

ISSN 0389-4010  
UDC 621.454.2.043

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-806

ロケット用液酸ポンプの動特性の研究(その2)

志村 隆 ・ 上 條 謙二郎

1984年4月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# ロケット用液酸ポンプの動特性の研究(その2)\*

志 村 隆\*\* 上 條 謙二郎\*\*

## A Study on Dynamic Characteristics of Liquid Oxygen Pumps for Rocket Engines (2nd Report)

Takashi SHIMURA and Kenjiro KAMIJO

### ABSTRACT

Since the dynamic performance of fluid machines is closely related to various kinds of fluid system instabilities, such as the “POGO” phenomena of liquid rockets, the dynamic characteristics of cavitating inducers, pumps and hydraulic turbines have been of great interest. In the present study, transfer matrix methods, which have been successfully applied to cavitating inducers, were used in order to examine the dynamic response of a centrifugal liquid oxygen pump with an inducer.

An ultrasonic flow meter was used to measure the dynamic flow rate. A slit type perturbing valve was used to cause periodical oscillations in the pump flow.

The major results of the present study were as follows:

1. Linearity of amplitude and phase existed in most parts of the experiment under high NPSH conditions.
2. The  $Z_{11}$  component of the pump transfer matrix was determined by two independent sets of data obtained by varying the helium gas volume in a vacuum-jacketed cryogenic accumulator.
3. The test results of the  $Z_{12}$  component of the pump transfer matrix showed that dependency of  $Z_{12}$  on frequency was small, and it was concluded that a quasi-static treatment of  $Z_{12}$  is applicable on a centrifugal pump such as the one used in this study up to relatively high frequency regions.

### 第1章 ま え が き

流体機械の動的な特性は、液体ロケットでしばしば生じる POGO<sup>1)~3)</sup>と呼ばれている、機体と推進系が関係し合った自励振動のような、システムの不安定に密接にかかわっている。このため、キャビテーション状態にあるインデューサ、ポンプおよび水

力タービンなどの動特性には重大な関心が払われてきている。<sup>4)~21)</sup>しかしながら。動的な流量測定をはじめとする実験的な困難の為に未だ一般的な結果は得られていない。

前報<sup>22)</sup>では、3種のロケット用液酸ポンプ試験時に自然発生的に生じた不安定振動現象を、主にパワースペクトル解析の手法により調べ、形状、運転条件等がどのようにポンプ動特性に影響を及ぼすか見た。本報告では、現在開発の進められているH-1ロケット2段目エンジンLE-5の液体酸素ポンプに強制

\* 昭和59年2月18日受付

\*\* 角田支所

的に脈動を与え、H-1ロケットのPOGO解析に必要な液体酸素ポンプ動特性を調べた結果について述べる。

Brennen と Acosta<sup>8)</sup> は、キャビテーション状態にあるインデューサの動的な特性を解析的に研究し、その特性を次に示すような、インデューサ入口と出口の圧力および流量を関係づける4つの成分からなる伝達トリックスで表わすことを試みた。

$$\begin{pmatrix} \tilde{h}_2 - \tilde{h}_1 \\ \tilde{Q}_2 - \tilde{Q}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{h}_1 \\ \tilde{Q}_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ng と Brennen<sup>9), 12)</sup> は、キャビテーション状態にあるインデューサの動特性の実験を行い、インデューサの伝達マトリックスを決定することができた。ロケット用推進薬供給用のインデューサ付1段遠心型ポンプの動特性について考えると、インデューサの解析に用いられたキャビテーションコンプライアンス成分  $Z_{21}$  およびマスフローゲインファクター成分  $Z_{22}$  の値が利用できるものと考えられる。しかしながら、他の2つの成分である  $Z_{11}$  と  $Z_{12}$  については、インデューサの揚程がキャビテーションの発生により大きく影響されるのに比べ、遠心ポンプの揚程はインデューサに生じたキャビテーションの影響を受けにくいことから、インデューサ単体とインデューサ付遠心型ポンプではかなり性質が異なっているのではないと思われる。このため、ここではインデューサ付1段遠心型ポンプ伝達マトリックスの  $Z_{11}$  と  $Z_{12}$  成分を求めることを目的とした。

(1) に示される関係より次の式が求まる。

$$\tilde{h}_2 - \tilde{h}_1 = Z_{11} \tilde{h}_1 + Z_{12} \tilde{Q}_1 \quad (2)$$

2つの独立なデータの組、 $\tilde{h}_{1i}, \tilde{h}_{2i}, \tilde{Q}_{1i}$  ( $i=1, 2$ ) を(2)式に代入することにより、 $Z_{11}$  と  $Z_{12}$  に関する2つの方程式が得られる。これらの2つの方程式を連立させて解くことにより  $Z_{11}$  と  $Z_{12}$  が決定される。 $Z_{12}$  成分は異なる2つの方法により求めた。ひとつは前述のように連立させた式を解くことにより求めた。もう一方は、高いNPSH(正味吸込水頭)の条件下では  $Z_{11}$  成分は小さく無視できるものとし、 $\tilde{h}_2 - \tilde{h}_1 = Z_{12} \tilde{Q}_1$  の式により1組のデータから求めた。また、ポンプ回転速度および平均流量の  $Z_{12}$  成分に及ぼす影響についても調べた。

動的な流量測定は、フランスのONERAによって開発された超音波流量計を用いて行った。ポンプに対する強制的な脈動は、スリットタイプの脈動発生弁により、1~45Hzの周波数範囲で与えた。異なった位相関係を持つ圧力と流量のデータの組は、ポンプ入口側に設けた真空断熱極低温アキュムレータ内のヘリウムガス容積を変えることにより取得した。実験データの振幅と位相は、結果の信頼性を高めるため、高速フーリエ変換装置(FFT)で複数回サンプルして得た値を平均して求めた。

## 第2章 供試体と実験装置

供試ポンプは図1に示されるような概観と表1に表すような主要設計諸元を持つ液酸ターボポンプのポンプ部である。このポンプは、H-1ロケット2段目の推進系であるLE-5液酸/液水エンジンの開発研究用に製作された。そのポンプインデューサと主羽根車の主要設計諸元を表2に示した。このポンプの詳細については文献(23)を参照されたい。

