

ゴールネットの取り付け方が衝撃吸収性に及ぼす影響

岡野紘大 尾崎真大 野口勇太郎

The influence that how to fix GOAL NET has on impact absorption

Hiroto OKANO, Mahiro OZAKI, and Yutaro NOGUCHI

本研究では、正方形の競技用ゴールネットを試験可能な落錘試験台を製作し、ネットの大きさ、ネットの張り具合、縁網の有無を様々に設定し、良いゴールネットの取り付け方を追究した。独自に定義した「良いネットの取り付け方」において、それは、大きくて・より張っていて・縁網を取り付けてあるネットであるという結果になった。しかし、より張っている方が良いという結果は、予想に反していたので、この力学的な考察を「ばねモデル」を用いて、さらに深めていった。

A. 問題提起・研究目的

漫画『キャプテン翼』では、シュートされたボールがゴールネット(以下ネット)を突き破るといったシーンが多々見られる(図1)。このようなことが本当に起こりうるのか疑問に思った。

まず、ネットの構成繊維であるポリエチレンの繊維は太さ1[dtex]あたり4.4~7.9[cN]の力で引っ張ると切れることがわかった。この力を「引張強度」と呼ぶ。実際に我々が実験で用いたネットは、440[tx]の太さの繊維を60本撚り合わせたものであり、ネットの引張強度は $1.2 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^5$ [N]であると計算できる。実際のサッカーの試合等において、瞬間的にこのような大きな力がシュートによってネットにかかることはない。よって、ネットの摩耗や支持部分によるネットの損傷を考慮しない場合、瞬間的にネットが破られることは無いと考えた。

次に、杉山らによる「安全ネットの衝撃吸収特性の評価技術に関する研究」(2016年)では、著書「仮設機材認定基準とその解説」をもとにした落錘試験が行われていた。錘の加速度を用いて、ネットを評価したところ、同一のネットは使用することによって性能が落ちること、使用前後の性能の低下は、結節部での網糸のつまり具合の差によるものと示唆されること、落錘試験において、ネットの縁に通してある太いロープ(以下縁網)は再利用できることが示されていた。

しかし、この研究ではネットの大きさは 1×1 [m²]で、支持間隔を1[m]とした試験のみが行われており、ネットの大きさや支持間隔による違いは言及されていなかった。そこで、ネットの大きさと支持間隔、さらに縁網の有無に着目し、良いネットの取り付け方の条件を調べることにした。

B. 研究方法

2-(1)「良いネットの取り付け方」の定義

本実験を行う上での「良いネットの取り付け方」を以下のように定義する。

実際のサッカーにおいて、ネットがシュートされたボールから受ける力は図2のようになる。ボールがネットに触れた瞬間に力を受け始め、その後ボールがネットに食い込んで一番奥に達したところでネットの受ける力が最大になる。(図2 赤丸/青丸)

また、ネットはある一定以上の力(引張強度 図2破線)を受けると繊維が切れる。そこで、ネットが受ける力がこの引張強度に達する可能性の低い状態(図2青いグラフ)、すなわち、力のピークが小さいネットの取り付け方を「良いネットの取り付け方」と定義した。



図1 シュートされたボールによってゴールネットが破られるシーン
(『キャプテン翼』集英社文庫(コミック版)7巻. pp192~193より抜粋)

