

Title	数値流体力学における 2 法を用いた渦の可視化手法の提案
Author(s)	埴田, 翔
Citation	
Issue Date	2010-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/8930
Rights	
Description	Supervisor:松澤 照男, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

数値流体力学における λ_2 法を用いた渦の可視化手
法の提案

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

埴田 翔

2010年3月

修士論文

数値流体力学における λ_2 法を用いた渦の可視化手法の提案

指導教官 松澤 照男教授

審査委員主査 松澤 照男 教授
審査委員 前園 涼 講師
審査委員 井口 寧 准教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

0810049 埴田 翔

提出年月: 2010 年 2 月

概要

近年、計算機性能の向上に伴い海洋流や気象のような大規模な数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics) 計算が行なわれるようになってきている。このような流れの現象においては、流れにおいて重要な特徴である渦が含まれている領域である渦領域が重要となる。しかし、大規模な計算結果全体を、現在使われてきたような一般的な可視化手法では可視化結果が複雑になり過ぎてしまう可能性がある。流れの現象を考えた場合、流れにおいて重要な特徴は渦である。本研究では、数値流体力学計算において、流れの現象を理解する為に重要な特徴である渦が含まれている領域である渦領域に注目し、時系列における渦領域の変化を明示的に示すような手法を提案 / 開発する。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	構成	2
第2章	一般的な可視化手法	4
2.1	Vector 表示による可視化	4
2.2	Streamline 表示による可視化	5
2.3	LIC 法による可視化	6
2.4	まとめ	6
第3章	可視化手法の提案	8
3.1	渦領域の抽出	8
3.1.1	λ_2 法	9
3.1.2	アルゴリズム	10
3.2	実験：Cavity Flow における渦領域の抽出	12
3.2.1	計算条件	12
3.2.2	可視化結果	13
3.3	提案手法	18
3.4	時系列可視化における渦領域の定義	18
3.5	アルゴリズム	18
3.6	実装	21
第4章	結果	22
4.1	実験：Cavity Flow での検討	22
4.1.1	計算条件	22
4.1.2	可視化結果	23
4.1.3	Cavity Flow レイノルズ数 $Re=100$ における可視化	24
4.1.4	Cavity Flow レイノルズ数 $Re=500$ における可視化	30
4.1.5	Cavity Flow レイノルズ数 $Re=1000$ における可視化	36
4.2	実験：Karman 渦列での検討	42
4.2.1	計算条件	42

4.2.2	可視化結果	43
4.3	まとめ	44
第5章	提案手法の応用方法の検討	46
5.1	差分の間隔についての検討	46
5.1.1	Cavity Flow 問題における検討	46
5.1.2	Karman 渦列における検討	51
5.2	まとめ：差分の間隔についての検討	55
5.3	重畳可視化について検討	56
5.3.1	Cavity Flow における重畳可視化	56
5.3.2	Karman 渦列における重畳可視化	58
5.4	まとめ	59
第6章	考察	61
第7章	結言	62
7.1	まとめ	62
7.2	展望	62

目 次

2.1	Vector による可視化	4
2.2	Streamline による可視化	5
2.3	LIC 法による可視化	6
3.1	process of lambda2	12
3.2	Cavity Flow モデル形状	13
3.3	Cavity Flow レイノルズ数 $Re=100$	14
3.4	Cavity Flow レイノルズ数 $Re=500$	15
3.5	Cavity Flow レイノルズ数 $Re=1000$	16
3.6	$Re=100$ 渦領域の可視化	16
3.7	$Re=500$ 渦領域の可視化	17
3.8	$Re=1000$ 渦領域の可視化	17
3.9	提案手法の処理工程	19
3.10	可視化の流れ	20
3.11	非構造格子の変換の際のデータの喪失	21
4.1	Moving Wall の非定常速度条件	22
4.2	Cavity $Re=100$ $t=0.1$ 提案手法による可視化	24
4.3	Cavity $Re=100$ $t=0.2$ 提案手法による可視化	25
4.4	Cavity $Re=100$ $t=0.3$ 提案手法による可視化	26
4.5	Cavity $Re=100$ $t=4.1$ 提案手法による可視化	27
4.6	Cavity $Re=100$ $t=4.2$ 提案手法による可視化	28
4.7	Cavity $Re=100$ $t=4.3$ 提案手法による可視化	29
4.8	Cavity $Re=500$ $t=0.1$ 提案手法による可視化	30
4.9	Cavity $Re=500$ $t=0.2$ 提案手法による可視化	31
4.10	Cavity $Re=500$ $t=0.3$ 提案手法による可視化	32
4.11	Cavity $Re=500$ $t=4.1$ 提案手法による可視化	33
4.12	Cavity $Re=500$ $t=4.2$ 提案手法による可視化	34
4.13	Cavity $Re=500$ $t=4.3$ 提案手法による可視化	35
4.14	Cavity $Re=1000$ $t=0.1$ 提案手法による可視化	36
4.15	Cavity $Re=1000$ $t=0.2$ 提案手法による可視化	37
4.16	Cavity $Re=1000$ $t=0.3$ 提案手法による可視化	38

4.17	Cavity Re1000 t=4.1 提案手法による可視化	39
4.18	Cavity Re1000 t=4.2 提案手法による可視化	40
4.19	Cavity Re1000 t=4.3 提案手法による可視化	41
4.20	Karman 渦列 モデル形状	42
4.21	Karman 渦列 Re500 t=300.0	43
4.22	Karman 渦列 Re500 t=300.1	44
4.23	Karman 渦列 Re500 t=300.2	45
5.1	Cavity Flow 問題 レイノルズ数 Re1000 $\Delta t=0.01$	47
5.2	Cavity Flow 問題 レイノルズ数 Re1000 $\Delta t=0.02$	48
5.3	Cavity Flow 問題 レイノルズ数 Re1000 $\Delta t=0.03$	49
5.4	Cavity Flow 問題 レイノルズ数 Re1000 $\Delta t=0.04$	49
5.5	Cavity Flow 問題 レイノルズ数 Re1000 $\Delta t=0.05$	50
5.6	Karman 渦列 $\Delta t=0.1$	51
5.7	Karman 渦列 $\Delta t=0.5$	52
5.8	Karman 渦列 $\Delta t=1.0$	53
5.9	Karman 渦列 $\Delta t=25$	53
5.10	Karman 渦列 $\Delta t=100$	54
5.11	Cavity Flow Vector との重畳可視化	56
5.12	Cavity FLow LIC 法との重畳可視化	57
5.13	Karman 渦列 Vector との重畳可視化	58
5.14	Karman 渦列 LIC 法との重畳可視化	59

表 目 次

3.1	計算条件	13
3.2	渦領域の定義	18
4.1	Cavity Flow 計算条件	23
4.2	Karman 渦列 計算条件	42

第1章 はじめに

1.1 背景

計算機性能の向上によって、近年、大規模な数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics) 解析が行われている。その結果、計算結果のデータサイズも非常に大規模になっている。大規模な数値流体力学計算の例として、海洋流や気象などのシミュレーションがあげられる。数値流体力学において、流れの現象を理解するためには、流れの現象において重要な特徴は渦である。先にあげたような、大規模な流れの現象を観察する際に、重要となるのが渦が含まれる領域である渦領域である。大規模な計算結果を可視化する場合、現在用いられているような一般的な可視化手法では、可視化のための表示オブジェクトが増加するために情報量が多くなり過ぎて、ユーザーが流れの現象を観察しづらい状態となってしまう。また、非常に大規模な計算結果になると、計算結果をそのまま可視化することが難しくなっている。非常に大規模な計算結果の可視化を行なう場合、一般的には格子点を間引くことでデータサイズを小さくして可視化を行う方法が使用される。しかし、データサイズを小さくするために、格子点を均一の間隔で間引きを行った場合に、間引きの割合が大きいと、流れにおいて重要な特徴を持った格子点まで間引かれてしまいう可能性がある。その結果、流れの現象において重要な特徴である渦が失われる可能性がある。したがって、流れにおいて重要な特徴である渦を喪失させないように可視化を行なう必要がある。そのため、渦が含まれている領域である渦領域に注目する。流れの特徴である渦を喪失させないために、渦領域に注目することとする。

数値流体力学における流れの可視化手法においては、Vector や Streamline, LIC 法 (Line Integral Convolution method) が広く用いられている。これら可視化手法は、ベクトル表示では流れにおける渦の強さや方向、流速線では流れの様相を見る事ができる。また、LIC 法では渦の中心を視覚的に表現することができる。

流れの強さや方向、渦の中心などといった流れの詳細を見るにはこれらの方法は、非常に有効である。しかし、渦領域を捉えようとした場合、これらの方法では経験を背景に視覚的な判断基準に頼ることになり、正確な渦領域を把握することは困難である。

一般的な可視化手法では、経験などの面から主幹的に渦の境界をある程度定めることができるかもしれないが、定性的に渦の境界を決定することは難しい。したがって、何らかの渦の境界の抽出手法を用いて渦の境界を明かにする必要があると考える。

渦領域の抽出手法について、研究が行われており [5], いくつかの手法が開発されている。一般的な方法の一つに Vorticity Magnitude を用いた渦の抽出手法がある。この方法

は、渦の強さを判定するのに良く使われる渦度の絶対値の大きさから、任意的にある閾値を定め、その閾値より大きい領域を渦領域として定義するというものである。

しかし、この方法では任意の閾値を人為的に決める必要があるため、渦領域の抽出は、一意的に渦領域を捉えることは困難である。したがって、閾値に左右されずに一意的に渦領域を抽出できるような抽出手法を用いる必要がある。

また、非定常計算や時系列計算における計算結果の可視化には、これまではアニメーションなどの方法が用いられてきた。しかし、計算機性能の向上により、複雑な形状や大規模な計算が行なわれるようになったため、これまで用いられてきた可視化手法でな流れの現象を捉えることが難しくなっていると考えている。

先にも述べたように、大規模な流れや複雑な流れにおいては、渦領域が非常に重要となってくる。そこで、時系列において流れの重要な特徴である渦領域に注目し可視化を行なう必要があると考える。

時系列における流れの現象を考えた場合、流れにおける渦の時系列における変化は主に、“生成”、“消滅”、“継続”、“結合”などであり、これらの状態を的確に表現する必要があると考えた。

1.2 目的

大規模や複雑な形状における数値流体力学計算の計算結果をうまく可視化できるような可視化手法が望まれている。大規模や複雑な形状での可視化では、これまで用いられてきたような Vector や LIC 法などといった一般的な手法では可視化結果が複雑になり過ぎて、流れの現象をうまく捉えることができないと考えられる。本研究の目的として、数値流体力学計算における時系列の計算結果において渦領域の変化を明示的に示すことが出来るような手法を開発を行なう。また、時系列の間隔を変化させた場合の本提案手法を適用した場合の可視化結果について検討を行ない、その結果を考察する。さらに、一般的な可視化手法と重畳して表現することにより、時系列における渦領域の変化と渦領域の内部の流れの詳細を表現することで、流れの重要な特徴である渦の変化を観察しやすいような可視化手法を目指す。

1.3 構成

1章では本研究の背景を説明し、その後目的について述べた。2章では数値流体力学における流れの可視化に広く用いられている、Vector, Streamline, LIC 法などといった一般的な可視化手法についての検討を述べる。3章では、 λ_2 法についてアルゴリズム及び数値計算結果での検討結果を述べたのち提案手法について述べる。4章では一般的な流れ問題である Cavity Flow 問題、Karman 渦列の数値計算結果に対して、提案手法を用いて可視化した結果について検討を行なった結果について述べる。5章では、提案手法を適用する際の

差分の間隔について検討を行なう。さらに、提案手法と一般的な可視化手法を重畳して使用した場合の可視化結果について検討を行なった結果について述べる。6章では本研究で得られた知見に対する考察を記す。7章では本研究で得られた知見を要約し今後の発展について述べる。

第2章 一般的な可視化手法

本研究においては可視化手法を提案するにあたり, Vector, Streamline, LIC 法などといった一般的な可視化手法について検討を行ない. 各手法が持っている利点と欠点を明確にする. 一般的な可視化手法を適用した可視化の例としてレイノルズ数 $Re=1000$ の解析結果に対して, それぞれの可視化手法を適用した結果を図に示す. Cavity Flow とは上部の壁面が動くことにより, 内部の流体が動く壁面に引っ張られ, 内部に渦が出来るような流れである. 一般的な可視化手法について議論する為, Cavity Flow の詳細については割愛する.

2.1 Vector 表示による可視化

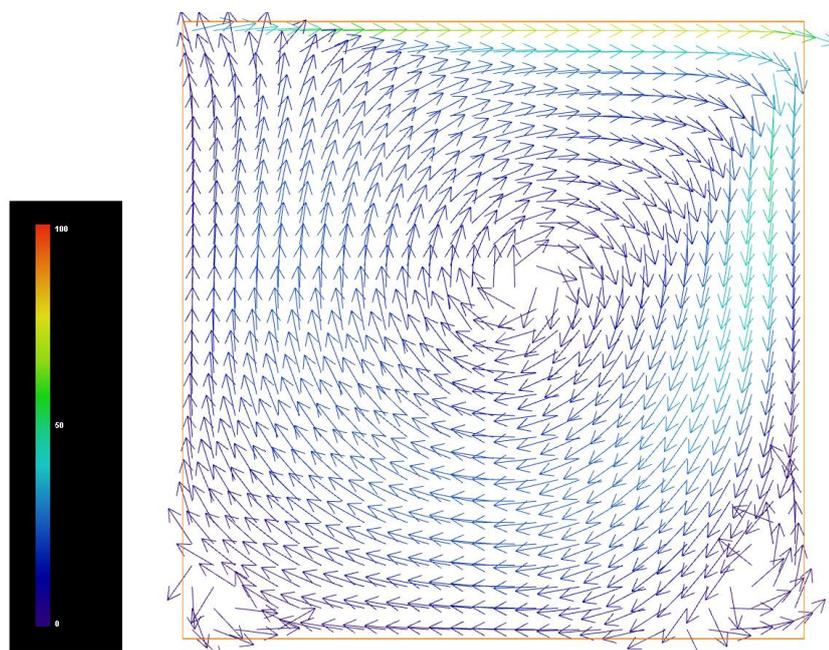


図 2.1: Vector による可視化

図 2.1 は Vector で可視化した例である. Vector 表示は流れの方向や強さなどを Vector でみることができるが, 数値流体力学計算において, 流れの詳細を見るのには非常に有効な手法である. また, 渦についても Vector の方向や並びかたなどである程度, 観察するこ

とができる。しかし、大規模な計算や複雑な形状での数値流体力学計算を行なった場合、Vector による可視化では、情報量が多過ぎ、渦の発生や消滅などの重要な流れの現象を観察することは困難であると考えられる。また、この可視化手法では渦の境界については、経験則など的人為的な評価に頼らざるを得ず、定性的に渦領域の境界を表現することは困難である。

2.2 Streamline 表示による可視化

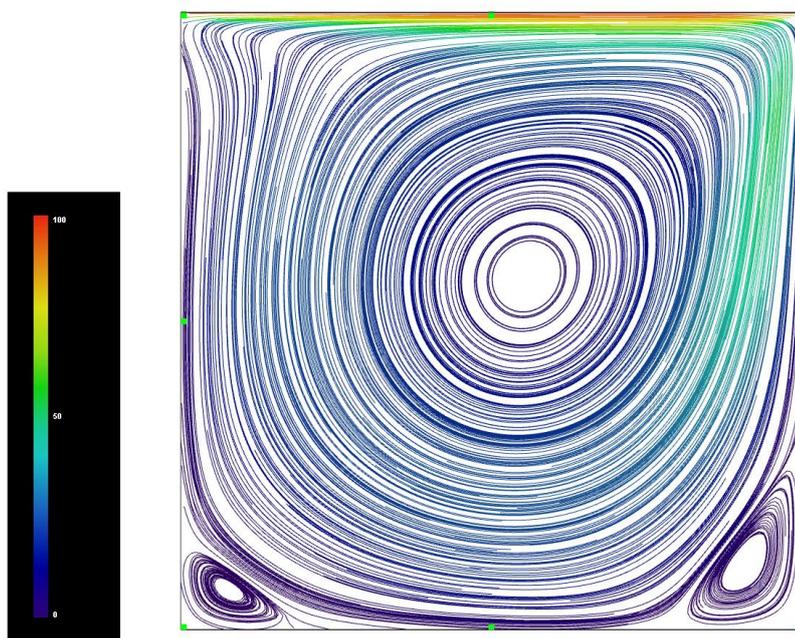


図 2.2: Streamline による可視化

図 2.2 は Streamline で可視化した例である。Streamline 表示では、流れの現象において流れの様相をみることができる。また、Velocity-Magnitudeなどをカラーマッピングすることで、流れの強さなども表現することが可能である。流れの現象を観察する場合において、どのような流れなのかを把握する為には非常に有効な手法である。また、渦についても Streamline の旋回等の様相から渦と思われる部分を見出すことが可能である。しかし、渦の回転の方向に回転しているか渦の中心がどこにあるかを表現することはこの手法では難しい。また、この手法でもある程度の観察者の経験的な観点から判別することは、可能であるが、Vector での可視化と同様に明確な渦領域の境界を判別することは困難である。

