

航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (ANSS) 企画セッション「JAXAソフトウェアユーザー懇談会」概要報告

相曾 秀昭, 村上 桂一

(宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 数値解析技術研究グループ)

A Brief Report on the Organized Session “JAXA Software Users’ Meeting”

Hideaki AISO and Kei-ichi MURAKAMI (Aeronautical Technology Directorate, JAXA)

ABSTRACT

The article gives a report on the organized session “JAXA Software Users’ Meeting”. The session is specialized in technical information provision and discussion on JAXA software developed for numerical simulation, mainly CFD (Computational Fluid Dynamics). The first part includes three lectures on recently developed software items that are BOXFUN, FBasis and Harmonee. The second includes three lectures on interesting usage of JAXA software in the research activity of universities and free discussion. A brief overview is reported in this article. The presentation slides used in the lectures in first session are attached for the readers’ reference as well.

1. はじめに

以前より航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (ANSS) において、JAXAの研究開発成果の社会還元の一つである大学等に対する覚書締結によるソフトウェア提供に関連し、それらソフトウェアの技術的課題等を議論する企画セッションが行われてきた。

ここ数年の間は『教育支援』としてより広い視野での議論を行うために流体力学講演会とANSSの合同企画としていたが、今回は再びANSS単独の企画セッションとして開催し、FaSTAR等のJAXAソフトウェアに関する情報の提供や議論等を行う場とした。

2. セッション構成

以下の様に前後半2つのセッションが企画された。

I. JAXAソフトウェアの展開

- ・格子生成ツールBOXFUNの紹介と開発進捗
石田 崇 (JAXA)
- ・特徴構造解析ツールFBasisの紹介
大道 勇哉 (JAXA)
- ・最適化ライブラリHarmoneeの紹介
金崎 雅博 (首都大、JAXA客員)

II. ツール利用事例に関する全体討論 —事例紹介と自由討論—

【事例紹介】

- ・FaSTARのUCR機能利用事例紹介:プラズマアークチューバの流体制御性能予測と最適化
松野 隆 (鳥取大)
- ・三次元航空機形状周りの数値流体解析におけるレイノルズ数効果の検討事例から
山崎 渉 (長岡技科大)
- ・HexaGridを用いたフィン付き飛翔体の解析事例
高木 雄哉 (横浜国大)

【自由討論】

3. 「I. JAXAソフトウェアの展開」概要

ソフトウェア開発担当者の三氏によるソフトウェア機能等の紹介である。

BOXFUNは主にFaSTAR利用時の格子生成ツールとしてHexaGridの後継として開発が進められており、現状での機能や利用例について解説がなされた。

FBasisは大規模シミュレーションで得られたデータの特徴を抽出し、シミュレーション結果についてのより本質的な理解を促進する為のデータ処理ツールであり、その動作原理や利用例が紹介された。

HarmoneeはFaSTAR等でのシミュレーション結果を設計等での最適化に活用できるように開発が進められており、原理の解説や利用例の提示が行われた。

なお、これらの3講演については、各講演において用いられた発表スライドを講演者より提供していただき参考資料として掲載している。

4. 「II. ツール利用事例に関する全体討論 —事例紹介と自由討論—」概要

大学等でJAXAソフトウェアを利用いただいているユーザーの方から、他のユーザーにとっても興味深いと思われる利用例を紹介いただき、そこから提起される課題等についての自由討論に広がっていった。

松野氏にはFaSTARの機能の一つであるUCR¹の具体的な利用例として標記の計算を紹介いただいた。山崎氏の事例は題目に沿う形でのいくつかの計算例の紹介をいただいたが、多くのユーザーに興味深いものであったと思われる。高木氏は機体に薄いフィンが付いた形状（一般に格子生成の困難さが知られる）でのHexaGridによる格子生成におけるパラメータ調整の効果や他のツールとの比較等について試行

¹ User Customized Routinesの略称。この機能によりFaSTARのプログラムにユーザー独自の計算条件を付加することができる。FaSTARの標準機能の一部としてマニュアルにおいても説明されている。

例を提示しながら紹介していただいた。

その後の会場全体での議論での主な質疑応答について要旨を以下にまとめておく。

【質問】格子生成ツールを使いこなすにはノウハウが重要だと思うが、HexaGridのマニュアルでは初めてのユーザーでも使いこなせるようなノウハウ的な情報まで含まれているのか？

【発表者の高木氏から】ユーザー目線で見ると充実していると言ってよいのではないかと。ただし、(格子生成も含んでの)解析事例がもっと多いとよいかもしれない。

【質問】(同じくHexaGridについて)ユーザーからのフィードバックの開発やマニュアル等への反映は？

【ツール提供側から】HexaGridでは開発フェーズは終了しているので、今後はノウハウをマニュアルに反映・蓄積していく。また、各場合について最適なパラメータ選択について実験計画法を適用する試みを考えている。ただ、格子生成では(後継として開発している)BOXFUNも利用してほしい。

【質問】UCRの利用例は2次元だったが3次元の場合でも同じようにやれるのか？

【発表者の松野氏から】試している範囲では3次元でも可能だと思う。計算の速さ等について言える段階ではないが。

【要望】(FaSTARによるCFD計算について)計算の規模感(メモリの必要量や計算速度)が分かるような情報が欲しい。例えば、先ほどのBOXFUN紹介にあったような「一千万点でメモリ10GB」といったガイドライン的なもの。自分がFaSTARでの計算を始める際、この辺りについては手探りでやっていった感じだった。情報があれば計算にとりかかる際に役に立つ。

【ツール提供側から】JAXA内部での解析例以外にもユーザーからアンケート等で情報を集め、いくつかの例についてどの程度(格子点数など)の計算でどの程度の(メモリ、CPU等)計算資源を使うかといった情報を提供するとよいかもしれない。検討したい。

【ツール提供側(開発者)から】当方の試験や経験では、一千万格子点の計算でメモリは10GB程度。また、並列性能では一千万点の計算で3000並列くらいまでは効果ありといえる。このあたりが目安にはなると思う。

5. おわりに

いまや前世紀となったCFDの黎明期から1990年代頃まではCFDは主にその研究開発者かそれと同等の専門的知識を有する者により行われるものであった。しかし、CFDがツールとして広く普及した現在ではJAXAソフトウェアにおいてもユーザーはより広い範囲に広がり、CFDに関する研究以外の工学研究の中でツールとして利用される例が増えている。このような状況の中でユーザーの役に立つ技術情報の提

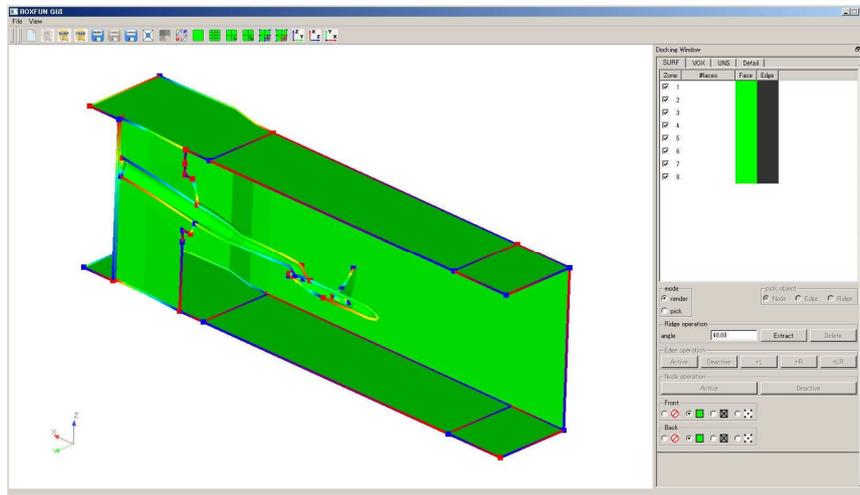
供の形を作りあげていくためにもユーザー会は重要なものであると考えられる。

最後に今回の議論に参加し、JAXAのソフトウェア開発や利用について有益な意見を述べていただいた発表者・参加者の皆様方への謝意を表すものである。

(次頁以降に「I.JAXAソフトウェアの展開」での3講演のスライドを掲載)

ANSS1「JAXAソフトウェアユーザー懇談会」

格子生成ツールBOXFUNの紹介と開発進捗



宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
数値解析技術研究ユニット
石田 崇

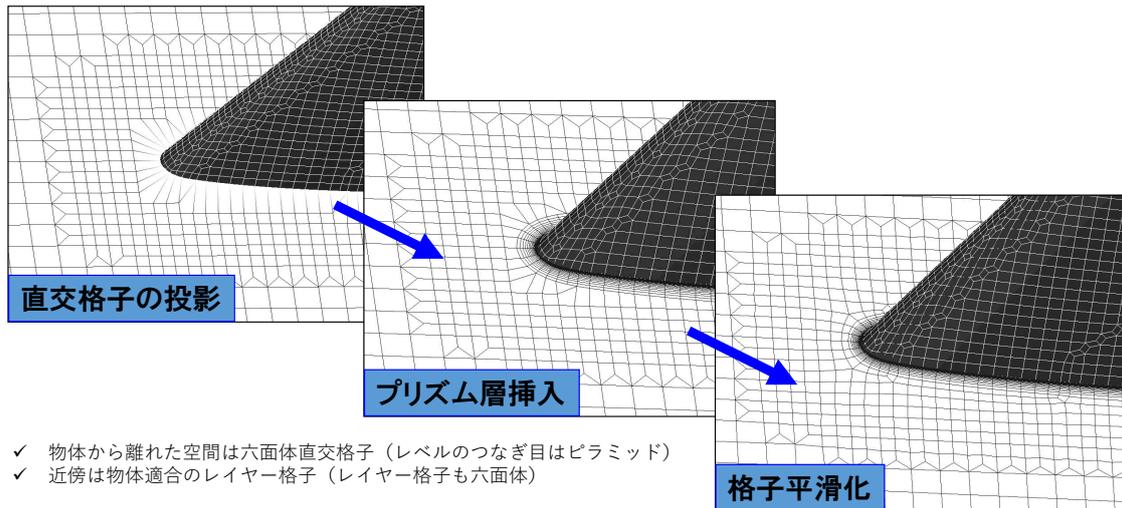
発表内容

- 研究背景
 - HexaGridからBOXFUNへ
- BOXFUN機能紹介
- 現状の課題
- まとめと今後

HexaGridの開発

■ 六面体ベースの自動格子生成ソフト

- 手動で作成すると~1カ月⇒HexaGridで1~2時間
- 直交格子に基づく非構造格子⇒高速に生成可能, 複雑形状に対応
- 通常のPCまたはJSS (JAXAスパコン) で動作

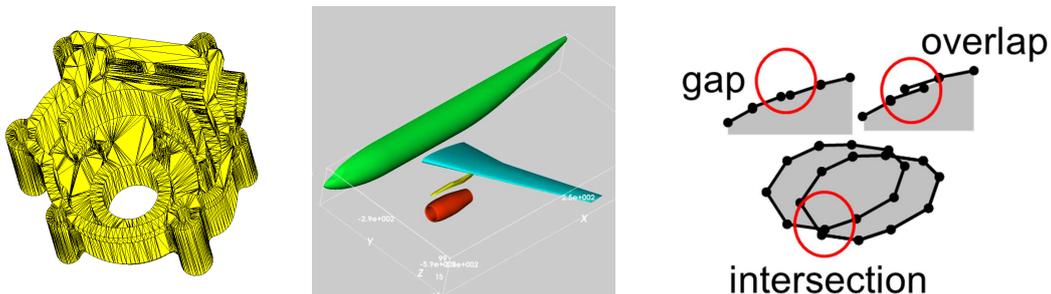


航空技術部門 数値解析技術研究ユニット

3

HexaGridの特徴

- 質の悪いSTLデータにも対応 ⇒ CADデータ修正作業の削減
- 複数のSTLデータに対応可能 ⇒ パーツの入れ替えが容易



※STLデータに小さなギャップ、オーバーラップ、交差があっても対応可能

■ 少ないパラメータで自動格子生成 ⇒ ユーザフレンドリー

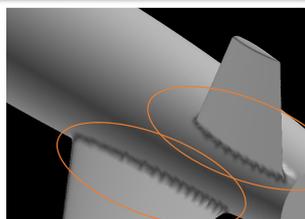
- 領域サイズ (x, y, zの最大・最小)
- 物体表面のセルサイズ (最大・最小)
- レイヤー格子の最小格子幅、拡大率



