

V形10気筒機関の起振モーメントとバンク角

桐 昭弘, 山根 俊和, 伊藤 紀男

Exciting Moment and Bank Angle Analysis of V-Type 10 Cylinder Engine

Akihiro KIRI, Toshikazu YAMANE, Norio ITO

The purpose of this study is to clarify how to determine more convenient or compact bank angle of the 10 cylinder V-type engine. Generally the total number of combinations of cylinder arrangement has a large number with the increase of cylinder. Therefore we usually requires tedious calculations to obtain the analytical result. But the amount of calculation are decreased by selecting reasonably cylinder arrangement of straight 5 cylinders constituting V-type 10 cylinder engine. In this report, we analyze the exciting moment by the latter method. As a result, there is not how to reduce perfectly an unbalance moment of the engine, but we make it clear that the practical engine with some new bank angles is found out. And their results agree with them by the former method.

Key Words: Reciprocating Engine, Exciting Moment, Dynamical Analysis, 10-Cylinder V-Type Engine, Cylinder Arrangement, Bank Angle

1. 緒 言

1989年に米国のデトロイトで開かれたモーターショーに、米国ビュック3の一つであるクライスラー社が、OHVで8,000cc, 400psの90°V形10気筒という途方もなく巨大なエンジンを搭載した“ダッジ・バイパー”というプロトタイプカーを持ち込んだ。これは2人乗りで典型的なアメリカン・スタイルのノスタルジックなロードスターであった。しかし、その車が実際に生産に移されるとは、そのときは誰も考えていなかったと言われている。ところが、その3年後には現実のものとなり、その後は好評を得ながら現在に至っている⁽¹⁾。

一般に、乗用車用のV形多気筒機関としては6気筒や8気筒が主流で、それ以上のものとしてはヨーロッパなどで12気筒のものが搭載されている。このことから、本来、V形10気筒機関は、総排気量と1気筒当たりの排気量とのバランスの関係で、実用には不向きだと言われていた。今回新たに実用化されたV形10気筒機関に関しては、すでに筆者の一人は、その機関に発生する起振モーメントの動力学的な解析を行ってきた。このような多気筒機関の解析においては、気筒数が増えると気筒配列の組

み合せ数は階乗で増加するため、その配列の選び方によって、起振モーメントの解析が煩雑になったり、比較的容易になったりする。すでに報告した論文では、V形10気筒機関の気筒配列の組み合わせ数を、最大限1,600通り考え、それらすべての組み合わせについて計算を試みた。そして、その中で起振モーメントが削減できないものを除外して、実用的なバンク角を求めてきた。それに対して本研究では、あらかじめ気筒配列の組み合わせ数を少なくするために、まず、V形を構成する直列5気筒機関の段階で、有効と考えられる配列を絞り込み、それらをV形に配置した場合の解析法について検討を行った。その結果、すでに報告したものと同一結果が得られたので、ここにその新しい解析法について報告する。

2. 直列5気筒機関の解析

2.1 単気筒機関の基本式

多気筒機関は単気筒機関の集合体であるから、ここではまず、本報告で使用する記号や座標系の説明もかねて単気筒機関の基本式について述べる。

図1は多気筒機関の中の1つの機関を示したものである。図1(a)はクランクシャフトを含む断面図、(b)はその側面図である。点 O_p 、 C はそれぞれピストンピン、クランクピンの位置を、 G は接続棒の重心を示す。 L は接続棒の全長、 L_p 、 L_c は接続棒の重心までの長さ、 r はクランク半径、 θ はクランクシャフトの回転角、 δ は x 軸と接続棒のなす角を示している。また、クランクピン C の原点对称の位置にバランスウエイト Q を設置し、回転質量によるモーメントを消滅させて考える。ここでは角速度 $\omega = \text{一定}$ 、角加速度 $\ddot{\theta} = 0$ とする一般的な方法で取り扱うことにする。このとき単気筒機関に生じる起振力は $F_x(\theta)$ は、次式で表される⁽²⁾。

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

ただし、 m_p 、 m_r はそれぞれピストンおよびコンロッドの質量であり、 C_p 、 λ はそれぞれ $C_p = L_p/L$ 、 $\lambda = r/L$ と表される。

