キャビテーション壊食ピットの寸法効果*

祖 山 均^{*1}

Scaling Effects on Cavitation Erosion Pits

Hitoshi SOYAMA

In order to clarify the scaling effects on cavitation erosion, erosion pits are carefully measured using a digital image processing technique for four similar flat-hydrofoils with chord length C from 53 mm to 160 mm, corresponding to the cavitation aspects, under similar conditions of cavitation-nuclei size-distribution in the test water, flow velocity, angle of attack and cavitation number. Because the cavitation intensity is correspond to types of cavitation and it is also associated with cavitation-nuclei size-distribution and flow velocity. The erosion intensity I_{ER} , that is defined by the diameter of erosion pits and the pitting rate, is determined to be a power law: $I_{ER} \propto C^n$. In the average erosion intensity over the hydrofoils, the exponent n is 2, while at the maximum local erosion intensity, the exponent n is 4.5. The erosion pits predominantly result from the vortex cavitation.

Key Words: Cavitation, Erosion, Digital Image Processing, Scaling Effects, Vortex, Hydrofoil

1. 結 言

流体機械は、スケールメリットをねらって急速に大形化されつつある。したがって、その設計に際しては、「寸法増大とともにキャビテーション壊食（以下単に壊食という）が急激に増加するという寸法の n 乗則」^{(1)~(9)}が大きな障壁となってきた。

文献^{(1)~(9)}によれば、べき指数 n は1~7と大きくばらついており、その特定が事実上困難なばかりでなく、ばらつきの原因もほとんど解明されていない。前報⁽¹⁰⁾において壊食に係わるキャビテーションのタイプ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を考慮して、キャビテーション衝撃圧を調べた結果、平均衝撃圧には寸法差の影響は小さいが、渦キャビテーションが生ずる局所的高衝撃圧スポットにおいては寸法効果が著しく現れる可能性を示唆した。なお、振動式装置あるいは回流水槽による壊食試験によると、壊食は塑性変形により疲労破壊的に発達する⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾とされているが、実機に用いられているような高耐壊食性材料では、十分に高い衝撃圧が負荷されて疲労破壊が生じている⁽¹⁵⁾。したがって、局所的高衝

撃圧の大きさおよびその発生頻度を調べる観点から、材料表面上に発生した壊食ピット（以下ピットという）の寸法効果を調べることは有意義であろう。

よって本報では、実機の壊食に関する寸法効果の解明の第1歩として、前報⁽¹⁰⁾と同じ平板状翼形を取り上げ、画像処理を用いて、弦長が53 mmから160 mmと異なる4相似翼形表面のピットの大きさ、分布などを、気泡の挙動との関連において詳細に調べる。

2. 実験装置および方法

実験には、流体科学研究所の密閉形寸度効果回流水槽を使用した⁽¹⁶⁾が、その詳細は文献⁽¹⁶⁾を参照されたい。

図1には、供試翼形が中央に設置されている測定部を示す。試料水には、空気ですべて飽和された水道水を使用している。図2には、平均的なキャビテーション核分布を示す。ここに、 N_n は核の数密度分布関数、 d_n は核の直径である。

供試翼形には、断面形状が相似で、弦長 C がそれぞれ160, 106, 80, 53 mm（アスペクト比はそれぞれ1.25, 1.89, 2.50, 3.77）の4枚のステンレス鋼製平板状翼形（以下PUM-I, II, III, IVと呼ぶ）を採用した（図3）。

ここでは、供試翼形背面にアルミニウム薄板（厚さ0.1 mm, 純度99.9%）を接着し、翼形背面に生じるピ

* 平成3年3月30日 第68期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成4年4月10日。

*¹ 正員、東北大学流体科学研究所（〒980 仙台市青葉区片平2-1-1）。

ットを測定した。この薄板は前縁および後縁付近においても翼形に十分密着するように引張力を加えながら注意深く接着した。また、翼形をキャビテーションにさらす時間は10hとしている。

ピットの大きさと数の分布の決定に際しては、誤判断の主因となる人為的な操作が入る余地を全く除去するために、光学顕微鏡を介して撮影した写真を画像処理する手法を採用した。特に、本実験では、ピットと壊食性の十分大きいキャビテーション衝撃圧との対比を目的としているから、ピットとしては機械的衝撃力によるもののみを取り上げ、電気化学的腐食作用による孔食⁽¹⁷⁾は除外することとした。すなわち、「走査電子顕微鏡SEM観察用レプリカ作成時に使用するアセチルセルロースフィルムの表面を酢酸メチルで溶かしたものを薄板壊食面にはり付け、表面の腐食生成物を吸着させて除去する」という手順を数回繰返し、薄板表面上の腐食生成物を完全に除去した。

