

# 地球シミュレータにおける 大気大循環モデルの並列化

2000.6.13

日本原子力研究所

地球シミュレータ開発特別チーム

地球シミュレータハードウェア開発グループ

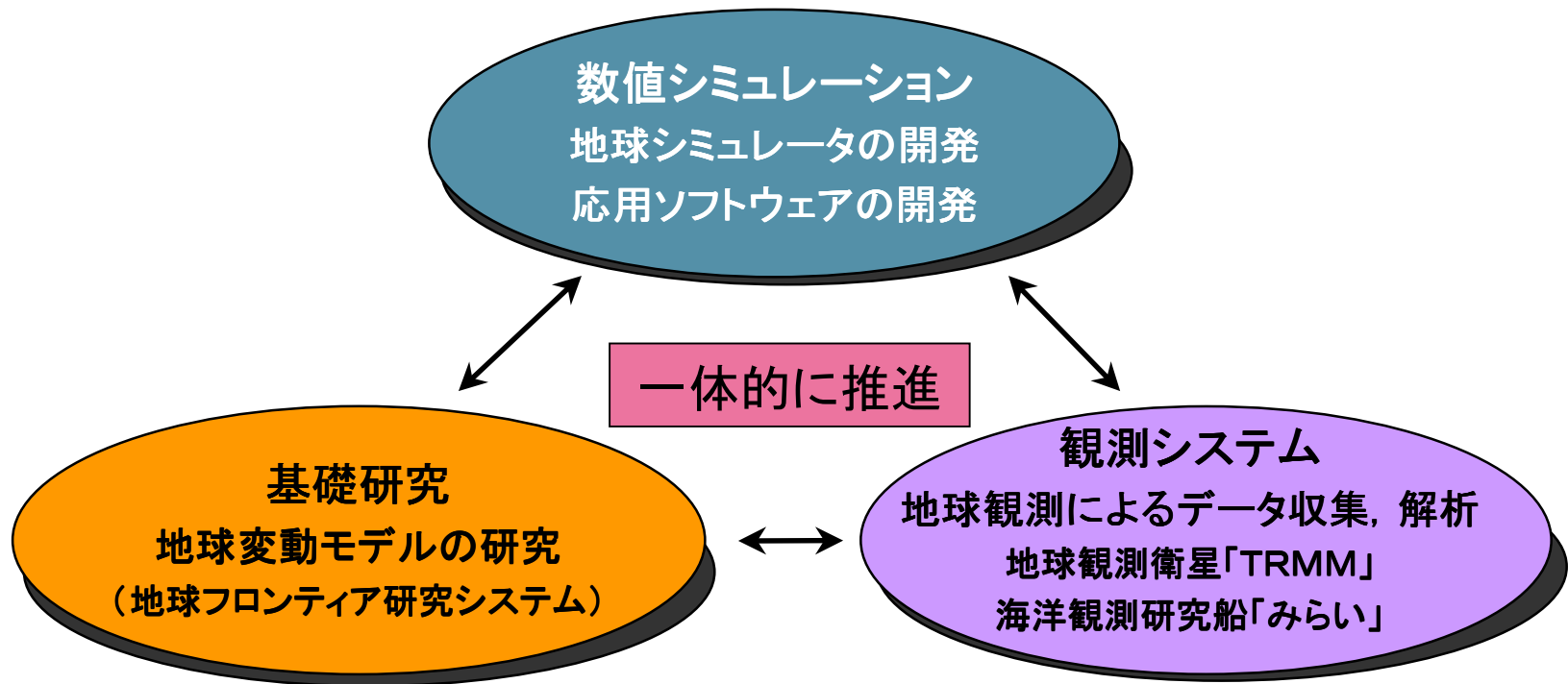
新宮 哲

# 目次

- 地球シミュレータの紹介
- 大気大循環モデル
- 基礎方程式
- スペクトル法(コアとなる計算部分)
- 並列化手法
- 実行性能
- 問題点と今後の予定

# 「地球シミュレータ」計画

- 地球変動現象の解明・予測の研究開発を推進
- 大規模, 高精度シミュレーションにより「仮想地球」を実現



# 「地球シミュレータ」計画の目標

## ■ 気象, 気候変動現象の解明

★ エルニーニョ現象, 地球温暖化現象等のグローバル現象の理解

- 現状の全球モデルで水平方向約60Km, 鉛直方向20層
- 計算格子数の増加による詳細なシミュレーション
- 大気・海洋結合モデルの高精度化

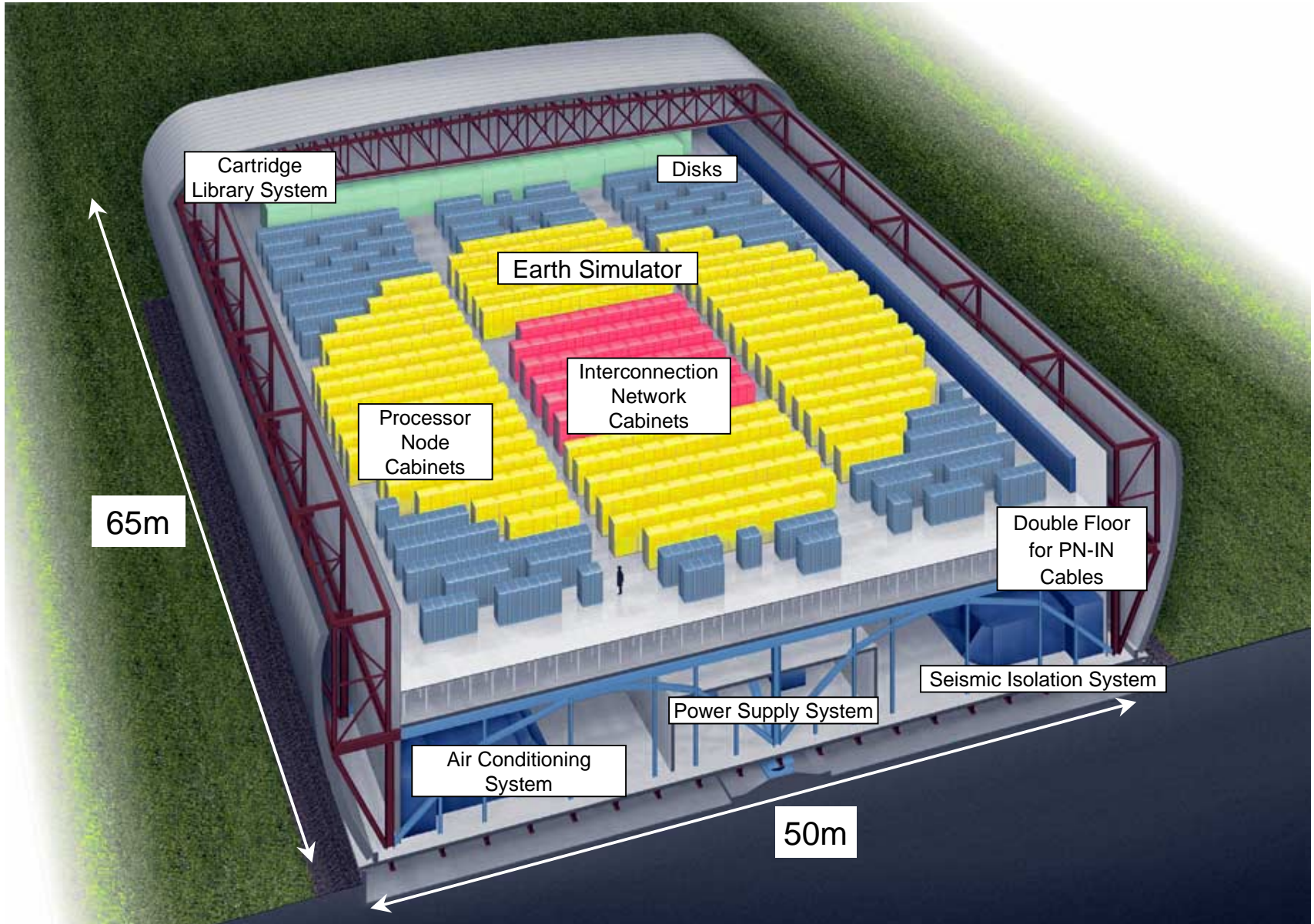
★ 集中豪雨, ダウンバースト等の局所的気象現象の理解

- 現状の局所モデルで水平方向約20Km
- 計算格子数の増加による詳細なシミュレーション
- 積乱雲等のパラメータ化の削減

## ■ 固体地球変動の解明

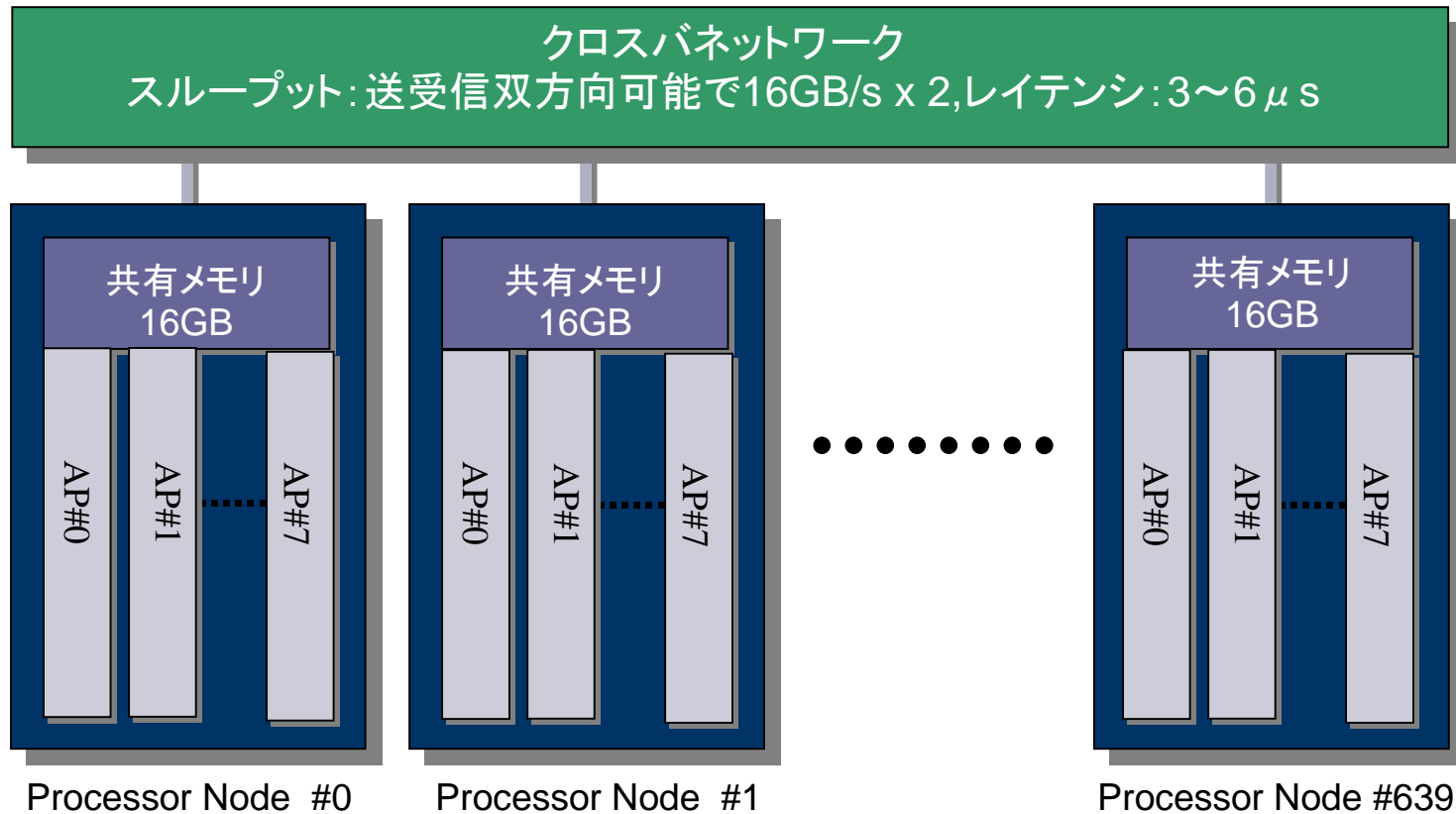
★ マントル対流, 地殻変動等の現象の理解

# Artist's Representation of the Earth Simulator



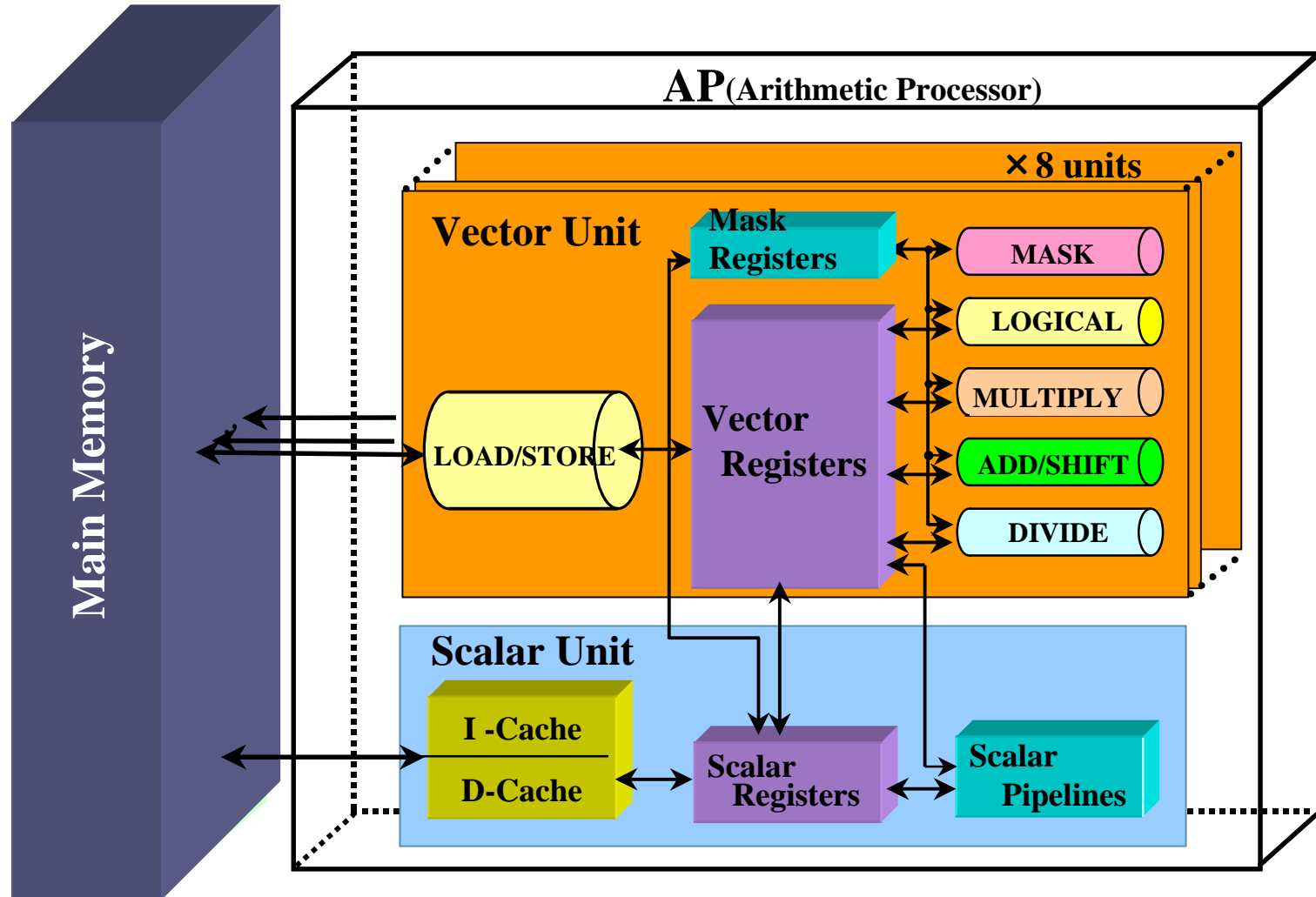
# 地球シミュレータの全体構成

- 総ノード数: 640
- 総プロセッサ数: 5120
- ピーク性能: 40Tflop/s
- 主記憶容量: 10TB
- 計算プロセッサ(AP)のPeak性能: 8Gflop/s
- 1ノード当たりのAP数: 8
- 1ノード当たりのピーク性能: 64Gflop/s
- 1ノード当たりの主記憶容量: 16GB



注) ハードウェア構成は今後の開発の進展により変更される可能性があります

