CFDの全体像と手法の位置づけ

理化学研究所
姫野龍太郎
himeno@riken.jp
http://accc.riken.jp

内容

- CFD
  - どんな風に分類できるかを知る
  - その上で、それぞれの例を知る
  - 自分の問題にあった手法を選択するための指針
    - 注意：研究者は自分の方法が一番だと信じている
      - 十人に聞けば十通りの違う答えが返ってくる
      - 論文等で発表された例はうまくいった例
      - 手間や試行錯誤は発表されないことが多い
  - 実務適用のポイント

分類と選択肢

１）取り扱いたい現象の本質を表す方程式

２）解きたい空間を取り扱う方法

３）乱流のモデル化

４）どのソフトウェアを使うか、あるいは自分で作るか

1．基礎方程式

- 流速:音速との比較
  - 圧縮性の方程式:M＞0.3、秒速72m（260km/h)
  - 非圧縮:M<0.3
  - M.5(120m/s,432km/h)では速度が倍となると衝撃波が出るので非圧縮と見なすのは危険
- 計算している場の中で密度変化があるかどうかもポイント（温度差が大きくても非圧縮は成り立たない）
  - 温度差数十度の対流ならブシネ近似（温度差に比例する浮力＋非圧縮性）
  - それより大きければ圧縮性で取り扱う
- 樹脂・血液など、粘性に異方性や速度・温度依存性があるとNavier-Stokes方程式は使えない

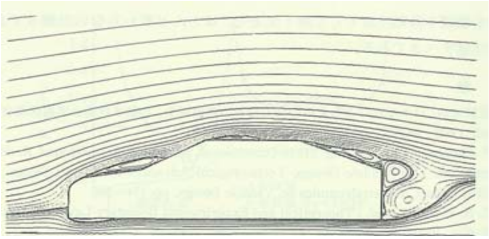
基礎方程式 (2)

- 構造物が柔らかい？　連成？
- 自由表面がある？　液滴、泡？
- 熱？　固体側の伝導？　放射？　日光照射？
- 音？　（ジェットノイズ、乱流騒音、エッジトーン…）
- 相変化？
- 化学反応？　燃焼？

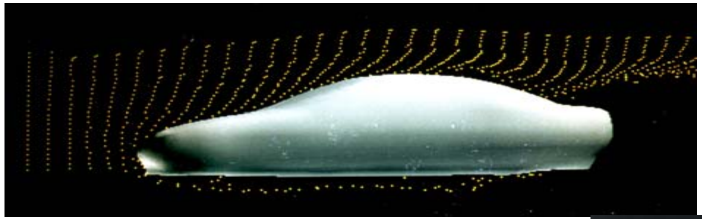
重要なことは何が本質か

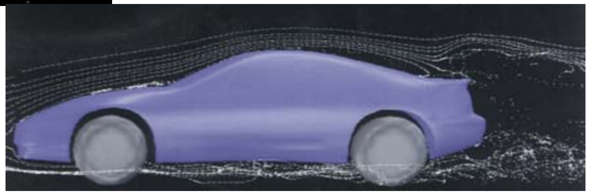
- 流れか？
- なるべく単純化
- Step by step
  - いきなり複雑な場合に挑戦しない
  - 単純な場合から、順番に現実に近づける

