

ウォーター・ハンマ現象等の実験研究について

上野 幸*
 榎本 喜七**
 浅野 幸雄**
 堀井 幸一**

図1 実験体形

1. はじめに

ポンプ運用における二線延長や二又分岐体形、あるいは中継体形等の各種放水体形で、多口放水中の1口をシャットすると、他の放水を続けているノズルの圧力やポンプ圧力が急激に上昇し、これが筒先担当員の安全を阻害し、ポンプ運用上の困難さをもたらしている。この急激な圧力上昇の実態を究明することは、ノズル側の安全対策上、また自動制ぎょ等によりポンプ運用を合理化する上で必要と思われる。このため、実用上の放水体形で1口シャット時におけるノズル圧力、ポンプ圧力、その他の変化について実態を実験究明した。

2. 実験項目

次の各体形において、1口シャットによるノズル圧力、ポンプ圧力、エンジン回転等について実験を行った。

1) 単独二口放水体形(可変ノズル使用)

- ア 二線延長体形
- イ 二又分岐体形

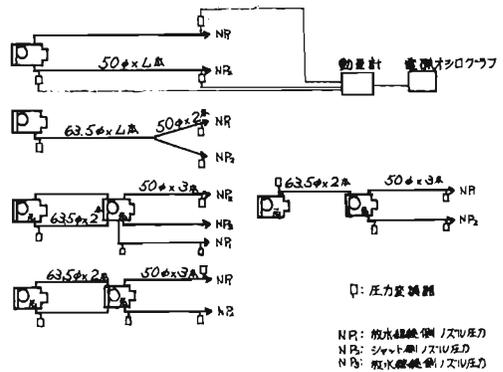
2) 中継体形(可変ノズル使用)

- ア 二線送水3口放水体形
- イ 二線送水2口放水体形
- ウ 一線送水2口放水体形

以上の各体形で、ホース本数、ノズル設定圧力等を変えて64項目について行った。

3. 実験体形

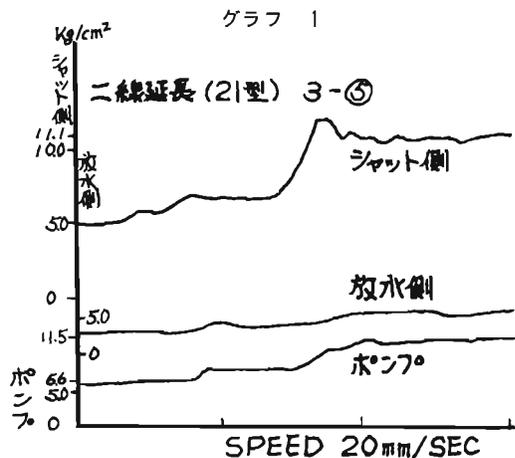
実験体形は図1のとおりである。



4. 実験結果

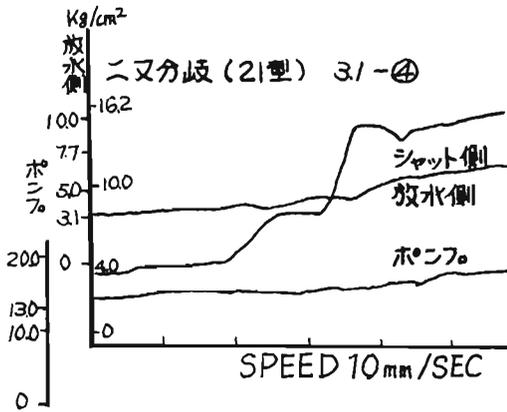
(1) 各計器の定量的変化(21型ノズル使用)