2.2 V形多気筒機関の起振モーメント

直列 n 気筒機関におけるピッチングモーメント M_{y0} は、 i 番目の気筒による起振力と機関中心からの距離をそれぞれ、 $F_{xi}(\theta)$ 、 z_i とすると、次式によって与えられる。

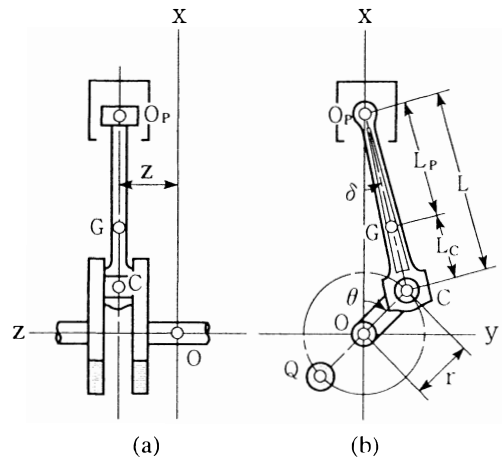


図1 単気筒機関

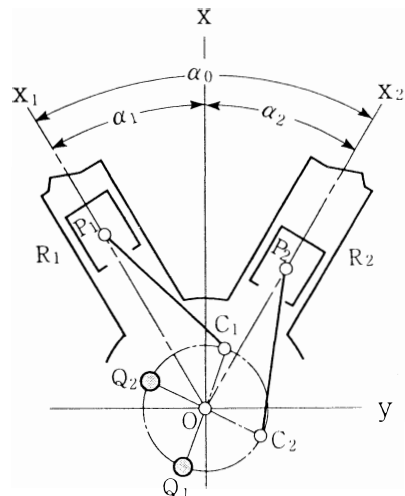


図2 V形機関の構成とバンク角

$$M_{y0} = \sum_{i=1}^n F_{xi}(\theta) \cdot z_i \dots\dots\dots (2)$$

次に、V形多気筒機関について考える。図2は、2つの直列形機関 R_1 、 R_2 がV形を構成する図である。 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x軸となす角を α_1 、 α_2 とする。また、直列形機関 R_1 、 R_2 に生じるピッチングモーメントをそれぞれ M_{y01} 、 M_{y02} とすると、このV形機関に生じる起振モーメント M_y 、 M_x は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_y &= M_{y01} \cos \alpha_1 + M_{y02} \cos \alpha_2 \\ M_x &= -(M_{y01} \sin \alpha_1 + M_{y02} \sin \alpha_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

2. 3 直列5気筒機関

V形10気筒機関の基礎をなす直列5気筒機関について解析する。直列5気筒機関の基準となるクランクピンの位相を $F_1 = F(\theta)$ とおくと、他のものは $F_2 = F(\theta + 72^\circ)$ 、 $F_3 = F(\theta + 144^\circ)$ 、 $F_4 = F(\theta - 144^\circ)$ 、 $F_5 = F(\theta - 72^\circ)$ と表すことができる。これら $F_1 \sim F_5$ の組み合わせによって直列5気筒機関のクランク配列を考えることができる。 $F_1 \sim F_5$ の組み合わせの総数は $5! = 120$ 通り存在する。表1は、それらすべての組み合わせを示したものである。表1中の1～5の数字は $F_1 \sim F_5$ の添字を表している。表1の第1行はクランクピンの位相が 0° のときの状態を基準として、右に 72° 間隔でクランクを回転させた状態を示している。表1より、120通りの組み合わせのうち基本となるのは 0° の状態のときの24通りであり、その他の組み合わせは、それらをそれぞれ 72° 間隔で位相分だけ回転させたものである。よって、直列5気筒機関に生じるピッチングモーメントは24通りに整理される。そこで、 0° の列のクランク配列を第1行から順にComb.1～24と表して、それぞれの配列についてピッチングモーメントを求めることにする。

