

全日本学生フォーミュラ ダンパー基礎講座

2022.12.17

蘓武新吾（株式会社アネブル）



株式会社アネブルの紹介



- ◆エンジン／モーター試験
国内3拠点に20基のエンジンベンチと
モーターベンチを保有



- ◆試作、開発事業
開発車両のエンジン載せ替え
試作部品や試験装置の新規開発



- ◆エンジニア派遣
秘匿レベルの高い案件などは、
メーカーの中に入って業務を行う。

株式会社アネブルの紹介 (AP部)



zf.com/motorsport

◆モータースポーツ部品
輸入/販売/開発/アフターサービス



アネブル拠点一覧

◆モーターラボ
(愛知県知多郡武豊町)



◆刈谷テクニカルセンター
(愛知県刈谷市)



◆神戸テクニカルセンター
(兵庫県神戸市)



◆行田事業所
(埼玉県行田市)



◆西湘テクニカルセンター
(神奈川県小田原市)



◆碧南デザインセンター
(愛知県碧南市)



社員数 436名 (2022/12/1現在)

<https://www.enable-apg.jp/>

<https://www.enable-os.co.jp/>

1. 「速く走る」 ために必要な事

目的：決められた距離を 短い時間 で走りきる

$$\text{時間} = \frac{\text{距離}}{\text{速さ}}$$

Diagram illustrating the relationship between time, distance, and speed:

- An arrow points from "時間" (Time) to "小さくしたい" (Want to make it small).
- An arrow points from "距離" (Distance) to "小さく" (Small).
- An arrow points from "速さ" (Speed) to "大きく" (Large).

Illustration of a race track with a car at the "スタート" (Start) and another at the "ゴール" (Goal).

短時間に 「速さを大きく」 するために
「加速度が大きい」 状態を目標とする。

加速度はどのように決まるか？

速度を大きくする = エネルギーが増える

短時間で大きなエネルギーを与える為には、大きな仕事率が必要。

$$P = F \times V$$

(仕事率：w) (力：N) (速度：m/s) ← $F=ma$ で置き換える

$$P = \frac{m \times a \times V}{1}$$

大きく

$$a = \frac{P}{m \times V}$$

大きくしたい 小さく



P, m 一定の場合、 a は V に反比例？

加速度の最大値

車両に力を加えないと加速をしない
この力は、タイヤが地面を後方に蹴っ飛ばした時の反作用

質量 m に下向きに加わる力 mg

車両を前向きに押す力 F

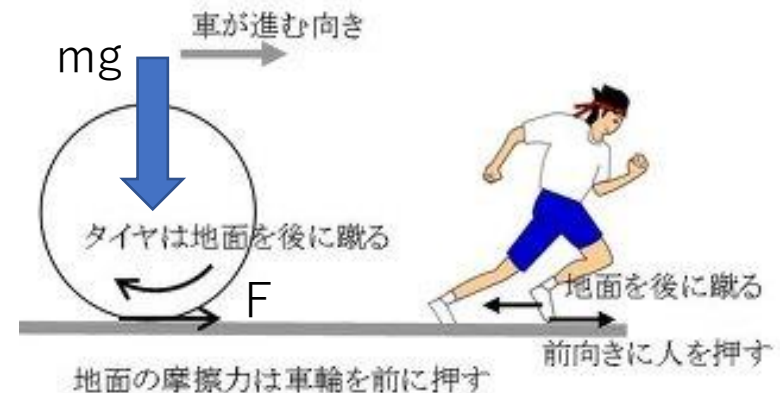
タイヤ～地面 の摩擦係数 μ

$$F \leq \mu mg \quad (\text{クーロンの法則})$$

$$ma \leq \mu mg$$

$$a \leq \mu g$$

地球上ではほぼ一定



加速度 a (m/s^2) を 重力加速度 g ($\approx 9.8\text{m/s}^2$) で割った物を G と呼びます。

加速度の最大値は、 μ に依存する。
次はコーナリングについて考える。

等速円運動の最大速度

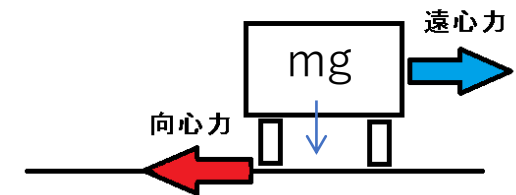
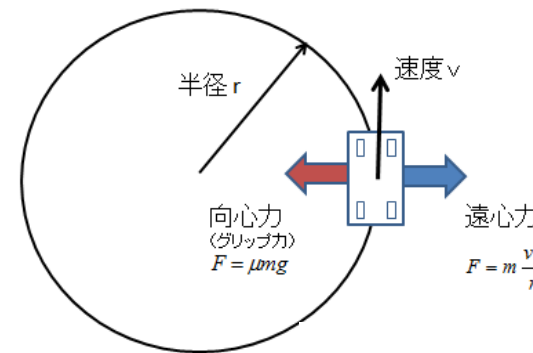
等速円運動 = 前後方向に加速しない (力が加わらない)
遠心力と向心力が釣り合っている状態

遠心力 $F = m \frac{v^2}{r}$

向心力 $F = \mu mg$ (タイヤの摩擦力)

$$\mu mg = m \frac{v^2}{r}$$

→ $V = \sqrt{\mu g r}$ → コースによって決まる
一定



最大コーナリング速度は、 μ に依存する。
速く走る為に μ を大きくする方法を考える。

2. 「タイヤの特性」を理解する

今までの常識： 摩擦力は垂直荷重に比例し、 μ はいつでも一定。
ではレーシングカーはなぜ太いタイヤを履くのか？

ゴムの摩擦係数は、圧力に依存する。

タイヤの場合、荷重 v s 摩擦力のグラフは、若干上に凸なグラフとなる。

($\mu \neq$ 一定)

荷重（圧力）に依存して、摩擦係数が変わる為、クーロンの法則は適用できない。

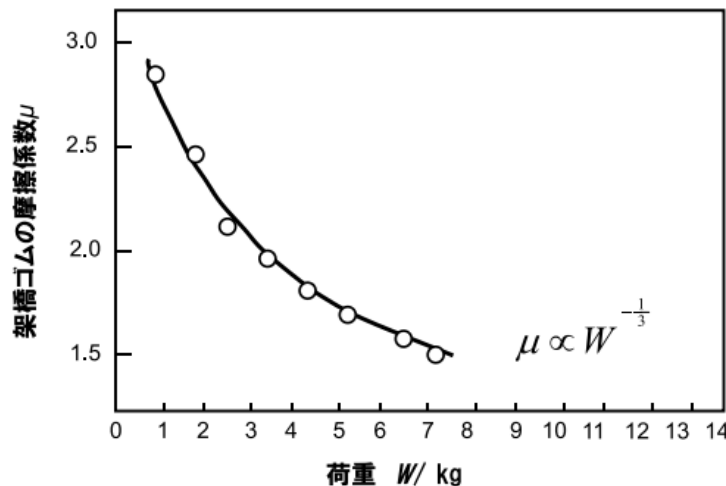
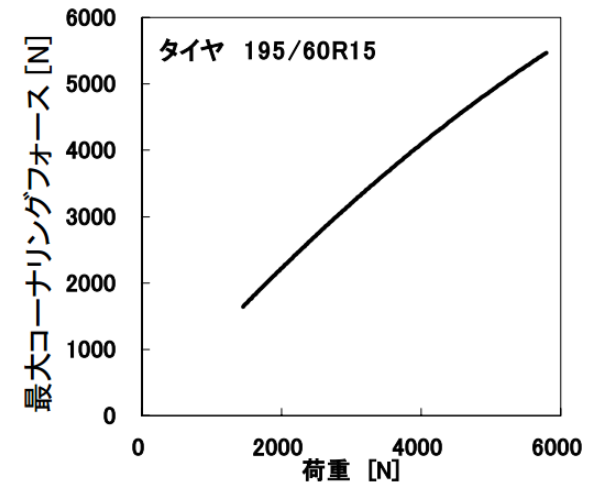


図7. 架橋ゴムの摩擦係数の荷重依存性⁴⁾



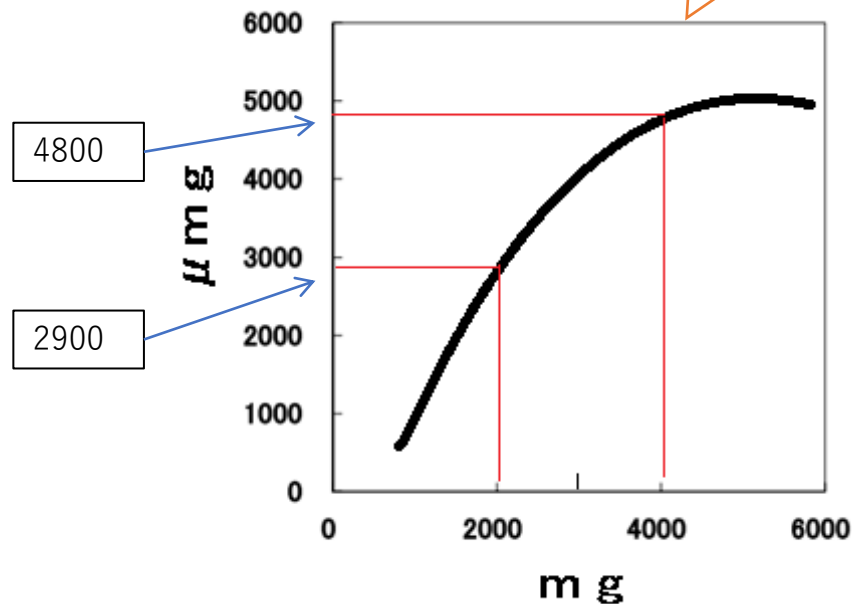
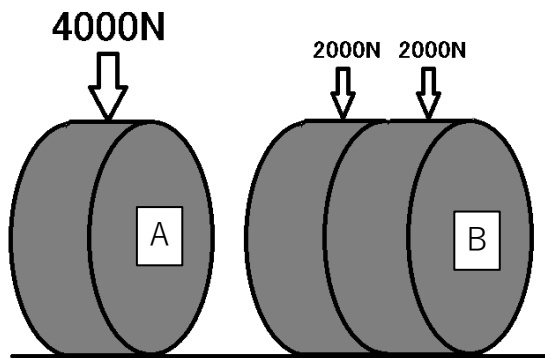
太さ2倍のタイヤで考えてみる。

A, B それぞれのタイヤの摩擦力を比較する。

A \Rightarrow 4800N

B $\Rightarrow 2900 + 2900 = 5800$ N

方向性を理解するために少し大げさなグラフで考えます。



\Rightarrow 太く、接地面積の大きいタイヤの方が高い摩擦力を期待できる。

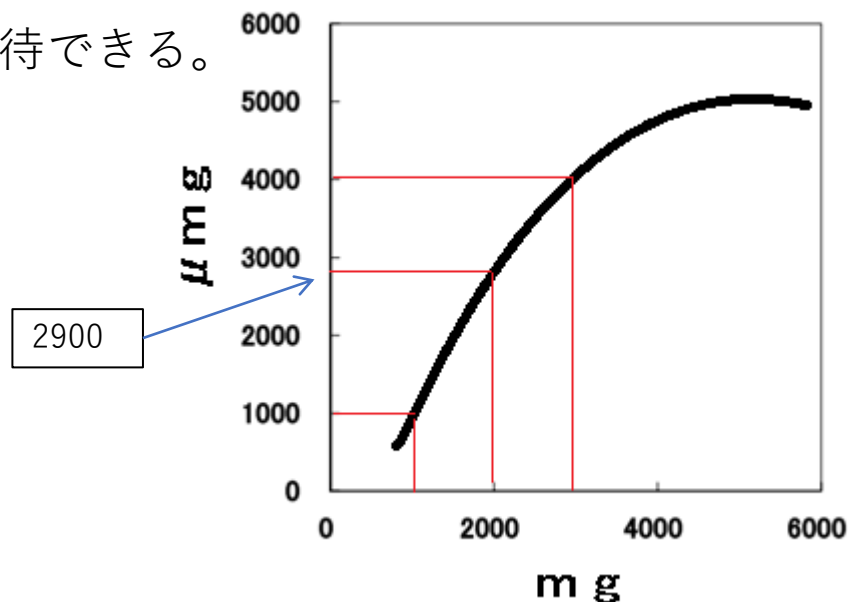
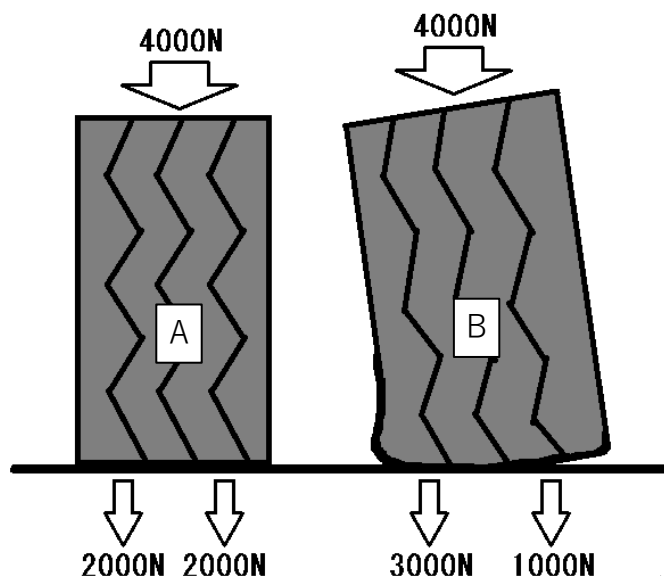
偏荷重について考えてみる。

A, B それぞれのタイヤの摩擦力を比較する。

$$A \Rightarrow 2900 + 2900 = 5800\text{N}$$

$$B \Rightarrow 4000 + 1000 = 5000\text{N}$$

圧力は均等な方が、高い摩擦力を期待できる。



⇒ 偏荷重が無い方が高い摩擦力を期待で生きる。

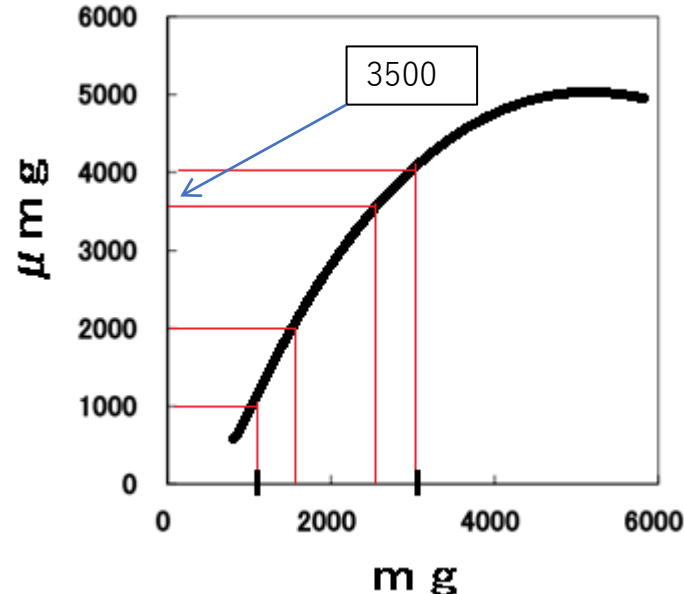
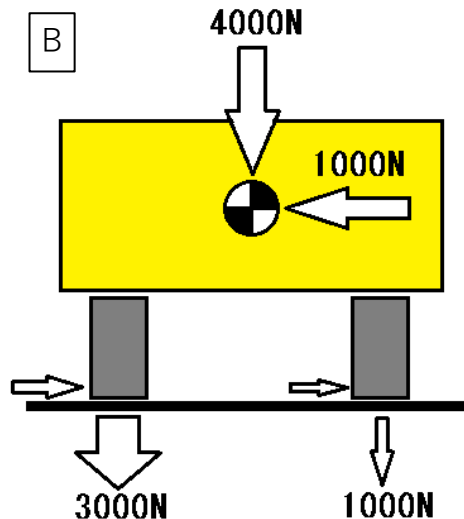
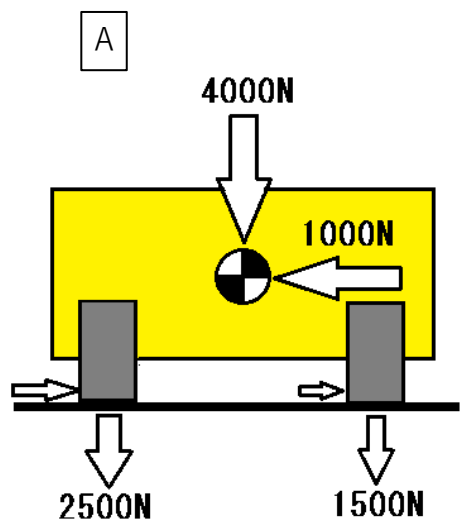
荷重移動について考えてみる。

