

リカレント型ビット演算による流体・構造体統一解析手法の開発

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：

○背景： 高精度なものづくり流体工学設計では、しばしば、流体と構造体の相互作用(FSI)を高解像度で数値シミュレーションしたいというニーズがある。（例：浮体式洋上風力発電ファーム等）

○目的： “高効率な並列計算”と“誤差の蓄積がない安定な時間発展乱流計算”を同時に実現できるという『ビット演算』の特徴を活かした“高効率なマルチスケールFSI解析手法”の開発を目指す。

○方法： C. M. Teixeiraが考案した高精度な4次元面心超立方体格子による54速度モデルをFSI用に改良する。

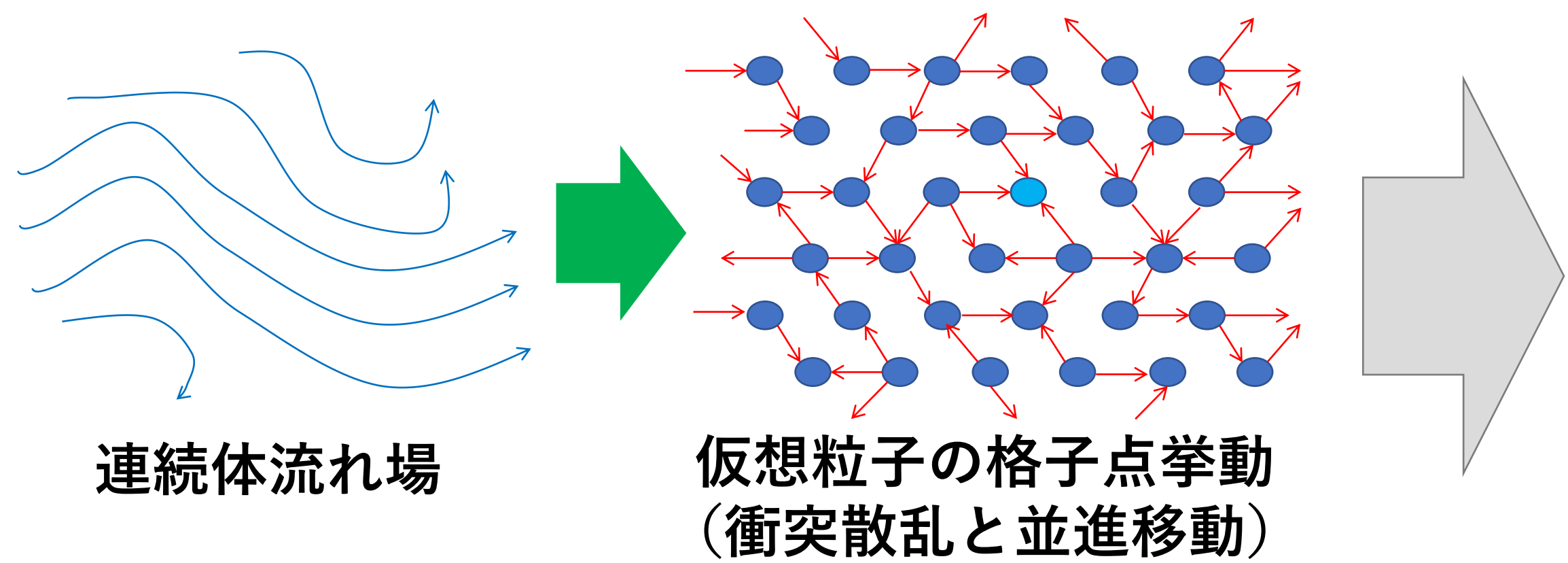
1. C. M. Teixeiraの格子ガスモデル（出発点）

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。

