

jh140047-NA27

直接数値シミュレーションの早期実用化を目指した 整数型格子ボルツマン法による非熱流体過渡変化解析

渡辺 正 (福井大学)

概要

整数型格子ボルツマン法が、工学設計等において実用的な直接数値流体シミュレーションを早期に実現する観点から優位性をもつことを示すため、500 億格子点規模の非熱流体過渡変化解析に関する性能評価を行った。

東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-9 及び SX-ACE を用いて解析を行った結果、SX-ACE の 256 ノード(256CPU) = 1024 コアを用いれば、10 万時刻ステップにわたる過渡変化を 9 日間で実行できることを実証できた。また、本手法によるコンパクトな状態記述の実現が、HPC 専用設計キャッシュ (ADB) 等とうまく協調して高い性能を達成できた可能性も示唆された。

なお、原子力流動解析への応用を目指して、福井大学にある流動実験設備を模擬した比較計算を行う予定であったが完了するには至らなかった。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

本研究課題への参加研究者は、“課題担当メンバー”として、研究課題代表者：渡辺正(福井大学)、副代表者①：松岡浩(東北大学(委嘱))、副代表者②：大木慎一(㈱テラバイト)、板倉憲一(独)海洋研究開発機構)、菊池範子(㈱サイエンス・サービス)、及び、“東北大学拠点共同研究メンバー”として、小林広明(東北大学)、江川隆輔(東北大学)である。

役割分担は、以下のとおりである。

- ①全体統括：渡辺
- ②計算モデルの改良・感度解析：松岡/菊池
- ③原子力流動解析への応用検討：渡辺
- ④個別流動解析への適用性検討：大木
- ⑤大規模並列化性能の比較：板倉
- ⑥SX-ACE における並列化性能向上：小林/江川

2. 研究の目的と意義

“整数型格子ボルツマン法”による 500 億格子点規模の非熱流体過渡変化解析に関する性能評価を行い、工学設計等において実用的な直接数値シミュレーション(DNS)を早期に実現する観点から、本手法の優位性を示す。

スーパーコンピュータの計算能力の飛躍的な向上にとともない、ものづくりの方法が大きく変化しつつある。例えば、航空機開発の場合、文献：“革新的な航空機開発のための次世代 CFD の研究” (中橋, 佐々木, SENAC Vol.45, No.1, pp.3-10 (2012.1))、及び、“Testimony of Michael Garret Director, Airplane performance Boeing Commercial Airplanes”, Before the United States Senate Committee on Commerce, Science, and Transportation Subcommittee on Technology, Innovation, and Competitiveness, July 19, 2006 を参照のこと。)によれば、1980 年代に開発されたボーイング 767 は 77 個もの主翼モデルが風洞で試験されたのに対し、最新のボーイング 787 では 11 個で済まされたという。また、空気抵抗係数の改善により、燃費向上のほか、CO₂ や NO_x の放出低減にもつながった。この状況は、自動車や大型船舶の開発でも同様 (cf. 坪倉, 京で目指す自動車の次世代空力シミュレーション, 京速コンピュータ「京」を知る集い in 福岡, 2011, cf. 藤井ら, CO₂ 排出量大幅削減船の開発, 三井造船技報 No.203 (2011-7)) であり、原子力分野でも現実事象の忠実な再現が重要課題になっている。

以上のような工学設計では、細かく不規則な運

動を含んだ乱流境界層を伴う。この微細な非定常運動までをシステム全体規模の形状モデルで解像することは、設計現場では全く困難であるため、微細な流れの不規則変動を平均して RANS(レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式)なり、LES(Large Eddy Simulation)で解く手法が一般的である。ところが、そこに用いる物理モデルが剥離等に伴う複雑な乱流を記述するのに万能ではない部分を含むため定量的な信頼が得られない。従って、最小の微細な渦まで解像できる時代がくれば、物理モデルへの依存性を“常に正確に成立する基礎方程式の部分”のみに限定できるが、それまでは、「細かな格子でできるだけ微細な渦までを直接計算して物理モデルの不正確な部分への依存性を極力少なくすることで精度改善を目指すというアプローチ」が選択される。

