

ポンプキャビテーション現象の基礎知識 [第3回]

能見基彦*

Basic Knowledge about Pump Cavitation Phenomenon [Part 3]

by Motohiko NOHMI

This paper explains erosion problems caused by pump cavitation. A single spherical bubble with low pressure shrinks rapidly if it flows into a high pressure area; when the bubble finally collapses, it generates a high pressure wave propagating to ambient solids. If the bubble is close to the ambient solid surface and deforms into a non-spherical shape, a micro jet directed toward the solid surface is generated and impinges against the surface. In a situation where a number of bubbles collapse repeatedly, multiple loads are applied onto the solid surface, resulting in erosion. In order to evaluate the erosion resistance characteristics of materials, two standards, ASTM G32 and ASTM G134, have been established as cavitation erosion tests on materials. Pump erosion can be reduced by using excellent erosion-resistant materials or by applying partial build up welding. Development of erosion prediction by numerical analysis is expected in the future.

Keywords: Cavitation, Cavitation erosion, Bubble collapse, Micro jet, ASTM G32, ASTM G134, Built up welding

4. ポンプにおけるキャビテーションの悪影響 その3 壊食現象

茶道において、沸騰中の茶釜から出る音を何種類かに分類するとのことで、なかでも、お茶を入れるのに最も良い状態のときの音を松風の音（しょうふうのね）というそうである。真に風雅で趣のある名前であるが、これは沸騰によって生じた気泡が、周囲のまだ沸点に達していない水の中でつぶれる際に出る音だそうである^{1), 2)}。

第1回解説で、キャビテーション現象が沸騰現象に近いことを述べた。また、第2回解説で、キャビテーション気泡から生じる音のことを述べた。今回のテーマである壊食とは、キャビテーション気泡がつぶれる際に、その近傍にある固体材料（金属を含む）が、徐々に欠損し、減肉していく現象である。

かつて、執筆者は、キャビテーションと沸騰が類似の現象ならば、なぜ沸騰が頻繁に発生する湯沸かし（冒頭で述べた茶釜も含む）や、鍋において壊食が生じないのかとの質問を受けたことがある。そのときは、返答に窮

した記憶があるが、今ならば、その違いは圧力差と流速差によるものであると説明するのがよいのではないかと考えるものである。このあたりから本論を始めるものとする。

4-1 気泡と圧力

(1) 水中における真空球の挙動

前回、単一気泡の挙動を示す式としてRayleigh-Plesset（レイリープレセット）方程式を紹介した。このように書くと、RayleighとPlessetとは同時代の人のように思えるが、実際は二人の活躍時期には数十年の違いがある。Rayleighとは、19世紀末から20世紀初頭にかけて活躍した英国の著名な科学者レイリー卿（Lord Rayleigh）その人である。一方、後者は1950年代から1970年代に活躍した、米国カリフォルニア工科大学の教授、Milton S. Plessetである。レイリー卿は数学的な解析からキャビテーション気泡の危険性を示唆した。その際に、気泡を液中の真空の単一球としてモデル化し、その挙動を解析した。本稿では、まずこのレイリー卿の解析にならない、水中にある真空の球の挙動を再検討してみる。

$$\frac{-P_{\infty}(t)}{\rho_l} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \dots\dots\dots (3.1)$$

* 風水力機械カンパニー 企画管理技術統括 技術開発統括部 流体技術室

$$u = \frac{R^2}{r^2} \frac{dR}{dt} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$-\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$u_B = u_{r=R} = \frac{dR}{dt} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここでは、液体は通常の水とし、なおかつ単純化のため、その粘性、圧縮性、表面張力は無視する。式 (3.1) は、気泡部の圧力を絶対圧ゼロ（すなわち真空）とし、粘性項と表面張力項を削除したレイリー-プレセット方程式である。