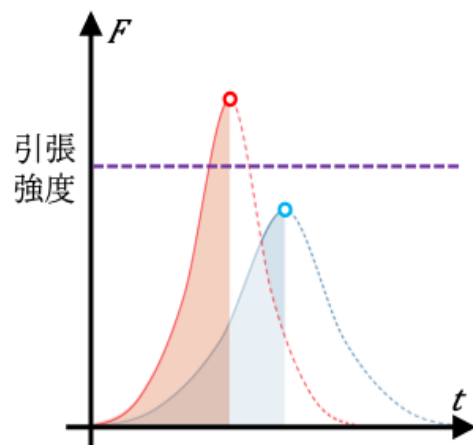


図2 ネットがボールから受ける力とその力が作用している時間との関係

2-(2) 実験装置

- i) ネットを水平方向に固定するための正方形の枠を、鉄パイプ(単管 $\Phi 48[\text{mm}]$ 長さ $2[\text{m}]$)を用いて作成した。このとき鉄パイプ同士の固定部分を調整することで、枠の大きさを自由に変更できるものとした。また、枠の中心の直上に距離センサーを設置した(図3)。
- ii) 実際にサッカーで用いられるネットを一边 $L[\text{cm}]$ の正方形に切り取り、実験サンプルとした。ネットの素材はポリエチレン、440tex/60本、網目の形は四角形、網目の一边の大きさは $13[\text{cm}]$ である。
- iii) PPロープを用いて、サンプルのネットを試験台に固定した。



図3 実験装置

2-(3) 実験方法

- i) ネットの底から高さ $73[\text{cm}]$ の位置から、質量 $4.0[\text{kg}]$ の錘(メディシンボール 直径 $22[\text{cm}]$)を自由落下させた。ボールの落下の様子は図4のようになった。なお、落下高度を $73[\text{cm}]$ に設定したのは、実際のシュートの衝撃(運動量)と本実験におけるそれを一致させるためである。ボールがネットに触れてから最下点に達するまでの力積が、すべての実験において等しくなるようにボールを落下させた。

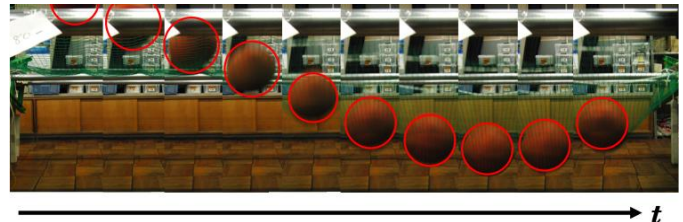


図4 ボールの落下の様子

- ii) このときのボールの位置を、距離センサーを用いて測定し、位置と時刻、速度と時刻、加速度と時刻の関係を、それぞれ $x-t$ 、 $v-t$ 、 $a-t$ グラフで表した(図5)。

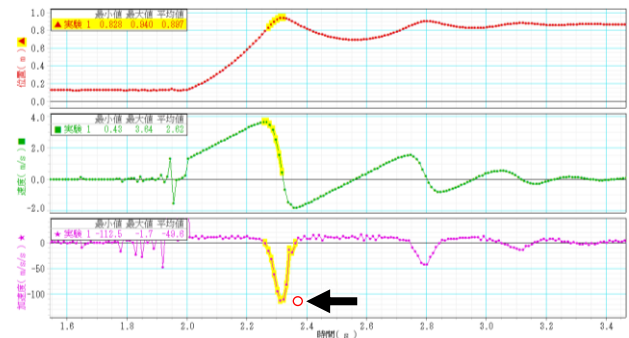


図5 落下するボールの(上から順に) $x-t$ 、 $v-t$ 、 $a-t$ グラフ

- iii) ここで、3つのグラフのうち $a-t$ グラフに注目する。作用反作用の法則より、「ネットがボールから受ける鉛直方向の力の大きさ」は「ボールがネットから受ける鉛直方向の力の大きさ」に等しく、これはボールの鉛直方向の加速度に依存する。よって、前項目で記した「よいネットの取り付け方」の定義に基づいて、ボールが最下点に達した瞬間の加速度(図5 赤丸)を読み取りそれぞれで比較した。

加速度に影響を及ぼしそうな要素を考え、縁網の有無・ネットの大きさ・ネットのたるみ具合について以下の実験①②③を行なった。ネットの大きさに関しては、正方形のネットの一边の長さ $L[\text{cm}]$ を入力変数とした。ネットのたるみ具合に関しては、「(たるみ $D[\text{cm}])=(\text{正方形の枠の一边}A[\text{cm}])-(\text{ネットの一边}L[\text{cm}])$ 」と定義し、これを入力変数とした。また、同一のネットは使用するごとに性能が落ちることを考慮して、実験②③は、張った新品のネットに何度かボールを落下させ、加速度の顕著な変化が見られなくなったところから、測定を開始した。

