

洗浄作用に及ぼす高圧噴流ノズルの影響

横田源弘*¹・田中辰彦*²・平野尊之*³・小松和也*²・桐畑友明*³

Influence of High Pressure Water Jet Nozzles on Cleaning Action

Motohiro Yokota*¹, Tatsuhiko Tanaka*², Takayuki Hirano*³,
Kazuya Komatsu*², and Tomoaki Kirihata*³

In order to clarify the practical cleaning action on a working surface resulting from impinging water jets for wash jet nozzles, by means of a pressure sensitive film technique and an image processing method, we measured distributions of impact pressures on flat plates against the impinging jets induced by a solid jet nozzle and a flat one for several standoff distances and impinging angles. Next, we removed organisms attached to marine floats, PVC plates, and steel pipes using these nozzles with several impinging angles. Results indicated that an impinging angle of about 60° facilitated efficient cleaning of the attached marine organisms. Characteristics of those distributions differed greatly for the solid jet nozzle and the flat one, furthermore, impact pressure for the solid jet nozzle was larger than for the flat one.

Key words : Wash Jet Nozzle, High-Pressure Water Jet, Cleaning Action, Impact Pressure Distribution, Marine Attaching Organisms

1 はじめに

漁船をはじめ海洋構造物、浮遊体、漁網、漁具に付着した貝などの海洋付着生物の除去は、それらの性能・寿命の維持にとって定期的実施すべき重要な作業である。また、ディーゼル機関燃焼室まわりに付着した含油堆積物の除去には、従来、ワイヤーブラシ、サンダー、スクレーパーによる手作業もしくは化学洗浄等の方法が行われている。しかしながら、いずれの方法もコスト・洗浄効率あるいは作業環境面で問題がある¹⁾。その中で、ウォータージェットによる洗浄は、水を使用するため維持費が安く無害、水のもつ濡らしと洗浄作用は粉塵が舞う作業に有利など、環境への配慮があり、事後処理も比較的容易なことより大いに期待されている¹⁻³⁾。また、機械加工などの分野においてもウォータージェットは各部のバリ取り・洗浄のほかに砥石の目詰まり防止などに応用する技術が発展しつつある³⁻⁵⁾。そして、それらの技術の発展に際しては、まず洗浄効率に直結する最適ノズルの提案あるいは改善法が急がれる。

これまで、この種の改善法に対して幾つかの研究⁵⁻⁸⁾があるが、実際の現場では良好な洗浄効果を得るため洗浄対象物ごとに最適ノズル、ノズル径、噴射距離、噴流衝突角度、噴射圧力などを選定しているのが現状である。洗浄性能には、噴流の衝突する物体表面での流動特性、内部構造および衝撃圧力に深く関わっているから^{3,9)}、種々のノズルの衝撃圧力分布特性の解明は重要なテーマである。

文献によれば、低圧の気中水噴流の衝突による衝撃圧力分布が感圧フィルム法と画像処理法を適用して調べられている¹⁰⁾。しかし、気中水噴流の衝撃圧力分布に関する研究¹⁰⁻¹³⁾は少ないのが現状で、噴流形状が衝撃圧力分布に及ぼす影響および洗浄効果とノズル形状の関係が十分に明らかにされているとは言えない。

そこで本報では、典型的な2種類のノズル(直射ノズルと平射ノズル)による洗浄効果を調べるため、まず最初にノズル特性(スタンドオフ距離と衝撃圧力など)を明らかにし、つぎに応用実験としてこれらのノズルを用いて海洋浮遊体、塩ビ板および鋼管内面に付着した生物を実際に

2006年1月17日受付。Received January 17, 2006.

* 1 水産大学校 海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University).

* 2 水産大学校練習船 耕洋丸 (Training Ship Koyo-Maru, National Fisheries University).

* 3 水産大学校練習船 天鷹丸 (Training Ship Tenyo-Maru, National Fisheries University).

