

明治大学 機械工学科 機械設計製図B

バランスウエイトの設計について



2024年5月9日

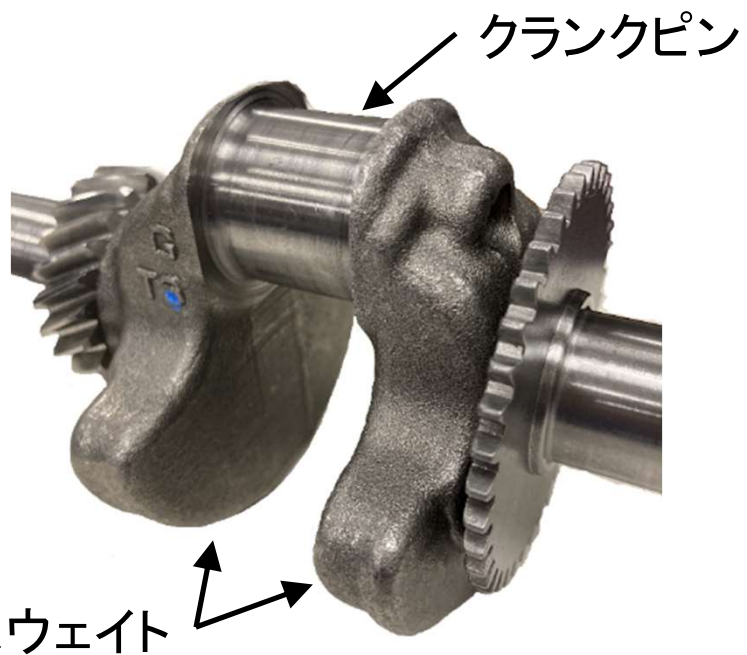
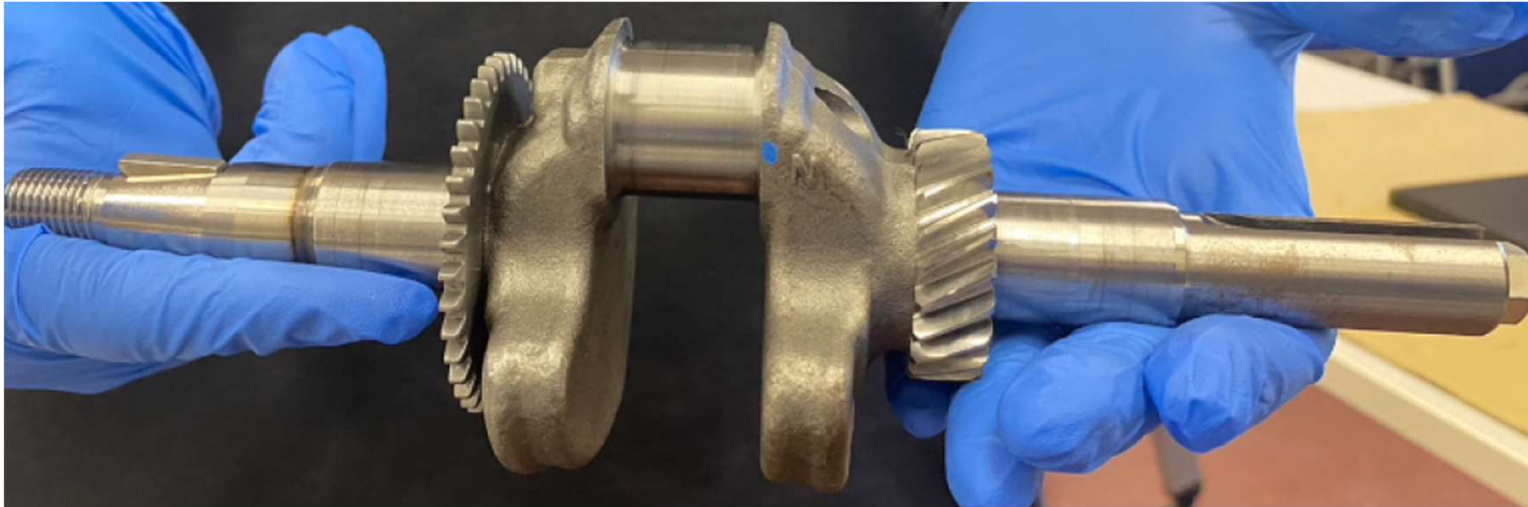
森 康時

更新日：2024/05/08

バランスウェイトとは？

[47]

クランクシャフト



扇形をした重り

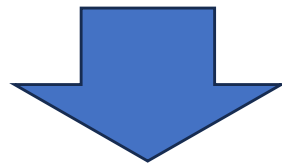
エンジンに振動は付き物

- 振動や騒音は人に**不快**かつ**有害**

例：白蠟病（はくろう病）

チェーンソー使用などによる強い振動を、長時間受け続けると振動によって手足の血管が収縮し、手足の色が白くなって感覚を失う振動障害。

- エンジンや装置の**強度・耐久性を低下**させる

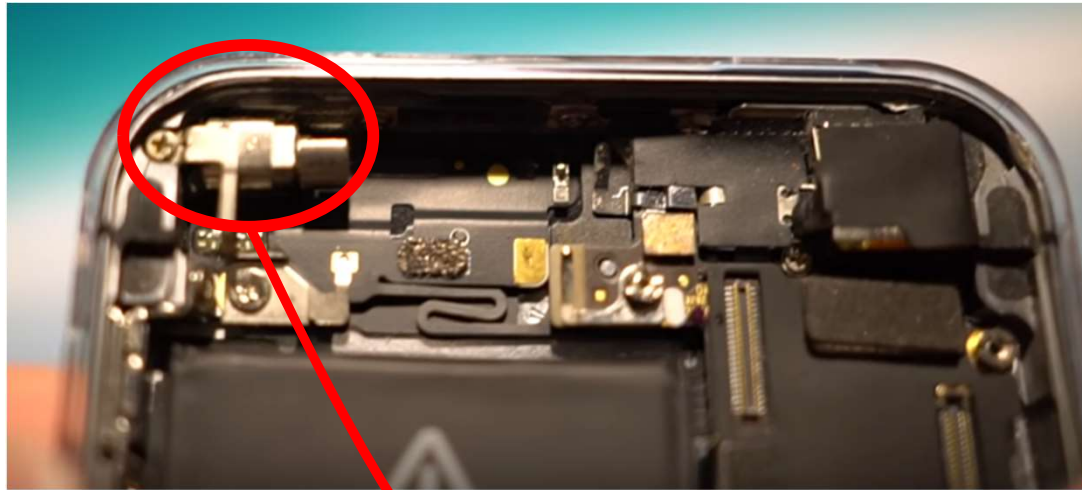


できるだけ振動が小さくなるよう設計する

振動を活用することもある

[47]

スマートホンのマナーモードは、故意にアンバランスなウェイトを回転させて振動を発生させる。



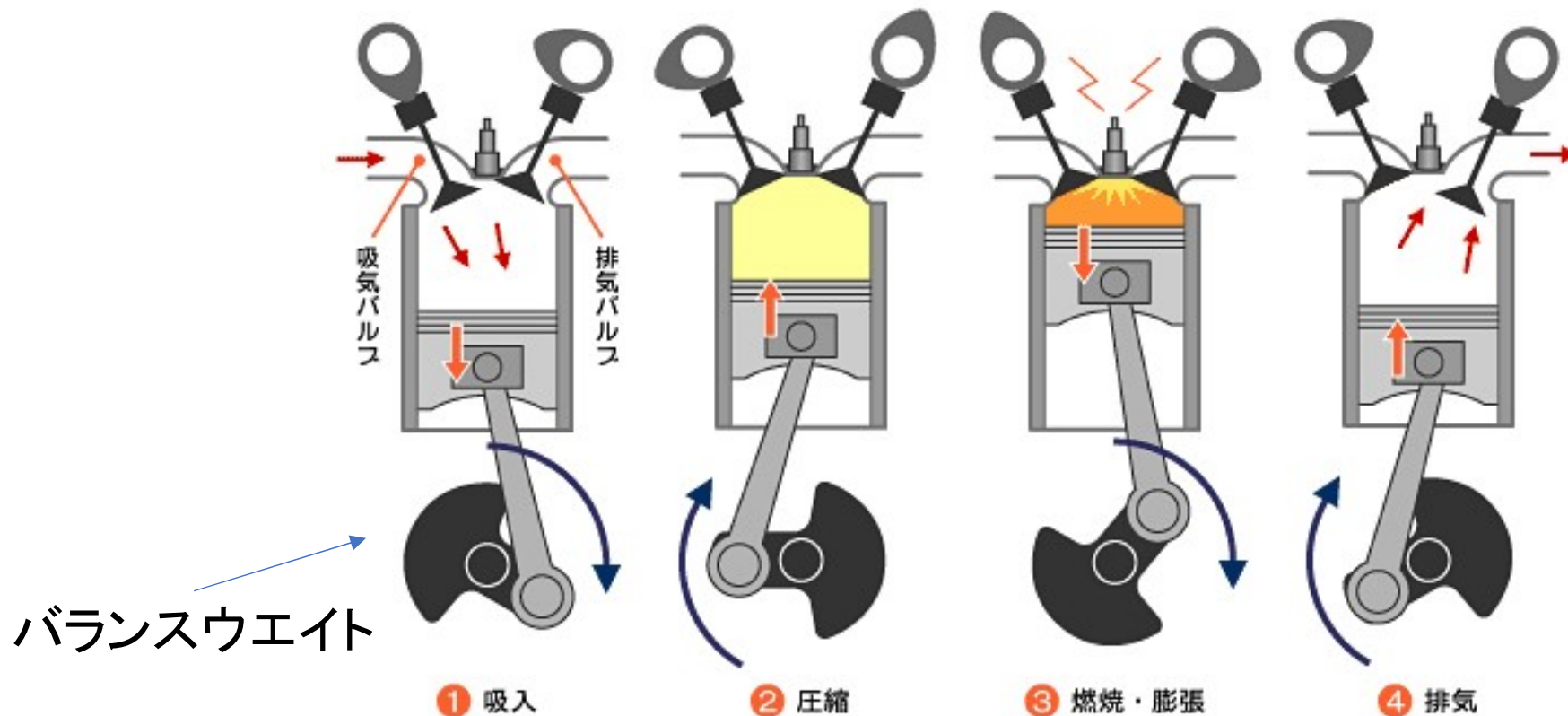
ERM方式 : Eccentric Rotating Mass
偏心回転質量

往復動エンジンの振動

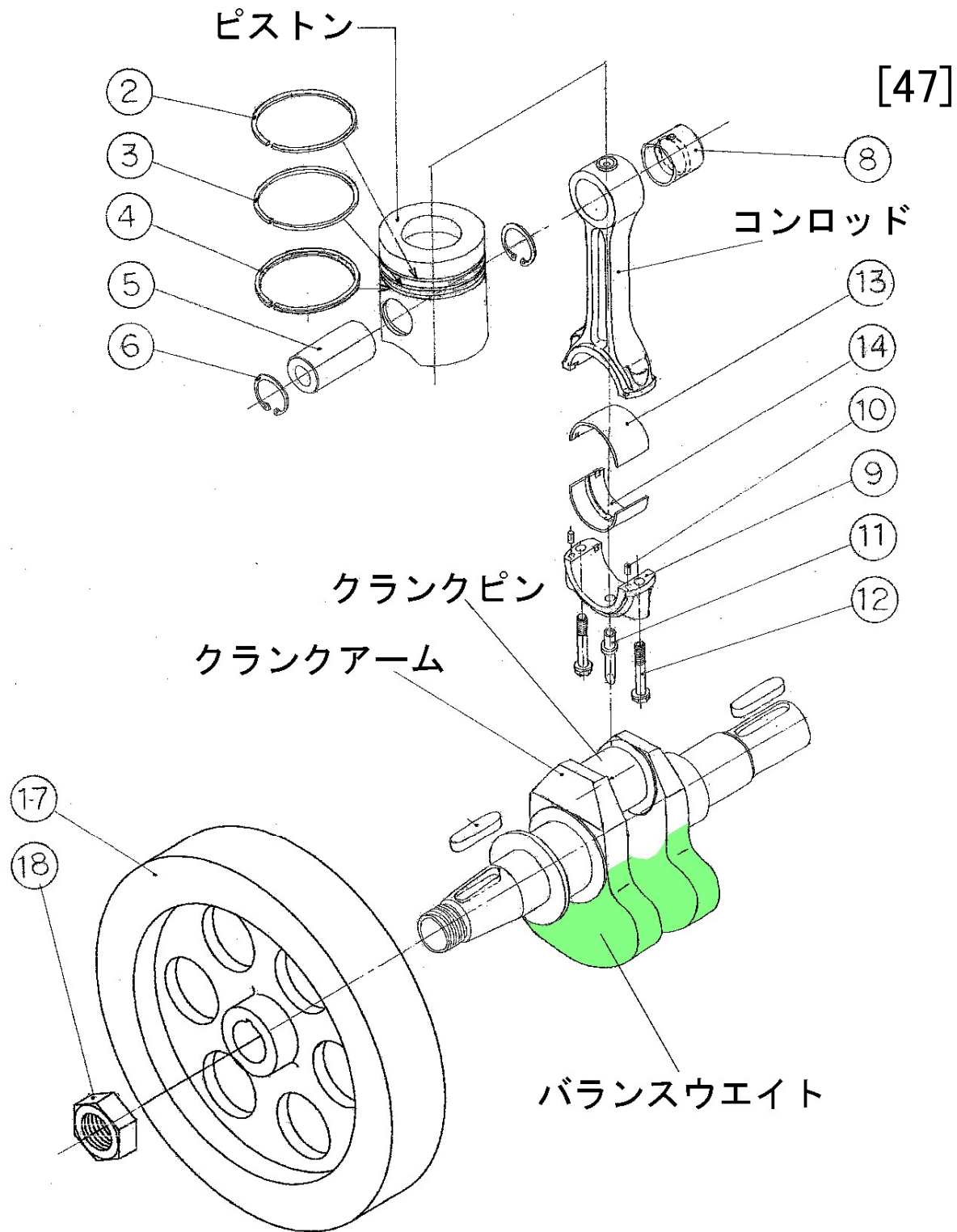
[47]

