

10-MD07

計測融合オペレーション実現のための

大規模計算機空気冷却風速場の高解像度過渡変化解析

松岡 浩（理化学研究所）

概要：

格子ガス法超並列計算手法を利用して、大規模計算機空気冷却風速場の高解像度な過渡変化シミュレーションの試行計算を実施し、その実用性を評価した。他のシミュレーション手法や実測データとの比較を試み、現時点では定性的な考察の域に留まるが、計算が大規模化したときの並列計算性能の良さ、複雑形状取扱いの容易さなど、格子ガス法のメリットを十分活かせるとの感触を得た。今後は、模擬できる現象のレイノルズ数を上げる観点から、粘性を下げる衝突規則とその制御法の考案が鍵になると考えられる。

1. 研究の目的と意義

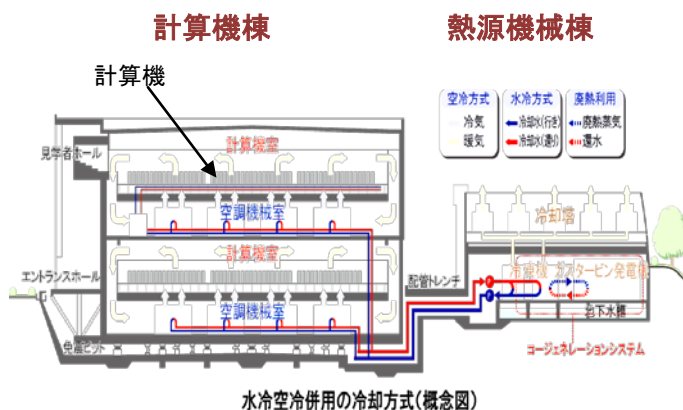
(1) 目的

格子ガス法超並列計算手法を利用して、大規模計算機空気冷却風速場の高解像度な過渡変化シミュレーションを実現する。また、本手法による結果を、現実の大規模計算機室（理化学研究所が神戸に設置する次世代スーパーコンピュータ施設等）における風速場の実測値や従来手法によるシミュレーション結果と比較して実用性を評価する。

さらに、風速計等各種センサーから得られる時系列計測データをもとに本手法による計算モデル（←格子ガス法における仮想粒子の衝突則など）を時々刻々補正することによってセンサーの設置されていない場所の風速場についても実際に近いより高精度なシミュレーション結果が得られるような計測融合シミュレーション手法について具体的な開発指針を得る。また、計算機センターの異常時にも過渡変化シミュレーションに基づく適切なオペレーション対応が可能のように、これらの計算をクラウドコンピューティングによって実現することを目指す。

以上のことを通じて、ペタフロップスを超える大規模計算機システム技術のうち、計算機空気冷却システムを中心にした“計測融合オペレーション技術”を確立し、①筐体内の電子部品にやさしい過渡変化を実現して高信頼性・長寿命化を目指す運転と、②冷却・空調・電源系を

含めた計算機システムプラント全体のエネルギー効率向上を目指す運転の両立に資する。



(2) 意義

ペタフロップスを超える超並列高速計算機システムでは、通常数十メガワット以上の巨大な発熱を伴うばかりでなく、その発熱分布は広範囲に広がり、計算機システムのジョブスケジューラによる計算ノードの割当て・解除、各種プログラムのエラー発生、計算機ハードウェアの故障のほか、これらに伴う筐体ファン自動オンオフや、故障の修理保守後の起動、さらには、

計算機システムの冷却・空調・電源系におけるトラブル発生で予測できない形状変化をする。他方、従来型の冷却制御は、液冷システム、空冷システムともに、計算機冷却場の入口温度と入口流量を確保し、各筐体では、温度や湿度がある制限値を超えた場合に電源オフにすることで計算ボード等の電子装置の財産保護を行っている。今後の大規模計算機システムにおいては、上述のとおり、異常な過渡変化の過程が多様化するため、従来の制御方式では、定格温度や定格湿度から大きなオーバーシュートやアンダーシュートが生じる可能性が高い。これらは、制限値に達すれば、稼働率の低下、達しない場合でも、電子部品の信頼性や寿命の低下を招く。このため、各種センサー情報とシミュレーションから過渡変化の全体像を的確に把握し、冷却システムの制御を適応的に実行する必要がある。すなわち、大規模計算機では、新たに“冷却制御システムアーキテクチャ”というものが重要課題になる。本研究は、格子ガス法による計測融合オペレーションの可能性を開拓するものである。なお、ここで開発する高解像度風速場シミュレーションコードは、筐体内部の空気冷却構造設計に活用することができ、次々世代計算機科学への橋わたしにもなる。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名

