

# 内 圧 振 動

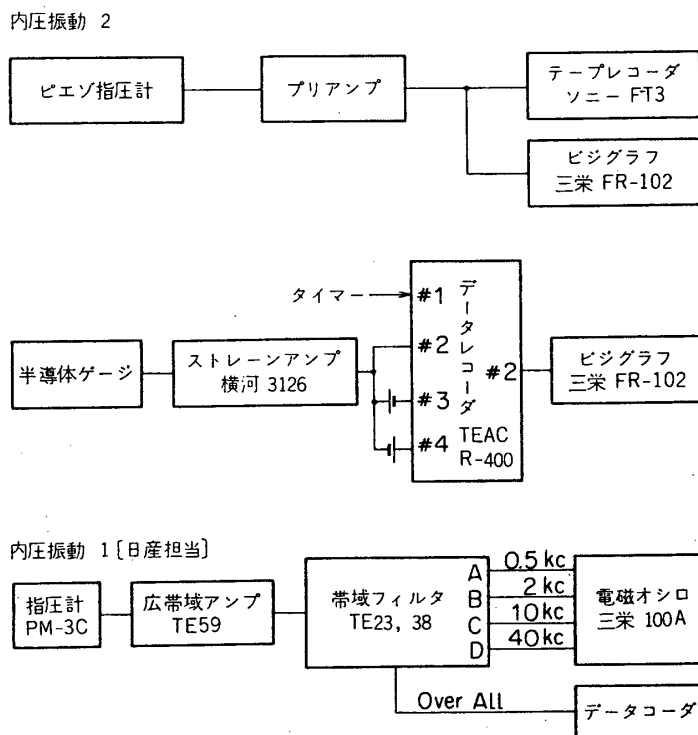
倉 谷 健 治

エンジンの異常燃焼の有無を確認する目的でほとんどすべての燃焼実験において内圧振動の計測が当研究室および日産自動車実験班の担当で行なわれている。

## 1. 測 定 法

当研究室では微弱な内圧振動を検出する目的で試作した [1] 圧電素子を受感部とする水冷式指圧計 I (新興製水冷式指圧計 PR-100 のボディを利用し、ひずみ発生部の円筒の代わりに剛体芯棒を入れ、その先端をくり抜いて圧電素子を埋込んだもの) を主として用い、一方、比較的強い内圧振動が発生した場合に、直流増幅方式で正確な波形を計測する目的で、半導体ひずみゲージを受感部とする水冷式指圧計 II (新興製指圧計 PR-100 のひずみ発生部の円筒に半導体ゲージ EN-104 U を貼付け、防水処理したもの) も試作して、指圧計を 2 か所に設置する余裕のあるときのみ使用した。

測定回路は図 1 にブロック図として示されているが、半導体ひずみゲージは直流増幅ゆえ、感度を上げるために 1 回路は全圧力範囲を低感度で、他の 2 回路はある圧力範囲に限



定して高感度で計測しうるようにバイアス電圧を加えてある。しかし、指圧計Ⅱは1枚ゲージのため、温度ドリフトが大きいこと、また内圧を正確に予測しないとバイアス電圧との関連で計測しえない場合も起り、今までのところ、完全な計測には至っていない。

日産自動車ではひずみゲージ指圧計を用い、その出力を帯域フィルタ群でわけて、各帯域の振動の強さをビジュグラフに直記する方式を用いている。

指圧計の取付位置は内圧振動計測上重要な因子であるが、燃焼室内の形状等をフライト時と変えてしまつては、異常振動が燃焼室内の形状等に非常に敏感に左右されるので、内圧振動を地上試験で計測してフライト時の異常振動の発生するか否かを予見しようとする目的からははずれてしまう。したがって、主として点火器背後に導孔をあけ、内圧指圧計と並んで取付けることが多い。そのため点火器ケースが内圧振動計測上じゃまものとなっているが、これは燃焼室内の形状に変化を加えないという原則上止むを得ない。なお、導孔はできる限り短かく太くして、指圧計受感部が前面に出るように努めた。

較正は分銅式指圧計較正装置を用い、圧電型とひずみゲージ型の両指圧計を並べて取付け、はじめにアンマ器を錘りのせ台に押付けて機械振動を発生させ、両指圧計の出力を記録し、次に錘りのせ部に1~2kgの分銅をのせて、ひずみゲージの直流感度を測定し、両者の比較で圧電型のp-pの電圧と圧力値との較正曲線を求めた。この方法は、衝撃波管を用いた較正結果と一致するので、通常は上記の簡便法を用いている。

**再生解析** 現地ではテープレコーダ、データレコーダに集録された計測値は研究室に持帰って下記の方法で解析される。解析回路は図2にブロック図で示されている。

i) オクターブフィルタ群(中心周波数が60, 120, 240, 480, 950 Hz, 1.7, 3.4, 6.8 kHzの8チャンネル)によって強い振動のみられる周波数帯域を見出す。

ii) i)で問題となりそうな周波数帯域が見出だされれば、その帯域を周波数分析器で10 Hz~50 Hzおきに細かく解析する。エンジンの音響振動数があらかじめ計算で求められるので、それに対応する周波数域もこの方法で精査する。

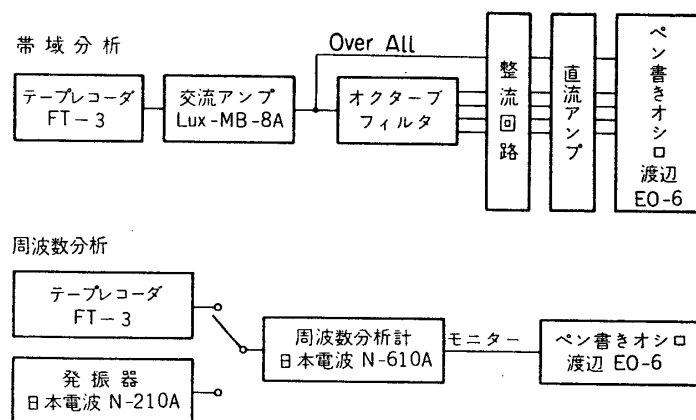


図2 再生解析回路

## 2. 測定結果

昭和 44 年頃までは当研究室と日産自動車とで内圧振動が並行して計測されていたが、最近ではもっぱら当研究室が担当している。前記の二つの指圧計中、指圧計Ⅱは感度設定が不完全なためと、激しい内圧振動に遭遇するという経験がないため、これといった成果を上げてはいない。表 1 に、前報 [2] 以来の計測結果をまとめ、各エンジンについてはそれぞれ各論の形で述べる。

表 1 内圧振動の計測\*

エンジン	ひずみゲージ 日産	ピエゾゲージ	半導体ゲージ
M-20-2	異常なし	本文	
M-20-3	37.5 sec にパルス	本文	
500-TVC-1	異常なし	弱い。23 sec にピーク	
735 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> -TVC-1		弱い	
735 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> -3	異常なし	かなり強い。本文	
735 <sup>3</sup> / <sub>3</sub> -2	0~4 sec に広範囲の振動	かなり強い。本文	
M-40-4		取付位置不相当のため弱い	
M-30-2		"	
M-11-オペ		300-SB エンジン、 300-TVC-1 に類似	抵抗線ゲージを使った。感度不足。
M-11		本文	
735 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> -TVC-2		弱い。本文	
300-TVC-1		300-SB の代表例。本文	点火直後の振動計測。
M-12-シミュレーション		高周波が強い。本文	内圧予測が高すぎた
420 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> -FRP-1		弱い。	
420 <sup>1</sup> / <sub>3</sub> -FRP-2		極めて弱い。	
M-12		強い。	内圧予測が高すぎた。0ドリフトが大きい。

