

卒業論文

人体頭部模型を用いた頭部衝撃による
頸部加速度計測とヘルメットの緩衝性
能評価

03-210251 屋敷昌堯

指導教員 泉 聡志 教授

目次

卒業論文	1
1 序章	8
1.1 研究背景	8
1.2 先行研究	9
1.2.1 先行研究①	9
1.2.2 先行研究②	10
1.2.3 先行研究④	10
1.3 研究の目的	11
1.4 論文の構成	11
2 研究手法	12
2.1 共通の実験機構	12
2.1.1 実験概要	12
2.1.2 実験種類	12
2.1.3 共通の実験装置	14
2.1.4 実験操作	15
2.2 予備実験	18
2.2.1 予備実験_1 か所固定	18
2.2.2 予備実験_2 か所固定	19
2.3 実験_前頭部	20
2.3.1 実験装置	20
2.3.2 実験内容	22
2.4 実験_側頭部	23
2.4.1 実験装置	23
2.4.2 実験内容	25
2.5 実験_後頭部	26
2.5.1 実験装置	26
2.5.2 実験内容	28
3 実験結果	29
3.1 予備実験	29
3.1.1 予備実験_1 か所固定	29
3.1.2 予備実験_2 か所固定	30
3.2 実験_前頭部	33
3.2.1 実験_前頭部_ヘルメット無し	33

3.2.2	実験_前頭部_ヘルメット有り	34
3.2.3	ヒビが入る前と後の比較	35
3.2.4	ヘルメット無し及び有りの比較	37
3.3	実験_側頭部	38
3.3.1	実験_側頭部_ヘルメット無し	38
3.3.2	実験_側頭部_ヘルメット有り	39
3.3.3	ヘルメット無しと有りの比較	40
3.4	実験_後頭部	40
3.4.1	実験_後頭部_ヘルメット無し	40
3.4.2	実験_後頭部_ヘルメット有り	42
3.4.3	ヘルメット無し/有りの比較	43
4	考察	44
4.1	予備実験	44
4.1.1	理論値との比較	44
4.1.2	衝撃対象物の固定方法	46
4.1.3	加速度センサーの固定方法	46
4.2	ひび割れによる影響	47
4.3	衝撃位置とヘルメットの緩衝性能	48
4.3.1	位置による緩衝性能の違い	48
4.3.2	圧縮による緩衝効果への影響	51
4.3.3	ヘルメットの周波数への影響	56
5	結論と課題	59
5.1	結論	59
5.2	課題および展望	59
6	参考文献	60

目次

Figure 2-1	ボールの投射位置.....	13		
Figure 2-2	フレーム.....	14		
Figure 2-3	鉄板.....	15		
Figure 2-4	糸とボールの接着	Figure 2-5	糸と皿の接着.....	15
Figure 2-6	皿・ボール・糸の接着を上からみた図.....	16		
Figure 2-7	皿の上の糸を切る直前&円形輪.....	16		
Figure 2-8	ボールを塩ビパイプに触れないように設置.....	17		
Figure 2-9	加速度の軸方向.....	18		
Figure 2-10	固定状態.....	19		
Figure 2-11	前頭部__ヘルメット無し/有り.....	21		
Figure 2-12	底面ひび.....	22		
Figure 2-13	底面補強.....	23		
Figure 2-14	側頭部__角度.....	24		
Figure 2-15	側頭部__ヘルメット無し/有り.....	25		
Figure 2-16	後頭部__角度.....	26		
Figure 2-17	後頭部__ヘルメット無し/有り.....	27		
Figure 3-1	予備実験_1 か所固定__加速度波形.....	29		
Figure 3-2	予備実験_2 か所固定__加速度波形 A.....	31		
Figure 3-3	予備実験_2 か所固定__加速度波形 B.....	32		
Figure 3-4	前頭部__ヘルメット無し__波形.....	33		
Figure 3-5	前頭部__ヘルメット有り__波形.....	34		
Figure 3-6	ひび割れ無し__波形.....	35		
Figure 3-7	ひび割れ有り__波形.....	36		
Figure 3-8	側頭部__ヘルメット無し__波形.....	38		
Figure 3-9	側頭部__ヘルメット有り__波形.....	39		
Figure 3-10	後頭部__ヘルメット無し__波形.....	41		
Figure 3-11	後頭部__ヘルメット有り__波形.....	42		
Figure 4-1	片持ち梁.....	44		
Figure 4-2	予備実験_2 か所固定__固定の様子.....	46		
Figure 4-3	ひび割れ.....	48		
Figure 4-4	緩衝材__チンベル無し.....	50		
Figure 4-5	緩衝材__チンベル有り.....	51		
Figure 4-6	実験装置.....	52		

Figure 4-7	圧縮__弱い	52
Figure 4-8	圧縮__強い	53
Figure 4-9	圧縮__弱い__波形	54
Figure 4-10	圧縮__強い__波形	55
Figure 4-11	緩衝材無し	57
Figure 4-12	緩衝材無し__z 軸波形	58

表目次

Table 2-1	加速度センサー種類	17
Table 2-2	実験条件__予備実験①	18
Table 2-3	実験条件__予備実験②	20
Table 2-4	実験条件__前頭部__ヘルメット無し	21
Table 2-5	実験条件__前頭部__ヘルメット有り	22
Table 2-6	実験条件__側頭部__ヘルメット無し	25
Table 2-7	実験条件__側頭部__ヘルメット有り	25
Table 2-8	実験条件__後頭部__ヘルメット無し	27
Table 2-9	実験条件__後頭部__ヘルメット有り	28
Table 3-1	予備実験__1 か所固定__測定データ	30
Table 3-2	標準偏差・変動係数	30
Table 3-3	予備実験__2 か所固定__周波数 A	31
Table 3-4	予備実験__2 か所固定__周波数 B	32
Table 3-5	前頭部__ヘルメット無し__測定データ	34
Table 3-6	前頭部__ヘルメット有り__測定データ	35
Table 3-7	ひび割れ無し__測定データ	36
Table 3-8	ひび割れ有り__測定データ	37
Table 3-9	前頭部__ヘルメットの有無__x 軸	37
Table 3-10	前頭部__ヘルメットの有無__z 軸	37
Table 3-11	側頭部__ヘルメット無し__測定データ	39
Table 3-12	側頭部__ヘルメット有り__測定データ	40
Table 3-13	側頭部__ヘルメットの有無__x 軸	40
Table 3-14	側頭部__ヘルメットの有無__z 軸	40

Table 3-15	後頭部__ヘルメット無し__測定データ.....	41
Table 3-16	後頭部__ヘルメット有り__測定データ.....	42
Table 3-17	後頭部__ヘルメットの有無__x 軸.....	43
Table 3-18	後頭部__ヘルメットの有無__z 軸.....	43
Table 4-1	アルミフレーム材料特性	45
Table 4-2	予備実験__1 か所固定__理論値との比較.....	45
Table 4-3	予備実験__2 か所固定__理論値との比較 A	45
Table 4-4	予備実験__2 か所固定__理論値との比較 B.....	45
Table 4-5	ひび割れの影響.....	48
Table 4-6	加速度 A を基にした緩衝性能	49
Table 4-7	ヘルメットの圧縮	51
Table 4-8	計測器.....	53
Table 4-9	圧縮__データ.....	55
Table 4-10	ヘルメットの有無による周波数比較.....	56
Table 4-11	測定器.....	57
Table 4-12	緩衝材有無比較.....	58

1 序章

1.1 研究背景

コンタクトスポーツにおいて、衝突時の衝撃によって人体が危険にさらされるケースが多々あり、その中でもアメリカンフットボールは死角からのコンタクトがルール上可能であることから衝突によって命を起すケースはたびたび報告されている。特に頭頸部への衝撃は、重度の場合は人の命を奪うもの、生涯後遺症を残すもの、軽度なものであっても選手としてのパフォーマンスを著しく下げるものもある。安全にコンタクトを行うことができれば、アメリカンフットボールを含むコンタクトスポーツへの新規参入のハードルが下がり、競技人口も増えるであろう。

頭頸部外傷は大きく頭部外傷と頸部外傷に分かれる。アメリカンフットボールにおいてもっとも頻繁に発生する頭部外傷は脳震盪である。脳震盪は軽度の外傷性脳損傷(Mild Traumatic Brain Injury)と定義され、米国ではアメリカンフットボール人口 100 万人のうち年間約 4 万人が脳震盪になると報告されている[1]。頸部外傷として最も致命的なものは、頸椎骨折および頸椎脱臼である。これらの外傷は死亡事故にもつながり、頸椎の外傷による死亡事故は、1946-1955 にかけては年間平均 32 名の死者が出ており、2016-2020 年には年間平均 1 人にまで減少している。頸椎外傷による永久四肢麻痺患者は、1976 年には 34 人であったが、1995 年には 5 人に減少している[3]。頸部外傷として最も一般的で、死亡には至らないが、その痛みや不安感から選手のパフォーマンスを下げるものとして、バーナー症候群や頸椎捻挫があげられる。

脳震盪や、頸椎骨折、頸椎脱臼は人体への影響が甚大であり、死亡事故や永久的な身体障害をもたらすこともあるため、数多くの研究がなされてきた[2][3]。ヘルメットの性能向上や、ルールの改正によって脳震盪や頸椎損傷による死亡事故や四肢の永久麻痺等の重篤な事故の件数は現在減ってきた[2]。しかし、アメリカンフットボールは競技の特性上、頭部に直接衝撃が加わる機会が多いので、脳震盪自体や、頸部の怪我はいまだに数多く発生している。例えば、自身が所属していた東京大学アメリカンフットボール部においても数多く発生しており、自分自身も大学 3 年次に頸椎捻挫 1 回、バーナー症候群 1 回、大学 4 年次に脳震盪 1 回、頭部打撲 3 回経験している。

このように、頸部への衝撃がプレイヤーには大きな障害となっているにもかかわらず、アメリカンフットボールにおいて頸部軸方向以外からの頭部衝撃に対して頸椎にどれだけ衝撃が加わり、衝突位置によって頸椎が損傷を負うリスクは

どのように変わるかを調べた研究は存在していない。また、人体に直接強い衝撃を与えて傷害評価を行うのは倫理上の観点から不可能であるため、人体を模したダミーを用いる。今回は頭部に衝撃を与えた際の頸部の衝撃を計測したいので、首から上の人体模型を用いる。

1.2 先行研究

1.2.1 先行研究①

アメリカンフットボールにおける死亡事故を伴う頸部損傷の研究を示す[2]。1959-1963のシーズンに比べて、1972-1975のシーズンは致命的な頭部外傷（頭蓋内出血と頭蓋内死亡の合計）の件数は100,000人当たり4.97人から2.07人に推移している。その一方で、致命的な頸椎外傷（頸椎骨折と永続的な頸部四肢麻痺の合計）は、2.09人から5.72人と増加している。頸部損傷のメカニズムを練習や試合のビデオクリップをもとに検証したところ、頸椎骨折や脱臼による死亡や永続的な四肢麻痺をもたらす原因は軸方向からの圧力であると結論付けられた。ヘルメットの機能改善によって改善された保護性能が頭部外傷の減少をもたらしたといえるが、これにより頭部から相手に接触することへの恐怖心が薄れ、頭頂部を最初の接触点として使用するコンタクトの技術が普及していった。アメリカンフットボールにおける接触過程において、頸椎は常に衝撃を与えられる環境下にいる。ほとんどの衝撃は、頸椎傍脊柱筋と椎間板を介して制御された脊椎運動によって消散される。しかし、頸椎の軸方向に沿って衝撃が伝達されるように頭、首、体幹が配置され、ヘルメットの頂点付近で接触が発生すると、椎骨、椎間板、支持靱帯構造が損傷する可能性がある。正常な頸椎状態には前弯が見られ、この前弯により衝撃を分散させることができるが、ストレートネックになると衝撃を分散することができなくなり、結果として重篤な頸部障害になりやすい。このような事態から1976年に頭頂部を最初の接触点としたコンタクトをルール違反とした。そのことで、1975年から1995年にかけて32人から4人に大幅に減少した。現在もこのルールは適用されているが、頭部を最初の接触点としたコンタクト自体は禁止されておらず、現在は顔を上げてヘルメットの正面を最初の接触点としてコンタクトをするように指導がなされている。すなわち、頭頸部は現在でも強い衝撃を受ける環境下に置かれている。実際東大のアメフト部においてもバーナーや頸部損傷といった頸部の怪我は年間で数多く報告されている。

1.2.2 先行研究②

軸方向以外から衝撃を受けた時に発生する外傷を2つ例に挙げる。バーナー症候群や頸椎捻挫の発生メカニズムを示す[5]。アメリカンフットボール競技中に引き起こされるバーナーのメカニズムおよび受傷機序は、頭部が強制的に頸部において側屈・回旋・伸展が引き起こされた状態、いわゆる“ヘルメットが側方に持っていかれた”時に発生する。この時に放散痛などの症状が発生するが、ストレッチされた側は腕神経叢の過伸展損傷などが要因と推測されており、つぶされた側は椎間孔での神経根への圧迫、あるいは頸椎症性変化、椎間板ヘルニアなどが要因となっている。このことから、バーナー症候群は軸方向からの衝撃ではなく、ヘルメットの側面からの衝撃によって引き起こされる。

頸椎捻挫のメカニズムを示す[6]。頸椎捻挫は一般的にはむち打ちと呼ばれる。身体に衝撃が加わる直前に反射的に頸椎に対する損傷を避ける防御のための筋緊張が生じ、衝撃の大きさによっては筋の部分断裂や靭帯の損傷が生じる。骨折や脱臼は生じていない。すなわち、軸方向の衝撃よりもヘルメットの正面や側面からの衝撃によって引き起こされる。

