

[課題番号]EX21204（萌芽課題研究）

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

課題代表者： 技術士事務所AIコンピューティングラボ 松岡 浩

目的と手法：

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その制御は、重要な検討課題のひとつである。

本研究では、「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簡単な計算規則から自己組織化的に再現(創発)できることを実証する。

なお、ここで用いる格子ガス法は、C. M. Teixeiraが考案した4次元面心超立方格子による“3速格子ガス法54速度モデル”である。この計算規則は“ビット演算”で実行できるので、時間発展計算の過程で誤差の蓄積がなく、また、1格子点に関する演算を1ビット幅で実行できるため、超並列格子点演算が可能である。このため、どんなに激しい流れに対しても、安定的かつ効率的に結果を得ることができ、乱流解析に適していると考えられる。唯一の欠点は、格子点数を膨大にしないと低粘性流体を模擬しにくいことである。

本年度は、各格子点で衝突散乱を起こした仮想粒子の出発の向きが、1時刻ステップ前に仮想粒子が出発した向きに一致する確率を上げる“連行同期”という操作を新たに導入することによって、流体の動粘性を低域まで広く変化させ、物体周辺の流体せん断流から創発される縦渦の状態を再現することを目指す。

1. C. M. Teixeiraが考案した高精度な格子ガスモデルから出発

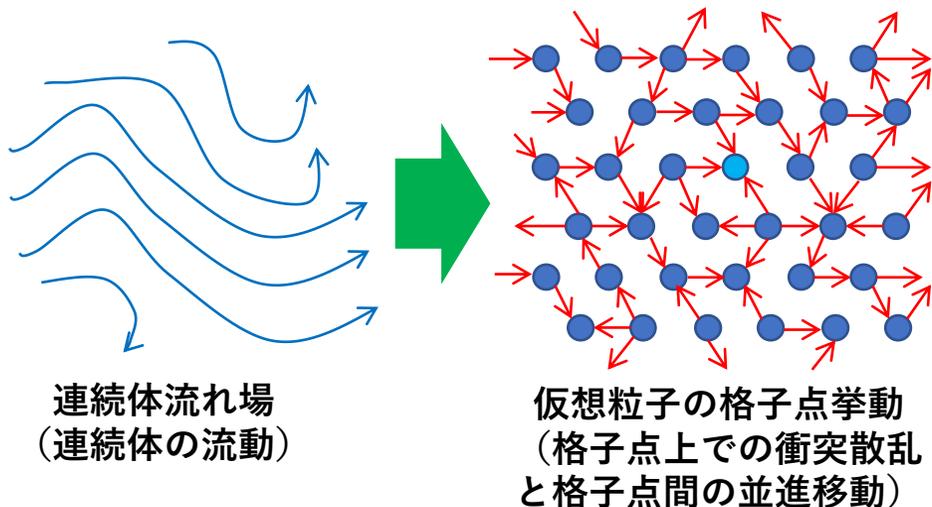
本研究では、C. M. Teixeiraが考案した4次元面心超立方格子による「3速格子ガス法54速度モデル」を出発点にして、この計算規則を改良することにより、流体力学設計に必要な高レイノルズ数領域の流体挙動も含めて、高解像度な流体解析を可能な限り手軽に実現する方法を探求する。

Teixeiraの54速度モデルに基づく格子流体解析の結果は、ナビエ・ストークス方程式を解く標準的な数値流体力学(非圧縮性流体)の結果と比較した場合、マッハ数に関する3次の精度まで一致することがTeixeiraの論文において証明されている。もっとも重要な特徴は、格子ガス法の移流項は“線型”であり、計算された流速のノイズがどんどん大きくなって、その平均値は正しい結果を与えること(“Shot Noise Theorem”)である。

(cf. Christopher M. Teixeira, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, MIT, 1993)

(cf. 松岡浩, 菊池範子, “多速格子ガス法実用化展開への手がかり”, SENAC, Vol.49, No.4, pp1-15, 2016)