東北大学、大阪大学、九州大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野、
大規模データ処理系応用分野
大規模情報システム関連研究分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

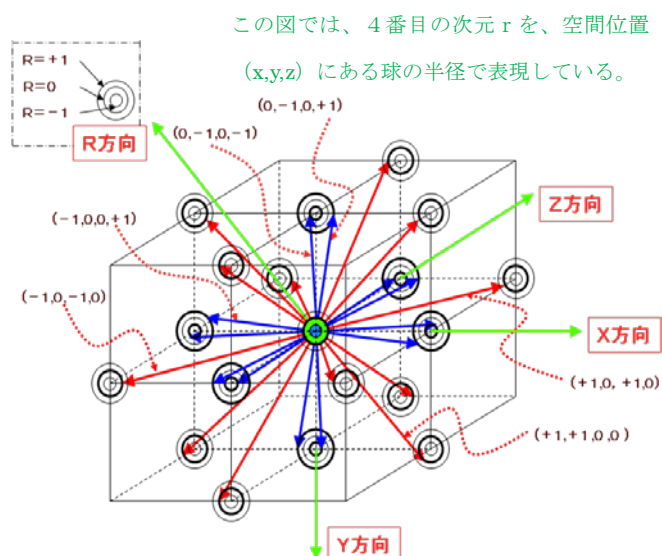
計算機室を実験計測の現場にするとともに、計算機センターの異常時にも過渡変化シミュレーションに基づく適切な操作が可能のように、本計算をクラウドコンピューティングで実現することを目指しており、SX-9の広域連携情報基盤によるシミュレーションにも挑戦している。

3. 研究成果の詳細

(1) シミュレーションコードの高度化

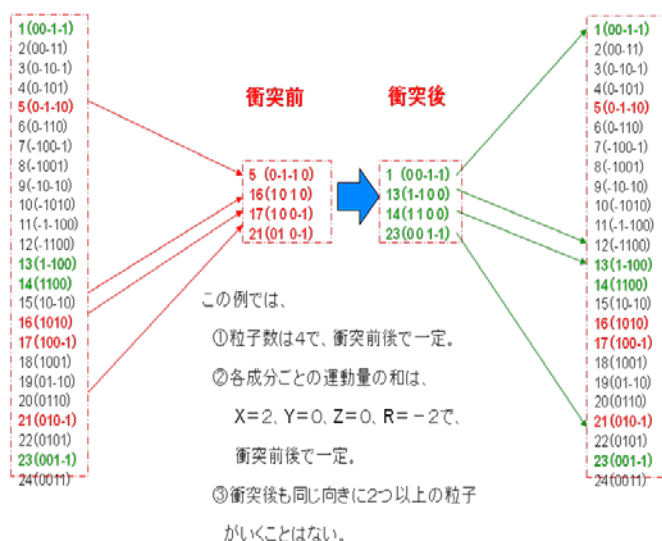
⇒新モデルによる過渡的物理現象再現性の確認

格子ガス法は、空間中に仮想的な格子を張り、格子上で多数の仮想粒子が並進と衝突を繰り返しながら移動していく様子を平均化して流体運動を模擬する手法である。格子の目と同じ大きさのサブマクロのスケールでは、仮想粒子の移動が格子の張られた方向に限定されるなど、このモデルは、現実世界を忠実に模擬できていないことは明らかである。しかし、適切な格子形状と適切な粒子速度をモデルとして選択すれば、多数の仮想粒子の動きを平均化して得られるマクロのスケールにおいて、ナビエ・ストークス方程式など流体に関する現象論的な基礎方程式を近似的に満足することが証明されている（証明例：チャップマン・エンスコグ展開）。すなわち、格子ガス法は、近似的には、しっかりした理論的根拠をもつシミュレーション手法である。今回採用したモデルは、このうち、“面心超立方体(FCHC)モデル”と呼ばれるものである。4次元空間中に格子点間隔=1で張られた超立方体格子を考え、仮想粒子は、長さが $\sqrt{2}$ だけ離れた格子点間のみを自由に移動できる。すなわち、ある時刻に (x, y, z, r) の位置にいた仮想粒子は、次の時間ステップでは、 $(x \pm 1, y \pm 1, z, r)$ 、 $(x \pm 1, y, z \pm 1, r)$ 、 $(x, y \pm 1, z \pm 1, r)$ 、 $(x, y, z \pm 1, r \pm 1)$ の24個の格子点のいずれかに移動する。(cf. 下図)



