

JAERI-Tech  
2002-010



JP0250142



シビアアクシデントの伝熱流動現象における  
素過程に関する研究

— 高温溶融物ジェットの分散冷却過程 —  
(原子力基礎研究 H10-027-2)  
(委託研究)

2002年3月

杉山 憲一郎\*・井口 健太郎\*

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）で複写による実費領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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

シビアアクシデントの伝熱流動現象における素過程に関する研究  
－高温溶融物ジェットの分散冷却過程－  
(原子力基礎研究 H10-027-2)  
(委託研究)

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部  
北海道大学大学院工学研究科  
杉山 憲一郎\*・井口 健太郎\*

(2002年1月18日受理)

シビアアクシデントの際、溶融炉心は直径数センチメートルから数十センチメートルのジェット状態で、圧力容器下部ヘッドへ落下する可能性がある。仮に溶融炉心ジェットが充分分散されずに下部ヘッドへ堆積すれば、冷却性が悪く溶融炉心は圧力容器内に保持されない可能性がある。したがって、溶融炉心ジェットの分散機構は、溶融炉心ベッドの冷却性を評価する上で、良く理解されていなければならない。

本実験研究の目的は、流体力学の分野で知られている周囲流体とジェットとの組織的運動(organized motion)に起因して、高温溶融物ジェット内に冷却材が捕らえ込まれることによって引き起こされる分散機構を確認することである。最初の実験は、直径 25mm までの溶融錫ジェットを用いて行われた。溶融錫の動粘性係数の値は溶融  $UO_2$  に比べて小さく、組織的運動による変形が容易に生じ、冷却材がジェット内に捕らえ込まれ易い。錫実験の結果を受けて、動粘性係数の値が溶融  $UO_2$  とほぼ同じである溶融銅ジェットの実験を行った。この実験においても冷却材捕捉型のジェットの分散が噴霧領域と呼ばれている高い周囲ウェーバー数域まで観察できた。

本報で報告するジェットの分散機構により、150kg 規模の溶融コリウム実験のジェット長さと 8kg 規模の鉛ビスマス実験のジェット長さとの見かけ上の相違が説明できる。また、高温溶融物ジェット中に効率よく冷却材が捕らえ込まれる機構は、ジェットの高い冷却性を保障する。

---

本研究 (H10-027-2) は、日本原子力研究所の平成 10、11 および 12 年度「原子力基礎研究推進制度」の支援により実施した研究の成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

北海道大学：〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目

\* 北海道大学大学院工学研究科

Research on the Fundamental Process of Thermal-hydraulic Behaviors in Severe Accident  
— Breakup and Cooling of Molten Material Jets —  
(JAERI's Nuclear Research Promotion Program, H10-027-2)  
(Contract Research)

Ken-ichiro SUGIYAMA\* and Kentarou IGUCHI\*

Department of Reactor Safety Research  
Nuclear Safety Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

Division of Quantum Energy Engineering  
Graduate School of Engineering  
Hokkaido University  
Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido

(Received January 18, 2002)

Core melt accidents could lead to the pouring of molten core materials into a body of water accumulating in the reactor lower head in the form of jets with a few centimeters up to a few tens of centimeters. If molten core jets penetrate the body of water without breakup. A poor coolability of the molten core bed would occur, which means the difficulty of maintaining the molten core bed in the reactor vessel. Hence, the breakup mechanism of molten core jets has to be well understood for the evaluation of the coolability of molten core bed.

The objective of the present experimental study is to confirm that, even in molten material jets, the breakup of jet originating in the coolant entrained within a molten material jet due to "the organized motion" between the coolant and the jet, which has been recognized in the field of fluid mechanics, is caused. The first series of experiment was conducted to observe this type of breakup by using molten tin

---

This research (H10-027-2) was supported by the JAERI's Nuclear Research Promotion Program (JANP) in 1998, 1999 and 2000.

\* Hokkaido University

jets up to 25 mm in diameter. Molten tin jet was expected to easily cause this kind of breakup of jet because of a low kinematic viscosity, which means an easy transformation of jet due to the organized motion for the coolant to entrain. The second series of experiment was conducted by using molten copper jet of 25 mm in diameter, of which kinematic viscosity is about same as that of molten UO<sub>2</sub>. The breakup of jet due to the entrainment of the coolant was observed up to high ambient Weber numbers, which cover the atomization regime.

The mechanism of the breakup observed in the present study is able to reasonably explain the apparent difference between the breakup lengths of 150 kg-scale corium jets and the breakup lengths of about 8 kg-scale lead-bismuth alloy jets. The breakup by the mechanism reported here also assures a high coolability of molten jets because of an efficient entrainment of coolant within the jet.

**Keywords:** Molten Core Jet, Breakup, Cooling, Mechanism

**This is a blank page.**

## 目 次

1. 序論	1
1.1 全体研究と本課題の内容	1
1.2 3年間の研究内容	2
2. 従来の研究	3
2.1 溶融物ジェットのブレイクアップ長さ	3
2.2 Schneider ら、Spencer らおよび Magallon らの研究	4
3. 実験	6
3.1 溶融二酸化ウランの動粘性係数の調査	6
3.2 本研究の溶融物の選択	7
3.3 実験装置および実験方法	8
4. 結果と考察	9
4.1 溶融錫ジェットでの結果と考察	9
4.1.1 13mm ノズル実験の結果と考察	9
4.1.2 25mm ノズル実験の結果と考察	14
4.2 溶融銅ジェットでの結果と考察	17
4.2.1 乱流領域でのジェットの挙動	17
4.2.2 噴霧領域でのジェットの挙動	18
4.3 ブレイクアップ長さの比較	19
4.4 銅凝固物の外観と粒径分布	20
5. 結論	21
参考文献	23

**Contents**

<b>1. Introduction</b>	-----	1
1.1 Breakup and Cooling of Molten Jets in Severe Accident Thermalhydraulic Process	-----	1
1.2 Research Subjects in Three Years	-----	2
<b>2. Previous Studies</b>	-----	3
2.1 Experimental Data on Jet Breakup length	-----	3
2.2 Experimental Studies of Schneider et al. ,Spencer et al. and et al	-----	4
<b>3. Experimental</b>	-----	6
3.1 Kinematic Viscosity of Molten UO <sub>2</sub>	-----	6
3.2 Selected Molten Materials	-----	7
3.3 Experimental Apparatus and Procedure	-----	8
<b>4. Results and Discussion</b>	-----	9
4.1 Molten Tin Jets	-----	9
4.1.1 Results and Discussion in 13 mm Nozzle Experiments	-----	9
4.1.2 Results and Discussion in 25 mm Nozzle Experiments	-----	14
4.2 Molten Copper Jets	-----	17
4.2.1 Jet Behavior in Turbulent Regime	-----	17
4.2.2 Jet Behavior in Atomization Regime	-----	18
4.3 Comparison of Jet Breakup Length	-----	19
4.4 Appearance and Size of Debris	-----	20
<b>5. Conclusions</b>	-----	21
<b>References</b>	-----	23

## 1. 序論

### 1.1 全体研究と本課題の内容

TMI やチェルノブイリ事故以来シビアアクシデントの重要性が認識され、わが国においても原子力安全委員会の方針に基づきアクシデントマネージメントの整備が電力事業者において進められ、さらにシビアアクシデントを想定した格納容器設計の自主基準が民間で作成されつつある。その際、シビアアクシデント事象はシュミレーションコード解析の結果や大型実験結果を利用して評価されている。しかし、シビアアクシデント事象には極めて高温の溶融炉心と構造材や冷却材との相互作用などが関係しており、その基本的メカニズム、すなわち素過程の解明が必要とされ、大学の研究者に期待されている。

本研究は、シビアアクシデント事象の伝熱流動過程のうち現象が最も不確定で、大型シュミレーションコードの開発・解析者、大型実験研究者、そして、産業界からの要請の強い現象の素過程に焦点を絞り、大学研究者による基礎的実験及び詳細シュミレーション解析により現象の解明を行い事象評価に役立てることを目的とする。

シビアアクシデント事象評価上、基礎的研究が必要な伝熱流動現象の 7 つの素過程につき、原子力工学と機械工学の 7 名の研究者が分担して担当し、実験及び詳細解析コードにより研究を進める。7 つの素過程を明らかにすることにより、シビアアクシデント事象としての溶融炉心の冷却と凝固、蒸気爆発、格納容器直接過熱、エアロゾルの挙動等の事象の解明に結びつける。

本課題は高温溶融物ジェットの分散冷却過程を実験的に明らかにすることを目的としている。溶融炉心ジェットが下部ヘッドに到達する過程で冷却材中に分散 (breakup) すれば、その冷却性が高まると同時に、大規模な蒸気爆発の必要条件と考えられている粗混合状態が達成されることになる。一方、溶融炉心ジェットが落下過程で充分分散しなければ、圧力容器下部ヘッドに高温の溶融物が堆積して、下部ヘッドの健全性が損なわれる。溶融炉心事故が In-Vessel 事象に留まらず、Ex-Vessel の事象に進展した場合も本質的な事情は同じである。従来、このような観点から、冷却材中を落下する溶融ジェットのブレイクアップ現象に関する研究が精力的に行われてきた。

溶融炉心ジェットのブレイクアップ現象を評価するための、解析コードも多数開発されているが、今まで、溶融ジェットの分散現象を広い条件に渡って、必要な精度で予測できたコードはない。Bürger ら<sup>(1)</sup>はこのような不一致の理由として、溶融ジェットのブレイクアップ現象の把握が不十分であることに加え、コードで用いられているブレイクアップのモデル化が、不適切である可能性を指摘している。従来、多くのコードでは、ブレイクアップはジェットの表面に生じる不安定波（ジェットの先端では Rayleigh-Taylor 不安定、ジェットの側面では Kelvin-Helmholtz 不安定）が周囲の流れによって剥ぎ取られるジェット表面の現象であるとしてモデル化を行っている。

本研究では、以下に述べる視点に基づき、シビアアクシデント事象の評価に関わる伝熱流動現象の素過程の一つである、高温溶融物ジェットの分散冷却過程を取り上げ、その基本的メカニズムを解明することを目的とする。

流体力学の分野では、ジェットの側面のように速度の異なる流体の境界に生じた不安定波

(Kelvin-Helmholtz 不安定による) は、両流体の連携運動である“組織的な運動”(organized motion) により大規模な渦に発達することが知られている。また、この組織的な運動によってジェットに生じる形態は“大規模構造”(large-scale structure) と呼ばれている<sup>(2)</sup>。本研究では、流体力学の分野で知られているこの現象に注目する。

すなわち、等温ジェットに生じる大規模構造の成長過程は、周囲流体のジェット内部への捕らえ込み過程と解釈できる。高温溶融物ジェットが水中に落下する過程で大規模構造が発生すれば、流体力学的必然性によってジェットの内側に周囲の蒸気および水が捕らえ込まれ、ジェット内部の熱エネルギーによって蒸気は過熱膨張し、水は沸騰して、ジェットのブレイクアップ(分散)と冷却が促進される可能性がある。

従来、このような視点で高温溶融物ジェットのブレイクアップと冷却現象を観察した研究はない。本研究において、ジェットの内部で生じる3次元的な熱・流体力学的現象の可能性を検討・考察することにより、すでに開発されている解析コードのモデル化、および原子炉過酷事故時のアクシデントマネジメントに関して有用な知見が得られると考える。

具体的には、蒸気膜で覆われた高温溶融物ジェットの大規模構造の発達と分散冷却過程の関連に注目し、下記の3項目の視点から、実験的研究を行う。

- (1) 蒸気膜で覆われた高密度の高温溶融物ジェットにおいて Kelvin-Helmholtz 不安定が成長し、流体力学で言うところの大規模構造に発展する可能性の確認。
- (2) 蒸気膜で覆われているにもかかわらず、周囲の冷却材が高温溶融物ジェットの内部に捕らえ込まれる現象の確認。
- (3) 上記2項目の本質的な現象が確認できたとして、従来の実験および解析研究の問題点に対して新たな展開が期待できる知見の取得。

## 1.2 3年間の研究内容

平成10年度は、上記の観点より溶融炉心の主要成分である溶融二酸化ウランの動粘性係数を調査し、本研究に用いる溶融物として錫を選択し、ステンレス鋼製坩堝を傾けて直接溶融錫を水プールに落下させる予備的実験を行った。その結果、上記の項目(1)および(2)の現象が確認できた。すなわち、溶融錫ジェットの大規模構造の成長過程と分散過程が密接に関連していることが確認できた。

平成11年度は、平成10年度と同様に溶融錫を用いて、ジェットの直径が一定に維持できる厳密な条件下で広いパラメータ範囲で実験を行い、大規模構造の発展に伴う内部起因型の分散(ブレイクアップ)機構を検討することを目標とした。具体的には、ノズル直径を13mmおよび25mmに選定し、同一ジェット直径を維持できるノズル付き加熱溶融装置を開発して、溶融錫ジェットを冷却水プールに落下させた。溶融錫の初期温度を250℃から1000℃、冷却水のサブクール度10℃から80℃の範囲で変化させ、溶融錫ジェットでの大規模構造の発展、分断、および分散の物理過程を詳細に観察した。

平成12年度は、溶融錫ジェットで確認された大規模構造の発達に起因する分散冷却メカニズムが溶融錫に特有な機構でないことを確かめるため、錫に比べて凝固点が850℃高く実機条件により近い銅(融点1083℃)を選定して同一機構による分散冷却現象の再現性を確認した。溶融銅

の動粘性係数の値は錫に比べて約2倍大きく、溶融二酸化ウランの値にはほぼ等しい。すなわち、物性値的にもより実機条件に近い溶融金属ジェットを用いた実験と言える。平成11年度まで観察が限られている25mmノズル実験を中心に、より実機条件に近い落下速度（より高い周囲ウェーバ数）での観察を行い、分散冷却過程を検討した。

## 2. 従来の研究

### 2.1 溶融物ジェットのブレイクアップ長さ

従来の研究では、溶融ジェット表面から溶融物が滴状あるいはフィラメント状で剥離することが、分散の主要なメカニズムであると考えている。すなわち、Fig.1に示すように溶融ジェットは表面からの分散により先細りし、ジェットの直径が零になった落下深さで分散が完了している。したがって、従来の研究では、分散が完了する落下深さをジェットのブレイクアップ長さと定義し、測定値および相関式が報告されている。

Fig.2は、従来の研究で得られたブレイクアップ長さを、Fr数に対して整理したものである。Schneiderら<sup>(3)</sup>の実験(□)では、溶融セロバンドジェットの先端速度が、後で述べる(2.2)式の自由落下速度と等しくなった落下深さをブレイクアップ長さと定義し、測定が行われている。Spencerら<sup>(4)</sup>の実験(×)およびMagallon<sup>(5)</sup>らの実験(■)では、溶融コリウムを落下させるノズルの中心軸に沿って、水中に多数の熱電対を設置し、熱電対の応答からジェットの落下速度を測定している。彼らは、落下速度が大きく変化する落下深さをブレイクアップ長さと判断している。

Saitoら<sup>(6)</sup>は、90°Cの水ジェットを室温のFreon-11中に落下させる実験を行った。したがって、この実験ではジェットの密度が冷却材の密度より小さく、苛酷事故の対象である大きな密度をもつジェットの実験とは異なることに留意する必要がある。彼らの実験では、ジェットの密度が小さいため、冷却材中で、ジェットが保持される。この状態での落下深さを侵入長さ(penetration length)と定義して測定を行った。彼らの実験では、水ジェットの速度を、2.5m/sから15m/s、ノズルの直径は5mmから40mmに設定している。得られた侵入長さは次式のように表される。

$$\frac{L}{D_j} = 2.1 \left( \frac{\rho_t}{\rho_c} \right)^{0.5} Fr^{0.5} \quad (2.1)$$

Schneiderらの実験結果はSaitoらの相関式と一致し、ブレイクアップ長さはFr数の1/2乗で増加することが分かる。一方、SpencerらおよびMagallonらの実機条件(溶融コリウム)の実験データは、ばらつきは大きいがFr数に対する依存性は明瞭に観察されない。溶融コリウムジェットの実験とSchneiderらの実験との差の原因は不明である。溶融コリウム実験では、熱電対の応答のみによってブレイクアップ長さを求めており、実際にどのような物理現象が生じていたかという点に関して情報はない。一方、Schneiderらの実験では、興味深いジェット挙動(分散)が観察されているにも係わらず、ジェット先端の速度のみでブレイクアップ長さを求めている。

次節では、Schneiderらの論文とSpencerらおよびMagallonらの結果を詳細に検討して、両者の差の原因について考察する。

## 2.2 Schneider ら、Spencer らおよびMagallon らの研究

Schneider らは、冷却材の沸騰を伴う条件下でジェットの分散現象を検討するため、低融点 ( $T_{m.p.} = 70^{\circ}\text{C}$ ) で密度の大きな (9200 kg / m<sup>3</sup>) 合金であるセロベンド (50.0 wt% Bi, 26.7 wt% Pb, 13.3 wt% Sn, 10.0 wt% Cd) の溶融ジェットを Freon-11 ( $\rho = 1519 \text{ kg} / \text{m}^3$  ( $7^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{b.p.} = 23.8^{\circ}\text{C}$  (0.1 MPa)) の中に落下させる実験を行った。ジェットの落下速度は 2.1 m / s から 6.0 m / s、ジェットの直径は 3.0 mm から 20.0 mm に設定している。また、高速度カメラ (500 fps) と X 線カメラによる現象観察を行い、高速度カメラの写真からジェットのブレイクアップ長さを決定し、X 線写真に基づき厚い蒸気膜内におけるジェットの分散挙動を報告している。

具体的には、ジェット先端の落下速度が次式の液滴の自由落下速度、

$$w = \sqrt{\frac{4gd}{3c_d} \left( \frac{\rho_j}{\rho_c} - 1 \right)} \quad (2.2)$$

に到達する落下深さを測定し、その深さをブレイクアップ長さとしている。彼らの提案する相関式を以下に示す。

$$\frac{L}{D_j} = 2 \left( \frac{\rho_j}{\rho_c} \right)^{0.5} Fr^{0.5} \quad (2.3)$$

上式は、前述した Saito らによって報告された (2.1) 式の相関式とほぼ等しい。

X 線写真によれば、溶融ジェットは、Freon-11 の蒸気中で変形し、大きな隆起 (bulge) が生じてくる (Fig.3)。Fig.4 ではこの隆起部分に液滴状とフィラメント状の溶融物が発生している。液面からさらに深い位置では、Fig.5 に示すようにジェットが分断 (segmentation) し、分断したジェット (以後、分断ジェットと呼ぶ) の側面あるいは背面から液滴状とフィラメント状の溶融物が多数噴出しているように見える。溶融ジェットの自由落下速度に対応する深さとして求めたブレイクアップ長さ位置付近では、Fig.6 のように、分断ジェットは分散し、液滴はジェットの軸から大きく広がることが観察されたと報告している。

Schneider らは、X 線写真により観察されたこのような溶融ジェットの分散挙動について次のように述べている。

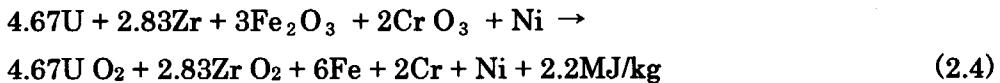
The formation of "bulges" from which drops are ejected resembles "the roll wave entrainment breakup" observed in the inverted annular flow experiments of De Jarlais et al. However, in the present experiments, these "bulges" may develop from varicose deformations already present on the jet as it enters the pool. The ultimate fragmentation of the large jet segments appears to be due to the ejection of small drops and filaments. This is presumably a result of Kelvin-Helmholtz instability on the vertical surface of the segments.

すなわち、ジェットの隆起 (bulge) は、ジェットが冷却材の中に入る前から生じていた、ジェットのこぶ (varicose) が発達したものだと述べている。また、分断ジェットの破碎は、小滴とフィラメントの噴出によるらしいと記している。さらに、このような現象が生じる原因是、おそらく、分断ジェットの側面に発生する Kelvin-Helmholtz 不安定に起因する結果であろうとしている。

る。この見解は、1.1で述べた本研究の視点と矛盾していない。

高速度カメラ写真より求められたジェット先端速度の変化の一例を Fig.7 に示す。先端速度は落下深さ約 58cmまで減少した後、短距離（10cm程度）のうちに増加（1.5m/sから 2.5m/s）し、再度、短距離（10cm程度）で減少（2.5m/sから 1.0m/s）し（2.2）式の自由落下速度に到達している。しかし、この深さ（約 80cm）以降にも速度の増加（1.0m/sから 2.0m/s）が示されている。このように速度の増加および減少を繰り返す現象が発生するメカニズムについて、Schneider らは説明を行っていない。著者の仮説として、X 線写真で観察されたジェットの分断と側面および背面からの噴出による分散現象が、ジェットの先端速度の増減と関係しているとすれば、彼らが報告しているブレイクアップ長さより短い落下距離で、実質的にジェットのブレイクアップが発生している可能性がある。

Spencer らは、次式に示す発熱反応を利用してコリウムジェットの落下実験（Corium-Coolant Mixing 実験、通常 CCM 実験と呼ばれている）を行った。



コリウム成分は、60 wt% UO<sub>2</sub>、16 Wt% ZrO<sub>2</sub>、および 24 wt% Steel (67 wt% Fe、21 wt% Cr、12 wt% Ni) である。Table 1 および Table 2 に CCM 実験の初期条件を示す。ジェット直径は 20.0 mm、25.4 mm および 50.8 mm で水プールの深さは約 1.1 mm である。また、水中に落下したコリウム質量は、2.15kg から 12.79kg の範囲にある。

Fig.8 にノズルの中心軸に沿って水面から深さ方向にセットした熱電対（図中の No.0 から 13）の応答の例（CCM-5 実験）を示す。横軸は時間、縦軸は水面からの深さである。○印は温度変化が始まった時間を示し、●印はコリュウムの直接接触があったと判断した時間を示す。No.1 から 6 および 8 の熱電対は、最高温度 1400°C を表示した後、溶融切断した。No.7 热電対は 1400°C を記録したが、溶融切断はしなかった。No.9 以降の熱電対については、最高記録温度を図中に示した。なお、？を記した No.9 热電対は正常な機能をしていない。

No.0 から 4 の熱電対はほぼ直線的に応答しており、コリウムジェットにコヒーレント性があることが分かる。一方、No.5 以降の熱電対では、最高温度が記録される時間がランダムで、ジェットの落下空間に冷却材（あるいは蒸気）が存在し、ジェットと混合している状況が推定される。すなわち、コリウムジェットのコヒーレント性が消失していると推測できる。このような熱電対の挙動より、Spencer らは、図中の実線の勾配（ジェット速度）が変化する破線部でジェットのブレイクアップが生じていると判断した。なお、Spencer らの実験で得られた凝固コリウムの粒径分布を Fig.9 に示す。平均粒径は、0.8mm から 5mm の範囲にある。

Spencer らが観察した熱電対の挙動は、少なくとも Schneider らが報告したブレイクアップ長さよりも早い時期に、コリウムジェットの内部（中心軸）に既に冷却材（蒸気も含めて）が入り込んでいて、ジェットのコヒーレント性が失われていることを示している。

Magallon らは、18kg から 151kg の溶融コリウムを 5.0MPa の飽和水中へジェット状で落下させる実験を行った。Table.3 に実験条件の一覧を示す。溶融酸化物 (UO<sub>2</sub>+ZrO<sub>2</sub>) を用いた実験 (Test

No. L-06,08,14) では、下記の意味でジェットのブレイクアップが観察された。すなわち、1/6から1/3のジェットは、溶融状態のまま水プール容器底部に到達し、ケーキ状に凝固した。この容器の底に付着したケーキ状の凝固物の表面は、光沢を帯びていて滑らかであり、クラックが入った痕跡は確認されていない。また、下部プレートの温度上昇は、最高でも330°C (L-14) にとどまった。これらの溶融酸化物の実験では、凝固までの距離が水プールの深さよりも大きいために、ジェットの一部は溶融した状態のままで容器下部に到達したと推定できる。

また、金属ジルコニウムを加えた溶融コリウム ( $\text{UO}_2+\text{ZrO}_2+\text{Zr}$ ) 実験 (L-11) も行った。ジルコニウム-水反応による水素の発生と、ジルコニウムの酸化の影響について調べることが目的であった。この実験では、分散したジェットが溶融した状態で容器下部まで到達することはなく、平均粒径が3.8mmの凝固物に微細化され、下部プレートの温度上昇はわずか20°Cであった。CCM実験と同様、ジェット先端の落下速度が変化した時点の、水面からの深さをブレイクアップ長さとしている。L-11実験のジェット先端の位置を時間に対してプロットしたものがFig.10である。こうして求まるブレイクアップ長さは、水プールの深さよりも小さく、分散滴は底に到達するまでに充分に冷却されたと考えている。また、金属ジルコニウムの酸化によって、溶融コリウムジェットのブレイクアップが促進された可能性を示唆している。Magallonらが得た凝固物の平均粒径は3.5から4.8mmの範囲であった。

以上の点を総合すれば、実機のジェットのブレイクアップは、(2.1)および(2.3)式よりも短い長さで発生する可能性が充分あると評価できる。また、実質的なブレイクアップ長さは、Fr数に依存しない可能性もあり、溶融コリウム中の金属成分の化学反応も考慮する必要がある。

### 3. 実験

#### 3.1 溶融二酸化ウランの動粘性係数の調査

溶融炉心の流動性を規定する動粘性係数を評価することは、2600°C前後での多成分系での測定という問題があるため、現在までほとんど行われていない。このため本研究では溶融炉心の主成分である溶融二酸化ウランを対象に動粘性係数の調査を行った。

Table 4とTable 5にBatesら<sup>(7)</sup>およびTsaiとOlander<sup>(8)</sup>による測定値(粘性係数)を示す。両者にはほぼ5倍の差があることが分かる。Table.6には、Woodley<sup>(9)</sup>の測定(粘性係数)を示す。彼の測定値はTsaiとOlanderの測定値よりさらに小さい。Woodleyの測定の動機は、Batesら測定値とTsaiとOlanderの測定値との5倍の相違に対して、信頼性の高い測定を提供することであった。

これらの測定ではいずれも振動粘度計( oscillating cup viscometer)<sup>(10)</sup>を用いている。この測定法では、ワイヤー部とそれに吊される耐熱性の金属カプセル部が主要構成部である。測定精度は、カプセル内の液体粘性による回転振動の減衰に対して、その他の部分(主にワイヤー部に関連する部分)による減衰が小さいほど高くなる。Batesらはこの点に関して定性的な記述を行っているのみである。TsaiとOlanderの測定では、その他の部分による減衰は10%から20%であったと記述している。一方、Woodleyの測定では、その値は3%と報告されている。従って、報告されている測定値の中ではWoodleyの値が最も信頼度が高いといえる。彼の測定値は次式で整

理できる。

$$\eta(cP) = 0.998 \exp(4620/T(K)) \quad (3.1)$$

Fig.11 に Woodley の測定値を動粘性係数として、常温の水の動粘性係数と比較して示した。なお、横軸は絶対温度の凝固点温度で規格化されている。溶融二酸化ウランの動粘性係数は常温の水の動粘性係数より小さいことが分かる。すなわち、溶融二酸化ウランの流体としての流動性および変形は水より優れていると言える。

なお、溶融炉心ジェットに係わる安全性評価の観点から言えば、動粘性係数が小さいことは分散（ブレイクアップ）が促進されることを意味し、蒸気爆発の素混合過程の評価では悲観側に、ジェットの冷却性の評価では楽観側にある。したがって、前者の安全性の評価に当たっては、Woodley の測定値を利用し、後者の安全性の評価に当たっては、Tsai と Olander の測定値を利用することも考えられる。

### 3.2 本研究の溶融物の選択

本研究では、溶融ジェットの分散挙動を観察するために好ましい高温溶融物として錫および銅を選択した。溶融金属ジェットが水中を落下する際、流体としての変形と、冷却材（水）に対する熱エネルギーの影響が、溶融炉心ジェットが水中を落下する場合と定性的にどのように異なるのか、物性値を比較することによって説明する。ただし、溶融炉心は、酸化ウラン、酸化ジルコニウム、さらに、ステンレス鋼などが含まれる 2600°C 前後の高温の溶融体であり、物性値の評価は現在定まっていない。そこで、溶融炉心の主要成分である二酸化ウランの物性値を比較対象に用いた。