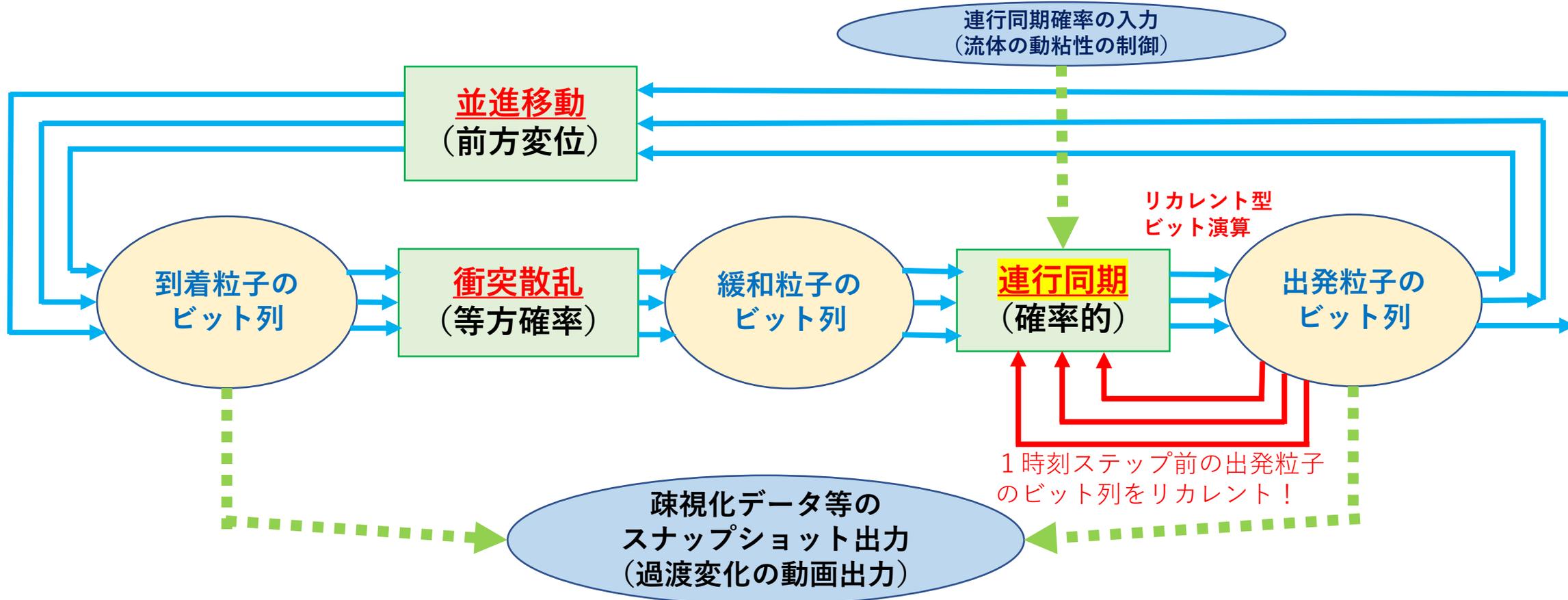
(cf. 松岡浩, “ビット演算によるCFDと等価な高精度流体解析手法”, RIST NEWS, No.64, pp17-28, 2018)



格子ガス法流体解析では、流体が存在する空間中に規則正しく格子点を配置し、特定の質量と運動量を担う多数の仮想粒子が、
①格子点上での「質量と運動量を保存する等確率な衝突散乱」
②格子点間での「衝突散乱後の各運動量の向きへの並進移動」
を繰り返しながら移動していく様子を疎視化(平均)して、マクロな流体物理量(密度、運動量、速度等)の時間発展挙動を得る。

