

複数GPUを用いた格子ボルツマン法による大規模流体・構造連成解析 — 卓球競技におけるピンポン玉の軌跡の解析 —



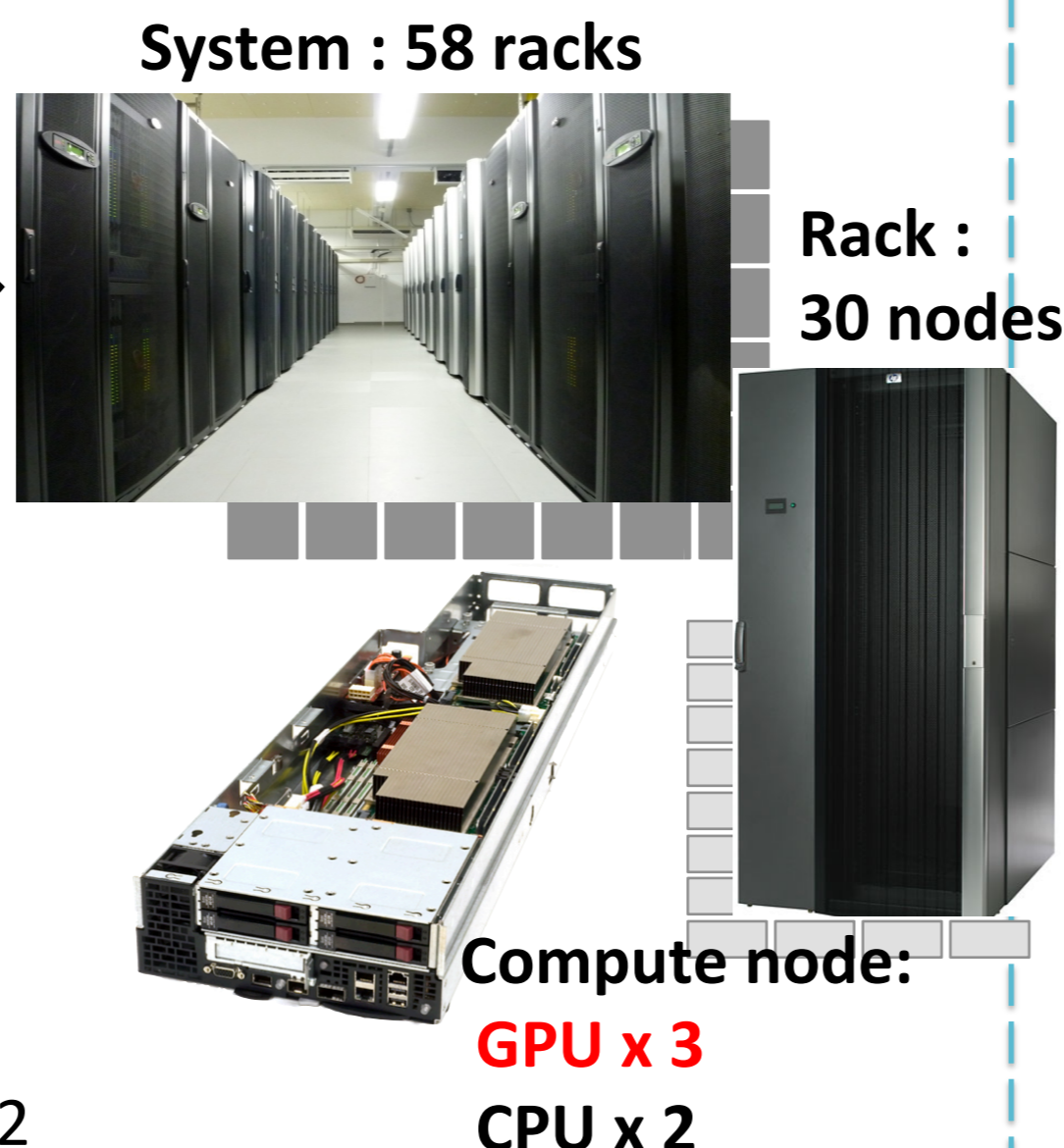
研究背景と研究目的

自動車の車体や飛行機の翼などの最適設計を行うには、物体周りの速度変動やそれに伴う圧力変動を予測・制御することが重要である。乱流と物体の連成問題を高精度に解析するためには、乱流モデルを用いた大規模計算が必須となる。本研究では、身近な物理現象であるピンポン玉の軌跡の解析をすることで、高精度な流体・構造物連成解析手法を構築し、物体形状の最適設計技術に貢献することを目指す。

