

特集 キャビテーション損傷予測式の構築*

Calculation of Experimental Equation to Predict Cavitation Erosion Level

犬飼 恭司

Kyoji INUKAI

A large number of studies on cavitation erosion have so far been made, however there have been few studies predicting cavitation erosion level on the material because cavitation erosion is a very complicated phenomenon. In the present study, cavitation erosion levels were measured by examining different steels under water, ethanol and diesel fuel with an ultrasonic vibrator. The depth of cavitation erosion on the material surface can be represented quantitatively with a cavitation number, energy for collapsing a bubble and material hardness.

Key words : Cavitation erosion, Fuel pump, High pressure

1. はじめに

近年環境問題の観点から，自動車の排出ガス規制が実施されており，その対策として，燃料噴射圧の高圧化による燃焼粒子の微細化が行われてきている．

噴射圧の高圧化により，燃料中の圧力変動が増大するため，キャビテーション（液体中で気泡が発生する現象）が新たに発生あるいはこれまで以上に増大し，その結果，キャビテーションによる材料の損傷（以下キャビテーション損傷と称す）の増大が懸念される．そこで，キャビテーション損傷レベルを定量的に予測する技術が求められている．これまで，キャビテーション損傷の支配因子についてはいくつか検討されている¹⁾²⁾が，定量的関係及び複数の因子を総合的に研究した報告は少ない．

本論文では，負荷，環境，材料の影響について検討し，キャビテーション損傷レベルを，キャビテーション係数，気泡崩壊エネルギー，材料硬度により定量的に予測する式を導出した．

2. 過去の研究内容と本研究の考え方及び手法

世の中では，キャビテーションに関する理論式として，液体物性や流速等をパラメータとして含むキャビテーション係数（式（1））及び気泡崩壊エネルギー U （式（2））が挙げられており，キャビテーション係数が小さいほど，また気泡崩壊エネルギー U が大きいほど材料の損傷が激しいとされている¹⁾．

$$k_1 = (P_e - P_v) / (V^2 / 2) \quad (1)$$

$$U = 4 \pi r^2 \sigma = 16 \pi^2 r^3 / (P_e - P_v)^2 \quad (2)$$

(P_e : 静圧, P_v : 蒸気圧, ρ : 密度, V : 流速, r : 崩壊前の気泡半径, σ : 表面張力)

また，損傷レベルを支配する材料の物性として，ピッカース硬度 (H_v , 以下 H とする) が分かっており，

そのほぼ逆数 ($1/H$) と相関があるとされている²⁾．

$$1/H \text{ (キャビテーション損傷レベル)} \quad (3)$$

以上のように，過去の研究例では，損傷レベルに及ぼす U, H 各パラメータ単体の定性的な影響のみが明らかとなっている．

今回，従来の研究内容の枠を越え，各パラメータを総合的に取込み，損傷レベルを一義的な式（式（4））で表すことを目的とした．

$$\text{損傷レベル} = k(\alpha, U, H) \quad (4)$$

次に，損傷予測式の導出ステップを Fig.1 に示す．最初に，試験装置 (Fig.2) の振幅により負荷因子で

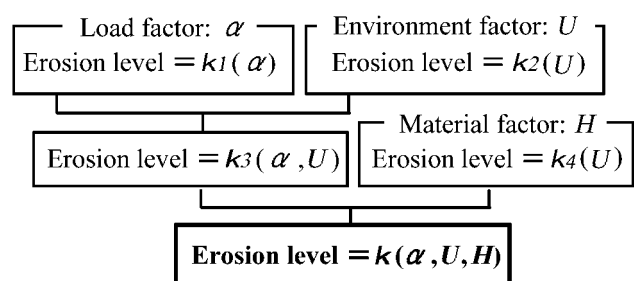


Fig.1 Step of calculating the equation

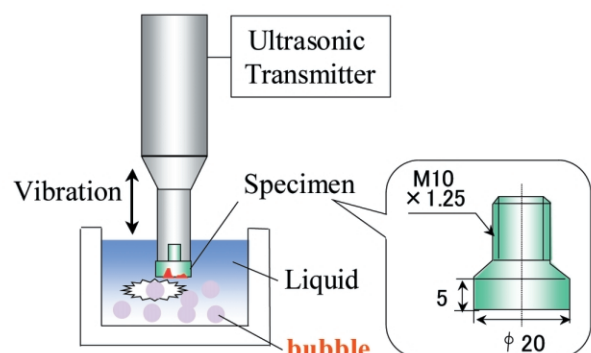


Fig.2 Equipment and specimen

* 2002年7月25日 原稿受理

ある流速 V を変動させ、損傷レベルと V の関係を定量化する。次に、液体により環境因子である液物性の表面張力 σ 、蒸気圧 P_v を変化させ、損傷レベルと U の関係を定量化する。そして上記二つの関係式から、損傷レベルを V と U の含んだ式で表す。さらに、材質と熱処理により材料因子である材料硬さ H を変化させ、損傷レベルと H の関係を定量化した上で、これらをすべて組み合わせ、損傷レベルを V, U, H のパラメータにより表す予測式を構築する。

