液滴衝突エロージョン現象と実用材料の寿命予測*

第2報—推算式の確立と材料評価法

磯本良則**, 宮田寛和**

** 広島大学大学院工学研究科

Erosion Phenomenon Caused by Water Droplet Impingement and Life Prediction of Industrial Materials*

Part2 — Establishment of predictive equations and evaluation of material performance

Yoshinori Isomoto** and Hirokazu Miyata**

** Graduate School of Engineering, Hiroshima University

It is necessary to evaluate material performance from erosion tests under known water impingement conditions, in order to derive effective equations for estimating and predicting damage and life span of practical materials which suffer from erosion caused by water droplet impingement. Using a water-jet testing apparatus, impingement conditions of water droplets were obtained with aluminum foils mounted on aluminum specimen surfaces under several operating conditions. Fundamental equations for estimating erosion damage to materials were proposed in the previous paper. In this paper, effects of impingement parameters such as velocity, frequency and diameter of water droplets on erosion behaviors were investigated with water droplet erosion tests for ordinary carbon steel, stainless steel and carbon tool steel as industrial materials. As a result, estimative equations of materials for erosion by water droplet impingement were precisely derived and validated from the test results. This paper introduced life predictions of industrial materials with the incubation period which is one of most important factors in the erosion behavior.

Keywords : water droplet impingement, erosion, damage depth, incubation period, material characteristic point, mechanical properties of materials, predictive equation, life prediction

1. 緒 言

液滴衝突エロージョン環境に曝される材料の損傷量および潜伏期間の推算は、耐エロージョン性に優れた材料の選定や材料の寿命予測を行ううえで極めて有用である。推算式を確立するためには、エロージョンに関係する液滴の攻撃条件や材料の諸性質を明らかにすることが必要不可欠である。一般的に、材料の硬さが液滴衝突エロージョンに関係する材料の機械的性質の代表値として用いられることが多い¹⁾⁻³⁾。しかし、Smith ら¹⁾ は合金の種類や鋼種が異なると、硬さと損傷速度の関係はそれぞれ別の相関になることを報告している。また、損傷速度に対して単一の物性ではなく弾性定数、極限強さまたは破壊に要するひずみエネルギーといった複合の性質による相関⁴⁾ が提案された。しかし、複合の性質と損傷速度との相関性は必ずしも良好であるとは言えない。このように、液滴衝突エロージョンに関係する材料性質を一義的に決定することができないのは、液滴衝突エロージョンが弾性変形、塑性変形を伴った複雑な材料の脱離現象のためである。また、質量減少量からみた損傷挙動が時間に対して曲線的に変化するので損傷の評価が困難であることも考えられる。さらに、液滴の攻撃条件が異なることによって損傷挙動が変化することが前報⁵⁾ で示され

た。すなわち、液滴の攻撃条件の影響を考慮せずに広範囲の材料および攻撃条件でエロージョンに及ぼす材料物性の影響を検討していたためではないかと考えられる。

前報⁵⁾ では、ウォータージェット法試験装置における攻撃条件を把握し、ジェットノズル直下の液滴衝突条件が比較的一定であることを示した。また、損傷深さの経時変化は潜伏期間の後に直線的に増加することが確かめられた。さらに、液滴速度が高い領域においてエロージョン量が運動エネルギーに相関することを見だし、材料のエロージョン量推算および寿命予測の基礎式を提案することができた。そこで本報では、前報で得られた基礎式の妥当性を検討するために、エロージョン量の推算式に材料側の因子である機械的性質を組み込むことを試みた。また、液滴衝突に曝される材料の耐エロージョン性の評価を限界液滴速度、および潜伏期間、すなわち損傷が起こり始める時間を指標として行った。

2. 試験装置および試験方法

エロージョン試験には前報と同様のウォータージェット法試験装置⁵⁾ を用いた。試験条件は噴射圧力 10~90 MPa、ノズルから試験片までの試験距離 (SOD) 20~500 mm、噴射液は水道水とした。本試験装置では噴射圧力および試験距離を変えることによって、液滴の攻撃条件である液滴速度、頻度および液滴径を変化させることができる。ただし、これらの攻撃条件を単独に変えることはできない。各試験環境における攻撃条件は前報に記載されている。また、ジェット中心部の狭い範囲で液滴の