注目した物性値は、動粘性係数、密度、および熱拡散率である。Fig.12 に溶融錫、銅および溶融二酸化ウランの動粘性係数 ( $\nu$ )、密度 ( $\rho$ ) および熱拡散率 ( $a$ ) を示す。動粘性係数は粘性係数と密度の比で、流体自身の変形しやすさを表す。すなわち、動粘性係数が大きいほど流体自身の変形は抑制され、小さいほど容易に変形が生じるといえる。密度については、各溶融物の値を比較することにより、溶融物が落下する際の慣性力の大きさを比較できる。熱拡散率は熱伝導率と熱容量の比で、物質内における温度の伝播の難易度を表す。熱拡散率が大きければ溶融物全体の温度分布（勾配）がより均一に（小さく）なり、熱拡散率が小さければ温度分布（勾配）が不均一に（大きく）なる傾向がある。すなわち、熱拡散率の大きい物質においては、界面温度が相対的に物質内部の温度に近いといえる。

Fig.12 では、横軸に溶融物の温度（絶対温度）を各物質の融点（絶対温度）で割って規格化した値を示し、縦軸に各物性値を示した。現在報告されている溶融二酸化ウランの値<sup>(9), (10)</sup>に対し、溶融錫の値は、動粘性係数が 0.4 倍から 0.6 倍、密度が 0.8 倍、そして、熱拡散率が 10 倍程度になっている。一方、溶融銅の値は、動粘性係数が 1 倍、密度が 0.9 倍、そして熱拡散率が 20 倍程度になっている。つまり、溶融錫は、同一落下距離に対して、溶融二酸化ウランに比べて、小さい慣性力をもち、変形しやすく、温度分布は均一に近く界面温度の低下は小さい。一方、銅は慣性力および動粘性係数は二酸化ウランに近く、温度分布は錫より一層均一に近くなる。したが

つて、溶融錫および銅を用いることにより、流体力学的にも熱的にも、注目する現象を容易に観察できるといえる。すなわち、溶融二酸化ウランジェットの定性的な変形挙動をより短い水中落下距離で観察でき、かつジェットの初期温度が相対的に低い条件でも膜沸騰状態での落下挙動が観察できるといえる。

すでに、上述の変形に関する考察が定性的に妥当であることを確認する目的で、等温の水銀ジェットを水中に落下する実験を行っている<sup>(11)</sup>。Fig.13に水銀の物性値を示した。水銀は、動粘性係数が錫よりも小さく（約0.5倍）、密度は二酸化ウランよりも大きい（1.3倍以上）。したがって、水銀ジェットが水中を落下する際には、流体としての変形は溶融錫および銅に比べて一層顕著になると考えられる。すなわち、本研究で注目する大規模構造が等温の水銀ジェットでは容易に発生すると推定された。等温の水銀ジェットで観察された大規模構造については、4.1.1(1)で述べる。

### 3.3 実験装置および実験方法

Fig.14に実験体系の概略を示す。左側の溶融物加熱装置はステンレス鋼（SUS304）製で、周囲にシース式の電気ヒーターを巻いて、溶融錫および銅ジェットの初期温度を1200℃までカバーできるようにした。加熱装置の下部には、溶融物の流出口（ノズル）を設けてあり、その内径は、従来報告されている小規模あるいは中規模の溶融ジェットの落下実験（たとえば、Saitoらの5.0 mmから40 mm、Schneiderらの3.0 mmから20 mm）を意識して、13 mm、14 mmおよび25 mmに設定した。

ノズル直径25 mmの加熱装置の詳細図をFig.15およびFig.16に示す。錫および銅を溶かす際には、加熱装置の上方から、ステンレス鋼製の弁をノズルの上部に載せて、流出口を塞ぎ、溶融した金属が所定の温度（錫では250℃～1000℃、銅では1150℃）に達したときに弁を持ち上げて溶融金属を落下させる構造となっている。ただし、錫用加熱装置では、底部は円錐形状に仕上げられノズルに接続している。一方、銅用加熱装置（平成12年度の装置）では、底部は凹面的な曲面（cone cave）に仕上げられノズルに接続されている。本実験装置は使用前に昇温し、1200℃に一定時間保持した。その結果、安定した酸化クロム膜が形成され、溶融金属とは濡れ性がなくなり、ステンレス鋼製の弁に特別な工夫を施さなくても、加熱装置内で溶融した金属が漏洩してノズルから流れ落ちる、あるいはステンレス鋼を腐食（合金化）することはないことが確認できた。また、本実験装置では、軸対称の条件を満たした溶融金属ジェットが落下することを確認した。

なお、平成10年度の実験は、Fig.14の左側に示すステンレス鋼製坩堝の中に金属錫の粒子を入れて、周囲に巻いたシース式の電気ヒーターで所定の初期温度まで加熱溶融し、坩堝から直接溶融錫を落下させる方式で行った。坩堝の内径は40 mm、深さも40 mmで、予備的検討という目的から、溶融錫の質量は基本的に100gとした。この方式では、ジェットの直径を一定に保持することは困難であったが、4.1で述べるように、平成10年度と平成11年度の観察結果には、十分な整合性があることが分かった。すなわち、ジェットの落下形状に大きく影響されることなく、大規模構造の発展に関連する現象が観察できた。

水槽はアクリル製で、断面が220×100 mm<sup>2</sup>、高さは800 mmである。実験を行う際には、水深を780 mmに設定した。水のサブクール度は、実験に応じて80℃（室温）から10℃に調節した。溶

溶融錫および銅の落下高さは、基本実験では 100 mm に設定した。この条件での溶融金属ジェットの落下速度は、約 1.00 m/s から 1.33 m/s であった。Fig.17 に平成 12 年度の溶融銅ジェット実験（高ウェーバ数実験）のセット状態を左側に示す。また、1100°C に到達した加熱装置内の溶融銅を中心的に示す。右側の写真は、ノズルから落下するコヒーレントな溶融銅ジェットである。

溶融錫および銅ジェットの水中落下挙動は、高速度ビデオカメラ（Photron 社製 FASTCAM Rabbit-2）で撮影した。高速度ビデオの録画時の設定は、シャッタースピードを 1/10000 sec、撮影コマ数を 400 fps とした。撮影した映像のうち、必要な部分は、ビデオプリンター（日立製、VY-170）によって写真出力した。実験後の凝固物の観察は、基本的には目視によって行い、必要に応じて一眼レフカメラ（本体：Nikon 製、F90X、レンズ：Nikon 製、AF Micro-Nikkor 60mm f/2.8 D）で撮影した。凝固物のカメラ撮影に際しては、接写をするために、カメラの絞り優先機能を用いるとともに、絞りを十分に絞って撮影した。

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 溶融錫ジェットでの結果と考察

###### 4.1.1 13mm ノズル実験の結果と考察

###### (1) 溶融錫ジェットの大規模構造

平成 10 年度の実験で明瞭に観察できなかった、溶融錫ジェット柱の中間領域での大規模構造の発生と成長過程を Fig.18 に示す。初期温度 250°C の溶融錫をサブクール度 20°C の水中に落下させた場合である。この実験では、ノズル出口を水面から 5 mm の高さに設置し、ジェットが水面に突入する際の空気の巻き込みによる外乱を少なくした。このため 0 ms の写真では白矢印部のみに空気泡が付随している。双方向矢印で示す領域では、Kelvin-Heimholtz 不安定が大規模構造に成長し始めているのが分かる。

矢印 A の形状（以下このような形状を単に構造と呼ぶ）に注目する。20 ms では、すぐ後方に矢印 B の構造が現れ始めて A 部に追いついて行く。50 ms では、A および B の領域はほぼ合体してさらに大きな構造を形成している。この構造の大型化は、二流体の組織的な運動として述べれば、先行部が周囲流体の抵抗を受けて減速し半径方向に広がるのに対して、後続部は、相対的に慣性力を保持していることと先行部の背面が流体力学的に負圧になることが加わって、先行部に追いつくため生じる。また、後述の Fig.23 に示すように、後続部がこの時点で大きな慣性力を保持している場合はさらに追い抜きを行うので、大型化は追い抜き過程でも生じる。

110 ms では、A と B の合体構造は直径が 20 mm 程度まで拡大している。130 ms では、後続部の領域にも同程度の直径の構造（矢印 C）が発生している。なお、Fig.18 のジェット周辺の薄い灰色部は発生した蒸気である。以上のように、溶融錫ジェット柱は、ジェットと周囲流体との組織的な運動により大規模構造を形成し、局所的に質量を集中化させて行くことが分かる。

Fig.19 は、平成 10 年度に報告した水銀を内径 6.5 mm のノズルを通して水中に落下させた際の様子である<sup>(11)</sup>。水銀、水は共に室温（15°C 程度）であった。D および X はそれぞれノズルの内径とノズル出口からの水深である。ノズル出口は水面下に設置し、水銀ジェットが水面に突入する際の衝突の影響を少なくした。

Fig. 19(a)では、Kelvin-Helmholtz的な不安定が発生して、下方では円錐形状が連なっている水銀ジェットが確認できる。このような形状は、流体力学の分野で知られている大規模構造であり、Fig.18 の  $t=0\text{ ms}$  の状態にほぼ対応していると言える。Fig. 19(b)では、合体して変形が進んだ円錐的な形状が多数見られるが、Fig.18 の  $t=20\text{ ms}$  および  $50\text{ ms}$  にほぼ対応している。Fig. 19(c)では、さらに、変形が進み複雑な形状が現れているが、基本的には合体が進んだため質量の集中化が起きて、ブレイクアップする直前のジェットの様子を観察していることになる。Fig.18 の  $t=110\text{ ms}$  および  $130\text{ ms}$  にほぼ対応していると言える。

上述の内容を整理すれば、本研究では、ジェットの密度が周囲流体の密度に比べて一桁大きな等温の系のみならず、沸騰を伴う系でも、ジェットに大規模構造が発生することを明らかにしたと言える。また、溶融錫ジェットにおいて大規模構造の成長過程が観察できたことは、流体力学分野で報告されている大規模構造の成長過程が等温系に制限されることはなく、沸騰系まで拡張できることを明らかにしたという意味で重要である。

## (2) 低温ジェットの表面凝固と空洞化

Fig.20 に、Fig.18 と同様、初期温  $250^\circ\text{C}$  の溶融錫  $100\text{ g}$  を、サブクール度  $20^\circ\text{C}$  の水中に落下させた場合のジェット先端の変形挙動を示す。ただし、基本実験としてノズル出口の高さは水面から  $100\text{ mm}$ とした。初期温度を融点 ( $232^\circ\text{C}$ ) 近傍に設定して、先端部の大規模構造の成長過程で表面凝固が生じる条件として、ジェット内部への周囲流体の捕らえ込みの可能性を検討する。この例では、表面凝固が早期に発生し、大規模構造が成長するために必要なジェットの変形が拘束されるため、初期温度が相対的に高いジェット（後述の Fig.23）のように先端部で明瞭な大規模構造の成長は観察されず、追い抜き現象のみが繰り返し観察される。

ジェットの先端部に注目する。 $0\text{ ms}$  では、後続のジェットの追い付き・追い抜きで、ジェットの先端部が初期直径より太くなっている。しかし、Fig.18 で観察されたような構造的外観は現れない。この時点で、白矢印で示した直径  $13\text{ mm}$ 程度のジェットが、それまでの先端部（黒矢印）に対して、追い抜きを開始している。 $20\text{ ms}$  では、双方向矢印部に対して追い抜きを行ったジェットが、さらに下方に伸びている。 $40\text{ ms}$  では、この追い抜きを行ったジェット（双方向矢印部）を、細い先端を持つジェット（白矢印部）が新たに追い抜いている。

$0\text{ ms}$ において黒矢印で示した領域の形状は、その後もほぼ一定して変化がない。また、 $20\text{ ms}$  および  $40\text{ ms}$ において双方向矢印で示した部分もそれ以降外観形状に大きな変化はない。したがって、この領域のジェットは表面凝固し、内部を溶融錫が落下していると推定される。また、 $80\text{ ms}$  以降では、表面凝固領域（双方向矢印部）を追い抜いたジェットが複雑に変形をしている。すなわち、 $80\text{ ms}$  で先端は左側へ傾き始め、その後水平に近い位置まで向きを変えて、 $145\text{ ms}$  では、ほぼコの字型に変形し（凝固物より確認）、最先端部のみが分断している。

Fig.21 に Fig.20 に示したジェットの凝固物の外観を示す。Fig.20 の  $145\text{ ms}$  の落下状態にほぼ対応させて写真撮影した。凝固物には、上面に数  $\text{mm}$  程度の開口部が数箇所あるが、内部は空洞で閉構造と見て良い。凝固物の A 部と B 部の中間の直径拡大部が、Fig.20 の  $0\text{ ms}$  の黒矢印部に対応し、A 部の大きな直径の領域は  $20\text{ ms}$  の双方向矢印領域、B 部の小さな直径の領域は  $40\text{ ms}$  の双方向矢印部である。即ち、Fig.20 で表面凝固が発生したと判断した時点でのジェットの輪郭は、凝固物にそのまま残っていることが確認できた。

A部およびB部の内部は完全に空洞である。C部から凝固物はコの字型に変形しているが、内部に空洞は観察されなかった。しかし、ジェットのより先端に近いD部の内部は広い範囲にわたって空洞になっている。C部の前後に空洞があることから、落下時に一度形成されていた空洞がその後の変形過程で潰れたため、C部には空洞が観察されないと判断した。なお、この凝固物の表面凝固層の厚さは平均1mm程度であった。

Fig.20の80ms以降では明瞭であるが、すでに0ms以降で、注目しているジェット先端部は、後続部と完全に分断され、かつ、表面凝固が進行している。このような状況で、ジェット先端から新たに溶融錫が追い抜きを行えば、溶融錫が下方へ移動した部分は空洞を形成する。同時に、上部に開口部があれば、吸い込み効果（空洞化による負圧発生による）により周囲の流体が内部に流入していると推定される。A、BおよびD部の空洞はこのような過程で形成されたと推定される。更に、この例のように、ほぼ閉構造の凝固物（上部が閉じる物理過程は現在不明）を生じる場合、内部に残っている溶融錫の自重による落下に加えて、内側に捕らえ込まれた周囲流体が加熱により圧力を発生させ、溶融物を内側から押し出している可能性もある。

Fig.20の40msでは、黒矢印部が20msの双方向矢印部の左側に比べて明らかに膨張している。また、この時点では、細い先端（白矢印）を持つ溶融錫が追い抜きを開始している。次項で述べる観察結果（Fig.24）も考慮すれば、これらの現象は、内部圧力の発生に起因していると推定される。

Fig.22は、平成10年度に報告した初期温度が270°Cの溶融錫をサブクール度17°Cの水プールに落下させた場合の連続写真である。Fig.20の条件に比べて幾分表面凝固が遅れる系と言える。0msの時には、不明瞭であるが、双方向矢印で示した3つの大規模構造が生じている。20msの時には、先端2つの構造が合体して大きな構造を形成すると共に、白矢印で示す部分で3番目の構造から分断している。60msの時には、3番目の構造が加速して先端の大きな構造に追い付いている。最終的に大きな塊になった錫は、形状を崩してフィラメント状に微粒化し始めている。このような微粒化現象や3番目の構造の加速運動は、すでに述べたように構造内部での沸騰に関連して高圧が生じることによって起きたと推定される。したがって平成10年度に報告したFig.22の現象と平成11年度で観察された低温溶融錫のジェットでの挙動は定性的に同じ機構によるといえる。

### (3) 中温ジェットの空洞化と崩壊

Fig.23は、初期温度600°Cの溶融錫をサブクール度20°Cの水中に落下させた場合の連続写真である。ノズル出口から水面までの距離を100mmに設定したため、ジェットが水面に突入した直後には、Fig.18に比べて多くの空気を巻き込み、ジェットは空気柱に覆われている。0msの空気柱内部の白矢印部分は、17.5msでは、外観上、Fig.18の50msのA+B領域に近い形状（白矢印部）に変化して、双方向矢印部の大規模構造に追い付こうとしている。35msでは体積が増大し（白矢印部）、双方向矢印部の先端部に追い付こうとしている。

次に、ジェット先端部の大規模構造の成長過程に注目する。Fig.18の場合と同様に、ジェット先端部は、周囲流体の抵抗とジェット自身の追い付きと追い抜きによって大規模構造を形成する。0msの先端は、Fig.18の0msに比べて台形状に角張っている。ビデオの映像では、ジェット先端は水の抵抗によって半径方向に広がり、丸みを帯びてこの傘状に変形した後、台形状に変

形している。この形状は、慣性力を保持した後続のジェットが追い抜く時点で発生すると推定される。

7.5 ms では、ジェット先端部が再び丸みを帯び、きのこの傘状に変形しようとしている。17.5 ms では、先端は再度台形形状に近づいている。また、この時点では、双方向矢印部に連続的な構造が現れている。22.5ms では、ジェットの先端部がより顕著に台形状に角張っており、追い抜きによる慣性力が卓越している。35ms の時点で、双方向矢印で示したジェットの先端部は、16 mm程度の直径を持つ大規模構造を形成している。

Fig.24 に、Fig.23 の 35 ms の先端ジェット部（双方向矢印と白矢印部）のその後の挙動を示す。47.5ms では、35ms の白矢印部は双方向矢印部に追い付き一体化し、かつ、後続ジェットからも完全に分断されている。また、35 ms の双方向矢印部の大規模構造はこの時点では不明瞭になっている。77.5ms から 97.5ms では不明瞭であるが大規模構造（97.5ms では 3 個の双方向矢印部）と見なせる形状が生じている。また、この時点付近で、直径がほぼ最大（24 mm程度）となり半径方向に膨張していると言える。117.5ms では、97.5ms の形状が大きく変形している。177.5ms では、117.5ms の形状をとどめないほど体積が減少している。

97.5ms から 177.5ms の間に、先端ジェット部はその体積を著しく減少させ崩壊したと言える。この現象は次のように解釈できる。先端ジェット部の大規模構造の成長過程で構造の内側に捕らえ込まれた周囲流体が、閉空間に近いジェット内部（定性的には Fig.21 の凝固物と同様の形態で液相を維持している）で加熱され圧力が発生する。その結果、内圧により膨張傾向を示す、空洞を持つ先端ジェット部の形状が作り出される。この先端ジェット部が内圧と変形のため開口部を作り内圧を放出すれば、周囲流体の圧力が高くなり急激な体積減少が生じる。また、この体積減少には周囲サブクール水による急激な凝縮効果も関与していると推定される。このような物理過程で、Fig.24 に示したジェット先端部の崩壊（177.5ms の現象）が生じたと考えられる。また、Fig.24 の現象は、次に述べる平成 10 年度の報告結果と整合している。

Fig.25 は、平成 10 年度に報告した初期温度 650°C の溶融錫をサブクール 20°C の水プールに落下させた場合の先端ジェットの連続写真である。先端ジェットは双方向矢印で示すように 3 つの大規模構造で構成され、後続のジェットから分断している。これらの構造が追い付き運動をする過程で、50ms では白矢印で示すように、ジェットの先端で新たに溶融錫が噴出し始めており、また、ジェットの左側ではフィラメント状の溶融錫が噴出している。

80ms の時には、2 個の白矢印で示すように、ジェットの先端から突き出した溶融錫が小さな構造を形成し、また、ジェットの右側からはフィラメントが噴出している（白矢印）。同時に、双方向矢印で示した部分では、ジェットが収縮している。フィラメントの噴出は、ジェットの内側で高圧が生じて起きたと考えられ、高圧の放出によって、ジェットの上側が収縮したと推定される。100ms から 120ms にかけては、白矢印で示した方向にジェットが収縮している。また、100ms では、80ms の時にジェットの先端に生じた小さな構造も収縮して、フィラメント状になっている（下部の白矢印）。収縮したジェットは 160ms の時に、微粒化し始めているが、双方向矢印で示した領域に存在する溶融錫の体積は、0ms で観察された 3 つの大規模構造の体積に比べて著しく減少している。

平成 10 年度と平成 11 年度の結果を含めて整理すれば、初期温度が低い Fig.20 では、表面凝

固のため局所的に膨張のみが観察された。しかし、Fig.24 および Fig.25 では初期温度が高くジェットは長時間液相を維持できる。このため、内部に捕らえ込まれた周囲流体はジェットにより加熱され内圧を発生させ、大きな空洞を持つ先端ジェット部を形成し、最後に崩壊した。Fig.25（初期温度が 650°C、水のサブクール度 20°C）の条件では、分断された先端部の大規模構造は、フィラメント状の溶融錫を多数回放出した後に急激に崩壊した。Fig.24 の場合には初期温度が 50°C 低いため、内圧によるフィラメント状の溶融物の噴出が生じず、崩壊のみが観察されたと推定できる。従って、Fig.24 の現象と Fig.25 の現象は本質的に同じと言える。

#### (4) 高温ジェットの分散

Fig.26 に初期温度 950°C の溶融錫 150 g を、サブクール度 10 °C の水中に落下させた場合の連続写真を示す。ノズル出口の水面からの高さは 100 mm である。この例ではサブクール度が小さく初期温度が高いため蒸気発生（黒色のジェット周辺の灰色部）が多い。

0 ms で、ジェット先端部は白矢印部で後続のジェットから分断し始める。また、先端は、Fig.23 の先端の台形形状以上に角張って落下している。前後の挙動から見て、大きな慣性力を保持した後続部の追い抜きによる現象ではなく、既に、ジェット先端部の内側に周囲流体が捕らえ込まれ、加熱による圧力発生の影響を受けた変形の可能性が高い。

80 ms では、液滴状の溶融錫（白矢印部）がこの領域から斜め下向きに左右に噴出している。また、100 ms では、2 個の白矢印で示すように先端が 80ms に比べて大きく変形し、太いジェット状で 2 方向へ噴出する形状となっている。80ms および 100ms の白矢印部の噴出方向は左右及び落下方向であり、内圧の発生に関連した分散過程と考えるのが自然である。145 ms の白矢印部は 100ms の白矢印部に対応する。100ms の太いジェット状の噴出部は、著しく体積が減少し、ほぼ液滴状になってジェットの落下方向に分散している。80ms から 145ms までの噴出的分散とその後の体積減少の挙動から、80ms のジェット内部には高圧蒸気が発生していると推定される。また、ジェット先端部は 145ms で全体が滴状に分散したと言える。

0ms の後続のジェット部（白矢印より上部）は、80ms でその体積（黒色の領域）を増加させていている。また、この時点で、黒矢印部で再度分断が生じている。分散が進んだ 145ms では、黒色部の体積は 80ms に比べて減少していると言える。後続ジェット部の体積の膨張と分散に伴う減少は、先端部と同様、ジェット内部の圧力の発生に関連していると推定される。

Fig.27 は、平成 10 年度に報告した初期温度 900°C の溶融錫を、サブクール 33°C の水プールに落下させた際の連続写真である。0ms の時点では、ジェット先端の形状は Fig.26 の先端形状にはほぼ対応している。また、ジェットが水中に落下する際には、空気を巻き込むため、この写真では、先端部を除いての空気柱が水面まで形成されている。後続のジェットは空気柱の内側を落下するため、周囲の流体から受ける抵抗が少なく、比較的滑らかな表面を保っている。

空気柱が上部へ移動した後では、ジェットの表面が周囲の蒸気と水にさらされるため、不安定波が生じて発達し、大規模構造が生じる。これらの大規模構造の発生過程は、蒸気膜が複雑に溶融ジェットを覆っているため不明瞭であるが、Fig.18 および Fig.19 に示した構造の発展過程と基本的に同じであることをビデオの映像では確認している。

30ms では、双方向矢印で示すように、3 つの大規模構造が生じている。これらの構造のうち、先端の構造は、0ms で観察されたジェット先端部に後続のジェットが追いついて合体したもので

ある。先端から 2 番目と 3 番目の円錐形に見なせる構造は、ジェットの中間領域に生じた大規模構造が合体してできたものである。また、ジェットの先端では白矢印で示したように、溶融物が噴出している。初期温度が低い溶融錫ジェットの凝固物形態を観察すると、このような噴出は、大規模構造を形成したジェットの内部で高圧が生じた場合に発生することが分かる。したがって、本溶融錫ジェットでも 30ms 以前にジェットの内側には水が捕らえ込まれているといえる。

40ms の時には、白矢印で示した部分で、ジェットが分断しているが、この分断は先端部を構成する 2 つの構造が相対的に加速して起きたように見える。この運動の原因として、先端部を構成する 2 つの構造の内側に水が捕らえ込まれて沸騰し、先端の 2 つの構造に対して加速の効果を与える力が生じることが関与していると考えられる。60ms の時には、分断した先端の 2 つの大規模構造は完全に合体している。また、この時点で、形状は複雑で明瞭な構造は確認できないが、やや膨張している。この時点では、後続のジェットの先端部には双方向矢印で示す 30ms の第 3 番の大規模構造と見なせる形状が後続のジェットから分断しようとしている。

80ms の時には、この構造が白矢印で示した部分で分断している。一方、先端で分断した構造はフィラメントと液滴に微粒化して形状を留めていない。30ms の時に観察された、ジェット先端で生じた噴出と 40ms の時に観察された先端ジェットの加速運動を考慮すると、先端ジェットの構造の分断とそのジェットの微粒化は、それぞれの構造の内部で生じた高圧によって起きたと考えられる。

以上のように平成 10 年度に報告した初期温度 900°C のジェット（平均直径 8mm、サブクール度 33°C）で観察された分断後に膨張しつつ分散が完了する現象も、溶融物が滴状に噴出して分散する現象が観察されなかった点を除けば、平成 11 年度に報告した Fig.26 の高温溶融錫ジェットの分散挙動と本質的に同じと言える。平成 10 年度の結果も含め、初期温度が高いジェットでは分断されたジェット内部に既に周囲流体が捕らえ込まれていて、ジェットが充分な熱エネルギーを持つため、分散過程が進展するために必要な内部圧力が維持され、ジェットが落下方向および左右方向に広がる形態で分散が完了すると言える。なお、滴状に噴出する現象の発生には、十分な熱エネルギーの保持が必要条件と考えるが、機構は不明である。

#### 4.1.2 25 mm ノズル実験の結果と考察

##### (1) 中温ジェットの挙動

Fig.28 に、初期温度 601°C の溶融錫 400 g を、内径 25 mm のノズルを通して、サブクール度 21.7°C の水中に落下させた場合の連続写真を示す。なお、ノズル出口から水面までの距離は 320 mm に設定した。0 ms のジェット先端は、外見上は異なるが、Fig.23 の 0 ms で示したジェットの先端の様相と本質的に同じである。Fig.28 のこの時点では、ジェットの落下速度（約 2.7m/s）が大きく、ジェットの先端において追い抜きが生じる際に後続のジェットの慣性力が大きいことと水の抵抗がバランスして、先端の形状は外見上円筒状になっている。

10 ms では、円筒状に見えていた先端形状の上部が自身の内側に巻き込まれる。その結果、先端形状は丸みを帯びている。この変形は、先端形状の上部が流体力学的に負圧になっているため、周囲の流体を巻き込む傾向があり、それに伴って、先端形状の上端部が構造の内側に押し込まれて生じたと言える。また 10 ms から 30 ms にかけては、先端形状が球状に大きく発達している。また、30 ms の時点では、先端形状の上部に、双方向矢印で示す大規模構造と見なせる形状が生

じている。60 ms では、30 ms において双方向矢印で示した構造が変形した先端形状に追いつくとともにまた、白矢印部で後続のジェットから分断している。

75 ms では、分断した先端ジェットの白矢印で示した部分に複数個の白い領域が見えている。これは、実験で用いた照明の光がジェットの背後から透過している領域である。実験では、高速度ビデオカメラの位置に対して水槽の背後からのみ照明の光を照らしている。照明の光がジェットを透過しているということは、ジェットの空間密度が低い状態であることを意味する。ジェットの空間密度が低くなる現象に関しては後述する。75 ms では、双方向矢印で示すように、後続のジェットに新たな合体的構造が生じている。90 ms では、75 ms において双方向矢印で示した構造が先端構造に追いつくとともに、白矢印部で後続のジェットから分断している。また、双方向矢印で示すように、さらに新たな構造が生じようとしている。この時点で発達し始めた構造は、115 ms で後続のジェットから分断し、135 ms では先行のジェットに追いついている。ただし、白矢印部で光がジェットを透過しており、合体が生じている訳ではない。また、135 ms でも、双方向矢印で示すように、後続のジェットに新たな構造が生じ始めている。この間、空气中から水中に進入するジェットの直径は概ね安定している。

