



流れの「かたち」を言葉に ～流線トポロジー解析の応用

京都大学 大学院理学研究科
数学・数理解析専攻
教授 坂上 貴之

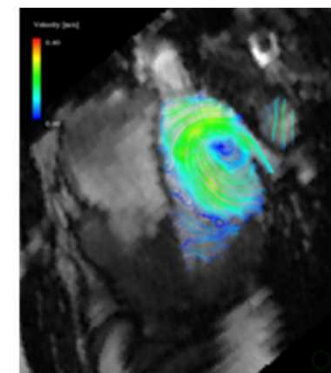
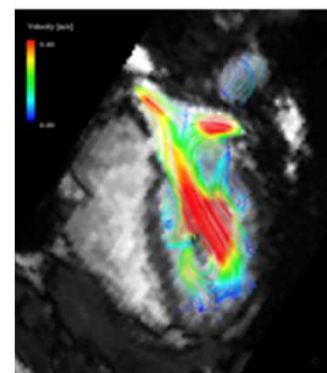
2020年2月13日

「流れ」にまつわる現象

運輸



医療



流れ＝水/空気に限らず，方向を持って変化するもの
分野を超えて普遍的な対象である。

環境



複合機械

そのほか

- 物性値(塑性・弾性)
- 人の流れ

など

流れの開発現場：従来手法の限界

計測技術や計算機の発展により，膨大な流れのシミュレーションデータや計測データを得ることが可能になっている。しかし...

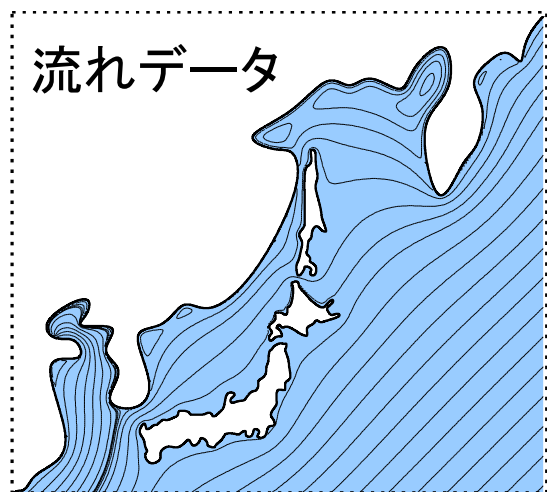
- パラメータサーチが膨大
- どのような流れ情報に着目するか明確でない
- 画像データから意味のある情報を抜き出す
- 流れの中にある潜在的な知識を抽出
- 効率的な機械学習

流れに関する客観的な指標の提案が望まれる

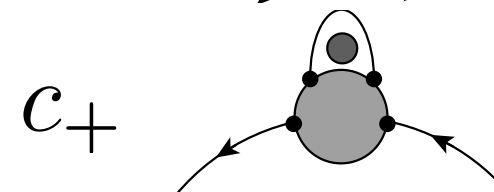
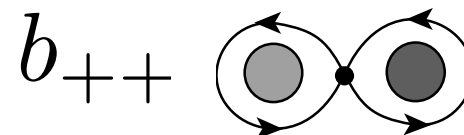
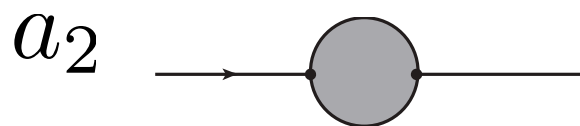
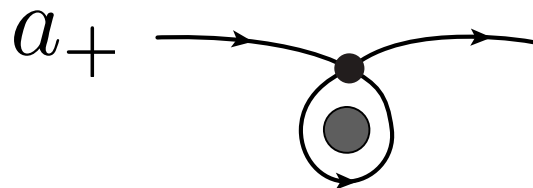
流れを言葉に～TFDA

流線トポロジー解析(TFDA)とは?

