

【整番】 FE-29-RP-002	【標題】 レインエロージョンに対する限界流速
分類：流れ(流速)/種別：推奨	作成年月：H17.10/改訂：Ver0.0 (H18.11)
	作成者：N.Miyamoto

全 5 枚

1. 機器や管路では、場合によって流れの中に遊離したミスト分によってエロージョンが発生することがある。例えば、低圧蒸気タービンのブレードに凝縮した水滴が衝突してエロージョンが起きる。また、熱交シェルに入るベーパー中のミストがチューブに衝突してエロージョンが起きる。このレインエロージョンの発生については ASTM stp408 に簡便な判定式があり⁽¹⁾、旧来から各種の標準や基準類に採用されている。本 TS はこの簡易判定式を紹介するとともに、レインエロージョンに関してプレ的な情報を与えるものである。



2. レインエロージョンは、下記の式を満足するとき一応回避できる。

$$1 \text{ 回性の衝突に対し: } Y_D / (10^{-6} \rho_l C_l U_i) > 2f \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{連続性の衝突に対し: } \sigma_e / (10^{-6} \rho_l C_l U_i) > 2f \quad \text{----- (2)}$$

ここで Y_D = 液滴衝突を受ける固体壁の動的降伏応力 (kgf/mm²)、

σ_e = 液滴衝突を受ける固体壁の耐力限 〈 Endurance Limit 〉 (kgf/mm²)

ρ_l = 液体の密度 (kg s²/m⁴) = γ/g 、 γ = 液体比重量 (kg/m³)、 g = 重力加速度 (9.807m/s²)

C_l = 液体の音速 (m/s)、 U_i = 流体の衝突速度 (m/s)、 f = 安全率

(a) 液滴を含んだ気体の衝突が極くまれにしかない場合は(1)式によってよい。液滴が連続的に衝突する場合は(2)式による。なお、(1)式左辺が $2f$ を超えても表面に粗傷が残るだけで直ちに破損が起こる訳ではない。従って、エロージョンの発生の可否は(1)式ではなく(2)式によって判定する。

(b) 動的降伏応力 Y_D は、**高いひずみ速度で高速試験したときの降伏応力をいう。**

(c) 耐力限 (ASME でいう Endurance Limit) σ_e は、いわゆる**疲労限界応力**であって、具体的には、**最適化疲労曲線(S-N 曲線)で繰返し数 10⁸程度における応力全振幅**である。JIS や ASME などコードルールで与えられる設計用疲労曲線を使用すればよいが、その場合、応力振幅が片振幅(O-P)で与えられているので、それを 2 倍して使用すること。また設計温度によって補正のこと。

(e) 安全率 f はパラメータ(例えば U_i)の不確かさに応じて設定する。基準は 1.25 とする。

(d) なお、限界衝突速度 U_{ic} は(1),(2)式を変形して、

$$1 \text{ 回性の衝突に対し: } U_{ic} = Y_D / (2f \times 10^{-6} \rho_l C_l) \quad \text{----- (3)}$$

連続性の衝突に対し： $U_{ic} = \sigma_e / (2f \times 10^{-6} \rho_l C_l) \dots\dots\dots(4)$

管路壁やインターナルに衝突するミスト分を含んだ流れの流速は、この限界流速以下に抑えなければならない。

3. 常温(20℃)の水滴が連続的に衝突する場合の限界衝突速度を求めてみる。固体材料は炭素鋼(SS41)、ステンレス鋼(SUS304)および 70Cu-30Ni とし、それぞれの σ_e は 16、25、7kgf/mm² とする。

炭素鋼： $U_{ic} = 16 / \{2 \times 1.25 \times 10^{-6} \times (1000 / 9.807) \times 1450\} = 16 / 0.37 = 43.2 \text{ m/s}$