表2は、表1のComb.1～Comb.24までの直列5気筒機関において、1次、2次における起振モーメントの振幅 M_1 、 M_2 、および初位相 θ_1 、 θ_2 の計算結果についてまとめたものである。

3. V形10気筒機関

3. 1 V形10気筒機関の基準配列の決定

ここでは、Comb.1～Comb.24の配列の中で、V形10気筒機関を構成するにあたって使用可能と思われる配列について検討する。

V形機関を構成するのに相応しいと考えられる直列5気筒機関の配列を決定するにあたって、V形機関の起振モーメントを小さくできる条件として、次の2つの条件が考えられる。

条件1. 1次の起振モーメントをバランスウエイトによって消滅させるためには、V形を構成する2つの直列形機関に生じる1次のピッチングモーメントの振幅は互いに等しくなければならない。

条件2. 2次の起振モーメントはバランスシャフトを設置しなければ消滅できないので、直列形機関に生じる2次のピッチングモーメントはできるだけ小さくしなければならない。

まず、条件1で、1次のピッチングモーメントが等しくなるものをグループごとに整理すると、表3のように、8つのグループに分けることができる。表3では、8つのグループをA、B、 \dots 、Hとして表している。これら8グループの中で、2次のピッチングモーメントの振幅がもっとも小さくなるものはグループEである。よって、Comb.5とComb.20の配列を基本として、V形10気筒機関の起振モーメントについて考察を行う。これによって、V形10気筒機関の配列の組み合わせ数を大幅に削減

表1 直列5気筒機関の気筒配列の組み合わせ

Comb.	0°	72°	144°	216°	288°
1	12345	23451	34512	45123	51234
2	12354	23415	34521	45132	51243
3	12435	23541	34152	45213	51324
4	12453	23514	34125	45231	51342
5	12534	23145	34251	45312	51423
6	12543	23154	34215	45321	51432
7	13245	24351	35412	41523	52134
8	13254	24315	35421	41532	52143
9	13425	24531	35142	41253	52314
10	13452	24513	35124	41235	52341
11	13524	24135	35241	41352	52413
12	13542	24153	35214	41325	52431
13	14235	25341	31452	42513	53124
14	14253	25314	31425	42531	53142
15	14325	25431	31542	42153	53214
16	14352	25413	31524	42135	53241
17	14523	25134	31245	42351	53412
18	14532	25143	31254	42315	53421
19	15234	21345	32451	43512	54123
20	15243	21354	32415	43521	54132
21	15324	21435	32541	43152	54213
22	15342	21453	32514	43125	54231
23	15423	21534	32145	43251	54312
24	15432	21543	32154	43215	54321

表2 直列5気筒機関のピッチングモーメントと初位相

Comb.	M_1 (1st)	θ_1 (deg)	Comb.	M_1 (1st)	θ_1 (deg)
	M_2 (2nd)	θ_2 (deg)		M_2 (2nd)	θ_2 (deg)
1	4.25325401	53.99999999	13	1.561311661	27.73230145
	2.6286556	18		4.749979568	40.38617757
2	4.749979568	40.38617757	14	2.62855561	-18
	1.56131166	-27.73230145		4.253254041	53.99999999
3	3.373716943	42.18141427	15	0.4490279766	53.99999999
	3.690262049	47.35462809		4.97979657	18
4	3.690262049	11.35462809	16	1.56131166	-80.26769855
	3.373716943	65.8185874		4.749979568	4.38617759
5	4.97979657	18	17	3.690262049	-47.35462809
	0.4490279766	-53.99999999		3.373716943	42.18141427
6	4.749979568	4.386177559	18	3.373716943	-65.81858574
	1.56131166	80.26769856		3.690262049	11.35462809
7	3.373716943	65.81858574	19	4.749979568	-4.38617755
	3.690212049	-11.35462809		1.56131166	-80.26769856
8	3.690212049	47.35462809	20	4.97979657	-18
	3.373716943	-42.18141427		0.4490279766	53.99999999
9	1.56131166	80.26769856	21	3.690262049	-11.35462809
	4.749979568	-4.386177559		3.373716743	-65.81858574
10	0.4490279766	-53.99999999	22	3.373716743	-42.18141427
	4.97979657	-18		3.6902622049	-47.35462809
11	2.628655561	18	23	4.749979568	-40.38617757
	4.253254041	-53.99999999		1.56131166	27.73230145
12	1.561311661	-27.73230145	24	4.253254041	-53.99999999
	4.749979568	-40.38617757		2.628655561	-18