実験は図2に示されるようなターボポンプ試験装置において、液体窒素をポンプ作動流体として行った。周期的な脈動は、ポンプ吐出側に配置したスリ

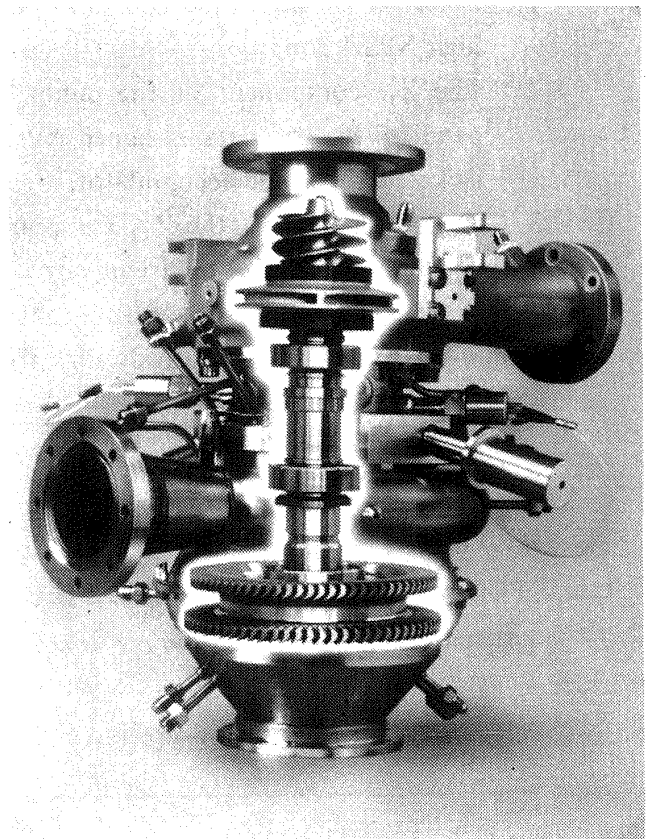


図1 液酸ターボポンプ

ット形式の脈動発生弁により与えた。この脈動発生弁は静止スリットとサーボ制御により油圧駆動される可動スリットから成っている。ポンプは任意の回転速度に自動的に保持される450KW直流電気動力

表1 液酸ターボポンプ主要設計諸元

回転速度	16,500 r.p.m.
軸動力	128 KW
ポンプ形式	インデューサ付1段遠心型
ポンプ流量	17.2 l/s
ポンプ揚程	452 m
NPSH	7.5 m
ポンプ効率	65.0 %
タービン形式	1段2列速度複式衝動型
タービン入口圧	0.49 MP <sub>a</sub> abs.
タービン出口圧	0.22 MP <sub>a</sub> abs.
タービン効率	33.0 %

表2 インデューサ・主羽根車主要設計諸元

	インデューサ	主羽根車
入口流量係数	0.1	0.151
出口流量係数	0.121	0.100
圧力係数	0.16	0.48
入口角度(度)	10.5	14.3
出口角度(度)	12.75	25.0
羽根数	3	6
外径(mm)	65.3	111.2

計により駆動された。直流電気動力計回転部の慣性モーメントは非常に大きいため、ポンプに脈動が与えられている時でも回転速度の変動は殆ど測定されなかった。ポンプの平均流量は、ポンプ吐出側に置かれたタービン式流量計により測定した。動的な流量はポンプ吸入側において、大変に早い応答速度を持つ超音波流量計により行った。その超音波流量計の動的流量測定性能については、フランスONERAによってピストン形式の動的流量校正装置<sup>24)</sup>により確認されている。定常流量の校正は、校正済のタービン流量計出力と超音波流量計出力を比較することにより実験毎に行った。動的圧力の測定はフラッシュマウントした結晶型の圧力センサーおよび歪ゲージ型の圧力センサーにより、ポンプ入口側についてはポンプ入口フランジから170mmおよび836mm上流、ポンプ出口側についてはポンプ出口フランジから265mmおよび1001mm下流で行った。ポンプフランジから測定部までの部分は、パイプ伝達マトリックスにより補正し、ポンプ出入口フランジ間の伝達マトリックスを結果として求めた。図3に測定した流量と圧力の例を示す。

