

自動車用V形機関のバンク角誤差が起振モーメントに与える影響

牧嶋 真也, 桐 昭弘, 伊藤 紀男 (富山大学)

Effect on Exciting Moment by Bank Angle Error of V-Type Engine for Automobile

Shinya MAKISHIMA, Akihiro KIRI, Norio ITO (Toyama University)

Recently, an automobile engine advances toward higher power and the powers per unit weight and unit displacement tend to increase. On the other hand, the compact design of the engine is desired for the fuel efficiency and habitability improvement. The compact design have been developed the structure of the engine from Straight-type to V-type, VR-type and W-type. One of the present authors has previously reported the compact design and the reduction of vibration of V-type engine. Then, it has been clarified that the number of the effective bank angle increases in the design, when the cylinder number of the V-type engine increases. The 45 kinds of bank angle have been obtained V-type 12 cylinder engine with the transposition crank pin. The bank angle required by the calculation has the fraction under decimal point. In this report, when the bank angle (V-angle) which decides the basic structure of V-type engine has the angle error, the effect of the error on the exciting moment is described.

Key words : Engine, V-type engine, Bank angle error, Manufacturing error, Exciting force, Exciting moment.

1. はじめに

近年, 乗用車用機関は高出力化が進み, 単位重量・単位排気量当りの出力が増加の傾向にある。同時に, 低燃費化や居住性向上のために, 機関のコンパクト化も進められている。機関のコンパクト化は, 機関の構造を直列形からV形化, VR形化, W形化へと進化させている。

著者の一人は, これまでV形機関のコンパクト化と振動の低減化に関する研究に取り組んできた^{(1)~(5)}。V形機関の気筒数が増加すると, それに伴って設計上有効なバンク角(V角度)が多数存在することがわかった。転位形クランク構造をもつV形12気筒機関では, 45種類ものバンク角が得られている⁽⁵⁾。

その際, 理論的に求められるバンク角は, 度(deg)以下に端数を生じる。そこで本報告では, V形機関の基本構造を決定するバンク角の角度誤差, すなわち加工誤差が, 機関の起振モーメントなどに与える影響について検討した。

2. バンク角誤差の影響

まず, V形機関に発生する起振力及び起振モーメントについて考える。一般に, バンク角 α_0 のV形機関は2列の直列形機関によって構成される。図1は, V形機関のクランク軸に直角な断面図で, 2つの直列形機関が R_1, R_2 である。破線はバンク角誤差が生じた場合を示す。機関中央のクランク軸上の点を原点Oとし, クランク軸をz軸, z軸を含む水平面内に

y 軸, それらに垂直に x 軸をとる。直列形機関 R_1, R_2 のピストンピン及びクランクピンの中心をそれぞれ P_1, P_2, C_1, C_2 , クランク軸に対してクランクピンと対称な位置に, y 軸方向の起振力を消滅させるためにバランスウェイトを Q_1, Q_2 に設置する。ここでは, シリンダと同数のピンをもつ転位形のクランクを扱う。 R_1, R_2 のピストンの運動方向を x_1, x_2 軸とし, それらが機関の鉛直方向 x 軸となす角 $(\alpha_0/2)$ は等しいものとする。角度の符号は, x 軸を基準とし z 軸の時計回りを正とする。直列形機関 R_1, R_2 の x_1, x_2 軸方向の起振力の総和を $F_{x1}^*(\theta), F_{x2}^*(\theta)$ とすると, V形機関に生じる起振力の x, y 成分 $F_x^*(\theta), F_y^*(\theta)$ は, 次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} F_x^*(\theta) &= F_{x1}^*(\theta)\cos\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) + F_{x2}^*(\theta)\cos\frac{\alpha_0}{2} \\ F_y^*(\theta) &= F_{x1}^*(\theta)\sin\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) + F_{x2}^*(\theta)\sin\frac{\alpha_0}{2} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