- ◆ クランク軸の回転中心から離れたところに質量があり、回転時にアンバランスによる振動が発生
- ◆ さらに各行程において、大きさと方向が時々刻々変化する力が加わり、振動を増大

→ バランスウェイトを用いて振動を抑制



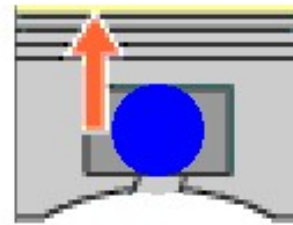
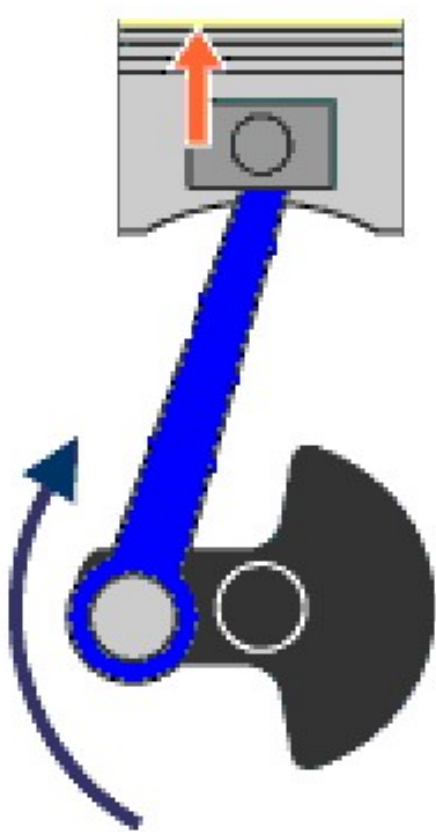
単気筒エンジンの 主運動部 分解図



単気筒往復動エンジンのバランス

[47]

回転バランスと往復動バランスに分けて考える。



往復動運動

- ・ ピストン
- ・ ピストンピン

→ コンロッドの質量の $1/3$



回転運動

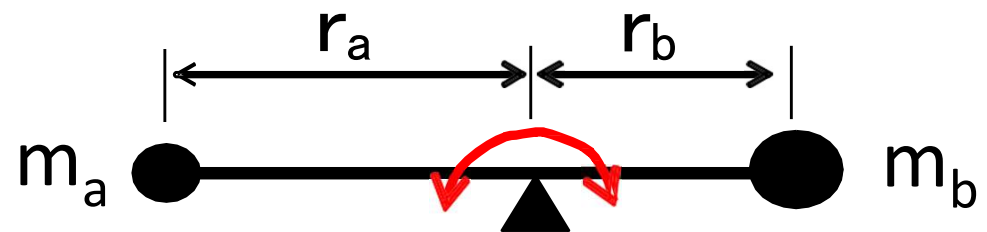
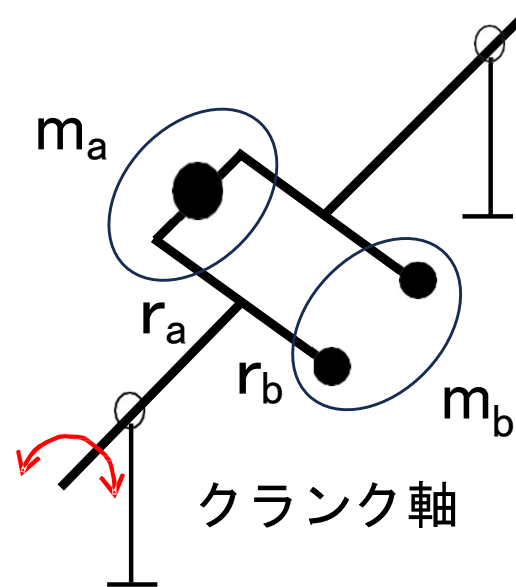
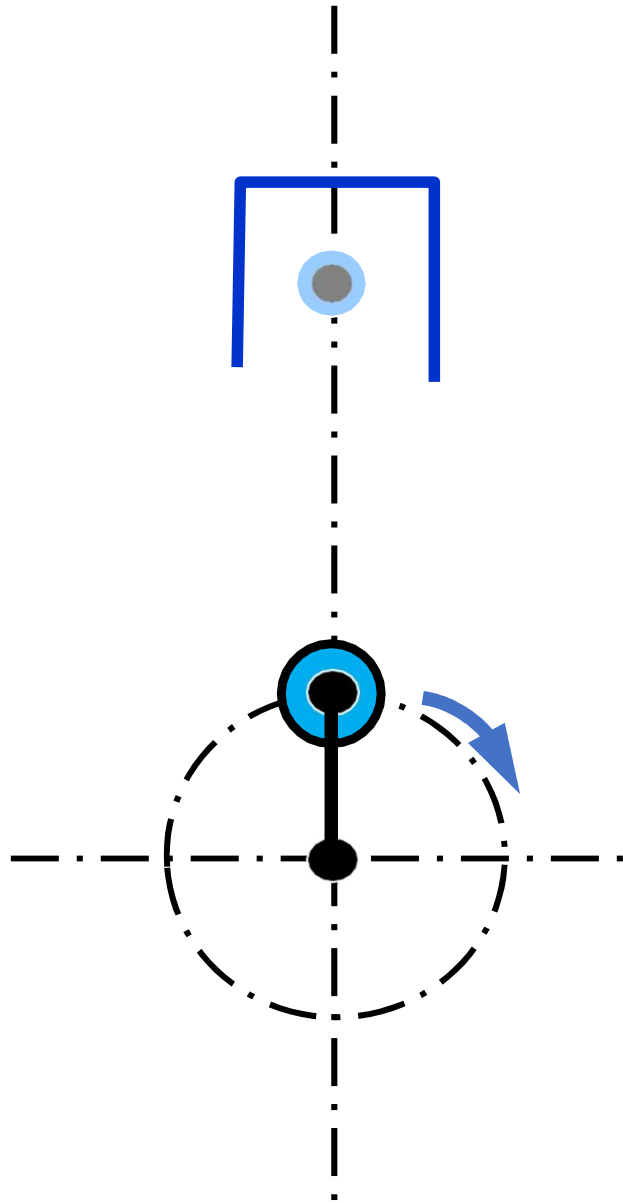
- ・ クランクピン
- ・ クランクアーム

→ コンロッドの質量の $2/3$

この授業では、回転バランスのみを考慮して
バランスウェイトを設計する。

回転バランスの基本はモーメント

[47]



モーメントのつり合いを取る

$$m_a \times r_a = m_b \times r_b$$

エンジンの回転バランス

[47]

回転する部分のモーメントをつり合わせる。

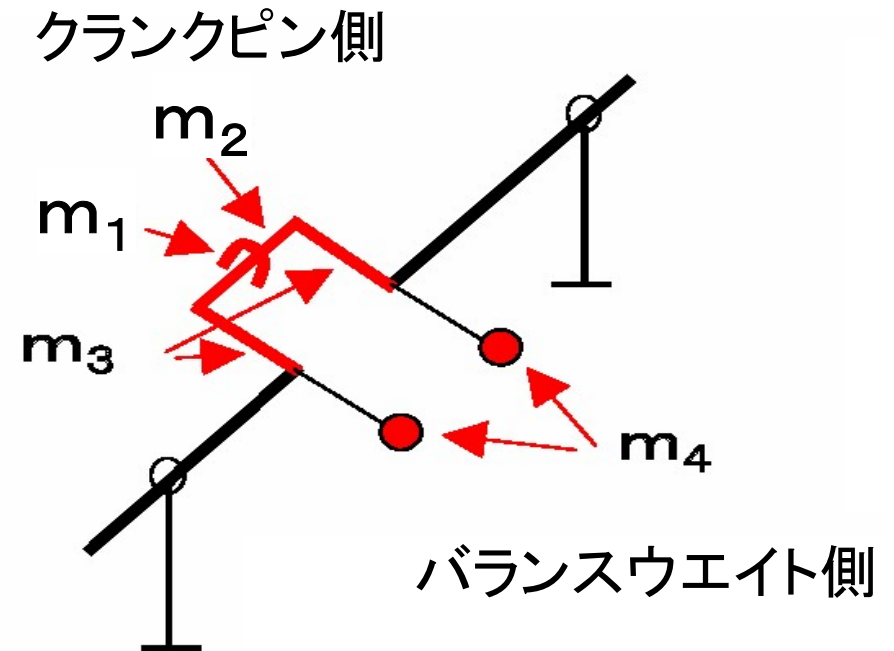
クランク軸のクランクピン側のモーメントと
つり合うモーメントをクランクピンの反対側
に取り付ける**バランスウェイト** m_4 によって
発生させる。

クランクピン側

- ・コンロッド大端部 m_1
- ・クランクピン m_2
- ・クランクアーム m_3

バランスウェイト側

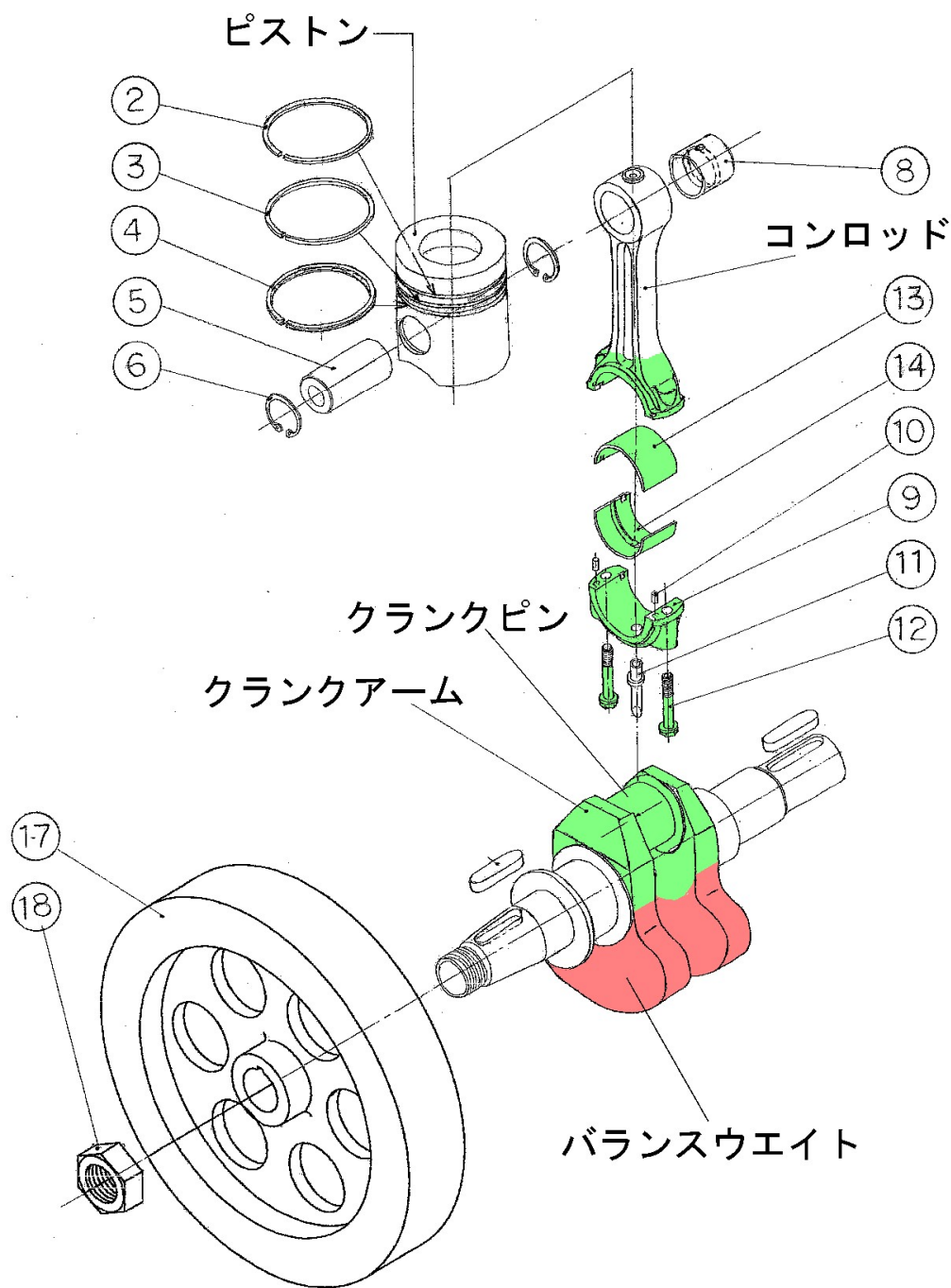
- ・バランスウェイト(+クランクアーム下半分) m_4



従って $m_1 r_1 + m_2 r_2 + m_3 r_3 = m_4 r_4$ とすれば、回転はバランスする。

バランスの取り方

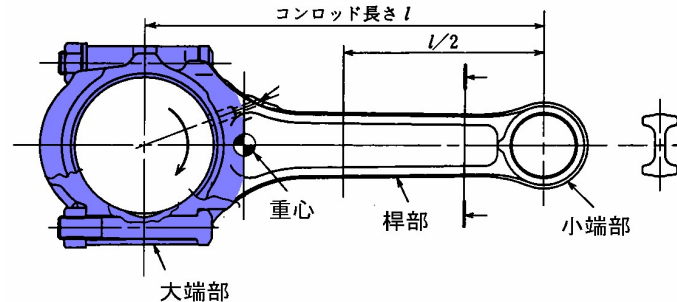
バランスウェイト(赤)により
回転部質量(緑)との
回転バランスをとる



回転部質量の計算方法

[47]

