

平面水噴流による円筒形物の削皮技術

門 久義・松村 博久

(受理 平成7年5月31日)

Peeling Technology for Circular Objects with Plain Water Jets

Hisayoshi KADO and Hirohisa MATSUMURA

Recently, water jet technology has been used for jet cutting. The discharge pressures of these nozzles extend from 100 MPa to 400 MPa, and in extreme cases, to 1000 MPa. The merits of this technology are to get the minimum power required, and the highly dense energy for cutting using small jet diameters. But, it is hard for this technology to peel wide skins of relatively soft objects.

In this report, plain water jet technology with low pressure, below 3 MPa, is investigated for peeling the skin of circular objects, such as vegetables. Eight flat nozzles 45 degrees apart are installed in a concentric circle. The axes of nozzles intersect at the center of the circle, and the plain water jets are on the same plane. A test cylinder is set among the nozzles, in order to measure static pressure on its surface. First, a suitable relation between the test cylinder diameter and the nozzle distance is examined experimentally. Next, a burdock is set instead of a test cylinder, pulled up with constant velocity and peeled by plain water jets. It is apparent that for proper peeling, there are appropriate combinations of the pull-up velocity and the discharge pressure. Lastly, the required power for peeling a burdock is estimated.

1. はじめに

近年、ウォータージェット技術は紙、布、ゴム、木材からプラスチック、複合材料、金属、ガラス、岩石、コンクリートに至る各種材料の切断加工に広く利用されるようになってきた¹⁾。このようなウォータージェット加工に使用する圧力は、通常100～400 MPa、極端な場合には1,000 MPaに達し、ノズル直径が数mm程度以下の円形ノズルを用いて行われる²⁾。この技術の特徴は、レーザー加工機などと同じく単位面積当たりの加工エネルギーを大きく取れ、噴流の直径が小さいため所要動力を少なくできることである。しかし、この技術は切断加工が目的であるため、比較的広い面にわたって表面から一定の深さを一様に加工することは困難である。

本研究は、3 MPa程度以下の低圧水噴流を用いて、農作物などの円筒状物体の表皮全面を削る方法につい

て実験的に検討したものである³⁾。加工性能に係わる主なパラメータとして、ノズル形状と出口直径、ノズルの吐出し圧力、ノズルと加工材料の距離、さらに加工材料の種類とノズル送り速度を検討した。

本実験においては、まず、その供試円筒の軸を中心とする同一円周上に等間隔で中心に向けて設置した平面噴射ノズルから水噴流を供試円筒側面に噴きつけた。そしてノズル吐出し圧力、ノズル間距離、供試円筒径等を変化させ、供試円筒側面上の静圧測定孔によって周方向の静圧分布を測定し、供試円筒表面における圧力分布特性について調べた。つぎに、実際にごぼうを例にとり削皮実験を行い、ごぼうの送り速度と最適な削皮条件が得られるためのノズル吐出し圧力の関係を調べた。最後に、ごぼう削皮機の所要動力特性を試算し、その経済性について言及した。

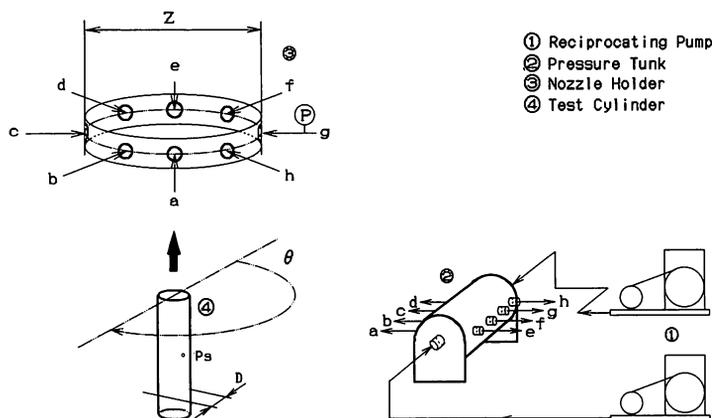


図1 表面圧測定用実験装置の概略

2. 実験装置および方法

2.1 表面圧測定実験

水噴流による壊食作用は、噴流コア部の連続した流体部分の衝突によって行われるのではなく、分散した液滴の衝突によることがわかっている⁴⁾。したがって、物体表面への液滴の衝突は圧力変動として検出され、その変動の大きさが壊食量の目安になると考えられる。しかし、円形ノズルの場合と異なり、本実験で用いた平面噴射ノズルでは、流出後比較的短距離で水噴流は全面的に液滴状になる。そのため噴流衝突面の圧力変動値はその平均値と一意的な関係にあると考え、本実験では水噴流衝突面の平均圧力を測定して考察を行った。