次に、光学顕微鏡でピットのくぼみを明りょうに判別できるように、ピット内部の一部から光が反射し、

かつ、一部が陰影となるように、光源とカメラの角度および位置を最適に設定して、4供試翼形を同一条件下に拡大(倍率12.6倍)撮影した。画像処理に際しては、ピットの数および大きさを正確に測定するために、上記の拡大写真を200 μm 間隔でサンプリングし、ピットの反射部分のみを抽出するように画像の濃度しきい値を設定し、さらに、画像の連結成分の数をピットの数、連結成分の画素の数をピットの大きさとして解析した。特に、拡大撮影の際にピットの一部の反射のみをとらえているので、光源とカメラの軸と垂直方向の画素の連結成分をピットの大きさとし、写真上のピットの大きさと画像の連結成分の大きさを比較するという比較検定法により、1画素当たりの長さを換算してピットの大きさを正確に定めた。なお、この画像処理法の妥当性をチェックするために、光学顕微鏡およびSEMを利用して、ピットの詳細も観察している。

キャビテーションの様相は、せん光時間1 μs のクセノンランプを用いて、測定部の上面と側面の二つの観測窓から同時撮影することにより、立体観察している。

実験結果の整理に用いたキャビテーション係数 σ 、レイノルズ数 Re は、測定部の静圧 P_t と平均流速 V_t より、次のように定義した。

$$\sigma = 2(P_t - P_v) / \rho V_t^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Re = CV_t / \nu \quad \dots\dots\dots (2)$$

と定義した。ここに、 P_v 、 ρ 、 ν は試料水の飽和蒸気圧、密度、動粘度である。

ピットの測定条件は、 $\sigma = 1.4$ 、 $Re = (0.84 \sim 2.54) \times 10^6$ 、 $V_t = 15 \text{ m/s}$ 、迎え角 $\alpha_a = 0.105 \text{ rad}$ 、水温 $t_w = 291 \sim 296 \text{ K}$ 、試料水の空気含有度 $a/a_s = 1.04 \sim 1.07$ である。ここに、 a は標準状態における全空気含有量(容量%)、 a_s は飽和状態における空気含有量である。

3. 実験結果

壊食には、キャビティ長さの変動量が支配的に効くとの報告⁽⁷⁾もあるが、ここでは、研究の対象領域を実用的なサブキャビテーション(以下Sub.Cという)領域に限定する。また、文献⁽¹⁰⁾⁽¹⁸⁾に詳述されたように、本報と同一の二次元翼形を取り上げて、種々の迎え角、流速において、キャビテーション衝撃圧、ノイズ、および振動加速度をSub.C領域で測定した結果、キャビティブレイクダウン⁽¹⁹⁾が発生する状態でキャビテーション強さが最大となり、かつ、キャビテーション強さおよびキャビテーションの様相に弦長差の影響(すなわち寸法効果)が顕著に認められた。したがって、

図1 測定部(単位はmm)

図2 試料水のキャビテーション核分布

図3 供試翼形の形状(弦長C)

図4 種々の弦長の翼形に発生するキャビテーションの様相

本報の試験条件としては、キャビティブレイクダウン⁽¹⁹⁾が発生する迎え角 $\alpha_a = 0.105 \text{ rad}$, 流速 $V_t = 15 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.4$ を選定した。

3・1 キャビテーションの様相 まず、ピットの発生箇所とキャビテーションの挙動との関連性を見るために、図4には、4種の弦長 C の翼形について、垂直上方 (Top v. で示す) と斜め側方 (Side v. で示す) からとらえたキャビテーションの様相を示す。なお、写真は同一仕上がり寸法 (写真上の L. E., T. E. は前縁、後縁を示す) としている。前縁側には、付着キャビテーションが発生し、スーパキャビテーション空洞のような単一空洞も形成され、しばしばスパン方向にかなりの幅を持つ単一空洞の脱落、いわゆるキャビティブレイクダウン⁽¹⁹⁾を生じ、かなりの大きさの渦キャビテーションおよびクラウドの放出を伴い、そして、弦長 C が大なるほど大きい渦キャビテーションも発生している。すなわち、顕著な寸法効果が現れている^{(10)**1}。