この超高解像度計算を実行し、いずれは DNS を実現する方法として、本研究課題では、一般に利用されているナビエ・ストークス方程式の実数解法ではなく、“整数型格子ボルツマン法”を用いる。本手法は、格子ボルツマン方程式を根拠にするものであるが、仮想粒子の分布関数に実数を用いる通常の“実数型格子ボルツマン法”とも異なる。本手法は、できるだけ細かな格子計算を行うため、各格子点の物理状態をできるだけ少ない情報量(非熱流体モデルの場合 30B 未満)で記述し、格子点あたりの状態情報の更新(時間発展計算)をできるだけ狭いビット幅(1 ビット幅)で超並列に行うことができるという特徴をもつ。また、大規模並列計算でも計算効率が落ちにくいセルオートマトン的な計算であるため、将来的には、工学設計において、他の手法より早期に実用的な DNS を実現できると期待できる。本研究の意義は、その方向に向けた第 1 歩として、注目度が高くない本手法の優位性を示す点にある。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

東北大学サイバーサイエンスセンターは、平成 25 年度に実施した文部科学省からの受託研究の一部において、NEC 等とともに、本研究課題で用いる流体シミュレーションコード(LGAsxm54v)の評価を行っている。そこでは、技術的には数年後に実現可能なある具体的な設計の超大規模ベクトル並列計算機(100PF、10 万 CPU)を仮想し、8.8 兆格子点規模の高解像度の流体過渡変化計算を、要求時間である 24 時間以内に実行できるか否か等を検討している。(cf. 江川, 板倉, 渡部, 撫佐「検

討状況報告『高メモリバンド幅アプリケーションのための将来の HPCI システムに関する研究』, 2 月 24 日), P9, 将来の HPCI システムのあり方の調査研究「アプリケーション分野第 12 回全体ミーティング, 2014 年 2 月 24 日」(cf. Hiroaki Kobayashi, Feasibility Study of A Future HPC System for Memory Intensive Applications, 19th Workshop on Sustained Simulation Performance, March 27 & 28, 2014) また、同センターでは、平成 27 年 1 月から SX-9 の後続機としてベクトル計算機 SX-ACE を運用しており、大幅な性能向上を実現している。このため、東北大学拠点共同研究メンバーは本研究課題で扱うシミュレーションコードと計算機の相互関係を熟知しており、課題担当メンバーは、共同研究を通じて最大限の計算機性能を引き出せる技術支援を受けることができる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究課題は、JHPCN の平成 26 年度新規課題であり、作成要領に基づき本章の記入は不要。

【参考】シミュレーション手法の従来開発成果

本研究のベースになる“整数型格子ボルツマン法非熱流体シミュレーションコード”は、平成 20 年度から SX-9 や地球シミュレータ等により開発を実施してきた。このモデルは、1 格子点に約 50 種類の速度をもつ仮想粒子が存在し得ると仮定し、これらが衝突と移動を繰り返しながら格子上を動きまわる様子を平均化して非熱流体のマクロな挙動を得る。なお、本手法は、3 次の精度でナビエ・ストークス方程式に一致することが証明されている (cf. Teixeira, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, MIT, 1992)。

また、前章冒頭に述べた東北大学等による平成 25 年度の研究では、それなりの計算機開発を行えば、8.8 兆格子点規模の流体計算を数年後には実現できる可能性が示された。他方、“直接数値シミュレーション (DNS)”の意味を「コルモゴロフスケールの最小渦まで解像できる格子点規模の流体シミュレーションの実現」と解釈した場

合、これに必要な格子点[N]はレイノルズ数[Re]の(9/4)乗で与えられるので、典型的な例として Re=100 万を考えれば、DNS の実現には、N=32 兆格子点規模の計算が必要であることがわかる。これは、今後 BCM の導入によって必要な領域だけで格子点を密に配置することができるようになれば、単純に格子点数の比較からだけの評価ではあるが、整数型格子ボルツマン法を用いて、Re=100 万程度の DNS の実現が数年以内の視野に入ると期待できる。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 東北大学 SX-9 による流体シミュレーションコードの改良 (平成 26 年 4 月～11 月)

この期間は、東北大学サイバーサイエンスセンターSX-ACE の運用開始以前であったため、SX-9 の 4 ノード (64CPU、主記憶合計 4TB) を用いて、「静止した流体中におかれた無限長円柱に対して垂直な方向に流体が突然動き出したときに生じる円柱後流の過渡変化」について、500 億格子点規模 (12288(流れ方向)×4096(流れ及び円柱軸に垂直な方向)×1024(円柱軸方向)=51,539,607,552 格子点)による非熱流体シミュレーションを試みた。

この過渡変化は、時刻ステップが進むにつれて、円柱後流に、まず対称的な流れが生じ、次に双子渦が発生してその尾が伸び、途中で尾が切れて揺れだし、カルマン渦に変化していくものである。

