

# 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

EX26207 (東北大学推薦課題: 萌芽型共同研究)

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の設計等)
- 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。

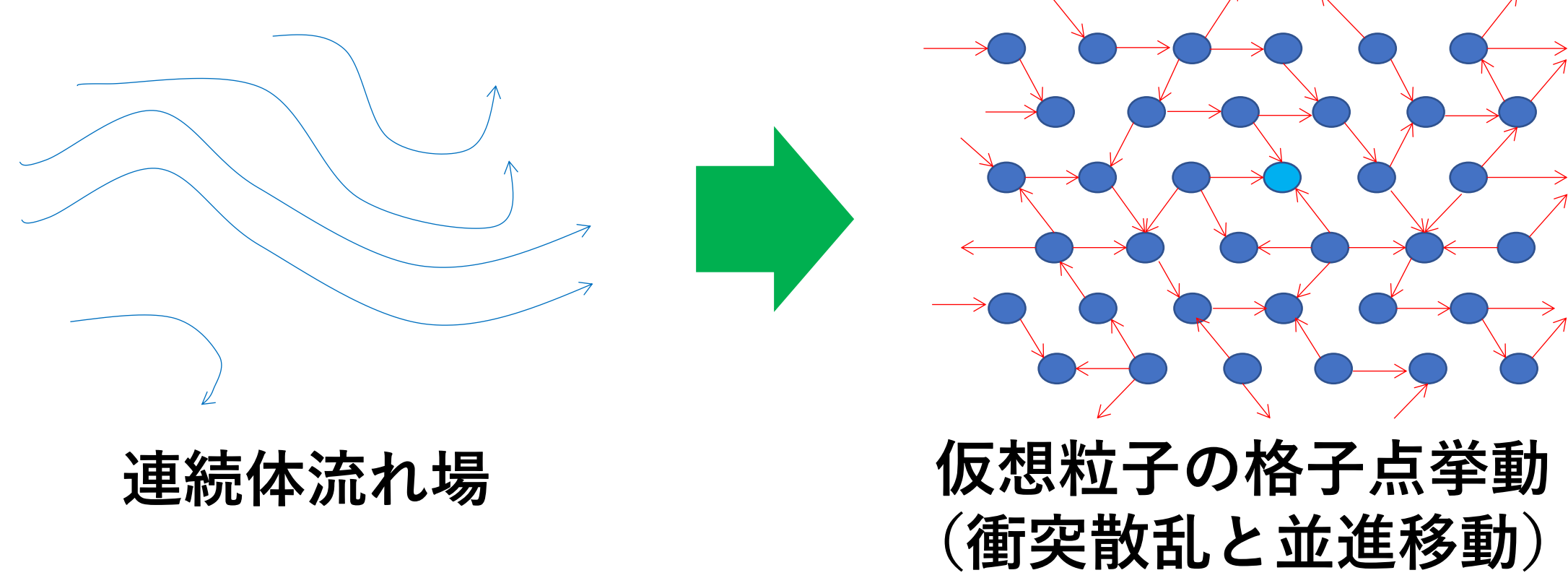
## 1. C. M. Teixeiraの格子ガスモデル (出発点)