1.2.3 先行研究④

人体モデルにボールを射出する実験を示す[4]。野球における脳震盪の原因である野球ボールによる頭部への衝撃を計測した実験における実験装置にて用いられている機器は、空気圧式ボールランチャーおよび3軸の加速度センサーを取り付けた頭頸部人体模型(Hybrid IIIモデル)である。ボールを頭部に射出して頭部の加速度を測るためには、空気圧式ボールランチャーと HybridIII, さらに頸部モデルを格納できるテーブルを用意する。また、空気圧ランチャーを動かないようにするために鉄骨のフレームに取り付ける。衝突速度はランチャーの空気圧によって制御し、衝突位置は、レーザー照準システムを使用して精度を担保したのち、ハイスピードカメラで衝突の瞬間を撮影することによって確認している。この実験において注意がなされているのは、毎回同じ速度でボールをぶつけていること、毎回同じ位置にボールをぶつけていること、そしてボールの投射対象がしっかりと固定されているという3点である。この3点を満たすような実験機構を考え、それを用いて実験を行っていく。

1.3 研究の目的

頭部衝撃による頸部の外傷に苦しむ選手は多い。ヘルメットの性能が向上して尚、頸部の外傷が多発している。そこで、アメリカンフットボールのヘルメットが持つ頸部への緩衝性能を調べるとともに、頭部衝撃を受ける位置によってヘルメットの緩衝性能はどのように変化するかを調べる。

今回はアメリカンフットボールにおける衝撃実験なので、衝撃が加わっている人体は自分自身の頭部に衝撃が加わることは事前にわかっているため、衝突の瞬間首を固めることができている。よって頭頸部模型は市販のマネキンで代用する。さらに、衝突の際の頭頸部は胴体に固定されているので、今回の実験では市販の頭頸部マネキンをアルミフレームと鉄板で作った台に固定する。さらに、測定内容は、ヘルメットをかぶった時とそうでないときのマネキンの頭部に衝撃を与えた場合の頸部加速度を測定するというものである。

1.4 論文の構成

第1章「序章」では、本研究の背景、先行研究、および目的を示した。

第2章「研究手法」では、実際に行った実験の装置、実験条件を示す。

第3章「実験結果」では、実験から得られた結果を示す。実際に得られた時刻歴データのグラフを一つ示し、最大加速度、周波数、減衰比の平均値を x , z 各軸方向で表にまとめる。 y 軸を実験結果の欄に含めなかったのは、 y 軸の加速度が x , z 軸に比べ小さく波形が他の軸の波形に比べて有意な形で得られていないためである。さらに、3.1節では、標準偏差および変動係数を表にまとめる。また、3.2~3.4節ではヘルメットなし/ありのときの測定値を比較する。

第4章「考察」では、得られた実験結果に力学的な解釈を与える。4.1節では、実験値と理論値を比較することで実験装置や実験手法の性能および妥当性を示す。

第5章「結論と課題・展望」では、本研究から得られた結論と、課題・展望を示す。

2 研究手法

2.1 共通の実験機構

2.1.1 実験概要

固定された衝撃対象物（マネキンなど）に一定の高さおよび位置からボールをぶつけることで、対象物の同じ位置に同じ加速度で衝撃を与えることができるような機構を設計し、組み立てを行った。実際に作り出した装置にて衝撃対象物を固定して、上からボールを落下させることで衝撃を与える。

同時に、実験装置が、①毎回同じ速度でボールをぶつけられること、②毎回同じ位置にボールをぶつけられること③実験装置が衝撃を受けた際も固定されている、という 3 つの条件を満たしているかを確認するための実験も行う必要がある。

2.1.2 実験種類

まずは、2.1.1 項に示した実験の条件にたいして、実際に作った実験装置がどのような性能を示すかを調べる実験を行う。その時に行う実験は2つあり、まず一種類目は、投射対象を一か所のみで固定する実験、そして二種類目は、投射対象の固定箇所を二か所にして行う実験である。1か所固定と2か所固定の2種類の実験を行った理由は、人体頭部模型の頭部に衝撃を加える際の模型をボルトで固定する際に何か所の固定で十分固定できているとすることを考えるためである。また、1か所固定の実験においては、投射対象に与える加速度の正確さを測る意図もあるので、最も小さいサンプリング周波数(0.625 ms)の加速度センサーのみを用いる。

次に、頭部衝撃が与えられる場所によるヘルメットの頸部加速度の緩衝性能を調べる研究目的を果たすために、ボールが当たる位置を変えて頸部の加速度を調べる実験を行う。この時ボールを当てる位置は figure2-1 の図の○印で、「前頭部」、「側頭部」、「後頭部」の三か所。アメリカンフットボールにおいて自発的に衝突を起こす場合のほとんどは前頭部から側頭部にかけての衝突であるが、競技中に相手が後ろからあたってくるケースもあり、そのときは後頭部に衝撃

が加わる。真横から衝撃を加えるケースも行いたかったが、実験装置の寸法の都合で行うことができなかった。前頭部、側頭部、後頭部に対する衝撃実験においては、人体模型がヘルメットを被っていないとき、被っているときの二種類の計測をそれぞれについて行う。



Figure 2-1 ボールの投射位置

以上の実験について以下で論じやすいように名前を付けておく。実験装置の性能を調べる実験において、投射対象を一か所のみで固定する場合を「予備実験__1か所固定」、2か所固定する場合を「予備実験__2か所固定」とする。頭部に衝撃を与えて頸部の加速度を測定する実験において、投射位置および投射対象が、前頭部でかつヘルメット無しの場合を「実験__前頭部__ヘルメット無し」、ヘルメット有りの場合を「実験__前頭部__ヘルメット有り」、側頭部でかつヘルメット無しの場合を「実験__側頭部__ヘルメット無し」、ヘルメット有りの場合を「実験__側頭部__ヘルメット有り」、後頭部でかつヘルメット無しの場合を「実験__ヘルメット無し」、ヘルメット有りの場合を「実験__後頭部__ヘルメット有り」とラベリングする。

以上4つの実験について第二章では実験装置と実験内容を示し、第三章ではその結果を示す。

2.1.3 共通の実験装置

実験機構を作り上げるにあたって、アルミフレーム(ミスミ, 20 mm*20 mm), 鉄板(ss400, 140 mm*260 mm), ボルト・ナット(M5), 加速度センサー(AccStick Shock & Vibration Data Logger/SHINYEI 社), 塩化ビニールパイプ(外径 89.02 mm, 内径 77.60 mm), 円形輪(段ボール, 内径 82 mm), 野球ボール(直径 75.41 mm, 420 g), プラスチック, 皿, 糸を全ての実験に共通で用いる.

このうち、アルミフレーム～塩化ビニールパイプまでを組み立てたのが figure2-2 であり、アルミフレーム～糸に加え、マネキンを設置したのが figure2-7 である. また、マネキンをはじめとした投射対象は鉄板に固定するため、固定ができるように加工する必要がある. そこで、四隅にアルミフレームと固定できるように直径 5 mm のバカ穴と 9 mm のざぐりの加工を施し、さらにど真ん中に直径 8 mm のバカ穴をあける. 衝撃対象物を様々な角度で固定できるように、真ん中のバカ穴を中心とした直径 60 mm の円周上に 8 つの直径 5mm のバカ穴をあけ、直径 9 mm のざぐりの加工を施した. その様子を figure2-3 に示している.



Figure 2-2 フレーム

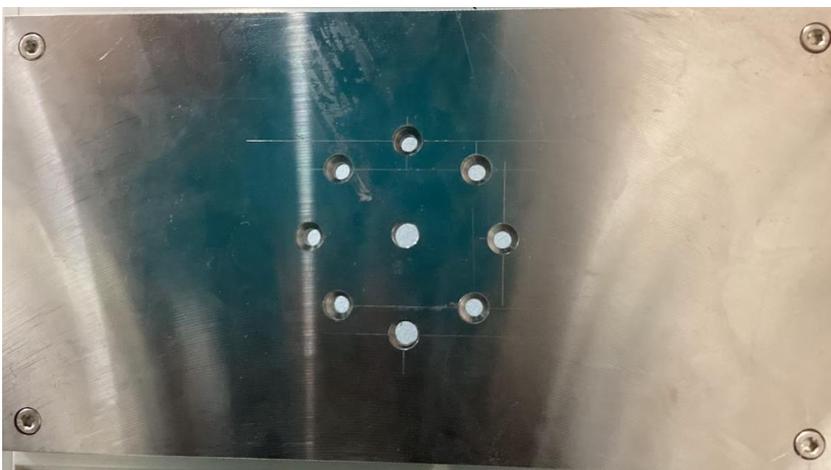


Figure 2-3 鉄板

2.1.4 実験操作

ボールをプラスチック皿に糸、ガムテープ、接着剤（アロンアルファ）にて Figure2-4~2-6 のように固定する.

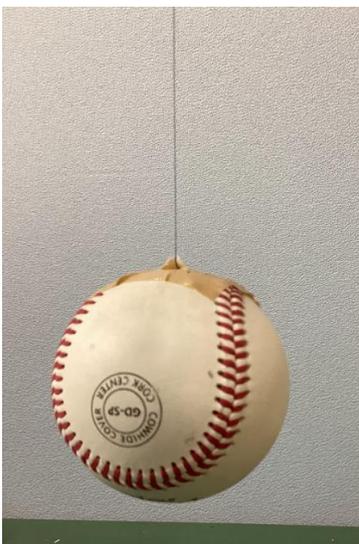


Figure 2-4 糸とボールの接着



Figure 2-5 糸と皿の接着



Figure 2-6 皿・ボール・糸の接着を上からみた図

ボールを塩化ビニールパイプ（皿を置く側の円環部分を「上部口」）に触れないように設置（figure2-7~8）し、糸を切ることでボールを落下させる。

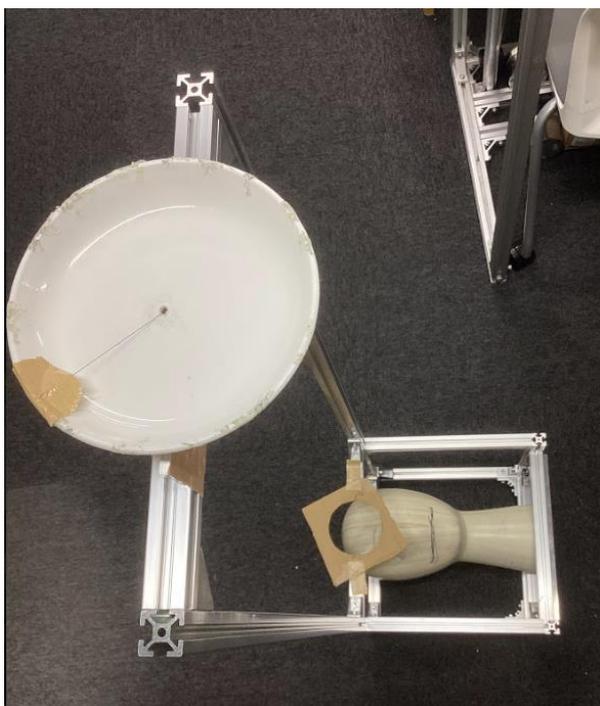


Figure 2-7 皿の上の糸を切る直前&円形輪

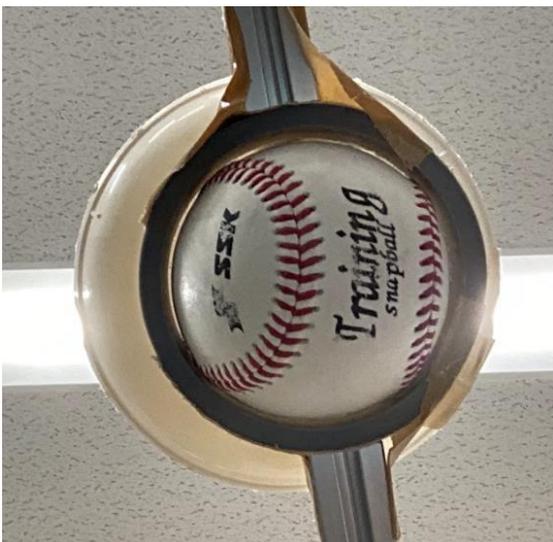


Figure 2-8 ボールを塩ビパイプに触れないように設置

ボールを設置した位置より下にある直径 82 mm の円形輪（下部口）を通ったもののみ計測することで測定の際のボールの衝突位置のずれを抑える。
また、加速度センサーの最大加速度、サンプリング周波数は、以下の 2 パターン (table2-1) で計測している。

Table 2-1 加速度センサー種類

	A	B
最大加速度(G)	16	400
サンプリング周波数(ms)	0.625	1.25

加速度センサーA の最大加速度は 16 G となっているが、実際に計測できる最大値は 23.91 G であることが実験的に分かった(table4-9 など)。

2.2 予備実験

2.2.1 予備実験__1 か所固定

2.2.1.1 実験装置

2.1.3 のほかに必要な材料として、アルミフレーム (280 mm) を用いる。280 mm アルミフレームに加速度センサーをアロンアルファおよびガムテープにて固定したうえでブラケットとボルト・ナットを用いて鉄板に固定する。その時の様子および加速度の軸方向を figure2-9 に示す。アルミフレームと鉄板は figure2-9 の○部にて固定されている。用いる加速度センサーの種類は A である。また、アルミフレームと上部口が 90 mm 離れているように塩ビパイプを設置する。

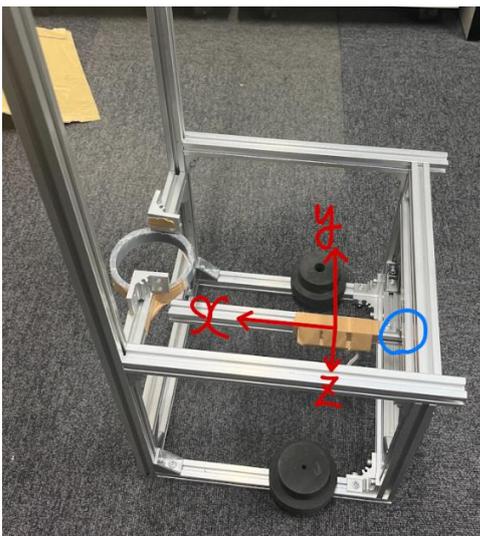


Figure 2-9 加速度の軸方向

これらの実験条件を以下の table2-2 にまとめる。

Table 2-2 実験条件__予備実験①

固定方法	ブラケット, ボルト・ナット
投射対象と上部口との距離	90 mm
加速度センサー	A

2.2.1.2 実験内容

落下した野球ボールから与えられた 280 mm アルミフレームの加速度を計測する。加速度の時刻歴データを得られるため、加速度の最大値、周波数、減衰比を調べる。周波数は、加速度の時刻歴データによって得られた波形から周期を割り出すことでもとめ、減衰比は加速度の時刻歴データから得られた波形のピーク値を基に手計算する。第 4 章での結果から、投射対象物は 2 か所での固定をすることにした。