なお, 式中の*印は, 無次元量を表し, 次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} F^*(\theta) &= F(\theta)/m_{rec}r\omega^2 \\ F(\theta) &= m_{rec}r\omega^2(\cos\theta + \lambda\cos 2\theta + \dots) \\ m_{rec} &= m_p + (1-c_p)m_r \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで, m_p, m_r はピストン及び接続棒の質量, c_p は, 接続棒の長さを L , 接続棒の重心までの長さを L_p としたとき, $c_p = L_p/L$ である。また, r はクランク半径を, λ は接続比 L/r を, ω はクランクの角速

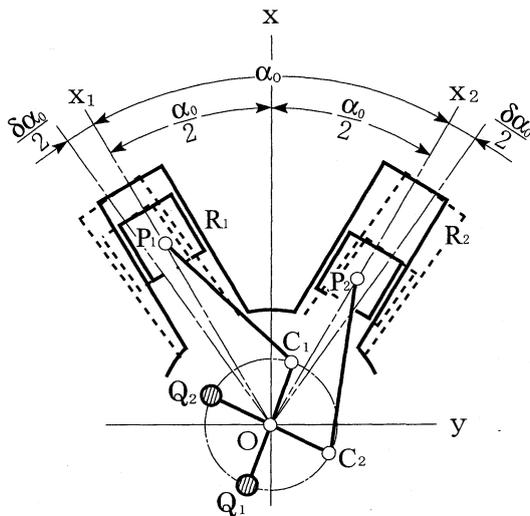


図1 V形機関の構成

度を表す。

V形機関のバンク角誤差が起振力に与える影響は, 式(1)より, 次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \delta F_x^*(\theta) &= \frac{1}{2} \left\{ F_{x1}^*(\theta)\sin\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) - F_{x2}^*(\theta)\sin\frac{\alpha_0}{2} \right\} \delta\alpha_0 \\ \delta F_y^*(\theta) &= \frac{1}{2} \left\{ -F_{x1}^*(\theta)\cos\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) + F_{x2}^*(\theta)\cos\frac{\alpha_0}{2} \right\} \delta\alpha_0 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

次に, V形機関に発生する起振モーメントの影響について考える。直列形機関 R_1, R_2 に生じるピッチングモーメントを M_{y01}^*, M_{y02}^* とすると, V形機関に生じる起振モーメントの x, y 成分 M_x^*, M_y^* は, 次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} M_y^* &= M_{y01}^*\cos\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) + M_{y02}^*\cos\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \\ M_x^* &= -\left\{ M_{y01}^*\sin\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) + M_{y02}^*\sin\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

V形機関のバンク角誤差が起振モーメントに与える影響も, 式(4)より, 次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \delta M_y^* &= \frac{1}{2} \left\{ M_{y01}^*\sin\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) - M_{y02}^*\sin\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \right\} \delta\alpha_0 \\ \delta M_x^* &= \frac{1}{2} \left\{ M_{y01}^*\cos\left(-\frac{\alpha_0}{2}\right) - M_{y02}^*\cos\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \right\} \delta\alpha_0 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

以上の関係式を用いて, バンク角誤差の影響を調べることができる。ここでは, いくつかの具体的な機関について, その影響を調べる。

3. 具体的計算例

バンク角誤差の影響については, 気筒数とバンク角の違いによって, 現在実用化されている 60° V形 6気筒機関 (60° V6 機関と略称する。以下同様に略称する。), 90° V6 機関, それに 90° V8 機関の3種類について検討する。V6 機関を2種類取り上げたのは, 唯一同一気筒数でバンク角の異なる機関が実用化されているからである。それぞれの機関には, 同じ振動特性をもついくつかの気筒配列が存在するが, ここではその中の一例について計算を試みる。バンク角誤差としては, 設計バンク角 α_0 に対し, $\pm 5^\circ, \pm 3^\circ, \pm 1^\circ$ の変化を与えることにする。

3.1 60° V6機関 60° V6機関は、排気量が3000cc 前後の国産車に最も多く利用されている機関である。V形を構成する左右の直列形3気筒機関 R_1, R_2 の気筒配列は、次のような場合について検討する。

