

## V形10気筒機関の起振モーメントに関する研究\*

### (第2報, 具体的計算例とその評価)

伊藤紀男<sup>\*1</sup>, 高橋幸敬<sup>\*2</sup>, 定免貴大<sup>\*3</sup>

## Exciting Moment Analysis of V-Type 10-Cylinder Engine (2nd Report, Concrete Calculation Examples and Evaluation)

Norio ITO, Yukitaka TAKAHASHI and Takahiro JOMEN

The demand for high quality and high performance of an automobile internal combustion engine is increasing steadily. Thus the shift toward producing multi-cylinder engine and V-type engine has also intensified. In the first report, we have clarified a general analytical method that reduces the exciting moment and determines the suitable bank angle of V-type engine. We have also clarified that the effective cylinder arrangements of a V-type 10-cylinder engine are divided into 24 groups. In this report we calculated numerically the 1st-order exciting moment and obtained the suitable bank angle for each group. We obtained practical bank angles of V-type 10-cylinder engine with small pitching and yawing moment using a balance weight. We also describe in details concrete examples and the evaluation of a V-type 10-cylinder engine.

**Key Words:** Reciprocating Engine, Exciting Moment, Pitching and Yawing Moment, 10-Cylinder V-Type Engine, Balance Weight, Bank Angle

### 1. 緒言

わが国における自動車用内燃機関は高級化や高性能化, それに伴う多気筒化, V形化が進められている。機関の多気筒化, V形化は出力性能の向上や省エネルギー化ばかりでなく, 機関の低振動化, ひいては車室内の騒音低減にも有効である。現在, わが国における自動車用V形機関の主流は, 6気筒や8気筒機関であるが, 米国やヨーロッパなどでは10気筒や12気筒, あるいはそれ以上の気筒数のものも実用されている。

筆者らは, これまでにV形6気筒, V形8気筒機関の起振モーメントの低減法とそれを実現するためのバンク角について追究してきた<sup>(1)(2)</sup>。本論文は, それらの研究をさらに進め, 数年前に米国で開発されたV形10気筒機関(以後, V10機関と呼ぶ。)の起振モーメント削減法とバンク角の関係について検討を加えた。

第1報<sup>(3)</sup>では, まずその基礎理論として, V形機関に発生する1次の起振モーメント削減条件とバンク角の関係について明らかにした。本報では, それらの結

果を踏まえて, V10機関に有効な気筒配列を選定し, それら気筒配列によって得られる1次の起振モーメント削減用のバランスヤバング角の値を決定する。最後に, 得られたV10機関についての評価を行う。

### 2. 記号

本論文で用いる主な記号は, 下記のとおりである。

$r$  : クランク半径

$s$  : 隣接気筒間隔

$\theta$  : クランク回転角

$\delta$  : 接続棒の傾き角

$\omega$  : クランク回転角速度

$m_p$  : ピストン質量

$m_r$  : 接続棒質量

$L$  : 接続棒長さ

$L_p$  : ピストンピンと接続棒重心間の距離

$L_c$  : クランクピンと接続棒重心間の距離

$\lambda$  :  $r/L$

$C_p$  :  $L_p/L$

$m_{rec}$  :  $m_p + (1 - C_p)m_r$

$\alpha_0$  : バンク角

$\alpha_1, \alpha_2$  : 機関の基準線とV形二列のなす角

\* 1995年9月12日 日本機械学会第73期全国大会において講演, 原稿受付 1996年5月20日。

<sup>\*1</sup> 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福3190)。

<sup>\*2</sup> 正員, (自宅: 〒230 横浜市鶴見区下末吉5-14-23)。

<sup>\*3</sup> 学生員, 富山大学大学院。

3. V10機関の気筒配列論

V10機関は、二つの直列5気筒機関をV形に配置したものである。それぞれの直列5気筒機関は、各気筒のクランクピンの位相差が $2\pi/5$ として与えられる。したがって、各バンクに働く起振力は $2\pi/5$ の位相差をもつ5つの気筒の配列方法によって決まる。一般に、バランス用おもりを付加された単気筒機関に働くピストン運動方向(x軸方向)の起振力 $F_x(\theta)$ は、次式のように与えられる<sup>(3)</sup>。

$$F_x(\theta) = m_{rec} r \{\dot{\theta}G(\theta) + \omega^2 F(\theta)\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} G(\theta) &= \frac{\sin(\theta - \delta)}{\cos \delta} \\ F(\theta) &= \cos \theta + \frac{\lambda \cos 2\theta}{\cos \delta} + \frac{\lambda^3 \sin^2 2\theta}{4 \cos^3 \delta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

