

Review of recent numerical  
weather/climate prediction model and our  
recent development of global grid  
configuration

気象数値シミュレーションモデルのレビュー  
および最近の自身の格子開発の話

伊賀 晋一  
Shin-ichi Iga

# 自身のこれまでの研究内容

- 大学院時代

- 金星大気力学に関する研究

- スーパーローテーション(雲層風速が自転の60倍)



- 海洋研究開発機構時代

- 非静力学20面体格子大気モデルNICAMの開発

- 数値安定性に関する研究
    - 気候感度研究
    - 新格子開発



今日はこれに関する話

# Contents of today's talk

- 気象予報モデルの変遷  
History of weather forecast model
- 気象予報モデルのタイプ  
Types of present weather forecast models
- 最近の我々の格子に関する研究  
Our recent development of new global grid configuration.
- 将来の夢  
future plan

# 気象予報モデルの変遷

- Bjerknes 1904
  - 数値的天気予報の提唱
- Richardson 1922 (リチャードソンの夢)
  - 史上初の数値シミュレーション(失敗)
    - 気圧変化が現実の10倍
    - 短周期の慣性重力波

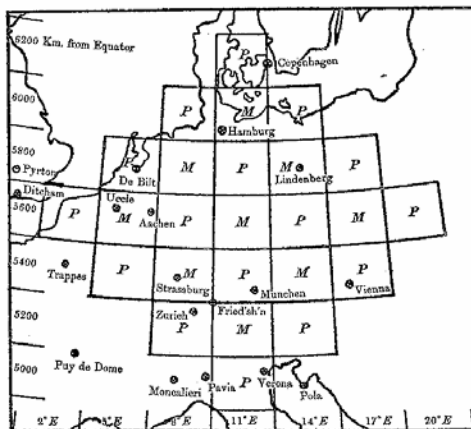


図 1.2 リチャードソンが用いた格子.  $P$  は気圧を,  $M$  は運動量を求める点.

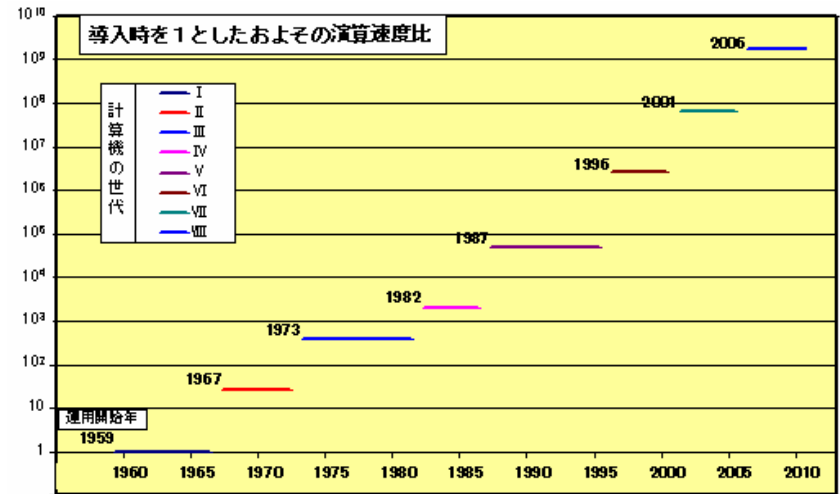


気象庁webより

# 戦後



1955年 米国気象局 IBM704  
1959年 気象庁 IBM704



いずれも気象庁webより

気象庁のコンピュータの演算速度の推移

2011年現在は気象庁では全球は格子間隔20km、メソモデルで5km

# 気象数値モデルの種類（解像度別）

	解像度	領域	特徴	用途
DNS	1cm以下	？	分子粘性のみを与える。 流体のあらゆる動きを陽に表現。	
LES	数10m	数キロ 周期境界条件	大きな渦成分は陽に解く。周期境界	乱流シミュレーション。下層雲のシミュレーション。
領域(メソ)モデル	数キロから数百メートル	例えば日本近辺。領域境界ではネスティングにより全球モデルからデータを得る。	乱流パラメタリゼーションの使用。	日々の天気予報モデル
全球モデル	数百から数キロ	全地球	積雲パラメタリゼーションを使うことが多い	週レベル以上の天気予報や気候変動予測

# 離散化の種類

- スペクトル法(基本は全球)
  - 球面調和関数で波数展開する方法。...現在の主流
  - ダブルフーリエ法
- 格子法
  - 緯度経度格子(全球or領域) ...海洋や領域モデルでは主流
  - Cubic 格子(全球)
  - 陰陽格子(全球)
  - 20面体格子(全球) ...今後の主流 (多分...(笑))

# スペクトル法

- 諸変数(基本は温度、速度ポテンシャル、流線関数、水蒸気量)を球面調和関数展開

$$T = \sum T_{nm} P_{nm}(\lambda, \theta) \exp(im\lambda) \quad \text{温度}$$

$$\psi = \sum \psi_{nm} P_{nm}(\lambda, \theta) \exp(im\lambda) \quad \text{流線関数}$$

$$\phi = \sum \phi_{nm} P_{nm}(\lambda, \theta) \exp(im\lambda) \quad \text{速度ポテンシャル}$$

$$q = \sum q_{nm} P_{nm}(\lambda, \theta) \exp(im\lambda) \quad \text{水蒸気}$$

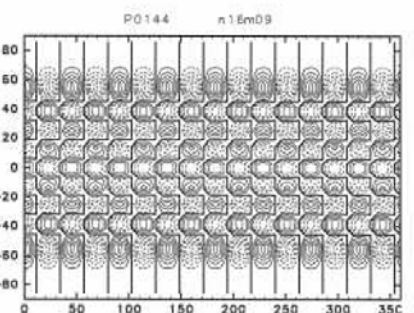
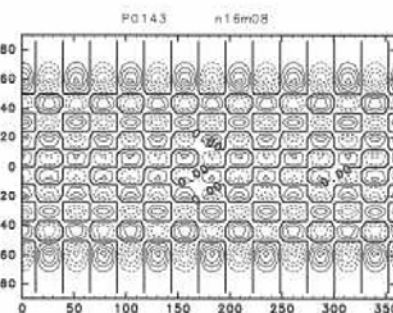
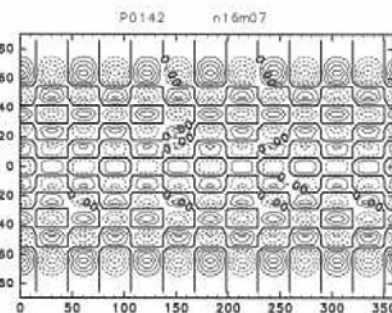
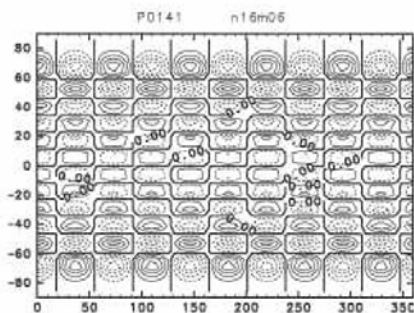
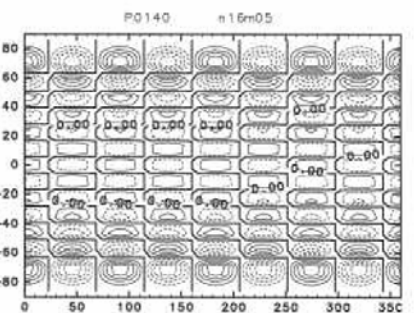
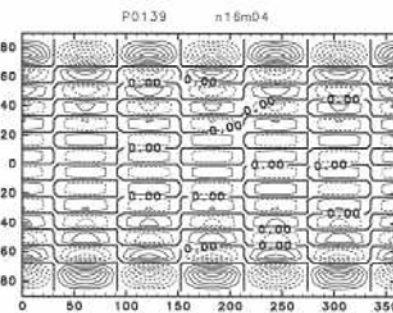
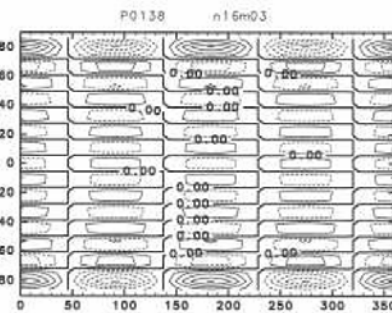
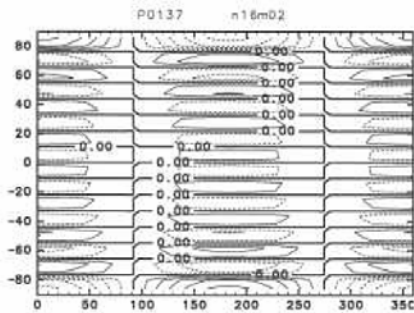
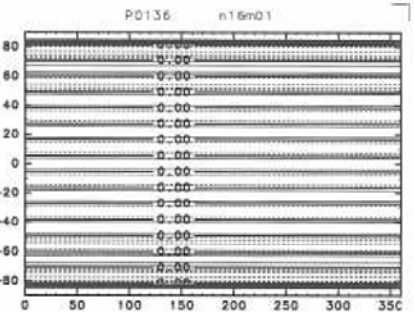
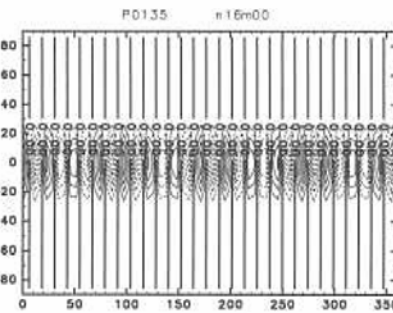
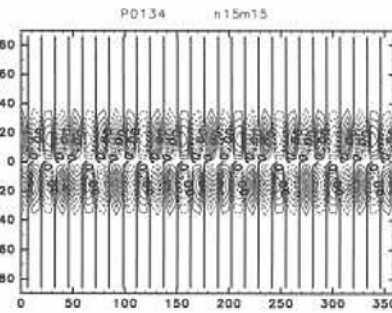
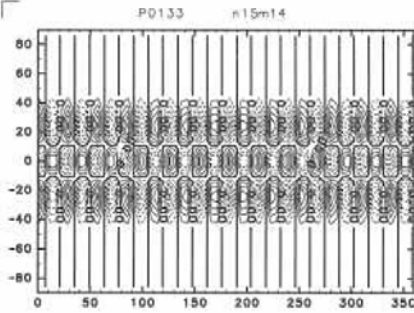
Legendre 陪関数

$$P_n^m(\zeta) \equiv (1 - \zeta^2)^{\frac{|m|}{2}} \frac{d^{|m|}}{d\zeta^{|m|}} P_n(\zeta)$$

$$P_n(x) \equiv \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} (-1)^k x^{n-2k} \frac{(2n-2k)!}{k!(n-k)!(n-2k)!}$$



# 球面調和関数の例



# 具体的には

- 毎ステップ、予報変数を数回

格子形式  $\Leftrightarrow$  スペクトル形式

に変換する「変換法」を用いる

- 例えば温度の式

$$dT/dt = \nabla(VT) + \dots \text{ を考える}$$

- 水平微分項はスペクトル形式のデータを用いる。  
( $\nabla$ の部分)。演算誤差0
- 非線形項の計算には格子形式のデータを用いる。  
(掛け算VTの部分)

# スペクトル法の長所、短所

- 長所

- 差分誤差がゼロ。(波数切断の効果を除く)
- なので理論研究に向いている

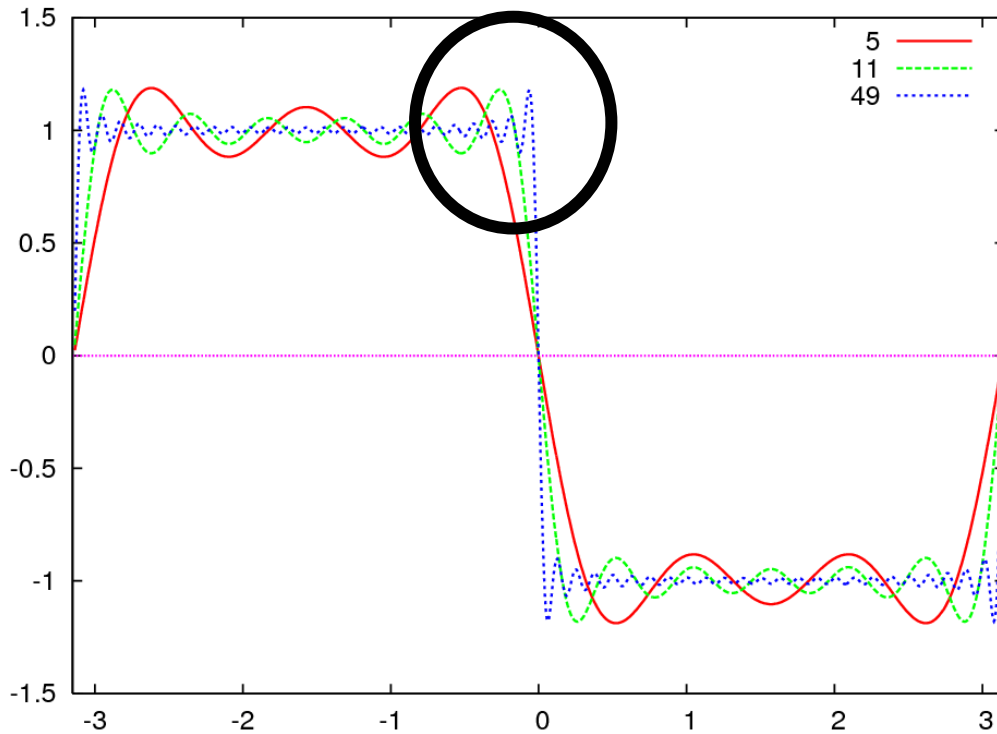
- 短所

- ギブスの現象(非負が保証されない)
- ガウス緯度の桁落ち?
- 並列化時の高速化が難しい。(隣接通信ではないので)