実験① 縁網の有無と加速度の関係と変化を調べる

縁網を取り付けたネット4枚と取り付けでないネット5枚を用意し、前者は縁網を枠に固定し、後者はネットを直接枠に固定した(図6)。縁網とは、ネットの外周と同じ長さ($4L[\text{cm}]$)の太いロープのことであり、ネットの縁に取り付けることができるものである。また、ネットの使用回数に対する加速度の変化を見るために、同一のネットでも加速度を10回ずつ測定した。ネットのたるみ D は $0[\text{cm}]$ 、ネットの一边 L は $100[\text{cm}]$ で一定とした。

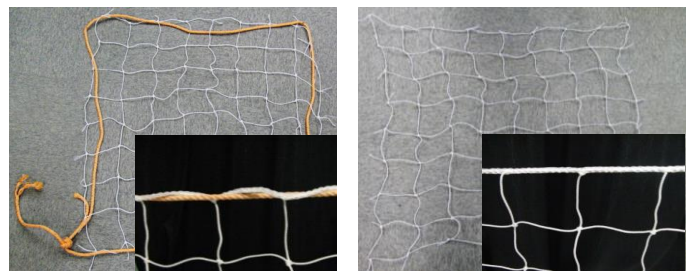


図6 縁網あり(左)となし(右)

実験② ネットの辺長Lと加速度の関係を調べる

大きいネットと小さいネットにおける、加速度の違いを調べた。ネットのたるみDは0[cm]で一定とし、ネットの辺長Lを100,87,74,61[cm]の4とおりにした(図7)。なお、網目が13[cm]のネットを外側から切っていたので、Lが13[cm]間隔となっている。

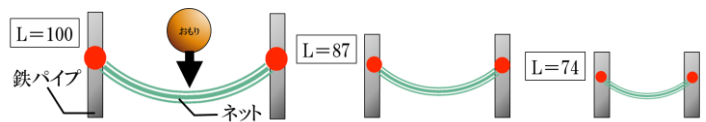


図7 実験②のモデル

実験③ たるみDと加速度の関係を調べる

たるんでいるネットと張っているネットの加速度の違いを調べた。ネットの辺長Lは100[cm]で一定とし、たるみDを100,90,80,70,60[cm]の5とおりにした(図8)。

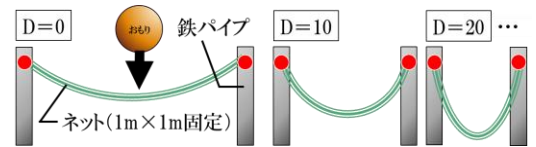


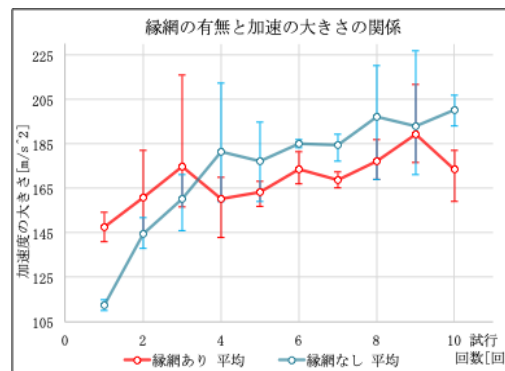
図8 実験③のモデル

C. 得られた結果

実験①

縁網の有無と加速度の関係は図9のようになった。この実験では、試行回数に対する加速度の変化も見するために、横軸を試行回数、縦軸を加速度の大きさとした。加速度が小さいほどネットが受ける力は小さくなるので、下に行くほど「良いネットの取り付け方」である。それぞれの試行回数における平均値をグラフの値とした。赤いグラフが縁網あり、青いグラフが縁網なしの結果である。