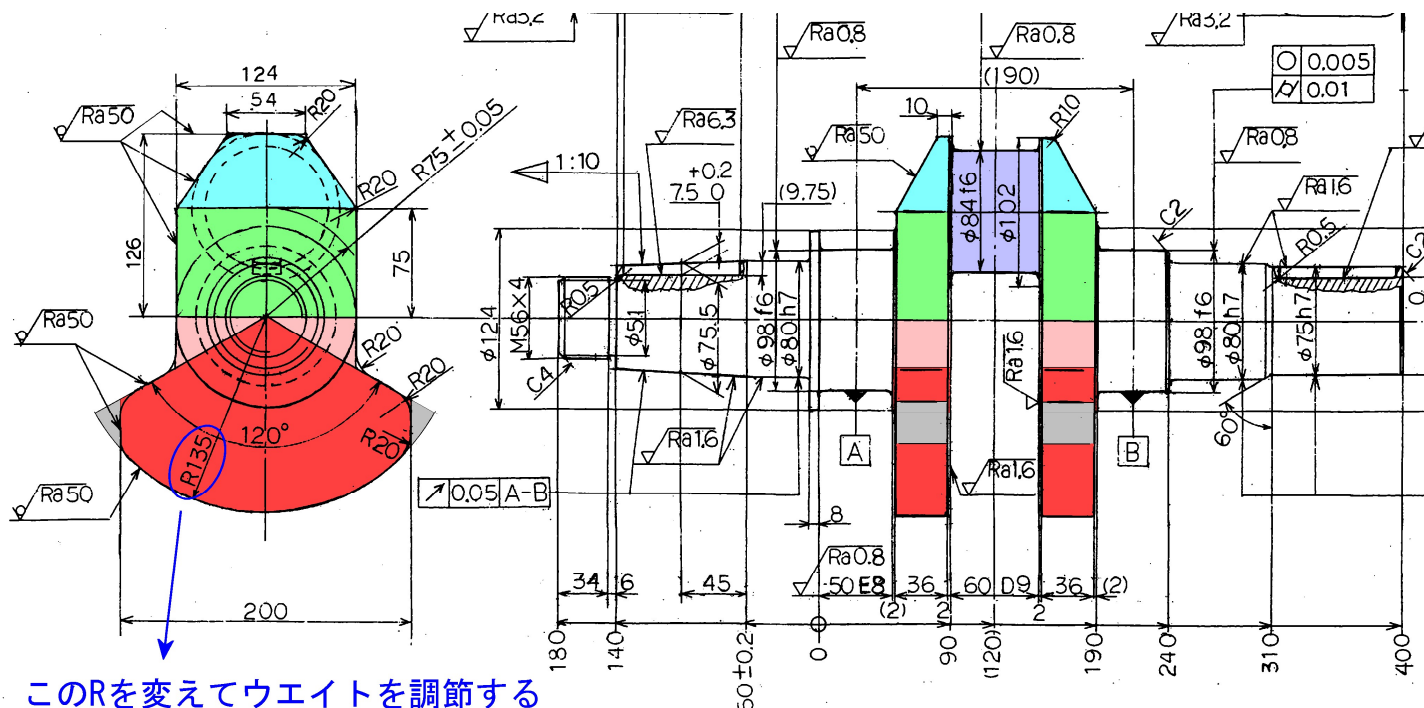
コンロッド



大端部質量

$$= \text{クランクピン質量} \times 1.33$$

クランクシャフト



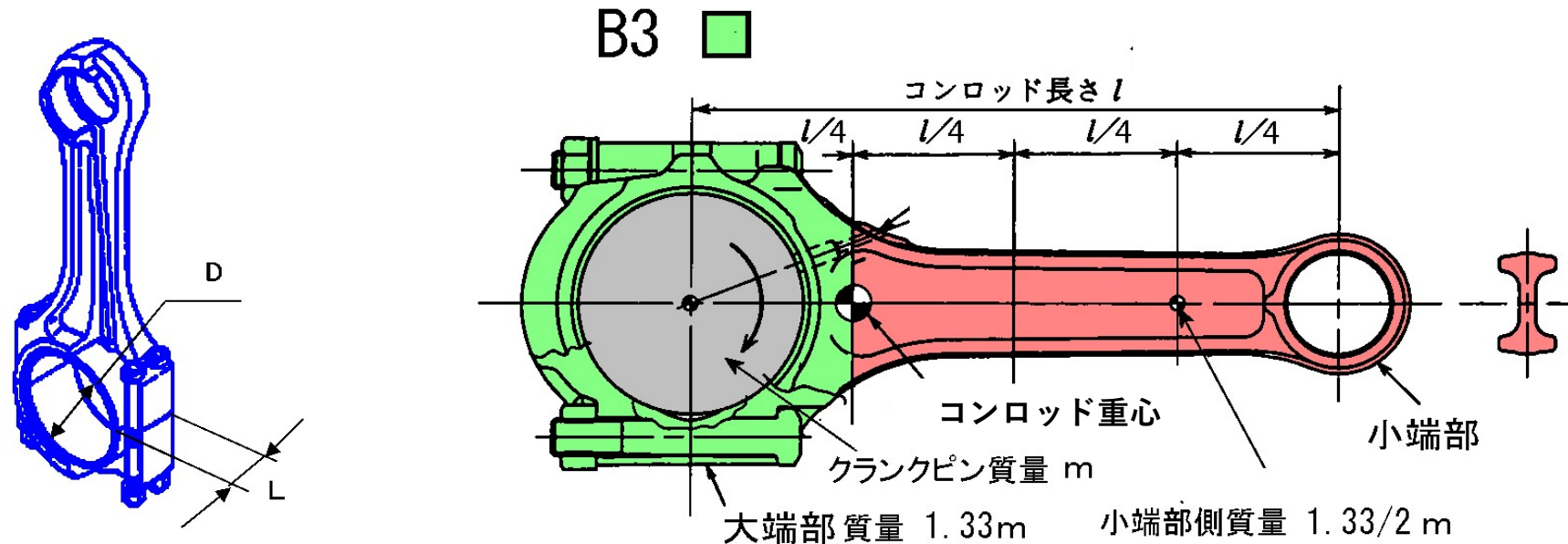
クランクピン側



バランスウエイト側

コンロッドの質量取り扱い詳細

[47]

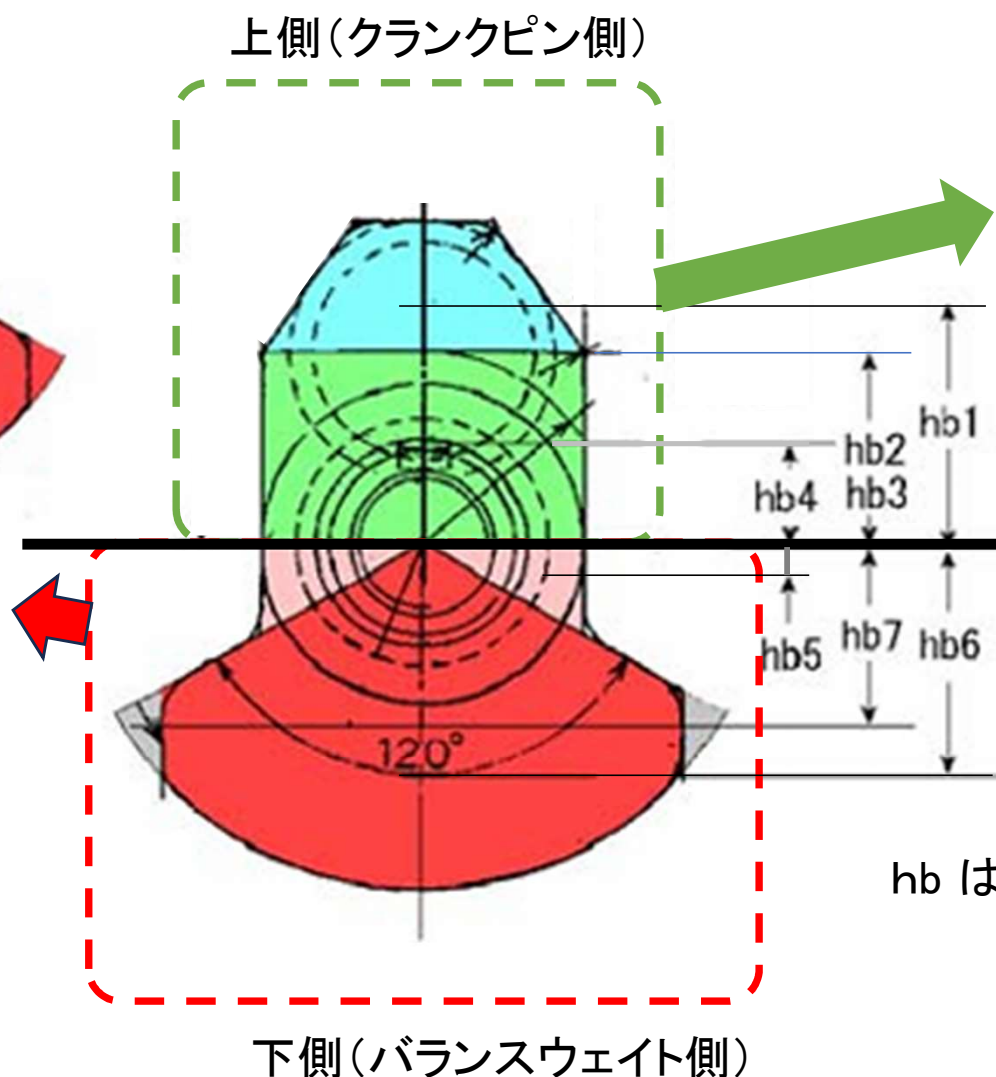
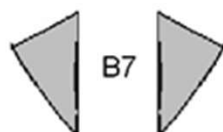
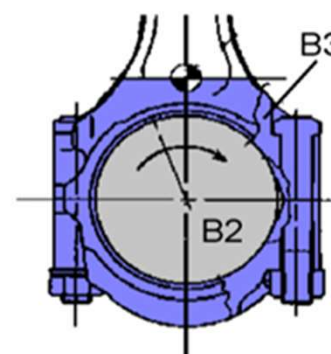
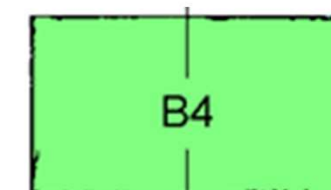


1. 大端部を回転部とし、小端部を往復動部とする。
2. 大端部質量はコンロッド全体の2/3とし、小端部質量を1/3とする(経験値)。【テキストPart 2 4/10ページ】
3. コンロッド全体の質量はクランクピン質量の2倍とする。
従って大端部の質量 m_1 はクランクピン質量の1.33倍
(多数エンジンの平均値)とする



$$m_1 = 1.33 \pi D^2 L / 4 \rho$$

[47]



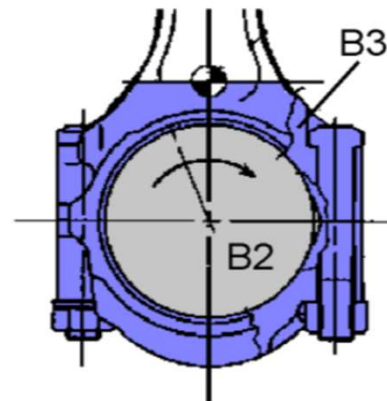
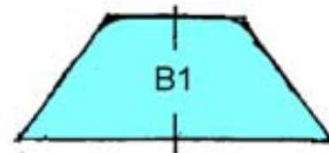
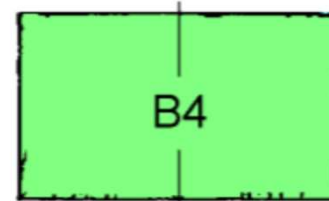
hb は重心までの距離

