

## 衝撃を抑制する段差の形状

### The shape of curb that will suppress the shock from curb

合田 陽晴

田村 駿希

GODA Yosei

TAMURA Shunki

#### 1 要旨、概要

学校に自転車で通学している時、車道と歩道の間にある段差を通過する際に、その段差から受ける衝撃により自転車が上下に揺れて、前かごに入れていた荷物を落として破損させてしまったことがある。このような被害を減らしたいと思い、この研究を始めた。

自転車で段差を通過する際、自転車が段差に衝突して、段差に力を及ぼす。同時に、作用・反作用の法則により、自転車も段差から力を受けて、それが衝撃となる。その衝撃に関係する要素としては、「段差の形状、段差の大きさ、自転車が段差を通過する時の速さ、自転車および運転手の重さ、自転車および運転手全体の重心の位置、自転車のこぎ方、タイヤの空気圧、タイヤの素材」などが考えられる。これらの中で、我々は段差の形状に注目して、衝撃を最も抑えられる形状を調べる研究を行った。

まず予備実験として、参考文献から得た、段差の衝撃の大小は加速度を用いて比較可能かどうかを検証した（予備実験Ⅰ）。その結果、確かに加速度を用いて比較可能と分かったので、本実験ではこの方法で衝撃を測定することにした。

次に実際に自転車をこいで実験をする際、段差を通過する時の速さを一定に保つことが困難であるため、まずは力学台車を用いて、段差入射速度と衝撃にどの程度関係があるのかを調べた（予備実験Ⅱ）。その結果、速さが大きくなるにつれて衝撃も大きくなったため、段差入射速度は無視できない要素として常に測定する必要があることが明らかとなった。

本実験ではまず、形状の異なる5種類の段差（3Dプリンタを用いて自作）と、通学で使用している自転車を使って、段差の形状と衝撃の関係を調べた（実験Ⅰ）。この実験では、段差入射速度も測定し、実験回数を多くして、さまざまな速度のデータを集めた。そして段差の形状別に、段差入射速度と衝撃（上下方向の加速度）の関係をグラフにした。その結果、最も衝撃を抑制する段差の形状は三角形型であることが分かった。

これは予想に反する結果であった。実験前は、地面と歩道をなめらかに結ぶ曲線（後述するが波型）が最も衝撃を抑えられる形状であると考えていた。そこで、なぜ三角形型が最も衝撃を抑制できたのかを調べるため、自転車が段差を通過している時の自転車のタイヤの様子をハイスピードカメラで撮影して分析を行った。その結果、三角形型の段差を通過する際にタイヤのへこみが最も小さくなっていることが分かった。

我々の予想が外れた原因はタイヤを弾性体として考えていなかったためだと分かり、最後にタイヤに注目して、タイヤの空気圧と段差の衝撃の関係を調べた（実験Ⅱ）。その結果、タイヤの空気圧が高くなるほど、反発力は大きくなり、衝撃は大きくなった。

結論は、以下の3点である。

1. 段差の形状は三角形型が良い。
2. 三角形型以外の段差を通過する際は、特にスピードを落とすべき。
3. タイヤは適正空気圧にするべきだが、空気を入れすぎてしまった状態で段差を通過する際は特に衝撃が大きくなるため、スピードを落とすべき。

#### 2 研究目的

自転車で段差を通過する際に、段差が自転車の前かごに及ぼす衝撃が小さい段差の形状を明らかにすること。

また、自転車が段差を通過する際の速さや、自転車のタイヤの空気圧が段差に及ぼす影響等も調べ、日常生活で活かせる結論を導くこと。

#### 3 研究方法

〈実験にあたって参考にした情報〉

参考文献Ⅰ：「自転車走行時の車体および人体への段差の影響」

長野県短期大学 加藤 麻樹 下平 佳江

- ・段差の衝撃の大小は、鉛直方向の加速度を用いて比較することができる。
- ・身体による吸収動作がはたらくため、頭頂部の衝撃は軽減される。

参考文献Ⅱ：「歩道等（歩道及び自転車歩行者道）基本的考え方」

石川県 土木部 建築住宅課

- ・段差の形状は、高さ 2cm、横 20cm を推奨する。

参考文献Ⅱで得られた条件の元で、斜面となる部分の形状をいくつか考え、3D プリンターで設計し、5 種類の段差を作製した。段差の形状自体については後述する。

#### 〈実験機材〉

- ① センサー内蔵の力学台車「スマートカート」  
タブレットやパソコンで、力・速度・加速度・距離（位置）に関する実験をワイヤレス（Bluetooth）で行うことができる。株式会社 島津理化が販売している。
- ② 速度センサー  
上部から LED の光を放ち、下部で光を受け取る仕組みで、物体がセンサーを通過中に光を遮る時間から速さを求めることができる。香川県理化部会物理研究班 村尾美明先生が製作した。

