

JAERI - M
84-158

原子炉に使用される流れの可視化法・第1報
——流体の流れ——

1984年8月

日野竜太郎・秋野 詔夫・稲垣 嘉之
佐野川好母・岡本芳三

JAERI-M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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株式会社

原子炉に使用される流れの可視化法・第1報

— 流体の流れ —

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

日野竜太郎・秋野詔夫・稲垣嘉之・佐野川好母・岡本芳三

(1984年8月6日受理)

原子炉で発生する熱は、冷却材で発電やプロセスなどの利用系に輸送されるので、炉心及び冷却系を流れる冷却材の流れの状態を知ることは、原子炉の熱除去特性を把握するためにも極めて重要である。このような冷却流体の流れを明らかにするために、圧力及び流速などの測定に先立って、あらかじめ流れの模様を可視化 (Flow visualization) することが、しばしば行われている。本報告は、このような可視化の手法のうち、特に原子炉内の流体の流れを把握するに必要な可視化手法について、その基礎的手法と応用事例を例記したものである。

Flow Visualization Techniques in Nuclear Reactors

(1) Fluid Flow

Ryutaro HINO, Norio AKINO, Yoshiyuki INAGAKI,
Konomo SANOKAWA and Yoshizo OKAMOTO

Department of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 6, 1984)

Heat energy generated in nuclear reactors is transferred by coolants to utilizing systems such as electric power and process industries etc. Therefore, heat removal characteristics of nuclear reactors depends on flow conditions of coolants in a reactor core and in cooling systems. In order to make clear flow patterns of these coolants, the flow visualization method is often applied prior to actual measurements of pressure, velocity and so on.

This paper describes basic techniques for flow visualization especially in nuclear reactor, and gives applied examples of this technique.

Keywords: Flow Visualization, Nuclear Reactor, Flow Pattern, Coolants

目 次

1. まえがき	1
2. 可視化の手法	2
2.1 可視化手法の概要	2
2.2 可視化手法の選択	13
3. 流れの現象の可視化例	15
3.1 流れの基礎	16
3.2 境界層	19
3.3 圧縮性流れ	32
3.4 噴流	38
3.5 物体回りの流れ	43
3.6 管水路	50
3.7 回転体と流体機械	56
3.8 非定常流	60
3.9 キャビテーション	65
3.10 粘弾性流体	68
3.11 模型実験	72
4. 原子炉の事例	81
参考文献	97

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Techniques of flow visualization	2
2.1 Outline of techniques	2
2.2 Comments on the application	13
3. Visual observations of flow phenomena	15
3.1 Basic flows	16
3.2 Boundary layers	19
3.3 Compressive flows	32
3.4 Jets	38
3.5 Flow around bodies	43
3.6 Various channel flows	50
3.7 Flows over rotating disks and in pumps	56
3.8 Unsteady flows	60
3.9 Cavitation	65
3.10 Flows of non-Newtonian fluid	68
3.11 Model tests	72
4. Reactor applications	81
References	97

1. ま え が き

原子炉炉心で発生した熱を発電やプロセスなどの利用系に有効に伝達するために、水、液体金属、ガスなどの各種の冷却材が使用されている。このような冷却材に関する圧力分布や熱伝達などの伝熱流動特性を把握するに当たり、あらかじめ、原子炉内の冷却材の流れの挙動を直接目でとらえて観察する、いわゆる流れの可視化法 (Flow visualization technique) がしばしば適用されており、流れの本質的な挙動の理解に役立っている。また、最近では、可視化に関する手法の開発及び利用も広範囲なものとなり、流体測定に先立つ基本的な性質を理解するための不可欠な手段として重要視されるようになってきている。

特に、原子炉においては、炉心内燃料要素及び出入口流路、配管、熱交換器、蒸気発生器等の各種流体機器用の流れを明らかにする目的で可視化法が適用され、流れの様子が写真などに記録され、複雑な流れの本質的機構とその挙動を記述するものとして有効に利用されている。

このような点に着目し、原子炉における流れの基本的な性質を可視化による記録に基づいて理解することを目的として、これまで公表されている文献や資料から、^(1,2,5,6) 代表的な結果を抜粋してまとめたのが本資料である。原子力の熱流力の分野の流れの基本的理解の資料として役立つものとする。なお、引用された 55 件の写真の中 28 件の写真及び実験・撮影条件は、主として流体力学における視聴覚研究分科会成果報告書より引用した。

2. 可視化の手法

2.1 可視化手法の概要

流動や伝熱の基礎的挙動を把握するために、これまで多種多様な可視化手法が開発され、その成果は流れの可視化ハンドブック⁽¹⁾や第1回流れの可視化学会講習会資料等⁽²⁾にまとめられている。また、研究成果も流れの可視化学会を中心に定期的に報告されている。しかし、実際に流れを可視化するときには、対象とする流れに最も適した手法を選定して使用する必要がある、そのためにはこれまでに開発された各種の可視化の手法の原理・適用範囲等について十分理解しておく必要がある。

可視化手法は上述のハンドブック⁽¹⁾等に記載されているように、主として、1) 壁面トレース、2) タフト、3) 直接注入、4) 化学反応、5) 電気制御、6) 光学などの手法に大別される。Table 2.1 に明石が行ったこれらの可視化手法と観測対象の一覧表を示す⁽³⁾。表には各種手法に対する適用可能な流体の種類、可視化に使用する薬品、材料等を記入してある。これらの主要な可視化手法の要点を以下に記す。

1) 壁面トレース法

物体表面に塗布あるいは溶着された物質が流れのせん断応力、熱伝達又は物質移動により形状、色彩あるいは化学的に変化することを利用して、物体表面近傍における流れの挙動を観察する方法である。物体表面に物質を塗布・溶着する際には、境界層に影響を与えないよう十分な注意を要する。また、表面に流れの縞模様が形成されるまでに時間が掛かるため、蓄積された効果が流れ模様に明確に現われるまでにはある時間を要する。従って、この方法は流れが定常である場合に限定して適用される。

(i) 油模法

物体表面に油と顔料等の混合物を塗布し、表面の油膜を流れにさらし、発生する縞模様から境界層内端におけるせん断力の方向を観察する方法である。垂直に置かれた面や回転する面などに油膜を塗布する場合、油膜に重力や遠心力などが作用して流れのせん断力と重なり合うため、得られた油膜パターンより流れを解釈するためには慎重な検討が必要である。

Table 2.2 に適用例と使用した油膜の組成を示す。表中に示した油膜の顔料と添加剤は一般的なもので、実際の場では流体の種類、流速及び流体温度によってその組成を適当に調整する必要がある。

(ii) 油点法

油と顔料の混合物の点滴を表面に配列したり、あるいは規則正しく配置された細い注出孔から押し出すことにより、油点が流れに沿って描く筋の模様を観察する方法である。描かれた筋の方向とその長さは、それぞれ流れの方向とせん断力の大きさの程度を表す。油点の組成は一般に油模法の油模とはほぼ同じで、流れの模様が観察できるよう油点の配置については工夫を要する。

2. 可視化の手法

2.1 可視化手法の概要

流動や伝熱の基礎的挙動を把握するために、これまで多種多様な可視化手法が開発され、その成果は流れの可視化ハンドブック⁽¹⁾や第1回流れの可視化学会講習会資料等⁽²⁾にまとめられている。また、研究成果も流れの可視化学会を中心に定期的に報告されている。しかし、実際に流れを可視化するときには、対象とする流れに最も適した手法を選定して使用する必要があり、そのためにはこれまでに開発された各種の可視化の手法の原理・適用範囲等について十分理解しておく必要がある。

可視化手法は上述のハンドブック⁽¹⁾等に記載されているように、主として、1) 壁面トレース、2) タフト、3) 直接注入、4) 化学反応、5) 電気制御、6) 光学などの手法に大別される。Table 2.1 に明石が行ったこれらの可視化手法と観測対象の一覧表を示す⁽³⁾。表には各種手法に対する適用可能な流体の種類、可視化に使用する薬品、材料等を記入してある。これらの主要な可視化手法の要点を以下に記す。

1) 壁面トレース法

物体表面に塗布あるいは溶着された物質が流れのせん断応力、熱伝達又は物質移動により形状、色彩あるいは化学的に変化することを利用して、物体表面近傍における流れの挙動を観察する方法である。物体表面に物質を塗布・溶着する際には、境界層に影響を与えないよう十分な注意を要する。また、表面に流れの縞模様が形成されるまでに時間が掛かるため、蓄積された効果が流れ模様に明確に現われるまでにはある時間を要する。従って、この方法は流れが定常である場合に限定して適用される。

(i) 油模法

物体表面に油と顔料等の混合物を塗布し、表面の油膜を流れにさらし、発生する縞模様から境界層内端におけるせん断力の方向を観察する方法である。垂直に置かれた面や回転する面などに油膜を塗布する場合、油膜に重力や遠心力などが作用して流れのせん断力と重なり合うため、得られた油膜パターンより流れを解釈するためには慎重な検討が必要である。

Table 2.2 に適用例と使用した油膜の組成を示す。表中に示した油膜の顔料と添加剤は一般的なもので、実際の場では流体の種類、流速及び流体温度によってその組成を適当に調整する必要がある。

(ii) 油点法

油と顔料の混合物の点滴を表面に配列したり、あるいは規則正しく配置された細い注出孔から押し出すことにより、油点が流れに沿って描く筋の模様を観察する方法である。描かれた筋の方向とその長さは、それぞれ流れの方向とせん断力の大きさの程度を表す。油点の組成は一般に油模法の油模とはほぼ同じで、流れの模様が観察できるよう油点の配置については工夫を要する。

Table 2.1 流れの可視化法の種類⁽³⁾
Classification of Flow Visualization Technique

		可視化手法	流体	手法の細分	手法		
物体表面近傍及び 内壁近傍の流れの	状態	油膜法	○	油, 顔料, 添加剤それぞれを可視化対象と流体が空気か水かによってさまざまに使い分ける。	壁面 トレース 法		
		油点法	○	油, 顔料, 添加剤それぞれを可視化対象と流体が空気か水かによってさまざまに使い分ける。			
		薬品塗膜溶解法	●	薬品として, ハイドロキノンジアセテートと安息香酸が主であるが, その他にもいくつかがある。			
		電解腐食法	●	陽極に黄銅製の試験体の表面にハンダ溶着したものをいう。			
		感温皮膜法	○	コレステリック型液晶使用色変化塗料使用			
		方向	表面タフト法	○		日本シシュウ用絹糸, 純毛糸系 以下も同じ ● ナイロン糸, 竹, 松, ABS樹脂	タフト 法
			デプスタフト法	○		ポストには, 虫ピンやステンレス管, 一段クフトの他, 二段(ツイン)タフトでは色を変える。	
			タフトグリッド法	○		タフトスクリーン法とも呼ばれる。グリッド ● 素線はビアノ線, ミシン用絹縫糸, 黄銅線	
		速さ	タフトスティック法	○		可視化の対象に応じたタフトの材料と長さ と挿入との距離に応じ棒の長さを変える。	化学 反応 法
			物体表面塗膜発色法	○		PH指示薬(ブルムチモルブルー他)アンモニア法 ● 鉛白・硫化アンモニウム法ほか	
流脈	物体表面トレーサ発生法	○	四塩化チタン・湿り空気法ほか ● 金属チモルブルー食塩水法ほか	直接 注入 法			
	流体間反応消色法	●	フェノールフタレン法, チモルブルー法, 過マンガン酸カリ法				
温度	流体間反応発色法	○	アンモニア塩化水素法, フッ化ホウ素湿り空気法 ● ルミノール反応法, PH指示薬法(チモルブルー他)	電気 注入 法			
	電解沈殿法	●	電解法, 電解発色法と呼ばれたことがある。同じ 電解微粒子発生法の仲間にてルル法がある。				
二流体境界の流れの状態	電解液発色法	●	電解PH指示薬法, 電解ルミノール反応法, 電解ヨウ化カリデンブ法	光 学 的 手 法			
	方向	注入流脈法	○		煙(たばこ, 線香)ミスト(ケロシン, 流動パラフィン) ● 色素・コンデンスミルク, インキ, 食紅,		
		注入流跡法	○		シャボン玉, メタアルデヒド, 炭素火粉 ● 空気泡, 油滴, 発光粒子, アルミ粉		
	流脈	懸濁法	○		メタアルデヒド, ステアリン酸亜鉛, 炭素火粉 ● ポリスチレン粒子, アルミ粉, クラファイト粉, 空気泡		
		表面浮遊法	●		アルミ粉, おがくず, 発泡スチロール ペークライト, スキムミルク, ポリスチレン粒子		
	流跡	タイムライン法	○		煙タイムライン法(四塩化チタン) ● 色素タイムライン法(水溶性染料)		
		水素気泡法	●		直線形電極, キンク形電極, まだら形電極, はし こ形電極; 直流電圧印加, パルス電圧印加		
	タイムライン	火花追跡法	○		針状電極(針, ビーズ針, タングステン線) 線状電極(タングステン線)のほか		
		スモークワイヤ法	○		塗布液として流動パラフィン, オリーブ油 シリコン油使用		
	物体回り及び 内部の流れの	シャドウグラフ法	○		(直接投影法とも呼ばれる。)	光 学 的 手 法	
シュリーレン法		○	光源として単色(モノクロ用), 白色(カラー用), 単色瞬間(非定常用), 手法にはさまざまの変形あり				
密度変化		マツハツェンダ干涉法	○	等密度干渉縞法(等密度干渉縞) ● 移動干渉縞法(平行干渉縞)			
		レーザホログラフ法	○	連続波ホログラフィを使う方法 ● パルスホログラフィを使う方法			
その他の光学法		○	ミラージュ法 ● 放電法 ○ 電子ビーム法 ○, (流動 複屈折法 ● は剪断変形が得られる。)				
表面高低	モアレ法	●	原理では格子照射法と格子投影法, 定量法で は接解法と非接解法。				
	ステレオ写真法	●	船型試験水槽, 浅底水槽及び実際の海洋開発, 土木工学それぞれの場合規模が異なる。				
		サーモグラフ法	●	赤外線カメラによる方法			

Table 2.2 油膜の組成と適用例⁽¹⁾

Composition and Applied Examples of Oil Film

流体	油	顔料	添加剤	混合比	流速	適用例
空	軽いディーゼル油 (Dieselene)	酸化チタン	オレイン酸	100g : 135cm ³ : 2cm ³	300 ft/s	後退翼
	非常に濃い油 (Shell Nassa 87)	〃	〃	—	M=0.7~1.61	航空機
	流動パラフィン	〃	〃	—	150 ft/s 60~40m/s	後退翼 円柱
	軽い機械油 Shell Vitrea 72	〃	〃	—	100 m/s	後退翼
	—	〃	ラウリン酸 オレイン酸	2 : 1 : 微量(V) 〃	M=0.6~1.2 M=1.68, 1.19	〃 〃
気	流動パラフィン Shell Vitrea 72 +Shell Limea 931	油煙 酸化チタン	〃	3 : 1 : 微量(V) (4+2)cm ³ : 3cm ³ : 2滴	M=0.45 M=0.2	デルタ翼 航空機の翼
	シリコン油	油煙	なし	—	M=5, 6	〃
	流動パラフィン +アマネ油	酸化チタン	オレイン酸	(30+5)cm ³ : 25g : 5cm ³	50 m/s	壁面噴流
水	流動パラフィンより 少し濃い油	〃	〃	—	20 ft/s	後退翼
	インジェクションポンプ油	四三酸化鉛 グロム酸鉛 酸化チタン	(オレイン酸)	2~10 : 10 5~15 : 10 (W) 10~30 : 10	3~15 m/s	後退翼 ポンプ
	モービル油 (SAE 20#)	四三酸化鉛+	カーボングリース	2 : (3+3) 1 : (1+2~4) (W)	2 m/s	流体継手 円柱群
	ひまし油	四三酸化鉛	—	3 : 1 (V) 1 : 5 (W)	10m/s 5.5 m/s	斜流ポンプ 流体継手
	流動パラフィン (モービル油を下塗り)	油煙, 他	オレイン酸	—	0.4~1.0 m/s	船体
ディーゼル油	四三酸化鉛	—	—	1.0 m/s	ノズルプロペラ	

(注) 混合比の後の (V) は体積比を, (W) は重量比を表す。流速の M は一様流のマッハ数を表す。

(iii) 薬品塗膜溶解法

物体表面に微溶性の不透明な薬品を膜状に塗布して水体中に置くと、流れによる物質移動率の変化によって薬品塗膜の溶解状態が変化する。このようにして生じた薬品塗膜の溶解パターンから流れの状態を可視化する方法であり、主として、境界層の遷移、流れのはく離、流れの方向などを観察するのに有効な方法である。塗布される薬品としては、ハイドロキノンジアセテート (H-D) や安息香酸が広く用いられている。

(iv) 電解腐食法

黄銅製の物体表面にハンダやスズなどを溶着し、これを陽極として水を電気分解すると表面の溶着物質が腐食浸食され白色の沈澱物が発生する。この沈澱物が流れに沿って描く模様を観察する方法である。0.01~0.1m/sの低速流に対して有効であり、低速流における表面の流動状態を可視化する方法として特色を持っている。また、流れが十分に定常状態に達してから電気分解を開始できるため、途中の非定常時の影響を含まずに流れを可視化することができる。

(v) 感温皮膜法

物体表面に液晶や、色変化塗料等を貼り付けたり塗布して、温度による色彩変化から物体表面の温度分布を観察する方法である。色彩変化の判別に際しては、温度変化によりある色

彩が特に鮮明に現われるカラーフィルムを使用したり、ある色彩をカットするフィルターを使うなど撮影に工夫を要する。

2) タフト法

局所的な流れの方向を知るために、絹糸、毛糸、ナイロン糸、木又は合成樹脂棒などの一端を壁面に固定し小さい吹流しのように使う方法である。これらのタフトを流れに置くことにより、流れの方向を示す模様が分かる。使用するタフトは液体の比重に近いものが望ましく、またタフトの寸法は可能な限り小さいものが良い。この方法は流体の別なく広い流速範囲に適用することができること、液体や流路を汚染しないなどの特徴を有する。反面、取り付けしたタフトが流れに影響を与える恐れがあること、3次元性の強い複雑な流れの場では全体の流れ模様を知るには情報が不足しているなどの欠点を有する。タフトの取り付け法により次のように分類される。

(i) 表面タフト法

物体表面に多数のタフトを貼り付けて、表面近くの流れの方向及び状態を観察する方法である。Fig. 2.1 に翼面に貼り付けたタフトの挙動と流れの状態の関係を模式的に示す。境界層が層流や乱流でもその厚さがあまり厚くなければ、タフトは表面に貼り付いたように動かないが、境界層が十分厚くなる乱流域下流からタフトの先端が揺れ始める。不安定域に入るとタフト取り付け点から揺れ始め、はく離域では旋回したり上流を向いたりする領域を確認することができる。

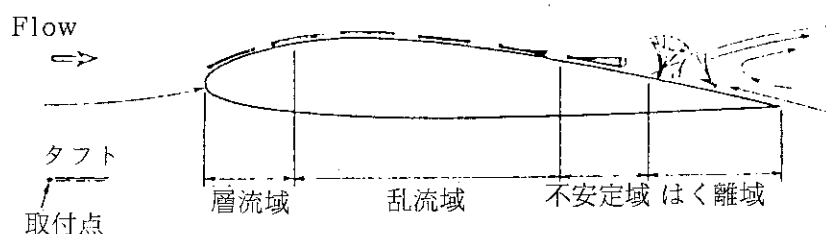


Fig. 2.1 タフトの挙動⁽¹⁾

Tuft Motion in Boundary Layer Flow

(ii) デブスタフト法

物体表面に針やピンなどを立てて支柱とし、これにタフトを取り付けて表面から離れた位置における流れの方向を観察する方法である。使用する支柱の径は、流れに影響を与えないように強度と剛性の許す限り細くするのが良い。この方法で可視化を行う場所は、(i)(iii)に示す表面タフト法とタフトグリッド法の間にある。

(iii) タフトグリッド法

剛性を持つわくに一定間隔で水平垂直方向に金属線などを張ってグリッドを構成し、それが交わる位置にタフトを取り付けて流体中に置き、グリッド面内の流れの方向分布をタフトにより観察する方法である。この際、グリッドには流れの抵抗に対して十分な強度と剛性を持たせる必要がある。また、タフトはその取り付け部で自由に回転できるようにリング状とするなど、取り付け方法に工夫が必要である。

(IV) タフトスティック法

細い棒の先にタフトを取り付けて、任意の位置における流れの方向を観察する方法である。タフトの長さは一般に短いほうが良いが、対象によっては長いタフトを使うこともある。

3) 直接注入法

流れの場にトレーサ物質を注入し、その描く線又は明暗模様を観察する方法である。この方法は2次元及び3次元の流れの速度と過度の場を可視化できることを特色としている。トレーサの密度は流体の密度に近いことが望ましく、そのため使用する流体に応じて気体、液体及び固体トレーサが使い分けられている。また、トレーサの粒径は重力、遠心力、揚力などの影響を少なくするために観察、若しくは撮影の可能な範囲でできるだけ小さくするのが良い。

(i) 注入流脈法

煙、ミスト、色素液などのトレーサ物質を、細管又は物体表面に設けた小孔やすき間から流れの中に注入したり、あるいは物体表面から発生させて、トレーサが描く線や明暗模様を観察する方法である。描かれた線は、定常流では流線、流脈及び流跡の三者と一致するが、非定常流では流脈を示す。トレーサを流れの中に注入する際、流れを乱さないように注入の方法やその速度等に注意する必要がある。

(ii) 注入流跡法

シャボン玉、空気法、油滴、発光粒子などをトレーサ物質として流れの中に単独あるいは断続的に注入し、個々のトレーサの移動軌跡、すなわち流跡を観察する方法である。トレーサを流れの中に注入する際に流れを乱さないよう注入方法を工夫する必要がある。

(iii) 懸濁法

トレーサ物質をあらかじめ流体中に一様に懸濁させておき、その流体が試験流路あるいは物体の回りを流れる際にトレーサの描く軌跡を観察する方法である。トレーサには、空気泡、油滴、アルミ粉、ポリスチレン粒子、ステアリン酸亜鉛、炭素火粉などが使用される。定常流のみならず非定常流にも適用でき、照明方法と撮影方法を工夫すれば定量的観測も可能である。

(iv) 表面浮遊法

自由表面を持つ液体の表面にトレーサ粒子を浮遊させ、その粒子の移動軌跡を観察する方法である。トレーサ粒子として、アルミ粉、ベークライト、オガクズなどが一般に使用されている。低速から高速流まで流速の適用範囲は広いが、表面の流れと内部の流れとは一般に異なることが多いので注意を要する。また、可視化に当たっては、表面波や液面の汚れなどの影響を除去するための工夫と努力が必要である。

(v) タイムライン法

主流に垂直に四塩化チタン塩や色素液を液体中に短時間射出して、トレーサの描く線の時間変化から速度分布を観察する方法で、その線をタイムラインと呼ぶ。適用流速範囲は、空気流の場合 50 cm/s 以下、液体の場合には 2 cm/s 以下である。トレーサを注入する際に流れを乱さないように工夫を要する。

4) 化学反応法

流体と物体表面あるいは注入流体など異種の物質の化学反応や流体の電気分解反応を利用し

てトレーサ物質を発生させ、流れを可視化する方法である。反応速度や発生するトレーサ物質の濃度などにより適用し得る流速に限界はあるが、定常流のみならず非定常流にも適用できるという利点を持つ。一方、使用する化学物質には毒性や腐食性などを有するものが多いので、安全、換気、防食などの対策を十分に施す必要がある。化学反応法は手法により次のように分類される。

(i) 物体表面塗膜発色法

物体表面に塗布した化学物質と細管又は物体表面に設けた小孔などから注入した薬品流体が接触して生じる発色、変色現象を利用して、物体表面極く近傍の流れの方向を観察する方法である。空気流の場合には物体表面にブルムチモールブルーなどのPH指示薬を塗布してアンモニアガスを注入する方法、水流の場合には物体表面に鉛白を塗布して硫化アンモニウム溶液を注入する方法などが一般に使用されている。薬品流体の注入流速は可視化に支障のない限り低くして、物体表面の流れに影響を与えないようにしなければならない。

(ii) 物体表面トレーサ発生法

チモールブルーと食塩の水溶液などが金属物体とイオン反応して発色する現象や四塩化チタンなどが湿り空気と反応して発生する濃厚な白煙をトレーサとして、物体表面近傍の流れや後流を観察する方法である。液体の流れの場合、発色した溶液の密度と試験流体のそれとが等しいという長所を持つが、一方ではイオン反応による発色速度が遅いという欠点を持つ。空気流の場合、比較的広い適用流速範囲を持つものの、白煙微粒子が注入孔等に付着堆積するという欠点を持つ。

(iii) 流体間反応発色法

アンモニアガスと塩化水素ガスあるいはフッ化ホウ素ガスと湿り空気などが接触して発生する白煙やルミノール含有カセイソーダ溶液とフェリシアン化カリ溶液との接触面における発光現象及びチモールブルーなどのPH指示薬溶液とカセイソーダ溶液との接触面における発色現象をトレーサとして、二種の流体の接触混合領域の流れを観察する方法である。一方の流れに微小時間だけパルス状に反応物質を混入すれば、二流体が接触する部分の流速を計測できる。

(iv) 流体間反応消色法

フェノールフタレンなどPH指示薬や過マンガン酸カリ溶液を細管又は物体表面に設けた小孔から流れに注入し、それらが描く線や模様から物体回りの流れを観察する方法である。RH指示薬は拡散によりPH値が低下すると無色になり、また過マンガン酸カリはチオ硫酸ソーダを注入することにより無色となるので、物体回りの流れを下流から観察することができる。

(v) 電解沈澱法

黄銅やハンダなどの合金を陽極として水を電気分解すると、陽極付近に白色の微粒子の雲が発生する。この微粒子が描く模様を観察する方法である。試験物体を陽極にすれば、物体表面の流れを乱すことなくトレーサを発生させることができるので、流れのはく離や非定常運動に伴う境界層の振舞いを観察するのに適している。但し、適用できる流速は、およそ $0.5 \sim 10 \text{ cm/s}$ の低い範囲で、 1 cm/s 程度のときに最も有効な結果が得られる。

(VI) 電解液発色法

チモールブルーなどPH指示薬溶液，デンプンとヨウ化カリの水溶液あるいは過酸化水素を添加したルミノール溶液を，試験物体又は金属細線を電極として電気分解すると，電極付近に発色又は発光溶液が発生する。これらの溶液をトレーサとして流れを観察する方法である。トレーサ溶液の密度は試験流体のそれと等しいという利点を持つ一方，その生成速度が極めて低いため，一般に流速が0.1 mm/s ~ 3 cm/sの極低速流に適用される。

5) 電気制御法

流れの中に置かれた金属細線に瞬間的に電圧又は電流を印加して水素気泡や火花あるいは煙を発生させ，それらが描く線や模様を観察する方法である。定常流のみならず非定常流，更に3次元流れにも適用でき，しかもトレーサ物質発生装置と可視化パターンの撮影方法を工夫することにより流速分布を精度良く計測することができる。

(i) 水素気泡法

水流中にタングステンや白金などの細線を張って陰極とし，これと少し離れた位置に陽極を置いて水を電気分解すると陰極線から水素気泡が発生する。この気泡をトレーサとして流れを観察する方法である。Fig. 2.2に電極形状と水素気泡が描く模様を示す。図に見られるように，電極に直流電圧又はパルス電圧を印加したり，電極形状を直線形，キック形，まだら形，あるいは，はしご形にすることにより，多様な水素気泡パターンが得られる。しかも，水素気泡の発生量や発生周期を容易に電気制御できるので，流れの状況及び流速分布を流線，タイムライン等を表す水素気泡パターンから明りょうに観測することができる。

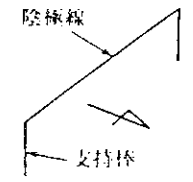
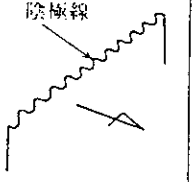
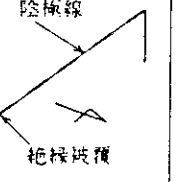
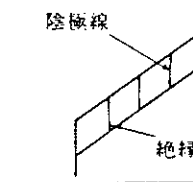
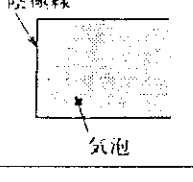
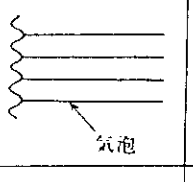
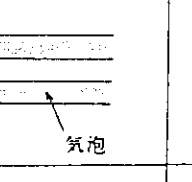
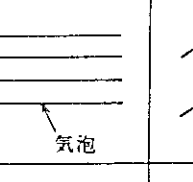
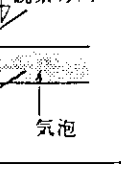

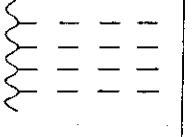
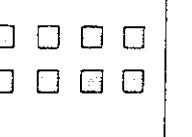
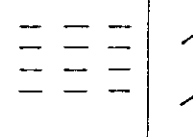

名称	直線形電極	キック形電極	まだら形電極	はしご形電極	
形状					
直流電圧を印加した場合					
パルス電圧を印加した場合					

Fig.2.2 主な電極形状と水素気泡の描く模様⁽¹⁾

Hydrogen Bubbly Flow Pattern Generated by Electrode Wire

(ii) 火花追跡法

Fig. 2.3 に示すように空気流中に適当な形状の電極を配置し、これに高パルス電圧を印加して放電を行うと電極間の空気がイオン化され、火花線となって流れと共に移動する。この火花線をトレーサとしてその移動経路から流れを観測する方法である。電極形状は、境界層の流れの観測には針状電極、静止模型回りの流れには線状電極が適しており、その材料には一般にタングステン線が用いられている。この方法は流速に従って火花線の強さや発生周期を容易に制御できる上、トレーサ物質の注入を必要としないため流れを乱すことも少ないが、その一方で、電極付近の火花線は放電の影響よりひずみを生じ、壁面付近の流速を精度良く計測することは困難である。

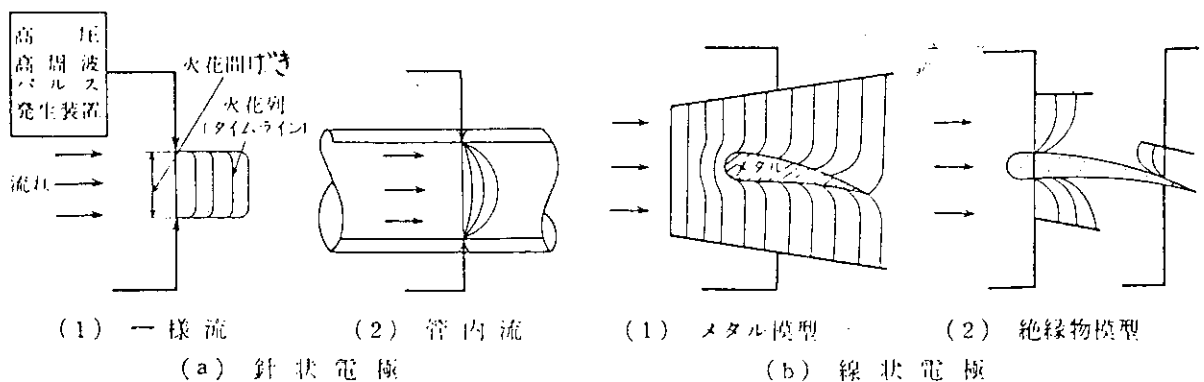


Fig.2.3 火花追跡法の電極配置⁽¹⁾

Typical Electrode Arrangements in Spark Tracing Technique

(iii) スモークワイヤ法

流れと直行して張った電熱細線上に流動パラフィンへ少量の機械油又はケロシンを加えたものを塗っておき、瞬間的に大電流を流して加熱すると流動パラフィンが蒸発して白煙状のミストが生成される。この白煙をトレーサとして空気流の流動状況を観察する方法である。この方法は手軽に行えて、適用流速範囲も 0.1~30m/s と広いが、煙は拡散しやすくまた浮力を有するため数m/s 程度の流速が観測に最も適している。

6) 光学的方法

流体の密度変化や液面の凹凸などを光の屈折率の変化あるいは干渉現象などを利用して観測する方法である。この方法は、流れに全く影響を与えずに可視化できることを最大の特徴とするが、鮮明な可視化象を得るためには、高性能の光学系を使用し、更にそれを完全に調整することが必要である。

(i) シャドウグラフ法

点光源からの発散光又は平行光束を流れの場に通してスクリーン又はフィルム上に投影させると、流体の密度変化が明暗模様影絵として現われる。この影絵から流れの状態を観察する方法である。一般に、衝撃波、膨張波、加熱流など密度変化の大きい流動現象を観察するのに使われている。

(ii) シュリーレン法

Fig. 2.4 にシュリーレン法の原理を示す⁽⁴⁾。点光源又はスリットからの光をレンズ・凹面鏡等で平行光束とし、これが流れの場を通過した後収束させ、その焦点に置いたナイフエッジで適当な明るさの視野に絞ると、エッジに近づく方向に屈折した部分は暗くなり、遠ざかる部分は明るくなる。こうして得られる明暗のコントラストをフィルム上に投影して流れの場の状況を観察する方法である。この方法は、超音速気流や強制加熱流などの流れ構造の観察に広く用いられる。

(iii) マッハエンダー干渉法

マッハエンダー干渉法は Fig. 2.5 に示すように、平行光束をビームスプリッタによって観測部窓用材料と光学的に等価なコンペンセータと呼ばれる補償ガラスを通る参照光束と観測部を通る試験光束に分割し、その両者を再びビームスプリッタに通した後、合成しスクリーン又はフィルム上に干渉縞を投影する方法である。投影される干渉縞を Table 2.3 に模式的に示す。観測部を流体が流れていないときにスクリーン全面を一様な明るさに調整しておくと、流動時には等密度線を表す干渉縞が得られ、流れのないときに平行縞が現われるように調整しておくと、流動時には密度変化に比例して移動する変形縞が得られる。このようにして得られる干渉縞から流れの状況を観測することができる。この方法は、超音速以上の気流や加熱流などの流れの構造や温度分布の観測に広く用いられている。液流に対しては、光源輝度の高いレーザー光源を使用するとより鮮明な可視化像が得られる。

(iv) レーザーホログラフ法

Fig. 2.6 にレーザーホログラフィ光学系を示す。シャドウグラフ法やシュリーレン法の光学系に参照光路を付加し、レーザー光源によってホログラム干渉させ、干渉像をホログラム乾板に投影する方式である。このようにして作製されたホログラム乾板を、Fig. 2.7(a)に示す光学系で再生するとシュリーレン写真が得られ、流れ場の密度変化を観察することができる。また、乾板に種々の影像処理を施した後、Fig. 2.7(b)に示す光学系で再生すると、流れ場の密度変化の3次元影像が得られ、流動状況を立体的に観察することができる。

(v) ミラージュ法

Fig. 2.8 にミラージュ法の原理を示す。黒色平行格子の裏から均一な照明光を流れ場に通すと、流体の密度勾配に対応した縞模様がスクリーン又はフィルム上に投影される。この方法は、伝熱面上に形成される薄い温度境界層のように狭い範囲に大きな温度勾配のある流れ場を観察するのに適している。

(vi) モアレ法

基準液面に平行に格子を置き、斜め上方から光を照射して液面上に格子の影を落とす。その影を格子を通して観察すれば、液面の凹凸の等高線を表す縞模様が得られる。この等高線から流れの状態を調べる方法である。格子のピッチを小さくするにつれて液面変形の解像度は向上する。一般に 0.025~1mm のピッチが多く使用されている。