3・2 ピットの様相 図5には、翼形 PUM-I に生じたピットを光学顕微鏡により拡大して示す (代表的ピットを○印で囲んで A~D に示す)。以下では、図5のような直径が数十から数百 μm のくぼみのみをピットとして取り上げる。なお、幅約 0.5 mm の縦状および横状の模様は、ピットに比較して非常にあらさが大きい、アルミニウム薄板の仕上げ模様および接着剤の塗りむらによるもので、現象には全くかわりない。

図6には、図5の A~D に示したピットの SEM 写真を示す。A~D のピットのいずれにも、くぼみの底部に研磨痕が明りょうに残り、特に B~D のピットにはくぼみ周辺部の盛り上がりも認められるから、これらは

**1 キャビティブレイクダウン時には、翼面に残存するキャビティ長さは湾曲しており、放出される渦キャビテーションも側壁境界層による三次元効果も含まれる可能性があるが、アスペクト比は最小の PUM-I においても 1.25 であるから十分に二次元性が保たれており、翼弦長 C のみによる寸法効果と言える。

図5 ピットの様相

図6 ピットの SEM 写真

明らかに材料欠損を伴わない塑性変形によるピットであると言える。このようなピットは、既報⁽¹⁵⁾で述べたように、実際の流体機械に致命的な激しい壊食の発生時に認められるので注目に値しよう。なお、図5のそれと比較して、SEM 写真上のピットがかなり小さいように見えるが、これは、ピット全体が非常に滑らかな塑性くぼみであるために、SEM 写真上では特にこ

う配が大きいところだけがくぼみと認められることと、さらに、ピット D に見られるように、その中央部に複数個の直径数 μm の微小くぼみからなる直径数十 μm のくぼみが存在するためであろう。そして、この結果は、「崩壊衝撃圧がその気泡群のサイズの 1/10 程度の領域で局所的に大になる」とする Hammitt ら⁽⁹⁾の結果と良く符合している。なお、本実験で用いたアルミニウム薄板の表面がややあらいために、詳細な観察が困難であったので、中央部のくぼみが数 μm の微小くぼみ数個から成る理由については、金属研磨剤を用いて壊食面を十分滑らかに仕上げた別報⁽¹⁵⁾に詳述している。

壊食表面には、以上のようなピットに比べれば数は少ないが、図 6 (e) に示すような壊食痕も認めた。これは、直径数百 μm のくぼみの中央部に認められるピットとは全く異なり、その周辺部が全くくぼんでおらず、また、内部がかなり複雑な形態をしているから、単一のキャビテーションアタックによって生じたとはとうてい考えにくいので、微小き裂箇所に弱いキャビテーションアタックが繰返し負荷されて疲労破壊的に生じたものか、あるいは、ピットあるいは表面のあらさなどに起因する壊食表面および内部の微小き裂が基になり、腐食が進展したものである。ここでは、特にキャビテーションアタックの大きさおよび数の分布を知るために、光学顕微鏡を用いて機械的なくぼみと認めたピットのみを測定している。このような壊食痕は計測の対象としていない。

次に、図 7 には、画像処理によりピット分布を計測するために撮影したピットの光学顕微鏡拡大写真を、上記の 4 翼形について対比する。それぞれの写真は、スパン方向中央部分を前縁 ($x=0\text{ mm}$) から 5 mm 間隔に、3 mm $\times$ 3 mm の正方形領域を撮影したもので

あるが、カメラの位置の関係から、写真上ではわずかに長方形に変形している。ここでは、撮影した写真のうちピットが認められる領域のみを示した (すなわち、どの翼形においても、図示された領域の上流側・下流側ではピットは全く認められなかった)。図 7 より、ピットは、4 枚のすべての翼形において、渦キャビテーションが発達・崩壊する $x/C=0.4$ 前後の領域で顕著に認められ、弦長 C が大きいほどピットの直径 d が増大している。この事実は、渦キャビテーションのサイズと発生頻度のそれらと良く符合するので、このピットは渦キャビテーションの崩壊によりもたらされていると言える。また、この種の円形ピットは、渦キャビテーションの発達・崩壊領域に集中し、そして、 C が大きいほど d が大きいという傾向は、感圧紙を用いて測定した局所的キャビテーション高衝撃圧を示す円形スポットの発生領域、形状などの傾向⁽¹⁰⁾と全く同じである。言うまでもなく、アルミニウム薄板および感圧紙をはった翼形のキャビテーションへの露出時間はそれぞれ 10 h と 20 min と大差があり、ここで認めたピットの発生率はかなり低い。要するに、このピットはアルミニウムに直接変形をもたらすような十分に高い局所的衝撃圧により生じたと言える。なお、これらのほとんどすべてのピットはそれぞれ単なる円形状に見えることから、今回採用したキャビテーション露出時間の 10 h においては、ピットはほとんど重なり合っておらず、これらのピットの大きさと数は局所的な高いキャビテーション衝撃圧の大きさと発生数に対応していると言える。

