

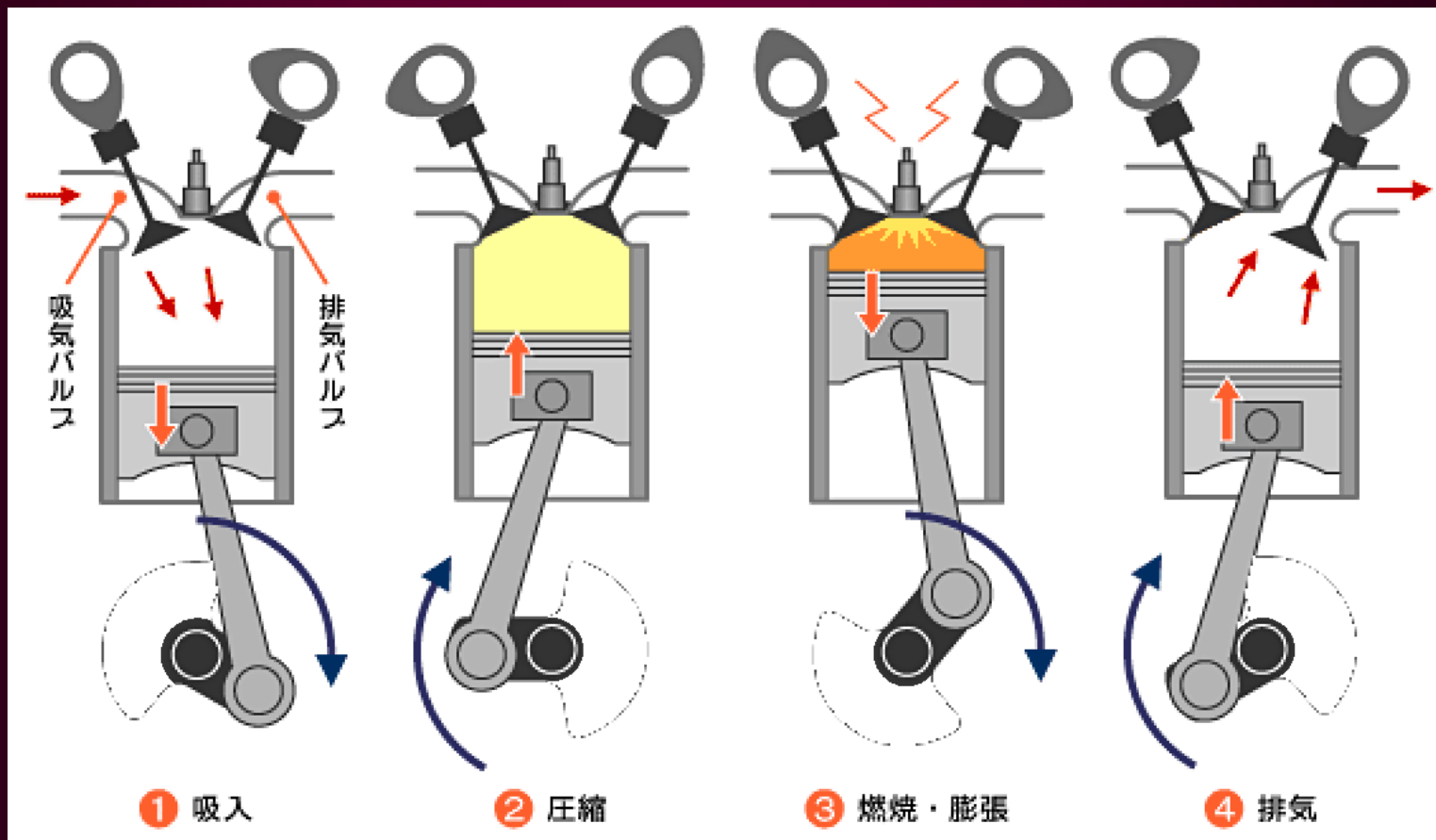
単気筒エンジンのバランスについて

明治大学 機械工学科 機械設計製図2

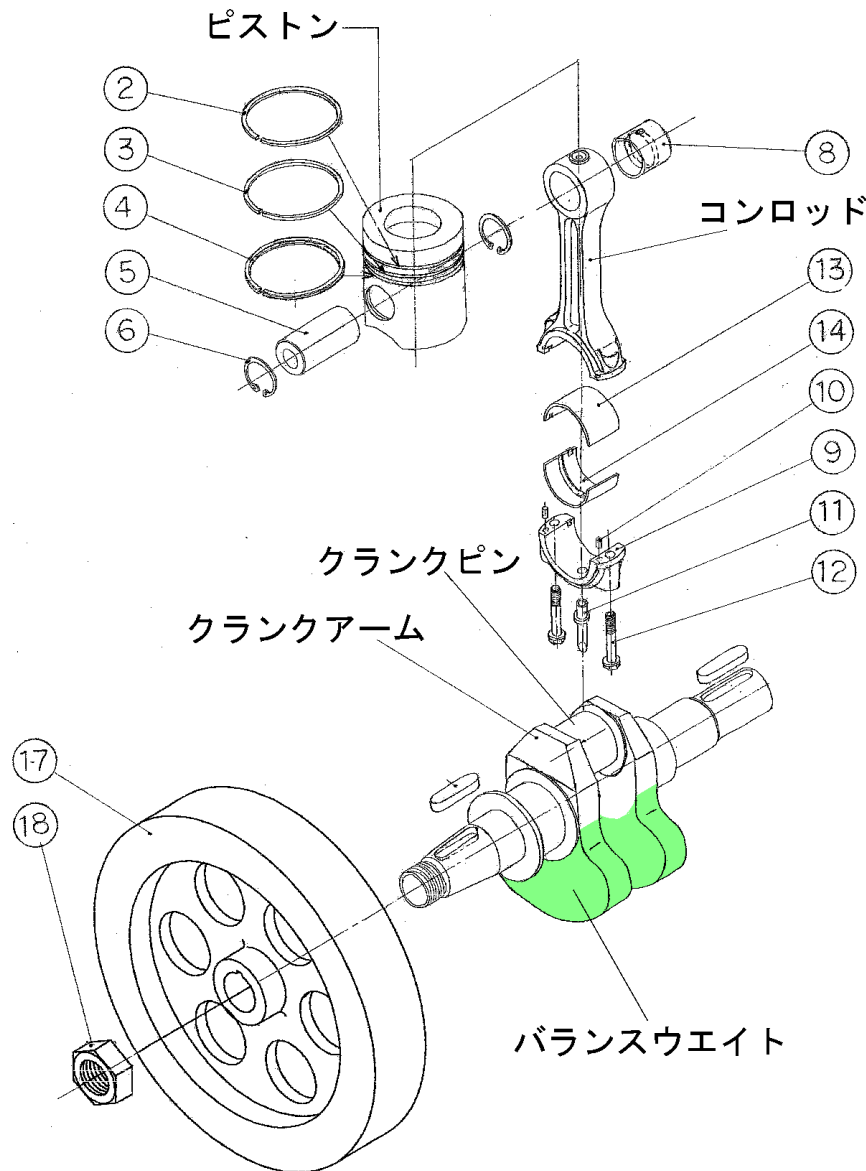
高村昭生

2016年5月19日

単気筒エンジンのバランス



単気筒エンジンの 運動部分分解図



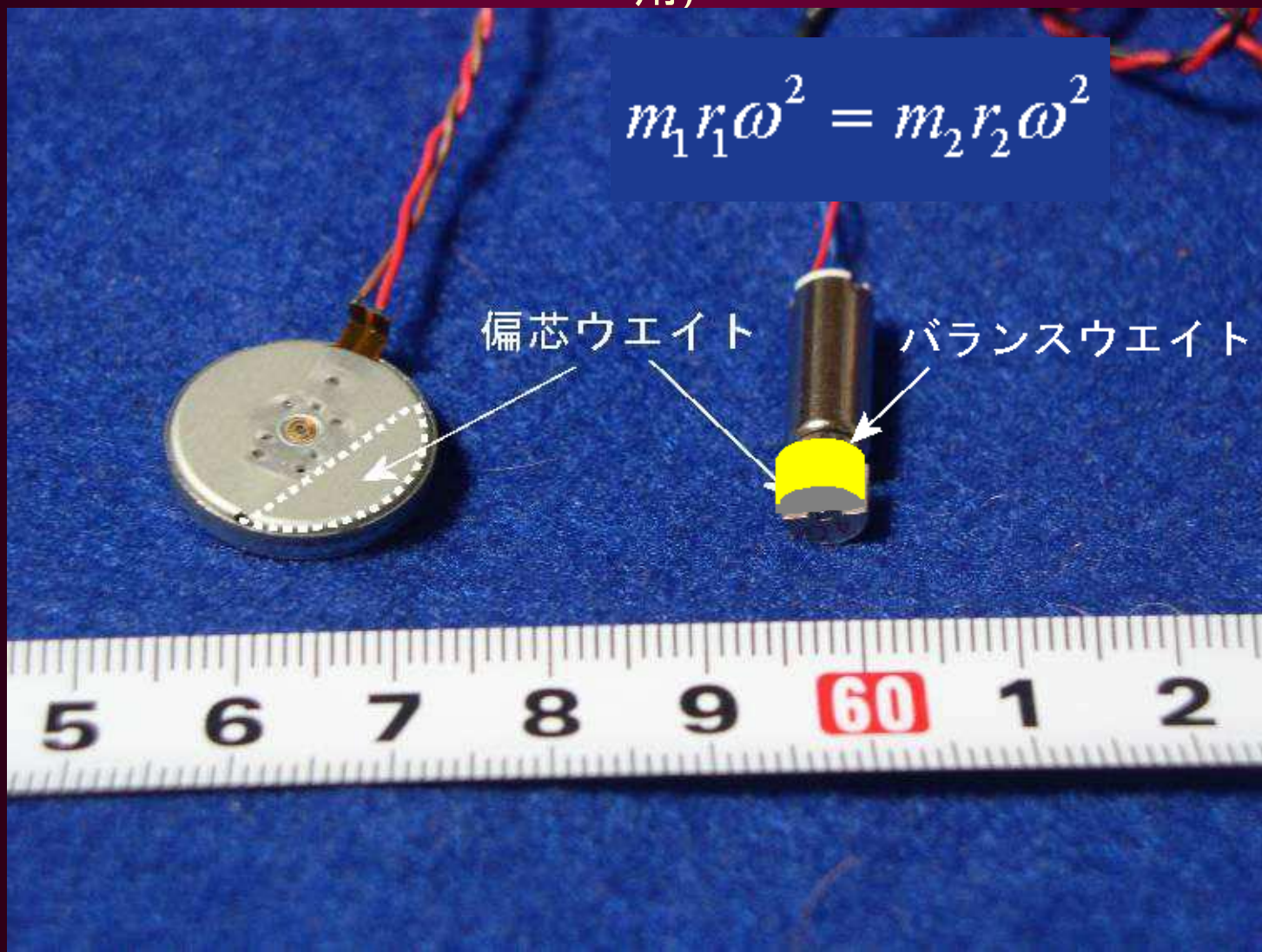
回転体のバランス

振動モータ (スマートホンのマナーモード
用)

