

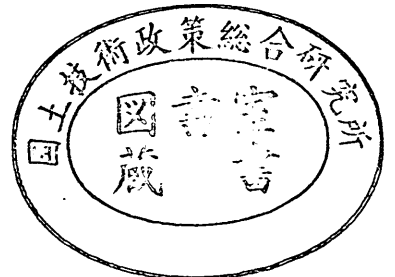
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 2(1) JUNE 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第30巻 第2号 (Vol. 30, No. 2) 1991年6月 (June, 1991)

目 次 (CONTENTS)

1. Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters
in the Surf Zone using Field Data Yoshiaki KURIYAMA 13
(現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討
..... 栗山 善昭)
2. 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討
..... 平石 哲也・本城 智 59
(Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm
..... Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJO)
3. 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション
..... 細川 恭史・古川 恵太 155
(Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate
Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA)
4. プラスティックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性
..... 田中 洋行・太田 一己・丸山 隆英 211
(Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils
..... Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA)
5. 杭の横抵抗における捨石層の評価
..... 高橋 邦夫・壹岐 幸史 229
(Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound
..... Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI)
6. サンドドレーンの効果に関する有限要素解析
..... 小林 正樹 275
(Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand Drains
..... Masaki KOBAYASHI)
7. 接円式深層混合処理地盤の挙動
..... 北誥 昌樹・中村 健・寺師 昌明 305
(Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with
High Replacement)
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI)

8. 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗	寺師 昌明・北誥 昌樹	327
(Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile	Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)	
9. 液状化による矢板岸壁の変形の数値解析	井合 進・亀岡 知弘	349
(Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall due to Liquefaction	Susumu IAI and Tomohiro KAMEOKA)	
10. 盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析手法の検討	上部 達生・長田 信	381
(Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers	Tatsuo UWABE and Makoto OSADA)	
11. ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性	清宮 理・山田 昌郎	445
(Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion	Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)	
12. 歩行式水中調査ロボットの開発		
— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —	朝倉 修・秋園 純一・岩崎 峯夫・根本 孝志	483
(Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection	— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —	
Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI	and Takashi NEMOTO)	
13. 水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山 義邦・鮎貝 基和・鈴木 誠・福本 裕哉	533
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in	Horizontal Pipe	
Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI	and Hiroya FUKUMOTO)	

離散渦法による構造物周りの 流れのシミュレーション

細川 恭史*
古川 恵太**

要 旨

港湾域に構造物が建造されると、湾内の流況に変化が生じ、物質の移流・拡散や海水の交換にも変化が起こる。近年こうした構造物による流況変化を利用して積極的な流況制御を行い、望ましい環境を創造するという試みがされている。

そこで、基礎実験として、海域の中の構造物を、定常な一様流中に所定の傾き角をもって設置された直線状の構造物として単純化した水理実験を行い、構造物周りの流れの変化を観察すると共に、離散渦法を用いた数値モデルの開発を行った。

水理実験では、構造物周りの流れをトレーサで可視化し、ビデオカメラにより収録された画像を処理することによって、渦の挙動や流速場を観察した。実験結果は、拡散渦法を用いた開発モデルに現れるパラメータの同定に用いた。また、本計算法の応用例として、振動流中に置かれたハの字型造流堤の造流機構を検討した。

本論文で得られた主な結果は次のとおりである。①流れに対して傾きを持った直線状の構造物の背後には、*Maue*の渦列が現れ、ストローハル数は0.15~0.19となった。②本計算法に現れる4つのパラメータの同定を行い、次元解析により、レイノルズ数の関数として一般化した。一般化されたパラメータを用いた計算結果は、異なる条件の実験値とも良い一致を示した。③ハの字型造流堤の造流機構は、造流堤近傍に存在する残差循環流の大きさと位置に支配されていることを明らかにした。また、造流効果の比較パラメータとして、ある場所での残差流速の大きさを採用した場合に造流効果の最適値が、作用する振動流の周期と造流堤の配置角とにより決定されることを示した。

キーワード：乱流，後流，離散渦法，シミュレーション，平板

* 海洋水理部 海水浄化研究室長
** 海洋水理部 海水浄化研究室

Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate

Yasushi HOSOKAWA*
Keita FURUKAWA**

Synopsis

Unsteady separated flow behind a structure causes various effects around them hydrodynamically and environmentally. Thus a numerical model is urgently required to predict turbulence and vortices induced by a structure placed in flow. This paper deals with the modeling of discrete vortices induced by a simple inclined flat plate.

Hydraulic model experiments were conducted so as to obtain the basic information on shedding vortex street behind an inclined flat plate. The inclined flat plate was placed in 2-D uniform flow with particulate tracers. The frequency of vortex shedding and the magnitude of velocity-deficit domain were observed with the help of an image processing analyzer.

A discrete vortex model was developed. In our model, inherent vortices are distributed along on the plate surface. Four parameters are necessary to assign. The value of each parameter is chosen in order to generate most fitted flow with that by hydraulic model experiments. These parameters are expressed as functions of Reynolds number (Re) by dimensional analysis. These functions can successfully evaluate the value of the parameters for wider range of flow ($Re = 3000 \sim 17000$).

This numerical model was applied to the estimation of flow around a set of double-inclined-plates which two inclined plates are placed together facing one another with opening angle θ . The set of these plates causes the different hydraulic resistances in between fore and against flows. One-directional residual flow was generated at the open mouth by the exerting of sinusoidal flow. It is observed that the residual velocity varies with both opening angle θ and sinusoidal time period, by a series of numerical experiments.

The following results are obtained ; 1) Due to experiments for an inclined plate in uniform flow, shedding vortices formulates Maue's vortex street. Observed Strouhal number is 0.15~0.19. 2) The newly-developed discrete vortex model shows an appropriate flow field which gives good agreement with experimental data. Four parameters are successfully described as functions of Reynolds number ($Re = 3000 \sim 17000$.) 3) The residual flow around double-inclined-plates showed the existence of circulate flow, which gives a one-direction residual flow at the open mouth.

Key Words : Turbulent Flow, Wake, Vortex Method, Simulation, Flat Plate

* Chief of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Member of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

1. はじめに	159
2. 構造物周りの流れの水力実験	159
2.1 一様流中の構造物周りの流れ	159
2.2 実験の方法と条件	160
2.3 実験結果	162
2.3.1 ビデオ画像の目視観測	162
2.3.2 トレーサの流跡線の抽出	162
2.3.3 平均流速の測定	164
3. 剥離渦を伴う流れのシミュレーション	166
3.1 離散渦法の概説	166
3.2 開発した離散渦法とパラメータの次元解析	168
3.2.1 乱流拡散係数 ν_t の次元解析	169
3.2.2 放出渦点導入位置 ε の次元解析	169
3.2.3 境界渦点数 Nb の次元解析	169
3.2.4 計算時間間隔 Δt の次元解析	170
3.3 離散渦法のパラメータフィッティング	170
3.3.1 代表例による各パラメータの決定	170
3.3.2 パラメータの一般化と検証	174
4. ハの字型造流堤の流れ制御効果	181
4.1 一様流中に置かれたハの字造流堤周りの流れ	184
4.2 非定常流中に置かれたハの字造流堤のシミュレーション結果	184
5. おわりに	185
記号表	185
参考文献	186
付録A けん濁されたトレーサの連続画像から流跡線の追跡を行い、個々のトレーサの 移動速度から平均流速を推定する方法	186
付録B シリーズA, Bの計算結果	190
付録C シリーズDの計算結果	199

1. はじめに

潮汐や波によって起こる流れの影響により、海域に設置された構造物の端部からは渦が放出される。構造物近傍では、この放出渦によって局所的に流れが変化し、場合によっては、広域の流れ場にもその変化が及ぶ。このように、港湾域に構造物が建造されると、湾内の流況に変化が生じ、物質の移流・拡散や海水の交換にも変化が起こる。近年こうした構造物による流況変化を利用して積極的な流況制御を行い、望ましい環境を創造するという試みがされている。しかし、個々の渦の挙動については渦の規模が小さく、かつその挙動は非定常であるため、模型実験によって確認することは難しい。数値シミュレーションでも個々の渦の挙動までは従来の方法では十分な検討ができない。

そこで、基礎実験として、定常な一様流中で、流れに対して所定の傾き角をもって設置された直線状の構造物により、発生する渦の挙動をビデオカメラを用いて観察する水理実験を行い特性量を抽出した。また、その特性量を再現できる数値計算法として離散渦法による数値モデルの開発を行った。本論文の構成は以下のとおりである。

2. では、既往の実験結果を整理するとともに、上述の基礎実験結果から、後流の特性を抽出する。

3. では、離散渦法の解説と、開発したモデルに現れるパラメータの同定を2.の結果を用いて行う。また、同定されたパラメータは次元解析により一般化され、レイノルズ数の異なる条件においても離散渦法が適用できることを示す。

4. では、開発されたモデルをハの字型に配置した造流堤に適用してその造流効果を計算により求め、流れの方向別流量係数の特性と妥当性、ならびに造流効果から見た造流堤の最適配置角度等の検討結果について述べる。

2. 構造物周りの流れの水理実験

2.1 一様流中の構造物周りの流れ

一様流中に構造物がおかれた場合、その背後には、後流と呼ばれる流速の減衰域が発生する。後流中には一般に渦が存在し、その様相は一様流の流速 U と、構造物の代表長さ L 、流体の動粘性係数 ν から規定されるレイノルズ数 Re ($Re = U \cdot L / \nu$) によって変化するとされている。例えば、図-1には、 Re 数が大きくなるにしたがって円柱の後流中に現れる渦の様相が、双子渦、交互剥離渦列、乱流へと変化する過程を円柱に働く抗力

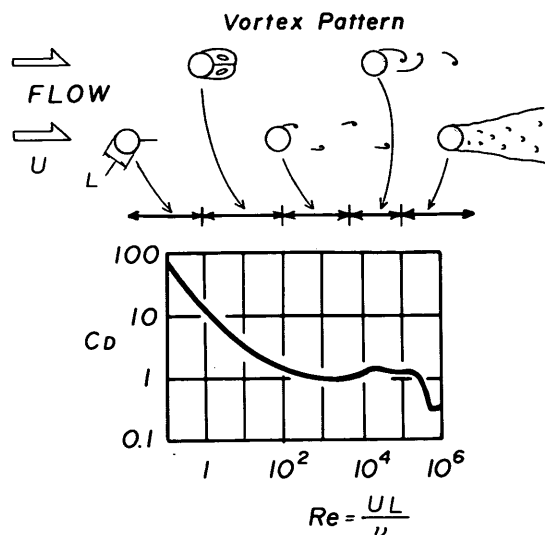


図-1 円柱の後流中に現れる渦の様相

C_D の変化と共に示してある。平板についても同様の変化が現れる。海域での Re 数は、構造物の規模を $1 \sim 1000\text{m}$ とした場合、 $10^4 \sim 10^8$ であるので、交互剥離渦列や乱流の後流が発生することが予想される。交互剥離渦列については、Karman が渦の安定計算より、図-2 に示すような渦列を提案している。この渦列は Karman の渦列として広く知られており、 Re 数の低い領域に現れる平行に進行する渦列をよく再現している。また、Maue は Karman の渦列を拡張し、図-3 に示す渦列に関して、安定に存在する条件を示した。図-3 の場合、平行な渦列に位相差 ($b < a/2$) があるために渦列に垂直な方向の流速成分が存在し、形成される渦列は接近流れに対して一定の角度をもって進行することになる。しかし、図-2、3 どちらの渦列も渦の減衰過程を考慮していないので、高 Re 数流れに対しては、その

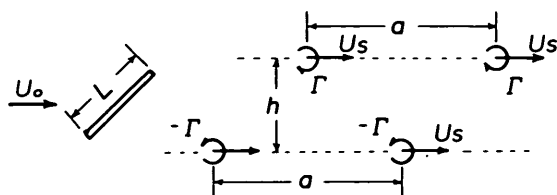


図-2 Karman の渦列

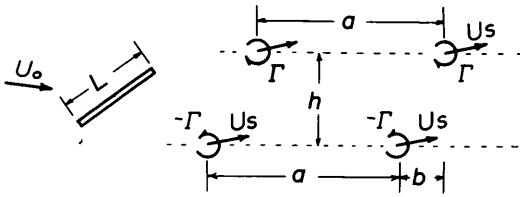


図-3 Maueの渦列

ままの適用は現実的でないが、初期放出渦列の様相を見る上で参考となる。

平板背後の渦列の形成に対して、FageとJohansen(1927)¹⁾は、一様流中に置かれた平板周りの流速を風洞内で実測し、平均流速場の空間分布から放出される渦の循環 Γ と、渦列の形成を測定している。放出される渦の循環 Γ は、後流中の流速の分布から式(1)によって定義されている。

$$\Gamma = (U_1 - U_2) \cdot dx \quad (1)$$

ここに、 U_1 は渦層外縁の流速、 U_2 は渦層内縁の流速であり、 dx は渦層の厚さである。Fageらは、これらの計測により放出される渦の特性として、①放出渦の外縁の流速 U_1 は接近流速 U の1.4~1.6倍となること、②放出される渦の強さは、放出後急速に40%程度の減衰を受けること、③放出渦の発生周波数は接近流速に比例し、平板の流れに対する投影幅に反比例すること等を指摘している。①、②の結果として、Karmanの渦列とは異なり、渦間隔 a と渦列間隔 h の比が流下につれて大きくなっている(表-1参照)。③に関しては、その後Abernathy(1962)²⁾によって修正ストローハル数(St^*)として整理され、0.15程度の値をとることが示されている。ここで、修正ストローハル数とは、周波数 f 、代表流速 U 、代表長さ L を用いて計算されるストローハル数($St=L \cdot f/U$)の代表長さに後流の広がり

表-1 Karmanの渦列とFageら(1927)の実績値との比較

$\theta = 90 \text{ deg}$		
x/L	h/L Karman	h/L Fage. et. al.
5	1.48	1.30
10		2.0
20		2.75

Center of Vortex

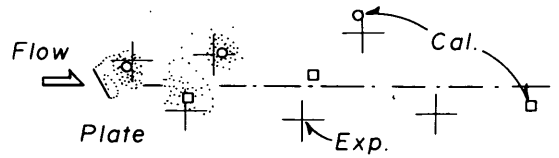


図-4 Maueの渦列の実験結果例の模式図(木谷ら(1977)³⁾による)

幅 L を用いたものである。また、放出渦の位相差に関して、木谷と有江(1977)³⁾は、数値計算により平板の後流中に放出される渦列を計算し、Maue渦列が形成されることを実験結果と共に示している(図-4)。

以上の知見をまとめると、交互剥離渦列の特性として、①渦の放出周期・②位相差といった、流れ場の時間的な特性量と、③放出される渦の強さと④その後の渦の減衰といった流れ場の空間的な特性量のあることがわかる。特性量の抽出のためには、それぞれを代表させる値として、① St 数・②渦列の傾き・③平均流速の空間分布を測定する必要があることがわかる。

2.2 実験の方法と条件

2.1により、放出渦を含む後流の特性量を抽出するためには空間的にも時間的にも測定を行う必要があることが示された。そこで、ビデオを用いた計測法をとり入れ、時間的な変化については、ビデオの原画像を可視化された情報として利用し、空間的な測定ではトレーサ粒子の移動計測を用いて平均流速の測定を試みた。実験対象とした構造物の諸元を図-5に示す。長さ L 、厚さ D 、傾き θ はそれぞれ、 $L=12\text{cm}$ 、 $D=0.6\text{cm}$ 、 $\theta=45\text{deg}$ に固定した。

一様な接近流速を再現するため、図-6に示すような実験水槽を用いた。深さ3m、長さ6m、幅1mの水槽内には、水平に移動する台車を設置し、その台車に構造物が固定されている。台車の水平移動により、構造物に相対的な一様流が作用することになる。台車の移動は、台車に取り付けられた牽引用のロープを滑車を介してクレーンに接続し、クレーンの定速牽引を利用して行った。滑車の配置により牽引モードは4通りに分かれている。クレーン自体の牽引速度が高速と低速の2通りが選べるので、発生する相対流速は8通りになる。流速の測定は、台車に取り付けられた電磁流速計と水中ビデオカメラによって行える。電磁流速計は主に、台車移動速度のモニターとして実験条件の確認のためにのみ用いた。下向き

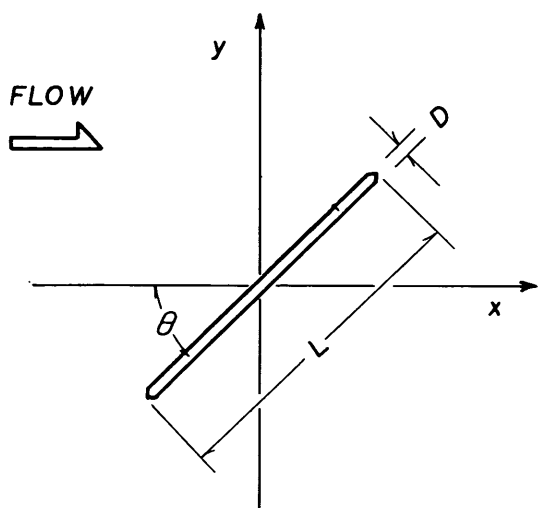


図-5 対象構造物諸元

に取り付けられた水中ビデオカメラにより、けん濁させたトレーサが後方に移動する連続画像を撮影する。再生画像から流跡線の追跡を行い、個々のトレーサの移動速度分布を求め、平均流速分布を推定している。その概要は、付録Aに別記する。図-7に水中ビデオカメラから測定された台車の移動速度と電磁流速計によって得られた流速の結果を各牽引速度に対して同時に図示する。測定結果は各流速で良好に一致しており、水中ビデオカメラによる流速計測法が妥当であることを示している。

実験の手順としては、①実験毎に事前に水槽内にトレーサを分散させる。トレーサとして、煮沸して比重調整された径1~2mmのスチレンビーズを用いる。次に、②水中ビデオカメラの下面75cmの位置で水槽の横から幅5cmのスリット光を当てることで二次元の測定空間を設定する。③その後、台車を移動させ、構造物近傍の

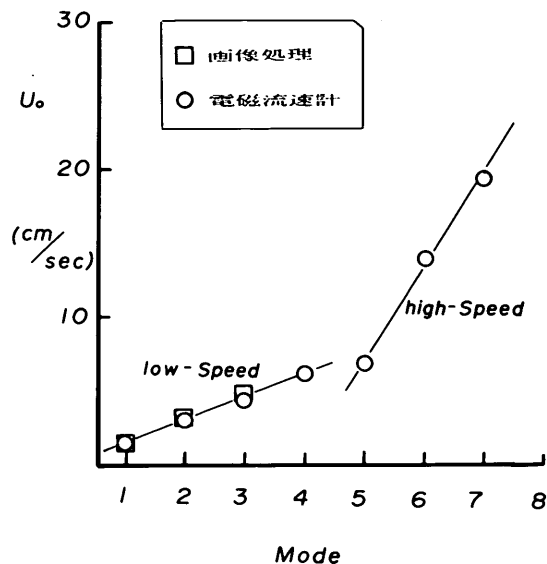


図-7 台車移動速度

流速分布と構造物背後に形成される渦列の様相を測定する。測定は、台車の移動速度が3.2~12.4 cm/sの4通りのケースについて行った。実験ケースを表-2に示す。また、実験の概要を模式的に表すために、水槽をふかん

表-2 実験条件

Case #	U_0 (cm/sec)	Re $U_0 L/\nu$
Exp. - 1	3.2	3800
Exp. - 2	4.4	5400
Exp. - 3	7.0	8400
Exp. - 4	14.2	17000

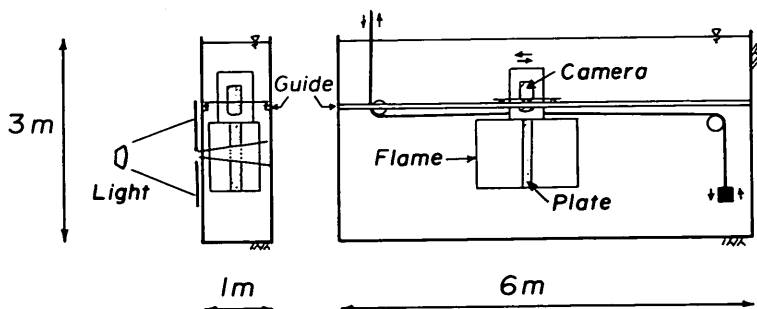


図-6 実験水槽

した様子を図-8に示す。

2.3 実験結果

実験結果は、ビデオ画像として得られる。結果の整理

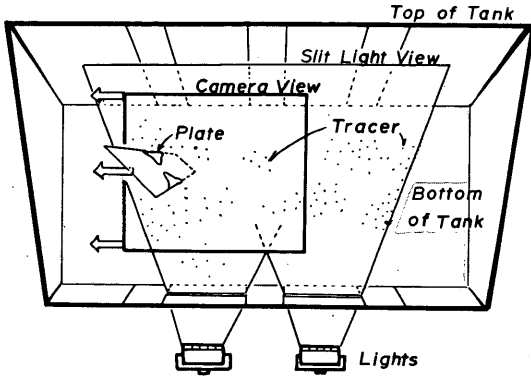


図-8 実験模式図

はつぎの三つの段階に分けて行った。まず初めに、原画像そのものを目視観察し、画面に同時収録されたタイマーにより渦の発生周期を求めた。次に、連続画像の重ね合わせによりトレーサの流跡線を抽出し、渦の様相の定性的な傾向を把握した。最後に、時間平均された平均流速の空間的分布を求めた。

2.3.1 ビデオ画像の目視観測

1秒毎4コマ分の原画像を、図-9に示す。画面左中央の構造物に左から右に向かって流れる一様流と発生する後流が平面的に捉えられている。ビデオ画像として連続的に観察すると、構造物の端部から発生する渦が判別でき、目視により渦の発生周期 T を測定した(表-3)。接近流速が速くなるほど、渦の発生周期が短くなっているのがわかる。また、表-3には接近流速 U_0 と平板長さ L を用いて計算したストローハル数 St と 2.3.2 で測定される渦の拡がり幅 L' を用いて計算した修正ストローハル数 St' を示す。

表-3 渦発生周期

Case #	T (sec)	St $\frac{L \cos \theta}{T U_0}$	$Mod. St$ $\frac{L'}{T U_0}$
Exp - 1	15.0	0.18	0.44
Exp - 2	13.5	0.14	0.37
Exp - 3	6.5	0.19	0.48
Exp - 4	4.2	0.14	0.43

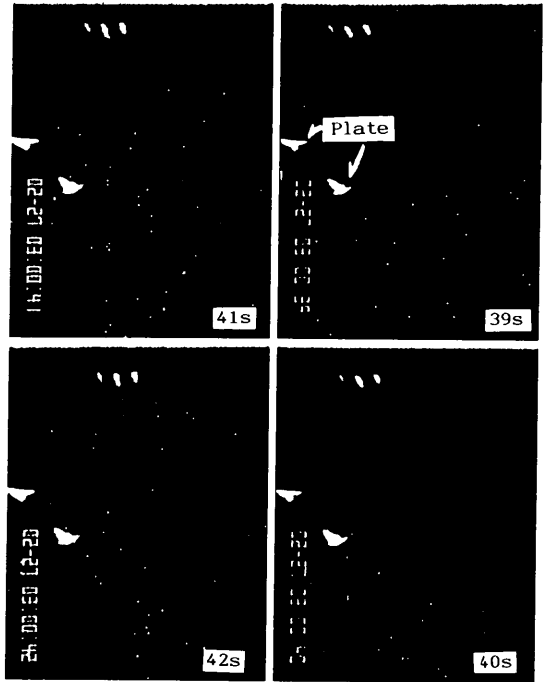


図-9 ビデオの原画像
(右上: $t = 39$ sec, 右下: $t = 40$ sec
左上: $t = 41$ sec, 左下: $t = 42$ sec)

2.3.2 トレーサの流跡線の抽出

図-9に示されたような画像を二値化し、トレーサ粒子を黒色で抽出し、8~10枚の画像を重ね合わせることで、図-10のようなトレーサ粒子の流跡線が得られる。図-10には、画面左中央の構造物の右に後流中に存在する渦によって曲げられた流跡線が現れている。流線の曲がりの中心を推定することにより渦の中心位置と、流線の曲がる範囲から渦の影響範囲とが読み取れる。こうして、読み取った渦の存在位置と影響範囲を実験ケース毎に示すと、図-11a~dのようになる。図中の×印は渦の中心を表し、破線は渦の影響範囲の包絡線を表している。影響範囲の幅を $x = 18$ cm の位置で計測した値を図中に示す。この幅は、渦列の間隔 h に対応し、流速が速くなるほど幅が拡がり、構造物前端側に影響範囲がシフトしていることがわかる。このことは、後流中の渦列が、接近する一様流から角度をもって放出されていることを示し、Maueの渦列の存在を示唆するものであるが、ビデオの撮影範囲が小さいために、渦列のFormationの定量化はできなかった。また、×印の移動から渦の移送速度を求め、接近流速で無次元化した値を縦軸にとり、渦放出点からの距離 S を横軸にしてプ

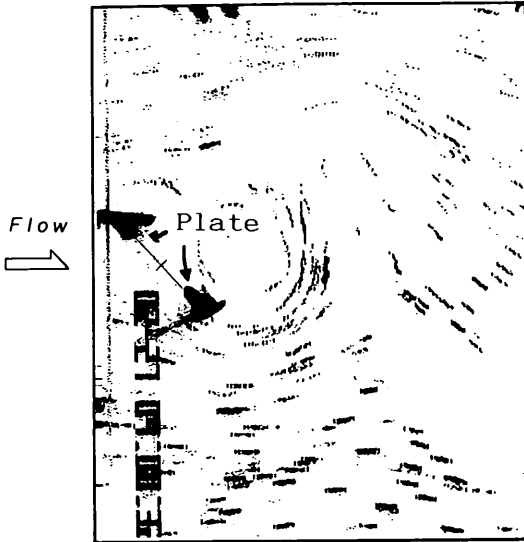


図-10 二値化された画像の合成
(Exp. - 1)

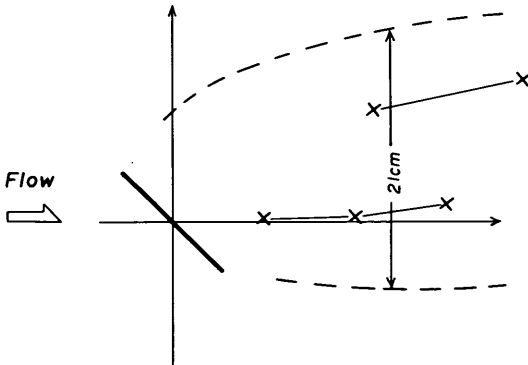


図-11a 画像から読み取った渦列様相
(Exp. - 1 : $U_0 = 3.2\text{cm/sec}$)

