

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20446

研究課題名（和文）衝撃波計測による減肉分布推定技術の開発

研究課題名（英文）Development of erosion modeling technology with shock wave measurement

研究代表者

藤澤 慶（Fujisawa, Kei）

長岡技術科学大学・産学融合トップランナー養成センター・特任講師

研究者番号：60906080

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、液滴衝突エロージョンの詳細なメカニズムの解明とモデルの構築を行った。衝撃波のモデリングのため、圧縮性混相流シミュレーションを行い、液滴が衝突する材料の表面状態と衝撃力の関係を明らかにした。また、減肉実験を行い、液滴衝撃エロージョンの進行メカニズムを明らかにした。さらに、衝撃波計測による減肉分布推定に向けた減肉量分布モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速な液滴衝突によって生成される減肉現象である液滴衝撃エロージョンは、原子力・火力発電所の配管で発生することが知られている。液滴衝撃エロージョンの発生により配管に貫通穴を形成するため、大規模な事故に発展する可能性がある。本研究で取り組んだ、液滴衝突時に発生する衝撃波のモデリングと減肉面の再構築による減肉分布推定技術は、原子力・火力発電所における配管の安全管理に役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the detailed mechanisms of the high-speed liquid droplet impingement erosion were investigated and models were developed. For modeling the shock wave caused by the high-speed liquid droplet impact, compressible multiphase flow simulations were performed, and the relationship between the surface condition of the target material and the droplet impact force was clarified. Furthermore, the progression mechanism of the high-speed liquid droplet impingement erosion was clarified through erosion test, and a model was developed to estimate the erosion distribution by shock wave measurements.

研究分野：機械工学

キーワード：液滴衝撃エロージョン

### 1. 研究開始当初の背景

近年、原子力・火力発電所の配管に貫通穴を形成する「液滴衝撃エロージョン」が問題となっている。液滴衝撃エロージョンとは、配管内の高速な気流中に含まれる液滴が配管壁面へ衝突し、配管壁面に衝撃波が発生することで、配管材料が物理的に削られる減肉現象である。これにより大規模な事故に発展する可能性があることから、原子力・火力発電所の配管の安全管理に向けた減肉分布推定技術が求められている。

これまでの研究により、液滴衝突時に発生する衝撃波が減肉の進行に重要であることが分かっている。しかし、液滴が衝突する壁面が液膜で覆われている状態での衝撃波の挙動は十分に解明されていないため、現在のところ有効な減肉の推定技術は確立されていない。本研究では、液滴が材料に衝突する際に発生する衝撃波に着目し、液滴衝突により発生する衝撃波のモデリングおよび減肉面の再構築を行う。減肉面の空間平均的な変動だけでなく、局所的な変動をモデル化する減肉分布推定技術を開発することで、原子力・火力発電所における実配管の安全管理に活用できると考えられる。

### 2. 研究の目的

液滴衝撃エロージョンの進行時、減肉面は液膜で覆われると考えられている。実際、減肉量の増加に伴い液膜が厚くなることで、減肉速度が減少することがこれまでの研究でわかっている。したがって、減肉量の推定には、液膜厚さの評価が重要である。本研究では、減肉深さが液滴直径よりも十分に大きい・減肉深さが液膜厚さと等しいという仮定の上で、数値シミュレーションにより高速液滴衝突現象における液滴・衝撃波挙動を解析した。また、液膜厚さを変えた計算により、液膜厚さの衝撃力への影響を評価する。最終的には、減肉実験により得られた局所減肉速度分布をモデル化することで、衝撃波計測による減肉面の推定を目指す。

