

キャビテーション壊食データベースの構築と炭素鋼データの解析*

服部 修次^{*1}, 石倉 亮平^{*2}Construction of Database on Cavitation Erosion
and Analyses of Carbon Steel DataShuji HATTORI^{*3} and Ryohei ISHIKURA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Fukui University,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

Cavitation erosion data has been accumulated in our laboratory since 1970 for about 30 years. The database was constructed in the electrical data of the Excel file. The data file is able to offer the quick search in terms of test material, test method and test condition among 859 data. The carbon steel data were analyzed, excluding stainless steels that exhibit the high work hardening. The average of erosion rate under the standardized condition (ASTM G 32, stationary specimen method, standoff distance 1 mm) was determined for different carbon steels. Since the coefficient of variation was obtained in the range from 0.1 to 0.3, the standard deviation can be easily estimated for these steels. The erosion resistance was defined as a reciprocal of erosion rate, and it was normalized with the erosion resistance of SUS 304 steel. The normalized erosion resistance is equal to $2.1 \text{ E-}06 \times \text{HV}^{2.4}$ (HV; Vickers hardness), and the correlation coefficient is 0.92. It was concluded that the erosion resistance could be estimated precisely by the material hardness for carbon steels.

Key Words: Hardness, Cavitation Erosion, Iron and Steel, Erosion, Cavitation

1. 緒 言

キャビテーション壊食の統計的な評価に関する研究としては、これまで二、三の研究がある。Heymann⁽¹⁾は、炭素鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、コバルト合金、銅合金、ニッケル合金、アルミニウム合金など9種類合計119個の材料について、キャビテーション壊食を含む液滴衝突に対する抵抗(壊食速度の逆数)を、材料の機械的性質のうち、硬さ、ひずみエネルギー、Ultimate Resilienceで整理し、その中でも硬さで整理すると比較的まとまりがよく、壊食抵抗はステライト(コバルト合金)を除いて硬さの約2.5乗に比例することを報告している。しかし、最もよく整理できる硬さでさえも同一硬さに対するキャビテーション壊食抵抗のばらつきは約30倍に達しており、壊食抵抗を硬さだけで評価するのは非常に困難である。また、解析に用いたデータはキャビテーション壊食だけでなく液滴衝突に関する結果も含んでいるという問題点がある。

Rao⁽²⁾らは、八つの研究所から各種材料の回転円板

法のデータを集め、体積減少量曲線から求めた壊食の潜伏期間 t_c と各種の機械的性質との関係について検討した。また、Rao のみが厚さ 3 mm の試験片に穴が開くまでの時間 t_p を測定し、その実験結果から t_c と t_p の間に $t_p = 160 t_c^{0.44}$ の関係を示すことを報告している。しかし、Rat らの実験と解析結果は、ASTM (American Society for Testing and Materials) 規格で規定されていない回転円板法の結果であり、汎用性に乏しい欠点がある。

本研究では、本研究室で1970年から現代までキャビテーション壊食試験を行って得られている859個のキャビテーション壊食試験データについて、材料名、化学成分、熱処理、機械的性質、試験方法、試験条件等の項目に分類して、データベースを構築した。また本報では、加工硬化の著しいステンレス系を除いた通常の炭素鋼について、キャビテーション壊食抵抗を硬さなどの機械的性質で整理し、平均値、標準偏差や壊食確率などの統計的パラメータを得た。