各体形において、多口放水中に1口を閉鎖した場合の圧力変化と時間、およびホース本数と各圧力変化の一例をグラフ1~6で示す。

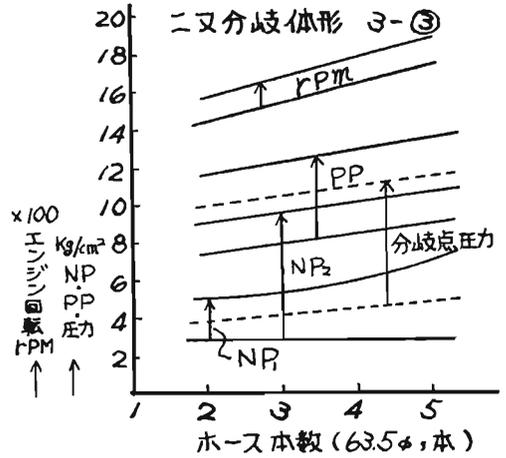


*第三研究室長
 **第三研究室

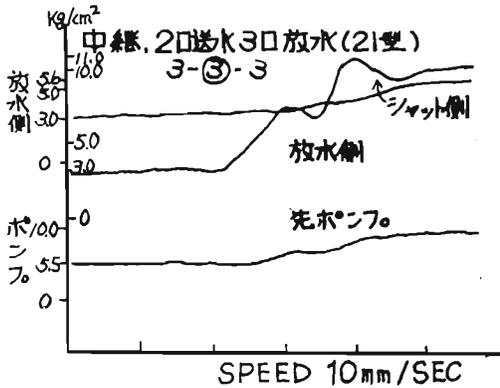
グラフ 2



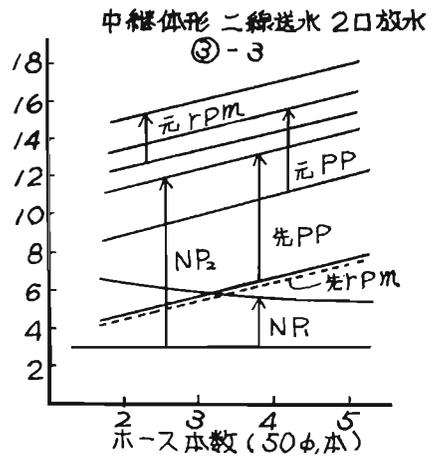
グラフ 5



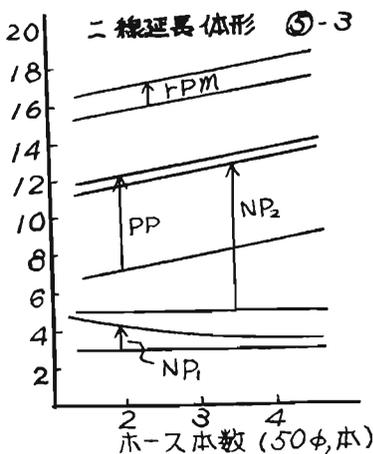
グラフ 3



グラフ 6



グラフ 4



注：シャット側の各可変ノズルは、開度を60度とした。
○印はシャット、○印内の数字は設定圧力を示す。

ア 放水中のノズル圧力

放水中のノズル圧力は、シャット側ノズルのシャット時間に対応して上昇しており、上昇し始めた圧力が安定圧になるまでに0.6～3secが測定されたが、各体形とも2sec前後の上昇時間が最も多い。圧力上昇は、各体形の設定圧力により多少の差はあるが、本実験体形では二線延長体形で設定圧力の1.5～2倍、ニ又分岐体形で2～2.5倍、中継体形では2.2～2.3倍であった。

グラフ1～3での圧力上昇は、二線延長 5 kg/cm²/1.4sec、ニ又分岐 7.7 kg/cm²/3 sec、中継体形では 5.6 kg/cm²/1.9secで、それぞれ設定圧力の1.67、2.5、1.9倍の上昇値である。

また、これらを各体形で、ホース延長本数との関係でみると、二線延長および中継体形では、ホース本数が増えると、1口シャットによる圧力上昇値は小さくなり、ニ又分岐体形においては、圧力上昇値は大きくなる。

イ ポンプ圧力

ポンプ圧力は各体形とも、1ロシャットにより上昇し、上昇値はホース本数に関係なく一定値となる。圧力の上昇する時間は、ノズルのシャット後、あるタイムラグを置いてシャット時間にはほぼ対応し、圧力上昇値は、二線延長で設定ポンプ圧力の1.5~2.0倍、二又分岐体形で1.5~1.6倍、中継体形では元ポンプで1.2~1.7倍、先ポンプでは2~2.4倍の上昇が測定された。