種々の噴流衝突角度で除去した後、この洗浄効果を左右するノズルの影響を検討したので報告する。

2 実験装置および方法

Fig. 1 には、実験装置の概略を示す。本装置は水供給部と噴射試験部から構成される。水供給部は水を加圧する高圧ポンプ、貯水槽（容量0.2m³）からなる。高圧ポンプには、最大吐出圧力20 MPa、最大流量12 l/minの三連プランジャーポンプを用いた。水供給部より送られた水は供試ノズルに導かれる。

噴射試験部は噴流の飛散を封じ込めるためのタンク（底部の縦550 mm、横800 mm、高さ480 mm）であり、底部に感圧フィルムや試験片を固定するステンレス板（厚さ10 mm）の台（試験固定台）が設置されている。供試ノズルはタンク中心軸上に取り付けられ、ノズル固定装置によりノズルと標的までの距離（スタンドオフ距離）が調整できるようになっている。噴流衝突角度 α の調整は、試験固定台の角度を変えることによって行われる。なお、平射ノズルの場合は長方形噴流断面の短辺方向に対する角度を示している。供試ノズルから鉛直下向きに噴射された噴流は、試験固定台に取り付けられた感圧フィルムの中心部に当たるように調整されている。

Fig. 2 には供試ノズル（直射ノズルと平射ノズル）を示す。供試ノズルには穴径 $d = 1.0$ mm、スロート部長さ $l = 4.0$ mmのサファイヤ製円筒ノズル（以下、直射ノズルという）と、公称穴径 $d = 0.9$ mm、噴流広がり角 $\theta = 35$ degの市販の平射ノズルを用いた。

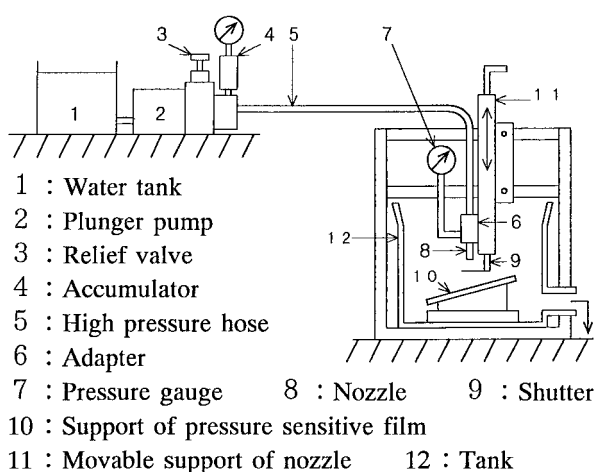
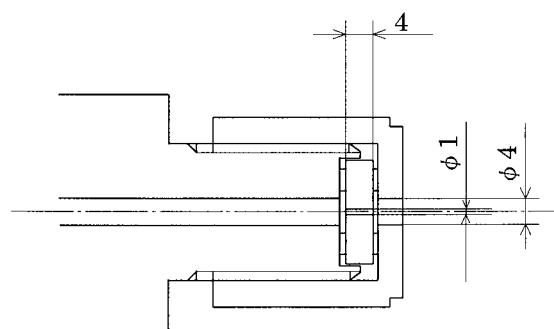
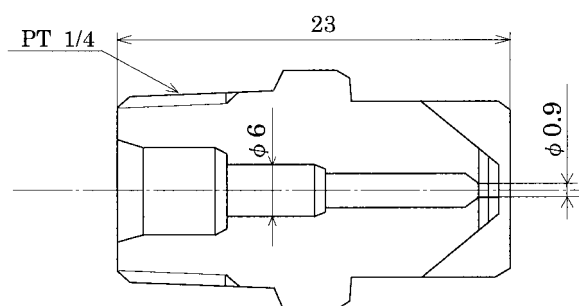


Fig. 1 . Scheme of the experimental setup.



(a) Solid jet nozzle



(b) Flat jet nozzle

Fig. 2 . Test nozzles.

気中水噴流の洗浄特性を明らかにするための標的（ここでは、試験片）には、噴流の流体力学的な壊食特性の把握によく用いられるアルミニウム板（A1050≒60 mmの正方形で厚さ10 mm）を用い、その壊食特性より気中水噴流の洗浄特性を推定した^{4,7)}。

衝撃圧力の検出は感圧フィルム（富士フィルム社製、測定範囲10~130 MPa）を使用した。壁面衝撃圧力分布の測定は、圧力を受けて着色した感圧フィルムをイメージスキャナーにより画像処理装置へ取り込み、画像解析することにより行った。併せて、衝撃圧力を専用の濃度計（直径2 mmの円内の平均値を指示）を用いて圧力換算することによっても行った。衝撃圧力値の算定には、使用した感圧フィルムの動的検定曲線をそのまま用いている。

