

NACHI  
**TECHNICAL  
REPORT**  
Components

Vol. **20** A1  
March/2010

機能部品事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

「**プラネタリーギヤ型  
低圧水圧モーターと増圧器**」

Low Pressure Water Hydraulic Planetary Gear Motor  
and Pressure Intensifier

〈キーワード〉 水圧駆動・低圧・プラネタリーギヤ  
モーター・増圧器

国立沼津工業高等専門学校／制御情報工学科

教授 大島 茂

Shigeru OSHIMA  
Numazu National College of Technology  
Department of Control and Computer Engineering

## 要 旨

新しいタイプの低圧水圧モーターと回転型水圧増圧器について紹介する。ここではその基本構造と作動原理を紹介し、さらに増圧機能の基本的特性について実験結果を示す。

基本構造はプラネタリーギヤ型回転機構となっている。内側に5つの凹凸をもつ曲線で構成されるステータと外側に4つの凹凸を持つ曲線で構成されるロータ、そして両者の間に組み込まれ両者の曲線上に切られた歯に噛合い回転する9つのプラネタリーギヤ、両側端面を塞ぐフランジ、ポートプレートなどで構成される。水圧モーターと増圧器は排出ポートを構成する1枚のポートプレートが異なるだけで、他は同じ部品から構成されている。試作機による実験で増圧比2.5まで可能であることが確認された。

## Abstract

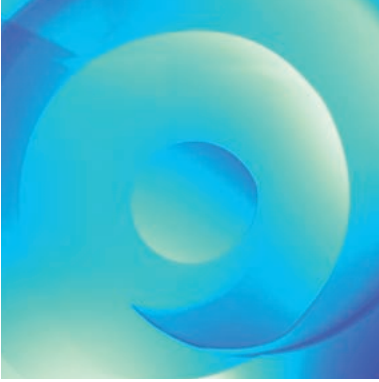
This paper introduces a new type low pressure water hydraulic motor and a rotary type water hydraulic pressure intensifier. The basic structure and the working principle of them are introduced and the fundamental characteristics of the intensifier are presented by experimental results.

Their basic structure is based on the planetary gear mechanism. Its main part consists of a stator, a rotor, nine planetary gears, a flange and side plates. The inside of the stator is formed by a curve with 5 lobes and the outside of the rotor is formed by a curve with 4 lobes. Their curved surfaces have teeth and they are in fitted with the planetary gears which revolve with rotation of the rotor. The difference between the motor and the intensifier is only on a port plate. Besides the port plate, the all parts of them are completely the same. It is found that the critical intensification ratio is about 2.5 by experimental results with a prototype of the pressure intensifier.

## 1.なぜ再び水圧か

約200年前の産業革命期から水圧駆動技術は本格的に使用されはじめ、当時イギリスの主要な都市では水圧動力を供給するための配管網が敷設され、港湾のクレーンや生産工場の水圧プレス、エレベータなどの駆動源として盛んに使われていた。20世紀に入る頃から石油系作動油が水の代わりに使用されるようになり、錆、摩擦、摩耗、漏れなどの問題が一気に改善され油圧駆動技術が主流となり1世紀余りが過ぎた。その間、石油資源の枯渇に対する危機感と難燃性への要求から1980年代には高含水作動液が製鉄や鋳業の分野で使用されるようになった。そして1990年代に入り、環境問題が重要視されるようになり、環境保全性と省資源・省エネルギーの要求から清水(水道水)を作動流体とする水圧駆動技術が再び注目されるようになった。現代の水圧駆動技術は、20世紀に発展した種々工学技術の応用の上に成り立ち、産業革命期のものとは大きく異なる。

本稿では、水圧駆動技術の現状を紹介し、さらに筆者がとくに興味を持つ低圧水圧駆動技術に関する研究の中で手がけているプラネタリーギヤ型低圧水圧モーターおよび、それを基に考案した回転型水圧増圧器の基本的作動の原理と特性について紹介する。