グラフより、1~3回目までは縁網なしの加速度の方が小さく、4回目以降では縁網ありの加速度の方が小さい。また、1~4回目の縁網なしのグラフは傾きが大きく、縁網ありのグラフは全体を通して加速度の変化(傾き)は小さい。したがって、縁網なしのネットは性能が悪くなりやすく、同じネットを使う複数回使う場合は、縁網ありの方が良いといえる。また、ネットを1度しか使わない場合は、縁網なしの方が良いといえる。



	あり1	あり2	あり3	あり4
1	141	154.2	E	E
2	157	160.8	182	144.5
3	216	167.8	157.7	156.5
4	170	164.4	163.9	142.9
5	168	156.9	164.8	E
6	173	181.4	172.7	167
7	166	172.4	170.7	165.2
8	169	180	172.4	186.6
9	185	176.5	211.4	183.7
10	173	179.6	159.1	182

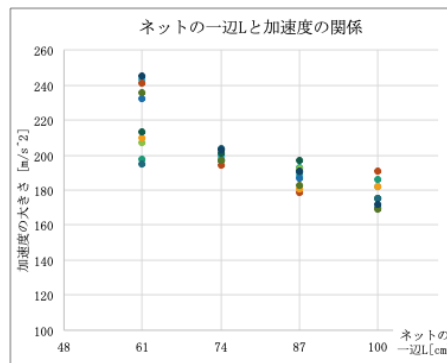
	なし1	なし2	なし3	なし4	なし5
1	E	110	E	E	115
2	152	E	138	E	143
3	163	E	146	E	171
4	212	159	E	175	180
5	175	E	159	180	195
6	187	184	E	183	187
7	182	189	177	189	186
8	220	169	E	188	211
9	188	182	227	171	197
10	200	E	E	193	207

図9 実験①の結果(表中Eは測定失敗)

実験②

ネットの辺長Lと加速度の関係は図10のようになった。それぞれのLにつき10個のデータをとった。横軸がネットの辺長で、右に行くほど大きいネットである。縦軸が加速度の大きさで、実験①同様下に行くほど「良いネットの取り付け方」である。

散布図より、ネットの辺長が大きいほど加速度が小さく、良いネットの取り付け方であるといえる。



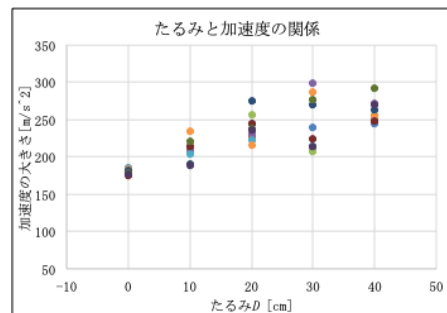
L	100	87	74	61
1	186	193	197	198
2	175	192	199	207
3	182	188	200	243
4	170	187	197	232
5	191	179	194	241
6	182	181	203	210
7	175	197	201	213
8	169	183	197	236
9	175	190	204	195
10	172	191	203	245
av	177.7	188.1	199.5	222

図10 実験②の結果

実験③

実験の結果、たるみDと加速度の関係は図11のようになった。それぞれのDにつき10個のデータをとった。横軸がたるみDで、左に行くほどネットが張っている状態である。縦軸が加速度の大きさで、下に行くほど「良いネットの取り付け方」である。

散布図より、たるみが小さい(=張ったネット)ほど加速度が小さく、良いネットの取り付け方であるといえる



D	0	10	20	30	40
1	180.9	210.9	244.5	239.5	244.6
2	178.9	213.3	227.1	213	250.1
3	180.5	190.4	256.8	207.1	256.1
4	184.4	208.7	231.8	298.8	272.3
5	184.6	203.6	221.8	214.8	250.7
6	182.9	234.6	215.1	286.5	255
7	181.1	189.8	274.7	270.6	263.2
8	175.8	214.9	245	224.4	247.4
9	179.2	220.3	237.1	276.5	292.4
10	177.4	188.9	235.9	214.2	270.5
av	180.57	207.54	238.98	244.54	260.23