でも何よりの欠点は、高解像度で計算コストがかかりすぎることに。

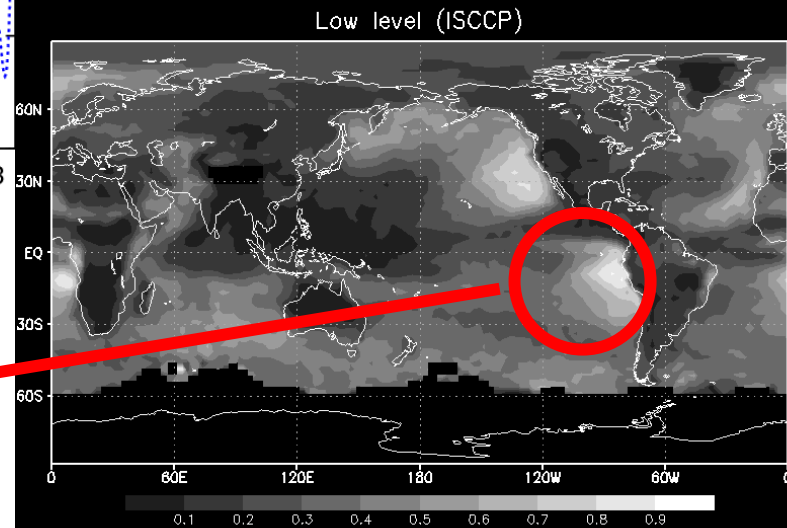
# ギブスの現象

解像度を上げててもノイズの高さは不変



負の降水や、非現実的な地形の壁が生じる問題。

離岸する原因



# 何よりの欠点は高解像度で 計算コストがかかること

切断波数をMとすると、

スペクトルモデルでは：

- 自分の配列の大きさ：緯度M, 経度MでMの2乗のオーダー
- $\Sigma$ による加算：Mのオーダー
  - 合計Mの3乗のオーダーの乗算が必要と言われてきた  
(最近では $M^2 \log M$  で済むアルゴリズムが提唱されている)

ダブルフーリエモデルでは

- FFTを使うので、 $M^2 \log M$  のオーダー

格子モデルでは：

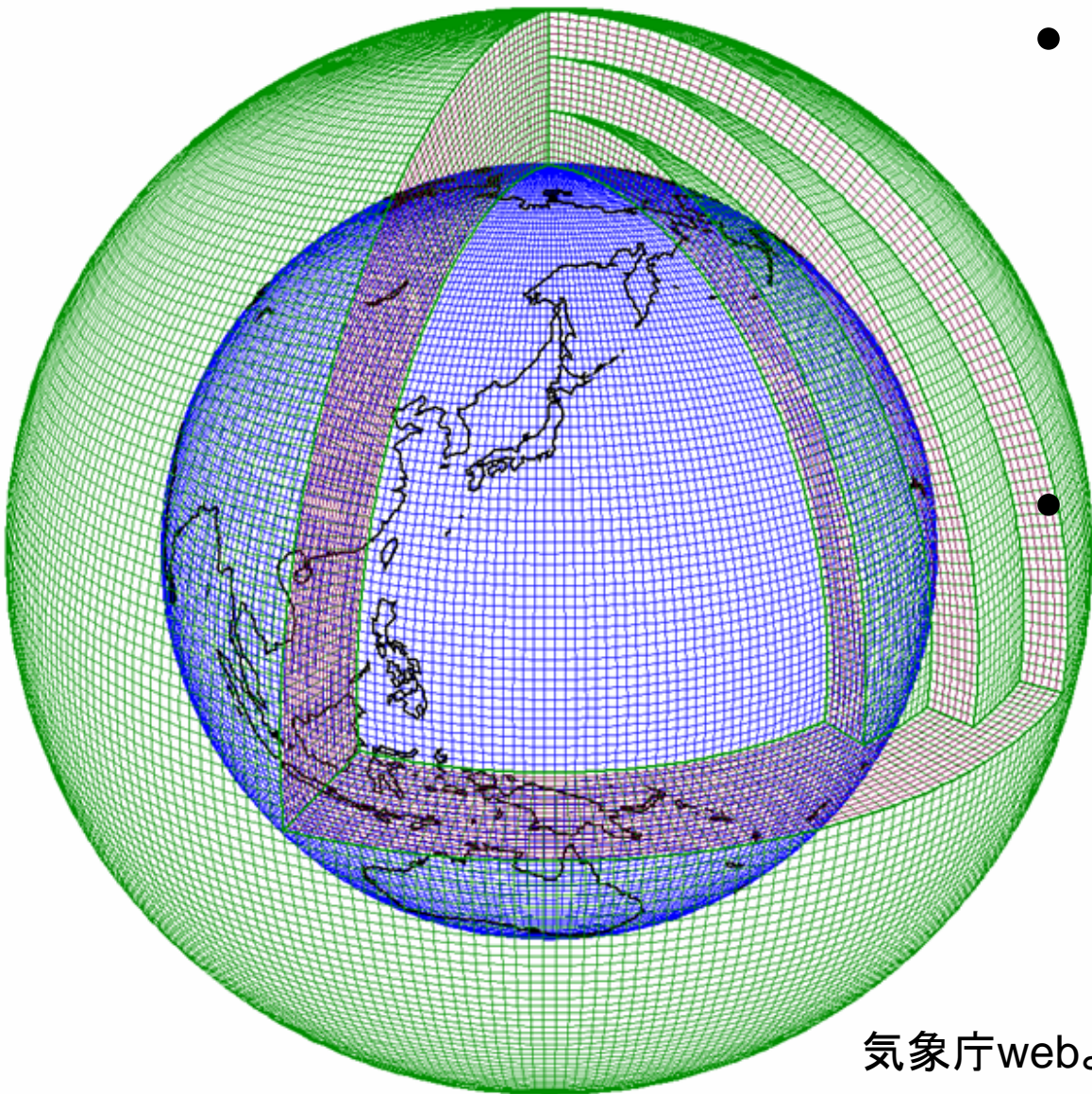
- 格子の数に比例するので、Mの2乗のオーダー

→ スペクトルモデルは格子モデルに比べて  
高解像度で  $\log M$  倍コストかかる！！

# ということで...

- スペクトル法には未来はない！（多分）
  - 世界のトレンドは格子法に向かいつつある。
  - とはいえ、最近、計算効率が格子のM倍ではなく  $\log M$  倍で済むようになったので、まだまだスペクトルも頑張っている。

# 緯度経度格子



- 欠点

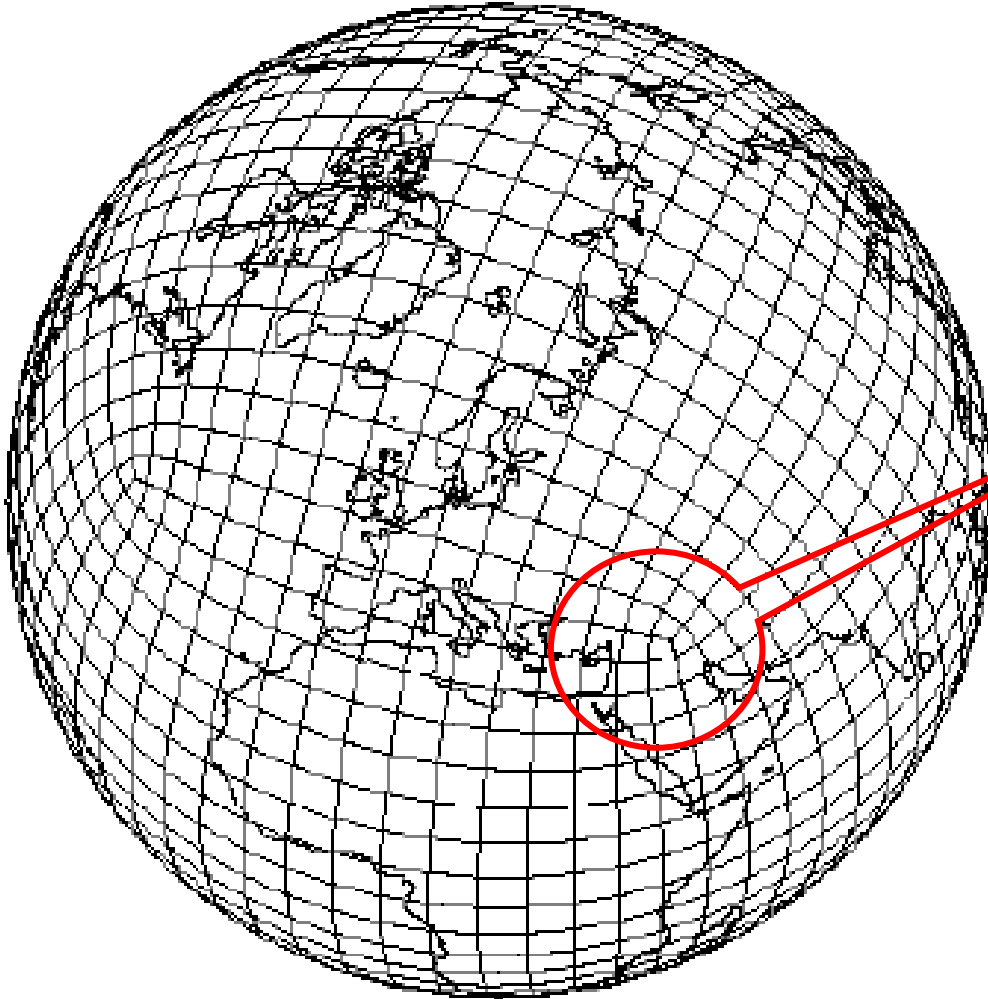
- 極にいくほど東西の格子間隔が狭くなる。

- 極で情報量の無駄が生じる。
- CFL条件が厳しくなる。

- 用途

- 領域モデルでは一般的。
- 海洋でも一般的。

# Cubic 格子



従来の緯度経度座標に似ている  
ので、フォーミュレーションが容易

Cubic の角の部分の扱いが  
やっかい。

Williamson 1968

Sadourny et al.1968

Purser and Rancic

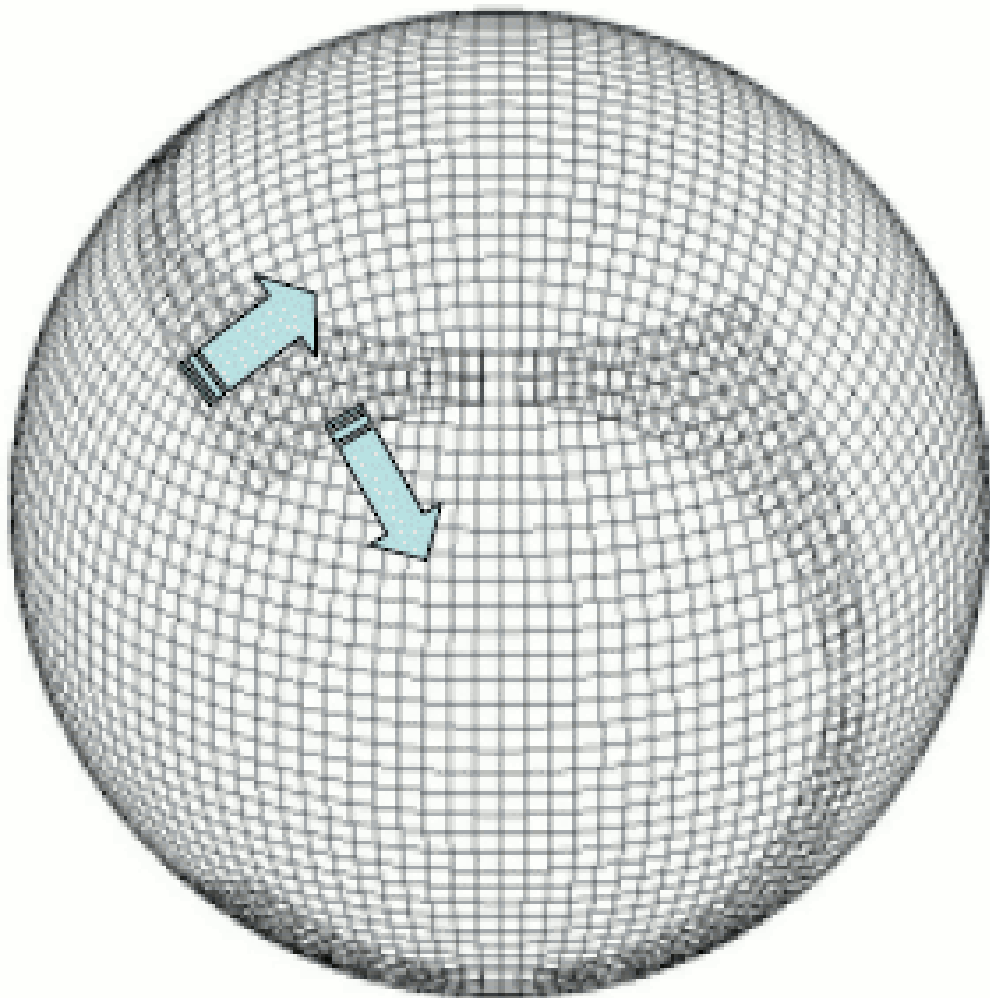
McGregor and dix1997

Adcroft et al 2004

Tsugawa et al 2008



# 陰陽格子



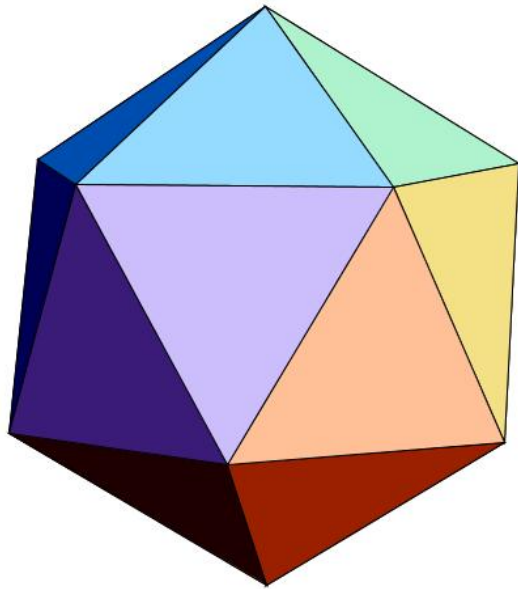
- 利点: 従来の緯度経度座標のフォーミュレーションをそのまま使える。
- シームの部分の扱いがやっかい。