2. 格子ガス法の計算過程算に“連行同期”の計算を追加

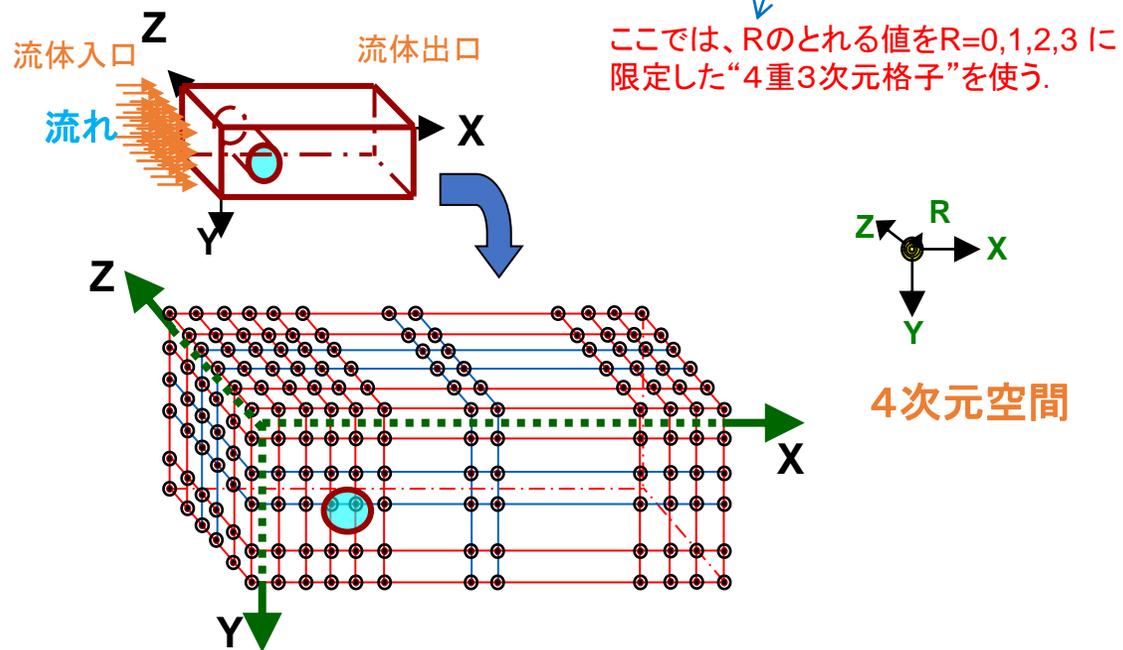
“連行同期”の操作を導入することで流体の動粘性を低域まで広く制御する原理は、「各格子点に到着する仮想粒子の方向別頻度分布から当該格子点近傍の運動量勾配を検知し、衝突による等方散乱後の仮想粒子(緩和粒子)に対して、当該格子点近傍の運動量勾配を強調する向きに連続して仮想粒子が出発する確率を意図的に増加させる操作を施して仮想粒子を出発させる」ことにある。(←この際、同じ向きに続けて仮想粒子を出発させるため、1時刻ステップ前の出発粒子の向きに関する情報が必要になる。)



3. “連行同期確率”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)を利用して円柱後流の縦渦発生挙動を計算した。約7.55億格子点の3次元体系を76800時刻ステップ計算するのに、8コア×16CPU(128並列)で約8時間40分を要した。256時刻ステップごとに300枚のスナップショットを取得し、Para Viewにより流体運動量分布の動画を観察した。

3次元空間中に多数の格子点をXYZの各方向に並べ、直方体形状の格子点配列を作る。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とする。これが下図であり、4次元面心超立方体格子を3次元空間へ投影した姿である。今回の数値シミュレーションでは、3次元縮退格子として、X方向に1280個、Y方向に768個、Z方向に768個の格子点を配置した。



ここでは、Rのとれる値を $R=0,1,2,3$ に限定した“4重3次元格子”を使う。

[過渡変化シミュレーションの条件]