3. 試験方法と供試材

今回、振動式試験装置を用いた (Fig.2)。この装置は超音波による縦振動で圧力変動を起こし、キャビテーションを発生させるものである。振動条件は周波数 19kHz、振幅 $8 \sim 48 \mu\text{m}$ で、振幅により負荷を変動させる。試験片はねじ型の形状をしており、ねじと反対側が試験面となる。供試材をTable 1に示す。硬さの影響を調べる目的で、ステンレス鋼や工具鋼等材質を変え、焼入れ焼戻し(以下QTと称す)や軟窒化(以下TFと称す)の熱処理を材料に施した。表面状態については、研削後、ラップ処理で $Rz0.4 \mu\text{m}$ 以内に仕上げた。また環境の影響を調べるために、試験液として水(イオン交換水)、エタノール、軽油(JIS 2号)を使用し、試験温度 30°C とした。損傷レベルについては、表面粗さ計で測定し得られた最大損傷深さをを用いた。

4. 試験結果と考察

4.1 評価条件の選定

水中でSKD11QTについて、振幅 $20 \mu\text{m}$ の条件で4時間まで試験を行い、TP表面の最大損傷深さの経時

Table 1 Tested materials

Material	Indication	Chemical composition (%)									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V
Austenitic stainless steel	SUS303	-0.15	-1.00	-2.00	-0.20	0.15-	8.00-10.00	17.00-19.00	-0.60	—	—
Chromium Molybdenum steel	SCM435,QT	0.33-0.15	0.15-0.35	0.60-0.85	-0.20	-0.03	—	0.90-1.20	0.15-0.30	—	—
Tool steel for hot working	SKD11,QT	1.40-1.60	-0.40	-0.60	-0.20	-0.03	—	11.00-13.00	0.80-1.20	—	0.20-0.50
High speed tool steel (W)	SKH2,QT	0.73-0.83	-0.40	-0.40	-0.20	-0.03	—	3.80-4.50	—	17.00-19.00	0.80-1.20
High speed tool steel (Mo)	SKH51,QT	0.80-0.90	-0.40	-0.40	-0.20	-0.03	—	3.80-4.50	4.50-5.50	5.50-6.70	1.60-2.20
Tool steel for hot working	SKD11,QT,TF	1.40-1.60	-0.40	-0.60	-0.20	-0.03	—	11.00-13.00	0.80-1.20	—	0.20-0.50
High speed tool steel (Mo)	SKH51,QT,TF	0.80-0.90	-0.40	-0.40	-0.20	-0.03	—	3.80-4.50	4.50-5.50	5.50-6.70	1.60-2.20

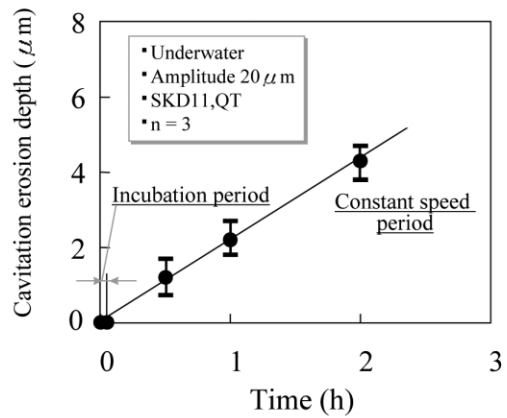


Fig.3 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with time under water

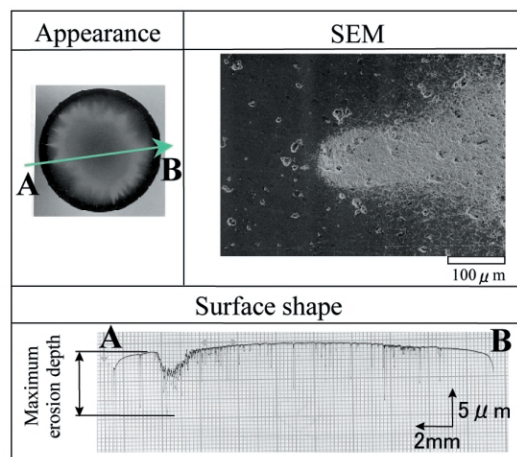


Fig.4 The appearance, SEM image and surface shape of SKD11, QT tested with $20 \mu\text{m}$ under water for 4 hours