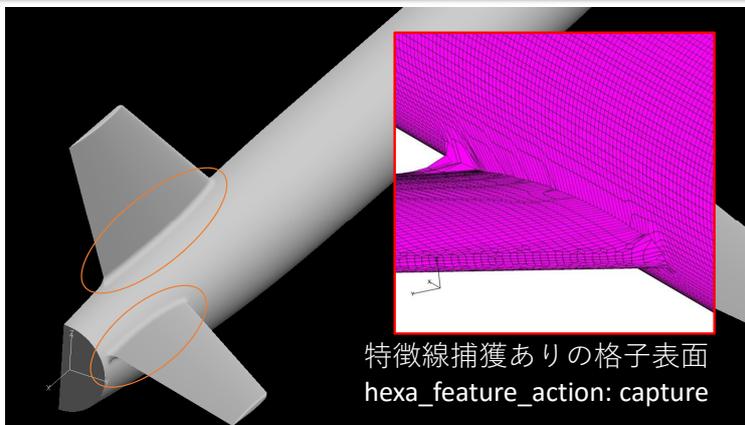
航空技術部門 数値解析技術研究ユニット

4

HexaGridの課題



特徴線捕獲なしの格子表面
hexa_feature_action: smooth



特徴線捕獲ありの格子表面
hexa_feature_action: capture

- 特徴線捕獲のオプションはあるが、うまく捕獲できずにバリが出来る。
⇒凹形状に対する特徴線捕獲が苦手
- シングルプロセス用のプログラムなので、格子生成に限界がある。
⇒大規模格子生成に向いていない

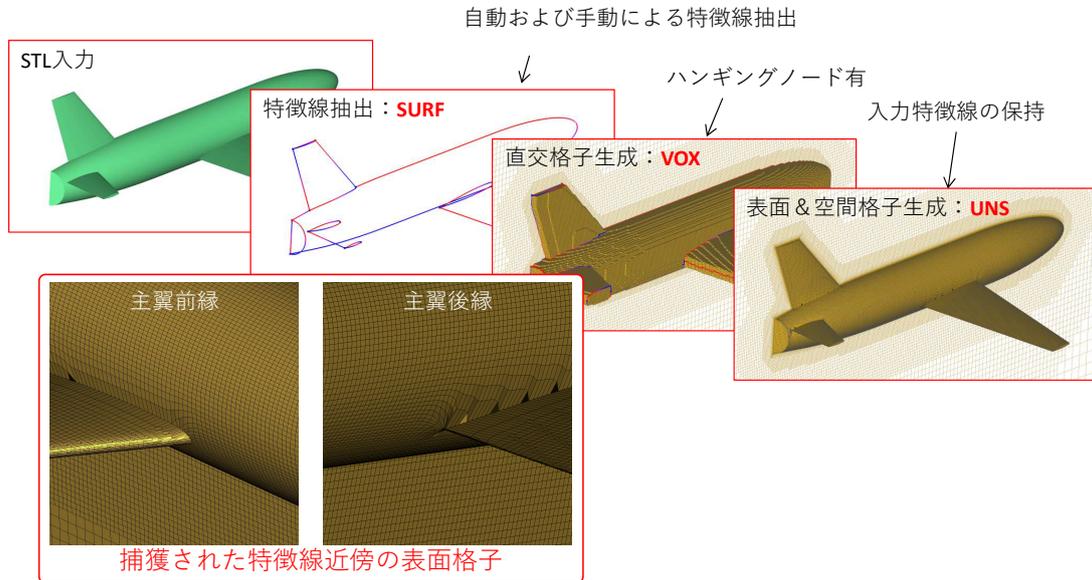


BOXFUNの開発

- HexaGridの課題を解決するべく、新たな格子生成コードの開発に着手
 - 特徴線捕獲 ⇒マニュアル操作機能を組み込む
 - 大規模格子生成 ⇒Building-Cube法のフレームワーク活用
- 名称：BOXFUN
Block-based vOXel for Fine UNstructured grid
- 開発環境
 - 開発言語： C++, Visual Studio 2017
 - 可視化ライブラリ： OpenGL, GLUT
 - GUIフレーム： GLUI (研究開発用), Qt (配布用)
- 動作環境
 - Windows
 - Linux (JSS2のリモートデスクトップ含む)
- プログラム構成
 - BOXFUN SURF： 特徴線抽出モジュール
 - BOXFUN VOX： 直交格子生成モジュール
 - BOXFUN UNS： 非構造格子変換モジュール



格子生成の流れ



Voxelデータ構造の詳細

理研フレームワークより

```
template<size_t D>
OctreeNode{
    OctreePos<D>      m_pos;
    union{
        OctreeNode<D> *m_child;
        OctreeLeaf<D> *m_leaf;
    };
};
```

```
template<size_t D>
OctreeInfo{
    unsigned short  depth;
    unsigned short  pdg[D];
};
```

m_pos : 2+2D=2(D+1)[byte]
 m_child : 4[byte]
 合計 : 2(D+4)[byte]

BOXFUN

```
template<size_t D>
OmnitreeNode{
    OmnitreePos<D>      m_pos;
    union{
        OmnitreeNode<D> *m_child;
        OmnitreeLeaf<D> *m_leaf;
    };
};
```

```
template<size_t D>
OmnitreeInfo{
    unsigned short  flags;
    unsigned short  depth;
    unsigned int    pdg[D];
};
```

m_pos : 2+2+4D=4(D+1)[byte]
 m_child : 4[byte]
 合計 : 4(D+2)[byte]



情報のビット管理

| OmnitreeInfo::depth | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------|----|----|----|----|---------|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| flag | Z depth | | | | | Y depth | | | | | X depth | | | | |

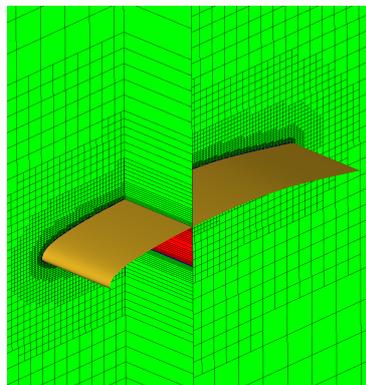
| OmnitreeInfo::flags | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|---|------|------|-------|------|------|-----------|---|---|---|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| ID | | | | | | | flag | | | | | dimension | | | |
| domain number for MPI | | | | | | | leaf | wall | fluid | agg. | div. | Z | Y | X | |

- unsigned short型変数 : 2[byte] =16[bit]
- unsigned int型変数 : 4[byte] =32[bit]
- 各軸方向のdepth : 5[bit] =0~31
- 解像度 : 2^{31} =2147483648
(代表長さ L_∞ , 外部領域 $100L_\infty$ の時, $4.7 \times 10^{-8} \infty$)

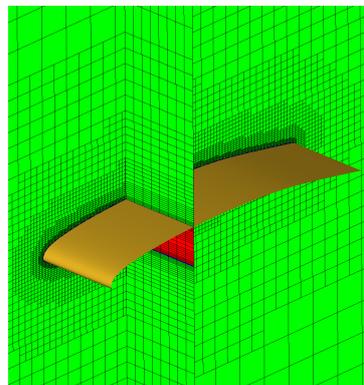


擬似2次元格子対応

- 従来のHexaGridには無い機能
- 3次元格子生成モジュールを用いて擬似2次元格子を作成出来る
 - 奥行き方向に座標が一致するよう修正機能を追加
 - Omnitreeの制約上, 分割数は2のべき乗
 - 奥行きの長さは自由に設定可能



奥行き1セル

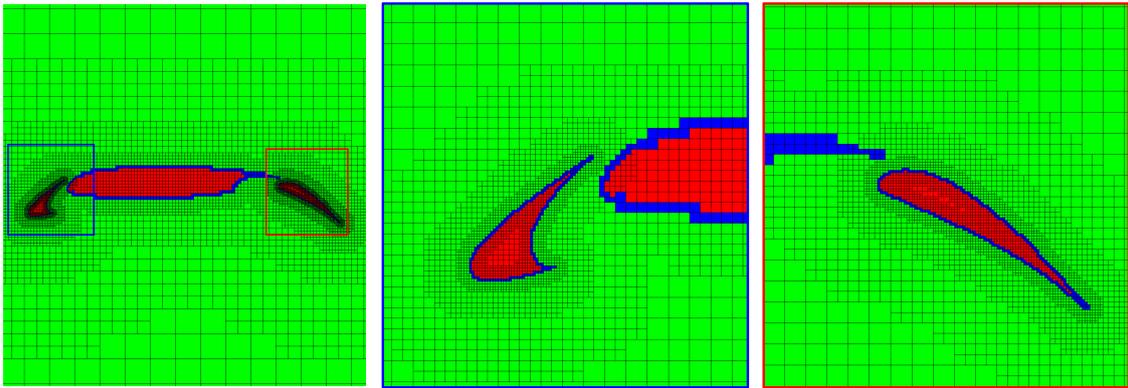


奥行き8セル



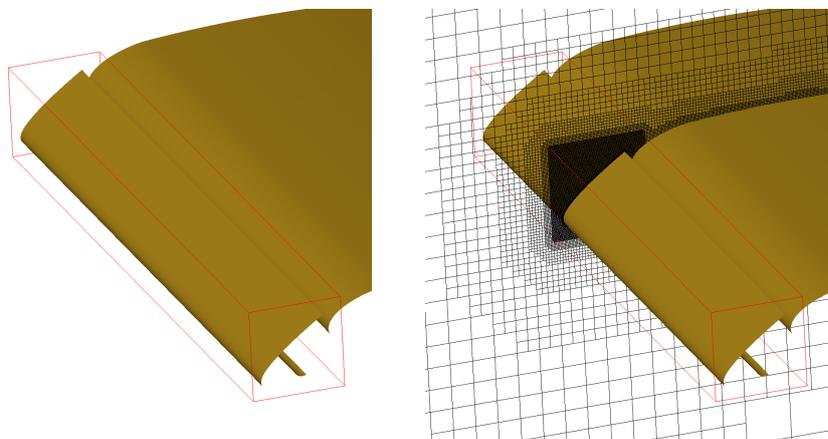
パーツ毎の細分化設定

- パーツ毎に最大・最小階層を設定
- 多要素翼型の格子生成例
 - スラット・フラップ : 15階層
 - メイン : 13階層



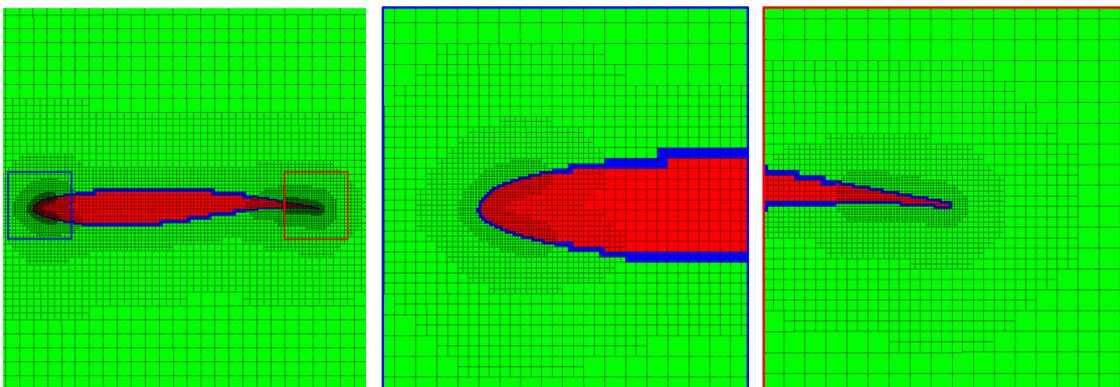
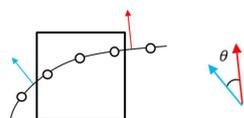
Refinement Boxによる細分化

