

気中ウォータージェットピーニングによる表面改質技術の開発

呉工業高等専門学校 機械工学科

教授 吉村敏彦

(平成14年度研究開発助成 AF-2002001)

キーワード：ウォータージェットピーニング，キャビテーション，崩壊圧力

1. 研究の目的と背景

水中でノズルより高圧水を噴射し、静止水との境界層で発生したキャビテーションを含むジェットを金属表面に衝突させる。このキャビテーションが材料表面で崩壊する際に、約1000MPaとも言われる非常に高い衝撃圧力を生じ、金属表面にピーニング痕を形成する¹⁾。この衝撃圧力と周囲の弾性拘束により、ショットピーニング (SP) と同様に材料表面に圧縮残留応力が生成される²⁾。この処理は、ウォータージェットピーニング (Water Jet Peening, 以下WJPと称する。) と呼ばれている。

従来、WJPは原子カプラントで発生する応力腐食割れ (SCC) を防止する技術として実プラントへの適用が図られている^{2,3)}。応力腐食割れは、図1に示すように腐食環境、材料の鋭敏化、そして引張残留応力の三つの要素が重なって起こる現象である^{2,3)}。WJP施工により、圧縮残留応力が引張残留応力に変えられて、SCCが防止される。また、WJP施工により材料の疲労強度が向上するとともに、き裂材ではき裂進展が抑制されることが報告されている。最近、軸受メーカー等の表面処理が必要とされる分野において、SPに代わる改質技術、非常に狭隘な部品にも適用可能な技術として、このキャビテーション噴流を利用したWJPが注目されている。

一方、気中ウォータージェットピーニング^{4,5)}は、大気中でノズルより低圧水を噴射し、さらにその低圧水中に高圧水を噴射し、水中WJPと同様の効果を得る技術である。以下では前者を水中WJP、後者を気中WJPとする。

水中WJPの場合、ノズルと施工対象を水を溜めた水槽中に設置しなければならないが、機械部材に適用するには非効率的である。これに対して気中WJPでは、WJPノズルと施工対象との間に適切なスタンドオフ距離をとれば、大気中で様々な形状、個所の機械部材に適用可能であり、水中WJPと比べ非常に効率的かつ実用的である。

本研究では、ノズル内部でキャビテーションを発生させ、気中でWJP施工する基本技術を開発することを目的として行った。また、気中でのピーニング効率を高めるため、従来の連続ジェットを対し、高圧ノズル内でキャビテーションを含んだ脈動流を発生させるパルスジェットノズルを開発し、適正な施工条件を確立する。

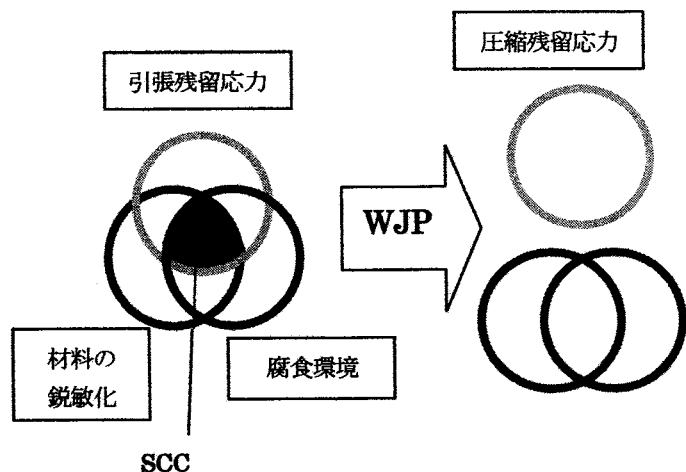


図1 ウォータージェットピーニングと応力腐食割れ

2. 実験方法

2.1 実験装置

気中WJP技術を開発する上で、ピーニング特性を比較するために同様な条件で水中WJP試験も行った。図2は、水中WJPおよび気中WJP試験に用いた実験装置である。水中WJPの場合には、水槽に水を溜め、水槽内において高圧ポンプ（荏原製作所製、JRX-185-700）を用い70MPaの高圧水を高圧ノズルより噴射した。気中WJPの場合には、水槽内に水を溜めず気中WJP用ノズルを装着し、低圧ポンプ（マルヤマエクセル製、ZHP35ER6）から1MPaを低圧ノズル内に導入するとともに、70MPaの高圧水を高圧ノズルに導入し、噴射を行った。