$$m_1 r_1 \omega^2 = m_2 r_2 \omega^2$$

偏心ウェイト

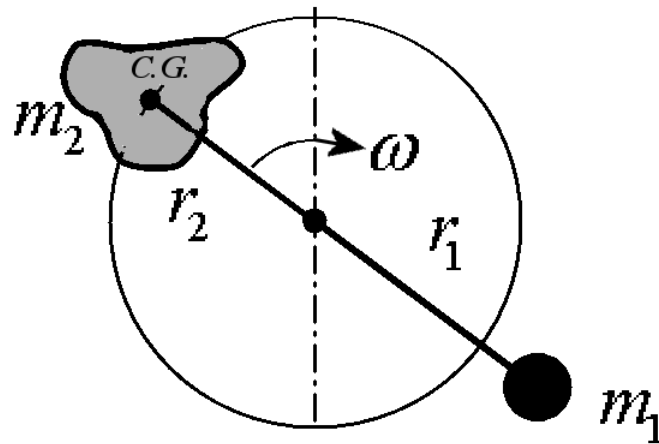
バランスウェイト



回転体のバランス

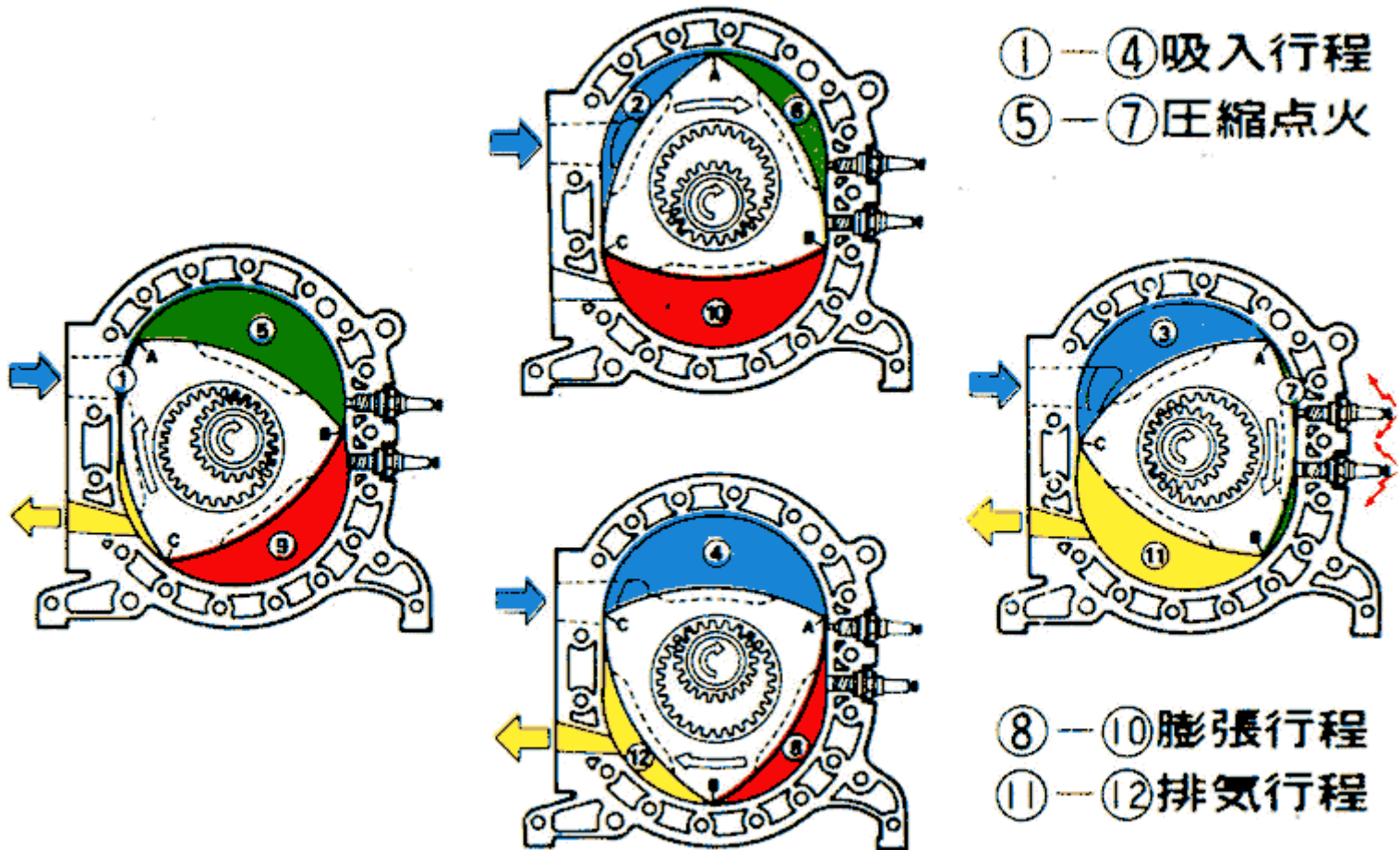
- 回転バランスは遠心力のバランス

$$m_1 r_1 \omega^2 = m_2 r_2 \omega^2$$



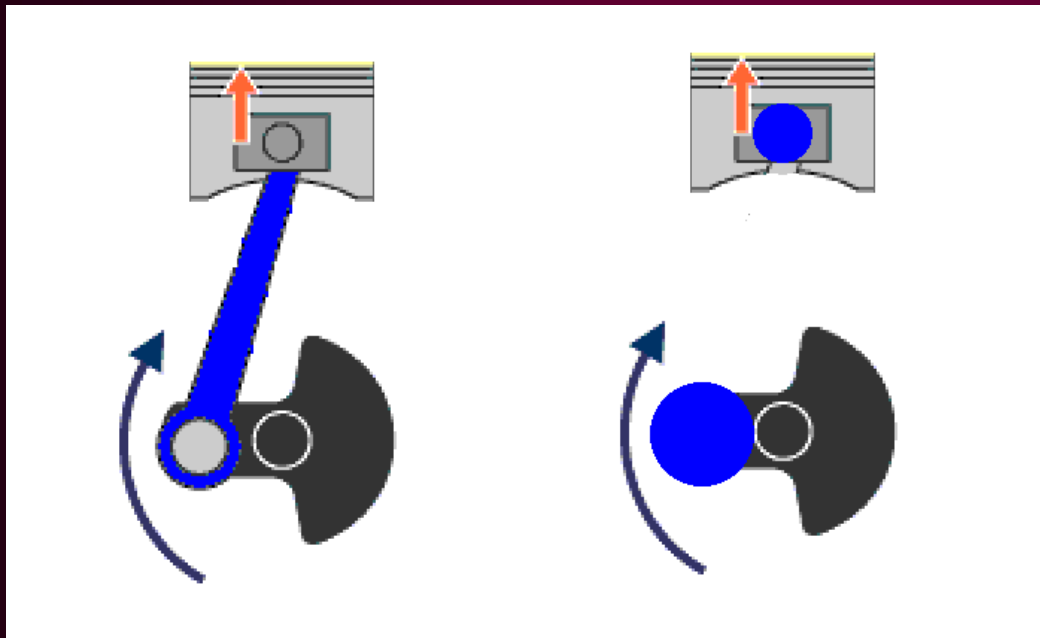
ロータリーエンジンのバランス

- ロータリーピストンの偏芯はバランスウェイトで完全に釣り合わせ可能



単気筒往復動エンジンのバランス

回転バランスと往復動バランスに分けて考える



