

(2) 複数ノズルによるウォータージェット 加工技術の開発研究

機械部 横 山 栄 一
機械科 本 山 英 雄
後 藤 幸 臣
大 塚 裕 俊

1. はじめに

ウォータージェット加工技術は近年その応用範囲を広げ、ビニール・プラスチック・金属薄板等の切断から IC モールド、プラスチック射出成型品等のバリ取り等に利用されている。

同技術の合理的活用のためには、加工物の精密・多数同時加工によって能率化と加工精度の均一化を図ることが是非重要である。

現在ウォータージェットについては衝撃強さ・壊食・噴流構造等について研究されているが、同技術は実用の場面において殆どシングルノズルによる切断・穿孔等の使用に限られており、複数ノズルについては理論的・実験的な解明がなされていないため不十分な形で使用されることが多い。

この問題解決のため複数ノズルの各々から噴出するウォータージェットの噴流形状等が均等になるような複数ノズル分岐ランナーの開発研究を行った。なお、本研究は国庫委託事業である加速的技術開発支援事業の共通基盤的技術開発として実施された。

2. 研究内容と研究結果

複数ノズル用直管型（従来型）ランナーにおけるウォータージェットの噴出流量・ランナー内圧力・壊食量等の測定及び噴流形状の差異の測定に並行して、コンピュータシミュレーションによる流体の理論的解析を実施し、ランナー内高圧水の挙動を推定した。

その結果をうけて効率的な均一加工用の複数ノズルランナー（開発型ランナー）の設計・製作のための各パラメータ等を抽出・決定し、同ランナーの製作・評価を実施した。

(1) 直管型（従来型）ランナーによるウォータージェット噴出流量測定実験

イ. 実験方法

実験に先だってシングルノズルにより一定圧力で噴出流量の測定を実施し、各々の噴出流量が±1.2%以内の誤差となるような4個のノズルチップを選定した。

複数ノズル（ノズル数4；ノズル径 $d=0.18$ mm）用ランナー3本（主管内径3 mm, 6 mm, 10 mm）について、ランナー内圧力500, 1000, 1370 kgf/cm²で各ノズルからの噴出流量を各々測定した。ランナー内圧力はランナー終端部に取り付けられたダイヤフラム式歪ゲージ（圧力センサー）で測定した。

ランナー形状を図1、同外観を写真1、ノズルチップ形状を図2、噴出流量測定機の外観を写真2に示す。

ロ. 結 果

ランナー内圧力が一定ならば、主管内径によらず各ノズルからの噴出流量はほとんど等しい。このことから各ノズル背圧もほとんど等しいと考えられる。また、ランナー終端部圧力と高圧ポンプ出口圧力（指針式圧力計による）との間には圧力差は認められなかった。

実験結果を表1に示す。

(2) 直管型（従来型）ランナーによる壊食実験

イ. 実験方法

ウォータージェット加工試験機を使用して、主管内径3 mm, 6 mm, 10 mmの3本のランナーについて各ノズルによる壊食量を測定した。

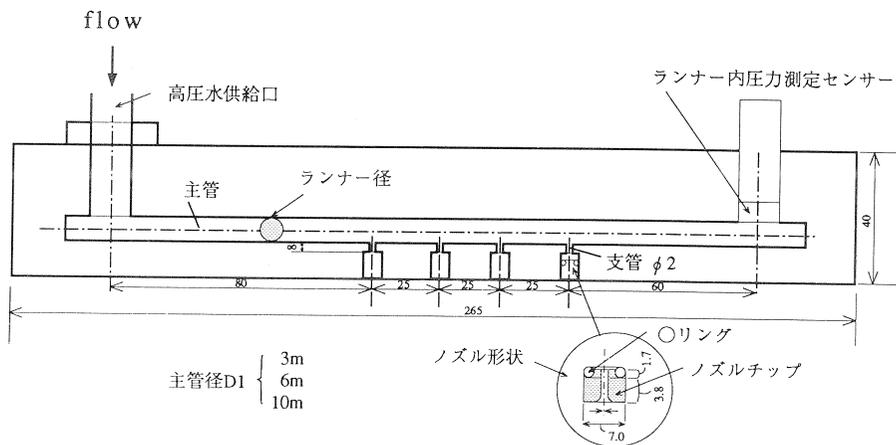


図1 直管型（従来型）ランナー形状

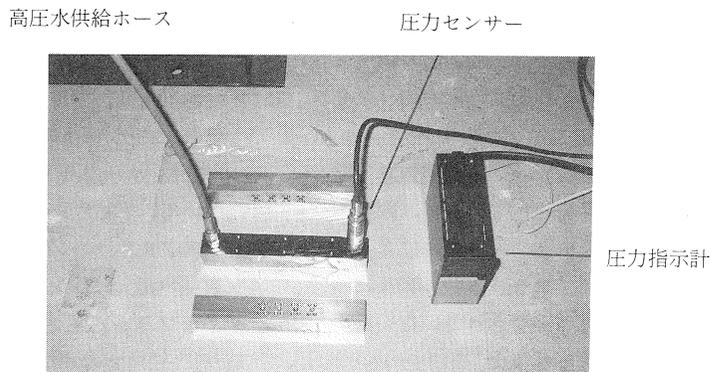


写真1 ランナー外観

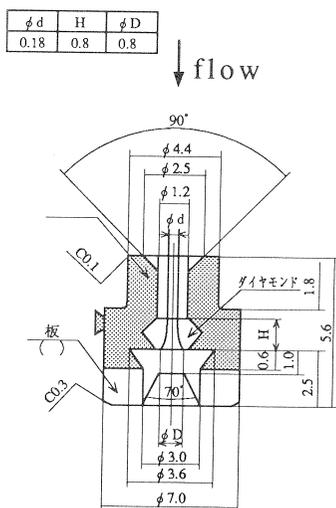


図2 ノズルチップの形状

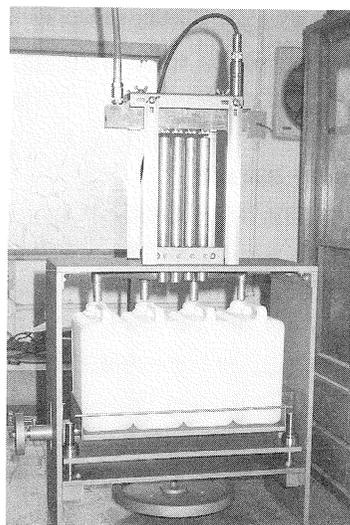


写真2 噴出流量測定機

表1 ランナー内圧力と各ノズルからの噴出流量（ノズル径0.18mm）

ランナー kg f / cm ²	主管内径 3 mm				主管内径 6 mm				主管内径 10 mm			
	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④
500	347	345	354	350	341	345	347	348	345	345	342	345
1000	476	474	478	472	480	480	477	485	485	473	478	479
1370	554	550	558	551	553	556	552	560	556	554	555	560