Kageyama and Satoh 2004

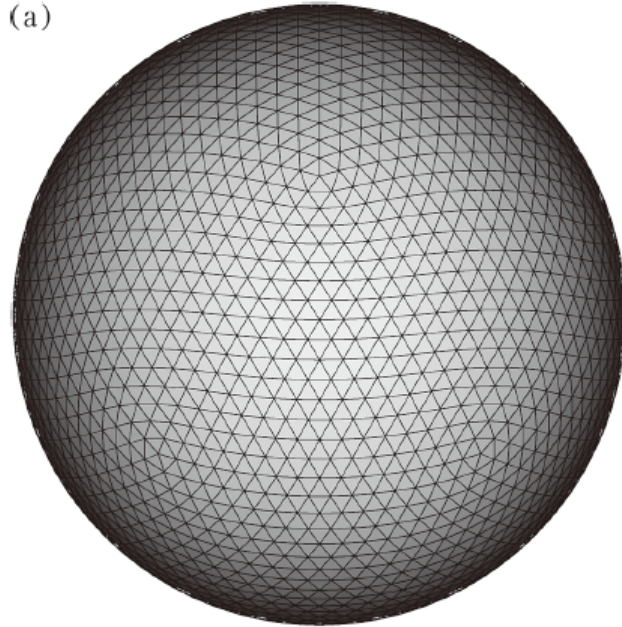
Peng et al. 2006(QJRMS)

Baba et al. 2010 (MWR)

# 20面体格子は流行りつつある



(a)



CSU-AGCM  
ICON  
GME  
NICAM  
FIM

ただ、20面体だけでは面白くない。  
ということで、自分が開発中の格子に関する話をこれからします。

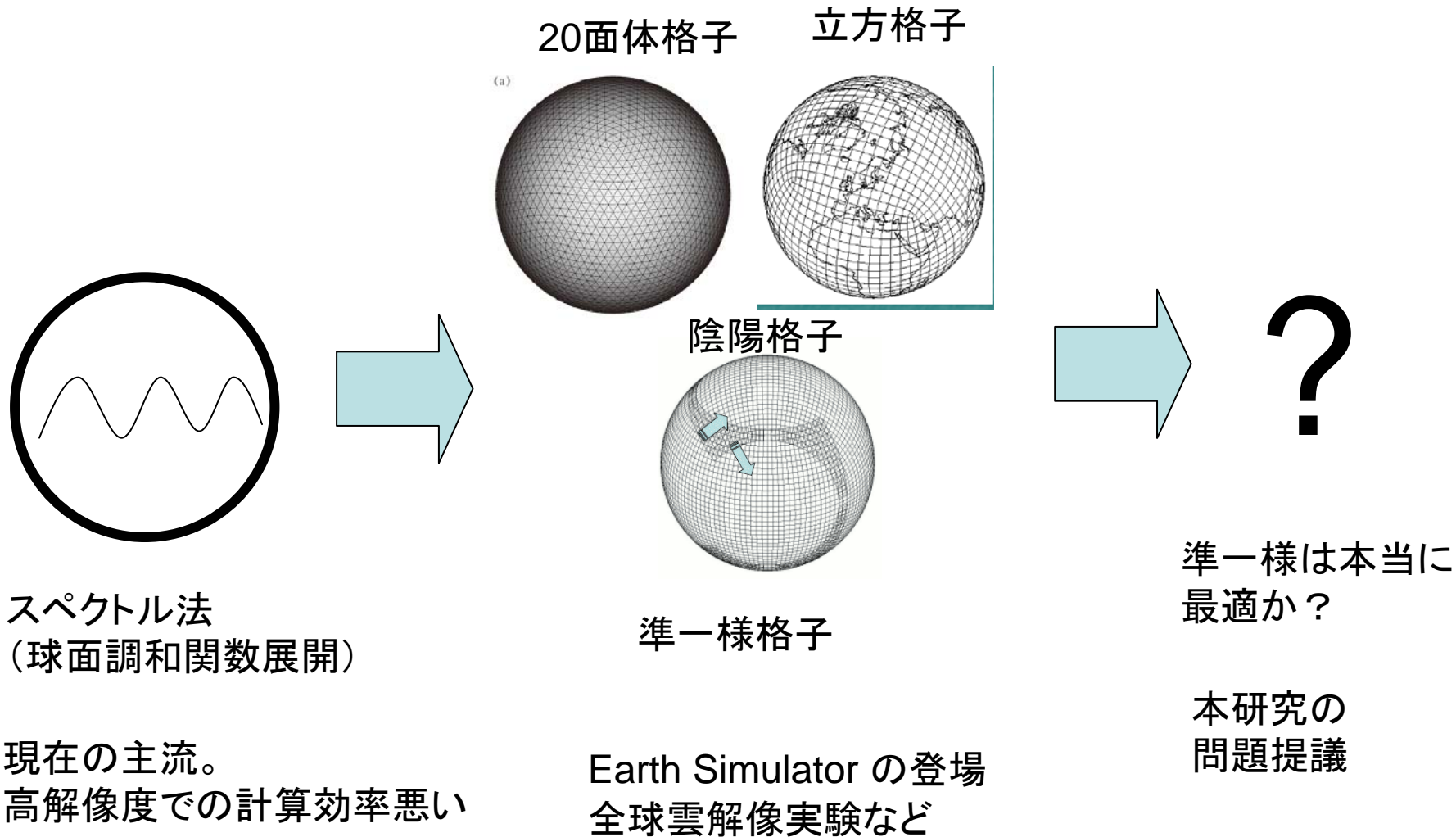
# 熱帯または局所領域で細かいス トレッチ型三角格子

2010 12

伊賀 晋一

NICAM グループ, 海洋研究開発機構

# 大気大循環モデルの変遷



# 熱帯で細かくすればいいのでは？

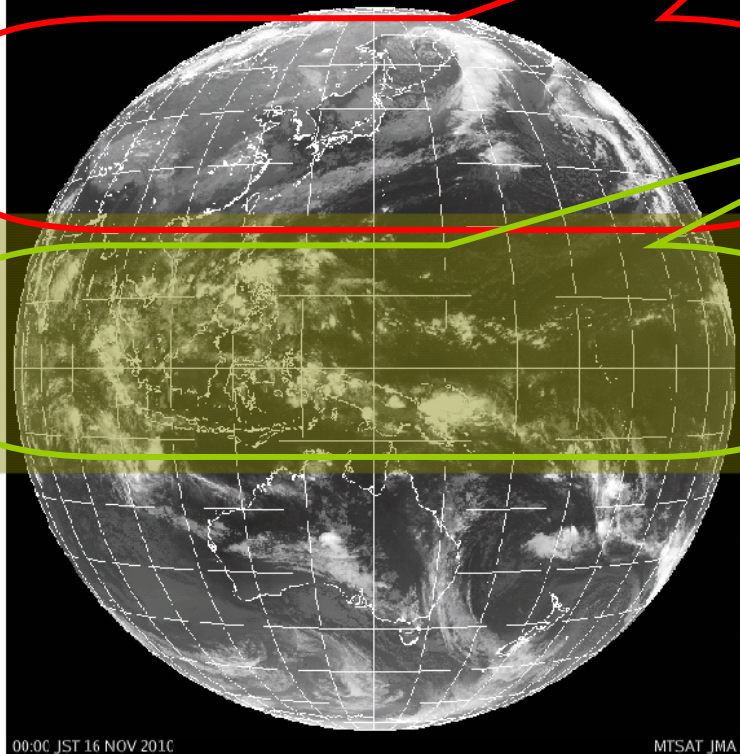
中高緯度は、日々の高低気圧に支配される。  
数100キロの格子間隔で十分

熱帯は個々の積雲対流がupscaleで組織化し、大規模スケールの波に影響を与える。  
数キロの解像度が欲しい。

積雲対流の  
活発な熱帯  
のみを高解  
像度にすれ  
ば効率的。

- 極端な話、大気大循環を表現するだけなら熱帯だけ細かくすればいいのでは？

全球 赤外



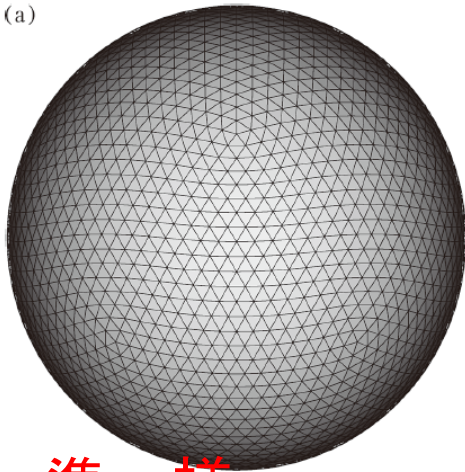
赤外画像(気象庁)

# 様々な格子を提唱

Newly proposed

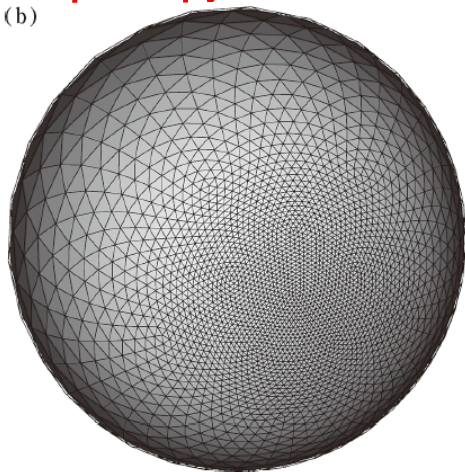
20面体格子

(a)



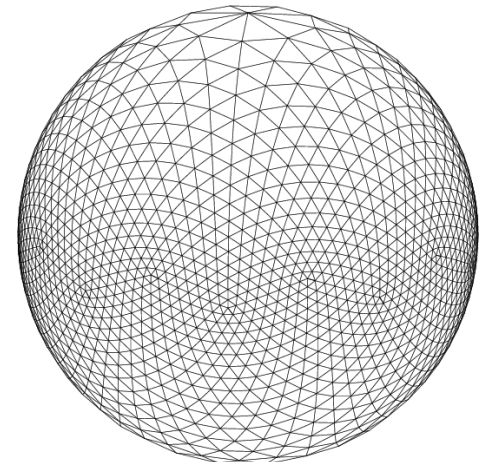
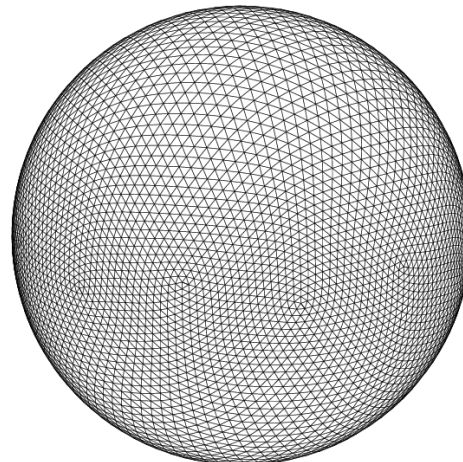
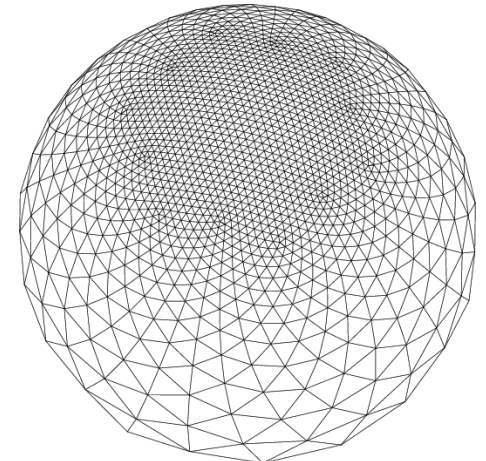
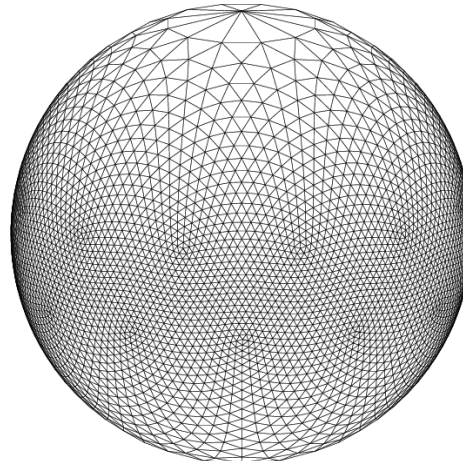
準一様

(b)



Stretched (Tomita2008)

