

熱流体の可視化に関する研究（I）

岡本芳三*, 神永文人*, 高根澤利夫**, 丸井良彦***

（平成2年8月27日受理）

Visualization Study of Thermal Fluid Flow

Yoshizo OKAMOTO*, Fumito KAMINAGA*, Toshio TAKANEZAWA**, Yoshihiko MARUI***

ABSTRACT—Electronic components consist of many kind of the electric parts, like IC and LSI, resistor, condenser, cylinder, etc. The cooling techniques play an important role of designing those components. Experimental study of the flow pattern around the electronic parts arranged on the base plate surface had been undertaken experimentally. The rectangular promoters were located on the base plane with IC elements which simulates the IC and LSI elements. The flow pattern around the promoter was visualized by smoke, mica, dye and aluminum tracers. In resort, ring, arch, swirl vortices around the promoter had been clearly visualized in photographs. The report shows the results of those flow pattern and its mechanism, induced by the vortex behind the promoter.

1. はじめに

電子機器を構成するICパッケージ、抵抗、コンデンサーなどの機器部品の熱除去を行なうためには、構成素子を冷却する空気の各素子の周りの流れを可視化し解析することが必要である。

とくに、最近における超LSIや集積回路の高度化にともなって、発熱密度がとみに増加するために、冷却技術の向上は、電子機器の熱設計にともなって、極めて重要な問題である。しかしながら、これらの素子は、基板の上にさまざまな形状、特性の異なる部品が配置されているために、それぞれの部品のまわりの流れと熱伝達の間を明らかにする必要がある。

一般に、物体の流れを目でとらえ、そのきょ動を明らかにするためには、流れの中にトレーサーである種々の物質を挿入し、物体の回りの流れを可視化（Flow visualization）することが行なわれている。

このような流れの模様の可視化を行なうために、水および空気の中に、種々のトレーサーを流れの中に注入し、基板上的ICパッケージおよびこれを模擬した角柱の回りに発生する渦の流れを可視化した。手法としては、回流水槽および水ループ中の水流に、Al、ガラス、顔料、ナイロン、染料をトレーサーとして注入した。空気流では、風洞中に煙を注入して行なった。その結果、基板上におかれた角柱の回りに発生する首飾渦、アーチ渦、スワール渦およびカルマン渦の模様

*茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316 Japan

**茨城大学大学院工学研究科機械工学第二専攻（日立市中成沢町）

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

***理化精機工業（株）

Rikaseiki Industry K.K, Kanda, Chiyodaku, Tokyo 101, Japan

が、懸濁法および注入流脈法により詳細にとらえることが出来た。

2. 可視化の手法

すでに1章で示したように、水流中の角柱のまわりの流れを可視化するため、既設の回流水槽を用いての低速流での角柱のまわりの流れを求めた。まず、回流水槽表面にアルミ粉を浮遊し、矩形角柱の回りおよび角柱間に発生する2次元渦流のきょ動を表面浮遊法に

より求めた。また、水槽のテスト部にアクリル製の矩形の流路を設置し、その底面に1ヶおよび数ヶの角柱および角柱群を取付けて、基板上のICパッケージ群を模擬した。このような流路を流れる水流中に、雲母の表面に酸化チタンをコーティングしたパール顔料、ナイロン、ガラスなどのトレーサーを懸濁させ、また、光源として、テスト部による素ランプおよび He-Ne レーザー光を入射し、模型の回りの全体の流れをライトシート法により求めた。また、壁附近の局部的流れを求めるために模型上流および表面にあけた注出口よ

Table 1 Methods of Flow Visualization

method	tracer	fluid	velocity	Re
1) surface floating	aluminum	water	5 ~ 20	10000 ~ 40000
2) suspension	mica Tio (3 μ m)	"	0.5 ~ 4.5	200 ~ 2100
	" (5 μ m)	"	0.5 ~ 4.5	200 ~ 2100
	" (10 μ m)	"	0.5 ~ 4.5	200 ~ 2100
	nylon (150 μ m)	"	0.5 ~ 4.5	200 ~ 2100
	spherical glass	"	0.5 ~ 4.5	200 ~ 2100
3) streak injection	dye (black, red, blue)	"	0.5 ~ 4.5	1000 ~ 2100
	smoke (vegetable oil)	air	20	1714

り、各種の色をもつ染料を流脈状に注出させ、注入流脈方によって壁付近の流れの可視化を行った。また、流れの可視化被告を行なうために、風洞を用いて矩形流路中におかれた角柱の上流より煙を空気流中に流脈状に注入し、流れのきょ動を煙風洞で可視化した。

使用トレーサーと実験条件を Table 1 に示す。

次に各トレーサーによる可視化の手法とその概要について述べる。^{1),2)}

(1) 表面浮遊法

表面浮遊法は、二次元水槽中の流体流れの表面にト

レーサー物質を浮遊させて、二次元物体回りおよび流路内の流線、流跡、流脈などを可視化する手法である。他の手法と比べて、手法は最も簡単で容易に行なえるが、壁面近くにおいて、表面張力、せん断力の影響を受ける。突起物の前側で水面がもり上がり、後側で下がる跳水現象、流体表面の波打ち現象、表面の流れが水深方向の影響を受けるなどの短所がある。したがって、この手法はあくまで、二次元流れの定性的手法にとどまる。トレーサーは、直径5 μ mのうろこ状のアルミ粉を表面に浮遊させて使用した。