- “トポロジー”を利用した新しいデータ解析手法
流れのデータ（ベクトル場や流線軌道など）から一意なCOT表現とよばれる文字列を割り当てる技術。
- 文字列から流れに関する定量的・定性的情報を抽出。



各文字列が表現する流れ構造



COT表現 $a_0(a_2, a_2, a_2, a_2(c_+(b_{++}\{\sigma_+, \sigma_+\}), c_+(b_{++}\{b_{++}\{\sigma_+, \sigma_+\}, \sigma_+\}), c_+(\sigma_+), c_-(\sigma_-))$

語表現(簡易表現) $I A_2 A_2 A_2 C C C C B_0 B_0 B_0$

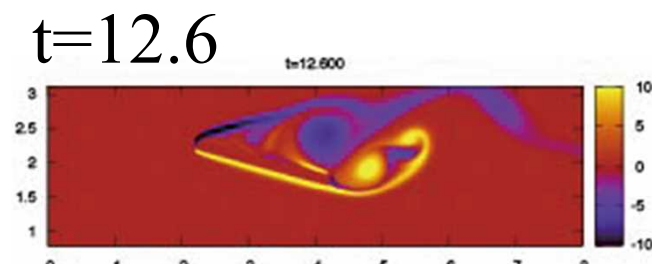
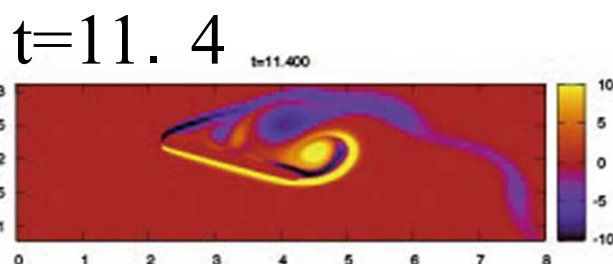
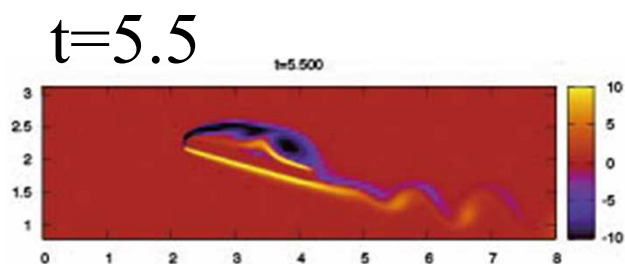
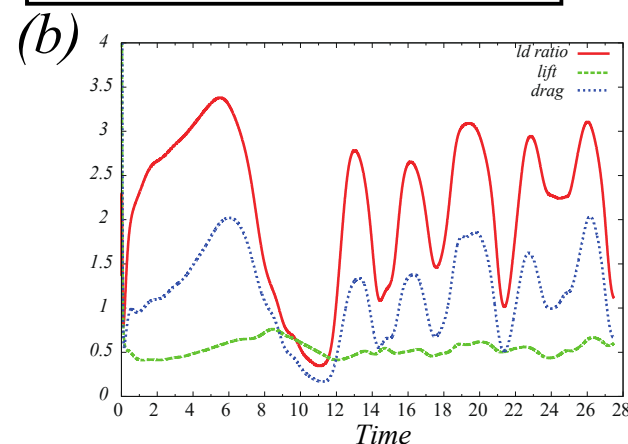
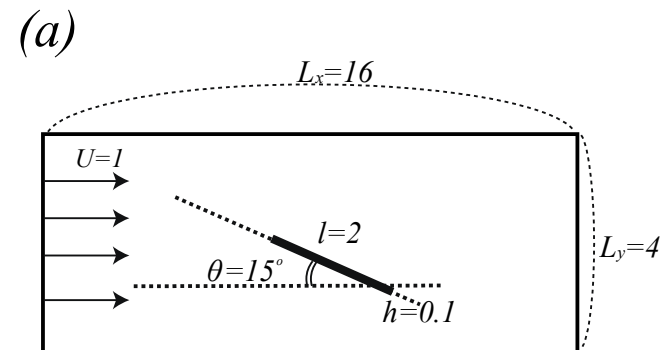
TFDAができること

- “流れ”に関する「**共通言語**」として.
- ツリー構造やその文字列表現を用いた流れのトポロジー情報の**データマイニング**（AIや機械学習の識別子として）
- COT表現を通した，将来に起こりうる流れパターンの「**遷移予測**」を可能に.
- 従来の手法で見えない新しい知見の抽出が可能に

