

微小スケール破壊解析による液滴衝撃エロージョンの評価

Evaluation of Liquid Droplet Impingement Erosion by Micro-scale Fracture Analysis

株式会社 東芝

北島 靖己 Yasumi KITAJIMA

萩原 剛 Tsuyoshi HAGIWARA

遠藤 哲央 Tetsuo ENDO

神保 雅一 Masakazu JIMBO

Several estimation methods based on round-robin experiments and/or actual plant experiences have been used to estimate erosion by liquid drop impingement (LDI). However, in recent years, due to developments on computer technology, it is possible to utilize large scale computational analyses. This study proposes a method for the evaluation of LDI erosion by means of computational fracture analysis using results (diameters, velocity, or speed of drops) of fluid dynamics analysis.

Keywords: Erosion, Liquid Droplet Impingement, Fracture Mechanics, Computational Analysis

1. 緒言

原子力プラント等の施設では、液滴が配管の内壁やタービン等の機器に衝突することで発生する液滴衝撃エロージョンによる減肉が問題となる。しかしながら、その減肉現象を精度よく評価する手法はなく、定期検査時に目視検査や非破壊検査等を実施しているものの、検査物量が多いことから、高コストの一因となっている。

こうした問題に対して、検査を実施する箇所を絞り込み、検査物量の低減を図るためには、減肉事象の詳細メカニズムの解明とメカニズムに基づくモデルによる詳細評価手法の確立が不可欠である。

こうしたメカニズムに基づくモデルによる詳細評価手法として、配管壁や機器への衝突速度、衝突角度等を定量的に求めることのできる流動数値解析による液滴飛散評価手法と、その結果に基づく微小破壊解析による減肉量評価手法を組み合わせた評価手法を検討した。本研究では後者について述べる。

2. 液滴衝撃エロージョンの減肉評価手法

2.1 既存評価法の検討

日本機械学会の『発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格』^[1]では、液滴衝撃エロージョンによる減肉評価式として、Heymann による評価式^[2]と Sanchez による評価式を取り上げている。また、これ以外にも Heymann 則同様に複数の試験結果から評価式を提案しているものに、Springer によるもの^[3]がある。ここでは、これらの評価手法について検討する。

Sanchez による評価式は減肉速度 m' [kg/h] を求めるものである。

$$m' = \frac{C \rho m'_{tot} (1-x) V^4 F_e F_h}{\rho^2 \varepsilon_c^2 A_c} \quad (1)$$

ここで、 C は減肉係数、 ρ は液体の密度、 m'_{tot} は蒸気の質量流量、 x は蒸気のカオリティ、 V は衝突速度、 F_e はエントレインメント率、 F_h はヒッティング係数、 p は酸化皮膜硬さ、 ε_c は酸化皮膜の破壊に必要なひずみ、 A_c は液滴が衝突する領域の面積としている。個々の液滴を考慮せず、蒸気流量、カオリティ、エントレインメント率から蒸気中の液滴量を求め、さらに形状ごとに異なるヒッティング係数をかけた分の液滴が衝突するものとしている。

Heymann 則はラウンドロビン試験のデータをまとめたものであり、減肉体積と総衝突液滴体積の比である

R_e を以下の式により求める。

連絡先: 北島靖己、〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8、株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター、電話: 045-770-2368、
e-mail: yasumi.kitajima@toshiba.co.jp

$$\log(R_e) = 4.8 \log(V) - \log(NER) - 16.65 + 0.67 \log(d) + 0.57J - 0.22K \quad (2)$$

ここで、 V は衝突速度、 NER はエロージョン耐性であり、材質の影響を基準材との比で求めたものである。 d は液滴径、 $J=0$ （液滴衝撃の場合）or 1 （ジェットエロージョンの場合）、 $K=0$ （衝突面が平面の場合）or 1 （衝突面が曲面の場合）である。

Springer 則も複数の試験データをまとめたものであり、こちらは液滴衝撃エロージョンを疲労破壊とのアナロジーで定式化している。

$$\alpha = 73.3 \times \rho_s d^3 \left\{ \frac{(1-2\nu)\rho_l C_L V \cos\theta}{4\sigma_u(b-1)} \right\}^4 \quad (3)$$

ここで、 ρ_s 、 ν 、 σ_u 、 b はそれぞれ部材の密度、ポアソン比、引張強さ、疲労特性パラメータであり、 d 、 ρ_l 、 C_L 、 V 、 θ はそれぞれ液滴の径、密度、液中での音速、衝突速度、衝突角度である。

