

dcpam5
コード解説

地球流体電脳倶楽部

2009年04月05日 (dcpam5-20090405)

目次

第1章	この文書について	1
第2章	コードの概要	2
2.1	変数の命名法について	2
2.1.1	基本ルール	2
2.1.2	次元情報に関する接頭詞・接尾詞	2
2.1.3	時間方向添字	3
2.1.4	物理的意味	3
2.1.5	変数の例	3
2.2	メインプログラムの流れ	4
2.3	参考文献	4
第3章	力学過程	7
3.1	力学過程の概要	7
3.2	力学過程 Dynamics の流れ	7
3.3	セミインプリシット時間積分	8
3.3.1	セミインプリシット時間積分の概要	8
3.3.2	セミインプリシット時間積分の詳細	8
3.4	モデル変数表	13
3.5	非重力波項の計算	14
3.5.1	NonLinearOnGrid 前の準備	14
3.5.2	NonLinearOnGrid での計算	14
3.6	格子点データからスペクトルデータへ	21
3.7	TimeIntegration	21
3.7.1	(??) の f の計算	21
3.7.2	(??) を解く	22
3.7.3	$t + \Delta t$ の値の算出	22
付録A	使用上の注意とライセンス規定	24
A.1	ライセンス規定	24
A.2	使用上の注意	24
A.3	開発グループメンバー	25
A.3.1	2008 年度	25

A.3.2	2007 年度	25
-------	-------------------	----

第1章 この文書について

この文書は, 地球流体電脳倶楽部で開発中の惑星大気モデル (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model) のバージョン 5 である dcpam5 のプログラム構造とソースコードについて解説したものである.

第2章では, プログラムの全体構造とソースコード中の変数命名法について記す. 第3章では, 力学過程に関して, 離散化された支配方程式とソースコード中の変数の対応を記す. 支配方程式系の定式化や離散化については別紙『dcpam5 支配方程式系とその離散化¹』を参照していただきたい.

現在整備されているのは力学過程に関する文書のみであり, 物理過程に関する文書は今後作成される予定である.

¹http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_current/doc/basic_equations/htm/basic_equations.htm

第2章 コードの概要

2.1 変数の命名法について

モデル中の主要な変数の命名法について述べる。これはコードと本稿の理解に必要である。下記の命名法は Takehiro *et al.* (2006) に倣い、また大気大循環モデルで用いるために多少の拡張をおこなったものである。

2.1.1 基本ルール

配列型の変数名の基本形は以下のようにする。

(次元情報に関する接頭詞)_(物理的意味)(時間方向添字)

配列ではない変数名の基本形は以下のようにする。

(物理的意味)(時間方向添字)

時間方向に変化しない変数は(時間方向添字)を記述しない。次元情報に関する接頭詞、物理的意味、時間方向添字の付け方については以下で説明する。

2.1.2 次元情報に関する接頭詞・接尾詞

次元情報に関する接頭詞・接尾詞には、以下の文字を用いる。

- x 格子点データ (x / 経度座標)
- y 格子点データ (y / 緯度座標)
- z 格子点データ (z / 動径座標)
- r 格子点データ半整数レベル (z / 動径座標)
- w 球面調和関数展開スペクトルデータ
- a 上記以外の座標

2.1.3 時間方向添字

時間方向の添え字には大文字を用いる。未来のタイムステップを表すには A を、現在のタイムステップを表すには N を、過去のタイムステップを表すに B を用いる。

- A : 時刻 $t + \Delta t$ (After)
- N : 時刻 t (Now)
- B : 時刻 $t - \Delta t$ (Before)

2.1.4 物理的意味

基本的なルールは以下の通りである。

- 頭文字は大文字とする。
- 数式表現と揃える。ただし、他の変数との混同が起こりそうなものに関しては記述的名称を省略したものをを用いる¹。

2.1.5 変数の例

上記の規則に基づく変数の例を示す。

- 1次元配列である座標データの例
 - x_Lon : 経度データ
 - y_Lon : 緯度データ
 - z_Sigma : 鉛直 データ (整数レベル)
 - r_Sigma : 鉛直 データ (半整数レベル)
- 3次元格子点データ, スペクトルデータの例
 - xyz_TempN: $T(t)$: 温度 格子点 3次元 (鉛直整数レベル) データ (t)

¹混同のしやすさに関する明確な基準は設けていない

- xyr-UA : $u(t + \Delta t)$: 東西風速 格子点 3 次元データ (鉛直半整数レベル)
- wz_VorB : $\zeta(t - \Delta t)$: 渦度 スペクトルデータ (鉛直整数レベル)
- w_DPiDtN : $\frac{\partial \pi}{\partial t}(t)$: 地表面気圧 $\pi = \ln p_s$ 時間変化率スペクトルデータ

2.2 メインプログラムの流れ

図 2.1 にメインプログラムとその直接の下請ルーチンから見たモデルの構造の概要を示す。さらに入出力に関連する部分も書き加えた。dcpam5 が必要とする入力ファイルは初期値ファイルと地表面に関する境界値、地形ファイルである。但し、初期値ファイル以外は省略して、デフォルトまたは陽に指定した一定値を用いることが出来る。出力ファイルとしては、結果を残すためのヒストリーファイルと時間積分を延長するためのリスタートファイルが出力される。後者は延長積分時に初期値ファイルとして使われる。

モデルは初期化部分と時間積分のメインループの二つの部分に分けることができる。前者は初期値の読み込みと若干の定数の設定を行う。後者が言うまでもなくモデルの主要部分である。境界値、地形ファイルの読み込みはループに組み込まれてはいるが、現在のところ最初の一回しか読み込まれないので時間変化しない。

時間積分にはリープフロッグのセミインプリシット法が用いられているので、時間の流れは単純ではない。例えば $\Delta t = 10$ 分として、ある時刻 $t = 90(t - \Delta t), 100(t)$ の値を用いて $t = 110(t + \Delta t)$ の値を計算した場合、この $t = 110$ の値をそのまま用いるのではなく、時間フィルター (図 2.1 の TimeFilter) を用いてこの 3 レベルの値から $t = 100$ の値を修正する。次のステップでは、 $t = 100(t - \Delta t), 110(t)$ の値を用い、次のステップの値を計算することとなる。

モデルの時間積分はリープフロッグスキームのセミインプリシット法により行われる。物理過程で計算された時間変化項は力学過程に引き渡され、時間積分は力学過程の中で行われる。ただし、物理過程のうち、降水過程などの調節過程は時間積分後に適用される。

2.3 参考文献

Takehiro, S., Odaka, M., Ishioka, K., Ishiwatari, M., Hayashi, Y.-Y., 2006: SP-MODEL: A Series of Hierarchical Spectral Models for Geophysical Fluid Dy-

