

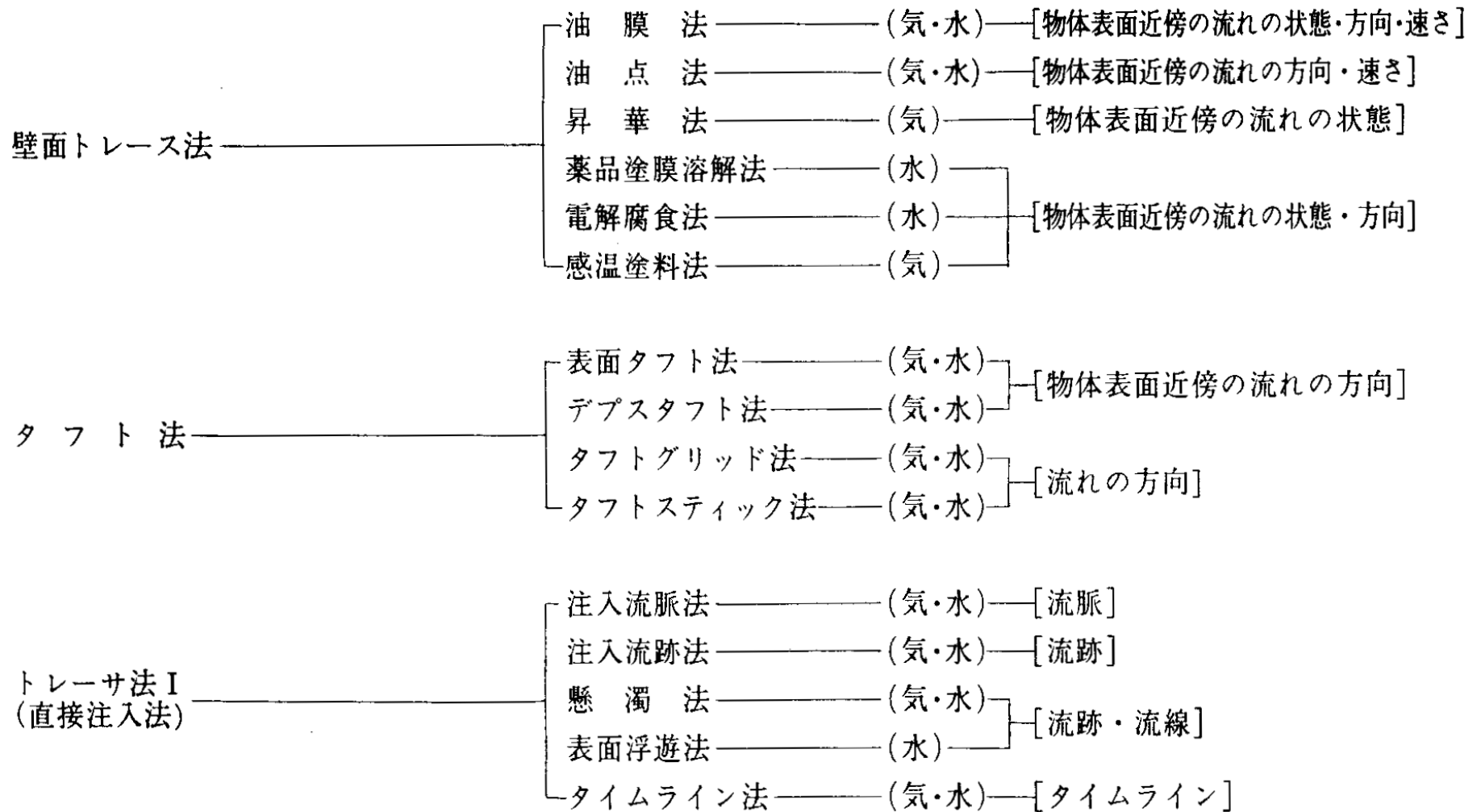
財団法人 神奈川科学技術アカデミー 教育研修講座
「エレクトロニクス実装における熱と信頼性」
2009年5月27日 かながわサイエンスパーク

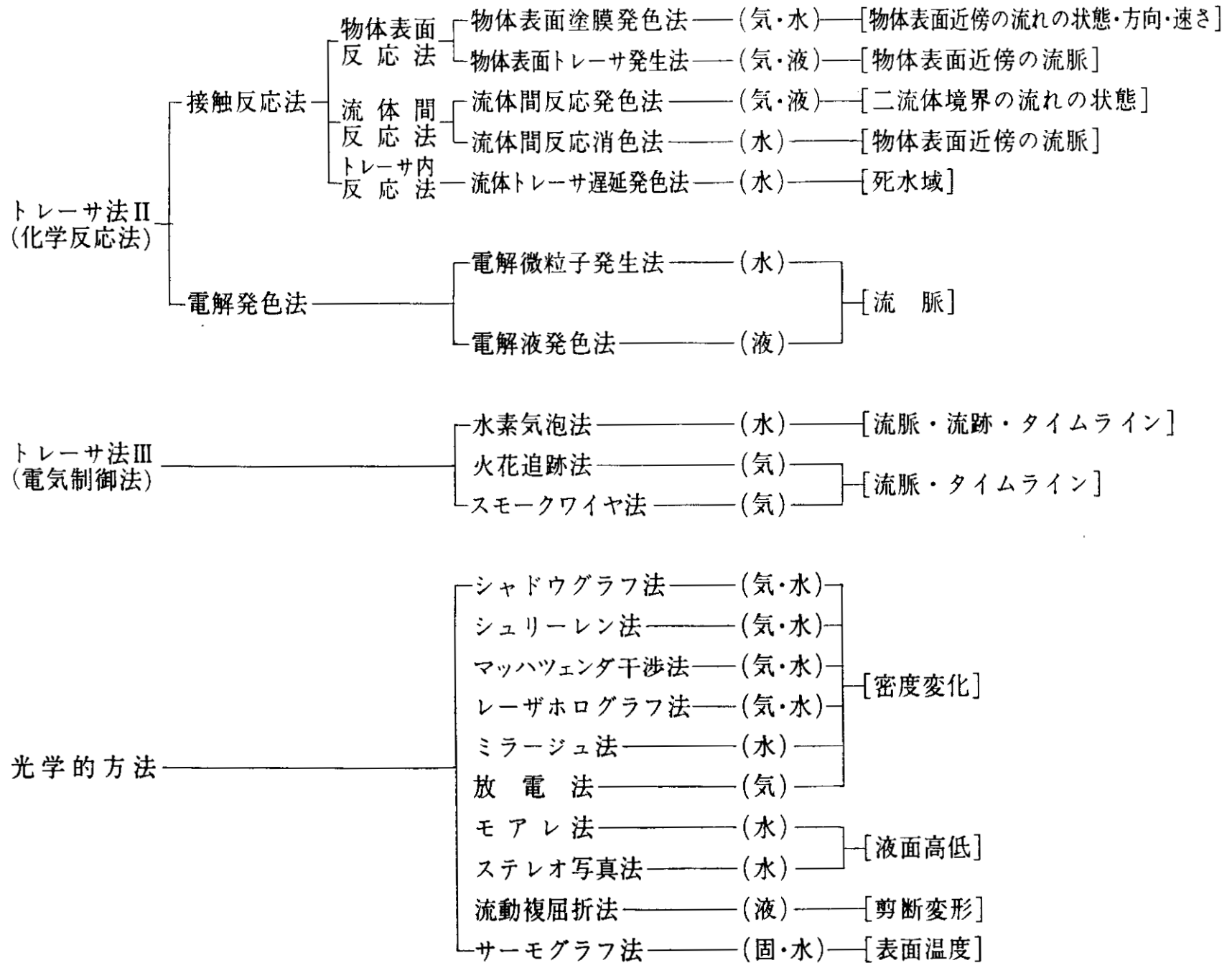
熱設計の検証 流れの可視化技術

防衛大学校 機械工学科

中村 元

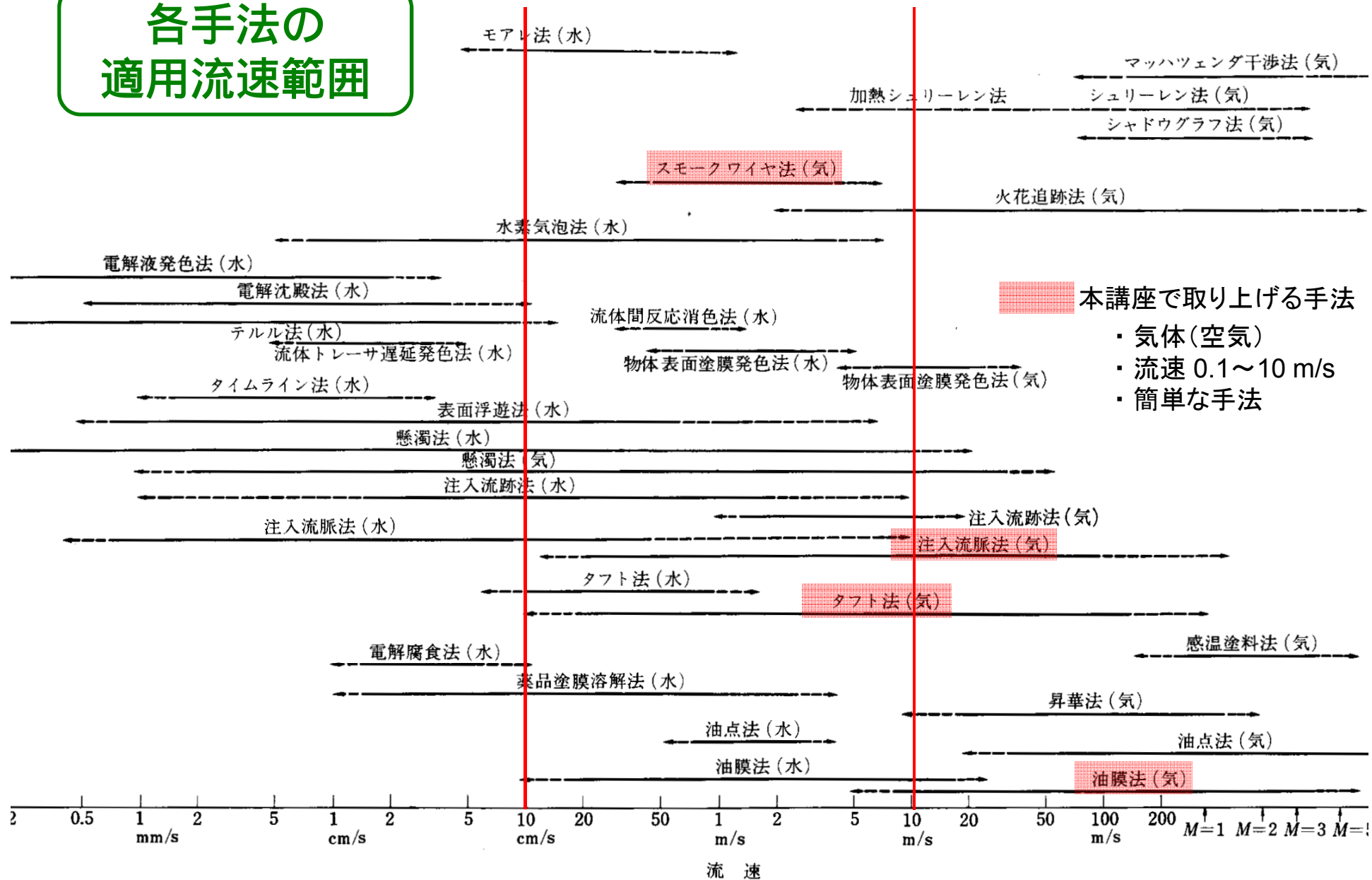
可視化手法の種類





「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼強編, 朝倉書店(1977)

各手法の適用流速範囲



「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼強 編, 朝倉書店(1977)

本講座で取り上げる手法

1. 注入流脈法（煙法）
 - ・ タバコや線香などの煙
 - ・ 灯油などのミスト
2. スモークワイヤ法
3. タフト法
4. 油膜法
5. PIV法
6. サーモグラフ法
 - ・ 定常温度分布 → 温度計測の基礎
 - ・ 非定常測定

1. 注入流脈法（煙法）

気体の流れに煙を連続的に注入すると、それが流脈(streak line)となるため流れを可視化することができる。

タバコ、線香の煙： 粒子径が $1\ \mu\text{m}$ 程度と小さく、しかも大きさが揃っているため、低速気流の観察に適している。

→ 適用流速範囲は $0.03 \sim 2\ \text{m/s}$ 程度

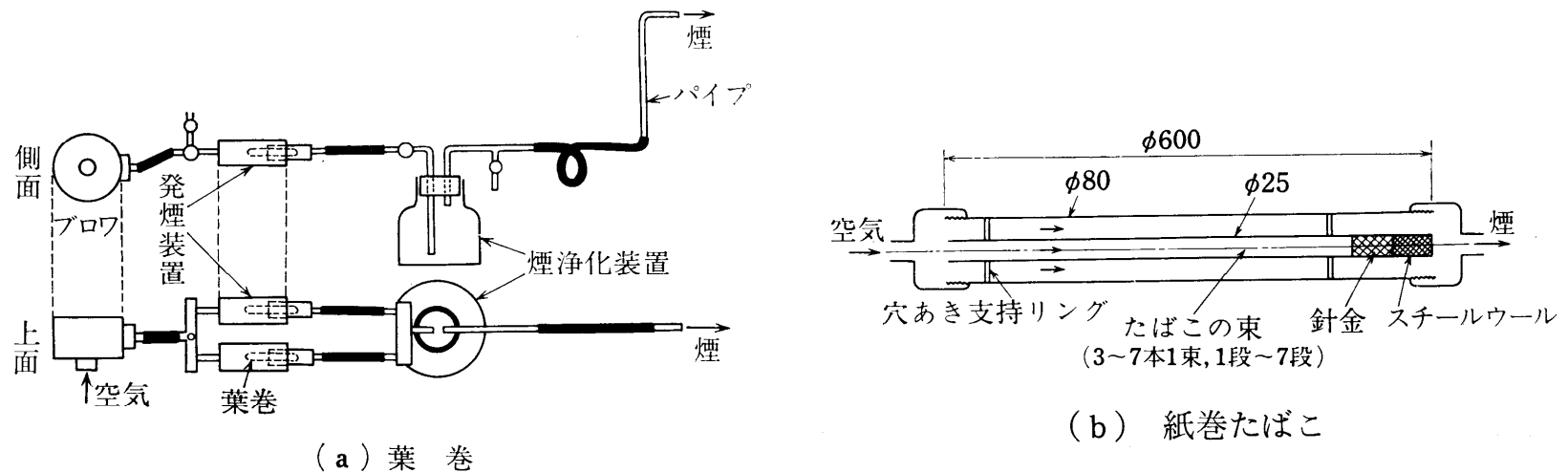
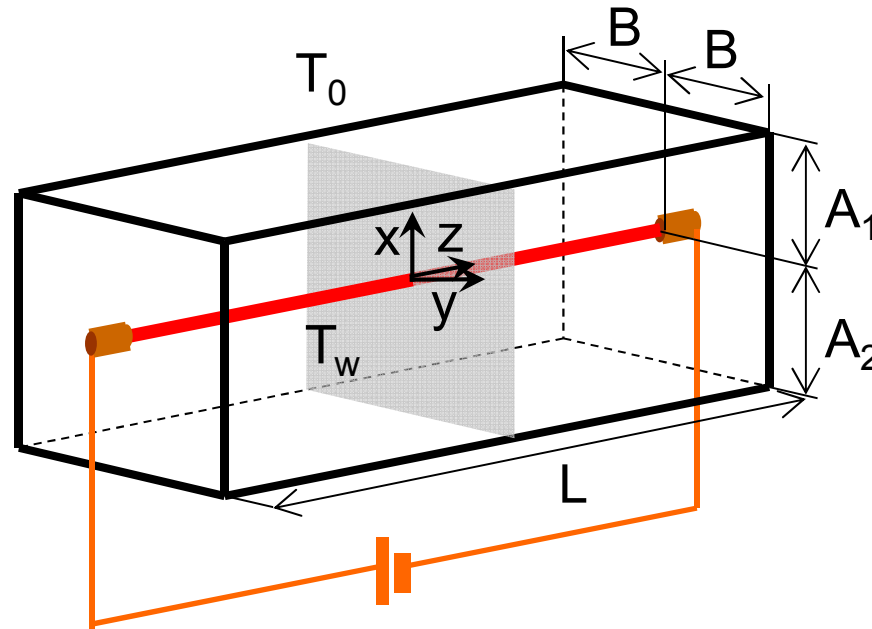