図1は供試円筒の表面圧を測定する実験装置の概略図である。往復動ポンプ①により圧送された水は、高圧タンク②で脈動を低減されてa～hの8本の圧力ホースに分配され、装置③の平面噴射ノズルa～hに送り込まれる。8本のノズルから噴出した平面噴流は、各ノズル中心軸を含む面内、すなわち水平面で広がり、隣り合う噴流間で干渉しながら供試円筒側面④に衝突する。8本の平面噴射ノズルの先端は同一円周上にあり、その直径をノズル間距離Z、ノズル吐出し圧力を P_n とする。

直径Dの供試円筒側面には、表面圧 P_s を測定するために内径1mmの測圧孔が設けられ、供試円筒を回転させることにより周方向の表面圧分布を測定した。圧力測定位置は、各ノズルの中心軸を通る円周上とし、ブルドン管圧力計により測定した。供試円筒の直径D

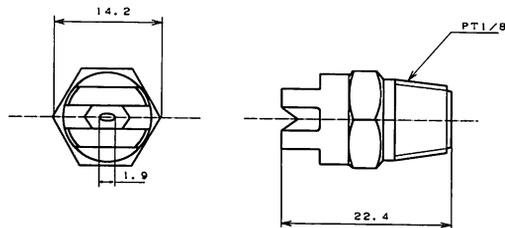


図2 平面噴射ノズルの詳細

は15, 18, 22, 26, 32, 38, 47.5mmの7種類とした。

実験に用いたノズルは、Spraying systems社製のフラットスプレーノズルVV11003(オリフィス直径1.1mm)、VV11010(同2.0mm)、VV65025(同1.0mm)、VV6508(同1.8mm)の4種類である。ノズルVV11003とVV11010は広がり角度が110°程度、VV65025とVV6508は約65°であり、前者は後者に比べて衝撃効率が低く、本実験の目的には不适当であることがわかった。さらに、ノズルVV65025はVV6508よりオリフィス直径が小さく速度への変換効率が少し低かった。したがって、本報告はノズルVV6508についての実験結果について述べる。図2は平面噴射ノズルVV6508の詳細である。本報告では、このノズルをNozzle Type 65080と表示している。

2.2 ごぼう削皮実験

水噴流によりごぼうを削皮する場合、図1に示した8本の平面噴射ノズルの中心にごぼうを保持して、上方にワイヤで移動させた。ごぼうの移動速度はモーターにより任意に設定できる。実験に際しては、ノズル設置条件を2.1の結果から得られた最適設置条件にし、

