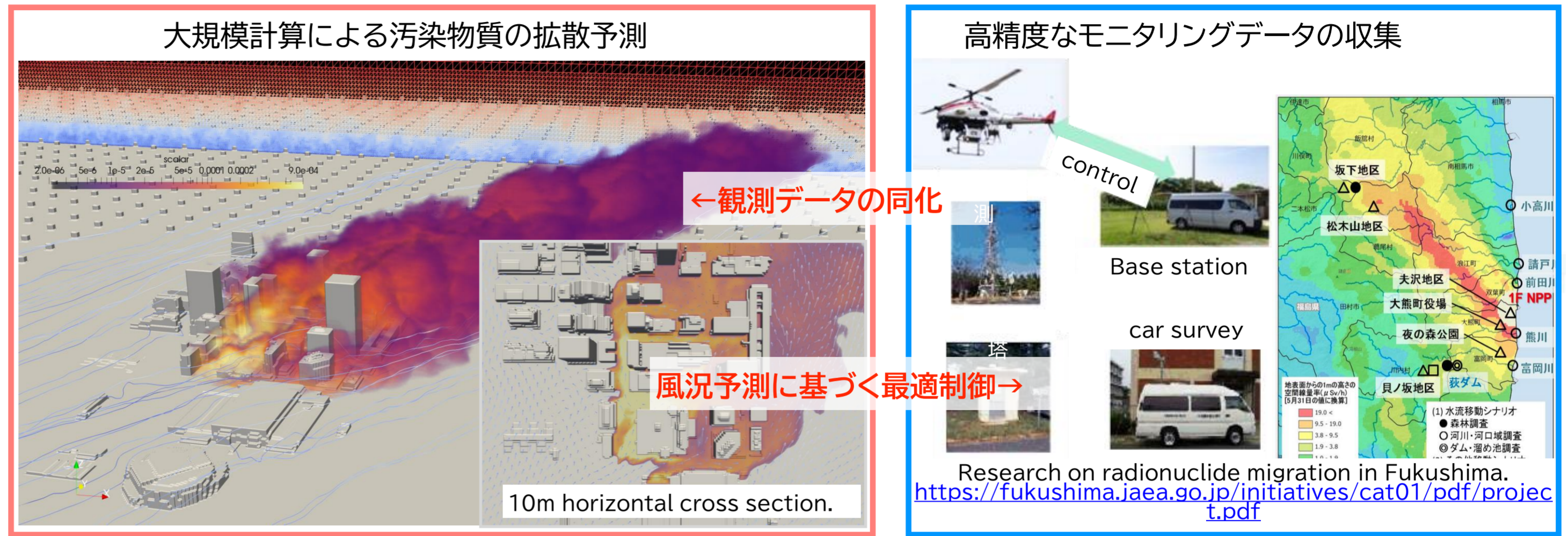


アンサンブル計算に基づく汚染物質拡散予測の開発



1. 研究背景と研究目的

放射性物質の拡散予測シミュレーションは社会的関心が非常に高く、迅速性および正確性が求められている。日本における予測システムとして、緊急時環境線量情報予測システム (SPEEDI) が用いられており、観測されたデータを基に放射性物質の拡散挙動を計算する。しかしながら、人が生活する路地や建物等を含んだ高解像度の汚染物質拡散予測を実施するためには、計算機性能を最大限に引き出すことが可能な解析手法および高度な物理モデルの開発が必須となる。そのような課題に対して、昨年度のJHPCN課題「格子ボルツマン法による都市街区を対象とした物質拡散シミュレーション」では、GPUスパコンに適した格子ボルツマン法 (LBM) による解析手法 (CityLBM) を用いて、都市部の熱対流および植生等を考慮した風況解析手法の確立、および基礎的なデータ同化手法を開発することで、任意の境界条件を与えた風況解析が可能となった。CityLBMは基礎的な風況解析手法であるため、信頼性の高い拡散予測システムとして運用するためにはメソスケールモデルや観測結果と連携が必須となる。そのような連携解析に対して、アンサンブル計算に基づく解析手法は、異なる精度 (解像度) を持つデータを融合するのに非常に有効な手法の一つである。今年度は、実際の観測データに対応したアンサンブル計算に基づくフレームワークを開発することで、汚染物質の拡散予測精度の向上および適用範囲の拡大を目指す。



