

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04200

研究課題名(和文) 高効率・低比速度小型二重回転スクリーポンプの開発

研究課題名(英文) Development of high efficiency low specific speed small double rotating screw pump

研究代表者

堀江 昌朗 (HORIE, MASAAKI)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：10388639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では低流量で高い圧力を得ることができる小型高効率ポンプを開発することを目的として、ステータがロータの回転に伴って受動的に回転する二重回転スクリーポンプを用いて、ステータの形状と材質がポンプ性能に及ぼす影響について調査した。その結果、ステータの段数が少なくポンプ内部の流路部が少ない形状であっても、一般的な容積型ポンプや小型の低比速度遠心ポンプに比べて高い効率を得ることができ、また、ステータの材質を金属に比べて質量が軽い樹脂にすることによりロータの回転トルクが減少するため効率が向上し、この傾向は作動流体の粘性が低い場合に顕著であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では低流量で高い圧力が得られる高効率の小型ポンプの開発を行うことが目標であり、これを実現するために二重回転スクリーポンプの駆動トルクと漏れ流れによる損失の低減を図り、ポンプ内部の一部の部品を金属から樹脂に変更することによりポンプ性能を向上させることができることを実験的に明らかにした。このことは、容積型ポンプのように駆動トルクが問題となるポンプに対しても適用が可能であるだけでなく、摩擦熱による薬品や食品、血液などの成分を変性させずに搬送できる高効率で小型・軽量な新しい低比速度ポンプを実現し、様々な分野で利用できると考える。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop a high-efficiency compact pump capable of obtaining high pressure at low flow rates. The effect of stator shape and material on pump performance was investigated using a double rotational screw pump in which the stator rotates passively with the rotor rotation.

As a result, it was found that even though the number of chambers formed between the stator and rotor is reduced due to the smaller stator, this pump can achieve higher efficiency than typical positive displacement pumps or small low specific speed pumps. Furthermore, by using engineering plastic, which is lighter than metal, for the stator material, the rotational torque of the rotor is reduced, thus improving pump efficiency. This tendency is more pronounced when the viscosity of the working fluid is low.

研究分野：流体工学

キーワード：流体機械 ポンプ効率 漏れ流れ スクリーポンプ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車のウォッシャー液供給や冷却水循環用ポンプ、機械や食品の生産工場における接着剤などの化学薬品やペースト状の食品の輸送用ポンプ、また、人工透析や心臓補助用の血液ポンプなど、様々な分野において毎分数リットル程度の低流量でありながら圧力が高い小型ポンプの需要が高まっている。ポンプ内部の羽根車が回転するターボ型ポンプの型式（遠心，斜流，軸流など）や特性を表す尺度として「比速度」と呼ばれるものが使用される。比速度とは毎分  $1\text{ m}^3$  の水を  $1\text{ m}$  上昇させるために必要な回転速度比を意味している。流量が増すにつれて比速度の値は大きくなり、一般的なターボ型ポンプの比速度は  $100\sim 1200$  以上であり、それ以下の場合には容積型ポンプが使用されることが多い。ターボ型ポンプは羽根車が回転する単純な構造であるが、比速度が低い場合には流体の粘性の影響が大きくなるために壁面摩擦損失や水力学的損失だけで無く、羽根車とケーシングの間の漏れ損失などが増すため効率は低くなる。一般的に低比速度では容積型ポンプが使用されるが、このポンプは内部の密閉度を増すために部品同士の機械摩擦による損失が大きく、モータの大型化と構造の複雑さによる部品数の増加により、装置全体の小型化と高効率化が困難である。そこで研究代表者はスクリーューポンプに着目した。スクリーュー型ポンプは容積型とターボ型の間中間的な存在である。一般的にスクリーュー型は容積型に比べて機構が単純で部品数は少ないものの、スクリーューを長くすることにより簡単にポンプ圧力を高くすることが可能である。しかし、スクリーュー部が長くなると容積型と同様にポンプ内部の密閉度を上げるために機械摩擦が増し、ポンプ効率が低くなることが問題である。そこで、研究代表者はロータがステータに接触することなく駆動できる隙間を有する一軸スクリーューポンプを考案し、性能実験および数値解析を行った。その結果、低比速度領域においてターボ型ポンプよりも高い効率が得られることを明らかにした。しかし、このポンプはロータとステータの間の狭い隙間を維持する機構が必要で小型化が難しく、また、隙間の大きさにより漏れ損失が増すことが問題であった。

