

LES 及び DNS による壁乱流の準秩序構造及び レイノルズ応力収支の視覚化

○ 河村 洋 (東理大)、広瀬 良一 (東理大院)、清水 康弘 (東理大院)
近藤 芳行 (東理大院)、佐々木 潤一郎 (東理大院)

Visualization of Quasi-Coherent Structures and Reynolds Stress Budget in the Wall Turbulence by LES and DNS

by

Hiroshi KAWAMURA, Ryoichi HIROSE, Yasuhiro SHIMIZU
Yoshiyuki KONDOH and Jun-ichiro SASAKI

Science University of Tokyo, 2641, Yamazaki, Noda-shi, Chiba-ken, 278 JAPAN

ABSTRACT

A large number of LES and DNS have been made for turbulent flows with simple geometries such as a pipe and a channel. In the present study, production, dissipation and diffusion terms are obtained from the LES and DNS data bases and visualized with the use of computer graphics. The animation of the near-wall turbulence structure enables further understandings of the complex turbulence phenomena.

1 緒言

自然界に存在する流れは一般に乱流であることが多く、乱流現象を予測し、あるいは制御することは工学の重要課題であり、従来よりさまざまな視点からの研究が行われてきた。

近年、電子計算機技術の発展により乱流の LES あるいは DNS が可能になってきている。LES (Large Eddy Simulation) は乱流場を計算格子で解像できる部分 (Grid Scale, GS) と格子分解能で解像できない部分 (Subgrid Scale, SGS) とに分け、GS については直接支配方程式を解き、SGS にはモデル化を施す方法である。この手法は計算機にかかる負荷は DNS よりも少ないものの、乱流場の三次元性及び非定常性を再現できるため、DNS では計算不可能とされるような高いレイノルズ数の流れ場への適用が期待されている。DNS (Direct Numerical Simulation) は Navier-Stokes 方程式を直接数値計算で解く手法で、計算機上に乱流場を再現することから実験室実験に対して数値実験と呼ぶことができる。しかしこの場合、乱れの最小渦のスケールまで計算格子をきる必要があるために計算機への負荷が非常に大きく、その適用範囲に制限があるものの、任意の時刻、位置での物理量やその微積分値、あるいは空間分布状況などの情報を得ることができるため、乱流モデルの評価・開発、乱流構造の解析など乱流研究に極めて有効な情報を与えている。これらの数値計算から得られ

る膨大なデータから流れ場を理解するためには、コンピュータグラフィックスによって流れを視覚化することが重要である。

乱流現象の可視化では、Robinson ら [1] は、平行平板間乱流の DNS データベースについて、圧力分布や流速、高速流体の壁に向かう運動 (スイープ、Sweep)、低速流体の壁からはなれる運動 (イジェクション、Ejection) 等をコンピュータ・グラフィックスを用いて可視化を行い、流れ場は全くランダムではなく、組織構造を持つことを示した。笠木ら [2] は、平行平板間の DNS データベースを可視化し、渦運動がレイノルズ応力の生成と消滅に寄与していることを示した。黒田ら [3] は、DNS の平行平板間乱流についてアニメーションを作成し、渦運動の動的な挙動を観察した。

二重円管内乱流は、熱交換器や原子炉など応用範囲が広く、以前より多くの研究がなされてきた。この流れは、流速の最大値の位置に対して非対称であるなど多くの他の乱流場には見られない特徴がある。また内管付近の流れ場は、内外径比 (R_1/R_2 : 内径 R_2 : 外径) が 1 に近い場合は、平行平板間乱流と差異はないと考えられるが、内外径比が非常に小さい流れ場については、内管壁面の曲率の影響を大きく受けるため、乱流構造が平行平板とは大きく異なっていることが考えられる。

本稿では、基礎的な流れ場である平行平板間乱流と二重円管内乱流の DNS あるいは LES データベースを

活用し、固体壁面近傍における乱流の準秩序構造及びレイノルズ応力収支を視覚化した。

2 計算領域と可視化領域

利用したデータベースの計算条件を以下に示す(表1, 2)。これらのデータベースはIBMのスーパーコンピュータシステムGSAP上で作成した。データが極めて大きいため、計算領域の全てを可視化することはワークステーション(WS)のメモリ、ディスク容量の能力の関係で難しい。そこで壁面近傍に絞って可視化を行う。図1,2に可視化領域を示す。

