

## エロージョン・コロージョンの評価尺度

解説

松村昌信\*・岡良則\*<sup>2</sup>

## Measures of Erosion-Corrosion Rate

Masanobu MATSUMURA and Yoshinori OKA

## 1. はじめに

本誌の編集委員会より次のようなテーマをいただいた。「コロージョンの度合い(速度)は  $\text{mm/y}$ ,  $\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$  などで表され、これは定着している。ところがエロージョンでは  $\text{g}$ ,  $\text{g/h}$  など面積を考慮していないものがあったり、多様である。エロージョンは、エロージョン・コロージョン現象を通じてコロージョンとは共通の側面をもっている。それなのに両者で評価尺度が異なっているのは不都合ではないか? ついてはエロージョンの評価尺度について合理性、定着性(汎用性)などの観点から考察せよ。」筆者らはキャビテーション・エロージョン、固体粒子衝突エロージョンおよびそれぞれのエロージョンとコロージョンが重畳した場合の浸食について報文を出したことがあるので、御指摘を受けたエロージョンの評価尺度の乱れ(?)には多少とも責任を感じる。そこで以下のような考察と反省を行った。

## 2. エロージョンの評価尺度

エロージョンを引き起こす原因には固体粒子衝突(サンドまたはスラリーエロージョン)、キャビテーション

表1 エロージョンの評価尺度

|               |   |   |  |
|---------------|---|---|--|
| 固体粒子衝突        | $\text{m}^3$<br>$\text{m}^3/\text{m}^2$<br>$\text{g}$ , $\text{mg}$     | $\text{m}^3/\text{m}^3$<br>$\text{m}^3/\text{g}$ , $\text{m}^3/\text{kg}$ , $\text{cm}^3/\text{g}$<br>$\text{m}^3/\text{kg m}^2$<br>$\mu\text{m}/\text{g}$ , $\text{mm}/\text{t}$<br>$\text{g}/\text{g}$ , $\text{mg}/\text{g}$ | $\text{m}^3/\text{min}$<br>$\text{m}^3/\text{cm}^2 \text{min}$<br>$\text{mm}/\text{h}$                                     |
| キャビテーション      | $\text{mm}$ (Mean depth of penetration)<br>$\text{mm}^3$<br>$\text{mg}$ |   | $\mu\text{m}/\text{h}$<br>$\text{mm}^3/\text{min}$<br>$\text{mg}/\text{s}$ , $\text{mg}/\text{min}$ , $\text{mg}/\text{h}$ |
| 液滴衝突          | $\text{mg}/\text{cm}^2$ , $\text{mg}/\text{mm}^2$                       | $(\text{cm}^3/\text{cm}^2)/(\text{cm}^3/\text{cm}^2)$<br>$\text{mm}^3/\text{kg}$  | $\text{m}/\text{s}$  |
| エロージョン・コロージョン | $\text{g}$  |   | $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$  |

および液滴衝突(レインエロージョン)がある。これらのすべてをテーマにして4年ごとに開かれている Erosion by Liquid and Solid Impact (ELSI) 国際会議の Proceeding<sup>1)</sup> でエロージョンにはどのような評価尺度が用いられているか調べてみた。その結果を表1に示す。左の欄は被害の量の、そして右欄はその度合い(速度)の評価尺度である。冒頭に挙げられたコロージョンの度合い  $\text{mm/y}$  などに対応するのは右欄である。これを概観すると、まず多様であることに気付く。確かに面積のないものや、分母に時間が無く代わりに質量( $\text{g}$ )が入っているものがある。さらに、すべての種類のエロージョンに共通して用いられている評価尺度は見当たらない。よって、すべてのエロージョンに適用されているという意味での定着性、汎用性を持った評価尺度は存在しないことを認めざるを得ない。それでは合理性についてはどうか? なぜこのような評価尺度を用いなければならないのか? この点を検討する前に比較の基準となっているコロージョンの評価尺度の  $\text{mm/y}$  自身の合理性について検討しておく必要がある。

