

# 見せない可視化 微分位相幾何学が切り拓く 超大規模データ視覚解析への道

藤代 一成

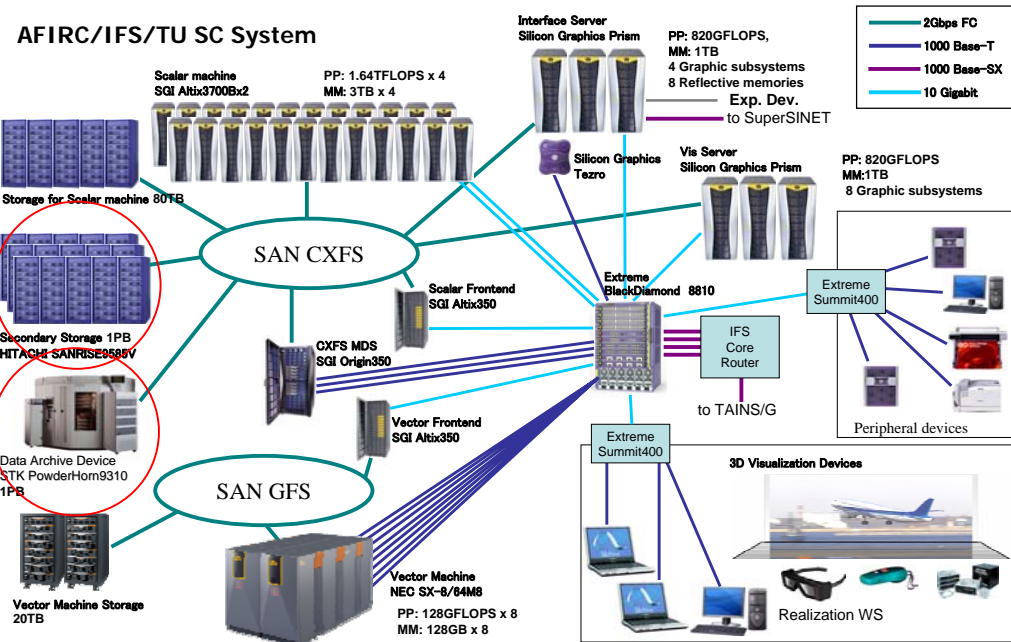
東北大学 流体科学研究所/大学院情報科学研究科

2006年12月19日

## 背景: データ危機 (data crisis)

- 計測, 数値シミュレーションから生成される  
大規模な時系列ボリュームデータ
- 例: パラメタスタディ
  - $256^3$  規則格子16ビット, 8,192タイムステップの時系列ボリューム
  - 4つの物理パラメタ各々に8個のサンプル値
  - 問題: 総記憶容量は?

$$256^3 \times 2 \times 8,192 \times 8^4 = 2^{24} \times 2 \times 2^{13} \times 2^{12} = 2^{50} = 1P \text{ (bytes)}$$



## 大規模ボリュームデータの探査

- データ危機 (情報ビッグバン)  
[NIH/NSF VRC Report Jan. 2006]
  - 興味ある部分時空間の特定が困難
  - 領域固有の知識や経験則に依存
  - 系統的探索による発見の機会が減少

- 半自動的特徴解析に基づく

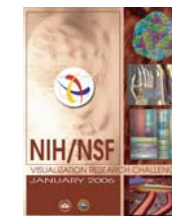
協調的可視化環境

(Cooperative Visualization Environment : CVE)

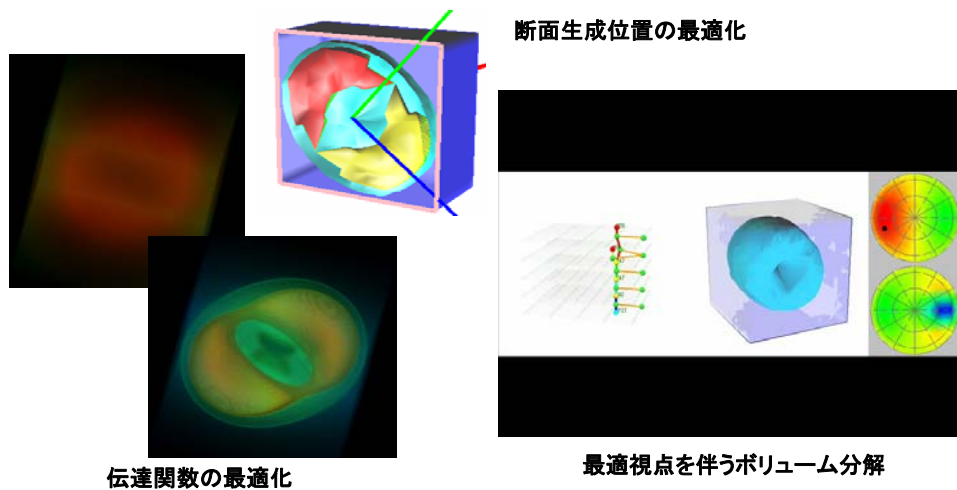
開発の必要性

- T-PROJECT (1999~)

- 微分位相幾何学 (differential topology) に根ざした横断的な VDM (Volume Data Mining) ツールを開発 [CG&A, 2000]
- データ中心 (data-centric) のパラメタ調整 (parameter tweaking) により セレンディピティ (serendipity) を提供



# ギャラリー1: 解析的関数

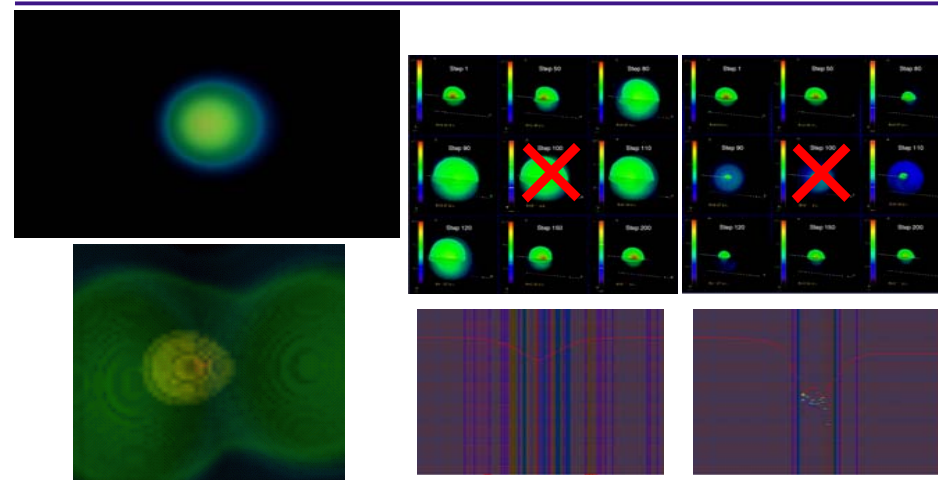


断面生成位置の最適化

伝達関数の最適化

最適視点を伴うボリューム分解

# ギャラリー2: 原子衝突



臨界時間区間に限定したアニメ

アニメを必要としないパラメタスタディ

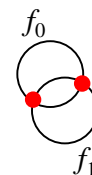
# 発表内容

- 数学的準備
- レベルセット解析
- 位相的VDMツール
  - 臨界点ヒストグラム
  - 多次元伝達関数設計
  - 区間型ボリューム分解
  - 最適視点決定
- T-Map
- 結論

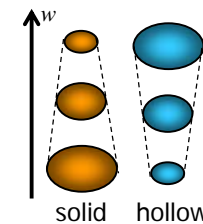
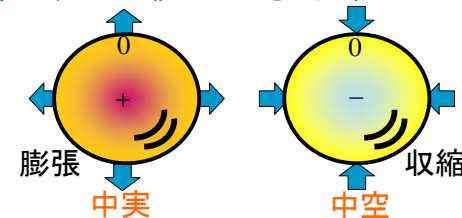
# ボリューム: 3次元ハイトフィールド

3次元のスカラー値関数:

$$w = f(x, y, z)$$



- 交差しない等値面列に分解可能
- 分類: フィールド値wが小さくなると ...