ロットすると図-12のようになる。渦は小さな移送速度で放出された後、次第に加速し、接近流速の大ききまで回復することがわかる。放出直後の移送速度が小さいのは、構造物の反対端から放出された逆回りの渦の誘起速度の影響を受けているためであり、渦の移送速度の回復は、渦の流下に伴う減衰を示している。

以上の観察から、放出渦の定性的な様相は以下のようになる。①構造物端部から放出された渦は、互いに位相差をもち、接近する流れに対して、ある角度をもって放出される。②放出された渦は平均流に乗って移流される

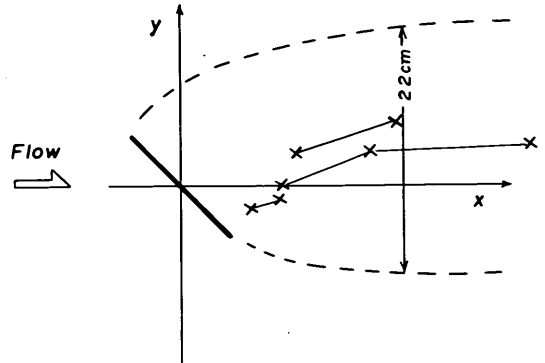


図-11b 画像から読み取った渦列様相
(Exp. - 2 : $U_0 = 4.4\text{cm/sec}$)

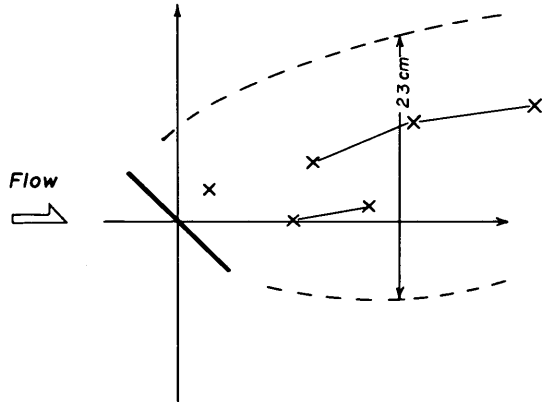


図-11c 画像から読み取った渦列様相
(Exp. - 3 : $U_0 = 7.0\text{cm/sec}$)

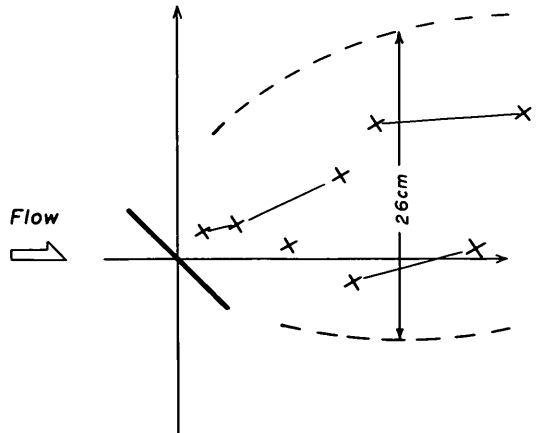


図-11d 画像から読み取った渦列様相
(Exp. - 4 : $U_0 = 14.2\text{cm/sec}$)

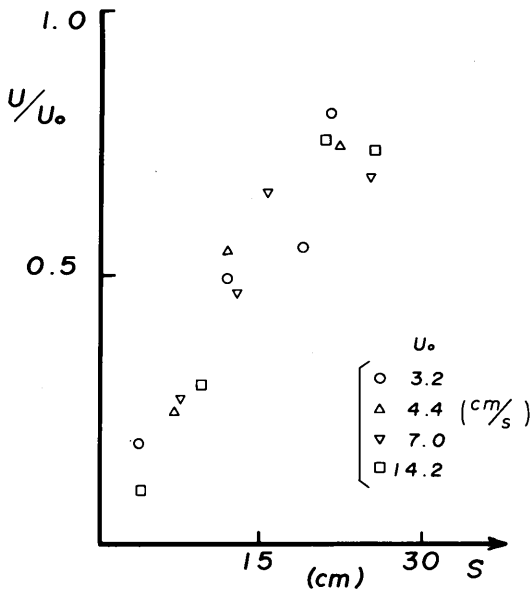


図-12 渦の移送速度

が、他の渦の影響により、移流速度は接近速度より遅くなっている。③渦は移流にしたがって減衰し、流速場への影響力を失っていく。それにともない、④渦の移送速度は接近流速 U_0 まで加速され、渦間の距離も拡大する。

2.3.3 平均流速の測定

平均流速は、付録A に示すような方法で図-13のメッシュに対して計測された。図中陰影を設けた上流側の領域は、構造物の写り込みなどの影響を除くため、解析の際にマスクをかけて処理をしたので、流速値が得られて

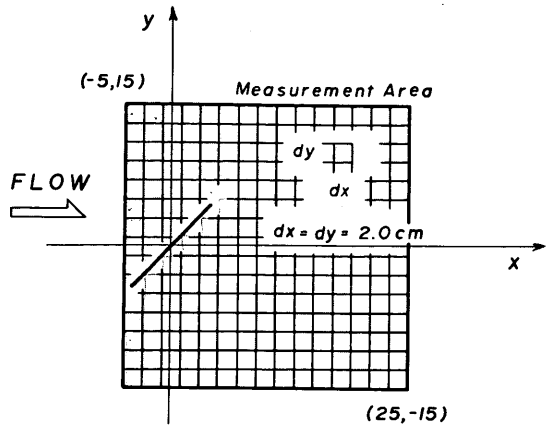


図-13 平均流速計測メッシュ

いない。図-14a～d にそれぞれのケースに対する平均流速分布をベクトル図で示す。各ベクトルは座標点を原点として表示してある。また、接近流速方向 (x 方向) の成分のみを取り出した図を、図-15a～d に示す。図-15では、せん断流の存在を明らかにするため、後流中の横断方向に陰影を付けている。比較的流速の低い2ケースについては、後流域における減衰と、構造物端部後方におけるせん断流の存在が現れているが、流速の高い2ケースについては、トレーサの分布状況が良くなかったことや、相対誤差の増加等により良好な結果は得られなかった。

得られた流速分布から、構造物後端から放出される渦の移送速度の推定をする。 x 方向流速値を接近流速 U_0 で無次元化した値を図-16a～d に示す。図中 S は構

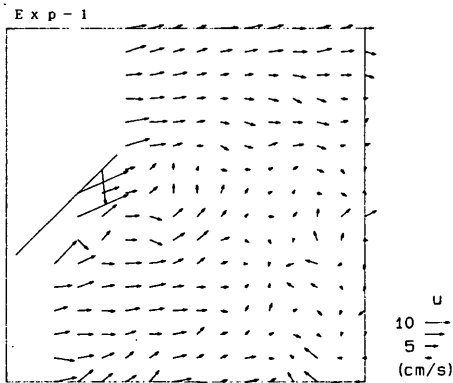


図-14a 平均流速分布実測値

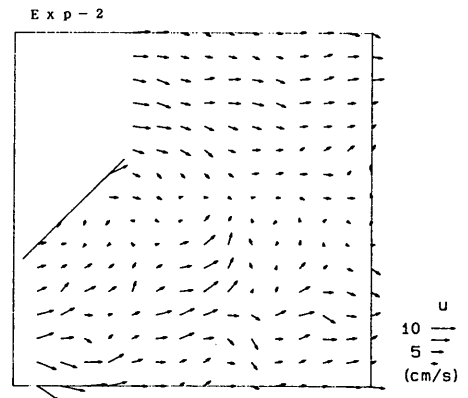


図-14b 平均流速分布実測値

離散渦法による構造物周りの流れのシミュレーション

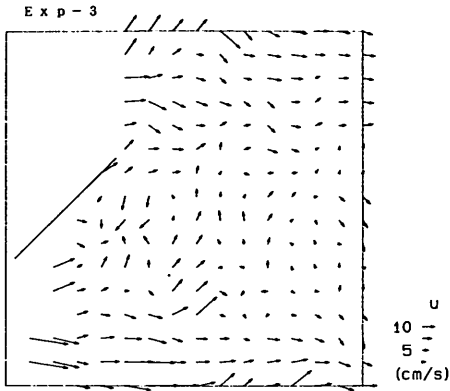


図-14c 平均流速分布実測値

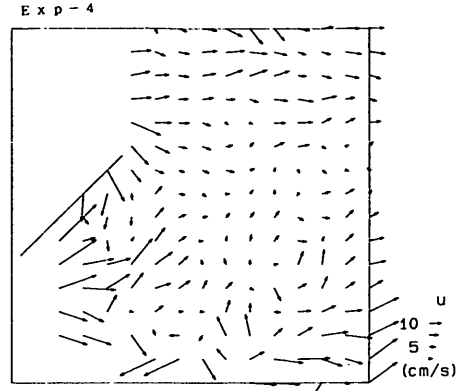


図-14d 平均流速分布実測値

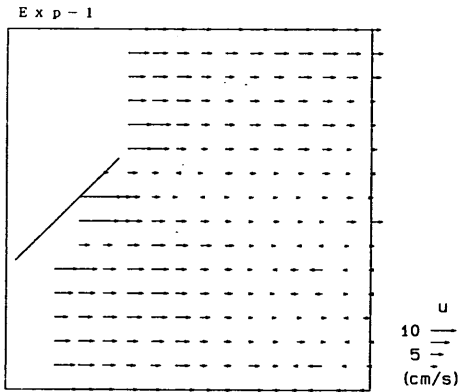


図-15a 接近流速方向平均流速分布

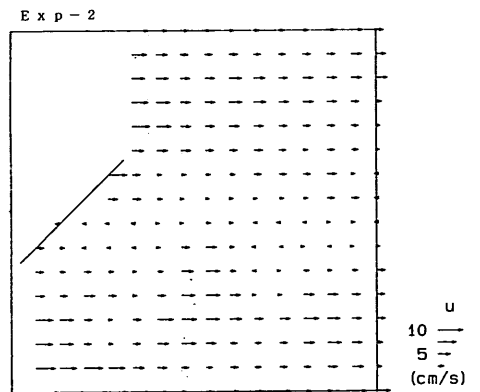


図-15b 接近流速方向平均流速分布

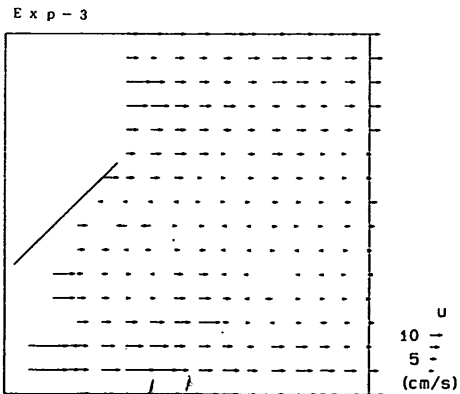


図-15c 接近流速方向平均流速分布

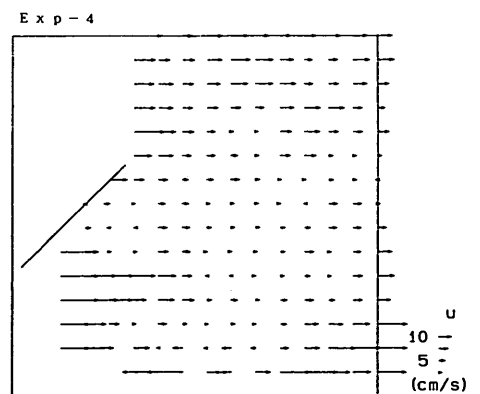


図-15d 接近流速方向平均流速分布

造物後端から測定した x 方向の距離である。図には流れの流下方向に向う4つの測線について、プロットを変えて示している。構造物背後での、流速の増加を示す右上がりのプロット（図-16aでは□や▽）と、構造物の外側で、後流域の拡大により流速が減少することを示す右下がりのプロット（図-16aでは○や△）が見られる。剥離渦は、 x 軸に対して傾斜した方向に放出されているので、これらの2つのプロット群の内挿により、移送速度を推定することができる。いずれのケースも $s=15\text{cm}$ で接近流速の約0.5倍まで移送速度が回復していることが読み取れる。これは、図-12で示した結果の傾向を再現している。

3. 剥離渦を伴う流れのシミュレーション

2.で示されたように、剥離渦を伴う流れは、非定常的に放出される渦によって乱されており、乱流として位置付けられる。非圧縮性の乱流の流体運動は、式(2)に示すようなナビエ・ストークス方程式で記述される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \frac{1}{\text{Re}} \nabla \cdot \nabla \mathbf{u} \quad (2)$$

この式は、流体の微小要素に対する運動量の釣合式であり、十分に小さな計算格子と時間間隔で離散化することにより、乱流がシミュレートできることが確かめられている。しかし、現在は計算時間や計算容量などの制約により、ごく限られた条件の問題にしか適用できていない。

ナビエ・ストークス方程式の解法として、通常は、右辺第2項に現れる拡散係数を乱流拡散係数に置き換えることで乱流のモデル化をしたり、乱流エネルギーのような高次の量に対する釣合式に置き換えて計算することが行われている。前者は、離散化された方程式における解の安定について注意を払う必要があり、しかも得られる解は、計算格子内で平均化された流れ場である。この解法の代表的な例として、ADI法がある。後者の方法は、 $\kappa-\varepsilon$ モデルに代表される方法であるが、高次の量を導入するために、方程式系が複雑になり、幾何学的境界条件の複雑な場に対しては、多量の計算時間を費やすことになる。

これらの問題を解決するため、高 Re 数流れの解法として、離散渦法を採用した。以下に、その概要を示し、本論で採用した計算法の説明と計算結果を示す。

3.1 離散渦法の概説

ここで、式(2)を変形すると、渦度 ω の輸送方程式が式(3)のように得られる。ただし、 $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$

である。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \omega + \nu \nabla \cdot \nabla \omega \quad (3)$$

この渦度を輸送する媒体として、二次元であれば渦点を三次元であれば渦糸を想定する方法が離散渦法である。空間的に離散化された渦点により、式(3)中の渦度 ω の移流・拡散をモデル化したものである。一つの渦は複数の渦点の「集合」によって再現される。

離散渦法は渦糸近似法として、Rosenhead (1931)によって開発された。当初は、渦の挙動をシミュレートする方法として、便宜的に導入されたモデルであったが、流体力学の分野の研究者によりモデルがナビエ・ストークス方程式の解を表すことの理論的根拠が示され、近年開発が進んできた。それと同時に、計算上の問題点も指摘されるようになってきた。近年の離散渦法の概説は、Leonard (1980)¹⁾によってなされている。

離散渦法の概要を計算の手順に従い説明する。計算は、大きく分けて①外部流の計算、②剥離渦の放出、③渦による誘起速度の計算、④渦点の移流・拡散に分かれている。

外部流は、扱う場が単純な場合には、座標変換により既知のポテンシャル流れの解を適用し求める方法が主流であった。しかし、汎用性に欠けるため、一般の構造物に拡張することが難しい。桑原 (1978)²⁾によって、構造物周囲に配置した複数個の渦点によって外部流を再現する方法が示され、汎用性が飛躍的に向上した。概念的には、図-17に示すように、遠方場での流れをポテンシャル流れで与え、構造物周囲に配した渦点の誘起する流れ場で構造物表面における法線方向の流速が0となるように渦点の強さを決定し、両者の線形的な重ね合わせによって外部流を再現する方法である。

剥離渦の放出には、渦の強さと放出位置とを決定する必要がある。決定方法に関して議論が分かれている。一つは、境界層の理論から強さと放出位置の決定を行う方法であり、もう一つは渦強さを Kutta の条件から決定し、放出位置は仮定した固定点とする方法である。第1の方法は、理論的に厳密であるが、境界層方程式を毎計算ステップ解くために、大量の計算時間を費やす。第2の方法は、簡便であるが、理論的根拠に薄く、放出位置のパラメータを増やすことになる。いずれの方法でも、渦列の再現ができることが Sarpkaya (1975)³⁾によって示されているが、方法の差による結果の優劣は判定されていない。

渦による誘起速度の計算は、渦の構造や減衰過程を評

離散渦法による構造物周りの流れのシミュレーション

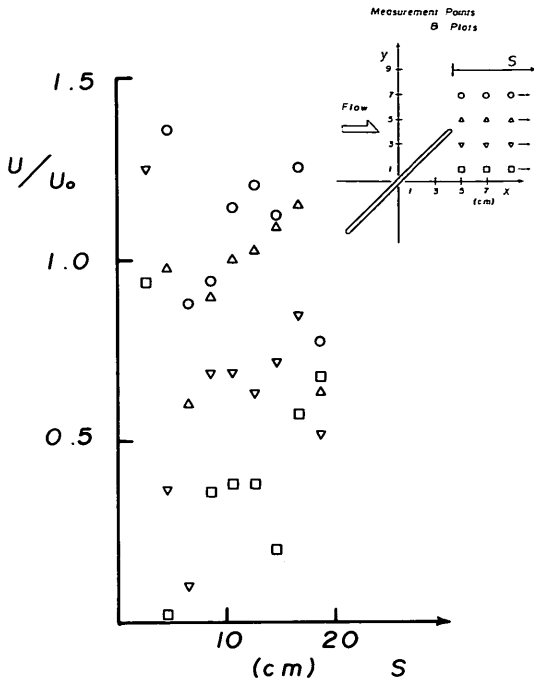


図-16a 構造物後端の均流速分布
(Exp. - 1 : $U_0 = 3.2$ cm/sec)

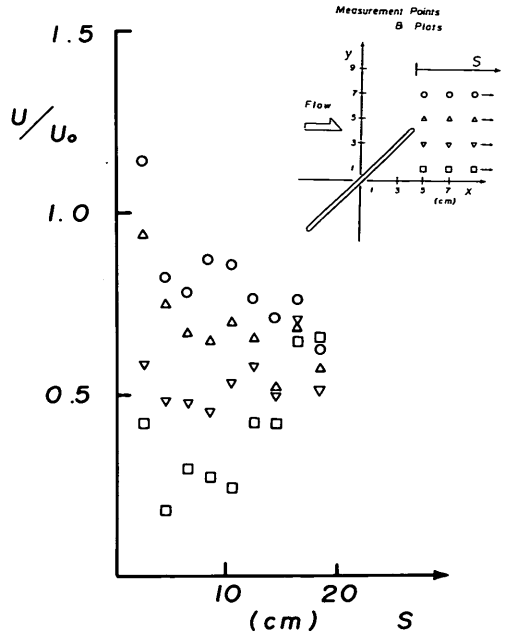


図-16b 構造物後端の均流速分布
(Exp. - 2 : $U_0 = 4.4$ cm/sec)

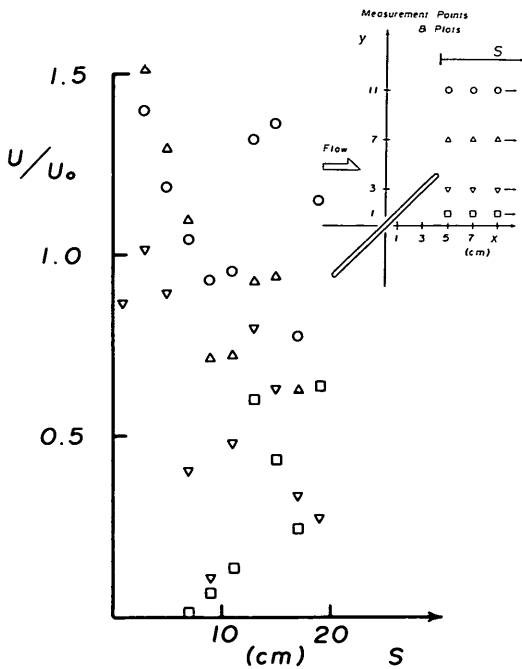


図-16c 構造物後端の均流速分布
(Exp. - 3 : $U_0 = 7.0$ cm/sec)

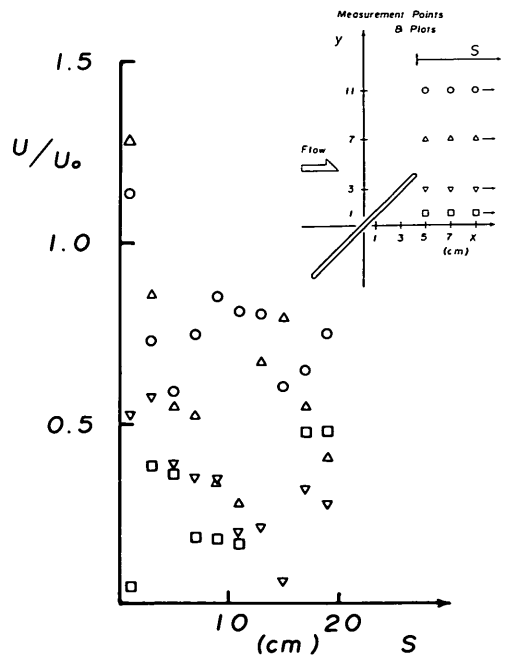


図-16d 構造物後端の均流速分布
(Exp. - 4 : $U_0 = 14.2$ cm/sec)

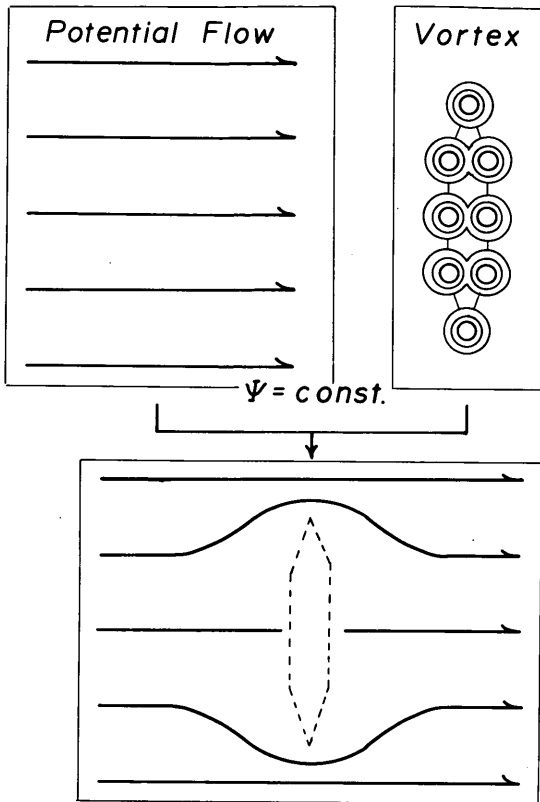


図-17 境界渦点による外部流の計算

価の対象にするかどうかで、計算式に違いが現れてくる。例えば、強さ K (渦のもつ循環は $2\pi K$ となる) の渦の誘起する回転速度 U_θ は、渦からの距離 r を用いて最も簡単に、

$$U_\theta = \frac{K}{r} \quad (4)$$

と表される。しかし、渦点同士が接近した場合に r が微小となり、非現実的な誘起速度を生じる。このため、半径 σ の渦核を想定し、その内部において渦無し流れとなるように、

$$U_\theta = \frac{r \cdot K}{\sigma^2} \quad (r < \sigma) \quad (5)$$

とする方法がある。ここでは、渦に構造を与えて、無限大の誘起流速の発生を抑制している。式(4)と(5)の誘起流速の概念図を図-18に示す。ある σ が与えられると、 $r = \sigma$ において式(4)と式(5)が交点をもち、 $r > \sigma$ での式(4)の流れと $r < \sigma$ での式(5)の流れが接続する。 σ が大き

くなれば、式(5)の傾きが小さくなり、いわゆる拡散渦を再現する。さらに、従来の研究の中には渦の時間的な減衰を考慮して、減衰項 $G(t^*, \nu_i)$ を導入し、

$$U_\theta = \frac{K}{r} \cdot G(t^*, \nu_i) \quad (6)$$

とする方法がある。ここに t^* は、渦が放出されてからの経過時間、 ν_i は渦の減衰率を表す乱流拡散係数である。

渦点の移流流速は、外部流と渦の誘起速度の線形和により計算される。その場合、流速の時間に関する積分を行うことになるので、積分法の精度により、各種の方法が存在する。例えば、1次のオイラー法による時間積分をタイムステップ Δt で移流流速を計算すると、移流流速は、ある時刻 t における流線の接線方向に固定されるので、図-19に示すように、移流位置に関して誤差 ϵ が生じる。

渦点の拡散は、渦点の移流の計算で発生する誤差 ϵ を拡散効果として考え、特に拡散効果を計算式で与えないで計算する方法や、移流計算を高精度に実施し、移流後の位置から拡散係数に見合った拡散距離を偏差として、乱数で与える方法などがある (Izumi & Kuwahara (1983))。

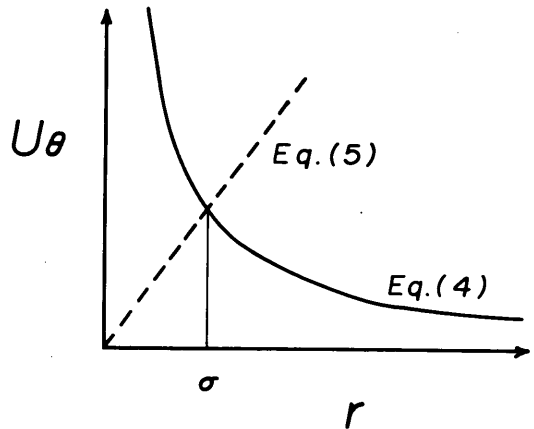


図-18 渦の誘起速度

3.2 開発した離散渦法とパラメータの次元解析

今回は、モデルの簡潔性を重視し、同時に計算時間の短縮を図るため、図-20に示すような計算法を採用した。まず、外部流は、連続条件を満たすように構造物がない場合におけるポテンシャル流で与え、構造物は Nb 個の渦点の配置により再現した。放出渦は、構造物端部

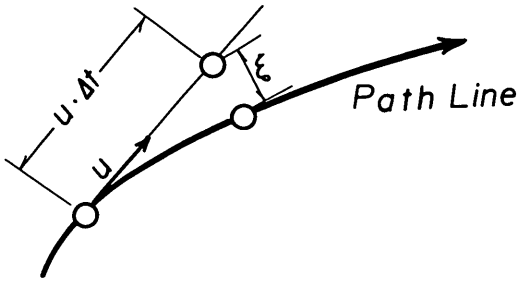


図-19 積分法のエラーに起因する拡散効果

を ϵ だけ延長した線上に放出点を固定し、強さ K は、構造物端部に配した渦点の強さをそのまま用いた。渦による誘起速度は、時間と共に減衰する孤立粘性渦を想定して式(6)の形で与えた。ただし、

$$G(t) = 1 - \exp\left\{-\frac{r^2}{(t^* + E_p) \cdot \nu_i}\right\} \quad (7)$$

とし、放出後の経過時間 t^* 、乱流拡散係数 ν_i の関数として、渦核の構造と粘性による減衰を考慮した。ここで、 E_p は $t^* = 0$ における計算の overflow を回避するための微小定数である。