①～④はノズル位置番号

測定時間60sec 単位 c c

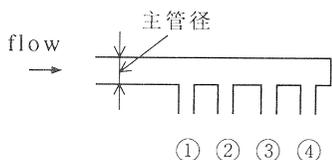


表2 各ノズルチップのシングルノズルとしての壊食量測定値

st n z	A	B	C	D
37	2.7	2.5	2.2	2.7
72	5.1	4.9	4.7	5.0
90	4.8	4.7	4.6	4.7
126	3.1	3.1	3.2	2.9

壊食量mg

st スタンドオフmm
n z ノズル名 (A~D)

試験片はアルミニウム合金A 5052 S 25mm角、厚さ10mmを用い、圧力は1000 kg f / cm²とした。またウォータージェット噴射時間を60secとし、スタンドオフ距離（ノズル出口ー試験片間距離）を36mm, 72mm, 90mm, 126mmの4条件（それぞれL / d = 200, 400, 500, 700ここでL : スタンドオフ距離mm d : ノズル径0.18mm）について実験を行った。

さらにノズル径dを0.14mm及び0.2mmとして同様の実験を行った。

壊食量の値は、実験前後の試験片の重量差により求めた。

ロ. 実験結果

本試験に先立ち、4個のノズルチップについて各チップによるバラツキを把握するため、各々シングルノズルとして壊食実験を行った。その結果を表2、図3に示す。

得られた測定値を表3に示し、各ノズル間の比較を壊食曲線として図4に示す。また、代表的な試験片の壊食状態を写真3に示す。

これらによればランナー内径が小さくなるに従って各ノズルの最大壊食量は大きくなり、その場合のスタンドオフ距離（焦点距離）は短くなるとともに、その壊食特性のばらつきも大きくなる。

ただ高圧水供給位置側から一番遠い距離にある

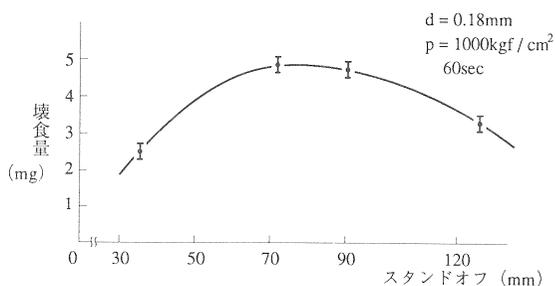


図3 同上

ノズル④についてはランナー内径の変化にもかかわらずほぼ一定の壊食特性を示している。

またランナー主管径・圧力を一定としてノズル径を変化させた場合について見ると、ノズル径の増減とともに壊食量も増減するが、これはノズルによる全噴出流量の変化のためである。ただし壊

食特性は図5のように各ノズル径により変化している。

前の実験(1)によればマクロ的ファクターである各ノズルでの流量及びノズル背圧はほぼ等しいと

の結果がでていますが、それにもかかわらず壊食曲線に上記のような差が現われることは、ウォータージェット噴流の形状・構造等が各ノズルによって異なることを示唆するものである。

表3 各ランナーによる壊食量測定値
(ノズル径0.18mm)

st \ np	①	②	③	④
3 7	5. 8	4. 8	4. 2	3. 0
7 2	5. 9	5. 6	5. 1	3. 8
9 0	3. 7	3. 9	4. 6	4. 7
1 2 6	1. 8	2. 5	3. 1	3. 9

壊食量mg
st スタンドオフmm
np ノズル位置番号
主管内径3mmランナー壊食量

st \ np	①	②	③	④
3 7	3. 6	3. 7	3. 7	2. 6
7 2	4. 9	4. 6	4. 7	3. 7
9 0	4. 7	4. 3	4. 5	4. 6
1 2 6	3. 6	3. 2	3. 4	3. 9

壊食量mg
st スタンドオフmm
np ノズル位置番号
主管内径6mmランナー壊食量

st \ np	①	②	③	④
3 7	3. 2	2. 9	2. 6	2. 6
7 2	4. 0	4. 0	3. 9	3. 7
9 0	4. 8	4. 4	4. 2	4. 1
1 2 6	3. 9	3. 2	3. 0	3. 8

壊食量mg
st スタンドオフmm
np ノズル位置番号
主管内径10mmランナー壊食量

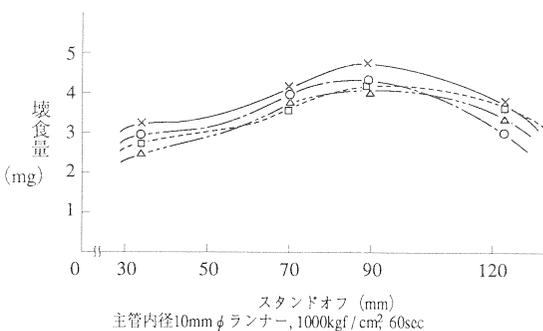
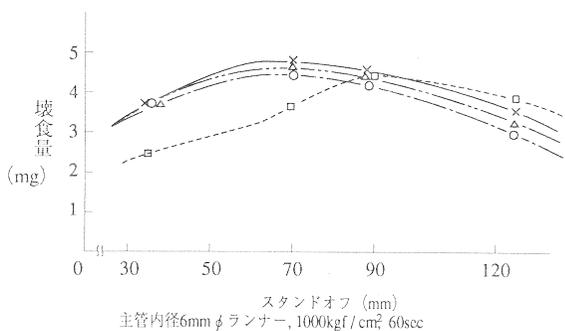
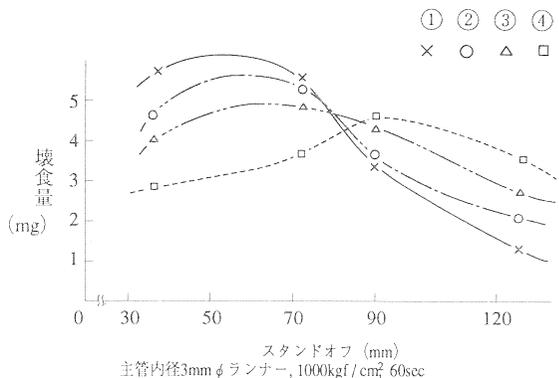
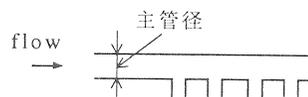