# 計算プロセッサ(AP)の構成



# NJR-SAGCMとは？

## ■ NJR

★NASDA:宇宙開発事業団

★JAMSTEC:海洋科学技術センター

★RIST:(財)高度情報科学技術研究機構

## ■ SAGCM

★スペクトル法(Spectral method)を用いた全球3次元の大気大循環モデル(Atmospheric General Circulation Model)

- 採用したモデルはCCSR/NIES AGCM5.4のものと同等

CCSR:東京大学 気候システム研究センター

NIES:国立環境研究所

★現在、地球シミュレータ向けに地球シミュレータ研究開発センターで高速化作業中



# 力学過程の特徴

- 断熱過程
  - ★ 熱の出入りがないと仮定
- 静力学プリミティブ方程式
- 水平方向に依存性があり, 鉛直方向には独立
- ルジャンドル変換の計算量が水平解像度(H)の3乗に比例して増加し高解像度になるほど支配的になる
- フーリエ変換は $H^2 \log H$

# 物理過程の特徴

- 非断熱過程
  - ★ 放射, 凝結, 蒸発などの熱の出入りを考慮
- 鉛直方向に依存性があり, 水平方向には独立
- 力学過程で解かれた場のもとで、各物理過程を間接的にパラメタリゼーションによって計算
  - ★ パラメタリゼーションとは？
    - マクロ(格子スケール)の場を用いて、ミクロ(格子スケールより小さなサブグリッドスケール)の現象がマクロに及ぼす影響をパラメータを用いてモデル化すること
- 性能で問題のあるのは積雲対流過程
  - ★ 計算量が鉛直層数の2乗に比例
  - ★ 積雲の有無により計算量が変化する

# NJR-SAGCMにおける物理過程モデル

積雲対流過程	凝結、降水、対流 (Arakawa and Schubert, 1974; Moorthi and Suarez, 1992)
大規模凝結過程	積雲対流以外の雲過程、雲水量予測 (Le Treut & Li, 1990)
放射過程	放射の吸収、射出、散乱 Discrete Ordinate Method / k-Distribution Method (Nakajima and Tanaka, 1986)