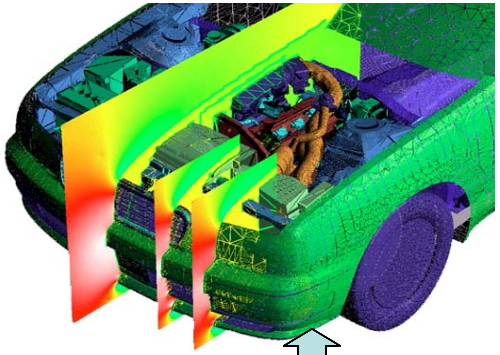
Step by step

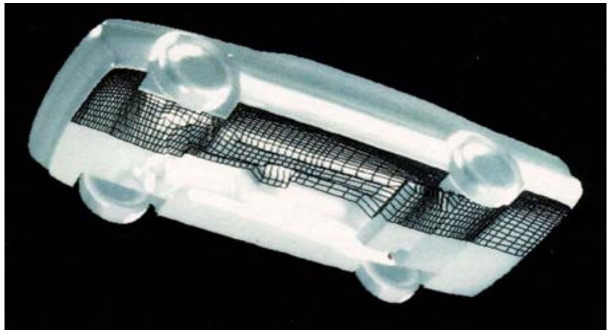


2D

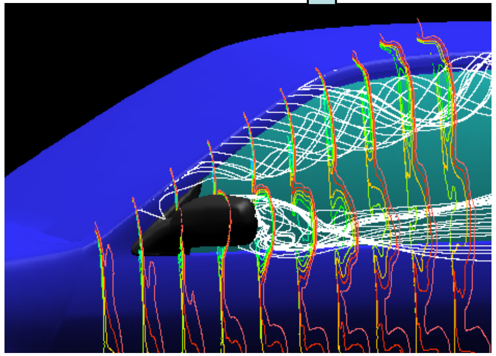


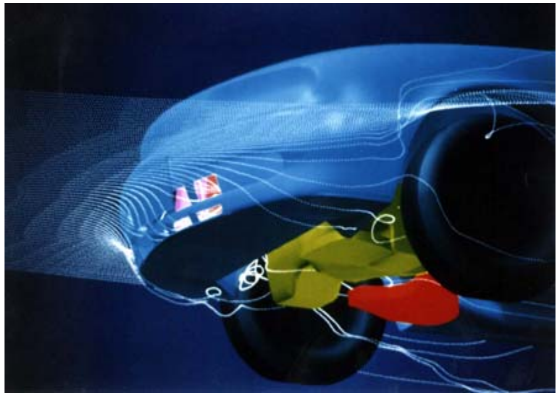






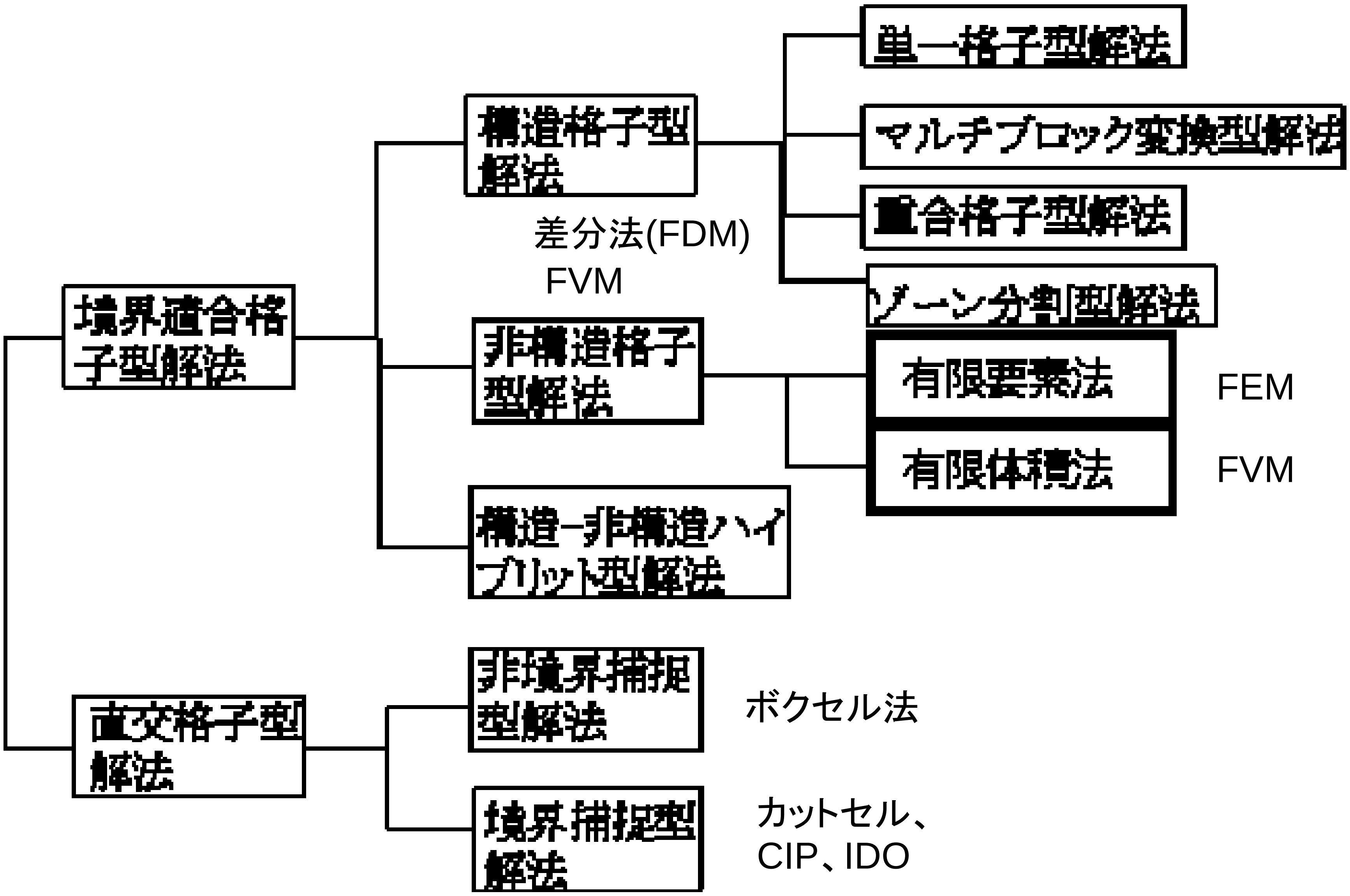
音





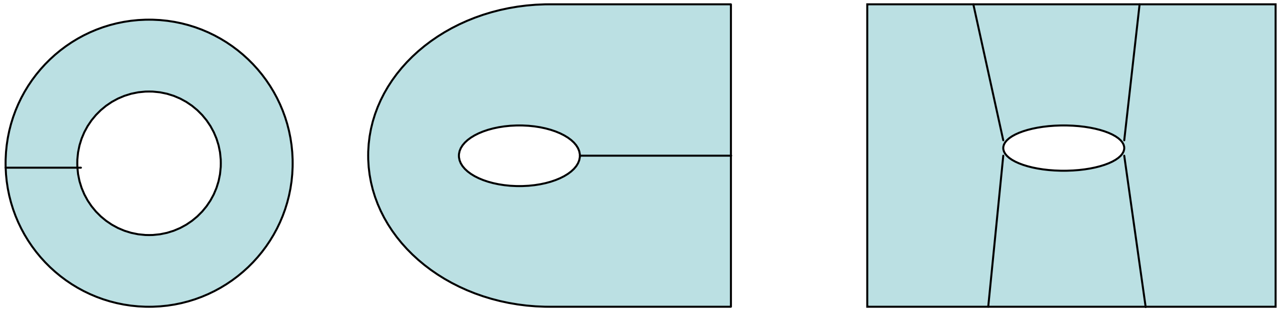
図は末尾の
出典1

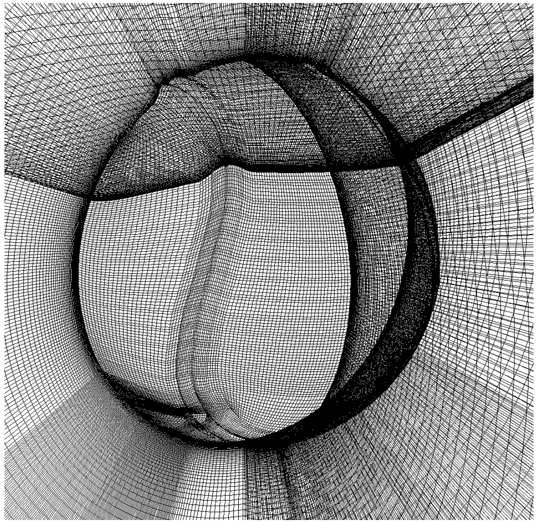
2. 解法の分類

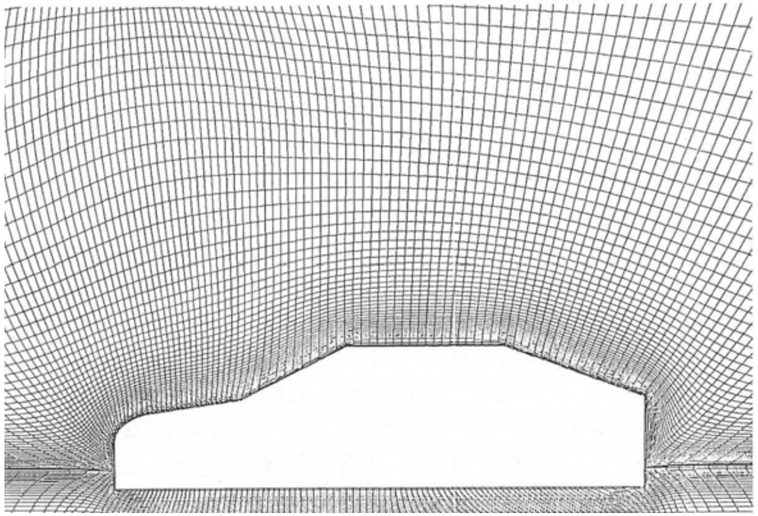

境界適合格子型解法
構造格子型解法
単一格子型解法
マルチブロック変換型解法
重合格子型解法
ゾーン分割型解法
差分法(FDM)
FVM
非構造格子型解法
有限要素法
FEM
有限体積法
FVM
構造-非構造ハイブリッド型解法
直交格子型解法
非境界捕捉型解法
ボクセル法
境界捕捉型解法
カットセル、
CIP、IDO