M_1, M_2 : 1次, 2次の起振モーメントの振幅

θ_1, θ_2 : 1次, 2次の起振モーメントの初位相

することができる。

3. 2 V形10気筒機関の気筒配列

V形10気筒機関を構成する直列形機関としてComb. 5 と Comb.20を選択した。表4は、これら2つの直列5気筒機関のすべての配列における起振モーメントの初位相を示す。但し、表4の中では、基準配列(クランク位相が0°の場合)の2次の初位相 θ_2 を $53.999999 \dots^\circ = 54^\circ$ としている。

V形10気筒機関を構成する表4の直列5気筒機関の配列の組み合わせは、全部で100通りの組み合わせが存在することになる。表5は、それら組み合わせのすべてを示す。表5で示す数字は、表1と同様であり、上段がV形機関を構成する第1列の直列形機関のクランク配列、下段が第2列のクランク配列を表す。

表3 1次のピッチングモーメント

Group	Comb.
A	1, 24
B	2, 6, 19, 23
C	3, 7, 18, 22
D	4, 5, 17, 21
E	5, 20
F	9, 12, 13, 16
G	10, 15
H	11, 14

表4 Comb. 5とComb.20の初位相

Comb.		0°	72°	144°	-144°	-72°
5	配列	F ₁ F ₂ F ₅ F ₃ F ₄	F ₂ F ₃ F ₁ F ₄ F ₅	F ₃ F ₄ F ₂ F ₅ F ₁	F ₄ F ₅ F ₃ F ₁ F ₂	F ₅ F ₁ F ₄ F ₂ F ₃
	θ_1	18°	90°	162°	-126°	-54°
	θ_2	-54°	90°	-126°	18°	62°
20	配列	F ₁ F ₅ F ₂ F ₄ F ₃	F ₂ F ₁ F ₃ F ₅ F ₄	F ₃ F ₂ F ₄ F ₁ F ₅	F ₄ F ₃ F ₅ F ₂ F ₁	F ₅ F ₄ F ₁ F ₃ F ₂
	θ_1	-18°	54°	126°	-162°	-90°
	θ_2	54°	-162°	-18°	126°	-90°

表5において、1~20の各行に生じる起振モーメントはクランクピンの位相が異なるだけなので、同等とみなすことができる。したがって、計算については第1列の20種類についてのみ行い、それぞれ起振モーメントの波形をPattern 1~20と呼ぶことにする。

4. V形10気筒機関のバンク角

V形機関のバンク角計算方法は、すでに報告⁽²⁾されているので、ここではそこで得られた条件式を用いてV形10気筒機関のバンク角を決定する。

バンク角算出の条件式は、次式(4)、(5)によって与えられる。表4の1列目の θ_1 を ϕ_1 に、2列目の θ_1 を ϕ_1 に代入し、V形10気筒機関のバンク角を求める。