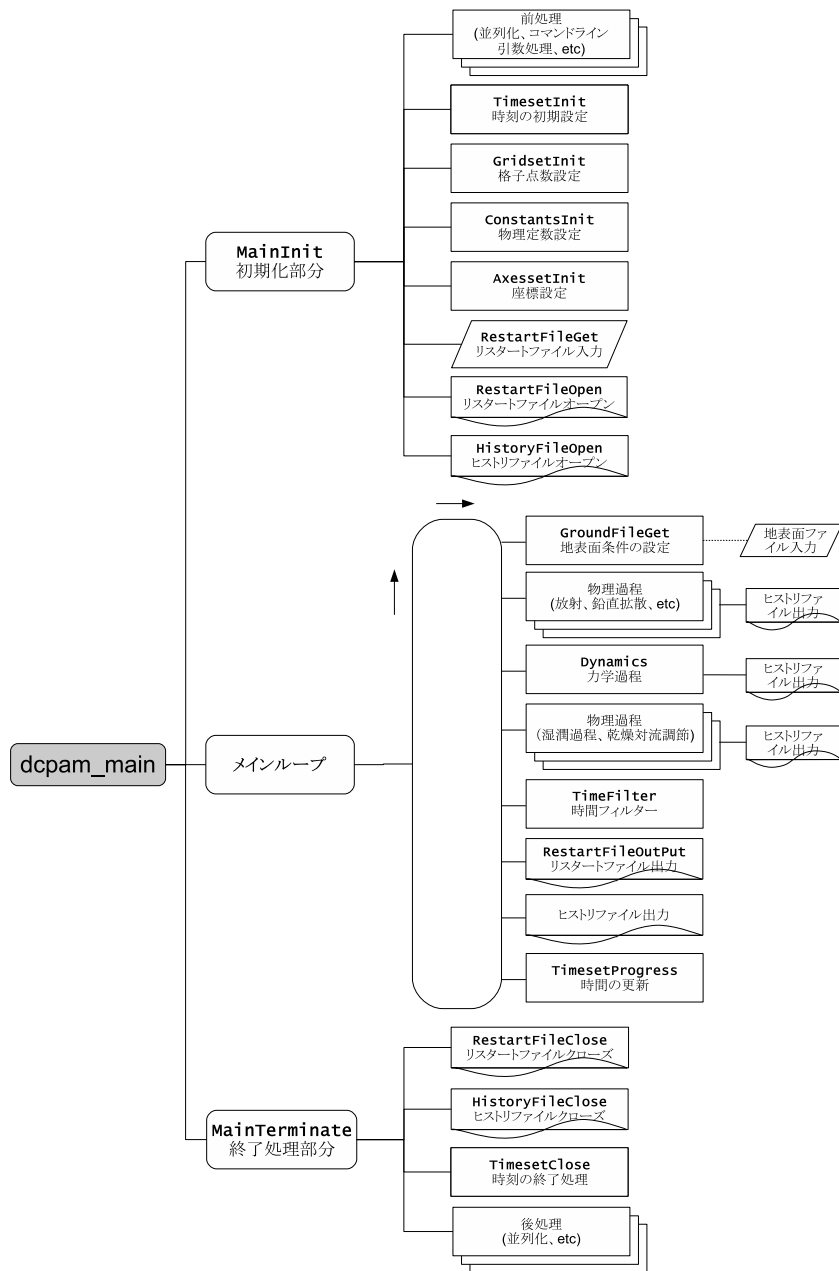


図 2.1: dcpam5 の構造の概要. アルファベット太字で書かれているのはメインプログラム dcpam_main (dcpam.main.F90) 中で呼ばれているサブルーチンである. 骨格を把握する上で冗長なものはひとまとめにしてあり, 個別のサブルーチン名は記載していない. MainInit および MainTerminate はメインプログラムファイル中に内部副プログラムとして定義されるサブルーチンである. 破線は, メインループの初回でのみ呼ばれることを示す. 図中では, 地表面ファイル入力とその一例として示されている. 診断量であるヒストリデータは, その出力の初期化と終了処理は主プログラムの MainInit および MainTerminate で行い, 出力自体は各所で行う.

namics, Nagare Multimedia 2006, <http://www.nagare.or.jp/mm/2006/spmodel/>

第3章 力学過程

3.1 力学過程の概要

本章では力学過程のコードの構造と計算手順を説明する。ここでいう力学過程とはスペクトルで計算される部分のことを指し、移流項や水平拡散項、圧力勾配項などである。あるいは物理過程以外と言っても良いかもしれない。スペクトルとは球面調和関数展開の係数のことであり、スペクトルへの変換とは球関数展開に他ならない。

実際の時間積分は力学過程の中で行われる。物理過程で計算された時間変化項は力学過程に引き渡され、力学過程の時間変化項に加えられ、セミインプリシット法による時間積分に組み込まれる。但し、降水過程などの調節過程は時間積分後に適用される。

3.2 力学過程 Dynamics の流れ

図 3.1~ 図 3.3 に力学過程サブルーチン Dynamics の流れを示す。四角枠内の太文字はサブルーチン名を表している。Dynamics とサブルーチン間にやりとりされる変数が示されている。四角枠内が空白であるものは、簡略に記述できるため Dynamics サブルーチン本体に直接コードが記述されているものである。これらのサブルーチンは、モジュール `dynamics_hspl_vas83` 内にひとまとめにされている。DynamicsInit および SemiImplMatrix 内で設定されたパラメータや配列はモジュール内の共有変数として保存され、各サブルーチンはその変数を参照する仕組みとなっているため、原則的に Dynamics と各サブルーチンとでやり取りされるのは時間変化する変数のみとなる。

Dynamics で呼ばれている NonLinearOnGrid は時間変化率の非重力波 (NG) 項を計算する。TimeIntegration はセミインプリシット時間積分 (3.3.1 節参照) を行

う. 以上の2つが Dynamics の主な下請ルーチンである.

NonLinearOnGrid 以前に呼ばれるサブルーチンは必要な定数等の準備にあてられる. SemiImplMatrix までは原則的に時間に依存しない. TimeIntegration の前後で格子点値とスペクトル値の変換を行う. その後, 水平粘性に失われた運動エネルギーを補償する摩擦熱を行い, Dynamics 外に出ない量の出力 (DiagOutput) を行う. DiagOutput では診断量の計算を行うが, これはモニターのためであり, 時間積分には影響しない.

3.3 セミインプリシット時間積分

3.3.1 セミインプリシット時間積分の概要

セミインプリシット法については, 支配方程式系とその離散化ドキュメントの 3.5 節に解説があるので参照のこと. 時刻 $t - \Delta t$ から $t + \Delta t$ へのセミインプリシットの計算手順は以下のようにまとめられる.

1. 発散項 D のみに関する単一のセミインプリシット方程式,

$$\underline{M} \bar{D}^t = f \quad (3.1)$$

を解く. ここで $\bar{D}^t \equiv \frac{1}{2}(D^{t+\Delta t} + D^{t-\Delta t})$ である.

2. \bar{D}^t と時刻 t における時間変化の非重力波 (NG) 項から各変数の $t + \Delta t$ での値を求める.

以上の手順の説明は 3.3.2 節で行う.

3.3.2 セミインプリシット時間積分の詳細

3.3.1 節で述べたように, セミインプリシット時間積分は2つのステップに分けられる. これを詳しく書くと以下ようになる.