- GUI上で細分化領域を指定して細分化する
- 現状では領域指定はboxのみ（始点座標，領域サイズ，階層）



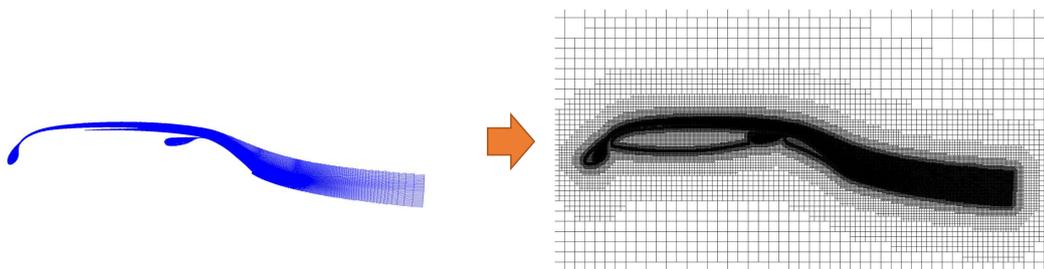
Adaptive Refinement

- 曲率の大きい所を簡易的※に細分化する
 ※着目しているvoxelを中心に検査体積を設定，内部に含まれる表面格子の法線ベクトル同士の内積を計算し，最小値が閾値以下なら分割



Adaptive Refinement

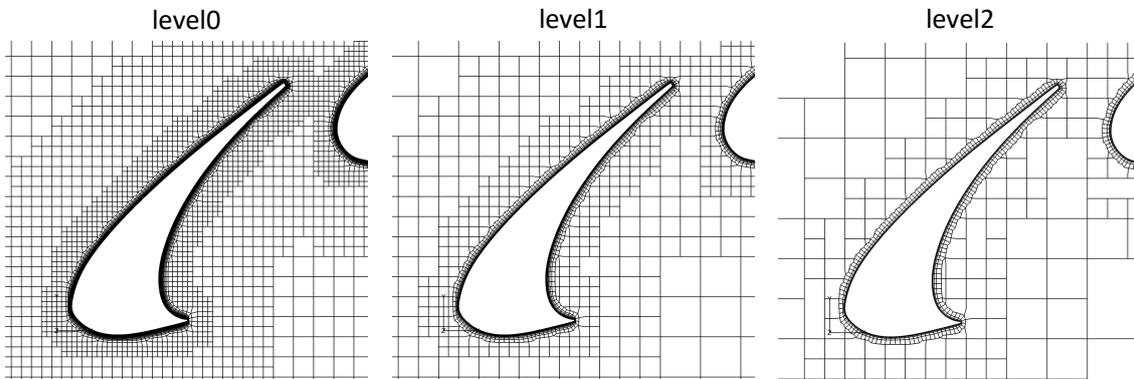
- 計算結果から細分化領域を特定・細分化



高揚力装置の後流細分化の例



Multigrid機能



- Multigrid機能を導入
 - 直交格子 : tree構造を用いて結合
 - レイヤー格子 : 鉛直方向に結合

- Hexagridとの性能比較は未実施



特徴線捕獲の改良

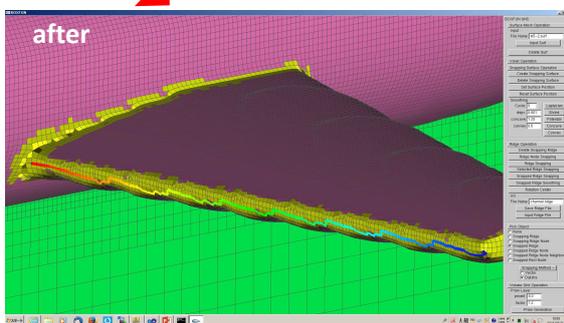
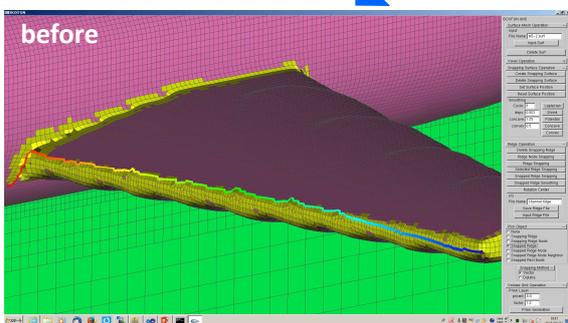
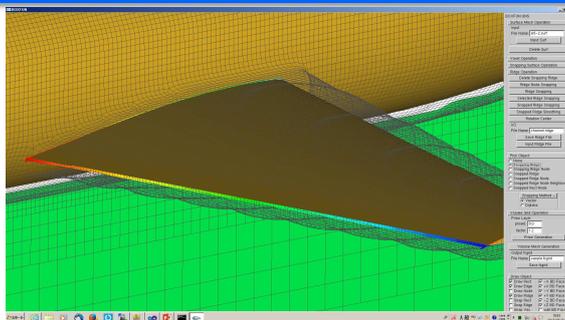
- ダイクストラ法 (Dijkstra's Algorithm) を適用し、自動化を図る

- ノード毎のコスト (評価関数) には、着目している特徴線との距離を用い、距離の総和が最小になる経路を探索する

- 手順
 - ① ある特徴線に着目
 - ② 全ての表面格子点と特徴線との距離計算を行う
 - ③ 距離を評価関数にしてダイクストラ法を適用
 - ④ 始点からコスト計算開始
 - ⑤ 対象の表面格子点が無くなるまでコスト計算実施
 - ⑥ 終点から始点に向かう最短経路 (格子点群) をリストアップ



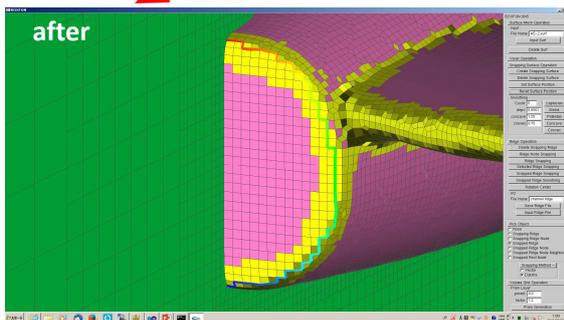
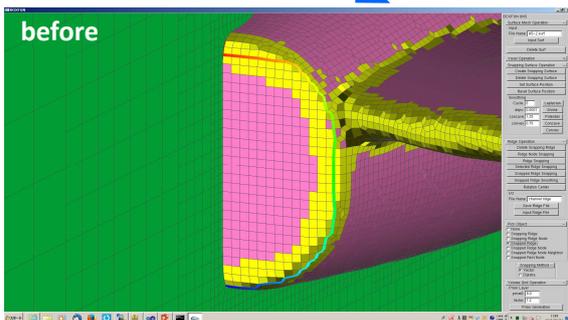
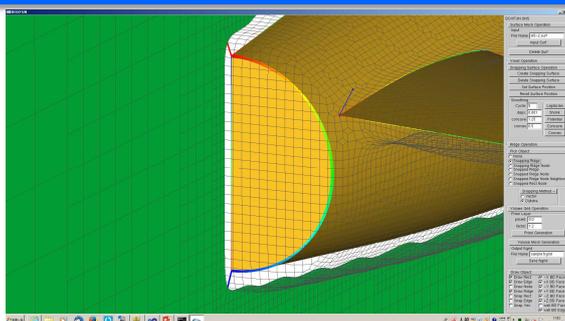
直線形状に対する適用例



航空技術部門 数値解析技術研究ユニット

17

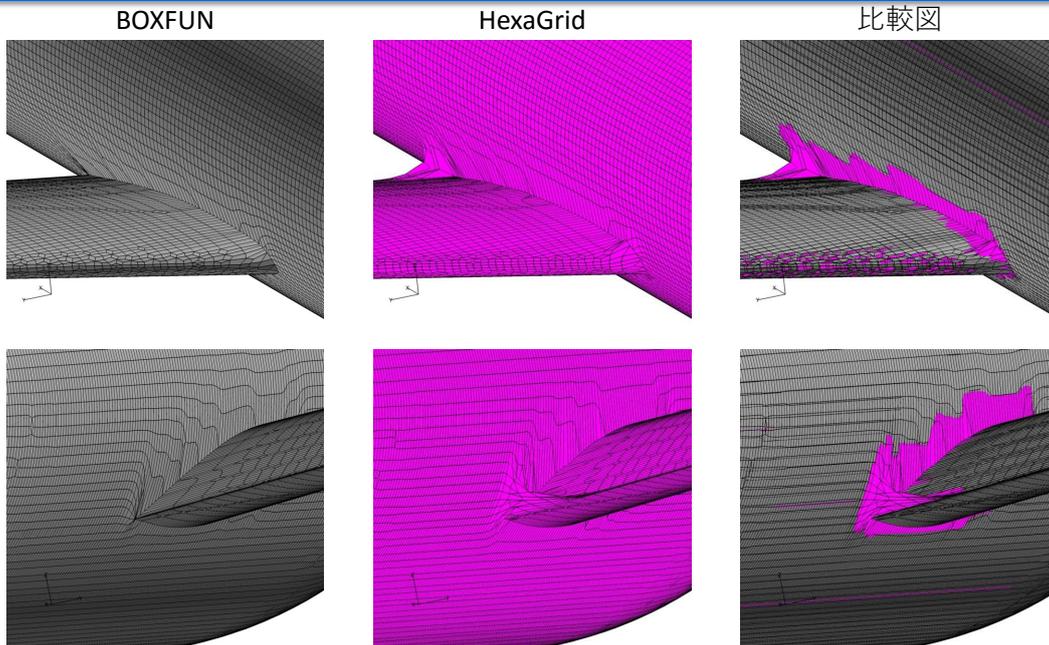
曲線形状に対する適用例



航空技術部門 数値解析技術研究ユニット

18

HexaGridとの比較



マニュアル操作により形状特徴の再現性が向上



メモリ使用量(64bit環境下)

■非構造データの要素数見積もり (All Hexaの場合)

| | |
|------------|----------------------------|
| ■Hexa | n_{hexa} |
| ■Node | $\sim n_{\text{hexa}}$ |
| ■Edge | $\sim 3 * n_{\text{hexa}}$ |
| ■Rectangle | $\sim 3 * n_{\text{hexa}}$ |

■各要素のメモリ使用量

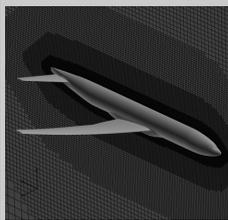
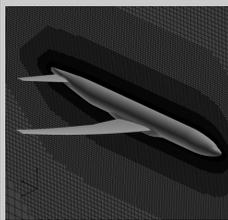
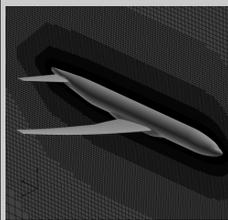
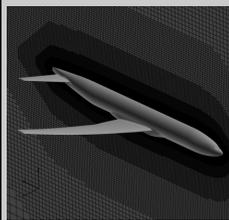
| | | |
|------------|-----|---------|
| ■Hexa | 232 | [bytes] |
| ■Node | 104 | [bytes] |
| ■Edge | 64 | [bytes] |
| ■Rectangle | 144 | [bytes] |

■全体のメモリ使用量

| | | |
|------------|----------------|------|
| ■10M hexa | $9.6 + \alpha$ | [GB] |
| ■100M hexa | $96 + \alpha$ | [GB] |