風況解析と観測の連携による汚染物質拡散予測

2. 研究計画

昨年度は、物理モデルおよび境界条件の高度化により都市部の風況解析の精度向上をおこなった。また、TSUBAME3.0のGPU間の通信の高速化として、AMR法に対応した省通信マルチタイムステップ法を提案することで、naiveな実装と比較して弱スケールングにて1.6倍の高速化が、強スケールングにおいて実時間解析が実現できることが示された。今年度は、その手法を更に発展させることで、信頼性の高い拡散予測システムのための基盤技術を開発する。以下に具体的な項目を示す。

- ・アンサンブル計算の実装
- ・Intel Omni-Pathを活用したアンサンブル統計処理における集団通信の高速化
- ・観測との連携におけるノード内ローカルSSDを活用した高速I/Oフレームワークの実現
- ・CityLBMでのアンサンブルデータ同化による汚染物質の拡散予測

4.1 D3Q27 Cumulant格子ボルツマン法

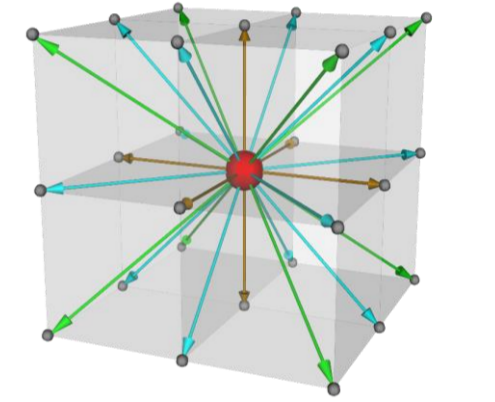
弱圧縮流れをGPUで効率的に計算できる格子ボルツマン法にAMR法を適用し、高速な都市気流解析を実装した。都市気流は超高レイノルズ数の乱流であるから、乱流を高精度かつ安定に計算できるD3Q27速度モデルおよびCumulant衝突項を採用した。

ボルツマン方程式

$$f_{ijk}(x + c_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = f_{ijk}(x, t) + \Omega_{ijk}$$

Cumulant衝突項

$$C_{\alpha\beta\gamma}^* = C_{\alpha\beta\gamma}^{eq} \omega_{\alpha\beta\gamma} + C_{\alpha\beta\gamma} (1 - \omega_{\alpha\beta\gamma})$$