第1段階: \bar{D}^t の計算

$$\underline{M} \bar{D}^t = f \quad (3.2)$$

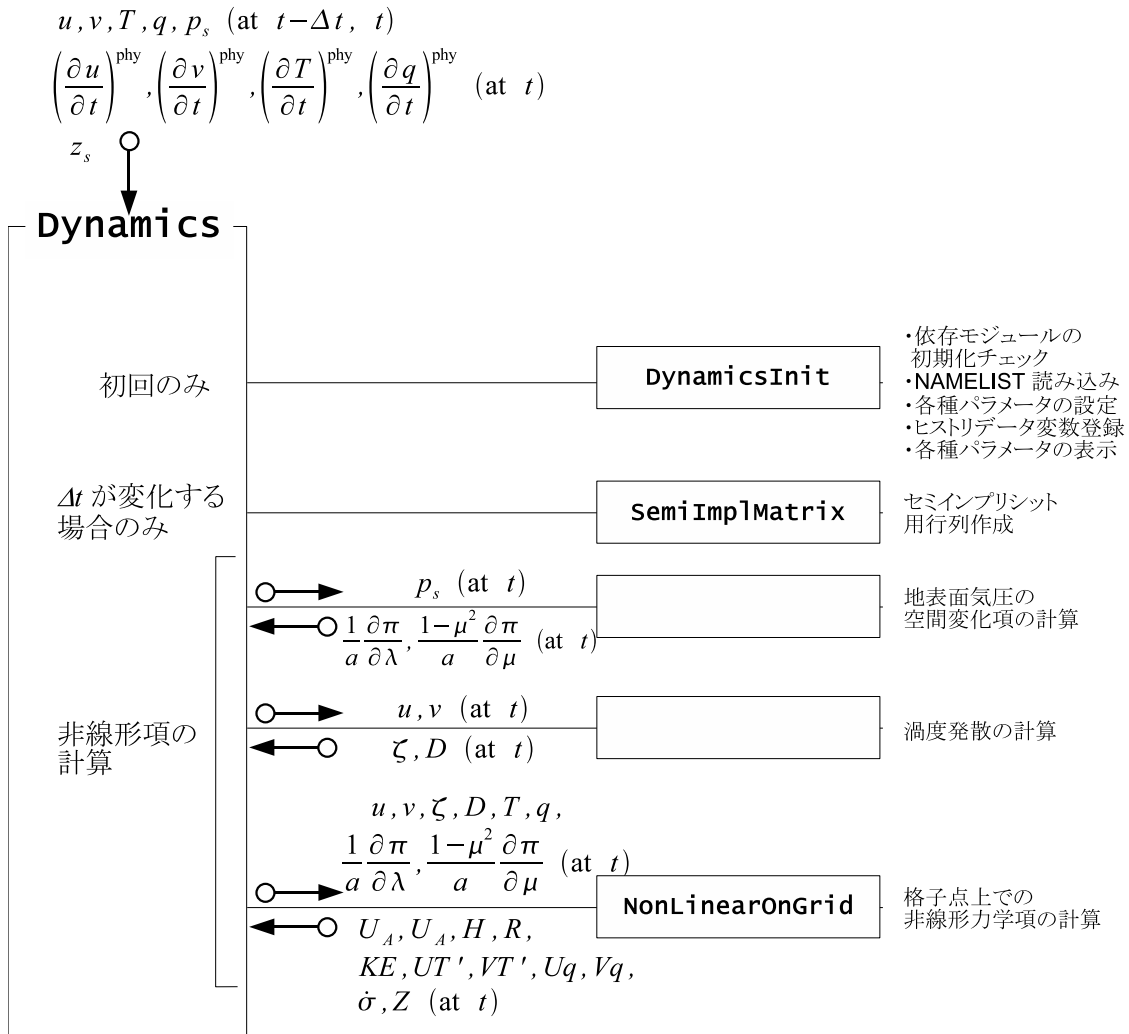


図 3.1: 力学過程 Dynamics の流れ 1. 四角枠内の太文字はサブルーチン名であり, Dynamics が呼ぶサブルーチンと引数を示している. 引数は, 特に注記されていないものは格子点値である. 四角枠内が空白であるものは, 簡略に記述できるため Dynamics サブルーチン本体に直接コードが記述されているものである. ここでは Dynamics が引数として値を受け取り, 初期設定 (DynamicsInit, SemiImplMatrix) および非線形項の計算 (NonLinearOnGrid) を行っているところまでが記されている. これ以後の処理については図 3.2 を参照されたい.

