

E-06 液滴衝撃エロージョン (LD I : liquid droplet impingement erosion)

1. 概要

液滴（水滴、雨滴、油滴）が材料表面に衝突する時に発生する衝撃圧によって、材料が損傷を受ける現象である。蒸気配管や蒸気タービンでは、蒸気流中の蒸気が一部が水滴になることにより LDI が生じる。航空機では、雨滴により LDI を生じる。LDI は、一般的には、「潜伏期」、「最大エロージョン速度期」、「最終定常期」からなる。

2. 損傷を受ける材料

炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、その他すべての材料（鉄鋼材料、非鉄金属材料、セラミック、高分子材料等）

3. 損傷機構の詳細

液滴の衝突過程を図 1¹⁾ に示す。液滴が固体表面に衝突すると、まず、その瞬間に衝撃波が固-液の接触点で発生し (b)、不均一な圧力分布が急速に最大値に達するにすぎない、接触面は減速しながら拡大する。衝撃波は液体内へ音速 CL で伝播し

(c)、その後高度に圧縮された液体 (c の黒い部分) を残す。その後液滴は材料表面で潰れていく (d、e)。

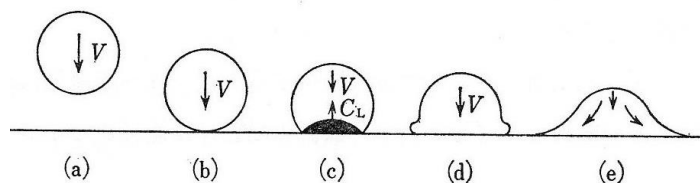


図 1. 液滴の衝突過程

圧縮域は、図 2²⁾ に示すように、液滴に接触する材料表面直下にも同様に生じる。この時発生する衝撃圧は、Springer によれば、次式で表すことが出来る。

$$\sigma = \rho U_L V$$

ここで、

σ = 衝撃圧、

ρ = 密度、

U_L = 衝撃波速度（音速）、

V = 液滴速度

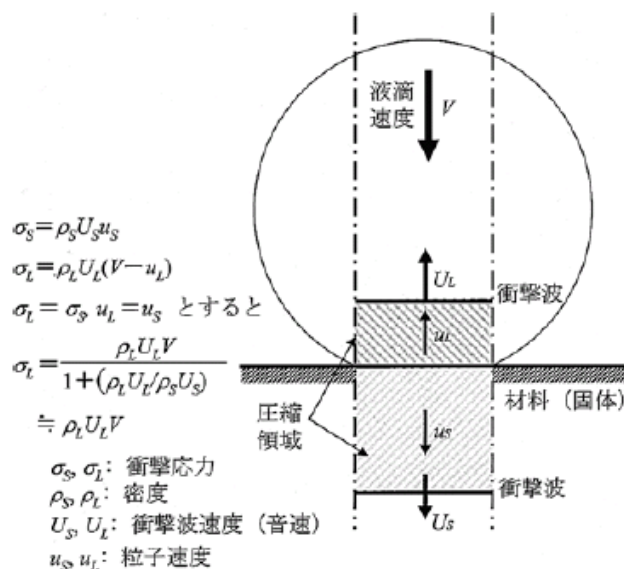


図 2. 液滴衝突による衝撃圧発生概念図

である。

延性を示す金属材料の代表的なエロージョン過程は、図3に示すように3過程からなる。最初は材料の損耗（離脱）が発生しない「Ⅰ、潜伏期」であり、この過程では、材料の離脱（除去）はないが、表面には小さな凹凸やくぼみが生じ、表面の不規則性が増大する。表面に加工層（塑性変形層）が形成される過程であり、

衝撃のダメージが材料表面に蓄積する。一定以上のダメージが材料内に蓄積すると、次の過程では、材料の損傷速度（離脱速度）が急速に増大し、損傷速度が最大となる「Ⅱ、最大エロージョン速度期」となる。この過程では、材料の離脱に基づき材料表面にはピットが形成され、やがて多数のピットが衝突表面全体を覆うようになり、表面があれてくる。次の過程では、材料表面があれてくるにつれて、くぼみに水が溜まり、液滴の衝撃を和らげる効果（クッション効果）等により損耗速度が減少し、やがて一定となる（Ⅲ、定常期）。材料の寿命の大部分は、Ⅲの期間で費やされる。

