



JP0150297

JAERI-Research
2000-068



高速噴流ノズルの壁面加工粗さが
自由表面噴流に与える影響に関する実験

2001年2月

中村 弘史*・井田 瑞穂・中村 博雄
中村 秀夫・江里 幸一郎・秋場 真人

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

高速噴流ノズルの壁面加工粗さが自由表面噴流に与える影響に関する実験

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

中村 弘史*・井田 瑞穂・中村 博雄

中村 秀夫+・江里 幸一郎・秋場 真人

(2000年12月19日受理)

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) では、液体リチウム(Li)の高速噴流ターゲットを生成するため、2次元の金属製縮流ノズルを用いる。本研究では縮流ノズルの内面粗さが自由界面の乱れに与える影響について、水模擬実験による検討を行った。

試験では、これまでの水模擬実験で用いてきたノズル形状を基に、内面の加工粗さの異なるアクリル製ノズル2体を使用した。それらの表面加工粗さは、▽ (最大粗さ 100 μm 以下) と ▽▽ (最大粗さ 6.3 μm 以下) である。加工粗さの差異が噴流の自由界面の乱れにおよぼす影響について、高速度ビデオカメラによる自由界面状態の撮影、およびレーザードップラー流速計 (LDV) を用いたノズル出口における流速分布の測定を行って調べた。また、大気開放時と減圧条件時における自由界面の乱れを可視的に比較し、空気の有無が界面の乱れに与える影響について調べた。表面加工粗さが▽の場合、流速が 7.5m/s 前後から液面の乱れは大きくなり、15m/s 以上になると液滴の発生が観察された。一方、表面加工粗さが ▽▽ の場合、液面の乱れは鏡面仕上げの場合と同程度 (液面の乱れは流速 12m/s 前後から大きくなるが、液滴の発生は流速 20m/s の場合でも観察されなかった) であり、十分使用に耐えることを確認した。また、液面の乱れに空気の影響は小さいことが分かった。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+ 東海研究所安全性試験研究センター 原子炉安全工学部

* 茨城大学大学院

Experimental Study on the Effect of
Nozzle Surface Finishing in High-speed Water Jet

Hiroshi NAKAMURA*, Mizuho IDA, Hiroo NAKAMURA
Hideo NAKAMURA+, Koichiro EZATO and Masato AKIBA

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 19, 2000)

International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) employs a liquid Li jet target being formed by two-dimensional metal contraction nozzle. The Li is corrosive substance and there is the possibility that the Li is corrosive to nozzle surface. Therefore, it is necessary to investigate the effect of nozzle surface finishing on the free surface instabilities, from the viewpoint of useful life and to determine the practical accuracy of finishing. The experiments were performed by two methods, one is the observation of free surface behavior by a high-speed video camera, and the other is the measurement of the velocity profile at the nozzle exit by Laser Doppler Velocimeter (LDV). Two types of nozzles are employed in the present experiment, namely, nozzles with surface finishing of ∇ (maximum roughness: $100\ \mu\text{m}$) and $\nabla\nabla\nabla$ (maximum roughness: $6.3\ \mu\text{m}$). In case of the surface finishing of $100\ \mu\text{m}$, the free surface waves grew growing about 7.5m/s mean velocity at the nozzle exit, and when the mean velocity is over 15m/s , many droplets were observed. On the other hand, there was little difference of free surface behavior between surface finishing of $6.3\ \mu\text{m}$ and mirror finishing. These results satisfy the specification required for the IFMIF target nozzle.

Keywords: Water Jet, Free Surface, Surface Wave, Surface Finishing, IFMIF

+ Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center Tokai Research Establishment

* Ibaraki University.

目次

| | |
|------------------------|----|
| 1. はじめに ----- | 1 |
| 2. 実験概要 ----- | 2 |
| 2.1 目的 ----- | 2 |
| 2.2 実験装置 ----- | 2 |
| 2.3 測定方法 ----- | 3 |
| 3. 実験結果 ----- | 5 |
| 3.1 高速ビデオによる液面観察 ----- | 5 |
| 3.2 流速分布 ----- | 6 |
| 3.3 境界層における速度分布 ----- | 6 |
| 3.4 境界層厚さ ----- | 7 |
| 4. まとめ ----- | 8 |
| 謝辞 ----- | 9 |
| 参考文献 ----- | 9 |
| 付録 ----- | 24 |

Contents

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of Experiment | 2 |
| 2.1 Objective | 2 |
| 2.2 Experimental Apparatus | 2 |
| 2.3 Measurement Method | 3 |
| 3. Experimental Results | 5 |
| 3.1 Observation of Free Surface Behavior by High-speed Camera | 5 |
| 3.2 Velocity Profiles | 6 |
| 3.3 Velocity Distributions in Boundary Layer | 6 |
| 3.4 Boundary Layer | 7 |
| 4. Summary | 8 |
| Acknowledgement | 9 |
| References | 9 |
| Appendix | 24 |

1. はじめに

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) においては、高エネルギー重陽子ビームを液体リチウム噴流のターゲットに照射し中性子場を発生させることが計画されている⁽¹⁾。このときターゲットに要求される条件として、最大 10MW のビームによる発熱を除去するため最大 20m/s の高速で流れるとともに、その流れが安定した噴流であり、厚みの変化と自由界面の擾乱が小さいことが求められている。これに関し、水を用いた模擬実験によるターゲット流の基本的な流動特性の解明が試みられており、自由界面の擾乱が、境界層によってもたらされる剪断層の不安定性によって引き起こされていることを明らかにすると共に、より自由界面の乱れが少ないノズル形状の提案など、成果を上げている⁽²⁾⁽³⁾。ところが、これまでの実験では滑らかな内表面の縮流ノズルを用いてきており、実機条件を想定した場合、腐食性の液体 Li によるノズル表面の荒れやノズル製作時の加工精度等、ノズル内表面粗さが流れの安定性におよぼす影響を調べておく必要がある。

本研究では、表面の加工粗さの異なるノズルについて、加工粗さの差異が噴流の自由界面の乱れにどのような影響をおよぼすか調べることを目的とする。製作したアクリル製ノズルは、表面加工粗さが▽ (最大粗さ 100 μm 以下) のものと▽▽▽ (最大粗さ 6.3 μm 以下) であり、実験は自由界面の乱れを高速度カメラにて撮影するとともに、レーザードップラー流速計 (LDV) にてノズル出口における流速分布、特に境界層厚さの違いに着目して測定を行った。

本研究の結果は、計画中の Li 流動試験で応用される予定である。ただし、ここでは実機のターゲットを想定した減圧 (真空) 下での実験も行うが、実験の簡便性と安全性を考慮して、大部分をカバーガスとしてアルゴンを用いた有雰囲気実験として行う予定である。このとき、高速噴流とカバーガスとの相互作用によって界面波が大きく成長することが予想されることから、今回の水模擬実験では、雰囲気ガス (空気) の有無が噴流の自由界面の安定性におよぼす影響を、減圧条件での実験を行うことで併せて調べた。

2. 実験概要

2.1 目的

水平噴流実験の目的は、加工粗さの異なるノズルを用い、表面の粗さが噴流の自由界面の乱れにどのような影響を与えるかを調べるとともに、金属製ノズル製作時の加工粗さの許容値を決定することである。また、噴流周辺の雰囲気圧力が自由界面の安定性に及ぼす影響について調べる。

2.2 実験装置

本実験は、日本原子力研究所東海研究所の化学工学特別研究棟内に設置されている直線水平噴流実験装置を用いて行った。実験装置のフローシートを Fig.1 に示す。循環ポンプによって送り出された水は、ノズルの上流において、アルミ製ハニカム（昭和飛行機工業、AL3/16-5052-0015N）と3枚の多孔板（孔径5mm、開口率63%）からなる整流部にて速度分布を均一にされた後、縮流ノズルによって平板状の噴流を形成する。噴流は水平バックウォールに沿って流れた後、水タンクに集められ、ここで回収時に巻き込んだ気泡を除去するとともに、キャビテーションの発生を防ぐために約6mのヘッドを与えて循環ポンプに送られる。なお、ポンプの振動が試験部に伝播しないように、ポンプ前後にゴム製フレキシブルフランジを設けたり、試験部の架台に重りを乗せるなど、防振に留意した。また、試験ループは気密性を有しており、真空ポンプを接続することで、減圧条件（ $0.5\text{kgf/cm}^2 \sim 0.15\text{kgf/cm}^2$ 程度）での実験も行えるようになっている。実験で用いたノズルは、島のモデル⁽⁴⁾に基づいた縮流ノズルを2段に連ねたもので、以下の要求を満たすものとして設計された。

- ・ノズル出口での速度分布は可能な限り一様である
- ・ノズル表面において減速領域が存在しない
- ・ノズル全長が可能な限り短くなる

Fig.2 に試験部の概略を、Fig.3 にノズル部の詳細をそれぞれ示す。ノズル出口は幅100mm厚さ10mmの矩形断面で、これより噴出する平板状の噴流が水平平面に沿って流れることで、自由界面を持つ高速噴流が得られる。試験体は透明アクリル製で、外部からの観察および、レーザー流速計による速度計測が可能である。また、ノズル直後およびノズルから150mmと300mm下流部の流路上面には80×50mmの取り外し可能な観測用窓を設けており、上方からの高速度ビデオカメラによる観察が可能である。（図の写真では、まだ観測窓は無く、装置起動時に生じる液滴の飛沫が天井部に付着するため液面の観察が出来ない。その対策として観測窓を設け、取り外

せるよう設計変更した。) なお、このノズルは、先だって伊藤⁽³⁾らが行った水模擬実験に用いた表面を鏡面仕上げとしたノズルと同形状とし、それとの比較も可能とした。ただし、本実験装置の方はノズル先端に平行部は無く、比較の際に平行部の影響について考慮する必要がある。

2.3 測定方法

本実験は、IFMIFにおける運転条件(ノズル出口平均流速 $U_m=15.0\text{m/s}$ 、Li:523K)について、水とLiの物性値やノズルサイズの違い、あるいはポンプの性能等を考慮し、ノズル出口平均流速が $U_m=2.4\sim 20.0\text{m/s}$ の場合について実験を行った。Table 1に水とリチウムの物性値の比較とこのときの無次元量の比較を示す。

Table 1 Thermophysical properties of Li at IFMIF and water

| | Li (523K) & IFMIF | Water (297K) |
|--|-------------------|--|
| Density; ρ [kg/m^3] | 507 | 997 |
| Kinematic velocity; $\nu \times 10^{-7}$ [m^2/s] | 10.6 | 9.1 |
| Surface tension; $\sigma \times 10^{-2}$ [N/m] | 38.7 | 7.2 |
| Nozzle size; $W \times D$ [mm] | 260 \times 25 | 100 \times 10 |
| Exit velocity; U [m/s] | 15 (10 \sim 20) | 2.4 \sim 20 |
| Reynolds number; $Re=UD/\nu$ | 3.5×10^5 | $3.5 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^5$ |

測定は表面加工粗さ ∇ (最大粗さ $100\mu\text{m}$ 以下) と $\nabla\nabla\nabla$ (最大粗さ $6.3\mu\text{m}$ 以下) について、各流速におけるノズル出口面での流速分布と、ノズル出口直後およびノズルより 150mm 下流における液面状態の観察を行った。Table2 に本実験での実験条件を示す。

Table 2 Experimental parameters

| item | velocity profile | surface behavior |
|---------------------------------|---|--|
| method | LDV | high-speed camera |
| surface finishing | ∇ (MAX roughness; $100\mu\text{m}$) / $\nabla\nabla\nabla$ (MAX roughness; $6.3\mu\text{m}$) | |
| velocity[m/s] | 2.4 \sim 20 | 2.5 \sim 20 (5 \sim 15 for vacuum) |
| measurement location | nozzle exit | nozzle exit / 150mm from nozzle |
| condition [kgf/cm^2] | atospheric air | atospheric air / vacuum(0.15 \sim 0.5) |

ノズル出口面の流速分布は、後方散乱型レーザー Doppler 流速計 (Aerometrics, RSA-2000) と、レーザー光源に Ar レーザー (Spectra Physics, Model 168-06) を用いて計測を行った。本機器の光学プローブはトランスミッタとレシーバレンズから成っており、有効口径は 72mm、その焦点距離は 250mm で、焦点位置でのビームウェストは $45\ \mu\text{m}$ である。本機器は 2 次元の速度計測が可能であるが、本実験では x 軸方向の 1 次元速度計測のみを行った。Fig.4 に光学プローブの設置状況を示す。図に示すように、光学プローブは 3 次元駆動装置に固定され、y 軸方向に 0.01mm 幅での移動が可能である。計測は試験部側面よりレーザーを照射し、ノズルの中心線における速度分布を計測したが、その際、壁面や自由界面におけるビームの散乱を防ぐため、光学プローブを上向きに少し傾けた。測定は 1 箇所につき 5000 点以上あるいは 15 分以上データのサンプリングを行い、得られたデータを平均化して流速を求めた。また、計測の際、壁面の位置を厳密に特定できないため、焦点位置を壁面内部から少しずつ移動させていき、明らかな反応があった場所を測定開始位置 (壁面から 0.01mm) とした。

液面状態の観察は、噴流の真上に設置した高速度ビデオカメラ (nac, 1000FPS) を用い、500 フレーム/秒の速度にて撮影した。撮影は大気開放条件と減圧条件の場合についてそれぞれ行い、大気開放条件においては観察窓を外し、減圧条件時には観察窓を拭いた後に曇り止めを塗るなど、より鮮明な画像が得られるよう留意した。光源は、カメラと同期させたストロボ光を噴流の斜め下方に設置し、透過光によって液面の凹凸のコントラストを強調して撮影を行った。その際、ストロボ前面にトレーシングペーパーを取り付け、散乱させることでより均一な照明を得た。なお、IFMIF において重陽子ビームが照射される位置はノズル出口から 150mm 下流付近であり、その位置での噴流表面の挙動および噴流の厚さが中性子場の形成に影響することから、液面状態の観察はノズル出口付近だけでなく、それより 150mm 下流の位置についても行った。