* 第 52 回材料と環境討論会 (札幌, 2005 年) で発表

** 〒739-8527 広島県広島市鏡山 1-4-1 (1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527 Japan)

攻撃条件は一定とみなすことができる。供試材として、前報で用いたアルミ合金 Al5083 のほかに、汎用炭素鋼 SS400、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS410J1、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および炭素工具鋼 SK3 を用いた。供試材および測定により得られた供試材の機械的性質を Table 1 に示す。表中には各試料に略記号を付した。SK3 は熱処理を施して硬さを変え、熱処理法に従って SKA, SKT および SKQ とした。任意の時間のエロージョン試験後に、表面粗さ計を用いて、損傷痕中心付近の最大損傷深さを測定した。

供試材の機械的性質を求めるために、マイクロビッカース硬度計を用いて、試験片の硬さや試験後の損傷表面の硬度分布測定を行った。また、万能試験機を用いて、供試材の引張試験 (JIS Z2241) を行い、応力-ひずみ曲線から降伏点および引張強さを求めた。

3. エロージョン量推算および寿命予測の基礎式

液滴衝突エロージョン量推算の基礎式は体積損傷量が液滴の運動エネルギーに相関し、液滴質量当たりの体積損傷量 E ($\text{mm}^3\text{kg}^{-1}$) が液滴の衝突速度 v の 2 乗に比例するという考えを一般化したもので (1) 式で与えられる。

$$E \propto v^n \quad (1)$$

ここで n はエロージョン量の液滴速度依存性における液滴速度指数であり、2 またはそれ以外の値をとる。2 以外の値をとるときは体積損傷量が運動エネルギーの相関からずれることを意味する。一方、エロージョン挙動として損傷深さに注目すると、損傷深さの経時変化から求められるのは単位時間当たりの損傷深さすなわち損傷深さ速度 R_d (mms^{-1}) である。従って、液滴衝突頻度 (回数) F_{req} ($\text{mm}^{-2}\text{s}^{-1}$) に液滴の密度 ρ (kgm^{-3})、液滴直径 D (m) の 1 滴当たりの体積 $\pi D^3/6$ (m^3) をかけた単位時間単位面積当たりの液滴量 $F_{\text{req}}\rho(\pi D^3/6)$ ($\text{kgmm}^{-2}\text{s}^{-1}$) を用いて体積損傷量を求めると (1) 式は (2) 式となる。

$$E = \frac{R_d}{F_{\text{req}}\rho(\pi D^3/6)} = Cv^n, \quad C = f(Hv) \quad (2)$$

ここで C は材料に依存する係数であり、硬さ (Hv) などの機械的性質の関数で表され则认为られる。よって (2) 式が体積損傷量推算の基礎式となる。

実際の液滴衝突エロージョンではある潜伏期間 I_p (s) の後に一定の損傷深さ速度 R_d で損傷するので損傷深さ E_d の経時変化から (3) 式が成り立つ。

$$E_d = R_d(t - I_p), \quad D_c = R_d I_p \quad (3)$$

ここで t は時間 (s), D_c は損傷深さ軸の切片の絶対値で、材料の機械的性質および衝撃の大きさまたは液滴の衝突速度によって決まる特性点である。(2), (3) 式から (4) 式が得られる。

$$E_d = CF_{\text{req}}\rho(\pi D^3/6)v^n t - D_c \quad (4)$$

この式において損傷深さ E_d が許容される深さに達するときの時間 t が材料の寿命を表すことから、(4) 式は損傷深さとしての推算の基礎式であり、寿命予測の基礎式でもある。損傷が脱離として現れた段階で寿命とみなす

Table 1 Mechanical properties of testing materials.