### 第3章 実験結果と考察

#### 3.1 脈動発生弁特性

脈動発生弁動特性の1例を図4に示す。脈動発生弁スリット上流と下流の圧力差DPおよび変動スリ

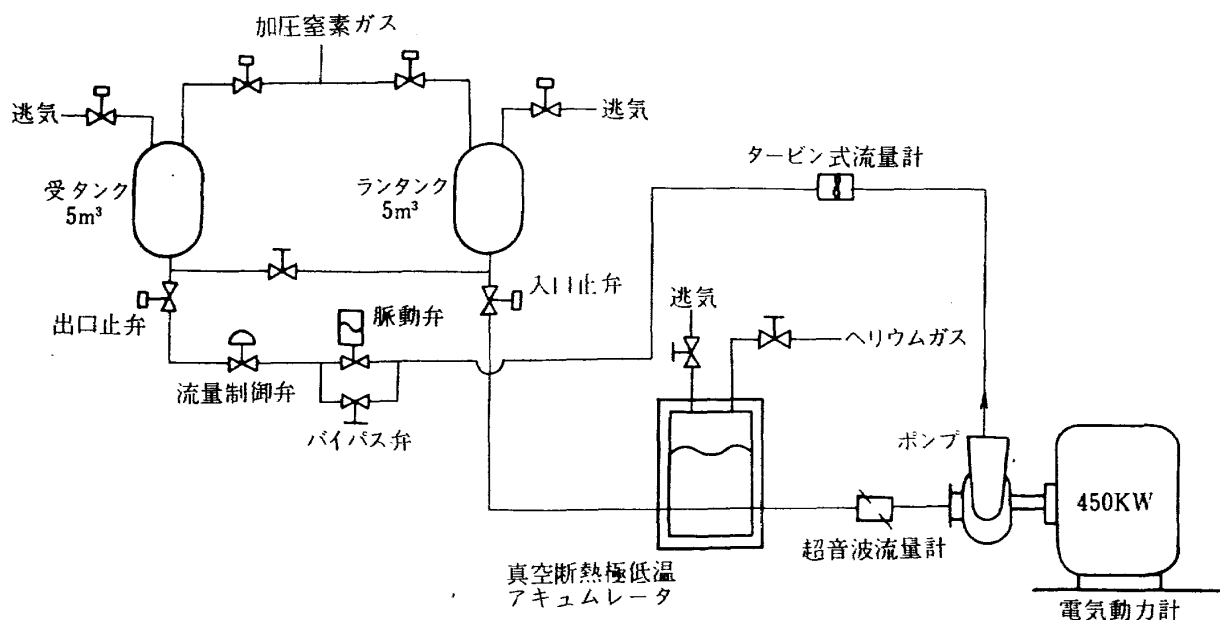


図2 実験装置系統図

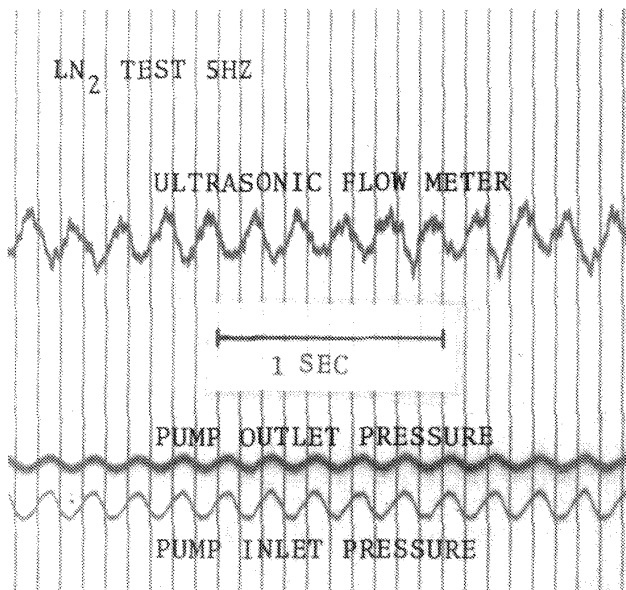


図3 アナログデータの例

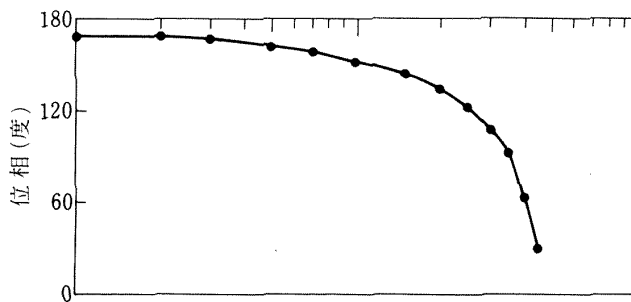
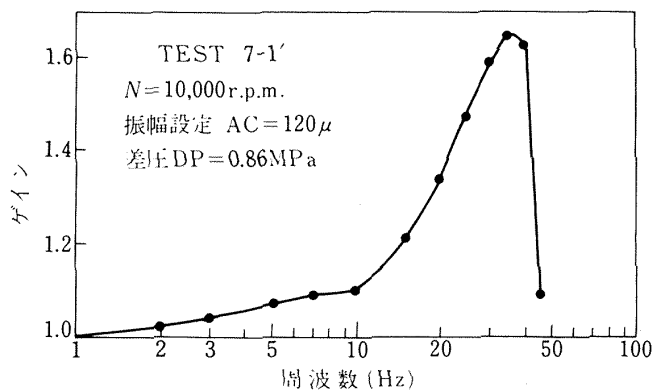


図4 脈動弁動特性

ット振幅設定ACは、脈動発生弁動特性に殆んど影響を及ぼさなかった。図4において、上のグラフ縦軸は、変動スリット実振幅と脈動指令信号波形振幅の比をニア表示したものをゲインとして表わしている。基準になる値として、1Hzの時の比を1としている。図に示されるように、ゲインは45Hzまで1以上となっており、この脈動発生弁は満足すべき性能を示すことが明らかとなった。