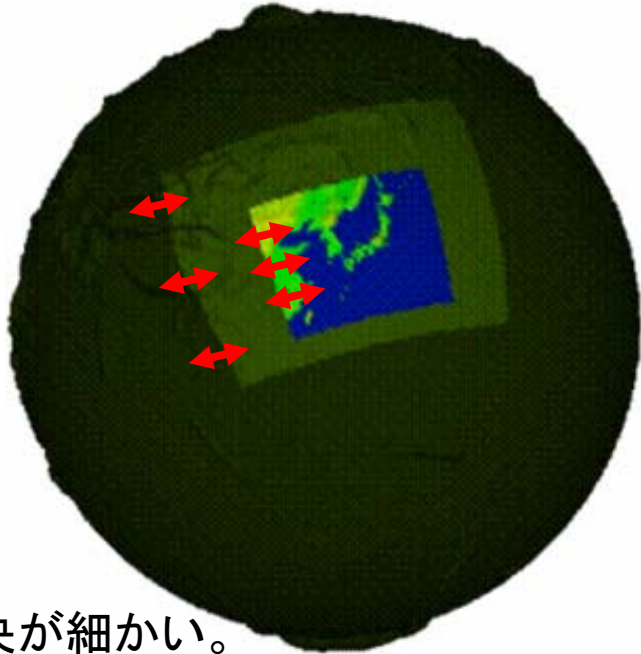
topologyを変えた



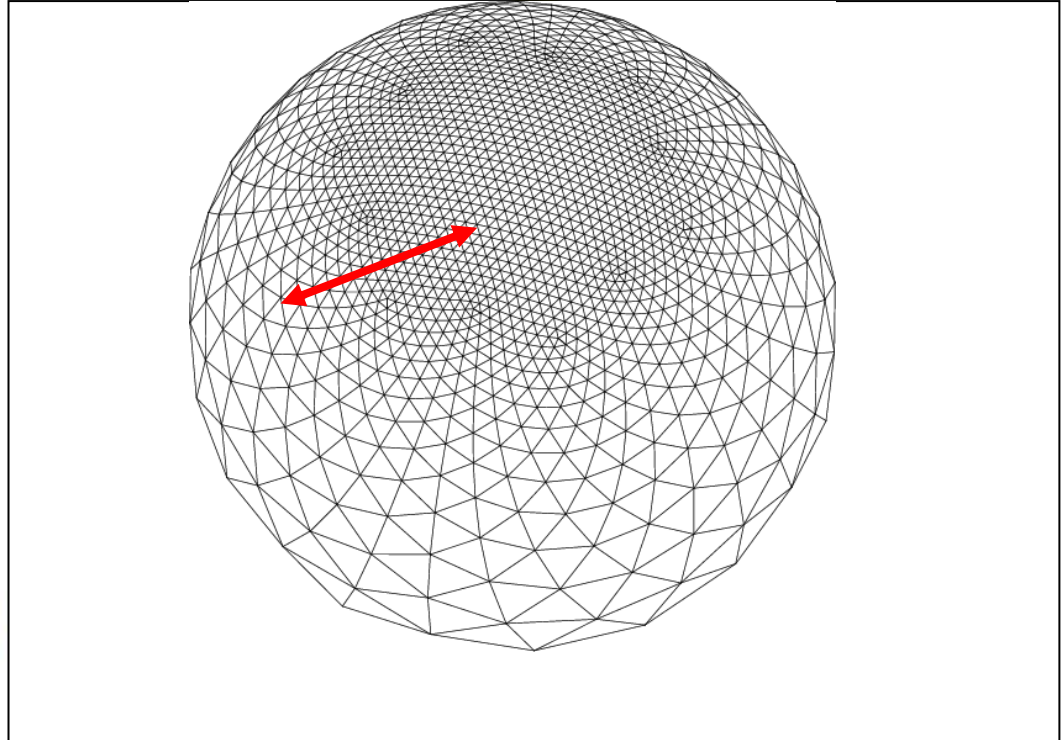
非一様

(Iga 2011, 投稿中)

# 局所領域を細かくもできる



中央が細かい。  
暗い所は粗い 気象庁webより



従来のネスティングモデルでは  
境目の波の反射が問題になる。  
全球から領域への1way

新格子では解像度が連続的に変化する  
ので、波の反射の問題は低減される。  
全球から領域、領域から全球の2way

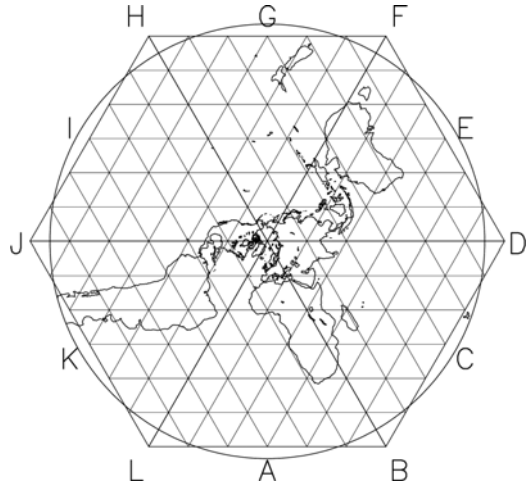
# 構造格子である

- コードはNICAMをベースとする。
- 全てダイヤモンド型の領域要素で構成される
- 従って構造がシンプルであり、並列化やベクトル化に向いている。

以下、格子の作り方の説明



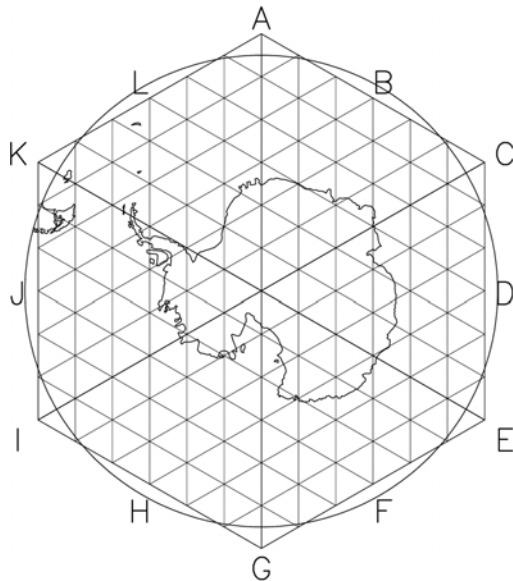
# 1、PSP格子



正六角形にポーラステレオ地図を投影する。

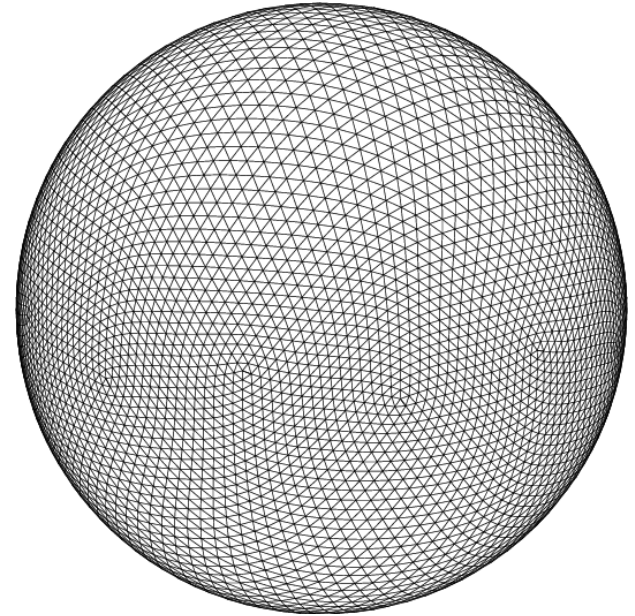
同じアルファベットをつなげる。

Tomita2001のばね格子でスムージング



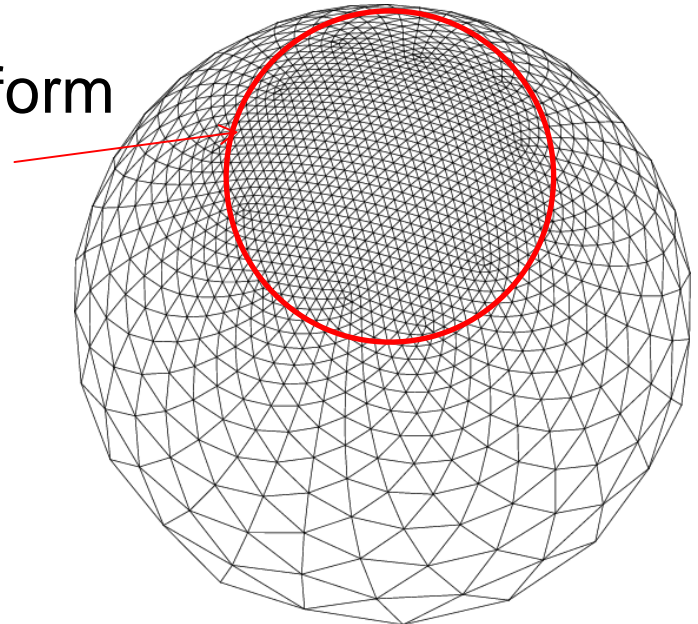
領域モデル

赤道でつなげた場合



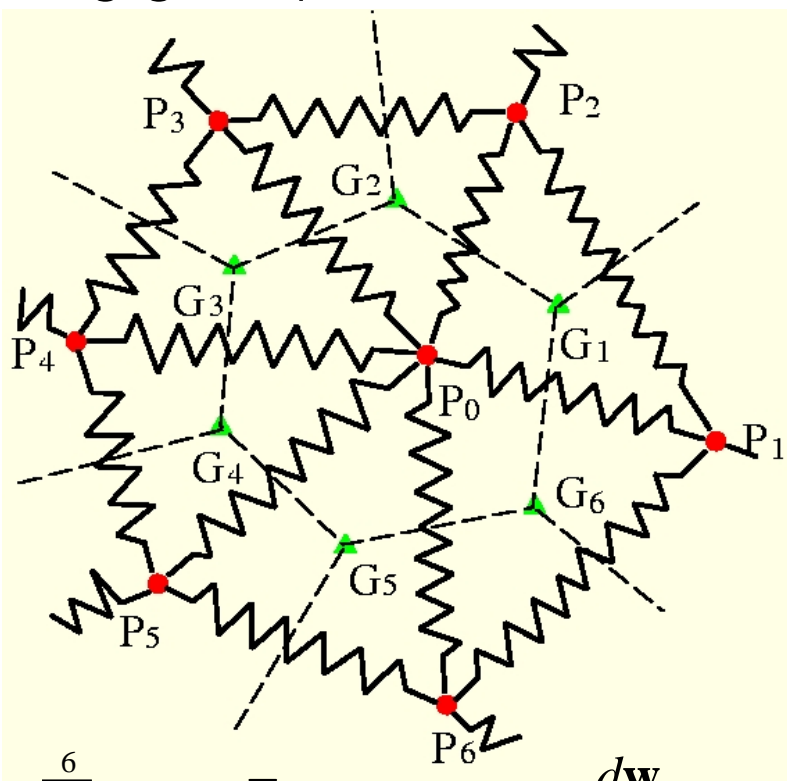
60Nでつなげた場合

Quasi uniform



Spring grid (Tomita et al 2001)

# バネ格子で境目を平滑化



- Tomita et al 2001 ではバネ自然長を平均格子間隔の1.2倍として与えている。
- 本研究では解像度が非一様なので、同様にはいかない。
- なので、ここでは自然長を0にする。

$$\sum_{i=1}^6 k(d_i - \bar{d})\mathbf{e}_i - \alpha\mathbf{w}_0 = M \frac{d\mathbf{w}_0}{dt}$$

$$\mathbf{w}_0 = \frac{d\mathbf{r}_0}{dt}$$

## SPR-grid:

Solve the spring dynamics

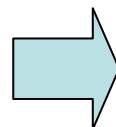
→ The system calms down to the static balance

# バネ格子2

自然長を0にすると、特異点  
で格子の粗密が生じる。

7角形の周り

5角形の周り

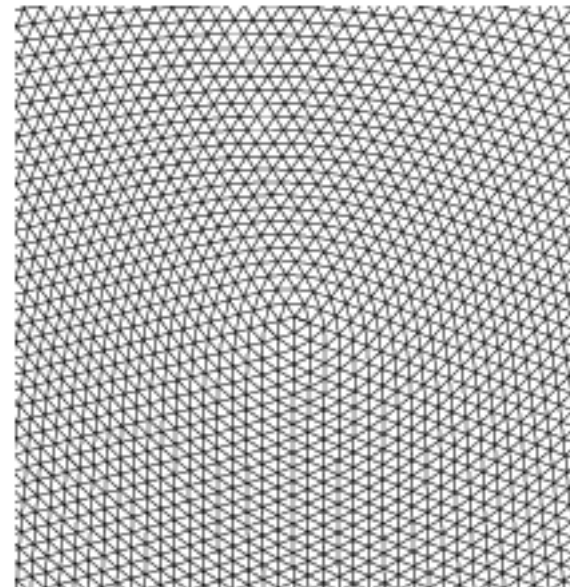
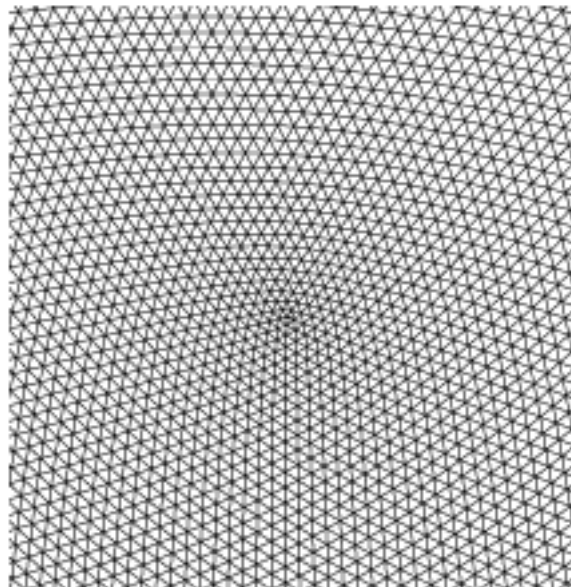
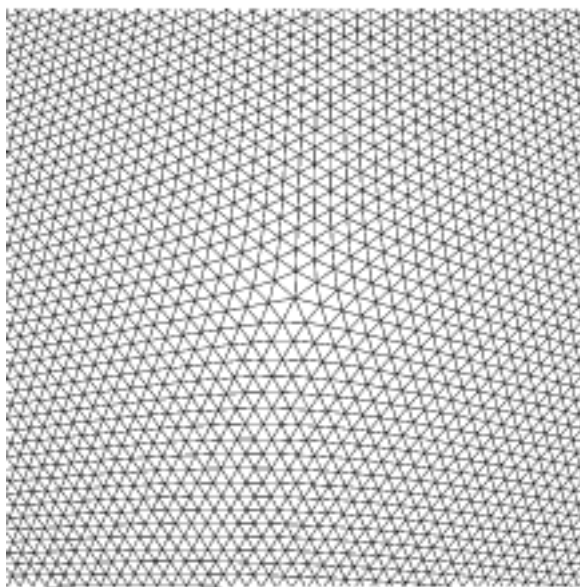