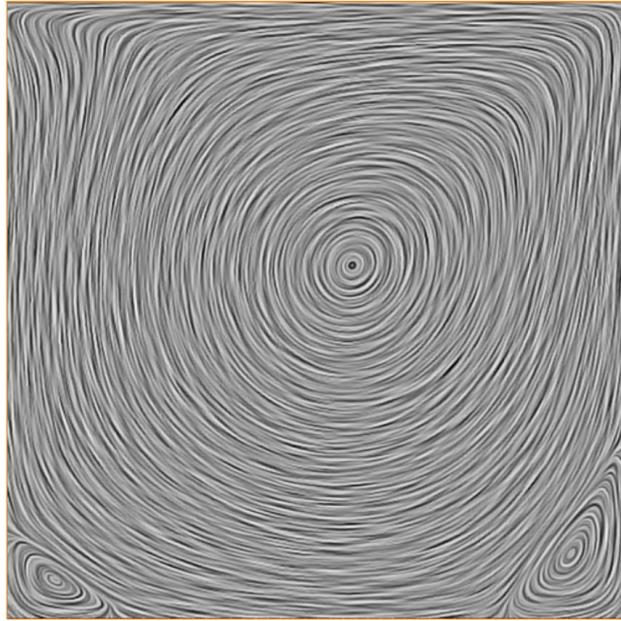


図 2.3: LIC 法による可視化

2.3 LIC 法による可視化

図 2.3 は LIC 法で可視化した例である。LIC 法は、速度場に対してホワイトノイズフィルタを挟むことで、モノクロの濃淡によるテクスチャを表現する。そのテクスチャによって渦の中心を表現することができる。しかし、この手法では渦の強さや方向などを見ることは困難である。また、渦の領域についても観察者の経験などを背景とした主幹的な判定に頼らざるを得ず、定性的な渦の境界を判別することは難しい。

2.4 まとめ

これらの一般的な可視化手法では、流れの強さや方向、渦の中心など流れの詳細を観察するには良い手法であるが、渦の境界を定性的に捉えることはできず、そのため渦領域を正確に捉えることが困難である。

n 大規模数値流体力学計算結果の可視化を行なう場合、計算結果も非常に大規模になるため、可視化する領域が広過ぎるため、これらの一般的な可視化手法を用いたとしても、流れの現象の特徴をうまく捉えて観察することは困難であると考えられる。

そこで、数値流体力学における流れにおいて重要な特徴である渦が含まれる領域である渦領域に注目した可視化手法が必要になると考える。

したがって、数値流体力学計算によって得られた計算結果から、何らかの手法を用いて渦領域を計算し、渦領域の抽出を行なう。抽出した領域に注目することで、流れの現象に

において重要な渦に注目することで、流れの現象における観察する領域を限定することができる。その結果、大規模や複雑な形状での数値流体力学計算の計算結果を可視化する場合に、流れの現象において特徴のある部分つまり渦に注目することで、流れの現象の理解を助けるような可視化手法の提案を行なった。

第3章 可視化手法の提案

3.1 渦領域の抽出

大規模な数値流体力学計算の結果を可視化する場合、流れにおける重要な特徴である渦に注目して可視化を行なうことがある。したがって、数値流体力学の解析結果から渦領域を抽出する必要がある。一般的に渦を評価するために広く用いられている手法に、渦度の大きさを評価する Vorticity Magnitude がある。渦の強さを評価するには良い手法である。しかし、この手法を渦の抽出に用いる場合には、渦を判定するために、一定以上の渦度の値を持った領域を渦領域とするといったような閾値を設定する必要がある。また、渦の抽出手法には、他にもいくつかの方法があるが、渦を判定するために、人為的に閾値を設定したければならない方法が多い。渦のなるべく定性的に捉える為には、閾値などを設定する必要がない方法が望ましいと考える。また、他の渦領域の定義としては、Chong et al.(1990) により提案された Δ -criterion や Hunt et al.(1988) により提案された Q-criterion などがある。これらの方法では、渦度を用いた場合のような閾値の問題は解消されている。

Hunt et al. の Q-criterion

$$Q \sim \frac{1}{2}(u_{i,i}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = -\frac{1}{2}u_{i,j}u_{j,i} = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) > 0 \quad (3.1)$$

- u :速度
- S : ∇u の対称成分
- Ω : ∇u の非対称成分
- Q : ∇u の第 2 不変量

ここで、 S は ∇u の対称成分であり、 Ω は非対称成分である。圧力の値が周囲より低く ∇u の二番目の不変量 Q が正の場合渦であると定義される。

また、Chong et al. の Δ -criterion

$$\Delta = \left(\frac{Q}{3}\right)^3 + \left(\frac{R}{2}\right)^2 > 0 \quad (3.2)$$

- u :速度
- R : $Det(u_{i,j})$
- Q : ∇u の第 2 不変量

ここで、 Q と R は ∇u の不変量であり、 Q は式 3.1 より与えられる。また、 $R \sim \text{Det}(U_{i,j})$ である。 ∇u の固有値が複素数であり、Streamline が螺旋状になっているところを渦領域として定義している。

しかし、Jeong et al. によると、 Q -criterion は強い外部応力による渦の場合、渦の検出が不正確になる可能性があることが指摘されており、 Δ -criterion についても渦が、正確に抽出出来ない場合があることが示されている [1]。

λ_2 法は高速から低速な流れにおいても安定して渦領域を抽出可能なことが Jeong et al. によって示されている。また、閾値などを設定しなくても一意的に渦領域の抽出することができる。これらの理由から、本研究では、渦領域の抽出手法として Jeong et.al によって開発された λ_2 法を渦領域の抽出手法として選択した。

したがって、Jeong et al. により提案された λ_2 法 [1] を渦領域の抽出手法として用いる。以下に λ_2 法の概要を示す。

3.1.1 λ_2 法

一般的な渦の評価手法である渦度などでは、速度境界層とせん断速度が大きく、渦度が大きく評価されるため、渦度では領域抽出が難しいという問題があった。また、圧力値は渦領域を決定する基準として十分ではないなどの課題があったが、 λ_2 法ではこの課題が解消されている。

λ_2 は Jeong et. al によって開発された渦領域を判別するために手法である。この手法は最低圧力を渦領域の一般的な判定基準として用いようとした場合におこる最低圧力と渦の存在の間に起こる不一致に注目することから、発想を得ている。この最低圧力と渦の存在の間に起こる不一致は、Unsteady straing と Viscous effects によるものである。例えば Unsteady irrotational straing において、渦ではない領域においても圧力値が最低の領域が存在することや、渦領域においても Viscous effects により最低圧力ではない場合があることである。

Hessian 圧力においては、領域での圧力極値の情報が含まれる為、Hessian 圧力に関する方程式に注目する。その結果、Navier-Stokes 方程式から 3.3 の式を得る。

$$a_{i,j} = -\frac{1}{\rho} p_{,ij} + \nu u_{i,jkk}. \quad (3.3)$$

- u : 速度
- p : 圧力
- ρ : 密度
- ν : 動粘性係数

ここで、 $a_{i,j}$ は加速勾配であり、Hessian 圧力 ($p_{,ij}$) は対称である。また、 $a_{i,j}$ は 3.4 に示すように対称成分と非対称成分に分けることができる。

$$a_{i,j} = \left[\frac{DS_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}\Omega_{kj} + S_{ik}S_{kj} \right] + \left[\frac{D\Omega_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}S_{kj} + S_{ik}\Omega_{kj} \right] \quad (3.4)$$

- S :歪みテンソル (対称速度テンソル)
- Ω :回転テンソル (非対称速度テンソル)
- t :時間

対称成分

$$\left[\frac{DS_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}\Omega_{kj} + S_{ik}S_{kj} \right] \quad (3.5)$$

非対称成分

$$\left[\frac{D\Omega_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}S_{kj} + S_{ik}\Omega_{kj} \right] \quad (3.6)$$

3.6 は渦度移送方程式である.

$$\left[\frac{DS_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}\Omega_{kj} + S_{ik}S_{kj} \right] = -\frac{1}{\rho}p_{,ij} \quad (3.7)$$

ある面における圧力最小には tensor p_{ij} の 2 つの固有値が正である必要がある. したがって, ここでは式 3.7 の左辺の第 3 項及び第 4 項について考える. 第 1 項は非定常の回転応力であり, 第 2 項は粘性応力であるそれらの寄与については考えない. ここでは, 渦運動と渦領域による圧力最小を決定するために, $S^2 + \Omega^2$ のみを考慮すればよい. また, $S^2 + \Omega^2$ は対称であり, 実数の固有値のみを持つ.

$S^2 + \Omega^2$ の固有値を計算し, 3 つの固有値が算出される. さらに, 3 つの固有値を降順に $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ と並べ, 且つ λ_2 が負の場合, その領域は渦領域として定義される. 上記の条件に沿う負の値であれば渦領域であり, λ_2 の値の大きさに関係しない.

$$\text{tran}(S^2 + \Omega^2) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (3.8)$$

渦の評価方法として代表的な渦度を用いて渦領域の抽出を行なおうとした場合, どこまでを渦領域とするかを定める為に, 渦度の大きさの閾値をきめる必要がある. この閾値は人為的に決定されるため, 渦領域を定性的に定めることは困難である. λ_2 法では, 閾値などを設定しなくても一意的に渦領域を抽出できる.

- 1 境界層の排除をできる.
- 2 圧力値による判定のミスの領域を排除できる.

3.1.2 アルゴリズム

J.Jeong et. al の λ_2 法のアルゴリズムについて述べる.

速度のヤコビアン

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} J^{-T} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

対称速度テンソル

$$S = \frac{1}{2}(J^T + J^{-T}) \quad (3.10)$$

非対称速度テンソル

$$\Omega = \frac{1}{2}(J^T - J^{-T}) \quad (3.11)$$

λ_2 法の概要については、先の項で述べたとおりである。したがって、変形の率(歪みの率)のテンソル S とし、その非対称部分である回転テンソル Ω に分解し $S^2 + \Omega^2$ からの寄与すればよい。対称速度テンソル S 及ば式 3.10 のようにヤコビアンを用いて表すことができ、非対称速度テンソル Ω についても同様にヤコビアンを用いて式 3.11 のように表すことができる。 $S^2 + \Omega^2$ は実数かつ対称であり、式 3.8 のように実数の固有値をもつ。

λ_2 法の処理の流れについては、図 3.1 に実装のアルゴリズムを示す。

- 1 数値流体力学計算を行ない計算結果を用意する。
- 2 計算結果の各節点において速度勾配を計算し、速度ヤコビアン J および J^T を求める。
- 3 速度テンソルより対称速度テンソル S と非対称速度テンソル Ω を計算する。
- 4 $|S^2 + \Omega^2|$ の固有値を計算する。
- 5 計算結果をファイルに出力する。

上記のようなプロセスにより、 λ_2 法の計算を行なっている。また、速度ヤコビアンを求める際の速度勾配の計算は式 3.12 に示すように、中心差分を用いて計算している。また、壁付近の境界については、式 3.13 のように片側 1 次差分を用いて計算している。

中心差分

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2dx} \quad (3.12)$$

片側一時差分

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{n+1} - u_n}{dx} \quad (3.13)$$

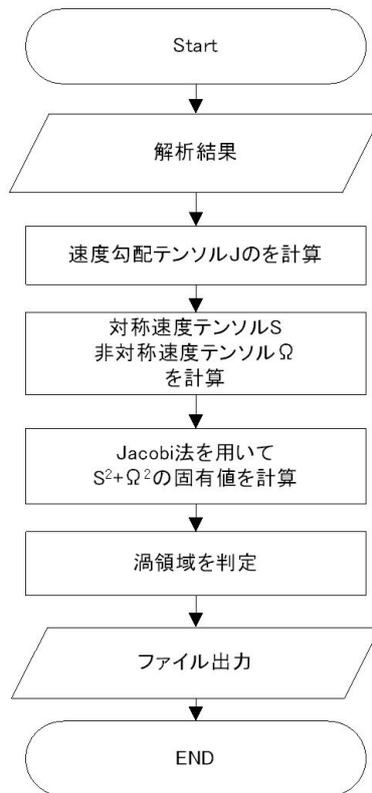


図 3.1: process of lambda2

$|S^2 + \Omega^2|$ の固有値の計算については、ヤコビ法を用いて固有値を計算している。また、先ほども記したように、この際に算出される固有値、 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ であり、 $\lambda_2 \neq 0$ の時、渦領域である。

計算結果に関しては UCD 形式でファイルに出力している。

3.2 実験：Cavity Flow における渦領域の抽出

λ_2 法の実装を行ない。実装の検証として、Cavity Flow を対象に渦領域を抽出した可視化した結果について述べる。

Cavity Flow 問題を対象に、本可視化手法を適用した結果を示す。Cavity Flow とは、図 3.2 に示すように、上部の壁面が動くことで、立方体内部に渦が出来るような流れである。

3.2.1 計算条件

Cavity Flow 問題の計算条件を示す。形状の構築およびメッシュの生成には ANSYS 社製 Gambit2.4.6 を用いた。図 3.2 に示すような $51 \times 51 \times 51$ の立方体の形状を構築した。メッ

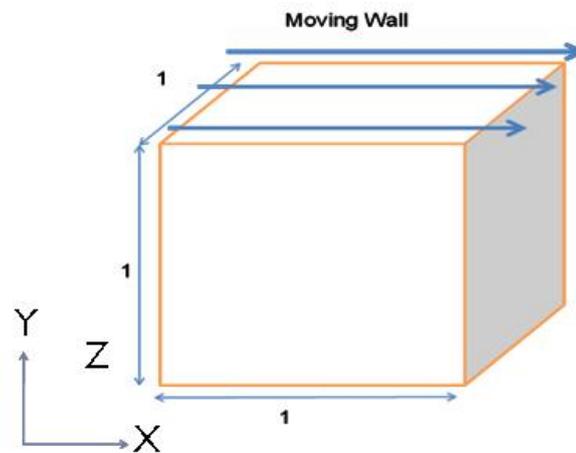


図 3.2: Cavity Flow モデル形状

表 3.1: 計算条件

形状	51x51x51
mesh 数	132651

シュ数は 132651 である。

また、流れの解析には汎用熱流体 Solver である ANSYS 社製 Fluent 6.3.26 を用いて計算を行なっている。また、可視化ツールとしては、Mercury 社製 AVIZO6.0 を用いて可視化を行なっている。

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (3.14)$$

ここで Re はレイノルズ数、 U は特性速度、 L は代表長さ、 ν は粘性係数を示している。

レイノルズ数に関しては、式 3.14 を用いてレイノルズ数を計算している。ここで、代表速度 U は Moving wall である上部壁面の移動速度である。その他の壁面は上部 Moving wall の移動方向に対して平行な側面辺を slip 境界として境界条件を与え、下面及びその他の辺については、noslip として境界条件を与えている。また、代表長さ L は立方体の辺の長さとしている。さらに、粘性係数は、0.1 として与えている。

3.2.2 可視化結果

Cavity Flow のレイノルズ数 $Re=100$, $Re=500$, $Re=1000$ を対象に実装した λ_2 法を用いて渦領域を抽出した。また、 λ_2 法により抽出された領域が適正であるか、検討を行なった。

Reynolds 数 $Re=100, 500, 1000$ について, Cavity Flow 問題を対象に数値流体力学計算を行った. 図 3.3 から図 3.5 に $Re=100, Re=500, Re=1000$ における Cavity Flow 問題の計算結果を中心断面において Streamline で可視化した結果を示す. Ghia et.al の計算による Cavity Flow[6] 問題における同一のレイノルズ数における渦の位置が一致しており, 計算結果は正しいと考えられる.