バランスウェイト計算サンプル(1)

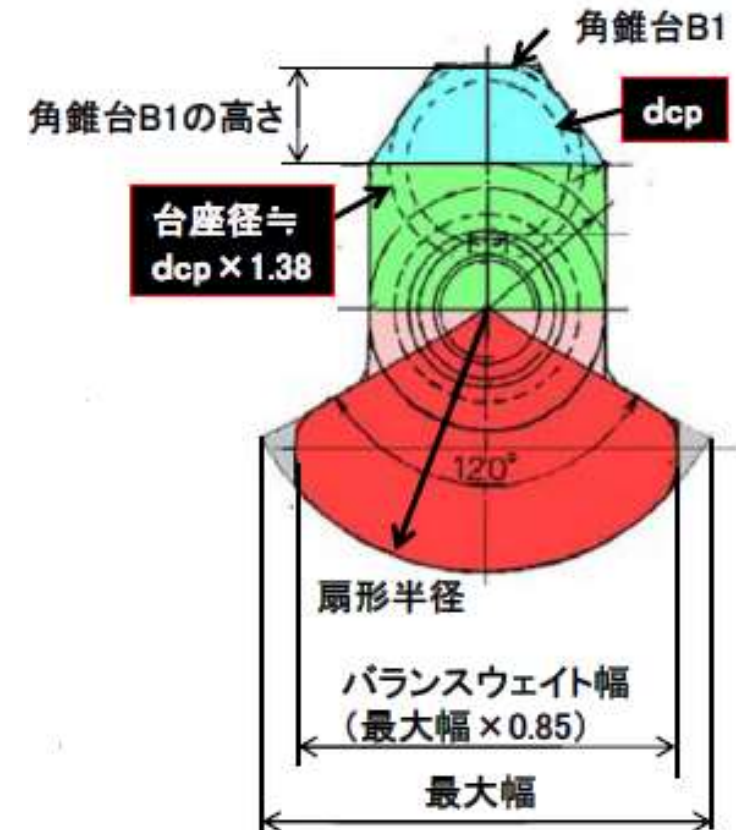
授業Webサイト: バランスウェイトの検討
(レポートサンプル: 手計算による場合) [24-1]

クランクピン側 [47]

上側(クランクピン側)			
クランクアーム B4	クランクアーム長	75.00	mm
	面積	9.83.E+03	mm ²
	体積	3.60.E+05	mm ³
	質量	2.81	kg
	重心距離 hb4	37.50	mm
	モーメント(両側合計)	0.21	kgm
角錐台 B1	上底幅	54.00	mm
	上底厚さ	5.00	mm
	上底面積	270.00	mm ²
	下底面積	4805.08	mm ²
	高さ (dcp X 1.38) / 2	57.96	mm
	体積	1.20.E+05	mm ³
	質量	9.36E-01	kg
	重心距離 hb1	93.41	mm
	モーメント(両側合計)	0.17	kgm
クランクピン B2	直径 dcp	84.00	mm
	長さ	64.00	mm
	体積	3.55.E+05	mm ³
	質量	2.77E+00	kg
	重心距離 hb2	75.00	mm
	モーメント	0.21	kgm
コンロッド 大端部 B3	質量	3.68	kg
	重心距離 hb3	75.00	mm
	モーメント	0.28	kgm
上側合計モーメント		0.84	kgm



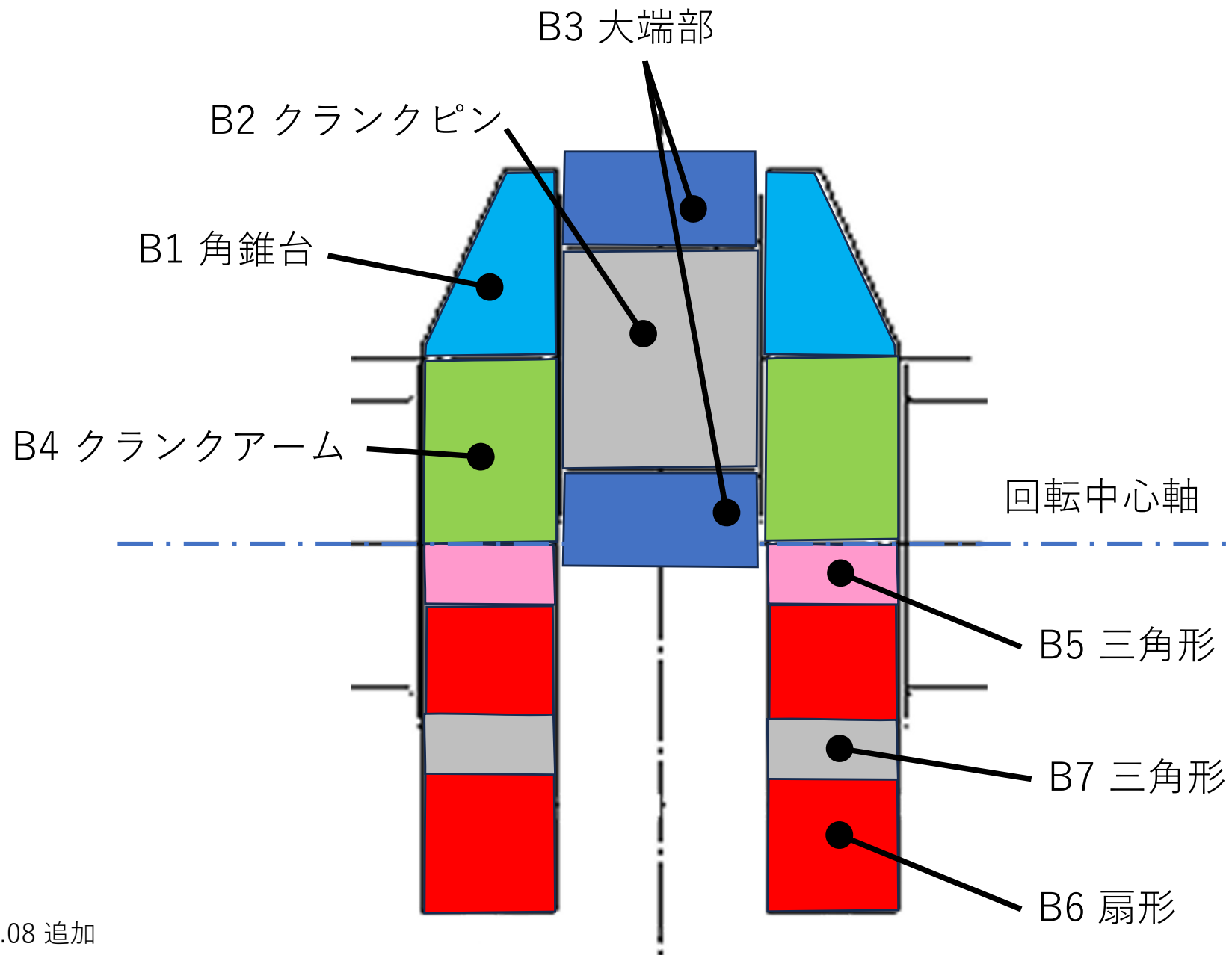
コンロッド大端部の質量は
クランクピン質量の1.33倍とする



角錐台B1高さは
(dcp × 1.38) / 2とする
dcp: クランクピン径

バランスウェイト計算各部位の形状と場所

[47]



バランスウェイト計算サンプル(2)

バランスウェイト側 [47]

バランスウェイト質量の検討

値入力

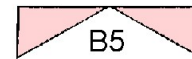
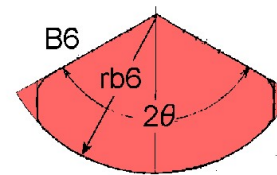
共通条件

密度(S45C)	7.80E+03	kg/m ³
クランクアーム厚(バランスウェイト厚)	36.00	mm

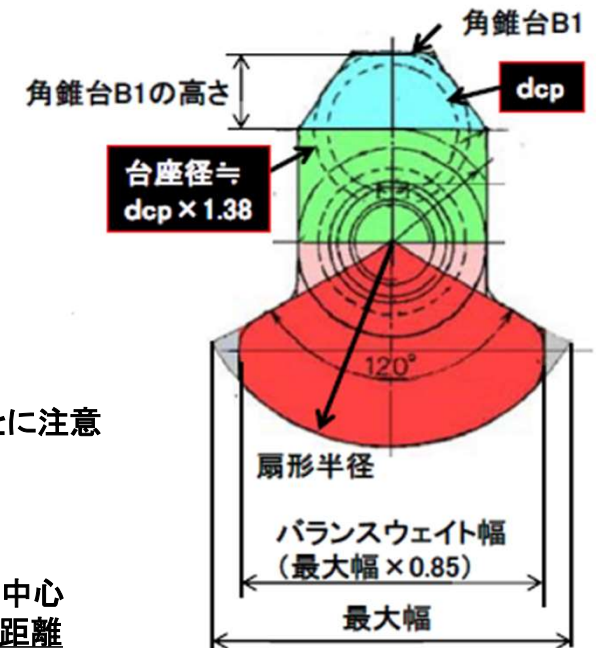
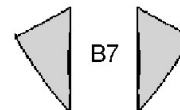
下側(クランプ反対側)			
扇型 B6	半径 rb6 *	138.00	mm
	中心角 2θ	120.00	deg
	面積	1.99E+04	mm ²
	体積	7.18E+05	mm ³
	質量	5.60	kg
	重心距離 hb6	76.08	mm
	モーメント(両側合計)	0.852	kgm
三角形 B5	クランクアーム幅	124.000	mm
	高さ	35.80	mm
	底辺	62.00	mm
	面積	1.11E+03	mm ²
	体積	3.99E+04	mm ³
	質量	0.31	kg
	重心距離 hb5	11.93	mm
三角形 B7	モーメント(4ヶ所合計)	1.49E-02	kgm
	バランスウェイト幅	200.0	mm
	高さ	19.51	mm
	頂点位置h1	95.10	mm
	頂点位置h2	69.00	mm
	頂点位置h3	57.74	mm
	底辺	37.36	mm
	面積	364.52	mm ²
	体積	1.31E+04	mm ³
	質量	0.10	kg
	重心距離 hb7	73.94	mm
	モーメント(4ヶ所合計)	3.03E-02	kgm
下側合計モーメント		0.84	kgm

授業Webサイト: バランスウェイトの検討
(レポートサンプル: 手計算による場合) [24-1]

←* バランス取りは主としてrb6で調節する



- 三角形が2つあることに注意
- B7は三角形で近似
- h1~h3はジャーナル中心を通る水平面までの距離
- 三角形が2つあることに注意



扇型B6中心角(2θ)は
120° を推奨

← 上側合計モーメントに合わせるべく扇形半径を決める

各部の重心とジャーナル中心の距離

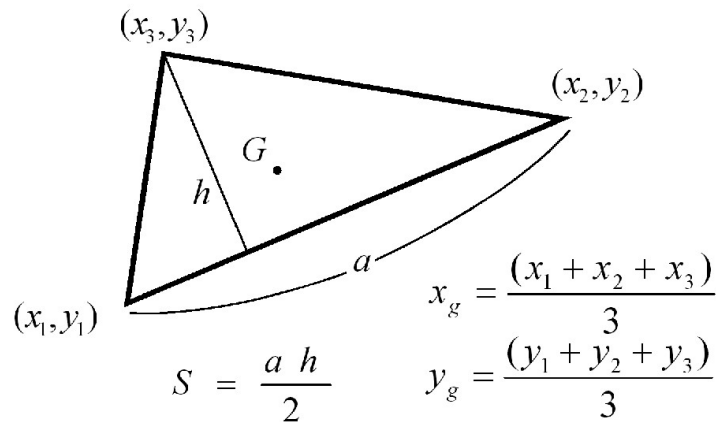
[47]

各部の重心位置は下記から求める。

授業Webサイト: 各種図心・重心の計算方法 [24-3]