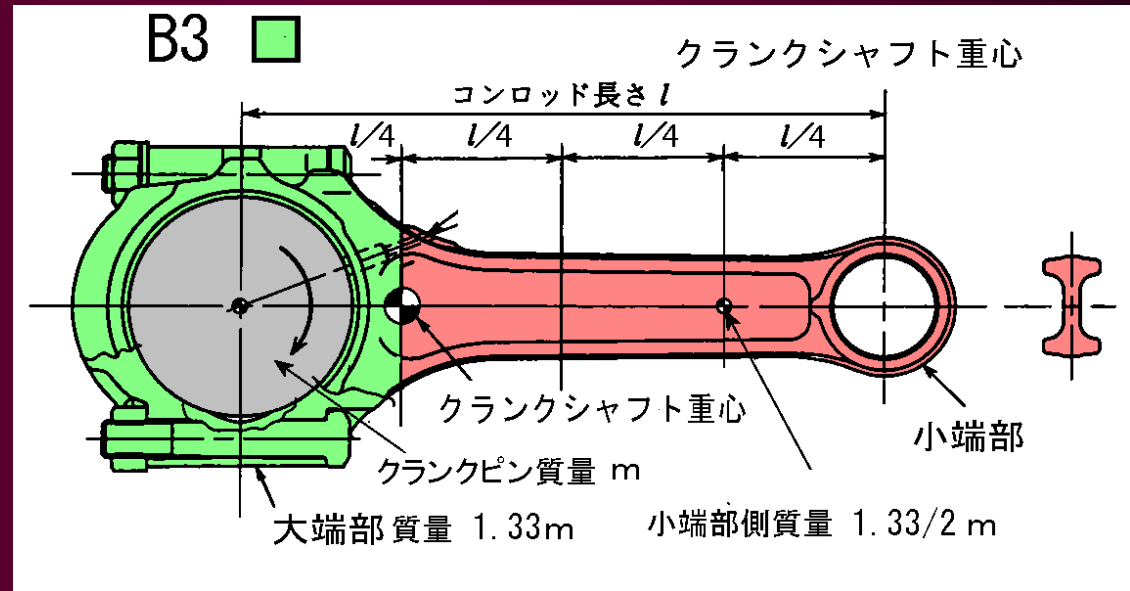
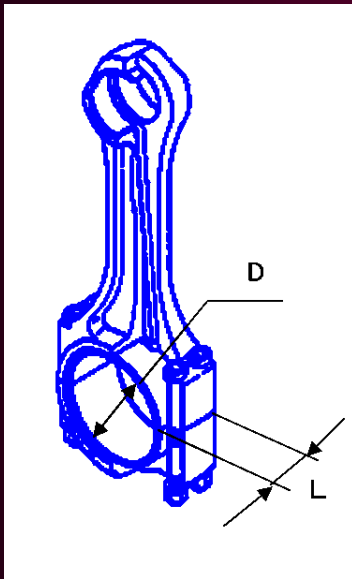
往復動運動

- ・ ピストン
- ・ ピストンピン
- ・ コンロッドの 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 2/3

コンロッドの取り扱い

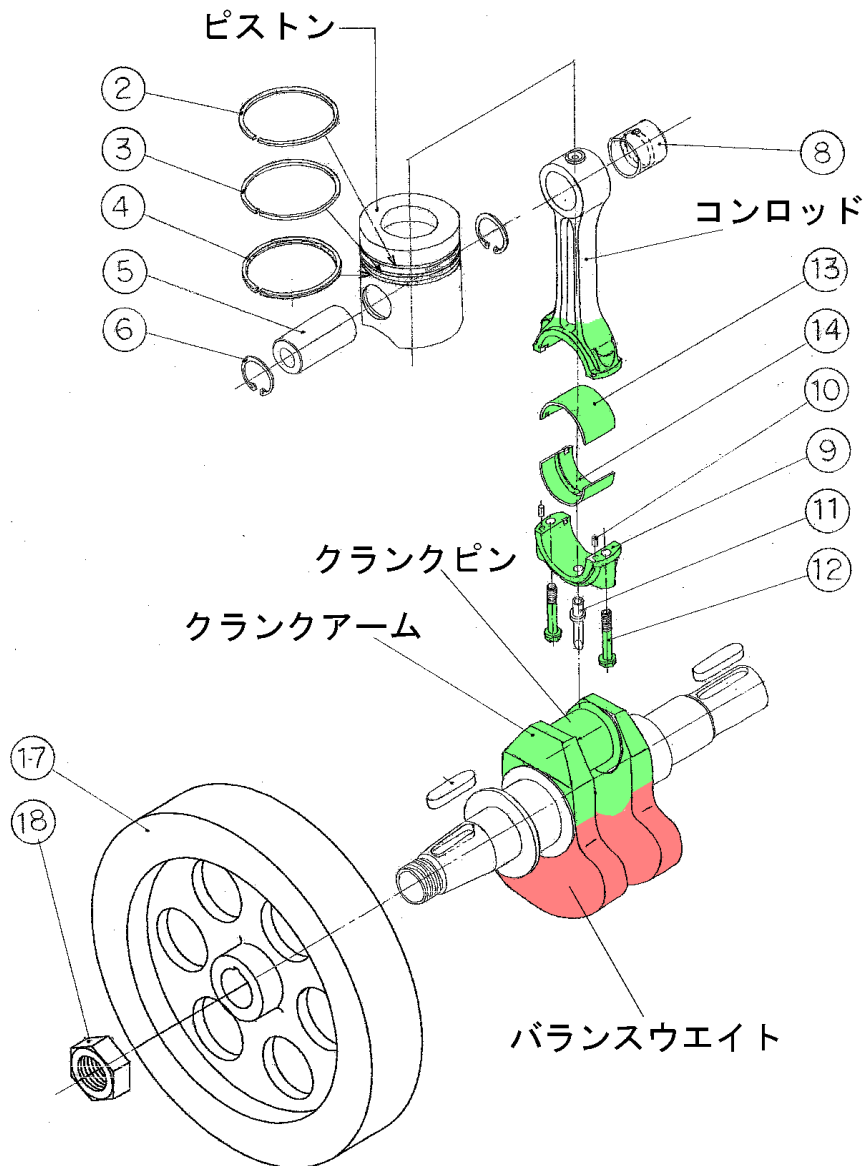


1. 大端部を回転部とし、小端部を往復動部とする。
2. 大端部質量はコンロッド全体の2/3とし、小端部質量を1/3とする(経験値)。
3. コンロッド全体の質量はクランクピン質量の2倍とする。
従って大端部の質量はクランクピン質量の1.33倍(多数エンジンの平均値)とする。