図4 各ランナーによる壊食曲線
(ノズル径0.18mm)

(3) 直管型（従来型）ランナーによるウォータージェット噴流の形状観測

イ. 実験方法

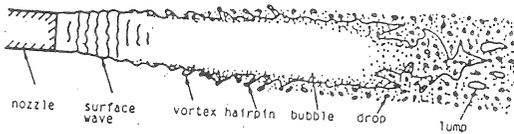
ウォータージェット噴流は模式的には図6に示すような、軸中心に位置する流体のみからなる部分（コア）とそれを取りまく気体-流体の混合領域が同心円状に配置された形をしている。このコアを中心とする噴流断面をレーザー光線を用いて可視化し、各噴流の形状の差異を観測した。

レーザー光線は He-Ne レーザーを用い、特殊レンズにより帯状の光線とし、スタンドオフ距離 30 mm, 50 mm, 90 mm にて噴流に角度 45° で照射した上、撮影・観測した。(図7)

ロ. 結果

内径 3 mm ランナーでのスタンドオフ距離 30 mm における噴流断面に映像を写真4に示す。(各ノズル間距離 25 mm)

各断面の中央に明るくはっきりと光っている部分がコア、その回りの赤くにじんで光っている部分が混合領域であると推定される。



「液体噴流における気液界流動」(橋本) による

図6 ウォータージェット噴流構造の概略図

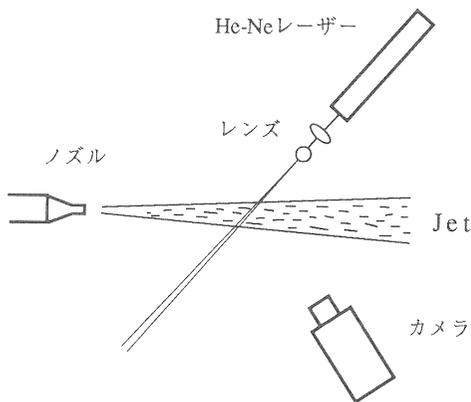


図7 ウォータージェット噴流断面観測装置概略図

スタンドオフ距離 30 mm での映像を見ると、ノズル④でははっきりとコアが確認できるのに対し、③②①の順序で次第にコアと回りの赤い混合領域との区別があいまいになっており、①ではコア自身がほとんど不明瞭になっている。

またスタンドオフ距離が 70 mm, 90 mm となるにつれてコアは消失してゆき、赤い混合領域の面積が拡大する。スタンドオフ距離 90 mm では、ついにノズル④でもコアが不明瞭となり消失する。

このことから、ノズル①が最も小さいスタンドオフ距離でコア崩壊を迎え、ノズル④が最も長くコアを維持していることがわかる。

また各ノズルの壊食曲線から、コア崩壊時のスタンドオフ距離が焦点距離にほぼ等しいことが推察される。

このような噴流形状の差異を生ぜしめる原因は、各ノズル部入口（上流）の分岐管・流速等に起因する乱流等のミクロ的・部分的要因の差異の影響によるものと考えられる。

(4) ランナー内高圧水の挙動のコンピュータシミュレーション

イ. 実験方法

以上の結果により、各ノズル上流の流体の微視

$P = 1000 \text{ kg f/cm}^2$
 主管内径 3 mm
 ノズル径 0.18 mm
 スタンドオフ距離 30 mm



写真4 複数ノズルウォータージェット噴流断面映像

$$P = 1000 \text{ kg f / cm}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ kg f / m}^3$$

$$\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ kg f / m} \cdot \text{s e c}$$

分岐管は幅 2 mm
 ×長さ 8 mm (実寸大)
 形成格子数 68 × 38
 使用コンピュータ: NEC PC-9801RL

的 (ミクロ的) 挙動の把握が必要であるので、これらの実験結果を踏まえながらランナー内流体をモデル化し、境界条件・物理的定数等を設定してコンピュータシミュレーションにより理論的解析を行なった。

流体解析用ソフトウェアは米 C/Creare 社の Fluent を用いた。

ロ. 実験結果

a. ランナー主管内径による管内分岐流の比較

主管内径 3 mm, 6 mm, 10 mm の 3 本の直管型 (従来型) ランナーについてのモデル設定条件及びシミュレーション結果を写真 5 ~ 写真 7 に示す。

写真 6 によればランナー内径が小さくなる程、分岐管分岐部及び支管内の渦や乱れの規模が大きくなる事が分かる。

b. 複数ノズル (4 本) ランナーの各ノズル間での管内分岐流の比較

主管内径 3 mm の直管型 (従来型) ランナーについて複数ノズル (4 本) のランナー全体でのモデル設定条件及びシミュレーション結果を写真 8 ~ 写真 10 に示す。

写真 9 によれば、分岐管分岐部及び分岐管内の渦や乱れの規模はノズル①が最も大きくノズル④ (高圧水入口側から最も遠い位置) で最も小さい事が分かる。また写真 10 を見れば、乱流規模の指標である κ (乱流エネルギー) の分布状況が端的にこれを裏付けていることがはっきり確認できる。

これらの結果により、噴流形状すなわち噴流軸心部 (コア) 長さとのノズル上流部の流体の乱れ (レイノルズ数・分岐比・分流比等の要因が深く関与) に相関関係があることが定性的に確かめられた。

