

物理過程ライブラリの開発とその適用

原 旅人 (気象庁予報部数値予報課)

1 はじめに

数値予報モデルにおける物理過程は、本来、各モデルのフレームに強く依存するものではなく、インターフェースを統一して、多くのモデルで利用できるようなものができれば、物理過程における様々な知見を集約しやすくなる。

しかし、従来の物理過程はモデルのフレームに即した形で実装されることが多く、他のモデルへの移植を試みようとする際にも、移植元、移植先両方のモデルの構造を理解してから作業をする必要があり、モデルが異なると連携することが困難であった。

また、モデルのスケールによって選択する物理過程が異なることは自然なことであるが、開発においては注目すべきスキームの特性はスケールを問わず共通することが多い。しかし、物理過程を単体でテストしたり、同じ条件で複数のスキームを比較する基盤が整備されてこなかった。

以上をふまえ、テスト機能を包含し、モデルを問わずに簡単に実モデルへの適用が可能である物理過程のライブラリを開発を行っている。以下では、物理過程ライブラリがめざすものとその仕様を述べ、物理過程ライブラリに実装された気象庁全球モデルとメソモデルの境界層スキームをライブラリに用意されたテスト環境で比較した結果を紹介する。

2 物理過程ライブラリがめざすものとその実装

従来の問題点をふまえ、物理過程ライブラリでは、以下のことを目指している。概念図を図1に示す。

2.1 “どのモデルでも”

できる限り、モデルフレームへの依存性をなくし、モデルを問わず使えることを目指す。物理過程ライブラリでは、「物理過程は鉛直1次元である」という原理から、すべて鉛直1次元で実装して、どのような配列インデックスの順序にも対応できるようにした。実モデルに実装する際には、最外の水平インデックスのループでOpenMPによる並列化をかけることを前提とする。

鉛直1次元化することは、様々なモデルに対応しやすいだけでなく、メモリの参照が局所化されることで、スカラー計算機においてキャッシュの利用効率がよくなり、また、CPU間のロードバランスも改善されるため、計算効率が良くなることにもつながる¹。また、鉛直1次元化することでコードが単純になり、スキームに関する新しい発想も生まれやすくなる。

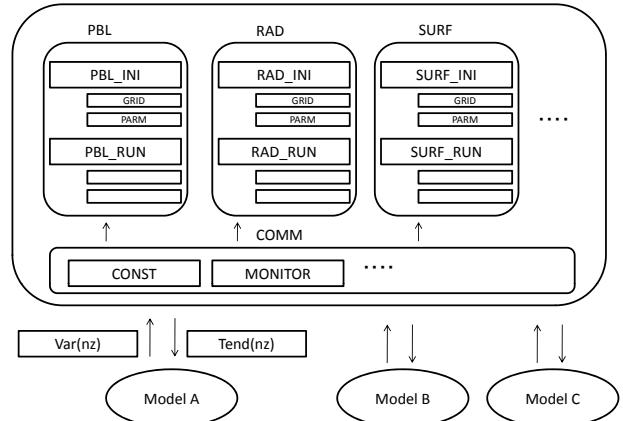


図1: 物理過程ライブラリ概念図。モデルは入力 (Var(nz)) をライブラリに渡し、時間変化率 (Tend(nz)) を得る。ライブラリ内部は、各過程ごとにコンポーネントが分かれ、初期化サブルーチン (INI)、本体サブルーチン (RUN)、格子情報モジュール (GRID)、パラメータモジュール (PARM) などから構成される。

```
! 初期化: 物理定数 格子情報、オプション、パラメータのセット
call pp_phys_const_set
call pbl_grid_set(nz, z_f)
call pbl_option_ini(mym_level = 3)
call pbl_parm_ini(imp_rate = 1.0)

! 最外ループをOpenMPで並列化
!$OMP PARALLEL DO
!$OMP PRIVATE(...)
do j = 1, ny
  do i = 1, nx
    do k = 1, nz
      ! 配列の詰め替えおよび変数変換 (factor: 密度や計量など)
      val_1d(k) = val_3d(k, i, j) / factor(k, i, j)
    end do
    ! 前処理
    call pbl_pre(val_1d, tmp_1d)
    ! 本体
    call pbl_run(val_1d, tmp_1d, tend_1d)
    do k = 1, nz
      ! 配列の詰め替えおよび変数変換
      tend(k, i, j) = tend_1d(k) * factor(k, i, j)
    end do
  end do
end do
!$OMP END PARALLEL DO
```

図2: 物理ライブラリを用いたアプリケーションのサンプル (概念)。val はユーザーからの入力、tend は時間変化率を示し、_3d はユーザーのモデルの3次元配列、_1d は物理ライブラリに入力するために詰め替える1次元配列を示す。

2.2 簡単にユーザーがモデルに組み込めるように

ユーザーがモデルに組み込む際に呼び出す公開サブルーチンのインターフェースを系統的かつできるだけ少なくすることで、ユーザーが簡単にモデルへの組み込みができるようにしている。各過程に対応するコンポーネントの公開サブルーチンは、基本的に初期化、

