

リカレント型ビット演算による縦渦挙動のマルチスケール創発解析

松岡 浩 (技術士事務所AIコンピューティングラボ)

目的と方法:

風力発電ファーム、航空機、船舶などの流体力学設計において、流下方向に回転軸をもつ縦渦の発生挙動予測と制御は、重要な検討課題であり、高解像度な数値シミュレーションの実現が望まれている。

⇒「流れの中に置かれた物体直後の剥離せん断層などの“局所スケール領域”」から「物体から相当離れた後流までの“大規模スケール領域”」までの縦渦挙動を、“格子ガス法”の各格子点における仮想粒子挙動の極めて簡単な計算規則から自己組織的に再現(創発)できる高解像度解析手法の原理確立を目指す。

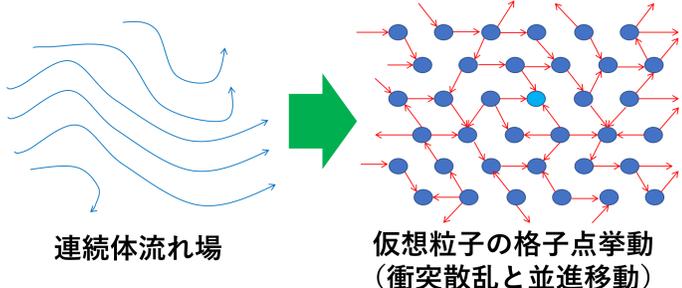
1. C. M. Teixeiraの格子ガスモデルから出発

ビット演算による長所:

- 誤差蓄積がない時間発展計算。
- 1格子点1bit幅で超並列計算。
- ⇒激しい変動流でも安定に計算。

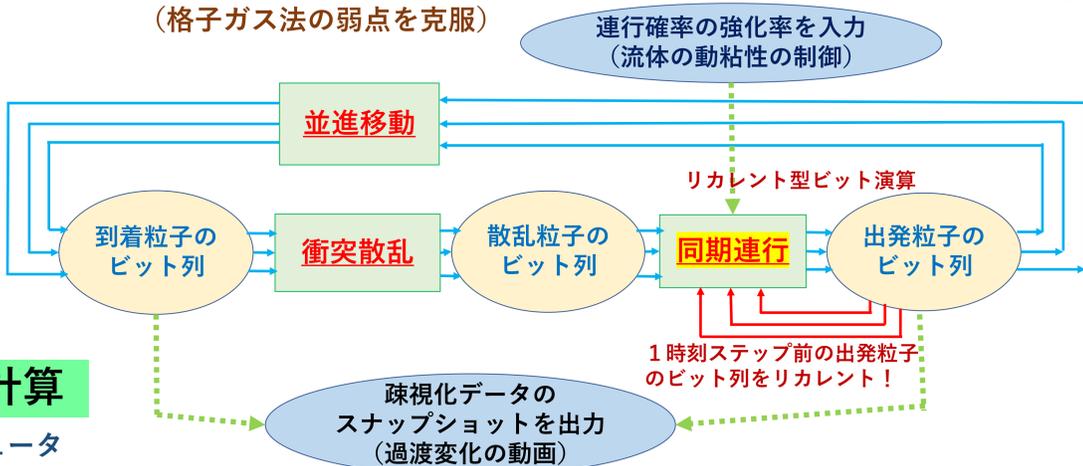
Teixeiraの4次元FCHC54速度モデル:

- マッハ数3次精度までNS式と一致。
- 移流項は線型で平均値計算は正確。
- ⇒高精度な流体計算の実現。



2. 格子ガス法の計算過程に“同期連行過程”を追加

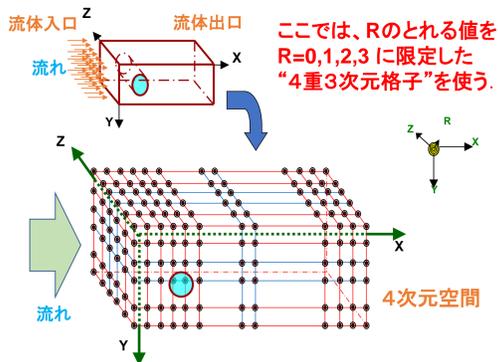
1時刻ステップ前の出発粒子の運動情報(1or0)をもとに、**「同じ向きに連続して出発する確率」=“連行確率”を強化**：
⇒格子点数を増さずに低粘性流体挙動の模擬を可能にしたい。
(格子ガス法の弱点を克服)