図 5.1 たばこ煙発生器（たばこ煙法）

「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼強編, 朝倉書店(1977)

線香による
自然対流の
可視化事例



$A_1 = 65 \text{ mm}$
 $A_2 = 40 \text{ mm}$
 $B = 75 \text{ mm}$
 $L = 300 \text{ mm}$



定常流 ($T_w - T_0 = 30$)



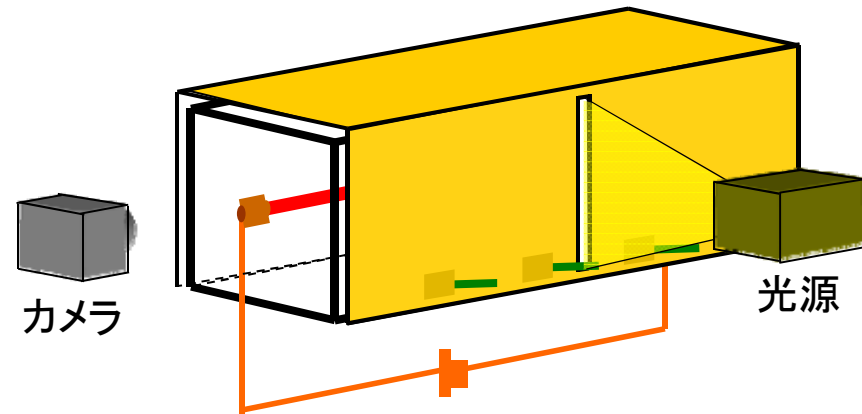
周期的揺動 ($T_w - T_0 = 112$)

加熱細線まわりの自然対流の可視化 (線香の煙)

中村, 他 : 機論B, 67巻 654号 (2001.2), p.487

装置の概要

アクリル製の密閉容器内に
直径 1 mm のニクロム線を張り、
直流電源で通電加熱



可視化手順

1. アクリルの密閉容器をダンボールで覆う
(観測面, 照明光用のスリット, 線香の挿入孔のみ空けておく)
2. 照明光用のスリットから1断面を照明 (ここではスライド映写機の光源を使用)
3. 線香の挿入孔から線香を挿入し, 煙を充満させる
4. 線香を取り除き, 挿入孔(アクリル容器)を塞ぐ
5. 線香の煙のパターンをカメラで撮影, あるいは煙の動きをビデオで撮影



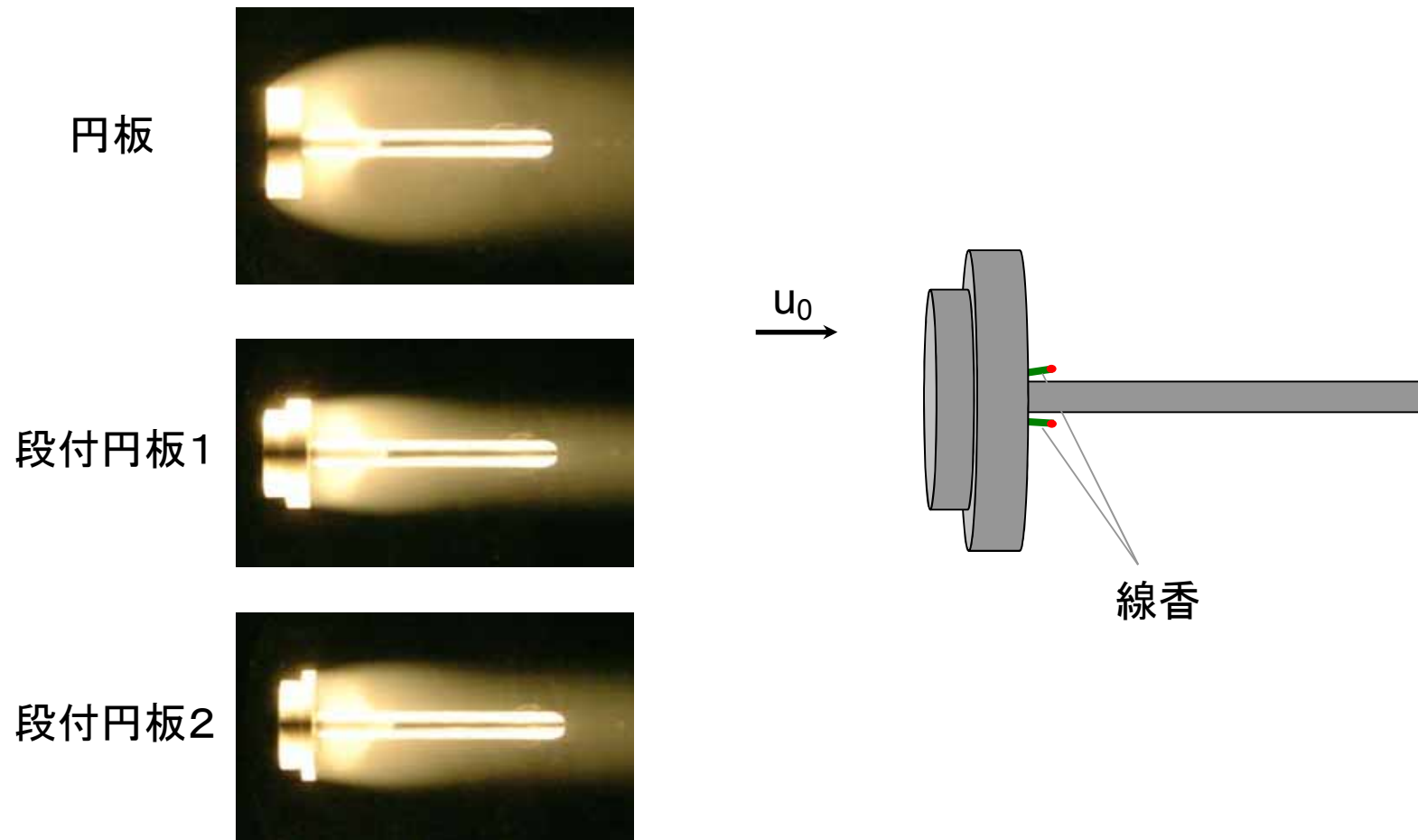
定常流 ($T_w - T_0 = 30$)



周期的揺動 ($T_w - T_0 = 112$)

線香の煙による自然対流の可視化 (ビデオ撮影)

線香による強制対流の可視化例



段付円板後流の可視化 ($u_0 = 3 \text{ m/s}$, $d = 50 \text{ mm}$)

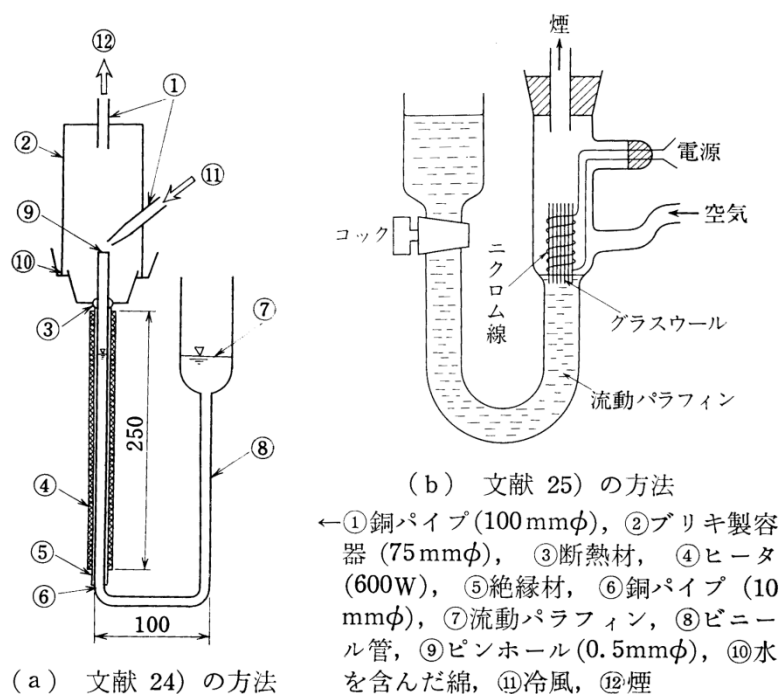
五十嵐, 他: 機論B, 73巻 725号 (2007.1), p.147

ミストによる気流の可視化

灯油，軽油，流動パラフィンなどのミスト：

油を加熱して蒸気を作り，それに冷風を当てると白煙(ミスト)が発生する。
 タバコや線香の煙と比べて粒子径が大きく，濃厚な煙が得られるため，
 流速が大きくても適用できる(流速が小さすぎると沈降速度が無視できなくなる)。

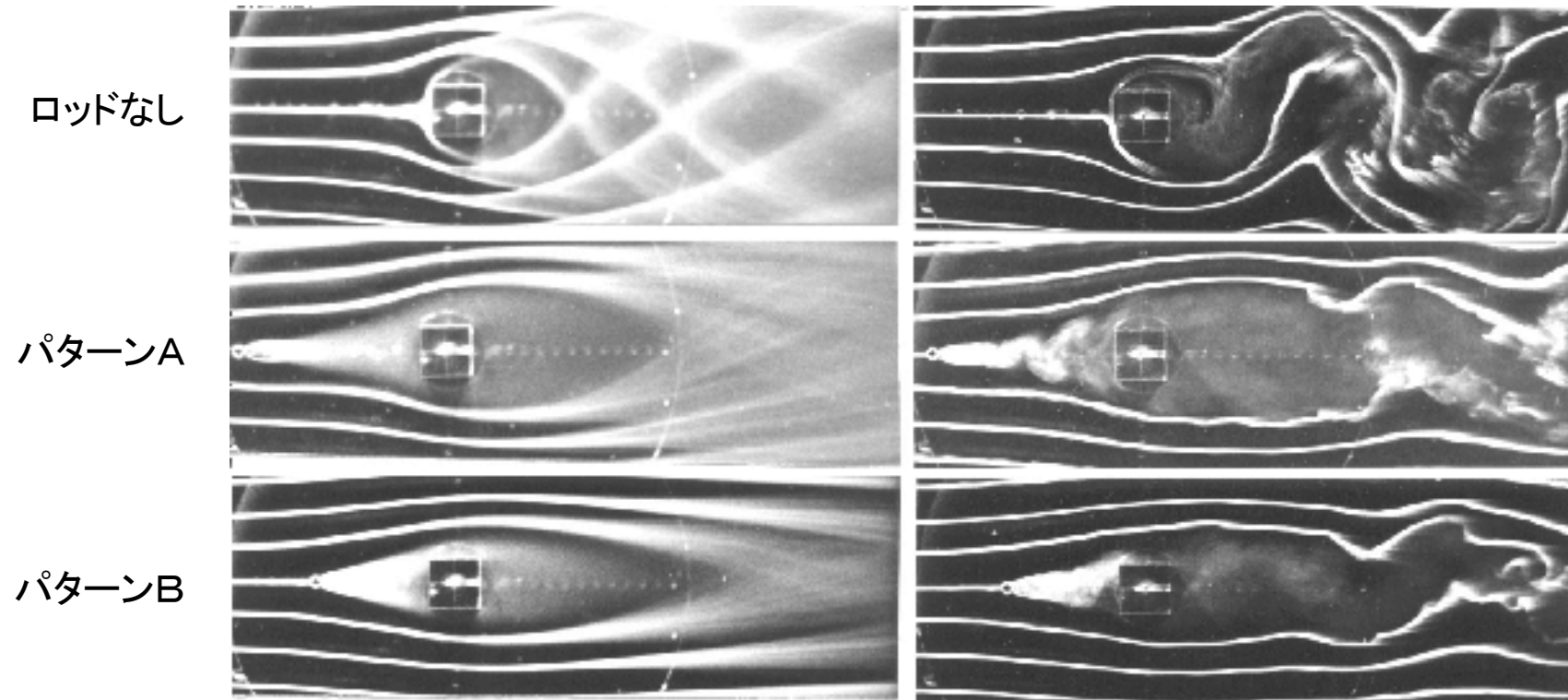
→ 適用流速範囲は 0.5 ~ 20 m/s 程度



流動パラフィンミスト発生器の例

「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼 強 編, 朝倉書店(1977)

ミストによる強制対流の可視化例



長時間露出 (1s)

瞬時

ロッドによる正方形柱まわりの流れの制御

($u_0 = 6 \text{ m/s}$, 正方形柱辺長 30 mm)

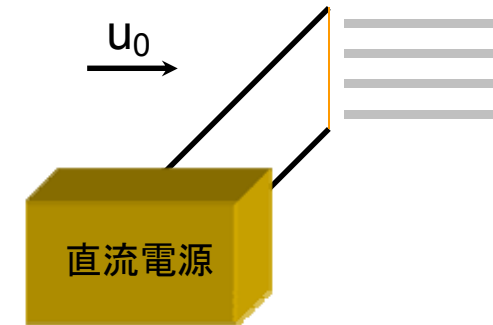
Igarashi, T., 8th Int. Symp. Flow Visualization (1998)

2. スモークワイヤ法

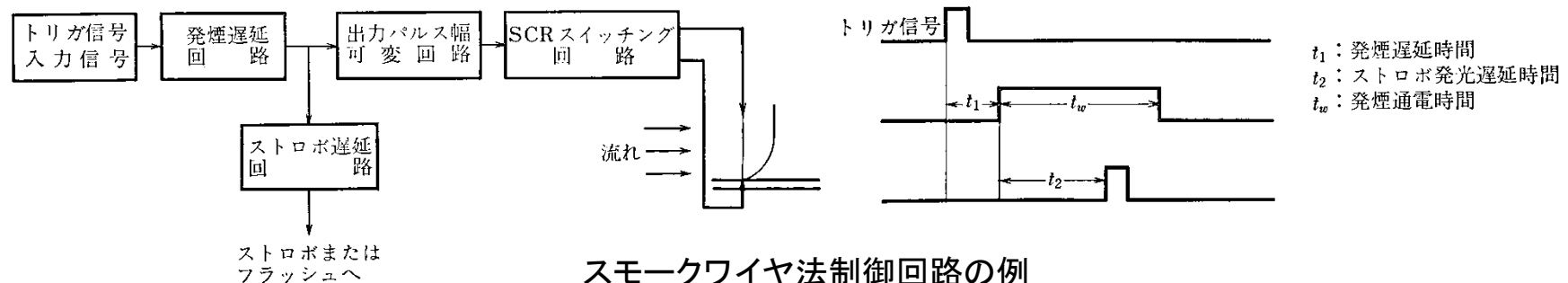
油を塗布した金属細線を通電加熱すると油が蒸発してミストとなる。
これをトレーサーとして流れを可視化する。(連続的な発煙はできない)