\* このほか S-300, S-350 も計測されているが、これらは別に報告する。

## A. M-ロケット系列

## M-20-2

振動は弱く、p-p 0.2 kg/cm<sup>2</sup> 以下の振幅である。0~20 sec で 330 Hz が特に強いが縦波振動ではない (図 3)。この図 3 中でも 14.8 sec にピークが見られるが、この実験で同時に計測されていた火焰輝度も、まったく同時期に明るく輝いており (図 4)、ノズルからの異物の飛び出しによって起る現象と類似している。

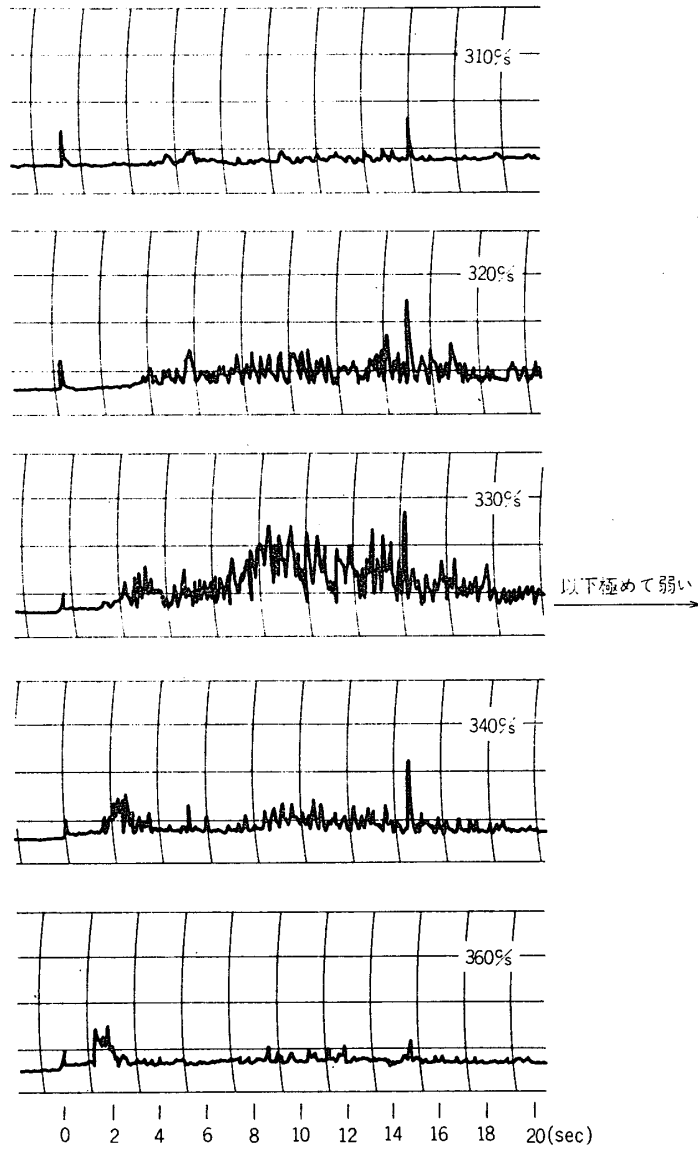


図 3 M-20-2 の内圧振動 (周波数分析)

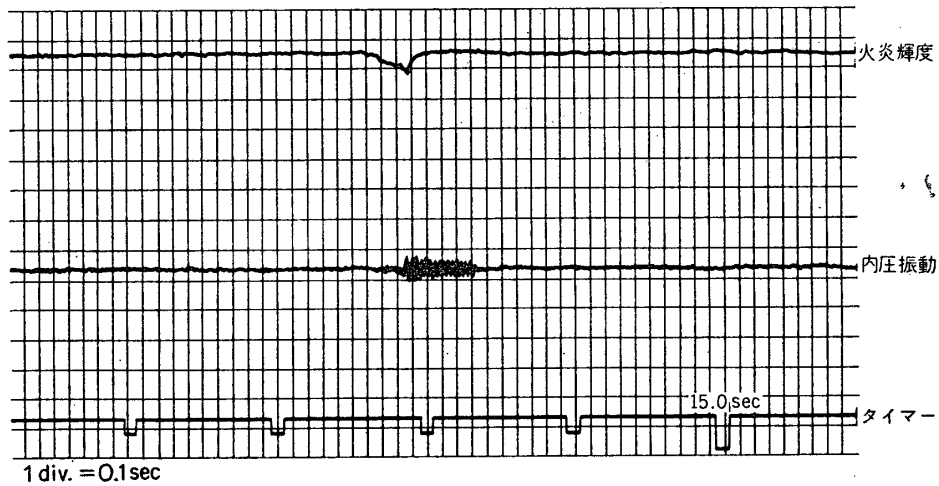


図 4 M-20-2 の内圧振動 (ビジグラフ)

## M-20-3

全般に振動は弱いが、最大の特徴は 37.5 sec, 43 sec に鋭いピークが出現したことで (図 5), FRP 点火器ケースの FRP 部が燃失し, 内部のスチール金具が溶けて一塊となってノズルより飛び出したために内圧振動が励起されたものと推定される。そこで, その際の振動数を明らかにするために, この時間域のみを周波数分秒計で解析することとし, まず 150 Hz より 50 Hz おきに 1,100 Hz まで解析し, 150~200, 250, 350, 850 Hz で振動が強いことを見出したので, さらに, これらの領域のみを 10 Hz おきに精査した (図 6)。その結果

37.5 sec……180, 860 Hz が強く, 260, 360 Hz がこれに次ぐ。

43 sec……180 Hz が強く, 260 Hz がそれに次ぐ。

ことがわかった。このことは図 5 のビジグラフでみられる約 15 波ほどで減衰消滅する振動は 180 Hz で, これに重なっている高周波振動が 860 Hz に当ることを示している。

エンジンの音響振動は, 音速を  $a$  m/sec, 燃焼室長さを  $L$  m, 推葉内径を  $R$  m とすると

$$\left. \begin{array}{l} \text{縦波} \quad f = a/2L \\ \text{横波} \quad f = a \cdot \alpha_{mn}/2R \\ \quad \quad n=0, m \neq 0 \quad \text{radial mode} \\ \quad \quad n \neq 0, m=0 \quad \text{tangential mode} \end{array} \right\} \quad (1)$$

