

# ポンプキャビテーション現象の基礎知識 [第1回]

能見基彦\*

## Basic Knowledge about Pump Cavitation Phenomenon [Part 1]

by Motohiko NOHMI

This paper presents basic information about the pump cavitation phenomenon. Firstly, the reason why the cavitation occurs is explained using the saturated vapor pressure curve of water. Water vaporizes vigorously when the water pressure drops to the saturated vapor pressure determined by its temperature. This is the principle of cavitation occurrence. In a fluid pipe line, water increases speed at a contraction section, lowering the static pressure at the same time. Then, when the pressure drops to the saturated vapor pressure, cavitation occurs. In the case of pumps, cavitation which occurs at the suction side of a blade because of the pressure drop is typical example. In addition, in transient phenomena, caused by sudden closing of a valve or pump trip, water column separation that is a kind of cavitation occurs. One of the problems caused by pump cavitation is pump head drop which makes non-attainment of a desired pressure. In relation to this, suction performance curve,  $NPSH_A$ , and  $NPSH_R$  are explained in this paper.

**Keywords:** Cavitation, Boiling, Saturated vapor pressure, Suction surface, Water column separation, Net positive suction head (NPSH), Suction performance curve

### 1. キャビテーションとは何か

ポンプ技術者なら、誰もが向き合わなければならない現象、それがキャビテーションである。元々は水中に発生する小さな泡だが、ポンプや水車、バルブなどの流体機械中では機能に影響を与える。まず発生原理から簡単に説明しよう。図1に水の飽和蒸気圧線図と呼ばれるグラフを示す。図の横軸は温度、縦軸は飽和蒸気圧である。ある温度の水が空気と接するとき、圧力が、その温度で決まる飽和蒸気圧以上ならば、水は穏やかに気化し、空気中の水蒸気分圧が飽和蒸気圧に達すると、蒸発は止まる。これがいわゆる湿度100%の状況である。水の圧力が、その温度で決まる飽和蒸気圧以上の場合、空気と接する面がなければ水の蒸発は起きない。我々が空気を吸って生きている大気圧下（100 kPa）では水は100℃で沸騰することはよく知られている。これは水を加熱することによって、水の温度が上昇し、飽和蒸気圧に達した状態である。沸騰は、水の中でも気化が起こり、空気界面での穏やかな水の蒸発と比べ、大変激しい変化であ

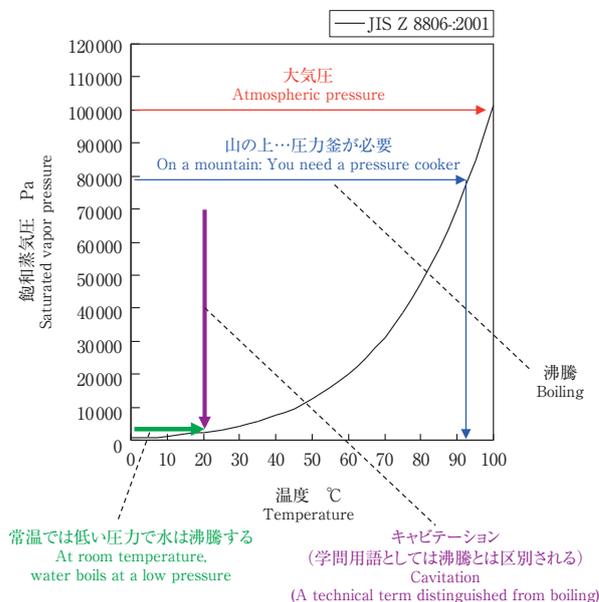


図1 水の飽和蒸気圧線図（沸騰が起こる温度と圧力の関係）  
 Fig. 1 Saturated vapor pressure of water (The relationship between boiling temperature and pressure)