油 : 流動パラフィンが良く用いられる
(低風速では灯油などを混合する場合もある)

金属細線 : ニクロム線, タングステン線など
太さは 0.1 mm 程度が良い



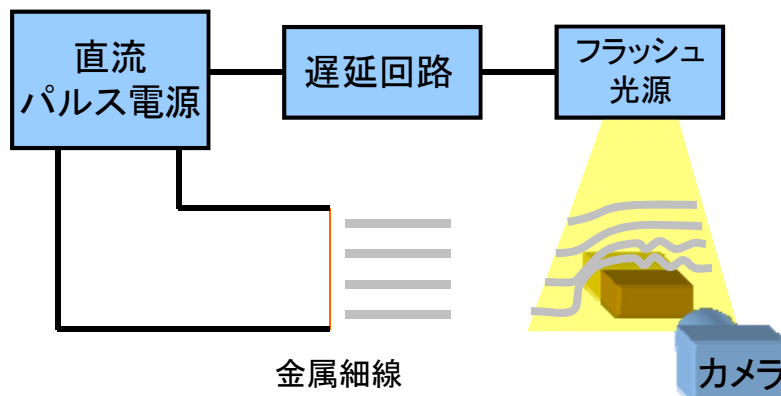
ミストには浮力が働いて上昇するため, これが無視できる流速で使用するの望ましい。
金属細線は加熱すると伸びるので, できるだけ張力がかかるように工夫しておくが良い。



スモークワイヤ法制御回路の例

「新版 流れの可視化ハンドブック」, 流れの可視化学会 編, 朝倉書店(1986)

可視化手順の一例



可視化手順

1. 金属細線に油を塗布
2. 部屋を暗くし、カメラのシャッターを開ける(露光時間 1秒程度)
3. 直流パルス電源ON (手動) → 金属細線から煙が発生
4. 遅延回路で設定した時間後にフラッシュが点灯
→ その瞬間の可視画像がカメラに写る
→ カメラのシャッターが閉じる

後述の測定事例で使用した機器

直流パルス電源：

菅原研究所 MS-405

遅延回路：

菅原研究所 RE-306

フラッシュ光源：

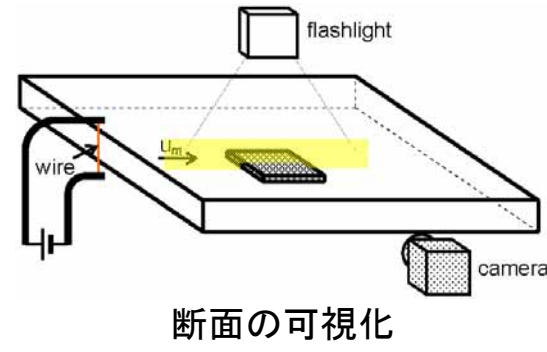
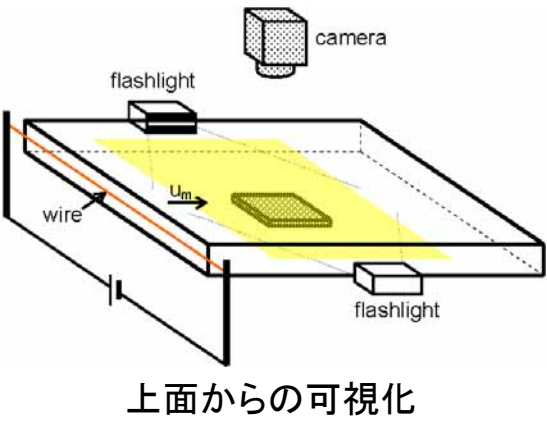
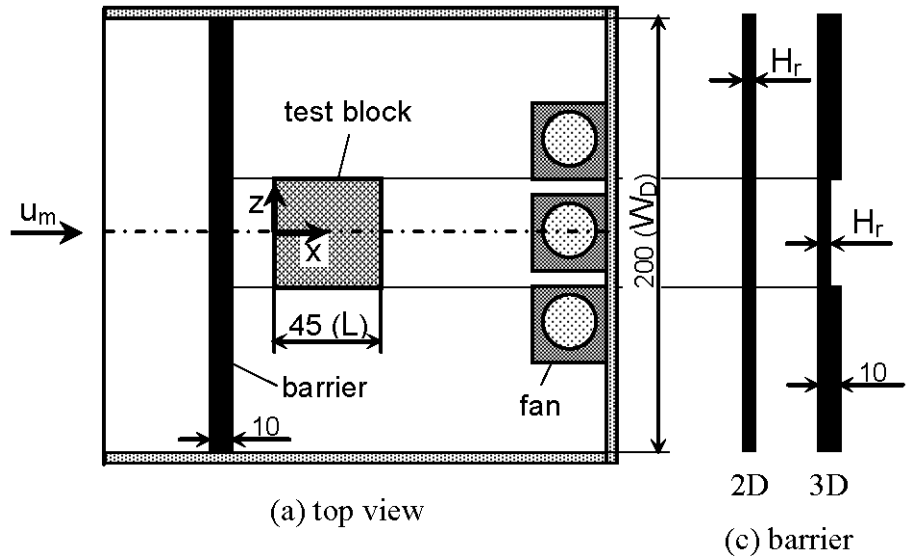
SUNPAK auto 25SR

カメラ：

富士フィルム FinePix 6900Z

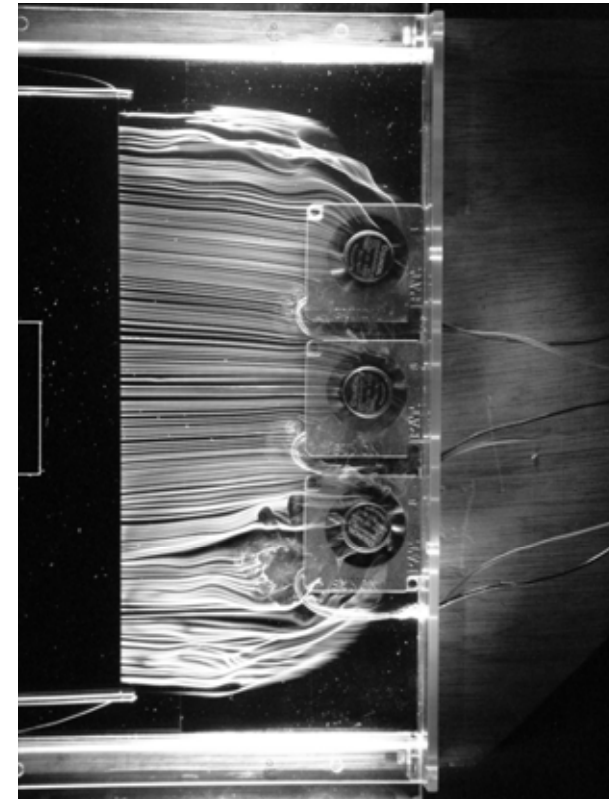
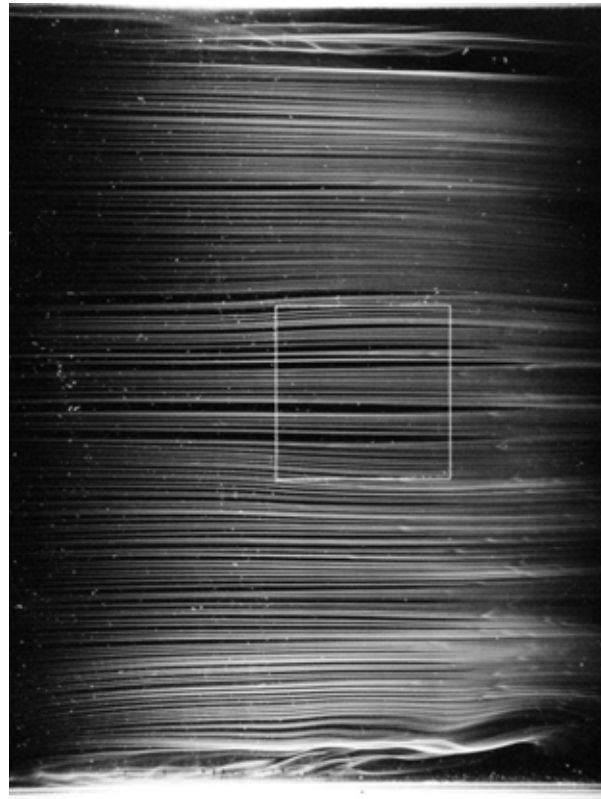
遅延回路から出力された信号は、トランジスタのスイッチング回路を介してフラッシュを点灯させる

薄型筐体内の流れの可視化例



実験装置 (ノートPCと同程度の大きさの筐体)
 (日本機械学会RC181研究分科会 熱WG ベンチマークモデル)

u_m →
上面からの
可視化

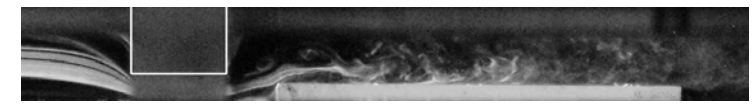
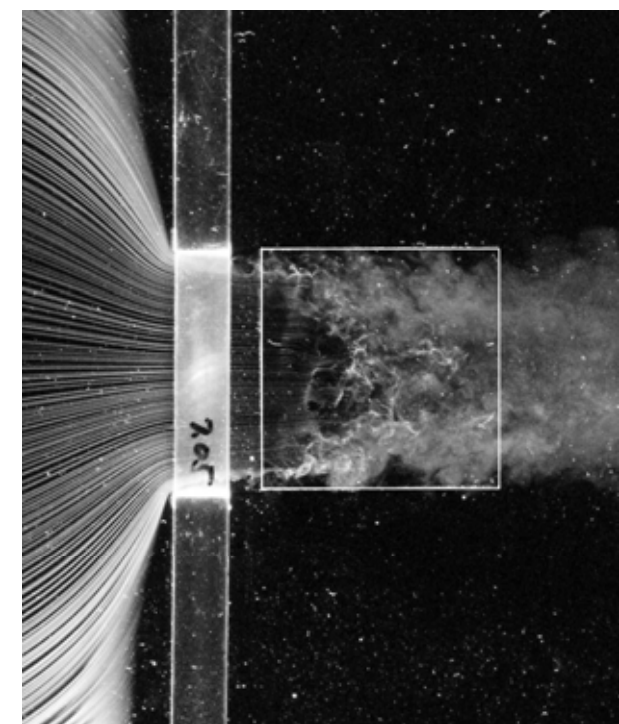
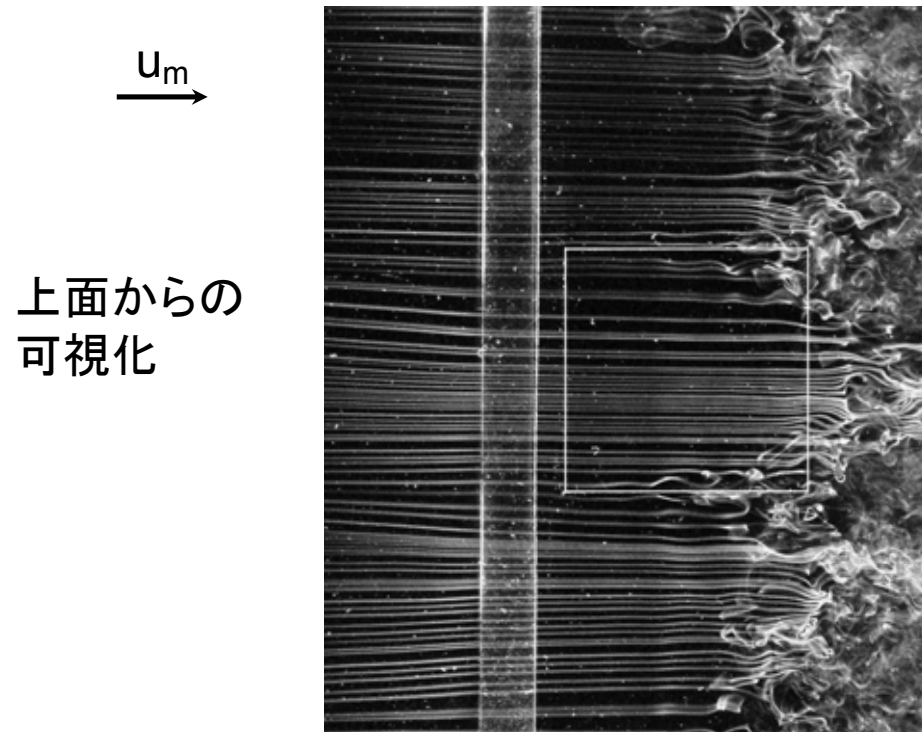


断面の可視化



スモークワイヤ法による筐体内の流れの可視化

($u_m = 0.8$ m/s ; 金属細線 - $\phi 0.1$ コンスタタン線 ; 油 - 流動パラフィン)

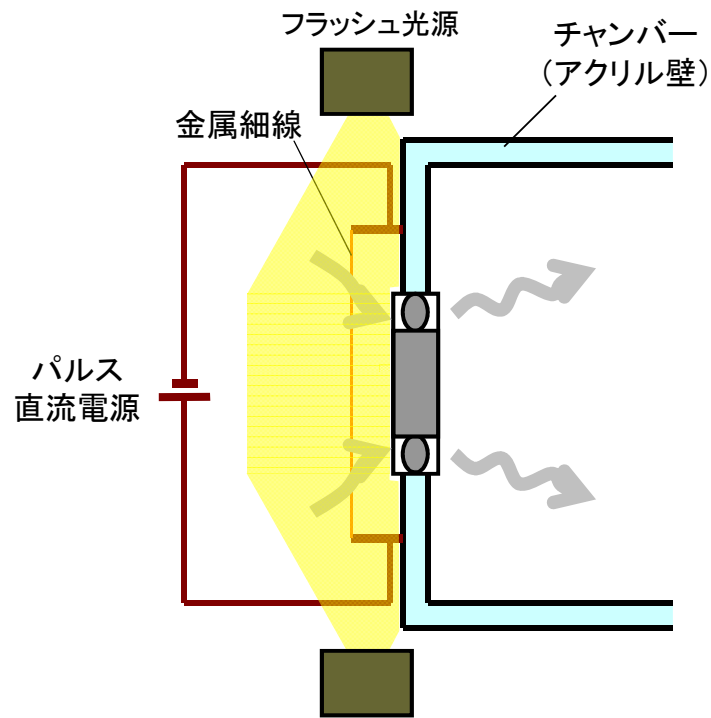


2D 障害物設置
 ($u_m = 0.78$ m/s, 障害物高さ 5.4 mm)

