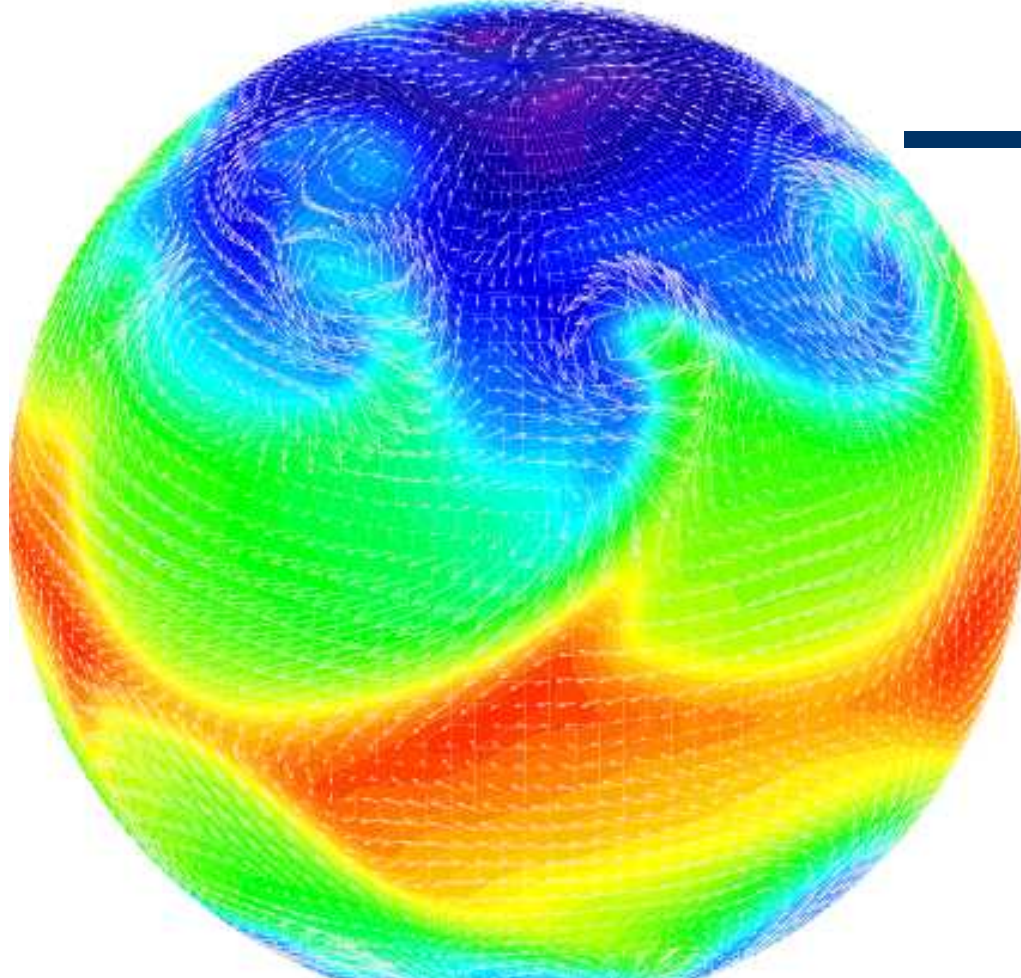


惑星大気大循環モデル DCPAM の設計と開発

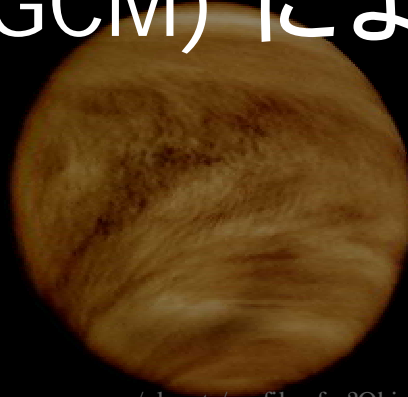


北大・理・宇宙理学
博士後期課程 2 年
森川 靖大

はじめに

[http://nl.wikipedia.org/wiki/Jupiter_\(planet\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Jupiter_(planet))