(2) 注入流脈法

注入流脈法は、三次元的な流脈を観測するのに適した手法である。トレーサーとしてはインクを用いた。青、赤、黒、の三種類のインクを10倍程度に水で薄め、内径0.7mmの細管およびプロモーター内部の4ヶ所から注入した。観測範囲は、流速が2~4cm/s, $Re_{2h} = 1200 \sim 2400$ 程度の低速範囲で層流の流れのみ有効で

あった。手法としては、懸濁法と比較しながら、流れの構造を可視化するのが有効である。また、mica (3 μm) をトレーサーとして注入、さらに同トレーサーを懸濁して観測したが、注入された mica が拡散してしまい、不適切であり中止した。

(3) 懸濁法

トレーサーを流れの中に懸濁させて、レーザーな

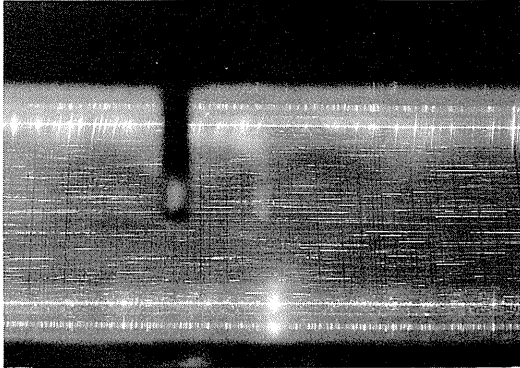


Fig. 1 Flow Pattern of Suspension Method
 $V=2.0(\text{cm}/\text{s})$, $Re=1200$, Tracer;nylon
 (150 μm)
 Tracer/Water=3/250(g/l)

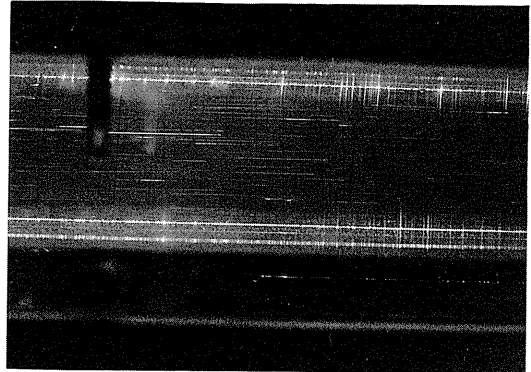


Fig. 3 Flow Pattern of Suspension Method
 $V=4.6(\text{cm}/\text{s})$, $Re=2760$, Tracer;glass
 Tracer/Water=3/250(g/l)

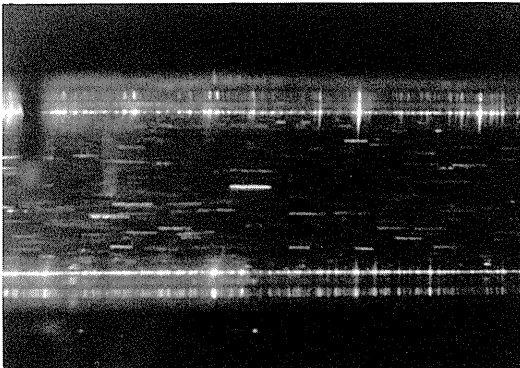


Fig. 2 Flow Pattern of Suspension Method
 $V=2.0(\text{cm}/\text{s})$, $Re=1200$, Tracer;glass
 Tracer/Water=3/250(g/l)

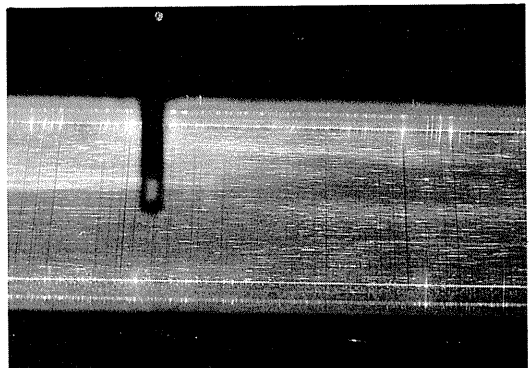


Fig. 4 Flow Pattern of Suspension Method
 $V=4.5(\text{cm}/\text{s})$, $Re=2700$,
 Tracer;Mica(3 μm)
 Tracer/Water=1/250(g/l)

どの光源により、懸濁したトレーサー粒子のある断面内の流れを見る手法として適切である。しかし、流れはつねに三次元的な動きを行なうので、注入流脈法との比較が有効である光源は、よう素ランプおよび He-Ne レーザーを使用した、He-Ne レーザーの方が

光量が大きく、かつ拡散が少なく有効である。

Fig.1からFig.4までの写真は、トレーサーの選定を行なった様子を示したものである。プロモーターを置いていない水流中に、各トレーサーについて、トレーサー/水の割合を変えて混入し、2.0m/s~4.0m/sの

流速における流れの様子を撮影した。なお、光源はすべて He-Ne レーザーを使用した。

Fig.1は、ナイロン (150 μ m) を、トレーサー/水の割合が3/250(g/l)になるように混入した流れの様子である。全面にわたって粒子が分散しており、トレーサーとして適している。

