

# キャビテーションCFDと壊食の予測

能見基彦\*

## Cavitation CFD and the Prediction of Cavitation Erosion

by Motohiko NOHMI

Considerations on the erosive cavitation phenomenon, an overview on the recent progress in cavitation CFD, and trends in the development of erosion prediction methods are introduced in the following. Cavitation Erosion occurs due to impact loadings caused by the collapse of cavitation bubbles in the vicinity of an object. Although this phenomenon can be analyzed at a single bubble level, analysis is extremely difficult at a bubble cluster level. Cavitation CFD, which is using an approximating method called cavitation model, enables comprehensive analysis and is applied in estimating pump head breakdown. A number of proposals have been submitted for predicting probable erosion zones and obtaining quantitative erosion rate by estimating erosion intensity levels based on cavitation CFD results. Significant studies on a trial basis are underway but a decisive method has yet to be found, thus making further research necessary.

**Keywords:** Cavitation, CFD, Erosion, Bubble, Bubble Collapse, Impact Loadings, Micro Jet, Energy Cascade, Cavitation Model, Pit

### 1. はじめに

近年、キャビテーションのCFD (Computational Fluid Dynamics) が進展し、流体機械への設計段階での適用が可能となってきた。キャビテーションの発生によって流体機械には、振動、騒音、性能低下、壊食と、様々な問題が発生する。現在、キャビテーションCFDが産業界で主として用いられているのは性能低下の予測であり、ある程度、実用化が果たされている。今後の大きな課題としては、壊食予測が挙げられる。本稿では、壊食現象の考察、キャビテーションCFDの概説と、壊食予測法開発の動向を紹介することとする。

### 2. キャビテーション壊食、マイクロスケールからマクロスケールへ

キャビテーションの壊食は、キャビテーションの気泡が物体 (固体材料) 近傍で崩壊する際に発生する高い衝撃荷重が、固体材料に作用することによって生じると考え

られている。衝撃荷重のメカニズムとして、ほぼ球対称に気泡が崩壊した際、球面状に周囲に伝搬し物体に到達する圧力波と、非対称に気泡が崩壊した時に気泡内に生じるマイクロジェットが物体に衝突する現象、及びその複合作用が指摘されている。このような現象を単一気泡のレベルで着目し、固体材料内の応力波の伝搬も連成させて数値解析した事例を図1に示す<sup>1)</sup>。図1において $y=0$

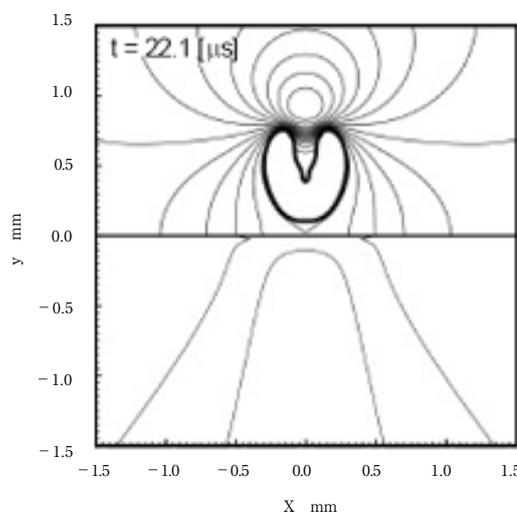


図1 キャビテーション気泡の崩壊と圧力波、圧力波の伝搬  
Fig. 1 The collapse of a cavitation bubble and the propagation of pressure wave and stress wave

\* 風水力機械カンパニー 開発統括部 技術開発室 流体解析グループ

本稿は、「ターボ機械」2010年11月号に掲載されたものである。エバラ時報への掲載にあたり、若干の修整を加えている。

の線が流体と固体材料の界面であり、上が流体側、下が固体側となる。流体中のハート型のものが崩壊途中の気泡であり下向きのマイクロジェットが形成途中である。流体側と固体側の等高線は、それぞれ静圧とフォンミーゼス相当応力である。このように壊食を発生させる素過程は、かなり詳細に解析できる状態となっている。

実際の流体機械や船舶における壊食過程では、単一の気泡により壊食が生じることは考えられず、気泡群の挙動を考慮しなければならない。ここで文献から、4種類の気泡崩壊過程の比較を表1に示すこととする<sup>2, 3)</sup>。