Material	Designation	σ_s / MPa	σ_B / MPa	Hv_i / GPa	Hv_E / GPa	η / -
Aluminum alloy						
Al5083 as received	Al	110	253	0.71	0.85	1.20
Mild steel						
SS400 as received	SS	298	420	1.23	1.46	1.19
Stainless steel						
SUS410J1 as received	410	253	664	1.94	2.20	1.13
SUS304 as received	304	300	560	1.77	2.50	1.41
Carbon tool steel						
SK3 as annealed	SKA	490	1050	1.92	2.85	1.48
SK3 as quenched	SKT	975	1125	3.20	4.50	1.41
and tempered						
SK3 as quenched	SKQ	2000	3000	8.50	10.6	1.25

σ_s : yield strength σ_B : tensile strength Hv_i : initial hardness before erosion
 Hv_E : hardness after erosion η : hardness ratio ($= Hv_E/Hv_i$)

場合は潜伏期間の終了時が寿命である。

4. 試験結果および考察

4.1 各種材料のエロージョン挙動

前述したように、損傷深さの経時変化は直線的となり、材料に明確な損傷がみられない潜伏期間 (時間軸切片) および損傷深さ速度 (直線の傾き) によりエロージョン挙動を特徴づけることができる^{6), 7)}。

試験条件として試験距離 200 mm, 噴射圧力 30, 50, 70, 90 MPa における各種材料に対する損傷深さの経時変化例を Fig. 1~3 に示す。噴射圧力が高くなるにつれて液滴速度および衝突頻度が高くなるために潜伏期間は短くなり、潜伏期間後の損傷深さ速度は上昇した。また、噴射圧力が高いほど特性点 D_c は小さな値をとる傾向を見せた (Fig. 1 参照)。噴射圧力 30 MPa (このときの液滴速度は 148 ms^{-1}) に注目すると同じ噴射圧力でも材料の種類によって潜伏期間、損傷深さ速度および特性点は大きく異なることが分かる。特に、熱処理によって同一の炭素工具鋼の機械的性質を変化させた場合の損傷深さ挙動は大きく異なっている (Fig. 3 参照)。これらの結果から、損傷深さ挙動が液滴の攻撃条件および材料の機械的性質の影響を受けて変化したことは明らかである。これらの図における潜伏期間、損傷深さ速度および特性点に

Fig. 1 Damage depth vs. testing time curves for various water pressures.

Fig. 2 Damage depth vs. testing time curves for various materials.

Fig. 3 Damage depth vs. testing time curves for SK3.

基づいてエロージョン量の推算や材料評価を行う。

4.2 エロージョン挙動に及ぼす攻撃因子の影響

エロージョン挙動に影響を及ぼす因子として液滴の速度、頻度および液滴径がある。このうち影響力の強い因子は液滴速度および頻度である。液滴径が比較的弱い因子である理由は、液滴衝突エロージョン現象において損傷の主因である衝撃圧 ($P = \rho C v$: ρ : 液滴密度, C : 音速, v : 液滴速度) に液滴径が反映されないためである。従って、例えば液滴径が2倍になると材料に作用する面積は4倍になるが、液滴体積は8倍になり(2)式でいう液滴質量当たりの損傷量は必ずしも多くなならない。また、液滴衝突頻度すなわち単位時間当たり、単位面積当たりの液滴の衝突回数が大きいほど同じ損傷を与える時間が短くなる。すなわち液滴衝突頻度が2倍になれば損傷深さ速度は2倍に、潜伏期間は逆に1/2になると理解することができる。ここでは液滴速度の影響について述べる。

まず、液滴速度が損傷深さ速度に及ぼす影響に注目してみる。噴射圧力および試験距離を変えた試験において損傷深さ速度を液滴速度に対して点綴したものを Fig. 4 に示す。いずれの材料においても液滴速度に対して、2つの領域に分けられる。しかも、これらの挙動は両対数図で直線関係となり、材料の種類に関係なくほぼ同じ傾きを示すことが分かった。速度依存性の指数は高く、低い速度域で約7、高い速度域では約4となり、既往の研究と同様な結果が得られた⁸⁾。前報で得られた攻撃条件

Fig. 4 Relations between damage depth rate and droplet velocity for various materials.

