

極端現象の予測精度向上を目指した予測モデルの改良

課題責任者

馬場 雄也 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

著者

馬場 雄也*¹

*¹ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

JAMSTEC の Data Analyzer (DA) システムが近々運用終了することに伴い、DA システムで開発・利用していた数値モデルを地球シミュレータ 4 の CPU ノード (ES4CPU) で動作させるために数値モデルコードの移植を行った。移植を行ったのは領域結合モデル、全球大気海洋結合モデル (SINTEX-F2)、気象庁全球モデル (GSM) の 3 つである。ES4CPU はスカラー型スパコンの構成のため、DA システムで動作していたコードがそのまま動作すると思われたが、実際にはクリアしなければいけないいくつかの課題があった。ES4CPU では DA システムで利用できていた汎用ライブラリの導入が必要であり、ES4 への追加インストール、コンパイルリンク時の修正が必要であった。さらに、インテルチップ+インテルコンパイラの構成で利用可能であった高速化・最適化オプションが ES4CPU では実質利用不可であり (ES4CPU は AMD チップ)、同様の最適化オプションを利用した場合、DA システムでは見られなかった不具合が発生した。これらの要因による動作不良が混在したため原因を特定することが困難となり、コードを正常動作させるために多大な時間を要した。最終的には 3 つの数値モデルの移植には成功したが、ES4 を DA システムの替わりとして利用する上での問題点もいくつか明らかになった。

キーワード：領域結合モデル, 全球大気海洋結合モデル, 気象庁全球モデル, 豪雨予測, 季節予測

1. はじめに

Data Analyzer (DA) システムは ES4 が導入されるまでは JAMSTEC で利用可能な唯一のスカラー型スパコンであった。海外の数値モデル (コミュニティモデル) は数多くの研究者が利用するため、スカラー型スパコンで動作させることを前提としており、海外の数値モデルをベースに国際協力を通じてモデルを開発する場合には、ベクトル型よりもスカラー型スパコンの方が適しており、著者も DA システムを研究開発の中心プラットフォームとして利用してきた。また、DA システムは ES ほど利用状況が混雑しておらず、コーディング、テストラン、チェックなどのデバッグサイクルが早く行えることや、利用に当たっての成果報告義務が緩やかで、自由な発想に基づき利用できることも DA システムを研究開発に主に用いた理由であった。

しかし、ES4 がスカラー型 CPU ノードを有するようになったこと、ポスト DA が計算システムではなくデータ解析中心のシステムになること、機構の予算状況が改善せず DA システムのような計算システムを維持することが困難なことから、DA システムから ES4 に移行することが求められたため、臨時的に用意されたチャレンジ課題に応募し、その計算資源を使って DA システムで開発し利用してきた数値モデルの ES4 への移植を試みた。移植を試みたのは領域結合モデル、全球大気海洋結合モデル、気象庁全球モデルの 3 つである。

2. 領域結合モデル

領域結合モデルは著者が海洋の影響を日本域の極端現象予測 (特に豪雨予測) に反映させ、海洋が極端現象予測

に果たす役割を明らかにするために開発した数値モデルである。大気モデルはもともと著者が開発していた新しい積雲対流スキーム [1] と、気候ランに適した各種物理過程を実装した、領域非静力学大気モデル [2] を利用している。海洋モデルはアプリケーションラボの季節予測モデル、SINTEX-F2 [3] にも組み込まれているフランスの NEMO (Nucleus European Modelling of the Ocean) ver. 3.6 [4] を利用した。NEMO はカップラー OASIS3 (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil version 3 coupler) [5] のインターフェースを備えており、この数値モデルでも OASIS3 (OASIS3-MCT ver. 3) を利用して領域結合モデルを構成した。

欧州の数値モデルでは netcdf を入出力データ・フォーマットとして採用しているため、netcdf 関連のライブラリ (netcdf, netcdf-fortran, hdf5 など) の利用がモデルのコンパイルには必須であったが、ES4 には必要なライブラリがインストールされていなかった。そのため、サポートに問い合わせ netcdf 関連のライブラリのインストールを行ってもらった。このとき、netcdf は並列計算に対応したオプションまたは parallel netcdf のインストールが必要であったが、最初のインストール作業ではここまで考慮されておらず、再度インストール作業が必要となった。例えば NEMO で入出力ライブラリとして用いられる XIOS2 では parallel netcdf の指定が以下のように必要である。

```
(xios2 のコンパイル実行スクリプトでの指定)  
./make_xios --full --arch ifort_ES4CPU --  
netcdf_lib netcdf4_par --use_oasis oasis3_mct --  
job 8
```