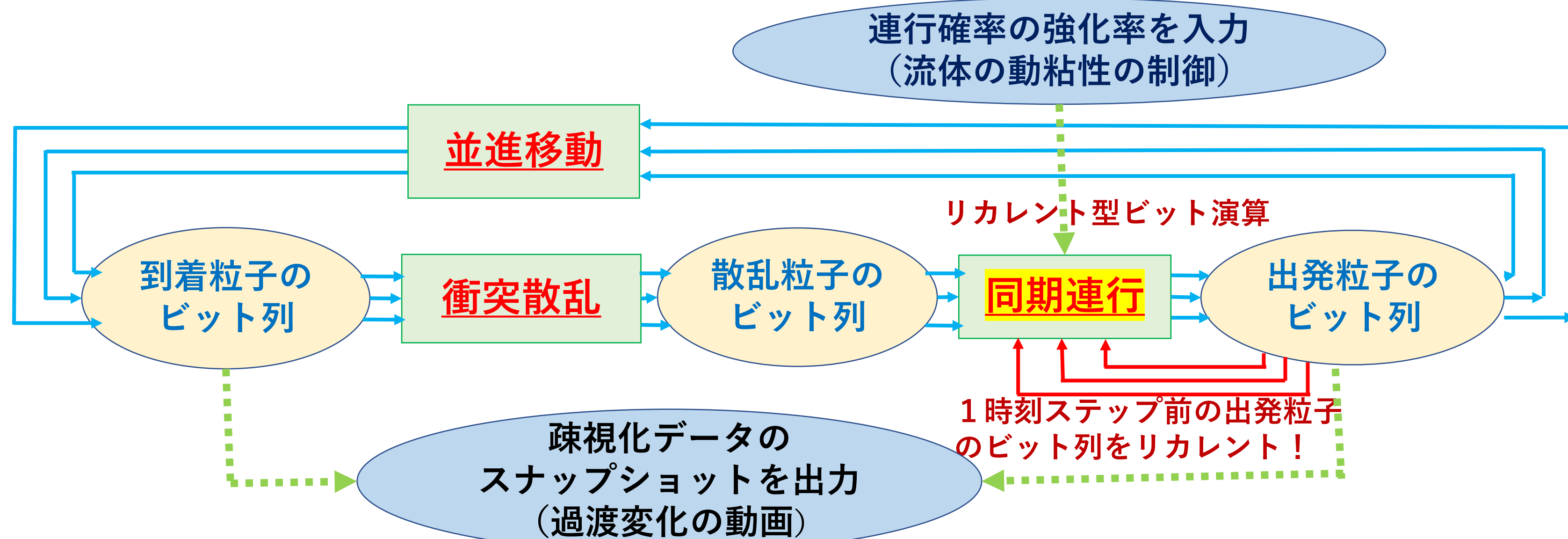
Teixeiraの4次元FCHC54速度モデル：

- 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。



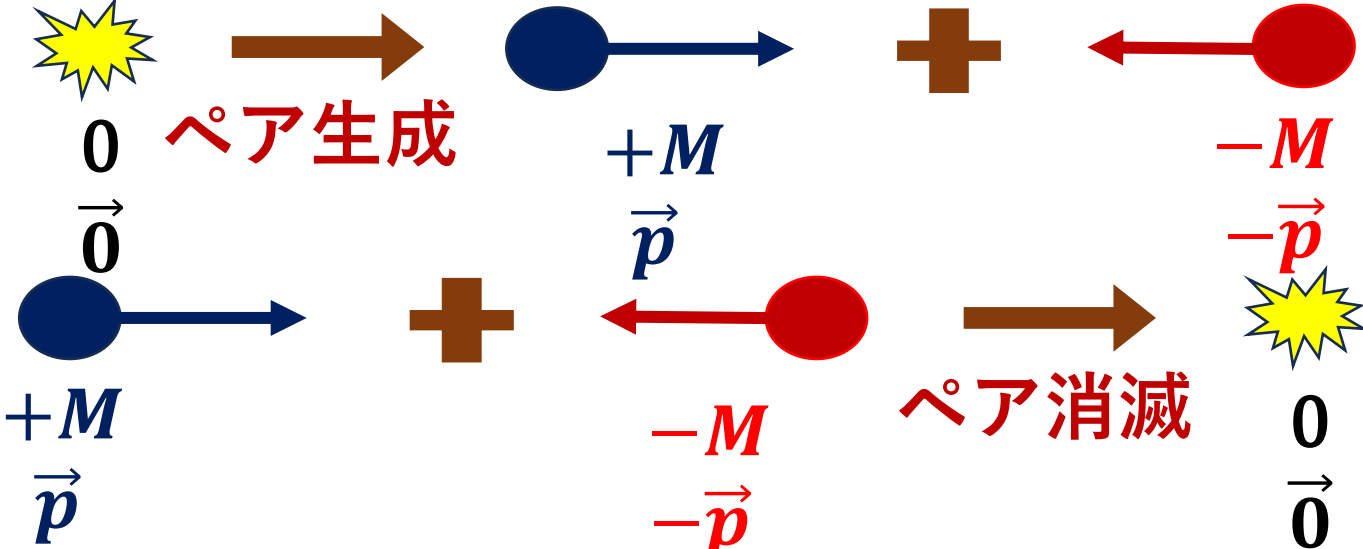
2. “リカレント型ビット演算”による粘性制御法

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する。（格子ガス法の弱点を克服）



3. “仮想反粒子”の導入による縦渦の計算

仮想粒子と“仮想反粒子”のペア生成消滅過程を導入(右図)し、出発粒子に同期してペア生成を行い連行確率をさらに強化。



円柱後流にて「流体粘性を小さく制御し高レイノルズ数状態を維持すると、円柱背後における剥離泡の崩壊位置が円柱軸方向に激しく振動。崩壊した剥離泡から発生する流体の円柱軸方向の強い流れが縦渦創発の起源。この流れが円柱背面から流下向きに離れて、円柱後流のローラ渦列の間で縦渦として強調されていく様子」を観察。