$$\alpha_0 = \pm \{(\phi_n - \phi_n) + 180^\circ\} \dots\dots\dots (4)$$

表5 V形10気筒機関の全組み合せ

Pattern	0°	72°	144°	-144°	-72°	Pattern	0°	72°	144°	-144°	-72°
1	12534	23145	34251	45312	51423	11	15243	21354	32415	43521	54132
	12534	23145	34251	45312	51423		12534	23145	34251	45312	51423
2	12534	23145	34251	45312	51423	12	15243	21354	32415	43521	54132
	23145	34251	45312	51423	12534		23145	34251	45312	51423	12534
3	12534	23145	34251	45312	51423	13	15243	21354	32415	43521	54132
	34251	45312	51423	12534	23145		34251	45312	51423	12534	23145
4	12534	23145	34251	45312	51423	14	15243	21354	32415	43521	54132
	45312	51423	12534	23145	34251		45312	51423	12534	23145	34251
5	12534	23145	34251	45312	51423	15	15243	21354	32415	43521	54132
	51423	12534	23145	34251	45312		51423	12534	23145	34251	45312
6	12534	23145	34251	45312	51423	16	15243	21354	32415	43521	54132
	15243	21354	32415	43521	54132		15243	21354	32415	43521	54132
7	12534	23145	34251	45312	51423	17	15243	21354	32415	43521	54132
	21354	32415	43521	54132	15243		21354	32415	43521	54132	15243
8	12534	23145	34251	45312	51423	18	15243	21354	32415	43521	54132
	32415	43521	54132	15243	21354		32415	43521	54132	15243	21354
9	12534	23145	34251	45312	51423	19	15243	21354	32415	43521	54132
	43521	54132	15243	21354	32415		43521	54132	15243	21354	32415
10	12534	23145	34251	45312	51423	20	15243	21354	32415	43521	54132
	54132	15243	21354	32415	43521		54132	15243	21354	32415	43521

$$\left. \begin{aligned} \tan \frac{\alpha_0}{2} &= -\frac{\cos \phi_1 + \cos \phi_1}{\sin \phi_1 - \sin \phi_1} \\ \tan \frac{\alpha_0}{2} &= -\frac{\sin \phi_1 + \sin \phi_1}{-\cos \phi_1 + \cos \phi_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

具体例として、Pattern 1 の場合について求めると、次のようになる。式(4)、(5)に初位相の値を代入する。

$$\alpha_0 = \pm \{(18^\circ - 18^\circ) \pm 180^\circ\} = \pm 180^\circ \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \tan \frac{\alpha_0}{2} &= -\frac{\cos 18^\circ + \cos 18^\circ}{\sin 18^\circ - \sin 18^\circ} \\ \tan \frac{\alpha_0}{2} &= -\frac{\sin 18^\circ + \sin 18^\circ}{-\cos 18^\circ + \cos 18^\circ} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

式(6)では、 α_0 は $\pm 180^\circ$ となるが、式(7)において計算すると α_0 は -180° となる。よって、式(6)、(7)の両方の条件式によって導かれる -180° が最適バンク角となる。

Pattern 2~20についても同様に計算する。表6は、その計算結果を示したものである。表6より、V形10気筒機関において1次の起振モーメントが消滅可能なバンク角は 36° 、 72° 、 108° 、 144° となり、特別な場合として直列形($\alpha_0 = 0^\circ$)と水平対向形($\alpha_0 = 180^\circ$)が存在することがわかる。

表6 V形10気筒機関のバンク角

Pattern	α_0	Pattern	α_0
1	-180°	11	144°
2	108°	12	72°
3	36°	13	0°
4	-36°	14	-72°
5	-108°	15	-144°
6	-144°	16	180°
7	144°	17	108°
8	72°	18	36°
9	0°	19	-36°
10	-72°	20	-108°

5. V形10気筒機関の起振モーメント

V形機関に発生する起振モーメントについて考察する。ここでは、 $\alpha_1 = -\alpha_0 / 2$ 、 $\alpha_2 = \alpha_0 / 2$ 、として両バンク角を機関中心線 x 軸に対して左右均等に傾けるものとする。V形機関を構成する2つの直列機関 R_1 、 R_2 のピッチングモーメントをそれぞれ M_{y01}^* 、 M_{y02}^* とすると、V形機関に発生するピッチングモーメント M_y^* 、およびヨーイングモーメント M_x^* は、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} M_y^* &= \cos \frac{\alpha_0}{2} (M_{y01}^* + M_{y02}^*) \\ M_x^* &= -\sin \frac{\alpha_0}{2} (M_{y01}^* - M_{y02}^*) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、第1列、第2列を構成する直列5気筒機関に発生する n 次のピッチングモーメントが、次式で表されたとする。