TSUBAME 2.0 Overview

低消費電力・高性能な演算性能を持つ、GPUにより構成されている。

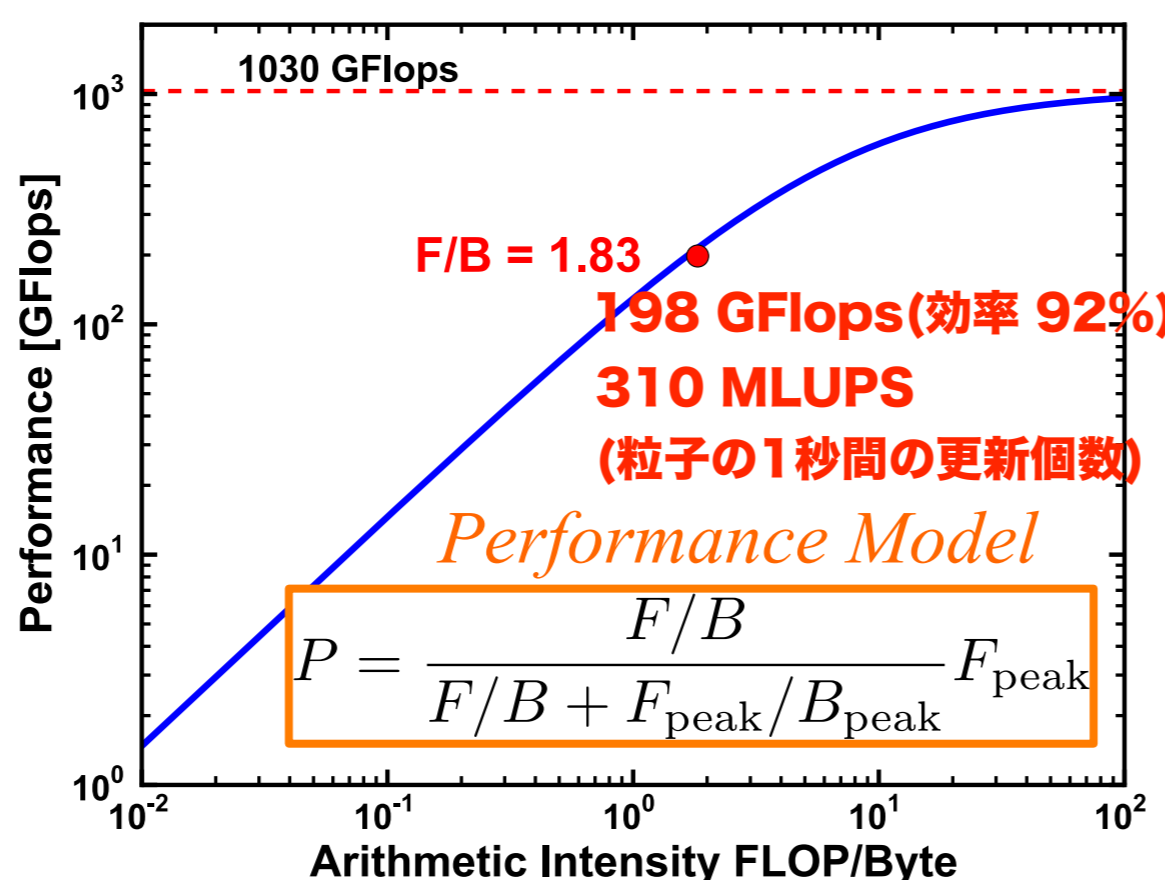
- 理論ピーク性能: **2.4 Pflops**
- GPU数 (Fermi core): **4224台**
- ネットワーク: Fat-tree type 200 Tbps (Full bi-section bandwidth)
- 計算ノード数: 1408 nodes
- ノードパフォーマンス: 1.7 Tflops
- GPU/node: **3 NVIDIA Tesla M2050**
- CPU/node: 2 Intel Xeon X5670
- 2 Infiniband QDR/node: 4.0 GB/sec x 2