3 可視化方法

データベースの可視化にはAVSをグラフィックス・ワークステーションTITAN3000上で使用した。AVS(Application Visualization System)は科学技術計算の後処理向けにつくられた汎用可視化ツールで、プログラムすることなく各種データを可視化することができる。

ソルバーから出力されるデータはそのままではAVSでは扱えないため、フィールドデータと呼ばれるデータフォーマットに変換した。フィールドデータとはスカラー、ベクトル情報と座標情報を持つデータである。

AVSでは単純な機能を持つ多数のモジュールを組み合わせて、ネットワークに組み込むことにより、独自の可視化アプリケーションを作ることができる。可視化では、このネットワーク・エディタを使用する。ここでは、フィールドデータ(圧力、速度分布データ)を、インプットモジュールによって読み込んだ後、フィルタモジュールで各種の後処理、データの抽出、座標変換を行う。フィルターを通して得られたデータを、マップモジュールを使用してコンターや等値面、パーティクル等の幾何データに変換する。このように作成されたデータは、アウトプットモジュールによってレンダリング、出力される。

AVSを用いて各タイムステップのデータに対して同じレイアウトのイメージデータを作成する。こうしてできた100フレーム分の画像ファイルをApple Power-Macintosh 8100/80AV上に転送し、QuickTimeを用いてアニメーション化を行った(図3)。このパーソナルコンピュータは、Audio Visual Interfaceを標準装備しているためディスプレイ上の映像を直接NTSC、PAL等のビデオ信号として出力することができる。また、QuickTimeは、動画処理を行うための汎用動画処理ライブラリで、動画化を行うために必要な処理を全て行

うことができる。

4 結果

4.1 平行平板間乱流

図7にレイノルズ応力 u^+v^+ の高い領域を示す。低圧領域の左右側方でスイープ(流れ方向に速く、壁面に近づく流れ)とイジェクション(流れ方向に遅く、壁面から離れる流れ)が現れていることがわかる(図4)。スイープに対して、イジェクションは卓越して観察される。これは壁の拘束のためにスイープは発達しないが、イジェクションは壁から離れて大きく発達するためである。

図8では平行平板間乱流の低圧領域と乱流エネルギーの生成及び散逸領域を視覚化している。一般に、低圧領域は渦と良く対応することが示されている[2]。また、生成領域は流れ方向に細長いですじとして現れ、これらの領域が高速流体の壁に向かう運動(スイープ)あるいは低速流体の壁から離れる運動(イジェクション)の発生位置とほぼ一致することが確認できる。さらに、生成領域と壁面との間に存在する粘性底層($y^+ \lesssim 40$)に、大きな散逸領域が認められる。

4.2 二重円管内乱流

図9に低圧領域の分布を示す。等値面の着色は、流れ方向の渦度の正負を表したもので、濃いグレーが負で流れ方向を向いたとき反時計回り、淡いグレーが正で時計回りの回転をしていることを表す。 $R_1/R_2 = 0.1$ のとき低圧領域が時間とともに流れ方向に伸長し、前後二つの渦に分裂するのが観察された。また、低圧領域が分裂する際、前後の渦の回転方向は必ず逆になっている。このように圧力等値面では一つだと思われた低圧領域が実は、逆回りの二つの渦であり、前方にある渦が後方の渦を誘発しているのが観察される。このような渦の再生成は平行平板上でも見られることを三宅ら[4]は指摘している。

二重円管の内管付近のスイープとイジェクションについて可視化を行ったのが、図10である。 $R_1/R_2 = 0.1$ のときは、渦の両側にスイープとイジェクションが見られ、平行平板間乱流と大きな差異はない(図5)。 $R_1/R_2 = 0.02$ の場合は、低圧領域の生成要因が内管への高速流体の衝突であるため、スイープは低圧領域の存在する面と反対側の面に現れる。イジェクションは、一般には衝突した流体が壁面から離れるときに低圧領域の側で生じると考えられる。しかし、内管径が小さ