ノズル上流部の乱れはウォータージェット噴流に対する不安定要因として機能し、コアの崩壊と深く関係があると考えられる。

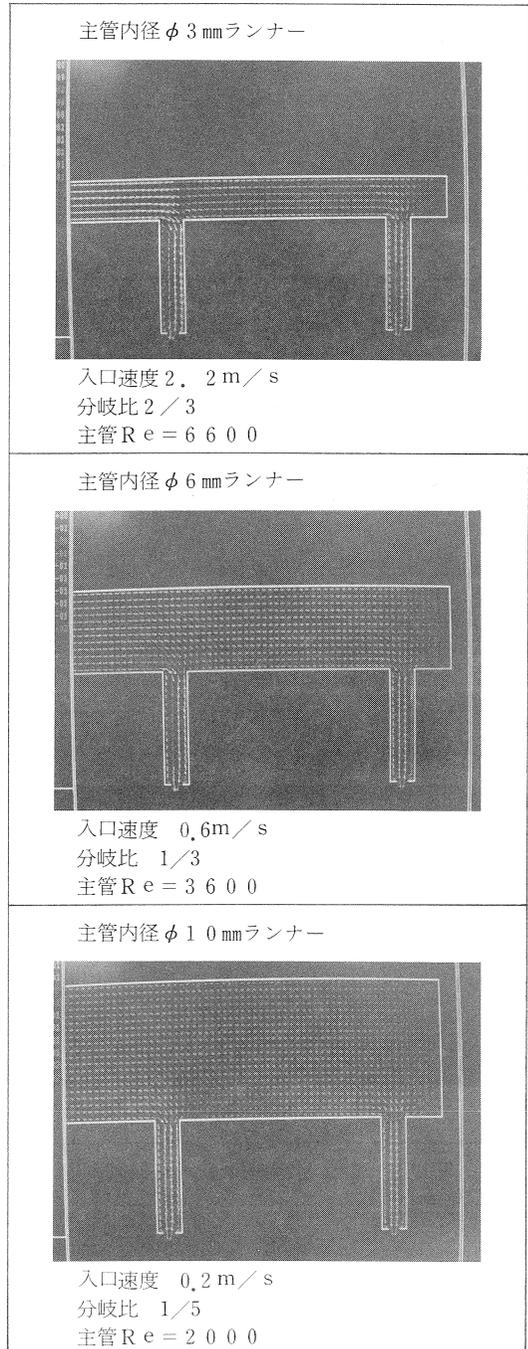


写真 5 シミュレーション a 速度ベクトル図

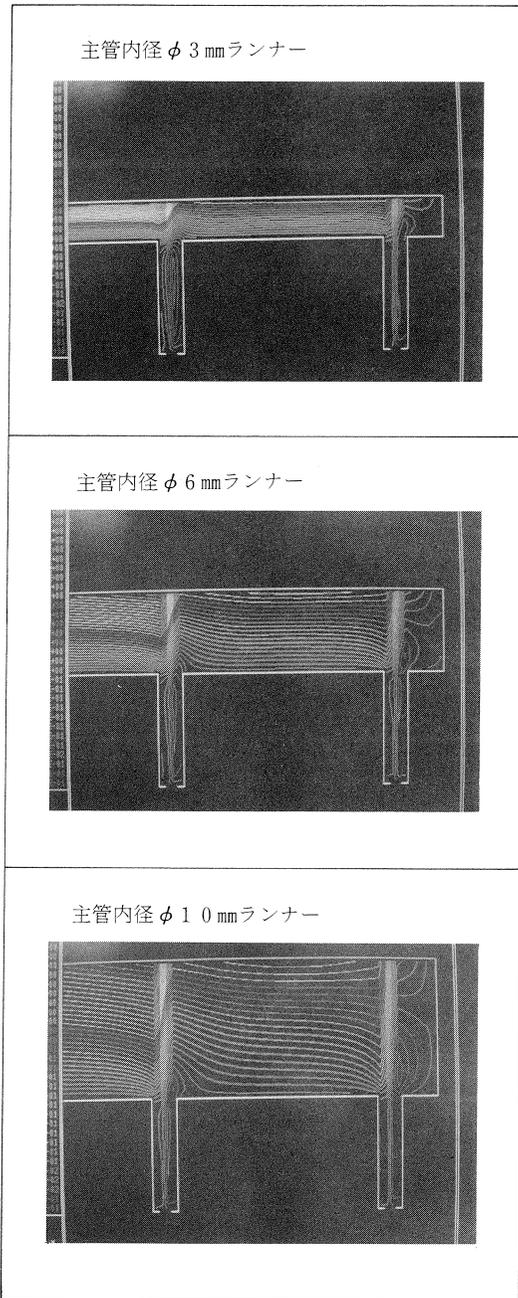


写真6 シミュレーションa 流線図

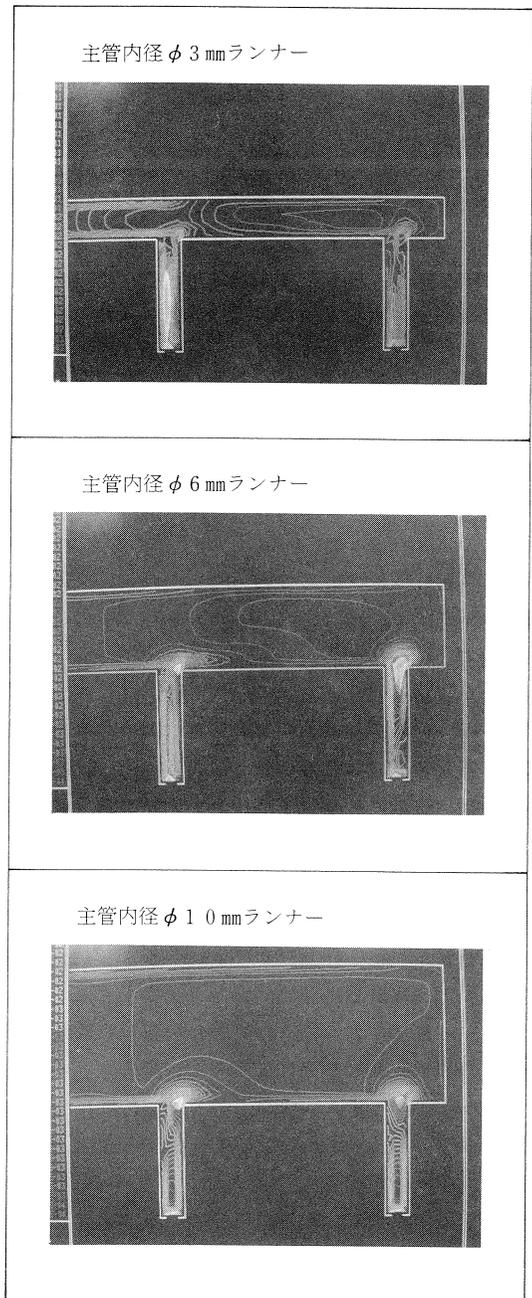


写真7 シミュレーションa 乱流エネルギー分布図

主管内径 $\phi 3 \text{ mm}$ ランナー
 $P = 1000 \text{ kg f/cm}^2$
 $P = 1000 \text{ kg f/m}^2$
 $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ kg f/m} \cdot \text{sec}$
 主管 $Re = 13200$
 分岐管は幅 2 mm
 \times 長さ 8 mm (実寸大)
 形成格子数 100×24
 使用コンピュータ: NEC PC-9801RL