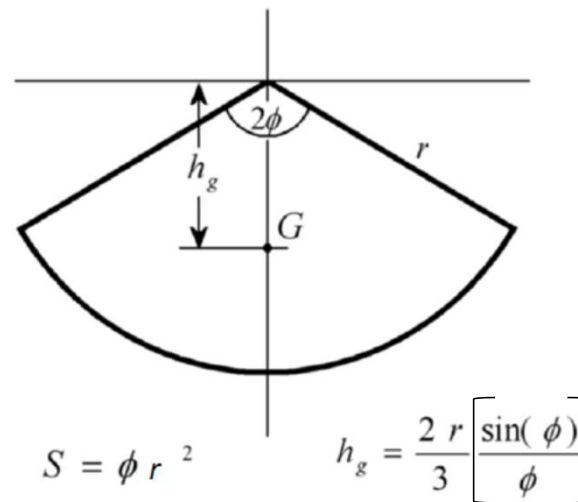
三角形の面積と
重心

B5、B7



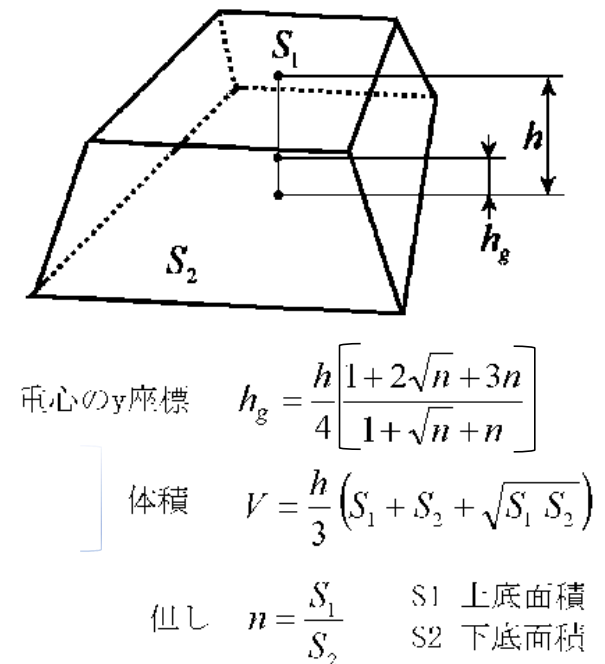
扇形の面積と
重心

B6



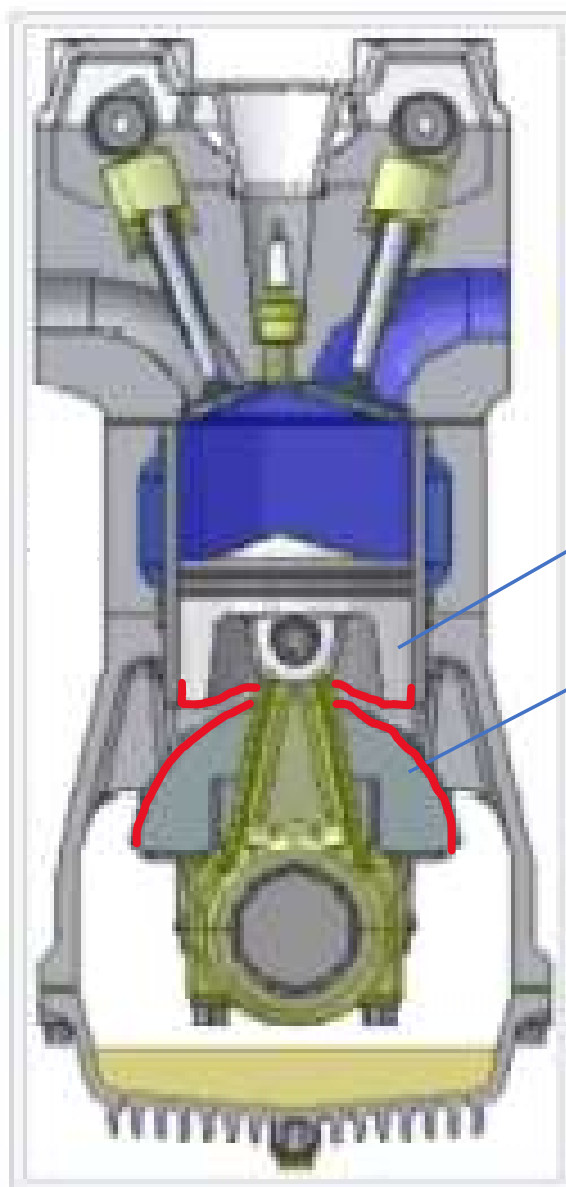
角錐台の体積と
重心

B1



ピストン下死点位置での ピストンとバランスウェイトの干渉を確認

[47]



ピストンとバランスウェイトの
隙間に注意(5mm以上確保)

ピストン
バランスウェイト

5mm以上確保できない場合
はピストン下部形状を変更

回転バランスの検討は以上

なお、CADSUPERの面積計算、
面芯計算機能を使ってEXCELでの
計算の当否を確認する事ができる

バランスウェイト計算サンプル

[47]

授業Webサイト: バランスウェイトの検討
(レポートサンプル: 手計算による場合) [24-1]

バランスウェイト質量の検討

値入力

共通条件

密度(S45C)	7.80E+03	kg/m ³
クランクアーム厚(バランスウェイト厚)	36.00	mm

下側(クランクピン反対側)			
扇型 B6	半径 rb6 *	138.00	mm
	中心角 2θ	120.00	deg
	面積	1.99E+04	mm ²
	体積	7.18E+05	mm ³
	質量	5.60	kg
	重心距離 hb6	76.08	mm
	モーメント(両側合計)	0.852	kgm
三角形 B5	クランクアーム幅	124.000	mm
	高さ	35.80	mm
	底辺	62.00	mm
	面積	1.11E+03	mm ²
	体積	3.99E+04	mm ³
	質量	0.31	kg
	重心距離 hb5	11.93	mm
	モーメント(4ヶ所合計)	1.49E-02	kgm
三角形 B7	バランスウェイト幅	200.0	mm
	高さ	19.51	mm
	頂点位置h1	95.10	mm
	頂点位置h2	69.00	mm
	頂点位置h3	57.74	mm
	底辺	37.36	mm
	面積	364.52	mm ²
	体積	1.31E+04	mm ³
	質量	0.10	kg
	重心距離 hb7	73.94	mm
	モーメント(4ヶ所合計)	3.03E-02	kgm
下側合計モーメント		0.84	kgm

6月6日 設計計算結果一覧,
計算書と共に提出のこと

上側(クランクピン側)			
クランクアーム B4	クランクアーム長	75.00	mm
	面積	9.83.E+03	mm ²
	体積	3.60.E+05	mm ³
	質量	2.81	kg
	重心距離 hb4	37.50	mm
	モーメント(両側合計)	0.21	kgm
角錐台 B1	上底幅	54.00	mm
	上底厚さ	5.00	mm
	上底面積	270.00	mm ²
	下底面積	4805.08	mm ²
	高さ(dcp X 1.38)/2	57.96	mm
	体積	1.20.E+05	mm ³
	質量	9.36E-01	kg
	重心距離 hb1	93.41	mm
	モーメント(両側合計)	0.17	kgm
クランクピン B2	直径 dcp	84.00	mm
	長さ	64.00	mm
	体積	3.55.E+05	mm ³
	質量	2.77E+00	kg
	重心距離 hb2	75.00	mm
	モーメント	0.21	kgm
コンロッド 大端部 B3	質量	3.68	kg
	重心距離 hb3	75.00	mm
	モーメント	0.28	kgm
上側合計モーメント		0.84	kgm

参考資料

[47]

- 1) 資料[10] テキスト Part 2 部品寸法の決定
- 2) 資料[24-1] バランスウエイトの検討(レポートサンプル)
- 3) 資料[24-3] 各種図心・重心の計算方法

往復運動のバランス

今回の設計では往復運動のバランスは考慮しないが、
参考として以下のページで説明する。

往復動型エンジンの振動

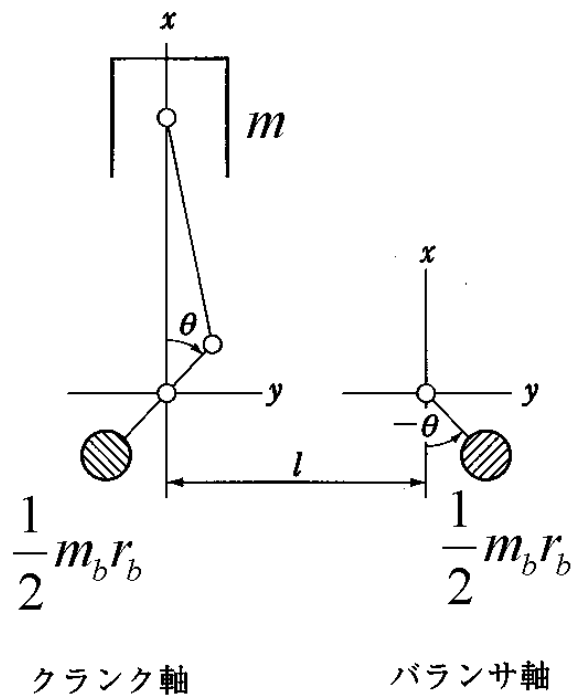
往復動型エンジンはクランクシャフトを用いるために、質量を持つクランクピンとコンロッド大端部が回転することによる振動が発生する。この振動は**バランスウェイト**をクランクピンと反対方向に付けることによって解消される。

しかしながら、これだけではピストンとコンロッドが往復運動することによって発生する振動を消すことは出来ない。

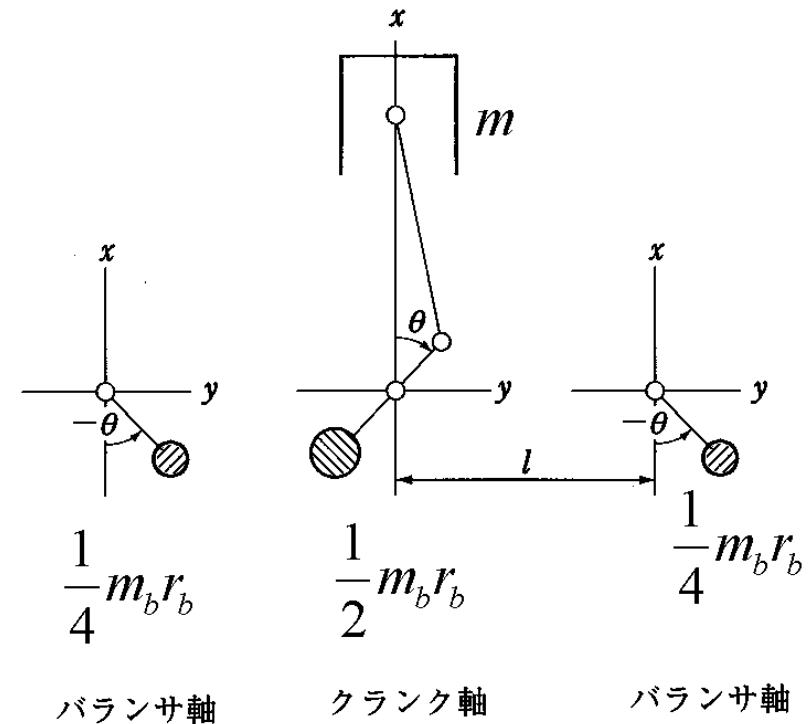
バランス(バランスシャフト)による対策

往復運動部の質量の1/2をバランスウェイトに付加し、更に同じ質量のバランスウェイトをクランクシャフトと逆回転するバランスとして追加

更に、クランク軸回りの偶力を打ち消すため、 balancer を2つに分割し、クランクシャフトの両側に配置

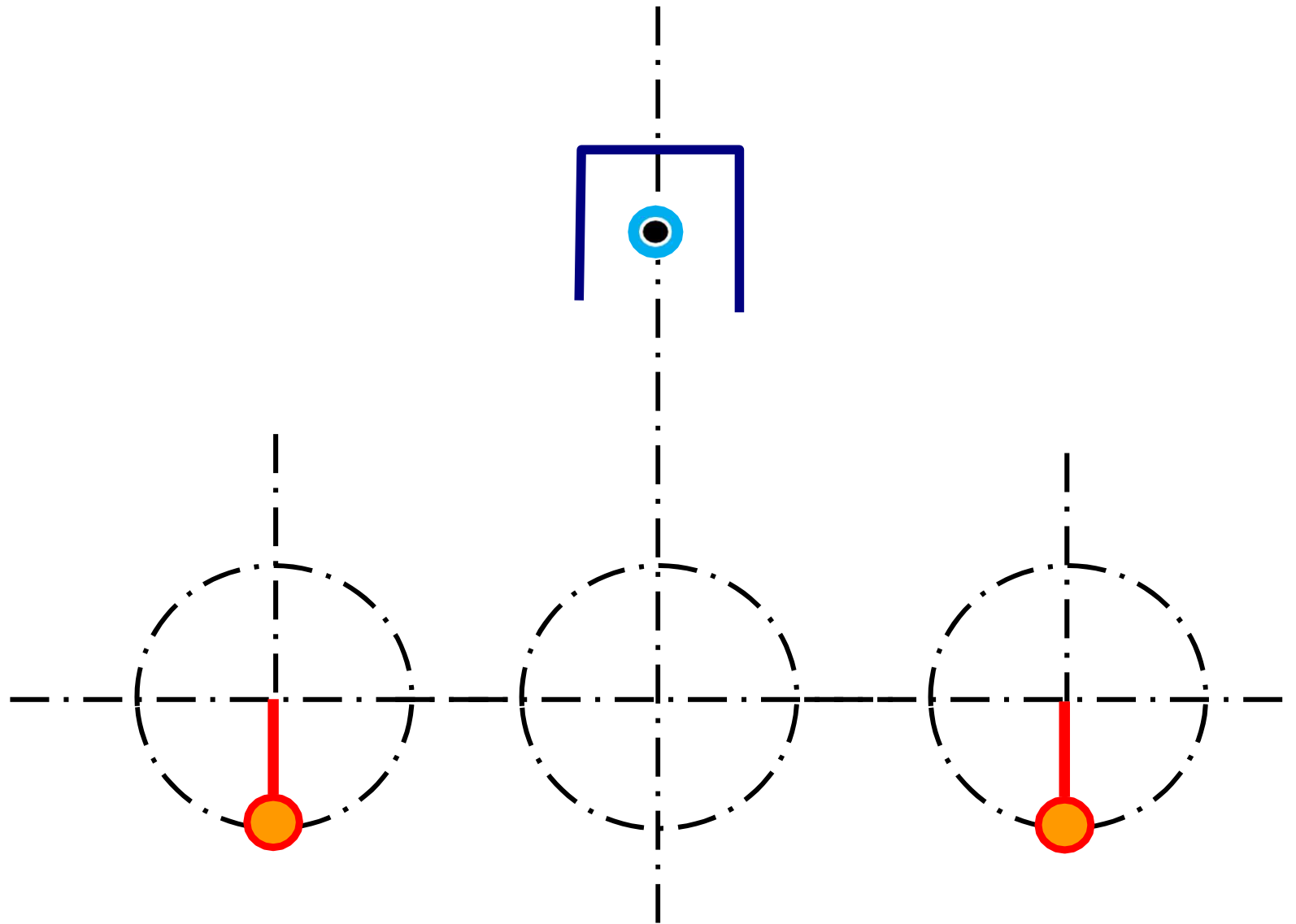


単気筒エンジンにおける 1 軸バランス



単気筒エンジンにおける 2 軸バランス

単気筒エンジンで完全な往復運動のバランスには [47]