い場合には、内管壁面をすり抜ける流れによる大きな低圧領域の発生に伴い、非常に大きなイジェクションが現れることが観察された（図6）。

5 結言

以上のように本研究では、乱流のLES及びDNSから得られた結果を動画化することにより、複雑な乱流現象の理解が促進されることを示すことができた。

参考文献

- [1] Robinson, S.K., Kline, S.J., and Spalart, P.R., 1990, "Quasi-Coherent Structures in the Turbulent Boundary Layer: Part II. Verification and New Information from a Numerically Simulated Flat-Plate Layer," *Near-Wall Turbulence*, S.J.Kline and N.H.Afgan, eds., Hemisphere, Washington, D.C., pp. 218-247.
- [2] 笠木, 大坪, 住谷, 鈴木, 飯田, 1992, "DNS データベースによる壁乱流の構造解析," 第7回生研NSTシンポジウム講演論文集, pp. 1-8.
- [3] 黒田, 工藤, 山本, 田中, 谷口, 三好, 木下, 酒井, "DNS データベースを用いた乱流構造の動画化," 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集 vol.I, pp. 25-27.
- [4] 三宅, 宇城, "壁近傍乱流の縦渦の再生について," 第26回乱流シンポジウム講演論文集, pp. 164-167.

表 1: 計算条件 (平行平板間乱流)

座標系	直交座標
メッシュ数	128 × 66 × 128
可視化メッシュ数	64 × 24 × 64
計算領域	6.4δ × 2δ × 3.2δ
可視化領域*	576 × 100 × 288
Grid	Staggered Mesh
Coupling 手法	Fractional Step Method
時間進行	Adams-Bashforth Method
Spatial scheme	2nd-order Consistent Scheme (Convective term)
	2nd-order Central Scheme (The others)
流れ方向境界条件	周期境界条件
スパン方向境界条件	周期境界条件
壁垂直方向境界条件	Non-Slip 条件
レイノルズ数	$Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 180$
時間刻み	$\Delta t^+ = 0.00008$
1frame 当り時間刻み	0.0192
初期条件	DNS Data-base

* u_τ と ν で無次元化した値

表 2: 計算条件 (二重円管内乱流)

座標系	円筒座標系	
メッシュ数	64 × 50 × 128	
可視化メッシュ数	32 × 16 × 128	
Grid	Staggered Mesh	
流れ方向境界条件	周期境界条件	
スパン方向境界条件	周期境界条件	
壁垂直方向境界条件	Non-Slip 条件	
内外径比 R_1/R_2	0.1	0.02
Smagorinsky 定数 c_s	0.1(LES)	0.0(DNS)
レイノルズ数 $Re_\tau = u_\tau D / \nu$	895	360
時間刻み Δt	0.0002	0.00001
1frame 当り時間刻み	0.001	0.002

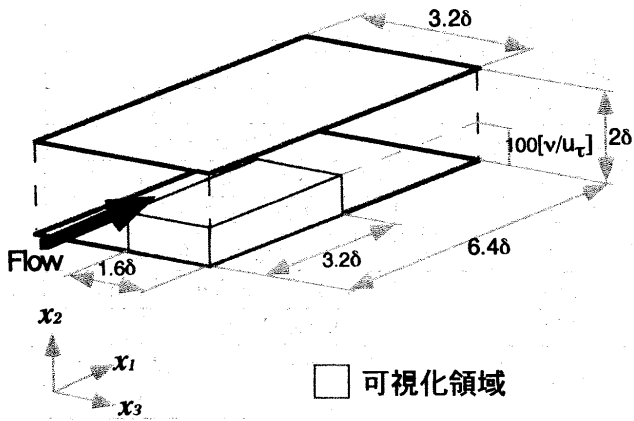


図 1: 計算及び可視化領域 (平行平板間乱流)