簡単な例

- (a) 一様流中におかれた一枚の翼の周りの流れを考える
- (b) 数値計算によって、その翼に加わる揚抗比の変動(赤線)が得られる。

揚抗比極大 : $t=5.5$ と $t=12.6$
 揚抗比極小 : $t=11.4$



この三枚のパターンをみるだけでは、違いは区別できない。

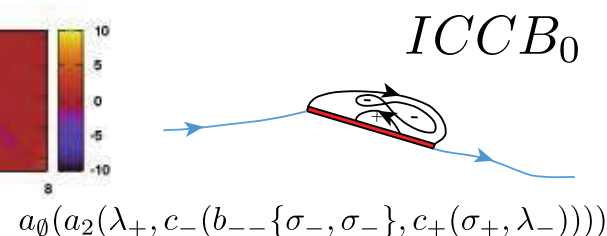
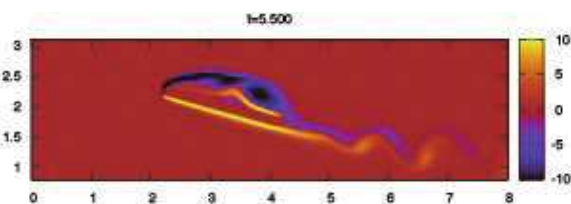
TFDAを使うと

流れのトポロジーにCOT表現とその簡略版である語表現が与えられる

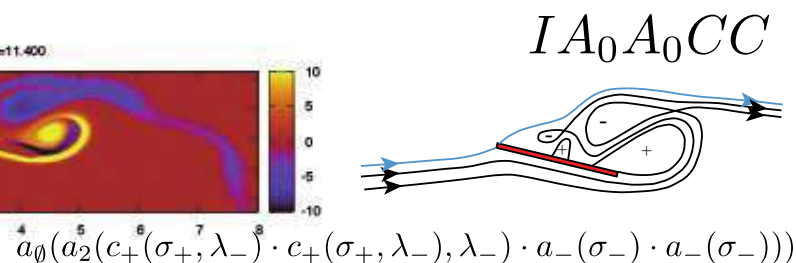
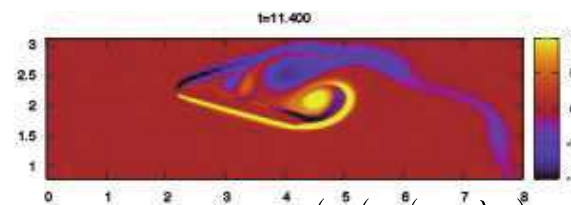
- 時刻at $t=5.5$ と $t=12.6$ において共通語表現ある " CCB_0 ".
- 時刻 $t=11.4$ には存在しない
- CCB_0 は 翼の上にある揚力向上をもたらす渦閉じ込め構造の存在に対応

全データに対して" CCB_0 "を持つ流れを検索，設計においてこの構造を持つ流れを最適化などで求める。

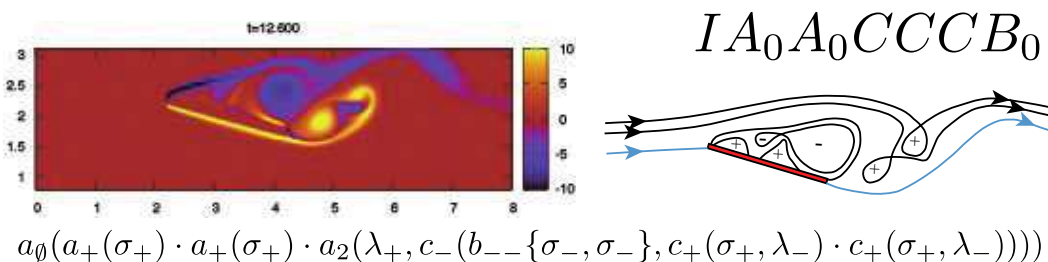
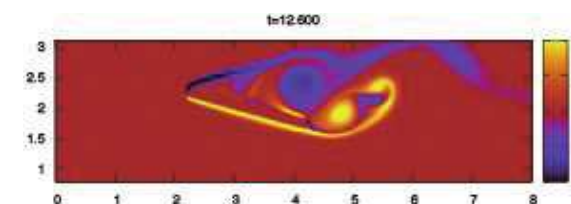
(c) $t = 5.5$



