

食品加工プラント用シャープンプの基本性能と キャビテーション特性に関する研究

千葉 克己

要 旨

ポンプ、水車などの流体機械の小型・高速化あるいは高信頼性作動範囲の拡大に関連して、エロージョン(壊食)、振動、騒音あるいは性能低下などキャビテーション諸障害の防止が工業界から強く望まれている。その一方で、食品、医薬品、化粧品、潤滑材および塗料などの製造分野においては、粉体の溶液への溶解、エマルジョンの生成、あるいは高粘度溶液の輸送などの諸性能を持つ粘性ポンプの一種であるシャープンプが多用されている。

すなわち、該諸性能はすべてキャビテーション効果と直結しており、シャープンプの基本的性能およびエロージョン、騒音、振動および上流側管内壁面変動圧特性に対するキャビテーション特性を解明することが不可欠である。さらに、シャープンプにおけるエマルジョン生成についての解明も必要となる。また最近では、シャープンプ利用の工業分野も著しく拡大しつつあるから、各分野におけるニーズに応え得る新しい機能を持つシャープンプの開発が望まれる。

最近、著者らは食品関連産業等において、粉体の混合・溶解、高粘度混合液の輸送およびエマルジョン生成を可能とするシャープンプを開発し、市販している。このポンプは円板の片面に機械加工された凹凸溝と3枚羽根を持つ羽根車と、同じく凹凸溝を持つケーシングより構成されている。羽根から流出した流体は凹凸溝細隙間で高速流れとなり、高せん断力とキャビテーション衝撃力を発生する。その結果、本シャープンプには、高粘度溶液の輸送・エマルジョン・混合作用が十分にあり、実際にこの分野において高い評価を得ている。しかし、キャビテーション効果を利用する際、騒音・振動・エロージョンが不可避免的に発生し、羽根車の回転数と羽根枚数の積を基本周波数とする圧力変動、キャビテーション気泡の崩壊に伴う衝撃波、および圧力変動による気泡の共鳴音から広帯域騒音が著しい。シャープンプの場合、凹凸溝と羽根が構成要素であるため、3枚の羽根と3段の同心円状凹凸溝の数と回転数の積の形、あるいは細隙間でのキャビテーション流れに伴う基本的周波数および上流側管内での旋回流れの発生に伴う低周波数成分での圧力変動も予想される。

すなわち、シャープンプに発生する騒音・振動・エロージョンは通常の遠心ポンプと異なり、ポンプ内の複雑な流動に直結したキャビテーション特性を示すことが考えられる。また、ポンプ羽根車およびケーシングにおけるエロージョンについても調べていく必要がある。

本論文では、著者が開発して工業界で多用されているシャープンプに着目し、本ポンプの性能向上と性能改善に関する設計資料を得る第一歩として、シャープンプのポンプ性能をはじめて解明するとともに、キャビテーションの発生に直結する騒音・振動・および上流側壁面変動圧の挙動、壊食特性を明らかにすると同時に、著者が設計したポンプシステムにおけるエマルジョン作用を明ら

学位記番号と学位：第19号，博士（工学）

授与年月日：平成16年3月20日

授与時の所属：大学院工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程

かにした。

その結果、(1) シャーポンプの基本性能と騒音・振動・エロージョンに対するキャビテーション特性ならびにエマルジョン作用について初めて明らかにし、シャーポンプ内のキャビテーション流れとの関連において性能改善に関わる基礎資料を得た。

(2) 低粘度溶液におけるシャーポンプの性能曲線は、有効吸込ヘッド $NPSH$ に依らず、清水中の遠心ポンプのそれに類似している。流入気泡の増加が凹凸溝まわりのキャビテーションの発生・発達を助長させ、低 $NPSH$ 側において性能がかなり低下する。(3) 騒音・振動・上流側圧力変動のキャビテーション特性はそれぞれ独自の様相を呈するため、これらの変動量の特性からシャーポンプ内のキャビテーションの挙動を推定する際には注意が必要である。

(4) 騒音、振動および上流側壁面変動圧をキャビテーションに対する吸込性能を表す吸込比速度に対してみると、騒音・振動は通常の遠心ポンプと同様にキャビテーションの発達に伴い増大する。しかし、上流壁面変動圧の場合、凹凸溝で発生するキャビテーションに伴う圧力変動の上流伝播の抑制により、キャビテーションの発達に伴い逆に低下する。すなわち、上流壁面変動圧の吸込比速度に対する変化傾向からキャビテーションの挙動を推定するのは難しいと言える。(5) シャーポンプ利用の小型プラントにおける O/W 型エマルジョン作用により、油滴径 d_m は時間とともに急速に小さくなる。しかし、経過時間が 5 min 以上では、 d_m はゆっくりと安定定常値に漸近していく。このように、本プラントは液輸送と同時にエマルジョンの生成作用も十分可能であることを明らかにした。(6) 食品加工製造において長期間実用に供したシャーポンプの羽根車およびケーシング表面のエロージョン破面の様相を電子顕微鏡 SEM により観察した。エロージョン発生領域は羽根先端付近、凹凸溝下流付近のケーシング表面およびケーシングから吐出管の入口付近に限定している。また、エロージョン領域をみると、中心から定常期、減速期、加速期そして潜伏期の様相を呈していることを確認した。