Fig.2は、球状ガラスを、トレーサー/水の割合が3/250(g/l)になるように混入したものであるが、撮影条件が悪く適当でない。

Fig.3は、球状ガラスを、トレーサー/水の割合が5/250(g/l)になるように混入したものである。流路

全体に均一に分散はしているが、各粒子があまり反射せず、各粒子間も疎になりやすいので、ガラスだけではトレーサーとして適さない。

Fig.4は、mica3 μ m をトレーサー/水の割合が1/250(g/l)となるように混入したものである。他の粒子と比較して、明るくみやすいが、粒子がかたより疎密のバラツキがでる。

また、mica 5 μ m, 10 μ m の粒子については、比重が1以上であり、重力による影響が大きく、正確に流れを表現するとはいえない。沈澱するまでの時間が短く、流路内の密度が保持できない欠点がある。

3. 実験装置と手法

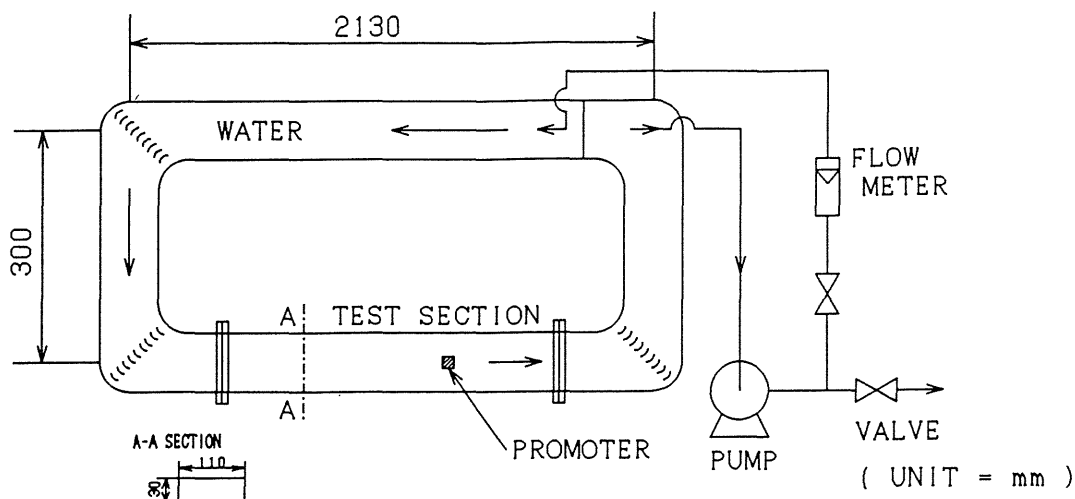


Fig. 5 Circulation Water Loop Free Surface and Closed Channel

結論として、懸濁法については、ナイロンあるいはガラスと、mica (3 μ m) との併用が最も有効である。

Fig.5は実験装置の概要を示したものである。実験に用いた回流水槽は、水槽、循環ポンプ、流量調節バルブ、流量計よりなる。AIを水流表面に浮かせて可視化を行なう表面浮遊法のための Test section は、幅10mm、高さ55mmの矩形流路であり、粒子の模様が可視化しやすいように黒色ペンキを塗布してある。水流表面に大きさ5 μ mのアルミ粉を浮かせ、図に示すようなテスト部にある、矩形模型の周りの流れを求めた。

流速は、最大20cm/sであり、比較的低流速で、

Re数が40000程度の流れを求めた。

また、予備実験として、懸濁法で可視化を行なうための Test section は、幅110mm、高さ30mm、長さ1700mmの矩形流路をアクリル板で製作したものである。流れの中に Table. 1 に示すトレーサーを懸濁させて可視化した。

また、注入流脈法のための Test section は、懸濁法に使用した Test section の上流に、内径0.7mmのステンレスパイプ3本を、プロモーター前方約4cmからトレーサーとして染料を流脈状に注入できるようにすると共に、プロモーター角柱の表面に、内径0.7mmの注出口4ヶ所をあげ、赤、青、黒の3種のインク色をもつ

タンクより, パイプを通じてプロモーター内部からも染料を注入できるようにした。なお, トレーサーの染料は, 円柱状タンクにためられ, 高さを変えて位置ヘッドを調整することにより, 水主流速と同一流速で注入することが出来るようにした。Fig.6にその図を示す。

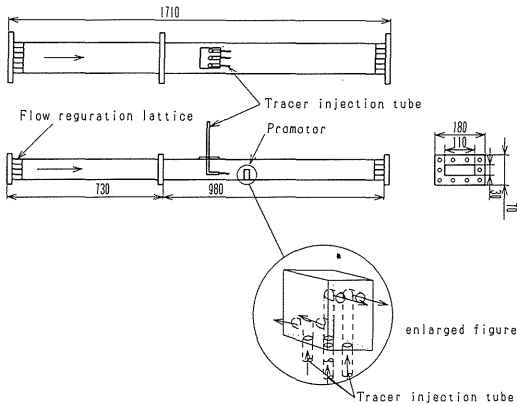


Fig. 6 Test Section of Injection Streaks
($V=0.5\sim 4.0\text{cm/s}$)

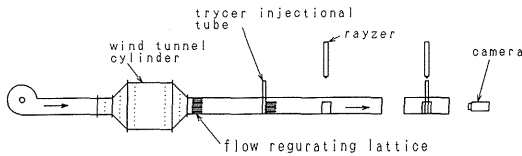


Fig. 7 Tested Wind Tunnel ($V < 1.0 \text{ m/s}$)