変化を測定した結果をFig.3に示す。一般に、キャビテーション損傷は、初期に損傷が開始するまでの疲労が蓄積される潜伏期間と、その後損傷が始まり、損傷速度がほぼ一定の恒速期間が存在するといわれており³⁾、本評価においても上記事項を確認した。また、TP表面の外観、SEM、形状測定結果をFig.4に示す。外観上のA付近を拡大したSEM写真、AからBに向かい測定した形状測定結果から、A付近でキャビテーションにより粒子が脱落し、部分的に激しく壊された様子が

観察された。なお腐食面は見られず、キャビテーションにより機械的に損傷を受けていた。評価条件としては、恒速期間に至っており、損傷量の測定が容易な4時間後、すなわち 2.7×10^8 回の圧力変動後の損傷深さを選定した。

4.2 各要因の影響調査

4.2.1 負荷の影響調査

水中でSKD11QTについて、振幅を変動させ、4時間後の損傷深さ d を測定した結果をFig.5に示す。また、速度と液物性等からキャビテーション係数を計算し、損傷深さ d とキャビテーション係数の関係をプロットした結果をFig.6に示す。振幅の増加に伴い流速が増加し、キャビテーション係数が低下するため気泡が発生しやすくなり、その結果損傷深さ d が増加したと考えられる。

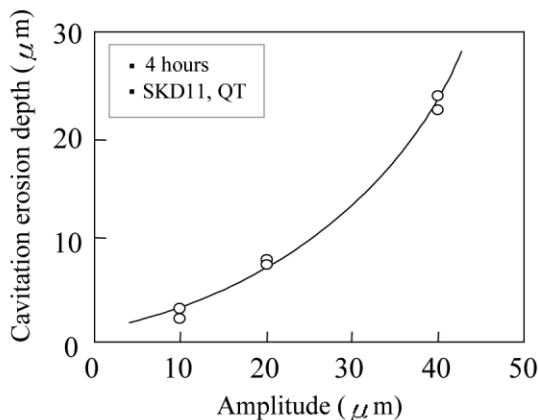


Fig.5 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with amplitude under water

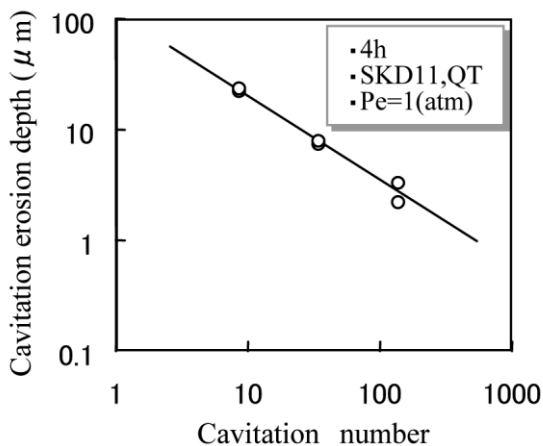


Fig.6 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with cavitation number under water

4.2.2 環境の影響調査

水、エタノール、軽油中でSKD11QTについて、振幅を変動させ、4時間後の損傷深さ d を測定した結果をFig.7に示す。すべての液体中で振幅の増加に伴い損傷深さ d が増加する傾向が確認されるとともに、水中の損傷が、エタノールや軽油と比べて非常に激しいことが確認された (Fig.8)。

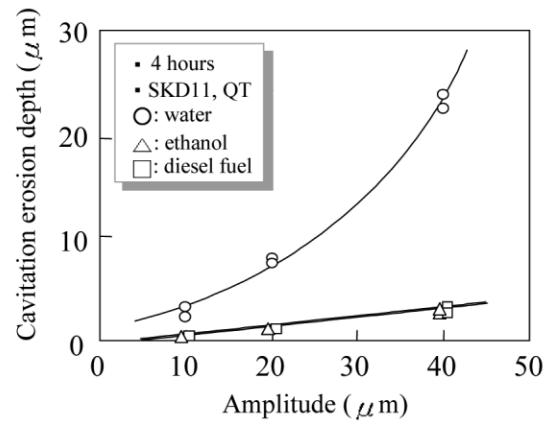


Fig.7 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with amplitude

	Appearance	SEM	Shape
Water			
Ethanol			
Diesel fuel			

Fig.8 The appearance, SEM image and surface shape of SKD11, QT tested with 20 μ m for 4 hours