2.2.2 予備実験__2 か所固定

2.2.2.1 実験装置

2.1.3 のほかに必要な材料として、アルミフレーム (300 mm) を用いる。A, B2 種類の加速度センサーの性質を知りたいので、用いる加速度センサーの種類は A と B の両方であり、300 mm のアルミフレームに加速度センサーをアロンアルファおよびガムテープにて固定したうえでブラケットとボルト・ナットを用いて鉄板に固定する。さらに、以下の figure2-10 のようにブラケットにて固定し、軸方向は予備実験__1 か所固定と同じである。また、300 mm アルミフレームと上部口との距離が 150 mm になるように塩ビパイプを設置した。

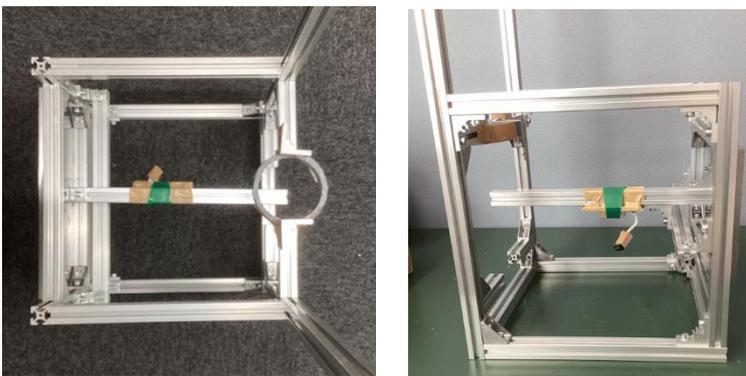


Figure 2-10 固定状態

これらの実験条件を以下の table2-3 にまとめる。

Table 2-3 実験条件__予備実験②

固定方法	ブラケット, ボルト・ナット
投射対象と上部口との距離	150 mm
投射対象と下部口との距離	70 mm
加速度センサー	A, B

2.2.2.2 実験内容

落下した野球ボールから与えられた 300 mm アルミフレームの加速度を計測する。加速度の時刻歴データから, x, z 軸加速度の周波数を求める。周波数は, 加速度の時刻歴データによって得られた波形から周期を割り出すことでもとめる。また, 第 4 章「考察」での理論値との比較から, 2 か所固定を以降の実験では採用し, 加速度センサー A, B ともに周波数を求めるのに使ってよいと判断した。

2.3 実験__前頭部

2.3.1 実験装置

2.1.3 の他に必要な材料は, マネキン, ヘルメットの二つである。「実験__前頭部__ヘルメット無し」においては, マネキンの底に元から空いているねじ穴に追加で一か所穴をあけ, そこに鬼目ナットを打ち込む。元から空いているねじ穴を用いて鉄板にねじで固定し, もう一つのねじ穴でも鉄板と固定することでマネキンの位置の精度および固定の強度を担保している。さらに, 「実験__前頭部__ヘルメット有り」においてはヘルメットなしと同様にマネキンを固定させたのち, ヘルメットを被せる。ヘルメットは, チンベルトと呼ばれる顎のカップを通るベルトをきつく締めることで固定する。ただし, ボールの衝突によってヘルメットがずれたかどうかの判別がつくようにヘルメットの位置をトレースしておく。また, 加速度センサーは極力サンプリング周波数の小さなものを使いたいが, 「ヘルメット無し」の時は加速度 A が図れる加速度の上限を超えてしまう。そこで, 用いる加速度センサーの種類は「ヘルメット無し」では加速度センサー B, 「ヘルメット有り」では加速度センサー A と分け, その加速度センサーをマネキンの頸部にアロンアルファとガムテープで固定する。加速度の軸および組み立ての様子は以下の figure2-10 に示す。衝撃対象であるマネキンやヘルメットと上部口との距離を 900 mm, 下部口との距離を 100 mm になるように塩ビパイプと円形輪を設置する。したがって, 上部口の中心と設置したボールが重なり,

その状態から真垂直に落下した時の衝突位置をずれ 0 mm とすると、ボールの落下位置のずれは、三角形の相似を考えて、

(パイプ上部の高さ-投射対象の高さ)/(パイプ上部の高さ-円形輪の高さ)=8/9より、

$$(82.00 \text{ mm} - 75.41 \text{ mm}) * 9 / 8 * 2 = 7.40 \text{ mm}$$

となる。

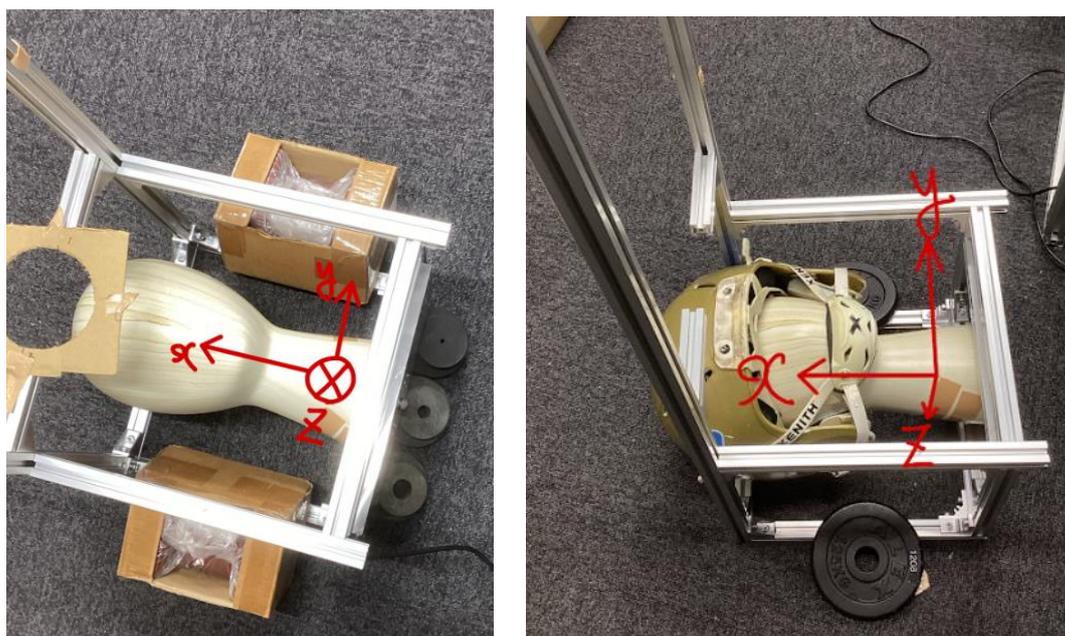


Figure 2-11 前頭部__ヘルメット無し/有り

これらの実験条件はそれぞれ以下の table2-4~5 の通り。

「実験__前頭部__ヘルメット無し」

Table 2-4 実験条件__前頭部__ヘルメット無し

固定方法	ねじ
投射対象と上部口との距離	900 mm
投射対象と下部口との距離	100 mm
加速度センサー	B

「実験__前頭部__ヘルメット有り」

Table 2-5 実験条件__前頭部__ヘルメット有り

固定方法	ねじ
投射対象と上部口との距離	900 mm
投射対象と下部口との距離	100 mm
加速度センサー	A

2.3.2 実験内容

ボールを投射対象の頭部に衝突させ、そのときの頸部加速度を加速度センサーによって測定する。加速度の時刻歴データを得られるため、2.2.2と同様に加速度の最大値、振動数、減衰比を調べる。

また、実際に行われた実験の順番は「実験__前頭部__ヘルメット有り」→「実験__前頭部__ヘルメット無し」であり、「実験__前頭部__ヘルメット無し」の測定を終えたのち、マネキンの底部にひびが入っていることが発見された (figure2-12)。ヘルメット有りの実験終了後は見られなかったため、ヘルメット無しでの実験の際にひびが入ったものと思われる。ヘルメット無しの時の初めの方のデータはひび割れがない、もしくはあったとしても影響が小さいと考えられるので、ヘルメット無しの最初の4つのデータをひび割れ前、最後の4つのデータをひび割れ後のデータとして第3章にてひび割れ前・後の測定データの比較を行い、第4章の考察ではひびが測定データにどのように影響を及ぼしているか、以後の実験__側頭部__以後の測定データがヘルメットの緩衝評価を議論する際に有効なデータとなっているかを議論する。



Figure 2-12 底面ひび

また、以降の実験ではマネキン底部のひび割れを補強(figure2-13)したうえで実験を行っているおり、ひびの拡張は見られなかった。

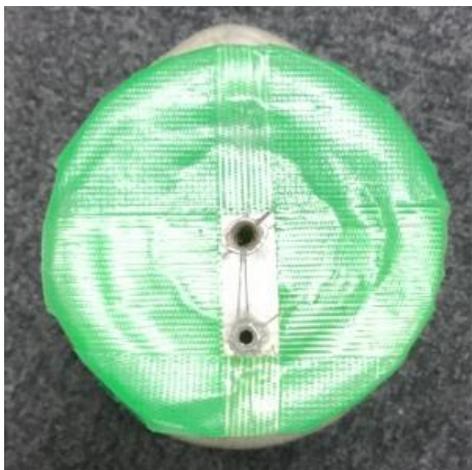


Figure 2-13 底面補強

2.4 実験__側頭部

2.4.1 実験装置

2.1.3 の他に必要な材料は、マネキンおよびヘルメットである。「実験__側頭部__ヘルメット無し」においては、マネキンの底に元から空いているねじ穴に追加で一か所穴をあけ、そこに鬼目ナットを打ち込む。元から空いているねじ穴を用いて鉄板にねじで固定し、もう一つのねじ穴でも鉄板と固定することでマネキンの位置の精度および固定の強度を担保している。今回は前頭部の実験の時から 45° 回転させて固定する(figure2-14).



Figure 2-14 側頭部__角度

「実験__側頭部__ヘルメット有り」のときは、「ヘルメット無し」と同様にマネキンを固定させたのち、ヘルメットを被せる。ヘルメットは、チンベルトと呼ばれる顎のカップを通るベルトをきつく締めることで固定する。ただし、ボールの衝突によってヘルメットがずれたかどうかの判別がつくようにヘルメットの位置をトレースしておく。また、実験__前頭部の時と同様の理由から、「ヘルメット無し」のときは加速度センサーBを用い、「ヘルメット有り」のときは加速度センサーAを用いる。加速度センサーをマネキンの頸部にアロンアルファとガムテープで固定する。加速度の軸および組み立ての様子は以下の figure2-15 に示す。

衝撃対象であるマネキンやヘルメットと上部口との距離が 850 mm, 下部口との距離が 100 mm となるように塩ビパイプと円形輪を設置する。したがって、ボールの落下位置のずれは、

$$\begin{aligned} & (\text{パイプ上部の高さ}-\text{投射対象の高さ}) / (\text{パイプ上部の高さ}-\text{円形輪の高さ}) \\ & = 8.5/7.5 \end{aligned}$$

より、

$$(82.00 \text{ mm}-75.41 \text{ mm}) * 8.5/7.5 * 2 = 8.38 \text{ mm}$$

となる。

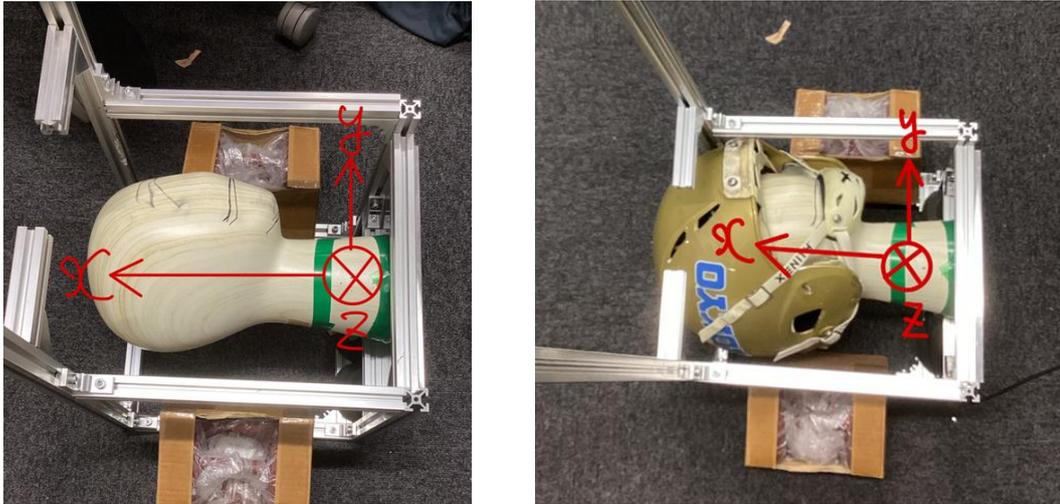


Figure 2-15 側頭部__ヘルメット無し/有り

これらの実験条件は以下の table2-6, 2-7 の通り.

