

キャビテーション その1

東北大学高速力学研究所

村 井 等

1 キャビテーションの発生とその影響

水その他の液体が水路、管路等を流れる（あるいは物体が液体中を運動する）とき、液体と壁面（物体）との相対速度が大きくなり、液体中の局所の静圧が低下して限界値を超えると、その領域にキャビテーションが発生する（図・1）。キャビテーションが発生すると、1）水力機械等の性能が劣化する。2）振動や騒音を伴って、運転を不安定にし、ときにはそれらを破壊し、さらに附属の設備や建造物を振動させ破壊する場合さえある。3）流路壁面、たとえば放水路、水力機械の羽根表面等を損傷（図・2）し、その寿命を短縮することが少なくない。

このように、キャビテーションによる障害は大きいにもかかわらず、水力機械等の使用あるいは設計条件が酷しくて、現今では、その発生を避けることはほとんど不可能であるばかりでなくますます酷くなる傾向にある。

キャビテーションは、水、海水その他の水溶液以外の液体、たとえば潤滑油、燃料、熔融金属等にも発生する。また、その障害あるいは利用に関して、水理設備、水力機械のほかに、水中通信、化学工業、原子力工業、鉱業、医学等の関係者にも興味ある現象と考えられるが、ここには主として、水および水理設備と水力機械とに発生するキャビテーションに関して、その概要を述べる。



(a) 初生キャビテーション



(b) 成長キャビテーション（激振）



(c) スーパー・キャビテーション
翼型に発生したキャビテーション
（文献 104 の引用文献 63 より）

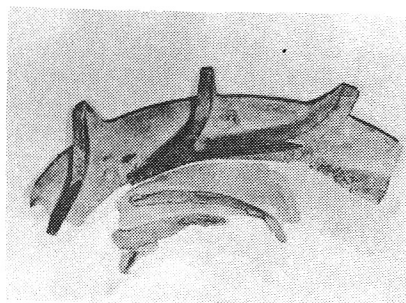
図-1 翼形に発生したキャビテーション
（文献104の引用文献 63より）

2 キャビテーション係数

キャビテーション発生に伴う気液二相流の流体力学的条件（静圧、速度、水温）を定量的に表示する基準として、相似律に従って、下の（あるいは類似の）式で定義される“キャビテーション係数”を用いる場合が多い。

$$k_d = (p_{\infty} - p_v) / \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \quad (1)$$

（ p_{∞} : 乱されない（無限遠前方の）流れの静圧、 p_v : 同じ流れの温度における蒸気圧、 V_{∞} : 同じ流れの速度、 ρ : 液体の密度）。キャビテーション発生の限界圧力 p_c が p_v に等しいと仮



4段タービンポンプ第1段羽根車および案内羽根
ポンプ要目 揚程 240 m 揚水量 8.1 m³/min
1450 rpm 750 HP
水温、水質 41°C PH 6.8 HCO₃⁻ 79.6 mg/l
SC₄⁻ 2 mg/l Cl⁻ 1262 mg/l
運転時間 84 hr
実揚程 (パイプ損失は含まない)
206 m, 暖込水頭 2.7 m

図-2 キャビテーション損傷の一例

定すれば、 k_d の分子はキャビテイの成長を妨げる力であり、物体の圧力係数

$$C_p = (p_\infty - p) / \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(p :表面における流体の静圧) は、ほぼ物体形状とレイノルズ数 Re との関数であるから、 k_d の分母が大きければ p は小さく、気ほうの成長を促進することになり、 k_d が小さいほどキャビテーションが発生し易いことを示す。

上述のとおり $p_c = p_v$ であれば、 $k_d = C_p \min(C_p \text{ の最小値})$ になるとキャビテーションが発生することになるが、 k_d だけを基準として、模型試験、実験室における実験等の結果から、水力機械等実物におけるキャビテーションの発生やその影響を予知するのは困難な場合が多い。

3 キャビテーションの発生機構

3.1 キャビテーション核

純粋な水の抗張力は数 atm ないし 1000 atm 程度であることは多くの研究者によって実験されている⁹⁾。しかるに実際には p_c は p_v と同程度の大きさであることの理由として、水の中に溶けないままで存在する半微視的な気ほう、宇宙線あるいは不純物⁴⁾⁹⁾、液体分子の欠陥による空孔等が核となってそれが可視的な気そうに成長するものであると了解されている。また、その過程が、高速映画に撮影され、解析されてもいる^{2) 3) 4) 30)}(図・10)。従来の空孔理論は水の抗張力として非現実的な高い値を与えたが、圧力勾配による空孔の移動集積を考慮すればかなり低い値となり、キャビテーション核となり得るという最近の研究⁵⁾ もある。

3・1・1 気ほう核の安定性と持続性

球(半径 R_o) 形の核の安定条件は次のとおりである⁹⁾

$$\frac{4T}{3(p_v - p)} \leq R_o \leq \frac{2T}{p_v - p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(T : 水の表面張力) 球形気ほうの運動方程式からも同様な安定条件が得られている⁹⁾。 R_o の上限は、核内の気体の分圧 $p_g = 0$ 、下限は $p_g = \frac{1}{2}(p_v - p)$ の場合に対応し、両限をこえると、核は無限に拡大あるいは縮小する。(3)式から、 $R_o = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{2) 9)}$ の場合には、 20°C の水では $p_v - p \geq 0.5 \text{ atm}$ でなければ、気ほうは成長しないことがわかる。

静かに放置された水においては、小さい気ほう、たとえば $R_o = 10^{-3} \text{ cm}^{20)}$ は 7 sec 以内に完全に周囲の水に溶ける¹⁰⁾。また、大きい気ほう、たとえば $R_o = 10^{-2} \text{ cm}$ は、飽和水中を約 2.5 cm/sec の速度で浮上し¹¹⁾ てなくなる。このような水からも、 p_v と同程度の静圧でキャビテーションが発生することは、なお、核の存在を示している。

3・1・2 気ほう核成長の限界圧力

気ほう核の成長には二つの型、1) 空気拡散による比較的緩慢なもの(気体的キャビテーション)、2) 爆発的に成長するもの(蒸氣的キャビテーション)があって¹²⁾、それぞれ限界圧力 p_c が計算されている^{7) 8)}。(図3)。2) ではつねに $p_c < p_v$ で、1) では R_o および p_g/p によって、 $p_c \leq p_v$ となる。いずれも実験^{1) 13)} と定性的に一致している。

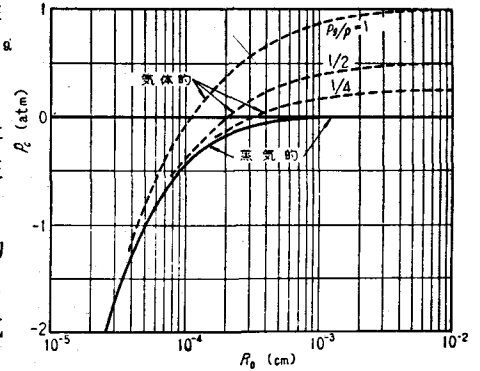
3.1.3 安定した気ほう核と限界圧力

気ほう核が気体相のまま存在することの説明として次の仮説がある。水中に存在する1) はつ水性の壁面あるいは、ちりの割れ目に附着しているあわ¹⁴⁾ (図・4)、2) 有機質の不純物の膜に包まれているあわ¹⁵⁾、3) ちりがあわの周囲で圧縮されてからとなっているもの¹⁶⁾。1) は、表面張力によって内圧 $p_i < p$ で平衡するとするもので、一旦加圧した水は、相当の大きさの引張力に耐えることから間接的に立証されている¹⁷⁾。2) および3) は、膜あるいはからが、あわの中と周囲の水との相互間の空気拡散を平衡させ、浮力も平衡させる役をしているとするもので、理論的および実験的な立証が試みられている¹⁸⁾。これらの研究者は R_0 としてそれぞれ $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ cm}^3$ および $(1 \sim 4) \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ を得ている。

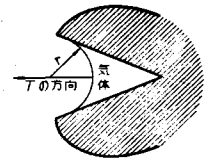
1) および2) の仮説は、理論的に同じ形の p_c を与える。

$$p_c = \alpha_1 p_l + \alpha_2 p_m \dots\dots\dots (4)$$

(p_l : 溶解空気の飽和圧力, p_m : 気ほう核によって加えられた最大水圧。 $\alpha_1 \cong 4$, $\alpha_2 = 2 \sim 3$) $p_c - p_v$ と空気含有量との直線関係は、実験によっても得られている¹⁹⁾。



図・3 キャピテーションの限界圧力 (文献(7)より)