で与えられ, 係数  $\alpha_{mn}$  は Barrère [3] の著書に記載されている。M-20-3 エンジンに (1) 式を適用すると, 縦波は約 170 Hz, 横波は, 推葉内孔の最大径 (燃え切り時) で計算すると

$$n=0, m=1 \quad 930 \text{ Hz} \quad \text{radial mode}$$

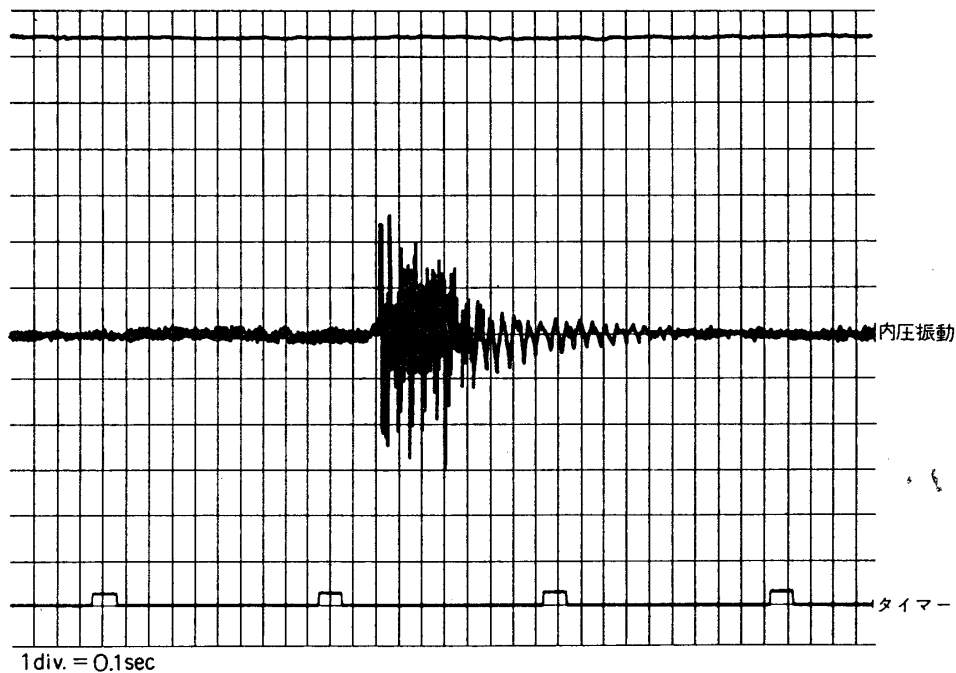


図 5 M-20-3 の内圧振動, 37.5 sec 付近 (ビジグラフ)

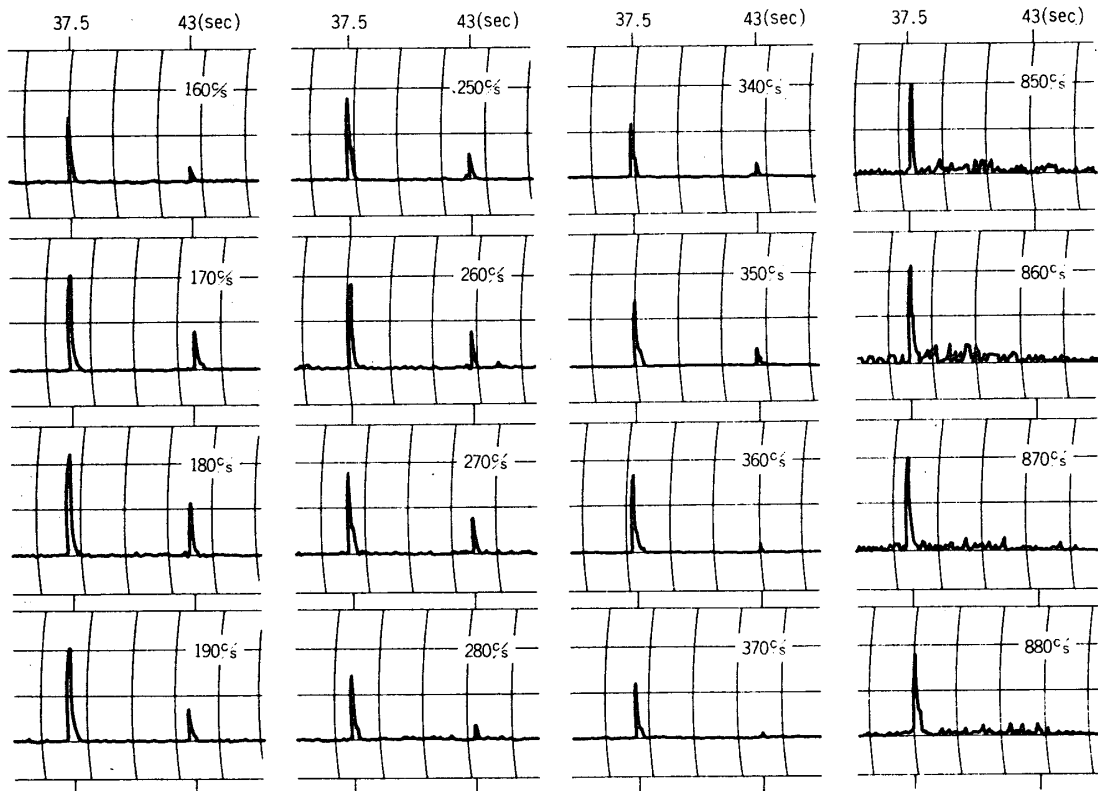


図 6 M-20-3 の内圧振動 (周波数分析)

$$m=0, n=1 \quad 470 \text{ Hz} \quad \text{tangential mode}$$

$$m=0, n=2 \quad 760 \text{ Hz} \quad \text{tangential mode}$$

などの値がえられる。したがって観測された振動数中、180 Hz は縦波、860 Hz は tangential mode である可能性が大きい (燃焼中は内孔径は上記の計算値には達していないから、振動数も当然、上記の計算値より高周波となる)。

### M-11

オクターブフィルタ群による解析で 240 Hz 帯が強いことが見出されたので、縦波振動の予測される 20~90 Hz を 10 Hz おきに、200~400 Hz を 20 Hz おきに精査した。その結果縦波振動とみられる 40~45 Hz の振動は全秒時を通じて強いが、なかでも 43 sec 付近では強度が一段と強くなっていた (図 7)。これに対し (1) 式から予想される横波の最低周波数は約 480 Hz で、上述のようにこの周波数域には振動は見当らない。200~400 Hz の解析では図 8 に示したように、260 Hz が 44~51 sec、280 Hz は 0~25 sec、300 Hz は 0~20 sec と出現する時期が異なっている。また図示は省略したが、同様な傾向が、