上記3評価則（及び破壊力学解析を用いた場合の評価法）の比較を Table-1 に示す。

Sanchez 則では液滴径による影響を考慮せず、減肉速度のみを求めて、潜伏期間を評価しない。また、材質の影響として、酸化皮膜厚さや酸化皮膜破壊ひずみ等、特殊な材料パラメータを用いており、任意の評価対象材料について適用するのは困難である。

Heymann 則^[2]では材料の影響を S_e というパラメータと

し、規準材（SUS316）の場合を 1 として、他の材料の値を与えているが、これも当該文献にない任意の評価対象材料について適用するのは困難である。

Springer 則^[3]は密度や引張強さ、ポアソン比等、任意の評価対象材料に関して入手しやすいパラメータを用いており、これら3則の中では使いやすいモデルを考えられる。しかし、ラウンドロビン試験で取り上げられていない材料や衝突回数範囲への拡張が可能かどうかは検討の必要がある。

また、上記3則はいずれも経験則や試験則であり、流動側詳細解析により得られた液滴の液滴径、衝突速度、衝突角度を入力パラメータとするのが妥当かどうかについても検討の必要がある。

以上のことから、本研究では、流動側詳細解析より得られるパラメータを入力とする減肉評価の部分弾塑性破壊解析に置き換えることで、精度の向上を図る。

2.2 微小スケール破壊解析

ここでは、微小スケール破壊解析の概念について説明する。

本解析には、汎用弾塑性構造解析コードである ABAQUS を用いた。解析自体は弾塑性解析であり、荷重ステップごとに塑性変形・塑性ひずみが残るため、累積損傷現象を模擬することができる。Fig. -1 に示すように、不連続境界での結合力を節点の多点拘束により模擬している。

Table-1 減肉評価法の比較

	Sanchez則		Heymann則		Springer則		解析手法	
発生	蒸気質量流量 クオリティ エントレインメント率	m'_{tot} [kg/h] (1-x) F_e	(衝突液滴総体積) ジェットor液滴 液滴径	J d	衝突回数 液滴径	n [個] d	入射回数 液滴径	n [個] d
飛散	液滴密度 衝突速度 ヒッティングファクタ	ρ V^4 F_h	衝突速度 平面or曲面	V (4.8 logV) K	液滴密度 液中音速 衝突速度 衝突角度	ρ C V^4 θ	液滴密度 液中音速 衝突速度 衝突角度	ρ C V θ
減肉	減肉係数 酸化皮膜厚さ 酸化皮膜破壊ひずみ 衝突面積	C p ϵ_c A_c	比較値(SUS316で1)	S_e	材料密度 引張強さ ポアソン比 疲労特性	ρ_s σ_u ν b	材料密度 弾性係数 ポアソン比 破壊靱性	ρ_s E ν J
求める値	m' : 減肉速度 [kg/h]		$R_e S_e$: 減肉体積 / 衝突液滴総体積		n_1 : 潜伏期間 [個] α : 減肉率 [kg/個]		n_1 : 潜伏期間 [個] α : 減肉率 [m^3 /個]	
特徴	設計向きだが、 現象によっては適用困難 $m'_{tot}(1-x)F_e$ で液滴量を評価 液滴径を用いない 潜伏期間を求めない		試験データの整理 ジェットと液滴を包含 衝突液滴総体積を用いる 液滴径を用いる 潜伏期間を求める		試験データの整理 減肉は疲労破壊でモデル化 衝突液滴総数を用いる 液滴径を用いる 潜伏期間を求める		流動解析と構造解析を用いて評価 液滴発生評価が確立していない 衝突液滴総数を用いる 液滴径を用いる 潜伏期間が求まる	

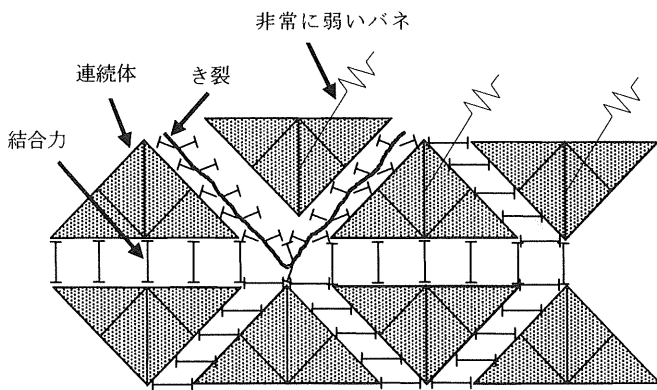


Fig. -1 微小スケール破壊解析モデルの概念

荷重ステップごとに各結合点での J 積分を計算し、この値が破損クライテリアを越えた時点で、多点拘束を書き換えて節点結合を解除する。これにより、微小連続体の節点結合がすべて外れ、周囲から切り離された場合、弱いバネによって系外へと排出することで剥離を模擬する。