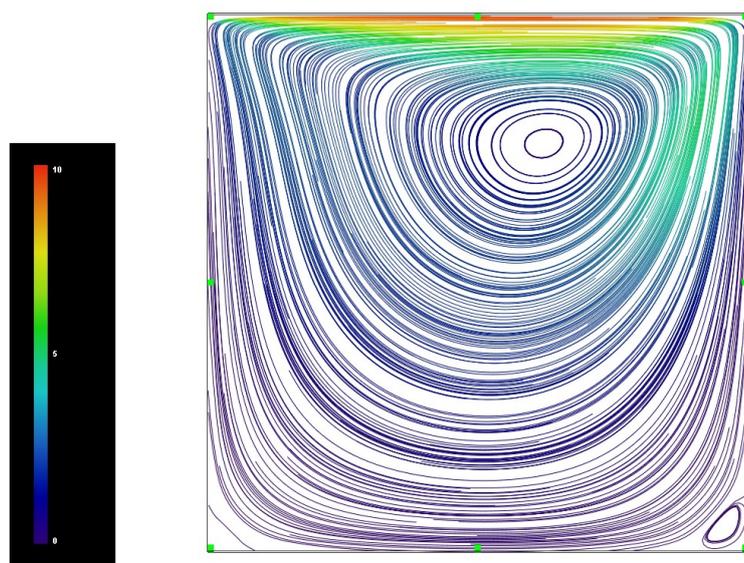


図 3.3: Cavity Flow レイノルズ数 $Re=100$

図 3.3 はレイノルズ $Re=100$ における Cavity Flow を Streamline で可視化した結果である. この可視化結果から渦が中心付近および右下部付近にあることがわかる. しかし, どこまでが渦であるかという渦の境界というものを正確に判定することは困難である.

図 3.4 はレイノルズ数 $Re=500$ における Cavity Flow を Streamline で可視化した結果である. この可視化結果から渦が中心付近および右下付近にあることがわかる. また, 図 3.3 と比較して, 中心付近の渦が下方方向に移動しており, 右下部の渦も大きくなっていることがわかる. しかし, どこまでが渦であるかという渦の境界を観測者の経験的な背景をもとに視覚的に判定することは出来るかも知れないが, 正確に渦の境界を知ることは困難である.

図 3.5 はレイノルズ数 $Re=1000$ における Cavity Flow を Streamline で可視化した結果である. この可視化結果から渦が中心付近および右下及び左下部に渦の存在を確認することができる. 図 3.4 と比較して, 中心付近の渦がさらに下方方向に移動していることがわかる. また, 左下部に渦領域が新たに発生しており, 右下部の渦も大きくなっていることがわかる. しかし, いずれについても渦の境界を経験をもとに視覚的に評価することはできるものの, 観察者によって, 渦の境界に異なり, 定性的に渦の境界を判定することは困難である.

それぞれの計算結果に実装した λ_2 法を適用し, 渦領域を抽出した可視化結果を示す.

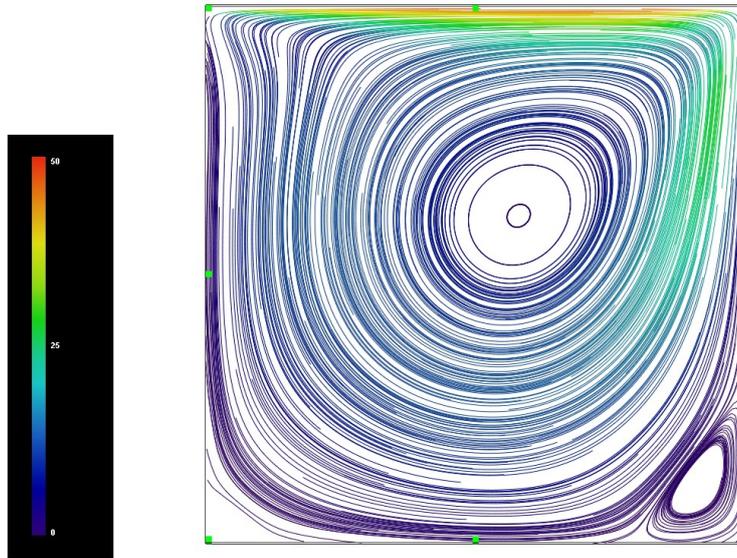


図 3.4: Cavity Flow レイノルズ数 $Re=500$

図 3.6 はレイノルズ $Re=100$ の Cavity Flow について、 λ_2 法を適用することで渦領域を抽出した結果である。白色の領域は渦領域を示しており、黒色の領域は非渦領域である。中心に大きな渦領域があり、右下部にも小さな渦領域が抽出されていることがわかる。

図 3.7 はレイノルズ数 $Re=500$ の Cavity Flow について、 λ_2 法を適用することで渦領域を抽出した結果である。白色の渦領域が中心付近に抽出されており、やや小さめの渦領域が右下部および左下部にも抽出されていることがわかる。また、図 3.6 と比較して、全体的に渦領域が拡大していることがわかる。これは、レイノルズ数を考慮しても妥当な結果であり適切に渦領域が抽出されていると考えられる。

図 3.8 はレイノルズ数 $Re=1000$ の Cavity Flow について、 λ_2 法を適用することで渦領域を抽出した結果である。中心付近に大きな渦領域が白色の領域として抽出されていることがわかる。また、右下部および左下部にも渦領域が抽出されており、白色の領域として示されていることがわかる。また、この結果において黒色の領域は非渦領域である。

図 3.6, 図 3.7 および図 3.8 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$, $Re=500$, $Re=1000$ の流れにおける渦領域を抽出し、その領域を可視化した結果である。

図 3.3 から図 3.5 で示した streamline による可視化では、観察者の経験を背景とした視覚的判断からある程度、渦領域を判定することができる。しかし、このような判定だと観察者により判定が異なり、正確に流れにおける渦領域を判定することは困難である。

図 3.6 から図 3.8 は λ_2 法を適用した可視化結果である。この可視化結果では白色の領域は渦領域であり、黒色の領域は非渦領域である。このように、渦領域と非渦領域を λ_2 法を用いることで、定性的に渦領域の抽出ができることを確認した。

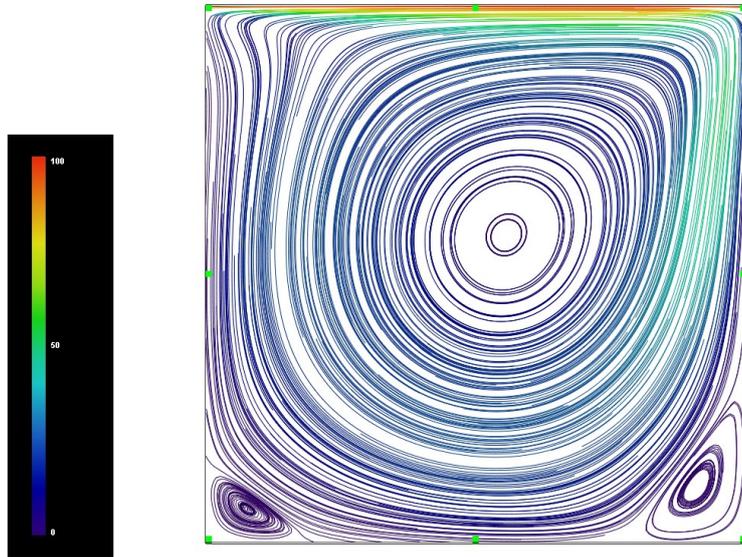


図 3.5: Cavity Flow レイノルズ数 $Re=1000$

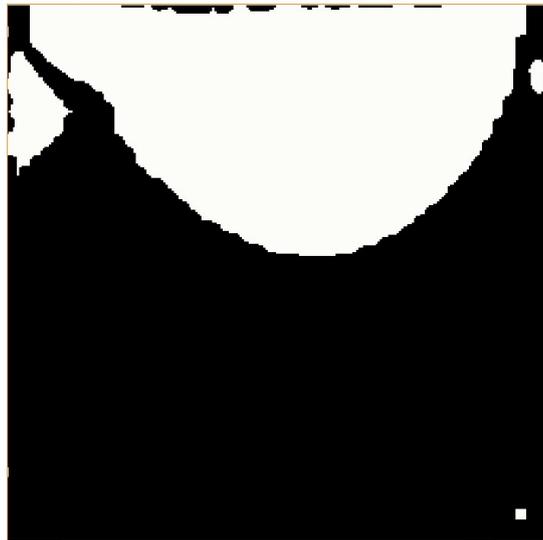


図 3.6: $Re100$ 渦領域の可視化

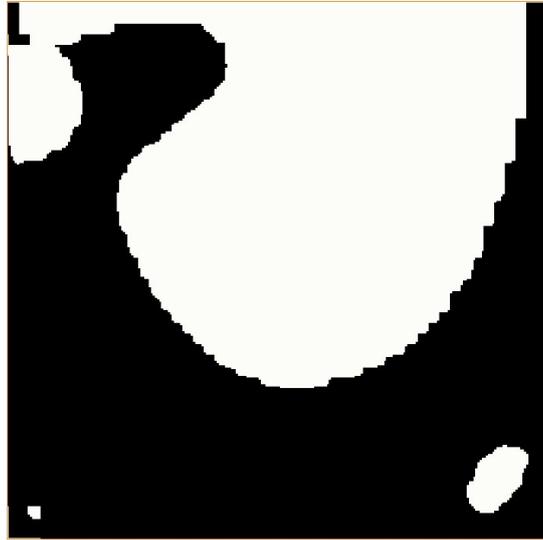


図 3.7: Re500 渦領域の可視化

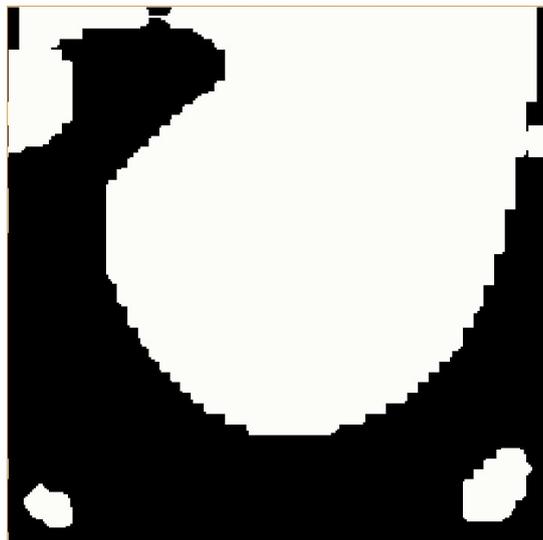


図 3.8: Re1000 渦領域の可視化

表 3.2: 渦領域の定義

		T	
		渦領域	非渦領域
T-1	渦領域	継続	消滅
	非渦領域	生成	非渦

3.3 提案手法

大規模や複雑な数値流体力学計算においては、先に述べたように流れ全体を可視化するのは困難である。また、時系列で変化する数値流体力学解析において、流れの特等である渦領域の変化を明示的に表現することで、流れの現象をわかりやすく表現できると考えた。したがって、時系列における計算において変化する渦領域を明示的に表現する可視化手法について提案を行なった。本章では提案した可視化手法について記す。

2法を用いて渦領域を計算することで、渦領域を求める。時系列における渦領域の変化を明示的に示すために、それぞれの渦領域について渦の状態を定義する。

3.4 時系列可視化における渦領域の定義

時系列における渦領域の変化を明示的に表現する為に、渦領域の状態の定義を行なった。渦領域の状態の定義を表に示す。

表 3.2 のように渦領域の状態の定義を行なった。時刻 T において渦領域であり、時刻 T-1 でも渦領域であれば、その状態を "渦領域の継続" として定義する。また、時刻 T で渦領域であり、時刻 T-1 で非渦領域であれば、その状態を "渦領域の生成" として定義する。また、時刻 T で非渦領域であり、時刻 T-1 で渦領域であれば、その状態を "渦領域の消滅" として定義する。時刻 T においても時刻 T-1 においても非渦領域であれば、その状態は非渦領域である。このように渦領域の状態を定義した。

3.5 アルゴリズム

提案した可視化手法の可視化手順を図 3.9 に示す。

3.9 に示す可視手順を箇条書にて示す。

- 1 数値流体力学計算により計算結果を得る。
- 2 計算結果から図 3.1 の手順により、各ステップにおける渦領域を計算する。
- 3 表 3.2 に示す定義を適用することで、渦領域の状態の情報を付与する。

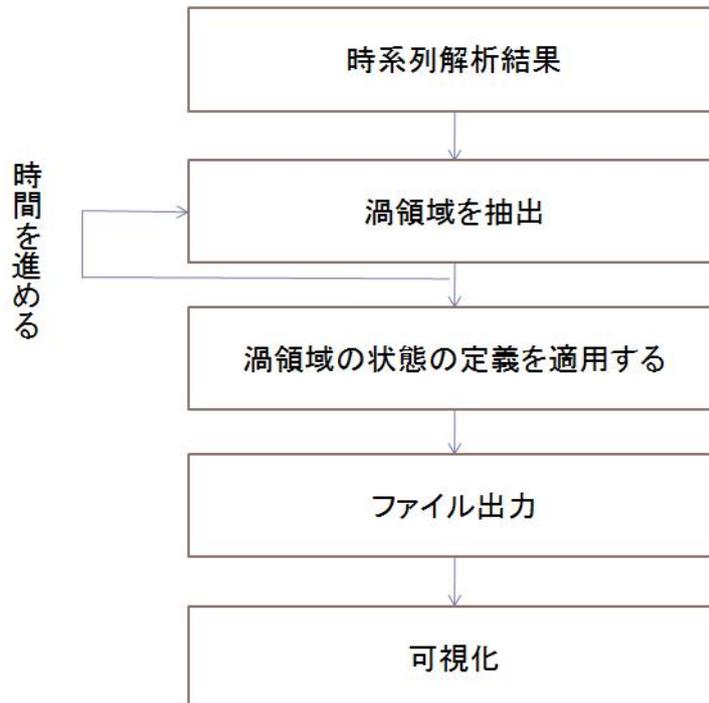


図 3.9: 提案手法の処理工程

4 計算結果をファイルに出力する.

上記のように処理を進める.

さらに, 3.10 を用いて Cavity Flow を実例をあげてに処理の過程を説明する.

数値流体力学計算の結果から渦領域を抽出するために, 図 3.1 で示した手順により, 各時間ステップにおける計算結果から λ_2 法を用いて渦領域を抽出する. さらに, T 時刻と T-1 時刻のステップの表 3.2 の渦領域を定義を用いて, 渦領域の状態を付与することで渦領域の "生成領域", "消滅領域", "継続領域" という状態を付与する. その可視化結果が図 3.10 の提案手法を用い可視化の項で示されている. 本手法では, 赤色で示している領域を T-1 から渦領域が生成されて領域として渦領域で生成領域である. また, 青色で示している領域は, T-1 から比較して渦領域が消滅したことから消滅領域である. 白色で示している領域は T-1 から T に掛けて渦領域が継続している領域である. また, 黒色で示している領域は T-1 時刻, T 時刻ともに渦領域でない領域を示している.

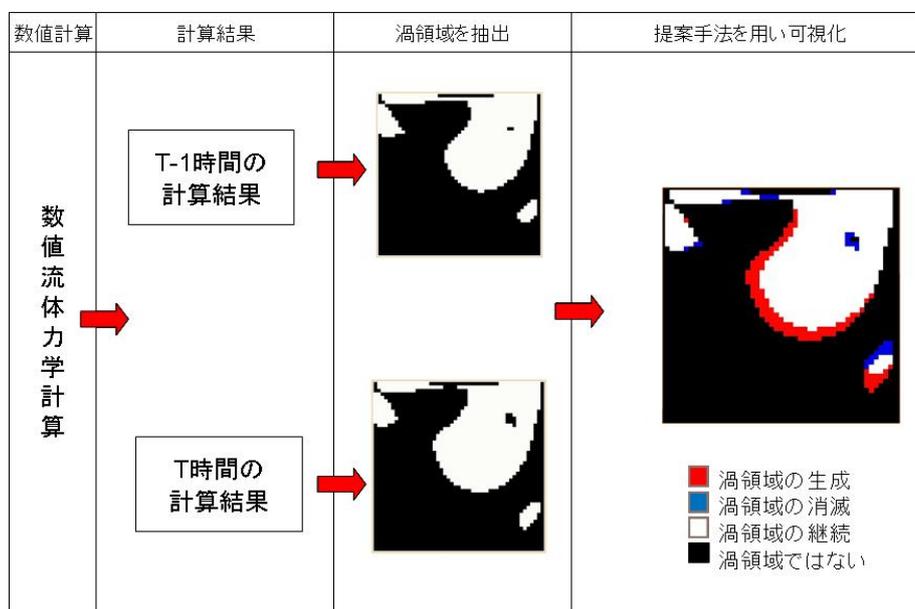


図 3.10: 可視化の流れ

3.6 実装

λ_2 法及び提案手法に関しては, すべて C 言語により実装を行なった. また, 入力データの形式としては FLD 及び UDF 形式に対応するような実装を用意してある.