(vii) ステレオ写真法

液面の凹凸をステレオ写真に撮り、この写真を写真測量の手法を応用して解析すると液面の等高線が得られる。得られた等高線から流れの状態を観察する方法である。タービン翼列

内の流れを浅底水槽を利用して観察する場合や海岸に打ち寄せる波の状態の観察など、海洋開発や土木工学の分野にも広く使われている。

(iii) サーモグラフィ法

固体表面あるいは液体表面から放射される赤外線を検出し、表面温度分布を明暗像又は等温度線像として可視化する方法である。一般に実用されている赤外線検知器は測定範囲 $-20 \sim 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、分解能 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （常温）程度の性能を持っており、表面温度分布を広い温度範囲にわたってかなり精度良く、しかも非接触で測定できる点に大きな特色がある。

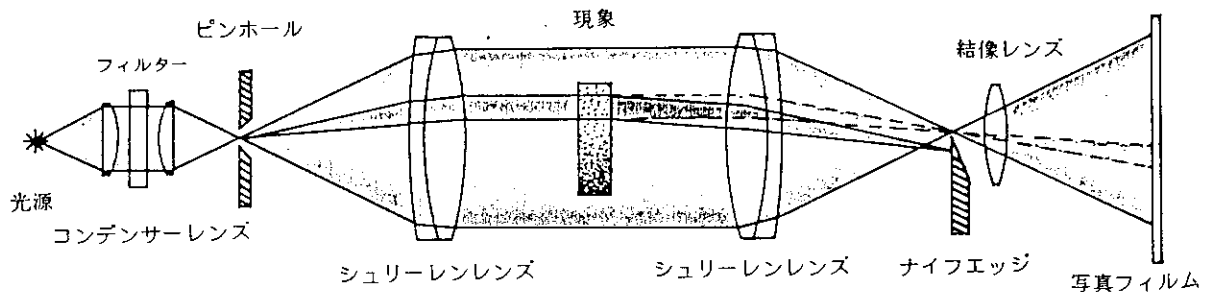


Fig.2.4 シュリーレン法の原理⁽⁴⁾

Basic Layout of Schlieren Optical System

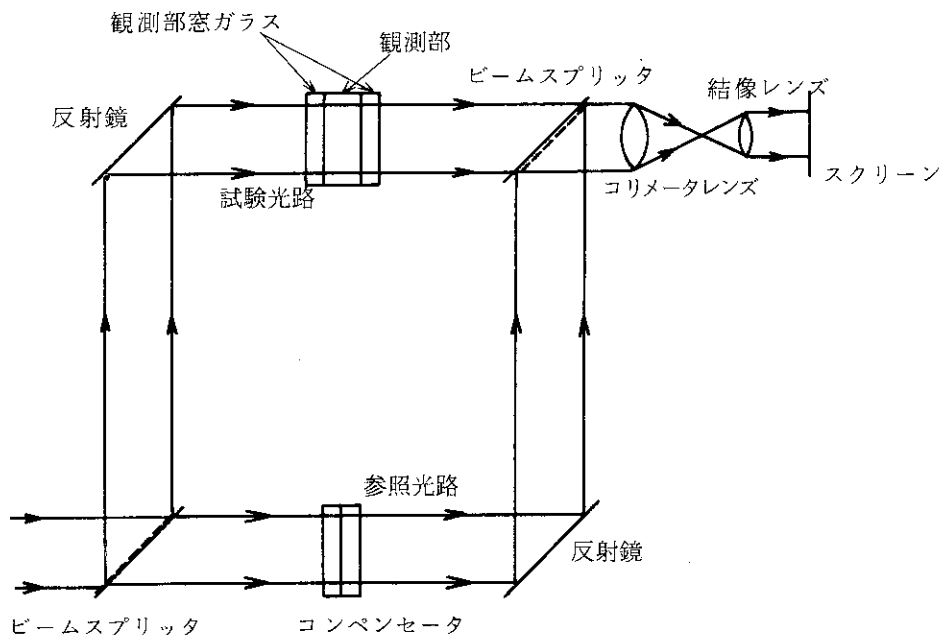


Fig.2.5 マッハツェンダー干渉法の光学系⁽¹⁾

Basic Layout of Mach-Zender Interferometry

Table 2.3 形成される干渉縞⁽¹⁾

Typical Fringe of Mach-Zender Interferometry

観測部	調整法	無限幅干渉縞	有限幅干渉縞
流れがないとき	マッハツェンダ干渉計の基準調整	無限幅干渉縞 (infinite fringe) (白色光源では白色干渉縞)	
	可視化前の設定	(上の調整のまま) 無限幅干渉縞又は不定干渉縞 (infinite fringe)	有限幅干渉縞又は (finite fringe) 平行干渉縞 (straight parallel fringe)
流れがあるとき	可視化で得られる干渉縞写真	等密度干渉縞 (density contour fringe)	移動干渉縞 (displacement fringe)

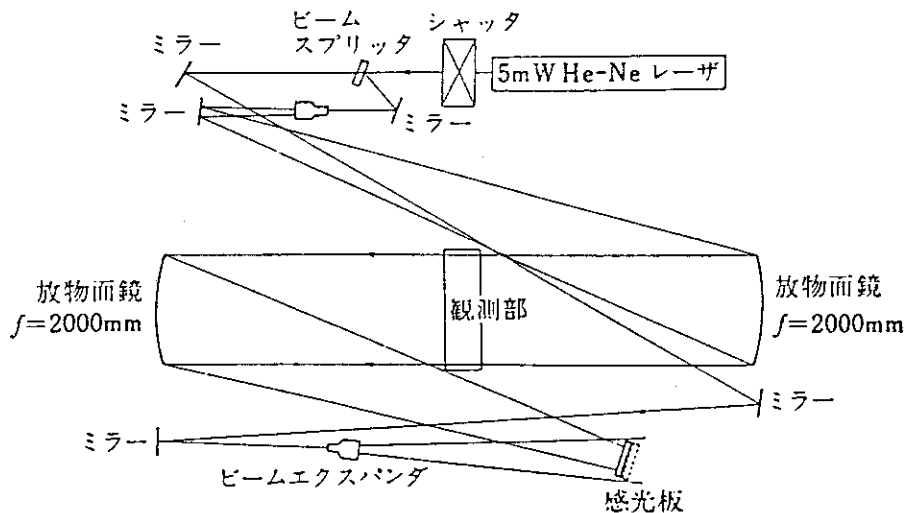


Fig.2.6 レーザホログラフィ光学系⁽¹⁾

Basic Layout of Laser Horography

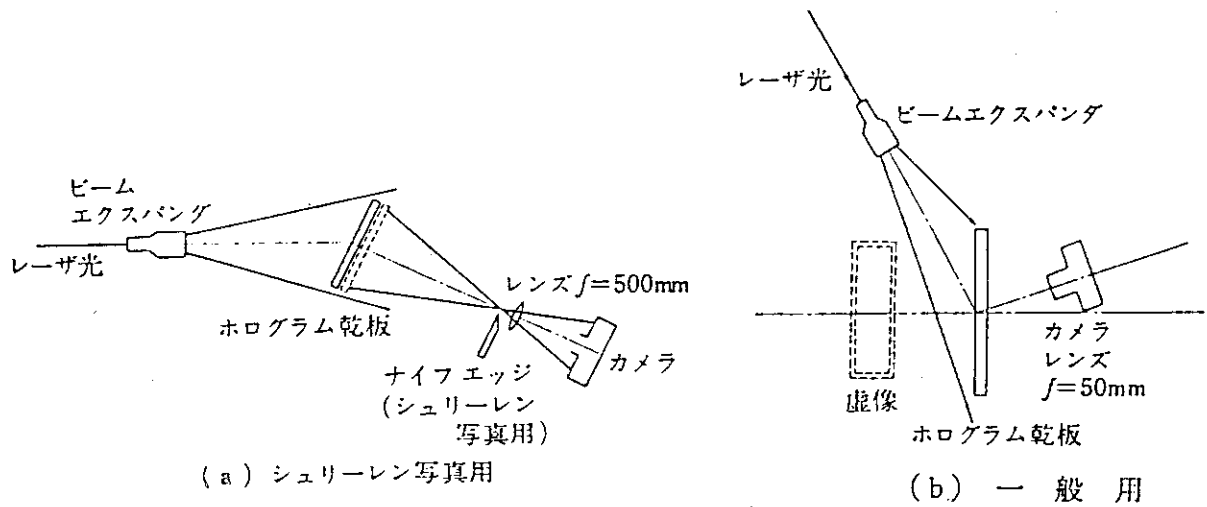


Fig.2.7 ホログラム乾板再生用光学系⁽¹⁾

Regenerating System of Hologram Plate

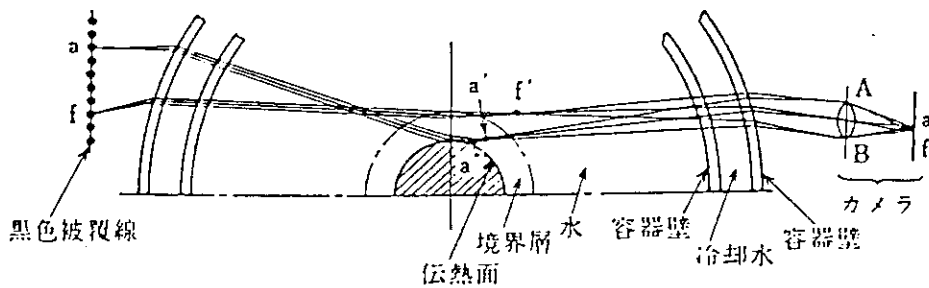


Fig.2.8 ミラージュ法の原理⁽¹⁾

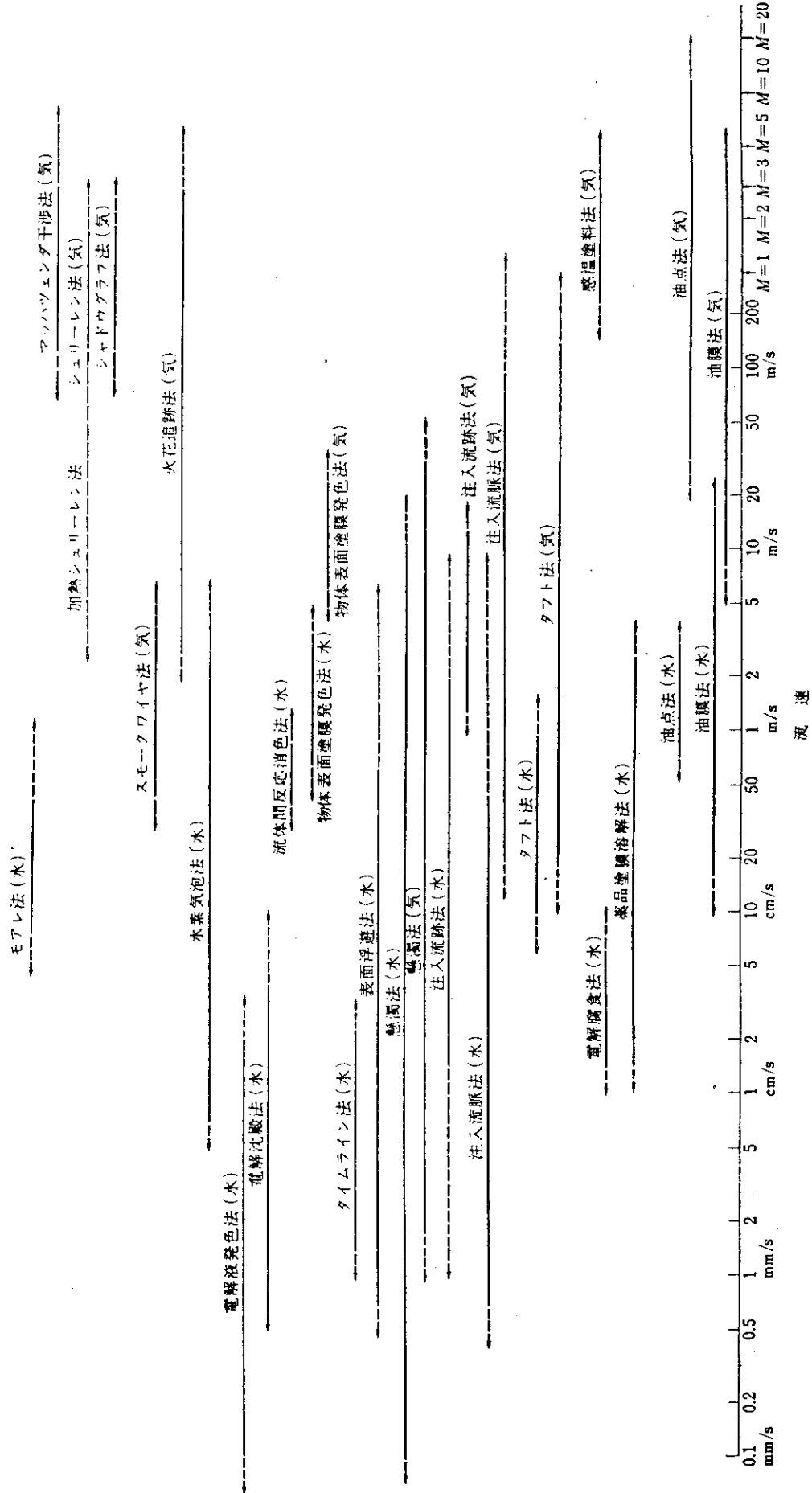
Basic Principle of Mirrorge Technique

2.2 可視化手法の選択

前項に述べたように可視化手法は多種多様にわたっており、しかもそれぞれの手法が対象とする流れやその適用範囲は限られている。従って、流れの可視化を行うときには、各種の手法についてその特徴、欠点、適用限界などを十分に理解した上で最も適した可視化手法を選択しなければならない。Table 2.4 に各種の可視化手法の適用流速範囲を示す。但し、鮮明な可視化像を得るためには、測定部周囲の環境の整備や照明方法あるいは記録撮影装置の工夫などに加えて、従来の手法を改善していく努力が必要である。

また、複雑な流動現象を可視化して調べる場合、ひとつの可視化手法だけでは不十分なことが多い。そこで、幾つかの手法をそれぞれ単独に、あるいは同時に組み合わせて使用して、流れを多面的に可視化することにより、流れの立体的状況が更に明確に把握できる。

Table 2.4 各手法の適用流速範囲
Applicable Velocity Range for Flow Visualization Techniques



3. 流れの現象の可視化例

流れの可視化により流れのイメージが直接的に描き出されるため、可視化による観測結果が、「流体力学における視聴覚研究分科会」資料⁽⁵⁾及び写真集「流れ」⁽⁶⁾にまとめられ発表されている。これらの資料は、流れ現象が抱括的に把握できるように編集されているが、流動状態や流動特性を理解するために上記の成果を中心として、定量的観測結果や流れの模式図等を引用し、流れ現象全体をより容易に理解できるよう編集する作業を行った。それぞれの流れの場を代表する可視化の写真が43例記載され、可視化による現象の説明が行われている。

3.1 流れの基礎

(1) 2次元クエット流れ

2枚の平行平板を静止状態から互いに逆方向に一定速度で動かすとき、平板の間の粘性流体が行う定常運動を2次元クエット流れと呼ぶ。2次元クエット流れの速度分布形は直線であり、すべてのRe数(レイノルズ数)において安定であることが知られている。

この写真は2次元クエット流れの速度分布を可視化するために、試験流体としてグリセリンを使用し、赤色顔料で着色したグリセリンを静止状態のグリセリン中へ注射器と直線定規を用いて直線を書いておき、運動開始後の色素線の変形を撮影したものである。

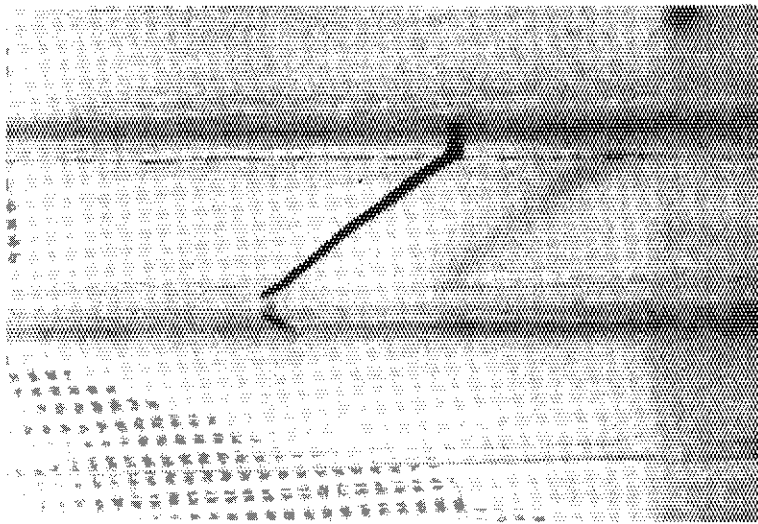


Fig. 3.1 2次元クエット流れの速度分布⁽⁵⁾
Velocity Distribution in Two-dimensional Couette Flow

可視化手法	色素線マーク法
実験条件	1. 流体：グリセリン 2. 圧力：大気圧 3. 温度：18℃ 4. 速度：平板相対速度 $U = 2 \text{ mm/s}$ 5. 関連無次元数： $Re = UD/\nu = 2.7 \times 10^{-2}$ 6. 代表寸法：平板間隔 $D = 2 \text{ cm}$
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：105mm/F4 3. 使用フィルム：エクタクローム160 4. 露光：F8, 1/125s 5. 撮影距離：0.4m 6. 照明方法：500w 写真ランプ1個 7. 現像：普通 8. その他：
製作	種子田定俊(九州大学応用力学研究所)

(2) 2次元ポアズイユの流れ

実在の流体は多少とも粘性を持っており、流路を流れる流体はこの粘性と流路壁によって速度勾配を持つ流体層、すなわち速度境界層を形成する。この境界層が成長して、流路断面内で一定の速度分布を持つようになる領域を発達した流れの領域と呼ぶ。下の写真は試験流体としてグリセリンを使用し、平行平板間の発達した層流速度分布を、赤色顔料で着色したグリセリンを注入して可視化したものである。この流れは2次元ポアズイユ流れとも呼ばれ、速度分布は流路壁で流速ゼロ、流路中心で流速が最大となる放物線形状を示している。

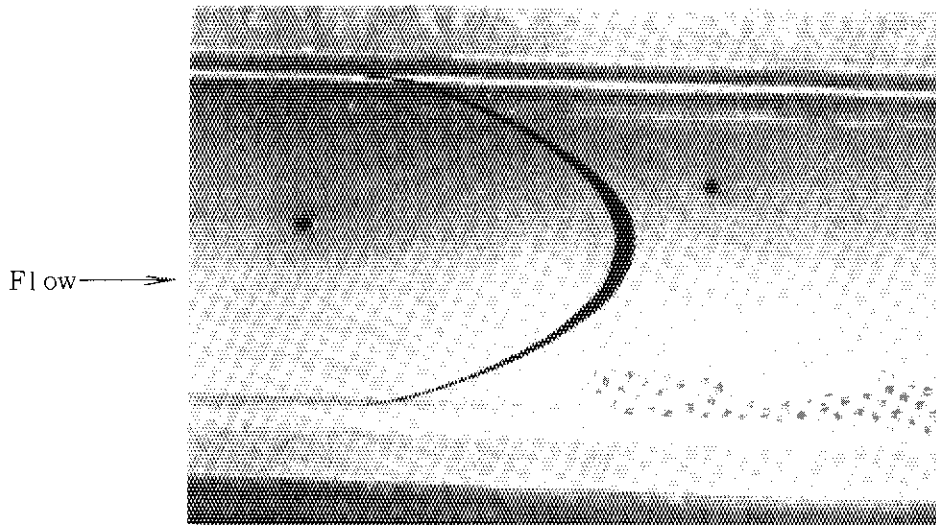


Fig. 3.2 2次元ポアズイユ流れの速度分布⁽⁵⁾
Velocity Distribution in Plane Poiseuille Flow

可視化手法	色素線マ-ク法
実験条件	1. 流体：グリセリン 2. 圧力：大気圧 3. 温度：18℃ 4. 速度：中央の速度 $U_{Max} = 2 \text{ mm/s}$ 5. 関連無次元数： $Re = U_{Max} D / \nu = 5.3 \times 10^{-2}$ 6. 代表寸法：平板間隔 $D = 4 \text{ cm}$
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：105mm/F 4 3. 使用フィルム：エクタクロ-ム 160 4. 露光：F 8, 1/125 s 4. 撮影距離：0.4 m 6. 照明方法：500 w 写真ランプ1個 7. 現像：普通 8. その他：
製作	種子田定俊（九州大学応用力学研究所）

(3) ヘルショウの流れ

粘性流体の運動は、流体粒子に作用する粘性力、慣性力及び圧力の釣り合いのうえに成り立っているが、レイノルズ数 Re が非常に小さく ($Re \ll 1$) になると慣性力も小さくなり、圧力と粘性力が釣り合った運動となる。そのため、物体周りの流れは、はく離が起こらず、ポテンシャル流れに相当する流れとなる。⁽⁷⁾

下の写真は、水平に置かれた2枚のガラス平板の間に円柱をはさみ込んで、 $Re \ll 1$ における円柱周囲の水流パターンを、赤インクを注入して可視化したものである。このときの流れはヘルショウの流れと呼ばれ、観察される流線は速度ポテンシャルを表している。

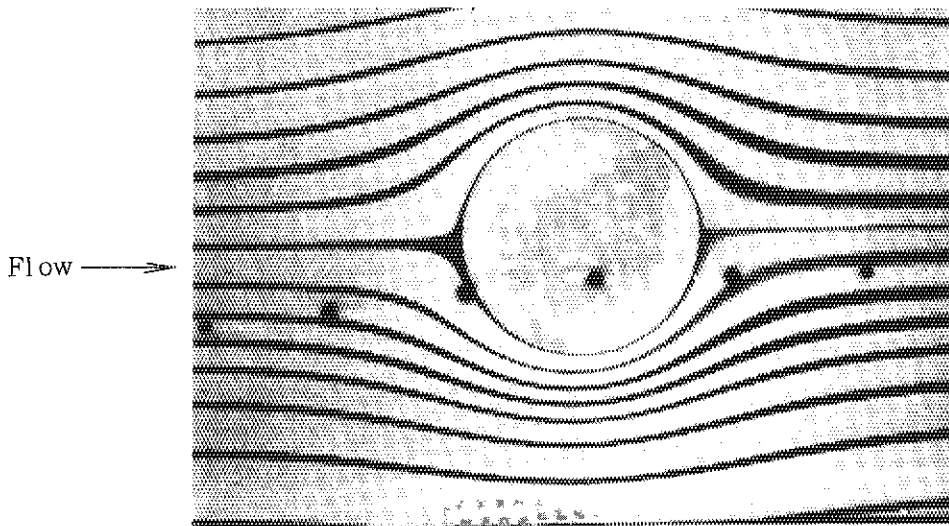


Fig. 3.3 ヘルショウ (Hele-Shaw) の流れ⁽⁵⁾
Flow Pattern of Hele Shaw Flow

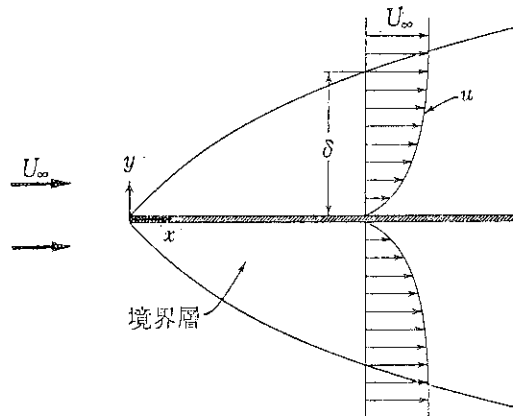
可視化手法	トレーサ法 (赤インク)
実験条件	1. 流体: 水 2. 圧力: 大気圧 3. 温度: 16.5℃ 4. 速度: $U_m = 2.8 \text{ cm/s}$ (断面平均) 5. 関連無次元数: $Re = U_m D / \nu \cdot (h/D)^2 \approx 0.7$ 6. 代表寸法: 円柱直径 $D = 80 \text{ mm}$, 流路高さ $h = 1.5 \text{ mm}$
撮影条件	1. カメラ形式: アサヒペンタックスSL 2. 撮影レンズ: ペンタックス 1:2.5/135 3. 使用フィルム: フジカラー 4. 露光: 5. 撮影距離: 1 m 6. 照明方法: カラー用フォトリフレクタランプ 100v 500w×2 7. 現像: 8. その他:
製作	安藤常世 (慶応義塾大学理工学部)

3.2 境界層

(1) 平板層流境界層

一様な流れ U_∞ の中に平板を置くと、下図に示すように板の先端から境界層の厚さ δ は次第に増加する⁽⁸⁾。先端からの距離を X とするとき $Re = UX/\nu < 10^5 \sim 10^6$ まで境界層内は層流が保たれる。

下の写真は、流れに平行に置いた平板の前方に陰極線を張り、これにパルス電圧を印加して水素気泡を発生させて、層流境界層が板の先端から発達していく様子をタイムラインで示したものである。下流に行くにつれて、次第に境界層厚さが増加していく様子を良く示している。



境界層の発達状況⁽⁸⁾

Schematic Profile of Boundary Layer Development

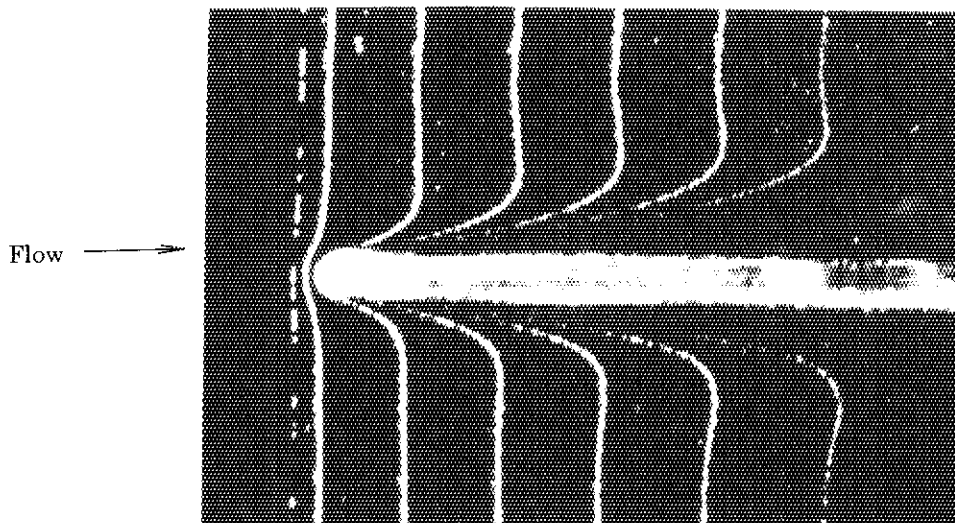


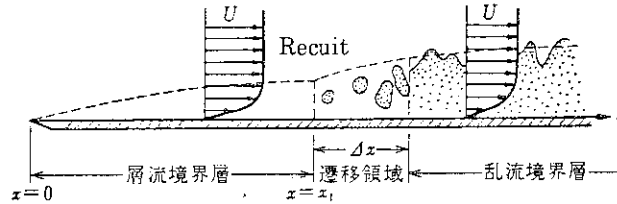
Fig. 3.4 平板層流境界層の発達⁽⁵⁾

Laminar Boundary Layer Development on a Flat Plate

可視化手法	水素気ほう法
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：0.11%食塩水 2. 圧力：大気圧 3. 温度：20℃ 4. 速度：U=0.6cm/s 5. 関連無次元数：$Re = \frac{Ux}{\nu}$ 6. 代表寸法：板厚 t = 0.5 mm, 板先端からの距離 x
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：50mm/F4, マクロ 3. 使用フィルム：TRI-X, ASA 400 4. 露光：F4, ストロボ同調 4. 撮影距離 0.15m 6. 照明方法：ストロボスリット光線, 閃光時間 1/1500 7. 現像：標準現像 8. その他：
製作	中山泰喜 (東海大学工学部)

(2) 層流から乱流への遷移 (平板流)

流れに平行な平板上に形成される境界層は、下図に示すように前線からある距離に達すると層流から乱流に遷移する⁽⁹⁾。遷移レイノルズ数 $Re_{crit} = \left(\frac{U_{\infty} X_t}{\nu} \right)_{crit}$ は主流の乱れによって異なるが、おおよそ $10^5 \sim 10^6$ の範囲にある。



境界層の遷移⁽⁹⁾

境界層の遷移⁽⁹⁾

Schematic Drawing of Boundary Layer Transition

下の写真は風洞気流中に置かれた水平板 (幅 1.2 m, 長さ 2.4 m) の前縁より薄い煙の膜を平板の上面に沿って流し出し、遷移の様態を撮影したものである。上の写真は上方から、下の写真は側方からのものであり、流れの縦断面を示す。この写真から分かるように、境界層が層流から乱流へ遷移すれば境界層は飛躍的に増大する。遷移現象は極めて不安定で、遷移位置は絶えず揺れ動いている。

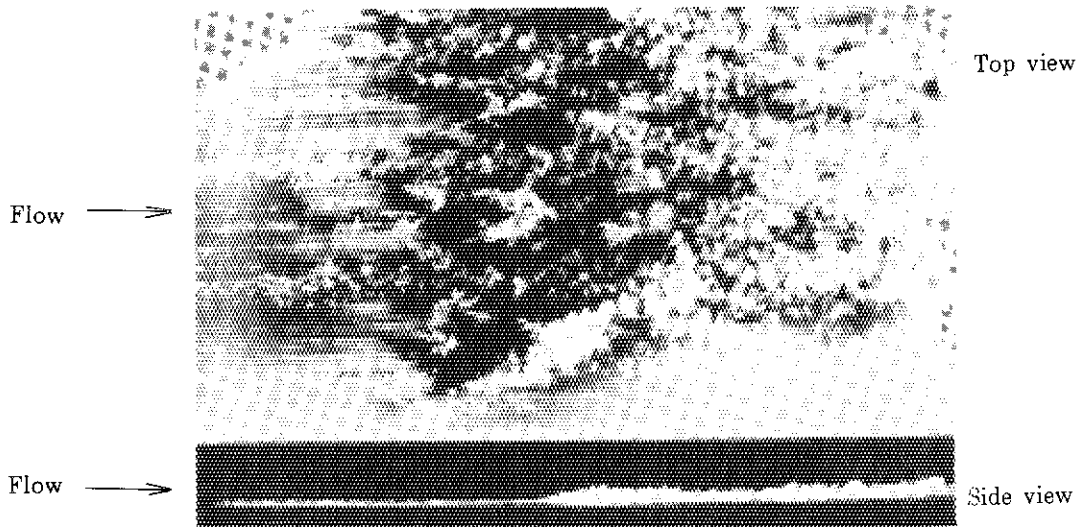


Fig. 3.5 層流から乱流への遷移⁽¹⁰⁾

Transition from Laminar to Turbulent Flow

可視化手法	煙 膜 法
実験条件	1. 流 体 : 空気 2. 圧 力 : 大気圧 3. 温 度 : 20℃ 4. 速 度 : $U = 3.3 \text{ m/s}$ 5. 関連無次元数 : $Re = UXt/\nu = 2 \times 10^5$ (前縁から遷移までの平均距離 Xt を基にした Re 数) 6. 代表寸法 : 平板幅 1.2 m, 平板長 2.4 m
撮影条件	1. カメラ形式 : 35mm 1眼レフ 2. 撮影レンズ : 35mm/F 1.4 3. 使用フィルム : ASA 400 4. 露 光 : F 1.4, 1/1000s 5. 撮影距離 : 3 m 6. 照明方法 : 1kw プロジェクタ × 4 台 7. 現 像 : 増感 8. その他 :
製 作	種子田定俊 (九州大学応用力学研究所)

(3) 管内流の遷移

管の中の流れは、レイノルズ数 Re が十分に小さい場合、隣り合う流体は滑り合って層状に流れ、巨視的な混合は起こらない。このような流れを層流と呼ぶ。レイノルズ数が大きくなり、ある値（臨界レイノルズ数 $Re_{cr} \geq 2240$ ）以上になると、巨視的な不規則な混合が生じるようになる。このように不規則な乱れた流れを乱流と呼び、層流から乱流への移り変わりを遷移と呼ぶ。但し、遷移を生じる臨界レイノルズ数は管入口形状、振動などの影響を受ける。

下の写真は、管の上流から染料を細管により注入して流れを可視化したもので、レイノルズ数が小さく層流の場合は染料の流脈が拡散せず、レイノルズ数が大きく乱流の場合は染料の流脈が乱れにより拡散している。

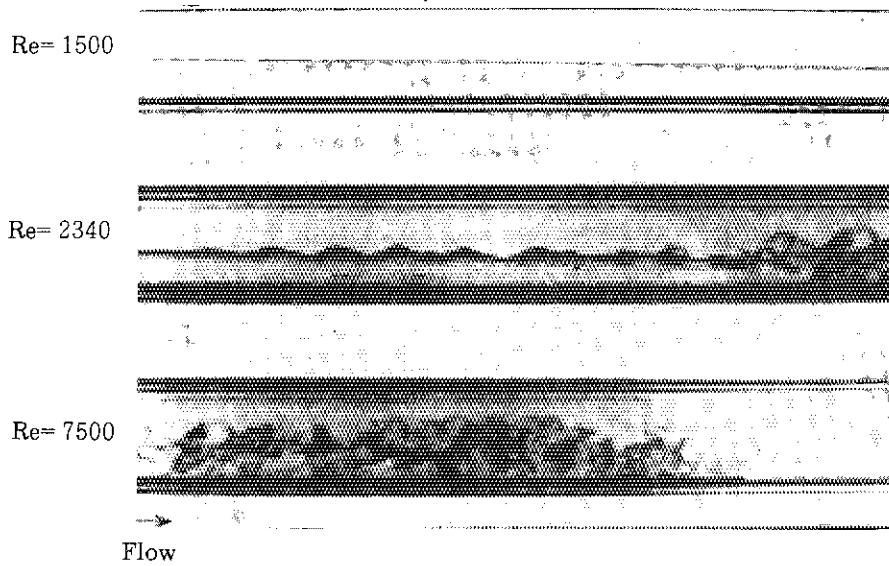


Fig. 3.6 管内流の遷移⁽⁵⁾
Transition from Laminar to Turbulent in a Pipe Flow

可視化手法	注入流脈法（染料）
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 流体：水 圧力：大気圧 温度：常温 速度：$U = 0.11 \text{ m/s}, 0.17 \text{ m/s}, 0.54 \text{ m/s}$ 関連無次元数：レイノルズ数 $Re = \frac{Ud}{\nu} = 1500, 2340, 7500$ 代表寸法：管内径 $d = 14 \text{ mm}$
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> カメラ形式：35mm 1眼レフ 撮影レンズ：50mm / F 2 使用フィルム：ASA 100 カラーリバーサル 露光：$F 16 \ 1/2000 \text{ s}$（ストロボ） 撮影距離：約 1m 照明方法：ストロボ 2灯 現像：標準 その他：
製作	田古里哲夫（東京大学工学部）

(4) トルミーン・シュリヒティング波

層流境界層は種々のじょう乱波を内在しており、流れの不安定は特定波長のじょう乱波によって励起される。2次元層流境界層におけるこのじょう乱波はトルミーン・シュリヒティングと呼ばれる。^{(1), (2)}

下の写真は、平板上に張ったリボンを磁氣的に振動させて形成したトルミーン・シュリヒティング波を膜状パラフィン煙で可視化したものである。このときの振動数は30 Hz, 振幅は印加する交流電流 $i = 3.5 \text{ A (a)}, 2 \text{ A (b)}, 1 \text{ A (c)}, 0.5 \text{ A (c)}, 0.5 \text{ A (b)}$ に従う。写真に見られるように、振幅すなわち印加電流が大きくなるにつれて流れ方向に波の凹凸が明りょうになっている。この凹凸が著しくなると、変形・崩壊して渦となり乱流状態に移行する。

