

危険速度付近の水中ロータの運動について

岡山 新史*・神山 新一**・山崎 堯右*・坪田 誠*

(*農学部機械工学研究室 **東北大学高速力学研究所)

Cavitation Occurrence in the Vicinity of Critical Speed of Rotor

Shinji OKAYAMA*, Shinichi KAMIYAMA**, Takasuke YAMASAKI*
and Makoto TUBOTA*

*Laboratory of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture

**Institute of High Speed Mechanics, Tohoku University

Abstract: This paper deals with the cavitation occurrence in the case where a rotor rotates near the critical speed in water. We carried out an experiment using a special rotor whose form is an incomplete circle. The outline is described as follows.

- (1) Our experimental data of cavitation occurrence agree with the data obtained by the usual experiments.
- (2) The cavitation at the surface of the rotor appears to be the uniform two-phase flow when the rotation speed is increased to critical one.
- (3) The cavitation occurrence is consistent with the theoretical values when we take into account the surface tension.

結 言

今日広く農業などに利用されているポンプ、水車、推進装置などの水力機械は羽根軸系でいわゆる水中ロータを構成しており、その軸系の設計指針は一見確立されているように見える。しかし、空気中での回転運動下の挙動に比して水中での危険速度については未だに多く残された問題がある。例えばロータが危険速度に達すると振動が発生するが、水中においては高速度になるとキャビテーションによる振動も発生する可能性がある。高速液流下で発生するキャビテーション下の軸系の挙動は不明な点が多く、特に危険速度との干渉問題はあまり検討されていない。

そこで本研究では、キャビテーションが発生する領域での危険速度通過領域のロータの挙動を実験的に検討し、2, 3の知見を得たので報告する。

以下にここで使用する記号を定める。

記 号

C_T : トルク係数	Re : レイノルズ数	$x_0, P_0 = 103.12 \text{ kPa}$
M : トルク Nm	T : 水温 K	$T = 286.5 \text{ K}$ のときの振幅
N : ロータの回転数 rpm	P_{lref} : 基準圧 kPa	α_0 : 大気圧で計ったボイド率
P_{g0} : 大気圧-飽和蒸気圧 kPa	P : ロータ先端の静圧 kPa	α_{ref} : 基準状態下でのボイド率
P_0 : タンク圧 kPa	K : $\alpha_0 P_{g0} / (1 - \alpha_0)$ kPa	ζ : 減衰率
P_s : 水の飽和蒸気圧 kPa	v : ロータの周速度 m/s	η : 系の粘度
R : ロータの半径 m	x : 振幅 mm	η_0 : 液体の粘度
R_{ref} : 基準状態下の気泡半径 m		ν : 動粘度 m^2/s

ξ_c : とけこみのみかけの分離圧
を P_{inf} で除した値

ρ : 水の密度 kg/m^3

ω : 固有振動数 rad/s

σ : キャビテーション係数

実験装置と実験方法

Fig. 1 にここで用いた装置の概略を示す。タンク⑬の体積を $0.029m^3$ とし、その中に軸ロータ系をおさめ水を封入し低圧にさらした。ロータの軸間距離を $0.585m$ 、ほぼ中央にロータ⑤を取り付けた。タンク側面にタンク内の様子が観測できるように透明なアクリル製の観測窓④を二カ所設けてある。

三相分巻モータによって駆動されるロータ、軸系と従動側プリー⑮との間に継手を設け、振動時に軸に曲げモーメントが生じないようにした。タンク内を水封する必要から Fig. 2 の様に軸支持部⑪はオイルシールにより密封した。供試ロータは Fig. 3 に示す形状とし、厚さは $9.25mm$ である。ちなみに円形断面のロータについても実験を行ったが、キャビテーション発生が明確でなかったのでここでは図の形状の場合に限って検討する。ロータ表面にはストロボライトで回転数がわかるように白線を一本つけた。