流れに放出された渦点の運動は、現在の渦点位置における流速を、1次のオイラー法によって時間積分し求める。したがって、1計算ステップにおける移流位置には誤差が含まれる。これを、乱流拡散による効果として見なし、拡散機構を陽に組み込むことはしていない。

以上のモデル化により、制御パラメータとしては、渦核の大きさと減衰率を左右する乱流拡散係数 ν_i 、境界渦点密度 Nb 、放出渦点導入変位 ϵ と計算間隔 Δt があ

3.2.1 乱流拡散係数 ν_i の次元解析

乱流拡散係数 ν_i は、渦の減衰を支配するパラメータであるので、渦の減衰に関与するせん断速度 $\partial u / \partial x$ と乱れ強度 u' の関数として定義できる。ここにせん断速度は

$$\frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \left[\frac{1}{T}\right] \quad (8)$$

の次元をもち、乱れ強度 u' は平均流速の大きさに支配されると仮定すると

$$u' \approx U_0 \rightarrow \left[\frac{L}{T}\right] \quad (9)$$

の次元をもつので、 ν_i の次元を考慮し、代表長さを L 、

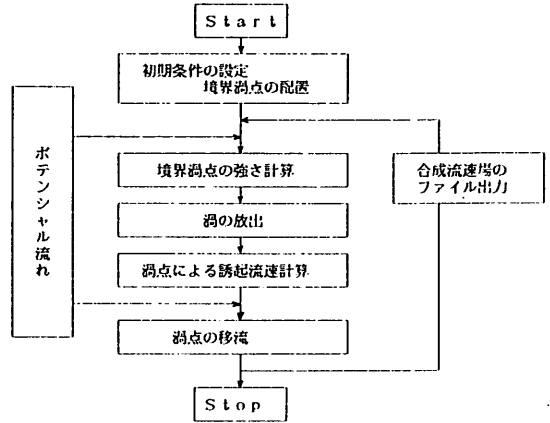


図-20 今回採用した離散渦法のフローチャート

代表流速を U_0 としたときのレイノルズ数 Re をもちいて、

$$\nu_i \rightarrow \left[\frac{L^2}{T}\right] \approx L \cdot U_0 \approx Re \cdot \nu \quad (10)$$

となる。

3.2.2 放出渦点導入位置 ϵ の次元解析

放出渦点導入位置 ϵ は、構造物端部からの距離を示している。渦の生成機構を拡大すると、模式的に図-21のようになっていると考えられる⁸⁾。つまり、境界層内のせん断流速により境界上に境界層厚さ δ のスケールをもった渦が発達していく。その後、境界上の圧力勾配が負となる剥離点から渦が放出されることになるが、放出高さは渦のスケールに支配されていると考えられる。したがって、放出高さは境界層厚さ δ に対応すると考えられる。ここで、境界層厚さ δ は発達距離 x を用いて

$$\delta \approx \frac{x}{\sqrt{Re}} \rightarrow [L] \quad (11)$$

であることが一般に知られているので⁸⁾、放出渦点の位置 ϵ は構造物長さ L を x の代わりに用いて、

$$\epsilon \rightarrow [L] \approx \frac{L}{\sqrt{Re}} \quad (12)$$

となる。

3.2.3 境界渦点数 Nb の次元解析

境界渦点数 Nb は境界上の渦点間隔に対応し、境界上の渦点間隔は、①境界の近似度および、②境界渦点の強度を支配する。①は、空間的に孤立した渦点により境界

であるので、

$$\Delta t \rightarrow [T] \approx \frac{L}{Re \cdot U} \quad (19)$$

となる。

3.3 離散渦法のパラメータフィッティング

3.2で開発された離散渦法は、4つのパラメータを含むため、実験結果と比較検討し、パラメータのフィッティングを行う必要がある。まず、接近流速 $U_0 = 4.4 \text{ cm/s}$ の場合についてパラメータ・フィッティングを行なった。この流速条件は、水理実験ケースの Exp.-2に相当する。次に、3.2の次元解析を用いてパラメータの一般化をし、 $U_0 = 3.3, 7.0, 14.2 \text{ cm/s}$ の場合について計算を行なった。

3.3.1 代表例による各パラメータの決定

パラメータ・フィッティングのための計算は、AとBの2つのシリーズに分けて行った。シリーズAでは、渦点による擾乱の発生と減衰を支配するパラメータとして、 ν_i と ε を変数とした。シリーズBでは、渦点の移流・拡散に関係すると考えられるパラメータとして、 Nb と Δt を変数とした。それぞれの計算条件を表-4に示す。シリーズAでは、計算時間90sとし、シリーズBでは、計算時間45sとした。計算結果の出力は、①渦点の配置図、②チェックポイントにおける流速の時間変化図、③平均流速ベクトル図の3種類とした。それぞれ、①渦列の様相の再現性、②放出渦の周期、③流速場パターンの再現性の比較を行った。

A33のケースを代表例として計算結果を図示すると、図-22~24のようになる。図-22は①渦点の配置の時間変化を表し、図-23は②構造物背後のチェックポイントの流速の時間変化を表す。図-24は③構造物周辺の平均流速ベクトルを表しており、平均流速は図-23を参考に、流速変動が安定したと見られる時刻以後の計算時間内で時間平均を計算した。その他のケースの結果は付録Bにまとめて収録する。

渦点の配置図からは、渦点の組織的な渦の形成や渦列の傾斜が読み取れる。また、構造物背後の流速変動は、渦列の形成の様子と、渦の通過周期が読み取れる。平均流速分布から、構造物により作られた後流の大きさがわかり、さらに構造物後端の流速分布を読み取ることで、渦の移送速度が推定される。

各図から読み取れる結果を表-5にまとめて示す。渦列様相の評価は、「集合」が渦点が組織的に集まり渦を形成している状況を、「分散」は渦点のまとまりが明確でない状況を、「螺旋」が渦点が螺旋状に巻き込み「集

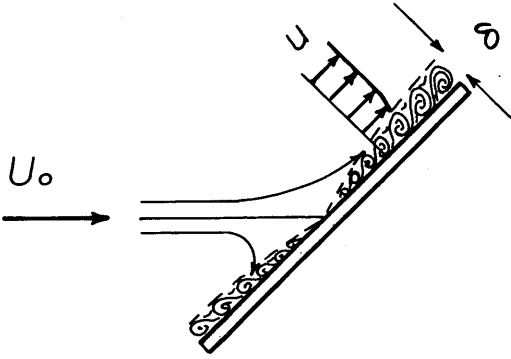


図-21 渦の生成の模式図

上の流速を制御することによって、外部流を近似的に表現していることによる問題である。 Nb を渦点間隔 ΔL で表し、外部流の近似の程度の評価長さとして構造物の厚さ D を用いて次元解析を行うと

$$\Delta L = \frac{L}{2 \cdot Nb} \rightarrow [L] \quad (13)$$

$$D \rightarrow [L] \quad (14)$$

であるので、

$$Nb \rightarrow [1] \approx \frac{L}{D} \quad (15)$$

となる。また、②は、端部の渦点が剥離渦となることから、剥離渦の強さ K を支配している長さをパラメータにもつことが予想され、この長さに境界層厚さ δ を採用すると、式(11)と式(13)から

$$Nb \rightarrow [1] \approx \sqrt{Re} \quad (16)$$

となる。

3.2.4 計算時間間隔 Δt の次元解析

図-19でも示されたように、計算時間間隔 Δt は、移流位置の偏差 ξ に影響する。代表流速として U を用いると

$$\xi \rightarrow [L] \approx U \cdot \Delta t \quad (17)$$

である。また、 ξ は拡散による偏差を表していると考え

$$\nu_i \approx \frac{d\xi^2}{dt} \rightarrow \left[\frac{L}{T} \right] \approx \frac{\xi^2}{\Delta t} \quad (18)$$

表-4 計算条件 (シリーズ A, B)

Run No.	νt (cm^2/sec)	ε (cm)	Nb	Δt (sec)
A31	0.0001	0.1	40	0.2
A32	0.001			
A33	0.01			
A34	0.1			
A35	0.2			
A36	0.5			
A03	0.1	0.001		
A13		0.01		
A23		0.05		
A43		0.5		
B11		0.1		
B12	20			
B13	40			
B14	80			
B21	10		0.2	
B22	20			
B23	40			
B24	80			
B31	10		0.5	
B32	20			
B33	40			
B34	80			
B41	10			
B42	20			
B43	40			
B44	80			

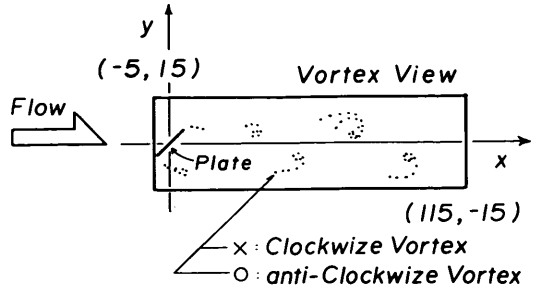


図-22a 渦点配置表示範囲

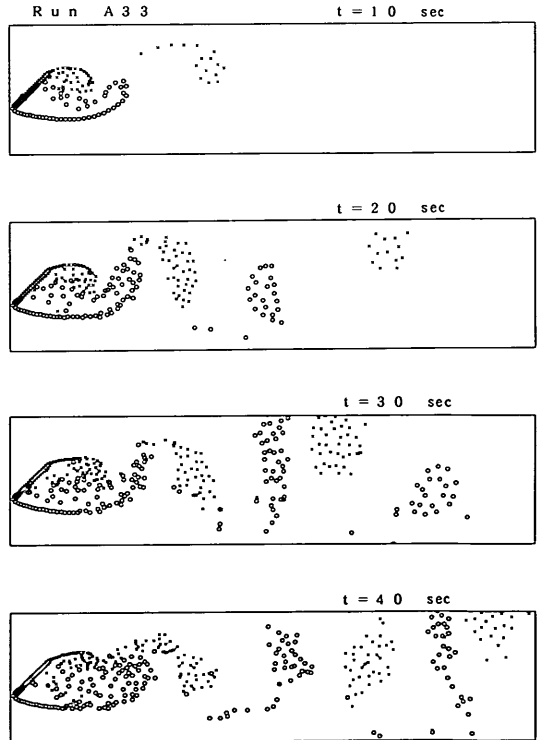


図-22b 渦点配置 (A33)

合」を形成している状況を表している。渦列の方向は、「集合」として渦を見たときに移流される方向を表しており、「\」がMaueの渦列に対応する。スパイクは、誘起流速が空間的に減衰していない渦点がチェックポイントの近傍を通過することにより発生する。スパイクが発生している場合には、渦点相互の誘起流速により「集合」が壊される場合がある。周期性は、相対比較を表示し、周期性の顕著なものに対し、周期を秒の単位で示している。後流域は、流速の減衰する領域の大きさを定性的に示している。概観すると、それぞれのパラメータが

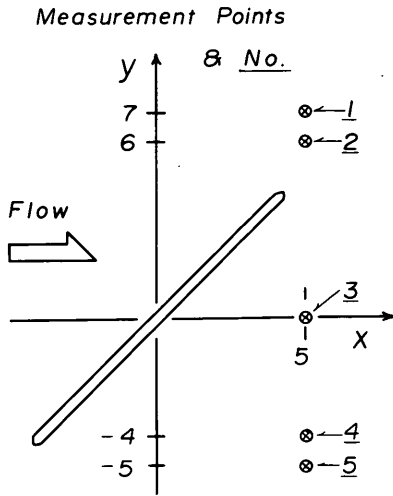


図-23a 構造物背後の流速変動測定点

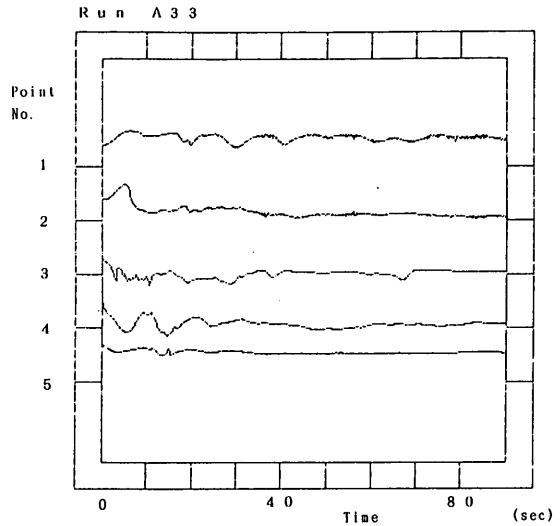


図-23b 構造物背後の流速変動 (A33)

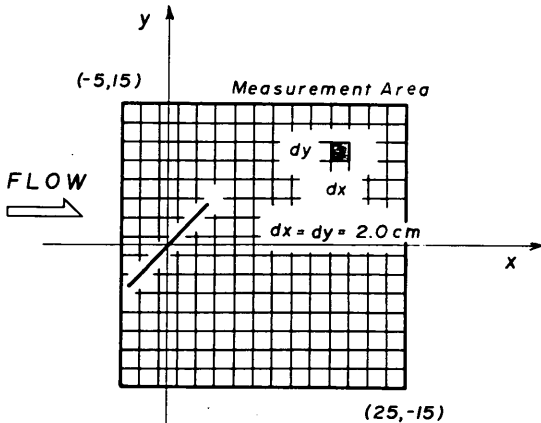


図-24a 構造物周りの平均流速 (A33)

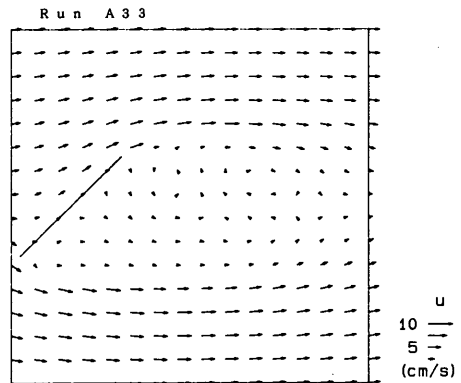


図-24b 構造物周りの平均流速 (A33)

何を支配しているかが、推察できる。全体的にみると、①渦列は、 Δt が0.1より小さく、 Nb が40より大きいケースで良好に再現される。②渦の集合状況は、 ν_i が0.1より大きい場合に「集合」となっている。このことは、構造物背後の流速変化からも裏付けられ、③構造物背後の流速変動周期は ν_i が0.1~0.2の時、顕著な周期性を示す。④ $\Delta t < 0.2$ において、 Nb が大きくなるにしたがって、周期も長くなり、実測値の13.5sに対応する周期が現れている。

さらに実験値との比較を行うために、平均流速分布図

から、構造物後端の延長線上に現れる流速分布を図-25の測線に対して抽出した。これは、2.における図-16に対応するものである。 ν_i 、 ε 、 Nb 、 Δt をパラメータとして計算値を線で表し、実験値を重ねてプロットすると、図-26~29ようになる。後流域の平均流速を支配するパラメータは、 ν_i と Δt であり、 ε と Nb による変化は少ないことがわかる。

以上の結果をパラメータ毎にまとめると以下ようになる。① ν_i は後流域の大きさと渦点の集散を支配し、 ν_i が小さくなると後流域は大きくなり、個々の渦点が

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

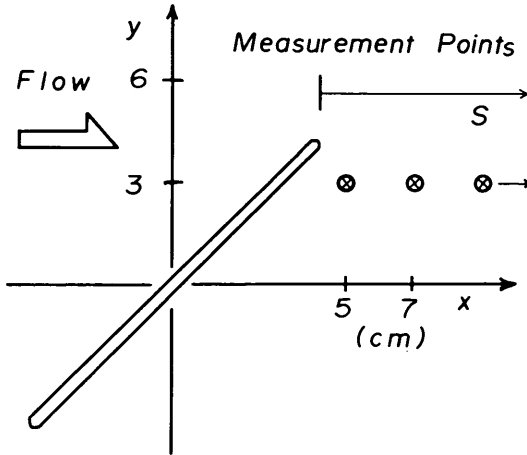


図-25 構造物後端の流速分布の測線

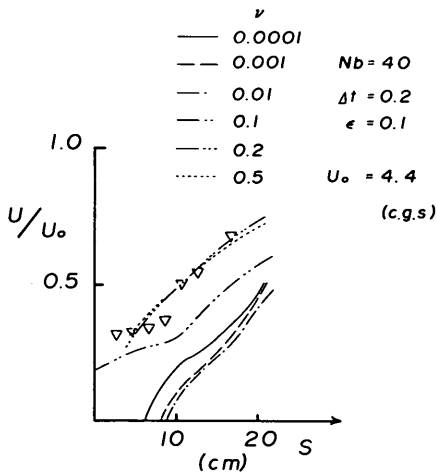


図-26 拡散係数の違いによる構造物後端の流速分布の違い

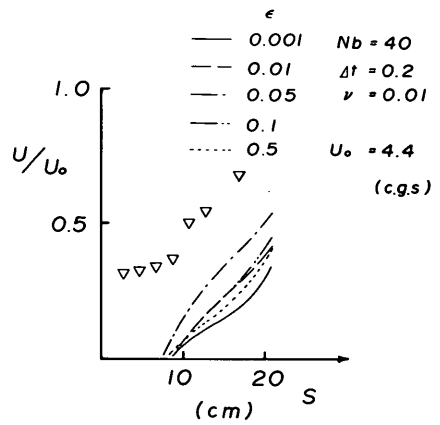


図-27 渦放出位置の違いによる構造物後端の流速分布の違い

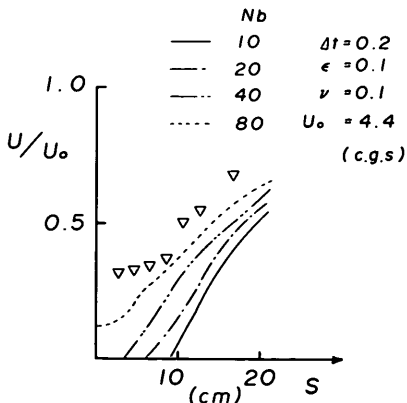


図-28 境界渦点数の違いによる構造物後端の流速分布の違い

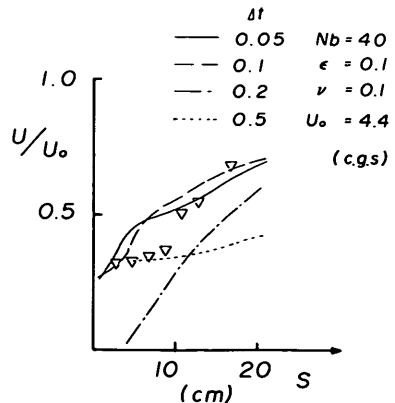


図-29 計算時刻刻みの違いによる構造物後端の流速分布の違い

表-5 各図の読み取り結果

Run No.	渦点配置図		流速変化図			平均流速図 後流域
	渦列様相	渦列方向	スパイク	周期生	周期(sec)	
A31	分散	↗	多	なし		大
A32	分散	↗	有	なし		中
A33	集合	↗	少	なし		中
A34	集合	↗	なし	中	11-12	中
A35	集合	↗	なし	大	11-12	小
A36	集合	↗	なし	中	11	小
A03	集合	↗	少	中	10	大
A13	集合	↗	少	小	10-11	大
A23	集合	→	少	なし		大
A43	分散	→	少	なし		大
B11	集合	→	なし	大	12-13	小
B12	集合	↘	なし	大	14-15	小
B13	螺旋	↘	なし	大	14-16	小
B14	螺旋	↘	なし	大	16-17	小
B21	集合	↗	なし	大	11-12	中
B22	集合	↗	なし	大	11-12	小
B23	集合	↗	なし	大	12	中
B24	集合	↘	なし	大	12	小
B31	分散	↗	なし	大	14	中
B32	分散	↗	なし	小	13	大
B33	集合	↗	なし	小	13	中
B34	集合	→	なし	なし		大
B41	分散	→	なし	なし		大
B42	分散	→	なし	なし		大
B43	分散	→	なし	なし		大
B44	分散	→	なし	なし		大

誘起する速度が減衰せず、流速変化にスパイク状のピークが現れる。② ϵ は渦点の初期放出方向を支配し、 ϵ が大きくなると放出された渦が後流域に滞留せず、渦の「分散」が生じる。③ Nb は放出渦点の強さを支配しており、 Nb が小さくなると渦点間の相互作用が過大に評価され、渦列の流下方向が Maue の渦列と逆の方向になり、放出周期が短く、周期性が少なくなる。④ Δt は後流域の大きさや渦点の集合状況を支配しており、 Δt が大きくなると、渦点の「集合」が起りにくく、後流域が小さくなる。

まず、構造物後端の延長線上に現れる流速分布分布から v_0 、 Δt を決定した。次に、渦列の流下方向、渦の放出周期をもとに ϵ 、 Nb を決定した。

3.3.2 パラメータの一般化と検証

3.3.1 の検討により、 $U_0 = 4.4 \text{ cm/s}$ の場合に付いては、表-6 のようにパラメータが決定された。ここで、式(10) (16) (19) の比例定数をそれぞれ k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 とし、

$$v_t = k_1 \cdot Re \cdot v \tag{20}$$

$$\epsilon = k_2 \cdot \frac{L}{\sqrt{Re}} \tag{21}$$

$$Nb = k_3 \cdot \sqrt{Re} \tag{22}$$

$$\Delta t = k_4 \cdot \frac{L}{Re \cdot U} \tag{23}$$

と書き換える。表-6 の値を代入することにより、 $k_1 \sim k_4$ が求められ、他の接近流速 U_0 の条件に対して各パラメータは表-7 のようになる。ただし、計算の都合上、 Δt 、 Nb 等は切りのよい数値に丸めて表示した。ここで決定されたパラメータの妥当性を検証するため、計算ケース C1 ~ C4 を実行した。

計算結果を 3.1.1 にならい図示すると、図-30~32 のようになる。図-30 は渦点の配置の時間変化を、図-31 は構造物背後のチェックポイントの流速の時間変化を、

図-32は構造物周辺の平均流速ベクトルを表している。図-30からは、いずれの場合も渦列の放出方向が傾いており、流速の速いケースほど傾きが大きくなっている。このことは、実験結果の図-11と対応するものである。図-31からは、渦の放出周期が読み取れ、実験値と共に表-8に示す。値に関しては、実測値がビデオ画像からの目視観察であること等により、細部の違いの議論はできないが、流速が速くなるほど放出周期が短くなる傾向が再現されている。また、構造物後端の流速分布を示すと、図-33のようになる。これは、実験値の図-16に対応するものである。

以上の検討により、表-7で与えたパラメータが今回の Re 数の範囲においては、良好な計算結果を示し、式(20)~(23)で与えた次元解析によりパラメータの一般化が行えた。

表-6 パラメーター

Run	U_0 (cm/sec)	νt (cm ² /sec)	ε (cm)	Nb	Δt (sec)
C 2	4.4	0.1	0.1	40	0.1

表-7 パラメーターの推定

		k_1 =0.2	k_2 =0.6	k_3 =0.5	k_4 =200
Run	U_0 (cm/sec)	νt (cm ² /sec)	ε (cm)	Nb	Δt (sec)
C 1	3.2	0.08	0.1	30	0.2
C 3	7.0	0.17	0.08	50	0.04
C 4	14.2	0.34	0.06	70	0.01

表-8 渦放出周期

U_0 (cm/sec)	T (Cal.) (sec)	T (Exp.) (sec)
3.2	14 - 15	15.0
4.4	12	13.5
7.0	8 - 9	6.5
14.2	4 - 5	4.2

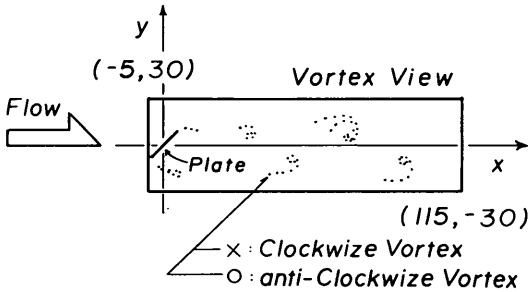


図-30 a 渦点配置表示範囲

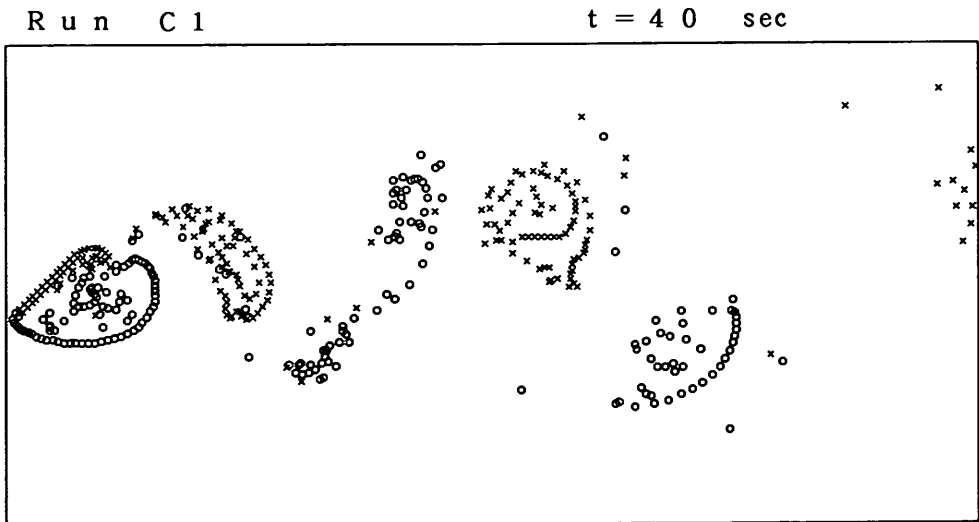


図-30 b 渦点配置 (C1)