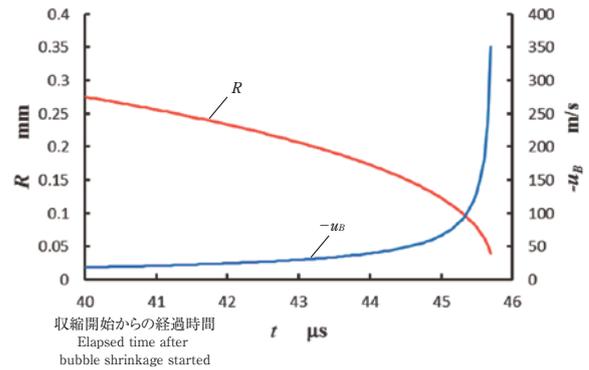
また真空にさらされても水は相変化しないと仮定する。式 (3.1), (3.2) は非圧縮性流体の球対称一次元流れ場における、それぞれ質量保存則と運動量保存則である。Rは気泡半径、uは半径方向外向きの流速、pは静圧、rは球中心からの距離、ρ_lは液体の密度である。P_∞(t)は、球から十分遠い位置での水の圧力であり、その値は時間的に変化せず大気圧相当の100 kPa一定とする。u_Bは気泡半径位置の流速、すなわち気泡壁面速度（気泡の膨張速度）である（負号の場合は収縮速度）。

気泡は膨張収縮するが、常に球形を保ち、その中心位置は移動しない。気泡周囲の流れも、常に気泡中心を原点とした球対称一次元を保つとする。

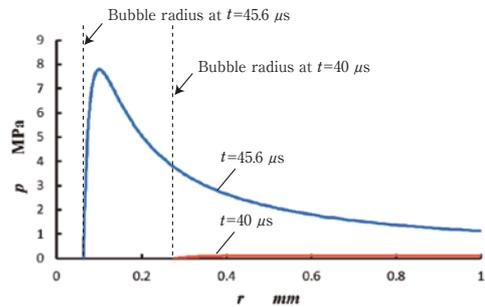
真空球の直径を1 mm、流れは静止した状態を初期値とし、そこからスタートする球の挙動を数値解析した結果を図1 (a), (b) に示す。この図から、真空球が徐々に縮み始め、45 μsを過ぎた頃から急激にその勢いを増すことが分かる。グラフに示した範囲で、球表面の内向き流速（すなわち球が縮む速度）は300 m/s以上に達している。また図1 (b) から、途中経過ではあるが、真空球の表面近くで、静圧が8 MPa（≒ 80気圧）近くに達している。たかだか直径0.1 mm程度の世界ではあるが、内側に向かって数100 m/sで突進する水の威力をご想像いただきたい。

計算はここでやめているが、このまま進めると最終的には、内向きの流れが球中心に達するとき（すなわち球が消滅するとき）に速度は無限大になり、中心部に無限大の圧力が無限小の時間発生して、その後、水は瞬時に静止するというのが非圧縮性流体の計算の解である。

もちろん、これはかなり仮想的な計算であり、現実とはかけ離れているとお考えの読者も多数であろう。まず水中に真空の球が存在するのが非現実的であり、実際のキャビテーション気泡は、気泡の内部には液体の蒸気や、



(a) 半径と気泡壁面速度
Bubble radius and flow velocity at the bubble surface



(b) 気泡周囲の圧力分布
Pressure distribution around the bubble

図1 単一球形気泡の崩壊過程の数値解析結果

Fig. 1 Results of numerical analysis for collapse process of a single spherical bubble

液体から遊離した他の気体で満たされている。気体の主成分が液体の蒸気の場合は、周囲との差圧によって内向きの流れ（すなわち気泡の縮み）が発生する際、気泡表面で気相から液相への凝縮も同時に発生する。このとき、凝縮速度が比較的速く、気泡内圧が飽和蒸気圧程度に保たれると考えれば、前述の真空球の仮定と、途中までは定量的にもあまり差がない形で現象が進行する。気泡表面の内向き流速が増大し、真空球周囲の水の音速のオーダーに近づいてくる（すなわち気泡壁のマッハ数が1に近づく）と、水の非圧縮性の仮定が成立しなくなり、それ以降の増速がにぶり、決して速度無限大にはならないが、最終的には気泡は消滅する（専門家の間では「気泡が崩壊する」と表現する場合が多い）。