鉛直拡散過程	大気境界層での熱・水蒸気・運動量の輸送 (Mellor and Yamada, 1974, 1982 の level 2 scheme)
地表面フラックス	接地境界層での熱・水蒸気・運動量のフラックス (Louis, 1979) 対流による影響の考慮 (Mellor et al., 1992)
地表面・地中過程	多層熱伝導、バケツモデル、 多層土壌水移動 (Manabe et al., 1965)、 凍土過程 (Clapp and Hornberger, 1978)、 海水過程、海洋混合層等
重力波抵抗	山岳効果 (McFarlane, 1987)
その他	乾燥対流調節

# 時間積分

## ■ Leap frog法

★力学過程と物理過程は基本的にLeap frog法による陽解法

$$\psi^{t+\Delta t} = \underbrace{\psi^{t-\Delta t} + 2\Delta t \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)_{dyn}}_{\text{力学過程}} + 2\Delta t \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right)_{phys}$$

物理過程

## ■ Asselin時間フィルター

★Leap frog法に特有の数値計算上の時間振動モードを除去

## ■ Semi-implicit法

★重力波に関連する項のみ陰解法で計算

# 水平方向の座標系と離散化

## ■ 球面座標系

★経度方向( $\lambda$ ): 等間隔

$$0 \leq \lambda_i = 2\pi \frac{i-1}{I} < 2\pi, \quad i=1,2,\dots,I$$

I: 経度方向の格子点数

★緯度方向( $\mu$ ): 不等間隔

• ガウス緯度(J次のルジャンドル多項式の0点)

$$-1 \leq \mu_j = \sin \phi_j \leq 1 \quad (\phi: \text{緯度}), \quad j=1,2,\dots,J$$