◆ 大気大循環モデル (General Circulation Model: GCM) による惑星大気の比較実験



<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Venus&Display=Overview>



<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/>



<http://earthobservatory.nasa.gov/Study/LivingEarth/>

はじめに

[http://nl.wikipedia.org/wiki/Jupiter_\(planet\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Jupiter_(planet))

◆ 大気大循環モデル (General Circulation Model: GCM) による惑星大気の比較実験

■ 仮想的な惑星大気の計算

- 大気組成, 太陽放射の入射量, 重力加速度, 自転周期, 大気圧, 大気温度などを徐々に変えて計算

<http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Jupiter&Display=Overview>



<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/>



<http://earthobservatory.nasa.gov/Study/LivingEarth/>

どのようなGCMが必要か？

- ◆ これまでのGCMでは惑星条件を変更しにくい
 - 放射スキームなどの素過程の交換や分離が困難
 - ソースコードが繁雑 = 読み書きが困難
 - 解説文書作成（実装の記録）が面倒
- ◆ 惑星比較実験に使うGCMに必要なのは...？
 - スキームの交換や分離が簡単
 - ソースコードの読み書きが簡単
 - 解説文書が整備しやすい

これまでに行われた試み

- ◆ AGCM5 (沼口,1992; SWAMP Project,1998; <http://www.gfd-dennou.org/library/agcm5>)
 - プログラム構造の階層化
 - プログラム書法の工夫
 - リファレンスマニュアル自動生成の試み
 - 限界: FORTRAN 77 の制約大など

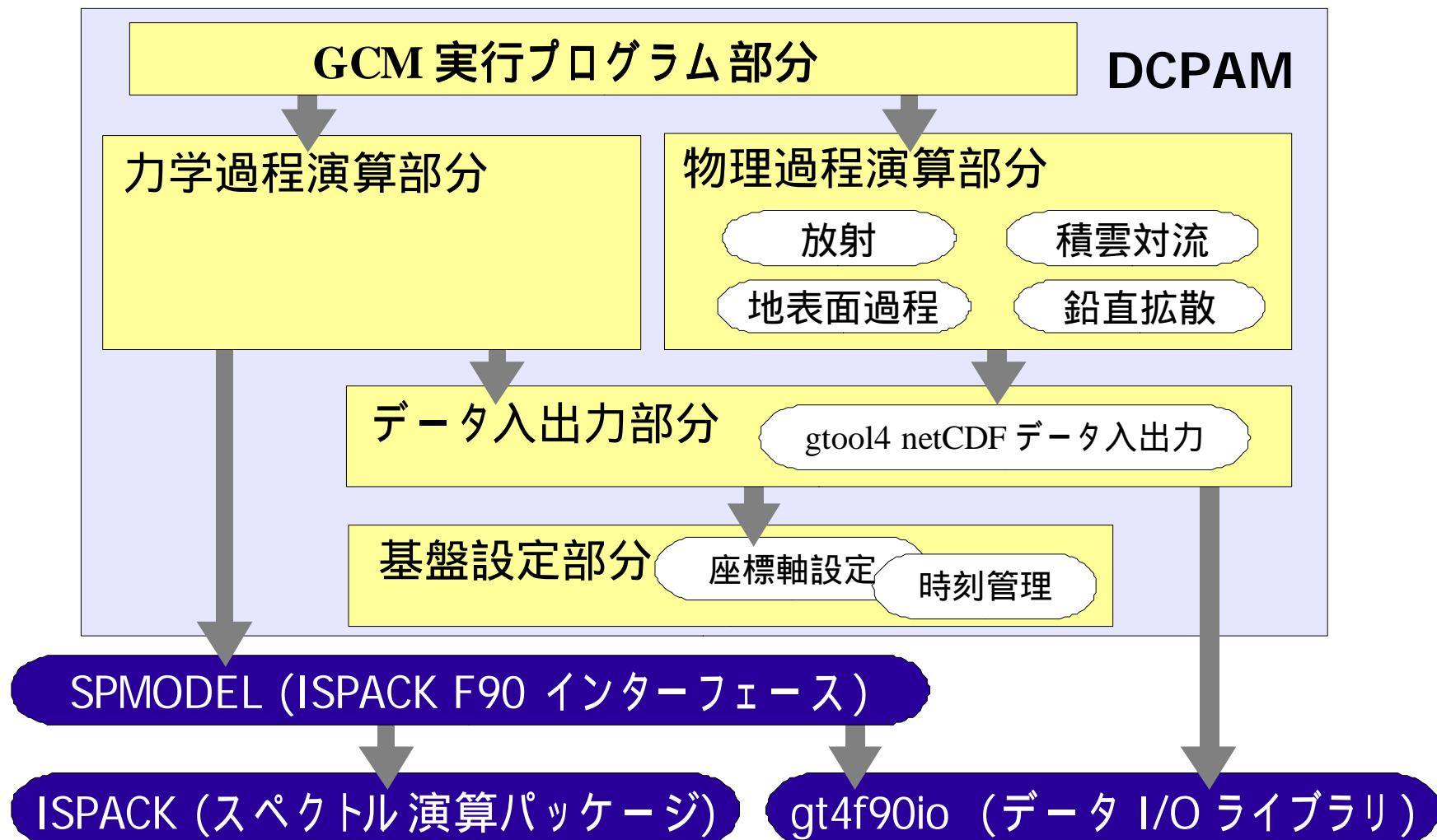
- ◆ 近年の試みとして...
 - FMS (Flexible Modeling System; Geophysical Fluid Dynamics Laboratory , 2005)
 - 地球を想定しており, すぐに惑星大気への移行は困難 (?)