A（荷重移動小）， B（荷重移動大） それぞれの車両の摩擦力を比較する。

$$A \Rightarrow 2000 + 3500 = 5500\text{N}$$

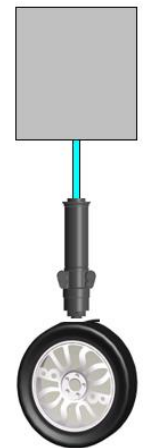
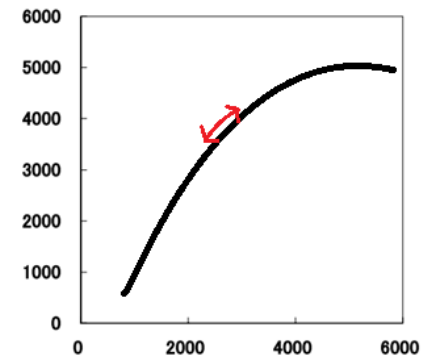
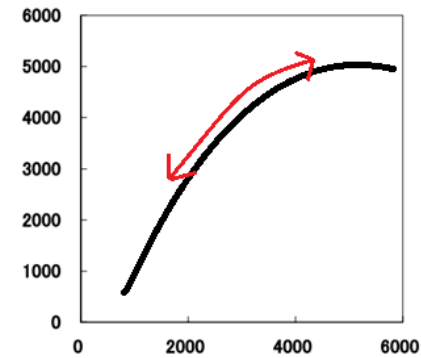
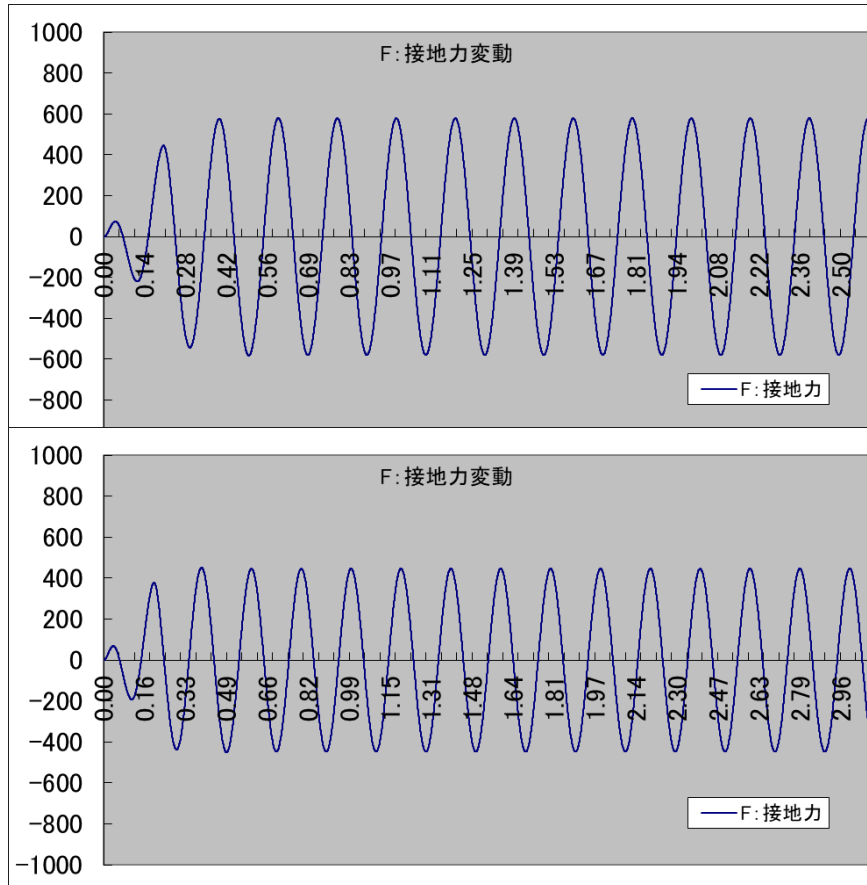
$$B \Rightarrow 4000 + 1000 = 5000\text{N}$$

荷重移動は少ない方が、高い摩擦力を期待できる。



⇒ 荷重変動が少ない方が高い摩擦力を期待できる。

1 輪で荷重が変動する場合

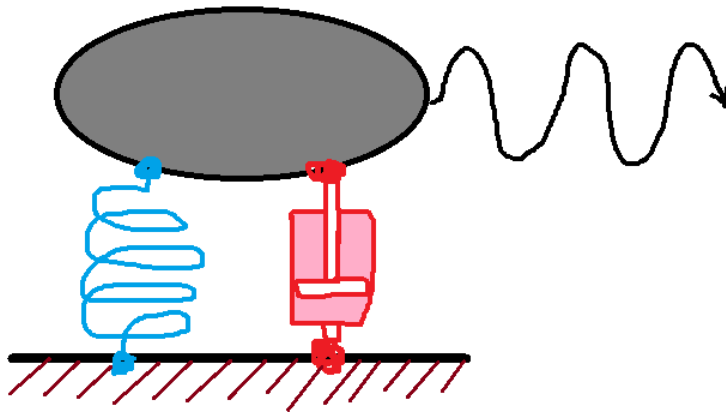


⇒ 荷重変動の少ない方が、平均の摩擦力を高くすることが出来る。



3. ショックアブソーバ、スプリングの働き

ショックアブソーバ： 振動を吸収する油圧緩衝装置



力の向き

スプリング

復元方向

ショックアブソーバ

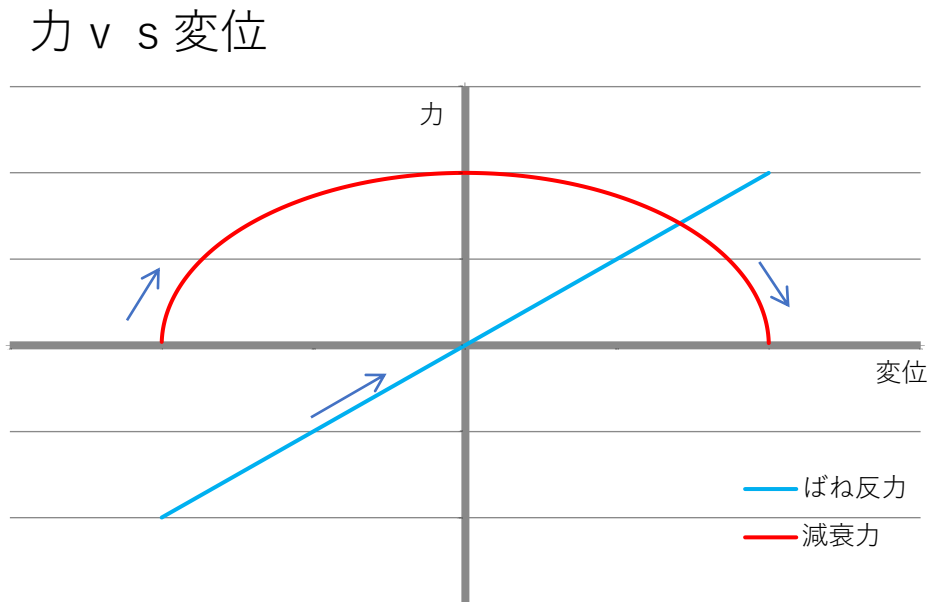
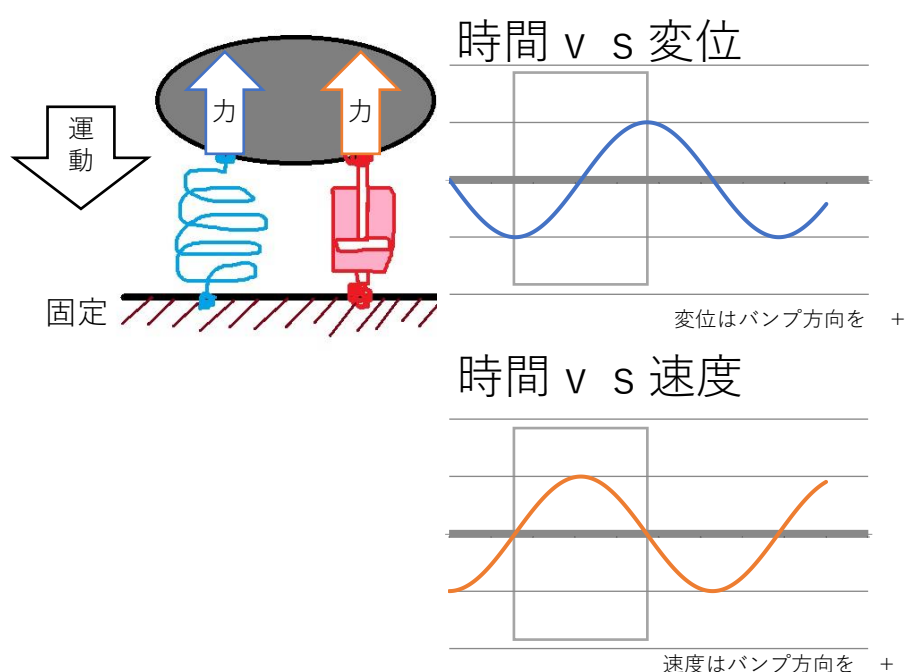
運動と反対

サスペンションに使用されるスプリングはすべて圧縮スプリングの為、力の向きは常に伸びる方向。

ショックアブソーバの力の向きは、運動の状態に左右される為、バンプ、リバウンドそれぞれの工程に分けて調査してみます。

バンプ工程はどうなっているか

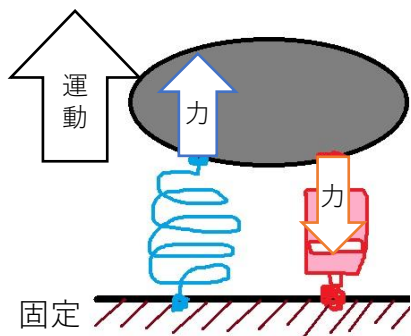
運動の方向、スプリング&ショックアブソーバの力の向きをそれぞれ調べてみます。



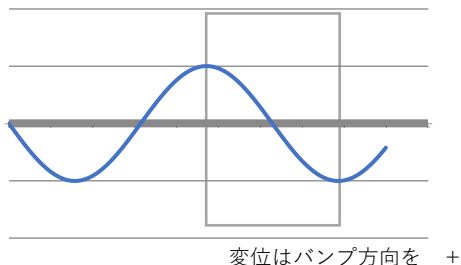
バンプの工程では、スプリング&ショックアブソーバはそれぞれ仕事をされている状態である。

次はリバウンド工程

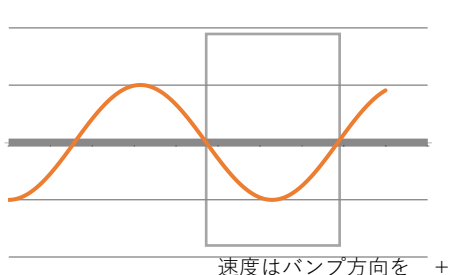
同様に運動の方向、スプリング&ショックアブソーバの力の向きを調べます。



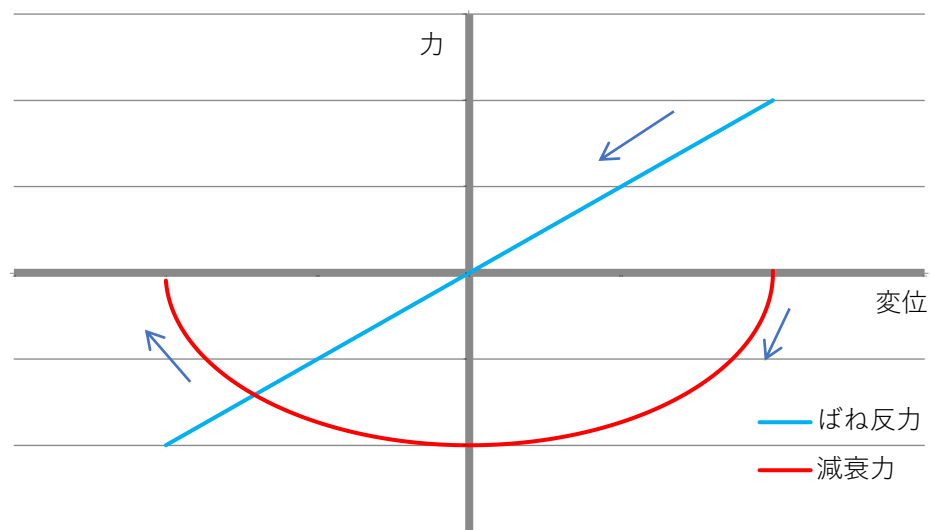
時間 v s 変位



時間 v s 速度



力 v s 変位



スプリング : 仕事をしている。

ショックアブソーバ : 仕事をされている。

まとめ

バンプ、リバウンドの工程を調べた結果をまとめます。

	スプリング	ショックアブソーバ
バンプ	仕事をされている	仕事をされている
リバウンド	仕事をしている	仕事をされている

スプリングは、バンプで蓄えたエネルギーを
リバウンド工程で放出。

1サイクルでのエネルギーの収支は ± 0

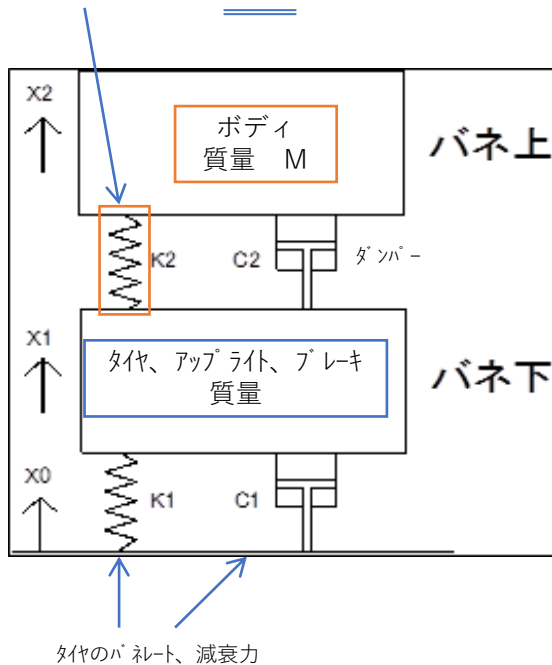
ショックアブソーバは、常に仕事をされている状態。
受け取ったエネルギーは熱エネルギーとして
蓄え→大気に放出。

4. ショックアブソーバの表し方

スプリングやショックアブソーバの強さ、効き具合を式で表します。

バネの固さの表し方

サスペンションスプリング： K (N/m)



50N/mm のスプリングは、
軽自動車にとっては、そこそこ固い
クラウンにとっては、ふにやふにやで柔らかすぎ

空燃比のように、排気量や気筒数に関係なく
濃い薄い を判断できるものさしはないだろうか？

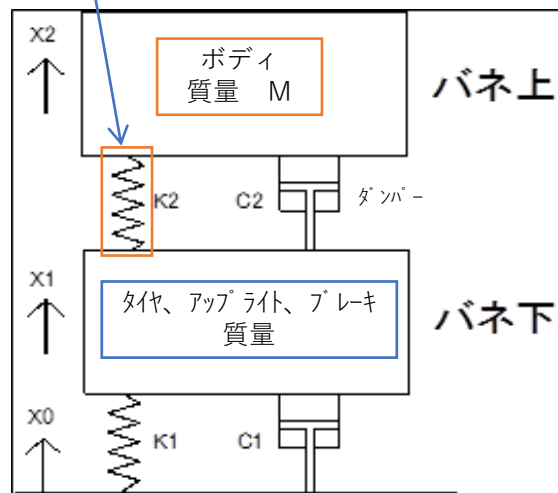
→ 固有振動数

$$F = \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ (rad/s)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ (Hz or 1/s)}$$

K の単位に注意！

レバー比がある場合

サスペンションプリング： K (N/m)

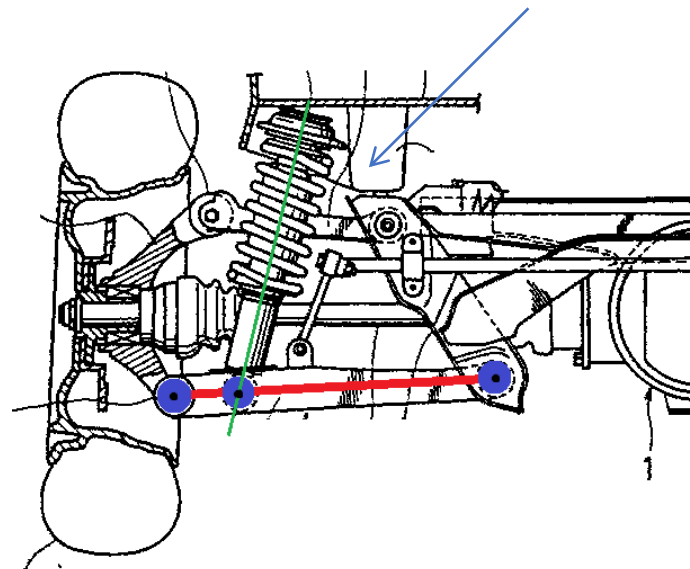


タイヤのバネレート、減衰力

左の形に変換して考えたい



実際のバネレート： K' (N/m)



レバー比がある場合、バネレート K は
実際のバネレート K' とレバー比を用いて

$$K = \frac{K'}{\text{レバー比}^2}$$

と書くことが出来る。

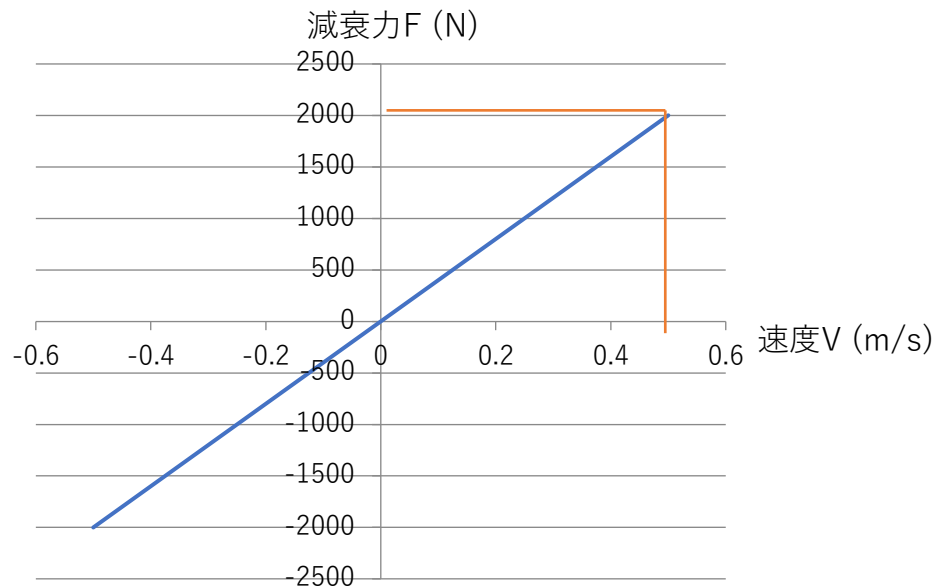
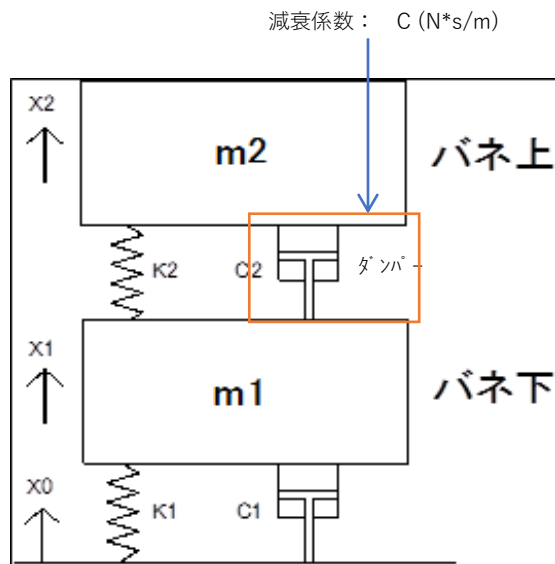
この時の K をホイールレートと言う。

