

路面洗浄システムにおける水噴流反力に関する実験的検討

An Experimental Study of Water Jet Flow Reaction Force in Road Surface Washing Systems

○流田裕介*, 遠藤央*, 柿崎隆夫*

○Yusuke Nagareda*, Mitsuru Endo*, Takao Kakizaki*

*日本大学工学部

*College of Engineering, Nihon University

キーワード： 除染 (Decontamination), ロボット (Robot), 力制御 (Force control),
噴流 (Jet flow), 反力 (Reaction force)

連絡先： 〒 963-8042 福島県郡山市田村町徳定中河原 110 号館 101 号室日本大学工学部機械工学科
サステナブルシステムズデザイン研究室

流田裕介, Tel.: (024)956-8784, Fax.: (024)956-8784, E-mail: nagareda.yuusuke.ss.lab@gmail.com

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災時に発生した東京電力福島第一原子力発電所（以下，第一原発）の事故により，広範囲に放射性物質が拡散した．このため福島県内では各地で除染作業が進められてきた (Fig.1).

事故直後より，政府は除染を推進するとしているが¹⁾，その進捗は必ずしも十分ではない．その理由の一つに，人手による除染作業が負担の大きい重労働という点にある．そのため著者らはロボット技術を用いた除染システムを提案してきた．これまで，はつり加工を利用した路面洗浄ロボットを試作し，効果的な除染のためのノズル位置制御法について明らかにした²⁾．

本研究では市販のノズル付高圧洗浄機を使用した．環境省ガイドラインに沿った除染方法では，6 割程度の除染効果であることが報告されている．一方，本研究ではこれまでノズルを除

染対象から 10~20mm の位置に位置決めすることで，9 割程度の除染が得られることを確認している²⁾．この方法では，水噴流をウォータージェットとして利用し，除染面を微細にはつり加工する．

一方，光学式センサにより，ロボットノズル



Fig. 1 除染作業の例 (<http://www.asahi.com/special/10005/TKY201112040313.html>) から引用

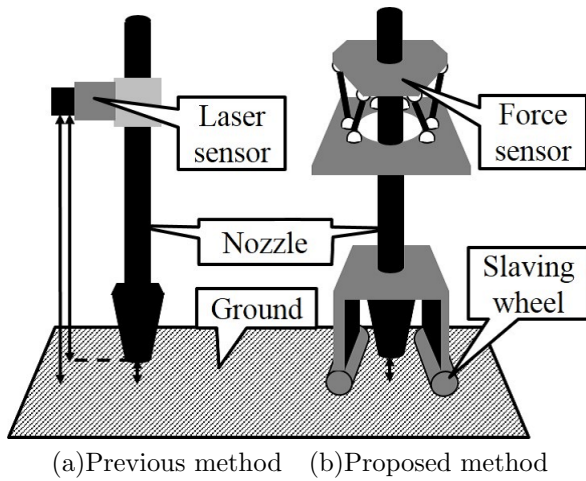


Fig. 2 洗浄ノズル目標間距離測定法

と除染面との距離計測が必須となるが、洗浄水の漏水が著しい場合には、計測精度が劣化する場合のあることが明らかになった³⁾。そこで本研究では、ノズルのガイド輪を路面に接触させ、その反力に基づいてノズルと路面間距離を保持する除染方法について提案する。その予備段階として、ノズルからの水噴流による反力について実験的に検討した。

2. ノズル位置の制御法

Fig.2(a) に既報でのシステムの構成を示す。レーザーレンジファインダで路面までの距離を測定し、ノズル位置を制御する。汚染水吸引回収型ノズルを導入したこの方式では、ノズルからの漏水が少量でもある場合、その漏れた水が外乱となり位置決め精度が劣化する。

そこで本研究では新たに Fig.2(b) に示すように、路面接触用の従動輪を導入し、そこへノズルを固定することとした。この方式では、高さ方向に変動する路面に一定の力で従動輪を押し付けるように制御することでノズル先端と除染面との距離を一定に保持する。

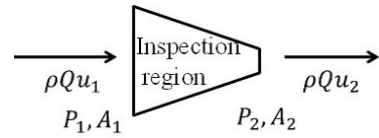


Fig. 3 流れの挙動に関する検査面モデル

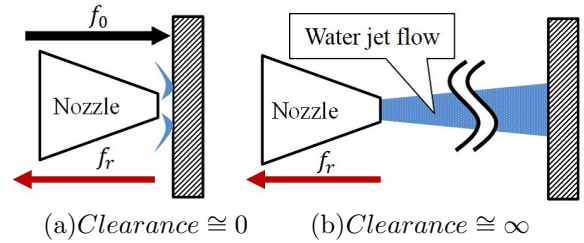


Fig. 4 ノズルからの噴流による反力モデル

3. 水噴流による反力の見積もり

Fig.2(b) に示す構成においては、路面から従動輪の反力に加え、ノズル噴流の噴出圧および反力がノズル固定部に加わる。以下では、この噴出圧および反力の影響について実験的に検討した。