以上の観察をまとめると、Fig.28 では、水面下 70 mm 付近でジェットが繰り返し構造を作り分断し、先行のジェットに追いついて見かけ上合体化しようとする現象が繰り返し起きたと言える。ただし、先端のジェット部では背面の光が透過しておりジェットの空間密度が低い状態にあり、コヒーレントなジェットが形成されているとは言えない。

ジェットの空間密度が低い状態になる現象についてより具体的に考察する。まず、Fig.28 における 0 ms の時点までに、水中に流入した溶融錫ジェットの体積（流入速度と直徑より求まる）と 0 ms の円筒状形状から計算された体積を比較すると、後者の方が 2 倍以上大きくなる。従って、溶融ジェットは水面に進入した後、先端に円筒状の形状を形成する過程で、すでに内部に水を捕らえ込んだ形態になっているといえる。

その後（30 ms まで）のジェット先端の球状形状への変形から分かるように、円筒形状上部が負圧であるため流体力学的に水の捕らえ込みが生じる。このような状態で、後続のジェットが追いついて合体あるいは追い抜きをすれば、溶融錫と水の混合が促進される。10ms および 30 ms の球状形状上部でのフィラメント形成はこの現象が寄与していると推定する。また、60 ms 以降では、構造の分断と、分断構造の追いつきと追い抜き的現象が繰り返されている。後続の構造が先行構造に追いついて追い抜き的挙動を示す際には、周囲水を巻き込みながら過程が進行している可能性が高い。このような過程で溶融錫と水の混合が進んで、空間密度の低いジェットが生じると考えられる。

以上のように考えれば、135 ms でジェットの軸近くに存在するジェットは、空間密度の低い状態であった先端構造と、同様な水の捕らえ込みを行なながら追いついて追い抜き的挙動を示す分断した後続ジェットの集合体だといえる。従って、本研究で対象とする溶融錫ジェットでは、コヒーレントなジェット特性は早期に消滅していると言える。また、この種のジェットでは周囲に、滴状に分散した溶融錫が存在するが、これらの滴状粒子は、多数の分断した構造的ジェットの半径方向への分散（内部での沸騰が関係していると推定される）により発生したものが多いと推定される。

Fig.29 は、平成 10 年度に報告した初期温度 500°C の溶融錫 100g をるつぼより直接サブクール 22°C の水中に落下させた場合の連続写真である。0ms でジェットが水面に突入するときには、ジェットの直径は 6.5 mm になっている。40ms では、ジェットの先端が水の抵抗を受けてきのこの笠状に変形している。80ms および 100 ms 先端の変形過程は、Fig.28 の 10ms および 30 ms で観察されたジェット先端の変形過程と本質的に同じと推定される。

80 ms では明瞭でないが、100ms では Fig.28 の 30 ms と同様にフィラメント形状の溶融錫が噴出している。また、フィラメントを噴出しているこの先端部分は、後続ジェットから分断する直前のように見える。120ms の時点では、先端の大規模構造は形状が大きく変形し、Fig.28 の 60 ms と同様の挙動を示している。165ms の時点では、分断した先端の構造は全体にわたって滴状あるいはフィラメント状にブレイクアップし始めている。すなわち、内部で発生した圧力のため一気にブレイクアップし始めているように見える。内部に捕らえ込まれた水の沸騰が生じブレイクアップに関与していると推定される。この実験では、後続のジェットの追い付き追い抜き現象がないため、Fig.28 に比べて先端部のブレークアップが明瞭に観察できる例となっている。

ジェットの先端に大きな構造が生じる現象は、Spencer ら<sup>(12)</sup>によって行われた、ウッドメタル (1000°C、直径約 20 mm) を水 (約 22°C) 中に落下させる実験でも観察されている。彼らによれば、水面に突入したジェットの先端には、突如として大きな渦球 (vortex ball) が生じ、この渦球から、かなりの量の溶融物が噴出すると報告している。このような現象も Fig.28 および Fig.29 で観察される現象と本質的に同じと推定される。

## (2) 高温ジェットの挙動

Fig.30 に、初期温度が 1000°C の溶融錫 400g を内径 25 mm のノズルを通してサブクール度 20.5°C の水中に落下させた際の連続写真を示す。なお、溶融錫ジェットの落下高さは 320 mm (落下速度 2.95m/s) である。0 ms では、ジェットが空気中をほぼ一様の直径を保って落下し、水面に突入した後、空気を巻き込みながら先端にはほぼ半球状の形状を形成している。20 ms では、ほぼ相似形を保ちこの形状が大きく発達している。この時点で、Fig.28 で説明したように、この形状内部に周囲水を捕らえ込んでいる。Fig.28 と同様に、ジェットの直径と水面突入の速度に基づき、求めた溶融錫の体積と、写真から見積もった見かけの体積 (黒色の部分) を比較すると、後者の方が 5 倍ほど大きくなっている。

40 ms 以降では、先端部に対して、後続のジェットが追い付いて、追い抜きをしている状況がビデオ上では明瞭に観察できる。Fig.28 と同様、白矢印付近で不鮮明であるがジェットがほぼ分断している。また、70 ms のビデオでは、双方向矢印部で不鮮明であるが透過光が観察される。100 ms では、ジェット全体の形状は長い円柱形に近い形状になっていて、白矢印部でジェットを透過した照明の光が観察されており、ジェットが空間密度の低い状態にあることが分かる。以上の観察より Fig.30 のジェット挙動も基本的に Fig.28 と同じと言える。

## (3) 表面凝固する溶融錫ジェットの外観観察

Fig.31(a) に、初期温度 248°C の溶融錫 1.0 kg を内径 25 mm のノズルを通して、サブクール度 80°C の水中に落下させた実験で得られた凝固物全体の外観写真を示す。ただし、ノズルの水面からの高さは 100 mm である。ジェットの先端にはきのこの傘状の形状が生じている。先端形状を斜め上方から撮影した写真を Fig.31(b) に示す。先端形状の内側は、黒矢印で示すような凝固クラストを

貫通する開口部がいくつか確認できた。

ジェットの柱部の大部分は落下中に表面凝固したことが分かるスムーズな表面を持つ。ただし、Fig.31(a)の双方向矢印で示した部分には、2個の大規模構造と確認できる形状が生じている。この部分の拡大写真をFig.31(c)に示した。矢印で示す上下2個所に、熱的相互作用によってポーラス状になった凝固錫が、ジェット柱の表面（構造的形状）から吹き出るように生じていることが分かる。表面凝固したジェット柱の一部にこのような構造的形状が発生するメカニズムについては現在よく分からない。

Fig.32(a)は、平成10年度に報告した円錐形状の大規模構造が明瞭に観察できる凝固物の例である。初期温度270°Cの溶融錫を直径6.5mmのノズルを通して水中に落下させた際に得られたものである。複数の円錐形状が連なっており、矢印で示した部分はポーラス状の凝固物が噴出しており、局的に溶融錫と水の熱的相互作用が生じたことが分かる。

Fig.32(b)は、Fig.32(a)と同種の凝固物の断面写真である。円錐形状の外観を示していた凝固クラストの内側は、ポーラス状の微粒子でみたされている様子が分かる。凝固クラストには亀裂があり、たとえば、白矢印で示した亀裂部は、凝固クラストが形成された後で円錐形状の内圧が上昇したことと推定できる。この結果は、大規模構造の発展過程で流体力学的作用によりクラストの内側に捕らえ込まれた水が、クラスト内に残る溶融錫と熱的相互作用を起こし高圧が生じたことを示している。

Fig.31とFig.32(a)は外見上の違いはあるが、同種のメカニズムにより、ポーラス上の凝固物が生じたと推定できる。

## 4.2 溶融銅ジェットでの結果と考察

### 4.2.1 乱流領域でのジェットの挙動

乱流領域( $We_a < 100$ )でのジェットの分散挙動を説明するため、Fig.33に、初期温度1150°Cの溶融銅1000gを内径25mmのノズル(実質直径13mm)を通してサブクール度80°Cの水中に落下させた際の連続写真を示す。錫ジェットで観察されたように、ジェットが水面に突入した直後(0ms)には、先頭が水の抵抗のために半径方向に広がる。この広がりによって、水面近くの空気が、ジェット周りを円筒状に覆うようにして巻き込まれ、柱状になる(30ms)。空気柱が分断された後、先端の傘形状の構造後方には、空気柱の一部および、水が接触したことにより発生した水蒸気が付随している。流体力学的に生じる負圧が空気泡(水蒸気混合)の浮力より卓越するため、残存した空気泡はジェットの傘構造背面を随伴して水中を移動している(105ms)。

その後、大きな慣性力を保持した後続のジェットによって、先端部では追い抜き運動が持続する(このケースではFig.40に示すように加速運動がほぼ持続すると言える)。この程度の周囲ウェーバー数(約40)では、先頭は半径方向に広がる傾向を持続し、傘状構造を維持したまま落下する(155–210ms)。その際、先端部から傘状に広がり追い抜かれた溶融銅は、端より順次分散する(例えば155ms白矢印部)。このような分散が発生する現象は、傘構造表面のせん断力による表面剥離の現象と解釈することも可能であるが、周囲ウェーバー数がそれほど大きくなこともあり、著者は負圧域である傘構造内部に捕らえ込まれる周囲水の沸騰と銅の大きな表面張力(溶融錫に比べて2倍以上)が作用し、内部起因的に分散してしまう現象が支配している可能性も否定

できないと考えている。105ms 以降の中心を落下するコアジェット周辺に分散する滴はこのような物理過程により形成されたものである。コアジェットに対して、相対的に取り残された分散滴は、以降断続的に広がり、分散がより明瞭となる。

ある程度水中に侵入した中心部のコアジェットは慣性力を失い、先端付近で分断が観察される ( $t=235\text{ms}$  白矢印)。また、 $t=155\text{ms}$  に示すように、傘状構造に起因する分数滴に覆われない後続のジェットは、ケルビン-ヘルムホルツ不安定が成長して、大規模構造と呼べる形状が現れている(黒矢印)。このような大規模構造が明瞭に観察されるようになった後に、ジェットは周囲の分散滴を含め大きく乱れ、全体が粗く分断された ( $315\text{ms}$ )。したがって、傘状構造から分散した溶融銅滴や蒸気のために確認が困難であるが、後続の中心を落下するコアジェットは、大規模構造の発生、発達・分断により、分散が生じていると推測される。 $t=235\text{ms}$  の先端の分断(白矢印)も、 $t=155\text{ms}$  の黒矢印で示す後続部の構造発生・分断により、後続ジェットの慣性力の喪失に関連して発生していると推定できる。

すなわち、溶融銅ジェットの分散機構も前年度に報告した錫ジェットの分散機構と同一である。

#### 4.2.2 噴霧領域でのジェットの挙動

平成 12 年度の重点実験として、実機条件で重要であり、平成 11 年度まで観察が不充分であった噴霧領域( $We_a > 100$ )、すなわち、ジェット表面から多数の滴が剥離する現象によって分散が引き起こされていると解釈されている領域を対象に観察を行った。

Fig.34 に初期温度  $1120^\circ\text{C}$  の溶融銅  $890\text{g}$  を内径  $25\text{ mm}$  のノズル(実質直径  $17\text{ mm}$ )を通してサブクール度  $80^\circ\text{C}$  の水中に落下させた際の連続写真を示す。先端が常に水の抵抗によって半径方向に広がり、傘状構造を保持したまま傘の端から分散滴を放出しながら水中を落下する挙動は、中  $We_a$  領域(乱流領域)のジェットと同様である。しかし、 $100\text{ms}$  以降では白矢印部で示すように、分散滴も含めた見掛け上のジェット直径の収縮部が観察される。この現象は、先端部が鈍い物体として周囲流体に作用する結果生じると推定される。すなわち、空気柱が分断する過程と同様と考える。 $130\text{ms}$  では新たな大規模構造(傘構造)が発達している(白矢印)。 $143.3\text{ms}$  ではその地点から分断している(白矢印)。ただし、この時点では、まだジェット先端は傘状構造を保持している。Fig.40 に示すように、ジェットが慣性力を失い減速運動を始め、再び先端が加速運動(傘構造が現れる)を開始する時点でコアジェットのブレイクアップが確認できた例である。

さらに落下高さを上げ、ジェットの速度を増加させた条件、つまりジェットの慣性力が大きい場合は、ジェットが 2 次的に発生した傘状構造を突き抜ける現象を観察した。Fig.35 に、初期温度  $1100^\circ\text{C}$ 、質量  $1000\text{g}$ 、落下高さ  $140\text{ cm}$  ( $We_a = 430$ ) の溶融銅ジェットの連続写真を示す。 $5\text{ms}$  では後続のジェットがきのこの傘状構造を追い抜き始めている(白矢印)。 $11.6\text{ms}$  では追い抜きを行った先端が水の抵抗によって丸みを帯び、 $18.3\text{ms}$  では再びきのこの傘状に変形している。 $25\text{ms}$  ではさらに後続のジェット(白矢印)がきのこの傘状構造を追い抜き始める。ジェット先端が傘構造を再び突き抜ける  $25\text{ms}$  以降は、ジェット先頭は小さな傘状形状を保持したまま水中を落下するが、その速度は減速している。なお、コアジェットの分断では  $55\text{ cm}$  付近で発生した。

Fig.36 に、初期温度  $1090^\circ\text{C}$ 、質量  $1000\text{g}$ 、落下高さ  $140\text{ cm}$  ( $We_a = 475$ ) の溶融銅ジェット(実質直径  $17\text{ mm}$ )の連続写真を示す。Fig.35 と同様に  $10\text{ms}$  では、後続のジェットがきのこの傘状構造を追い抜く。 $20\text{ms}$  では、再度きのこの傘状の大規模構造が発生し、先端の後方側面にはわずか

ではあるがくぼみが見られる（白矢印）。40ms では先頭の傘状構造が膨張し、自発的に分散している。この挙動は錫ジェットの先端挙動に近いと言える。このような分散現象は、20ms で観察される大規模構造の形成に関連して、流体力学的に周囲の水（水蒸気）を構造内に巻き込み、傘構造内部の熱により沸騰（膨張）して内圧が上昇した結果と推定される。なお、10ms 以降のジェット先端は減速過程に入っている。

本研究では安全上（蒸気爆発が発生）したため、これ以上落下高さを上げ、ジェットの速度（約 6m/s）を増加させることは困難であった。しかし、これらのジェットの分散挙動の観察から、銅ジェットを用いる場合、噴霧領域では乱流領域より構造の発達、分断、分散が明瞭に現れ、前年度報告した錫ジェットの挙動と充分な整合性があることが分かった。

#### 4.3 ブレイクアップ長さの比較

本研究では、映像よりコアジェットが軸方向に分断した時点での、ジェット先端の水面からの距離をブレイクアップ長さと定義した。Fig.37 は、平成 12 年度の溶融銅を用いた実験で得られたブレイクアップ長さを  $We_a$  に対して整理したものである。本実験データは、 $We_a < 100$  の乱流領域では、ウェーバー数の増加に伴い、ブレイクアップ長さが大きくなる。一方、 $We_a > 100$  の噴霧領域では、ブレイクアップ長さは減少傾向にある（少なくとも明瞭な増大傾向は観察されない）。Ginsberg<sup>(13)</sup>の沸騰を伴わない小直径ジェットのブレイクアップの整理結果も  $We_a > 100$  の領域において、ブレイクアップ長さが減少傾向を示している。

Fig.38 は、従来の研究との比較するために、実験で求めたブレイクアップ長さを  $Fr$  に対して整理したものである。Fig.7 で紹介したように、Schneider ら<sup>(3)</sup>の実験では、映像観察から水中における溶融セロベンドジェットの先端速度が、自由落下速度と等しくなった時点での、ジェット先端の水面からの深さをブレイクアップ長さと定義している。Magallon<sup>(5)</sup> らおよび Spencer ら<sup>(4)</sup>は、溶融コリウムジェットを落下させるノズルの中心軸に沿って、水中に多数の熱電対を設置し、熱電対の応答からジェット先端の落下距離の履歴を測定して、落下速度が大きく減速した時点でのジェット先端の水面からの深さをブレイクアップ長さと判断している。

Fig.38 の  $Fr$  数 70 以下の範囲では、平成 12 年度の溶融銅の結果は、Schneider らの実験値の傾向に近いと言える。すなわち、ブレイクアップ長さは、 $Fr$  数に対して単調に増加しているといえる。しかし、 $Fr$  数が 80 以上の結果は  $Fr$  数に対する依存性が観察されない。この領域の結果は、むしろ Magallon ら（△）および Spencer ら（×）の実機条件の実験データの傾向を示していると言える。また、見かけ上、平成 11 年度に報告した溶融錫の結果は、 $Fr$  数 60 以下においても定性的にいえば、Magallon ら（△）および Spencer ら（×）の実機条件の実験データの傾向に近いと言える。しかし、この傾向はあとで述べるように、溶融錫ジェット自体の水中進入前の不安定性が反映している可能性が高く、溶融銅の結果と同列に議論すべきではないと考えている。

ジェットのブレイクアップについての物理的解釈を比較するために、本実験のジェット先端速度の一例を Fig.39 に示す。映像から得た本研究のブレイクアップ長さとした水深を A で示す。ジェットの慣性力が水からの抵抗より勝る約 30cm まではジェット先端の速度はほぼ一定である。その後、水の抵抗の方が勝るようになると、ジェットは減速する。減速過程の途中で、表面張力により先頭は滴状に分散（分断）するが、以降、分散した先頭の滴はある程度、慣性で落下し、自

由落下速度（本実験例では約1.0m/s）に至る。図面には、MagallonらとSpencerらによるコリウム実験の定義によるブレイクアップ長さをM-S、Schneiderらの定義したブレイクアップ長さをSとして示した。他の実験結果も含めて本実験のブレークアップ長さは全て両者の間にあり、この事実がFig.38のデータの傾向を説明する。S地点の映像では、ジェットは既に広く分散しており、溶融物は十分な冷却性を有しているといえる。したがって、Schneiderらの評価はブレイクアップ長さを過大に見積もっている。M-S地点からジェットが軸方向に分断した時点（A地点）までの映像は、ジェット外観に大きな変化は見られない。したがって、コリウム実験の評価法であるジェットの減速開始点を溶融物ジェットのブレイクアップ長さとする物理的根拠について、現時点ではコメントできない。しかし、ジェットの減速が、水の抵抗の相対的増加によるものであり、観察が困難な傘状構造内部あるいは分散滴内部のジェットコアに構造の発達と分断現象が生じジェット自体の抵抗の増大、慣性力の減少を反映している可能性は充分ある。この解釈であれば、ジェット先端の減速時にジェットコアの分散機構（水の捕らえ込み）が既に機能し始めているといえる。

この点に関連して、Fig.40に、MagallonらおよびSpencerらのコリウム実験に近い一定速度（この例では加速度運動）後、短距離でコアジェットの分断を観察した例（左側）を示す。また、右側には、コアジェットの分断を観察した後先端ジェット自体の速度の増加（Schneiderらの速度履歴（Fig.7）で観察されると同様な速度の急激な増加）の例を示す。この分断時の先端速度の急激な増加は、本実験では何度も観察された。

すでに述べたように、平成11年度報告した溶融錫ジェットのブレイクアップ長さの値（○）は、Fig.38に示すように、Fr数に対して一定あるいは幾分減少していると言える。大気中での錫ジェットの不安定（銅に比べてジェットの直径が不均一である）が原因の一つと考えているが、平成12年度、加熱溶融装置底部とノズルの接続形状が不安定を作り出す一つの要因であることを確認した。

時間な制約のため溶融銅のみによりこの点を確認した。従来型装置（平成11年度装置）で得られたブレークアップ長さの結果（▼▲）に基づく相関式（破線）と、改良型装置（平成12年度装置）で得られた結果（■●）に基づく相関式（実線）を比較してFig.41に示す。両者の比較が可能と思われるFr<100の領域に限定しているが、従来型装置はブレイクアップ長さを小さく評価する。この点は空気中を落下する溶融銅ジェットの変形過程でも確認できる。

Fig.42は溶融銅50gを高さ50cm（水面上）から落下させた時点での変形の様子である。右は従来型装置を、左は改良型装置を使用した場合のジェットの挙動である。従来型ではノズルから流出した直後（a）にジェットが不安定となり水面に到達するまでに、滴状に分断している。一方、改良型では水面突入直前（b）でも一体のジェット形状を保っていることがわかる。この図より、改良型の方が従来型よりも安定したジェットが形成されることが分かる。動粘性係数の値が小さい錫ジェットは、空気中で不安定なジェットであったことを確認した。すなわち、水面に突入する際のジェットの安定性が、ブレイクアップ長さに影響し、小さく評価している可能性がある。

#### 4.4 銅凝固物の外観と粒径分布

実用域にある $We_i=236$ で得られた凝固物の外観をFig.43に示す。この領域の凝固物は、大きさ

が広範にわたり、粒径 0.5mm 以下の粉末状の凝固物も得られている。また、4.0mm 以上の凝固物は形状が不規則であり、分散後に複数の溶融銅粒子が合体したことによる形状であるのか、分散した時点での変形・凝固による単体の形状であるのかは不明である。しかし、低  $We_a$  領域で観察された形態とは大きく異なることから、合体の可能性を含めて、大規模構造からの分散としての形態を留めている可能性が高いと想定している。凝固物の粒径分布を Fig.44 に示す。 $We_a = 4.3$  の結果は最上位にあり、 $We_a$  の増加と共に粒径が小さくなることが分かる。ただし、 $We_a = 202$  以上では粒径分布の相違は非常に小さいといえる。Fig.45 は質量平均粒径を  $We_a$  に対して整理した結果である。溶融銅ジェットの  $We_a$  が大きくなるに伴い、質量平均粒径が減少している、すなわち微細化が進行していることがわかる。また、Fig.44において  $We_a = 202$  以上では、差は不明瞭であるが、Fig.45 では  $We_a$  が 200 のグループと 400 のグループでは、明瞭な差が表れている。

## 5. 結論

- (1) 従来報告されている高温溶融物ジェットの分散冷却過程に関する実験研究では、溶融物ジェットのブレイクアップ長さを比較している場合が多い。例えば、本研究で調査した Spencer らおよび Magallon らの溶融コリウムジェットのブレイクアップ長さは  $Fr$  数に依存せずほぼ一定であるのに対して、Schneider らのセロベンドによる実験値は  $Fr$  数に依存し、両者に大きな差が生じていた。しかし、詳細に検討してみると、Schneider らの溶融物ジェットは、大規模構造の発生のため、より短い距離で実質的に分散・冷却されている可能性がある。一方、Spencer らおよび Magallon らは、ノズル中心軸に沿ってセットされた熱電対が時間に対して直線的に応答する距離までをブレイクアップ長さとしている。本研究から熱電対が直線的に応答しなくなる距離ではジェット内部に冷却材が捕らえ込まれている可能性があることが分った。したがって、従来不明であった Schneider らの結果に対する Spencer らおよび Magallon らの結果の大きな差は、実質的に小さくなる可能性がある。
- (2) 大規模構造の発展によりジェットの分散冷却過程が規定されているのであれば、第一段階では、大規模構造が容易に発展する溶融物ジェットの系で実験が行われるべきである。大規模構造は溶融物ジェットの流体力学的な変形により出現する。すなわち、溶融物ジェットの動粘性係数が小さい場合、大規模構造が容易に発生し、上記の観点での検討が可能になる。平成 10 年度および平成 11 年度は、この観点より、密度は溶融二酸化ウランに比較的近く、動粘性係数がほぼ 50% である溶融錫ジェットによる実験を行った。なお、金属であるため、熱拡散率は溶融二酸化ウランに比べて一桁大きいが、界面温度が低下しないため比較的低い初期温度で、膜沸騰状態でのジェットの分散冷却過程が観察でき、この値が大きいことは差し当たり好ましい特性といえる。錫ジェット実験の結果は大規模構造の発達、分断によりジェットの分散・冷却過程が規定されていることを明瞭に示した。
- (3) 特に平成 11 年度に準備した内径 13 mm および 25 mm のノズル付きステンレス鋼製の坩堝を用いた実験では、高い初期温度 (1000°C) から低い初期温度 (250°C) まで系統的に観察を行った。高い初期温度のジェットでは、構造 (不明瞭であるが) の発生、ジェットの分

断、そして完全な分散が観察できた。中程度の初期温度のジェットでは、構造の発生、ジェットの分断と膨張、そして崩壊が観察できた。低い初期温度のジェットでは、構造の部分的発生、ジェットの分断、そして分断ジェットの凝固と空洞化が観察できた。これらの現象の発生は、ジェット自体の保持熱量に密接に関係しており、充分な保持熱量を持つ系では、大規模構造に基づく内部起因型の分散が発生することを確認した。

- (4) 平成 12 年度の銅実験の結果も含めて、乱流 (Turbulent) 領域 ( $We_a < 100$ ) の溶融金属ジェットでは、傘状の構造を形成し大きな慣性力を保持した後続のジェットによって、この先端部で追い抜き運動が起こり、ある程度水中に浸入したジェットは慣性力を失い、大規模構造の形成に基づく分断・分散が観察された。特に、溶融銅ジェットでは、先端部傘状構造が、追い抜かれることにより、端より順次分散することが明瞭に観察できた。相対的に取り残されたこれらの分散滴は、以降断続的に広がり、分散がより明瞭となる。後続のジェットは、大規模構造を発達させ、分散滴内部で粗く分断していると推定された。
- (5) 平成 12 年度の銅実験の結果も含めて、噴霧 (Atomization) 領域 ( $We_a > 100$ ) の溶融金属ジェットでは、慣性力が大きいため、最初に形成された傘状構造を後続ジェットが突き抜け（追い抜き）、新たな大規模構造（傘構造）を形成し、再度後続ジェットが追い抜くという過程を繰り返す。慣性力の減衰と共に、大規模構造の形成に基づくジェットの分断、あるいは内部への水（水蒸気）の捕らえこみによる、内圧上昇型の分散を観察した。すなわち、噴霧領域においても、大規模構造を起因事象として分散過程が進展していること確認した。

## 参考文献

- (1) Bürger, M., Cho, S. H., Berg, E. v., and Schatz, A., Breakup of melt jets as pre-condition for premixing: Modeling and experimental verification, J. Nucl. Eng. Des., Vol. 155, pp. 215-251 (1995).
- (2) Laufer, J., New trends in experimental turbulence research, Annual Review of Fluid Mech., Vol. 7, pp. 307-326(1975).
- (3) Schneider, J. P., Marciniak, M. J. and Jones, B. G., Breakup of metal jets penetrating a volatile liquid, Proc. NURETH-5, Salt Lake City, US, Vol. 2, pp. 437-449 (1992).
- (4) Spencer, B.W., Wang, S. K., Blomquist, C. A., McUmber, L. M. and Schneider, J. P., Fragmentation and quench behavior of corium melt stream in water, NUREG/CR-6133, ANL93/32 (1994).
- (5) Magallon, D., Hohman, H., Experimental investigation of 150-kg-scale corium melt jet quenching in water, Nuclear Engineering and Design, 177, pp.321-337, 1997.
- (6) Saito, M., Sato, K. and Imahori, S., Experimental study on penetration behaviors of water jet into freon-11 and liquid nitrogen, ANS-Proc. 25th National Heat Transfer Conf., Houston, TX, HTC3, pp. 173-183 (1988).
- (7) Bates, J. L., McNeilly, C. E, and Rasmussen, J. J., Properties of molten ceramics, Material Science Research, Vol. 50, pp. 11-26 (1971).
- (8) Tsai, H. C., and Olander, D. R., The viscosity of molten uranium dioxide, J. Nucl. Mat., Vol. 44, pp. 83-86 (1972).
- (9) Woodley, R. E., The Viscosity of Molten Uranium Dioxide, J. Nucl. Mat. Vol. 50, pp. 103-106 (1974).
- (10) Fink, J. K., Chasanov, M. G., and Leibowitz, L., Thermophysical properties of uranium dioxide, J. Nucl. Mat. Vol. 102, pp. 17-25 (1981).
- (11) Sugiyama, K., Sotome, F., and Ishikawa, M., Thermal interaction in crusted melt jets with large-scale structures, Proc. OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions, Tokai, Japan, pp. 639-945 (1997).
- (12) Spencer, B. W., Gabor, J. D., and Cassulo, J. C., Effect of boiling regime on melt stream breakup in water, Proc. 4th Miami Int. Symp. on Multi-Phase Transport and Particulate Phenomena (1986).
- (13) Ginsberg, T., Liquid jet breakup characterization with application to melt-water mixing, Proc. Int. ANS/ENS Top. Mtg. On Thermal Reactor Safety, San Diego, US, II.4-1 (1986).