2. データベースの構築

これまで本研究室では、1970年以降現在まで約30年間キャビテーション壊食に関する多数の研究を行い、非常に多くの壊食試験データを蓄積している。こ

* 原稿受付 2003年4月10日。

*1 正員、福井大学工学部(〒910-0017 福井市文京3-9-1)。

*2 福井大学大学院学生。

E-mail: hattori@mech.fukui-u.ac.jp

Table 1 Number of test data

Material			Test method			Frequency kHz			Amplitude μm				Test liquid			Standoff distance mm		
	Type	Total	Vibratory	Stationary	others	14.7	19.5	others	<30	40	50	>60	Ion	NaCl	others	0.5	1	others
Iron&Steel	15	368	274	85	9	229	25	114	90	135	100	43	207	92	69	20	58	7
Cast iron	7	45	23	22	0	41	4	0	3	17	22	3	30	15	0	0	19	3
Stainless Steel	12	116	44	72	0	60	47	9	13	18	74	11	95	19	2	0	68	4
// Castings	10	26	0	26	0	10	16	0	0	2	22	2	26	0	0	0	26	0
Al alloy	8	82	0	76	6	34	42	6	9	9	50	14	46	13	23	0	74	2
Cu alloy	3	66	10	40	16	12	25	29	16	9	24	17	37	7	22	4	35	1
Ti alloy	5	17	1	16	0	13	0	4	1	0	16	0	17	0	0	0	16	0
Ni alloy	2	4	2	2	0	1	3	0	0	0	4	0	4	0	0	0	2	0
Co alloy	5	5	0	5	0	1	4	0	0	0	5	0	5	0	0	0	5	0
Plastics	4	8	0	8	0	0	8	0	0	0	8	0	8	0	0	0	8	0
Ceramics	4	12	0	12	0	12	0	0	0	0	12	0	12	0	0	0	12	0
Other	43	110	2	108	0	33	55	22	7	3	98	2	104	1	0	0	108	0
Total	118	859	356	472	31	446	229	184	139	193	435	92	591	147	116	24	431	17

の壊食試験データは磁わい振動装置を用いた振動試験片法および静置試験片法、ベンチュリ管法、回転円板法、キャビジェット法などさまざまな装置で得られている。また試験液は主にイオン交換水で、食塩水などの腐食液も用いられている。そこで本研究室で得られているこれらのキャビテーション壊食試験データを次に示す試験基礎データと壊食データに分類した1枚のデータシートに記入した。

[1] 試験基礎データ

- ・実験者および実験年月日
- ・データ記入者および記入年月日
- ・試験データの材料規格名および試験材料の化学成分、熱処理、機械的性質
- ・試験条件(装置および方法、共振周波数、振幅、試験片の大きさ、試験液、液温)

[2] 壊食データ

- ・試験時間
- ・質量減少量および質量減少速度
- ・体積減少量および体積減少速度
- ・MDER (Mean Depth of Erosion Rate)

このデータシートを基に、試験基礎データ[1]をすべて一つのExcelファイルに入力し、壊食データと関連付けるために壊食データ[2]のフォルダ名(=実験年度)とファイル番号も追加した。また試験基礎データ[1]のすべての項目にオートフィルタを施し、調査対象項目について(試験材料、材料の系統、試験条件など)検索ができるようにした。さらに試験材料すべてにハイパーリンクを施すことで、材料名をクリックすると、それに対応した壊食データ[2]の個別Excelファイルを開くことができる。

表1は今回のデータベースの構築を行った試験材料と試験条件のデータ個数を取りまとめたものである。本研究室の過去32年間に壊食試験を行った試験材料

は鉄鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、鋳鋼、アルミニウム合金、銅合金、チタン合金、ニッケル合金、コバルト合金、プラスチック、セラミックス、その他の材料の118種類で、各種の試験条件下のデータを含めると合計859データを集積した。

キャビテーション壊食試験には磁わい振動法、ベンチュリ管法、回転円板法などさまざまな装置で壊食試験が行われているが、本研究室における研究のほとんどが磁わい振動装置を用い、試験液、液温、共振周波数、全振幅などを変化させて試験を行っている。試験方法についてまとめてみると、磁わい振動装置を用いた振動試験片法でのデータは全体の4割、同装置による静置試験片法では5割を占めている。また、振動試験片法のデータは92年以前のものが多く、逆に、静置試験片法のデータは93年以降のものが大半を占めている。これは、静置試験片法の場合、試験片が容易に作成できるとともに、本研究室では気泡崩壊圧システムを開発したために静置試験片の位置での気泡崩壊圧が容易に計測できるようになったためである。

共振周波数は、14.7 kHzのデータが5割、19.5 kHzが3割を占めている。現在、本研究室ではASTM規格G 32⁽³⁾に基づいて試験を行っているため、91年以降から現在に至るまで、本研究室でのキャビテーション壊食における研究のほとんどが、19.5 kHzで行われている。また、同規格に基づいて、大半のデータがディスクの全振幅を50 μm 、試験液をイオン交換水、静置試験片法におけるディスクと試験片のすきまを1 mmに設定されている。