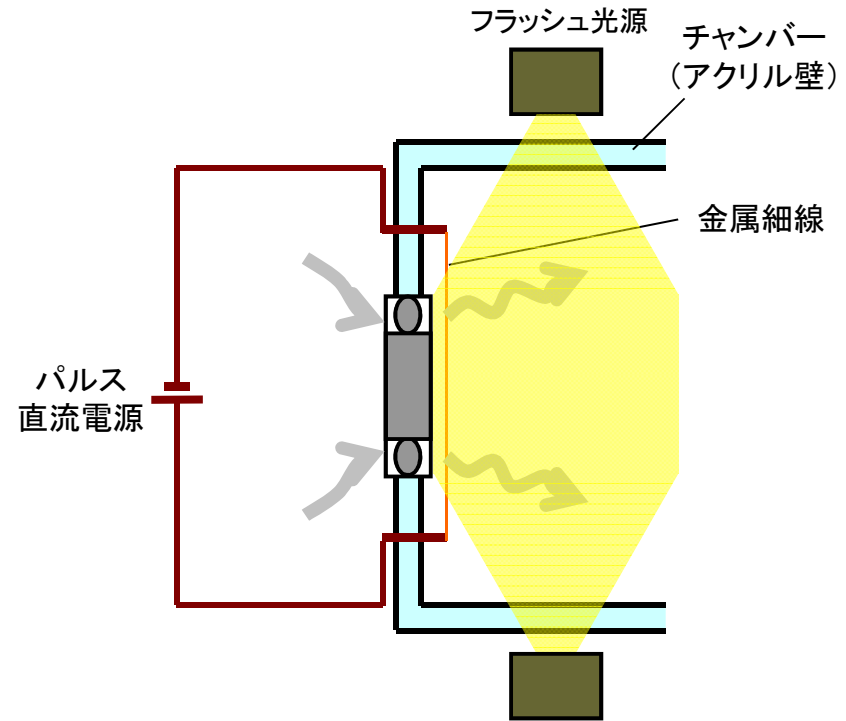
3D 障害物設置
 ($u_m = 0.4$ m/s, 障害物高さ 7.1 mm)

スモークワイヤ法による筐体内の流れの可視化
 (金属細線 - $\phi 0.1$ コンスタンタン線 ; 油 - 流動パラフィン)

軸流ファン周囲の流れの可視化例



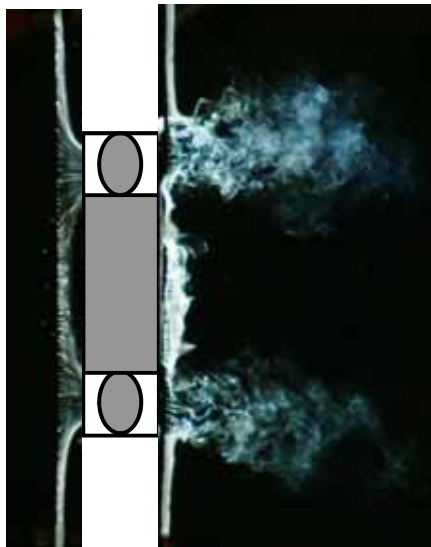
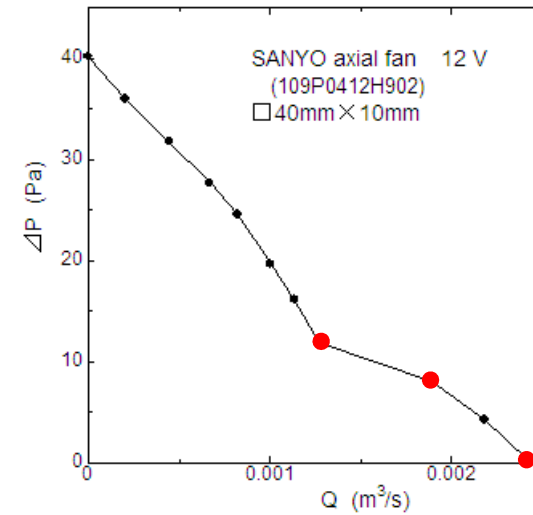
ファン前方の可視化



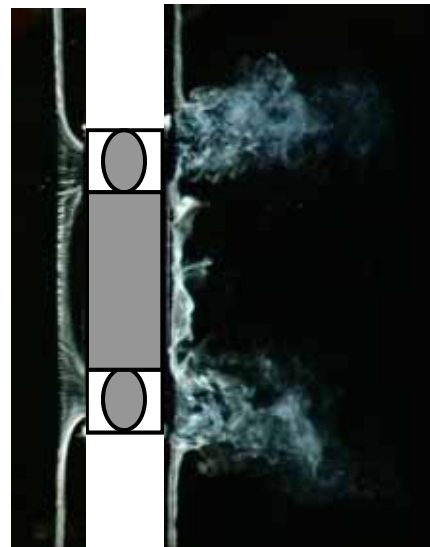
ファン後方の可視化

軸流ファンの前方または後方に金属細線を設置して、スモークワイヤ法で流れを可視化

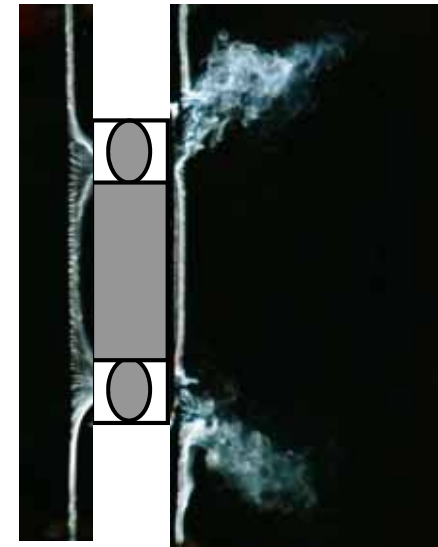
供試ファン：
山洋電気
109P0412H902
(□40×10 mm)



$\Delta P = 0$ Pa



$\Delta P = 8$ Pa (動作点)



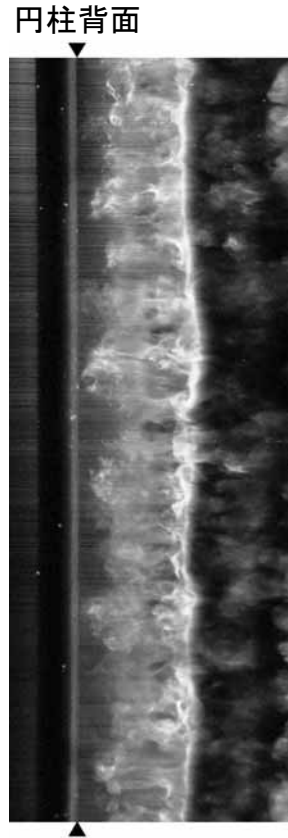
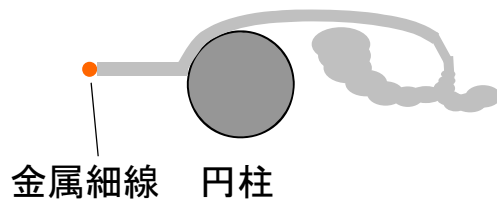
$\Delta P = 12$ Pa

スモークワイヤ法による軸流ファンまわりの流れの可視化

(金属細線 - $\phi 0.1$ コンスタンタン線；油 - 流動パラフィン)

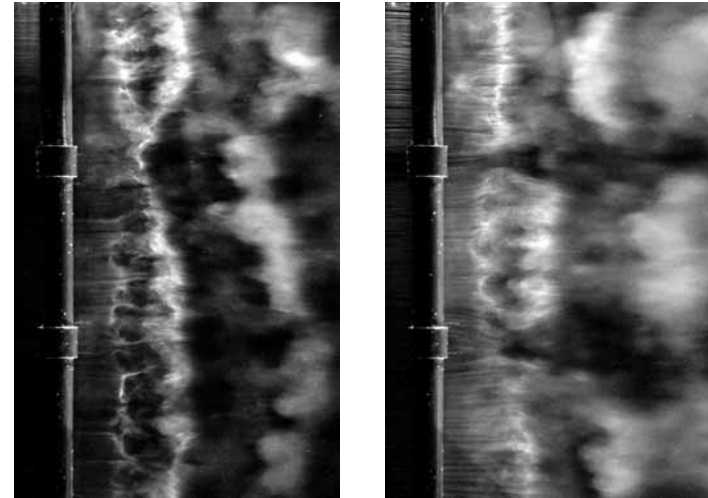
円柱まわりの流れの可視化例

1) 2次元円柱



$u_0 = 2 \text{ m/s}, \text{Re} = 2900$

2) リング設置円柱



$u_0 = 8 \text{ m/s}, \text{Re} = 10000$ $u_0 = 16 \text{ m/s}, \text{Re} = 20000$



段差位置で形成される渦
 $u_0 = 8 \text{ m/s}, \text{Re} = 10000$

1) Nakamura & Igarashi, Int. J. Heat and Fluid Flow, 25-5 (2004), p.741

2) 中村・五十嵐：機論B, 71巻 704号 (2005), p.1075

いずれも, 金属細線 - $\phi 0.1$ コンスタタン線 ; 油 - 流動パラフィン)

3. タフト法

物体の表面などに糸 (tuft) を取り付け, それが流れによってどのような挙動を示すかを調べることにより流れを可視化することができる.

- 特長
- ・ 油膜法やトレーサ法と違って, 気体や実験装置を汚さない
 - ・ 広い流速範囲で適用可能

流れに追従するように, 剛性が低く曲がりやねじれの癖がないタフトを選ぶ必要がある
 タフトの設置が流れに影響を与えないように注意する必要がある

表 4.2 タフトの材料と特性³³⁾

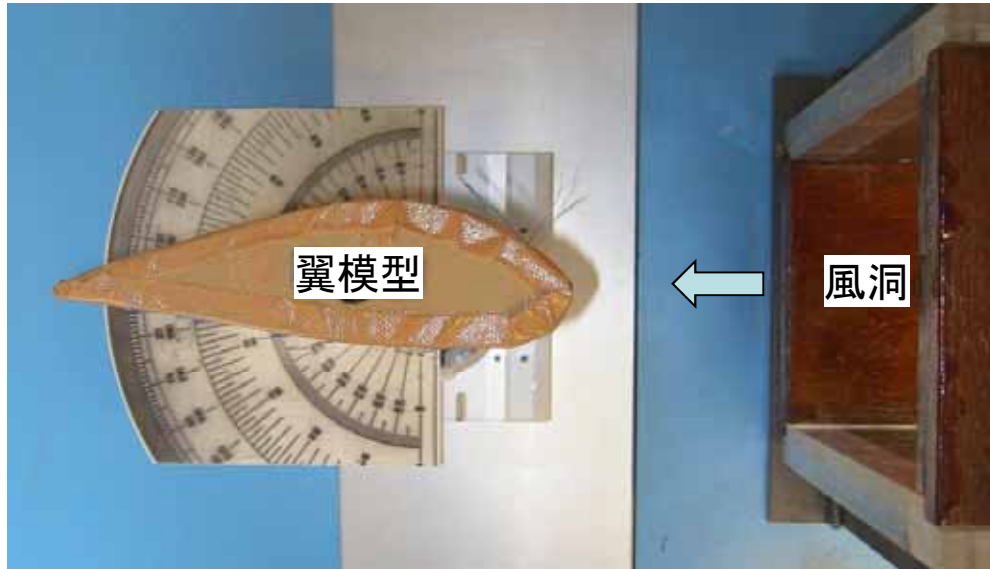
(a) 気流用タフト

材 料 特 性	マーク	A	B	C	D	E	F
	日本刺繍用 絹 糸	純 毛 糸				ナイロン ミニタフト	
		極 細	中 細	並 太	極 太		
見かけの直径 d [mm]	0.4×0.9	1.2	1.9	3.2	3.2	0.048	
単位長さ当り質重 m [g/m]	0.030	0.105	0.300	0.639	0.660	7.8×10^{-5}	
$dC_D \times 10^3$ [m]	11.0~13.0	15.2~16.9	16.7~18.8	17.8~22.8	17.3~22.0	—	
$m/(dC_D) \times 10^3$ [kg/m ²]	2.7~2.2	6.9~6.2	18~16	36~28	38~30	—	

- (注) 1. 市販材料をそのままの姿で計測したもので, 同じ呼称でも製品により差がある.
 2. d は繊維がかなり稠密になった部分で測った値.
 3. $m/(dC_D)$ の値は図 4.4 より.

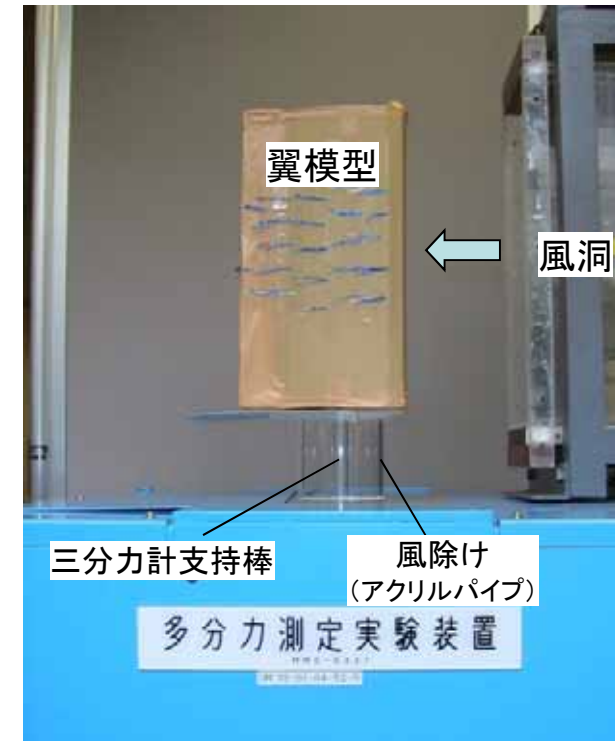
「新版 流れの可視化ハンドブック」, 流れの可視化学会 編, 朝倉書店(1986)