ここに示された、圧力振幅と持続時間のオーダは、おおよその目安、あるいは一例として認識すべきと、筆者は考えるが、いずれにせよ、単一気泡レベルの崩壊よりも、気泡群や、多くの気泡を含む渦キャビテーションといった、より大きなマクロスケールの現象のほうが、大きな衝撃荷重を生じ、壊食の危険度は高まるといえる。エネルギー移動の観点で見ると、マクロスケールのキャビテーション場がもつポテンシャルエネルギー（流体が内部エネルギーの形で保持するエネルギー）が、崩壊過程で気泡界面の運動エネルギーに変換され、エネルギー密度が高まっていく。このようなプロセスは、研究者によって、エネルギーカスケード（Energy cascade）やエネルギーの集中（Concentration）あるいは集束（Focusing）と呼ばれている<sup>2, 4, 5)</sup>。エネルギー密度の上昇を定量的に捕らえたのが、表1の圧力振幅値や持続時間といった量である。単一気泡においても、収縮する気泡界面に運動エネルギーが集束されることはRayleigh-Plesset方程式の解から理解されるが、気泡群においては、更に大規模なエネルギーの集束が発生することを表1は示している。

表1 異なるキャビテーション現象によって発生する衝撃荷重

Table 1 Review of impact loadings for different cavity phenomena

メカニズム Mechanism	荷重の種類 Type of loading	圧力の振幅値 MPa Amplitude	持続時間 $\mu$ s Duration
マイクロ気泡（単一）の崩壊 Micro bubble collapse	圧力波 Pressure wave	100	1
1 mmの（単一）気泡からのマイクロジェット Micro jet (from a 1 mm bubble)	衝突噴流 Impacting jet	150	0.03
マイクロ気泡の気泡群の崩壊 Collective micro bubble collapse	圧力波 Pressure wave	>>100	>>1
渦キャビテーション Cavitating vortices	衝突噴流 Impacting jet	>100	>10

集束された高密度エネルギーが、材料表面のマクロスケールの領域に作用することにより、ピットという形でマクロスケールの損傷が生じる。これが繰り返されていくと、目視可能なマクロスケールの壊食に至るといえるのが、壊食プロセスの全体であろう。したがって、壊食を定量的に予測するためには、マクロスケールの気泡群や渦キャビテーションのもつエネルギーがマクロスケールに集束され、その結果生じる衝撃荷重を精度良く推定する必要がある。その衝撃荷重に起因する材料側の塑性変形や疲労、亀裂の発生や脱落といった材料側の挙動の予測も不可欠である。もちろん、マクロスケール及びマクロスケールの流体側と材料側の連成も考慮しなければならない。しかしながら計算機の能力の限界から、前者の流体側のマクロスケールからマイクロスケールまでのエネルギー集束過程だけでなく、一気通貫に直接予測できる状況には至っていないのが現状である。

### 3. キャビテーションモデル

前章に示したように、実際の流体機械や船舶などの興味のある全領域を、通常mm以下である気泡を十分に解像する数値解析格子で解析するには、相当な計算機の性能向上を待たねばならない。一方で、マクロスケールのキャビテーション現象のみに着目し、ポンプの揚程低下のようなオーバーオール値の予測に目標を絞れば解析手法は全く異なってくる。いわゆるキャビテーションCFDと称される解析では、気泡の1個1個の挙動を解析せず、多数の微細な気泡を含む液体を連続体とみなすキャビテーションモデルを採用することによって大域的な流れの予測を可能としている。特にポンプの揚程低下に関しては定常解析でも十分実用的な予測が可能な場合が多い。キャビテーションモデルの分類は、種々に紹介されているが<sup>6~8)</sup>、筆者なりに分類すると表2のようになる。

著者は、局所で平均化した気泡流を解析する観点から、③、④、⑤を総称して気泡流モデルと仮称しているが、対象流体の物理的な取り扱いの相違から、③を均質流モデルあるいは擬似単相媒体モデル、④を気泡流モデルと呼ぶ場合もある<sup>4)</sup>。

現在、流体機械内部流れのキャビテーション解析に用いられるキャビテーションモデルは③、④の範疇に入るものがほとんどである。③の一例としてChenらによるキャビテーションモデルを式(1)に示す<sup>9)</sup>。

$$\frac{Dp}{Dt} = C (p - p_v) \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