### 2. 研究の目的

本研究の大目標は低流量で高い圧力が得られる高効率の小型ポンプを開発することであり、本研究では特に駆動トルクと漏れ損失の低減に着目した。そこで機構の簡略化と小型・軽量化を目指して、ロータの回転によりステータが受動的に回転する小型二重回転スクリーューポンプを考案した。このポンプは金属製のロータの回転によってステータが受動的に回転する機構である。研究代表者等のこれまでの研究において、ロータ、ステータ、ケーシングの間の隙間における漏れと、ロータ回転トルクによる損失がポンプ効率の低下を招いていることが明らかとなった。そこで、回転トルクを低減するためにステータを樹脂化して軽量化を図るため、マイクロ波成形機によりステータを樹脂成形により高い精度で製作する着想に至った。この装置はシリコン製の型を用いて簡単に熱可塑性樹脂の成形ができる画期的な装置であり、切削加工では困難であったステータ内壁面の表面粗さが極めて小さいステータの製作が可能となる。そこで、本研究では高効率・低比速度小型二重回転スクリーューポンプの金属ロータと樹脂製ステータの間の回転トルク特性と漏れ特性を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

Fig.1 に本研究で使用した二重回転スクリーューポンプ内部の断面概略を示す。このポンプは主に螺旋状のロータと長円がねじれた孔を持つステータ、外部ケーシングで構成されており、ロータとステータの間には腹と節が連なった二重螺旋状の流路が形成

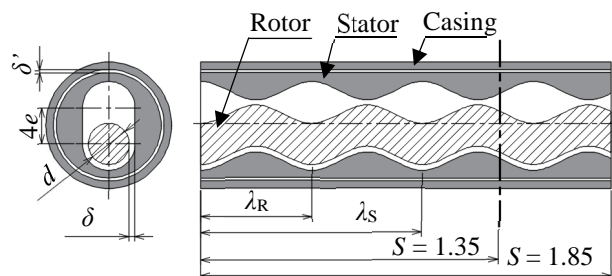
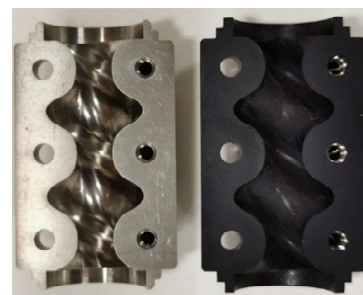


Fig.1 Outline of double rotation screw pump

される．一般的な一軸のスクリーポンプのステータは固定されており，ステータ内部のロータが自転と公転をすることによって二重螺旋状の流路が軸方向に移送されポンプとして機能する．これに対して，本実験で使った二重回転スクリーポンプのステータはロータの回転に伴い受動的に回転する構造であり，ステータはロータの1/2の速度で回転する．また，二重回転スクリーポンプでは，ロータをロータ偏心中心軸で自転させることによりステータを回転させることができる．このような構造であるために，本スクリーポンプはロータとステータ，およびステータと外部ケーシングとの間の二カ所に隙間を有する．本研究ではステータの材質の違いによるロータの回転トルク特性を調査するために Fig. 2 に示すチタンと ABS 樹脂からなるステータを用いて実験を行った．樹脂製ステータの製作にはマイクロ波成形技術を用いた．マイクロ波成形とはプラスチックペレットを微粒子状にしてシリコンゴム型内に充填し，真空圧縮しながら外部から照射する電磁波で完全に熔融一体化した立体モデルを成形するものである．そのため，シリコンゴムの母型の形状を正確に転写することができるため，複雑な螺旋状流路を再現した樹脂ステータを作成することができる．



a) Titanium                      b) ABS

Fig.2 Stator material

Fig.3 にポンプ性能評価実験装置の概略を示す．ポンプは回転式トルク測定器を介して外部モータを用いて回転させた．また，ポンプの入口，出口に圧力センサを設置して差圧を測定し，バルブを用いて流量を調節し，容積型流量計を用いて流量の測定を行った．作動流体は粘性係数の異なる 3 種類のシリコンオイルを使用し，粘性係数を一定に保つためにポンプ出口側の流路に熱電対を用いて温度を測定し，リザーバタンクを恒温槽に浸して温度管理を行った．