(cf. 松岡, 菊池, “多段 2 体衝突法”による流体粘性の制御効果, SENAC, Vol. 44, No. 3, pp21-28, 2011 年) 十分な計算時間をかければ、この全ての過程を再現できるが、500 億格子点規模では、初めの対称的な流れが生じる段階までの計算に、約 8 日間 (5952 時刻ステップ目で計算時間: 約 7.98 日) を要した。

なお、本計算は、64CPU による MPI 並列計算であり、ベクトル長: 255.95、ベクトル化率: 99.5% という比較的良好な性能評価値を得た。

[参考]500 億格子点規模を標準問題にした意味

工学設計において、どの程度細かな格子まで直接計算すれば、必要な精度が得られるか? ---平成

26 年 10 月 31 日に開催された第 1 回 “「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会” (cf. 第 1 回 “「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会” 予稿集, Oct. 31, 2014) における戦略分野 4 (代表者: 加藤千幸教授) の “乱流の直接シミュレーションによる次世代流体設計システムの研究開発” によれば、「京を用いて最大 500 億格子点規模の乱流の直接計算を実現し、それを産業界の熱流体設計に適用することにより、自動車、ターボ機械、船舶、燃焼器などの多くの工業製品の熱流体性能設計を革新できることを、ものづくり企業と連携して実証すること。」が目標として掲げられ、1 例として示された自動車の空力シミュレーションでは、「格子解像度 2mm から 0.5mm に改善することにより、空気抵抗を風洞試験との 2%以内の誤差で予測できることを『京』によって実証できた」との報告があった。従って、例えば、風洞試験を代替できる精度を求めるとすれば、第 4 章[参考]で述べた “コルモゴロフスケール” までの “全ての微細渦” を解像する必要はなさそうである。また、「計算科学ロードマップ (平成 26 年 3 月)」によれば、準第一原理的な計算を行う LES 解析において、Re=200 万の場合に必要な計算格子点数として「79 億格子点」という値が示されている。これを、“全ての微細渦” ではなく “マクロな流体挙動に影響を与えうる主要な微細渦” のスケールだと解釈すれば、“500 億格子点” という数値は、これより大きく、高精度な流体ものづくりに利用できるシミュレーション精度を達成するのに必要な格子点規模のひとつの目安値になると考えて差し支えないと思われる。

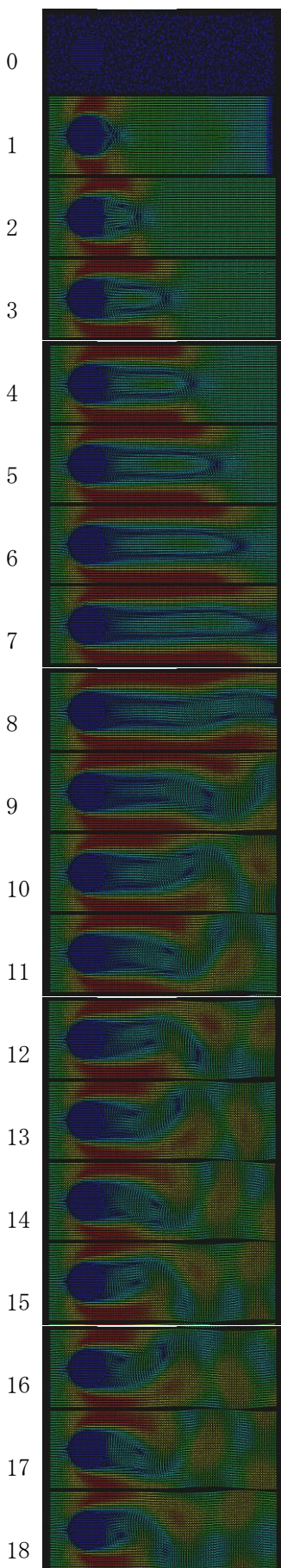
(2) SX-ACE による過渡変化解析の性能評価

(平成 27 年 1 月～27 年 3 月)

A. 過渡変化過程全体を把握するために必要な時刻ステップ数の考察

5(1)で SX-9 により解析した過渡変化の全体を把握するため、SX-ACE の 32 ノード (32CPU、128 コア) を用いて、2 億格子点規模 (1536(流れ方向)×512(流れ及び円柱軸に垂直な方向)×256(円柱軸