タイヤが10動いた時、ダンパ-が8動く場合。
 $10/8 = 1.25$ (今回はこちらを使用します。)
 $8/10 = 0.8$
 どちらも使われているので、注意しましょう。

ストローク&スピード → 1/1.25 倍
 力 → 1.25 倍

→仕事量、仕事率はどの場所でも変わらない。

ダンパーの効き具合の表し方 : 減衰係数



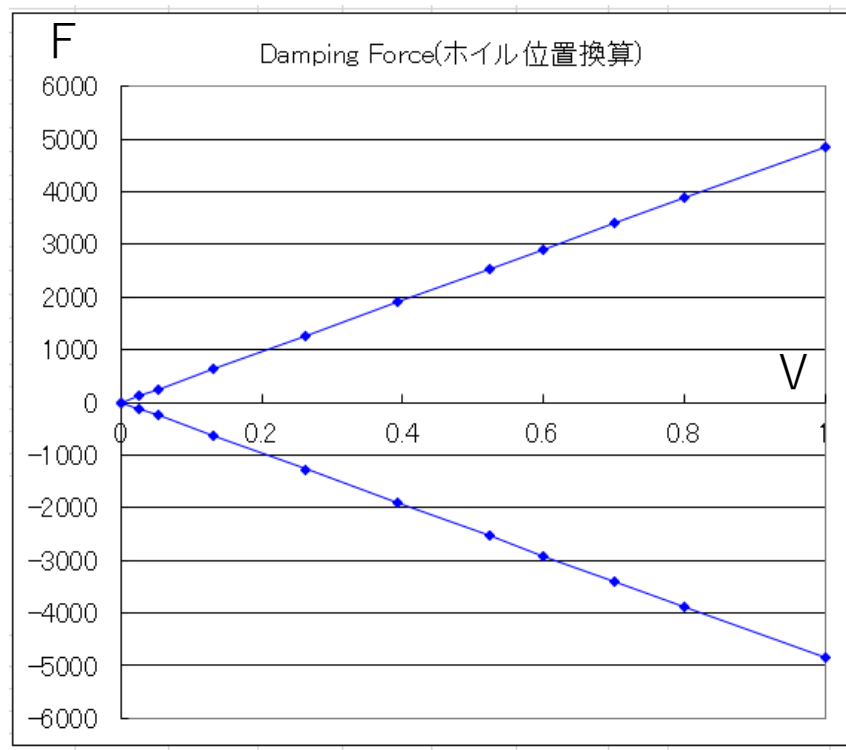
減衰力 F がストロークスピード V を使って

$$F = CV$$

と表せる時、 C を減衰係数と言う。

C の単位は、 $N*s/m$

上のグラフの場合、 $V=0.5$ の時 $F=2000$ なので
 $C = 2000/0.5 = 4000$
 となる。



減衰係数**C** 約5000 (N・s/m)

$$F=CV$$

このような1次式で表す事が出来るような減衰特性の場合、

グラフの傾き = 減衰係数

となります。

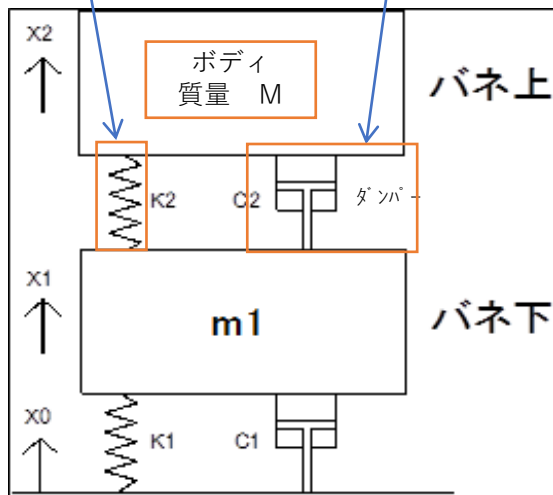
また、 $V=1$ の時 $F=C$

1.0m/sの減衰力が減衰係数に等しくなる。

臨界減衰係数

サスペンションスプリング： K (N/m)

減衰係数： C (N*s/m)



バネ上質量 M 、バネレート K
が決まると振動を最短時間で収束させる減衰係数

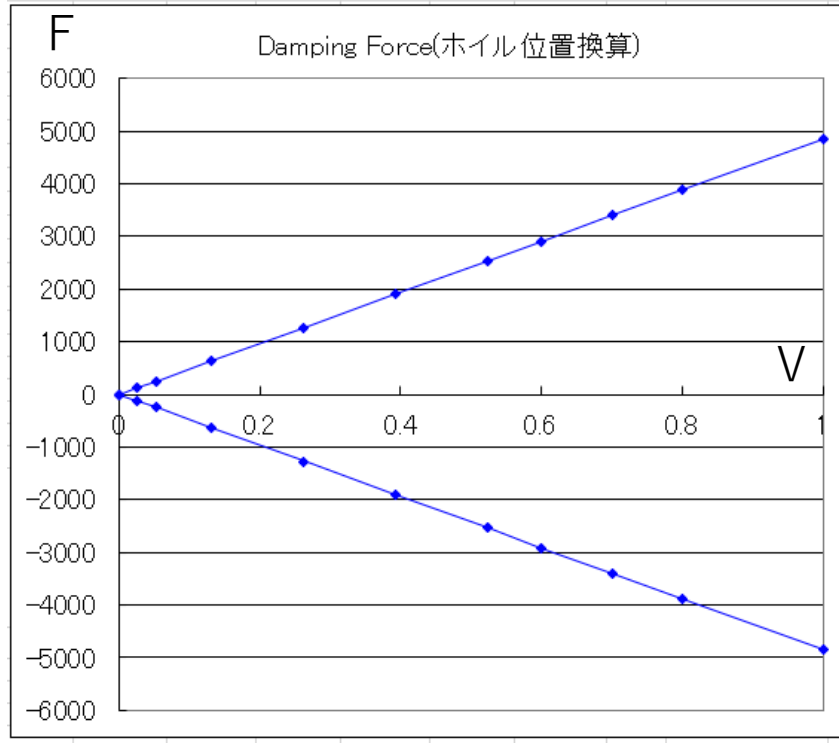
$$\text{臨界減衰係数 } C_c = 2\sqrt{M * K}$$

が決まる。

臨界減衰係数 C_c と 実際のダンパーの減衰係数 C
の比率を 『減衰比』 と呼ぶ。

$$\text{減衰比} = C/C_c$$

減衰比を ζ (ゼータ、ツェータ) と呼ぶ人もいます。

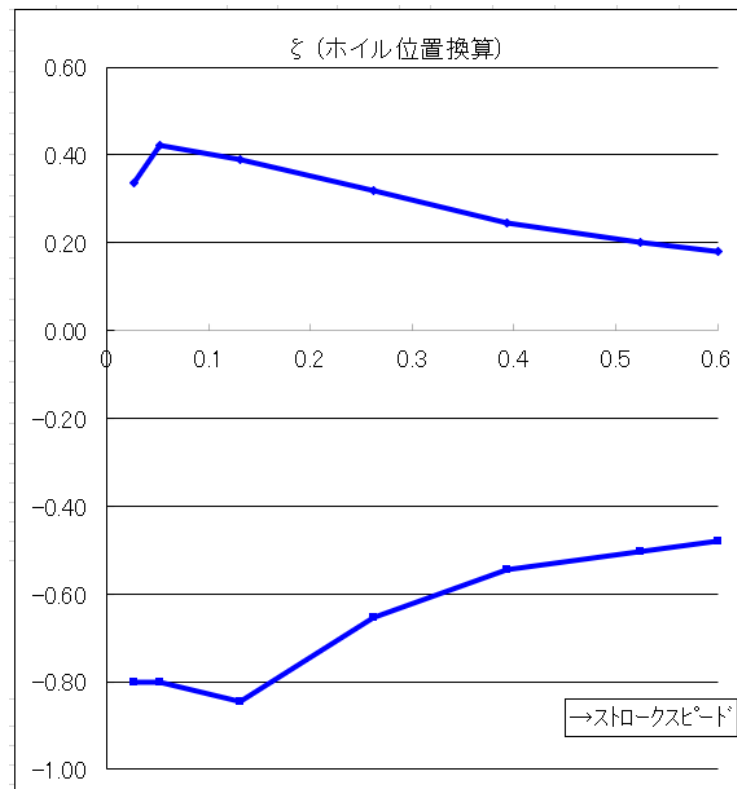
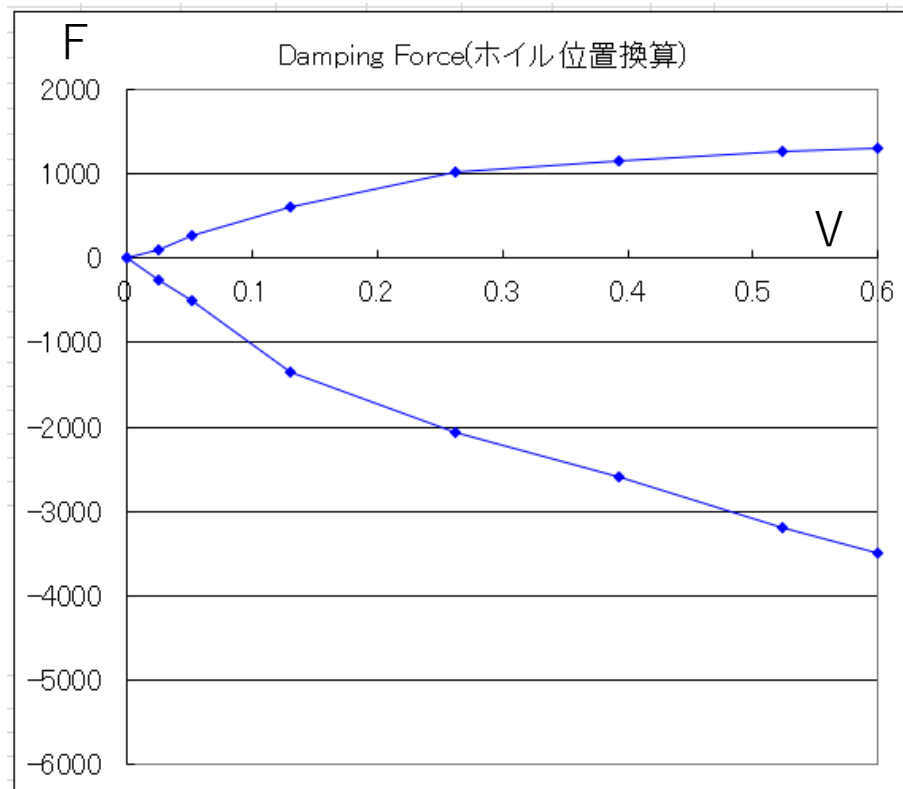


減衰係数**C** 約5000 (N・s/m)

臨界減衰係数**C_c** が 10000の場合、

$$\text{減衰比 } \mathbf{C/C_c} = 5000/10000 = 0.5$$

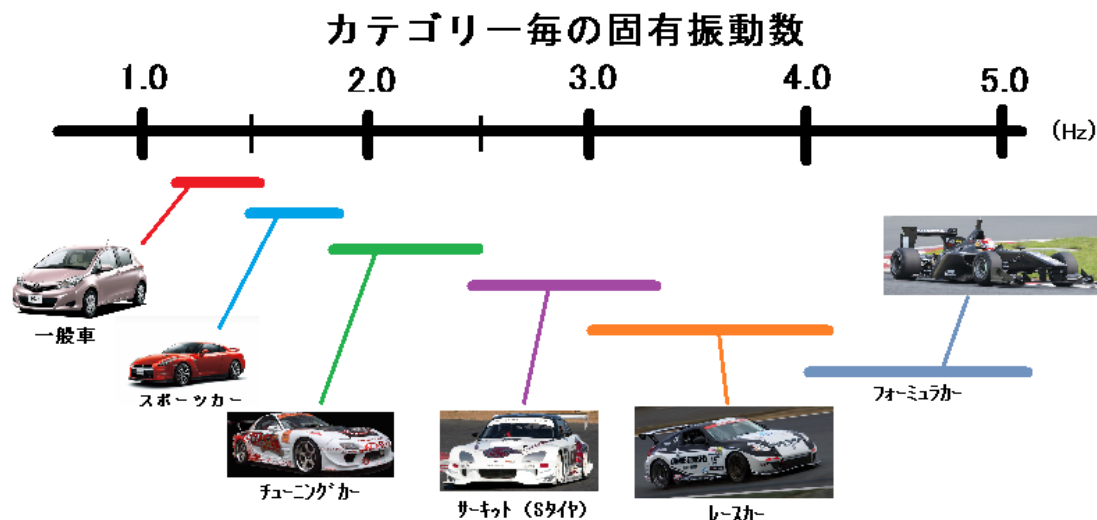
となります。



1次式で表すことが出来ない減衰特性の場合、
右グラフのように、速度毎に減衰比は変わってきます。

今回は、減衰力のグラフから減衰比を計算しましたが、
通常は、 ターゲットの減衰比 ⇒ 減衰力のグラフ という順番で進めます。

固有振動数と減衰比



バネ上固有振動数は、左のようなイメージで各カテゴリ毎に異なった数値が用いられる。空力の重要度が増すほど、固く動かさない傾向にある。

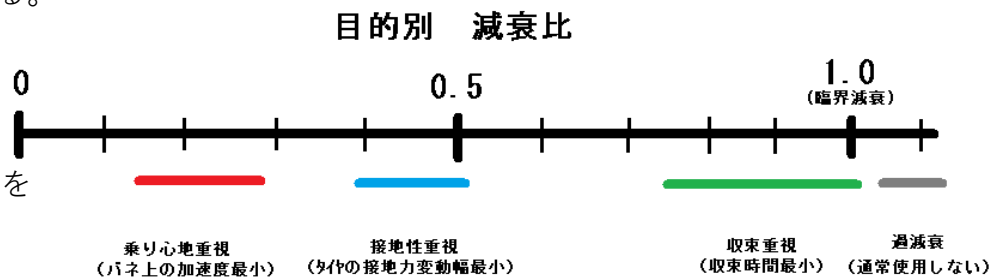
固有振動数が高くなるほど、リバウンドストロークは減少するので、不整地には不向きである。

車両の使用目的によって、減衰比のターゲットは変わってくる。

自動車メーカーが作る標準車には、0.2前後の減衰比を採用される事が多いが、スポーツ走行には不向きである。

タイムアタックを目的とする場合、減衰比は 0.4-0.5 辺りをターゲットにする事が多い。
理由は次ページより説明する。

ラリー車には、収束時間優先で0.7以上の減衰比が用いられる。



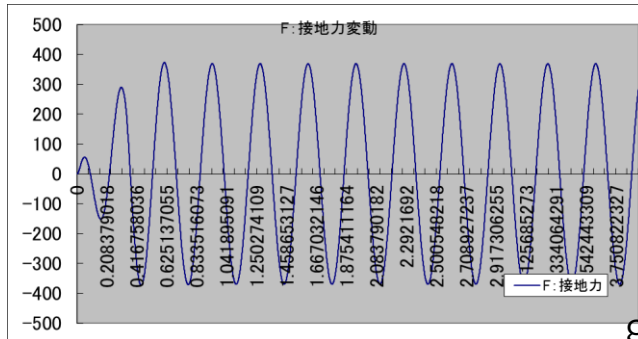
減衰比と接地荷重の変動

C/Cc

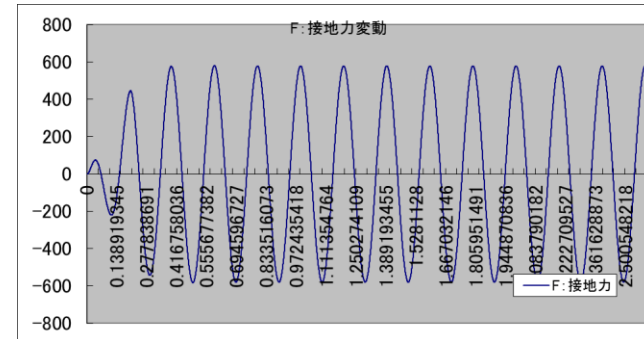
3 Hz

5 Hz

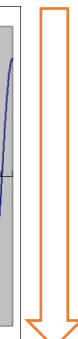
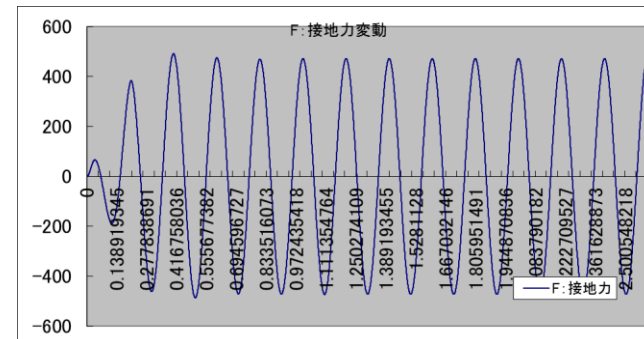
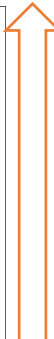
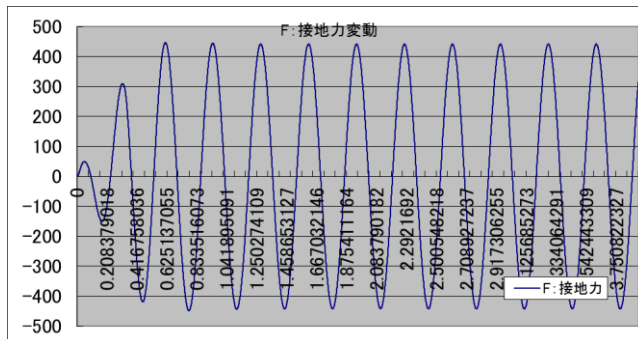
0.6



