

報 文

教育訓練用「パソコン支援動つりあい試験装置」 の製作とその効果

茨城職業訓練短期大学校 印 南 義 雄

A Newly Developed "Dynamic Balancing Test Machine Supported by a Personal Computer"

Yoshio Innami

要 約 実用的な熱機関が利用されるまでは、機械の回転速度は低く振動も大きな問題ではなかった。その後、技術の急速な進展に伴い、機械装置には高回転、高精度が要求されるようになった。特に、エレクトロニクスを中核とする最先端機器に使用されている部品類にはその例が多い、VTRシリング、ジャイロをはじめ光学工業におけるポリゴンミラー、回転装置など数多く挙げられる。

これらに 대응するために、高速回転における「動つりあい」の問題を解決する必要がある。なぜならば、高速回転において「動つりあい」を生じれば、機械装置に振動が発生し十分な機能を果たすことができない。そこでこれからの機械装置に対応するためには、「動つりあい」の問題は今後益々重要な課題の一つになると考える。

このような理由でカリキュラムの中に「動つりあい試験」を実験に取り入れ、さらに教育訓練効果を考えた試験装置を考案した。ここでは「動つりあい試験機」の現状と趨勢、基本的な「動つりあい」および振動理論、新しく考案製作した試験装置、教育訓練用に開発したプログラムソフトの紹介と実験方法、教育訓練への効果について述べる。

この課程を導入することによって、回転運動体の設計、材料の選択、機械力学、振動、動つりあいを得るための精密加工、動つりあいの精密計測など、機械技術者としての総合判断力を養成するために大きく役立っている。

I. はじめに

実用的な熱機関が利用されるまでは、機械の回転速度は低く、振動も大きな問題ではなかった。その後、社会的にも機械は高回転、高精度が要求されるようになった。汎用機であるフライス盤、旋盤等の加工精度での「動つりあい」問題について特別な配慮はされてない、しかし、エレクトロニクスを中核とする最先端機器に使用されている部品類にはその例が多い。例えば、電気機械工業におけるタービン発電機、ジャイロスコープ、各種高速回転、高精度スピンドル、遠心分離機、工学工業における、レーザプリンタ用ポリゴンミラー、ビデオディスク等、さらに高精度が要求されている。さらに数多くの部品が高い回転精度を要求されている。これらの要求に 대응するために、高速回転における「動つりあい」の問題を解決する必要がある。なぜならば、高速回転において、「動つりあい」を

生じれば、機械装置に振動が発生し、十分な機能を果たすことができなくなる。そこでこれからの機械装置に対応するためには「動つりあい」の問題は今後、益々重要な課題の一つになると考える。

このような理由でカリキュラムの中に「動つりあい試験」を実験に取り入れ、さらに教育訓練効果を考えた試験装置を考案した。ここでは「動つりあい試験機」の現状と趨勢、基本的な「動つりあい」および振動理論、新しく考案製作した「動つりあい試験装置」、教育訓練用に開発したプログラムソフトの紹介と実験方法、教育訓練への効果について述べる。

II. 「動つりあい試験機」の現状と趨勢

1907年ドイツのLawaczekが初めてハイスポット法による「動つりあい試験機」を製作した後に、Heymannによって改良された。ハイスポット法は操作は簡単であるが、修正おもりを何回も付けたり除いたりして、修正するため時間がかかり面倒であった。

その後オフセット法が考案された。これは、ハイスポット法とは原理が違い試験体にその振動と同一振動の逆位相の振動を与えて「不つりあい量」と、その位相を見い出そうとするもので、Soderberg(1923年)などによって考案された。しかし、以上のような試験機は欠点が多かった。

日本においても1925年に末広恭二、久野五男らによって「久野式動つりあい試験機」が考案された。これらは、今までの試験機の欠点を補った試験機である。特に、久野式は1950年頃まで用いられ我国工業界に偉大な貢献をした。

これらの試験機はいずれも一面交互測定であり。測定上、修正上取り扱いにくかった。最近ではこのような試験機は採用されておらず、同時二面の測定可能な「動つりあい試験機」が使用されている。

現在用いられている同時二面式「動つりあい試験機」には、ハードタイプとソフトタイプがある。ハードタイプは試験機の構造が、「不つりあい」の測定回転数に比べて4～5倍以上ばね剛性が高い軸受けで作られているものであり、ソフトタイプは軸受けを支えるバネの剛性が低いものをいう。前者は重量物の回転体の測定に使用され、後者は軽量物の回転体の測定に使用されている。これらの試験機は簡単な操作でデータが得られやすく、さらに試験機と修正機を組み合わせ、全自動つりあい修正機が開発された。この機械はいっさい人手をわずらわさず、自動的に修正するもので、今後の「動つりあい試験機」のあるべき姿を示している。