方向) ≈ 2 億点) による非熱流体シミュレーション (MPI による 1024 並列計算) を行った。



具体的には、全体の時刻ステップ総数を 29184、スナップショット取得のための時刻ステップ間隔を 1536 とし、以下のスナップショット時系列画像を得た。

このスナップショット画像から、時刻ステップが進むにつれて、円柱後流に、双子渦が発生してその尾が伸び、途中で尾の先が切れて揺れだし、カルマン渦に変化し、第 13 時刻ステップあたりから定常的な繰り返し状態に至っていることがわかる。すなわち、静止状態が定常的なカルマン渦に移行する過渡変化過程の全体は、13 時刻ステップを要している。

一般に、流体の過渡変化の速さは、初期状態と最終状態の違いの大きさや流体の粘性など、解析したい過渡変化の種類ごとに多くの条件に左右されるため、どのくらいの時刻ステップ数の時間発展計算を行えば過渡変化過程の全体を把握できるかを一律に決めることはできない。しかし、ここで解析した「静止

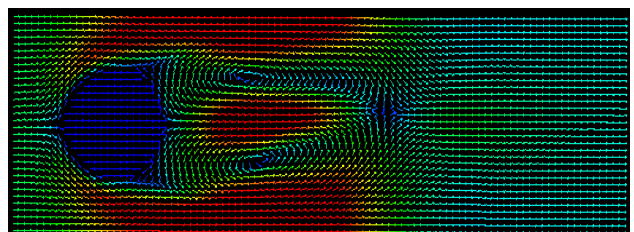
流体 \Rightarrow 双子渦 \Rightarrow カルマン渦」という過渡変化は、典型的な流体過渡変化事象のひとつであり、多くの事象の代表例のひとつとしてこの事例をとりあげて考察することに特に不都合はないと思われる。

2 億格子点規模の解析では、流れ方向の格子点数が 1536 であり、1536 時刻ステップ間隔で採取したスナップショット時系列を見ると、過渡変化全体の移行過程は 13 画面程度で追跡できている。これから類推すると、500 億格子点規模の解析で過渡変化全体の移行過程を追跡するためには、例えば、流れ方向の格子点数を 7680 とした場合、7680 時刻ステップ間隔で採取したスナップショット時系列で 13 画面程度を追跡できる時刻ステップ数が目安になり、 $7680 \times 13 = 99840$ 時刻ステップとなる。すなわち、500 億格子点規模の解析を行う場合、10 万時刻ステップオーダーの時間発展計算を実用上支障のない時間で完了できるか否か？が、本手法が工学設計等において実用的な直接数値流体シミュレーションを早期に実現する観点から有望か否か？のひとつの判定目安になる。

B. SX-ACE による 10 万時刻ステップ数の計算

平成 27 年 1 月、東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-ACE の 256 ノード (256CPU、1024 コア、主記憶合計 16TB) を用いて、前述の過渡変化について、500 億格子点規模 (7680 (流れ方向) \times 2560 (流れ及び円柱軸に垂直な方向) \times 2560 (円柱軸方向) = 50,331,648,000 格子点) による非熱流体シミュレーション (MPI による 1024 並列計算) を試みた。

次図に、このシミュレーションの最後の時刻ステップ、107520 時刻ステップ目 (計算時間: 約 747302 秒 \approx 207.58 時間 \approx 8.65 日) のある瞬間状態について、円柱軸に垂直な断面における速度ベクトル分布のスナップショットを示す。



ここでは、約 500 億個の格子点における流速ベ

クトルを小領域ごとに合計して疎視化し、 $96 \times 32 \times 8$ の速度ベクトルを求めている。

なお、本現象のレイノルズ数は、約 1200 である。また、上記計算は、256 ノード (1024 コア) による MPI 並列計算であり、ベクトル長：255.93、ベクトル化率：99.822%、ADB ヒット率：92.184% という良好な性能評価値を得た。

なお、このとき利用した東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-ACE の 256 ノード (256CPU = 1024 コア) の主記憶容量は、64GB / ノード \times 256 ノード = 16TB であり、“500 億格子点規模” の計算時に必要な主記憶容量 (4 TB) を十分上回っている。