(a) WJP用水槽

(b) 高圧ポンプ

図2 水中WJP及び気中WJP用実験装置

2.2 レンガを用いたキャビテーションジェット衝撃圧力

評価

従来WJPにおけるキャビテーションの崩壊圧力やピーニング効率は、ステンレス鋼に噴射して施工後の試験片の圧縮残留応力をX線回折により評価していた。しかしながら、多数の噴射条件を効率良く評価することができないという問題があった。そこで本研究では、主にレンガを施工対象として、キャビテーションジェットによるレンガ表面の壊食形状により、衝撃圧力の大小を評価した。

実際に水中WJPを施工したレンガの様子を図3に示す。

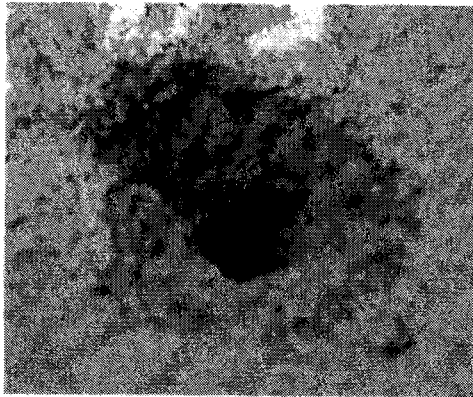


図3 水中WJP施工によるレンガの壊食状況

写真に見られるように、レンガは水中キャビテーションジェットによって壊食されるが、その壊食痕は中心部が細く深く掘り下げられ、その周囲が広く浅く壊食される。ここでは前者を掘り下げ部、後者を広がり部と呼ぶこととし、レンガ表面から掘り下げ部の底までの最大深さ h 、広がり部の最小直径を D_{\min} 、最大直径を D_{\max} とする。また、高圧ノズル先端から施工対象までの距離をスタンドオフ距離 s 、高圧水側のノズル直径を d_1 、圧力を p_1 、気中WJPを行う際の低圧水側のノズル直径を d_2 、圧力を p_2 とする。

水中WJPの圧縮残留応力付与能力について、ノズル直径2mm、水圧70MPaとしてSUS304に施工したとき、水中キャビテーション噴流中心部で約500MPa、また施工中心から±40mmのところでは約300MPaと、広範囲で圧縮残留応力が得られることが確かめられている。以上のことから、レンガに施工した際の広がり部においても十分な圧縮残留応力が得られる衝撃圧力がかかっていると考えられる。したがって、ここではWJPの衝撃圧力を下記の式で評価する。

評価値E

$$E = D_{\min} \times D_{\max} \times h$$

気中WJPにおいても、同様な評価式を用いて実験を行った。

2.3 水中WJP実験

水中WJPでは、ある特定のスタンドオフ距離において衝撃圧力が大きくなる第1ピークと第2ピークが現れることが知られている(図4参照)。以下では第1、第2ピークが現れる

スタンドオフ距離を順に s_{p1} 、 s_{p2} とする。

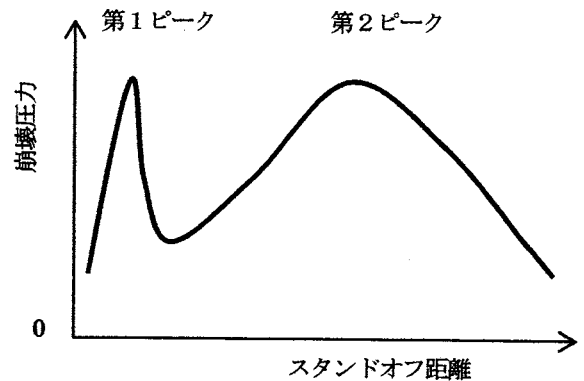


図4 水中WJPの崩壊圧力分布

ノズルから噴射された高圧水とその周囲の水との境界層にせん断渦が生じ、その中心部が低圧になり、飽和蒸気圧以下になるとキャビテーションが発生する。発生した個々のキャビテーションは集合して渦キャビテーションを形成し、さらに渦キャビテーションが合体してキャビテーションクラウドを形成する⁹⁾。その間に、キャビテーションは崩壊、発生、成長を繰り返す、またキャビテーション崩壊の際に発生する衝撃圧力が、新たなキャビテーションを発生させ、増殖していく。スタンドオフ距離が大きくなると高圧水の流速が低くなって、周囲水との境界層で新たなキャビテーションが発生しにくくなり、キャビテーションジェットの威力も落ちる。これらの過程においてキャビテーションの発生量が最大となる点、すなわちキャビテーションクラウドが最も成長するスタンドオフ距離で第2ピークが現れる。