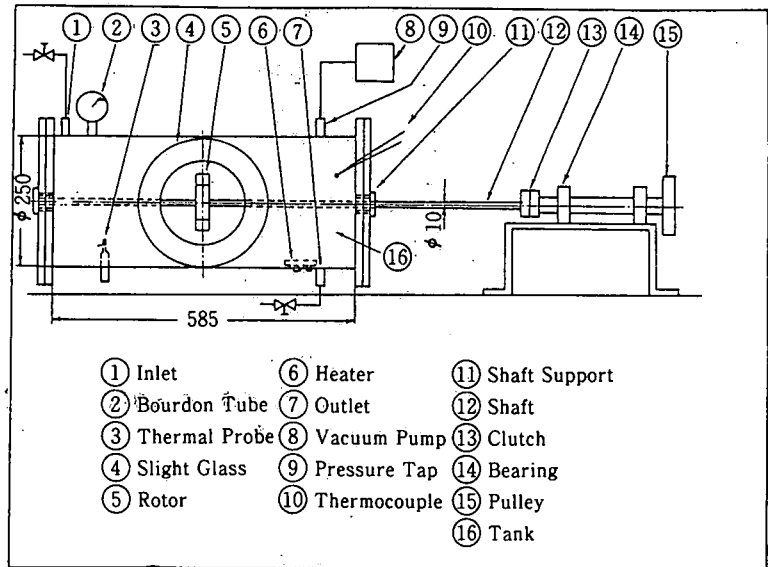


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

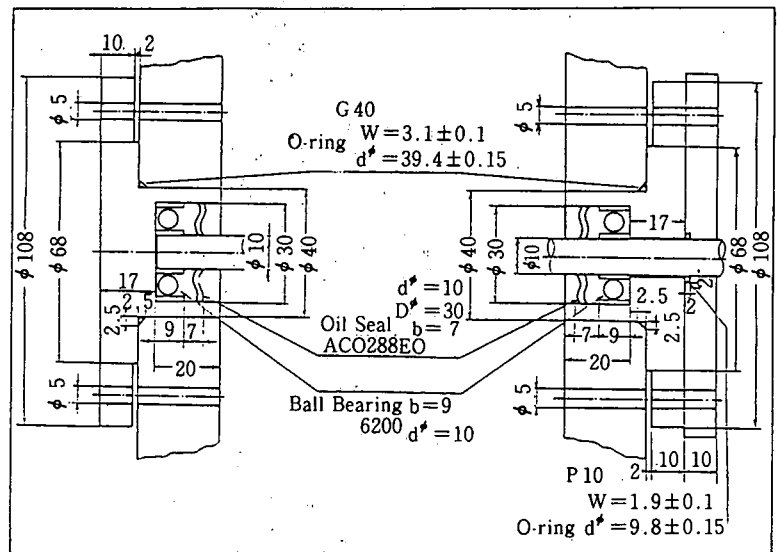


Fig. 2. Shaft support.

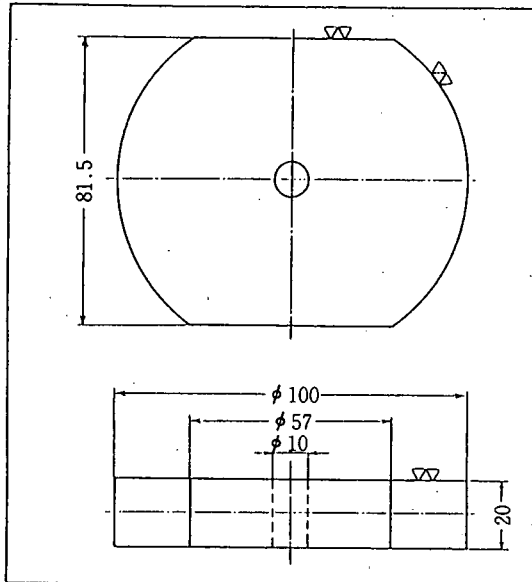


Fig. 3. Test rotor.

タンク内の加温は Fig. 1 に示す箇所のタンク内にヒーターを取り付け、任意の水温に設定した。三相分巻モータで任意の回転数に設定したあと、ロータの振動の様相をビデオテープに録画した。タンク内の水温は熱電対⑩を用いて測定した。また Fig. 4 に示すように二組の観測窓からみたロータの様子を同時に記録できるように鏡⑪を置いた。軸の振動は実際の寸法と、撮影し再生した軸の寸法の比率をとり、実際の寸法になおした値である。

ロータの運動はロータにつけた白線の根元に着目し、ストロボライトの点滅により各振動した箇所に着目して求めた。キャビテーションの抑制点は、ロータ表面の切り欠き角の部分のまわりに気