TSUBAME 2.0 での実効性能

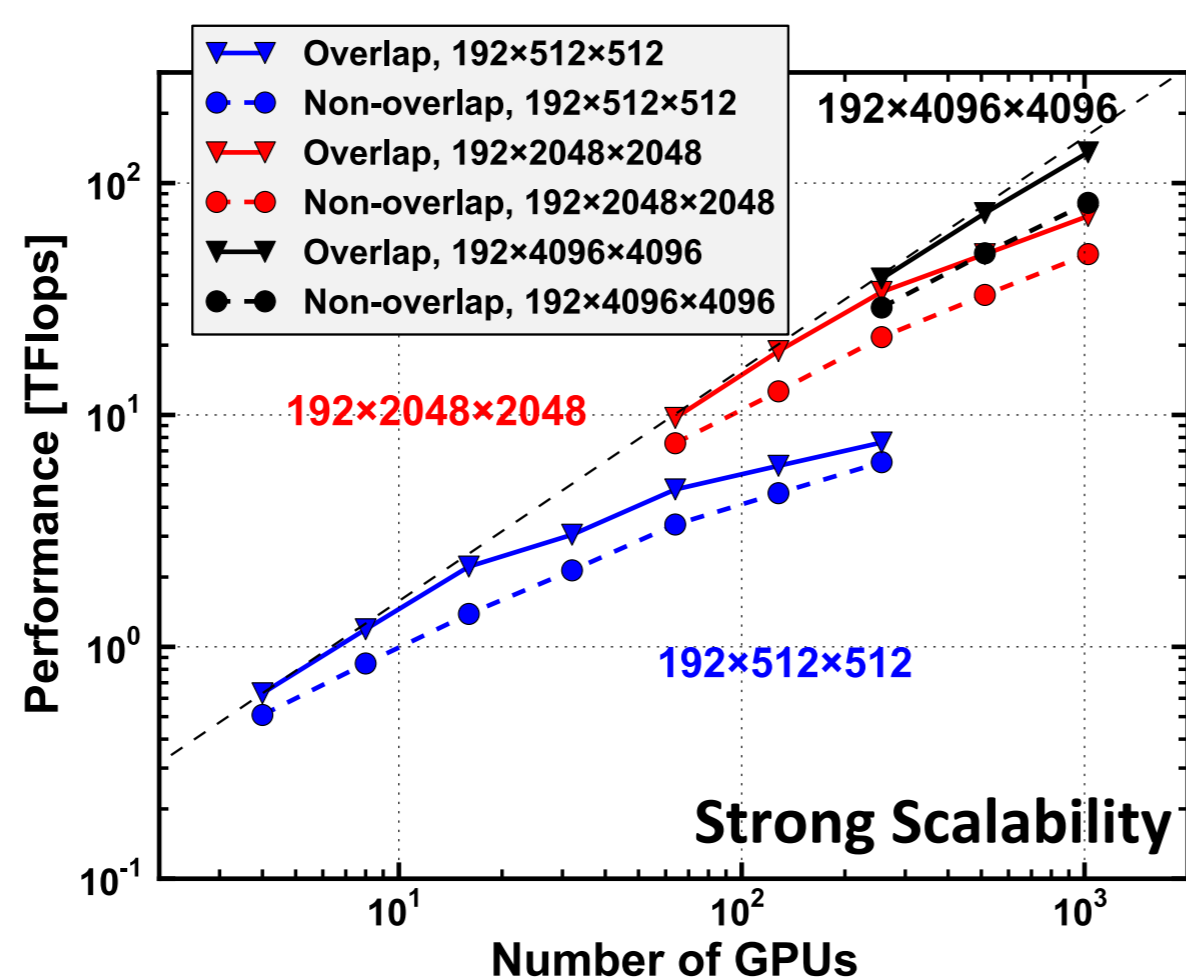
Improved Roofline Model

F : Number of FP operation for application (=476)
 B : Byte number of memory access (= 260 Byte)
 F_{peak} : Peak performance (M2050:1030 GFlops)
 B_{peak} : Peak memory bandwidth (M2050:148 Gbyte/sec)
 実効性能: 198 Gflops (効率 92%)