いま、直列5気筒の気筒配列の基準として、クランク軸方向であるz軸の正側から位相が $2\pi/5$ ずつずれた気筒を順番に1, 2, ..., 5と番号を付し、その位相をもつ式(2)の $F(\theta)$ を $F_1, F_2, \dots, F_5$ と表すことにする。このとき、 $F_1 = F(\theta), F_2 = F(\theta + 2\pi/5), \dots, F_5 = F(\theta - 2\pi/5)$ となる。二列の直列5気筒機関を区別するために、他列の機関に対しては $F_{(1)}, F_{(2)}, \dots, F_{(5)}$ と表すことにする。

図1は、V10機関のクランク構成と位相の一例を示す。図1(a)はクランク軸を、図1(b)はクランク位相とバンク角の関係を示している。ここでは、 $F(\theta)$ は $F_i, F_j, \dots, F_m, F_{(i)}, F_{(j)}, \dots, F_{(m)}$ と表され、図1にはそれらの添字のみが示してある。添字*i, j, ..., m*は位相番号を表す1, 2, ..., 5のいずれか一つを示すことになる。図1を参考にして、V10機関を構成する二列の直列5気筒機関の起振モーメント $M_{01}, M_{02}$ を求めると、次のよ

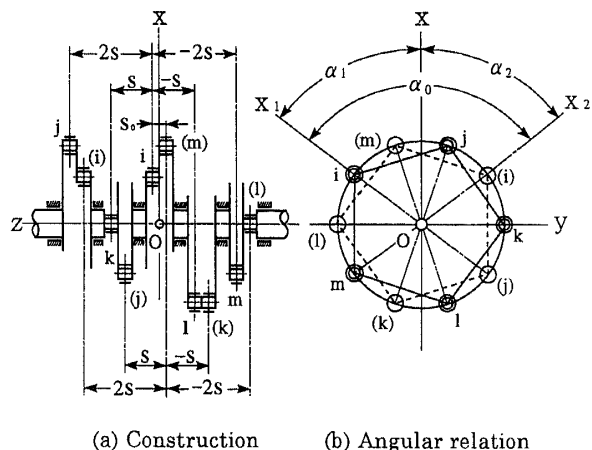


Fig.1 Crankshaft example of a V-10 engine

うに表される。

$$\left. \begin{aligned} M_{01} &= m_{rec} r s \omega^2 \{2(F_j - F_m) + (F_k - F_l)\} \\ M_{02} &= m_{rec} r s \omega^2 \{2(F_{(i)} - F_{(j)}) + (F_{(l)} - F_{(k)})\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

一般に、V形をなす二列の5気筒機関の中心は、図1(a)に示されるように互いに $s_0$ のずれをもつ。したがって、二列の5気筒機関のそれぞれに生じる起振力の作用点は異なり、ずれ $s_0$ による偶力が作用することになる。しかし、二列の起振力の差(相対力) $\Delta F_x, \Delta F_y$ の値は小さいことから、V形機関の起振モーメント $M_y, M_x$ への影響は考えないものとする<sup>(2)</sup>。

式(3)からわかるように、V10機関の起振モーメントは*i, j, ..., m*の組み合わせ、すなわち気筒配列の方法によって決まることになる。そこで有効な気筒配列の組み合わせを選定するにあたって、まず本論文で扱う機関が等間隔爆発の4サイクル機関であることから、その点火順序により組み合わせ数を制限することができる。ここでは、点火順序は各バンクの直列5気筒機関において、バンクの中央の気筒を挟んで交互か、あるいは中央気筒を経由して、その反対側で爆発が行われるようにする。そのような条件に基づいて気筒配列を考えると、直列5気筒の組み合わせ数は40とおりあることがわかる。V形ではそれらを独立して二列に配置することから、気筒配列の組み合わせ総数は、 $40 \times 40 = 1600$ とおりとなる。これら1600とおりのすべての配列について計算を実施しなければならない。その際、実用的なバランス用おもりによって1次の起振モーメントが削減できる正転形の円形すりこぎ運動を行うためのバンク角 $\alpha_0$ の条件は、 $x = \cos \alpha_0$ とおくと、次のxに関する2次方程式を満足しなければならない<sup>(3)</sup>。

$$4gex^2 + 4f(g+e)x + (g-e)^2 + 4f^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} b_1^2 + b_2^2 &= e \\ a_1 b_1 + a_2 b_2 &= f \\ a_1^2 + a_2^2 &= g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