### 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。

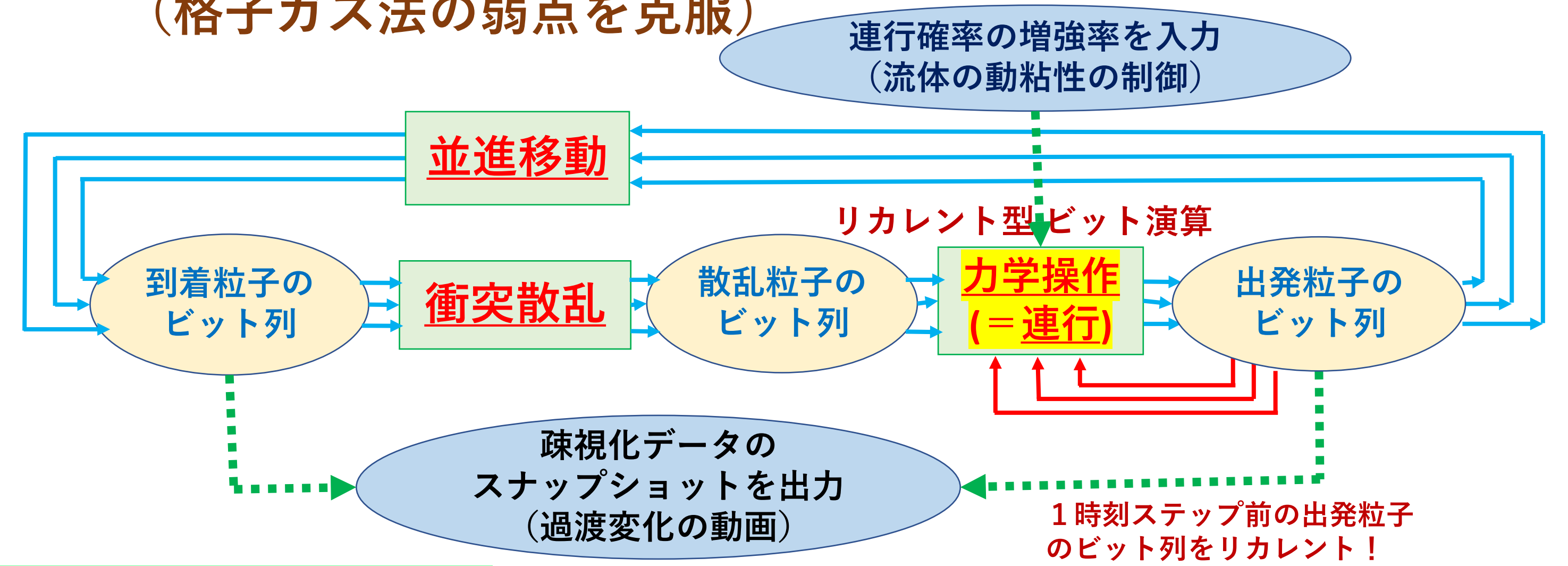
### Teixeiraの4次元FCHC54速度モデル:

- マッハ数3次精度までNS式と一致。
- 移流項は線形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

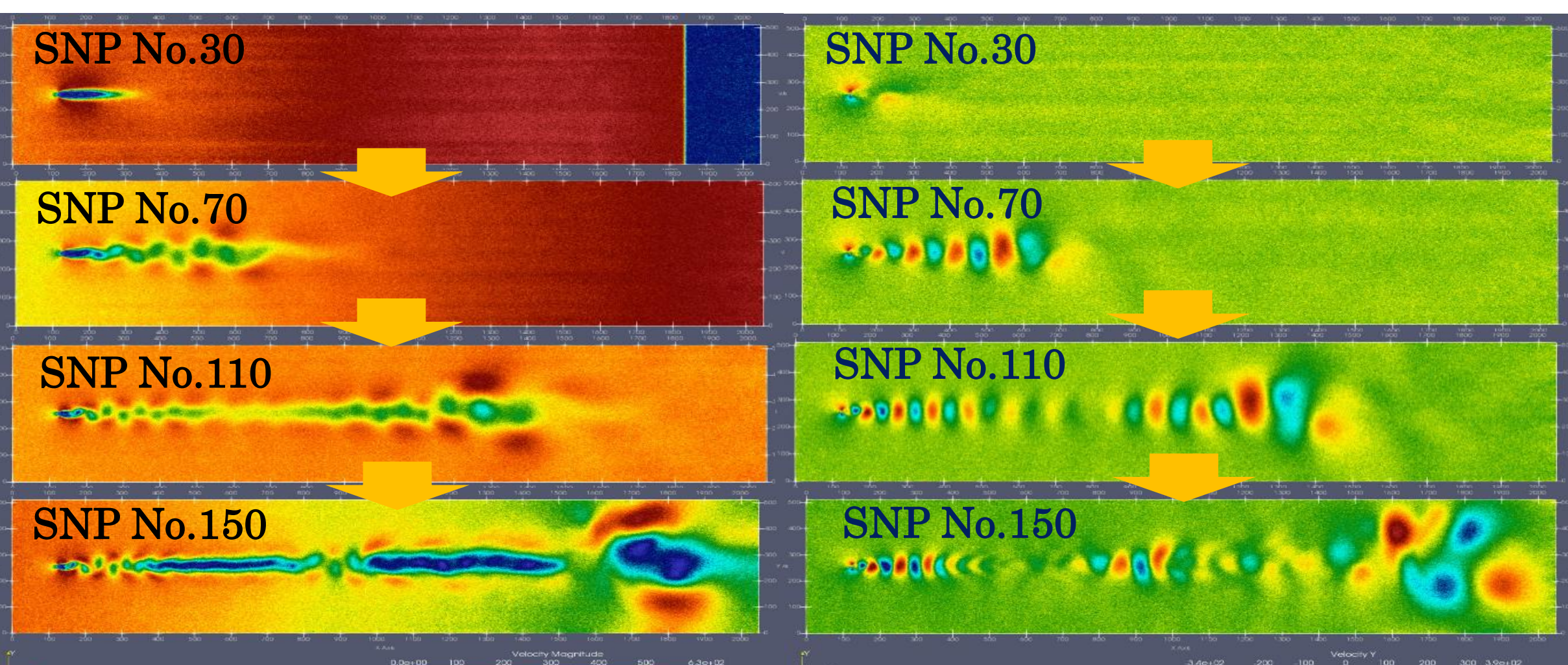
1時刻ステップ前の出発粒子の運動情報(1or0)をもとに、**「同じ向きに連続して出発する確率」=「連行確率」を制御**:  
⇒格子点数を増さずに低粘性流体挙動の模擬を可能にする。(格子ガス法の弱点を克服)