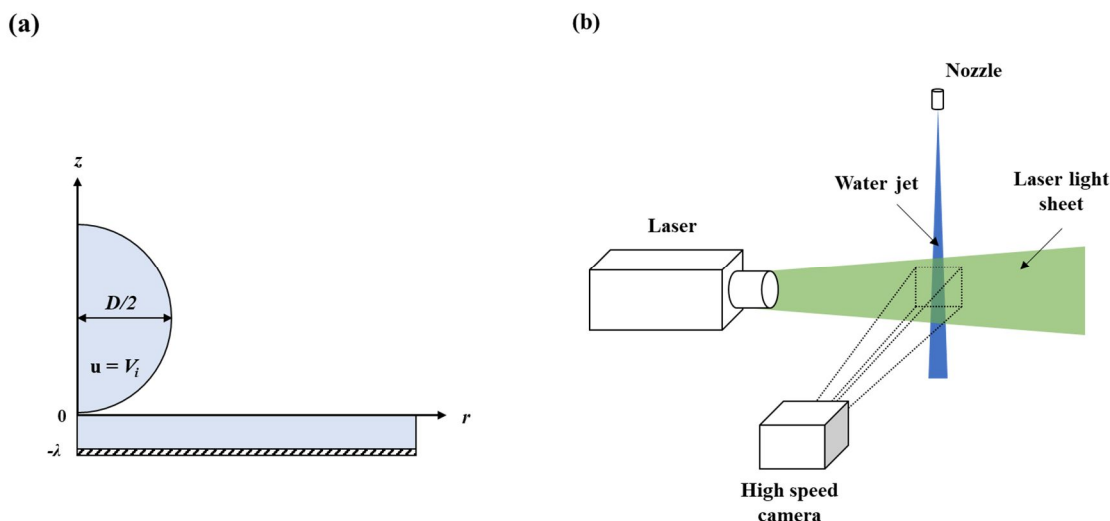


図 1 (a) 計算条件、(b) 流速計測システム

### 3. 研究の方法

#### (1) 液滴衝突により発生する衝撃波のモデリング

本研究では、圧縮性混相流シミュレーションを実施することで、高速な液滴衝突によって生成される衝撃波の挙動・減肉面に形成される液膜の衝撃力への影響について考察する。なお、本研究では、軸対称 Euler 方程式をベースとした支配方程式を用いている。図 1(a)に計算条件を示す。液滴直径を  $D$  としたときに、厚さ  $\lambda/D = 0.1 \sim 0.4$  の液膜が存在すると仮定して計算を行った。液滴衝突によって生じた衝撃力の時間変化を観察することで、液膜厚さの衝撃力への影響を評価した。

#### (2) 減肉面の再構築

高速液滴衝突によって生じる衝撃波および減肉量を計測するため、力センサと金属プレートからなる減肉センサを新たに開発した。減肉センサをノズルから 10cm の位置に設置し、ウォータージェット減肉実験を実施した。減肉実験後に、プレート体積の変化から空間平均減肉速度を計測した。また、プレート表面に発生した減肉分布の表面粗さ計測を行うことで、局所減肉速度分布を計測した。これらの実験により、液滴衝撃エロージョンの進行メカニズムを考察した。なお、ウォータージェットの衝突速度は直接相互相関法を用いた PIV (粒子画像流速測定法) によ

る流速計測システムにより計測している（図 1(b)）。PIV で用いたレーザーライトシートの厚みは 1mm とし、作動流体として 21 ° の水を用いた。

ウォータージェットの衝突速度が 93.7 m/s の減肉実験によって得られた空間平均減肉速度の衝突流量  $Q_t$  に対する変化を図 2 に示す。なお、縦軸は減肉速度  $E_r$  を表し、横軸は衝突流量  $Q_t$  を表す。 $Q_t$  が 0.03 以下の場合、空間平均減肉速度にわずかな変動があるものの、大きな変化は確認できない（ $a_1$  図 2）。この減肉状態は、減肉現象が体積変化として観察できないことから incubation stage と呼ばれている。 $Q_t$  が 0.03 以上になると、空間平均減肉速度は急激に上昇を開始する（ $a_2$  図 2）。最終的には、最大値  $E_r = 0.048 \text{ l/m}^2$ （ $a_3$  図 2）に達した後減少する。この実験結果によると、 $Q_t = 0.006 \text{ m}^3$  と  $Q_t = 0.04 \text{ m}^3$  の間で大きく空間平均減肉速度が変化していることがわかる。本研究では、 $Q_t = 0.006 \text{ m}^3$  と  $Q_t = 0.04 \text{ m}^3$  における局所減肉速度分布計測とそれぞれモード解析を行った。また、計測されたデータにより局所減肉速度分布のモデルを構築した。