これらは単体部品を対象にした「不つりあい」の測定であって、組み合わさった状態での「不つりあい量」の測定は困難であった。最近フィールドバランスが開発されて大型回転機器などを組み立てた状態で「動つりあい」の測定が可能になってきた。

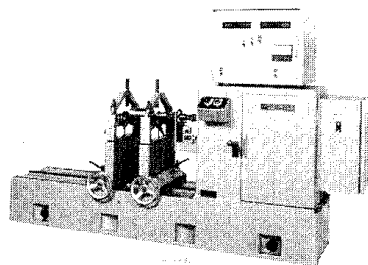


図 1 同時二面つりあい試験機 (島津製)

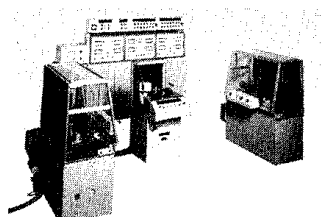


図 2 超精密つりあい試験機 (島津製)

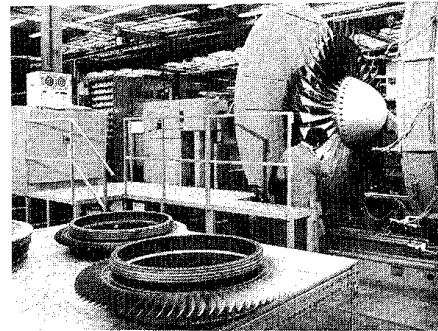


図 3 ファンロータつりあい試験機 (Schenck)

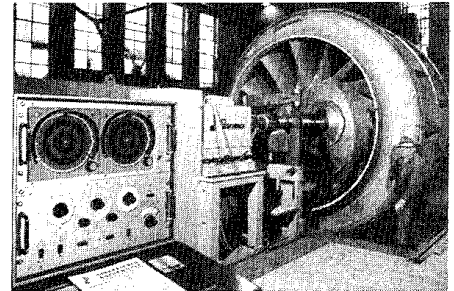
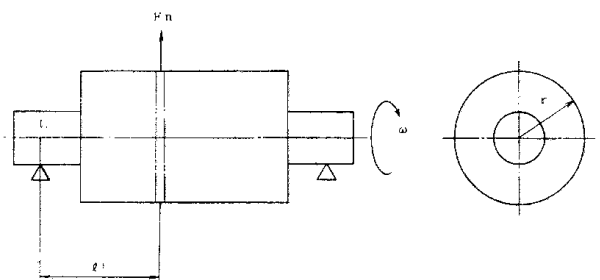


図 4 大形ファンつりあい試験機 (Schenck)

ここに最近の「動つりあい試験機」のごく一部を紹介する。図 1 は一般的な二面同時「動つりあい試験機」図 2 は光学工業におけるポリゴンミラーなどの超精密つりあい試験機、図 3 はジェットエンジンのファンロータつりあい試験機、図 4 は大型ファン用「動つりあい試験機」である。その他クランク軸、弾性ロータ用などに使用されている高速回転用「動つりあい試験機」などがある。

III. 基本的な「動つりあい」、及び振動理論

一般に回転体の「不つりあい」は、回転体の各部に無数にあると考えられるが、一定角速度 (ω) で回転する回転



体を図 5 のように、回転軸に直角な平面で任意に分割したその n 番目の微小部分に対し、「不つりあい質量」U が軸中心から r だけ離れているとすると、その微小幅に働き、遠心力 $F_n = (U \cdot r)_n \cdot \omega^2$ となる。

回転体全体の遠心力は、 $F = \sum (U \cdot r)_n \cdot \omega^2$ となる。又、任意の点 L に関するモーメント M_L は、微小幅までの距離を l とすれば $M_L = (U \cdot r)_n \cdot l \cdot \omega^2$ となり、これらの式において、 ω は一定であるので、これらの項を外して考えると、

$$F = \sum U \cdot r \dots\dots\dots(1)$$

$$M = \sum U \cdot r \cdot \ell \dots\dots\dots(2)$$

が得られる。したがって遠心力および、それによるモーメントを生じない状態、すなわち「つりあい」の状態にするためには、F及び、Mが0でなければならない。

(1)式が「静つりあい」の条件式、(2)式が「動つりあい」の条件式となる。ここで、「静つりあい」の条件の場合は、厚さの薄い1面だけの「つりあわせ」ができる。

「動つりあい」の条件の場合は回転軸方向に長い回転体での場合で、2面で「不つりあい」を代表させる。いわゆる「2面つりあわせ」ができる。又、「不つりあい」は回転体の各部に無数にあると考えられるが、「つりあわせ」にあたっては適当に選んだ2面で「不つりあい」を代表させ「つりあわせ」を行うことができる。