## 記号

- a : 热拡散率  
c<sub>d</sub> : 液滴の抵抗係数  
D<sub>j</sub> : 溶融物ジェットの直径  
d : 液滴の直径  
g : 重力加速度  
L : ブレイクアップ長さ  
T : 温度  
T<sub>m.p.</sub> : 融点温度  
T<sub>b.p.</sub> : 沸騰温度  
w : 液滴の自由落下速度  
w<sub>j</sub> : 溶融物ジェット初期速度  
ν : 動粘性係数  
ρ : 密度  
ρ<sub>j</sub> : 溶融物ジェットの密度  
ρ<sub>c</sub> : 冷却材の密度  
σ<sub>j</sub> : 溶融物ジェットの表面張力  
Fr : フルード数 [ $w_j^2/gD_j$ ]  
We<sub>a</sub> : 周囲ウエーバ数 [ $\rho_c w_j^2 D_j / \sigma_j$ ]

Table 1 Initial conditions of CCM-experiment (I)

	CCM-1	CCM-2	CCM-3	CCM-4	CCM-5	CCM-6
<b>Water</b>						
Depth, m	1.06	0.63	1.1	1.07	1.07	1.07
Vessel Diameter, m	0.21	0.21	0.21	0.21	0.76	0.76
Temperature, C	57.4	99.0	100.3	63.3	55.4	100.8
Volume, m <sup>3</sup>	0.037	0.022	0.039	0.039	0.533	0.533
Mass, kg	37.	22.	39.	38.	525.	510.
<b>Gas</b>						
<u>Interaction Vessel</u>	Air	Air	Air	Ar	-	-
Temperature, C	44.0	108.4	103.0	57.8	-	-
Pressure, MPa	0.1	0.1	0.1	0.096	-	-
Volume, m <sup>3</sup>	0.024	0.023	0.022	0.023	-	-
<u>Expansion/Experiment Vessel</u>	Air	Air	Air	Ar	Ar	Ar
Temperature, C	139.4	139.3	136.0	137.1	-	130.6
Pressure, MPa	0.1	0.1	0.1	0.096	0.117	0.114
Volume, m <sup>3</sup>	1.38	1.38	1.38	1.38	0.460	1.4
<u>Atmosphere</u>						
Pressure, MPa	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Temperature, C	21.0	21.0	19.5	23.0	23.0	23.0
<u>Structure Temperature, C</u>						
Interaction Vessel Body	54.3	101.4	92.4	53.4	-	-
U-Bend	113.2	98.8	97.2	100.9	-	-
<u>Expansion/Experiment Vessel</u>						
Top Section	144.0	143.9	144.1	143.3	86.1	124.2
Upper Section	136.4	137.1	137.6	128.8	-	131.3
Single Viewport Section	-	-	-	-	59.4	107.0
Multi-Viewport Section	136.6	127.9	131.4	135.0	55.5	106.9
Bottom Section	117.4	104.8	96.7	118.5	52.2	98.9

<sup>1</sup>Includes Pipeway

Table 2 Initial conditions of CCM-experiments ( II )

	CCM-1	CCM-2	CCM-3	CCM-4	CCM-5	CCM-6
Reactant Mass, kg	3.784	12.012	4.8	10.01	12.012	12.012
Injected Corium Mass, kg	2.15	11.15	3.34	9.24	11.34	12.79
Injection Diameter, mm	25.4	20.0	25.4	50.8	50.8	50.8
Distance to Water Surface, mm	454.0	435.0	412.8	447.7	339.7	339.7
Pressure at Onset of Injection, MPa	0.11	0.175	0.315	0.355	0.134	0.202
Initial Gas Temperature, C	2.63	29.0	24.0	20.0	116.9	100.4
Gas Temperature at Onset of Injection, C	64.9	40.0	40.6	39.9	151.8	126.3
Burn Time, s	22.85	20.8	16.27	4.0	8.63	7.65
<u>Corium Free Fall</u>						
Maximum Velocity at Water Surface, m/s	2.98	2.92	2.85	2.96	2.58	2.58
Time to Reach water Surface, s	0.30	0.30	0.29	0.30	0.26	0.26
<u>Corium Free Fall + Initial Velocity</u>						
Maximum Velocity at Water Surface, m/s	3.39	5.30	8.15	8.73	2.58	5.57
Time to Reach Water Surface, s	0.18	0.09	0.05	0.05	0.26	0.06
<u>Calculated Drain Time, s</u>						
Liquid Head Only	0.99	0.78	1.19	0.69	0.78	0.78
Liquid Head + Initial ΔP	0.54	0.17	0.16	0.08	0.78	0.16

Table 3 Summary of experimental conditions

	Test number							
	L-06	L-08	L-14	L-11				
<b>Melt</b>								
Composition ( $\text{UO}_2\text{ZrO}_2$ ) (wt.%)	80 20	80 20	80 20	76.7 19.2				
Zr (wt.%)	0	0	0	4.1				
Temperature (K)	2923 <sup>a</sup>	3023 <sup>a</sup>	3073 $\pm$ 50 <sup>b</sup>	2823 <sup>a</sup>				
Discharged mass (kg)	18	44	125	151				
Hydrostatic head in release vessel (m)	0.34	0.47	0.57	0.59				
$\Delta p$ Delivery	~Gravity <sup>c</sup>	~Gravity <sup>c</sup>	Gravity	Gravity				
Initial discharge diameter (m)	0.1	0.1	0.1	0.1				
Free fall in gas (m)	1.66	1.53	1.04	1.09				
<b>Water</b>								
Mass (kg)	120	255	623	608				
Height (m)	0.87	1.00	2.05	2.00				
Diameter of water container (m)	0.470	0.710	0.710	0.710				
Initial mean temperature (K)	539	536	537	535				
Fuel/coolant mass ratio	0.15	0.17	0.21	0.25				
<b>Free-board</b>								
Gas composition (steam) (wt.%)	83 17	70 30	77 23	77 23				
Argon (wt.%)								
Volume (m <sup>3</sup> )	0.464	0.875	1.260 <sup>d</sup>	1.280 <sup>d</sup>				
Initial pressure (MPa)	5.0	5.8	5.0 <sup>d</sup>	4.9 <sup>d</sup>				
Initial mean temperature (K)	543	536	536	536				
<b>Exhaust valves</b>								
Start opening pressure P <sub>s</sub> (MPa)	—	—	9.3 $\pm$ 0.15					
Full opening pressure <sup>e</sup>	—	—	1.05 P <sub>s</sub>					
Full opening time <sup>e</sup> (s)	—	—	<0.1 from 1.05 P <sub>s</sub>					
Flow area at full opening <sup>e</sup> (m <sup>2</sup> )	—	—	8.04 $\times$ 10 <sup>-4</sup>					
Sensitivity to back pressure <sup>e</sup>	—	—	No if <0.5 P <sub>s</sub>					
<b>Condenser</b>								
Overall volume (m <sup>3</sup> )	—	—	4.0					
Water mass (kg)	—	—	1440					
Initial water temperature (K)	—	—	290					

Table 4 Viscosity data of molten  $\text{UO}_2$   
reported by Bates et al

Temperature (°C)	Viscosity (Poise)
2755	0.46
2795	0.36

Table 5 Viscosity data of molten UO<sub>2</sub>  
reported by Tsai and Olander

## Sample # 1

Mass: 93.6 g

Moment of inertia: 823.0 gm·cm<sup>2</sup>

Torsion wire: 8 mil molybdenum

Radius: 0.79 cm

Temperature (°C)	Decay const. ( $\times 10^3$ sec <sup>-1</sup> )	Period (sec)	Density *	Viscosity (cP)
<b>First melt</b>				
2880	4.67	5.14	8.71	5.83
2880	5.10	5.12	8.71	7.39
2880	4.70	5.12	8.71	5.94
2950	4.47	5.13	8.66	5.14
<b>Second melt</b>				
2840	4.73	5.23	8.77	6.28
2840	4.90	5.21	8.77	6.86
2900	5.10	5.21	8.71	7.62

## Sample # 2

Mass: 72.0 g

Moment of inertia: 547.9 gm·cm<sup>2</sup>

Torsion wire: 8 mil molybdenum

Radius: 0.81 cm

Temperature (°C)	Decay const. ( $\times 10^3$ sec <sup>-1</sup> )	Period (sec)	Density *	Viscosity (cP)
2810	7.39	4.26	8.80	9.21
2915	7.32	4.24	8.71	8.69
2915	7.00	4.24	8.71	7.71
2865	7.01	4.26	8.77	7.81
3055	6.41	4.26	8.59	6.02
3055	7.00	4.26	8.59	7.65
2975	7.14	4.24	8.67	8.08
2975	6.70	4.24	8.67	6.82

Table 6 Viscosity data of molten UO<sub>2</sub> reported by Woodley

Run	Temp (°C)	Decay, const. $\times 10^3$ (sec <sup>-1</sup> )	Period (sec)	Density a) (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosity (cP)
<u>Series 1</u>					
1	2870	10.35	2.693	8.74	4.25
2	2875	9.72	2.682	8.73	3.65
3	2875	9.26	2.682	8.73	3.26
4	2920	10.60	2.667	8.69	4.41
5	2920	10.55	2.657	8.69	4.34
6	2920	10.66	2.655	8.69	4.44
7	2985	10.43	2.660	8.63	4.20
8	2985	10.39	2.665	8.63	4.17
9	2985	10.36	2.667	8.63	4.15
10	2940	10.47	2.660	8.67	4.26
11	2940	10.48	2.663	8.67	4.28
12	2945	10.48	2.660	8.67	4.27
13	2905	10.51	2.663	8.70	4.32
14	2910	10.55	2.663	8.70	4.36
15	2910	10.54	2.660	8.70	4.34
16	2890	10.42	2.663	8.72	4.24
17	2890	10.38	2.662	8.72	4.20
18	2890	10.40	2.665	8.72	4.23
<u>Series 2</u>					
1	2885	10.35	2.663	8.72	4.18
2	2885	10.45	2.663	8.72	4.28
3	2890	10.43	2.663	8.72	4.25
4	2925	10.36	2.663	8.69	4.17
5	2935	10.39	2.657	8.68	4.18
6	2925	10.38	2.663	8.69	4.19
7	2990	10.20	2.663	8.63	3.99
8	2990	10.27	2.663	8.63	4.05
9	2990	10.23	2.663	8.63	4.02
10	3025	10.21	2.663	8.60	3.98
11	3025	10.18	2.663	8.60	3.95
12	3030	10.16	2.666	8.59	3.94
13	3000	10.21	2.663	8.62	3.99
14	3000	10.19	2.666	8.62	3.98
15	3000	10.19	2.663	8.62	3.97
16	2945	10.28	2.666	8.67	4.09
17	2940	10.24	2.669	8.67	4.06
18	2945	10.22	2.671	8.67	4.04
19	2905	10.28	2.671	8.70	4.12
20	2905	10.22	2.671	8.70	4.06
21	2905	10.28	2.674	8.70	4.13

a) Based on the density function

$$\rho = 8.74 / [1 + 0.000105 (T - 2865)] .$$

with  $T$  in deg C. This function was derived from the data of Christensen [8], but it was assumed that the liquid density, 8.74 g/cm<sup>3</sup>, was obtained at 2865°C rather than at 2800°C, the apparent melting point as determined by Christensen.

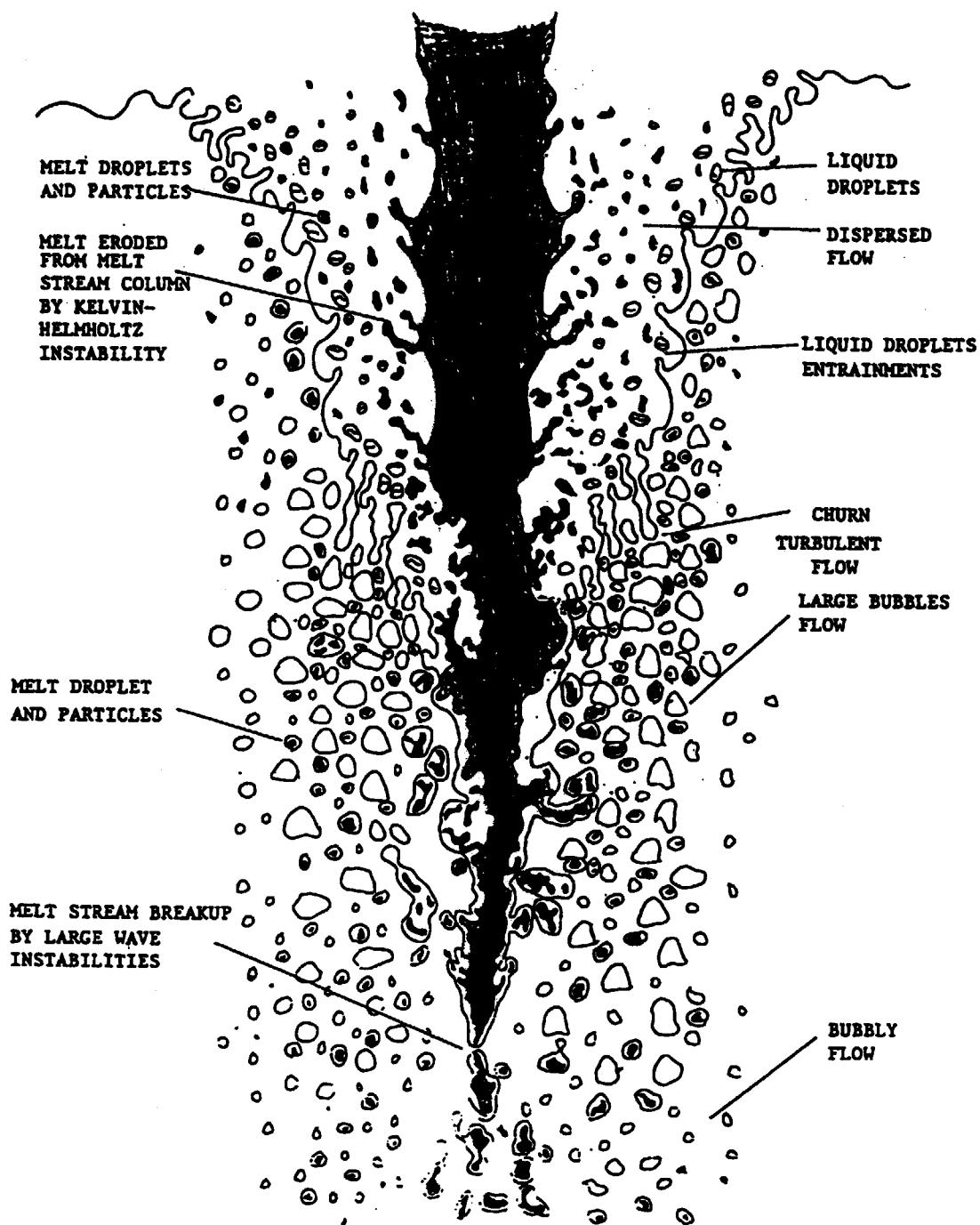
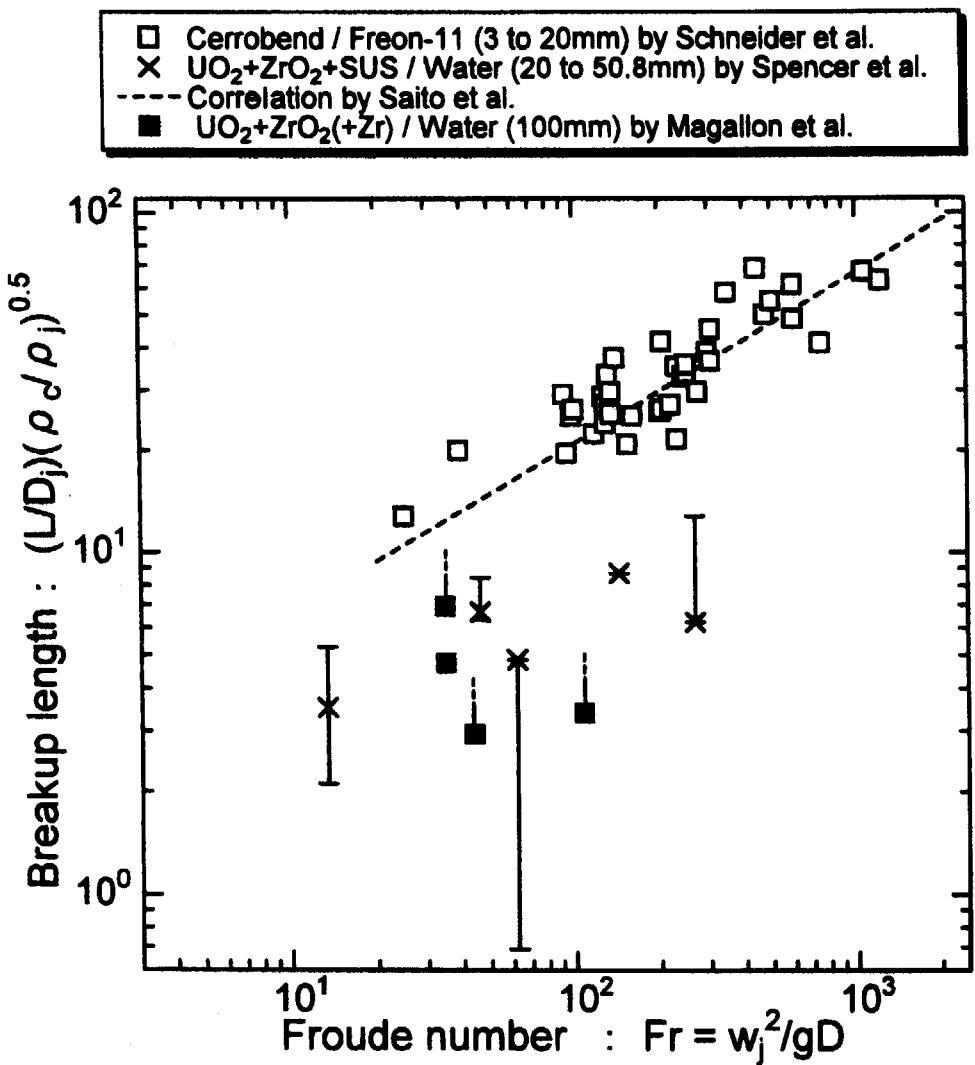


Fig.1 Depiction of melt stream in a water pool  
(cited from Chu et al., 1995)



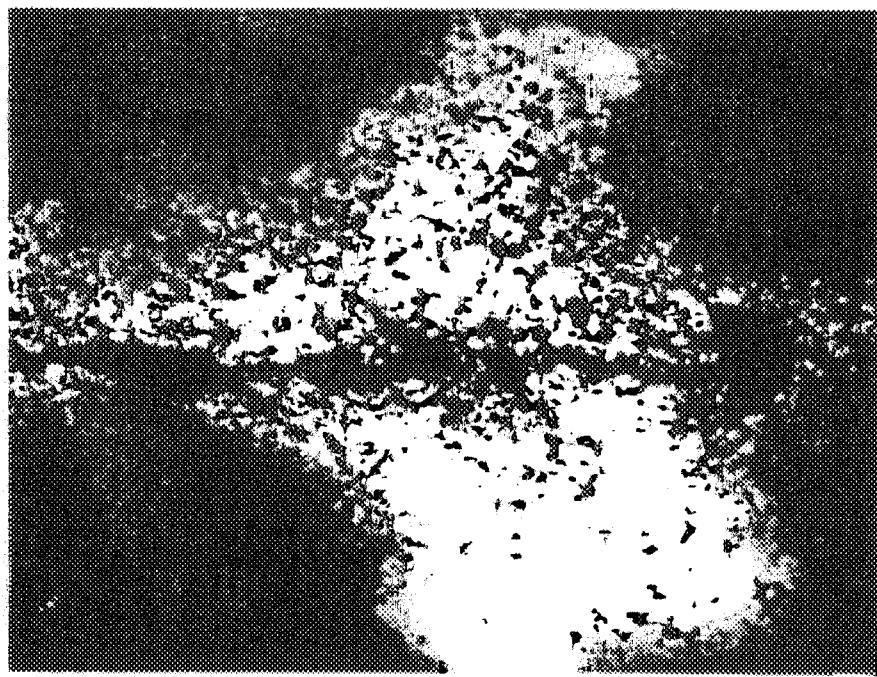


Fig.3 X-radiograph of Cerrobend jet  
falling through Freon-11  
(initial jet diameter:10mm)

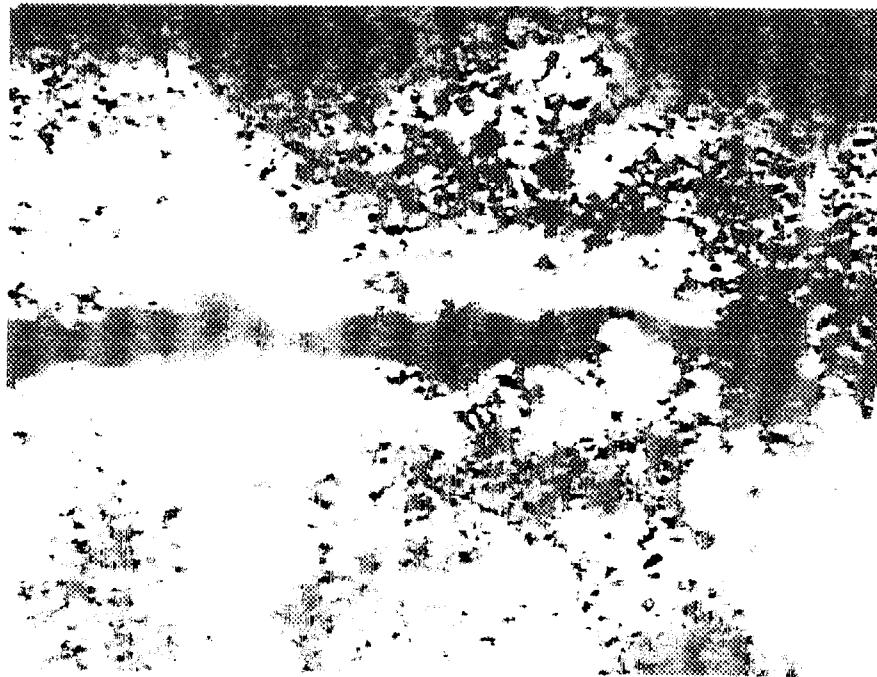


Fig.4 X-radiograph of Cerrobend jet  
falling through Freon-11  
(initial jet diameter:5.9mm)



Fig.6 X-radiograph of Cerrobend jet  
falling through Freon-11  
(initial jet diameter:11mm)

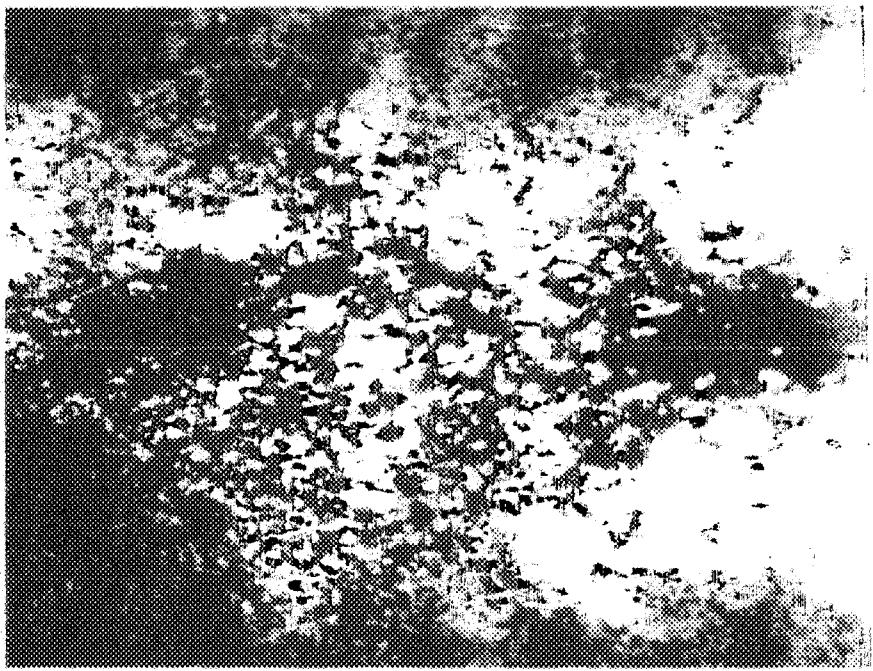


Fig.5 X-radiograph of Cerrobend jet  
falling through Freon-11  
(initial jet diameter:11mm)