一方, 比較のために空気を流す既設の風洞を用いて, 煙注入流脈法による可視化を行なった。風洞出口のテスト部に, 煙をトレーサーとする, 注入流脈法に使用した装置を Fig.7 および Fig.8 に示す。遠心ファンで加圧した空気を整流格子で整流し, アクリル製の

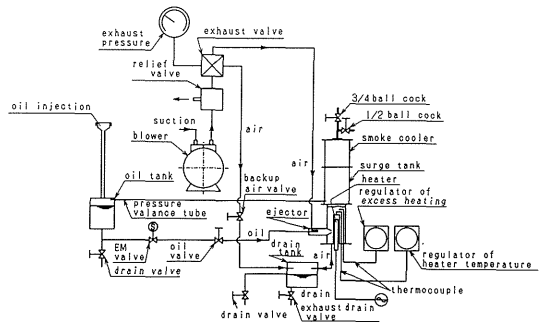


Fig. 8 Flow Chart of Smoke Generator

幅240mm, 高さ60mmの矩形流路に導き熱線風速計で流速を測定した。トレーサーは, 薬用ホワイトオイルと空気を混合し, そのジェットをヒーターエレメントに吹きつけ煙を発生する煙発生装置を用い, 煙をプロモーター前方約10cmから, 内径2.5mmのパイプ5本から流脈状に注入した。また, パイプは流線形状として, 上流注入部の乱れの発生を防止するように改良した。

4. 実験結果

表面浮遊法, 懸濁法, 注入流脈法, による平板上におかれた突起物の流れの可視化を行った。その結果を以下に示す。

4.1 表面浮遊法による矩形プロモーターのまわりの流れ

すでに, Fig.1に示した様な回流水槽の片側に, 一定間隔で矩形模型を取付け, 表面にAl粒子を浮遊させて流れの可視化を行った。試験条件を Table.2に示す。

Table. 2 Test Condition of Flow Pattern around Square Promoter by Free Surface Methods

$$Re = \frac{2v \cdot H}{\nu} \quad H = 100 \text{ (mm)}$$

Fig. No.	width(mm)	height(mm)	velocity(cm/s)	Re	pitch(mm)	tracer	time(sec)
9	20	20	19.0	41120	40	A1	1/15
10	20	20	18.0	38957	80	A1	1/15

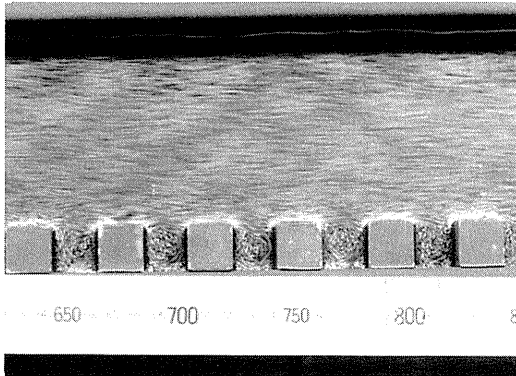


Fig. 9 Flow Pattern around Square by Free Surface Method
 $w=20(\text{mm})$, $l=20(\text{mm})$, $V=19.0(\text{cm/s})$,
 $Re=41120$, Tracer;Al, $p=40(\text{mm})$
 s.s 1/15

Fig.9は $p/d=2$ で $Re=41120$ の場合の流れを示す。最もピッチのせまい場合の写真である。プロモーターのすきまの間には、1つの渦が主流とかみ合うように回転しており、副次的な渦は見られない。

Fig.10は $p/d=4$ で $Re=38900$ の場合の流れを示す。プロモーター前端ではく離してプロモーター背面に入り込む渦A、かみ合う渦B、主流から流れ込みプロモーター前縁に当たって形成される渦Cとの3つの渦により構成される。渦Aと渦Bはかみ合っていないが、渦Cは渦A、B両方とかみ合っており、両方の渦の副次的な渦である。渦A、Bは渦Cとの関係で、その大きさをかえ、特に、渦Aは不安定で、渦B、Cとの関係で発生消滅を繰り返している。また、ピッチが

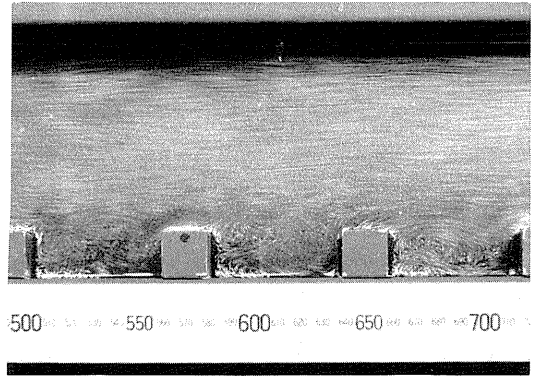


Fig.10 Flow Pattern around Square by Free Surface Method
 $w=20(\text{mm})$, $l=20(\text{mm})$, $V=18.0(\text{cm/s})$,
 $Re=38957$, Tracer;Al, $p=80(\text{mm})$
 s.s 1/15

増大し、 $p/d=4$ 場合に、各渦の移動が激しくなり、渦Aが移動して渦Bとあわさる。また、渦Bが渦Aを取り込むなどの合体発生消滅をくりかえす、非定常流れが可視化された。

4.2 矩形アクリル流路内に取付けた有限幅の角柱のまわりの流れ(懸濁法)

Fig.5の回流水槽の矩形アクリル流路内底面におかれた有限高さの角柱まわりの流れを可視化するために、各種のトレーサーを水に懸濁させて、これに任意の方法によりHe-Neレーザーをあて、2次元断面内の流れを可視化した。実験条件表をTable.3に示す。