J: 緯度方向の格子点数

## ■ スペクトル法により離散化

# 鉛直方向の座標系と離散化

## ■ シグマ座標系 ( $\sigma$ -p座標系): 不等間隔

★ 各地点の地表面気圧で規格化した気圧

$$\sigma = \frac{p}{p_s}$$

★ 各物理量  $\psi$  は Full sigma level で定義

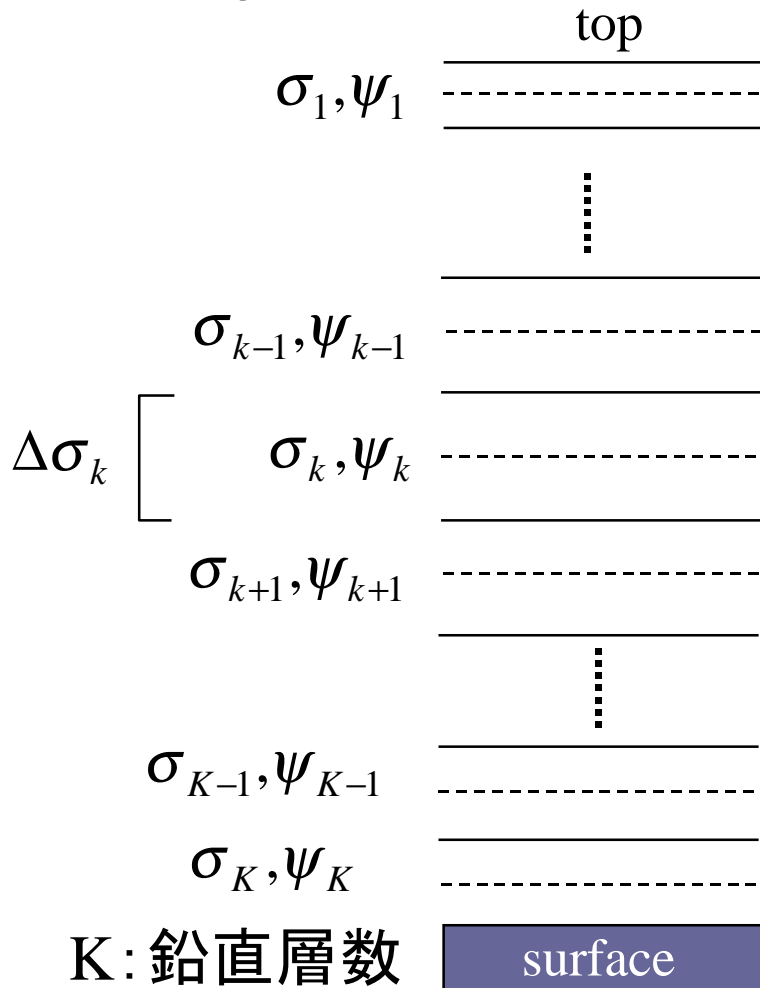
★ Half (半整数) sigma level での  $\sigma$  値を固定で与え、Full (整数) sigma level での  $\sigma$  値は次式で計算 (Arakawa & Suarez 1983)

$$\sigma_k = \left[ \frac{1}{1 + \kappa} \left\{ \frac{\sigma_{k+1/2}^{\kappa+1} - \sigma_{k-1/2}^{\kappa+1}}{\Delta\sigma_k} \right\} \right]^{1/\kappa}$$

$$\Delta\sigma_k = \sigma_{k+1/2} - \sigma_{k-1/2}, \quad \kappa = R/C_p$$

# シグマ座標系における離散化格子

Full sigma level



Half sigma level

$$\sigma_{1/2} = 0, \dot{\sigma}_{1/2} = 0, p_{1/2} = 0$$

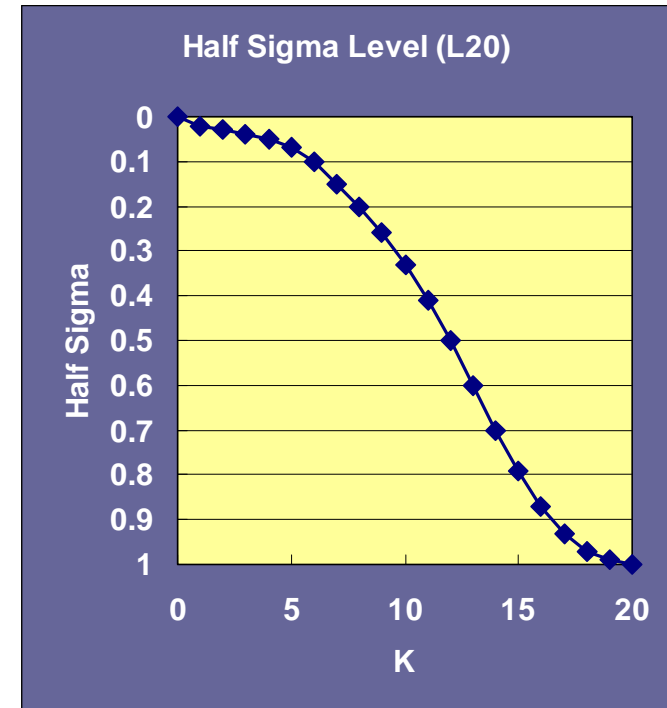
$$\sigma_{3/2}, \dot{\sigma}_{3/2}$$

$$\sigma_{k-1/2}, \dot{\sigma}_{k-1/2}$$

$$\sigma_{k+1/2}, \dot{\sigma}_{k+1/2}$$

$$\sigma_{K-1/2}, \dot{\sigma}_{K-1/2}$$

$$\sigma_{K+1/2} = 1, \dot{\sigma}_{K+1/2} = 0, p_{K+1/2} = p_s$$



# シグマ座標での差分表現の例

$$\begin{aligned}
 \dot{\sigma} \frac{\partial \psi}{\partial \sigma} &= \frac{\partial}{\partial \sigma} (\dot{\sigma} \psi) - \psi \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \\
 &= \frac{1}{\Delta \sigma_k} \left( \dot{\sigma}_{k+1/2} \frac{\psi_{k+1} + \psi_k}{2} - \dot{\sigma}_{k-1/2} \frac{\psi_k + \psi_{k-1}}{2} \right) - \psi_k \frac{\dot{\sigma}_{k+1/2} - \dot{\sigma}_{k-1/2}}{\Delta \sigma_k} \\
 &= \frac{1}{2\Delta \sigma_k} \left[ \dot{\sigma}_{k+1/2} (\psi_{k+1} - \psi_k) + \dot{\sigma}_{k-1/2} (\psi_k - \psi_{k-1}) \right]
 \end{aligned}$$

このようにしてFull Sigma Levelでの差分表現が得られる  
 (左辺の最初の式のままだとHalf Sigma Levelでの定義)



# プリミティブ方程式(状態方程式)

## ■ 状態方程式

$$p = \rho R_d T_v$$

## ★ 仮温度の式

$$T_v = \left[ 1 + \left( \frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q - l \right] T$$

## ★ 比湿の式

$$q = \frac{\rho_v}{\rho_d + \rho_v}$$

$p, \rho, T$  : 湿潤大気(*moist air*)の気圧、密度、温度

$\rho_d, R_d$  : 乾燥大気(*dry air*)の密度、気体定数

$\rho_v, R_v$  : 水蒸気(*vapor*)の密度、気体定数

$T_v$  : 仮温度(*virtual temperature*)

$q$  : 比湿(*specific humidity*)

$l$  : 雲水(*liquid water*)

# プリミティブ方程式(運動方程式)

## ■ 水平方向

気圧傾度力

$$\frac{dv_h}{dt} = -2\Omega \times v_h - \frac{1}{\rho} \nabla_z p$$

コリオリカ

$v_h = (u, v, 0)$ : 水平方向の風の色度ベクトル  
 $\Omega$ : 地球の自転角速度ベクトル

## ■ 鉛直方向(静力学方程式)

★ 鉛直方向の色度を無視( $w=0$ )

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \nabla \Phi \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \Phi}{\partial (\ln \sigma)} = -R_d T_v$$

$\Phi = gz$ : ジオ・ポテンシャル

# 水平方向の運動方程式から渦度・発散方程式へ

## ■ 座標変換と $u, v$ から渦度及び発散への変換

$\eta = \zeta + f$  ; 絶対渦度,  $f \equiv 2\Omega \sin \phi$ はコリオリのパラメータ

$$\zeta = \frac{1}{a \cos \phi} \left[ \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \phi} (u \cos \phi) \right] ; \text{ 相対渦度}$$

$$\delta = \frac{1}{a \cos \phi} \left[ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos \phi) \right] ; \text{ 発散}$$

$$U = u \cos \phi, \quad V = v \cos \phi, \quad \mu = \sin \phi, \quad E = \frac{u^2 + v^2}{2}$$

