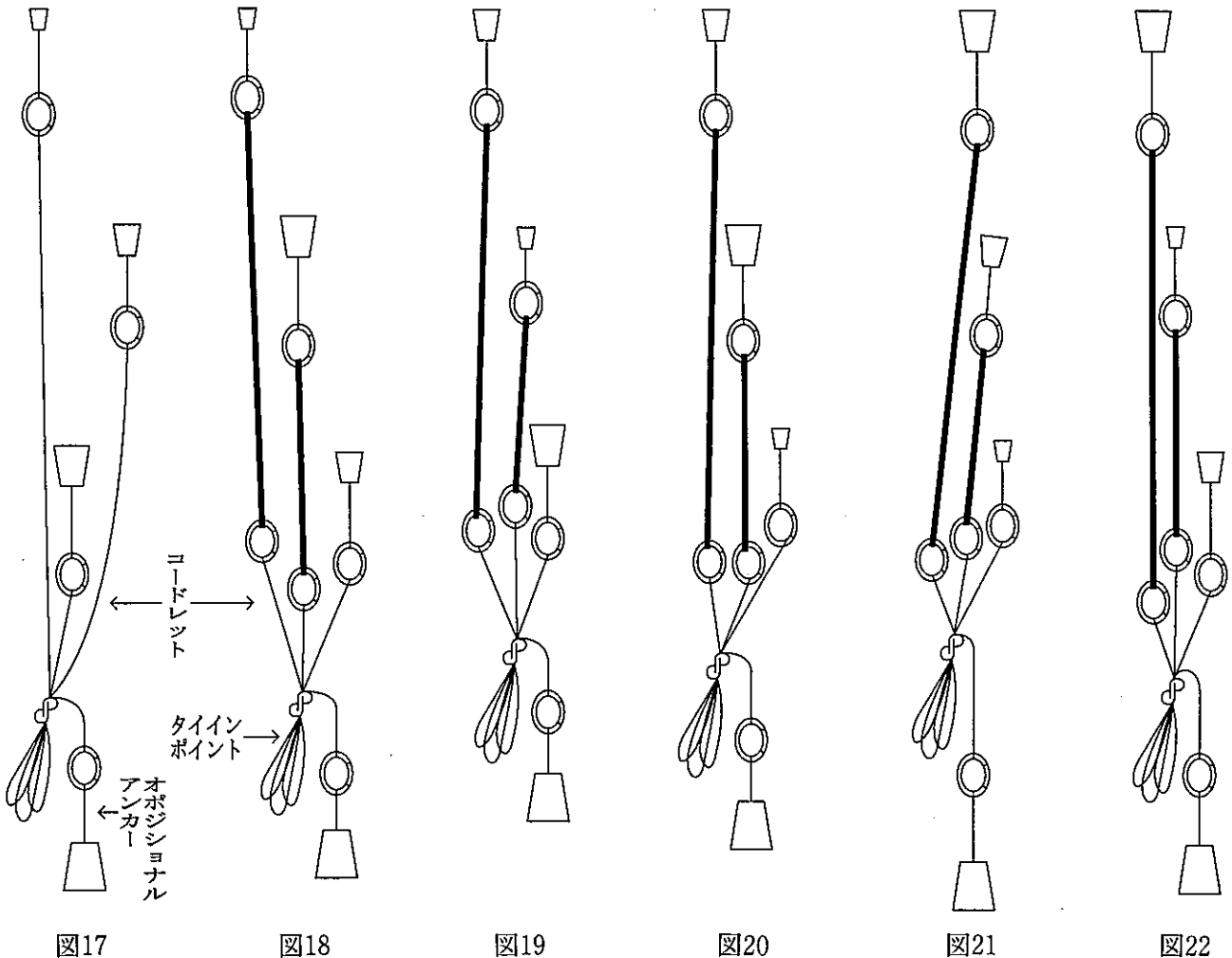


図16



- : チョック
- : ケブラーコードスリング
- : φ6~7mmロウストレッチ(ナイロン) } コード
- : アクセサリーコードによるコードレット
- : カラбина

図中太線の直線はスタティックスリングのループを、細線はロウストレッチスリングのループを意味している。支点はウエッジタイプのチョックを模したイラストで表し、大きさが相対的な推定強度を表している。

図17は上から下へと強度が漸増する場合を示す。単純にコードレットで連結すれば短いスリングが強度の大きい支点到、長いスリングが強度の小さい支点对応するので、タイインポイントへの大きな荷重に耐え得る。