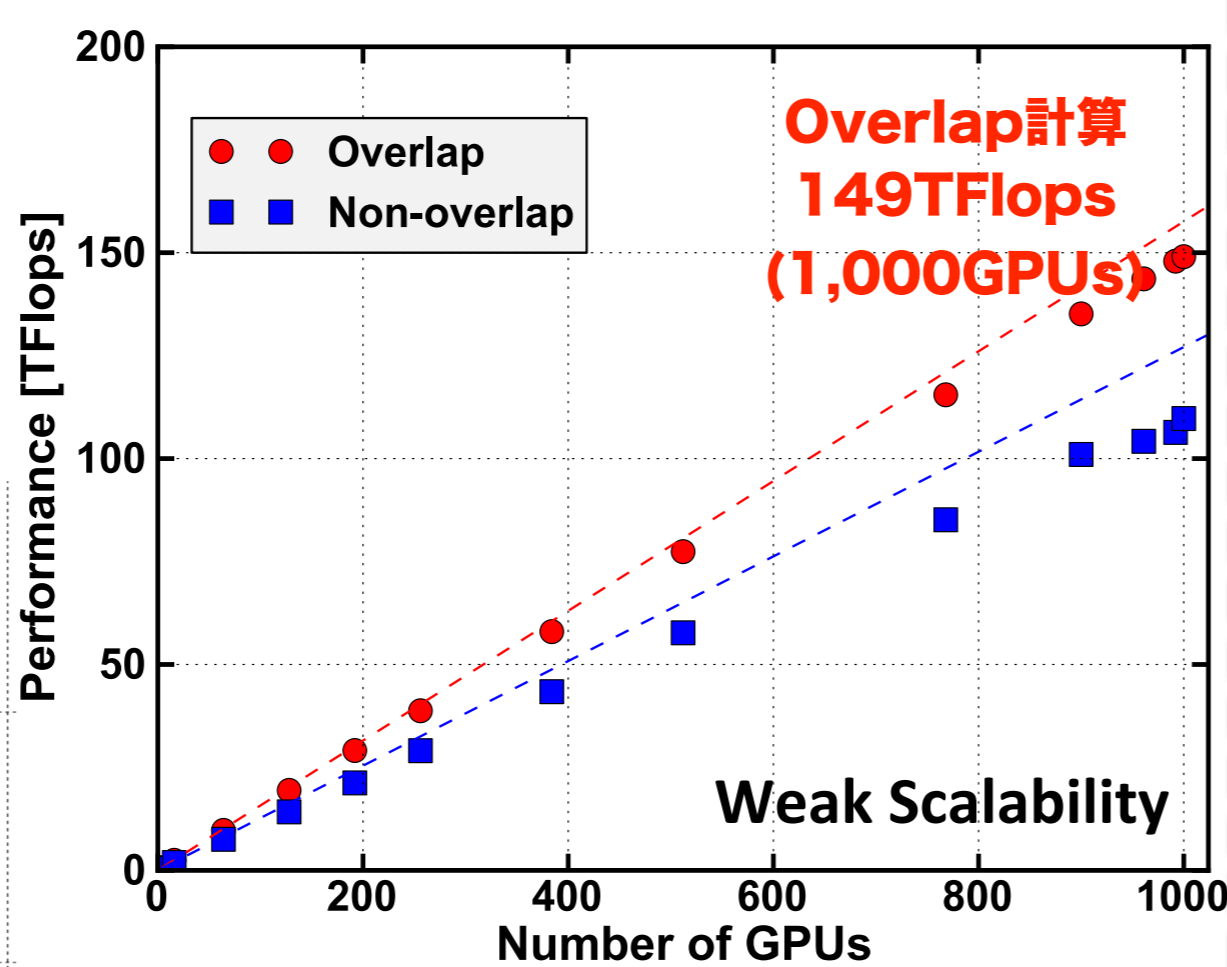
Strong Scalability

GPUのカーネル計算とMPIによるノード間通信を同時に行うオーバーラップ手法を導入することで30%程度性能が向上し、計算時間の効率的な短縮が可能となる。

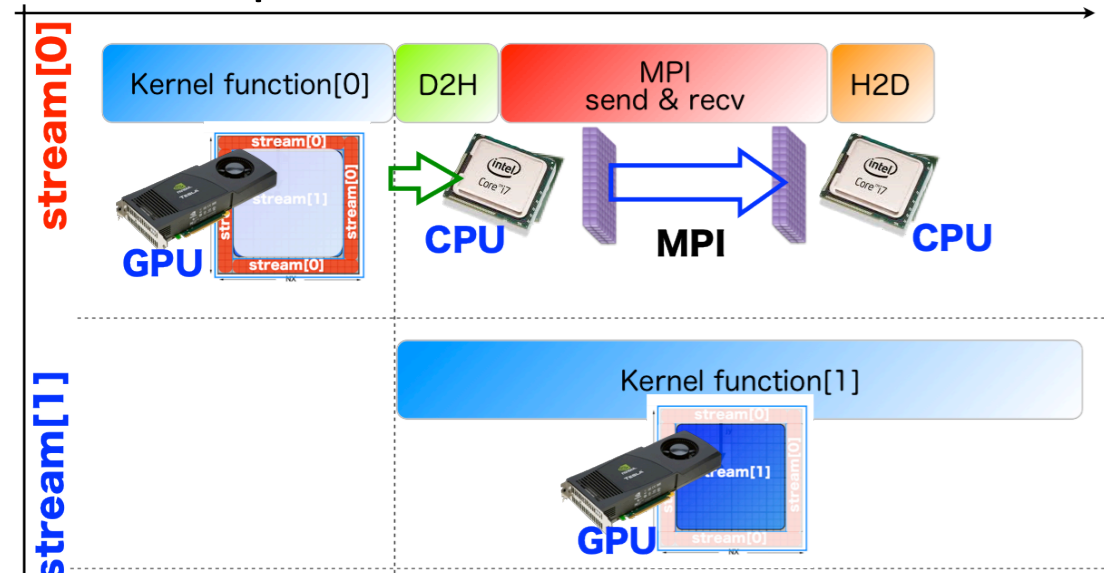


Weak Scalability

オーバーラップ手法を導入した計算では1000GPUで149 TFlopsが得られ、ハードウェアのピーク性能の15%を達成した。



Overlap計算順序



格子ボルツマン法によるラージエディ・シミュレーション

格子ボルツマン法は有限個の方向を持つ速度分布関数の時間発展方程式を解くことで、流体现象を再現する。メモリアクセスが局所的であり、大規模計算に非常に適している。本研究では、ラージエディ・シミュレーションの乱流モデルであるコヒーレント構造スマゴリンスキーモデルを適用することで、高精度な乱流計算を可能とした。

格子ボルツマン方程式

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} (f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t))$$

$$\text{局所平衡分布関数: } f_i^{eq} = w_i \rho \left(1 + \frac{3c_i \cdot u}{c^2} + \frac{9(c_i \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right)$$