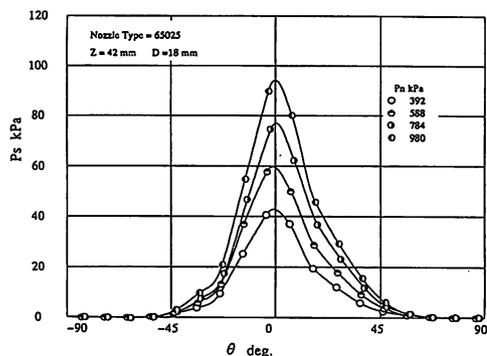


図3 単一水噴流による表面圧

ごぼうの移動速度 U とノズル吐出し圧力 P_n を変化させて、削皮状態が最適となる圧力を求めた。

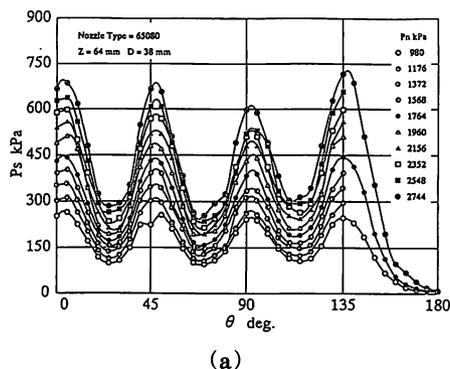
3. 実験結果および考察

3.1 静圧分布と最適ノズル間距離

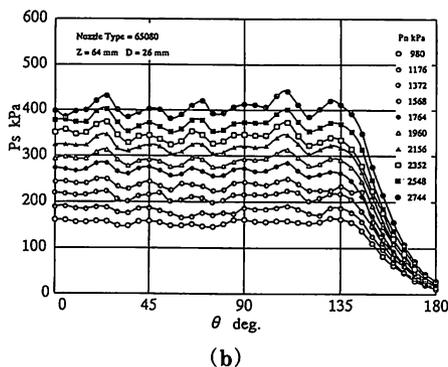
図3は供試円筒に1本のノズルから水噴流を吹き付けた場合の例である。ノズル正面は $\theta = 0^\circ$ であり、 $\theta = \pm 45^\circ$ ではノズル吐出し圧力 P_n の値にかかわらず非常に小さい値となっている。ノズル間距離 Z 、供試円筒径 D を変化させてもこの傾向は変わらない。

図4(a)~(c)は供試円筒に8本のノズルから水噴流を吹き付けた場合の例で、ノズル間距離 $Z = 64\text{mm}$ とし、それぞれ供試円筒径 $D = 38, 26, 18\text{mm}$ と変化した場合の表面圧 P_s の分布である。図中の各曲線は、ノズル吐出し圧力 P_n が異なっている。いずれの図においても $\theta = 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ がノズル正面である。なお、隣り合う水噴流の相互干渉の様子を示すために、この図では、 $\theta = 180^\circ$ の位置にあるノズルには水を噴出させていない。これらの例から、ノズルを 45° のピッチで取り付けられた場合、隣接するノズルの中間位置において表面圧が上昇していることがわかる。さらに、 $D = 38\text{mm}$ の場合はノズル正面に圧力ピークが表われているが、 $D = 18\text{mm}$ の場合にはノズルの中間位置に表面圧のピークが表われている。そして、 $D = 26\text{mm}$ の場合には表面圧が θ 方向にほぼ一様な値を示している。このような傾向はノズル吐出し圧力の値に関わりないことも明らかである。

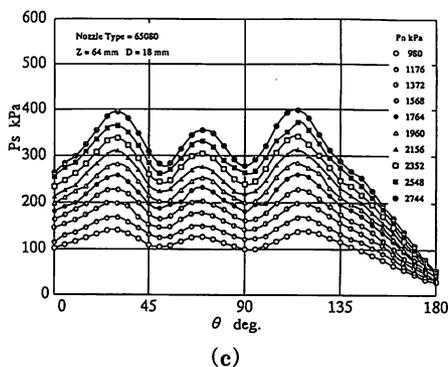
図5はノズル正面圧を P_{sf} 、ノズル中間圧を P_{sb} として供試円筒直径 D に対する変化を示している。ノズル正面圧 P_{sf} は D の増加とともに急激に大きくなり、



(a)



(b)



(c)

図4 8方向水噴流による表面圧の例

ノズル中間圧 P_{sb} は漸増ののち減少に転じている。 P_{sf} と P_{sb} の曲線の交点は、供試円筒の表面圧が周方向に一様になっている場合に相当する。

前図の交点により求められた円筒直径 D の値の例を図6に示す。これより、ノズル間距離 Z を固定すると、供試円筒の表面圧が一様になる場合の円筒直径 D の値はノズル吐出し圧力 P_n の値に関わらずほぼ一定となっていることがわかる。この D の値に対する