損傷深さ d とキャピテーション係数 α との関係を図.9に示す。すべての液体で、振幅の増加に伴いキャピテーション係数 α が低下するため、気泡が発生しやすくなり、損傷深さ d が増加する。また、損傷深さ d とキャピテーション係数 α との関係式を式(5)~(7)に示すが、すべての液体で、損傷深さ d がキャピテーション係数 α の約 -0.8乗に比例することが明らかとなった。

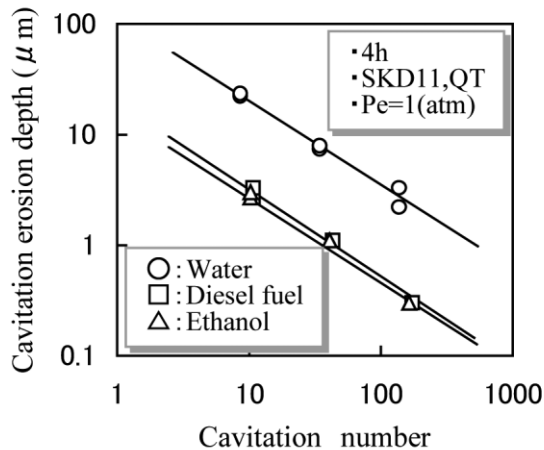


Fig.9 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with cavitation number under water, diesel fuel and ethanol

$$d_{水} = 118 \cdot \alpha^{-0.7} \quad (5)$$

$$d_{軽油} = 20 \cdot \alpha^{-0.81} \quad (6)$$

$$d_{エタノール} = 22 \cdot \alpha^{-0.83} \quad (7)$$

次に、各液体物性から気泡崩壊エネルギー U を計算し、損傷深さ d と気泡崩壊エネルギー U との関係プロットした結果を図.10に示す。水中での気泡崩壊エネルギー U が、エタノールや軽油と比べ非常に大きいため、水中での損傷深さ d が大きくなるのが分かる。また、損傷深さ d と気泡崩壊エネルギー U との関係式を式(8)~(10)に示すが、すべての α において、損傷深さ d が気泡崩壊エネルギー U の約0.5乗に比例する結果となった。

$$d(\alpha=8.54) = 15.9 \times 10^6 \cdot U^{0.50} \quad (8)$$

$$d(\alpha=34.2) = 7.4 \times 10^6 \cdot U^{0.51} \quad (9)$$

$$d(\alpha=137) = 5.2 \times 10^6 \cdot U^{0.54} \quad (10)$$

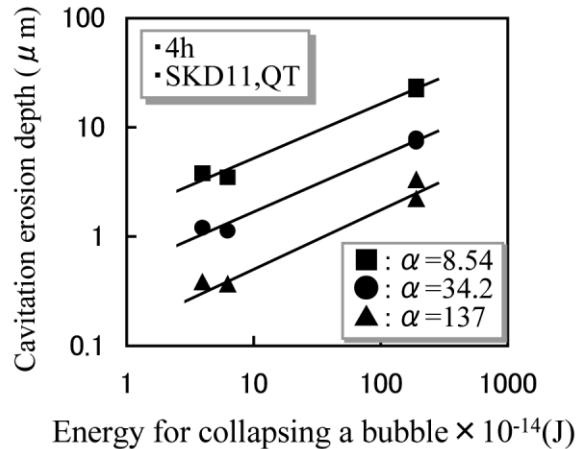


Fig.10 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with energy for collapsing a bubble under water, diesel fuel and ethanol

4.2.3 損傷深さとキャピテーション係数・気泡崩壊エネルギーの関係

Fig.9から損傷深さ d は式(11)と表され、グラフ上で、キャピテーション係数 α がどの値をとっても、液体間の損傷深さの差が一定値を示し、この差が気泡崩壊エネルギー U によるものと考えられる。同様に、Fig.10から損傷深さ d は式(12)と表され、グラフ上での損傷深さの差が、キャピテーション係数 α によるものと考えられる。損傷深さ d は、キャピテーション係数 α と気泡崩壊エネルギー U により決まり、グラフ上での損傷深さの差が一定であることから、損傷深さ d は式(13)で表される。したがって、損傷深さ d は、キャピテーション係数 α と気泡崩壊エネルギー U のべき乗で表すことができる(式(14))。