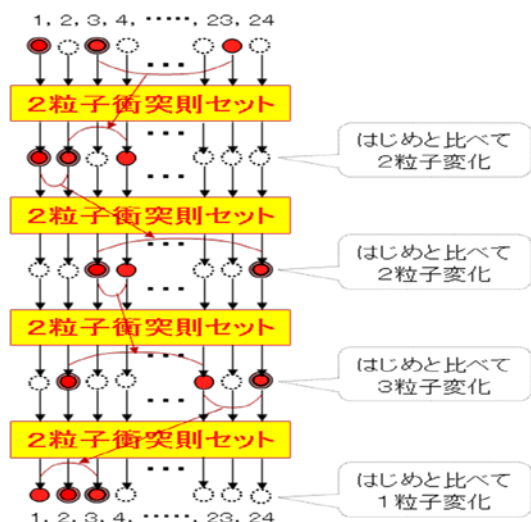
ただし、各格子点で複数の仮想粒子が出会った際には、衝突前後で、粒子数と各成分の運動量の和が保存される衝突しか許されない。

(cf. 下図の例)



仮想粒子が多様なパターンで衝突するほど、同じ距離だけ離れた位置にある仮想粒子の移動向きの確率分布間の相関が小さくなる。すなわち、ある場所にある流体塊がある向きに移動したからと言って、その隣にある流体塊もその向きに移動する確率が必ずしも高くはならず、これは、粘性が小さい流体挙動を模擬できることを意味している。

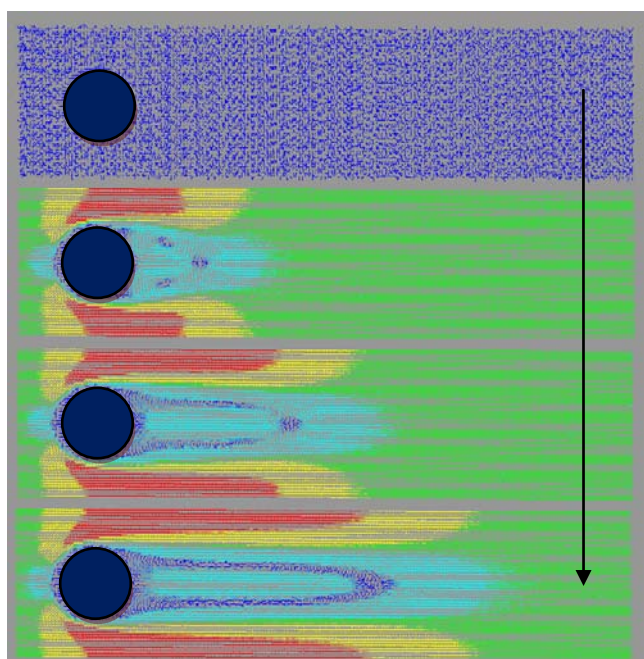
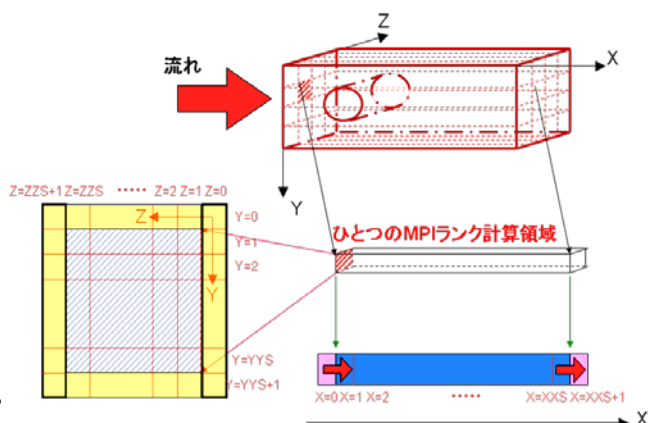
2体衝突によって、2つの仮想粒子の向きが変化するパターンは、282通りある。通常、1回の衝突でこのうちたかだか1通りの衝突しか生じさせない衝突規則が採用されるが、今回は、下図のように2粒子衝突を多段に適用し、約90通りの衝突規則の網をくぐらせて粘性を下げるよう試みた。