- 仮定: fは等値面の一番外側が中空になるように符号を定義

# 区間型ボリューム [Vis'95&TVCG96]

$$IV(\alpha, \beta) = \{p \in R^3 \mid \alpha \leq f(p) \leq \beta\}$$

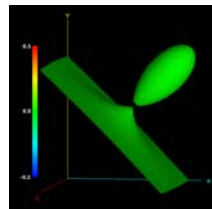
## ■ 定義

- ソリッドコンター (等値面の掃引)
- 汎化された等値面  
 $IV(\alpha, \alpha)$ : 目的値  $\alpha$  の等値面に縮退

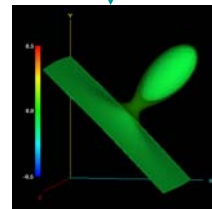
## ■ ソリッドフィッティング

- **Marching Cubes** を拡張して, 四面体ブロックをハンドリング

$$f(x, y, z) = x^3 - 3xy + y^3 + \frac{3}{2}z^2(x + y + 1)$$



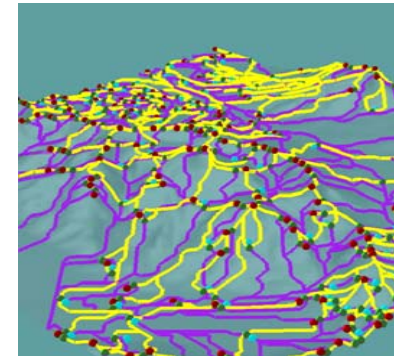
等値面  $f=0$



$IV(-\epsilon, +\epsilon)$

# DEMの特徴解析

地理的特徴の利用 [Takahashi, et al.:EG95]



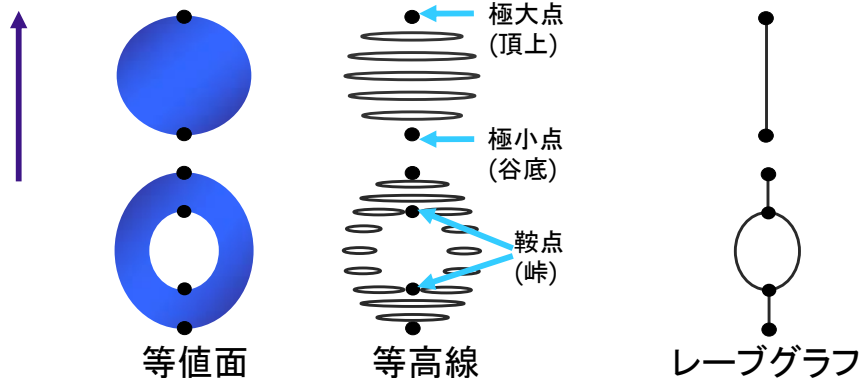
**臨界点** (頂上・谷底・峠)

**特徴線** (尾根線・谷線)

ボリューム空間に拡張

# レーブグラフ: DEMの骨格化

高さ関数



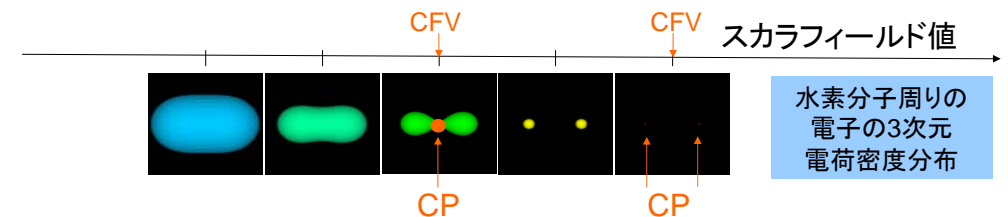
# ボリューム臨界点

## ■ 臨界点 (Critical Point:CP)

等値面の位相変化が生じている点

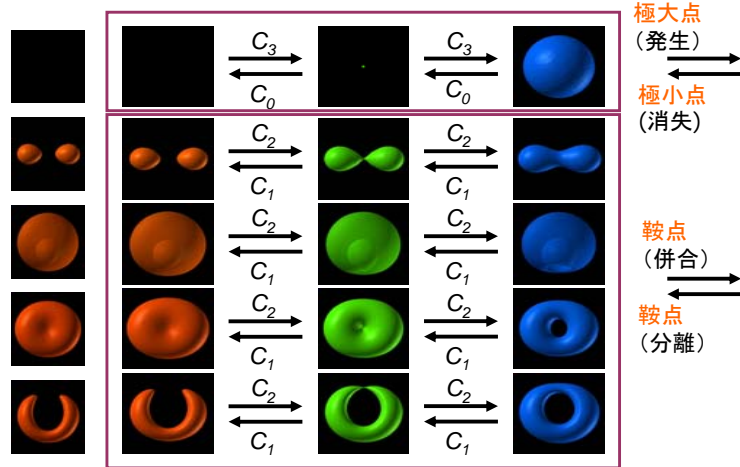
## ■ 臨界フィールド値 (Critical Field Value:CFV)

等値面の位相変化に対応するフィールド値



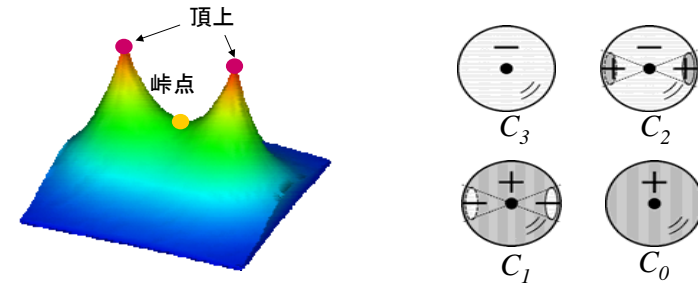
# 臨界点周りの等値面の変化

wが小さくなるにつれて...



# 臨界点の抽出

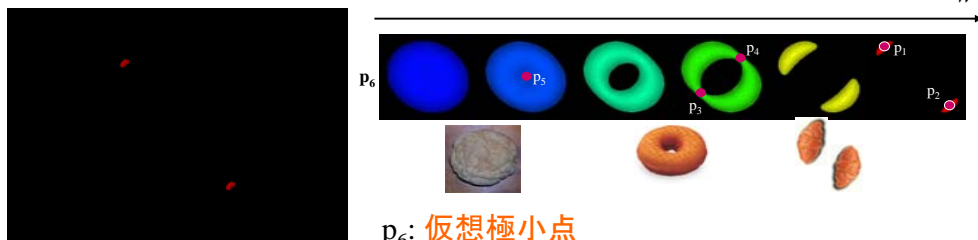
- 隣接する標本点間のフィールド値の差
- 位数: 標本点におけるヘシアン固有値の負の固有値の個数



