

円柱後方のキャビテーションについて

田 島 勲*・原 田 彊**

On Cavitation behind a Circular Cylinder

Isao TAJIMA and Tsuyoshi HARADA

要 旨

円柱後方のキャビテーションによる圧力変動と騒音およびキャビテーションの様相を調べ、それらの関係について考察した。

1. 結 言

円柱から放出されるキャビテーションに伴って生ずる衝撃性の圧力変動および騒音は流路壁面の損傷に関連するため、数多くの研究がなされている。たとえば Varga⁽¹⁾⁽²⁾ は騒音と損傷との関係について、Rao⁽³⁾ らはうず流動の振動数が損傷に与える影響を、山崎⁽⁴⁾⁽⁵⁾ らは損傷の原因となる衝撃と気ほう流動の関係について、大場⁽⁶⁾ らはキャビテーションの様相と流れの動的挙動との関係の解明に対して、それぞれ緻密な研究を行った。その結果振動騒音の強さは、キャビテーション係数を漸次小にすると増加し山頂を形成した後降下するというつりがね形をなすこと、また衝撃は蒸気ほうの圧壊と気ほううず流動による圧力変動がひきがねとなって生ずること等が示された。しかし試験水槽が異なれば、試験片やレイノルズ数、キャビテーション係数が同じでもキャビテーションの様相が異なるというジョンソン効果や、騒音・衝撃・損傷およびキャビテーションの様相との関係が定量的にも定性的にも明確になったとはまだ言えないと考えられる。本報では最も基本的な流れのパターンを持つ円柱回りの二次元流れを取り上げ、流れの様相や騒音、圧力分布とその変動を調べるために、キャビテーション係数の広い範囲で実験を行なったので、その結果を報告する。

d : 円柱直径
 p_v : 実験水の蒸気圧
 p_∞ : 代表静圧
 Re : レイノルズ数 $= U_\infty d / \nu$
 St : ストローハル数 $= fd / U_\infty$
 f : 水流うずの振動数
 l : 空洞長さ
 U_∞ : 代表流速
 p : 回転側板での静圧
 σ : キャビテーション係数 $= 2(p_\infty - p_v) / \rho U_\infty^2$
 ν : 実験水の動粘性係数
 ρ : 実験水の密度

2. 実験装置および方法

図 1 に示す回流式の管路途中に、幅 49 mm 高さ 96.5 mm の長方形断面を持つ長さ 360 mm の測定部が設けられ、その前面はアクリル樹脂板である。供試円柱は直径 28 mm の黄銅製で、同じ材質の円板に取りつけられており、この円板を O リングでシールし背面をスラスト軸受で押えてあるので、円板に取り付けられている円柱および円板側壁の圧力測定点を実験中に回転させることが出来る。実験は流速 6.21 m/s、レイノルズ数 1.7×10^5 、キャビテーション係数 4 ~ 1.5 の範囲で行った。実験水は水道水で空気含有量は 2 % 程度であり、実験中の水温は 15 ~ 20℃ である。圧力測定には、円柱中心から 85 mm 上流に代表静圧測定孔

* 助 手 機械工学科

** 教 授 機械工学科

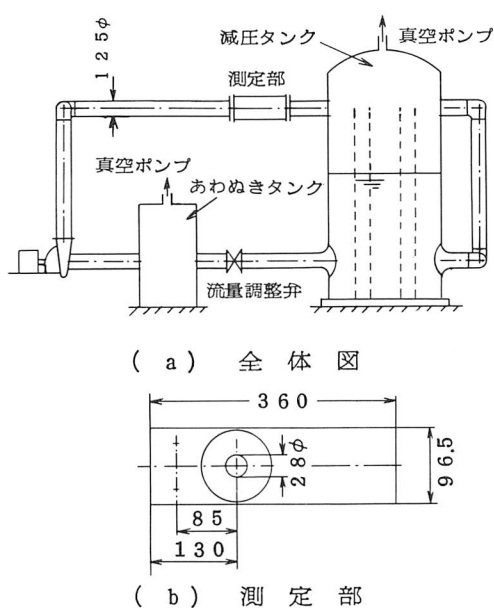


図1 キャビテーション試験用回流装置と測定部

が、また円柱表面には0.5mmの圧力測定孔がそれぞれ設けられ、いずれもひずみゲージ式圧力変換器で圧力が測定された。円板側壁には、中心から32mmの位置に半導体式とひずみゲージ式の圧力変換器を、圧力変動や衝撃圧が直接測定出来るように受圧面を水流にさらして取り付けした。これらの固有振動数と受圧面の直径は、半導体式が35^{KHZ}、5mm、ひずみゲージ式は2.5^{KHZ}、8mmである。同じ流れ状態における2種類の出力波形を図2に示すが、これらには違いが特に認められず、水流うずやキャビテーションによって発生する気ほうの圧壊による周期性のある衝撃的圧力変動の検知にはいずれを用いても大差はない。騒音計はコンデンサマイクロホンを用いた。