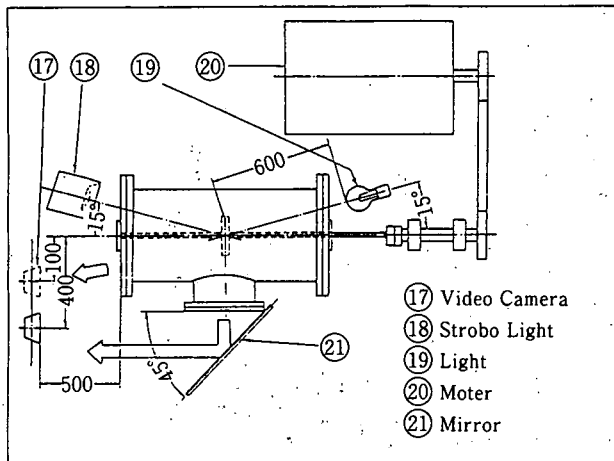


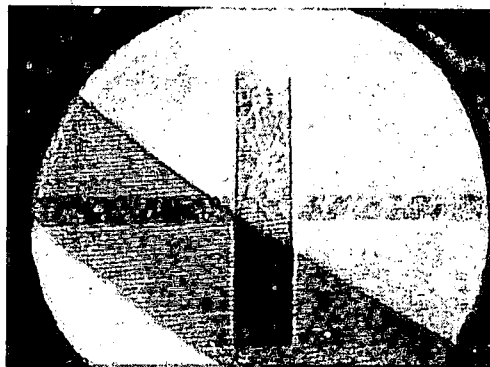
Fig. 4. Schematic position of observation set-up.

泡が発生した後、抑制し消滅する寸前の状態を目測によって求めた。

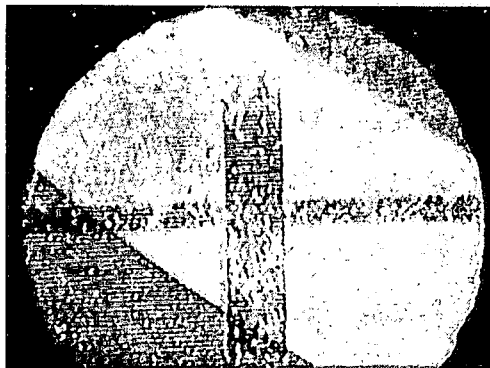
実験結果及び考察

Fig. 5 (c) はキャビテーション初生の様子を示す。

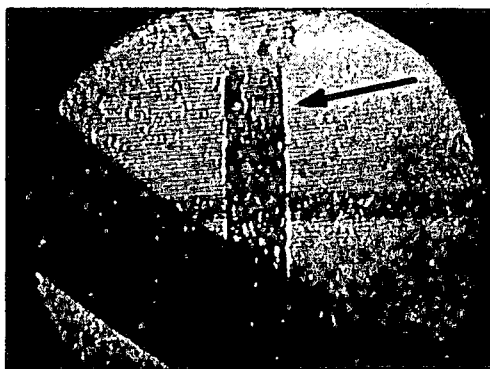
危険速度付近におけるロータの様相を Fig. 6 に示す。水中のロータの危険速度は空气中よりも低い回転数で起こっている傾向にある。また、ロータの振幅も水中では空气中よりも低下する傾向に



(a)

 $T = 337.2 \text{ K}$ $P_o = 29.930 \text{ kPa}$ $N = 1130 \text{ rpm}$ 

(b)

 $T = 328.2 \text{ K}$ $P_o = 29.930 \text{ kPa}$ $N = 1482 \text{ rpm}$ 

(c)

 $T = 328.2 \text{ K}$ $P_o = 29.930 \text{ kPa}$ $N = 1363 \text{ rpm}$

Fig. 5. Cavitation of rotor in tap water.