第1列： 1 2 3

第2列： 3 1 2

ここで、1, 2, 3は、直列形3気筒機関のクランク位相番号を表し、それぞれ位相が120°ずつずれた気筒を表す。このとき、 x_1, x_2 軸方向の起振力の総和 $F_{x1}^*(\theta), F_{x2}^*(\theta)$ は、次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_{x1}^*(\theta) &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta + \lambda \cos 2\theta + \dots \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta + 240^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta - 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta - 240^\circ) + \dots \right\} \end{aligned} \right\} \\ F_{x2}^*(\theta) &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta + \lambda \cos 2\theta + \dots \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta + 240^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta - 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta - 240^\circ) + \dots \right\} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \cdot (6)$$

λ の値は一般的な1/3.5を使用する。式(6)を式(3)に代入してバンク角誤差 $\delta\alpha_0$ による起振力の変化 $\delta F_x^*(\theta), \delta F_y^*(\theta)$ を求める。起振力変化のy軸成分 $\delta F_y^*(\theta)$ は0となる。

次に、60° V6 機関の左右の直列形3気筒機関に生じる起振モーメント M_{y01}^*, M_{y02}^* は、次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} M_{y01}^* &= \left\{ \begin{aligned} &\cos(\theta - 120^\circ) - \cos\theta \\ &+ \lambda \left\{ \cos(2\theta + 240^\circ) - \cos 2\theta \right\} + \dots \end{aligned} \right\} \\ M_{y02}^* &= \left\{ \begin{aligned} &\cos(\theta + 120^\circ) - \cos(\theta - 120^\circ) \\ &+ \lambda \left\{ \cos(2\theta + 240^\circ) - \cos(2\theta - 240^\circ) \right\} + \dots \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} (7)$$

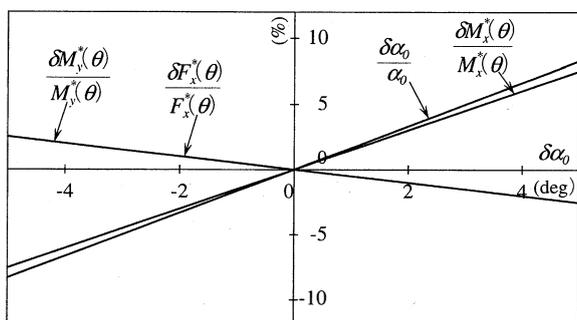
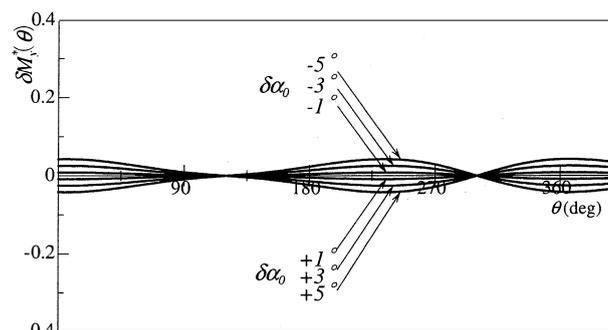