図11 実験③の結果

D. 考察

4-(1) 実験①～③の考察

実験①

使い始めは縁網なしが良いが、すぐに性能が低下していき、その後は縁網ありの方が良いという結果になった。性能がすぐ低下した原因として、縁網ありのネットが間接的に伸ばされていくのに対して、縁網なしのネットは支持点で直接伸ばされ、変形していくためだと考えられる。その後縁網ありの加速度の方が小さかったのは、ボールを受け止めるとき、縁網がネットの形を一定に保とうと作用したためだと考えられる。また、この実験より同一のネットは使用すごとに性能が落ちることが確認できたので、以降の実験②③ではあらかじめ使い古したネットを用いた。

実験②

大きいネットの方が良いという結果になった。これはボールが自由落下してきたとき、大きいネットの方がより沈み込む。ボールがネットに接触してから止まるまでの力積は等しいので、ボールとネットの接触時間が長くなり、そのぶん力の最大値が小さくなるためだと考えられる。

実験③

たるみが小さい(張っている)状態の方が良いという結果になった。たるんでいるネットに対して、張っているネットは硬いのでボールとの接触時間が短くなり瞬間的に大きな力を受けるので、たるんでいる方が良いだろうと実験前に予想していたが、結果はこれに反した。

そこで、ネットは引っ張っても顕著には伸びない繊維ロープを編んだものだが、複雑に編まれることによって、ネット全体としてばねのように伸び縮みするのではないかと考えた。そして、様々な「ばねモデル」を検討した(図12)。

また、考察をする中でゴムを用いて考えた。ネットやばねのように引っ張ると弾性力が働くので、実際に手で様々な力を加えて、伸びや手応えを確かめた。その中で図13の方法でゴムを押したことからヒントを得た。図13右をネットが張った状態とみて、それぞれ指で下向きに押し続けた。すると、明らかに右の方が手応えが小さく、左の方が手応えが大きかった。そこで、図12右のようなモデルにおいて、ゴムを押したときの手応えが弾性定数に関わると考え、追加実験を行うことにした。

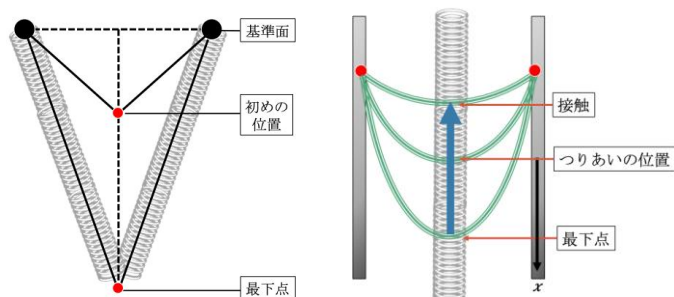


図12 ばねモデル(左:複数のばね説 右:1つのばね説)



図13 ゴムを用いた考察

4-(2) 追加実験 ネットを含めた実験装置全体が“ばね”のように作用していることを確かめる

i 実験方法

一辺 $L=100[\text{cm}]$ のネットを正方形の枠(落錘試験台)の一辺 $A=100,60[\text{cm}]$ で取り付けた。このとき、たるみ $D=0,40[\text{cm}]$ である。その上におもり(ベンチプレスのおもりなど)を載せていき、鉛直下向きの力を徐々に加えていった。そのときのおもりの質量とのネットの鉛直下方向の伸びの関係を、光てこを用いて測定した(図14)。

ii 実験結果

ネットにおもりを徐々に乗せていったときの、鉛直下方向の伸びは図15のようになった。横軸が載せたおもりの質量 $[\text{kg}]$,縦軸が鉛直下方向の伸び $[\text{mm}]$ である。なお、ネットに何も乗せない状態ではネットの底の形が定まらないため、はじめに $4.4[\text{kg}]$ のおもりを乗せたときのネットの底を鉛直下方向の伸びの基準($=0\text{mm}$)とした。