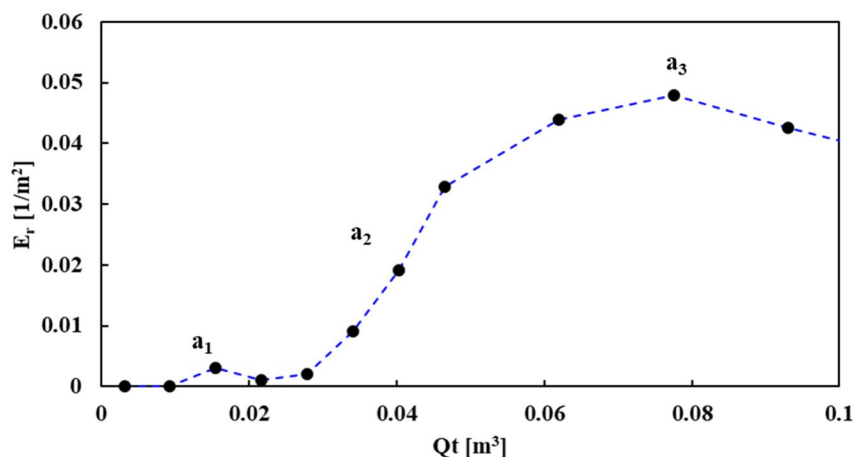


図 2 空間平均減肉速度の時間変化

#### 4. 研究成果

##### (1) 液滴衝突により発生する衝撃波のモデリング

衝突速度が 120 m/s の液滴衝突による衝撃力の時間変化を図 3 に示す。なお、縦軸は液滴衝撃力の理論値  $F_i$  で無次元化した衝撃力を表し、横軸は液滴衝突時間によって無次元化した時間を表す。液滴に液膜が衝突した時間を  $t/t_d = 0$  とする。液滴衝突直後には、衝撃力が発生していないことがわかる。これは、衝撃波が液膜中を伝搬している間は、壁面圧力が上昇しないためである。そのため、液膜が厚くなるほど衝撃力が発生しない時間は増加する。また、液膜厚さに依らず衝撃力に強い振動が生じていることが確認できる。これは、液滴衝突時の衝撃波が壁面と液滴界面で反射することによって発生したものと考えられる。いずれの液膜厚さの場合においても、最大で理論的に得られる衝撃力の 2 倍程度に達しているが、液膜厚さの増加に伴いピーク値が増加していることがわかる。これらの結果から、液滴衝突時に発生する衝撃力の変化により液膜厚さ・減肉深さが評価できることがわかった。

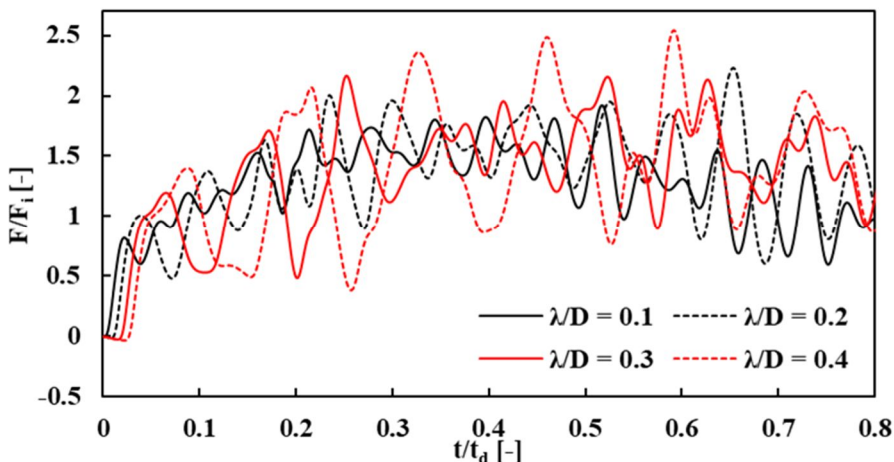


図 3 液滴衝突後の衝撃力の時間変化

## (2) 減肉面の再構築

図4に  $Q_t = 0.006 \text{ m}^3$  における局所減肉速度分布とその一次モードを示す。なお、縦軸は減肉速度  $E_r$  を表し、横軸は衝突中心からの距離を表す。計測された局所減肉速度分布およびその一次モードは、ほとんど凹凸のない分布となっており、衝突中心においても減肉は確認されなかった。また、局所減肉速度分布は  $E_r = 0.0 \text{ 1/m}^2$  に対して対称な分布である。この傾向は、 $Q_t$  が  $0.03$  以下の incubation stage の局所減肉速度分布においては、衝突流量に依らず同じである。図5に  $Q_t = 0.04 \text{ m}^3$  における局所減肉速度分布とその一次モードを示す。 $Q_t = 0.006 \text{ m}^3$  の場合と異なり、局所減肉速度分布の  $E_r = 0.0 \text{ 1/m}^2$  に対する対称性が崩れていることがわかる。このことは、減肉開始後においては、凹部の形成が支配的であることを意味する。凸部の形成に関しては、液滴衝突時に発生する衝突方向と垂直方向のサイドジェットと呼ばれる高速な流れによって除去されたと考えられる。これらの結果から、局所減肉速度分布の非対称性は減肉進行と強い相関があると考えられる。