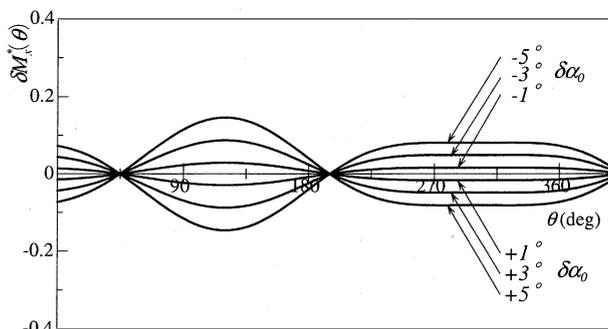
図2 60° V6 機関のバンク角誤差の影響

式(7)を式(5)に代入してバンク角誤差 $\delta\alpha_0$ による起振モーメントの変化 $\delta M_x^*, \delta M_y^*$ を求める。計算例の気筒配列では、 $\theta = 234^\circ$ のとき、ピッチングモーメントは最大値 $M_{y\max}^* = 1.689$ をとり、 $\theta = 120^\circ$ のとき、ヨーイングモーメントは最大値 $M_{x\max}^* = 1.935$ をとる。ここでは、それぞれの最大値の点で、バンク角誤差が起振モーメントに与える影響について計算する。バンク角誤差と起振力変化のx軸成分 $\delta F_x^*(\theta)$ 及び起振モーメント変化 $\delta M_x^*, \delta M_y^*$ の相対変化を図2に示す。図3は、バンク角誤差と起振モーメントの変化 δM_y^* 及び δM_x^* の様子を示す。図3(a)はピッチングモーメントを、図3(b)はヨーイングモーメントを示す。

図2より、x軸方向に働く起振力の相対変化 $\delta F_x^*(\theta)/F_x^*(\theta)$ とピッチングモーメントの相対変化 $\delta M_y^*/M_y^*$ は同じ値をとる。また、ヨーイングモーメントの相対変化 $\delta M_x^*/M_x^*$ とピッチングモーメントの相対変化 $\delta M_y^*/M_y^*$ を比較すると、ヨーイングモーメントはバンク角誤差の影響をより大きく受けることがわかる。



(a) Pitching moment



(b) Yawing moment

図3 60° V6機関の起振モーメントの変化

3.2 90° V6 機関 90° V6 機関は国内では一社のみが実車に搭載している。V形を構成する左右の直列形3気筒機関 R_1, R_2 の気筒配列は、次のような場合について検討する。

第1列： 1 2 3

第2列： 3 1 2

x_1, x_2 軸方向の起振力の総和 $F_{x1}^*(\theta), F_{x2}^*(\theta)$ は、次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_{x1}^*(\theta) &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta + \lambda \cos 2\theta + \dots \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta + 240^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta - 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta - 240^\circ) + \dots \right\} \end{aligned} \right\} \cdot (8) \\ F_{x2}^*(\theta) &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta + \lambda \cos 2\theta + \dots \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta + 240^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta - 120^\circ) + \lambda \cos(2\theta - 240^\circ) + \dots \right\} \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

60° V6 機関と同様に、式(8)を式(3)に代入してバンク角誤差 $\delta\alpha_0$ による起振力の変化量 $\delta F_x^*(\theta), \delta F_y^*(\theta)$ を求める。ここでも、起振力変化の y 軸成分 $\delta F_y^*(\theta)$ は 0 となる。

次に、左右の直列形3気筒機関に生じる起振モーメント M_{y01}^*, M_{y02}^* は、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} M_{y01}^* &= \left\{ \begin{aligned} &\cos(\theta - 120^\circ) - \cos\theta \\ &+ \lambda \left\{ \cos(2\theta + 240^\circ) - \cos 2\theta \right\} + \dots \end{aligned} \right\} \\ M_{y02}^* &= \left\{ \begin{aligned} &\cos(\theta + 120^\circ) - \cos(\theta - 120^\circ) \\ &+ \lambda \left\{ \cos(2\theta + 240^\circ) - \cos(2\theta - 240^\circ) \right\} + \dots \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} (9)$$

式(9)を式(5)に代入してバンク角誤差 $\delta\alpha_0$ による起振モーメントの変化量 $\delta M_x^*, \delta M_y^*$ が求められる。計算例の気筒配列では、 $\theta = 234^\circ$ のとき、ピッチングモーメントは最大値 $M_{y\max}^* = 1.379$ をとり、