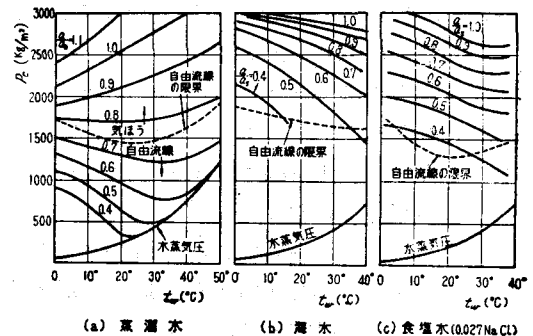


図・4 割れ目に附着しているあわ

3.2 含有空気量の影響

ガラス製ノズルを用いた実験²⁰⁾によると、1) キャピテーション発生箇所の半微視的平均圧力 $p_c > p_v$ 、2) p_c と平均速度 v_e あるいは p_∞ と V_∞ とは、 $k_l = (p_l - p_c) / \frac{1}{2} \rho v_e^2$ あるいは $k_l' = (p_\infty - p_l) / \frac{1}{2} \rho V_\infty^2$ の形に整備すると、 $3 \sim 55^\circ\text{C}$ の実験水温に無関係に a/a_s (a : 水の全空気含有量, a_s : 溶有空気の飽和量) に対して1本の曲線になる。3) 初生、成長、減縮キャピテーションの形態が a/a_s を用いて整理できる。図・5は、その実験結果を再整理したもの²⁰⁾である。表・1は、水の全空気含有量である。天然の水、海水(特に海面近く)等は過飽和であることがわかる。

溶有されている空気 α は、 k_{dd} (キャピテーションを一旦発生させて、後圧力を徐々に上昇させて消滅するときの k_d) にわずかな影響をおよぼすという結果が得られている²²⁾が、 C_p が下流に向かって上昇する壁面では“蒸氣的キャピテーション”が消え(k_{ddv}) た後でも“気体的キャピテーション”は残って、その限界値 k_{ddg} は、 $(k_{ddg} - k_{ddv}) \propto \alpha / V_\infty^2$ の関係にあるという結果¹⁸⁾も得られている。これに対し、羽根の先端渦に発生するキャピテーションにおいては、 k_{di} は“自



図・5

表・1 いろいろの水の気体含有量（文献（20）より）

採取日付	水の種類	温度	a %	a/a _s	a'/a _s	CO ₂ %	O ₂ %	N ₂ %
月 日		°						
1 1 18	水道水（採取直後）	9.5	2.48	1.06	1.02	4.00	29.7	66.3
2 1 21	水力室の水（ " ）	7.3	2.56	1.04	1.04	1.13	31.4	67.47
3 5 20	" （ " ）	11.8	2.44	1.09	1.02	6.98	30.9	62.12
4 1 22	蒸溜水（1ヵ月放置）	10.5	1.59	0.70	0.70	0.00	32.0	68.00
5 2 28	市街水道（採取）	14.2	2.63	1.24	1.22	1.64	31.4	66.96
6 5 29	海水（表面直後）	16.3	1.94	1.13	0.97	14.4	25.5	60.10
7 6 5	" （水深1.6m）	16.0	1.91	1.10	0.96	13.1	28.0	58.90
8 5 27	" （水深6m）	11.0	2.06	1.10	0.96	12.0	27.9	60.10
9	大気圧でとけるものとして	15.0	2.09	1.00	0.99	1.41	33.3	65.3

由な" 空気含有量には大きい影響を受けるが、 α にはわずかししか影響されないという結果²⁰⁾がえられている。

3.3 キャビテーションの発生

液体内の局部静圧 p が p_c をこえて低下すると、核は成長を始める。 p 最小の点が物体表面にあるか、あるいは物体表面から離れているか、また、その点の周りの圧力勾配等の流体力学的状態によって、核成長の条件および形態は異なっている。

3.3.1 境界層の影響

流線型物体の周りの流れのようにく離を伴わない場合には、キャビテーションの発生は境界層の影響を受ける。図・6 に示す C_p をもつ回転対称体についての観察、測定²¹⁾ によれば、 C_p 極小点、さらに $C_p = k_d$ の点よりやや下流の、層流境界層の領域で、壁面上に発見された微視的な気泡²²⁾ が、その位置にとどまったままで、ほぼ排除厚に等しい直径にまで気体的²³⁾ に成長した後、主流のほぼ $1/2$ の速さで下流に運ばれ、乱流境界層の領域で、" 蒸氣的 " に可視的な気泡²⁴⁾ に成長している。境界層内の乱れの影響に関しては、流れの方向に圧力の低下する二次元ノズルを用いた実験結果²⁵⁾ から、" 蒸氣的 " に成長する気泡²⁶⁾ が、境界層

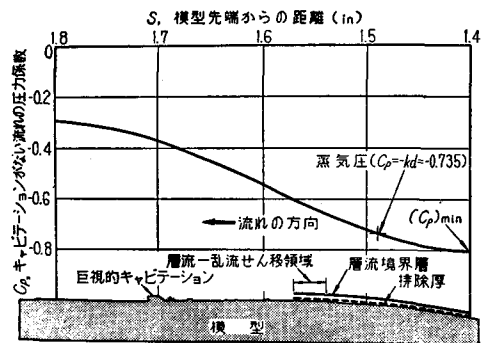


図-6

（厚さ δ ）内の乱れによる変動圧力 $\sqrt{p'^2}$ 最大の位置（壁面から $\delta/3$ ）に最も多く分布していること、および、

$$k_{d1} = C_{p \min} + k_t - k_b (R_o, T) \quad \dots \dots \dots (5)$$

($C_{p \min}$: C_p の最小値, $k_t = \sqrt{p'^2} / \frac{1}{2} \rho V_\infty^2$, k_b : R_o および T の影響を示す圧力係数) が示されている。

流線型物体でも、 C_p が下流に向かって上昇するものでは、境界層が局部的にはく離して、キャビテーションが発生する可能性がある²⁷⁾。

3.3.2 後流域に発生するキャビテーション

物体表面の $C_p \min$ の点附近からはく離れた流れにおいては、後流の境界にそう渦の中心にまずキャビテーションが発生する²⁰⁾。翼端渦の場合には、渦の核の大きさが翼下面の境界層厚さに支配され、 k_{di} は Re と共に、また、循環とはほぼ直線的に増大する等の実験結果²⁰⁾が得られている。

噴流の伴流領域に発生するキャビテーションについては、渦によるとして $k_{di} = 0.6$ の定数を与えているもの²¹⁾もあるが、 k_{di} が噴流の直径と共に増大するという実験結果も得られている²²⁾。

3.4 キャビテーション初生と発生状態に及ぼす寸法効果

キャビテーションの初生条件、発生状態、その影響等は、実物と模型とで、 k_d だけで対応するものではなくて、1) 寸法 L 、表面粗さ A 、速度 V_∞ 、静圧 P 、水温 t_w 等流体力学的条件、2) 水の全空気含有量 a および自由空気の大さき R_o 、数 N 等水の状態あるいは化学的性質の影響を受ける。これらを総称して寸法効果と呼ぶ。寸法効果は、一般的には、未だ基礎的研究の段階にあって、上述の相関を完全に推算できるまでには到っていない。

3.4.1 初生キャビテーション係数

流線型軸対称体（直径 D ）に関する実験²³⁾によると、 $k_{di} - Re$ 関係は1本の曲線にならず、 k_{di} は、 D あるいは V_∞ 各々の増大と共に増大し、 $C_p \min$ に近づいている（図・7）。これに反し、同じ軸対称体について k_{dd} は V_∞ と共に増大するが、 D が増大によって減少し、また、 C_p の分布が平らな NACA 16012 翼形においては、 k_{dd} は V_∞ の増大によって減少し、弦長 l と共に増大する結果²⁰⁾も得られている。

円板の後流については、 $k_{di} - Re$ 関係は1本の曲線となり、 k_{di} は Re と共に増大するが、つねに $k_{di} > C_p \min$ という結果²³⁾（図・8）と、 k_{dd} も類似の関係になるという結果²⁰⁾とが得られている。これに対し、 $k_{dd} \propto R_o^m$ で表わされるという提案²⁰⁾もある。

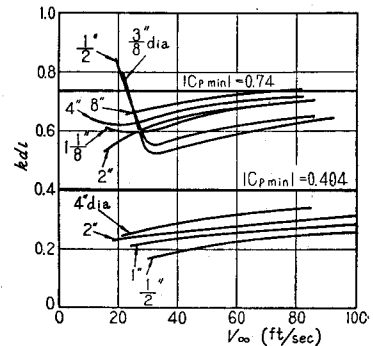
3.4.2 静圧の影響

翼形においては、 $P = -0.3 \sim 3 \text{ atm}$ で、

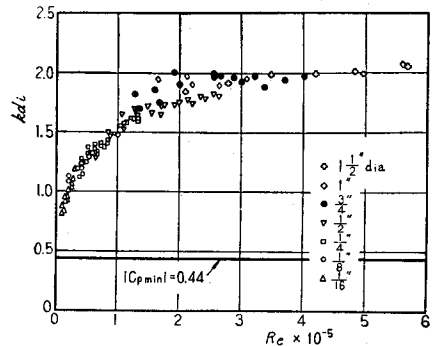
- 1) k_{di} は大差ない、2) λ_o および λ は P と共に増大する、3) ϵ の変化は度外視できない程度に大きい。