3.1 水噴流による反力モデル

一般に、噴流によりノズルに作用する力は、流路に設けた検査空間を設けてその前後の圧力および流体の運動量から計算できる。

Fig.3 に水噴流の検査面を模式的に示す。 ρ は水の密度、 Q は流量、 P は圧力、 A は断面積、添え字 1, 2 は入口、出口における物理量であることを示す。このモデルは流れ方向に 1 次元としており ρQu は流体の運動量となる。

Fig.4 はノズルと噴流、洗浄面を模式的に示したものである。(a) はノズルが極めて近い場合、(b) はノズルが路面から十分に離れた場合を示す。まず、(a) のケースでは、反力 f_r は近似的に次式で与えられる。

$$f_r = -\rho Qu_2 \quad (1)$$

一方、(b) のケースでは流れ方向を正として作用力は次のように近似される。

$$f_r = \rho Q(u_1 - u_2) + P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (2)$$

ここで、本研究でのノズルは絞りの状態であるため、 $u_1 \ll u_2$, $P_1 > P_2$, $A_1 > A_2$ とみなせ、第1項が支配的ならば $f_r < 0$ となり反力となる。

3.2 実験装置および方法

実験における噴流射出にはケルヒャージャパン株式会社製高圧洗浄機 K4.00 (排出圧力 7.5MPa, 排出水量 0.1l/s, ノズル径 3mm) を用いた。実験は水平方向に移動可能な台車にノズルを固定し噴流射出による反力をテンションゲージにて測定した。まず、路面を模擬した板を十分に離して測定を開始し次第にノズルと板との隙間を無くしほぼ 0 近傍まで近づけた。

3.3 実験結果と考察

Fig.4 に実験結果を示す。縦軸は反力、横軸はノズルと除染面との無次元距離 $D(=l/d)$ である。d はノズル径, l は実際の距離である。

ノズル隙間が十分に大きい場合は隙間の値によらず反力は 8.4 N とほぼ一定となる。 $D = 1$ 近傍では反力は急増する。これは、 $0 < D < 1$ 付近では噴流径はノズル径とほぼ同一となるため、流体の運動量が軸方向にのみ集約され反力として現れるためである。これは式 (1) および式 (2) の理論式と定性的に一致する。前述したように既報の実験で、高い除染効果を得られるノズルと除染面の距離は 10 ~ 20mm 程度である。このとき $D \cong 3$ である。実験結果より、10 ~ 20mm においては噴流による反力は一定値となっている。そのため、力制御時においては予め計測された噴流の反力に基づいて、外乱の大きさが十分に予想できることがわかった。

4. おわりに

本研究では住環境の除染を加速するための除染ロボットを開発している。本稿ではノズル部

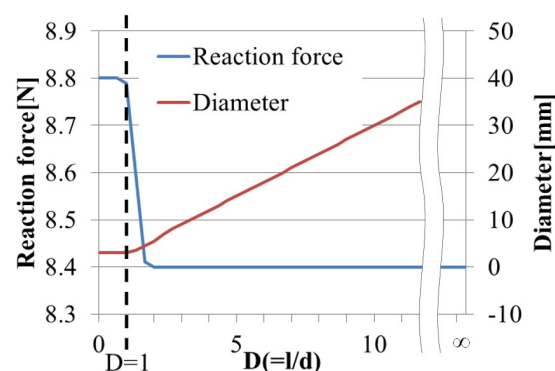


Fig. 5 水噴流反力と距離の関係

を洗浄対象へ物理的に接触させることで最適な距離を保つ洗浄手法のための実験について述べた。具体的には接触反力に基づいてノズル位置を力制御するときの、力情報への噴流による反力の影響を実験より評価した。実験結果より、噴流の反力は一定となり力情報への影響は十分に予想可能である見通しを得た。

参考文献

- 1) 環境省：除染関係ガイドライン第2版 (2013)
- 2) Endo, M., et al. : Washing operation of a road surface washing mechanism for decontaminating radioactive substances, Robomech Journal, Vol.1, No.13 (2014)
- 3) 遠藤央, 柿崎隆夫：放射性物質除去を目的とした路面洗浄システムに関する研究 (効率の良い洗浄を実現させるための路面做い機構の試作), 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演 2014, 3P2-L03 (2014)