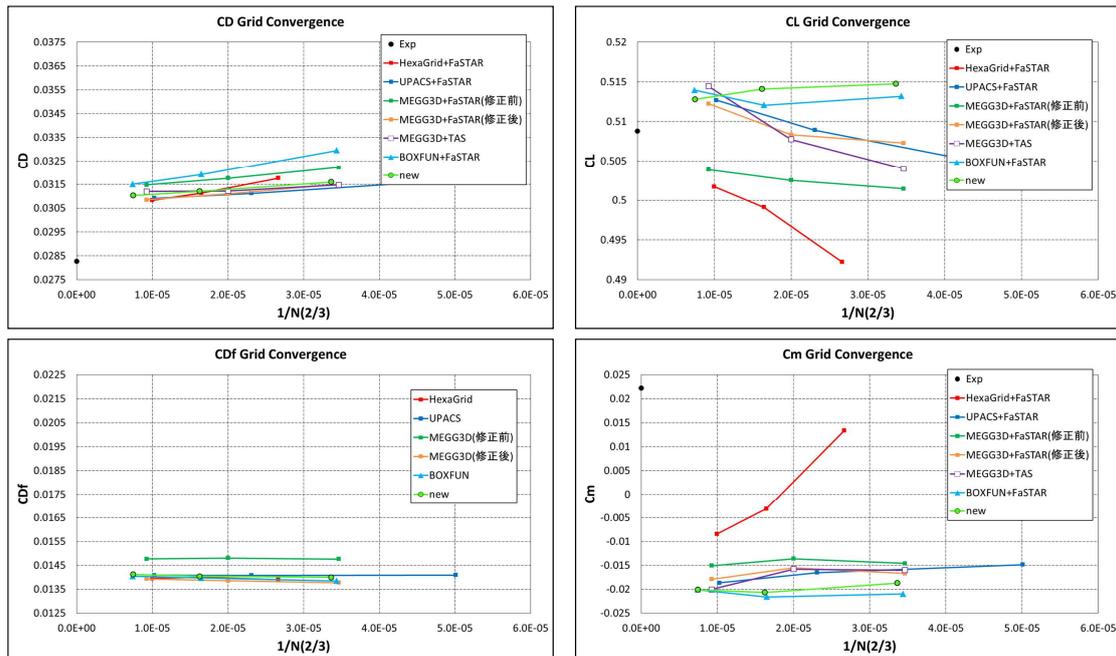
大規模格子生成 : NASA-CRM

| | coarse | medium | fine | Extra |
|-----------------|---|---|--|---|
| 最大階層 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Smoothing range | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 格子点数 | 5332807 | 15787099 | 50451793 | 174936195 |
| 総セル数 | 5126829 | 15310414 | 49152135 | 170838235 |
| 格子図 |  |  |  |  |

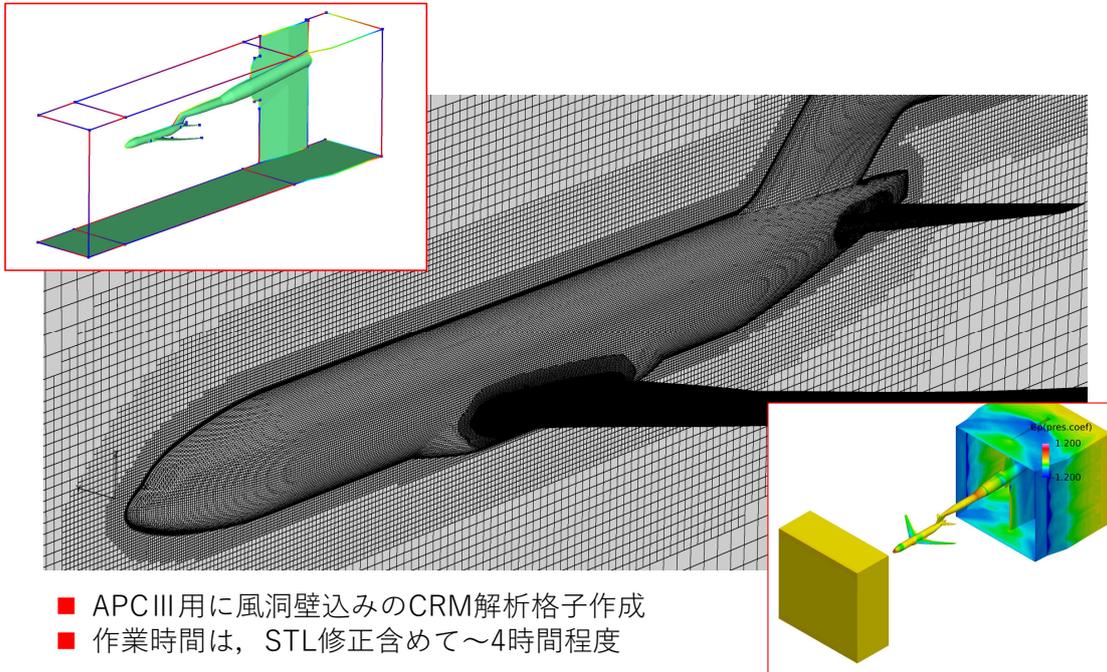
■ 壁面でのadaptive refinementは無し⇒表面でのhanging-nodeの影響調査は未実施



APCの条件での格子収束



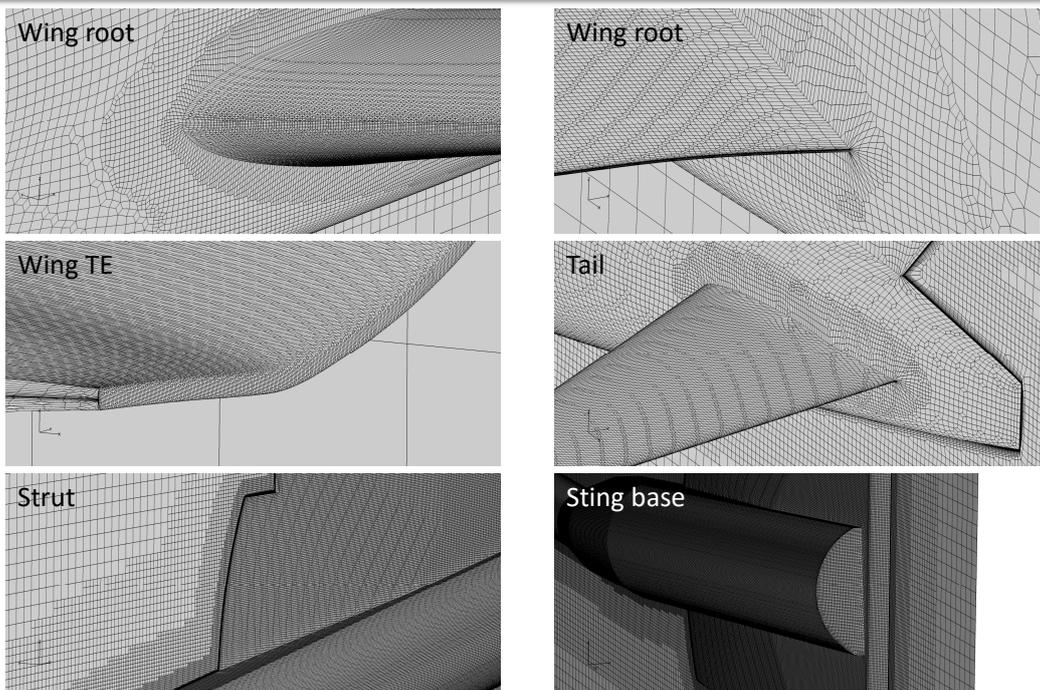
風洞壁込みのCRM解析



- APCIII用に風洞壁込みのCRM解析格子作成
- 作業時間は、STL修正含めて～4時間程度



風洞壁込みのCRM解析

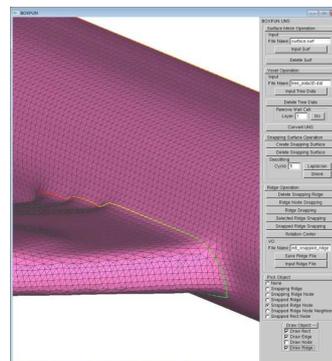


現状の課題

- 表面格子が四角形のため、表現できる形状に制約がある。
 - 凹部ではnegative volumeが発生するが、FaSTARの前処理でcell center位置を修正して回避
 - 四角形を三角形に分割して対応
 - 格子フォーマットの改良

- HexaGridのように完全自動では無い。
 - 形状再現性と作業時間はトレードオフ

- メモリ使用量が多い。
 - 直交格子自体はLaptopで数千万～数億ボクセル程度生成可能。
 - 直交格子から非構造格子データに落とし込むときにメモリを要する。
 - 現状では表面格子生成と空間格子生成を分けることで対応。



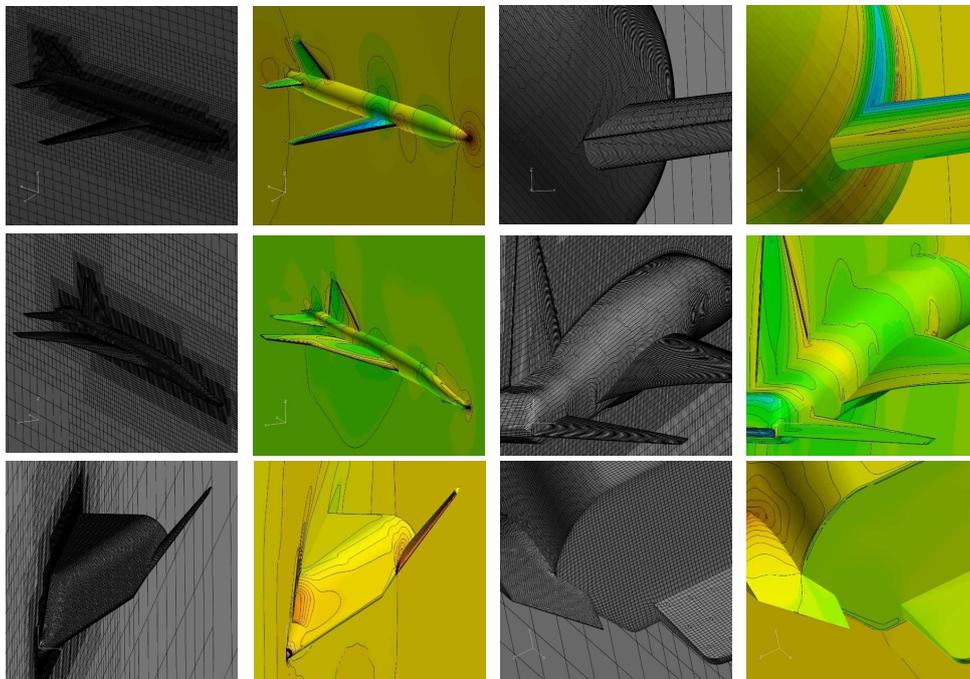
まとめと今後

- BOXFUNの開発状況について報告した。
 - GUIを用いたマニュアル操作による特徴線捕獲の改善
 - BCMフレームワークを用いた並列化

- 今後の予定
 - 自動化アルゴリズムの改良
 - 特徴線捕獲の自動化を促進し、ユーザの負担軽減
 - HexaGridライクな使い方への対応
 - 機能拡充
 - 完全分散並列対応、周期境界対応、円筒座標系対応
 - GUIの整備
 - 操作性向上
 - マニュアルの整備
 - 配布準備
 - β版
 - マニュアル・チュートリアル・Webの整備