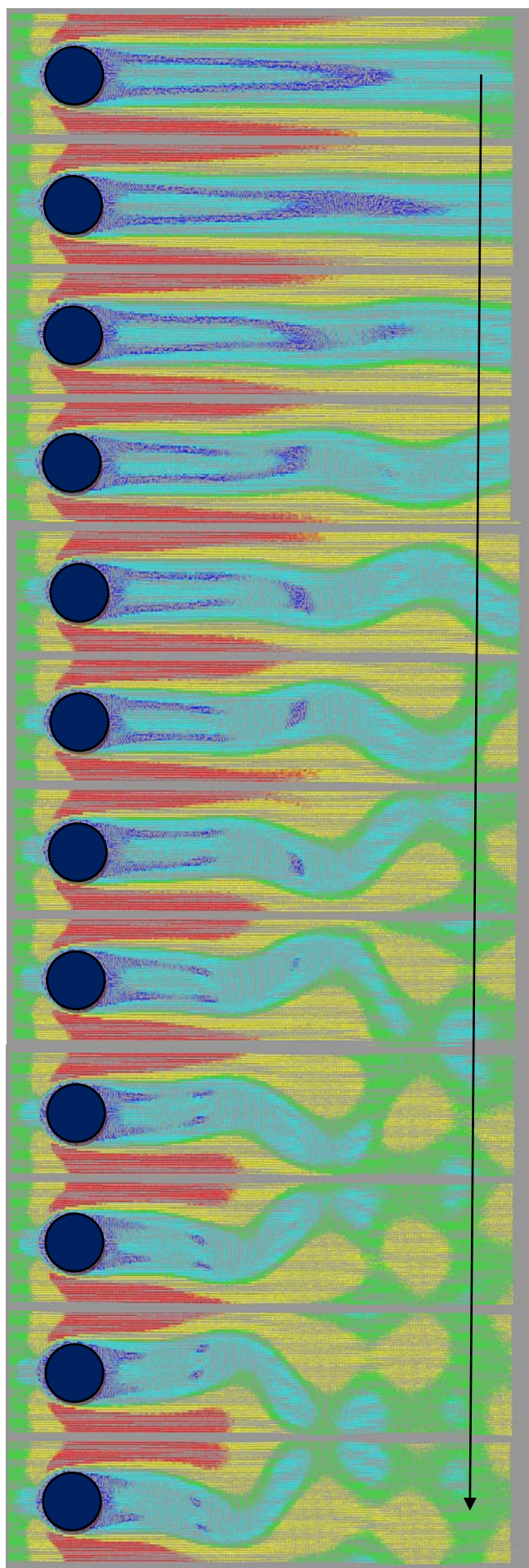


東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータ SX-9 の2ノード (32cpu) を用い、今回改良した3次元格子ガス法新モデルが流体の過渡変化シミュレーションを実行できることを定性的に確認した。

以下の一連の図は、 $3072 \times 768 \times 768$ =約18億個の3次元微細格子点を設定し、 $16 \times 16 \times 16$ 個ごとに3次元微細格子点を合計して得た $192 \times 48 \times 48$ 個の流体運動量ベクトルの時系列である。

並列計算は、Y方向8個、Z方向4個の合計32領域分割を行い、MPIで32スレッドのプログラムで並列計算を実施した。並列計算能力は、64cpuまでほとんど完全な直線性を示した。





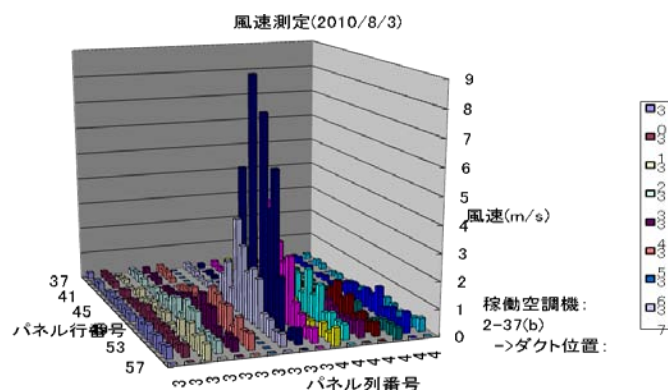
静止した流体中に z 方向の中心軸をもつ無限長円柱を置き、時刻ゼロで突然、左端から $+x$ 向きに流体を注入していった場合の、円柱後流に生じる渦は、はじめ双子渦ができて、その尾が伸び、次にその尾の先が揺れだしてちぎれ、最後に短くなった部分が残って、その尾の先が、定常的に揺れ続ける。この結果は、先行研究(種子田氏)の「急発進円柱後流の渦」に関する実験観察の結果とほぼ一致している。

(2) 計算機空気冷却空調システムの試験運転

平成22年6月～9月、理化学研究所が神戸に建設した計算機棟の計算機冷却用空調システムを実際に作動させ、不均一分布での床吹き出しやその動的な切り替えなどの過渡変化条件下で、計算機室内における冷却空気の流動状況を概略測定した。この時点では、計算機ラックの搬入はない。計算機棟3階の計算機ラック設置スペースと計算機棟2階に設置された空調機を下図に示す。