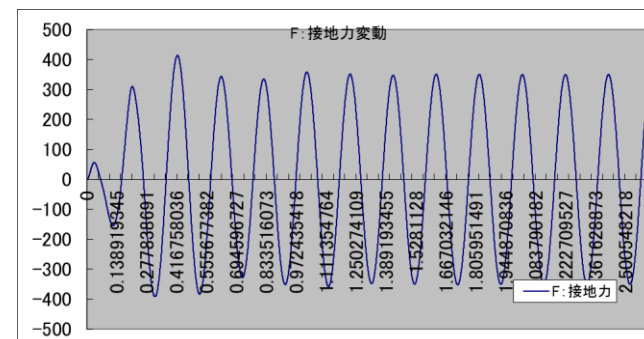
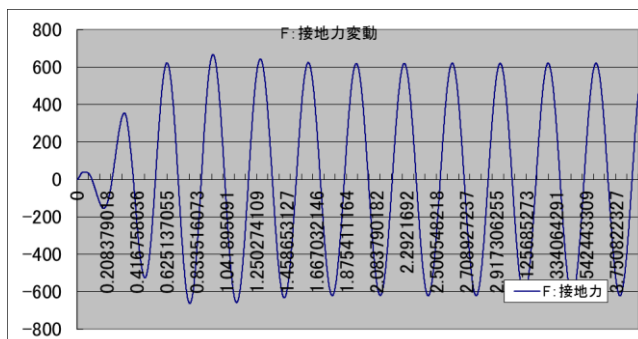
good



0.4



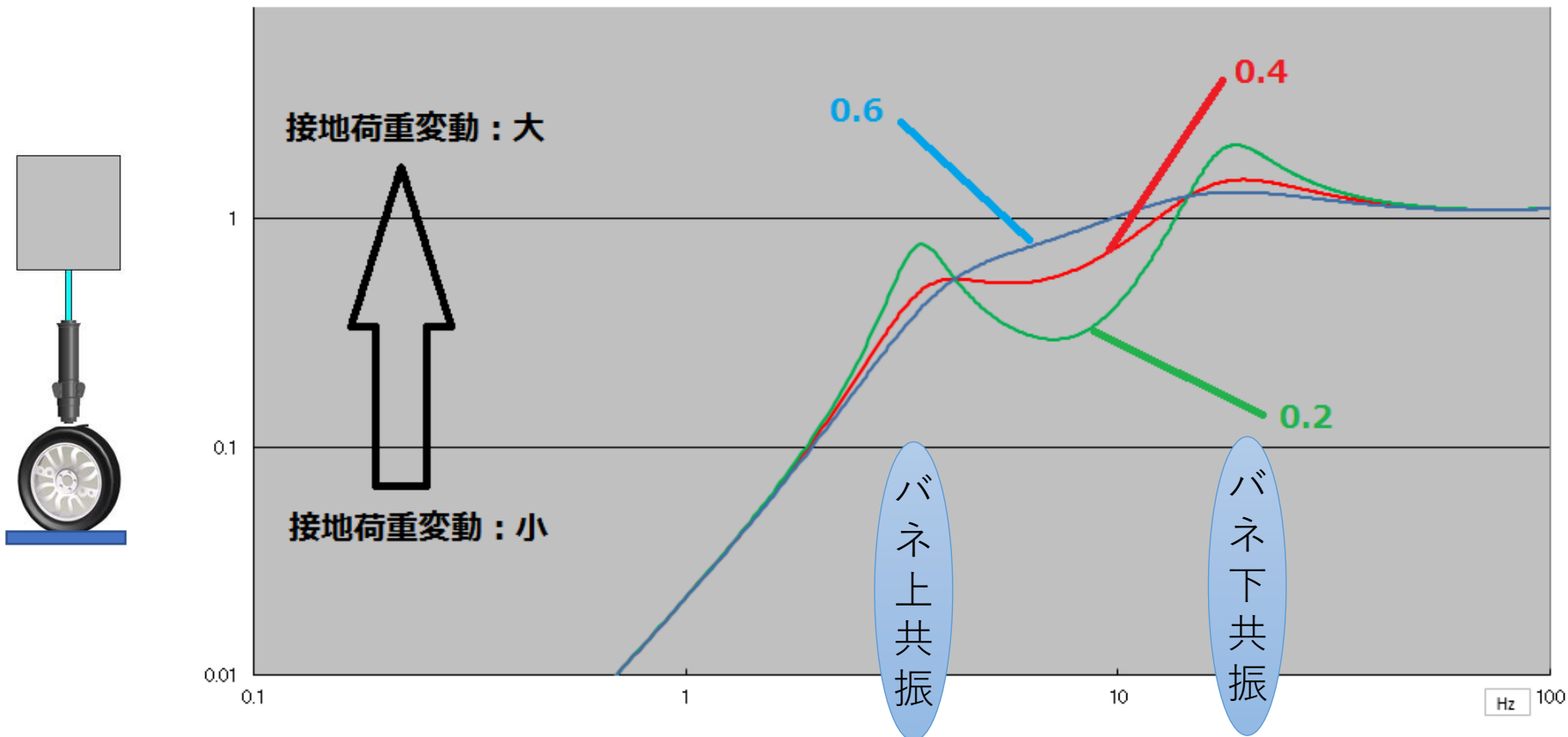
0.2



good



周波数ごとの接地荷重変動

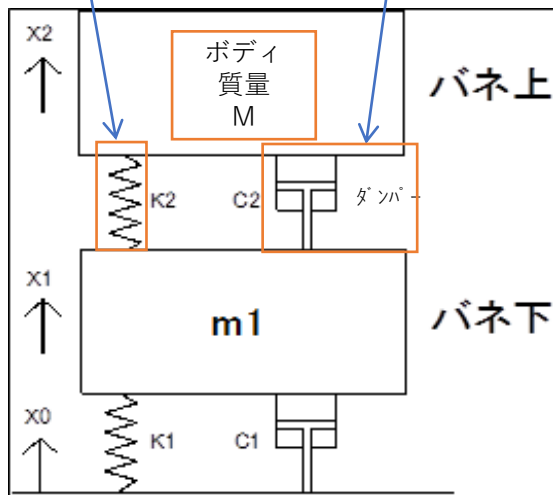


低めの減衰比は、共振点でのピークが大きく出てしまう。
高めの減衰比は、バネ上～バネ下 共振点の荷重変動が悪化する。
接地荷重変動を重視する場合、バランスの良いところで
0.4～0.5近辺の減衰比が選ばれる事が多い。

減衰係数 練習問題

サスペンションスプリング： K (N/m)

減衰係数： C (N*s/m)



- ①バネレートの x 倍になった場合、減衰比を変えないためには、減衰係数はどのようにすべきか？
- ②バネ上質量が x 倍になった場合、固有振動数、減衰比を変えないためにはバネレート、減衰係数はどのようにすべきか？

臨界減衰係数 $C_c = 2\sqrt{M * K}$

減衰比 $= C/C_c$

減衰力を計算しよう

コーナーウェイト (1輪) 750N
バネ下質量 (1輪) 15Kg
レバー比 1.25

●固有振動数 3.5Hz狙い

ホイルレート N/m
単体バネレート N/m

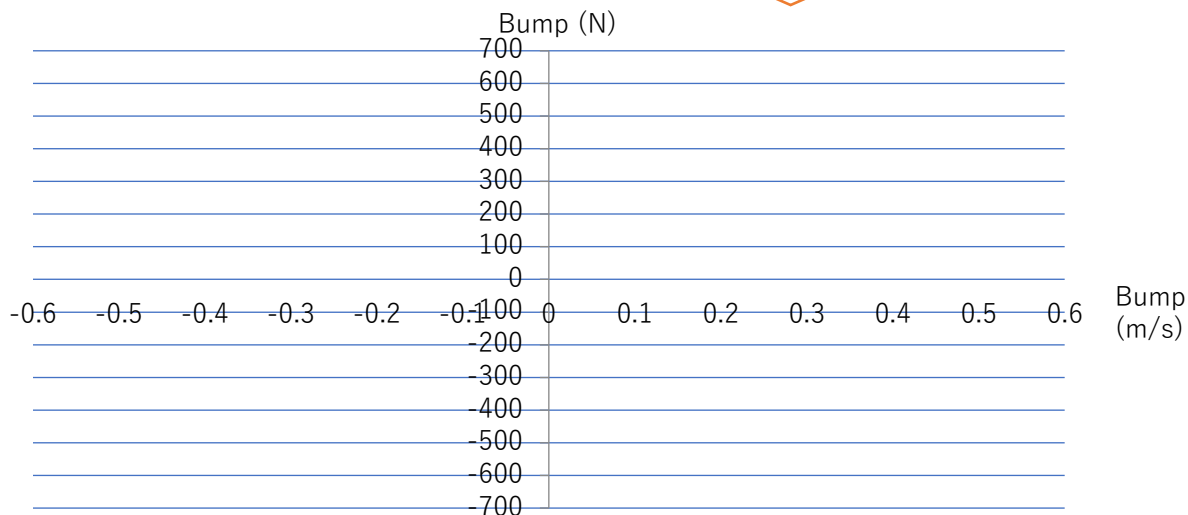
●臨界減衰力

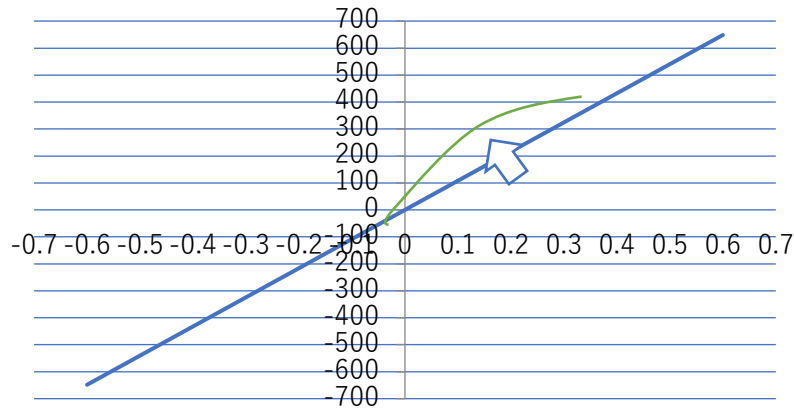
$C_c =$ $N \cdot s / m$

●減衰比 0.4狙い

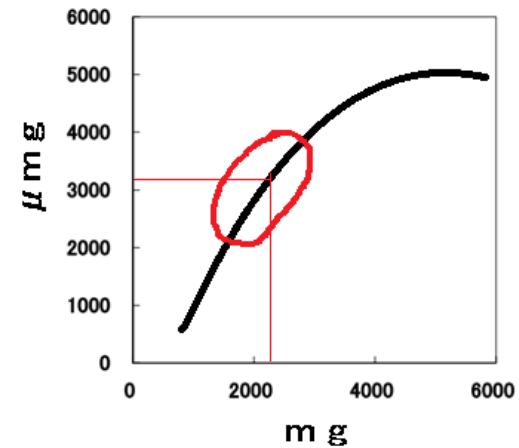
減衰係数 $N \cdot s / m$

重力加速度 $g = 9.8$
円周率 $\pi = 3.14$





タイヤの荷重と摩擦力が比例する範囲では、姿勢変化を抑える事を優先する方が良い場合がある。



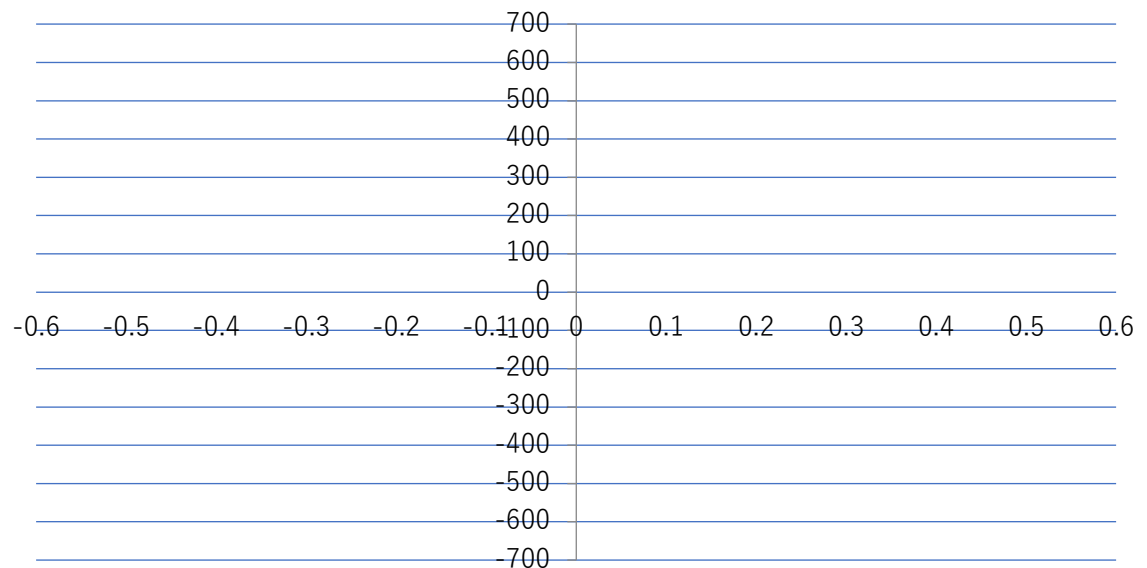
減衰比をそれぞれ

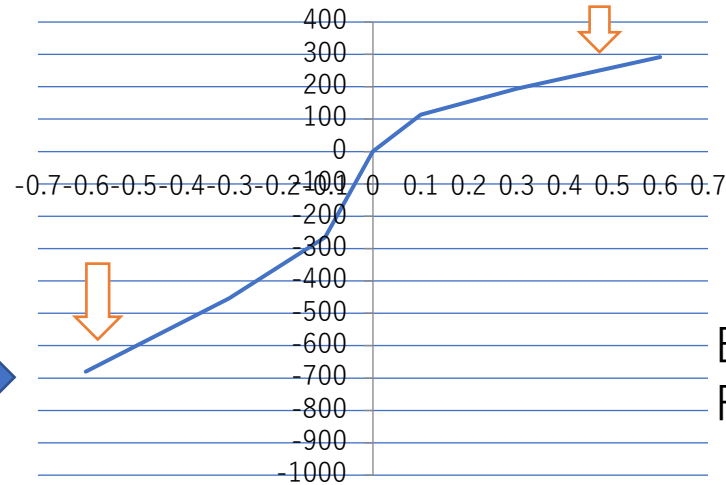
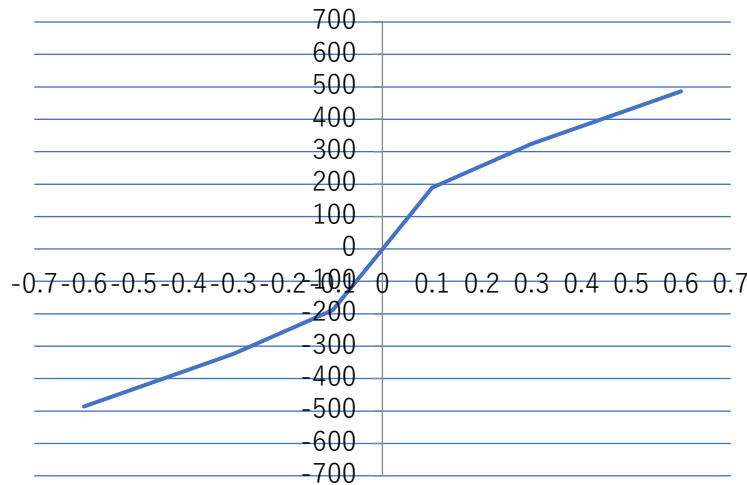
0.7 (0.1m/s)

0.4 (0.3m/s)

0.3 (0.6m/s)

で設定した場合の
グラフを書いてみよう

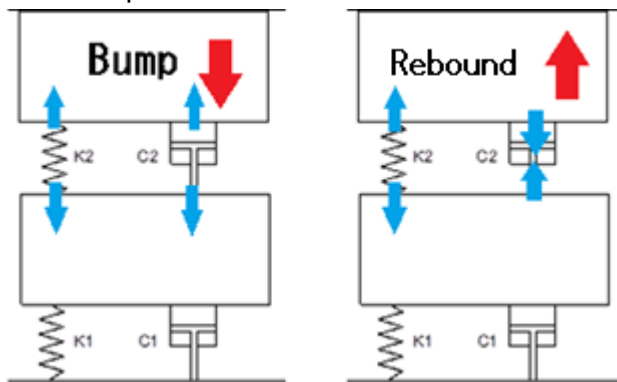




Bump:30%
Rebound:70%

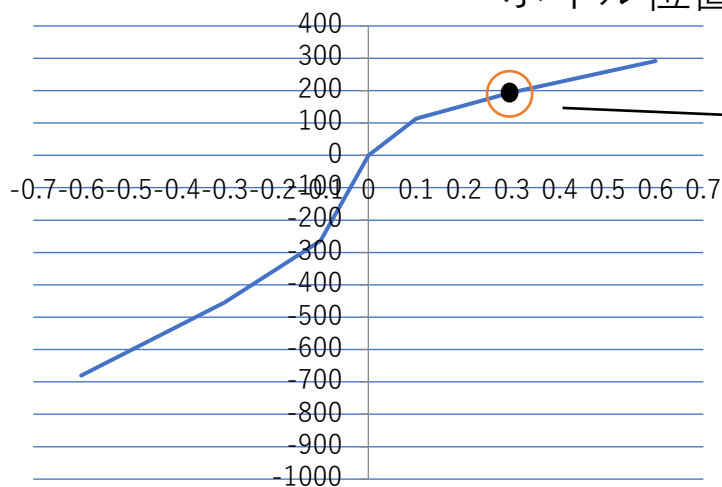
上のようなグラフになりますが、高い固有振動数を使う場合、減衰力のボリュームをreboundよりにした方が荷重の変動が緩やかでタイヤを上手に使える事があります。ただし、空力が大きなレースカーではbump=rebound に近づく傾向もあります。