180 Hz	200 Hz	220 Hz	240 Hz
60~63 sec	54~56 sec	52~54 sec	44~51 sec

のように、周波数が高くなると、燃焼前期の方に強い振動がみられる。

### M-12 シミュレーションモータ

今までに経験した中では最も特異的で高周波成分が強い。図 9 にはオクターブフィルタ群

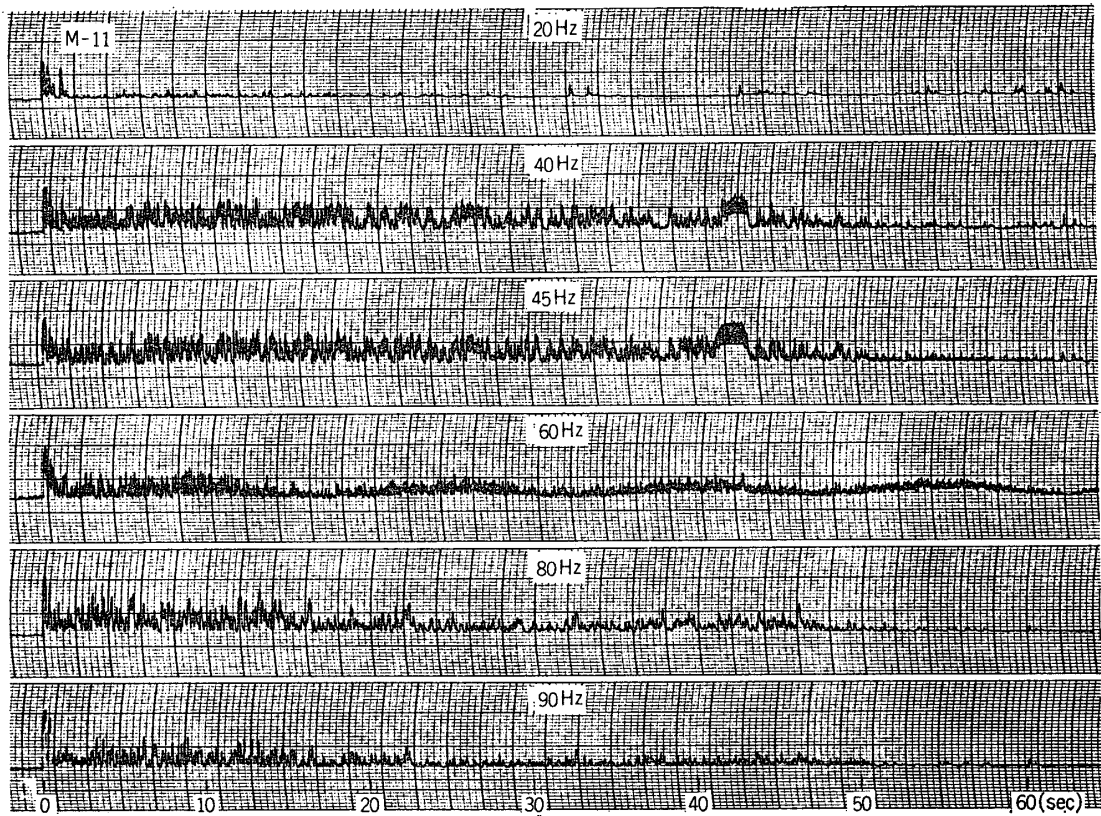


図 7 M-11 の内圧振動 (周波数分析-1)

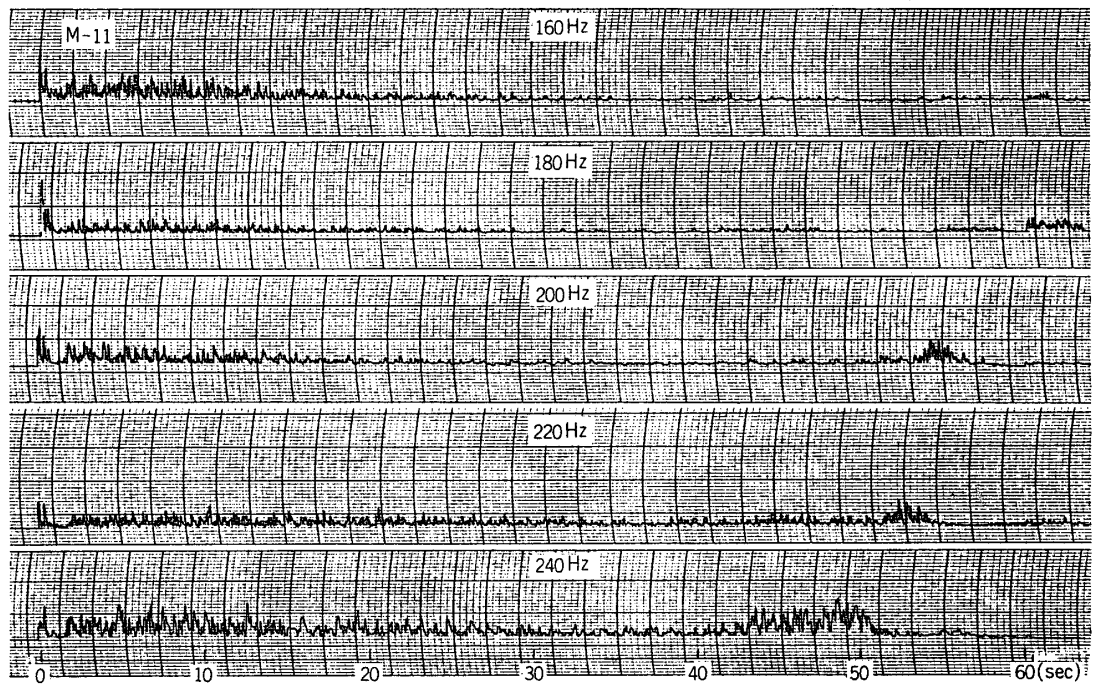


図 8-1 M-11 の内圧振動 (周波数分析-2)



図 8-2 M-11 の内圧振動 (周波数分析-3)

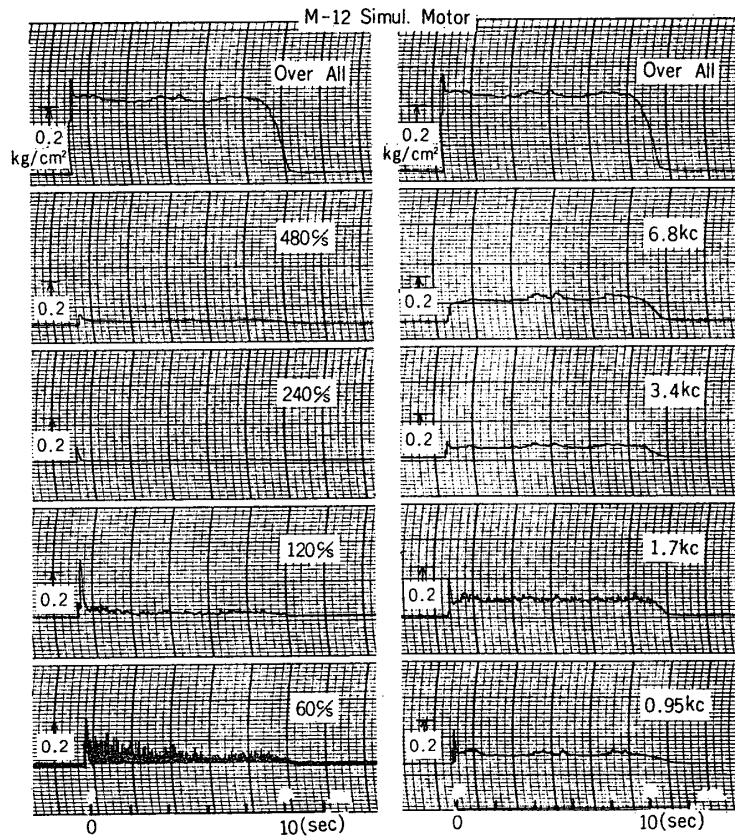


図 9 M-12 シミュレーションモータの内圧振動 (帯域分析)