## 3. コロージョン速度の評価尺度

コロージョン速度を得るには、ある露出面積をもつ試片を環境中(温度一定)に一定時間浸漬し、その前後の秤量によって腐食減量を算出する。これらの減量、試験面積、浸漬時間から  $\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$  が得られる。さらにこれを試片の密度で割って  $\text{mm/y}$  を得る。ただし、この手順には環境の濃度、温度は一定で、静止しているという条件の他に、さらに次に述べる3条件が成立することが前提となっている。

(1)被害は試験面の全域に均一に生ずる。すなわち全面腐食(あるいは均一腐食)である。

(2)被害の進行は時間の関数である。すなわちコロージョン量は時間と共に増加する。

(3)被害の進行速度は試験期間中変化しない。すなわ

平成元年5月25日受付 (Received May 25, 1989) (依頼解説)

\* 広島大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Hiroshima University, Shitami Saijyo-cho Higashihiroshima 724)

\*<sup>2</sup> 広島大学工学部助手 工博 (Faculty of Engineering, Hiroshima University)

Key words: erosion-corrosion; criterion; erosion; corrosion; rate; cavitation; erosion by solid impact; erosion by liquid impact.

ち、潜伏期間は無い。さらに、この先1年間ぐらいは、その速度は一定値を保持する。

mm/y を算出したり、それを利用するためには上記の3条件はどれも欠かすことはできないが、とりわけ(2)の条件は重要で、コロージョンの大きな特徴でもある。当然のことではあるが、時間の経過の速さはピーカーの中でも化学装置の中でも同一である。従って、どの金属も濃度と温度が同一である限りピーカーの中でも、現場の化学装置の中でも同一の腐食速度を示す。それゆえピーカー中の浸漬試験で得られた腐食速度から諸材料の耐食性の評価ばかりでなく、その材料で作った化学装置の“腐食しろ”を計算することができる。コロージョン速度の mm/y は、この意味での再現性あるいは適用性を十分備えている。

#### 4. エロージョン速度評価尺度の問題点

##### 4.1 固体粒子衝突エロージョン

この種のエロージョンを受けた金属表面は梨子地膚を呈し、浸食域には均一な減肉が生ずる。この点は全面腐食とよく似ている。つまり前節で述べた3条件内の(1)は満足されている。しかし(2)の条件は全然満足されていない。すなわち損傷量は時間と共に増加するのではなく、金属表面への固体粒子衝突と共に増加する。これが表1の評価尺度の分母に h ではなく g や  $m^3$  が用いられている理由である。g は衝突した固体粒子の質量、 $m^3$  はその体積である。すなわち、分母には攻撃側の代表値がくる。なお、面積が無いのは、これを無視したのではなく、分子の損傷量を  $g/cm^2$  で表し、分母の固体粒子の衝突を単位面積当たりの衝突粒子質量  $g/cm^2$  で表したためである。

速度の経時変化に関する(3)の条件については、衝突粒子が金属内部に埋没することが無ければ潜伏現象は発生しない。また、衝突に関する諸条件が一定であれば損傷量は衝突のどんな特性値(衝突回数、粒子質量・体積)にも比例して増加する。すなわち、 $g/g$ 、 $g/m^3$  の評価尺度で表されたエロージョン速度は一定である。これに対して  $g/cm^2 h$  で表されたエロージョン速度が一定になるためには、さらに粒子の衝突の度合い  $g/m^2 h$  が一定であるという条件を加えなければならない。

以上の検討から、固体粒子衝突エロージョン速度は単位時間当たりではなく、単位衝突粒子量当たりの損傷量で表すのが合理的であることが分かる。

次に、このように  $g/g$  または  $m^3/m^3$  で表されたエロージョン速度の再現性、現場への適用性について検討しよう。“腐食しろ”に対応する“エロージョンしろ”の算出や、エロージョンによる減肉の予測を行うためには、上記のエロージョン速度の外に実際の装置・機械における粒子衝突の度合い( $g/cm^2 h$  または  $m^3/m^2 h$ )が分かっているなければならない。しかも、それに加えて衝突角度