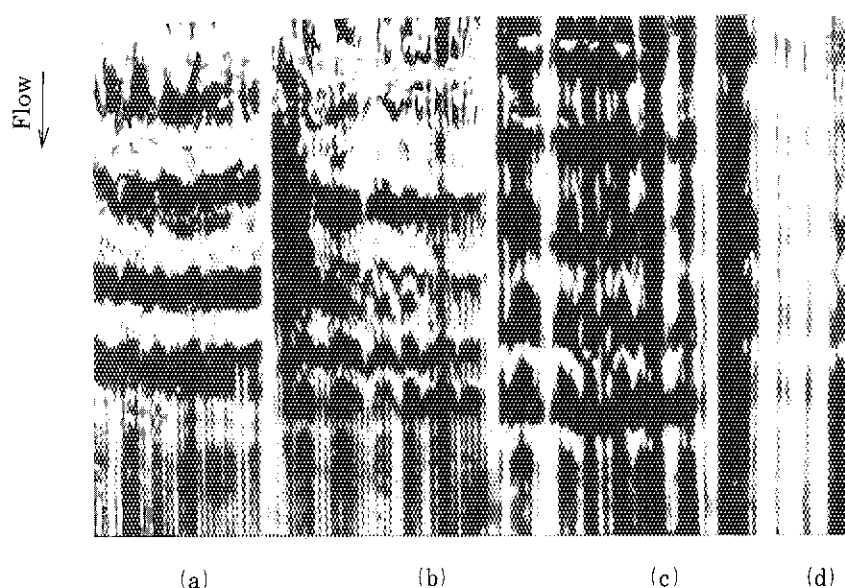


Fig. 3.7 トルミーン・シュリヒティング波の層流から乱流への遷移⁽¹³⁾
Laminar-turbulent Transition of Tollmien-Schlichting Wave

可視化手法	注入流脈法 (パラフィン煙)	
実験条件	1. 流体: 空気 2. 圧力: 大気圧 4. 速度: $U = 5.0 \text{ m/s}$ 5. 関連無次元数: 6. 代表寸法: 振動リボンの高さ $h = 1 \text{ mm}$	3. 温度: 常温
撮影条件	1. カメラ形式: 一眼レフレックスカメラ 35mm 2. 撮影レンズ: 50mm/F2 4. 露光: 絞り 2.8 $10 \mu\text{s}$ 6. 照明方法: ストロボ 4 WS/pulsc 2台 7. 現像: フェニトール現像 8. その他:	3. 使用フィルム: ASA 200 4. 撮影距離: 1.0 m
製作	坂上治郎, 望月昌子 (お茶の水女子大学, 理学部(元))	

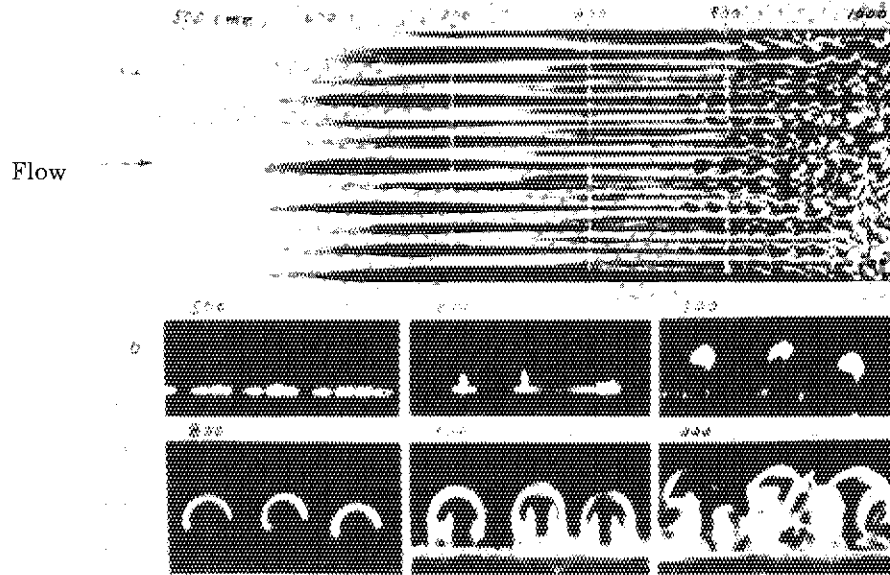


Fig. 3.8 凹曲面に沿う縦渦の生成と崩壊⁽¹⁵⁾
 Generation and Breakdown of Longitudinal Vortices along
 a Concave Wall

可視化手法	軽油ミスト法
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：空気 2. 圧力：大気圧 3. 温度：20℃ 4. 速度：U = 2.5 m/s 5. 関連無次元数：X = 0.6m, $Re_x = \frac{Ux}{\nu} = 96000$, $Re_\theta = \frac{U\theta}{\nu} \sqrt{\frac{\theta}{R}} = 7.38$ 6. 代表寸法：R = 1m, $\theta = \frac{1.328}{2} Re_x^{-1/2} \cdot X = 1.29 \times 10^{-3}$ m
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ 2. 撮影レンズ：55mm / F 1.2 3. 使用フィルム：ASA 400 4. 露光：1 / 15s, F 5.6 5. 撮影距離：0.8 m 6. 照明方法：ストロボライト 7. 現像：普通現像 8. その他：
製作	伊藤光（明治大学工学部）

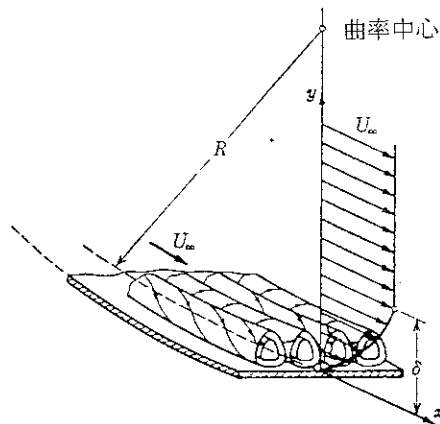
(5) ゲルトラー渦の生成と崩壊

下図に示すように凹曲面に沿う境界層内では、凹面によって生じる遠心力の作用で壁付近の流れが不安定となり、ゲルトラー渦と呼ばれる交番配列の縦渦が発生する。この縦渦が成長し崩壊することによって乱流状態に移行する。このような縦渦は、運動量厚さ θ と曲率半径を代表寸法としたレイノルズ数 Re_θ

$$Re_\theta = \frac{U_\infty \theta}{\nu} \sqrt{\frac{\theta}{R}} > 7$$

において現われる。⁽¹⁴⁾

次の写真(a)は、曲率半径 $R = 1 \text{ m}$ の凹曲面上に軽油蒸気を一様に流してゲルトラー渦の生成から崩壊までの過程を可視化したもので、写真(b)はその過程における断面内の状況を可視化したものである。前線から 600 mm あたりでゲルトラー渦が生成され始め、その後煙は縦渦間に集中して筋となっている。更に下流の 850 mm あたりでは一対の縦渦をまたぐ3次元的な馬蹄形渦が生成され始めており、下流に行くにつれて縦渦は次第に崩壊している。ゲルトラー渦が生成し始める $X = 600 \text{ mm}$ におけるレイノルズ数は $Re_x \frac{U_\infty x}{\nu} = 96000$ および $Re_\theta = 7.4$ である。



凹壁面に発生するゲルトラー渦⁽¹⁴⁾

Schematic Drawing of Görtler Vortices

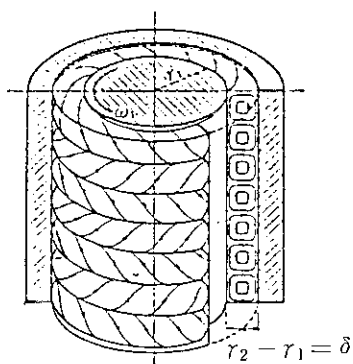
(6) テーラー渦

一般に粘性流体の流れは、レイノルズ数がある流れに特有な限界値を超えると、層流状態を維持することができず周囲からのじょう乱の影響により乱流状態に移移する。一方、同心回転二重円筒内の流れは、流れが安定な場合には単純なクエット流であるが、回転数がある値以上になると遠心力の作用でじょう乱が発生し流れは不安定となり、下図に示すようにテーラー渦と呼ばれるリング状の渦列を形成する。このような流れの様相はテーラー数 $Ta = \frac{U_i \delta}{\nu} \sqrt{\frac{\delta}{r_i}}$ によって次のように与えられている。⁽¹⁶⁾

$Ta < 41.3$: クエット流
$41.3 < Ta < 400$: 層流テーラー渦
$400 > Ta$: 乱流テーラー渦

次の写真(1)は外円筒静止、内円筒のみが低速で回転する場合の層流テーラー渦をアルミ粉法で撮影したものである。アルミ粉がうろこ状であり、流れに平行に配向する性質を利用して、テーラー渦をアルミ粉の反射光の明暗模様として検出することができる。このときのテーラー数は $Ta = 52.6$ でテーラー渦のピッチは両円筒の間隔にほぼ等しい。

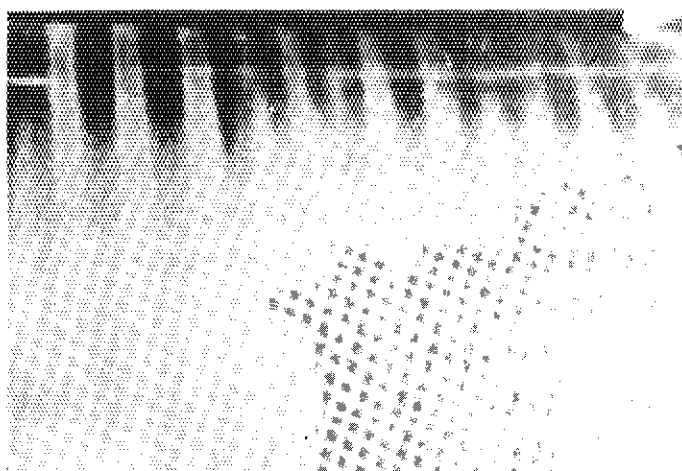
内円筒の回転数を更に高めると渦輪は波打ち始め、更に回転数を上げると乱流になる。写真(2)は写真(1)に比べて内円筒の回転数を15倍に高めたときすなわち $Ta = 789$ における乱流テーラー渦を示している。写真に見られるように、乱流になっても渦輪列は存在し、しかもそのピッチは層流の場合とほとんど同じである。



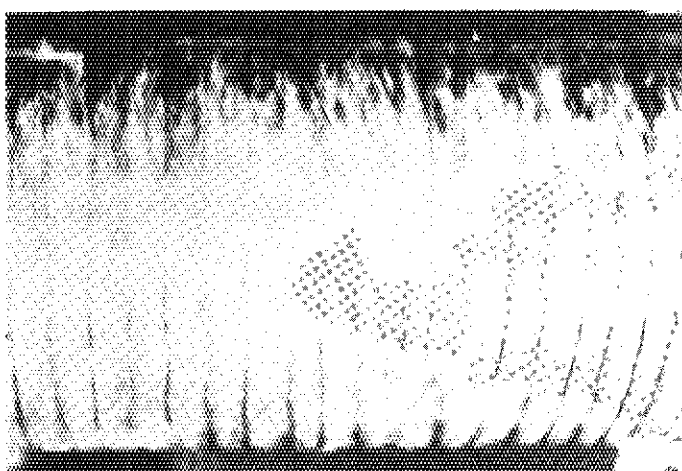
- r_1 : 内筒半径
- r_2 : 外筒半径
- ω_1 : 内筒回転数
- $\delta = r_2 - r_1$

テーラー渦の様式図⁽¹⁶⁾

Schematic Drawing of Taylor Vortices



(1) 内筒回転数 2 rpm, $Ta = 526$



(2) 内筒回転数 30 rpm, $Ta = 789$

Fig. 3.9 テーラー渦⁽⁵⁾

Taylor Vortices

可視化手法	懸濁法 (アルミ粉)
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体: 水 2. 圧力: 大気圧 3. 温度: 18°C 4. 速度: 外筒静止, 内筒回転数 (1) 2 rpm (2) 30 rpm 5. 関連無次元数: $Ta = \frac{w D_i \alpha}{2 \nu} \sqrt{2d/D_i} = 526$ (写真1), 789 (写真2) 6. 代表寸法: 内円筒外径 12.6cm, 外円筒内径 $D_o = 14.6$cm, $d = (D_o - D_i)/2 = 1$cm
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式: 35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ: 105mm/F 2.5 3. 使用フィルム: ASA 200 4. 露光: F 2.5, $\frac{1}{30}$ s 5. 撮影距離: 0.5 m 6. 照明方法: 500W 写真ランプ × 1個 7. 現像: 標準 8. その他: 接写リング使用
製作	種子田定俊 (九州大学応用力学研究所)

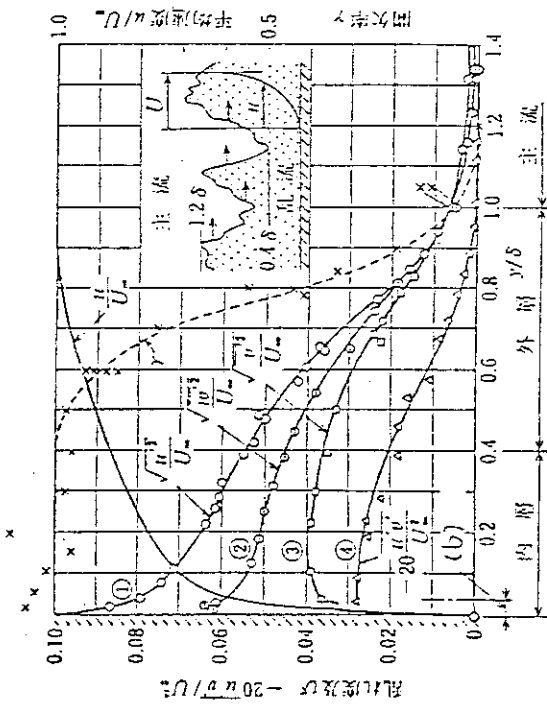
(7) 乱流境界層の構造

一様な流れの中に流れと平行に平板を置くと、平板に沿って速度境界層が形成される。層流から乱流へ遷移した後の流れは発達した乱流境界層となる。

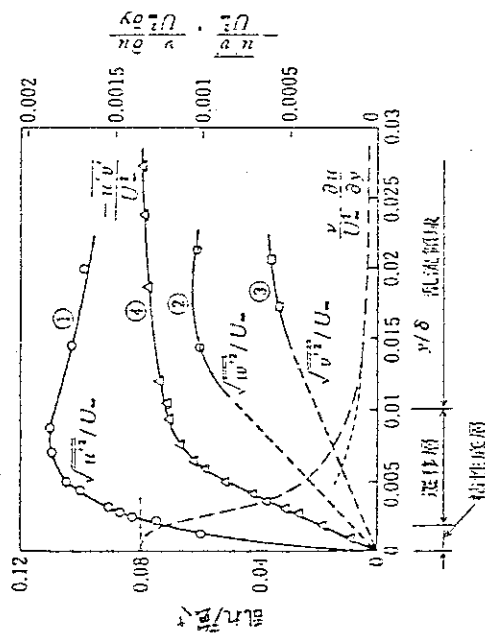
写真(1)は、平板と平行に流れと垂直に張られた水素気泡電極線によって可視化された境界層の各断面の流れの構造を示すものである。電極線と壁面との距離は、別図に速度分布と共に示されている。境界層の壁面近傍の速度分布は、壁法則として知られる $u^+ = f(y^+)$, ($u^+ = u/u_\tau$, $y^+ = u_\tau y/\nu$, $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$ 摩擦速度) によって良く表される。写真 A, B は粘性底層, C は緩和層, D, E は対数領域である。粘性底層には、局所的に流速の小さい部分と大きい部分が、スパン方向に交互に出現し、流れ方向に長く伸びた縦縞状の乱れの構造が特徴的である。このような分子粘性の影響を強く受けた乱れの構造はストリーク構造と呼ばれている。白い筋状の部分が低速のストリークでその隣りは高速のストリークである。緩和層では激しい流体の混合が観察され、更に壁面からの距離が大きくなると共にストリーク構造は消失し、Fig. (a) に示すように乱れのスケールは増大する。⁽⁷⁾

写真(2)は平板に垂直に張られた電極線から周期的に水素気泡を発生させて得られた瞬間的な可視化写真である。写真下部に平板が置かれている。乱流境界層の全般的な形状は、境界層厚さ δ 程度のスケールのゆっくりとした渦運動が次々に平板上を通過することによって形成されているように見える。境界層外縁は複雑に変形した3次元的な界面で形取られていて、境界層内の乱流部分と外側の非乱流部分とが明確に識別される。一方、境界層の壁面近くの流れは、壁面の存在によって強い拘束を受けている。壁面近傍で減速された流体が外層へ向かって間欠的に放出され (ejection) 引き続き高速の流体が壁面へ向かう運動 (sweep) が観察される。このような特徴的な流体運動はバースティング現象と呼ばれ、乱れの生成や乱流応力の発生機構を主として担っていることが知られている。

以上の結果を基にして乱流の構造を模式的に表したのが Fig. (b) で、低速のストリークに沿ってバースティング現象が現われる。⁽⁸⁾

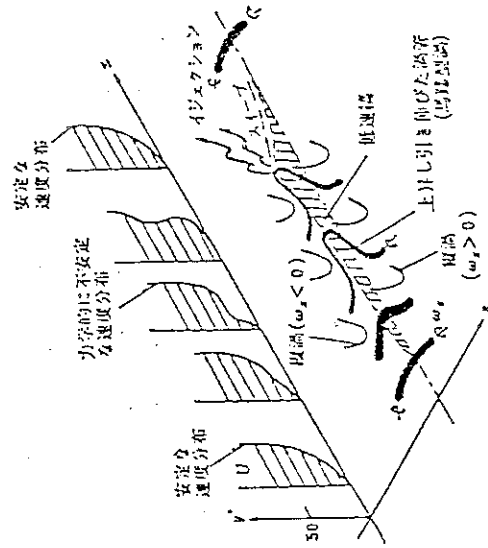


(i) (Klebanoff, 1955 による)



(ii) (乱れ強さは Klebanoff, 1955; レイノルズ数は Schubauer, 1945 による)

(a) 乱流の速度特性 (17)



(b) 壁面近傍の組織構造 (18)
Coherent Structure in Turbulent Flow

Velocity Characteristics of Turbulent Flow

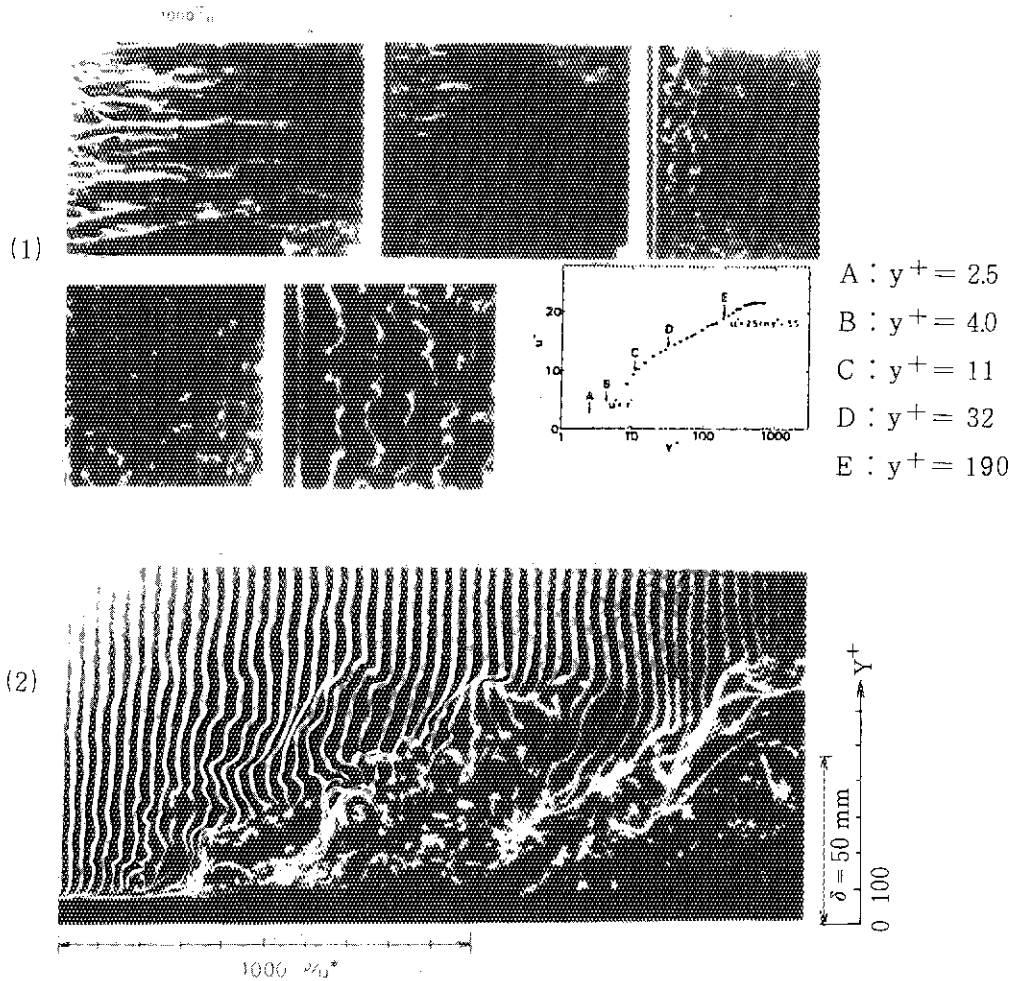


Fig. 3.10 乱流境界層の組織構造⁽¹⁷⁾

Coherent Structure in Turbulent Boundary Layer

(記号; $u^+ = u/u^*$, $y^+ = u^* y/\nu$, u^* = 摩擦速度, u = 平均速度, y = 壁からの距離, ν = 動粘性係数) -

可視化手法	水素気泡法
実験条件	1. 流体: 水 2. 圧力: 大気圧 3. 温度: 20℃ 4. 速度: 主流速度 $U = 0.204 \text{ m/s}$ 5. 関連無次元数: $Re_\theta = U\theta/\nu = 990$ 6. 代表寸法: 境界層厚さ $\delta = 50 \text{ mm}$, 運動量厚さ $\theta = 4.9 \text{ mm}$
撮影条件	1. カメラ形式: 35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ: 55mm F1.2 3. 使用フィルム: コダック Trx 4. 露光: F1.2, 1/500s 5. 撮影距離: 0.7 m 6. 照明方法: 500 W スポットライト 2個 7. 現像: 4倍増感 8. その他: スリット使用
製作	笠木伸英, 入谷陽一郎, 平田賢 (東京大学工学部)

3.3 圧縮性流れ

(1) タービン翼列の流れ

次の写真は、右下約 45° の方向から翼列に流入した常温常圧の空気が翼列通路を通過して左下約 10° の方向に流れ去るときの状況を可視化したものである。写真 (1.a) と (2.a) は、マッハウェンダー干渉計を用いて撮影した等密度干渉縞写真で、この縞を数えることによって流れ場の密度分布、及び速度分布などを求めることができる。一方、写真 (1.b) と (2.b) は、ナイフエッジを流れに平行に置いて撮影したシュリーレン写真である。シュリーレン法は衝撃波など密度変化の大きい流れの観察に適しており、写真に見られる黒い部分は密度変化が特に大きい領域である。

写真 (1.a) は翼列出口マッハ数 $M_2 = 0.68$ の亜音速における干渉縞写真である。一本一本の縞が明りょうに見られることから、流れははく離せず流れていることが分かる。また、翼型前線に見られる小さな黒縞リングの部分は流れのよどみ点を示しており、翼後縁から流れに平行に伸びた線は伴流 (ウェーク) を示している。

写真 (1.b) は (1.a) に対応するシュリーレン写真で、密度変化の大きい伴流のみが観察される。

写真 (2.a) は、翼列入口でマッハ数 $M_1 = 0.28$ の空気流が翼列通路内で膨張して、出口マッハ数 $M_2 = 1.54$ で流出するときの干渉縞写真である。翼列通路内の縞の数が写真 (1.a) よりも増加していることから、流れの速度が更に増加されているのが分かる。また、翼型後縁から少し離れたところで2本の衝撃波が発生しており、そのほぼ中央に伴流が観察される。伴流の方向は、写真 (1.a) に比べてかなり上方に偏向している。この流出方向の偏向は、超音速流の特徴の一つである。

写真 (2.b) は写真 (2.a) に対応するシュリーレン写真である。翼型後縁の上而と下面側に黒く広がった部分が膨張波で、その境界に伸びた線が衝撃波である。衝撃波は隣の翼に干渉することなく流れ去っている。また、それら衝撃波のほぼ中央に伴流が見られ、伴流は衝撃波を通過することに偏向しているのが観察される。

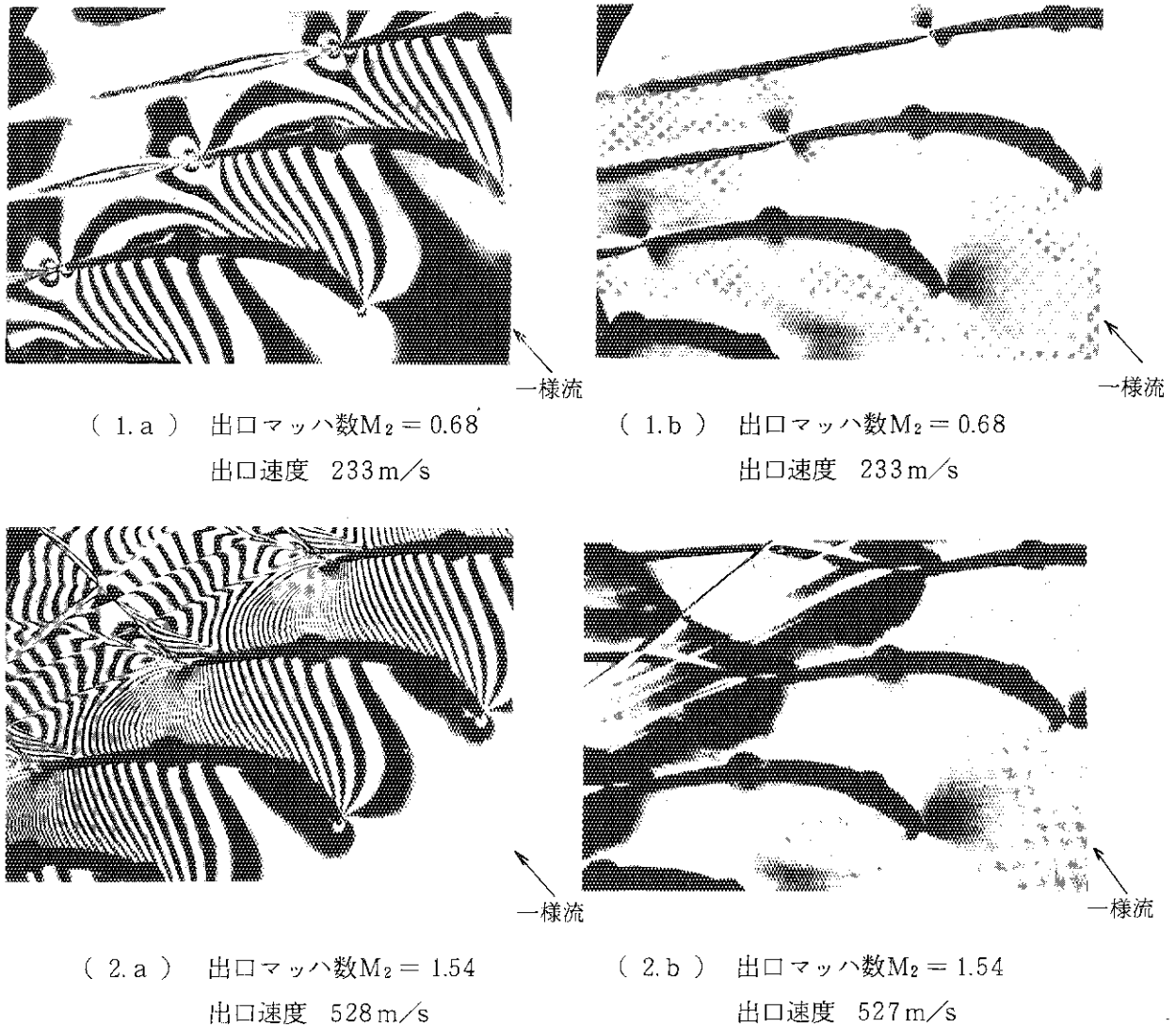


Fig. 3.11 タービン翼列の流れ⁽²⁾

Flow in a Turbine Cascade

可視化手法	(1. a, 2. a) マッハツェンダ-干渉法, (1. b, 2. b) シュリー-レン法
実験条件	1. 流体: 空気 2. 圧力: 入口大気圧 3. 温度: 18~19℃ 4. 速度: 出口速度 $U_2 = 233 \text{ m/s}, 528 \text{ m/s}$ 5. 関連無次元数: 出口マッハ数 $M_2 = U_2/a = 0.68, 1.54$ (a : 音速) 6. 代表寸法: 翼コード長 33.6 mm
撮影条件	1. カメラ形式: 一眼レフレックスカメラ (35 mm) 2. 撮影レンズ: 800 mm / F 8 3. 使用フィルム: X-RAY フィルム 4. 露光: 3 μs 4. 撮影距離: 5 m 6. 照明方法: マグネシウムスパーク光源 7. 現像: 富士レンドール使用 5 分間 8. その他:
製作	永山猛彦 (三菱重工(株)長崎研究所)

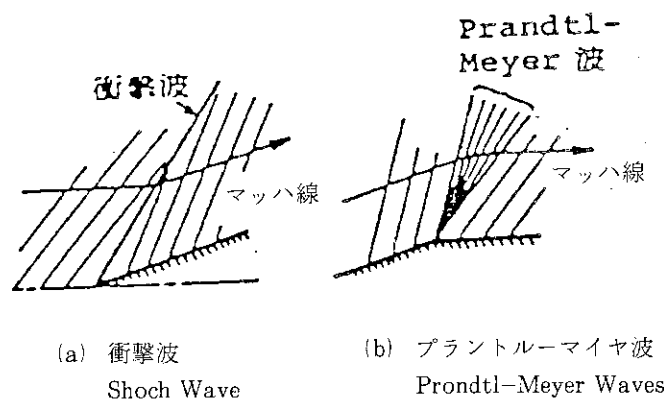
(2) くさび形平板翼まわりの流れ

大きな密度変化を伴う圧縮性流れでは、流れの境界壁が曲がったり、上流や下流で流速や圧力が変わると、そこで生じたごく僅かの流速や圧力の変化が次々と流れの中に伝わって流れ全体に影響を与える。この波は音波と呼ばれ、流れの速度 U に相対的に音速 a で球面状に伝わっていく。従って、流れの速度 U が音速 a よりも小さければ、音波は発生源を中心にして上流にも下流にも伝わっていくが、逆に音速 a よりも大きいと音波は発生源よりも下流にのみ伝わる。このとき、音波の包絡線を結んだ直線をマッハ線と呼ぶ。⁽²⁾

次の写真は、前半部くさび形、後半部が平行な2次元翼の回りの流れをマグネシウムせん光を光源にしたシュリーレン法により瞬間撮影したものである。実験には衝撃波管を使用しているので、流れには初期乱れや上流乱れはほとんど含まれていない。

写真(1)はマッハ数 $M = 0.5$ の亜音速流れのもので、後縁から上下交互に渦が放出される度に音波が発生し上流に伝わっていく様子をよくとらえている。この音波は翼面に沿って発達する境界層を乱すので、後縁の渦放出すなわち音波の発生源自身に影響を与えることになる。このときの渦の放出周波数すなわち音波の周波数 f はストローハル数にして $St = 6.2$ ($= U \cdot \ell / \nu$, ℓ : 翼弦長) である。

写真(2)はマッハ数 $M = 1.4$ の超音速流れのものである。壁面から無数のマッハ線が放出されており、前縁と後縁に斜め衝撃波、翼型の中央部付近にプラントル・マイヤ波、後縁部に膨張波が形成されているのが分かる。ここで斜め衝撃波は、下の図(a)に模式的に示すようにマッハ線が収束し重なり合って形成される圧縮波で、プラントル・マイヤ波は図(b)に示すように隣り合う同じ向きのマッハ線が互いに発散するように変化するとき形成される最も単純な膨張波である。



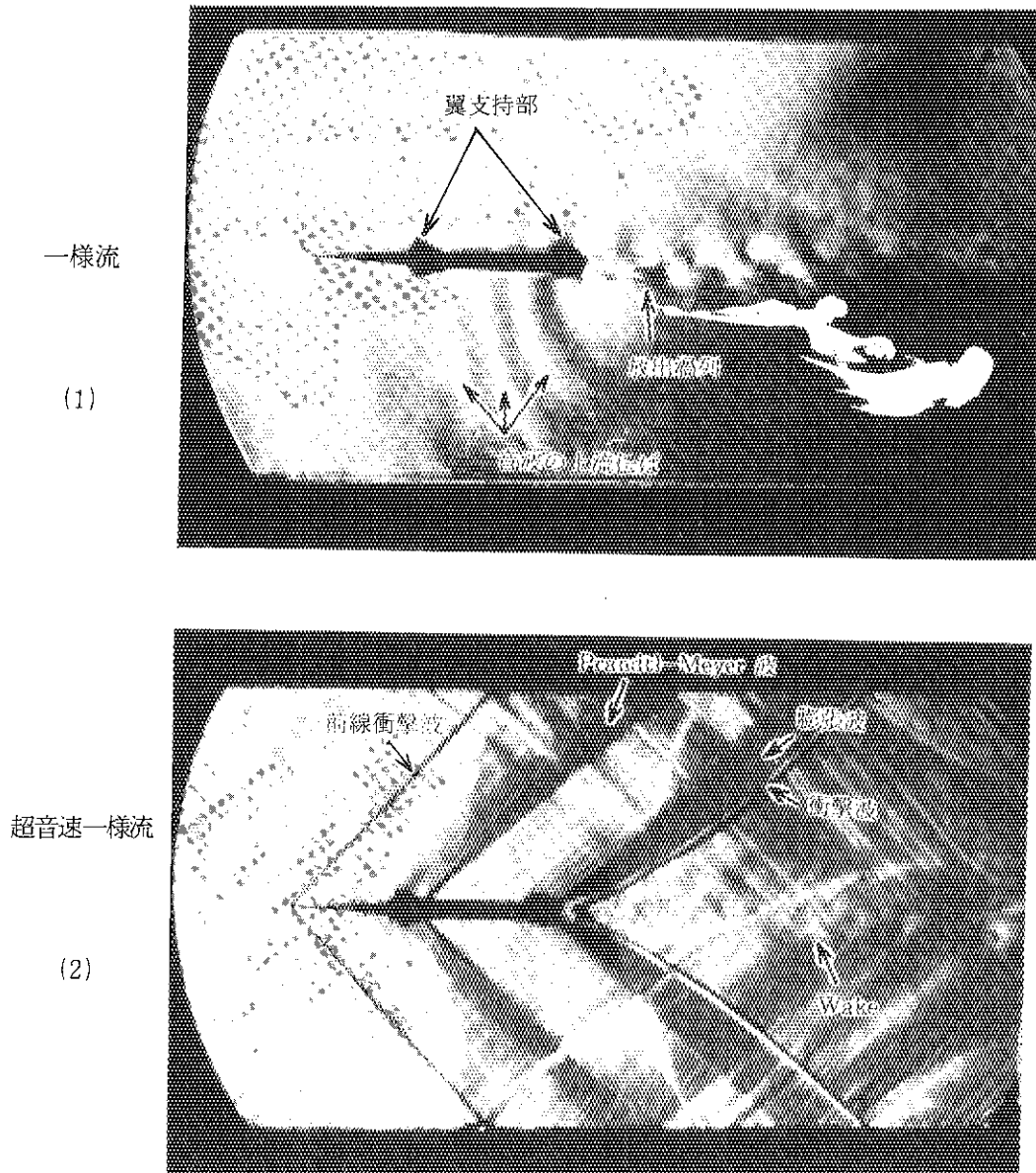


Fig. 3.12 くさび形平板翼回りの圧縮性流れ⁽⁵⁾

(1) 亜音速流：後縁渦放出と音波の上流伝ば

(2) 超音速流：斜め衝撃波及びプラントル-マイヤ波

Compressible Flow around a Sharp~ Wedged Plate

Subsonic Flow: Upstream Propagation of Acoustic Waves
Generated by Vortex Shedding at the Trailing Edge.