$$\text{緩和時間: } \tau = \frac{3\nu_*}{c^2 \Delta t} + \frac{1}{2}$$

$$\text{粘性係数: } \nu_* = \nu_0 + \nu_{SGS}$$

コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル

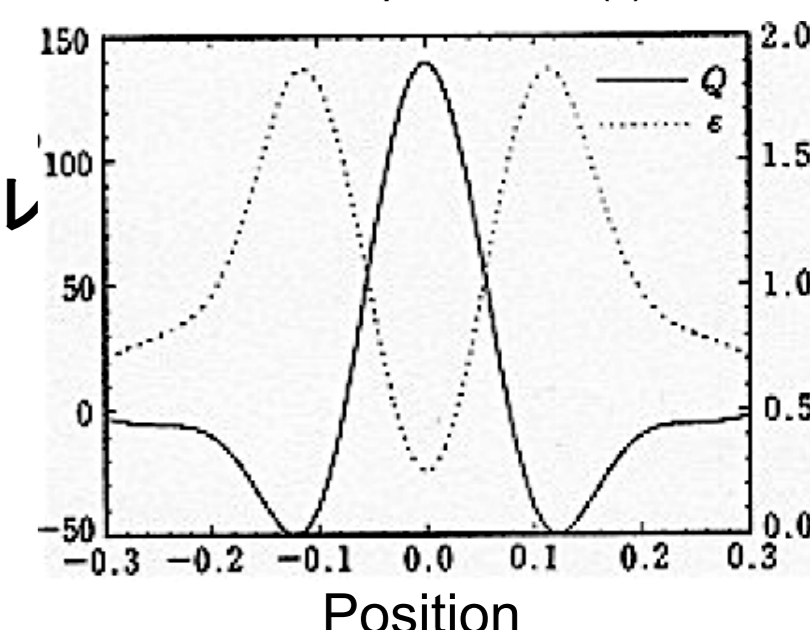
$$\text{渦粘性係数: } \nu_{SGS} = C \Delta^2 |S|$$

$$C = C_1 |F_{CS}|^{3/2}$$

$$\text{コヒーレント構造関数: } F_{CS} = \frac{Q}{E}$$

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad E = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2$$

Second invariant of the velocity gradient(Q) and dissipation rate(ε)



球体周りの乱流計算

格子点数: 1,152 x 512 x 512

GPU数: 24 GPUs

レイノルズ数: 20,000



複雑物体周りの乱流計算

格子点数: 3,072 x 1,536 x 768 (4.2mm 格子解像度)

GPU数: 288 GPUs

車体速度: 約 60 km/h



今後の研究計画

構築した連成解析手法を用いて、TSUBAMEを利用した大規模計算を実施し卓球の競技におけるピンポン玉の軌跡の変化を再現する。さらに、流体と物体の相互作用により引き起こされる複雑な乱流現象を解明することで、物体形状の最適化技術の確立に貢献する