# Bread Basket Volume

$$w = f(x, y, z) = 4c^2((x-R)^2 + (z-R)^2) - ((x-R)^2 + y^2 + (z-R)^2 + c^2 - d^2)^2 + 4c^2((x+R)^2 + (z+R)^2) - ((x+R)^2 + y^2 + (z+R)^2 + c^2 - d^2)^2$$

where  $0 < d < c, c^2 + d^2 \geq 6R^2$



$P_6$ : 仮想極小点  
 $\#\{C_3\}=2, \#\{C_2\}=2, \#\{C_1\}=1, \#\{C_0\}=1$

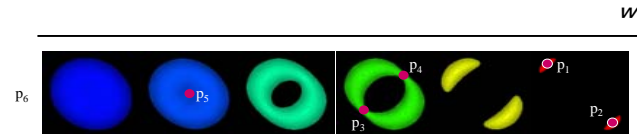
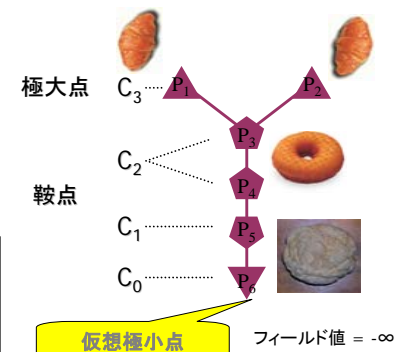
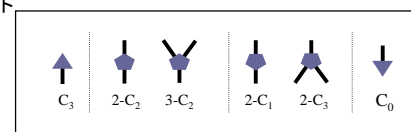
オイラーの公式:  $\#\{C_3\} - \#\{C_2\} + \#\{C_1\} - \#\{C_0\} = 0$

# 等値面の位相変化の追跡 [Graph. Models:04]

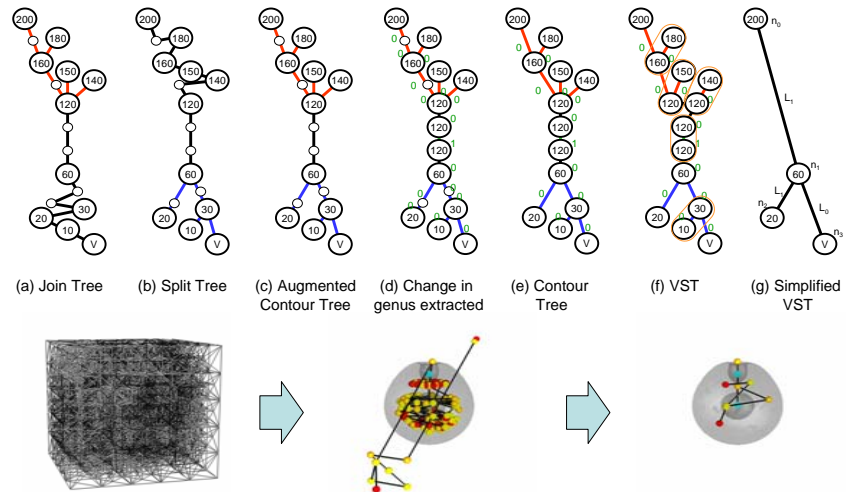
## Volume Skeleton Tree (VST)

- ノード: 臨界点
- リンク: 区間型ボリュームの連結成分

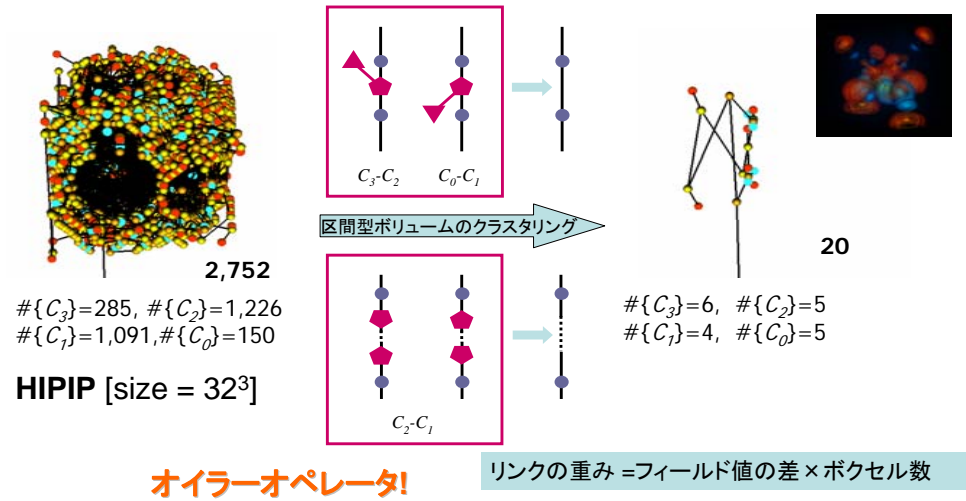
スカラーフィールド



# 位相的ボリューム骨格化 [GMP04]

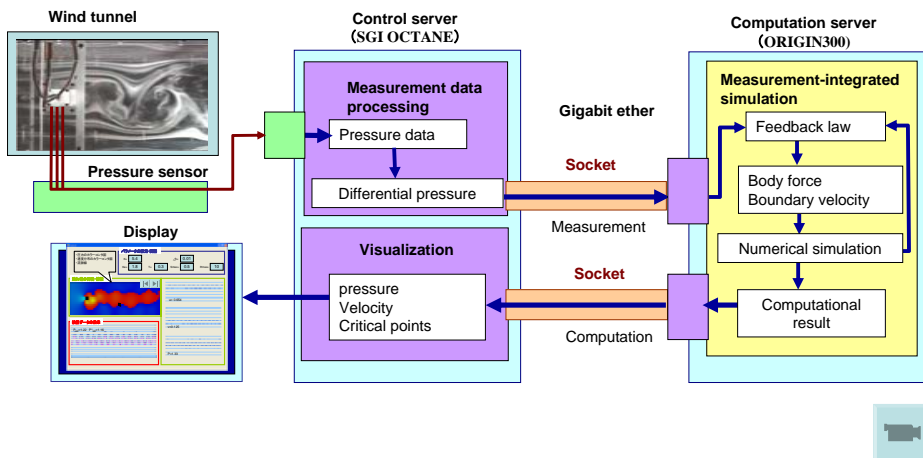


# VSTの簡単化

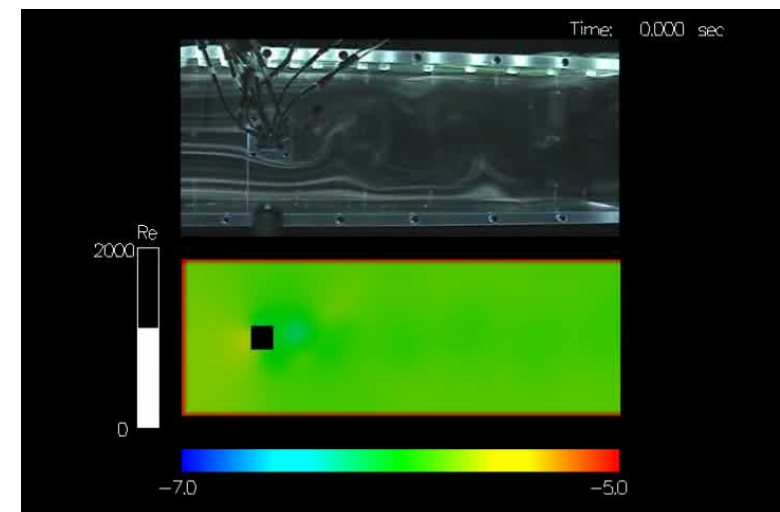


# ハイブリッド風洞

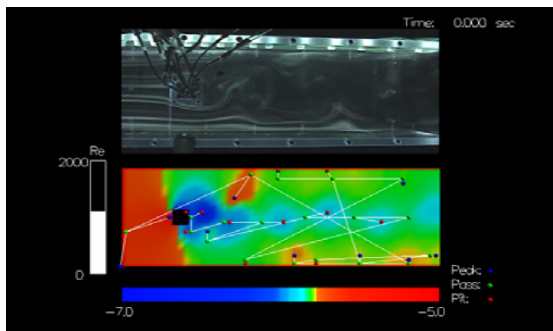
## 2D計測融合シミュレーションによる角柱後流の解析 (流体研早瀬研)