振幅の中心位置が変化する事で、タイヤが離陸しにくくなる効果も見込めます。bump、reboundのバランスを変更する場合、合計値は変えないようにします。

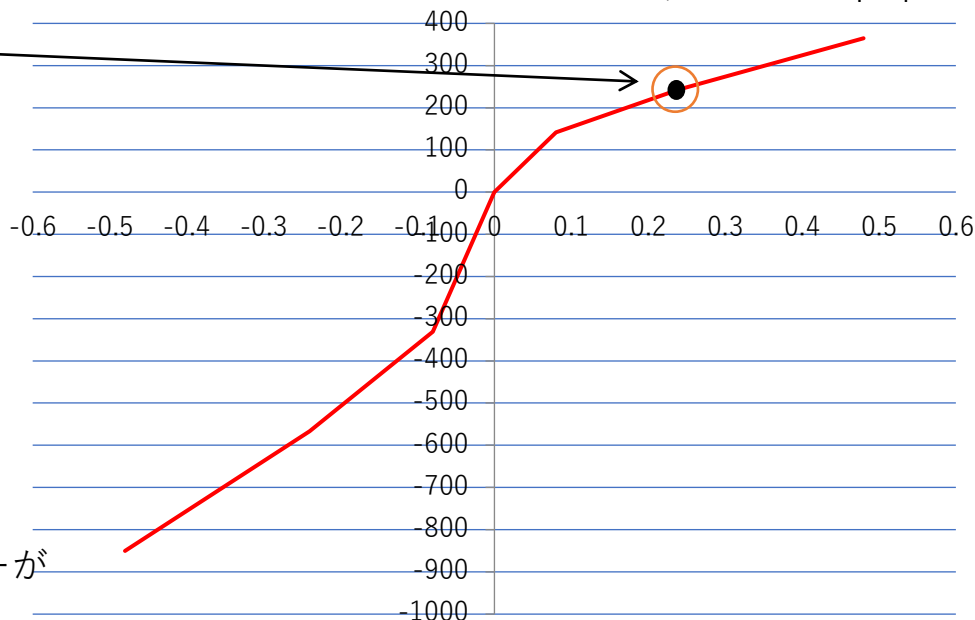


Bumpの減衰力とバネ反力は、いつも同じ方向に力を加えています。ダンパ-は、運動の向きと力の向きが常に逆向きの為、常に『仕事をされている』状態になります。

ホイール位置



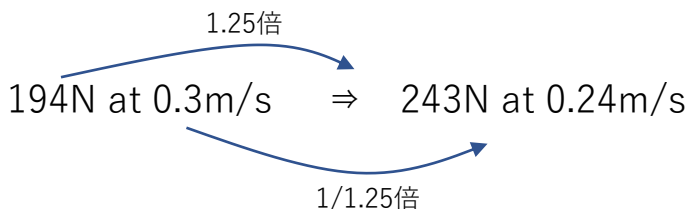
ダンパー位置



まだ完成ではありません。

このグラフは、タイヤ位置（レバー比1）にダンパーがあると仮定した状態での減衰力です。

レバー比1.25の場合、ダンパ-位置だとスピードは1/1.25になりますが、力は1.25倍必要になります。



これで計算値が出来ました。

午前中の講義はここまですになります。

減衰比は、エンジンセッティングにおける空燃比のような物で、この数値を押さえておけば大外しをする事はありません。

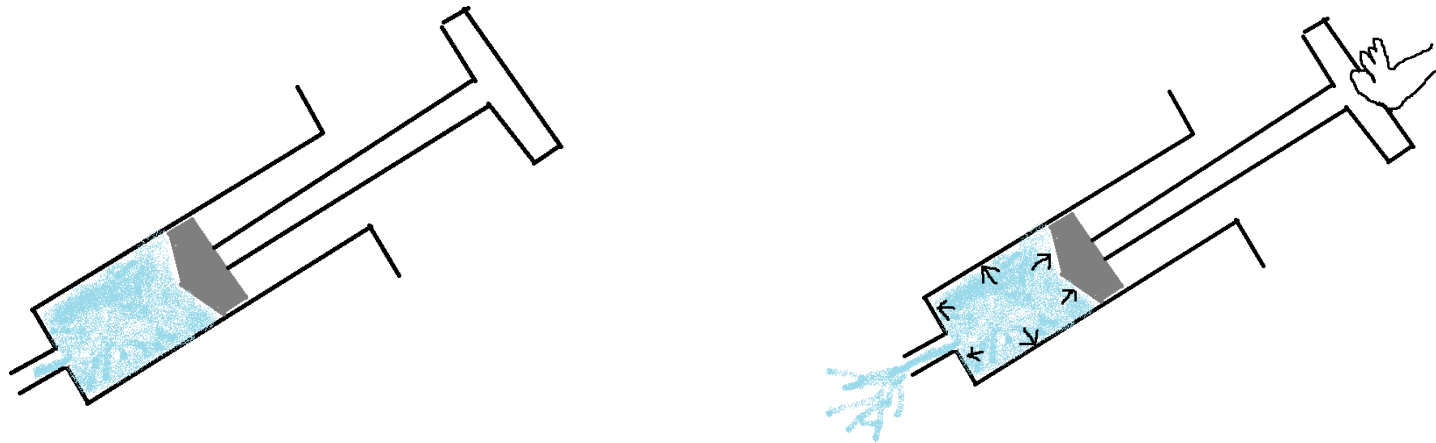
逆に大きく外れるような事があったら、他の要素が大外ししてないか疑ってみましょう。

参考文献

自動車技術会 公開論文
築地原政文（株式会社ブリジストン）
タイヤの力学と操縦安定性

KYB株式会社
自動車のサスペンション（グランプリ出版）

1. ダンパーの構造（モノチューブ）

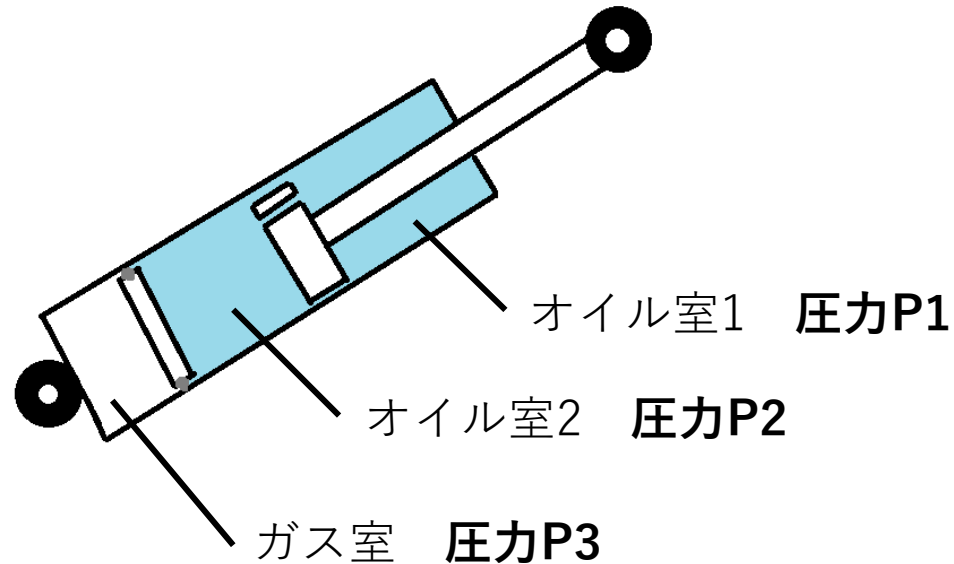


ダンパーって注射器に例えられることが多いです。
ピストンが液体を押し出す過程で、圧力が上がって

圧力 x ピストン面積

の力が手に伝わります。

モノチューブダンパー 静止状態



ダンパーが静止状態の各部屋の圧力は

$$P1 = P2 = P3$$

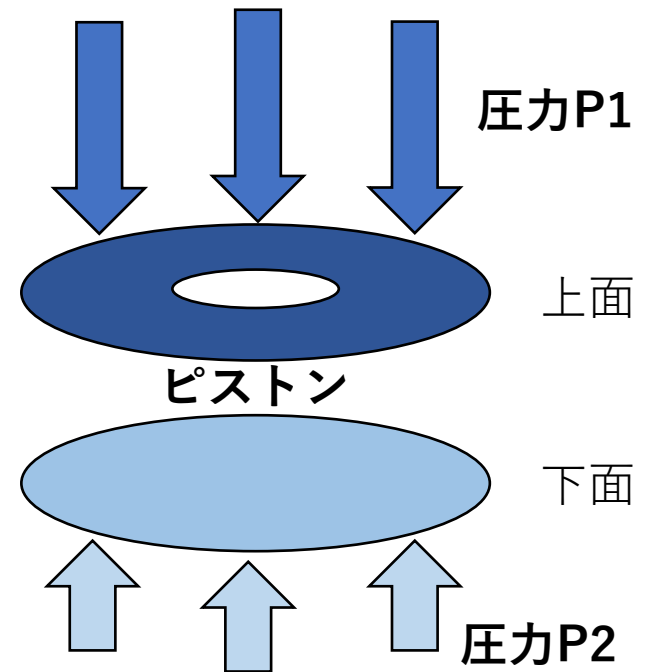
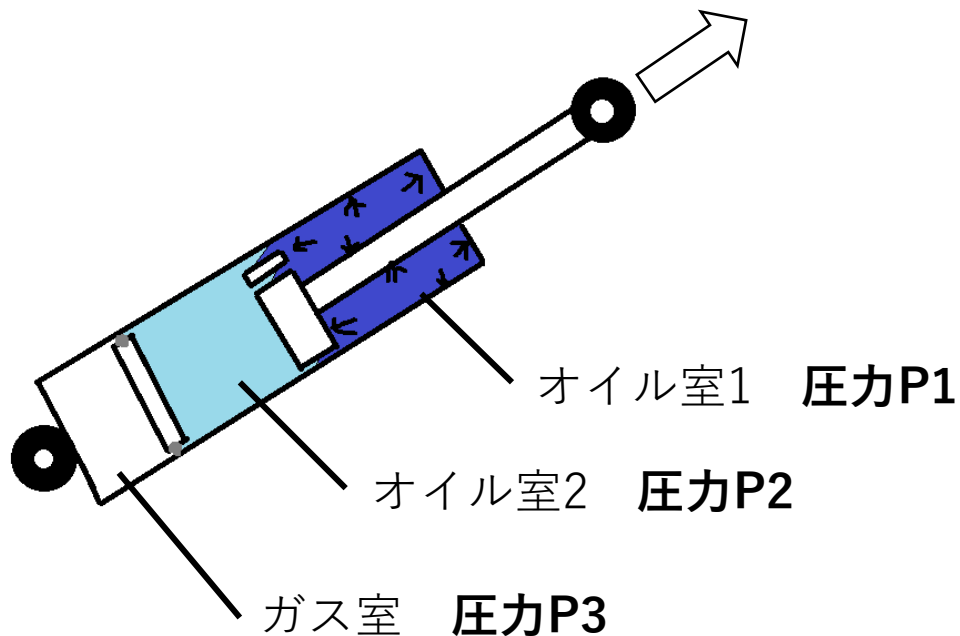
パスカルの原理

密閉された容器内の圧力は、どの部分でも一定

アネブル クイズ1

ダンパーが伸びてくるのは
なぜでしょう？

モノチューブダンパー Rebound



ダンパーが伸びている状態

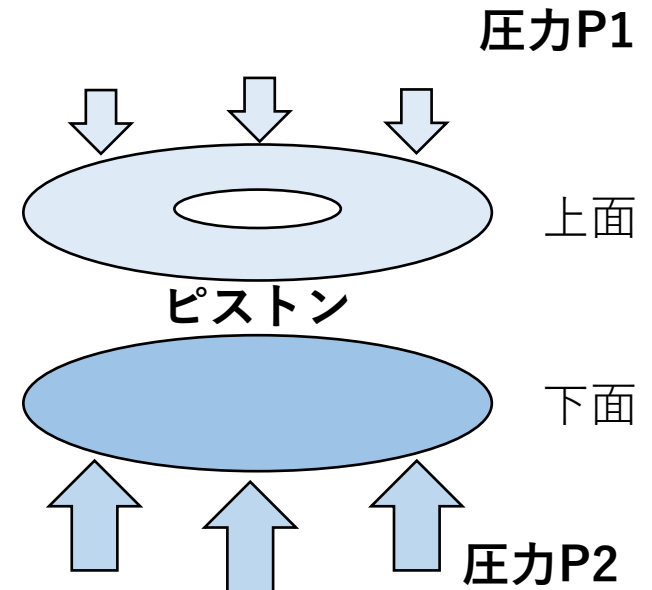
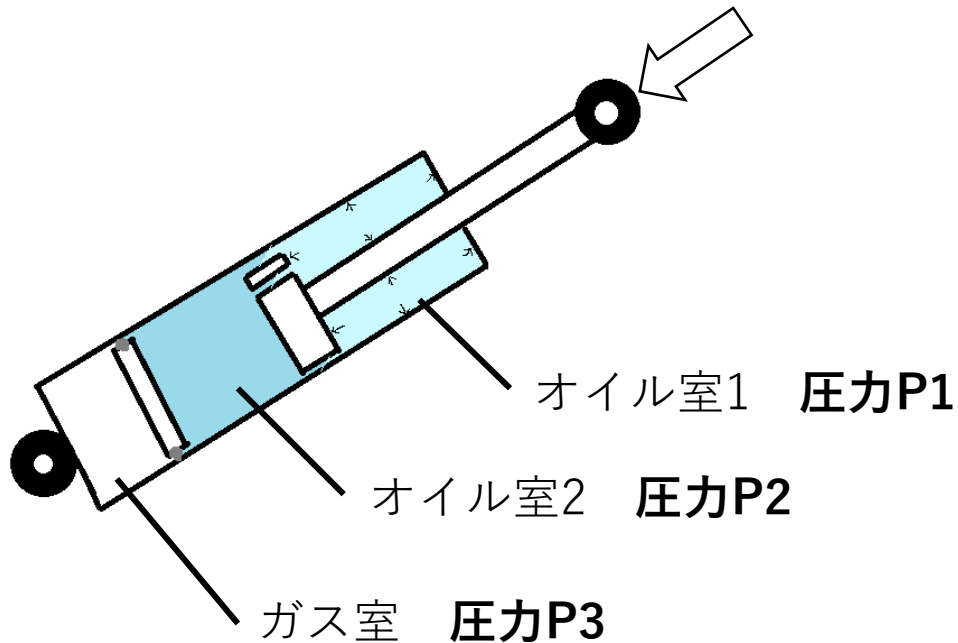
$$P1 > P2 = P3$$

ピストンに加わる力

$$P1 \times (\text{ピストン上側面積}) - P2 \times (\text{ピストン下側面積})$$

向きは下向き

モノチューブダンパー Bump



ダンパーが縮んでいる状態

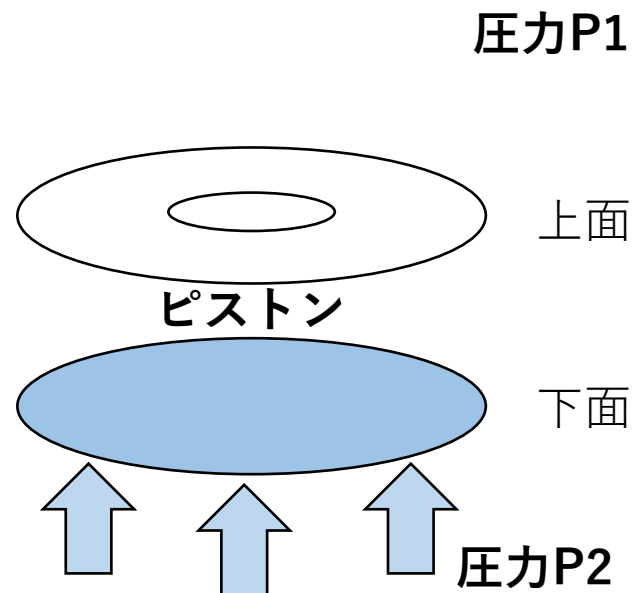
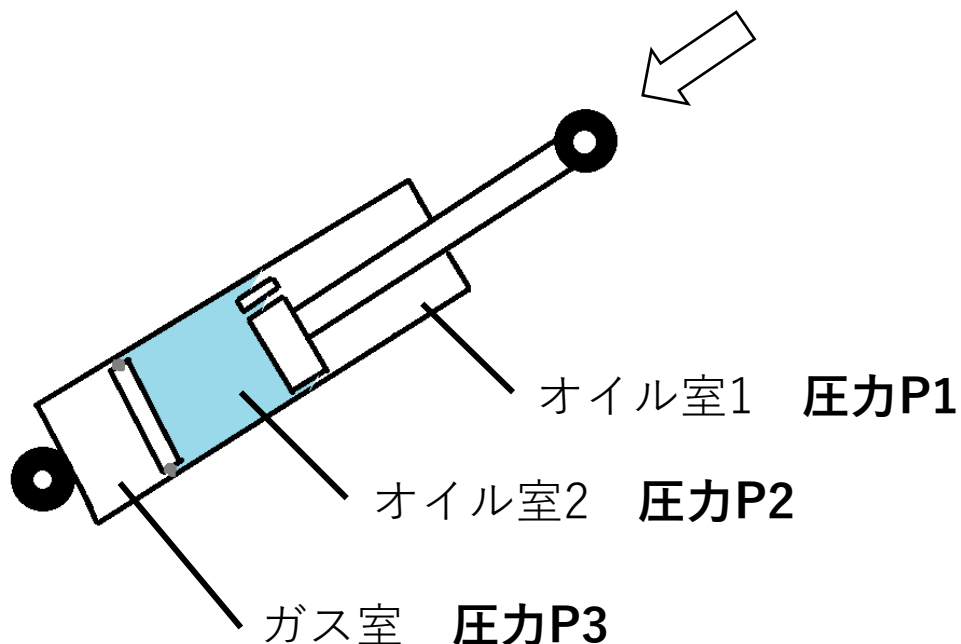
$$P1 < P2 = P3$$