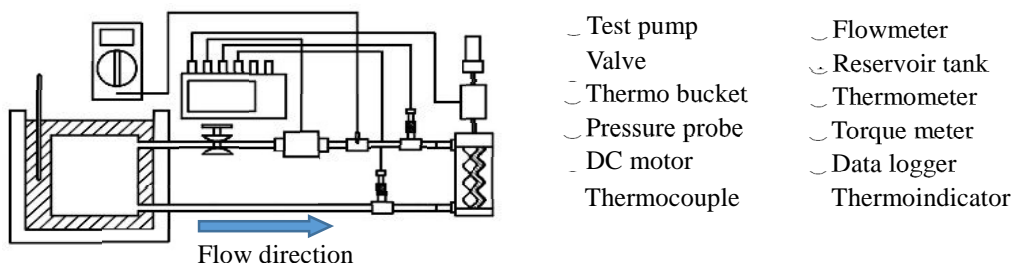


Fig. 3 Outline of experimental apparatus for pump performance measurement

#### 4 . 研究成果

Fig.4 と Fig.5 はステータの段数  $S$  が 1.35 段で，材質が ABS 樹脂およびチタン製のステータを使用し，粘性係数が異なる場合の圧力特性と漏れ特性をそれぞれ示している．プロットマークはロータ回転速度  $n$  とステータの材質の違いを示している．本ポンプは構造上，ロータとステータおよびステータと外部ケーシングの間に狭い隙間が存在する．この隙間においてポンプ内部の下流側の高圧部から入口側の低圧部に向けて漏れ流れが生ずる．この漏れ流れはロータの回転速度にはほとんど依存せず，ポンプ内部の圧力差のみによって生じるものと考えられる．また，粘性係数が増すと狭い隙間部において管路抵抗が増し，二重螺旋流路に形成される隣り合うチャンバを囲む狭い隙間におけるシール性が高くなる．その結果，漏れ量が減少し，粘性係数が高くなるにつれてポンプ圧力は高くなる．粘性が高くなるにつれてポンプ圧力が高くなるのは本ポンプの特徴の 1 つである．ポンプ圧力は ABS 製のステータを使用したポンプの方が金属製に比べて平均で約 6% 程度減少した．これは，樹脂製ステータをマイクロ波成型器で製作したため，樹脂成形時の樹脂の熱収縮などにより隙間の寸法が変わってしまい，数値解析の結果から約 1% 程度大きくなったことが原因であることが明らかとなった．しかし，寸法精度をチタン製ステータと全く同じ精度で制作することにより，同等の圧力が得られると考えられる．