感圧フィルム法で測定される衝撃圧力値は、噴流を衝突させた受圧時間により変化する。そこで、衝撃圧力の受圧時間に対する変化を調べた結果、20秒以上噴流を供試試片へ衝突させれば衝撃圧力値はほぼ一定となり、またその分布形状もほとんど変わらなかった。そこで本実験では、噴

射時間の長さを20秒間一定とした。

実験方法は、試験固定台のステンレス板上に感圧フィルムや試験片を置き、感圧フィルムの場合にはその上から接着性の良好なステンレス箔（厚さ20 μm ）を貼り、ノズルの真下に固定した。次に、スタンドオフ距離や噴流衝突角度を調整し、高圧ポンプを始動した。噴射圧力 P_w は、ノズル手前の圧力計で測定し、圧力調整弁により所定の圧力に設定した。そして、遮へい板を動かすことにより受圧面への噴射を開始した。

試験条件は、スタンドオフ距離 $x = 5 \sim 480$ （ x はノズル出口から標的表面までの距離）、噴射圧力 $P_w = 5 \sim 15$ MPaである。また、噴流衝突角度は $\alpha = 0$ （噴流が標的平板に垂直に衝突）、15, 30, 45, 60 degとした。

3 実験結果と考察

まず最初に、Fig. 3には直射ノズルおよび平射ノズルから噴射された気中水噴流を、透過光を用いて可視化した状態（せん光時間1 μs のストロボ撮影）を示す。両ノズルとも噴射圧力 P_w は15 MPaである。直射ノズルの場合には、噴霧角が小さい噴流で、ノズル近くの噴流界面は滑らかであるが、ノズル出口から相当離れたところでは噴流の連続性が崩れて、液塊・液滴状態へと移行していく様子が見取れる。一方、平射ノズルの場合には、扇状に広がる噴流で、噴流の一部はノズルの出口付近からすでに分裂状態にあり、スタンドオフ距離 $x = 5$ mmより長くなると噴流は乱れていると推定できる。

つぎに、Fig. 4には直射ノズルおよび平射ノズルから噴

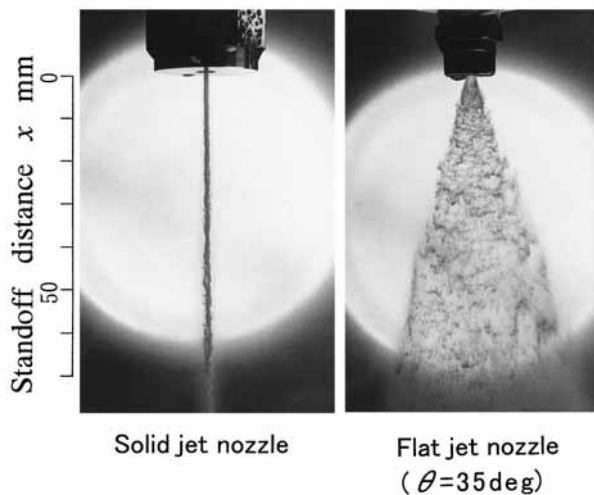


Fig. 3. Aspects of the high-pressure water jets in air ($P_w = 15$ MPa).

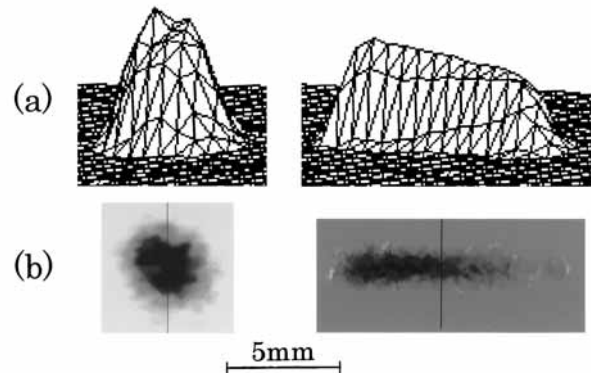


Fig. 4. Comparison of the distributions between the brightness levels (i. e. impact pressures and the eroded surface roughness).