1例として、2010年8月3日に測定した計算機室床面からの冷却空気吹き出し風速分布の測定結果を以下に示す。このとき運転された空調機は中央部の2台のみである。



(3) 格子ガス法シミュレーションの本格的なケーススタディ 平成22年9月～23年1月 ⇒高解像度・複雑形状計算有利性の確認：

格子ガス法では、各格子点において仮想粒子が持ちうる速度の種類が限定(3次元シミュレーションの場合でも、20～30個程度)されている。このため、各格子点の状態記述に当たっては、それぞれの速度ごとに、その速度をもつ仮想粒子が存在する(1)か、否(0)か?の2値情報を2値整数で表現すればよい。また、各格子点における仮想粒子の衝突による移動向きの変更についても、2値整数に対するビット演算 (and, or, not, shift 等) を適用でき、時間発展計算に実数を使用しなくて済む。従って、実数演算の場合に生じる打ち切り誤差の蓄積がなく、数値計算的にも安定である。また、メモリ容量が節約できるので同一メモリサイズでは、より多くの格子点状態をまとめて並列計算できる。このため、高解像度計算に有利である。

特に、当グループで自主開発してきた格子ガス法シミュレーションコードでは、個々の格子点に関する一連のデータ処理を1ビット幅で実行できる。このため、SX-9のようなベクトル処理プロセッサでは、1回のベクトル命令発行で、64ビット／ワード×256ワード／命令=16384ビット／命令のデータが処理されることから、16384個の格子点に係る計算を1CPUで並列的に実行できることになる。このような多数の格子点に関する計算を同一のプロセッサさらには同一のノードで実行できることは、プロセッサ間通信またはノード間通信の相対的頻度を減らせる点でも有利である。

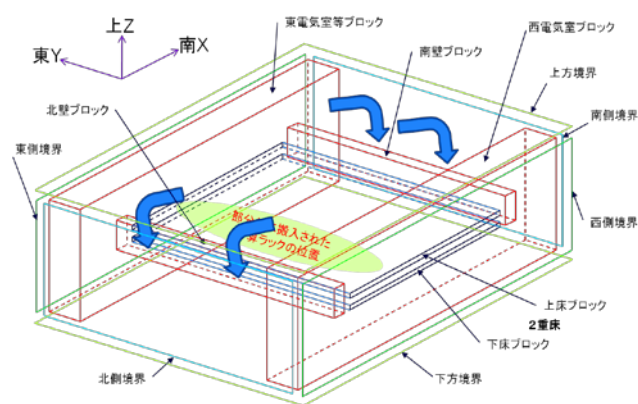
また、格子ガス法では、各格子点が固体であるか液体であるかを指定するだけで、任意の形状の境界条件を容易に与えることができる。これは、局所的な形状の考慮が重要な風速場の解析には大変有利である。

計算機室の形状は、非常に複雑である。冷却空気は、次図に示すように、計算機棟2階にある空調機から、計算機棟3階の計算機室床下に

に注入される。

計算機室下の2重床の間には、計算ラックを冷やすための冷水供給配管、信号通信ケーブル、電源ライン、ケーブルトレイなどが存在する。

第一近似の計算においては、計算機棟2階空調機室の構造と、計算機室下の2重床内部の構造を無視し、下図のような体系を仮定した。



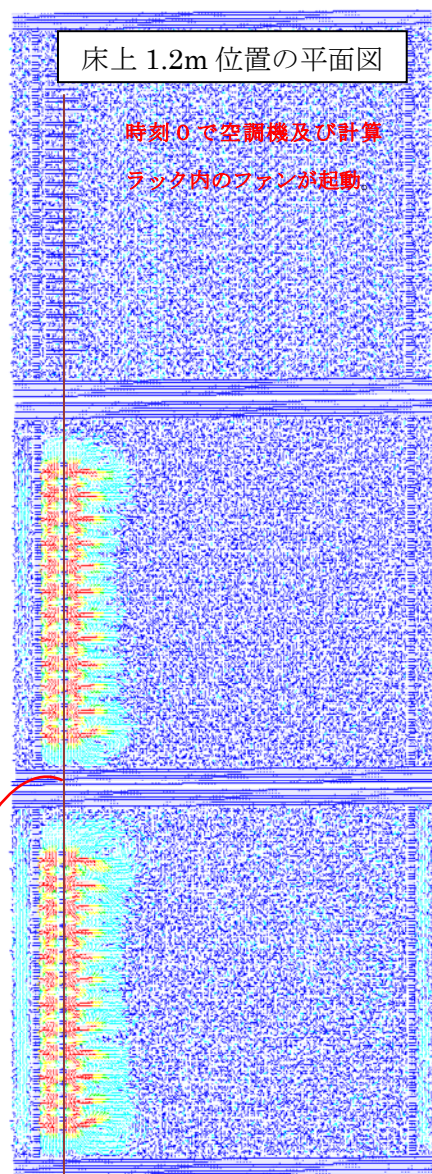
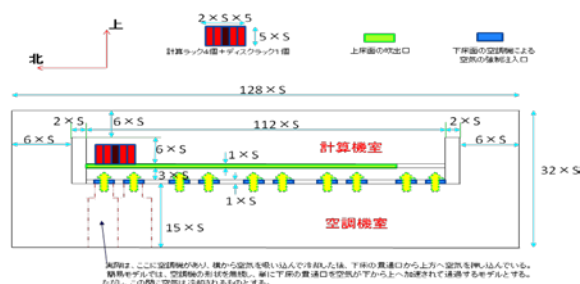
計算機を少しずつ搬入しながら、順次、据付調整を行い計算機の規模を拡大しているが、その途中状況を模擬した状況として、計算機が下図のように北側から5ラックの幅で搬入された状態を想定する。また、このとき動いている計算機棟2階の空調機を6台と仮定し、その計算機棟3階2重床の下床における冷却空気注入口の位置を下図の赤印の位置とした。