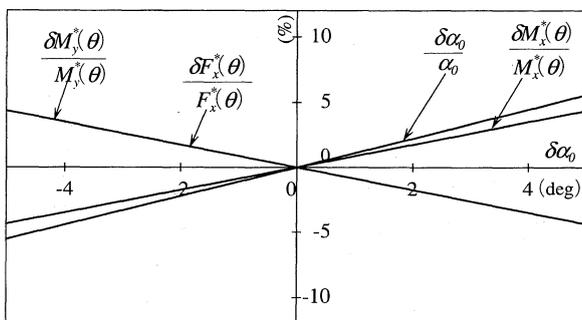


図4 90° V6 機関のバンク角誤差の影響

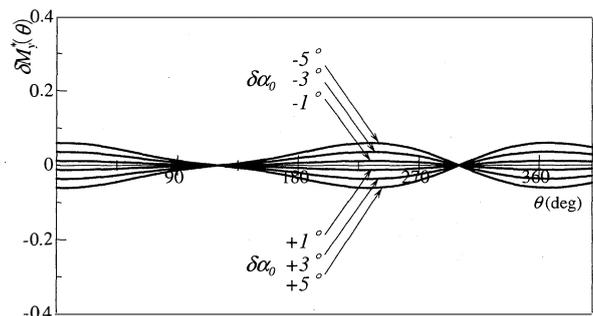
$\theta = 120^\circ$ のときヨーイングモーメントは最大値 $M_{x\max}^* = 2.737$ をとる。ここでも、それぞれの最大値の点で計算する。バンク角誤差と起振力の x 軸成分の変化 $\delta F_x^*(\theta)$ 及び起振モーメント変化 $\delta M_x^*, \delta M_y^*$ の相対変化の様子を図4に示す。図5は、バンク角誤差と起振モーメントの変化 δM_y^* 及び δM_x^* を示す。図5(a)はピッチングモーメントを、図5(b)はヨーイングモーメントである。

図4より、ピッチングモーメントの相対変化 $\delta M_y^*/M_y^*$ とヨーイングモーメントの相対変化 $\delta M_x^*/M_x^*$ はバンク角誤差により符号は異なるが同じ影響を受けている。またここでも、x 軸方向の起振力の相対変化 $\delta F_x^*(\theta)/F_x^*(\theta)$ とピッチングモーメントの相対変化 $\delta M_y^*/M_y^*$ は同じ値を示している。

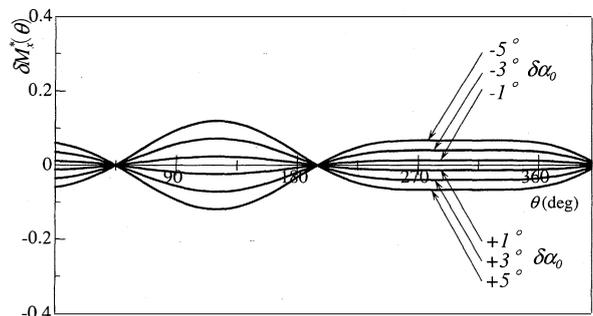
3.3 90° V8 機関 90° V8 機関は、国内では主として 4000cc 以上の大型乗用車に搭載されている。V形を構成する左右の直列形4気筒機関 R_1, R_2 の気筒配列は、次の場合について計算を試みる。

第1列： 1 2 3 4

第2列： 3 1 4 2



(a) Pitching moment



(b) Yawing moment

図5 90° V6 機関の起振モーメントの変化

1, 2, 3, 4は、直列形4気筒機関のそれぞれの位相を表し、位相は90°ずつずれている。このとき x_1, x_2 軸方向の起振力の総和 $F_{x1}^*(\theta), F_{x2}^*(\theta)$ は次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_{x1}^*(\theta) &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta + \lambda\cos 2\theta + \dots \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 90^\circ) + \lambda\cos(2\theta + 180^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta - 90^\circ) + \lambda\cos(2\theta - 180^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 180^\circ) + \lambda\cos(2\theta + 360^\circ) + \dots \right\} \end{aligned} \right\} \\ F_{x2}^*(\theta) &= \left\{ \begin{aligned} &\cos\theta + \lambda\cos 2\theta + \dots \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 90^\circ) + \lambda\cos(2\theta + 180^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta - 90^\circ) + \lambda\cos(2\theta - 180^\circ) + \dots \right\} \\ &+ \left\{ \cos(\theta + 180^\circ) + \lambda\cos(2\theta + 360^\circ) + \dots \right\} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