R u n C 2

t = 4 0 sec

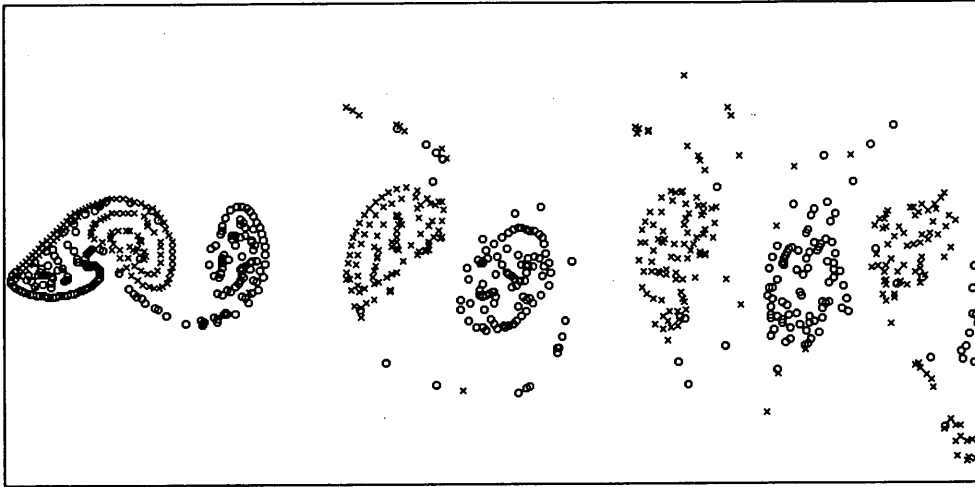


图-30c 渦点配置 (C2)

R u n C 3

t = 2 0 sec



图-30d 渦点配置 (C3)

Run C4

t = 20 sec



図-30e 渦点配置 (C4)

Measurement Points

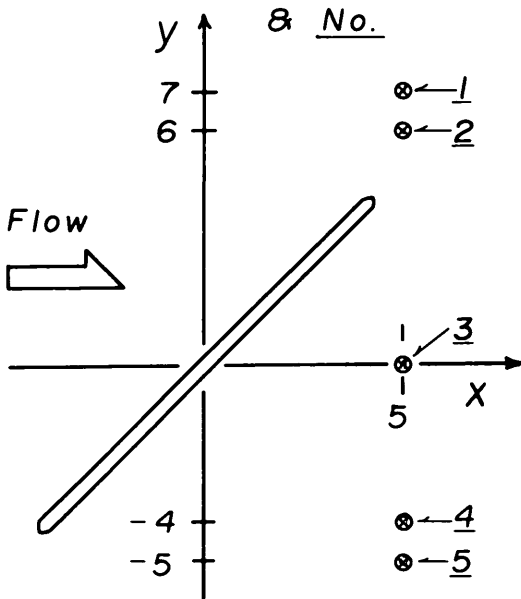


図-31a 構造物背後の流速変動測定点

Run C1

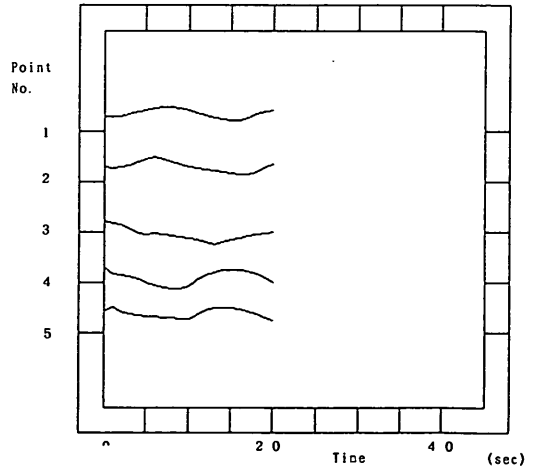


図-31b 構造物背後の流速変動 (C1)

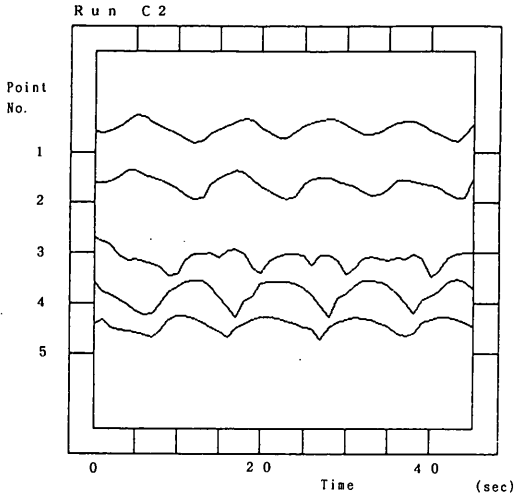


図-31c 構造物背後の流速変動 (C2)

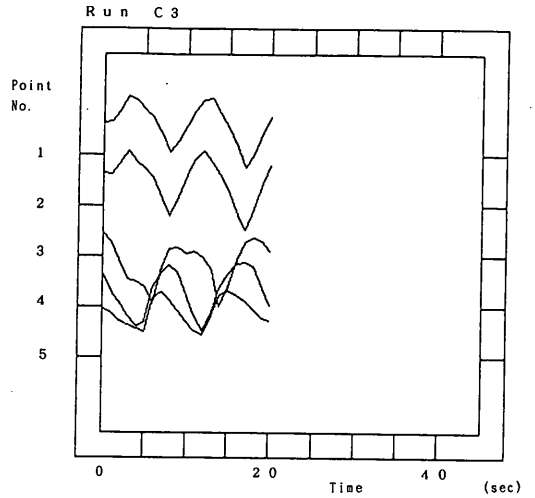


図-31d 構造物背後の流速変動 (C3)

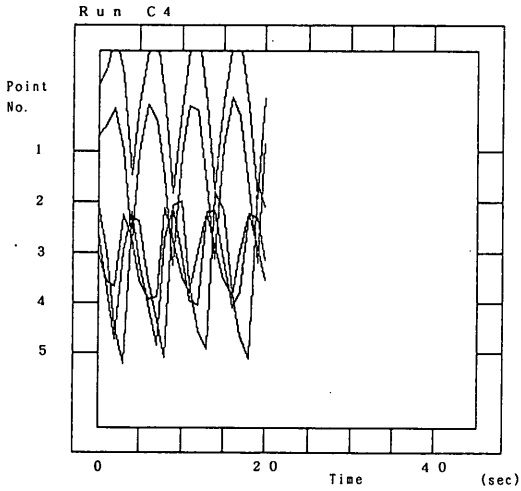


図-31e 構造物背後の流速変動 (C4)

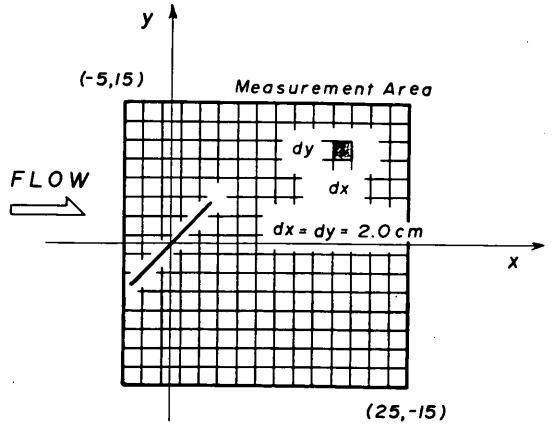


図-32a 構造物周りの平均流速測定点

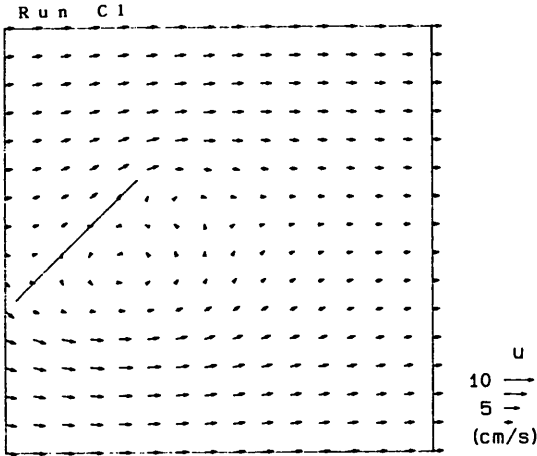


図-32b 構造物周りの平均流速 (C 1)

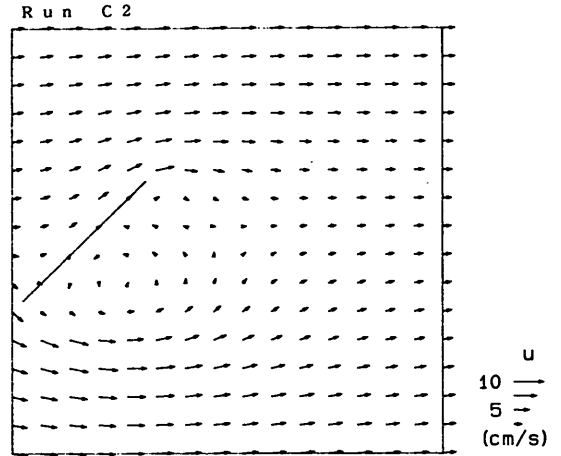


図-32c 構造物周りの平均流速 (C 2)

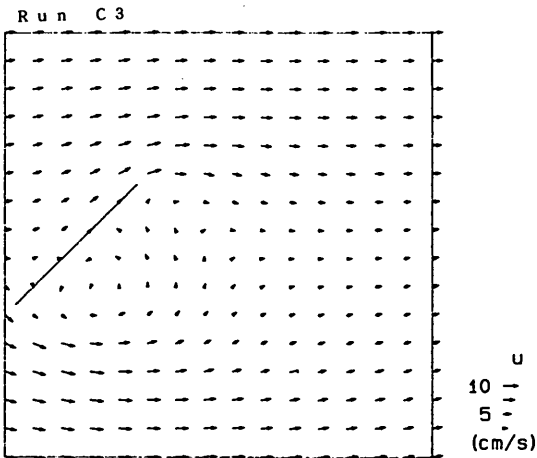


図-32d 構造物周りの平均流速 (C 3)

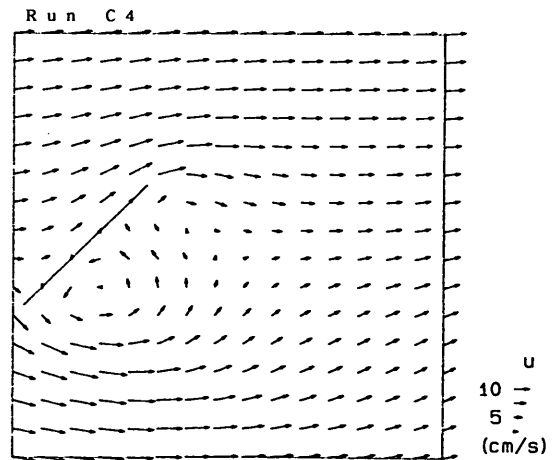


図-32e 構造物周りの平均流速 (C 4)

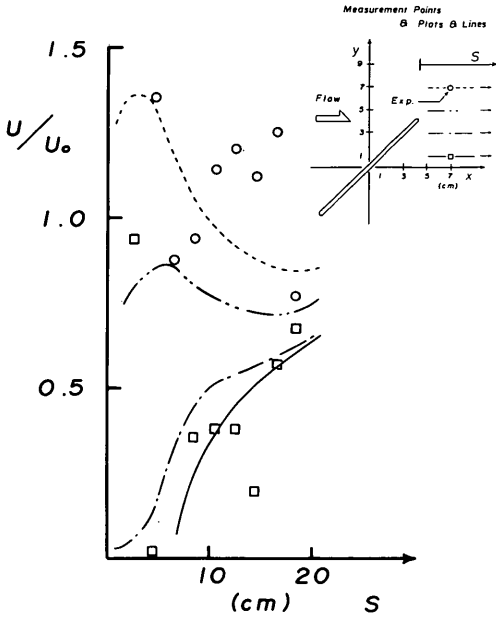


図-33a 構造物後端の流速分布
(C1 : $U_0 = 3.2 \text{ cm/sec}$)

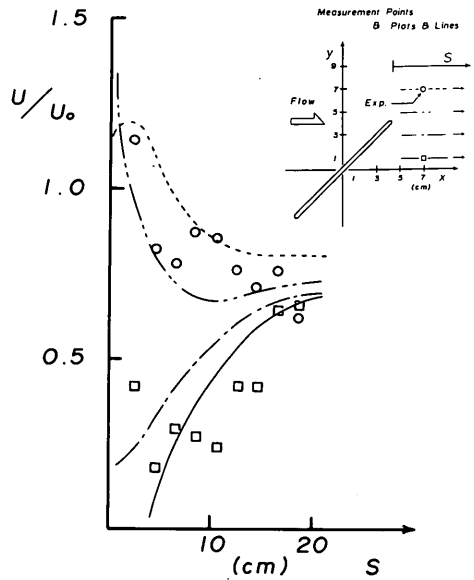


図-33b 構造物後端の流速分布
(C2 : $U_0 = 4.4 \text{ cm/sec}$)

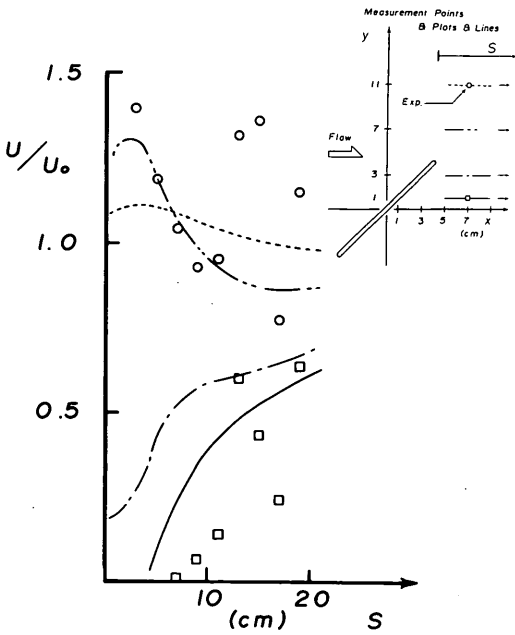


図-33c 構造物後端の流速分布
(C3 : $U_0 = 7.0 \text{ cm/sec}$)

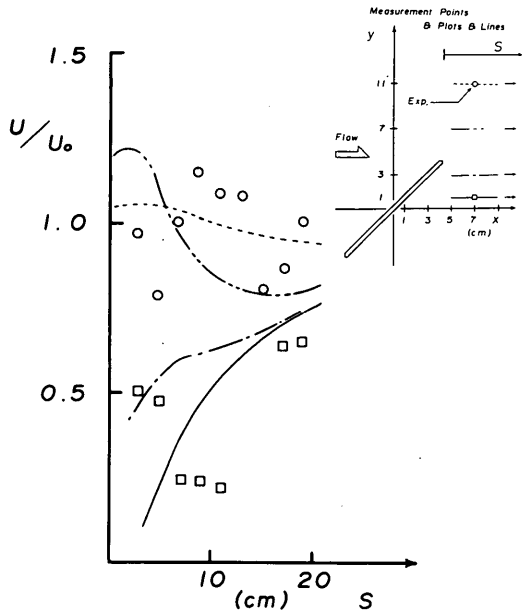


図-33d 構造物後端の流速分布
(C4 : $U_0 = 14.2 \text{ cm/sec}$)

4. ハの字型造流堤の流れ制御効果

本論文で開発された離散渦法の適用例として、図-34に示すようなハの字型に配置された堤の検討を行う。ハの字型造流堤は、図-35に示すように流れの方向によって抵抗係数が変化する。この特性を利用して、残差流成分を作り出し、一方に卓越した流れを創造させようとするものである。

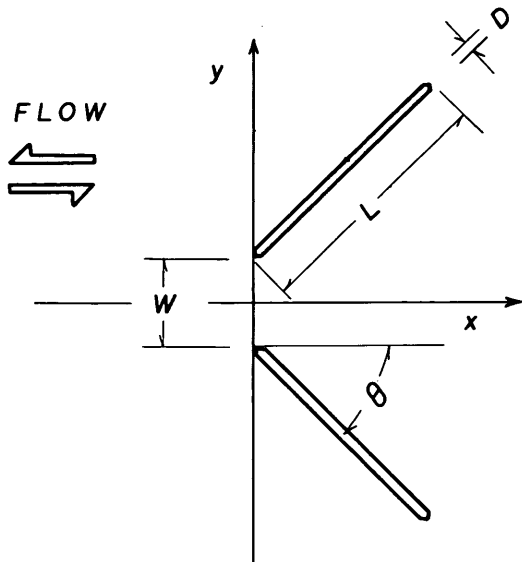


図-34 ハの字型造流堤

類似の構造物として、中村ら (1975)⁹⁾ は双曲線型の導流堤を提案している。中村らは、抵抗係数の変化を水理実験で実測し、瀬戸内海に適用した場合の計算例を示し、水質改善効果の予測をしている。しかし、①局所的な流れ場の様相や流れの生成機構、②抵抗係数の根拠を実測に頼っているため、流れや境界条件が変化した場合の取り扱いが不明確であること等が指摘できる。

ここでは、直線状の構造物の組合せによるハの字型の

表-9 計算条件 (シリーズ D 予備計算)

Run	θ (deg)	νt (cm ² /sec)	ν (cm)	Nb	Δt (sec)
D1	45.0	0.1	0.1	40	0.1
D2	-45.0	0.1	0.1	40	0.1

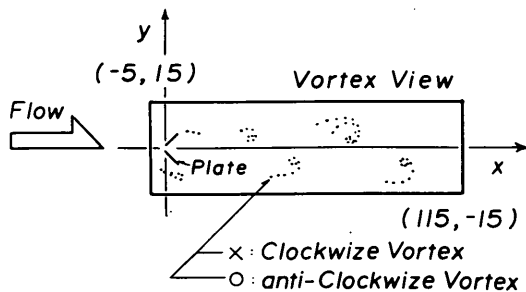


図-36a 渦点配置表示範囲

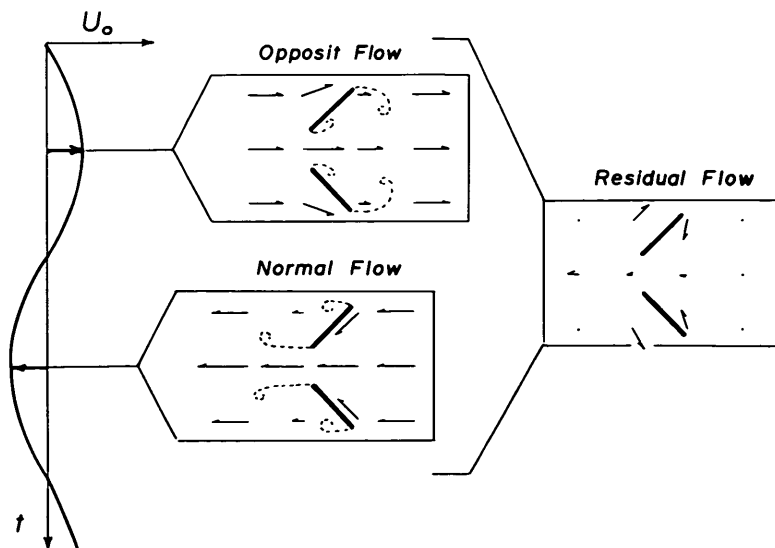
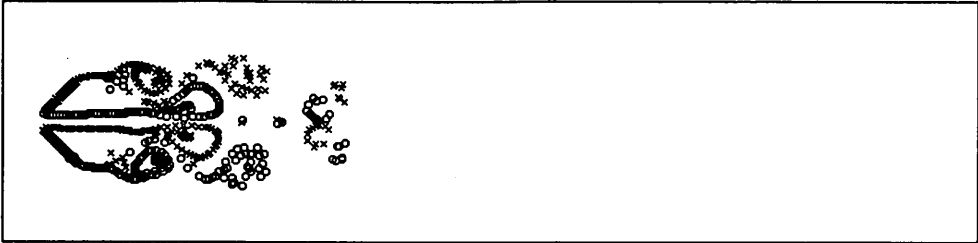


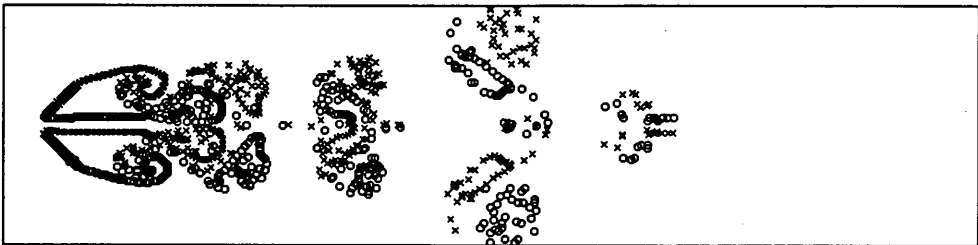
図-35 ハの字型造流堤の造流機構

R u n D 1

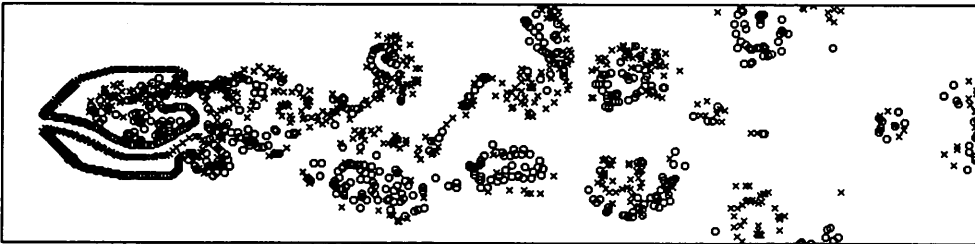
t = 1 1 sec



t = 2 2 sec



t = 3 3 sec



t = 4 4 sec

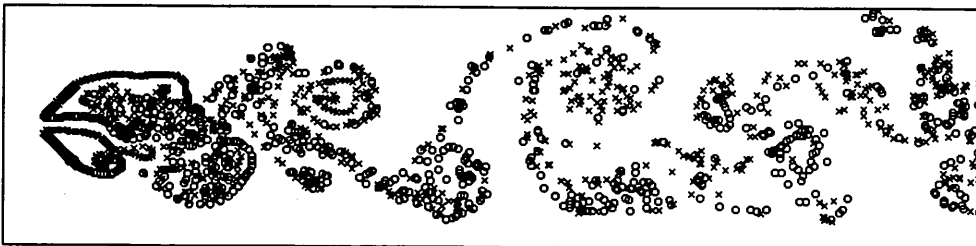
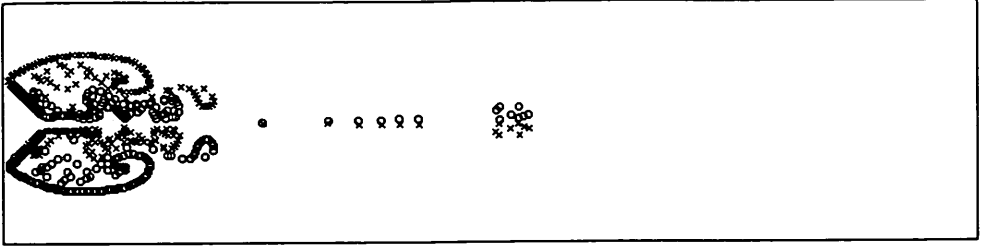


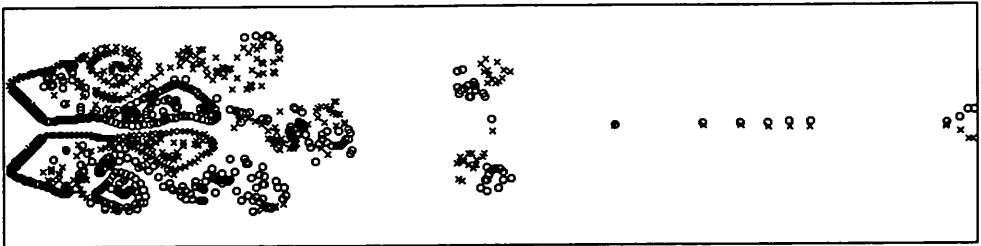
図-36b 渦点配置 (D1)

R u n D 2

t = 1 1 sec



t = 2 2 sec



t = 3 3 sec



t = 4 4 sec

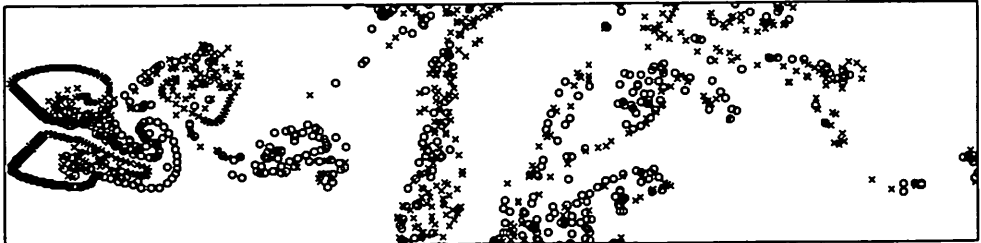


図-36c 渦点配置 (D2)

造流堤の残差流の生成機構，配置角度の最適化について計算により検討を行う。

4.1 一様流中に置かれたハの字型造流堤周りの流れ

予備計算として，定常一様流中に置かれたハの字型造流堤周りの流れ場についてシミュレーションを行った。造流堤の諸元は，長さ $L=6.0\text{ cm}$ ，幅 $D=0.3\text{ cm}$ ，開口間隔 $W=2.0\text{ cm}$ である。接近流速は 4.4 cm/s で順流・逆流の2ケースを実施している。表-9に計算条件を示す。渦点の配置を11s毎に経時的に示すと図-36のようになる。2枚の造流堤の両端から放出された4列の渦列が互いに影響し，1組の大きな渦列を形成していく様子がわかる。造流堤開口部前面での流速を比較すると，D1の時， 2.4 cm/s で，D2の時， 4.0 cm/s であった。これを接近流速 4.4 cm/s で除して近似的に流量係数を計算すると，0.6と0.9であり，中村ら⁹⁾の実験により求められた流量係数(0.64,0.93)とほぼ一致する。また，渦の周期はおよそ7~8sであった。

4.2 非定常流中に置かれたハの字型造流堤のシミュレーション結果

本計算は，設置角度 $\theta = 15 \sim 60\text{ deg}$ の4つの造流堤に対して，短周期から長周期の振動流3通りを外力として与え，表-10に示す12ケース行った。振動流は，周期 T として，コサイン・カーブで与えた。

計算結果として渦点の配置，造流堤の中心線における流速変動，平均流速分布を付録Cに示す。平均流速分布は，外力として与えた振動流の1周期分の流速を平均化して得た残差流の分布である。残差流のパターンを模式化すると図-37のようになり，造流堤に付随した循環流が，周囲から造流堤中心線に向かう流れを起し，一方向に移流する機構がわかる。振動流の周期や増流堤の開口角度による開口部前面の平均流速の違いは，図-37に現れる循環流の規模と位置とに左右されている。また，振動流の周期が長くなると，後流中の渦の相互作用により，渦列の蛇行が始まり，流速の極大値を示す位置が時

表-10 計算条件 (シリーズD)