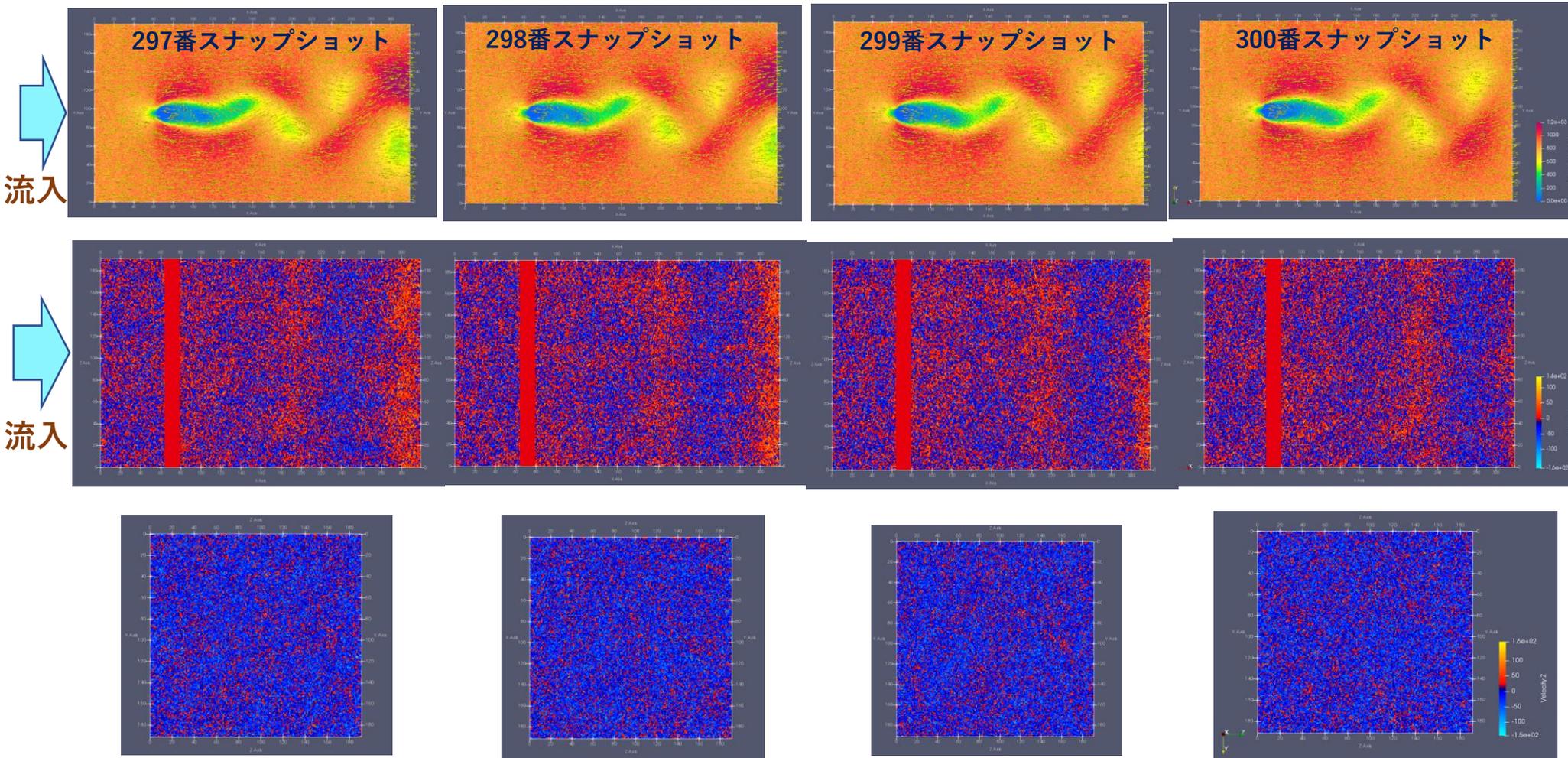
シミュレーション計算を開始する時刻ステップ0の時点で、各格子点には、そこに存在できる仮想粒子の最大数の20%の数の仮想粒子をランダムな向きに配置する。この結果、疎視化して得られるマクロナ流速はゼロであり、流体は、直方体形状の中で静止している。次に、時刻ステップ1の時点から、+X向きの速度をもつ仮想粒子を $X=0$ の位置から注入していく。すると、時刻ステップが進むにつれて、流体全体が+X向きのマクロナ速度をもつようになる。このとき、+X側の先にある直方体出口においては、出口直前に存在する格子点上の仮想粒子配置を、出口直後に存在する格子点の仮想粒子配置にコピーして、出口におけるマクロナ流速の勾配がゼロになるという境界条件を近似的に実現した。また、±Y方向と±Z方向には、周期的境界条件を適用した。