## 3. ビット演算による角柱後流のカルマン渦列崩壊と再配列計算

(四角柱の遠方後流におけるカルマン渦列の崩壊と再配列を再現)

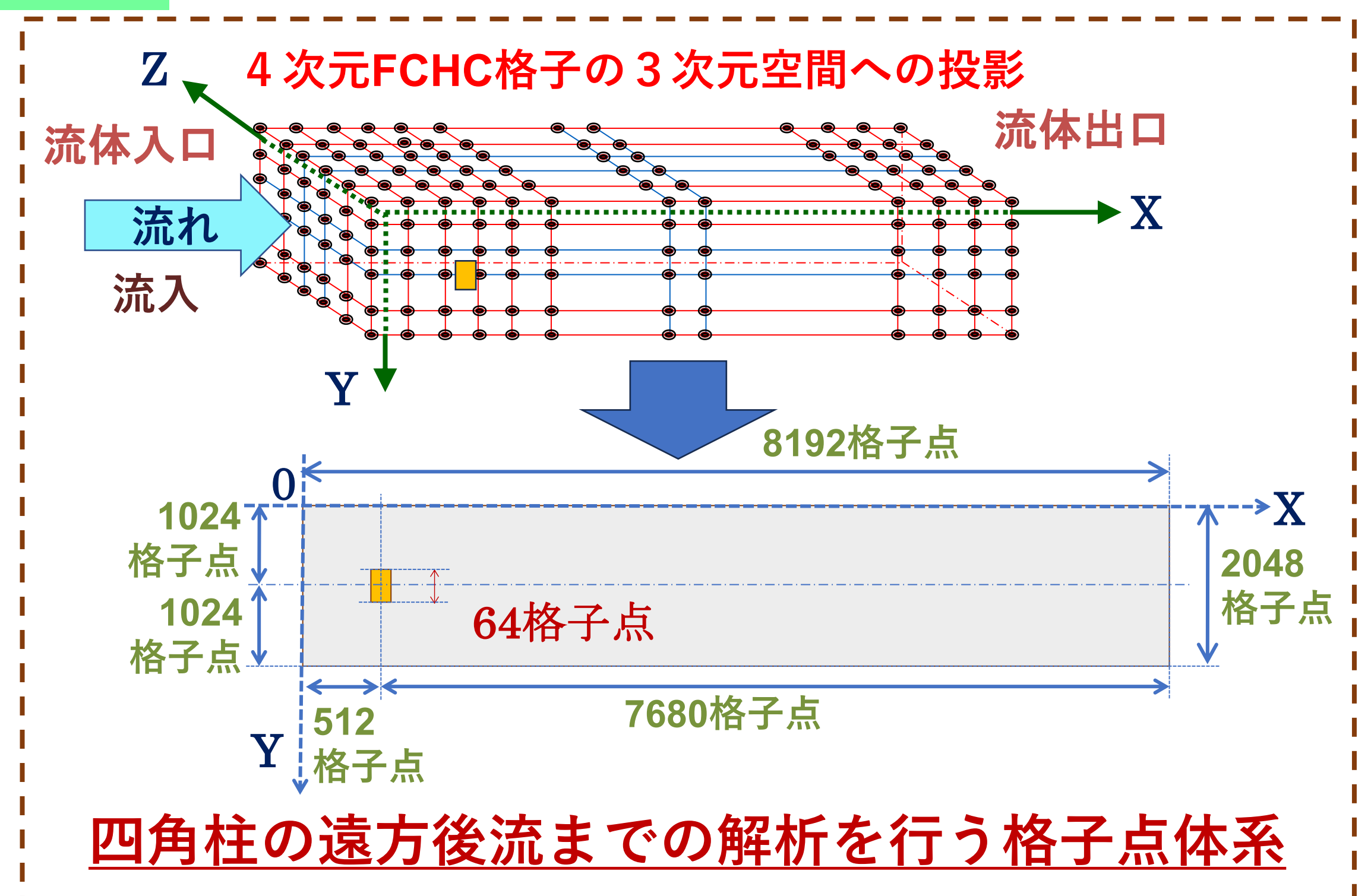
アスペクト比0.125の四角柱を静止流体中に置き、左から急に流体を一定速度で流入した場合の後流の流速(下図左側)とそのY成分速度(下図右側)の過渡変化を計算。⇒先行研究(例: 種子田)の知見と定性的に整合。