Supersonic Flow: Oblique Shock Waves and Prandtl-Meyer
Waves Constructed with Two Characteristic Families.

可視化手法	カラーシュリレン法
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：空気 2. 圧力：1.02 kgf/cm² 3. 温度：107℃ 4. 速度：U=216m/s 5. 関連無次元数：(1)M=U/a=0.5, Re=U·ϕ/ν=5.4×10⁵, St=f·c/U=6.2 (2)M=1.4, Re=3.8×10⁶ 6. 代表寸法：翼弦長 ϕ=59mm
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：300mm/F4.5 3. 使用フィルム：Kodak Ektachrome 400 (Daylight) 4. 露光：2 μsec (F4.5) 5. 撮影距離：∞ 6. 照明方法：マグネシウムせん光 7. 現像：ノーマル 8. その他：200 ϕ/焦点距離 2m シュリレン系
製作	大田英輔, 落合孝正 (早稲田大学理工学部機械工学科)

(3) 平面衝撃波と傾斜壁との干渉

静止気体中を伝ばする平面衝撃波が進行方向に対し傾斜した壁に入射する場合の反射形態は正常反射，単純マッハ反射，複合マッハ反射及び二重マッハ反射に分類される。

これらの発生は，入射衝撃波マッハ数 M_3 ，入射衝撃波の進行方向に対する壁面の傾斜角 θ_w 及び気体の熱力学的物性によって一義的に決まる。この写真には，代表的な三つの反射形態が示してあり，衝撃波の伝ば方向はいずれも入射衝撃波に垂直の方向である。(a)は正常反射で，一般に θ_w が大きい場合に起こる。(b)は単純マッハ反射で，入射衝撃波は壁面に達せずマッハ衝撃波が生じ，三つの衝撃波の交点（三重点）から滑り面が現れる。この反射形態は一般に M_3 が比較的小さく， θ_w が小さい場合に起こる。(c)は二重マッハ反射で，反射衝撃波上に折れ曲り点（キンク点）が生じ，そこから第二反射衝撃波が現われる。また，滑り面の巻き上りが見られる。この反射形態は M_3 がかなり大きく， θ_w がある特定の範囲の場合に起こる。

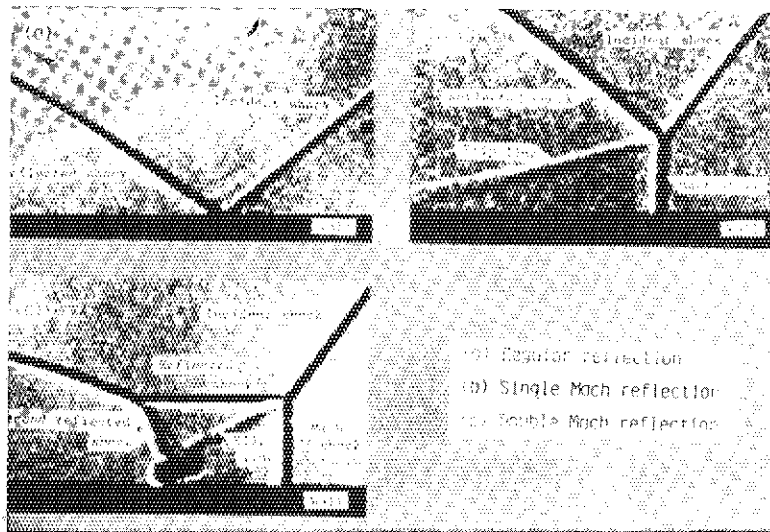


Fig. 3.13 平面衝撃波と傾斜壁との干渉⁽⁵⁾

Interaction of a Plane Shock Wave with an Inclined Wall

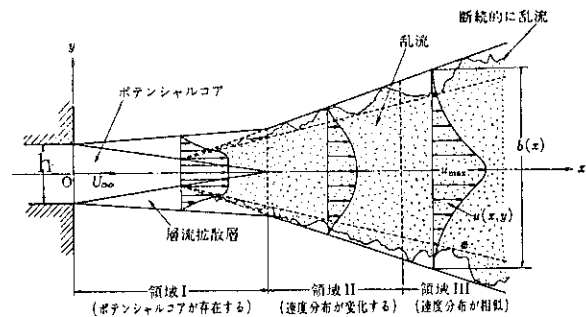
可視化手法	シャドウグラフ法
実験条件	1. 流体：炭酸ガス 2. 圧力：衝撃波上床圧力 30～80kPa 3. 温度：衝撃波の上流 298K (25℃) 4. 速度：衝撃波の伝ば速度 (1)455 m/s (2)384 m/s (3)958 m/s 5. 関連無次元数：入射衝撃波マッハ数 (1)1.68 (2)1.42 (3)3.54 6. 代表寸法：入射衝撃波の進行方向に対する壁面の傾斜角 (1)50° (2)36° (3)36°
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：50mm/F 3.5 3. 使用フィルム：ASA 400 4. 露光：F 3.5, 露光時間 13ns 4. 撮影距離：0.3 m 6. 照明方法：ジャイアントパルスルビールーザ (波長 6943 Å, 出力 50 MW) 7. 現像：増感現像 8. その他：シャドウグラフ法
製作	松尾一泰 (九州大学総合理工学研究所)

3.4 噴流

(1) 2次元自由噴流のポテンシャルコア部

スリットから一様な流速 U_∞ で静止流体中に噴出する噴流を2次元自由噴流と呼ぶ。自由噴流は壁面の制約を受けないため非常に不安定で、 $Re = U_\infty h / \nu \approx 30$ で乱流に遷移する。乱流噴流は、その速度分布から下図に示すように領域Ⅰのポテンシャルコア部、Ⅱの遷移域、Ⅲの発達した領域に分けられる。領域Ⅰのポテンシャルコア周辺には、静止流体を粘性の作用で噴流中に引き込む層流拡散層が存在する。層流拡散層は $Re_x = Ux / \nu = 7 \times 10^4$ で乱流拡散層に遷移する⁽²⁾

この写真は、 $Re = 520$ におけるポテンシャルコア部の流れを、噴出口出口とそれから少し離れた所に張った細線から水素気泡を発生させて可視化したものである。噴出直後の速度分布はほぼ一様で下流に行くにつれて層流拡散層が広がりポテンシャルコア部が狭まっているのが分かる。なお、このときの条件では、層流拡散層はスリット出口より約1.5 m 下流まで維持される。



2次元自由噴流の流れ構造⁽²⁾

Flow Structure of Plane Free Jet

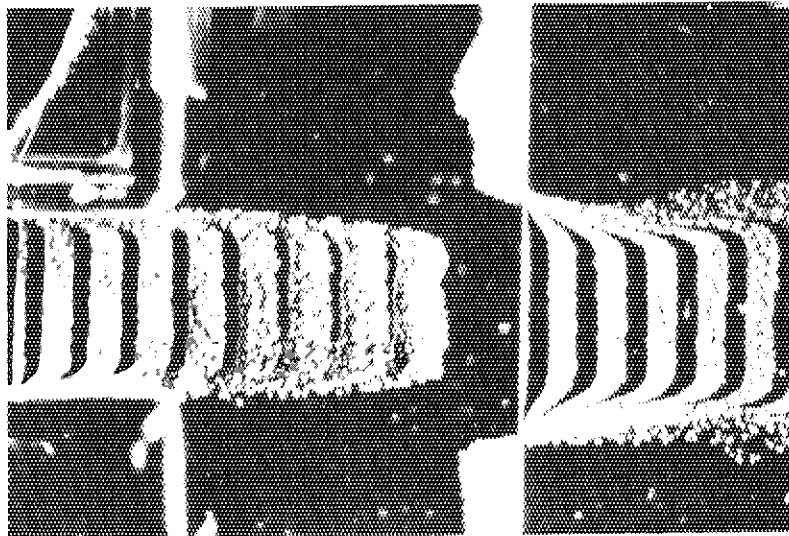


Fig. 3.14 2次元自由噴流のポテンシャルコア部の速度分布⁽⁵⁾

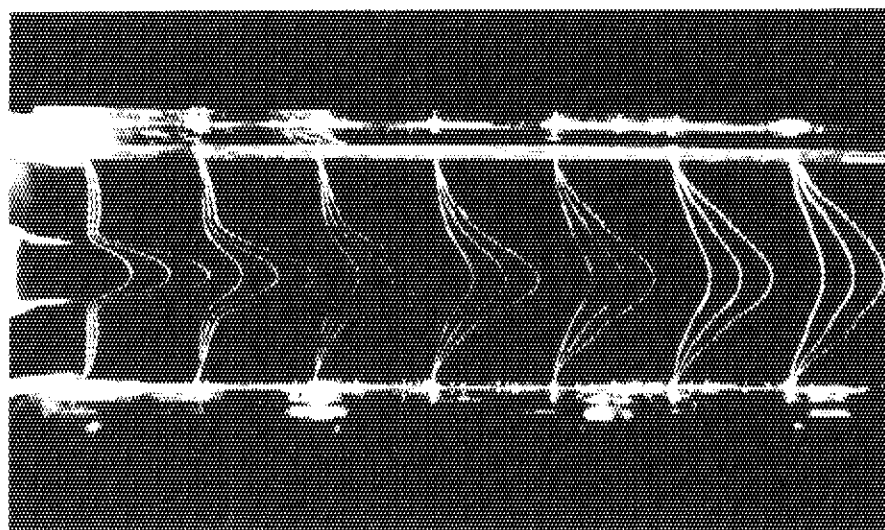
Velocity Distribution in Potential Core Region of Plane Free Jet

可視化手法	水素気泡法		
実験条件	1. 流体：水		
	2. 圧力：766mmHg	3. 温度：24℃	
	4. 速度：U = 4.3 cm/s		
	5. 関連無次元数：Re = Uh / ν = 520		
	6. 代表寸法：出口幅 h = 1.1 cm		
撮影条件	1. カメラ形式：35mm 1眼レフ		
	2. 撮影レンズ：標準サイズ F 1.8 接写リング PK-1, PK-2	3. 使用フィルム：ASA 400	
	4. 露光：F 1.8 / 1 / 60s	5. 撮影距離：0.18 m	
	6. 照明方法：ストロボ × 2台		
	7. 現像：標準		
	8. その他：		
製作	中山泰喜（東海大学工学部）		

(2) 2次元せん断流れの混合

平均流速 U_1 の2次元流れに平行に、一様な流速 U_2 ($>U_1$)で噴き出した自由噴流は、その境界面付近において速度の不連続を緩和するよう周囲の流体に噴流の運動エネルギーの一部を与えて二つの流れが混合する領域を形成する。この混合領域は下流に行くに従って広がり、速度の遅い周囲流体は噴流に引き込まれていく。

この写真は、平均流速 $U_1 = 0.25 \text{ cm/s}$ の2次元ポアズイユ流中にノズル径 $d = 15 \text{ mm}$ の円形ノズルから速度 $U_2 = 2 \text{ cm/s}$ で噴き出した円形噴流の流速分布を水素気泡で可視化したものである。噴流が自由噴流の場合、ノズル出口から約3.5m下流までポテンシャルコア部は維持されるが、この場合には流路壁面に拘束されるために周囲流体との混合が速やかに行われ、ノズル出口からそれほど遠くないところですでに放物線状の層流速度分布になっている。

Fig. 3.15 2次元せん断流れの混合⁽⁵⁾

Mixing of Two-dimensional Shear Layer

可視化手法	水素気泡法
実験条件	1. 流体：0.01%食塩水 2. 圧力：大気圧 3. 温度：20℃ 4. 速度： $U_1 = 0.25 \text{ cm/s}$, $U_2 = 2 \text{ cm/s}$ 5. 関連無次元数： $Re = U_2 \cdot d / \nu = 300$ 6. 代表寸法：ノズル径 $d = 15 \text{ mm}$
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35 mm) 2. 撮影レンズ：28 mm / F 3.5 3. 使用フィルム：TRI-X, ASA-400 4. 露光：F 4, ストロボ同調 5. 撮影距離：0.35 m 6. 照明方法：ストロボスリット光線 7. 現像：標準現像 8. その他：
製作	中山泰喜 (東海大学工学部)

(3) 噴流の壁面付着現象

下の写真は、中央に黒く写っている円柱の上面から噴出する2次元噴流をドライアイスの白煙で可視化したものである。噴流は噴出口からの角度にして120°前後の位置まで円柱表面に付着して流れ、その後はく離している。これは、円柱表面上に乱流境界層が形成され、境界層内部の圧力勾配により周囲流体を引き込んで、境界層は成長を続け、ついにははく離に至る現象である。このような噴流の壁面付着現象を生じる作用はコアンダ効果と呼ばれ、写真に見られる乱流付着は特性レイノルズ数 $Re^* = U_j \sqrt{Rh/2} / \nu > (1.4 \sim 3.5) \times 10^4$ において現れる。

ここに、 U_j は噴流の噴出速度、 R は円柱半径、 h は噴流口の高さである。

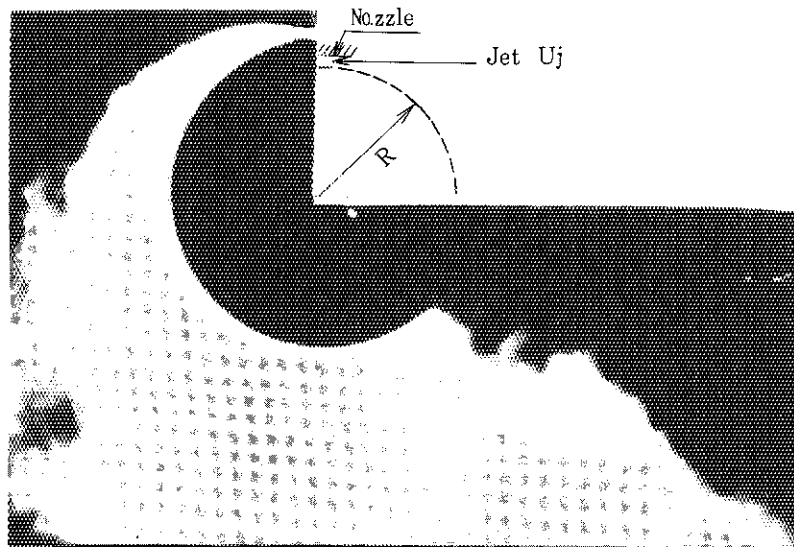


Fig. 3.16 コアンダ効果（壁面噴流）⁽²³⁾

Adherence of Wall Jet on Circular Cylinder Caused by Coanda Effect

可視化手法	ドライアイス
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：ドライアイス白煙 ($O_2 + H_2O$) と空気 2. 圧力：大気圧 3. 温度：室温 4. 速度：$U_j = 20 \text{ m/s}$ 5. 関連無次元数：$Re^* = U_j \sqrt{hk/2} / \nu = 1.4 \times 10^4$ 6. 代表寸法：$h = 3.175 \text{ mm}$, $R = 50.8 \text{ mm}$
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：135mm/F 4.8 3. 使用フィルム：TRI - X 4. 露光：F 4.8, 1/250s 5. 撮影距離：2 m 6. 照明方法：フッドライト (500W) 2個 7. 現像：通常 8. その他：
製作	鳥居薫 (横浜国立大学工学部)

(4) 流体素子内の流れ

狭い空間内に流体を噴出させるとき、噴流に何らかの外乱を与えると、噴流は周囲の流体を巻き込みながら偏向して流れる。下の写真は流体素子内の流れをポリスチレン粒子で可視化したものである。流体素子内に流入する噴流は、右側制御ノズルから与えられる弱い流れにより偏向し、周囲の流体を巻き込みながら左側通路を流れる。そのため、Bernoulliの定理により左側の通路の圧力が右側通路のそれよりも低くなり、噴流は更に左に片寄る。結局、噴流は左側の壁に付着し、以後はその状態を安定に保つ。このような付着現象を生じる作用をコアンダ効果といい、流体素子ではこの現象を利用して、主噴流より小さなエネルギーの制御流を加えることにより主噴流の流れを切り替えることができる。

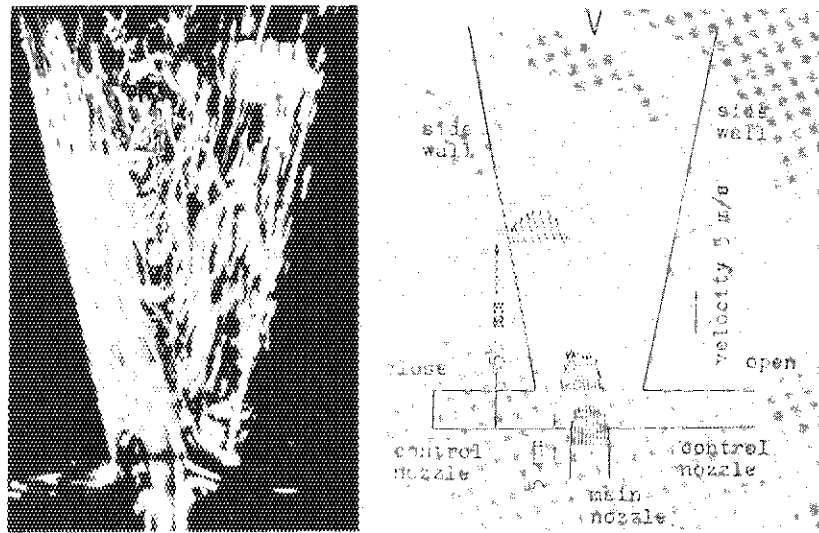


Fig. 3.17 側壁付着型純流体素子における流れ⁽²⁴⁾

Flow in a Wall Attachment Fluidic Element

可視化手法	トレーサ法（ポリスチレン粒子）
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：水 2. 圧力：主ノズル供給（ゲージ）圧, $15.7 \times 10^3 \text{ Pa}$, 3. 温度：$20^\circ\text{C}$ 4. 速度：主ノズル平均流速 $U = 5.5 \text{ m/s}$ 5. 関連無次元数：$Re = U \cdot d / \nu$ 6. 代表寸法：主ノズル幅 $d = 1 \text{ mm}$
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ（35 mm） 2. 撮影レンズ：50 mm / F 3.5 3. 使用フィルム：ASA 400 4. 露光：F 1.7, 1S 5. 撮影距離：100 mm 6. 照明方法：500 Wクセノンラップ集光照明 7. 現像：普通現像 8. その他：接写リング
製作	中谷登（大阪大学工学部）

3.5 物体回りの流れ

(1) 円柱回りの流れ

一様な流れ U_{∞} の中に物体を置くと物体表面上に境界層が形成され、境界層内部の流体粒子に作用する粘性力と慣性力のバランスによって物体回りの流れは色々に変化する。次の写真(1)と(2)はグリセリン水溶液、(3)と(4)は水を使用し、それぞれにアルミ粉を懸濁させて円柱回りの流れを可視化したものである。

写真(1)にレイノルズ数 $Re = 0.038$ ($=U_{\infty}d/\nu$, d = 円柱直径)における流線模様を示す。 $Re \ll 1$ の流れは、慣性力の作用を省略したストークスの式で近似することができるので、ストークス流れと呼ばれる。ストークス流れの流線模様はポテンシャル流れと非常に良く似ており、円柱のように前後対称な形状では写真に見られるように流線模様も前後対称となる。

Re 数が1の程度よりも大きくなると慣性力の作用が無視できなくなり、流れはナビエ・ストークスの式に支配される。写真(2)に $Re = 1.1$ における流線模様を示す。この程度の Re 数ではまだ粘性の作用が強いため流れのはく離は起こらないが、流線模様は前後非対称になっている。

Re 数が約6以上になると、流れを物体表面に止めようとする粘性力の作用よりも慣性力(円柱の場合には遠心力)の作用が大きくなり、流れははく離して物体背後に後流域を形成する。写真(3)に $Re = 26$ における流線模様を示す。円柱背後に後流域が明りょうに見られ、そこに一对の渦巻を生じているのが観察される。この渦巻は $Re \approx 40$ まで維持され、その長さは $Re = 6 \sim 40$ の範囲で Re 数に比例して大きくなる。

Re 数が約40以上になると円柱背後の後流域は不安定になって揺れ動き始め、それに伴って後流域の一对の渦巻は上下非対称になり、交互に後方に流れ去るようになる。このような渦をカルマン渦と呼ぶ。写真(4)は $Re = 55$ において発生したカルマン渦を可視化したものである。カルマン渦の発生周期 f (1/s)はストローハル数 $Sh = f d/U$ で整理され、従来の実験によれば $Re = 55$ のとき $Sh \approx 0.12$ ⁽⁵⁾すなわち約30秒間隔で渦が放出される。

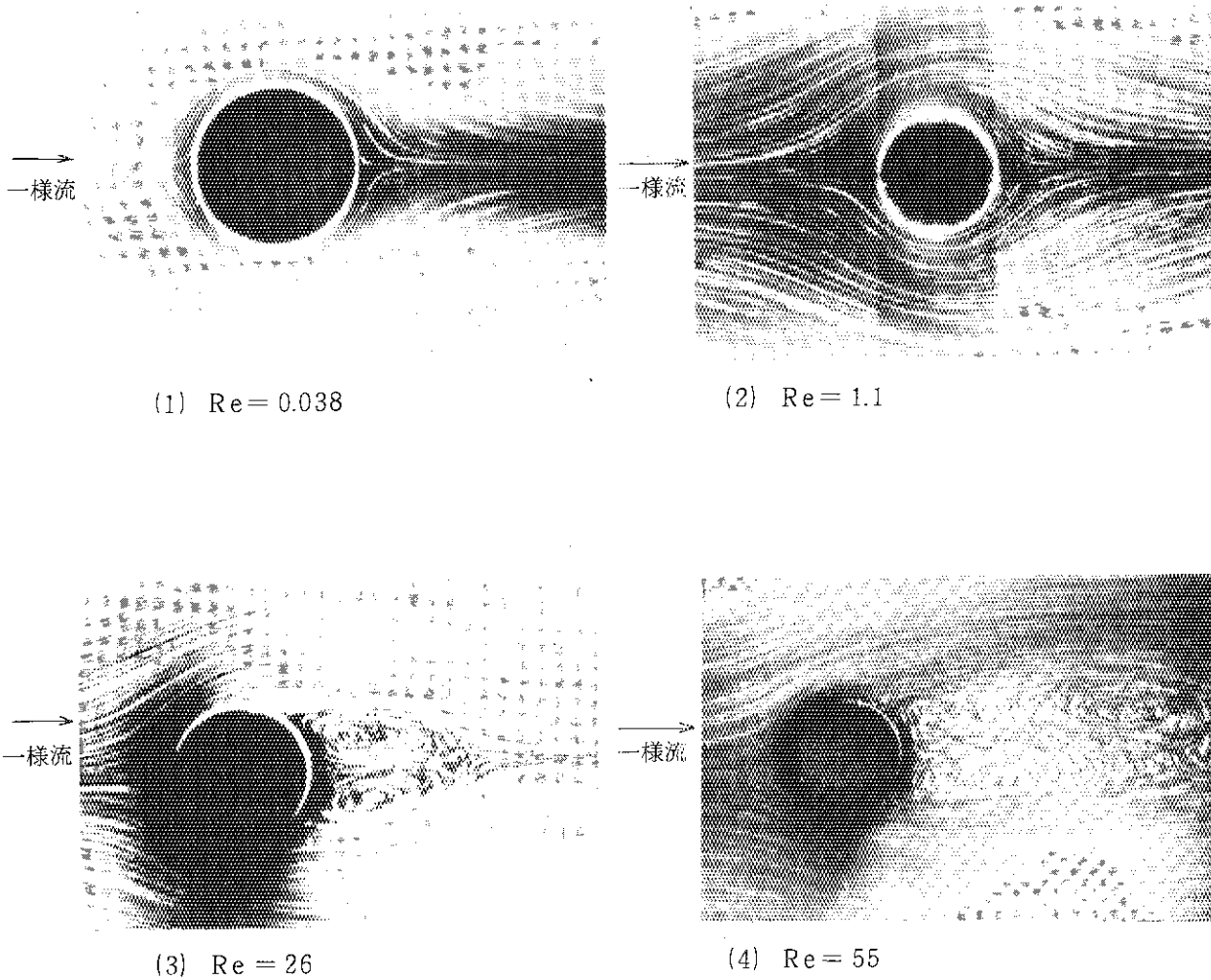


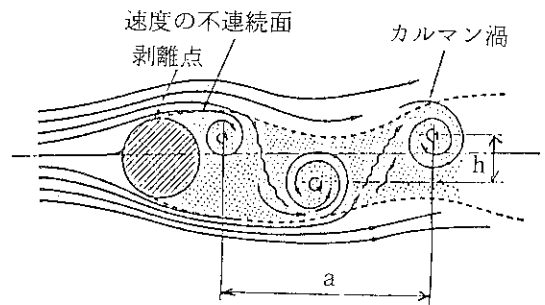
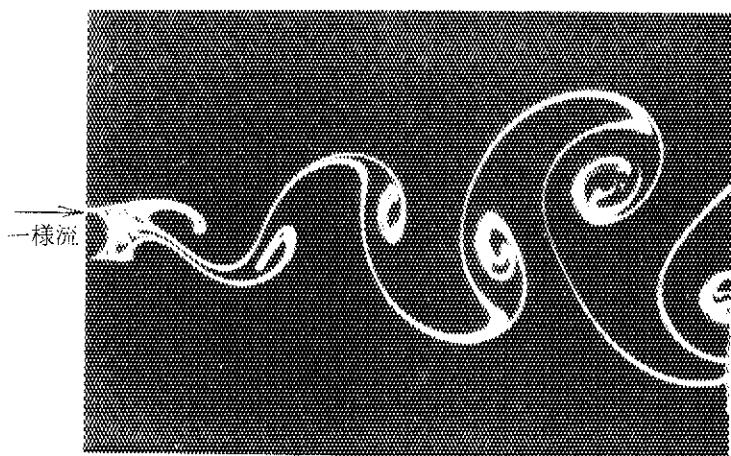
Fig. 3.18 円柱回りの流れ⁽⁵⁾
Flow Around a Circular Cylinder

可視化手法	懸濁法 (アルミ粉)
実験条件	1. 流体: グリセリン水溶液 (写真1, (2)), 水 (写真(3), (4)) 2. 圧力: 大気圧 3. 温度: 18℃ ((1), (2)) 4. 速度: $U = 0.25 \text{ cm/s}$ 5. 関連無次元数: $Re = Ud/\nu = 0.038, 1.1, 26, 55$ 6. 代表寸法: 円柱直径 $d = 1 \text{ cm}$ 7. 20℃ ((3), (4))
撮影条件	1. カメラ形式: 35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ: 180~135mm/F2.8~3.5 3. 使用フィルム: ASA 32, 36, 200 4. 露光: F2.8, 90s 5. 撮影距離: 0.3~0.5m 6. 照明方法: 1kwプロジェクタ×1~2台, 又は300wプロジェクタ×4台 7. 現像: 標準 8. その他: ペローズアタッチメント使用
製作	種子田定俊 (九州大学応用力学研究所)

(2) カルマン渦列

一般に柱状物体の後流はレイノルズ数 Re が約 40 以上になると不安定になり、下図に模式的に示すように物体背後から交互に渦を放出して千島状の渦列を形成する⁽²⁶⁾。この渦列はカルマン渦列と呼ばれ、渦の間隔 a と列間の距離 h は $h/a = 0.28$ の関係がある。また、カルマン渦は周期的に発生するため、物体は周期的な圧力変動を受ける。そのときの振動数が物体の固有振動数と一致すると大きな振動や騒音を引き起こすので注意を要する⁽²⁷⁾。

この写真は、 $Re = 140$ において発生した円柱後方のカルマン渦列を電解沈澱法で可視化したもので、白い筋は流脈を示している。このときのストローハル数は $St = 0.19$ で⁽²⁵⁾ 約 4 秒間隔でカルマン渦が放出される。但し、カルマン渦列は非定常流なので、可視化の方法により流れ模様が大きく異なることを付記しておく。



カルマン渦列⁽²⁶⁾
Schematic Drawing of Karman Vortex Street

Fig. 3.19 カルマン渦列⁽²⁸⁾
Karman Vortex Street

可視化手法	電 解 沈 澱 法	
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：大気圧 4. 速 度： $U = 1.5 \text{ cm/s}$ 5. 関連無次元数： $Re = Ud/\nu = 140$ 6. 代表寸法：円柱直径 $d = 1 \text{ cm}$	3. 温 度： 17°C
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 照明レンズ：135mm/F 2.8 4. 露 光：F 2.8, 1/15s 6. 照明方法：1kw プロジェクタ × 2台 7. 現 像：増感 8. その他：接写リング使用	3. 使用フィルム：ASA 200 5. 撮影距離：0.5 m
製 作	種子田定俊（九州大学応用力学研究所）	

(3) 翼型回りの流れ

流速 U の一様流中に迎角 α で翼弦長 ℓ の翼を置くと、翼に働く単位幅当たりの揚力 L は次式で表される。

$$L = C_L \frac{\rho}{2} U^2 \ell$$

ここに、 C_L は揚力係数で、その値は翼の形状、迎角、レイノルズ数等で定まるが、 $Re (= U \ell / \nu) > 3 \times 10^5$ では Re 数の影響は小さい。図(a)に代表的な翼型である NACA 2412 翼型の揚力特性、すなわち揚力係数 C_L と迎角 α の関係を示す。図において $\alpha = 0$ で C_L がゼロでないのは翼型に反りがあるためで、 $C_L = 0$ となる零揚力角は約 -2° である。 α が α_S のとき C_L は最大値を取り、 α をそれ以上増すと C_L が減少する。これは、翼上面の流れが前縁直後からはく離して翼上面の圧力が増加するためで、この状態を失速 (stall) と言い、このときの迎角 α_S を失速角と呼ぶ。この場合の失速角は $\alpha_S = 15^\circ$ である。

写真(1)~(5)は、NACA 2412 翼型回りの流れを煙流脈法で可視化したものである。

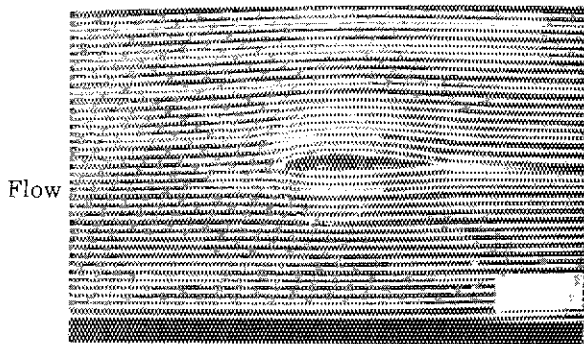
写真(1)は迎角 $\alpha = 0^\circ$ の場合で、写真に見られるように翼上下面の流れは翼面に沿って流れ、その流線はほぼ上下対称となっていることから揚力係数 C_L は非常に小さいことがわかる。このときの揚力係数 C_L は図(6)より約 0.2 である。

写真(2)は $\alpha = 5^\circ$ の場合で、翼の前縁付近において煙線は上面で密、下面で疎になっている。密のところは流速が速く負圧、疎のところは流速が遅く正圧となるため、前縁付近にかなり大きい揚力が働いていることが分かる。また、翼後方の後流域の幅が狭いことから、翼に働く抗力の小さいことが推察される。

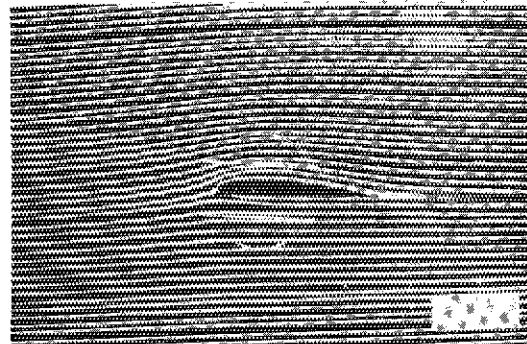
写真(3)は $\alpha = 10^\circ$ の場合で、翼上面において前縁あたりから煙線が乱れ始めている。これは翼上面の前縁で小さい層流はく離が起こるためで、はく離流は乱流になって再び翼面に付着するので失速には至らない。一方、後流の幅が広がっていることから、翼に働く抗力がかなり大きくなっていることが想像される。

写真(4)は失速直前の $\alpha = 15^\circ$ マイナスの状況である。流れは翼上面の前縁付近からはく離しているが、前縁部の上面で煙線がかなり密になっていることから、このあたりに大きい揚力が働いていると考えられる。

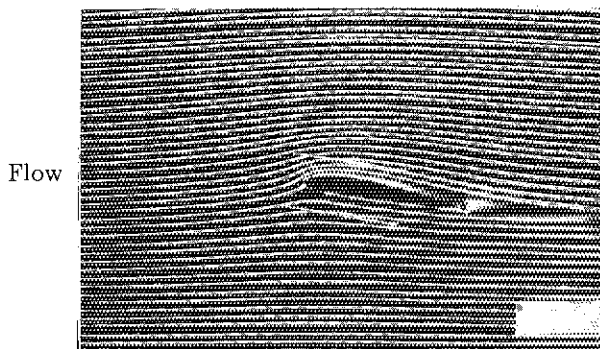
写真(5)は失速直後の $\alpha = 15^\circ$ プラスの状況で、流れは翼上面の前縁直後からはく離し、翼上面に大きいはく離域を形成している。また、写真には翼後方の煙線の揺れが写っており、この部分の流れが翼上面のはく離域から周期的に放出される渦によって振動していることが分かる。



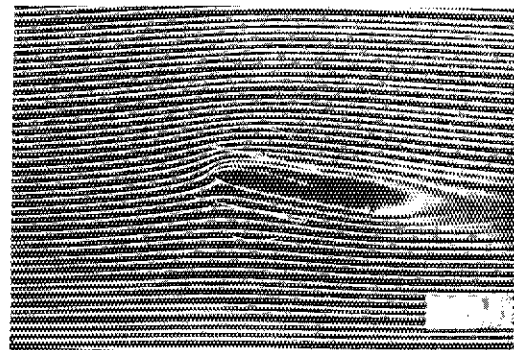
(1) $\alpha = 0^\circ$



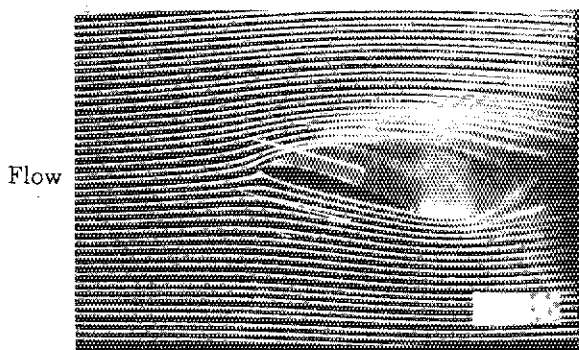
(2) $\alpha = 5^\circ$



(3) $\alpha = 10^\circ$



(4) $\alpha = 15^\circ$ マイナス



(5) $\alpha = 15^\circ$ プラス

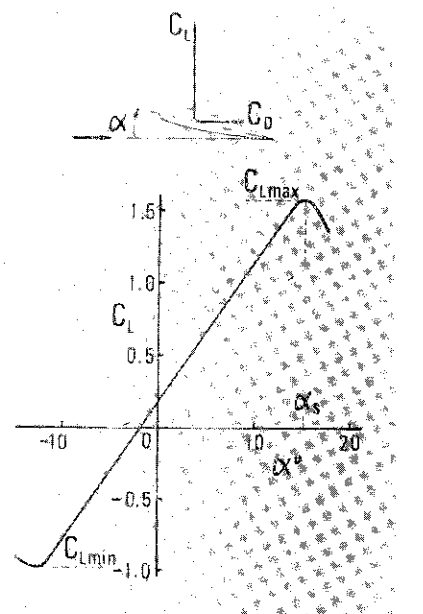


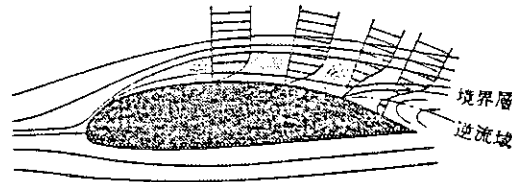
Fig. 3.20 翼型回りの流れと揚力特性⁽⁵⁾
Flow around a stationary Aerofoil