これより、バンク角誤差 $\delta\alpha_0$ による起振力の変化 $\delta F_x^*(\theta), \delta F_y^*(\theta)$ を求める。同様にして、90° V8 機関の左右の直列4気筒機関に生じる起振モーメント M_{y01}^*, M_{y02}^* は、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} M_{y01}^* &= \frac{3}{2} \left[\left\{ \cos(\theta + 180^\circ) - \cos\theta \right\} \right. \\ &\quad + \lambda \left\{ \cos(2\theta + 360^\circ) - \cos 2\theta \right\} + \dots \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[\left\{ \cos(\theta - 90^\circ) - \cos(\theta + 90^\circ) \right\} \right. \\ &\quad \left. \left. + \lambda \left\{ \cos(2\theta - 180^\circ) - \cos(2\theta + 180^\circ) \right\} + \dots \right] \right\} \\ M_{y02}^* &= \frac{3}{2} \left[\left\{ \cos(\theta + 90^\circ) - \cos(\theta - 90^\circ) \right\} \right. \\ &\quad + \lambda \left\{ \cos(2\theta + 180^\circ) - \cos(2\theta - 180^\circ) \right\} + \dots \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[\left\{ \cos(\theta + 180^\circ) - \cos\theta \right\} \right. \\ &\quad \left. \left. + \lambda \left\{ \cos(2\theta + 360^\circ) - \cos 2\theta \right\} + \dots \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

この場合の計算例による気筒配列では、 $\theta = 208^\circ$ のとき、ピッチングモーメントは最大値 $M_{y\max}^* = 3.162$ をとり、 $\theta = 117^\circ$ のときヨーイングモーメントは最大値 $M_{x\max}^* = 3.162$ をとる。これまでと同様にそれぞれの最大値をとる点で、バンク角誤差が起振モーメントに与える影響について計算する。バンク角誤差と起振力のx軸成分の変化 $\delta F_x^*(\theta)$ 及び起振モーメント変化 $\delta M_x^*, \delta M_y^*$ の相対変化を図6に示す。図7は、バンク角誤差と起振モーメントの変化 δM_y^* 及び δM_x^* を示す。図7(a)はピッチングモーメントを、図7(b)はヨーイングモーメントを示す。

図6より90° V6 機関と同様、ピッチングモーメ

ントの相対変化 $\delta M_y^*/M_y^*$ とヨーイングモーメントの相対変化 $\delta M_x^*/M_x^*$ はバンク角誤差により、符号は異なるが同じ影響を受けている。また、x軸方向に働く起振力の相対変化 $\delta F_x^*(\theta)/F_x^*(\theta)$ とピッチングモーメントの相対変化 $\delta M_y^*/M_y^*$ は、ここでも同じ値を示している。