具体的な気筒配列による計算の結果、式(4)でxが実根をもつ配列は、1600中600とおりあることがわかった。600とおりの中には、得られたxの値や1次の起振モーメントの合成振幅の値が同じものもいくつも含まれる。そこで、それらの結果をバンク角と起振モーメントの波形パターンでグループ分けすると、最終的に24のグループに分類できることがわかった。各グループには、20種類か40種類の気筒配列が所属している。

表1は、それら24グループのそれぞれに含まれる気筒配列の1例を示したものである。最左列は24グループをCase 1~24と表し、最上段のi~vは、各Caseの

i の配列を  $72^\circ (2\pi/5)$  ずつ回転させたときに得られる配列で、各行の配列は全く同じ形状のクランクをもつことになる。このことは、1つの気筒配列に対して、全く同じものと考えられる配列が5つあることになり、表1には24のCaseに対して、合計120とおりの配列が示されている。気筒の配列を示す5桁の数字は気筒の位相番号を表し、上段が第1列、下段の括弧を付した方が第2列の位相番号である。

以上のように、V10機関に有効な気筒配列は多数存在しているが、それらは24のグループに分類できることになる。

4. 具体的な計算例

表1を参考にして、具体的な計算例を示す。計算例に取り上げた24Caseの内の7つのCaseの配列は、得られたバンク角の値が実用的と思われるものや機関の構造が直列形あるいは水平対向形などになるものを選んだ。

4.1 Case 1 表1より、この場合のV10機関の第1列、第2列の直列5気筒機関の気筒配列は、次のとおりである。

第1列 1 2 3 5 4  
第2列 (1)(2)(3)(5)(4)

各列に生じる起振モーメント  $M_{01}, M_{02}$  は、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} M_{01} &= m_{rec} r s \omega^2 \{2(F_1 - F_4) + (F_2 - F_5)\} \\ M_{02} &= m_{rec} r s \omega^2 \{2(F_{(1)} - F_{(4)}) + (F_{(2)} - F_{(5)})\} \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

これにより、V形機関に発生するy軸およびx軸まわりの起振モーメント  $M_y, M_x$  は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_y &= M_{01} \cos \alpha_1 + M_{02} \cos \alpha_2 \\ M_x &= -M_{01} \sin \alpha_1 - M_{02} \sin \alpha_2 \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

$M_{01}, M_{02}$  を無次元化し、その1次成分を  $(M_{01}^*)_1, (M_{02}^*)_1$  と表し、それらを展開して整理し、 $\cos \theta, \sin \theta$  にかかる係数をそれぞれ  $a_1, a_2, b_1, b_2$  とすると、次のように整理できる。

$$\left. \begin{aligned} (M_{01}^*)_1 &= a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta \\ (M_{02}^*)_1 &= b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

これより、 $M_y, M_x$  の無次元化された1次成分を  $(M_y^*)_1, (M_x^*)_1$  と表すと、次のように整理される。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_1 &= D_1 \cos \theta - E_1 \sin \theta \\ (M_x^*)_1 &= -(D_2 \sin \theta + E_2 \cos \theta) \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

このとき、1次の起振モーメントが消滅可能となる条件は、 $M_0$  を合成振幅、 $\theta_0$  を初位相とすると、次の2式が成立することである<sup>(3)</sup>。

$$M_0 = \sqrt{D_1^2 + E_1^2} = \sqrt{D_2^2 + E_2^2} \dots (10)$$

$$\tan \theta_0 = E_1/D_1 = E_2/D_2 \dots (11)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= a_1 \cos \alpha_1 + b_1 \cos \alpha_2 \\ E_1 &= -(a_2 \cos \alpha_1 + b_2 \cos \alpha_2) \\ D_2 &= a_2 \sin \alpha_1 + b_2 \sin \alpha_2 \\ E_2 &= a_1 \sin \alpha_1 + b_1 \sin \alpha_2 \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

Case 1 の気筒配列より、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 4 \sin^2(2\pi/5) \\ a_2 &= -4 \sin(2\pi/5) \cos(2\pi/5) - 2 \sin(2\pi/5) \\ b_1 &= 4 \sin^2(2\pi/5) \\ b_2 &= -4 \sin(2\pi/5) \cos(2\pi/5) - 2 \sin(2\pi/5) \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