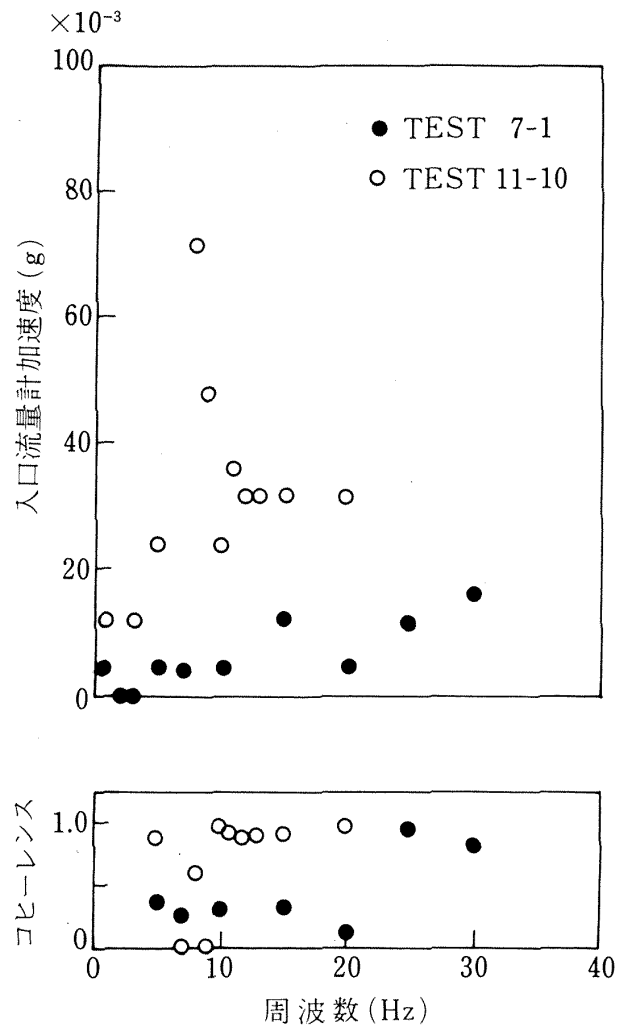


図5 入口流量計加速度

### 3.2 流量計加速度

流量計の振動は動的な流量測定に影響を与えるものと考えられる。この影響を調べる為に、流量計の流れ方向の加速度を測定した。図5に例として、ポンプ入口流量計加速度の測定結果を示す。試験7-1はポンプ回転速度10,000r.p.m.でNPSHを高くした場合、試験11-10は15,000r.p.m.でNPSHを低くした場合である。試験11-10の場合にはポンプ入口の共振周波数は7Hzで、この周波数における流量計加速度は比較的大きかったが、加速度と脈動指令信号との間のコヒーレンスは小さかった。試験結果から、それぞれの周波数における加速度の振幅は非常に小さいため、流量計加速度の動的流量測定に及ぼす影響は無視できるものと結論された。

### 3.3 直線性

図6と図7は、高いポンプ入口NPSHの条件下

で脈動の振幅を変えた時に線形性が存在するかどうか調べた結果を示している。図6はポンプ流量変動振幅とポンプ揚程変動振幅の関係を示している。この図に示されるように、試験を行った殆どの範囲において振幅の線形関係が存在した。なお、図示した

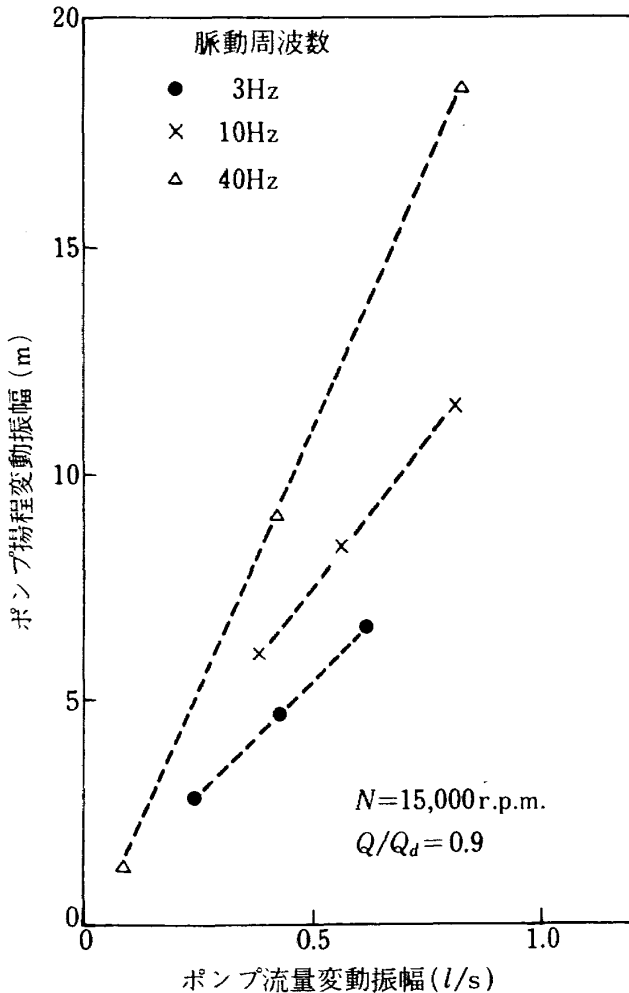


図6 振幅の線形性

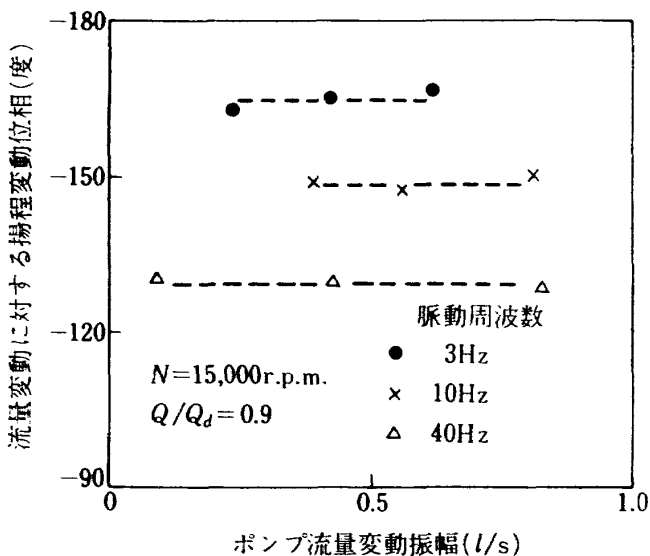


図7 位相の線形性

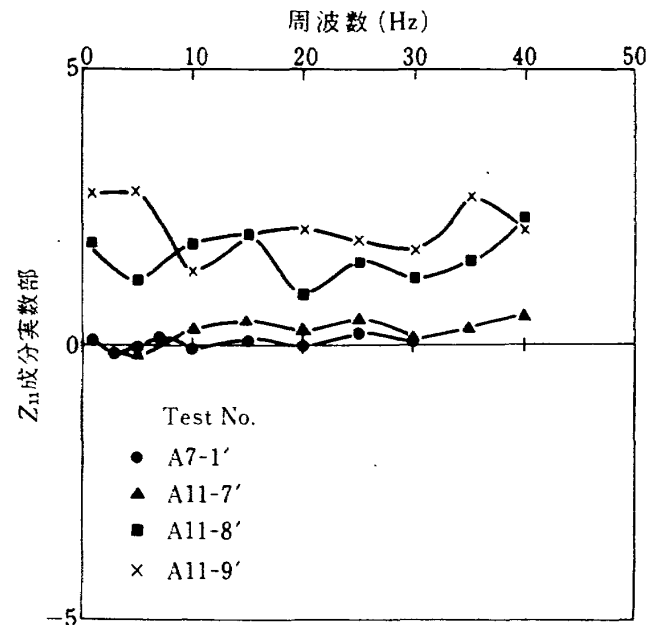
試験の平均流量は約14 l/sである。

図7はポンプ流量変動振幅と、ポンプ流量変動に対するポンプ揚程変動の位相を示したものである。試験結果は、脈動周波数一定とするとポンプ流量変動とポンプ揚程変動の間の位相関係は変動振幅が変わっても保持され、位相の線形性が成立つことを示している。また、図に示されるように周波数が増加するとポンプ内部のイナータンスに起因する成分が増大する為に、位相は-90度に漸近している。