1)構造格子

- A)単一格子：O型、C型、H型
  - 格子線が途中でなくならない
  - 全てのセルが2次元だと四角、3次元だと六面体

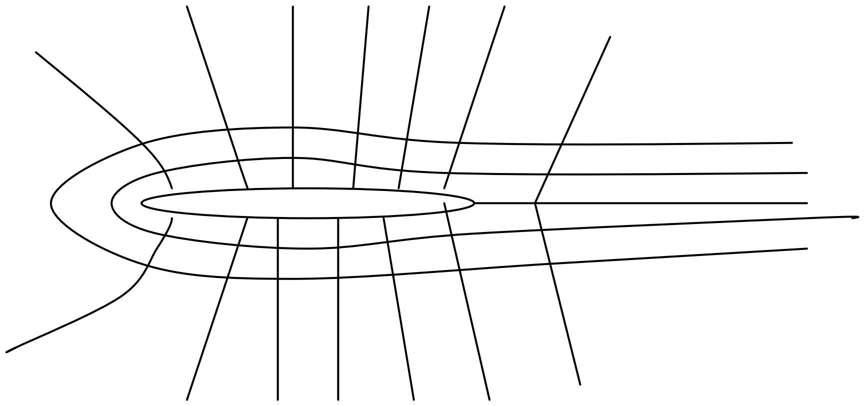




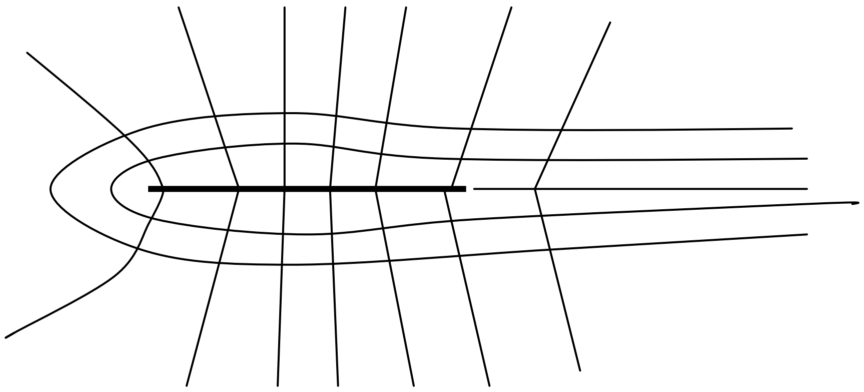


3次元の翼の処理1

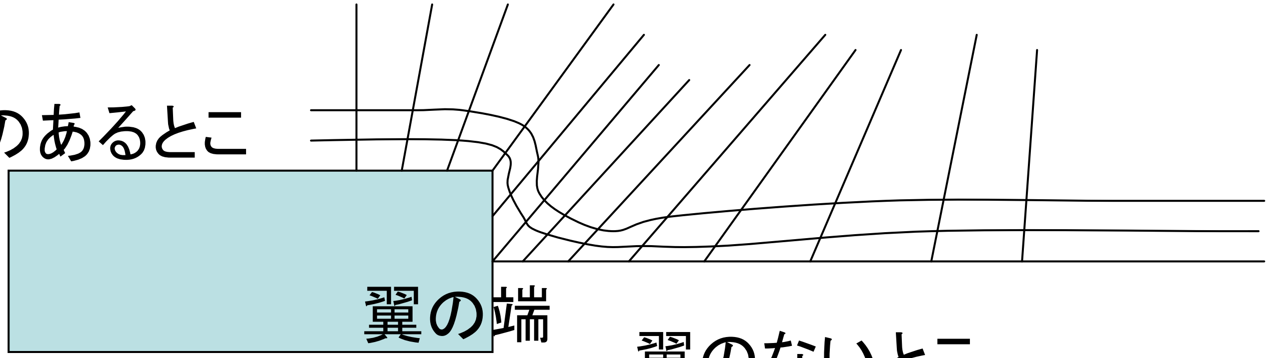
翼のあるとこ



翼のないとこ

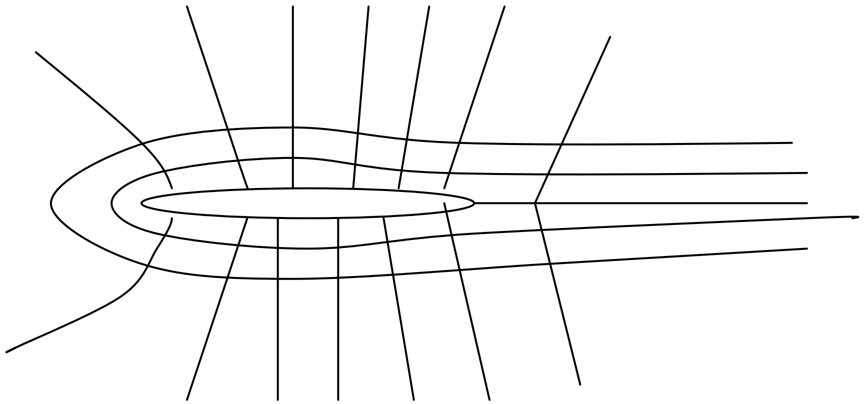


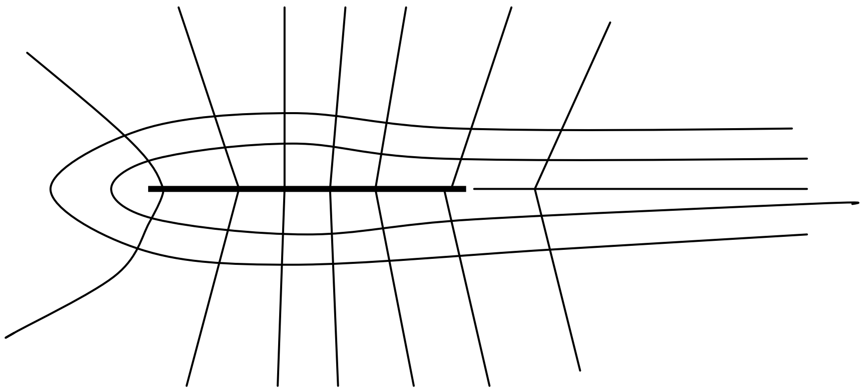
翼のあるとこ

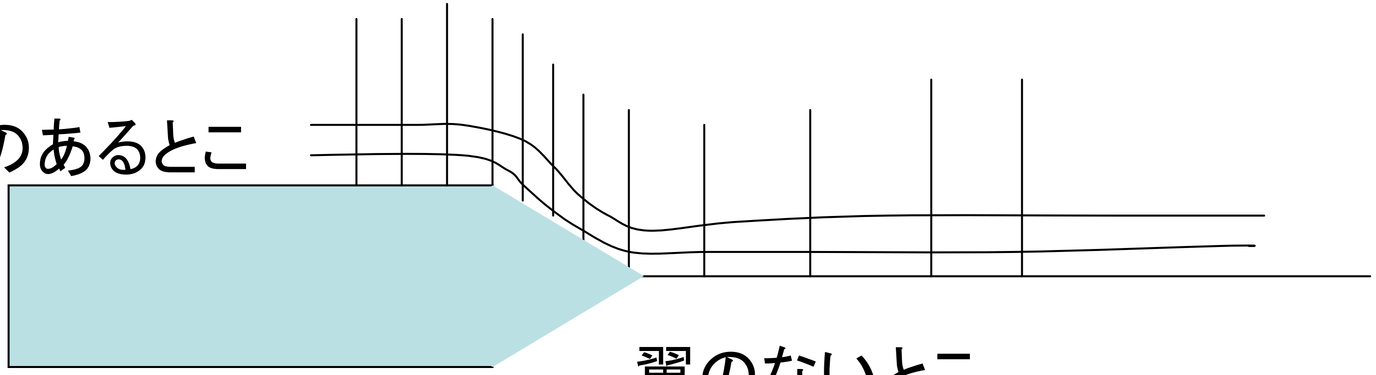


翼のないとこ

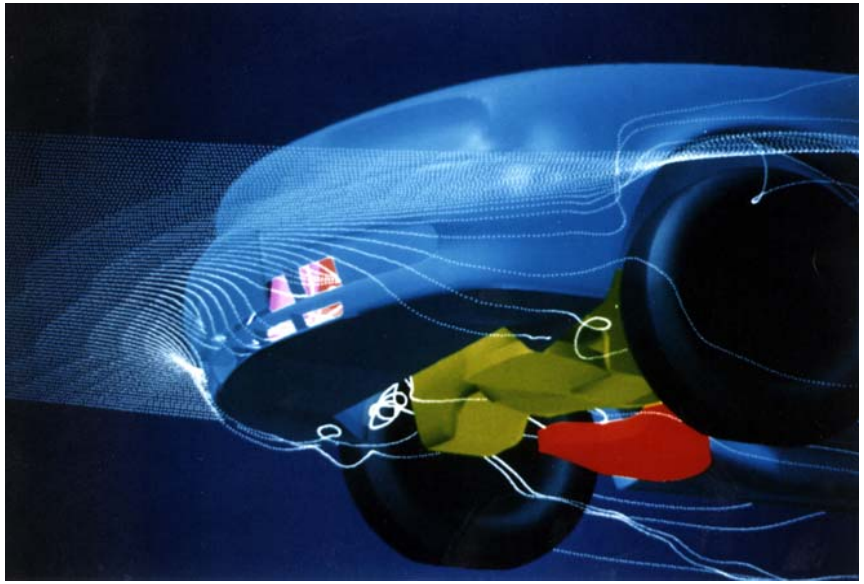
3次元の翼の処理2



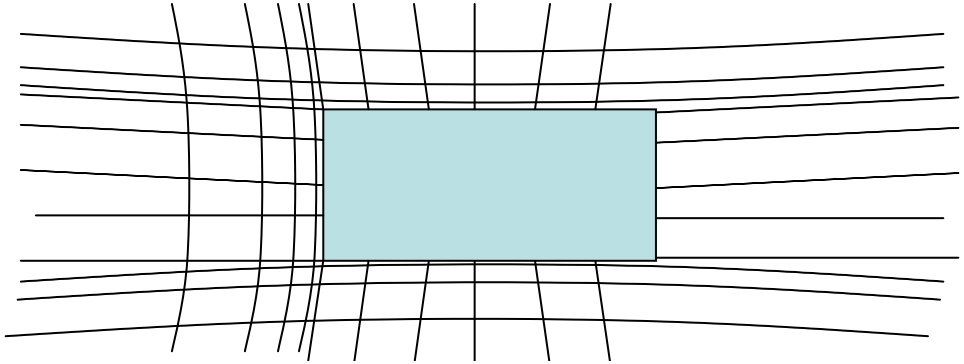