グラフ3から、中継2口送水3口放水の先ポンプの圧力上昇は、11.0kg/cm²/2secで、設定ポンプ圧力の2倍の上昇を示している。

ウ シャット側ノズル圧力

各体形に関係なく、シャット開始とともに圧力が上昇し始め、可変ノズルのシャット完了後に最大圧力を示している。各体形別では、二線延長で設定圧力の2.7~4倍。二又分岐で3~4倍、中継体形では4~5倍の圧力上昇を示している。圧力上昇時間は2sec前後の場合が多い。またホース延長本数が増えると、圧力上昇値は大きくなる。

グラフ2から、二又分岐体形で圧力上昇は14.5kg/cm²/3.1secで、所期設定圧力の3.6倍の上昇を示している。

エ エンジン回転

エンジン回転は、各体形、ホース延長本数に関係なく上昇する。ただし、中継体形の先ポンプでは、エンジン回転はほとんど変化がない。

グラフから、各体形で150rpm~200rpmの変化

を示している。

オ 放水中のノズルからの放水量

各体形とも、放水中のノズル圧力の上昇値、上昇時間に対応して増減する。

カ 真空度

各体形とも、真空度は1ロシャットにより低下する。低下時間および低下値は、放水ノズルの放水量の変化と対応している。

なお、上記各項目について、23型ノズル、およびコンスタントノズルを使用した場合の各計器の変化は、21型ノズルの場合と同様の傾向を示しているが、21型ノズルに比べ各計器の上昇・下降が、23型ノズルでは若干大きく、コンスタントノズルでは若干小さくなる傾向にある。

(2) 他ノズルへの圧力伝播時間等

64項目の実験のうち、無作為に抽出した10例についての、可変ノズルシャット時間、シャットに要した回転回数、および他ノズルへの圧力伝播時間等については、表1のとおりである。

表1から、1ロシャットにより、放水側ノズル圧力は、上昇した圧力の最大値と安定値がほぼ等しくなり、シャット側では、シャット後のノズル圧力の最大値と安定値とに差がある。

また、ノズルの設定圧力が同じでも、シャット側ノズルのシャット回転回数およびシャット時間、ホース本数、体形上の相違等により、シャット後の圧力上昇値が異なる。とくに、可変ノズルのシャットの完了す

表1 圧力伝播時間等

例	シャット時 (S)	シャット 回数	他ノズルへの 圧力伝播時間 (S)	シャットから、 他ノズルの最大 圧までの時間 (S)	シャット側ノズル圧 kg/cm ²			放水側ノズル圧 kg/cm ²		
					設 定	最 大	安 定	設 定	最 大	安 定
1	3.0	3	1.45	4.45	5	→	17.4	2	→	3.7
2	0.42	2	1.1	2.02	3	8.0	7.8	3	→	4.2
3	0.7	1	0.7	1.40	3	9.5	7.0	3	→	4.2
4	1.75	2	0.45	2.20	3	8.7	8.0	3	→	5.0
5	1.0	2	1.05	2.05	3	12.5	12.0	3	→	5.0
6	1.35	2	0.95	2.30	3	11.9	10.9	3	→	4.7
7	0.6	1	0.5	1.10	3	10.7	8.7	3	→	4.7
8	3.7	3	0.92	4.62	4	13.4	13.0	6	→	14.7
9	3.35	4	0.5	3.90	5	→	19.5	3	→	6.8
10	3.2	3	0.6	38.0	4	→	18.5	2.7	→	3.5

註 →印は、最大圧力が安定圧力に等しいことを示す。

る最後の回転が大きく影響すると思われる。

5. 考 察

(1) 異常圧力上昇について

ア 単独体形における二線延長と二又分岐の相違
ホース延長本数が増えると、二線延長体形では放水中のノズルの圧力上昇値は小さくなり、二又分岐体形では、圧力上昇値は大きくなる。