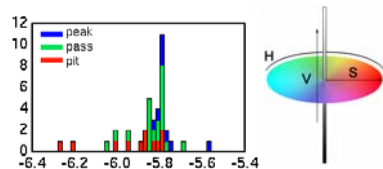
# 線形カラーマップによる圧力表示



# 段階的カラーマップの生成

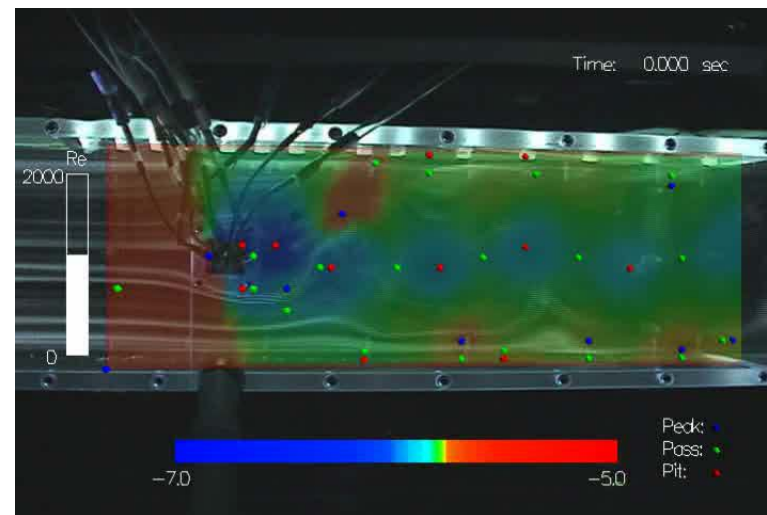


1. 各時刻の圧力場に対しレーブグラフを構成
2. 臨界点ヒストグラムを生成
3. CFV(特に極小値)の頻度に応じて色相角速度を制御したカラーマップを生成

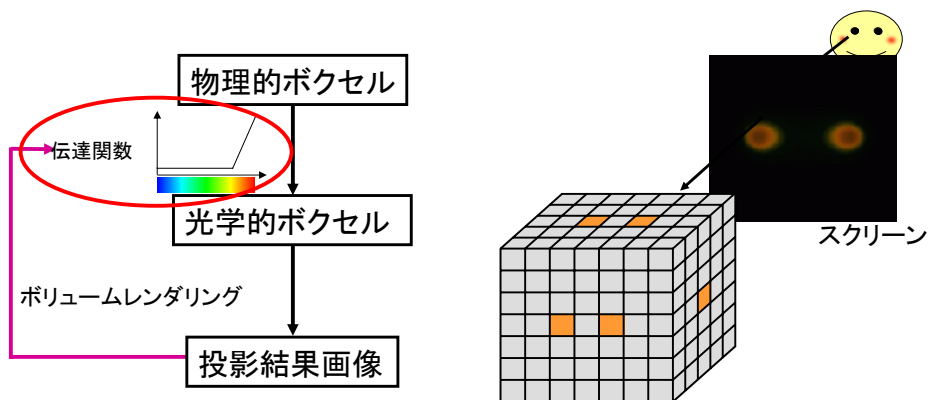


一意性を犠牲にして渦の記述能力を優先

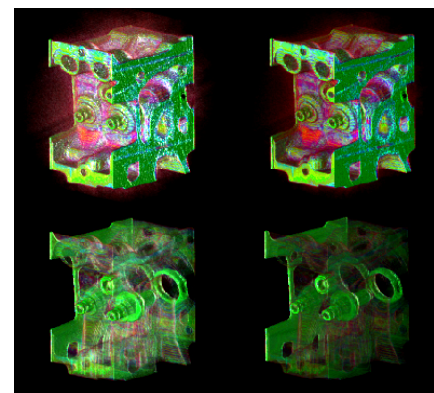
# 流跡線と圧力場の複合現実型表示



# ダイレクトボリュームレンダリング



# 伝達関数の自動設計問題

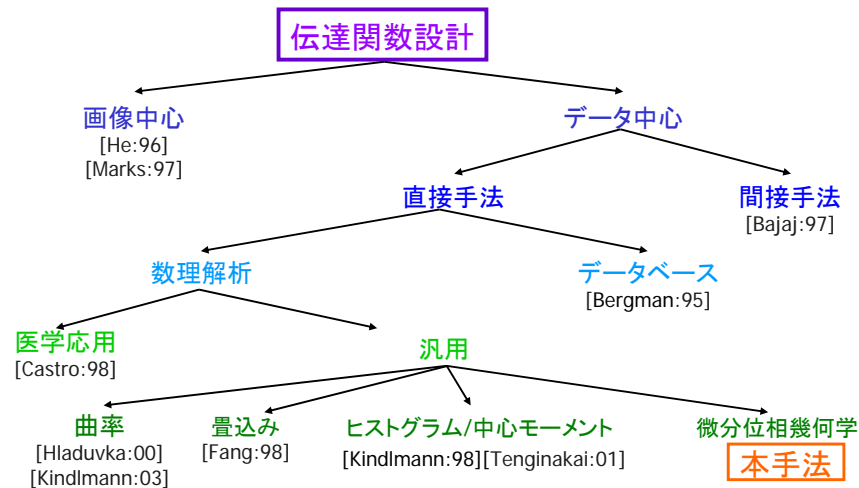


■ 4チャンネル(色ベクトル+不透明度)の制御

- ボリューム可視化における十大問題の一つ (Hanrahan@VolVis92)
- 次の10年間の挑戦的課題 (Panel@VG'99)
- TF Bake-off/パネル (Pfister, et al. @Vis2000)