マルチブロック変換



境界層を解像する細かい格子が流れの中に出る



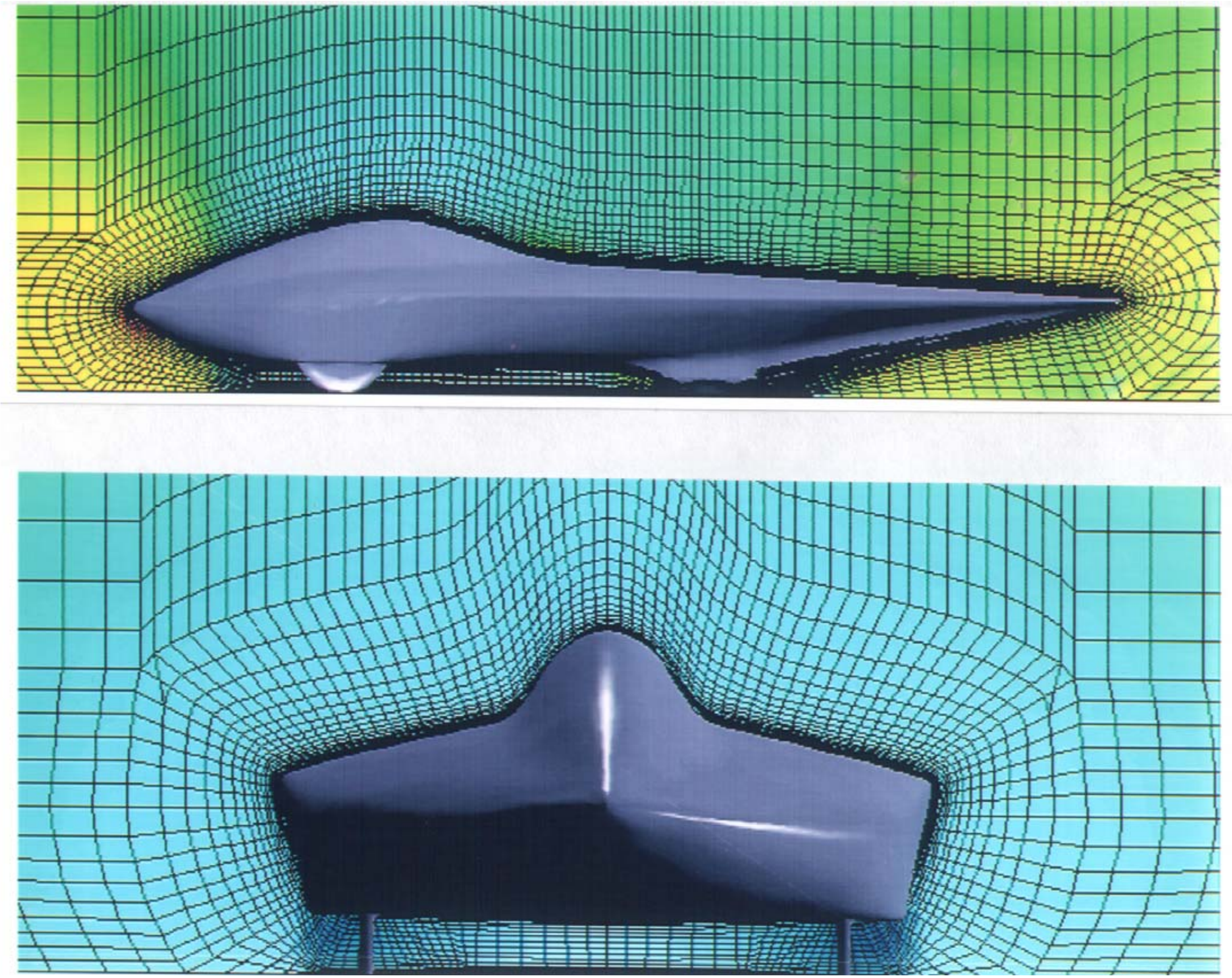
出典3

zonal

それぞれのゾーンに適した格子を使う

境界層を解像する細かい格子が流れの中に出ない

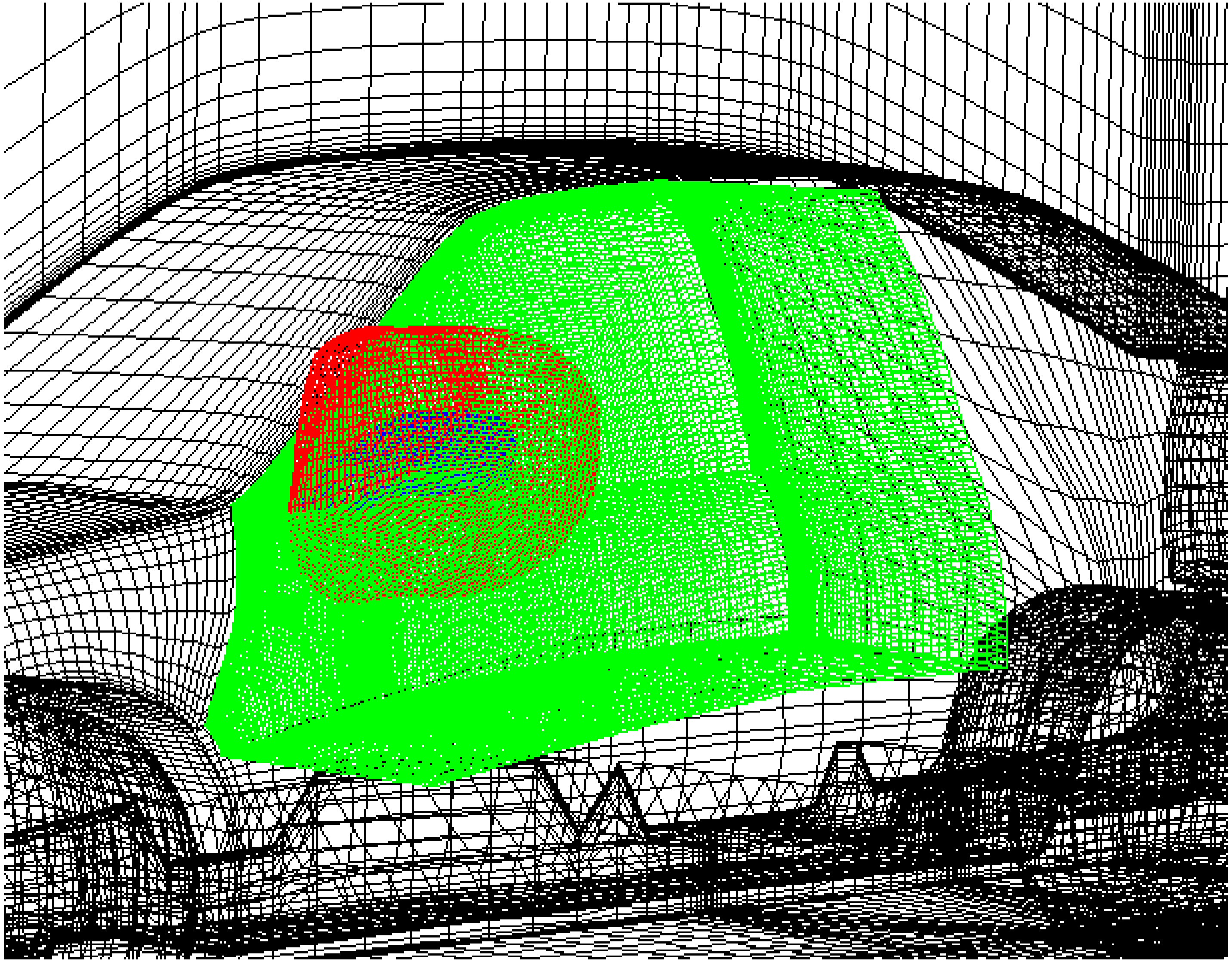
ゾーン境界で必ずしも同じ格子分布である必要はない



出典4

重合格子

局所的に細かい計算をしたい場合



出典５

非構造格子(FEM,FVM)

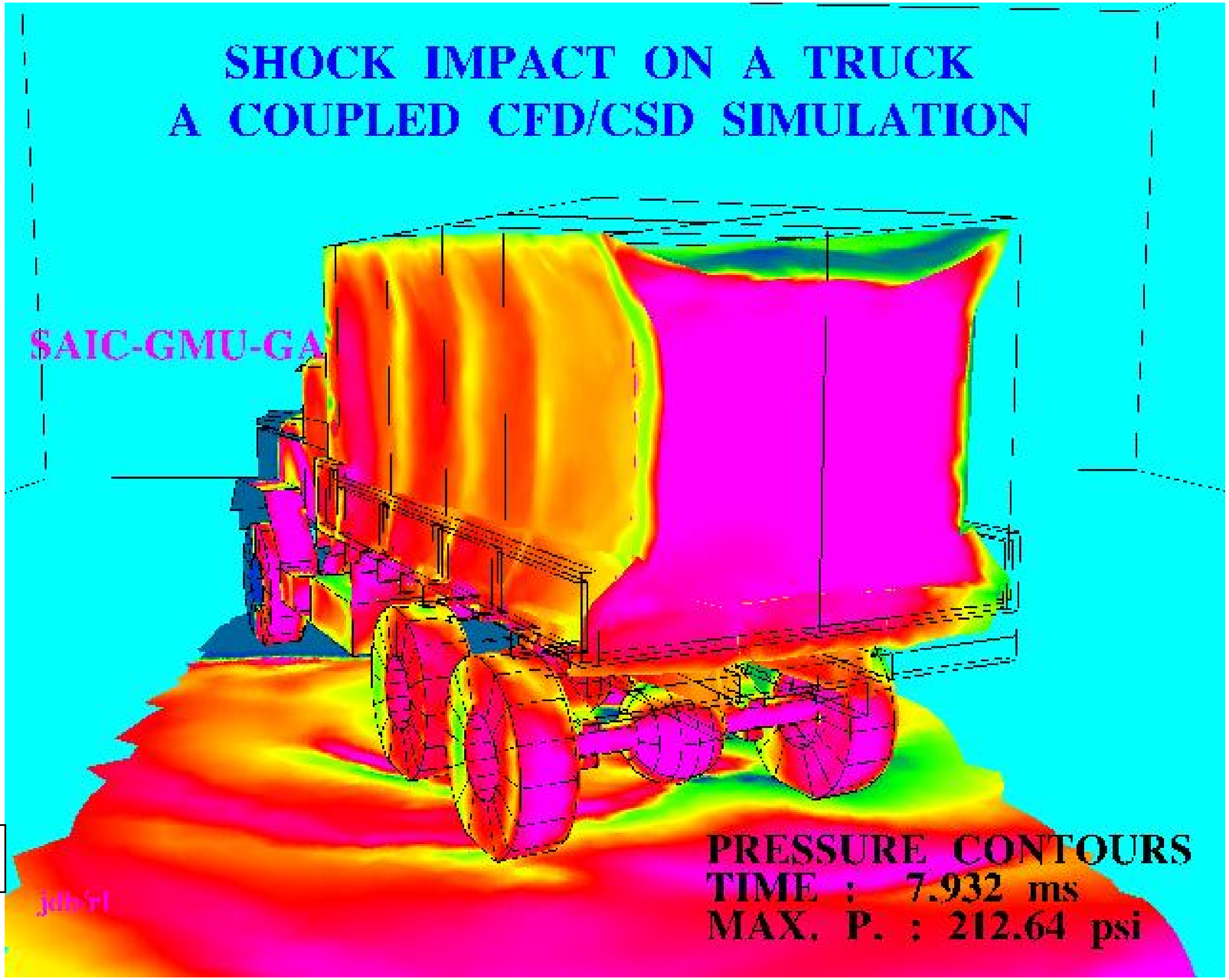
- ２次元：三角、四角
- ３次元：三角錐、四角錐、六面体

- 形状表現の自由度が高い
- 必要な部分だけにメッシュ密度を高くすることができる

- メッシュの品質のチェック・制御が困難（特に3次元、非常に扁平とかひずんだメッシュの存在）
- 三角メッシュや三角錐は自由度は高いが、要素数が多くなるので計算時間・記憶領域の点では不利