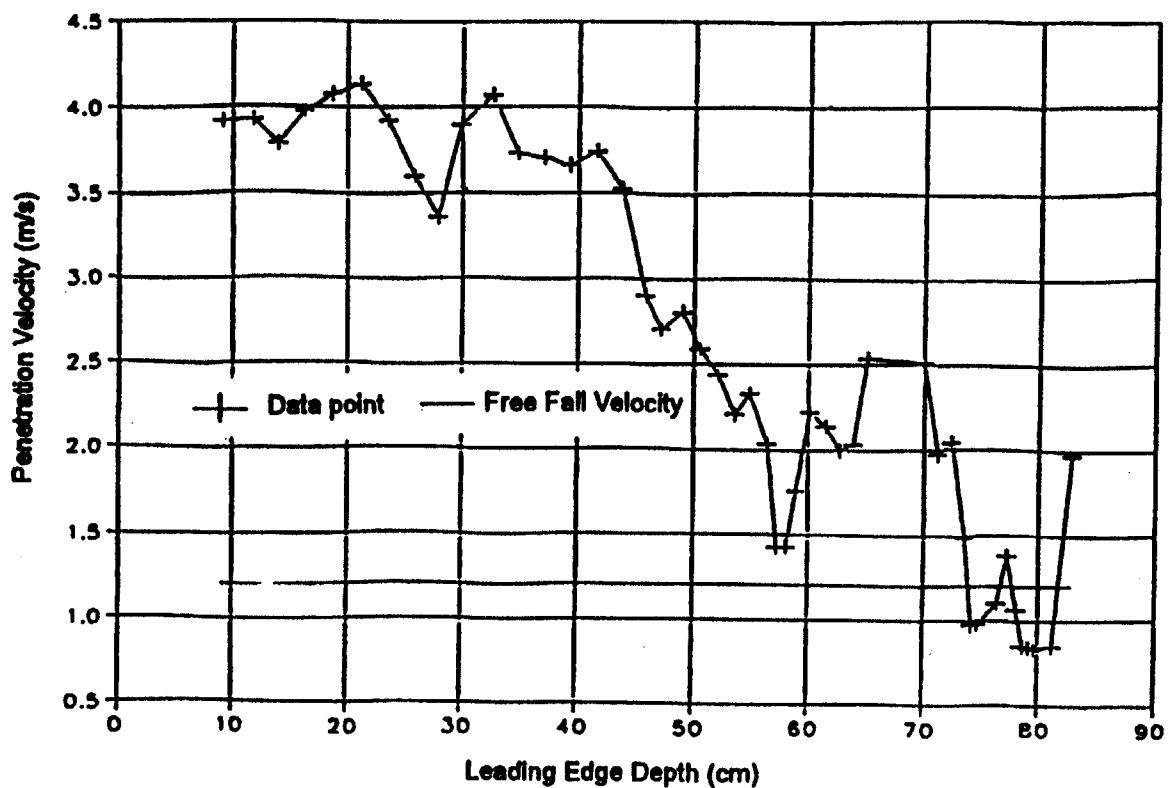


Fig.7 Penetration velocity of leading edge

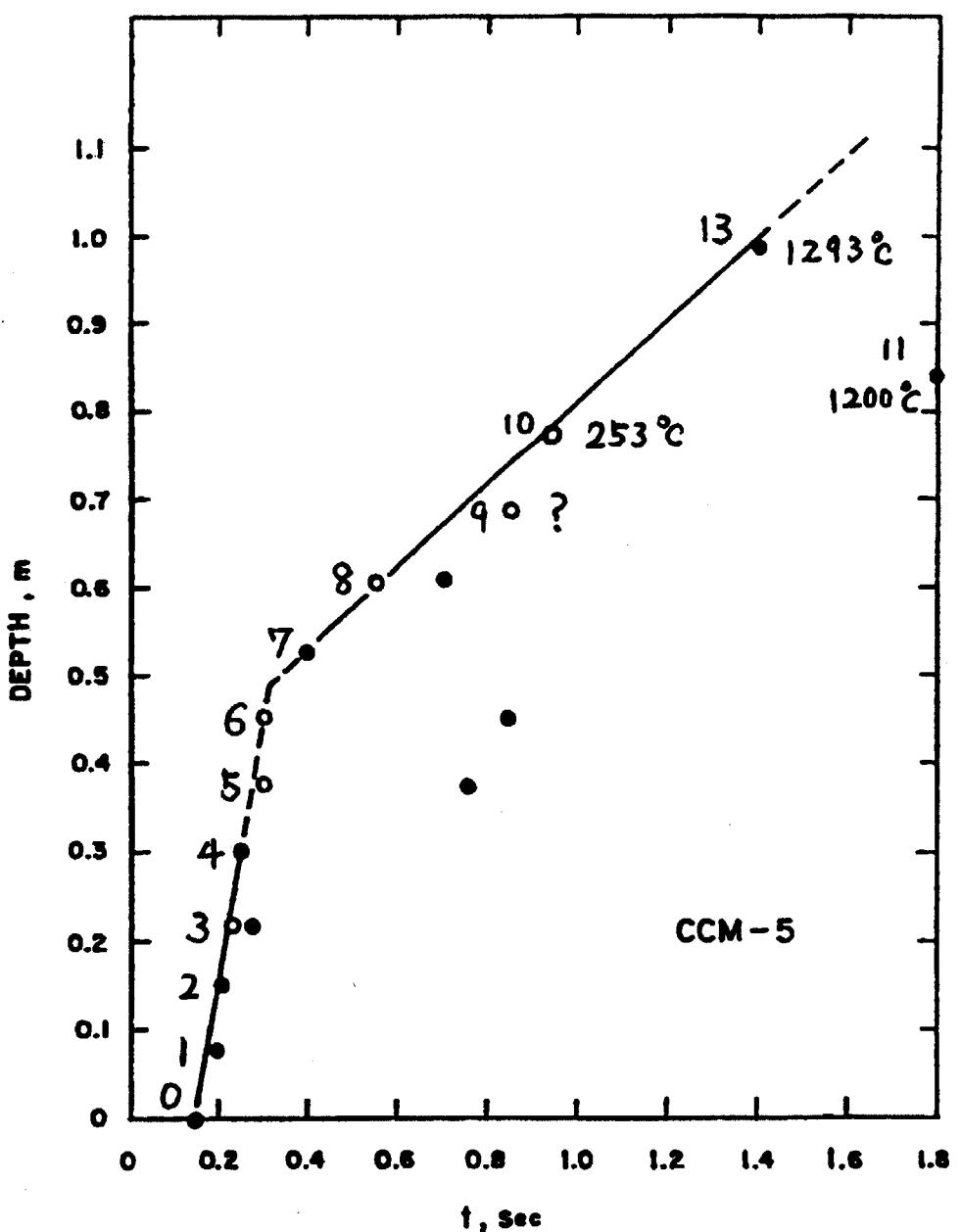


Fig.8 Centerline thermocouple responses

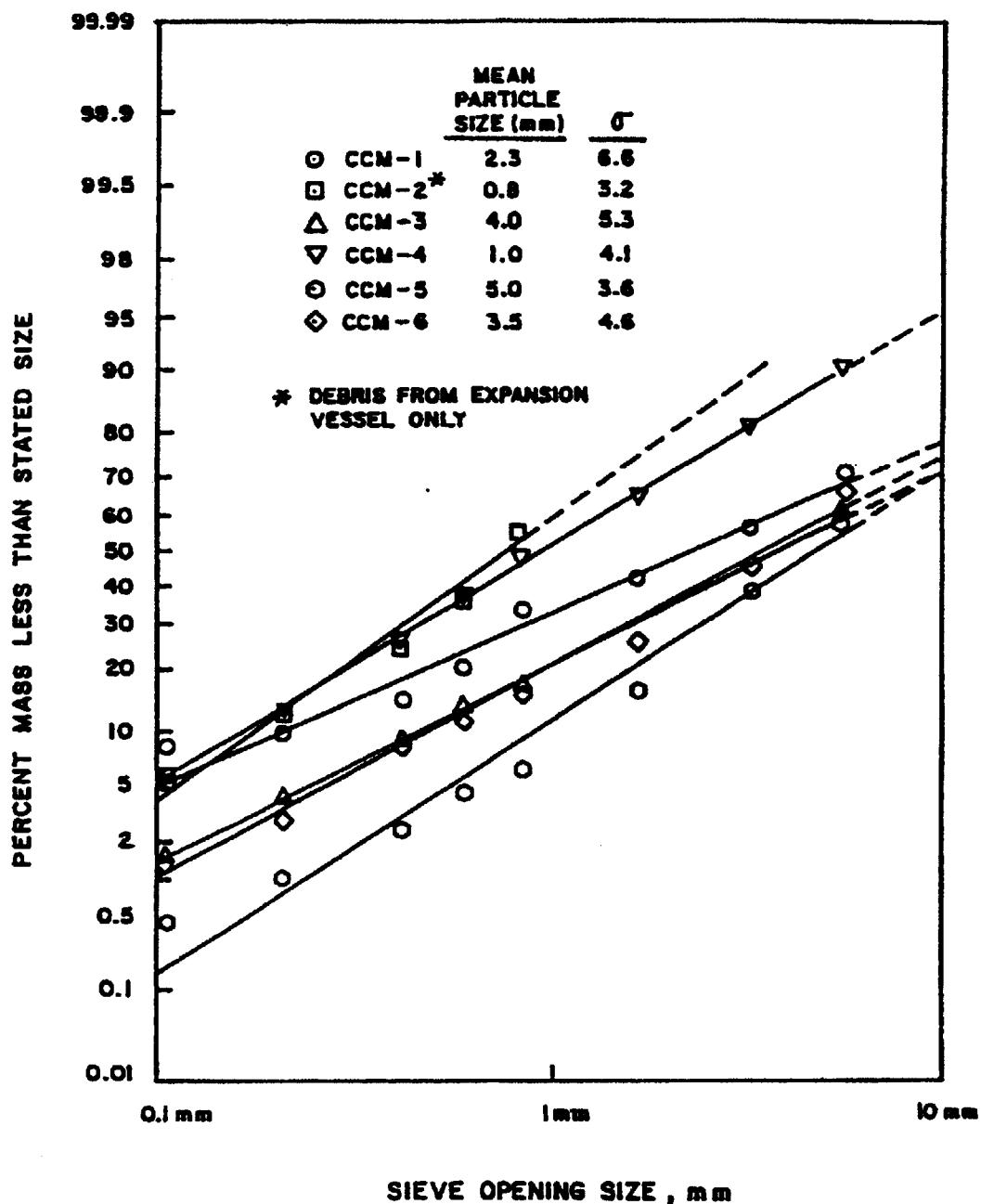


Fig.9 Particle-size distribution of debris

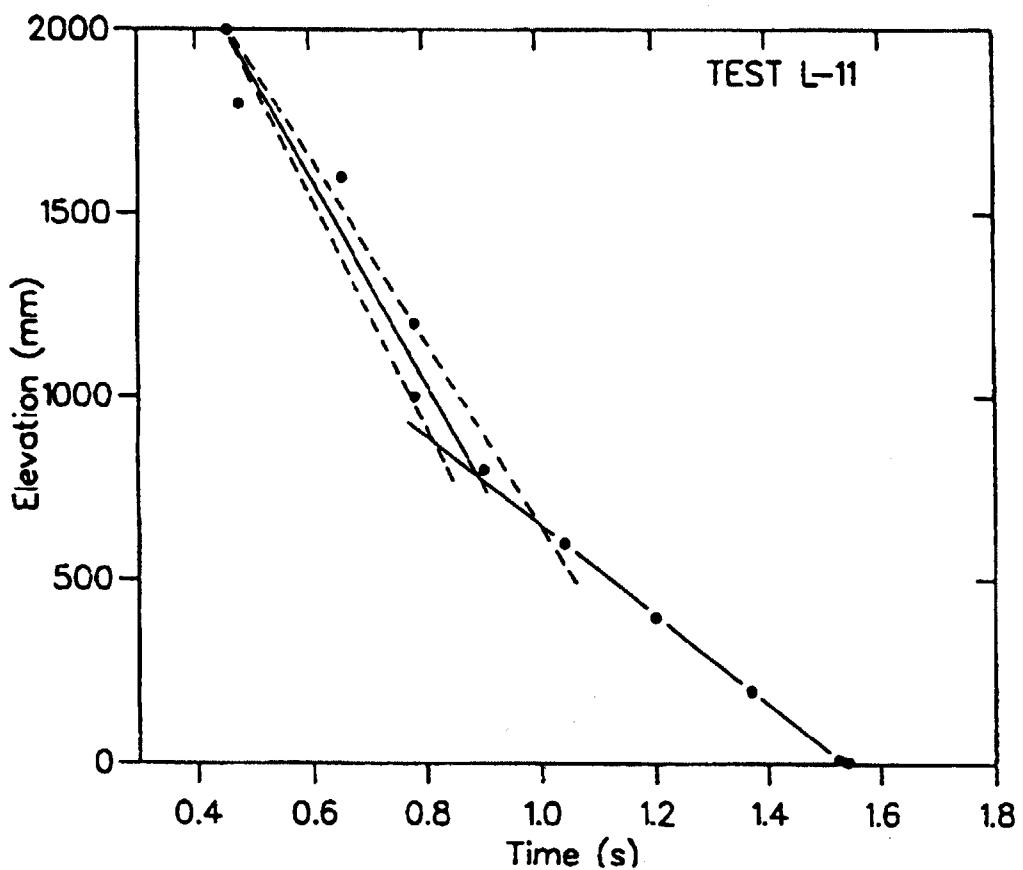


Fig.10 Melt down progression in test L-11

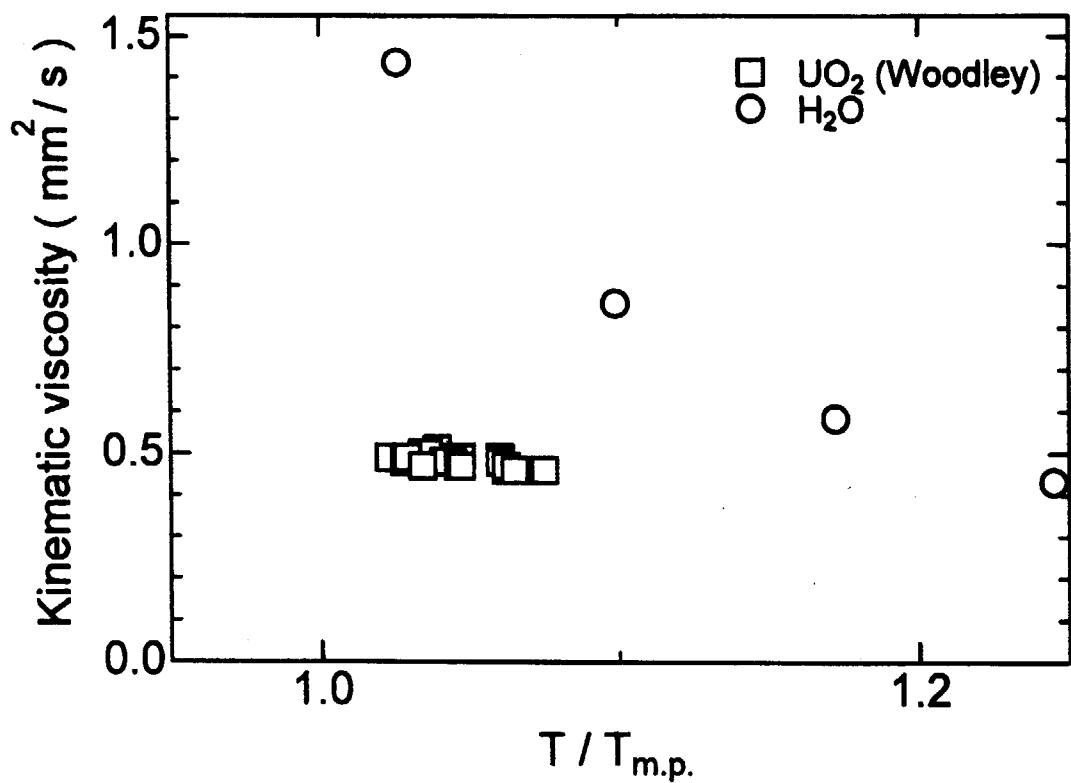
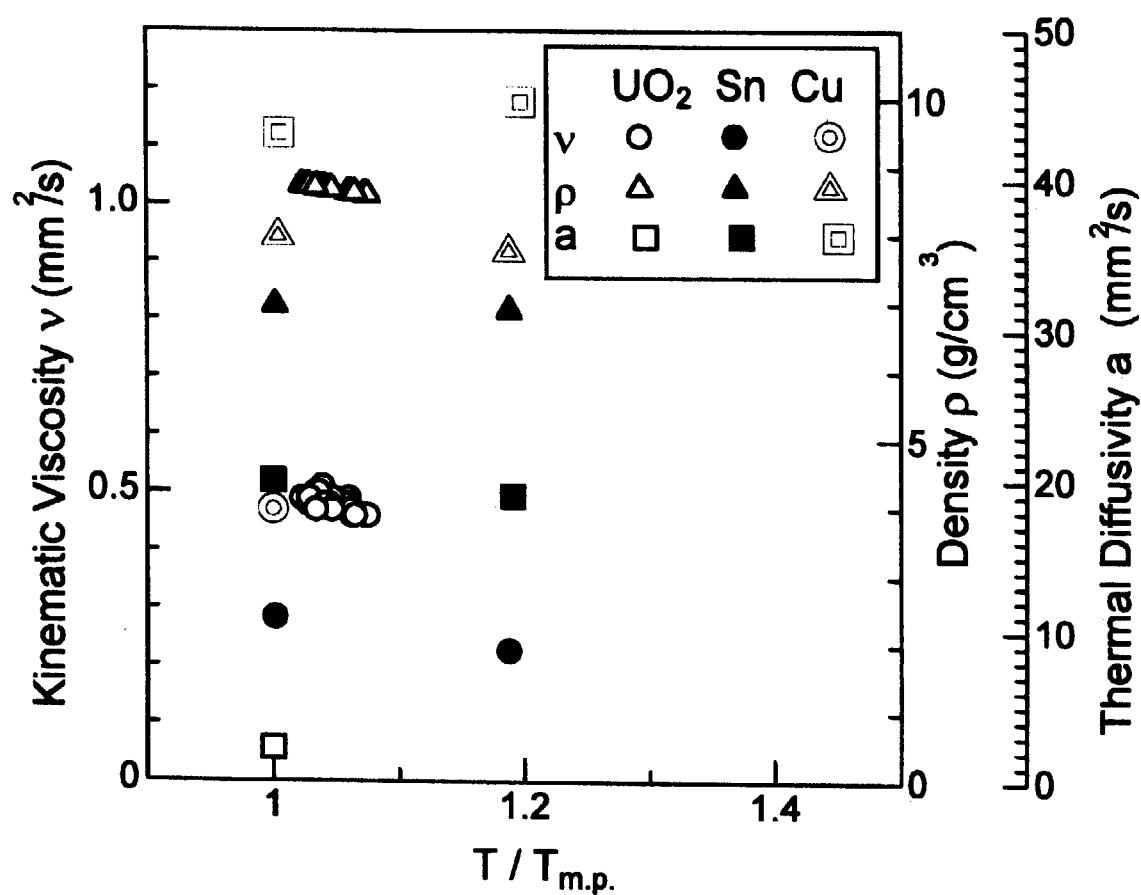


Fig.11 Comparison of kinematic viscosity between molten  $\text{UO}_2$  and water

Fig.12 Thermal and physical properties of molten  $\text{UO}_2$ , molten Sn and molten Cu