「実験__側頭部__ヘルメット無し」

Table 2-6 実験条件__側頭部__ヘルメット無し

固定方法	ねじ
投射対象と上部口との距離	850 mm
投射対象と下部口との距離	100 mm
加速度センサー	B

「実験__側頭部__ヘルメット有り」

Table 2-7 実験条件__側頭部__ヘルメット有り

固定方法	ねじ
投射対象と上下口との距離	850 mm
投射対象と下部口との距離	100 mm
加速度センサー	A

2.4.2 実験内容

ボールを投射対象の頭部に衝突させ、そのときの頸部加速度を加速度センサーによって測定する. 加速度の時刻歴データを得られるため, 実験__前頭部と同

様に加速度の最大値，振動数，減衰比を調べる。

2.5 実験__後頭部

2.5.1 実験装置

2.1.3 の他に必要な材料は，マネキン(⑪)，ヘルメット(⑫)である。「実験__後頭部__ヘルメット無し」においては，マネキンの底に元から空いているねじ穴に追加で一か所穴をあけ，そこに鬼目ナットを打ち込む．元から空いているねじ穴を用いて鉄板にねじで固定し，もう一つのねじ穴でも鉄板と固定することでマネキンの位置の精度を担保している．今回は実験__前頭部の時から 180° 回転させて固定する (figure2-16)．



Figure 2-16 後頭部__角度

「実験__後頭部__ヘルメット有り」においては，「ヘルメット無し」と同様にマネキンを固定させたのち，ヘルメットを被せる．ヘルメットは，チンベルトと呼

ばれる顎のカップを通るベルトをきつく締めることで固定する。ただし、ボールの衝突によってヘルメットがずれたかどうかの判別がつくようにヘルメットの位置をトレースしておく。また、実験_前頭部の時と同様の理由から、「ヘルメット無し」の時は加速度センサーBを用い、「ヘルメット有り」の時は加速度センサーAを用いる。その加速度センサーをマネキンの頸部にアロンアルファとガムテープで固定する。加速度の軸および組み立ての様子は以下の figure2-17 に示す。マネキンおよびヘルメットから上部口までの距離が 850 mm、下部口までの距離が 100 mm になるように塩ビパイプ及び円形輪を設置する。したがって、ボールの落下位置のずれは、実験_側頭部と同様に、

$$\begin{aligned} & (\text{パイプ上部の高さ}-\text{投射対象の高さ}) / (\text{パイプ上部の高さ}-\text{円形輪の高さ}) \\ & = 8.5/7.5 \end{aligned}$$

より、

$$(82.00 \text{ mm}-75.41 \text{ mm}) * 8.5/7.5 * 2 = 8.38 \text{ mm}$$

となる。

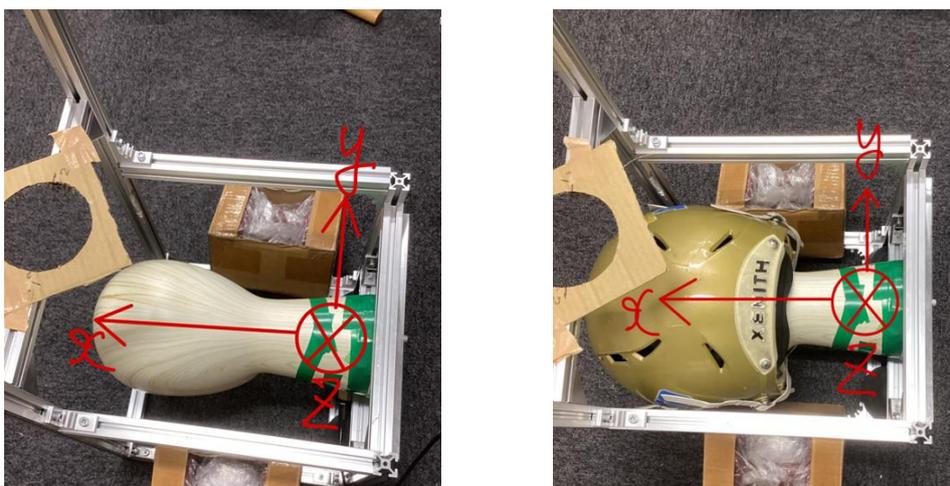


Figure 2-17 後頭部_ヘルメット無し/有り

これらの実験条件は以下の table2-8, 2-9 の通り。

「実験_側頭部_ヘルメット無し」

Table 2-8 実験条件_後頭部_ヘルメット無し

固定方法	ねじ
投射対象と上部口との距離	850 mm
投射対象と下部口との距離	100 mm
加速度センサー	B

「実験__側頭部__ヘルメット有り」

Table 2-9 実験条件__後頭部__ヘルメット有り

固定方法	ねじ
投射対象と上部口との距離	850 mm
投射対象と下部口との距離	100 mm
加速度センサー	A

2.5.2 実験内容

ボールを投射対象の頭部に衝突させ、そのときの頸部加速度を加速度センサーによって測定する。加速度の時刻歴データを得られるため、実験__前頭部__と同様に加速度の最大値、振動数、減衰比を調べる。

3 実験結果

3.1 予備実験

3.1.1 予備実験_1 か所固定

得られた加速度の時刻歴データは figure3-1 の通り。

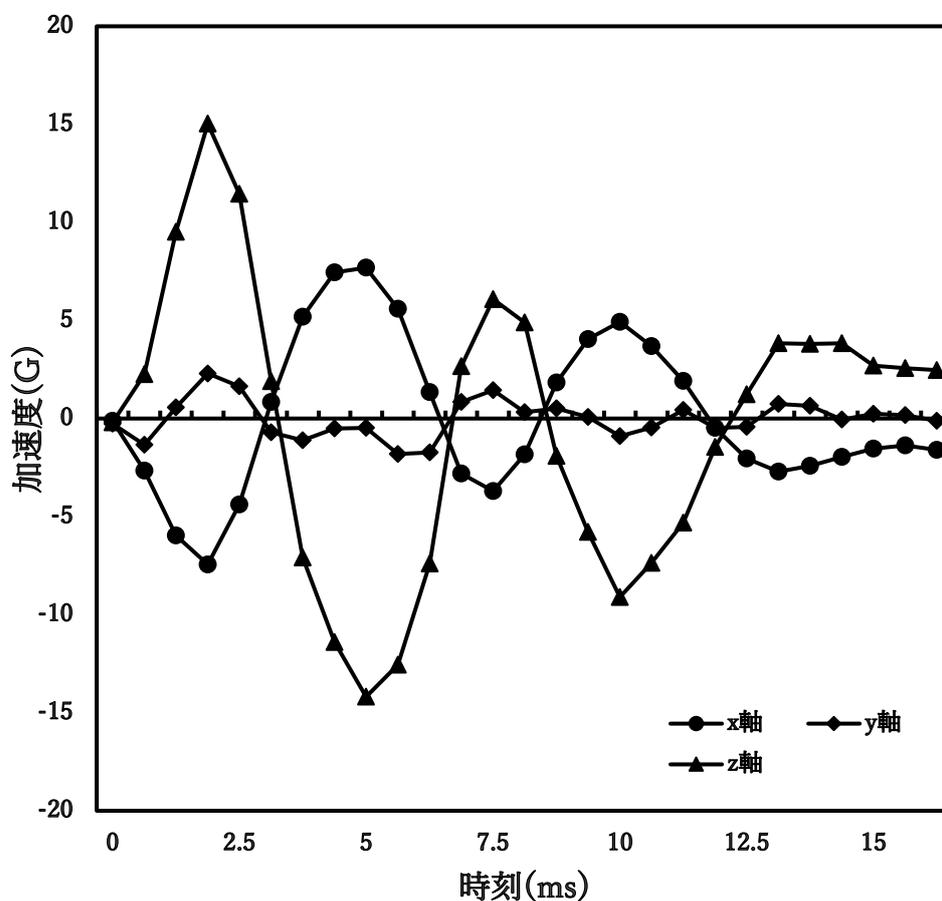


Figure 3-1 予備実験_1 か所固定_加速度波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、0.625ms. 縦軸は加速度を表している. 波形の取れている x, z 軸の最大加速度, 周波数, 減衰比の平均値を table3-1 にまとめる.

Table 3-1 予備実験_1 か所固定_測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度(G)	8.74	16.05
周波数 (Hz)	158.9	153.9
減衰比	0.55	0.51

データのばらつきを調べるため、最大加速度の標準偏差及び変動係数（＝標準偏差/平均値）を table3-2 にまとめる。

Table 3-2 標準偏差・変動係数

	x 軸	y 軸	z 軸
標準偏差	0.65	0.95	1.65
変動係数	7.6%	27%	10%

という性能を得た。

3.1.2 予備実験_2 か所固定

加速度センサーA によって得られた加速度の時刻歴データを figure3-2 に示す。

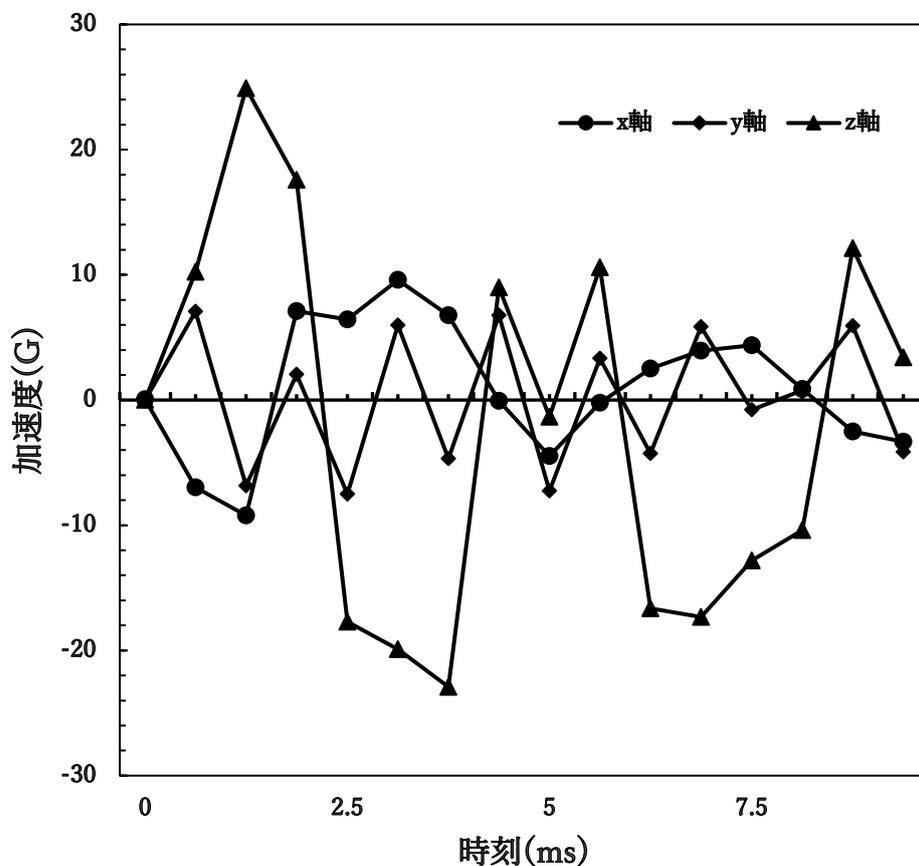


Figure 3-2 予備実験_2 か所固定_加速度波形 A

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、0.625ms. 縦軸は加速度を表している. x, z 軸の周波数の平均値を table3-4 にまとめる.

