

ノズル主流がない場合のLITVCの横推力特性

長 友 信 人・橋 本 保 成

Characteristics of a Secondary Flow Injection Type
Thrust Vector Control (SITVC) Device without Main Jet Flow in Vacuum
By
Makoto NAGATOMO and Yasunari HASHIMOTO

Abstract: An experimental study was conducted to know the characteristic of a SITVC device in abnormal operating condition where secondary flow is injected without the main nozzle flow. The result was applied to determine events sequence of L-4SC test vehicle for SITVC developed by ISAS.

1. 序 論

二次流体噴射によるTVC方式は二次流体噴射量をエンジン燃焼時にセットしてあるが、この設計点からはずれる燃焼末期において設計時と異った方向へ横推力が発生することがある。

その一つは大気中で燃焼中に内圧が低くなって、ノズル内部に衝撃波が入ってくるときで真空中ではこのようなことは発生しない。その二はエンジン燃焼後に二次流体のみによる横推力が発生する場合である。

ここでは、後者についてL-4SC-1号機の2段目の飛行シーケンス設定のために、1/2スケールモデルについて実測を行った結果をまとめる。

2. 実 験 条 件

2.1 実験環境

大気中

真空中（姿勢制御エンジン試験装置）

2.2 実験装置

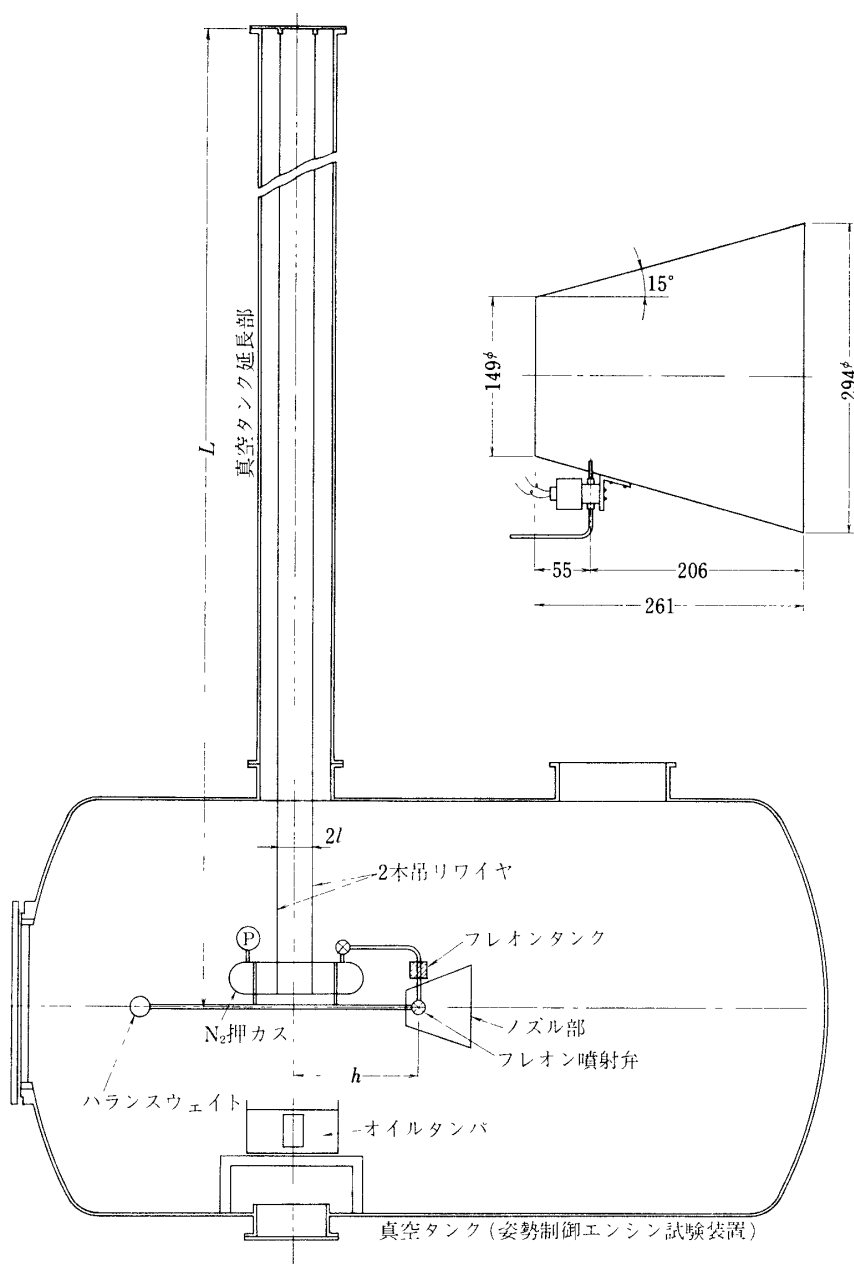
① 735 B₂ ノズル部 1/2 モデル

第1図にモデルの寸法を示す。

ノズルはアルミ板 厚さ 1 mm

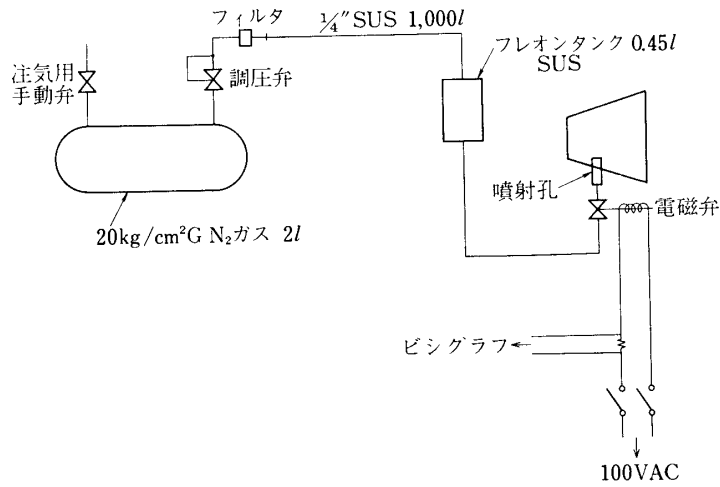
② 推力測定法

- ・二本吊り，バリスティック法による回転角測定。
- ・第1図は真空タンク内にセットしたものを示す。

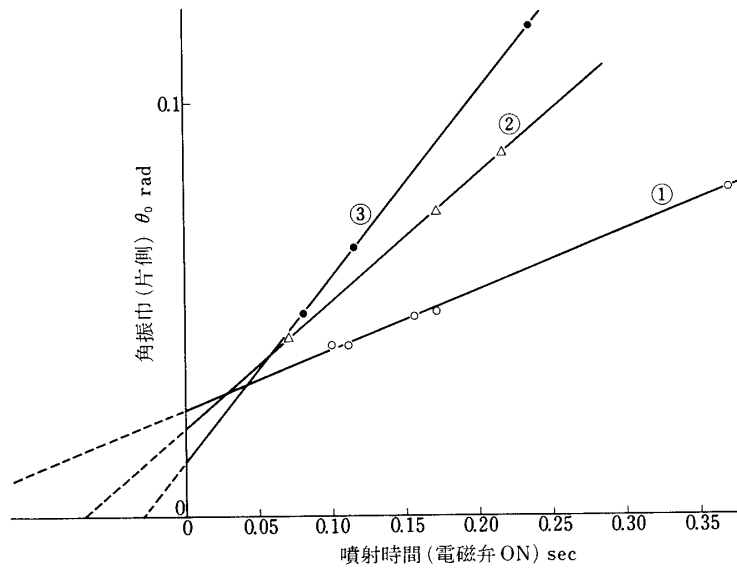


第1図 ノズル部拡大図

- 大気圧下で行ったものにはオイルダンパーがない。
 - 二本吊りの変位測定はねじれ角を横に出た棒の位置から読みとる。したがって、推力による前後方向の運動が連成される。
- ③ フレオン供給系
- 第2図に示す。
 - 流量はセット圧によって一定であると見なし、別に電磁弁ONの時間を記録してフ



第2図 フレオン供給系



第3図 圧力-流量特性

- レオン流量を求める.
- 第3図が圧力対流量の実測値である.