# プリミティブ方程式(渦度・発散方程式)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial N_v}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial N_u}{\partial \mu}$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial N_u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial N_v}{\partial \mu} - \nabla_h^2 [E + \Phi + R_d T_0 \ln p_s]$$

$$T_v(\lambda, \mu, \sigma, t) = T'_v(\lambda, \mu, \sigma, t) + T_0(\sigma)$$

変動成分

標準気温

重力波に関する項  
はimplicitに計算

## ★ 非線形項

$$N_u = \eta V - R_d T'_v \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln p_s - \sigma \frac{\partial U}{\partial \sigma}$$

$$N_v = -\eta U - R_d T'_v \frac{1-\mu^2}{a} \frac{\partial}{\partial \mu} \ln p_s - \sigma \frac{\partial V}{\partial \sigma}$$

# プリミティブ方程式(保存式)

## ■ 質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_h) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = -(v_h \cdot \nabla_\sigma \ln p_s + \delta) - \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}$$

## ■ 比湿(水蒸気)の保存式

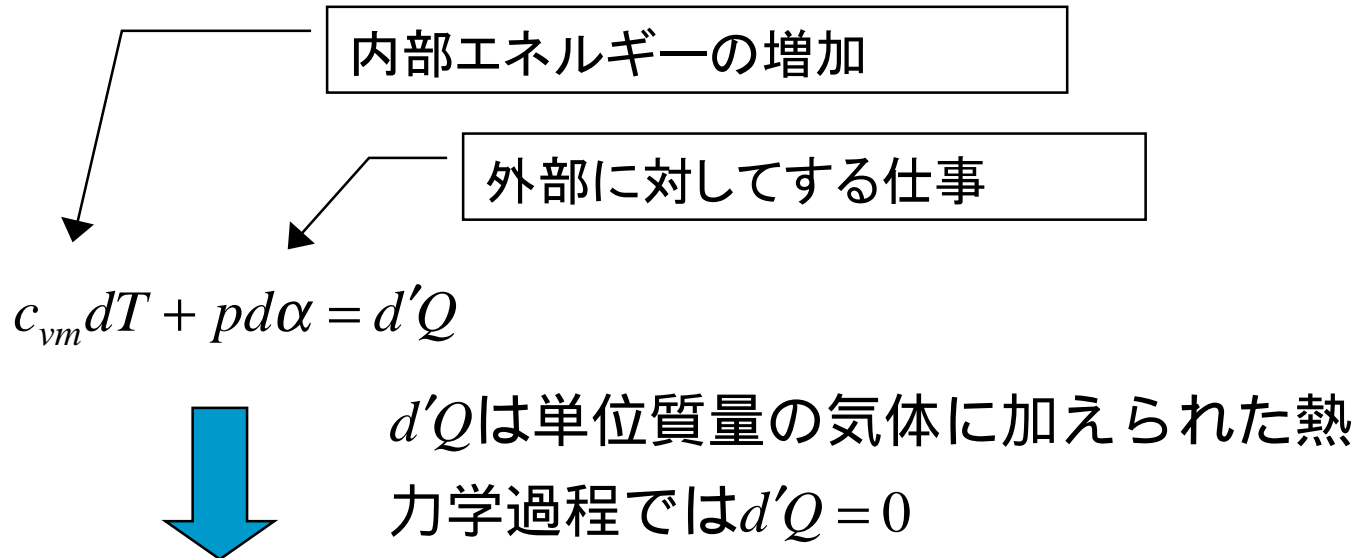
$$\frac{dq}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (Uq) - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \mu} (Vq) + q\delta - \sigma \frac{\partial q}{\partial \sigma}$$

## ■ 雲水の保存式

$$\frac{dl}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial l}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (Ul) - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \mu} (Vl) + l\delta - \sigma \frac{\partial l}{\partial \sigma}$$

# プリミティブ方程式(熱力学方程式)

## ■ 熱力学第1法則



$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT_v}{C_{pm}} \frac{\omega_p}{p}$$

$C_{vm}$ : 湿潤大気 of 定積比熱

$C_{pm}$ : 湿潤大気 of 定圧比熱

$\alpha = 1/\rho$ : 湿潤大気 of 比容

$\omega_p$ : 鉛直 $p$ 速度

# プリミティブ方程式(熱力学方程式)

## ■ 熱力学方程式

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = -\frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (UT') - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \mu} (VT') + T'\delta - \sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{R_d T_v}{C_{pm}} \frac{\omega_p}{p}$$

$$T(\lambda, \mu, \sigma, t) = T'(\lambda, \mu, \sigma, t) + T_0(\sigma)$$

## ★ 鉛直p速度の式

$$\frac{\omega_p}{p} = v_h \cdot \nabla_\sigma \ln p_s - \frac{1}{\sigma} \int_0^\sigma (v_h \cdot \nabla_\sigma \ln p_s + \delta) d\sigma$$

# スペクトル空間のサイズ

## ■ スペクトル空間のサイズパラメータ

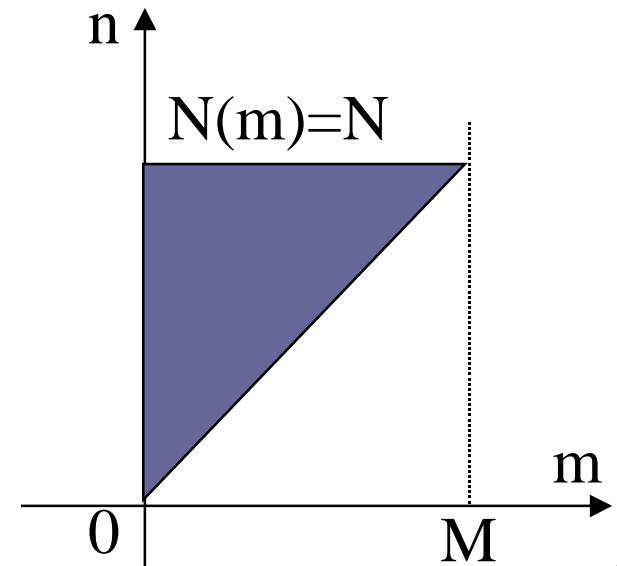
- ★  $M$ : 経度方向に対応したフーリエ空間での最大波数
- ★  $N$ : 緯度方向に対応したLegendre陪関数の最大次数
- ★  $L$ : 波数 $m=0$ に対するLegendre陪関数の最大次数

## ■ Legendre変換における波数切断

- ★ 三角形切断(Triangular)

$$N=L=M$$

$$N(m)=\min(m+L, N)=N$$





# スペクトル法(球面調和関数)

## ■ 球面調和関数

$$Y_n^m(\lambda, \mu) = P_n^m(\mu)e^{\hat{i}m\lambda} \quad ; \hat{i} = \sqrt{-1}$$