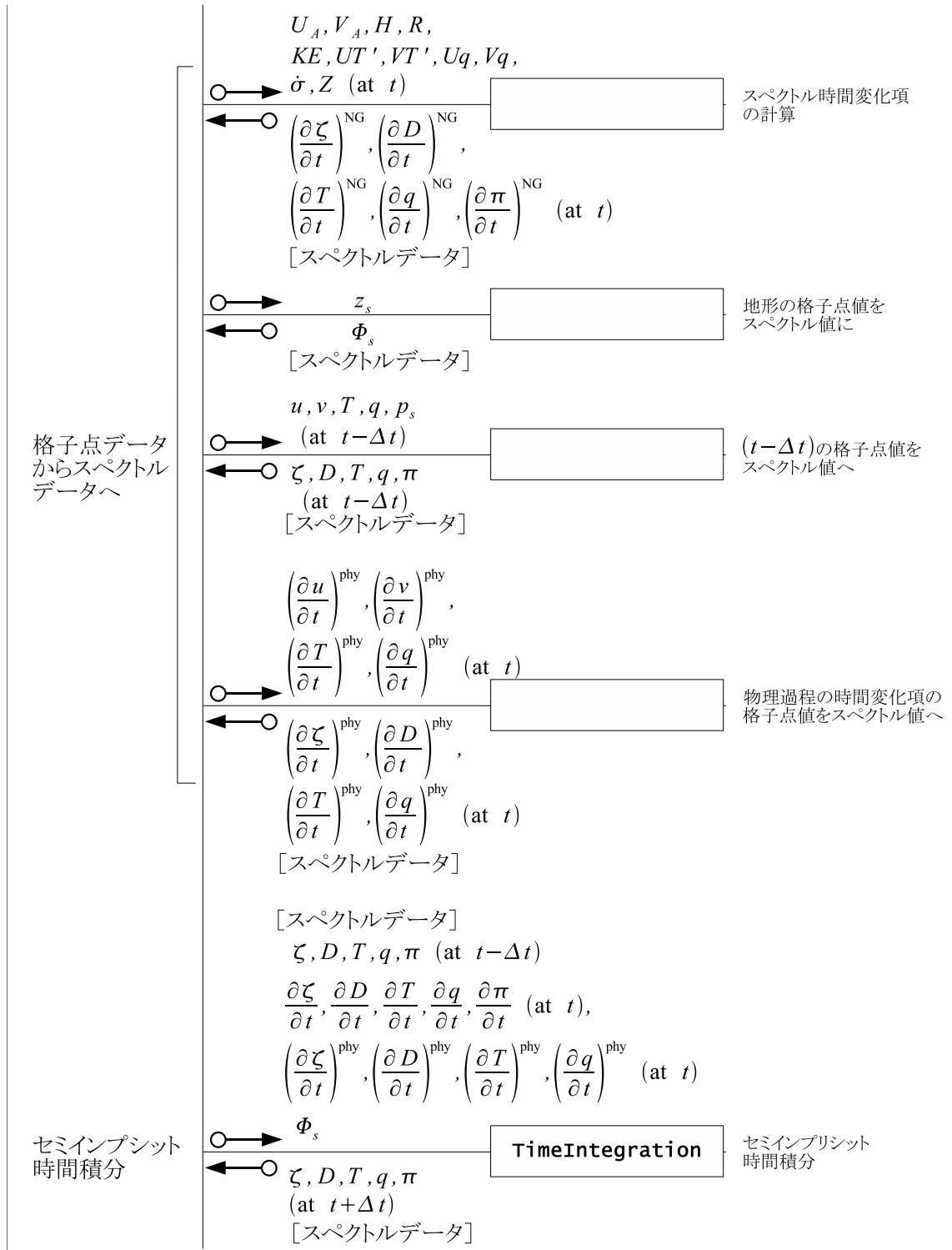


図 3.2: 力学過程 Dynamics の流れ 2. 図 3.1 の続きである. 図の見方については図 3.1 を参照せよ. ここでは格子点データをスペクトルデータに変換し, それらを用いて, セミインプリシット時間積分 TimeIntegration を行っている. これ以後の処理については図 3.3 を参照されたい.

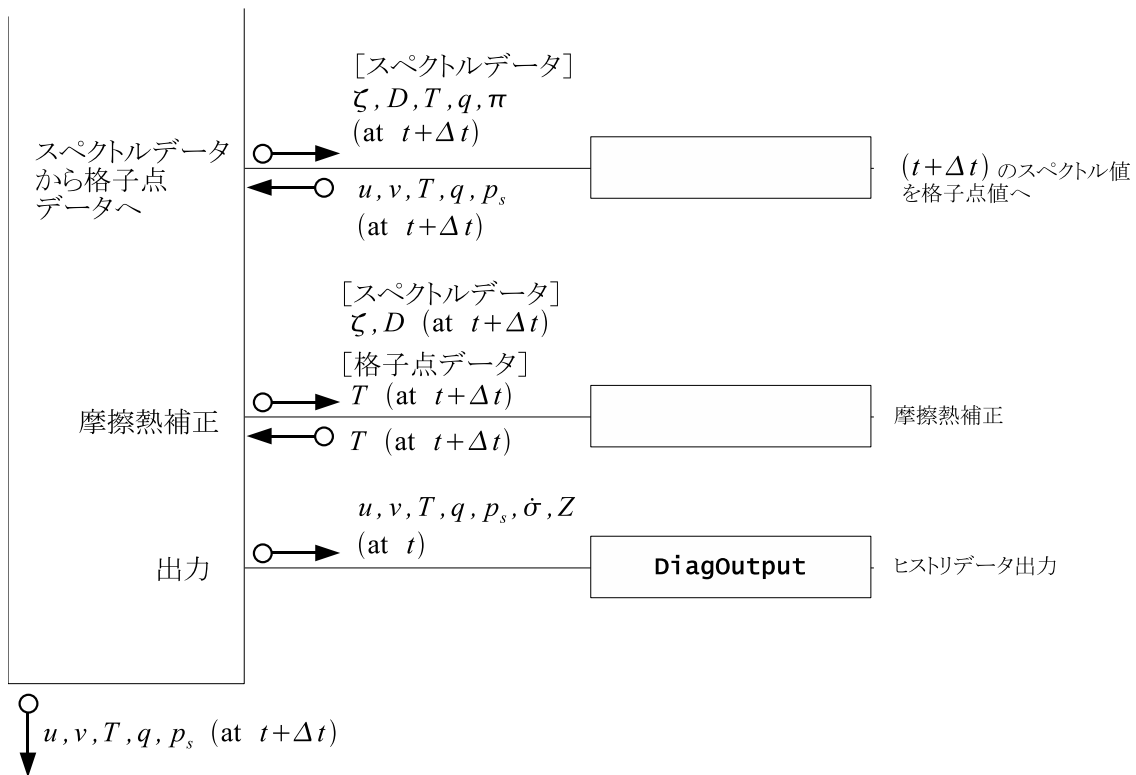


図 3.3: 図 3.2 の続きである. 図の見方については図 3.1 を参照せよ. ここではスペクトルデータを格子点データに戻し, 摩擦熱補正をかけた後, ヒストリデータを出力し, 最後に $t + \Delta t$ の値をサブルーチンの外に返している.

という形の式を解くのが第1段階である。ここでは支配方程式系とその離散化ドキュメントの3.5節と同様、太字で鉛直に離散化したベクトルを表し、下線で行列を表す。水平方向に関しては、各スペクトル係数が独立に計算されるので離散化したことが表向きは現れない。 D は発散で、

$$\overline{D}^t \equiv \frac{1}{2}(D^{t+\Delta t} + D^{t-\Delta t}) \quad (3.3)$$

である。行列 \underline{M} は

$$\underline{M} \equiv (1 - 2\Delta t D_H)(1 - 2\Delta t D_M)\underline{I} - (\Delta t)^2[\underline{W} \underline{h} + (1 - 2\Delta t D_H)\underline{G}C^T]\nabla_\sigma^2 \quad (3.4)$$

であり、ベクトル f は、

$$\begin{aligned} f \equiv & (1 - 2\Delta t D_H)(1 - \Delta t D_M)\underline{D}^{t-\Delta t} + (1 - 2\Delta t D_H)\Delta t \left(\frac{\partial \underline{D}}{\partial t}\right)^{\text{NG}} \\ & - \Delta t \nabla_\sigma^2 \left\{ (1 - 2\Delta t D_H)\underline{\Phi}_S + \underline{W} \left[(1 - \Delta t D_H)\underline{T}^{t-\Delta t} + \Delta t \left(\frac{\partial \underline{T}}{\partial t}\right)^{\text{NG}} \right] \right. \\ & \left. + (1 - 2\Delta t D_H)\underline{G} \left[\pi^{t-\Delta t} + \Delta t \left(\frac{\partial \pi}{\partial t}\right)^{\text{NG}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

である。

\underline{M} はサブルーチン `SemiImplMatrix` で計算され、LU分解される。 \underline{M} は時間刻みの大きさが変らない限り設定し直す必要がない。 f の計算と(3.2)を解く作業はサブルーチン `TimeIntegration` で行われる。

第2段階: 時間積分

時間積分も `TimeIntegration` が行う。第1段階で \overline{D}^t が求めたので発散の時間積分は容易である:

$$D^{t+\Delta t} = 2\overline{D}^t - D^{t-\Delta t}. \quad (3.6)$$

他の物理量についても、 \overline{D}^t と時刻 t における時間変化率の非重力波 (NG) 項から、 $t + \Delta t$ での値が求まる:

$$\mathcal{X}^{t+\Delta t} = \gamma_{\mathcal{X}}^{-1} \left\{ \mathcal{X}^{t-\Delta t} + 2\Delta t \left[\left(\frac{\partial \mathcal{X}}{\partial t}\right)^{\text{NG}} + \mathcal{G}_{\mathcal{X}} \overline{D}^t \right] \right\}. \quad (3.7)$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 \mathcal{X} &= \pi, & \zeta, & \mathbf{T}, & \mathbf{q}, \\
 \left(\frac{\partial \mathcal{X}}{\partial t}\right)^{\text{NG}} &= \left(\frac{\partial \pi}{\partial t}\right)^{\text{NG}}, & \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right)^{\text{NG}}, & \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t}\right)^{\text{NG}}, & \left(\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t}\right)^{\text{NG}}, \\
 \gamma_x &= 1, & (1 - 2\Delta t \mathcal{D}_M), & (1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H), & (1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H), \\
 \mathcal{G}_x &= -\mathbf{C}^T, & \underline{0}, & -\underline{h}, & \underline{0}.
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

以下の各節で, 具体的な計算手順とプログラムソースとの対応を述べる.