4. 考察

以上の結果より、次のようなことがわかる。まず、

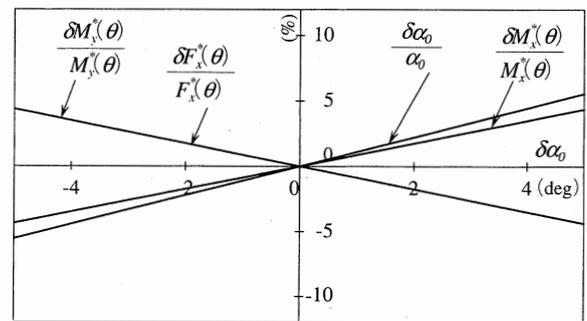
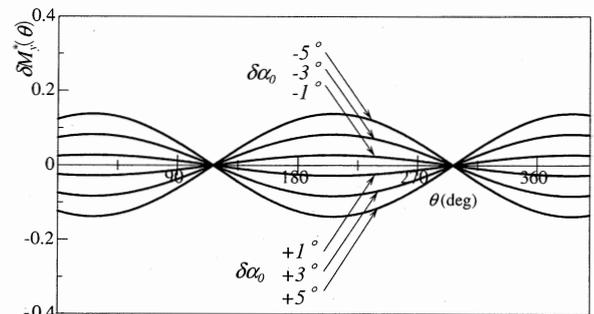
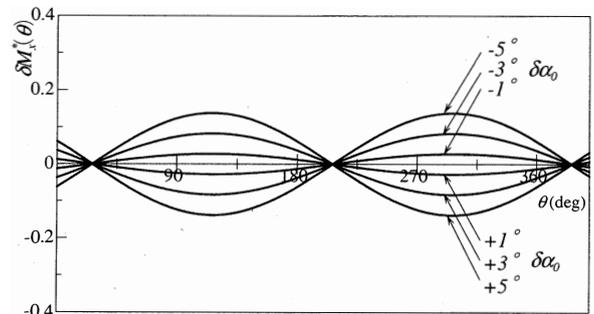


図6 90° V8 機関のバンク角誤差の影響



(a) Pitching moment



(b) Yawing moment

図7 90° V8 機関の起振モーメントの変化

図2, 4, 6よりピッチングモーメント及びヨーイングモーメントが最大になる θ の値でのバンク角誤差の影響は, 設計バンク角が小さいと, ピッチングモーメントの相対変化が小さくなることがわかる。逆に, 設計バンク角が大きくなると, ピッチングモーメントの相対変化は大きくなる。ヨーイングモーメントについては, その逆の傾向を示している。なお, 図2, 4, 6では, ピッチング及びヨーイングモーメントの値が最大となる θ でその相対変化を調べたが, 実際には変化量の絶対値は異なるが, それぞれの相対変化は θ の値に無関係に一定である。

次に, バンク角誤差による起振モーメントの相対変化は, 式(5)から気筒数に関係なくバンク角のみに関係する。図4, 6より, $90^\circ V 6$ と $90^\circ V 8$ とが起振モーメントの相対変化が同じ値を示していることからわかる。

また, バンク角誤差は, バンク角が大きい場合はピッチングモーメントに, そして小さい場合はヨーイングモーメントに影響が出やすいことがわかる。

これらのことから, バンク角の加工誤差の影響は無視できないことがわかった。

5. まとめ

V形機関の設計バンク角の加工誤差が, 起振モーメントなどに与える影響に関して, 次のことが明らかになった。

(1)バンク角の加工誤差による起振モーメントの

変化は, 気筒配列, 気筒数によらず, 設計バンク角のみが影響する。

(2)ピッチングモーメント, ヨーイングモーメントともに設計バンク角の大きさにより, その変化は異なる。

(3)バンク角の加工誤差による起振力の変化は, y軸方向の成分は0となるが, x軸方向の変化はピッチングモーメントと同じ変化の値を示す。これより, 機関のV角度に加工誤差が生じる場合は, 上記の結果を考慮しなければならない。

参考文献

- (1)伊藤・高橋, V形 10 気筒機関の起振モーメントに関する研究(第1報), 機論, 63-610, C(1997), 1875-1879.
- (2)伊藤・他2名, V形10気筒機関の起振モーメントに関する研究(第2報), 機論, 63-160, C(1997), 1880-1886.
- (3)N.Ito, T.Yamane, Exciting Moment Analysis of VR-Type Engine, *JSME Int. J. Series C*, 41-4, (1998), 734-740.
- (4)N.Ito, I.Hattori, Exciting Moment Analysis of V-Type Engine (14-Cylinder V-Type Engine), *JSME Int. J. Series C*, 43-2, (2000), 311-317.
- (5)N.Ito, A.Nakagawa, R.Kitamura, Bank Angle of a V-Type 12-Cylinder Engine, *JSME Int. J. Series C*, 44-3, (2001), 643-649.