る。そして水の圧力が低下すると、もっと低い温度で水は沸騰する（静的な状態では、真空ポンプ等による減圧によってこのような状態を作ることができる）。3000～

\* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 開発統括部

4000 Pa程度まで圧力が下がると、水は常温で沸騰する。これがキャビテーションが発生する原理である。通常、沸騰とは、同じ圧力下で水温が上昇して飽和蒸気圧に達し、水が急激に蒸発する現象を指すが、キャビテーションの場合、ほぼ同じ温度下で水圧が低下して飽和蒸気圧に達し、水が急激に気化する現象を指す。

流体中で圧力が低下する典型的な箇所は、**図2**に示すような送水管路系での断面積が小さくなる絞り部である。ベルヌーイの定理から、管の断面積の大きいところでは、水の速度が遅く、静圧は高くなる。逆に管の断面積の小さいところでは、水の速度が速く、静圧は低くなる。この低下した静圧が飽和蒸気圧まで達すると、水は気化を開始する。すなわちキャビテーションの発生である。もちろん、管の絞りで常にキャビテーションが発生するわけではなく、管内の静圧レベルが高ければ、（これをライン圧が高いと言う）絞りで圧力が低下しても、飽和蒸気圧までに余裕があるのでキャビテーションは発生しない。流体管路系において断面積が絞られている典型的な箇所は弁（バルブ）である。弁開度が絞られていくと、通常は流量が減るが、弁体近くの流速が局所的に上がり、キャビテーションが発生する可能性が増大することは広く知られている。

さて、ポンプの定義はいろいろとあると思うが、一つの定義として、水の圧力を上げて押し出す機械と言える。しかし、この定義からは忘れがちだが、ポンプとは、ある部分では水の圧力を下げる機械でもある。海や池の水をポンプで吸い込む際に、ポンプの入口の圧力が、海や池の中の取水口の静圧より低くなければ、そもそも水を吸い込むことができない。そしてポンプ本体に取り込まれた後で、ターボ型ポンプなら羽根車の作用で、容積型

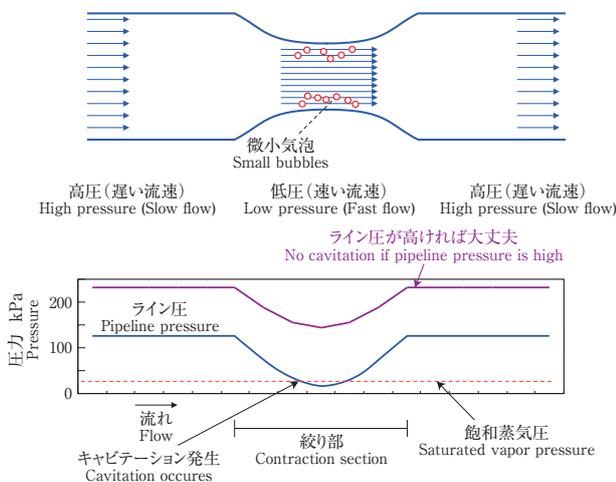


図2 管路内流れの低圧部に発生するキャビテーション

Fig. 2 Cavitation occurred at a low pressure point in the stream

ポンプなら容積が変化する圧力室の作用で水の圧力が高まる。このポンプ入口部近傍の圧力が低下する箇所で、静圧が飽和蒸気圧まで達すると、ここでもキャビテーションが発生する。これがポンプのキャビテーション発生の基礎原理である。**図3**は、流体数値解析で計算した軸流ポンプ内の圧力分布である。図3の中で、圧力が解析領域入口の静圧のレベルより5%以上、静圧が低下する箇所を等値面で示している。ターボ型ポンプの羽根の表裏は、圧力が上昇する圧力面と、圧力が低下する負圧面に区別されるが、図3から圧力が低下している箇所も、この負圧面であることが分かる。ターボ型ポンプでキャビテーションが発生する典型例が、この負圧面のキャビテーションとなる。もちろん、このほかにも、ポンプ内の漏れ流れや、いろいろなタイプの渦でもキャビテーションは発生する。運転条件によっては圧力面にキャビテーションが発生する場合もあるし、ケーシングや、羽根車の下流にある案内羽根で観察される場合もある。