3. 実験データ

3.1 噴射ポート径

実際の燃焼末期の状態では

フレオン押圧は 8 kg/cm^2

流量は $500 \sim 600 \text{ g/sec}$

である。モデルのノズルの寸法は1/2としてあるが、有効径はこれよりやや小さい

3.2 フレオン押圧

押圧は大気、真空各2点を取り噴射壁の影響をみる。

セット圧力は下記の通り、単位 $\text{kg/cm}^2 \text{G}$ (真空中のものは大気圧下でセットした値である。減圧弁の構造から真空中では噴射圧に近い値となる)

大気中	5.5	10.5
真空中	2.0	10.0

3.3 横推力測定

フレオンを0.1~0.5 sec 供給して装置全体の振動巾を測定する。計算方法は下記に示す。

i) 計算方法

装置の計算が M 、慣性モーメント I で重心まわりに運動するものとして二本吊りの振動系を考える。記号は第1図にしたがう。

フレオンを短時間 Δt (sec) 噴射して、その間 F の力が発生したとすると、ふれ角 θ について角運動量は次式で表わされる。

$$I\dot{\theta} = F \cdot h \cdot \Delta t \quad (1)$$

減衰が無視できれば、装置の回転エネルギーが位置のエネルギーに等しいから、振巾 θ として

$$\frac{1}{2} I\theta^2 = \frac{1}{2} Mg \frac{l^2 \theta^2}{L} \quad (2)$$

I は自由振動の周期 T より、

$$I = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{Mg \cdot l^2}{L} \quad (3)$$

(1)(2)(3) より、

$$F = \left(\frac{Mg \cdot T \cdot l^2}{2\pi h l} \right) \frac{\theta}{\Delta t}$$

これより、 θ と Δt を測定して F を求める。諸数値は表1に示す。

ii) 測定結果

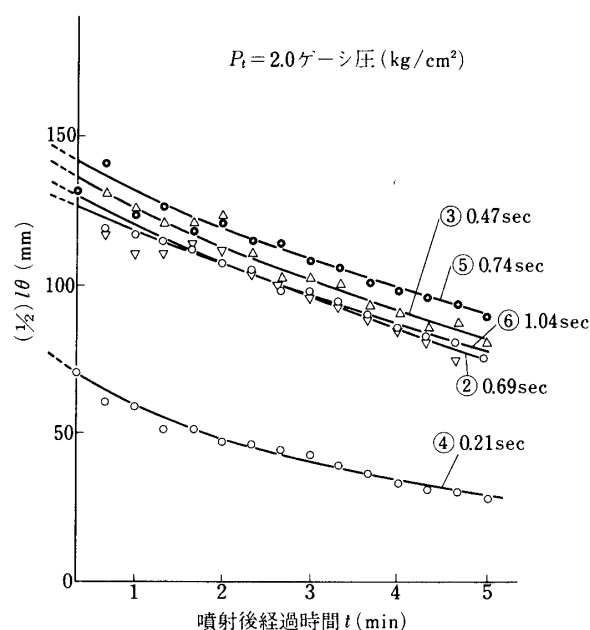
振巾および噴射時間の実測値を第4図に示す。 $l\theta$ の値は各時間振巾曲線の初期の値をとった。

第5図は第4図にもとづいて噴射時間のフレオン量の関係を求めたものである。△印は押圧 $10 \text{kg/cm}^2 \text{G}$ のもの。◎印は $2 \text{kg/cm}^2 \text{G}$ のものである。

最終データは流量 - 横推力に換算して、第6図に示す。ここには真空中のデータのみ示されている。大気中のものは微少であるので誤差も大きいと思われるが、最終データにこれを示す

表 1

	大 気 用	真 空 用
T (sec)	14.0	18.8
Mg (kg)	14.4	26.2 (フロンなし)
L (m)	5.25	5.7
$2l$ (m)	0.13	0.13
h (m)	0.490	0.470
F	$0.81 \cdot l\theta/\Delta t$	$1.9 \cdot l\theta/\Delta t$