これに対して第1ピークは、ノズルから噴射する高圧水が噴射孔付近で脈動することにより、周囲水が振動して衝撃破を発生することにより、キャビテーションが十分に成長していないスタンドオフ距離に現れる。

本実験では、前述の評価方法で各スタンドオフ距離における衝撃圧力を評価し、レンガを用いた評価方法により第1、第2ピークの発生するスタンドオフ距離が存在するかどうかを検討する。

本水中WJP実験における装置の概略を図5に示す。ノズル径 $d_1=0.8\text{mm}$ 、噴射圧力 $p_1=70\text{MPa}$ として、水で満たした水槽中で高圧水を噴射し、レンガに2分間スタンドオフ距離を変えて施工した。高圧ノズルはスタンドに取り付け、スタンドに多数空けた孔にボルトを挿し込み、スタンドオフ距離に応じて孔の位置を選択して、ボルトでノズルを固定した。従来ノズルの水深がキャビテーション噴流に与える影響が小さいことが明らかになっている。本実験では、ノズルが水面下に完全に浸漬した状態で噴射を行った。また、水に含まれる塩素などの溶存元素の影響は小さいため、水道水から直接高圧ポンプに水を供給し、ノズルから噴射した。

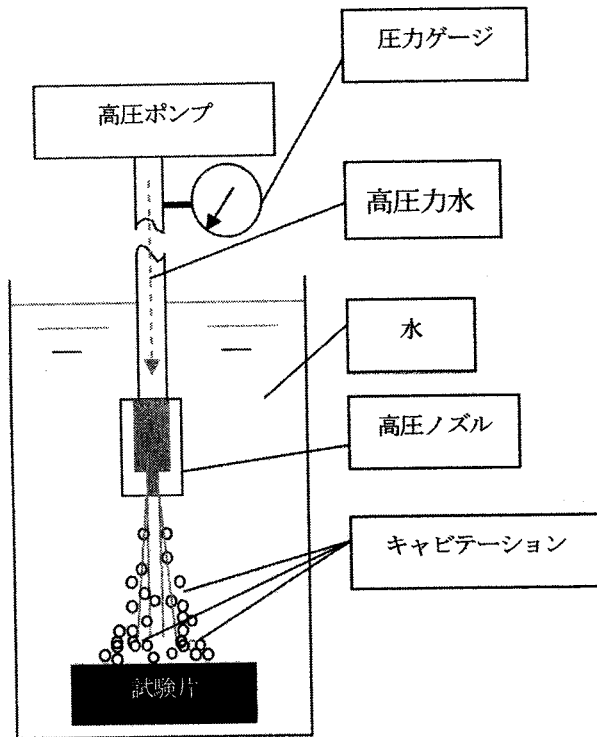


図5 水中WJPの実験方法

2.4 気中WJP実験

水中WJPの場合、水中で高圧水を噴射すれば必ずキャビテーション噴流を得られたが、気中WJPの場合、的確なノズル径、圧力差、流量でなければ威力のあるキャビテーションジェットは得られないと考えられる。本実験では、前述の水中キャビテーションジェットと同等の威力を持つ気中キャビテーションジェットを発生させることを目標に、いくつかの実験を行った。また、施工対象を水中WJP実験と同様にレンガを使用し、水中WJPと同様の評価方法により気中キャビテーションジェットの崩壊圧力を評価した。