構造流体連成問題

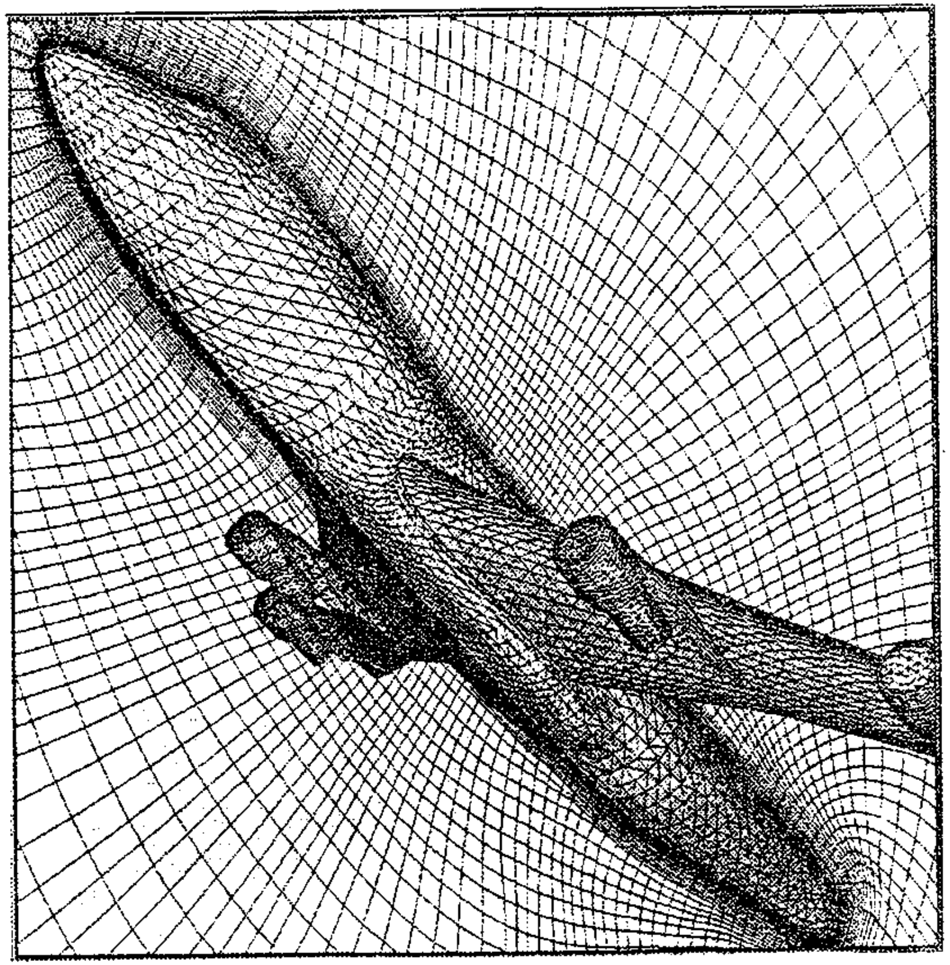
爆風によってトラックが変形してゆく様子をシミュレーションしたもの



出典7

構造・非構造ハイブリッド

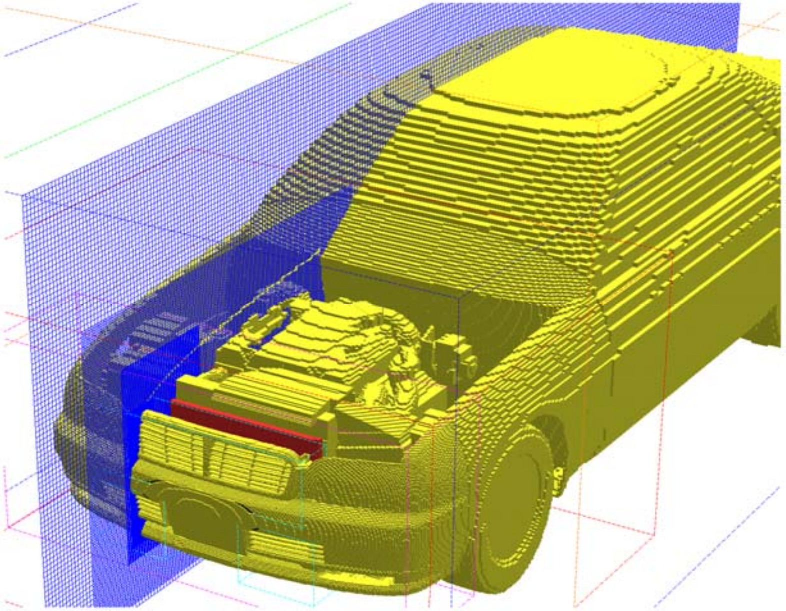
物体表面近傍を非構
造格子で、その外側は
構造格子を使う



出典9

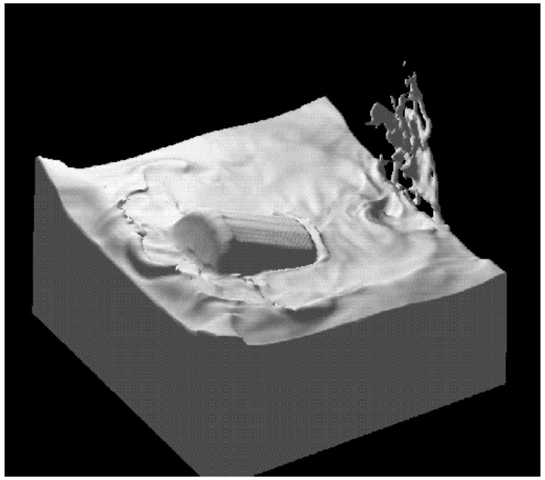
直交格子

- ボクセル法
- カットセル法
  - セルを横切る点を使い、線形補間、小さすぎると計算が不安定
- CIP
  - 微係数を使い、高精度化



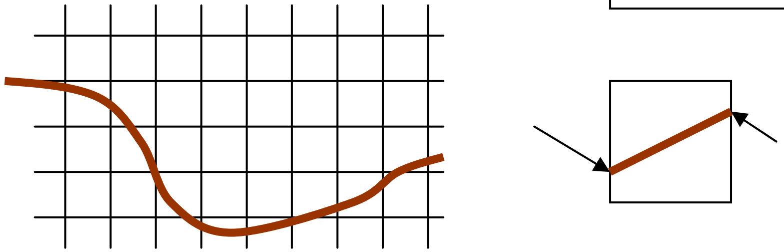
マルチレベル・ボクセル法

出典10



CIPでの例（東工大・肖 鋒先生のホームページより）

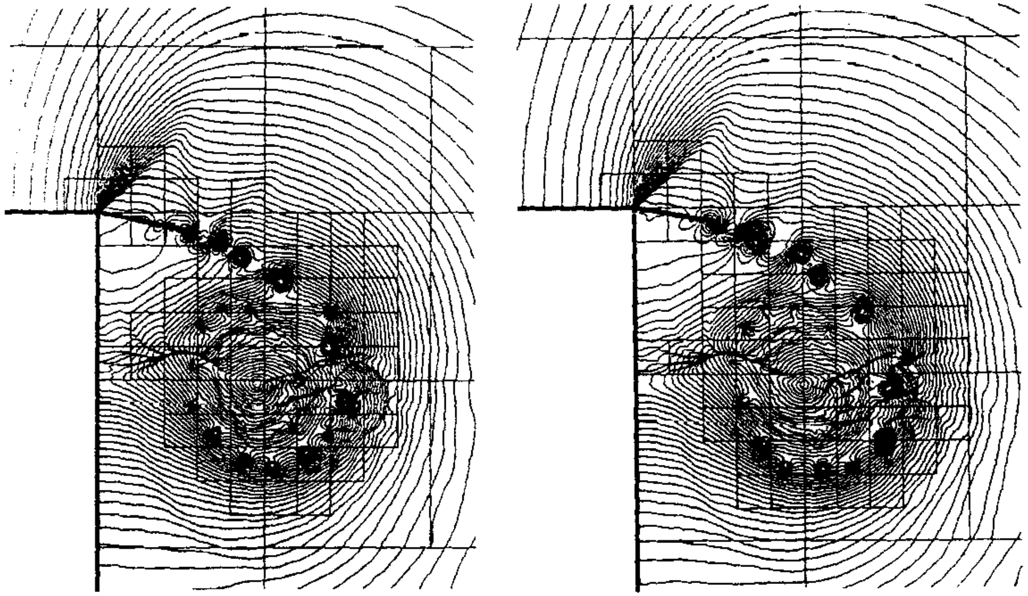
http://www.es.titech.ac.jp/xiao/index_j.html