第4図 その1

4. 検 討

4.1 予想される現象

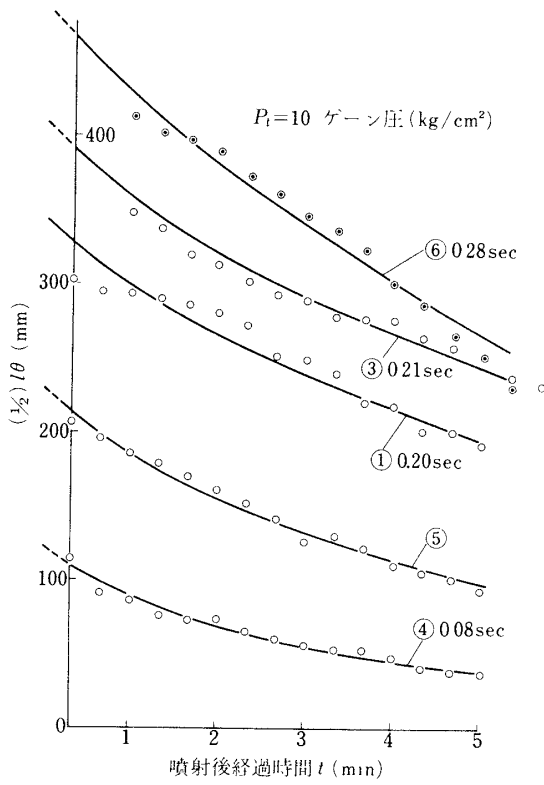
予想としては、フロン噴射口の反対側の壁による運動量反射の影響の方がフロン噴射より大きく、力として作用するため、正常なTVCの F_S とは逆になる。

4.2 実験方法と制約条件

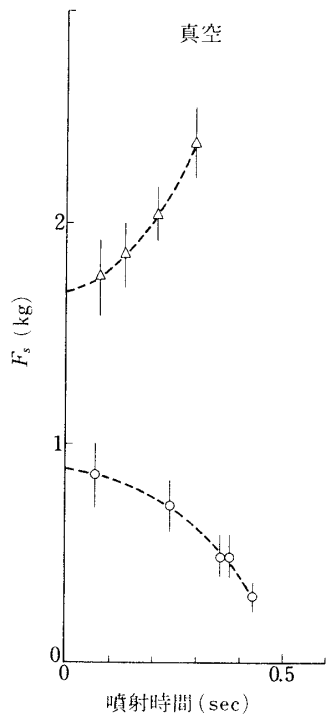
限られた空間の真空タンク内では噴射されたフロンがタンク内を循環して、試験体の外側からの力が作用することが予想される。

このありさまは、第5図において噴射時間が長くなると横推力が変化してくることにあらわれていると思われる。

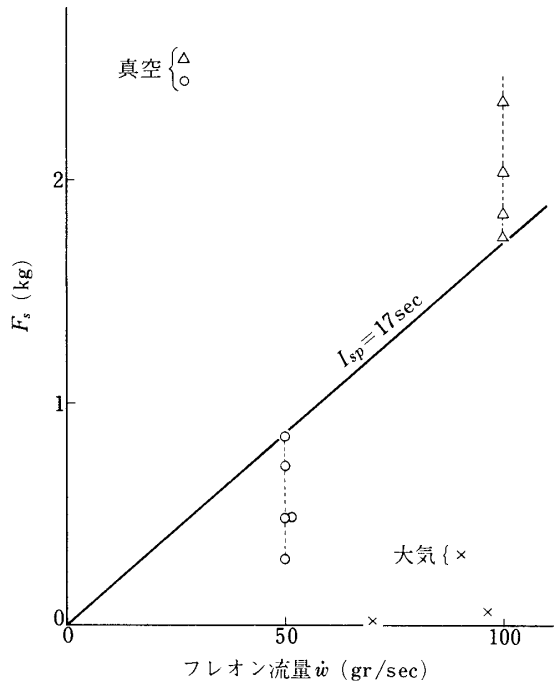
F_S の比推力を推定するため第6図のように、横軸に流量(押圧と等価)をとって、第5図の F_S の値をプロットすると $t = 0$ の極限值については一直線にのり、このとき、この勾配は



第4図 その2



第5図



第6図

比推力を表わしているのので、 $I_{SP} = 17 \text{ sec}$ で一定となる。この点からも真空タンクの大きさの影響が流量が大きくなるとともに顕著になってくるといえるように思えるが、実際に直線になるかどうかは、これだけのデータでは断定できないだろう。

4.3 実験結果と実機への適用

大気と真空の比較は第6図に示す通り歴然たるものがある。大気圧下では $I_{SP} \div 1 \text{ sec}$ にすぎない。このことから、大気中ではフレオンは液として作用しており、真空中では対向するノズル壁で気化していると推測される。実際のノズルでは温度が高いため、フレオンはより高温ガスになり、横推力はもっと大きくなるであろう。

5. 結 論

二次気体噴射方式による推力方向制御装置において、モーター主流がない場合、二次流体のみの噴射によって発生する横推力を予想するために模型実験を行い、次のような点が明らかにされた。