#### 〈作成した段差について〉

- ① 三角形型  
両端を直線で結んだ形状の段差である。
- ② もっこり型  
両端を上凸な滑らかな曲線で結んだ形状の段差である。曲線の頂点が一方の端と一致するように設計した。
- ③ 逆もっこり型  
両端を下凸な滑らかな曲線で結んだ形状の段差である。曲線の頂点が一方の端と一致するように設計した。
- ④ 台形型  
三角形型の斜面部分を短くした形状の段差である。傾斜角が三角形型よりも大きくなっている。
- ⑤ 波型  
低いほうの端から中間までは下に凸な曲線で、中間から高いほうの端までは上に凸な曲線で結んだ段差である。地面と段差の傾きの変化を小さくすることを狙いとしたが、そのような形状の段差を 3D プリンターで設計することが難しく、作製したものは中間部が地面に対してほぼ垂直な形状となってしまった。  
※作成した段差のイメージは、図 1

**予備実験Ⅰ**：自転車を使って、鉛直方向の加速度を用いて、衝撃の大きさを比較できるかを調べる。

〈準備物〉

自転車（ALBELT）、加速度センサー（スマートカート）、パソコン（データ処理用）、学校の音楽科棟前にある段差

\*学校の段差は高さが 10cm、3cm の段差で実験を行い、10cm 段差の衝撃が 3cm の段差の衝撃より大きいことは明らかとする。

〈方法〉

- ① 自転車のサドル部分にスマートカートを取り付ける。  
（この実験をした時は、「前かごの衝撃を抑える段差の形状を調べる」という研究目的がまだ確立していなかったため、サドルに取り付けている。）
- ② 立ちこぎで段差の上を通過し、そのときの鉛直方向の加速度の変化を調べる。サドル部分にスマートカートを取り付けていたため、立ちこぎをした。

**予備実験Ⅱ**：スマートカートを使って、段差を通過する時の速さと衝撃（鉛直方向の加速度）の関係を調べる。

〈準備物〉

力学台車・速度センサー・加速度センサー（スマートカート 1 台でこれらの役割を果たす）、パソコン（データ処理用）、斜面（物理実験で使うアルミ製のもの）、段差（斜面と水平面の間でできた溝を段差とみなす）

〈方法〉

- ① 傾斜角一定の斜面上を、スマートカートのスタート位置を変えることによって段差入射速度を変えて走らせる。
- ② それぞれの段差入射速度に応じた、鉛直方向の加速度を計測する。

**実験Ⅰ**：自転車を使って、段差の形状と段差の衝撃の関係を調べる。

〈準備物〉

自転車（ALBELT）、5 種類の段差（3D プリンターを用いて自作）、段差の高さに合わせるためのベニヤ板 3 枚、速度センサー（村尾美明先生が製作）、加速度センサー（スマートカート）、パソコン（データ処理用）

〈方法〉

- ① スマートカートを自転車の前かごに固定する。

- ② 自転車をこいで、作成した段差の上を通過する（自転車をこぐ人はいつも同じ）。  
段差を通過するとき、
- ・段差の直前に設置した速度センサーで段差入射速度を測定
  - ・前かごに設置したスマートカートで鉛直方向の加速度を測定
- ③ 自転車をこぐ速さを調整し、日常生活で実際に起こりうる範囲内（約 1.5 m/s ～ 2 m/s）の様々な速さで実験する。
- ④ 段差の種類を変えて、①～③の手順を繰り返す。

\*自転車の適正空気圧について

自転車のタイヤ側面に適正空気圧が記載されている。実験に用いた自転車の適正空気圧は 3bar であったため、実験は 3bar で行った。

**実験Ⅱ：**自転車のタイヤの空気圧と段差の衝撃の関係を調べる。

<準備物>

自転車 (ALBELT)、「もっこり型」の段差 (3D プリンタを用いて自作)、段差の高さに合わせるためのベニヤ板 3 枚、速度センサー (村尾美明先生製作)、加速度センサー (スマートカート)、パソコン (データ処理用)、自転車用空気入れ (空気圧のメーター付き)

<方法>

- ① スマートカートを自転車の前かごに固定する。
- ② 自転車をこいで、作成した段差の上を通過する（自転車をこぐ人はいつも同じ）。  
段差を通過するとき、
- ・段差の直前に設置した速度センサーで段差入射速度を測定
  - ・前かごに設置したスマートカートで鉛直方向の加速度を測定
- ③ 自転車をこぐ速さを調整し、日常生活で実際に起こりうる範囲内（約 1.5 m/s ～ 2 m/s）の様々な速さで実験する。
- ④ タイヤの空気圧を変えて、①～③を繰り返す。タイヤの空気圧は、低いほうから順に、1.8 bar、2 bar、2.5 bar、3 bar、3.5 bar、4 bar、4.5 bar で実験を行った。

## 4 結果

**予備実験Ⅰ：**自転車を使って、鉛直方向の加速度を用いて、衝撃の大きさを比較できるかを調べる。

<結果>

各段差において、前輪後輪がそれぞれ段差を越えたとき、鉛直方向の加速度が大きく変化した。また、その値は 10cm の段差の方が 3cm の段差よりも大きかった (グラフ 1・2)。

**予備実験Ⅱ：**スマートカートを使って、段差を通過する時の速さと衝撃 (鉛直方向の加速度) の関係を調べる。

<結果>

実験は 17 回行い、どの実験においてもグラフの形状は同じであった。斜面を下っているときは、等加速度直線運動なので、 $v-t$  グラフは右上がりの直線である。段差を越えるとき、鉛直方向の加速度が大きく変化した (グラフ 3・4)。また、段差を通過する時の速さが大きい時、衝撃も大きくなった。