### 3.4 ポンプ伝達マトリックス $Z_{11}$ 成分

ポンプ伝達マトリックスの  $Z_{11}$  成分に関する実験結果を図8および図9に示す。これらの結果はポンプ回転速度が10,000 r.p.m. および15,000 r.p.m. の場合について得られたものである。各試験におけるポンプ運転条件は表3に示されている。図8は  $Z_{11}$  成分の実数部を示している。ポンプ入口NPSHが高い場合、即ちキャビテーション係数が大きい場合には  $Z_{11}$  成分実数部の値は大変に小さい。ポンプ入口NPSHが低下するに従って実数部の値は増加している。

ここで、ポンプ伝達マトリックスのモデルを考えてみる。ポンプ動特性にキャビテーションコンプライアンス  $C_b$ 、マスフローゲインファクター  $M_b$ 、ポンプダイナミックゲインファクター  $\mu$ 、ポンプレジスタンス  $R$ 、ポンプイナータンス  $L$  が関与している


 図8  $Z_{11}$  成分の実数部

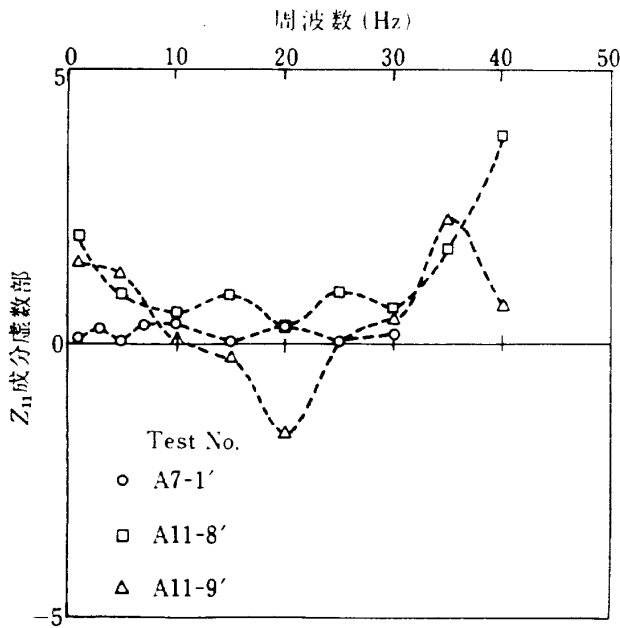
図9  $Z_{11}$  成分の虚数部

表3 ポンプ運転条件

Test No.	回転速度 r.p.m.	ポンプ流量 l/s	キャビテーション 係数 K
A7-1'	10,000	10.5	0.607
A11-7'	15,000	14.5	0.184
A11-8'	15,000	14.6	0.145
A11-9'	15,000	14.1	0.109
A7-6	5,000	5.1	2.747
A7-5	7,500	7.7	1.122
A7-7	12,500	13.0	0.414
A7-4'	15,000	15.6	0.254
A10-1'	10,000	8.4	0.734
A10-2	10,000	11.5	0.574

ものとする、ポンプ伝達マトリックス各成分は次のように記述される。<sup>6), 8), 20), 21)</sup>

$$Z_{11} = \mu + j2\pi fRC_b - (2\pi f)^2 LC_b \quad (3)$$

$$Z_{12} = -R + j2\pi f(RM_b - L) - (2\pi f)^2 LM_b \quad (4)$$

$$Z_{21} = -j2\pi fC_b \quad (5)$$

$$Z_{22} = -j2\pi fM_b \quad (6)$$

ここで、

$$C_b = -\frac{\partial \bar{V}_c}{\partial \bar{h}_1} \quad (7)$$

$$M_b = -\frac{\partial \bar{V}_c}{\partial \bar{Q}_1} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\partial (\bar{h}_2 - \bar{h}_1)}{\partial \bar{h}_1} \quad (9)$$

式(3)より  $\mu$ ,  $L$ ,  $C_b$  一定として周波数  $f$  を増加させた場合には、 $Z_{11}$  成分の実数部は小さくなることが期待される。しかしながら、図8における  $Z_{11}$  成分の実数部は周波数の増加に従って減少していない。考えられるひとつの理由としては、ポンプ入口圧力変動振幅の差があげられる。今回の実験では、脈動周波数の増加に伴ってポンプ入口圧力変動振幅が大きくなっている。この為、ポンプ入口 NPSH の変動範囲が広がってポンプダイナミックゲイン  $\mu$  が大きい領域にまで至ったものと考えられる。

図9は  $Z_{11}$  成分の虚数部を示している。 $Z_{11}$  成分の実数部と同様に、NPSHが高い場合には  $Z_{11}$  成分の虚数部の値も小さくなっている。NPSHが低い場合には、脈動周波数の高い領域において  $Z_{11}$  成分の虚数部が周波数の増加に伴って増大する傾向が見られた。