3.4.3 水温の影響

翼形のキャビテーション性能は、 $t_w = 8 \sim 20^\circ\text{C}$ ²³⁾ で、軸対称体の k_{di} は $14 \sim 34^\circ\text{C}$ で²⁰⁾、 Re で整理すると、大きな影響が認められない。



図・7 寸法効果（回転対称体）（文献(3)より）



図・8 寸法効果（円板）（文献(3)より）

3・4・4 粗度の影響

単一の表面粗さ模型においては、 k_{ai} は1) Δ/δ および V_∞ の増大、境界層内速度プロフィール係数の減少によって増大する、2) $\Delta v/r$ (v は境界層内の速度) の減少と共に $C_{p\min}$ は増大するから、 Δ/δ が小さくて、 Δ が層流境界層あるいは層流底層に埋れる近くでも、 k_{ai} に相当な影響があり得ることを示唆している。翼形については、 k_{ai} は粗さと共に大きくなる³⁰⁾

3・4・5 含有空気の影響

水の全空気含有量および溶有量が k_{ai} および発生状態に与える影響は、前述のとおりである^{13) 20) 22)}。また、気ほう核の大きさ R_0 は k_{ai} およびキャビテーションの形態に影響を及ぼす^{34) 35) 36)}ばかりでなく、さらに水の単位体積当りの気ほう核の数 N も影響を及ぼす³⁶⁾。従って、模型試験および実物試験に際しては $N-R_0$ 関係を測定すべきこと、および比較的大きい核を保持することにより、低速の模型試験から実物の k_{ai} を予知する可能性のあることが示唆されている³⁶⁾。

4 キャビテーション発生の様相と形態

キャビテーションが発生すると、周波数の高い騒音と共に、水中に乳白色の領域が現われる(図・1(a))。 k_d の減少と共にキャビティは成長するが、ある程度の大きさになるとキャビティが成長、消滅あるいは縮小を繰返す非定常な状態を肉眼でも認められるようになる(図・1(b))。さらに k_d が減少すると、非定常性は徐々に消えて流れは安定する。この状態ではキャビティは透明でその周辺と後流が乳白色の領域となる(図・1(c))。この状態をスーパーキャビテーションと呼ぶ。

4.1 フィクストキャビテーション

キャビテーションを半微視的に観察すると2種類の型があり、1) フィクストキャビテーション2) トラベリングキャビテーションと名付けられている³⁴⁾。

1) は、その領域が、時間平均をとれば、物体に対して固定されているもので(図・1)、その微視的な構造は次のとおりである³⁷⁾(図・9)。i) 成長したキャビティは、物体表面と流れの自由表面との間に空間を作る、ii) 自由表面に近い限られた巾の流れは、キャビティの下流端からキャビティ内へ逆流してそれを満たす、iii) キャビティは破壊されて、その1部は下流に流れ去る。このi) ii) iii) の過程を周期的に繰返している。ii) の自由表面は、キャビティの上流部で発生、成長し自由表面上の流速で下流端まで流されてそこで消滅する、小さい気ほうでおおわれている。 k_d が小さくなると、キャビティは長くなり、ii) の逆流の運動量が減って、流れはかえって安定となり、キャビティは気体が充満している透明な領域と、気ほうと水とが混合している領域(図・1(c))とに分れたスーパーキャビテーションとなる。



図-9 フィクスト・キャビテーション
(文献³⁷⁾より)

はく離した流れ(渦の核)に発生したキャビテーション^{3) 26)}の時、時間平均的な境界は、自由流線の様相を呈しない。しかしながら k_d の減少と共に、後流と自由流線の両方の様相を呈し、上述ii)の逆流を認めることができる。

4.2 トラベリングキャビテーション

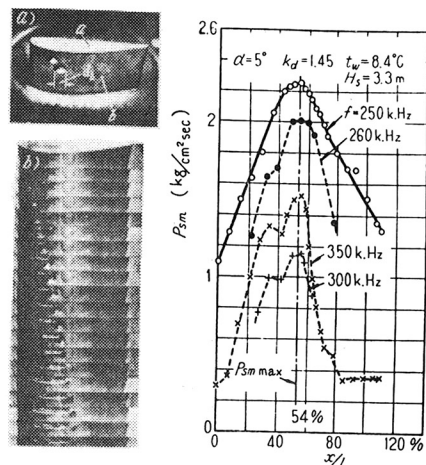
前節の2)の型は、核から成長した比較的大きい各々のあわが、物体表面近くを、ほぼ主流と同じ速さで、成長しながら下流に移動し、圧力の高い領域に到達して縮小を始め、消滅する

もの (a/a_0 が小さい場合³⁹⁾), あるいは一度で消滅しないで数回再成長 (リバウンド), 縮小を繰返してから消滅する²⁾ もので, 1) と同様, 同じ領域で発生, 成長, 消滅している³⁹⁾。大きい核は k_{d1} が大で 1) の型, R_0 が小さいものは k_{d1} が小で 2) の型が発生し易いとする研究³⁹⁾ ³⁹⁾, C_p の形が傾斜の少ないものは 1), 極小値をもつものは 2) の型が発生するとする研究³⁹⁾ 等があるが, 同じ水, 同じ迎角の翼形で 1) と 2) が時間的に交互に発生している結果³⁹⁾ も得られている (図・10)。

4.3 超音波キャビテーション

液体の中に焦点を合せた超音波の音場⁴⁰⁾ ⁴¹⁾, 共鳴器の中に作られた音場⁴²⁾ ⁴³⁾ あるいは進行平面波の音場⁴¹⁾等においては, 音圧がある限界値⁴¹⁾ ⁴¹⁾に達すると, 1 周期の中で負圧の間にキャビテイが発生, 成長し, 正圧のときに消滅する過程を繰返す⁴⁰⁾ ⁴⁴⁾。周波数が高い (20 KC ~ 2.5 MC/sec) ため, 混合液の乳化, 高分子化合物溶液の分子が核として作用した解重合⁴⁵⁾等の現象が起り, これらは利用されている。

水槌現象による圧力波⁴⁶⁾あるいは水中爆発による衝撃波の背後⁴⁷⁾にもキャビテーションが発生する。



(a) 翼型のトラベリングおよびフィクスト・キャビテーション
 $\alpha=5^\circ$, $k_d=1.45$, $t_w=7^\circ\text{C}$, $P=3.3\text{m}$

(b) 翼弦上における平均衝撃音圧 P_{im} の変化
 $\alpha=5^\circ$, $k_d=1.45$, $t_w=8.4^\circ\text{C}$, $P=3.3\text{m}$, $f=250, 260, 300, 350\text{ kHz}$

5 実験装置および測定法

5.1 含有気体の測定

5.1.1 全含有気体, 抽出法

水を真空中に保ちながら振動を与えて, 気体を抽出する方法²⁰⁾, Van Slyke⁴⁸⁾の方法を用いて, キャビテーションタンネル中の水の空気全含有量を連続的に測定する方法³⁵⁾等がある。

5.1.2 溶有気体 (主成分空気)

水中に溶有されている酸素, 窒素等を別々に測定する方法⁴⁹⁾がある。水が溶有する硝酸塩, 鉄塩, 有機物等が存在する場合, 誤差が大きいとされている²⁰⁾。

5.1.3 自由気体

1) 音響学的方法: ある巾をもった一定周波数の超音波が, 水中の“自由気体”の共鳴により減衰する割合を測定し, R_0 と単位体積の水中の数 N のスペクトルを作成する⁷⁾ ³⁵⁾。2) 光学的方法: 光の散乱現象を利用して R_0 と N を測定する方法⁵⁰⁾。

5.2 キャビテーションタンネル

図・11に見られるように, 管路の一部をなす測定部に取付けた物体, あるいは測定部自身の壁面にキャビテーションを発生させる装置である。測定部の流速および静圧をそれぞれ調節することにより, 広範囲の k_d において, 流体力学的に発生したキャビテーションを得る特長を利用して, いろいろの目的に, 諸種の型式のものが使用されている⁵¹⁾。

5.2.1 使用目的

1) キャビテーションの基礎的研究, 2) 翼形等水力機械の要素, 水理設備の要素等の設計資料を提供するための半応用的研究, 3) 船用推進器等の模型による性能試験等広範囲の

目的に使用される。4) キャビテーションを発生させないで、 R_c の大きい流れ等空気力学の研究に用いられることもある。

5・2・2 型式

基準のとり方によっていろいろに分類できるが、1) 密閉型と開放型、2) 廻流式と放流式、3) 固定壁、4) 水中あるいは空気中に吹出す水のジェットからなる測定部の型式、5) 自由表面をもつもの等に大別さ