(a) No cavitation (b) Developed Cavitation (c) Cavitation inception

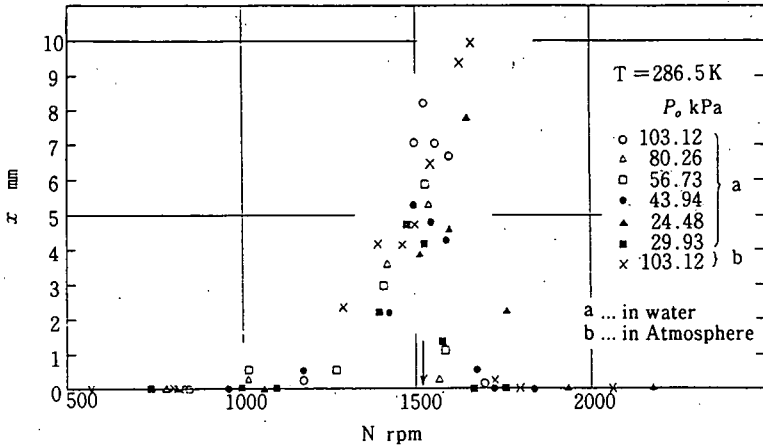


Fig. 6. Appearance of rotor motion in the vicinity of critical speed.

ある。また、水圧を大気圧から徐々に下げていくとキャビテーションが発生し二相流の状態となり、二相流のみかけの粘度の増加が著しく、そのためにみかけ上振幅が小さくなっていく傾向にある。さらに低圧になると再び振幅が大きくなる。これは低圧によっていわゆるスーパーキャビテーションの状態となり水がロータの表面から剝離し、ロータに加わる抵抗が減少したためと考えられる。また、図中の矢印は水の存在を考慮しない場合の危険速度である。

Fig. 7 にはキャビテーションの抑制条件をキャビテーション係数 σ で表してある。この図よりキャビテーション係数 σ が 0、すなわちロータ表面の液圧が飽和気圧 P_v に等しくなった状態ではキャビテーションは発生せず、やや負圧の時にキャビテーションが発生しており、周速度 v の影響は著者らの理論的予測値⁽¹⁾と同傾向を示す。また温度効果としての、いわゆる熱力学的効果は常温付近においては温度が増加すると共にキャビテーションは発生しやすくなり、さらに高温においてはキャビテーションが発生しにくい傾向を示す。この図の実線は文献⁽¹⁾による計算値を図示し

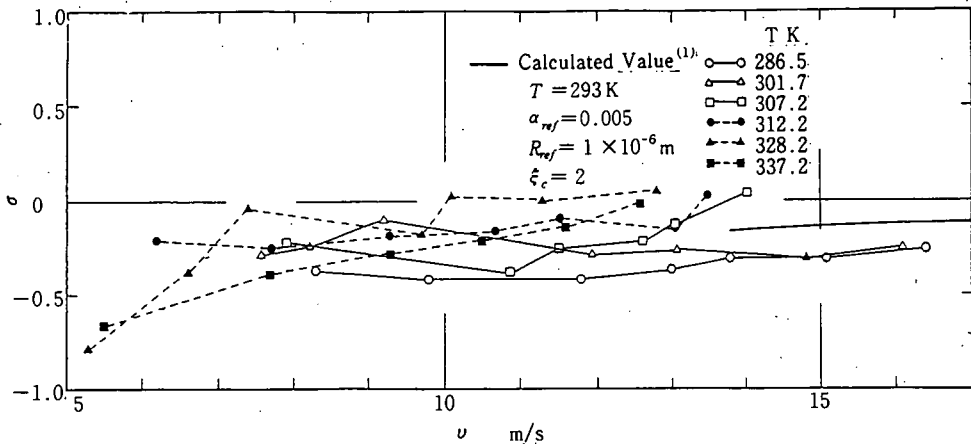


Fig. 7. Experimental data of cavitation desinence.

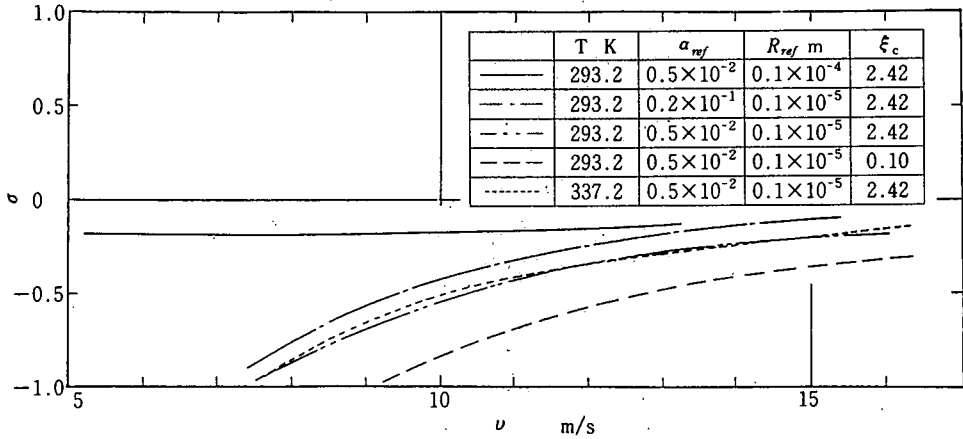


Fig. 8. Theoretical prediction of cavitation desinence.