このとき、1次の起振モーメントがバランス用おもりによって削減可能となるためには、式(4)を満足しなければならない。式(4)を用いてxを求めると、次のように得られる。

$$x = -1 \dots (14)$$

すなわち、バンク角  $\alpha_0$  は、次の値となる。

$$\alpha_0 = 180^\circ \dots (15)$$

これは水平対向形10気筒機関となる。式(7)より起振モーメントは零となり、バランス用のおもりを必要としない理想的な機関といえる。しかし、構造上の問題や

Table 1 V-10 engine cylinder arrangements

Case	i	ii	iii	iv	v
1	12354 (12354)	23415 (23415)	34521 (34521)	45132 (45132)	51243 (51243)
2	12354 (12543)	23415 (23154)	34521 (34215)	45132 (45321)	51243 (51432)
3	12354 (15234)	23415 (21345)	34521 (32451)	45132 (43512)	51243 (54123)
4	12354 (21534)	23415 (32145)	34521 (43251)	45132 (54312)	51243 (15423)
5	12354 (32145)	23415 (43251)	34521 (54312)	45132 (15423)	51243 (21534)
6	12354 (32451)	23415 (43512)	34521 (54123)	45132 (15234)	51243 (21345)
7	12354 (34215)	23415 (45321)	34521 (51432)	45132 (12543)	51243 (23154)
8	12354 (34521)	23415 (45132)	34521 (51243)	45132 (12354)	51243 (23415)
9	12354 (43251)	23415 (54312)	34521 (15423)	45132 (21534)	51243 (32145)
10	12354 (43512)	23415 (54123)	34521 (15234)	45132 (21345)	51243 (32451)
11	12354 (51243)	23415 (12354)	34521 (23415)	45132 (34521)	51243 (45132)
12	12354 (54312)	23415 (15423)	34521 (21534)	45132 (32145)	51243 (43251)
13	12354 (15423)	23415 (21534)	34521 (32145)	45132 (43251)	51243 (54312)
14	12354 (21345)	23415 (32451)	34521 (43512)	45132 (54123)	51243 (15234)
15	12354 (45321)	23415 (51432)	34521 (12543)	45132 (23154)	51243 (34215)
16	12354 (54123)	23415 (15234)	34521 (21345)	45132 (32451)	51243 (43512)
17	12534 (15243)	23145 (21354)	34251 (32415)	45312 (43521)	51423 (54132)
18	12534 (23145)	23145 (34251)	34251 (45312)	45312 (51423)	51423 (12534)
19	12534 (32415)	23145 (43521)	34251 (54132)	45312 (15243)	51423 (21354)
20	12534 (34251)	23145 (45312)	34251 (51423)	45312 (12534)	51423 (23145)
21	12345 (15432)	23451 (21543)	34512 (32154)	45123 (43215)	51234 (54321)
22	12345 (21543)	23451 (32154)	34512 (43215)	45123 (54321)	51234 (15432)
23	12345 (23451)	23451 (34512)	34512 (45123)	45123 (51234)	51234 (12345)
24	12345 (34512)	23451 (45123)	34512 (51234)	45123 (12345)	51234 (23451)

組付け,整備に関して難しい問題が残る。

**4・2 Case 2** 表1より,この場合の二列の気筒配列は,次のとおりである。

第1列 1 2 3 5 4  
第2列 (1)(2)(5)(4)(3)

二列の無次元化された起振モーメント  $M_{01}^*, M_{02}^*$  は,次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} M_{01}^* &= 2(F_1 - F_4) + (F_2 - F_3) \\ M_{02}^* &= 2(F_{(1)} - F_{(3)}) + (F_{(2)} - F_{(4)}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

この場合,式(8)の1次の起振モーメント  $(M_{01}^*)_1, (M_{02}^*)_1$  の係数  $a_1, \dots, b_2$  を求めると,次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 4 \sin^2(2\pi/5) \\ a_2 &= -4 \sin(2\pi/5) \cos(2\pi/5) - 2 \sin(2\pi/5) \\ b_1 &= 4 \sin^2(2\pi/5) + 2 \sin(3\pi/5) \sin(\pi/5) \\ b_2 &= 4 \sin(2\pi/5) \cos(2\pi/5) - 2 \sin(3\pi/5) \cos(\pi/5) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

これらを式(4)に代入して  $x$  を解くと,次のように求められる。

$$x = -0.80901699 \dots \dots\dots (18)$$

これより  $\alpha_0 = +144^\circ$  となる。二列の直列5気筒機関が機関の基準線となす角  $\alpha_1, \alpha_2$  は,一般的には等分に配分されることから,  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  は,次の値となる。