3.4 モデル変数表

ここでは, これ以後の節で述べられるモデル変数の表記法を述べる. モデル変数は xyz_U のようなフォントで示され, その入出力に関連して表 3.1 のように分類される.

当該サブルーチンからの出力変数 (入力に上書きする場合を含む) の出力時	xyz_U [●]
関数からの返り値	//
当該サブルーチン内の作業変数または, 入 (出) 力変数が入 (出) 力時の値と違う場合	xyz_U
当該サブルーチンへの入力変数	xyz_U
関数への入力変数	//
当該サブルーチンへの入力に上書きして出力される変数の入力時	xyz_U [●]
定数 (座標データや物理定数など)	z_Sigma
関数	w_Lapla_w

表 3.1: 数式と対応させて書く場合のモデル変数の表記法. 本文中で定数の下に付した文字列は, 値を設定したサブルーチン名を示す. 緑で示される定数は, 物理定数管理, 座標データ管理モジュールなどから参照するか, もしくはそれらの値を用いて DynamicsInit や SemiImplMatrix で時間ループの初回に設定される.

3.5 非重力波項の計算 (サブルーチン NonLinearOnGrid)

3.5.1 NonLinearOnGrid 前の準備

NonLinearOnGrid の直前で計算される, 地表面気圧の空間変化と渦度発散について記す. 灰色文字で示されるのは spml ライブラリの関数である.

$$\underbrace{(\nabla\pi(t))_\lambda}_{\text{xy_GradLambdaPiN}^\bullet} = \underbrace{\frac{1}{a}}_{\text{RPlanet}} \underbrace{\frac{\partial(\ln p_s(t))}{\partial\lambda}}_{\text{xy_GradLambda_w(w_xy(...))}}, \quad (3.9)$$

$$\underbrace{(\nabla\pi(t))_\mu}_{\text{xy_GradMuPiN}^\bullet} = \underbrace{\frac{1}{a}}_{\text{RPlanet}} \underbrace{(1-\mu^2)\frac{\partial(\ln p_s(t))}{\partial\mu}}_{\text{xy_GradMu_w(w_xy(...))}}, \quad (3.10)$$

$$\underbrace{\zeta(t)}_{\text{xyz_VorN}^\bullet} = \underbrace{\frac{1}{a}}_{\text{RPlanet}} \left(\underbrace{\frac{1}{1-\mu^2}\frac{\partial V(t)}{\partial\lambda}}_{\text{wa_DivLambda_xya(...)}} - \underbrace{\frac{\partial U(t)}{\partial\mu}}_{\text{wa_DivMu_xya(...)}} \right) \quad (3.11)$$

xya_wa(...)

$$\underbrace{D(t)}_{\text{xyz_VorN}^\bullet} = \underbrace{\frac{1}{a}}_{\text{RPlanet}} \left(\underbrace{\frac{1}{1-\mu^2}\frac{\partial U(t)}{\partial\lambda}}_{\text{wa_DivLambda_xya(...)}} + \underbrace{\frac{\partial V(t)}{\partial\mu}}_{\text{wa_DivMu_xya(...)}} \right) \quad (3.12)$$

xya_wa(...)

3.5.2 NonLinearOnGrid での計算

非重力波 (NG) 項はサブルーチン NonLinearOnGrid で計算される.

NG 項の計算に関する式の各項の下にモデル中の変数名を記す. 以下で, 数式と対応させて書く場合のモデル変数の表記法は 表 3.1 に従って統一する.

$$\left(\frac{\partial\pi}{\partial t}\right)^{\text{NG}} = \underbrace{Z_k}_{\text{xy_DPiDtN}^\bullet} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D_k}{\partial t}\right)^{\text{NG}} &= \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial \widehat{U_{A,k}}}{\partial \lambda} + \frac{\partial \widehat{V_{A,k}}}{\partial \mu} \right) \\ &\quad - \underbrace{\nabla_\sigma^2 \left[(KE)_k + \sum_{l=1}^K W_{kl}(T_{v,l} - T_l) \right]}_{\text{xyz_KinEngyN}^\bullet}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\left(\frac{\partial \zeta_k}{\partial t}\right)^{\text{NG}} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial \widehat{V_{A,k}}}{\partial \lambda} - \frac{\partial \widehat{U_{A,k}}}{\partial \mu} \right), \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T_k}{\partial t}\right)^{\text{NG}} &= -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial \widehat{U_k T'_k}}{\partial \lambda} + \frac{\partial \widehat{V_k T'_k}}{\partial \mu} \right) \\ &\quad + \underbrace{H_k}_{\text{xyz_DTempDtN}^\bullet}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial q_k}{\partial t}\right)^{\text{NG}} &= -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial \widehat{U_k q_k}}{\partial \lambda} + \frac{\partial \widehat{V_k q_k}}{\partial \mu} \right) + \underbrace{R_k}_{\text{xyz_DQVapDtN}^\bullet}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

NonLinearOnGrid の出力変数は、以上の 10 個の時間変化項と、以下の変数である。

$$\text{xyr_SigDotN}^\bullet \equiv \dot{\sigma}. \quad (3.18)$$

NonLinearOnGrid の入力変数は時刻 t でのグリッド値 xy_*N , xyz_*N ($*$ = 変数名) である。

次に時間変化項の具体的な中身とモデル変数の対応を見ることにする。

地表面気圧の変化に関連する項の計算

$$\underbrace{\text{xy_DPiDtN}^\bullet}_{Z_k} = - \underbrace{\sum_{k=1}^K \underbrace{\widehat{\mathbf{v}_k \cdot \nabla \pi}}_{\text{xyz_PiAdv}} \underbrace{\Delta \sigma_k}_{z_DelSigma}}_{\text{xyz_PiAdvSum}_{k=1}} \quad (3.19)$$

ここで,

$$\underbrace{\mathbf{v}_k \cdot \nabla \pi}_{\text{xyz_PiAdv}} = \underbrace{U_k}_{\text{xyz_UCosLatN}} \underbrace{\frac{1}{1-\mu^2} \frac{1}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda}}_{\text{xy_GradLambdaPiN}} + \underbrace{V_k}_{\text{xyz_VCosLatN}} \underbrace{\frac{1}{1-\mu^2} \frac{(1-\mu^2)}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \mu}}_{\text{xy_GradMuPiN}}. \quad (3.20)$$