一方、気泡内に液体の蒸気以外の気体が大量にある場合は、気泡収縮時に、この気体が縮み、圧力が上昇することによって気泡消滅まで到達しにくい状況となる。このような気泡の急収縮時に、過渡的に気泡内の気体が高温高圧化し、状況によっては中の気体が発光する場合がある。これをソノルミネッセンス (sonoluminescence) と呼ぶ³⁾。

余談であるが、気泡によって容易に高温高圧状態が発生

することを利用し、これを化学反応の促進に利用する技術分野が存在する。これはソノケミストリー (sonochemistry) と呼ばれる³⁾。

その極限的な例として、理想的に気泡を収縮させれば、その内部の高温高压状態によって、熱核融合が発生可能とする研究もある⁴⁾。これは bubble fusion あるいは sonofusion と呼ばれる。本当にそのようなことが発生するのか、実験物理学者と理論物理学者の中で、肯定派と否定派に分かれ、文字どおり熱い議論が交わされている。

(2) 気泡と周囲圧

話がいささか脱線したが、前述の気泡の挙動解析に話を戻す。前述の解析の仮定の中で、大気圧下の広い領域中にポツンと1箇所にて定在し続ける球形気泡というシチュエーションも非現実的である。

実際のキャビテーション気泡は、ポンプなどの低压部に発生した後、すぐには消滅せずに流れに沿って運ばれる。ここで、気泡内部の圧力は、中に満たされたガスの作用で、ある時定数 (時間遅れ) をもって変化する。一方、気泡周囲の流れは、容赦なく気泡を下流に運び、ポンプの場合では、やがて強い正の圧力勾配の領域に達する。ここに至って、前述の解析と類似した、低压の気泡球が高圧の場にさらされる状況が発生する。前回に記述したように、気泡はある固有振動数をもっているため、周囲圧の変化に対して、まずは膨張収縮を開始するが、周囲圧が高い場合、最終的には、図1 (a) のように半径の急激な変化を伴って崩壊に至る。崩壊時に発生する圧力は、前述したように、非圧縮性の仮定では無限小時間に無限大の値を取るが、実際は、水の圧縮性が存在するため、有限値の高圧が球中心に発生する。この球中心部の高圧は持続時間が短く、その圧力は、直ちに波となって周囲に伝播することになる。気泡崩壊時に、気泡中心部に、このようにパルス的な高圧が発生するメカニズムは、半径内向きの水流が球中心で衝突する際に生じる水撃圧 (前々回ご参照) であるとお考えいただくのもよいであろう。この球中心からの高圧の圧力波が、近傍の固体材料に到達すると、その位置に面積は微小であるが、高い応力が発生し、固体材料を変形させ、ひいては破壊する一要因となる。一方、球の中心部で発生した高圧によって半径外向きの流れが生じるが、特異点である球中心点は、外から流れが供給されないため急激に圧力が低下し、ついには新たなキャビテーションが発生する場合もある。これをリバウンドと呼ぶ。こうして、崩壊とリバウンドを繰り返し、最終的に元の水に戻る。なおキャビテーション気泡の発生過程で生じた、元の液体から遊離した

凝縮しない気体は、そのまま液相に溶け込むことなく気泡の形態で下流に流れる場合もある。

本稿の導入部に書いた、茶釜の中で沸騰中に発生した気泡の崩壊の話に戻ると、茶釜の気泡は、ほぼ一定圧 (おおよそ大気圧と一致) の状況に常におかれている。このため、消滅する際も、極めて高速な内向き流れが生じることもなく、水蒸気から液相の水への凝縮が主体の比較的ゆっくりとした変化で崩壊にいたる。したがって、崩壊時にパルス的な高圧も発生せず、幸いにも茶道の名器がキャビテーション壊食によって大穴があくということもないのであろう。