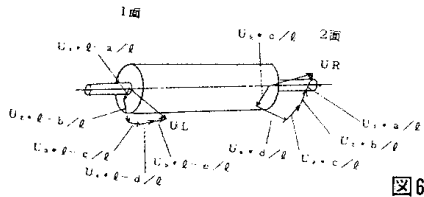
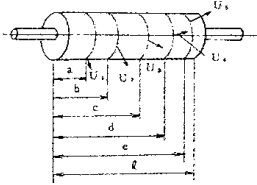


図6

ここでは、回転体を薄い円盤状に分割した各部に U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 なる「不つりあい質量」があるとす。両端面を1、2面とすれば図6のように静力学的方法によって、1、2面に分けることができる。このように回転体にある無数の「不つりあい」も1、2面についてベクトル合成すれば2面で力学的に等価となる「不つりあい」で表わすことができる。

IV. 「不つりあい」の修正方法

「動つりあい試験機」によって測定した「不つりあい質量」は、「つりあわせ」作業によって除去、あるいは付加される。この修正を行うに当たって、どちらを採用するかは、ロータの形状や使用条件によって決定する。

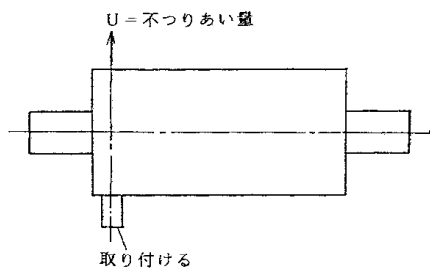


図7

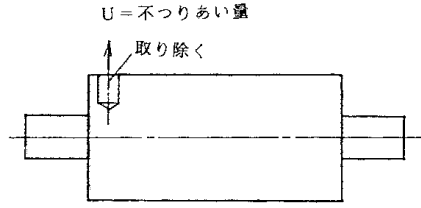


図8

「不つりあい質量」の修正方法としては機械加工による場合が多い。最も用いられる加工方法としては、「不つりあい質量」のある方向と180°反対方向に修正おもりを付加する方法(図7)と「不つりあい質量」のある部分を除去する方法がある。(図8)(その他、飛行機ジェットファンなどの特殊な修正方法がある。)

前者には、溶接、ねじ、はんだ付け、リベッティングなどの修正方法がある。その他、最近では液体(水など)をポケットに付加して、自動的に修正する方法もある。欠点としては、除去修正と比べて微小量の修正や修正作業の自動化が困難である。

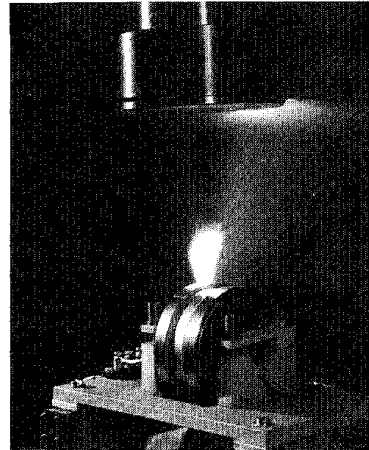


図8(a)

後者には、レーザによる自動修正(図8(a))、穴あけ、フライス加工、研削、たがねはつり、などの修正方法がある。これらの除去による修正方法は、作業が容易で、修正量の制御がし易いので、自動修正機などに広く採用されている。

以上の方法によって修正するときには注意をしないでならないことは、「つりあい試験機」によって測定した、「不つりあい質量」の値が正確であっても不適当な修正によって、修正誤差を生じ一回の修正では正しい修正が得られず、何回も修正を繰り返さなければならない場合が非常に多い。一般に修正誤差を生ずる原因としては、ロータの構造上正しく修正が出来ない場合、あるいは修正面の選び方が適当でない場合がある。