表面タフト法による可視化例

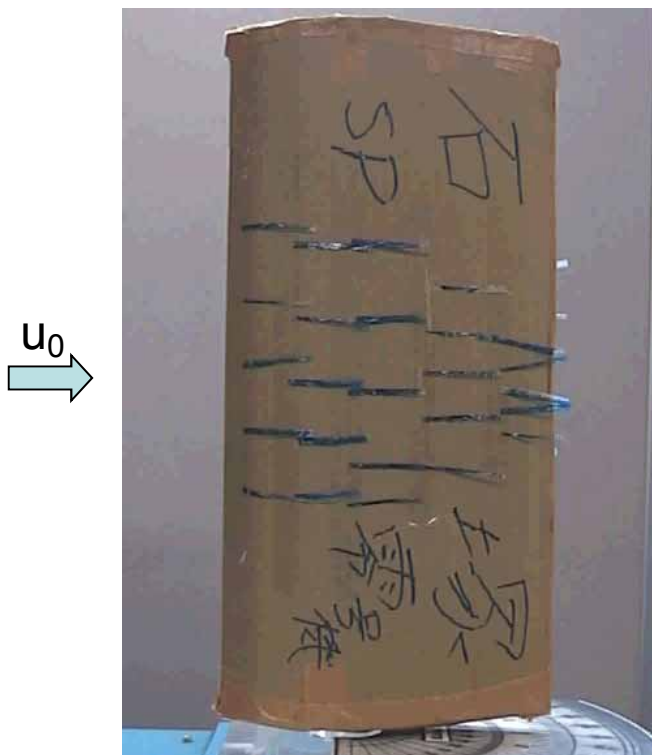
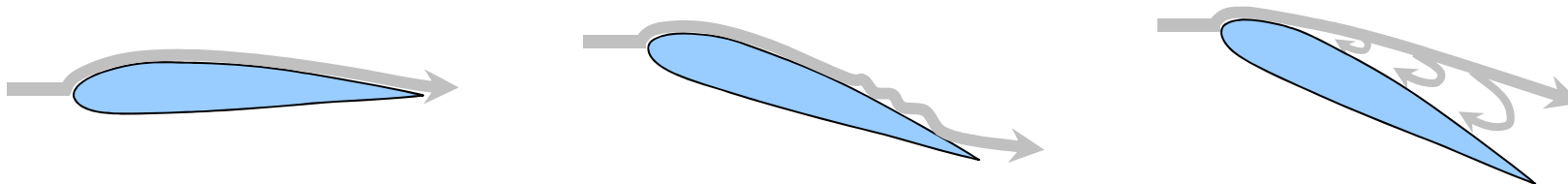


二次元翼模型（ダンボール製）

二次元翼模型の表面（上面及び下面）にタフトを張付けて表面流れを可視化すると共に，模型を三分力計に取付け，翼に働く揚力及び抗力を測定



タフトの材料
(ポリプロピレン)



迎角 0°



迎角 20°



迎角 30°

表面タフト法による二次元翼模型上面の流れの可視化

(翼弦長 200 mm , 流速 $u_0 = 8 \text{ m/s}$)

表面タフト法による可視化例

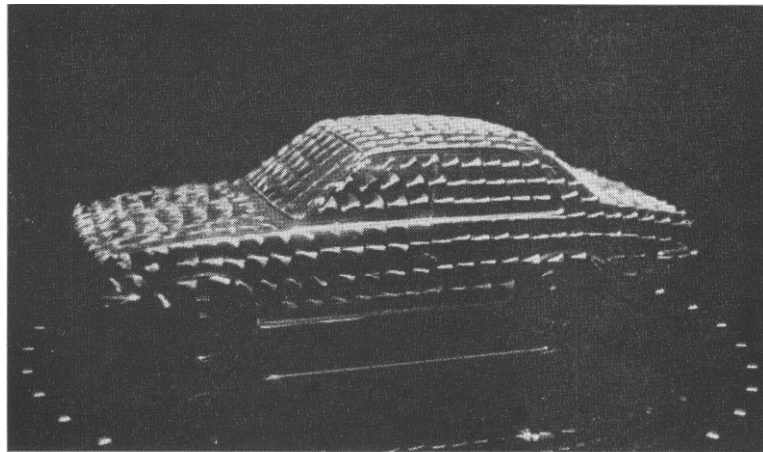
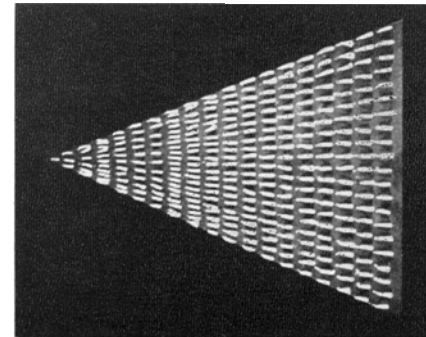
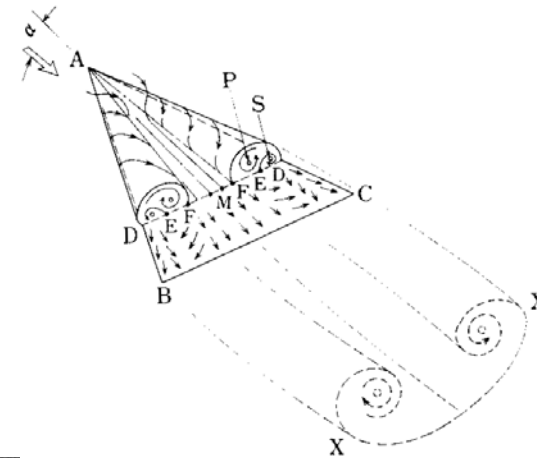


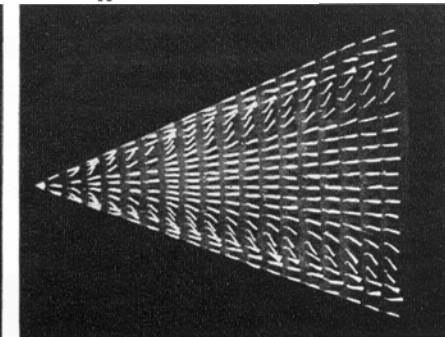
図 4.10 自動車模型の気流試験 (表面タフト法)⁸⁾

実験条件 空気, 12m/s, $Re=2.56 \times 10^5$ (ホイールベース基準)
 撮影条件 50mm F1.4, ASA 200, 開放・1/15秒, 距離 2.1m,
 スポットライト (500W) 6個, 偏光フィルタ使用

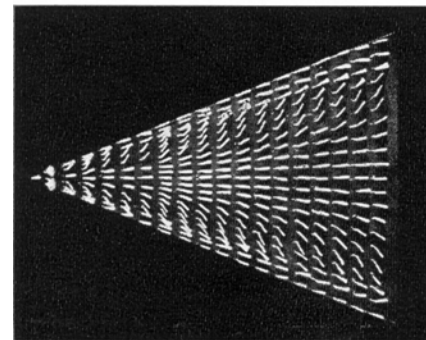
自動車模型表面の流れ
 (空気流速 12 m/s)



(a) 迎え角 0°



(b) 12.5°



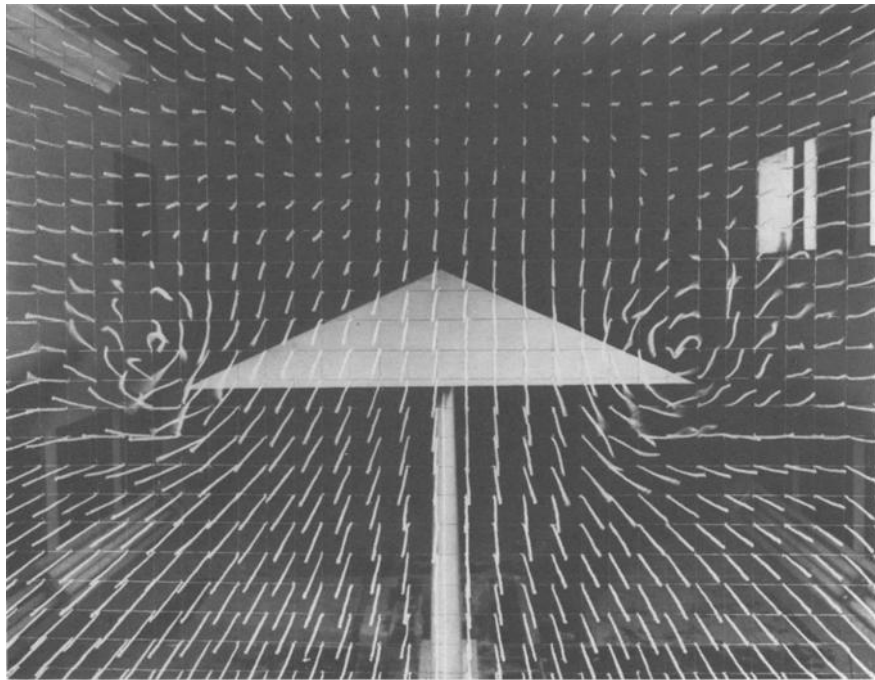
(c) 20°

図 4.12 デルタ翼上面の流れ (表面タフト法)³³⁾
 (流れは左から右へ)

実験条件 空気, 12m/s, $Re=3.1 \times 10^5$
 撮影条件 50mm F1.4, ASA 100, F2.8・1/60秒,
 距離 1.5m, スライドプロジェクタ (500W) 2個

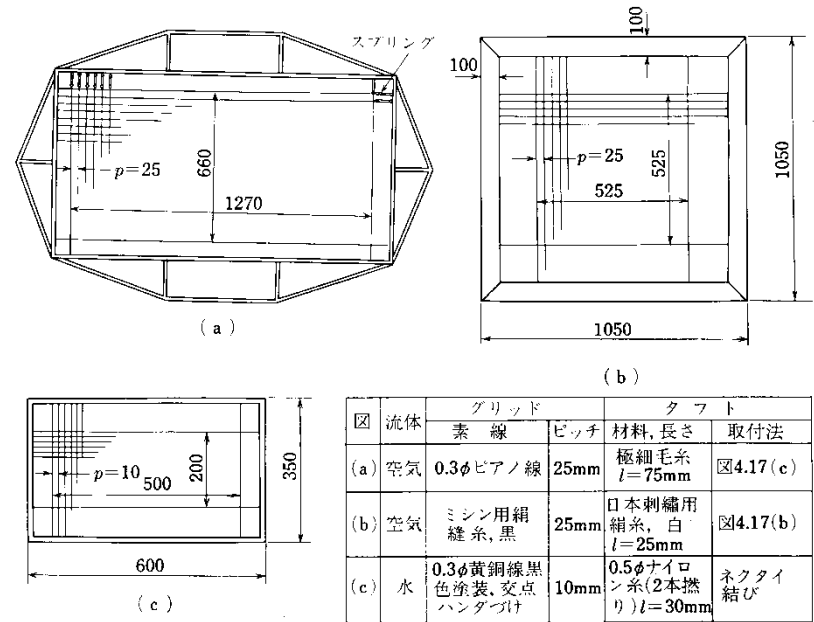
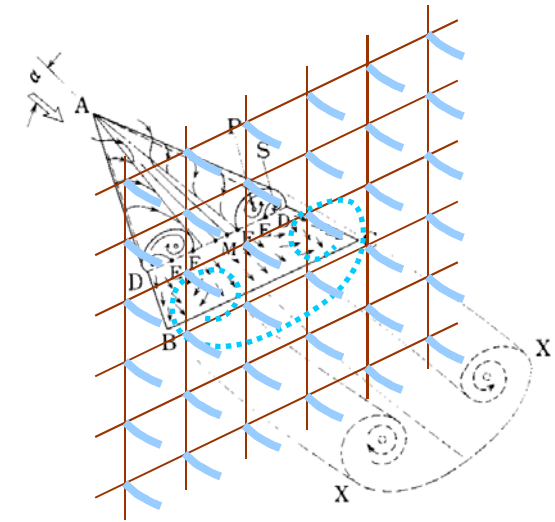
デルタ翼上面の流れ
 (空気流速 12 m/s)

タフトグリッド法による可視化例



デルタ翼後方の流れ

“Handbook of Flow Visualization”, W.J.Yang, Hemisphere, (1989)



タフトグリッドの例

「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼強編, 朝倉書店(1977)

4 . 油 膜 法

油で塗膜した物体を気流にさらすと油が模様を形成するため、そのパターンによって表面近傍の流れを可視化することができる。

油膜には、油に顔料を混ぜて着色したものを使用する。
均質な油膜を得るために添加剤を混ぜる場合が多い。

表 3.1 油膜の組成と適用例

流体	油	顔 料	添 加 剤	混 合 比	流 速	適 用 例	文献
空	軽いジーゼル油 (Dieselene)	酸化チタン	オレイン酸	100g : 135cm ³ : 2cm ³	300 ft/s	後 退 翼	14
	非常に濃い油 (Shell Nassa 87)	〃	〃	—	$M=0.7\sim 1.61$	航 空 機	30
	流動パラフィン	〃	〃	—	150 ft/s 60~40m/s	後 退 翼 柱	31 36
	軽い機械油	〃	〃	—	100 m/s	後 退 翼	21
	Shell Vitrea 72	〃	ラウリン酸	2 : 1 : 微量(V)	$M=0.6\sim 1.2$	〃	32
	—	〃	オレイン酸	〃	$M=1.68, 1.19$	〃	17
気	流動パラフィン	油 煙	〃	3 : 1 : 微量(V)	$M=0.45$	デルタ翼	12
	Shell Vitrea 72 +Shell Limea 931	酸化チタン	〃	(4+2)cm ³ : 3cm ³ : 2滴	$M=0.2$	航空機の翼	33
	シリコーン油	油 煙	なし	—	$M=5, 6$	〃	34 35
	流動パラフィン +アマニ油	酸化チタン	オレイン酸	(30+5)cm ³ : 25g : 5cm ³	50 m/s	壁面噴流	37

「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼強 編, 朝倉書店(1977)

通常は風速が 10 m/s 以上で使用可能であるが、油膜の粘度を小さくすれば 5 m/s 程度でも可能。

油膜の組成例（風速 10 ~ 20 m/s）



酸化チタン(顔料)

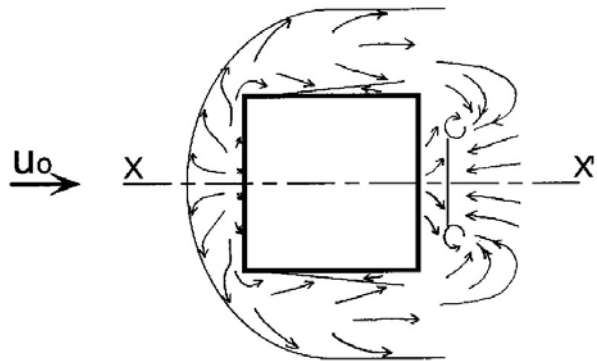
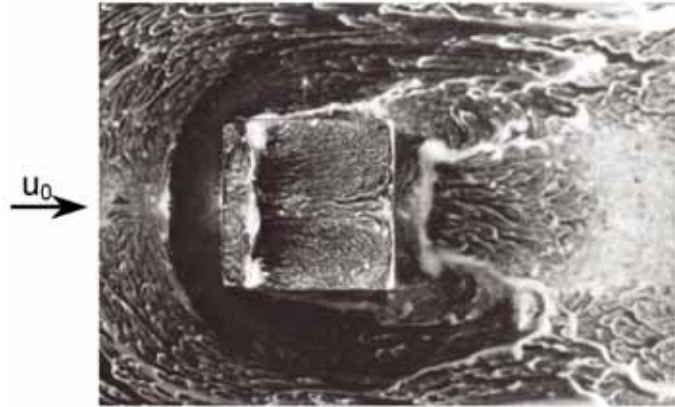
流動パラフィン