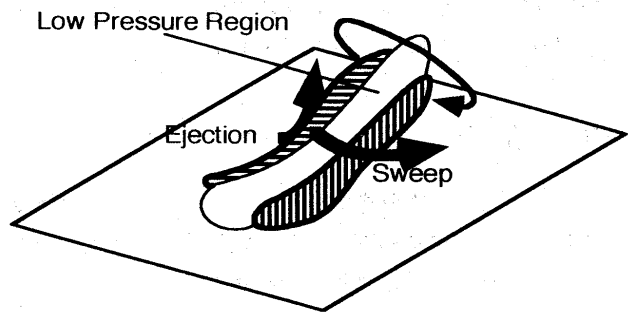


図 4: 平板上に見られる乱流構造

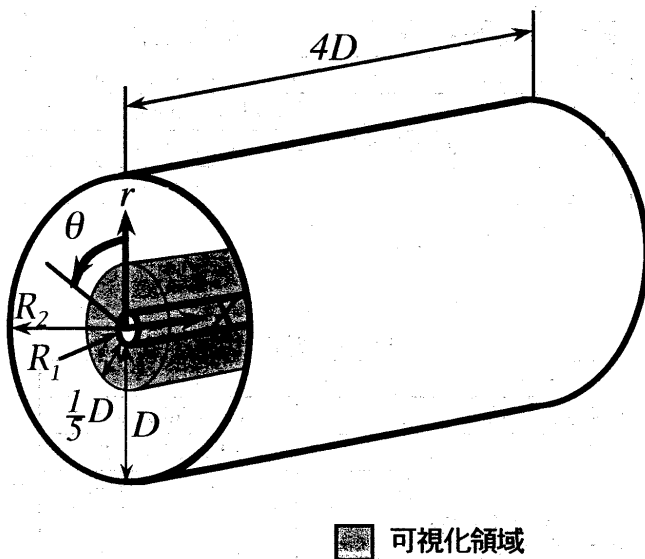


図 2: 計算及び可視化領域 (二重円管内乱流)