である液滴の速度、頻度および液滴径は噴射圧力や試験距離が異なることによって大きく変化することが分かっている。従って、この図における損傷深さ速度の液滴速度依存性は液滴速度だけでなく液滴の衝突頻度や液滴径が関与して得られた結果である。この図から液滴の衝突速度のみの影響を直接求めることは困難である。そこで、前報で求めた任意の噴射圧力および試験距離における液滴の攻撃条件を用い、(2)式から換算される単位液滴量当たりの体積損傷量 (mm^3/kg) に対する液滴衝突速度の関係を Fig. 5 に示す。この図から Fig. 4 と比べると液滴速度依存性を示す直線の傾きが低下し、いずれの材料においても液滴速度の低い領域でエロージョン量に及ぼす液滴衝突速度の指数が6程度、高い液滴速度領域で速度依存性がほぼ2になることが分かった。

これは、(2)式における指数 n が2、すなわちエロージョン量が液滴の運動エネルギーに比例することを意味する。液滴の衝撃圧は衝突速度に対応する(例えば液滴速度 200 ms^{-1} における衝撃圧は約 0.3 GPa ($\rho = 1000 \text{ kgm}^{-3}$, $C = 1500 \text{ ms}^{-1}$) となる)ので、低い液滴速度領域における衝撃圧は材料の降伏点以下である (Table 1 参照)。逆に、液滴速度指数が2である高い液滴速度領域すなわちエロージョン量が運動エネルギーに相関する領域は衝撃圧が材料の降伏点を越える領域であることが分かる。固体粒子衝突によるエロージョン量についても基本的に粒子の運動エネルギーと相関する⁹⁾ ことから、この領域における液滴衝突による材料の損傷現象は固体粒子衝突によるエロージョン挙動に類似しているといえる。エロージョン挙動に及ぼす液滴速度の依存性が液滴領域で二分される理由は液滴の攻撃性が材料の弾性的あるいは塑性的な損傷過程に関わるためと考えられる。

材料の機械的性質に關与する特性点 D_c に及ぼす液滴速度の影響を Fig. 6 に示す。いずれの材料においても、液滴速度が高くなるにつれて、特性点は小さな値をとることが分かる。仮に液滴速度が変わらない条件で液滴衝突頻度が2倍に変化したとすると、単純に損傷深さ速度が2倍、逆に潜伏期間が1/2になるだけで、この特性点は変化しないと考えられる。ところが、実際には液滴速

Fig. 5 Relations between E and droplet velocity for various materials.

度が高いほど特性点は小さくなっていた。また、Al, SS および 410 では特性点は液滴速度に反比例（両対数図の直線の傾きが -1 ）するが、熱処理された炭素工具鋼における直線の傾きが小さくなっている。固体粒子衝突現象において材料の変形挙動はひずみ速度の影響を受けることが知られている¹⁰⁾ ことから、液滴衝突現象においても潜伏期間における材料の変形挙動あるいはその後の脱離挙動がひずみ速度の影響を受け、結果的に特性点に影響を与えたものと推察される。

潜伏期間についてみると、(3)式から潜伏期間は特性点を損傷深さ速度で割った値である。高い液滴速度領域において損傷深さ速度は液滴速度の2乗に、特性点は液滴速度のおよそ $-0.5 \sim -1$ 乗に比例する (Fig. 6 参照) ので、潜伏期間は液滴速度の $-2.5 \sim -3$ 乗に比例することになる。このことは液滴速度が高い場合には潜伏期間は液滴速度の増加とともに短くなる、すなわち、材料の寿命が短くなることを意味する。