**実験Ⅰ：**自転車を使って、段差の形状と段差の衝撃の関係を調べる。

<結果>

それぞれの段差において、実験を 5～10 回繰り返したところ、どの実験でも同様のグラフが得られた。まず段差にさしかかったとき、上方向の加速度が大きくなり、その後下方向の加速度が大きくなった (グラフ 5・6・7・8・9)。

**実験Ⅱ：**自転車のタイヤの空気圧と段差の衝撃の関係を調べる。

<結果>

それぞれの段差において、実験を 5～10 回繰り返したところ、どの実験でも同様のグラフが得られた。まず段差にさしかかったとき、上方向の加速度が大きくなり、その後下方向の加速度が大きくなった (グラフ 10・11・12)。

## 5 考察

**予備実験Ⅰ：**自転車を使って、鉛直方向の加速度を用いて、衝撃の大きさを比較できるかを調べる。

<考察>

3cm の段差より 10cm の段差の方の衝撃が大きいことは明らかであり、グラフより、衝撃が大きい方が、鉛直方向の加速度の振幅は大きくなっていることから、加速度を用いて衝撃の大きさを比較することは可能と言える。

**予備実験Ⅱ**：スマートカートを使って、段差を通過する時の速さと衝撃（鉛直方向の加速度）の関係を調べる。

<考察>

段差を通過する時の速さが大きくなるにつれて、スマートカートが受ける衝撃は大きくなった。また段差入射速度が速い時は後輪が、遅い時は前輪がより衝撃を受けることが分かった（グラフ 13）。

**実験Ⅰ**：自転車を使って、段差の形状と段差の衝撃の関係を調べる。

<考察>

段差入射速度が大きいほど、衝撃は大きいことが分かる（グラフ 14）。「三角形型」が最も衝撃を抑えられていた。「台形型」は一種の「三角形型」とみなせるが、「三角形型」に比べて衝撃が大きくなったのは、傾斜角が大きいことが影響したと考えられる。

段差の形状によって衝撃の大きさに違いがみられた理由を探るため、ハイスピードカメラを用いて、動画解析を行った（図 2）。それぞれの段差において、タイヤが最も凹んだときのタイヤの様子を調べた。段差上でタイヤが最もへこむ位置は、形状により異なることが分かった。衝撃を最も抑えられていた「三角形型」を通過するとき、段差上でのタイヤのへこみ具合は一定で、また、他の段差に比べて最もへこみが小さかった。衝撃が大きかった「波型」や「もっこり型」、「逆もっこり型」においては、大きくタイヤがへこむ位置があり、タイヤのへこみ具合は「三角形型」に比べて大きかった。

そこでへこみと衝撃の関係について考察した。まず、へこみが大きいほど、タイヤと段差の接地面積が大きくなる。圧力と面積の積は力なので、空気圧が一定の時、接地面積が大きいほど地面により大きな力を与え、その反作用で、より大きい反発力を受ける。運動方程式より、自転車と人の質量は一定なので、反発力が大きいほど加速度すなわち衝撃が大きくなったと考えられる。

\* グラフの線分は右上がりの傾向を示すための補助線であり、直線で近似できるとは考えていない。

\* 上下方向の加速度とは、鉛直方向の加速度の最大値と最小値の絶対値の和である。

**実験Ⅱ**：自転車のタイヤの空気圧と段差の衝撃の関係を調べる。

<考察>

データ数が少なくばらつきが多いが、おおよそ空気圧が低いほど、衝撃は小さくなった（グラフ 15）。空気圧が大きいほど接地面積は小さくなる。 $(\text{圧力}) \times (\text{面積}) = (\text{力})$  の関係と、空気圧が大きい程、衝撃が大きくなったことから、タイヤと段差の接地面積よりも、タイヤの空気圧の方が、衝撃に及ぼす影響は大きいのではないかと考えられる。

## 6 結論（課題）

段差を通過する時の速さがほぼ同じ時で比較した場合、我々が作製した 5 種類の中で最も衝撃を抑制する段差の形状は「三角形型」である。今後、道路に段差を作る業者には、ぜひ「三角形型」で作製していただきたい。また、どの形状の段差においても、段差を通過する時の速さが大きくなるにつれて、衝撃は大きくなったので、段差を通過する際はスピードを落とすべきである。更に、タイヤの空気圧は下げた方が衝撃は抑えられるが、タイヤには適正空気圧が記載されているため、それに従うべきである。

### 課題・反省

- ・人が自転車をこぐ実験方法なので、より試行回数を増やし、データ数を増やす必要がある。
- ・段差に対して垂直に上る実験しか行っていないため、日常生活で活かせる結果を導くためには、段差を下るときや、斜めに上り下りする場合の実験も行う必要がある。
- ・「波型」は形状がいびつな物しか作製できなかった。傾きの変化が小さい波型はより衝撃を抑えられると予想できるため、よりなめらかな「波型」を作製する必要がある。
- ・タイヤがへこまない仮定した時の理論上の衝撃の大きさを算出し、へこまないタイヤを作製してそれを用いた実験ができれば、実験Ⅰの考察を深めることができる。