画像提供: H. Pfister, MERL

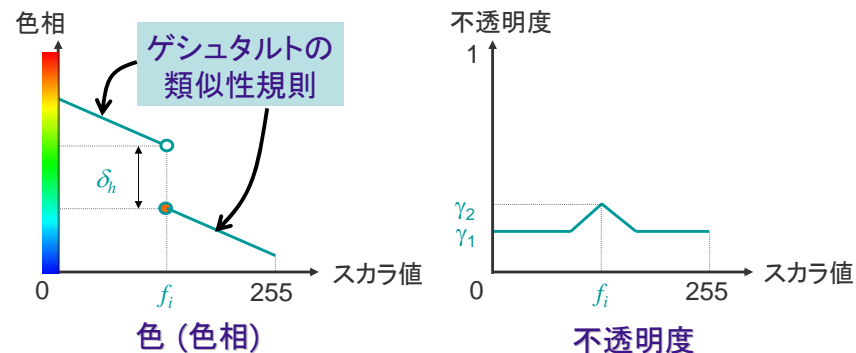
# 伝達設計手法の分類学



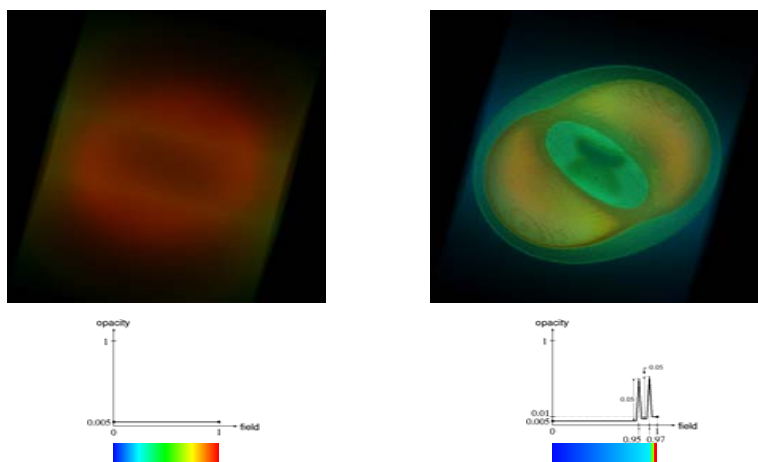
# 1次元伝達関数設計の基本方針

等値面の位相変化を強調

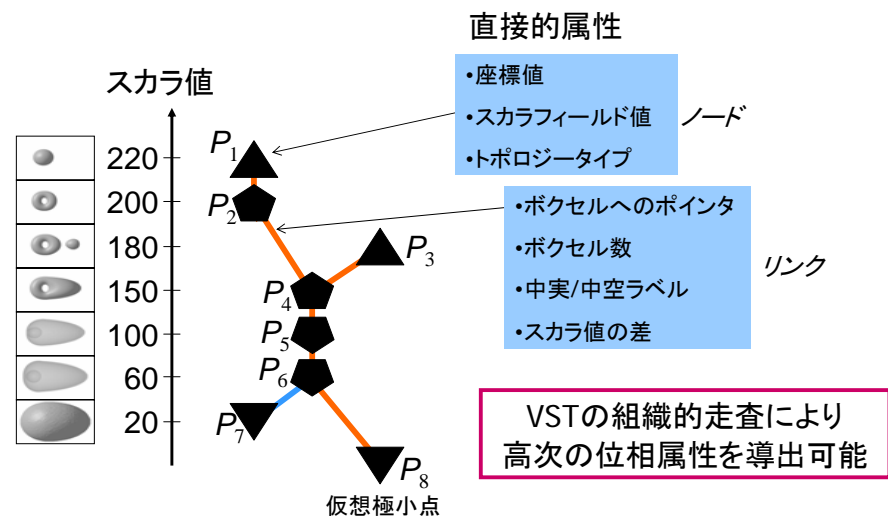
- 色相: CFV  $f_i$  で段差
- 不透明度: CFVの不連続性を強調



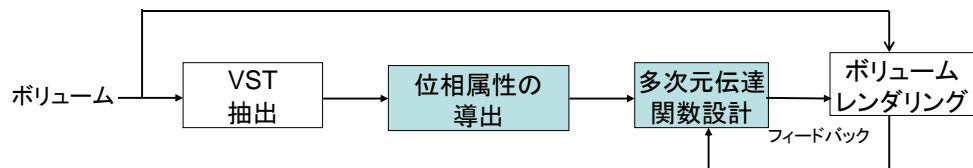
# 例:BBVのポリリューム可視化



# VSTの再検討



# 位相強調型多次元伝達関数 [VG05]



局所的属性

- 勾配 [Levoy:88]
- 導関数 [Kindlmann:98; Kniss:02]
- 曲率 [Hlavuska:00, Kindlmann:03]
- :

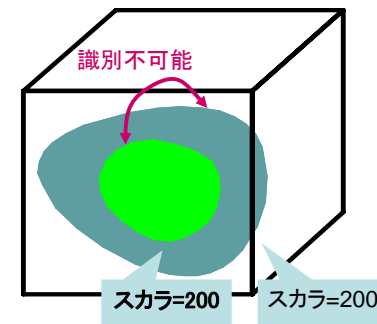
大局的属性

- 包含レベル
- 等値面軌道距離
- 等値面種数

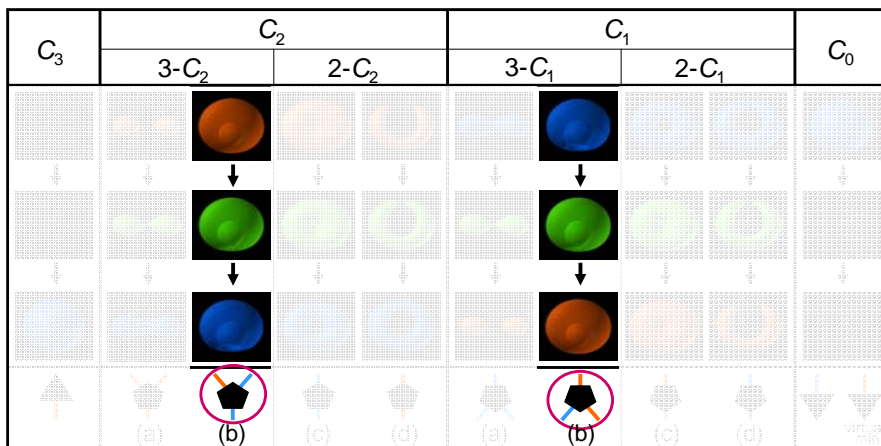
# 等値面の埋込み

頻繁に現れる問題

- 従来の1次元伝達関数では識別不可能
- 位相属性**包含レベル**を用いた2次元伝達関数を設計



# 臨界点周りの等値面の振舞い

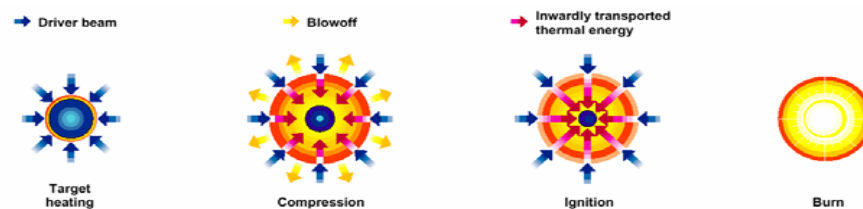


等値面埋込みの特定は対応するノードパタンの検出問題に帰着！

— 中実  
— 中空

# レーザ核融合における爆縮シミュレーション

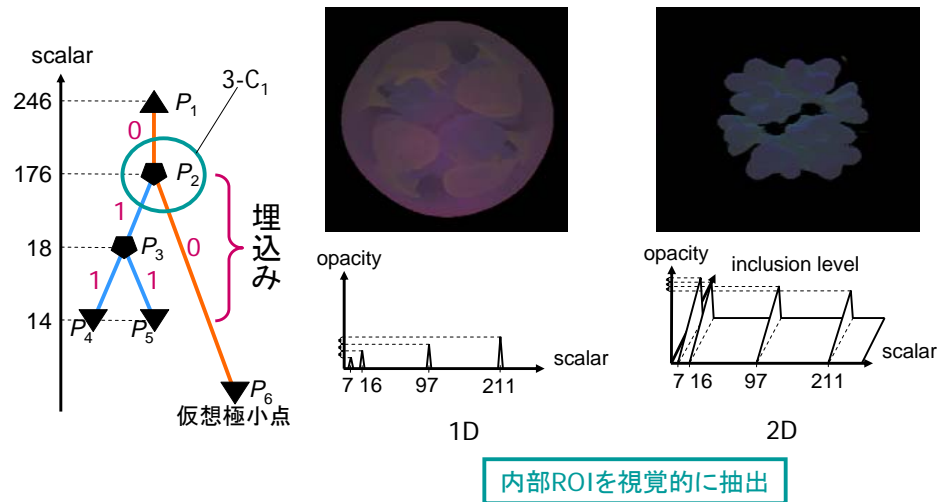
データ提供: 坂上仁志 (兵庫県立大学)