表2 キャビテーションモデルの分類  
Table 2 The classification of cavitation model

界面追跡・捕獲モデル Surface tracking or capturing	気泡流モデル Bubble flow model
① 飽和蒸気圧一定の界面追跡・捕獲 (キャビティ内の流動は考慮せず) Surface tracking or capturing of water-vapor interface without phase change (Gas flow inside bubble are not considered)	③ 1流体モデル (1密度, 1流速) One fluid model
② 液体-蒸気の自由表面追跡・捕獲 Surface tracking or capturing of water-vapor interface considering phase change one density and one velocity	④ 連続相 (液体) と分散相 (気泡) の二相流モデル (気泡力学式と気泡数密度の保存則) Continuous water phase and dispersed gas phase model (Considering bubble dynamics and conservation of number density of bubble)
	⑤ 二流体モデル (2密度, 2流速, 構成方程式の利用) Two fluids model (Two densities, two velocities and constitutive equations)
⑥ セルラーオートマトン (格子ボルツマン法) Lattice Boltzmann method	

ここで、 $\rho$  は気泡を含む液体の平均密度、 $p$  は場の局所圧力、 $p_v$  は飽和蒸気圧、 $C$  は経験定数である。場の圧力が飽和蒸気圧以下になると気泡の発生により平均密度が低下し、飽和蒸気圧以上になれば気泡が崩壊し復水するために平均密度が上昇するという、直観的にわかりやすいモデルである。

④は、Rayleigh-Plesset 方程式等の、球形気泡の膨張収縮を記述する気泡力学方程式、気泡の数密度分布保存則、気泡群の並進運動の運動方程式をNS方程式と連成させるモデルである。

①、②はキャビテーションを一つあるいは数個程度の気体の固まりと捉え、その界面位置を追跡するモデルである。①は、複雑なキャビテーション流れ場に適用するのは難しいが、計算時間が短い利点は大きい。②は、数個程度の蒸気泡を対象に、界面の位置を追跡しつつ、相変化と気泡内の気体の流動をすべて解析する方法である。図1の事例は、この分類に入る。⑤は、気液の混相流を、液相の方程式と、気相の方程式をそれぞれ独立に立て、両者を関連付ける構成方程式とともに解析する手法である。蒸気配管系の一次元解析には広く用いられているが、キャビテーションに適用した事例は少ない。⑥のセルラーオートマトン (格子ボルツマン法) は、格子状に配列された粒子が衝突と並進運動を繰り返す過程を計算し、その統計平均量を評価することによって流体の流動を解析する手法である。二相流解析にも展開され、キャビテーション解析への適用例もあり、今後の進展が待たれる。キャビテーションモデルの、より詳細な解説は拙稿を参照されたい<sup>10, 11)</sup>。

図2は、あるインデューサポンプの揚程低下を2種類

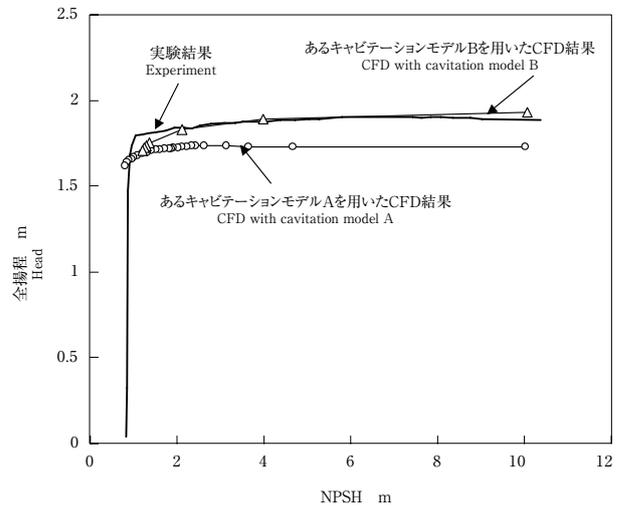


図2 インデューサポンプの揚程低下、実験結果とCFD結果の比較  
Fig. 2 Head breakdown of an inducer pump, experimental result and CFD results