(a) 迎角 α と揚力係数 C_L の関係 - 揚力特性

可視化手法	煙 流 脈 法
実験条件	1. 流 体：空気 2. 圧 力：大気圧 3. 温 度：20℃ 4. 速 度：U=8.0 m/s 5. 関連無次元数： $Re = U \ell / \nu = 2.11 \times 10^5$ 6. 代表寸法：翼弦長 $\ell = 400\text{mm}$
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ 2. 撮影レンズ：55mm/F 1.2 3. 使用フィルム：ASA400 4. 露 光：F 1.2, 1/8 s 4. 撮影距離：2.3 m 6. 照明方法：150w スポットライト（多数） 7. 現 像：普通現像 8. その他：
製 作	伊藤光（明治大学工学部）

(4) 翼回りの速度分布

下の写真は、翼面に設置した針状電極とそれに対向して設置したL字形線状電極を翼回りに8カ所配置して、火花追跡法で翼回りの流速分布を可視化したものである。このときの迎角は13°で失速角(15°)には達していない。写真に見られるように翼前縁から後縁にかけて境界層の発達状況がよく現われており、後縁付近で流れははく離しているのが見られる。このような状況を模式的に表したのが下の図である。⁽²⁹⁾



翼回りの流れ⁽²⁹⁾

Schematic Drawing of Flow Around a Aerofoil

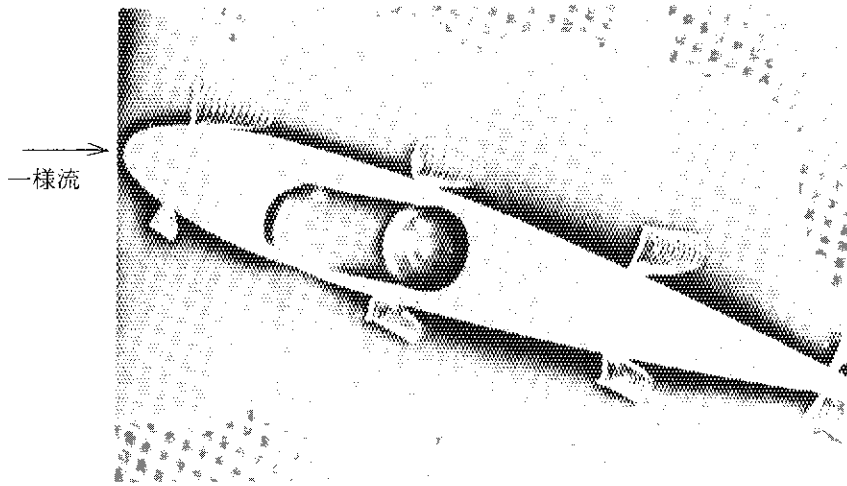


Fig. 3.21 静止翼回りの流れ⁽³⁰⁾

Flow around a Stationary Aerofoil

可視化手法	火花追跡法	
実験条件	1. 流体：空気	3. 温度：20℃
	2. 圧力：大気圧	翼型：NACA-0015(失速角15°)
	4. 速度：U=20 m/s	印加電圧：80 kv
	5. 関連無次元数：Re = U · L / ν = 2.1 × 10 ⁵	周波数：14.5 kHz
	6. 代表寸法：翼弦長L = 150 mm	
	撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ(35mm)
	2. 撮影レンズ：105 mm / F 3.5	3. 使用フィルム：ASA-200
	4. 露光：F 5.6 / 1/15s	5. 撮影距離：~1 m
	6. 照明方法：スポットライト(500 w)1ヶ	
	7. 現像：増感	
	8. その他：接写リング使用	
製作	栗原利男(東京都立航空工専航空原動機科)	

3.6 管水路

(1) 管入口部の流れ

管入口部における圧力損失係数は、下図に示すように入口部の形状及び流体の流入角度により大きく異なる。⁽²²⁾上の写真は下図に対応する入口形状を持つ管入口部の流れを水素気泡で可視化したものである。

写真(1)は管入口端を切断したままの状態のときの流れである。入口部で流れははく離し縮流を生じている。この縮流部では流れの速度変化が大きいため、運動エネルギーの損失が大きい。写真(2)は管路を傾けたときの流れを可視化したもので、流れのはく離は管入口部の片側にしか発生しないが、はく離域が大きいため、かなり大きな縮流を生じている。写真(3)は、入口部に丸みをつけた場合のもので、流れのはく離がほぼ完全に抑制されているのが分かる。

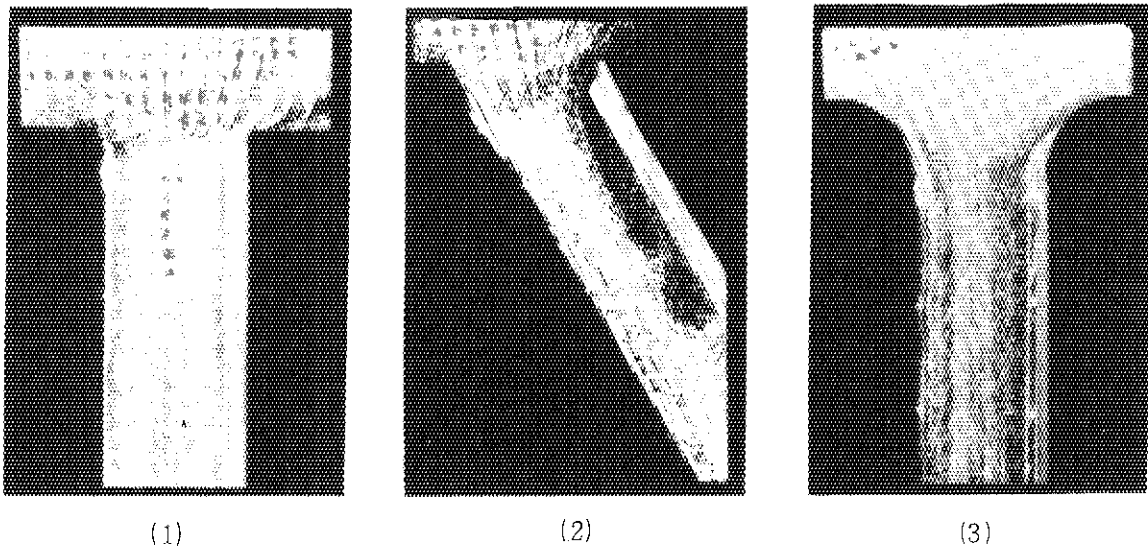
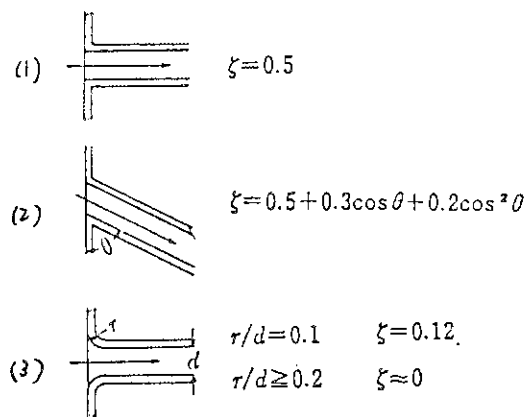


Fig. 3.22 管入口部の流れ⁽⁵⁾

Flow in Channel Inlet



管入口部の圧力損失係数⁽³¹⁾

Pressure Loss Factor at Channel Inlet

可視化手法	水素気泡法		
実験条件	1. 流体：水		
	2. 圧力：大気圧	3. 温度：20℃	
	4. 速度： $U = 3.4 \text{ cm/s}$		
	5. 関連無次元数： $Re = Ud/\nu = 370$		
	6. 代表寸法：流路幅 $d = 1.1 \text{ cm}$		
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ		
	2. 撮影レンズ：標準レンズ F 1.8, 接写リング PK-1 PK-2	3. 使用フィルム：ASA 400	
	4. 露光：F 2.8 1/2, 1/60s	5. 撮影距離：0.16m	
	6. 照明方法：ストロボ×2台		
	7. 現像：標準		
	8. その他：		
製作	中山泰喜（東海大学）		

(2) ベンドの流れ

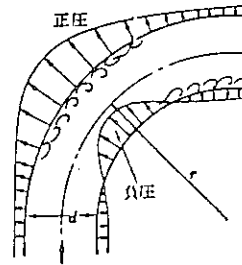
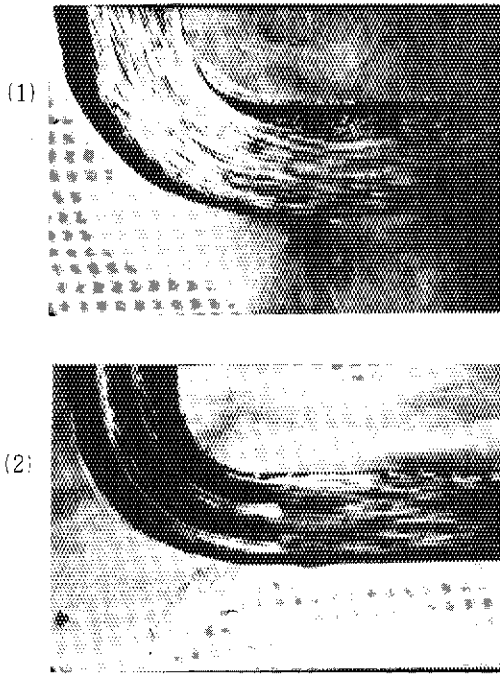
流体がベンドを通過するとき、流体に遠心力が作用するため、下図に示すように曲がりの外側では流れ方向に圧力は上昇し、内側では曲がり部で負圧になる⁽³²⁾。その結果、下の写真(1)に見られるように、曲がりの外側では曲がり前方で流れのはく離が起こり、内側では曲がった後で流れのはく離する。流れのはく離すると流れは収縮して大きな圧力損失を生じる。写真(2)は曲がり部に案内羽根を設けたときの流動状況を可視化したもので、流れのはく離が抑制されているのが分かる。このようにはく離を抑制することで、圧力損失をかなり低くすることができる。案内羽根の取り付け位置は次のとおりである⁽³³⁾

$$r_{s1} = (r_o^n r_i) ^{1/(n+1)}, r_{s2} = (r_o^{n-1} r_i^2) ^{1/(n+1)}, \dots, r_{sn} = (r_o r_i^n) ^{1/(n+1)}$$

r_s : 案内羽根曲率半径, n : 案内羽根枚数

r_o : ベンド外壁半径 ($= r - \frac{d}{2}$), r_i : ベンド内壁半径 ($= r + \frac{d}{2}$)

r : ベンド中心線の曲率半径, d : 流路幅



ベンド内圧分布⁽³²⁾
Pressure Profile in Bend

Fig. 3.23 ベンドの流れ⁽⁵⁾

Flow Pattern through Bend

可視化手法	表面浮遊法
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：水 2. 圧力：大気圧 3. 温度：21℃ 4. 速度：U = 10 cm/s 5. 関連無次元数：Re = Ud / ν = 2×10^3 6. 代表寸法：流路幅 d = 2 cm
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：50mm / F 1.4 3. 使用フィルム：ASA 400 4. 露光：F 11.0, 1/8sec 5. 撮影距離：0.45m 6. 照明方法：リフレクターランプ×2灯 7. 現像：標準 8. その他：
製作	中山泰喜（東海大学工学部）

(3) 2次元広がり流れ

境界層内の流体粒子は、壁に沿って流れるとき摩擦によってその速度を減じていくが、もし流れの方向に圧力が減少していれば、流体は圧力差によってその減速が補われるため、速度は減少せずに壁に沿って流れ続けることができる。しかし、広がり流れにおいては流れ方向に圧力が増加するため、流体粒子は圧力差と摩擦によって減速され急激にその速度を減じ、境界層厚さが増大する。そして、ついに壁面に接したところで速度勾配はゼロとなり、その下流では逆流を生じ流れははく離する⁽³⁴⁾。

下の写真は、一様流速Uで流入する2次元広がり流れの流動状況を水素気泡で可視化したものである。広がり部入口から境界層が発達し始め、下流において逆流を生じ流れがはく離している。はく離を生じない広がり角 α (rad)は $\alpha Re < 10$ で、レイノルズ数Reは広がり部入口幅bを代表寸法として $Re = U \cdot b / \nu$ で与えられる⁽³⁵⁾。従って、このときの条件では、はく離を生じない広がり角は約 6° である。

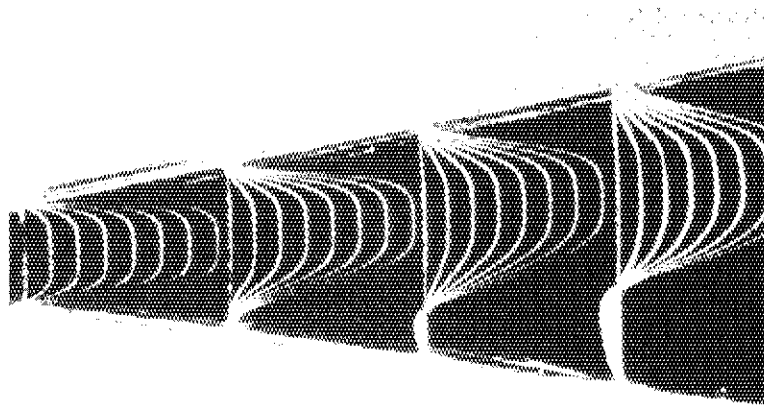


Fig. 3.24 2次元広がり流れ⁽⁵⁾

Two-dimensional Divergent Flow

可視化手法	水素気泡法	
実験条件	1. 流体：水（食塩水 0.006%） 2. 圧力：大気圧 4. 速度：U = 3.0 cm/s 5. 関連無次元数：Re = U · b / ν = 900 6. 代表寸法：広がり部入口 b = 30 mm, θ = 20°	3. 温度：20℃
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ（35 mm） 2. 撮影レンズ：55 mm / F 4, マクロ 4. 露光：F 4, ストロボ同調 6. 照明方法：ストロボスリット光 7. 現像：標準現像 8. その他：	3. 使用フィルム：TRI - X, ASA - 400 5. 撮影距離：0.53 m
製作	中山泰喜（東海大学工学部）	

(4) 開水路の流れ

静水深Hの開水路の流れは、波の伝ば速度 \sqrt{gH} と平均流速Uの関係、すなわち、フルード数 $F = U / \sqrt{gH}$ によって常流と射流に区別される。 $F < 1$ の流れが正常流、 $F > 1$ の流れが射流である。⁽³⁶⁾下の写真は射流から正常流に移行する様子を捕らえたものである。水路の勾配が急なところでは流速が波の伝ば速度より大きいため射流となっており、下流で勾配が緩やかになると流速が小さくなり正常流に移行する。正常流に移行する際に現われる水面の飛び上りを躍水と呼び、そこでは大規模で強烈な渦動を生じている。

ところで、開水路流れにおけるフルード数は圧縮性流体のマッハ数とよく対応している。そのため、圧縮性流体のアナロジーに浅底水路内の流れが使われる。このとき正常流、射流及び躍水はそれぞれ亜音速流、超音速流及びマッハ線に相当する。⁽³⁶⁾

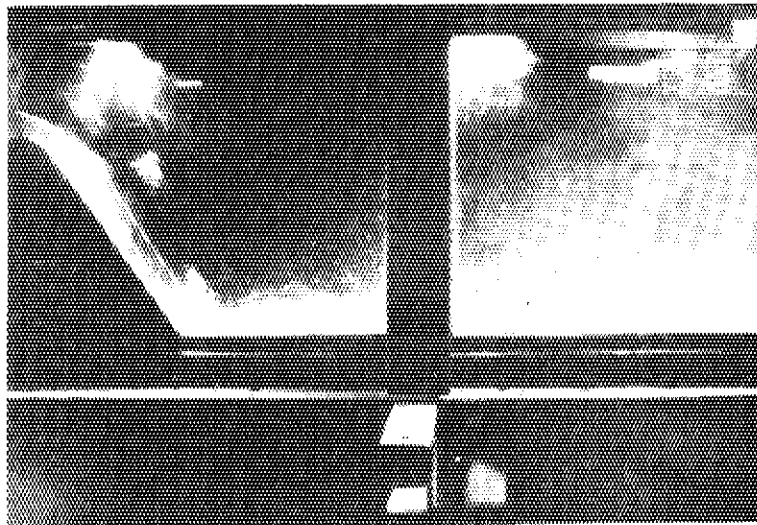


Fig. 3.25 正常流, 射流, 躍水⁽⁵⁾
Tranquil Flow, Rapid Flow and Hydraulic Jump

可視化手法	直接撮影
実験条件	1. 流体：水 2. 圧力：大気圧 3. 温度： 4. 速度： $U = 50 \text{ cm/s}$ 5. 関連無次元数： $F = U / \sqrt{gH}$ (H：静水深) 6. 代表寸法：
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：35mm/F2 3. 使用フィルム：ASA 400 4. 露光：F22, 1/60sec 5. 撮影距離：1m 6. 照明方法：ストロボ×4灯 7. 現像：標準 8. その他：
製作	中山泰喜（東海大学工学部），大田英輔（早稲田大学理工学部）

3.7 回転体と流体機械

(1) 回転円板の流れ

下図に模式的に示すように静止流体中で半径 r の円板が中心軸回りに一定の角速度 ω で回転するとき、円板近くの流体は円板に引きずられて回転し、同時に回転によってその流体は外周へ移動する。従って、円板近くの流体は渦巻き状に回転しながら外側へ向かって流れ出ることになる。更に流れの連続条件によって、流出した流体を捕うために円板の中心へ向かって外部から流体が流れ込み、ここに一つの循環流が形成される。このときの流れは $Re_w = \omega D^2 / 4 \nu \approx 3 \times 10^5$ まで層流が保たれ、それ以上になると乱流に遷移する。⁽³⁷⁾

下の写真は $Re_w = 1.9 \times 10^6$ における壁面せん断力の作用方向を油膜法で可視化したものである。油膜が塗布状態のままになっている領域は、せん断力の小さい領域で、層流状態にあることを示しており、渦巻状の油膜パターンが見られる外周部は乱流状態にある。油膜パターンは円周方向に対し約 $10 \sim 15^\circ$ 傾いている。

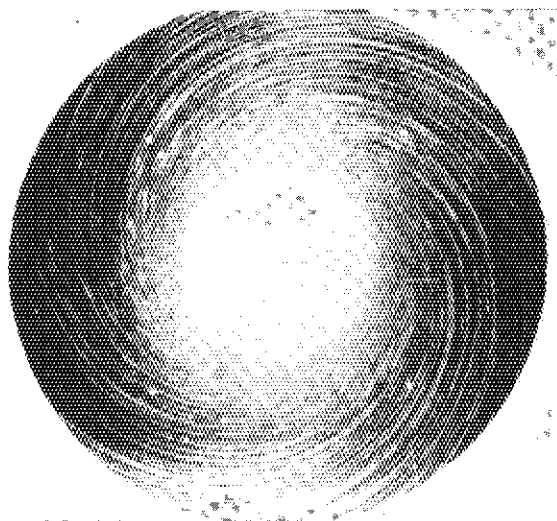
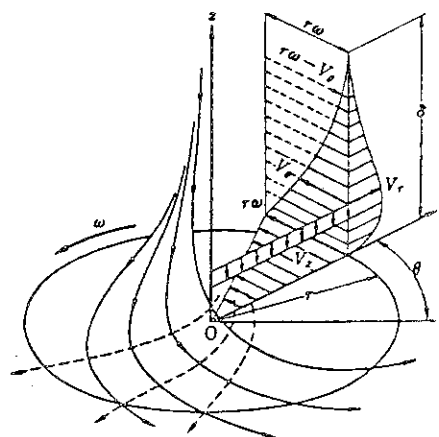


Fig. 3.26 回転円板の流れ⁽⁵⁾

Flow over Rotating Disk



回転円板回りの流れ⁽³⁷⁾ (但し Z 方向の寸法を拡大して示す)

— 流線, --- 円板に相対的な流線

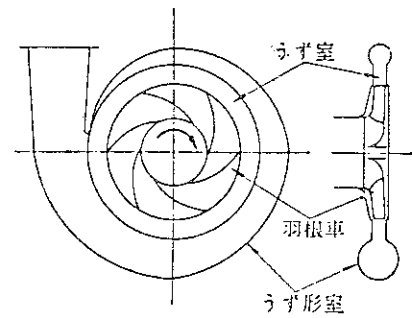
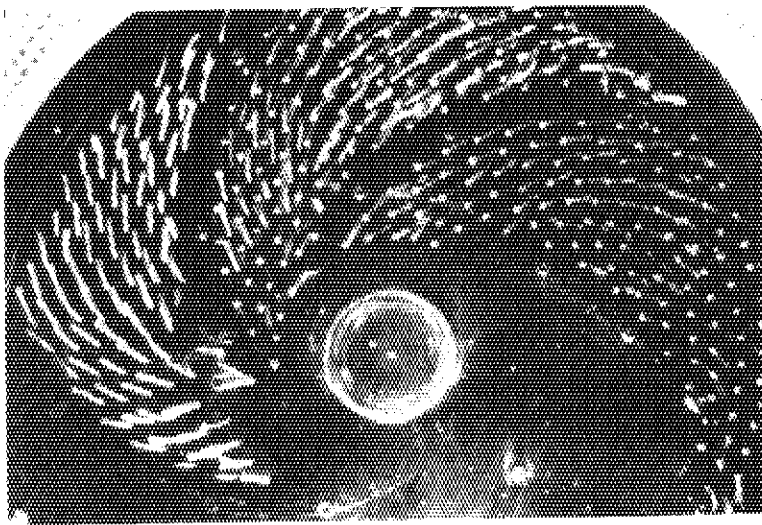
Schematic Drawing of Flow over Rotating Disk

可視化手法	油 膜 法
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：大気圧 3. 温 度：常温 4. 速 度：回転数 $N = 800 \text{ rpm}$ 5. 関連無次元数：レイノルズ数 $\text{Re}_w = \frac{D^2 \omega}{4 \nu} = 1.9 \times 10^6$ 6. 代表寸法：円板直径 $D = 300 \text{ mm}$
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：50mm / F 2 3. 使用フィルム：ASA100 カラーリバーサル 4. 露 光：F 11, 1/60sec 5. 撮影距離：0.7 m 6. 照明方法：写真電球 2灯 7. 現 像：標準 8. その他：
製 作	田古里哲夫（東京大学工学部）

(2) 渦巻きポンプ羽根車内の流れ

渦巻きポンプは、下図に示すように渦室とその内部に収められた羽根車と渦形室（ポリュートケーシング）で構成される。液体は羽根車の回転によってエネルギーを与えられ、更にポリュート内で速度エネルギーの一部が圧力エネルギーに変換されて高圧部へ送られる。⁽³⁸⁾

この写真は羽根車内の水の流動状態を羽根車の三つの区画についてタフト法で可視化したものである。左側の区画は吸い込み側側板に白糸を付け、右側の区画はハブ側に赤糸を付け、中央の区画は左右の区画と同じ糸を同じ面に取り付けている。このときの流量はポンプ最大流量の1/4である。タフトの挙動から、吸い込み側の羽根前進面において流れがはく離し、羽根の裏面では羽根に沿ってスムーズに流れているのが分かる。



渦巻きポンプ⁽³⁸⁾

Centrifugal Pump

Fig. 3.27 渦巻きポンプ羽根車内の流れ⁽⁵⁾

Flow around Impeller of Centrifugal Pump

可視化手法	タフト法	
実験条件	1. 流体：水 2. 圧力：5～8気圧 4. 速度：1200rpm 5. 関連無次元数： 6. 代表寸法：羽根車直径 230mm	3. 温度：14℃
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：マイクロ 4. 露光： 6. 照明方法：ストロボ回転同調 7. 現像： 8. その他：	3. 使用フィルム：フジカラーネガ 5. 撮影距離：50cm
製作	山柘雅信（関東学院大学）	

(3) 渦巻きポンプのポリュート内の流れ

渦巻きポンプのポリュート内の流れは、流量が設計流量 Q_0 よりも大きい場合と小さい場合とで著しく異なった流れを示すことが知られている。

この写真は、羽根車出口幅と等しい幅を持つ2次元ポリュートの壁面流線を油膜法によって可視化したものである。中央部の2円は羽根車外径と吸込管内径を示す。設計流量時 ($Q/Q_0 = 1.0$) には、流れははく離もせず、またポリュートの巻き始め (舌部) 先端のすき間を通して再循環もせず極めてスムーズに流れている。過小流量 ($Q/Q_0 = 0.6$) の場合には、ポリュートの巻き終り付近に流れのはく離が見られ、また舌部先端のすき間を通してかなりの量の再循環流があることが観察される。一方、過大流量 ($Q/Q_0 = 1.7$) の場合には、舌部すき間を通る再循環流れがほとんど見られないものの、ポリュートの内外壁に流れのはく離域が大きく広がっている様子が観察される。

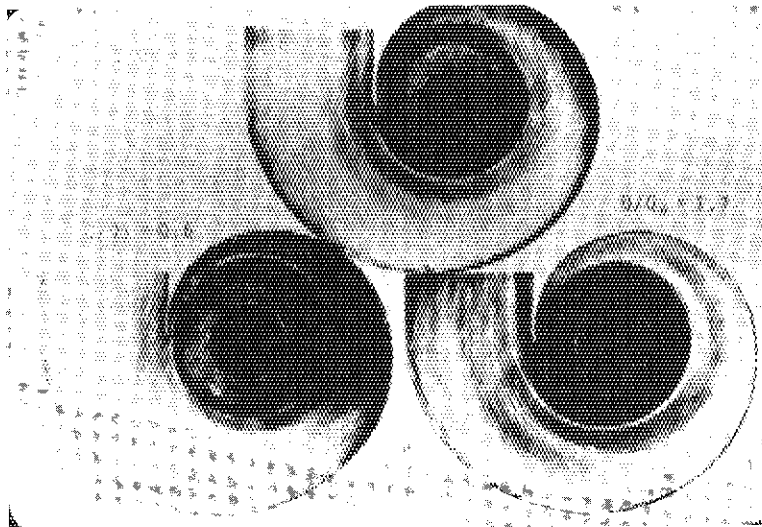


Fig. 3.28 渦巻きポンプのポリュート内の流れ (2次元ポリュート)⁽⁵⁾
Flow in Volute Casing of Centrifugal Pump

可視化手法	油 膜 法
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：40kPa (ケージ圧) 3. 温 度：13℃ 4. 速 度：羽根車周速 10.2m/s, ポリュート内平均流速 3.3 ~ 3.7 m/s ($\theta = 180^\circ$) 5. 関連無次元数： $Re = \frac{U_2 r_2}{\nu} = 1.1 \times 10^6$ (U_2 ：羽根車周速) 6. 代表寸法：羽根車直径 $d = 260$ mm, 流路幅 $b = 16$ mm (羽根出口幅)
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフレックス 2. 撮影レンズ：55mm/F 1.2 標準 3. 使用フィルム：ASA100 4. 露 光：F 2, 1/125sec 5. 撮影距離：約 1 m 6. 照明方法：フラッドランプ (500w) 2個 7. 現 像：増感現像 8. その他：
製 作	山田日出夫 (名古屋工業大学工学部)

3.8 非定常流

(1) 脈動流の速度分布

下に示す一連の写真は、長方形管路の一端に設置したプランジヤを振動させたときに生じる流れをスモークワイヤ法で可視化したもので、このときの流れを脈動流と呼ぶ。プランジヤは振幅 3.8 cm, 振動数 1 Hz で振動し、写真の下に記した角度はプランジヤの位相である。写真に見られるように、壁近くに流速が最大となる位置があり、主流部の流れは壁近くの流れに比べて若干の時間遅れを伴って流動している。これは、流体に与えられる慣性力と流体の持つ粘性力とが釣り合うように流体自身が励起する現象で、一般にリチャードソン効果と呼ばれている。

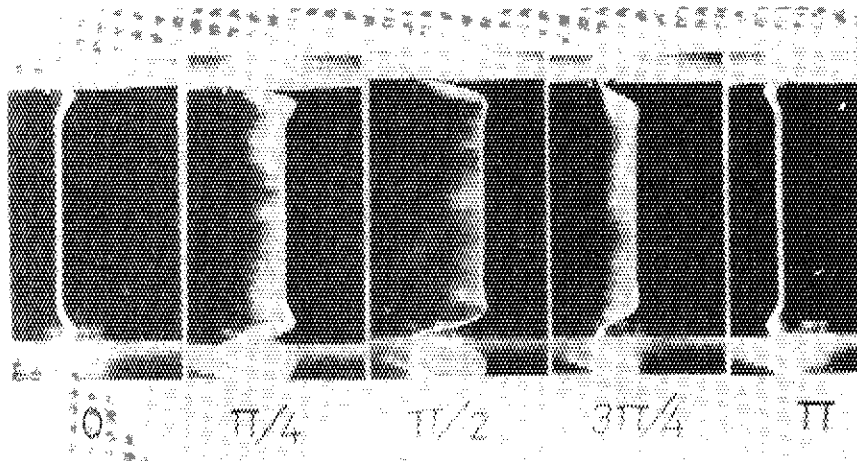


Fig. 3.29 脈動流の速度分布⁽³⁹⁾

Smoke Profiles of an Oscillating Flow in a Rectangular Channel

可視化手法	スモーク・ワイヤ法
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体：空気 2. 圧力：大気圧 3. 温度：15℃ 4. 速度：ピストンの瞬間最大速度 $U = 16 \text{ cm/s}$ 5. 関連無次元数：$(R \cdot S)^{1/2} = \left(\frac{Uh}{\nu} \cdot \frac{\omega h}{U}\right)^{1/2} = \left(\frac{\omega h^2}{\nu}\right)^{1/2} = 32.4$ 6. 代表寸法：管路高さ $h = 5 \text{ cm}$, 幅 $w = 15 \text{ cm}$, 長さ $\ell = 430 \text{ cm}$
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：50mm/F 1.4 3. 使用フィルム：ASA 200 4. 露光：F 2.0, 開放 5. 撮影距離：50cm 6. 照明方法：ストロボスコープ 7. 現像：増感現像 8. その他：クローズアップレンズ使用
製作	山田日出夫 (名古屋工業大学工学部)

(2) 回転振動円柱回りの流れ

静止流体中で円柱が自身の幅を中心にして回転振動を開始すると、振動開始直後には一様な薄い振動境界層が形成されるが、時間の経過と共に境界層の厚みに周期的変化が現れ、やがて円柱を取り囲んでリング状の渦列が形成される。下の写真は、直径 1 cm の円柱を振動数 0.25 Hz、片振幅 2π で振動させたときに形成されたリング状渦列の断面を可視化したものである。渦巻き先端はマッシュルーム状で、時間の経過と共に半径方向に伸びて行き、変形して崩壊する。同様の現象は静止流体中で円柱が回転を開始した場合にも現れる。

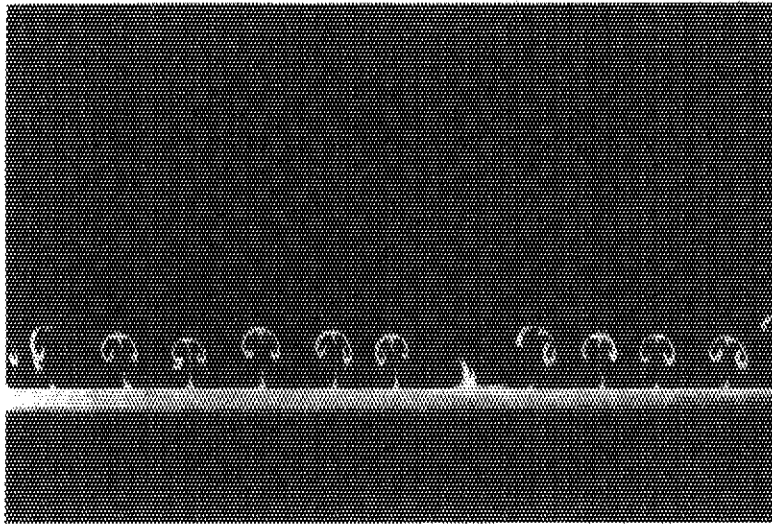


Fig. 3.30 回転振動円柱近傍の流れ⁽⁴⁰⁾

Flow around an Oscillating Circular Cylinder

可視化手法	電解沈澱法
実験条件	1. 流体：水 2. 圧力：大気圧 3. 温度：20℃ 4. 速度：静止流体 5. 関連無次元数： $N d^2 / \nu = 25$ (Nは振動数, ν は動粘性係数) 6. 代表寸法：円柱直径 $d = 1$ cm
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：135mm/F 3.5 3. 使用フィルム：ASA 200 4. 露光： $F 5.6, \frac{1}{4}$ s 5. 撮影距離：0.5 m 6. 照明方法：1kwプロジェクタ×1台 7. 現像：増感 8. その他：ベローズアタッチメント使用
製作	種子田定俊（九州大学応用力学研究所）

(3) 振動平板上の層流境界層

下に示す一連の写真は、一様流中に平行に置かれた振動平板近傍の流れをスモークワイヤ法で可視化したものである。スモークワイヤは振動平板の前縁から $\ell = 25.4 \text{ cm}$ の所に設置され、平板は振幅 2.54 cm 、振動数 2 Hz で振動する。平板は写真に示した矢印の方向に運動しており、その下に記した角度は平板の位相である。写真に見られるように、速度分布は平板の振動に伴って周期的に変化している。このような流れは平板境界層の層流から乱流への遷移の研究に用いられることがある。

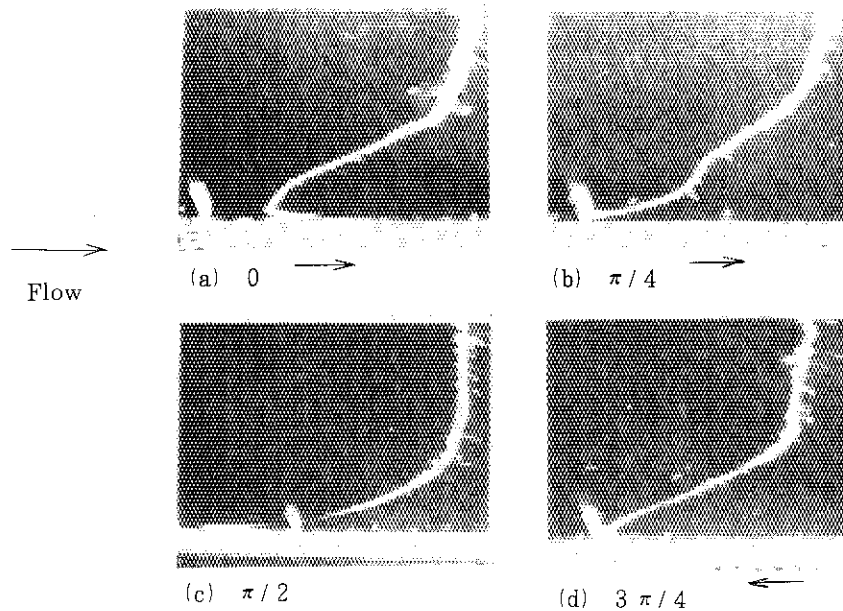


Fig. 3.31 振動平板上の層流境界層⁽³⁹⁾
Laminar Boundary Layer over an Oscillating Flat Plate

可視化手法	スモークワイヤ法
実験条件	1. 流体：空気 2. 圧力：大気圧 3. 温度： 20°C 4. 速度：一様流速度 $U = 43 \text{ cm/s}$ 5. 関連無次元数： $Re = U \ell / \nu = 7300$ 6. 代表寸法： $\ell = 25.4 \text{ cm}$
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：50mm/F 1.4 3. 使用フィルム：ASA 200 4. 露光：F 2.0, 開放 5. 撮影距離：70cm 6. 照明方法：ストロボ 7. 現像：増感現像 8. その他：クローズアップレンズ使用
製作	山田日出夫 (名古屋工業大学工学部)