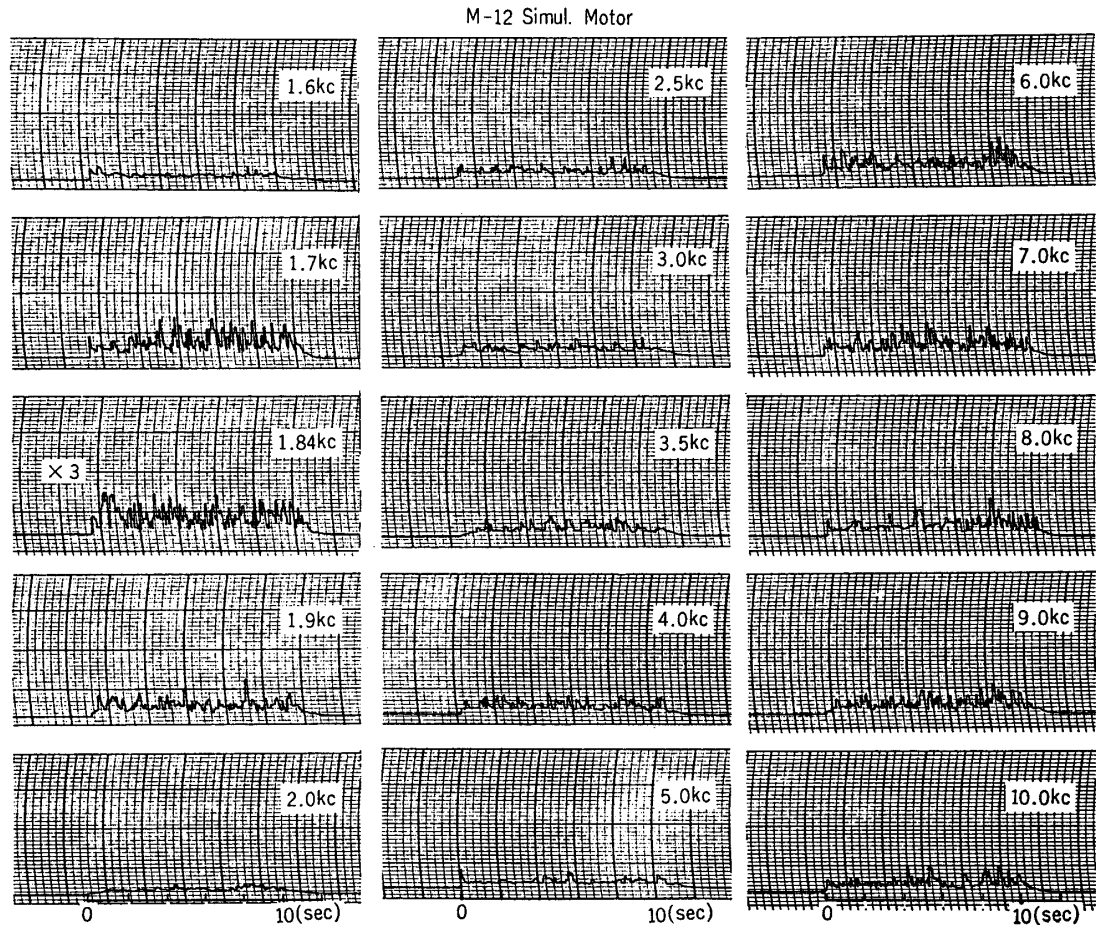


図 10 M-12 シミュレーションモータの内圧振動 (周波数分析)

で解析した結果を示す。高周波域を周波数分析した結果は図 10 に示されているが、1.84 kHz はきわだって強いので、他の 1/3 のゲインで記録してある。横波中最低の周波数は radial mode で  $R=0.15$  m として約 1.95 kHz となるが、全期間を通じて強く観測されている 1.84 kHz は横波に対応するものとはいえない。一方縦波振動数は 240 Hz 近傍と見積られるが、図 9 にも明らかなように 240 Hz 帯にはほとんど振動は検出されておらず、今までに前例の見られない変わった例といえる。

#### M-12

内圧振動はかなり激しい。ビジグラフでは点火直後に 500~800 Hz、振幅  $0.6 \text{ kg/cm}^2$  程度の振動が見られ、以後 40 sec までの全秒時にわたって 200~300 Hz、振幅  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  前後の振動が続いているが、21~25 sec、33~37 sec にはこのほかに 53 Hz の振幅  $1 \text{ kg/cm}^2$  弱の振動も顕著である。図 11 にはオクターブフィルタ群による帯域分析結果を示したが、240 Hz 域が最も強く、60 Hz 域は 21~25、33~37 sec で特に強くなっている。この点をさらに明瞭に示したものが図 12 の周波数分析結果で、53 Hz の振動は縦波振動であろう。100 Hz 以上についても 20 Hz おきに精査したが、下記の時間帯では

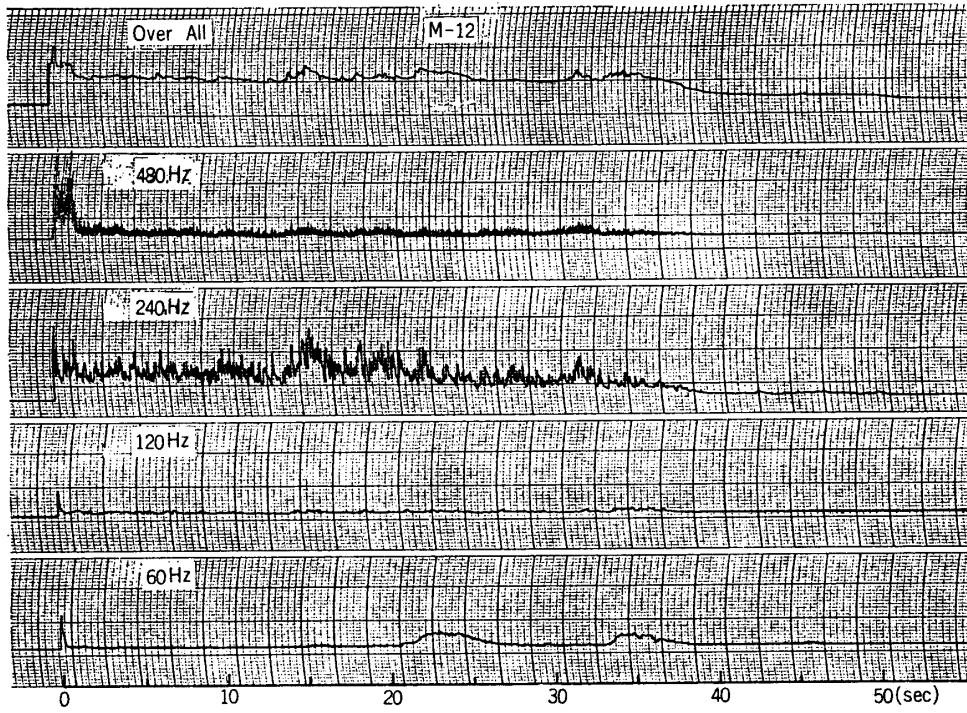


図 11 M-12 の内圧振動 (帯域分析)

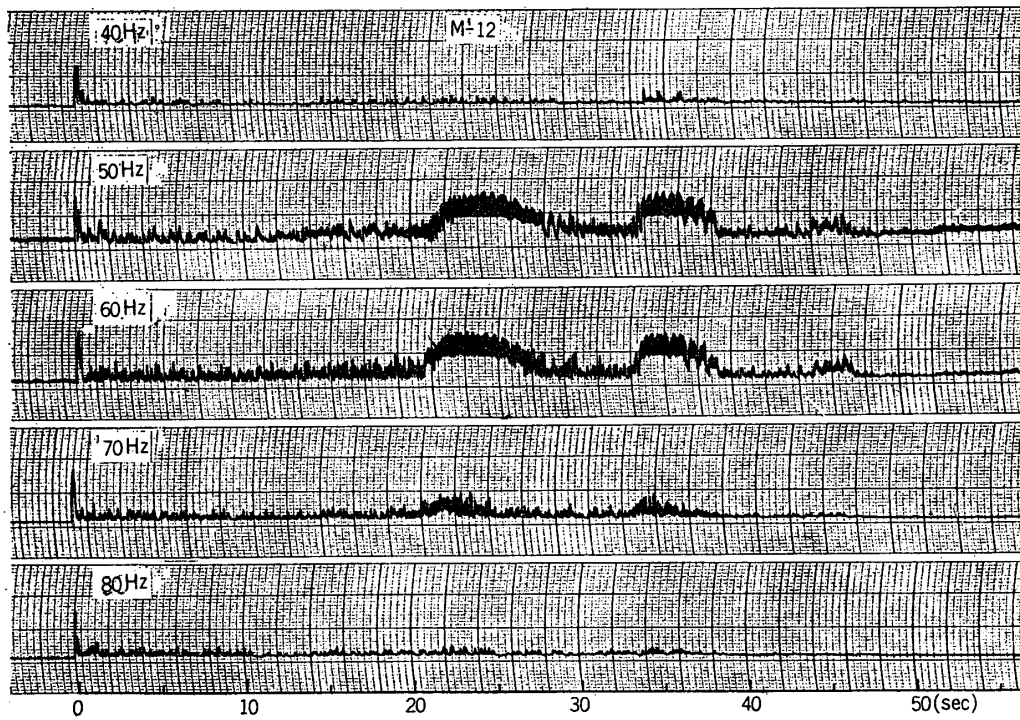


図 12 M-12 の内圧振動 (周波数分析)