のキャビテーション流れコードで1ピッチ定常解析した事例である。2種類のコードとも定性的には揚程低下特性を良く捉えているが、計算結果から吸込比速度を求めると実測値との差は大きい。ユーザが設計ツールとしてこれを使いこなすには、一モデル一運転点での検証にこだわりすぎず、ある程度実際とずれていることを承知の上で、色々なケースに試し、相対比較に耐えられるか確認するのが重要である。相対比較の精度に関しノウハウが積み重ねられれば、新設計のA羽根車とB羽根車の吸込性能はどちらが勝っているか事前に予測でき、試作件数を減らすこともできよう。

### 4. 壊食の予測手法

対象とする機械の大域的な流れと、壊食過程の、時間空間スケールに極端な差があることから、現状で可能な壊食予測としては、大域的な流れをキャビテーションモデルで解析し、その結果に対し、なんらかの壊食モデルを適用した「壊食強さ」を算出することによって壊食危険箇所や壊食量を推定する方法が現実的となる。以下に現在提唱されている壊食予測法を数例紹介する。

#### 4-1 気泡の崩壊圧力を予測する手法

表2の④のモデルを用いるか、あるいは表2の③のモデルによる大域のキャビテーション解析と球形気泡解析を連成させ、気泡の崩壊圧を解析する手法である。深谷らは、表2の④のモデルで、大域的な解析を行うとともに、モデルに内包された気泡力学の式から、局所的な気泡内圧上昇を算出することにより、式(2)に示す壊食強さを求め、遠心ポンプに適用している<sup>12)</sup>。

$$I = \sum_{P_{Bth}} \frac{p_{Bth}^2 n_G \Delta V \Delta t}{2 p_{L,C}} / \Delta T \quad \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

Cは液中音速、 $\Delta V$ は羽根近傍第一層のメッシュ体積、 $\Delta t$ は計算時間刻み、 $\Delta T$ は評価時間、 $p_B$ は気泡内圧力、 $n_G$ は気泡数密度、 $p_{Bth}$ はしきい値である。

落合らは、キャビテーションの気液二相流を擬似的に単相圧縮性媒体をみなすキャビテーションモデルにより羽根周りの大域的な流れを解析し、更に羽根上流からトレーサとなる気泡を流入させ、大域流れと気泡の挙動をワンウェイで連成させる方法を用いている(図3)<sup>13)</sup>。気泡崩壊時の高

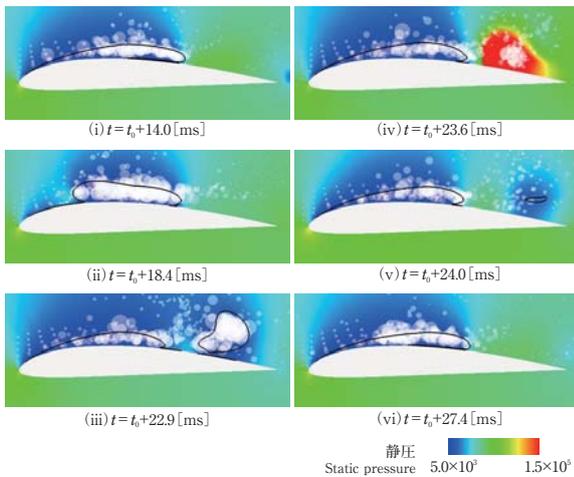


図3 圧力分布とボイド率10%の等値線及び気泡位置と気泡の大きさの時間経過

Fig. 3 Time evolution of pressure distribution and isoline of void fraction 0.1, and bubble positions and sizes