$t = 11.4$



$t = 12.6$



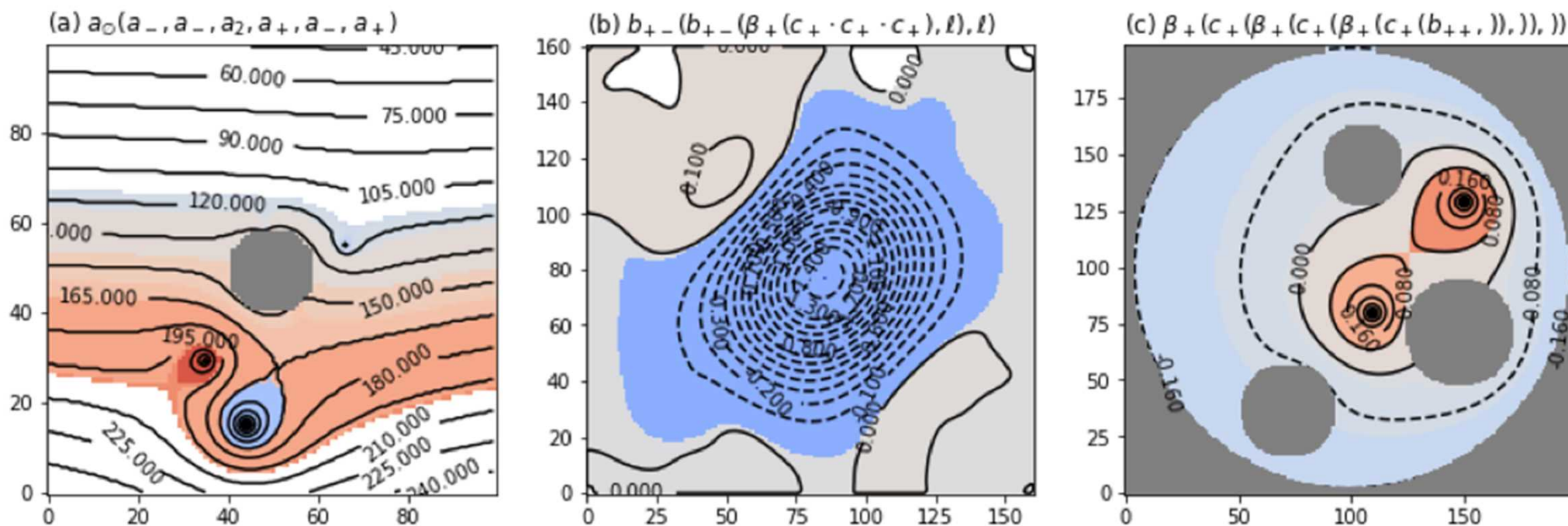
TFDAを通して流れの有効情報の抽出と設計指針を得る。

TFDAの課題と新技術による解決

| 現状 | 課題 | 今回紹介する技術 |
|--|---|-------------------------------|
| TFDAはこれまで開発者による「手計算」によって実施 | 大量データの一括処理が困難 | 大量のデータに対して一括対応できるソフトウェアの開発に成功 |
| 実際の流れデータは三次元データ,あるいは二次元スライスとして与えられている. | 流れは非圧縮とは限らないが,理論は二次元非圧縮流れにしか適用できない | 三次元流れに拡大できるように理論を構築,適用範囲を拡大 |
| 流体の流れを専門に扱う業種を適用先として想定. | 実際にこの技術を必要としているのは流れの専門家が少ない業種 流体とは限らない多くの「流れ」現象の存在 | 適用先の拡大のための活動 |

ソフトウェア “psiclone”

与えられたハミルトンベクトル場からCOTを計算するソフトウェア



- 適合性と安定性を兼ね備えた数値計算手法
- 格子点上の高さ関数(ハミルトン関数)のデータだけで変換可能
- トポロジカルな構造だけでなく, 構造の影響領域(定量情報)を抽出
- pythonコードとして実装. 大量処理が可能. 機械学習と相性がよい.