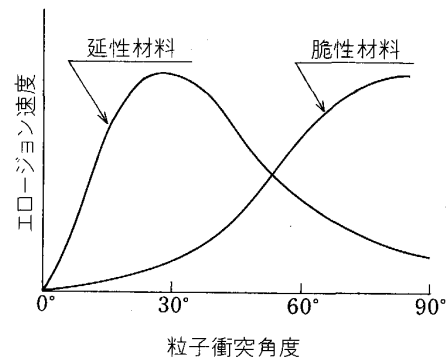


図1 固体粒子衝突エロージョン速度に及ぼす衝突角度の影響

が正確に分かっていなければならない。その理由はエロージョン速度の粒子衝突角度依存性を示している図1を見れば明らかである。ガラスや焼入れされた鋼のような脆性材料と、アルミニウムや軟鋼などで代表される延性材料とでは曲線の形が異なっているが、両者に共通していることは、それぞれのエロージョン速度が粒子衝突角度によって大きく変化することである。従って試験機における衝突角度と実機のそれとが異なっていると、同一材料でもエロージョン速度は大きく相違する。例えば試験機で粒子を試片に直角に衝突させてエロージョンを測定したとすれば、図1から明らかなように脆性材料により大きな被害が生ずるので延性材料の方が耐エロージョン性に優れているという判定が下される。しかし、これらの材料を粉体の空気輸送管に利用したときは衝突角度が浅いので延性材料により大きな被害が現れるであろう。このように二つの材料の相対的な優劣という定性的な判定さえ試験機と実機とでは逆転することになる。この不都合が生ずる原因は2種類の損傷機構が共存し、材料特性や衝突角度によってそれらが出現する割合が異なるためである。さらに、その割合は衝突粒子の性状(硬さ、大きさ、形状)および衝突速度にはもっと大きく依存する。従って、実機で取り扱う粒子よりも大きく、硬い粒子を用いて、衝突角度も衝突速度も全く分からない条件下で得られた迅速試験(加速試験)の結果は、定量的にも定性的にも現場の被害とは一致しない。すなわち、この種のエロージョンでは迅速試験で得られた速度はどんな評価尺度を用いて表しても再現性、適用性は極めて乏しい。いや、むしろ皆無と言ってよい。

##### 4.2 キャビテーション・エロージョン

キャビテーションの攻撃を受けた金属表面は海綿状になり凹凸が激しい。従って、被害が均一に生ずるといふ前述の(1)の条件は満足されていない。そこで、被害の程度を数量化するために平均値(Mean depth of penetration)や、試片全体の減量( $g$  または  $mm^3$ )を用いる。

(2)の条件も満足されていない。キャビテーション・

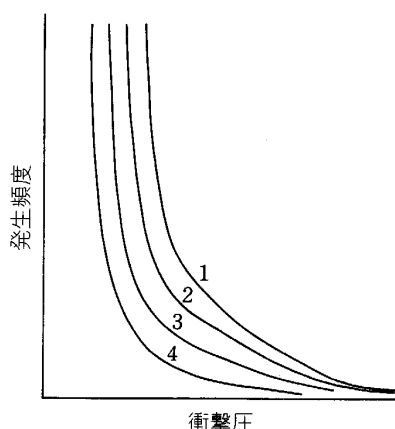


図2 キャピテーション衝撃圧の発生頻度曲線, 1, 2, 3, 4 は試片上の位置を示す

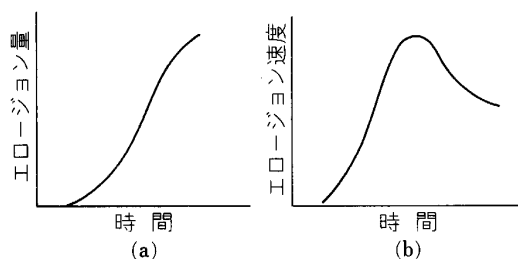


図3 キャピテーション・エロージョン量 (a) および速度 (b) の経時変化

エロージョンを進行させるのは時間の経過ではなく、繰り返し発生しているキャピテーション衝撃圧である。しかも、厄介なことに衝撃圧はエネルギーの低いものから高いものまで広く分布し、その発生頻度が異なる。図2はピエゾメーターで測定した衝撃圧分布の一例である。このような分布を示す衝撃圧の攻撃性を代表する単一の数値はまだ得られていない。そこでやむをえず衝撃圧の発生状況が時間によって変化しないとみなして攻撃側を時間で代用している。表1の mg/h の h にはこの程度の意味しかない。この評価尺度は衝撃圧の発生状況が異なる場では利用できないので、その再現性、適用性は一段劣ることになる。