解析関数で修正

(a) around  $GP_7$ ,  $\gamma = 0$  (conformal)

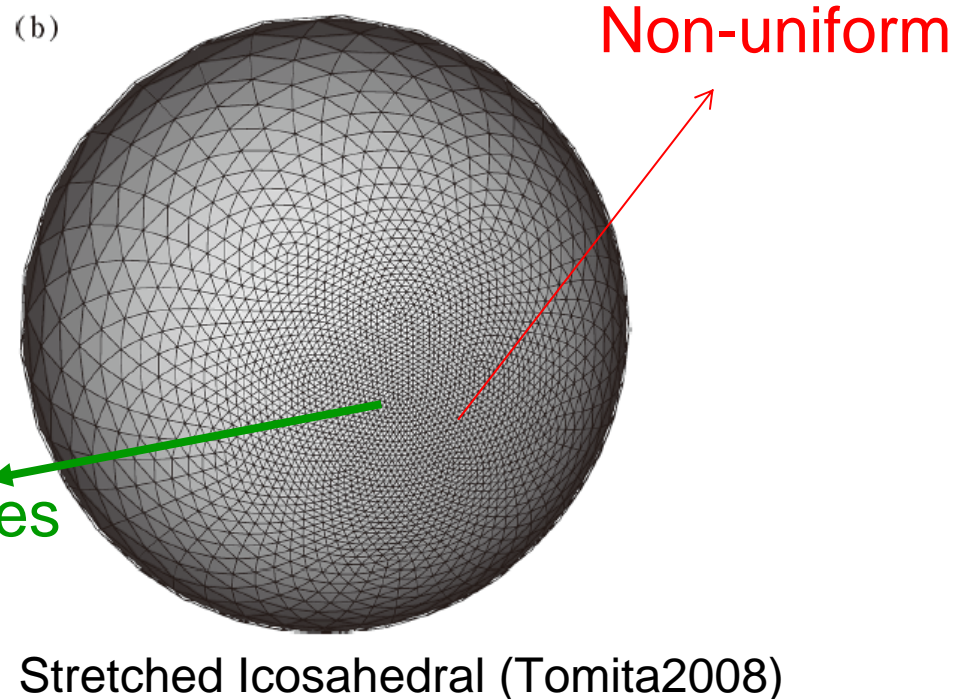
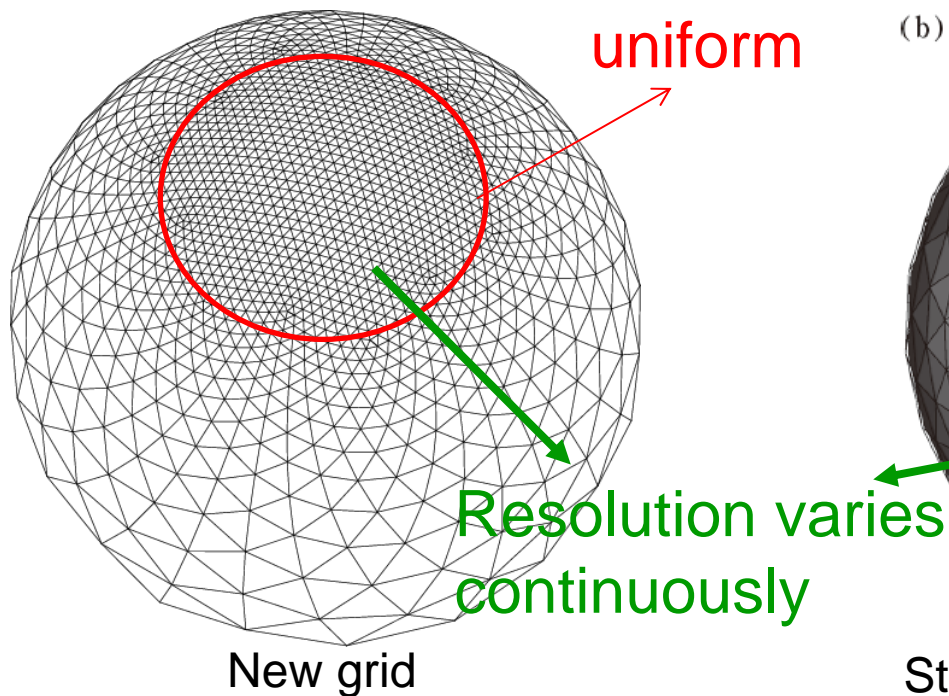
(b) around  $GP_5$ ,  $\gamma = 0$  (conformal)

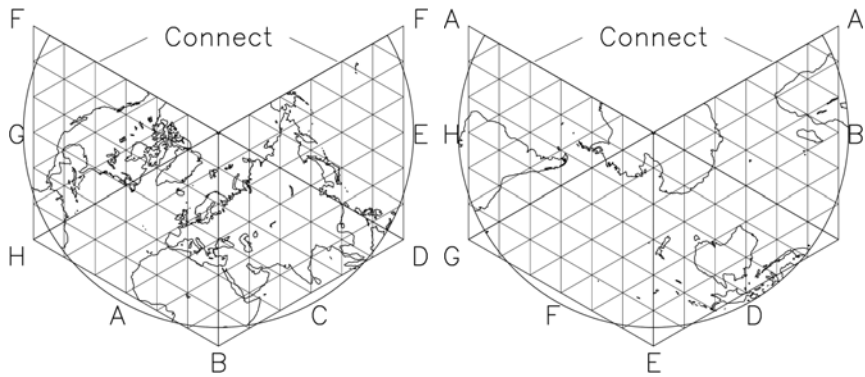
(c) around  $GP_5$ ,  $\gamma = 1$



# 富田2008との違い

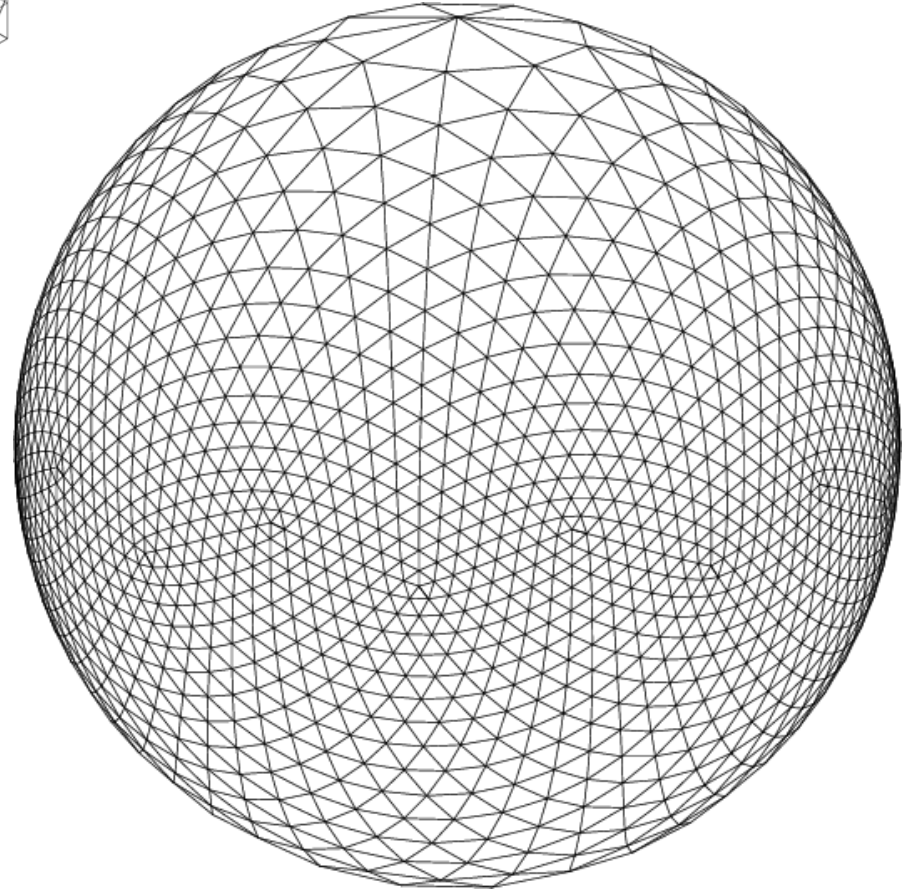
- ターゲット領域内部が一様





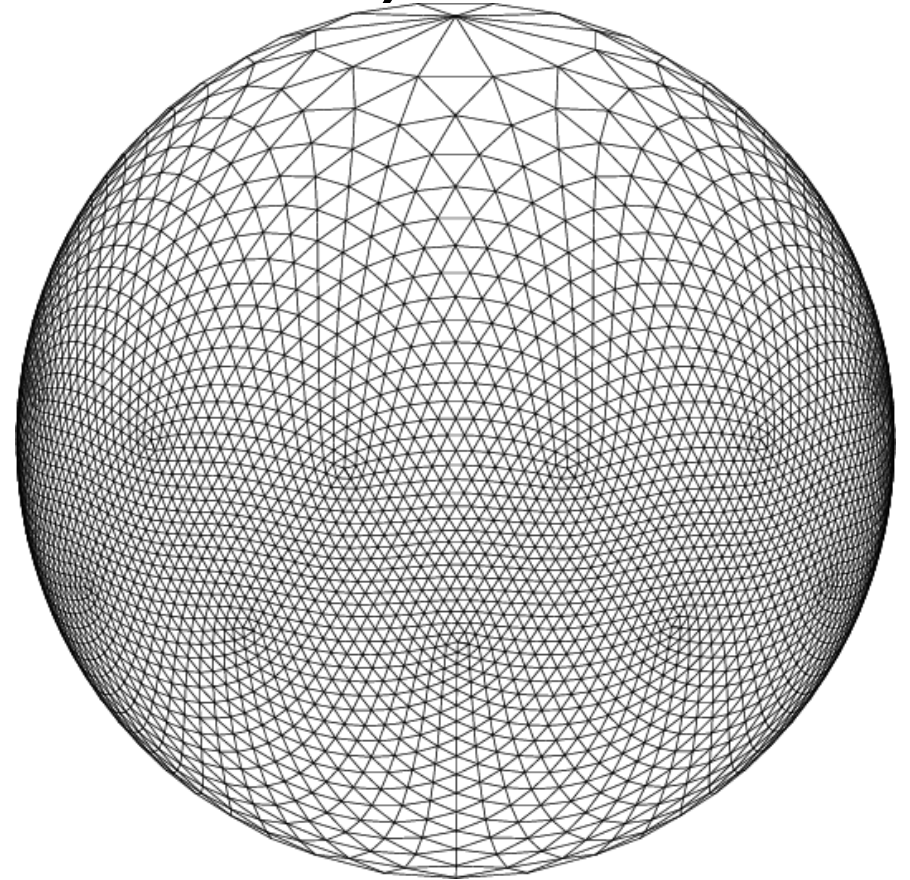
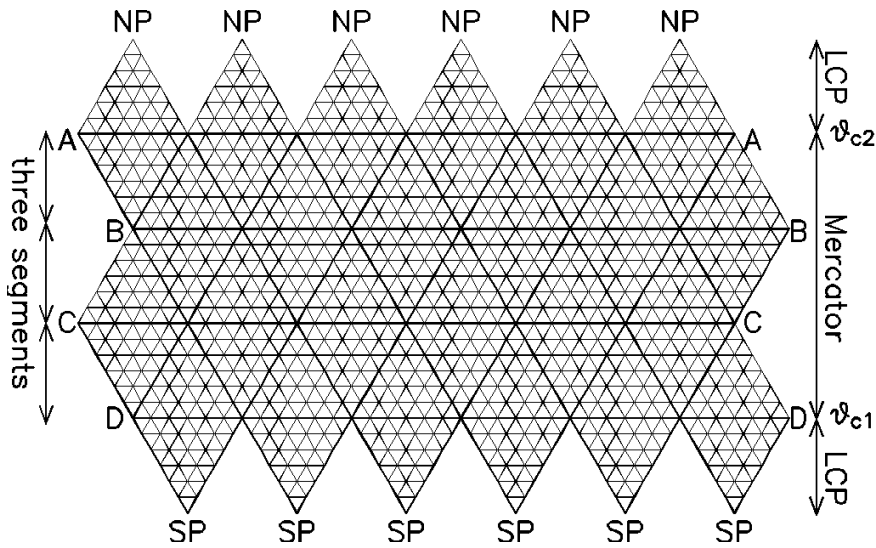
## 2、LCP (Lambert's conformal conic)