- 活用促進指定研究制度で開発を加速

ご清聴ありがとうございました。





特徴構造解析ツール FBasisのご紹介

大道勇哉

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

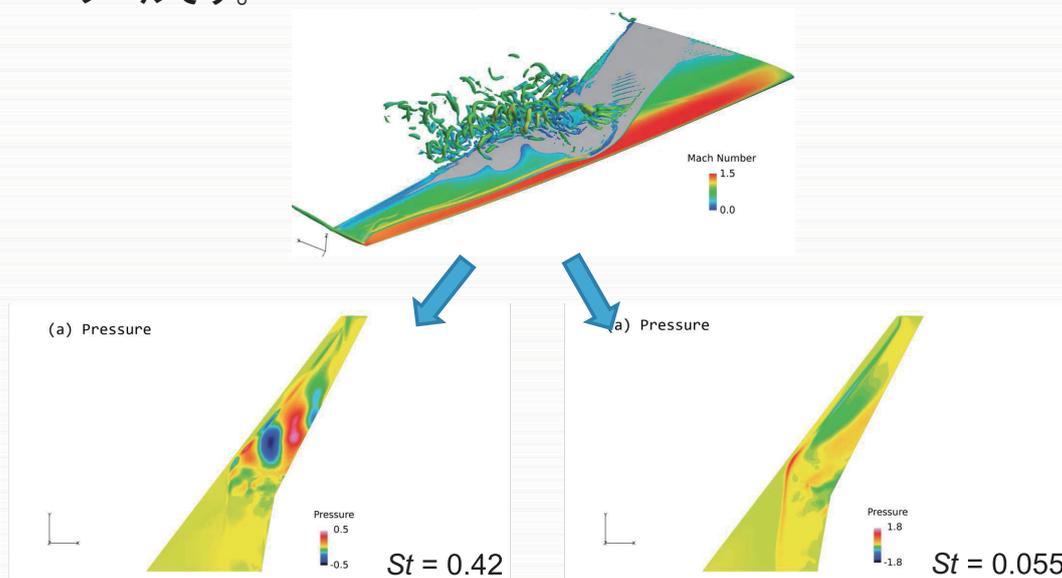


2018.7.6
第50回流体力学講演会／第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム@宮崎市民プラザ



FBasisとは

- 空間3次元の時系列データから特徴構造（パターン）を抽出するツールです。

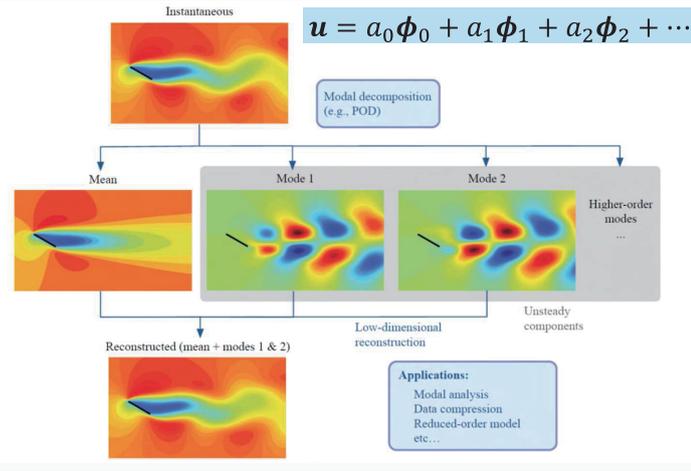


*Ohmichi, Ishida, and Hashimoto, AIAA J. 2018. 2



流体のモード分解解析

- モード分解：時空間的な特徴構造を表すモード（基底）の重ね合わせとして入力データを表現することで入力データの性質を理解
- 流体分野では**固有直交分解(POD)**, **動的モード分解(DMD)**がよく利用される



AIAA Journal, Vol. 45, No. 12, December 2007

Modal Analysis of Fluid Flows: An Overview

Kenneth Taira
Florida State University, Tallahassee, Florida 32310
Srinivas Aravamudan
University of Washington, Seattle, Washington 98195
Santosh K. Saha
Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907
Theodore G. Shepherd
California Institute of Technology, Pasadena, California 91125
Gautam Iyer
University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801
Gautam Thekdi
University of Liverpool, Liverpool L69 3GB, United Kingdom
Lorenz S. Taylor
University of Florida, Gainesville, Florida 32611
959-4222410000

1. Introduction
SPOD is an advanced modal analysis method that can be used to analyze unsteady flow fields with a high degree of temporal and spatial resolution. It has been shown to be particularly useful in the analysis of unsteady flows in which the dominant flow structures are highly correlated in time and space. This paper provides an overview of the SPOD method and its applications to fluid flow problems.

Keywords: Taira is an Associate Professor of Mechanical Engineering at the Florida State University. He received his M.S. degree from the University of Virginia and his Ph.D. from the University of California, Berkeley. He is currently a Senior Research Scientist at the University of Florida. He is also a Senior Research Scientist at the University of Florida.

Keywords: Aravamudan is an Assistant Professor of Mechanical Engineering at the University of Washington. He received his B.S. degree from the University of California, Berkeley and his Ph.D. degree from the University of California, Berkeley. He is currently an Assistant Professor at the University of Washington.

Keywords: Saha is an Assistant Professor of Mechanical Engineering at Purdue University. He received his B.S. degree from the University of Illinois, Urbana-Champaign and his Ph.D. degree from the University of Illinois, Urbana-Champaign. He is currently an Assistant Professor at Purdue University.

Keywords: Shepherd is an Associate Professor of Mechanical Engineering at the California Institute of Technology. He received his B.S. degree from the University of California, Berkeley and his Ph.D. degree from the University of California, Berkeley. He is currently an Associate Professor at the California Institute of Technology.

Keywords: Iyer is an Assistant Professor of Mechanical Engineering at the University of Illinois, Urbana-Champaign. He received his B.S. degree from the University of Illinois, Urbana-Champaign and his Ph.D. degree from the University of Illinois, Urbana-Champaign. He is currently an Assistant Professor at the University of Illinois, Urbana-Champaign.

Keywords: Thekdi is an Assistant Professor of Mechanical Engineering at the University of Liverpool. He received his B.S. degree from the University of Liverpool and his Ph.D. degree from the University of Liverpool. He is currently an Assistant Professor at the University of Liverpool.

Keywords: Taylor is an Assistant Professor of Mechanical Engineering at the University of Florida. He received his B.S. degree from the University of Florida and his Ph.D. degree from the University of Florida. He is currently an Assistant Professor at the University of Florida.

[Taira et al. 2017 AIAA J.]



FBasisの機能

- 実施可能なモード分解手法
 - ✓ 固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD)
 - ✓ 動的モード分解 (Dynamic Mode Decomposition, DMD)
 - ✓ Total least squares DMD (TDMD)
 - ✓ 逐次型の固有直交分解 (Incremental POD)

特徴 1 :
空間3次元のデータを扱えます

- 入力データ形式
 - ✓ FaSTARのrsltファイル
 - ✓ Plot3D形式ファイル (.qファイル)

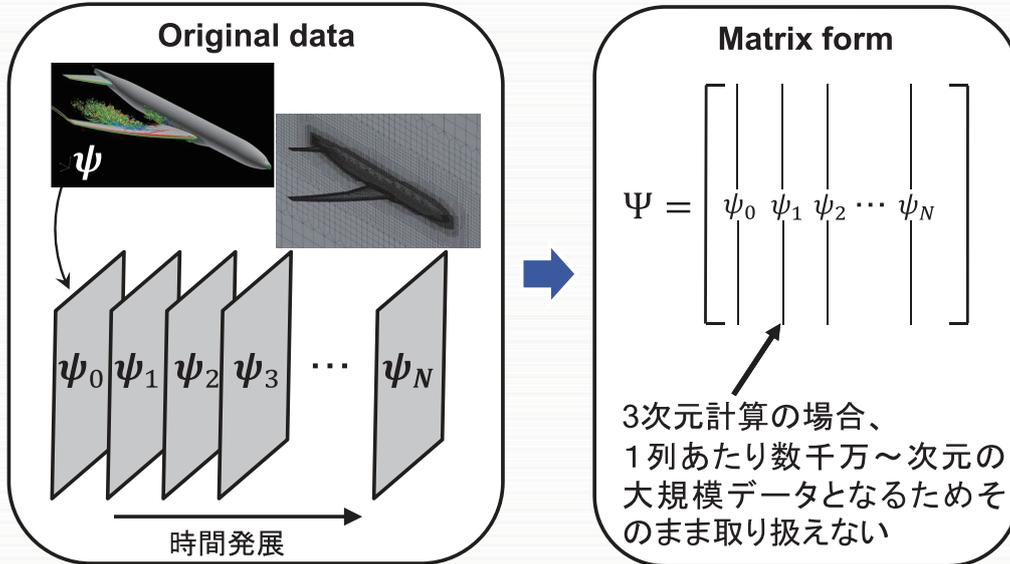
特徴 2 :
FaSTARデータを簡単に扱えます

- 入力変数のパターン
 - ✓ 速度、密度、圧力
 - ✓ 速度と音速
 - ✓ 速度 (3方向成分) のみ
 - ✓ 圧力のみ





入力データのイメージ



- 各時刻の流れ場(Snapshot)を並べたデータ



固有直交分解 (POD)

- 特徴抽出、次元削減、データ圧縮、データの可視化などに使われる
- データを射影した際の誤差が最小となる新しい (少数の) 基底を求める

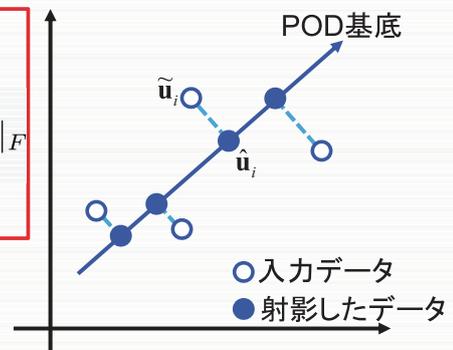
次式を最小化する直交基底 P_q を求める

$$J(P_q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| (\underbrace{u_i - \mu_N}_{\tilde{u}_i}) - P_q P_q^T (\underbrace{u_i - \mu_N}_{\hat{u}_i}) \|_F$$

解法: 以下の共分散行列の固有値問題を解く

$$S_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \mu_N)(u_i - \mu_N)^T$$

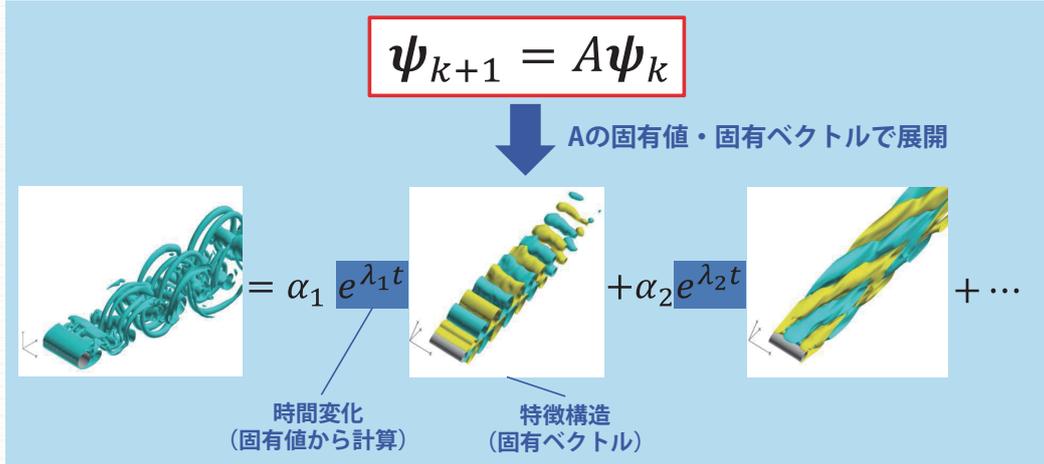
固有ベクトルがPOD基底、固有値が寄与度となる



動的モード分解 (DMD)

■ 動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)

- ✓ 流れ場に潜在する**特徴構造**とその**時間変化** (周波数、増幅率) を抽出
- ✓ スナップショット間の流れ場の時間成長を線形の関係で表現



Incremental POD

- Incremental POD^{1,2,3}では、入力データセットを一度にすべて使うのではなく、少しずつ使い、その都度結果を更新していくメモリに保持できる大きさの次元の行列で表現
- 消費メモリ量が入力データ数によらない
- 得られたPOD基底を入力データセットの低次元化に利用