3. 実験結果

3.1 高速ビデオによる液面観察

高速ビデオによるノズル直後の液面の観察結果を Fig.5、Fig.6 に示す。ノズル出口平均流速 U_m が比較的低速な場合 ($U_m \leq 5\text{m/s}$) 液面状態は 3 形態に分類できる。まず、ノズル出口直後において観察されるほとんど波が存在しない平滑領域、次に連続した波で比較的周期性を有する 2 次元波が観察され、その下流では波の 2 次元性が崩れ 3 次元的に乱れた波に成長した領域が現れる。2 次元波の波長は最初 1~2mm 程度であるが、下流に行くに従って液面近傍の速度回復に伴う波長の延長が観察される。また、ノズル出口平均流速が増加するに伴い、平滑領域および 2 次元波領域の長さは徐々に減少していき、ノズル出口直後から 3 次元波の発生が観察されたが、この場合も、ノズルからの距離が離れるに従って平均的な波長は増加した。ノズル出口平均流速が低い場合においては、表面加工粗さの違いによる影響はほとんど現れておらず、表面粗さが $100\ \mu\text{m}$ と $6.3\ \mu\text{m}$ 共にほぼ同様の液面状態を示しており、場合によっては、表面が粗い $100\ \mu\text{m}$ の方がより滑らかな液面状態が観察できた。これに対し、流速が 7.5m/s 前後から、表面加工粗さの違いによる影響が現れ始めた。表面粗さが $100\ \mu\text{m}$ の場合、 7.5m/s 付近からそれまで存在していた平滑領域と 2 次元波領域は消失し、ノズル出口直後から 3 次元波が観察されるようになった。一方、表面粗さが $6.3\ \mu\text{m}$ の場合、平滑領域はわずかではあるが存在しており、流速を 20m/s まで上げて消失することは無く、3 次元波の成長の仕方も緩やかである。この表面加工粗さが液面状態に与える影響は、ノズルから離れるに従ってより顕著に現れるようになった。Fig.7、Fig.8 にノズル出口から 150mm 下流における液面の観察結果を示す。写真が示すように 5m/s までは液面の乱れにそれほど差は生じていないが、 7.5m/s 付近から $100\ \mu\text{m}$ の方は乱れが大きくなり始め、 15m/s では明らかに差が確認できる。また、画像では確認できないが、表面粗さが $100\ \mu\text{m}$ の場合、流速が 15m/s 付近から液面の乱れによる液滴の飛沫が観察され、 20m/s では観察窓にまで盛んに液滴が付着するようになった。伊藤ら⁽²⁾は、流速が 8m/s を超えた辺りから平滑領域や 2 次元波領域が消失したと報告しているが、これは、表面の加工粗さの影響によるものと言うよりは、縮流部直後の平行部によって境界層が発達したため剪断層の不安定性が増加したものと考えられる。なお、液滴の飛沫についての記述は無く、液滴の飛沫が生じていたかは明らかではない。

Fig.9 に大気開放時と減圧時における液面の観察結果を比べたものを示す。図の比較から分かるように、液面の乱れに大きな差は無く、当初予想していたような噴流と雰囲気との速度差に伴う剪断応力による表面波の成長は観察されなかった。これは、試験部の液面上方が閉じた空間となっていることから、液面付近において噴流と同じ

方向に空気が流れるような循環流が発生し、結果的に液面と雰囲気との間の速度差が小さくなり大きな剪断力が働かなくなったためと考えられる。同様に、程度の差はあるものの開放された空間においても液面近傍では噴流方向の流れが生じており、強制的に流れ方向と反対の方向に送風しない限り雰囲気の影響は小さいものと考えられる。

3.2 流速分布

Fig.10 に表面加工粗さが $100\ \mu\text{m}$ と $6.3\ \mu\text{m}$ におけるノズル出口面での速度分布の様子を横軸に壁面からの距離、縦軸に流速をとって整理したものを示す。また、速度分布形状を比較しやすいように、縦軸の流速を断面平均流速にて除して、無次元に規格化したものを Fig.11 に示す。なお、鏡面仕上げの結果については、伊藤⁽³⁾より提供されたデータを元に作図してある。図の比較から分かるように、加工粗さが $100\ \mu\text{m}$ の方が境界層の厚さが厚く、壁面の影響が大きいことが分かる。図から表面粗さが $6.3\ \mu\text{m}$ の場合、主流速が大きくなるにつれ、速度勾配も大きくなっていくが、表面粗さが $100\ \mu\text{m}$ になると $U_m=7.5\sim 10.0\text{m/s}$ 付近を境に速度分布に明らかな差異が認められる。前節の高速ビデオによる観察結果によると、表面粗さが $100\ \mu\text{m}$ の場合 7.5m/s 付近から液面形状の違いが観察されており、表面加工粗さによる速度分布の差異が、液面状態に影響することが確認できた。なお、鏡面仕上げの場合の速度分布が、 $6.3\ \mu\text{m}$ の場合と比較して速度勾配が緩やかになっているのは、ノズル出口における平行部の有無によるもので、 10mm の平行部によって境界層が発達したためと考えるのが妥当である。

3.3 境界層における速度分布

伊藤ら⁽²⁾は境界層の速度分布について、摩擦速度 U_τ と動粘度 ν を用いて $y^*(=yU_\tau/\nu)$ 、 $u^*(=u/U_\tau)$ による評価を行っている。本報告書においても同評価法を用いて検討を行ってみた。その結果を Fig.12 に示す。ここで、 U_τ は

$$U_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho} \quad (1)$$

で定義しており、 τ_w は壁面摩擦剪断応力である。ただし、伊藤らは壁面剪断応力を直接測定していないため、ある2つの条件を矛盾無く満たす値として定義し、その値を用いているが、本報告書においては、

$$\tau_w = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (2)$$

で定義し、 du/dy を最初の測定点（壁面から 0.01mm の位置）までの直線の傾きで近似した。一般に、層流境界層と乱流境界層において、速度分布はそれぞれ次式

$$u^+ = y^+ \quad u^+ = \frac{1}{0.41} \ln y^+ + 5.2 \quad (3)$$

とよく一致するとされているが、図からは速度分布と式との一致は認められない。また、伊藤らのデータについても、上記方法で τ_w を求めて再評価したところ、Fig.12の(c)のようになり、やはり式との一致は見られなくなる。伊藤らは、速度分布の評価の際、 τ_w を矛盾の無い値として仮定しているが、本実験では壁面からの距離とその位置での流速から近似値を求めており、アクリル表面の凹凸(25 μm , 100 μm)やビームウェスト径(45 μm)などによる壁位置の不確かさに大きく影響される。

3.4 境界層厚さ

境界層の厚さについて、排除厚さ δ_1 および運動量厚さ δ_2 を求め、比較検討を行った。排除厚さ、運動量厚さは以下の式による。^{注1)}

$$\delta_1 = \frac{1}{U} \int_0^\infty (U - u) dy \quad (4)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{U^2} \int_0^\infty u(U - u) dy \quad (5)$$

ただし、 U は最大流速とした。Fig.13に排除厚さと運動量厚さについて整理したグラフを示す。また、これら境界層厚さについての比、 $H_{12} = \delta_1 / \delta_2$ をFig.14に示す。この境界層厚さの比は形状係数と呼ばれ、境界層における速度分布の形状を表すパラメータとされ、例えば一様な流れに平行に置かれた平板上の境界層では、層流の場合には $H_{12} \doteq 2.6$ 、十分発達した乱流の場合には $H_{12} \doteq 1.4$ とされる⁽⁵⁾。図では、表面粗さが100 μm の場合、平均流速が5m/sから7.5m/sにかけて急激に値が変化しており、表面粗さが6.3 μm では12m/sから13m/sで急激な変化が見られる。これらの流速範囲は、液面観察において液面が大きく乱れ始めた値とほぼ一致しており、境界層が乱流境界層に変化する付近から液面の乱れが大きくなっていることを示している。また、鏡面仕上げの場合についても同様の傾向が見られ、ノズル出口での境界層の状態が液面の状態に大きく影響していることが分かる。

注1) δ_2 については被積分項に u がかけられているので、どこを壁位置($y=0$)にとろうとも値は変わらないが、 δ_1 は壁位置のずれの分だけ増減することから、壁位置の不確かさの影響について考慮する必要がある。

4. まとめ

縮流ノズルの内表面加工粗さが噴流の自由界面の安定性に与える影響、および雰囲気圧力が自由界面の安定性に与える影響を調べることを目的とし、表面の加工粗さの異なるアクリル製ノズルによる水模擬実験を大気圧下と減圧下で実施し、以下の結果を得た。

- (1) 表面加工粗さが $\nabla\nabla\nabla$ (最大粗さ $6.3\mu\text{m}$ 以下) においては、自由界面の乱れは比較的小さいが、表面加工粗さが ∇ (最大粗さ $100\mu\text{m}$ 以下) では、界面の乱れは大きく、平均流速が $U_m \geq 15\text{m/s}$ では、液滴の飛散が観察された。
- (2) 境界層の状態と液面との乱れの関係を知るため、形状係数 $H_{12} = \delta_1 / \delta_2$ によるノズル出口での境界層の評価を行った。その結果、乱流境界層において液面乱れが成長することを、定性的に確認出来た。また、鏡面仕上げとの比較から、ノズル表面の加工粗さやノズル出口における平行部の有無など、ノズル出口での境界層の状態が液面状態に大きく影響していることが分かった。
- (3) 減圧下における実験の結果から、液面の乱れに空気の影響は小さいことが分かった。ただし、今回の実験では液面上方の空間が比較的小さく、液面に沿った循環流が生じており、完全な大気開放下における影響は未確認である。

上記の水模擬実験結果を液体 Li 流れに適応させる場合、水と Li の物性値の違いを考慮する必要がある。しかし、高速噴流上に生じる自由界面波が剪断層の不安定性によって引き起こされるとした場合、界面波は剪断層厚さと剪断層内の速度分布に支配されるため、重力加速度(密度)と表面張力が界面波におよぼす影響は無視できる。そのため、水模擬実験の結果を基に液体 Li 噴流の自由界面波を予測することは可能である。

以上のことから、液体 Li 噴流用金属ノズルの製作にあたっては、表面の加工粗さは $\nabla\nabla\nabla$ (最大粗さ $6.3\mu\text{m}$ 以下) の精度が必要であり、且つ縮流部直後に平行部など境界層を発達させるものが無い方が有利であることが明らかとなった。

最後に、(1)で述べた液滴の飛沫については、明確な要因は明らかになっておらず、今後の調査、検討が必要である。また、リチウムによる腐食等に伴う表面粗さの悪化の許容値をより明確にするためにも、本実験とは異なった表面仕上げ荒さを有するノズルでの補完データ取得も必要である。

謝辞

本水平噴流実験を実施するにあたり、ご助言、ご協力を頂いた原子力エンジニアリング(株)の皆様には深く感謝いたします。また、データをまとめるにあたり、有用なご助言、貴重な実験データを提供してくださいました東電ソフトウェア(株)の伊藤和宏氏に深く感謝します。また、多くのご支援とご助言を頂いた NBI 加熱研究室および核融合中性子工学研究室の皆様には深く感謝いたします。最後に、本試験にあたり多くのご支援を頂いた那珂研究所松田慎三郎所長、核融合工学部関昌弘部長、竹内浩室長・次長に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Y.Kato, et al., "Conceptual Design Study of IFMIF Target System", 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 3, 1260 (1997)
- (2) H.Nakamura, et al., "Water Experiment of High-speed, Free-surface, Plane Jet, Along Concave Wall", 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 3, 1268 (1997)
- (3) K.Itoh, et al., "Initial Free Surface Instabilities on a High-speed Water Jet Simulating a Liquid-metal Target", Fusion Technology, 36, 69 (1999)
- (4) 島 章、「任意のノズル形状に関する直接法および逆接法の理論」、東北大学 高速力学研究所報告、17-164、61(1961)
- (5) 生井・井上、「粘性流体の力学」理工学社、109(1990)