ここまでの話は、定常的な流れにおいて発生するキャビテーションの発生原理である。キャビテーションを細かく観察すると決して定常的な現象ではないが、ポンプの運転や送水作業という観点で見れば定常的であるという意味である。一方、キャビテーションは、非定常な現象においても発生する。**図4**は、送水管路系を示している。ここで弁を急閉すると弁上流の水は弁体に衝突する。この現象は水撃現象と呼ばれ、大変高い圧力が発生する。家庭や職場などでも、水道の蛇口を急に閉じるとガーンという音が聞こえる場合があるが、これは水撃による音である。一方、弁下流の水は慣性があるため急停止することができず、そのまま進もうとする。このとき、弁と弁下流の水の間で一種の「ちぎれ」現象が発生する。これを水柱分離と呼ぶ。実際は、大根を包丁でスパッと切るように水がちぎれるわけではなく、ぼこぼこ水中に泡が発生する様子が観察される。これは一種のキャビテーション現象である（研究者によっては、前述の“定

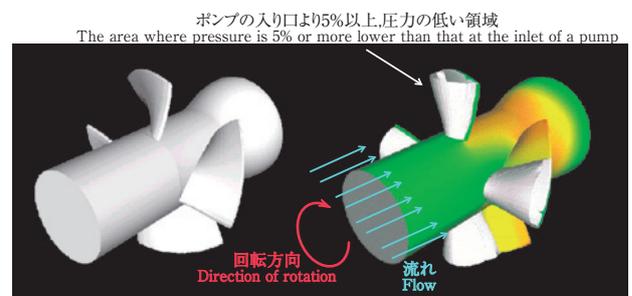


図3 数値計算で算出した軸流ポンプ内部の圧力

Fig. 3 Pressure inside an axial flow pump calculated by numerical calculation

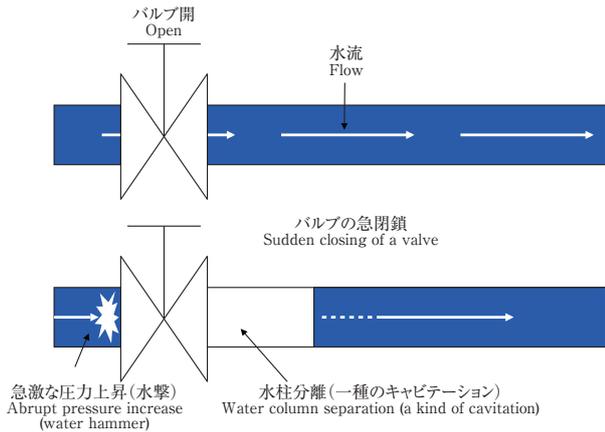


図4 非定常現象で発生するキャビテーション  
Fig. 4 Cavitation occurred as a transient phenomenon

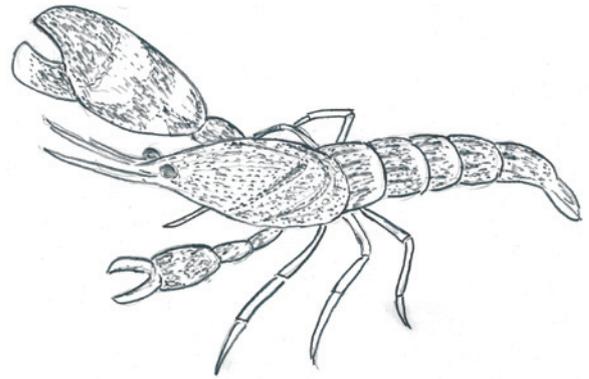


図5 キャビテーションを利用するテッポウエビ  
Fig. 5 A snapping shrimp utilizing cavitation

常的な”キャビテーションと区別する方もいる)。水撃も水柱分離も、管路内の圧力波の伝播（でんば）を伴うので、圧力波の反射形態によっては、水撃の後で水柱分離が発生したり、水柱分離後に水柱が再結合して水撃を起こしたりと複雑な過程を経る。このように水撃も水柱分離も、いずれも過渡的な現象であり、決して長続きする訳ではないが、管路系に対しては大きな損傷を与える可能性があり、なるべく発生を防がなければならない。大きな送水管路系で弁の急閉をしてはならないのは、このためである。また、送水中にポンプが急停止（ポンプトリップと呼ぶ）すると、これも水撃や水柱分離の発生理由になる。これを防ぐため、仮に動力を喪失しても羽根車が急停止しないようにフライホイールを付ける場合もある。