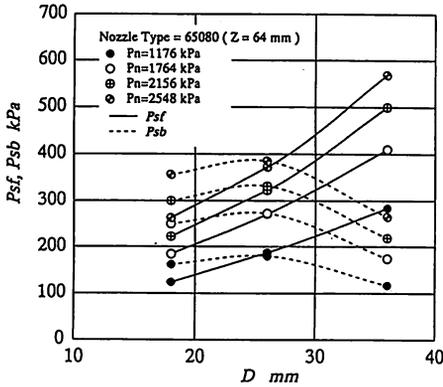


図5 ノズル正面圧と中間圧の変化

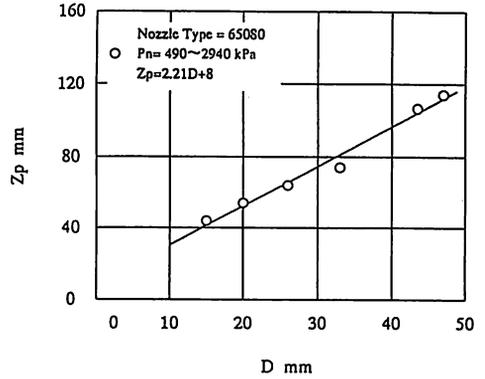


図7 最適ノズル間距離と供試円筒径の関係

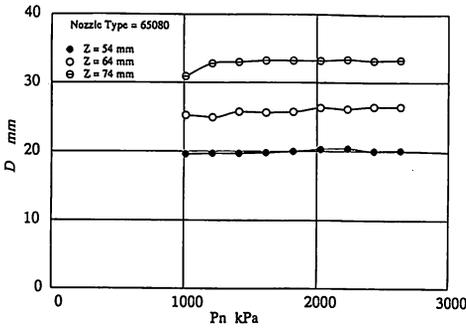


図6 一様な表面圧になる供試円筒直径

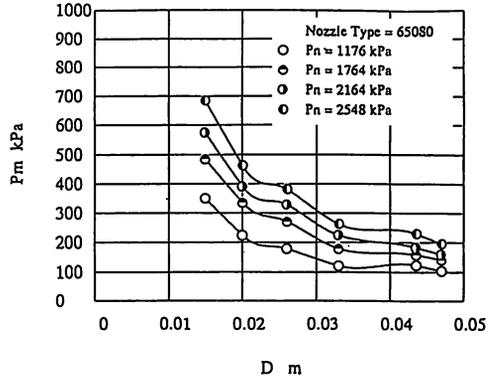


図8 最適設置条件における表面圧と供試円筒径

Zの値を最適ノズル間距離 Z_p と呼び、これらの関係を図7に示す。図中の実線は、実験結果の近似直線を表し、次式で与えられる。

$$Z_p = 2.21D + 0.08 \quad (\text{m}) \quad (1)$$

この式によって円筒径 D (m)に対するノズル間距離 Z_p (m)を計算し、ノズル間距離を設定することにより表面圧を一様にする事ができる。以後、式(1)を最適設置条件と呼ぶ。

3.2 最適設置条件における表面圧

円筒形物体の削皮を行うためには、水噴流の吹き付けによって円筒表面圧を一様にする事は必要条件であるが、十分条件ではない。したがって最適設置条件の式(1)は必要条件である。ここでは最適設置条件において一様となる供試円筒の表面圧を P_m とし、ノズル吐出し圧力 P_n と表面圧 P_m との関係を調べる。

図8は P_m の実験結果を表している。この結果より、

表面圧 P_m は供試円筒径 D とノズル吐出し圧力 P_n の関数であることがわかる。式(2)はこの依存性を調べ、最小自乗法により近似した関数である。

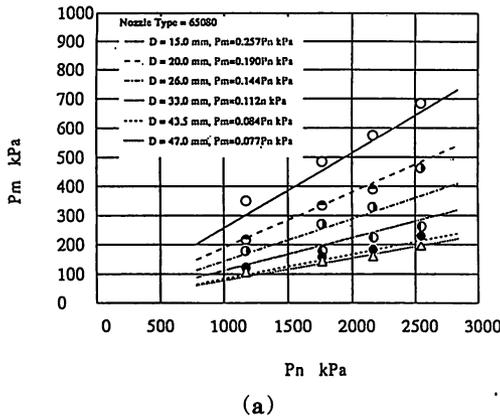
$$P_m = 0.0031 \frac{P_n}{D^{1.05}} \quad (\text{kPa}) \quad (2)$$

ただし、供試円筒径 D の単位は(m)、 P_m と P_n の単位は(kPa)である。

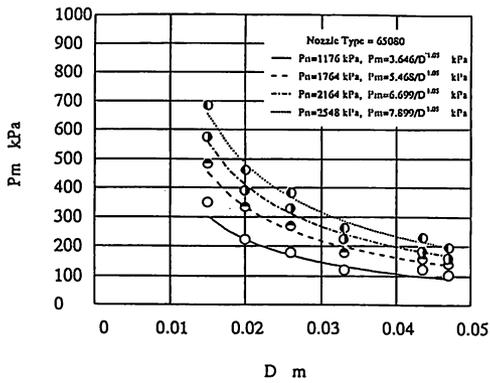
図9(a)、(b)は実験値に対する式(2)の近似程度を表している。同図(a)中の直線および同図(b)中の曲線は式(2)の値である。これより、実験式(2)は、最適設置条件におけるノズル吐出し圧力と表面圧の関係をよく近似しているものと考えられる。