ピストンに加わる力

$$P2 \times (\text{ピストン下側面積}) - P1 \times (\text{ピストン上側面積})$$

向きは上向き

モノチューブダンパー Bump (最大値)



ダンパーのbump側減衰力最大の状態

$$P1 = 0, P2 = P3$$

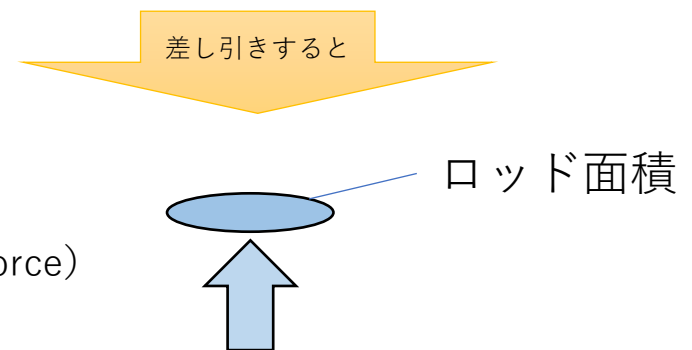
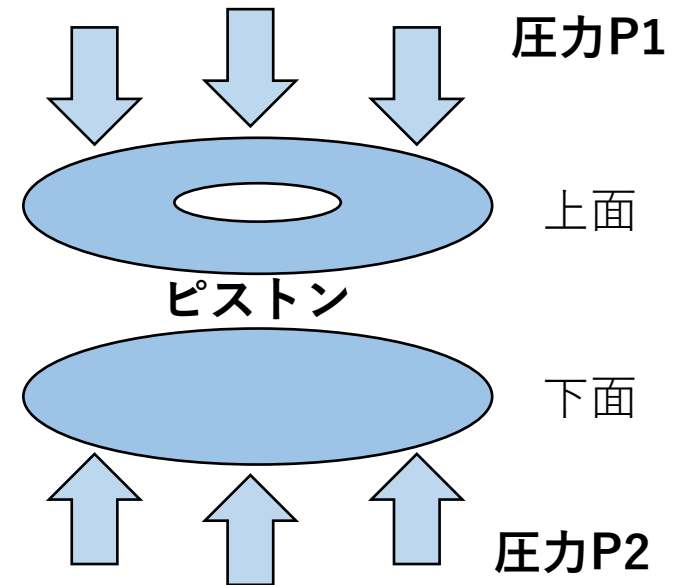
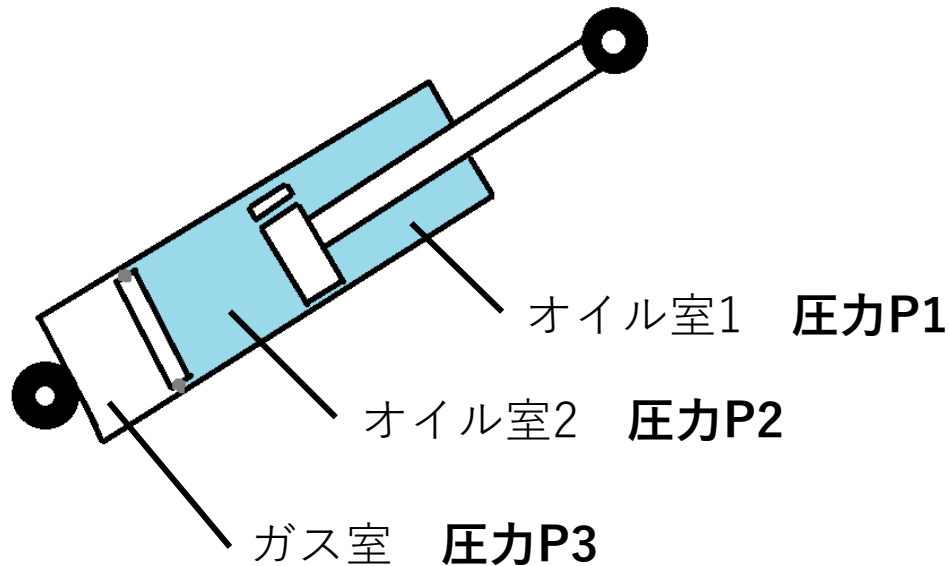
ピストンに加わる力

$$P2 \times (\text{ピストン下側面積}) - P1 \times (\text{ピストン上側面積})$$

0

bump最大減衰力から、必要なガス圧を計算する事が出来る。

静止状態の力のつり合い

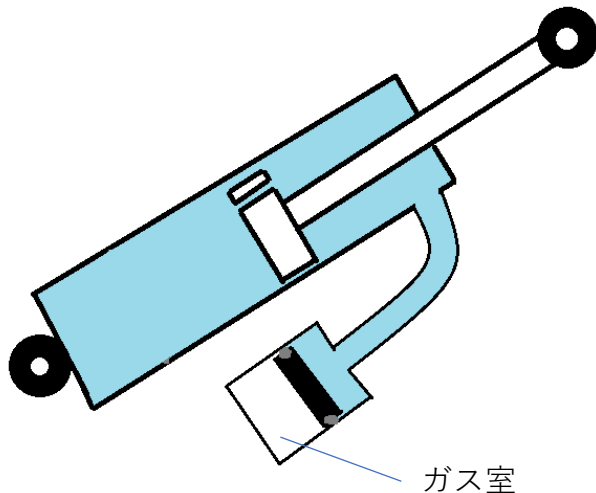
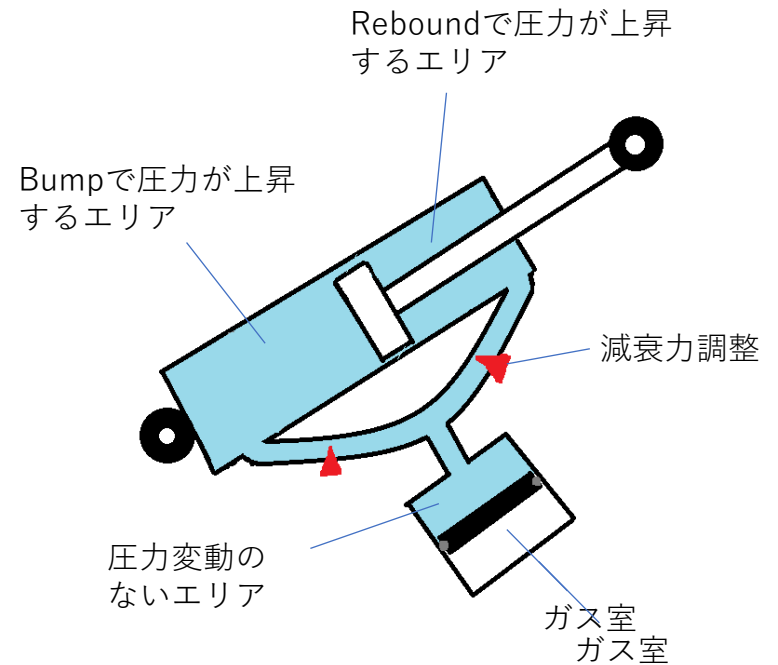
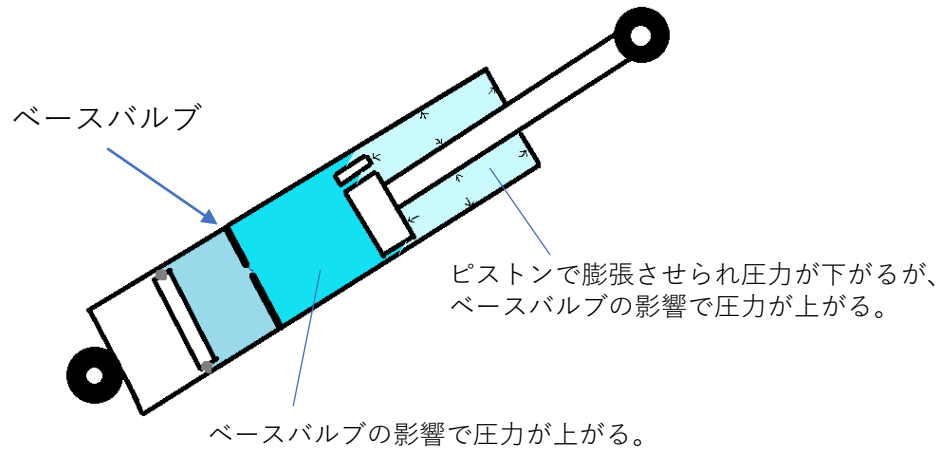


ダンパーが静止状態でピストンに加わる力（ガス反力、rod force）

$$P2 \times \text{ロッド面積}$$

ロッド面積は、計測可能なためP3を計算する事が可能。

色々なモノチューブダンパー



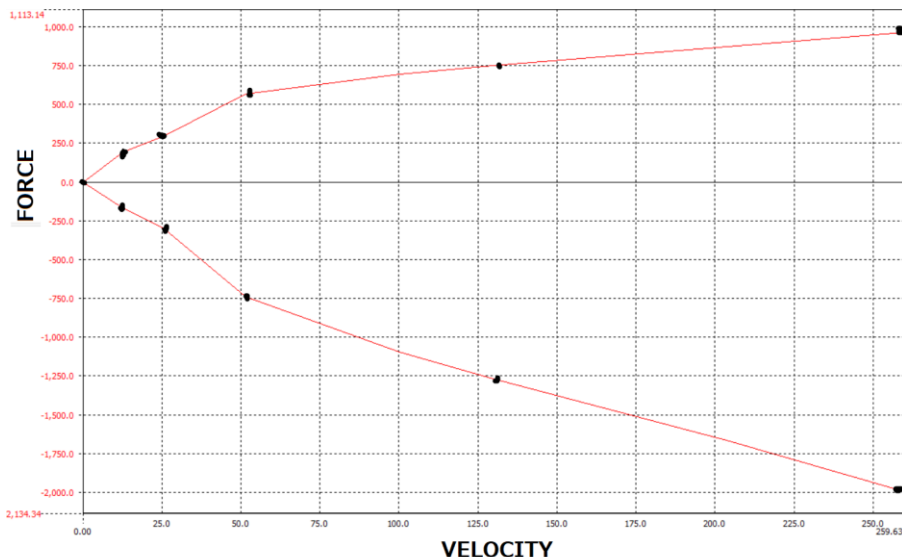
アネブル クイズ2

👉 この構造、どんな用途、目的で使われるのでしょうか？

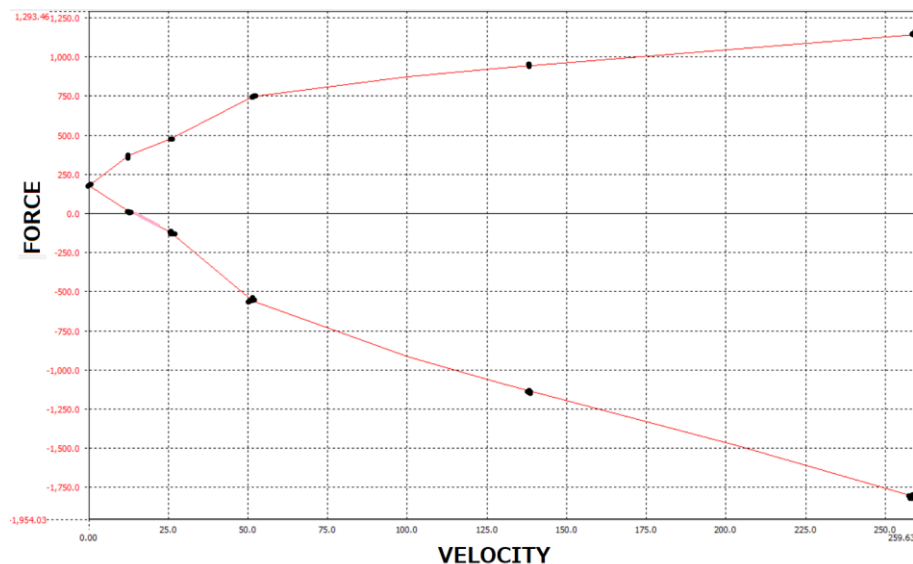
2. 減衰力のグラフ

ダンパーは、速度に応じて運動と反対向きの力を発生します。
グラフでの表し方には、何通りかの方法があります。

ガス反力キャンセル済みグラフ



ガス反力を含んだグラフ

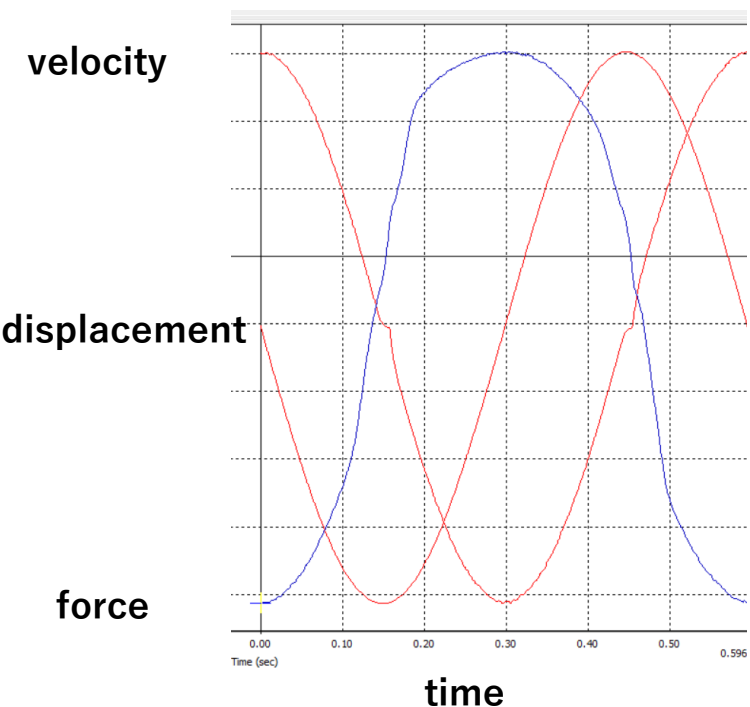


一般的な物は、速度（velocity）を横軸、力（force）を縦軸にとった F-Vグラフと言われるものです。
bump, rebound どちらをプラスにするかメーカー毎に違うため、必ず確認しましょう。

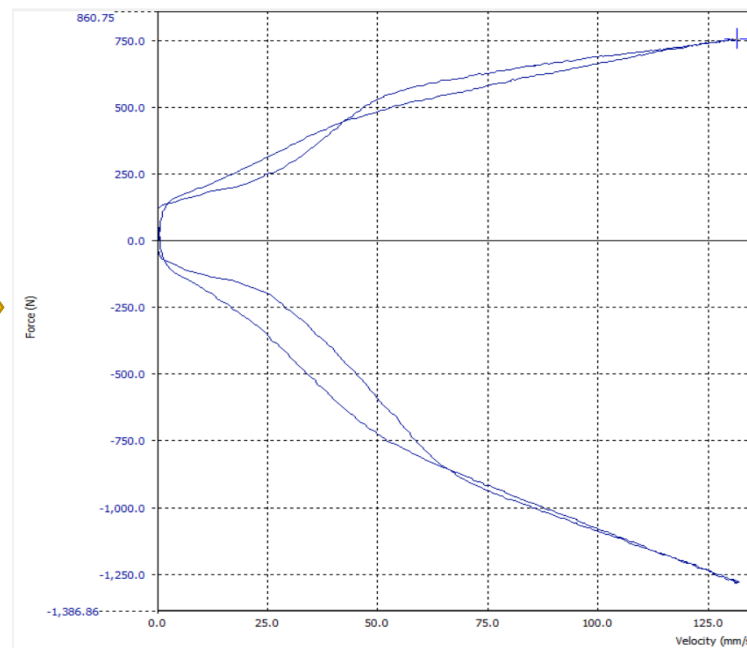
ガス反力は速度に依存しないため、ガス反力をキャンセルしたグラフで表すことが多いです。