使用した気中WJPのノズルを図6に、実験装置の概要を図7に示す。今回は、下記のような実験を行った。水中WJPで使用した高圧ノズルにねじ込み式で低圧ノズルを装着した。ノズル径を変化させるために、高圧ノズルおよび低圧ノズルともノズル先端部を脱着式とした。発生するキャビテーションは一種の脈動流（パルスジェット）であることが知られている。とくに高圧ノズルで流れを乱し、キャビテーションを発生させると静止水との境界層で発生するキャビテーションの崩壊圧力が増加すると考えられる。本研究では、図6に示すように高圧ノズルおよび低圧ノズルの脱着式円板にスリットを設け、脈動キャビテーションの崩壊圧力の向上を図った。

表1に、本研究の行った気中WJPの実験条件を示す。低圧ノズル圧力 p_2 を1MPa、高圧ノズル圧力 p_1 を70MPaとした。また、低圧ノズル径 d_2 は3.5mmと12mmに定めた。さらに、比較のため、低圧ノズルを装着せず（条件①）、大気中で高

圧ノズルから噴射する条件でも実験を行った。この大気中噴

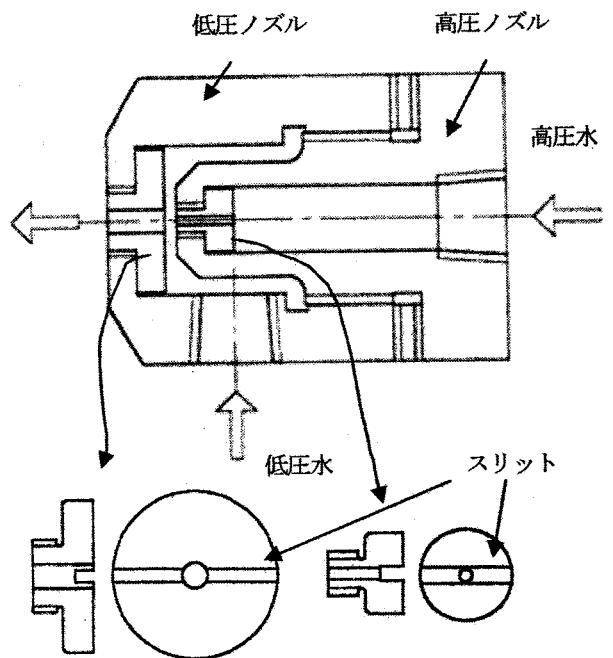


図6 気中WJP用ノズル

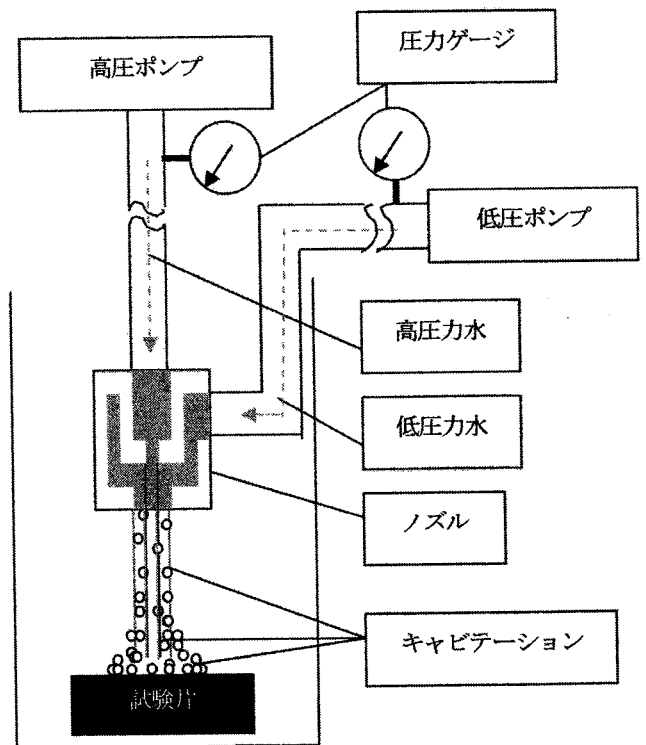


図7 気中WJPの実験方法

表1 気中WJPの実験条件

項目	条件①	条件②	条件③	条件④
高圧ノズル圧力 p_1 (MPa)	70	70	70	70
高圧ノズル径 d_1 (mm)	0.8	0.8	1	0.8
低圧ノズル圧力 p_2 (MPa)	—	1	1	1
低圧ノズル径 d_2 (mm)	—	3.5	3.5	12