0~10 sec      10~25 sec      25~40 sec  
 200, 220 Hz      260, 280 Hz      300 Hz

のように、それぞれの時間帯で異なった最強の振動がみられるが、図示は省略する。

### 300-SB

M-11 スタンドのオペレーションに ON-OFF 型 TVC を 300-SB につけて実験し、次いで比例制御 TVC の実験にも 300-SB エンジンが用いられ、これらの機会に内圧振動の計測を行なった。当然のことながら、両測定結果は類似しており、図 13 には比例制御 TVC のオクターブフィルタ群による解析結果を示しておく。ON-OFF 型でも図 13 と同様、120 Hz 域が最も強く、60 Hz, 1,700 Hz 域がこれに次いでいる。両者の差は、ON-OFF 型 TVC のときには、このほか 480 Hz 域もやや強い振動が見られたことのみである。

このエンジンの特色は 11.4 sec に後燃えが毎回必ず見られることで、図 13 にもそれによる内圧振動が検出されているが、面白いことに、後燃えでは 60 Hz 域のみが顕著である。

### その他

M-ロケット系列では M-30-2 TVC, M-40-4 でも内圧振動の計測を行なったが、指圧計取付位置が不適當であったため、ほとんど振動を検出しなかった。

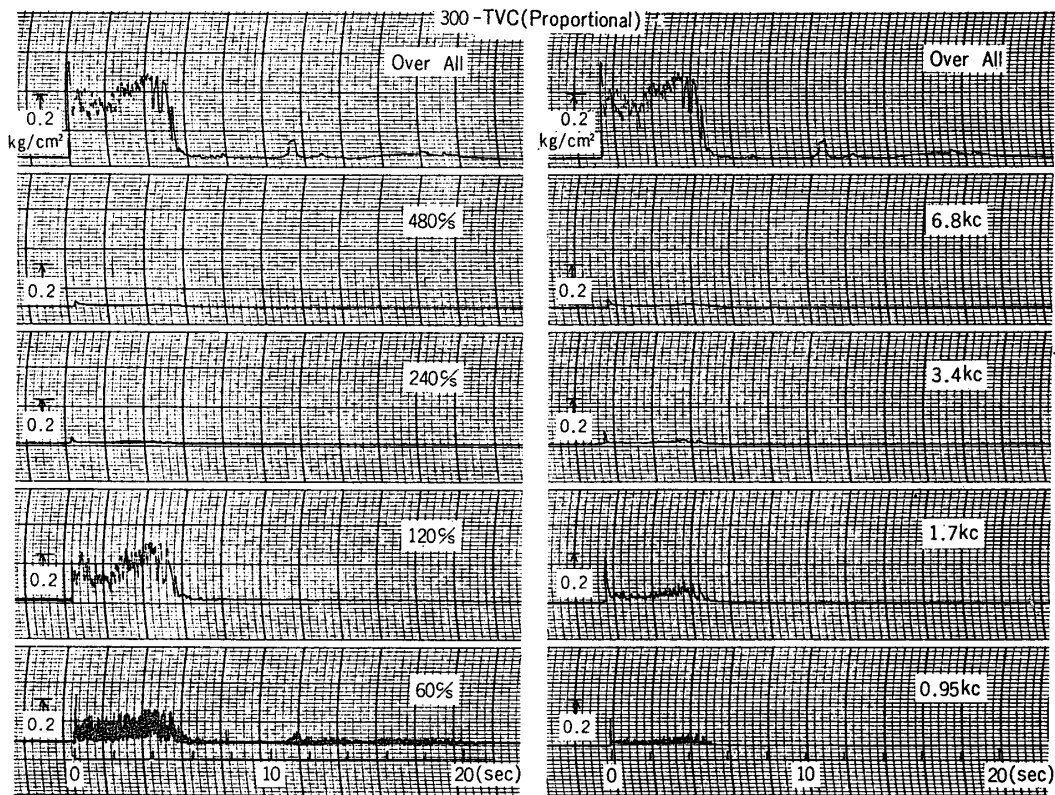


図 13 300-SB の内圧振動 (帯域分析)

## B. L-ロケット系列

## 500-TVC-1

全般に弱いので図示は省略し、測定結果の概略を記しておく。オクターブフィルタ群による解析では 240, 480, 1,700 Hz を中心周波数とする帯域のみにやや強い振動がみられたが、他のチャンネルではきわめて弱い。ビジグラフ記録でも 17.1, 19.4, 22.6~22.9, 24.6 sec に ~300 Hz で数波で減衰消滅する振幅 0.2~0.4 kg/cm<sup>2</sup> 程度の振動が観測されているが、周波数分析器を用いて 20 Hz おきに精査した結果でも、全秒時にわたって 200~220 Hz, 280, 300 Hz の振動のみがやや強くみられ、22.6~22.9 sec では特に 220 Hz が、24.6 sec では 280~300 Hz が顕著であり、ビジグラフの結果と一致している。

735<sup>1</sup>/<sub>3</sub>-3

全般にかなりの強さの振動が検出されている。140~400 Hz を 10 Hz おきに周波数分析したが縦波振動に対応する 160~170 Hz の振動は 0~10 sec の間では強いが、他の秒時では治まっているのに対し、310~360 Hz の振動はほぼ全燃焼期間中強く現われている。中でも 0~10 sec, 30~34 sec では振幅が大きい、その中間の 12.2, 13.2 sec に鋭いピークがある(図 14)、ビジグラフにも 12.2, 13.2 sec のピークは認められるが振幅は 0.4 kg/cm<sup>2</sup> 程度で 735<sup>3</sup>/<sub>3</sub>-2 に比すると弱い、内圧振動としては中程度の強さとみられる。また図 14 にも明らかなように 18~26 sec の間では各周波数とも振動が弱まり、30~34 sec で再び振動が激しくなっている点も興味深い(図には 340~380 Hz の解析結果のみを示した)。

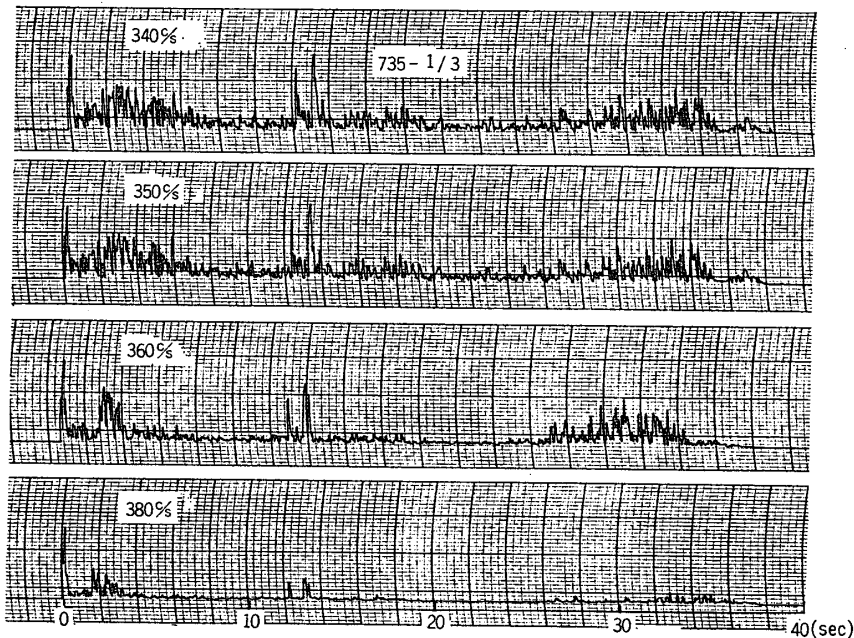


図 14 735 1/3-3 の内圧振動 (周波数分析)