たものであるが、本実験における水温286.5K～337.2Kの範囲においては同様な傾向を示している。Fig. 8は本実験の条件を用いた理論的予測値である。この図における α_{ref} 、 R_{ref} は、基準状態でのボイド率、気泡半径であり ξ_c はとけこみのみかけの分離圧を基準圧 P_0 で除したものである。

この図において流速 v が増加すれば、飽和状気圧に近づく傾向を示し、また温度による影響は少ない傾向を示す。Fig. 7の実験値と比較すると、ほぼ同様の傾向を示している。またFig. 9はレイノルズ数 Re で整理したキャビテーション発生条件を示す。ただし、実験値に使われたキャビテーション係数 σ は次式で求めた。

$$\sigma = \frac{2(P - P_v)}{\rho (2\pi RN/60)^2}$$

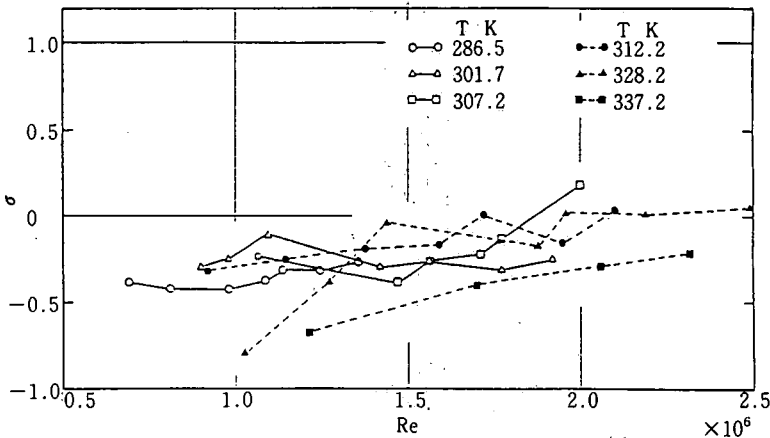


Fig. 9. Cavitation desinence data.

Fig.10は低圧にした設定圧力 P_0 におけるキャビテーション発生条件での回転数 N と温度 T との

関係をみたものである。これによると、いずれの設定圧力 P_0 においても高温になるほど低回転数域でキャビテーションが発生している傾向にある。また、設定圧力 P_0 が高圧域ではこの領域での高温であっても危険速度付近ではキャビテーションの発生はみられず、低圧、高温になると危険速度付近でキャビテーションの発生がみられ、この傾向は低圧であるほど、低温でもキャビテーションが発生することを示している。Fig.11は、キャビテーションの発生条件に及ぼすタンク圧 P_0 と液温 T の影響を图示したものである。

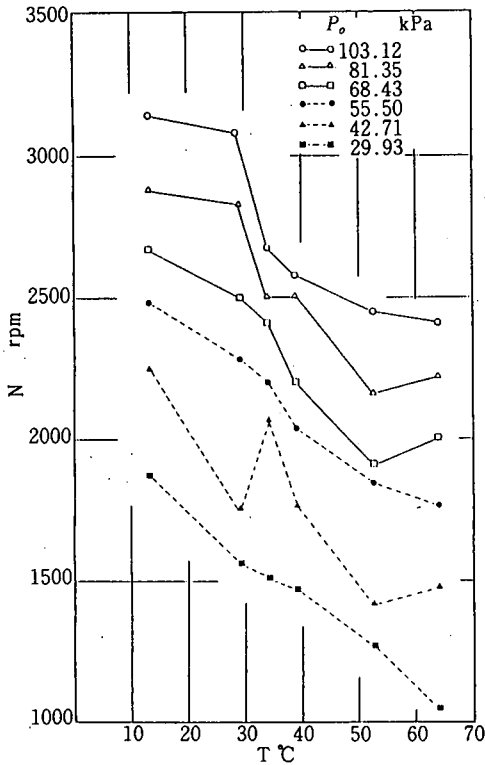


Fig. 10. Revolution vs. temperature at cavitation desinence.