[参考] 計算モデルの概要

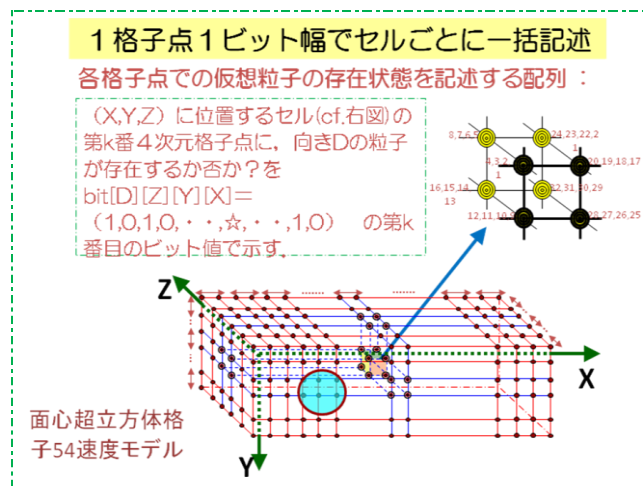
基本的には、Teixeira の 54 速度モデルを以下の方法で実現している。(cf. 松岡, 菊池, “多段 2 体衝突法” による流体粘性の制御効果, SENAC, Vol. 44, NO. 3, pp21-28, 2011 年)

① 仮想粒子に関する存否情報の表現方法

格子点の配置については、“4 次元面心超立方体格子 (FCHC) モデル” を採用している。各時刻ステップごとに、多数の仮想粒子が 4 次元空間中で衝突により向きを変え、新しい向きに並進移動していく。このとき、瞬間ごとに各格子点において速度 D をもつ仮想粒子が存在するか否か? の存否情報を 4 次元配列 $\text{bit}[D][Z][Y][X]$ で表現している。具体的には、まず、通常の 3 次元空間の離散的な各位置 (X, Y, Z) に立方体のセルを配置する。立方体セルの中心位置が (X, Y, Z) であり、立方体セルの各辺は、それぞれ X, Y, Z 方向を向いていて、隣り合う立方体セルの中心間距離は、立方体セルの 1 辺の長さの 2 倍に等しい。各立方体セルは、8 つの頂点をもつが、それぞれの頂点に、 $(X, Y, Z$ に続く) 第 4 の座標として、0, 1, 2, 3 の循環座標値をもつ座標 R を考える。こうして得られる各 4 次元位置 (X, Y, Z, R) が、FCHC 計算モデルにおけるひとつひとつの 4 次元空間中における格子点となる。この結果、ひとつの立方体セルには、32 個の格子点が存在することになる。

各格子点においては、同一の速度 (\leftarrow 向きと大き

さが両方とも同じ) をもつ仮想粒子は、高々 1 個しか存在できないと仮定する。この仮定があるので、速度 D の仮想粒子が i 番目の格子点に存在する場合は、 $\text{bit}[D][Z][Y][X]$ の第 i ビットを “1” にし、存在しない場合は、 $\text{bit}[D][Z][Y][X]$ の第 i ビットを “0” にして、いろいろな速度をもつ仮想粒子の各格子点における存否状態をビット列で表現することができる。



② 仮想粒子がもちうる速度 D の範囲

仮想粒子は、前述の 4 次元座標をもつ格子点間を時刻ステップが進むたびに飛びながら移動する。従って、その速度は 4 つの速度成分をもち、ある時刻ステップにおいて、格子点位置 (X, Y, Z, R) にいた仮想粒子が、その格子点において $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta R)$ の速度を持っていれば、次の時刻ステップには、 $(X + \Delta X, Y + \Delta Y, Z + \Delta Z, R + \Delta R)$ の位置に移動していることになる。仮想粒子がもちうる速度は、54 速度モデルの場合、 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta R) = (00-1-1), (00-11), (0-10-1), (0-101), (0-1-10), (0-110), (-100-1), (-1001), (-10-10), (-1010), (-1-1, 00), (-1100), (1-100), (1100), (10-10), (1010), (100-1), (1001), (01-10), (0110), (010-1), (0101), (001-1), (0011), (-1-1-1-1), (-1-1-11), (-1-11-1), (-1-111), (-11-1-1), (-11-11), (-111-1), (-1111), (1-1-1-1), (1-1-11), (1-11-1), (1-111), (11-1-1), (11-11), (111-1), (1111), (2000), (0200), (0020), (0002), (-2000), (0-200), (00-20), (000-2)$ と 6 つの静止状態：(0000) の合計 54 種類を考えている。そして、各速度は、上記の配列順に $D=1$ 番から番号を付けて区別する。