¹Arora+, 2012

²大道, 橋本, 流力ANSS2016

³Ohmichi+, AIAA J., 2018

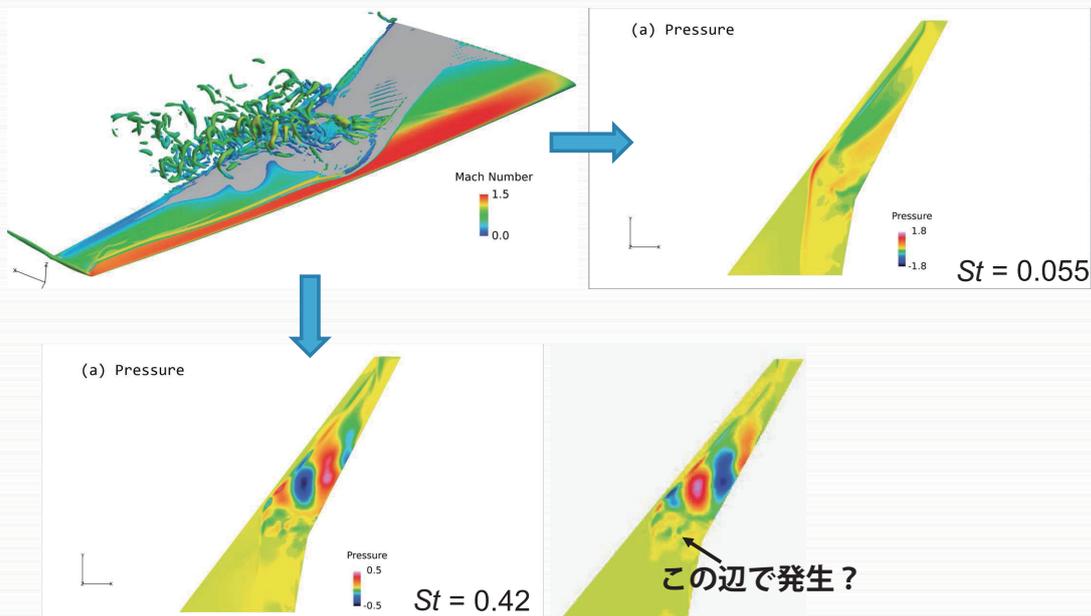
$$\text{共分散行列 } C_{n+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n & \frac{\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp}{\|\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp\|} \end{bmatrix} \mathbf{Q}_{n+1} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n & \frac{\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp}{\|\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp\|} \end{bmatrix}^T$$

where,

$$\mathbf{Q}_{n+1} = \frac{n}{(n+1)^2} \begin{bmatrix} (n+1)\mathbf{D}_n + \hat{\varphi}_{n+1}\hat{\varphi}_{n+1}^T & \|\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp\| \|\hat{\varphi}_{n+1}\| \\ \|\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp\| \|\hat{\varphi}_{n+1}\| & \|\tilde{\varphi}_{n+1}^\perp\|^2 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \hat{\varphi}_{n+1} &= \mathbf{U}_n^T \tilde{\varphi}_{n+1} \\ \tilde{\varphi}_{n+1}^\perp &= \tilde{\varphi}_{n+1} - \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^T \tilde{\varphi}_{n+1} \end{aligned}$$



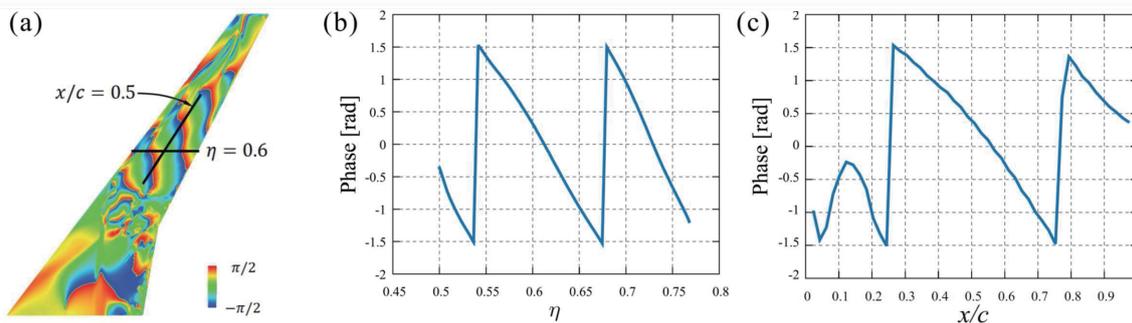
空間パターン (DMD)



*Ohmichi, Ishida, and Hashimoto, Modal Decomposition Analysis of Three-Dimensional Transonic Buffet Phenomenon on a Swept Wing, AIAA J. Vol. 56, No. 10, October 2018



位相分布 (DMD)

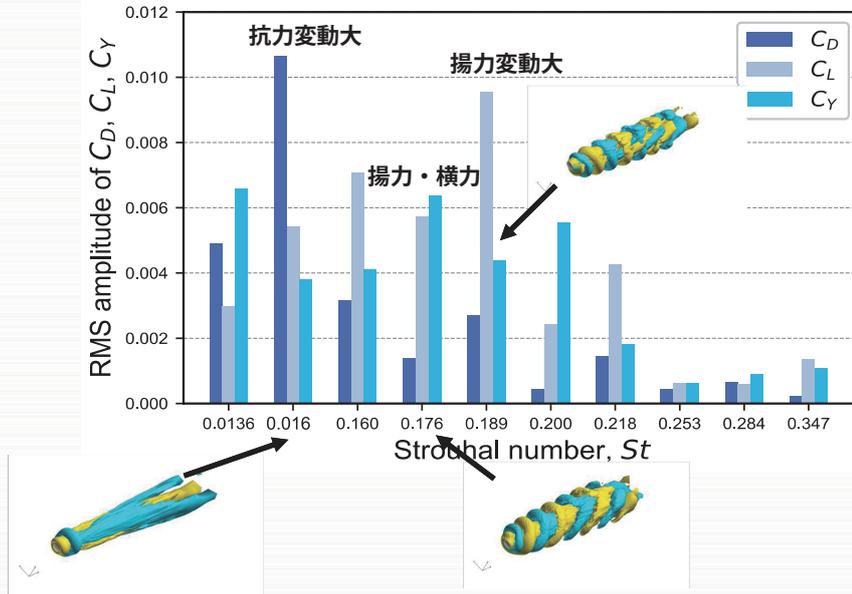


- 位相分布から (大体の) 伝播速度や伝播方向がわかる
- 位相速度 $U_p = 0.58U_\infty$ 、伝播角度 $\beta = 56^\circ$





各モードが及ぼす空気力 (DMD)



- どのモードがどの程度、空気力の変動を与えているのか等も解析可能



特徴構造解析ツールFBasis

- POD, Incremental POD, DMD, TDMD
- 大規模データに適用可能
- FaSTARデータ (.rsltファイル)、Plot3Dファイルを簡単に取り扱える
- 参考文献 (手法に関して)
 - ✓ 平邦彦, 固有直交分解による流体解析: 1, 2, ながれ: 日本流体力学学会誌, 30, 2011.
 - ✓ Taira, K. et al, Modal analysis of fluid flows: An overview, AIAA J., pp.1-29, 2017.
 - ✓ Ohmichi, Y., Ishida, T., and Hashimoto, A., Modal Decomposition Analysis of Three-Dimensional Transonic Buffet Phenomenon on a Swept Wing, AIAA J. Vol. 56, No. 10, October 2018.
 - ✓ Ohmichi, Y., Preconditioned dynamic mode decomposition and mode selection algorithms for large datasets using incremental proper orthogonal decomposition, AIP Advances, 7, 075318, 2017.
 - ✓ 大道勇哉, 小林憲司, 金崎雅博, 大規模非定常データに対する特徴構造抽出法の開発と大気突入カプセル後流解析への適用, FDC/ANSS2018, 2E05
 - ✓ 大道勇哉, 五十嵐康彦, 動的モード分解による多次元時系列解析, 日本神経回路学会誌 25 (1), pp.2-9, 2018.

平成30年7月6日(金)
第50回流体力学講演会／第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
JAXAソフトウェアユーザー懇談会

最適化ライブラリHarmoneeの紹介

金崎雅博
宇宙航空研究開発機構
首都大学東京

TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

もくじ

2

1. 最適化ライブラリの概要
2. 評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化
3. 近似関数を利用した最適化
4. FaSTARにおける適用

TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

最適化ライブラリの概要

3

- 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化をFaSTARのライブラリ
”Harmonee (Heuristic Algorithm for Real-world Multi-Objective
problem and NEEDs)”として整備中
- 実績のある手法を中心に構成

| | |
|-----------|--|
| 進化計算法 | Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II (NSGA-II) |
| 多目的解評価 | 非優劣ソート法(Non-dominated Sorting), 混雑度距離, 制約満足度ランク |
| 選択法 | トーナメント選択 |
| 交叉法 | 擬似二進交叉(Simulated Binary Crossover: SBX) (NSGA-IIの標準) 混合交叉(Blended Crossover: BLX) |
| 突然変異 | 多項式突然変異(Polynomial Mutation) (NSGA-IIの標準), 一様突然変異 (Uniform Mutation) |
| 制約違反処理 | 指向性交配と制約満足ランク近傍交配のハイブリッド (両手法の利用率を指定可能) |
| 近似関数法 | Kriging法 |
| 初期サンプリング法 | Latin Hypercube Sampling (LHS) |
| 追加サンプリング法 | Expected Hypervolume Improvement (EHVI), Multi-additional sampling (MAs) |

TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化

4

- “Harmonee-ea”として整備(2018年7月現在実装済み)
 - ✓ Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II (NSGA-II)をベースとし, 指
向性交配・近傍ランク交配ハイブリッド法に基づいた制約条件の処理

| | |
|-----------|--|
| 進化計算法 | Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II (NSGA-II) |
| 多目的解評価 | 非優劣ソート法(Non-dominated Sorting), 混雑度距離, 制約満足度ランク |
| 選択法 | トーナメント選択 |
| 交叉法 | 擬似二進交叉(Simulated Binary Crossover: SBX) (NSGA-IIの標準) 混合交叉(Blended Crossover: BLX) |
| 突然変異 | 多項式突然変異(Polynomial Mutation) (NSGA-IIの標準), 一様突然変異 (Uniform Mutation) |
| 制約違反処理 | 指向性交配と制約満足ランク近傍交配のハイブリッド (両手法の利用率を指定可能) |
| 近似関数法 | Kriging法 |
| 初期サンプリング法 | Latin Hypercube Sampling (LHS) |
| 追加サンプリング法 | Expected Hypervolume Improvement (EHVI), Multi-additional sampling (MAs) |

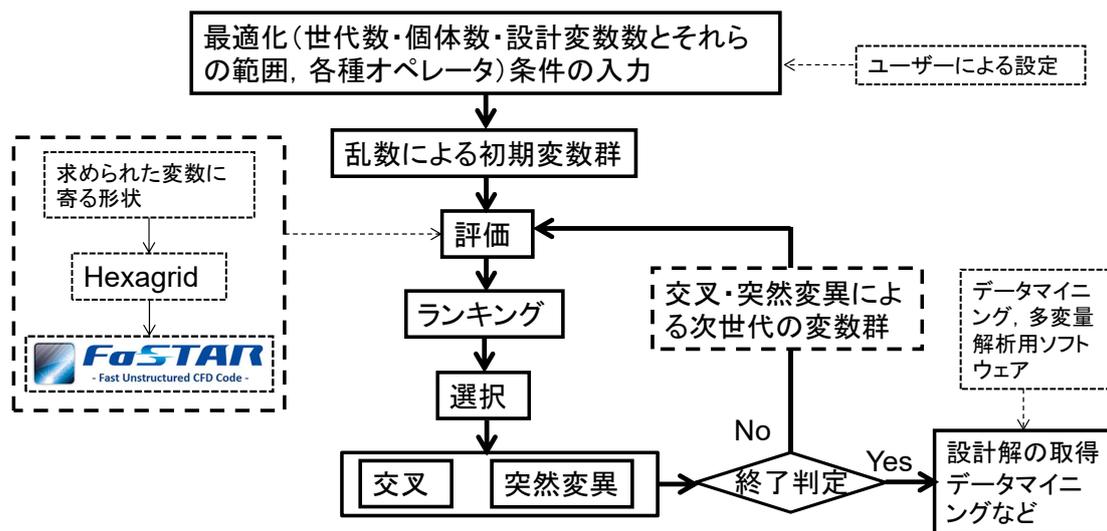
TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化