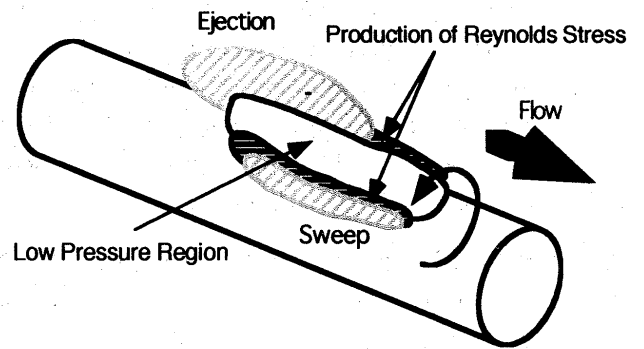


図 5: 内管付近に存在する低圧領域とレイノルズ応力の生成機構 $R_1/R_2=0.1$

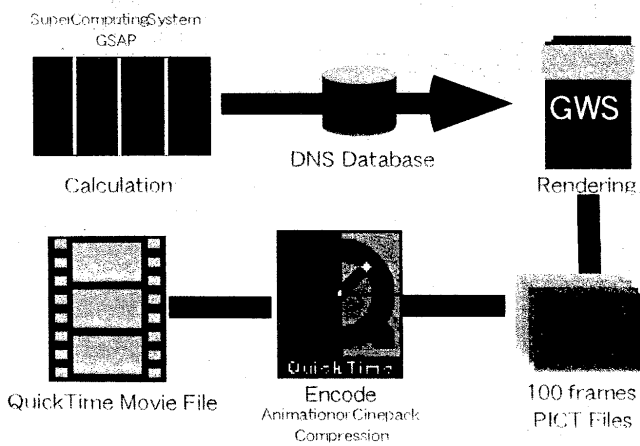


図 3: 動画化の手順

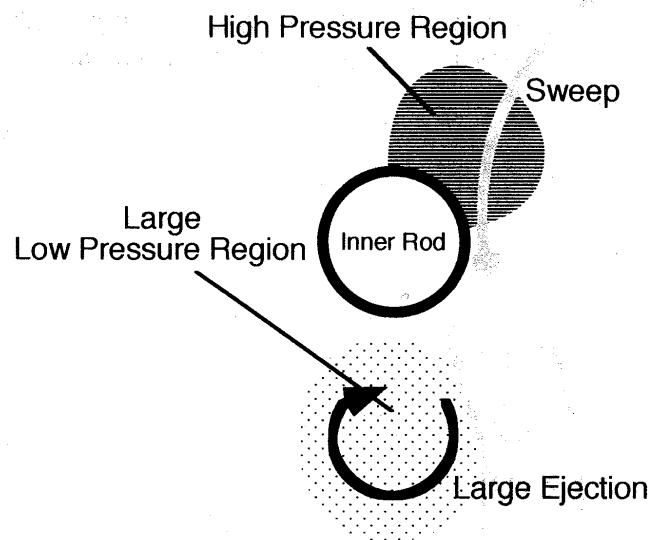


図 6: 内管付近に存在する低圧領域とレイノルズ応力の生成機構 $R_1/R_2=0.02$