カットセル法

解適合格子

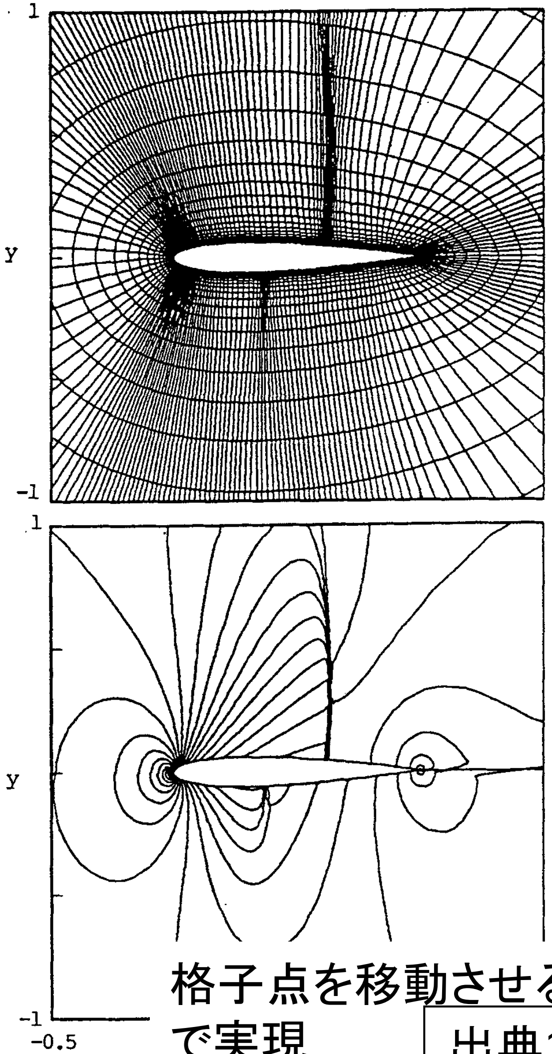
直交格子での解適合格子



Adaptive mesh refinement and coarsening

出典11

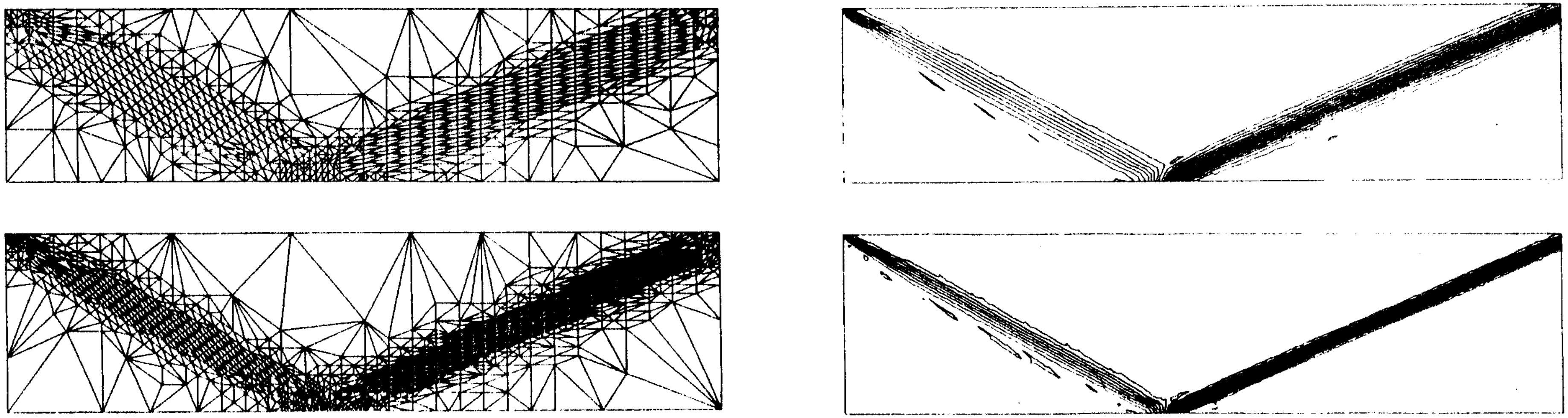
構造格子での解適合格子



格子点を移動させること で実現

出典12

解適合格子(2)



出典13

時間変化を追う場合は、メッシュの
再分割だけでなく、細かすぎる部分
を粗くする必要もある

選択のポイント

1)物理的側面からのポイント

- 境界層を解像することが必要か
- 計算対象の形状の複雑さはどの程度か
- 形状や境界が時間的に変化するか

2)使い方の側面からのポイント

- 解析に費やす期間:じっくり/さっさと
- 精度:絶対値? 傾向がつかめれば良い?
- 一回だけ? ルーチン的?

1)a境界層の解像が必要か？

出典1

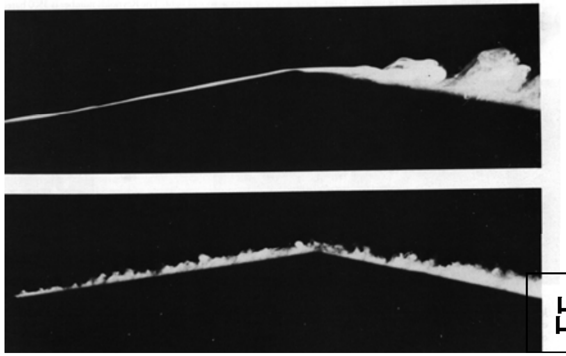
- 必須:　境界適合格子を用いる
  - 剥離の起こる場所が境界層で決まる場合(Re数で流れが変わる)
    - ファン、タービン、流体機械
    - 航空機
    - 自動車、列車
    - 流体力学的に設計された管路

http://www.sanyodenki.co.jp/index.html

http://ja.wikipedia.org/wiki/F-15E

- 不要:　直交格子型
  - 剥離の起こる場所が境界層で決まらない場合(Re数で流れが変わらない)
    - 流線型でない物体がたくさんあり、物体の角で剥離が起こる
    - エンジンルーム・室内空調
    - 細かいリブのついたフレキシブルチューブ、直角曲がる管路

Re数で流れが変わる例



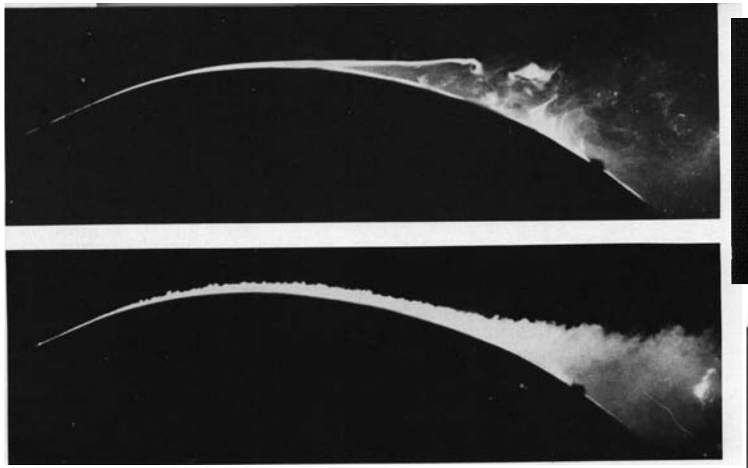
出典14

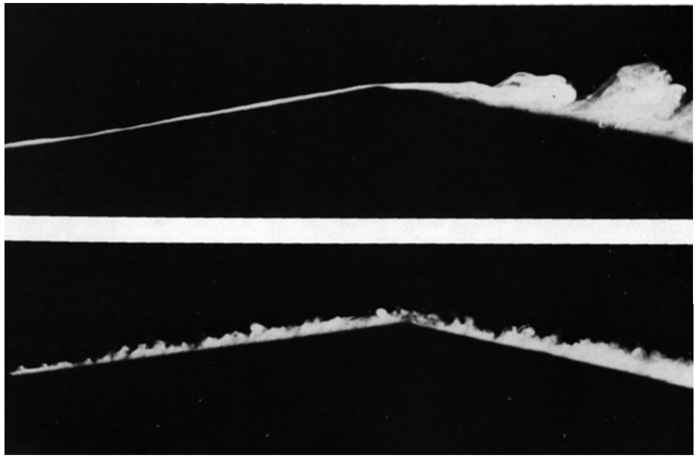
フレキシブル・チューブ/ホース

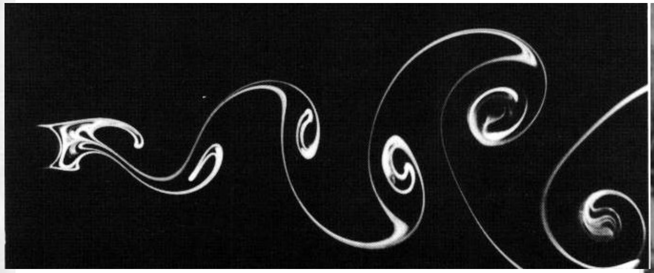
http://www.mitsumoto-bellows.co.jp/products/p_flexible.html

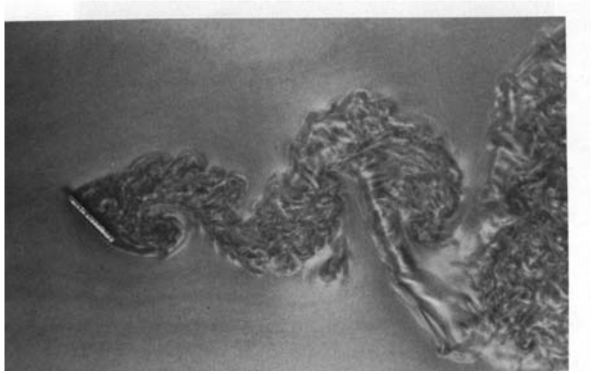
http://store.shopping.yahoo.co.jp/ryohinzakka/makita-a-37568-38402.html