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

バランスウェイト

- ・ バランスウェイト(赤)により回転部質量(緑)と回転バランスをとる



回転バランス

回転する部分の遠心力を釣り合わせる

クランク軸のクランクピン側の遠心力と
バランスする力をクランクピンの反対側
に取り付けるカウンターウェイトによっ
て発生させる

上側

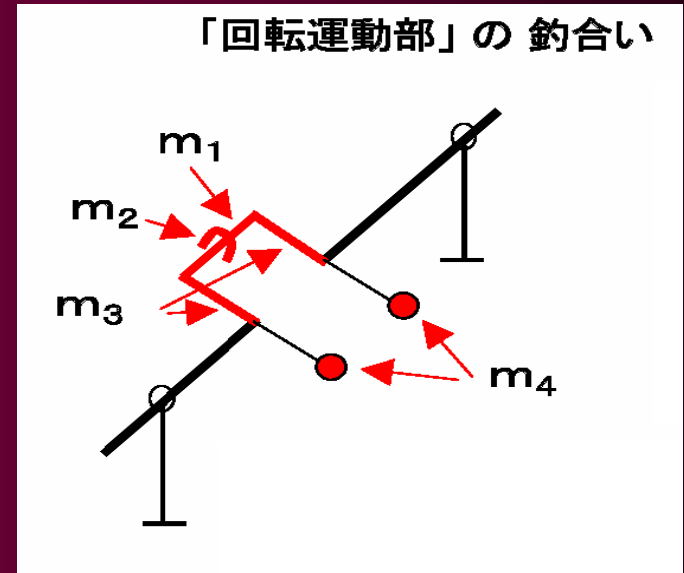
- ・コンロッド大端部
- ・クランクピン
- ・クランクアーム

下側

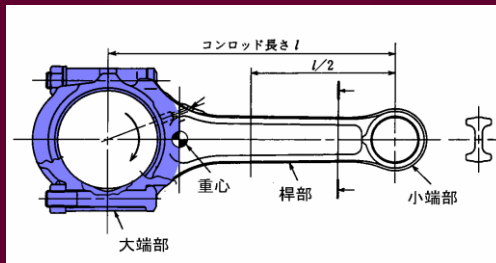
- ・バランスウェイト(クランクアーム下半分)

遠心力は $mr\omega^2$

従って $m_1r_1+m_2r_2+m_3r_3=m_4r_4$ とすれば回転はバランスする

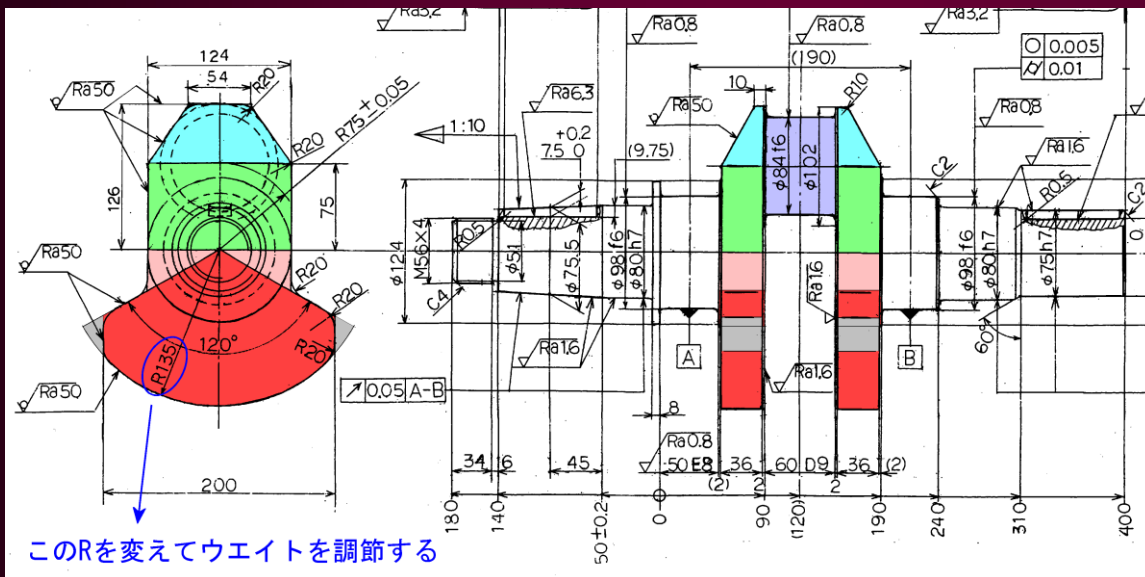


回転部質量の計算方法



大端部質量
= クランクピン x 1.33

クランクシャフト



クランクピン側

クランクピン反対側

計算サンプル

クランクピン反対側

バランスウェイト質量の検討

値入力

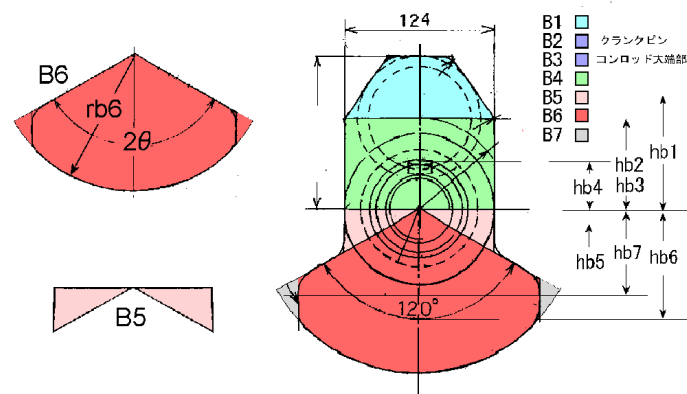
共通条件

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

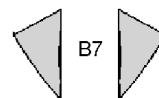
下側(クランクピン反対側)

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
下側合計モーメント		0.84	kgm

←* バランス取りは主としてrb6で調節する



B7は三角形で近似する
h1～h3はジャーナル中心を通る水
平面までの距離

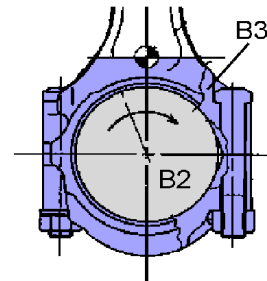
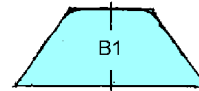


計算結果サンプル

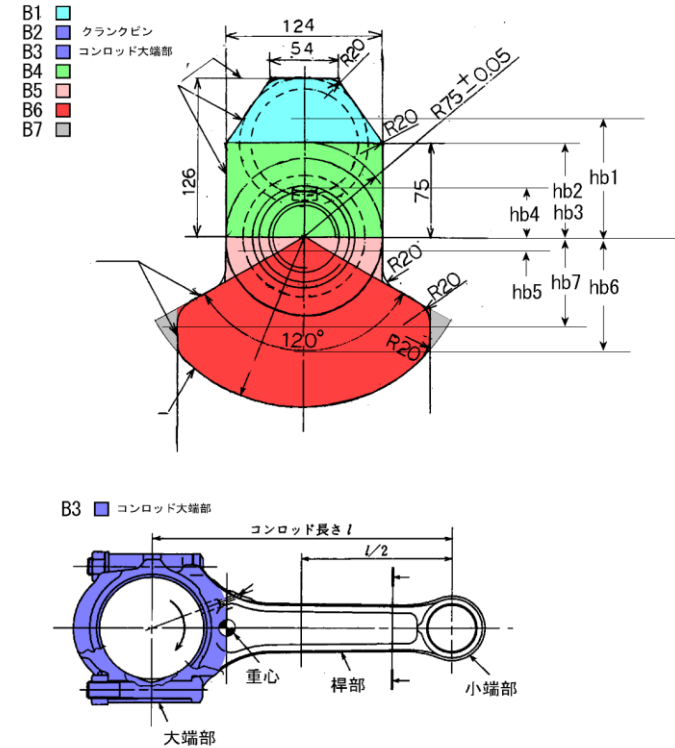
クランクピン側

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	9.30E+03	mm ²
	体積	3.35E+05	mm ³
	質量	2.61	kg
	重心距離 hb4	37.50	mm
	モーメント(両側合計)	0.195858	kgm
角錐台 B1	上底幅	540.00	mm
	上底厚さ	10.00	mm
	上底面積	540.00	mm ²
	下底面積	4464.00	mm ²
	高さ	51.00	mm
	体積	111462.16	mm ³
	質量	0.87	kg
	重心距離 hb1	92.87	mm
	モーメント(両側合計)	1.61E-01	kgm
クランク ピン B2	直径	84.00	mm
	長さ	64.00	mm
	体積	3.55E+05	mm ³
	質量	2.77	kg
	重心距離 hb2	75.00	mm
コンロッド 大端部 B3	モーメント	0.21	kgm
	質量	3.68	kg
	重心距離 hb2	75.00	mm
上側合計モーメント		0.84	kgm