Table 3-3 予備実験_2 か所固定_周波数 A

	x 軸	z 軸
周波数(Hz)	216.92	217.86

加速度センサーB のときも同様に

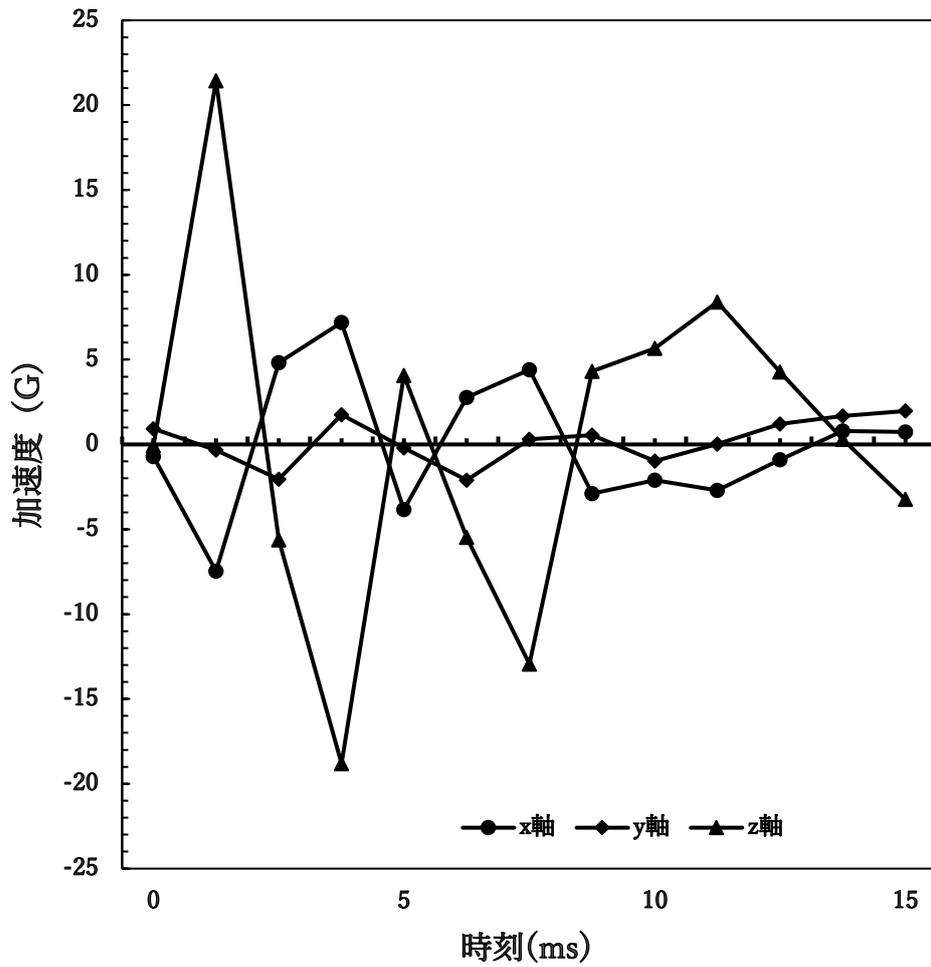


Figure 3-3 予備実験_2 か所固定_加速度波形 B

Table 3-4 予備実験_2 か所固定_周波数 B

	x 軸	z 軸
周波数 (Hz)	210.52	195.12

3.2 実験__前頭部

3.2.1 実験__前頭部__ヘルメット無し

得られた加速度の時刻歴データは figure3-4 の通りである。

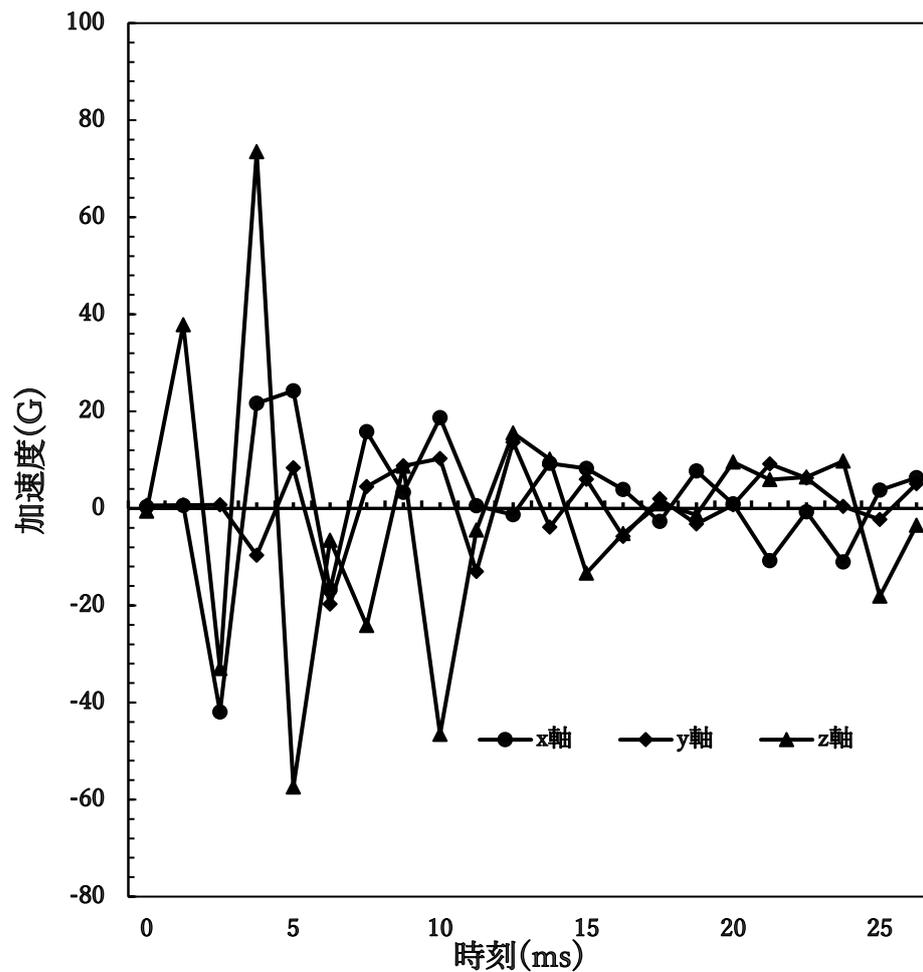


Figure 3-4 前頭部__ヘルメット無し__波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、1.25ms. 縦軸は加速度を表している. ここで、明確な波形がとれている x, z 軸の最大加速度, 周波数, 減衰比の平均値を table3-6 にまとめる.

Table 3-5 前頭部__ヘルメット無し__測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度 (G)	53.68	91.25
周波数 (Hz)	264.55	355.87
減衰比	0.46	0.37

3.2.2 実験__前頭部__ヘルメット有り

得られた加速度の時刻歴データは figure3-5 の通りである。

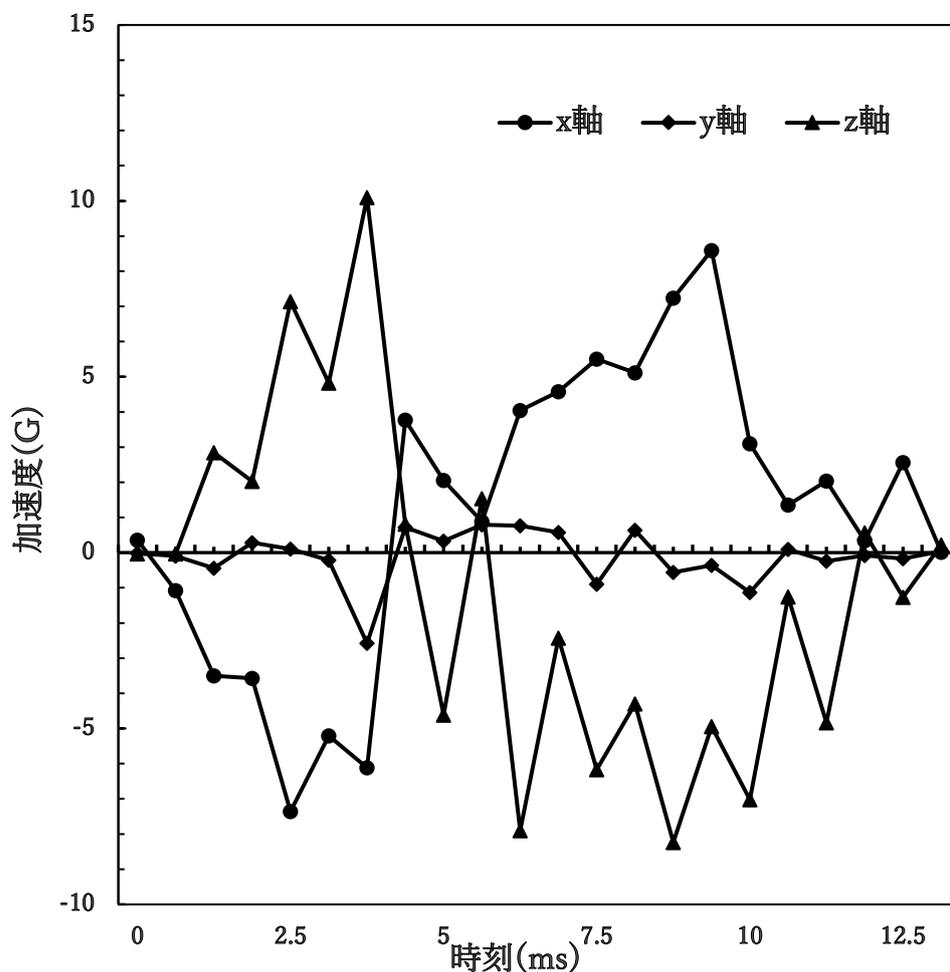


Figure 3-5 前頭部__ヘルメット有り__波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、0.625ms. 縦軸は加速度を表している. ここで、波形が取れている x, z 軸の最大加速度、周波数、減衰比の平均値を table3-7 にまとめる.

Table 3-6 前頭部__ヘルメット有り__測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度(G)	8.36	8.42
周波数(Hz)	123.15	101.52
減衰比	0.16	0.22

3.2.3 ヒビが入る前と後の比較

得られた加速度の時刻歴データは以下のグラフの通りである

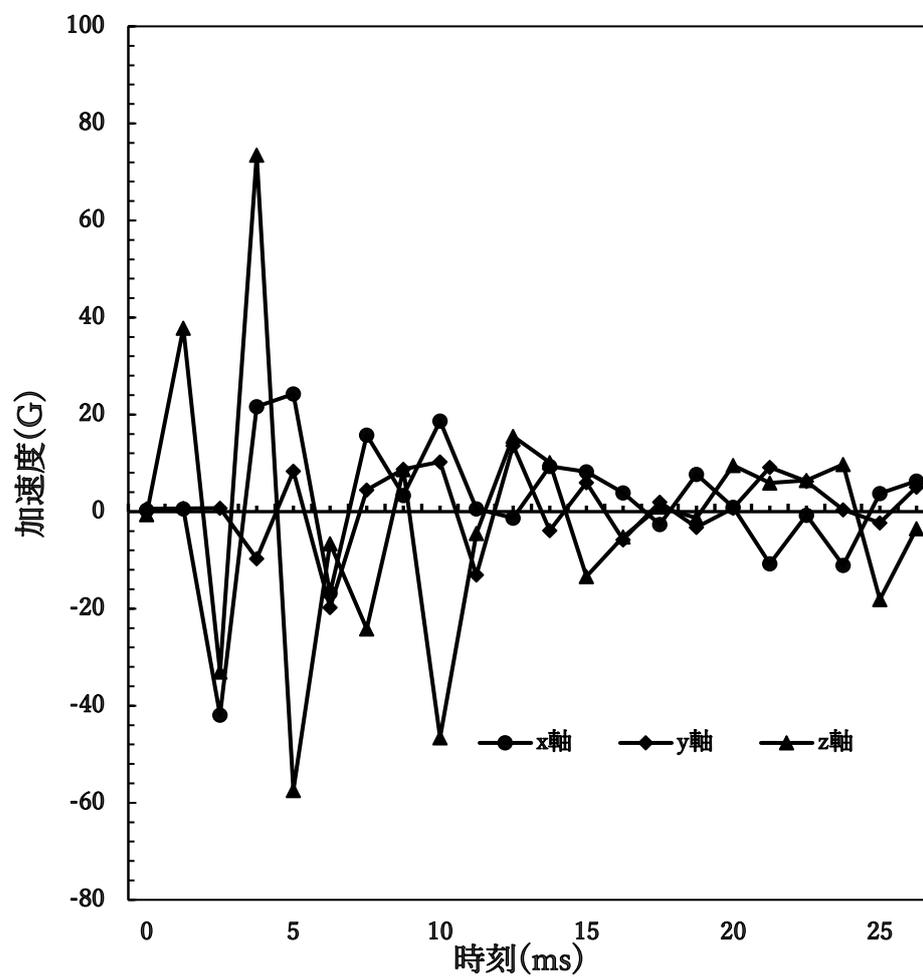


Figure 3-6 ひび割れ無し__波形

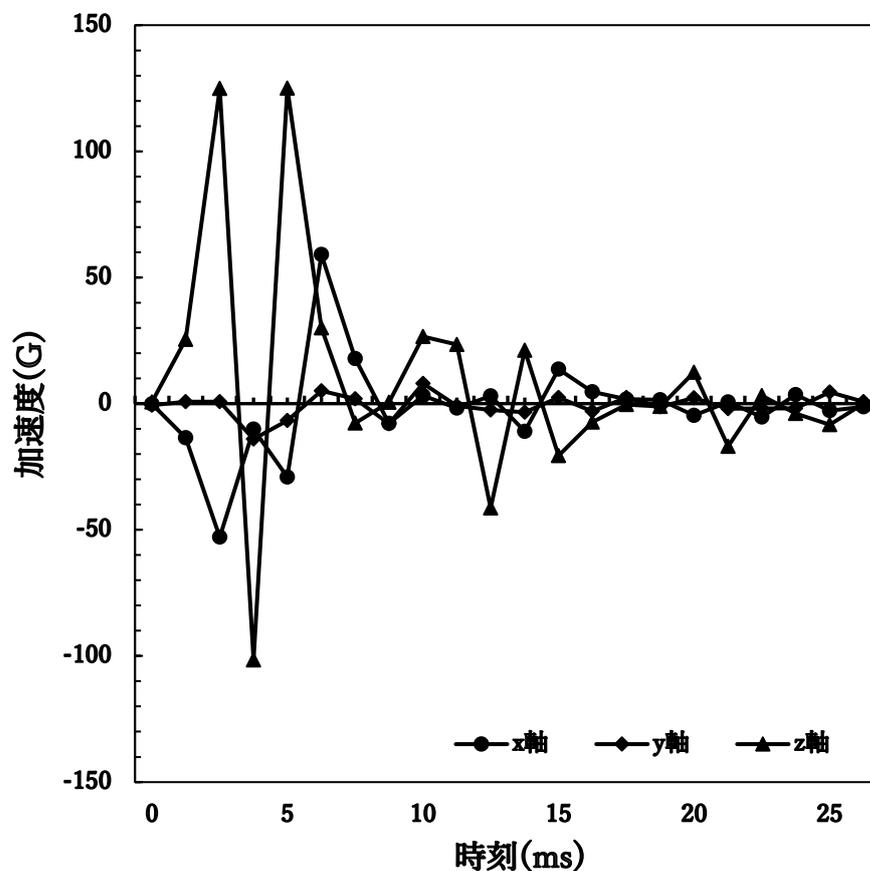


Figure 3-7 ひび割れ有り_波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、1.25ms. 縦軸は加速度を表している. ここで、波形がしっかりとれている x, z 軸のみ最大加速度、周波数、減衰比を table3-8, 3-9 で比較する.