5

□ “Harmone-*ea* (evolutionary algorithm)”として整備(2018年7月現在実装済み)

- ✓ Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II (NSGA-II)をベースとし, 指向性交配・近傍ランク交配ハイブリッド法に基づいた制約条件の処理



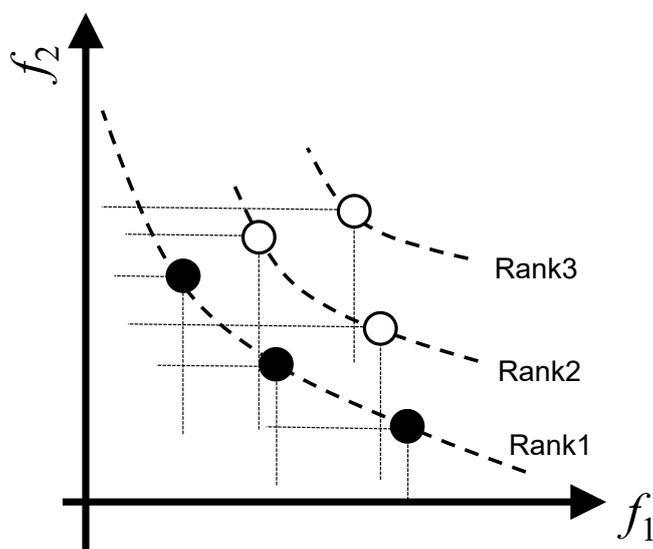
TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化

6

□ 非優劣ソート法に基づく解選択

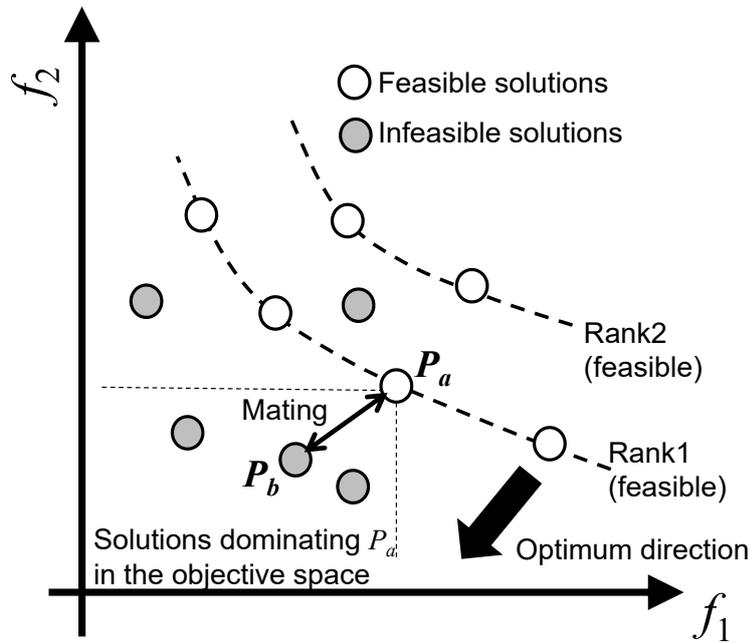
- ✓ 関数 f_1, f_2 の同時最小化を考える



TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化 7

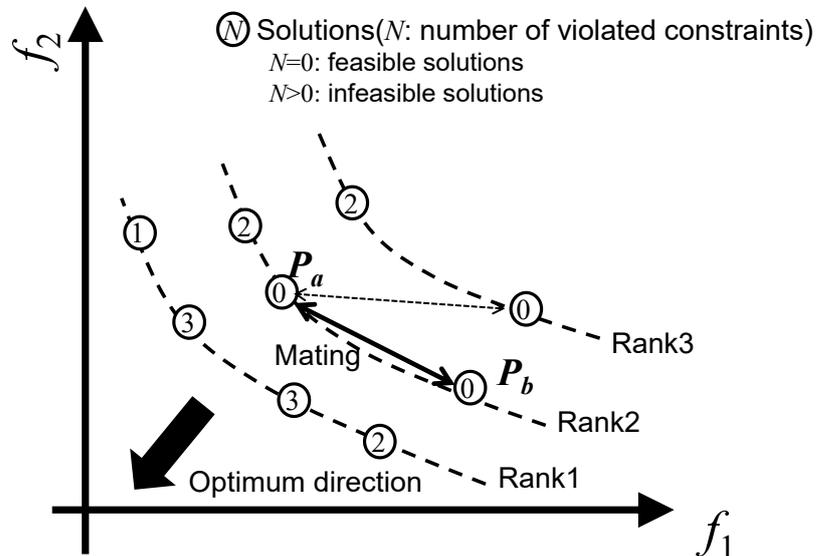
□ 指向性交配



評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化 8

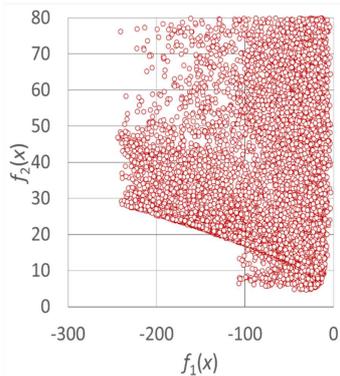
□ 近傍ランク交配

✓ 近い制約違反ランク同士のうち、解空間でのRankが高いものをトーナメント選択により選択

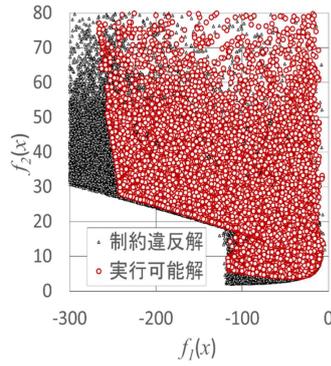


評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化 9

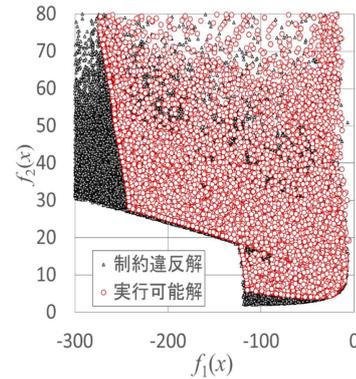
□ テスト関数による制約付き問題 (f_1, f_2 の最小化問題)



ペナルティ法



Harmonie (指向性交配
: 近傍ランク交配 = 1:0)



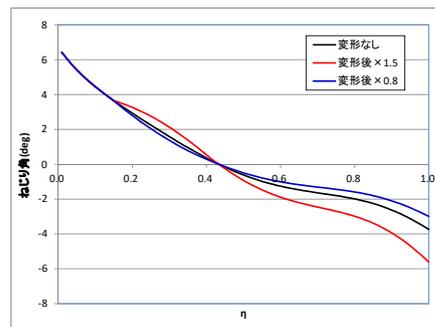
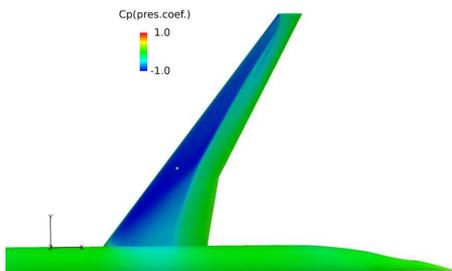
Harmonie (指向性交配: 近
傍ランク交配 = 1:1)

評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化 10

□ 空力設計問題への適用例

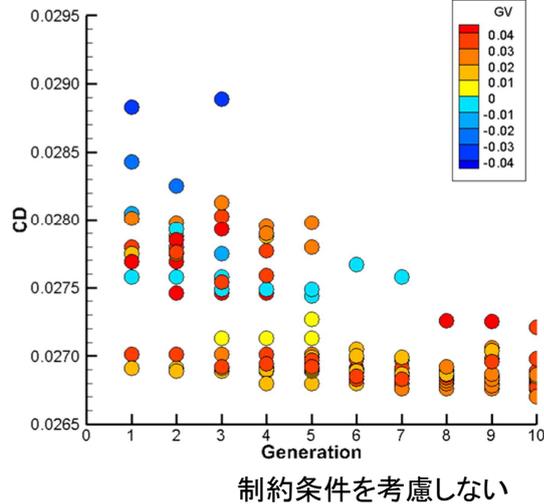
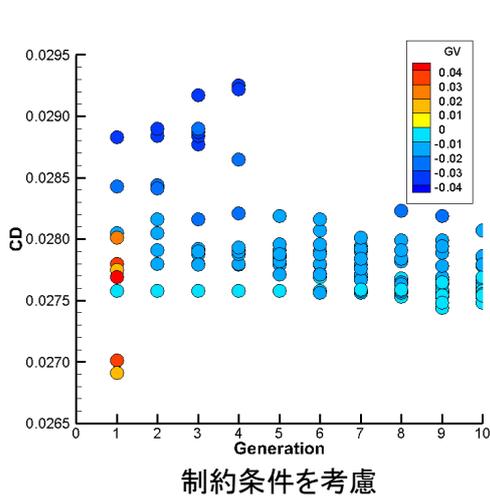
- ✓ 簡単な遷音速翼設計 (ねじり分布とキャンバー分布の設計) に **Harmonie-ea** を適用
- ✓ 空力性能の取得は **FaSTAR** を利用
- ✓ 1 個体の評価に **約 120 分** (約 660 万セル, 128 並列)

Minimize C_D
Subject to $C_{M_CRM} \leq C_M$



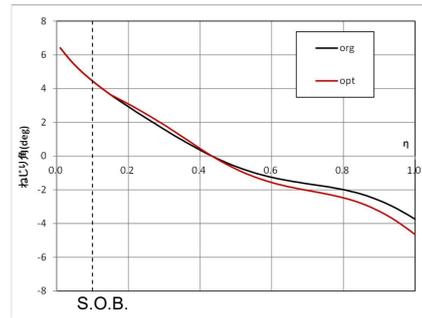
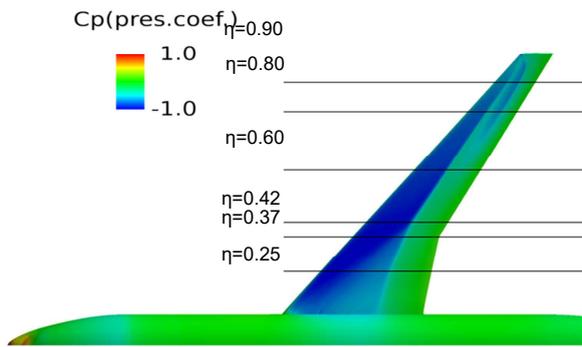
評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化

最適方向に解が求められた



評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化

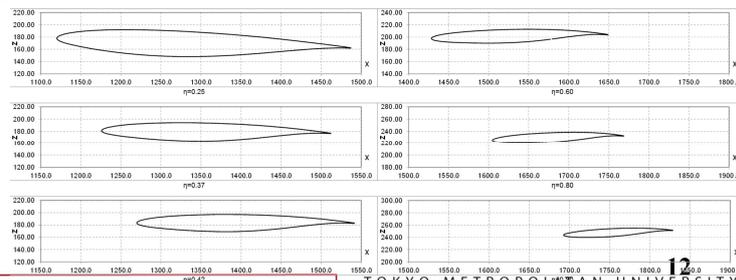
代表解



$C_D=274.370\text{cts}@C_L=0.5$
 キャンバ比 (opt/org) = 1.0755
 ねじり角比 (opt/org) = 1.2431