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2) = (144^\circ, -72^\circ, 72^\circ) \dots\dots\dots (19)$$

次に,起振モーメントの1次成分を消滅させるためのバランス用おもりを求めます。起振モーメントが正転形の円形すりこぎ運動をするための条件は,  $M_0, \theta_0$  に関する式(10), (11)を満たすことである。バンク角が式(19)のように決定されると,式(12)の  $D_1 \sim E_2$  は,次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= a_1 \cos(-2\pi/5) + b_1 \cos(2\pi/5) \\ E_1 &= -\{a_2 \cos(-2\pi/5) + b_2 \cos(2\pi/5)\} \\ D_2 &= a_2 \sin(-2\pi/5) + b_2 \sin(2\pi/5) \\ E_2 &= a_1 \sin(-2\pi/5) + b_1 \sin(2\pi/5) \end{aligned} \right\} \dots\dots (20)$$

これらを用いて,  $M_0, \tan \theta_0$  を求めると,次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= 2.79196793 \dots \\ \tan \theta_0 &= 0.41188805 \dots \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

以上のことより,Case 2における起振モーメントの1次成分は,次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_1 &= 2.7920 \cos(\theta + 22.3862^\circ) \\ (M_x^*)_1 &= -2.7920 \sin(\theta + 22.3862^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

したがって,次式の起振モーメント  $M_{by}^*, M_{bx}^*$  を発生させるバランス用おもりを  $x$  軸に対して  $(\theta_0 + \pi)$  だけ位相のずれたところに設置することにより,1次の起振モーメントは消滅可能となる。

$$\left. \begin{aligned} M_{by}^* &= 2.7920 \cos(\theta + 22.3862^\circ + \pi) \\ M_{bx}^* &= -2.7920 \sin(\theta + 22.3862^\circ + \pi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

なお,式(18)で  $\alpha_0 = -144^\circ$  とした場合は,逆回転形のバランスを必要とすることになるため除外する。

**4・3 Case 15** この場合の気筒配列は,次のとおりである。

第1列 1 2 3 5 4  
第2列 (4)(5)(3)(2)(1)

これより  $M_{01}^*, M_{02}^*$  は,次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} M_{01}^* &= 2(F_1 - F_4) + (F_2 - F_3) \\ M_{02}^* &= 2(F_{(4)} - F_{(1)}) + (F_{(5)} - F_{(2)}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

Case 1, 2 と同様にして  $\alpha_0$  を求めると,この場合は  $\alpha_0 = 0^\circ$  となり,直列形10気筒機関となる。Case 1の水平対向形と同様に,起振モーメントは零となり,理想的機関であるが,機関の全長が長くなり,剛性上の問題が生じ,実用的とは言い難い。

**4・4 Case 16** この場合の気筒配列は,次のとおりである。

第1列 1 2 3 5 4  
第2列 (5)(4)(1)(2)(3)

これより  $M_{01}^*, M_{02}^*$  は,次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} M_{01}^* &= 2(F_1 - F_4) + (F_2 - F_3) \\ M_{02}^* &= 2(F_{(5)} - F_{(3)}) + (F_{(4)} - F_{(2)}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

この場合の  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  は,次のように求められる。

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2) = (63^\circ 14', -31^\circ 37', 31^\circ 37') \dots\dots\dots (26)$$

起振モーメントの1次成分は,次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_1 &= 4.2408 \cos(\theta - 18^\circ) \\ (M_x^*)_1 &= -4.2408 \sin(\theta - 18^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

この場合もバランス用おもりによって,1次の起振モーメントは消滅可能となる。

**4・5 Case 19** この場合の気筒配列は,次のとおりである。

第1列 1 2 5 3 4  
第2列 (3)(2)(4)(1)(5)

これより  $M_{01}^*, M_{02}^*$  は,次式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} M_{01}^* &= 2(F_1 - F_4) + (F_2 - F_3) \\ M_{02}^* &= 2(F_{(3)} - F_{(5)}) + (F_{(2)} - F_{(1)}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  を求めると,次のように得られる。

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2) = (-72^\circ, 36^\circ, -36^\circ) \dots\dots\dots (29)$$

この場合,式(4)の根の判別式の値は計算精度上零とはならないが,零として計算する。起振モーメントの1次成分は,次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_1 &= 4.7361 \cos(\theta + 72^\circ) \\ (M_x^*)_1 &= -4.7361 \sin(\theta + 72^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