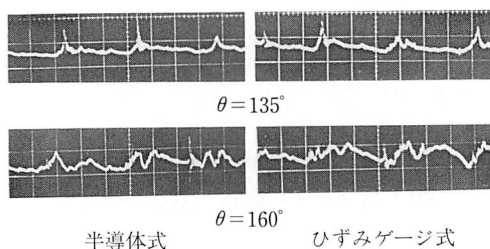
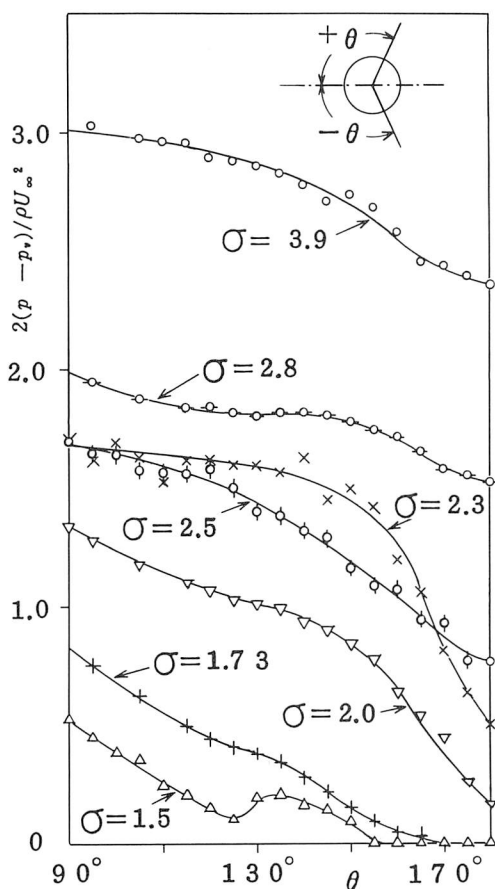
図2 圧力変換器出力波形 ($\sigma=2.0$)

図3 円柱回りの圧力分布

3. 実験結果とその考察

3.1 圧力分布

図3は円柱中心から、 $1.14d$ 離れた円板側壁上で測定された圧力 p と蒸気圧との差を、一樣流れの動圧で割り無次元圧力係数とし、円板の回転角に沿って示したものである。圧力分布は、上下で同じ分布が確認された。キャビテーションの初生はキャビテーション係数 $\sigma=3.9$ 付近であり、円柱の上下から断続的にキャビテーションによる気ほうが観察されたが、円柱後方での圧力変化は、発生前と同じ傾向である。圧力を下げキャビテーションの程度を順次大きくすると、 $\sigma=2.8$ 付近で気ほうが目視出来る程度の小さな気ほう群となり円柱上下から現われ始めるが、圧力分布の傾向は、初生時と同じである。 $2.8 < \sigma < 2.0$ の範囲でキャビテーションは、急激にその様相を変えながら成長し、気ほう群の流動も円柱後方中心に巻きこまれるようになり、円柱上下から生長離脱を繰返す

