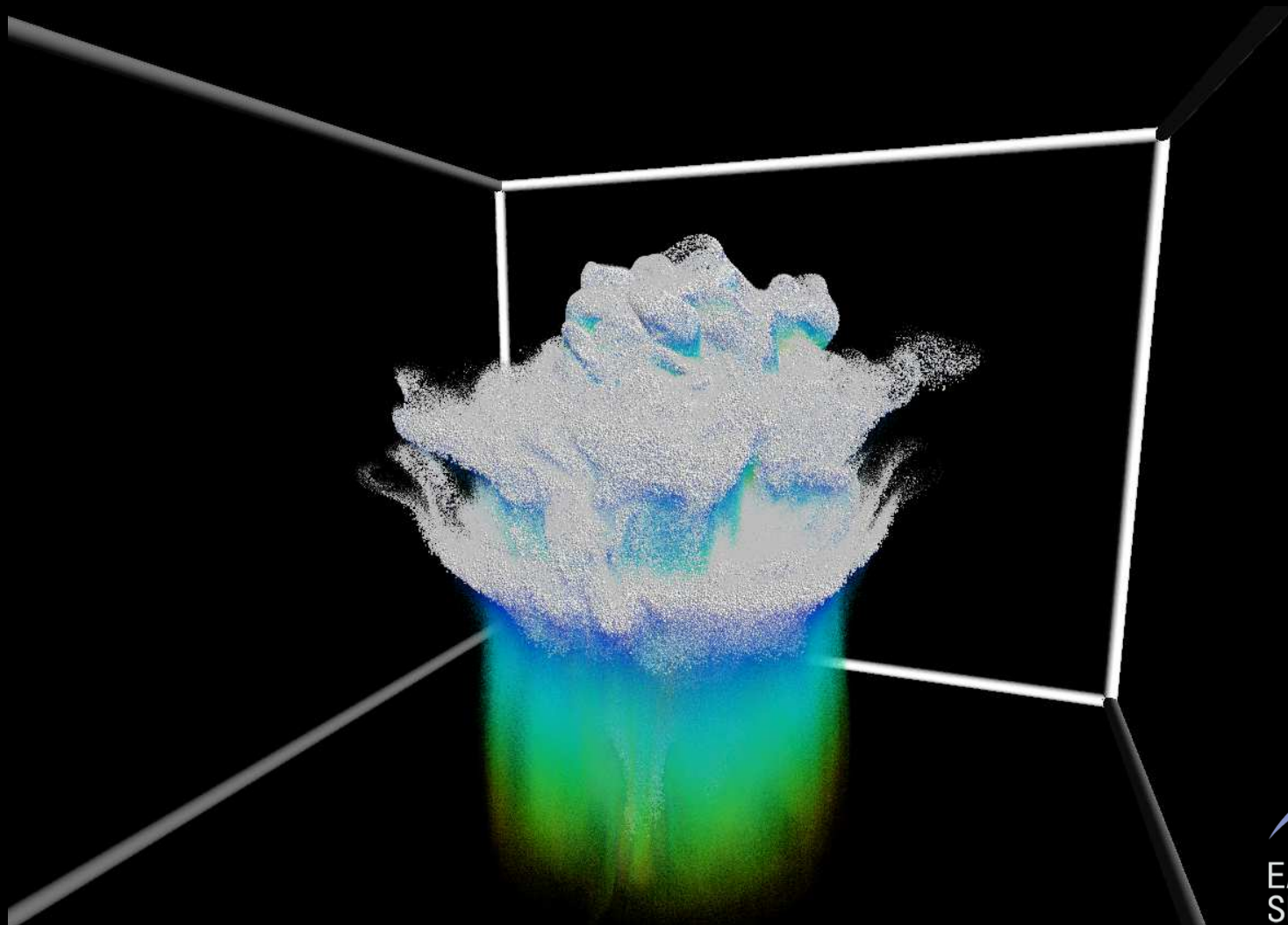


CReSS-SDMのFX1向け計算性能チューニング

島 伸一郎（兵庫県立大学, シミュレーション学研究科）
長谷川 晃一※（(株)中電シーティーアイ）



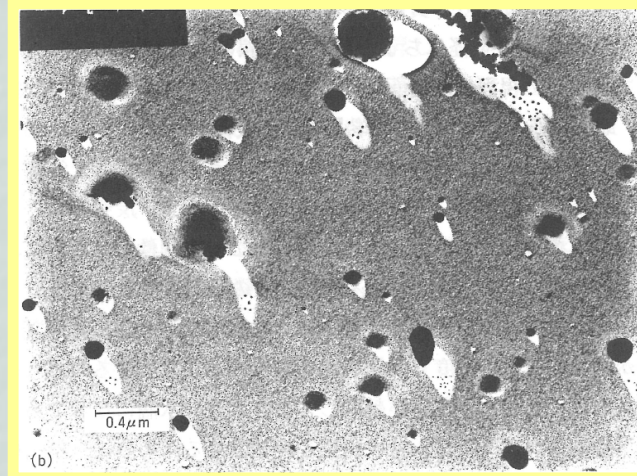
雲に関わる物理

大気（乾燥大気・水蒸気etc）
（流体場, 大気の力学過程）

相互作用

エアロゾル/雲粒/降水粒子
（粒子系, 雲の微物理過程）

核生成や風による巻き上げ

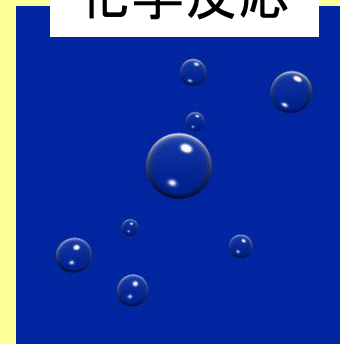


エアロゾル

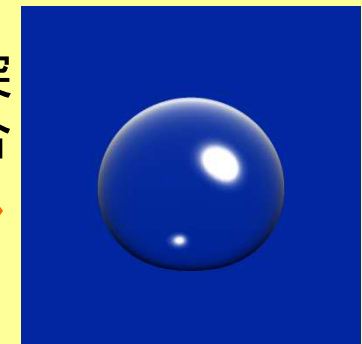
(S.Twomey, 1977: Atmospheric Aerosols, Elsevier Pub. Co)

蒸発

化学反応

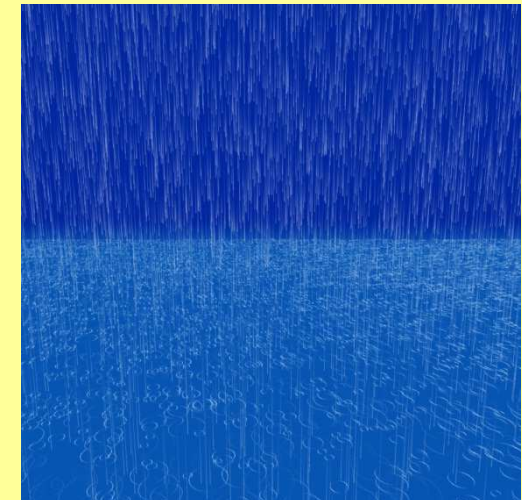