Hex メッシュで比較的単純な形状のみに対応している. また, 形状によっては, 非構造格子を構造格子に内挿する際にデータ落ちする可能性があり改善が必要である.

図 3.11 に示すように, メッシュの歪みなどによってデータ落ちが発生する可能性がある. これは, ヤコビアンを計算する際の非構造格子を構造格子に内挿するアルゴリズムに問題があり, これを検討する余地がある.

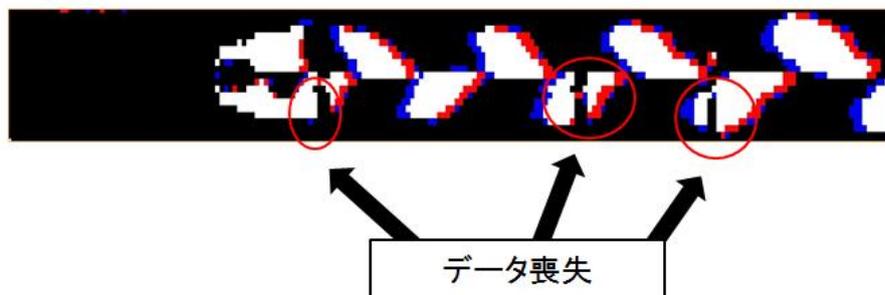


図 3.11: 非構造格子の変換の際のデータの喪失

また, 本研究で開発したプログラムは大型計算機である Altix4700 を対象に実装を行なっている. したがって, 32bit マシンにおいては, メモリ空間を確保出来ない可能性がある.

第4章 結果

提案した可視化手法を検討するために, Cavity 流れ問題と Karman 渦列の問題を対象に可視化を行なった. また, 提案した可視化手法では, 時系列変化における渦領域の状態の変化を明示的に表現することができる. この情報にさらに, 従来から用いられてきた一般的な可視化手法を重畳して用いることで, 渦をわかりやすく観察するために情報を付与する.

4.1 実験: Cavity Flow での検討

Cavity Flow 問題を対象に, 本可視化手法を適用した結果を示す.

4.1.1 計算条件

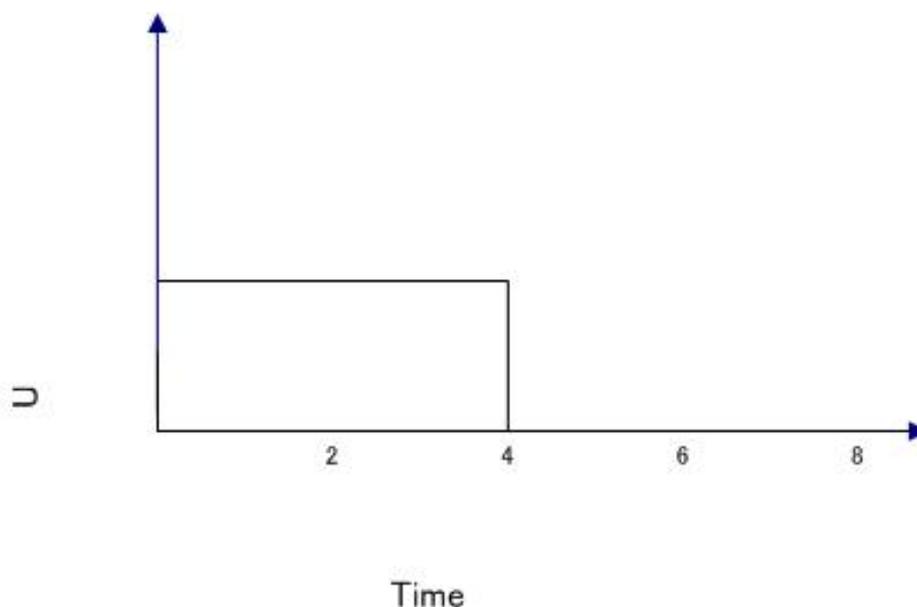


図 4.1: Moving Wall の非定常速度条件

無次元のパラメータであるレイノルズ数に関しては, 3.14 を用いてレイノルズ数を計算している. ここで, 代表速度 U は Moving wall である上部壁面の移動速度である. その他

表 4.1: Cavity Flow 計算条件

形状	51x51x51
mesh 数	132651

の壁面は noslip 条件として境界条件を与えている。また、代表長さ L は立方体の 1 辺の長さとしている。さらに、粘性係数は、0.1 として与えている。形状に関しては、先に用いた 3.2 と同一の形状を用いている。形状は 51x51x51 で mesh 数は 132651 である。形状の構築及びメッシュの生成には、ANSYS 社製の Gambit2.4.6 を用いている。また、流れの解析には汎用熱流体 Solver である ANSYS 社製 Fluent 6.3.26 を用いて計算を行なっている。非定常計算に関しては、Fluent 内で UDF(User Define Function) を記述することで、非定常解析を行なっている。また、可視化ツールとしては Mercury 社製 AVIZO6.0 を用いて可視化を行なっている。

計算に関しては非定常非圧縮粘性流れ計算を行っており、4.1 に示すような非定常な Moving wall を速度の条件として与えている。計算に関しては、無次元パラメーターであるレイノルズ数 Re が、 $Re=100$ 、 $Re=500$ 、 $Re=1000$ の条件で計算を行なっている。

4.1.2 可視化結果

Cavity Flow 問題について提案した可視化手法を適用した結果を示す。この計算では渦領域が時間経過とともに拡大していくような過渡的な変化を可視化したものである。

4.1.3 Cavity Flow レイノルズ数 $Re=100$ における可視化

Cavity Flow のレイノルズ数 $Re=100$ において提案手法を適用し可視化した結果を示す。

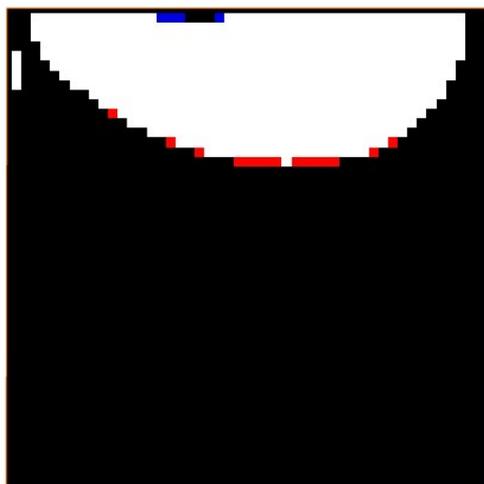


図 4.2: Cavity $Re=100$ $t=0.1$ 提案手法による可視化

図 4.2 から図 4.4 はレイノルズ数 $Re=100$ における Cavity Flow 問題の $t=0.10$ から $t=0.30$ までに本手法を適用し可視化した結果である。

提案手法を用いることで、前の時間ステップからの渦領域の生成領域、消滅領域、継続領域および渦ではない領域をそれぞれ、赤色、青色、白色、黒色で表すことで、渦領域の $t-1$ 時間からの変化を明示的に示すことができた。ここで、赤色は渦領域の生成領域を示しており、青色は渦領域の消滅領域を示している。また、白色は渦領域の継続領域を示しており、黒色は非渦領域を示している。

図 4.2 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$ における時系列計算における $t=0.1$ の時の可視化結果を示したものである。

$t=0.1$ 時刻において、 $t=0.09$ から渦領域が増減を明確にみることができる。渦領域の生成領域の方が渦領域の消滅領域より多いので、渦領域が拡大していることから渦領域の過渡期と考えられる。

また、Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=100$ の現象から考慮しても、この時間ステップにおいては、過渡期であり可視化結果は妥当であると考えられる。

図 4.3 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$ における時系列計算における $t=0.2$ の時の可視化結果を示したものである。

$t=0.2$ 時刻において、 $t=0.19$ から渦領域が増減を明確にみることができる。渦領域の生成領域の方が渦領域の消滅領域より多いので、全体として渦領域が拡大しているといえる。

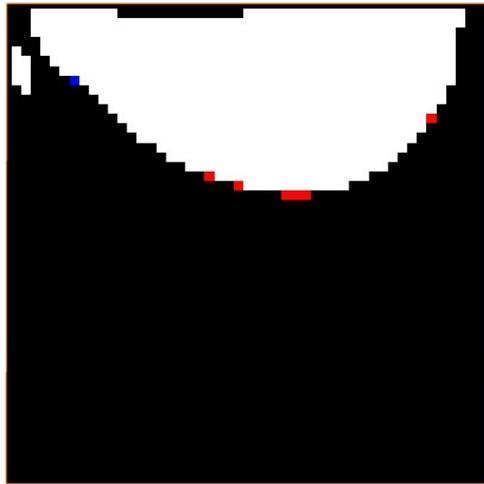


図 4.3: Cavity $Re=100$ $t=0.2$ 提案手法による可視化

また, Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=100$ の現象から考慮しても, この時間ステップにおいては, 渦領域は拡大しているということは妥当である.

また, 図 4.2 と比較して, 渦領域の変化している領域が減少していることが, 見てとれこの現象が定常状態に近付いていることが推測できる.

図 4.4 は, Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$ における時系列計算における $t=0.3$ の時の可視化結果を示したものである.

$t=0.3$ 時刻において, $t=0.29$ からの渦領域の生成領域, 消滅領域, 継続領域, 非渦領域を明示的に示されていることがわかる.

また, 図 4.3 と比較して, 渦領域の変化があまりないことから, ほぼ定常状態であると考えられる.

Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=100$ の現象から考慮しても, この時間ステップにおいては, ほぼ定常な状態であるといえる.

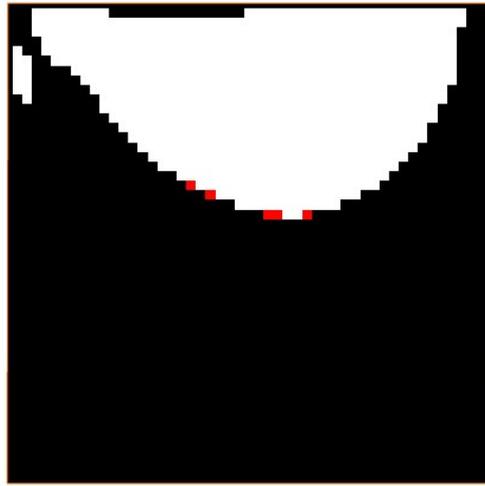


図 4.4: Cavity Re100 $t=0.3$ 提案手法による可視化

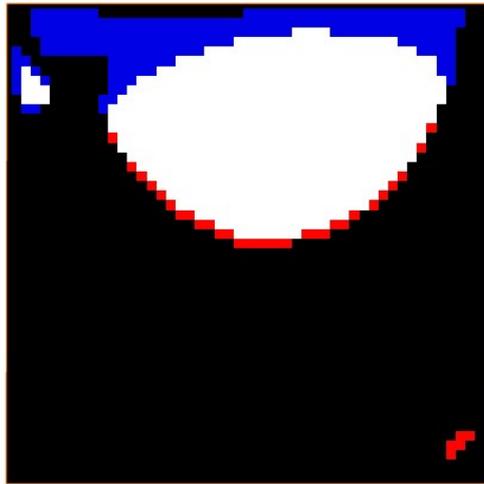


図 4.5: Cavity Re100 t=4.1 提案手法による可視化

図 4.5 から図 4.7 はレイノルズ数 $Re=100$ における Cavity Flow 問題の $t=4.10$ から $t=4.30$ までに本手法を適用し可視化した結果である。

これは、レイノルズ数 $Re=100$ における Cavity Flow 問題の非定常条件により上部の壁面が停止することにより、内部の流れが減衰する過程である。

図 4.5 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$ における $t=4.1$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。この結果からは、 $t=4.1$ 時刻において、 $t=4.09$ からの渦領域の増減を明確に見ることができる。また、この可視化結果では、青色の領域つまり渦領域の減少領域が生成領域に比べ、広いことがわかる。つまり、この可視化結果から、時間経過により渦領域が減少していることから、渦領域が減衰する過程であることが推測できる。

計算条件から考慮しても、この時刻では上部壁面の運動が停止しており、内部の渦は徐々に減衰することから、この可視化結果は妥当であると推測される。

図 4.6 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$ における $t=4.2$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。この結果からは、 $t=4.2$ 時刻において、 $t=4.19$ からの渦領域の増減を明確に見ることができる。また、この可視化結果から、渦領域の消滅領域である青色の領域が多くみられ、渦領域の生成領域である赤色の領域はあまりみられない。つまり、この可視化結果から渦領域が減衰していることがわかる。

図 4.7 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=100$ における $t=4.3$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。

この結果からは、 $t=4.3$ 時刻において、 $t=4.29$ からの時系列における渦領域の変化を明確に見ることができる。

また、この可視化結果から、渦領域の消滅領域である青色の領域が、渦領域の生成領域である赤色の領域に比べ、広い領域であることがわかる。

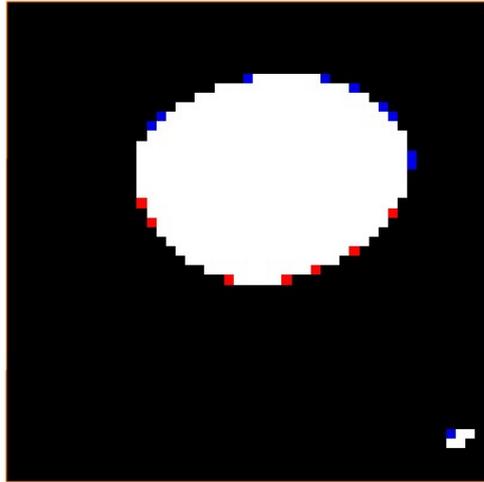


図 4.6: Cavity Re100 $t=4.2$ 提案手法による可視化

このことから、流れの現象は、渦領域が減衰している過程であることがわかる。また、4.6と比較して、渦領域の生成、消滅などの変化の領域が小さくなっていることから、変化の過程が緩やかであることがわかる。

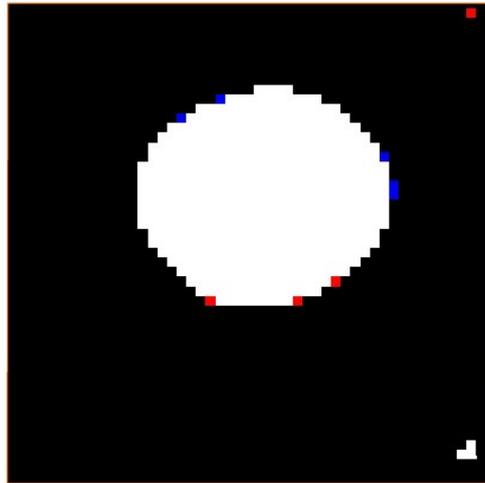


図 4.7: Cavity Re100 $t=4.3$ 提案手法による可視化

4.1.4 Cavity Flow レイノルズ数 $Re=500$ における可視化

Cavity Flow におけるレイノルズ数 $Re=500$ を対象に提案手法を適用した結果について述べる.