四角柱の後流における流速(左)とY成分速度(右)の過渡変化

- 体系の格子点配置は、X方向8192×Y方向2048×Z方向16≒2.68億個。
- 256ステップごとに1画面を出力し150画面までの計算。
- 四角柱の中心軸の中央を垂直に切る平面上の流体速度を可視化。
- 4×4×4個の格子点領域ごとに疎視化。
- ParaViewで動画観察。

○東北大学サイバーサイエンスセンターのAOBA-Sで計算。1ケースあたり「16ベクトルコア/CPU×8CPU」の128MPI並列で3時間20分。  
⇒ベクトル化率: 約98.8%、ベクトル長: 約220



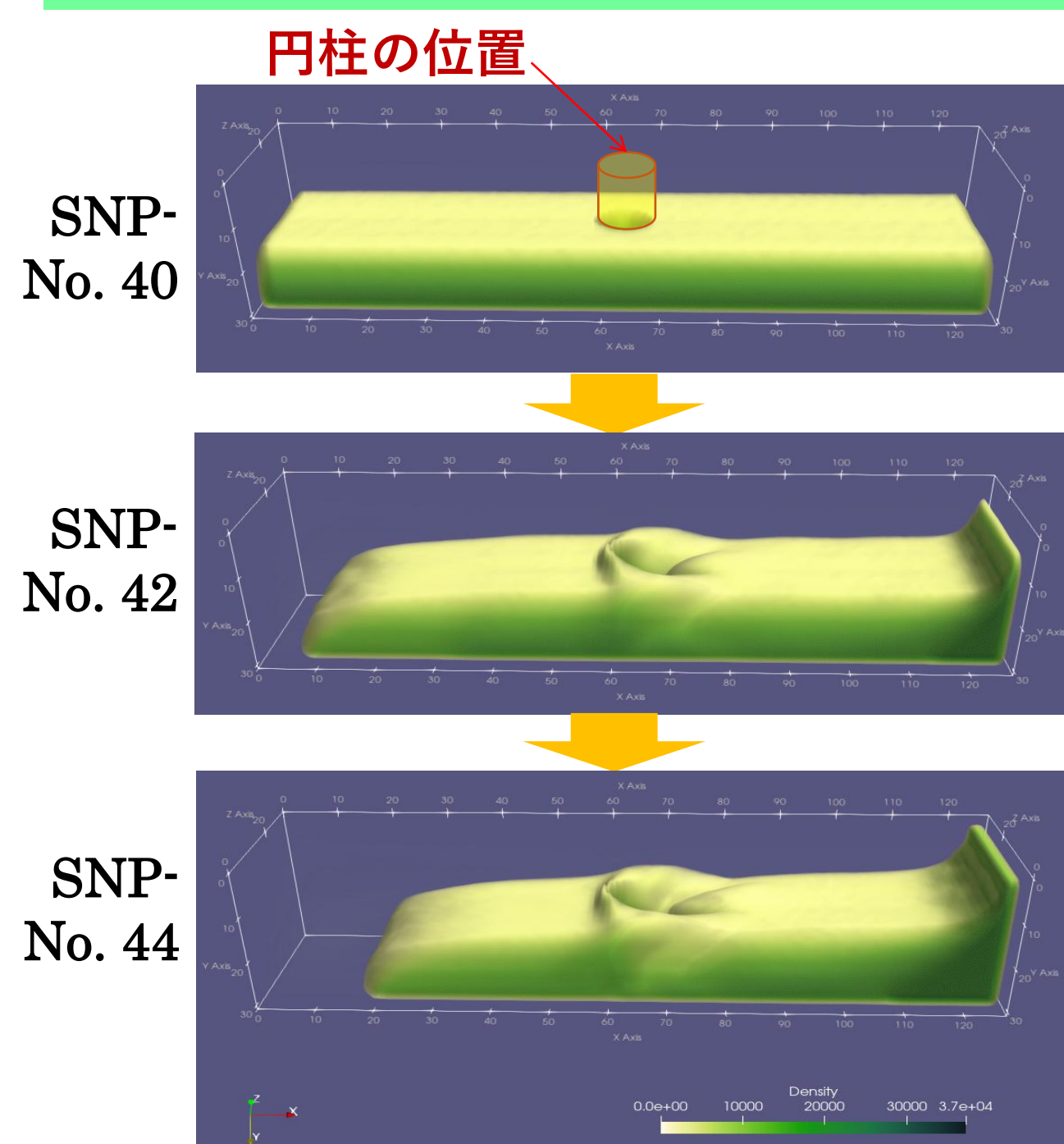
四角柱の遠方後流までの解析を行う格子点体系

【3つの力学操作をすべて使う】

- ①連行操作: 流体粘性を低下させるために行う同じ向きへの粒子の連続出発確率の増加操作
- ②逆進操作: 固定剛体構造体の表面で流体粒子をバウンスバックさせる粒子速度の反転操作
- ③加速操作: 重力や人為的なある向きへの力を模擬するために行う粒子速度の強制的変更操作

## 4. ビット演算による円柱に衝突する気液界面の挙動計算

(重力で分離した気液2相流が円柱に衝突して生じる界面挙動を再現)