回転バランス		
差引モーメント(下側-上側)	0.00	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



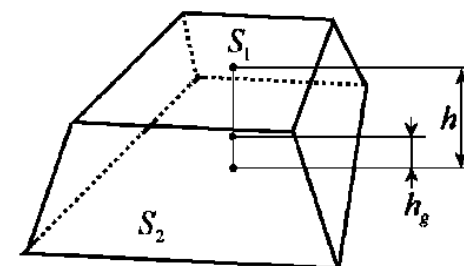
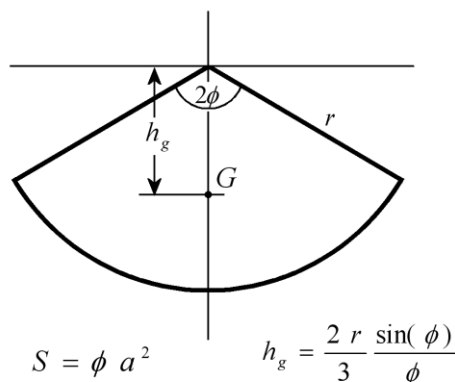
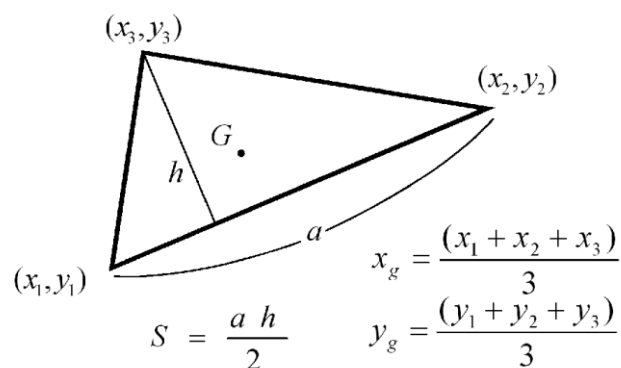
回転半径の計算方法

各部の重心とジャーナル中心の距離

三角形の面積
と重心

扇形の面積と
重心

角錐台の体積と
重心



重心のy座標
$$h_g = \frac{h}{4} \frac{1 + 2\sqrt{n} + 3n}{1 + \sqrt{n} + n}$$

 体積
$$V = \frac{h}{3} (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2})$$

 但し
$$n = \frac{S_1}{S_2}$$

S1 上底面積
 S2 下底面積

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。

計算サンプル

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16日 組立図, 設計計算一覧と一緒に提出する

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	9.30E+03	mm ²
	体積	3.35E+05	mm ³
	質量	2.61	kg
	重心距離 hb4	37.50	mm
	モーメント(両側合計)	0.195858	kgm
角錐台 B1	上底幅	540.00	mm
	上底厚さ	10.00	mm
	上底面積	540.00	mm ²
	下底面積	4464.00	mm ²
	高さ	51.00	mm
	体積	111462.16	mm ³
	質量	0.87	kg
	モーメント(両側合計)	1.61E-01	kgm
クランク ピン B2	直径	84.00	mm
	長さ	64.00	mm
	体積	3.55E+05	mm ³
	質量	2.77	kg
	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 hb2	75.00	mm
	モーメント	0.28	kgm
上側合計モーメント		0.84	kgm

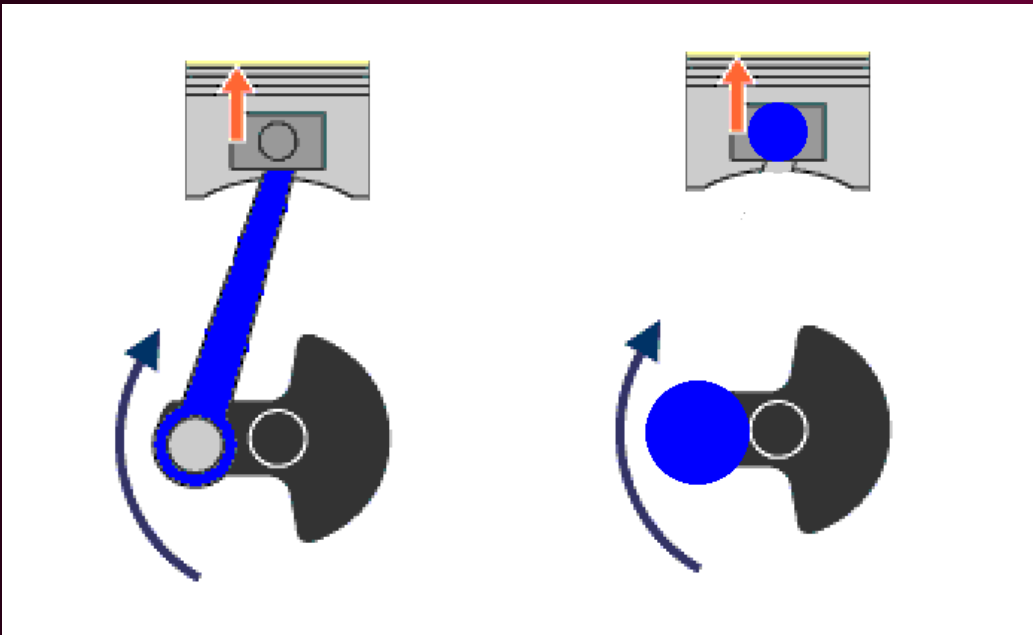
回転バランス		
差引モーメント(下側-上側)	0.00	kgm

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)

往復運動する質量

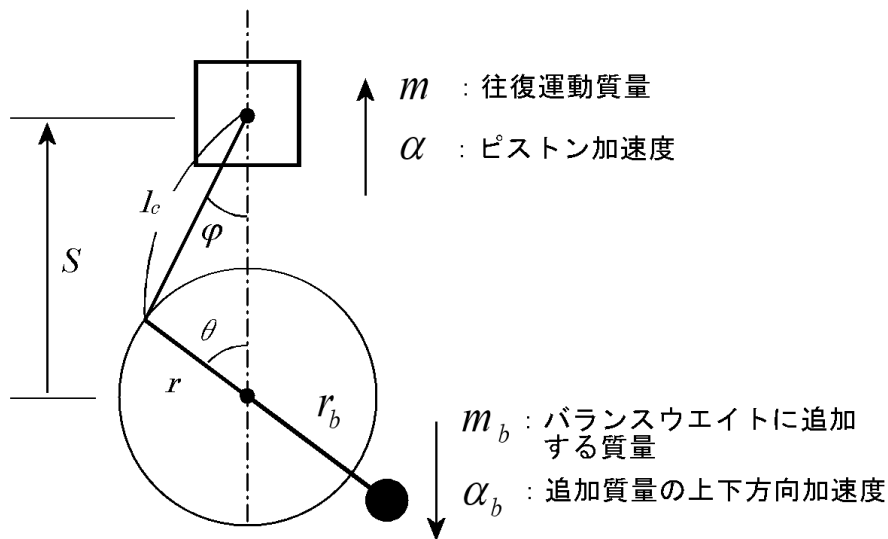
往復振動の力は、往復運動する質量の加速度による



往復動運動

- ・ ピストン
- ・ ピストンピン
- ・ コンロッドの 1/3

往復運動の加速度



ピストンの位置

$$\begin{aligned}
 S &= (l_c + r) - (l_c \cos \varphi + r \cos \theta) \\
 &= r \left\{ (1 - \cos \theta) + \lambda \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} \right) \right\} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

ピストン速度

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = r\omega \left(\sin \theta + \frac{\sin 2\theta}{2\lambda \sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta}} \right) \quad (3.13)$$

$$\sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta} \approx 1 \quad (3.15)$$

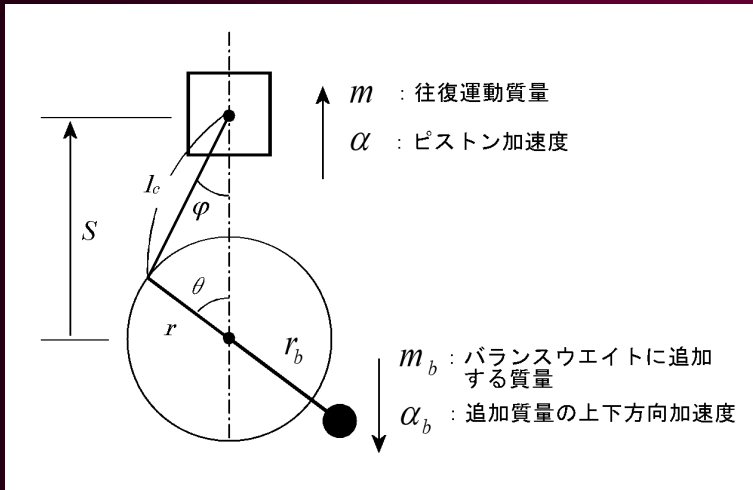
と近似して

ピストンの加速度

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 S}{dt^2} &= r \frac{d \left(\sin \theta + \frac{1}{2\lambda} \sin 2\theta \right)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r \left(\sin \theta + \frac{1}{2\lambda} \sin 2\theta \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\
 &= r\omega^2 \left(\cos \theta + \frac{1}{\lambda} \cos 2\theta \right) + r \left(\sin \theta + \frac{1}{\lambda} \sin 2\theta \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\
 &= \alpha \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

$$\alpha = r\omega^2 \left(\cos \theta + \frac{1}{\lambda} \cos 2\theta \right)$$

往復運動の慣性力バランス



追加したウエイトに
よる新た追加重量
の回転を回転が往
復運動の両バランス
をとることが出来る。
しかし、...