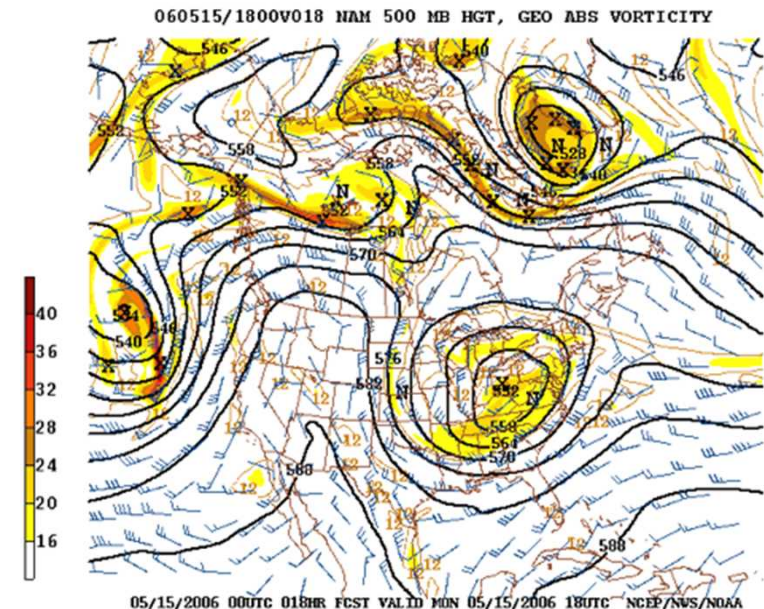
適用例：気象状態の判断指標

ブロッキング現象の同定

偏西風などの大規模な風の南北の流れの振れ幅(蛇行)が大きくなり、その状態が長期間続き低気圧あるいは高気圧が移動せず停滞する気象現象。同じ天候が長期間続くため、長雨、豪雨、旱魃、熱波、寒波などといった、いわゆる異常気象を引き起こしやすい。

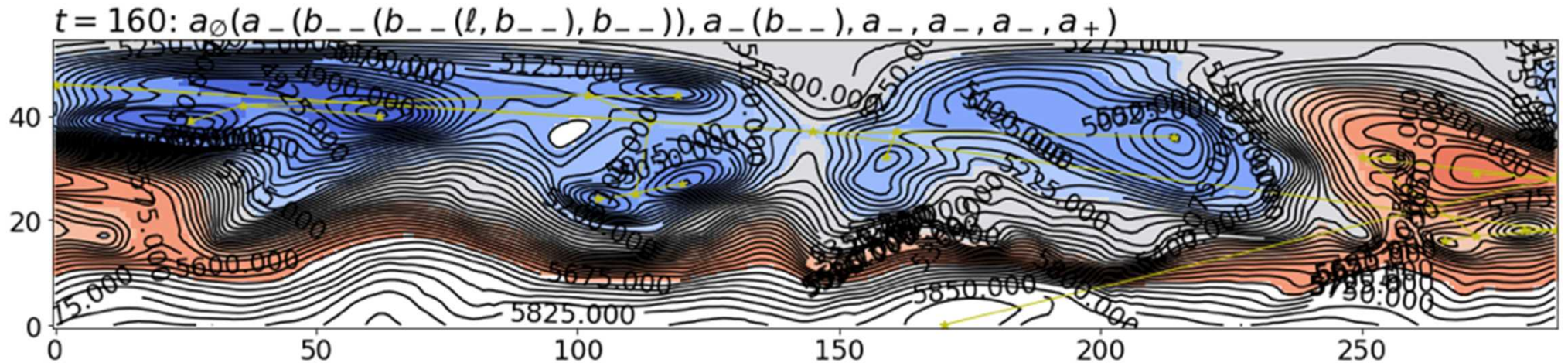
気圧配置のブロッキング判定は「気象の専門家」の経験に基づいて行っており、自動的に判定するのは難しいとされている。