1, 2枚の Lambert 正角円錐図を組み合わせる。



PSPよりコントラスト大

# MLCP (Mercator + LCP)



高緯度でLambert 図を射影、  
低緯度で Mercator図を射影

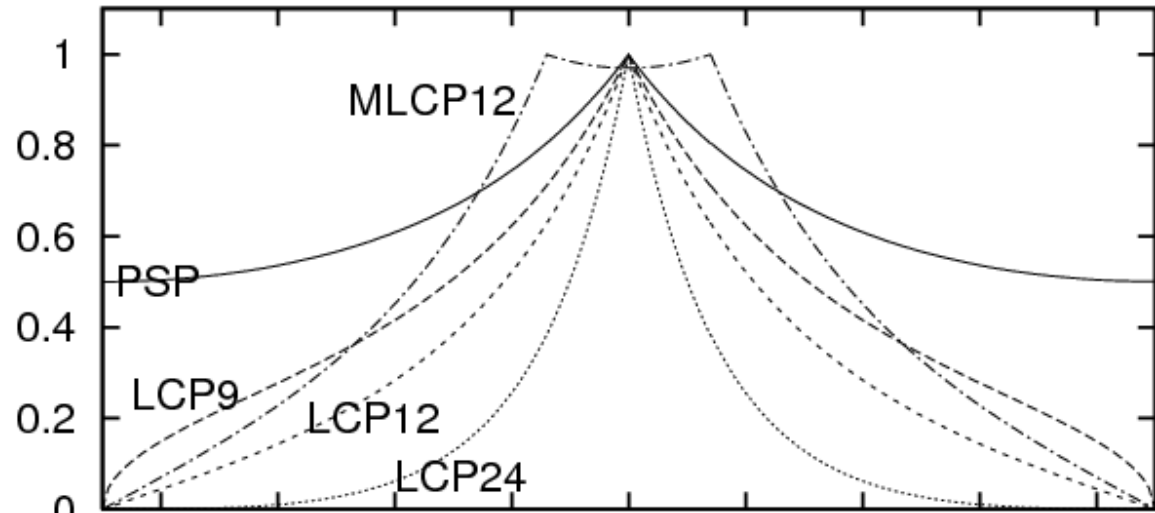
Tropical belt of uniform resolution

# resolution

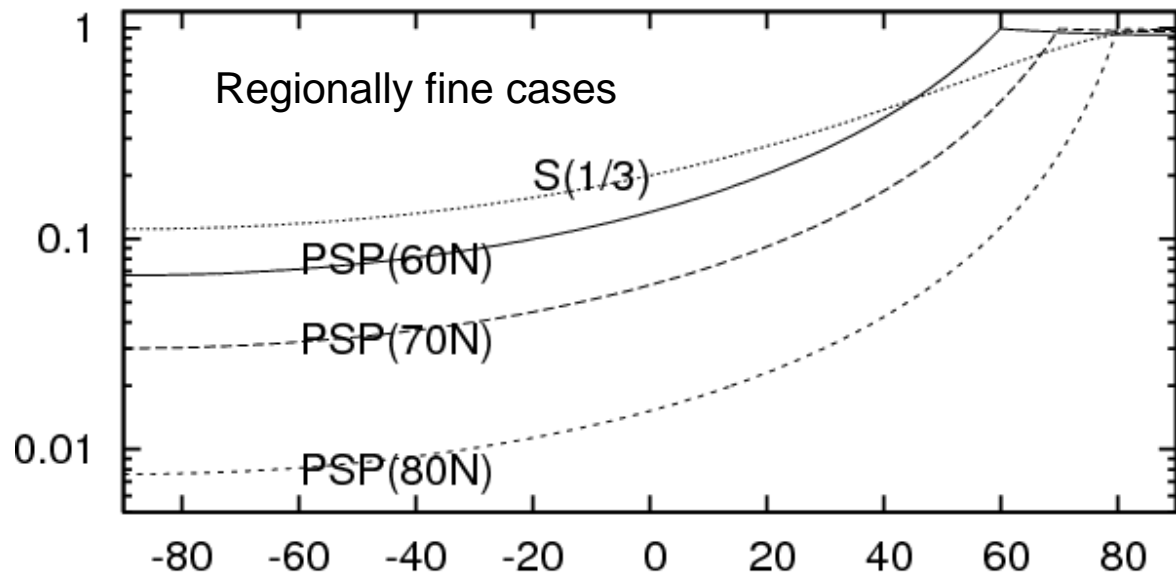
Normalized by maximum

様々な解像度の緯度分布をつくることができる。

Tropically fine cases



Regionally fine cases



S(1/3) is NICAM Stretch Model

# 格子トポロジー生成テクニック

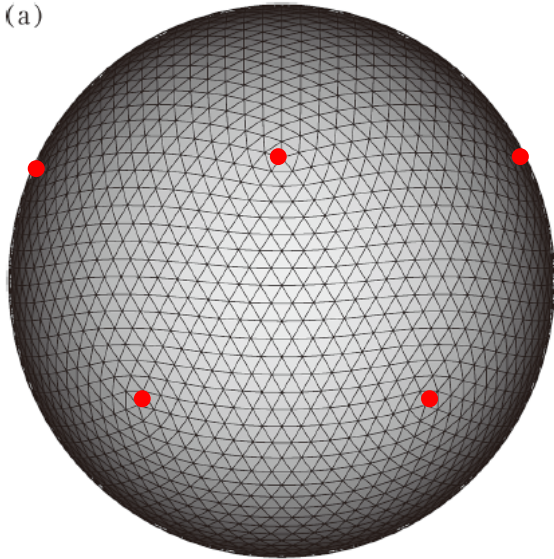
- $GP_n$ :  $n$ 本の線分でつながる点と定義。
- 三角格子の通常の点は $GP_6$ 。20面体格子は他に12の  $GP_5$ を持つ。
- Euler's formula:  
頂点 - 辺 + 面 = 2
- これを使うと、あらゆる三角格子では:  
 $\sum_n (6-n)V_n = 12$ 、  $V_n$  は of  $GP_n$ の個数。
- 全て $GP_6$ か $GP_5$ ならば、 $GP_5$ は12存在する



# 12のGP5を再配置する

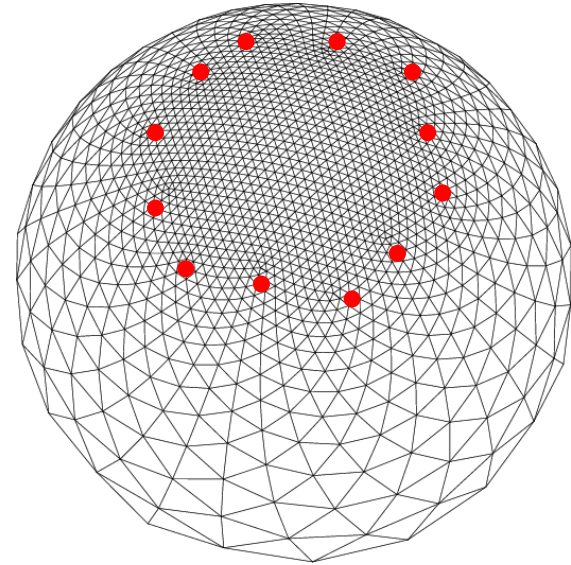
20面体格子

(a)



12のGP5  
が均等に  
分布

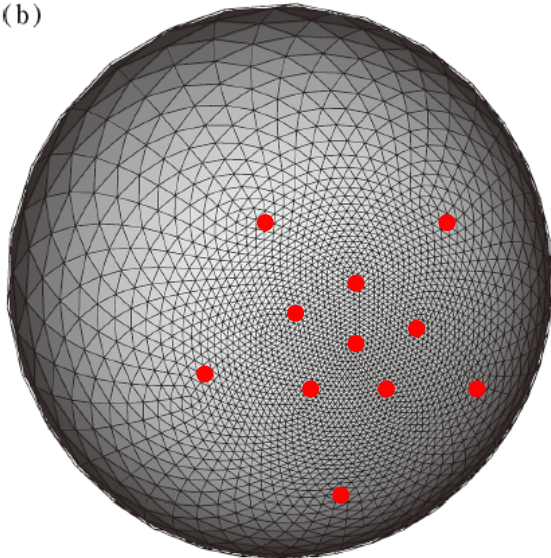
PSP (locally fine)



ターゲット  
領域の周囲  
にGP5を  
配置

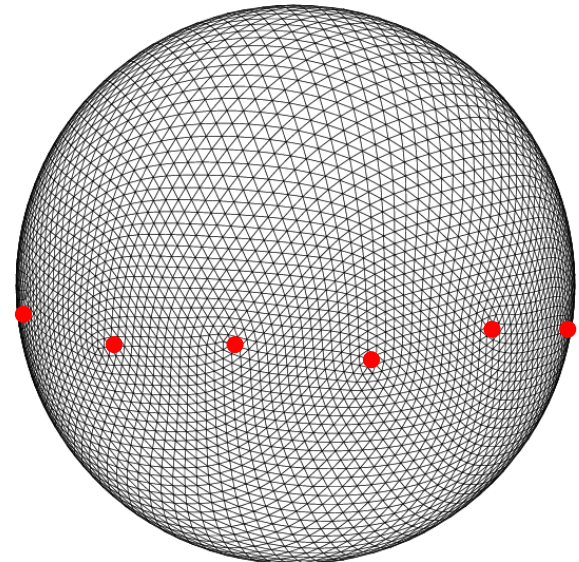
ストレッチした20面体格子

(b)



一部の領域  
にGP5が  
集中

PSP



赤道に  
GP5を  
配置r

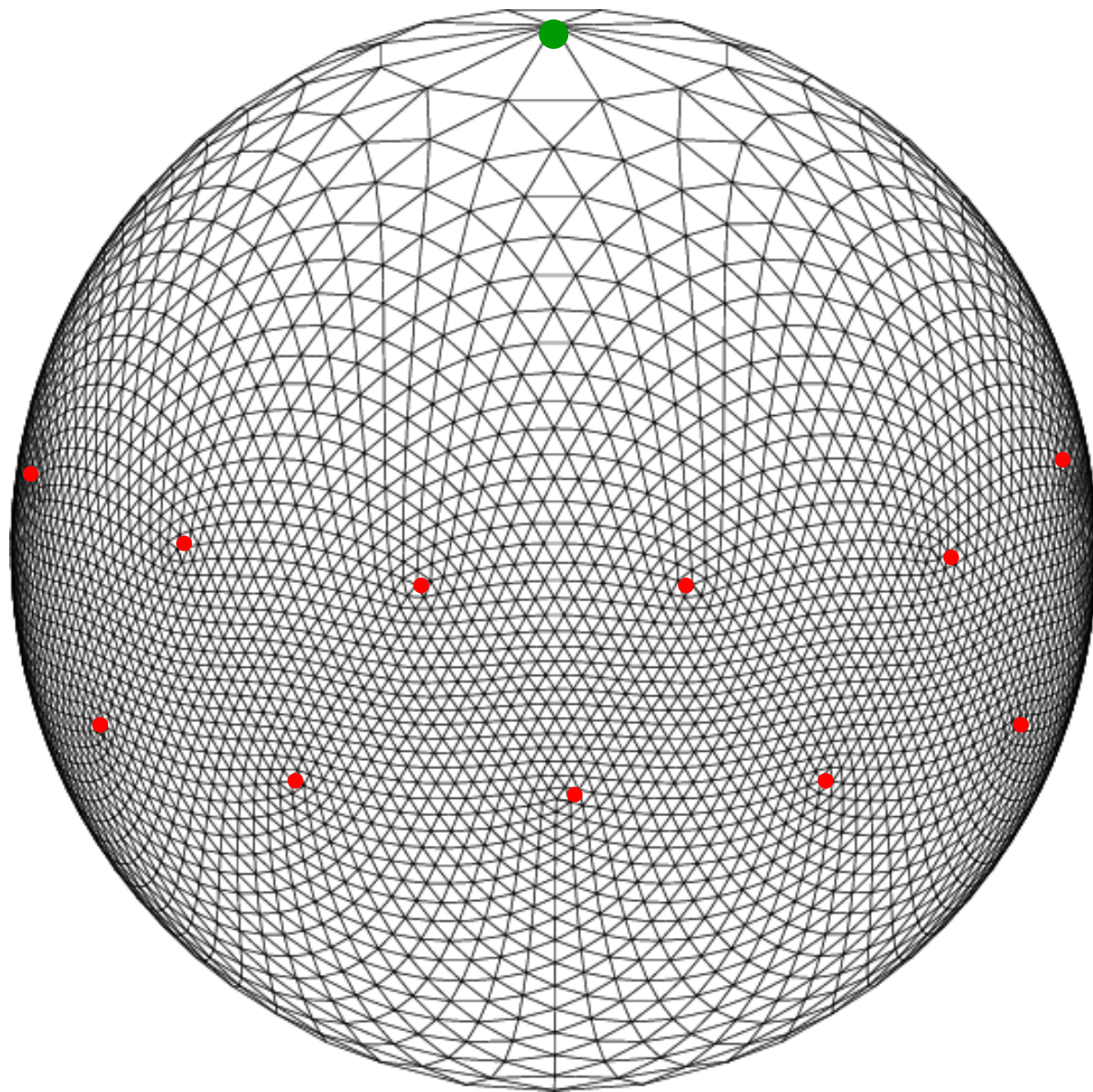
●  
GP5

# 24 GP<sub>5</sub> and 2 GP<sub>12</sub>

● GP<sub>12</sub>

● GP<sub>5</sub>

Quasi  
uniform



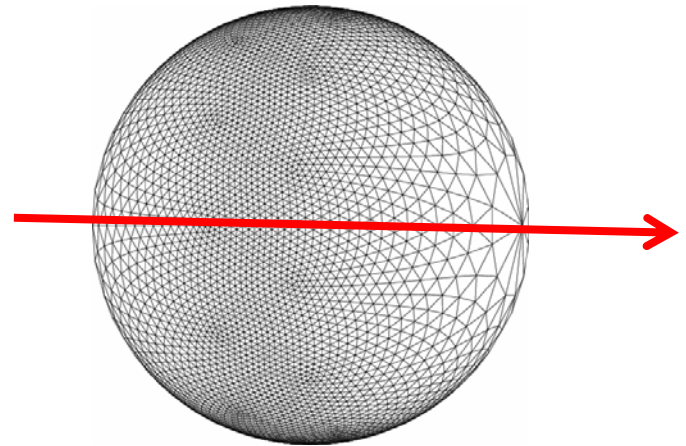
GP<sub>5</sub> を熱帯の境界に配置。  
GP( $n > 6$ ) を極に配置。