### 3.5 ポンプ伝達マトリックス $Z_{12}$ 成分

図10は、 $Z_{12}$  成分を異なった方法で求めた2つの結果を比較して示したものである。ひとつの結果は、互いに位相関係の異なった独立な2組のデータから導かれた2つの式、 $\tilde{h}_{2i} - \tilde{h}_{1i} = Z_{11}\tilde{h}_{1i} + Z_{12}\tilde{Q}_{1i}$  ( $i = 1, 2$ )、を連立させて解いたものである。もうひとつの結果は、NPSHが高い条件では  $Z_{11}$  成分が小さく無視できるものと仮定し、 $\tilde{h}_2 - \tilde{h}_1 = Z_{12}\tilde{Q}_1$  の関係に1組のデータを代入して求めた。即ち、 $Z_{12} = (\tilde{h}_2 - \tilde{h}_1)/\tilde{Q}_1$  として求めた。ここで用いたような遠心型ポンプでは、ポンプ揚程の殆んどが主羽根車で出される。従って、ポンプ入口圧変動がポンプ揚程変動に及ぼす効果が無視できるという仮定は、少なくとも低い周波数領域においては比較的低い NPSH の条件下でも成立するように考えられる。図10に示されるように、仮定を設けて1組のデータから求めた結果と、仮定を設けずに2組のデータから求めた結果の差は大変に小さかった。

ポンプ回転速度の  $Z_{12}$  成分虚数部および実数部に及ぼす効果を図11と図12に示す。図11と12に示した各試験のポンプ運転条件は表3に示されている。 $Z_{12}$  成分のそれぞれの値は1組のデータから求めら