ステンレス鋼： $U_{ic} = 25 / 0.37 = 67.6 \text{ m/s}$

70Cu-30Ni： $U_{ic} = 7 / 0.37 = 18.9 \text{ m/s}$

安全率は 1.25 としている。安全率 1 のときはそれぞれ、54.1m/s、84.5m/s、23.7m/s となる。

【 解 説 】

A. エロージョンは流れ誘起局部腐食(Flow induced localized corrosion)とも呼ばれ、次の 3 つのタイプがよく知られている。

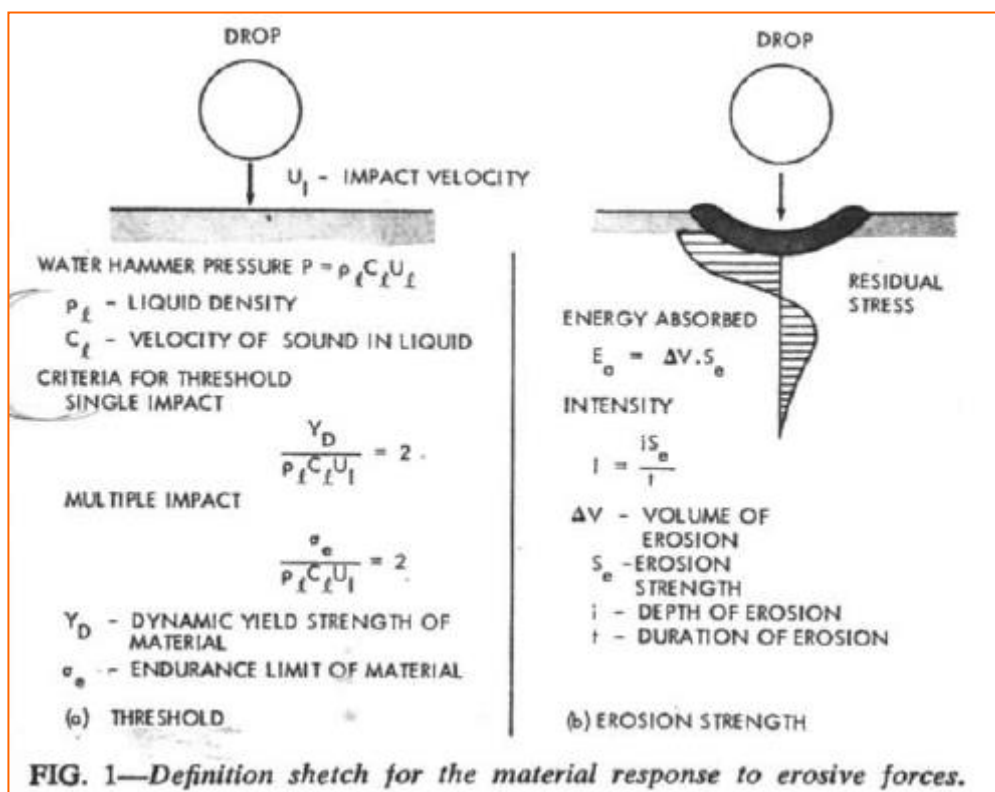
- ・ キャビテーション・エロージョン -----水車/船用プロペラ/ポンプ/弁類など
- ・ レインエロージョン(液滴衝突エロージョン) -----航空機/低圧蒸気タービン/熱交類など
- ・ サンドエロージョン(固体粒子衝突エロージョン) ----宇宙船/鉱山設備/スラリ・設備など

これらはいずれも流れに関係している。レインエロージョンとサンドエロージョンは流体速度に依存しているので、管路や機器内の局部流速を決める場合に重要となる。

B. 判別式(1)(2)は、ASTM stp408 の Thiruvengadam の論文に記載されたものである。論旨は

エロージョン発生条件 / 発生後の損傷量の予測

の 2 点で、これらはこの論文の Fig.1(下記)に要約されている。



この図の左がエロージョンの発生条件、右が損傷量の予測を示している。本 TS は左側の判別式によっている。(右側の“エロージョン発生後の損傷量の予測”は、耐エロージョン特性を表す材料物性として歪エネルギーに着目したものであるが、結局うまくいかなかったようである。以下割愛。)

C. 液滴衝突時に金属表面に生じる衝撃圧力は水撃圧力【 $\rho_l C_l U_l$ 】である。これを、

一回衝突に対し、延性破壊を念頭に動的降伏応力 Y_D 、

連続衝突に対し、高サイクル疲労破壊を念頭に耐力限(疲労限界応力) σ_e 。

と対比させたところ、 $Y_D/(\rho_l C_l U_l)$ 、 $\sigma_e/(\rho_l C_l U_l)$ ともほぼ 2 を数値にするのがわかった。この結果は Thiruvengadam の論文の Table 1 (下記)に示されている (但し $\sigma_e/(\rho_l C_l U_l)$ に関する結果のみ表示)。

TABLE 1—Threshold criteria.