この流れの中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した。

次頁以降に、ある断面上の疎視化された運動量分布の過渡変化動画の中からスナップショット画像を抜粋して表示する。

3 (1). 同期連行確率1%ではカルマン渦列が生じても縦渦発生せず

静止した流体中に円柱を配置し左側から流体を注入すると、同期連行確率 = 1, 2, 3% の全ケースで、円柱後流にカルマン渦列が発生し、その挙動は、150番スナップショット以降ほぼ同様な変化の繰り返しとなった。297番から300番までのスナップショットを示す。(X軸：流下方向、Z軸：円柱軸方向、Y軸：X軸とZ軸に垂直な方向)



←同期連行確率 = 1%の場合：
円柱軸に垂直なXY平面上の運動量の大きさ分布
←円柱軸を含むXZ平面上のZ成分運動量分布
※縦渦の存在を示すZ成分運動量の帯状分布が見えない。
←流入向きXに垂直な、体系中央位置における断面(YZ平面)上のZ成分運動量分布

3 (2). 同期連行確率2%ではカルマン渦列とともに縦渦が発生

流入

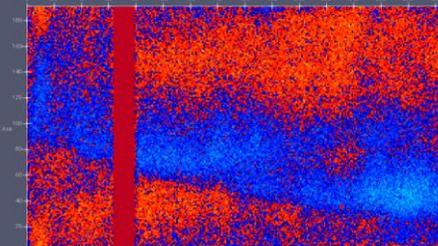
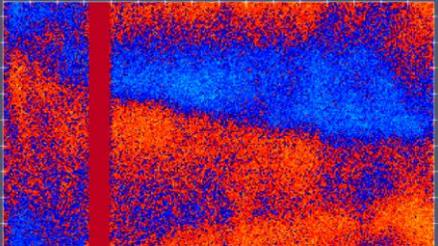
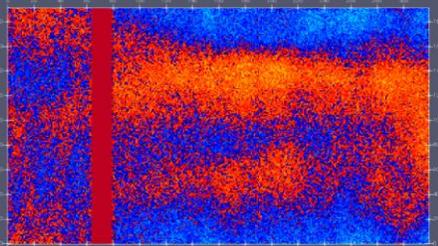
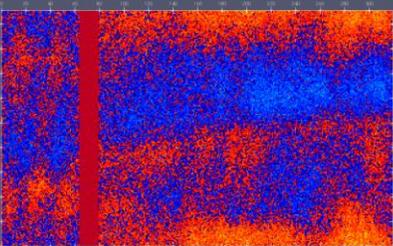
297番スナップショット

298番スナップショット

299番スナップショット

300番スナップショット

流入



←同期連行確率 = 2%の場合：
円柱軸に垂直なXY平面上の運動量の大きさ分布

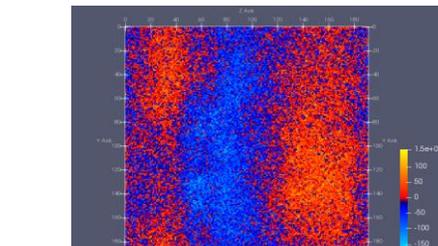
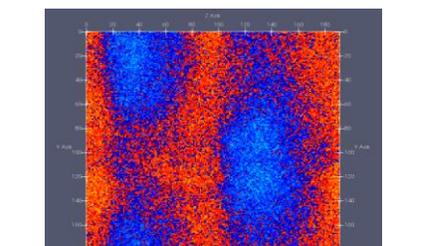
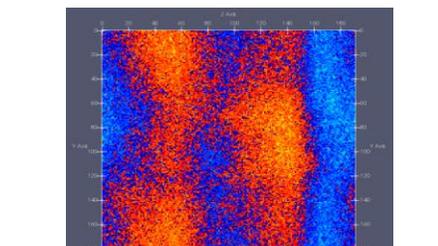
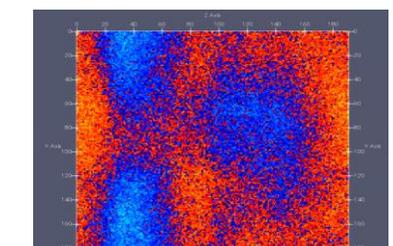
←円柱軸を含むXZ平面上のY成分運動量分布
(横渦位置確認)