れよう。密閉型廻流式のタンネルではレザープの機能と容量に注意を払わなければならない⁵⁰⁾。4) は特に小さい k_d を得られる特長がある。

5.3 損傷試験の装置および方法

5・3・1 キャビテーションタンネルによる試験

ノズル型 (あるいはベンチュリ型) タンネルが使用される^{52) 53)} 多大の時間と経費を要する。

5・3・2 円あるいは長方形の孔をあけた円板を、水中で高速回転させ、円板自身もしくは取付けた試片の減量を測定する方法^{54) 55)}。

5・3・3 回転車に取付けた試片に水の噴流を直角に切らせて損傷を起こさせる方法⁵⁶⁾。

5・3・4 磁わい振動法

磁わい効果による振動子の縦振動を利用し、振動子の先端に取付けた試片を液体中で6～8kcで振動させ、試片の減量を測定する。試験に要する時間が非常に短い利点があるので、規格化が企図されている (図・12および表・2)。流体力学的に発生するキャビテーションとの対応に関しては、定性的には一致するが、定量的には一致しない結果が得られている^{56) 57)}。

5・3・5 超音波による方法⁵⁸⁾

ピーカー様の水容器 (図・13) 上部につるしたチタン酸バリウム製変換器から発する18～24kcの超音波を、底面中心に取付けた試片の上で音圧が最大になるよう調節して、雲状のキャビテーションを発生させる。試験時間が短い、経費が低廉である、試片に加速度を加えない等の利点があるといわれている。

6 キャビテーションノイズ

6.1 あわの挙動

トラベリングキャビテーションのあわの半径 R (気ほうは

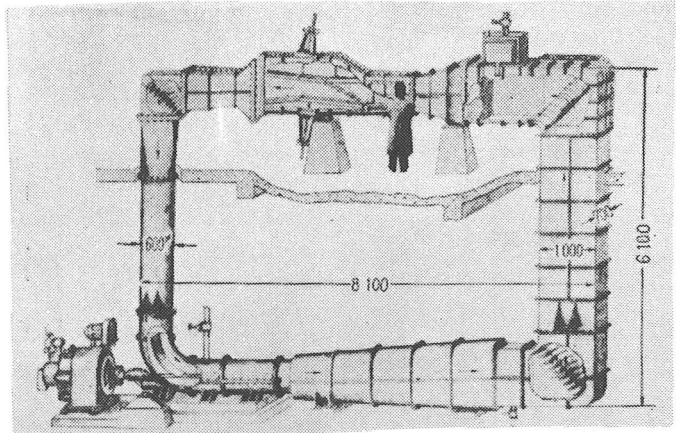


図-11 翼形キャビテーションタンネル (文献(106)より)
(東北大学高速力学研究所に設置)

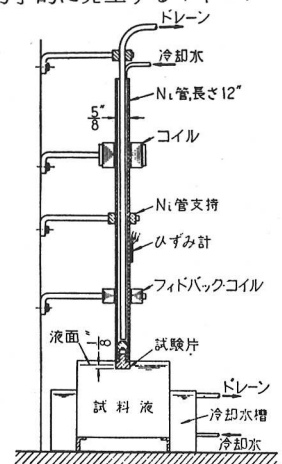


図-12 磁わい振動式試験器

4・2 L・E・Robinson 等の提唱する磁わい振動試験の基準

1. 試 料 直径5/8"の円形平面をもつこと

2. 試験液容器 直径約3 1/2"の円形平底パイレックスガラス製
試験液温度調節用の恒温槽内におくこと

3. 試験条件

振 動 数 6500 ± 50 c/sec

振 幅 0.00342 ± 0.00005"
(0.087 ± 0.001 mm)

試 験 液 新しい蒸留水

試 験 液 温 76 ± 1°F (24 ± 1°C)

試験時の大気圧 1 気圧に補正換算

テスト・ピース浸漬深度

0.125" (3.2mm)

試 験 液 深 4.5" (114mm)

試 験 時 間 120 分 各 30 分ごと 4 回

4. 操作時の注意

(i) 水中空気含有量を最小限にするため、蒸留水をあらかじめ15 分間煮沸する。

(ii) 試験片表面の自乗平均粗さをエメリー・ペーパー 000 で 0.08 μ にする。

(iii) 試験片の酸化および吸水防止のため、次の安定化処理を行なう。

蒸留水中で15 分間煮沸後室温に低下するまで蒸留中に浸す。CP アセトン試薬で乾燥後直ちに秤量、試験する。

(iv) 試料は各30 分テストごとに振動子よりはずし、乾燥後秤量する。秤量精度は0.1 mg までとする。

ほぼ、球形)の時間変化を、高速度映画を用いて測定した²⁾(図・14) 縮小時のR-t 関係は、Rayleigh の理論³⁾と大よそ一致している。

Rayleigh の理論は、1) あわが球形であることを仮定し、2) T 3) 液体の圧縮性、4) 液体の粘性、5) 熱拡散、6) p_g および p_v 等の効果を無視している。2) はあわの縮小の速さを増し、3) ~6) は速さを減ずる効果があるが、いずれも消滅に近い時期のあわ壁面の速さ、従って消滅により発生される衝撃圧に影響を及ぼすものと考えられるので、その1項あるいは数項の影響に関し、多くの研究が展開されている。2) ~6) の全部を考慮した、球形のあわの運動方程式として次式が得られている⁴⁾

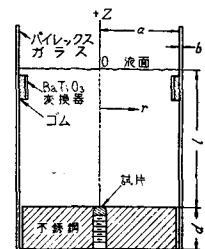


図-13 超音波による損傷試験器(文献58より)

$$R\ddot{R} \frac{dR}{dR} \left(1 - \frac{R}{C}\right) + \frac{3}{2} R^2 \left(1 - \frac{\dot{R}}{3C}\right) = H \left(1 + \frac{R}{C}\right) + \frac{R\dot{R}}{C} \frac{dH}{dR} \left(1 - \frac{\dot{R}}{C}\right) \dots (6)$$

$$\left(\dot{R} = \frac{dR}{dt}, \quad C: R \text{ における液体中の音速} \right)$$

$$H = \int_{p^\infty}^p dp / d\rho, \quad p, p^\infty :$$

：それぞれあわの壁面および無限遠における圧力)。

この式の積分に際し、 T および μ を省略し、あわの内圧 p_i を一定と仮定すると、 $R=0$ になる瞬間には $\dot{R} \propto R^{-\frac{1}{2}}$ が得られる。これを Rayleigh の $(\dot{R})_{R=0} \propto R^{-\frac{3}{2}}$ にくらべると、消滅直前の $\dot{R}$ が小さく、より現実的であり、この結果が実験とよく一致することが確かめられている⁶⁰⁾。あわの持つ全運動エネルギーが、 $R=0$ に集中することになる Rayleigh の理論に対し、圧縮性を考慮すれば、 $R=0$ を中心とするある範囲に、その約 20 % だけが集中するという理論的な計算もある⁶²⁾。3) の影響は、このほかにも実験的に認められており^{28) 38) 63)} シュリーレン写真その他を用いて消滅前のあわ壁面から出る圧縮波が撮影されている^{63) 64)}。

μ だけを考慮した理論からは、限界の R^* (1 atm の水で約 9×10^{-5} cm) があって、 $R_0 < R^*$ では消滅に ∞ の時間を要し、 $R_0 > R^*$ では $(\dot{R})_{R=0} \propto R^{-\frac{3}{2}}$ 、 $R_0 = R^*$ では $(\dot{R})_{R=0} \propto R^{-\frac{1}{2}}$ となる^{65) 66)}。

熱拡散の効果を考慮すると、局部的冷却によって R の成長が遅れるとする理論的な計算結果は、実験結果⁶⁶⁾ と一致している。

壁面に附着した“球形でない”あわの振動については、あわ壁面の変形の理論(上の映画とよく一致する)が示唆する“あわ壁面の変形によりジェットとなった水があわを突き抜けて物体壁を衝撃する”様相が高速映画に撮影されている^{67) 70) 126)}。

球形のあわは縮小するときは不安定であって、近くにある物体壁面⁷¹⁾ や圧力勾配の影響を受けて非対称となり、崩壊時にはドーナツ状の渦輪(図・15、模型 A) となってその中心に微小な水のジェットができることが、高速水流⁷²⁾ および超音波⁷³⁾ により発生するキャビテーションの高速撮影によって示され崩壊および再成長時の模型を図・15 のように説明されている。

6.2 消滅の際の衝撃圧

球形のままであわが崩壊するときの衝撃圧については多くの実験的および理論的研究^{36) 38) 61) 63) 74)} が行なわれ衝撃圧 $4 \times 10^3 \text{ dt} \sim 10^5 \text{ at}$ 程度、それにより壁面が受ける応力は 10^4 kg/cm^2 程度の値も得られている。しかしながら