い内圧が翼表面に伝搬するとし、壁面衝撃圧 $P_w$ を予測し、そこから壊食強さ $\Sigma P_w^2$ を算出する。

#### 4-2 キャビテーションCFDの出力結果から壊食強さを算出する方法

キャビテーションCFDでは、格子スケールで圧力、流速、密度、ボイド率等の情報を算出できる。これらの値を用い、物体表面の格子スケールで壊食強さを求める方法である。筆者らは、物体表面における「多数の気泡」、「気泡近傍の圧力の高さ」、「気泡崩壊速度」、「気泡崩壊による圧力上昇」が壊食強さを規定するパラメータになると仮定し、それぞれ $a$ 、 $p-p_v$ 、 $-\partial a / \partial t$ 、 $\partial p / \partial t$ で表し関数化した壊食強さを提案した<sup>14)</sup>。ここで $a$ はボイド率である。4種類の壊食強さを二次元羽根に適用した例を図4に示す。図4の $T_c$ はクラウドキャビテーションの放出周期であり、この値で時間平均値を求めている。ここから壊食量を予測するためには、更に材料特性を加味した関数形に変える必要がある。Dularらは、壊食過程初期の潜伏期にピット群が形成される過程を「キャビテーションクラウドの崩壊」、「崩壊によって生じた衝撃圧が物体に伝搬」、「物体近傍の気泡が崩壊しマイクロジェット形成」、「マイクロジェットの衝突による物体上のピット形成」の4段階に分け、それぞれの過程にモデル式を構築した<sup>15, 16)</sup>。キャビテーションCFDの計算結果画像あるいは実験結果の画像をグレースケールで表示し、そのグレースケール値の標準偏差がクラウドキャビテーションの変動と相関するという仮定からピット面積を算出する<sup>7)</sup>。このほか、DularらはキャビテーションCFDから物体表面の圧力変化を求め、モデル式によりマイクロジェットの速度を算出し、

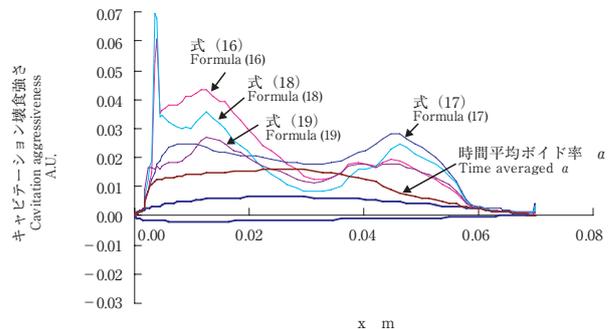


図4 解析された圧力とボイド率に基づくキャビテーション壊食強さ  
Fig. 4 Calculated cavitation aggressiveness based on computed pressure and void fraction

$$\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} a \cdot \max \left[ \frac{\partial p}{\partial t}, 0 \right] dt \quad (16) \quad \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} a \cdot \max [p - p_v, 0] dt \quad (17)$$

$$\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} p \cdot \max \left[ -\frac{\partial a}{\partial t}, 0 \right] dt \quad (18) \quad \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \max \left[ -\frac{\partial a}{\partial t}, 0 \right] dt \quad (19)$$

ピット面積を算出する過程も提案している<sup>16)</sup>。

### 4-3 実験計測に基づく方法

系統的な実験や、壊食事例データベースからポンプの壊食速度の実験式が作られている。EPRI (Electric Power Research Institute) で提唱された式 (3)<sup>17, 18)</sup>、我が国ではターボ機械協会が提案する式 (4) が知られている<sup>18)</sup>。

$$ER_p = C_L \left( \frac{L_{cav}}{L_{cavref}} \right)^x \frac{(p_0 - p_v)^3 F_{cor}}{R_m^2 F_{mat}} \left( \frac{a_{ref}}{a} \right)^{0.36} \dots\dots\dots \text{式 (3)}$$

$ER_p$ : 最大損傷点の予測損傷速度 (m/s),  $C_L$ : 定数,  
 $L_{cav}$ : 羽根前縁から測ったキャビテーション長さ (m),  
 $p_0$ : ポンプ入口静圧 (Pa),  $R_m$ : 材料の引っ張り強さ (Pa),  
 $a$ : 水の気体含有量 (ppm), 他詳細は文献参照

$$\frac{ER_p}{D_e \times 2\pi n} = 5.4 \times 10^{-12} \left( \frac{h_{sv}}{H_{sv}} \right)^{-0.774} \left( \frac{Q}{Q_d} \right)^{-2.56} K^{-0.0518} \left( \frac{R_m}{R_{mref}} \right)^{-1.13} \dots\dots\dots \text{式 (4)}$$

$D_e$ : 羽根車目玉径 (m),  $n$ : 羽根車回転速度 (1/s),  
 $h_{sv}$ : 有効NPSH (m),  $H_{sv}$ : 必要NPSH (m),  $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/min),  $Q_d$ : 設計点流量 (m<sup>3</sup>/min),  $K$ : ポンプ形式数, 他詳細は文献参照