3.3 ピットの分布 ピットの分布および大きさの正確な測定のために、図 7 を二値化処理し、画素の濃度値にしきい値を設定して、ピットのみを判別できるように画像処理した。このように処理した結果を図

図 7 壊食面の画像処理用光学顕微鏡写真

図 8 画像処理後の壊食面の様相

8に示す。ここでは、ピットは、画素が互いに連結して一つの塊を形成する「連結成分」として表れている（ここに、画素の数を s とする）。なお、ピットの判別に際し、原理的には、画像の黒色部分と白色部分とを採用する二つの場合が考えられるが、後者のほうがピットをより適確に表し得ることが図7との比較より明らかになったので、図8では、ピットの判別に際して白色部分を採用し、濃度値を反転処理したものをを用いている。ピットの直径と画像処理結果の連結成分の大きさの比較より、この分解能は1画素当たり0.03 mmであるので、ピットを生じていない部分を基準面として、光学顕微鏡により基準面よりくぼんでいると認められる部分をピットとみなすと、ピットの直径 d mmは、これを円形近似したときの直径であるから、 $d=0.03s$ と表される。なお、拡大写真においては、光源に対する反射部分のみ（白色部分）をとらえてピットとしているので、光源-カメラの軸と垂直方向の連結成分の画素数 s を用いて d を求めている。また、図8に明りような数珠状の連結成分が現れているが、これは、前述のように、アルミニウム薄板の仕上面の模様もしくは接着剤の塗りむらによるものであるから、図7と比較して、明らかにピットと認められない連結成分として以後の解析データから除外している。なお、このようにして求められる直径 d の下限値は0.03 mmであるが、以下では、キャビテーション衝撃圧が大きいほどピットの直径が大きい可能性があるので、衝撃圧にしきい値を設定した場合の寸法効果を調べる意味から、 $d \geq 0.03$ mmと $d \geq 0.09$ mmの場合について示す。

図9には、4種の弦長 C の相似翼形について、局所ピット発生率 $\dot{n}$ の流れ方向の分布を(a) $d \geq 0.03$ mmの場合と、(b) $d \geq 0.09$ mmの場合について示す。ここで、 $\dot{n}$ は、位置 j ごとの面積 A 内、時間 t 内に生じた全ピット数 $(n_{pit})_j$ より以下のように表される。

$$\dot{n} = n_{pit}/(At) \quad (3)$$

いずれの翼形においても、明らかに、 $x/C=0.4$ 前後の範囲でのみピットが発生している。なお、この発生範囲は、PUM-Iでは $x/C=0.2 \sim 0.6$ であり、PUM-IVでは $x/C=0.3 \sim 0.5$ であることから、弦長 C が大なるほど流れ方向に対して発生範囲が広がる傾向があると言える。また、図4に示したキャビテーション発生領域との比較から、ピットの発生領域は、付着キャビテーションの平均的発生領域ではなく、渦キャビテーションが発達・崩壊する領域に対応していると言える。また、発生率 $\dot{n}$ は $x/C=0.3 \sim 0.45$ で最大値 $\dot{n}_{max}$ を取り、その値は弦長 C が大なるほど大である。なお、 $\dot{n}_{max}$ を呈する位置は、 C が大なるほど下流に移動す

る。特に、図9(b) $d \geq 0.09$ mmのピットにおいてその傾向が顕著である。また、図9(a) $d \geq 0.03$ mmより、図9(b) $d \geq 0.09$ mmのピットのほうが $\dot{n}_{max}$ となる位置が下流に移動しており、比較的大きいピットの発生率は下流において高いと言える。この事実は、Knappら⁽²⁰⁾の結果と良く符合している。これは、ピット発生領域と3.1節のキャビテーションの様相との比較からも言える。すなわち、ピットは渦キャビテーションあるいはクラウドの崩壊によって生じるであろうから、大きなピットを生じる大きな渦キャビテーションあるいはクラウドほど崩壊に至るまでの時間が長くなるはずだからである。