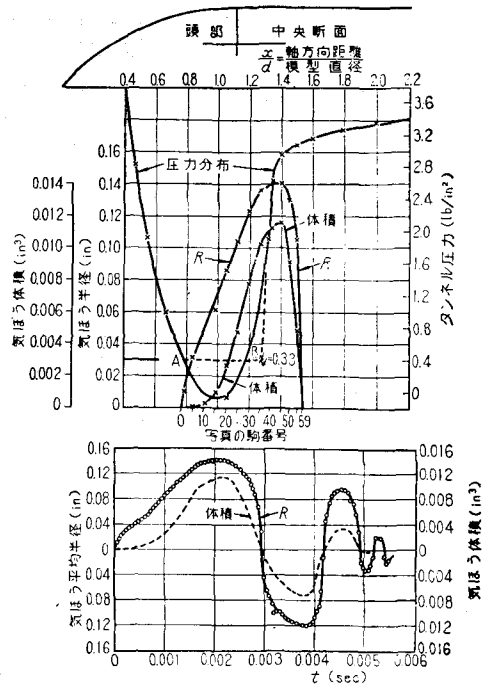


図-14 気泡の挙動(文献(2)より)

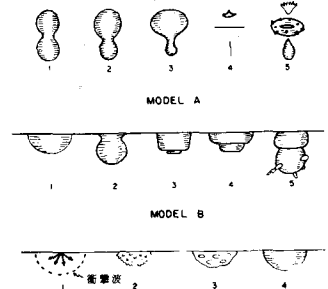


図-15 あわの非対称な崩壊および再成長の模型(文献(73)より)

前節の2)～6)の影響を考慮した最近の数値計算結果^{70) 71)}によると、最初の球形崩壊による衝撃圧は後述のキャビテーション損傷を生ずるには不十分であるが、再成長したあわは物体壁面から半径に等しい程度の距離にあれば、十分大きい衝撃圧を生ずる可能性があるとしてい

る。
これに対し、壁面に附着した半球形⁷²⁾あるいは球形のあわの非対称な崩壊によって生ずる微小なジェットが壁面に衝突する作用が壁面の損傷に支配的役割を演ずるとするもの^{73) 74) 75)}がある。

6.3 キャビテーションが発する超音波

キャビテーションは可聴音から超音波に到る広範囲の周波数のノイズを発する。音圧の周波数スペクトル等に関しては多くの研究⁷⁶⁾があるが、水中ジェットの実験⁷⁷⁾によると、 k_d 附近ではスペクトルは寸度効果および R_o の影響が認められるが、 k_d が小さい時は、 $p_s / \frac{1}{2} \rho V^2 \propto (p_s : \text{音圧})$ はストルホール数 $S = fd / V_\infty$ (f : 周波数, d : 噴流直径) に対して1本の線で表わされる。翼形のキャビテーションが発する超音波の音圧はトラベリングキャビテーションが最終的に消滅する(フィクスでもリバウンドでもなく)位置で最大になる^{78) 79)}。また、音圧の総合レベルは流速の5乗に比例し、 k_d に対して1本の曲線に表わすことができ(図・16) k_d の減少に対して極大値があり、その後は減少する。またキャビテーション壊食の強さはノイズの強さに比例するとするものもある⁸⁰⁾。

6.4 ノイズによるキャビテーションの検出

上述のノイズを音響学的に測定して、初生あるいは発生の度合を検出しようとする試みがなされており^{81) 82)}、6000～20,000 c/sより上の振動数を選べば、音圧測定あるいは振動測定によってその検出ができるとするものもある⁸³⁾。

7 キャビテーションが誘起する振動

フィクストキャビテーションは周期的現象である。翼形においては振動は k_d の減少によって一旦増大するが、キャビティ長さ λ が弦長 l の約120%のとき最大で、さらに k_d が減少すると、振動は小さくなる^{84) 85)}。欠円翼形に発生するキャビテーションの観測⁸⁶⁾によると、 λ/l が2～3%までは振動数は比較的大きいが、翼形に作用する力の振巾は小さい。キャビティが成長してその先端が透明になり始めると顕著な振動を始めるが、初めは振動数が上の数分の1程度で振巾も小さい。しかしながら $\lambda/l \cong 60\%$ 程度になると λ の振巾は約 $l/2$ で振動数は12～25 cps程度に低下し、翼形に作用する力は平均値の $\pm 10\%$ 程度になる。この際 λ が最大のとき力も最大となり位相のずれはない。この振動は λ/l が約1.2になるまで続く。その後は λ の増大と共に振動は減少する。翼形の振動が、軸対称体のそれと異なる点は、翼形の周りの循環が時間的に変化することにある。

円筒の後流で発生、消滅するキャビティの単位時間当りの数 n に関するストルホール数 $S = nD/v$ (D : 円筒直径, v : 円筒の位置の流速)は、 R_o および k_d の関数となり(図・17)、 k_d 附近では、キャビテーションのない流れにおける渦生成の S に近く、 k_d の減少に対し一度極大

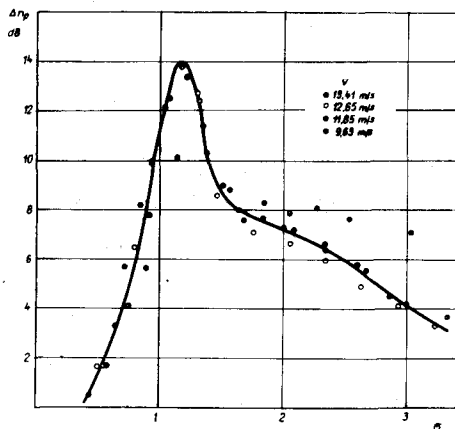


図-16 ノイズレベルのキャビテーション係数による変化(文献79より)

となるが、ついで S も減少し、ある λ/D で翼形の場合と同様流れは安定することが示されている³⁰⁾。

対称なくさびの後流の渦列による振動に及ぼす、渦中心に発生するキャビテーションの影響も実験と理論とから論じられ、円筒の場合と類似の結果が得られている³¹⁾。

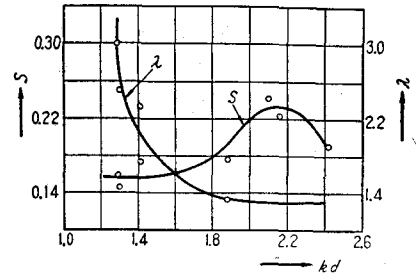


図-17 S の kd による変化(文献³⁰⁾より)

8 キャビテーションによる損傷

8.1 損傷の機構

キャビテーション損傷の度合は、液体の物理化、化学的性質、材料の諸性質、流れの静圧、速さ、温度等によって異なるが、損傷を被るのは、キャビテーションが消滅する領域に限られていることから、損傷の誘因は、この消滅の際の衝撃圧あるいは微小な液体ジェットの影響(6・1)であるとされている。しかしながら、支配的な(互に補助的作用はあるから)原因が機械的かあるいは化学的かに関しては、いろいろな論議がなされている。

機械的な機構を主張するものとしては、音響学的試験器を用いて、キャビテーションにさらした面の顕微鏡およびX線回折写真の観測から、損傷の基本的な過程は塑性変形であって、その冷間加工効果が材料の疲労破壊を招くものであり、腐蝕疲労として化学的作用の影響はあり得るとするもの³²⁾。ベンチュリ管による損傷試験結果から、二つの型の破壊(1)応力集中がある領域の、逐次にかかる変形による破壊、2)はく離あるいはへき開の裂け目にみられる疲労破壊)があるとするもの^{32) 33)}。衝撃圧によって金属に浸み込んだ液体が、表面圧力が低下した瞬間に逸出する際、金属表面の粒子を引き裂くものであるとするもの³³⁾。キャビテーション発生状態における、強い乱れによる侵蝕作用であるとするもの³²⁾ 等がある。

化学的な機構を主張するものとしては、衝撃圧による応力により結晶間に生ずる局部電池および結晶格子の中の原子に繰返し与える強いじょう乱が、温度上昇や変形に基づいて生ずる局部電池が水蒸気、酸素等と化学変化を起すことが本質的な機構であるとするもの^{34) 35)} がある。

これらのほかに、支配的な原因が機械的あるいは化学的であるとする研究はそれぞれ数多く見受けられるが、いずれが支配的であるかは流速によって定まるとする学説もある。

すなわち、約 15 m/sec 以下では化学的、 25 m/sec 以上では機械的、その中間では両者が対等に寄与すると主張するもの^{34) 35)} である。また、ひずみエネルギーを採り入れた理論により、疲労限から限界流速 V_c と kd との関係を求め³⁵⁾、同様な理論から、損傷に関する模型と実物との相似則を見出そうとする研究³⁶⁾ もある。 V_c は、材料の諸性質のほかに、液体の化学的、物理的性質、静圧、温度、物体の大きさ、表面粗さ等によっても異なるであろうから、機械的原因が寄与する割合が顕著になり始める限界の存在を主張しているものと見るべきであろう。