オレイン酸

酸化チタン : 流動パラフィン : オレイン酸 = 1 : 1 : 2 (重量比) 程度で混合

風速が大きい時は, 酸化チタンを追加して粘度を上げる
風速が小さい時は, オレイン酸を追加して粘度を下げる

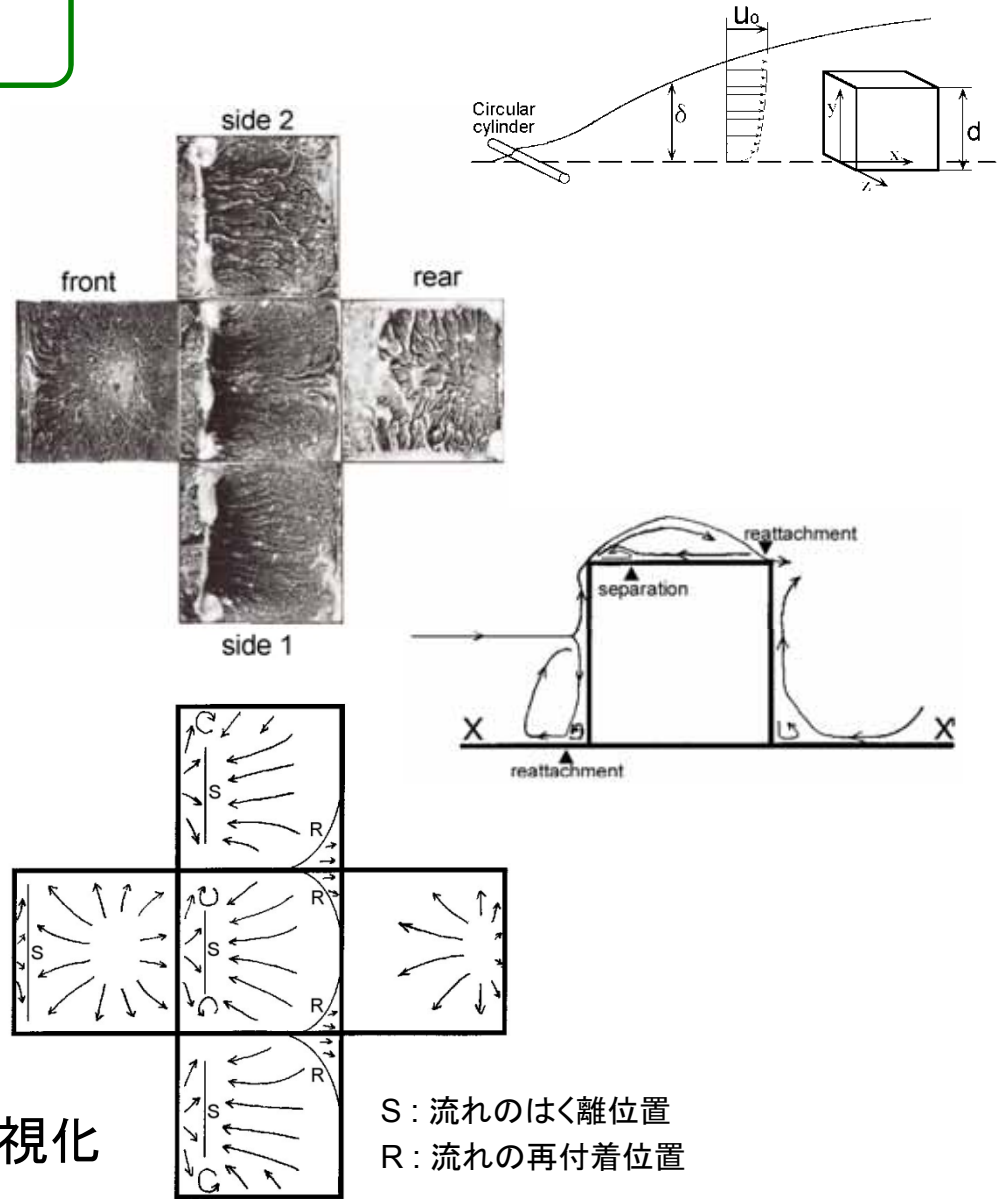
油膜法による可視化例



上方から見た油膜模様

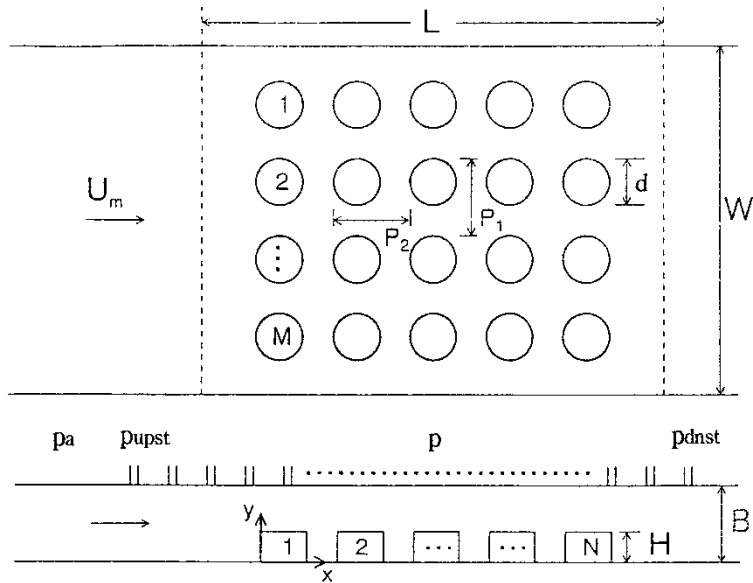
立方体突起まわりの表面流れの可視化

(風速 16 m/s, 立方体辺長 $d = 30$ mm)



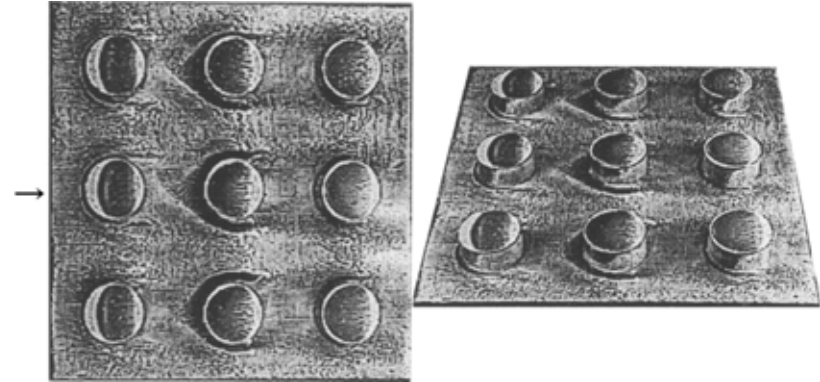
S: 流れのはく離位置
R: 流れの再付着位置

油膜法による可視化例

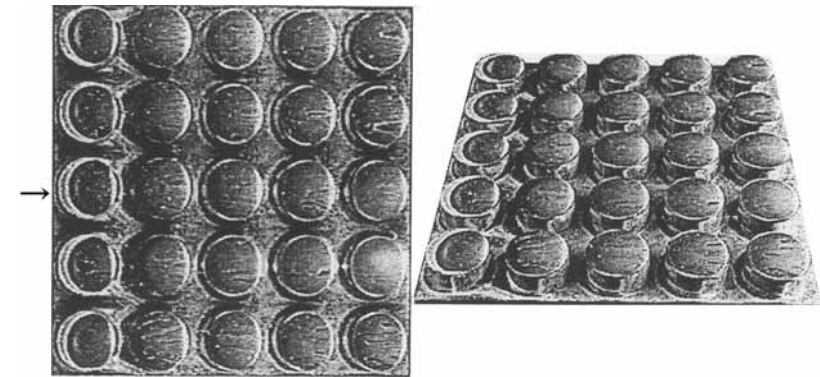


矩形ダクト実験装置

($W = 250 \text{ mm}$, $B = 30 \text{ mm}$)



$$P_1/d = P_2/d = 2.0$$



$$P_1/d = P_2/d = 1.25$$

円柱突起列まわりの表面流れの可視化

(風速 $U_m = 10 \text{ m/s}$, 円柱辺長 $d = 40 \text{ mm}$, 円柱高さ $H = 18 \text{ mm}$)

五十嵐, 他 : 機論B, 66巻 648号 (2000), p.2157

5 . P I V (Particle image Velocimetry)

気体の流れに微細なトレーサ粒子を混入し、これをレーザーシートなどで照明すると流れを可視化することができる（注入流脈法）。瞬時の可視化画像を微小な時間間隔で2枚取得すると、粒子群の移動距離から面の速度分布を求めることができる。

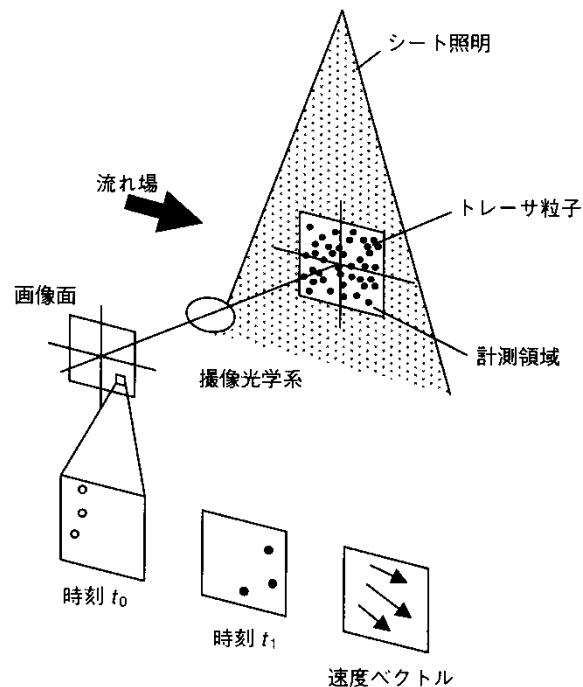


図 1.2 PIV の原理

- 長所
 - ・ 面の速度分布が定量的に測定できる
 - ・ 非接触で測定できる
- 短所
 - ・ システムが複雑で高価
 - ・ ノウハウが必要

「PIVハンドブック」, 可視化情報学会 編, 森北出版, (2002)

PIVシステムの構成例

後述の測定事例で使用した機器 (2D PIV)

煙発生装置: Rosco Fog Machine Alpha900 v2
(舞台演出用, 平均粒子径 $1\ \mu\text{m}$ 程度)

照明装置: ダブルパルスレーザー
New Wave Research社
(532 nm; pulse 15 Hz, 30 mJ, 3-5 ns)

撮影装置: 高速度カメラ IDT社 XS-3
(1280 × 1024 pixel, ~610 fps)

同期装置: IDT社 X-Stream Timing Hub

解析装置: IDT社 PIV解析ソフト ProVISION

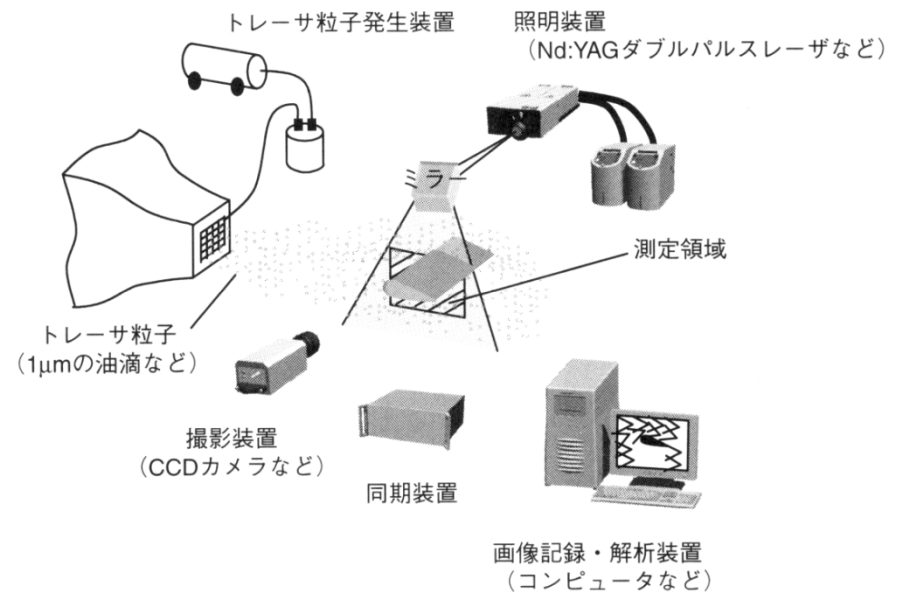


図 1.3 PIV システムの構成例と計測の概要

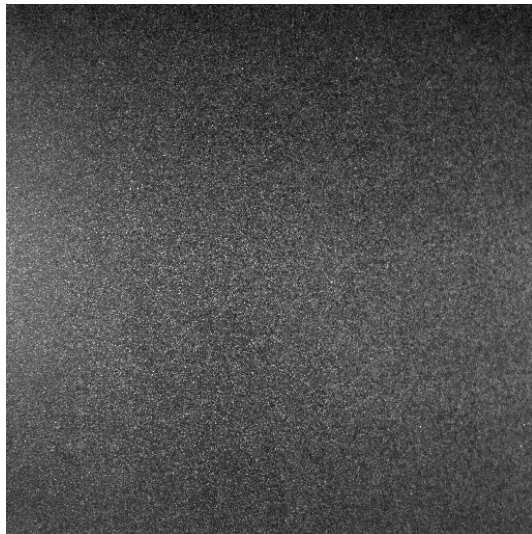
「PIVハンドブック」, 可視化情報学会 編, 森北出版, (2002)

後述の事例では, 部屋を密閉して煙を充満させた状態で測定を実施した.