本研究の試み

- ◆ DCPAM (Dennou Club Planetary Atmospheric Model)
 - プログラム構造の階層化
 - Fortran 90/95 のモジュールや構造体機能の活用
 - プログラム書法に工夫
 - Fortran 90/95 の配列演算関数の積極的な利用
 - 変数命名規則の考案
 - リファレンスマニュアルの自動生成
 - オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby のドキュメント生成ライブラリ **RDoc** の Fortran 90/95 解析機能を改良

プログラム構造の階層化

- ◆ モジュールと構造体の活用



プログラム書法の工夫 (1)

配列演算関数の利用

- ◆ 多次元配列が簡単に記述可能
 - 階層的地球流体スペクトルモデル集 SPMODEL (竹広 他, 2006) より

```
! FORTRAN 77 style
      REAL*8      A(10,10), B(10,10)
      INTEGER     I, J
      ...
      DO 1000 J=1,10
          DO 1000 I=1,10
              B(I,J) = EXP( A(I,J) )
1000 CONTINUE
```



```
! Fortran 90/95 style
real(8) :: a(10,10), b(10,10)
...
b = exp(a)
```


プログラム書法の工夫 (2)

変数命名規則

- ◆ 変数の情報が容易に分かる命名規則
 - SPMODEL (竹広 他, 2006) の命名規則を導入
 - 変数名規則 : x_VarA
 - $x_$: 空間 (座標軸) 情報
 - Var : 物理的意味
 - A : 時刻情報
 - ◆ 例 : $A: t+\Delta t$, $N: t$, $B: t-\Delta t$
- 具体例
 - x_Lon : 経度座標の格子点データの1次元配列
 - xyz_TempB : 温度の格子点データ (時刻 $t-\Delta t$) の3次元配列
 - wz_VorA : 渦度を水平スペクトル変換したスペクトルデータ (時刻 $t+\Delta t$) の2次元配列
- 「dcmode1 プログラミングガイドライン」として集約

一目でわかる

配列演算関数・変数命名規則の 活用例

- ◆ 支配方程式から容易に想像できるソースコード

$$\frac{\partial \zeta(t)}{\partial t} = \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial VA(t)}{\partial \lambda} - \frac{\partial (\cos \varphi) UA(t)}{\partial \varphi} \right)$$

$$\zeta(t + \Delta t) = \zeta(t - \Delta t) + 2\Delta t \times \frac{\partial \zeta(t)}{\partial t}$$

```
wz_DVorDtN = &
    & wa_Div_xya_xya( xyz_VaN , - xyz_UaN ) &
    & / Rplanet
xyz_VorA = &
    & xya_wa( wa_xya( xyz_VorB ) &
    & + 2. * DelTime * wz_DVorDtN )
```