## 2. 水圧駆動技術の現状

作動流体に水を使用するため、水質の維持管理、材料に対する腐食や錆の発生、潤滑性が低いことによる摩擦や摩耗の増大、粘性が低いことによるすきま漏れの増大、飽和蒸気圧が高いことによるキャビテーションの発生し易さ、凍結や蒸発の問題など技術的課題は多く存在する。しかし、新しい材料の技術、精密加工技術、表面処理技術、設計技術などの長足な進歩により多くの問題が解決され、現在の水圧駆動技術が実現されている。油圧技術の発展とともに進歩した流体制御手法と電子制御技術の応用により、油圧、空気圧、電気駆動に並ぶ第4の駆動制御技術として実用されるようになった。

水圧駆動システムは、油圧駆動システムと基本的に構造・原理は同じであるが、競合するものではない。建設機械や重量車両などでは非常に高い動力密度が要求され油圧駆動システムは必須のものとなっている。現状の水圧駆動システムでは、一般に最高使用圧力は14MPa程度であり、主な応用分野としては、クリーンで衛生的、環境保全性に優れ、火災の危険がなく、水中での使用や洗浄が容易、作動流体の入手や廃棄が容易などの利点を活かすところで使用されている。食品加工機械、水門用駆動装置、水圧フォークリフト、半導体成形水圧プレスなどの応用が報告されている<sup>1)</sup>。

一方、機器を低圧力仕様にすることで価格を下げ、低い圧力を使用することで、安全・安心な水圧駆動システムが実現されている。空気圧駆動よりも高剛性で効率は高く、水辺や水中あるいは高湿度の環境下において漏電によるトラブルなどが無いことから電気駆動にも優る面を持つ。そのような観点から、低圧水圧駆動システムは、高動力密度のシステムを目指すのではなく、安全で安心して容易に使用できる一般ユーザー向けの駆動システムとして、幅広い分野への応用が期待できる。プールサイドで使用する水圧リフト、入浴介助リフター、水圧自動スライドドア、水圧昇降洗面台、地下道入口などに設置される水圧駆動防水壁など、介護用機器や防災機器などへの実用例が見られる。水道圧力(0.2~0.6MPa程度)で直接駆動するものも多く、それらは水圧源装置をもたない単純なシステム構成で実現されている。産業分野では、工場内に設備されている注水ラインの利用や、遠心型ポンプを水圧源装置として使用することも可能である。

低圧水圧システムにおいては、低圧力で作動する水圧増圧器が時として必要になる。本稿で紹介する回転型水圧増圧器はそのようなところに使用されるものである。

### 3. プラネタリーギヤ型低圧水圧モーターの構造と作動原理

図1に主要部の内部構造を、図2に側断面図を示す。主要部を構成する部品は、ステータ、ロータと9つのプラネタリーギヤであり、その他にポートプレートやフランジなどで構成されている。ロータの外周形状は余弦曲線で形成し、この曲線とこがり接触するための条件を満たすようにステータ内面の曲線とプラネタリーギヤのピッチ円半径は決定される。そのため条件式は文献<sup>2)</sup>に示されている。ステータとロータの間のすきまはプラネタリーギヤにより9つの部屋に仕切られており、ロータの回転に伴いプラネタリーギヤは自転しながら公転し、それぞれの部屋の体積は周期的に増減を繰り返す。

ポートプレートAには排出ポートが明けられ、図3に示すように五角形の溝により5つの分配穴に連結されている。ポートプレートBには、図3に示す位置に供給ポートが明けられ、5つの分配穴に五角形の溝で連結されている。供給ポートはセンタープレートとポートプレートAを貫通して外部配管に接続される。排出と供給の各5つの分配穴は交互に配置されており、

全てがポートプレートBを貫通してモーター内の各部屋に接続するようになっている。ロータの回転に伴いプラネタリーギヤが公転するため、モーター内の各部屋は排出と供給の分配穴に交互に切替わって接続する。各部屋の体積は供給分配穴に接続している間はロータの回転とともに増大し、排出分配穴に接続している間は減少するように設計されている。