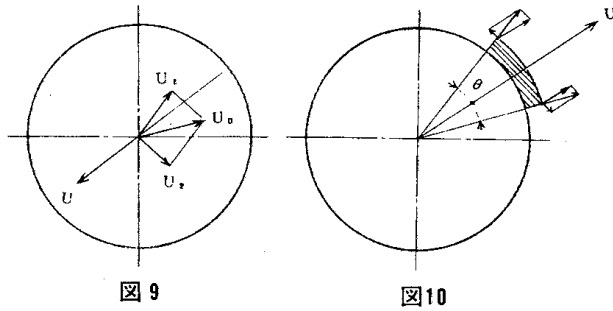
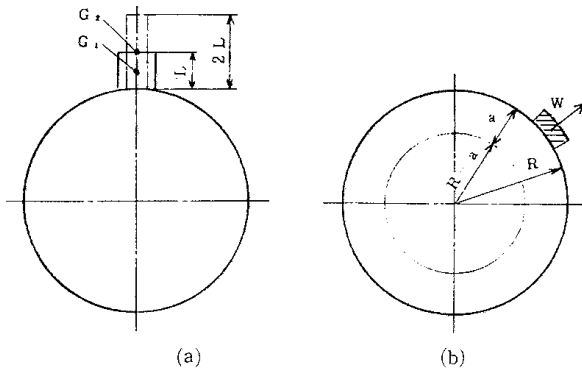


図 9

図 10



(a)

(b)

図 11

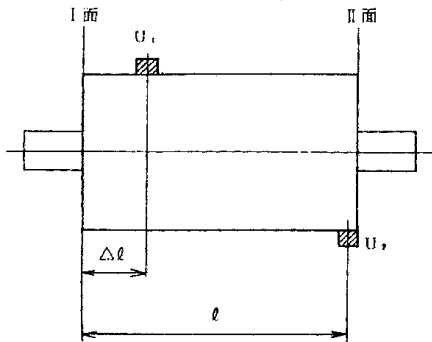


図 12

一般の修正誤差には、角度誤差 (図 9)、量誤差 (図 10)、半径誤差 (図 11(a), (b))、修正面誤差 (図 12) などがある。

角度誤差は修正誤差のうち最もよく起るものであり、角度位置に、正しく修正を行わないときに生じる。

U と 180° 反対側に修正したいが、その角度に修正が不可能なとき、修正おもりを適当に二つに分けてとりつける、そのとき分けた合力の向きが U と 180° 反対位置に同じ「不つりあい質量」がなければ、つりあわない訳である。

量誤差は「不つりあい」の測定値に対し、正しい修正量でない場合に起こる誤差であり、図のように「修正おもり」が広い角度にまたがっている場合に生じる。

半径誤差は、測定した「不つりあい質量」を修正するときに、あらかじめ設定した半径 R の位置で修正が行われ

ないときに生ずる誤差である。図 11(b) のように半径 R の位置で修正を行わなければならないのに、半径 $R - a$ のところに修正おもりを取付けたとすると、測定した「不つりあい質量」 $R \cdot W$ に対し $W \cdot (R - a)$ の修正を行ったのであるから $W \cdot a$ が「残留不つりあい」となって誤差を生じる。

修正面誤差は、図のように I、II 面に修正おもりを取り付けなければならないのに、I 面から Δl だけずらして修正してしまった場合に起こる誤差であり、 $\Delta l \cdot U$ の「残留不つりあい質量」が生じる。いずれにしても、回転体での「つりあわせ」を容易に、正確に行うためには、れそらを考慮した設計でなければならず、設計者はこれらの諸問題を知っておく必要がある。

V. 教育訓練用「パソコン支援動つりあい試験装置」と実験方法

最近の「動つりあい試験機」は簡単な操作でデータが得られる。しかし、教材としては適当でないため、図 13、図 14 の試験装置を考案した。

この装置はパソコン (P C 9800)、A/D コンバータ、プリンタ (NEC 製)、「不つりあい質量」計算ソフト、軸受、架台 (長浜製作所製) 等の各メーカーのものを有効に組み合わせ製作した。特に外部からの振動の影響がないこと、架台は完全な剛体であることに注意を払った。標準回転体は「不つりあい」がないロータであるので、あらかじめ「不つりあい質量」(ここでは 40 g) を付け、それによってロータから発生する振動速度は、軸受、架台を通して、速度センサに入り (振動はクロスバネ) を通って、テコ式レバーで拡大される)、光センサは回転数を表示するためのものである。