(3) マイクロジェット

さて、以上の議論は気泡が理想的に球対称に崩壊する例を示したが、実際は非対称に崩壊する場合が多い。その典型例がマイクロジェットの発生である。マイクロジェットは、気泡が固体壁近傍で崩壊する際に特に生じやすい。このマイクロジェットの発生プロセスを数値解析によって観察した結果を図2に示す。粘性を考慮した軸対称二次元のナビヤ・ストークス方程式を数値計算によって解析している。初期状態は、前述の真空球の解析条件となるべく合わせ、気泡の初期直径は1 mmであり、初期圧力は常温のキャビテーション気泡と同じオーダとして3 kPaとする。また気泡周囲の初期圧力も大気圧相当の100 kPaとしている。そして気泡の初期位置は、その中心が剛体壁から1 mm離れた状態としている。この計算においては、気泡内の気体は空気とし、相変化は考慮しない。また、気泡内の空気は等温変化すると仮定する。計算開始後、球は非対称に変形し、特に剛体壁とは反対側の気泡表面が剛体壁の方向に向かって大きく変形する。この変形を噴流とみなしてマイクロジェットと呼称する。その後、マイクロジェットは、剛体壁側の気泡表面と衝突し、これを貫通して剛体壁に向かって突進する。今回の数値解析例では、120 m/s程度のマイクロジェットが生じている。高速なマイクロジェットが固体壁に衝突する現象も壊食の一要因と考えられている。このマイクロジェットに関する解説は、(一社)日本機械学会の機械工学便覧に比較的詳しく記載されている⁵⁾。

(4) 気泡崩壊メカニズムと衝撃荷重

単一のキャビテーション気泡崩壊時の流体現象から壊食の要因を前項で説明したが、実際の流体機械におけるキャビテーションは単一気泡ではなく、固体材料は、多数の気泡群の崩壊現象にさらされることになる。気泡1個の崩壊によって生じる衝撃的な荷重の発生は、単発の現象であり、作用する面積も、崩壊時の気泡の大きさ