PVP (peak velocity plot) グラフの作られ方

ダンパーは、速度に応じて運動と反対向きの力を発生します。
グラフでの表し方には、何通りかの方法があります。



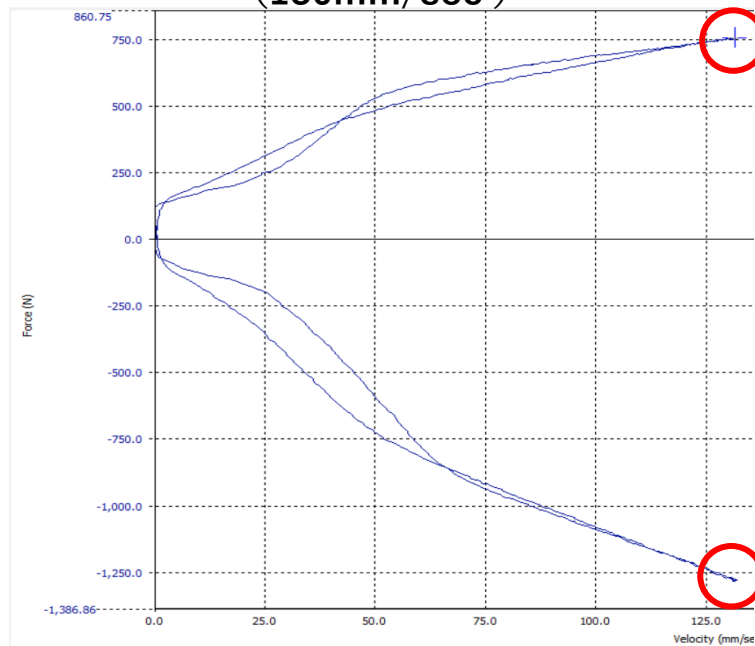
force – velocity リサージュ図
(130mm/sec)



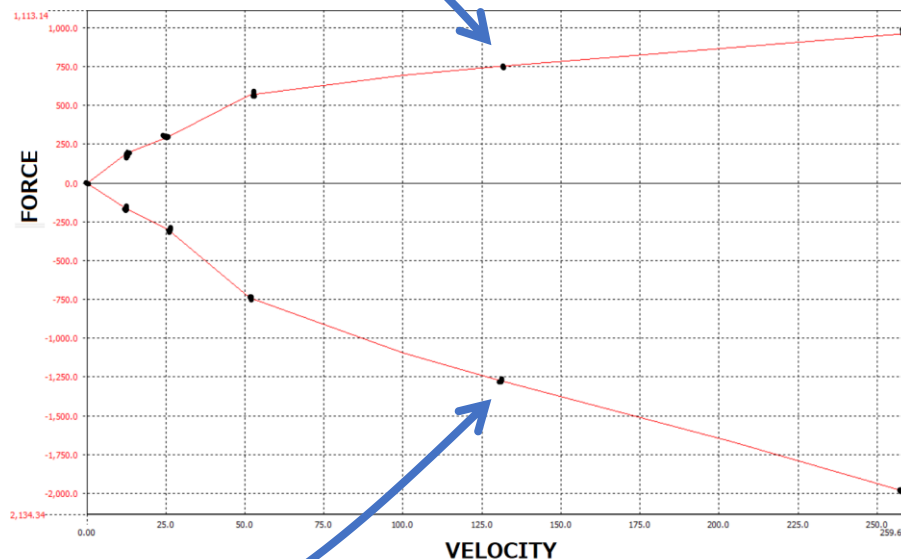
左のグラフは、ピークスピード130mm/secの正弦波でダンパーをストロークさせた時の
time vs force , velocity のグラフです。
force とvelocity でリサージュ図を書くと、右のようなグラフを書くことができます。

リサージュ図を描くことで、フリクション、ヒステリシスなどを確認する事が出来ます。

force – velocity リサージュ図
(130mm/sec)



PVP (peak velocity plot)



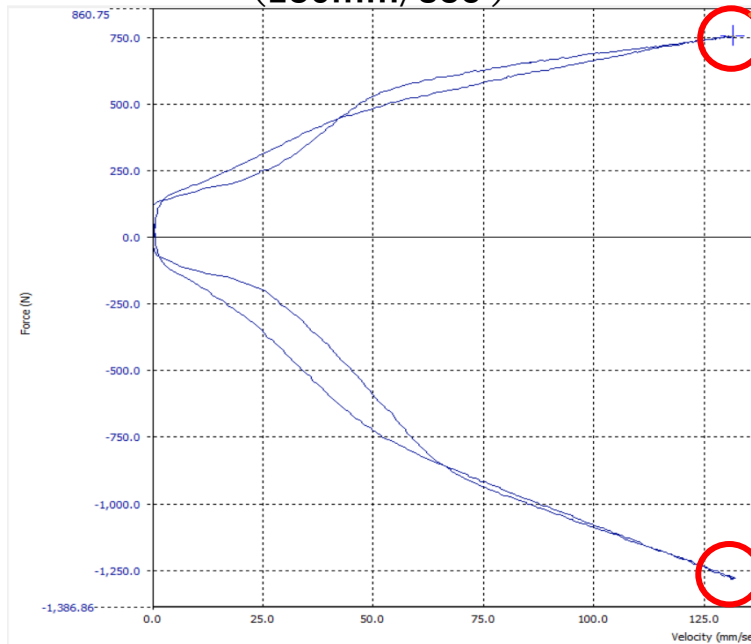
このようなテストを異なったスピードで繰り返し行い、ピークスピード時の減衰力を数字をプロットしていくと、右のようなグラフを書くことが出来ます。

色々な速度のテストのピークの力を直線で結んだグラフを PVP (peak velocity plot) グラフ と呼ぶ事があります。

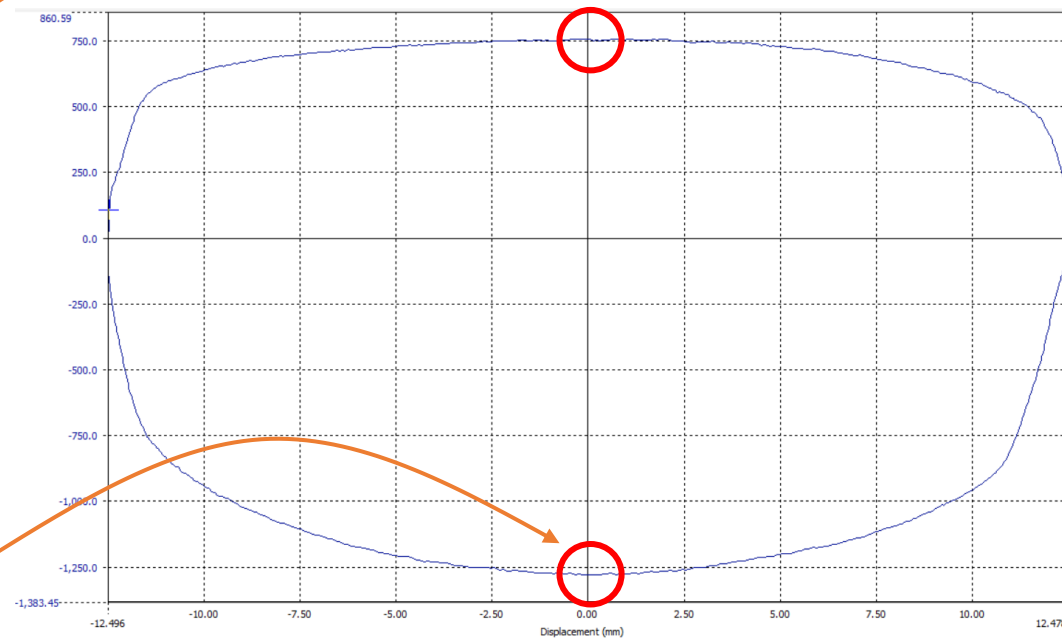
force vs displacement での表し方

横軸を displacement にしてリサージュ図を描くとこのようなグラフになります。

force – velocity リサージュ図
(130mm/sec)



force – displacement リサージュ図
(130mm/sec)

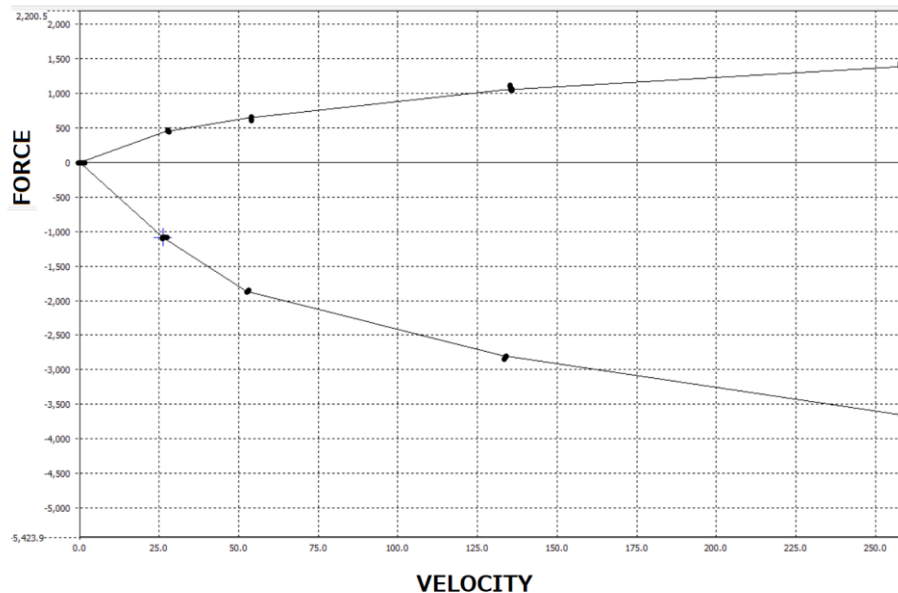


情報量が増える訳ではありませんが、位置に依存する減衰力、バンプラバー荷重、ガス反力などを確認する場合は、この方が見やすい場合があります。

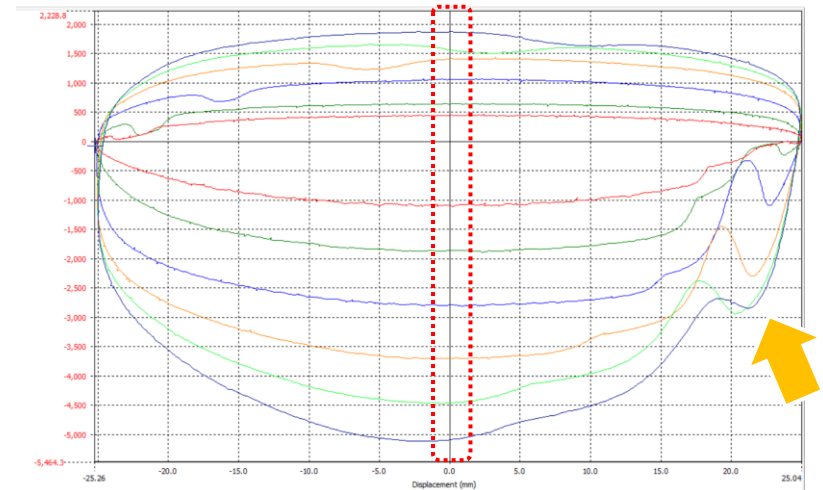
リサージュ図の活用例1

PVPグラフだけでは、不具合を見落としてしまうことがあります。
赤破線で囲った部分以外で不具合が起きていても、PVPグラフに反映される事はありません。

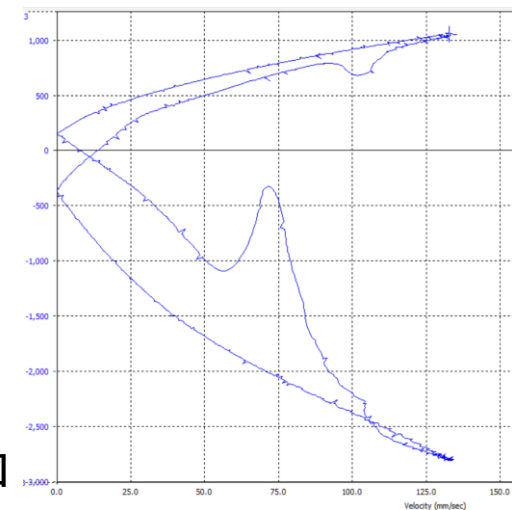
PVPグラフ



force - displacement リサージュ図



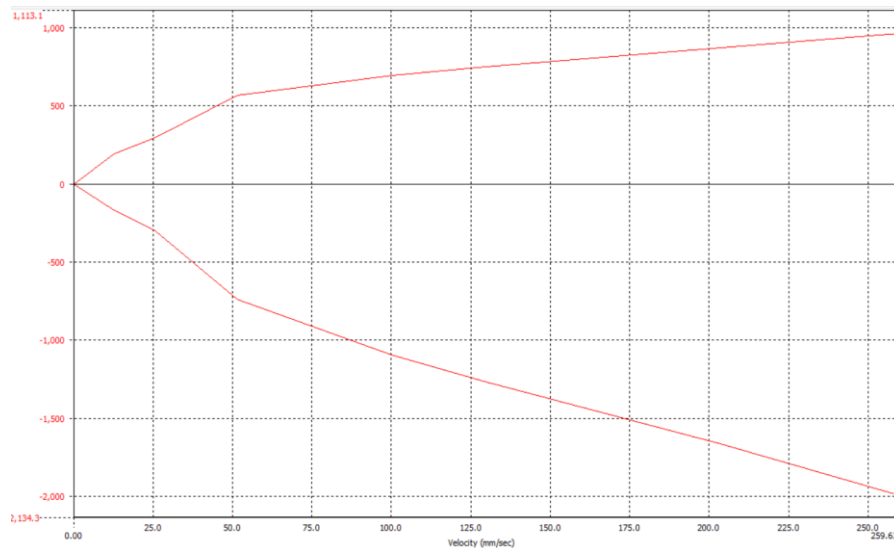
force - velocity リサージュ図



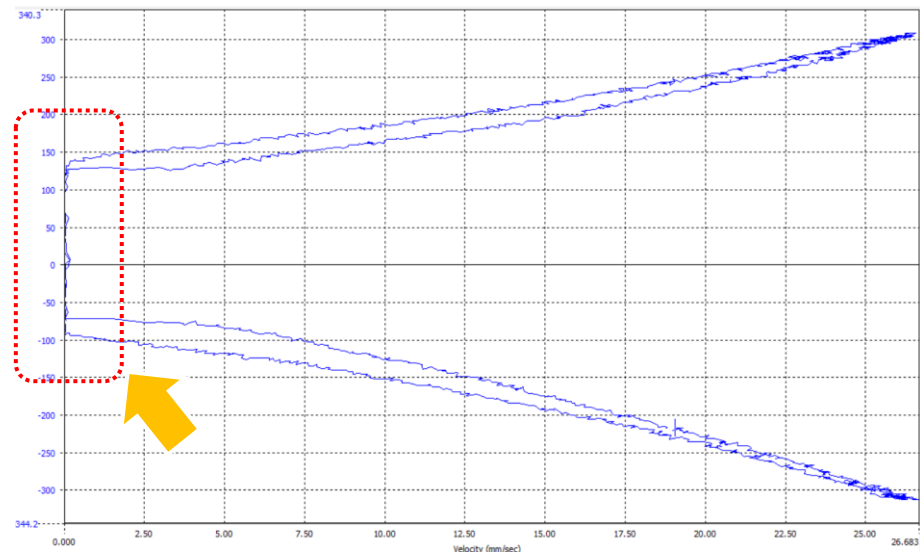
リサージュ図の活用例2

フリクションは、ダンパーの性能を語るうえで外すことは出来ません。
フリクションは速度特性ではありませんので、PVPグラフでは埋もれてしまいます。

PVPグラフ



force – velocity リサージュ図



リサージュ図の活用例3

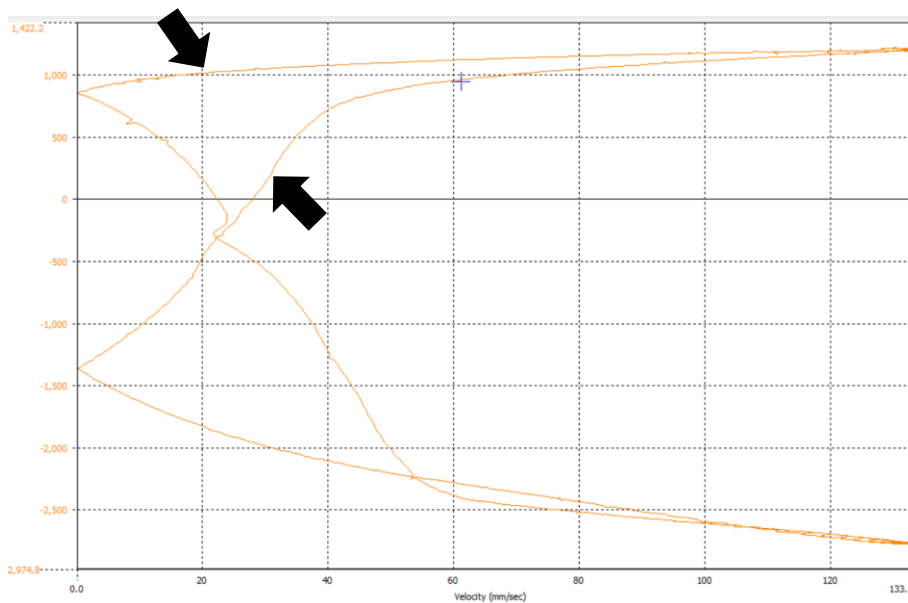
ヒステリシス (Hysteresis) とは、

ある系の状態が、現在加えられている力だけでなく、過去に加わった力に依存して変化すること。

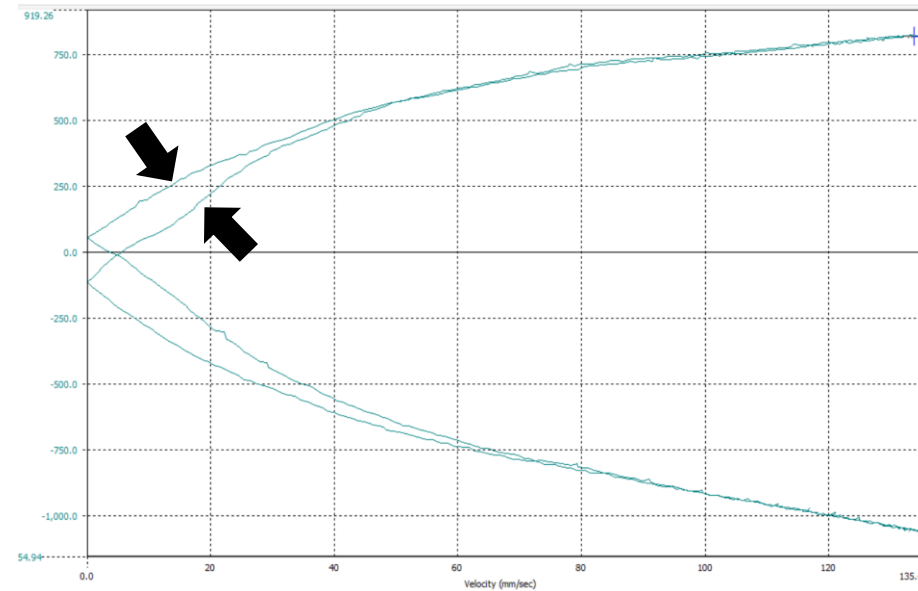
ヒステリシス=悪 ではありませんが、レースではヒステリシスが少ないダンパーを求められる事が多いです。