下図では、円柱の下流位置において「発達した縦渦」が現れている。

4次元FCHCモデルの3次元空間への投影

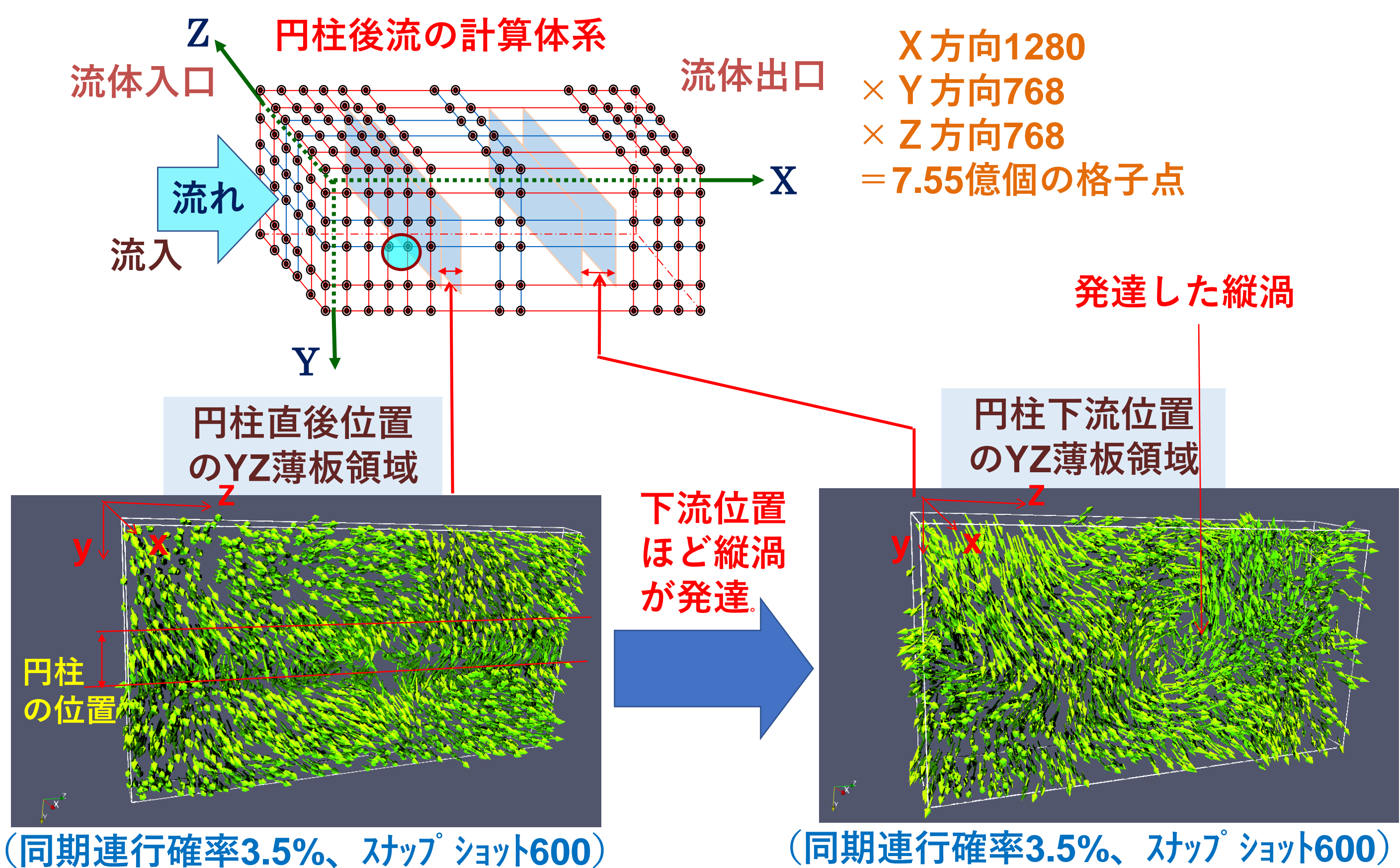
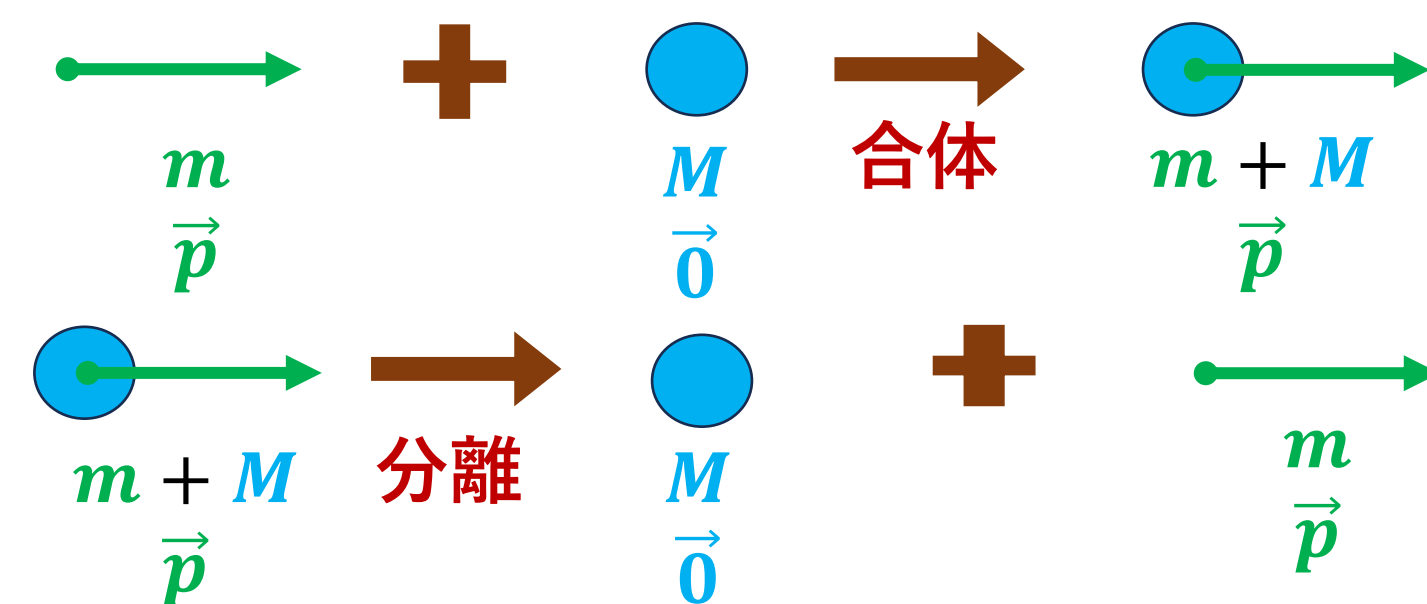


図 “仮想反粒子場モデル”に基づく粘性制御手法による縦渦挙動創発の計算（水平円柱に左側から流体を注入し、円柱の直後及び少し離れた下流位置において流下方向に垂直な薄板領域内の運動量ベクトルを出口側から見た図）

4. “仮想光子”の導入によるカルマン渦列の計算

“静止仮想子”と“仮想光子”の合体分離過程を導入(下図)し、出発粒子に同期して光子合体を行い連行確率をさらに強化。



計算体系における格子点配置は、X方向1280×Y方向768×Z方向192 ≃ 1.89億個の格子点。0から51200時刻ステップまでの計算を行い、256時刻ステップ経過するたびに一つのスナップショットを出力。スナップショットの総数は、201枚。スナップショットは、円柱軸を通りY軸に垂直な平面上における流体の運動量ベクトル。疎視化は、4×4×4の3次元格子点領域ごと実行。可視化には、ParaViewを利用し動画として観察。