射でも、試験片表面に溜まった水に高圧水が噴射されるため、多少のキャビテーションが発生すると考えられる。

3. 実験結果と考察

3.1 水中WJP実験

ステンレス鋼の表面に、水中WJP施工した場合の圧縮残留応力分布を図8に示す。第2ピークのスタンドオフ距離で施工した場合の結果である。施工前に400MPa程度あった引張残留応力が、WJP施工により300~600MPaまでの圧縮残留応力に変換されている。レンガ施工でも圧縮残留応力の高い部位が壊食されると考えられる。

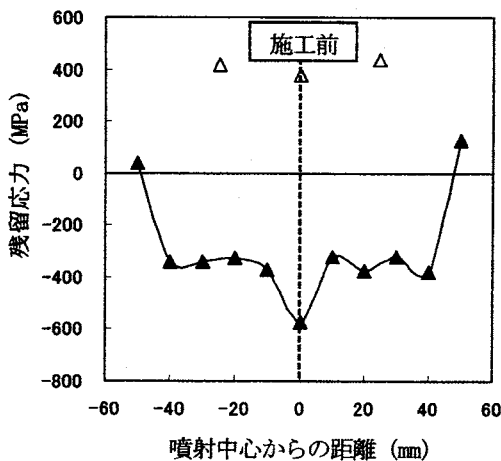


図8 WJP施工により得られる圧縮残留応力 (ステンレス鋼)

各スタンドオフ距離におけるレンガの壊食痕の深さと径を図9に示す。スタンドオフ距離が大きくなるほど、深さが浅くなり径が大きくなっているのが分かる。また、これら単独で見ただけでは上記のような第1、第2ピークと思われるものは現れなかった。

次に、各スタンドオフ距離における評価値を図10に示す。図から分かるように、 $s=30\text{mm}$ で第1ピーク、 $s=65\text{mm}$ で第2ピークと思われる変化が現れている。従来、キャビテーション噴流における崩壊圧力のピークは、X線回折による

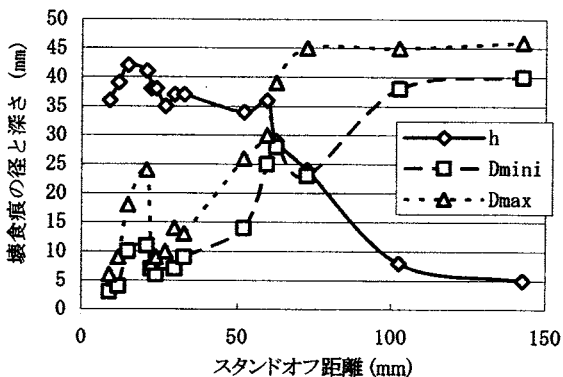


図9 水中WJPにより形成される壊食痕とスタンドオフ距離の関係 ($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$)

残留応力測定により、多大な時間を費やして明らかにされてきた。本研究では、レンガの壊食痕の大きさをを用いて簡便にピークの存在を評価できることが明らかになった。

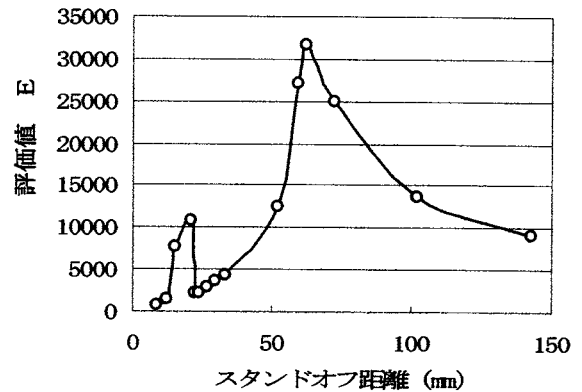


図10 水中WJPにより形成される壊食痕の評価値とスタンドオフ距離の関係 ($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$)