D3Q27速度モデル

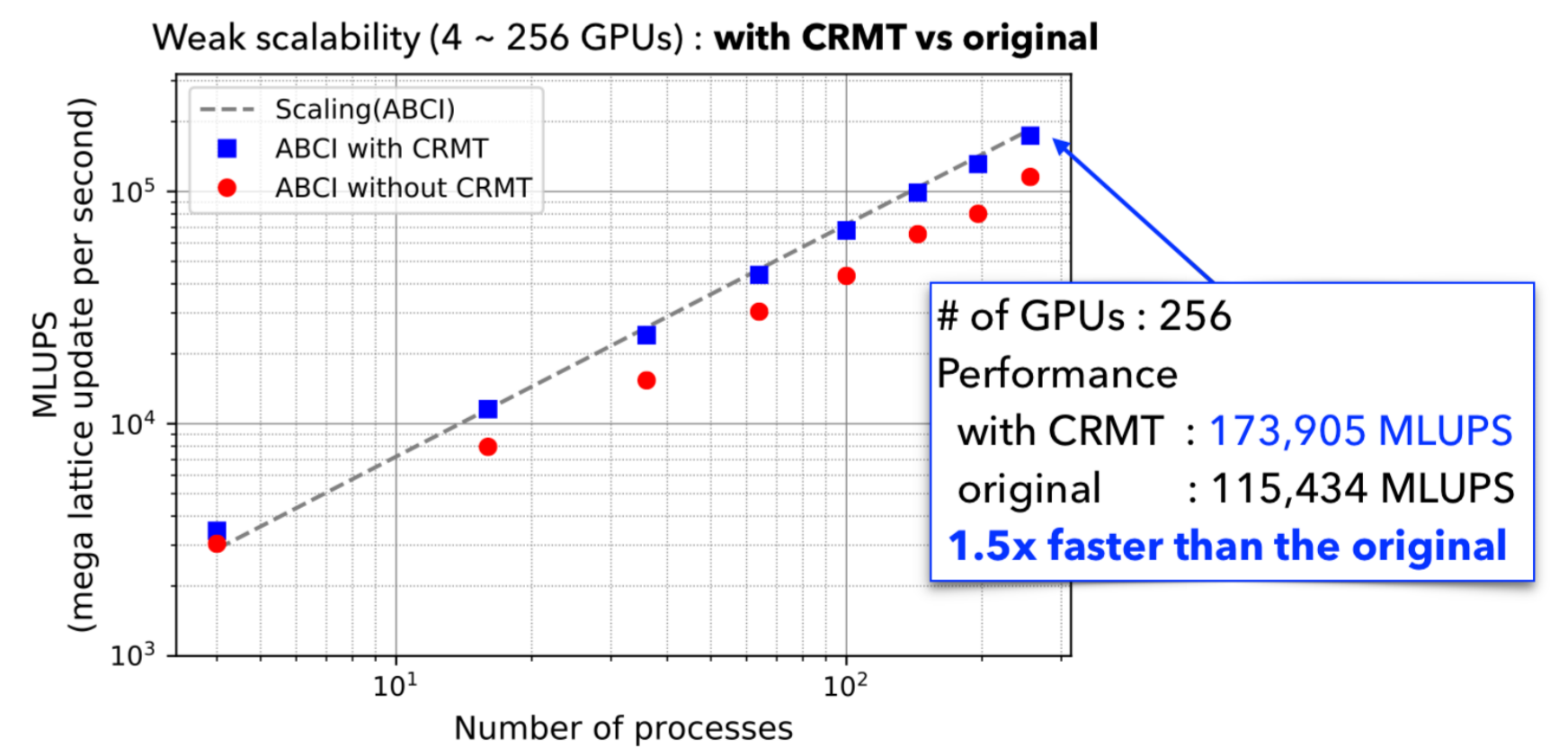
3. 共同研究に関する情報

- (1) 共同研究拠点: 東京工業大学
- (2) 共同研究分野: 超大規模数値計算系応用分野
- (3) 研究グループ:

代表者	小野寺直幸	(日本原子力研究開発機構)
副代表者	青木尊之	(東京工業大学)
課題参加者	長谷川雄太	(日本原子力研究開発機構)
	井戸村泰宏	(日本原子力研究開発機構)
	中山浩成	(日本原子力研究開発機構)
	真弓明恵	(日本原子力研究開発機構)
	下川辺隆史	(東京大学)