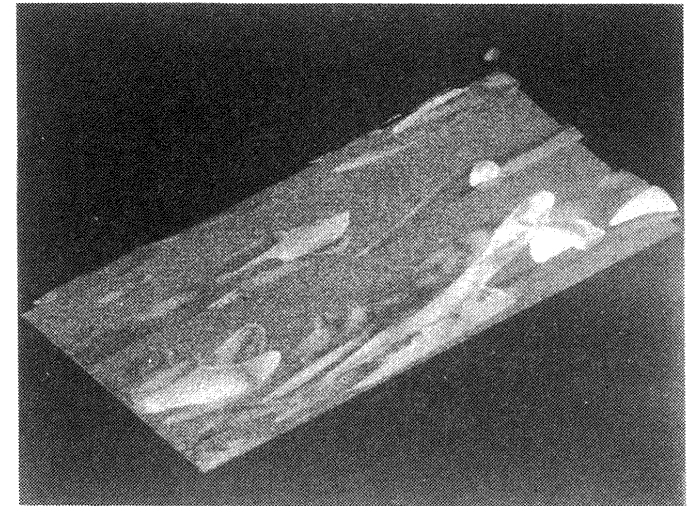
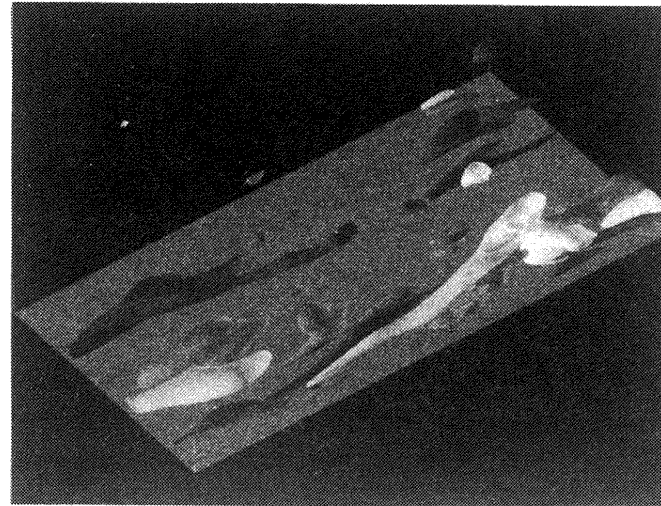
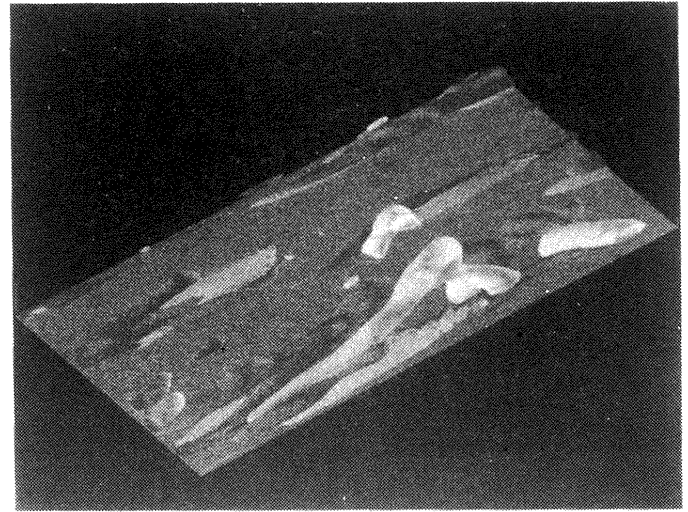
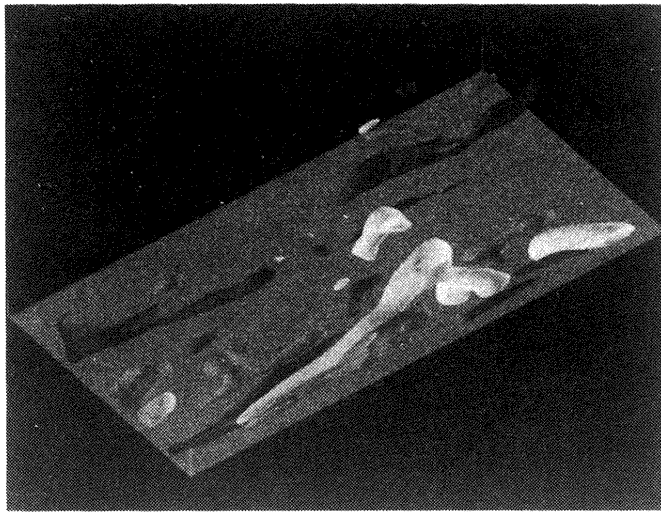
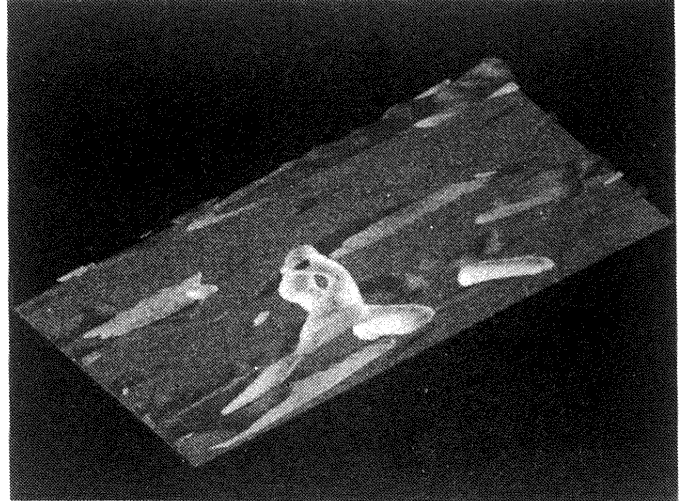
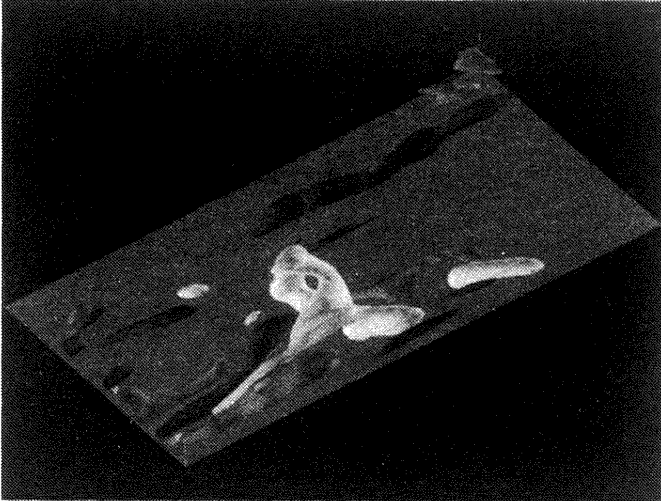