3.2 気中WJP実験

3.2.1 条件①

条件①において得られた実験結果を図11に示す。高圧水のみでのWJPでは、水中WJPのように有効なキャビテーションは発生しないので、壊食痕に大きな広がり部は見られず、高圧水によって細かい穴が形成されるのみであった。掘り下げ部の深さは、スタンドオフ距離が短い場合では、距離が長くなると浅くなる傾向にあったが、 $s=70\text{mm}$ 付近から再び深くなり始めた。これはスタンドオフ距離が長くなるにつれてジェットが広がり、それによって壊食痕径が大きくなり、壊食痕内に水が溜まりやすくなる。その壊食痕内でキャビテーションが発生することで、WJPの衝撃力が大きくなったためと考えられる。図12

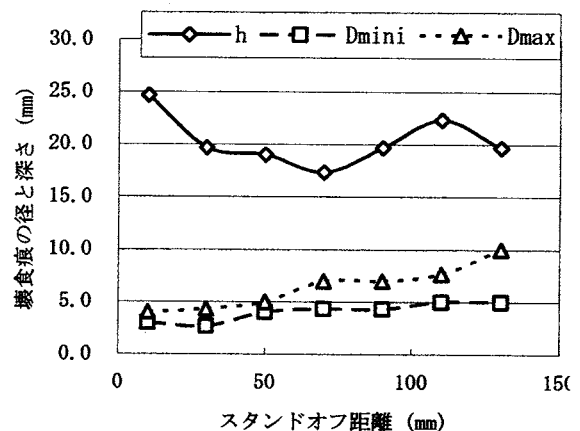


図11 大気中WJPにより形成される壊食痕とスタンドオフ距離の関係 ($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$)

は評価値のグラフであるが、比較的滑らかに右肩上がりになっている。さらにスタンドオフ距離を伸ばせば、ジェットの威力が減少すると考えられる。

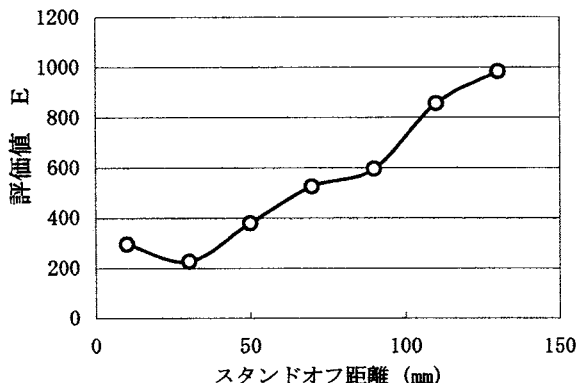


図 1 2 大気中W J Pにより形成される壊食痕の評価値とスタンドオフ距離の関係($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$)

3.2.2 条件②

実験結果を図 1 3 に示す。大気中で得られた図 1 1 と比べると、壊食痕径は気中 W J P の方が大きい。しかし、壊食痕深さはスタンドオフ距離が大きくなるにつれて浅くなっており、大気中 W J P とは違う傾向を示した。これは、低圧水が高圧水の抵抗となって、高圧水の流速が低下したこと、そして水中 W J P のような良好なキャビテーションが発生せず、キャビテーションによる壊食が得られなかったことが原因であると考えられる。図 1 4 は評価値のグラフである。図から分かるように、水中 W J P とほぼ同じスタンドオフ距離で衝撃圧力の第 2 ピークを示すかのような起伏が認められる。気中 W J P は水中 W J P のように、十分な静止水（低圧水）が供給され、静止水と高圧水の境界層で良好なキャビテーション発生すれば、水中 W J P 同等の威力が得られると考えられる。このことから、本実験においては、低圧ノズルの径が 3.5mm と小さく、静止水が充分供給されていないため、評価値が小さくなったものと思われる。

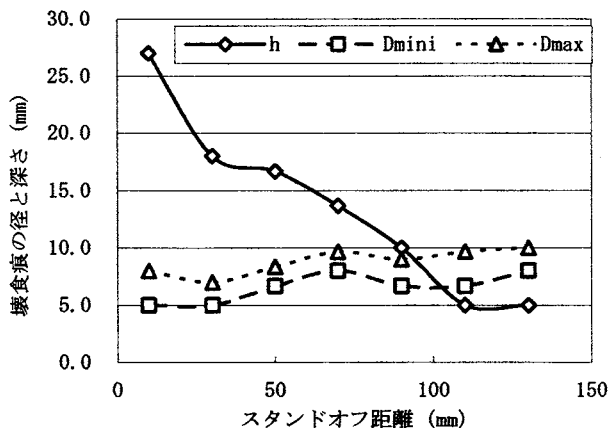


図 1 3 水中W J Pにより形成される壊食痕とスタンドオフ距離の関係($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$, $d_2=3.5\text{mm}$, $p_2=1\text{MPa}$)