Table. 3 Test Condition of Flow Pattern around Cubic Promoter by Suspension Methods

Fig. No	h(mm)	w(mm)	H(mm)	v(cm/s)	Re	tracer	position
11	10	10	100	1.2	720	glass	vertical, middle
12	20	10	100	0.46	276	glass+mica	vertical, middle
13	10	10	100	3.7	2220	glass+mica	horizontal, middle

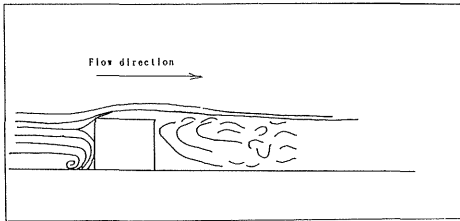
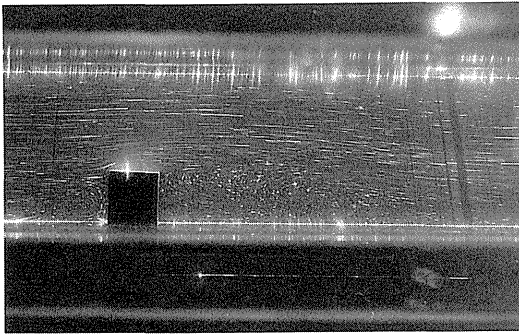


Fig. 11 Flow Pattern around Cubic Promoter by Suspension Method
 $h=10(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm}),$
 $v=1.2(\text{cm}/\text{s}), \text{Re}=720,$ Tracer;Glass
 Vertical, Middle, s.s 1/1

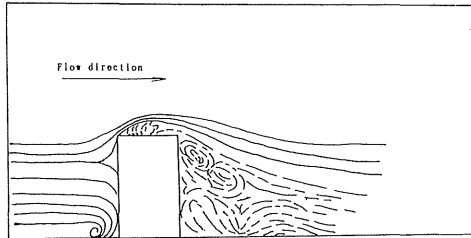
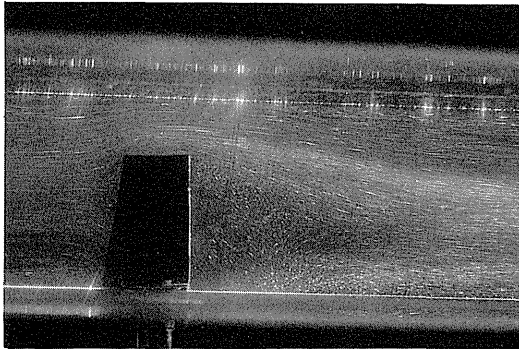


Fig. 12 Flow Pattern around Cubic Promoter by Suspension Method
 $h=20(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm}),$
 $v=0.46(\text{cm}/\text{s}),$
 $\text{Re}=276,$ Tracer;Glass+Mica($3 \mu\text{m}$)
 Vertical, Middle, s.s 1/1

Fig.11は、高さが30mmの流路内に、高さ10mm、幅10mm、長さ10mmの角柱をおいた場合の $\text{Re}=720$ の垂直断面で、ガラス粒子を懸濁した場合を示す。プロモーターの前後に流れにかみ合うはく離渦が発生しているようすがわかるが、ガラス粒子は大きく、流れ中の粒子密度が小さいため、こまかい流れの様子を可視化するにはいたっていない。

Fig. 12は、前記のガラス粒子に、TiOをコーティングした雲母粒子を混合させたトレーサーによる結果を示す。 $h=20(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm})$ のプロモーターの、 $\text{Re}=276$ の垂直断面の場合であり、プロモーターの後ろに1ヶのはく離渦が見えている。ガラスの場合より、局所的な流れがよくみえている。

Fig.13は、 $h=10(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm})$ で $\text{Re}=1649$ の場合の、底面に接した部分の流れを示す。角柱の回りの首飾り渦の様子、また、角柱背面の巻き上がる流れのきょ動がよく観測される。

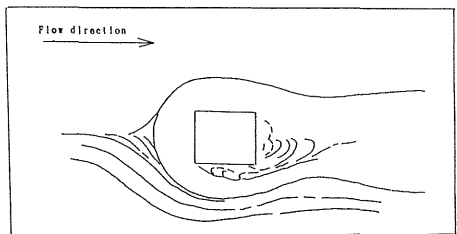
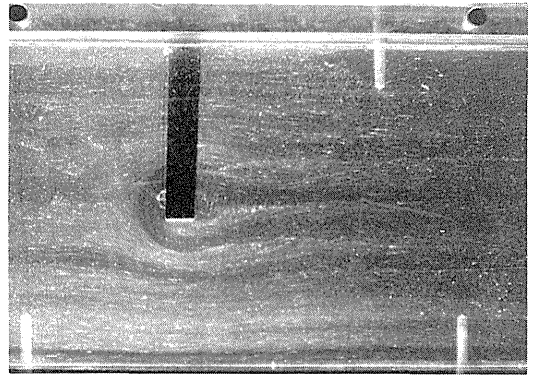


Fig. 13 Flow Pattern around Cubic Promoter by Suspension Method
 $h=10(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm}),$
 $v=3.7(\text{cm}/\text{s}),$
 $\text{Re}=2220,$ Tracer;Glass+Mica($3 \mu\text{m}$)
 Horizontal, Middle, s.s 1/1