$P = 1000 \text{ kg f/cm}^2$
 $P = 1000 \text{ kg f/m}^2$
 $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ kg f/m} \cdot \text{sec}$
 主管 $Re = 6600$
 分岐比 = $4/9$
 分流比 = $1/4$
 分岐管は幅 2 mm
 \times 長さ 8 mm (実寸大)
 形成格子数 35×38
 使用コンピュータ: NEC PC-9801RL

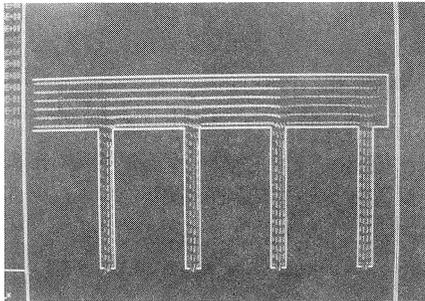


写真8 シミュレーションb
速度ベクトル図

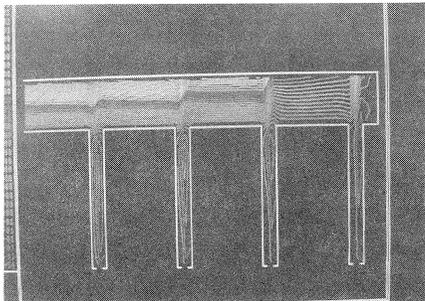


写真9 シミュレーションb
流線図

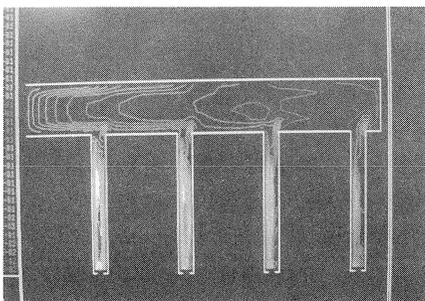
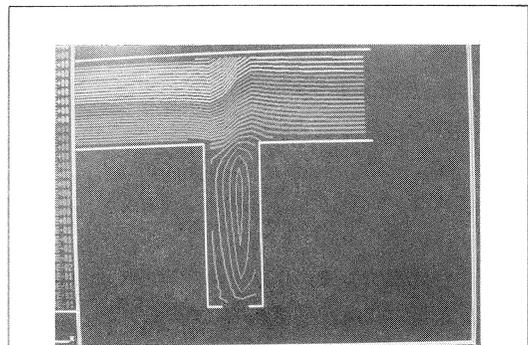
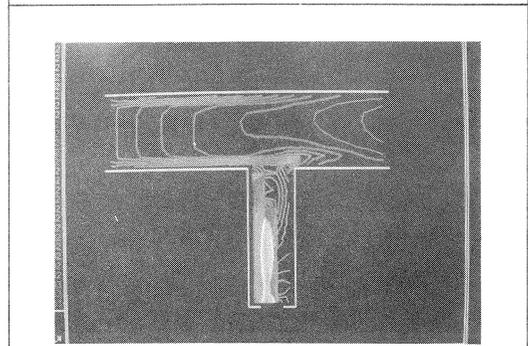


写真10 シミュレーションb
乱流エネルギー分布図



流線図



乱流エネルギー図

写真11 分岐部高圧水乱流評価シミュレーション結果 (例)

(5) 異型（開発型）ランナー設計用CADデータの構築シミュレーション

イ. 実験方法

分岐管分岐部および分岐管内での乱れの規模は、幾つかの要因が深く関与している。各種パラメータの検討の結果、主管レイノルズ数・分岐比・分流比をパラメータとして定め、これらを変化させてシミュレーションを繰り返し、発生する乱れの規模を求めて基礎データとした。

使用した流体解析ソフトウェア（Fluent）は乱流モデルとして $\kappa-\epsilon$ モデルを採用しているので、 κ （乱流エネルギー）を乱れの規模を表わす仮の指標とした。

ロ. 結果

各パラメータによる κM （ κ の最大値）の変化を図8に示す。

また代表的なモデル設定条件及びシミュレーション結果（状況）を写真11に示す。

なおモデルでの各パラメータは次の無次元数である。

主管レイノルズ数＝主管幅(代表的長さ)×主管流速／粘性係数

分岐比＝分岐管幅／主管幅

分流比＝分岐管流量／主管流量

但し分岐管は幅2mm×長さ8mmにスケールとした。(実寸大)

この結果を利用すればランナー（主管）入口の径・流速等の条件が与えられれば、各ノズル部での乱れの影響を均一にするようなランナー形状の設定が可能となる。

またこのシミュレーションでは4本ノズルを前提としたが、一般的なN本ノズルランナーへの応用も可能である。

(6) 異型（開発型）ランナーの製作及び評価

イ. 実験方法

以上のシミュレーションにより構築された設計データをもとに、加工の難易性等を考慮した上で、効率的な均一加工を可能とするような複数ノズルランナー（開発型ランナー）として図9に示すようなランナー形状を定め、その製作を行なった。

(2本) 製作されたランナーの外観を写真12に示す。

さらに同ランナーの性能評価をおこなうため壊食実験を実施した。実験方法については(2)に準ずる。

なお、開発型ランナーについてもシミュレーションを行なった結果を写真13に示す。

ロ. 結果

開発された同ランナーA・Bによる壊食量の測定値を表5に、壊食曲線を図10に示す。

ハ. 評価

この異形（開発型）ランナーを用いた場合、ランナー内各分岐部へ供給する主管内の高圧水速度は一定であり、主管の断面積変化でそれに対応している。

ランナー内径を6→3mm及び12→6mmに変化させた場合、それぞれランナー内流速は1.1m/sec, 0.3m/secである。

ランナー内高圧水速度が1.1m/sec(一定)では、各ノズルによる最大壊食量は5.1~4.3mg/min, 同様に0.3m/sec(一定)では3.9~3.5mg/minであり、異形（開発型）ランナーにおいてもランナー内速度大で壊食量大、速度小で壊食量小となる傾向がある。

表7により壊食効果（最大壊食量とその各ノズル間でのばらつきの場合）について検討すると、まず異形ランナーA（6→3mm）では最大壊食量は内径3mm及び6mmの直管型ランナーによる結果の中間の値に近いが、ばらつきの場合は小さく総合的には優れているといえる。