射された噴流が試験片に垂直に衝突している際の本画像処理により得られた輝度レベル分布、すなわち衝撃圧力分布とアルミニウム板上の壊食表面粗さを対比している。感圧フィルムから得られた衝撃圧力はジェットの真の圧力を示すものではないが、衝撃圧力分布の傾向はこの方法で知ることができる。これより、いずれのノズルにおいても衝撃圧力分布と壊食面粗さ分布はそれらの変化の様相がほぼ対応していることがわかる。すなわち、直射ノズルによる壊食部は、ジェットが拡散せず収束した状態で衝突するため、円形の狭い範囲に限定されているが、平射ノズルによるそれはジェットが扇状に拡散するので、噴流の長手方向に広がるが見取れる。

3.1 ノズルの特性

Fig. 5には噴流衝突面中心軸状の衝撃圧力 P_m とスタンドオフ距離の関係を直射ノズルおよび平射ノズルについて示す。直射ノズルの場合、前図Fig. 3で見たようにジェットが収束した状態で衝突するため大きな衝撃力が発生している。そして、スタンドオフ距離が $x/d = 200$ 付近（以後、第2ピークという）を超えると衝撃圧力 P_m は150 MPa以上で、噴射圧力 P_w の10倍にも達している。ここで噴射圧力と衝撃圧力間の大きな差異は、液滴ないしは液塊の衝突により発生する水撃作用が生じるためである¹⁰⁾。すなわち、水噴流衝突の水撃作用による衝撃圧力は $P_m = \rho CV$ （ここで、 ρ :水の密度、 C :水の音速、 V :噴流速度）と同程度に達するから、 $V = 117$ m/s（噴射圧力 $P_w = 15$ MPaで噴射した場合に相当）の壁面衝突速度に対応する衝撃圧力は約169 MPaと計算される。測定された衝撃圧力が上式で計算されたそれより低い原因は、まずマイクロ秒と

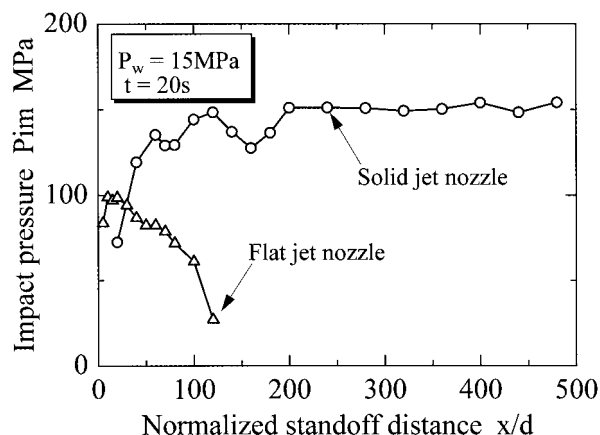
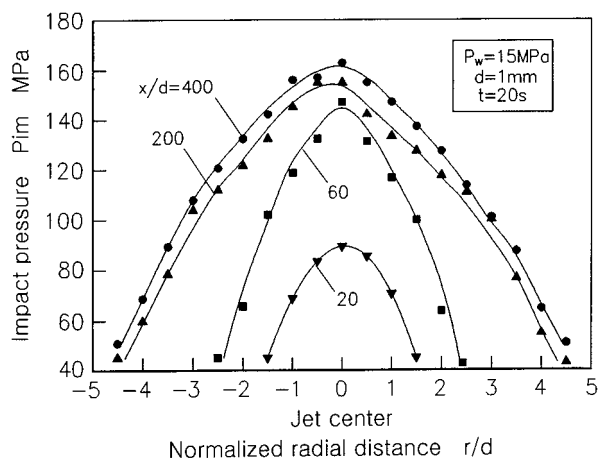


Fig. 5. Impact pressure P_{im} with normalized standoff distance x/d .