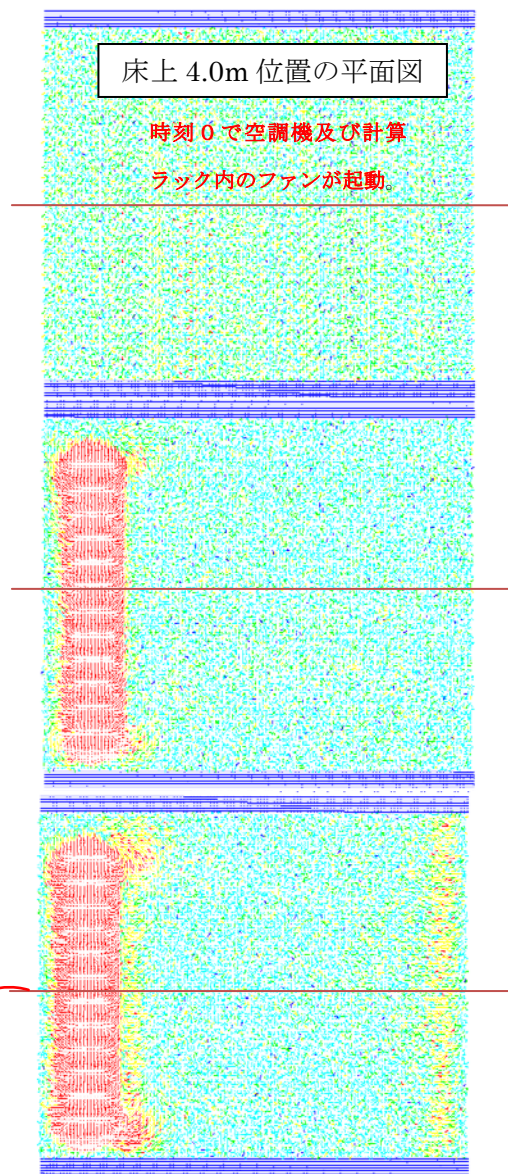
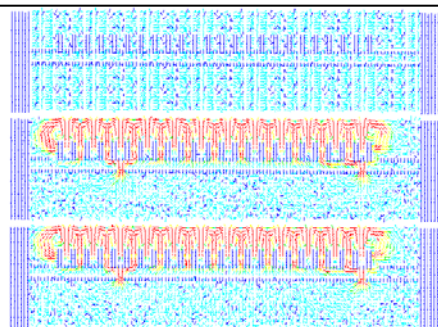
さらに、計算ラック内部では、計算ラック冷却ファンの作動により、コールドアイル側からホットアイル側に水平に空気が加速される。

下図では、 $1024 \times 1024 \times 256 = 2.6$ 億個の3次元微細格子点を設定し、1024タイムステップごとに $8 \times 8 \times 8$ 個の3次元微細格子点ずつ合計して $128 \times 128 \times 32$ 個の運動量ベクトルを算出した。