異形ランナーB（12→6mm）についても同様の点で改善されている。

以上のことからランナー内高圧水の各分岐部での速度等を含めた各種物理量、ひいては物理的状态を各種パラメータの制御により均一に近づけることが必要であると考えられる。

また主管一分岐管部の製作過程での精度等も物理的条件として結果に微妙な影響を及ぼすと考えられ、この点についての管理も考慮すべき問題である。

なお本研究開発に際し、製作・利用したウォータージェット加工試験機一式の構成・仕様等につ

いて図12, 表8, 写真14等に示す。

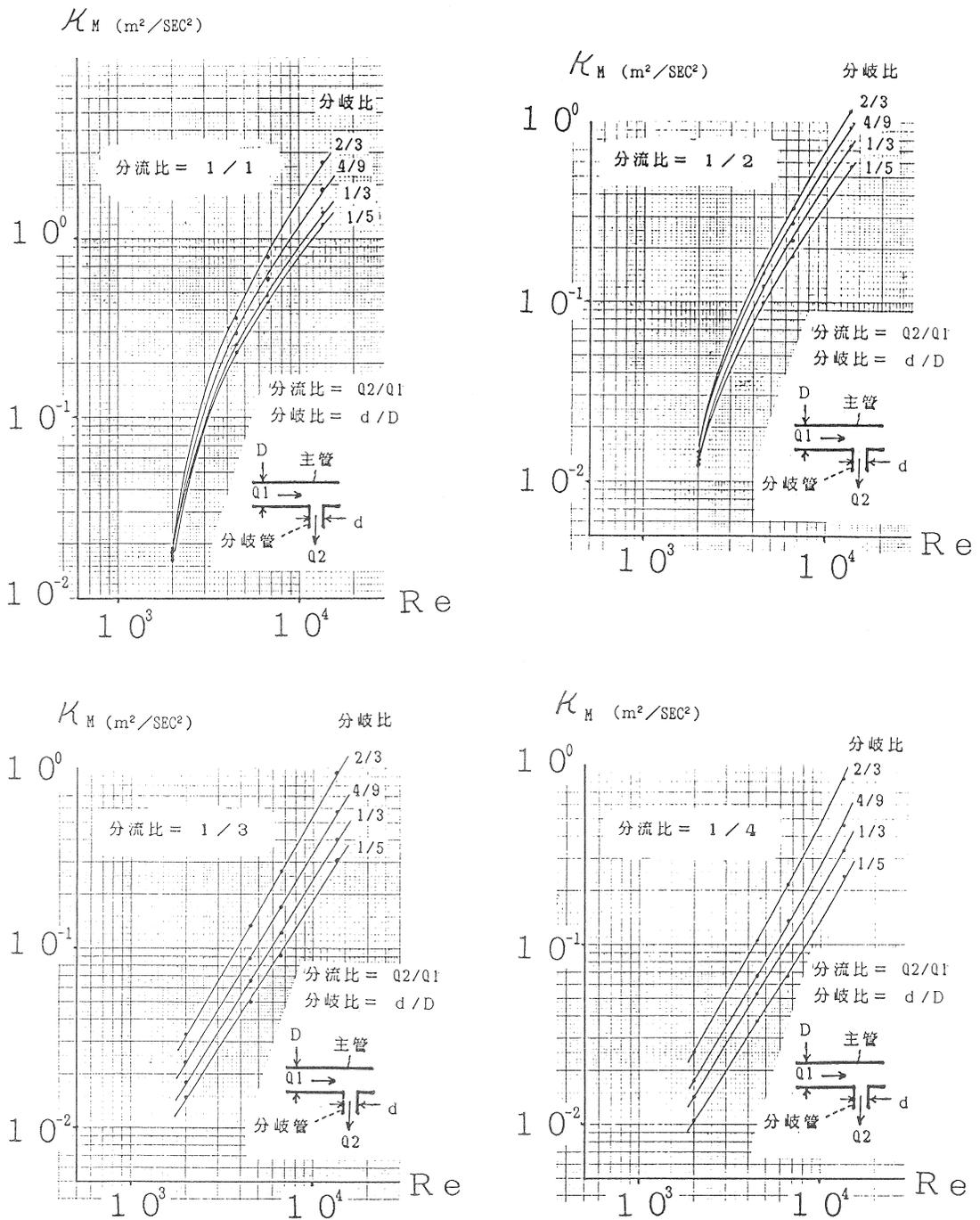


図8 各パラメータによる K_M (乱流エネルギー最大値) の変化 (シミュレーションによる)

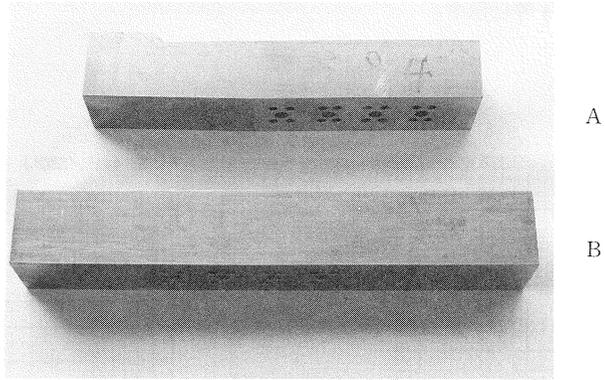
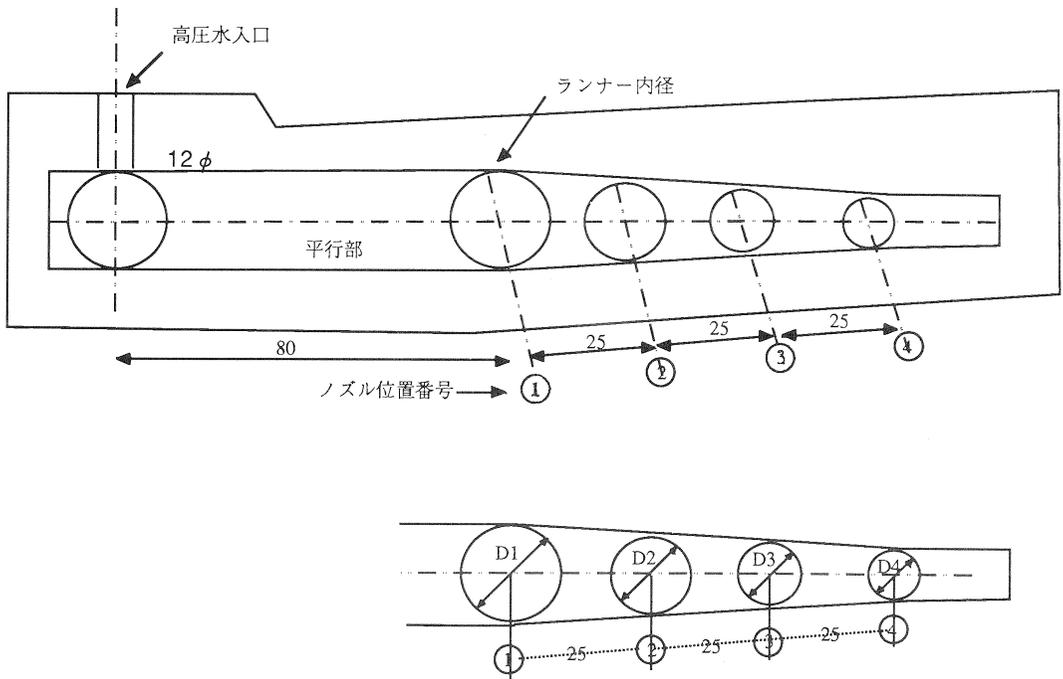