測定回転数 (r p m) は危険速度を 20% 離して設置したほうが誤差が少ない。以下に、これらの実験方法及びベクトル解法を説明する。

第 1 回目の運転では (1000 r p m)、ロータに試加量を付けずに、そのまま回転し、そのロータが持っている「不つりあい質量」による振動速度 (1, 2 面の) を速度センサを介して振動計測器に取り込み、A/D 変換されたものをパソコンによって処理する。

第 2 回目の運転では回転を止め、最初、1 面に試しおもり (60 g) を手でネジ付けし、再び回転させ (1000 r p m) それによる 1, 2 面の影響 (振動速度) をパソコンのキー操作 (RETURN) によって速度センサを介して振動計測器に取り込み、パソコンで処理する。

第 3 回目の運転は、1 面の試しおもり (60 g) を取り外

し、2面に付け、第2回目と同様な操作を繰り返す。この試しおもりを付けることによって生じる振動、及びその影響はプログラムソフトにより処理される。

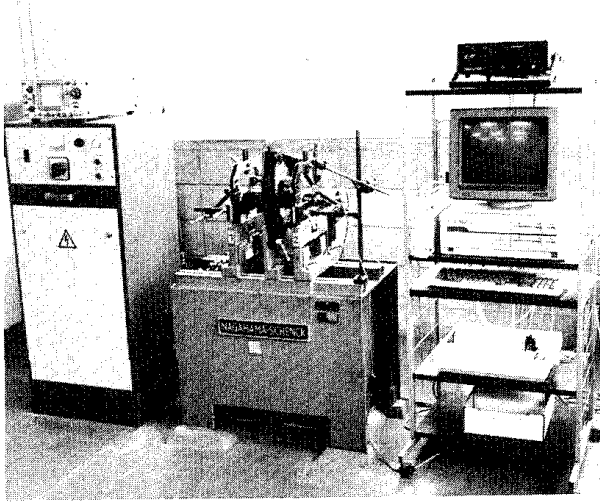


図13

```

10 PAI=3.14159265#
20 ***** Serial whiken (78) *****
30 SCREEN 3,1,0,1
40 CONSOLE 0,25,0,1
50 CLS 3
60
70 *MAIN
80 GOSUB *GRAPH1
90 COLOR 1
100 LOCATE 51,1:PRINT "SEQ-"
110 COLOR 5
120 LOCATE 52,2:PRINT "1.MG      5.M2"
130 COLOR 7
140 LOCATE 53,3:PRINT "R =      R =      "
150 LOCATE 53,4:PRINT "T =      T =      "
160 COLOR 5
170 LOCATE 52,5:PRINT "2.FG      6.F2"
180 COLOR 7
190 LOCATE 53,7:PRINT "R =      R =      "
200 LOCATE 53,8:PRINT "T =      T =      "
210 COLOR 5
220 LOCATE 52,10:PRINT "3.NI      7.RESULT"
230 COLOR 7
240 LOCATE 53,11:PRINT "R =      WN =      "
250 LOCATE 53,12:PRINT "T =      TN =      "
260 LOCATE 56,13:PRINT "WF =      "
270 COLOR 5
280 LOCATE 52,14:PRINT "4.F1      " ;:COLOR 1:PRINT "TF =      "
290 LOCATE 53,16:PRINT "R =      "
300 LOCATE 53,18:PRINT "T =      "
310 LOCATE 1,21:PRINT "DISPLAY =      SEQ =      WTWN =      TTWN =      MTF =      "
320 COLOR 3
330
340 LOCATE 1,23:PRINT "SELECT INPUT RANG.  OK THEN HIT ANY KEY.;"
350 ANS=INPUT$(1)
360
370 COLOR 5
380 LOCATE 11,21:PRINT "NO"
390 LOCATE 23,21:PRINT "1"
400 COLOR 3
410
420 LOCATE 1,22:PRINT "NO INPUT. REMOVE ANY WEIGHT FROM ROTOR UNDER TEST.;"
430 LOCATE 23,23:PRINT "      CHECK REVOLUTION SPEED.  OK THEN HIT ANY KEY.;"
440 ANS=INPUT$(1)
450
460 GOSUB *ADINP
470 GOSUB *GRAPH2
480 GOSUB *ZACHG