本研究室に設置されている磁わい振動装置の性能とASTMで規定されている試験装置の性能の関係を明らかにするために、ASTMに規定されている試験装置の検定⁽³⁾を行った。標準参照試料には、米国規格B 160に準拠するニッケル200焼なまし材を使用し、

ASTM G 32 に規定されている振動試験片法, 標準試験条件(全振幅 50 μm , 共振周波数 20 ± 0.5 kHz, イオン交換水, 液温 $25 \pm 2^\circ\text{C}$)で試験を行った. 図 1 はニッケル 200 と SUS 304 の試験結果であり, 試験時間と累積質量減少量の関係を示したものである. ①~⑤は上記と同じ試験条件で行った五つの研究所の試験結果であり, ⑥は本研究室の試験結果である. また, ⑦は SUS 304 の試験結果の標準である. ⑥は①~⑤に比べてもあまり差がなく良い結果が得られた. したがって, 磁わい振動装置の性能は問題なく, 本研究室の装置で得られたデータは ASTM 規格の性能を十分に満たしている, 汎用性のあるデータと考えられる.

図 2 はデータベースの構成について示す. 壊食試験データ総数 859 個あり, そのうち磁わい振動装置を用いて ASTM G 32 に規定されている試験液がイオン交換水, 液温が $25 \pm 2^\circ\text{C}$ で試験を行っているデータは 570 個ある. またその中から ASTM 規格で定義された標準試験条件(共振周波数 20 ± 0.5 kHz), すきま 1 mm の静置試験片法に対応しているデータは 472 個

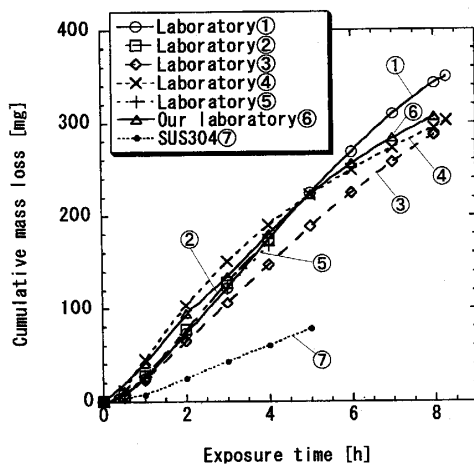


Fig. 1 Cumulative mass loss-time curves for Nickel 200 from six laboratories including ours

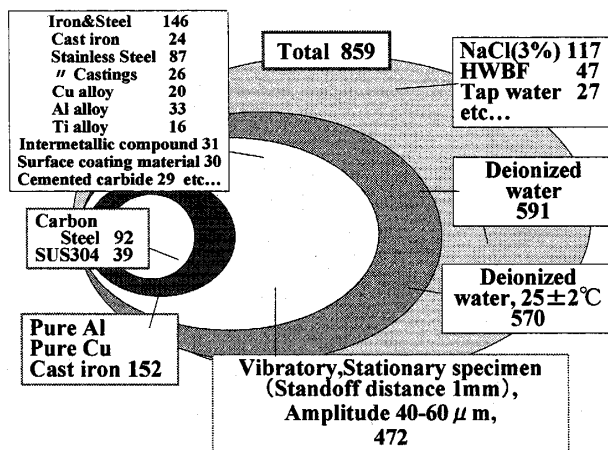


Fig. 2 Structure of cavitation erosion data

であり, 3章ではこの中の炭素鋼のデータ 92 個と本研究で標準参照材料として使用している SUS 304 のデータ 39 個について解析を行った.