4.2 Temporal blocking法を用いた省通信アルゴリズム

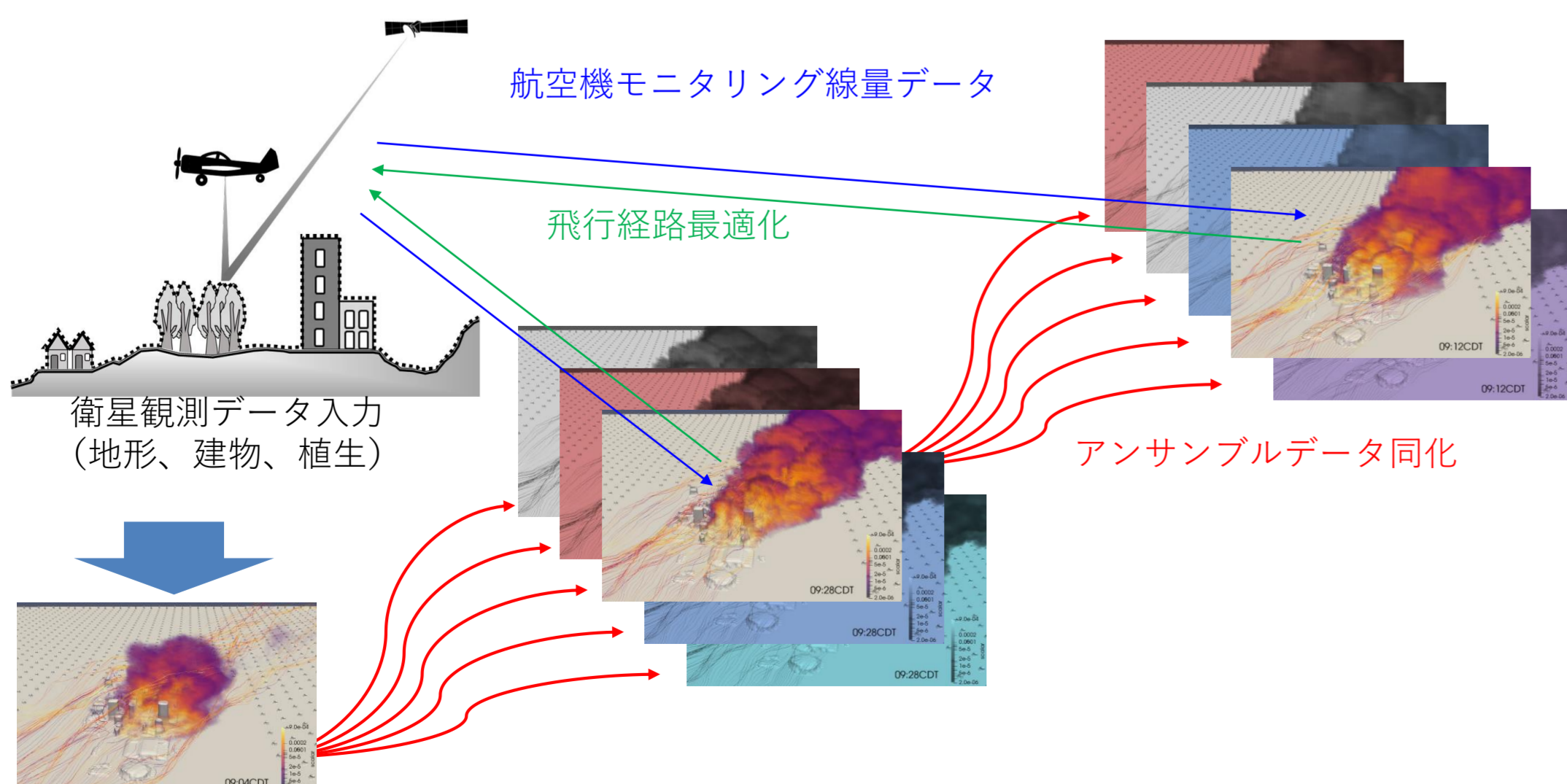
GPUを用いた解析では、その演算性能の高さから通信のオーバーヘッドが顕著となる。特にAMR法を適用した解析では、格子解像度間の境界面における余分な時間・空間補間が必要となり、そのオーバーヘッドはより深刻である。Temporal blocking (TB)法は、計算に必要なメモリバンド幅の比 (Byte/Flops) を削減可能な方法であり、そのアルゴリズムの採用により、対象のオーバーヘッドを別の計算に置き換えることが可能である。本研究では、Block AMR法での袖領域のLeafの通信を、GPUを用いた時間発展計算に置き換えることで、通信量および通信回数を削減した。本課題において利用しているTSUBAME3.0の他、最新のGPUであるNVIDIA Tesla V100を搭載したABCIにおいても、同様の省通信アルゴリズムを適用することにより計算が高速化されることを確認した。ABCIでは60 GPUの強スケールングにより実時間解析が可能であり、アンサンブルデータ同化のリアルタイム解析の実現の目処が立った。