(4) 水波

液面（水面）に波が生じているとき、液体中の粒子は一定の曲線上を運動する。現象が2次元のとき、底の深さが十分にある場合は、液体粒子の運動径路は真円で、水面で円の直径は最大となり、深い所ほど円の直径は減少する。このような波を深水波と呼ぶ。底が浅い場合は、液体粒子の運動径路は楕円で、水面では長径と短径比が最小となり、深い所ほど長径と短径の比が大きくなり、底では往復直線運動となる。このような波を浅水波と呼ぶ。下に示す写真は水槽の水中に水と比重が等しいプラスチック小粒子を分散させて、水槽の一端から波を作り、波の1周期にはほぼ等しい露光時間で撮影したものである。プラスチック粒子の運動径路が大体上記のようになっていることが分かる。露光時間の関係で、水面波形は撮し込まれなくなるので、参考のためある瞬間の水面波形を後から写真上に描き加えておいた。

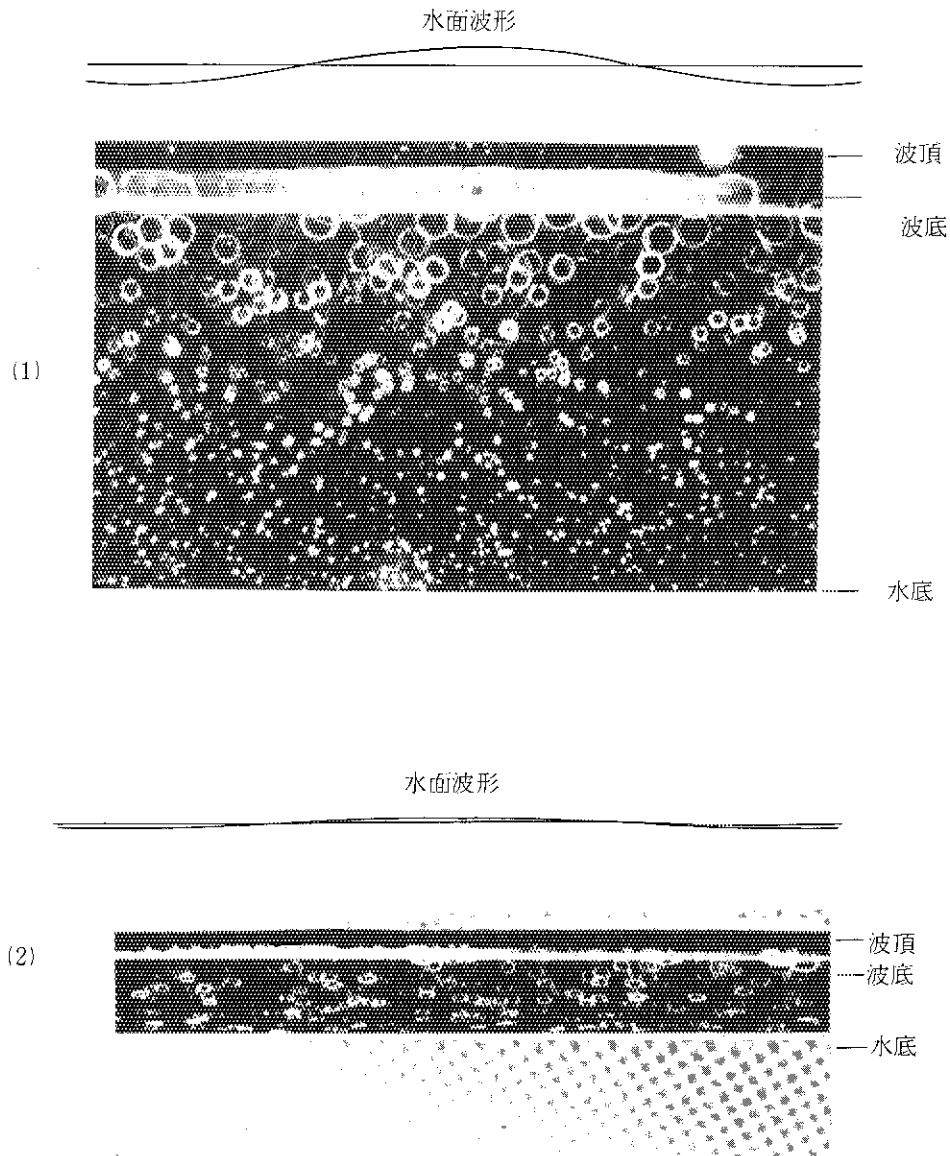


Fig. 3.32 水波⁽⁴¹⁾ (1) 深水波 (2) 浅水波
 Waves : (1) Deep-water Wave, (2) Shallow-water Wave

可視化手法	懸濁法 (プラスチック粒子)	
実験条件	1. 流体: 水 (砂糖水) 2. 圧力: 大気圧 3. 温度: 常温 4. 速度: ———— 5. 関連無次元数: ———— 6. 代表寸法: 波長 L = 深水波 約 20 cm, 浅水波 約 15 cm	
撮影条件	1. カメラ形式: 35 mm 一眼レフ 2. 撮影レンズ: 135 mm / F 4.5 3. 使用フィルム: ASA 100 白黒 4. 露光: 深水波 F 8 1/4 s, 浅水波 F 8 1/4 s 5. 撮影距離: 約 1 m 6. 照明方法: 650 w スライド映写機スリット照明 7. 現像: 標準 8. その他:	
製作	田古里哲夫 (東京大学工学部)	

3.9 キャビテーション

(1) オリフィスのキャビテーション

物体の周りの流れや縮流等を伴う流路内の流れなど圧力分布を持つ流れでは、使用流体が液体の場合、ある部分の静圧が飽和蒸気圧以下になるとそこで気泡を発生する。この現象をキャビテーションという。

下に示す写真はオリフィスで発生したキャビテーションを連続光（左側）とストロボ（右側）を使用して撮影したものである。このときのキャビテーションは、オリフィス板の開孔部から流出する水中噴流と周囲の流体との境界面に形成される混合領域で発生する。写真右に記した h_d は次のキャビテーション係数である。⁽⁴²⁾

$$k_d = (P_0 - P_v) / \left(\frac{\rho U^2}{2} \right)$$

ここに、 P_0 は縮流タップにおける静止、 P_v は飽和蒸気圧、 U は開孔部平均流速である。 k_d の低下と共にキャビテーションが活発になって発生気泡が増加し、特に $k_d = 0.13$ におけるストロボ写真では、オリフィス開孔から流出する流れに直角な渦輪と、それが下流で崩壊しているのが見られる。この渦が崩壊するときに衝撃波などを発生して管壁に損傷を与える。

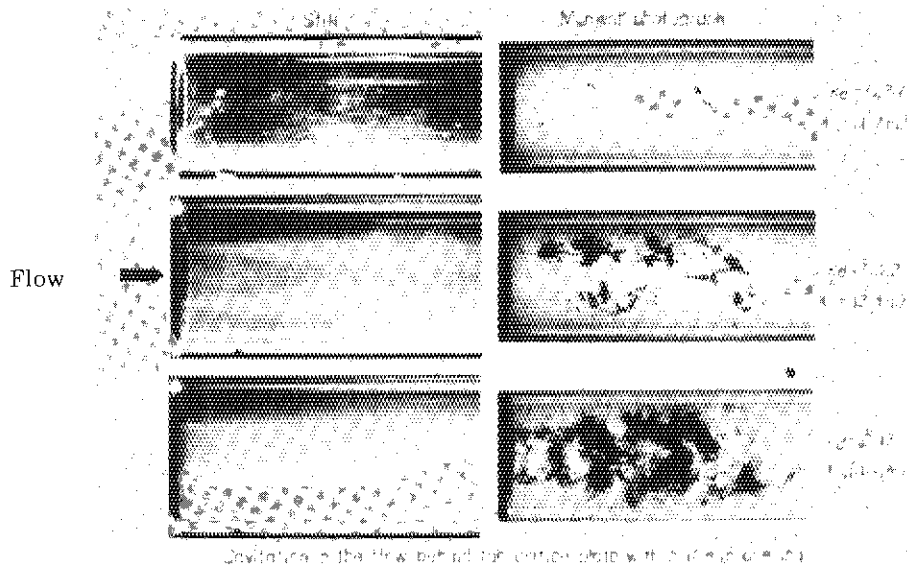


Fig. 3.33 オリフィスのキャビテーション⁽⁵⁾

Cavitation in the Flow Behind the Orifice Plate

可視化手法	直 接 撮 影
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：16～28kPa(絶対圧力) 3. 温 度：21℃ 4. 速 度：U=11.7～14.6m/s 5. 関連無次元数： $Re=U \cdot d / \nu = 1.2 \sim 1.5 \times 10^5$ 6. 代表寸法：オリフィス開孔の直径 $d = 10 \text{ mm}$
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：105mm/F 4 3. 使用フィルム：ASA-400 4. 露 光：スチール：F 8～11, $1/125 \text{ s}$ 瞬間写真：F 8～11, $4 \mu\text{s}$ (ストロボ) 5. 撮影距離：約0.2m 6. 照明方法：スチール：カラー用フラッド(500w)2個, 瞬間写真：ストロボ1灯 7. 現 像：標準 8. その他：ペローズ使用
製 作	村井等(東北大学高速力学研究所)

(2) 円柱背後のキャビテーション

下に示す写真は流れに直角に置いた円柱背後より発生するキャビテーションを連続光（左側）とストロボ（右側）を使用して撮影したものである。連続光による写真では定常な気相領域に見える部分がストロボ写真では個々の気泡として観察できる。ストロボ写真に注目すると、キャビテーション係数 $k_d = (P_\infty - P_v) / (\frac{\rho U^2}{2})$ (P_∞ : 流体圧力, P_v : 飽和蒸気圧, U : 一様流速) の大きい場合 ($k_d = 1.33$), 気泡は円柱上下から放出されるカルマン渦の内部で発生しており, 下流に行くにつれて次第に消滅しているのがよく分かる。キャビテーション係数が減少すると ($k_d = 0.9$), 円柱背後には安定なキャビテーション領域が形成されており, そこから放出される気泡がカルマン渦列に乗って流れ去っているのが観察される。また, 側壁近くの円柱の上流から形成される首飾り渦にもキャビテーションの発生が認められる。

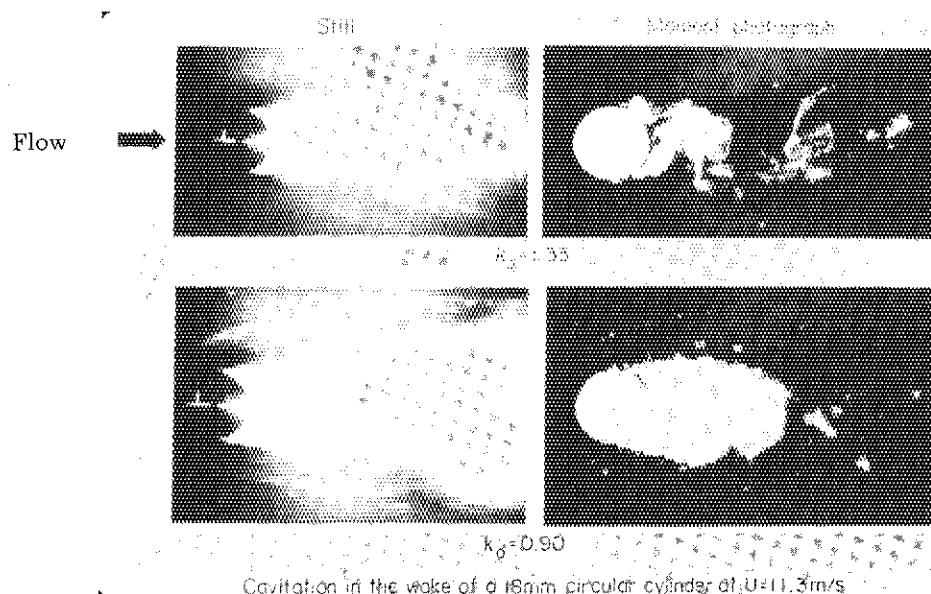


Fig. 3.34 円柱背後のキャビテーション⁽⁵⁾

Cavitation in the Wake of a Circular Cylinder

可視化手法	直接撮影
実験条件	1. 流体：水 2. 圧力：58～90kPa 3. 温度：20℃ 4. 速度：U=11.3m/s 5. 関連無次元数：Re=U・d/ν=2×10 ⁵ 6. 代表寸法：円柱直径 d/18mm
撮影条件	1. カメラ形式：350mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：55mm/F 3.5 マクロ 3. 使用フィルム：ASA-100 4. 露光：スチール：F 5.6～8, 1/125s 5. 瞬間写真：開放, 4μs(ストロボ) 6. 撮影距離：0.3m 7. 照明方法：スチール：カラー用フラッド(500w)2個, 瞬間写真：ストロボ1灯 8. 現像：標準 9. その他：
製作	村井等(東北大学高速力学研究所)

3.10 粘弾性流体

(1) ワイセンベルグ効果

濃厚な高分子融溶液などの粘弾性流体は、単純せん断流れにおいても法線応力差を生じ、ニュートン流体とは著しく異なった流動様相を示す。上の写真は試料の入った容器中で丸棒を回転させたときの状況を撮影したものである。写真(1)は、試料にニュートン流体（グリセリン水溶液）を使用しており、液面にほとんど変化は見られない。写真(2)は粘弾性流体（ポリエチレン融液）に対するもので、円周方向、軸方向及び半径方向に法線応力差が生じ、そのために液体は丸棒に沿って盛り上っている。このような現象はワイセンベルグ効果と呼ばれている。

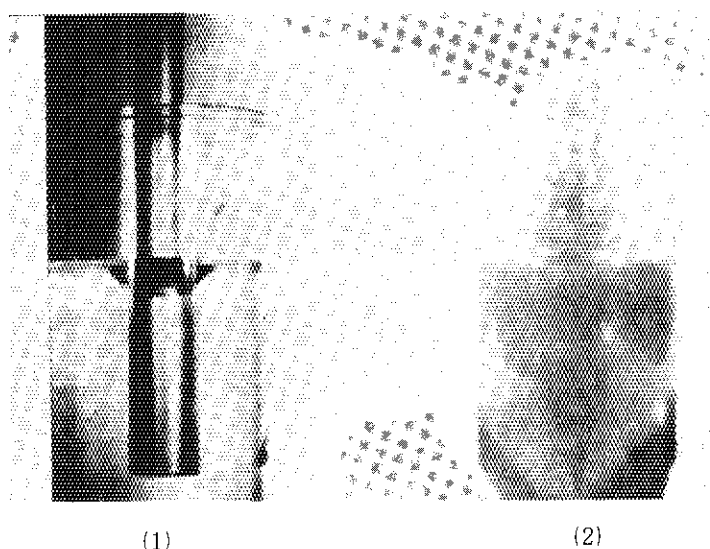


Fig. 3.35 ワイセンベルグ効果⁽⁵⁾
Weissenberg Effect

可視化手法	直接撮影
実験条件	1. 流体：(1)グリセリン水溶液 (2)ポリエチレンオキサイト (PeO15) 3%水溶液 2. 圧力： 3. 温度：15℃ 4. 速度：700 r.p.m 5. 関連無次元数： 6. 代表寸法：円筒直径 1.2 cm
撮影条件	1. カメラ形式：35mm一眼レフ 2. 撮影レンズ：接写用レンズ 50mm F 4 3. 使用フィルム：Kodak Ekt achrome ASA 160 4. 露光：F 5.6, 1/250 sec 5. 撮影距離：30cm 6. 照明方法：300w 写真用ランプ 1個 7. 現像：標準現像 8. その他：
製作	加藤宏，後藤清治（東京都立大学工学部）

(2) バラス効果

写真(1)のように管から水を噴出させると、噴流は管出口において縮流を起し管内径よりも細くなる。ところが写真(2)のように高分子溶液を管から押し出すと流出物は管出口で管内径よりも太くなる。この現象をバラス効果という。管内の圧力勾配が一定ならば、管長が短い程バラス効果は大きく現れることが実験的に明らかにされている。現在バラス効果の主原因として次の二つのことが考えられている。すなわち、高分子溶液を管へ流入させるとき、流体の受けた弾性変形が管出口において回復することによりバラス効果を生じるという考え方（弾性流入効果）及び管内流において、流体に加えられたずり変形によって生じた法線応力が管出口において弾性回復力として作用し、その結果バラス効果を生じるという考え方（法線応力効果）である。

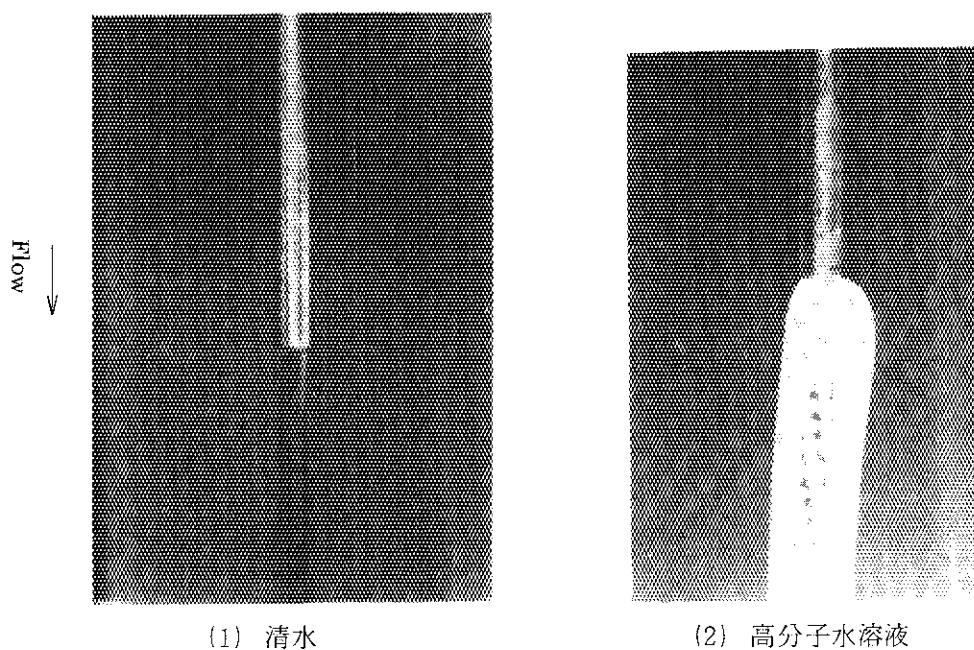


Fig. 3.36 バラス効果（メリントン効果又はダイ・スウェル）⁽⁵⁾
Barus Effect (Merrington Effect or Die Swell)

可視化手法	直 接 撮 影
実験条件	1. 流 体 : (1)水, (2)高分子水溶液 2. 圧 力 : 1.0 kg/cm^2 , 105 kg/cm^2 , 3. 温 度 : 20°C 4. 速 度 : $U = 230.9 \text{ cm/s}$, 68.9 cm/s 5. 関連無次元数 : $Re = 1005$, 9.3 6. 代表寸法 : 細管直径 $d = 0.80 \text{ mm}$, 1.94 mm
撮影条件	1. カメラ形式 : 一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ : $50 \text{ mm/F} 1.2$ 標準 3. 使用フィルム : ASA-32 4. 露 光 : $F 2$, $1/125 \text{ s}$ 5. 撮影距離 : 0.2 m 6. 照明方法 : 白黒用 スポットライト (500 w , 300 w) 各 1 個 7. 現 像 : 増感現像 8. その他 : 接写リング使用
製 作	進邦紀夫 (都立航空工業高等専門学校)

(3) トムズ効果

分子量数 100 万の直鎖状高分子の稀薄溶液（溶液濃度数 ppm ～ 数 100 ppm）では乱流管摩擦係数が通常の $1/3 \sim 1/4$ に減少する。この現象をトムズ効果と呼ぶ。トムズ効果の生じている管内乱流では、清水などの場合と比較して乱れの高周波成分が減少し、低周波成分が増加することが知られている。

下の写真は管の上流から染料を細管により注入し管内乱流の状態を可視化したもので、清水と高分子稀薄水溶液の場合を対比してある。清水に比較し、高分子稀薄水溶液では染料流脈の拡散が遅く、低周波の流体運動が目立っている。

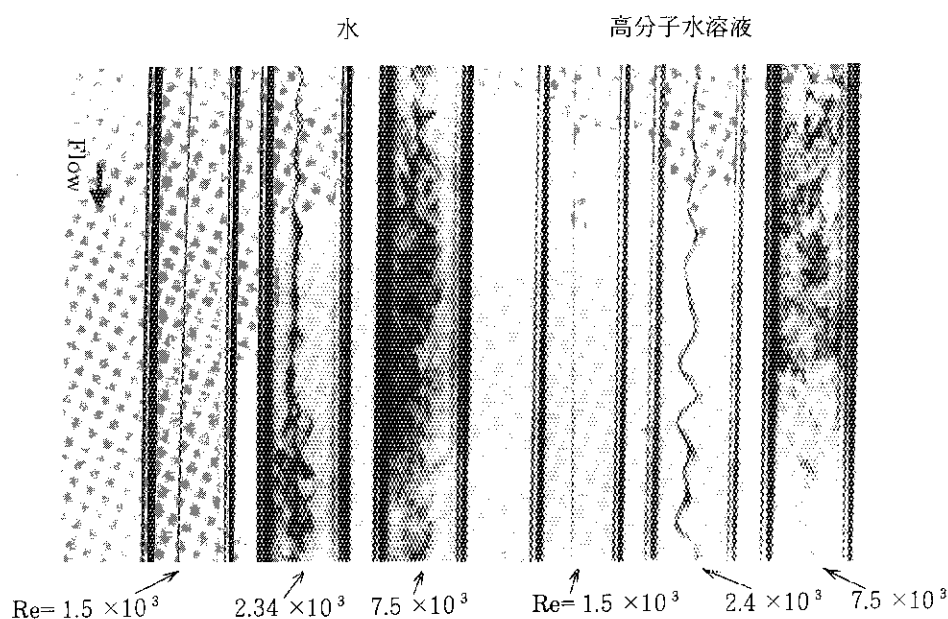


Fig. 3.37 トムズ効果⁽⁵⁾

Toms Effect

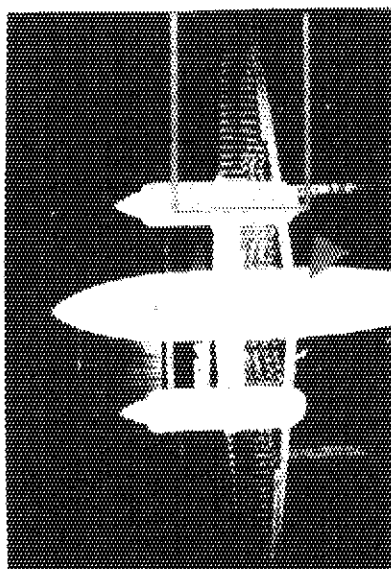
可視化手法	注入流脈法
実験条件	1. 流体：水，高分子水溶液（ポリエチレンオキサイド 50 ppm 水溶液） 2. 圧力：大気圧 3. 温度：常温 4. 速度：0.11m/s，0.17m/s，0.54m/s 5. 関連無次元数：レイノルズ数 $Re = \frac{Ud}{\nu} = 1.5 \times 10^3, 2.34 \sim 2.4 \times 10^3, 7.5 \times 10^3$ 6. 代表寸法：管内径 $d = 14\text{mm}$
撮影条件	1. カメラ形式：35mm 1眼レフ 2. 撮影レンズ：50mm / F 2 3. 使用フィルム：ASA 100 カラーリバーサル 4. 露光：F 16, 1/2000 s ストロボ 5. 撮影距離：約 1 m 6. 照明方法：ストロボ 2灯 7. 現像：標準 8. その他：
製作	田古里哲夫（東京大学工学部）

3.11 模型実験

(1) 飛行機回りの流れ

形状の相似な二つの物体の回りの非圧縮流が力学的にも相似となる条件は、二つの流れのレイノルズ数が等しいことである。そのため、模型による実験で実物の流れを評価するときには両者のレイノルズ数を一致させる必要がある。

下の写真は、双発プロペラ機の模型を風洞内に置いて、その主翼上面の流れを表面タフト法で可視化したものである。このときのレイノルズ数は装置上の制約から実物の値よりも小さいため、レイノルズ数の実効性を高める目的で模型左方に格子を置き、気流の乱れを大きくしてある。この例では、翼弦長と風速で定義したレイノルズ数は $Re = 0.5 \times 10^6$ であるが、気流に大きな乱れを与えているため乱流係数が 2.8 と大きく、有効レイノルズ数は $Re^* = 2.8 \cdot Re = 1.4 \times 10^6$ となる。また、模型の主翼の迎角は 12° である。写真に見られるように胴体・ナセル外側の後縁部から補助翼手前付近に掛けて流れのはく離が見られるが、そのほかの部分、特に補助翼部では流れははく離もせずスムーズに流れており、この飛行機の翼型はおおむね良好と言える。

Fig. 3.38 飛行機回りの流れ⁽⁵⁾

Flow Pattern around Aeroplane

* 乱流係数 = $\frac{\text{乱れO と考えられる自然の大気中における球の臨界レイノルズ数, } Re = 3.85 \times 10^5}{\text{特定の風洞における球の臨界レイノルズ数 (} C_D = 0.3 \text{ となる } Re \text{ で定義する)}}$

可視化手法	表面タフト法
実験条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. 風速：U = 40 m/s 2. 翼弦長：$\ell = 195.6 \text{ mm}$ 3. レイノルズ数：$Re = U \ell / \nu = 0.5 \times 10^6$ (有効レイノルズ数 = 1.4×10^6) 4. 乱流格子：ϕ 3.1 鋼棒, ピッチ 21mm, turbulence factor 2.8
撮影条件	<ol style="list-style-type: none"> 1. カメラ：35mm/m 1眼レフ 2. レンズ：50mm/F 1.4 3. 使用フィルム：ASA 100 カラーネガ 4. 絞り・露光：F 4, 1/60s 5. 照明：500w フラッドライト × 4 6. 撮影距離：2m
製作	中口博 (千葉大学工学部), 写真提供 (富士重工空力設計課)

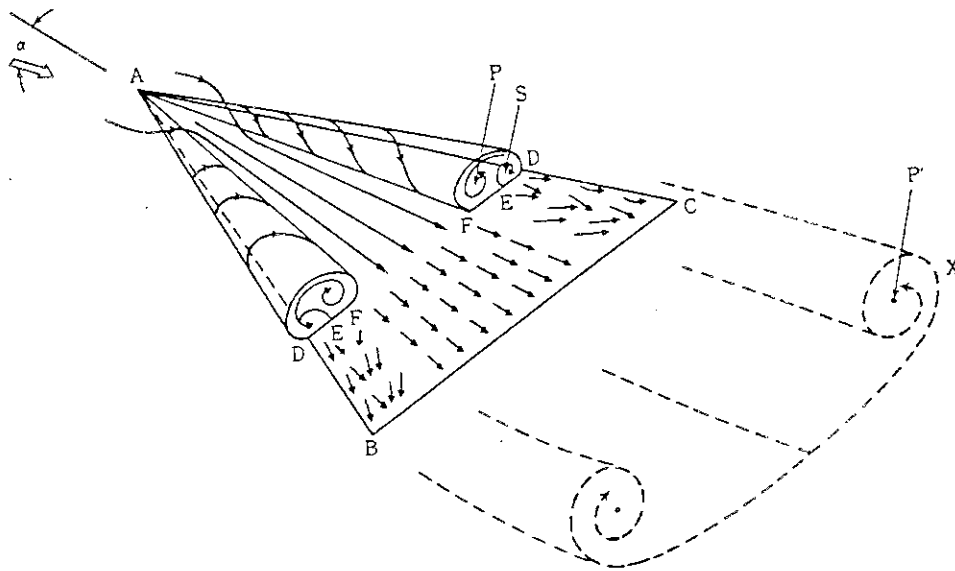
(2) デルタ翼回りの流れ

アスペクト比の大きい直線翼（左右翼の軸線がほぼ一直線をなす翼）の回りの流れは各断面ごとにほぼ2次元であるが、デルタ翼など超音速での圧力抵抗を低減するよう配慮された翼は、翼厚比とアスペクト比が小さくしかも後退角が大きいため、その回りの流れは強い3次元性をもつ。

写真(1)は頂角 44° の薄い平板デルタ翼面上の流れを油膜法で可視化したものである。デルタ翼先端から左右の前縁に沿って境界層はく離により生じた渦の領域が次第に発達し、渦領域に囲まれた翼内中央部ではスムーズな流れが実現しているのが観察される。また、渦領域は直線状の油膜ラインで仕切られており、前縁寄りが前縁はく離渦領域で内中央部寄りがはく離渦の内部に生じた2次渦の領域である。

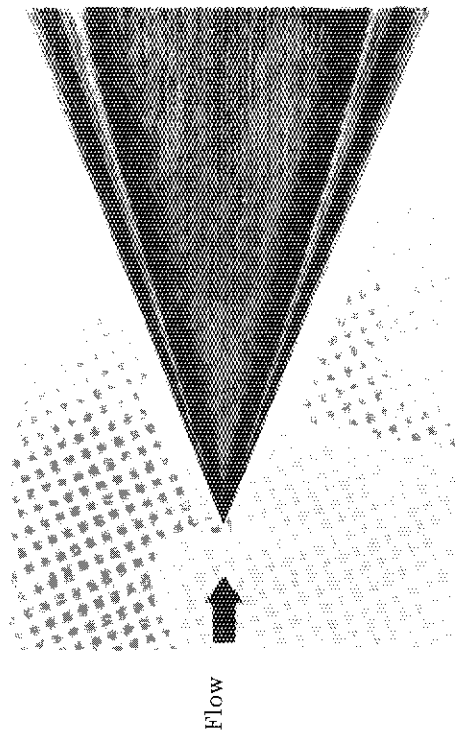
写真(2)は、負の迎角を持つ平板デルタ翼の後端から放出される前縁はく離渦をデルタ翼後方に設置したタフトグリッドで可視化したもので、グリッドのピッチは 10 mm 、タフトの長さは 50 mm である。翼端の少し内側を中心とした一対の強い縦渦が観察される。

以上の結果を基にして、デルタ翼回りの流れを模式的に表したのが下の図である。図において、Pは前縁ABとACに沿って発達する前縁はく離渦、Sはその内部に生じた2次渦で、Eがその境界線である。Fは前縁はく離渦が翼面に再付着する境界線で、F-Fの領域ではスムーズな流れが実現している。また、翼後方のX-X面に見られる一対の縦渦が翼端より放出される前縁はく離渦である⁽⁴³⁾



迎え角の大きいデルタ翼回りの流れの構造⁽⁴³⁾

Flow Structure around Delta Wing

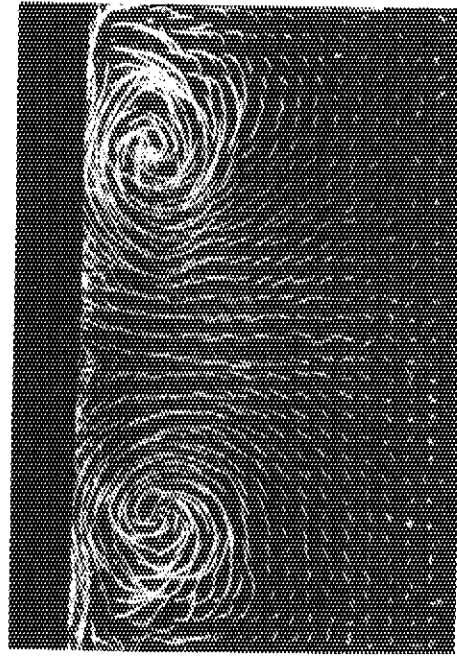


(1)

Fig. 3.39 デルタ翼上面のオイル・フローパターン⁽⁵⁾

Oil Flow Pattern on 44° Delta Wing with Flat Upper Surface

可視化手法	油 膜 法
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：20kPa (ゲージ圧力) 3. 温 度：19°C 4. 速 度：U = 4.5 m/s 5. 関連無次元数：Re = U · C / ν = 5.6 × 10 ⁵ 6. 代表寸法：頂点と底辺との距離 C = 130 mm
撮影条件	1. カメラ形式：35 mm 一眼レフ 2. 撮影レンズ：55 mm / F 3.5 マクロ 3. 使用フィルム：ASA - 100 4. 露 光：F 11, 1/15 s 5. 影条距離：約 0.3 m 6. 照明方法：カラー用フラッド (500 w) 2 個 7. 現 像：標準 8. その他：迎角 5° 及び 15°
製 作	村井等 (東北大学高速力学研究所)



(2)

Fig. 3.40 デルタ翼の後流⁽⁵⁾

Flow Pattern behind Delta Wing

可視化手法	タフトグリッド法
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：大気圧 3. 温 度：常温 4. 速 度：U = 1 m/s 5. 関連無次元数：Re = $\frac{UL}{\nu} = 3 \times 10^5$ 6. 代表寸法：(翼幅) L = 300 mm
撮影距離	1. カメラ形式：35 mm 一眼レフ 2. 撮影レンズ：3. 使用フィルム：ASA 100 カラーリバーサル 4. 露 光：F 11, 1/2000 s 5. 撮影距離：約 1.2 m 6. 照明方法：ストロボ 4 灯 7. 現 像：標準 8. その他：
製 作	田古里哲夫 (東京大学工学部)

(3) 自動車の回りの流れ

走行する自動車に働く空気力は、燃料消費・操縦性・安定性及び最高速に影響を及ぼす。そのため、できるだけ空気抵抗の小さい形状にするのが望ましい。

写真(1)は極端に角ばった自動車模型を使用して、その回りの流れを煙流脈法で可視化したものである。フード先端ではく離れた流れは再付着することなく車体後部まで続き、車体後方に大きな後流域を形成している。このような状況の下では車体に大きな抗力が作用することになり、この模型の抗力係数 C_D は 0.85 と非常に高い値である。

写真(2)は流線型をしたスポーツカー模型の場合で、写真(a)に比べて格段に優れた流れとなっている。すなわち、ルーフ先端等において流れのはく離は見られず、また車体後方の後流域も狭くなっており、車体に作用する抗力が極めて小さいことが分かる。ちなみに、この模型の抗力係数 C_D は 0.32 であり、乗用車の平均値 0.42 を大幅に下回っている。