参考: AGCM5 によるプログラム書法の工夫

◆ FORTRAN77の例（AGCM5の場合）

```
CALL SMTV2S
I      ( MMAX , IMAX , IDIM, JMAX, JDIM, KMAX,
O      GTUA , GTVA ,
W      WTDIV, WTVOR,
I      WORK,
I      IT, T, IP, P, QUSDER, R, ML)
```

```
CALL SMTG2S
I      ( MMAX , IMAX, IDIM, JMAX, JDIM, KMAX,
O      GBVOR,
W      WBVOR,
I      WORK,
I      IT, T, IP, P, QGS )
```

```
DO 7100 K = 1 , KMAX
DO 7100 NM = 1 , NMDIM
WAVOR( NM,K ) = WBVOR( NM,K ) + WTVOR( NM,K )*DELT2
7100 CONTINUE
```

```
CALL SMTS2G
I      ( MMAX, IMAX, IDIM, JMAX, JDIM, KMAX,
O      WAVOR,
W      GAVOR,
I      WORK,
I      IT, T, IP, P, QGS )
```

$$\frac{\partial \zeta(t)}{\partial t} = \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial VA(t)}{\partial \lambda} - \frac{\partial (v \cos \varphi) UA(t)}{\partial \varphi} \right)$$

$$\zeta(t + \Delta t) = \zeta(t - \Delta t) + 2\Delta t \times \frac{\partial \zeta(t)}{\partial t}$$