EPRIの式は、キャビテーション長さの実測値を必要とするが、この長さをCFDから求め代入する方法も提案されている。Francは、加工硬化する延性材料に対し、単位時間の試験で物体表面に生じたピット群から、個数、深さと直径の分布を求め、そこから先はモデル式を用いて壊食の潜伏期長さと定常期の壊食速度を求める方法を提案している<sup>19)</sup>。材料表面のピット群を、壊食強さを計測するセンサとして使用していることになるが、ピットのデータが数百個分集められれば、精度の良い予測が可能としている。ピット群の情報を前述の4-1, 4-2の方法を援用して推定することができれば、この手法を実験無しに適用することも考えられる。

## 5. まとめ

キャビテーションは、 $\mu$  mからmmスケールの気泡に端を発し、mスケールの流体機械に性能低下、振動・騒音、壊食を生じさせる、典型的なマルチスケール現象である。近年発達してきたキャビテーションCFDは性能低下の予測には、かなり有効であることが検証されてきた。壊食の予測に関しては、何種類かの方法が提案され試験的に用いられている状況であるが、決定打となる方法は見出されてはいない。実現象においては、腐食現象が重畳し、

更に複雑な壊食・腐食面が形成される場合も多い。更なる数値解析上の工夫とモデルの精密化、実験によるデータの蓄積と予測の検証が不可欠と考える。

## 参考文献

- 1) 新保ほか4名, 気泡崩壊による固体内応力波伝搬挙動の連成数値解析, (2006), キャビテーションに関するシンポジウム (第13回), CD-ROM.
- 2) Van Terwisga, T.J.C. et al., "Cavitation Erosion A review of physical mechanisms and erosion risk models", (2009), CAV2009.
- 3) Franc, J.P., Michel, J.M. 2004; "Fundamentals of Cavitation", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 4) Fortes-Patella, R., Reboud, J.L. and Briancon-Marjollet, L. 2004; "A phenomenological and numerical model for scaling the flow aggressiveness in cavitation erosion", EROCAV Workshop, Val de Reuil.
- 5) Bark, G., Friesch, J., Kuiper, G., Ligtelijn, J.T. 2004 "Cavitation Erosion on Ship Propellers and Rudders", 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Luebeck-Travemuende, Germany.
- 6) 加藤, ターボ機械協会第21回講習会資料, (1995), pp.73-88.
- 7) 井小萩, 岡村, ターボ機械協会第31回講習会資料, (2004) pp.13-24, pp.37-41.
- 8) 加藤洋治編著, 新版キャビテーション, (1999), 横書店, pp.128-157.
- 9) Chen Y., Heister S.D., "Two-Phase Modelling of Cavitated Flows", Computers & Fluids, Vol.24 (1995), pp.799-809.
- 10) 能見, キャビテーションのCFD解析, 日本機械学会 水力機械に発生する非定常現象 講習会配布資料, (2009), pp.17-29
- 11) 能見, ポンプにおけるCFD, ターボ機械協会第90回セミナー ターボ機械におけるCFDの基礎と応用 配布資料, (2010), pp.23-34.
- 12) 深谷ほか2名, 気泡流モデルキャビテーション流れ解析による遠心ポンプ内のキャビテーション強さの回転速度依存性予測, (2009), キャビテーションに関するシンポジウム (第14回), CD-ROM.
- 13) 落合ほか3名, キャビテーションエロージョンの数値予測法の研究, (2009), キャビテーションに関するシンポジウム (第14回), CD-ROM.
- 14) Nohmi M. et al., "Numerical Prediction Method of Cavitation Erosion", (2008), FEDSM2008-55126.
- 15) Dular M. et al., "Experimental and Numerical Modeling of Cavitation Erosion", (2006), CAV2006.
- 16) Dular M., Coutier-Delgosha O., "Numerical Modeling of Cavitation Erosion", (2008), FEDSM2008-55034.
- 17) EPRI GS-6398 Project 1884-10 Final Report, "Guidelines for Prevention of Cavitation in Centrifugal Feedpumps, (1989).
- 18) ターボ機械協会指針, ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価 TSJ G001:2003, (2003).
- 19) Franc J., "Incubation Time and Cavitation Erosion Rate of Work-Hardening Materials", (2009), Trans. ASME J.F.E., February Vol.131, 021303.