¹DO ループの中にサブルーチン呼び出しがあることによるオーバーヘッドが生じるが、最近の主流であるスカラー計算機ではそれ以上のメリットがある。

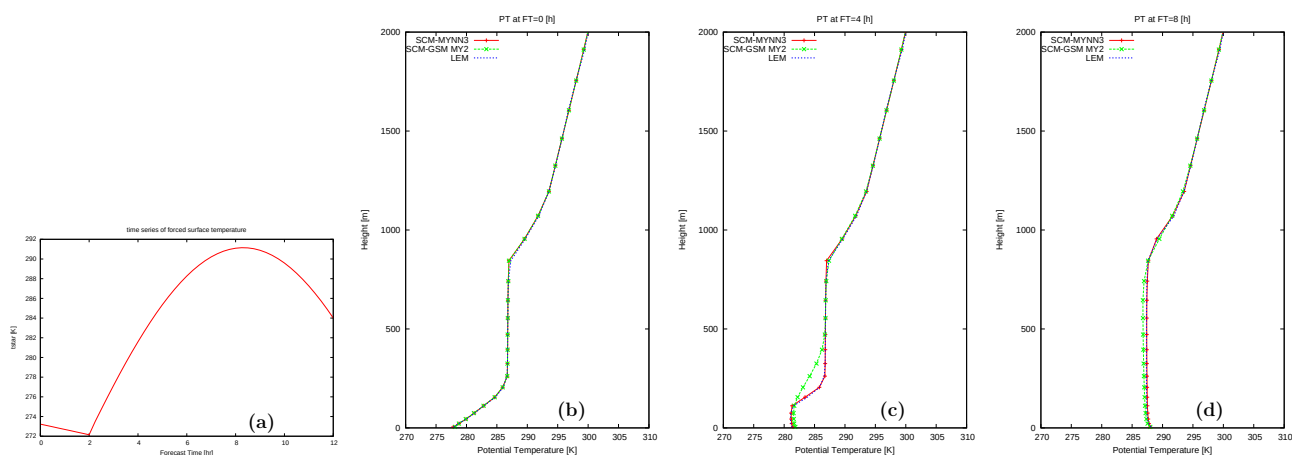


図 3: GABLS2 のテストケースにおける設定と結果。地表面温度の時系列を (a) のように与え、温位の初期値は (b) のように与える (他の初期値の図は略)。(c) と (d) はそれぞれ 4 時間後、8 時間後 (最も地表面温度が高くなったとき) の MYNN3(赤)、GSM MY2(緑)、LES(青、A. Lock による) の温位の鉛直プロファイル。

前処理、本体、後処理で構成され、その他に鉛直格子情報、スキームに関するスイッチ、パラメータを扱うモジュールとそれらを設定する公開サブルーチン、公開サブルーチンから呼び出される内部サブルーチンなどがある。物理ライブラリを用いたプログラムのサンプル (概念) を図 2 に示す。

また、ユーザーへの便宜および継続的な開発のため、実装の詳細やインターフェースに関するドキュメントを充実させる。特にインターフェースに関するものは、コードを変更したときに同時に変更できるように、インライン化を検討している。

2.3 時間変化率を与えるという役割を徹底

先に述べたように、物理過程の最終出力は予報変数に対する時間変化率である。そのことを徹底し、ユーザーが呼び出す本体サブルーチンでは、時間変化率を `intent(out)` で返す。ユーザーから入力として与えられた変数は、`intent(in)` として一切変更しない。

2.4 テスト環境の提供

物理過程ライブラリは、“ライブラリ”であるので、それ単体では動作せず、それを利用するアプリケーションが必要となる。そのアプリケーションの一つとして、GABLS2², GABLS3³, TRMM-LBA⁴, KiD⁵ などの国際モデル比較プロジェクトに用いられたテスト事例を実行するプログラムを提供している。このプログラムは、物理ライブラリのアプリケーションのサンプルとして、実モデルへの組み込み方を示すとともに、スキームの動作検証やスキーム間の比較などができる。

3 テストケースを用いた境界層スキームの比較

従来、ある初期値、強制力を仮定して鉛直 1 次元モデルの相互比較を行う際には、それぞれのモデルでそのテスト環境を整備しており、少なからず条件の異なることがある。物理ライブラリのテスト環境では、複

数のスキームを完全に同一の条件のもとで比較することが可能である。

その例として、物理ライブラリに実装した MYNN3 (Nakanishi and Niino, 2009; 原, 2008) と気象庁全球モデル (GSM) の境界層スキーム (Mellor-Yamada level 2 を改変したもの) を GABLS2(雲がない境界層の日変化) における混合層の発達について比較したときの設定の一部と結果を LES の結果とともに、図 3 に示す。境界層スキーム以外の設定は同じである。最終的な混合層の様子に両者に大きな差はないが、GSM の境界層スキームでは安定層での乱流輸送が大きく、それによって、混合層の立ち上がりが早すぎるのがわかる。

4 物理過程ライブラリの実モデルへの適用

現状では、対流過程以外は、現在の気象庁の現業メソモデル (MSM) で用いられている物理過程とほぼ同等、もしくは改良されたものが物理ライブラリに実装されている (たとえば Hara (2010) など)。その物理ライブラリを asuca に適用した。asuca の開発者による実装に要した日数は実質 2 日程度で、物理ライブラリに用意されたテストケースを再現するかのテストを含め、数日程度で実装が完了した。このことは、「簡単にユーザーがモデルに組み込めるように」という目標を達成していることを示している。

物理過程ライブラリを用いた asuca の性能に関しては、本ワークショップの河野ほかによる講演を参照されたい。

参考文献

原旅人, 2008: 気象庁非静学モデル II 第 4 章 乱流過程. 数値予報課報告別冊 54 号, 117–145.

Hara, T., 2010: Comparisons on the boundary layer schemes using a single column model. *Proceedings, First International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Kyoto, Japan, 29 September - 1 October, 2010.*, 19–20.

Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912.

²<http://people.su.se/~gsven/gabls/>

³<http://www.knmi.nl/samenw/gabls/>

⁴<http://www.mmm.ucar.edu/gcss-wg4/gcss/case4.html>

⁵<http://appconv.metoffice.com/microphysics/index.shtml>