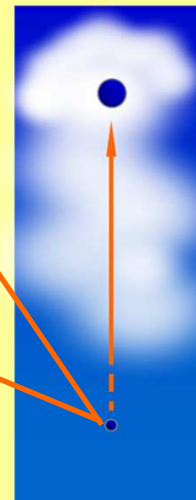


衝突
併合



水蒸気の凝結

降雨



気象モデルでの雲微物理過程

バルク法（暖かい雨）

- モデル定義点における雲水・雨水の混合比(と数濃度)を予測する
- 計算コストが小さく、多くのモデルで利用されている
- 各水物質の粒径分布を表現することはできない
(バルク法では仮定した粒径分布を与える必要がある)

ビン法（暖かい雨）

- 粒径などでいくつかに区分け(ビン)して、定義点における各ビンの混合比より粒径分布が表現できる
(例：雲水・雨水 → 粒径によって100個のビンに区分け)
- バルク法より、現実に近い雲微物理過程を表現できる
- バルク法に比べて、計算コストが膨大である

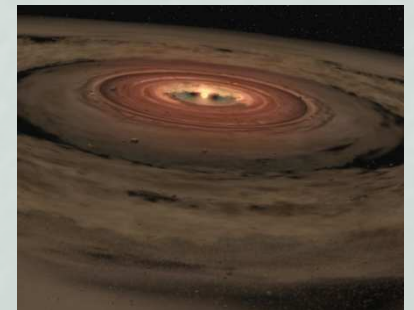
CReSS-SDMとは

超水滴法 (SDM, 暖かい雨)