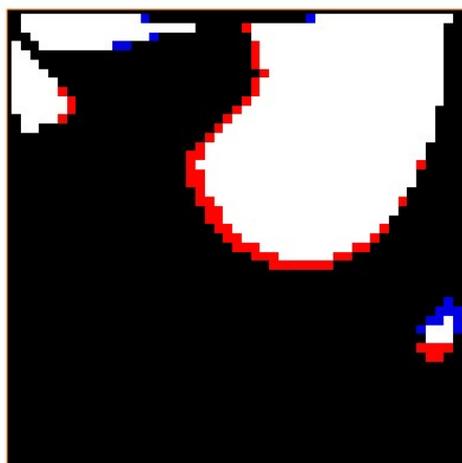


図 4.8: Cavity $Re=500$ $t=0.1$ 提案手法による可視化

図 4.8 から図 4.10 はレイノルズ数 $Re=500$ における Cavity Flow 問題の $t=0.10$ から $t=0.30$ までに本手法を適用し可視化した結果である. これは, レイノルズ数 $Re=500$ における Cavity Flow 問題の時間変化により渦が拡大していく過渡期を可視化したものである. 提案手法を用いることで, 前の時間ステップからの渦領域の拡大領域, 消滅領域, 継続領域および渦ではない領域をそれぞれ, 赤色, 青色, 白色, 黒色で表すことで, 渦領域の $t-1$ 時間からの変化を明示的に示すことができていることがわかる. ここでは, 赤色は渦領域の生成領域であり, 青色は渦領域の消滅領域である. また, 白色は渦領域の継続領域であり, 黒色は非渦領域である.

図 4.8 は, Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における時系列計算における $t=0.1$ の時の可視化結果を示したものである. $t=0.1$ 時刻において, $t=0.09$ から渦領域が増減を明確にみることができる. 渦領域の生成領域の方が渦領域の消滅領域より多いので, 全体として渦領域が拡大しているといえる. また, Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=500$ の現象から考慮しても, 図 4.2 と比較して渦領域が広がっていることから, 的確に流れの現象を可視化出来ていると考える.

図 4.9 は, Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における時系列計算における $t=0.2$ の時の可視化結果をある.

$t=0.2$ 時刻において, $t=0.19$ から渦領域が増減を明確にみることができる. 渦領域の生成領域の方が渦領域の消滅領域より多いので, 渦領域が拡大していることから過渡期であ

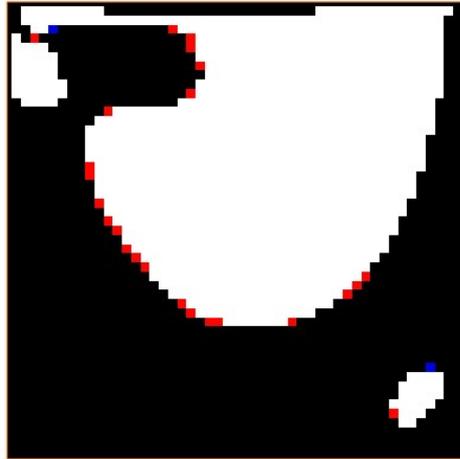


図 4.9: Cavity Re500 $t=0.2$ 提案手法による可視化

ると推測できる.

Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=500$ の現象から考慮しても, この時間ステップにおいては, 渦が成長していく過渡期であり可視化結果としては妥当なものと考えられる.

また, 図 4.8 と比較して, 渦領域の変化している領域が減少していることが, 見てとれこの現象が定常状態に近付いていることが推測できる.

図 4.10 は, Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における時系列計算における $t=0.3$ の時の可視化結果である.

$t=0.3$ 時刻において, $t=0.29$ から渦領域の生成領域, 消滅領域, 継続領域及び非渦領域を明確にみることができる.

また, 図 4.9 と比較して, 渦領域の生成領域及び渦領域の消滅領域とも小さくなっていることがわかる. このことから, ほぼ定常状態であるといえる.

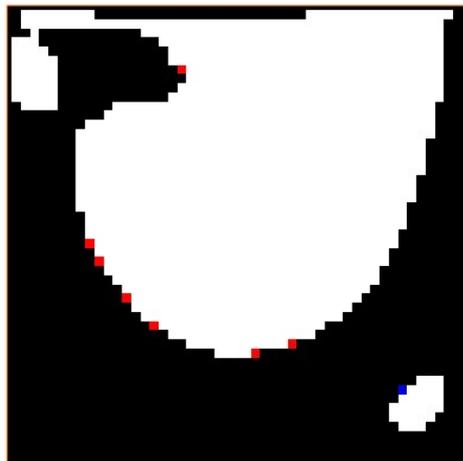


図 4.10: Cavity Re500 $t=0.3$ 提案手法による可視化

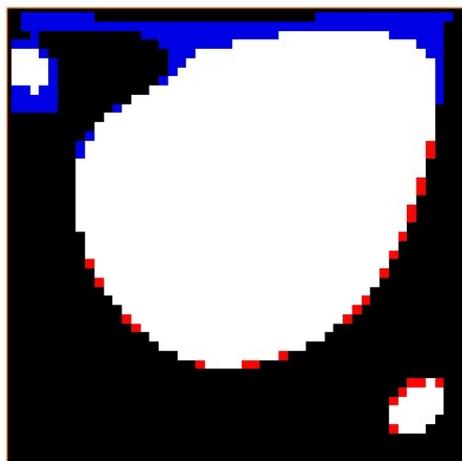


図 4.11: Cavity Re500 $t=4.1$ 提案手法による可視化

図 4.11 から図 4.13 はレイノルズ数 $Re=500$ における Cavity Flow 問題の $t=4.10$ から $t=4.20$ までに本手法を適用し可視化した結果である。

これは、レイノルズ数 $Re=500$ における Cavity Flow 問題の非定常条件により上部の壁面が停止することにより、内部の流れが減衰する過程である。図 4.11 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における $t=4.1$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。

この結果からは、 $t=4.1$ 時刻において、 $t=4.09$ からの時系列における渦領域の変化を明確に見ることができる。また、この可視化結果では、青色の領域つまり渦領域の減少領域が生成領域に比べ、広いことがわかる。つまり、この可視化結果から、時間経過により渦領域が減少していることから、渦領域が減衰する過程であることが推測できる。計算条件から考慮しても、この時刻では上部壁面の運動が停止しており、内部の渦は徐々に減衰することから、この可視化結果は妥当であると推測される。

図 4.12 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における $t=4.2$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。この結果からは、 $t=4.2$ 時刻において、 $t=4.19$ からの渦領域の増減を明確に見ることができる。また、この可視化結果から、渦領域の消滅領域である青色の領域が多くみられ、渦領域の生成領域である赤色の領域はあまりみられない。つまり、この可視化結果から渦領域が減衰していることがわかる。また、実際の計算条件から考慮してもこの結果は妥当であると考えられる。

図 4.13 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における $t=4.3$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。この結果からは、 $t=4.3$ 時刻において、 $t=4.29$ からの渦領域の増減を明確に見ることができる。

また、この可視化結果から、渦領域の消滅領域である青色の領域が渦領域の生成領域で

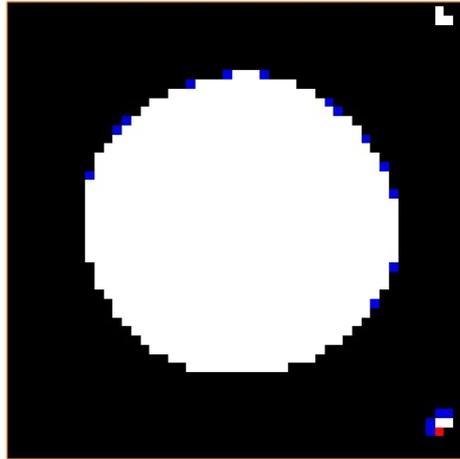


図 4.12: Cavity Re500 $t=4.2$ 提案手法による可視化

ある赤色の領域に比べ, 多く見ることができる. つまり, この可視化結果から渦領域が減衰している過程であることがわかる. また, 4.12 と比較して, 渦領域の生成, 消滅などの変化の領域が小さくなっていることから, 変化の過程が緩やかであることがわかる.

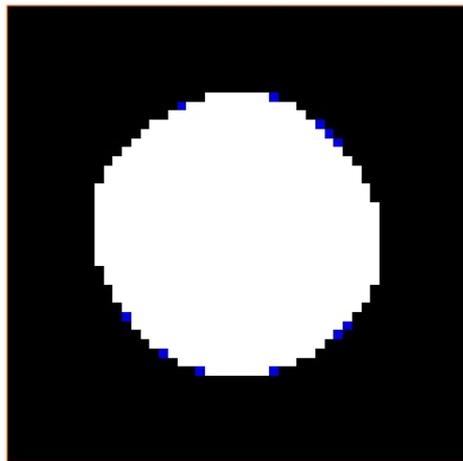


図 4.13: Cavity Re500 $t=4.3$ 提案手法による可視化

4.1.5 Cavity Flow レイノルズ数 $Re=1000$ における可視化

Cavity Flow におけるレイノルズ数 $Re=1000$ を対象に提案手法を適用した結果について述べる.

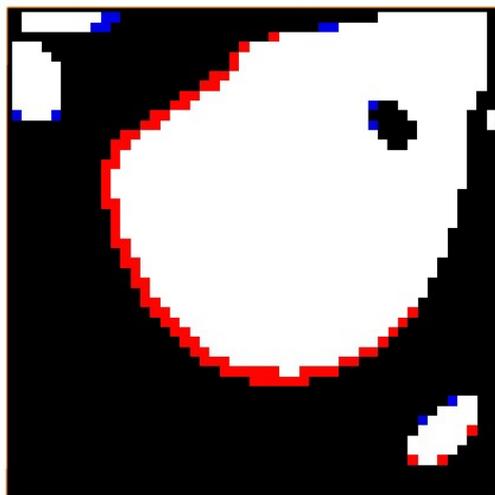


図 4.14: Cavity $Re1000$ $t=0.1$ 提案手法による可視化

図 4.14 から図 4.16 はレイノルズ数 $Re=1000$ における

Cavity Flow 問題の $t=0.10$ から $t=0.30$ までに本手法を適用し可視化した結果である.

これは、レイノルズ数 $Re=1000$ における Cavity Flow 問題の時間変化により渦が拡大していく過渡期を可視化したものである.

提案手法を用いることで、前の時間ステップからの渦領域の生成領域、消滅領域、継続領域および渦ではない領域をそれぞれ、赤色、青色、白色、黒色で表すことで、渦領域の $t-1$ 時間からの変化を明示的に示すことができていることがわかる.

図 4.17 から図 4.19 はレイノルズ数 $Re=100$ における Cavity Flow 問題の $t=4.10$ から $t=4.30$ までに本手法を適用し可視化した結果である.

これは、レイノルズ数 $Re1000$ における Cavity Flow 問題の非定常条件により上部の壁面が停止することにより、内部の流れが減衰する. その結果、内部の渦も縮小していく過程を本手法を用いて可視化した結果である.

図 4.14 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=1000$ における時系列計算における $t=0.1$ の時の可視化結果を示したものである.

$t=0.1$ 時刻において、 $t=0.09$ から渦領域が増減を明確にみることができる. 渦領域の生成領域の方が渦領域の消滅領域より多いので、全体として渦領域が拡大しているといえる. また、Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=1000$ の現象から考慮しても、この時間ステップにおいては、渦領域は拡大しているということは妥当である. 図 4.15 は、Cavity

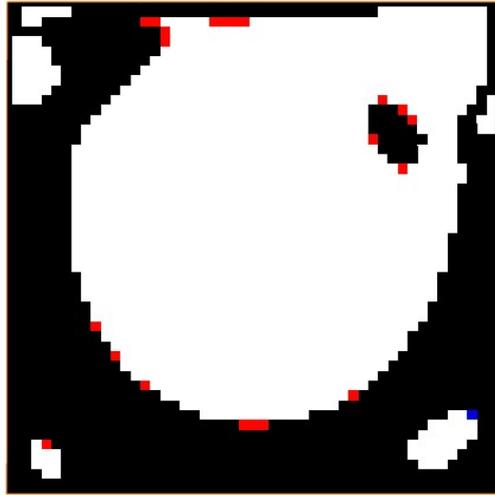


図 4.15: Cavity $Re=1000$ $t=0.2$ 提案手法による可視化

Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=500$ における時系列計算における $t=0.2$ の時の可視化結果を示したものである。 $t=0.2$ 時刻において、 $t=0.19$ から渦領域が増減を明確にみることができる。渦領域の生成領域の方が渦領域の消滅領域より多いので、全体として渦領域が拡大しているといえる。また、Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=1000$ の現象から考慮しても、この時間ステップにおいては、渦領域は拡大しているということは妥当である。また、図 4.14 と比較して、渦領域の変化している領域が減少していることが、見てとれこの現象が定常状態に近付いていることが推測できる。図 4.16 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=1000$ における時系列計算における $t=0.3$ の時の可視化結果を示したものである。 $t=0.3$ 時刻において、 $t=0.29$ から渦領域が増減を明確にみることができる。渦領域の生成領域があることがわかる。また、図 4.15 と比較して、渦領域の増減があまりないことから、ほぼ定常状態であるといえる。

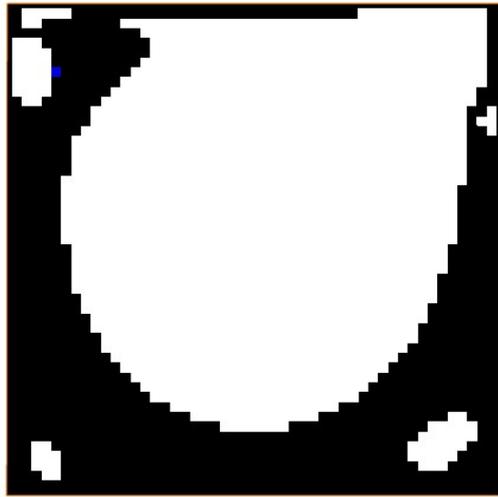


図 4.16: Cavity Re1000 $t=0.3$ 提案手法による可視化

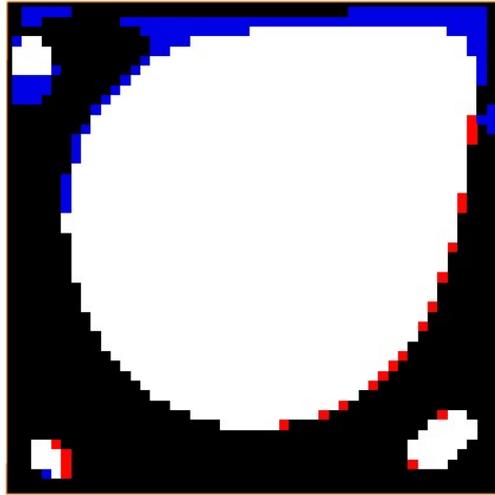


図 4.17: Cavity Re1000 $t=4.1$ 提案手法による可視化

Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=1000$ の現象から考慮しても、この時間ステップにおいては、ほぼ定常な状態であるといえる。図 4.17 から図 4.19 はレイノルズ数 $Re=500$ における Cavity Flow 問題の $t=4.10$ から $t=4.30$ までに本手法を適用し可視化した結果である。

これは、レイノルズ数 $Re=1000$ における Cavity Flow 問題の非定常条件により上部の壁面が停止することにより、内部の流れが減衰する過程である。図 4.17 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=1000$ における $t=4.1$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。

この結果からは、 $t=4.1$ 時刻において、 $t=4.09$ からの渦領域の増減を明確に見ることができる。また、この可視化結果では、青色の領域つまり渦領域の減少領域が生成領域に比べ、広いことがわかる。

つまり、この可視化結果から、時間経過により渦領域が減少していることから、渦領域が減衰する過程であることが推測できる。計算条件から考慮しても、この時刻では上部壁面の運動が停止しており、内部の渦は徐々に減衰することから、この可視化結果は妥当であると推測される。

図 4.18 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=1000$ における $t=4.2$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。この結果からは、 $t=4.2$ 時刻において、 $t=4.19$ からの渦領域の増減を明確に見ることができる。