1 / 2 の質量で互いに逆回転する「バランスシャフト」

2軸バランサによる往復運動振動対策

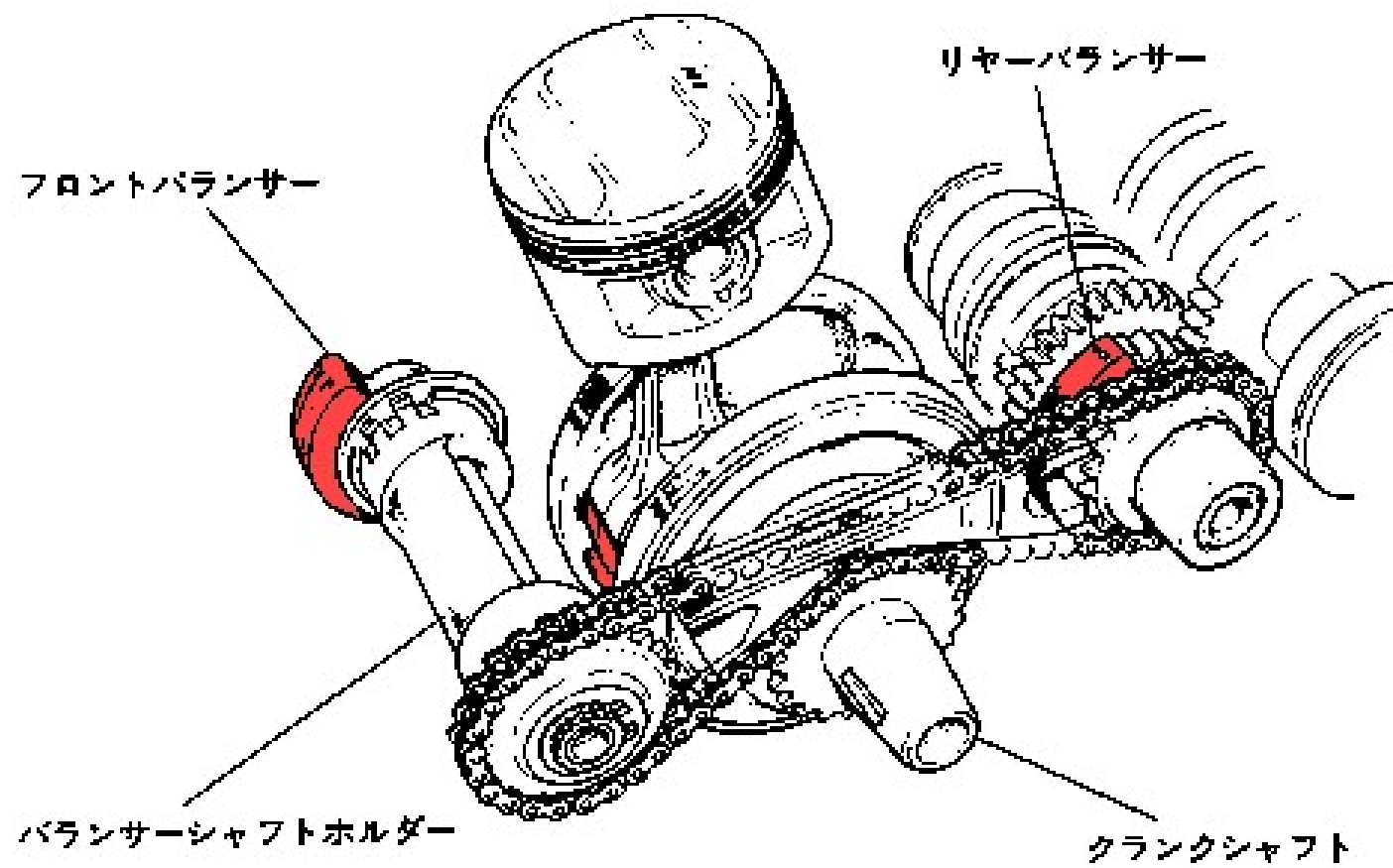
[47]

ピストン慣性力の垂直一次成分
と 2本のバランサシャフト垂直成分
が、釣り合う

バランサシャフト水平成分は、互いに相殺

2軸バランサの例

[47]



単気筒エンジンのバランス まとめ

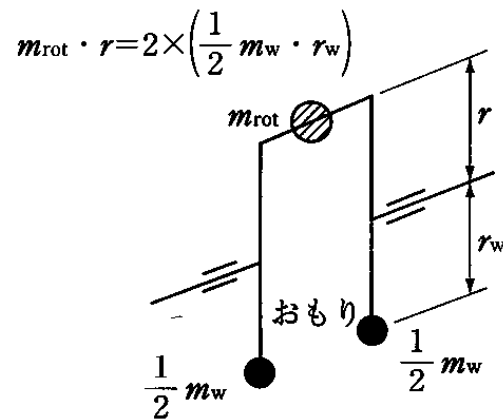
[47]

①回転バランス

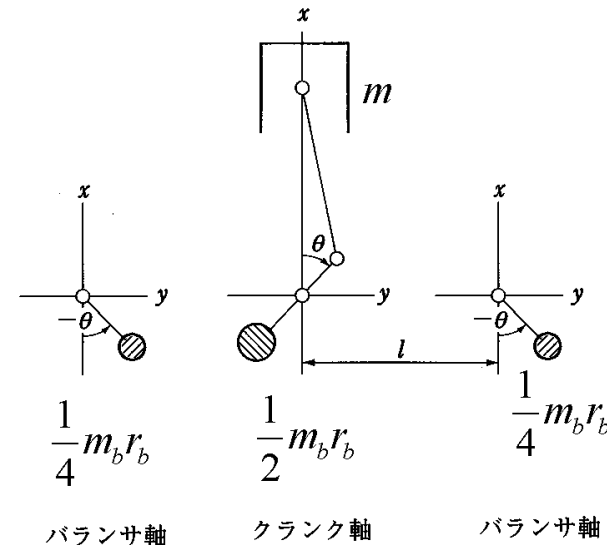
……回転慣性力を**バランスウェイト**によって釣り合わせる。

②往復動バランス

……**バランスシャフト**により釣り合わせる。



単気筒エンジンにおける回転慣性力の
つり合わせ

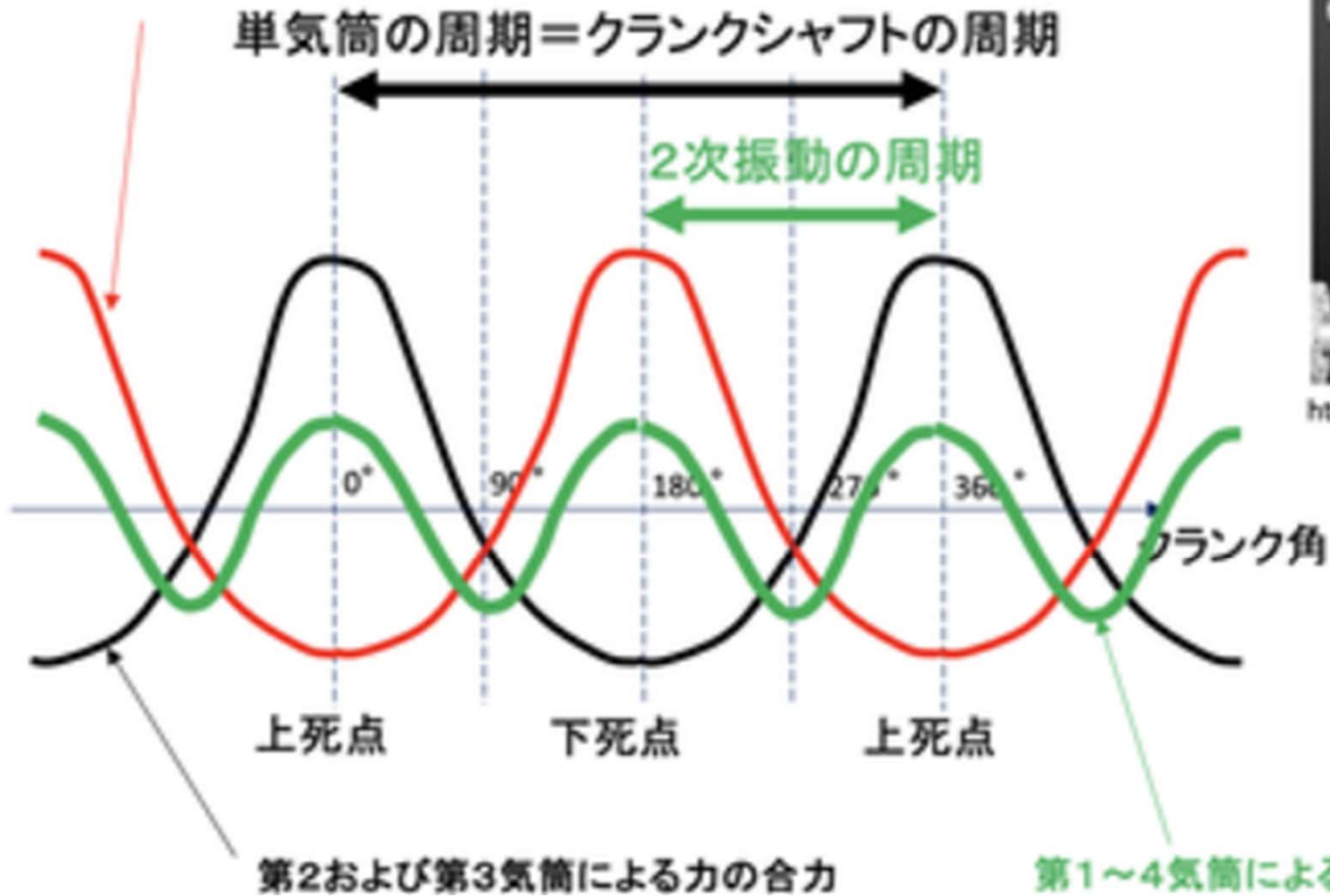
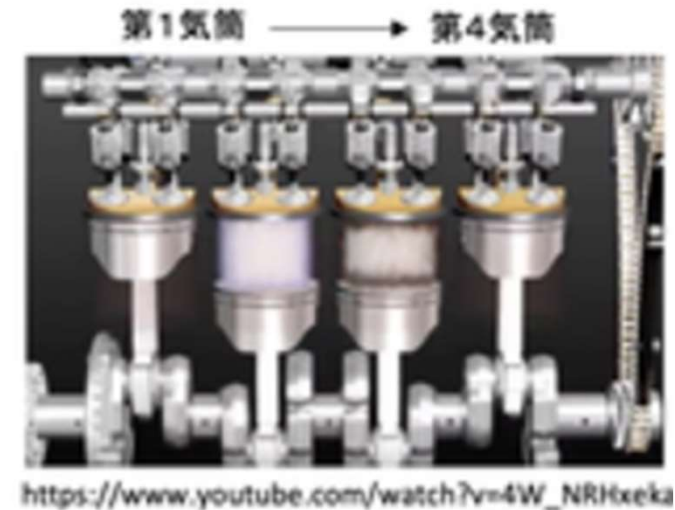