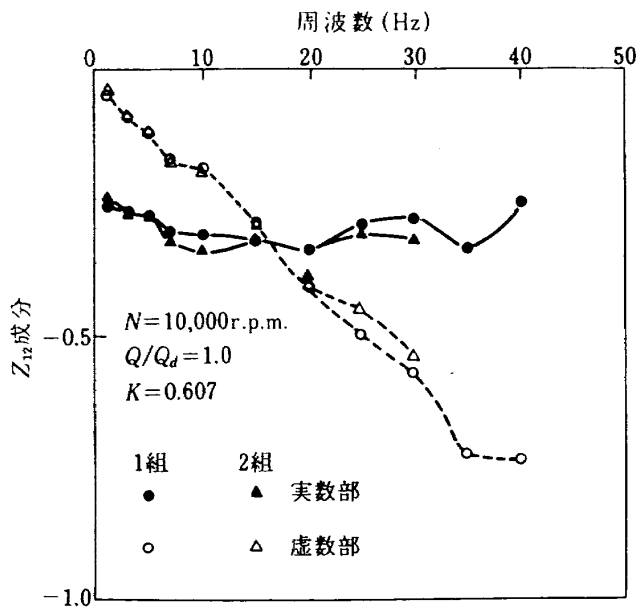


図10  $Z_{12}$  成分結果比較

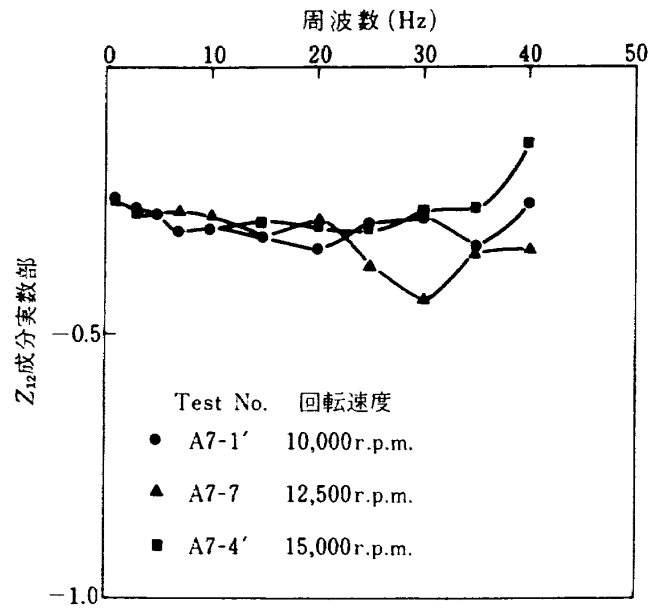


図12  $Z_{12}$  成分実数部に対する回転数の影響

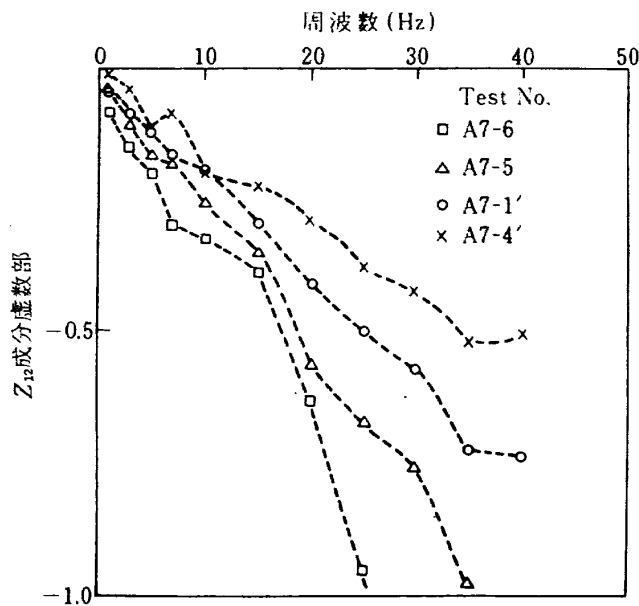


図11  $Z_{12}$  成分虚数部に対する回転数の影響

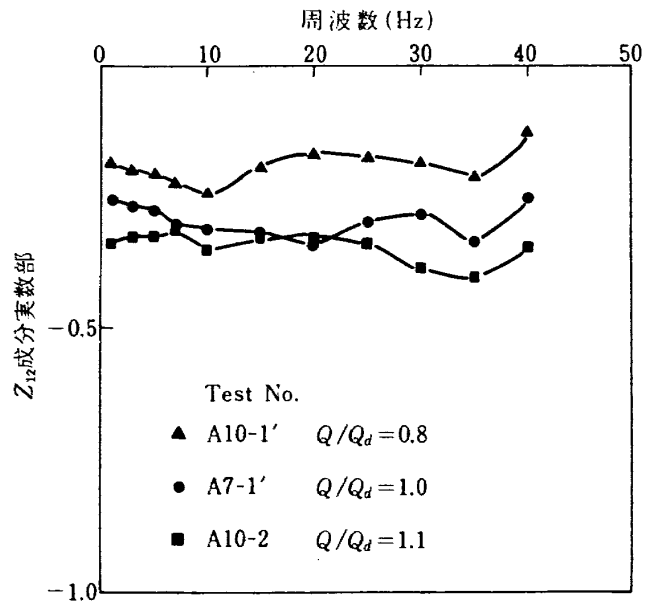


図13  $Z_{12}$  成分実数部に対する平均流量の影響

れた。

図11に示されるように、ポンプ回転速度一定とすると $Z_{12}$ 成分の虚数部は脈動周波数と共に殆ど直線的に変化している。ポンプ揚程変動は、主羽根車周速ヘッドの2倍に相当する $U_t^2/g$ で割って無次元化している。このため、各回転速度に対応する $Z_{12}$ 成分虚数部の傾きは、ポンプ回転速度が低下するに従ってきつくなっている。しかしながら、これらの傾きから、単純化された関係式 $Z_{12} = -R - j2\pi fL$ を用いて推定したポンプ内イナータンス $L$ の値はそれぞれ殆ど同じであった。

図12は、ポンプ回転速度の $Z_{12}$ 成分実数部に及ぼす効果を示している。脈動周波数が20Hz以下の領域では、回転速度が異なっても $Z_{12}$ 成分実数部の値は殆ど同じであった。

ポンプ平均流量の $Z_{12}$ 成分実数部および虚数部に及ぼす効果を図13と図14に示す。図13と14に示した各試験のポンプ運転条件を表3に示す。図13に示されるように、ポンプ平均流量の減少に伴って $Z_{12}$ 成分実数部が小さくなっている。これはポンプ揚程曲線の傾きの違いによるものと考えられる。ここで用いたような遠心型のポンプでは、設計点より



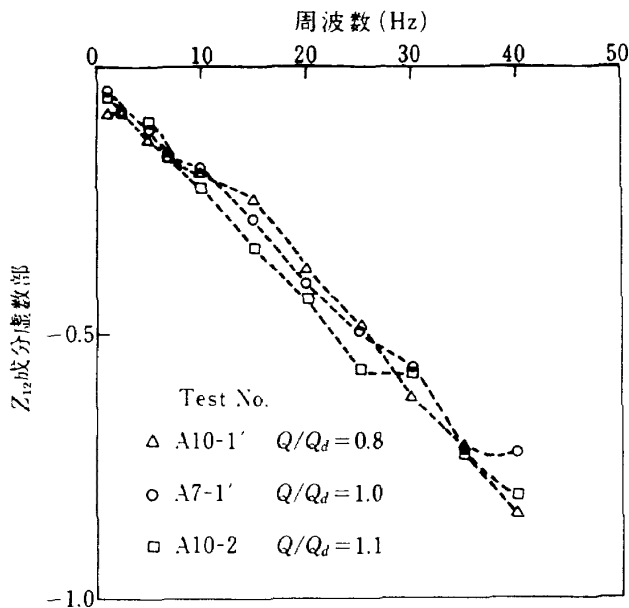


図 14  $Z_{12}$  成分虚数部に対する平均流量の影響

も低い流量域では揚程曲線がかなり平坦になっている。その為、揚程曲線の傾きに担当する  $-R$  の値が低流量域で小さくなっている。図 13 で、脈動周波数が低い領域においては  $Z_{12}$  成分実数部の値は、定常試験から得られるポンプ揚程曲線の傾き  $-R$  と殆ど一致した。

図 14 は、ポンプ平均流量の  $Z_{12}$  成分虚数部に及ぼす効果について示したものである。脈動周波数全域にわたって各流量に対する虚数部の値に大きな差は見られなかった。このことから、ポンプ平均流量の  $Z_{12}$  成分虚数部に対する効果は小さいものと考えられた。

#### 第 4 章 む す び

本報告では極低温液体用のインデューサ付 1 段遠心型ポンプの動特性に関する実験結果について示した。特にポンプ伝達マトリックスの  $Z_{11}$  成分と  $Z_{12}$  成分について調べることを目的とし、これら 2 つの成分を異なった位相関係を持つ 2 組の圧力と流量のデータから求めた。ポンプに対する脈動流は、スリット形式の脈動発生弁により与えた。圧力と流量の独立なデータの組は、ポンプ吸入側に配置した真空断熱極低温アキュムレータ内のヘリウムガス容積を変えることにより得た。動的流量の測定はフランス ONERA によって開発された超音波流量計を用いて行った。このような手法により独立なデータの組

を得ることができ、ポンプ伝達マトリックスの  $Z_{11}$  成分と  $Z_{12}$  成分を求めることができた。結果をまとめると次のようである。

- (1) 振幅の線形性および位相の線形性が、高い NPSH の条件下で、殆どの試験範囲で存在した。
- (2)  $Z_{11}$  成分の実数部、虚数部ともに、高い NPSH のもとで非常に小さかった。実数部はポンプ入口 NPSH の減少に伴って増加したが、脈動周波数による変化は小さかった。虚数部の値は高い周波数領域において、周波数の増加に伴って増大する傾向が見られた。
- (3)  $Z_{12}$  成分は、 $Z_{11}$  成分が無視できるという仮定の妥当性を調べる為に異なる 2 つの方法により求めた。2 つの結果の差は小さく、用いられた仮定は妥当であるものと判断された。 $Z_{12}$  成分虚数部の値は周波数に伴ってほぼ直線的に増加し、各回転速度に対するデータから推定されたポンプイナータンスの値はそれぞれほぼ同じ値であった。ポンプ平均流量の  $Z_{12}$  成分虚数部に対する影響は小さかった。実験結果は  $Z_{12}$  成分の脈動周波数に対する依存性が小さいことを示した。従って、ここで用いたような遠心ポンプ伝達マトリックス  $Z_{12}$  成分については、比較的高い周波数領域まで準静的な取扱いが可能なものと考えられた。