3. 炭素鋼データの解析

3.1 データの換算 データベースの解析では, できるだけ多くのデータを統計的に解析する必要がある. ASTM 規格で定義された標準試験条件(イオン交換水, 液温 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 全振幅 50 μm)に近い値に換算する手法について検討した. まず, 全振幅 50 μm 以外のデータを 50 μm に換算することを試みた. 振幅と壊食量の関係については Thirvengadam の研究では振幅の 1.8 乗に, Hobbs の研究では 1.5 乗に比例すると報告している⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 本研究では簡単のために指数を 2 として 50 μm に換算した. ちなみに, 指数 1.5 と 2.0 では, 40 μm の結果を 50 μm に換算した場合の誤差は 12% に過ぎない. このようにすべてのデータを振幅 50 μm 相当の条件下に換算し, 振動試験片法の 14.7 kHz と 19.5 kHz, 静置試験片法(すきま 1 mm)の 14.7 kHz と 19.5 kHz の 4 種類に分けて整理した. また, これらを 19.5 kHz の静置試験片法の標準データに換算し, 壊食量の平均値と変動係数を求めることを考えた. さらに, 炭素鋼について壊食抵抗を硬さで整理し, 標準偏差や壊食確率などの統計的パラメータを用いて Heymann の結果と比較検討した.

本研究のデータの解析に先立ち, Heymann の結果を図 3 に示す. 図 3 はビッカース硬さと相対壊食抵抗を両対数で示したものであり, 同一硬さに対する相対壊食抵抗のばらつきは軟らかいものから硬いものまでほぼ同じであることがわかる. このことから, 本データの解析でも同一硬さに対する相対壊食抵抗は対数正

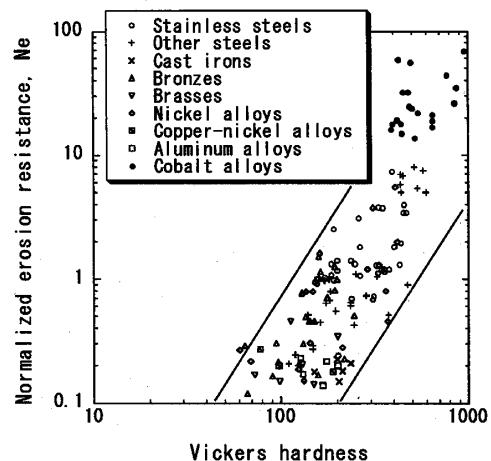


Fig. 3 Normalized erosion resistance versus hardness (Heymann)

規分布であると仮定した。

炭素鋼について整理したデータは、SS 400, S 10 C, S 15 C, S 35 C, S 45 C, S 55 C, SK 4 の 7 種類であり、ステンレス鋼では、標準参照材料の SUS 304 の 1 種類の整理を行い、全 8 種類、合計 82 個のデータを解析した。壊食試験の壊食量を示すパラメータ⁽³⁾としては、測定された質量減少量を材料の密度で除して求めた体積減少量を、さらに表面積(壊食面積)で除して求められる MDE(平均壊食深さ)があり、それを各試験時間で割ったものに MDER(平均壊食深さ速度)がある。図 4 は一例として 19.5 kHz の静置試験片方式で機械構造用炭素鋼 S 15 C の壊食試験を行ったときに得られた MDER 曲線である。MDER_{max} は平均壊食深さ速度の最大値であり、μm/h で表される。図 5 は代表例として S 15 C, S 35 C, S 55 C, SK 4 を振動試験片法、14.7 kHz で壊食試験したときに得られる最大壊食速度 MDER_{max} の累積頻度分布を対数正規確率紙上にプロットしたものである。MDER_{max} の累積頻度分布は直線で近似でき、対数正規分布によく適合していることがわかる。またその他の材料についても同様であった。