$$\left. \begin{aligned} (M_{n01}^*)_n &= M_n \cos (n\theta + \theta_{1n}) \\ (M_{n02}^*)_n &= M_n \cos (n\theta + \theta_{2n}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 M_n は振幅、 θ_{1n} 、 θ_{2n} は初位相を表す。式(9)を(8)に代入することにより、n 次の起振モーメントが求められる。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_n &= M_n \cos \frac{\alpha_0}{2} \sqrt{2\{1 + \cos(\theta_{1n} - \theta_{2n})\}} \cos(n\theta + \theta_1) \\ (M_x^*)_n &= -M_n \sin \frac{\alpha_0}{2} \sqrt{2\{1 - \cos(\theta_{1n} - \theta_{2n})\}} \sin(n\theta + \theta_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \cos^{-1} \left[\frac{\cos \theta_{1n} + \cos \theta_{2n}}{\sqrt{2\{1 + \cos(\theta_{1n} - \theta_{2n})\}}} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta_{1n} + \sin \theta_{2n}}{\sqrt{2\{1 + \cos(\theta_{1n} - \theta_{2n})\}}} \right] \\ \theta_2 &= \cos^{-1} \left[\frac{-\sin \theta_{1n} + \sin \theta_{2n}}{\sqrt{2\{1 - \cos(\theta_{1n} - \theta_{2n})\}}} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{\cos \theta_{1n} - \cos \theta_{2n}}{\sqrt{2\{1 - \cos(\theta_{1n} - \theta_{2n})\}}} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

式(10)、(11)に次数、振幅、初位相を代入することによって、V形10気筒機関の起振モーメントを求めることができる。表7は、Pattern 1 ~ 20までの計算結果を示す。ただし、2次の振幅を求める際、 λ の値を1/3.5とした。

次に、図3 ~ 図14に、V形10気筒機関の機関の構成と、1、2次の起振モーメントの振動パターンを示す。図中の数字1 ~ 5は気筒番号で、括弧付きの番号は第2列の直列機関を表す。P、(P)はピストンピン位置を表す。また、その後が続く振動波形はそれぞれのPatternにおけるピッチングモーメント M_y 、ヨーイングモーメント M_x の波形を示す。

これらの起振モーメントの波形より、V形10気筒機関の1次の起振モーメントはバランスウエイトによって完全に消去できることがわかる。よって、残存する起振モーメントは2次以上だけであり、それらは非常に小さい値であることもわかる。

表7 V形10気筒機関の起振モーメント

Pattern	1次起振モーメントの振幅	初位相 (deg)	2次起振モーメントの振幅	初位相 (deg)
1	0	18	0	-54
2	4.736068	54	1.146605	18
3	2.927051	90	1.197424	-90
4	2.927051	-54	1.197424	-18
5	4.736068	18	0.046605	54
6	2.927051	0	0.046605	0
7	2.927051	36	0.046605	72
8	4.736068	72	0.197424	-36
9	0	90	0	0
10	4.736068	-72	0.197424	-72
11	2.927051	-36	0.046605	0
12	4.736068	0	0.197424	72
13	0	36	0	0
14	4.736068	-72	0.197424	36
15	2.927051	-36	1.046605	-72
16	0	-18	0	54
17	4.736068	18	0.046605	-54
18	2.927051	54	0.197424	18
19	2.927051	90	0.197424	90
20	4.736068	-54	0.046605	-18