③仮想粒子の移動規則

仮想粒子が移動する場合、固体壁と衝突する場合も含めて、『仮想粒子は、次の時刻ステップにおける行き先の格子点が液体の場合(配列 DF[D]の対応するビットが 0)は、そのまま行き先の格子点に到達し、行き先の格子点が固体の場合(配列 DF[D]の対応するビットが 1)は、現在いる格子点において、移動の向きを反転する。』という規則を採用している。

④仮想粒子の衝突規則

同じエネルギーをもつ仮想粒子どうしが同じ格子点で出会う場合、必要な頻度で、『ある格子点に、速度 a をもつ仮想粒子と速度 b をもつ仮想粒子が存在して、速度 c をもつ仮想粒子と速度 d をもつ仮想粒子が存在しない場合、速度 a と速度 b をもつ仮想粒子は消滅し、速度 c と速度 d をもつ仮想粒子が生成する。あるいは、その全く逆のことが生じる。』という 2 体衝突モデル ($a + b \leftrightarrow c + d$) を採用している。ここで、衝突に関与する 4 つの仮想粒子は、衝突過程の前後で、粒子数は「2」のまま保存するのは明らかであるが、運動量の各成分(X, Y, Z, R 成分)の和と運動エネルギーの和も保存するものが選ばれている。

FCHC54 速度モデルの場合、仮想粒子は、3 種類の異なるエネルギー 0, 1, 2 をもちうる。これらの異なるエネルギーをもつ仮想粒子どうしが同じ格子点で出会う場合は、必要な頻度で、『ある格子点に、エネルギー 1 をもつふたつの仮想粒子 a と b が存在して、エネルギーゼロをもつ仮想粒子 c とエネルギー 2 をもつ仮想粒子 d が存在しない場合、エネルギー 1 をもつふたつの仮想粒子 a と b は消滅し、エネルギーゼロをもつ仮想粒子 c とエネルギー 2 をもつ仮想粒子 d が生成する。あるいは、その全く逆のことが生じる。』という 2 体衝突モデルを採用している。ただし、ここでも、衝突に関与する 4 つの仮想粒子は、衝突過程の前後で、運動量の各成分(X, Y, Z, R 成分)の和と運動エネルギーの和も保存するものが選ばれている。

なお、54 速度モデル以上に速度の種類が増すと、ノイズの問題もかなり軽減され、また、時

間平均値が物理法則を満たすことが Teixeira により証明されている。(cf. Teixeira, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, MIT, 1992)

C. SX-9 から SX-ACE への性能向上

5(1)に前述した SX-9 による 500 億格子点計算は、51, 539, 607, 552 格子点であり、5(2)B に上述した SX-ACE による計算は、50, 331, 648, 000 格子点であって計算体系が多少異なっている。しかし、総格子点数の差を比較すると、その差は 3%以内に収まっており小さい。

500 億格子点規模の計算を行った際に、SX-9 による 64 並列計算から、SX-ACE による 1024 並列計算に変えたことで、どれだけ性能が向上したのであろうか? --- SX-9 による 64 並列計算では、5952 時刻ステップ目まで進むのに約 689398 秒=約 7.98 日の時間発展計算時間を要し、SX-ACE による 1024 並列計算では、107520 時刻ステップ目まで進むのに約 747302 秒=207.58 時間=8.65 日時間を要している。総格子点数の差は 3%以内でわずかであるので、これをちょうど「500 億」と考え、この 500 億格子点のすべての状態情報を 1 回更新するのに要する時間を求めると、それぞれ、以下のようなになる。

SX-9 による 64 並列計算の場合：

$$689398 \div 5952 \approx 115.8 \text{ 秒/更新回数}$$

SX-ACE による 1024 並列計算の場合：

$$747302 \div 107520 \approx 6.950 \text{ 秒/更新回数}$$

従って、 $115.8 \div 6.950 \approx 16.66$ 倍の高速化がなされたことがわかる。

この値を、単純に用いたプロセッサの合計ピーク性能の比の値 ≈ 10 と比較すると、それよりも大きくなっているが、これは、本プログラムに対する実行性能が SX-ACE の方が良いことを示している。SX-9 による計算では HPC 専用設計キャッシュ (ADB) を動作させず、SX-ACE による計算では、1 コアごとに 1 MB と増強された ADB を自動機能させているので、うまく協調して高い性能を達成できた可能性が考えられる。(ADB ヒット率：92.184%)

いずれにしても、SX-ACE の 256 ノード (256CPU) = 1024 コアを用いれば、整数型格子ボルツマン法流体シミュレーションコードを利用して、500 億格子点規模の非熱流体解析の 10 万時刻ステップにわたる過渡変化を 9 日間で実行できることを実証できた。