往復運動の加速度

$$\alpha = r\omega^2 \left(\cos\theta + \frac{1}{\lambda} \cos 2\theta \right)$$

追加バランスウエイトの上下方向加速度

$$\alpha_b = r_b\omega^2 \cos(\theta + \pi) = -r_b\omega^2 \cos\theta$$

ピストン、ピストンピン、コンロッド小端部の慣性力

$$m\alpha = mr\omega^2 \left(\cos\theta + \frac{1}{\lambda} \cos 2\theta \right)$$

回転2次の項を省略すれば

$$m\alpha = mr\omega^2 \cos\theta$$

追加バランスウエイトの上下方向慣性力

$$m_b\alpha_b = -m_b r_b \omega^2 \cos\theta$$

従って、往復運動のバランスは

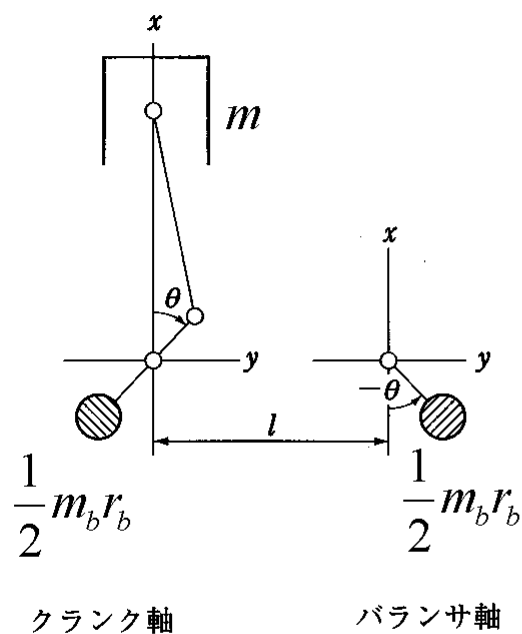
$$mr = m_b r_b$$

とすれば上下方向の慣性力はバランスする

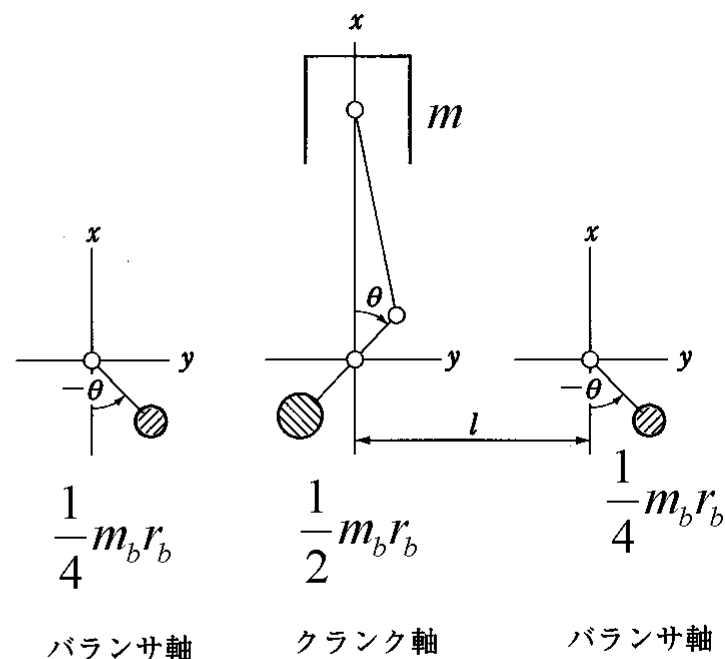
バランサ（バランスシャフト）

そこで、追加バランスウェイトを2つに分けて、その一つをクランクシャフトと逆回転するバランサとする。

さらに、クランク軸回りの偶力を打ち消すため、バランサーを2つにわけクランクシャフトの両側に配置することもある。



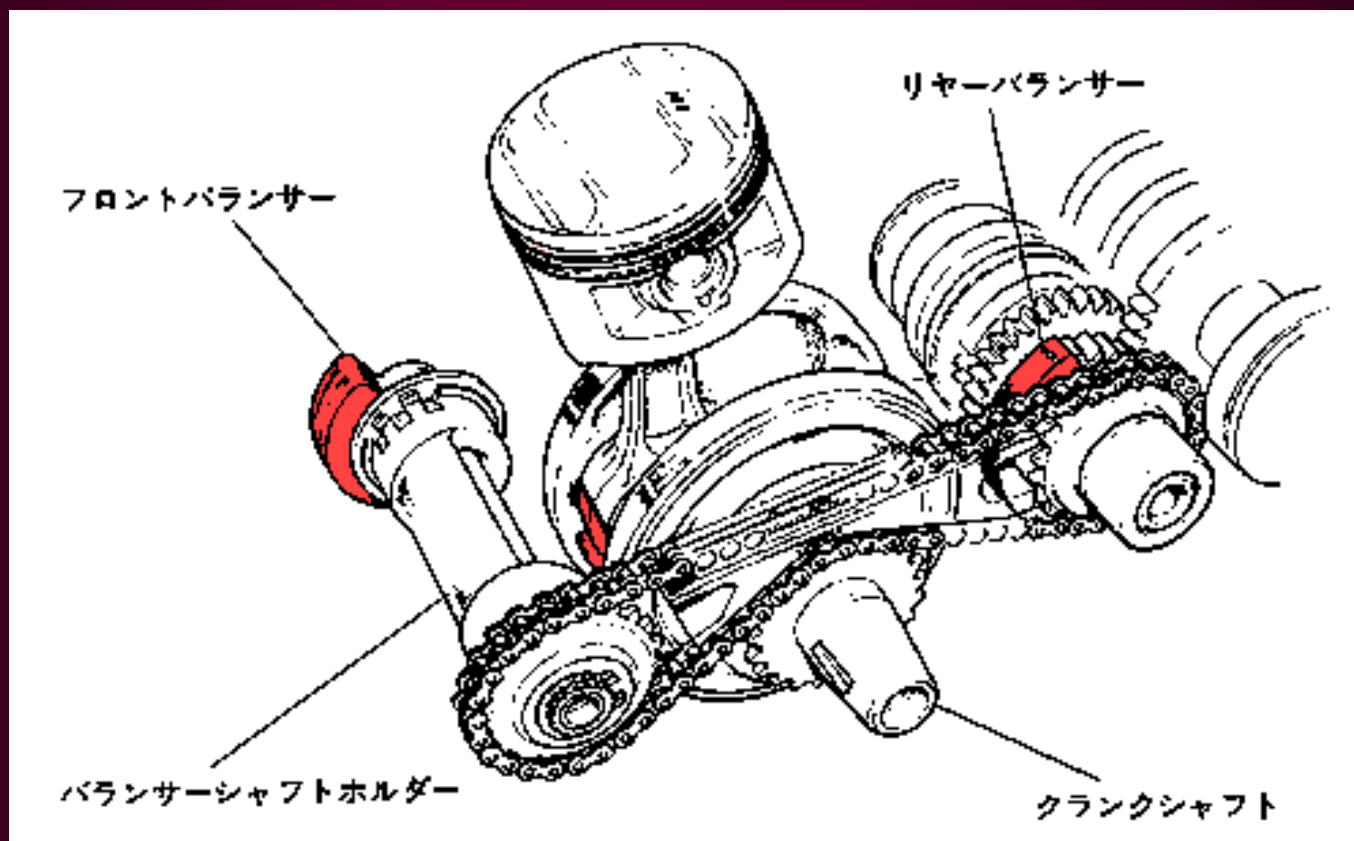
単気筒エンジンにおける 1 軸バランサ



単気筒エンジンにおける 2 軸バランサ

単気筒エンジンのバランス まとめ

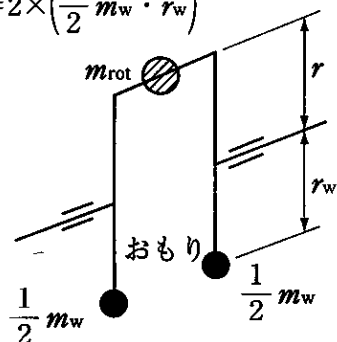
③ 2軸バランサの例



単気筒エンジンのバランス まとめ

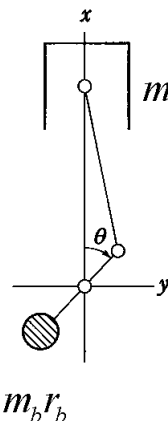
① 回転バランス

$$m_{\text{rot}} \cdot r = 2 \times \left(\frac{1}{2} m_w \cdot r_w \right)$$



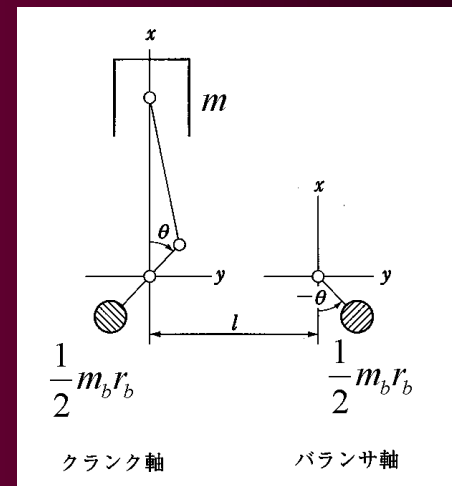
単気筒エンジンにおける回転慣性力の
つり合わせ

② 往復動バランス



クランク軸

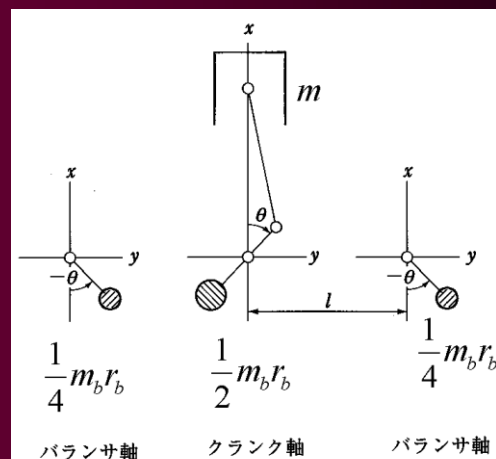
単気筒エンジンにおける
往復動バランス



クランク軸

バランス軸

③ 1軸バランス と2軸バランス



バランス軸

クランク軸

バランス軸

単気筒エンジンのバランス まとめ

① 回転バランス

- ・・・ バランスウェイトで遠心力を釣り合わせる

② 往復動バランス

- ・・・ ピストンの最大加速度における慣性力をバランスウェイトの追加で低減する。（①の回転バランスはくずれる）
100%バランスさせずにハーフバランスとすることもある。