渦度, 発散の変化に関連する項の計算

$$\begin{aligned} \underbrace{U_{A,1}}_{\text{xyz_UAdvN}^\bullet} &= \underbrace{(\zeta_1 + f)}_{\text{xy_Cori}} \underbrace{V_1}_{\text{xyz_VCosLatN}} - \frac{1}{2\Delta\sigma_1} \underbrace{\dot{\sigma}_{3/2}}_{\text{z_DelSigma}} \underbrace{(U_1 - U_2)}_{\text{xyz_UCosLatN}} \\ &\quad - \underbrace{C_p}_{\text{CpDry}} \underbrace{\hat{\kappa}_1}_{\text{xy_TempVirEdd}} \underbrace{T'_{v,1}}_{\text{xy_GradLambdaPiN}} \frac{1}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_{\lambda,k} \cos \varphi, \\ U_{A,k} &= (\zeta_k + f)V_k - \frac{1}{2\Delta\sigma_k} [\dot{\sigma}_{k-1/2}(U_{k-1} - U_k) + \dot{\sigma}_{k+1/2}(U_k - U_{k+1})] \\ &\quad - \frac{C_p \hat{\kappa}_k T'_{v,k}}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_{\lambda,k} \cos \varphi, \quad (k = 2, \dots, K-1) \\ U_{A,K} &= (\zeta_K + f)V_K - \frac{1}{2\Delta\sigma_K} \dot{\sigma}_{K-1/2}(U_{K-1} - U_K) - \frac{C_p \hat{\kappa}_K T'_{v,K}}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_{\lambda,K} \cos \varphi, \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \underbrace{V_{A,1}}_{\text{xyz_VAdvN}^\bullet} &= -(\zeta_1 + f)U_1 - \frac{1}{2\Delta\sigma_1} \dot{\sigma}_{3/2}(V_1 - V_2) - \underbrace{C_p \hat{\kappa}_1 T'_{v,1}}_{\text{xy_GradMuPiN}} \frac{1-\mu^2}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \mu} + \mathcal{F}_{\varphi,1} \cos \varphi, \\ V_{A,k} &= -(\zeta_k + f)U_k - \frac{1}{2\Delta\sigma_k} [\dot{\sigma}_{k-1/2}(V_{k-1} - V_k) + \dot{\sigma}_{k+1/2}(V_k - V_{k+1})] \\ &\quad - \underbrace{C_p \hat{\kappa}_k T'_{v,k}}_{\text{xy_GradMuPiN}} \frac{1-\mu^2}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \mu} + \mathcal{F}_{\varphi,k} \cos \varphi, \quad (k = 2, \dots, K-1) \\ V_{A,K} &= -(\zeta_K + f)U_K - \frac{1}{2\Delta\sigma_K} \dot{\sigma}_{K-1/2}(V_{K-1} - V_K) \\ &\quad - \underbrace{C_p \hat{\kappa}_K T'_{v,K}}_{\text{xy_GradMuPiN}} \frac{1-\mu^2}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \mu} + \mathcal{F}_{\varphi,K} \cos \varphi, \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\underbrace{(KE)_k + \sum_{l=1}^K W_{kl}(T_{v,l} - T_l)}_{\text{xyz_KinEngyN}^\bullet} = \frac{U_k^2 + V_k^2}{2(1-\mu^2)} + \sum_{l=1}^K \underbrace{W_{kl}(T_{v,l} - T_l)}_{\text{xyz_TempN}}. \quad (3.23)$$

HydroGrid を呼ぶと W_{kl} がかかる

ここで,

$$\underbrace{U_k}_{\text{xyz_UCosLatN}} = \underbrace{u_k}_{\text{xyz_UN}} \underbrace{\cos \varphi}_{\text{xy_CosLat}}, \quad (3.24)$$

$$\underbrace{V_k}_{\text{xyz_VCosLatN}} = \underbrace{v_k}_{\text{xyz_VN}} \underbrace{\cos \varphi}_{\text{xy_CosLat}}, \quad (3.25)$$

$$\underbrace{\dot{\sigma}_{k-1/2}}_{\text{xyr_SigDotN}} = \underbrace{\sigma_{k-1/2}}_{\text{r_Sigma}} \left[\underbrace{\sum_{k=1}^K D_k \Delta \sigma_k}_{\text{xyz_DivSum}_{k=1}} + \underbrace{\sum_{k=1}^K \mathbf{v}_k \cdot \nabla \pi \Delta \sigma_k}_{\text{xyz_PiAdvSum}_{k=1}} \right] - \left[\underbrace{\sum_{l=k}^K D_l \Delta \sigma_l}_{\text{xyz_DivSum}_{k=l}} + \underbrace{\sum_{l=k}^K \mathbf{v}_l \cdot \nabla \pi \Delta \sigma_l}_{\text{xyz_PiAdvSum}_{k=l}} \right] \quad (k = 2, \dots, K),$$

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

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

$$\underbrace{T'_{v,k}}_{\text{xyz_TempVirEdd}} = \underbrace{T_{v,k}}_{\text{xyz_TempVir}} \quad (3.28) \text{ 参照} \quad - \underbrace{\bar{T}_k}_{\text{z_RefTemp}}, \quad (3.27)$$

$$\underbrace{T_{v,k}}_{\text{xyz_TempVir}} = \underbrace{T_k}_{\text{xyz_TempN}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\epsilon_v} - 1 \right) \underbrace{q_k}_{\text{xyz_QVapN}} \right\}, \quad (3.28)$$

$$\underbrace{\hat{\kappa}_k}_{\text{z_TInpCoefK DynamicsInit}} = \frac{\underbrace{\sigma_{k-1/2}}_{\text{z_HydroAlpha}} \underbrace{\alpha_k}_{\text{z_HydroAlpha}} + \underbrace{\sigma_{k+1/2}}_{\text{z_HydroBeta}} \underbrace{\beta_k}_{\text{z_HydroBeta}}}{\Delta \sigma_k}, \quad (3.29)$$

$$\underbrace{\alpha_k}_{\text{z_HydroAlpha DynamicsInit}} = \left(\frac{\underbrace{\sigma_{k-1/2}}_{\text{r_Sigma}}}{\underbrace{\sigma_k}_{\text{Kappa}}} \right)^{\text{Kappa}} - 1, \quad (3.30)$$

$$\underbrace{\beta_k}_{\text{z_HydroBeta DynamicsInit}} = 1 - \left(\frac{\sigma_{k+1/2}}{\sigma_k} \right)^{\kappa}, \quad (3.31)$$

$$\underbrace{\kappa}_{\text{Kappa DynamicsInit}} = \frac{\underbrace{R}_{\text{GasRDry}}}{\underbrace{C_p}_{\text{CpDry}}}. \quad (3.32)$$