なお、定量的な分析はできていないが、整数型格子ボルツマン法によるコンパクトな状態記述は、ADB へのより多くの格子点情報の収納を可能にする点で、計算機とアプリのコードデザインによる高解像度化への貢献とも解釈することができる。

(3) 原子力流動解析分野への応用計算に関する事例研究 (平成 26 年 4 月～27 年 3 月)

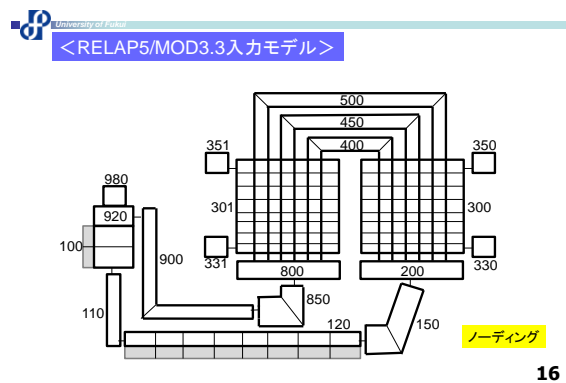
原子力流動解析の分野では、原子炉冷却系等の安全評価等において、近年、とくに、実際に生じる事象をできるだけ忠実に再現して、それを統計解析するシミュレーション評価手法の実用化ニーズが高まっている。また、工学設計においても、通常時ではなく、異常時・事故時の過渡変化解析のニーズが、他の分野よりも際立って大きい。そのような中、DNS の実現も視野に入れた超高解像度の過渡変化解析をめざす本コードの開発成果を応用できるケースが、多く存在すると考えられる。ここでは、原子炉冷却系における過渡変化事象について、他のシミュレーション手法との比較計算を試みることにした。計算体系は、福井大学国際原子力工学研究所にある、原子炉冷却系を模擬した熱交換実験装置であり、その冷却水流路系統図を下図に示す。

上図右側にある高温水タンクの熱水は、原子炉で加熱された冷却水を模擬しており、熱交換機右下の入口プレナム部にポンプによって注入される。入口プレナム部に注入された熱水は、逆 U 字形の伝熱管 (短尺逆 U 字管 4 本、中尺逆 U 字管 3 本、長尺逆 U 字管 2 本) を通過して、反対側の熱交換機左下の出口プレナム部で合流し、配管を經由して高温水タンクに戻される。熱水は、伝熱管外部の冷水によって冷却されるが、この部分が、原子炉冷却系の一部をなす蒸気発生器を模擬している。

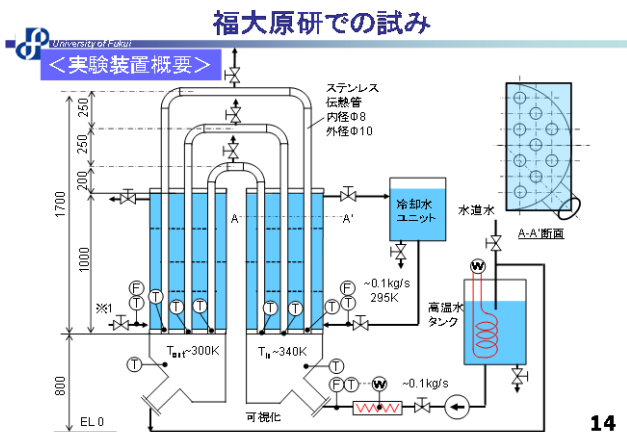
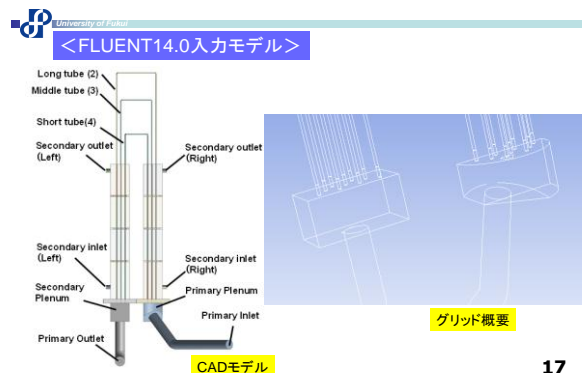
これら冷却水が一巡する経路の全体システムを概観した流動のシミュレーションについて RELAP5 コードを用い、蒸気発生器部分の詳細な流動シミュレーションについて FLUENT コードを用いて、試計算を行った。下図に、このとき用いたノード分割を示す。