1. 二次流体のみ噴射すると、正常作動時と逆方向に横推力が生じる。
2. その大きさはフレオンを噴射した場合、 I_{SP} 換算で17 sec以上である。
3. この値は実機ではノズル壁温度が高いためにより大きくなるだろう。

したがって、実際のロケットでは主モーター点火前および燃焼後に噴射させた場合、制御系としては不安定状態になることを考慮してシーケンスを決める等の対策をたてる必要がある。

1975年12月20日 新設部(工学)

附 録

K-10-8 CNJの真空テスト

概 要

K-10-8用N₂ガスジェットの推力は

$$\text{ピッチ・ヨー} = 129 \text{ gr/1 コ}$$

$$\text{ロール} = 19 \text{ gr/1 コ}$$

と定められた。また、大気中で測定するときは

$$\text{ピッチ・ヨー} = 100 \text{ gr} \pm 10 \text{ gr}$$

$$\text{ロール} = 15 \text{ gr} \pm 3 \text{ gr}$$

という目安を与えたが、スロート径が小さくなるため、粘性の効果が大きくなり、ジェット設計上の理論式が成り立たなくなるおそれがある。また、ピッチ・ヨーエンジンでは組立ての都合上、ノズル部を機体壁より内側に入れるが、この際、機体壁にあける穴の大きさを検討する必要がある。

以上の理由でピッチ・ヨー各2種類の大きさのものを真空中で推力測定を行った。この結果、適していると判断されるのはロールはスロート径が0.560φ/0.574φ (No.2)で、ピッチはスロート径が1.488φ (No.3)であった。

実 験 方 法

1) ガスジェットは420φのダミー胴体に取り付けて第1図のように真空タンク内にセットする。

二本吊りのねじり方向の運動をロールジェットにより、またブランコ運動をピッチ・ヨージェットにより与え、おのおのガルバノメータの光を記録して解析することにする。

1-i) ロール運動についてはトルクをインパルスとみなして、振動のふれ巾より力積を求め、作動時間を別に記録して力を求めた。これから①ローラー対のトルク、②ローラー対の時間おくれが求められる。

1-ii) ブランコ運動は1/4周期の変位から直接、力の大きさを測定した。

2) ガスの供給系は第2図に示す。電磁弁はEckel DC 28Vで作動するもので、Sig traceからON-OFF時が読みとれる。調圧弁は市販の減圧弁で6.7 kg/cm²Gにセットし、流れているときは6.0 kg/cm²位にさがる。各ノズルの寸法は第1表に示す。