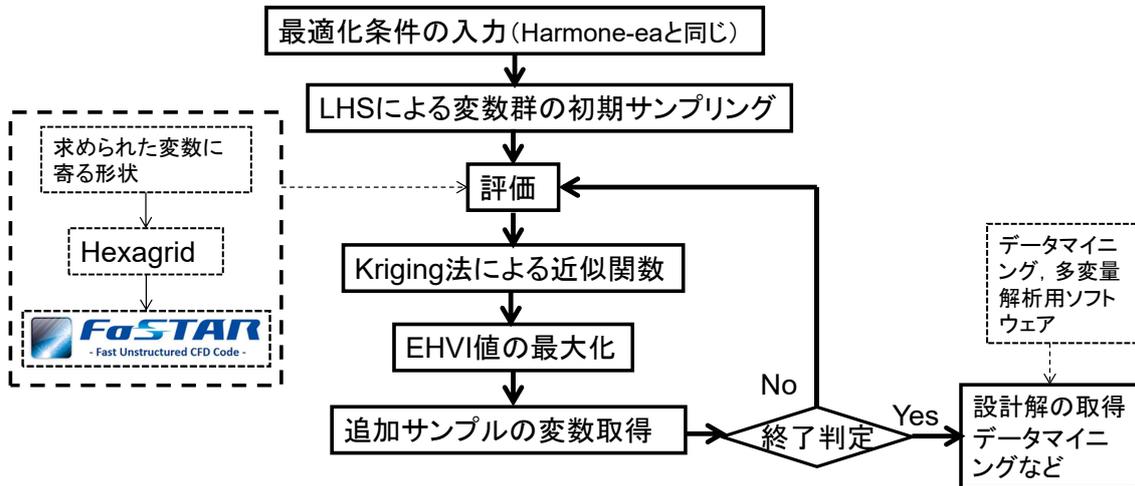
(初期形状

$C_D=271.713\text{cts}@C_L=0.5)$



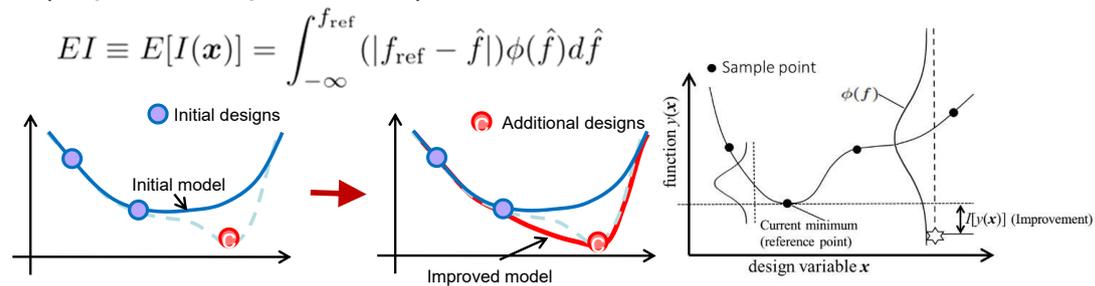
近似関数を利用した最適化 13

■ “Harmonee-sa (surrogate model assisted)”として整備中
Kriging法による近似関数



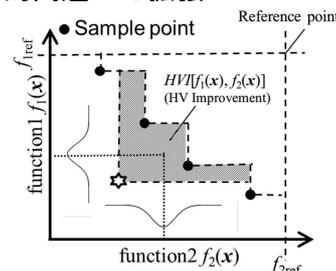
近似関数を利用した最適化 14

■ “Harmonee-sa (surrogate model assisted)”として整備中
EI(Expected Improvement)による近似関数上での解探索



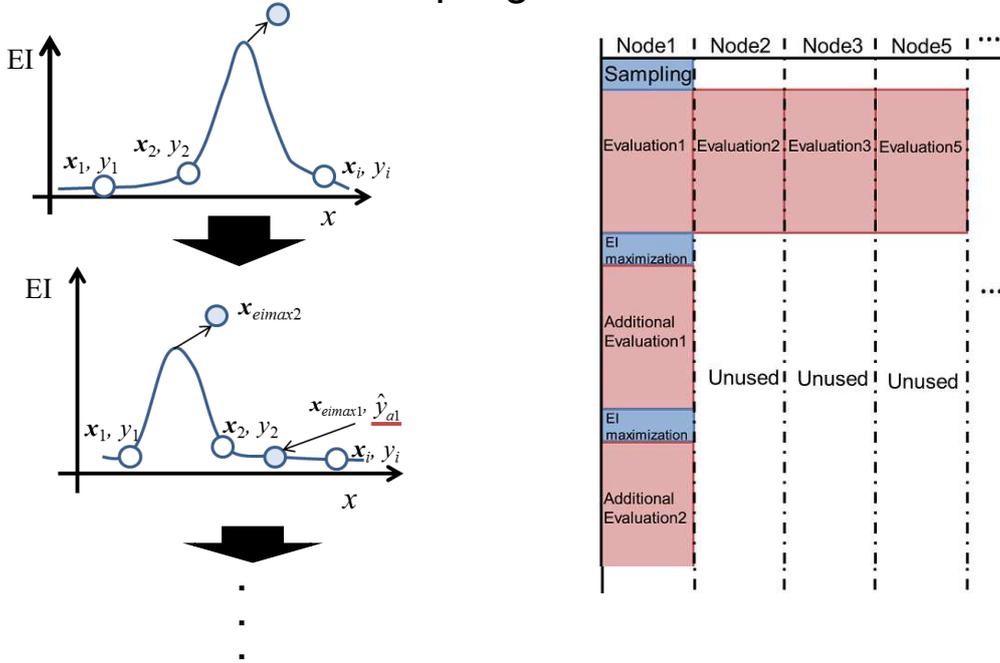
EHVI(Expected Hypervolume Improvement)による多目的問題への拡張

$$EHVI[f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] = \int_{-\infty}^{f_{1ref}} \int_{-\infty}^{f_{2ref}} \dots \int_{-\infty}^{f_{mref}} HVI[f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]$$

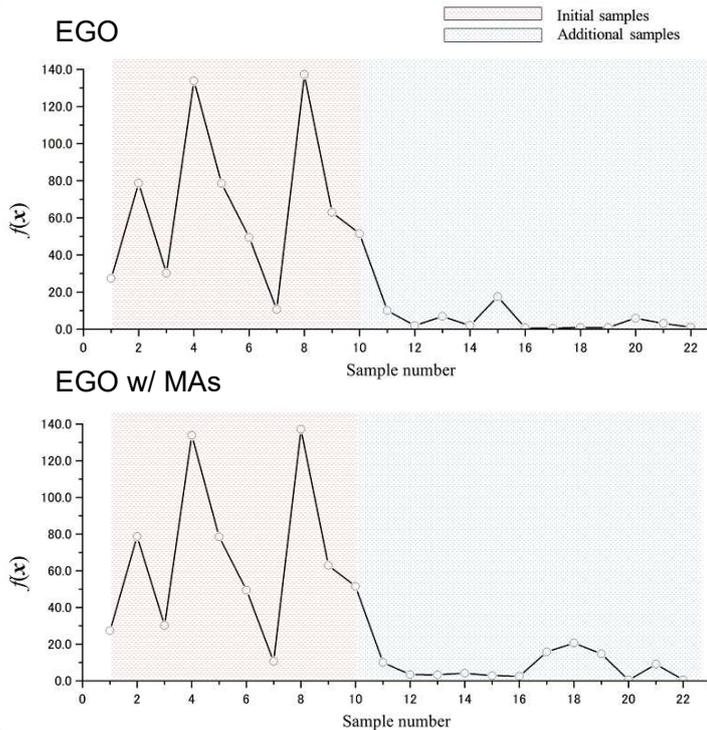


近似関数を利用した最適化 15

Multi-Additional Sampling



近似関数を利用した最適化 16



- MAsを用いても, 最適解を取得可能
- 効率は並列数分向上
- 今後, 空力設計問題への適用を実施

今後の展望

17

□ Harmonie-eaの整備

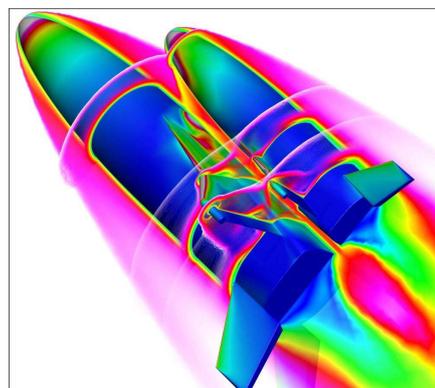
- ✓ 問題定義箇所のインターフェースづくり
- ✓ より複雑な問題への適用

□ Harmonie-saの整備

- ✓ FaSTARによる実問題解決事例
- ✓ 制約条件処理

◆ FaSTAR-moveなどの利用

- ◆ 多分野統合最適化
- ◆ 事例の拡充・整理

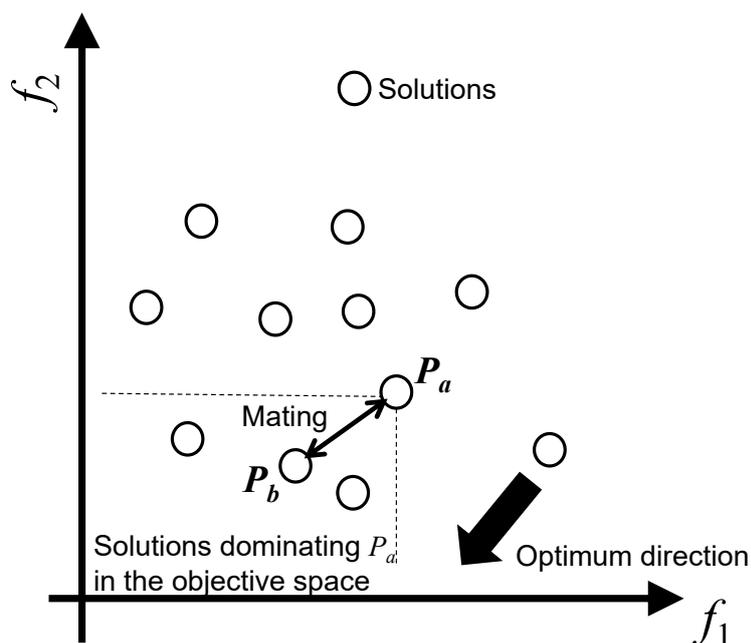


TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

評価値を直接利用した進化計算に基づく最適化

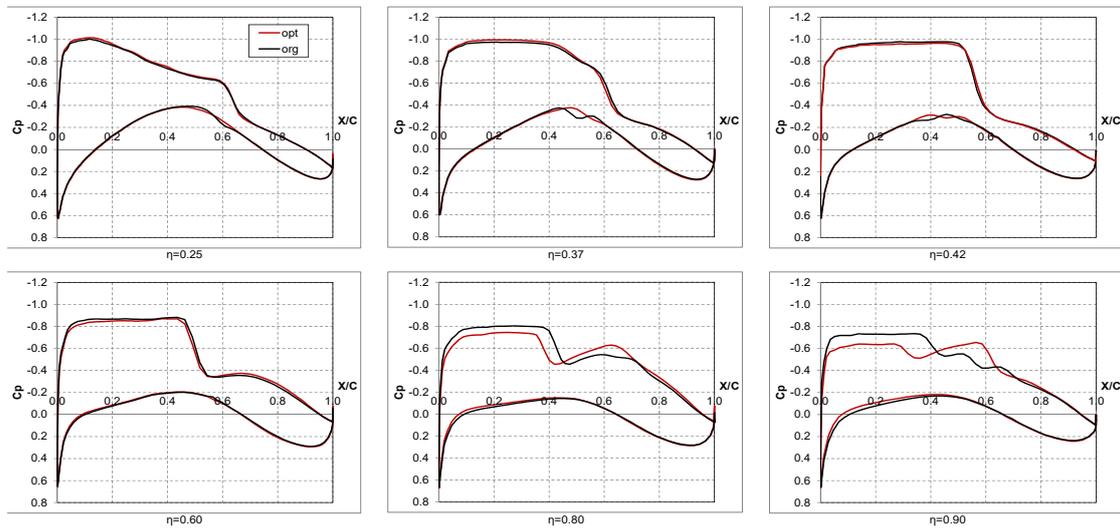
18

□ 指向性交配



TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

□ 圧力分布の比較



断面圧力分布比較
(最優秀個体vs初期形状)