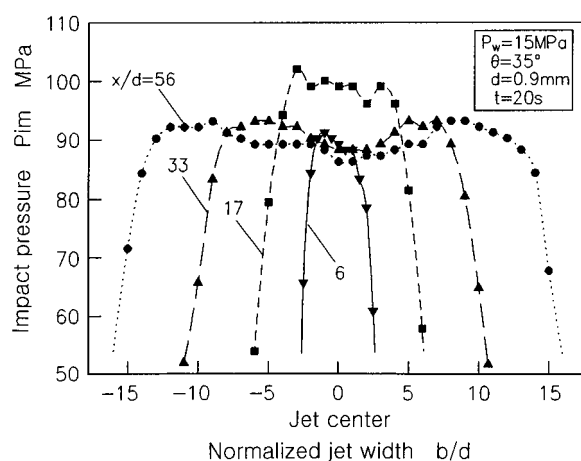
いう極めて短い負荷時間の衝突圧力に対して感圧フィルムの感度が低いこと、あるいは感圧フィルムの検定方法の相違、ステンレス箱による被覆や被覆内部の残留空気による衝撃圧力の緩和、および噴出後の噴出速度の減衰のためと考えられる。一方、平射ノズルの場合、噴流軸上の衝撃圧力はスタンドオフ距離が $x/d = 17$ 付近でピークを持っている。そして、そのピーク ($x/d = 17$) における衝撃圧力は噴射圧力の約7倍程度に達している。壊食実験においてもこの位置が最大壊食量の位置であることを確認している。したがって、 $x/d = 17$ 付近が最大洗浄力の得られる位置と考えられる。直射ノズルと比較すると、ジェットが扇状に拡散するので衝撃圧力は小さいが、広範囲の面積を一度に洗浄することができるメリットがある。そして、最大の洗浄力が得られる位置はノズル側にかなり近づく。この理由は前図Fig. 3に示すように、噴流の分裂がノズルのすぐ近くから生じていることとも対応している。

Fig. 6には、直射ノズルおよび平射ノズルから噴射された噴流が平板に垂直に衝突している際の衝撃圧力分布を種々のスタンドオフ距離について示す。いずれのノズルも噴射圧力 P_w は15 MPaである。まず直射ノズルの場合、衝撃圧力分布はベル形の分布であるが、感圧フィルムの輝度分布を画像解析すると後図Fig. 8に示すように、第2ピークより近距離の場合リング状を呈している。前者の P_{im} は半径方向に0.5 mmごとの直径2 mm内の衝撃圧力の平均値を測定しているのに対して、輝度分布のそれは画素単位の輝度が基本となっている。そのため、両者の分布には差がみられる。一方、平射ノズルの場合、衝撃圧力は噴流の長手方向にわたってほぼ均一に分布していることがわかる。

Fig. 7には直射ノズルおよび平射ノズルから噴射された



(a) Solid jet nozzle



(b) Flat jet nozzle

Fig. 6. Impact pressure patterns.

噴流が垂直に平板に衝突している際の、所定の衝撃圧力（しきい値 $P_s = 50$ MPa）以上の衝撃圧力が占める幅（円形の場合は直径、長方形の場合は長手方向の幅を指す。以下、噴流衝撃幅という）とスタンドオフ距離の関係を示す。いずれのノズルも噴射圧力 P_w は15 MPaである。まず直射ノズルの場合、噴流衝撃幅 L とスタンドオフ距離 x の関係は、 $x/d = 240$ 付近（第2ピーク近傍）までは L は緩やかに増加するが、それを超えるとほぼ一定となっている。一方、平射ノズルの場合、噴流衝撃幅はスタンドオフ距離の増大とともに急激に増加するが、 $x/d = 120$ を過ぎると急激に低下している。図中、平射ノズルの場合噴流衝撃幅のデータを直線近似すると、その傾き $(L/d)/(x/d)$ がほ

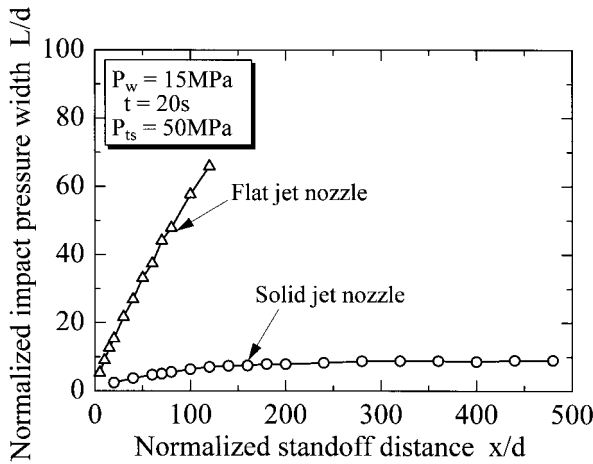


Fig. 7. Change of normalized impact pressure width L/d with x/d .