## 7 参考文献

### ・参考文献 I

「自転車走行時の車体および人体への段差の影響」

長野県短期大学 加藤 麻樹 下平 佳江

### ・参考文献 II

「歩道等（歩道及び自転車歩行者道）基本的考え方」

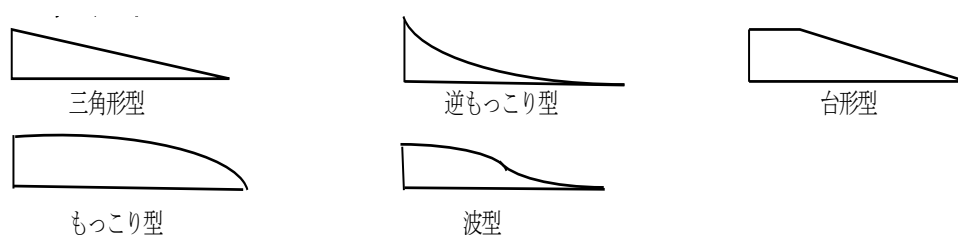
石川県 土木部 建築住宅課 ホームページ

## 8 謝辞

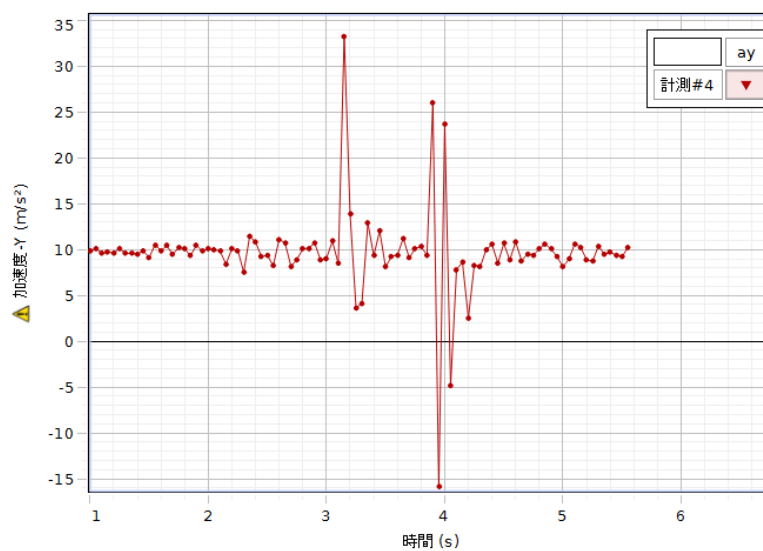
この研究にあたって指導して下さった本田一恵先生をはじめ、高松第一高等学校の先生方、ありがとうございました。