並列計算対応の netcdf ライブラリがインストールされたことで必要な外部ライブラリは揃ったが、さらに DA システムとは異なる方法でコンパイル時にリンクする必要があった。nf-config を利用して必要なパスを特定する必要があった。

```
(NEMO の makefile における include/lib 指定)
%NCDF_INC    $(nf-config --cflags)
%NCDF_LIB    $(nf-config --flibs) -lhdf5hl_fortran
-lhdf5_fortran -lcurl
```

同時に ES4 には環境設定に Environment modules が導入されているため、計算実行時に適切な module がロードされないとエラーが起り、モデルが正常に動作しなかった。領域結合モデルでは以下のようにして実行直前の環境を整えた。以下の例は特に parallel netcdf をリンクさせたコードを動作させるのに必要な設定である。

```
(実行シェル中の Environment modules の設定)
module purge
module load --no-pager Intel_oneAPI/2021.1.1/all
module load --no-pager IntelMPI/2021.1.1
module load --no-pager zlib_intel/1.2.11
module load --no-pager szip_intel/2.1.1
module load --no-pager PHDF5_intel/1.10.5
module load --no-pager NetCDF4_intel-parallel/all
```

領域結合モデルでは短期予測を前提としていたため、並列化はフラット MPI のみ、最適化オプションもデバッグの煩雑さを避けるため DA システムのころから-02 までと限定しており、ここまでの修正で動作させることができた。DA システムでは 5 ノード(ノード当り 1CPU、40 コア)で動作させていた実行環境は、ES4CPU では 3 ノード(合計 6CPU、384 コア)と変更することで同等の計算速度を実現できた。

3. 全球大気海洋結合モデル (SINTEX-F2)

SINTEX-F2(Scale Interaction Experiment-Frontier version 2) [3] はマックス・プランク気象研究所の ECHAM5 [6] を大気モデルとし、海洋モデルは先の領域結合モデルと同じ NEMO (ただし ver3.4)、カップラー OASIS3 (ただし MCT でない) で大気・海洋モデルは結合されている。SINTEX-F2 は季節予測モデルであるため、気候変動予測のためのスピン・アップには長期積分が必要であり、可能な限り最適化・高速化することが必要である。

海洋モデルとカップラーが先の領域結合モデルと類似しているため、netcdf をリンクしてコンパイルすることには早い段階で成功したが、実行時にエラーとなり正常に動作しなかった。この原因としてコンパイルには成功するもののライブラリのバージョンがモデルと不整合を起し、動作しないことが考えられた。この原因を特定するためには、大気モデル、海洋モデルを個別に調べて問題

を切り分ける必要があると考えたため、大気、海洋単体でモデルが動作する環境を臨時的に構築した。

SINTEX-F2 は DA システム上では Intel AVX 命令 (Advanced Vector Extensions, SIMD を発展させた演算、スカラー型 CPU で実現されるベクトル演算のようなもの) を有効にして高速化を行っていた。DA マニュアルでは AVX の利用に関する詳細な説明が掲載されていて、高速化には AVX が有効であると書かれていたが、ES マニュアルでは AVX 命令の利用については記載がなかった。そこで ES4 では推奨されるオプションではないと考え、AVX 命令を有効にするオプションを外し、最適化オプションを-02 まで落としたところ、大気、海洋モデル単体では動作することを確認できた。このとき、netcdf 関連ライブラリを独自にビルドし、ライブラリのバージョンを変えたテストも行っているが、どのバージョンでも単体では動作することを確認している。従って、ライブラリの不整合の問題は存在しておらず、最適化レベルを下げればモデルは正常に動作する可能性が高いことがわかった。以下は ECHAM5 の例であるが、AVX 命令を有効にするオプション-xCORE-AVX2 を ES4CPU 用のコンパイルでは削っている。

```
(変更前)
FFLAGS = -fpe0 $(DEBUG) -i4 -r8 -convert
big_endian -03 -xCORE-AVX2 -fp-model precise -fno-alias
F90FLAGS = $(INCLUDES) -fpe0 $(DEBUG) -i4 -r8 -convert
big_endian -03 -xCORE-AVX2 -fp-model precise -fno-alias
-Duse_comm_MPI1 -D__prism -D__cpl_nemo -fpp
```

```
(変更後)
FFLAGS = -fpe0 -traceback -g -i4 -r8 -convert
big_endian -02 -fp-model precise -fno-alias
F90FLAGS = $(INCLUDES) -fpe0 -traceback -g -i4 -r8 -convert
big_endian -02 -fp-model precise -fno-alias -Duse_comm_MPI1 -D__prism -D__cpl_nemo -fpp
```