図 5 の結果から MDER_{max} の対数正規分布の平均 μ_M を

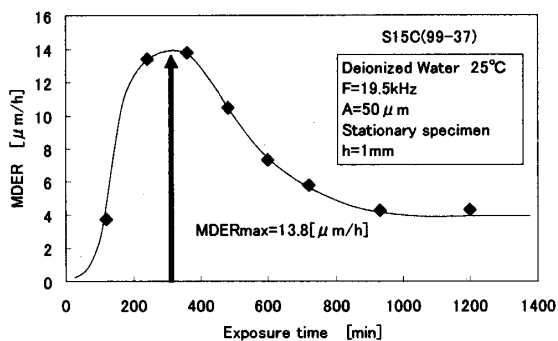


Fig. 4 MDER curve

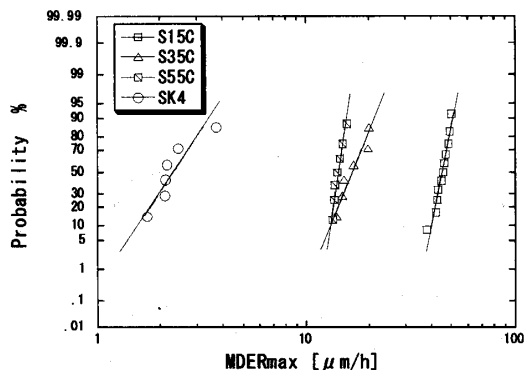


Fig. 5 Probability versus MDER_{max} (Vibratory, 14.7 kHz)

$$\mu_M = \exp\left(E\mu + \frac{E^2 s^2}{2}\right) \dots \dots \dots (1)$$

$$E = \ln 10$$

により求めた⁽⁶⁾。μ は図 5 で累積頻度 50% に対応する log(MDER_{max}) の値であり、s は 15.9% に対応する log(MDER_{max}) の値が μ-s であることから求めた。

表 2 は、各試験条件でのデータ個数と対数正規分布の平均値を示したものである。炭素鋼では振動試験片法の 19.5 kHz のデータがないので振動試験片法での共振周波数 19.5 kHz と 14.7 kHz の平均値の比を求めることができないが、静置試験片法では共振周波数 19.5 kHz と 14.7 kHz の平均値の比は 1.2 である。この換算係数を使って S 15 C の振動試験片法、14.7 kHz のデータを 19.5 kHz のデータに換算して、静置試験片法、19.5 kHz のデータとの比を計算すると 3.9 が得られる。14.7 kHz での振動試験片法と静置試験片法の比は 3.9~6.2 であり、その相加平均は 4.7 である。

また SUS 304 では、標準試験条件で行っている 27 個のデータについて整理した。振動試験片法による 14.7 kHz のデータ、同法による 19.5 kHz のデータ、静置試験法による 14.7 kHz のデータ、同法による 19.5 kHz のデータをそれぞれ比較すると、共振周波数 19.5 kHz と 14.7 kHz の平均値の比は 1.2、振動試験片法と静置試験片法の比は 3.6 となる。この換算係数を用いてそれぞれの MDER_{max} の値を 19.5 kHz の静置試験片法に換算したところ、図 6 に示す結果が得られ、平均 μ_M は 3.0 μm/h となった。さらに対数正規分布の標準偏差 S_M を

$$S_M^2 = \{\exp(E^2 s^2) - 1\} \exp(2E\mu + E^2 s^2) \dots \dots \dots (2)$$

により求めた⁽⁶⁾。E, μ, s は式(1)に用いたものと同様に図 5 と同様なグラフを作成し求めた。また、標準偏差 S_M を平均 μ_M で除して得られる変動係数は 0.2 となる。

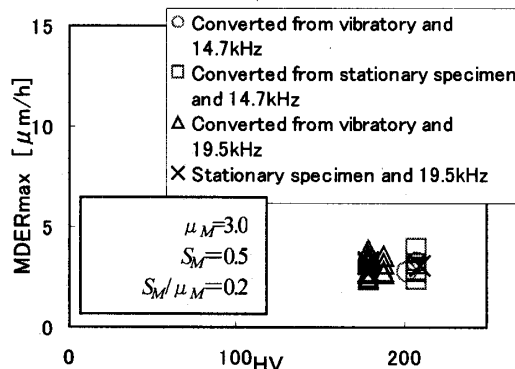


Fig. 6 Analysis of SUS 304 [Stationary and 19.5 kHz]

表3は、炭素鋼についても19.5 kHz/14.7 kHzと振動試験片法/静置試験片法の換算係数(1.2および4.7)を用いて19.5 kHzの静置試験片法に換算して一つにまとめ、対数正規分布の平均、標準偏差と変動係数を算出したもので、変動係数はどの材料においても0.3以下となる。今回整理した材料について $MDER_{max}$ の標準データが得られたことになる。参考のために、標準正規分布の平均と標準偏差、変動係数を計算したが、炭素鋼やSUS 304に限定すれば、対数正規分布のものと比べてそれほど変わらないことがわかる。