## 9 図表・画像

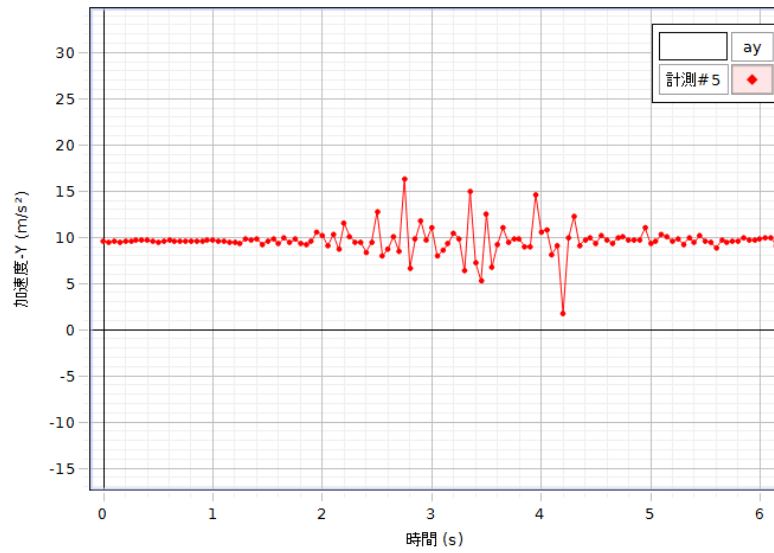
図1 段差の形状



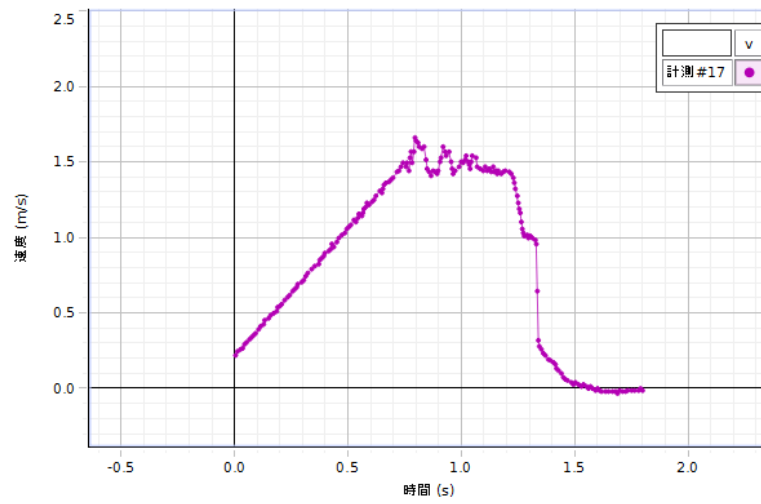
グラフ 1  
段差 10cm



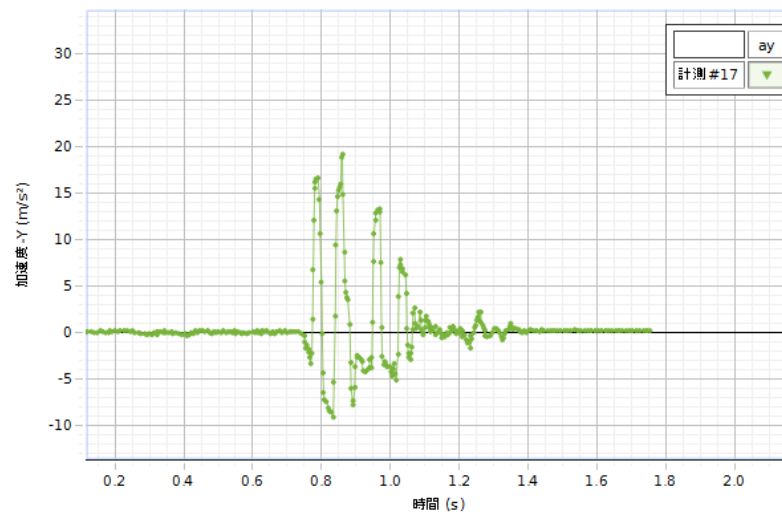
グラフ 2  
段差 3cm



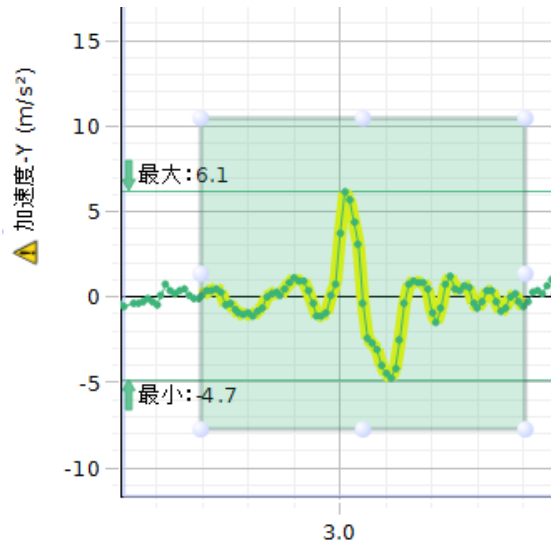
グラフ 3  