8.2 材料の諸性質と損傷に対する抵抗

材料の抵抗性は、損傷の機構に支配される。従って、損傷試験の条件あるいは材料の選択は、実際の使用条件によらなければならないことはいうまでもあるまい。

抵抗性にとって本質的に必要なのは、疲労に対する抵抗であり、従って硬度が高く破壊強度の大きい材料は損傷抵抗が大きい、硬度と強度だけが必要なのではなくて、 M_0 のように応力に対して降伏の時間的遅れがある材料は、キャビテーションのように時間間隔の短い加重

には強いことが指摘されている⁷⁹⁾。また、1) 硬度大、2) 加工硬化に対する優秀性、3) 自由炭素、不純物等、結晶粒子間のはく離を助ける組織がない、4) 粒子が小さいこと等が重要であるとして、組成および熱処理、表面処理、溶接の効果等に関する詳細な所見も述べられている。表3にその一部を示す。

この他に、多くの実用的材料について比較試験を行なった結果も発表されている⁸⁰⁾。表・4はコンクリートおよびそれを表面保護したものを、ベンチュリ管を用いて試験した結果の一部である。

表・4 コンクリートおよび表面保護物の抵抗性
(ノズル型, 27 m/sec) 文献(53)より)

No	条 件	減量 in^3/in^2			W/C	圧縮強さ (28日) lb/in^2	セメントの 型 およ び 混
		キャビテーション にさらした日数		摩 耗			
		28 日	90 日	28 日			
1	W/C = 0.55	42.1	—	0.97	0.55	4030	型 II 混合 A
2	スランプ = 3"	42.1	—	0.95	0.55	4300	型 II 混合 A
3	空 気 4 %	12.2	19.3	0.92	0.55	3800	型 II 混合 B

被膜の種類	接着の型	厚 さ in	表面膜	試験時間	減 量 %
ネオプレン	刷 毛 塗	0.0625	コンクリート	15	100
ネオプレン	刷 毛 塗	0.1250	コンクリート	15	4
ゴ ム 板	埋 込 み	1.000	—	50	0

8.3 損傷に対する保護法

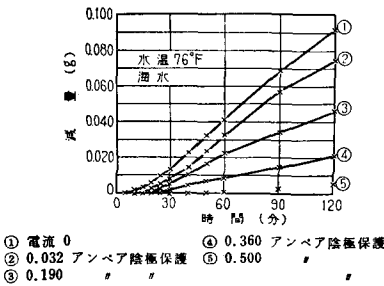
1) 損傷を緩和あるいは回避しようとする方法、2) 表面保護、表面処理あるいは両者を兼ねた処理を施す方法等がある。

8・3・1 陰極保護

陰極保護は電気化学的な保護法として提案され⁸¹⁾、キャビテーションが小さい時にだけ有効とされていた。しかしながら、海水中で鋼を陰極保護するに要する電流(図・18)は、水素発生器に属する程度に大きく、水素気ほうによる衝撃圧のクッション効果であるとするものもある⁵⁷⁾。

8・3・2 空気を吹込む方法

キャビテーションの領域に小さい気ほうを吹込む方法で、クッション効果であると説明されている。図・19はAl 試片の回転円板による実験結果で、Al, 鉄, 黄銅の円筒による実験の場合にも類似の結果が得られている⁸²⁾。図・20は銅棒による実験結果である。



図・18 陰極保護の効果(文献57)より)

8・3・3 高抵抗材料による表面保護

不銹鋼あるいはゴム等、損傷に対する抵抗の大きい材料を、キャビテーションにさらされる領域に溶接、接着あるいは吹付ける。

8・3・4 表面処理

窒化等の処理で抵抗性を材料の表面に与える方法。表3および表4にそれらの一部がみられる。なお表面粗さ小にすることも表面保護の効果がある¹⁰⁰⁾。

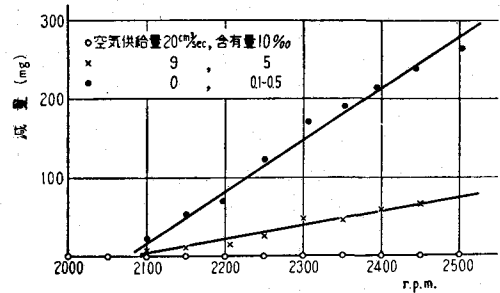


図-19 空気吹込み損傷に対する保護効果 (文献(99)より)

9 翼形および翼列のキャビテーション性能

水車、ポンプ、船用推進器等水力機械の主要

部である走車、導羽根等の羽根断面は、翼形からなる翼列^{101) 102)}とみなすことができる。従って、水力機械の設計あるいは性能解析の資料として、また、性能向上を図るための基礎的な資料として、単独あるいは翼列翼形のキャビテーション性能を測定し、さらに優秀な性能をもつ翼形を深求することが必要となる。研究結果¹⁰³⁾の中から沼知らのそれ¹⁰⁴⁾について概要を述べる。

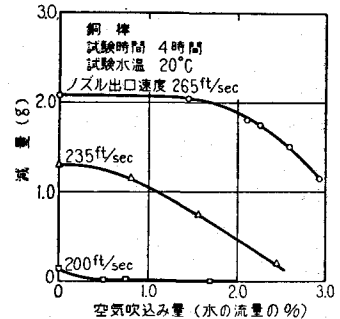


図-20

9.1 キャビテーション性能¹⁰⁵⁾ (図・21)

9・1・1 発生状態

kd および迎角 α によって発生する領域 (第I, II, III, 翼形によってはIVと、それぞれ初生および成長 (初生後成長した) キャビテーションの発生および消滅の位置 λ , λ とが変化する。 $(\lambda - \lambda_c)$ が損傷の危険範囲となる。

9・1・2 翼形性能のkd による変化

kd および α によって揚力係数Ca および抗力係数Cwが変化するので、(1) α をパラメータとするCa, Cw-kd 曲線、(2) kd をパラメータとする極(Ca - Cw) 曲線、(3) kd による抗揚比Cw/Ca 最小の迎角 α_{em} の変化が示されている。Cl が減少を始める前に一旦増大する翼形と、単調に減少する翼形とがある。C_oはkdの減少と共に増大する。

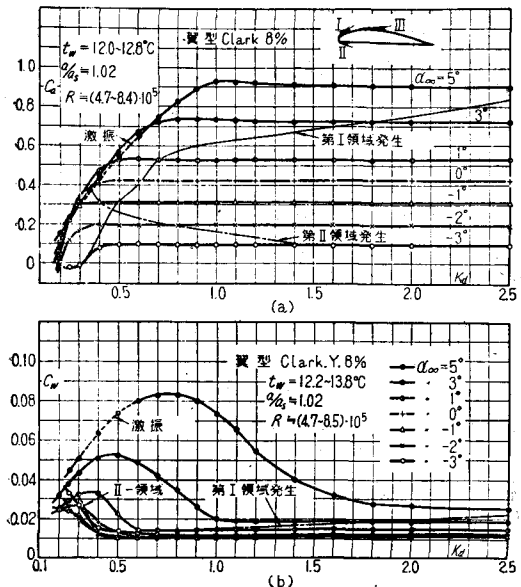


図-21 CY8翼形のキャビテーション性能 (文献(83)より)

9.2 単独翼形のキャビテーション性能

9.2.1 既存翼形

クラーク Y 翼形既存の翼形のキャビテーション性能^{82) 83) 84)} が求められている。

9.2.2 優れた性能を有する翼形の探求

k_{ai} が小さく、しかも、キャビテーション発生後も性能の劣化する度合の小さい特殊翼形が求められている⁸⁵⁾。

9.2.3 製作しやすい翼形

円弧と直線だけからなる翼形を考案して、それぞれキャビテーション性能が求められている⁸⁶⁾。その中には形状が簡単でしかも性能の優秀なものも発見されている。

このほか水温、静圧、表面粗さ等の影響が求められる。

9.3 翼列翼形のキャビテーション性能

9.3.1 翼列キャビテーションタンネル (図・11)

翼列実験に際して直面する、翼形の枚が有限であることと水槽の上下壁面の存在との影響を除去するため特に考案、製作した翼列キャビテーションタンネル¹⁰⁰⁾を用いて下記の研究が行なわれている。

9.3.2 既存翼形

既存翼形の減速翼形¹⁰⁷⁾および増速翼形¹⁰⁸⁾について、キャビテーション性能を求め、それぞれ同じ翼形が単独である場合と比較された。

9.3.3 “適列翼形”の提唱と探求

翼列に配置されたときに優れた性能を呈する翼形の存在を推定して、水力機械には、“適列翼型”を使用すべきであることを提唱し¹⁰⁹⁾、理論的研究¹¹⁰⁾と共に実験的研究を進め^{111) 112)} 既存翼形にくらべて、キャビテーション発生の前後共非常に優れた適列な翼形が求められている。これらの研究はさらに進展中である⁷⁸⁾。