TFDA による客観指標の提案



適用例：気象状態の判断指標

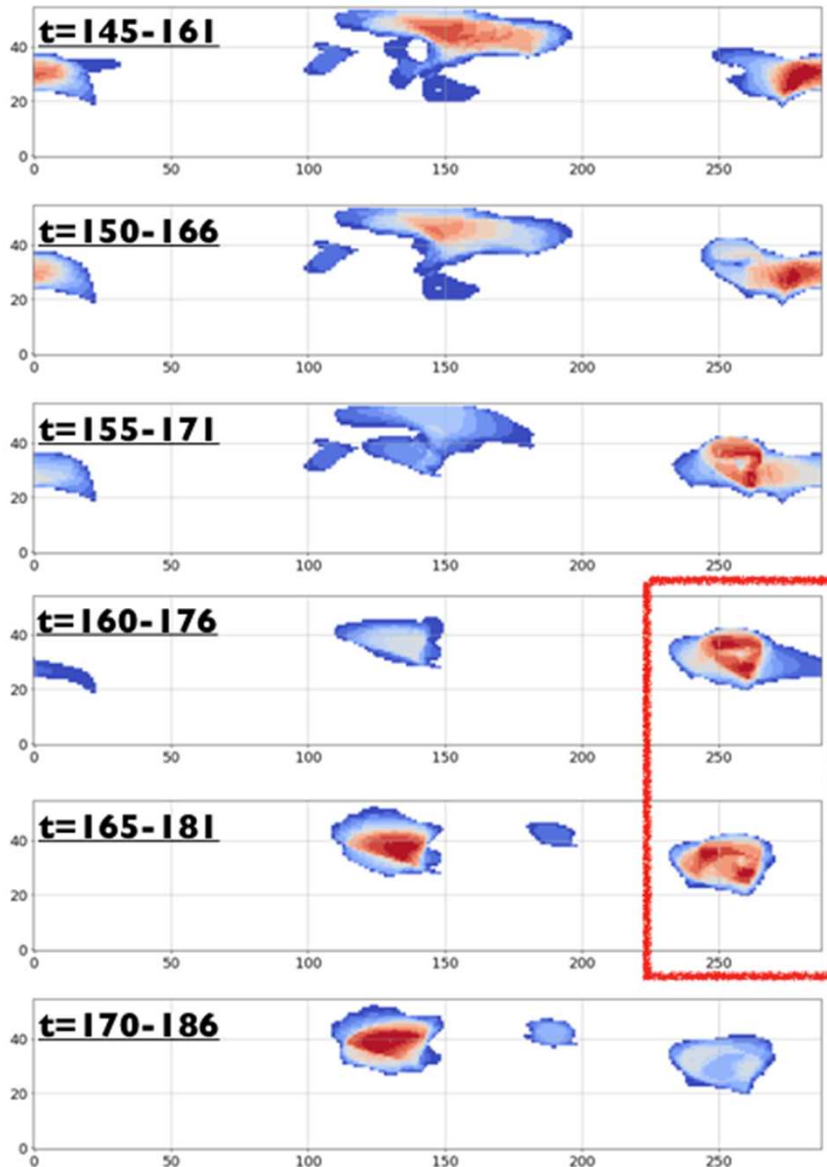
利用データ：500hPa等高度面(等高線は流れの軌道群と一致)



$a_0(a_-(b_{--}(b_{--}(\ell, b_{--}), b_{--})), a_-(b_{--}), a_-, a_-, a_-, a_+)$

- “青い領域”は低圧部, “赤い領域”は高圧部(文字“a”の軌道)
- 大きな高圧部や低圧部がある場所に一定時間(4日程度)とどまり続けていること.

適用例：気象状態の判断指標



データの処理(専門家との対話から)