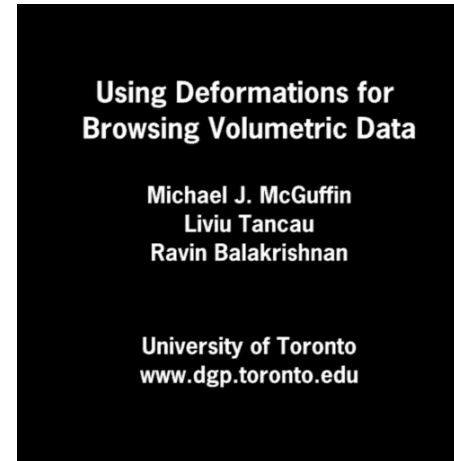
爆縮による3D燃料密度分布

- 目的: 燃料-容器間に時間発展する泡状の微細構造の観察
- 事実: 作用反作用により, 容器(外側)にゴースト面が発生し微細構造を遮蔽

# 等値面の埋込みを考慮した2次元伝達関数



# ボリュームブラウジング [McGuffin:03]



## ■“本”メタファ: 直感的な変形と文脈的ブラウジング

- Cutting into
- Opening up
- Spreading apart
- Peeling away

## ■制限: 層構造ボリュームを仮定

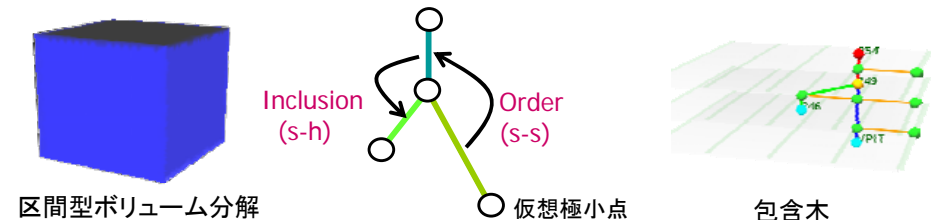
# 区間型ボリューム分解 [VDA05]

- **対話モード**: VSTのリンクを指定して対応する区間型ボリュームを直接剥ぐ
- **自動モード**: VSTを組織的に走査して外側から順に区間型ボリュームを剥ぐ (peeling)



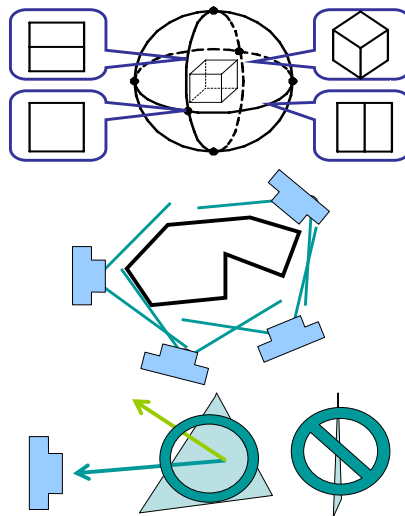
# 自動的分解

- VSTを仮想極小点から系統的に走査
- 等値面の位置関係
  - 順序関係 (中実-中実)
  - 包含関係 (中実-中空)



# 最適視点選択の基準

- 心理学実験 [Blanz et al.:1999]
  - 重要な特徴が見える
  - 見え方が安定している
  - 遮蔽されている特徴が少ない
- 関連研究
  - アスペクトグラフ (CAD) [Koenderink et al.:1979] [Shimshoni et al.:1997]
  - 3次元形状再構成 (CV) [Gremban et al.:1994] [Pito:1997]
  - 3次元オブジェクトの投影 (CG) [Kamada et al.:1988] [Barral et al.:2000]
  - ボリュームレンダリング (Vis) [Bordoloi&Shen:2005] [Takahashi et al.:2005]



# ビューエントロピー [Vazquez et al.:2001]

各面の見え具合を確率とみなして、エントロピーを定義

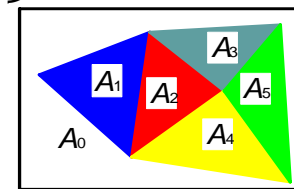
$$E = - \sum_{i=0}^m \left( \frac{A_i}{S} \right) \log_2 \left( \frac{A_i}{S} \right)$$

パッチの見え具合

$$S = \sum_{i=0}^m A_i$$

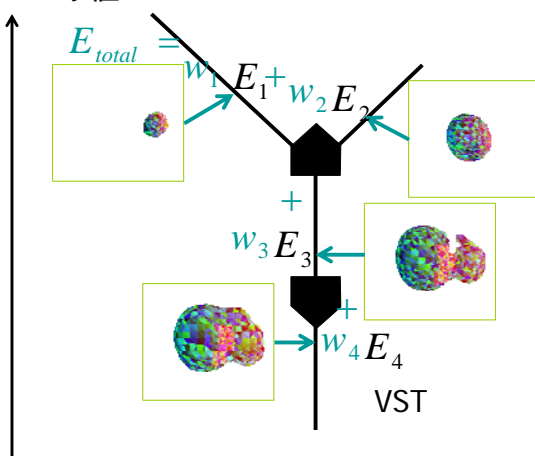
スクリーンの総面積

スクリーン



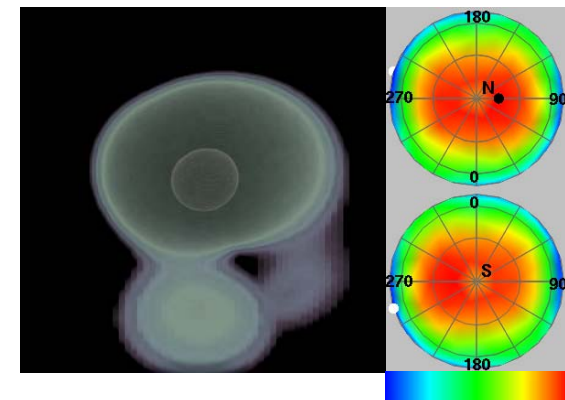
# 区間型ボリューム分解に基づく最適視点決定

スカラ値



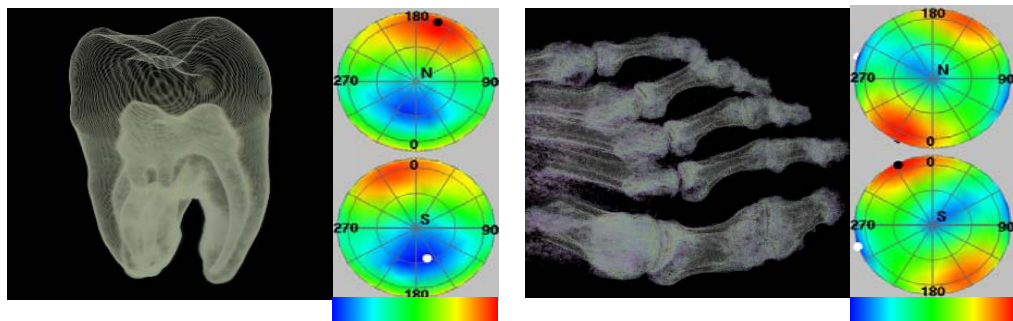
- VSTの各リンクに対応する区間型ボリュームに対して、ビューエントロピーを評価し、その加重平均を最大化
  - 重み: 多次元不透明度伝達関数