Water-Hammer theory $\frac{\sigma_e}{\rho_l C_l U_l} \cong 2$; Engel's theory $\frac{\sigma_e}{U_l \rho_l^{1/2} E_m^{1/2}} \cong \frac{1}{\beta}$; $\frac{1}{\beta} = 2 \left(\frac{K_t}{E_m} \right)^{1/2}$

E_m = Young's modulus of material
 K_t = Bulk modulus of liquid

No.	Material	Liquid	Threshold Impact Velocity, U_l , ft/sec	Density of Liquid, ρ_l , slugs/ft ³	Velocity of Sound, C_l , ft/sec	Dynamic Yield Strength, Y_D , psi	Modulus of Elasticity, E_m , psi	Endurance Limit, σ_e , psi	$\frac{\sigma_e}{\rho_l C_l U_l}$	$\frac{\sigma_e}{U_l \rho_l^{1/2} E_m^{1/2}}$	$\frac{1}{\beta}$	Ref
1...	Copper	water	99 (30 m/sec)	value of $\rho_l C_l U_l = 5750$ psi (= 4 kg/mm ²)		21 500 (15 kg/mm ²)	16×10^4	12 000	1.85	0.25	0.26	10
2...	Steel	water	295 (90 m/sec)	$\rho_l C_l U_l = 17\ 100$ psi (= 12 kg/mm ²)		72 000 (50 kg/mm ²)	30×10^4	36 000	2.1	0.18	0.20	10
3...	Chromium Steel	water	400	1.94	4800	...	30×10^4	50 000	1.9	0.19	0.20	11
4...	Stellite 6	water	600	1.94	4800	...	36×10^4	80 000	2	0.20	0.20	11
5...	Stellite	water	1100	1.94	4800	...	36×10^4	80 000	1	0.10	0.18	7 (p. 4-4)
6...	Chromium Steel	water, single impact	800 to 900	1.94	4800	100 000	30×10^4	...	2	0.4	0.20	12
7...	Stellite 6	water, single impact	1100 to 1200	1.94	4800	150 000	36×10^4	...	2	0.2	0.18	12

上表の矢印部分は $[\sigma_e/(\rho_l C_l U_l)]$ に該当し、5. Stellite を除けば 1.85～2.1、およそ 2 になっている。なお、この表の Endurance Limit(耐力限)は全振幅になっている。例えば 2. Steel は、比較的強度の高い炭素鋼と思われるが、 $\sigma_e = 36000 \text{ psi} (25 \text{ kg/mm}^2)$ であるから、疲労限界の片振幅値 13 kg/mm^2 の約 2 倍即ち全振幅である。動的降伏応力は現状データ不足であるが、通常の降伏応力よりかなり高くなる。

Table 1 は実験結果を要約したものであるから、結局(1)および(2)式は実験式になるが、これは次のような材料力学上の意味があるものと思われる。

まず、 $[\rho_l C_l U_l]$ は前述のごとく液滴の衝突圧力であり、この圧力は計測によって確認されている。ところが、この圧力によって固体表面に加わる力は動的なものであるから、固体表面に生じる応力は $\sigma = \rho_l C_l U_l$ ではなく、これに動荷重係数 DLF を乗じた $\sigma = \text{DLF} \times \rho_l C_l U_l$ になる。DLF は 1.3～2.0 程度であり、負荷時間が短いと 2.0 に漸近する。

この表面応力 σ が動的な降伏応力に漸近すると(換言して動的歪が動的降伏歪に漸近すると)固体の表面がちぎれて損耗が起きる。一方この表面応力 σ は衝突サイクルに於ける全振幅でもあるからこれが全振幅で表される耐力限(疲労限界応力)に漸近すると高サイクル疲労が起きてエロージョンが進行する。