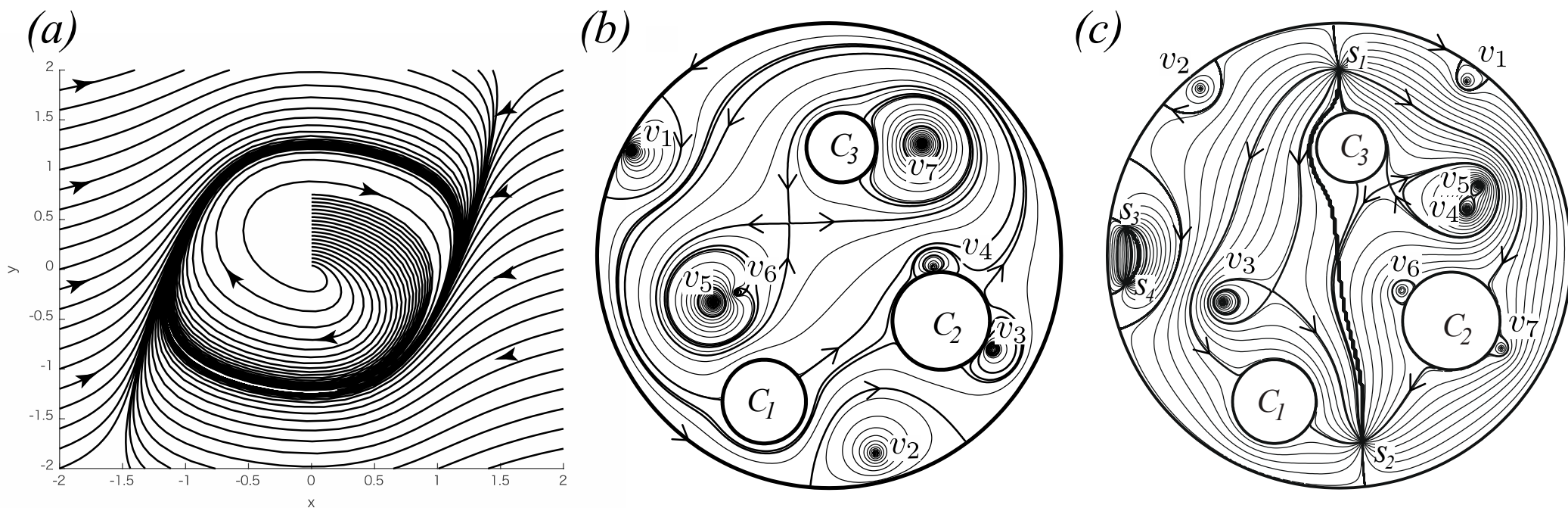
a構造の囲む(高圧)領域を抽出して時系列16フレームごとのヒストグラムをプロット

- ブロッキングでない=ヒストグラムの構造が広く西に移動する(分散した分布)
- ブロッキングは最高圧部が一定の場所にとどまり続ける(局在化した分布)
- ブロッキングには形状学的特徴付け(Ω型, 双極子型)「TFDAならではの**特徴付け**」

t=155-181あたりでΩ型ブロッキング現象が起こっていると判断

三次元流れへの対応

三次元データの二次元スライスの流線軌道群の分類とCOT表現



(a) $\sigma_{\theta\mp}(b_{\pm}(p_{\pm}(b_{\mp}(\sigma_{\mp}))))$

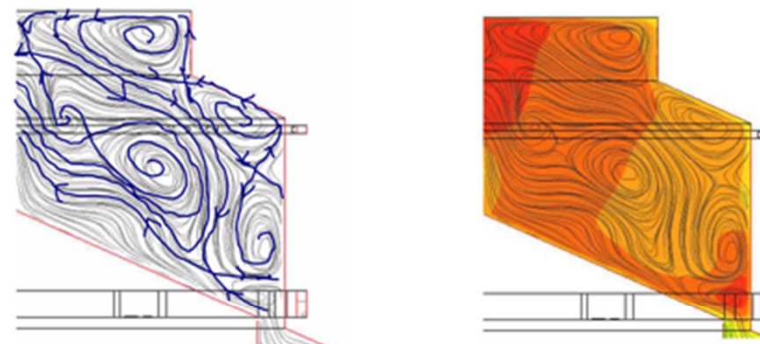
(b) $\beta_{\theta-}(\beta_{+}\{c_{+}(\sigma_{+}) \cdot c_{+}(\beta_{+}\{b_{++}\{b_{+-}(\sigma_{+}, \sigma_{-}), \beta_{+}\{c_{+}(\sigma_{+})\}\}\}, c_{-}(\sigma_{-})\}, \{c_{-}(\sigma_{-}) \cdot c_{-}(\sigma_{-})\})$

(c) $\beta_{\theta 2}(\{c_{+}(\sigma_{+}), \sigma_{\mp}, c_{-}(\sigma_{-}) \cdot c_{2-}(\sigma_{-}, \sigma_{\mp}), \sigma_{-}\}, a_2 \cdot a_{+}(\sigma_{+}) \cdot a_2 \cdot a_{-}(b_{--}\{\sigma_{-}, \sigma_{-}\}) \cdot a_2(c_{+}(\sigma_{+}), c_{-}(\sigma_{-}))$

適用範囲が大幅に拡大した.