Run	T (sec)	θ (deg)	νt (cm^2/sec)	ε (cm)	Nb	Δt (sec)
D11	10.0	15.0	0.1	0.1	40	0.1
D12		30.0				
D13		45.0				
D14		60.0				
D21	5.0	15.0				
D22		30.0				
D23		45.0				
D24		60.0				
D31	20.0	15.0				
D32		30.0				
D33		45.0				
D34		60.0				

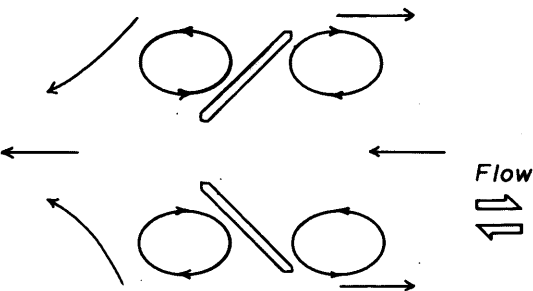


図-37 残差流のパターン

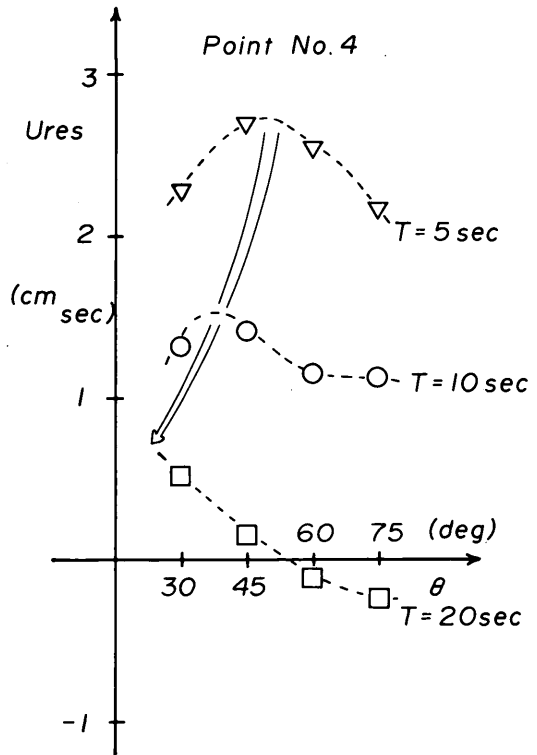


図-38 増流堤開口部前面における残差流速

間的に変化する。このために、残差流として造流効果を計算したときに、流速が時間的な平均により平滑化され、造流効果の過小評価をする恐れのあることも渦点の配置図からわかる。

開口部前面 ($x = -5$, $y = 0$) における残差流速 U_{res} を、設置角度 θ 、外部流の振動周期 T をパラメータとして表示した場合、図-38のようになる。この図から周期の短いほど①残差流速が強くなり、②設置角度の広い方にピーク値を与える角度が偏ることがわかる。ただし、 T が長くなると、空間的にみて U_{res} のピークが開口部から離れたところに現れるようになること、渦列の蛇行により時間的な平均量である残差流速が見かけ上、低減することなどから、この図だけで造流効果の良否を判定することはできない。しかし、ある Control Volume での流体の流出入量等の判定条件が与えられれば、本計算法を用いて、造流堤の造流効果の比較・判定が行えることを示している。

5. おわりに

本論文で得られた結論をまとめると次のとおりである。

2. においては、一樣流中に流れに対して所定の傾きをもった直線状の構造物の背後に形成される後流の特性を実験的に抽出した。この結果、①後流中の渦列は、接近流に対して角度をもって放出され、いわゆる Maue の渦列を形成する。②放出される渦の初期移流速度は小さく、流下するにしたがい接近流速に漸近する。③渦の放出周期は、接近流速が速くなるほど短くなり、 St 数で整理すると、0.15~0.19の範囲にある。④構造物端部近傍で平均流速の最大値が、接近流速の1.3~1.6倍となる。等を確認した。

3. においては、接近流速4.4 cm/s の水理実験ケースに基づいて、開発した離散渦法に現れるパラメータの同定を行った。パラメータとしては、乱流拡散係数 ν_t 、渦展放出位置 ϵ 、境界渦点数 N_b 、計算時間間隔 Δt があり、それぞれについて次元解析の結果、 Re 数の関数として表され、同定されたパラメータの拡張が可能であることを、計算結果を水理実験結果と比較することによって確かめた。

4. では、今回開発した離散渦法の適用の一例として、ハの字型の造流堤の造流効果の検討を行った。外力としては3通りの周期をもった振動流を与えた。ハの字型の造流堤の造流機構は、残差流のパターンを比較することにより、造流堤近傍に存在する循環流の大きさと位置に支配されていることを明らかにした。また、造流効果の

比較パラメータとして、ある場所での残差流速の大きさを採用した場合に、造流効果の最適値が、作用する振動流の周期と造流堤の配置角により決定されることを示した。

本研究は、離散渦法の開発を目的とした基礎的な研究であるので、今後への課題として、①計算法の開発に残された問題点の解決と、②実際の問題への応用法の検討をあげておく。

①に関しては、流れ場の解析対象を2次元から3次元へ拡張するといった、計算法そのものの限界を解決することを目的とした課題と、構造物として、平板以外の形状に対応した渦の放出方法を検討すること等が残されている。

②に関しては、計算法の適用限界や特性を十分認識した上で、対処する必要があるが、汚濁防止膜周りの局所流の解析、防波堤周りの浮遊物や生物卵等の漂流予測、潜堤による湧昇流の造流効果の検討等、幅広い解析へと発展させることができると期待される。

本研究は、特別研究「港湾施設による海水流動と海洋環境の制御技術に関する研究」の一部として実施した実験および計算を中心に取りまとめたものである。本研究を遂行するにあたって、東京大学の桑原邦郎助教授には、離散渦法の計算原理に関してご指導をいただいた。(株)計算流体力学研究所の坪井一洋研究員には、離散渦法の開発段階で、多くの助言をいただいた。また、特別研究として本研究を遂行する上で、当港湾技術研究所海洋水理部長堀江毅博士には、多くのご尽力をいただいた。ご意見・ご指導をたまわった関係各位に深く感謝いたします。

記号表

dl	: トレーサ移動距離の相対変化量
dS	: トレーサの大きさの相対変化量
dS_{sh}	: トレーサの大きさの変化量のしきい値
$d\theta_{sh}$: トレーサ移動方向の変化量のしきい値
dl_{sh}	: トレーサ移動距離の相対変化量のしきい値
$d\theta$: 移動方向の変化量
dx	: 後流中に放出される渦層の厚さ
f	: 渦放出周波数
l	: トレーサ移動距離
l_{sh}	: トレーサ移動距離のしきい値
r	: 渦からの距離
t	: 時間
t^*	: 渦が放出されてからの経過時間
u	: 流速ベクトル

- u : 流速
- u' : 乱れ強度
- x : 接近流速流れ方向座標
- D : 構造物の厚さ
- E_p : 微小定数
- G : 渦の時間的な減衰項 ($G(t^*, \nu_i)$)
- K : 渦の強さ ($\Gamma = 2\pi K$)
- L : 代表長さ・構造物幅
- L' : 後流の広がり幅
- Nb : 構造物境界上の渦点数
- Re : レイノルズ数 ($Re = U \cdot L / \nu$)
- S : 放出点からの距離・トレーサの大きさ
- S_{sh} : トレーサの大きさのしきい値
- St : ストローク数 ($St = L \cdot f / U$)
- T : 代表時間
- U : 代表流速
- U_1 : 渦層外縁の流速
- U_2 : 渦層内縁の流速
- U_0 : 接近流速
- U_0 : 渦の誘起する回転速度
- δ : 境界層厚さ
- ε : 放出渦点導入位置
- θ : 構造物の傾き
- ξ : 渦点移流位置の偏差
- σ : 渦核の半径
- ν : 動粘性係数
- ν_t : 乱流拡散係数
- ω : 渦度
- Γ : 渦の強さ
- Δt : 計算時間間隔
- ΔL : 渦点間隔 ($\Delta L = 2L / Nb$)

参考文献

- 1) A. Fage, F. C. Johansen : *On the Flow of Air behind an Inclined Flat Plate of Infinite Span*, Proc. Roy. Soc., Vol. A, No. 116, pp. 170~197, 1927
- 2) F. H. Abernathy : *Flow over an Inclined Plate*, A. S. M. E., Ser. D, No. 84-3, pp. 380~388, 1962
- 3) 木谷 勝, 有江 幹男 : 傾斜平板に対する非粘性うず放出モデルに関する一寄与, 機械学会論文集 (B編), 43巻, 367号, pp. 1015~1026, 1977
- 4) A. Leonard : *Vortex Methods for Flow Simulation*, J. of Comp. Physics, No. 37, pp. 289~335, 1980
- 5) Kuwahara K. : *Study of Flow Past a Circular Cylinder by an Inviscid Model*, J. Phys. Soc. Japan, Vol. 45, No. 1, pp. 292~297, 1978

- 6) T. Sarpkaya : *An Inviscid Model of two-dimensional Vortex Shedding for Transient and Asymptotically Steady Separated flow over an Inclined Plate*, J. of Fluid Mech., Vol. 68, No. 1, pp. 109~128, 1975
- 7) Izumi K., Kuwahara K. : *Unsteady Flow Field, Lift and Drag Measurements of Impulsively Started Elliptic Cylinder and Circular-arc Airfoil*, AIAA, Vol. 83, No. 1711, pp. 15, 1983
- 8) 巽 友正 : 乱流と渦, 数理科学別冊「流れの数理」, サイエンス社, pp. 72~79, 1987
- 9) 中村 充, 乃万 俊文, 萩野 静也, 富田 和夫 : 瀬戸内海の水質予測と導流堤による水質改善工, 海岸工学講演会, 第21回, pp. 287~289, 1974
- 10) 細川 恭史, 古川 恵太, 三好 英一 : 水中ビデオ画像の特性と利用, 港湾技研資料, No. 683, 1990

付録A けん濁させたトレーサの連続画像から流跡線の追跡を行い、個々のトレーサの移動速度から平均流速を推定する方法

場の中にけん濁させたトレーサは、その場の流速にしたがって移流される。したがって、トレーサの流跡を追跡することにより流速場の測定が可能である¹⁰⁾。実際の手順の概要を図-A 1に示す。①測定したい場の中にトレーサをけん濁させ、移流されるトレーサの連続画像を収録する。②各画像中のトレーサを個々に分離し、その1つ1つについて大きさと重心位置の情報に変換する。③ある画面内に分布する個々のトレーサと、それに続く

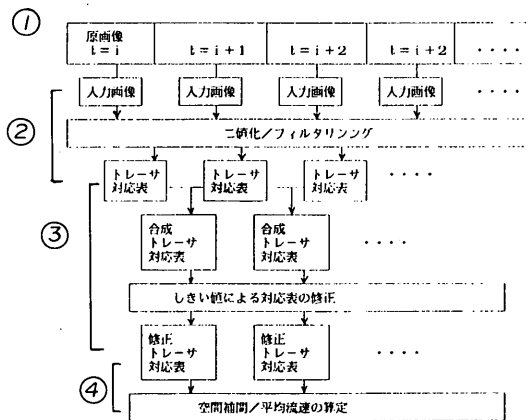


図-A 1 トレーサ移動追跡法

画面内に分布するトレーサの対応関係を推定し、流跡線を得る。④得られた流跡線を空間的に補間し、目的の場の流速分布を得、各時刻における流速分布を時間的に積分し、平均の流速場を得る。以下にその詳細を説明する。

①：トレーサは目的の場の流速を代表するものであるから、その材質や、大きさに留意する必要がある。水中の計測であるのでなるべく沈降速度の小さいものがよい。また、大きさは、画像に収録することを考えるなるべく大きい方が分解が良く、流れへの追従性を考えると小さい方がよい。色は、背景と明確に分離できることが必要である。今回は、簡単に入手可能なものの中から、煮沸により比重調整した径1.0~1.5 mm のステンピーズを用いた。色は煮沸処理のため白濁し、静止水中で測定された沈降速度は1.0 cm/sであった。トレーサは、水面から散布し目的の高さに分散させ、ハロゲンライトを用いたスリット光により、約10cm間の厚さに浮遊分布している物のみを撮影した。

②：画像は、1画素あたり白黒であれば256階調の輝度値に分解され、濃淡画像として入力される。この画像からトレーサを分離するために、設定した輝度値より大きい場合には1、小さい場合には0とする二値化を行う。ただし、画像にノイズが多く含まれる場合や、ピントのずれが生じてトレーサの端部が明瞭に写っていない場合などは、原画像にフィルターをかけてトレーサの抽出を行う必要がある。作用させるフィルターとしては、メディアン・フィルターや空間コンボリューションマスクの利用が考えられる。二値化された画像が得られれば、画像処理装置の画像計算ルーチンを使用して、トレーサの位置と大きさを各画像毎にファイル化することができる。画像がカラーの場合には、RGBの3原色に関してそれぞれ256階調の濃淡画像が得られるので、解析用の色を選択または合成し、白黒画像と同様の解析を行う。

③：得られる画像の特性および、計算時間等を考慮して、本論文では、著者らによって開発された3画面間参照のトレーサ追跡法による流跡線の推定を行った。

推定は2段階に分かれている。まず第1段階で、②において各時間毎に作成されているトレーサの位置および大きさのファイルから、連続する2画面間のトレーサ対応表を作成する。この対応表は、図-A2に示すように2画面間(時刻 $t = i, i + 1$)で移動距離 l が最小となるものの組を示している。第2段階として、連続する2つのトレーサ対応表を用いて3画面間(時刻 $t = i, i + 1, i + 2$)にまたがる合成トレーサ対応表を作成し、以下に示す5つの条件を満足する対応のみを取り出

す。これを時刻 $t = i$ における修正トレーサ対応表とし、個々のトレーサの流跡線を推定する。これらの操作により、第1段階は、解析画像数-1個のトレーサ対応表を、第2段階は、(解析画像数-2)個の合成トレーサ対応表と修正トレーサ対応表を作成することになる。

修正トレーサ対応表を作成するための条件は、合成トレーサ対応表に従い抽出されたトレーサの内の1組を用いて模式的に表すと図-A3のようになる。5つの条件は、5つのしきい値で規定される。 l_{max} は移動距離の最大値を規定し、 dl_{rel} は移動距離の相対変化量を制限している。 S_{max} はトレーサの大きさの最大値を規定し、 dS_{rel} で大きさの変化量を制限している。 $d\theta_{rel}$ は移動方向の変化量を規定している。それぞれの値は、合成トレーサ対応表に基づき移動距離 l 、移動距離の相対変化 dl 、大きさ S 、大きさの相対変化 dS 、移動方向の変化 $d\theta$ の分布を計算し、誤対応とみられるしきい値を推測して決定した。また、修正トレーサ対応結果を図化して、必要であればしきい値の修正・再計算を行っている。

④：得られた流跡線の長さを計測時間間隔で除すことにより、各時間、各トレーサの位置における流速値が得られる。それを、近傍の流速計算点に配分し、場の流速

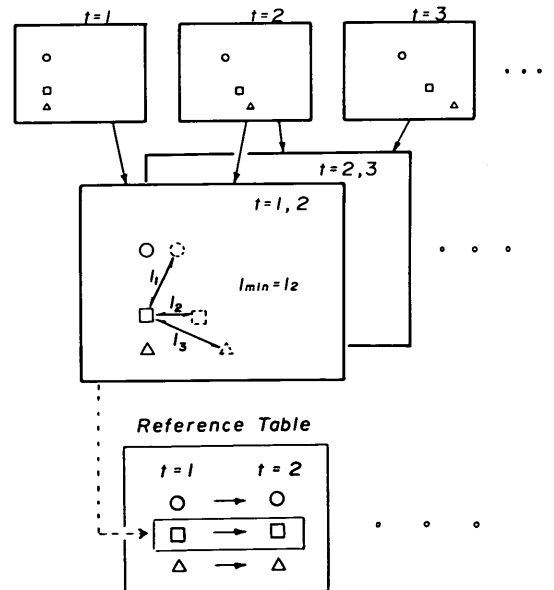
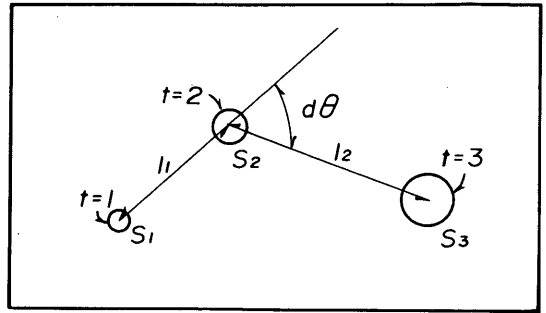


図-A2 トレーサ対応表の作成

とした。配分の方法は、各トレーサ位置からの内挿や、流れ関数の最小自乗法による決定等の手法があるが、今回は、計算の簡略化のために、単純に、各トレーサ流速値を近傍4点の流速計算点に代入し、加算された回数で平均した値を用いた。こうして求められた流速の空間分布を計測時間分積分し、時間平均流速分布を得ている。

参考までに、本実験で使用した画像から得られたトレーサの流跡線を図-A4に示す。



- $l_i < l_{sh}$
- $\frac{|l_2 - l_1|}{l_1} < dl_{sh}$
- $S_i < S_{sh}$
- $\frac{|S_2 - S_1|}{S_1} < dS_{sh}$
- $d\theta < d\theta_{sh}$

図-A3 修正トレーサ対応表作成のための対応条件

Exp. - 1 $U_0 = 3.2 \text{ cm/sec}$

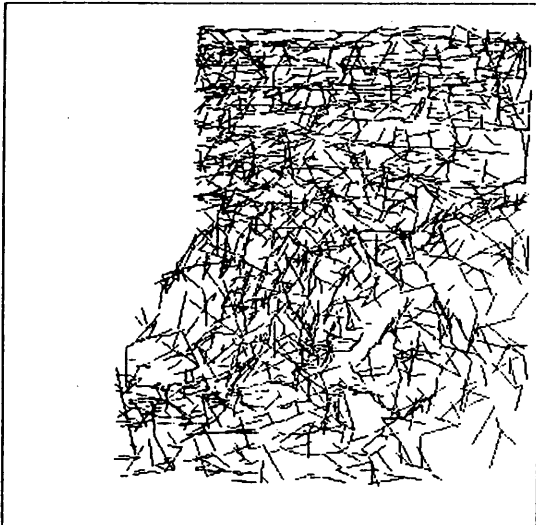


図-A4 a 実験によりえられたトレーサの流跡線

Exp. - 2 $U_0 = 4.4 \text{ cm/sec}$

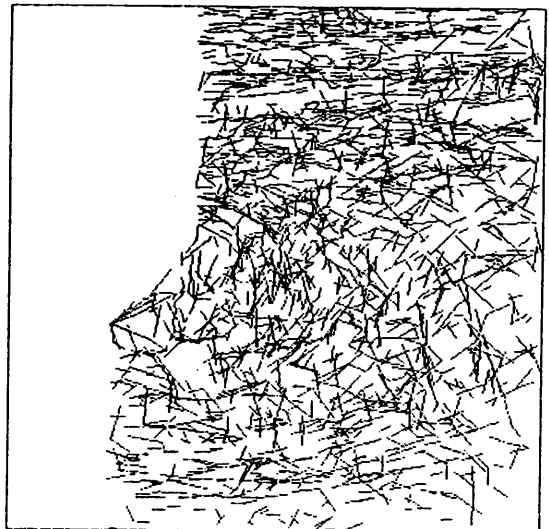


図-A4 b 実験によりえられたトレーサの流跡線

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

Exp. - 3 $U_0 = 7.0 \text{ cm/sec}$



図-A 4 c 実験によりえられたトレーサの流跡線

Exp. - 4 $U_0 = 14.2 \text{ cm/sec}$

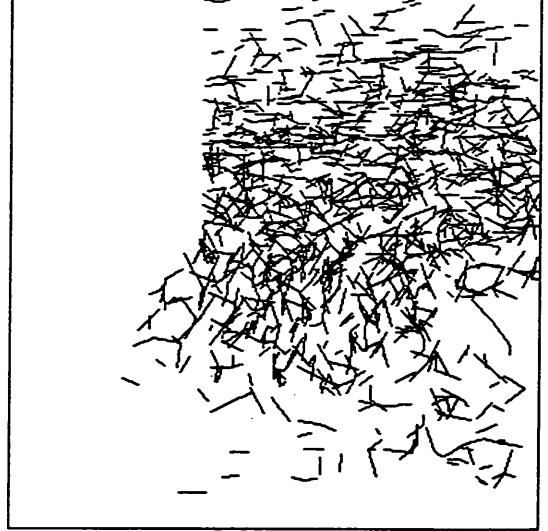


図-A 4 d 実験によりえられたトレーサの流跡線

付録 B シリーズ A, B の計算結果

表-B1 シリーズ A 計算条件

Run No.	νt (cm ² /sec)	ε (cm)	Nb	Δt (sec)
A31	0.0001	0.1	40	0.2
A32	0.001			
A33	0.01			
A34	0.1			
A35	0.2			
A36	0.5			
A03		0.001		
A13		0.01		
A23		0.05		
A43		0.5		

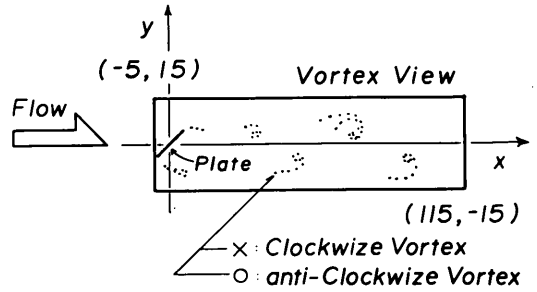


図-B1a 渦点配置表示範囲

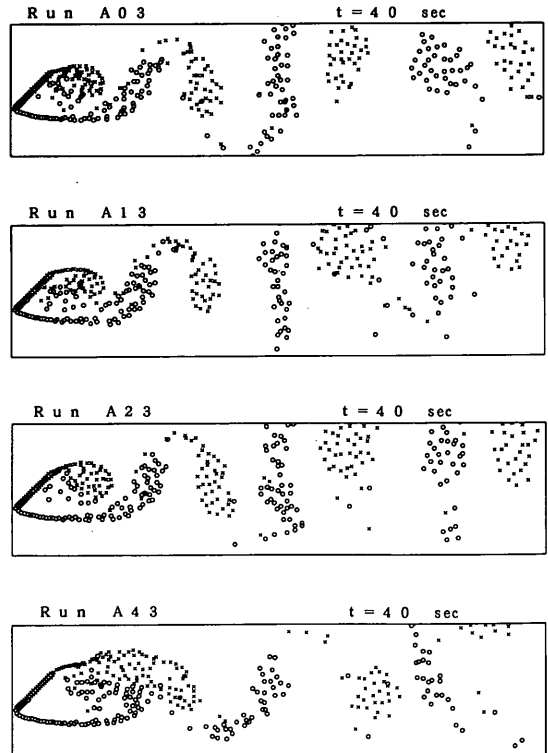
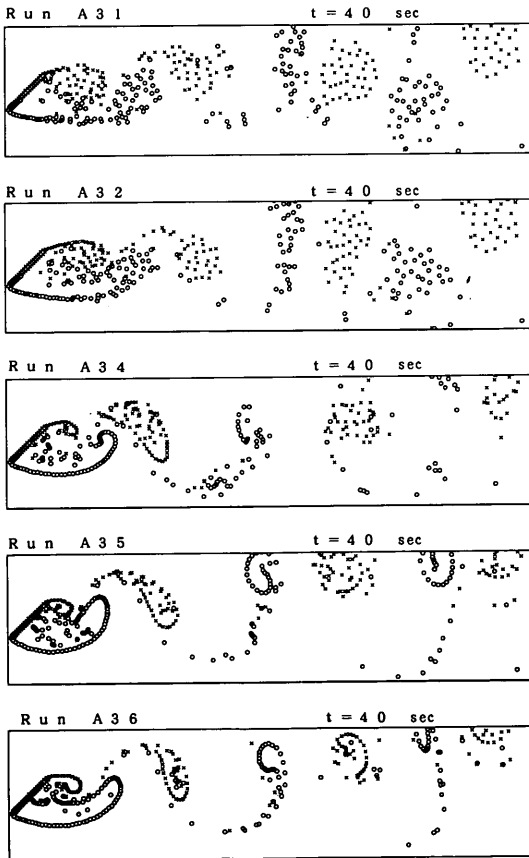