9.4 3次元翼のキャビテーション性能

翼巾が有限な場合にはキャビテーション性能にも3次元効果があらわれる¹¹³⁾。また翼端渦にキャビテーションが発生する¹¹⁴⁾。矩形翼¹¹⁵⁾、種々な平面形状をもち没水深を変えたもの¹¹⁶⁾ デルタ翼¹¹⁷⁾、等の実験結果が報告されている。

9.5 理論的な取扱い

2次元の理論的な解析は、むしろスーパーキャビテーションの理論に関連して展開された。すなわち、自由流線理論¹¹⁸⁾に re-entrant jet 模型¹¹⁹⁾あるいは逸散模型¹²⁰⁾を仮定した、くさびあるいは平板の周りの流れ、吹出し分布を用いた任意翼形の周りの線型理論¹²¹⁾、平板翼¹²²⁾あるいは厚みをもたない反りのある翼形¹²³⁾および欠円翼形¹²⁴⁾の線形理論、平板翼列の線形理論¹²⁵⁾等が展開されている。しかしながらキャビテーションの終端の流れ模型(翼列において特に)や、前縁の丸い翼形においてはキャビテーションの始まる点の決定法等に問題があり、実験結果との十分な一致は得られていない。

文 献

- (1) L. J. Briggs ; J. Appl. Phys., 26-8, 1955-8, 1001/1003.
- (2) R. T. Knapp & A. Hollander ; Trans. ASME, 70-5, 1948-7, 419/435.
- (3) R. W. Kermeen. J. T. McGraw & B. R. Parkin ; Trans. ASME, 77-4, 1955-5, 533/541.
- (4) J. W. Daily & V. E. Johnson, Jr ; Trans. ASME, 78-8, 1956-11, 1695/1706.
- (5) F. D. Finch ; Phys. Fluids, 12-9, 1969 -9, 1775/1778.
- (6) J. T. S. Ma & P. K. C. Wang ; I B M J., 6-4, 1962-10, 472/474.
- (7) M. Strasberg ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at NPL on Sep. 1955, London, 1956, 6 p. 1.
- (8) M. Strasberg ; J. Acoustical Soc. America, 31-2, 1959-2, 163/176.
- (9) E. N. Harvey, Wm. D. McElroy & A. H. Whiteley ; J. Appl. Phys., 18-2, 1947-2, 162/172
- (10) P. S. Epstein & M. S. Plesset ; J. Chem. P hys., 8-11, 1950-11, 1505/1509.
- (11) L. Liebermann ; J. Appl. Phys., 28-2, 1957-2, 205/211.
- (12) (7)の引用文献(6)および(8)の引用文献(8)
- (13) J. W. Holl ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 82-D-4, 1960-12, 941/946.
- (14) F. E. Fox & K. F. Herzfeld ; J. Acoustical Soc. America, 26-6, 1954-11 , 984/989
- (15) W. R. Turner ; J. Acoustical Soc. America. 33-9, 1961-9, 1223/1233.
- (16) R. T. Knapp ; Trans. A S M E, 80-6, 1958-8, 1315/1324.
- (17) W. J. Galloway ; J. Acoustical Soc. America, 26-5, 1954-9, 849/857.
- (18) D. M. J. P. Manley ; British J. Appl. Phys., 11-1, 1960 -1, 38/42.
- (19) G. Ziegler ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at NPL on Sep. 1955, London 1956, 3 p. 1.
- (20) 沼知 ; 日本機械学会論文集, 3-11, 1937, 177. Ing. - Arch., 7-6, 1936, 396.
沼知 ; 日本機械学会論文集, 3-11, 1937, 182. Ing. - Arch., 7-6, 1936, 396
沼知, 黒川 ; 東北大学工学報告, 12-4, 1937, 529 ; 日本機械学会論文集4-14, 1938, 117
- (21) F. Gutsche ; Schiffbau, 40-11, 1936-6. 196/200.
- (22) E. E. Williams & P. McNulty ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at NPL on Sep. 1955, London, 1956, 2 p. 1.
- (23) B. W. McCormick, Jr. ; Trans. A S M E, 84-D-3, 1962-9, 369/378.
- (24) B. R. Parkin & R. W. Kermeen ; Proc. Preprint for IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, Japan, Paper No. A - 2, 1962.

- (25) P. Eisenberg ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 83-D-3, 1961-9, 396/397.
- (26) K. K. Shalnev ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at N P L on Sep. 1955, London, 1956, 22 p. 1.
- (27) H. Rouse ; La Houille Blanche, 8-1, 1953-1/2, 9/19.
- (28) D. W. Jorgensen ; J Acoustical Soc. America, 23-10, 1961 -10, 1334/1338.
- (29) J. W. Holl & G. F. Wislicenus ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 83-D-3, 1961-9, 385/395.
- (30) B. W. McCormick ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 83-D-3, 1961-9, 397/398.
- (31) 沼知, 角田, 千田 ; 東北大学高速力学研究所報告, 6-57, 1952-2, 97/115
沼知, 角田, 千田 ; 東北大学高速力学研究所報告, 6-59, 1952-2, 135/153
- (32) J. W. Holl & J. M. Robertson ; Trans. A S M E, 77-4, 1955-5, 540/541.
- (33) 沼知, 大場, 千田 ; 日本機械学会第40期通常総会講演前刷集 (昭38・4・1 ~ 5) No. 86, 49/52.
- (34) R. T. Knapp ; Engineering, 173-4500, 1952-4, 533 ; 4501, 1952-5, 566 ; 4502, 1952-5, 597.
- (35) J. F. Ripken & J. M. Killen ; Univ. Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. Tech. Rep. No. 27, Ser. D, 1959-9.
J. F. Ripken & J. M. Killen ; Preprint for IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, Japan, Paper No. A-3, 1962-9.
- (36) 沼知福三郎 ; 東北大学高速力学研究所報告, 15-144, 1959/1960, 101/121.
Forsch. Ing. - Wes., 24-4, 1958, 125/132.
- (37) R. T. Knapp ; Trans. A S M E, 77-7, 1955-10, 1045/1054.
R. T. Knapp ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at N P L on Sep. 1955, London, 1956, 19 p. 1.
- (38) M. Harrison ; J. Acoustical Soc. America, 24-6, 1952-11, 776/782.
- (39) (29)の引用文献(7)
- (40) G. W. Willard ; J. Acoustical Soc. America, 25-4, 1953-7, 669/686.
- (41) W. Connolly & F. E. Fox ; J. Acoustical Soc. America, 2605, 1954-9, 843/848.
- (42) W. J. Calloway ; J. Acoustical Soc. America, 26-5, 1964-9, 849/857.
- (43) C. West & R. Howlett ; British J. Appl. Phys. (J. Phys. D), 1-2 1968, 247/254.
- (44) B. E. Noltingk & E. A. Neppiras ; Proc. Phys. Soc. (London), B-63-9, 1950-9, 674/685.
- (45) N. H. Langton & P. Vaughan ; British J. Appl. Phys., 13-9, 1962-9, 478/487.
N. H. Langton & P. Vaughan ; British J. Appl. Phys., 14-9, 1963-9,

563/566.

- R. S. Porter, M. J. R. Cantow & J. F. Johnson ; J. Appl. Phys., 35-1, 1964-1, 15/18.
- N. H. Langton ; J. Sound Vibration, 10-1, 1969-7, 22/31.
- (46) L. Esande ; Proc. IAHR Symposium, Sendai, Japan, 1962, 193, 113/124.
- (47) R. A. Wentrell, H. D. Scott & R. P. Chapman ; J. Acoustical Soc. America, 46-3, 1969-9, 789/794.
- (48) Van Slyke & J. M. Neil ; J. Biol. Chem., 61-2, 1924-9, 523/573.
- (49) E. Berl ; Chemische-technische Untersuchungsmethoden 1, Berlin, 1921, 567.
- (50) K. S. Iyenger & E. G. Richardson ; Mech. Engng. Research Laboratory, East Kilbride, Glasgow, Fluids Report, No. 57, 1957-8.
- (51) J. M. Robertson ; Trans. ASME, 78-1, 1956-1, 95/104.
- (52) J. M. Mousson ; Trans. ASME, 59-5, 1937-7, 399/408.
- (53) W. H. Price & G. B. Wallace ; J. Am. Concrete Inst., Vol. 21, Title No. 46-7, 1949-10, 109/120.
- (54) J. Z. Lichtman, D. H. Kallas, C. K. Chatten & E. P. Cochran, Jr ; Trans. ASME, 80-6, 1958-8, 1325/1341.
- (55) N. S. G. Rao & A. Thiruvengadam ; Proc. ASCE, 87, HY 5, 1957-9, 37/62.
- (56) R. Mathieson & J. M. Hobbs ; Engineering, 189-4892, 1960-1, 136/137.
- (57) W. C. Leith & A. L. Thompson ; J. Basic Engng., Trans. ASME, 82-D-8, 1960-12, 795/807.
- (58) M. S. Plesset & A. T. Ellis ; Trans. ASME, 77-7, 1955-10, 1055/1064.
- (59) L. Rayleigh ; Phil. Mag., 34-200, 1917-10, 94/98.
- (60) (61) の引用文献(3)
- (61) R. H. Mellen ; J. Acoustical Soc. America, 28-3, 1956-5, 447/454.
- (62) C. Hunter ; Fluid Mech., 8-2, 1960-6., 241/263.
- (63) I. R. Jones & D. H. Edwards ; J. Fluid Mech., 7-7, 1960-7, 596/609.
- (64) E. Meyer ; Proc. Second Symposium Naval Hydrodynamics, 1958, 179/200.
- (65) E. I. Zababakhin ; J. Appl. Math. & Mech., USSR English Trans., 24-6, 1960, 1714/1717.
- (66) S. S. Shu ; Proc. First U. S. Nat. Congr. Appl. Mech. ASME, 1952, 823/825.
- (67) M. S. Plesset & S. A. Zwick ; J. Appl. Phys., 25-4, 1954-4, 493/500.