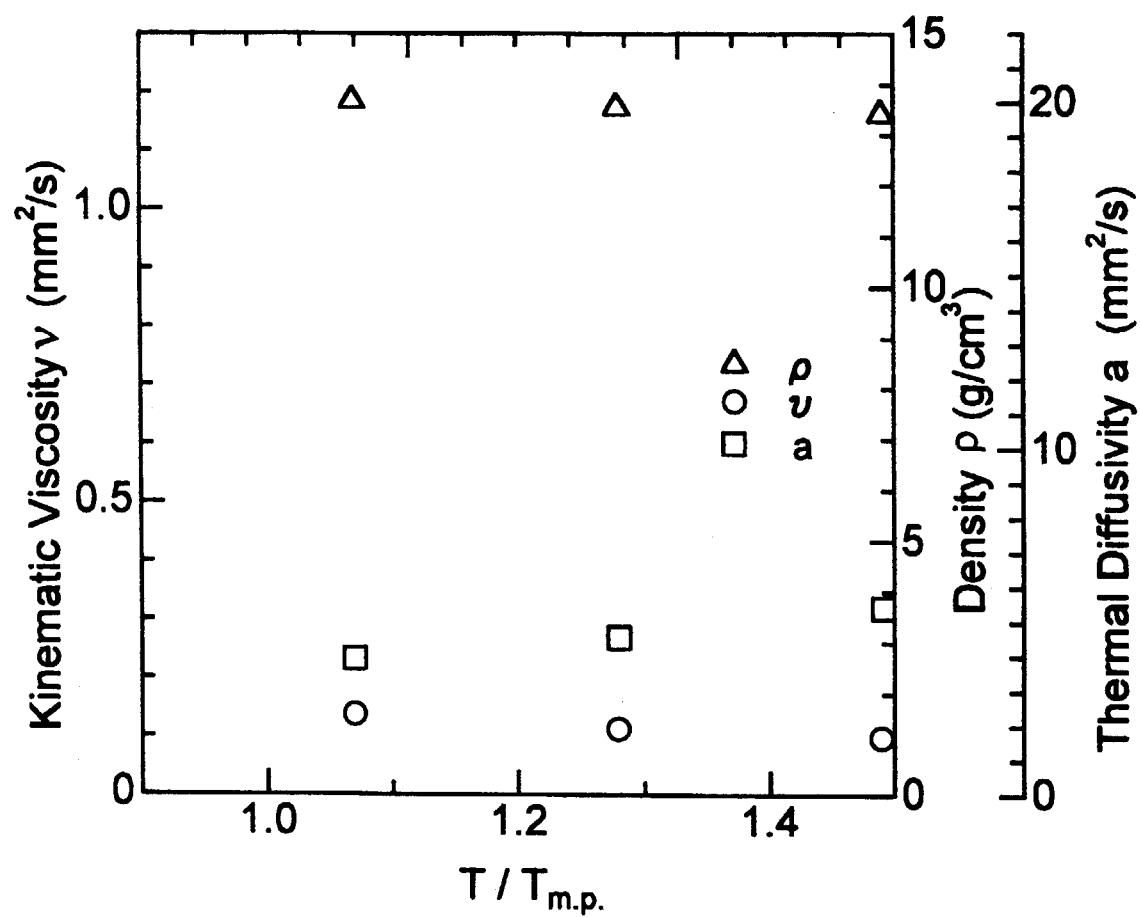


Fig.13 Thermal and physical properties of mercury

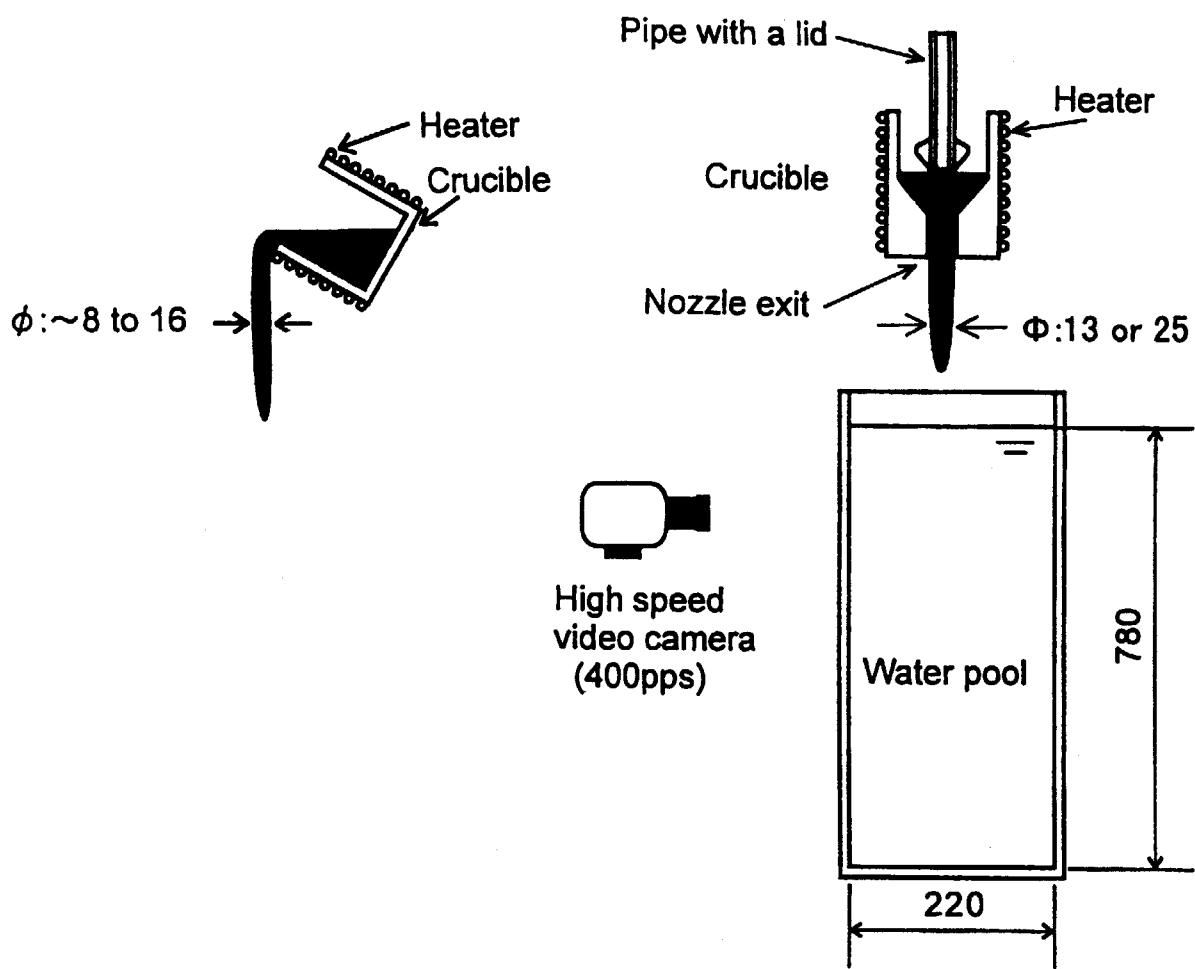


Fig.14 Conceptual setup of experimental apparatus

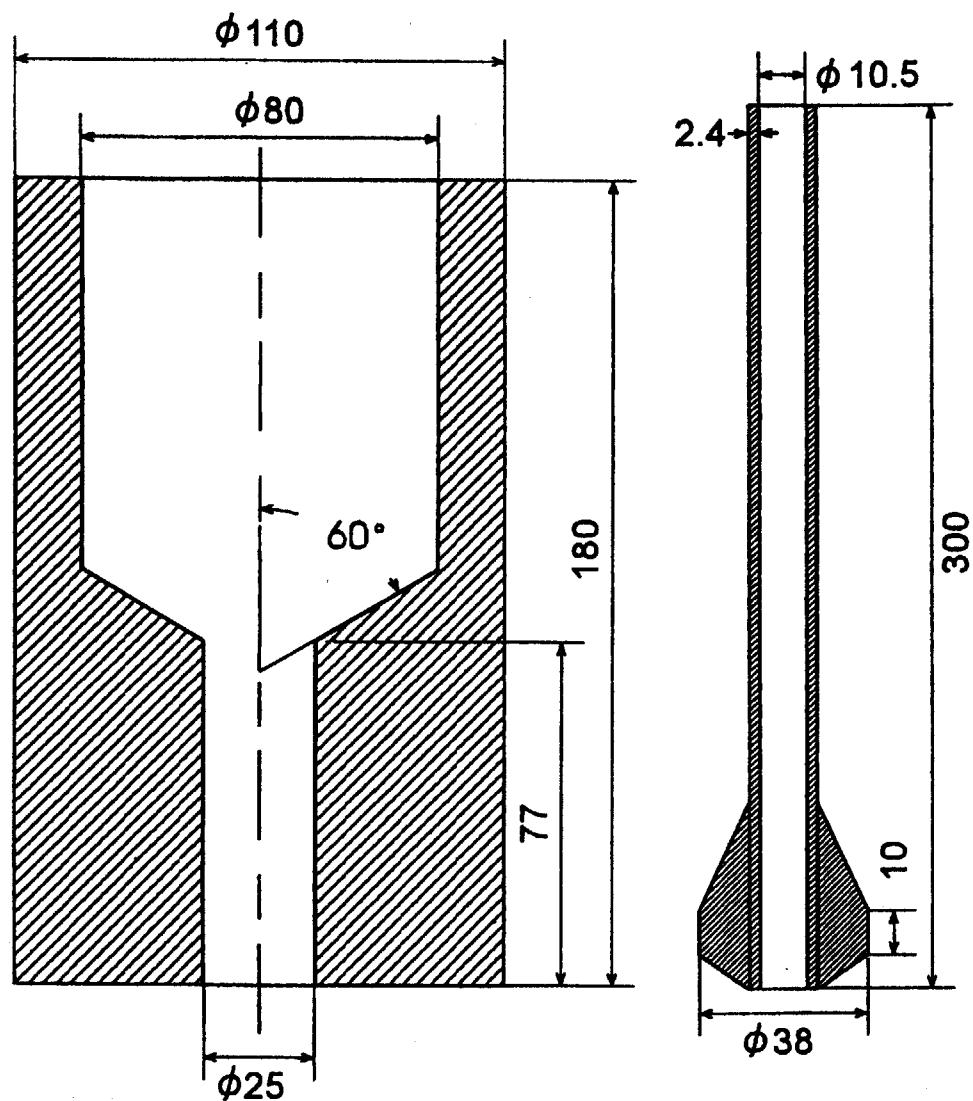


Fig.15 Crucible with 25mm nozzle for molten Sn

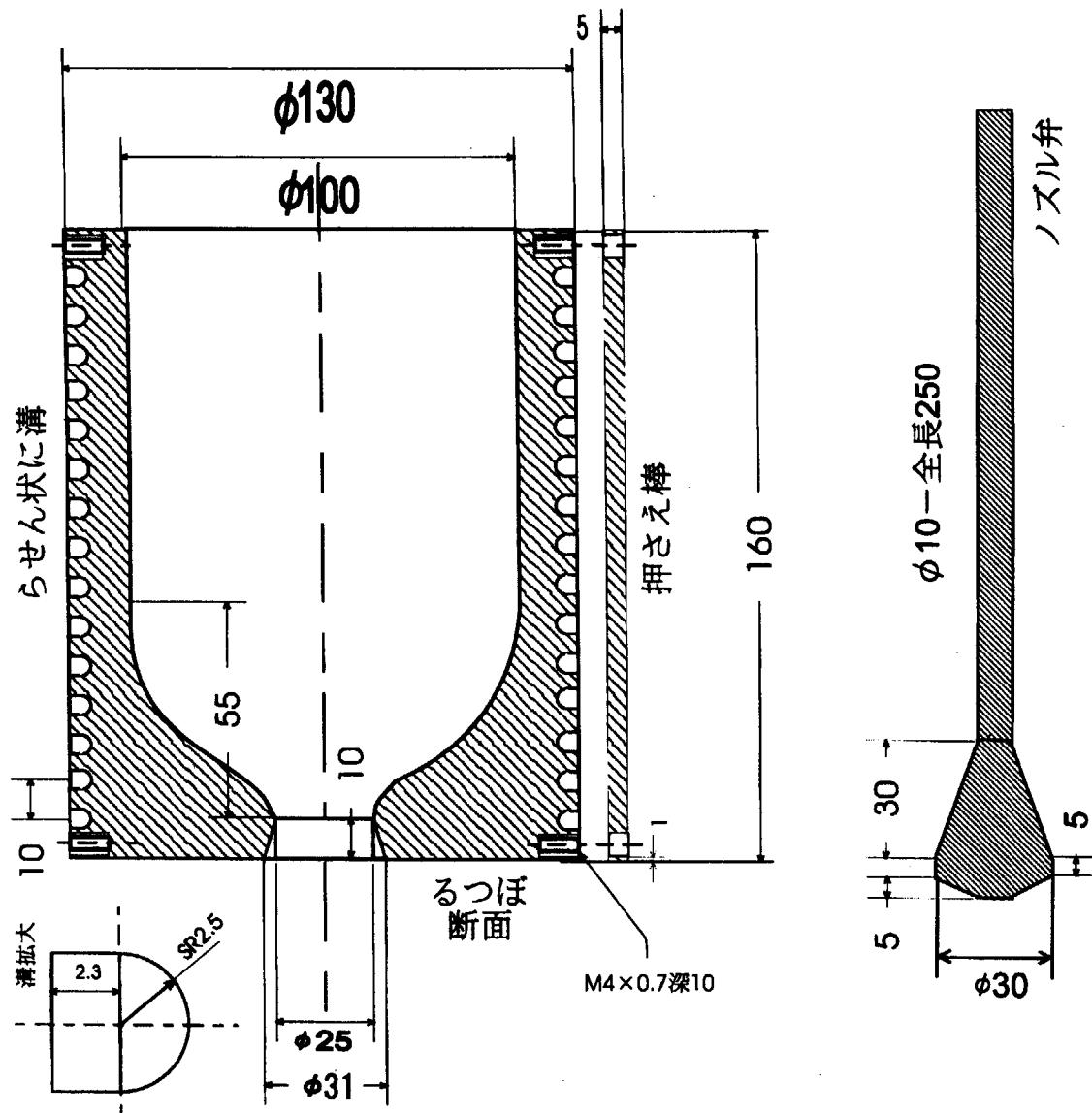


Fig.16 Crucible with 25mm nozzle for molten Cu

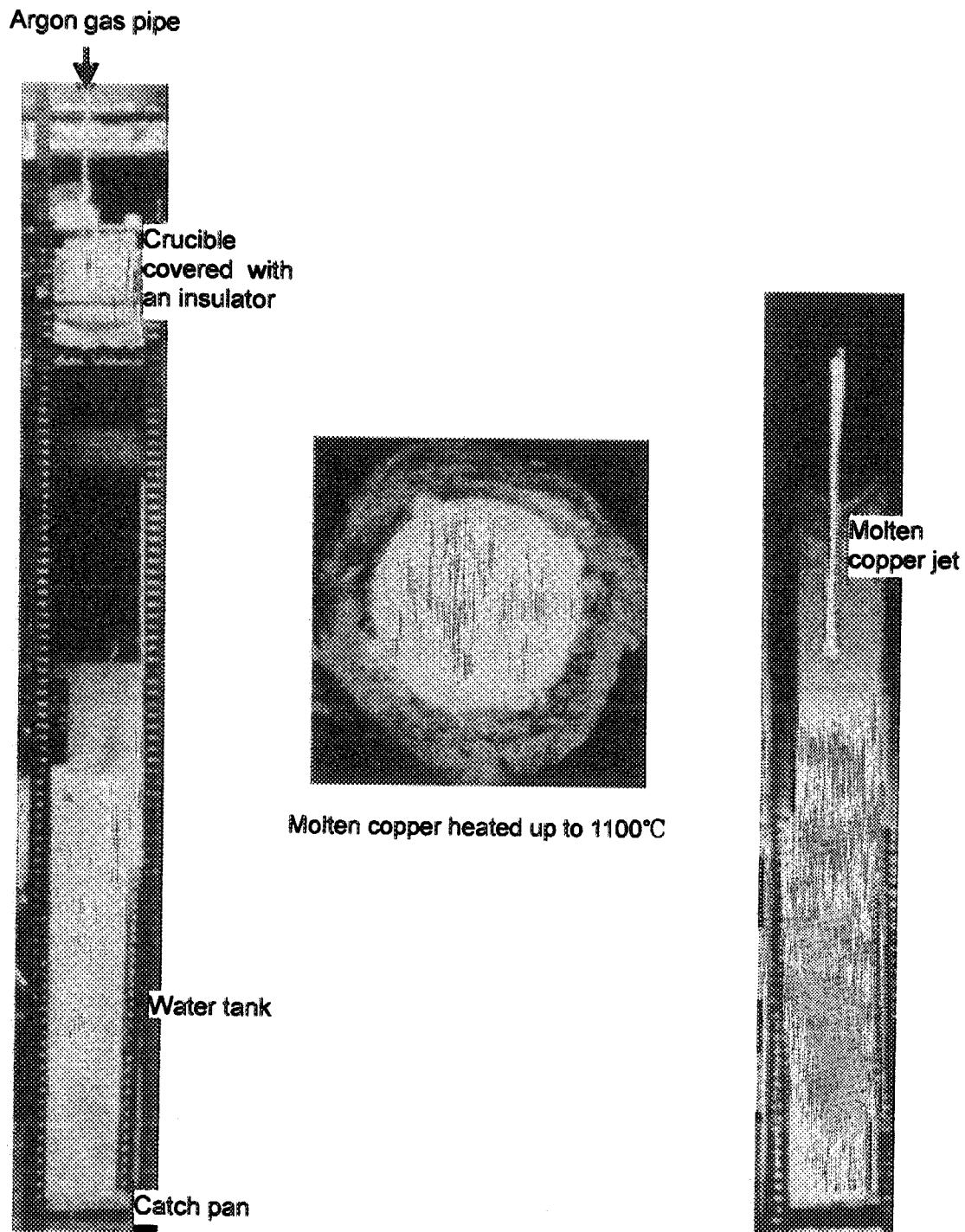


Fig.17 Experimental apparatus, molten copper in crucible and molten copper jet falling through the air

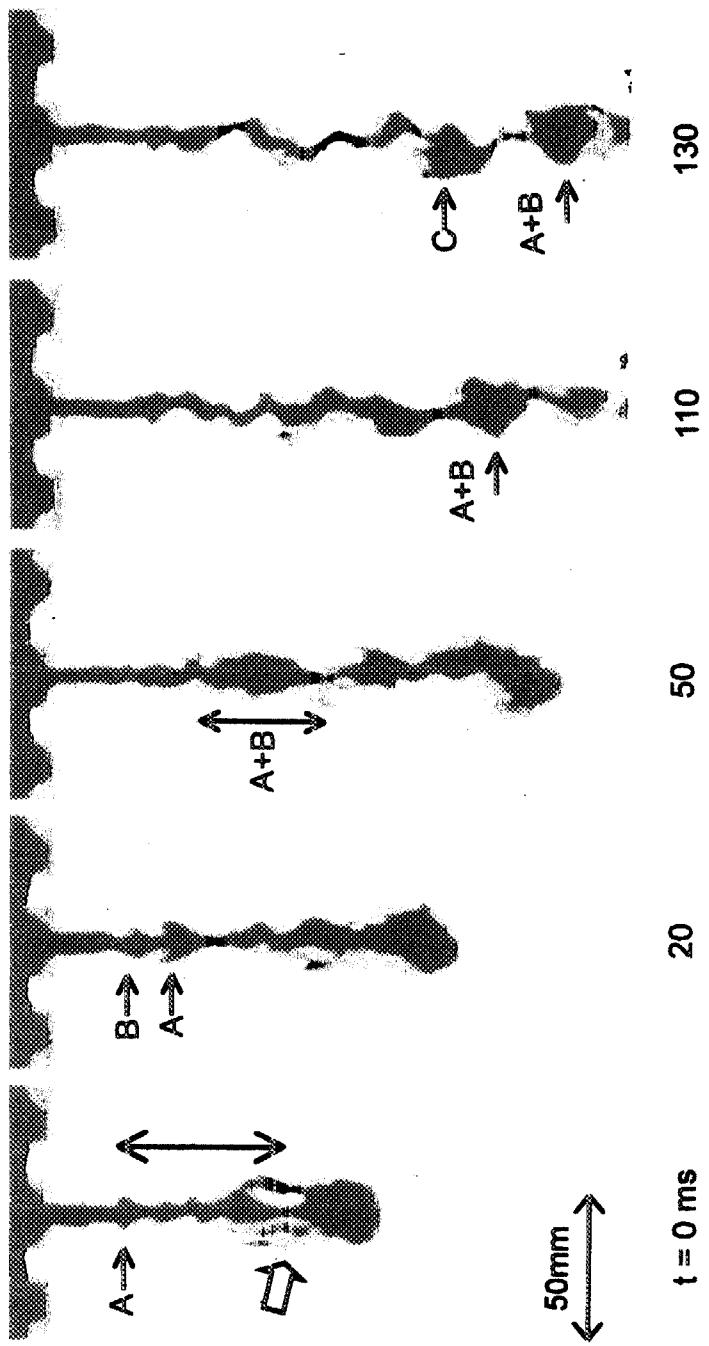


Fig.18 Development of large-scale structures in molten tin jet with an initial Temperature of  $250^\circ\text{C}$  falling through the water with a subcooling of  $20^\circ\text{C}$  ( $\text{We}_a=22.6$ )

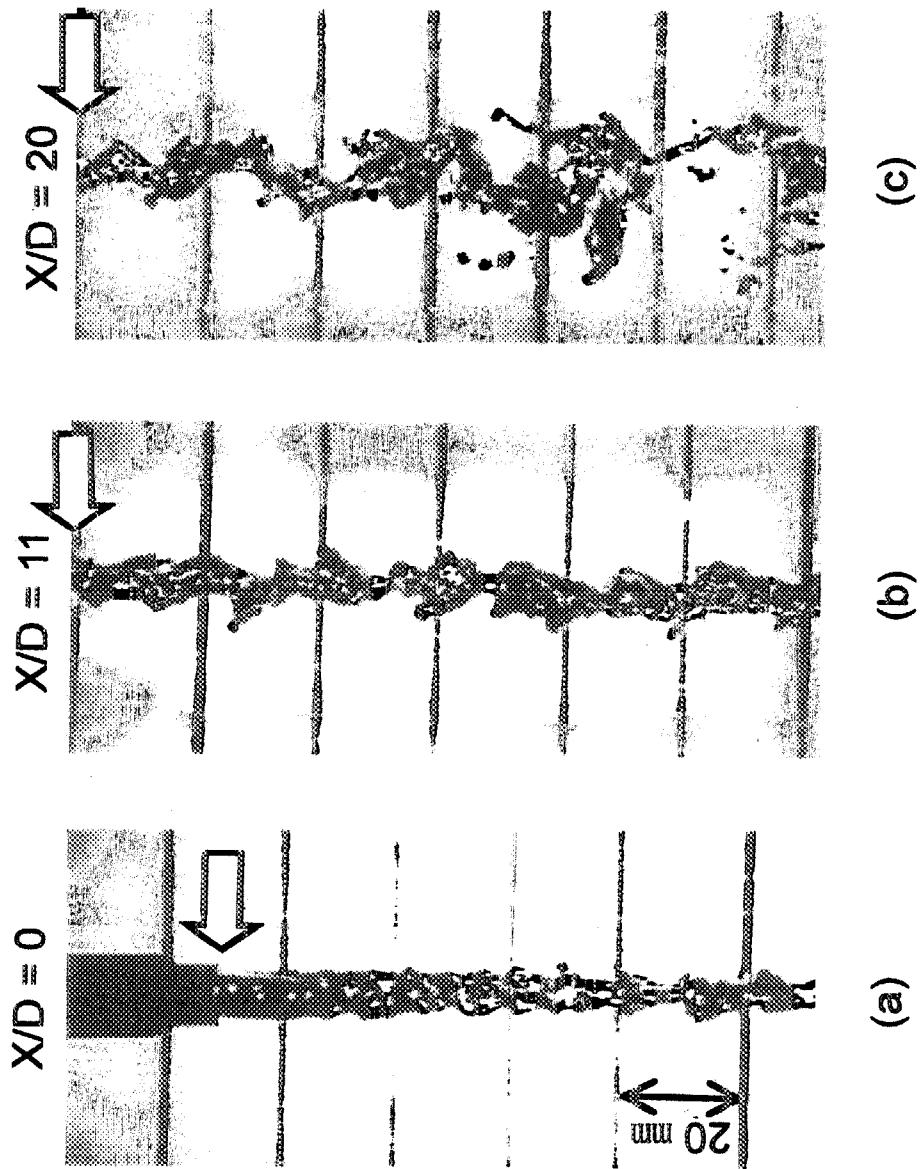


Fig.19 Large scale structures and deformation  
of mercury jet falling through water

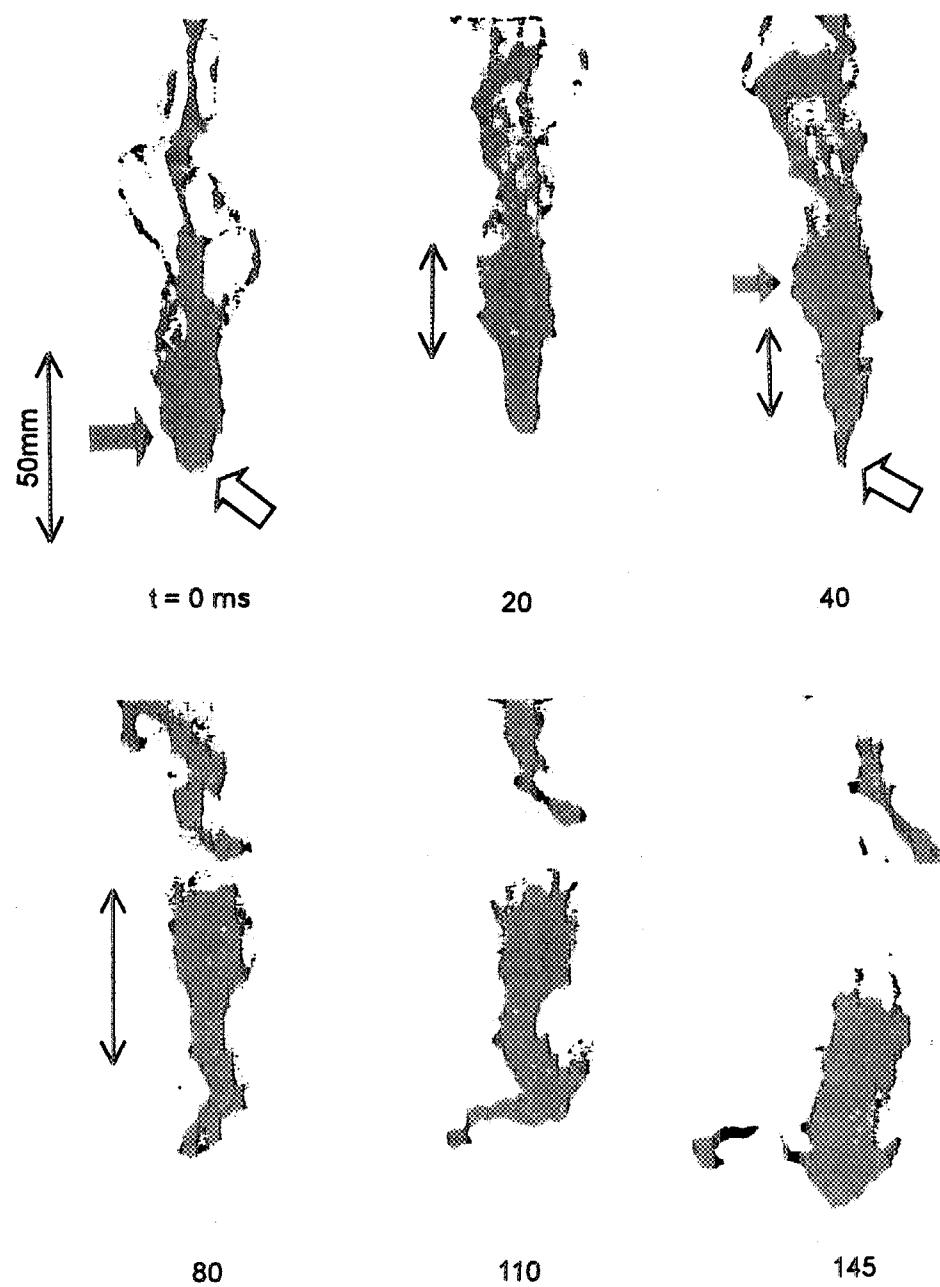


Fig.20 Outrunning in leading jet with an initial temperature of  $250^\circ\text{C}$  falling through the water with a subcooling of  $20^\circ\text{C}$  ( $\text{We}_a=23.0$ )

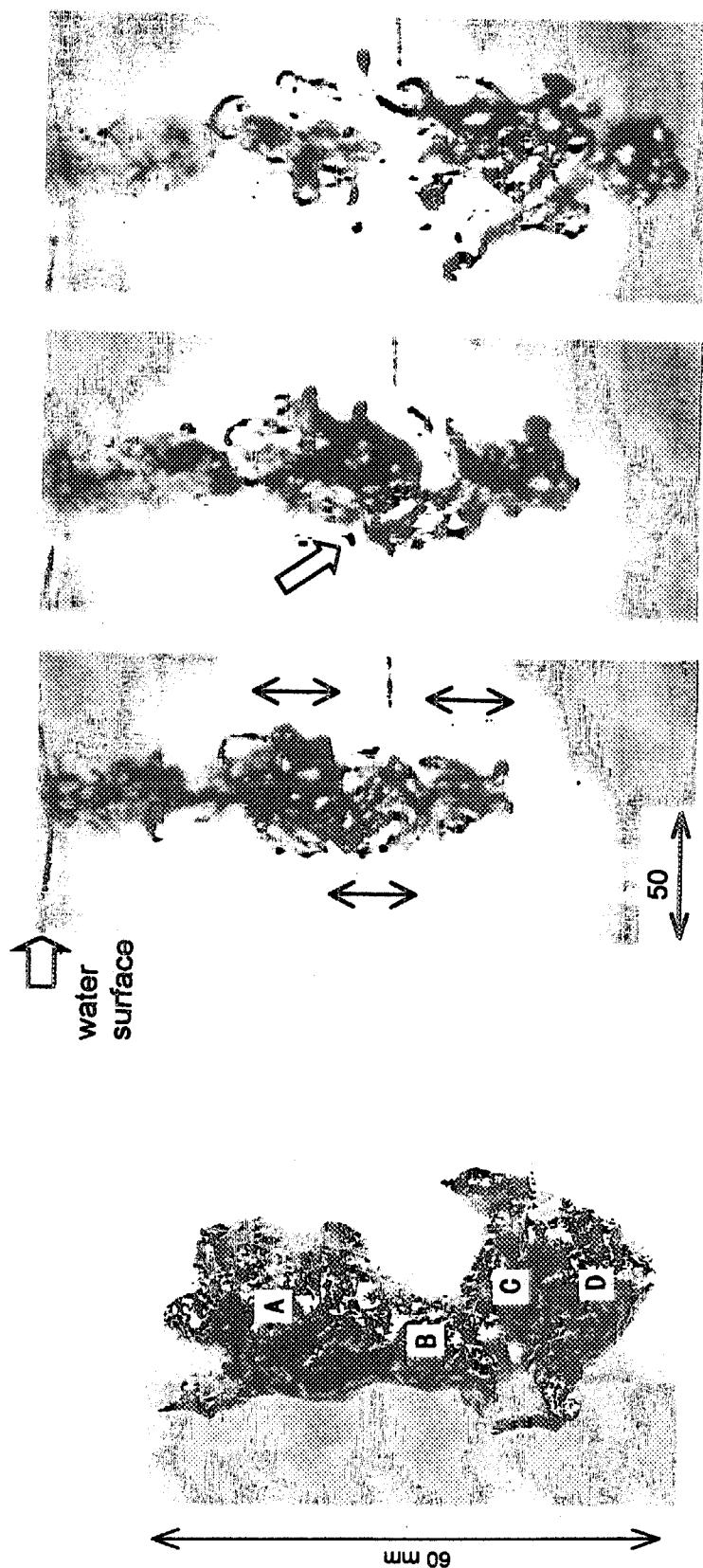


Fig.21 Solidified leading jet  
showed in Fig.25

60

Fig.22 Breakup of jet column with an initial temperature of 270°C  
Falling through the water with a subcooling of 17°C

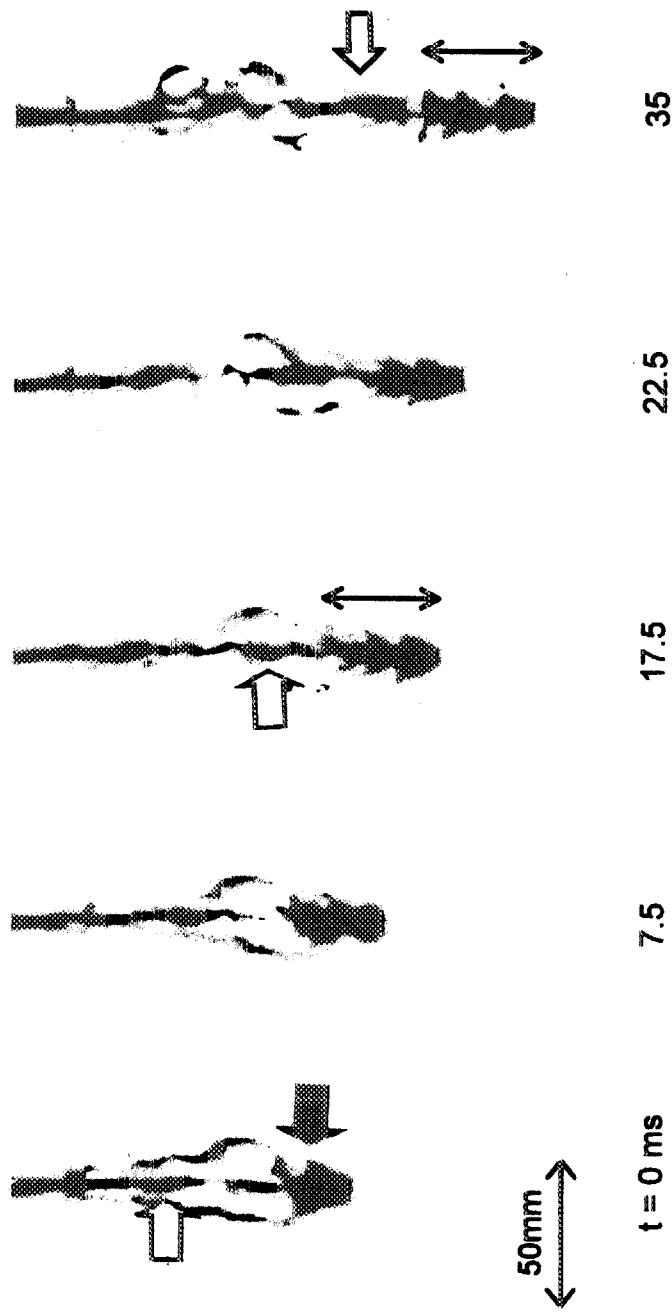


Fig.23 Development of large-scale structures in molten tin jet with an initial temperature of 600°C falling through the water with a subcooling of 20°C ( $We_a=40.6$ )

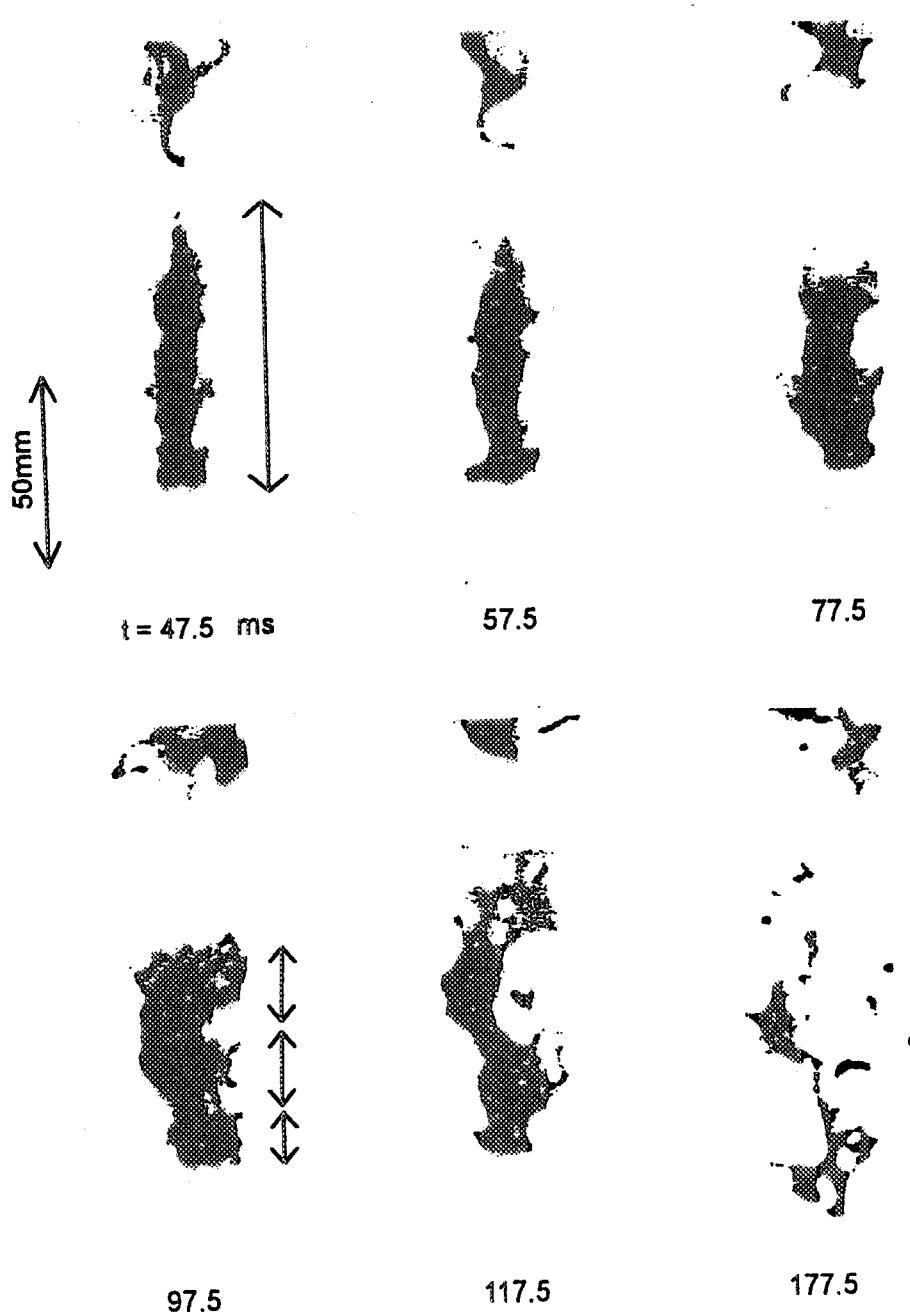


Fig.24 Collapse of leading-jet column with an initial temperature of 600°C falling through the water with a subcooling of 20°C (We<sub>a</sub>=40.6)