4気筒エンジンの2次振動

第1および第4気筒による力の合力

単気筒の周期＝クランクシャフトの周期

2次振動の周期

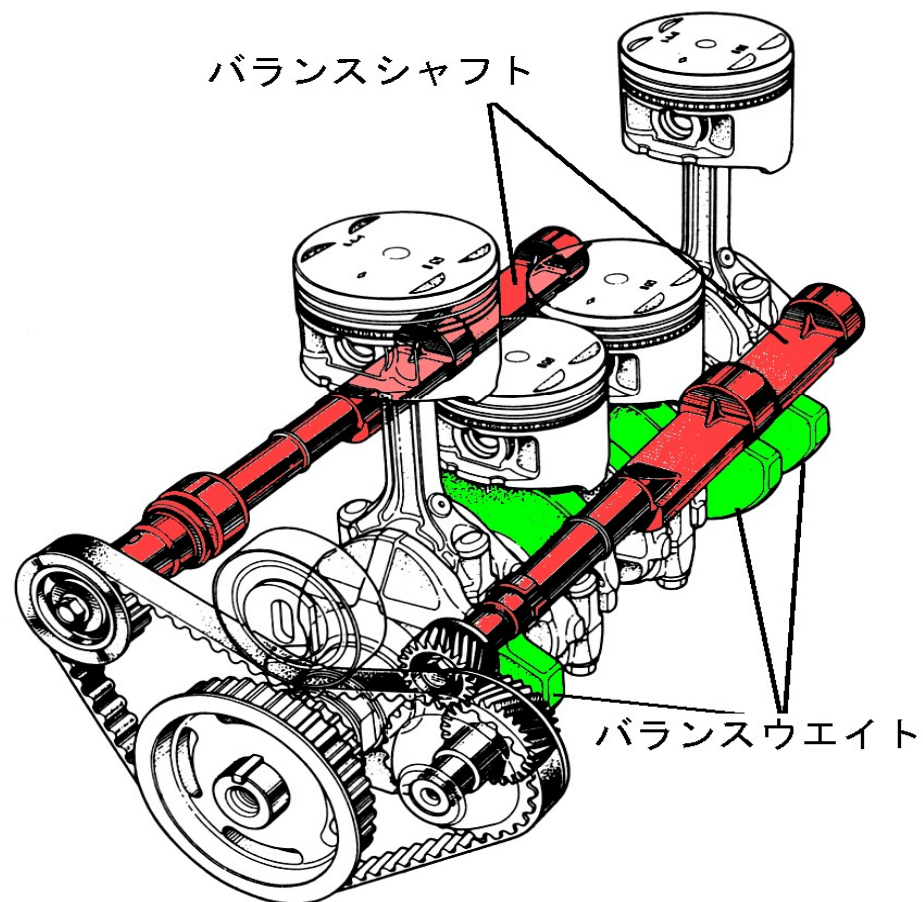


出典：rikeiminimalist.blog.jp

多気筒エンジンのバランスシャフト

2次の往復動振動を打ち消すためのバランスシャフト

多気筒エンジンにおける2軸バランサー



直列4気筒

動弁系

カムシャフト

Unless your main ride is a lawn mower [no disrespect], your engine probably has more than one cylinder. Here's a 4 cylinder setup.

カム

タイミングプーリ

タイミングベルト

A timing belt or chain synchronizes the rotation of the crankshaft and the camshaft(s) so that the engine's valves open and close at the proper times during each cylinder's intake and exhaust strokes. It also prevents the piston from striking the valves.

A timing belt [shown] is a rubber belt that usually features teeth on the inside surface, while a timing chain is a metal roller chain.

RPM
RPM means Revolutions Per Minute. If your engine is running at 3,000 RPM

本体構造系

シリンダヘッド

シリンダブロック

フライホイール

クランクシャフト

The crankshaft carries piston power out of the engine and eventually to the wheels. It has counterweights to produce a balanced spin.

その他のシリンダ配列

You told all your buddies when dad bought that V8 sedan. Now you can find out what it actually means: opposing cylinders arranged in a "V" shape.

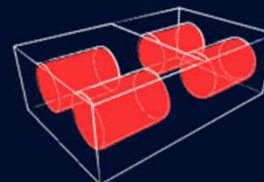
V型2気筒

A two cylinder arrangement. Many Harley-Davidson motorcycles use this configuration, for instance.



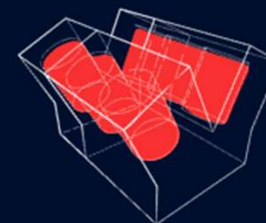
水平対向4気筒

Four cylinders arranged in a flat, opposing configuration. Found in classic VW Beetles and various current Subaru model cars.



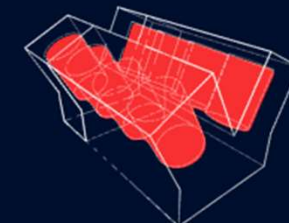
V型6気筒

Six opposing cylinders. Well suited for sports cars or mid-size SUVs.



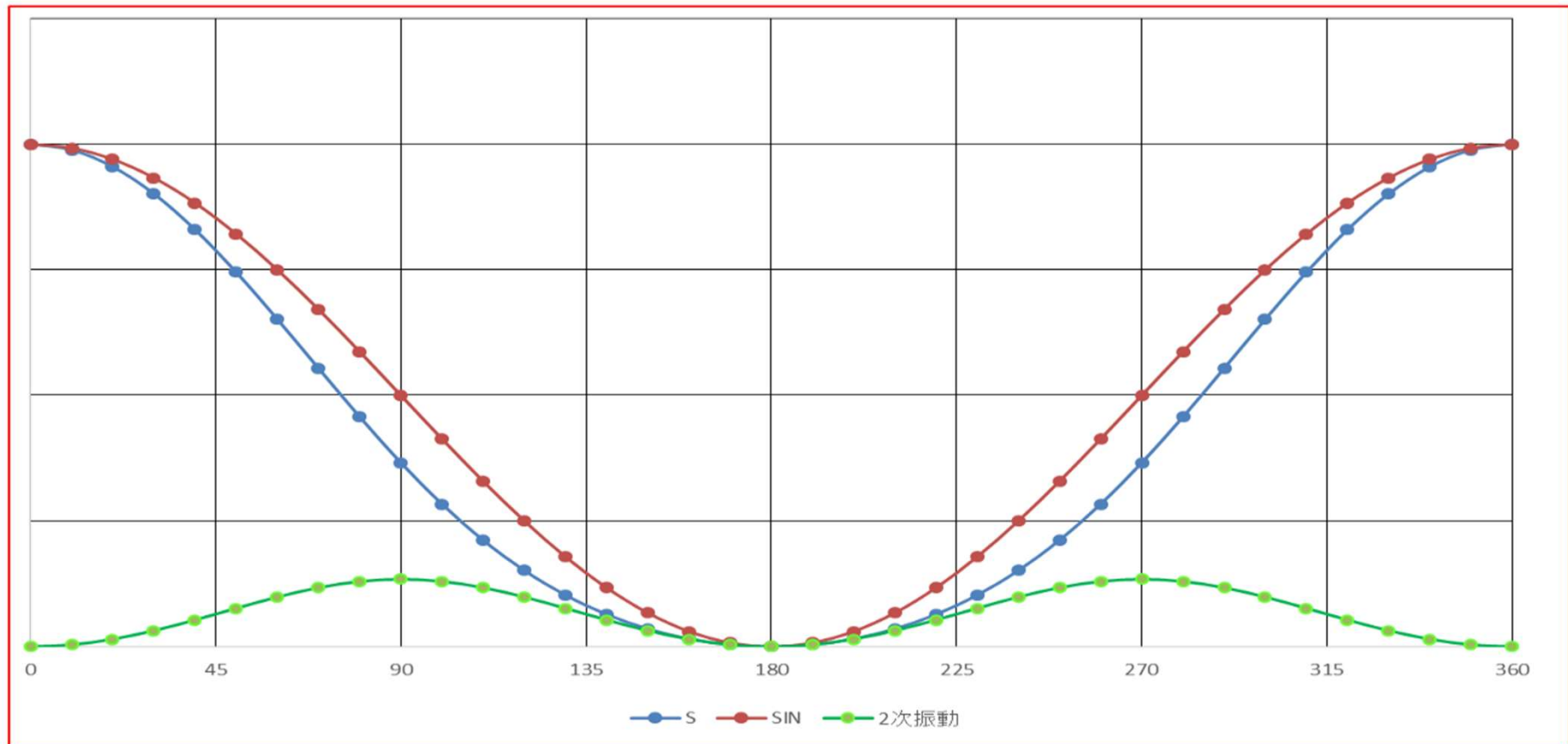
V型8気筒

Eight opposing cylinders. Generally suited for muscle-car applications or heavy duty engines.



ピストンの変位

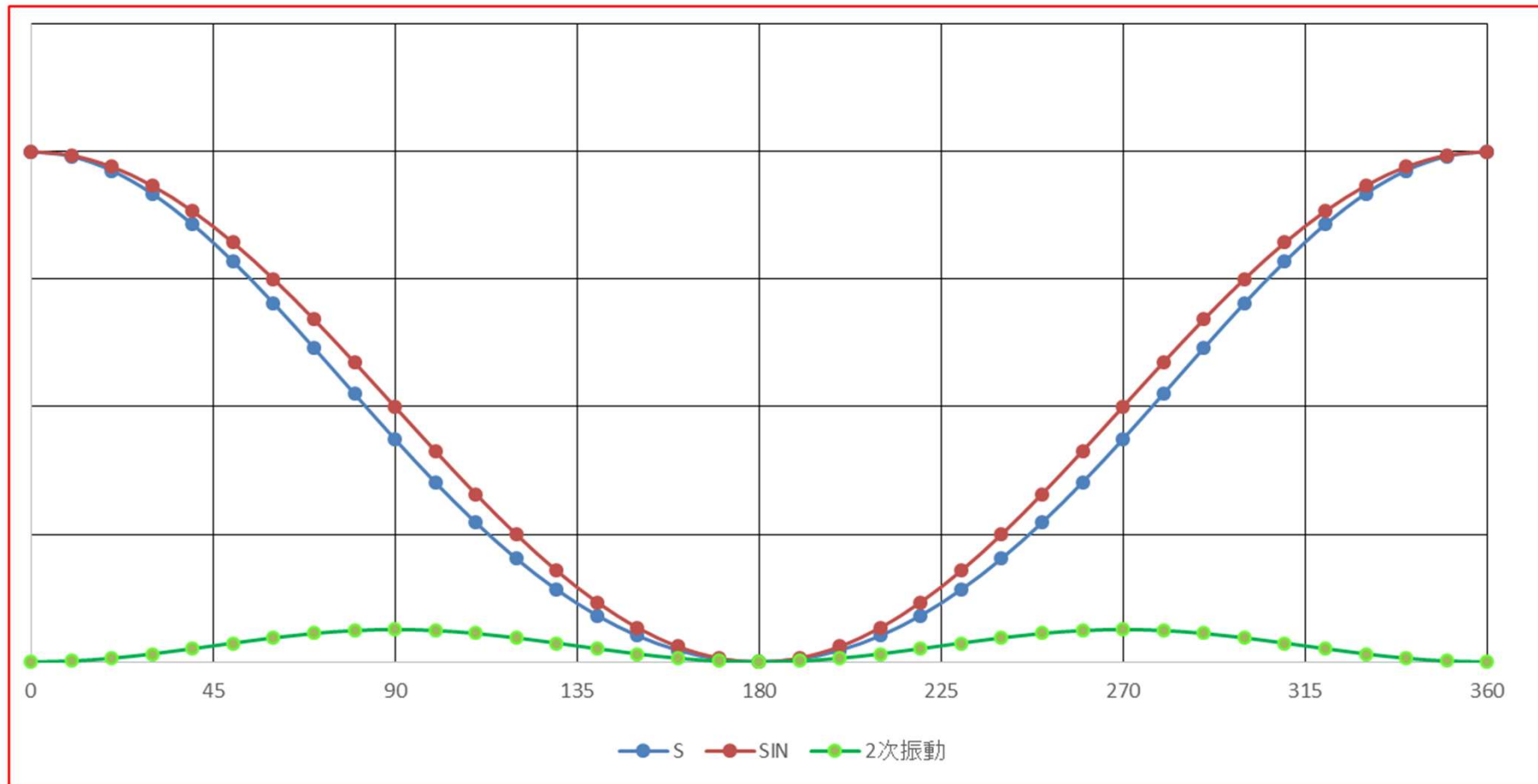
[47]



ピストン変位はコンロッドの傾斜があるので正弦波ではない。
つまり1次振動ではなく、必ず2次以上の高次成分を含む振動となる。

ピストンの変位（連桿比大）

[47]