ロールジェットの推力計測

ロールとピッチ・ヨーは異った方法で推力計測を行っている。まずロールから説明すると、装置全体のロールの運動方程式は次のように表わされる。

$$I\ddot{\theta} + \mu\dot{\theta} + k\theta = T \quad (1)$$

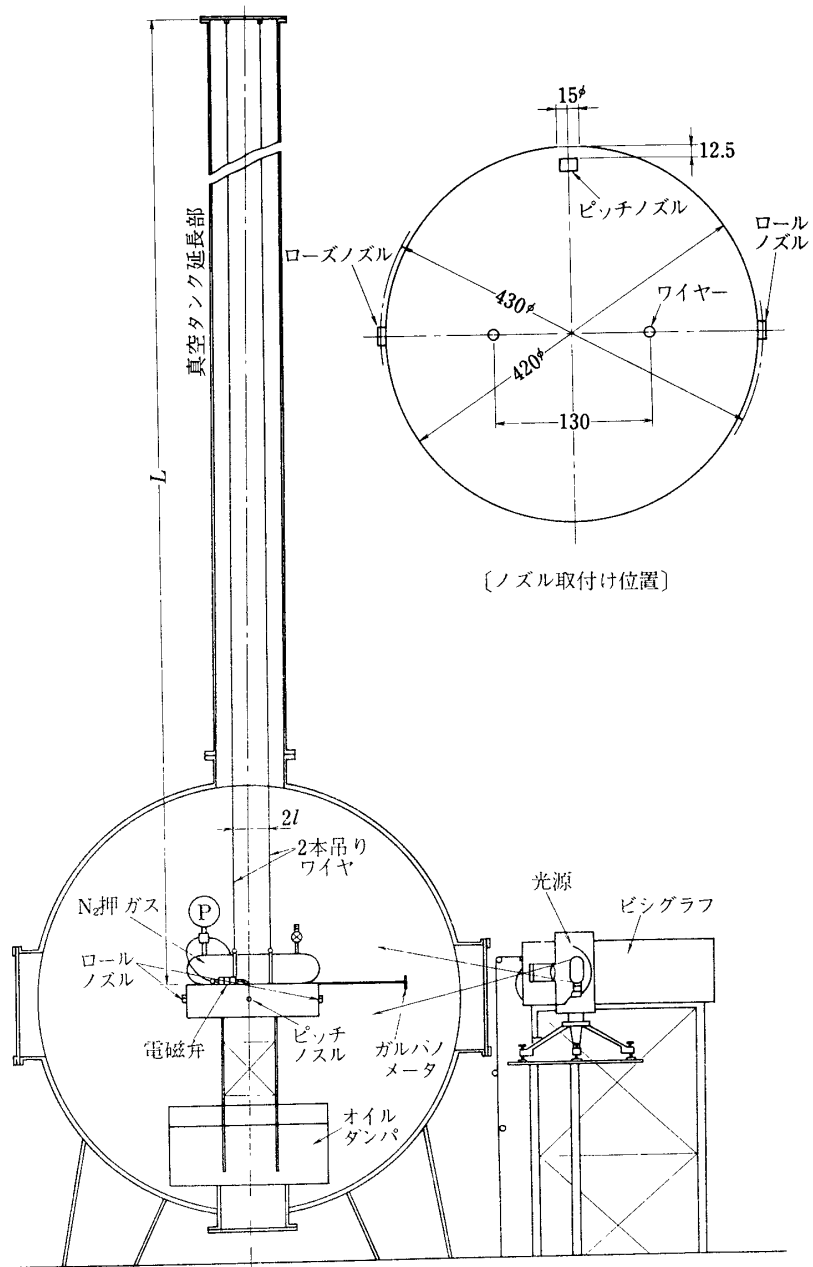
I : 慣性モーメント

μ : 粘性係数

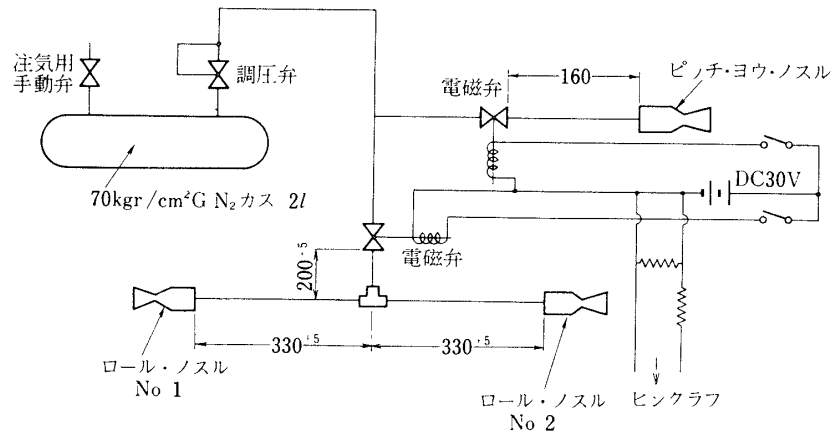
K : 復元力係数

T : トルク

θ : 変位角



第1図 実験装置



第2図 供給系

第1表 K-10-8 リアクションジェット推力試験用ノズル寸法

1) ロールノズル

No.	スロート径 d°	開口比 ϵ
1 - 1	0.403	7.410
1 - 2	0.428	7.409
2 - 1	0.574	8.283
2 - 2	0.560	8.082
3 - 1	0.723	7.372
3 - 2	0.723	8.040

2) ピッチ・ヨーノズル

No.	スロート径 d°	開口比 ϵ
1	1.070	9.483
2	1.330	10.015
3	1.488	10.007

静止状態 ($\theta = \dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0$) において左辺振動率の周期より充分短時間な Δt だけ T を加えると

$$I_w = T \Delta t \quad (2)$$

の角運動量を得て減衰振動をはじめ。

$$\theta = \theta_0 e^{-\mu/2I \cdot t} \cdot \sin \omega_0 t \quad (3)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I} - \frac{\mu^2}{4I^2}}$$

$$\omega = \left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{t=0} \text{ とすれば}$$

$$\omega_0 \theta_0 = \frac{T \Delta t}{I} \quad (4)$$

各数値は自然振動の特性および二本吊りによる慣性モーメント算出によってすべて求められる。まず、自然振動をおこしたときの減衰率から粘性の影響がわかるが、一周期の振巾比

$$e^{-\mu/2I \cdot t_0} = 1/1.09 \sim 1/1.10$$

である。一方、 $\omega_0 = 2\pi/t_0 \div 2\pi/10 = 0.6$ であるから、振動数におよぼす粘性の効果はきわめて小さく1/10000のオーダーで無視できる。