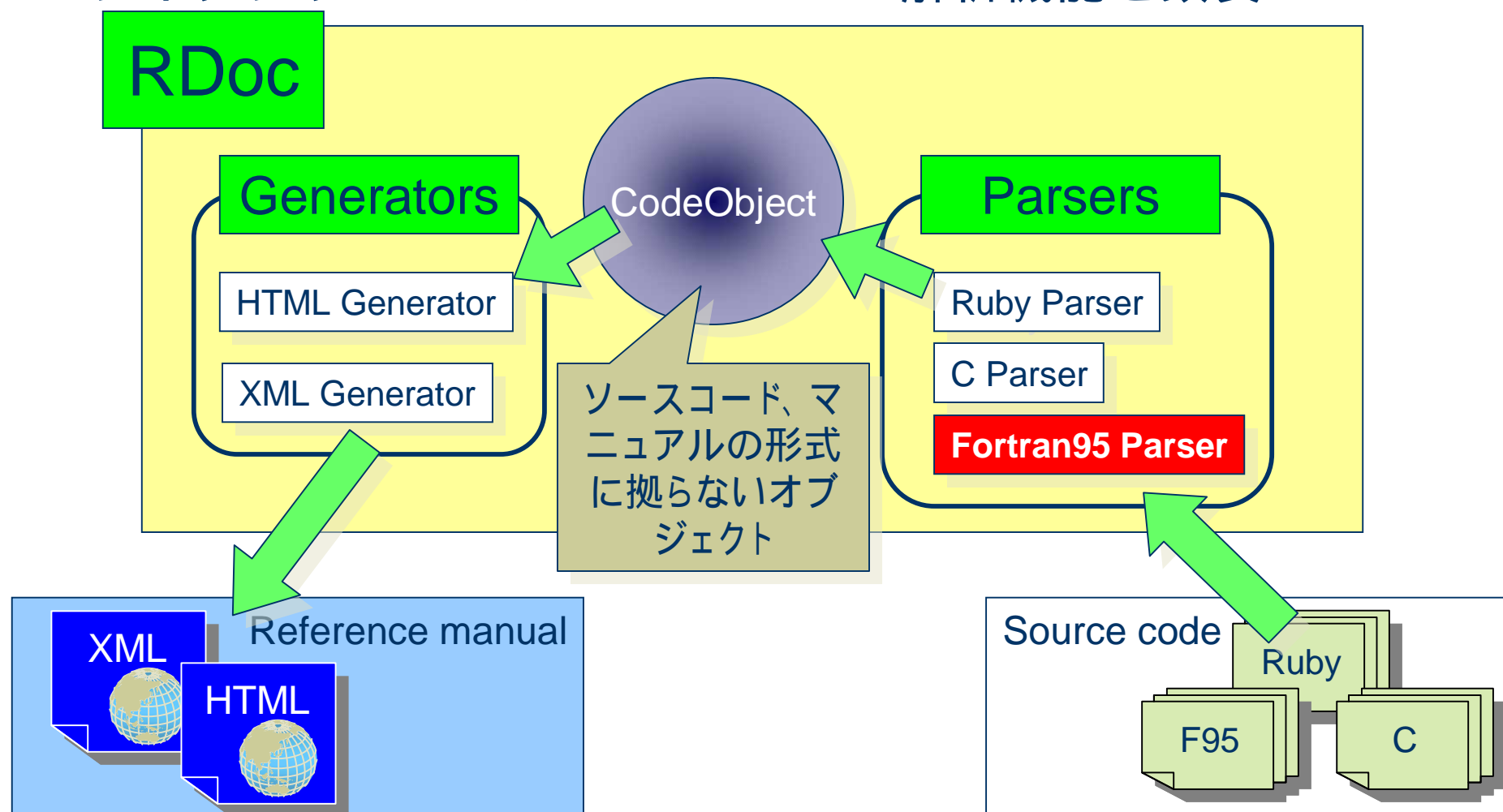
工夫

- ◆変数命名規則
- ◆プログラム書法
- 可読性低下の原因
 - ◆サブルーチンコール
 - ◆配列サイズ情報
 - ◆WORK 領域
 - ◆6 文字制限

リファレンスマニュアルの自動生成 (1)

RDoc の利用

- ◆ オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby のドキュメント生成ライブラリ RDoc の Fortran 90/95 解析機能を改良



リファレンスマニュアルの自動生成 (2)

Fortran 90/95 解析機能強化版

- ◆ リファレンスマニュアルをお手軽に生成
 - Fortran 90/95 ソースのコメント行に解説文書埋め込み
 - ソースファイル置き場で rdoc コマンド実行
 - HTML 生成
- ◆ 最新のソースコードを反映したドキュメントを簡単に整備
- ◆ 解説文書を埋め込まなくともサブルーチンのリストや引用仕様が記述されたマニュアルが生成

リファレンスマニュアルの自動生成 (3) ソースと HTML の対応

◆ ソースコードから HTML リファレンスマニュアルの自動生成

```

module integral
:
contains
function trapezoid(a,b,n) result(s)
!=== 台形公式を用いた数値積分のプログラム例
! $ f(x) = x^2 - 2x + 2 $ の積分値を台形公式
! によって求める.
!
! * 積分区間は $ [a, b] $ とする.
! * 実際に計算する式は以下の通り.
!   ここで $ h $ は $ h = \frac{b-a}{n} $ である.
!   ¥[
!     ¥int_{a}^{b} f(x) dx =
!     ¥frac{h}{2} ¥left¥{f(a)
!       + f(b)¥right¥} + h¥sum_{i=1}^{n-1} f(a+ih)
!   ¥]
!   このサンプルプログラムは
!   http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1
!   にて入手できます.
real, intent(in) :: a ! 積分区間の下限
real, intent(in) :: b ! 積分区間の上限
integer, intent(in), optional :: n ! 積分区間の分割数
real :: s ! 積分値
:
end function trapezoid
end module integral

```

見出し

箇条書き

数式 (TeX)

URL

引数に関するコメント

ファイル一覧 モジュール一覧 副プログラムなどの一覧

Files
calc.f90
integral.f90

Classes
integral

Methods
calc (calc.f90)
trapezoid (integral)

Class **integral**
In: integral.f90

モジュール名

Methods
trapezoid

Public Instance methods

trapezoid(a, b, [n]) result(s)

Function :

s : real
: 積分値

a : real, intent(in)
: 積分区間の下限

b : real, intent(in)
: 積分区間の上限

n : integer, intent(in), optional
: 積分区間の分割数

引数に関するコメント

見出し

台形公式を用いた数値積分のプログラム例

$f(x) = x^2 - 2x + 2$ の積分値を台形公式によって求める.