3. 連行確率を変えて円柱後流の縦渦挙動を計算

東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータAOBA-A (SX-Aurora TSUBASA) の8コア×16CPU (128並列) を利用。約7.55億格子点の3次元体系を76800ステップ計算するのに8時間30分程度。128ステップごとにスナップをとり運動量ベクトル分布をPara Viewで動画観察。

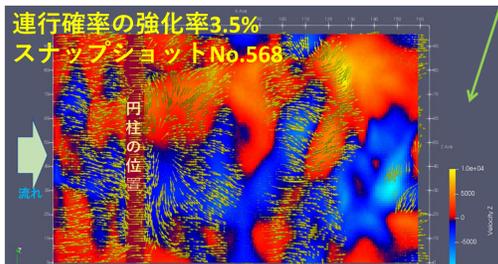
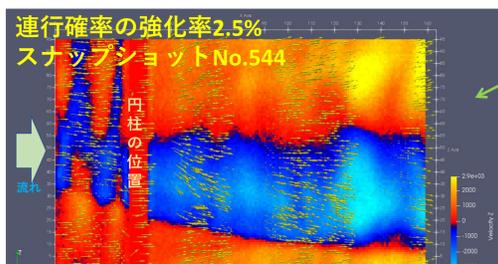
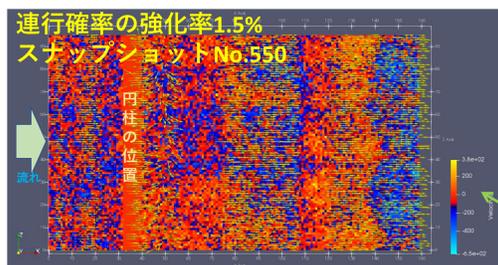
3次元空間中に多数の格子点をXYZ各方向に並べ直方体形状の格子点配列を作成。各格子点は、その内部に4次元目の座標としてR=0,1,2,3の位置を識別できる自由度をもつ。下図は、4次元面心超立方格子を3次元空間へ投影した姿。今回のシミュレーションでは、3次元縮退格子として、X方向1280個、Y方向768個、Z方向768個の格子点。



「過渡変化シミュレーションの条件」

時刻ステップ0で、各格子点に存在できる最大仮想粒子数の20%の仮想粒子をランダムな向きに配置 (流体は、直方体形状の中で静止)。
ステップ1から、+X向きの速度をもつ仮想粒子をX=0の位置から注入。ステップが進むにつれて、流体全体が+X向きのマクロな速度をもつ。
+X側の先にある直方体出口では、出口直前に存在する格子点上の仮想粒子配置を、出口直後に存在する格子点の仮想粒子配置にコピー (出口でマクロな流速の勾配がゼロという境界条件を近似的に実現)。±Y方向と±Z方向には、周期境界条件を適用。流れの入り口に近い位置に、“Z方向の中心軸をもつ無限大の長さの円柱”を置き、その後流に生じる流体挙動を計算。