# 結果:陽子-水素原子衝突データ



ビューエントロピーマップ

# メディカルデータの結果



Tooth

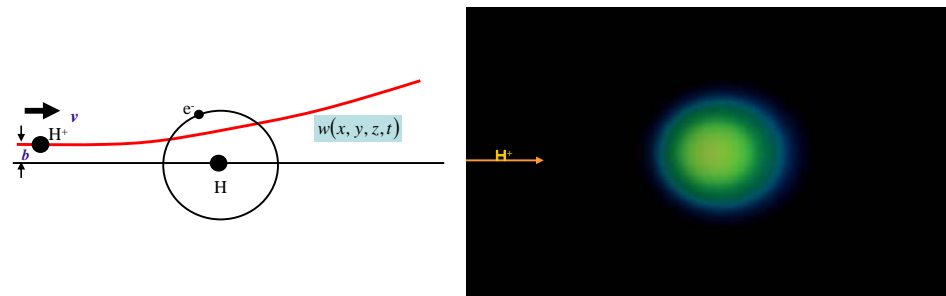
Human foot

区間型ボリューム分解との組合せ



# 陽子-水素原子衝突

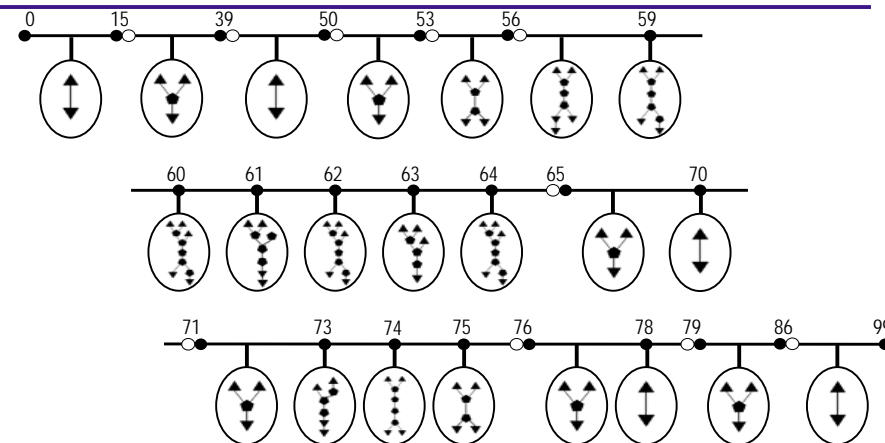
- 最も原始的な原子衝突問題
- 4Dシミュレーションデータ
  - $61^3 \times 10^4$  (オリジナル),  $30^3 \times 10^2$  (解析),  $61^3 \times 10^2$  (レンダリング)
- 陽子の初速度  $v$ , 衝突径数  $b \rightarrow$  陽子の軌跡・電荷密度  $w$



# ボリュームアニメーションの問題点

- GPUレンダリングを利用しても時間を浪費
- 共通する伝達関数  $\rightarrow$  重要な特徴を描ききれない可能性
- 関連研究
  - 対話的4D可視化 [Hanson:93]
  - 渦管の再構成 [Bank:95]
  - 等値面トラッキング [Silver:97]
  - 特徴アイコンビューワ [Walsum:96]
  - ハイパーボリュームスプラッティング [Bajaj:98]
  - 時間的伝達関数 [T-J Kelly:01]
  - 時間方向の射影ボリューム [Woodring:03]
- **T-map: 4Dボリュームの位相探索ツール** [画電誌:02, ISHPC05]
  - 応用独立
  - 真にvolumetric

# H-H+データのVST時系列



VSTに基づく時区間の二分探索  $\rightarrow$   
**臨界時刻(critical timings)**を特定

# 位相索引の導入

## 臨界点グラフの同値性の検出

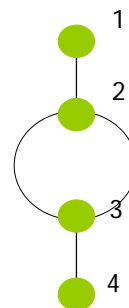
- グラフマッチング: 計算量的に高価
- グラフの定量化: **位相索引**
  - 計算化学からの導入

隣接行列  $\Rightarrow \Phi_C(x) = \sum_{i=0}^n p_i x^i$  : 特性多項式

距離行列  $\Rightarrow \Phi_D(x) = \sum_{i=0}^n q_i x^i$  : 距離多項式

$(I_C, I_D)$   $I_C = \sum_{i=0}^n |p_i|$   $I_D = \sum_{i=0}^n |q_i|$

# 位相索引の計算例



$$M_A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M_D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_C(x) = x^4 - 3x^2 + 1$$

$$\Phi_D(x) = x^4 - 20x^2 - 32x + 12$$

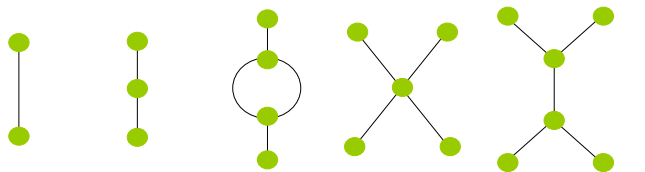
$$I_C = 1 + |-3| + 1$$

$$I_D = 1 + |-20| + |-32| + |-12|$$

$(I_C, I_D) = (5, 65)$

# 位相索引の特徴

臨界点  
グラフ

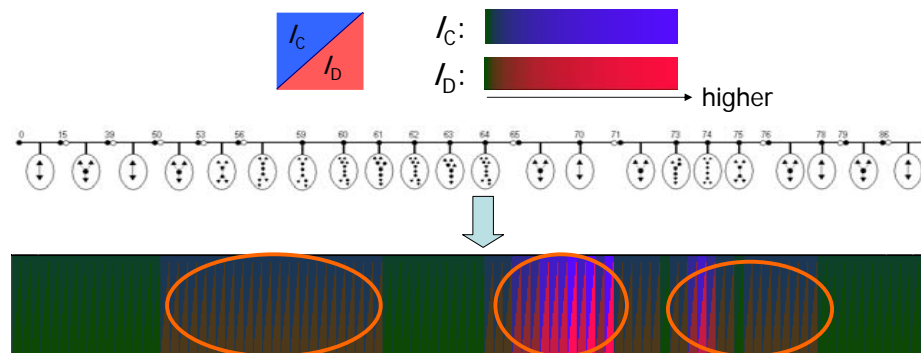


ノード数	2	3	4	5	6
リンク数	1	2	4	4	5
$(I_C, I_D)$	(2,2)	(3,10)	(5,65)	(5,245)	(10,1298)

- ✓ 極稀なケースを除いて、位相索引は探索キーとして利用可能
- ✗ 位相索引はノード数やリンク数の単調関数ではないので、相似性測度としては利用不可

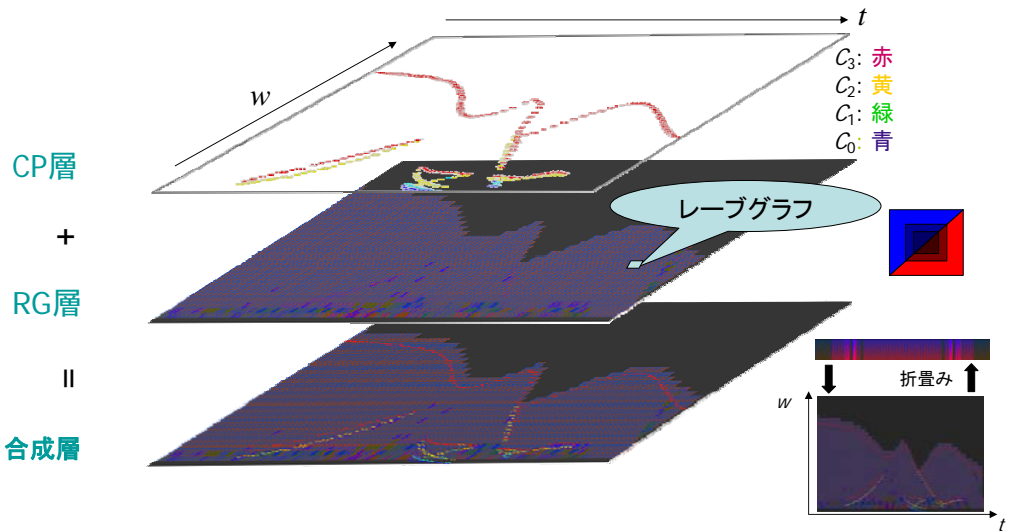
# 位相索引空間(T-IS)