 $v-t$  グラフ



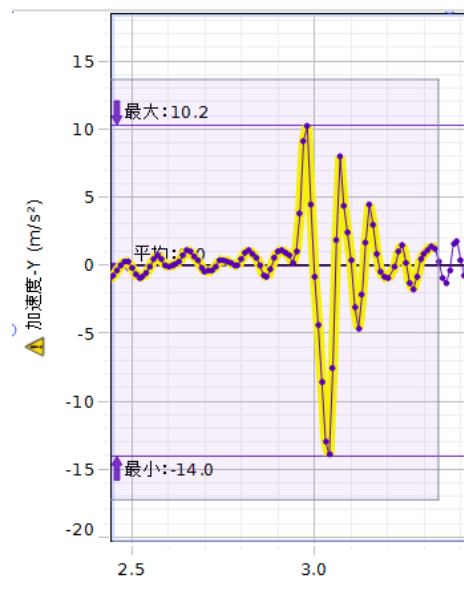
グラフ 4  
鉛直方向の  
 $a-t$  グラフ



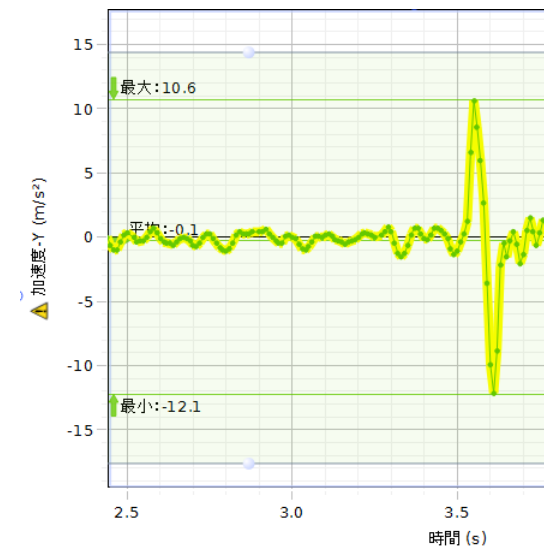
グラフ 5  
三角形型



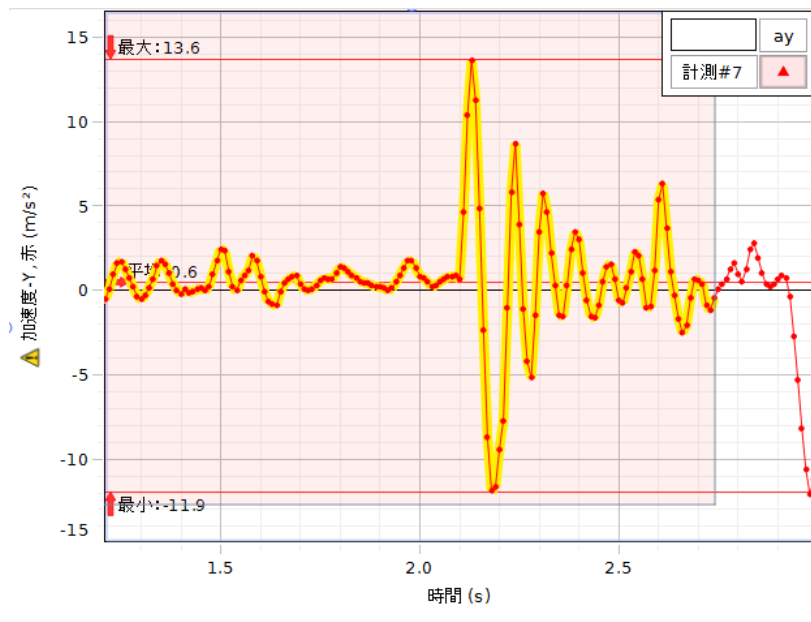
グラフ 6  
もっこり型



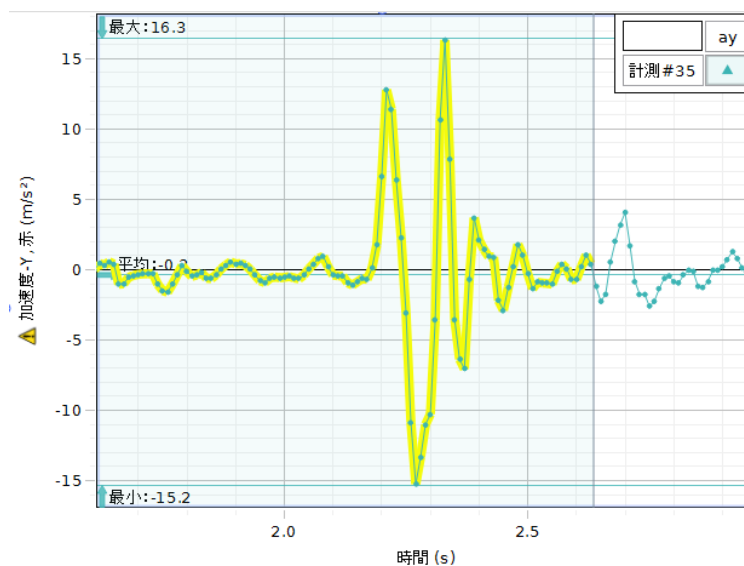