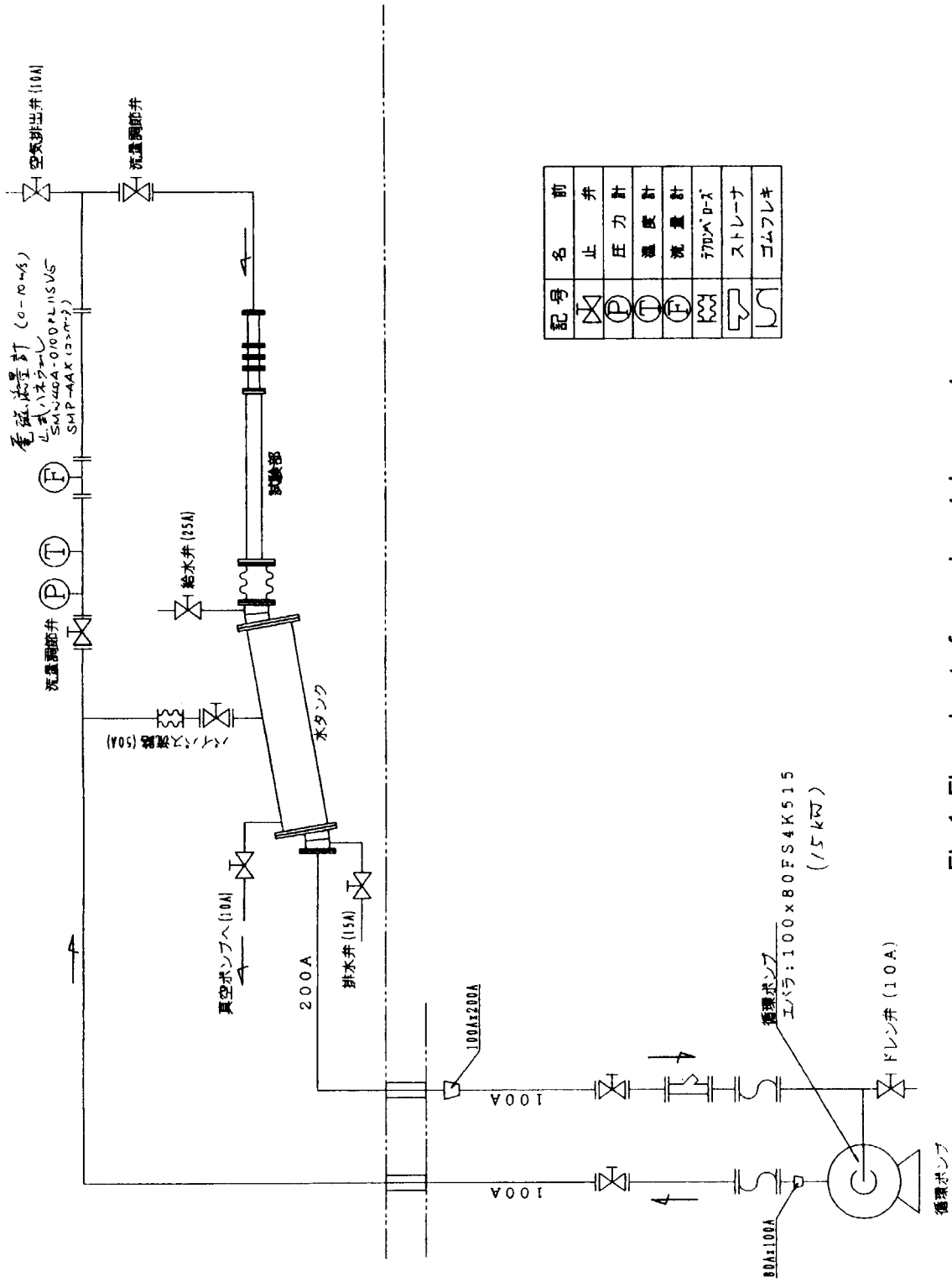


Fig.1 Flow sheet of experimental apparatus

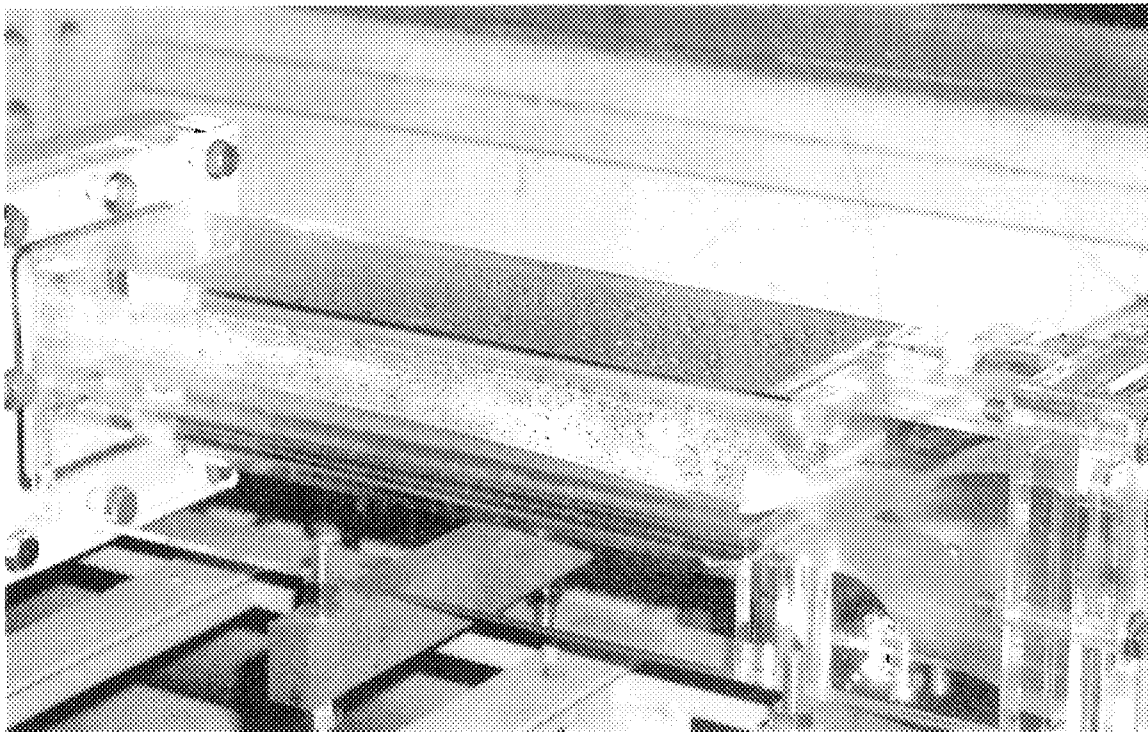
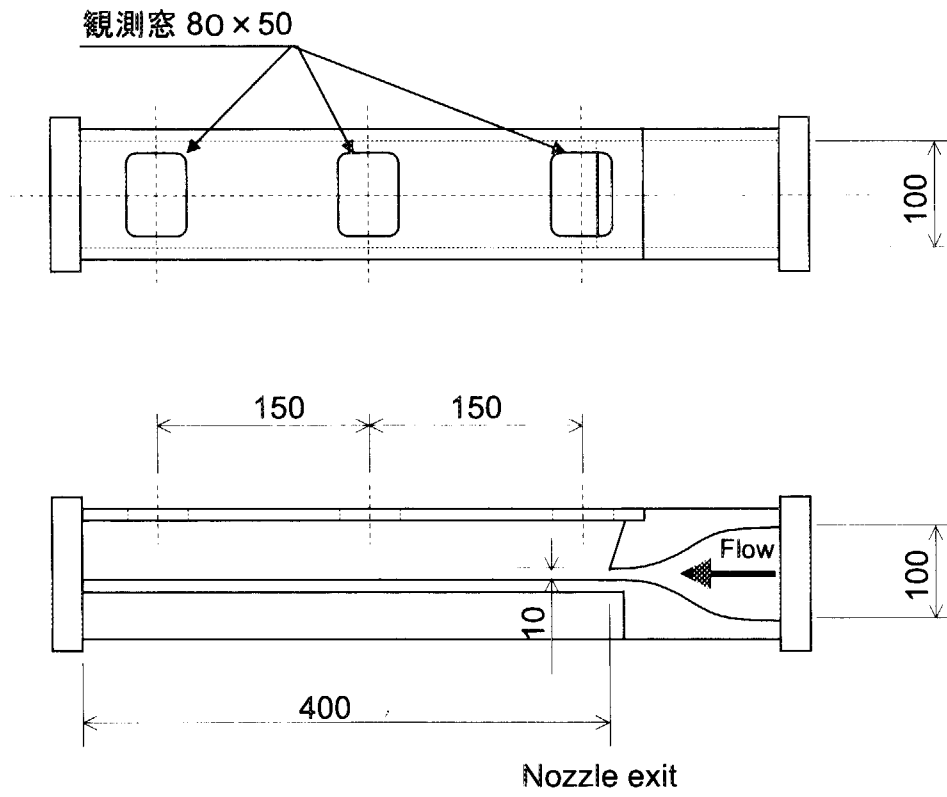