温度の変化に関連する項の計算

$$\text{xyz_TempUAdvN}^\bullet \equiv \underbrace{U_k}_{\text{xyz_UCosLatN}} \overbrace{T'_k}^{\text{xyz_TempEdd (3.36) 参照}}} \quad (3.33)$$

$$\text{xyz_TempVAdvN}^\bullet \equiv \underbrace{V_k}_{\text{xyz_VCosLatN}} T'_k, \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned}
\underbrace{H_k}_{\text{xyz_DTempDt}^\bullet} &= T'_k D_k + Q_k/C_p \\
&\quad \text{xyz_DivN} \quad \text{GTH}^\bullet \\
&\quad \text{PHYSICS} \\
&\quad - \frac{1}{\Delta\sigma_k} \left[\underbrace{\dot{\sigma}_{k-1/2}}_{\text{xyr_SigDotN}^\bullet} \left(\underbrace{\hat{T}'_{k-1/2}}_{\text{xyz_TempEdd}} - T'_k \right) + \dot{\sigma}_{k+1/2} \left(T'_k - \hat{T}'_{k+1/2} \right) \right] \\
&\quad \text{r_RefTemp} \quad (3.37) \text{ 参照} \\
&\quad - \frac{1}{\Delta\sigma_k} \left[\underbrace{\dot{\sigma}_{k-1/2}^{\text{NG}}}_{\text{xyz_SigDotNonG}} \left(\underbrace{\hat{T}_{k-1/2}}_{\text{z_RefTemp}} - \bar{T}_k \right) + \dot{\sigma}_{k+1/2}^{\text{NG}} \left(\bar{T}_k - \hat{T}_{k+1/2} \right) \right] \\
&\quad \text{xyz_PiAdv} \\
&\quad + \underbrace{\hat{\kappa}_k}_{\text{z_TlnpCoefK}} T_{v,k} \mathbf{v}_k \cdot \nabla \pi \\
&\quad \text{z_HydroAlpha} \\
&\quad - \frac{\alpha_k}{\Delta\sigma_k} \left[\underbrace{T_{v,k} \sum_{l=k}^K \mathbf{v}_l \cdot \nabla \pi \Delta\sigma_l}_{\text{xyz_PiAdvSum}} + \underbrace{T'_{v,k} \sum_{l=k}^K D_l \Delta\sigma_l}_{\text{xyz_DivSum}} \right] \\
&\quad \text{z_HydroBeta} \\
&\quad - \frac{\beta_k}{\Delta\sigma_k} \left[T_{v,k} \sum_{l=k+1}^K \mathbf{v}_l \cdot \nabla \pi \Delta\sigma_l + T'_{v,k} \sum_{l=k+1}^K D_l \Delta\sigma_l \right] \\
&\quad (k = 1, \dots, K-1),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underbrace{H_K}_{\text{xyz_DTempDt}^\bullet_{k=K}} &= T'_K D_K + Q_K/C_p \\
&\quad - \frac{1}{\Delta\sigma_K} \left[\dot{\sigma}_{K-1/2} \left(\hat{T}'_{K-1/2} - T'_K \right) + \dot{\sigma}_{K+1/2} \left(T'_K - \hat{T}'_{K+1/2} \right) \right] \\
&\quad - \frac{1}{\Delta\sigma_K} \left[\dot{\sigma}_{K-1/2}^{\text{NG}} \left(\hat{T}_{K-1/2} - \bar{T}_K \right) + \dot{\sigma}_{K+1/2}^{\text{NG}} \left(\bar{T}_K - \hat{T}_{K+1/2} \right) \right] \\
&\quad + \hat{\kappa}_K T_{v,K} \mathbf{v}_K \cdot \nabla \pi \\
&\quad - \frac{\alpha_K}{\Delta\sigma_K} \left[T_{v,K} \mathbf{v}_K \cdot \nabla \pi \Delta\sigma_K + T'_{v,K} D_K \Delta\sigma_K \right].
\end{aligned} \tag{3.35}$$

ここで,

$$\underbrace{T'_k}_{\text{xyz_TempEdd}} = \underbrace{\hat{T}'_k}_{\text{xyz_TempN}} - \underbrace{\bar{T}_k}_{\text{z_RefTemp}}, \tag{3.36}$$

$$\underbrace{\hat{T}'_{k-1/2}}_{\text{xyr_TempEdd}} = \begin{cases} 0, & (k = 1) \\ \underbrace{a_k}_{\text{z_TInpCoefA}} T_k + \underbrace{b_{k-1}}_{\text{z_TInpCoefB}} T_{k-1} - \underbrace{\hat{T}_{k-1/2}}_{\text{r_RefTemp}}, & (k = 2, \dots, K) \\ 0, & (k = K + 1) \end{cases} \quad (3.37)$$

$$\underbrace{\hat{T}_{k-1/2}}_{\text{r_RefTemp DynamicsInit}} = \begin{cases} 0, & (k = 1) \\ \underbrace{a_k}_{\text{z_TInpCoefA}} \bar{T}_k + \underbrace{b_{k-1}}_{\text{z_TInpCoefB}} \bar{T}_{k-1}, & (k = 2, \dots, K) \\ 0, & (k = K + 1) \end{cases} \quad (3.38)$$

$$\underbrace{a_k}_{\text{z_TInpCoefA DynamicsInit}} = \underbrace{\alpha_k}_{\text{z_HydroAlpha}} \left[1 - \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_{k-1}} \right)^\kappa \right]^{-1}, \quad (3.39)$$

$$\underbrace{b_k}_{\text{z_TInpCoefB DynamicsInit}} = \underbrace{\beta_k}_{\text{z_HydroBeta}} \left[\left(\frac{\sigma_k}{\sigma_{k+1}} \right)^\kappa - 1 \right]^{-1}, \quad (3.40)$$

$$\underbrace{\dot{\sigma}'_{k-1/2}}_{\text{xyr_SigDotNonG}} = \underbrace{\overline{\sigma}_{k-1/2}}_{\text{r_Sigma}} \underbrace{\sum_{k=1}^K \mathbf{v}_k \cdot \nabla \pi \Delta \sigma_k}_{\text{xyz_PiAdvSum}_{k=1}} - \underbrace{\sum_{l=k}^K \mathbf{v}_l \cdot \nabla \pi \Delta \sigma_l}_{\text{xyz_PiAdvSum}}. \quad (3.41)$$

比湿の変化に関連する項の計算

$$\text{xyz_QVapUAdvN}^\bullet \equiv \underbrace{U_k}_{\text{xyz_UCosLatN}} \underbrace{q_k}_{\text{xyz_QVapN}}, \quad (3.42)$$

$$\text{xyz_QVapVAdvN}^\bullet \equiv \underbrace{V_k}_{\text{xyz_VCosLatN}} q_k, \quad (3.43)$$

$$\underbrace{R_1}_{\text{xyz_DQVapDtN}^\bullet} = q_1 \underbrace{D_1}_{\text{xyz_DivN}} - \frac{1}{2} \underbrace{\Delta \sigma_1}_{\text{z_DelSigma}} \underbrace{\dot{\sigma}'_{3/2}}_{\text{xyz_QVapN}} (q_1 - q_2), \quad (3.44)$$

$$R_k = q_k D_k - \frac{1}{2 \Delta \sigma_k} [\dot{\sigma}'_{k-1/2} (q_{k-1} - q_k) + \dot{\sigma}'_{k+1/2} (q_k - q_{k+1})],$$

$$(k = 2, \dots, K - 1)$$

$$R_K = q_K D_K - \frac{1}{2 \Delta \sigma_K} \dot{\sigma}'_{K-1/2} (q_{K-1} - q_K).$$