3.2 硬さと壊食抵抗の関係 表3で得られた炭素鋼の結果のほかに熱処理された炭素鋼を含めた $MDER_{max}$ と硬さの関係を図7に示す。硬さが硬い材料ほど、 $MDER_{max}$ の値は小さく、耐壊食性に優れていることがわかる。

$MDER_{max}$ の逆数を壊食抵抗と定義し、両対数グラフ上に硬さと壊食抵抗の関係を示すと、図8のようになり、傾き2.4の直線で近似することができる。またHeymannの結果は縦軸に相対壊食抵抗で整理されているので、本研究でも相対壊食抵抗で整理した。 $HV=170$ の18-8ステンレス鋼(SUS 304)の相対壊食抵

抗を1としたとき、参照材料(ref)に使用した硬さの異なる18-8ステンレス鋼(SUS 304)の相対壊食抵抗 $(N_e)_{ref}$ は、Heymannの定義⁽¹⁾⁽⁷⁾に従って、

$$(N_e)_{ref} = \left(\frac{H_{ref}}{170} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

で得られる。これより、試験材料Xの相対壊食抵抗 $(N_e)_X$ は、

$$(N_e)_X = \left(\frac{H_{ref}}{170} \right)^2 \left(\frac{MDER_{max} \text{ of ref}}{MDER_{max} \text{ of } X} \right) \dots\dots\dots (4)$$

で与えられ、本研究室の炭素鋼の硬さと相対壊食抵抗の関係は図9のようになる。本研究室で使用した参照材料(SUS 304)の硬さは $HV=187$ であり、相対壊食抵抗とビッカース硬さとの間には

$$(N_e)_X = 2.1E-06 \times HV^{2.4} \dots\dots\dots (5)$$

の関係式が求められ、相関係数も0.92と良い相関が得られる。また、式(5)から任意の材料Xに対して材料の硬さから相対壊食抵抗が推測でき、式(4)より参照材料(SUS 304)の硬さ H_{ref} と $MDER_{max}$ の値がわかれば任意材料Xの $MDER_{max}$ の値も推測できることを示している。

Table 2 Mean of the log-normal distribution of $MDER_{max}$

Materials		Vickers hardness (HV)	Vibratory				Stationary specimen					Vibratory/ Stationary	
			14.7kHz		19.5kHz		Ratio	14.7kHz		19.5kHz		Ratio	
			Number	Mean μ_M ($\mu\text{m/h}$)	Number	Mean μ_M ($\mu\text{m/h}$)		Number	Mean μ_M ($\mu\text{m/h}$)	Number	Mean μ_M ($\mu\text{m/h}$)		Ratio
Carbon steel	SS400	134-143					3	14.7	2	16.3	1.1		
	S10C	125-137	3	47.1			4	11.5				4.1	
	S15C	130-151	11	45.3					4	13.2	(1.2)	(3.9)	
	S35C	184-210	6	16.9									
	S45C	240	2	13.5			2	2.8				4.8	
	S55C	204-267	7	14.3			2	2.3	3	2.7	1.2	6.2	
	SK4	360-371	6	2.4									
Stainless steel	SUS304	178-209	2	9.2	15	10.8	1.2	5	2.6	5	3.0	1.2	3.6
Total			37		15		16		14				

Table 3 Standard values of $MDER_{max}$

Materials		Vickers hardness (HV)	Conversion to Stationary specimen, 19.5kHz						
			Log-normal distribution				Standard normal distribution		
			Total	Mean μ_M ($\mu\text{m/h}$)	Standard deviation S_M	Coefficient of variation	Mean ($\mu\text{m/h}$)	Standard deviation	Coefficient of variation
Carbon steel	SS400	134-143	5	17.1	2.0	0.1	17.0	1.5	0.1
	S10C	125-137	7	12.9	2.9	0.2	12.8	2.4	0.2
	S15C	130-151	15	12.0	1.4	0.1	12.0	1.2	0.1
	S35C	184-210	6	4.3	0.8	0.2	4.3	0.7	0.2
	S45C	240	4	3.3	0.8	0.3	3.2	0.6	0.2
	S55C	204-267	12	3.3	0.6	0.2	3.3	0.5	0.2
	SK4	360-371	6	0.6	0.2	0.3	0.6	0.2	0.3
Stainless steel	SUS304	178-209	27	3.0	0.5	0.2	3.0	0.4	0.1
Total			82						