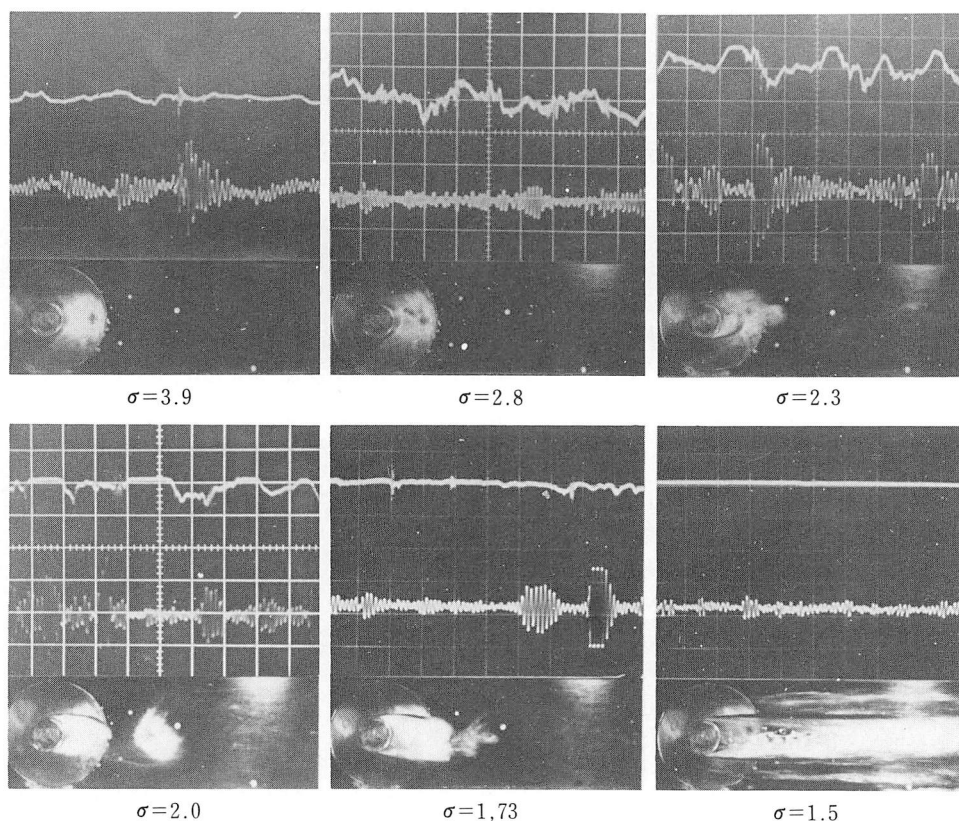


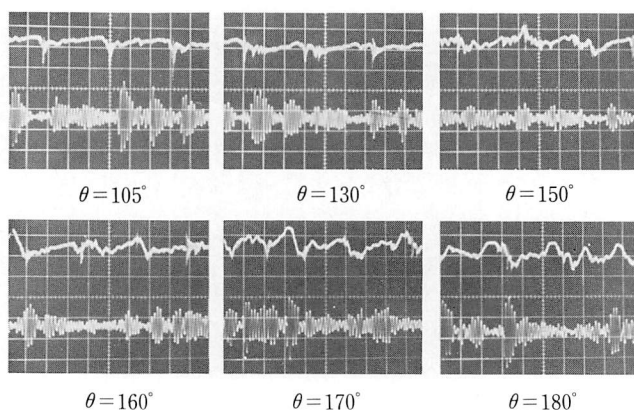
図4 円柱後方における圧力変動 騒音およびキャビテーションの様相

気ほう群と、円柱に付着した気ほう群とが共存するようになる。 σ が大きいときは、後方に大きい圧力変化は起こらず、そのために気ほうの流動は上下に分かれている。しかし σ が小さくなるに従って流れの変化が大きくなり、 $\sigma=2.5$ 付近から後方に圧力変化が徐々に現われ、気ほうが後方流れの中心に巻きこまれるようになる。 $\sigma=2.3$ では主流での圧力変化は非常に小さく、それは $\sigma=2.5$ に比較して圧力係数で最大0.2程高い値を示しており、そのため後方での圧力変化は急激となり、気ほう群の巻きこみが最も激しくその圧壊による衝撃は最も強い状態となる。キャビテーションが成長し $\sigma<2.3$ になると円柱後方に空洞が付着し、急激な圧力の変化は再び緩やかになり、同時に衝撃も弱くなってゆく。 $\sigma=2.0$ になると気ほう群の長さは $1.6d$ となり、 $\sigma=1.7$ では $3d$ に達して空洞領域も広がる。圧力測定によるとその領域は、圧力係数で0.05程の値を示したが、これはまだ後方 $1.14d$ ではまだ透明な空洞になっていないからである。 $\sigma=1.5$ では、円柱後方のキャビテーションは透明な空洞となり、この圧力は蒸気圧に

等しく、主流と空洞との境界付近の圧力は連続的に主流にむけてゆるやかに圧力が上昇している。なお $\sigma=1.4$ の圧力分布で $\theta=125^\circ$ で圧力係数が小さくなっているのは、後で述べるように円柱前方から生ずるヒモ状キャビテーションによるものである。

3. 2 圧力変動

図4には、キャビテーションの成長過程における、 $\theta=180^\circ$ の位置で測定された圧力変動と騒音およびキャビテーションの様相を示す。著者らは、圧力変動を2種類の圧力変換器から求め、ひずみゲージ式圧力変換器はペンレコーダとシンクロスコープに出力させた。キャビテーション初生時の圧力変動は、その初生前とはほぼ同様で、水流うずによる正弦波に近い波形であり、気ほう圧壊による衝撃的圧力変動が現われるが、圧力測定点が発生点から約 $1d$ 離れているためその振幅は小さい。圧力変換器のダイヤフラム径はキャビテーション初生時に生ずる気ほうの大きさとその量に比べて大きいので、キャビテーションが初生する