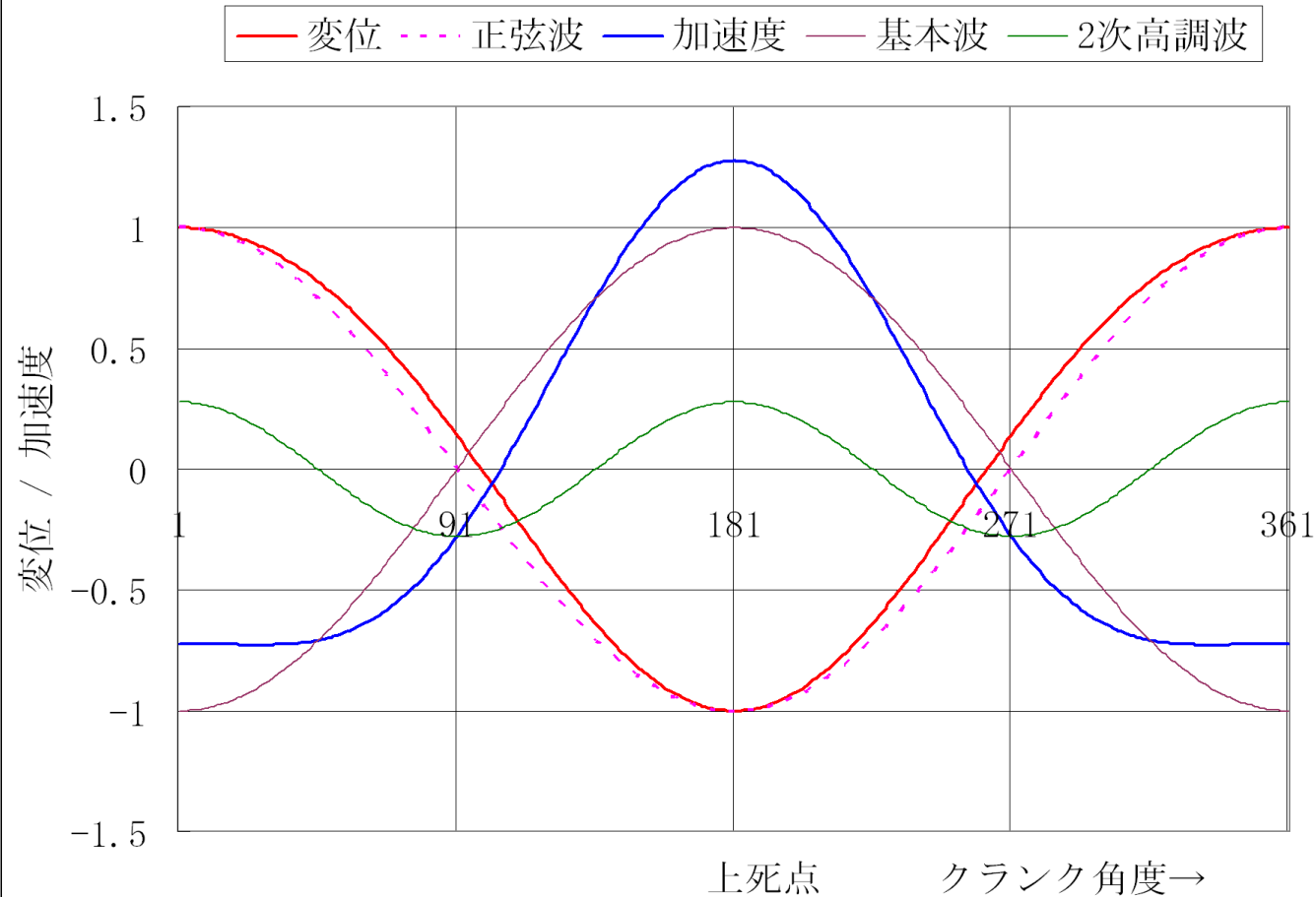
③ 横振動バランス

- （横振動は②の往復動バランスによって発生する）
・・・ バランスシャフト（ balanサー）を設ける

今回の設計では ①回転バランス のみを計算する

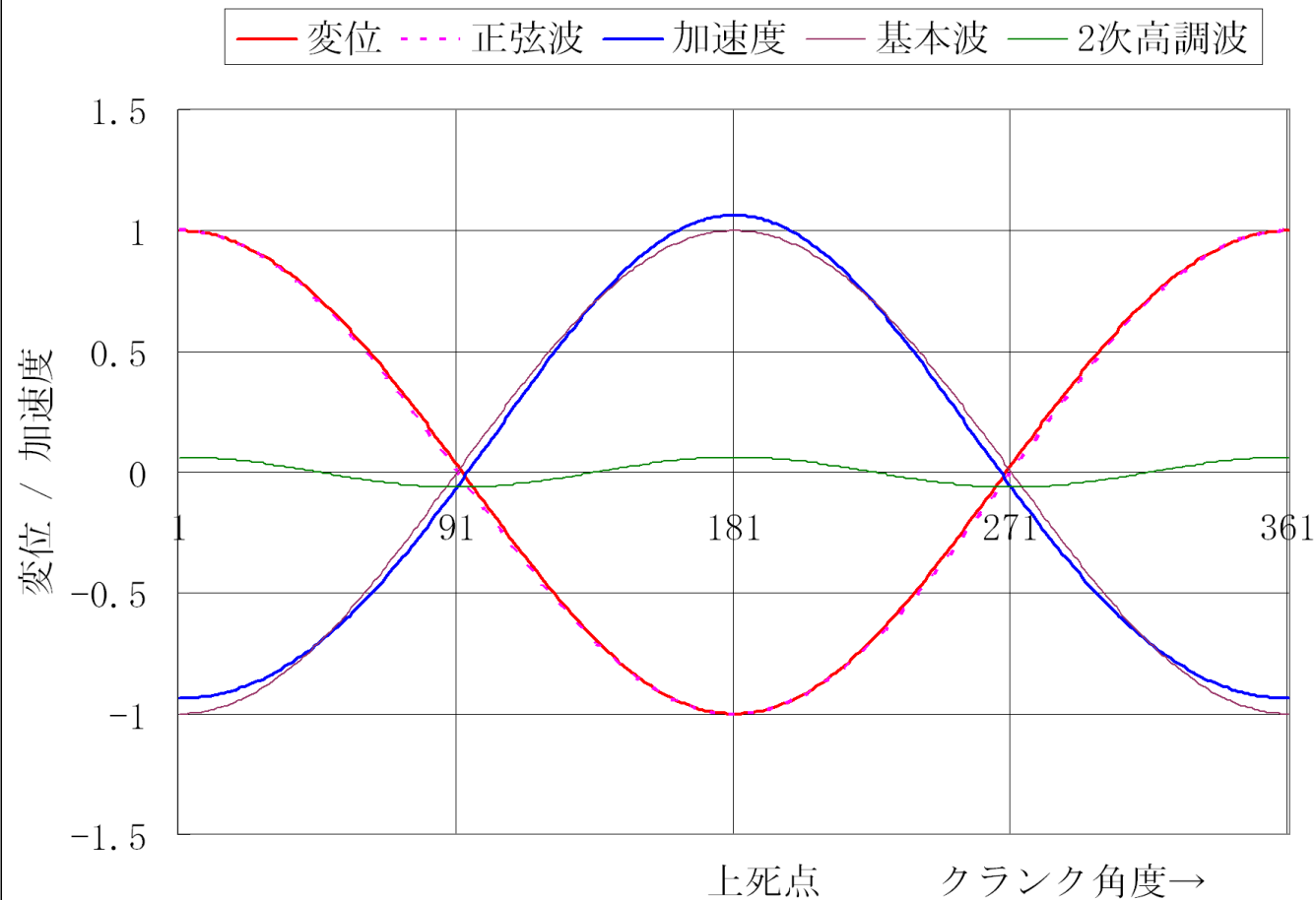
回転2次の振動 $\lambda = 3.6$

ピストンの変位と加速度



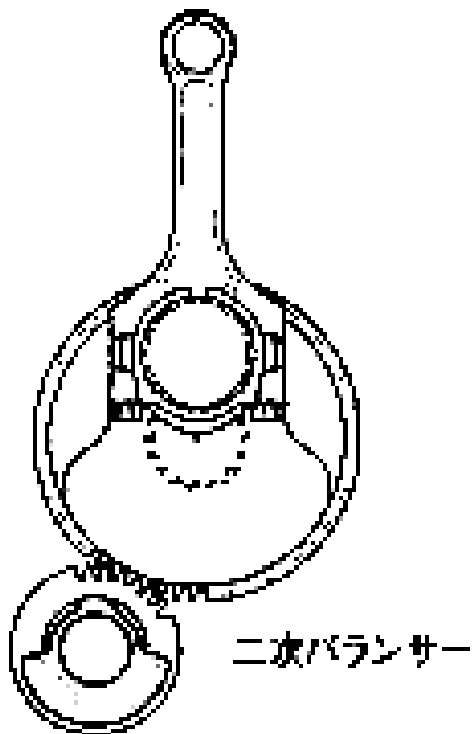
回転2次の振動

ピストンの変位と加速度

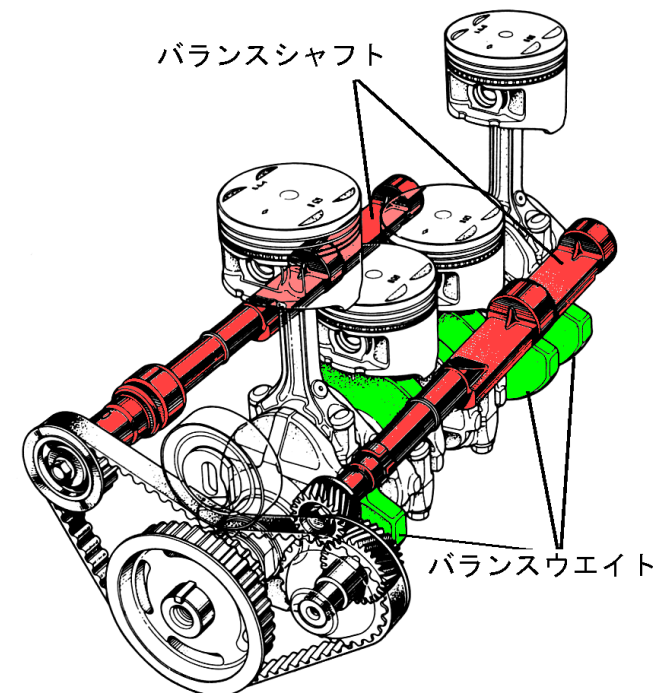


回転2次の振動

- ・ 回転2次の振動を打ち消すためのバランスシャフト



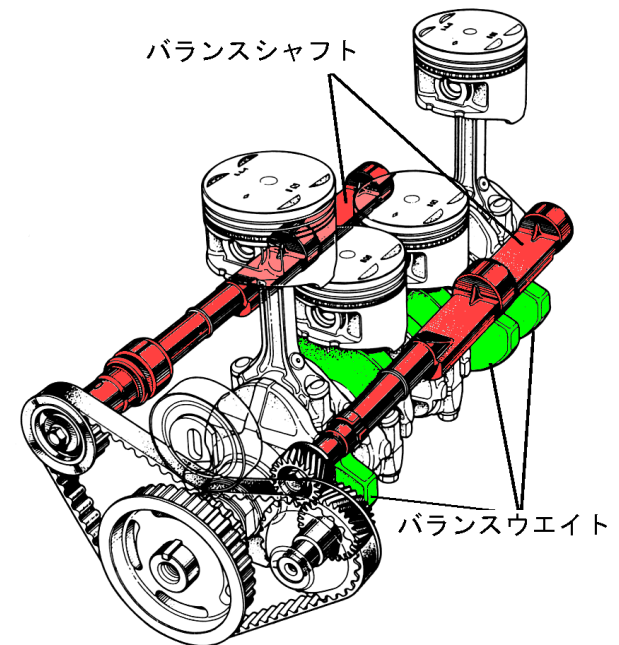
多気筒エンジンにおける2軸バランサー



多気筒エンジンのバランス

- ・ 多気筒エンジンではクランク配列により、回転慣性力、往復動慣性力を低減することが出来る
- ・ クランク軸の倍の回転速度の balanser (バランスシャフト) により、2次の慣性力を打ち消すことが出来る
- ・ 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出来る。

多気筒エンジンにおける2軸バランスー



振動はできるだけ小さくする

- 振動や騒音は人に不快かつ有害
- エンジンや装置の耐久性を阻害する
- エンジンの構造や使用目的によって対処方法は異なる

以上

計算サンプル

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16日 組立図, 設計計算一覧と一緒に提出する

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	9.30E+03	mm ²
	体積	3.35E+05	mm ³
	質量	2.61	kg
	重心距離 hb4	37.50	mm
	モーメント(両側合計)	0.195858	kgm
角錐台 B1	上底幅	540.00	mm
	上底厚さ	10.00	mm
	上底面積	540.00	mm ²
	下底面積	4464.00	mm ²
	高さ	51.00	mm
	体積	111462.16	mm ³
	質量	0.87	kg
	モーメント(両側合計)	1.61E-01	kgm
クランク ピン B2	直径	84.00	mm
	長さ	64.00	mm
	体積	3.55E+05	mm ³
	質量	2.77	kg
	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 hb2	75.00	mm
	モーメント	0.28	kgm
上側合計モーメント		0.84	kgm

回転バランス		
差引モーメント(下側-上側)	0.00	kgm