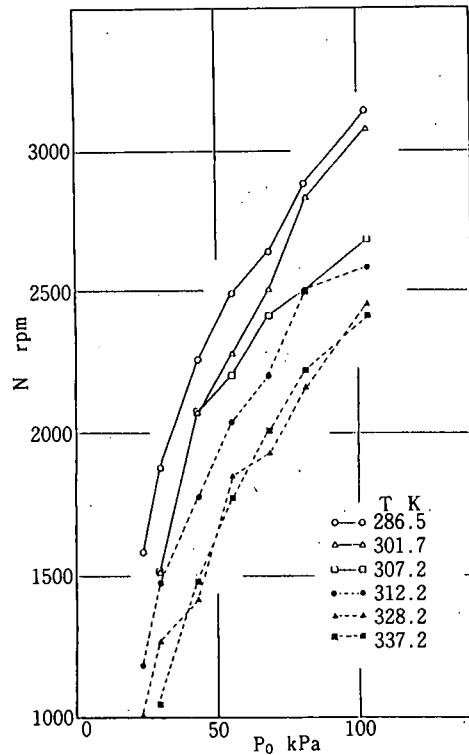


Fig. 11. Revolution vs. pressure at cavitation desinence.

Fig.12は危険速度付近のロータの運動の様相を图示したものであり、各点はストロボライトをロータの回転数とほぼ一致させて、ロータが一回転ごとに前の回転位置よりずれた動いた位置の軌跡を求めたものである。図中の一点破線は最大振幅の時のロータの位置を示した。①, ③, ④, ⑤, ⑦においては、運動の様相に偏りがみられるが、これはロータが Fig. 4 に示すような形状であるため抵抗の少ない方向にふれが偏ったものである。

次に、任意の液圧 P_0 下における気液二相状態下でのトルクを考える。本実験の水中のロータの先端レイノルズ数の範囲は

$$Re \approx 2.5 \sim 7.5 \times 10^5$$

である。ところでこのレイノルズ数範囲のトルク係数は文献 (2) では、

$$C_j \approx \text{const } Re^{-0.5}$$

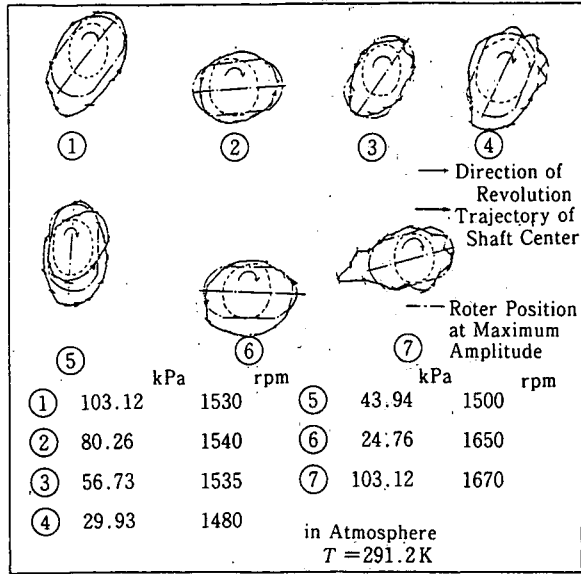


Fig. 12. Appearance of rotor motion in the vicinity of critical speed.

だから、トルク M は次のような関係になる。

$$M \approx \text{const } \rho_o \omega^2 R^5 \left(\frac{\omega^{0.5} R}{\nu^{0.5}} \right)^{-1}$$

$$= \text{const } \rho \omega^{1.5} R^4 \nu^{0.5}$$

次に気液二相流れ下では、ボイド率が増加するためのみかけの粘度の上昇を考える。文献 (3) よりボイド率 α 下の粘度は、

$$\eta / \eta_o = \left(1 + \frac{1.25 \alpha}{1 - 1.35 \alpha} \right)$$

ここで、任意減圧下のボイド率 α は文献 (4) より

$$\alpha = \frac{K}{P_o - P_v + K}$$

よって、上式に代入すると

$$M = \text{const} \left(1 - \frac{K}{P_o - P_v + K} \right)^{0.5} \times \left(1 + \frac{1.25 K}{P_o - P_v - 0.35 K} \right)^{0.5} \cdot \omega^{1.5} R^4$$