さて、ここで少し変わり種のキャビテーションを紹介しよう。今までは、流体機械や流体管路系でのキャビテーション発生のお話を中心に述べてきたが、全く別の環境でもキャビテーションは発生する。我々にとって最も身近なキャビテーションの発生箇所、それは人体である。よく、指などの関節を曲げるとポキポキ音がする場合があるが、これはクラッキング音と呼ばれ、一種のキャビテーションに起因する。関節を急に動かすことによって、関節を満たした液体に瞬間的に圧力の低い箇所が発生し、そこに気泡ができる。その気泡がつぶれるときに音が発生する。このほかにも自然界に発生する有名なキャビテーションがある。図5は日本近海にもいるテッポウエビである。このエビが大きな鉄砲のような音を出すのは有名であるが、ここにキャビテーションが利用されている。テッポウエビは、大きなはさみを急に閉めて、その際に生じる圧力変動で水中に気泡を発生させる。そして、気泡が崩壊する際に発生する音と衝撃的な圧力波で、敵

から身を守ったり、獲物を捕まえたりする。人体の関節で生じるクラッキング音も、テッポウエビの鉄砲のような音も、前述の分類でいえば、非定常な現象の際に発生するキャビテーションの一種と言える<sup>1)</sup>。

## 2. ポンプにおけるキャビテーションの悪影響 その1 揚程低下

時々、ポンプのキャビテーションを完全に消す方法はないのかという質問を受けることがある。ポンプのキャビテーションを止めるのは、実は大変簡単である。ポンプ吸込部の圧力が高いところにポンプを据え付け、さらに非常に大きいポンプを作り、羽根車をゆっくり回せば、キャビテーション無しで運転することができる。しかしながら、ポンプ自体のコストやサイズ、あるいはポンプ機場の建設費の観点で、これらの施策は全く現実的ではない。そこで、ある程度ポンプは小型化して羽根車も速く回し、結果として出てきてしまったキャビテーションは、少し「がまん」という方法が採られる。

では、ポンプ内にキャビテーションが発生すると何が問題で、何をがまんしないといけないのか？ここで、運転中のターボ型ポンプの入口部圧力を徐々に下げると、どのような現象が生じるか、順を追って見てく。最初は圧力を下げてもキャビテーションは発生しない。更に圧力を下げ続けると、わずかにキャビテーションの気泡が発生する。これを初生と呼ぶ。多くの場合、キャビテーションが初生したくらいでは、ポンプの運転に何ら問題は生じない。しかしながら、お客様の要望で、初生も防がなければならない場合もある。初生の定義として、目視による確認や、水中マイクロフォン等による微弱な騒音の検知などいろいろなものがある。入口部の圧力が下がり、キャビテーションがもう少し成長してくると、