したがって,この場合も1次の起振モーメントは消滅できる。

**4・6 Case 20** この場合の気筒配列は,次のとおりである。

第1列 1 2 5 3 4  
 第2列 (3)(4)(2)(5)(1)

これより  $M_{01}^*$ ,  $M_{02}^*$  は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_{01}^* &= 2(F_1 - F_4) + (F_2 - F_3) \\ M_{02}^* &= 2(F_{(3)} - F_{(1)}) + (F_{(4)} - F_{(5)}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  は、次のように得られる。

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2) = (-36^\circ, 18^\circ, -18^\circ) \dots\dots\dots (32)$$

この場合、 $D_1 \sim E_2$  の計算で、 $D_1, D_2$  の値が零となる特殊形であるが、このような場合は  $\theta_0 = 90^\circ$  として計算する。このとき、起振モーメントの1次成分は、次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_1 &= 2.9271 \cos(\theta + 90^\circ) \\ (M_x^*)_1 &= -2.9271 \sin(\theta + 90^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

この場合も1次の起振モーメントは消滅可能である。

**4.7 Case 21** この場合の気筒配列は、次のとおりである。

第1列 1 2 3 4 5  
 第2列 (1)(5)(4)(3)(2)

これより  $M_{01}^*$ ,  $M_{02}^*$  は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_{01}^* &= 2(F_1 - F_5) + (F_2 - F_4) \\ M_{02}^* &= 2(F_{(1)} - F_{(2)}) + (F_{(5)} - F_{(3)}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  は、次のように得られる。

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2) = (72^\circ, -36^\circ, 36^\circ) \dots\dots\dots (35)$$

起振モーメントの1次成分は、次のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} (M_y^*)_1 &= 4.0451 \cos \theta \\ (M_x^*)_1 &= -4.0451 \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (36)$$

この場合も1次の起振モーメントは消滅できる。

Case 21では、Case 19と同じバンク角  $72^\circ$  が得られるが、1次の起振モーメントの振幅の値が異なる場合である。

**5. V10機関の評価**

V10機関の1600とおりにも及ぶ気筒配列のすべての組み合わせについて計算を試みた。その際、式(4)で  $x$  が実根を得たとしても、 $\alpha_0$  の値によっては正転形の円形すりこぎ運動をなさないものもある。そのようなものを除外し、さらに水平対向形と直列形の2種類を除くと、22のタイプのV形に分類できることがわかった。

表2は、Case 1~24で得られたバンク角をまとめたものである。表2の中には同じバンク角のものが含まれているが、それらは同じバンク角をもちながら起振モーメントの波形パターンが異なるものである。すなわち配列の違いによって異なる起振モーメントが生じるということである。この点はV形8気筒機関<sup>(2)</sup>とは著しく性質の異なるところである。

次に、具体的計算例で示した7Caseの中でいくつか

のものについて、そのクランク軸の構成と発生する起振モーメントの波形パターンを示す。

図2は、Case 16の  $\alpha_0 = 63^\circ 14'$  の場合のV10機関を示す。図2(a)はクランク軸の構成を、図2(b)はバンク角とクランクピンの位相を位相番号によって示す。

図3は、Case 16の起振モーメントのパターンを示す。図3(a)はピッチングモーメント  $M_y^*$  を、図3(b)はヨーイングモーメント  $M_x^*$  を示す。縦軸は無次元化された起振モーメントの大きさを示し、横軸は機関の回転角  $\theta$  が度で示されている。それぞれのパターンは、実線が機関の起振モーメントを、破線がバルンサーの起振モーメントを、一点鎖線が残存する起振モーメントを示す。これより、Case 16ではバルンサーによってピッチングモーメントはほとんど消えるが、ヨーイングモーメントは若干残ることになる。

図4は、Case 19の  $\alpha_0 = -72^\circ$  の場合のクランク軸の構成とクランク位相を示す。

図5は、Case 19の起振モーメントのパターンを示す。この結果から、Case 19は実用上優れたV10機関であると考えられる。ピッチングモーメントはわずかに残るが、ヨーイングモーメントの残存はさらに小さな値となっている。バンク角も  $72^\circ$  とV10機関としての相性も良く、大きさも最適と考えられる。

図6は、Case 20の  $\alpha_0 = -36^\circ$  の場合のクランク軸の構成とクランク位相を示す。

図7は、Case 20の起振モーメントのパターンを示す。ここでは、ヨーイングモーメントはほとんど消えるが、ピッチングモーメントの方がわずかに残っている。しかし、これらの値はV形6気筒の実用機関に比べるとはるかに小さいものであり、問題にならない程度とい