3.3 ごぼう削皮における送り速度と最適削皮表面圧の関係

図10は、実際にごぼうを用いて削皮を行った結果である。実験装置の都合で、ノズル間距離 Z を54mmに



(a)



(b)

図9 最適設置条件における表面圧の近似式

固定し、最適円筒径に近い $D = 19 \sim 22 \text{ mm}$ のごぼうを選び、ごぼうの送り速度 U とノズル吐出し圧力 P_n を変化させて削皮実験を行った。削皮の仕上がり状態は目視により判定した。図中の▲と△印は削れ過ぎを表し、▼と▽印は表皮が一部残っていることを表している。○印はほぼ適切と思われる削皮結果を示し、このときの P_n の値は最適削皮が行えるノズル吐出し圧力である。

しかし、ごぼうを実際に削皮する条件はごぼうの表面圧に直接関係しているものと考えられる。図10の結果から、最適な削皮状態における表面圧 P_{mp} を換算し、送り速度 U との関係を表わしたものが、図11である。この最適削皮表面圧 P_{mp} は、基本的にごぼうの直径とは無関係に一定であり、送り速度 U にのみ依存するものと考えられる。

3.4 ごぼう削皮機の経済性

前節までの結果から、8本の平面噴射ノズルを用い

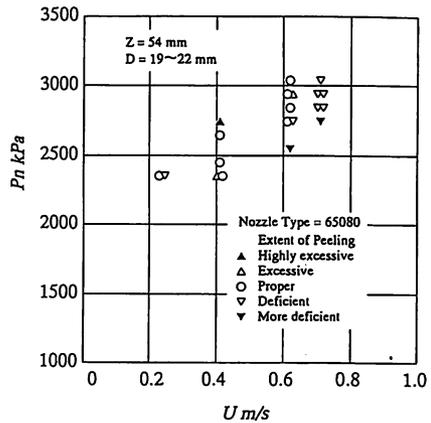


図10 ごぼう削皮実験の結果

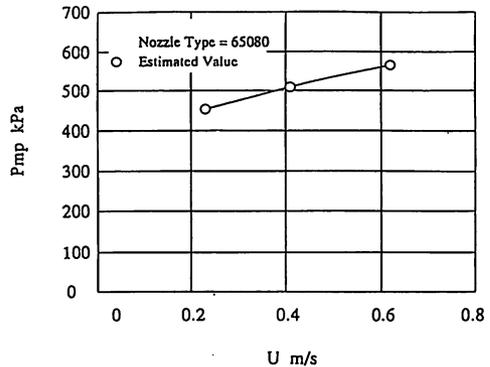


図11 最適削皮表面圧とごぼう送り速度の関係

てごぼうを削皮するための最適設置条件と最適削皮表面圧の条件が明らかになった。しかし、ごぼう削皮機を開発する場合には、その経済性を検討しておくことが重要である。ここでは、ごぼうを最適に削皮する場合にノズルで消費される水動力を見積もる。

図12は、3.3節で得られた送り速度 U と最適削皮表面圧 P_{mp} の関係を用いて、式(2)からごぼう径 D とノズル吐出し圧力 P_n の関係を示したものである。図中の実線、破線、一点鎖線は、それぞれ送り速度 $U = 0.23, 0.41, 0.62 \text{ m/s}$ のときに必要なノズル吐出し圧力 P_n の値である。ごぼう径 D の増加とともに次式のような関係に従って増加する。

$$P_n = \frac{P_{mp} D^{1.05}}{0.0031} \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$