また、危険速度付近で考えているのでロータの粘性減衰が上のトルクのみで効いてくると考えると、共振の鋭さの関係から振幅 $_{max} \approx 1/2 \zeta$ だから

$$\text{最大振幅} = \frac{1}{2 \zeta} \propto \frac{1}{M} \approx \text{const} \left(1 - \frac{K}{P_o - P_v + K} \right)^{-0.5} \times \left(1 + \frac{1.25 K}{P_o - P_v - 0.35 K} \right)^{-0.5}$$

したがって、水のみの大気圧下の x_0 との比で見ると、近似的に次式の関係となる。

すなわち、

$$x/x_0 = \left(1 - \frac{K}{P_o - P_v + K} \right)^{-0.5} \times \left(1 + \frac{1.25 K}{P_o - P_v - 0.35 K} \right)^{-0.5} \dots (2)$$

となり、これを実験値と比較した。Fig.13はロータの危険速度付近における振幅の変動量に及ぼすタンク圧 P_0 の影響をみたものであり、○印は水中 ($T=286.5\text{K}$) における実験値、●印は空气中 ($T=291.2\text{K}$) における実験値、破線は式 (2) の計算値、ロータの粘性減衰の変化をトルクでみたものである。本実験の範囲においてはその影響が少ないことを示している。

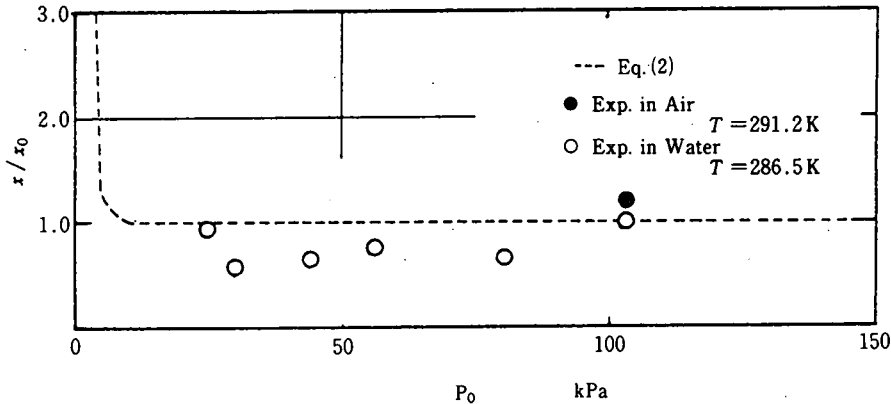


Fig. 13. Amplitude of vibration vs. pressure P_0 .

結 論

以上検討の結果、次の諸点が明らかとなった。すなわち、

- (1) 円形ロータを回転させた場合、回転数を上げて本実験の範囲では、キャビテーションの発生がみられなかった。
- (2) ここで用いた切り欠き円形状のロータを使用した場合、本実験の範囲ではキャビテーション抑制条件は従来多く求められていた傾向と同様の傾向を示し、二相流臨界条件に基づく理論的予測値と同様の傾向を示す。
- (3) ロータ表面に危険速度付近で生じるキャビテーションは、均質二相流的様相を示し、ふれまわりによって特有の運動を誘起している。

なお、発達したキャビテーションとロータの回転運動の関係についてなど、いくつかの興味ある課題を今後検討する必要がある。

最後に、本実験を遂行するにあたり、当時本学学生であった廣田誠二君に多大の助力を得た。ここに謝意を表します。

文 献

- 1) 神山 新一・山崎 堯右：特殊液体のキャビテーション発生条件の一推定法。日本機械学会論文集B編, 48 (425), 43-49 (1983).
- 2) 便覧編集委員会 (編)：水力機械工学便覧。コロナ社, 121 (1968).
- 3) 和田八三久 (責任編集)：力学物性実験物理学講座。共立出版株式会社, 11 (1968).
- 4) 神山 新一・山崎 堯右：水およびナトリウムの気泡性キャビテーション発生条件の一推定法。日本機械学会論文集B編, 46 (401), 1-8 (1980).

(昭和63年9月30日受理)

(昭和63年12月27日発行)