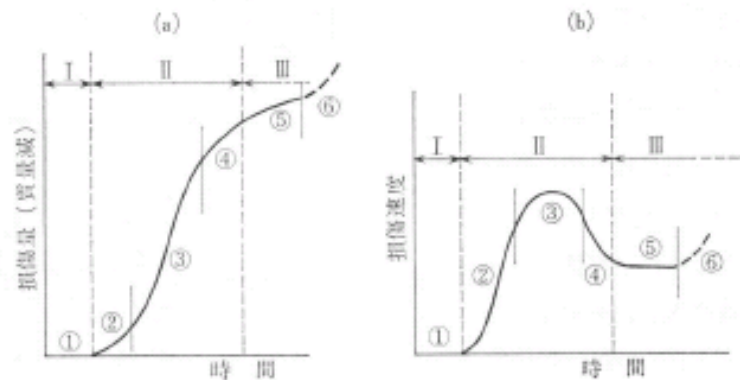


図3. 延性を示す金属材料の

(a) エロージョン曲線と損耗域（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）

(b) 損耗速度—時間曲線と損耗域（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）

なお、損傷に及ぼす、諸因子を次に整理する

- (a) 衝突速度：材料表面に液滴が直角に衝突する場合、損傷量は衝突速度の指数乗に比例し、次の式で表すことが出来る¹⁾。

$$m \propto (V - V_c)^b \quad R_{max} \propto (V - V_c)^d$$

ここで、 m ：質量減、 R_{max} ：最大損傷速度、 V ：衝突速度、 V_c ：衝突開始速度であり、 V_c は衝突開始速度で、この速度以下ではLDIは生じない。

b 、 d は材料定数であり、これらの値の報告例を参考に次に示す。

b については2（高強度合金）、2.4（アクリル樹脂）等の数値が報告されてる。

d については2.6（12Cr）、2.4（アクリル樹脂）等の数値が報告されてる。

V_c （m/s）については125（高強度合金）、120（12Cr）、208（アクリル樹脂）等の数値が報告されてる。

- (b) 衝突角度：LDIの場合、衝突角度の垂直成分が損傷を支配する。したがって、液滴の衝突方向と材料表面に垂直な線とのなす角を θ （投射角）とすると、 R_{max} （最大損傷

速度)は次のように表すことが出来る。

$$R_{max} \propto (V \cos \theta - V_c)^d$$

(c) 材料因子：硬さが硬いほど耐 LDI 特性も優れている。材料の選び方に関しては、4 で説明する。

なお、上記の説明では、LDI は機械的因子（衝撃圧）により材料が損傷していく現象とし諸因子の説明をしたが、水滴に腐食性がある場合は、LDI 現象において腐食の影響も考慮しなければならない。すなわち、水の腐食性も考慮する必要性が生じる。衝突速度が遅く、機械的因子が弱い一方、水滴が腐食性を持つ場合は、エロージョン・コロージョンの様相を呈してくる。

4. 損傷事例

発電プラントで蒸気系配管で水滴が形成される機器、オリフィス下流やドレン配管、蒸気タービンで LDI が生じる。例えば、復水器では、低圧タービン排気蒸気にて加速された水滴が管配列上の外周管に高速で衝突することにより、冷却管外表面が侵食を受けることがある。

航空機は雨滴により LDI を被る。

写真 1 は、発電用蒸気タービンの 12Cr 鋼翼に生じた LDI である。蒸気タービンでは、蒸気は高圧の過熱蒸気としてタービン内に入る。タービンを通過していく段階でエネルギーが仕事（発電）に変換され、蒸気は冷却して低圧蒸気となる。その過程で、水滴を生じる。水滴は高速の蒸気流にのり、翼面にぶつかり、LDI を生じる。対策として、LDI を生じやすい個所の翼には、耐エロージョンに優れている、ステライト盛りが行われている。