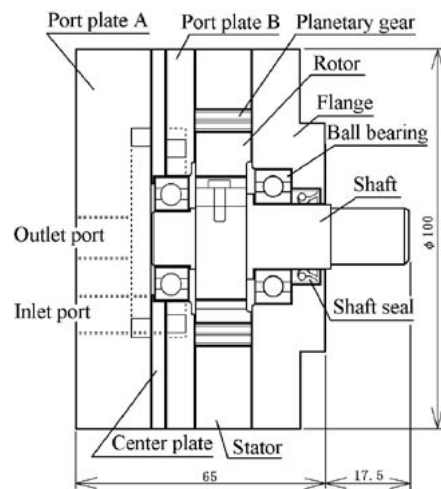


図2 プラネタリーギヤ型水圧モーターの側断面図

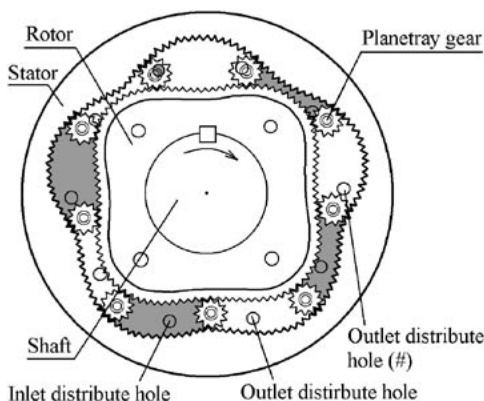


図1 プラネタリーギヤ型水圧モーターの主要部構造

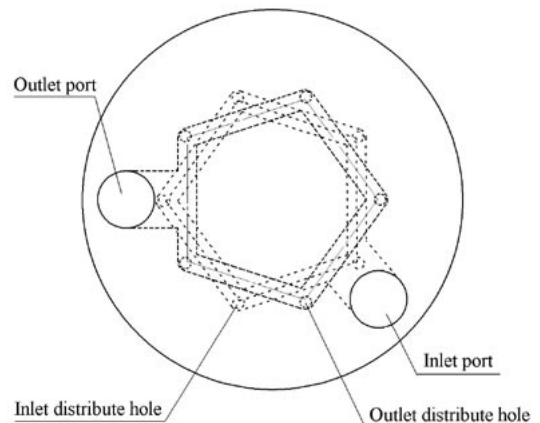


図3 ポートプレート上の供給／排出ポートと分配穴の配置

供給された水圧によりトルクが生成される原理は図4により説明できる。図4の灰色に塗られた部屋は供給分配穴に接続する位置にある部屋であり、ロータ外周面およびプラネタリーギヤ外周面に供給水圧が作用する。ロータ外周面に作用する水圧による力の作用線は(a)の図の矢印で示すようにロータの中心軸より $e$ だけ偏心しているため時計方向のトルクが生じる。一方、プラネタリーギヤに作用する水圧は(b)に示すように相反する方向の力を生じるが、力の作用点までの距離 $r_1$ が $r_2$ に比べ長いため、ここでも時計方向のトルクが生じる。灰色に塗られた全ての部屋で同様な状況が得られ、それらの部屋の総合トルクがモーターの出力トルクとなる。ロータの回転に伴いプラネタリーギヤが公転し、供給と排出の分配穴への接続が自動的に切換わり時計方向へ連続的に回転する。