グラフ 7  
逆もっこり型



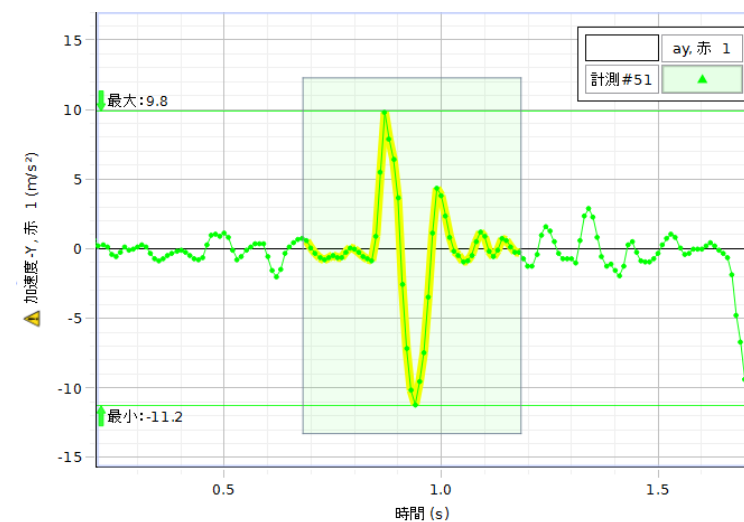
グラフ 8  
台形型



グラフ 9  
波型

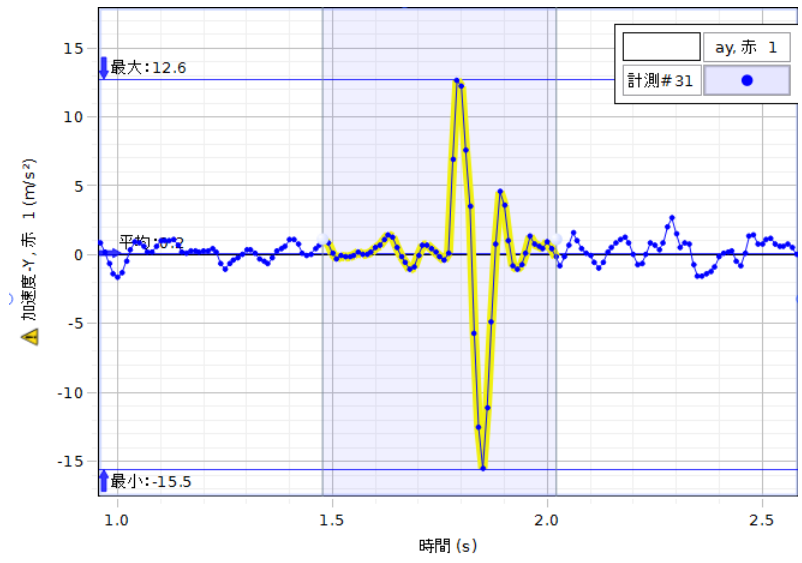


グラフ 10  
1.8 bar

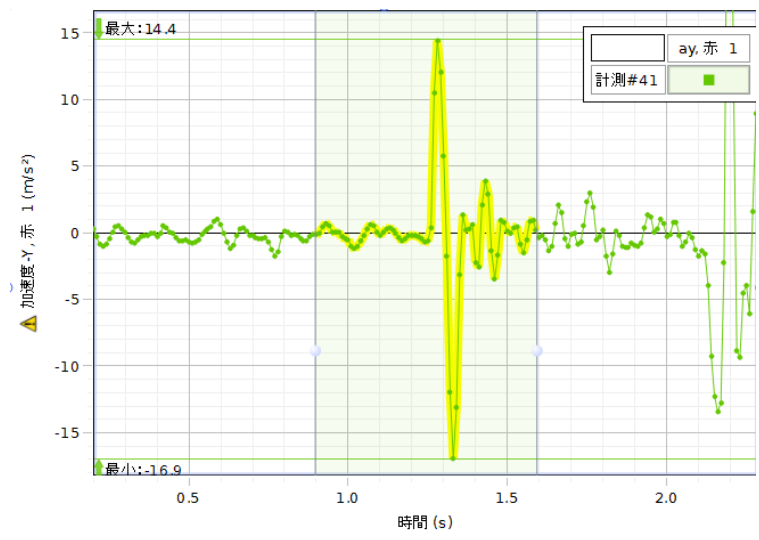