主指導教員 伊藤幸雄

Study on the Performance and the Cavitation Characteristics of Shear Pumps for Food Industries

Katsumi CHIBA

Abstract

As pumps, water turbines and other hydraulic equipment become smaller and are operated across wider speed and power ranges under increasingly higher expectations of reliability, industry has become extremely interested in preventing various cavitation damage such as erosion, vibration and noise that can result in substandard equipment performance. Shear pumps, a type of viscosity pump, are currently used in an increasing variety of applications. These pumps are used for dissolving powders into solvents, emulsifying, pumping highly viscous fluids, and other applications in the production of food, pharmaceuticals, cosmetics, lubricants, paints and other products. Cavitation effects are of immediate concern in each of these applications. It is essential to clarify the characteristics of cavitation with respect to the fundamental performance indices of shear pumps and to erosion, noise, vibration and pressure fluctuations on the upstream walls (upstream wall pressure fluctuations). It is also important to identify how these factors effect pump performance during the production of emulsions. Shear pumps are currently used in an increasing number of industrial applications, and great interest has been shown in developing new shear pumps to fulfill unmet needs in various fields.

Recently, the authors developed a shear pump that enables the mixing and dissolution of powders as well as the transport and emulsification of highly viscous liquids in the food processing industry. The pump is already commercially available and consists of a rotating disc, one side of which is machined with grooves of varying depth, a three-blades, and a casing with grooves of varying depths corresponding to the machined grooves on the disc. The fluid exiting the blades is accelerated to high speeds between the high and low portions of the grooves, producing high shear flows and cavitation generated shock pressures. As a result, the pump functions well for transport, emulsification or mixing of highly viscous fluids and has earned a good reputation in the field. Despite the benefits of this newly developed shear pump, noise, vibration and erosion cannot be avoided when using cavitation effects. The cavitating flow in a pump emits a broad frequency range of intense noise due to pressure fluctuations about the fundamental frequency (blade rotation rate \times blade number), shock waves following cavitation bubble collapse, and the resonance of bubbles subjected to pressure fluctuations. Shear pumps are thought to resonate at a fundamental frequency due to their basic components of grooves and blades. This resonance is a function of the form of the product and is determined by the number of blades and number of three-stage concentric grooves. Cavitating

flow in the narrow gaps between the blades and the stages of the concentric grooves generates the fundamental frequency. In addition, there is a low-frequency component in the pressure fluctuations due to helical flow upstream of the pump. In other words, compared to centrifugal pumps, the noise, vibration and erosion in shear pumps is thought to be a direct result of cavitation resulting from the complex flow pattern in shear pumps. It is also necessary to investigate erosion occurring at the blades and the casing.

In the present study, the authors focused on shear pumps, which are used in numerous industrial applications. Using a pump system designed by the authors, we clarified the basic functioning of the shear pump as a first step toward obtaining the design data needed to improve shear pump capabilities, and we elucidated how the pumping function acts to produce emulsification while also explaining the behavior and erosion characteristics that result from cavitation-induced noise, vibration and upstream wall pressure fluctuations. The following results were obtained :

(1) This is the first explanation of the fundamental performance in a shear pump and of noise, vibration and erosion with respect to cavitation characteristics and emulsification. Basic measurements were taken which will aid in improving pump performance.

(2) Performance curves of shear pumps with low-viscosity fluids do not depend on the net positive suction head *NPSH*. Instead, they resemble centrifugal pumps in submerged operation. When operating with highly viscous fluids, however, frictional losses and an increase in bubbles in the inlet near the blade roots result in the occurrence and development of cavitation in the vicinity of the grooves, and consequently pump performance is not good at the low end of *NPSH*.

(3) Since shear pumps have particular characteristics of noise, vibration and upstream wall pressure fluctuations, care must be taken when using the characteristics of fluctuations in these parameters to estimate cavitation behavior in shear pumps.

(4) When noise, vibration and upstream wall pressure fluctuations are examined with respect to suction specific speed, noise and vibration are seen to increase as cavitation develops, just as in a centrifugal pump. However, pressure fluctuations accompanying the onset of cavitation near the grooves propagate upstream, and thereby act to suppress upstream wall pressure fluctuations that tend to diminish with the development of cavitation. In other words, given suction specific speed, it is more difficult to estimate cavitation behavior than to estimate upstream wall pressure fluctuations.

(5) The diameter of oil droplets d_M decreases sharply over time, due to O/W type emulsification in small plants using shear pumps. However, after an initial interval of 5 minutes or longer, d_M approaches a stable value. Thus, in this plant, it is clear that emulsification can be performed simultaneously with fluid transport.

(6) The eroded surfaces of blades and casings in shear pumps used for long periods in food packing were observed with a SEM. Erosion-prone regions are confined to the vicinity of blade root tips, the vicinity of the downstream side of grooves, and the vicinity of the casing outlet. An examination of eroded areas shows wear regions corresponding (from the center

outwards) to the incubation-, steady-, deceleration-, acceleration- and steady-state.

Professor (Chairperson) Yukio ITO