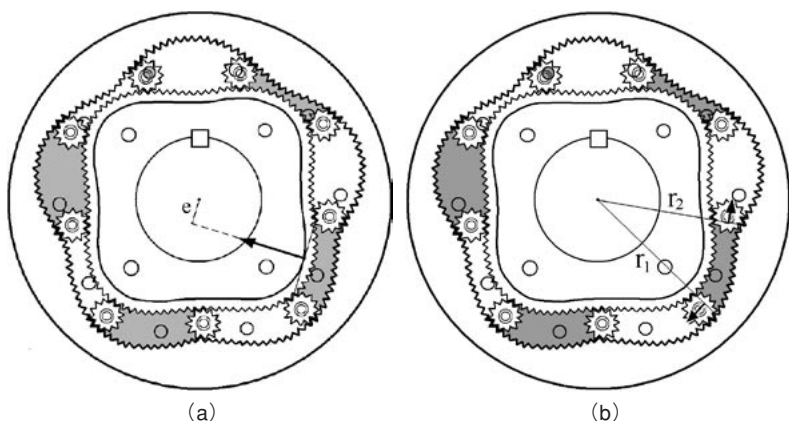


図4 トルク生成原理の説明図

筆者らの研究で用いた試作モーターの基本仕様を表1に示し、内部構造の写真を図5に示す。理論押しけ容積は $37.6\text{cm}^3/\text{rev}$ で、ロータは4つ凹凸をもつ曲線、ステータ内面は5つの凹凸をもつ曲線で構成されている。排出および供給分配穴の数はそれぞれ5つ設置している。

表1 試作供試モーターの基本仕様

Working fluid	tap water
Rated supply pressure	0.25 MPa
Rated supply flow rate	$0.008\text{ m}^3/\text{min}$
Rated rotational speed	200 rpm
Rated output torque	0.9 Nm
Rated output power	20 w



図5 試作供試モーターの内部構造写真

## 4. 回転型水圧増圧器の構造と理論

上述のプラネタリーギヤ型低圧水圧モーターのポートプレートAを図6のように改造するだけで増圧器とすることができる。排出分配穴の一つを他の4つから切離し、独立した排出ポート(増圧ポート)とした。モーター内の各部屋は排出分配穴に接続する位置にあるときはロータの回転とともに体積が減少するため、この増圧ポートに接続する位置にあるとき各部屋はポンプの機能を果たし、昇圧した水を吐出する。つまり、プラネタリーギヤ型水圧モーターで駆動されるポンプとなる。

増圧ポートから得られる流量 $Q_i$ と供給流量 $Q_s$ 、増圧圧力 $P_i$ と供給圧力 $P_s$ との関係は、供給分配穴および排出分配穴の数を $n$ とした場合、式(1)、式(2)で表される<sup>3)</sup>。

$$Q_i = \eta_v \frac{Q_s}{n} \quad (1)$$

$$P_i = \eta_T \cdot n \cdot P_s \quad (2)$$

ここで、 $\eta_v$ は容積効率、 $\eta_T$ はトルク効率であり、増圧器の全効率は $\eta = \eta_v \cdot \eta_T$ である。

筆者らの研究で用いた試作増圧器の場合、 $n=5$ であるので、増圧比は式(3)となる。

$$\frac{P_i}{P_s} \eta_T = \times 5 \quad (3)$$

摩擦が全くない理想状態では $\eta_T=1$ となり、理論的には最大の増圧比は5となる。

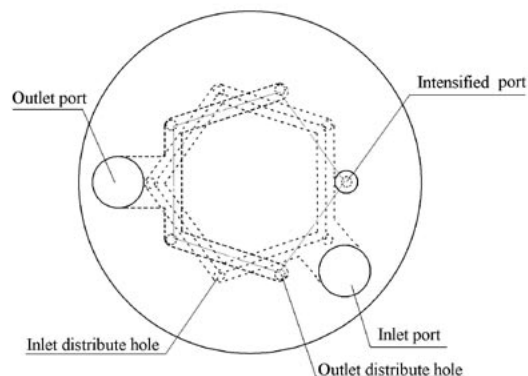


図6 増圧器用に改造したポートプレートA

## 5. 試作増圧器による実験結果

増圧器としての基本的な特性を確認するために、図7に示す実験回路を用いて性能測定を行なった。水圧源にはアキシヤルピストン型水圧ポンプを用い、リリース弁とスロットル弁(1)で供給圧力を設定し圧力 $P_s$ の水を供試増圧器に供給した。増圧ポートにはスロットル弁(2)を取付け、増圧圧力 $P_i$ を調整し、任意の増圧比 $P_i/P_s$ に設定した状態で、供給流量 $Q_s$ と増圧ポートから得られる流量 $Q_i$ 、供給圧力 $P_s$ 、増圧圧力 $P_i$ 、排出ポート圧力 $P_e$ およびロータの回転速度 $N$ を測定した。増圧ポート以外の4つの排出分配穴からの水は排出ポートから直接タンクへもどした。