図-B1b 渦点配置

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

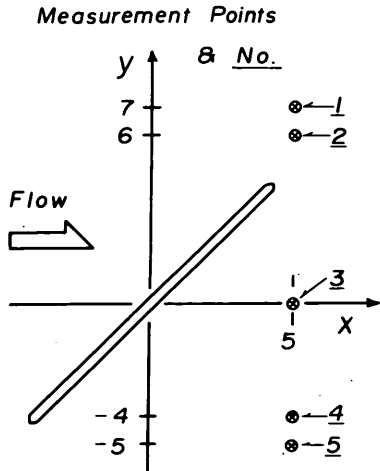


図-B 2 a 構造物背後の流速変動測定点

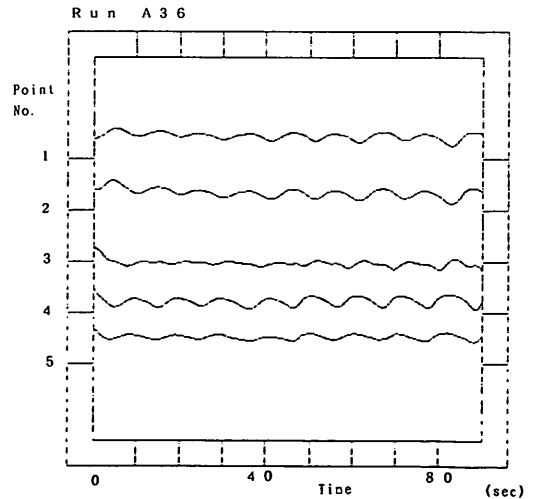
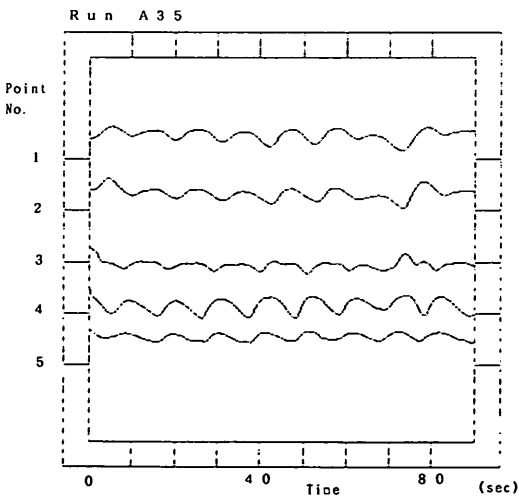
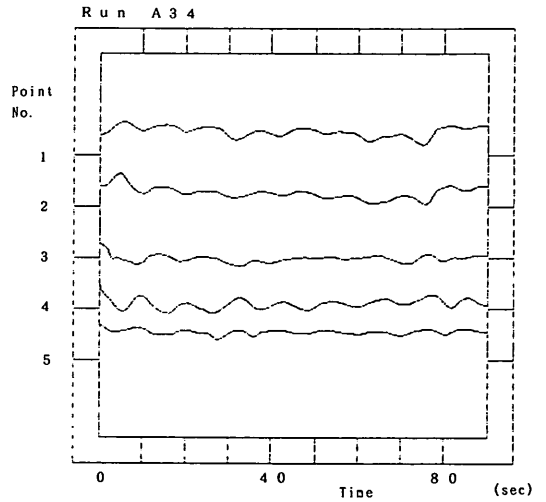
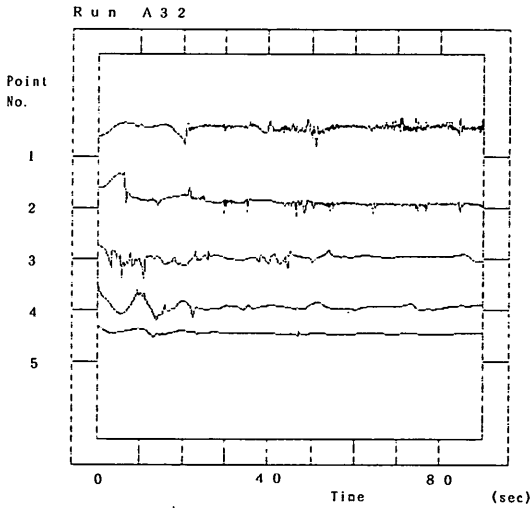
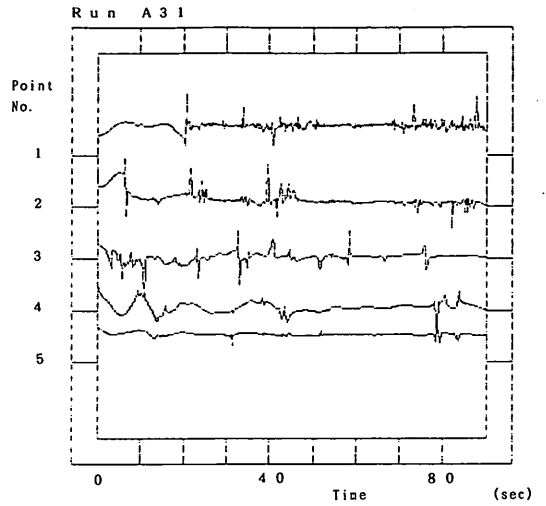


図-B 2 b 構造物背後の流速変動

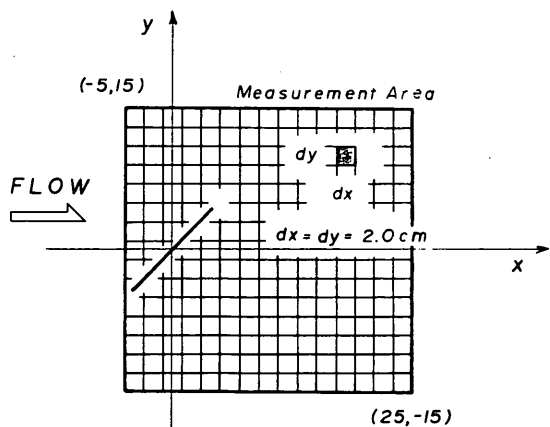
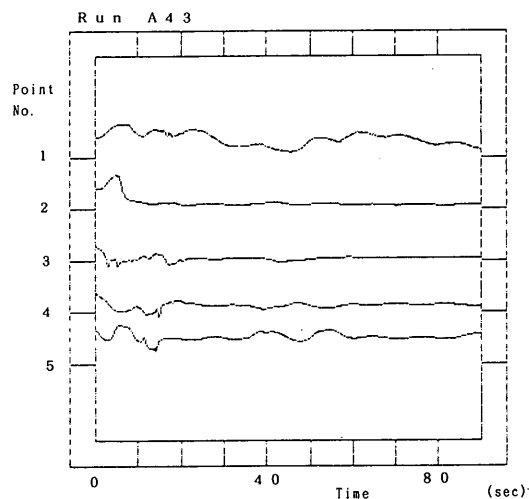
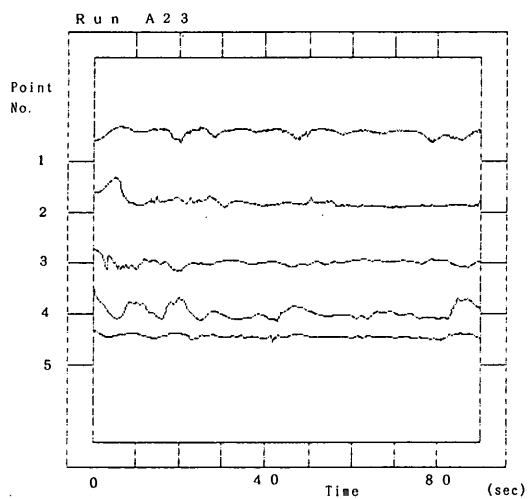
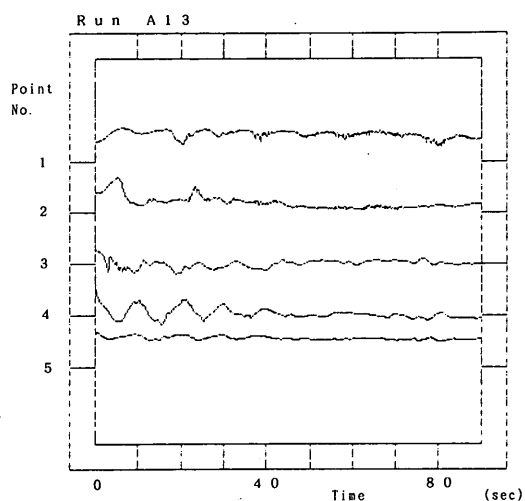
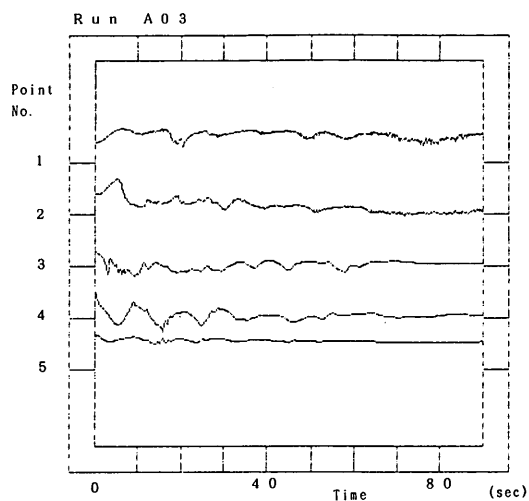


图-B3a 平均流速分布测定点

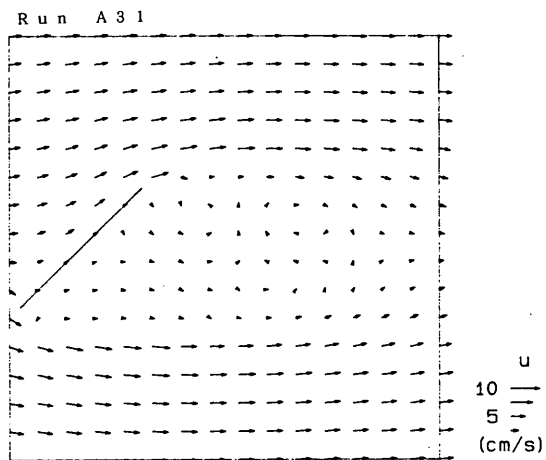


图-B3b 平均流速分布

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

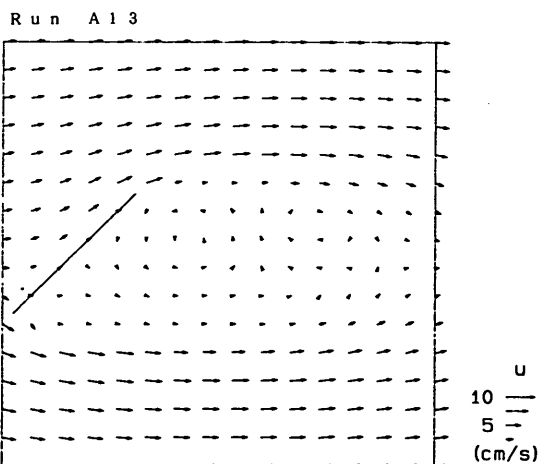
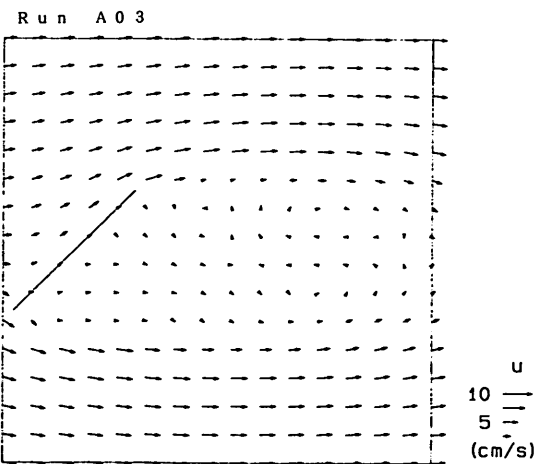
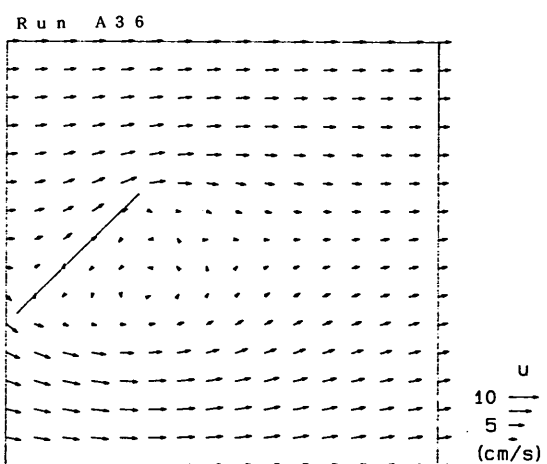
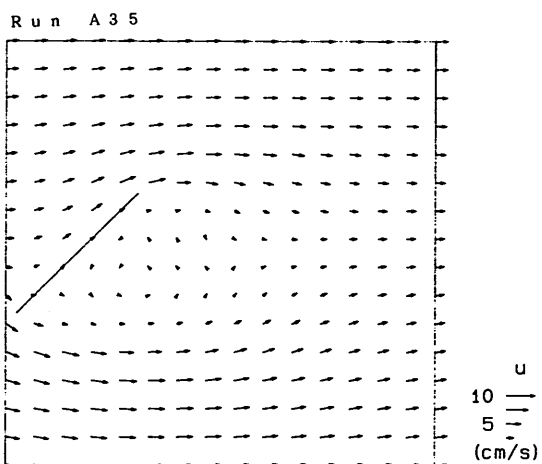
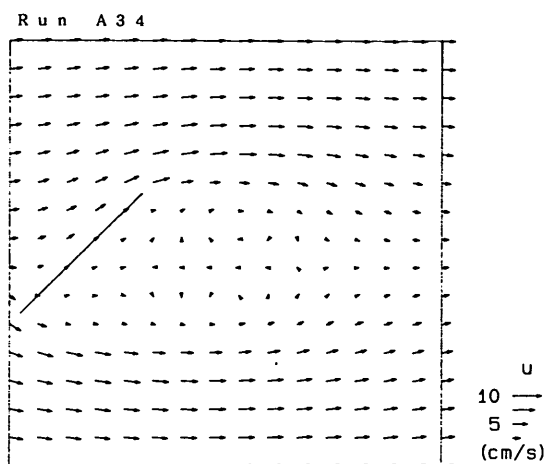
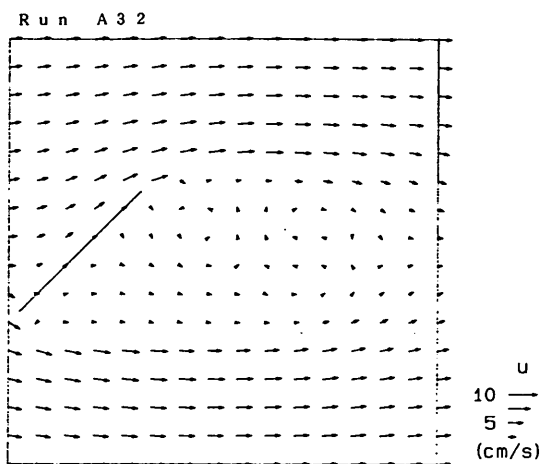


図-B3b 平均流速分布 (つづき)

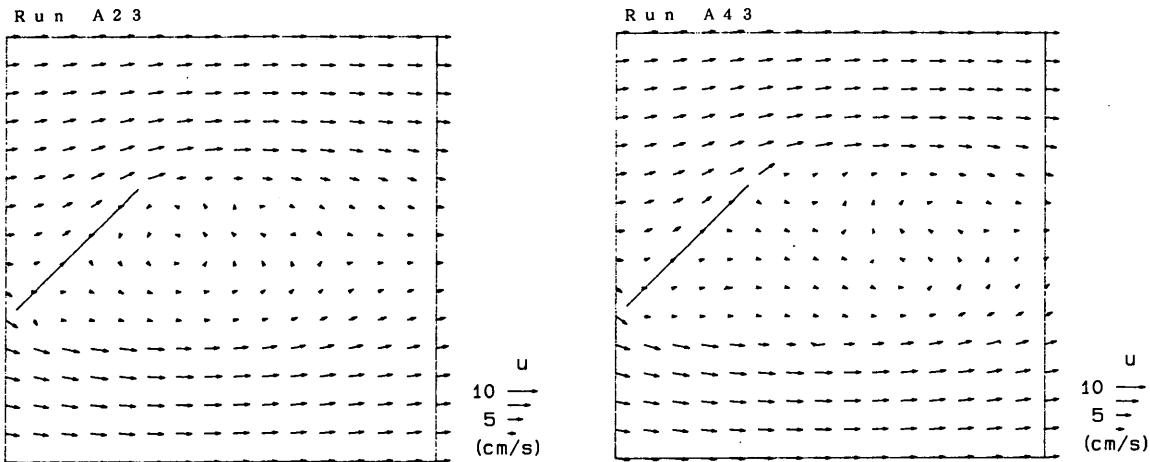


図-B 3 b 平均流速分布 (つづき)

表-B 2 シリーズ B 計算条件

Run No.	νt (cm ² /sec)	ϵ (cm)	Nb	Δt (sec)
B11	0.1	0.1	10	0.05
B12			20	
B13			40	
B14			80	
B21			10	0.1
B22			20	
B23			40	
B24			80	
B31			10	0.2
B32			20	
B33			40	
B34			80	
B41			10	0.5
B42			20	
B43	40			
B44	80			

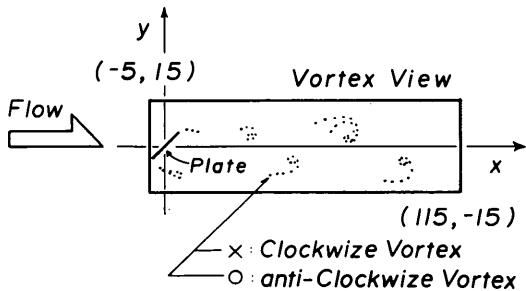


図-B 4 a 渦点配置表示範囲

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

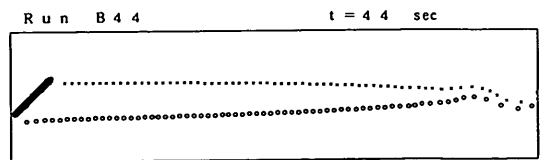
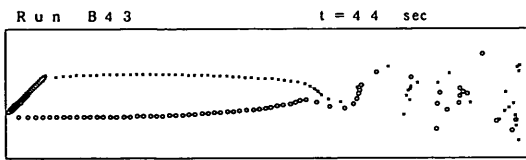
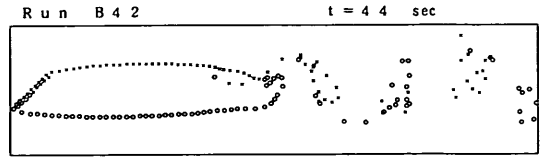
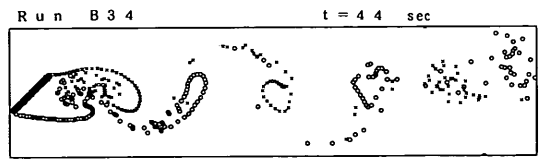
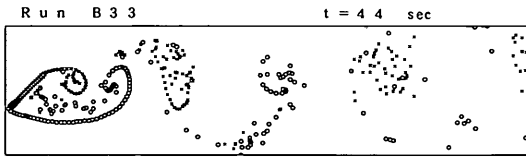
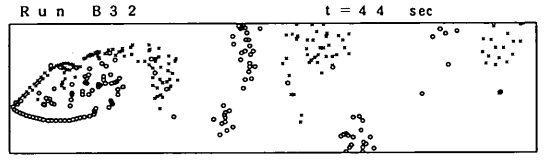
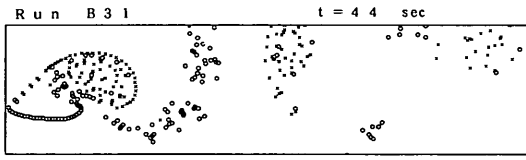
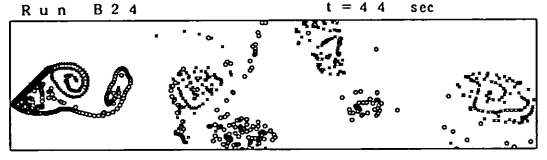
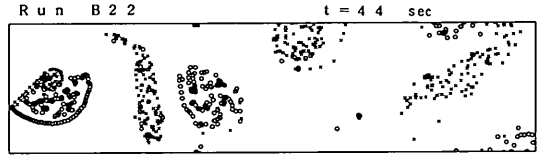
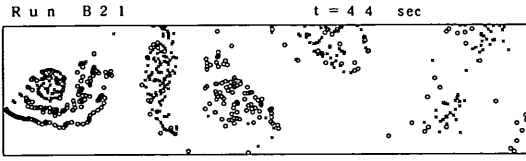
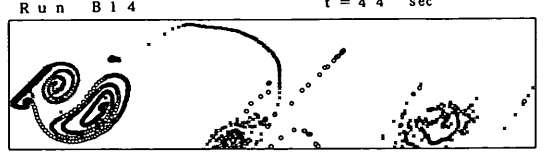
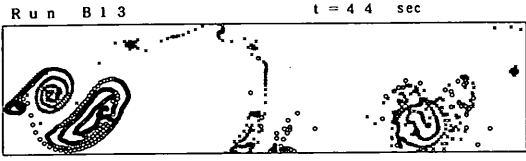
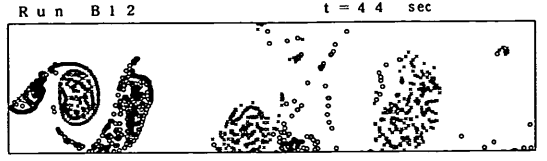


図-B4b 渦点配置図

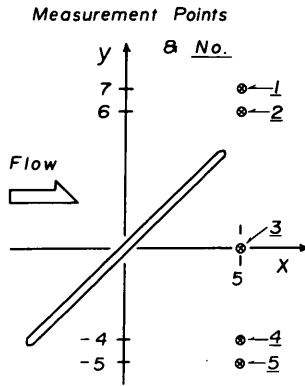


図-B5a 構造物背後の流速変動測定点

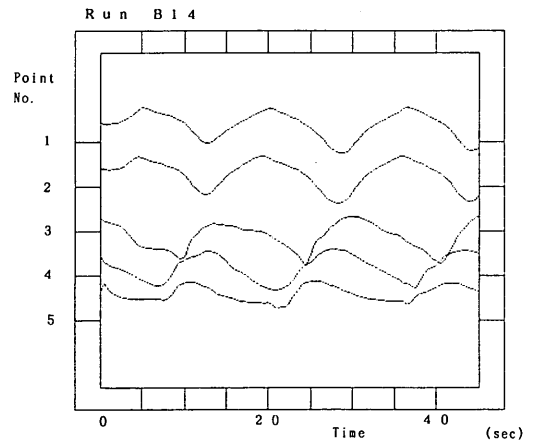
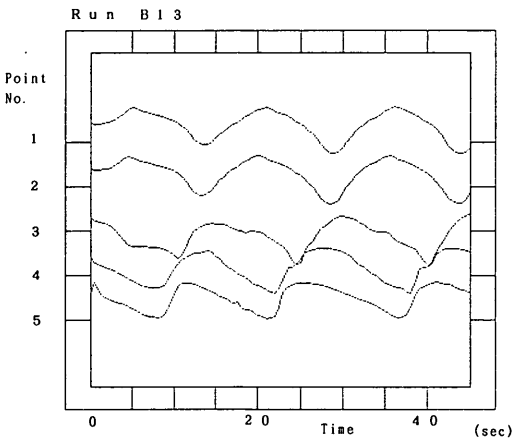
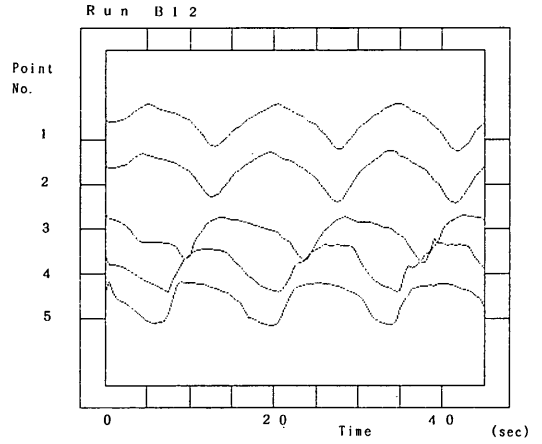
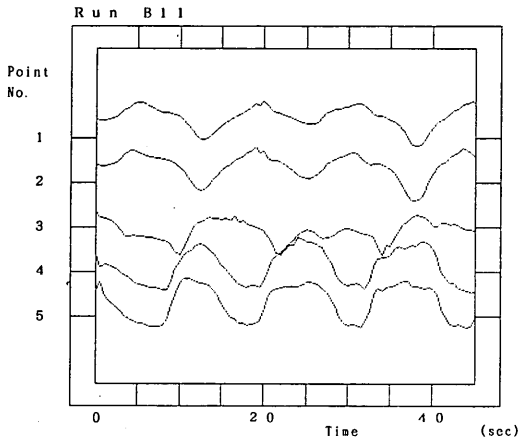


図-B5b 構造物背後の流速変動

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

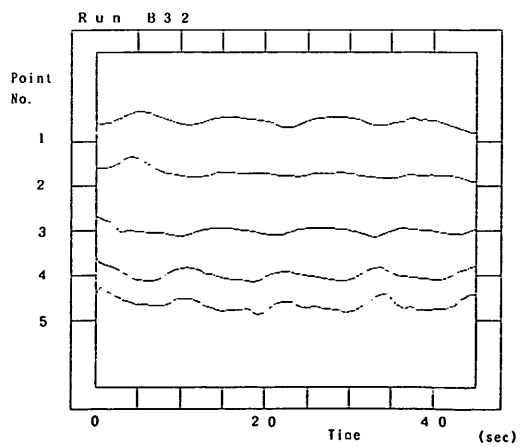
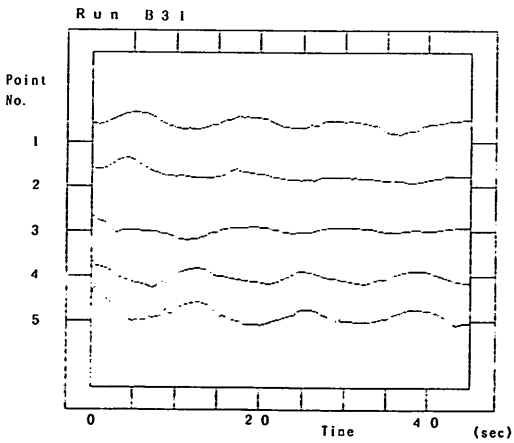
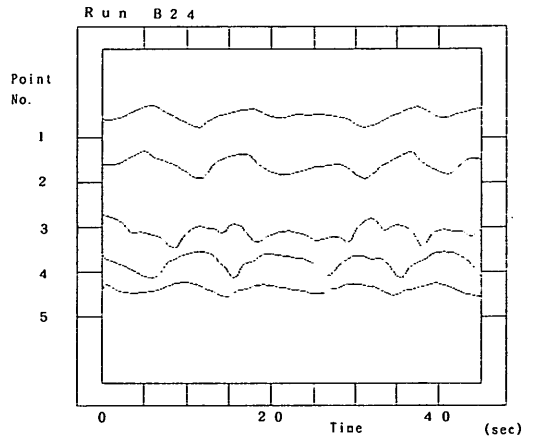
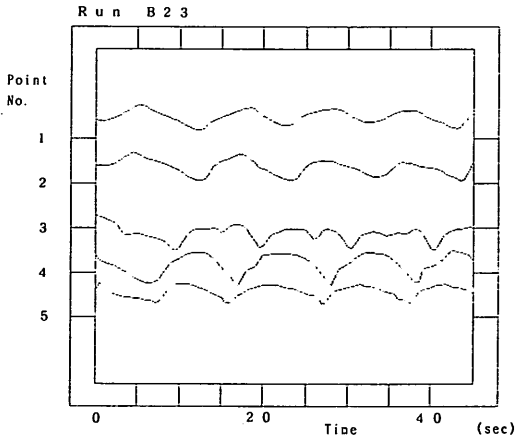
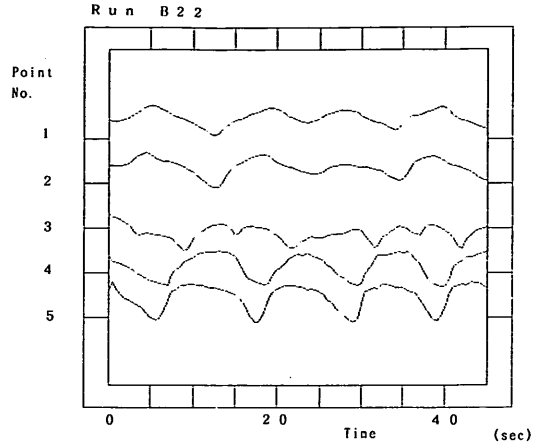
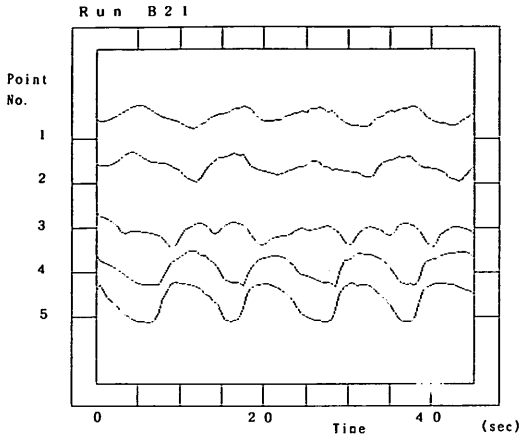