写真12 ランナー（開発型） A・B



径 (mm)	D1	D1	D1	D1
ランナーA	6	5.2	4.2	3
ランナーB	12	10	8.5	6

図9 ランナー断面図 A・B

$P = 1000 \text{ kg f/cm}^2$
 $P = 1000 \text{ kg f/m}^2$
 $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ kg f/m} \cdot \text{sec}$
 主管 $R_e = 13200$

分岐管は幅 2mm
 ×長さ 8mm (実寸大)
 形成格子数 100×24
 使用コンピュータ: NEC PC-9801RL

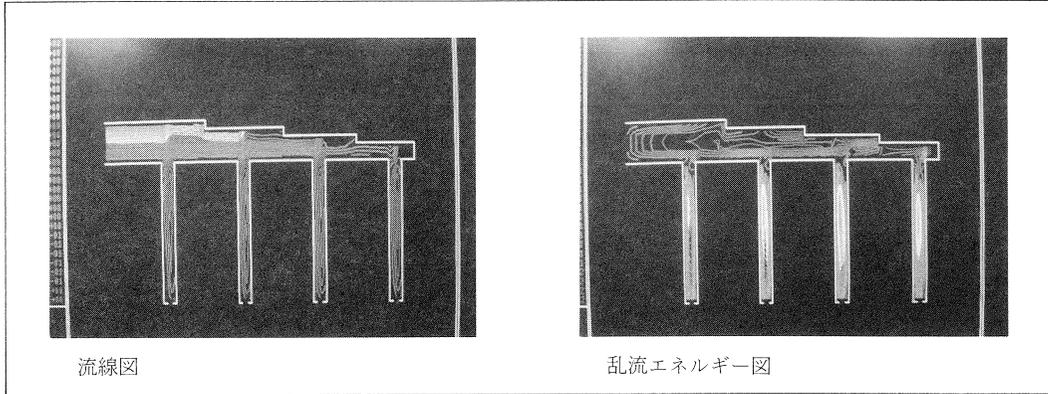


写真13 異形ランナー評価シミュレーション結果 (例)

表5 異形ランナーによる壊食量測定値

st \ np	①	②	③	④
37	3.6	3.6	3.3	3.0
72	4.9	5.1	4.7	4.3
90	4.6	4.6	4.6	4.6
126	3.0	3.2	3.0	3.6

st \ np	①	②	③	④
37	2.0	2.2	2.1	2.0
72	3.1	3.7	3.3	2.9
90	3.5	3.9	3.6	3.6
126	3.1	3.0	2.8	3.5

壊食量mg

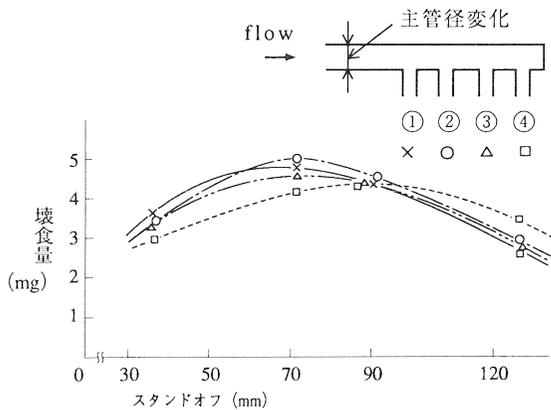
st スタンドオフmm
np ノズル位置番号

壊食量mg

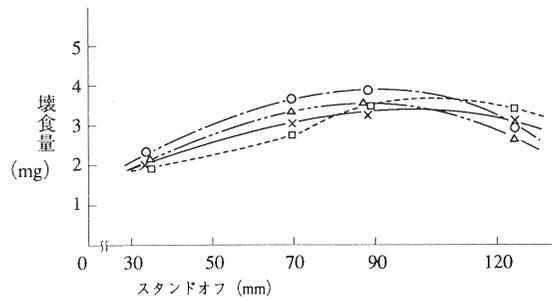
st スタンドオフmm
np ノズル位置番号

A. 主管内径6mm-3mm異形ランナー壊食量

B. 主管内径12mm-6mm異形ランナー壊食量



A. 主管内径6→3mm φランナー 1000kgf/cm² 60sec, d=0.18mm



B. 主管内径12→6mm φランナー 1000kgf/cm² 60sec, d=0.18mm

図10 異形ランナーによる壊食曲線

表6 直管型及び異形ランナーによる懐食特性の比較

ランナー内径 (mm)	ランナー内速度 (m/sec)	スタンドオフ (mm)	壊食量最大値 (mg)	
			ノズル①~④	差
3	4.4 ~ 1.1	72	5.9 ~ 3.7	2.2
6	1.2 ~ 0.3	90	4.9 ~ 3.7	1.2
10	0.4 ~ 0.1	90	4.8 ~ 4.1	0.7
6 - 3	1.1	72	5.1 ~ 4.3	0.8
12 - 6	0.3	90	3.9 ~ 3.5	0.4