4.3 煙風洞流による流れ (注入流脈法)

幅240mm, 高さ60mmの亚克力流路の中央に取りつけた, 有限高さの角柱の回りの流れを可視化するため

に, 角柱の上流10cmの位置にある2.5φの5本の煙取り出し口より, 煙発生装置より空気流中に煙を注入して, レーザーシートにより角柱のまわりの垂直および水平断面の流れを見た。実験条件をTable.4に示す。

Table. 4 Test Condition of Flow Pattern around Cubic Promoter by Smoke Streak Methods

Fig. No.	h(mm)	w(mm)	l(mm)	v(cm/s)	Re	tracer	position
14	40	20	20	0.2	1714	smoke	vertical, middle
15	60	20	20	0.2	1714	smoke	horizontal, near wall

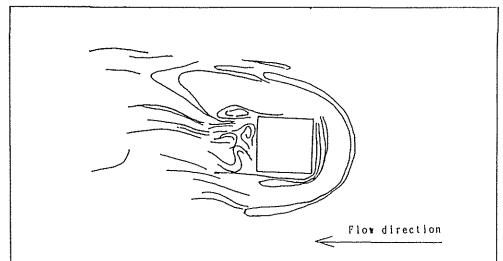
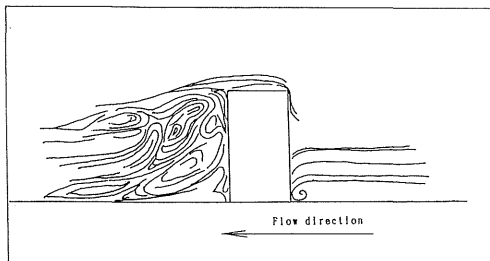
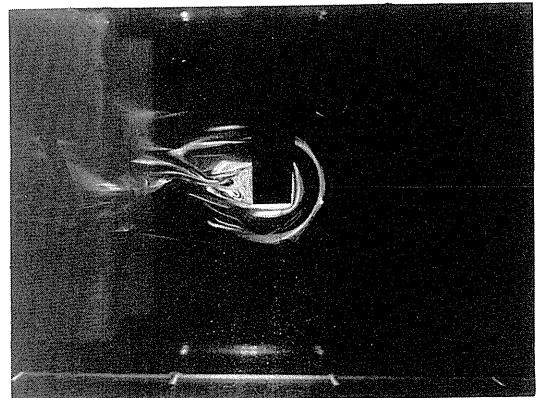
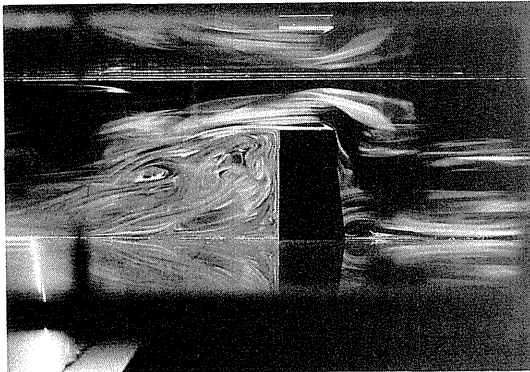


Fig. 14 Flow Pattern around Cubic Promoter by Smoke Tracer

$h=40(\text{mm})$, $w=20(\text{mm})$, $l=20(\text{mm})$,
 $v=0.2(\text{cm/s})$,

$Re=1714$, Vertical, Middle, s.s 1/8

Fig. 15 Flow Pattern around Cubic Promoter by Smoke Tracer

$h=60(\text{mm})$, $w=20(\text{mm})$, $l=20(\text{mm})$,
 $v=0.2(\text{cm/s})$,

$Re=1714$, Horizontal, near Wall, s.s 1/8

Fig.14は, $h=40(\text{mm})$, $w=20(\text{mm})$, $l=20(\text{mm})$ の角柱の垂直断面の流れを可視化したものである。上流の角柱

にまきつく首飾り渦と, 後流に生ずるはく離渦が見えるが, かなり乱れた流れとなっている。

Table. 5 Test Condition of Flow Pattern around Cubic Promoter by Dye Streak Method
n; Cubic Number (row×column)

Fig. No.	n	h(mm)	w(mm)	l(mm)	v(cm/s)	Re	direction
16	1	20	10	10	2.6	1560	plane
17	1	20	10	10	2.6	1560	side
18	1	20	10	10	2.5	1500	back
19	1	20	10	10	2.8	1680	side
20	5×5	20	10	10	3.0	1800	plane

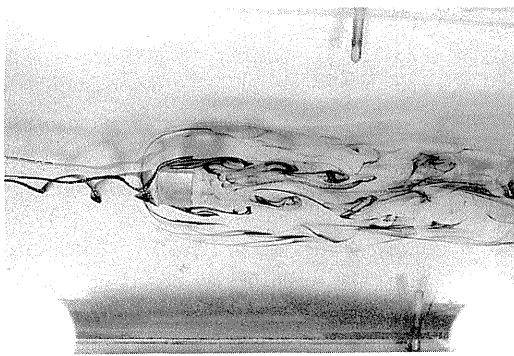


Fig. 15は、水平断面の流れを見たものである。上流に角柱にまきつくアーチ渦と、後流のはく離渦の様子が可視化されている。

4.4 染料による注入流脈法の流れ

矩形アクリル流路内に取付けた、有限高さの角柱まわりの流れを可視化するために、角柱の上流5cmの位置に高さ1.5cm(中心線状)、高さ0.5cm(左、右)から赤、青、黒のインク流を注入し、流れを可視化した。Table.5に実験条件を示す。