## ■ 球面調和関数による展開

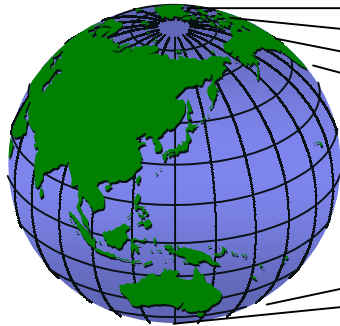
$$\psi(\lambda, \mu) \approx \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{N(m)} \psi_n^m P_n^m(\mu)e^{\hat{i}m\lambda}$$

## ■ スペクトル係数

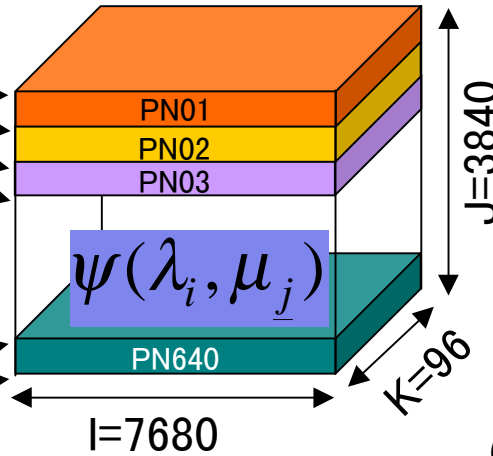
$$\psi_n^m = \int_{-1}^1 \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\lambda, \mu) e^{-\hat{i}m\lambda} d\lambda \right] P_n^m(\mu) d\mu$$

# スペクトル法の並列化

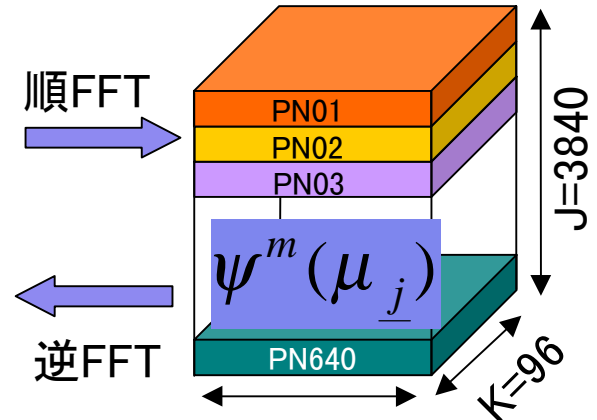
格子点数: 7680x3840x96  
I(経度) × J(緯度) × K(鉛直層)



格子空間(緯度分割)



フーリエ空間(緯度分割)

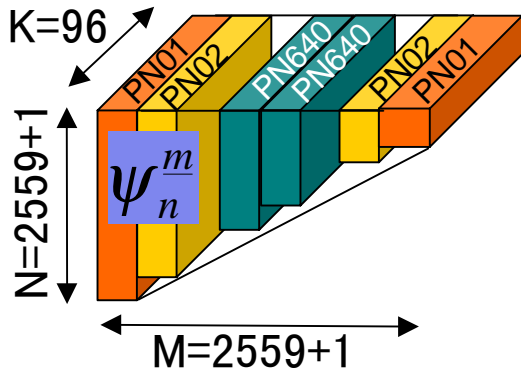


順FFT

逆FFT

$(M+1) \times 2 = (2559+1) \times 2$  (実部・虚部)

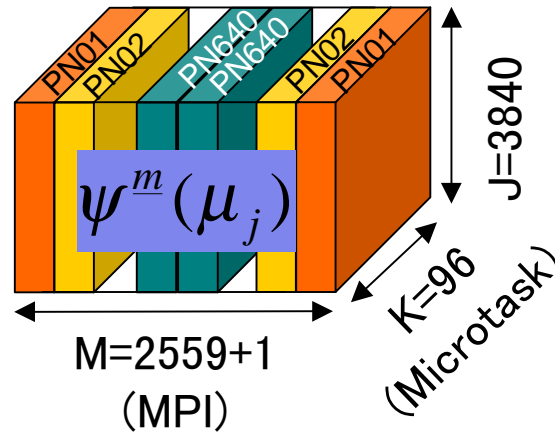
スペクトル空間(波数分割) T2559xL96 M,N(波数) × K(鉛直層)



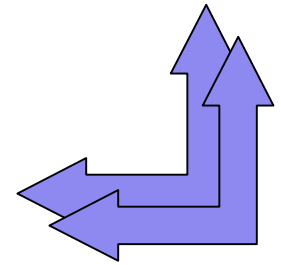
順LT

←

逆LT



(Vector)



トランスポート  
(MPI通信)

# スペクトル変換の式

Fourier順変換

$$\psi^m(\mu_j) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \psi(\lambda_i, \mu_j) e^{-\hat{i}m\lambda_i}$$

Legendre順変換(Gauss積分)

$$\psi_n^m = \sum_{j=1}^J \psi^m(\mu_j) P_n^m(\mu_j) w_j$$

格子空間

$i=1, I$

$j=1, J/NP$  分割

$k=1, K$

フーリエ空間

$m=0, M$

$j=1, J/NP$  分割

$k=1, K$

スペクトル空間

$m=0, M/NP$  分割

$n=0, N(m)$

$k=1, K$

微分操作

時間積分

Fourier逆変換

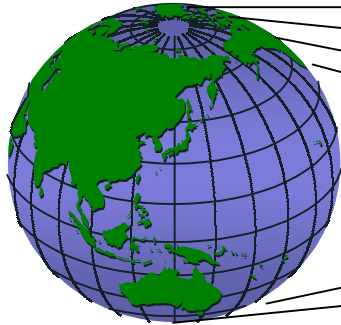
$$\psi(\lambda_i, \mu_j) = \sum_{m=-M}^M \psi^m(\mu_j) e^{\hat{i}m\lambda_i}$$

Legendre逆変換

$$\psi^m(\mu_j) = \sum_{n=|m|}^{N(m)} \psi_n^m P_n^m(\mu_j)$$

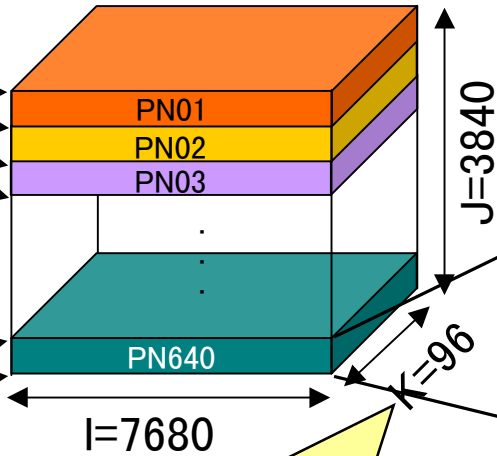
# 物理過程の並列化

格子点数: 7680x3840x96  
I(経度) × J(緯度) × K(鉛直層)