θ_0 と Δt の実測

第2表の三組のロールジェットについて θ_0 と Δt および I を求めた。平均理論 $\overline{C_f}$ の定義は

$$\begin{aligned} \sum F &= (A_{t1} C_{f1} + A_{t2} C_{f2}) P_c \\ &= \overline{C_f} (A_{t1} + A_{t2}) P_c \end{aligned}$$

①と②は I 、 μ とともに同一条件、③が異なる条件で行っている。この違いは後で述べるように、ピッチ・ヨー・ジェットのロール成分除去のための質量バランスをとるために生じたものである。 I は粘性がないとした場合の振動数と吊っている重量 W とから次式で求められる。

$$I = \left(\frac{t_0}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{W \cdot l^2}{L} \quad (5)$$

l 、 L は第1図に示すもの

第2表 用いたノズルの数値

ノズル番号	スロート径	出口径	開口径	平均理論 $\overline{C_f}$	データ番号
1-1	0.403	1.097	7.410	1.62	①
1-2	0.428	1.165	7.409		
2-1	0.574	1.652	8.283	1.63	②
2-2	0.560	1.592	8.082		
3-1	0.723	1.963	7.372	1.625	③
3-2	0.723	2.050	8.040		

これから

$$T = \left(\frac{W}{2\pi} \cdot t_0 \cdot \frac{l_2}{L} \right) \cdot \frac{\theta_0}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\text{①② } W = 23.1 \text{ kg} \quad t_0 = 10.50 \text{ sec}$$

$$\text{③ } W = 24.6 \text{ kg} \quad t_0 = 10.68 \text{ sec}$$

測定された θ_0 と電磁弁開の時間 $\Delta t'$ の関係は(本文第4図)に示すようなものとなる。このグラフによると、 $\Delta t' \rightarrow 0$ でも $\theta_0 \rightarrow 0$ にならない。これは次の理由による。

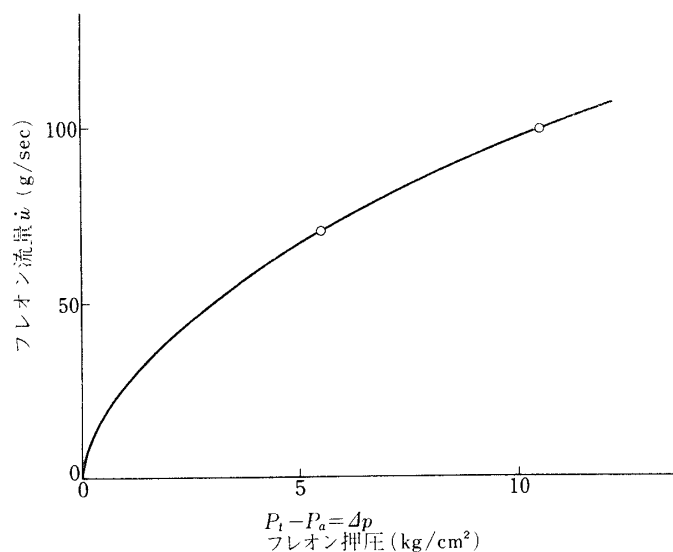
ノズルスロートは電磁弁の下流にあってその間に空間がある。このため電磁弁開閉の信号に対してジェット推力の応答は(本文第5図)のように表わされる。

イ) τ_{v1} と τ_{v2} は電磁弁の開閉に要する時間できまってくるものである。電磁弁によって異なってくる。

ロ) τ_{f1} は電磁弁が開いた後にノズルスロート電磁弁の間の空間にガスが入るのに要する時間である。現在の場合にはバルブが充分流量がとれるのでスロートまでは音波の伝播に要する位の時間しかかからない。すなわち、

$$\frac{300 \text{ mm}}{300 \text{ m/sec}} = 1 \text{ m sec}$$

ハ) τ_{f2} は電磁弁閉の後スロートまでの空間にあったガスが出てしまうまでの時間である。このガス量は $\Delta t'$ が短くても不変であるから第3図で $\Delta t' = 0$ の所は $\theta_0 = 0$ になる必要はなくなる。ガス量とスロート径によって τ_{f2} は異なるが第3図の $\theta_0 = 0$ に相当する $\Delta t'$ の値は全力積を $F\tau_{f2}$ と表わしたときの τ_{f2} に相当するものであることがわかる。 Δt としてはノズルからジェットの出ている時間をとるべきであるから当然この部分を含むことになる。