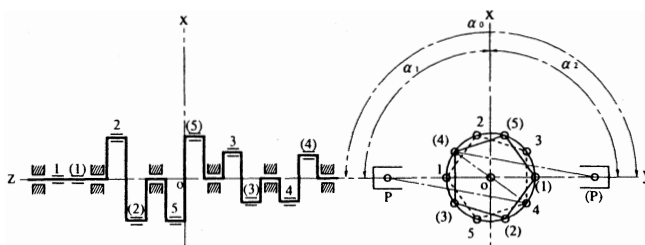


図3 Pattern 1のクランク構成とクランクピンの位相

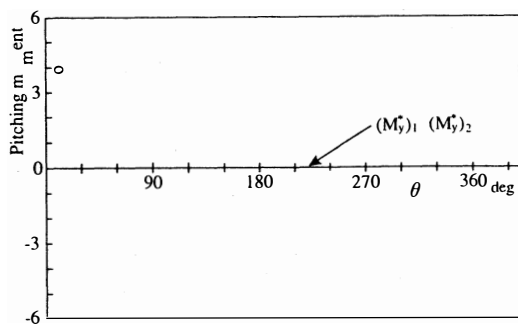


図4 Pattern 1のピッチングモーメント

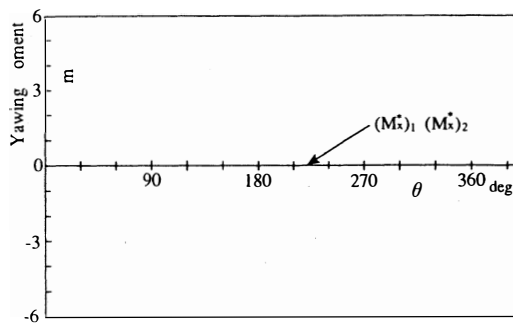


図5 Pattern 1のヨーイングモーメント

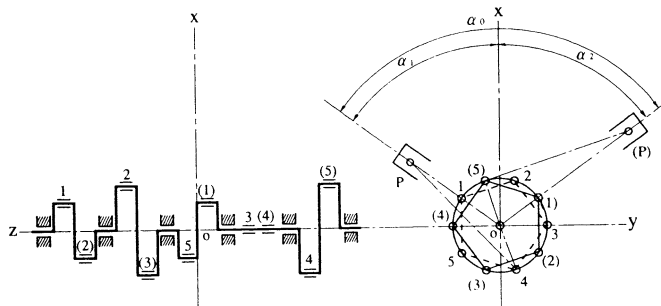


図6 Pattern 2のクランク構成とクランクピンの位相

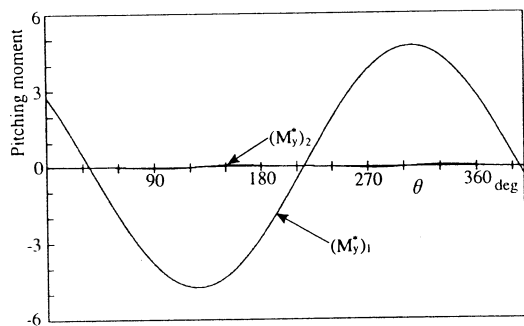


図7 Pattern 2のピッチングモーメント

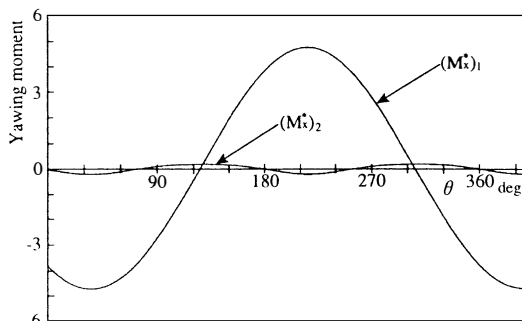


図8 Pattern 2のヨーイングモーメント

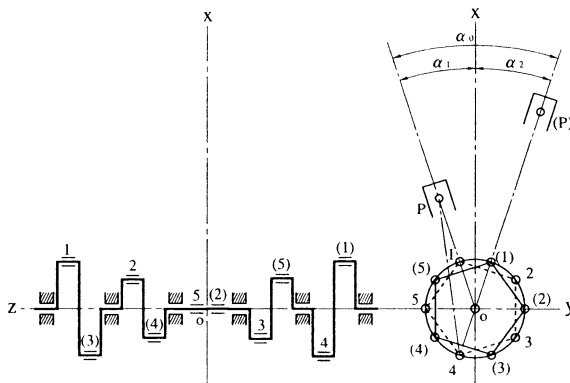


図9 Pattern 3のクランク構成とクランクピンの位相

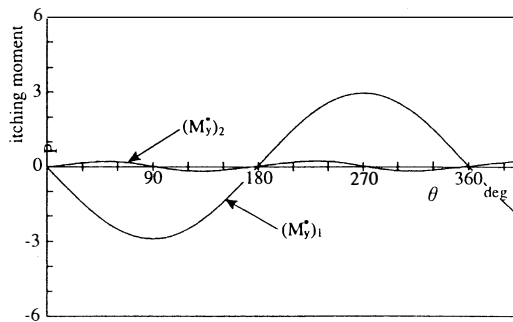


図10 Pattern 3のピッチングモーメント

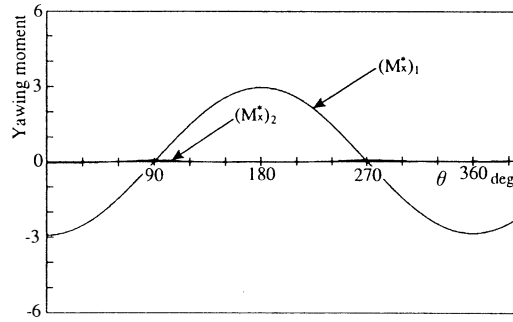


図11 Pattern 3のヨーイングモーメント

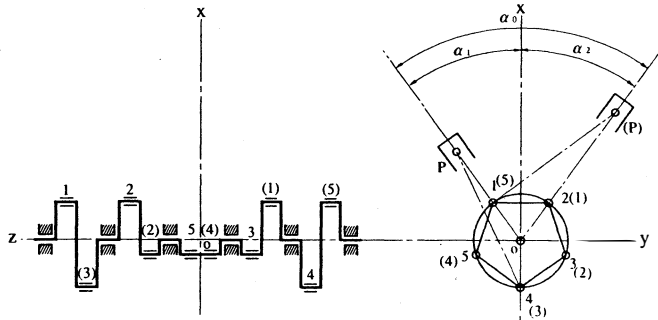


図12 Pattern 8 のクランク構成とクランクピンの位相