エロージョンの発生は固体材料の耐力限 σ_e に依存すると Thiruvengadam は言い切っている。これには異論が多いと思われるが、(2)式自身の有効性は広く認知されているようで、十分妥当性があると

考える。

D. 上記 Table 1 に **Engel' Theory** なるものが示されているが、これは、エロージョン発生のにきい値を

$$\sigma_e / (U_{ic} \rho_l^{0.5} E_m^{0.5}) = 1/\beta \quad \text{----- (5)}$$

で与えるもの。ここで U_{ic} =限界衝突速度(m/s)、 E_m =固体のヤング率(kg/m²)、 ρ_l =液体の密度(kg/m³)、 σ_e =耐力限(kgf/m²)、 β =定数である。この式の有効性もよく認知されており、事実、この式は実質的に(2)式に等しい。以下、これを例証する。

(5)式を変形して、 $U_{ic} = \beta \sigma_e / (\rho_l^{0.5} E_m^{0.5})$

一方(2)式の単位を(5)式に合せると共に U_i を限界衝突速度とすれば $\sigma_e / (\rho_l C_l U_i) = 2$ (as $f=1$)

これを变形して、 $U_i = \sigma_e / (2 \rho_l C_l)$

$U_{ic}=U_i$ において、 $\beta \sigma_e / (\rho_l^{0.5} E_m^{0.5}) = \sigma_e / (2 \rho_l C_l) \rightarrow 1/\beta = 2 C_l (\rho_l / E_m)^{0.5}$

液体音速は、 $C_l = (k_l / \rho_l)^{0.5}$ (但し K_l = 体積弾性率)であるから、

$$1/\beta = 2 C_l (\rho_l / E_m)^{0.5} = 2 (K_l / E_m)^{0.5}$$

液体が水の場合、 $K_l = 2 \times 10^{10}$ kg/m²、また固体が鋼の場合、 $E_m = 2 \times 10^{12}$ kg/m² であるから

$$1/\beta = 2 \times (2 \times 10^{10} / 2 \times 10^{12}) = 0.2$$

これは Table 1 の $1/\beta$ の値と略々合っているので、(5)式と(2)式は実質、同一ということが言える。

E. レインエロージョンには**液滴サイズの影響**が考えられる。例えば、

ごく微小なミストの衝突は壁面の境界層の影響を受けて緩和されるが、液滴径が 10 μ m 以上になると壁面境界の影響を受けずに直接、壁に当たるようになる^②。また、雨滴によるコロージョンテストについての ASTM レポートによれば“雨滴が壁に接近すると、雨滴～壁間の局部圧力が雨滴径の減少と共に増加して衝突速度がダウンし(それだけ衝突面圧が下がり)エロージョンが減少する。そして、雨滴径が 0.1mm 径以下ではこの傾向が顕著。また雨滴径が 1mm を越えると衝突速度の低下はみられない。0.1mm→1.0mmでは雨滴径が増えるにつれエロージョンが増加する。”

更に他のデータを付き合わせる必要があるが、ここでは、50 μ m(0.05mm)程度以下であれば、一応エロージョンフリーに近いような気がする。

F. エロージョンが発生しても寿命期間中の損傷量が許容内にあれば、設備として成立するので、**エロージョン発生後の損傷量の予測**は重要である。液滴衝突エロージョンについて現状、オーソライズされた予測法は聞かないが、このエロージョンはキャビテーション・エロージョンとよく似ていることからキャビ・エロで用いられている手法が流用できそうである。以下、参考としてキャビ・エロにおけるエロージョン量の予測法を文献(3)によって紹介しておく。

エロージョン量の予測方法には次の 2 種類がある。

① 現状の減肉深さから今後の減肉深さを予測する方法 (図 A 参照)