x 軸について

Table 3-7 ひび割れ無し_測定データ

	ひび割れ無し	ひび割れ有り
最大加速度(G)	38.50	55.41
周波数(Hz)	207.03	277.77
減衰比	0.60	0.28

z 軸について

Table 3-8 ひび割れ有り__測定データ

	ひび割れ無し	ひび割れ有り
最大加速度(G)	88.69	105.12
周波数(Hz)	263.15	272.47
減衰比	0.63	0.32

3.2.4 ヘルメット無し及び有りの比較

ヘルメットの効果を論ずるための比較であるので、マネキンにひびが入っていない場合のデータのみ比較として用いる。

x 軸に関する最大加速度，周波数，減衰比を table3-10 で比較する。

Table 3-9 前頭部__ヘルメットの有無__x 軸

	ヘルメット無し	ヘルメット有り
最大加速度(G)	38.5	8.36
周波数(Hz)	207.03	123.15
減衰比	0.60	0.16

z 軸に関する

最大加速度，周波数，減衰比を表で比較する。

Table 3-10 前頭部__ヘルメットの有無__z 軸

	ヘルメット無し	ヘルメット有り
最大加速度(G)	88.69	8.42
周波数(Hz)	263.15	101.52
減衰比	0.63	0.22

3.3 実験__側頭部

3.3.1 実験__側頭部__ヘルメット無し

得られた加速度の時刻歴データは以下のグラフの通りである。

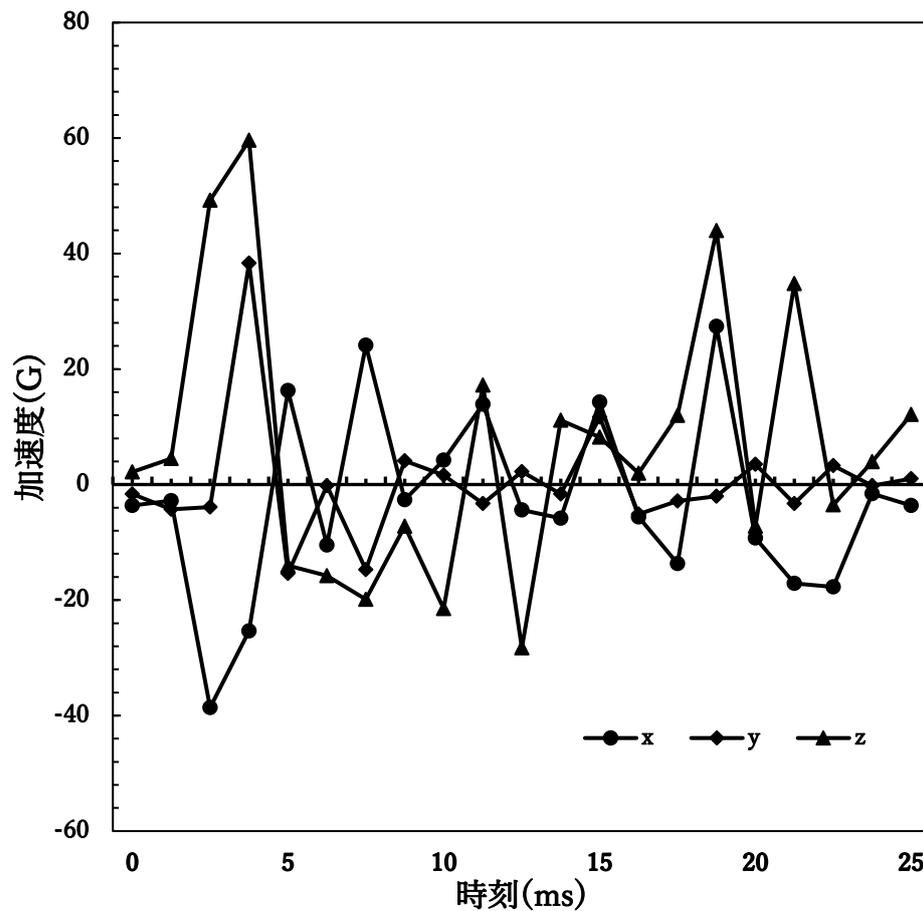


Figure 3-8 側頭部__ヘルメット無し__波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、1.25ms. 縦軸は加速度を表している。ここで、加速度の波形が取れている x, z 軸の最大加速度, 周波数, 減衰比の平均値を table3-12 にまとめる。

Table 3-11 側頭部__ヘルメット無し__測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度(G)	43.49	75.50
周波数(Hz)	192.3	186.21
減衰比	0.25	0.47

3.3.2 実験__側頭部__ヘルメット有り

得られた加速度の時刻歴データは以下の figure3-9 の通りである。

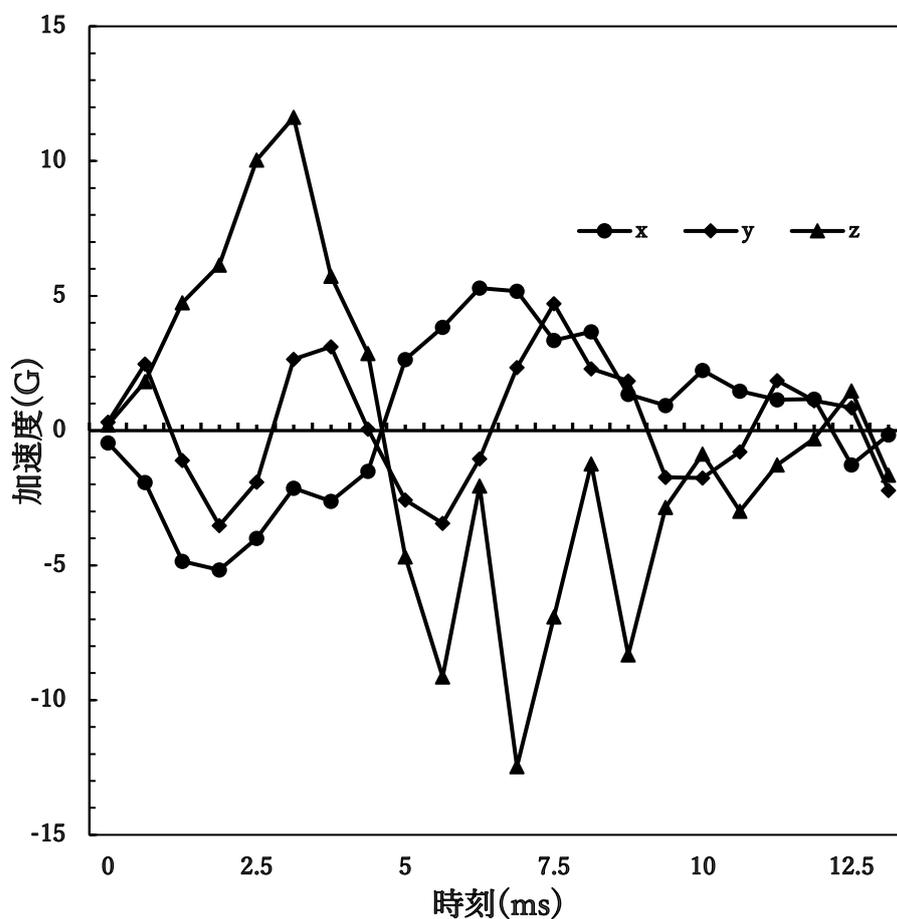


Figure 3-9 側頭部__ヘルメット有り__波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、0.625ms. 縦軸は加速度を表している。ここで、波形が取れている x, z 軸の最大加速度, 周波数, 減衰比の

平均値を table3-13 にまとめる.

Table 3-12 側頭部__ヘルメット有り__測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度 (G)	7.66	14.42
周波数 (Hz)	120.00	234.19
減衰比	0.29	0.18

3.3.3 ヘルメット無しと有りの比較

x 軸に関する最大加速度, 周波数, 減衰比を table3-14 で比較する.

Table 3-13 側頭部__ヘルメットの有無__x 軸

	ヘルメット無し	ヘルメット有り
最大加速度 (G)	43.49	7.66
周波数 (Hz)	192.30	120.00
減衰比	0.25	0.29

z 軸に関する最大加速度, 周波数, 減衰比をで比較する.

Table 3-14 側頭部__ヘルメットの有無__z 軸

	ヘルメット無し	ヘルメット有り
最大加速度 (G)	75.5	14.42
周波数 (Hz)	186.21	234.19
減衰比	0.47	0.18

3.4 実験__後頭部

3.4.1 実験__後頭部__ヘルメット無し

得られた加速度の時刻歴データは figure3-10 の通りである.

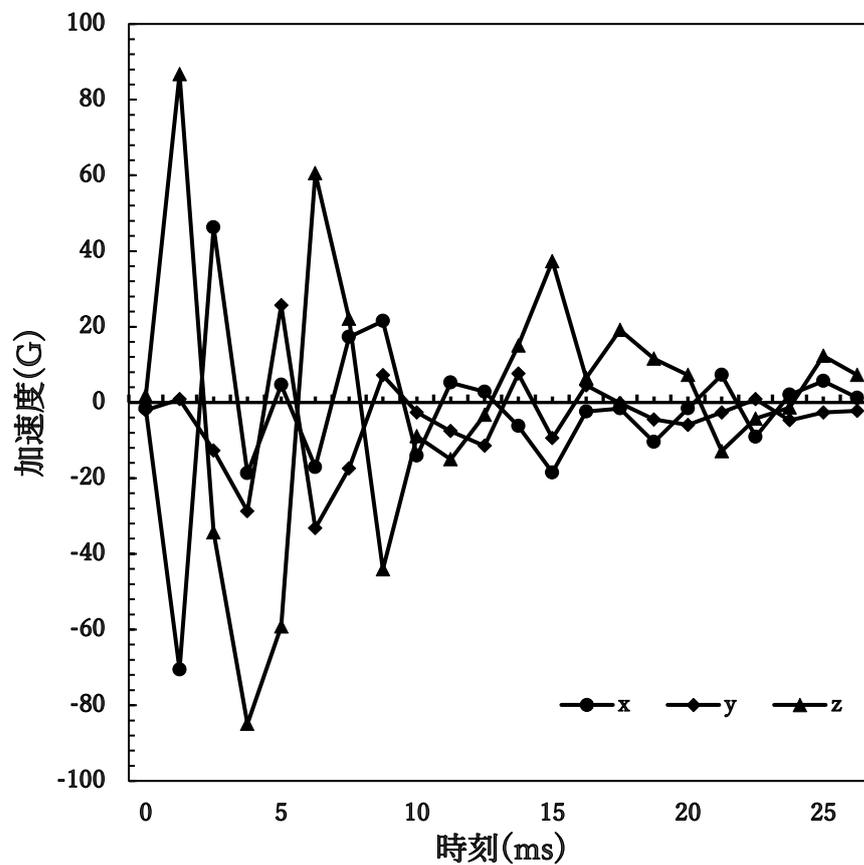


Figure 3-10 後頭部__ヘルメット無し__波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、1.25ms. 縦軸は加速度を表している. ここで、加速度の波形が取れている x, z 軸の最大加速度、周波数、減衰比の平均値を以下の表にまとめる.

Table 3-15 後頭部__ヘルメット無し__測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度 (G)	89.96	100.68
周波数 (Hz)	253.16	321.54
減衰比	0.32	0.44

3.4.2 実験__後頭部__ヘルメット有り

得られた加速度の時刻歴データは figure 3-11 の通りである。

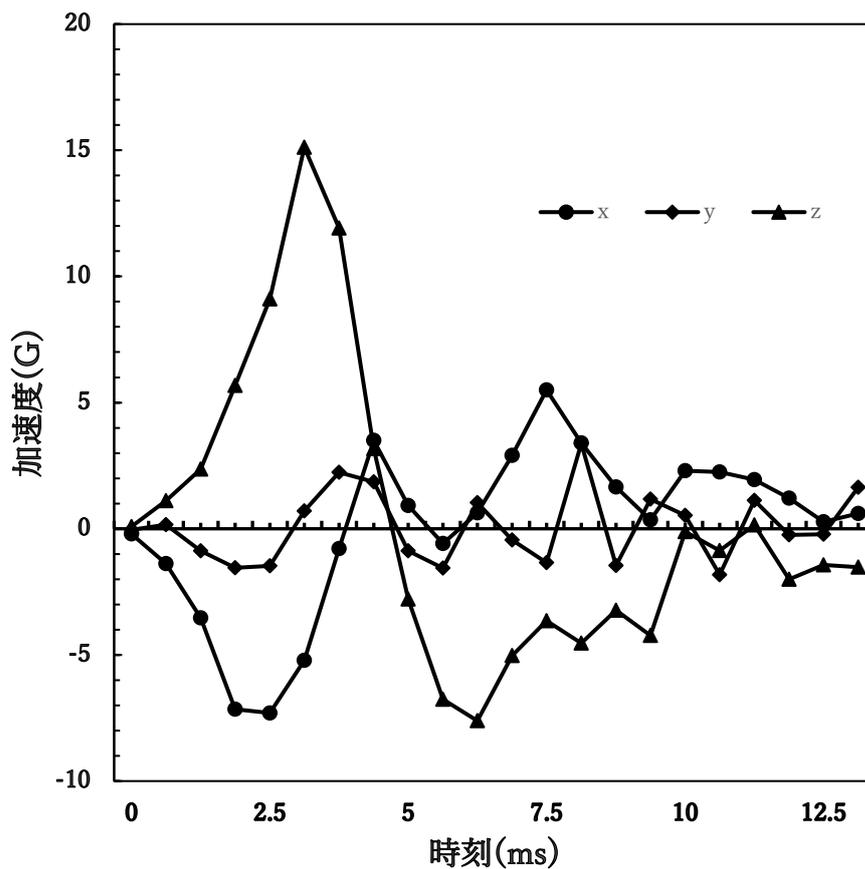


Figure 3-11 後頭部__ヘルメット有り__波形

横軸は衝突の瞬間を 0s として、一コマの間隔は、0.625ms. 縦軸は加速度を表している. ここで、波形が取れている x, z 軸の最大加速度, 周波数, 減衰比の平均値を table3-17 にまとめる.