キャピテーション・エロージョンでは(3)の条件が満足されていないことが特徴である。図3にキャピテーション損傷および速度の経時変化を示した。速度は潜伏期間(初期の減量が現れない時間)の後に上昇し、最大値に達した後は漸減する。そこで ASTM の振動法キャピテーション・エロージョン試験法<sup>2)</sup>では、試験結果を表す評価尺度について次のような内容の注意が記してある。「試験結果を最大エロージョン速度や終末段階エロージョン速度などの単一数値で表すことは無意味である。むしろ累積減量対時間曲線(図3(a)のような)で表すべきである。また、試験機によって衝撃圧の発生状況が異なる恐れがあるので、基準材料(純ニッケル)につい

ても試験を行い、試験結果はそれを基準にした相対値で示すことが望ましい。」

以上のようにキャピテーション・エロージョンでは前述の条件(1)~(3)のすべてを満足していない。しかし、ASTM規格の注意書きからも分かるように試験機で得られたエロージョン速度は実機の減肉量の推定などの定量的予測には利用することはできないが、諸材料の耐エロージョン性の相対的評価には利用することができる。

#### 4.3 液滴衝突エロージョン

この種のエロージョンはいろいろな点でキャピテーション・エロージョンに似ている。まず、被害部の外観は海綿状を呈して凹凸が激しい。被害は時間でなく液滴の衝突によって進行するので、その速度の評価尺度の分母には  $\text{mm}^3/\text{kg}$ ,  $(\text{cm}^3/\text{cm}^2)/(\text{cm}^3/\text{cm}^2)$  のように衝突液量がかかる。この点だけは固体粒子衝突エロージョンに似ている。しかし、液滴衝突エロージョン速度はキャピテーションと同様に図3(b)のような経時変化を示す。そのため試験結果は累積損傷曲線、あるいは最大エロージョン速度で表す必要があるが、そのような速度でもキャピテーションの場合と同様に諸材料の相対的耐久性の評価には利用できる。さらに、液滴衝突角度が変わっても損傷機構はあまり変化しないので、もし試験機と実機における液滴の衝突条件が明確に分かるなら、それらを利用して実機における比較的短時間内の被害の定量的予測ができるはずである。

### 5. エロージョン速度評価尺度の合理化

以上の検討において、エロージョンとコロージョンの速度の評価尺度が一致するか否かに関与するのは(2)の条件であった。このことを根本的に考えると、エロージョン、コロージョンにかかわらず次のように度合いと速度を区別するのが合理的であるという結論に達した。

$$\text{被害度合い} = \frac{\text{被害度数}}{\text{攻撃度数}}, \quad \text{攻撃速度} = \frac{\text{攻撃度数}}{\text{時間度数}}$$

これらを用いると次の関係が得られる。

$$\text{被害速度} = \text{被害度合い} \times \text{攻撃速度} = \frac{\text{被害度数}}{\text{時間度数}}$$

今までコロージョン速度 ( $\text{mm}/\text{y}$ ,  $\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ) と称していたのは被害速度であり ( $\text{mm}$ ,  $\text{gm}^{-2}$  が被害度数,  $\text{y}$ ,  $\text{h}$  が時間度数), 固体粒子衝突エロージョン速度 ( $\text{g}/\text{g}$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) は被害度合いであったことになる(分子の  $\text{g}$ ,  $\text{m}^3$  が被害度数, 分母のそれらが攻撃度数)。被害度合いは材料特性であり、その種の攻撃によってその材料に生ずる相対的被害量を表す。攻撃速度は環境特性であり、環境の厳しさを表す。被害度合いと攻撃速度は互いに独立であるので、被害度合いの適用性、普遍性は大きい。すなわち、多くの環境に対応して多くの被害速度を測定する必要はなく、一つの材料については一つの被害度合いを測定しておき、それに、それぞれの環境に特有な攻