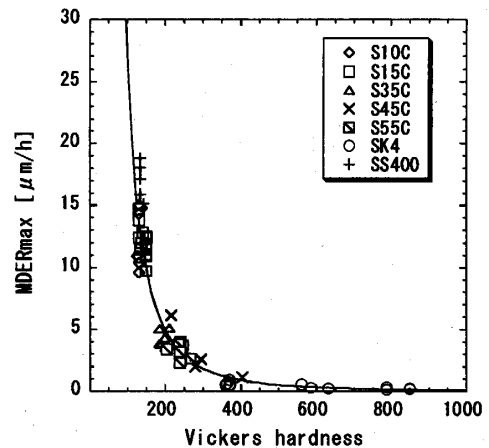


Fig.7 Relation between hardness and $MDER_{max}$

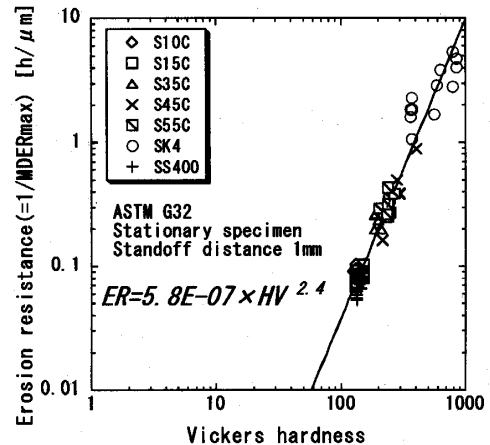


Fig.8 Relation between hardness and erosion resistance ($=1/MDER_{max}$)

Heymann と本研究のデータのばらつきの比較を行うために、相対壊食抵抗の対数の標準偏差 ($\log N_e$) の推定値⁽⁸⁾などの統計的パラメータを用いて評価した。表4には Heymann と本研究の標準偏差の推定値など種々の値の比較を示す。Heymann の解析したデータは、総数 119 個あるのに対し、本研究の解析したデータの総数は 68 個とやや少ないが、本研究の材料の種類は炭素鋼のみであり、ステンレス鋼や鋳鉄、ニッケル合金、アルミ合金は含まれていない。相対壊食抵抗の対数の標準偏差の推定値は Heymann の 0.32 から 0.14 へと縮小し、相関係数も Heymann の 0.77 から 0.92 へとよりよい相関性が得られた。また、Heymann の相対壊食抵抗は硬さの約 2.5 乗に比例すると報告されている⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁹⁾が、Heymann のデータを実際に統計解析すると傾きが 1.6 となり、本研究の炭素鋼では 2.4 となる。

ばらつきを明らかに比較するために疲労試験での破壊確率⁽⁸⁾に相当する壊食確率を用いて評価した。図 10 は計算した本研究の 1%, 10%, 50%, 90%, 99% の壊食確率と Heymann の 1%, 99% の壊食確率

の硬さと相対壊食抵抗の関係を比較したものである。壊食確率 1% とは同じ硬さの材料 100 個を試験したときにその中の 1 個がその相対壊食抵抗以下であることを示す指標である。両者を比較すると、同一硬さに対する壊食確率 1~99% の相対壊食抵抗のばらつきは Heymann の結果では約 29 倍、本研究の炭素鋼の結果では約 4.3 倍であり、明らかにばらつきが小さくなっているのがわかる。

4. 結 言

本研究において、キャビテーション壊食試験のデータベースの構築を行い、ASTM G 32-98 に基づく磁わい振動法により得られているデータの解析を行って壊食抵抗を硬さで整理し、Heymann の解析結果と比較したところ、以下の点が明らかになった。