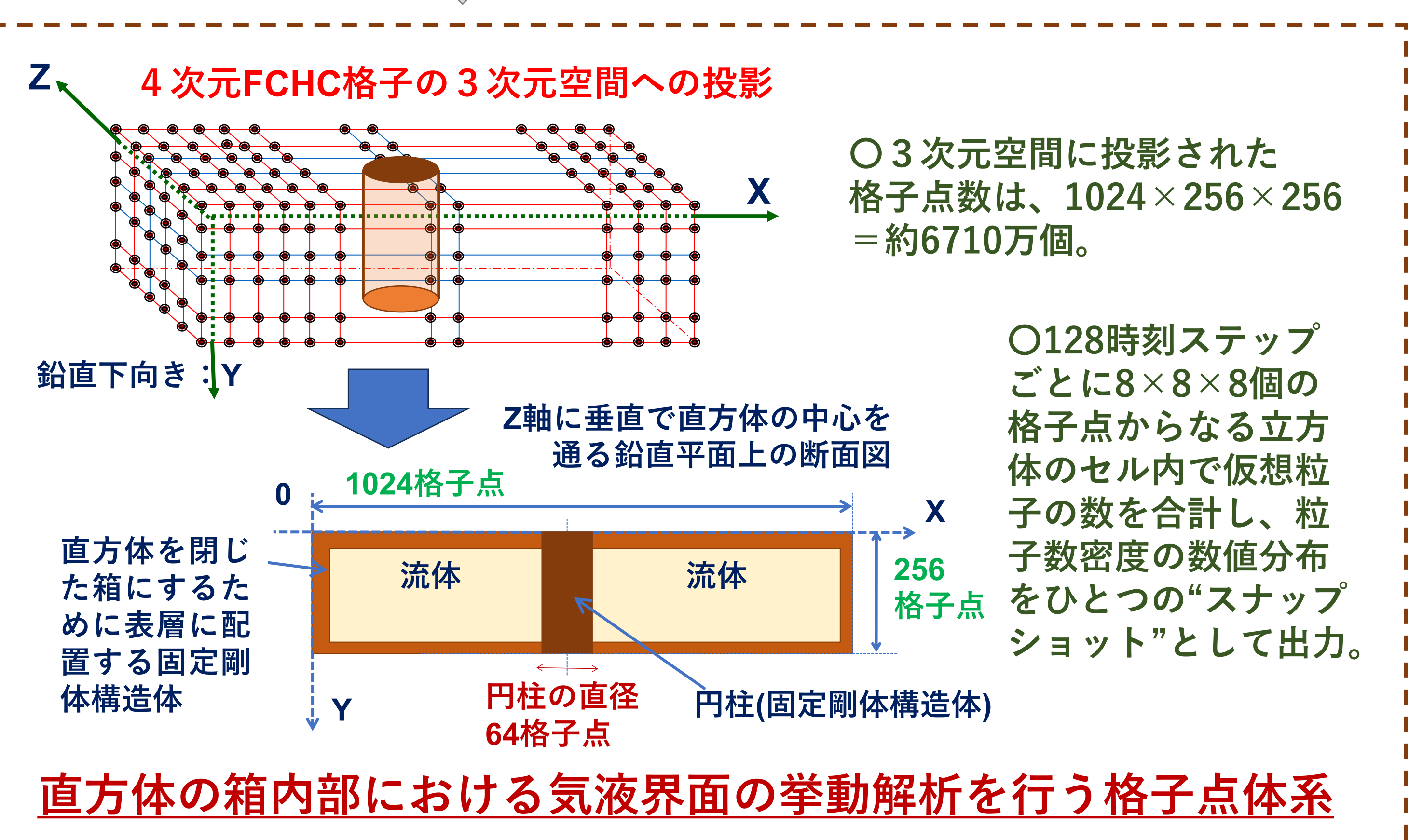


直方体の箱内部で気液相に分離した全ての仮想粒子に右向きに“加速操作”を行った時の気液界面の過渡変化

○時刻0で、各格子点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速度分布で配置し、スナップショット1~39までの間、+Y向き(鉛直下向き)に仮想粒子を加速する。  
⇒仮想粒子の数密度が高い下層=“液相”、数密度が低い上層=“気相”が生成する。  
○スナップショット41から44までの間、右壁向きにすべての気液2相流体粒子を強制加速して、円柱と右壁に衝突させる。

○東北大学サイバーサイエンスセンターのAOBA-Sで、128時刻ステップ×100 Snap-shotの計算を128MPI並列で約26分。  
⇒ベクトル化率: 約97.2%、ベクトル長: 約217

○ParaViewで動画観察。粒子数密度が低い“気相”と解釈できる領域の“不透明度”をゼロにして見えなくし、“液相”と解釈した領域の表面を直視することで気液界面を直接観察する。



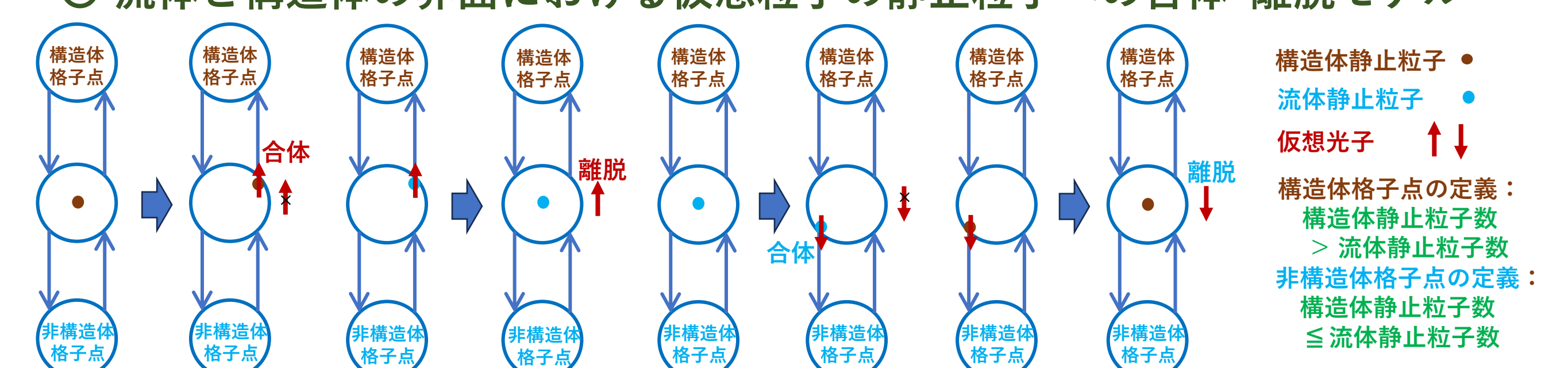
直方体の箱内部における気液界面の挙動解析を行う格子点体系

○3次元空間に投影された格子点数は、1024×256×256=約6710万個。

○128時刻ステップごとに8×8×8個の格子点からなる立方体のセル内で仮想粒子の数を合計し、粒子数密度の数値分布をひとつの“スナップショット”として出力。

## 5. ビット演算によるFSI界面の自動生成 (試算中)

○流体と構造体の界面における仮想粒子の静止粒子への合体・離脱モデル



### 【謝辞】

○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下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。  
○ポスター発表の機会をくださったJHPCN関係者に深く感謝いたします。