図-B 5 b 構造物背後の流速変動 (つづき)

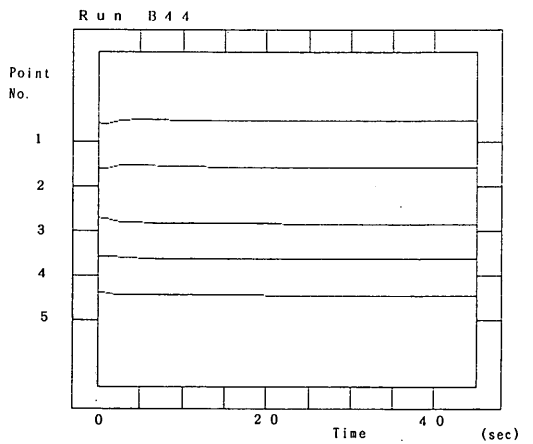
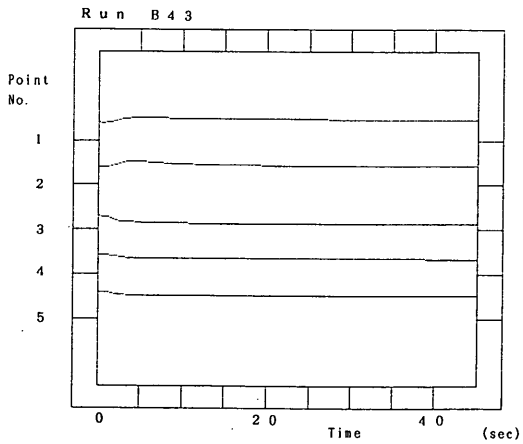
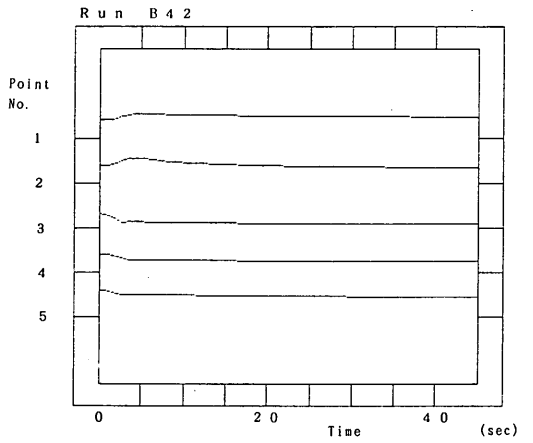
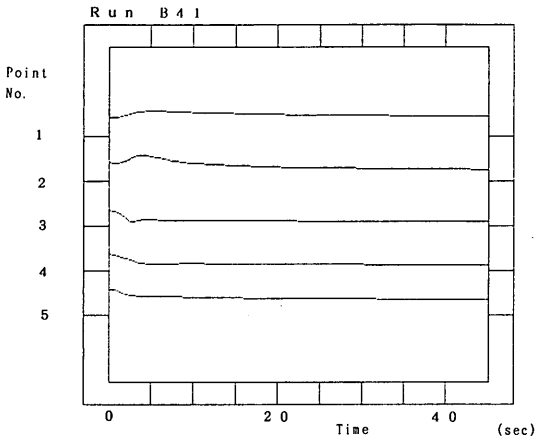
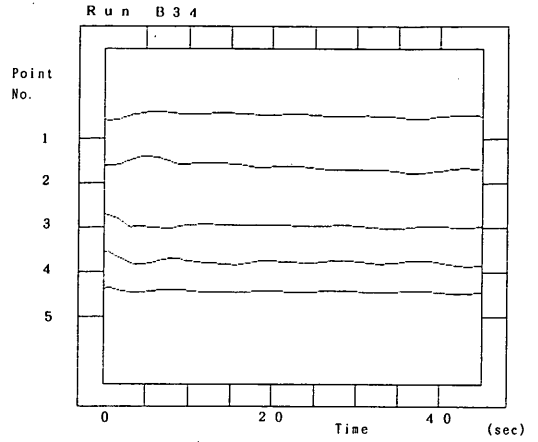
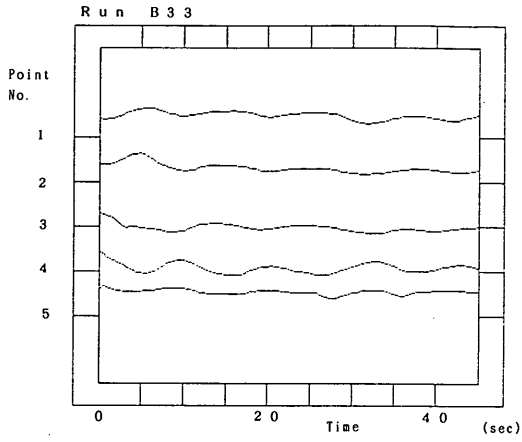


図-B5b 構造物背後の流速変動 (つづき)

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

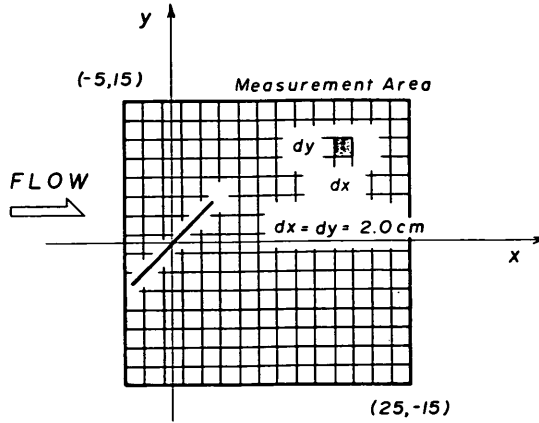
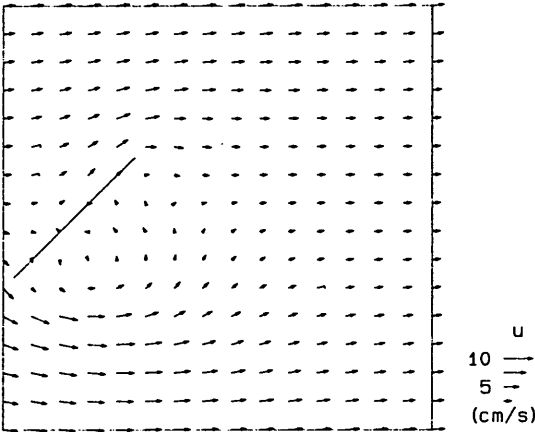
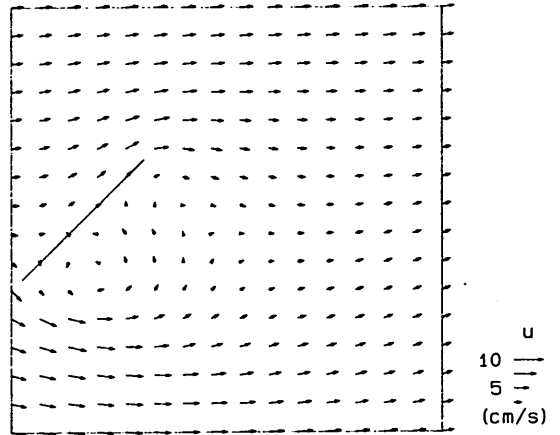


図-B 6 a 平均流速分布測定点

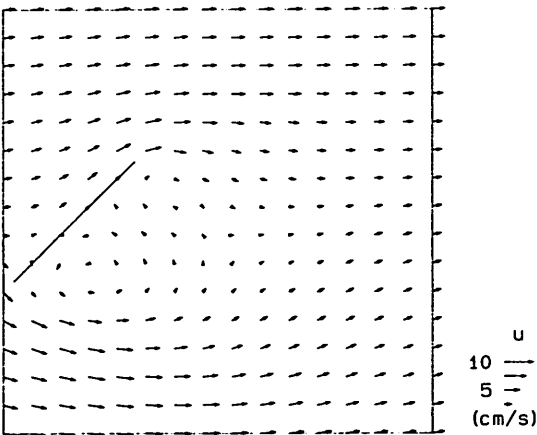
Run B 1 1



Run B 1 2



Run B 1 3



Run B 1 4

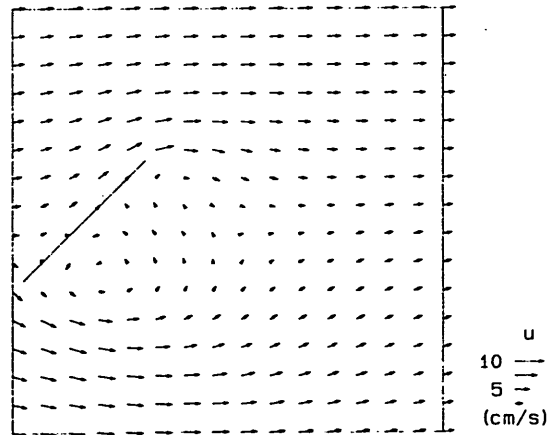


図-B 6 b 平均流速分布

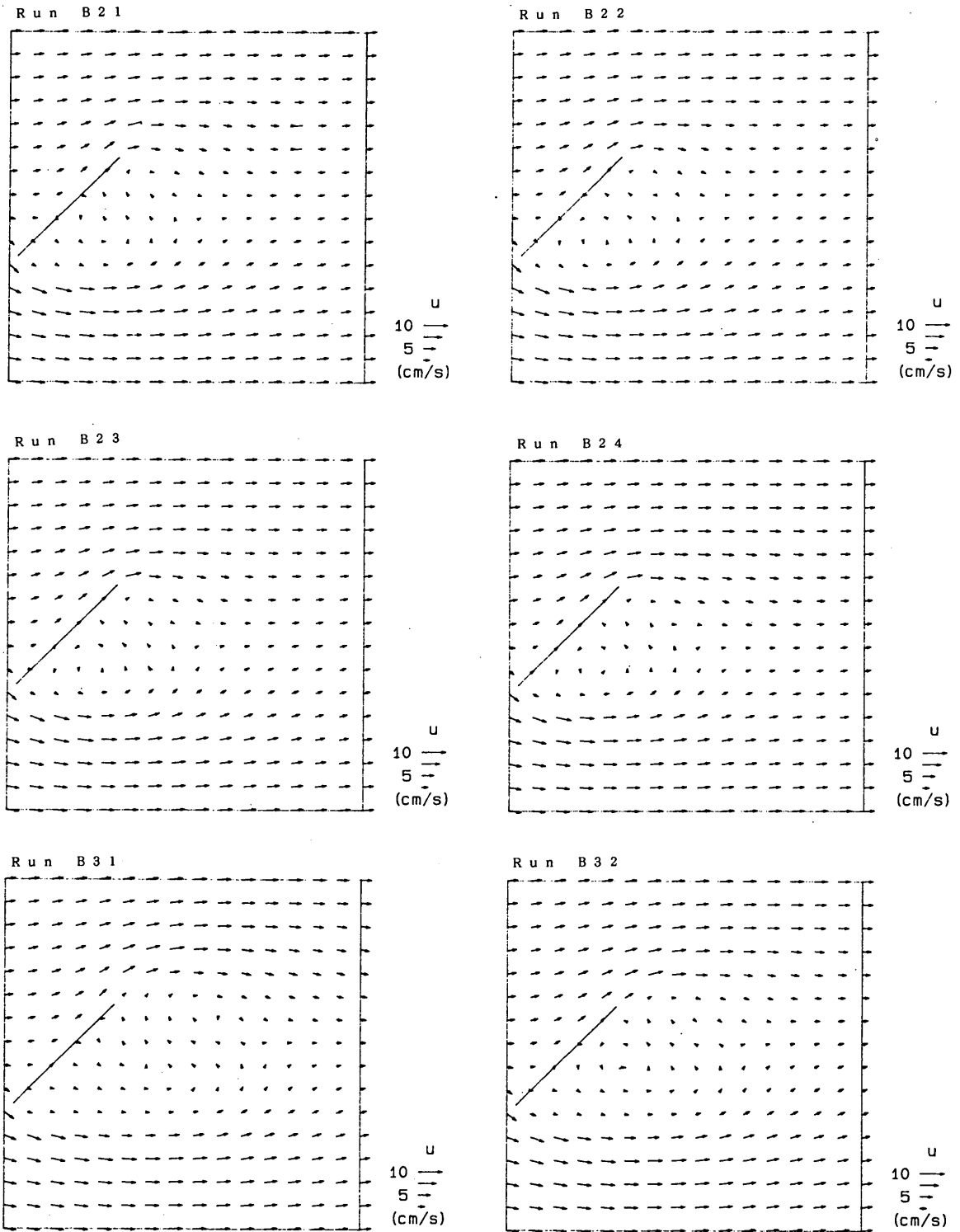


図-B6b 平均流速分布 (つづき)

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

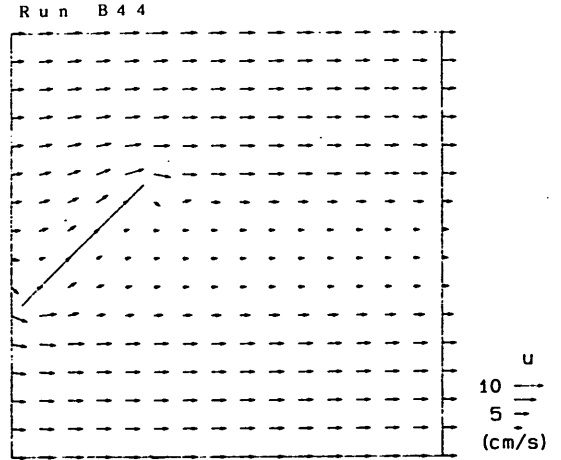
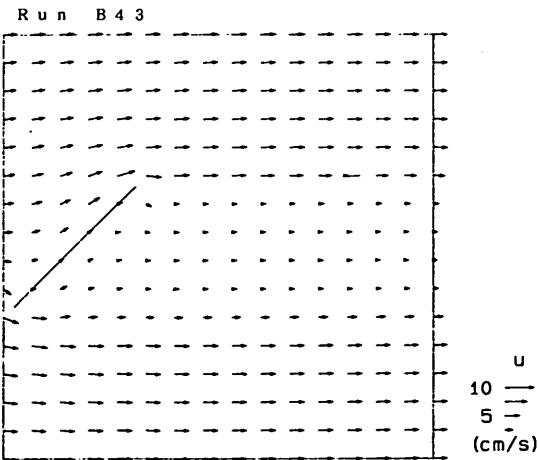
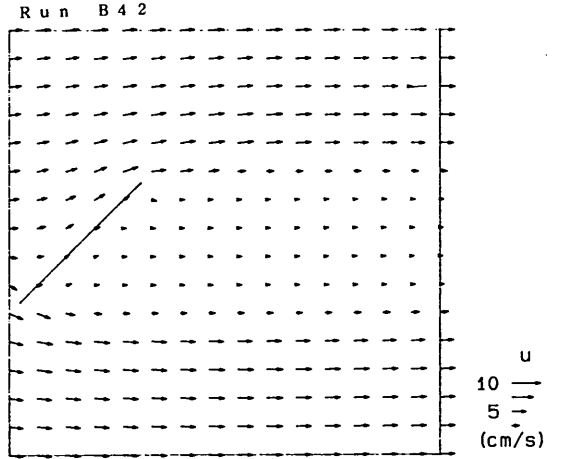
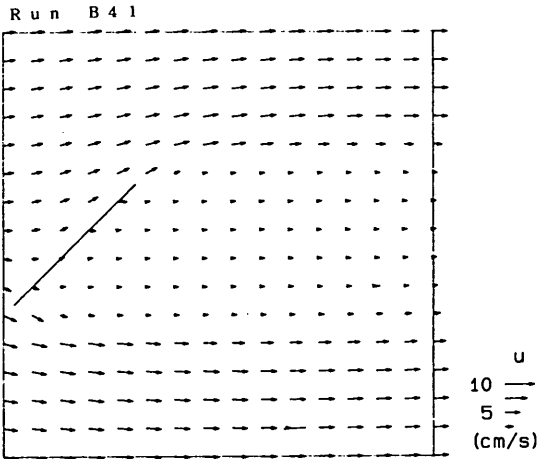
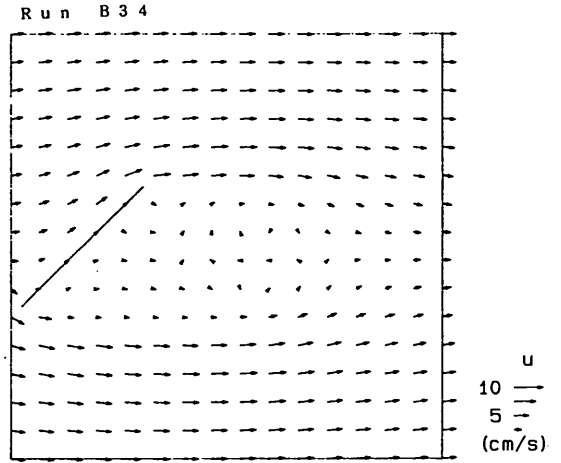
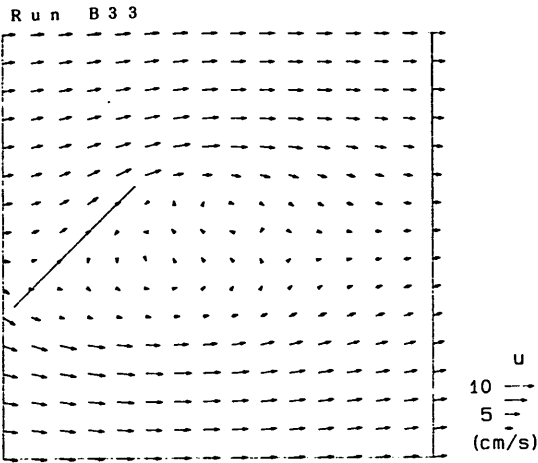


図-B6b 平均流速分布 (つづき)

付録 C シリーズ D の計算結果

表-C1 シリーズ D 計算条件

Run	T (sec)	θ (deg)	νt (cm ² /sec)	ε (cm)	Nb	Δt (sec)
D11	10.0	15.0	0.1	0.1	40	0.1
D12		30.0				
D13		45.0				
D14		60.0				
D21	5.0	15.0	0.1	0.1	40	0.1
D22		30.0				
D23		45.0				
D24		60.0				
D31	20.0	15.0	0.1	0.1	40	0.1
D32		30.0				
D33		45.0				
D34		60.0				

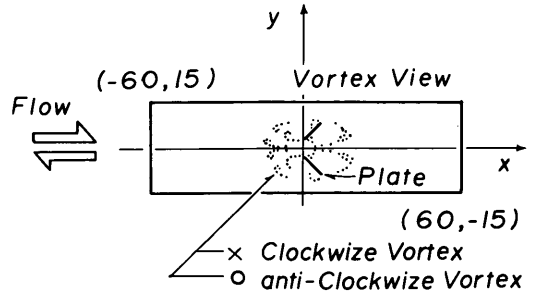


図-C1a 渦点配置図

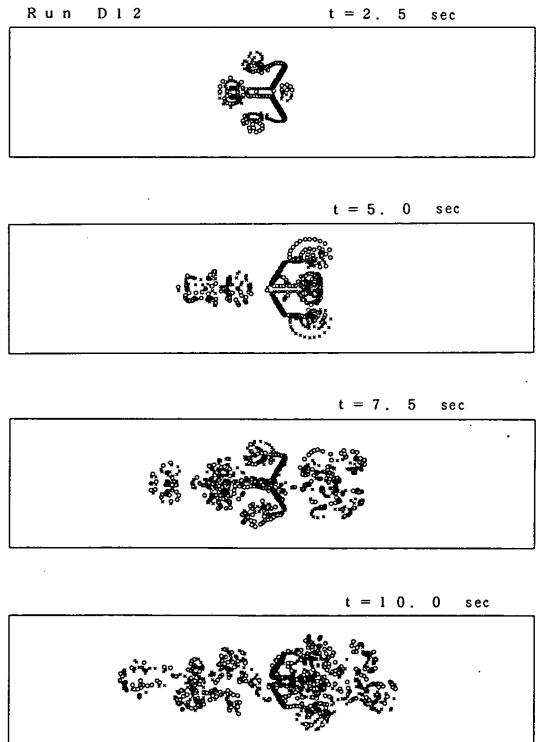
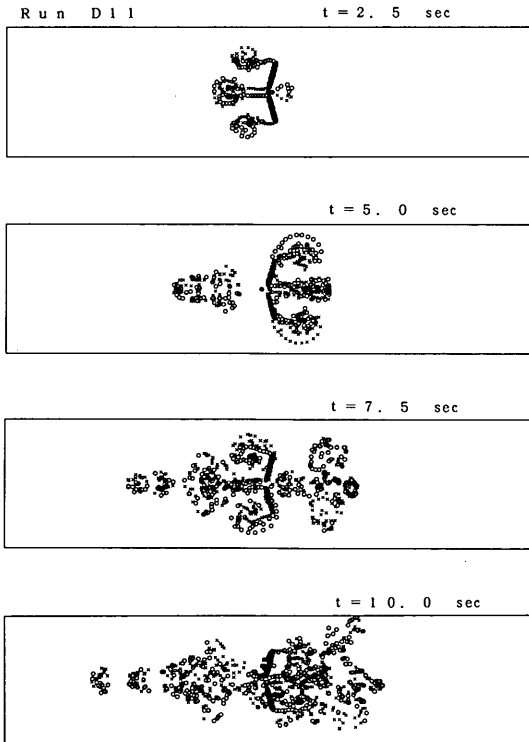


図-C1b 渦点配置図

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

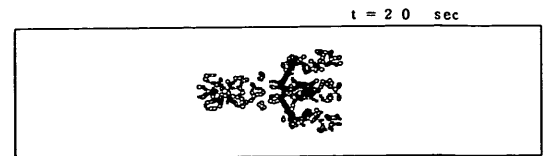
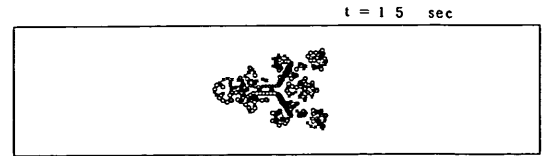
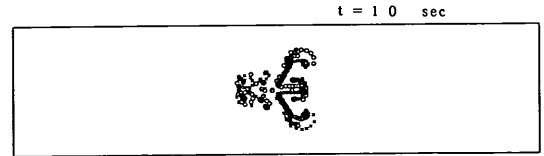
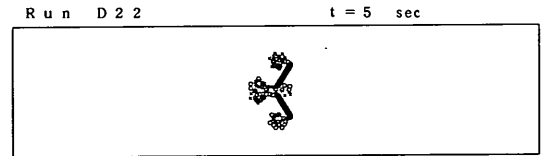
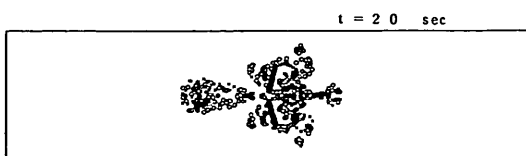
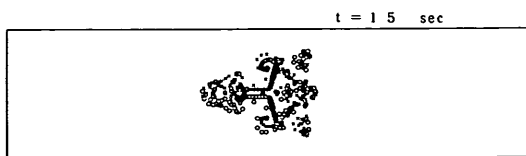
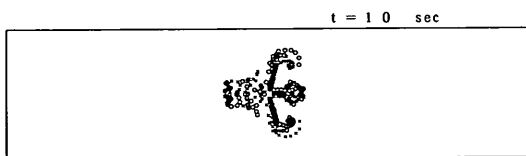
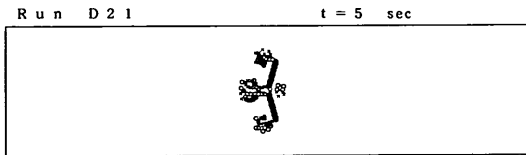
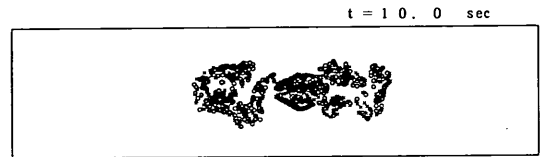
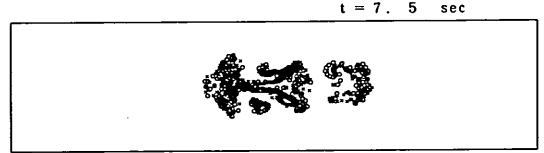
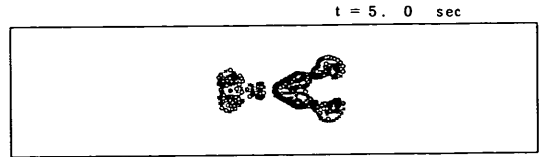
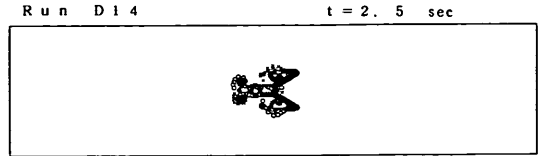
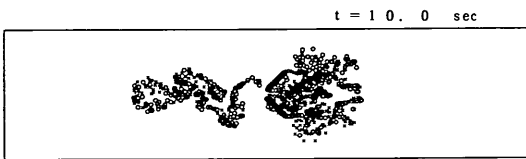
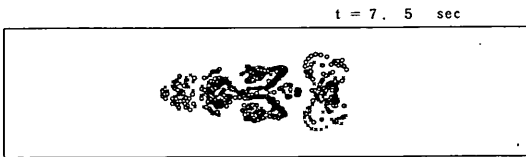
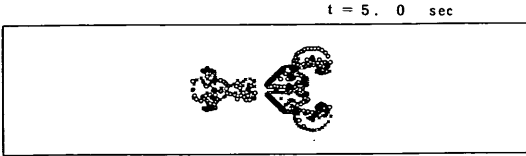
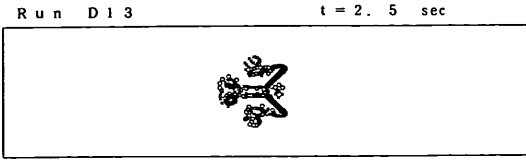