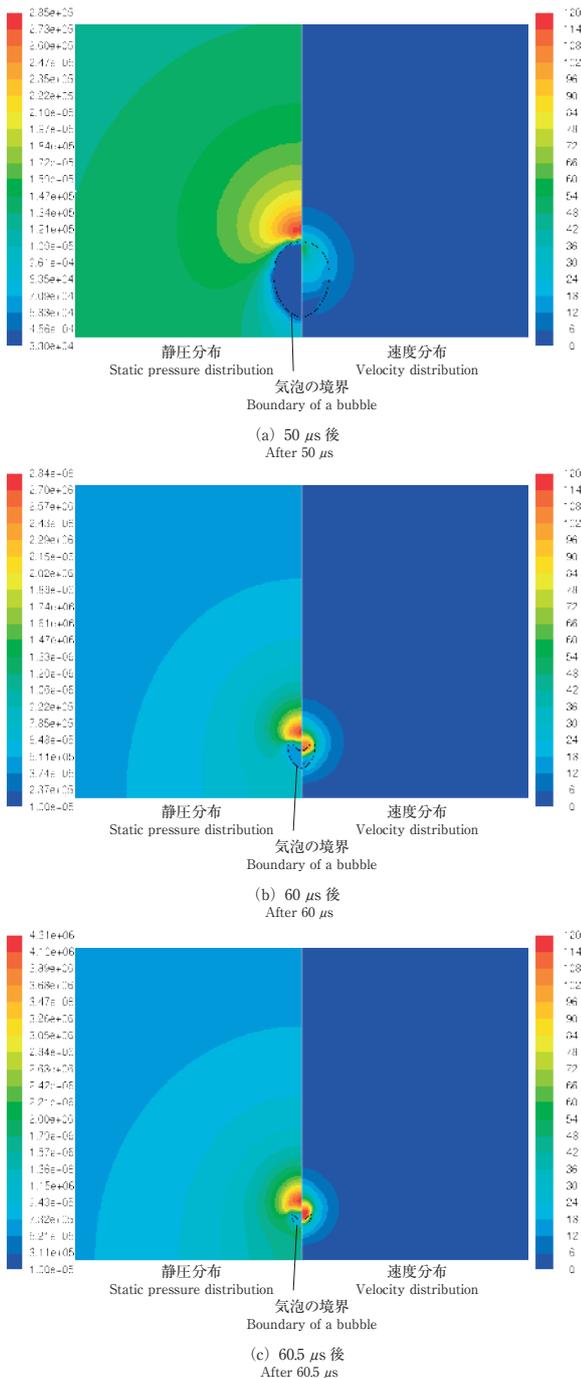


図2 気泡周りの静圧と速度分布

Fig. 2 Static pressure around the bubble and velocity distribution

によって決まり、長さのオーダーにしておよそ μm 程度のスケールである。しかしながら、多数個の気泡の崩壊が繰り返されることによって物体表面には多数回の荷重印加が生じ、これによって疲労や塑性変形、加工硬化などの現象が発生し、状況によっては腐食も加わり、ついには、 $\text{mm} \sim \text{cm}$ 以上のオーダーの領域において材料の欠損が始まる。これが壊食現象の総合的なメカニズムと考えられている。

表 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 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 μs 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	$\gg 100$	$\gg 1$
渦キャビテーション Cavitating vortices	衝突噴流 Impacting jet	> 100	> 10

気泡群の崩壊の危険性に関し、エバラ時報の既報から一部引用する⁶⁾。4種類の気泡崩壊過程の比較を表に示す。

ここに示す圧力振幅と持続時間のオーダーはおおよそその目安と認識すべきと執筆者は考えるが、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言える。

4-2 キャビテーションによる壊食試験

次に、実際の壊食状況を示すこととする。図3は、純アルミニウム試験片をキャビテーションにさらした際の試験片表面の写真である。金属の場合は、このように多孔状の壊食表面を示す例が多く、その表面性状を指して、しばしば梨地状という表現が用いられる。もちろん損傷の様相や、損傷量はケースバイケースであり、材料によっても異なる。各種の材料がどのような耐キャビテーション壊食性をもつかは、流体装置の設計者の重大な関心事である。キャビテーション壊食は、ポンプや水車、船舶のスクリュプロペラから、プラントに設置したバルブなど多様な状況で生じるが、一般化された材料特性として耐壊食性を評価するためには、キャビテーションの発生過程を制御して標準化した試験方法を用いないと



図3 純アルミニウムのキャビテーション壊食
Fig. 3 Cavitation erosion of pure aluminum

比較できない。このような観点から、材料のキャビテーション壊食試験法に関しては、ASTM G32、及びASTM G134という二つの規格が制定されている。前者は、磁歪式振動子と呼ばれる振動装置に試験片を直付けし、あるいは振動子に試験片を近接させ、試験片を水没させた状態で振動を印加し、試験片表面に生じたキャビテーションによる壊食量を計測するものである。後者は、試験片を設置した容器内を水で満たし、その状態で試験片に対向したノズルから噴流を発生させ、この水中水噴流によって生じたキャビテーションを試験片に衝突させる試験法である。図4に磁歪式壊食試験装置の模式図を示す⁷⁾。これらの試験法で各種の材料を比較することによって、各材料の耐キャビテーション壊食特性を定量化することができる。図5(a)は、磁歪式振動子を用いた試験方法で10時間、キャビテーションにさらしたSUS304の壊食状況を計測した事例である。この試験においても、試験片表面は多孔質状に壊食されることが分かる。図5(b)は、壊食面の表面粗さ計測である。このほか、最大壊食深さや平均壊食深さ、壊食質量、壊食面積等を計測し、定量化することができる。このように標準化された方法で、各種の材料の耐壊食性を数値化することによって、ポンプメーカーは、想定されるキャビテーションの発生状況に応じて、適切な材料を選定することができる。もちろん、常に耐壊食性にすぐれた材料を利用することは、経済性の観点から現実的でない場合もある。その際は、耐壊食性にすぐれた材料を肉盛溶接や溶射によって部分的に付加し、激しいキャビテーションにも耐える構造とする場合もある^{7), 8)}。また、壊食後のポンプ部品に対し、溶接補修や各種の樹脂材料を用い修理して延命化処置を施す場合もある。