Fig. 16はh=20(mm), w=10(mm), l=10(mm)の流れを上流より見たものである。角柱の上流より注入した流れは、赤の壁に近い流脈は角柱の上流よりまわりつくようならせん状の首飾り渦となっている。高さ0.5cmよりはいたった青の流脈は、角柱にそって流れ後流ではく離しながらカルマン渦を構成する。しかし、後流にいくほどその幅は広がらない。

Fig. 17は、h=20(mm), w=10(mm), l=10(mm), Re=1560の場合の流れを示す。座面より注入した赤色の流れは、角柱底部にまつわりつく首飾り渦と、青色のらせん状に流入して角柱の後流でカルマン状のくいちがい渦がよく見ることができる。

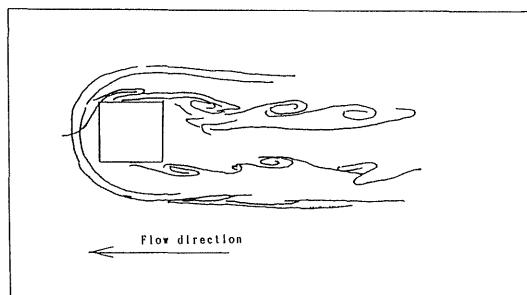


Fig. 16 Flow Pattern around Cubic Promoter by Dye Streak Method

h=20(mm), w=10(mm), l=10(mm),

v=2.6(cm/s),

Re=1560, Direction; Plane, s.s 1/60

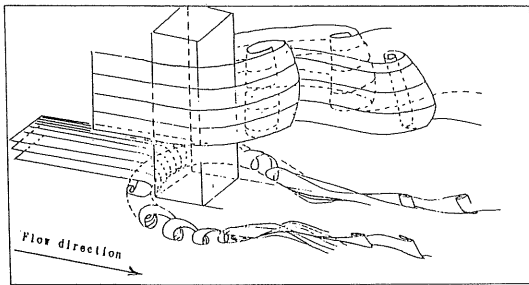
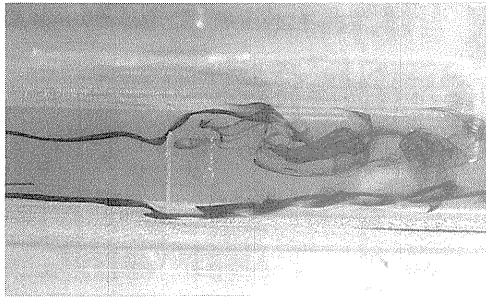


Fig. 17 Flow Pattern around Cubic Promoter by Dye Streak Method
 $h=20(\text{mm})$, $w=10(\text{mm})$, $l=10(\text{mm})$,
 $v=2.6(\text{cm/s})$,
 $Re=1560$, Direction;Side, s.s 1/60

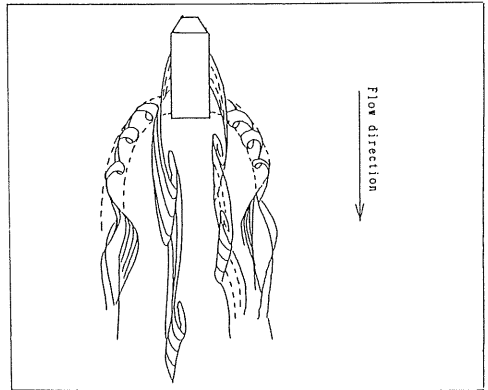
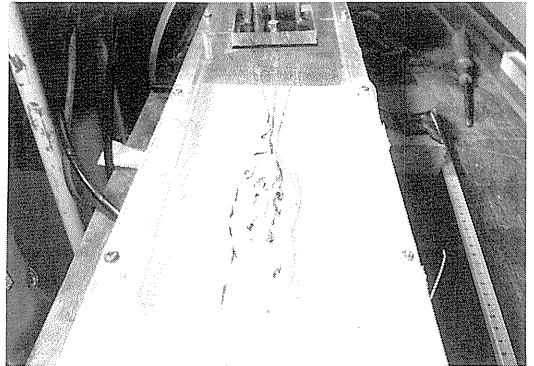


Fig. 18 Flow Pattern around Cubic Promoter by Dye Streak Method
 $h=20(\text{mm})$, $w=10(\text{mm})$, $l=10(\text{mm})$, $v=2.5(\text{cm/s})$,
 $Re=1500$, s.s 1/60

Fig.18は、Fig.17とほぼ同様の条件の流れを、角柱広報から見たものである。首飾り渦が、ひょうたん型に途中でくぼみをもつ様子が可視化された。

Fig.19は、上流より流した染料による注入流脈法では、流れの全体の模様が見えるが、さらに局所的な流れを見るために、角柱の表面にあなをあけ、そのあなよりインクを注入できるようにした。 $h=20(\text{mm})$, $w=10(\text{mm})$, $l=10(\text{mm})$, $Re=1680$ の場合の流れを、角柱内部背面から、後方に向かってインクを注入した場合の流れを示したものである。流れは角柱背面をつたって後方基底部にいったんよどみ、その後、一度上方に巻き上がって渦を形成したあと後流に向かって流れる。また、角柱背面を出た流れの一部は、角柱側面にそって逆流し、側面前端にまで達している。