### 分散メモリ向け並列化

#### MPIプロセス(緯度分割)

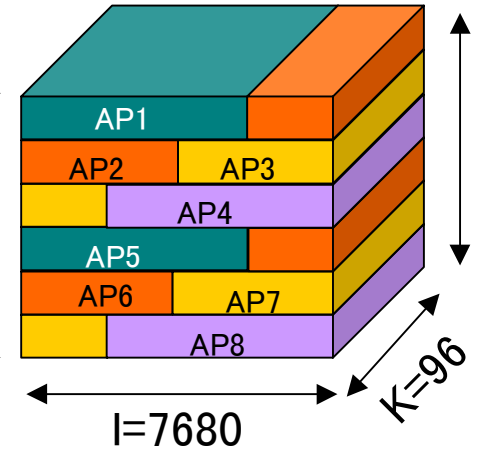


物理過程では依存性  
があるので分割不可

### 共有メモリ向け並列化

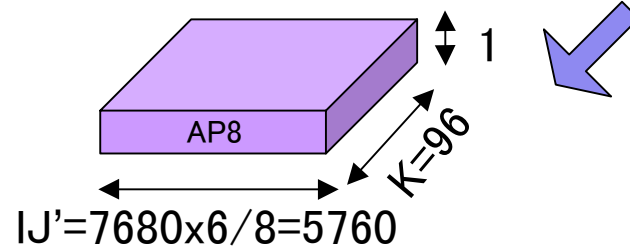
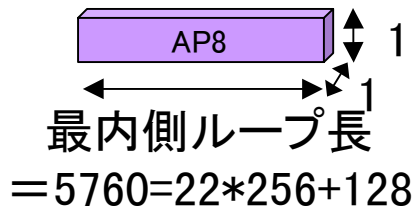
#### Microtask指示行

(水平方向を一次元化して分割)



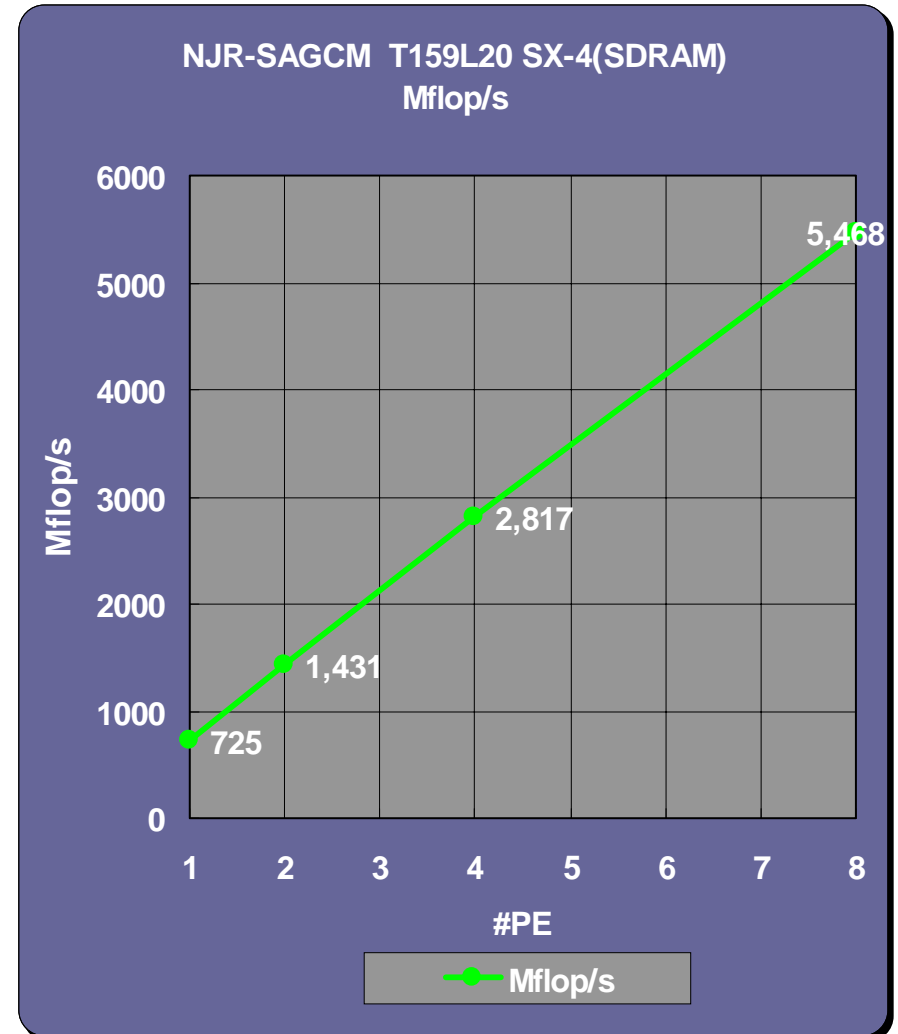
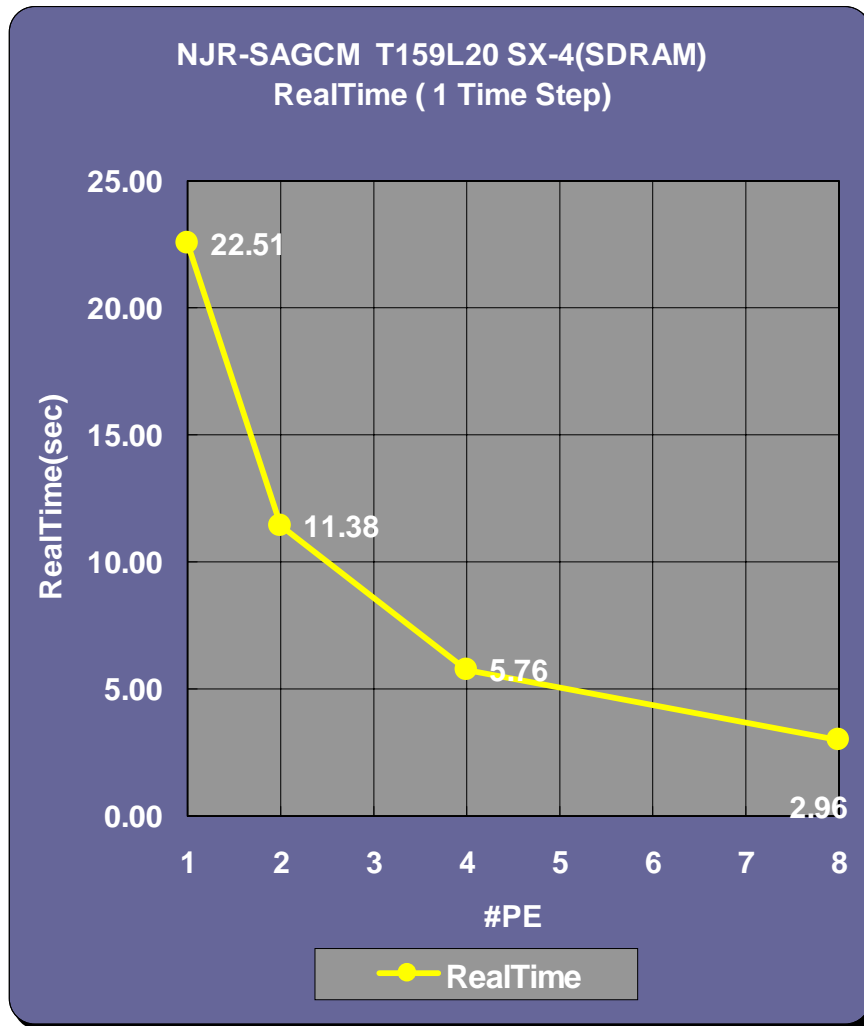
1つのMPIプロセスで処理