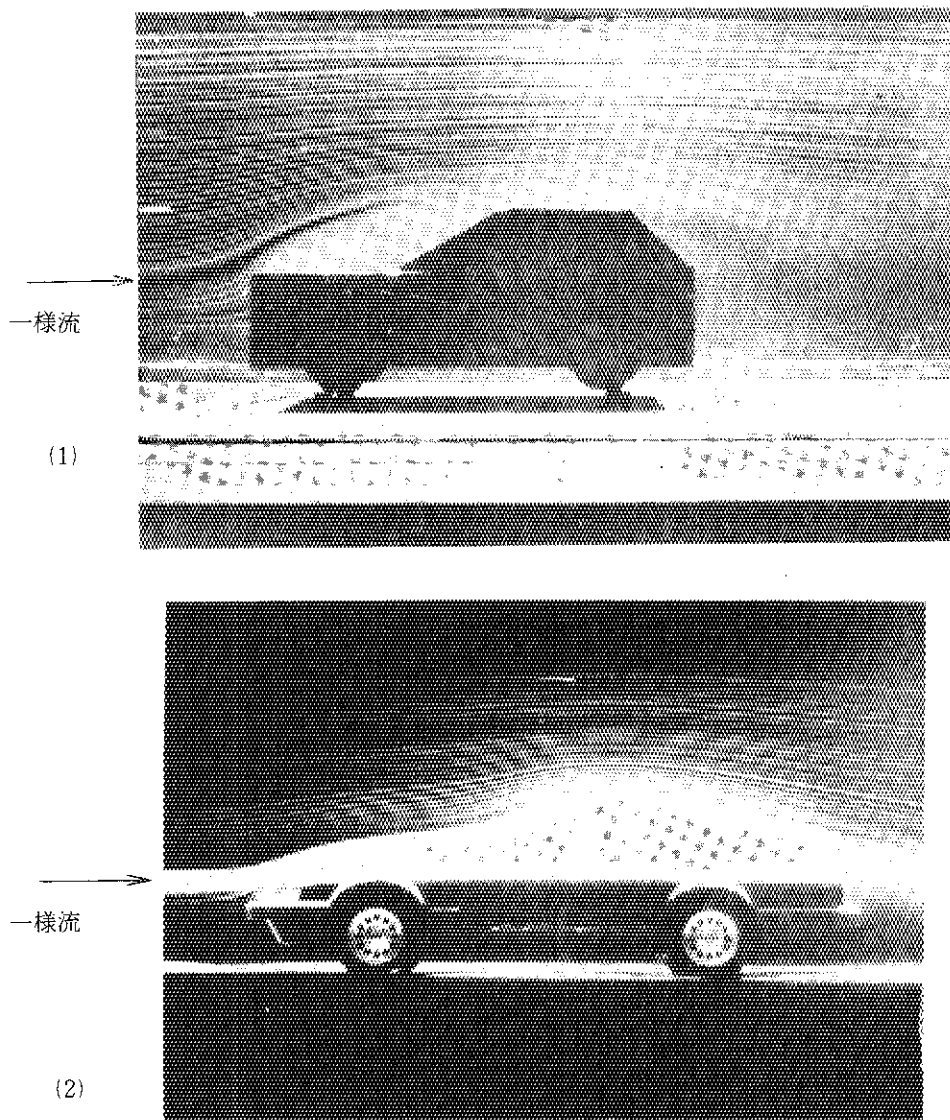


Fig. 3.41 自動車の回りの流れ⁽⁵⁾ - (1)角型自動車, (2)流線型自動車

Flow around a Vehicle - (1)Square model, (2)Streamlined model

可視化手法	煙流脈法
実験条件	1. 流体：空気 2. 圧力：大気圧 3. 温度：25℃ 4. 速度：U = 4 m/s 5. 関連無次元数：Re = UL / ν = 1.3×10^5 6. 代表寸法：軸間距離 L = 500mm
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ (35mm) 2. 撮影レンズ：200mm/F 4.5 3. 使用フィルム：ASA-100 4. 露光：F 4.5, 1/8 5. 撮影距離：5m 6. 照明方法：ブルーフラッドランプ (500w) 4個 7. 現像：普通現像 8. その他：
製作	高木通俊 (H産自動車株)

(4) 船の回りの流れ

軸対称でない3次元物体回りに形成される境界層は、ねじれた速度分布を持つため、そこで生じる流れのはく離は2次元物体の場合と大きく異なる。

次の写真は、普通型船首を持つ肥えた船の回りの流れを調べるため、同型の縮尺模型船を使用して油膜法で可視化したものである。

写真(1)は船首船底における可視化写真で、塗布した油膜の色は船側が赤色系、船底が黒色系である。写真に見られるように、船側の流れは船底に向かって流れ込んでいるが、ある線から内側には入り込んでいない。この線は、油膜に印された限界流線の包絡線となっており、3次元的な流れのはく離線を示している。写真(2)は船尾における可視化写真で、船側には黒色系の油膜、船底側には赤色系のものを塗布している。船底から船側に向う流れが観察され、その流れはある線から下に限られている。この線は、限界流線の包絡線となっており、3次元的なはく離線を示している。はく離した流れは船尾後方に縦渦を形成する。

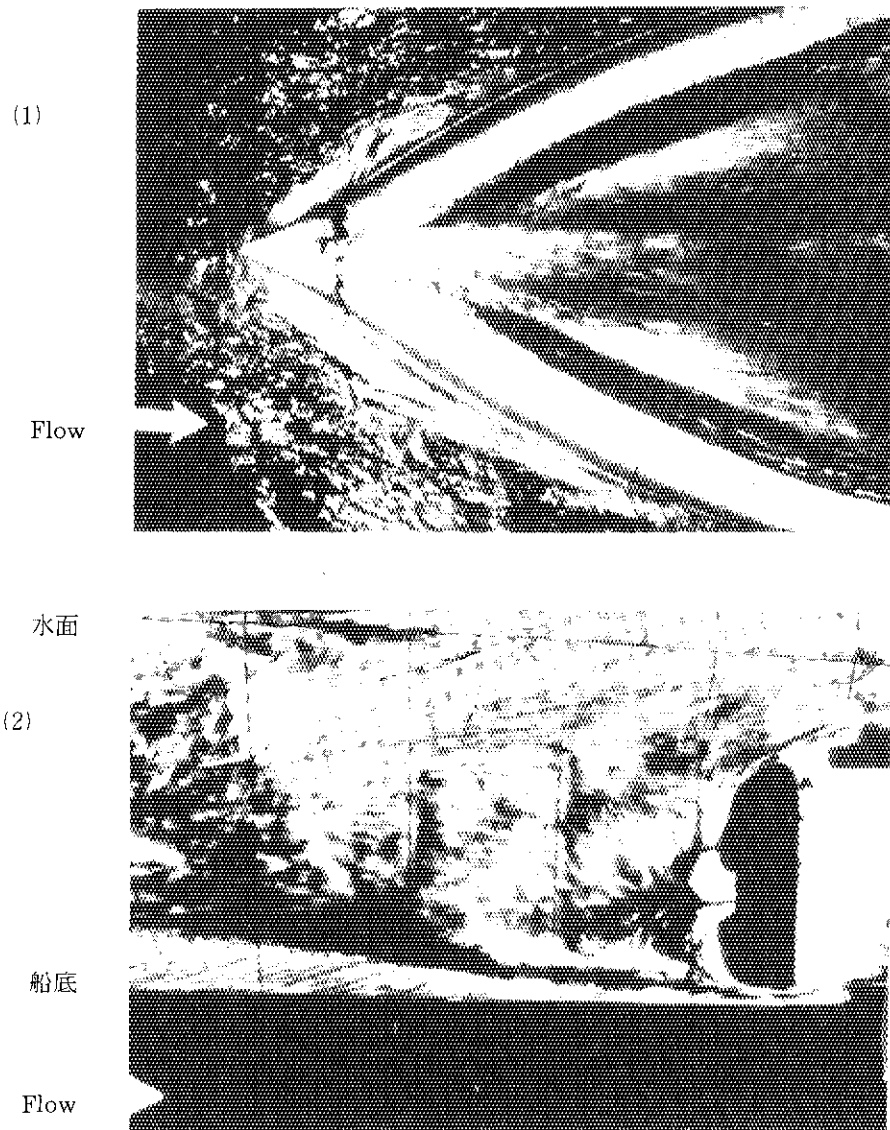


Fig. 3.42 船の周りの流れ⁽⁴⁴⁾ (1) 船首, (2) 船尾
Flow Pattern at Prow(1) and Stern(2)

可視化手法	油 膜 法
実験条件	1. 流 体：水 2. 圧 力：大気圧 3. 温 度：常温 4. 速 度：U=0.8 m/s 5. 関連無次元数： $Re = \frac{UL}{\nu} = 1.6 \times 10^6$ 6. 代表寸法：(長さ) L=2 m
撮影条件	1. カメラ形式：35mm 1眼レフ 2. 撮影レンズ：85~210mm/F 4.8 3. 使用フィルム：ASA100カラーリバーサル 4. 露 光：F 8, 1/100s 5. 撮影距離：約1m 6. 照明方法：ピースポット 1kw 2灯 7. 現 像：標準 8. その他：
製 作	奥野武俊(大阪府立大学工学部)

(5) 超高層建物周辺の流れ

下の写真は、超高層建物模型の風上壁面と屋上面に四塩化チタンを塗布して、発生する白煙により建物周辺の流れを可視化したものである。対象とした建物は東京都豊島区池袋に建設された高さ250mの超高層建物で、縮尺1/750の模型を使用した。写真に見られるように、建物風上側壁面でせき止められる風は建物上方と側方を回り込むように流れ、このとき建物の角で流れのはく離を生じている。このはく離により建物後方に後流域が形成され、その領域内では激しい渦動によっていわゆる風害現象が引き起こされる。

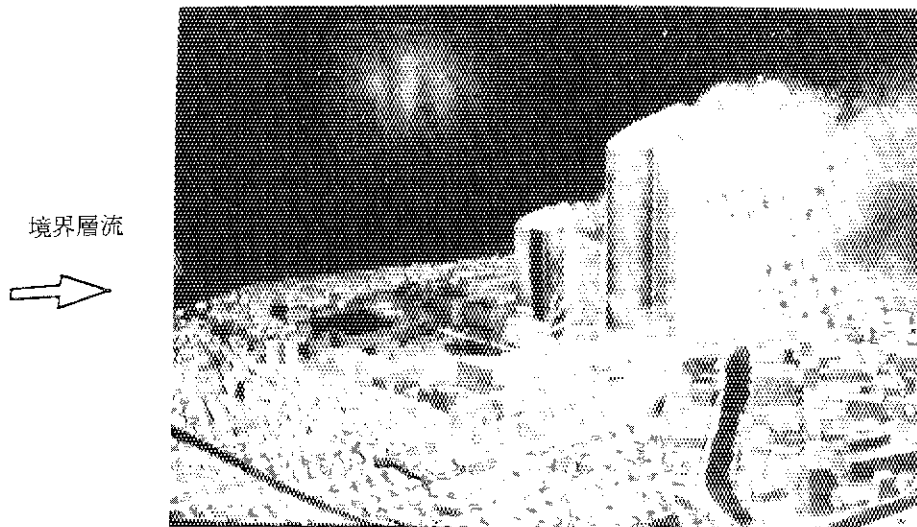


Fig. 3.43 超高層建物模型周辺の流れ⁽⁴⁵⁾

Air Flow around a High-rise Building Constructed in Built-up Area

可視化手法	物体表面トレーサ発生法（四塩化チタン）	
実験条件	1. 流体：空気 2. 圧力：大気圧 3. 温度：20℃ 4. 速度：U = 0.5 m/s 5. 関連無次元数：Re = U d / ν = 3400 6. 代表寸法：超高層建物の幅 d = 10cm	
撮影条件	1. カメラ形式：一眼レフレックスカメラ（35mm） 2. 撮影レンズ：50mm/F 1.4 標準 3. 使用フィルム：ASA-100 4. 露光：F 8, 1/60 sec 5. 撮影距離：0.9m 6. 照明方法：白黒用フラッドランプ（500w）2個＋スポットライト（500w）1個 7. 現像：普通現像 8. その他：UV フィルター	
製作	村上周三（東京大学生産技術研究所）	

4. 原子炉の事例

4.1 原子炉炉心内の流れ

一般に、原子炉炉心内の流体の流れは多種多様であり、流体力学上の測定を行う前段階として流れの全容を把握するために、流れの可視化が必要に応じて行われている現状にある。Table 4.1は、これまで実用化されている水、ガス、液体金属等を使用した原子炉における冷却材の流動条件について示したものである⁽⁴⁶⁾。液体金属炉については、液体金属が不透明なため、流れの可視化を行うには、水や空気などの透明流体を使用して相似な流動条件の下で模型実験を行う必要がある。また、その他の原子炉についても、実機の条件下で流動状態を可視化することは特殊な場合を除いて不可能なため、既存の風洞及び水槽などの流体試験装置を用いた流体模型実験を行うことが必要である⁽⁴⁶⁾。

Table 4.2は、原子炉における冷却材の流動様式について、原子炉炉心部、炉心関連機器及び安全性に分類し、各部の流れを列記したものである。これらの流れを可視化する際には、流体力学上の相似性を考慮に入れ、十分に注意を払って実験を進める必要がある。特に、原子炉炉心部では、放射線照射、材料強度及び伝熱などが複合して、燃料棒の照射変形による偏心及び湾曲流れ、相対熱膨張差による間げきの発生によるすき間流れ、熱出力分布による流量配分の変化及び層流化現象など原子炉炉心部に特有な流れが発生するため、流動条件を一致させるだけでは流れを再現することはできない。従って、このような流れが実現するように装置に工夫をこらして可視化を行う必要がある。^(46, 47)

4.2 軽水炉における流れ

軽水炉は原子炉の中で最も実用化の域に達している炉型であり、加圧水型（PWR）と沸騰水型（BWR）とに分類される。原子炉設計製作の初期においては、炉心及び蒸気発生器における冷却材の沸騰現象、限界熱流束、水-蒸気二相流動等に関する多くの実験研究が行われ、それに併行して、シャドウグラフなどの光学的方法、瞬間撮影及び高速度撮影などにより沸騰及び流動状況の可視化も行われている。^(48～53) このほか、炉心プレナムの透明模型を製作し、プレナム内部の流動状況を染料、スモーク、アルミ粒子などをトレーサとして可視化を行っている。^(54～56)

現在、軽水路の研究開発の主体は、以下に述べる炉心の工学的安全性試験課題に焦点が移行している。下記のテーマは非定常現象であるため、その解析においては定量的な測定と共に流れを直接観察できる流れの可視化が大きな役割を担っている。

(1) 冷却材の喪失事故（Loss of Coolant Accident, LOCA）に関する安全性試験

配管破断時の炉心内冷却材の挙動を明らかにするため、透明テスト部を用いてブローダウン中の炉心内の流動状況が観測されている。^(57, 58) 一方、非常用炉心冷却系（Eccs）が作動して炉心燃料体を冷却する再冠水過程についても、透明の亚克力ル模型を用いて可視化観測が行わ

れている。Fig. 4.1は過熱された模擬燃料棒がクエンチ (quench) される状況を直接撮影したもので、⁽⁵⁹⁾このような冷却状況を炉心燃料体冷却材流路について模式的に表したのが Fig. 4.2である。⁽⁶⁰⁾また、再冠水時における上部プレナム内の流動状態が、水-空気二相流で流動条件を模擬して Fig. 4.3に示すように可視化されている。⁽⁶¹⁾Fig. 4.4はそのときの流れを模式的に表したものである。⁽⁶²⁾このほか、LOCA時に核分裂生成物を気相中から除去するための格納容器内スプレー装置についても、Fig. 4.5に示すようにスプレーノズルから噴霧粒子の放出される状況が可視化観測されている。⁽⁶³⁾

(2) 反応度事故時の安全性試験

原子炉出力の異常上昇時において燃料破断に至る過程と燃料周囲の冷却材の過渡的流動特性を明らかにするため、反応度パルス炉内のカプセルにカメラを装着し、熱及び放射線シールド層を介して Fig. 4.6に示すように可視化が行われている。^(64, 65)これは、燃料破断に伴って発生する衝撃圧や高温燃料破片の衝突・付着及び高い放射線場という極限状況のもとで可視化が成功した例として注目すべき成果である。

今後、軽水炉炉心における伝熱流動状態をより明瞭に可視化する手法を開発し、可視化の結果を基に安全性に関連した伝熱流動モデルの確立、及び実機との相似性の吟味などの課題に取り組むべきものとする。

4.3 ガス冷却炉における流れ

ガス冷却炉は、冷却材に炭酸ガスやヘリウムガスなどの気体を使用する原子炉である。特に、熱的に安定な気体であるヘリウムガスを冷却材とする場合には、1000℃近くまで昇温することが可能なため、軽水炉よりもはるかに高い熱効率が得られ、また、高温のガスを発電のみならず製鉄プラントなどの熱源として利用することができる。そのため、多目的高温ガス炉と呼ばれて、核熱エネルギーの有効利用の見地から現在大きな注目を集めている。

日本原子力研究所で開発が進められている多目的高温ガス炉は、Fig. 4.7に示すように入口冷却材流路で燃料集合体部を覆う二重容器構造になっている。⁽⁶⁶⁾このような炉体内部の流れについて、炉体構成要素の相似模型を用いた可視化観察が行われている。Fig. 4.8は、炉底に設置された冷却材入口部の流れを油膜法を用いて可視化したものである。⁽⁶⁷⁾支持ピンの後流側で流れのはく離が生じており、これを抑制するために案内板を設置する必要があることを示している。また、炉心出口部の高温プレナム内の流動状態をドライアイス蒸気煙を注入して可視化した例を Fig. 4.9に示す。⁽⁶⁷⁾

一方、燃料体は Fig. 4.10に示すようにブロック構造をしており、燃料棒には流路のすき間保持と燃料棒支持のためにスペーサーリブが取り付けられている。⁽⁶⁸⁾Fig. 4.11は、スペーサーリブ回りの流れを平行平板流路で模擬し、液晶加熱板で伝熱面の温度分布を可視化したものである。⁽⁶⁹⁾スペーサーリブの回りに形成されるはく離渦領域が、伝熱が促進されている範囲とその程度を明瞭に示しており、伝熱現象の可視化例として注目すべきものである。また、燃料棒の伝熱性能を更に向上させるため、表面に伝熱促進用の突起物材を設けた場合についても、Fig. 4.12に示すように油の上に浮遊するアルミナ粒子によって可視化されている。⁽⁷⁰⁾このとき、加熱及び冷却

状況を流路の縮小及び拡大効果で模擬しており、突起物後方に生成するはく離渦が流れに及ぼす影響から、伝熱が促進される状況を十分に推察することができる。

原子炉容器内に設置される中間熱交換器内の流動状態についても、透明の亚克力模型を用いて可視化が行われている。Fig. 4.13は、胴側の流動状態をタフト法により可視化したもので、2次流れが観察できる。⁽⁷¹⁾また、熱交換器に用いられる管群やフィンの回りの流れについても、アルミ粉による表面浮遊法、水素気泡法、シュリーレン法などを用いて可視化が行われている。^(72～75)

一方、炉心容器及び配管など高温のガスに接する部分には熱遮断のために断熱層が設置されているが、断熱層内で自然対流やバイパス流などが発生すると断熱性能が低下し、ホットスポットが発生する可能性がある。⁽⁷⁶⁾Fig. 4.14に示すような3層の断熱層から成る高温断熱配管について断熱配管の圧力管表面温度分布を赤外線サーモビューワで可視化したものがFig. 4.15である。⁽⁷⁷⁾図に見られるように、ホットスポットの発生は見られず、実用条件下では十分な断熱性能を維持していることが分かる。

このほか高温ガス炉に関しては、炉心内でのバイパス流れやショートパス流れ、及び減圧事故や冷却材供給停止事故など安全性に関連した過渡的流れについても、流動モデルを確立するために新しい可視化手法の開発が必要とされている。

4.4 高速増殖炉における流れ

高速増殖炉は、ウラン資源を最大限まで利用し得る炉型であるため、核燃料サイクルの要として現在実用化が進められている。高速増殖炉の冷却材には液体ナトリウムが使用されるが、液体ナトリウムは不透明であり、また水や空気などを反応しやすいため、流動状況を直接可視化することは極めて困難である。そこで、原子炉内の流れを調べるために、一般に液体ナトリウムと動粘性係数を一致させた熱水と透明な亚克力模型を用いて流れの可視化が行われている。

炉心上部を模擬した亚克力模型中にポリスチロール粒子を混入して可視化を行った結果をFig. 4.16に示す。このときの粒子の移動軌跡から炉心上部の流れを模式的に表したものがFig. 4.17である。流れは複雑な3次元旋回流となっているが、上部液面にデッププレートが取り付けられているため、自由液面の盛り上りと脈動を防止することが出来る。⁽⁷⁸⁾

一方、燃料要素は、発熱量が高いため燃料棒を十分に冷却できるように燃料棒束となっている。Fig. 4.18は、空気泡と染料をトレーサとして燃料棒束内部の流れを可視化したもので、⁽⁷⁹⁾ブロッケージ後方に形成されるはく離領域の流動状況を観察することができる。

今後は、安全性に関連した液体ナトリウムの沸騰状況燃料・冷却材間の反応状況、炉心や蒸気発生器等の流動状態について、新規の手段を使用する可視化手法の適用が一層期待される。⁽⁸⁰⁾

Table 4.1 原子炉における流動条件⁽⁴⁶⁾

Flow Conditions in Nuclear Reactors

炉 型	流 体	温度 (K)	圧 力 (MPa)	流 速 (m/s)
ガス冷却炉	He, CO ₂	300~1000	1~10	~100
水冷却炉	H ₂ O, D ₂ O	300~500	50~100	~5
液体金属炉	Na, K	400~600	0.5~1	~5

Table 4.2 原子炉における冷却材の流動様式

Flow Patterns of Coolants in Nuclear Reactor Components

流 動 箇 所	流 れ の 様 式
炉 心 部	入 口 部 容器・配管・ノズル部の流れ 炉心側壁の流れ 燃料入口部の流れ 流量配分器（オリフィス・ゲート等）の 流れ
	出 口 部 プレナムの流れ 出口管ノズル部の流れ 出口管自由液面部の流れ 気水分離部の流れ 炉心断熱層の流れ
	燃 料 部 燃料棒（棒，ブロック）の流れ 燃料支持部（スペーサ，ワイヤ）の流れ
炉心 関連 機器 部	蒸気発生器 中間熱交換器 胴体部（シェル）の流れ（均一配分） 入口・出口部の流れ 蒸気発生部（気水分離部，二相流部）の 流れ
	配 管 スペーサ，断熱部の流れ 耐圧管の局部温度分布
安 全 性	炉 心 配 管 料 容 器 壁 冷却材の喪失時（LOCA）の流れ 注水系（Refloodings）の流れ 熔融反応（Melt Down）の流れ 噴霧流（Core Spray）の流れ

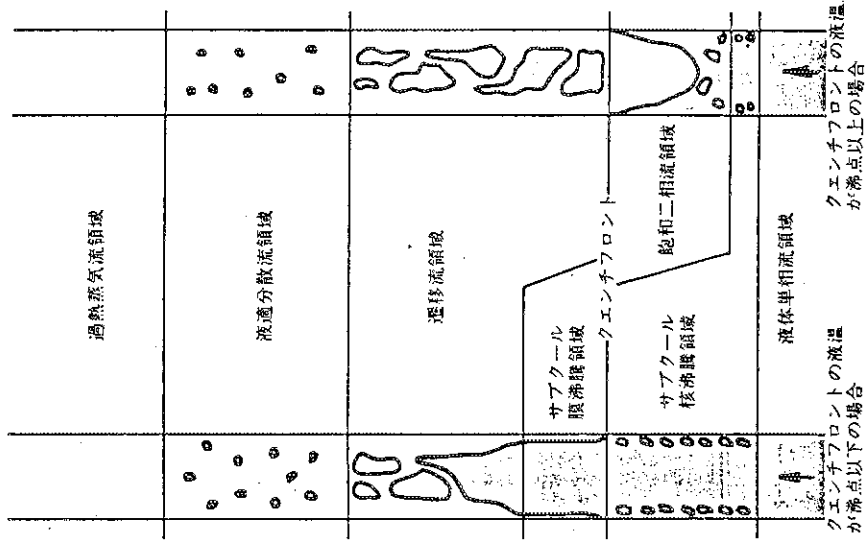


Fig. 4.2 再冠水時の炉心流動様式モデル

Flow Pattern Model in Reflooding

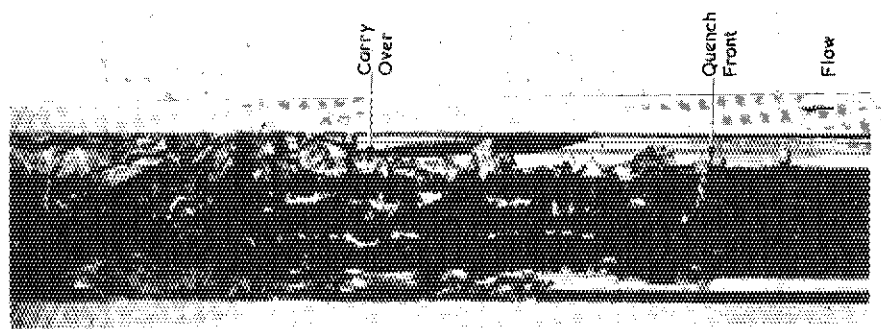


Fig. 4.1 再冠水時のクエンチング状況(59)

Quenching during Reflooding

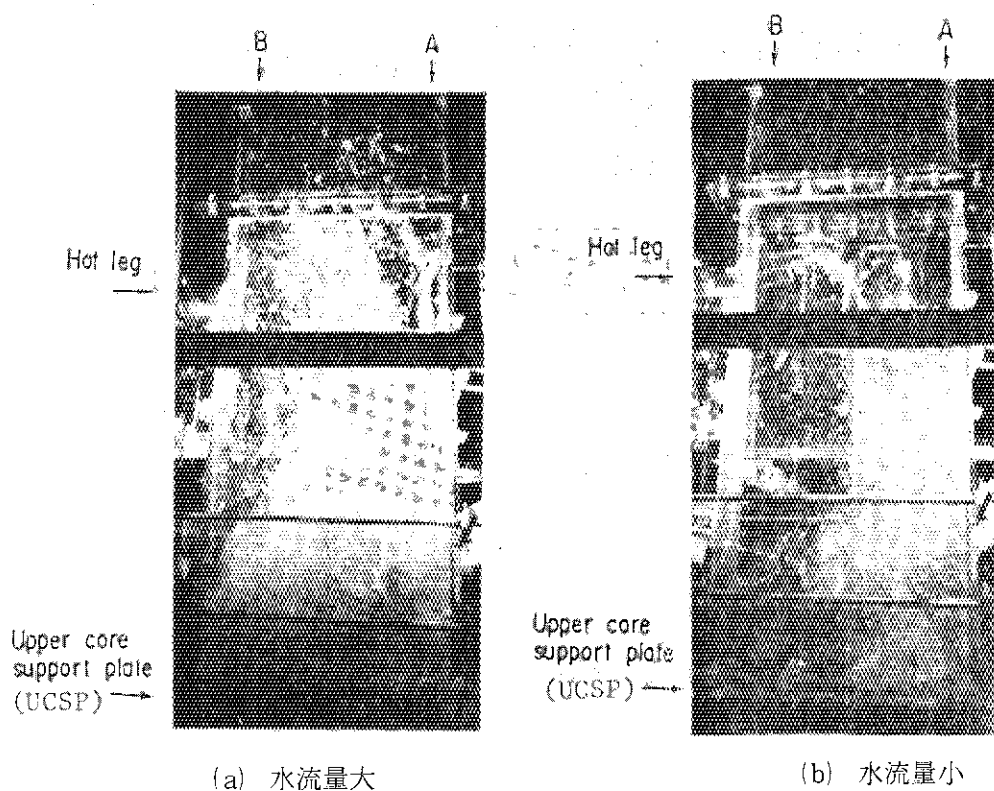


Fig. 4. 3 再冠水時の上部プレナム内の流動状態⁽⁶¹⁾

Flow Pattern in Upper Plenum during Reflooding

- (a) large liquid inventory
- (b) small liquid inventory

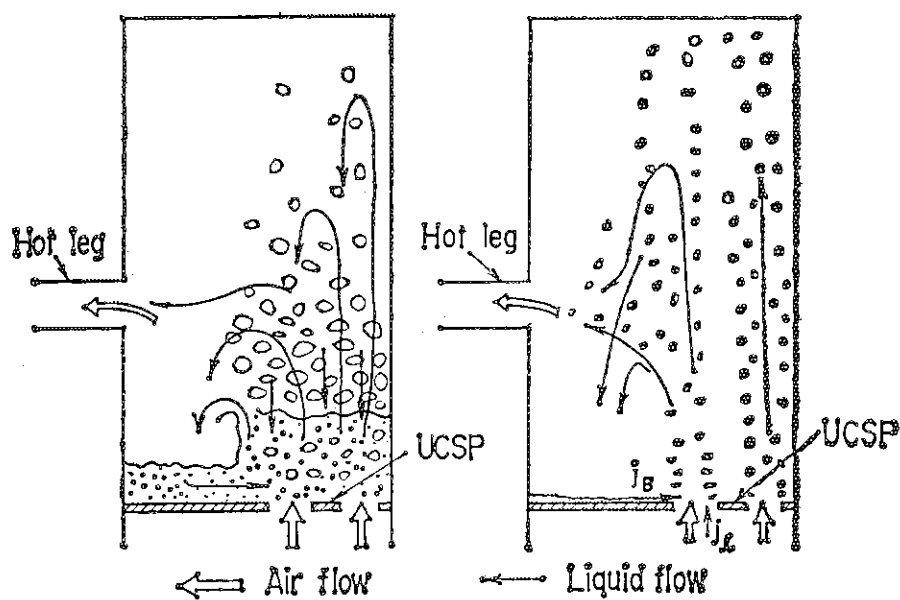


Fig. 4. 4 可視化により観測された上部プレナム内の流動状態⁽⁶²⁾

Flow Pattern Observed in Upper Plenum by Visualization

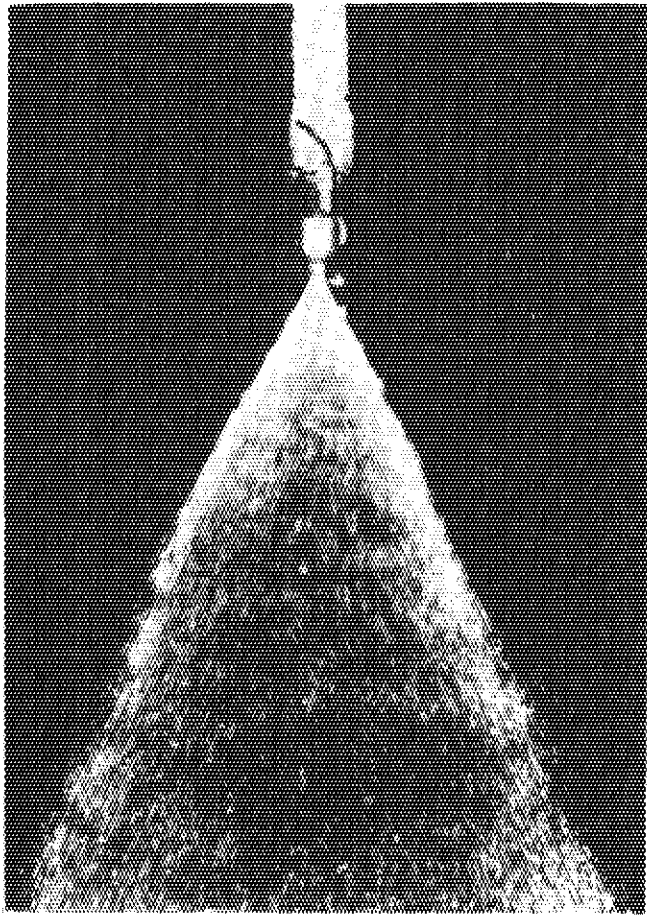


Fig. 4. 5 コアスプレーノズルの噴霧状況⁽⁶³⁾
Spray from a Core Spray Nozzle

時間(秒)	燃料の挙動
0.0	パルス出力発生。
0.06	膜沸騰開始。
0.12	燃料被覆管赤熱開始。ペレット-ペレット間の位置の被覆管の赤熱(昇温)遅れる。
0.20	被覆管表面温度は 1700°C を記録し、熱電対破損。激しい膜沸騰。自然対流が発生。
0.25	画面全体を覆うほどの膜厚の大きな膜沸騰, 波の伝ば速度~80 cm/秒。
0.54	燃料棒全体赤熱, しかし, ペレット-ペレット境界部ではまだやや黒味を帯びている。
1.0	被覆管温度は最高に達し(推定 2,000 °C), 白色を帯びる。
2.2	燃料棒下部の 5% 濃縮ペレット領域においてクメンチが開始し, 小さな気泡の上昇が認められる。
3.5	発熱部上部において縦方向のクラック判明。
4.6	10% 濃縮ペレット領域下部においてクメンチ開始。
7.12	燃料棒の 1/3 が冷却され黒色となり, 大きな気泡発生。
8.65	燃料棒上部からもクメンチが起こり, 発熱部中心ややや上部を残して黒色となる。
9.7	燃料棒すべての領域で被覆管は冷やされ, 黒色となる。
15.0	気泡の発生頻度, 上昇速度とも時間の経過と共に減少, 燃料棒著しく変形。撮影終了。