図13は、実験に用いた平面噴射ノズル1本の特性、

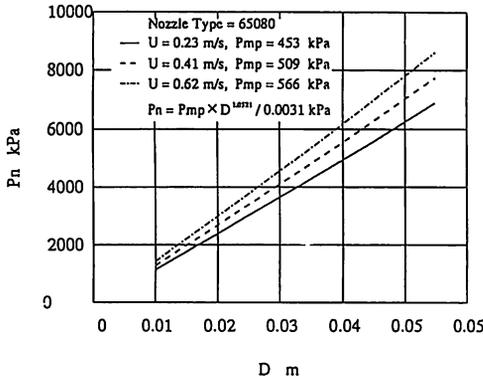


図12 最適削皮条件におけるノズル入口圧と
ごぼう径の関係

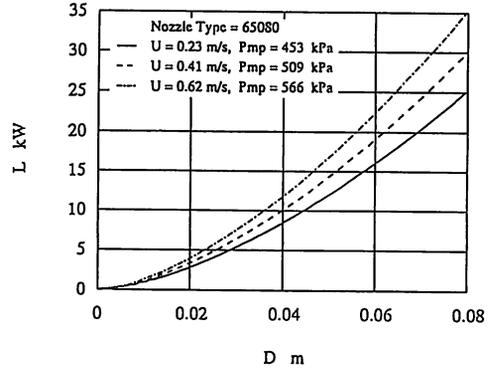


図14 最適削皮条件における所要動力とごぼう径

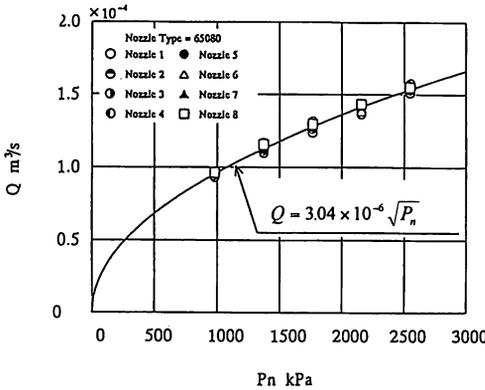


図13 平面噴射ノズルの流量特性

ノズル吐出し圧力 P_n (kPa)と流量 Q の関係を示している。図中の近似曲線は、次のように与えられる。

$$Q = 3.04 \times 10^{-6} \sqrt{P_n} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4)$$

したがって、8本のノズルにより消費される水動力 L (kW)は、式(3)、(4)より次のように与えられる。

$$\begin{aligned} L &= 8QP_n \\ &= 24.3 \times 10^{-6} P_n^{1.5} \\ &= 0.141 P_{mp}^{1.5} D^{1.58} \quad (\text{kW}) \end{aligned} \quad (5)$$

この式よりごぼう削皮機に必要な動力を見積もると、図14のようになる。図中の実線、破線、一点鎖線は、それぞれごぼうの送り速度 $U = 0.23, 0.41, 0.62 \text{ m/s}$ の場合に相当し、ごぼう径 D によって必要な水動力 L を表している。例えば、 $U = 0.62 \text{ m/s}$ の場合、 $D = 20 \text{ mm}$ のごぼうを削皮するためには $L = 3.96 \text{ (kW)}$ であ

表1 所要動力の試算

D (m)	L (kW)		
	$U = 0.26 \text{ m/s}$	$U = 0.41 \text{ m/s}$	$U = 0.62 \text{ m/s}$
0.01	0.94		1.34
0.02	2.83	3.37	3.96
0.03	5.37	6.40	7.50
0.04	8.46	10.07	11.81
0.05	12.03	14.33	16.80
0.06	16.04	19.10	22.40
0.07	20.45	24.36	28.57
0.08	25.25	30.08	35.27

るが、 $D = 40 \text{ mm}$ のごぼうでは 11.8 (kW) の動力を必要とし、 $D = 50 \text{ mm}$ のごぼうでは、 16.8 (kW) となる。

表1に、式(5)による動力の試算例を示す。ごぼう径 D の増加とともに所要動力が急激に増加することがわかる。したがって、ごぼう削皮機を開発する際には、この所要動力を目安として、ごぼう径の対象範囲を限定する必要があると考えられる。

4. 結論

以上の実験結果について検討した結果、つぎのような結論が得られた。

- (1) 供試円筒側面の周方向圧力分布が一様になるためには、供試円筒径に対する最適なノズル間距離があり、式(1)で与えられる。これを最適設置条件という。
- (2) 最適設置条件において、一様な表面圧はノズル吐出し圧力と供試円筒径の関数で、式(2)のように表される。
- (3) ごぼうに対する最適な削皮条件を与える表面圧は、

ごぼうの送り速度に依存して一意的に定まる。

- (4) 8本の水噴流で削皮を行う場合に、ごぼう径の増加とともに所要動力は急激に増加する。この所要動力の見積もりは、式(5)により概算できる。

参考文献

- 1) 例えば Allen, N. G. (ed.), Proc. 12th Int. Conf., Jet Cutting Technol., (1994)
- 2) 小林陵二, 機械の研究, 40-11 (1988), 1181
- 3) 黒木誠・前田明博・門久義・松村博久, 日本機械学会鹿児島地方講演会講演論文集, No.938-3 (1993), 413.
- 4) 小林陵二・新井隆景・山田泰司, 機論B, 53-489 (1987), 1539