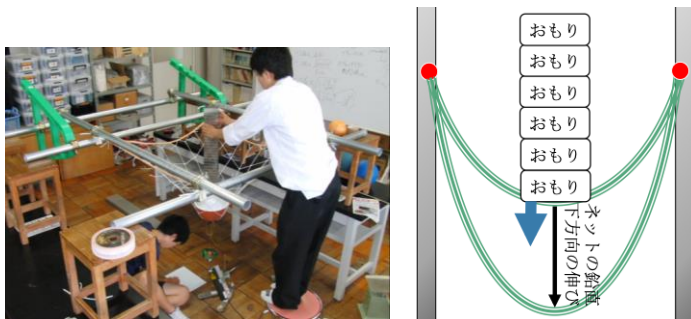


図14 追加実験の様子(左) 追加実験のモデル(右)

グラフより、たるみ $D=0, D=40$ ともにおおよその比例関係が見られる。よって、ネットが自由落下してきたボールを受け止める時、ばねのように力を加えていることが分かった。また、たるみ D はグラフの傾き、すなわち弾性定数に関係しないことが分かった。

iii 考察

乗せたおもりの質量とネットの鉛直下方向の伸びには比例関係が見られた。したがって、実験①～③において、ネットを含む装置全体が鉛直方向にばねのように作用してボールを受け止めていることが分かった。

しかし、それぞれの測定値の近似直線(図16)を引いたところ、たるみ $D=0[\text{cm}]$ (張った状態)のグラフと $D=40[\text{cm}]$ (たるんだ状態)のグラフに大きな違いは見られなかった。また、それぞれの傾きを求め、その逆数である弾性定数 k を算出した(図17上)。続いて、この弾性定数を用いて、実際に実験③において $4[\text{kg}]$ のボールを受け止める時にネットにかかった力の大きさ(計算値) F_1 をばねモデルを用いて算出し、実験③で得た力の大きさ(測定値) F_2 と比較をした(図17下)。

図17下の表を見ると、たるみ $D=40[\text{cm}]$ および $D=0[\text{cm}]$ の実測値と計算値が一致しているとは言えない。したがって、何らかの原因で、追加実験より得た弾性定数は誤っていたと言える。

以上より、たるみ D と弾性定数、および力(加速度)の大きさの関係は分かっておらず、実験③の結果の考察は結論に至っていない。

なお、実験③におけるネットが受けた力の大きさ(計算値)と(計算値)の算出方法は以下のとおりである。

実験③におけるネットが受けた力の大きさ(計算値) F_1 は、フックの法則 $F=kx$ にしたがって計算した。実験③の $x-t$ グラフから、ネットの鉛直下方向の伸びを読み取ると、 $D=0, 40[\text{cm}]$ のいずれにおいても、自由落下したボールはネットに接触した後 $11[\text{cm}]$ 沈み込んでいた。(図18) よって、上記の方法で求めたそれぞれの弾性定数 k にネットの鉛直下方向の伸び $x=11[\text{cm}]$ を掛けて、ネットが受けた力の大きさ(計算値) F_1 を算出した(式1)。