←円柱軸を含むXZ平面上のZ成分運動量分布

※弱い縦渦が位置を円柱軸方向に振動させつつカルマン渦列を乱さずに重畳。

←流入向きXに垂直で、体系中央位置における断面(YZ平面)上のZ成分運動量分布

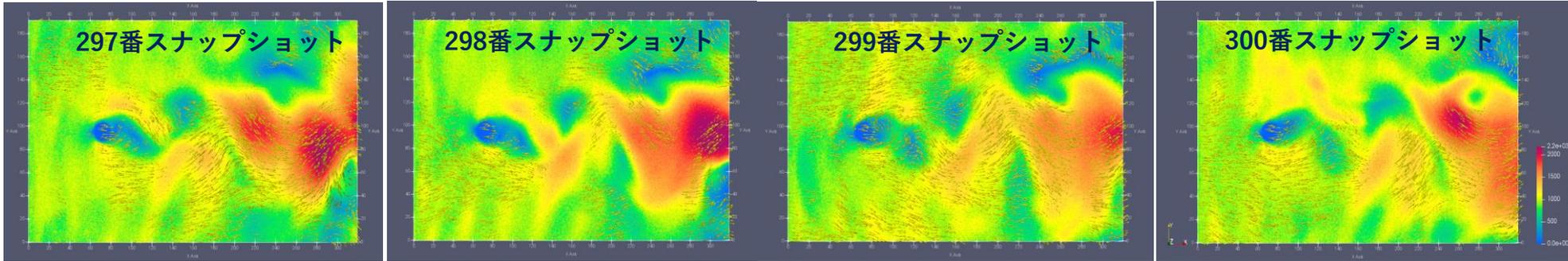
流入



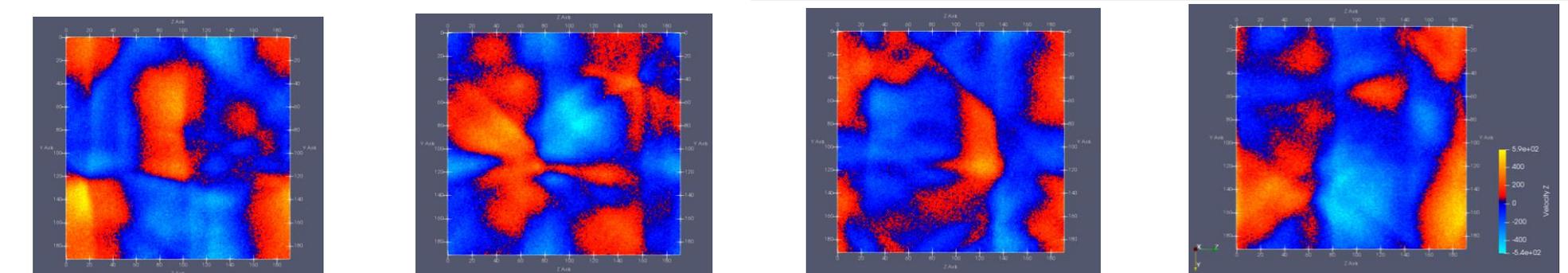
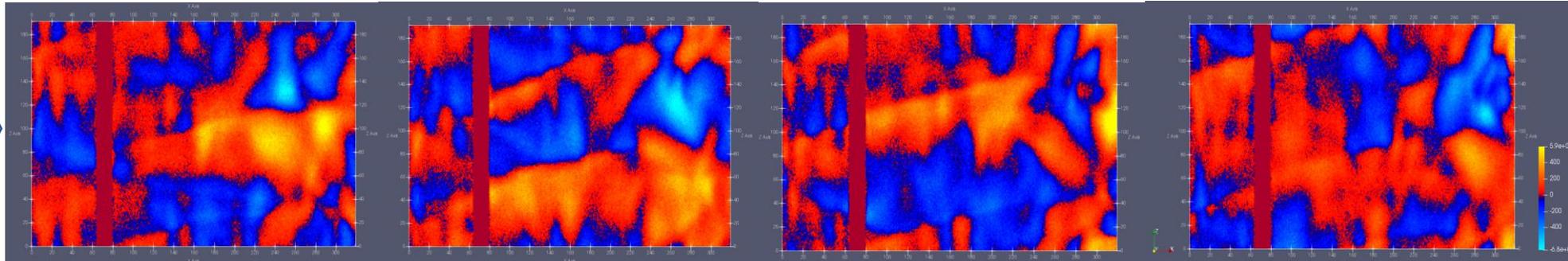
3 (3). 同期連行確率3%ではカルマン渦列と縦渦が複合して変動