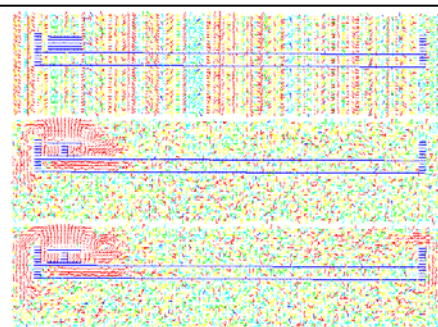
SX-9を2ノード用いて、約5分/1024ステップ。



ラック位置における東西断面図



計算機室東西中央位置における南北断面



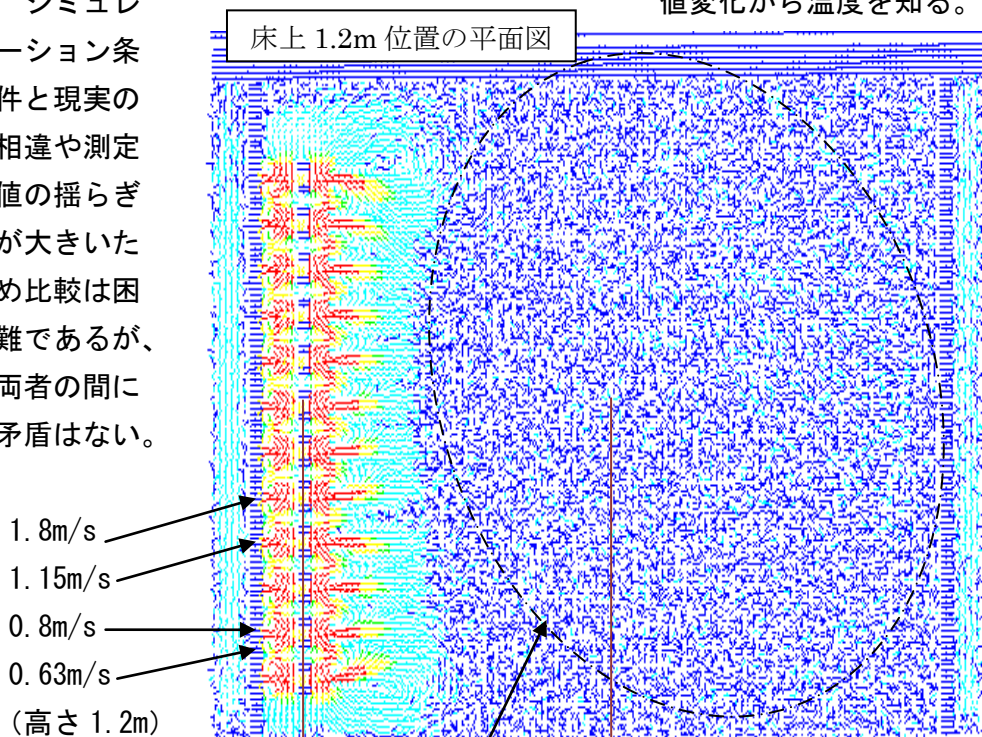
(4) 他のシミュレーション手法や実測データとの比較評価

平成22年9月～23月1月

① 実測データとの比較

2010年12月15日の実測結果の一部を以下に示す。(図は前頁の拡大再掲)

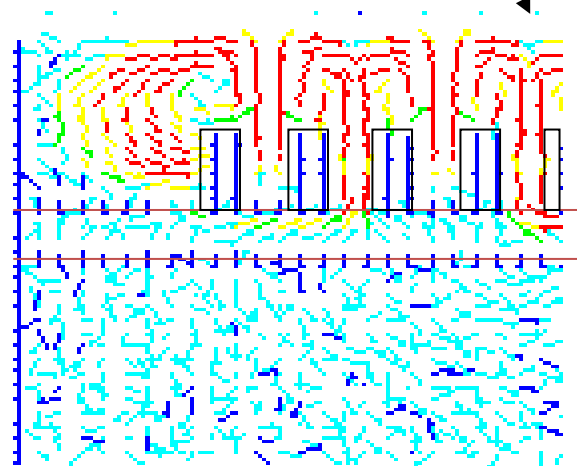
シミュレーション条件と現実の相違や測定値の揺らぎが大きいため比較は困難であるが、両者の間に矛盾はない。



計算機ラック群から数m以上離れると右写真の風向計でも、風速を検知できなくなった。(0.2m/s 未満)

② 全計算ラック設置時のシミュレーション結果との比較

過去に業者が実施した全計算ラック設置時の、ある東西断面の一部の拡大図を右下図に示す。(左下図は前頁の計算結果の拡大再掲)



※風速測定に用いた測定器を右の写真に示す。

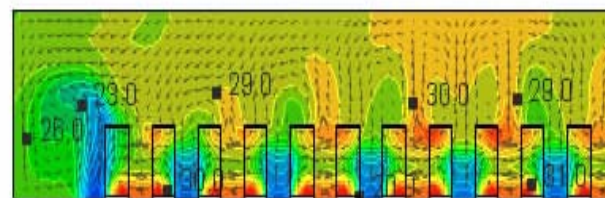
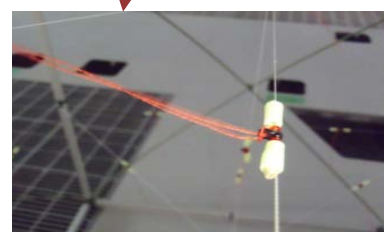
センサー先端に通電加熱された抵抗体があり、その風による冷却と抵抗値変化から温度を知る。