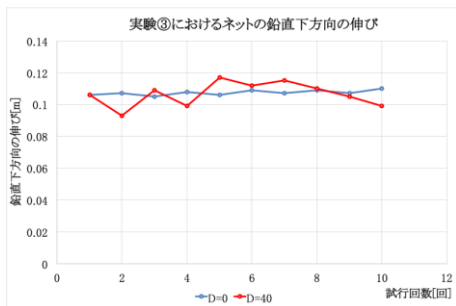


図18 実験③におけるネットの鉛直下方向の伸び

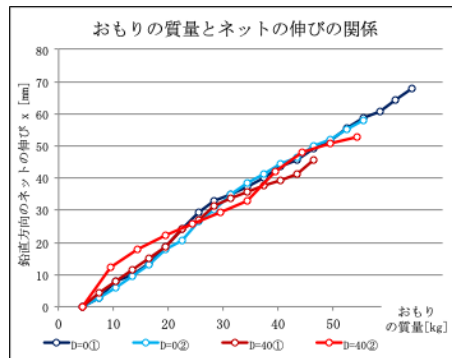


図15 追加実験の結果

D	0(1)	0(2)	40(1)	40(2)
4.4	0	0	0	0
7.4	2.856296013	2.856296013	4.28444402	
9.4				12.13925806
10.4	7.854814037	5.712592027	7.854814037	
13.4	9.997036047	9.282962044	11.42518405	
14.4				17.85185008
15.4	13.56740606	12.85333206	14.99555407	
19.4				22.1362941
19.4	18.56592409	17.85185008	18.56592409	
22.4	24.27851611	20.7081461	24.27851611	
24.4				25.70666412
25.4	29.27703414	26.42073812	27.13481213	
28.4	32.84740416	29.99110814	31.41925615	
29.4				29.27703414
31.4	34.98962617	34.98962617	33.56147816	
34.4	37.13184818	38.55999618	35.70370017	32.84740416
37.4	39.98814419	41.4162922	37.84592218	
39.4				42.1303662
40.4	43.58851421	44.27258821	39.27407019	
43.4	45.70073622	46.41481022	41.4162922	
44.4				47.84295823
46.4	49.27110623	49.98518024	45.70073622	
49.4	51.41332824	52.12740225	50.69925424	
52.4	55.6977226	54.98369826		
54.4				52.84147625
55.4	58.55406828	57.83999427		
58.4	60.69629029			
61.4	64.2666603			
64.4	67.83703032			

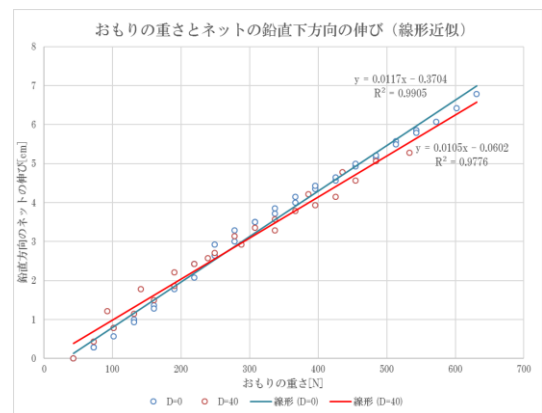


図16 追加実験の結果の近似直線

	傾き d	弾性定数 k [N/cm]
$D=0$	0.0117	85.5
$D=40$	0.0105	95.2

	計算値 F_1 [N]	実測値 F_2 [N]	差
$D=0$	941	761	180
$D=40$	1047	1080	33

図17 弾性定数(上) 実験③における力の大きさ(下)

$$F_1 = kx$$

F_1 : ネットが受けた力の大きさ(計算値)
 k : 弾性定数
 x : ネットの鉛直下方向の伸び

式1 ネットが受けた力の大きさ(計算値)

最後に、実験③におけるネットが受けた力の大きさ(実測値) F_2 は、実験③で得た加速度をもとに計算した。ボールが最下点に達した瞬間の運動方程式は $ma=F_2-mg$ となる。(図19) 実験③の $a-t$ グラフから(図11)の示す通り、最下点でのボールの加速度の大きさ a を読み取ると、平均値で $D=0[\text{cm}]$ のとき $a=180.57[\text{m/s}^2]$ 、 $D=40[\text{cm}]$ のとき $a=260.23[\text{m/s}^2]$ であった。これと実験で使用したボールの質量 $m=4.0[\text{kg}]$ 、重力加速度 $g=9.8[\text{m/s}^2]$ を式2に代入し、ネットが受けた力の大きさ(実測値) F_2 を算出した。