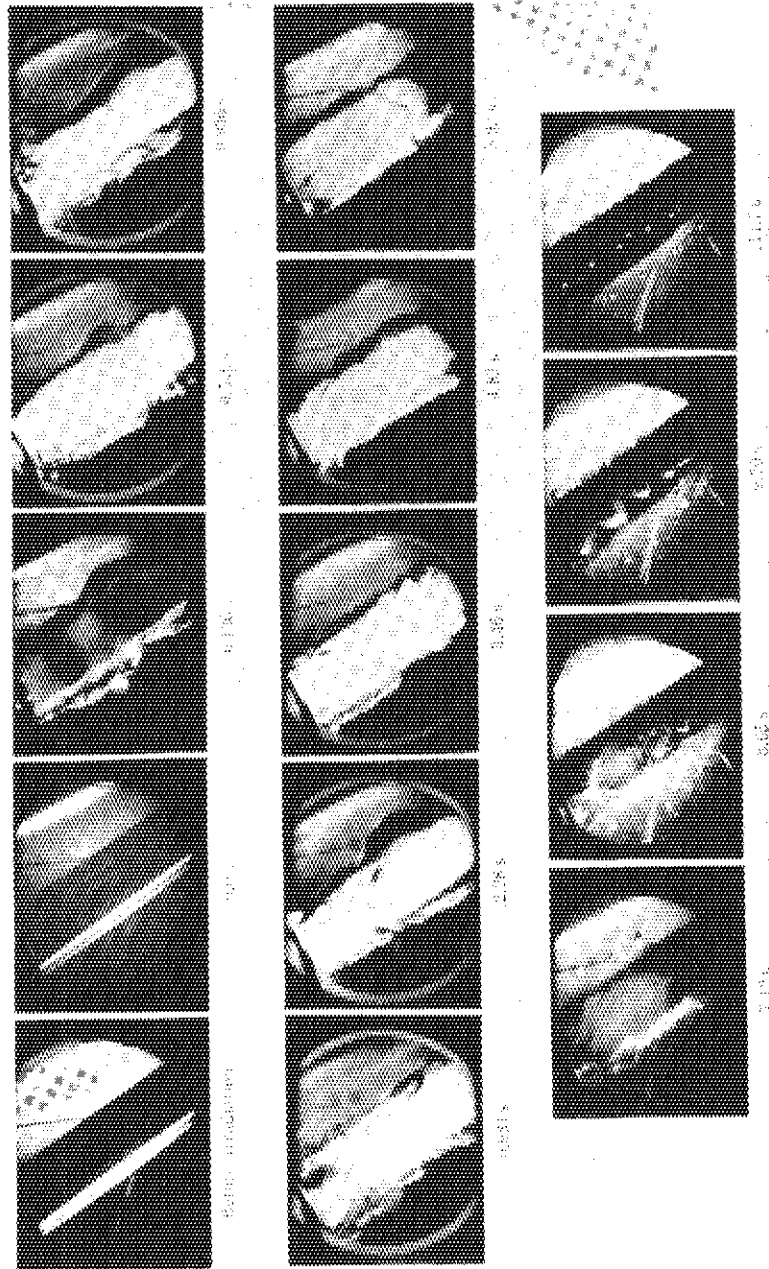
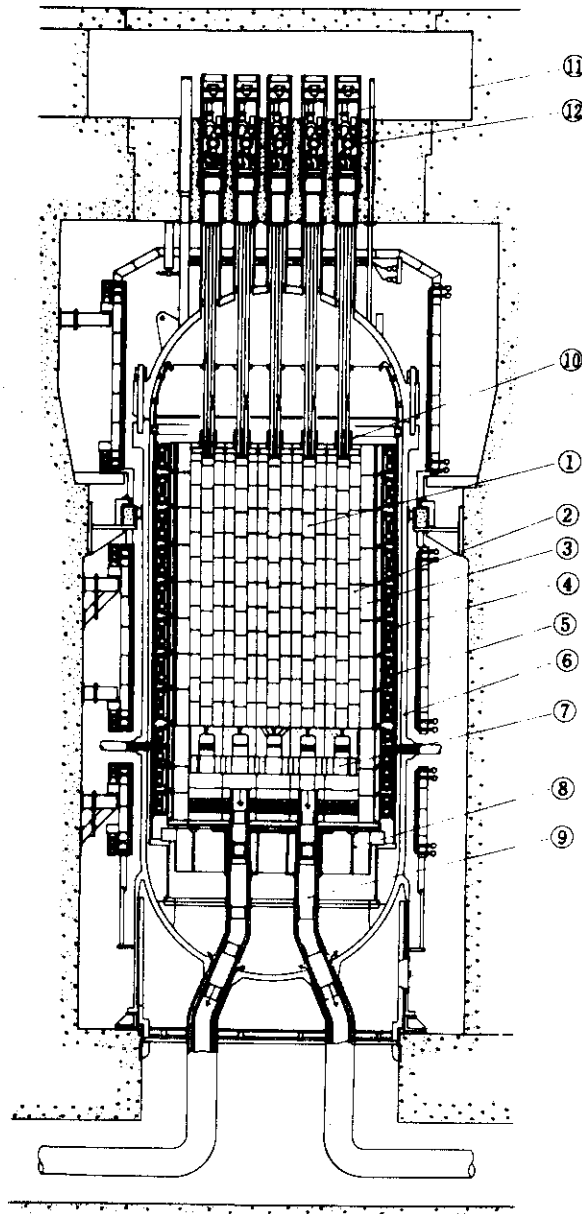


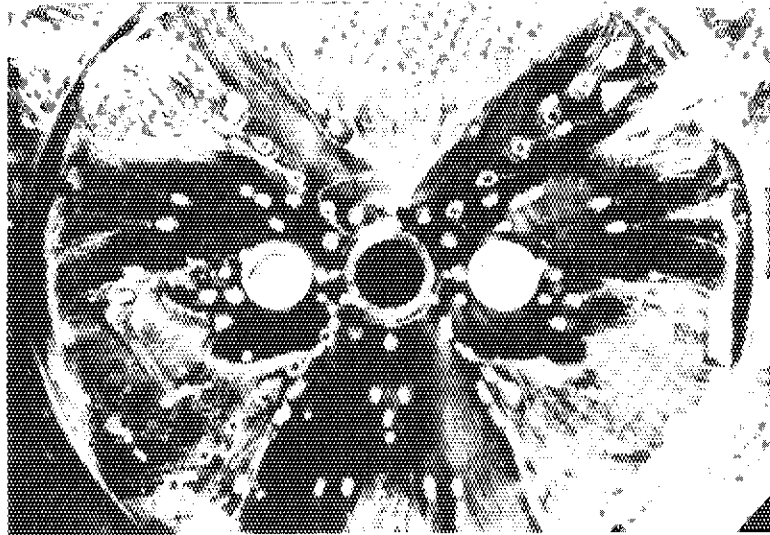
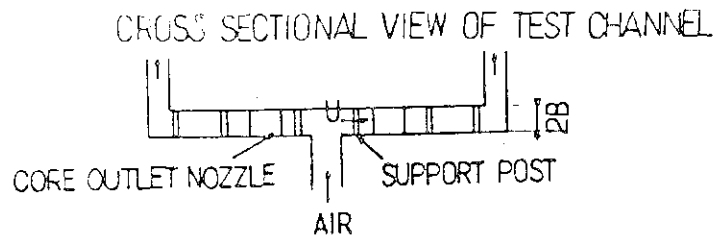
Fig. 4.6 原子炉燃料棒急速加熱時の挙動(64, 65)
 Transient Fuel Behavior of Nuclear Fuel Rod under
 Rapid Heating Condition



番号	名称	番号	名称
①	燃料体	⑦	高温プレナム
②	可動反射体	⑧	ダイヤグリッド
③	固定反射体	⑨	冷却材出口管
④	炉心拘束機構	⑩	流量調節装置
⑤	コアバレル	⑪	スタンドパイプ
⑥	原子炉圧力容器	⑫	制御棒駆動装置

Fig. 4.7 多目的高温ガス炉の炉体構造⁽⁶⁶⁾

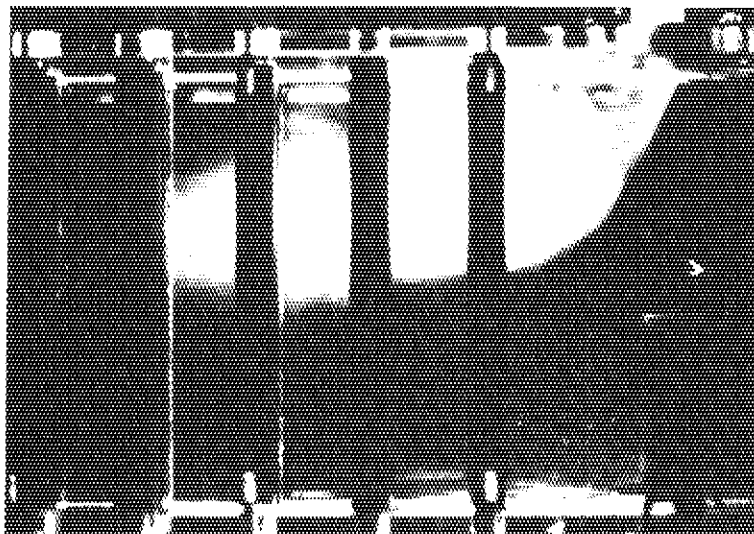
Structure of Multi-purpose VHTR



$$Re = \frac{UB}{L} = 4.4 \times 10^4 \quad V = 75 \text{ m/s}$$

Fig. 4. 8 多目的高温ガス炉炉心底部の流れ（油膜法）⁽⁶⁷⁾

Flow Visualized by Oil Film in Lower Plenum of Multi-purpose VHTR



$$U_0 = 3.0 \text{ m/s}$$

Fig. 4. 9 プレナムポストの回りの流れ（ドライアイス煙）⁽⁶⁷⁾

Flow Visualized by Dry Ice Smoke around Plenum Post

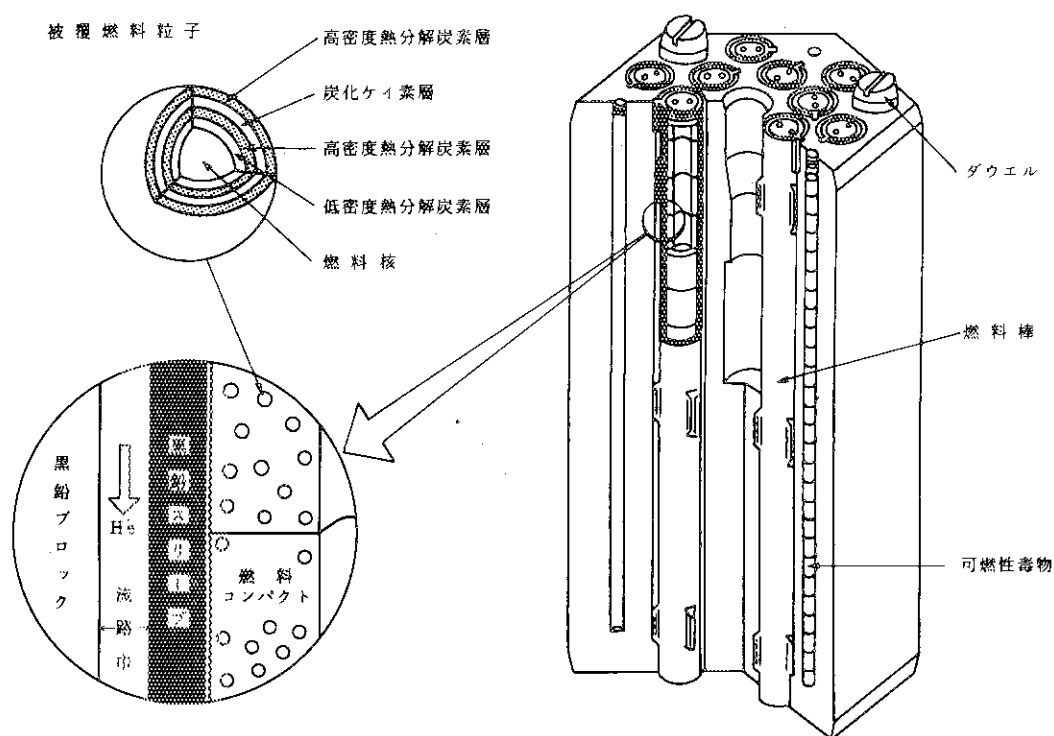


Fig. 4.10 多目的高温ガス炉用燃料体の構造⁽⁶⁸⁾

Cutaway View of Multi-purpose VHTR Fuel Block

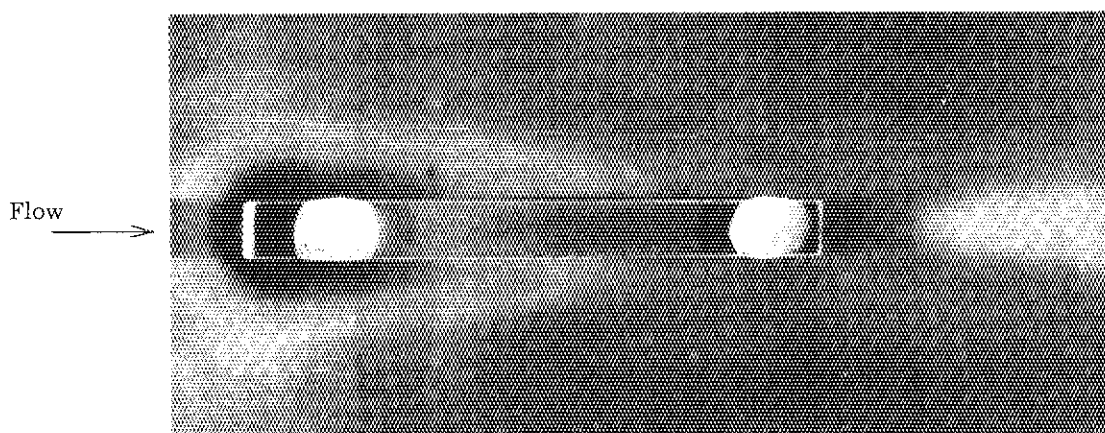
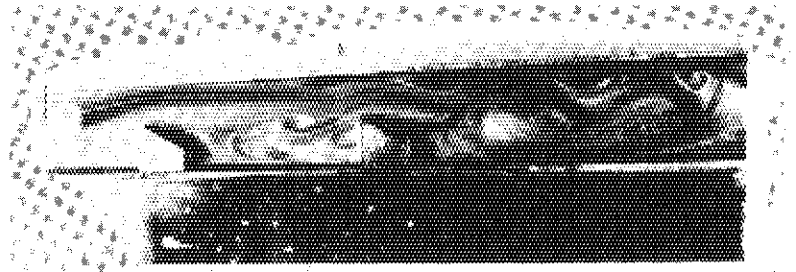
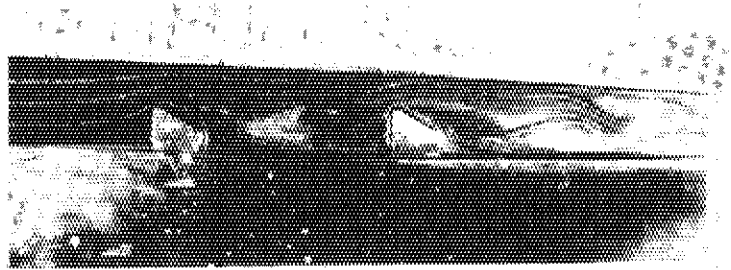


Fig. 4.11 スペースリブ回りの流れ (液晶)⁽⁶⁹⁾

Flow Visualized by Liquid Crystal Film
around Spacer Rib



(a) $Re = 737$



(b) $Re = 1350$

Fig. 4. 12 拡大, 縮小流路におけるプロモーターの
回りの流れ (アルミナ粒子)⁽⁷⁰⁾

Flow Visualized by Suspended Alumina Particle
around Turbulence Promotor in Convergent and
Divergent Channel

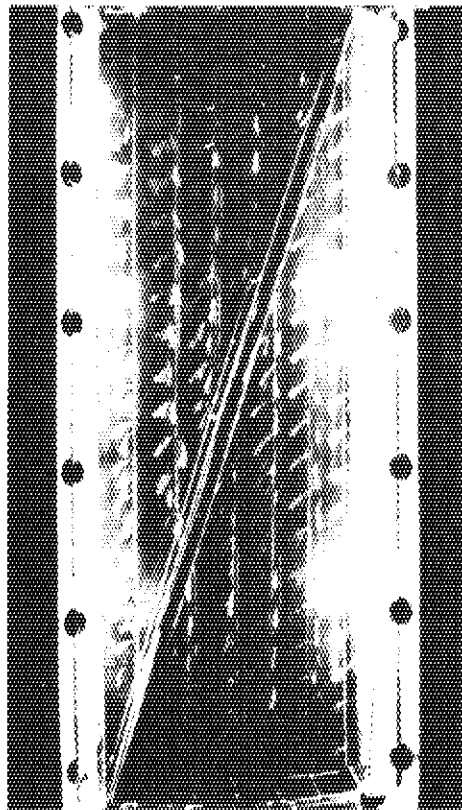


Fig. 4. 13 ステップバッフル型熱交換器胴部の流れ (タフト法)⁽⁷¹⁾

Flow Visualized by Tuft in Drum of
Heat Exchanger with Step Baffle

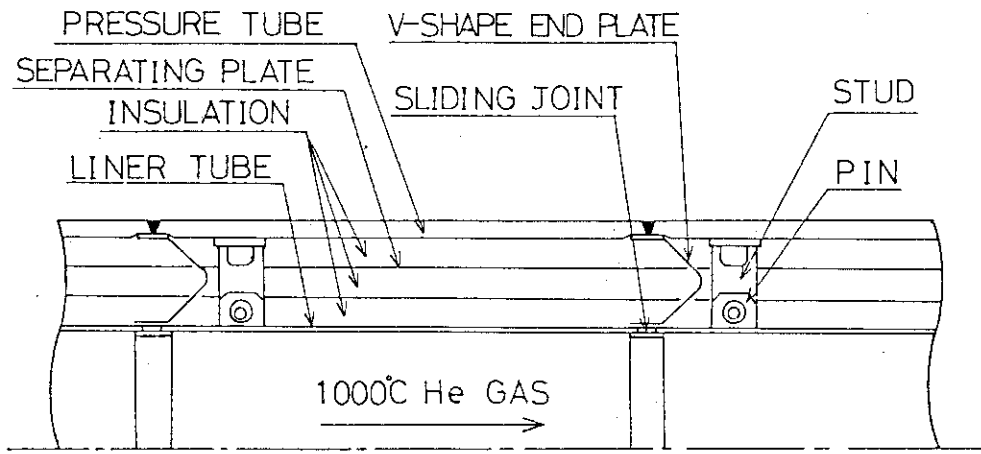


Fig.4.14 高温断熱配管の構造⁽⁷⁷⁾

Structure of Hot Gas Duct

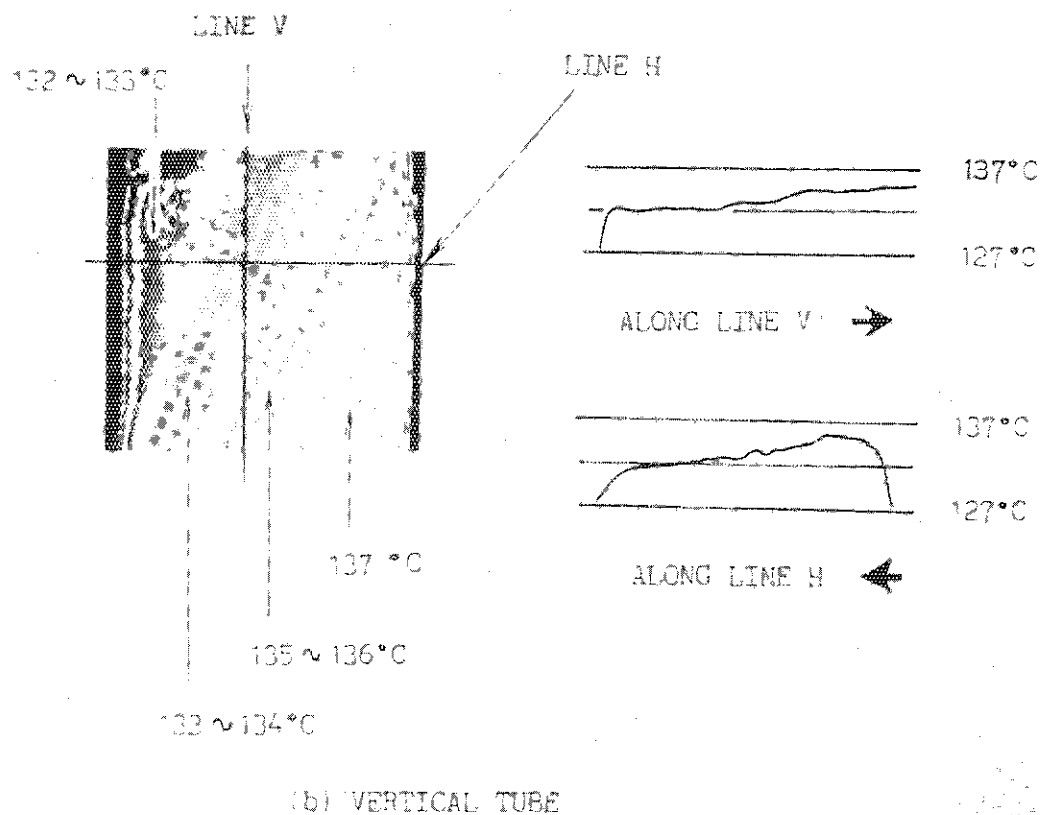
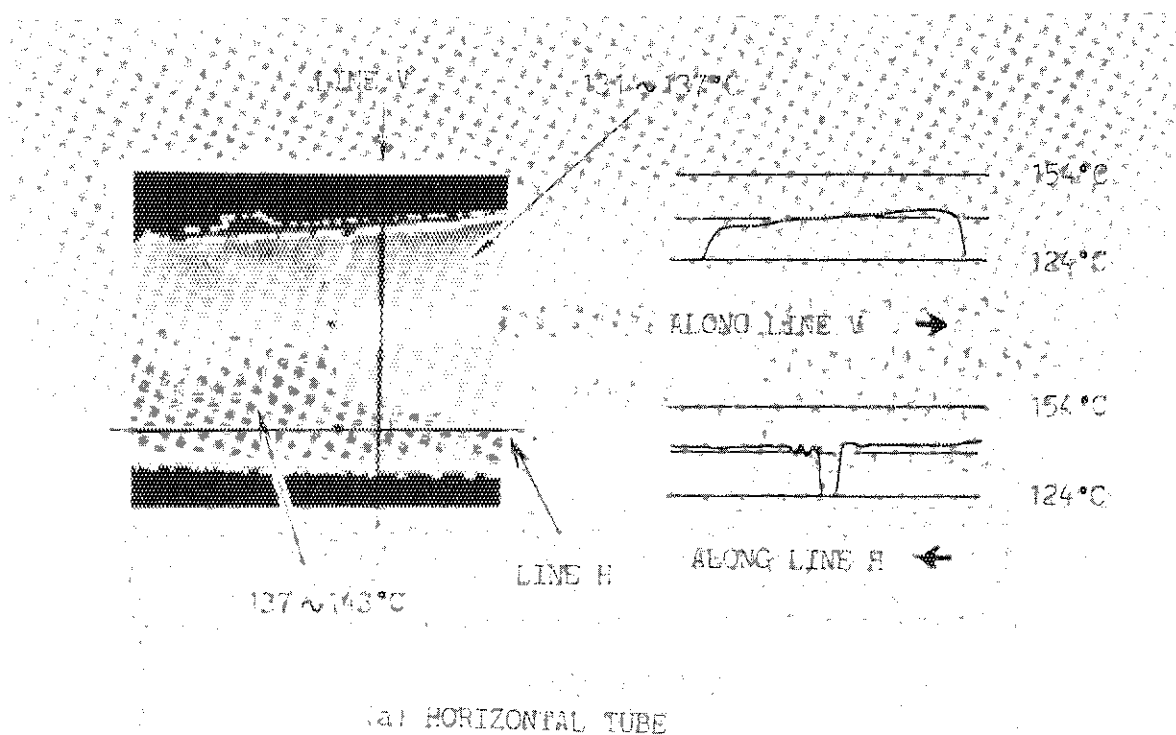


Fig. 4.15 高温断熱配管の表面温度分布⁽⁷⁷⁾
 Temperature Distribution of Pressure Tube
 (He Gas Temperature = 950°C)
 (He Gas Pressure = 4.0 MPa)

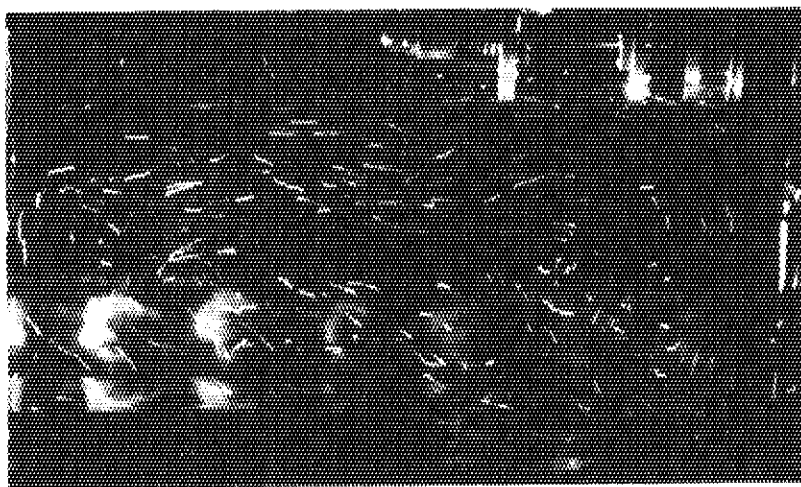


Fig. 4.16 炉心上部機構の流れ(78)

(ポリスチロール粒子)

Flow in Upper Core Plenum
(polystyrene particle)

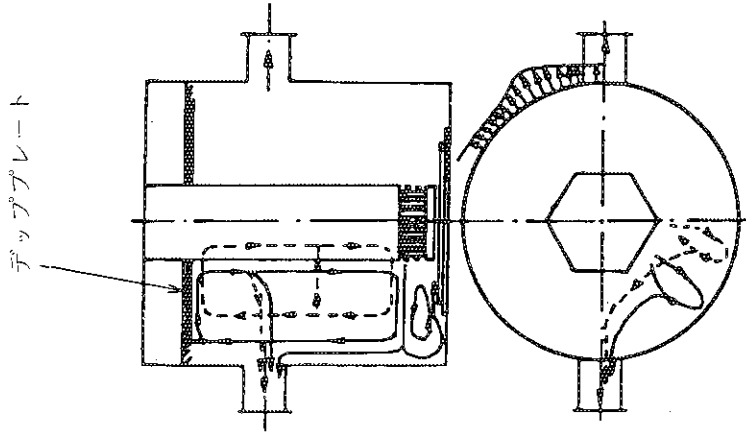


Fig. 4.17 炉心上部機構の流れの模式図(78)

Schematic Drawing of Flow in
Upper Core Plenum

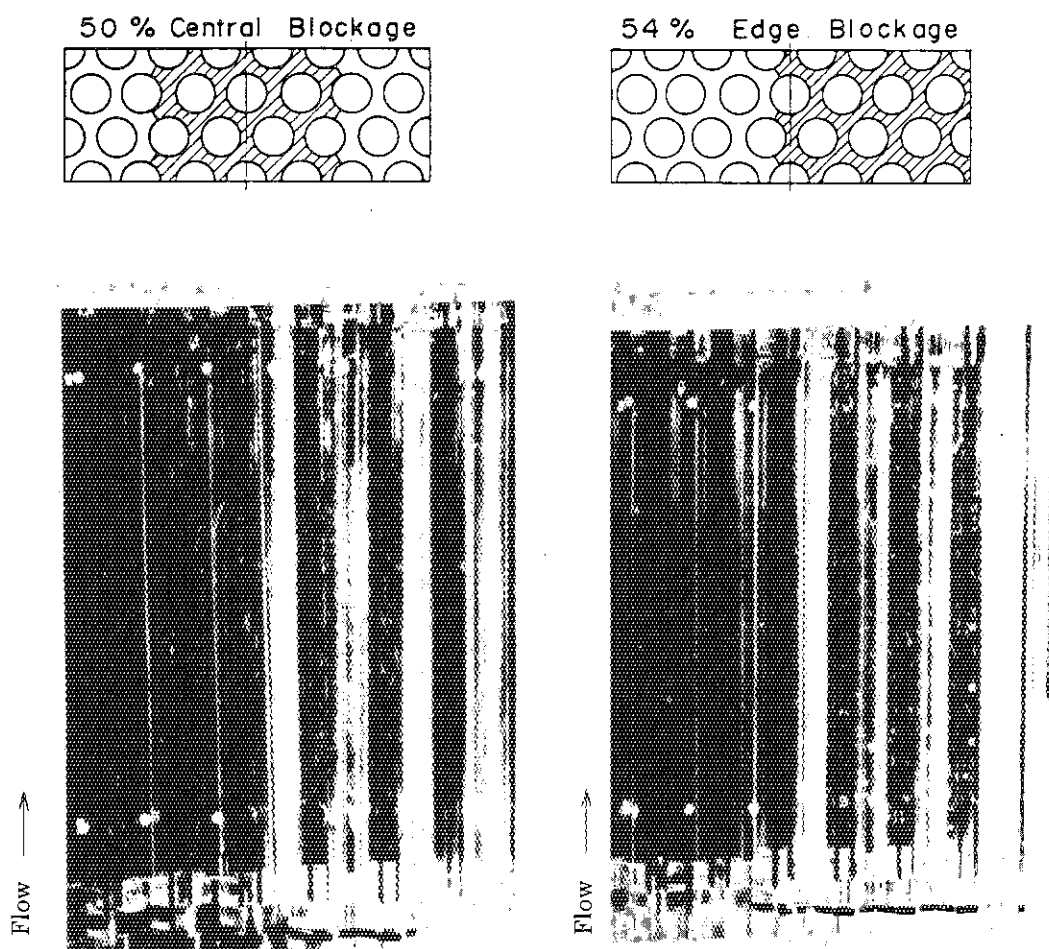


Fig. 4. 18 高速増殖炉用燃料棒束のブロック後方の流れ (空気泡, 染料)⁽⁷⁹⁾

Flow Visualized by Air Bubble and Dye behind
a Simulated Fuel Pin Assembly of LMFBR

参考文献

- 1) 浅沼強編：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店（1977）。
- 2) 流れの可視化学会：第1回講習会教材・流れの可視化技術とコンピュータの応用（1983）。
- 3) 明石光一郎：同上，P. 51-58。
- 4) 溝尻光学技術資料提供
- 5) 日本機械学会：流体工学における視聴覚研究分科会成果報告書（1982）。
- 6) 日本機械学会編：写真集「流れ」，丸善（1984）。
- 7) 豊倉富太郎，亀本喬司：流体工学，実教出版社，P. 193-197（1976）。
- 8) R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot : Transport Phenomena, John Wiley & Sons, p.142-144 (1960).
- 9) 文献 (7), P. 228 - 229
- 10) 種子田定俊：流れの可視化学会誌，vol. 1, No 1, P. 50-56（1981）。
- 11) 古屋善正：流体力学Ⅱ（粘性流体編），共立出版，P. 75（1973）。
- 12) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，P. 199-201（1976）。
- 13) 坂上治郎：第1回流れの可視化シンポジウム講演論文集，P. 9-12（1973）。
- 14) 文献 (11), P. 81-82
- 15) 伊藤光：日本航空宇宙学会誌，vol. 28, No 318, P. 25-31（1980）。
- 16) H. Schlichting : Boundary-Layer Theory (seventh edition), McGraw-Hill, p.525-529 (1979).
- 17) 生井武文，井上雅弘：粘性流体の力学，理工学社，p. 135（1978）。
- 18) 菱田幹雄，長野靖尚：機械の研究，vol. 35, No 11, P. 1232-1236（1983）。
- 19) 笠木伸英，入谷陽一郎，平田賢：流れの可視化学会誌，vol. 2, No 6, P. 167-172（1982）。
- 20) N. Ukeguchi and Y. Kuramoto : Proc. of the 2nd Int. JSME Symp., Tokyo, vol.2, p.131 (1972).
- 21) 高野臆：流体力学，岩波書店，P. 227-233（1976）。
- 22) 富田幸雄：流体力学序説，養賢堂，P. 275-277（1971）。
- 23) 鳥井薫：第1回流れの可視化シンポジウム講演論文集，P. 33-36（1973）。
- 24) 中谷登，小野明，山田朝治：第1回流れの可視化シンポジウム講演論文集，P. 53-56（1973）。
- 25) 文献 (14), P. 225-227
- 26) 文献 (16), P. 73
- 27) 文献 (7), P. 177-180
- 28) 種子田定俊：ターボ機械，vol. 7, No 11, P. 43（1979）。
- 29) 日野幹雄：対流力学，朝倉書店，P. 144（1976）。
- 30) 浅沼強，谷田好通，栗原利男：第2回流れの可視化シンポジウム講演論文集，P. 37-42（1974）。
- 31) 古屋善正，村上光清，山田豊：流体工学，朝倉書店，P. 122（1974）。

- 32) 生井武文：流れの力学，コロナ社，P. 119-120 (1978)。
- 33) 日本機械学会：技術資料「管路ダクトの流体抵抗」P. 82 (1979)。
- 34) 文献(10)，P. 41-42
- 35) 文献(17)，P. 172-178
- 36) 宝田明：応用流体力学，共立出版，P. 90-94 (1979)。
- 37) 文献(11)，P. 62-68。
- 38) 文献(31)，P. 247。
- 39) 山田日出夫：第4回流れの可視化シンポジウム講演論文集，P. 119-124 (1976)。
- 40) 種子田定俊，天本肇，石井幸治：九州大学応用力学研究所所報，第36号，P. 49-56 (1972)。
- 41) 田古里哲夫：流れの可視化学会誌，vol. 3, No.9, 口絵7 (1983)。
- 42) 文献(31)，P. 242-243。
- 43) 文献(6)，P. 84-85。
- 44) 奥野武俊：第2回流れの可視化シンポジウム講演論文集，P. 55-56 (1974)。
- 45) 文献(1)，P. 179。
- 46) 岡本芳三：流体力学，vol. 16, P. 18-27 (1980)。
- 47) 岡本芳三：日本機械学会講習会(第478回)，P. 9-13。
- 48) R.H. Sabersky, G. Hauptmann : Int. J. Heat Mass Transfer, vol.10, No.10, p.1499-1508 (1967)。
- 49) F.C. Gunther : Trans. ASME, vol.73, No.2, p.115-123 (1951)。
- 50) Y.Y. Hsu and R.W. Graham : NASA, TND-1564 (1963)。
- 51) L.M. Jiji, J.A. Clark : Trans. ASME, Ser.C, vol.86, No.1, p.50-58 (1964)。
- 52) F.E. Tippets : Trans. ASME, Ser.C, vol.86, No.1, p.12-22 (1964)。
- 53) L.S. Tong : Int. J. Heat Mass Transfer, vol.11, No.8, p.1208-1211 (1968)。
- 54) W.R. Mixon, H.A. MacHill : CF-58-8-6, p.1-7 (1958)。
- 55) A.R. Orban, H.R. Hazard : BMI-1258, p.1-42 (1958)。
- 56) F.A. Grockowski, et al. : Nucl. Eng. Sci. Conf. at Chicago, p.1-44 (1958)。
- 57) 早田邦久ほか3名：JAERI-M 6708。
- 58) 熊丸博滋，田坂完二：JAERI-M 9307。
- 59) B.D.G. Piggott, R.B. Duffey : Nucl. Eng. Desi., vol.32, p.182-190 (1975)。
- 60) 日本原子力研究所：原子力安全性研究の現状，P. 57 (1983)。
- 61) T. Iguchi, T. Okubo, Y. Murao : J. Nucl. Sci. Technol., vol.20, No.8, p.698-700 (1983)。

- 62) T. Iguchi, Y. Murao : J. Nucl. Sci. Technol., vol.20, No.6, p.453-466 (1983).
- 63) M. Tanaka ほか6名 : Nucl. Technol., vol.54, p.54-67 (1981).
- 64) S. Saito ほか3名 : J. Nucl. Sci. Technol., vol.18, No.6, p.427-439 (1981).
- 65) 齊藤伸三 : 流れの可視化学会誌, vol. 2, No 5, P. 38-45 (1982)。
- 66) 日本原子力研究所 : 多目的高温ガス炉研究開発の現状, P. 20 (1981)。
- 67) バブコック日立吳工場技術資料提供
- 68) 日本原子力研究所高温工学部 : 高温工学の研究と開発, P. 3 (1983)。
- 69) 鈴木邦彦, 秋野詔夫, 佐野川好母 : 流れの可視化学会誌, vol. 1, No 2, P. 67-70 (1981)。
- 70) 椎名保顕ほか6名 : 第4回流れの可視化シンポジウム予稿集, P. 115-118 (1974)。
- 71) 三菱重工業長崎研究所技術資料提供
- 72) 船川正哉, 馬越立郎 : 日本機械学会論文集, vol. 35, No 275, P. 1417-1424 (1969)。
- 73) 相場真也, 土田一, 太田照和 : 日本機械学会論文集, vol. 48, No 434, P. 1976-1984 (1982)。
- 74) 岡本芳三, 花輪寿一, 亀岡利行 : 日本機械学会論文集, vol. 37, No 294, P. 305-312 (1971)。
- 75) 石谷清幹, 西川栄一 : 日本機械学会論文集, vol. 40, No 337, P. 2599-2608 (1974)。
- 76) 下村寛昭, 岡本芳三 : 機械の研究, vol. 26, No 10, P. 1247-1255 (1974)。
- 77) 菱田誠ほか6名 : JAERI - M 83 - 180 (1983)。
- 78) 関昌弘ほか4名 : 第1回流れの可視化シンポジウム予稿集, P. 85-88 (1973)。
- 79) H. Nakamura, K. Miyaguchi, J. Takahashi : Nucl. Eng. Desi., vol.62, p.323-333 (1980)。
- 80) P.J. Munk : Proc. of Reactor Heat Transfer, p.504-518 (1973)。