次に、ピットに対する寸法差の影響を調べてみよう。まず、ピットの発生率 $\dot{n}$ に対する寸法差の影響を見るために、図10には、最小翼形PUM-IVの値で標準化した平均発生率 $\bar{\dot{n}}/\bar{\dot{n}}_{IV}$ を弦長 C/C_{IV} に対して示す。ここに、 $\bar{\dot{n}}_{IV}$ はPUM-IVの平均発生率であり、 C_{IV} はPUM-IVの弦長である。なお、平均発生率 $\bar{\dot{n}}$ は弦長 C を考慮し、測定間隔 $\lambda=5$ mmを用いて、

$$\bar{\dot{n}} = \sum(\dot{n}_i \lambda)/C \quad (4)$$

と定義している。すなわち、 $\bar{\dot{n}}$ は、図9において $\dot{n}$ の分布曲線と横軸で囲まれた面積に相当している。図10より、大略、

(a) $d \geq 0.03$ mm

(b) $d \geq 0.09$ mm

図9 ピット発生率 $\dot{n}$ の流れ方向分布

$$\bar{n}/\bar{n}_{IV} \propto C/C_{IV} \quad \cdots \cdots (5)$$

の関係が成立している。また、最大壊食深さに対する寸法効果の観点から、図 11 には、標準化したピット発生率の最大値 $\dot{n}_{\max}/(\dot{n}_{\max})_{IV}$ と弦長 C/C_{IV} の関係を示す。ここに、 $(\dot{n}_{\max})_{IV}$ は最小翼 PUM-IV のピット発生率の最大値である。図 11 より、

$$\dot{n}_{\max}/(\dot{n}_{\max})_{IV} \propto (C/C_{IV})^{1.5} \quad \cdots \cdots (6)$$

の関係がある。したがって、「翼面全体の平均壊食量よりも局所的壊食量において寸法差の影響がより顕著に現れる」と言える。なお、図 9 のそれと同様に、 $d \geq 0.03$ mm のピットのものより $d \geq 0.09$ mm のそれに対して寸法差の影響がより明りょうに現れている。

次に、ピットの直径 d に対する寸法差の影響をみる。図 12, 13 には、標準化したピットの平均直径 $\bar{d}/\bar{d}_{IV}$ と、ピットの最大径 $d_{\max}/(d_{\max})_{IV}$ を弦長 C/C_{IV} に対して示す。同様に、これらに寸法の n 乗則を適用してみると、

$$\bar{d}/\bar{d}_{IV} \propto (C/C_{IV})^{0.2} \quad \cdots \cdots (7)$$

$$d_{\max}/(d_{\max})_{IV} \propto C/C_{IV} \quad \cdots \cdots (8)$$

図 10 ピットの平均発生率 $\bar{n}$ と弦長 C の関係

図 11 ピット発生率の最大値 $\dot{n}_{\max}$ と弦長 C の関係

となるから、翼弦長 C が 3 倍になれば、 $d_{\max}$ は 3 倍になる(ただし、 $\bar{d}$ は 25% ほどしか増加しない)。この事実と、前述した「発生頻度は小さいが、弦長 C の増大とともに巨大な渦キャビテーションおよびクラウドが生じている」という事実から見て、「ピットは渦キャビテーションもしくはクラウドの崩壊によって生じる」という推定がここに裏付けられたと言える。

3.4 壊食エネルギーに対する寸法則の考察

次に、ピットによる壊食エネルギーに対する寸法則を考察してみる。壊食エネルギー I_{ER} は、壊食ピットの形状は幾何的に相似であるとして、キャビテーション衝撃圧 P_{sc} とピット発生率 $\dot{n}$ およびピットの直径 d より、

$$I_{ER} \propto \sum P_{sc}(\dot{n}_j d_j^3) \quad \cdots \cdots (9)$$

で表されると仮定する。なお、ここでは P_{sc} を一定としている。

図 14 には平均壊食エネルギー $\bar{I}_{ER}$ を標準化弦長 C/C_{IV} に対して示す。ここに、平均壊食エネルギー $\bar{I}_{ER}$ は、弦長の大きさを考慮して、

$$\bar{I}_{ER} = \sum I_{ERj} \lambda / C \quad \cdots \cdots (10)$$

と定義し、 $\bar{I}_{ER}$ を最小翼の値 $(\bar{I}_{ER})_{IV}$ で標準化している。ピット発生率および直径と同様に、寸法の n 乗則を仮定してみると、 $\bar{I}_{ER}$ におけるべき指数 n は 2 となる。一方、局所的エネルギーの最大値 $I_{ER\max}$ に対しては、 $\dot{n}_{\max}$ および $d_{\max}$ に対する寸法の n 乗則の n がそ