供給圧力 $P_s$ を0.2MPaから1MPaの間で0.2MPaずつ変化させて、増圧比 $P_i/P_s$ に対する $Q_i$ の変化を示したものが図8である。同じ $P_i/P_s$ においては $P_s$ が高いほど $Q_i$ は大きく得られる。これは $P_s$ が高いほどロータの回転速度が速くなることに起因する。また、 $P_i/P_s$ が大きくなるほど $Q_i$ は小さくなる。これもロータ回転速度の変化に起因するものである。増圧比 $P_i/P_s$ が2.5以下の範囲においては供給圧力が0.2MPaの低い圧力でも良好に作動することが確かめられた。

一方、 $P_i/P_s$ が2.5を超えるあたりから、ロータの回転状態が間歇的となり、増圧圧力 $P_i$ の変動が非常に激しくなった。それ以上の $P_i/P_s$ では回転は停止した。そのため本試作増圧器では増圧比2.5が限界であった。従って式(3)より、本試作増圧器のトルク効率 $\eta_T$ は0.5程度であることがわかる。ギヤ噛み合い部や摺動部の摩擦低減を図りトルク効率の向上を図ることで、限界の増圧比は向上できるものと考えられる。

図9は増圧比 $P_i/P_s$ に対する $Q_i/Q_s$ の変化を示したものである。式(1)から分かるように、漏れがなく

容積効率 $\eta_V$ が1であるならば $Q_i/Q_s$ は0.2となる。それに対して、図9の実測結果では、 $P_i/P_s$ および $P_s$ が大きいほど漏れの影響で $Q_i/Q_s$ の値は0.2より小さい値となる。

試作増圧器の全効率を図10に示す。最大効率は増圧比 $P_i/P_s$ が2.5において約45%である。実用化のためには全効率 $\eta$ の向上が不可欠である。それはトルク効率の改善を図ることで限界増圧比を高めることにより実現できる。