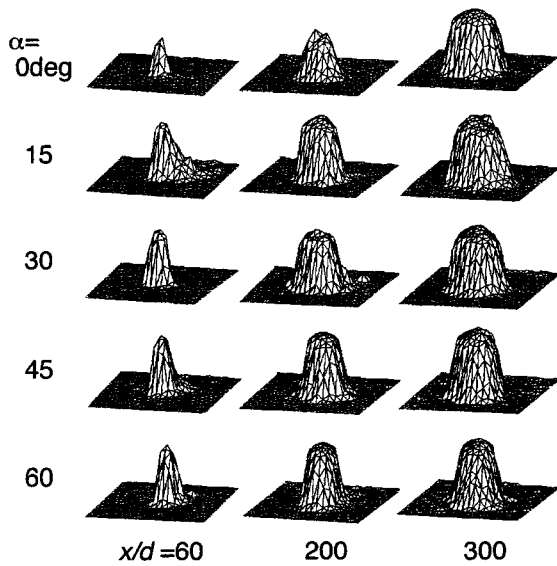


Fig. 8. Three-dimensional distributions of impact pressures with jet impingement angle α and x/d for a solid jet nozzle ($P_w = 15\text{MPa}$).

は60/100であることから、噴流広がり角がほぼ35 degの噴流を表していることになる。すなわち、噴流衝撃幅の変化はほぼ噴流形状を表している。

つぎに、噴流衝突角度の影響について見てみる。Fig. 8には、直射ノズルの場合において、代表的なスタンドオフ距離 $x/d = 60, 200, 300$ における衝撃圧力分布の三次元表示を種々の噴流衝突角度 α について示す。まず、噴流が試験片に垂直に衝突する場合 ($\alpha = 0 \text{ deg}$) について見てみる。第2ピークより近距離の場合 (例えば、 $x/d = 60, 200$)、噴流中心が低圧でその周囲がリング上に高圧の分布を示す。しかし、第2ピークを越える (例えば、 $x/d = 300$)

とベル形に近い分布となる。つぎに、 α が増大していく場合の衝撃圧力分布を見てみる。第2ピークより近距離においては、 α の増大とともに $\alpha = 0 \text{ deg}$ のリング状分布はベル形分布へ移行していく。第2ピークより遠距離では α が増加してもベル形分布は変わらないが、すその広い分布となる。なお、いずれのスタンドオフ距離においても、衝撃圧力は $\alpha = 15 \sim 45 \text{ deg}$ で最大値が存在するようである。一方、Fig. 9には平射ノズルの場合において、代表的なスタンドオフ距離 $x/d = 17, 50, 100$ における衝撃圧力分布の三次元表示を種々の噴流衝突角度 α について示す。これより、 α および x/d の増加とともに衝撃圧力は著しく低下している。

3.2 塩ビ板、浮遊体及び鋼管内面の洗浄

まず最初に、塩ビ板 (一辺が500 mmの正方形で厚さ10 mm)、浮遊体 (外径550 mm、長さ850 mm) および鋼管内面 (内径100 mm、長さ500 mm) に付着したフジツボ、ムラサキガイ、海藻、スライムなどの付着生物の除去に対して実地試験を行った (Fig.10参照)。これらは海に2年6ヶ月程度放置していたものである。海面下表面部分には多数のムラサキガイが付着している。一方、塩ビ板上にはフジツボも密着している。噴射圧力が15 MPaにおける空気中での洗浄試験の結果、次のことが明らかになった。

(1) ムラサキガイ、フジツボを効率よく除去するには、試片に垂直に噴射 (噴流衝突角度 $\alpha = 0 \text{ deg}$) するより、噴流衝突角度 $\alpha = 60 \text{ deg}$ 程度で噴射し、衝撃圧力よりも壁面噴流として利用した方が良い。

(2) 塩ビ板および海洋浮遊体上に密集して付着する大型のムラサキガイ (大きさ30~90 mm) 群および相対的に強固に付着するフジツボ (直径10~20 mm) 群の洗浄には、局所的に衝撃力の大きい直射ノズルが適していた。

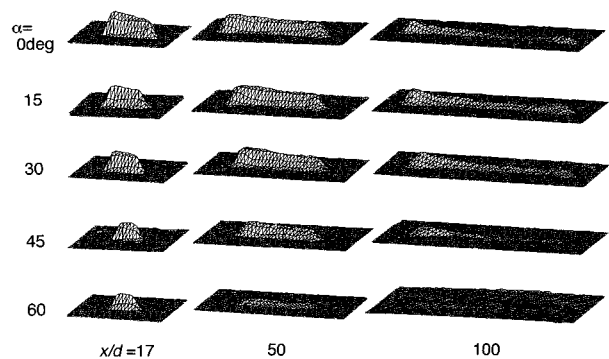


Fig. 9. Three-dimensional distributions of impact pressures with jet impingement angle α and x/d for a flat jet nozzle ($P_w = 15\text{MPa}$).