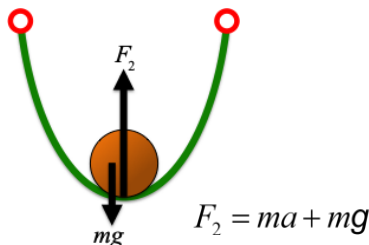


図19 実験③においてボールにかかる力

$$ma = F_2 - mg$$

F_2 : ネットが受けた力の大きさ(実測値) g : 重力加速度
 a : ボールの再加点での加速度の大きさ m : ボールの質量

式2 ネットが受けた力の大きさ(実測値)

iv 追加実験に関する仮説

追加実験の結果が予想と異なった原因として、我々が立てた仮説を以下に記す。

追加実験ではネットの上におもりを積んでいったが、おもりの落下の危険性もあり、最大で $64.4[\text{kg}]$ までしかおもりを積むことはできなかった。実際、実験③においてボールを落下させた時の加速度は最大で $299[\text{m/s}^2]$ になっており、これは追加実験のおもりを $126[\text{kg}]$ 載せたときの力に相当する。よって、今回の追加実験の範囲(載せたおもりの質量が $64.4[\text{kg}]$ まで)では、ネットの鉛直下方向の伸びは一定の割合で変化したが、この範囲を越えてさらにおもりを積んでいくと、ネットの鉛直方向の伸びは異なる変化をするかもしれないと仮説を立てた。

また、どのような物質であっても変形が一定の範囲(弾性範囲内)であれば弾性を示す。そして、変形が弾性範囲を超えると、性質がもとに戻らない変形(塑性変形)をするようになり、この臨界点を弾性限界と呼ぶ。以上より、我々の実験③において、ボールが最下点に達したときにはすでにネットが弾性限界に達しており、ネットの伸びとネットの受ける力には複雑な関係があると予想できる(図20)。

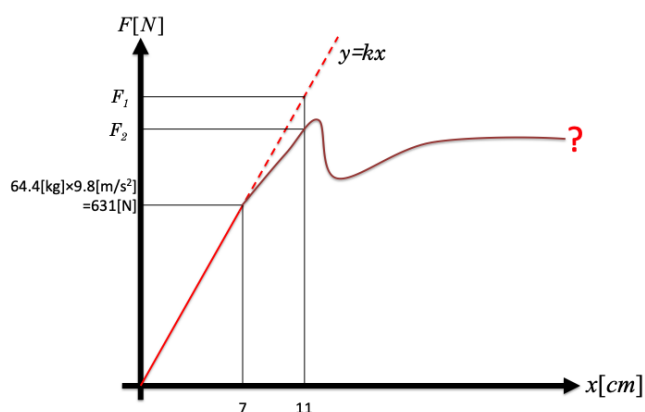


図20 弾性限界を超えたネットの力の働かせ方のイメージ

E. 結論

競技用ゴールネットは、より大きくて、縁網がついていて、より張った状態がよい、ということが分かった。また、ネットを水平方向に張り鉛直方向に力を加えた場合、ネットが弾性を有しバネのように作用していることもわかった。これはゴールネットに限らず、安全ネットや防球ネットなど、様々なネットの利用場面において応用できる。

しかし、たるみと加速度の関係(実験③)の原因を詳しく調べる必要がある。項目4-(2)に示したような仮説のもと、ネットの弾性について追究するべきである。

F. 謝辞

ご指導いただいた、佐藤哲也先生、本田一恵先生をはじめとする本研究に携わっていただいた全ての方々に、深く御礼申し上げます。ありがとうございました。

G. 参考文献

- ・ あいち産業技術総合センター 杉山儀,原田真,柴田佳孝「安全ネットの衝撃吸収特性の評価技術に関する研究」研究報告. 2016. P.152-155.
 <<http://www.aichi-inst.jp/mikawa/research/report/05-p152-ms04.pdf>>
- ・ 『「砥石」と「研削・研磨」の総合情報サイト。www.toishi.info 繊維の引張強度の比較』
 <<https://www.toishi.info/sozai/textile/polyethylene.html>>