3. 液滴衝撃エロージョン解析

ここでは、上記微小スケール破壊解析モデルを用いた液滴衝撃エロージョン解析を試みた。

3.1 解析条件

本解析の比較対照として、Fig-2 に示す材料力学ハンドブック^[4]所載の試験データを用いた。

衝突速度と衝撃圧の関係は水撃とのアナロジーにより以下の式で求められる (Springer 則の項も参照)。

$$P = \rho_l C_l V \cos \theta \quad (4)$$

この関係から Fig. -2 の縦軸を衝撃圧に換算し、外挿したグラフを Fig. -3 に示す。Fig. -3 から、約 3000 回の衝突で破損が生じる衝撃圧を求めると、500 [MPa] 程度となる。

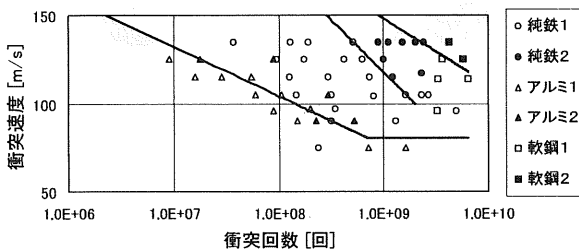


Fig. -2 衝突回数と衝突速度の関係

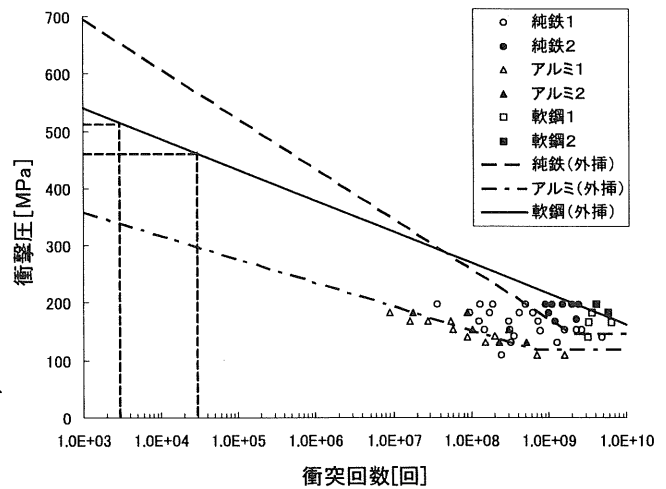


Fig. -3 外挿図

Fig. -4 に示すように、液滴径 120 [μm] の液滴が部材表面に垂直 ($\theta=90^\circ$) に衝突する場合を仮定した。微小破壊モデルの表面 4 要素に対し、500 [MPa] の衝撃圧に相当する表面圧力を、衝突速度と液滴径から求められる衝突時間で負荷する動解析を行った。除荷過程は静解析とし、負荷過程と除荷過程を 1 回の衝突とし、衝突回数が 5000 回に達するか、剥離クライテリア $1/2 \times J_{IC}$ (軟鋼の破壊靱性値 J_{IC} として 12 [kJ/m²] を使用) に到達するまでの解析を実施した。

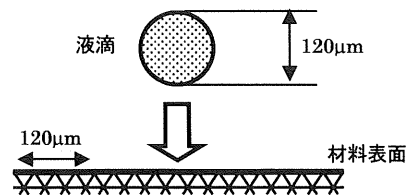


Fig. -4 液滴衝突概念図

3.2 解析結果

次頁 Fig. -5 に各 J 積分計算点における J 積分値の変化を示す (図の 1 区画は 4 要素で構成されている)。図中、繰り返し衝突解析によって破損クライテリアに達した位置の数字は太字下線付きで示してある。

J 積分値は上辺に衝撃圧を受ける 2 つの要素において高い値を示し、衝突回数 3798 回 (当初予想の 3000 回より +27% の衝突回数) で J 積分 $\geq 1/2 \times J_{IC}$ のクライテリアに達した。第一層にあるが、直接衝撃圧を受けない要素においては、点 1-1 (1) を除いては発生する J 積分値は非常に低い値となっている。