(1) 総データ数 859 個を Excel 上にてデータベースの構築を行い、オートフィルタ、ハイパーリンクを施すことにより、容易に試験基礎データ、壊食試験データの検索を可能にした。

(2) 相対壊食抵抗をビッカース硬さで整理すると、材料 Fe, Al, Cu, Ni をいっしょに解析した Heymann の結果では相関係数が 0.77 であるのに対して、同一研究室でステンレスを除いた炭素鋼だけで解析した本研究の結果では相関係数が 0.92 とよりよい相関性が得られる。

(3) 炭素鋼のビッカース硬さに対する相対壊食抵抗は $N_e = 2.1E-06 \times HV^{2.4}$ で表示できる。このことから、任意の材料の硬さから相対壊食抵抗をある程度推測できる。また、これより標準参照材料 SUS 304 の硬さとその $MDER_{max}$ がわかれば任意の材料の壊食抵抗も推定できる。

Table 4 Comparison of the data analysis of Heymann and our laboratory

	Heymann	Our laboratory
Total	119	68
Type of material	St.Stl, Ni, Al, etc...	Carbon steels
Reference material (SUS304)	HV=170, Ne=1	HV=187, Ne=1.21
Estimator of standard deviation	0.32	0.14
Correlation coefficient	0.77	0.92
Slope	1.6	2.4

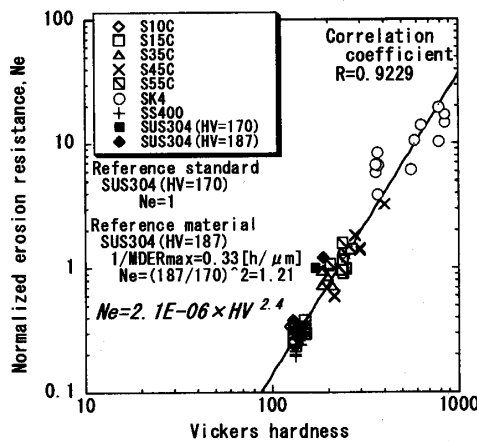


Fig. 9 Relation between hardness and normalized erosion resistance (N_e)

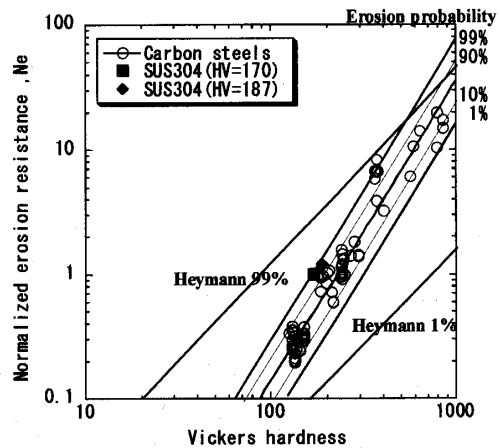


Fig. 10 Comparison of the data analysis of Heymann and our laboratory using erosion probability

(4) $MDER_{max}$ 標準値の変動係数(標準偏差/平均値)は0.1~0.3となる。材料が指定されれば, $MDER_{max}$ の平均値が予測でき, 標準偏差もある程度推定できる。

文 献

- (1) Heymann, F. J., *ASTMSTP*, 474 (1970), 212-222.
- (2) Rao, P. V., Martin, C. S., Rao, B. C. S. and Rao, N. S. L., *J. Testing Evaluat.*, **9**-3 (1981), 189-197.
- (3) *ASTM Designation*, G 32-98 (2000), 107-120, Annual Book of ASTM Standards.
- (4) 加藤洋治, キャビテーション, (1979), 175-188, 槇書店.
- (5) 岡田庸敬・服部修次, 機械の研究, **49**-10 (1997), 1078-1081.
- (6) Gibra, I. N., *Probability and Statistical Inference for Scientists and Engineers*, (1973), 154-155.
- (7) 岡田庸敬・服部修次, 機械の研究, **50**-5 (1998), 606-608.
- (8) JSME 社会法人日本機械学会, 統計的疲労試験方法, (1981), 1-43.
- (9) 加藤洋治, 新版キャビテーション, (1999), 224-225, 槇書店.