```

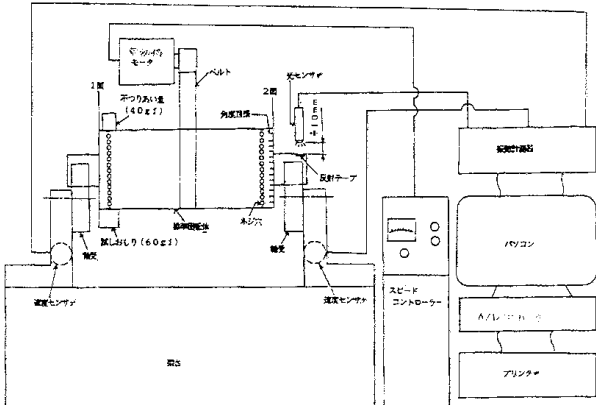


図14 実験装置の構成図

```

1890 COLOR 6
1900 LOCATE 71,11:PRINT USING "###";WN
1910 CALW=(TN*180)/ PAI: GOSUB *CALC
1920 LOCATE 71,12:PRINT USING "###";CALW
1930 COLOR 2
1940 LOCATE 71,13:PRINT USING "###";MF
1950 CALW=(TF*180)/ PAI: GOSUB *CALC
1960 LOCATE 71,14:PRINT USING "###";CALW
1970
1980 COLOR 3
1990 LOCATE 1,23:PRINT "PRINT ? END ? (P/E)      " ;
2000 LOCATE 22,23:ANS=INPUT$(1)
2010 COLOR 6
2020 IF ANS="E" THEN SCREEN 3:CLS 3:END
2030 IF ANS="P" THEN SCREEN 3:CLS 3:END
2040 *BREA
2045 COPY 3
2050 GOTO *MAIN

2070 *----- SUBROUTINES -----
2080 *
2090 *GRAPH1
2100 SCREEN 3,1,0,1
2110 CLS 2
2120 VIEW (0,0)-(401,331)
2130 LINE (0,0)-(400,330),1,B
2140 LINE (80,170)-(340,170),7,AHAAAA
2150 LINE (200,30)-(200,310),7,AHAAAA
2160 FOR I=50 TO 340 STEP 10
2170 LINE (I,167)-(I,173),7
2180 NEXT I
2190 FOR I=30 TO 310 STEP 10
2200 LINE (187,I)-(203,I),7
2210 NEXT I
2220 PUT (345,163),KANJI(AH2358),PSBT,7,0
2230 PUT (152,13),KANJI(AH2358),PBET,7,0
2240 CIRCLE (200,170),140 ,6
2250 RETURN
2260 *
2270 *GRAPH2
2280 VIEW (60,30)-(340,310)
2290 WINDOW (-2048,-2047)-(2047,2048)
2300 LINE (0,0)-(X,-Y),6
2310 CIRCLE (X,-Y),14,6
2320 RETURN
2330 *
2340 *ADINP
2350 ANS=AHDD
2360 CH=0
2370 GOSUB *START
2380 X=VOLTAGE
2390 CH=1
2400 GOSUB *START
2410 Y=VOLTAGE
2420 RETURN

2710 *----- T=SQ(X^2+Y^2) -----
2720 *ZACHG1
2730 R=SQR(X*X+Y*Y)
2740 IF X=0 THEN X=1E-10
2750 RT=X/R
2760 T = ATN( RT ) : IF X < 0 THEN T = T+PAI
2770 GOSUB *THOD
2780 RETURN
2790 *CALC
2800 IF CALW < 0 THEN CALW=CALW+360:GOTO 2800 ELSE 2820
2810 IF CALW >=360 THEN CALW = CALW - 360:GOTO 2810
2815 *
2820 RETURN
2825 *
2830 *THOD
2840 IF T > PAI*2 THEN T = T - PAI*2
2850 RETURN