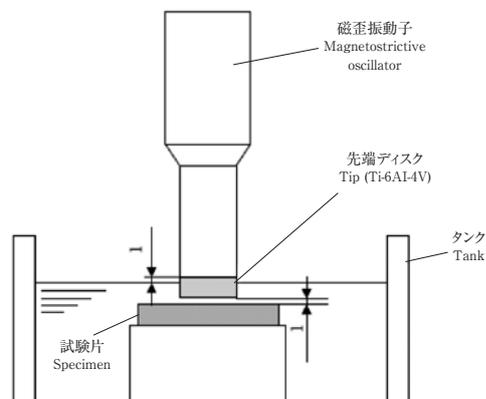


図4 磁歪式キャビテーション壊食試験装置の概略図

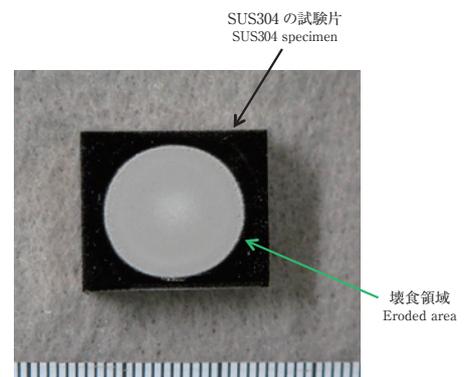
Fig. 4 Schematic drawing of magnetostriuctive cavitation erosion test apparatus

4-3 キャビテーションによる壊食現象と解析

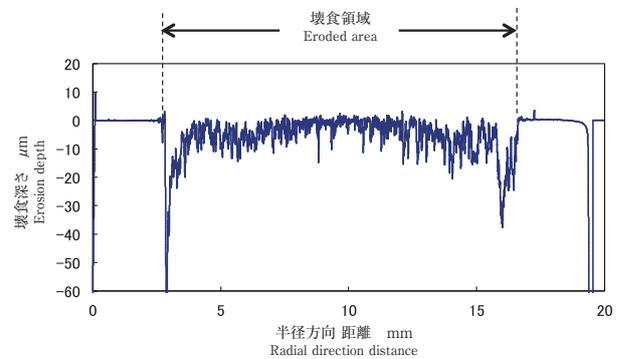
本稿では、キャビテーション壊食現象を、気泡の挙動の検討を出発点として概説してきた。もう一つの見方として、ポンプ等のマクロな機械の壊食現象から捉えることも極めて重要である。これに関しては、(一社)ターボ機械協会から発行されている指針「ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価」に、材料関係の多様な情報も加え、詳細な解説が記載されているので、これを参照いただくのが、読者のご参考になるものと考え⁹⁾。

また現在、キャビテーションに関する各種の研究テーマの中で、壊食現象を数値解析から予測しようとする試みがある。これに関しては、エバラ時報の既報にも解説記事が掲載されているが⁹⁾、最近では最先端の研究を集めた成書¹⁰⁾も出版されたばかりであるので、ご興味をお持ちの方は、こちらも参照されたい。

本稿の最後に、壊食に関する当社の研究トピックスとして、キャビテーション壊食面の近似技術の開発を紹介する。これは、既に壊食を受けた機械の健全性の評価を簡便に実施するため、損傷形状を近似的に再現する手法である¹¹⁾。金属の壊食でしばしば観察される梨地状の多