図5 円柱回りの圧力変動と騒音 ($\sigma=2.3$)

位置でその衝撃圧を測定しても、後で見られるような大きな衝撃による振幅は見られないと考えられる。 $\sigma=2.8$ 付近では、円柱回りでの圧力分布は発生前と同じであるが、圧力変動はカルマンの渦を推定させる周期性のある変動が現われる。キャビテーションが成長すると $\sigma=2.5$ 付近からは、それまでの成長過程に見られない突起のあるするどい波形を示し、衝撃的変動が頻繁に現われる。気ほう群の圧壊による衝撃は、圧壊する位置が圧力測定位置と一致すること、また圧壊の衝撃を和らげる空洞が円柱後方に付着していないことから、 $\sigma=2.3$ 付近で衝撃の強さは最も強くなり出力波形からは約 290kPa の衝撃圧が観測された。さらにキャビテーションが成長すると円柱後方に空洞が付着し、上下から発生した気ほう群がうず中心に巻きこまれ圧壊する際、衝撃を和らげるようになる。 $\sigma=2.0$ 付近になると波形は1部平たい底部を持ち始め、圧力変換器受圧面が気ほうにおおわれていることを示している。衝撃圧の鋭いピークも $\sigma=2.3$ と比べわずかであるが小さくなっている。 $\sigma=1.73$ では円柱後方の圧力測定位置は、完全に気ほう群におおわれるため圧力変動はなくなるが、主流では、気ほうの尾が振動する衝撃を周期性のある波形で示す。 $\sigma=1.4$ になるとスーパーキャビテーションとなり、圧力変動はなくなった。図5に円柱回りの特徴的圧力変動の波形を $\sigma=2.3$ について示す。円柱後方では、水流うずと気ほうの圧壊による圧力変動が、また主流では、圧壊による衝撃的圧力変動だけが主に現われる。これらの周期的圧力変動の結果からうず流動の振動数を求めることが出来た。それによると周期的変動は、 $\sigma=2.5$ 付近から観測され σ とストローハル数 S_L の関係は図6のようになる。結果

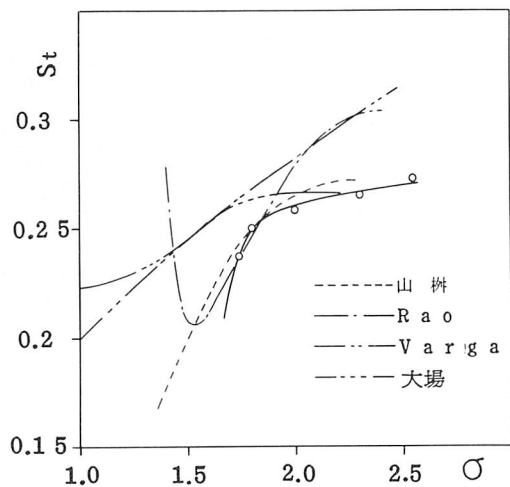


図6 キャビテーション係数とストローハル数

が文献により異なるのは、周期性の測定方法、実験装置、およびレイノルズ数にそれぞれ違いがあることが原因と考えられ、継続した研究が必要と考えられる。Rao⁽³⁾らによると S_L は最小値を持ち、その時の σ より小さい場合には S_L が再び増加するという結果が得られているが、山根らと同様に著者らの実験でもそれは確認出来なかった。 $\sigma=1.5$ ではヒモ状キャビテーションが現われるため、これを境に主流内では圧力変動はなく、ヒモ状キャビテーションと空洞の間では、ペンレコーダに、わずかな変動が示される。空洞部分を含めると三つの層に分かれていることが確認された。

3.3 騒音

著者らは、ひずみゲージ式圧力変換器と騒音計の出力を同時にシンクロスコープに出力させ、そ

の同時性とキャビテーション成長過程における変化を調べた(図4)。それによるとキャビテーションが初生すると騒音計に最初その変動が現われ、 σ で0.2程遅れて圧力変換器にも変動が現われている。2つの波形を比較するとその変動は時間的に一致し、このことは簡単に外部からキャビテーションの初生を検知しうることを示していると考えられる。キャビテーションが成長し気ほう群となって発生するようになると、騒音と圧力の変動は時間的に一致なくなる。その後騒音はキャビテーションの成長と共に徐々に激しさを増し、円柱後方に安定した気ほう群が出来ると急激に弱まってゆく。騒音の最も強かったのは $\sigma=2.2$ 付近であり、衝撃的圧力変動が最も大きかった $\sigma=2.4$ の間にキャビテーション係数が違いがあるのは、圧力測定点が $1.14d$ に固定されているためであろうと推察される。騒音と損傷を関連づけるためには、より多数の圧力測定点での結果と比較することが必要と考えられる。