$$\text{Log}d = P_1 \text{Log} \alpha + \text{Log}Q_1 \quad (11)$$

$$\text{Log}d = P_2 \text{Log}U + \text{Log}Q_2 \quad (12)$$

(P_1, Q_1, P_2, Q_2 : 定数)

$$\text{Log}d = (P_1 \text{Log} \alpha + \text{Log}Q_1) + (P_2 \text{Log}U + \text{Log}Q_2) \\ = \text{Log} \alpha^{P_1} U^{P_2} Q_1 Q_2 \quad (13)$$

$$d = Q_1 Q_2 \alpha^{P_1} U^{P_2} = k \alpha^{P_1} U^{P_2} \quad (14)$$

(k : 定数)

水、エタノール、軽油中でSKD11QTについて、振幅を変動させ、4時間後の損傷深さを測定した結果を式(14)とおき、重回帰分析を行った。その結果、損傷深さ d とキャピテーション係数 α 、気泡崩壊エネルギー U との関係式は、式(15)で表される。

$$d = 1.4 \times 10^8 \cdot \alpha^{-0.80} \cdot U^{0.51} \quad (15)$$

(自由度二重調整済奇与率:0.98)

4.2.4 材料硬さの影響調査

水中、振幅20μmの条件下で、各材料の評価を行い、損傷深さを材料硬度で整理した結果をFig.11に示す。硬い材料ほど損傷深さが小さく、式(16)で表されるように、ピッカース硬度のほぼ逆数に比例することが分かる。損傷面の外観、SEM、形状結果をみてもその傾向が明らかである (Fig.12)。

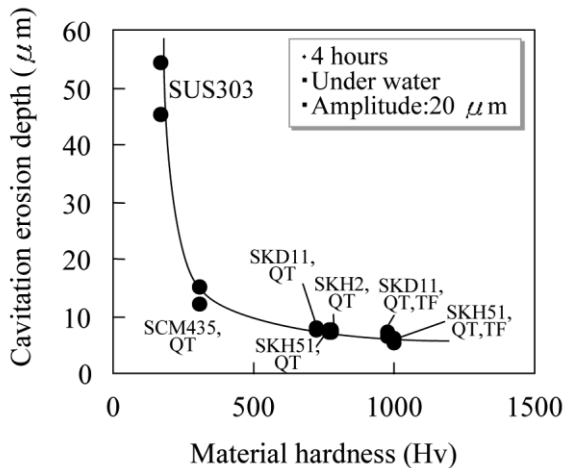


Fig.11 Variation of the cavitation erosion maximum depth damaged on specimen with material handness

	Appearance	SEM	Shape
SUS 303			
SKD11 QT			

Fig.12 The appearance, SEM image and surface shape of SUS303 and SKD11, QT tested with 20μm for 4 hours

$$d = 10121 \cdot H^{-1.1} \quad (16)$$

4.3 損傷予測式の導出

SKD11QTにおける、損傷深さ d とキャピテーション係数、気泡崩壊エネルギー U との関係式が式(15)、また式(16)から、損傷深さ d は材料硬度 H の - 1.1 乗に比例する。したがって、式(17)と考えることができる。

$$1.4 \times 10^8 = k_2 \cdot H^{-1.1} \quad (17)$$

$k_2 = 1.8 \times 10^{11}$ したがって、損傷予測式は式(18)で表すことができる。

$$d = 1.8 \times 10^{11} \cdot U^{-0.80} \cdot H^{-1.1} \quad (18)$$

(d : 圧力変動 2.7×10^8 回後の損傷深さ ($\mu\text{m}/2.7 \times 10^8$ 回), k_1 : キャピテーション係数, U : 気泡崩壊 エネルギー (J), H : 材料硬度 (Hv))

5. まとめ

本論文では、キャピテーション損傷レベルを予測する第一歩として、キャピテーション係数、気泡崩壊エネルギー、材料硬度による基礎式を導出した。本予測式により、実際の製品においても、使用環境や負荷を入力することにより(流速すなわち負荷の把握が困難であるが)、材料の損傷レベルの概略値の予測が可能となった。今後、本予測式のさらなる精度向上に取り組みたい。

<参考文献>

- 1) 遠藤吉郎, 他: 日本機械学会論文集(第3部), 32 (1966), p.831.
- 2) 小野修二, 他: までりあ, 35 (1996), p.790.
- 3) 松村昌信: 防食技術, 26 (1977), p.527.

<著者>



犬飼 恭司
(いぬかい きょうじ)
材料技術部
金属材料の研究及び海外現地調達化業務に従事