撃速度を掛けてやれば被害速度が得られる。

上述のように固体粒子衝突エロージョンの  $g/g$ ,  $m^3/m^3$  は被害度合いである。それなのに、その適用性、普遍性が著しく劣り材料の相対的耐久性さえも表し得ないのはなぜか？ それは不適切な攻撃度数を用いているためである。2種類の損傷機構が共存しているので複数の攻撃度数を用いる必要があるのかも知れない。

キャビテーションにおいても適切な攻撃度数は得られていない。しかし、図2のような衝撃圧分布が既に測定されているので、これから攻撃の大きさを代表する度数が抽出されるのは時間の問題であろう。また、キャビテーションおよび液滴衝突においては、被害速度が時間によって変化する問題がある。基本的な損傷機構は同一でも少なくとも損傷形態が異なっているため、各期間に分けて被害度合いを表す必要があるかも知れない。

以上の議論はコロージョンにもあてはまる。コロージョンにも適切な攻撃度数が見つかれば、いろいろな濃度、温度、あるいは流速に対してコロージョン速度をいちいち測定する必要はない。腐食機構が同一である限り、濃度、温度、流速に依存しない被害度合いを測定しておけば、後はそれぞれの環境の厳しさを代表する攻撃速度をかけてコロージョン（被害）速度を算出すれば良い。

## 6. エロージョン・コロージョンの評価尺度

本質的に機構が異なるエロージョンとコロージョンが同時に発生して引き起こすエロージョン・コロージョンの概念式として、筆者らは既に次式を提案している<sup>3)</sup>。

$$W_t = W' + F' \quad [g]$$

$$\dot{W}_t = \dot{W}' + \dot{F}' \quad [g/(cm^2 \cdot min)]$$

$W_t$  は全被害量、 $W'$  はエロージョンとコロージョンが重畳している条件下でのエロージョン被害量（金属片として脱離する量）、 $F'$  は同条件下のコロージョン量（イオンとして脱離する量）である。下側の式は上側の式を時間で微分したもので、速度の次元をもつ。これらの概念式がキャビテーション・エロージョン・コロージョンおよびスラリーエロージョン・コロージョンにおいて成立

していることも確認されている<sup>3)4)</sup>。

上記の概念式は、エロージョン・コロージョンの評価尺度には被害速度を用いなければならないことを明確に示している。なぜならエロージョンとコロージョンとでは機構が異なり、従ってそれぞれの被害度合いの評価尺度は当然異なるので加え合わすことができないからである。被害速度は加え合わすことができるが、そのとき得られる全被害速度は、当然のことであるがその特定の環境にしか適用することができない。

## 7. おわりに

エロージョンとコロージョンとで評価尺度が異なっているように見えたのは、前者では被害度合いを、後者では被害速度を用いているためであった。被害度合いにおいては、損傷機構が異なると攻撃度数が異なるのですべてのエロージョンに共通な評価尺度を用いることはできない。一方、被害速度を用いれば、適用性は小さくなるもののエロージョン、コロージョンにかかわらず共通の評価尺度で表すことができる（例えば  $mm/y$  でも、 $g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$  でも）。従ってエロージョン・コロージョン速度の表示には問題はない。

本誌の編集委員の中には比較文化論を能くする才質がいて、良いテーマを与えて下さったようである。お陰で筆者らが漠然としか意識していなかったエロージョンとコロージョンの相違点を明確にすることができた。賢慮に感謝の意を表すのしだいである。

## 文 献

- 1) Proc. 7th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, ed. by J. E. FIELD and N. S. CORNEY (1987)
- 2) ANSI/ASTM G32-77, "Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test", Annual Book of ASTM Standards, Part 10 (1980), p. 881
- 3) 松村昌信, 岡 良則: 防食技術, 31 (1982), p. 67
- 4) 岡 良則, 山脇正昭, 松村昌信: 防食技術, 35 (1986), p. 270