これもリサージュ図を描くことで、確認する事が可能になります。

ダンパー A



ダンパー B



3. 減衰力チューニング

減衰力発生方法にはいろいろな方法があります。
ここでは代表的な物を紹介します。

①ピストン+シム

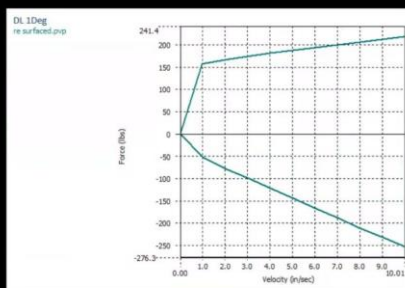
ピストン自体のデザイン、シムの組み合わせなどで
チューニングの幅が広いのが特徴

DL Piston (PI-DL005-1DG)



Side 1

Side 2



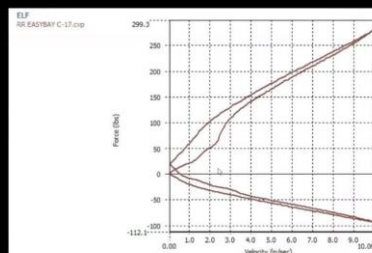
PENSKE
RACING SHOCKS

ELF Piston (PI-ELF55)

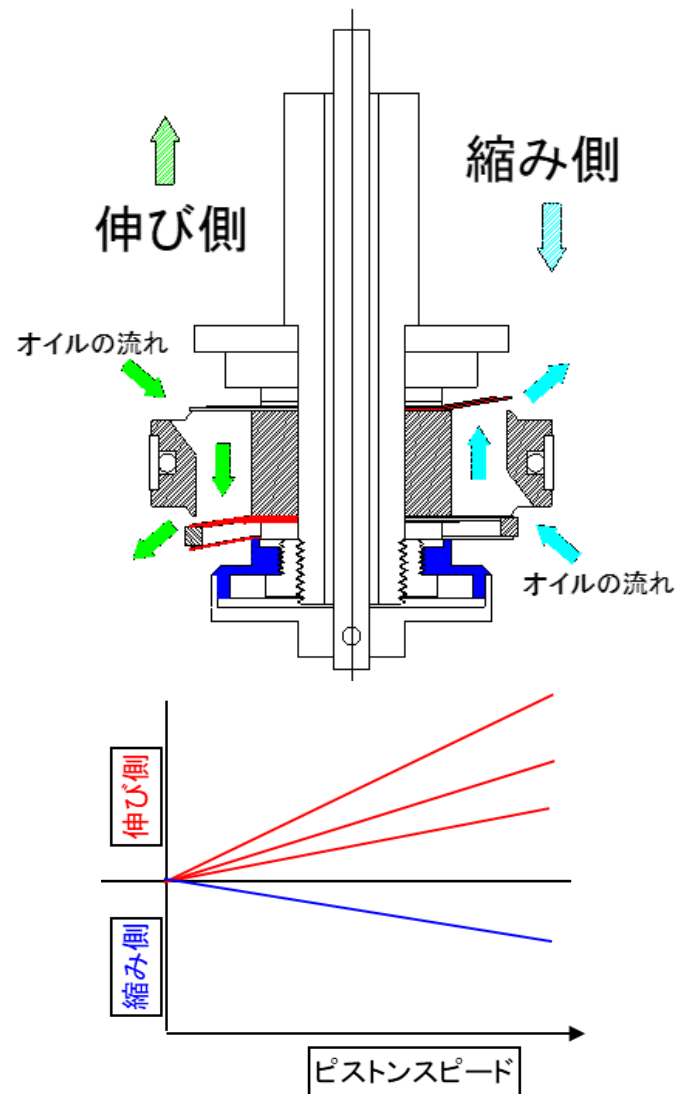


Side 1

Side 2



PENSKE
RACING SHOCKS

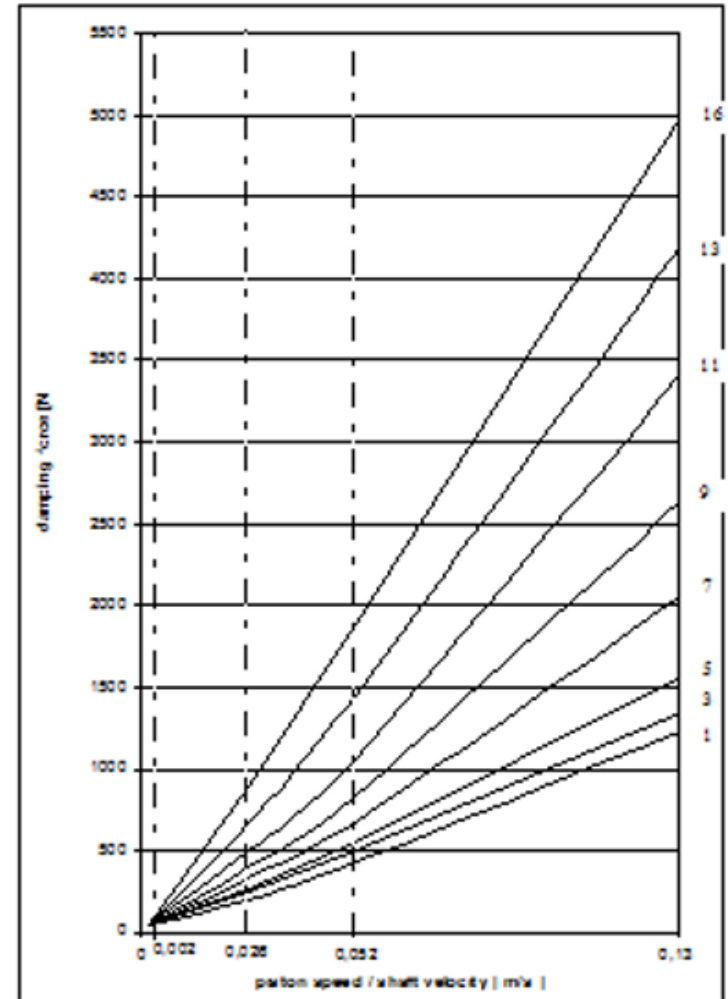
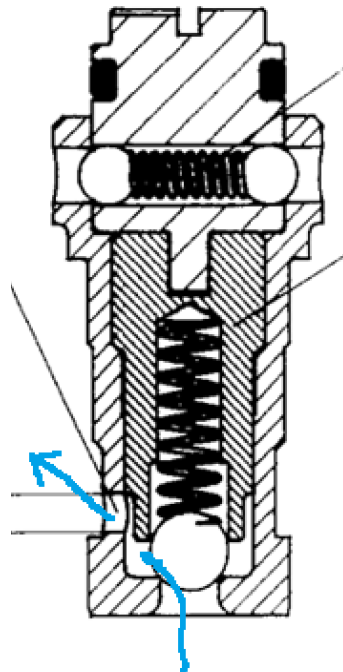
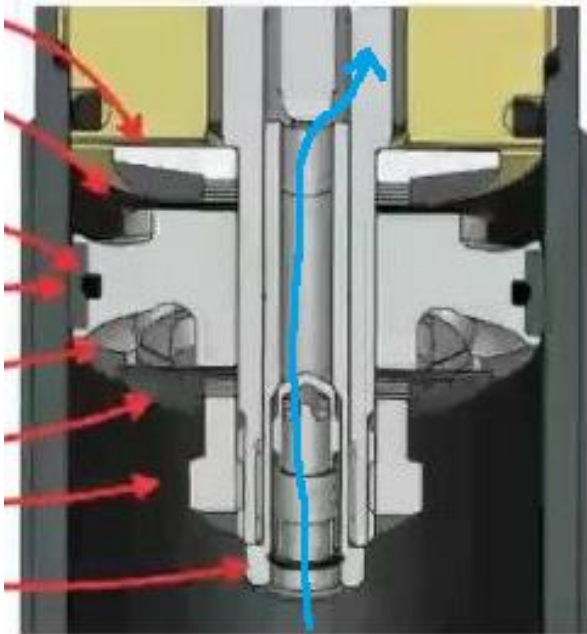


シムの枚数や厚みを変えて、特性を変化させる
事が可能です。

②ニードル または シャッター

調整機構を持たせることが容易

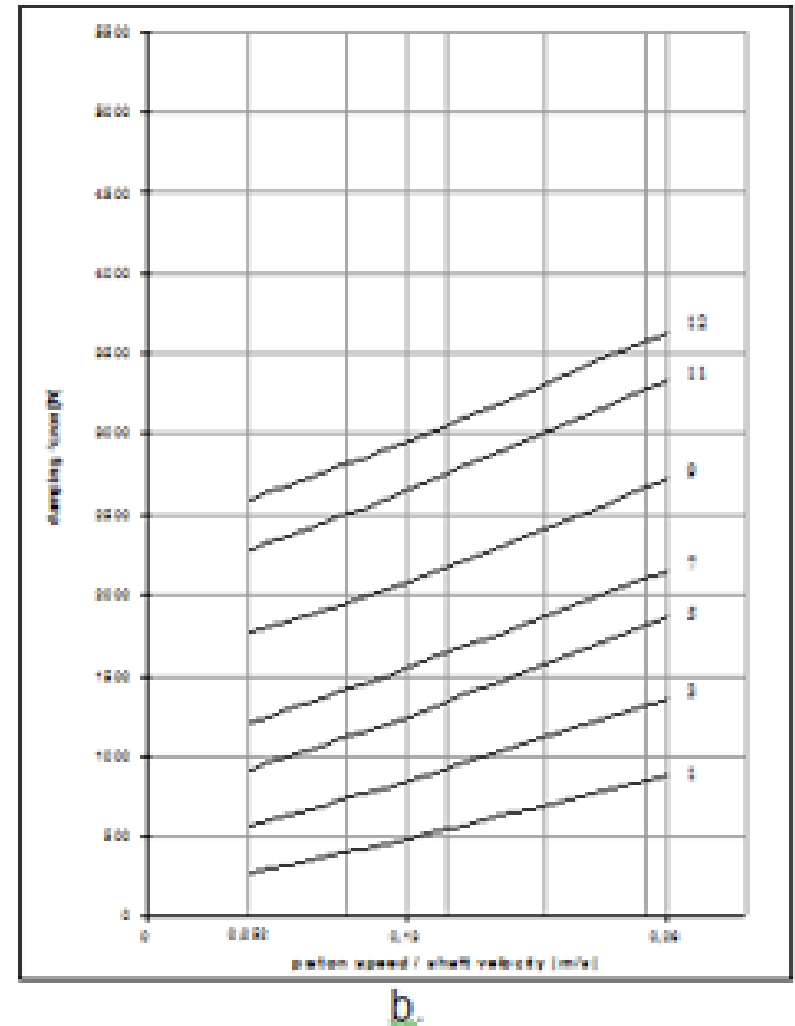
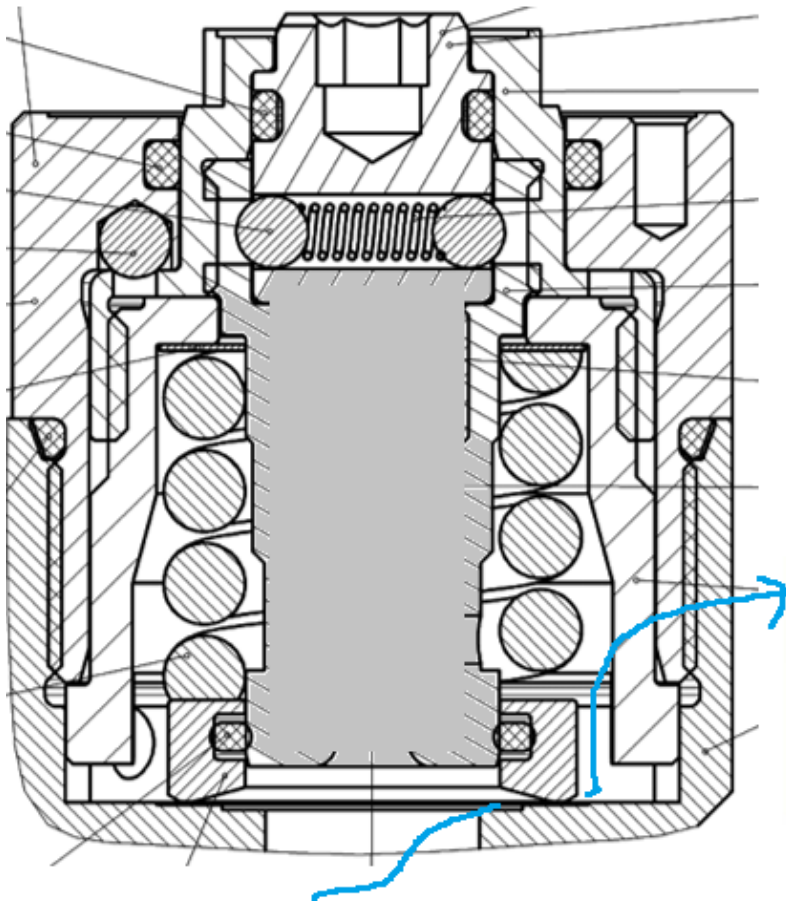
開口部面積の2乗に反比例し、
速度の2乗に比例する特性が特徴



③バルブ+コイルスプリング

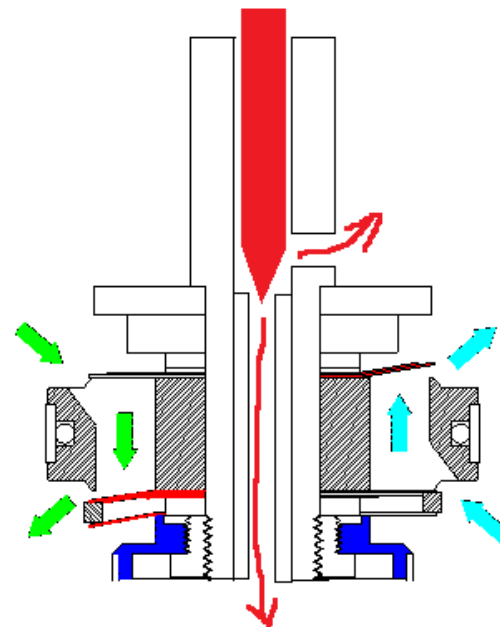
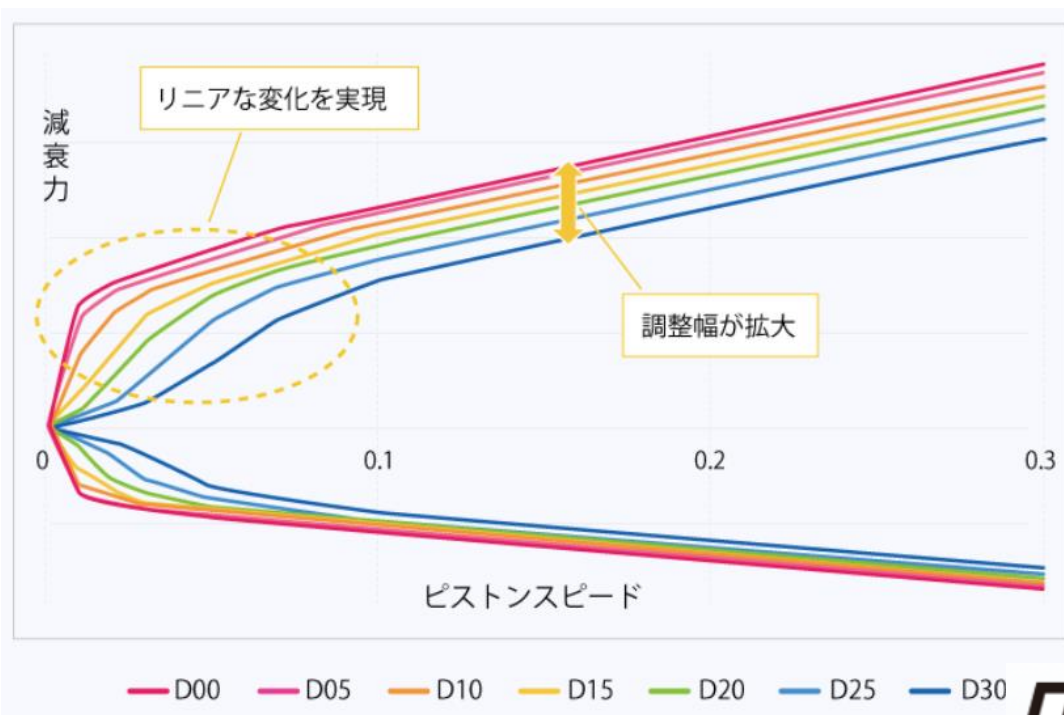
コイルスプリングのレートや、バルブの受圧面積をチューニング可能。

調整機能を持たせる事が容易。



- ①ピストン+シム で全体的な特性を決めて
+
②ニードル/シャッター で低速を調整可能にしたもの

少ない部品点数で実現可能で比較的低コストの為、
アフターマーケットのダンパーへの採用例が多い。



HKS

HIPERMAX

②ニードル/シャッター

と

③バルブ+コイルスプリング

レース用4wayダンパーなどに採用されている。