以上の結果は、現在我国で開発の進められている H-1 ロケットの POGO 解析に用いられている。

終りに、本研究を行うにあたり御助力を頂いた三菱重工業 (株) の方々に心から感謝致します。また、本研究を進めるにあたり、航技研角田支所の冠昭夫ロケットエンジンシステム研究室長に御助力を頂き、ロケット流体機器研究室の方々に実験に御協力頂いたことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) Rubin, S. ; Longitudinal Instability of Liquid Rockets due to Propulsion Feedback (POGO), Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.3, No.8, 1966, pp.1188-1195.
- 2) NASA ; Prevention of Coupled Structure-Propulsion Instability (POGO), NASA

- SP-8055, 1970.
- 3) Rubin, S., Wagner, R. G., and Rayne, J. G. ; POGO Suppressin on Space Shuttle Eearly Studies, NASA CR-2210, 1973.
- 4) Acosta, A. J. ; An Experimental Study of Cavitating Inducers, Second Symposium on Naval Hydrodynamics, 1958, pp. 533-557.
- 5) Brennen, C. and Acosta A. J. ; Theoretical Quasi-Static Analyses of Cavitation Compliance in Turbopumps, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.10, No.3, 1973, pp.175-180.
- 6) Young W. E., et al ; Study of Cavitating Inducer Instabilities Final Report, NASA CR-123939, 1973.
- 7) Natanzon, M. S., et al ; Experimental Investigation of Cavitation-Induced Oscillations of Helical Inducers, Fluid Mechanics, Soviet Research, Vol.3, No.1, 1974, pp.38-45.
- 8) Brennen, C. and Acosta, A. J. ; The Dynamic Transfer Function for a Cavitating Inducer, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.98, 1976, pp.182-191.
- 9) Ng, S. L. and Brennen, C. ; Experiments on Dynamic Behaviour of Cavitating Pumps, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.100, 1978, pp.166-176.
- 10) Brennen, C. ; Bubbly Flow Model for the Dynamic Characteristics of Cavitating Pumps, Journal of Fluids Mechanics, Vol.89, Part 2, 1978, pp.233-240.
- 11) Brennen, C. and Braisted, D. M. ; Stability of Hydraulic Systems with Focus on Cavitating Pumps, IAHR and AIHR Symposium 1980 Tokyo, 1980, pp.255-265.
- 12) Brennen, C., et al ; Scale Effects in the Dynamic Transfer Functions for Cavita-ting Inducers, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.104, 1982, pp.428-433.
- 13) 大橋 ; ターボポンプの動特性に関する研究, 日本機械学会論文集, 第 33 巻, 255 号, 1967, pp.1789-1799.
- 14) Anderson, D. A., Blade, R. J., and Steven, W. ; Response of a Radial-Bladed Centrifugal Pump to Sinusoidal Disturbances for Non-Cavitating Flow, NASA TN D-6556, 1971.
- 15) Ghahremani, F. G. and Rubin, S. ; Empirical Evaluation of Pump Inlet Compliance Final Report, No. ATR-73(7257)-I, The Aerospace Corporation, El Segundo, Calif., 1972.
- 16) Knapp, R. T. ; Complete Characteristics of Centifugal Pump and Their Use in the Prediction of Transient Behavior, Trans. ASME, 1973, pp.683-689.
- 17) Fanelli, M. ; Further Considerations on the Dynamic Behavior of Hydraulic Turbo-Machinery, Water Power, 1972, pp.208-222.
- 18) Kamijo, K., et al ; An Experimental Investigation of Cavitating Inducer Instability, ASME paper, 77-WA/FE-14.
- 19) Kamijo, K., et al ; Visual Observation of Cavitating Inducer Instability, NAL TR-598T, 1980.
- 20) 上條 ; インデューサ付ポンプの低NPSHならびに低流量域における問題, ターボ機械第 8 巻第 9 号, 1980, pp.37-43.
- 21) Watanabe, T., Kawata, Y. ; Research on the Oscillation in Cavitating Inducer, Proceedings Vol.2, Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, 1978, pp.265-277.
- 22) 志村, 上條 ; ロケット用液酸ポンプの動特性の研究 (その 1), 航空宇宙技術研究所報告 TR - 725, 1982.
- 23) 上條, 他 6 名 ; 液酸・液水ロケットエンジン用液酸ターボポンプの試作研究, 航空宇宙技

術研究所報告 TR - 588, 1979.

- 24) ONERA ; Calibration of Ultrasonic Flowmeters, ONERA Activities, 1975, pp.88-89.

添 字

- 1 : ポンプ入口  
2 : ポンプ出口  
 $d$  : 設計点  
 $ij$  : 成分番号  
 $p$  : ポンプ  
~ : 変動量  
- : 平均値

## 記号表

- $C_b$  : キャビテーションコンプライアンス, ( $m^2$ )  
 $f$  : 周波数, (Hz)  
 $g$  : 重力加速度, ( $m/s^2$ )  
 $h$  : 無次元ヘッド, ヘッド/ $(U_t^2/g)$   
 $H$  : ポンプ揚程, (m)  
 $j$  : 虚数単位  
 $L$  : イナータンス, ( $s^2/m^2$ )  
 $M_b$  : マスフローゲインファクター, (s)  
 $N$  : 回転速度, (r.p.m.)  
 $Q$  : 流量, ( $l/s$ )  
変動流量に対しては無次元流量,  $Q/((N/N_d) \times Q_d)$   
 $R$  : レジスタンス, ( $s/m^2$ )  
 $U_t$  : 主羽根車周速, (m/s)  
 $V_c$  : キャビティ容積, ( $m^3$ )  
 $Z_{ij}$  : ポンプ伝達マトリックス成分  
 $\mu$  : ポンプダイナミックゲインファクター

---

## 航空宇宙技術研究所報告 806号

昭和59年4月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社三興印刷  
東京都新宿区信濃町12三河ビル

---

Printed in Japan