Y軸(鉛直軸)に垂直で円柱軸を含む水平面上の流体運動量ベクトルの分布

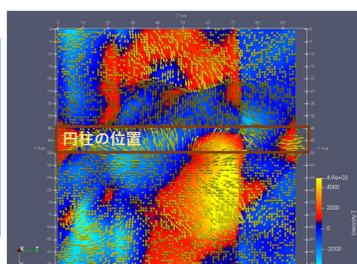


円柱後流のカルマン渦の速度ベクトルは、本来は円柱軸方向(Z軸方向)の成分を持たないので、±Zペア成分の出現領域から縦渦の存在領域を推測できる。

結果は、連行確率に大きく依存。

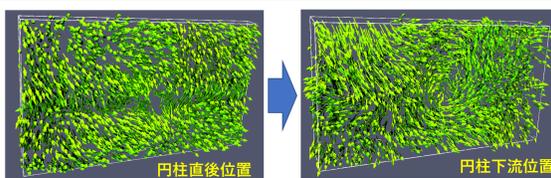
- 強化率1.5%の場合：
±Z領域はランダム変動で出現し、連続領域での縦渦発生なしを確認。
- 強化率2.5%の場合：
流下方向にきれいな帯状をなした領域に縦渦成分の分布を確認。
- 強化率3.5%の場合：
カルマン渦(ローラ渦)と縦渦の相互作用が大きく、帯状が乱れて縦渦成分が分布することを確認。

左と同じ条件で、流下方向(X軸)に垂直で円柱直後に位置する鉛直面上の流体運動量ベクトル



4. 連行確率で大きく変化する縦渦挙動を動画観察

- (1) “連行確率”によって、
 - 強化率1.5%の場合：縦渦は発生するに至らず、きれいなカルマン渦列。
 - 強化率2.5%の場合：カルマン渦列に弱い縦渦が重なるが相互干渉は少。
 - 強化率3.5%の場合：カルマン渦列に強い縦渦が重なり複雑な乱流。
- (2) 円柱背後から帯状に伸びる逆回転ペア縦渦の発生位置は、円柱背後の流速発散位置と一致しながら円柱軸方向に高速で振動している。
⇒円柱背面における剥離泡崩壊による円柱軸方向流速の発生とその位置の激しい振動が、縦渦ペア発生位置の円柱軸方向振動の要因。←推測
⇒円柱背後のせん断流中でカルマン渦(ローラ渦)が“楕円渦”化し、その間で伸長する流管において縦渦の渦度が強調。←定説の間接確認

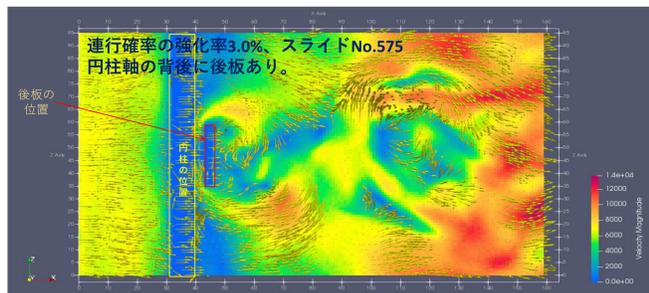


← 流下方向(X軸)に垂直な薄い直方体内の流体運動量ベクトル (下流ほど縦渦が発達。) (連行確率の強化率3.5%、スナップショットNo.600)

(左上図では、中央の水平部分が水平円柱の背後の位置に対応している。剥離泡崩壊によるとみられる±円柱軸方向成分をもつ発散流動が、円柱背後に沿って絶えずその発生位置を振動させながら、下流にいくにしたがって発達する縦渦ペアの出発点になっているように見える。)

5. 今後の予定 (令和3~5年度計画の最終年度後半)

- ① “局所的スケール”で生じる縦渦挙動の高解像度観察：
物体周辺から発生する剪断流中の“楕円渦”と“縦渦”の複合挙動を観察。
⇒AOBAの性能向上を利用して、さらに高解像度な解析を行い、「剥離泡崩壊から縦渦の発生」に特化したリアルな動画可視化。
- ② “工学機器のまるごとスケール”で生じる縦渦挙動の解析評価：
“円柱翼縦渦風車”を想定し、効果的な縦渦利用条件を先行研究と比較。
⇒円柱翼とクロスする後板によるローラ渦と縦渦の相互強調の影響分析。



【謝辞】 発表の機会を与えてくださったJHPCN関係者に深く感謝いたします。また、本研究の実施にあたり、高性能ベクトルスパコンの利用環境とユーザ支援を常時提供してくださった東北大学サイバーサイエンスセンターの関係者の方々に深く感謝します。今後とも、サイバーサイエンスセンターとNECの方々、ユーザ利用を第一に考えたSXシリーズの開発と運用を続けられ、常に最先端の利用環境を提供して下さることを希望します。特に、令和5年度からのAOBA-Sの運用開始に期待しています。