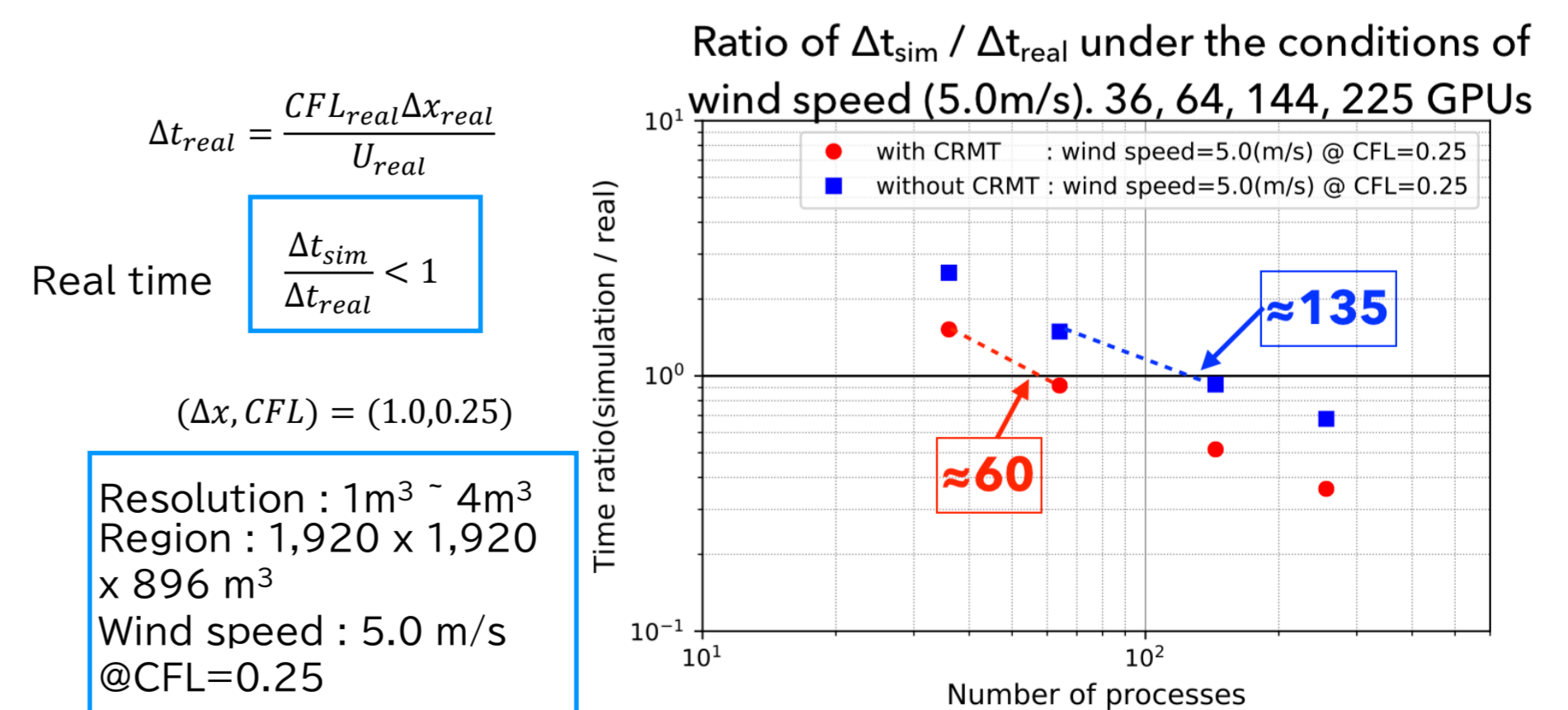
ABCIにおけるCityLBMの弱スケールング性能

5. 今後の実施計画

本研究の汚染物質拡散解析では風況、温度、汚染物質濃度の観測データに基づき、格子ボルツマン法の境界条件や外力を調整してデータ同化を行う。現在、基礎的なデータ同化手法として、観測値を計算領域外縁に混ぜ合わせるナッジングデータ同化を導入しているが、予測精度および信頼性向上のため、これをアンサンブル計算に基づく手法へと発展させる。アンサンブルデータ同化は、自身の統計量を利用することでデータ同化を行う手法であるため、4次元変分法に基づくデータ同化のように複雑な物理モデルを必要としない。アンサンブルデータ同化の手法としては、気象学の分野で十分な実績のある局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いる予定である。開発システムの検証にあたっては、汚染物質拡散解析の標準的ベンチマークとなっている既往研究の野外実験データを用いる、あるいは、より高解像度、広域なシミュレーションのデータを実験データの代替として実証研究を実施する。



アンサンブルデータ同化による観測との連携の強化



ABCIにおけるCityLBMの強スケールングによるリアルタイム解析の実現