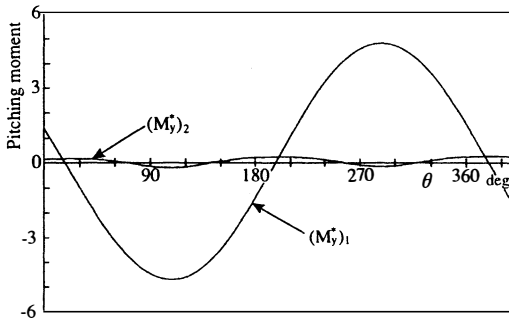


図13 Pattern 8 のピッチングモーメント

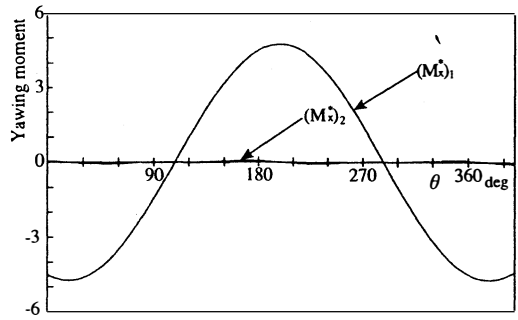


図14 Pattern 8 のヨーイングモーメント

6. 結 言

本報告では、V形10気筒機関の起振モーメントとバンク角について考察し、以下の結論を得た。

(1)V形10気筒機関を構成するに相応しい二列の直列5気筒機関の条件は、まず、それらの起振モーメントの波形の振幅が等しくなければならない。また、その振幅はできる限り小さい方が望ましい。計算の結果、この条件を満たす直列5気筒機関は2種類の配列のものが存在する。

(2)2種類の配列による気筒の組み合わせ総数は100通り存在する。しかし、それらの中で同一とみなせるものを除くと、20通りのものに整理できる。

(3)20通りについて解析した結果、 36° 、 72° 、 108° 、 144° の4つのバンク角が求められる。また、特別な場合として、 0° の直列形と 180° の水平対向形が存在する。

(4)起振モーメントに関しては、適切なバランススイートを設置すれば、1次の起振モーメントを消去できる。残存する2次以上の起振モーメントは非常に小さくなり、バランスシャフトなどの機構を用いなくても実用には差し支えない。

文 献

- (1) R.Kurowski, 他5名, SAE, No.933033, (1993).
- (2) 高橋, 伊藤, 機論, 60-576, (1994), 2699.