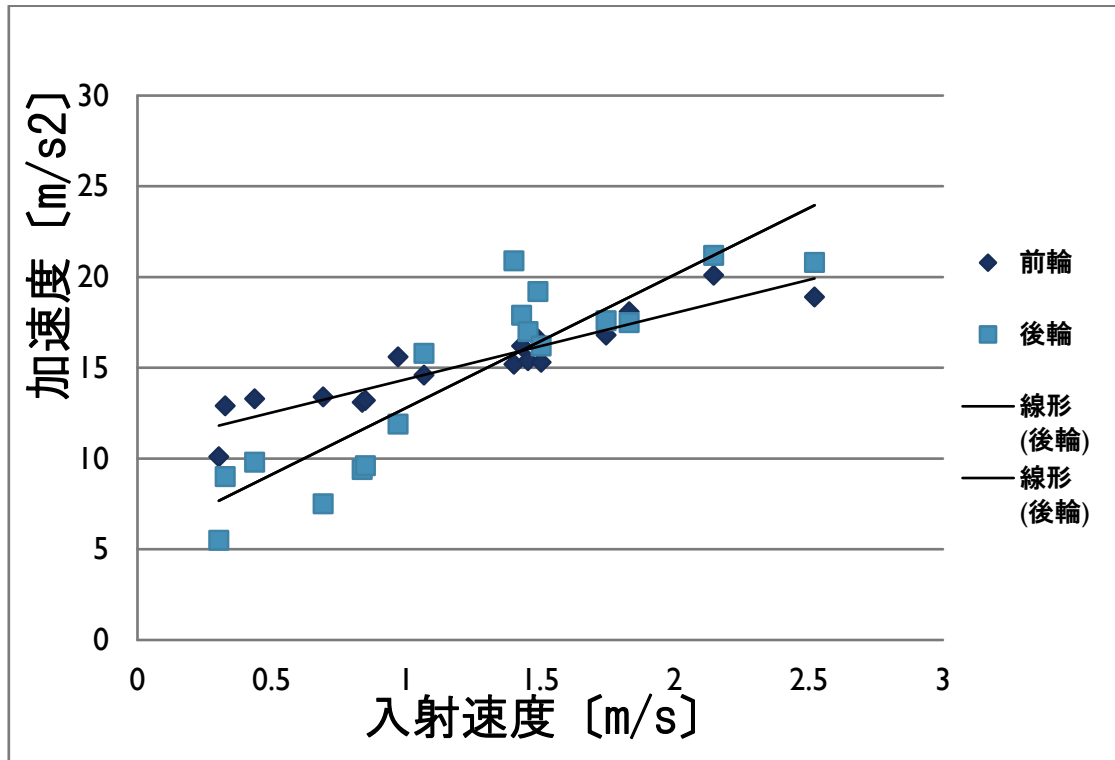
グラフ 11  
3.0 bar



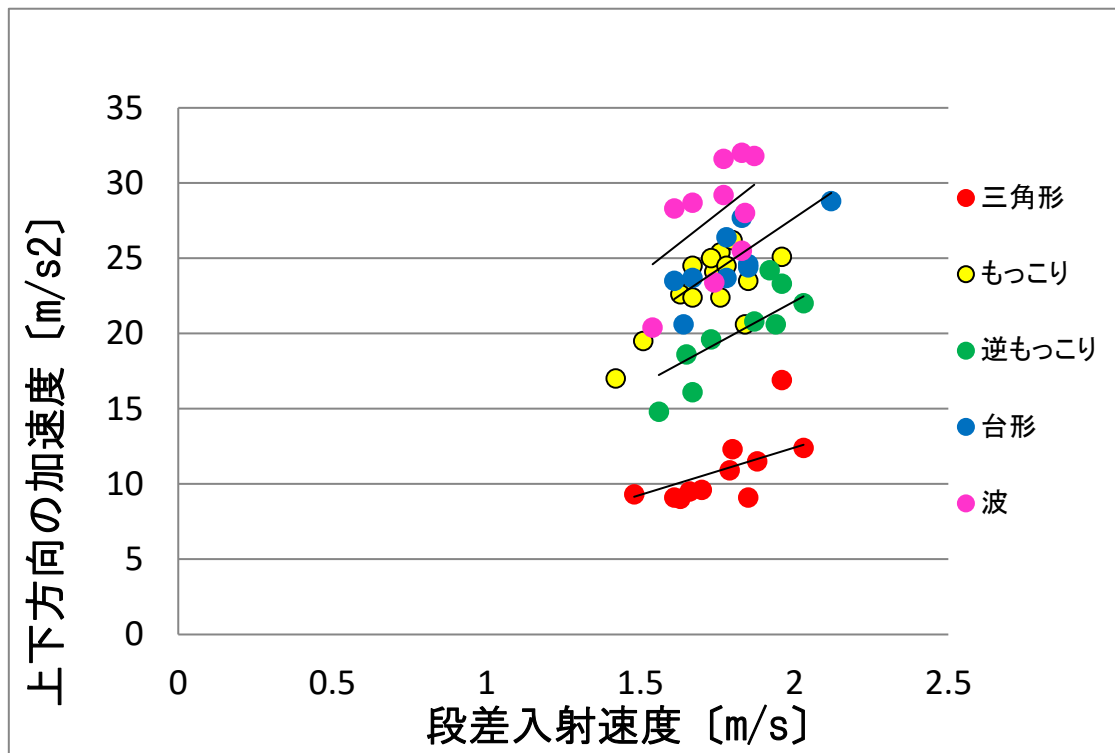
グラフ 12  
4.0 bar



グラフ 13



グラフ 14



グラフ 15

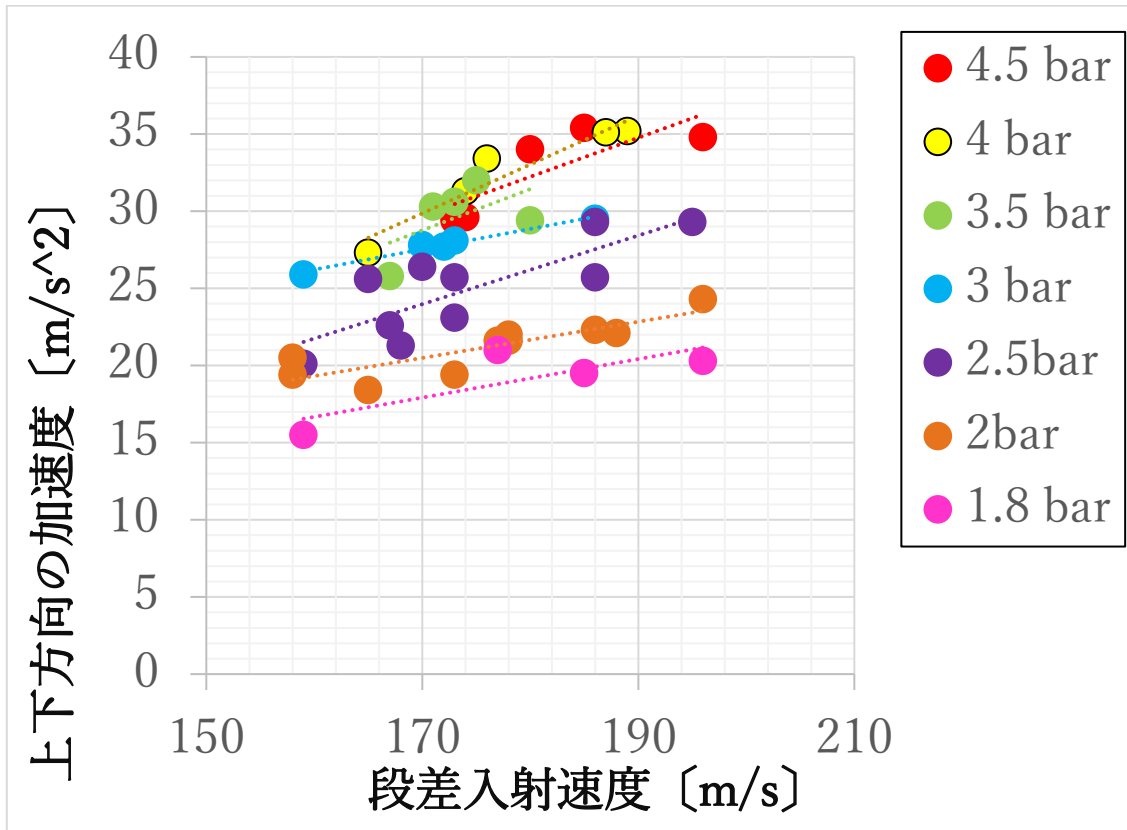


図 2 動画解析の際に用いた画像

三角形型



もっこり型



逆もっこり型



台形型



波型