図5に計測データにより減肉面を再構築した減肉速度分布モデルを示す。構築したモデルが局所減肉速度分布のピークや負の減肉速度分布を再現できていることがわかる。局所減肉速度分布のピークに関しては、相対誤差4%以下であることから、構築したモデルの有用性が確認された。しかし、局所減肉速度分布における細かい凹凸は再現できていないことがわかる。今後、モデルの高次精度化による高精度減肉分布推定技術の開発が期待される。

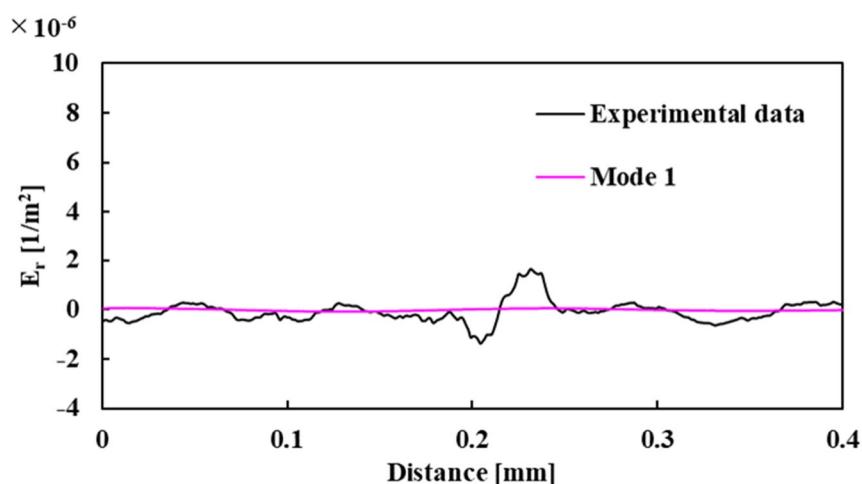


図4 衝突流量  $Q_t = 0.006 \text{ m}^3$  における局所減肉速度分布

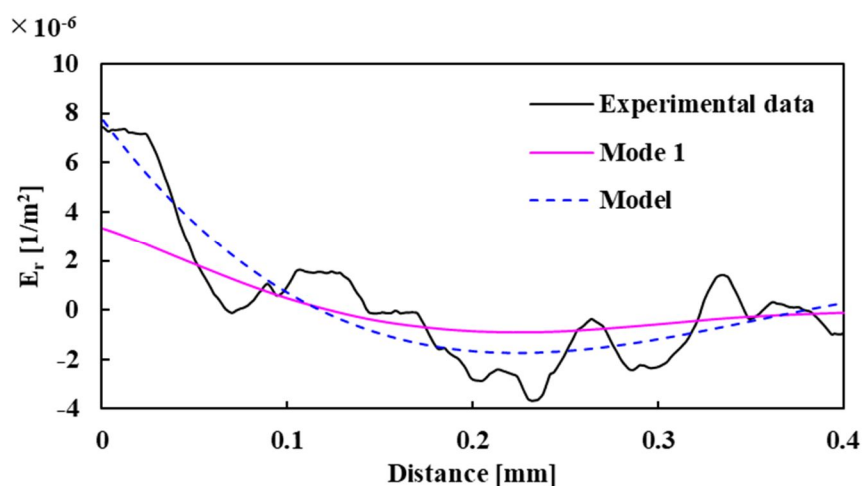


図5 衝突流量  $Q_t = 0.04 \text{ m}^3$  における局所減肉速度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kei Fujisawa	4. 巻 183
2. 論文標題 Time-dependent force in high-speed liquid droplet impacting on a wet wall	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2022.109655	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kei Fujisawa	4. 巻 528
2. 論文標題 On erosion transition from the incubation stage to the accumulation stage in liquid impingement erosion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Wear	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.wear.2023.204952	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kei Fujisawa	4. 巻 175
2. 論文標題 Simulation of lateral jet formation in high-speed liquid droplet impingement and its impact on crater side wall.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2022.109202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Fujisawa, K.
2. 発表標題 Mechanisms for generating impact force in high-speed liquid droplet impacting on a wet wall
3. 学会等名 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fujisawa, K.
2. 発表標題 Experimental investigation on the initiation of low speed liquid droplet impingement erosion.
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Fujisawa
2. 発表標題 On the dynamics of high speed lateral jet in high-speed liquid droplet impingement
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部第75期総会・講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関