Fig.20は、 $h=20(\text{mm})$, $w=10(\text{mm})$, $l=10(\text{mm})$ の角柱を、10mm間隔で流れと直角の方向に5ヶ並べた場合の

流れである。角柱底部にまつわりつく首飾りの渦の様子が見えている。

Fig.21は全体の流れの模様を示したもので、角柱の流れは、カルマン渦と、首飾り渦と、角柱のうらのまきあがるスワール渦に分類する事ができる。カルマン渦は、プロモーターをよぎるせん断流によりはく離れた流れが、くいちがい状のカルマン渦を構成する。角柱の表面付近では、らせん状に後方に向かってわずかに上昇しつつ流れる首飾り渦が見られる。また、角柱の背面では、流れが逆流し、上部にまきあがるアーチ渦が見えている。角柱の上面には、流れのはく離にともなうマッシュルーム渦が見えている。

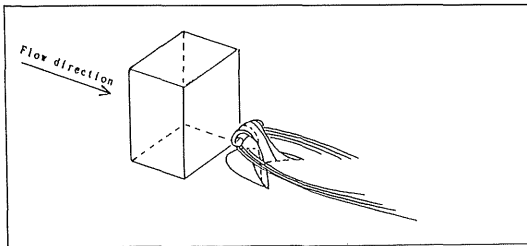
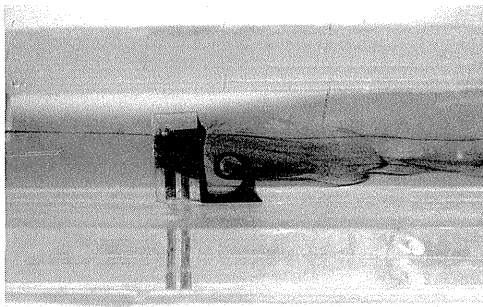


Fig. 19 Flow Pattern around Cubic Promoter by Dye Streak Method

$h=20(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm}),$

$v=2.8(\text{cm}/\text{s}),$

$Re=1680, \text{Direction;side, s.s } 1/60$

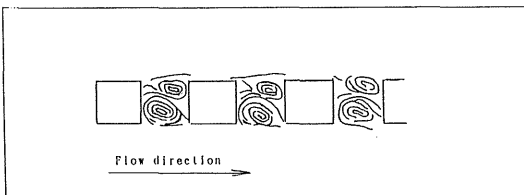
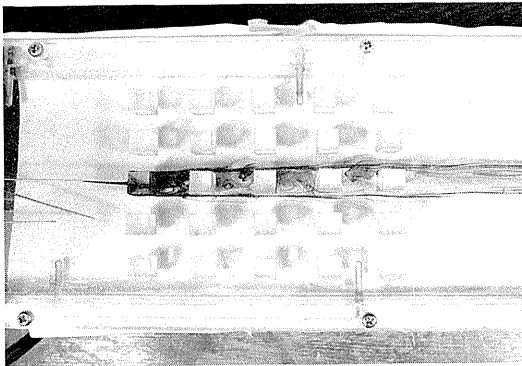


Fig. 20 Flow Pattern around 25 Cubic Promoter by Dye Streak Method

$h=20(\text{mm}), w=10(\text{mm}), l=10(\text{mm}),$

$v=3.0(\text{cm}/\text{s}),$

$Re=1800, \text{Direction;Plane, s.s } 1/60$

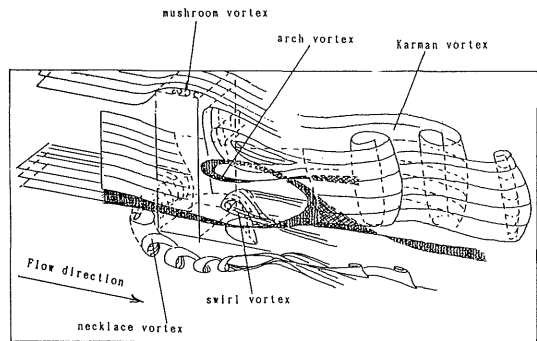


Fig. 21 Figure of Vortex Combination

5. まとめ

1. IC packageを模擬した角柱を平行流路内の基板上においた場合の流れを、表面浮遊法、懸濁法、注入流脈法により可視化した。
2. 表面浮遊法では、Alの粉をトレーサーに用い、プロモーター区画内に発生する渦の模様を可視化した。
3. 懸濁法では、ナイロン、ガラス、顔料をトレーサーとして用いて、水流中の角柱の3次元の流れを可視化した結果、ガラスと顔料との組合せが、可視化に最も適していることを明らかにした。角柱にまつわりつく首飾り渦、後流に生ずるアーチ渦、カルマン渦の模様を可視化した。
4. 水流中に3種の色のインクを主流の流れの中に入れて、角柱のまわりの流れを可視化した。その結果、角柱のまわりの首飾り渦、後流のアーチ渦、カルマン渦の模様が極めて明らかに可視化することができた。
5. 壁面のまわりの局所的な流れを調べるために、角柱の壁面に穴を明け、表面より染料を注入して流れを見た結果、角柱背面に発生するアーチ渦および角柱の後でまきあがるスワール渦の発生を確認することができた。

参考文献

- 1) 流れの可視化学会; 流れの可視化ハンドブック
- 2) 流れの可視化学会; 新版 流れの可視化ハンドブック