ステップ 1. 材料の加速振動試験から特性点 D_c (飽和ひずみ量)を割り出す。

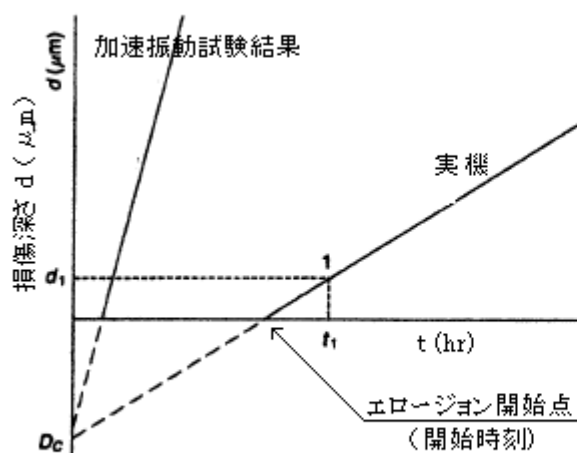
ステップ 2. ある期間運転した後の実機の計測から損傷深さを求め、これと特性点 D_c を結んで延長し、実機の損傷深さ－時間曲線とする。

② エロージョンが現れない潜伏期間を予測する方法 (図 B 参照)

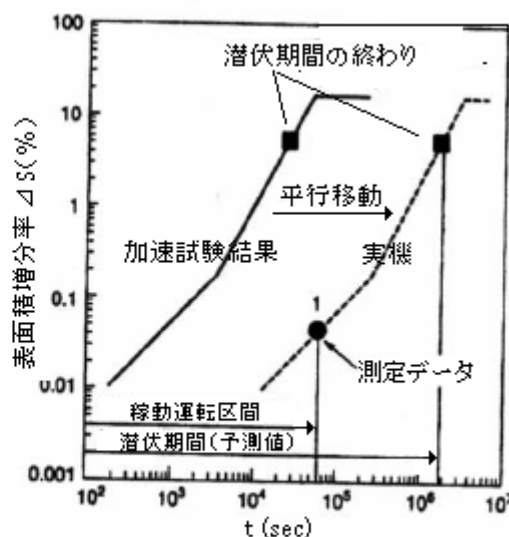
ステップ 1. 材料の加速試験から、上記の特性点 D_c を割り出し、更に表面積増分率($\angle S$)－時間(t)の関係を求める。

ステップ 2. ある期間運転した後の実機の計測から実機における ΔS を求め
図 B のように加速試験から得た $\Delta S-t$ 曲線を平行にスライドし
実機における潜伏期間の終わり(エロージョン開始)の点を求めて
潜伏時間を推定し、これを図 A のエロージョン開始点に割り
当てて、特性点 D_c と結んで実機の損傷深さ-時間曲線とする。

①は実機計測でエロージョンが進行していた場合に、②は実機計測で未だエロージョンが現れていない場合に用いられる。いずれにしろ、特性点 D_c 及び $\Delta S-t$ 関係を加速試験によって求めておく必要がある。なお、特性点 D_c 及び表面積増分率については文献(3)を参照のこと。



図A 特性点 D_c を利用した実機のキャビテーション損傷深さの推定法 <文献(3)より抜粋>



図B $\Delta S-t$ の関係を利用した潜伏期間の予測法 <文献(3)より抜粋>

G. 以上のエロージョン量の予測方法は精度が高いと思われるが、実際は実機計測など厄介事が多い。単純には下記のような関係がわかれば、実機計測に拠ることなくその使用条件にたいするエロージョン量を予測できる。

$$(\text{液滴衝突の強さ}) \propto (\text{固体材料の持つ耐エロージョン性}) \times (\text{時間当たりの損傷量})$$

文献(1)では、液滴衝突の強さとして、粒子の運動量($n \pi d^3 \rho_l U_i^2 / 12$)を挙げている。また文献(3)では耐エロージョン性として、損傷速度を下げるということで[硬さ]と[ひずみ硬化]を、エロージョンの初生を遅らすということで[破断時の伸び]を挙げている。しかし実際に、時間当たりの衝突回数 n や粒子径 d を割り出すのは難しく、また硬さ/ひずみ硬化の影響も定量化し難い。従って、未だ有効な相関式は得られておらず、実験データや実機の計測データを用いてエロージョン量を推定しているのが実状のようである。その場合、上式のような認識は役に立つだろう。

引用文献：

(1)ASTM stp408 「Erosion by Cavitation or Impingement」

“The Concept of Erosion Strength” by A.Thiruvengadam

(2)植田「気液 2 相流一流れと熱伝達」9.2 (養賢堂)

(3)松村ほか「エロージョン-コロージョン入門」第 5 章 (日本工業出版)