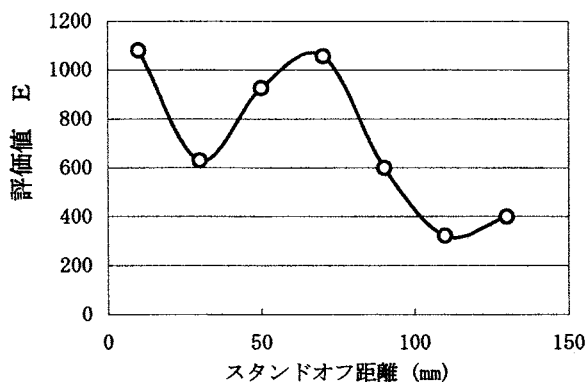


図 1 4 水中W J Pにより形成される壊食痕の評価値とスタンドオフ距離の関係($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$, $d_2=3.5\text{mm}$, $p_2=1\text{MPa}$)

3.2.3 条件③

実験結果を図 1 5 に示す。条件②よりもノズル直径が 0.2mm大きくなった影響で、壊食痕径、深さともに最高で10mm近く大きくなっている。しかし、 $d_1=0.8\text{mm}$ の水中W J Pと比較すると、キャビテーションジェットとしての威力は小さい。良好なキャビテーションはあまり発生せず、主にジェットの威力で壊食していると考えられる。

図 1 6 は評価値のグラフである。これも条件②と同様にピ

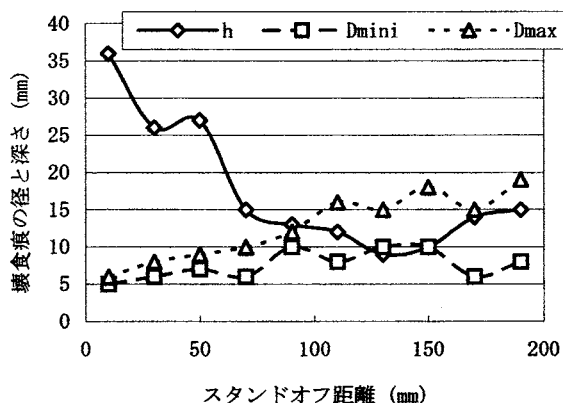


図 1 5 水中W J Pにより形成される壊食痕とスタンドオフ距離の関係($d_1=1\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$, $d_2=3.5\text{mm}$, $p_2=1\text{MPa}$)

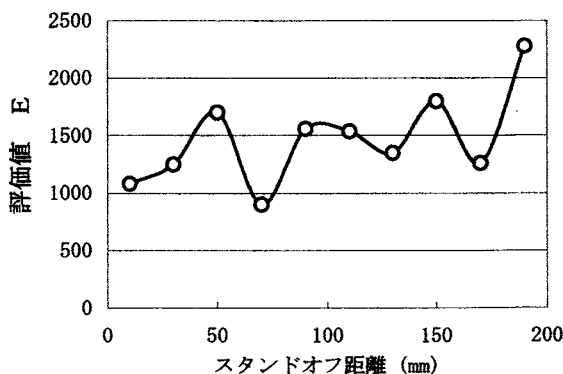


図 1 6 水中W J Pにより形成される壊食痕の評価値とスタンドオフ距離の関係($d_1=1\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$, $d_2=3.5\text{mm}$, $p_2=1\text{MPa}$)

ークを思わせる変化を表してはいるものの、第1ピークと第2ピークと識別することができない。条件②と同様に、本実験においては、低圧ノズルの径が3.5mmと小さく、静止水が充分供給されていなかったためと考えられる。

3.2.4 条件④

実験結果を図17に示す。壊食の進展の仕方が条件②と似ている。グラフ上のスタンドオフ距離が一番短い点では、壊食痕径はほぼ同じものの、壊食深さは条件②の方が5mm程度大きい。条件②は低圧ノズル径が小さく、低圧水の流速が大きいことから、スタンドオフ距離の短いところでは、低圧水が壊食深さに影響しやすいため、このような結果が出たと考えられる。