これは次によるものと思われる。

図 2

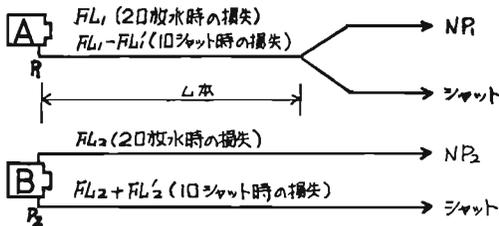


図 2 より

$$NP_1 = P_1 - (FL_1 - FL_1')$$

$$NP_2 = P_2 - (FL_2 + FL_2')$$

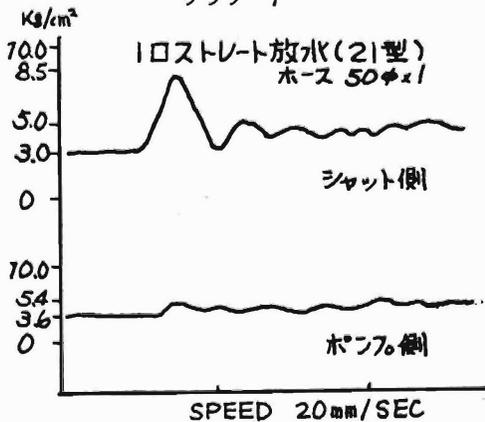
となり

FL_1' と FL_2' とがプラス、マイナスの関係にあり、摩擦損失がホースの長さに比例することによる現象であり、A 体形の二又分岐から先のホースを長くすると B 体形と同様の結果になる。

イ ウォーター・ハンマ現象について

ウォーター・ハンマ現象は、水流が管路で急激に閉鎖され、速度エネルギーが圧力エネルギーに変換されて閉鎖部に圧力上昇が起こるもので、圧力波の伝播により圧力変化を繰り返す周期現象を伴なうものである。これを再現するために、1 口ストレート放水をシャットした時の圧力変化を求めたところグラフ 7 のようになった。

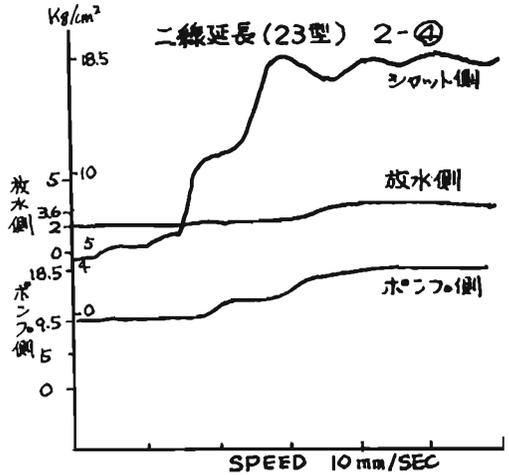
グラフ 7



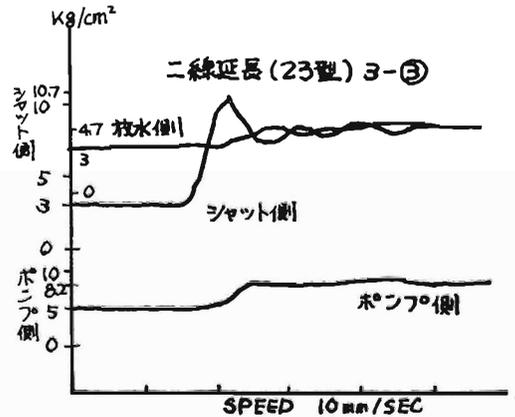
このグラフから、シャットした時の最大圧力および安定圧力が、圧力変化の周期現象からみることができると。

本実験で、このような周期現象を現わしているものと思われる例をグラフ 8, 9 に示す。

グラフ 8



グラフ 9



このグラフから次のことが考えられる。

○ 放水を続けているノズル圧力は、シャット側の可変ノズルを閉の方向に回転するたびに、異常な上昇を示し、最後の回転がもっとも大きい影響を受けている傾向にある。

○ 放水を続けているノズル圧力は、異常圧力の上昇がみられるが、シャットしたのち、あるタイムラグをおいて、時間とともに上り昇て、安定値に達するところから、ウォーターハンマ現象でなく、タービンポンプの特性による圧力上昇と思われる傾向にある。

○ この異常圧力の上昇は、多口放水時の設定圧力やホース延長本数、あるいは放水体形によって異なる数値を示している。

○ シャット側のノズル圧力は、シャットと同時に

ウォーター・ハンマに似た周期現象がみられる。この現象もすべての体形で生じるのではなく、単独二線延長や二又分岐体形では、現われる場合があるが、中継体形ではその現象が少ない。

○ 可変ノズルのシャット速度とノズルの最後の回転量が大きいと、シャット後のシャット側ノズル圧力は、最大圧力と、減衰して安定した安定圧力との差を生じる。(表1参照)