### ベクトル処理

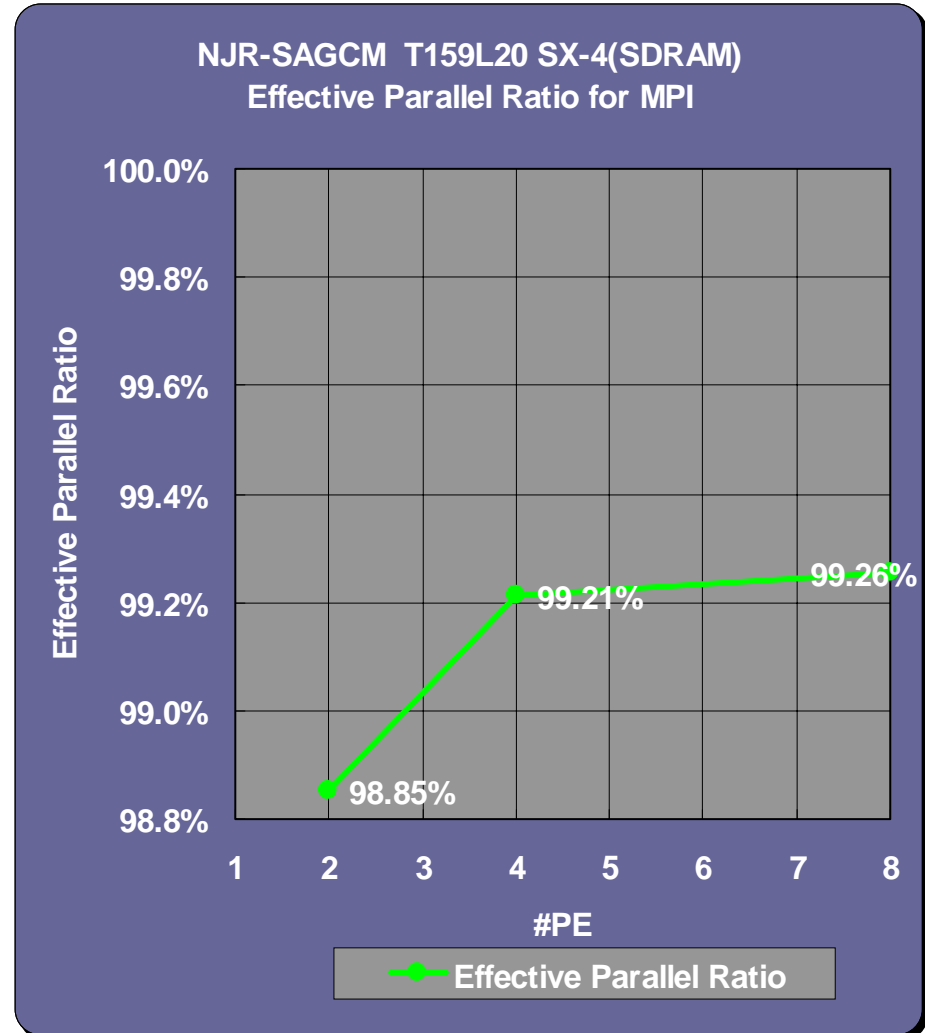
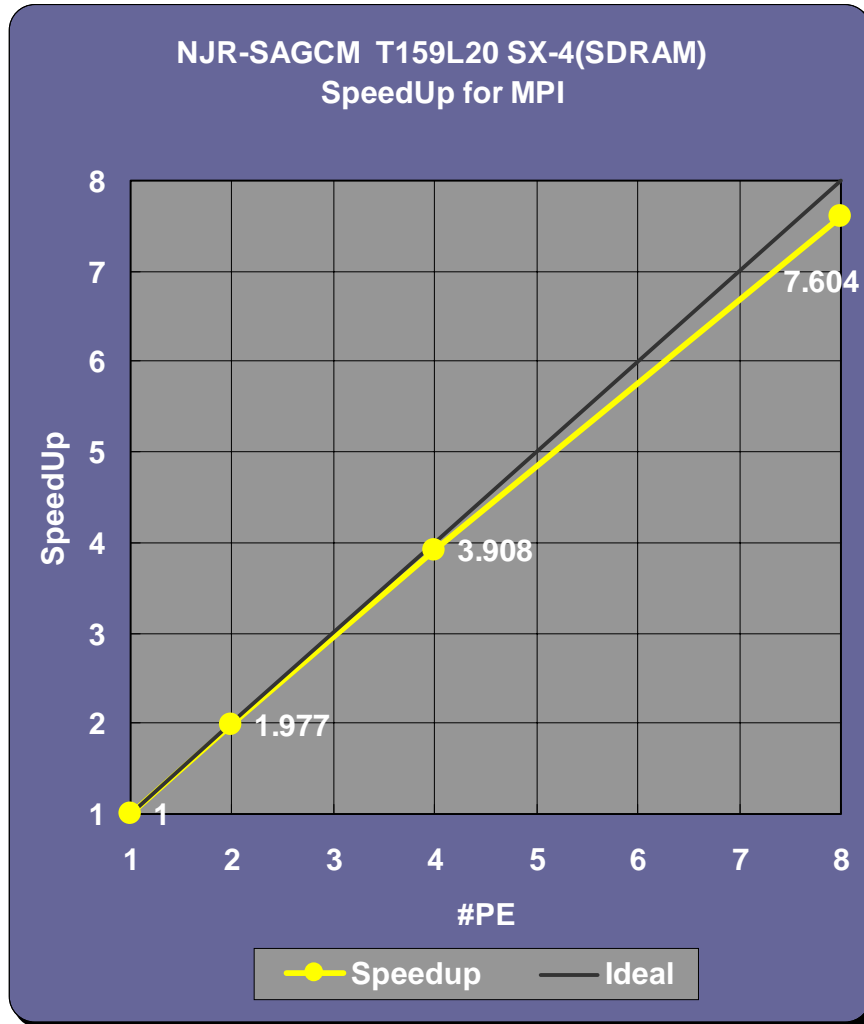


1つのMicrotaskで処理

# 並列実行特性 1 (SX-4,T159L20)



# 並列実行特性2 (SX-4,T159L20)



# 解像度と処理時間の関係

	水平解像度(H)	鉛直解像度(L)	T159L20
力学過程			54.29%
LT	$H^2 \sim H^3$	L	41.08%
FFT	$H^2 \log$	L	4.60%
LU solver	$H^2$	$L^2$	0.23%
その他	$H^2$	L	8.41%
物理過程			44.21%
積雲対流過程	$H^2$	$L^2$	23.21%
大規模凝結過程	$H^2$	L	6.49%
放射過程	$H^2$	L	5.40%
地表面過程	$H^2$	1	1.81%
乾燥対流調節	$H^2$	$L \sim 2L$	2.78%
その他	$H^2$	L	11.73%

## ■ 高解像度化すると

★ 水平解像度に対してはLegendre変換が卓越

★ 鉛直解像度に対しては積雲対流過程が卓越

# 問題点と今後の予定

## ■ プログラムの改良

- ★Fortran90化、特にModule化を推進

- ★スカラ処理、ファイル入出力、通信を極力削減

## ■ Microtask化

- ★ベクトル処理との並列性の取り合い

## ■ 物理過程のロードバランサーの組み込み

- ★積雲対流過程でロードインバランスが発生

- ★物理過程の分散方法を静的に変える仕組み

- 緯度、経度2次元サイクリック等

## ■ MPI通信の評価