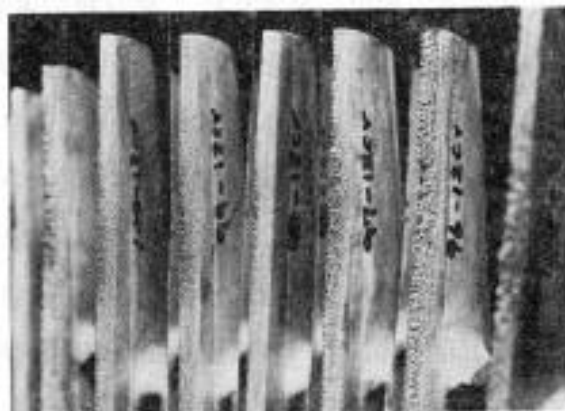


写真 1. 12Cr 鋼翼群の損傷

5. 対策

設計的な改善で液滴が生じないように工夫出来る場合、液敵が生じないように設計することが一番重要である。例えば蒸気系配管のオリフィスの場合は、オリフィスの絞り比を調節することにより、水滴の発生は防止できる。水滴の発生が避けられない場合は、LDI を防止するために保護エレメント、保護パイプ、邪魔板などが取り付けられる。発電設備の復水器や脱気器では、保護板等が LDI 防止に適用されている。水滴の発生を避けられない

場合は、LDI に対して優れた材料を使用する。

図4は LDI 速度と材料の硬さとの関係である。LDI の速度は、硬い材料ほど遅いが、材質にも依存する。同じ硬さで比べると、コバルト合金<鉄合金<焼結炭化物の順に LDI 速度は、速くなる。このことは、単に硬いだけでなく、材料の靱性も耐 LDI に重要な働きをしていることを示す。靱性と硬さの両者の特性を併せ持つ材料が、耐 LDI に優れていることになる。液滴が腐食性をもつ場合は、材料の耐食性も必要となる。実際の設備で生じる LDI は、比較的時間をかけて生じる場合がある。このような場合は、環境の腐食性も無視できない。実際の設備では、耐 LDI に優れた材料をコーティングして用いる場合がしばしば見られる。

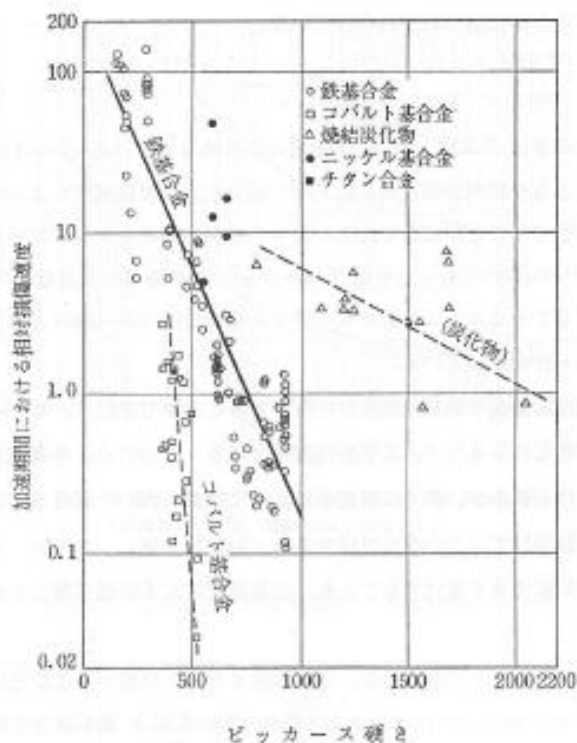


図4. LDI 速度と材料の硬さとの関係

6. 参考文献

- 1) (社)腐食防食協会編 編集委員長、北條英光 エロージョンとコロージョンー流体による材料の侵食ー、しょう華房 1987 年
- 2) 磯本良則：材料と環境 Vol.57 No.1 p15～21 (2008)