同期連行確率 = 2% の場合、縦渦の存在を示す Z 成分運動量は、X 方向(流下方向)にも Y 方向(X 軸と円柱軸に垂直な方向)にも帯状に分布したが、同期連行確率 = 3% になると、強い縦渦がカルマン渦列を乱し複雑に変化する。また、297~300 番の間、カルマン渦列はわずかな移動であるが、縦渦の位置は円柱軸方向に激しく振動する。

流入



流入



← 同期連行確率 = 3% の場合：

円柱軸に垂直な XY 平面上の運動量の大きさ分布

← 円柱軸を含む XZ 平面上の Z 成分運動量分布

※ 強い縦渦が位置を円柱軸方向に振動させつつカルマン渦列を乱すまでに複合。

← 流入向き X に垂直な、体系中央位置における断面 (YZ 平面) 上の Z 成分運動量分布

3 (4). 縦渦の円柱軸方向位置は円柱背後の流速発散位置に一致して振動

同期連行確率 3% の場合の、298番及び299番スナップショットを下図に示す。

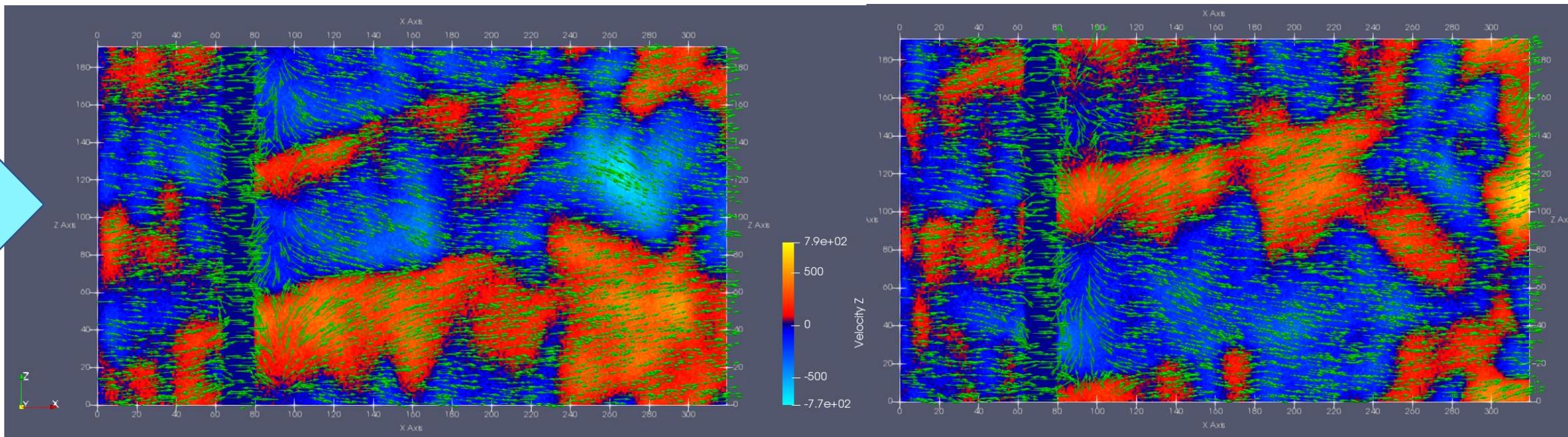
図では、円柱軸を含むXZ平面上的の運動量ベクトルを緑の矢印で表示している。

ただし、X軸：流下方向、Z軸：円柱軸方向、Y軸：X軸とZ軸に垂直な方向。Z方向運動量が正の領域を赤色で、負の領域を青色で表示。円柱の位置は、左側からほぼ1/5の位置にある縦長の細長い紺色長方形の位置。

動画を観察すると、円柱背後の流速発散位置(運動量ベクトルが1点から広がるように見える位置)と、円柱背後における2つの逆回転縦渦の発生位置(上側に赤色帯状領域、下側に青色帯状領域が存在する境界の位置)が一致しながら、円柱軸方向に振動していることがわかる。そのことを示すスナップショット事例が下図。