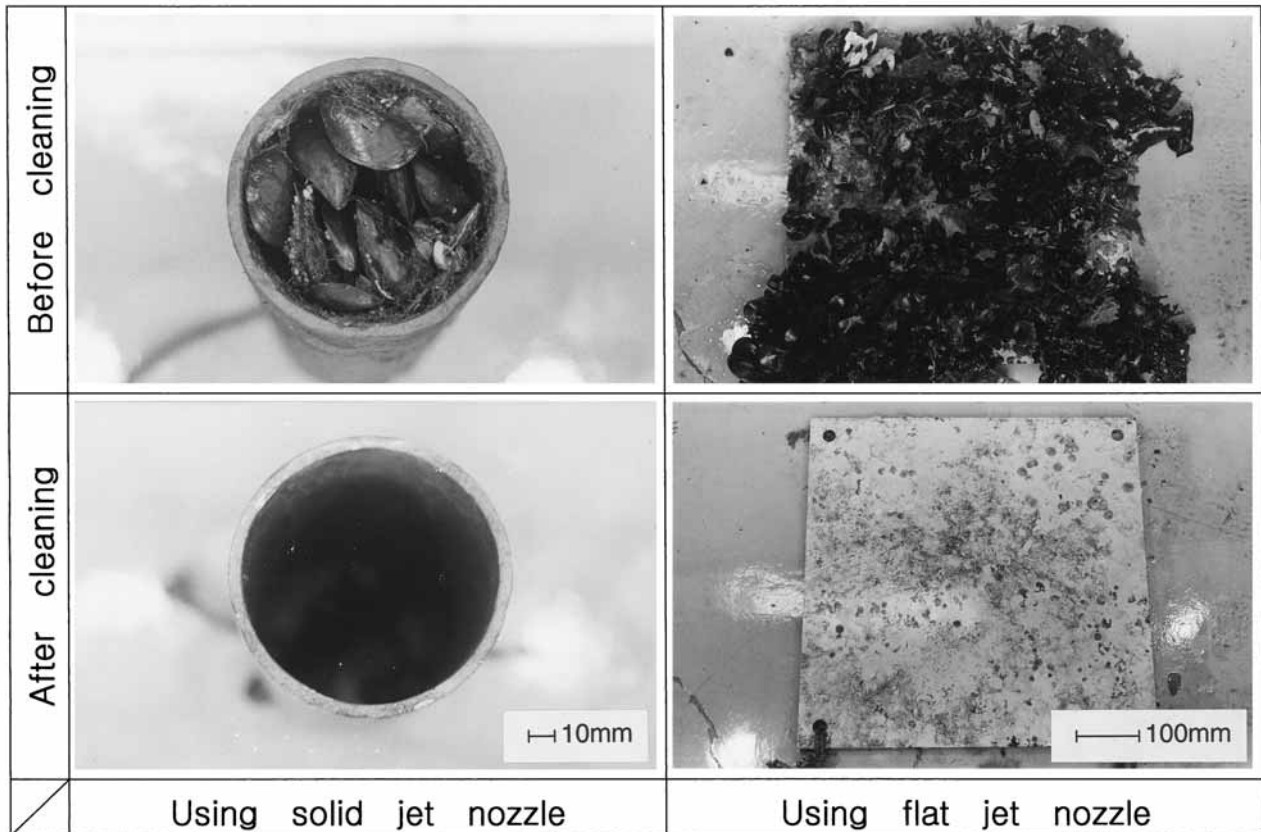


Fig.10. Cleaning of marine organisms attached to a steel pipe and a PVC plate ($P_w = 15\text{MPa}$).