第3図 ロール

第3表 各ノズルの推力値

データ番号	推力 (gr)	理論推力値* (gr)	η_{cf} =推力/同理論値
①	9.65	13.1	0.74
②	20.2	24.4	0.83
③	32.4	40	0.81

* $C_f = 1.62$ とした

したがって、 $\theta_0/\Delta t$ はこの直線の勾配である。各ケースについてトルクを求めると第3表のようになる。

P & Y ジェットの推力計測

省略

「高温気流連続燃焼実験装置」

辻 廣, 竹野忠夫, 堀 守雄

正 誤 表

頁	図, 表, 行	誤	正				
71	第1図	機器記号FR, FIC, PR, PIC, FrC, TR, と機器番号の間にハイフンを挿入する (18ヶ所) 例: <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>FR</td></tr><tr><td>11-1</td></tr></table>	FR	11-1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>FR-</td></tr><tr><td>11-1</td></tr></table>	FR-	11-1
FR							
11-1							
FR-							
11-1							
77	第3表, 8行目	燃料・空気混合比	燃料・空気当量比				
80	第6図(a), (b)	燃焼ガス流量 0.14 kg /s	燃焼ガス流量 0.14 kg /sec				
82	第8図(a), (b)	空気流量 1 kg /s	空気流量 1 kg /sec				
84~85	第9図 (a), (b), (c)	機器記号FR, FIC, PR, PIC, FrC, TR, FT, PT, FE, と機器番号の間にハイフンを挿入する ((a): 10ヶ所, (b): 19ヶ所, (c): 9ヶ所) 例: <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>FR</td></tr><tr><td>11</td></tr></table>	FR	11	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>FR-</td></tr><tr><td>11</td></tr></table>	FR-	11
FR							
11							
FR-							
11							
86	6行目	圧力調整弁	圧力調節弁				
90	第6表, 下より1行目	亜音速常温・高温用空気流量 比率設定計	亜音速常温・高温用空気流量 比率設定器				
91~92	第11図 第12図	第11図と第12図の説明はそのままにして図のみを入れ替える					
91	第11図	27 イブニッショントランス通電・ 停止押ボタン	27 イグニッショントランス通電・ 停止押ボタン				
92	第12図	5 ノズル冷却水ポンプ運転	5 ノズル冷却水ポンプ運転				
94	第15図	FCV 1	FCV-1 (7ヶ所)				
"	"	FCV 5	FCV-5 (5ヶ所)				
"	"	計装空気圧力低下 (2.5 kg / cm ² 以下)	計装用空気圧力低下 (2.5 kg / cm ² - G以下)				
"	"	燃料用空気圧力低下 (1.5 kg / cm ² 以下)	燃焼用空気圧力低下 (1.5 kg / cm ² - G以下)				

頁	図, 表, 行	誤	正
95	第16図	自動調節弁記号FCV, PCVと弁番号の間にハイフンを挿入する (23ヶ所) 例: FCV 3	FCV - 3
95	第16図	計装空気圧力低下 (2.5 kg / cm ² 以下)	計装空気圧力低下 (2.5 kg / cm ² - G 以下)
96	第17図	自動調節弁記号FCV, PCV および空気圧作動遮断弁記号PVと 弁番号の間にハイフンを挿入する (13ヶ所) 例: PCV 2	PCV - 2
96	第17図	計装空気圧力低下 (2.5 kg / cm ² 以下)	計装空気圧力低下 (2.5 kg / cm ² - G 以下)
97	12行目	非常	非常停止

東京大学宇宙航空研究所報告第12巻第1号(A)

1976年2月

頁	図, 表, 行	誤	正
198		193 頁の第 3 図 202 頁の第 3 図 ノズル主流がない場合の LITVC の横推力 特性 の附録	202 頁の第 3 図 193 頁の第 3 図 小型コールドガスジェット の特性についての附録