4.3 エロージョン挙動に及ぼす機械的性質の影響

一般に固体粒子衝突またはキャビテーションによるエロージョンを受ける表面の硬さは上昇することが知られている^{11), 12)}。そこで液滴衝突においても硬度上昇を生ずるかどうかを確かめてみた。一例として噴射圧力が 30 MPa、試験距離が 200 mm である場合の損傷深さが約 200 μm に達したときの種々の試験片断面の硬度上昇分布 ($H_v/H_{v\infty}$) を Fig. 7 に示す。 $H_{v\infty}$ はエロージョンの影響を受けない深さにおける硬さであり初期の硬さに等しいことを確認している。全ての材料において液滴衝突による硬度が上昇していることが分かる。硬度上昇曲線を外挿して得られた硬度上昇率およびそのときの硬さを Table 1 に示す。Fig. 7 から硬度上昇率が 1.13~1.25 である場合 (Al, SS, 410, SKQ) と 1.41~1.48 と比較的大きな硬度上昇が見られる材料 (304, SKA, SKT) に大別することができた。試験距離が長い場合や衝突速度が高い場合でも充分損傷していれば硬度上昇分布はほぼ同じ結果になることが分かった。注目すべきは焼入れされた炭素工具鋼の硬度上昇分布である。固体粒子衝突エロージョンでは粒子衝突による発熱のためにエロージョンを受けた

Fig. 6 Relations between D_c and droplet velocity for various materials.

Fig. 7 Hardness distributions of various materials after erosion caused by droplet impingement at a pressure of 30 MPa and a SOD of 200 mm.

表面の硬度は低下した¹²⁾ が、液滴衝突では液滴が冷却効果をもつためか硬度低下は見られず、逆に初期の硬さよりもさらに硬度が上昇する結果となった。

エロージョン量を材料の硬さ、降伏点、引張強さなどの機械的性質と関連させる試みは多くの研究者によって行われている。ところがこれらの機械的性質を複数組み入れた相関⁴⁾ には疑問が残る。そこで、材料の硬さのほかに万能試験装置を用いて降伏点、引張強さを求め、液滴衝突エロージョンによる硬化後の硬さと相関させた結果を Fig. 8 に示す。エロージョンによる硬化後の硬さに対して初期硬さがわずかに低く、2.5~5 GPa の領域で 304, SKA および SKT の硬さが相関から逸脱した。これらは Fig. 7 において硬度上昇が大きかった試料である。それ以外では材料の初期硬さ、降伏点および引張強さはいずれも硬化後の硬さと良く相関した。従って、これらの性質を組み合わせるとエロージョン量と相関させる意味はないと考えられる。言い換えれば、エロージョン量と相関させる材料の機械的性質はこれらの性質のどれでも良い。

Fig. 5 において 2 つの液滴速度領域における直線の傾

Fig. 8 Relations among hardness, tensile and yield strengths for various materials.

きをそれぞれ2および6とし、(2)式の $n=2,6$ の指数関数の係数 C_1 、 C_2 を材料の硬さに対して求めたものをFig. 9に示す。図中●▲は材料の初期硬さ、○△はエロージョン試験後であり硬化後の硬さを示す。硬化後の硬さが液滴速度関数の係数と良く相関することが分かる。それぞれの係数・指数をTable 2に示した。これらの結果を用いてエロージョン量推算式が得られる。

4.4 エロージョン量推算式の確立および材料評価

損傷深さの経時変化が直線的となるために、エロージョン量の推算として(3)式を基本に損傷深さ速度に注目すればよい。(2)式、Table 2およびFig. 8の液滴速度依存性の係数 C の相関から、(4)式は具体的に(5)式で与えられる。

$$E_d = 4.04 \times 10^{-4} H v^{-2.75} F_{\text{req}} \rho (\pi D^3/6) v^2 t - D_c \quad \text{または} \quad 3.00 \times 10^{-12} H v^{-3.45} F_{\text{req}} \rho (\pi D^3/6) v^6 t - D_c \quad (5)$$

ただし、特性点はFig. 6の相関を数値化して求められるが、いずれの材料についても0.02~0.2 mmの範囲であり、それほど大きな違いではなく損傷深さの推算に大きな影響を与えないと思われる。これらの式には液滴の攻撃条件である液滴速度、頻度及び液滴径、さらに材料の機械的性質である硬さ（特に硬化後の硬さ）が組み込ま

Fig. 9 Relations between material hardness and C_1 , C_2 .