- 粒子法による確率的な雲微物理モデル
複数の粒子を代表させた超水滴の時間発展を予測
衝突併合は独自のモンテカルロ法
- ビン法と同程度の詳細な雲微物理過程を扱える
- ビン法に比べて、離散化に伴う数値拡散が小さい
- ビン法に比べて、粒子の属性(粒径・エアロゾルなど)が増えたと、計算コストが小さくなる
- 衝突併合する任意の離散粒子系に適用可能
惑星形成・噴霧燃焼・火山噴煙 etc

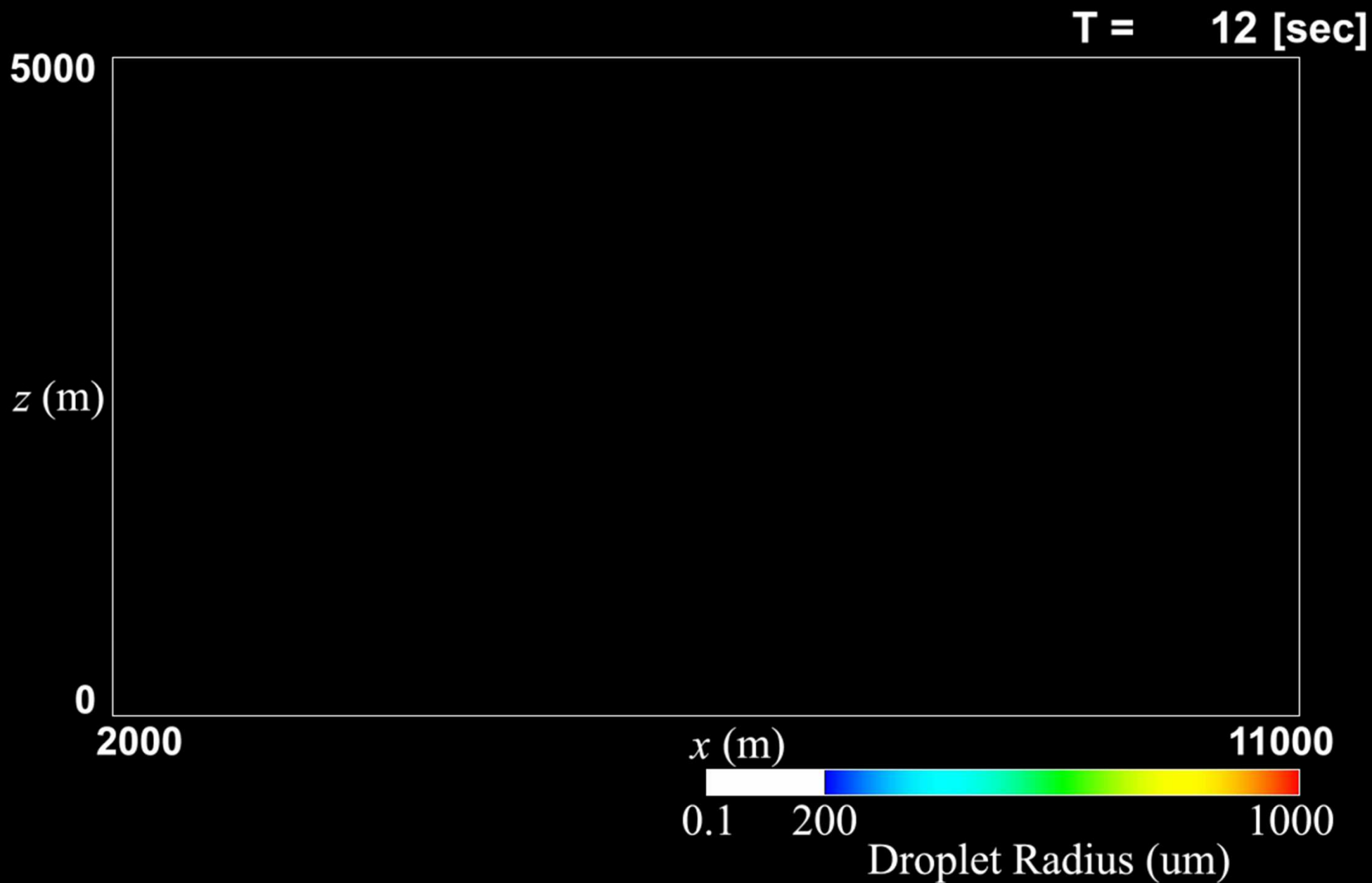
CReSS-SDM

- SDMを気象モデルCReSSに実装
流体(大気)と粒子(雲)の連成計算



原始惑星系円盤の想像図
(NASA のHPより)