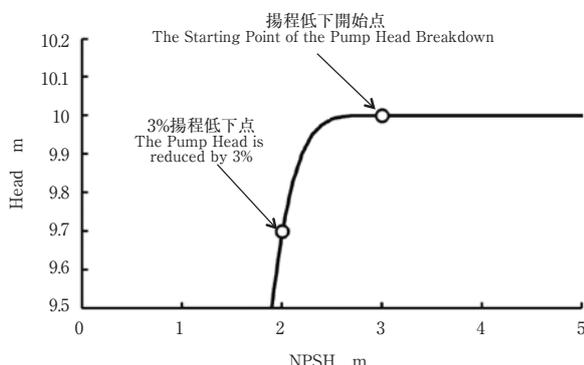
特徴的なパチパチあるいはパチパチといった感じの騒音が発生してくる。さらにキャビテーションが成長していくと、ポンプ本体を揺らすような振動が生じる場合もある。このようにキャビテーションが成長するにつれ、ポンプが発生する圧力、すなわち全揚程が下がりはじめる。この現象を揚程低下と呼び、ポンプにとっては所望の性能が出せなくなるので、最も問題となる現象である。この揚程低下をどこまで許容するかが問題である。ポンプの使用目的によっては、わずかでも全揚程の低下が許されない場合もあるだろうし、また逆に、かなり圧力が下がっても許されるケースもあるだろう。このようにケースごとに異なる許容値を決めていると、ポンプの性能としては非常に評価しづらくなるので、通常は、ポンプの全揚程が3%低下する点で評価するということが規格\*で規定されている（高压多段ポンプでは、初段の全揚程3%の低下量を用いる）。**図6**は、ポンプの吸込性能曲線と呼ぶものである。横軸はNet Positive Suction Head；NPSH、日本語では有効吸込ヘッドと呼ばれる量である。縦軸は単純にポンプの全揚程となっている。NPSHは、ポンプ上流で規定し、以下のような式で表わされる。

$$NPSH = \frac{p + \frac{1}{2} \rho u^2 - p_v}{\rho g} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $p$ は静圧、 $\rho$ は水の密度、 $u$ は水の流速（断面平均流速）、 $p_v$ は飽和蒸気圧、 $g$ は重力加速度であり、NPSHの単位はJIS規格ではmとなる。この量はポンプ上流の全圧と飽和蒸気圧の差をm単位で表したものであり、ポンプ入口の水の圧力の低さを意味するが、あるい

はキャビテーション発生が不可避である飽和蒸気圧からの余裕も見ることができる。このポンプ入口のNPSHが低いほど、ポンプ内でキャビテーションの発生する可能性が高まることになる。図6のポンプでは、NPSHが3 mまでは、全揚程に変化はない。NPSHが3 m以下になると、全揚程が下がり始め、2 mになると、全揚程が3%低下する。このNPSHをNPSH requiredあるいはNPSH<sub>R</sub>、日本語では必要NPSHあるいは要求NPSHと呼ぶ。そして、キャビテーションが発生していないときの仕様が同じポンプで比較して、NPSH requiredが低いポンプほど、キャビテーションの影響を受けにくいことを意味する。これを吸込性能が高い、あるいは吸込性能が良いなどと言う。この図6のようなグラフを実験で求める場合は、ポンプ試験場において、何らかの方法で、ポンプ入口部の圧力を徐々に下げて、そのときのNPSHと全揚程をプロットしていく。ポンプ試験管路系に取り付けられた真空ポンプで、直接、ライン圧を下げるのが、ポンプ入口部の圧力を下げる代表的な方法である。一方、ポンプがお客様の元で運転される場合、ポンプ入口部の圧力は、季節的な変動や、お客様の業務の都合などで変化はするが、真空ポンプで上げ下げするほどには変わらず、ある範囲に収まるのが普通である。このポンプの使用現場によって決まってくるポンプ入口部のNPSHをNPSH availableあるいはNPSH<sub>A</sub>、日本語では有効NPSHと呼ぶ。そして通常は、ポンプの特性値として決まるNPSH requiredが、NPSH availableよりも小さくしなければいけないと考える。「いけない」というのは、あくまでそのように規格で取り決めたからであって、前述したように、全揚程が少しでも下がっては困るお客様は、これでも足りないし、逆に全揚程が3%を超えて下がっても問題のないお客様は、NPSH required > NPSH availableでご使用いただいても良いことになる。ただし、ポンプにおけるキャビテーションの問題は、揚程低下だけではないので、NPSHと全揚程の大きさだけの関係で運転状態を決めて良いわけでもない。これに関しては、次回以降に説明する。

\* JIS B 8301:2001「遠心ポンプ、斜流ポンプ及び軸流ポンプ—試験方法」



**図6** 吸込性能曲線の例  
**Fig. 6** Example of a suction performance curve

参考文献

1) Science, Vol.289, no.5487, pp.2114-2117, (2000).