これらの 2 つのコードを利用して、最終的には、冷却水駆動ポンプが急停止した場合などの過渡変化の計算を目指している。

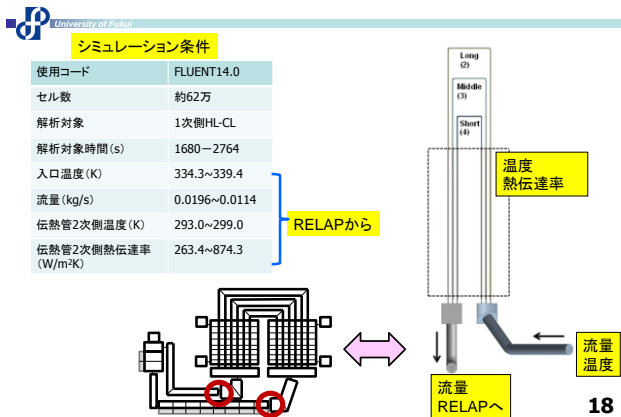
[RELAP5 利用時のノード分割]



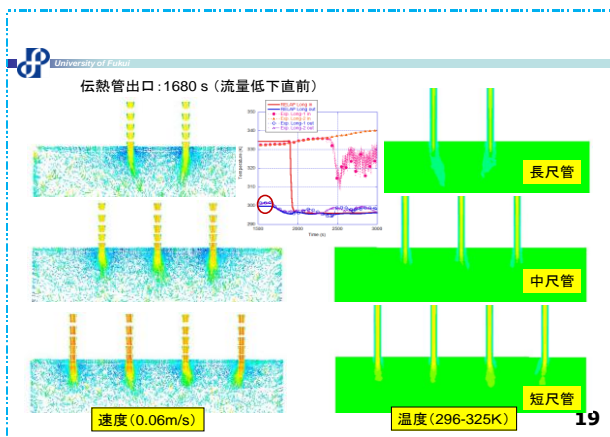
[FLUENT 利用時のノード分割]



FLUENT を用いて、約 62 万セルによる熱流動計算を下記の条件のもとで実施した。



第 1 段階として、通常時の流動計算を対象にして比較評価を行うため、冷却水駆動ポンプが急停止する以前の通常定常状態におけるシミュレーション結果に注目する。下図に、この場合の出口プレナム部における伝熱管出口からの流れのシミュレーション結果を示す。



6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(1) 東北大学 SX-9 による流体シミュレーションコードの改良

500 億格子点規模による過渡変化シミュレーション時の基本的な性能評価データを得たので完了。

(2) SX-ACE による過渡変化解析の性能評価

東北大学サイバーサイエンスセンターにおける新スパコン棟の建設工事の遅れに伴い、SX-ACE の運用開始時期が平成 26 年 10 月から 27 年 1 月に延期された。このため、以下、SX-ACE による研究成果は、中間報告書には全く記載できず、本報告書

への記載が初めてである。

また、SX-ACE の利用期間が当初予定していた 6 ヶ月（平成 26 年 10 月～27 年 3 月）から後半 3 ヶ月に半減したことに対応するため、500 億格子点規模の過渡変化シミュレーションの実行を 2 回に絞ったが、基本的な性能評価データは得ることができたので完了。工学設計等における実用的な直接数値流体シミュレーションの実現が、この種のコンピュータによって間近に迫っていることを示すことができた。

(3) 原子力流動解析分野への応用計算に関する事例研究

福井大学にある流動実験設備を模擬した蒸気発生器出口プレナム部における冷却水の流動について、FLUENT コードによる解析を完了。

これと比較すべき整数型格子ボルツマン法によるシミュレーションについては、実験体系をやや簡素化したモデル体系の境界条件等を作成したが、SX-ACE の利用可能な残された期間が短くなったため、試行錯誤を伴うことが予想されるその実行は断念した。比較計算を完了するには至らなかった。なお、平成 27 年度の JHPCN で本課題の継続は不採択であったため、JHPCN による将来計画はない。今後の基本的な課題は、全体格子点数の節約と局所的なレイノルズ数向上を同時に実現させることが可能な①BCM の導入と②仮想粒子衝突規則の多様な制御法の開発である。

7. 研究成果リスト

- (1) 学術論文 なし
- (2) 国際会議プロシーディングス なし
- (3) 国際会議発表 なし
- (4) 国内会議発表 なし
- (5) その他（特許，プレス発表，著書等）なし