# Shallow-water テスト

- 新グリッドをNICAM (Tomita et al 2001)に実装
- Williamson et al.(1992) test case 1 and 2 を行った。
  - Test case 1: cosine-bell 型passive tracerを剛体回転に流す。12日間
  - Test case 2: 剛体回転。5日間

# 時間発展

MLCP 横倒しケース  
Dx\_min=53km

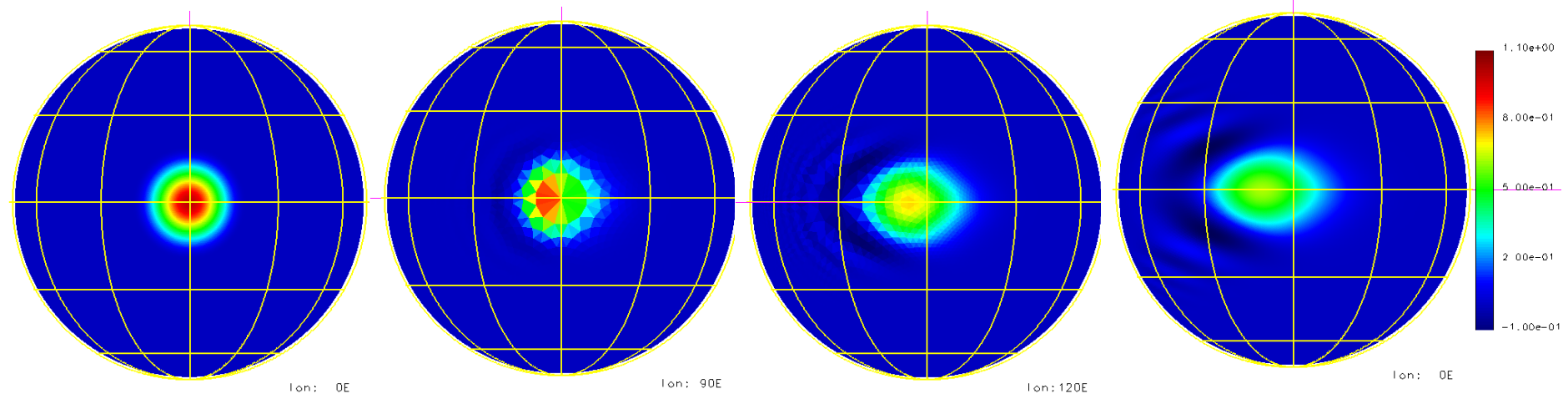


t=0

t=3day

t=4day

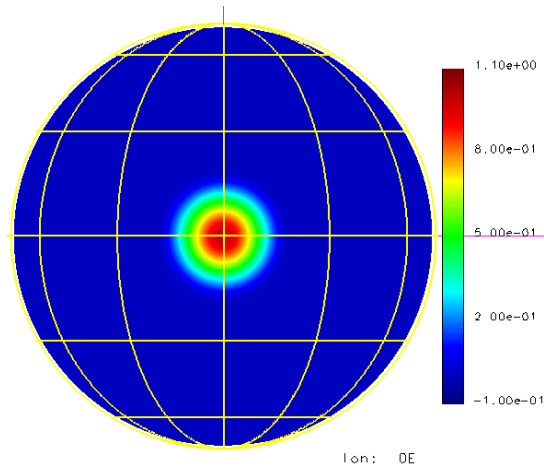
t=12day



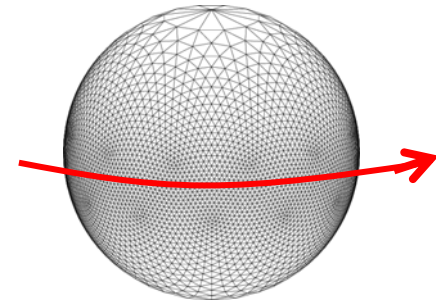
Grid interval around poles is near the size of cosbel. But original bell shape is remain

# 解像度依存性 1

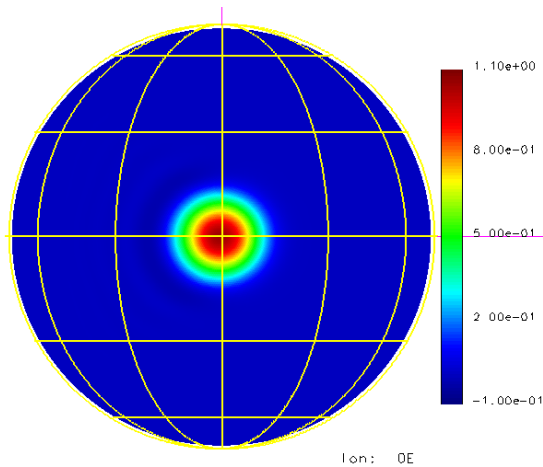
Initial



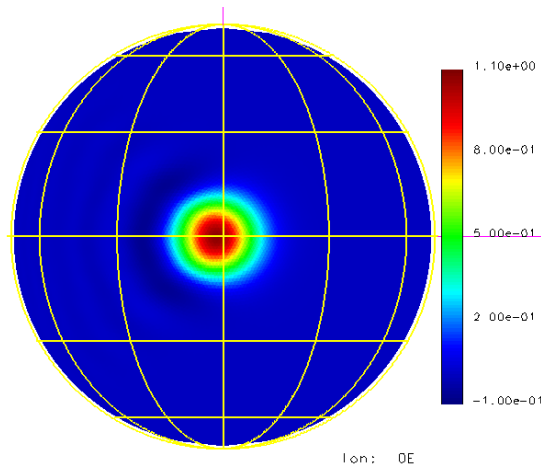
MLCP  
After 12 days



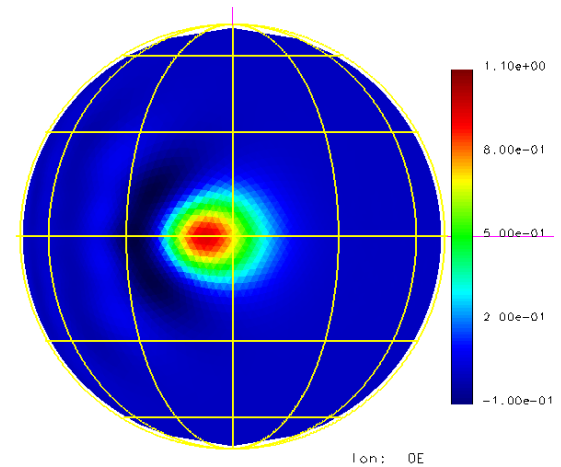
Dx\_min=53km



Dx\_min=108km



Dx\_min=212km

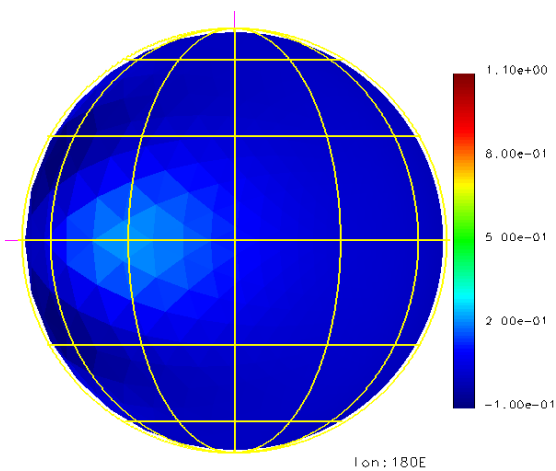


MLCP after 12days

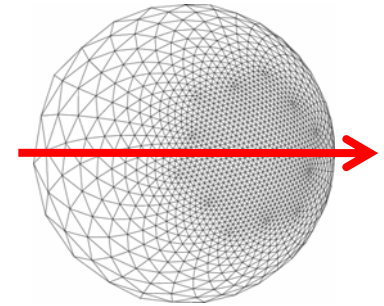
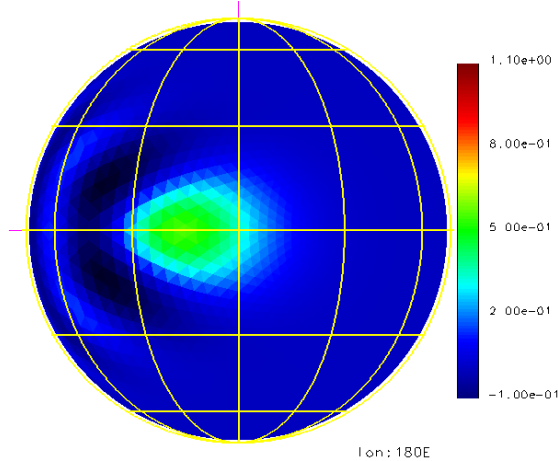
解像度が下がるとコサインベルが変形する。

# 解像度依存性 2

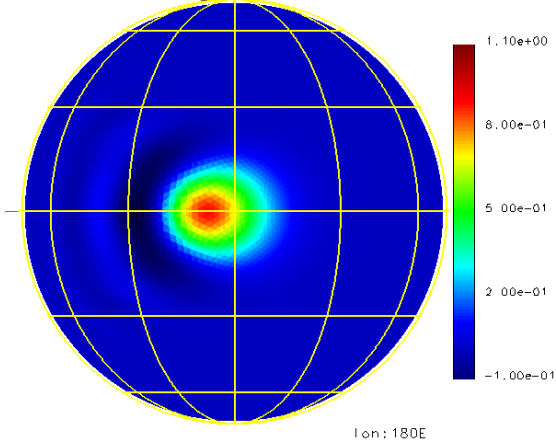
PSP-region dx=102km



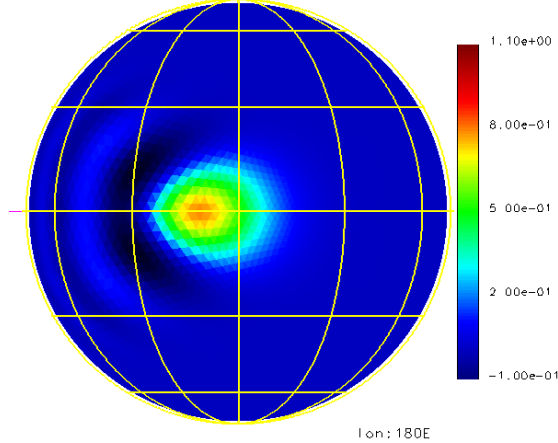
PSP-region dx=51km



PSP-region dx=25km



Icosahedral-stretched dx=27km

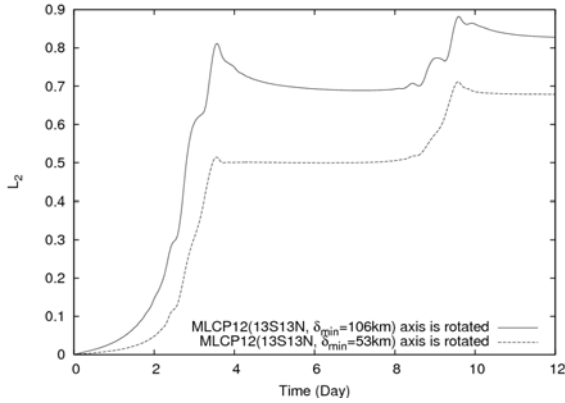


PSP regional model. After 12 days. As resolution increases, error decreases

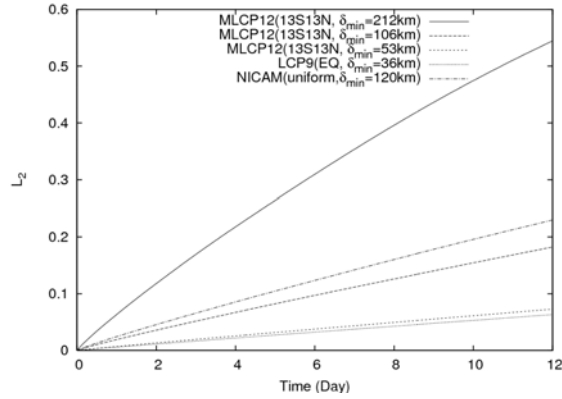
# 誤差

case1

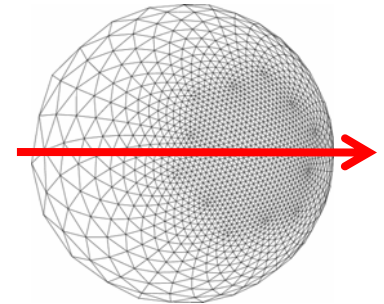
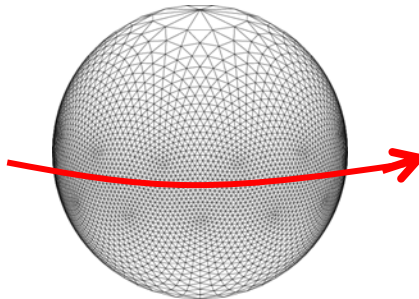
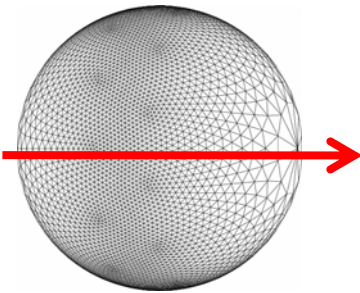
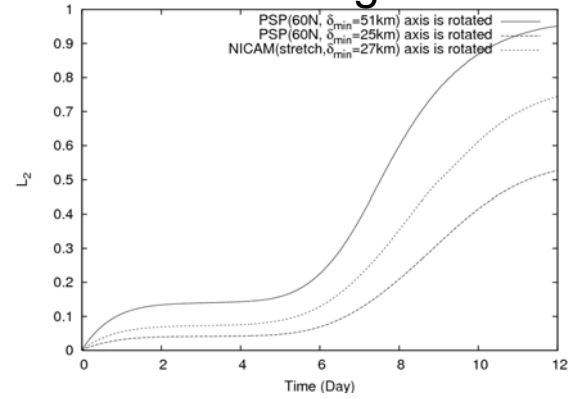
MLCP pole passing