3.6 格子点データからスペクトルデータへ

サブルーチン `NonLinearOnGrid` から得られた非重力波項 `xy_D*DtN`, `xyz_D*DtN` や、物理過程の時間変化項 `xy_D*DtPhy`, `xyz_D*DtPhy`, $t - \Delta t$ の予報変数 `xy_*B`, `xyz_*B` をスペクトルデータ `w_D*DtNo`, `wz_D*DtNo`, `w_*Bo`, `wz_*Bo` へ変換する。

3.7 セミインプリシット時間積分 (サブルーチン `TimeIntegration`)

3.3.2 節述べた時間積分の2つの手続きは `TimeIntegration` で行われる。ここでは `TimeIntegration` 内の計算の流れを、物理量とモデル変数の対応を示しながら説明する。

3.7.1 (3.2) の f の計算

時間積分の第1段階は (3.2) を解くことである。時間に依存しない行列 M は `SemiImplMatrix` で計算され、LU分解されて `wzz.siMtxLU` として `TimeIntegration` で使用されるので、最初にするべきことは f を求めることである。(3.5) を再掲し、各項の下にモデル内の変数名を記す。

$$\begin{aligned}
\underbrace{f}_{wz_siDivAvrTime} &\equiv \underbrace{(1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H)}_{wz_HDifCoefT} \underbrace{(1 - \Delta t \mathcal{D}_M)}_{wz_HDifCoefM} \underbrace{\mathbf{D}^{t-\Delta t}}_{wz_DivB} + \underbrace{(1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H)\Delta t}_{wz_DDivDtN} \underbrace{\left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right)^{NG}}_{wz_siTemp} \\
&\quad - \underbrace{\Delta t \nabla_\sigma^2}_{wz_LaplaCoef} \left\{ \underbrace{(1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H)}_{w_SurfGeoPot} \underbrace{\Phi_s}_{w_SurfGeoPot} + \underbrace{W}_{wz_siTemp} \left[\underbrace{(1 - \Delta t \mathcal{D}_H)}_{wz_TempB} \underbrace{\mathbf{T}^{t-\Delta t}}_{wz_TempB} + \underbrace{\Delta t \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t}\right)^{NG}}_{wz_DTempDtN} \right] \right\} \\
&\quad + \underbrace{(1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H)}_{z_siMtxG} \underbrace{G}_{z_siMtxG} \left\{ \underbrace{\pi^{t-\Delta t}}_{w_PiB} + \underbrace{\Delta t \left(\frac{\partial \pi}{\partial t}\right)^{NG}}_{w_DPiDtN} \right\}.
\end{aligned} \tag{3.45}$$

3.7.2 (3.2) を解く

サブルーチン LUSolve により解かれる。結果は `wz.siDivAvrTime` に上書きされる。その他の LUSolve の引数は `M` とそのピボット (`wzz.siMtxLU` と `wz.siMtxPiv`) である。

3.7.3 $t + \Delta t$ の値の算出

(3.6) と (3.7) を解く。以下に式とモデル変数との対応を記す。

$$\underbrace{\pi^{t+\Delta t}}_{w_PiA^\bullet} = \underbrace{\pi^{t-\Delta t}}_{w_PiB} + 2\Delta t \underbrace{\left[\underbrace{\left(\frac{\partial \pi}{\partial t}\right)^{NG}}_{w_DPiDtN} - \underbrace{C^T \overline{D}^t}_{z_DelSigma} \right]}_{w_siDPiDt}, \tag{3.46}$$

$$\underbrace{\zeta^{t+\Delta t}}_{wz_VorA^\bullet} = \frac{1}{1 - 2\Delta t \mathcal{D}_M} \left\{ \underbrace{\zeta^{t-\Delta t}}_{wz_VorB} + 2\Delta t \underbrace{\left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right)^{NG}}_{wz_DVorDtN} \right\}, \tag{3.47}$$

$$\underbrace{\mathbf{D}^{t+\Delta t}}_{\text{wz_DivA}^\bullet} = 2\overline{\mathbf{D}}^t - \underbrace{\mathbf{D}^{t-\Delta t}}_{\text{wz_DivB}}, \quad (3.48)$$

$$\underbrace{\mathbf{T}^{t+\Delta t}}_{\text{wz_TempA}^\bullet} = \frac{1}{1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H} \left\{ \underbrace{\mathbf{T}^{t-\Delta t}}_{\text{wz_TempB}} + 2\Delta t \underbrace{\left[\left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \right)^{\text{NG}} - \underbrace{\frac{\text{zz_siMtxH}}{h} \overline{\mathbf{D}}^t}_{\text{wz_siDTempDtN}} \right]}_{\text{wz_siDTempDt}} \right\}, \quad (3.49)$$

$$\underbrace{\mathbf{q}^{t+\Delta t}}_{\text{wz_QVapA}^\bullet} = \frac{1}{1 - 2\Delta t \mathcal{D}_H} \left\{ \underbrace{\mathbf{q}^{t-\Delta t}}_{\text{wz_QVapB}} + 2\Delta t \underbrace{\left(\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} \right)^{\text{NG}}}_{\text{wz_DQVapDtN}} \right\}. \quad (3.50)$$

付録 A

使用上の注意とライセンス規定

A.1 ライセンス規定

COPYRIGHT¹ を参照ください。

A.2 使用上の注意

dcpam5 は研究・教育の場で用いられることを前提としております。教育現場においては自由に使用・改変・再配布していただいて結構です。利用する場合には正式なライセンス規定に従って頂くようお願いいたします。

dcpam5 を利用して得られた科学技術的成果を論文や Web 等にて発表する際には、その旨を記し、リファレンスに挙げて頂きますようお願いいたします。

引用例 (和文)

森川 靖大, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 土屋 貴志, 山田 由貴子, 小高 正嗣, 堀之内 武, 林 祥介, DCPAM 開発グループ, 2008: 惑星大気モデル DCPAM, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, 地球流体電脳倶楽部。

引用例 (英文)

Morikawa, Y., Ishiwatari, M., Takahashi, O. Y., Tsuchiya, T., Yamada, Y., Odaka, M., Horinouchi, T., Hayashi, Y.-Y., DCPAM Development Group, 2008: DCPAM:

¹http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_current/COPYRIGHT

planetary atmosphere model, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>,
GFD Dennou Club.

A.3 開発グループメンバー

A.3.1 2008 年度

プログラム製作

森川 靖大, 石渡 正樹

プログラム製作協力

高橋 芳幸, 小高 正嗣, 堀之内 武, 中島 健介, 林 祥介

解説文書作成

森川 靖大, 石渡 正樹

A.3.2 2007 年度

プログラム製作

森川 靖大, 石渡 正樹

プログラム製作協力

土屋 貴志, 山田 由貴子, 高橋 芳幸, 小高 正嗣, 堀之内 武, 林 祥介

解説文書作成

石渡 正樹, 森川 靖大