また、この可視化結果から、渦領域の消滅領域である青色の領域が多くみられ、渦領域の生成領域である赤色の領域はあまりみられない。

つまり、渦領域の消滅領域が多いことから渦領域が減衰していることがわかる。また、計算条件から上部壁面が停止することで、内部の渦は減衰するはずなので、この可視化結果

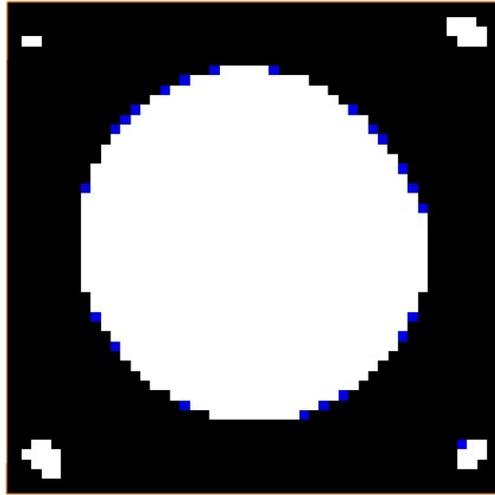


図 4.18: Cavity $Re=1000$ $t=4.2$ 提案手法による可視化

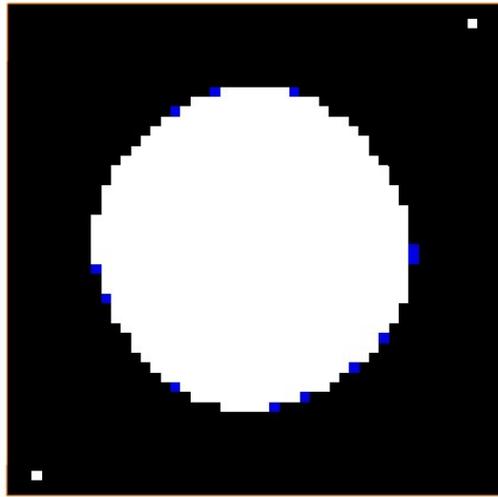
は妥当であると考えられる。

図 4.17 と比較して、渦領域の変化の領域が減少していることがわかる。したがって、流れの現象の変化が緩やかになっていると推測できる。

図 4.19 は、Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数 $Re=1000$ における $t=4.3$ の結果を本手法を用いて可視化した結果である。

この結果からは、 $t=4.3$ 時刻において、 $t=4.29$ からの渦領域の変化を明確に見ることができる。また、この可視化結果から、渦領域の消滅領域である青色の領域が渦領域の生成領域である赤色の領域に比べ、多く見ることができる。

つまり、この可視化結果から渦領域が減衰している過程であることがわかる。また、4.18 と比較して、渦領域の生成、消滅などの変化の領域が小さくなっていることから、徐々に渦領域の変化が緩やかになっていることが推測される。



n

図 4.19: Cavity Re1000 $t=4.3$ 提案手法による可視化

4.2 実験：Karman 渦列での検討

Karman 渦列の問題を対象に、提案手法を適用し可視化結果について検討を行なった結果について述べる。

4.2.1 計算条件

Karman 渦列の計算条件を表に記す。

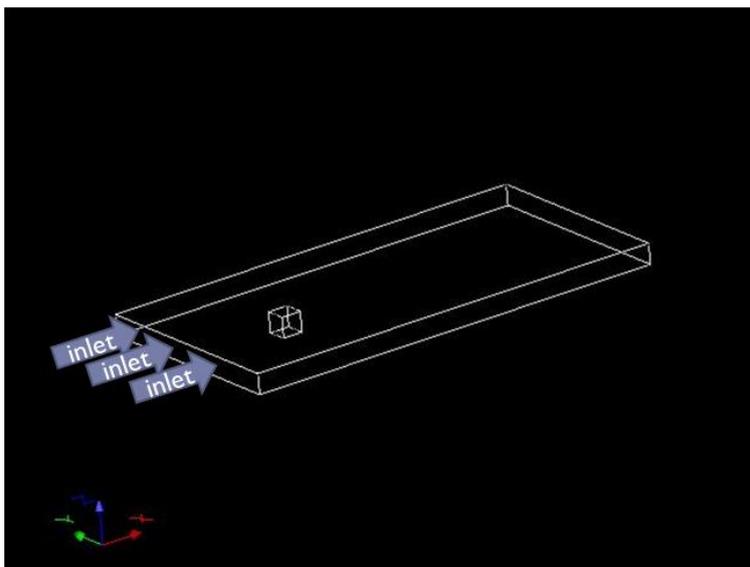


図 4.20: Karman 渦列 モデル形状

計算条件を記す。計算形状については図 4.20 に示すような形状を与える。形状は $200 \times 100 \times 10$ であり内部の角柱は $20 \times 20 \times 10$ である。また、Mesh 数は 391488 である。

境界条件は流入条件として速度を与え、流出条件は自由流出として境界条件を与えている。また、その他の外部形状の境界は slip 条件として与えている。内部形状については、すべての壁面を no-slip 条件として境界条件を与えている。

表 4.2: Karman 渦列 計算条件

Reynolds 数	500
mesh 数	389472

4.2.2 可視化結果

Karman 渦列の問題を対象に、提案した可視化手法を適用した可視化結果を示す。



図 4.21: Karman 渦列 $Re=500$ $t=300.0$

図 4.21 から図 4.23 は、レイノルズ数 $Re=500$ における Karman 渦列の数値計算結果に対して本手法を適用した可視化結果である。

Karman 渦列特有の渦が連続して発生し、移動していく様子を表現できている。また、提案を適用することで、渦領域の生成、消滅、継続などといった変化を明確に表現することができる。

図 4.21 はレイノルズ数 $Re=500$ における Karman 渦列の $t=300.0$ に提案手法を適用し可視化した結果である。この結果からは、 $t=300.0$ 時刻において、 $t=299.9$ からの時系列における渦領域の変化を見ることができる。

この可視化結果について、渦領域に注目してみると、渦領域の生成領域である赤色の領域が渦領域内において流れ方向側に多く分布しており、渦領域の消滅領域である青色の領域は渦領域内の流れ上流側に多く分布していることがわかる。このことから、渦領域が流れの方向に移動していることを表している。

図 4.22 はレイノルズ数 $Re=500$ の $t=300.1$ における Karman 渦列に提案手法を適用し可視化した結果である。

この結果についても先に示した図 4.21 と同様に、時系列における渦領域の変化を明示的に見ることができる。また、時系列における渦領域の変化から渦領域が流れ方向に移動し



図 4.22: Karman 渦列 $Re=500$ $t=300.1$

ていることが推測できる.

図 4.23 はレイノルズ数 $Re=500$ の $t=300.2$ における Karman 渦列に提案手法を適用し可視化した結果である.

この結果についても, 同様に時系列における渦領域の生成, 消滅, 継続, 非渦といった変化を明示的に示すことが出来た.

4.3 まとめ

Cavity Flow 問題においてレイノルズ数 $Re=100$, $Re=500$, $Re=1000$ 及び Karman 渦列のレイノルズ数 $Re=1000$ を対象に数値流体計算を行ない, その計算結果に対して提案手法を適用し可視化を行なった結果を検討した.

提案手法を用いることで, 時系列計算における Cavity Flow 問題における時系列における渦領域の変化を渦領域の生成, 渦領域の消滅, 渦領域の継続, 非渦領域と明示的に表現することができた.

Cavity Flow 問題においてレイノルズ数 $Re=100$, $Re=500$, $Re=1000$ と複数のレイノルズ数において提案手法を用いて可視化を行なった. その結果, Cavity Flow 問題におけるレイノルズ数による時系列における渦領域の変化を渦領域のみを見て比較することと比べ, 渦領域の生成領域, 消滅領域, 継続領域, 非渦領域と明示的に示すことで渦領域の時系列に



図 4.23: Karman 渦列 $Re=500$ $t=300.2$

おける変化をわかりやすく表現できたと考える。

また、提案手法を用いることで、渦領域の生成や消滅といった変化する領域が明示的に示される為、渦領域の変化の度合を明確に知ることができると考える。、つまり、本提案手法を用いることで、渦領域の時系列における変化を定量的に表すことができると考える。

第5章 提案手法の応用方法の検討

本章では、提案した可視化手法の応用の検討として、提案手法を適用する際の差分の間隔を変化させることによる可視化結果の変化についての検討を行なう。また、提案手法と一般的な可視化手法を重畳して表示した場合の可視化結果についての検討も行なう。

5.1 差分の間隔についての検討

本報で提案した可視化手法では、 $T-\Delta t$ 時刻と T 時刻での渦領域の変化を表す為、 $T-\Delta t$ 時刻と T 時刻の間隔が小さい方が渦領域の変化を細かく捉えることが可能である。

しかし、小さな時間変化ではあまり流れの現象が変化しないようなような流れの問題においては、流れの現象を理解する上で、 $T-\Delta t$ 時刻と T 時刻との間隔をそれほど細かく取らない方が現象を理解する上で都合がよいと考えた。

したがって、本節では $T-\Delta t$ 時刻と T 時刻との間隔について検討を行なう。

5.1.1 Cavity Flow 問題における検討

差分の時間間隔の検討としてレイノルズ数 $Re=1000$ における Cavity Flow 問題を対象に検討を行なった結果について述べる。

図 5.1 から図 5.5 に本報において提案した可視化手法において、差分の時間間隔を変化させることで、可視化結果がどのように変化についての検討を行なった。

可視化結果については、先に説明したのと同様に赤色の領域が渦領域の生成を表しており、青色の領域は渦領域の消滅を表している。また、白色領域は渦領域の継続を表している。その他の黒色の領域については、非渦領域である。

図 5.1 は、レイノルズ数 $Re=1000$ における $t=0.10$ において Δt を $t=0.01$ として、本報で提案した可視化手法を適用し可視化した結果である。この結果からは、渦領域の生成領域、消滅領域、継続領域、非渦領域を明確に見てとることができる。

また、この結果は今回行なった検討の中で最も Δt が小さいため、渦領域の変化を正確に捉えることができる。しかし、時間幅 Δt 間のみ情報のみであるため、変化が緩やかな流れの現象においては、視覚的な変化を捉えることは難しい。

図 5.2 は、レイノルズ数 $Re=1000$ における $t=0.10$ において Δt を $t=0.02$ として、提案した可視化手法を適用し可視化した結果である。

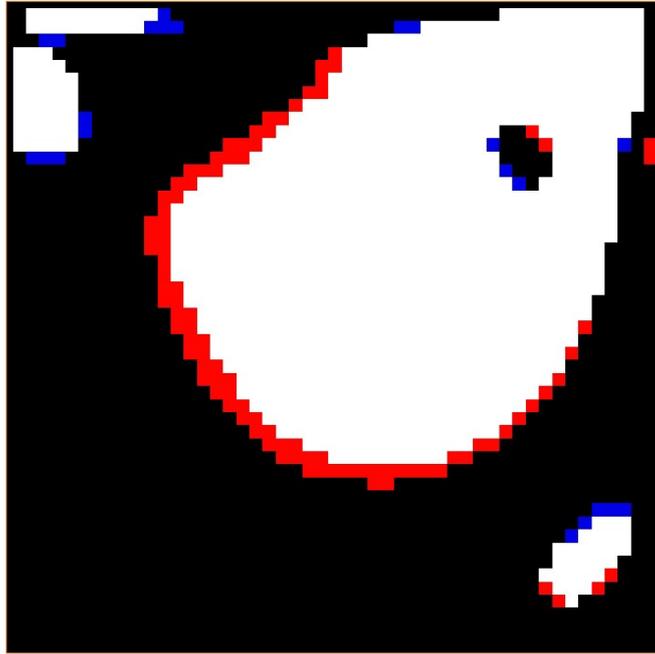


図 5.1: Cavity Flow 問題 レイノルズ数 $Re=1000$ $\Delta t=0.01$

渦領域の生成領域が赤色で示されており、渦領域の消滅領域は青色で示されている。また、渦領域の継続領域は白色で示されており、非渦領域は黒色で示されている。

図 5.1 の結果と比較して、赤色で示された渦領域の生成領域及び青色で示された消滅領域が拡大していることがわかる。これは、 Δt を $t=0.02$ としたため、 $t=0.01$ 分の渦領域の変化が表現されたためである。

レイノルズ数 $Re=1000$ において $t=0.10$ の時に Δt を 0.03 とした場合をしてみると、可視化結果は図 5.3 のようになる。この結果をしてみると、渦領域の生成領域である赤色の領域と減少領域である青色の領域が図 5.2 に比べて更に拡大していることがわかる。

レイノルズ数 $Re=1000$ において $t=0.10$ の時 Δt を 0.04 とした場合をしてみると、可視化結果は図 5.4 のようになる。赤色の領域である渦領域の生成領域および青色の領域である渦領域の消滅領域が拡大しているのがわかる。

また、渦領域の継続領域である白色の領域が赤色の領域である渦領域の生成領域に変化していることがわかる。非渦領域である黒色の領域が青色の領域である渦領域の減少領域に変化していることがわかる。

さらに詳しく見てみると、中心付近の大きな渦領域においては、内側方向に渦領域の生成領域が拡大しており、右下のある渦領域に関しては、図 5.3 と比較して、完全に渦の継続領域である白色の領域が消滅しており、その変わりとして渦領域の生成領域である赤色の領域となっていることがわかる。また、青色の渦領域の消滅領域が上方方向に移動していることがわかる。

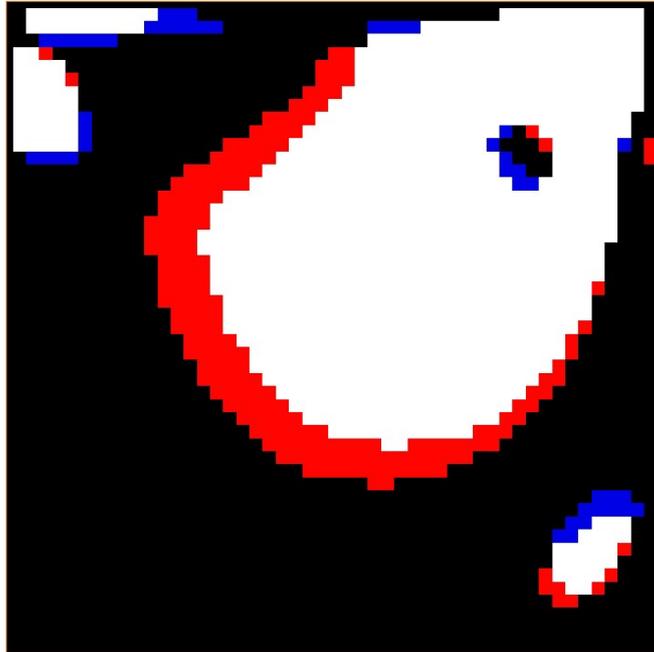


図 5.2: Cavity Flow 問題 レイノルズ数 $Re=1000$ $\Delta t=0.02$

レイノルズ数 $Re=1000$ において $t=0.10$ の時 Δt を 0.05 とした場合をしてみると、可視化結果は図 5.5 のようになる。図 5.4 と比較すると、さらに渦領域の生成領域、消滅領域が拡大おり、継続領域および非渦領域に関しては領域が縮小していることがわかる。

また、大きな変化としては、右下の渦領域の生成領域と消滅領域が完全にはなれたことである。このことで、 $\Delta t=0.05$ 間において、右下の渦領域が移動したことが明確に知ることができる。