図-C1b 渦点配置 (つづき)

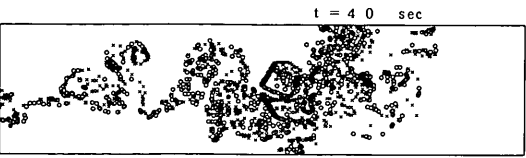
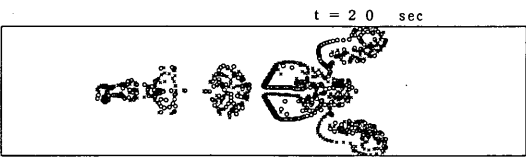
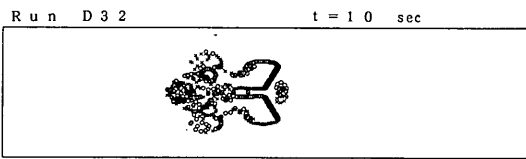
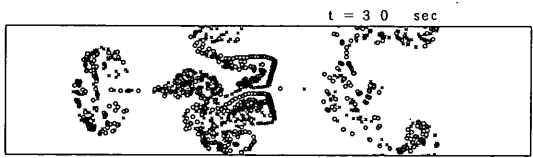
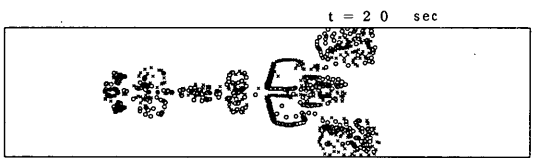
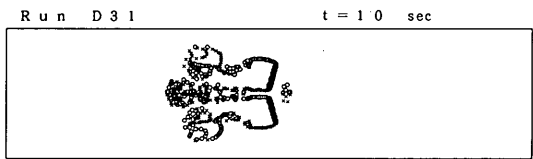
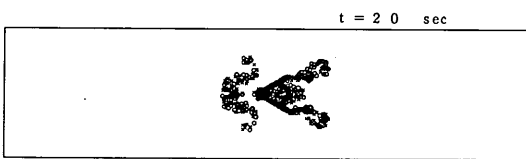
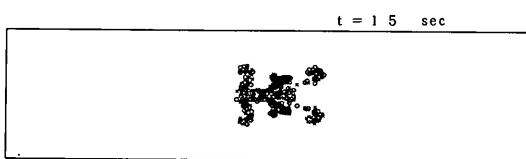
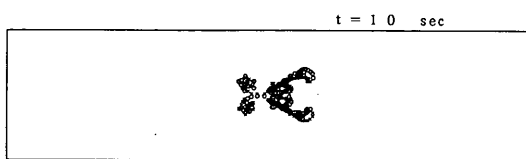
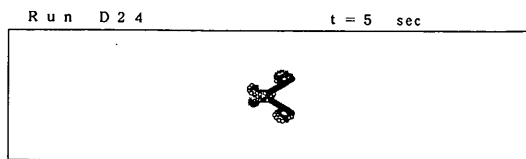
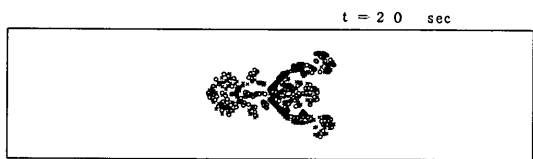
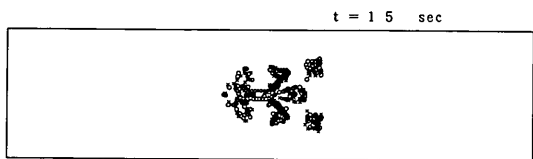
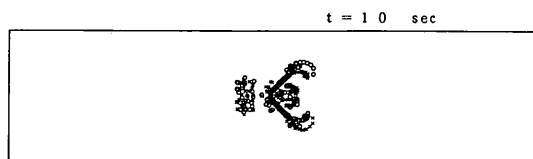
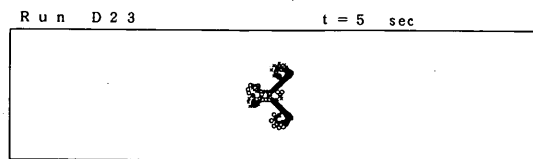


図-C1b 渦点配置 (つづき)

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

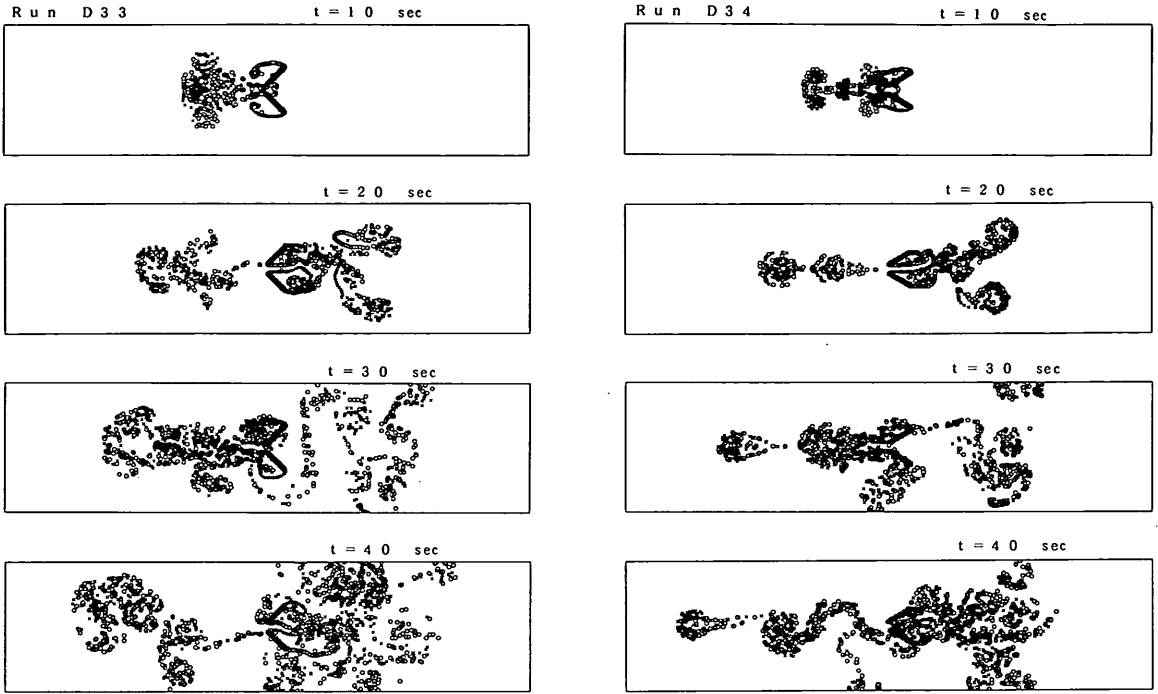


図-C1b 過点配置 (つづき)

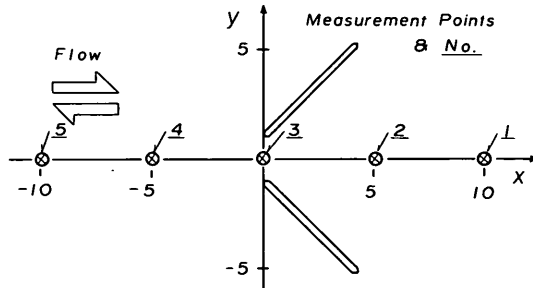


図-C2a 構造物背後の流速変動

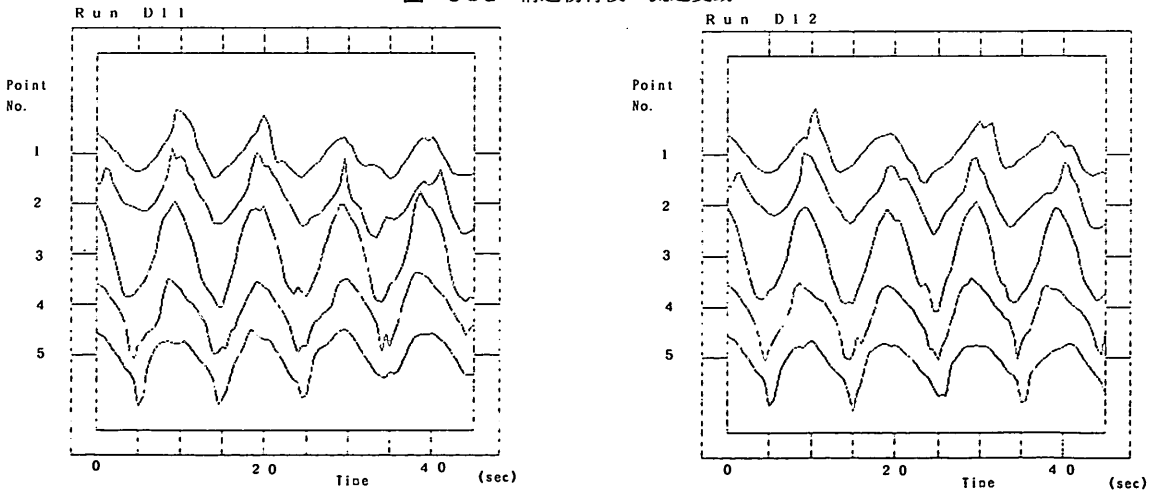


図-C2b 構造物背後の流速変動

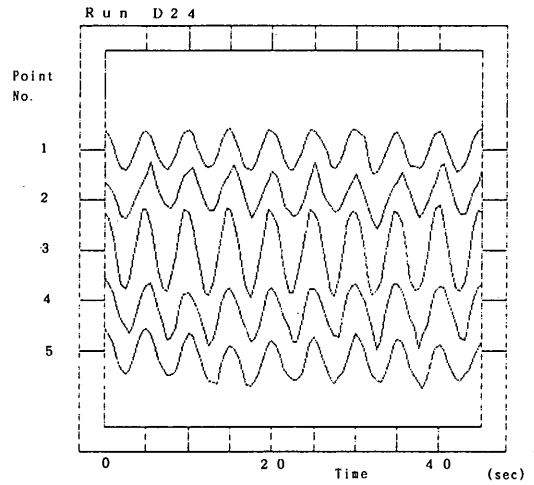
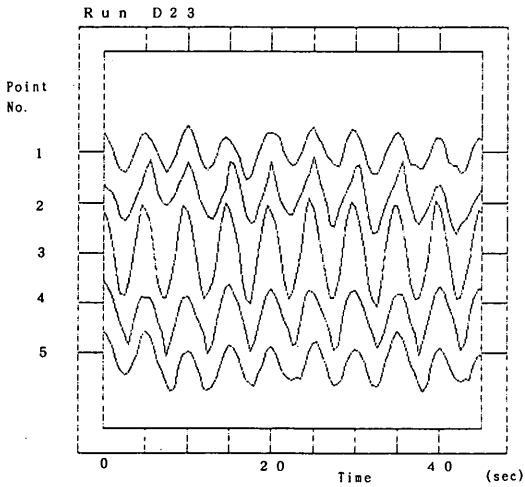
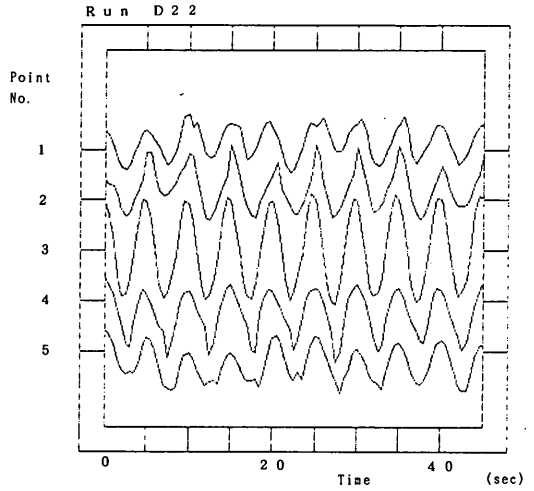
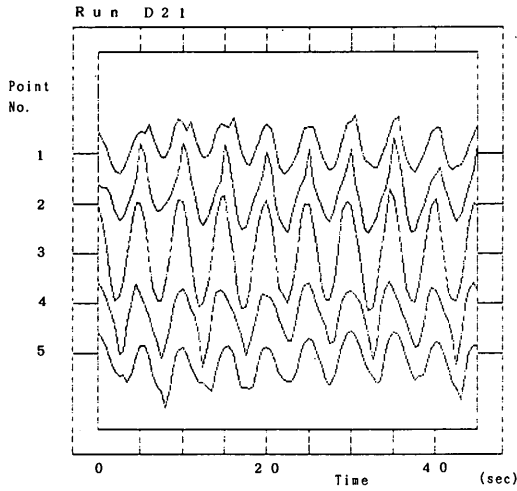
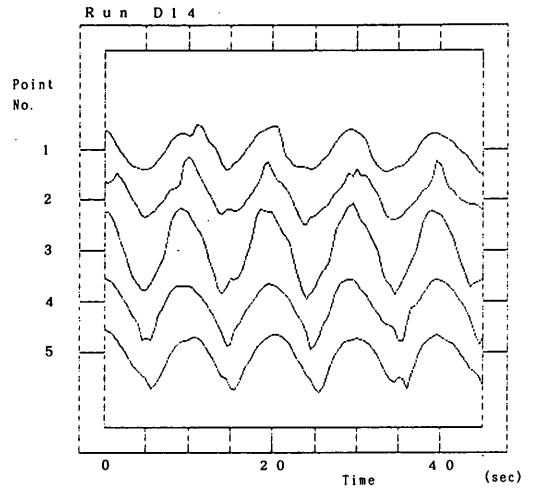
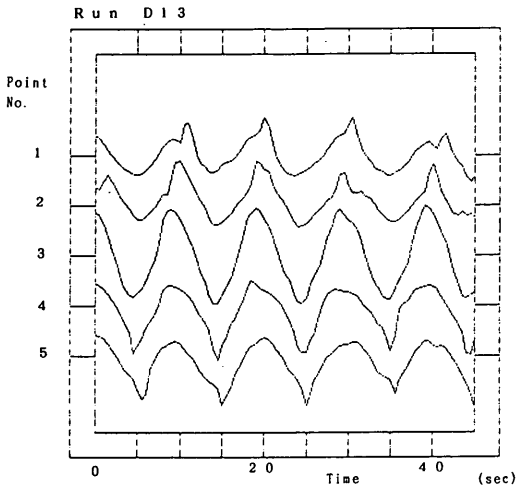


図-C2b 構造物背後の流速変動 (つづき)

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

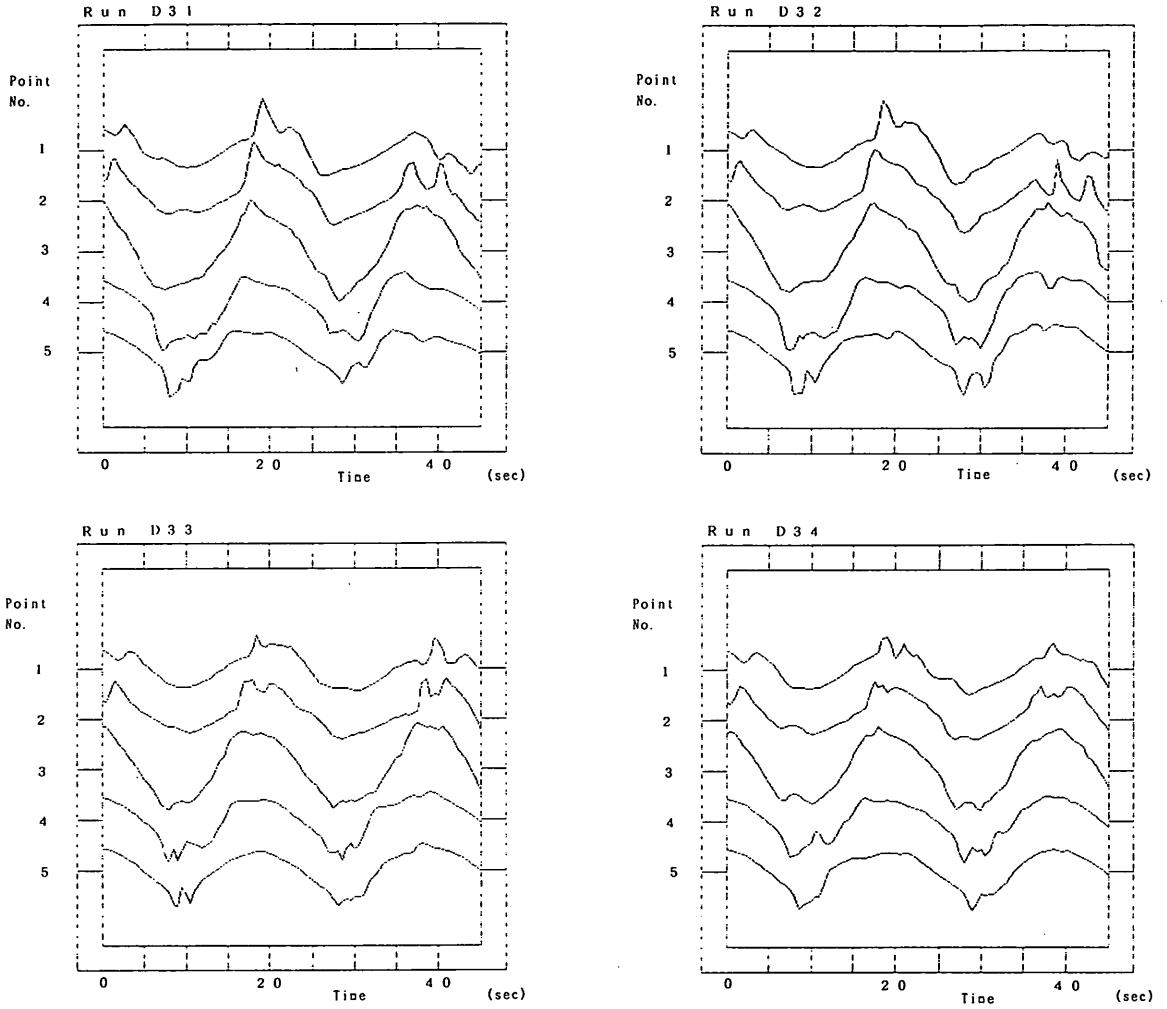


図-C2b 構造物背後の流速変動 (つづき)

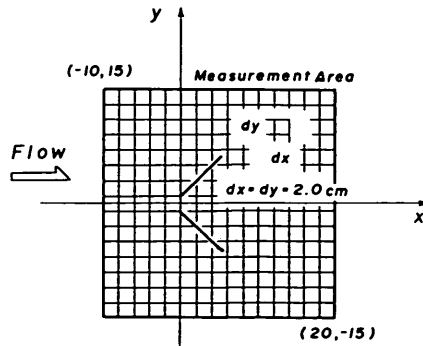


図-C3a 残差流速分布

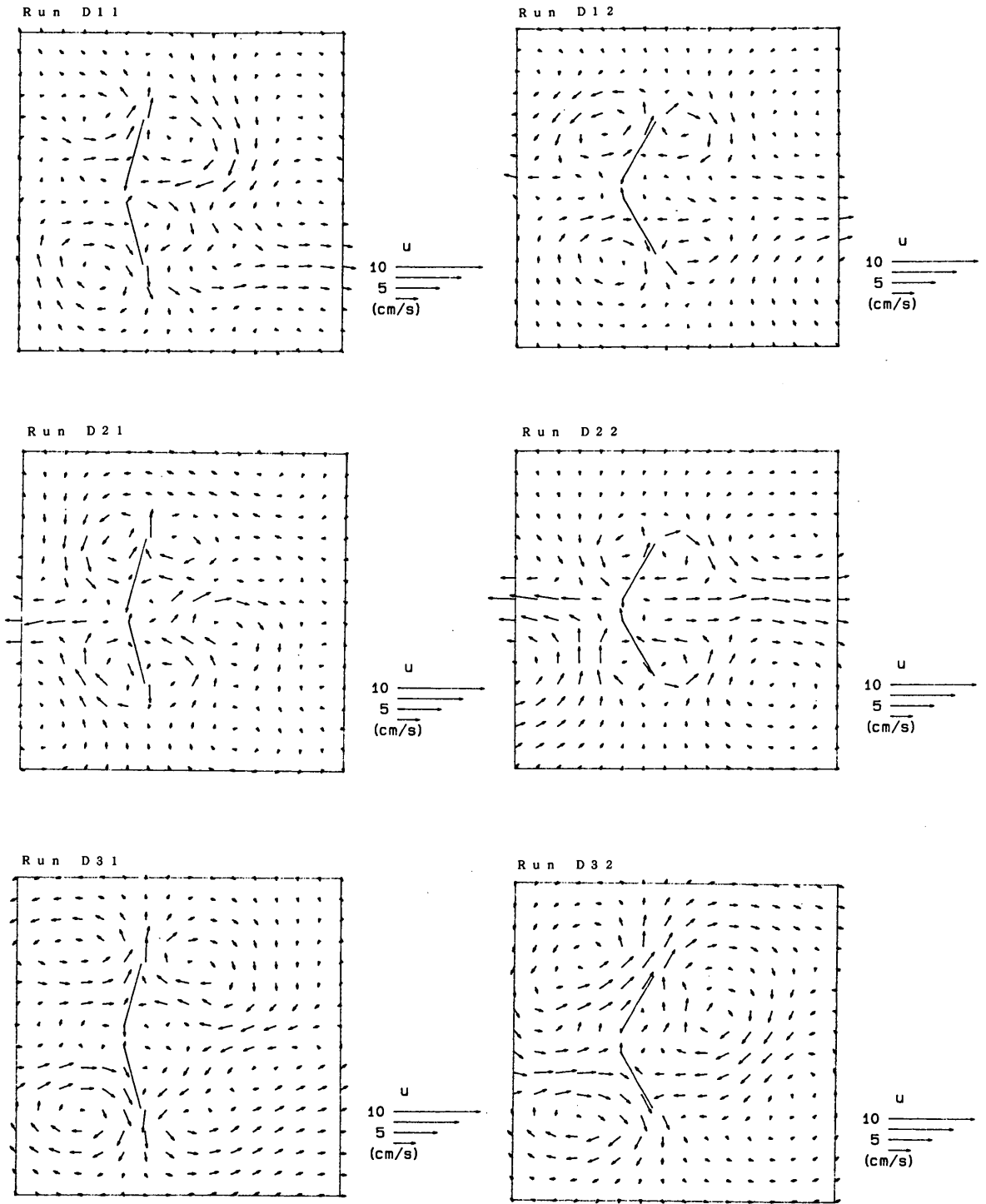


図-C5b 残差流速分布

離散過去による構造物周りの流れのシミュレーション

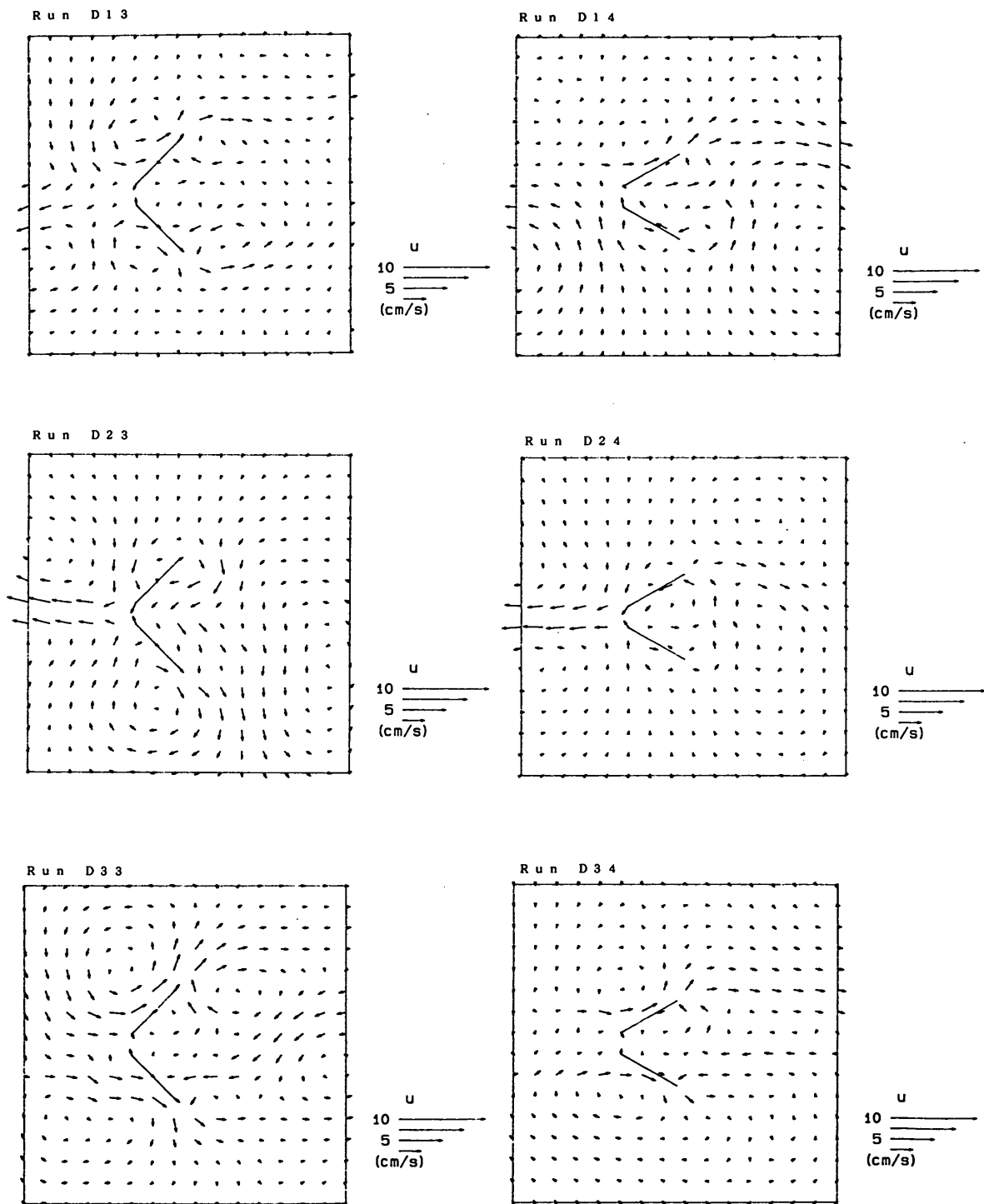


図-C5b 残差流速分布 (つづき)