境界層が重要な例と重要でない例

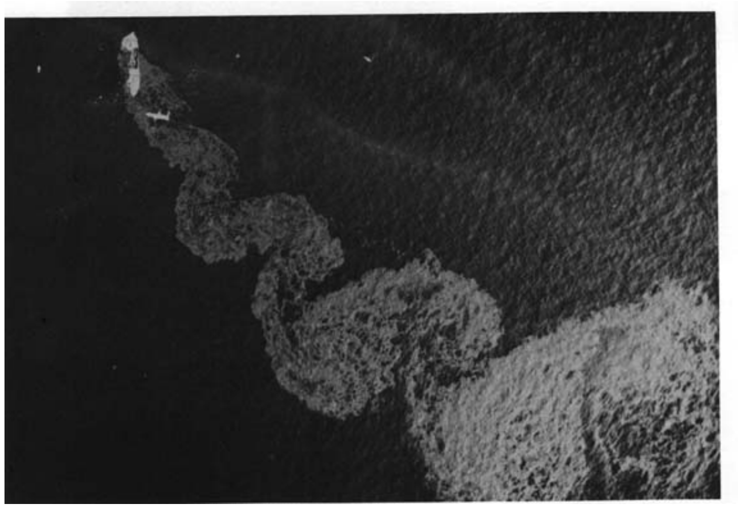








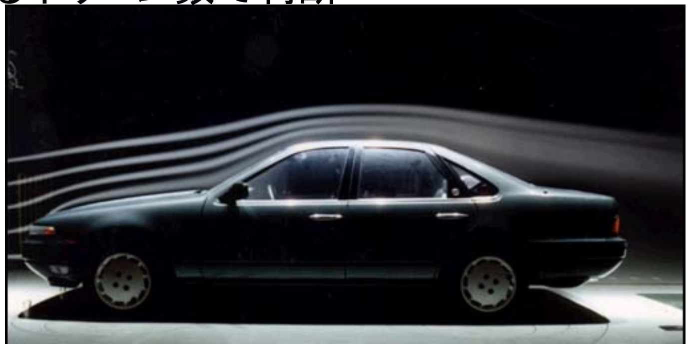
出典：流れのファンタジー、ブルーバックス



出典14

b.形の複雑さの度合い

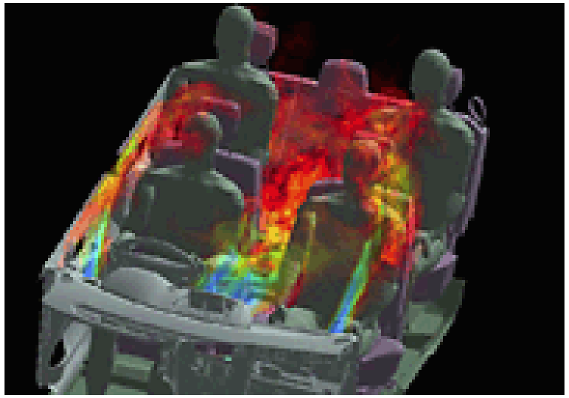
- 単純：境界適合
  - 表面を定義するポリゴン数で判断



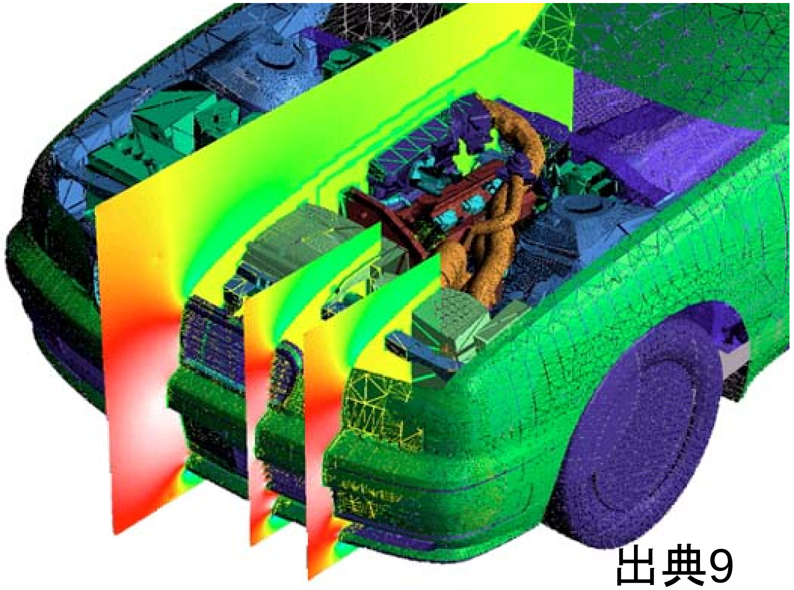
出典1

http://ja.wikipedia.org/wiki/F-15E

- 複雑：直交格子型



http://www.nec.co.jp/hpc/sx6i/product/application.html
元画像は日産自動車(株)

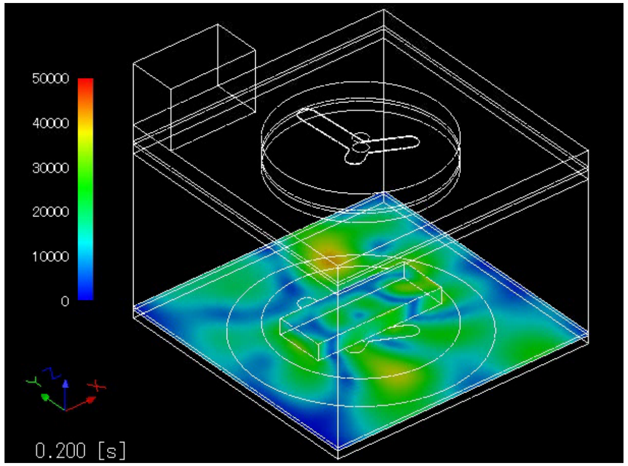


出典9

c.形が変化

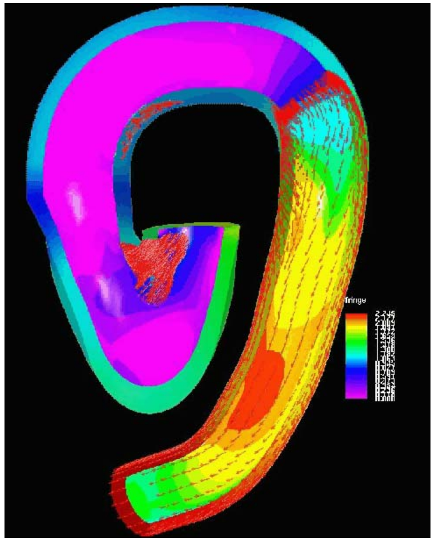
- あらかじめ変化が想定可能
  - 境界適合
- 自由表面
  - 直交格子の境界捕捉
  - 気泡