Fig.2 Detail and dimensions of test section

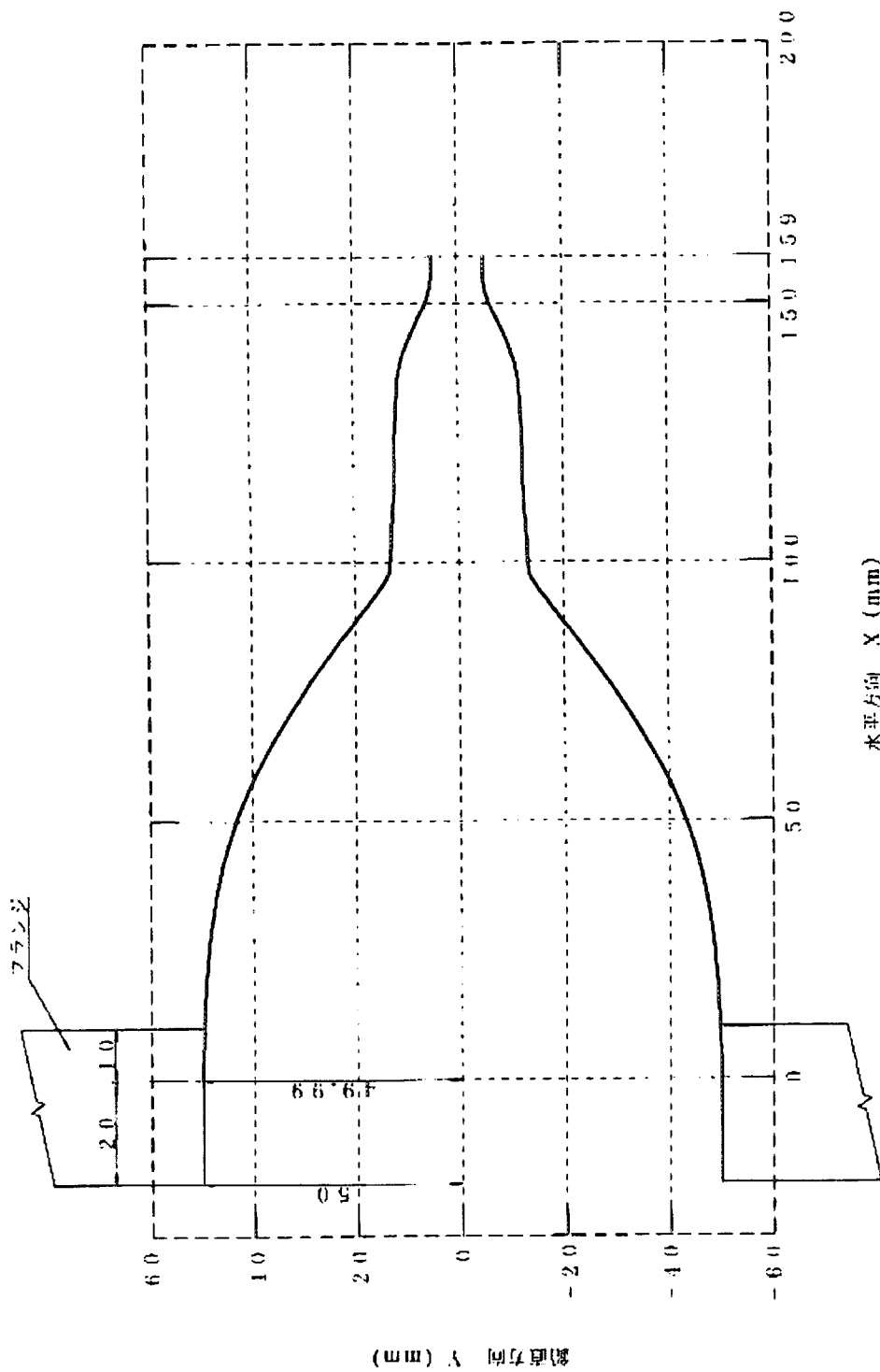


Fig.3 Cross-sectional view of the nozzle part

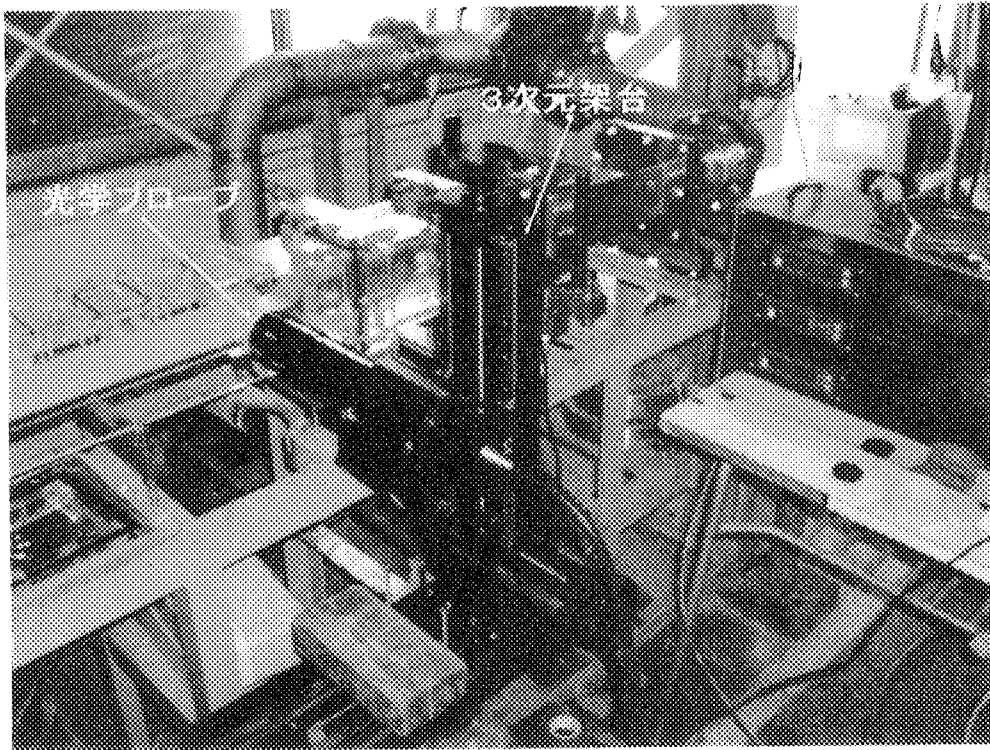


Fig.4 Optical probe set up

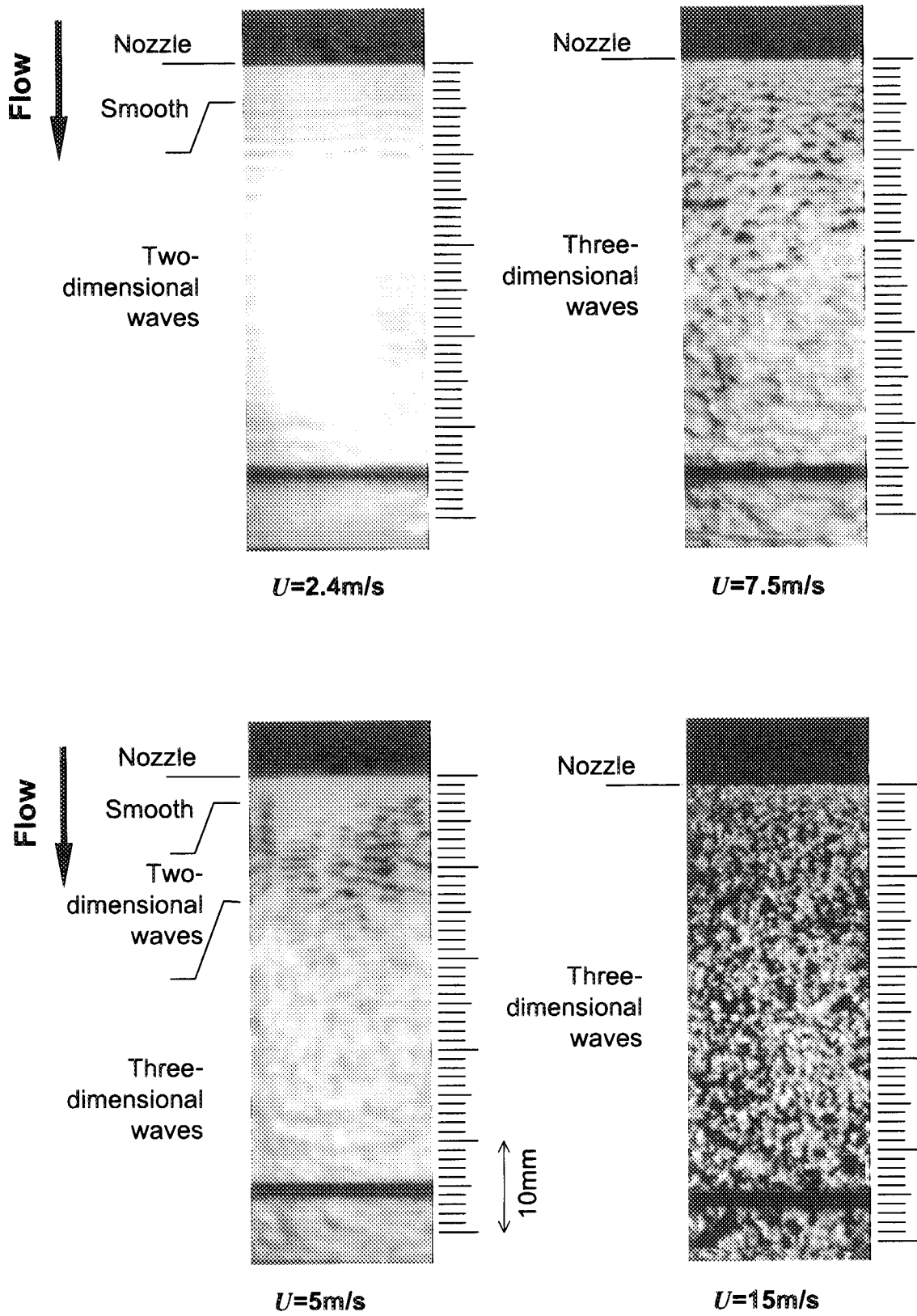


Fig.5 Photographs of free surface wave at the nozzle (surface roughness ;100 μm)

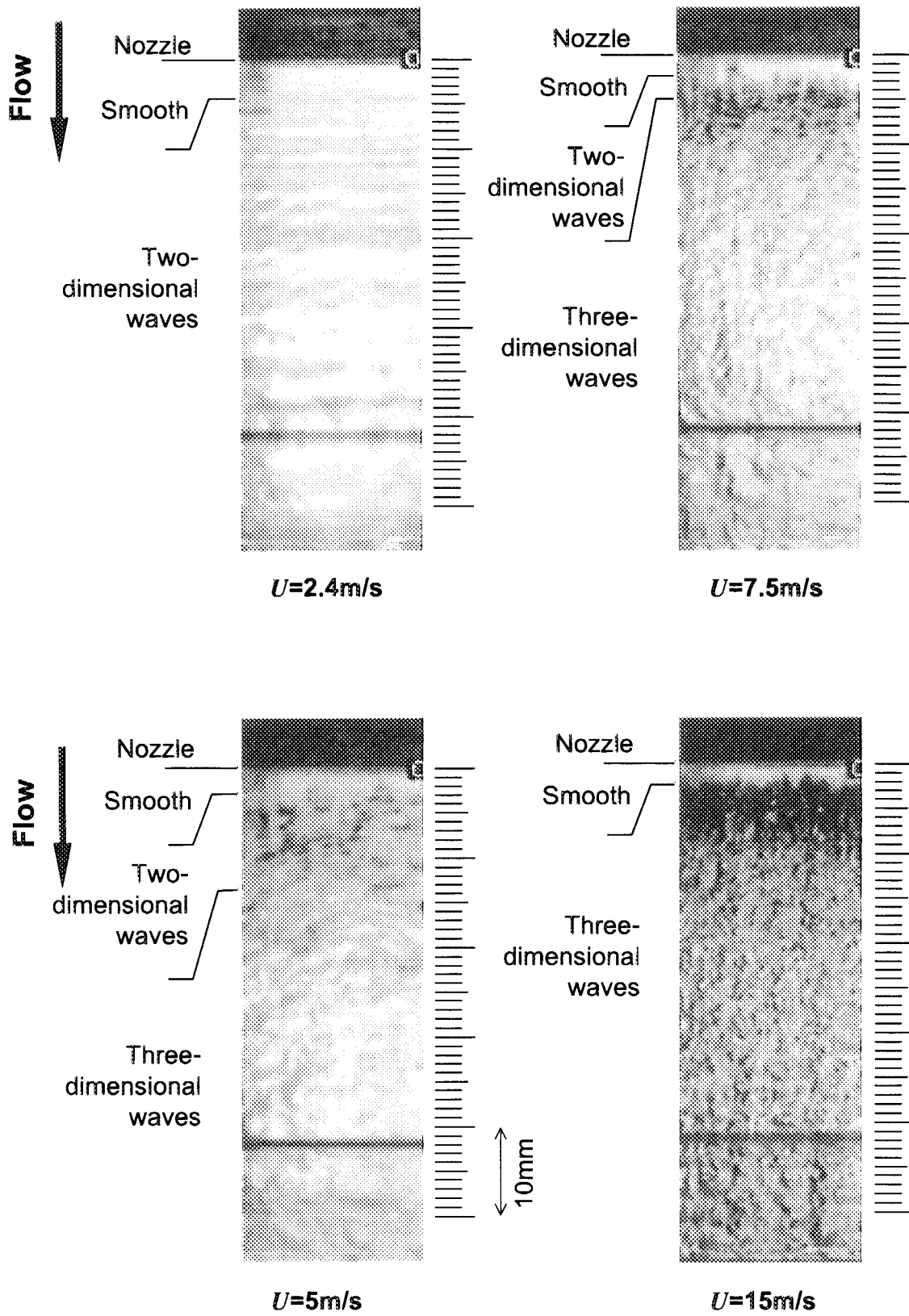


Fig.6 Photographs of free surface wave at the nozzle (surface roughness ; $6.3\mu\text{m}$)

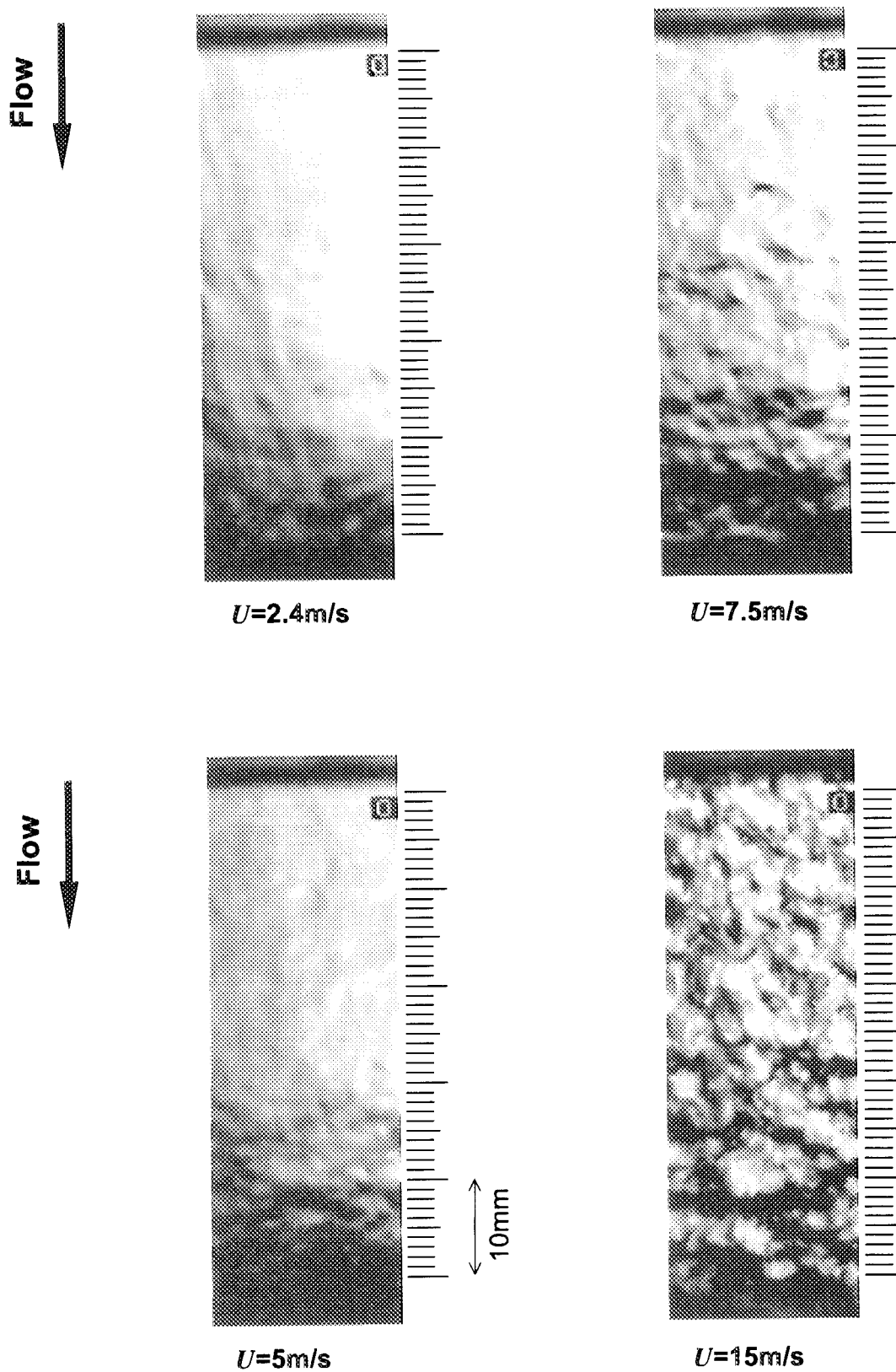


Fig.7 Photographs of free surface wave at 150mm from the nozzle (surface roughness ; $100\mu\text{m}$)

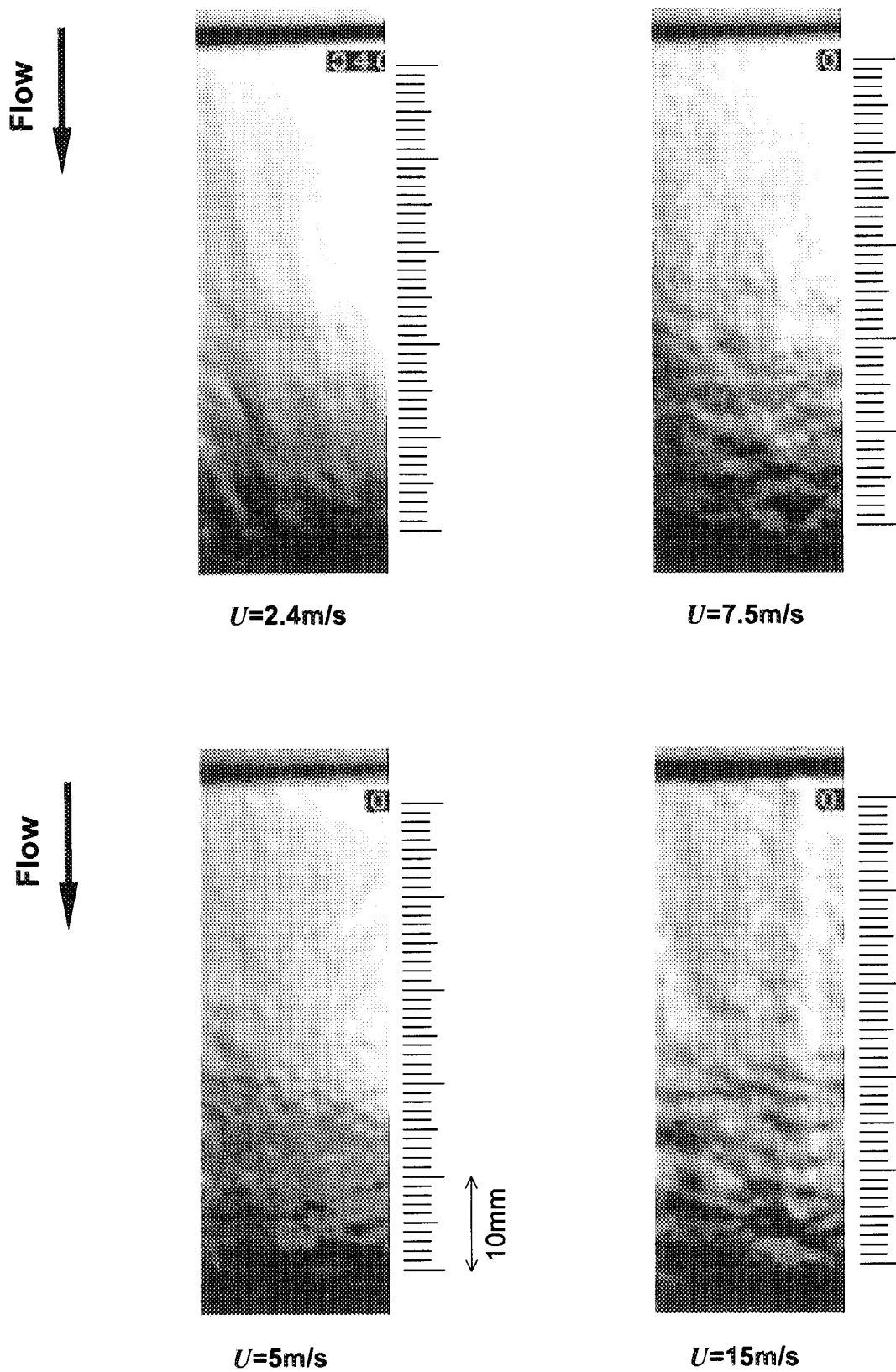


Fig.8 Photographs of free surface wave at 150mm from the nozzle (surface roughness ; $6.3\mu\text{m}$)

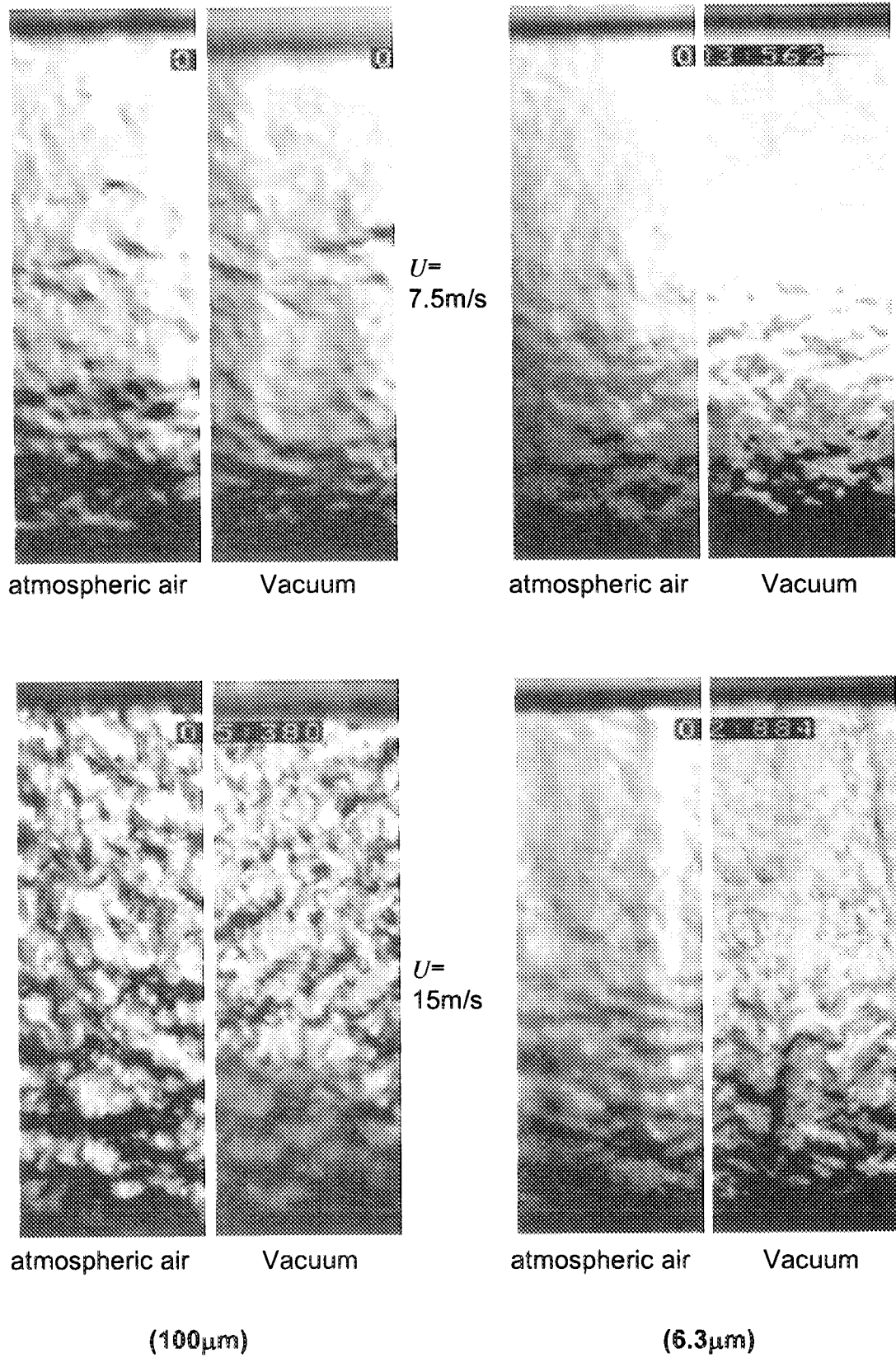


Fig.9 Photographs of free surface wave at 150mm from the nozzle

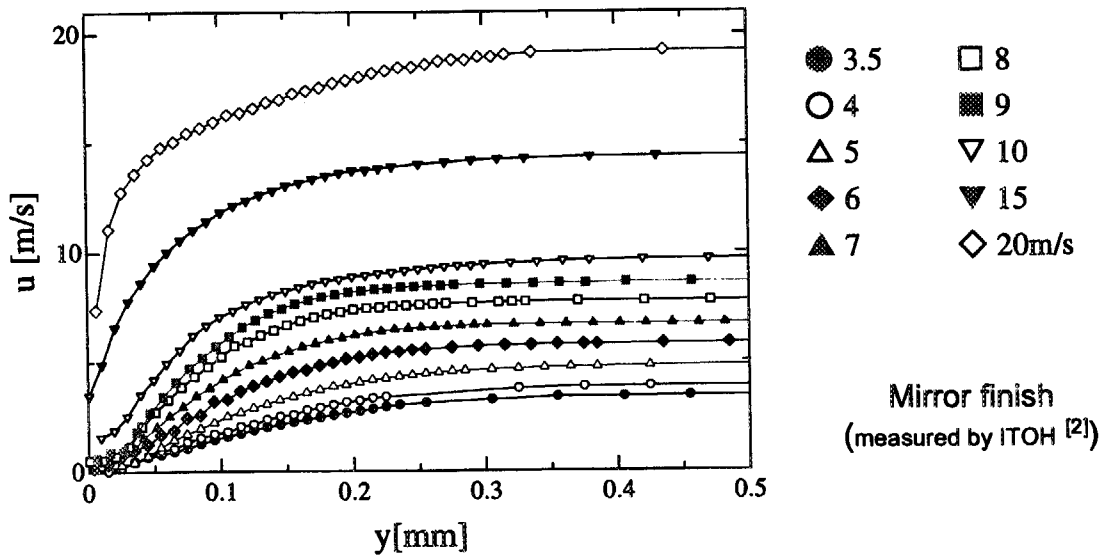
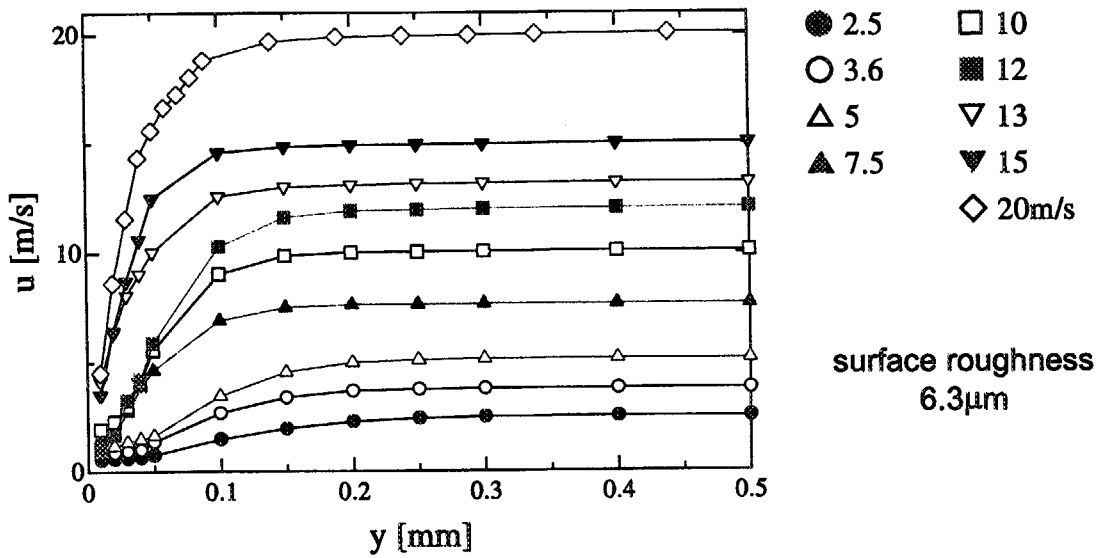
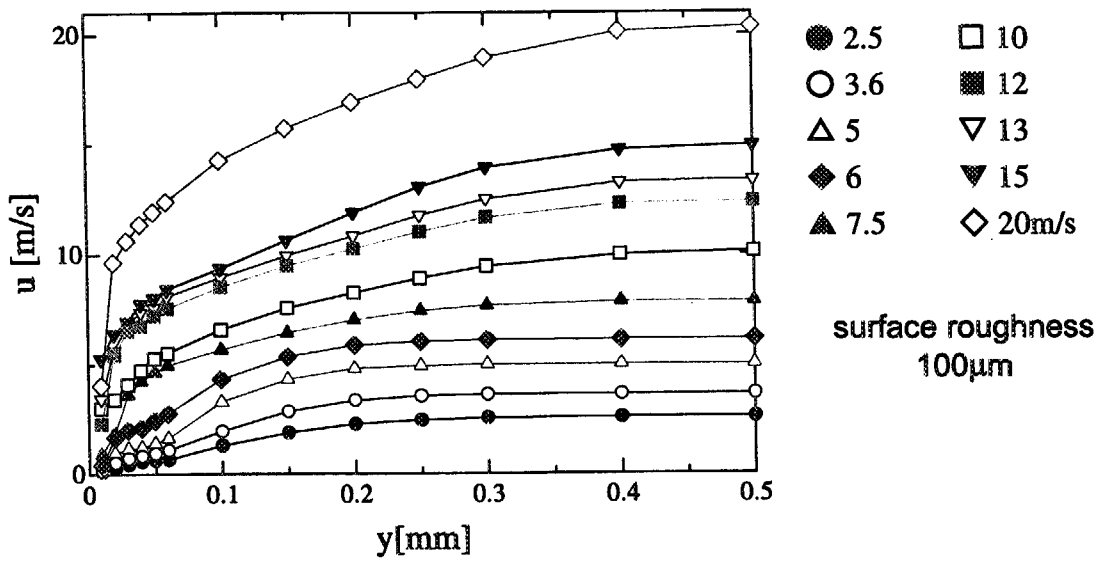


Fig.10 Velocity profiles at the nozzle exit
(comparison 100μm, 6.3μm and mirror)

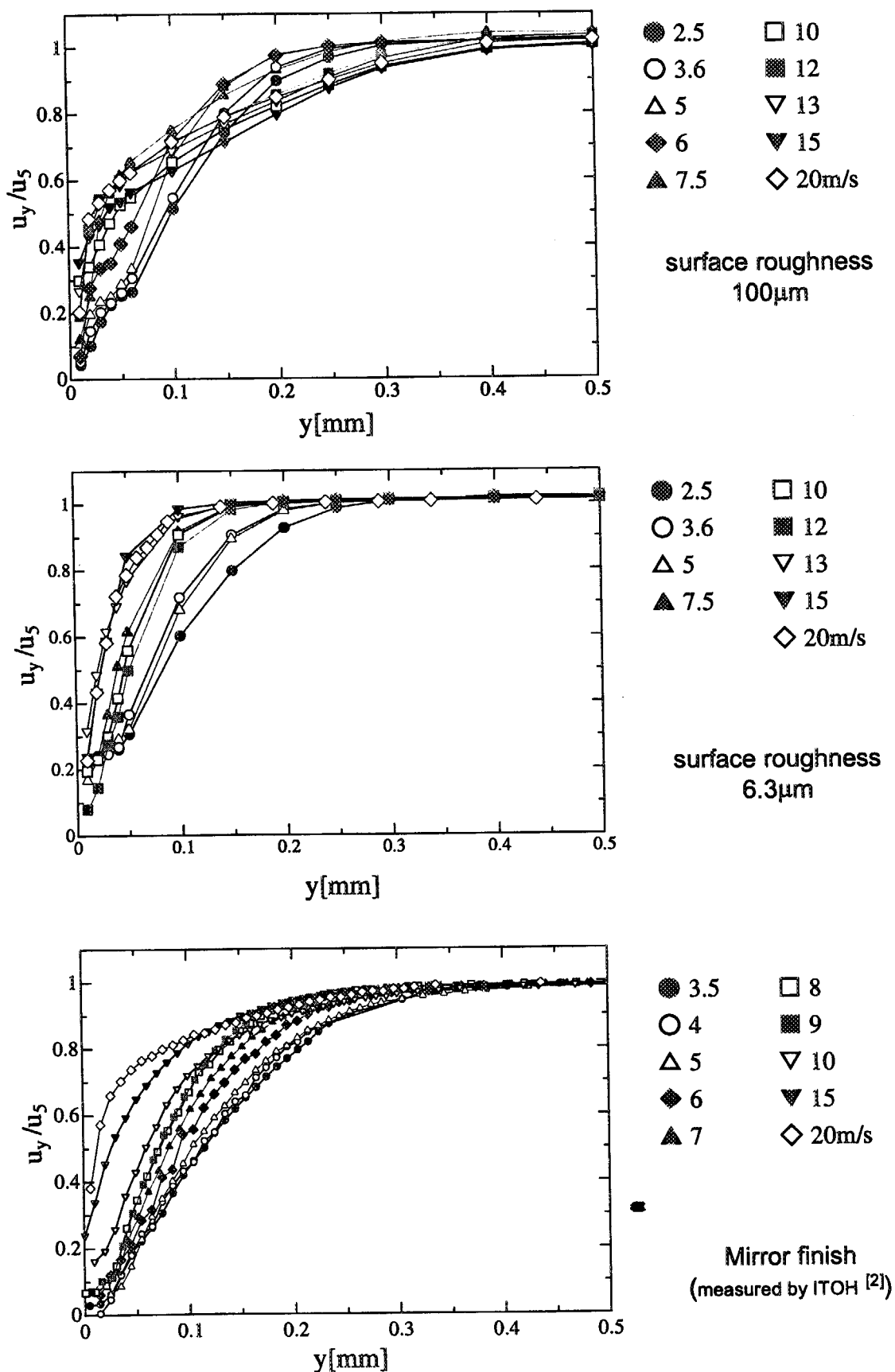


Fig.11 Normalized velocity profiles at the nozzle exit (comparison $100\mu\text{m}$, $6.3\mu\text{m}$ and mirror)

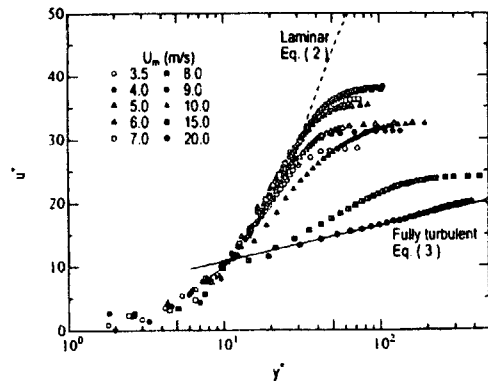
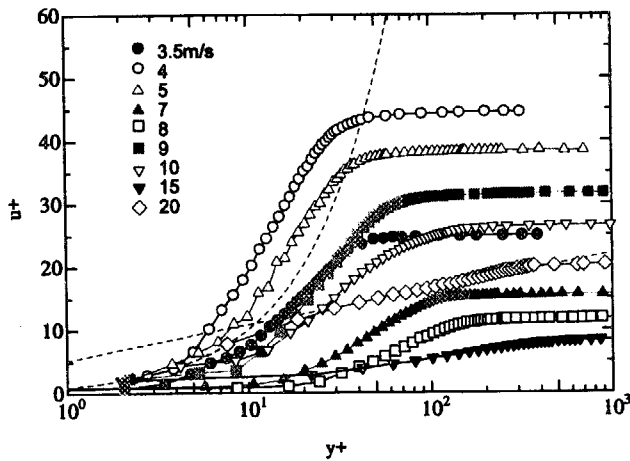
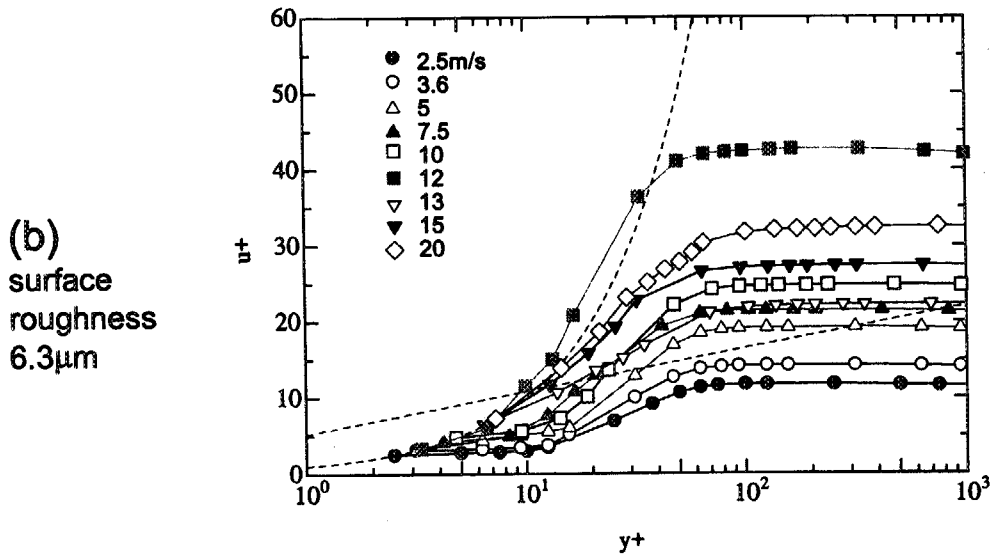
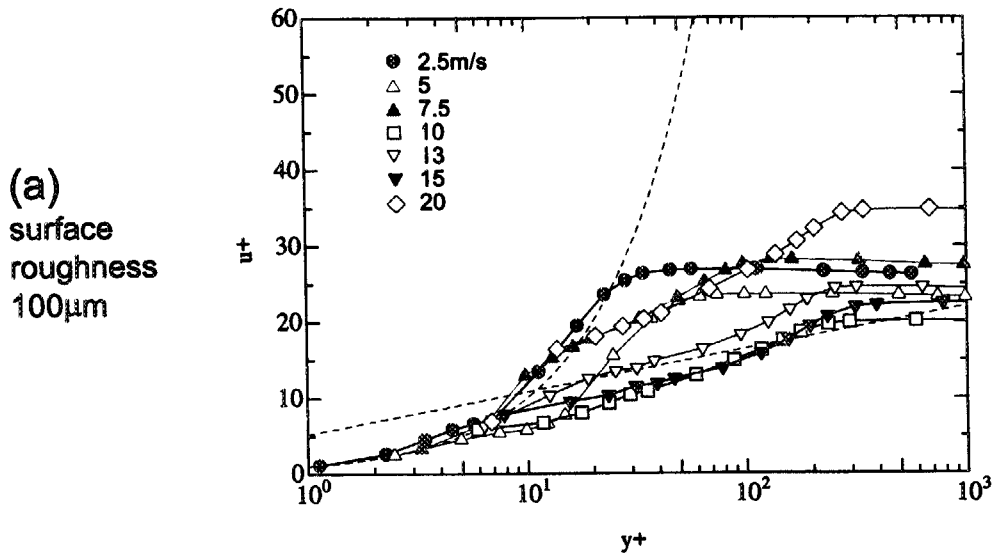


Fig. 7. Velocity distributions in the free surface side boundary layer at the nozzle exit.

(c) Mirror finish (similar process)

(d) Mirror finish (reference [2])

Fig.12 Velocity distributions in the boundary layer at the nozzle exit (comparison 100 μ m, 6.3 μ m and mirror)

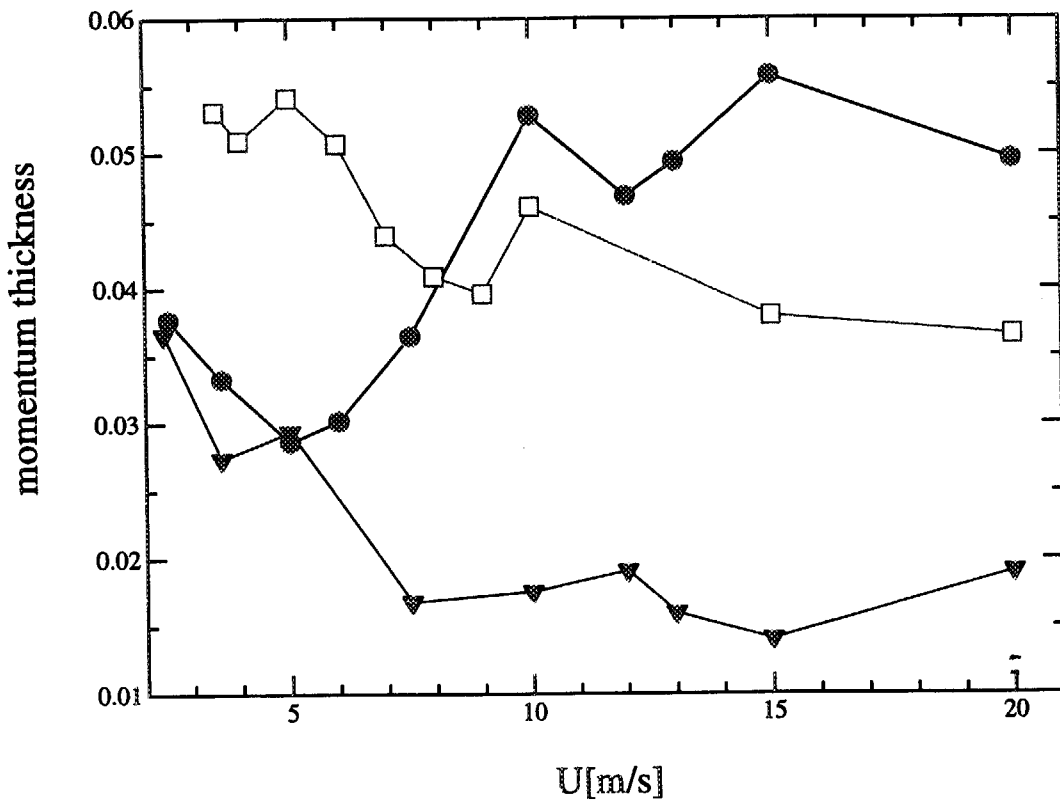
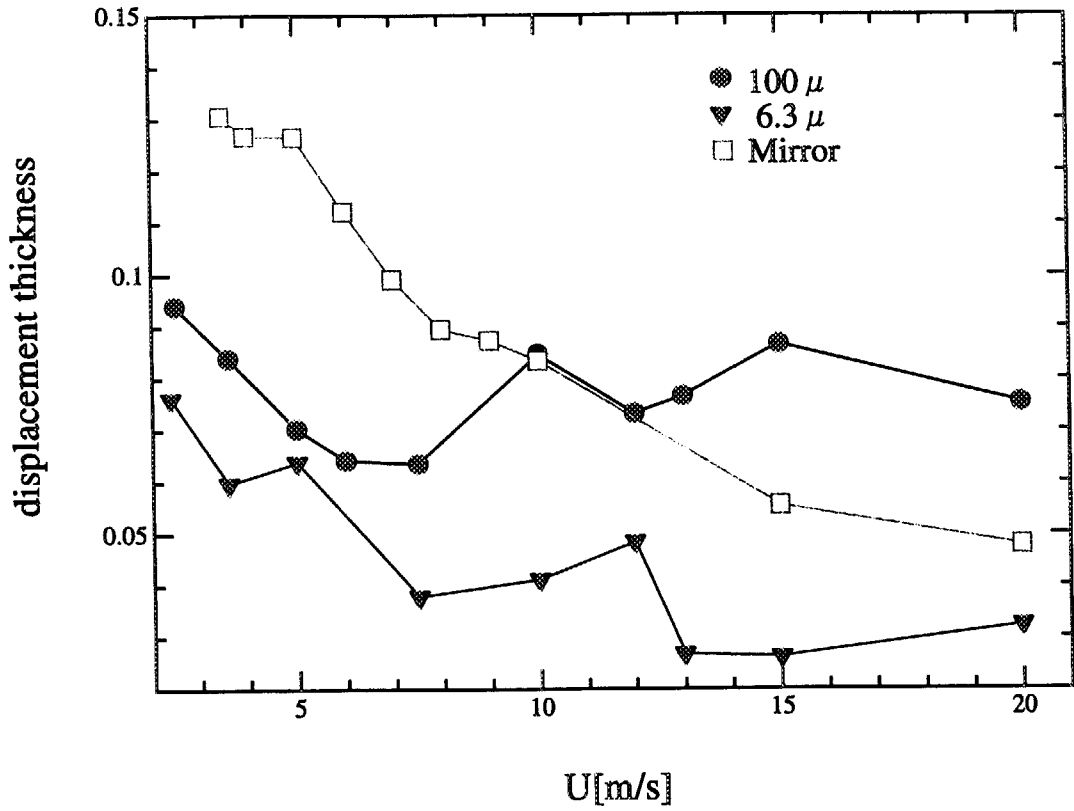


Fig.13 Relationship between mean velocity and boundary layer (comparison 100μm and 6.3μm)

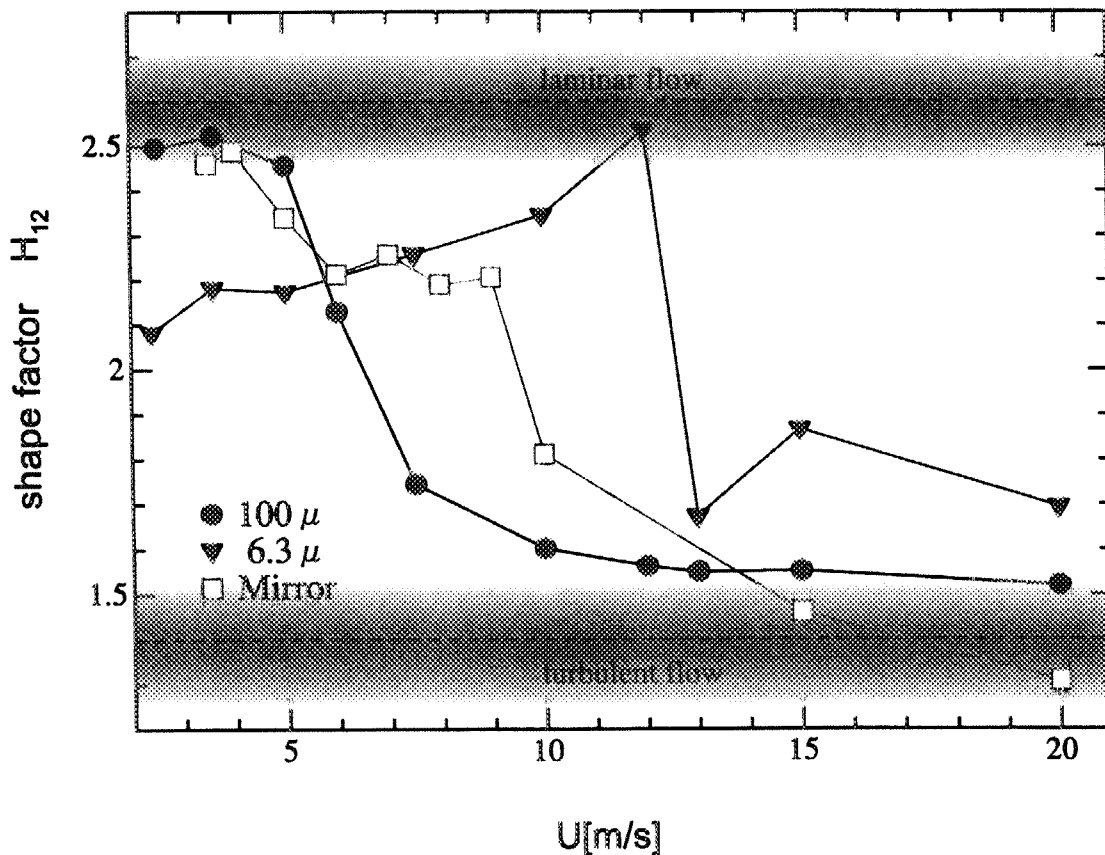


Fig.14 Relationship between mean velocity and shape factor (comparison 100 μ m and 6.3 μ m)

付録

Fig.A-1 から A-6 に本文中で示した高速ビデオの画像を含め、それぞれの条件における液面の画像を添付する。

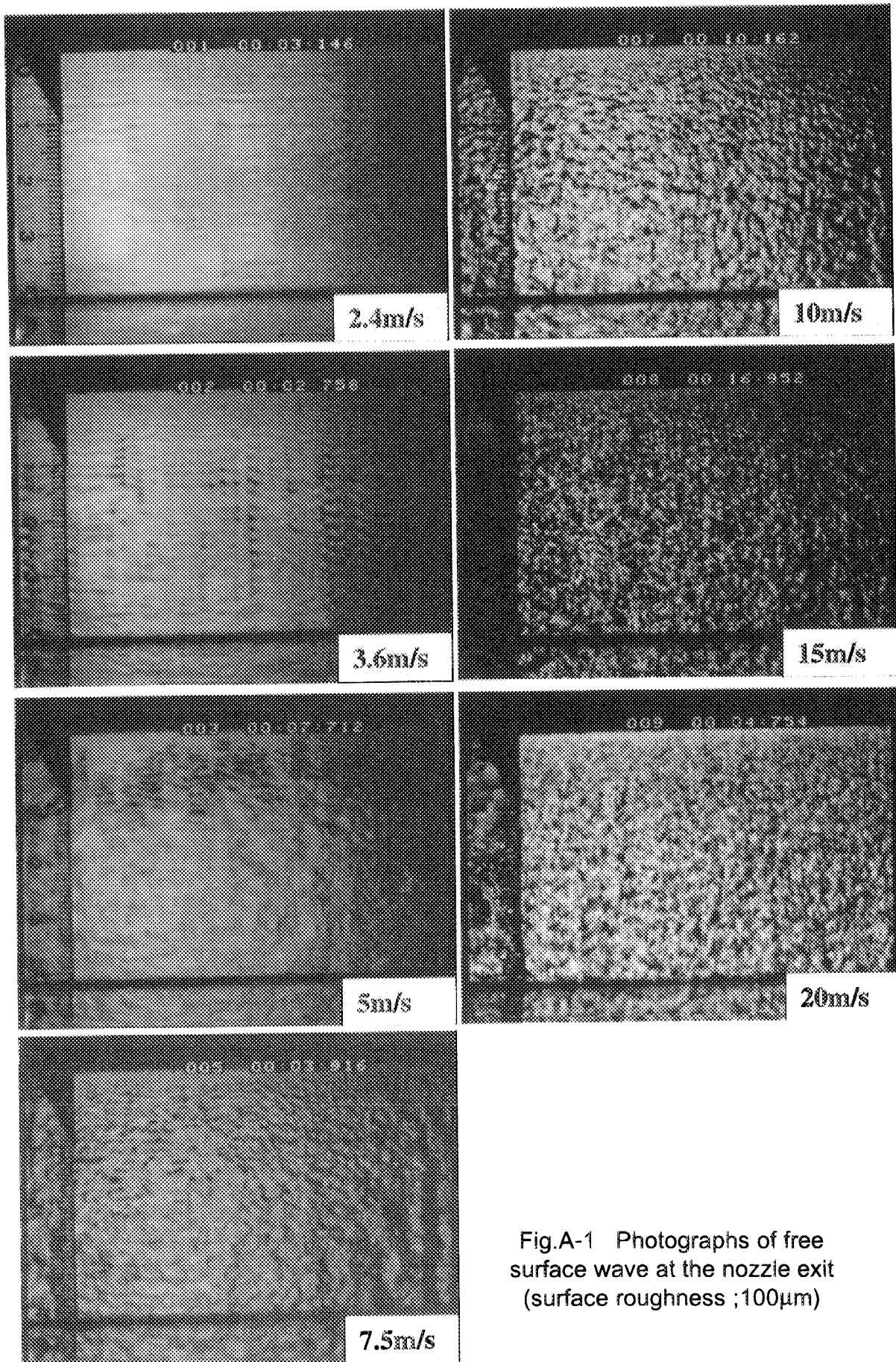


Fig.A-1 Photographs of free surface wave at the nozzle exit (surface roughness ;100 μ m)

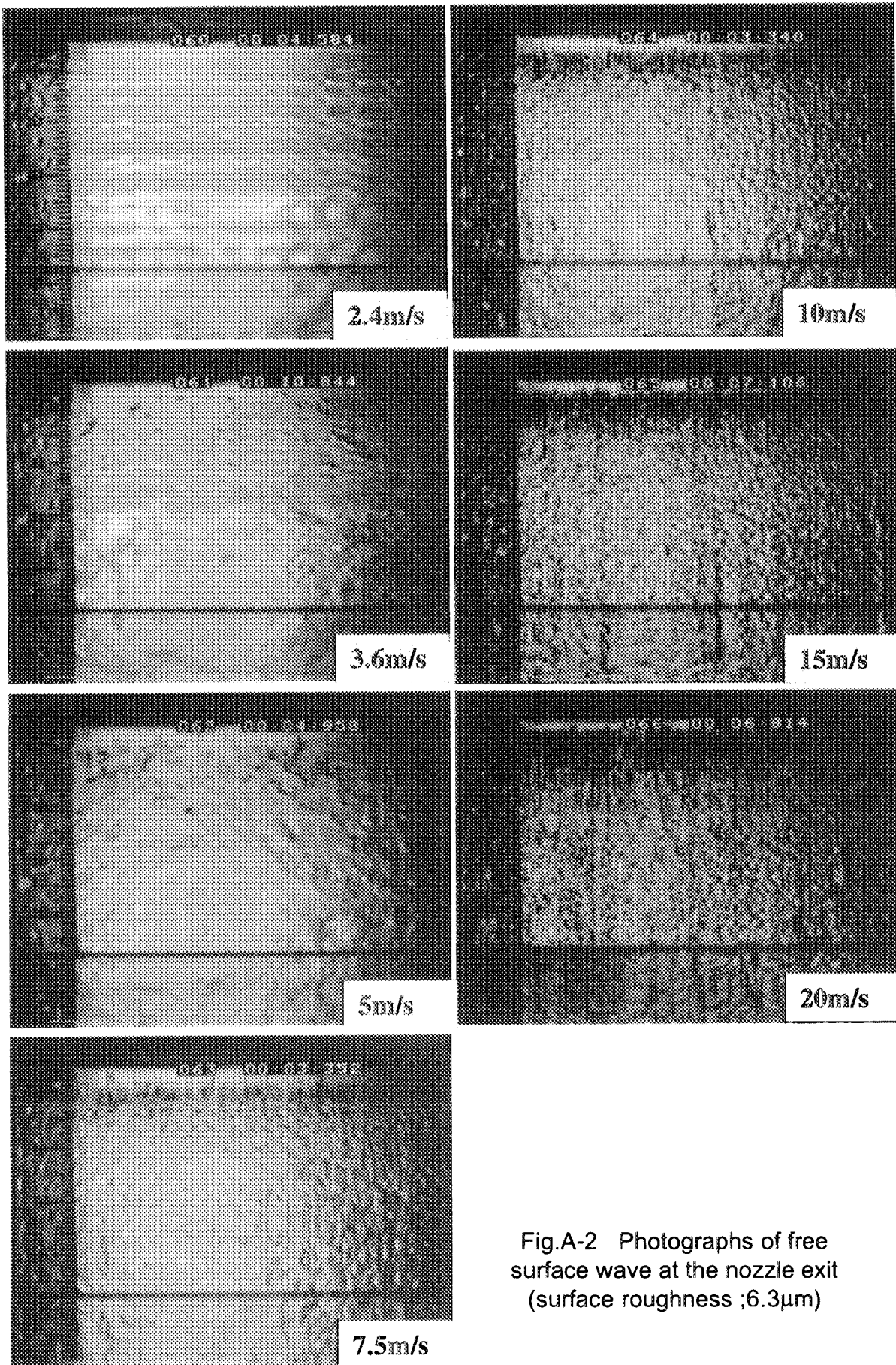


Fig.A-2 Photographs of free surface wave at the nozzle exit (surface roughness ;6.3 μ m)

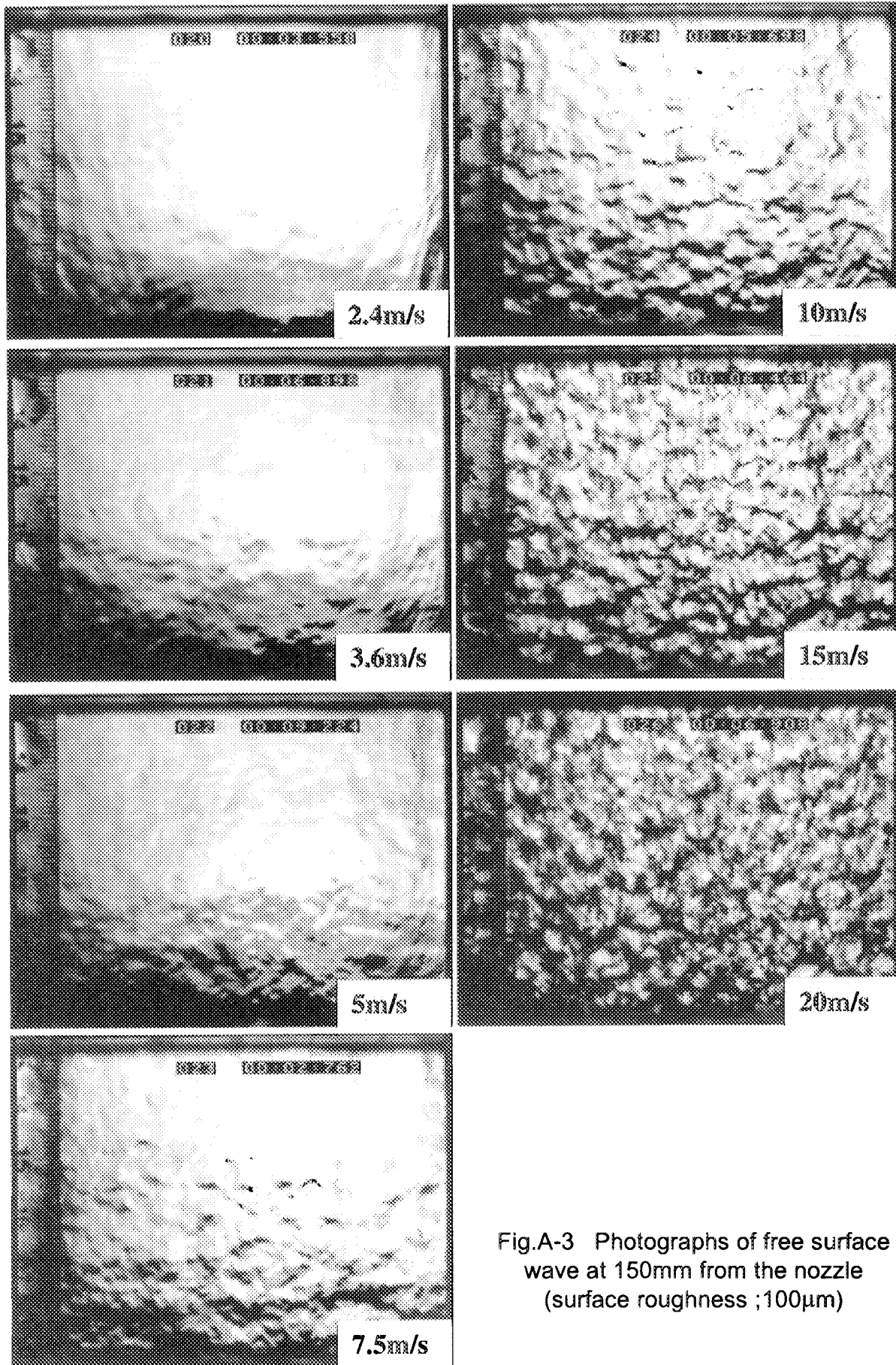


Fig.A-3 Photographs of free surface wave at 150mm from the nozzle (surface roughness ;100 μ m)

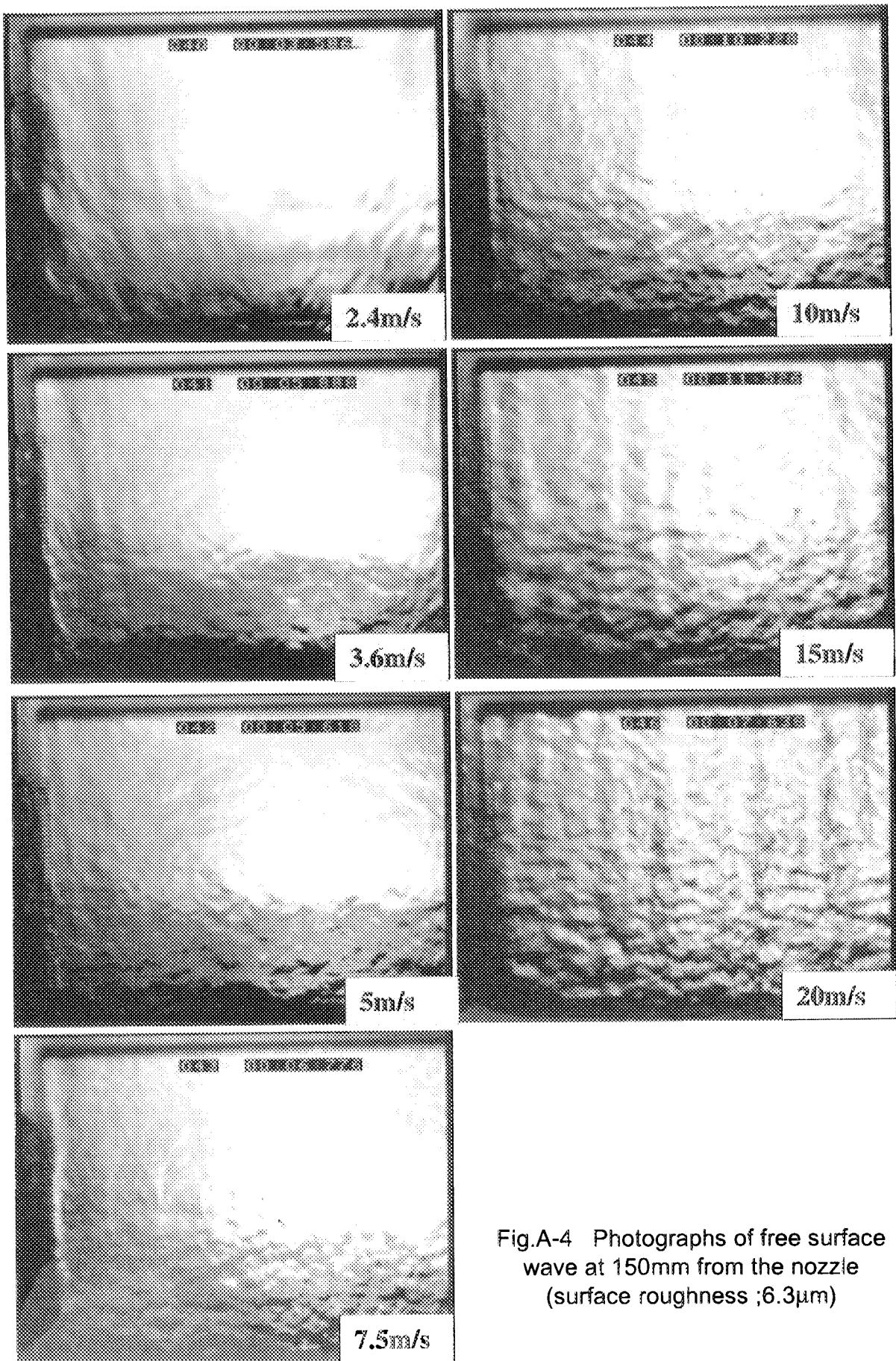


Fig.A-4 Photographs of free surface wave at 150mm from the nozzle (surface roughness ;6.3 μ m)

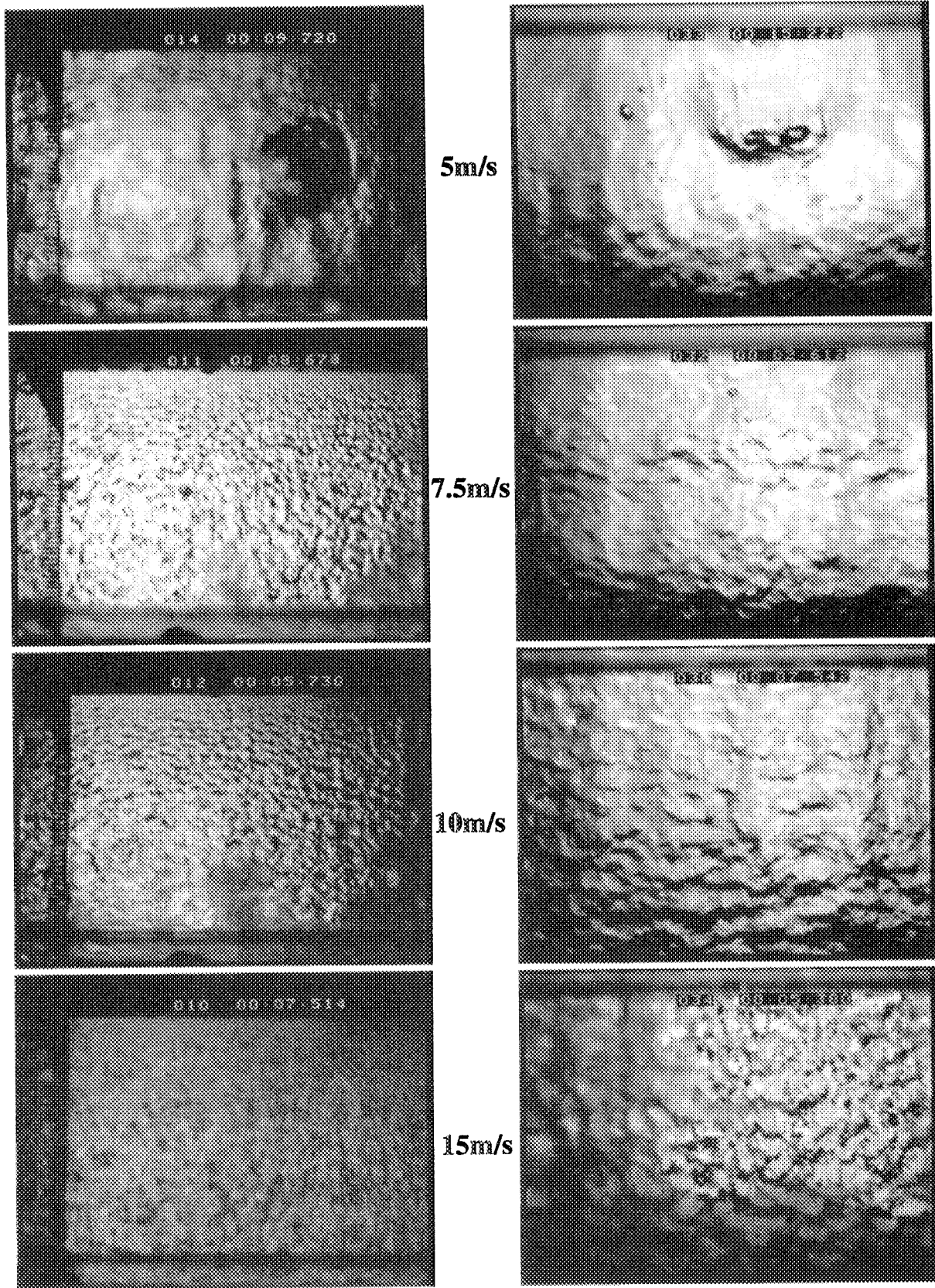


Fig.A-5 Photographs of free surface wave for vacuum condition (surface roughness ;100 μ m)

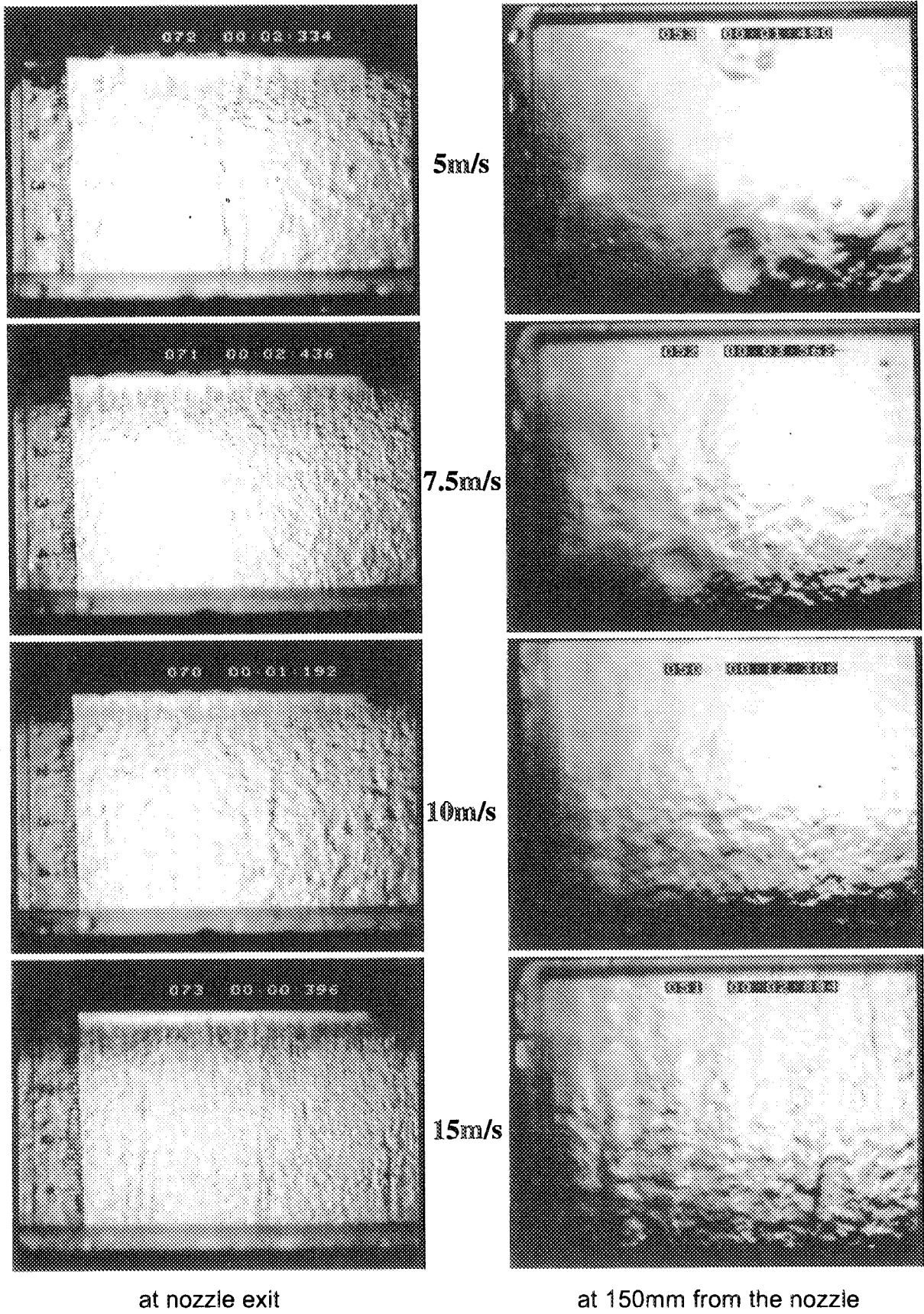


Fig.A-6 Photographs of free surface wave for vacuum condition (surface roughness ;6.3 μ m)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N·m |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量, 電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位, 電圧, 起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメン | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光束 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量等量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オングストローム | Å |
| バ | b |
| バール | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリー | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- F・C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N(=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---|-------------------------|----------|----------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 |

粘度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

| 圧 | MPa(=10bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062×10 ² | 145.038 |
| 力 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322×10 ⁻¹ | 1.35951×10 ⁻¹ | 1.31579×10 ⁻¹ | 1 | 1.93368×10 ⁻² |
| | 6.89476×10 ⁻³ | 7.03070×10 ⁻³ | 6.80460×10 ⁻³ | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J(=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal(計量法) | Btu | ft·lbf | eV |
|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778×10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813×10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150×10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407×10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487×10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082×10 ¹⁹ |
| | 3.6×10 ⁶ | 3.67098×10 ⁵ | 1 | 8.59999×10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522×10 ⁶ | 2.24694×10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279×10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759×10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272×10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072×10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515×10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616×10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506×10 ⁻³ | 1 | 8.46233×10 ¹⁸ |
| | 1.60218×10 ¹⁹ | 1.63377×10 ²⁰ | 4.45050×10 ²⁰ | 3.82743×10 ²⁰ | 1.51857×10 ²² | 1.18171×10 ¹⁹ | 1 |

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15℃)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|----------------------|---------------------------|
| | 1 | 2.70270×10 ⁻¹¹ |
| | 3.7×10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-----------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58×10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

高速噴流ノズルの壁面加工粗さが自由表面噴流に与える影響に関する実験