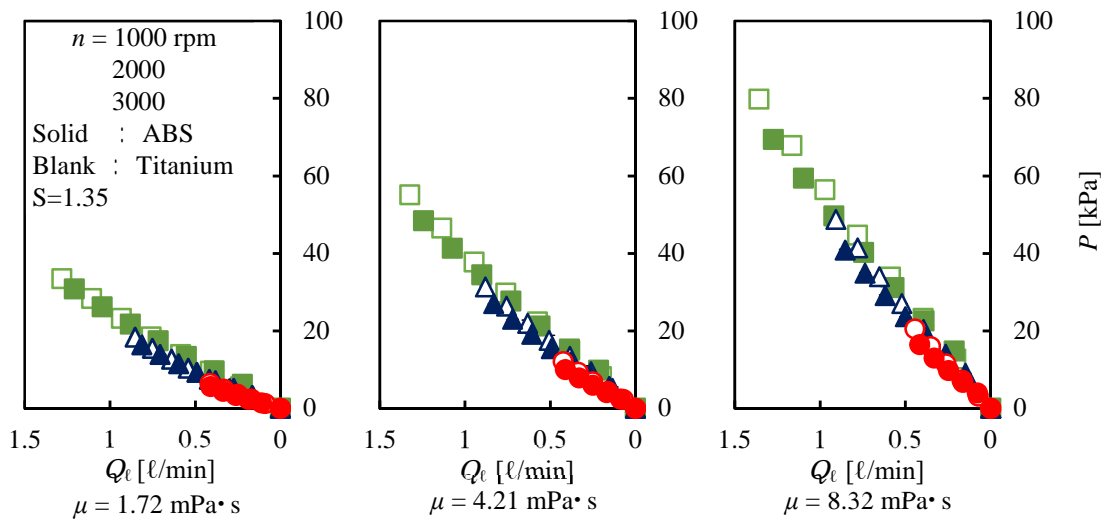
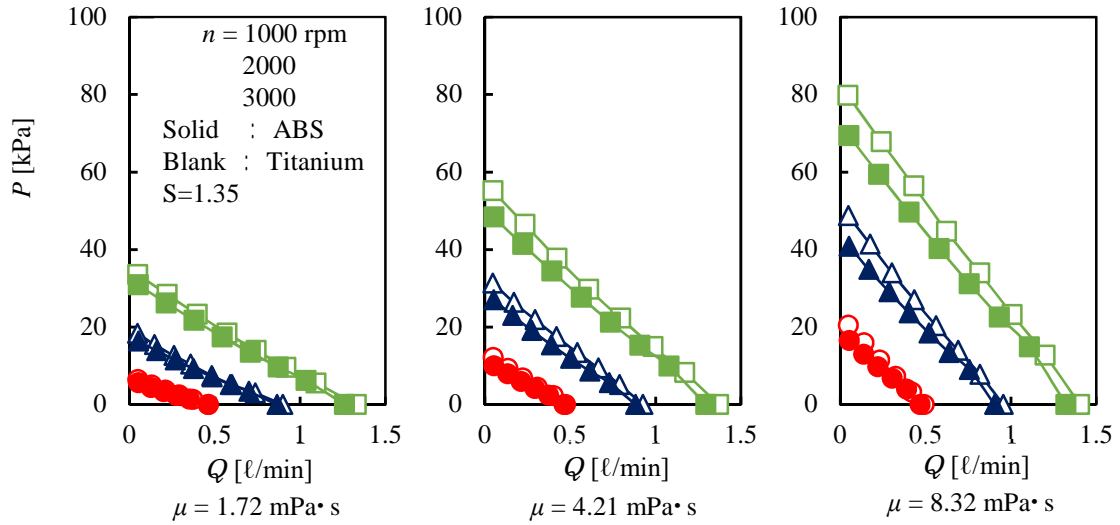
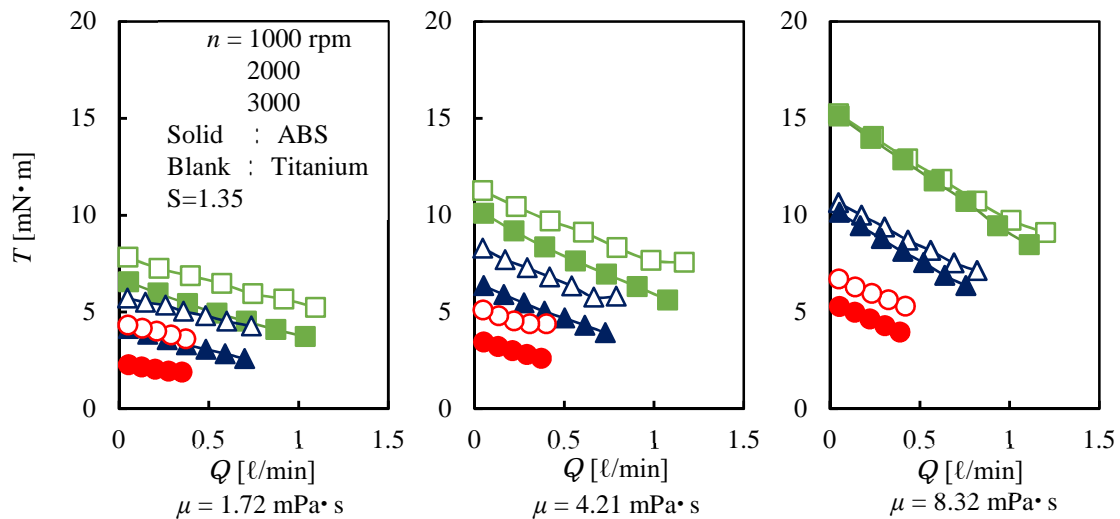


Fig.6はトルク特性を示している．ロータ回転トルク  $T$  は粘性係数  $\mu$  が小さい場合，ロータ回転速度  $n$  によって ABS 樹脂ステータの方が 20～50%程度低い値となった．本二重回転スクリーンプンプのステータは，ロータの回転に伴う回転力がロータとステータの間に形成されるシールラインの液膜を介してステータの内壁を押し出すことによって回転している．ここで，ステータの質量はチタン製ステータが 26.4g であるのに対して，ABS 製ステータは約 1/4 の 6.4 g である．そのため，質量の軽い樹脂ステータの慣性モーメントが小さく