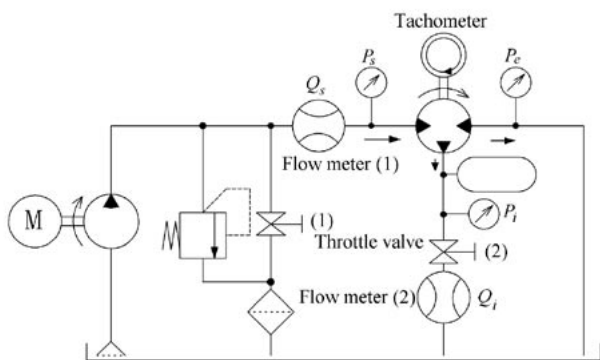


図7 実験装置回路図

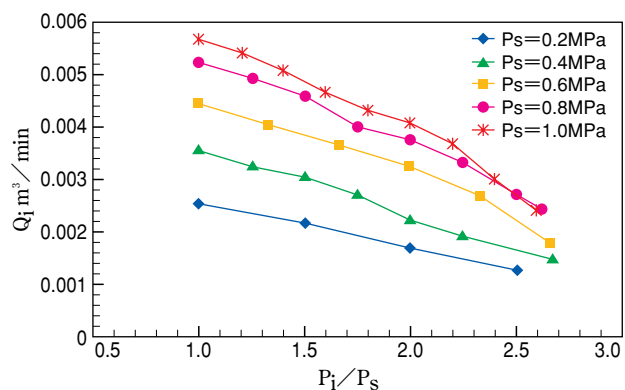


図8 供給圧力 $P_s$ 、増幅比 $P_i/P_s$ と流量 $Q_i$ の関係

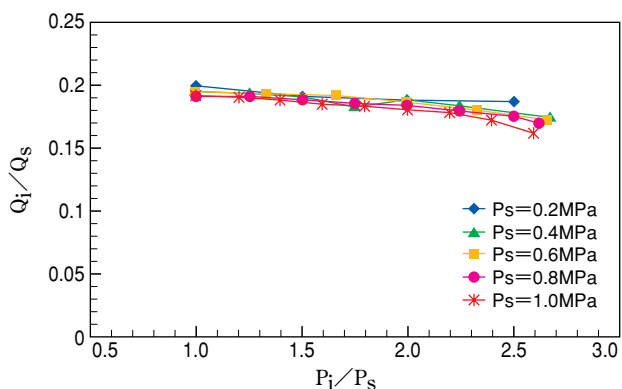


図9 供給圧力 $P_s$ 、増幅比 $P_i/P_s$ と流量比 $Q_i/Q_s$ の関係

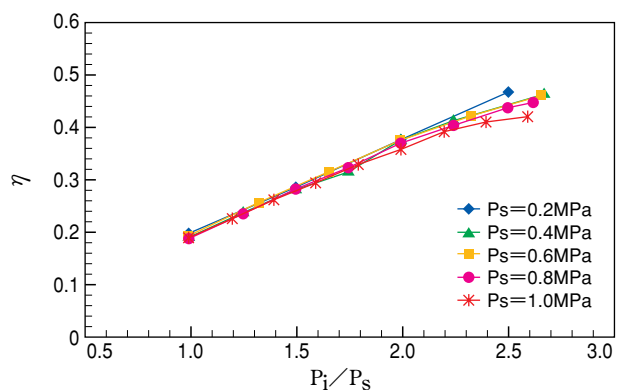


図10 増圧器の全効率 $\eta$

## 6. 課題と今後の可能性

水圧駆動技術はまだ十分に広く世の中に認知されておらず製品化されている機器の種類も多くない。また、種々の新しい材料の採用や高精度な加工技術の必要性などから機器の価格は必然的に割高となっている。水圧駆動技術の抱える現在の課題は、イニシャルコストが高いという観点だけでその採用を躊躇される例が非常に多いということである。作動流体の入手や維持管理にかかるコスト、対環境対策コスト、種々法規対応コスト、使用者の安全・安心に対するリスク対策や省エネルギー効果など、システムのライフサイクル全体にわたる検討からその経済効果は判断されるべきである。さらにいうならば、社会はすでに経済最優先でなく、環境保全を最優先して考えなければならない時代に突入している。そのような中で、水圧駆動技術に期待される場所は大きく、今後普及がすすむものと期待している。

もう一つの課題は製品化された水圧駆動用機器の種類が少ないことである。食品加工機械や水中作業用機械などへの必要性から、比較的高い圧力仕様の製品化が先行してすすめられ、最高使用圧力14MPa程度の製品は比較的种类も揃っている。それに対して、水道圧程度から3MPa前後の低圧仕様の機器の製品化は遅れており、低価格で安全・安心な駆動システムとして低圧水圧駆動システムの普及を図るためには、機器の開発と製品化が急がれる。機器の入手が容易な環境が整うことにより、日常生活分野にも広く水圧駆動技術が実用されるときが来るものと確信する。それをめざして、ここに紹介したプラネタリーギヤ型低圧水圧モーターおよび水圧増圧器の研究をすすめている。

### 参考文献

- 1) (社)日本フルードパワー工業会：アクアドライブシステムー技術資料3、(2004)
- 2) J.W.G.M.Huijbers：Kinematics of the Planetary Gear Motor, Report PGM-T1, Hessels & van Rooij Engineering, (1990)
- 3) S.Oshima, T.Hirano, S.Miyakawa, Y.Ohbayashi：Development of a Rotary Type Water Hydraulic Pressure Intensifier, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA, Vol.2 (2008) 391-396