図18は評価値のグラフである。図13と比較して、威力が向上していることが分かる。

本気中WJP実験より、気中WJPで水中WJPと同等の広がりを持つキャビテーションジェットを作り出すには、低圧ノズル径/高圧ノズル径の比を大きくし（比率 $15=12\text{mm}/0.8\text{mm}$ ）、水中WJP実験における壊食痕径以上の低圧ノズル径を確保すること、および十分な流量の水流が必要であることが明らかになった。

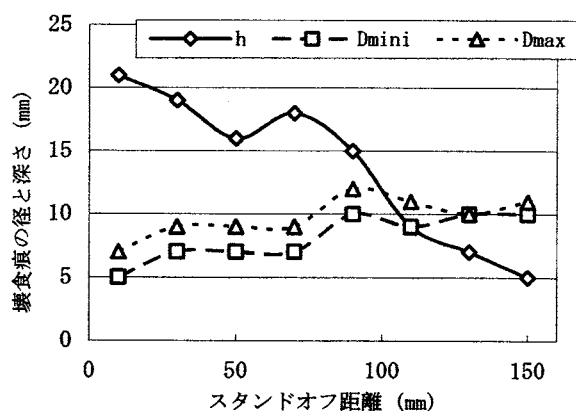


図17 水中WJPにより形成される壊食痕の評価値とスタンドオフ距離の関係 ($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$, $d_2=12\text{mm}$, $p_2=1\text{MPa}$)

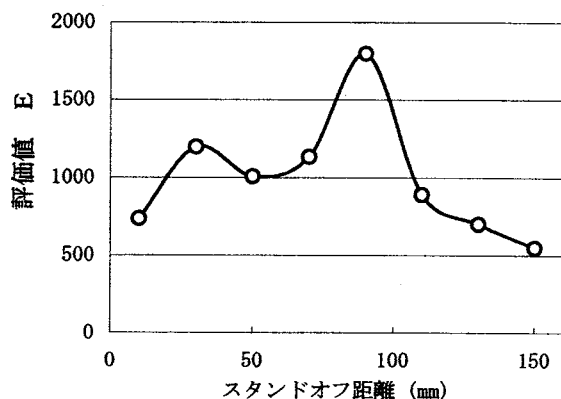


図18 水中WJPにより形成される壊食痕とスタンドオフ距離の関係 ($d_1=0.8\text{mm}$, $p_1=70\text{MPa}$, $d_2=12\text{mm}$, $p_2=1\text{MPa}$)

4. 結言

気中ウォータージェットピーニングによる表面改質技術の開発に関する研究を推進し、以下の結論を得ることができた。

- (1) レンガの壊食痕サイズを測定することにより、従来のX線による残留応力測定に比べて、水中キャビテーションジェットにおける衝撃圧力やピークを容易に評価することができる。
- (2) 気中WJPで良好なキャビテーションを発生させるには、低圧側に高圧側より十分に大きいノズル径と流量が必要である。
- (3) 気中ウォータージェットピーニングの基礎技術を確立することができた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団から多大なる御援助を頂戴いたしました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 稲見和則, 吉村敏彦, 日本機械学会平成14年度材料力学部門講演会講演論文集, (2002) 485.
- 2) 吉村敏彦, 大城戸忍, 榎本邦夫, 守中廉, 平野克彦, 黒澤孝一, 林英策, 第38回 X線材料強度に関する討論会 講演論文集, (2001), 38.
- 3) 齋藤昇, 榎本邦夫, 黒澤孝一, 守中廉, 林英策, 石川哲也, 吉村敏彦, 噴流工学 vol.20, No.1 (2003), 4.
- 4) 祖山均, 斉藤健一, 坂真澄, 日本機械学会 東北支部八戸地方講演 講演論文集, 021-2(2002), 83.
- 5) 祖山均, 斉藤健一, 御子柴直樹, 佐々木圭, 坂真澄, 第51期日本材料学会学術講演会後援論文集(2002), 223.
- 6) 山崎卓爾, キャビテーション工学, 日刊工業新聞社 (1978).