適用例(ライセンス例)2019.10プレスリリース

流線トポロジー解析による理想的流れを
実現する形状の提案
(日本ニューマチック工業(株))

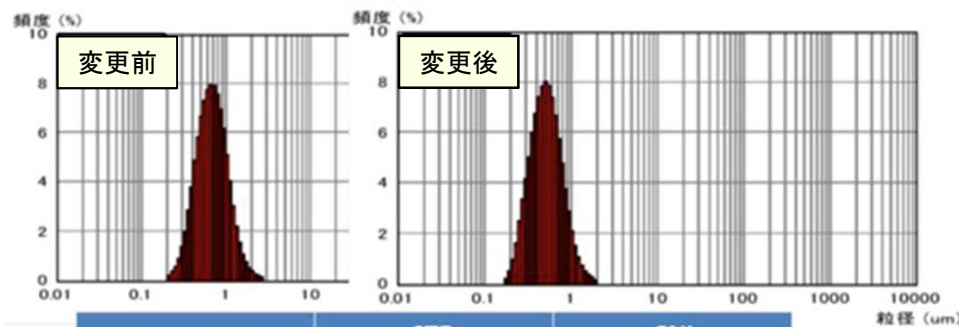


回転流 = 二次元断面 + 軸方向の流れの強さ

実機による実証実験

実粉試験結果(前回)

実商品化(粉体工業展出品)



| | STD | CNI |
|--------------------------|-------|-------|
| D50 (μm) | 0.671 | 0.507 |
| Dmax (μm) | 2.75 | 1.945 |
| 最頻径 (μm) | 0.688 | 0.530 |
| 回収率 17.3 ⇒ 23.0 (5.7P増加) | 17.3 | 28.0 |
| 分級精度 2.23 ⇒ 1.77 (25%減少) | 2.23 | 1.77 |
| 分級点 (μm) | 0.69 | 0.57 |

従来機よりより細かい粒子が高い精度で分離可能に



TFDAの今後と期待

- 三次元流れのスライスデータに適用できるソフトウェアの開発
- 適用範囲の拡大と適用例の増加
- データノイズとの戦い. サンプル数との戦い
- (Message) これまでの実例からわかったこと
 - 流れの解析においては流れの変化が大きいところばかりに目がいきがちだが, TFDAによると流れが「全くない」ところ(よどみ点)の構造が実は流れ全体の構造に重要となる場合が多い.
 - 「流れ」は流体だけのものではなく, ベクトル場として表される対象であればよい, 適用例は思った以上に広い.
例), 弾性や塑性といった物性値も変位ベクトルとして表現される.
 - 画像処理技術としても利用が可能

本技術に関する知的財産権(1)

- 発明の名称: 流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラム
出願番号: 特願2014-535424号 PCT/JP2013/070939号
出願人: 科学技術振興機構
発明者: 坂上貴之、横山知郎
特許番号: 特許第5899323号
公開番号: [WO2014/041917A1 \(US,EP,CN,IN,KR\)](#)
- 発明の名称: 流体遷移経路取得装置、流体遷移経路取得方法、および、プログラム
出願番号: 特願2015-546684 PCT/JP2014/079512
出願人: 科学技術振興機構
発明者: 坂上貴之、横山知郎
特許番号: 特許第6440629号
公開番号: [WO2015/068784A1 \(US,EP,CN,KR\)](#)

本技術に関する知的財産権(2)

- 発明の名称: 流れパターンの正規表現作成方法、正規表現作成装置、および、コンピュータが実効可能なプログラム
出願番号: 特願2016-557834号 PCT/JP2015/081402号
出願人: 科学技術振興機構
発明者: 坂上貴之、横山知郎
特許番号: 特許 6401288号
公開番号: [WO2016/072515 \(US,EP,IN\)](#)
- 発明の名称: 有限型の流れパターンの語表現装置、語表現方法、プログラム、構造形状学習方法および構造物設計方法
出願番号: 特願2019-139657
出願人: 科学技術振興機構
発明者: 坂上貴之、横山知郎

本技術に関する問い合わせ先

【ライセンスについて】

国立研究開発法人科学技術振興機構

知的財産マネジメント推進部 知財集約・活用グループ

TEL 03-5214-8486

e-mail license@jst.go.jp

【技術内容について】

京都大学 大学院理学研究科 数学・数理解析専攻

教授 坂上 貴之

TEL 075-753-2660

e-mail sakajo@math.kyoto-u.ac.jp