```

図16 「動つりあい量」プログラム

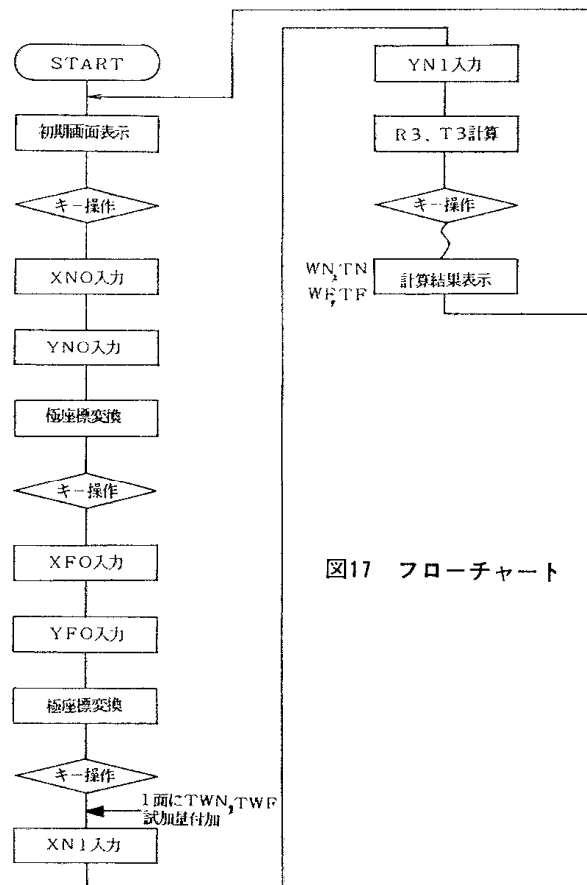


図17 フローチャート

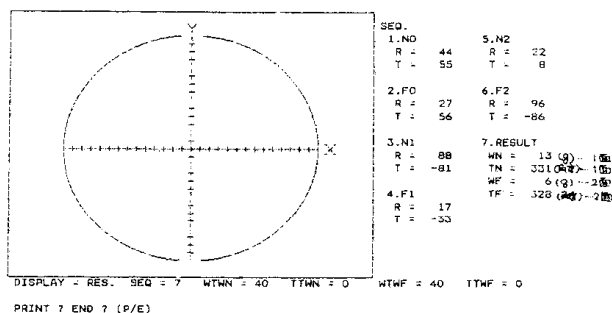


図18 測定データ

図16はプログラム、図17はフローチャートである。図18は試験データであり、左図に運転ごとの「不釣り合い質量」による振動がベクトル量として表示される。N0は1面、F0は2面の第1回目の運転データで、Rは（振動速度）、Tは（位相）である。N1、F1は1面に試しおもりを付けた時の1、2面のデータである。

N2、F2は2面に試しおもりを付けた時の1、2面のデータである。RESULTは計算結果である。WN、TNは1面の「釣り合い質量」と位相である。WF、TFは2面の「釣り合い質量」と位相である。

次にベクトルの解法を説明する。

第1回目の運転では、ロータに試加量を付けず、そのま

ま回転し、振動ベクトルを測定する。第2回目の運転では、片側の「釣りあい面（1面）」に試加量を付加したとき、2面に及ぼす影響、すなわち、ベクトルオペレータを決定する。

第3回目の運転は2面に試加量を付加し、1面に及ぼす影響（ベクトルオペレータ）を決定する。第1回目の運転で、N0側（1面）振動ベクトル（角度T1、振動R1）、F0側（2面）振動ベクトル（角度T2、振動R2）を得たとし、これを図15(a)、(b)、(c)のように書く。

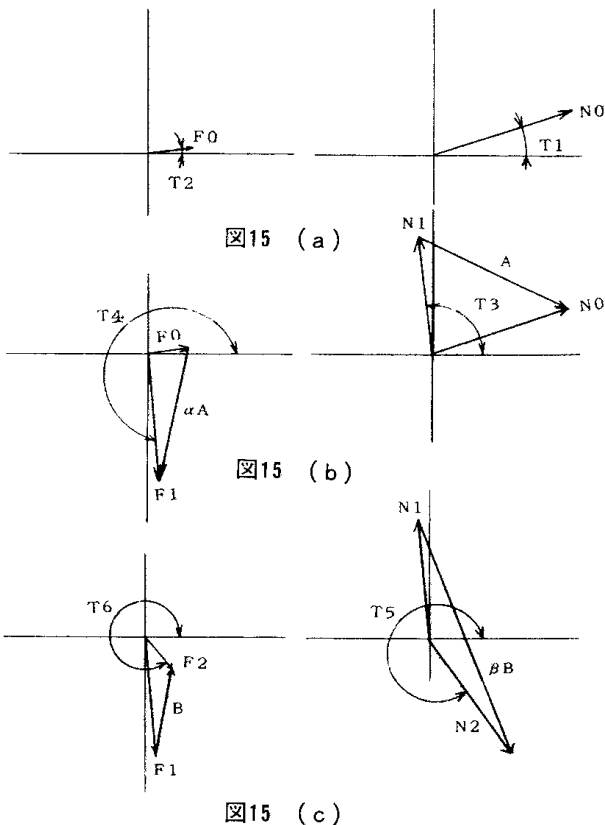


図15 (c)