図18-22は支点の配列が図17と異なる場合を示している。いずれの場合も、遠くの強度大の支点到スタティックスリングのクイックドローを連結してからそれぞれの支点到繋がるカラビナをロウストレッチコードレットで連結してタイインポイントを作っている。ここで使用するスタティックスリングのクイックドローの長さの調節方法を図23-24に示した。なお、図23の方法は三菱重工広島造船所山岳部・岡谷良信氏に教わったものである。

スリングの短縮法

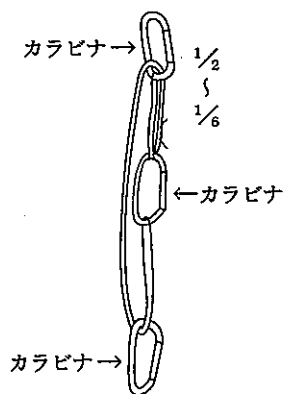


図23

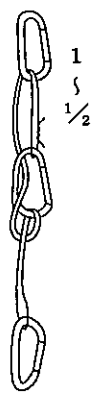


図24

(特定のループに弛みを持たせて荷重を調整する方法)

図25は縦に配列した4支点的上部3支点到下方向への荷重が均等になるようにスリンギング

したものである。荷重前の最上部の支点到繋がるスリングループ(L₁)は自重で緊張しているが、上部第2支点到繋がるスリングループ(L₂)はわずかに弛みがあり、上部第3支点到繋がるスリングループ(L₃)は更に弛んでいる。スリングループの弛みはタイインポイントに作った結び目で維持されている。この状態からタイインポイントに下方向の力を加えると、まずL₁が伸び始め、次いでL₂が、最後にL₃が伸び始める。この時点の各支点到への荷重値はF(L₁) > F(L₂) > F(L₃)となる。更にタイインポイントへの荷重が増加するとF(L₁) = F(L₂) = F(L₃)の状態を経て、F(L₁) < F(L₂) < F(L₃)の状態に移行する。故に最大荷重値を予測して各スリングループの長さを調節することで、最大荷重時の各支点到への均等荷重が可能となる。

この方法は上記のスタティックアクセサリコード(あるいはスタティックウエッピング)とロウストレッチアクセサリコードを組み合わせる方法より簡便である。しかし、均等荷重できる荷重値幅が狭いと予測される。

3. まとめ

以上に述べたように、アンカーを構築するスリンググループ群のそれぞれのループの長さの違い、スリンググループ同志が成す角度およびスリングとカラビナの摩擦に起因する各支点到への不均等荷重は1)スリンググループ長さの調節、2)伸びの異なるスリングの組み合わせ、3)特定のスリンググループに弛みを持たせる方法のいずれかで解決できることが理論的に理解できた。

また、この方法は特定の支点到に掛る荷重を制限して、その支点的崩壊を防止することもできる。この方法を採用することで支点的群の合計強

度を最大限に利用でき、支点崩壊による事故が防止できる。

実験の部

(方法)

裏六甲・不動岩の中央稜末端大テラス横にボルトを埋設し、あるいはチョックを使って支点群を構成した。各支点にカラビナを介してロードセルあるいはストレインゲージを連結し、更にそれぞれの測定器にカラビナを掛けた。この末端のカラビナにスリングを掛け、各スリンググループが荷重初期から同時に緊張するように、各スリンググループの長さを調節した後結び目を作りノウイクステンションとするかまたは結び目を作らずスライディングノットとした場合並びに特定のスリンググループが荷重初期に弛みを持つように各スリングの長さを調節した後結び目を作ってノウイクステンションとした場合の各支点への荷重値の測定を行った。なお、荷重はラチェット式の可般式引っ張り器を用いた静荷重がタインポイントに掛かるように行った。

(結果と考察)

実験1 縦配列支点群の流動分散型スリング(従来法)

図25に示す縦配列3支点アンカーを構築し、

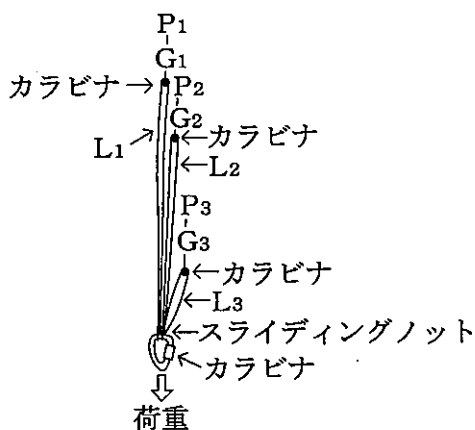


図25

表1 実験1のスリング条件と荷重値

(単位: kgF)