(3) 割合付着力の弱い、小型のムラサキガイ（大きさ10~20 mm）群およびスライムの洗浄には、噴射距離を増大させ噴流衝撃幅を増大させることが可能である平射ノズルが適していた。

(4) 鋼管内面に密着している大型のムラサキガイ群および錆の除去には、遠距離まで大きな衝撃力が期待できる直射ノズルが適していた。

以上のように、試験条件は不十分であったが、実用面における両ノズルの特徴は把握できた。

4 まとめ

噴流形状の全く異なる直射ノズルと平射ノズルによる洗浄効果に係わる実験資料を得るため、洗浄作用に及ぼす高圧噴流ノズルの影響を実験的に調べた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 噴流形状が異なるため、直射ノズルと平射ノズルの特性（スタンドオフ距離と衝撃圧力など）は大いに異なる。

同一噴射圧力で比較した場合、気中水噴流の衝撃圧力は直射ノズル>平射ノズルの順序に低くなる。すなわち、ノズル形状差による噴流の拡散性の増大に対応している。

(2) 衝撃圧力分布に及ぼす噴流衝突角度 α およびスタンドオフ距離 x/d の影響は直射ノズルと平射ノズルでは大いに異なる。すなわち、直射ノズルの場合には衝撃圧力分布は α および x/d の増加に伴い特徴的分布を示す。なお、衝撃圧力は $\alpha = 15\sim 40\text{ deg}$ において最大値が存在するようである。一方、平射ノズルの場合には α および x/d の増大とともに衝撃圧力は著しく低下する。

(3) 塩ビ板、海洋浮遊体および鋼管に付着した海洋付着生物（ムラサキガイ、フジツボ、スライム等）の除去・洗浄に際して実地試験を行った結果、最適な噴流衝突角度は60 deg付近にあり、衝撃圧力より壁面噴流による効果が大きいことが示唆された。そして、付着力の強い大型の貝類の洗浄には局所的に衝撃力の大きい直射ノズルが適し、割合弱い付着力のものが広範囲に一様に分布するときには平射ノズルが適する。

文 献

- 1) 電気化学協会：海生生物汚損対策マニュアル(海生生物汚損対策懇談会編)，初版，技報堂出版，東京，1991，pp. 121-135.
- 2) 日本ウォータージェット学会：ウォータージェット技術辞典，丸善，東京，1993，p. 126，p. 8.
- 3) (株)スギノマシン編：ウォータージェットバリ取り・洗淨ハンドブック，富山，2002，pp. 57-66.
- 4) 江副覚・北原敬二・横田源弘：ウォータージェットによる研削砥石の目づまり除去と研削性能の向上に関する研究，噴流工学，16(1)，31-39 (1999).
- 5) 新井田徳雄・高橋等・沢村利洋・小林陵二：強力キャビテーションジェットシステムの開発とバリ取り技術への応用，噴流工学，21(2)，32-42 (2004).
- 6) 半田啓二・幾世橋広・山門憲雄：二次流体の衝突による強制滴状化高圧水噴流加工試験，噴流工学，14(1)，4-13 (1997).
- 7) 横田源弘・伊藤幸雄・北原敬十・渡＝敏晃・江副覚：特殊二流体ノズルを通る高速噴流の洗淨効果，噴流工学，16(1)，17-22 (1999).
- 8) 本川高男・南典明・川北浩久・濱田聡美・山崎堯右：環状噴流とその応用，ウォータージェット，9(2)，1-12 (1992).
- 9) 新谷昌之・内田俊彦・伊藤幸雄・大場利三郎：高速水噴流の内部構造とそれがもたらす壊食の様相，ウォータージェット，9(4)，1-11 (1992).
- 10) 伊藤幸雄・内山恒久・横田源弘：気中水噴流の衝突による衝撃圧分布の画像処理，噴流工学，14(1)，14-19 (1997).
- 11) 平尾政利・羅天軍・白瀬敬一・寺崎尚嗣・安井武司：ウォータージェットの加工特性（壊食量に及ぼす噴流速度と圧力分布の影響），噴流工学，12(3)，4-8 (1995).
- 12) 横田源弘・三上博道・湯川紀行：気中衝突水噴流による衝撃圧の分布と壊食挙動，日本船用機関学会誌，30(5)，412-416 (1995).
- 13) 松山欽一・上野秀治：アプレシブウォータージェットの噴流構造（第1報 片持ち梁法を用いた噴流動圧分布測定のための新しい観測方法の開発），噴流工学，13(1)，33-39 (1996).
- 14) 日本ウォータージェット学会：ウォータージェット技術辞典，丸善，東京，1993，p. 8，pp. 72-77.