MLCP equator passing



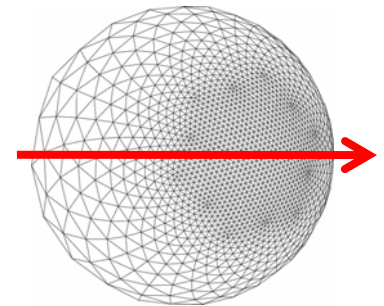
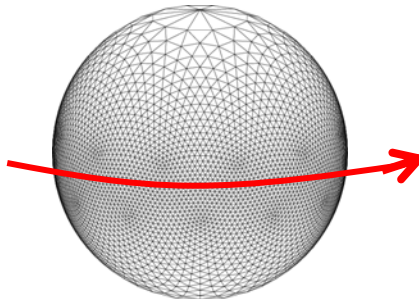
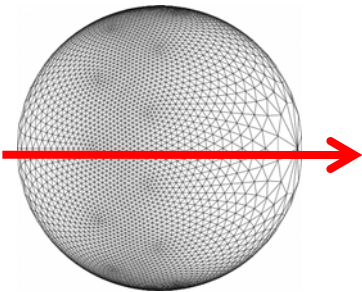
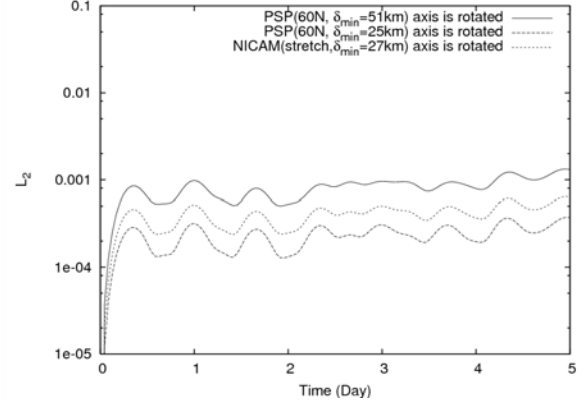
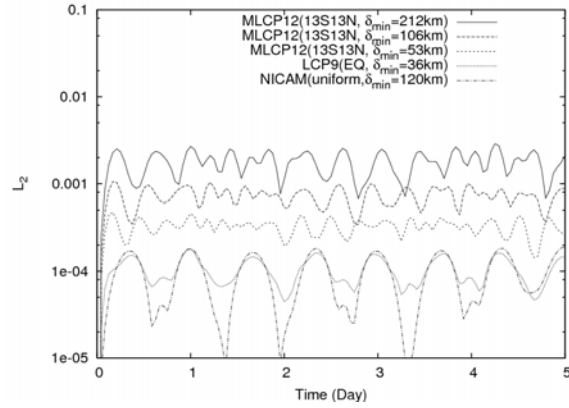
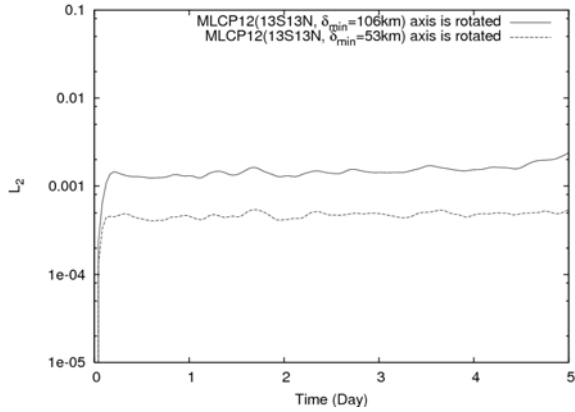
PSP regional model  
Pole massing



They are reasonable

# 誤差

## case2



They are reasonable



# 新格子研究の 今後の課題

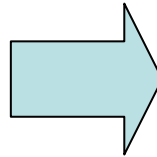
- 3次元NICAMでのテスト
- 周囲への売り込み

# 研究のスタイル

## 1: 目的先行型

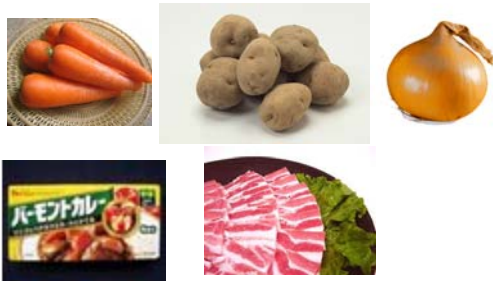


カレーを作ろう！

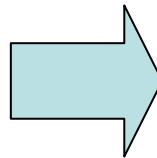


材料を買いに行こう...

## 2: 材料先行型



が、冷蔵庫に余っている...

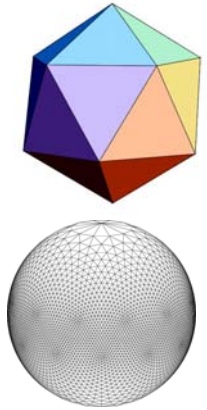
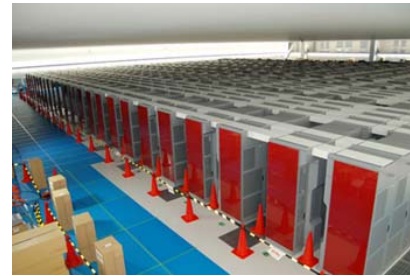
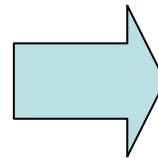


今日はカレーにでもしよう！

# 研究のスタイル

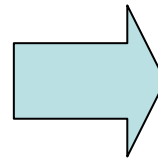
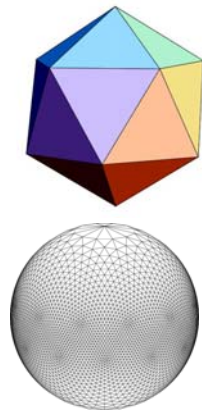
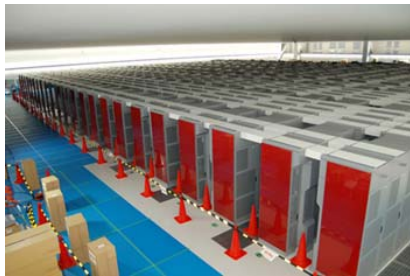
## 1: 目的先行型

○×を解明  
したい！



京とモデル(NICAM)が必要だ...

## 2: 材料先行型

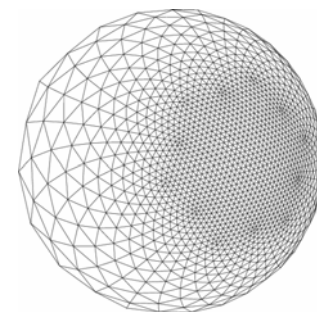


○×に活用  
できないだろ  
うか？

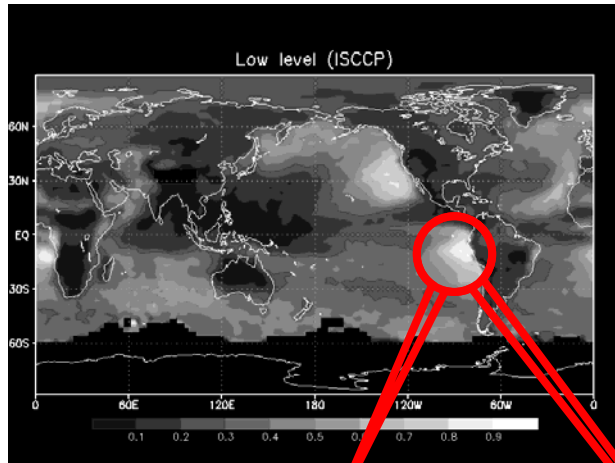
京とNICAMと新格子がある。

# NICAMと京と新格子を使って 何かできないか？

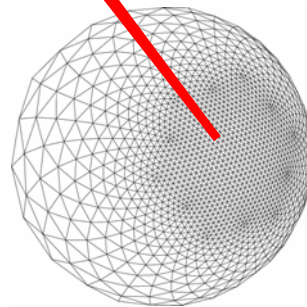
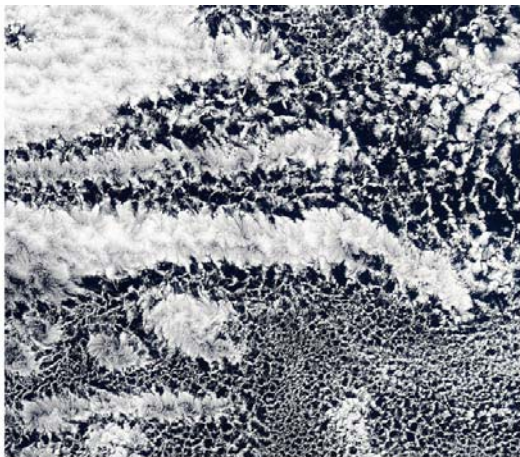
- 1、全球格子間隔400mのグランドチャレンジラン(来年初頭)に向けたデバッグ
  - 局所だけ400mにし、地形による安定性等のテスト
- 2、CINDYプロジェクト(2011.10.1-2012.3.31)
  - 熱帯のMJOや台風の観測+シミュレーション
  - 実用化が間に合えば新格子実装コードをJAMSTEC那須野チームに提供。



# 3、下層雲シミュレーション



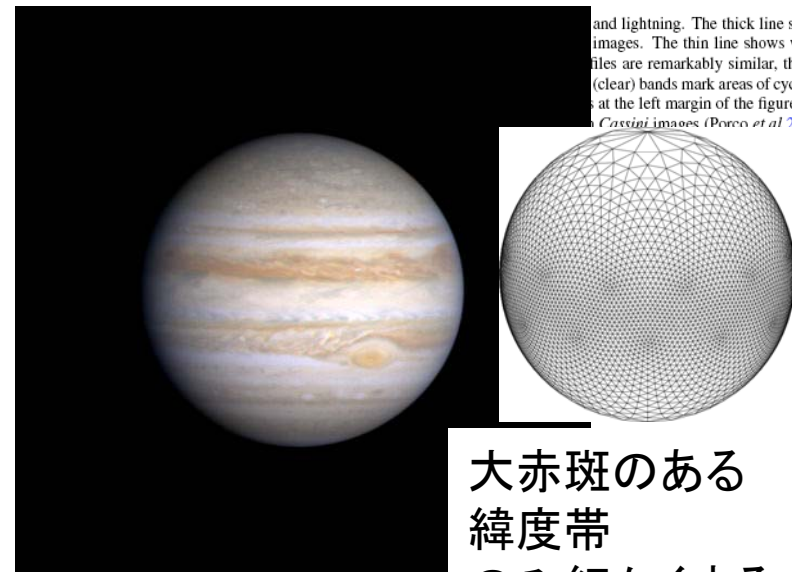
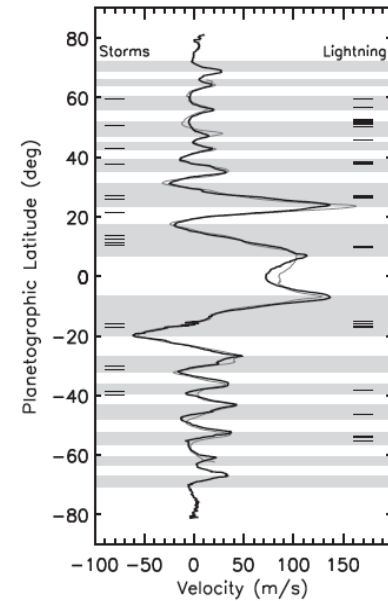
- ペルー沖、カリフォルニア沖の下層雲は、気候感度に大きな影響。
- ペルー沖のみフォーカスしたシミュレーション



Open cell, closed cell

# 4、木星大赤斑

- 何が問題か？
  - 縞模様(風速分布)
    - 再現を試みようとしている人は多い。
    - 順圧安定なプロファイルしかモデルでは再現されない。
  - 大赤斑
    - 長期存続する渦はモデルで再現されていない。
    - 全球モデルでの例はない。
- 神戸大CPS林研究室とコラボできれば理想



大赤斑のある  
緯度帯  
のみ細かくする