しかし本実験では、グラフ4,5のような周期現象を伴うものは少なく、次の理由により、実用上の体形では現われにくいものと思われる。

① 可変ノズルはシャットに時間を要し、ノズルを回転する都度、圧力が上昇し、シャット完了時は、圧力が概ね安定してしまう。(表1参照)

② 各多口放水体形では、1口シャットしても完全な閉塞にはならず、圧力波の逃げ込みがある。

③ タービンポンプの特性から、1口シャットによりポンプ負荷が軽減し、ポンプ圧力およびノズル圧力が上昇する。

④ 多口放水時で、各ノズル圧力を設定するのに放口開口面積で行うが、設定圧力によっては放口の開口面積が小さくなり、圧力伝播がさまたげられる。

⑤ シャットによる上昇圧力は、ホースの内容積増加によりエア・チャンバーとしての働きがあるため圧力伝播が途中で吸収される。

⑥ ノズル急閉鎖時の最大圧力の実測値は計算値よりも非常に小さい。

可変ノズルのシャットに要した時間から、弁の急閉鎖に該当する場合の最大圧の実験値と計算値とを比較すると表2のようになる。

弁急閉鎖条件

$$T < 2L/a$$

T: 弁閉鎖時間

L: 管路長さ

a: 圧力伝播速度

急閉鎖の最大値

$$H_{max} = \frac{a \cdot v^0}{g}$$

H_{max}: 急閉鎖最大値

a: 圧力伝播速度

v: 閉鎖前平均流速

g: 重力加速度

表2から、実験値が非常に小さい圧力上昇を示しているといえる。

なお、弁の急閉鎖が成り立つ体形のうち、シャット側ノズルからポンプとの間を管路とすると急閉鎖に該当し、放水側ノズルまでを管路とすると該当しない場

表2 最大圧力の実験値と計算値

No.	H _{max} (m)	H (kg/cm ²)	実験値 (kg/cm ²)	a=H/ 実験値
1	247.1	24.7	9.2	2.98
2	424.4	42.4	9.2	4.6
3	247.1	24.7	11.0	2.3
4	395.4	39.5	11.0	3.6
5	428.2	47.8	8.8	5.4
6	180.8	18.1	12.0	1.8
7	22.5	22.5	17.0	1.32
8	34.8	34.8	17.0	2.0

合が多い。

以上により、多口放水体形の1口シャットによる各ノズル圧力、ポンプ圧力等の上昇は、ウォーター・ハンマの結果というより、ウォーター・ハンマ現象を含め、タービンポンプ特性、ホースの弾性等が複合して発生した異常圧力上昇とみることができる。

(2) 各体形での上昇圧力の比較

本実験から、通常のポンプ運用での異常圧力上昇は表3のようになるとと思われる。

表3 各体形での比較

設定圧力 体形	放水側 3kg/cm ² シャット側 3kg/cm ²	放水側 3kg/cm ² シャット側 5~6kg/cm ²
	単独二線延長	4~5 kg/cm ²
単独二又分岐	5~6 kg/cm ²	7~8 kg/cm ²
中継二線延長	6~7 kg/cm ²	7~8 kg/cm ²

註 1. 放水中のノズル圧力を示した。
2. ホース延長本数2~3本の平均値を示した。
3. ホース延長本数が異なれば、上昇値も異なる。

これらのことから、中継体形では他の体形に比較して、異常圧力の上昇の程度が大きい傾向にあることがわかる。

(3) ポンプ運用上の対策

ア ノズル側

可変ノズルのシャットは、スムーズに、かつシャット速度を遅くする。特にシャットの完了する最後の回転は、上昇最大圧力の大小、圧力上昇時間の長短に影響を及ぼすので注意する。

イ ポンプ側

ポンプ圧力、エンジン回転、真空度等の各計器の変動に対応するスロットル、放口等の調整を図る。(中

継体形では、1ロケットにより先ポンプのエンジン回転はほとんど変化しない。）

ウ 上記ア、イの処置は実用上困難が伴なうので、電磁弁、電子カバナー、定流量器等を使用する等、自動制ぎょにより、ノズル側の安全対策とポンプ運用の合理化を図る必要がある。

6. ま と め

今回は、実用上の各体形でのウォーター・ハンマ現象等による異常圧力上昇の実態等について実験究明しようとしたものであるが、今後更に実験を重ね、自動化等によるポンプ運用の安全化効率化に役立てたいと考える。