箇条書き

- 積分区間は $[a, b]$ とする.
- 実際に計算する式は以下の通り. ここで h は $h = \frac{b-a}{n}$ である.

数式 (MathML)

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{2} [f(a) + f(b)] + h \sum_{i=1}^{n-1} f(a+ih)$$

ハイパーリンク

このサンプルプログラムは www.gfd-dennou.org/library/dcmode1 にて入手できます.

リファレンスマニュアルの自動生成 (4)

マニュアル概要

◆ 拡大図

The screenshot shows a web-based reference manual interface. At the top, there are three tabs: 'Files', 'Classes', and 'Methods'. The 'Files' tab is active, showing a list of files: 'calc.f90' and 'integral.f90'. The 'Classes' tab is also visible, showing a list of classes: 'integral'. The 'Methods' tab is visible, showing a list of methods: 'calc (calc.f90)' and 'trapezoid (integral)'. Below the tabs, there is a section for the 'Class integral'. It shows the class name 'integral' and its location 'In: integral.f90'. Below this, there is a section for 'Methods', showing the method 'trapezoid'. Below the methods section, there is a section for 'Public Instance methods', showing the method 'trapezoid(a, b, [n]) result(s)'. Below the method signature, there is a section for 'Function', showing the function signature 's : real' and the arguments 'a : real, intent(in)', 'b : real, intent(in)', and 'n : integer, intent(in), optional'.

Annotations (Callouts):

- ファイル一覧 (File List)
- モジュール一覧 (Module List)
- 副プログラムなどの一覧 (List of Subprograms, etc.)
- モジュール名 (Module Name)
- 副プログラムの名称と引数 (Subprogram Name and Arguments)
- 言語要素の種別 (Language Element Type)
- 引数のデータ型と INTENT 属性など (Argument Data Type and INTENT Attribute, etc.)

リファレンスマニュアルの自動生成 (5)

マニュアル詳細

◆ 拡大図

Public Instance methods

trapezoid(*a*, *b*, [*n*]) *result(s)*

Function :

s : real

: 積分値

a : real, intent(in)

: 積分区間の下限

b : real, intent(in)

: 積分区間の上限

n : integer, intent(in), optional

: 積分区間の分割数

引数に関するコメント

見出し

台形公式を用いた数値積分のプログラム例

$f(x) = x^2 - 2x + 2$ の積分値を台形公式によって求める。

箇条書き

- 積分区間は $[a, b]$ とする。
- 実際に計算する式は以下の通り, ここで h は $h = \frac{b-a}{n}$ である。

数式 (MathML)

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{2} \{f(a) + f(b)\} + h \sum_{i=1}^{n-1} f(a + ih)$$

ハイパーリンク

このサンプルプログラムは www.qfd-dennou.org/library/dcmode/ にて入手できます。

まとめ

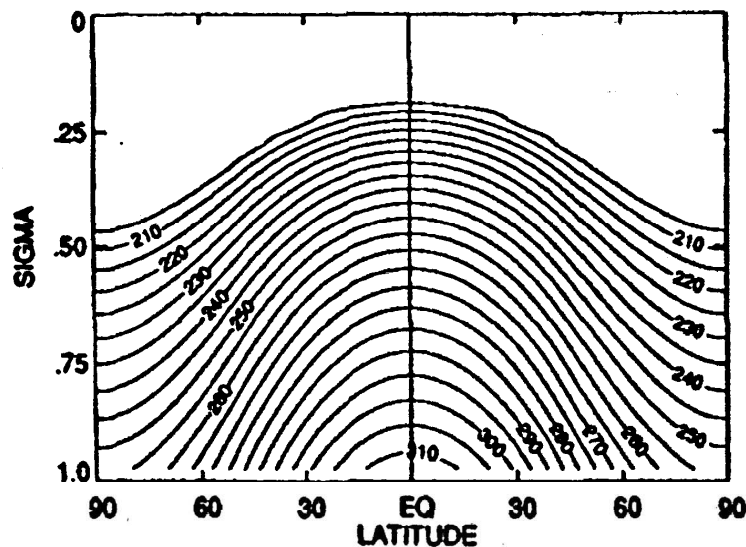
- ◆ 惑星大気大循環モデルを目指して
 - モデル内の各プログラムをモジュールにより階層化
 - 「何を計算しているか」が分かりやすいソースコード
 - リファレンスマニュアル生成の自動化
- ◆ 今後の課題
 - パフォーマンスの改善
 - モジュール間のインターフェースの検討
- ◆ DCPAM (Dennou Club Planetary Atmospheric Model)
 - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>
- ◆ dcmodel プログラミングガイドライン
 - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmodel/>
- ◆ RDoc Fortran 90/95 解析機能強化版
 - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmodel/rdoc-f95/>