図 7: スイープとイジェクション
 (白: $p^+ = -3$, 淡灰: $(u^+v^+)_4 = -3$, 濃灰: $(u^+v^+)_2 = -3$)

図 8: 乱流エネルギーの生成と散逸
 (白: $p^+ = -3$, 濃灰: $Prod. = 0.3$, 淡灰: $Diss. = 0.3$)

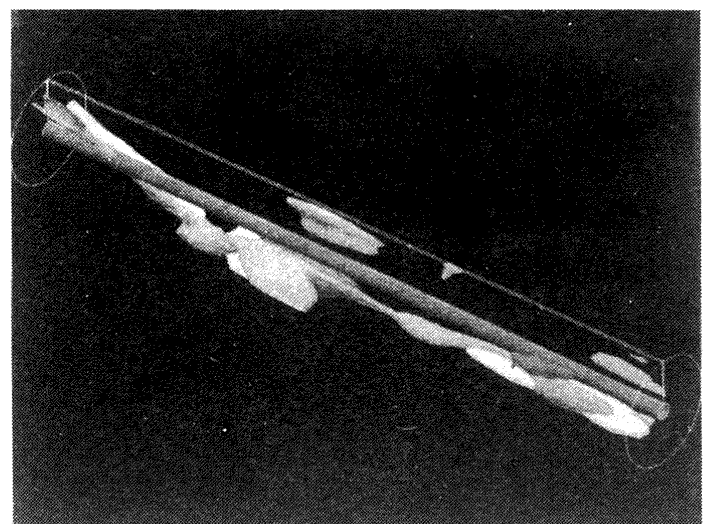
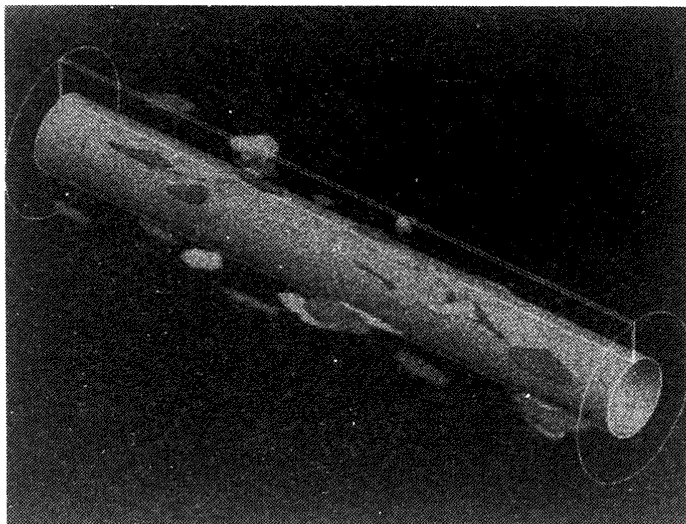
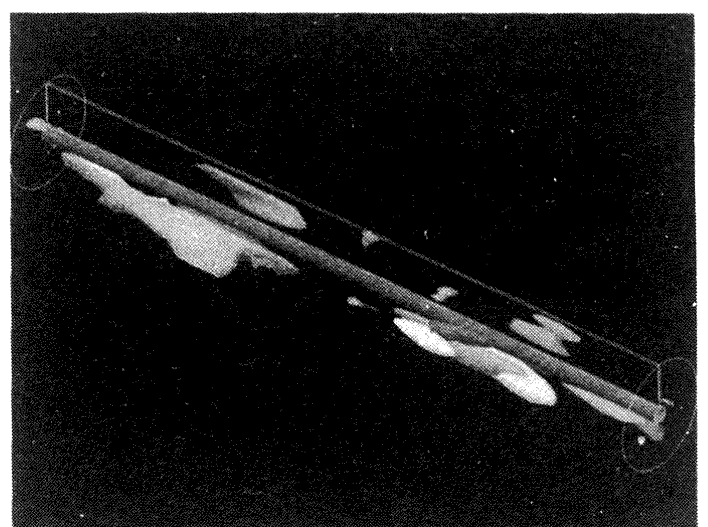
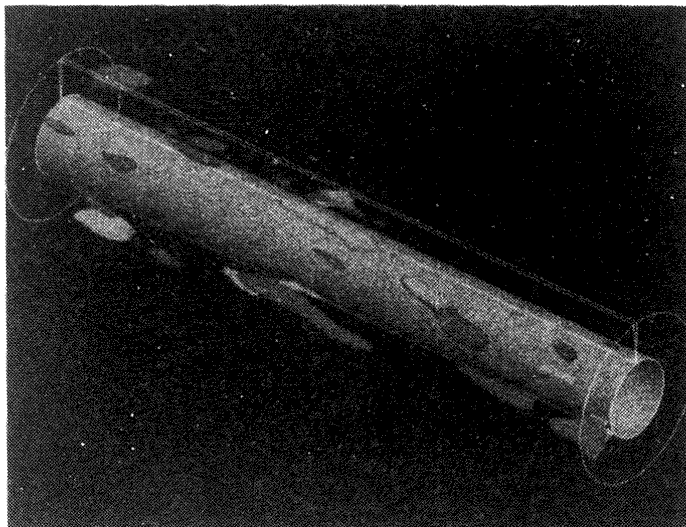