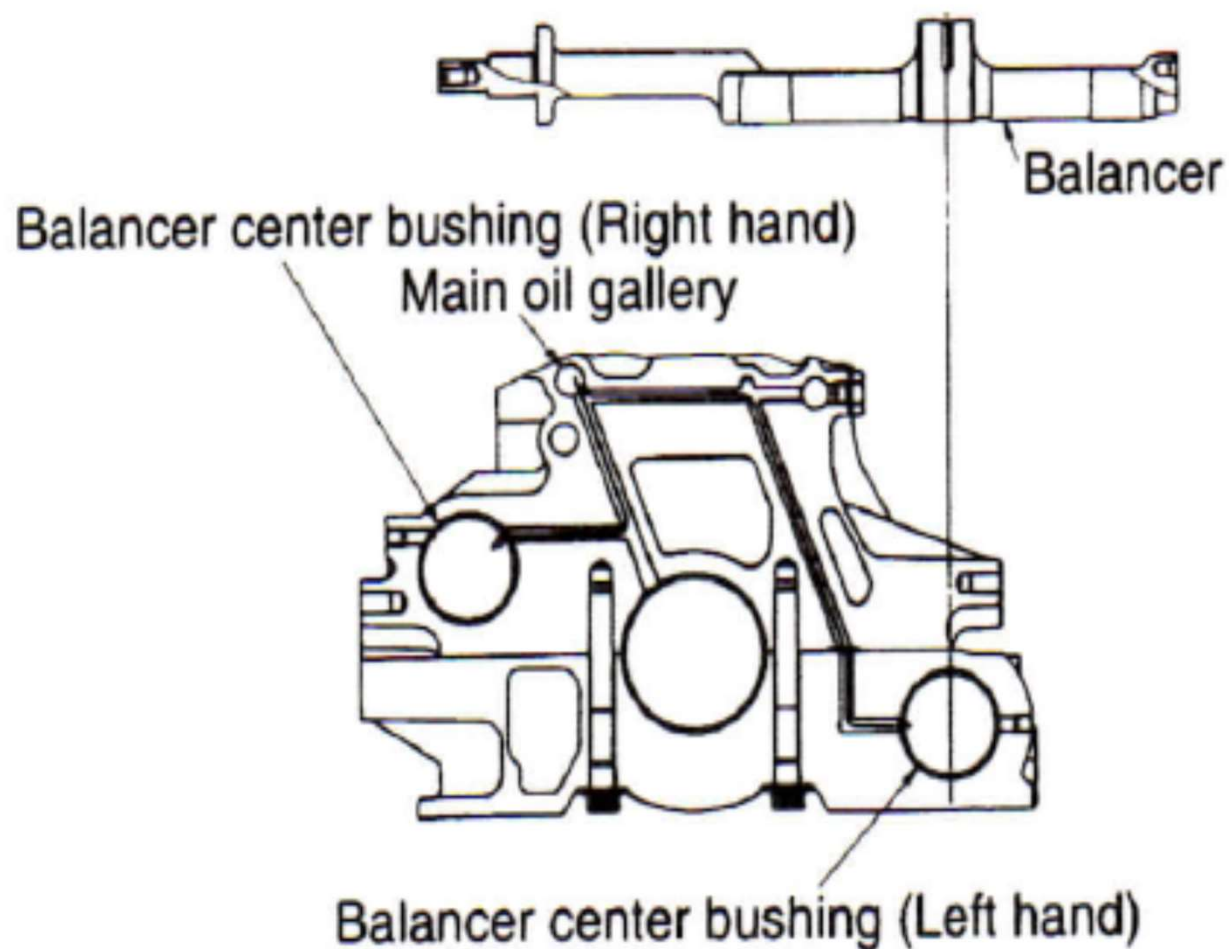
連桿比を大きくすると正弦波とピストン変位の差（緑）は小さくなる。
2次振動は小さくなるがコンロッド長さを長くするにも限界がある。

4気筒エンジンのバランスシャフト配置

[47]

三菱 4 M 4 系エンジン

バランスシャフト（サイレントシャフト）配置

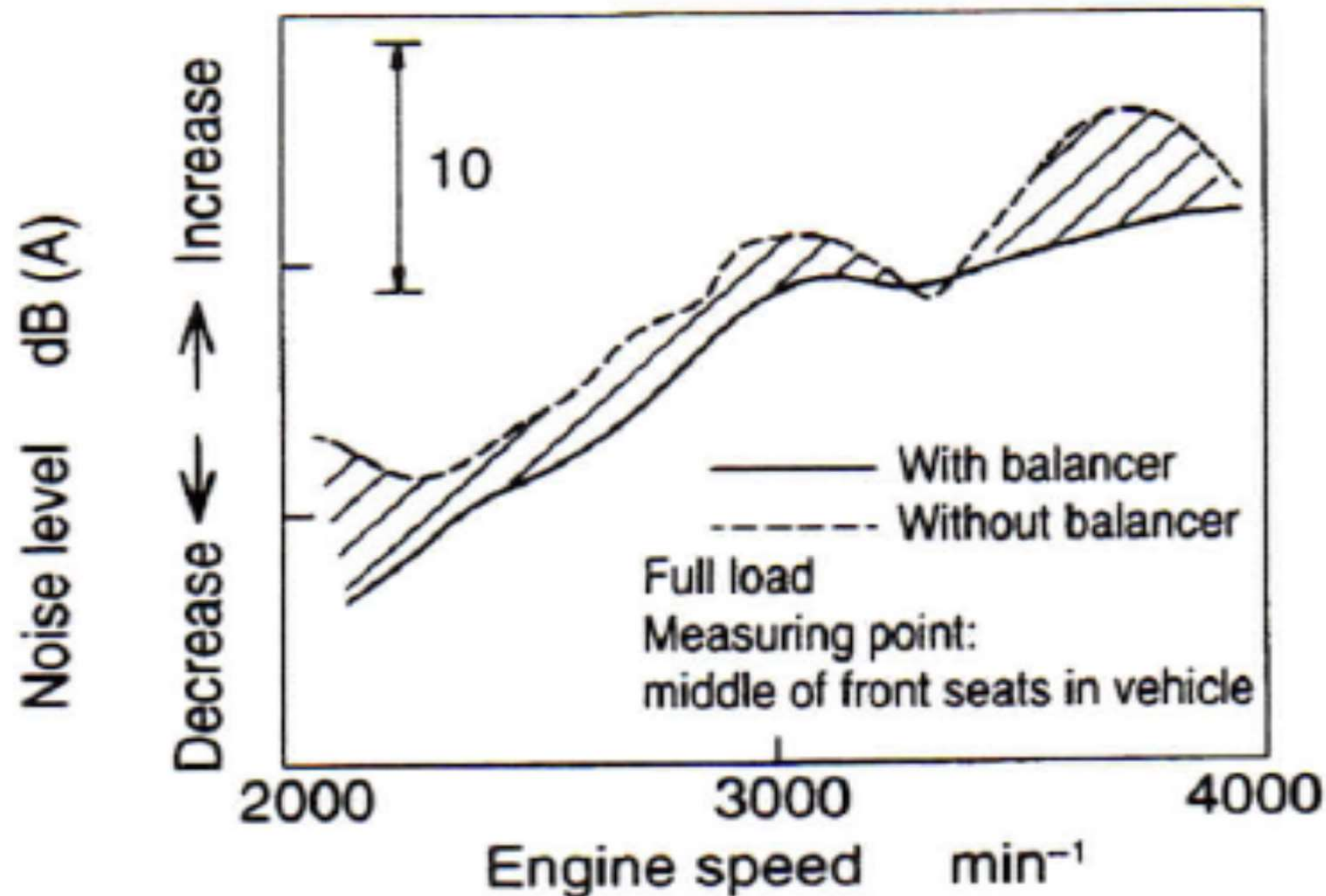


4気筒エンジンのバランスシャフト効果

[47]

三菱 4 M 4 系ディーゼルエンジン

バランスシャフトの騒音低減効果（車内こもり音対策）



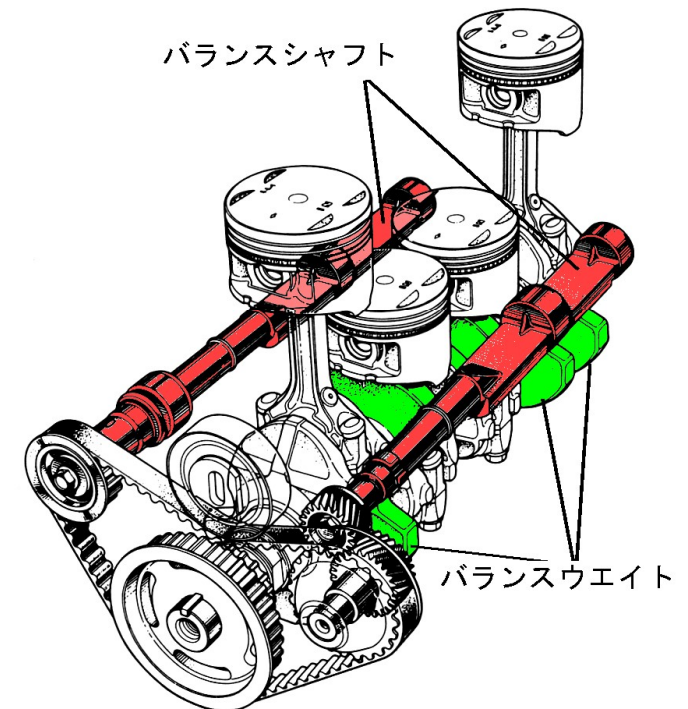
多気筒エンジンのバランスまとめ

多気筒エンジンではクランク配列により、回転振動、往復動振動を低減することができる。

4気筒エンジンでは、2次の往復動振動が問題になるため、クランク軸の倍の回転速度の balancer (バランスシャフト) により、2次の往復動振動を打ち消すことができる。

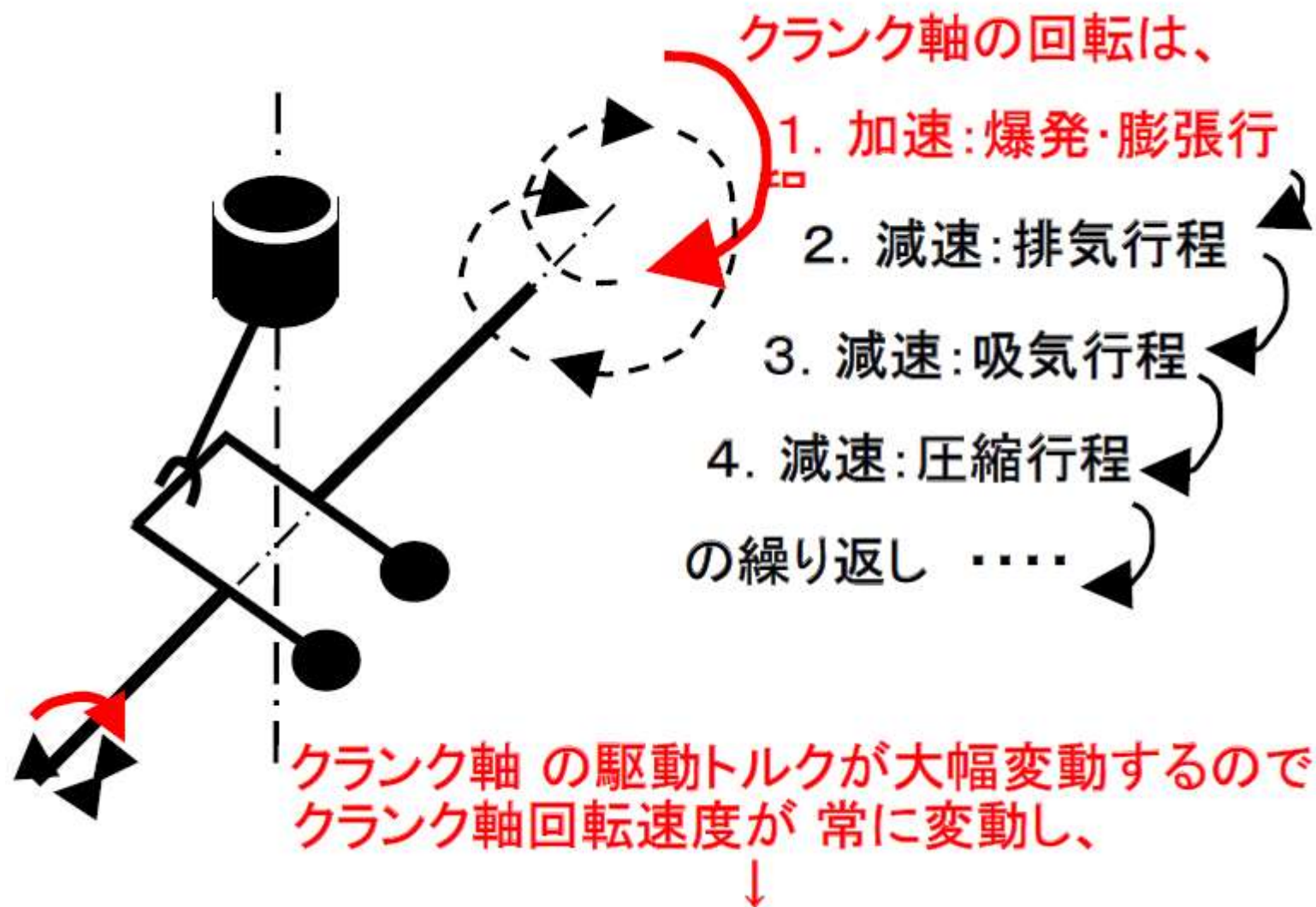
更に、燃焼圧によるトルク変動も振動の原因となるが、フライホイール、多気筒化で軽減することができる。

多気筒エンジンにおける2軸 balancer



回転方向の振動

[47]



回転速度変動＝回転方向の振動

回転方向の振動低減方法

[47]

クランク軸に フライホイールを装着