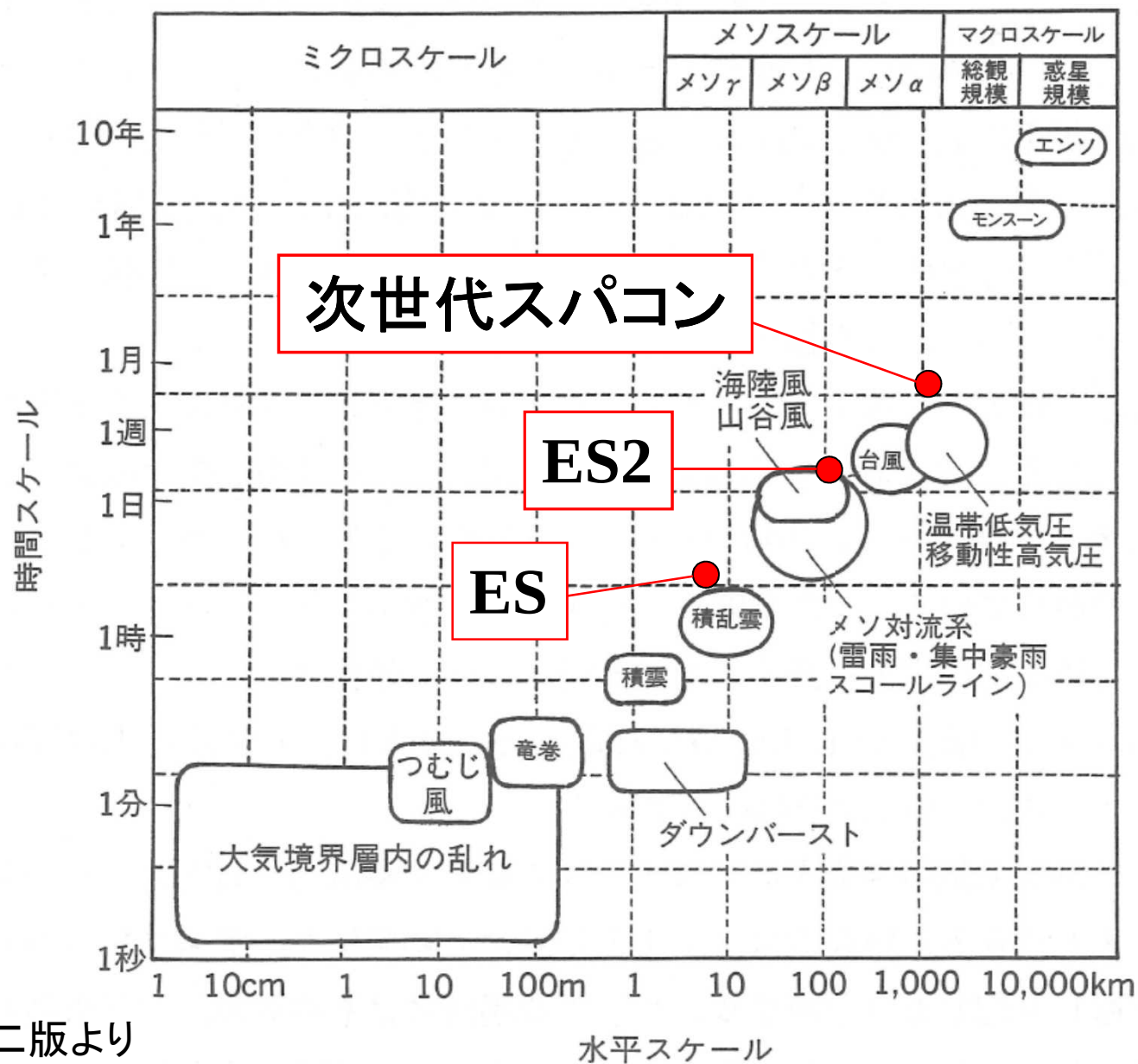
洋上の浅い積雲 ($\Delta z = 4$ m)