Table 2 Bank angle of V-10 engine

Case	Bank angle	Case	Bank angle
1	180° (opposed)	13	99°14'
2	144°	14	-152°46'
3	135°14'	15	0°(straight)
4	171°14'	16	63°14'
5	-116°46'	17	144°
6	-80°46'	18	-108°
7	-72°	19	-72°
8	-36°	20	-36°
9	-44°46'	21	72°
10	-8°46'	22	144°
11	108°	23	-108°
12	27°14'	24	-36°

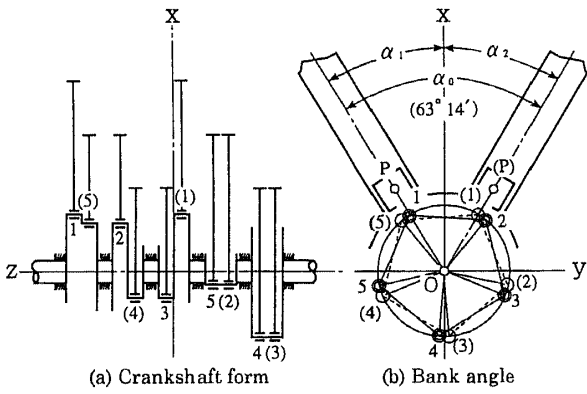


Fig. 2 63°14' V-10 Engine

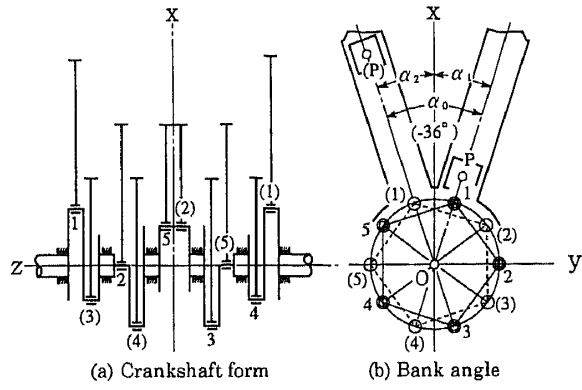


Fig. 6 -36° V-10 Engine

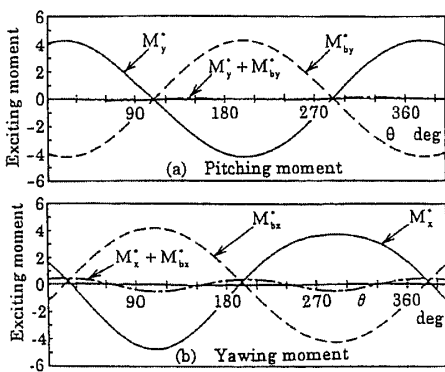


Fig. 3 Exciting moment of Case 16

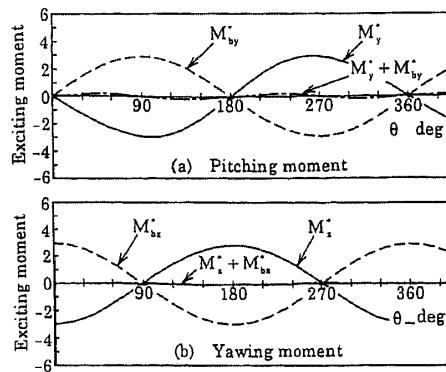


Fig. 7 Exciting moment of Case 20

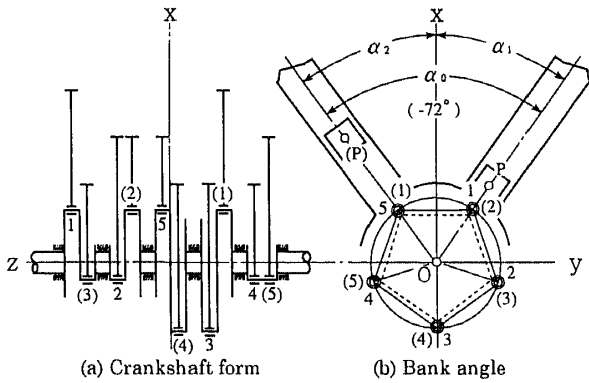


Fig. 4 -72° V-10 Engine

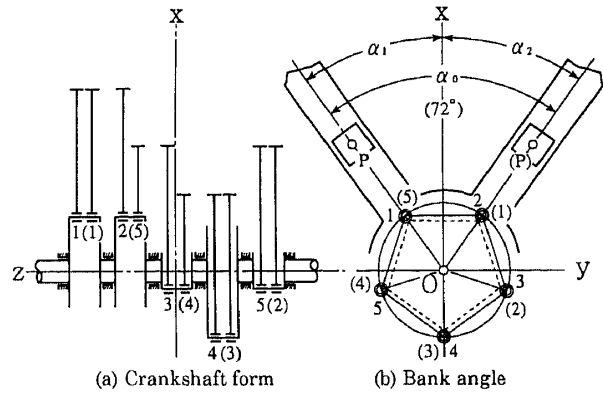


Fig. 8 72° V-10 Engine

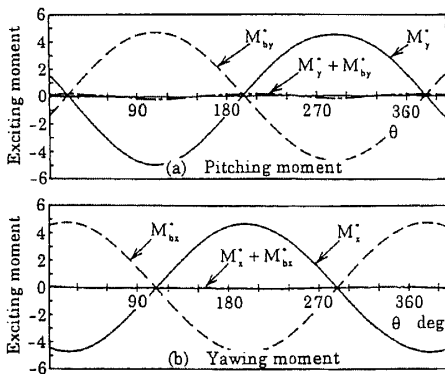


Fig. 5 Exciting moment of Case 19

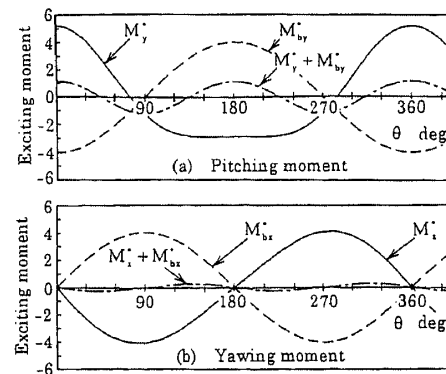


Fig. 9 Exciting moment of Case 21

える。バンク角もコンパクトな値となっている。

図8は, Case 21 の  $\alpha_0 = 72^\circ$  の場合のクランク軸の構成とクランク位相を示す。

図9は, Case 21 の起振モーメントのパターンを示す。これは Case 19 のバンク角と同じ値をもつ例であることはすでに述べたが, 残存モーメントが Case 19 より大きい場合である。特にピッチングモーメントの残存が大きく, 実用不可と考えられる。