Table 2 Constants and exponents of material property in a predictive equation.

	α	β
C_1	4.04×10^{-4}	-2.75
C_2	3.00×10^{-12}	-3.45

れているので、材料の硬さまたは、エロージョンによる硬化の予想値、および実機の液滴条件が分かれば、任意の材料および攻撃条件における損傷深さを推算することができる。

本研究における噴射速度、試験距離の異なる条件におけるすべてのエロージョン試験結果と(5)式による推算式の妥当性をFig. 10に示す。実験値と推算値の間には広い損傷深さ速度範囲においておおむね良好な相関が得られた。しかし、広範囲の材料および液滴条件であるために、特に炭素工具鋼に最大で100%程度の誤差を生じた。この誤差はFig. 9において硬さに対する低い衝突速度領域の C_2 の相関からのずれによるものである。

(5)式を変形して材料の寿命とみなされる任意の深さに達する時間 t を求めることで寿命を予測することができる。材料が大きく損傷し始める時点が寿命であると判断されれば、潜伏期間を求めることになる。潜伏期間は特性点 D_c を R_d で割った値である。特性点 D_c はFig. 6に示されるように、液滴の衝突速度に対して材料ごとに異なった挙動をとる。従って、Fig. 6を基に対象材料の特性点が予想の範囲であるか、特性点の衝突速度依存性が得られれば実機の寿命予測が可能である。

材料評価法については、前述した損傷深さ速度を用いるべきである。同一の液滴攻撃条件下の材料による損傷深さ速度の違いは材料の優劣を測る上で重要である。寿命予測として潜伏期間を求めることも材料評価法の1つに挙げられる。本実験で行われたデータを基に液滴速度に対する潜伏期間、または潜伏期間内の液滴の衝突数（衝突頻度に時間をかけたもの）の関係をFig. 11に示す。潜伏期間と液滴の衝突数は攻撃条件によって厳密には一致しないので、この液滴の衝突数は概略的なものである。

Fig. 10 Relationships between experimental and calculated damage depth rates.

Fig. 11 Relations between incubation period and droplet velocity extracted from various test data.

前報で述べたように、液滴の衝突速度は衝撃圧に対応するので材料に作用する応力に換算される。液滴衝突エロージョンにおける潜伏期間の後の材料の脱離は、応力振幅下の材料の疲労破壊に類似した現象とみなされるために、Fig. 11 は疲労に関する S-N 曲線のように扱われる。Thiruvengadam ら⁸⁾ は疲労限に対応する液滴の限界衝突速度が存在することを報告しているが、本研究では明確な限界衝突速度を得ることはできなかった。腐食疲労では、明確な疲労限が現れないことが知られている¹³⁾。本試験では水道水を使用しているため、腐食の影響を完全に無視できるとはいえない。そのため、明確な限界衝突速度を得ることができなかった可能性がある。しかし、液滴速度が減少するにつれて曲線が任意の液滴速度に漸近する傾向が見られるので、一例として液滴の衝突回数 10^9 における液滴の衝突速度を擬似限界衝突速度として、液滴速度と材料の硬さの関係を求めたところ、Fig. 12 が得られた。この図から液滴衝突によるエロージョンが生ずる限界の液滴速度または応力は材料の硬さと良く相関することが分かった。この図は液滴衝突エロージョンを生じる環境における材料の使用限界を示す図として有効である。

5. 結 論

本研究で得られた結論は以下に示す通りである。

(1) 単位液滴質量当たりの体積損傷量すなわちエロージョン量の液滴速度指数は、用いたすべての材料について低速域と高速域で異なり、高速域でおよそ 2 となった。このことはエロージョン量が液滴の運動エネルギーに相関することを示し、損傷量推算の基礎式を与えた。なお、高速域の損傷は材料の塑性変形が起因していることが示唆された。

(2) 損傷深さ-時間曲線において材料の特性点とみなされる損傷深さ軸の切片は液滴速度に対して指数関数的に

Fig. 12 Relations between hardness and droplet velocity at a cycle of 10^9 in Fig. 11.