3. 4 キャビテーションの様相

キャビテーションが発生していない状態から、十分成長したスーパーキャビテーションの状態までの様相の写真を図4に示す。初生近傍では円柱上下のはく離部分から小さなキャビテーションによる気ほうが流れ始め、 σ の減少とともに気ほうの量も増す。しかし $\sigma=2.8$ 近くまでは圧力分布に示されたように円柱後方における圧力の低下が小さいため、円柱上下のはく離点から、初めは断続的に、その後成長するに従って連続的にキャビテーションによる気ほうが発生し、円柱後方のうず中心に巻きこまれる前に消滅している様子が観察される。 $\sigma=2.5$ 付近になると円柱後方の圧力低下も大きく、気ほう群は交互に発生し、さらに成長し $\sigma=2.3$ になるとキャビテーションによる気ほう群は最も激しく円柱の上下から交互に円柱後方のうず中心に巻きこまれる。気ほう群の圧壊する位置はおよそ $1d$ となり、圧力変換器で測定された衝撃的圧力が最も大きい状態となる。キャビテーションはこれより成長すると円柱後方に白濁した固定キャビテーションが付着し、 $\sigma=2.0$ では円柱表面には薄い透明な空洞が観察される。しかし気ほう群は垂直方向と流れの方向に激しい振動を繰り返している。 $\sigma<2.0$ では、円柱後方に付着した透明な空洞と白濁した気ほう群は、その長さを急に増加させ、尾部の垂直方向の振動が減少し騒音が急に小さくなる。 $\sigma=1.6$ 付近で円柱前方

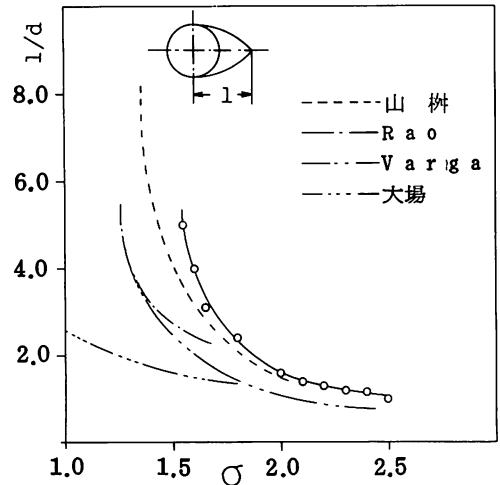


図7 キャビテーション係数とキャビテーション長さ

からのヒモ状キャビテーションが現われ透明な空洞も長さを増す。 $\sigma=1.5$ でスーパーキャビテーションとなり空洞内部は、透明で内部ではね返り噴流も良く観察された。図7は直接写真(1/1000 Sec)から測定したキャビテーション気ほう群の長さ l と σ の関係である。ストローハル数の変化と同様に $\sigma=2.3$ 付近から、長さが急に大きくなっている。

4. 結 び

円柱後方キャビテーションの成長過程において、圧力と騒音およびキャビテーションの様相を、 $Re=1.7\times 10^5$ の条件のもとに観測し次の結果を得た。

1. 円柱後方の圧力変化が最も急激で、付着空洞がない状態のとき、キャビテーション気ほうの圧壊による衝撃的圧力は最大となる。
2. 圧力変換器と騒音計は、ほぼ同時にキャビテーション初生を検知し、それらによる瞬間的な圧力と騒音の変動についての同時性が確認された。
3. 圧力測定点が、発生位置からおよそ $1d$ 離れていても、円柱後方で交互に形成される気ほうの圧壊によって生ずる衝撃的圧力変動の周期性は、明確に確認出来る。

文 献

- (1) Varga, J. J. and Sebestyen, G. Y., Act Technica Academiae Sientiarum Hungaricae, 53 (1966), 91
- (2) Varga, J. J. and Sebestyen, G. Y., Proc. 2nd Int. JSME. Symp. Fluid Machinery and Fluidics, 1 (1972-9), 285
- (3) Syamala Rao, B. C.,ほか 2 名, Trans. ASME, Ser. D, 92-3 (1970-9), 563
- (4) 山柵・横溝, 機論, 43-369, (昭 52), 1829
- (5) 横溝・山柵, 機論, 45-394, B (昭 54), 783
- (6) 大場, 安, 機論, 46-402, B (昭 55), 197

(昭和 58 年 11 月 30 日受理)