右図のスナップショットは、いずれも、過渡変化が十分安定化した後の、195枚目のスナップショットの瞬間画像。“同期連行確率”を0から増やしていくと、カルマン渦列の挙動が乱流化。

本計算には、東北大学サイバーサイエンスセンターのAOBA-Aを使用し、1ケース（1.89億個の3次元格子点についての時間発展計算を51200ステップ行う計算）を「8コア×16CPU」のmpiによる128並列計算で約110分で実行。（ベクトル化率：約97.5%、ベクトル長：約200）

なお、本プログラムは日々改良をしているため、特別なチューニングは未実施。

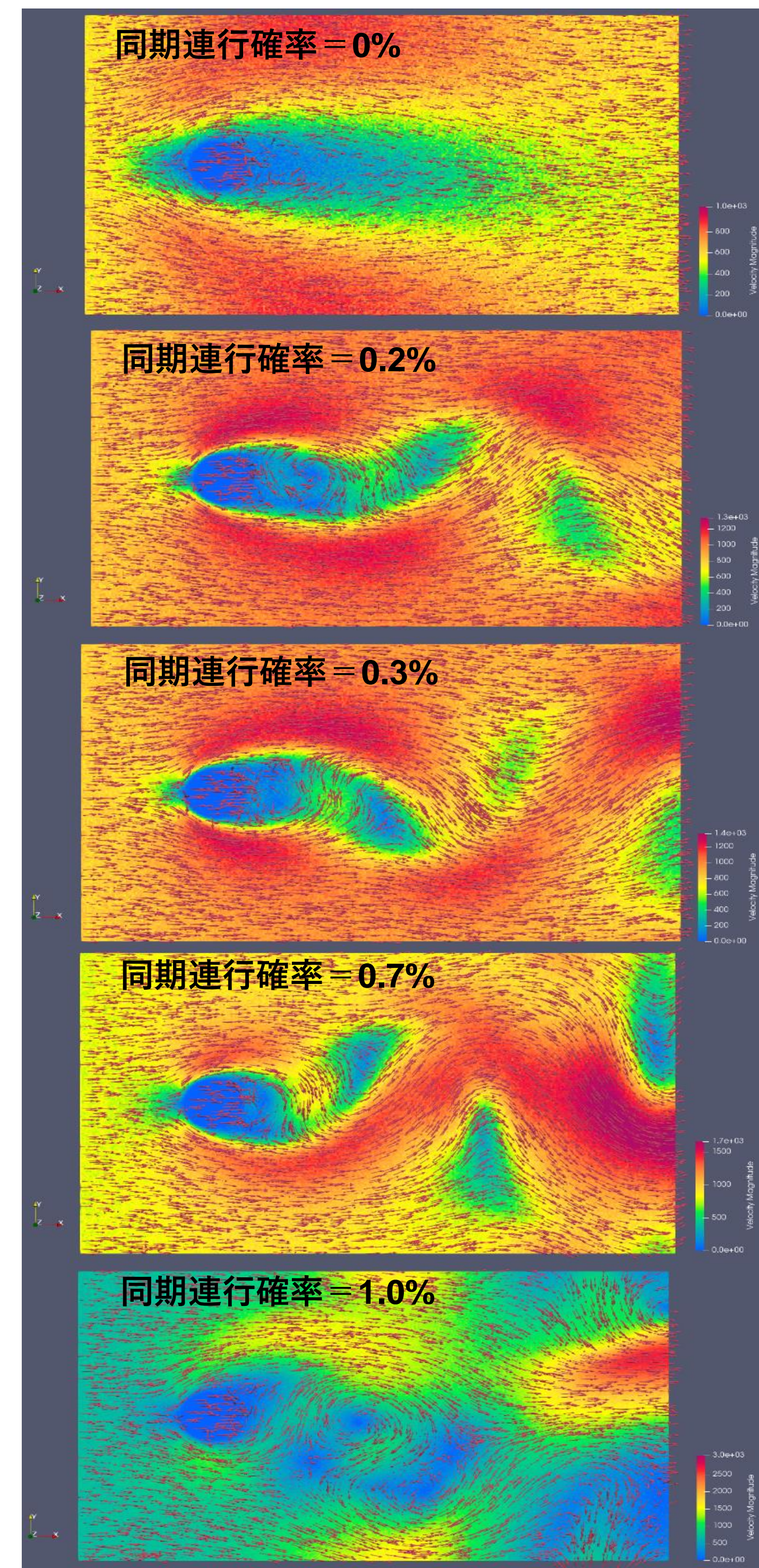


図 “仮想光子場モデル”に基づく粘性制御手法による円柱後流のカルマン渦列の計算（3次元計算の円柱軸垂直断面上の運動量ベクトル。同期連行確率は下ほど大。）