298番スナップショット (同期連行確率 3%)

299番スナップショット (同期連行確率 3%)



4. これまで実施した「円柱後流における縦渦解析」からの考察

1. カルマン渦が発生すれば、隣り合うカルマン渦間に流管の伸長領域が存在し、この伸長軸に垂直な面内の流れが多少ともあれば、その流れが強調されて縦渦が発生すると考えられる。しかし、Re数がかかなり小さい場合、カルマン渦が発生しているにも拘わらず、縦渦が発生しないRe数領域が存在する。

(cf. 同期連行確率 1%の事例：3 (1))

2. 円柱後流において発生している縦渦の様子を動画で観察すると、縦渦の発生場所は、円柱の背後において、円柱軸方向に激しく位置を変えて振動しているのがわかる。この振動は、円柱後流におけるカルマン渦の変化時間スケールに比べて桁違いに速い。また、Re数が比較的小さいうちは、発生する縦渦の振幅が小さく、カルマン渦列の大きなY方向振幅をほとんど乱すことなく、2つの渦が重畳する。

(cf. 同期連行確率 2%の事例：3 (2))

3. Re数がある程度大きくなると、発生する縦渦の振幅が大きくなり、カルマン渦列の大きな振幅を乱すほどになる。結果として、2つの渦(カルマン渦列と縦渦)は相互作用で複雑な流動を生み出す。

(cf. 同期連行確率 3%の事例：3 (3))

4. 円柱背後における2つの逆回転縦渦の発生位置は、円柱背後の流速発散位置と一致しながら円柱軸方向に振動している。従って、円柱背面における剥離泡の崩壊位置の激しい振動が、縦渦の円柱軸方向振動を生み出す最初の要因になっている可能性がある。

(cf. 同期連行確率 3%の事例：3 (4))

5. [先行研究](#)(Williamson, 1996a. J. Fluid Mech., 328, p.361)によれば、Re数が約190を超えると、円柱軸方向に軸を持つ主渦とそれに直角方向の“縦渦”が生じ始め、主渦を歪ます。また、円柱後流の縦渦には、円柱軸方向に波打つ波長の大ききで区別される2つのモード(Aモード及びBモード)があり、Re数が約250を超えると“波長が長いAモード”から“波長が短いBモード”に移行し、Bモードは、少なくともRe数が10000までは存続することが知られている。今回の計算事例からは、AモードとBモードの識別まではできなかった。

5. 全体の研究計画と今後の予定

① “局所的スケール”で生じる縦渦挙動の高解像度観察（補足）

物体周辺から発生するせん断流中における“楕円渦”と“縦渦”の複合挙動を連行同期確率を変えて観察する。

本研究は、令和3年度から5年度までの3か年計画で実施している。

令和4年度にこれまで実行したシミュレーション計算には、前述のとおり、すべて、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」を利用した。このような比較的小規模な計算機利用であり、しかも十分なチューニングを行わなくても、約7.55億格子点規模の3次元体系で76800時刻ステップの時間発展計算を実行し、256時刻ステップごとに300枚のスナップショットを得ることにより過渡変化挙動を十分観察できる動画ファイルを約8時間40分で作成できた。

【謝辞】このような高性能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する次第である。

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（今後の予定）

シミュレーション計算の試行例として、“円柱翼縦渦風車”を想定し、効果的な縦渦利用設計条件を求める。

地球温暖化に伴う気候変動対策として、「2050年のカーボンニュートラル実現」を目指すことが宣言され、二酸化炭素を排出しない風力発電設備についてもより効果的な設計が望まれている。ここでは、従来の風車と異なり、円柱形のブレードの後流に生じる縦渦を利用して回転力を得る“円柱翼縦渦風車”を例にとり解析評価を行う。翼型が単純な円柱形であるため解析しやすいと同時に、現実の風車ブレードとしては十分な強度を得やすいという特徴がある。

これにより、工学機器まるごとスケールで生じる縦渦挙動を、格子ガス法の格子点間隔スケールにおける計算規則から自己組織化的に発現(創発)できるか否かを確認する。