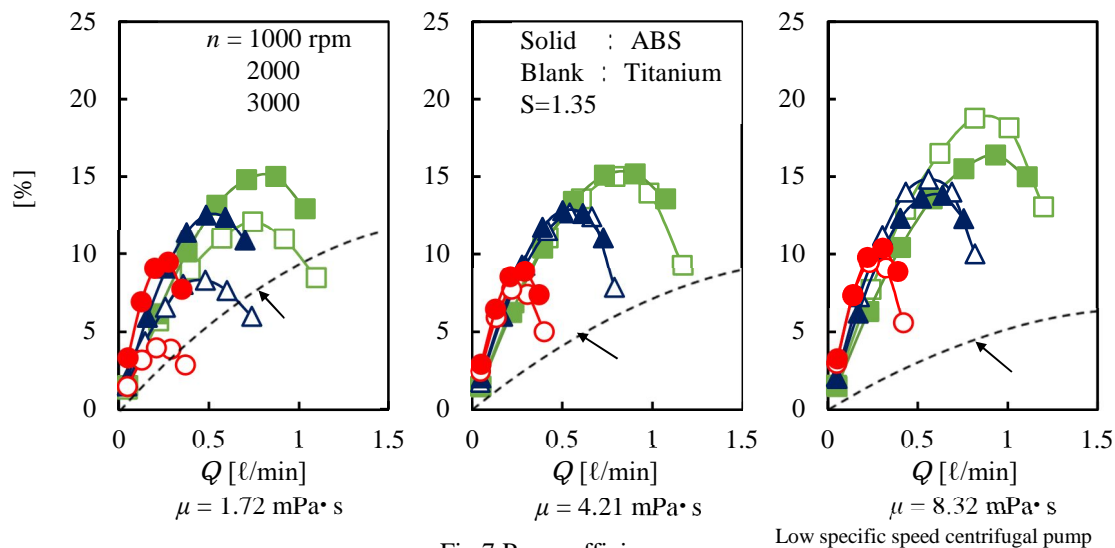


Fig.7 Pump efficiency

なるため、小さな回転トルクでステータを回転させることができる。また、粘性が増すと金属ステータと樹脂ステータのトルクの差は徐々に小さくなる傾向を示し、 $\mu=8.32$  mPa·s の 3000rpm の場合、ほぼ同じトルクの値であった。これは、粘性係数が増加することでステータとケーシングの間の摩擦損失が大きくなり、質量差によるメリットが小さくなるためであると考えられる。

Fig.7 はポンプ効率を示しており、図中の破線は研究代表者等が実施した小型低比速度低機械レイノルズ数遠心式ポンプの効率を示している。粘性係数が低い場合、ポンプ効率は樹脂ステータの方が高い結果となった。これは、ポンプ圧力は樹脂製ステータを用いた場合僅かではあるが低い値となっていたが、ステータ樹脂化によるロータの回転トルクの低減効果が非常に大きかったためであると考えられる。一方で粘性係数が高い領域ではチタン製ステータの方が高い効率を得る結果となった。粘性係数が高く、ロータの回転トルクの差が少ない場合、前述の樹脂ステータの隙間が僅かに大きいためポンプ圧力が低下したため、ロータとステータの間の隙間が狭いチタン製ステータの方が高い効率を得たものと考えられる。この結果から、粘性係数が高い領域では、ステータの寸法精度がポンプ効率に大きく影響していると考えられる。しかし、どちらのステータを用いた場合であっても、破線の低比速度ポンプの効率に対して、本ポンプは作動流体の粘性が低い場合は約 2 倍、粘性が高い場合は約 4 倍もの高い効率を得ることができることを実証した。

本研究では低流量で高い圧力が得られる高効率の小型ポンプの開発を目標として、二重回転スクリーポンプのステータの材質を樹脂化することによるポンプ性能の向上を図った。その結果、本ポンプのようにロータの回転に伴いステータが受動的に回転する構造の場合、ステータを樹脂化して質量を軽くすることによりロータの駆動トルクを低減させ、ポンプ効率を向上させることができることを明らかにした。特に 1 l/min 以下の流量において 15% 程度の効率が得られたことは、流体機械の効率としては極めて高いと考える。本ポンプはロータとステータの直接的な接触がほとんど無いために、摩擦熱による流体の変性や摩擦による異物混入が極めて少ない高効率・小型低比速度ポンプとして、自動車、食品、化学、薬品、医療など様々な分野において利用が可能である。また、隙間を小さくすることにより、運転開始時の呼び水が不要な吸引ポンプとしての利用も考えられ、これまでにない新しい用途でも発展させることができると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松原佑樹, 堀江昌朗
2. 発表標題 小型二重回転スクリーポンプに関する研究（ステータ段数及び材質がポンプ性能に及ぼす影響）
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松原 佑樹, 堀江 昌朗
2. 発表標題 小型二重回転スクリーポンプにおけるロータ回転トルク低減に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚本 裕, 小田 靖久, 堀江 昌朗
2. 発表標題 狭い隙間を有する一軸スクリーポンプの設計法に関する研究（ロータの直径がポンプ性能に及ぼす影響）
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第95期定時総会関西学生会卒業発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松原 佑樹, 小田 靖久, 堀江 昌朗
2. 発表標題 狭い隙間を有する小型二重回転スクリーポンプに関する基礎的研究（ステータ段数がポンプ性能に及ぼす影響）
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第95期定時総会関西学生会卒業発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------