フォトンマッピング法による 写実的可視化



CReSS-SDM開発の現状と将来展望



小倉義光, 1999:
「一般気象学」第二版より

H23年度の成果

ES2上での計算性能

FLOPSピーク性能比4～10%

高い並列化効率 (99.98%)

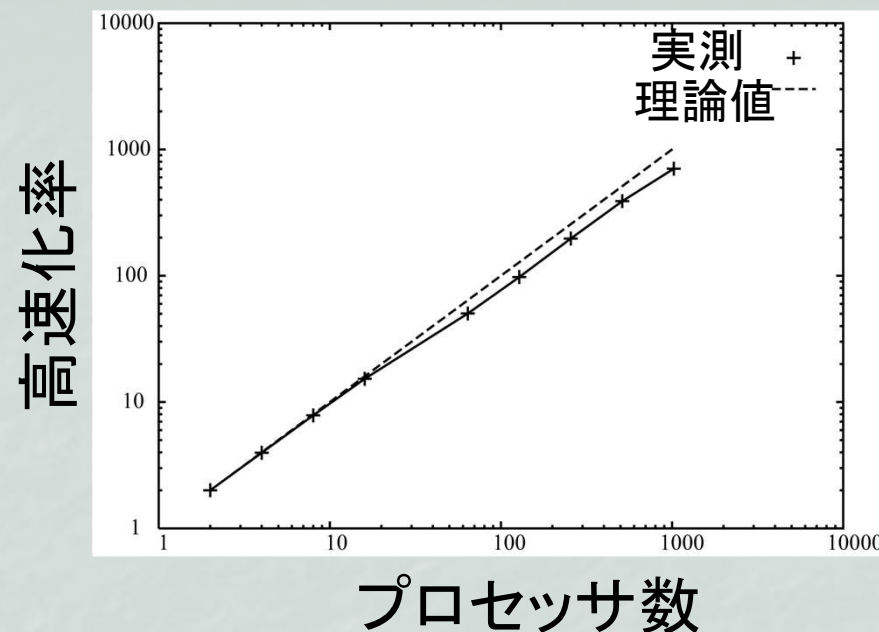
高いベクトル化率 (99.54%)



FX1上でチューニング

コアあたりの性能の向上をはかるために、
スカラチューニングを実施した。

(並列チューニングについては、ES2上でよく並列化されていることから、
ある程度の水準のチューニングはできていると見込んだ)



	Before (H22)	After (H23)	前年比
計算時間 [h]	4.16	2.55	0.61倍
MFLOPS	263 (ピーク比2.6%)	360 (ピーク比3.6%)	1.37倍
MIPS	899	1225	1.36倍
L2キャッシュミス [%]	0.33	0.12	0.35倍

※ スカラチューニングの目安

コアあたり (松尾2010, <http://www.j-focus.or.jp/activities/20100528/JAXA-FX1.pdf>)

- 500MFLOPS (ピーク比5.0%)
- 1000MIPS
- L2キャッシュミス率 0.2%

スカラチューニングによってFLOPS以外は達成できた！

スカラチューニングの詳細

チューニング前の性能

コンパイルオプション：全体に `-Kprefetch_model=FX1`

- ・ 計算時間 4.16[h]
- ・ 263MFLOPS (ピーク比2.6%)
- ・ 899MIPS
- ・ L2キャッシュミス率 0.334%

コストの大きいサブルーチン

`sdm_coales.f90` (33%) ... 粒子の衝突併合のモンテカルロ計算

`sdm_condevp.f90` (23%) ... 雲粒の活性化/凝結成長/蒸発

`sdm_getvz` (6%) ... 粒子の終端速度の計算

⇒ この3ルーチンについて、チューニングを実施

sdm_coales.f90

特徴

粒子の衝突併合のモンテカルロ計算

毎時間、各格子内で粒子が確率的に衝突併合する

チューニング前の性能

- 計算時間 1.42[h] (全体比33.3%)
- 118MFLOPS (目安値:500)
- 443MIPS (目安値:1000)
- L2キャッシュミス率 1.38% (目安値:0.2)

粒子の位置における格子データを間接参照するためにL2ミスが多い？

ソースコードのチューニング①

```
do id=1, 格子内の粒子数  
do n=1, 格子数
```



```
do n=1, 格子数  
do id=1, 格子内の粒子数
```

最内が格子数のループになるので、格子内に含まれる粒子数によらず長いベクトル長(格子数)を取ることができる。ただし、参照する格子の情報が常に変わるので、キャッシュミスは多くなる。

最内が格子内に含まれる粒子数のループになり、参照する格子の情報が同じになるので、キャッシュミスは少なくなる。

ソースコードのチューニング②

```
do n=1, sd_numasl
```



```
do n=1, 2
```

sd_numaslが2しか入らない時も、コードの拡張性を考えて、sd_numaslとしていたが、左のように直接2と書いた方が早くなった
(ループがインライン展開されるためか?)