以上のように, V 10 機関は予想以上の気筒配列の組み合わせが生じたが, ピッチングおよびヨーイングモーメントを完全に消滅できる配列は存在しない。しかし, 直列5気筒の起振力が零に近いことを考えれば, バンク角が  $72^\circ$  や  $36^\circ$  のものは実用的には優れたV 10 機関になるものと期待される。1600とおりの内 Case 1~24 に属さない配列は,  $x$  に関する式(4)の実根が求められないものであり, また仮に Case 1~24 に属する配列であっても, 残存する起振モーメントが実用のV形6気筒機関のものよりも大きいものがあったりして, 実用には不向きなものも含まれている。

## 6. 結 論

V形10気筒機関に発生する1次の起振モーメント削減法とバンク角に関して, 具体的な気筒配列につい

て考察した。その結果, 次の結論を得た。

(1) V形10気筒機関の気筒配列法は1600とおりの組み合わせが存在するが, そのうち起振モーメントの削減に有効な組み合わせは600とおりである。

(2) 600とおりの組み合わせのうちバンク角  $\alpha_0 = 180^\circ$  の水平対向形と,  $\alpha_0 = 0^\circ$  の直列形を除けば, 22のタイプに分類できる。

(3) 22のタイプについて, バンク角, バランス用おもり, 残存ピッチングモーメントおよびヨーイングモーメントを求め, その実用性について検討を加えた。その中で, 同じバンク角をもつものでも気筒配列の違いによって, 起振モーメントの大きさが異なるものがある。

(4) 直列5気筒機関の起振力がほとんど零に近いことを考慮すれば, 今回得られたバンク角  $72^\circ$  と  $36^\circ$  のV形10気筒機関は理論的にも, 実用的にも優れた機関になりうると判断される。

最後に, 本研究に対して数々の御指導を賜った元富山大学教授 高橋幸一先生に深く感謝の意を表す。

## 文 献

- (1) 伊藤・他4名, 機論, 59-563, C(1993), 2026-2034.
- (2) 高橋・他2名, 機論, 60-576, C(1994), 2699-2705.
- (3) 伊藤・高橋, 機論, 63-610, C(1997), 1875-1879.