- (68) P. Dergarabedian ; J. Appl. Mech., 20-4, 1953-12, 537/545.
- (69) C. F. Naude & A. T. Ellis ; J Basic Engng., Trans. A S M E, 83-D-4, 1961-12, 646/656.
- (70) A. T. Ellis, M. E. Slator & M. E. Fournery ; Proc. at the I A H R Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, Japan, Paper No. A - 4, 1962 - 9.
- (71) 小林陵二；東北大学高速力学研究所報告, 22-213, 1966/1967, 41/62.
島章；東北大学高速力学研究所報告, 24-238, 239, 241, 1968/1969, 83/109, 111/148, 183/206,
- (72) R. D. Ivany, F. G. Hammitt & T. M. Mitchell ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 88-D -3, 1966-9, 649/651.
- (73) G. Olson & C. Hammitt ; J. Acoustical Soc. America, 46-5-2, 1969, 1272/1276.
- (74) G. W. Sutton ; J. Appl. Mech., 24-3, 1957-9, 340/348.
- (75) R. Hickling & M. S. Plesset ; Phys. Fluids. 7-1, 1964-1, 7.
- (76) R. D. Ivany & F. G. Hammitt ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 87-D-4, 1965-12, 977/985.
- (77) 文献 (28), (38), (64), (78).
- (78) 沼知福三郎；東北大学高速力学研究所報告, 18-177, 1962/1963, 147/160 の引用文献 (3~7) (10~12).
- (79) J. J. Varga, G. Sebestyen & A. Fay ; La Houille Blanche, No. 2, 1969, 137/148.
- (80) M. Rata ; La Houille Blanche, No. 6, 1963, 671/677.
- (81) P. De Santis, D. Sette & F. Wanderlingh ; J. Acoustical Soc. Am., 42-2, 1967-8, 514/516.
- (82) 沼知福三郎；日本機械学会論文集, 7-28, 1941-8, 1/9.
V D I - Forschung, 11-6, 1940-11/12. 303/308.
- (83) 沼知福三郎；日本機械学会誌, 52-367, 1949-7, 230/231 ; 沼知. 角田. 千田；速研報告 1-1, 1949, 1.
- (84) 沼知. 角田. 千田；日本機械学会論文集, 15-51, 1950, 52 ; 速研報告, 1-2, 1949, 17.
- (85) 沼知福三郎；東北大学工学報告 13-3, 1943, 511, 日本機械学会論文集, 8-31, 1942, III - 4.
- (86) 沼知. 角田. 千田；日本機械学会論文集, 15-51, 1950, 58, ; 速研報告, 1-3, 1949, 31.
- (87) 沼知. 角田. 千田；(104)の引用文献〔13〕~〔23〕
沼知, 川島. 中村；(104)の引用文献〔24〕
- (88) R. B. Wade & A. J. Acosta ; J. Basic Engng., T rans. A S M E, 88-D-1, 1966-3, 273/283.

- (89) J. O. Young & J. W. Holl ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 88-D-1, 1966-2, 163/176.
- (90) H. N. Böttcher ; Trans. A S M E, HY D-58-1, 1936, 355/360.
H. N. Böttcher ; Zt. V D I, 80-50, 1936-12, 1499/1503.
- (91) T. C. Poulter ; J. Appl. Mech., 9-1, 1942-3, A-31/A-37.
- (92) G. T. Callis ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at N P L on Sep. 1955, London, 1956, 18 p. 1.
- (93) G. Petracchi ; (92) の引用文献
- (94) W. H. Wheeler ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at N P L on Sep. 1955, London, 1956, 21 p. 1.
- (95) 下平三郎 ; 日本機械学会誌, 63-500, 1960-9, 1226/1236.
- (96) A. Thiruvengadam ; J. Ship Res., 13-3, 1969-9, 220/233.
- (97) M. S. Plesset & A. T. Ellis ; Trans. A S M E, 77-7, 1955-10, 1055/1064.
- (98) W. J. Rheingans ; Trans. A S M E, 72-5, 1950-7, 705/724.
- (99) R. E. H. Rasmussen ; Cavitation in Hydrodynamics, Proc. Symposium held at N P L on Sep. 1955. London, 1956, 20 p. 1.
- (100) 栄 幸雄 ; 腐食, 防食に関する研究, 学位論文, 下平教授の御好意により提供を受けた。
- (101) F. Numachi ; J. Mech. Engr. Japan, 31-136, 1928-8, 530/583.
- (102) 村井等 ; 東北大学高速力学研究所報告, 16-152, 1960/1961, 19/43.
- (103) O. Walchner ; Hydromechn. Prob. d. Schiffsantriebes, 1932, 256.
E. Martyrer ; Hydromechn. Prob. d. Schiffsantriebes, 1932, 252/255.
藤本武助, 山本正 ; 日本機械学会論文集, 17-60, 1951-10, 41/46.
神元五郎, 堀江修三, 羽田幹夫 ; 日本機械学会論文集, 22-117, 1956-5, 324/330.
J. W. Daily ; Trans. A S M E, 71-3, 1949-4, 269/284.
R. W. Kermeen ; Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., Report No. 47-5, 1956.
B. R. Parkin ; Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., Report No. 47-6, 1956.
M. C. Meyer ; International Shipbuilding Progress, 6-60, 1959, 361/368.
および (88)
R. B. Wade & A. J. Acosta ; J. Basic Engng., Trans. A S M E, 89-D-4, 1967-12, 693/706.
- (104) 沼知福三郎 ; 東北大学高速力学研究所報告, 11-10, 1954-9, 1/10.
- (105) 沼知福三郎 ; 日本機械学会誌, 52-367, 1949-7, 230/231.
- (106) 沼知福三郎 ; (104) の引用文献 (26)
- (107) 沼知・淵沢・角田 ; (104) の引用文献 (27)
- (108) 沼知・千田 ; 東北大学高速力学研究所報告, 17-163, 1961/1962, 37/60.
T. B. Bebjamin ; Proc. Second Symposium on Naval Hydrodynamics, 1958-8, 201/205. の (17)
- (109) 沼知・淵沢 ; (104) の引用文献 (28)

- (110) 沼知・その他；(104) の引用文献 (29) ～ 33)
- (111) 沼知・その他；(104) の引用文献 (34) ～ 42)
- (112) 沼知・その他；(78) の引用文献 (19) および (20)
- (113) R. W. Kermeen ; Calif. Inst. of Techn. Rep. No. 47-14, 1960-9.
- (114) B. W. McCormick ; J. Basic Engng., Trans. A S M E. 84-D-3, 1963-9, 369/379.
- (115) H. Reichardt & W. Sattler ; Max-Plank-Institut für Strömungs -
forschung, Göttingen, Final Report, 1967-3.
- (116) H. R. Wright ; Experimental Study of High Speed Hydrofoils, Vol. II,
Grumman Aircraft Engineering Corporation, Report No. AD-624413,
1963-8.
- (117) H. Reichardt & W. Sattler ; Max-Plank-Institut für Strömungs-
forschung, Göttingen, 1962-7.
- (118) H. Lamb ; Hydrodynamics. 6th Ed., Cambridge, 1963.
- (119) A. D. Cox & W. A. Claydon ; J. Fluid Mech., 3, 1958, 615/637.
- (120) T. Yao-Tsu Wu ; J. Fluid Mech., 13-2, 1962, 161/181.
- (121) A. N. Ivanov ; AIAA J. 1-1, 1963-1, 278/280.
- (122) A. J. Acosta ; Hydrodynamics Laboratory, California Institute of
Technology, Pasadena, Calif., Report No. E-19.9, 1955.
- (123) J. A. Geurst ; International Shipbuilding Progress, 6-60, 1959.
- (124) R. B. Wade ; J. Ship Research, 11-1, 1967-3, 20/27.
- (125) R. B. Wade ; Appl. Sci. Res., 17-3, 1967, 169/188.
- (126) N. D. Shutler & R. B. Mester ; J. Basic Engng., Trans. ASME,
87-D-2, 1965-6, 511/517.