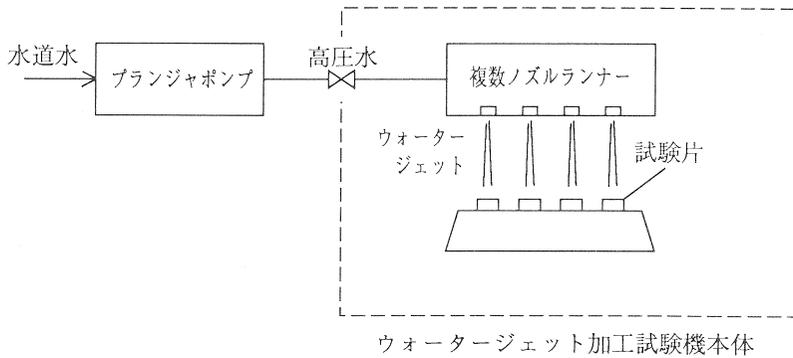


図11 ウォータージェット加工試験機一式の概略

表7 ウォータージェット加工試験機一式の仕様及び機能

①複数ノズルランナー		ロ. 加工材移動機構
イ. 直管型(従来型)ランナー (3本)		切断加工台 340w×300Lmm
主管内径 3mm、6mm、10mm		移動距離 900mm
ロ. 異型(開発型)ランナー (2本)		移動速度(可変) 15~60mm/sec
A (断面内径が10mmから6mmに変化)		ハ. 高圧水切替機構
B (" 6mmから3mmに変化)		作動方式 空気圧シリンダーブロック式
ノズル数 4ヶ ノズルピッチ 25mm		作動圧力 2kgf/cm ²
ノズル径 0.14mm、0.18mm、0.2mm	(材質 ダイヤモンド)	ニ. 制御系
高圧水供給側平行部管長 80mm		手動・自動切替方式
材質 SUS304		高圧水切替バルブON・OFF
②ウォータージェット加工試験機(写真14)		切断加工台 前・後進
イ. ランナー昇降機構		③高圧ポンプ(写真15)
上下可動距離 600mm		プランジャ式ポンプ FOD-15JH (有光工業製)
昇降方式 手動ハンドル方式		吐出量 3ℓ/min
		吐出圧力 0~2000kgf/cm ²
		プランジャ 1φ×85mm×3本
		電力 11kW

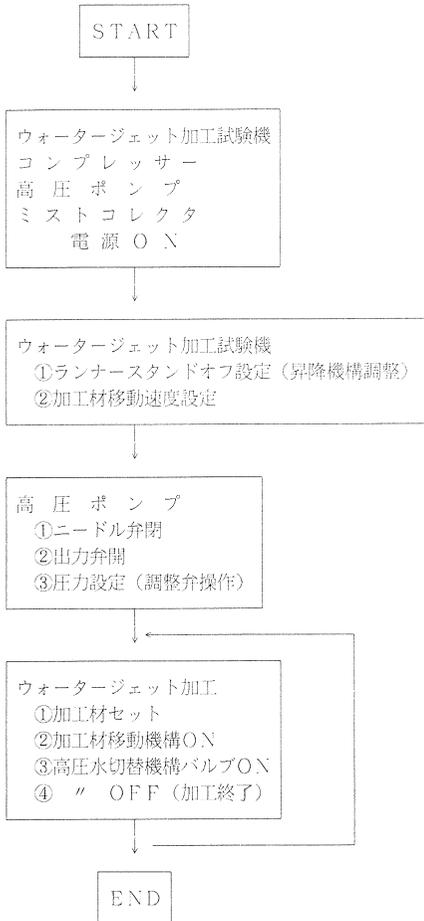


図12 ウォータージェット加工試験機作動手順

3. 結 言

- ① 複数ノズル用直管型(従来型)ランナーを製作し、ランナー内高圧水の挙動を把握するため各ノズルによるウォータージェットの噴出流量を、各種ランナー内径について測定し、ウォータージェットの噴出速度及びランナー内高圧水の挙動等について検討した結果、各ノズル毎のウォータージェット噴出流量及びノズル背圧はほぼ等しいが、アルミ試験片の壊食試験によれば各ノズル毎の壊食曲線の形状はランナー径によって大きくばらつきを生ずることがわかった。
- ② レーザー光を用いて噴流断面形状を可視化し、各ノズルによる噴流形状の差異を観測した結果、

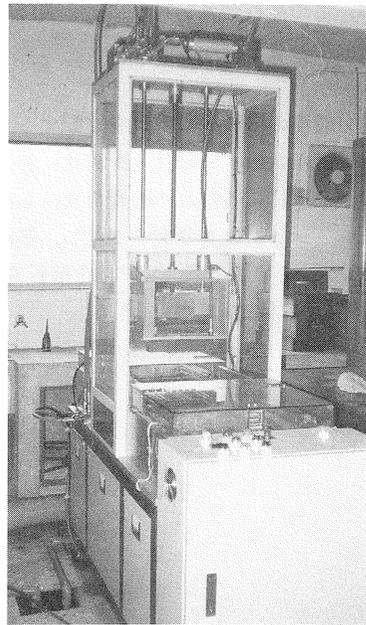


写真14 ウォータージェット加工試験機(本体)

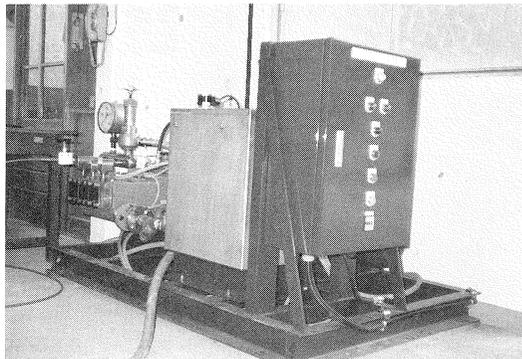


写真15 高圧ポンプ

壊食曲線の形状の変化はウォータージェット噴流形状、特に噴流軸心部(コア)の長さや密接に関係していることがわかった。

- ③ ランナー内高圧水のモデリング・境界条件の設定を行い、高圧水の理論的挙動解析をコンピュータシミュレーションにより実施した結果によれば、直管型(従来型)ランナーの場合、ランナー分岐部の分岐比・ランナー径・流速等の条件によって各ノズル上流の分岐部付近に不均一な渦を生

ずるが、この乱れが各ノズルによる噴流形状の差異の原因であると推定される。

- ④ 管内分岐流の微視的な乱れを支配するパラメータ（レイノルズ数・分岐比・分流比）を抽出し、各パラメータによる乱れへの寄与をコンピュータシミュレーションによりデータ化し、基礎的設計データとしてCAD化の基本的指針を確立した。

- ⑤ 直管型（従来型）ランナーの実験結果及びシミュレーション結果により、異型（開発型）ランナーの形状を決定した上でこれを製作し壊食実験を実施した結果、従来型ランナーに比較して壊食曲線のばらつき・壊食効果の点で改善された。

最後に今回の研究開発の企画に際し、適切な助言・指導を与えて頂いた(財)大分県高度技術開発研究所の立川逸郎所長に感謝します。