コンパイルオプションのチューニング

-Kprefetch_indirect (高速なメモリを使用) を追加

チューニング後の性能

	Before (H22)	After (H23)	前年比
計算時間 [h]	1.42	0.22	0.15倍
MFLOPS	118	294	2.49倍
MIPS	443	992	2.24倍
L2キャッシュミス [%]	1.38	0.96	0.70倍

L2キャッシュミスは依然高いままであるが、
計算時間がかなり速くなった (0.15倍！)

sdm_condevp.f90

特徴

雲粒の活性化/凝結成長/蒸発

各粒子に対する常微分方程式を陰的にニュートン法で解く

チューニング前の性能

- 計算時間 1.00[h] (全体比23.2%)
- 417MFLOPS (目安値:500)
- 808MIPS (目安値:1000)
- L2キャッシュミス率 0.013% (目安値:0.2)

陰解法の反復計算が断然重い

格子データを間接参照するが、キャッシュミス率は小さい

ソースコードのチューニング

陰解法のループに **!OCL FRECIPRO**(逆数を使った最適化)が効果的
(**!OCL UNROLL**('full')より有効。他ではあまり効果的でなかった)

ベクトル化のための書き方を修正

コンパイルオプションのチューニング

-Kprefetch_indirect を追加

反復回数を減らせれば
更に改善する可能性も

チューニング後の性能

	Before (H22)	After (H23)	前年比
計算時間 [h]	1.00	0.74	0.74倍
MFLOPS	417	527	1.26倍
MIPS	808	769	0.95倍
L2キャッシュミス [%]	0.013	0.031	2.38倍

sdm_getvz.f90

特徴

粒子の終端速度の計算

流体場と粒子の大きさが引数の複雑な関数を評価

チューニング前の性能

- 計算時間 0.26[h] (全体比6.0%)
- 476MFLOPS (目安値:500)
- 1469MIPS (目安値:1000)
- L2キャッシュミス率 0.078% (目安値:0.2)

格子データを間接参照するが、キャッシュミス率は小さい

ソースコードのチューニング

有効な手法が見つからなかった...

コンパイルオプションのチューニング

-Kprefetch_indirect を追加

チューニングの効果は
ほとんど見られなかった

チューニング後の性能

	Before (H22)	After (H23)	前年比
計算時間 [h]	0.26	0.25	0.96倍
MFLOPS	476	484	1.02倍
MIPS	1469	1550	1.06倍
L2キャッシュミス [%]	0.078	0.075	0.96倍

まとめ

Before(H22)	全体	sdm_coales	sdm_condevp	sdm_getvz
計算時間	4.16 (100%)	1.42 (33.3%)	1.00 (23.2%)	0.26 (6.0%)
MFLOPS	263	118	417	476
MIPS	899	443	808	1469
L2ミス率	0.33%	1.38%	0.013%	0.078%



After(H23)	全体	sdm_coales	sdm_condevp	sdm_getvz
計算時間	2.55 (100%)	0.22 (8.5%)	0.74 (28.5%)	0.25 (9.5%)
MFLOPS	360	294	527	484
MIPS	1225	992	769	1550
L2ミス率	0.177%	0.96%	0.031%	0.075%

- sdm_coalesへのチューニング & ”-Kprefetch_indirect” の追加により実行速度が向上
- sdm_condevpをもっと高速化できると更に効果的

ご清聴ありがとうございました

people involved

雲のモデリング

坪木和久 (名大/JAMSTEC)
榊原篤志 (Chuden CTI Co. Ltd.)
長谷川晃一 (Chuden CTI Co. Ltd.)
大淵済(JAMSTEC)
草野完也 (名大/JAMSTEC)

データ処理と可視化

荒木文明 (JAMSTEC)
川原慎太郎 (JAMSTEC)

連結階層の理論

戸田幹人(奈良女)
佐藤譲 (理研/北大)