※メンバーが自作した3次元風向計を下の写真に示す。



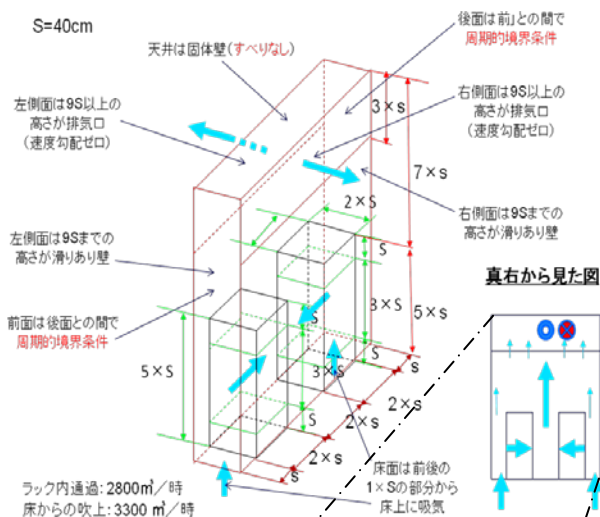
赤糸が吹き流される向きから風向を知る。



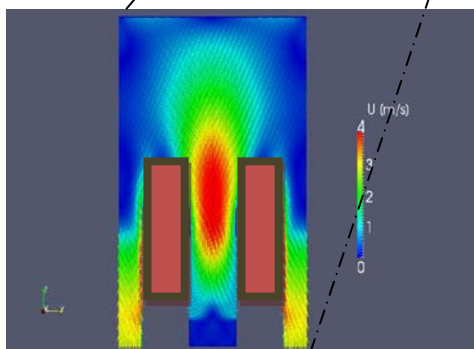
両者は、計算ラックや空調機の数異なるので直接比較はできないが、ホットアイルやコールドアイルの内部や上空における流線は、同じパターンをしている。

③Open-FORM による計算機室中央部における空気流動計算との比較

Open-FORM による大規模体系計算は、九州大学のスパコンを今後利用して行う予定であるが、森村設計の協力を得て、HP ワークステーション (Xeon12コア) により計算機室中央部の小規模な体系を下図のように模擬して、標準 $k-\varepsilon$ モデルによる流体計算を実施した。



右に計算結果を示す。前頁左下図と比べると、



計算条件が異なるので直接比較はできないがホットアイル上部の流動パターンが似ている。

(5) クラウドコンピューティングによる大規模計算へのトライ :

格子ガス法流体シミュレーションプログラムのクラウドコンピューティングによる大規模計算にトライする手始めとして、東北大学、大阪大学、NEC の協力により、広域連携計算基盤(東北大学 SX-9、2 ノードと大阪大学 SX-9、2 ノードを JGN2plus で接続)で、2次元格子ガス法流体シミュレーションアプリのジョブを実行して動作を確認した。

4. これまでの進捗状況と今後の展望

(1) シミュレーションコードの高度化

基本部分は完了。今後は粘性制御モデル。

(2) 計算機空気冷却空調システムの試験運転

基本パターンは完了。今後は実運用準備。

(3) 格子ガス法シミュレーションの本格的なケーススタディ

基本パターンは完了。今後は、より現実に近い計算条件下でのケーススタディ。

(4) 他のシミュレーション手法や実測データとの比較評価

小規模比較評価を完了。今後は、Open-FORM について、九州大学のスパコンを利用した大規模な体系での比較評価に着手。

(5) クラウドコンピューティングによる大規模計算へのトライ

2次元格子ガス法コードを用いた通信実験を実施済み。今後、実験内容を高度化。

(6) 結果の整理及び考察のとりまとめ

定性的な比較に基づくものであるが、格子ガス法超並列計算手法により大規模計算機空気冷却風速場の高解像度な過渡変化シミュレーションを実現できる可能性は高く、粘性を下げる衝突規則とその制御法の考案が鍵となる。今後、年度末までにさらに具体化を進める。

5. 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

①東北大学電気通信研究所公開シンポジウム

ポスターセッション, H22-12-1, 「不揮発性ビット演算による次世代シミュレーションの創造開拓」

②電気通信研究所共同プロジェクト研究会「不揮発性ビット演算大規模コンピューティングの創造開拓」

H22-12-3, 「SX-9 を利用した格子ガス法による大規模計算機空気冷却風速場の試計算」

- (5) その他(特許, プレス発表, 著書等) なし