参考資料

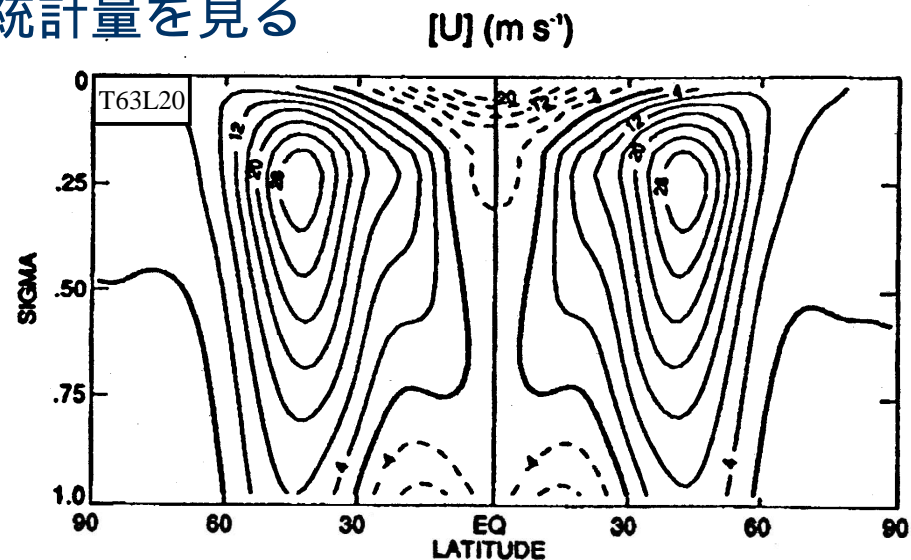
- ◆ Balaji, V.: The FMS Manual: A developer's guide to the GFDL Flexible Modeling System. <http://www.gfdl.noaa.gov/~vb/FMSManual/FMSManual.html>
- ◆ The flexible modeling system (FMS). <http://www.gfdl.noaa.gov/~fms/>, GFDL
- ◆ Held, I. M., and Suarez, M. J., 1994: A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **75**, 1825—1830.
- ◆ 森川 靖大, 小高正嗣, 石渡 正樹, 林 祥介, gtool4 開発グループ, 2006: gt490io ライブラリ, <http://www.gfd-dennou.org/library/gtool4/>, 地球流体電脳倶楽部.
- ◆ 沼口 敦, 1992: 博士論文.
- ◆ RDoc: <http://www.ruby-doc.org/stdlib/libdoc/rdoc/rdoc/>
- ◆ Ruby: <http://www.ruby-lang.org/>
- ◆ 森川 靖大, 石渡 正樹, 堀之内 武, 小高 正嗣, 林 祥介, 数値モデリングプロジェクト dcmmodel, 2007: RDoc Fortran 90/95 ソースコード解析機能強化版, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/>, 地球流体電脳倶楽部.
- ◆ SWAMP Project, 1998: AGCM5. <http://www.gfd-dennou.org/library/agcm5/>. 地球流体電脳倶楽部
- ◆ 竹広 真一, 小高 正嗣, 石岡 圭一, 石渡 正樹, 林 祥介, 2006: 階層的地球流体スペクトルモデル集 SPMODEL. ながれマルチメディア 2006.
- ◆ 竹広真一, 石岡圭一, 森川靖大, 小高正嗣, 石渡正樹, 林祥介, SPMODEL 開発グループ, 2004: 階層的地球流体力学スペクトルモデル集 (SPMODEL), <http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/>, 地球流体電脳倶楽部.