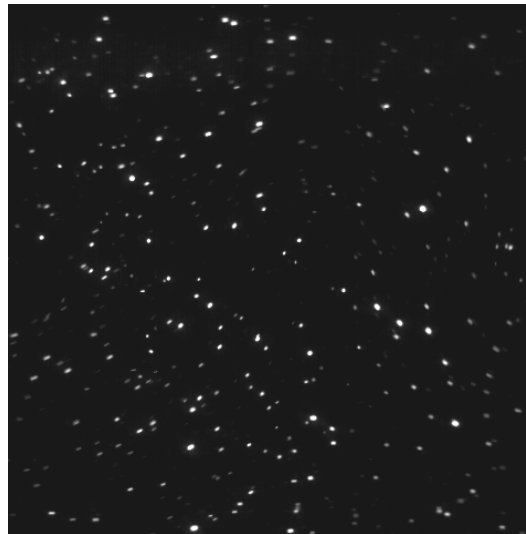
PIV可視化画像

良質の可視化画像を得ることが
PIVを成功させる鍵となる

- ・ 粒子の数密度が多く、濃淡のはっきりした可視化画像を取得する
- ・ 物体表面での反射に注意を払う

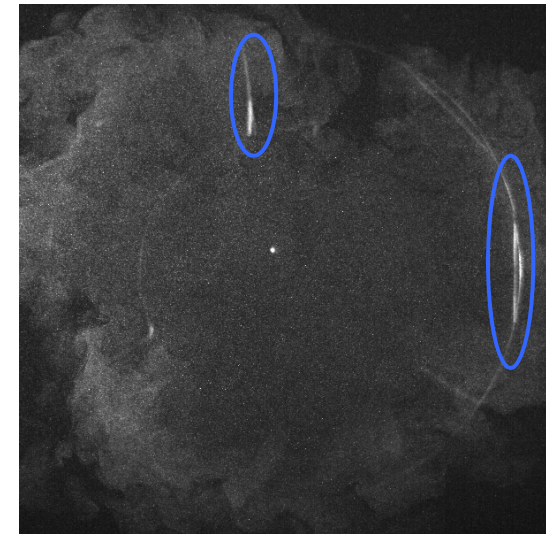


良い例



悪い例－1
(粒子の数密度が小さい)

↓
空間分解能が低下



悪い例－2
(反射の影響がある)
↓
正しい速度が求められない

PIVの一般的な条件

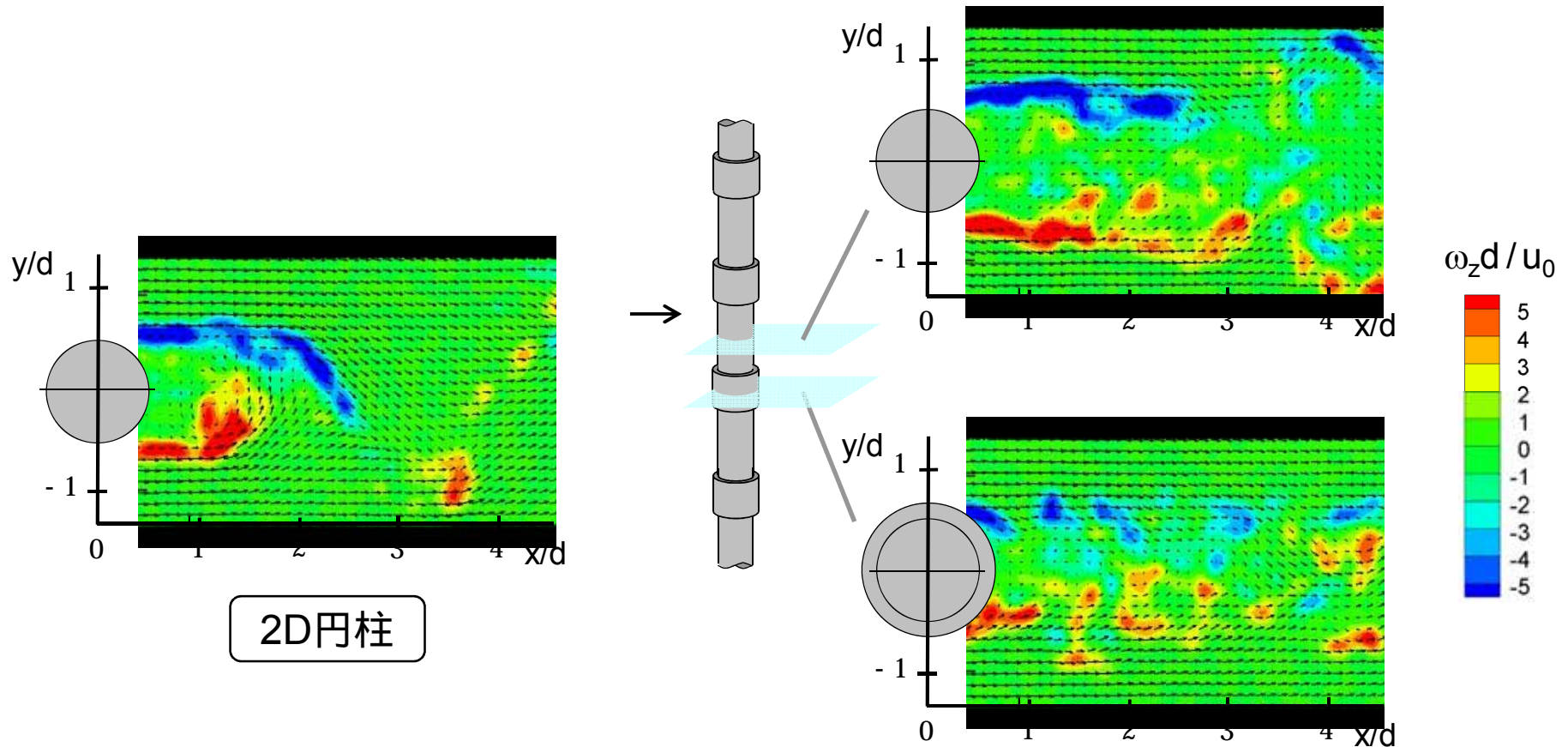
2画像間の粒子の移動距離

- ・ 光シート面方向の移動距離は2 pixel 以上 (3~5 pixel が理想) でかつ PIV検査領域の辺長の1/4程度以下になるようにする.
- ・ 光シート垂直方向の移動距離は光シート厚さの1/4程度以下になるようにする.

トレーサー粒子

- ・ 気流の場合, 追従性を高めるために粒径の小さなミストなどを用いる.
(詳細は PIVハンドブック参照)
- ・ PIV検査領域中に常に5個以上の粒子(粒子群)が記録されるようにする.
(粒子の数密度を大きくするか, 検査領域を大きくする)

PIVによる速度分布測定例

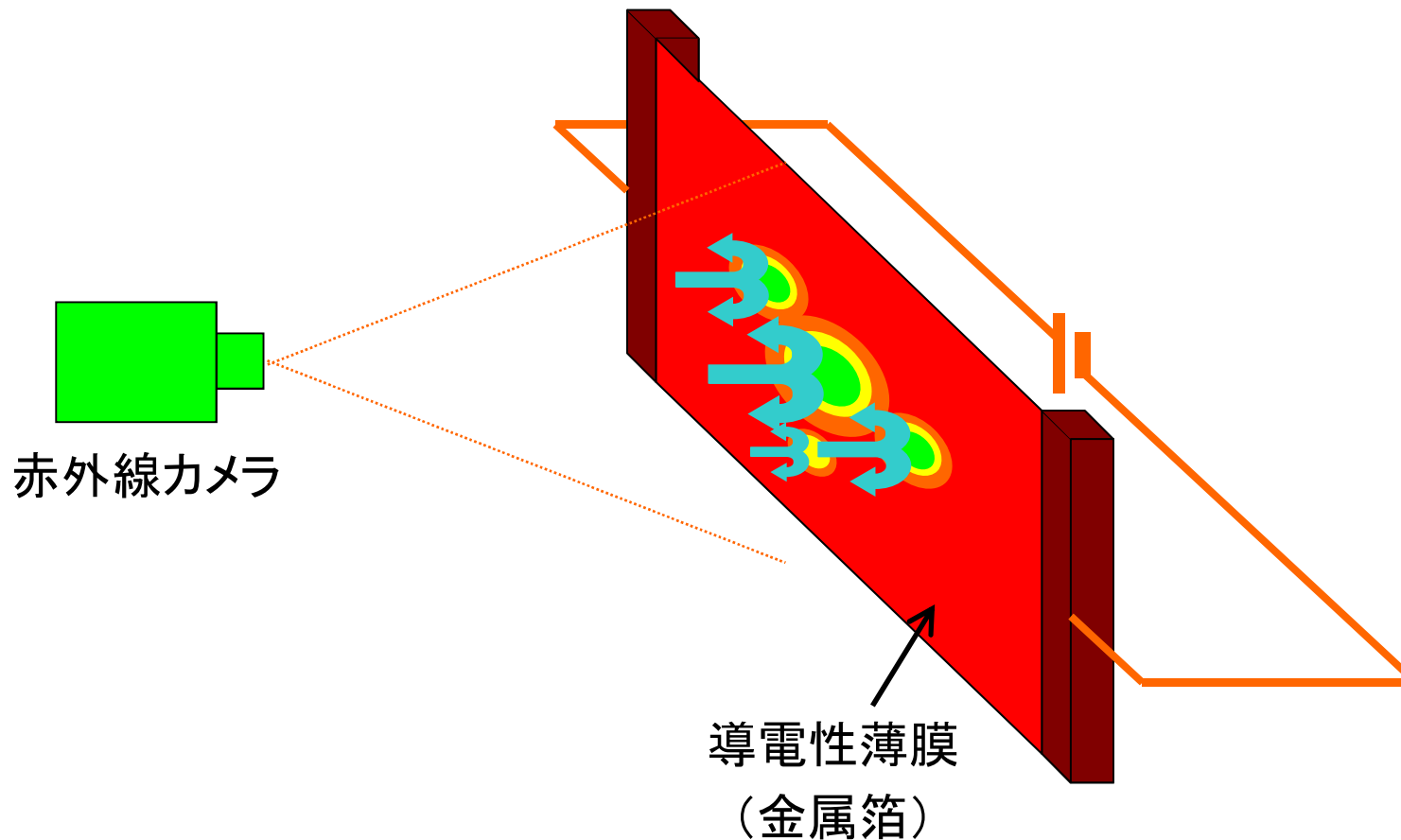


円柱後方の瞬時速度分布

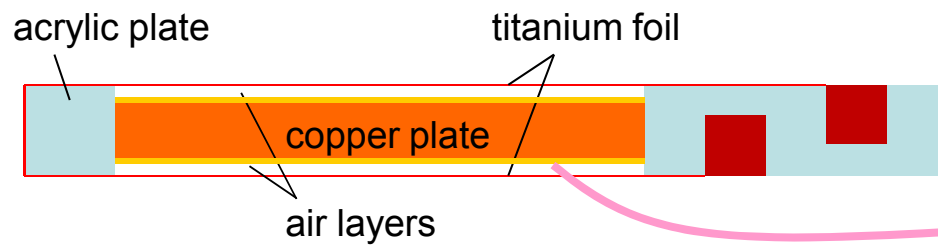
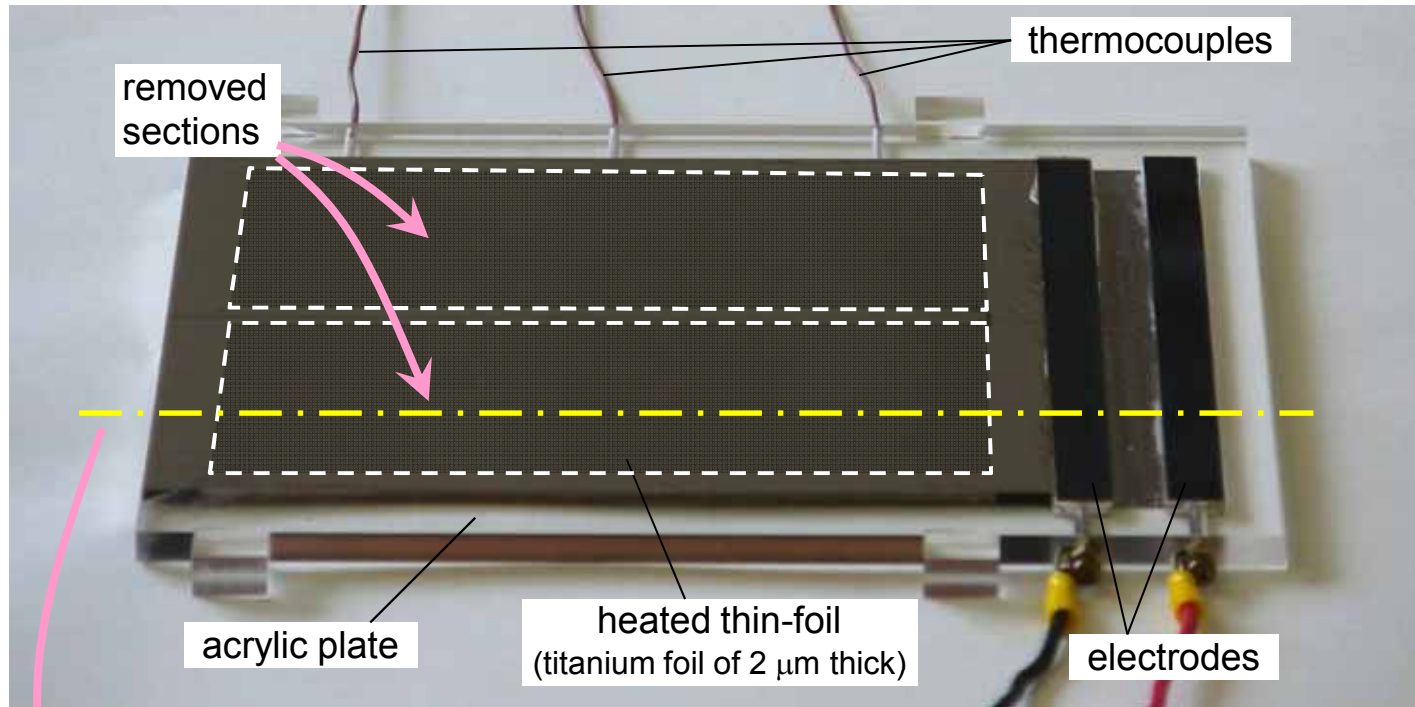
(風速 $u_0 = 24$ m/s, 円柱直径 $d = 20$ mm)

リング設置

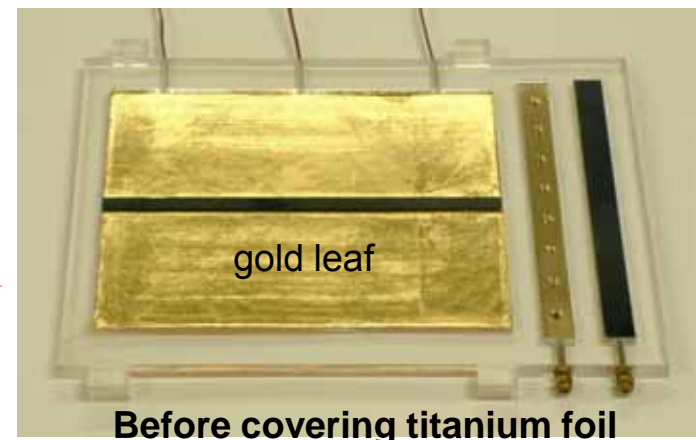
6 . サーモグラフィ法（非定常測定）



中村, 機論B, 73-733 (2007), pp.1906-1914
中村, 可視化情報, 29-113 (2009), pp.116-121

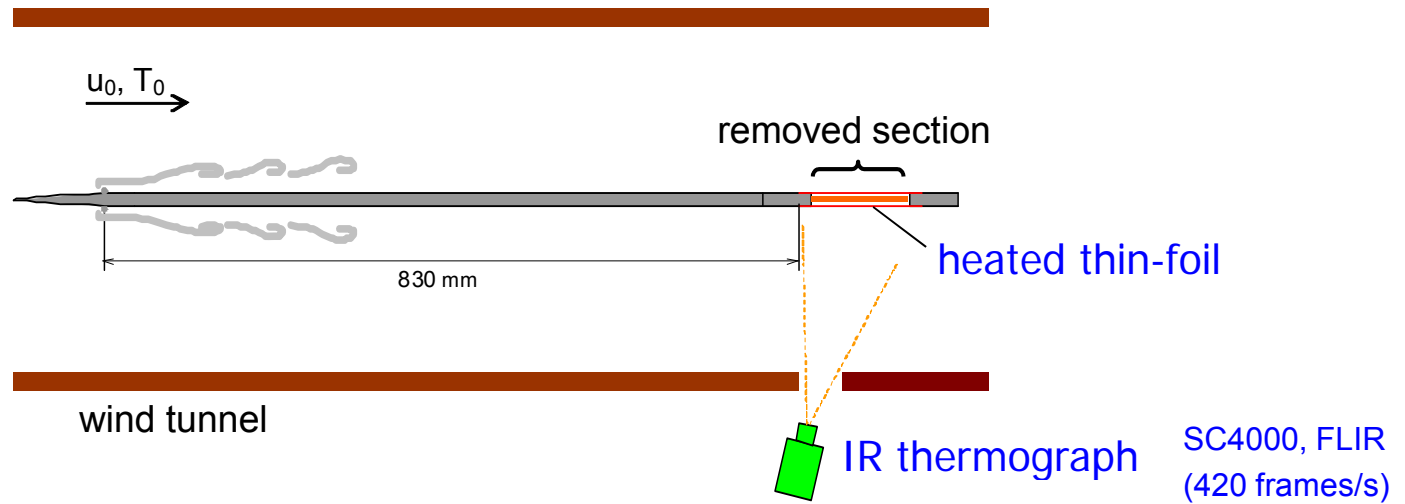


Cross-sectional view

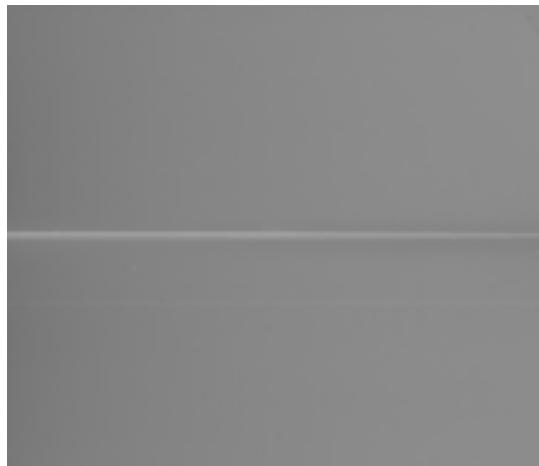


Photograph of the test plate (2 μm thick titanium foil)