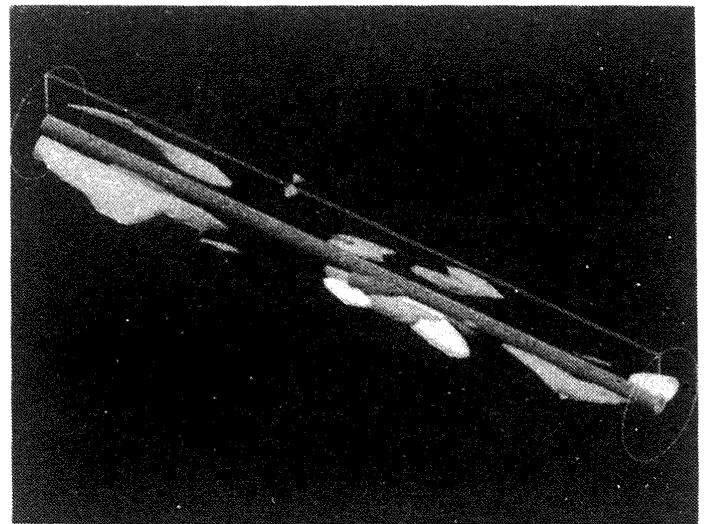
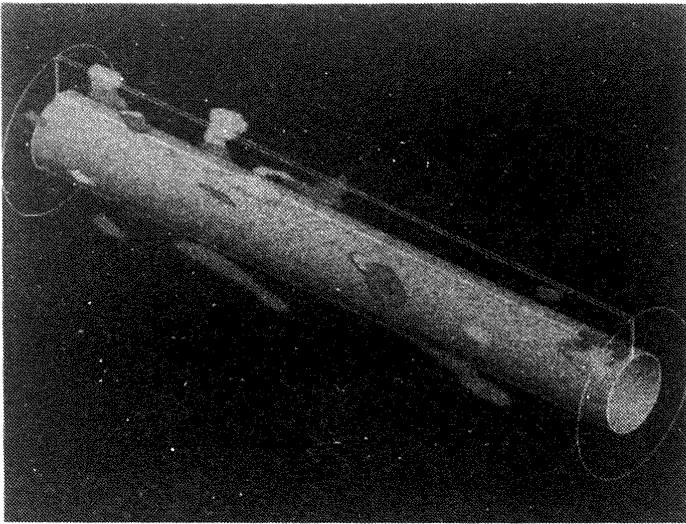


図 9: 低圧領域と渦度 $R_1/R_2=0.1 Re_\tau=895$
 ($p'=-3.5$, 濃灰: $\omega_x < 0.0$, 淡灰: $\omega_x > 0.0$)

図 10: スweepとイジェクション
 $R_1/R_2=0.02 Re_\tau=360$
 ($p'=-0.75$, 淡灰: $(u'v')_1=-1.0$, 濃灰: $(u'v')_2=-1.0$)