スリング長さ (cm)	荷重値 (RL*1)			
	G No	1回目	2回目	3回目
L ₁ :155	1	65(0.21)	90(0.21)	125(0.20)
L ₂ : 91		100(0.32)	125(0.30)	185(0.30)
L ₃ : 50		149(0.47)	205(0.49)	300(0.49)
	Total	314(1.00)	420(1.00)	610(0.99)

*1 RL: Relative Load

タインポイントに314-610kgFを加重して、それぞれの支点への荷重を測定し、結果を表1に示した。

表1に示すように、各支点に掛かるスリンググループの約3倍の長さの違いにより2倍強の大きな荷重差が生ずる結果となった。

実験2 縦配列支点群の荷重差を減少させる方法1

図26に縦配列3支点の荷重差をスタティックコードスリング(SCS)とロウストレッチコードスリング(LCS)との組み合わせで減少させる実験例を示す。

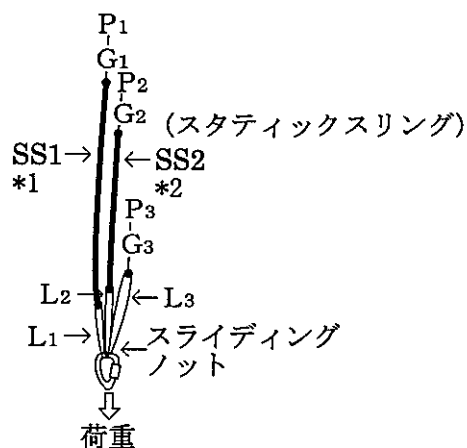


図26

なお、ノウイクステンションとした場合の各スリンググループの緊張度合いのばらつきあるいは弛みおよび結び目内部での滑りのばらつきに

表2 実験2のスリング条件と荷重値

(単位：kgF)

スリング 長さ(cm)	荷重値 (RL [*])			
	G No	1回目	2回目	3回目
*2SS1:131				
*2SS2: 52	1	100(0.30)	220(0.34)	370(0.36)
L ₁ :29	2	120(0.36)	215(0.34)	350(0.34)
L ₂ :47	3	113(0.34)	204(0.32)	306(0.30)
L ₃ :64	Total	333(1.00)	639(1.00)	1026(1.00)

*2 SS : Static Sling

よる荷重差の発生を警戒してタイインポイント
をスライディングノットとした。

表2に示した結果から分かるように、3支
点にほぼ均等に荷重できた。

実験3 縦配列の支点群
の荷重差を減少
させる方法2

図27に縦配列3支点の
荷重差をスリングに弛み
を持たせて解消する実験
例を示した。

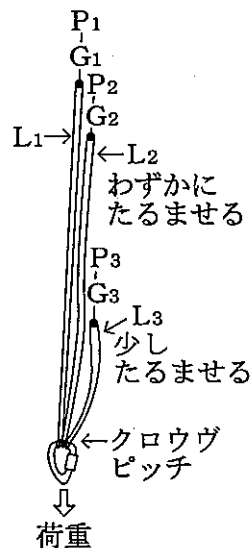


図27

表3 実験3のスリング条件と荷重値

(単位：kgF)

スリング 長さ(cm)	荷重値 (RL [*])			
	G No	1回目	2回目	3回目
L ₁ :124				
L ₂ :103	1	128(0.39)	160(0.36)	185(0.30)
L ₃ : 43	2	100(0.30)	125(0.28)	170(0.29)
	3	101(0.30)	158(0.36)	239(0.40)
	Total	329(0.99)	443(1.00)	594(1.00)

各スリンググループの弛みの差を維持するため
にノウイクステンションとする必要があるので
各グループに個別のクローヴヒッチを作ってナス
型カラビナにかけてタイインポイントとした。

表3に示した結果から分かるように実験2と
同等の効果が認められたが、さらに実験を重ね
て実験2の方法との差を見極める必要があるだ
ろう。

実験4 横配列支点群の荷重差

図28に水平に配列した3支
点に掛かる荷重差
を測定した。なお、自然の岩場で実験した関係
で支点間の距離は均等にできなかつたし、各ス
リンググループ末端の高さは厳密には同じにでき
なかつた。