図 12 ピットの平均直径 $\bar{d}$ と弦長 C の関係

図 13 ピットの最大径 $d_{\max}$ と弦長 C の関係

図 14 平均壊食エネルギー $\bar{I}_{ER}$ と弦長 C の関係

れぞれ 1.5 と 1 であるから、 I_{ERmax} における n は 4.5 となり、明らかに、顕著な寸法差の影響が現れる。特に、機械の寿命に直結する局所壊食量において n が大となることは、注目に値する。

4. 結 言

壊食の寸法効果の解明を目的として、4 種の弦長 C を持つ平板状翼形を取り上げ、局所的高衝撃圧の寸法効果を解明する観点から、ピットの大きさ、数および分布などをキャビテーションの様相との関連において、同一の核分布、流速 V_t 、迎え角 α_a ならびにキャビテーション係数 σ のもとに画像処理により詳細に調べた。得たる結果を要約すれば次のようになる。

(1) ピットの直径および発生率から求められる壊食エネルギー I_{ER} において寸法差の影響が認められ、特に、局所的壊食エネルギーの最大値 I_{ERmax} に対して顕著であり、寸法の n 乗則のべき指数 n の値は 4.5

である。一方、平均壊食エネルギー $\bar{I}_{ER}$ では 2 である。

(2) ピットの平均直径 $\bar{d}$ に対する寸法効果は小さいが、最大直径 d_{max} に対する寸法差の影響は顕著である。すなわち、大寸法になると、発生率は極めて低いが大きなピットを生じる。

(3) ピット発生率においても、平均壊食発生率 $\bar{n}$ より最大壊食発生率 n_{max} に対して寸法差の影響が大きい。

(4) 渦キャビテーションは注目すべき壊食性気泡である。

文 献

- (1) Canavelis, R., *Ph. D. Thesis*, (1966). Univ. Paris, Faculte de Science.
- (2) Shalnev, K. K., ほか 2 名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 408, (1967), Philadelphia, 220.
- (3) Conn, A. F., *Proc. 14th Int. Towing Tank Conf.*, (1975), 94. NRC Canada, Ottawa.
- (4) Sotnikov, A. A. and Pylayev, N. I., *Proc. 10th IAHR Symp.*, (1980), 143. Tokyo.
- (5) Hammit, F. G., *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, (1980), 271. McGraw-Hill.
- (6) Malyshev, V. and Pylayev, N., *Proc. Cavi. Fluid Mach. Group*, I Mech E, (1974), 309. Edinburgh.
- (7) Kato, H., ほか 2 名, *Proc. 12th Symp. Naval Hydrodyn.*, (1978), 452. Washington D. C.
- (8) Kato, H., ほか 2 名, *Proc. 3rd Int. Symp. Cavi. Noise Erosion Fluid Syst.*, (1989), 79. San Francisco.
- (9) 加藤, キャビテーション, (1990), 326, 横出版.
- (10) 伊藤・ほか 6 名, *機論*, 54-506, B(1988), 2727.
- (11) 大場, *機誌*, 82-728(1979), 666.
- (12) Selim, S. M. A. and Hutton, S. P., *Proc. 2nd Int. Conf. Cavi.*, I Mech E, (1983), 41. Edinburgh.
- (13) Plesset, M. S. and Ellis, A. T., *Trans. ASME*, 70-7(1955), 1055.
- (14) 岡田・岩井, *機誌*, 91-831(1988), 168.
- (15) 祖山・ほか 4 名, *ターボ機械*, 18-12(1990), 699.
- (16) Murai, H. and Ihara, A., *Rep. Inst. High Speed Mech.*, 42-329(1980), 79. Tohoku Univ.
- (17) 渡辺・ほか 3 名, *機論*, 54-505, A(1988), 1807.
- (18) Soyama, H., ほか 2 名, *Proc. 3rd Int. Symp. Cavi. Noise Erosion Fluid Syst.*, ASME, (1989), 41. San Francisco.
- (19) 伊藤・ほか 4 名, *機論*, 54-503, B(1988), 1555.
- (20) Knapp, R. T., ほか 2 名, *Cavitation*, (1970), 321. McGraw-Hill.