また、代表的な衝突回数における変形及び応力コンター図を Fig. -6 に示す。これによると、衝突回数が増えるに従い、部材表面が微小変形を起こしているのが判る。

以上より、この条件で多数回の衝突解析を実施した場合、3798 回の液滴衝突で表面の 2 要素が剥離するという結果となった。

4. 結言

汎用弾塑性構造解析コード ABAQUS を用いた微小破壊解析モデルの、エロージョン解析への適用性を検討した。

- ・文献データと比較し、J 積分値を用いた破壊クライテリアを 2 通りに変化させて液滴衝撃を模擬した衝撃圧を繰り返し与えた解析により、損傷が生じるまでの衝突回数において、文献データ外挿値と比較して ±27% 程度の誤差で予測することができた。
- ・表面変位の分布では、要素の方向性依存によるものと考えられる問題が生じた。要素形状の選択も含めた改良を検討する。

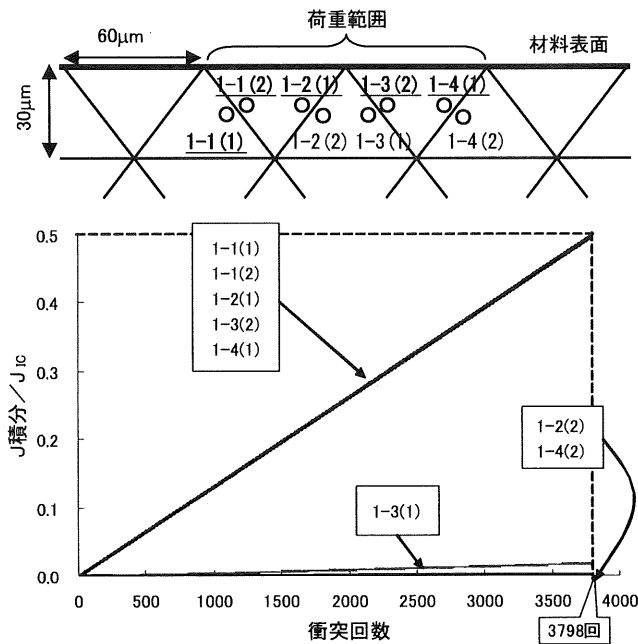


Fig.-5 解析結果

- ・現状では、実用的な計算時間で評価可能な衝突回数は 10^4 回程度が上限であるが、実機減少では $10^7 \sim 10^8$ 回程度の衝突回数を評価する必要があるため、計算の加速を検討する。

参考文献

- [1] 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (2005 年版) (増訂版)、JSME、2005.
- [2] Heymann, Frank J., CONCLUSIONS FROM THE ASTM INTERLABORATORY TEST PROGRAM WITH LIQUID IMPACT EROSION FACILITY, Proc 5th Int. Conf. Erosion by Liquid and Solid Impact, 1979, 20-1 to 20-10.
- [3] Springer, George S., Erosion by Liquid Impact, Scripta Publishing Co., 1976.
- [4] 材料力学ハンドブック、日本機械学会著、丸善。

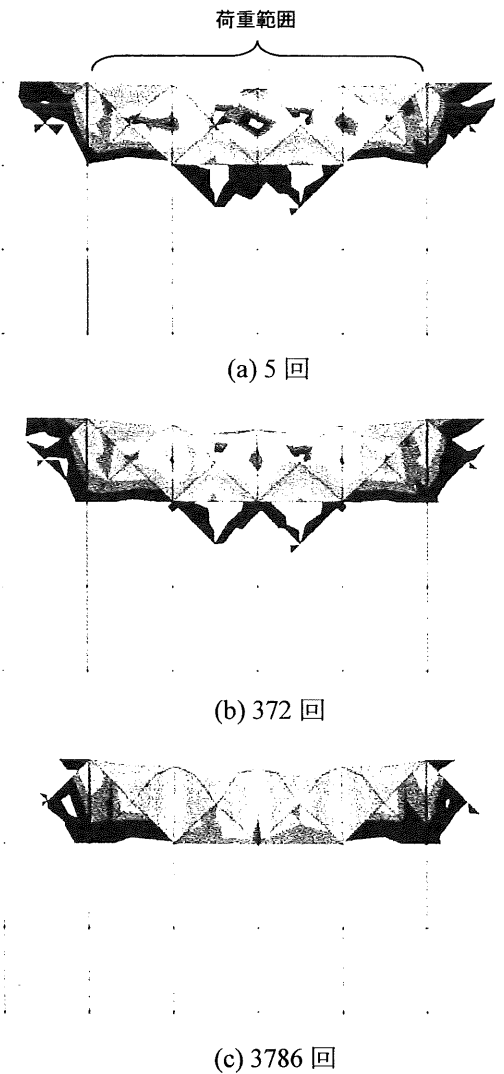


Fig.-6 変形状の例