5. 流体と弾性構造体の界面自己組織化モデル

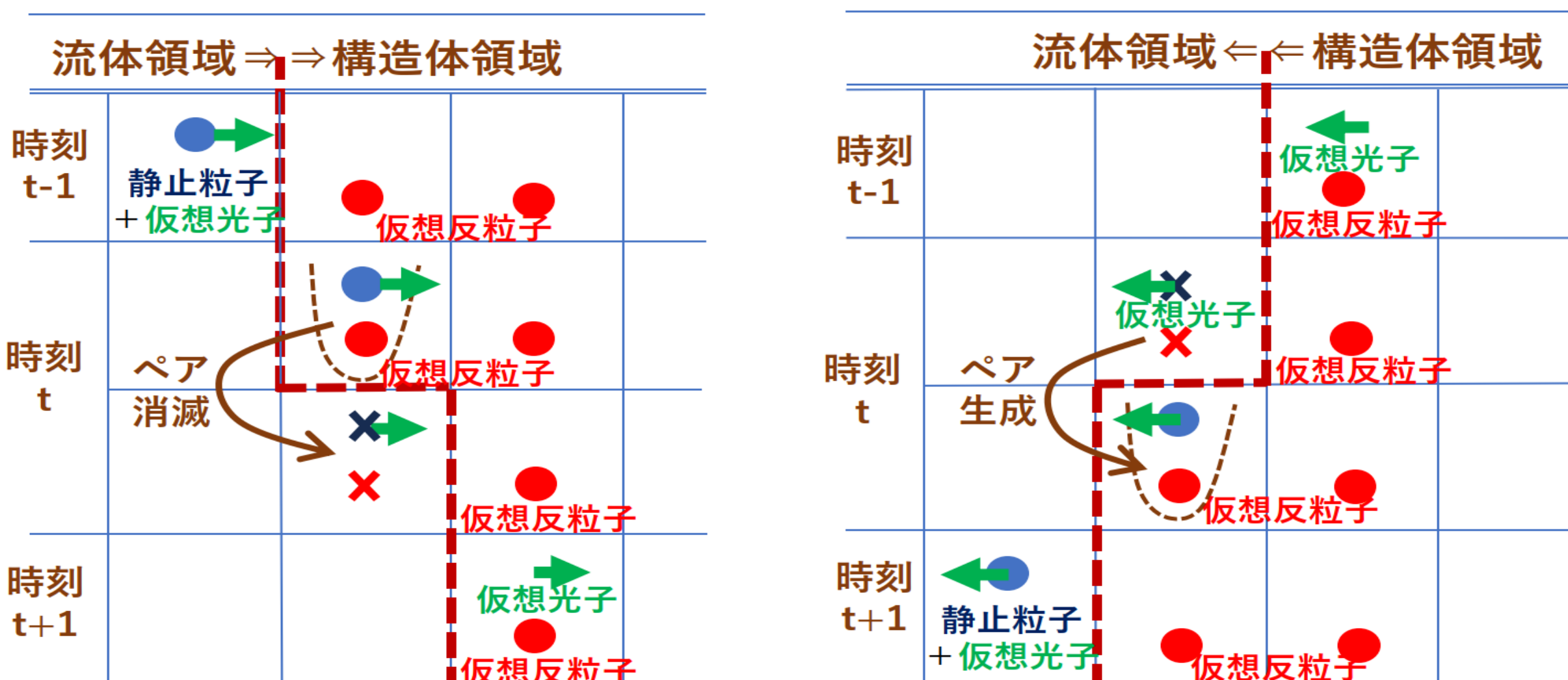


図 流体と構造体の境界を自由に移動する“仮想光子”と“仮想反粒子”の消滅生成によって移動する界面

5. 全体計画（令和6～8年度計画）

- (1) 流体と弾性構造体間の界面自己組織化生成法の開発（令和6年度）
- (2) 流体と“移動可能な構造体”の相互作用モデルの開発（令和7年度希望）
- (3) 流体と“変形可能な構造体”の相互作用モデルの開発（令和8年度希望）

【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の方々が、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。今回は、昨年運用開始されたAOBA-Sの利用も始めたいと思います。