変化した。特性点は、ひずみ速度の影響を受けることが示唆された。

(3) エロージョン後の材料表面の硬さとエロージョン量の液滴速度指数は良く相関した。また、材料の硬さは他の機械的性質である降伏点や引張強さとも良く相関し、材料の機械的性質の指標としてはどの性質でも良いことが分かった。

(4) 液滴の攻撃条件および材料の硬さを組み込んだ損傷深さ速度の推算式を提案し、その妥当性および汎用性を確認することができた。

(5) 衝撃圧または衝撃圧に対応する液滴速度に対して潜伏期間または液滴の繰り返し数の関係を求めることができ、疲労現象の S-N 曲線に相当する曲線を得ることができた。また、擬似限界衝突速度と材料の硬さは良く相関し、材料の耐エロージョン性を評価することができた。

参 考 文 献

- 1) A. Smith, R. P. Kent and R.L. Armstrong, *ASTM STP 408*, p.125 (1966).
- 2) G. Hoff, G. Langbein and H. Rieger, *ASTM STP 408*, p.42 (1966).
- 3) F. G. Hammit, E. E. Timm, J. B. Hwang and Y. C. Huang, *ASTM STP 567*, p.197 (1974).
- 4) J. M. Hobbs, *ASTM STP 474*, p.48 (1970).
- 5) H. Miyata and Y. Isomoto, *Zairyo-to-Kankyo*, **57**, 138 (2008).
- 6) M. Matsumura, Y. Oka, M. Ueda and Y. Yabuki, *Boshoku-Gijutsu* (presently *Zairyo-to-Kankyo*), **39**, 550 (1990).
- 7) A. Sakamoto, Y. Isomoto and M. Matsumura, *Zairyo-to-Kankyo*, **43**, 76 (1994).
- 8) A. Thiruvengadam, S. L. Rudy, M. Gunasekaran, *ASTM STP 474*, p.249 (1970).
- 9) Y. Isomoto Oka, K. Okamura and T. Yoshida, *Wear*, **259**, 95 (2005).
- 10) Y. Isomoto Oka, M. Matsumura and T. Kawabata, *Wear*, **162-164**, 688 (1993).
- 11) M. Matsumura, Y. Oka, H. Hatanaka and M. Yamawaki, *Boshoku-Gijutsu* (presently *Zairyo-to-Kankyo*), **29**, 13 (1980).
- 12) Y. Isomoto and I. M. Hutchings, *Boshoku-Gijutsu* (presently *Zairyo-to-Kankyo*), **39**, 610 (1990).
- 13) J. Soc. Mater. Sci. Jpn., "Kinzoiku Zairyo Hirou Sekkei Binran", p.137 (1978).

(Manuscript received August 15, 2007;
in final form December 11, 2007)

要 旨

液滴衝突エロージョンを受ける実用装置材料の損傷推算式や寿命予測式を得るには、液滴の攻撃条件がよく分かっている試験から、材料の性能評価を行う必要がある。ウォータージェット法試験装置を用いて、前報ではアルミニウム試験片に貼られたアルミ箔を用いて試験装置の各操作条件における液滴の攻撃条件を求めた。また、材料の損傷量推算のための基礎式を提案した。本報では実用的な材料として汎用炭素鋼、ステンレス鋼、炭素工具鋼を用いてエロージョン試験を行い、エロージョン挙動に及ぼす攻撃因子としての液滴速度、頻度、液滴径、および材料の機械的性質の影響を明らかにした。結果として、具体的なエロージョン量推算式を誘導し、妥当性を確認した。また、寿命予測法についてもエロージョン挙動の中で重要な因子の1つである潜伏期間とともに誘導した。

キーワード 液滴衝突, エロージョン, 損傷深さ, 潜伏期間, 特性点, 材料の機械的性質, 推算式, 寿命予測