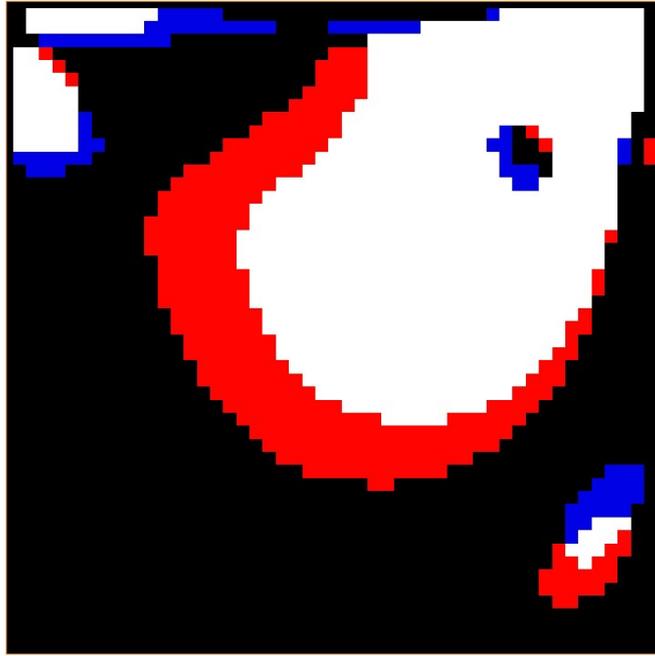


図 5.3: Cavity Flow 問題 レイノルズ数 $Re=1000$ $\Delta t=0.03$

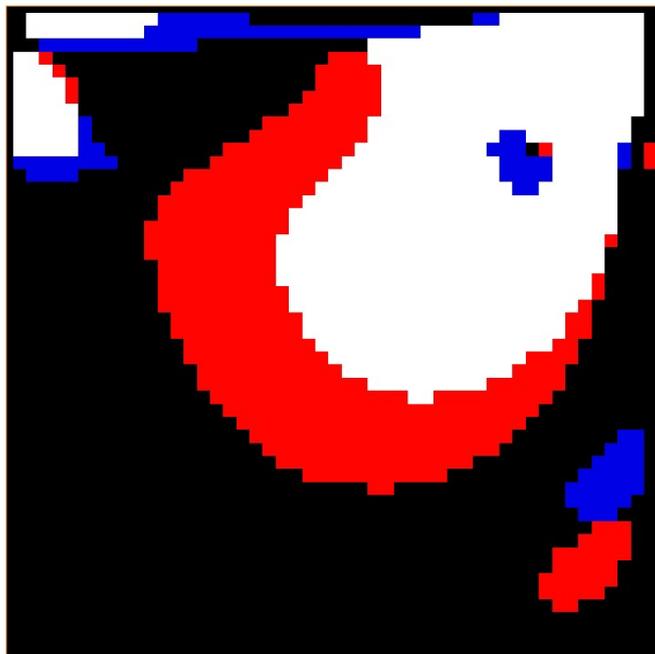


図 5.4: Cavity Flow 問題 レイノルズ数 $Re=1000$ $\Delta t=0.04$

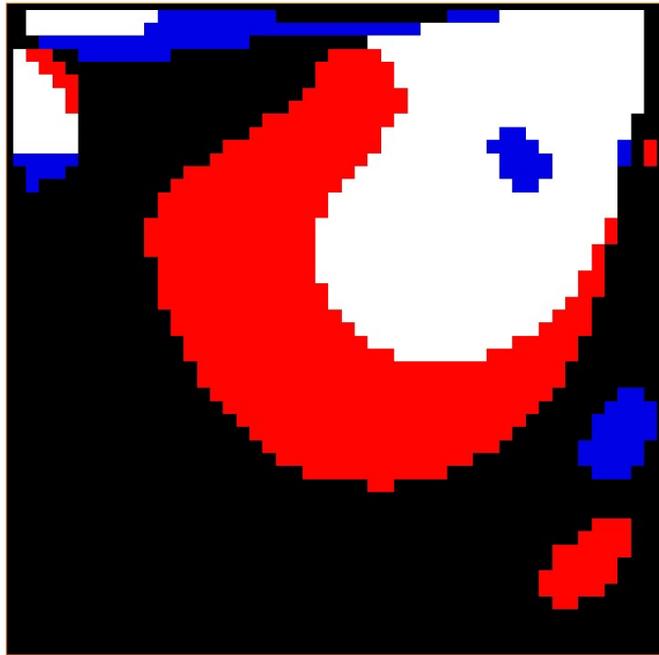


図 5.5: Cavity Flow 問題 レイノルズ数 $Re=1000$ $\Delta t=0.05$

5.1.2 Karman 渦列における検討

提案手法を用いる際の時間の差分間隔に関する検討をレイノルズ数 $Re=500$ の Karman 渦列 ($t=300.0$) を対象に行なった結果について述べる.



図 5.6: Karman 渦列 $\Delta t=0.1$

提案手法を用いるに辺り, T と $T-\Delta t$ の時間間隔による可視化結果の変化についてのレイノルズ数 $Re=500$ の Karman 渦列を対象として検討を行なった. ここでは, 時間間隔 Δt を以下のように変化させた.

図 5.6 は, レイノルズ数 $Re=500$ における Karman 渦列の $t=70.0$ に対して, 提案手法を適用した可視化結果である. ここでの時間間隔 $\Delta t=0.1$ としている. この結果では, 渦領域の生成領域及び生成領域を渦領域の前後に微細な変化を見ることができるとは思われるが, 変化の度合いが小さくどのように変化しているのかを正確に捉えることは難しいと考える.

$\Delta t=0.5$ とした時の結果を図 5.7 に示す. 5.6 と比較して, 渦領域における生成領域および消滅領域が拡大していることがわかる.

しかし, 生成領域と消滅領域で表現されている領域が小さいため流れの現象を理解するのに, あまり良い可視化ではないと考える.

$\Delta t=1.0$ とした時の結果を図 5.8 に示す. 赤色が渦領域の生成領域, 青色が渦領域の消滅領域, 白色が渦領域の継続領域, 黒色が渦領域の非渦領域を示しており, 渦領域の生成領域および渦領域の消滅領域が図 5.7 と比較して, 拡大していることがわかる.

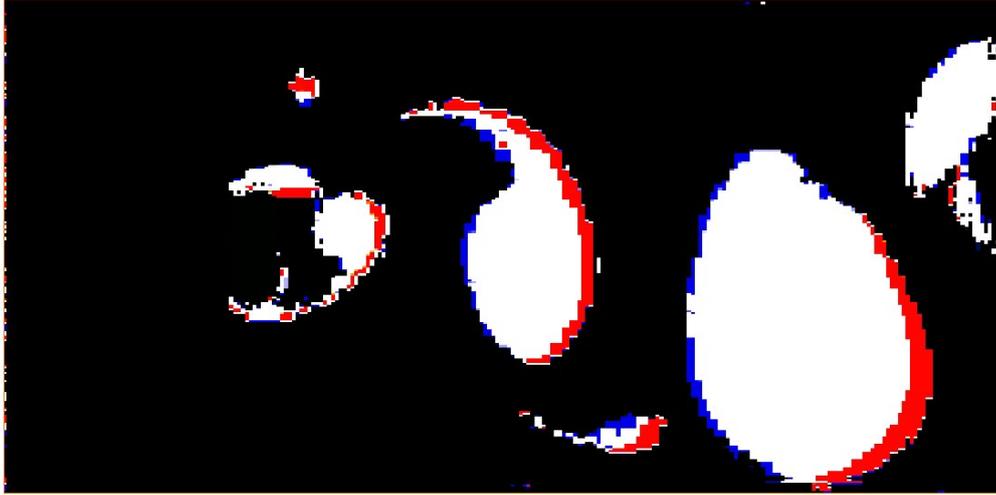


図 5.7: Karman 渦列 $\Delta t=0.5$

これにより、渦領域において左側に青色で示された消滅領域が存在しており、右側に赤色でしめされた渦領域の生成領域がそんざいするため、左から右に渦が移動していることが推測できる。5.7の可視化結果と比べ、流れの現象を明確に表現出来ていると考える。

$\Delta t=25.0$ とした時の可視化結果を図 5.9 に示す。赤色が渦領域の生成領域、青色が渦領域の消滅領域、白色が渦領域の継続領域、黒色が渦領域の非渦領域を示している。図 5.8 と比較して、渦領域の生成領域および渦領域の消滅領域が拡大しており、明確に時系列における渦領域の変化を捉えることが出来ていると考える。先ほど述べた渦領域の移動についても、5.8 に比べて、より明確に渦領域の移動を把握することができる。

$\Delta t=100.0$ とした時の可視化結果を図 5.10 に示す。赤色の領域は渦領域の生成領域を示しており、青色の領域は渦領域の消滅領域を示している。また、白色の領域は渦領域の継続領域を示しており、黒色の領域は、非渦領域を示している。この可視化結果では先の結果と比較して、個々の渦領域の渦領域の生成領域および渦領域の消滅領域が拡大していることがわかる。このことにより、5.9の可視化結果と比較して、より明確に渦領域の移動を把握することが出来る。

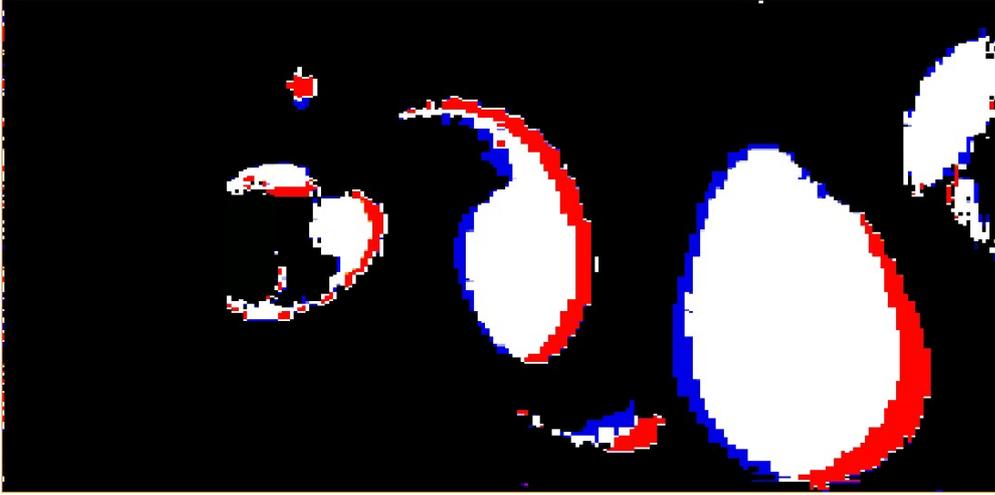


图 5.8: Karman 渦列 $\Delta t=1.0$

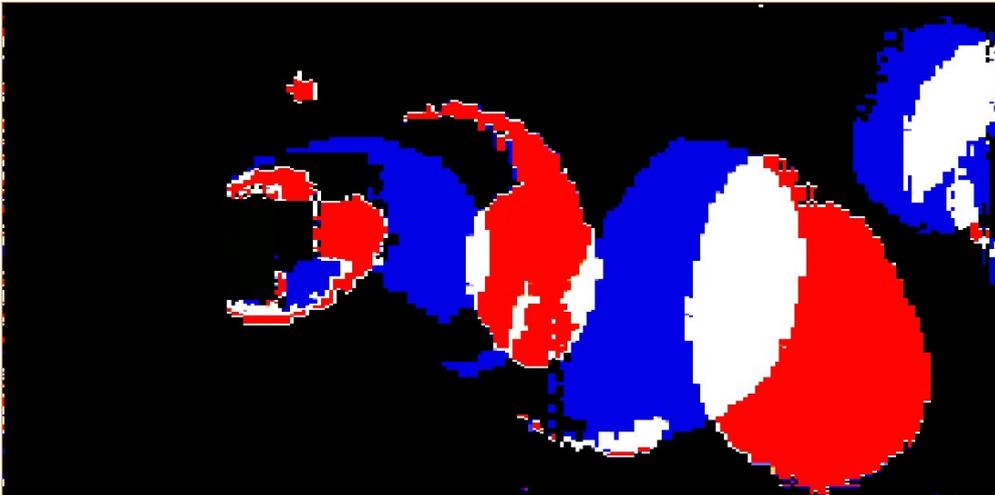


图 5.9: Karman 渦列 $\Delta t=25$

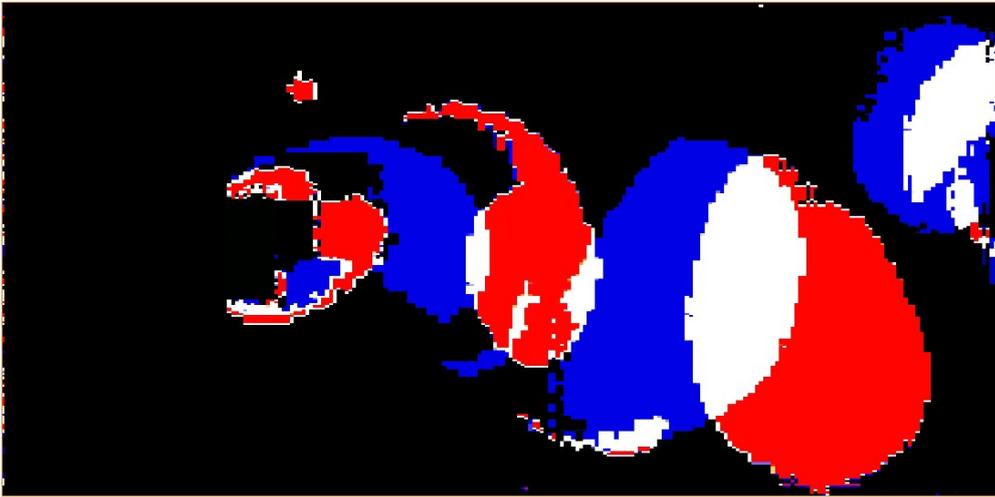


图 5.10: Karman 渦列 $\Delta t=100$

5.2 まとめ：差分の間隔についての検討

提案手法における差分の間隔についての検討を Cavity Flow 問題及びカルマン渦列を対象に行なった。

Cavity Flow 問題についてはレイノルズ数 $Re=1000$ の $t=0.1$ において、 Δt を 0.1 から 0.5 まで変化させた提案手法を用いて可視化を行なった。 Δt を増やすことで、流れの現象が進行するため、時系列における渦領域の変化も大きくなったことで、静止画 1 枚で広いタイムステップ間の渦領域の変化を捉えることができる。検討の対象とした Cavity Flow の $t=0.1$ におけるレイノルズ数 $Re=1000$ の問題は、渦が拡大していくという過渡的な変化をするため、差分間隔を大きくしても、特徴をあまり喪失することなく可視化できた。したがって、流れの現象における時系列における渦領域の変化を大雑把に観察したい場合は、 Δt を大きくとることが有効である。しかし、 Δt が多き過ぎた場合、差分の間に起きた渦領域の変化が欠落してしまう可能性があるため、流れの現象を考えて Δt を決定する必要がある。逆に、 Δt を小さくすると渦領域の生成や消滅といった変化を精度良く捉えることができる。これは、流れの現象を正確に見たい場合に有効に使うことができるが、渦領域が微細にしか変化しないため簡単に現象を把握しようとした場合には不向きである。例をあげると、Karman 渦列での検討における図 5.6 が良い例である。この可視化においては、検討した中で最も小さい Δt を 0.1 取っており、流れの現象における渦領域の変化を最も精度良く捉えている。しかし、可視化結果としては、流れの現象を容易に理解するには有効とはいえず、 Δt を大きく取った図 5.8 が流れの現象を理解するには有効であると考えられる。

5.3 重畳可視化について検討

本報で提案した可視化手法では、渦領域及び時系列計算における $T-1$ 時刻から T 時刻での渦領域の変化を明示的に捉えることができる。

流れの現象をより詳しく観察したいと考えた場合、流れにおける重要な特徴を含んでいる渦領域を詳しく見ることが良いと考える。しかし、提案手法は、大まかな流れの渦領域の生成、消滅や継続などといった情報を得ることができるが、流れの強さや方向などの情報を得ることは困難である。

したがって、本報で提案した可視化手法における時系列における渦領域の変化と2章で述べた一般的な可視化手法とを重畳して可視化することで、流れの現象の特徴的な部分のみを詳細に観察できると考えた。

そこで、本可視化手法+一般的な可視化手法を重畳して表示した場合の可視化結果について検討を行なった結果を述べる。

5.3.1 Cavity Flow における重畳可視化

Cavity Flow 問題のレイノルズ数 $Re=1000$ の $t=0.10$ における結果を対象に本研究において提案した可視化手法を適用した後、一般的な可視化手法である Vector 及び LIC 法を重畳して表示した結果を示す。

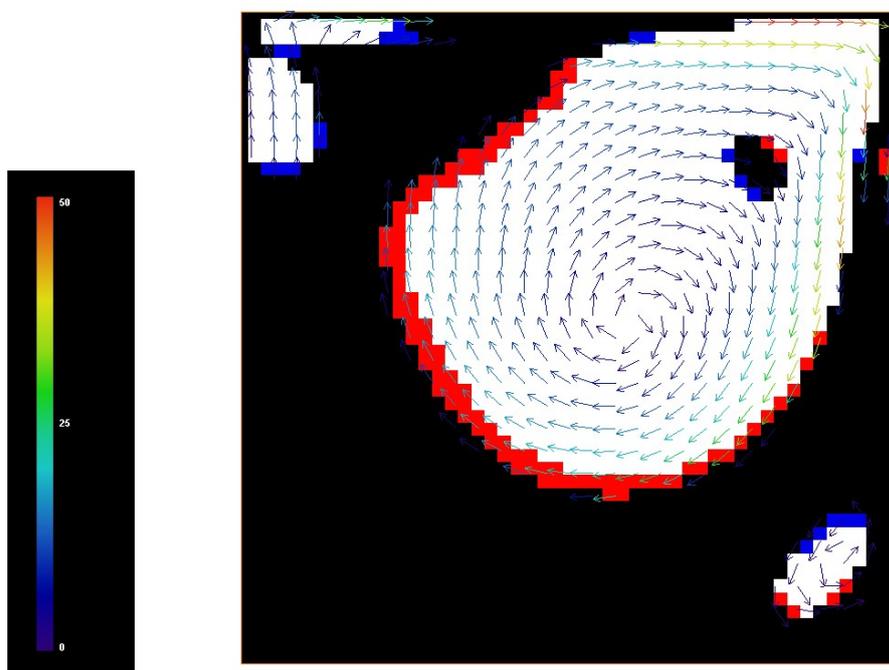


図 5.11: Cavity Flow Vector との重畳可視化

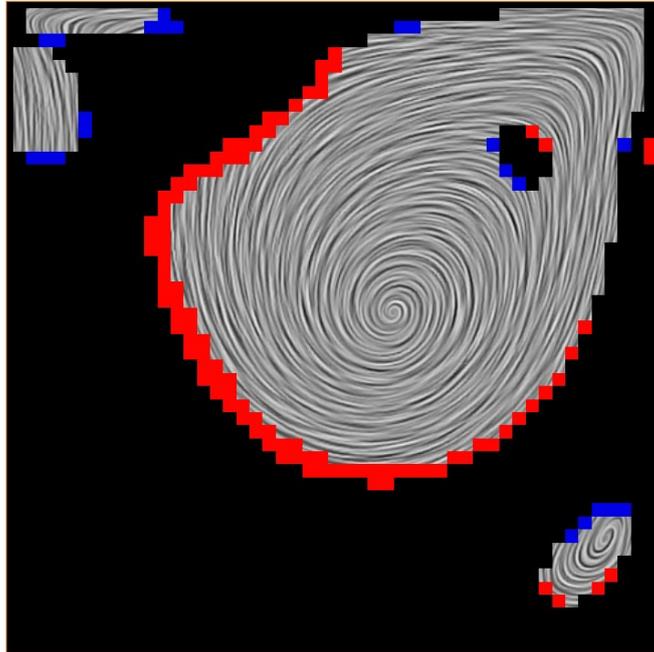


図 5.12: Cavity Flow LIC 法との重畳可視化

図 5.11 は, レイノルズ数 $Re=1000$ における $t=0.10$ における Cavity Flow 問題に提案可視化手法を適用し, 渦領域内に Vector による可視化手法を重畳して可視化を行なった結果である.