FEM回転機器

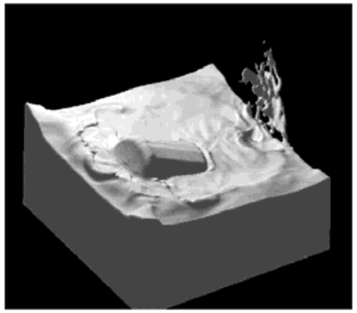


FVM：変形する外壁と流体解析

http://www.comp-bio.riken.jp/1/research/team2.html



CIP：自由表面＋物体



CIPでの例（東工大・肖 鋒先生のホームページより）

http://www.es.titech.ac.jp/xiao/index_j.html

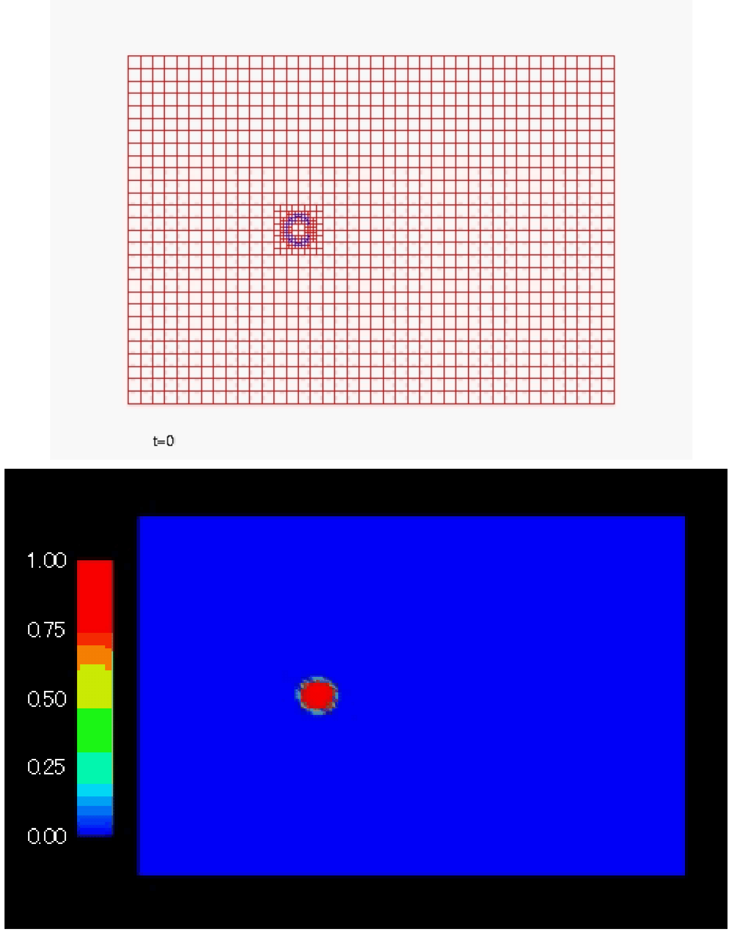
FEM：構造流体連成＋筋肉モデル

東大・久田先生の心臓シミュレーションにおける連成計算

http://www.sml.k.u-tokyo.ac.jp/

解適合型

- ソルバーに形状をどう与えるかが難しい
  - CADとの連携
- 発展途上



理研・V-CADプロジェクトでの開発例

http://vcad-hpsv.riken.jp/

2)使い方の側面からのポイント

a.解析に費やす期間：じっくり/さっさと

じっくり（ヶ月～年）：境界適合FEM/FVM

さっさと（週）：直交格子型

b.精度：絶対値?　傾向がつかめれば良い？

精度が必要：境界適合FDM/FEM/FVM

傾向が分かればいい：直交格子型

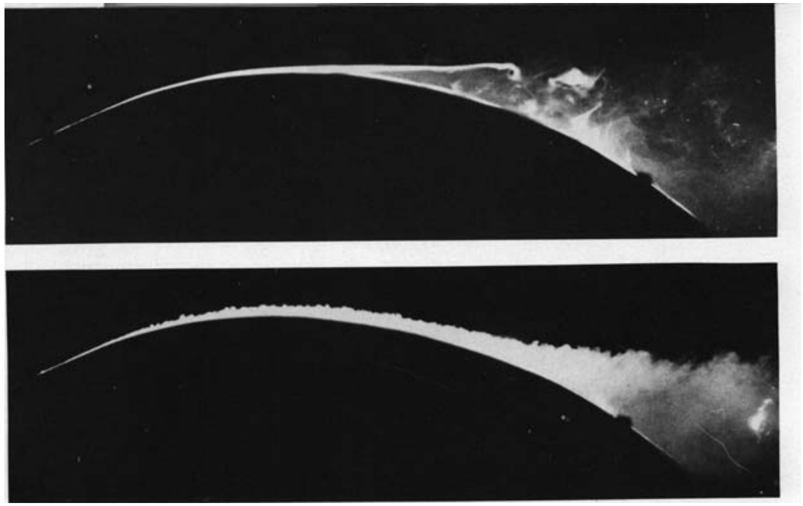
c.一回だけ？　ルーチン的？

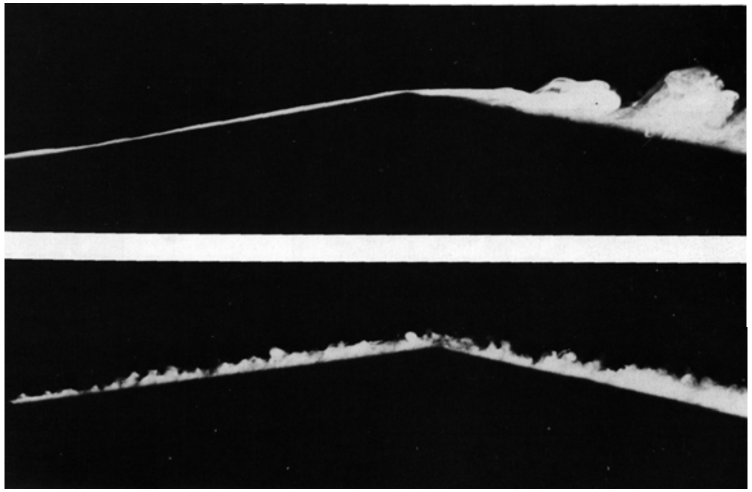
一回：構造格子型、直交格子型

ルーチン：境界適合FDM/FEM/FVM、直交格子型

乱流モデル

- 高レイノルズ数の流れを定常問題として解くのに必要
  - 強制対流問題などの例：流れの時定数と温度の時定数が大きく異なる
- オールマイティーの乱流モデルはない
  - Re数が変化する場合
  - 一番良いのはLESや直接計算（明な乱流モデルを使わない方法も含む）
  - メッシュを細かくすると、どんなモデルを使おうと解は改善





出典14

何を使えばいいか：一般論

- 乱流モデル：信じるものは救われる？
- 自分の問題と似た対象を扱っている論文を参照、同じモデルを使う
  - 複数の論文がある場合、最も実験と一致するモデルを選択
  - どれも似たような結果：パラメータの少ないものを選択
- 自分の対象とする問題で必ず検証するための実験を計画すること

乱流モデル私見(1)

1. まずは乱流モデルなしで計算する（疑似直接計算）
2. 計算が発散するなど、計算できない場合、LESなど、空間の渦だけをモデル化する乱流モデルを使って計算する
3. 比較する実験値と大きく狂う場合や、定性的にも満足のいく結果が得られない場合、
   - 乱流モデルのパラメータを変えたり、乱流モデルそのものを変えず、まずは計算メッシュを増やす
4. 計算メッシュを増やすときは局所的に増やすより、倍の密度にしてみる(3次元の場合は8倍のメッシュになる)

乱流モデル私見(2)

5. 実現象が流れの時間スケールよりも長い現象を取り扱う（温度が平衡に達するまでとか）場合
   - 時間変化を追った計算ではとても計算時間がかかる
   - 類似した現象を取り扱っている論文で使われている乱流モデルを試す
   - このとき乱流モデルのパラメータは推奨値（あるいは参考となる論文で使っていた値）を使い、自分で変えない
6. それでも合わない場合、専門家に相談する
7. それでも満足できない場合
   - 計算機シミュレーションなんてその程度のものだと理解し、その結果から何を読み取るかにエネルギーを注ぐ

ソフトウェアの選択

- 市販ソフトを使うか、大学等で開発されたものを使うか
  - 関連する論文を調査：現状で解けるレベル、実験等と一致している程度を知る。市販ソフトを使っている場合はその名前も分かる場合が多い。
  - 市販ソフトで解けそう、満足できそう：サポートの良いもの、プリ・ポストのでき、価格で選択
  - 新たに開発や研究が必要：大学や研究機関と共同研究。大学等で開発されたものを使う。

CFDの実務適用の勘所

理化学研究所
姫野龍太郎

効果的なCFDの適用

- 実験でもできることをやるのは損
  - パラメータを変えた計算をたくさん
  - 実験と違う結果
  - 流体現象は非線形現象のため違って当然
- 実験が簡単で、素早く、安くできる
  - CFDを使ってはいけない!!

実験ではできないことを対象

- 実験が非常に困難か、できない
  - 高温、高圧、真空、爆発
- 実験ではよく分からない
  - なぜそうなるか分からない
- 経済的困難
  - 実験装置や試作物が非常に高価
- 実験できない時期
  - 試作前、設計時期

実務適用時の問題

- 新しい仕事のやり方への反発
- CFDに対する信頼性への疑問
- 経済的な損益
- 情報の不足

1)技術的対応

- CFDでどこまで出来るか
  - 過度な期待
  - 悲観的すぎる予測
  - 適正な計算量
- 経験がないと予測は困難
  - 専門家に相談
  - 予備的な計算後により正確な判断をする

CFDの学会は？

- 日本流体力学会
  - 数値流体力学会が流体力学会に吸収合併
- 日本機械学会
  - 流体工学部門、計算力学部門、熱工学部門
  - 他に、燃焼、ターボ機械など応用多数
  - 講習会が盛ん
- 日本航空宇宙学会
  - 航空宇宙からCFDが生まれた
- AIAA:CFDで最高峰
- ICCFD（ICNMFD+ISCFD)

シンポジウム･講演会

- 流体力学講演会
  – 航空宇宙学会･流体力学会共催、秋
- 数値流体力学シンポジウム
- 可視化情報学会
  – 全国大会(夏）
- 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
  – JAXA主催
- CFD-net：メーリングリスト、立命館大で運用

コンピュータ関連

- PCクラスター･コンソーシアム主催シンポジウム
- Supercomputing200x(アメリカ、毎11月）
- NEC, IBM, SGI, CRAYユーザー会
  - 必ずしもユーザーでなくても良い
  - 参加費無料
  - Web、メーリングリスト（ML）
- Softek　HPCメーリングリスト
  - PCクラスタ、HPC、コンパイラ：ML

2)経済的対応

- 計算費用
- ソフト導入費用
- メッシュ生成
- 可視化

計算機費用

- High End:スーパーコンピュータ
- SMPサーバー
- PCクラスタ
- PC

- PC、PCクラスタが最も価格性能比がいい

PCでは遅い？

- PCクラスタ
- PCをネットワークで接続、並列化
- 8-16台くらいは簡単
- 32以上だと注意が必要

PCクラスタ＋α情報

- PCクラスタは安い！！
  - ハードは確かに安い
  - 並列化して性能は出るのか？
  - メンテ・運用は結構手間

PCがお得

- 計算
- メッシュ生成
- 可視化
- ソフト導入費用

3)政治的対応

- 官僚的組織では重要(?)
- 外部の権威に弱い
- 内部の実力は不当に低く見る
- 同業他社の動向に過敏

計算精度の考え方

- 実験と計算の比較
  - いつまでも実験との比較を繰り返す
- 精度を上げるにはメッシュ点を増やす
- 実験ではわからない原因探求に使う
- 最適パラメータ探査は不適当
- 大学や公的研究機関の人に相談を持ちかける

図の出典

1. 熱流体とコンピュータアナリシス、第４章自動車の空気抵抗と空力騒音の予測、熱流体フォーラムシリーズ5、日刊工業新聞社
2. 姫野：魔球をつくる -野球ボールに働く空気力の数値解析-、科学、Vol.69, No.9, pp.769-774, 岩波書店, 1999.
3. Ono, K., Himeno, R., Fujitani, F. and Uematsu, Y., Simultaneous Computation of the External Flow around a Car Body and the Internal Flow Through its Engine Compartment, SAE, SAE Technical Paper Series, 920342, 1992.
4. 姫野、佐藤、松原、藤谷、流れのシミュレーションとCGによる流れの可視化を使ったソーラーカー空気抵抗の低減、NICOGRAPH論文集、日本コンピュータグラフィック協会、pp.209-213、１９９３年。
5. 福島、姫野、小野、塩澤、自動車の空力騒音数値解析システムの開発、自動車技術会学術講演前刷集953、9535521、1995年.
6. 深見、内山、藤井、BVI解析における高次精度スキームの効果、第１３回数値流体シンポジウム講演論文集、日本数値流体力学会、A09-1、１９９９年
7. Baum, J.D., Luo, H.., Lohner, R., Yang, C., Pelessone, D. and Charman, C., A Coupled Fluid/Structure Modeling of Shock Interaction with a Truck, AIAA-96-0795, 1996.
8. Nakahashi, K. and Obayashi, S., FDM-FEM Zonal Approach for Viscous Flow Computations Over Multiple-Bodies, AIAA-87-0604, 1987.
9. Nakahashi, K., Marching Grid Generation for External Viscous Flow Problems, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol.35, No.108, pp.88-102.
10. Ono, K., Himeno, R., Tomita, N., and Fujitani, K., An Application of Voxel Modeling Approach to Prediction of Engine Cooling Flow, Proceedings of the Society of Automotive
11. 内山、井上、圧縮性流体における渦構造の数値解析、第6回数値流体力学シンポジウム講演論文集、日本数値流体力学会、pp.81-89, 1992年。
12. Nakahashi, K. and Deiwert, G.S., Self-Adaptive-Grid Method with Application to Airfoil Flow, AIAA Journal, Vol.25, No.4, pp.513-520, 1987.
13. Loehner, R. and Morgan, K., Improved Adaptive Refinement Strategies for Finite Element Aerodynamic Computations, AIAA-86-0499, 1986.
14. Milton Van Dyke, Album of Fluid Motion, Parabolic Press.1982.