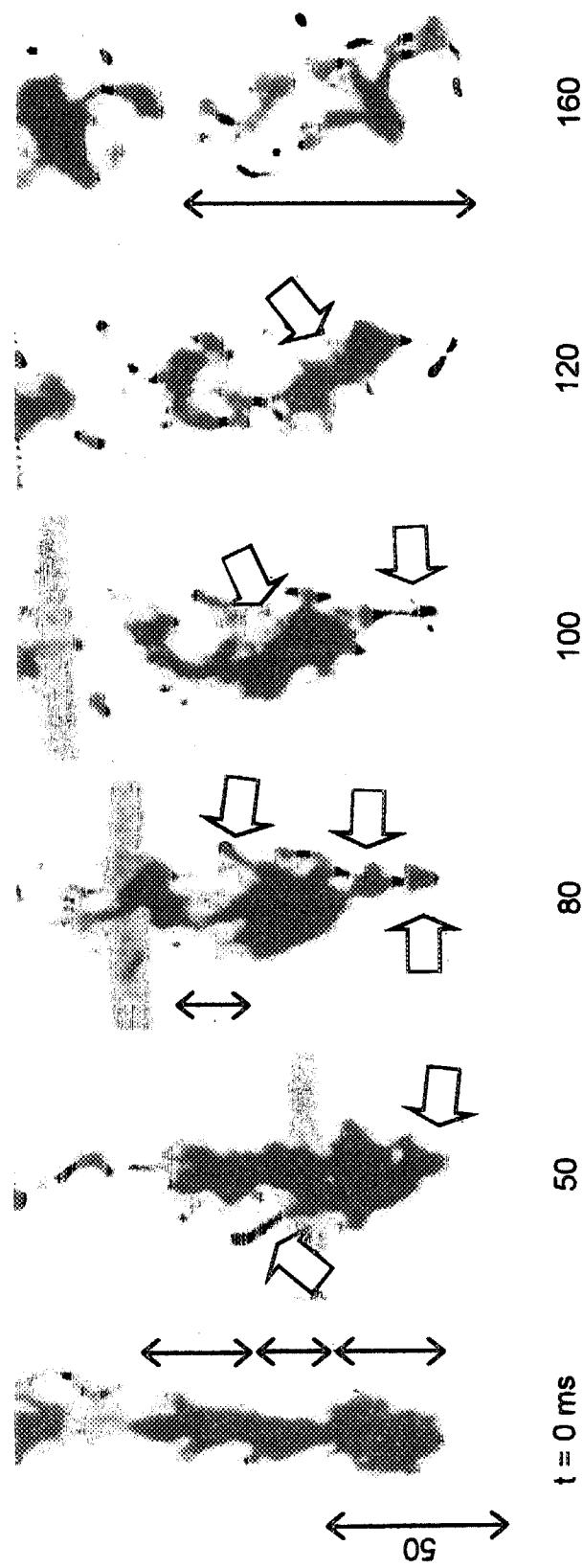


Fig.25 Collapse of leading jet column with an initial temperature of 650°C falling through the water with a subcooling of 20°C ( $We_a=23.0$ )

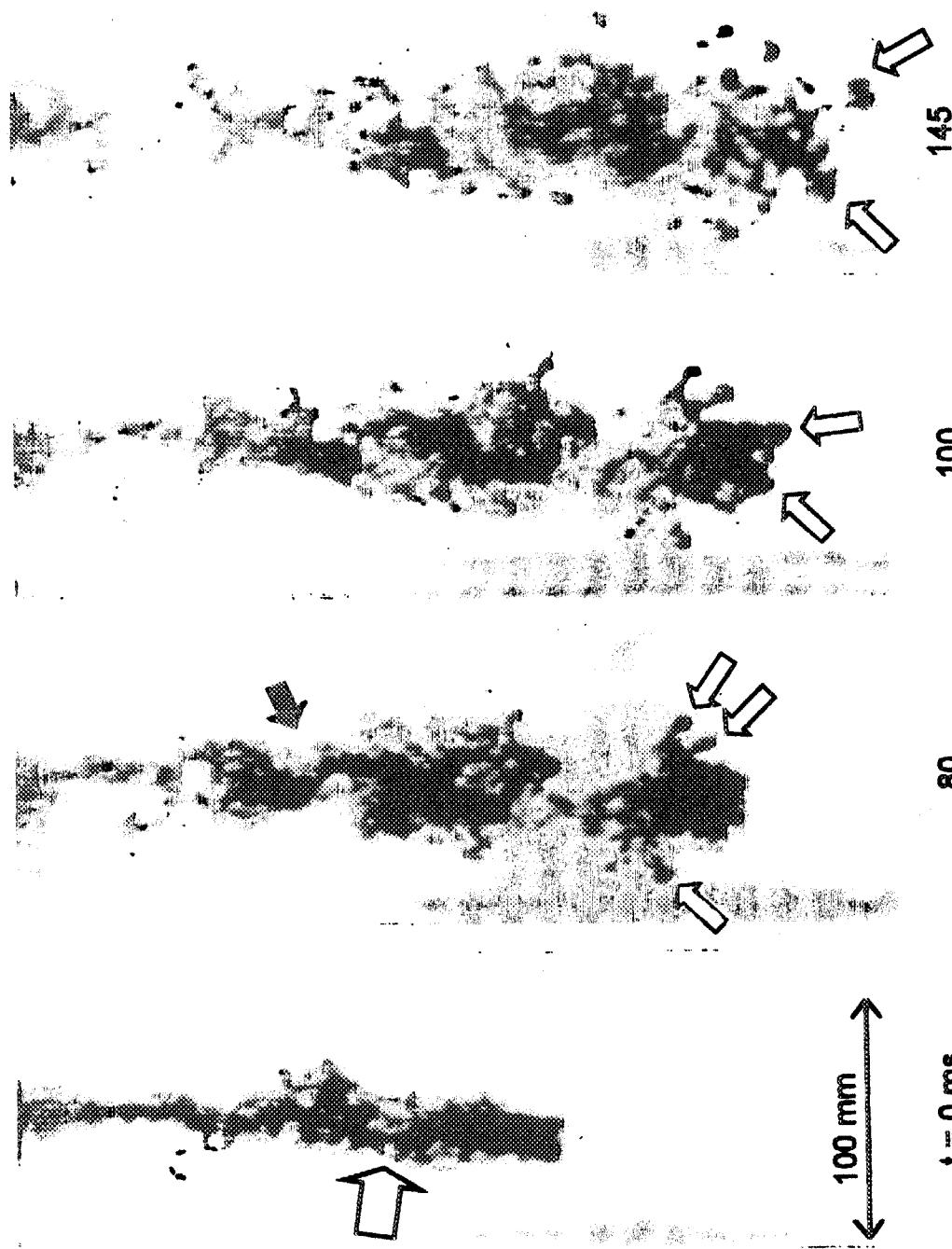


Fig.26 Breakup of jet column with an initial temperature of 950°C falling through the water with a subcooling of 10°C ( $We_a=53.3$ )

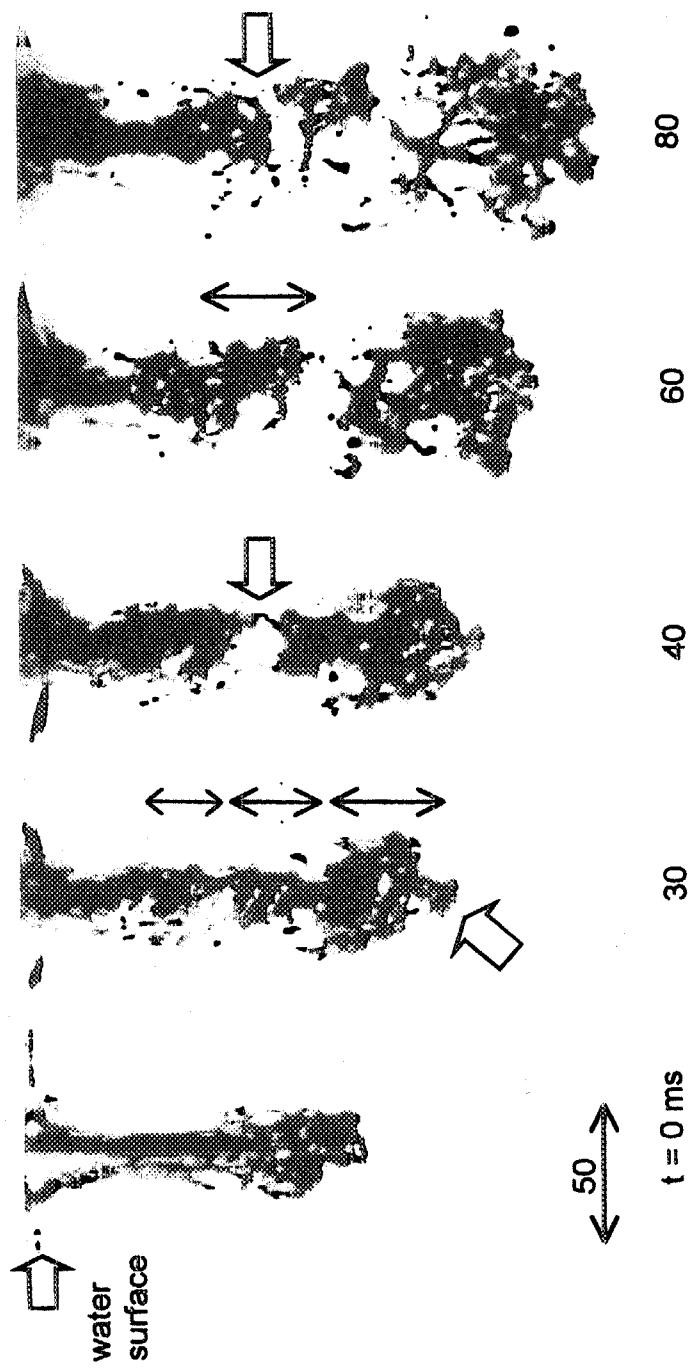


Fig.27 Breakup of jet column with an initial temperature of 900°C falling through the water with a subcooling of 33°C( $We_a=15.6$ )

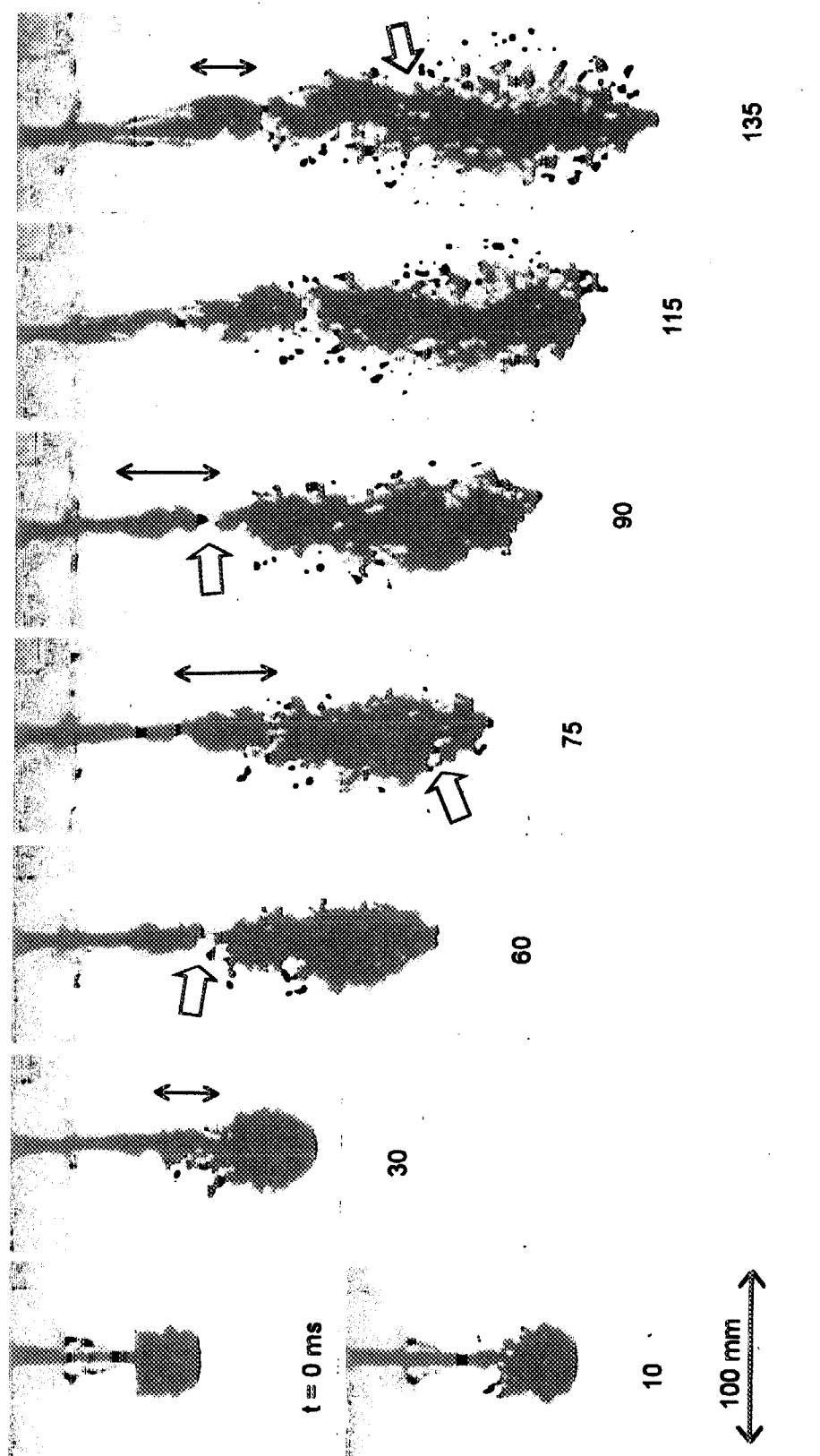


Fig.28 Breakup of jet column with an initial temperature of 601°C falling through the water with a subcooling of 27.1°C ( $We_a=314.6$ )

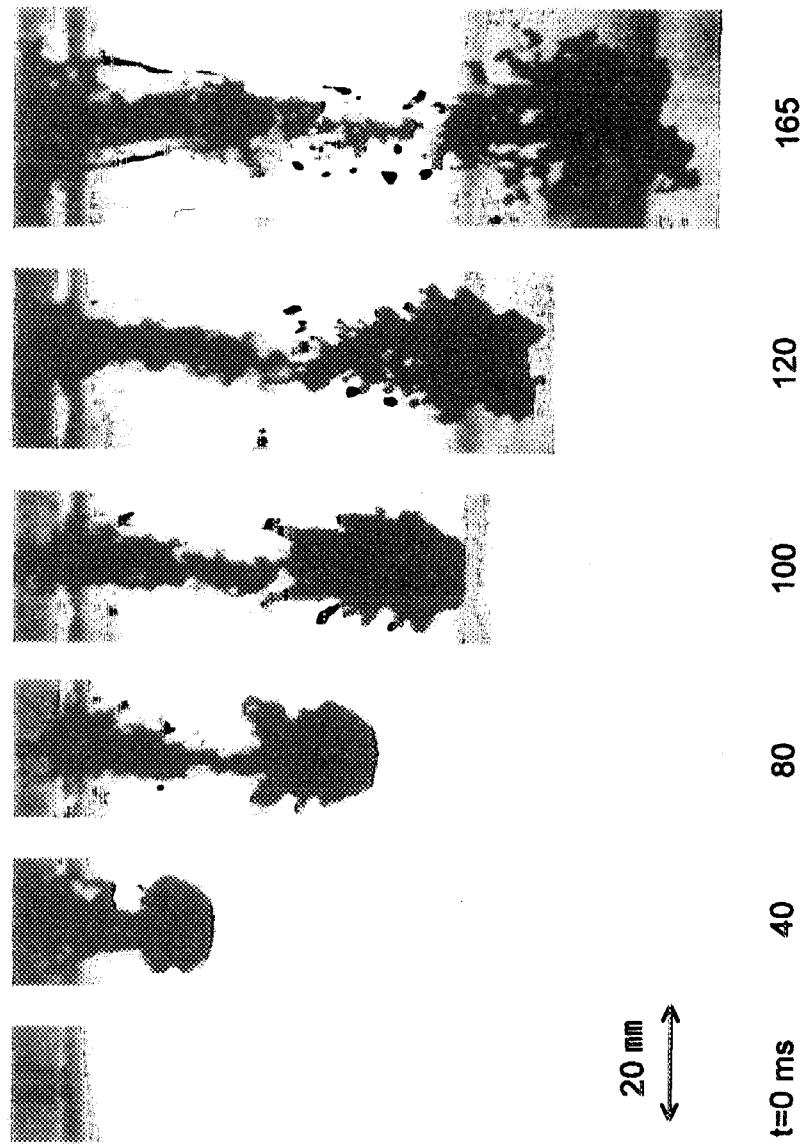


Fig.29 Breakup of jet column with an initial temperature of 500°C falling through the water with a subcooling of 22°C

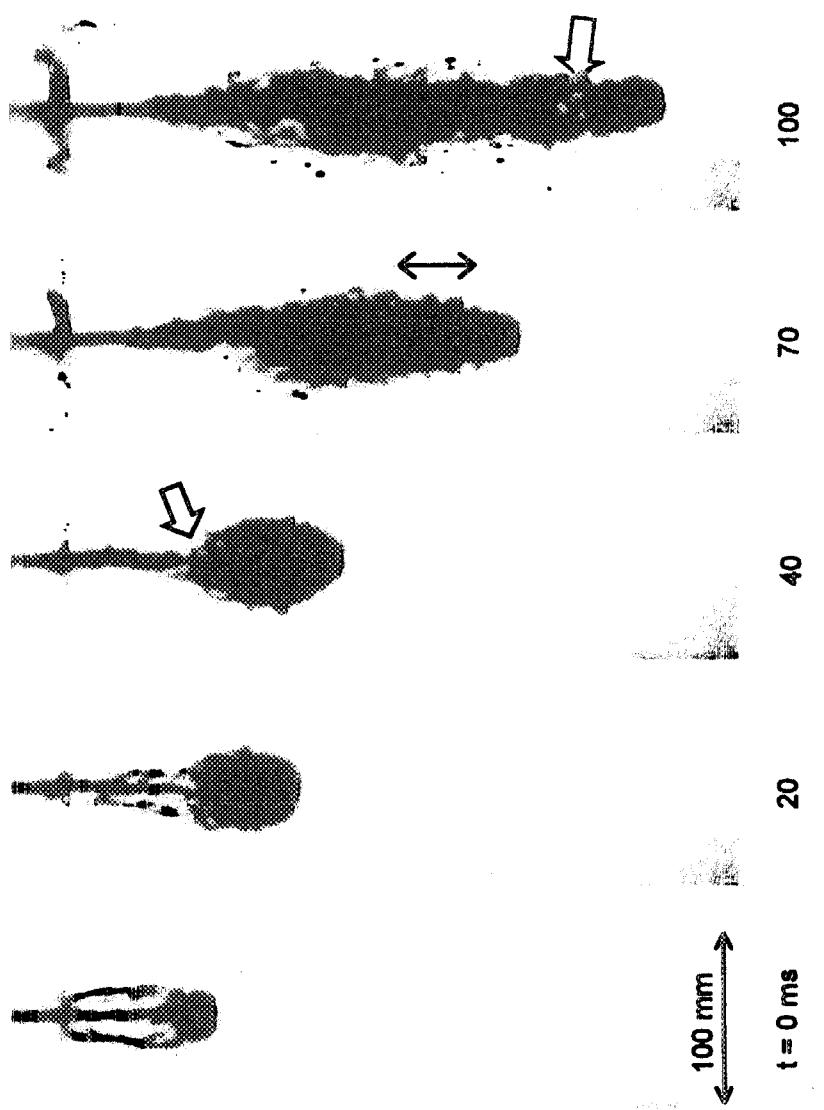


Fig.30 Breakup of jet column with an initial temperature of 1000°C falling through the water with a subcooling of 20.5°C( $We_a=391.5$ )

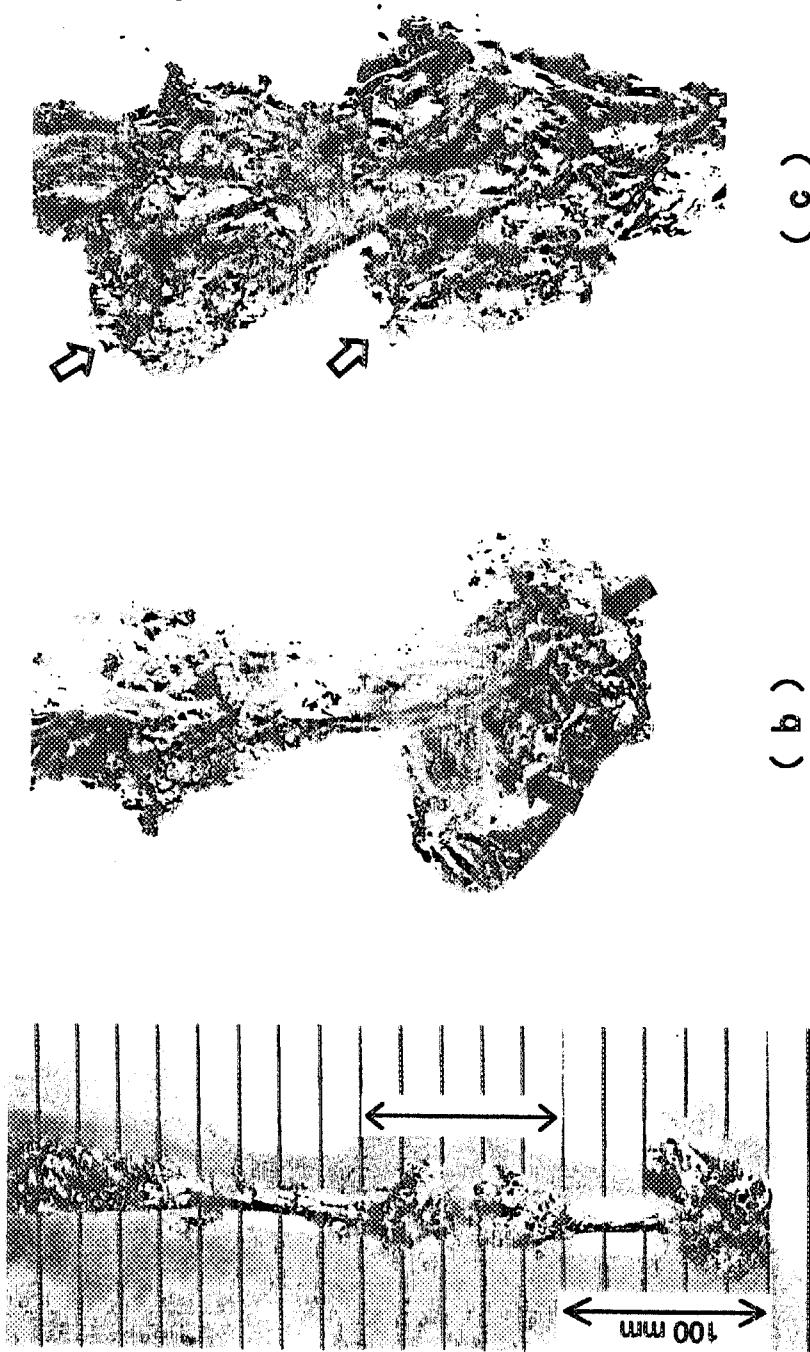
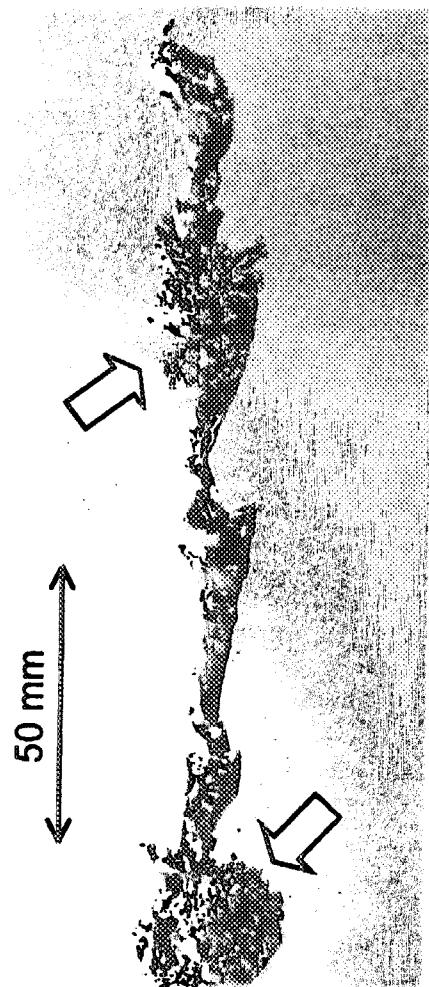
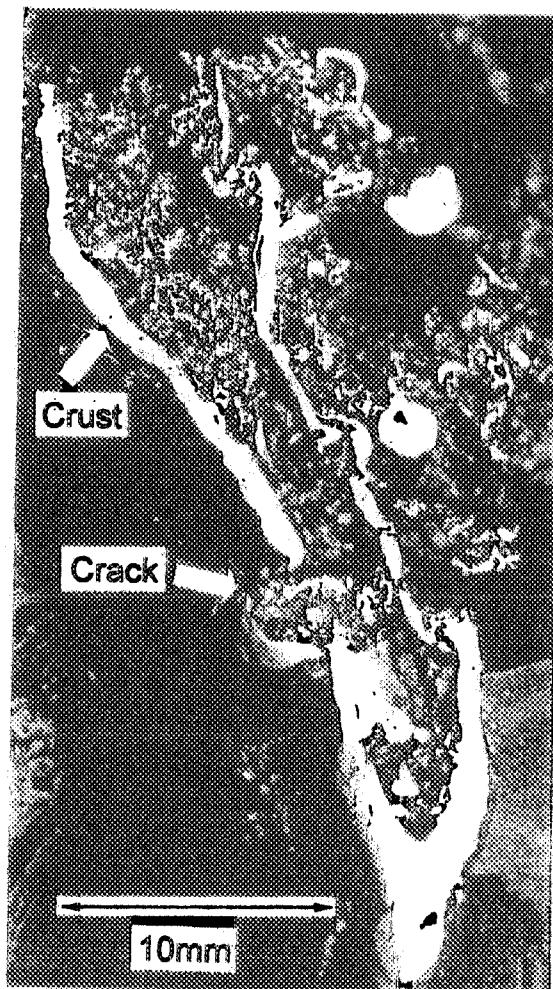


Fig.31 Solidified jet-column with an initial temperature of 248°C falling through the water with a subcooling of 80°C



(a) Appearance



(b) Cross-sectional view

Fig.32 Thermal interaction in crusted tin jet

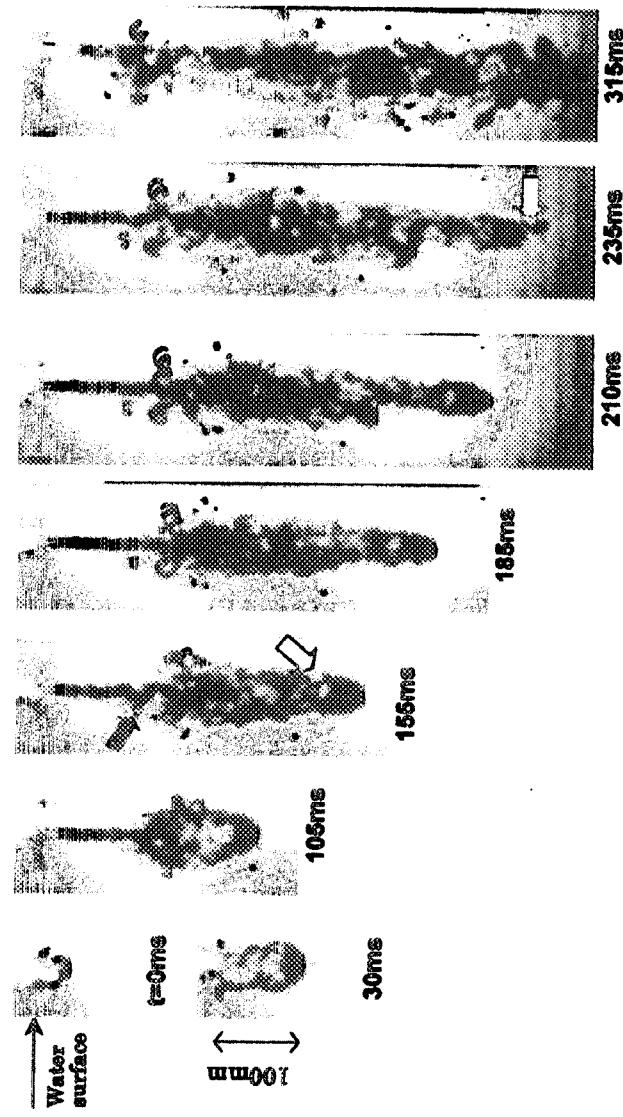


Fig.33 Breakup process of molten copper jet ( $We_a=40.0$ )