付録：Held and Suarez (1994)^{19/18} テスト

- ◆ GCM の力学過程の長期的性質を評価
- ◆ 計算設定
 - 左下図の温度分布に近づけるニュートン冷却と $\sigma > 0.7$ の風にレイリー摩擦を与える
 - 1200 日積分を行い、その統計量を見る



与える放射平衡温度
(Held and Suarez, 1994 より)



Held and Suarez(1994) の T63L20 のスペクトルモデルから得られた
帯状平均東西風。200 ~ 1200日の平均値 (Held and Suarez, 1994 より)

付録：FMS について

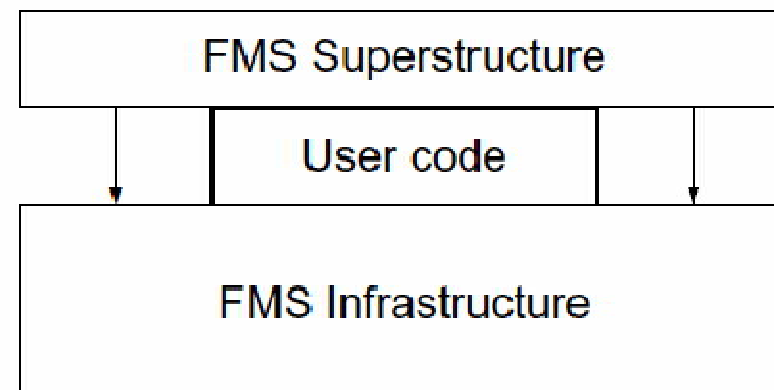
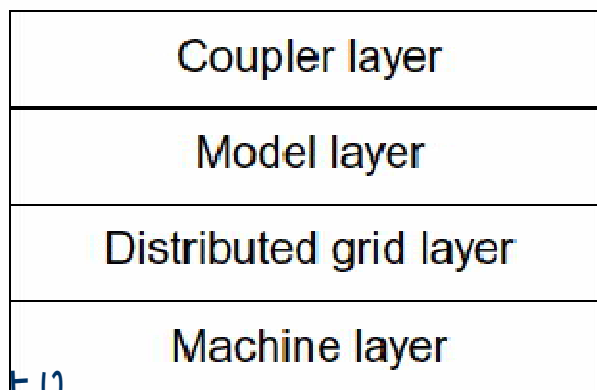
◆ FMS (Flexible Modeling System)

■ 目的

- 結果の考察を容易に (今のところ地球での利用のみ想定)

■ 仕様

- FMS の利用者は「User code」部分のみを編集
- Infrastructure で I/O や並列化を行う
- Superstructure は land, ocean, sea ice の結合インターフェース提供



付録：配列演算関数・変数命名規則の活用例で示された式の解説

◆ 例：渦度方程式

$$\frac{\partial \zeta(t)}{\partial t} = \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial VA(t)}{\partial \lambda} - \frac{\partial (\cos \varphi) UA(t)}{\partial \varphi} \right)$$

$$\zeta(t + \Delta t) = \zeta(t - \Delta t) + 2\Delta t \times \frac{\partial \zeta(t)}{\partial t}$$

λ : 経度

φ : 緯度

σ : 圧力/地表面圧力

t : 時刻

a : 惑星半径

f : コリオリパラメータ

$\zeta(\lambda, \varphi, \sigma, t)$: 渦度

$UA(\lambda, \varphi, \sigma, t) = (\zeta + f)v$

$VA(\lambda, \varphi, \sigma, t) = -(\zeta + f)u$

$u(\lambda, \varphi, \sigma, t)$: 東西風速

$v(\lambda, \varphi, \sigma, t)$: 南北風速

付録：AGCM5 メインプログラムの流れ