Table 3-16 後頭部__ヘルメット有り__測定データ

	x 軸	z 軸
最大加速度 (G)	7.44	14.48
周波数 (Hz)	157.23	117.31
減衰比	0.47	0.04

3.4.3 ヘルメット無し/有りの比較

x 軸に関する最大加速度，周波数，減衰比を table3-18 で比較する．

Table 3-17 後頭部_ヘルメットの有無_x 軸

	ヘルメット無し	ヘルメット有り
最大加速度 (G)	89.96	7.44
周波数 (Hz)	253.16	157.23
減衰比	0.32	0.47

z 軸に関する最大加速度，周波数，減衰比を Table3-19 で比較する．

Table 3-18 後頭部_ヘルメットの有無_z 軸

	ヘルメット無し	ヘルメット有り
最大加速度 (G)	100.68	14.484
周波数 (Hz)	321.54	117.31
減衰比	0.44	0.04

4 考察

4.1 予備実験

4.1.1 理論値との比較

予備実験の周波数を材料力学的な片持ち梁の理論式と比較するが、実際と違い、理論値を出す際は、アルミフレームの底部のみ固定していること、加速度センサーが取り付けられていることの影響は無視している。

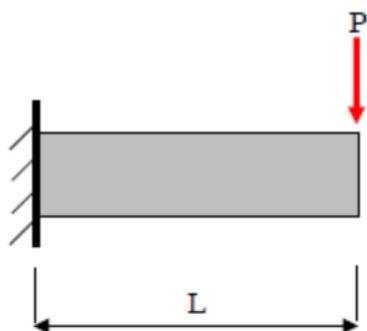


Figure 4-1 片持ち梁

長さ L のアルミフレームを上図のように固定し、図の P の位置に撃力を加える場合の周波数を考える。

片持ち梁の周波数の理論式は以下のとおりである。

$$f[\text{Hz}] = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

予備実験_1 か所固定, 予備実験_2 か所固定で用いている部材の違いは, L=280 mm か, L=300 mm かの違いのみである。用いるアルミフレームの λ , E, ρ , A の値を table4-1 でまとめる。

λ : 振動モード E: ヤング率 ρ : 密度 A: 断面積

Table 4-1 アルミフレーム材料特性

	アルミフレーム(20 mm*20 mm)
λ	1.875
$E[\text{N}/\text{m}^2]$	$70 \cdot 10^9$
$I[\text{m}^4]$	$7.4 \cdot 10^{-9}$
$\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$	$2.7 \cdot 10^3$
$A[\text{m}^2]$	$1.7 \cdot 10^{-4}$

上の表を基に周波数を計算すると、

$L=280 \text{ mm}$ のとき、

$$f = 250.19 \text{ Hz}$$

$L=300\text{mm}$ のとき、

$$f = 217.94 \text{ Hz}$$

となる。

この値と予備実験の x, z 軸方向加速度の周波数とを比較する。

予備実験_1 か所固定

Table 4-2 予備実験_1 か所固定_理論値との比較

理論値[Hz]	x 軸[Hz]	z 軸[Hz]
250.19	158.91	153.92

予備実験_2 か所固定

Table 4-3 予備実験_2 か所固定_理論値との比較 A

理論値[Hz]	x 軸[Hz]	z 軸[Hz]
217.94	216.92	223.71

Table 4-4 予備実験_2 か所固定_理論値との比較 B

理論値[Hz]	x 軸[Hz]	z 軸[Hz]
217.94	210.52	195.12

表から、加速度センサーA, Bともに大きなオーダーのずれはなく加速度の周波数を求める用途で使うことが可能であると判断できる。ただし、加速度センサー

B を用いたグラフを参照すると、加速度 0 の付近に点がプロットされていないことから、加速度センサー A に比べると正確な周波数測定とは言えないことがわかる。

4.1.2 衝撃対象物の固定方法

予備実験_1 か所固定では、アルミフレームをブラケットにて一か所のみ固定しているのに対し、予備実験_2 か所固定では、アルミフレームをブラケットにて 2 か所固定している。1 か所固定の場合はブラケットの振動数が大きく影響していると考え、固定の箇所を 2 か所にするこで固定を強化したところ、アルミフレーム自体の周波数に実験値が近くなった。



Figure 4-2 予備実験_2 か所固定_固定の様子

上図の□の部分でブラケットとアルミフレームとの固定部、▽の部分で鉄板とアルミフレームとの固定部で、x、yの矢印は加速度の軸方向を表す。

4.1.3 加速度センサーの固定方法

加速度センサーは接着剤（アロンアルファ）で固定した後、ガムテープで補強した。加速度センサーの取り付け方法に関する実験[8]では、接着剤にて取付けを行った場合、周波数 0~5000Hz の範囲では振幅が 0dB となっている。そのため、5000Hz 以内の振動実験を行う場合、接着剤にて加速度センサーを固定してもよいと考えられる。また、新保が行った研究[9]によると、およそ 2000Hz もの振動数を測る実験の際に部材をアロンアルファで固定している。今回の実験ではせいぜい 400Hz が上限なので、アロンアルファを接着材料として問題はない。

4.2 ひび割れによる影響

ひび割れの影響を見るために、最大加速度、周波数、減衰比の
ひび有り/ひび無し

の値を x 軸, z 軸ともに table4-5 に示す. これらの値は x 軸方向の方が z 軸方向より 1 から離れている, すなわち x 軸方向の方がひび割れの影響を強く受けていることがわかる.

マネキン底部に開けられた円孔およびひび割れは figure4-3 の通りである. 真ん中のねじ穴は商品にもともと加工されてあった穴であることに対して, 左右のねじ穴およびバカ穴は筆者が購入後に開けたものであり, 真ん中のねじ穴に比べて板厚が薄く, 強度も低い. ひび割れの形状は, 真ん中を中心として左右の円に接する 2 つの円を描いている. 真ん中のねじ穴にボルトを締めて手前方向 (x 軸方向) に引っ張ると, わずかだがたわみが生じる. ひび割れの入る前は, 全く変位は生じないため, ひび割れによってマネキン底部の x 軸方向バネ定数が小さくなったと考えてよい. さらに一方, 締めたボルトを上方向 (z 軸方向) に引っ張ると, 人の力では全く変位が生じない, すなわち z 軸方向バネ定数は x 軸方向に比べて変化していないことがわかる.

単振動の周波数は,

$$f[\text{Hz}] = 2\pi \sqrt{\frac{\text{質量}}{\text{バネ定数}}}$$

で与えられ, バネ定数が小さくなると周波数が大きくなる.

これは実験の傾向と一致している. すなわち, 今回は x 軸方向にたわみやすくなるようなひびが入ったことで x 軸方向へのひび割れの影響が大きかったと考えられる.

ただ, table4-5 を見るとわかる通り, 予備実験である程度正確に測定できていた周波数の値に注目すると, ひび割れ前後で致命的に大きい差があるわけではない. 以後の測定ではひび割れに進展がないように補強もしているため, ヘルメットの緩衝性能を議論するのに有効なデータが取れていると考えてよい.

Table 4-5 ひび割れの影響

	最大加速度	周波数	減衰比
x 軸	1.44	1.34	0.46
z 軸	1.18	1.03	0.50



Figure 4-3 ひび割れ

4.3 衝撃位置とヘルメットの緩衝性能

4.3.1 位置による緩衝性能の違い

緩衝性能を評価するにあたって、加速度の最大値を衝撃力とし、ヘルメットをした時としていない時における衝撃力の比を求めることで衝撃吸収率[10]を評価する。衝撃吸収率は以下の式で定義する。

$$\text{衝撃吸収率 (\%)} = 1 - \frac{\text{ヘルメットを装着した場合の衝撃力}}{\text{ヘルメットを装着しない場合の衝撃力}} \times 100$$

x, y, z 軸各方向について議論をすると、ボールと投射対象物の入射角がそれぞれ大きく影響するため、x, y, z 軸方向について実際に測定した加速度を合成した加速度（加速度 A と定義）を基に衝撃力の計算をし、緩衝性能について議論をする。加速度 A は以下の式より求める。

$$(\text{加速度 A}) = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

A の値から衝撃吸収率を求め、table4-6 にまとめる。

また、実際にヘルメットが吸収した加速度を衝撃力差分として表にまとめる。実

験__前頭部の時はボールと投射対象との距離は 900 mm, 実験__側頭部および後頭部の時は 850 mm であった。撃力を考えると, 前頭部の加速度は実際の加速度に,

$$\frac{850 \text{ mmの時の速さ}}{900 \text{ mmの時の速さ}}$$

をかける。そこで, エネルギー保存則より,

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

を用いると, 投射対象にボールが衝突する直前の速さは実験__側頭部の時の

$$\sqrt{\frac{850}{900}} = 0.97 \text{ 倍}$$

となる。

Table 4-6 加速度 A を基にした緩衝性能

	前頭部	側頭部	後頭部
ヘルメット無し 加速度 A (G)	98.47	92.24	139.82
ヘルメット有り 加速度 A (G)	12.10	18.33	16.69
衝撃吸収率%	87.72	80.12	88.06
衝撃力差分 (G)	83.77	73.91	123.13

一般的な作業用のヘルメットの場合, 衝撃吸収率は 46.0%である[10]のに対し, アメリカンフットボールのヘルメットは最低値でも 80%と, 非常に高い緩衝性能を示した。

ここから, 投射位置による緩衝性能の違いについて議論する。衝撃吸収率の大小を比較すると,

$$\text{側頭部} < \text{前頭部} < \text{後頭部}$$

となる。

したがって, 側頭部が最も緩衝性能が低く, 後頭部が最も緩衝性能が高いことが分かった。ヘルメット内部の緩衝材の大きさはすべて等しいので, ヘルメット自

体の緩衝性能はどの地点でも同じのはずにもかかわらず，このように緩衝性能の大小関係がつく原因について以下では考察する。

マネキンにヘルメットを固定するときは，チンベルト (figure4-4, 4-5 の顎あてから出ている紐) によって固定するが，チンベルトはその構造から明らかなように，頭全体を均一な力で締め付けるわけではない．そこで，チンベルトでの固定により，ヘルメット内部の緩衝材の圧力が位置によって変化することに注目する．そこで実際に，前頭部，側頭部，後頭部を守るための衝撃吸収材が，チンベルトを締めることによってどのように変化するかを見てみる．

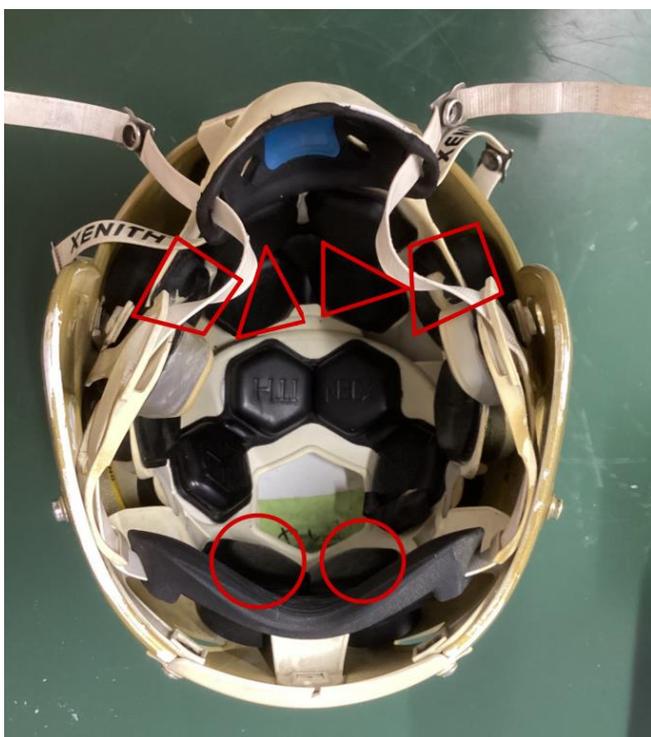


Figure 4-4 緩衝材__チンベルト無し



Figure 4-5 緩衝材_チンベルト有り

前頭部の保護をしている緩衝材は上図の△，側頭部の保護をしているのは□，後頭部の保護をしているのは○である．チンベルトを締めた前後での△同士，□同士，○同士の距離を測る．すると table4-7 のような結果になった．

Table 4-7 ヘルメットの圧縮

	前頭部	側頭部	後頭部
締める前[cm]	10.0	15.5	10.0
締めた後[cm]	9.5	11.0	10.0

となった．このことから，チンベルトを締めた時に緩衝材にかかる圧力は，
後頭部<前頭部<側頭部

となっている．ゆえに，緩衝材にかかる圧力が高い，すなわち圧縮が強いほど緩衝性能が低いとすることができれば，ヘルメットの位置による緩衝性能の違いを系統的に説明することができる．

4.3.2 圧縮による緩衝効果への影響

次に，ヘルメットの緩衝材を用いて，緩衝材にかかっている圧力が緩衝性能にどのように影響を及ぼすかを調べた．figure4-6 に示す装置には，先端にヘルメット内部の緩衝材がついてい 300 mm アルミフレームが取り付けられている．緩衝材は figure4-7 ように圧縮が弱い場合と，figure4-8 のように圧縮の強い場