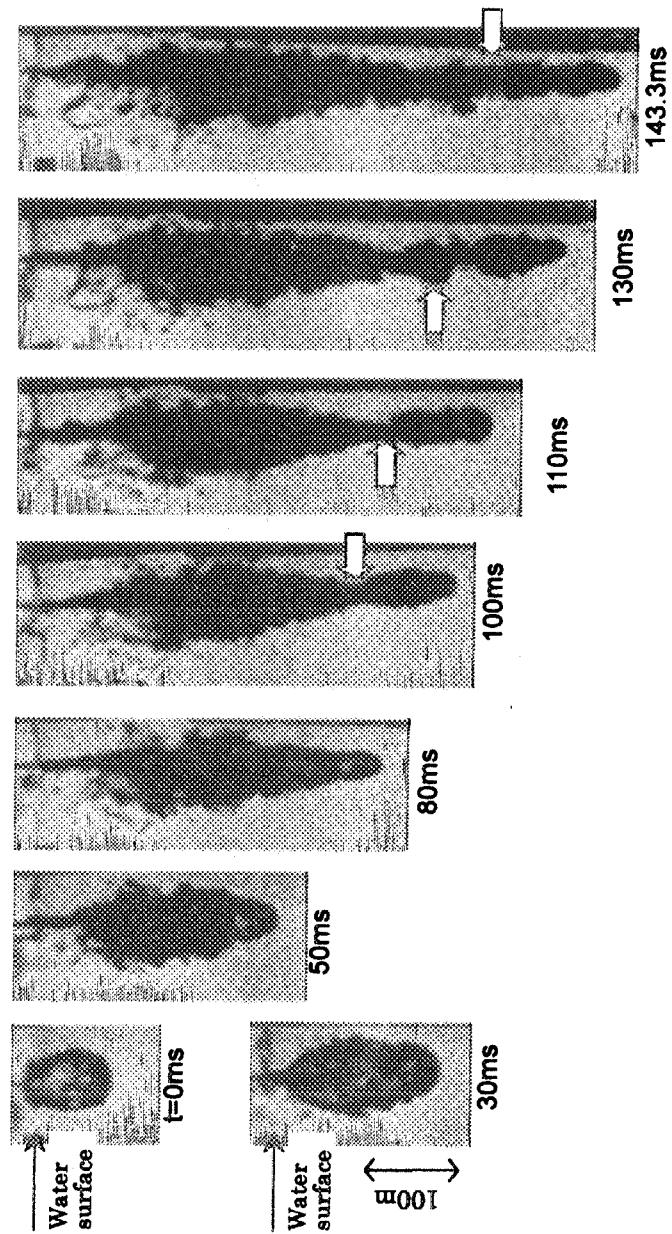


Fig.34 Breakup process of molten copper jet ( $We_a=202$ )

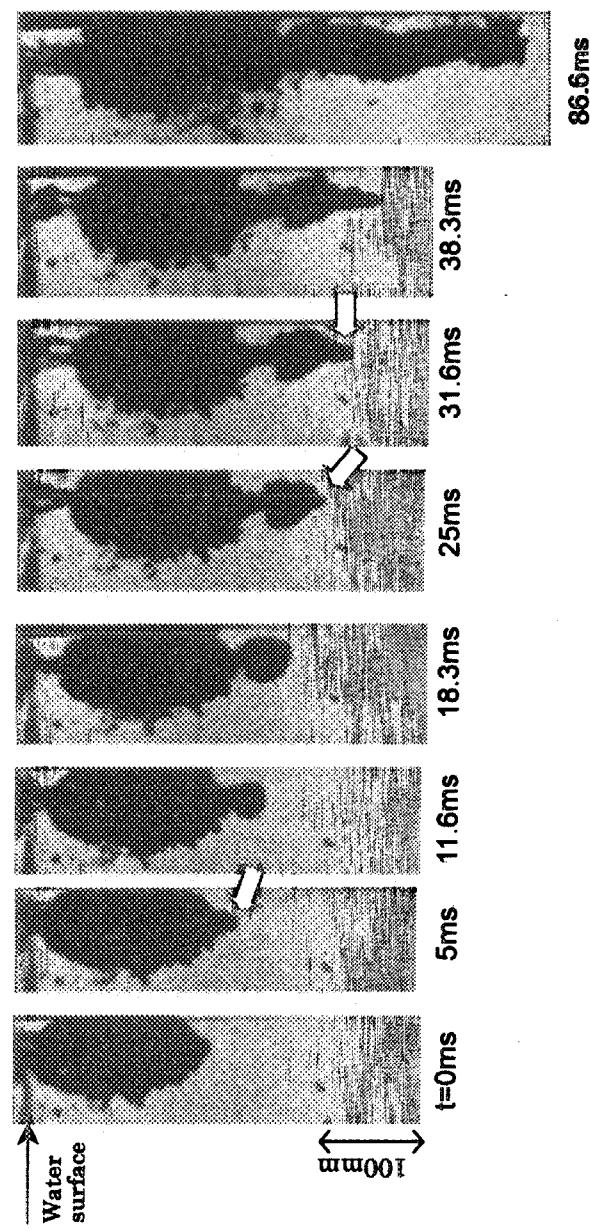


Fig.35 Breakup process of molten copper jet ( $We_a=430$ )

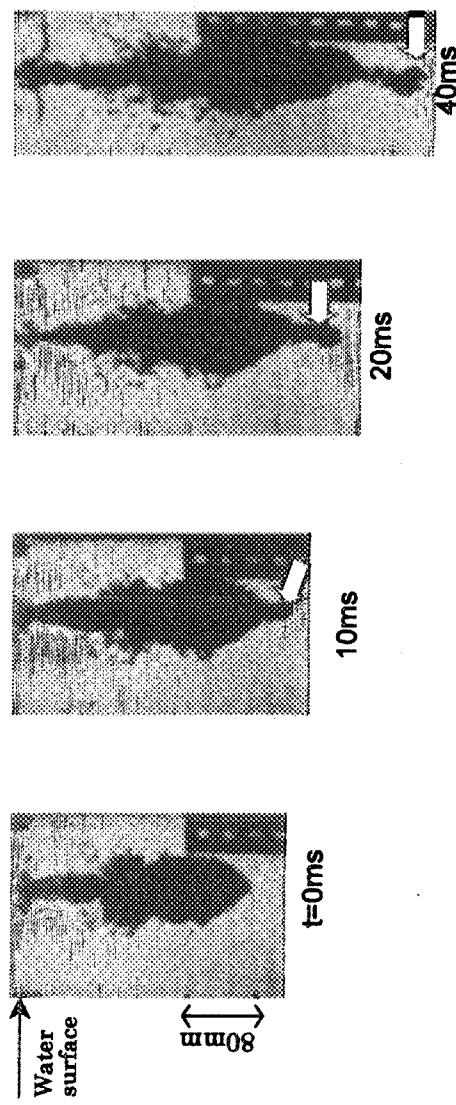
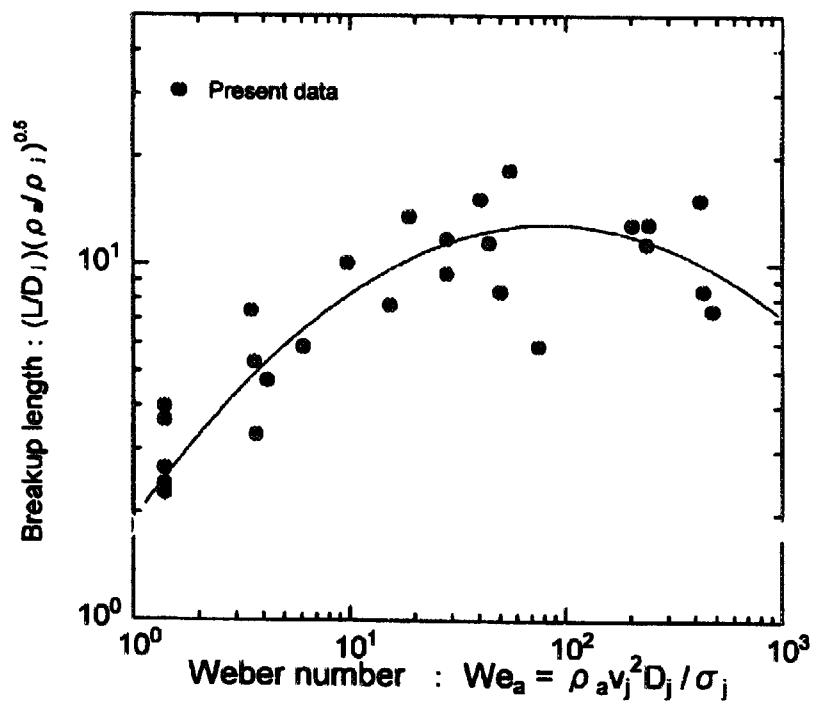


Fig36 Breakup process of molten copper jet ( $We_a=475$ )



**Fig.37** Change of dimensionless breakup length

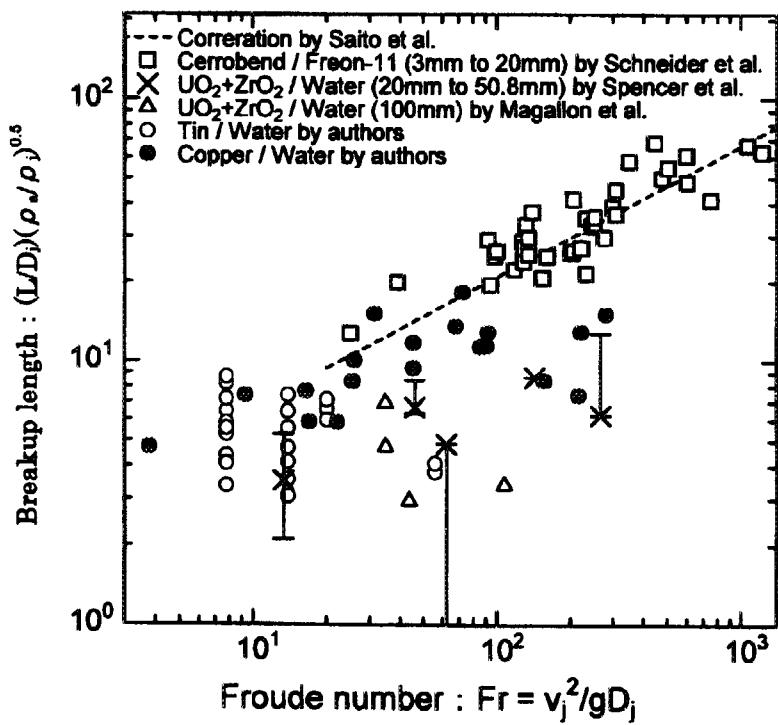


Fig.38 Comparison of dimensionless breakup length

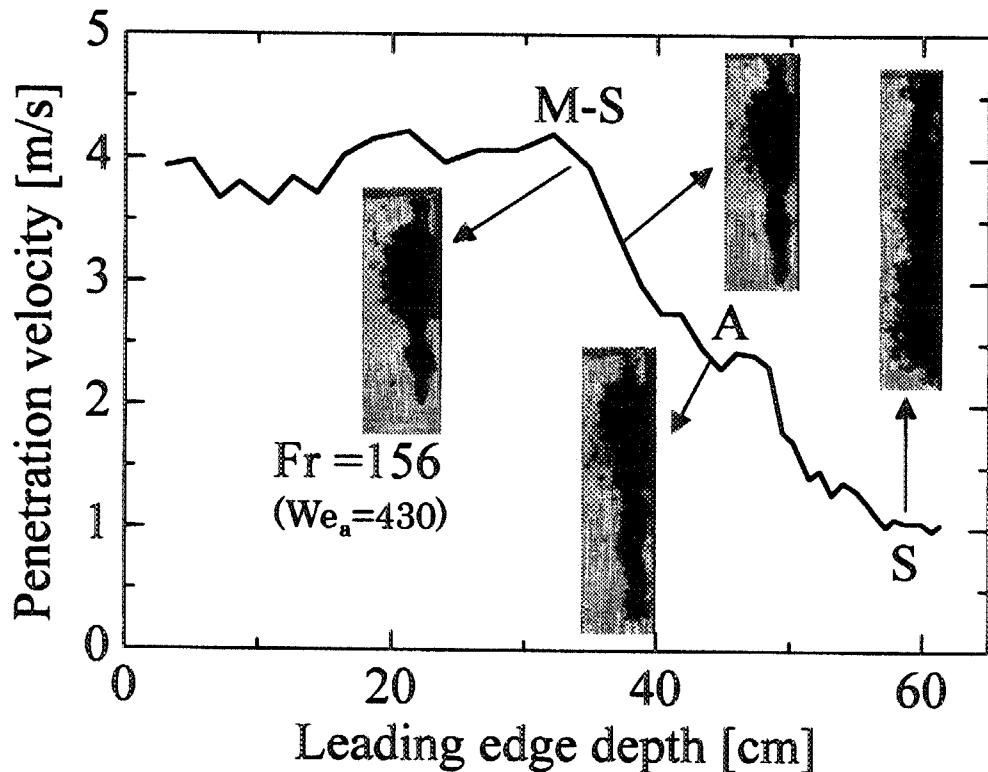


Fig.39 Relationship between penetration velocity and jet breakup

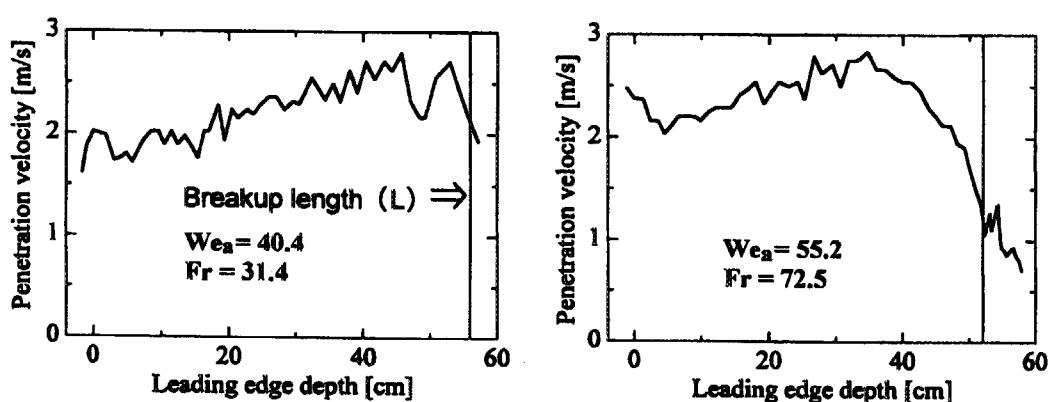


Fig.40 Relationship between penetration velocity and jet breakup

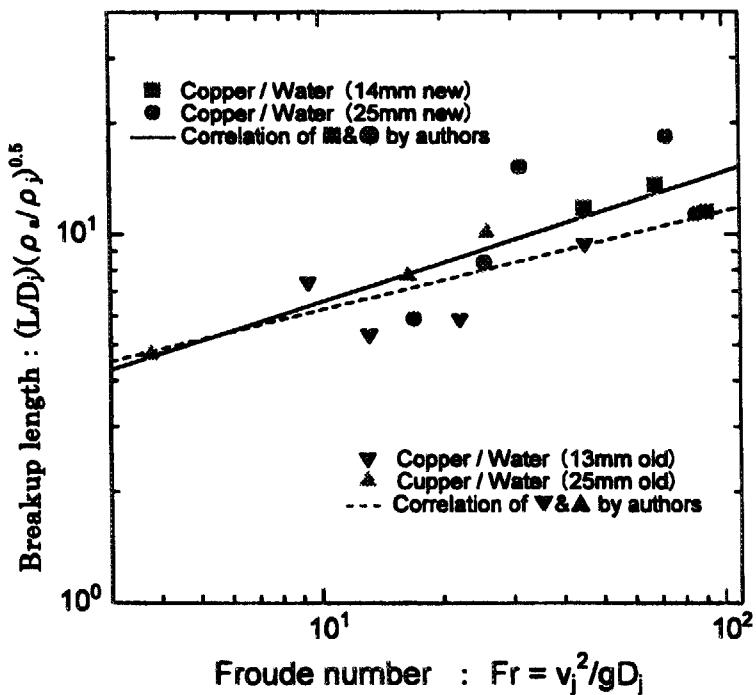


Fig.41 Comparison of dimensionless breakup length  
Between new nozzle and old nozzle

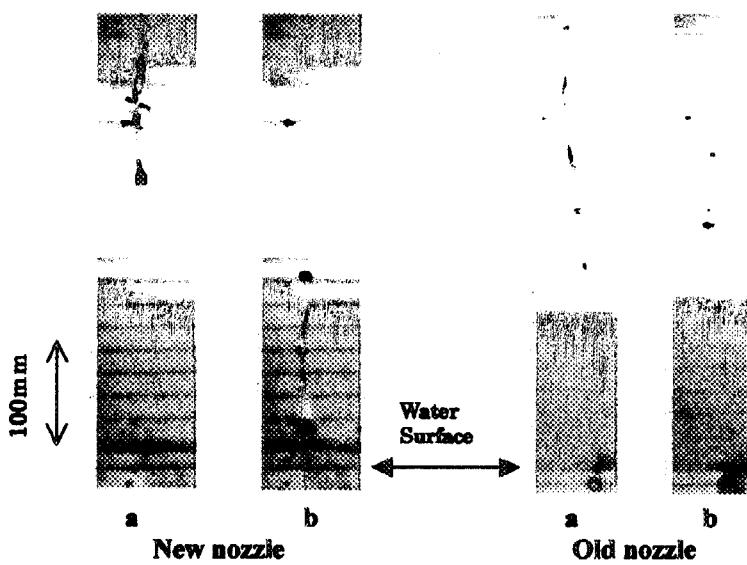


Fig.42 Behavior of jet falling in the air

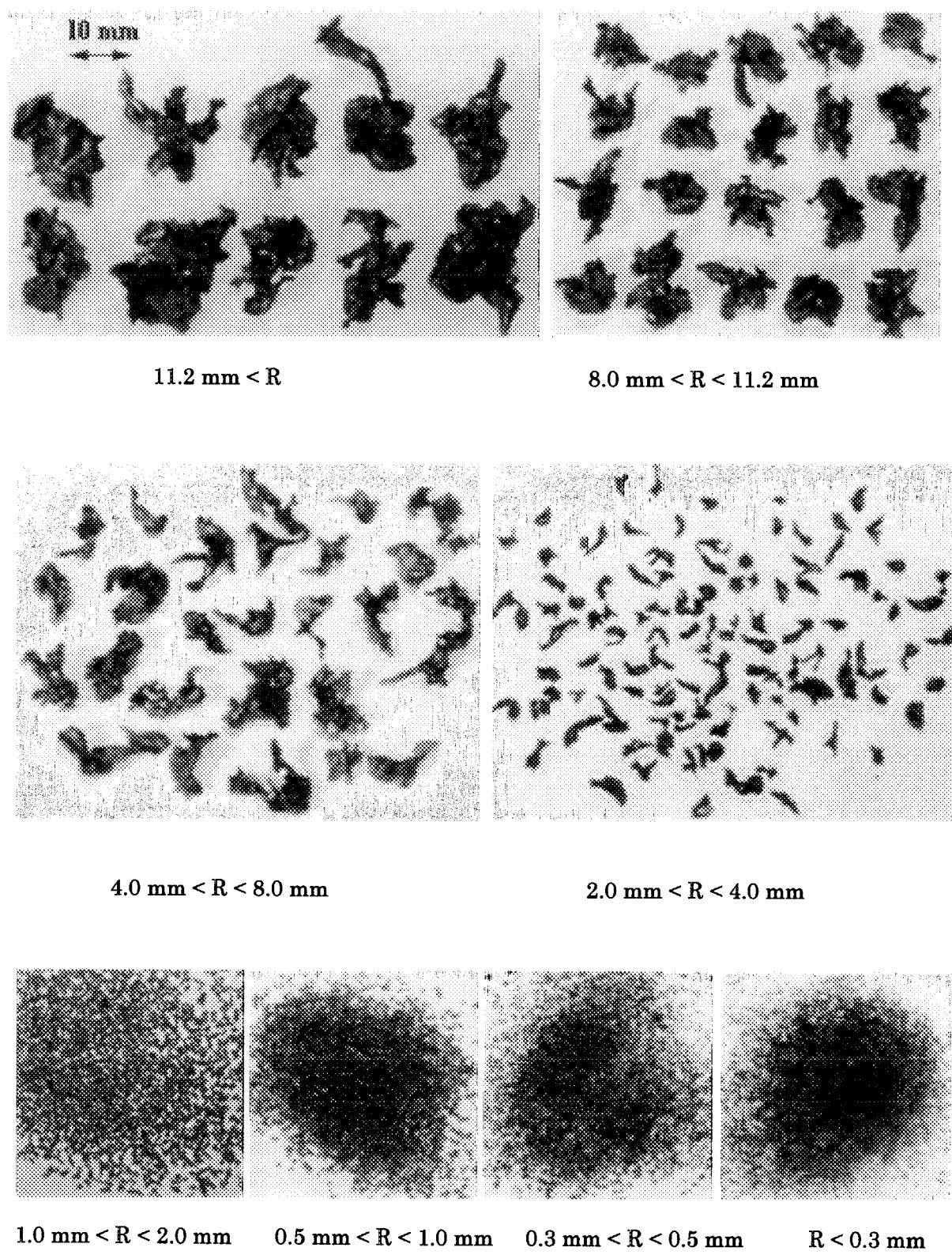


Fig.43 Typical debris at a high Weber number ( $We_a = 236$ )

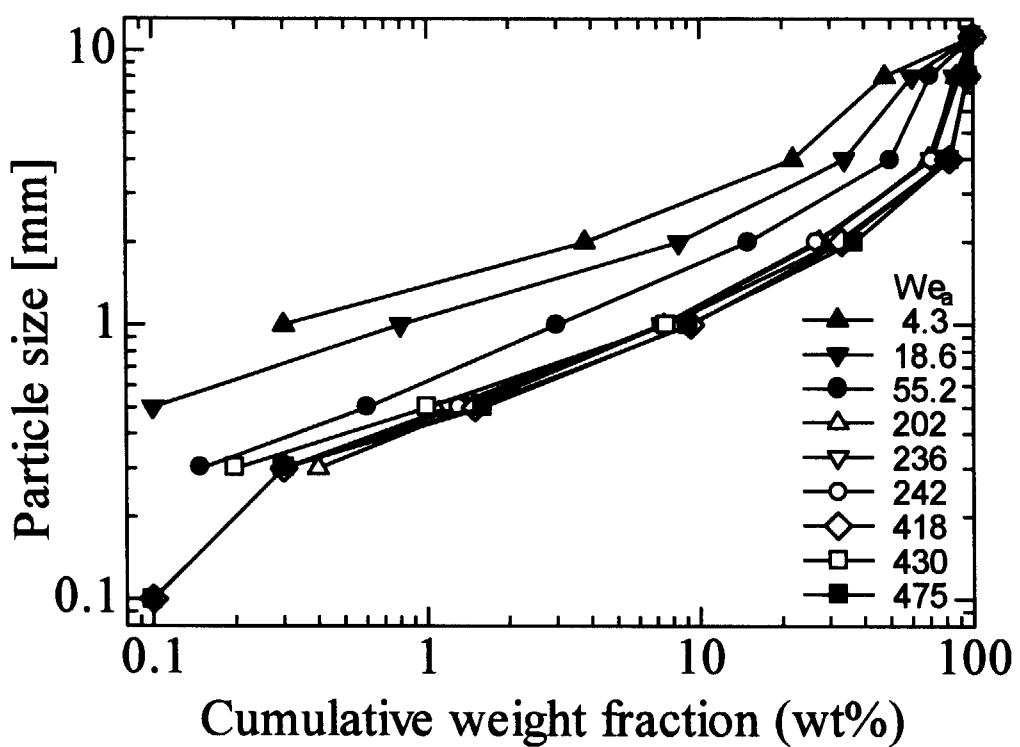


Fig.44 Particle size distribution

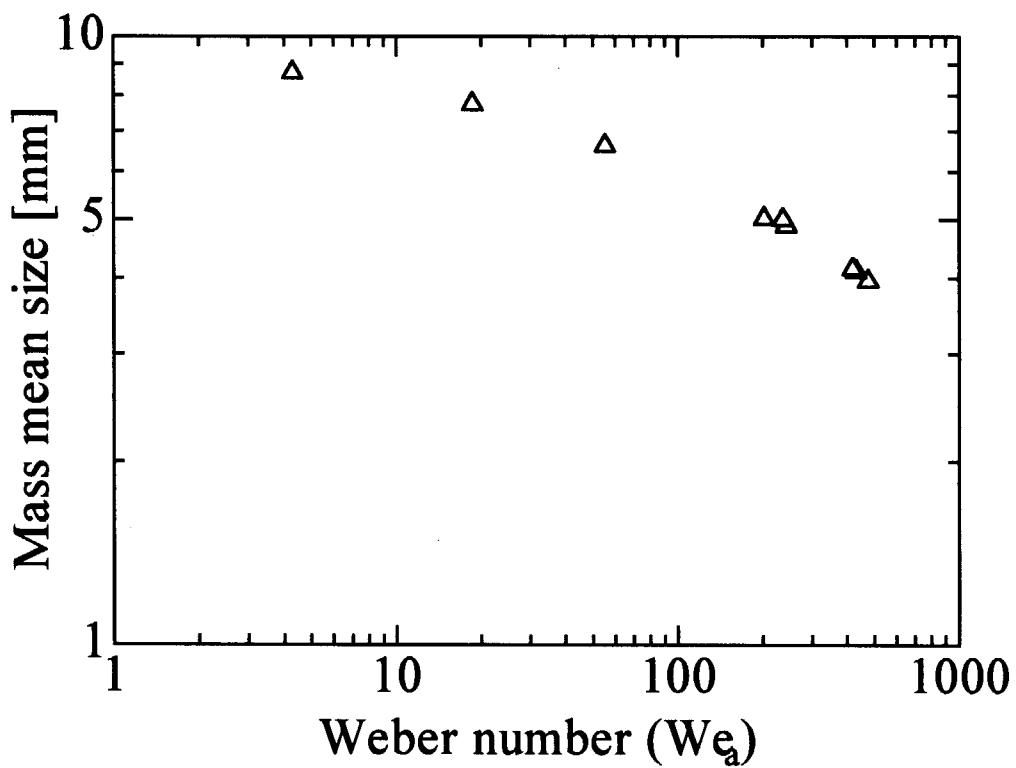


Fig.45 Effect of Weber number on the particle mass mean size

This is a blank page.

## 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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(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、ヘクタ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。
- E C開発理事会指令では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。

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
バーン	b
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

### 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf	压	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	0.101972	0.224809		1	10.1972	9.86923	7.50062×10 <sup>3</sup>	145.038
	9.80665	1	2.20462		0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1		0.101325	1.03323	1	760	14.6959
粘度	1 Pa·s(N·s/m <sup>2</sup> )	10 P(ポアズ)(g/(cm·s))			1.33322×10 <sup>-4</sup>	1.35951×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1	1.93368×10 <sup>-2</sup>
動粘度	1 m <sup>2</sup> /s	10 <sup>4</sup> St(ストークス)(cm <sup>2</sup> /s)			6.89476×10 <sup>-3</sup>	7.03070×10 <sup>-2</sup>	6.80460×10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu		ft·lbf	eV
		1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889		9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562		
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>			= 4.184J(熱化学)
	3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>			= 4.1855J(15°C)
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>			= 4.1868J(国際蒸気表)
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>			仕事率 1 PS(仏馬力)
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>			= 75 kgf·m/s
	1.60218×10 <sup>-19</sup>	1.63377×10 <sup>-20</sup>	4.45050×10 <sup>-26</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1			= 735.499W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10 <sup>-11</sup>		1	0.01		1	2.58×10 <sup>-4</sup>		1	100
	3.7×10 <sup>10</sup>	1									

(86年12月26日現在)

ハサウエイ・ヒューリック流動現象における緊密性と温度の関係 一 高温流體物質シートの外観外見過程 (原子力発電所 H-10-O-N-2) (総合技術)



古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています