

## [共同研究成果]

## 格子ガス法流体解析における背景粒子場モデルの活用と将来性

—— “仮想光子場” の中でブラウン運動する仮想粒子への達人操作

松岡 浩

技術士事務所 AI コンピューティングラボ

筆者は、東北大学サイバーサイエンスセンターの共同研究公募制度により、令和3年度から5年度までの3年間で「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」を実施してきた。縦渦は、高レイノルズ数状態の流れで発生するため、その数値シミュレーションに用いる流体は、非常に小さい正の値の粘性を発現する必要がある。筆者は、これまで10年以上にわたり、格子ガス法流体解析において、「望むだけ小さい粘性を、極めて簡単な計算手順で発現できる粘性制御モデル」を夢みて追求してきた。本稿では、その最新版である“背景粒子場モデル”と名付けたモデルに基づく粘性制御手法の検討状況を紹介する。また、円柱後流における縦渦創発のシミュレーションなどへの適用事例を定性的に考察し、その手法の将来性について言及する。

## 1. 2つの“背景粒子場モデル”（“仮想反粒子場モデル”と“仮想光子場モデル”）

## (1) 仮想反粒子場モデル

“背景粒子場モデル”として、2つのものを考える。ひとつは、“仮想反粒子場モデル”であり、“仮想反粒子”が、流体の存在する空間中の全ての格子点にある程度存在していると考え。流体自体を模擬している通常の仮想粒子が、これらと相互作用を起こすことによって低粘性流体の挙動を発現させる。当該モデルにおける“仮想反粒子”は、負の質量 ( $m < 0$ ) をもつ仮想粒子であり、従って、この粒子がある向きに正の速さ ( $v > 0$ ) をもっていれば、当該粒子は、逆向きの運動量 ( $mv < 0$ ) と負のエネルギー ( $\frac{1}{2}mv^2 < 0$ ) をもつことになる。正の質量をもつ通常の仮想粒子が“仮想反粒子”と相互作用を起こせば、両粒子の“ペア消滅”が生じる。このとき、質量も運動量もエネルギーも正負が打ち消しあうので真空状態が残る。逆に、真空状態から、仮想粒子と“仮想反粒子”のペアを、必要に応じて生成させることができる。(cf. 図1)

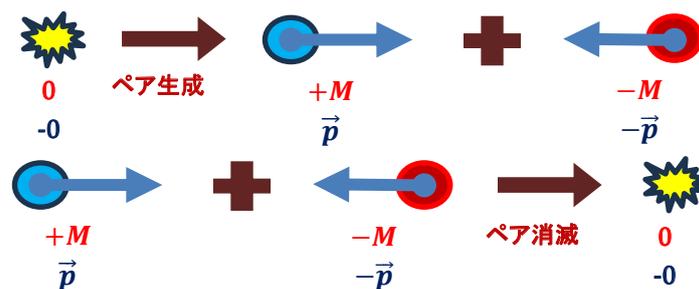


図1. 仮想粒子と“仮想反粒子”のペア生成消滅過程

当面のシミュレーションニーズにおいては、“仮想反粒子”は、各格子点に拘束させる。格子点間を移動できるのは、通常の仮想粒子のみだと考える。そして、流体の質量や運動量やエネルギーを集計して疎視化を行う場合、仮想粒子のみを合計してマクロな物理量を導出する。“仮想反粒子”は集計に含めず、目に見えない背景空間であるかのように扱う。従って、仮想粒子と“仮想反粒子”のペアの生成消滅過程を導入することで、必要に応じて、仮想粒子を目の前に生成させたり、目の前から消滅させたりすることができる。これは、シミュレーション上出会ういろいろな問題を解決するのにかなり役立つ。ただし、ひとつだけ重要な制限がある。「仮想粒子と“仮想反粒子”の“ペア生成”と“ペア消滅”は、疎視化を行う時空間のスケールにおいて平衡して生じ

させる」ことが必要である。これによって、仮想粒子の挙動だけを集計して疎視化した場合でも、質量と運動量とエネルギーの保存則を破らないことが保証できる。

なお、“仮想反粒子”というここでの呼称は、物理学における“反粒子”の概念からの連想であるが、物理学における“反粒子”は正の質量をもつなど全てが同様ではないことに注意されたい。

【“仮想反粒子場モデル”の発想】

筆者が“仮想反粒子”の概念を目にしたのは、Robert P. Bosch, Jr による MIT の論文「A Multigrid Algorithm for Lattice Gases (格子ガスのためのマルチグリッドアルゴリズム)」においてである。流体解析シミュレーションの計算機負担を軽くするため、格子ガス法においても、流れの中の物体近傍では格子点間隔を小さくし、物体から遠く離れた位置では格子点間隔を大きくしたい。このとき、格子点間隔が異なる複数の格子を使用することになる。細かい格子と粗い格子の接続領域では、質量、運動量、エネルギーの保存をうまく維持しながら、「細かい格子上を動く複数の“軽い仮想粒子”」と「粗い格子上を動くひとつの“重い仮想粒子”」を等価交換しなければならない。例えば、“重い仮想粒子”の質量が“軽い仮想粒子の”8倍であった場合、ある向きの速度をもつ重い粒子1個が粗い格子から接続領域にやってきたとすれば、接続領域では“重い仮想粒子”を1個消滅させ、同じ向きの速度をもつ“軽い仮想粒子”を8個生成させて細かい格子に送り出せばよい。しかし、その逆には工夫が必要である。例えば、細かい格子から同じ向きの速度をもつ“軽い仮想粒子”6個が接続領域にやってきたときは、とりあえず、同じ向きの速度をもつ“重い仮想粒子”1個を粗い格子に送り出し、接続領域には、2個の同じ向きの速度をもつ“軽い仮想反粒子”を残しておく。これらの“軽い仮想反粒子”は、その後、同じ向きの速度をもつ“軽い仮想粒子”がくれば、その個数分、ペア消滅させる。こうして、疎視化を行う時空間スケールでは、質量、運動量、エネルギーの保存を成立させることができる。本稿のモデルは、この“仮想反粒子”の存在する領域を、接続領域から流体が存在する全領域に広げたものである。

(2) 仮想光子場モデル

もうひとつは、“仮想光子場モデル”である。“仮想光子”が、流体の存在する空間中の全ての格子点にある程度存在していると考え、流体自体を模擬している通常の仮想粒子が、これらと相互作用を起こすことによって低粘性流体の挙動を発現させる。ただし、当面のシミュレーションニーズにおいては、“仮想光子”は仮想粒子のうち“静止している仮想粒子”とだけ相互作用を起こすと仮定する。“仮想光子”は、まさに通常の光のように考え、目に見えない背景空間をなす。静止した仮想粒子を動かしたい時は、背景空間から“仮想光子”を拾い上げ、それと合体して運動量を得よう。運動している仮想粒子を静止させたい時は、背景空間に“仮想光子”を分離して、運動量を返却する。“仮想光子”は、仮想粒子がもつような質量はもたないが、運動量とエネルギーをもつ。そして、流体が存在する領域においては、“仮想反粒子モデル”の場合と同様に、「静止仮想粒子と“仮想光子”の合体と分離は、疎視化を行う時空間のスケールにおいて平衡して生じさせる」ことが必要である。(cf. 図2)

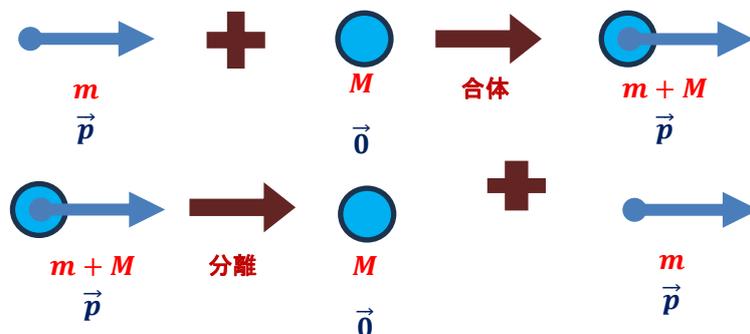


図2. “静止仮想粒子”と“仮想光子”の合体分離過程  
 (注：上図で、 $m$ は“仮想光子”がもつエネルギーに対応する質量)

【“仮想光子場モデル”の発想】

“静止仮想粒子”が、全空間中に満ちている“仮想光子”と合体や分離を引き起こす過程のイメージは、花粉が多数の水分子の中で“ブラウン運動”するイメージを連想させる。疎視化を行う時空間スケールにおいて、合体と分離が平衡して生じていれば、花粉(=“静止仮想粒子”)は、静止状態を保持してみえるはずである。しかしながら、ときどき同じ向きに連続して水分子(=“仮想光子”)が花粉(=“静止仮想粒子”)に衝突(=相互作用)すれば、花粉(=“静止仮想粒子”)は揺動する。こう考えると、流体を模擬している仮想粒子の揺動運動についても、非平衡統計力学における揺動散逸定理(グリーン-久保公式)[1]のようなものが成立し、粘性係数に直接関連づけられると思われる。しかし、ここでは、この詳細に深入りする必要はない。「グリーン-久保公式は流体の粘性係数を与える式であり、その導出の前提には“揺動力”の仮定があって、その大きさが粘性係数の値を左右する」という点だけに注目する。

流体場には、いつも系を乱そうとする“揺動力”が働いている。“揺動力”はあくまで揺らぎなので平均したらゼロでなければならない。あるときにプラスの揺動力が作用したとすれば、平均的には、次にはマイナスの揺動力が作用するので、その効果はゼロになる。しかし、たまたまほぼ同じ時刻に同じ場所で同じ向きの揺動力が続けて2回以上作用する場合もあり、このとき、“揺動力”は効果をもつ[1]。“仮想光子場モデル”では、“プラスの揺動力”が“仮想光子”が“静止仮想粒子”に衝突合体して“運動仮想粒子”を生成する過程」に対応し、“マイナスの揺動力”が“運動仮想粒子”が“仮想光子”を分離して“静止仮想粒子”を生成する過程」に対応づけられる。従って、“静止仮想粒子”と“同じ向きの運動量をもつ仮想光子”の合体か分離のいずれか一方の過程が続けて2回以上作用する確率が、流体粘性に直接効果を及ぼすはずである。“仮想光子場”に基づく粘性制御手法は、この発想に基づくものであり、非平衡統計力学における流体モデル[1]と整合している。

2. “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解析

まず、“仮想反粒子場モデル”に基づく粘性制御を利用した縦渦挙動創発解析の事例について述べる。計算手順の大枠は、通常の格子ガス法の計算手順(“並進移動”及び“衝突散乱”)に加えて、粘性制御を行うための“同期連行過程”と呼ぶ過程を追加したものである。(cf. 図3)

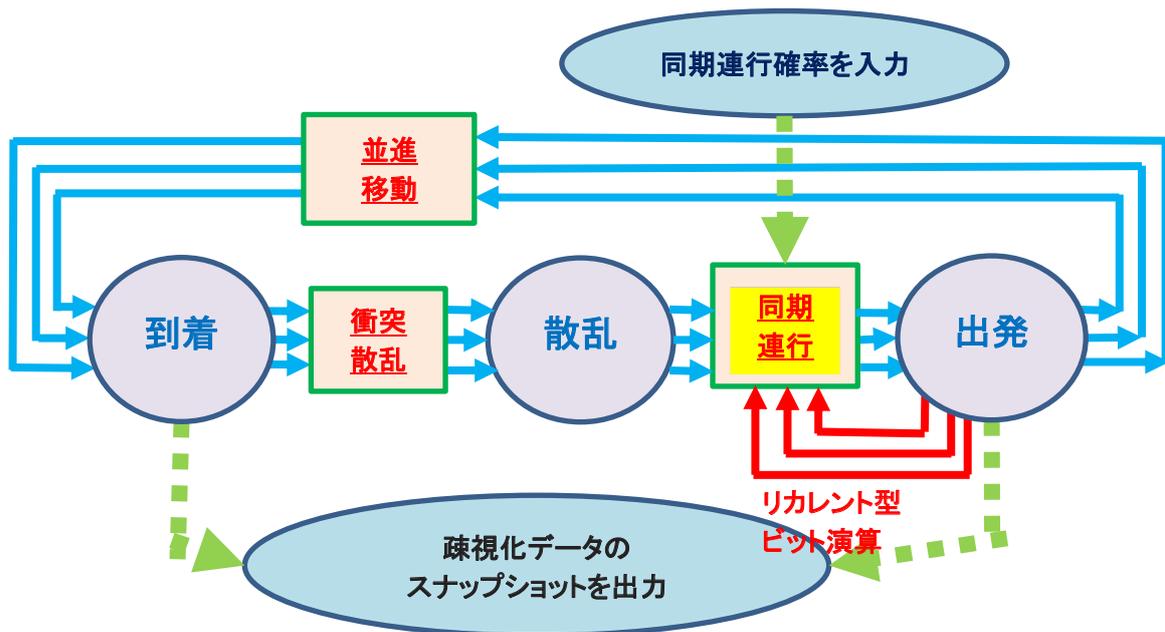


図3. 粘性制御のための同期連行過程を組み込んだ計算手順

「同期連行過程」における計算手順は、極めて簡単である。流体領域にあるすべての格子点のすべての“方向”に対して、以下に述べる操作を行えばよい。ただし、ここで“方向”とは、ある向きDとその逆向きをセットで考えた概念であるとする。

【同期連行過程における計算手順（“仮想反粒子場モデル”の場合）】

1. 時刻  $t-1$  にD向きまたは逆D向きの速度をもって格子点から出発した仮想粒子、及び、時刻  $t$  にD向きまたは逆D向きの速度をもって格子点に到着した仮想粒子の、合計4つの仮想粒子だけに注目して、その存否（存在するか否か？）を調べる。
2. 4つの仮想粒子うち、時刻  $t-1$  に向きDの速度をもって格子点から出発した仮想粒子だけが存在すれば、
  - ① 時刻  $t$  にも向きDの速度をもつ仮想粒子を出発させるよう努める。  
⇒このため、時刻  $t$  における衝突散乱の結果、向きDに出発する仮想粒子が既に準備されていれば何もしない。準備されていない場合は、向きDの速度をもつ“仮想反粒子”が存在しない場合に限り、真空からペア生成によって向きDに出発できる仮想粒子を準備する。
  - ② 時刻  $t$  に逆D向きに仮想粒子を出発させないよう努める。  
⇒このため、時刻  $t$  における衝突散乱の結果、逆D向きに出発する仮想粒子が準備されていない場合は何もしない。準備されている場合は、逆D向きの速度をもつ“仮想反粒子”が存在する場合に限り、ペア消滅によって逆D向きに出発できる仮想粒子を削除する。
3. 2の操作は、逆D向きに対しても同じに実行する。
4. 1から3の操作は、確率的に行うとともに、例えば「必ず交互に行う」などの方法により、平衡が成立するように実行する。

以上の計算手順は、詳細な説明は省略するが、下記のようなビット演算で実行できる。

プログラム：

```

AF = AV[D]; SF = ST[D]; RF = RX[D]; MF = MI[D];
AB = AV[D̄]; SB = ST[D̄]; RB = RX[D̄]; MB = MI[D̄];
mkF = (~AF & ~AB & SF & ~SB & HASA & ~RF & ~MF & EXC)
      | (~AF & ~AB & ~SF & SB & HASA & RF & MF & ~EXC);
mkB = (~AF & ~AB & ~SF & SB & HASA & ~RB & ~MB & EXC)
      | (~AF & ~AB & SF & ~SB & HASA & RB & MB & ~EXC);
EXC = EXC ^ (mkF ^ mkB);
RX[D] = RF ^ mkF; MI[D] = MF ^ mkF;
RX[D̄] = RB ^ mkB; MI[D̄] = MB ^ mkB;
    
```

ここで、

AV[D] : 時刻  $t$  にD向きの速度をもって到着した仮想粒子の存否配列  
 ST[D] : 時刻  $t-1$  にD向きの速度をもって出発した仮想粒子の存否配列  
 RX[D] : 時刻  $t$  の衝突散乱によって生じたD向きの速度をもつ緩和粒子の存否配列  
 MI[D] : 時刻  $t$  にD向きの速度をもって当該格子点に存在する仮想反粒子の存否配列  
 AV[D̄] : 時刻  $t$  に逆D向きの速度をもって到着した仮想粒子の存否配列  
 ST[D̄] : 時刻  $t-1$  に逆D向きの速度をもって出発した仮想粒子の存否配列  
 RX[D̄] : 時刻  $t$  の衝突散乱によって生じた逆D向きの速度をもつ緩和粒子の存否配列  
 MI[D̄] : 時刻  $t$  にD向きの速度をもって当該格子点に存在する仮想反粒子の存否配列  
 HASA : 同期連行を試みる確率に応じて、HASAの各ビットの「1」の出現数が決まる。  
 EXC : 平衡が成立するように、交互に処理を行うための工夫。

以上の計算手順により、円柱後流に生じる縦渦の創発挙動を計算した。本稿に示した計算に限らず、筆者がこれまでに行ってきたシミュレーション研究[2]を通じて、格子ガス法による仮想粒子の衝突散乱モデルを用いた場合でも、円柱後流における縦渦の創発については、「流体粘性を小さく制御し高レイノルズ数状態を維持した場合、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し、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となり、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」を観察できている。図4の右下図は、円柱の下流位置において「発達した縦渦」が現れていることを示している。

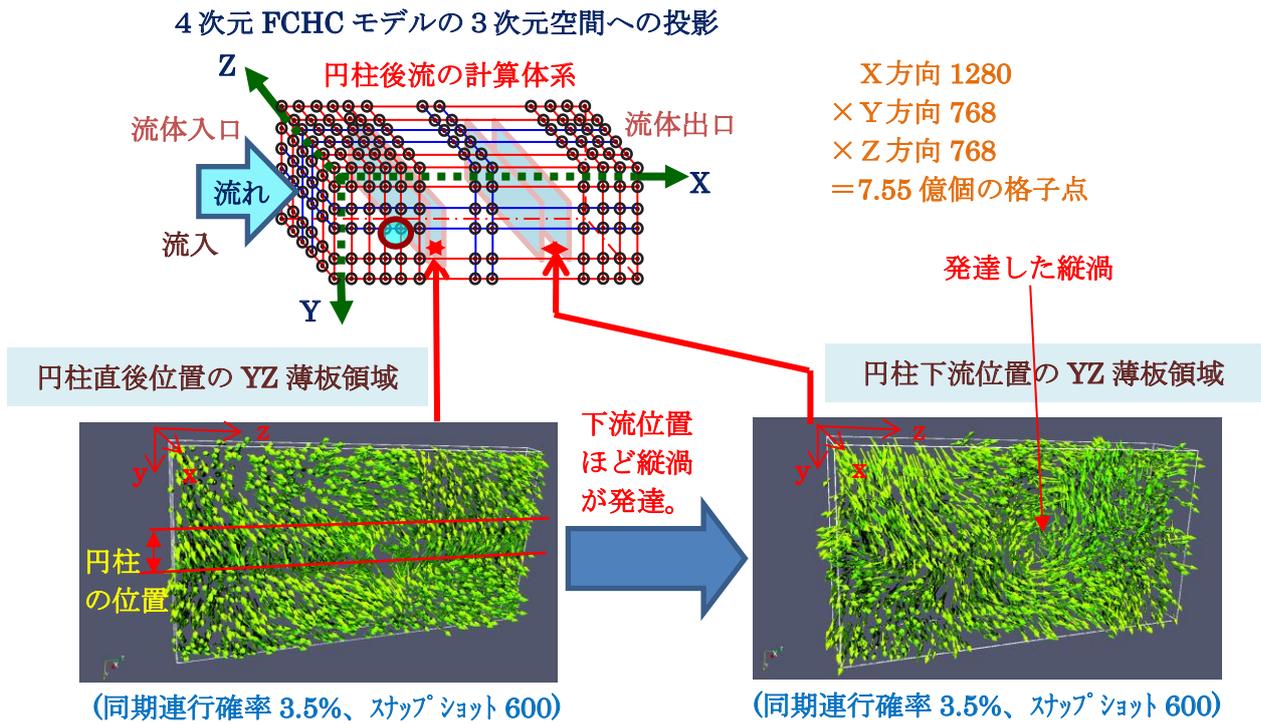


図4. “仮想反粒子場モデル”に基づく粘性制御手法による縦渦挙動創発解析  
(水平円柱に左側から流体を注入し、円柱の直後及び下流位置において流下方向に垂直な薄板領域内の運動量ベクトルを出口側から見た図)

“縦渦”は、時として非常に遠方にまで伝わり、ものづくり流体工学設計では、重要な関心事になっている。航空機の主翼両端から発生する縦渦は燃料の過剰消費につながり、船舶の船首で発生した1対の縦渦は船尾にあるプロペラに到達して損傷の原因になる。また、洋上風力発電ファームでは、風上側の風車から発生する縦渦が、風下側の風車に影響を与え、機械的な振動や発電量に悪影響を与える。

他方、風力発電機のロータブレードを円柱形にして強度上有利にできるなどのメリットがある“円柱翼風車”の研究[3]も進められている。これは、回転する円柱翼とその後ろで翼にクロスするような配置で設置された円環状の平板等の中から発生する“縦渦”によって生じる定常揚力を利用するものである。“縦渦”の発生をリスクと捉えずに、積極的に利用する点で興味深い。このような関心もあり、手始めに、静止した水平円柱とその下流に十字交差配置された帯状の垂直な平板から発生する縦渦の計算を行ってみた。図5に、これを真上から見た時の流体運動量ベクトルの分布を示す。工学的に関心のある“ネックレス渦”の発生状態を模擬できている。

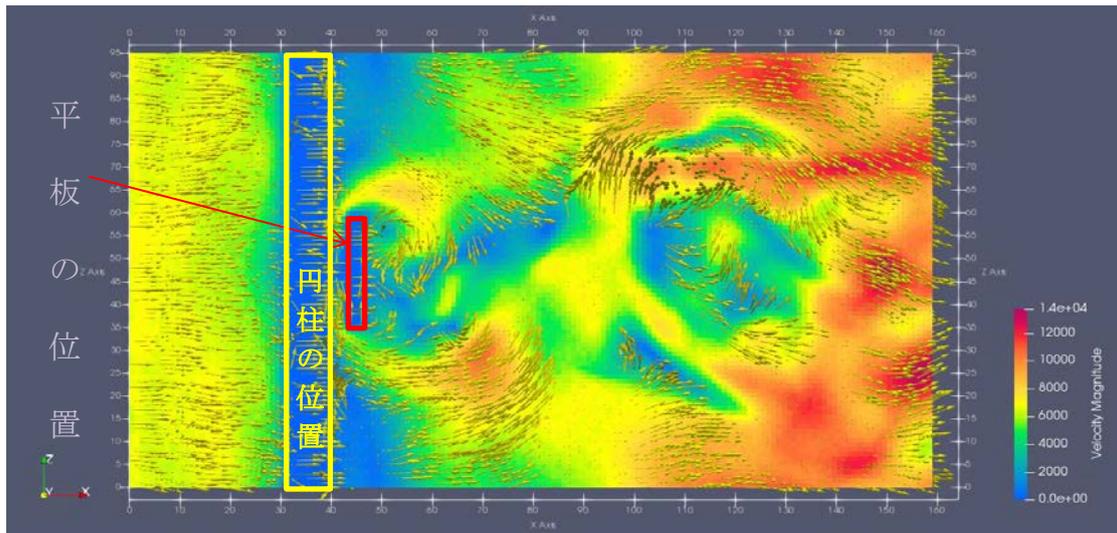


図5. 円柱とその下流に十字交差配置された帯状の平板から発生する縦渦の計算事例  
(同期連行確率 3.0%、スナップショット 575。水平円柱の背後の位置(赤枠)に帯状の平板が垂直に配置。)

図6は、加藤らが、小型水流実験装置によって行った先行研究[4]の実験例である。円柱とその下流に十字交差配置された帯状の平板から、ある特定の条件下で発生する“ネックレス渦”を可視化している。図5の数値計算結果は、図6と似たような様相の描写に成功している。

以上は、すべて定性的な比較である。しかし、“個々の仮想粒子の動きに対して、“マクスウェルの魔”のように人為的ではあるが簡単に要素還元的な操作（達人操作）を行うだけで、高レイノルズ数領域において発生する縦渦挙動の特徴的な様相を再現できた。このことから、これまでに開発してきた粘性制御手法は、機構論的な観点から、自然界に存在する乱流のある特性をうまく模擬できているものだと考えられる。

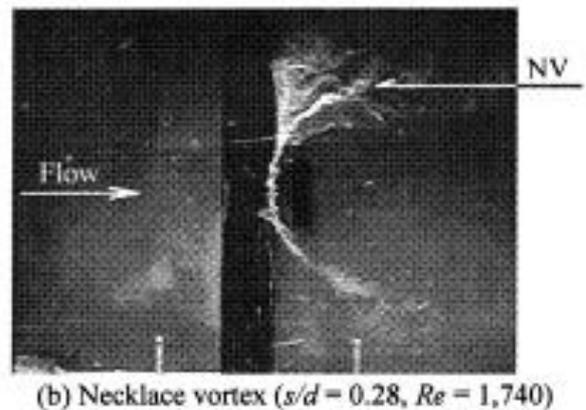


図6. 【加藤らによる先行研究[4]からの引用】  
円柱とその下流に十字交差配置された帯状の平板から発生する縦渦の実験写真

もちろん、ここで用いた粘性制御手法は、“単に、似たような流体挙動を作り出しているに過ぎず、現実とは別物である”という疑問も当然ある。この点については、ここで用いた粘性制御手法が仮想粒子の挙動に与える影響を理論的な式で表現してナビエ・ストークス方程式の形に変形し、粘性項を比較することによって、当該粘性制御モデルが内包している機構論的な調整パラメータ(同期連行確率)と粘性係数の関係を式で示すことが一番わかりやすい。しかし、筆者は、前述の【“仮想光子場モデル”の発想】で述べた「非平衡統計力学という“揺動力”の観点からは、「たまたま同じ向きの揺動力を続けて2回与える確率を制御する」という粘性制御手法は、単純明快でわかりやすいように思える。今後の方向としては、現実の流れを観測して、そのフィードバックにより機構論的な調整パラメータ(同期連行確率)を制御する方法を確立したい。また、フィードバック制御を導入した場合、粘性制御モデル自体がナビエ・ストークス方程式を正確に反映していなくても、流体挙動の因果関係の特徴を機構論的に正しくとらえていれば、調整パラメータの学習だけでも高精度な流体挙動の模擬が可能なのもあり得ると期待している。

### 3. “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解析

次に、“仮想光子場モデル”に基づく粘性制御を利用した円柱後流のカルマン渦列解析の事例について述べる。計算手順の大枠は、前述した図3と全く同じである。ただし、【同期連行過程における計算手順】においては、“仮想反粒子”は登場しない。“仮想光子”と“静止仮想粒子”の合体分離が主役になる。具体的には、以下のとおりである。

#### 【同期連行過程における計算手順（“仮想光子場モデル”の場合）】

1. 時刻  $t-1$  にD向きまたは逆D向きの速度をもって格子点から出発した仮想粒子、及び、時刻  $t$  にD向きまたは逆D向きの速度をもって格子点に到着した仮想粒子の、合計4つの仮想粒子にだけ注目して、その存否（存在するか否か？）を調べる。
2. 4つの仮想粒子のうち、時刻  $t-1$  に向きDの速度をもって出発した仮想粒子だけが存在すれば、
  - ① 時刻  $t$  にも向きDの速度をもつ仮想粒子を出発させるよう努める。  
⇒このため、時刻  $t$  における衝突散乱の結果、向きDに出発する仮想粒子が既に準備されていけば何もしない。準備されていない場合は、“静止仮想粒子”が存在する場合に限り、背景の仮想光子場から向きDの速度をもつ仮想光子を拾いあげて合体させ、向きDに出発できる仮想粒子を準備する。
  - ② 時刻  $t$  に逆D向きに仮想粒子を出発させないよう努める。  
⇒このため、時刻  $t$  における衝突散乱の結果、逆向きDに出発する仮想粒子が準備されていなければ何もしない。準備されている場合は、“静止仮想粒子”が存在しない場合に限り、向きDの速度をもつ仮想粒子を“静止仮想粒子”と“仮想光子”に分離して、逆D向きに出発できる仮想粒子を削除する。
3. 2の操作は、逆D向きに対しても同じに実行する。
4. 1から3の操作は、確率的に行うとともに、例えば「必ず交互に行う」などの方法により、平衡が成立するように実行する。

プログラムは省略するが、“仮想反粒子場”の場合のプログラムにおいて、“仮想粒子”と“仮想反粒子”の存否関係を、“静止仮想粒子”と“仮想光子”の存否関係に置き換えるだけなので、ビット演算としての計算手順は同じである。

以上の計算手順により、下記の条件で、円柱後流のカルマン渦列が生成する過渡変化シミュレーションを行った。シミュレーション体系の形状は、図4に示すものと同様である。

#### [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最初の時刻ステップ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な運動量はゼロであり、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向きの運動量をもつ仮想粒子を  $X=0$  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向きのマクロな運動量をもつようになる。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な運動量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。そして、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。

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  
 である。

なお、4次元FCHCモデルであるため、上記の格子点配置に加えて、同じ3次元位置に4個ずつ第4の方向に沿って格子点を配置している、

また、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させた。スナップショットの総数は、201枚である。

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である。

疎視化は、 $4 \times 4 \times 4$ の3次元格子点領域ごとに行っている。

可視化には、ParaViewを用いた。

図7に示した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である。

“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していくのがわかる。実際は、201枚のスナップショットの動画をParaViewで観察できるので、この変化は一層明らかである。

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（上述のとおり、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分であった。（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大きな改良をしているため、特別なチューニングは行っていない。

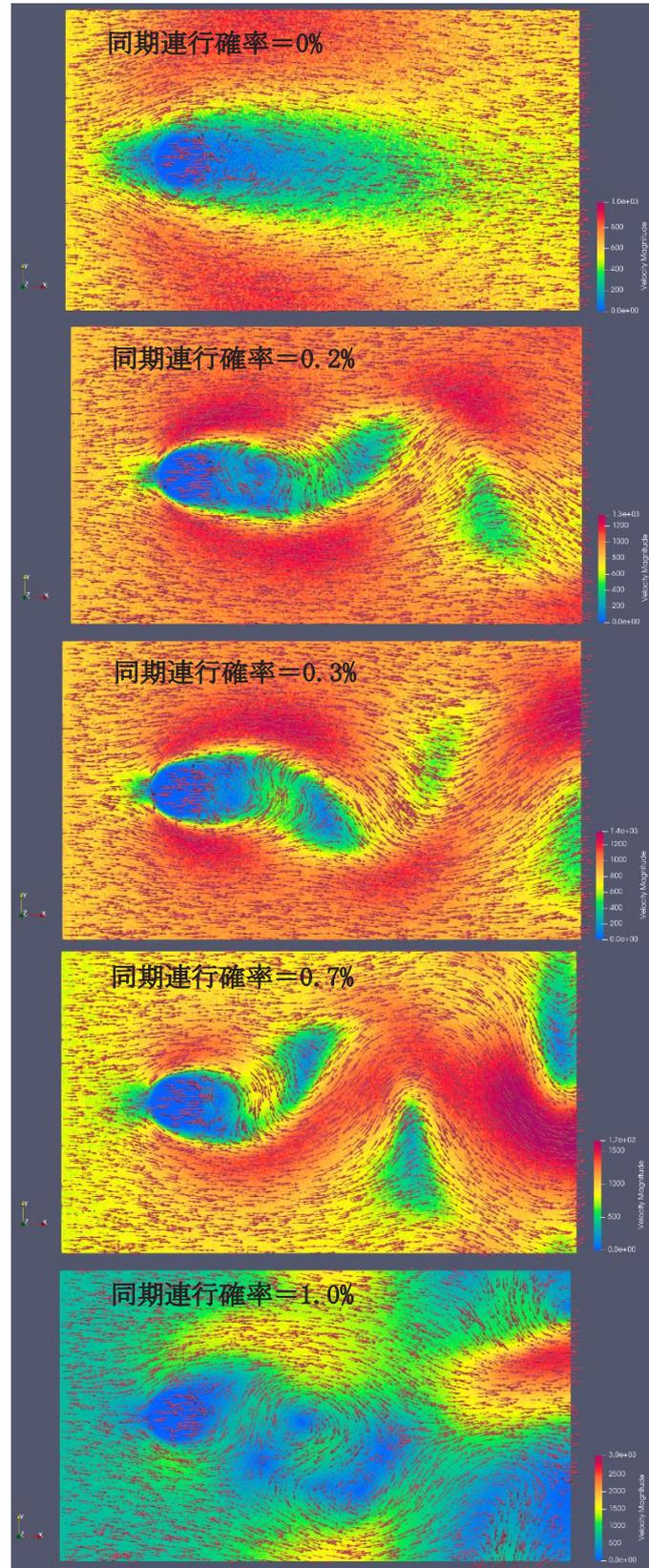


図7. “仮想光子モデル”に基づく粘性制御手法による円柱後流のカルマン渦列解析

#### 4. “格子ガス法”の将来性

筆者が行ってきた今回の3か年の研究は、「流れの中に置かれた物体境界やその直後におけるせん断流の“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)できることを示すことを主要な目的にしている。

今後は、この計算手法を高解像度な流体工学設計の実現に役立てる方法を追求していきたい。筆者が、このような流体工学設計の実現に向けて、なぜ、あえて“格子ガス法サバイバル”の道に期待するのか?その理由は以下のとおりである。

(1) “格子ガス法”における基本的問題の解決:

- ① 等方性の問題、ガリレイ不変性の問題は、Teixeira の FHC モデル[5]によって解決済み。
- ② 例えば、Teixeira による「3速さ 54 速度モデル」では、本手法による解析結果を、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[5]において証明済み。
- ③ また、時間発展計算式の線形性(multi linear)により、計算された運動量のノイズがどんなに大きく変動しても、その平均値は常に正しい結果に収束することも、同論文において証明済み。(cf. Shot Noise Theorem : [5]の第6章)

(2) マルチスケール解析実現に向けた将来性:

- ① 1 格子点に関する時間発展計算を1ビット幅で行うことができるので、非常に多数の格子点に関する演算を高効率な超並列計算で実行可能。
- ② 仮想粒子の“衝突散乱”、“並進移動”等の時間発展計算をすべて「ビット演算」で実行できるので、時間発展計算での誤差の蓄積がない。特に、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るので、乱流解析に好都合。
- ③ Bosch による「仮想反粒子を利用した“マルチグリッドアルゴリズム” [6]」によって、流体中の物体近傍など、詳細な解析が必要な領域にだけ細かい格子の割り当てが可能。
- ④ ゲート型量子コンピュータは、格子ガス法が行う“確率的なビット演算”に向いており、これを利用した高速計算が近々実現できる可能性がある。

(3) マルチフィジックス解析実現に向けた将来性:

- ① 二相流[7]、高温物体による流体の蒸気爆発[8]など様々な流体関連現象について、格子ガス法による解析事例が蓄積。
- ② 粒子の挙動を追跡するので、化学反応や燃焼現象を直接的なモデル化が容易。

【注】格子ガスオートマトン法のマルチフィジックス解析への適用事例は、少数の例示では表現できないほど数多く存在している。

(4) リアルワールド解析実現に向けた将来性:

- ① 格子ガス法の時間発展計算はすべてリカレント型ニューラルネットワークで表現できる[9、10]ので、ニューラルネットの分野で開発された学習アルゴリズムを計測融合シミュレーション(リアルタイムデータ同化)に直接利用することが可能。
- ② リアルタイムデータ同化が可能になれば、各種工学システムの IoT によるエッジコンピューティング制御のニーズに対応可能。
- ③ 計算過程をリカレント型ニューラルネットワークで表現できることは、深層学習により簡単なニューラルネットワークに変換することで低計算量の「サロゲートモデル」を作ることが可能。

以上。

## 謝辞

本研究で実行したシミュレーション計算には、本文にも述べたとおり、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。また、利用にあたって同センター関係各位のご親切なご指導とご協力をいただき、心から感謝する次第である。今後とも、このような使い勝手のよいベクトル型スーパーコンピュータのさらなる開発導入と同センターの有意義な活動の継続を期待している。特に、昨年 AOBA-S が導入されているので、今後は、この利用も試みたい。

## 参考文献

- [1] 香取, “非平衡統計力学”, pp89-127, 1999, 裳華房 (ISBN 978-4-7853-2086-7)
- [2] 松岡, “リカレント型ビット演算による多様な縦渦挙動の創発”, SENAC Vol. 56 No. 1, pp. 24-36, 2023
- [3] 坂本, Hemsuwan, 高橋, “縦渦の定常揚力により駆動する円柱翼風車の抗力特性”, 日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 894, 2021
- [4] 加藤, 小出, 高橋, 白樫, “円柱の下流に十字交差配置された帯状の平板による振動制御”(第1報, 固定系からの縦渦流出), 日本機械学会論文集 (B編), 73巻 728号(2007-4), pp. 957-964, 論文 No. 06-0029
- [5] Christopher M. Teixeira, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, Ph.D. Thesis, MIT, 1993
- [6] Robert P. Bosch, Jr., “A Multigrid Algorithm for Lattice Gases”, MIT, 1993
- [7] 妻屋彰, 「格子ガスオートマトンを用いた二相流の機構論的解析」, 学位論文, 東京大学, 1998
- [8] 枳尾大輔, 「蒸気爆発現象のトリガリング過程における蒸気幕崩壊現象に関する研究」, 学位論文, 筑波大学, 2003
- [9] 松岡, 菊池, “リカレントニューラルネットワークによる実世界流れ場解析用時間発展計算モデルの探求”, SENAC Vol. 53 No. 1, pp. 25-33, 2020
- [10] 松岡, “格子ガス法流体解析モデルとニューラルネットワークの融合”, SENAC Vol. 54 No. 1, pp. 39-49, 2021