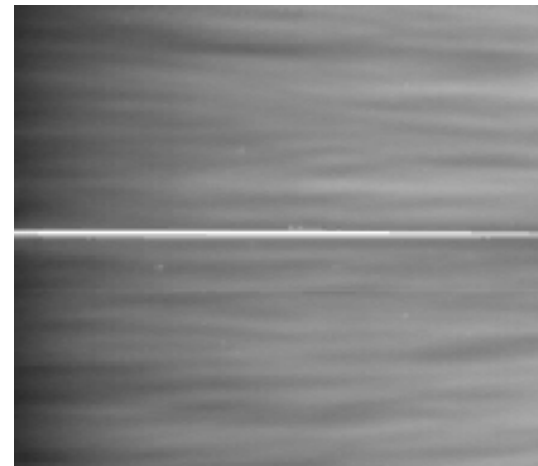
乱流境界層の測定



u_0



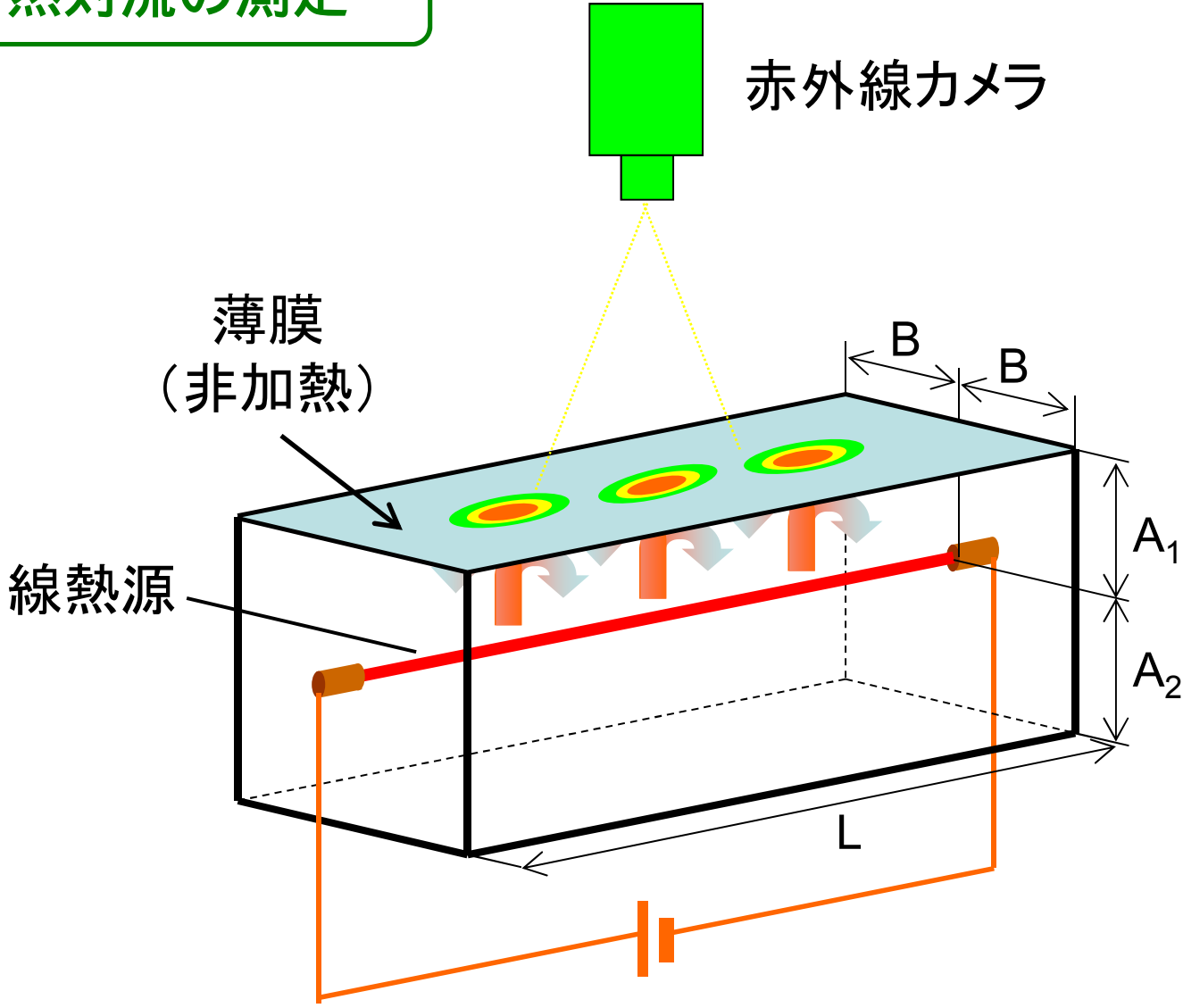
laminar, $u_0 = 1$ m/s



turbulent, $u_0 = 6$ m/s, $Re_\theta = 925$

Playback speed
1/21

自然対流の測定

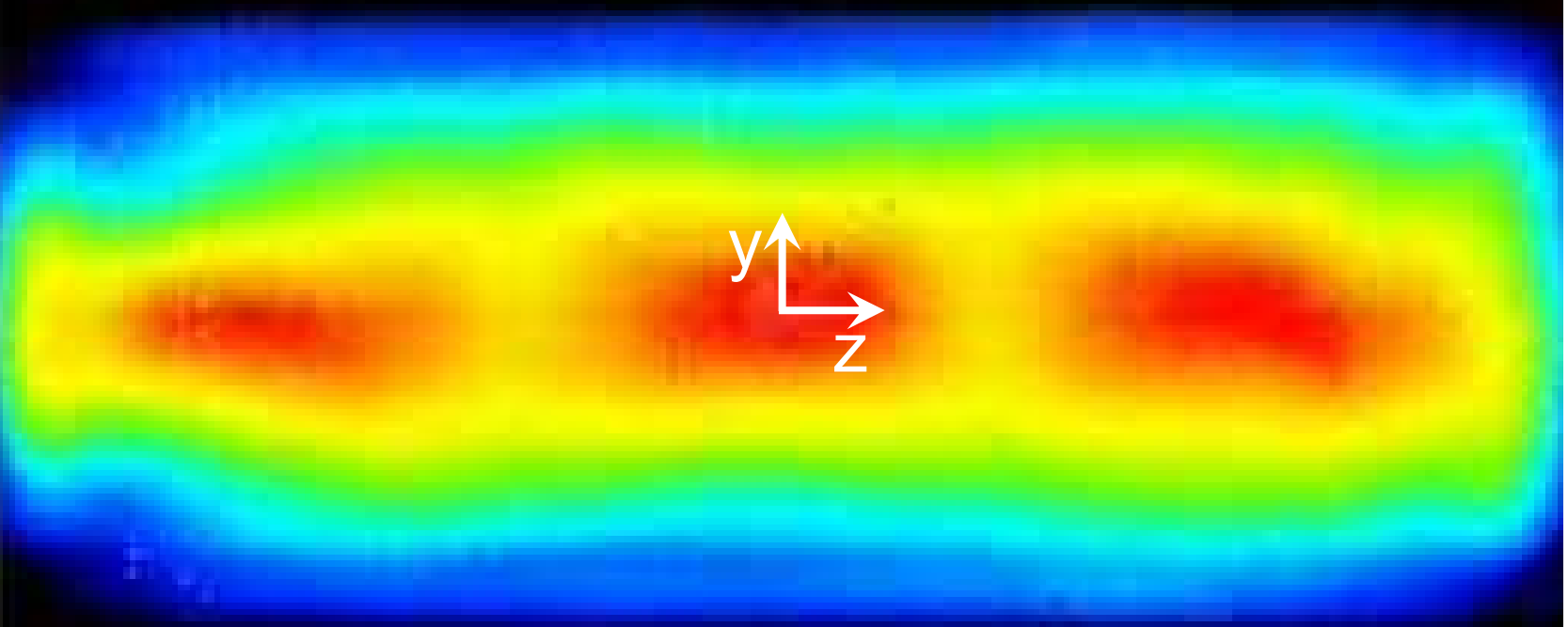


密閉容器内の自然対流

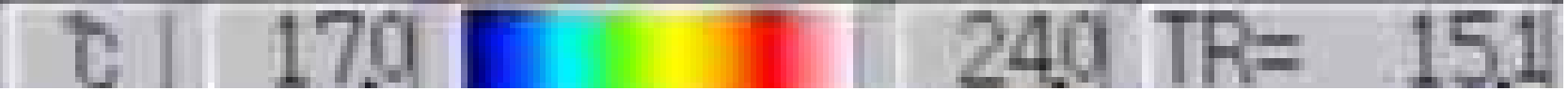
密閉容器上面 (食品用ラップフィルム + 黒ペイント)

$A_1 = 60 \text{ mm}$, $B = 50 \text{ mm}$, $L = 300 \text{ mm}$

$$T_w - T_0 = 72$$



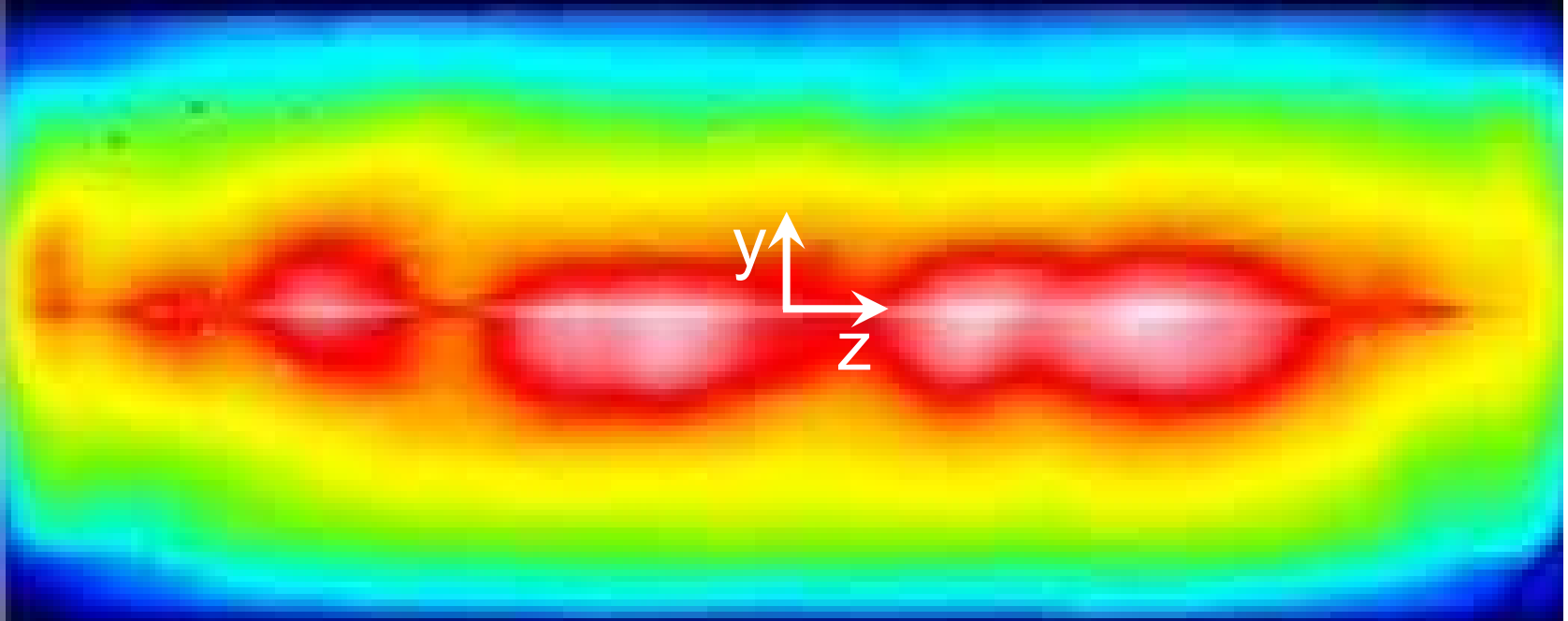
容器の軸方向(図の横方向)に, 3つの同程度の大きさのセル構造が形成される.
各セルは周期的に揺動するが, セルの左端と右端では揺動の位相が逆になる.
また, 隣り合うセルでは揺動の位相が逆になる.



密閉容器上面 (食品用ラップフィルム + 黒ペイント)

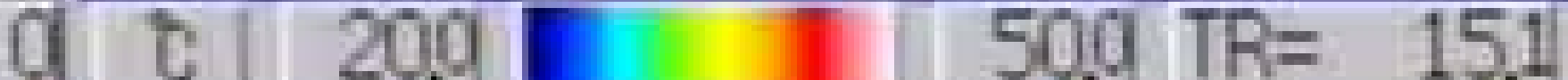
$A_1 = 60 \text{ mm}$, $B = 50 \text{ mm}$, $L = 300 \text{ mm}$

$$T_w - T_0 = 300$$



細線の温度を上昇させるとセル構造の数が増えると共に、隣り合ったセルでは不規則に結合・分裂を繰り返す。それに伴い、揺動の周期の不規則性が強まる。

加熱細線から放射された赤外線の一部が薄膜を透過している
赤外線の透過を無くすためには、薄膜に金属箔 + 黒ペイントを用いると良い



流れの可視化に関する文献

- ・ 「流れの可視化ハンドブック」, 浅沼 強 編, 朝倉書店, 1977
- ・ 「新版 流れの可視化ハンドブック」, 流れの可視化学会 編, 朝倉書店, 1986
- ・ “Handbook of Flow Visualization”, Edited by W.J. Yang, Hemisphere, 1989
- ・ 「PIVハンドブック」, 可視化情報学会 編, 森北出版, 2002
- ・ 「画像から学ぶ流体力学」, 種子田定俊, 朝倉書店, 1988
- ・ “An Album of Fluid Motion”, Assembled by M.V. Dyke, Parabolic Press, 1982