重畳して可視化したことにより, 提案手法により時系列における渦領域の生成, 消滅, 継続などといった変化と Vector による渦領域内の流れの方向や強さを見ることができる.

図 5.12 は, レイノルズ数 $Re=1000$ における $t=0.10$ における Cavity Flow 問題に提案した可視化手法を適用し, 渦領域内に LIC 法を重畳して可視化を行なった結果である.

重畳して可視化したことにより, 提案手法による時系列における渦領域の生成, 消滅, 継続といった変化および, LIC 法の可視化による渦領域の渦の中心を見ることができる.

5.3.2 Karman 渦列における重畳可視化

Karman 渦列のレイノルズ数 $Re=500$ の $t=300.0$ における結果を対象に本研究において提案した可視化手法を適用した後、一般的な可視化手法である Vector 及び LIC 法を重畳して表示した結果を示す。

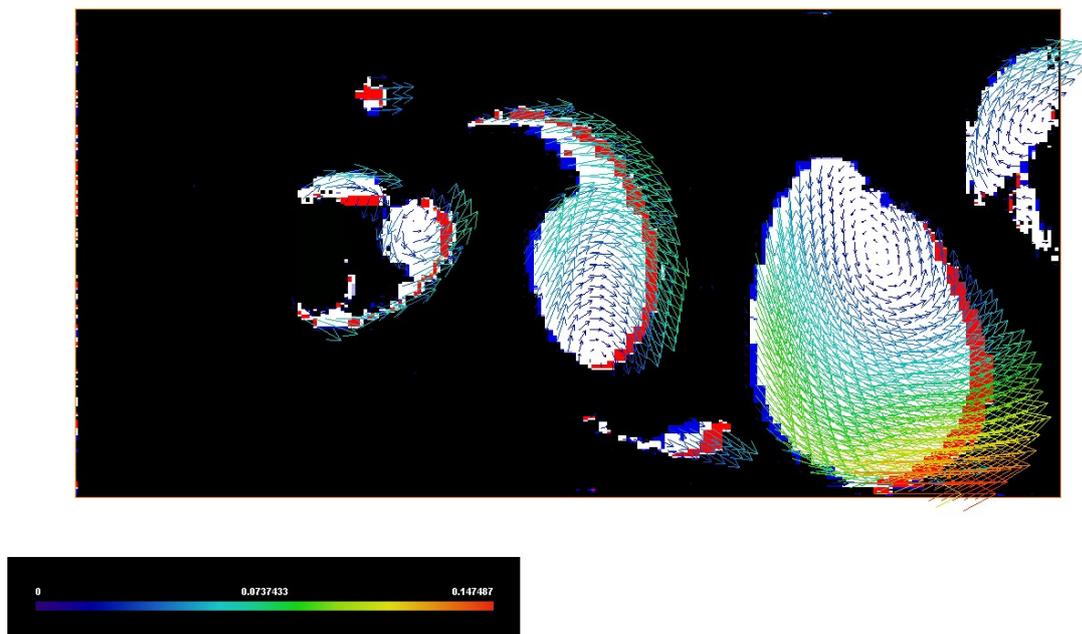


図 5.13: Karman 渦列 Vector との重畳可視化

図 5.13 は、レイノルズ数 $Re=500$ における $t=300.0$ のカルマン渦列を対象に提案手法を適用し、渦領域内を Vector 表示で可視化した結果である。

提案手法による可視化では、渦領域の生成、消滅、継続、非渦などといった変化を見ることができ、それ以外の流れの詳細な情報は得ることは困難である。

Vector 表示を重畳を渦領域内に重畳して可視化することで、渦領域の変化の情報以外にも、流れの方向や強さなどといった情報を得ることができる。

また、領域全体を可視化するのではなく重要な特徴である渦領域内のみについて重畳して可視化を行なうことで、注目領域を限定することができユーザの可視化におけるユーザの負担を減らすことができると考える。

図 5.14 は、レイノルズ数 $Re=500$ における $t=300.0$ の Karman 渦列を対象に提案手法を適用し、渦領域内に LIC 法を適用し可視化を行なった結果である。

提案手法による可視化で、時系列における渦領域の生成、消滅、継続、非渦などといった変化を見ることができ、それ以外の情報を得ることは難しかった。

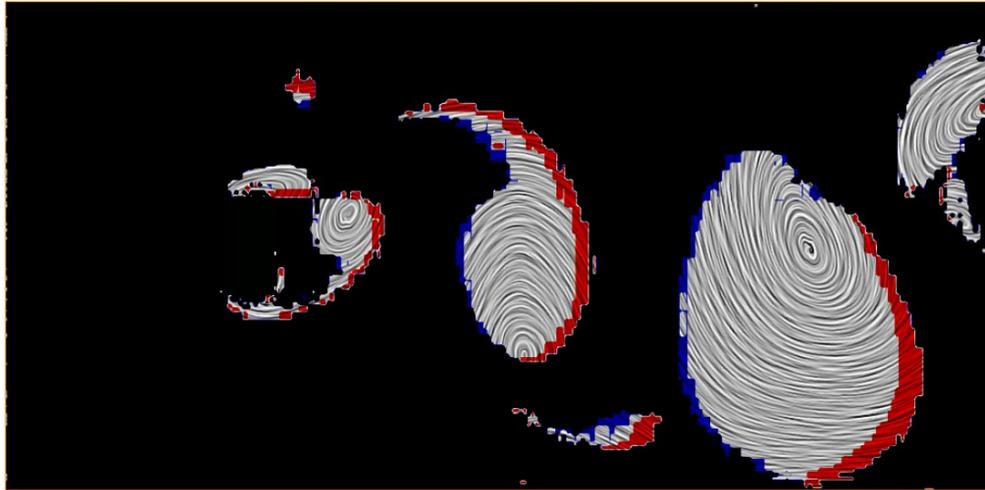


図 5.14: Karman 渦列 LIC 法との重畳可視化

LIC 法による可視化を渦領域内に適用することで、時系列における渦領域の変化の情報以外にも渦中心を見ることができる。

また、領域全体を可視化するのではなく渦領域内のみについて LIC 法による可視化を重畳することで、注目領域を限定することができる。

これにより、大規模な流れや複雑な流れに提案手法と一般的な可視化手法を重畳して用いることで、流れの現象をわかりやすく表現できると考える。

5.4 まとめ

Cavity Flow の $t=0.10$ におけるレイノルズ数 $Re=1000$ の問題と Karman 渦列の $t=300.0$ におけるレイノルズ数 $Re=500$ を対象に重畳可視化に関する検討を行なった。

提案手法では、時系列における渦領域の変化を、渦領域の生成、渦領域の消滅、渦領域の継続、非渦領域と定義することで明示的に示すことがことを 4 章にて確認した。

そこで、提案手法を用い、渦領域内に一般的な可視化手法な可視化手法である Vector 及び LIC 法を対象に重畳可視化を行なった。

提案手法に一般的な可視化手法を重畳して表現することで、渦領域内における流れに詳細な情報を得ることが可能となった。

Vector を重畳して可視化すると、時系列における渦領域の生成、消滅、継続などといった変化および、渦領域内における流れの方向や強さなどという情報を得ることができる。

また、LIC 法を重畳して可視化すると、時系列における渦領域の生成、消滅、継続などといった情報の他に、渦領域内における中心表現することができた。

提案手法と他の流れの表現手法を重畳して用いるということは、渦領域内の流れを詳細に示すことができ、流れの現象を理解する上で有効であると考えられる。また、渦領域内のみを可視化することで、大規模や複雑な流れにおいても観察領域を減らすことができ、流れの現象を理解しやすく出来ると考える。

第6章 考察

本研究では、 λ_2 法による渦領域抽出法を利用して、時系列による渦領域の変化を明示的に表現する可視化手法を提案した。本手法の場合、静止画を複数並べて比較した場合に比べて、1つの画像のみで境界面の移動量に関して定量的に評価可能である。非定常流れの場合、渦の主な変化は生成、移動、合流・分岐、消滅の4つの現象が起こる可能性があるが、その変化を2つのフレーム間で確認できる。近年、断面の2次元+奥行きに時間変化を取る3次元可視化が盛んであり、この場合は渦領域の変化をボリュームレンダリング、等値面生成などの手法によって俯瞰で観察することになる。この手法は上記4つの現象を観察することに有効性があるが、一方、本報告の場合は2フレーム間の定量的な変化が観察可能であり、目的によって手法の選択が必要となる。定常解析におけるレイノルズ数による渦領域の変化においては、領域の変化を明示することができた。これまでも渦度、速度の大きさによる等値線による差分可視化が流体解析の後処理として行われている。本手法は、 λ_2 法を使用することで、渦領域の境界位置比較が可能な点に有効性があり、レイノルズ数の変化によっても渦領域境界を示すパラメータ(λ_2 値)に変化はない。渦度による等値線の場合、ユーザは渦領域を渦度の閾値を決定する必要があるが任意性が高く、その閾値が必ずしも渦領域境界を示すとは限らない。また、渦度の場合せん断速度(境界層流れ)も含まれてしまうなどデメリットも知られている。よって、ユーザビリティの面で有効性があるものと考えられる。また、提案した渦領域の定義について考察すると、渦領域の変化を渦領域の生成、渦領域の消滅、渦領域の継続、非渦領域と定義した。これによって、時系列における渦領域の変化を明示的に示すことが出来るようになったと考える。さらに、提案手法を適用する際の時間間隔について Cavity Flow 及び Karman 渦列を対象に検討を行なった。その結果、時系列において渦領域の変化の少ないものに対しては時間間隔 Δt を比較的大きくとした方が、流れの現象がわかりやすく表現できると考える。提案手法と一般的な可視化手法である Vector 及び LIC 法との重畳可視化について検討をおこなった。重畳可視化を行なうことで、提案手法による時系列における渦領域の変化と一般的な可視化による詳細な流れの情報を得ることが出来るため、流れの現象を理解する上で有効な可視化手法であると考えられる。また、渦領域を抽出することで、可視化する領域を大幅に減らすことができるため、大規模や複雑な形状における数値流体力学計算において観察する領域を減らすことができ、流れの現象を理解を容易にできると考える。

第7章 結言

7.1 まとめ

数値流体力学計算の結果の可視化に使われている Vector や LIC などの一般的な可視化手法に関して検討を行なった。数値流体力学計算において、流れの現象を理解する為に重要な特徴である渦が含まれている領域である渦領域に注目し、渦領域の変化の状態を定義することにより時系列における渦領域の生成や消滅、継続といった変化を明示的に示すような手法を開発した。

また、Cavity Flow 及び Karman 渦列について提案手法を適用し、提案手の実装の検証及び、その可視化結果について検討を行なった。

Cavity Flow に関してはレイノルズ数 $Re=100$, $Re=500$, $Re=1000$ を対象に提案手法を適用し可視化した結果について検討を行なった。また、渦が移動するような流れの現象である Karman 渦列のレイノルズ数 $Re=500$ の流れを対象に提案手法を用いて、可視化結果を検討を行なった。

さらに、提案手法を適用する際の時間間隔 Δt を変化させた際の可視化結果について検討を行なった。

Δt に関しては Δt を小さい値から大きな値に変化させて、提案手法を適用した場合の可視化結果について考察を行なった。

また、Cavity Flow 及び Karman 渦列を対象に、提案手法と一般的な可視化手法と重畳可視化を行ないその結果について考察を行なった。

7.2 展望

数値流体力学計算における時系列の計算結果に関して渦領域の変化を明示的に示す可視化手法を開発した。

しかし、今回対象としたような Cavity Flow や Karman 渦列といった比較的単調な渦の変化の現象では提案手法の有効性を十分に示せたとはいえない。

近年は、計算機性能の向上により、海洋流や気象などの分野においても数値流体力学計算が行なわれるようになっており、そのような流れを観察する際には渦領域というものが非常に重要となってくる。

今回開発した提案手法はこのような大規模な可視化に適用した場合、流れをわかりやすく可視化するのに非常に有効であると考えられる。

また、鼻腔や血管などの複雑な渦の変化がおこるような流れにおいても、本提案手法は有効に活用できると考える。

したがって、今後は大規模な流れや鼻腔や血管などといった複雑な流れを対象に、提案手法の有効性を検証する必要があると考える。

しかし、現状の実装では非構造格子から構造格子への変換アルゴリズムが未熟であるため、複雑な形状を扱うことができない。そこで、非構造格子から構造格子への変換アルゴリズムを修正する必要がある。

参考文献

- [1] J.Jeong and F. Hussan On the Identification of Vortex Journal of Fluid Mechanics, Vol. 285, pp69–94, 1995.
- [2] Ming Jiang , Raghn Marchiraju and David Thompson A Novel Approach To Vortex Core Region Detection IEEE TCVG Symposium on Visualization(2002)
- [3] Topology-Preserving λ_2 -based Vortex Core Line Detection for Flow Visualization IEEE-VGTC symposium on Visualization(2008) Volume27
- [4] Monika Jankun-Kelly, Ming Jiang, David Thompson, Raghu Machiraju. Vortex Visualization for Practical Engineering Applications IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, VOL. 12 NO.5, 2006
- [5] Vaclav Kolar Vortex identification: New requirements and limitations Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp638–652, 2007.
- [6] U.Chia, K.N.CHIA and C.T.SHIN High-Resolution for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method Journal of Computational Physics, Vol. 48, pp387–411, 1982.

謝辞

本研究を行なうに当たり、終始御指導を賜りました松澤照男教授に深く感謝致します。また、日頃から有益なご助言を頂きました渡邊正宏博士に感謝致します。

的確なご意見、ご助言いただきました前園 涼 講師、井口 寧 准教授に深く感謝致します。議論及び貴重なご意見を賜りました松澤研究室の先輩である太田理氏、森太志氏に感謝致します。

本論文をまとめるに当たり御協力下さいました松澤研究室の皆様に厚く御礼申し上げます。なお本研究は、富士通株式会社の御支援を賜りました。

発表論文

1. 埴田 翔, 渡邊 正宏, 安里 彰, 門岡 良昌, 松澤 照男, "非圧縮性粘性流れにおける渦領域の抽出及び可視化", 第 23 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集 pp.119, 2009.12