735<sup>3</sup>/<sub>3</sub>-2

内圧振動はかなり激しい。ビジグラフ上にも点火直後には振幅 0.8~1.5 kg/cm<sup>2</sup> 程度の 1 kHz 付近の強い振動がみられ、以後 18.5~18.9, 21.3~21.5, 23.0 sec 付近に 0.6~1.5

kg/cm<sup>2</sup> 程度のピークが散在している。ことに 23 sec 付近では 1 kHz 程度の高周波が強く見出される。そこで、例によって周波数分析器を用いて 40~180 Hz を 10 Hz おき, 300~1,000 Hz を 20 Hz おき, 1,000~2,000 Hz を 200 Hz おきに精査した。

低周波域の中で図 15 には 40~90 Hz の結果を図示するが、縦波振動とみられる 70~80 Hz の振動は 0~20 sec ではほぼ全域にわたってみられるが、23~25 sec ではきわめて弱い。次に 300~800 Hz 中で、興味深い例として 460~560 Hz の解析例を図 16 に示す。この図からも明らかなように、これらの振動は高周波程、燃焼初期の方にずれて出現している。すなわち、480 Hz は 14~15 sec に、500 Hz は 10~13 sec に、520 Hz は 8~10 sec に、540 Hz は 4~6 sec に、560 Hz は 2~4 sec に強度の最大点がきている。また図には示さなかったが、18.5~18.9 sec では 440 Hz が、21.3~21.5 sec では 340 Hz が、23 sec では 800 Hz がそれぞれ鋭いピークとして見出されており、ビジュグラフの解析とよく対応している。480~560 Hz の振動はエンジンの諸元から算出される横波振動数とは一致しないが、横波振動では、燃焼初期には内孔半径が小さいため、高周波の振動数となることと図 16 で高周波ほど

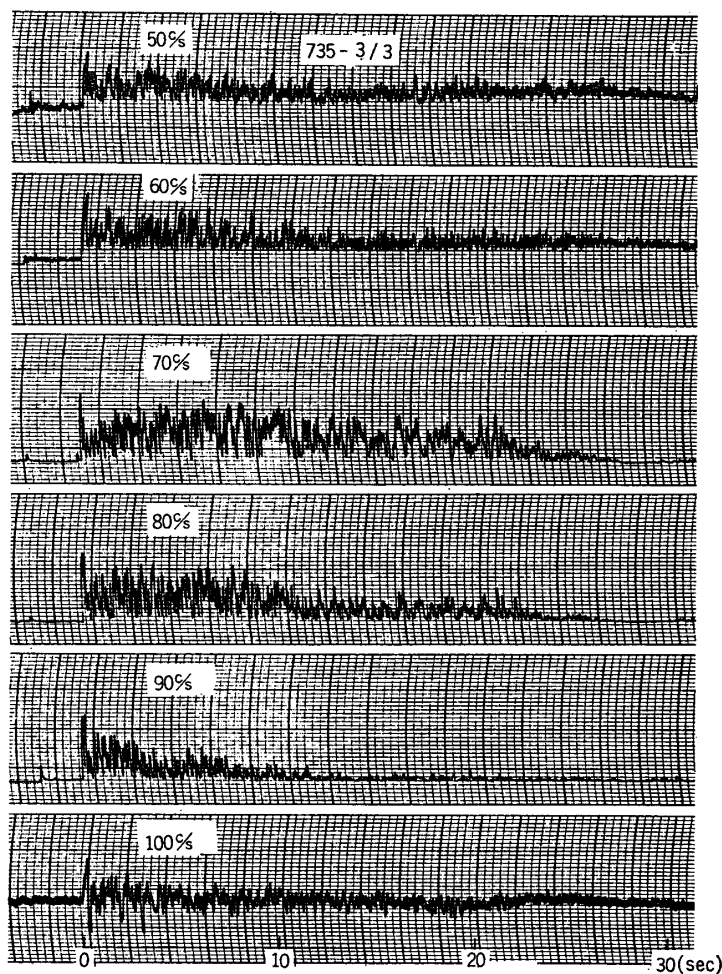


図 15 735 3/3-2 の内圧振動 (周波数分析-1)

燃焼初期に強いこととは傾向的には一致している。

最後に 900~2,000 Hz の振動の分布も図 17 に示されているがきわめて特異的で、0~2, 3~5, 7~9, 23~25 sec の時間帯のみに振動がみられ (900~1,000 Hz は類似するので図は省略)

0~2 sec……いずれの振動も強い

3~5 sec……980~1,000 Hz が最強で、1,600 Hz 以上はなし

7~9 sec……920~940 Hz が強く、1,600 Hz 以上はなし

23~25 sec……980~1,000 Hz が強く、1,200 Hz 以上はなし

と大別できる。

### 735-<sup>1</sup>/<sub>3</sub>-TVC-2

TVC-1 号機では内圧振動はきわめて微弱であった。TVC-2 号機でも概して内圧振動は弱かった。ビジグラフでは、点火直後に ~500 Hz の振動が顕著にみられるが、その後はしばらく穏やかで、40 sec になると再び高周波振動がみられた。オクターブフィルタ群で解析

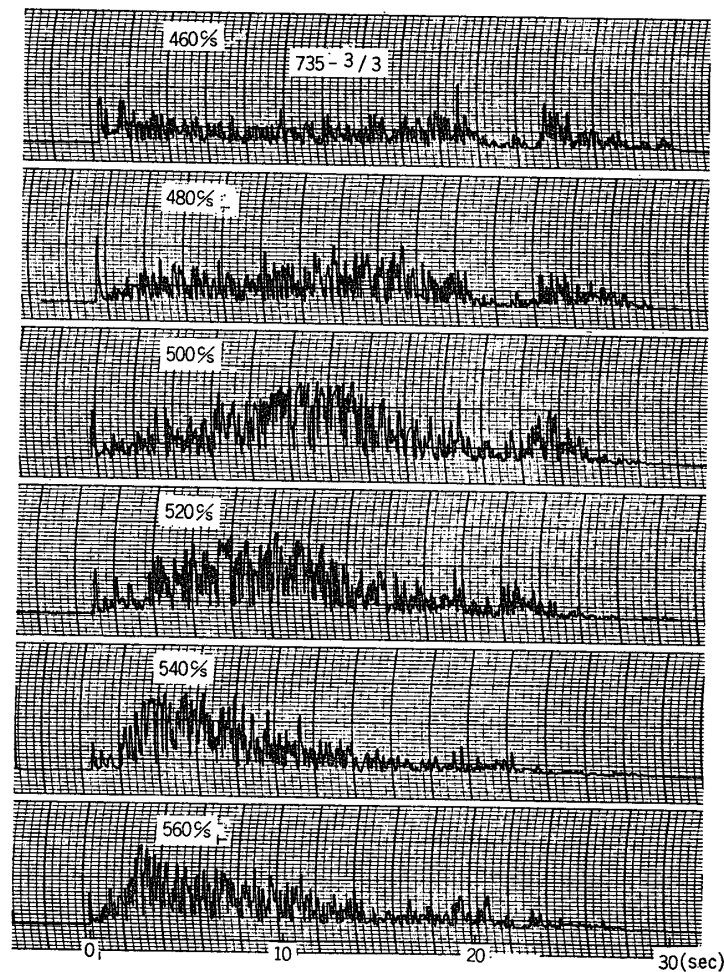


図 16 735 3/3-2 の内圧振動 (周波数分析-2)