(a) 試験片写真
Photo of specimen



(b) 試験片の表面粗さ計測結果
Measurement result of surface roughness of the specimen

図5 SUS304のキャビテーション壊食面
Fig. 5 Cavitation erosion surface of SUS304

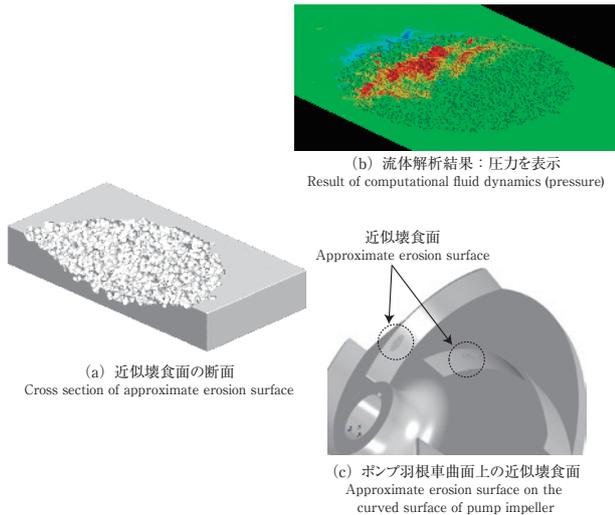


図6 壊食面近似技術の開発

Fig. 6 Development of technology for approximate erosion surface

孔質表面を表現するため、ここでは、平坦な表面を有するソリッドモデルに対し、ランダムに発生させた多数の球面群でくり抜く操作を行う (図6 (a))。こうして生成された近似壊食面は、流体解析や構造解析に利用することができる (図6 (b))。複雑な形状によって、近似された壊食領域の内部には渦が発生し、圧力分布が生じていることが分かる。また図6 (a) の近似壊食面をポンプ羽根車の三次元モデル上の曲面に写像したものが図6 (c) である。もちろん、この技術は、実際の壊食現象との整合性を十分取った上で利用することが重要であり、その点を今後の課題としている。

5. 講座の終わりに

3回にわたり、ポンプにおけるキャビテーションの諸問題の概説を行ってきた。第1回では、キャビテーションの発生原理と、キャビテーションに起因するポンプの揚程低下を説明した。第2回では、キャビテーションによって発生する、騒音と振動を紹介した。本号では、キャビテーションの気泡の崩壊現象と材料の壊食現象を説明した。読者の皆様に、多少でも、ご参考になるところがあれば幸甚である。

参考文献

- 1) http://www.shizecon.net/sakuhin/48jhs_1.html
- 2) http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/ubung/yyosuke/lclec_text/chemliq04_c04.htm
- 3) 上山, 宮本, マイクロバブルの世界, 工業調査会, (2006), pp190-195.
- 4) 笠木, キャビテーション誘起核融合, キャビテーションに関するシンポジウム (第17回), (2014).
- 5) 日本機械学会編 機械工学便覧 基礎編 a 4, 丸善 (2006), pp136-144.
- 6) 能見, キャビテーションCFDと壊食の予測, エバラ時報 No.231 (2011), pp3-7.
- 7) 杉山, 川村, 長坂, 三橋, 屋代, 近藤, 耐食・耐摩耗性を備えた肉盛材料の開発, エバラ時報 No.207 (2005), pp50-57.
- 8) 杉山, 川村, 長坂, 小川, 成田, 浅野, 中国万家寨引黄プロジェクト向けポンプ羽根車の耐エロージョン対策, エバラ時報 No.211 (2006), pp3-10.
- 9) 一般社団法人ターボ機械協会指針 TSJ G001 2011, ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価, (2011).
- 10) Editors: Kim, K.-H., Chahine, G., Franc, J.-P., Karimi, A., Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction, Springer, (2011).
- 11) Nohmi M. An Approximation Method for the Cavitation Eroded Surface, Proc. FEDSM2013, (2013), FEDSM2013-16506.