合の 2 種類を用いて加速度を測定する。



Figure 4-6 実験装置



Figure 4-7 圧縮_弱い



Figure 4-8 圧縮_強い

Table 4-8 計測器

固定方法	ブラケット, ボルト・ナット, ガムテープ
投射対象と上部パイプとの距離	190 mm
加速度センサー	A

以下に得られた時刻歴波形を圧縮が弱いとき, 強いとき一つずつ示す

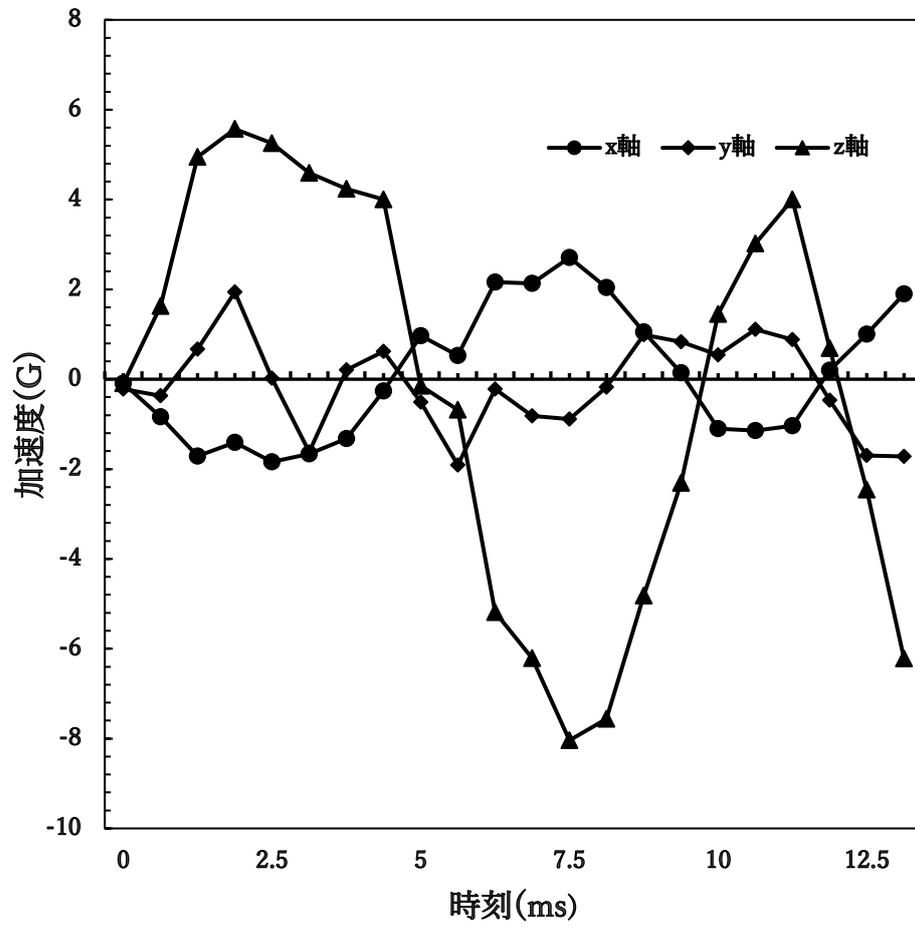


Figure 4-9 圧縮_弱い_波形

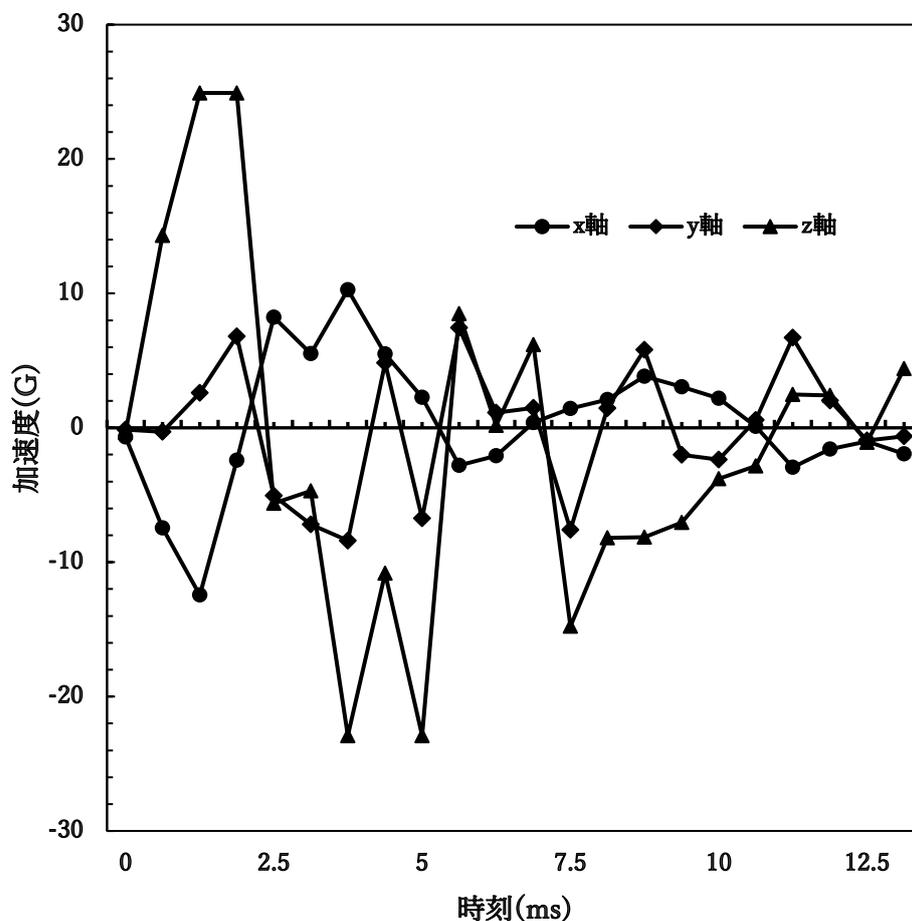


Figure 4-10 圧縮_強い_波形

ボールの落下方向である z 軸の最大加速度と周波数の平均値を以下の表にまとめる。

Table 4-9 圧縮_データ

	圧縮_弱い	圧縮_強い
最大加速度[G]	7.78	23.91
周波数[Hz]	103.19	190.47

加速度センサーA は 23.91 G が測定しうる加速度の上限であるが故、圧縮が強い場合の加速度の最大値の minimum が 23.91 G である。

表を見ると、圧縮が弱いときの方が強いときに比べて緩衝性能が高いことが分かった。

したがって、ヘルメットの内部で圧力が高ければ高いほど緩衝材の圧縮が進み、ヘルメットの緩衝性能も低くなると考えられる。4.3.1 項から得られた2つ

の不等式と併せると、緩衝性能の差異は、ヘルメットの締め付け力の差異によって説明できる。

実際のアメリカンフットボールの現場に落とし込むと、ヘルメットの側頭部でコンタクトが起こるケースの多くは、相手と真正面からぶつかる時、コンタクトの瞬間恐怖心から顔をよけた結果起こる。顔をよけながら当たることは、先行研究②から、バーナー症候群になりやすいという理由で推奨されていない。しかし、今回の研究でそもそもヘルメットの最大加速度の緩衝効果の観点からも頸部外傷を負うリスクが高くなることがわかった。

4.3.3 ヘルメットの周波数への影響

最も特徴的であった周波数のデータは、table4-14 である。他のデータでは必ずヘルメットを着けた方が周波数は小さくなり、周波数の面からも外傷のリスクを軽減する[9]効果が認められたが、側頭部の z 軸に限り、ヘルメットを着けた方が周波数の増加が見られた。各実験で得られたヘルメットの有無による周波数の比較を以下の table4-10 に示す。

次に、緩衝材が周波数に与える影響を調べるために以下の実験を行う。figure4-6 から緩衝材を取り除いて (figure4-11) 衝突実験を行い、周波数を調べる。この実験から得られた z 軸方向の周波数と、緩衝材を取り付けた時の周波数 (table4-9) とを比較する。3 者の比較は table4-10 の通り。

Table 4-10 ヘルメットの有無による周波数比較

周波数[Hz]		ヘルメット無し	ヘルメット有り
前頭部	x 軸	207.03	123.15
	z 軸	263.15	101.52
側頭部	x 軸	192.30	120.00
	z 軸	186.21	234.19
後頭部	x 軸	253.16	157.23
	z 軸	321.54	117.31



Figure 4-11 緩衝材無し

この時の実験規格は table4-11 の通り.

Table 4-11 測定器

固定方法	ブラケット, ボルト・ナット, ガムテープ
投射対象と上部パイプとの距離	190 mm
加速度センサー	A

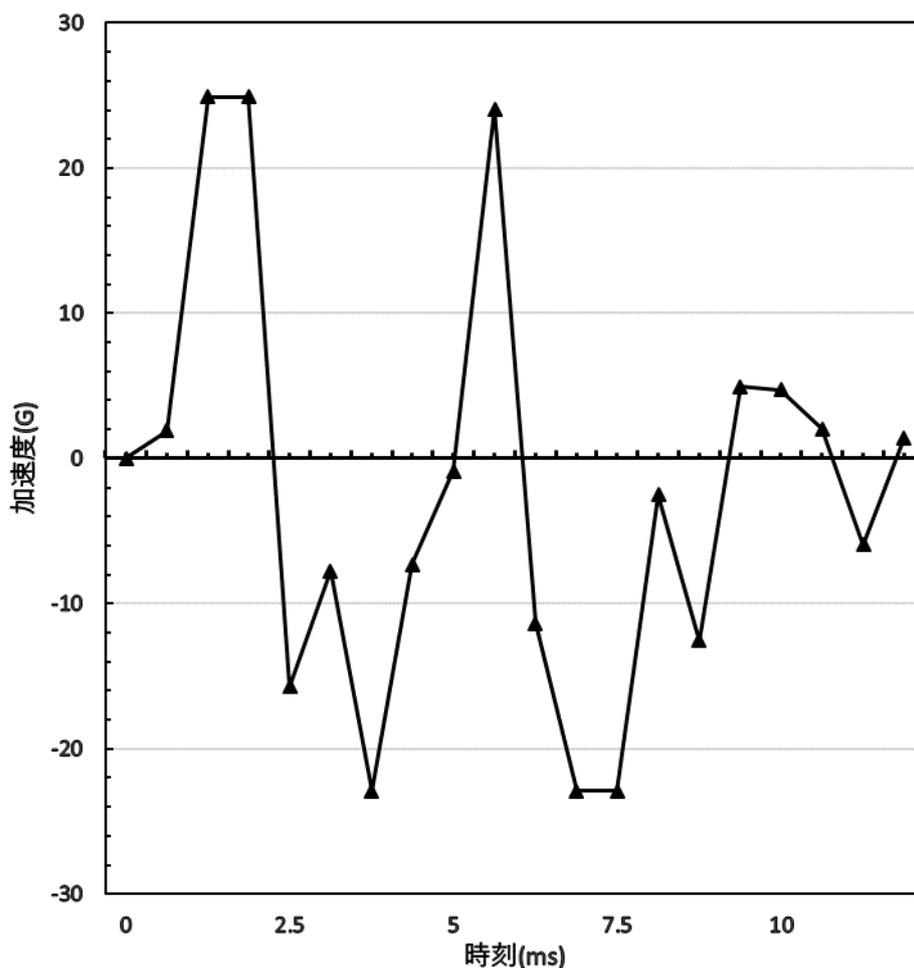


Figure 4-12 緩衝材無し_z 軸波形

Table 4-12 緩衝材有無比較

	圧縮_弱い	圧縮_強い	緩衝材無し
周波数[Hz]	103.19	190.47	219.17

このように、緩衝材を強く巻いている場合の方が緩衝材を着けていない時より周波数が低くなった。緩衝材の内圧が上がるにつれて周波数は高くなるとは考えられるが、緩衝材をきつく着けることで振動数が緩衝材のない場合より上がるということとはできない。

今回、実験_側頭部_ヘルメット有りの時、他のケースと比べてボールがこすれるようにヘルメットと衝突しているようにも見え、それによって振動数が上がった可能性はあるが、ボールの入射角と反射角、当たり方による振動数の変化はわからないため、今回の実験段階では、実験_側頭部_ヘルメット有りの時に限り振動数が上がった原因についてはわからない。

4.4 頭部衝撃の位置と頸部加速度センサーとの位置関係

頭部マネキンおよびヘルメットは、前頭部から後頭部にかけての方向を「縦」としたとき、縦長の構造になっている。そこで、ヘルメットの前頭部からセンサーまでの距離、後頭部からの距離、側頭部からの距離を比較する。正確な距離は測れないため、ヘルメットの縦横の長さを測ると、横幅は約 22.7 cm、縦幅は約 27.0cm となっている。このことから、側頭部からセンサーまでの距離は、前頭部・後頭部からセンサーまでの距離に比べて短いことがわかり、このことがヘルメットの頸部への緩衝性能に影響が出ていると考えられる。

5 結論と課題

5.1 結論

今回の研究にて前頭部・側頭部・後頭部間の加速度の緩衝性能を調べたところ、後頭部の緩衝性能が最も高く、次いで前頭部、次いで側頭部となることが分かり、さらにその緩衝性能の差は内部の緩衝材が、ヘルメット内部圧力が変化したことによって生じていることも併せてわかった。ヘルメットは衝突位置により最大加速度に対する緩衝性能が変化し、また、ヘルメットには加速度の周波数を低くする性質があることも分かった。

5.2 課題および展望

マネキンにひびが入ったことにより、測定対象物の材料特性および実験の拘束条件を一貫させることができなかった。また、実際のアメリカンフットボールのコンタクトにおいて頭頸部が完全に固定されることはなく、頸椎捻挫などは首が持っていられることによって生じる。先行研究②の図からもわかる通り、首が持っていられる時は頸椎の下部よりも上部（頭部に近い方）が持っていられることによっておこる。すなわち、頸椎の場所によって加速度は変わる。そのため、マネキンを用いたとしても頸部の様々な位置の加速度を測るとより様々な情報が得られたと思われる。ただ、各頸椎関節の加速度を詳細に求めるのはマネキンでは不可能で、実人体の頭頸部を模したものでなければならない。

さらに、日本では一般的には頸部の衝撃評価を行う場合、T1（第一胸椎）に対する頭部回転角(HA-TA)が頸部障害に大きく影響していることから、T1と頭部重心の相対速度、相対加速度によって算出される頸部障害基準(NIC)という指標が用いられる。また、米国では、頸部障害は衝突時の各頸椎間の相対運動が生理的限度を超えた時に発生するという仮説を基にIV-NICという、生理可動域に対する衝撃時の相対椎体間の動きの比率で定義される指標をもちいている。実人体に近い模型を使った場合、NICやIV-NICといった指標を基に評価していくとさらに詳細かつ正確なデータが得られる[11]。

また、本研究では実験装置のサイズの都合上、フェイスガードを外しての実験となったが、本来ならばフェイスガード部分にも衝撃吸収能力があるため、フェイスガードを着けたうえで実験を行うべきである。

6 参考文献

- [1]西村 忍, “アメリカンフットボール現場における脳震盪の管理について—現場における緊急対応フローチャートの提案—”. スポーツ健康科学紀要, 2013, pp.7-18.
- [2]L. Kucera, K. et al., *ANNUAL SURVEY OF FOOTBALL INJURY RESEARCH*. National Center for Catastrophic Sport Injury Research. 2021
- [3]Torg, J. S. et al., "*Injuries to the Cervical Spine in American Football Players*". The journal of Bone & Joint Surgery. 2002.
- [4] Andrew Post, et al., “Evaluation of the protective capacity of baseball helmets for concussive impacts”, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 19:4, pp.366-375,
- [5]西村 忍, “大学アメリカンフットボール選手のバーナー症候群 既往歴と頸

部画像所見との関係について”。スポーツ健康科学紀要，pp.7-18.

[6] <https://www.oita-kotsujiko.com/muchiuchi/>

[7] <https://www.toyo.co.jp/mecha/casestudy/detail/id=12950>

[8]新保栄一，振動試験における接合要素に関する調査研究，

[9]富岡 良平，ほか4名，“硬式野球用ヘルメットの緩衝性能に及ぼすライナー材料の影響”，The Japan Society of Mechanical Engineers

[10]小山 憲路，他1名，“頭部衝撃試験機による頭部保護帽の衝撃吸収性能”，労災リハビリテーションセンター，2006. 11. 15

[11]中島 太一 他2名，“ヘッドレスト評価試験における頸部傷害低減性能基準の検討”，自動車技術会論文集，2017, Vol.48, N0.2+