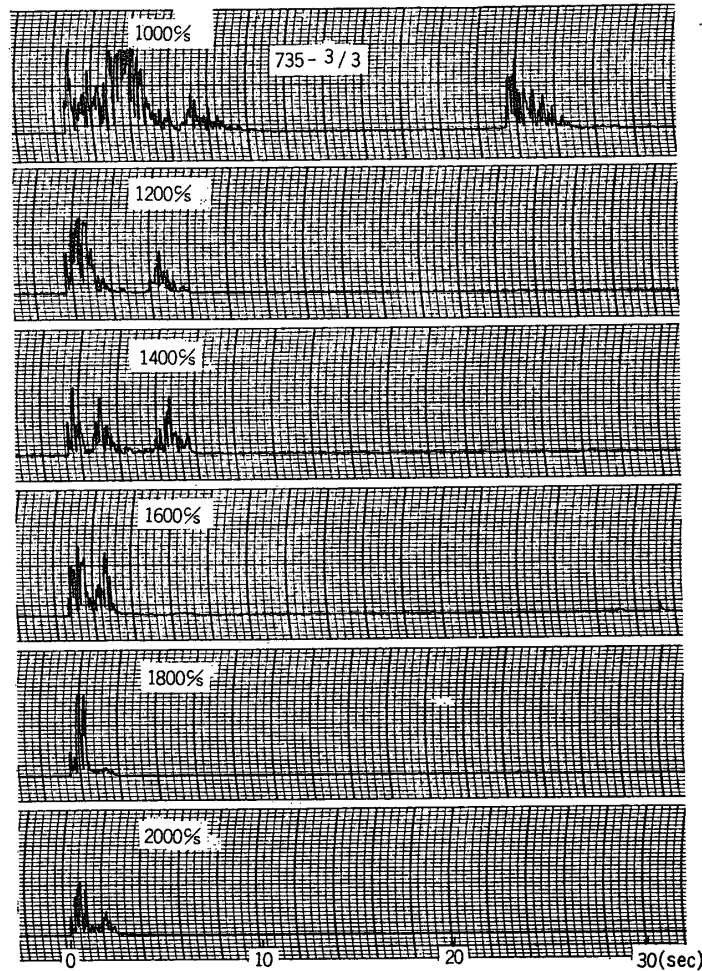


図 17 735 3/3-2 の内圧振動 (周波数分析-3)

すると、点火直後では 480 Hz 域、40 sec 付近では 480, 960, 1,700 Hz 域に (1,700 Hz 域が強度最高) のみ振動が検出され、ビジグラフの結果と一致している。そこで、周波数分析器により、320~700 Hz を 20 Hz おきに、1.0~2.0 kHz を 200 Hz おきに、縦波振動と推定される 160~170 Hz を 10 Hz おきに精査した。その結果

160~170 Hz……0~3 sec と 8~12 sec でみられるが 40 sec ではなし。

200~1,000 Hz……一般に弱い。0~2 sec にもあるが 40 sec で最も強いのは 480, 620 Hz であった。

1.0~2.0 kHz……振動が弱いのでゲインを 10 倍に上げて周波数分析すると、ほぼ全秒時にみられるのは 1.2, 1.8 kHz の振動で、40 sec 付近で最も強いのは 1.4 kHz の振動である。

などが判明した。160~170 Hz はエンジンの縦波振動数と一致するが、480, 620 Hz は横波振動数とは一致しない。なお、オクターブフィルタ群による解析では 15 sec にピークがみられたが、これは 2 Hz 程度の低周波の振動によるもので、内圧振動ではなく、雑音による

ものである。

### C. 420<sup>1</sup>/<sub>3</sub>-FRP

前後2回の燃焼実験が行なわれたが、いずれの場合でも内圧振動は弱く、ことに2号機ではほとんど検出されなかった。図18には1号機での低周波域のオクターブフィルタ群による帯域分析の結果を示す。

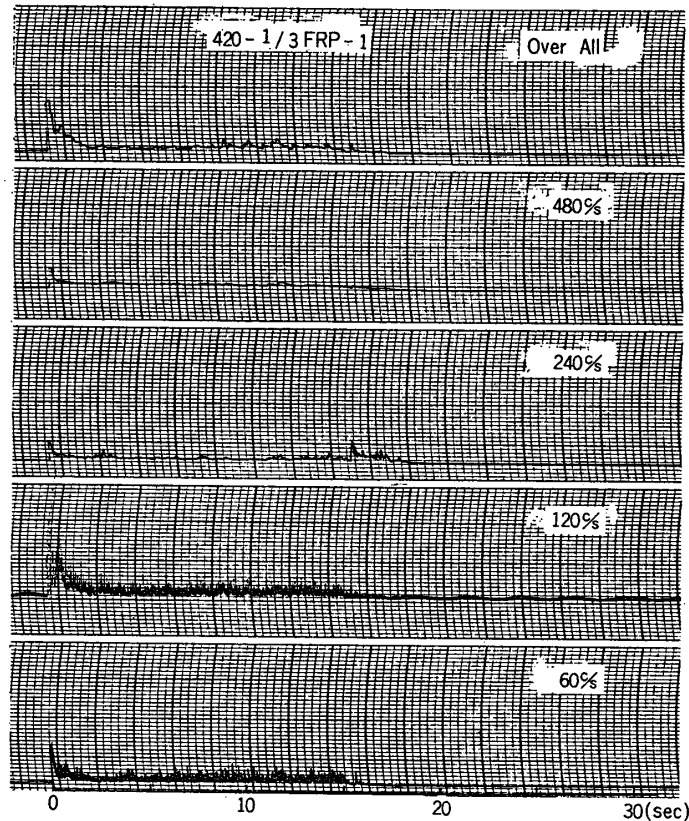


図18 420 1/3-FRP の内圧振動 (帯域分析)

以上の各論をふり返ってみると、縦波振動の基音はしばしば実測されているが、横波振動は一、二の場合を除いては観測されていない。むしろ横波振動より低周波の振動が強く出現している。これらは縦波振動の倍音とみられる。このように横波振動が観測されないのは指圧計の取付位置が、鏡板中央部でしかも導孔により、燃焼室よりかなり引込んだところに設けられていることによるものと思われる。また、各論記述中に振動の全般的な強弱にふれたが、これも、エンジンごとに指圧計取付部に至る間の障害物の状況が異なっているため、異なるエンジン間の比較は元来無理で、定性的な意味しか持ち得ない。計測自体および再生解析では同一ゲインを保持するように努めているが、取付状況を統一しない限りエンジン間の比較は困難である。

1972年6月10日 原動機部



## 参 考 文 献

- [1] 倉谷健治, 坂井卓爾, 宇宙研報告, 2, 654 (1966)
- [2] 倉谷健治, 宇宙研報告, 3, 166 (1967)
- [3] M. Barrère, et al., "Rocket Propulsion" (1960), Elsevier Publ. Co., p. 697