次にN0側（1面）「釣りあい」面に既知の（大きさと角度を任意に選んだ）試加量Wn（ベクトル量）を付加し、前と同じ速度で測定し、結果を図15(b)のように書く。

試加量WnのN0側（2面）軸受の振動に対する影響は、ベクトルN1からN0をベクトル的に引き算して得られ、 $N1 - N0 = A$ となる。

同一試加量のF0側（2面）軸受の振動に対する影響は、ベクトルF1からF0を引き算して得られ、 $F1 - F0 = \alpha A$ となる。ここに「 α 」はベクトルオペレータという。「 α 」は一つの機械について、据付け条件を変えない限り定数である。

次にWnを取り除いて、F0側（2面）に既知の試加量Wfを付加し、回転し測定を行って、図15(c)のような振動ベクトルN2、F2を得たとすると、WfのF0側（2面）、N0側（1面）軸受の振動への影響は、それぞれ、

$F_2 - F_0 = B$ 、 $N_2 - N_0 = \beta B$ となる。ここに「 β 」は「 α 」と同様ベクトルオペレータである。

つりあわすべき「つりあい質量」を N_0 側（1面）、 F_0 側（2面）それぞれ W_n 及び W_f とする。新しいベクトルオペレータ「 θ 」、及び「 ϕ 」を考えると、つりあわすべき量は、 $W_n = \theta \cdot W'_n$ ……………①

$W_f = \phi \cdot W'_f$ ……………② として求められる。

振動振幅は「つりあい質量」に比例するから、試加量の効果「 A 」、「 αA 」、「 B 」及び「 βB 」に①、②式の「 θ 」、及び「 ϕ 」を代入すれば、 $\theta A + \phi \beta = -N_0$ ……③

$\phi B + \theta \alpha A = -F_0$ ……④

の式が成り立つ、③、④式を「 θ 」、「 ϕ 」について解くと、 $\theta = \beta F_0 - N_0 / (1 - \alpha \beta) A$ 、 $\phi = \alpha N_0 - F_0 / (1 - \alpha \beta) B$ となり、「 θ 」と「 ϕ 」が計算されれば①、②式から「つりあい質量」を決定することが出来る。

VI. 教育訓練への効果

最近の「動つりあい試験機」は自動化され生産性は向上したが「動つりあい」の理論を理解させるための教材としては適当でない。その点、この試験装置は測定要素別に構成されているので、試験機のメカニズムの原理が理解しやすい。又、ベクトルによる図式解法で得た値と比較させることによって、さらに理解が深まる。データの信頼性についても理論値と一致しているので、教材としては勿論、実用の計測としても使用できると確信している。図19はこの試験装置を使用して修正したものである。

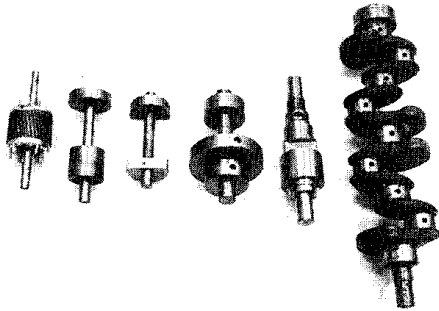


図19

又、この課程を導入することによって、回転運動体の設計、材料の選択、機械力学、振動、動つりあいを得るための精密加工、動つりあいの精密計測など、機械技術者としての総合判断力を養成するのに大きく役に立っている。

VII. おわりに

以上、教育訓練用「パソコン支援動つりあい試験装置」を紹介したが、冒頭で述べたように、益々「超精密」な加工精度が要求される中で、いかに早く、正確に計測、修正

することが望まれる。

さらに、DDC(Direct Digital Control)の開発が進むだろう。いわゆる、今までは部分的「つりあい」のみだけであったが、今後は全製造工程をシステムとして、回転機器の「つりあい」状態を監視し自動制御する装置も改良が加えられるであろう。

今後は、生産ラインにおいて「動つりあい」の分野は今後益々重要な課題の一つになると考える。

この教材は、これらに対応するための「機械力学」の基礎、設計、あるいは一般の計測用として参考になれば幸いである。

参考文献

- (1) 小林 昭：超精密加工入門、総合技術センター、61年4月
- (2) 印南義雄：茨城職業訓練短期大学校、紀要第1号、紀要第2号、63年8月、63年9月
- (3) 三輪修三、下村 玄：回転機械のつりあわせ、コロナ社、55年8月
- (4) 明石和彦、浅羽正三、下村 玄：動つりあい試験、コロナ社、52年9月
- (5) 小堀与一：実用振動計算法、工学図書株式会社 52年