グリフを一系列化し、位相索引値の変化を可視化

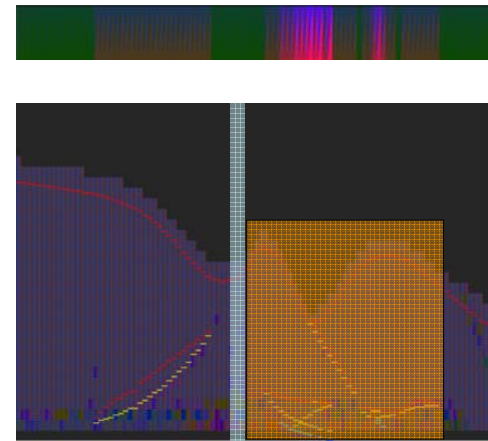


明度の高い部分時区間に位相的に複雑な現象が生起

# 位相索引空間の拡大



# 位相索引空間の解釈



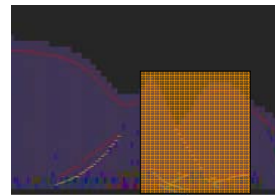
- 極小化するVSTの複雑さは衝突の瞬間を示唆
- 臨界点が衝突後の比較的低い電荷密度値の周りに集中

# 適応的データ操作

## ■ 選択的データマイグレーション (selective data migration)

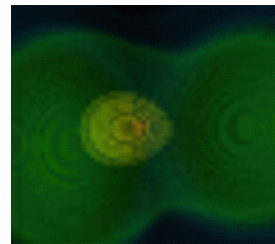
臨界時刻を含む時区間だけ  
選択的に仮想記憶にロード

- c.f. *Out-of-core*可視化
- 伝達関数の最適化



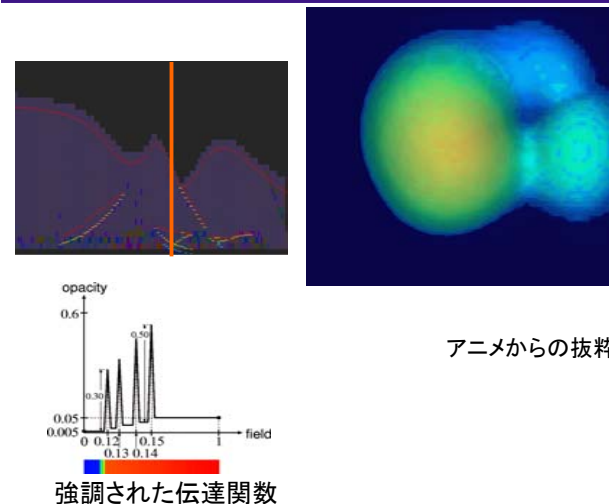
## ■ 適応的計算ステアリング (Adaptive computational steering)

選択された時区間に限定して詳細な計算を実行



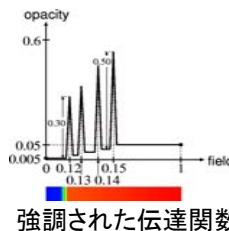
最適伝達関数を利用した短いアニメ

# スナップショットボリュームの位相強調可視化



位相強調型の可視化結果

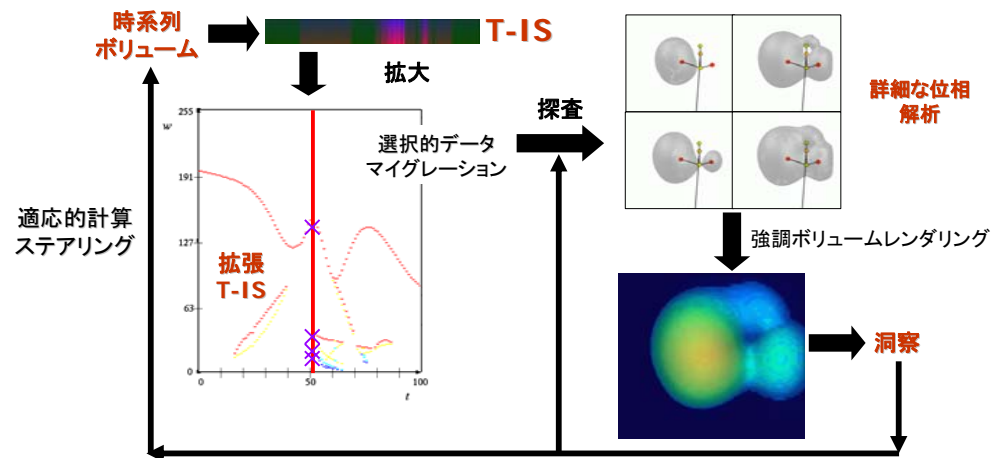
アニメからの抜粋



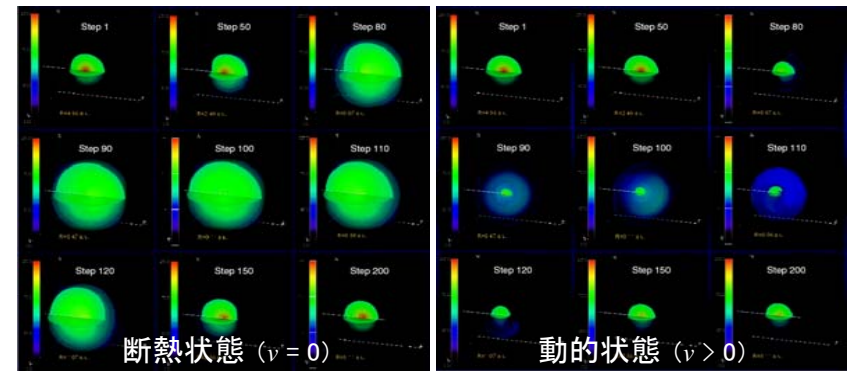
強調された伝達関数

- 多次元伝達関数
- 区間型ボリューム分解
- 最適視点決定
- :

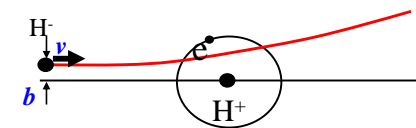
# サイクリック情報ドリルダウン



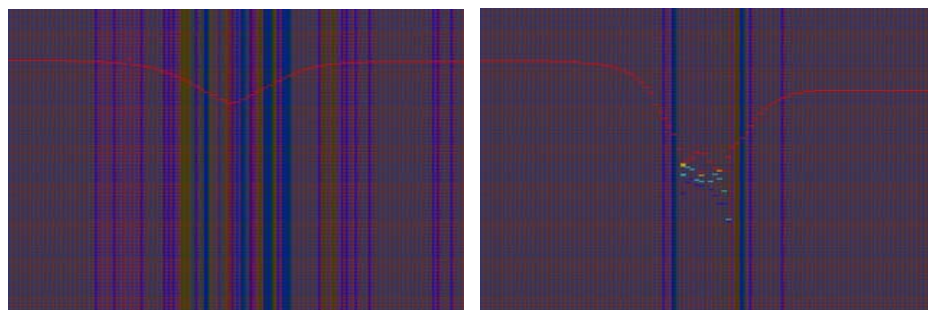
# 反陽子-水素原子衝突



[Suzuki:02]



# パラメスタディのための 拡大位相索引空間の並置化



断熱状態 ( $v = 0$ )

動的状態 ( $v > 0$ )

## ■大局的特徴

- 断熱状態: 衝突前後の対称性(時間の可逆性)
- 動的状態: 衝突による標的水素原子の電荷損失

# 結論

- 見せない可視化 (invisiblization) = 魅せる可視化
- 3次元フィールドトポロジー解析を利用した CVE
  - ✓ 4D: T-map
  - ✓ 3D: CPH,  $m$ -D TFs, IVD
  - ✓ 2D: Optimal viewpoint locator
- 適切な初期可視化 (good initial guess): 後段の解析を効率化
- ボリューム探索ツールの高度化
- コーパスの必要性: 分野固有の問題を位相の“ことば”に翻訳

# 謝 辞

---

## ■ 共同研究者

- 高橋 成雄 (東京大学新領域創成科学研究科)
- 竹島 由里子 (東北大学流体科学研究所)

## ■ 科学研究費補助金基盤(B) 18300026 (2006-2009)



---

## 照会先:

藤代 一成

isseif@acm.org

---