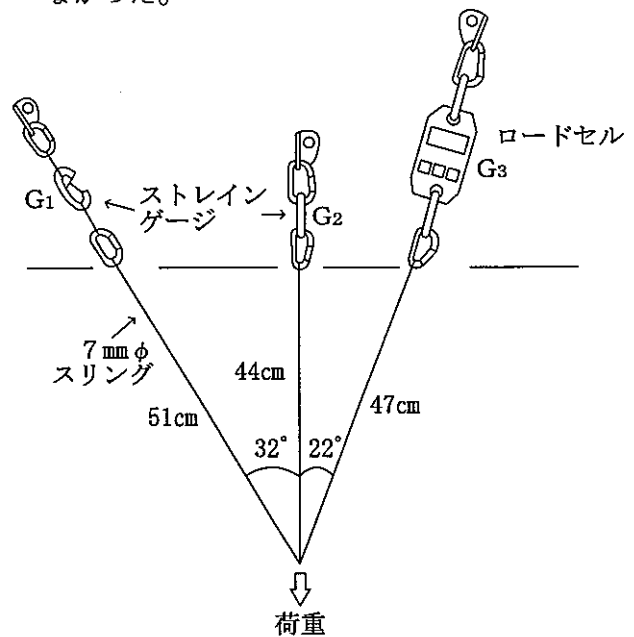


図28

表4 実験4の荷重値(RL^{*})

(単位：kgF)

G No	1回目	2回目	3回目
1	110(0.32)	210(0.31)	240(0.29)
2	130(0.38)	260(0.39)	350(0.42)
3	103(0.30)	200(0.30)	250(0.30)
Total	343(1.00)	670(1.00)	840(1.01)

表4に示した結果から分かるように、中央の支点にかなり過大な荷重が掛かっている。

実験5 横配列支点群の荷重差の軽減1

図29に実験4のスリングングを修正した荷重実験の概念図を示した。

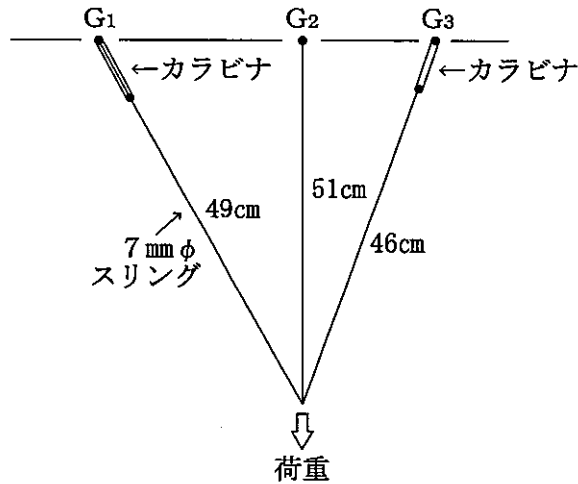


図29

修正は外側の2本のスリング末端にそれぞれカラビナ1個を繋いで中央のスリングと長さの差を減じた。

表5 実験5の荷重値(RL²)

(単位: kgF)

G No.	1回目	2回目	3回目
1	80(0.26)	140(0.25)	300(0.36)
2	120(0.40)	220(0.39)	285(0.34)
3	103(0.34)	205(0.36)	253(0.30)
Total	303(1.00)	565(1.00)	838(1.00)

表5に示した結果から分かるように荷重差の修正はわずかだった。

実験6 横配列支点群の荷重差の軽減2

実験5のスリングングの修正をスタティックコードスリングを用いて行った。

すなわち、ジュミニコードのスリングを外側の2本のスリングの末端にカラビナを介して連結し、中央のスリングを相対的に

長くした(1.7-1.9倍、図30参照)。表6に示した結果から分かるように、ほぼ完全に均等荷重されている。

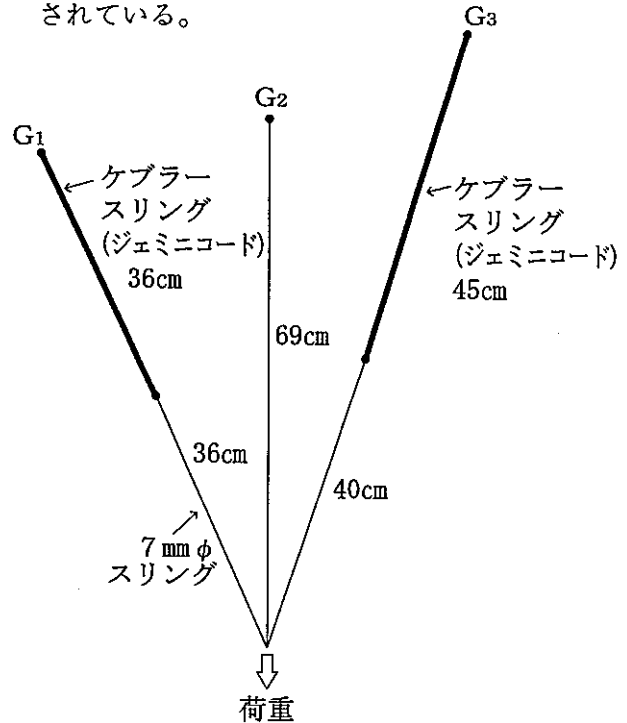


図30

表6 実験6の荷重値(RL²)

(単位: kgF)

G No.	1回目	2回目	3回目
1	100(0.32)	170(0.33)	220(0.33)
2	110(0.35)	180(0.35)	220(0.33)
3	103(0.33)	171(0.33)	221(0.33)
Total	313(1.00)	521(1.00)	661(0.99)

結論

以上に述べたように、複数の支点を使用したアンカーの各支点への不均等荷重はスリングングの工夫で克服できることが実験的にも証明された。この方法を逆に応用すれば、強度の異なる支点群のそれぞれの支点の強度に応じたスリングングが可能であることも間接的に証明されたことになるだろう。ここに述べた方法を実際のクライミングや遭難救助の現場に精密に応用できるようになるにはかなりのデータの蓄積あるいは訓練が必要に

なるだろう。しかし、概念さえ理解できればより良いアンカーの構築に役立つことは明らかである。

注) 図31に示すように水平に等間隔で3個の支点があるとする。各支点に同型のカラビナ各1を掛けてスリングし、タイインポイントのカラビナのスライディングノットとしたときのスリングの成す同形の2個の直角3角形が組合わさった2等辺3角形 $OO'T$ の頂角が45度とし、 OO' の中点を C とするなら(カラビナで頂点が円弧となるのは無視した)、角線分の長さの比率は図のようになる。

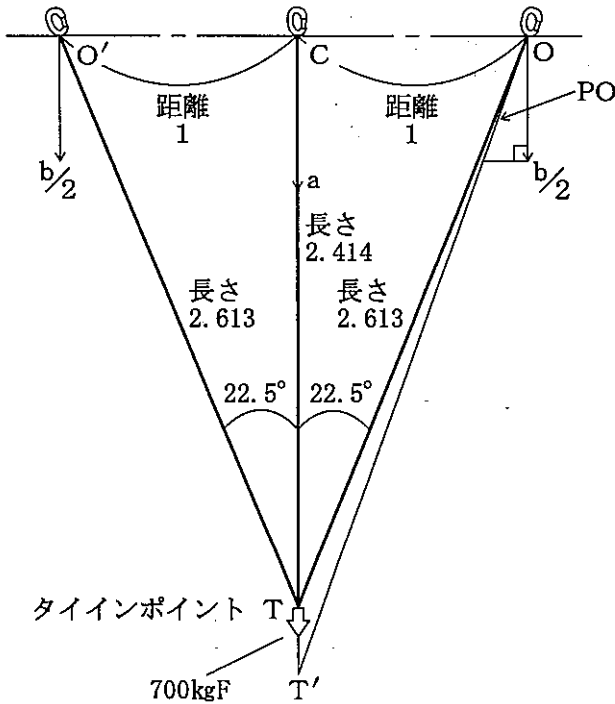


図31

このとき使用したスリングにカラビナ2個を掛けてそれぞれを反対方向に700kgFで引っ張ったときの伸び率をカラビナの移動距離から測定して25%と仮定する。

Tに掛けたカラビナに700kgFの静荷重を図の下向きに掛けたときTがT'まで移動したとする。

CT'のスリングにaの荷重が掛かったとすれば、OおよびO'に掛かった力の下方向のベクトルは $(700-a)/2$ で、これを $b/2$ とする($a+b=700$)。

今仮に $a=250$ とすれば $b/2=225$

$$TT' = 0.25CT \times 250/700 = 0.2156$$

$$CT' = 2.6928$$

$$\theta = \tan^{-1}/CT' = 20.82^\circ$$

$$\cos \theta = 0.9437$$

$$OT' = CT' / \cos \theta = 2.8135$$

$$PO = 700/0.25(OT/OT' - 1) = 214.9$$

$$PO \cos \theta = 200.8 = b' \text{ とする}$$

$200.8 - 225 = -24.2 \dots$ aの想定値が小さかった
 $a=270$ と仮定して同様に計算すると

$b'=216.8$ となり、aの想定値がわずかに大きい
 グラフを描いて $b \approx b'$ となる aの値を求めると
 $a=269$ を得る

$a=269$ で同様に計算すると $PO=231.3$ となる
 すなわち両側の支点到231,中央の支点到269kgF
 の力が掛かることになる。