しかしその後結合モード設定で再び動作させようとしたが、結合モードでは結局のところ動作しないままであった。SINTEX-F2 を正常に動作させることを一旦諦め、気象庁全球モデルに取り掛かろうとしたところ、作業ミスで SINTEX-F2 の環境を消してしまう。慌てて覚えている限りで環境を再構築するとモデルは結合モードで正常に動作した。自身では原因が特定できなかったため、予めサポートに渡していたコードと、動作したコードの違いを調べてもらったところ、OASIS3 のネームリストに違いがあることがわかった。OASIS3 は OASIS3-MCT にバージョンアップして以降、カップラーのプロセスは計算実行時に発生しないようになっていて、ネームリストは非常に簡素化されていて、大気・海洋モデルが交換するフラックスの情報しか基本的には必要ない。しかし、SINTEX-F2 で使われている OASIS3 はバージョンが古く、ネームリストで

は実行時のモデルプロセスの順番を記述する必要があり、これが実際のMPMD(Multiple Program Multiple Data,一度の実行で複数プログラムを複数データで動かすこと)実行の実行ファイル順と一致していないと正しく動作しないことが分かった。例えば実行シェルでは以下のようにmpirunを記述しており、実行ファイルの順番(oasis, echam, nemoの順)がネームリストの記述と一致しないと、モデルは正常に動作しない(具体的には結合モードのデータ転送時に計算がハングアップする)。

```
time mpirun -f ${PBS_NODEFILE} -np  
${NCPUCPL} ./oasis : -np ${NCPUATM} ./echam : -np  
${NCPUOCE} ./nemo > out_run.txt 2>&1
```

ライブラリの不整合に関する調査時点から実行順番を変えたりして調査を行っていたため、順番がOASIS3のネームリストで指定されているものと変わってしまい、このために動作しなくなってしまうと考えられる。

さらにその後サポートに問い合わせたところ、ES4CPUではAVX命令を有効にすることは推奨されていないため(ES4CPUはAMDチップであり、インテルコンパイラはこのチップ用に最適化されていない)、最適化・高速化のオプションで計算速度を上げることはできず、計算速度を上げるためにはモデルの並列分割数を上げる必要があった。DAシステムで実行していたスクリプト修正し、2ノード(合計4CPU、256コア、フラットMPI)での実行としたところ、DAシステムにおける計算速度と同等の速度を得ることができた。ただし、AVX命令が使用できなくなったため、システムが更新されたにも関わらず、計算速度は上がらない結果となった。

4. 気象庁全球モデル (GSM)

気象庁全球モデルであるGSM(global spectral model)[7]は日々の天気予報や台風予測に利用されており、気象庁に申請すれば研究目的で利用することが可能である。著者は近年改良が難しい雲のモデルである積雲対流スキームを独自に開発し[1]、その有効性を様々な角度から実証してきた[8-12]。これらの有効性を日本の気象予測へ反映させるため、気象庁のGSM開発担当部署と協力して、DAシステム上でスキームのGSMへの実装を進めてきた。課題開始時点で、DAシステムを利用してスキームの実装は完了しており、ES4CPUでは動作確認だけが必要となっていた。

GSMは様々なプラットフォームで利用されることを想定しているため、コンパイルオプションも一般的なものだけが指定されており、コンパイル自体は早い段階から成功することができた。しかし、実行時にはある程度計算が進んだ段階で不明なエラーで計算がストップしてしまう問題が発生した。デバッグ用オプションとしてトレースバックを付けてもエラーメッセージが出力されないため、自身での解決は困難であると考えサポートに相談することとした。結果、サポートに相談しても原因を特定す

ることはできなかったため、気象庁GSM開発担当部署に相談の上、NECにコード調査を依頼することにした。

結果、NECでは配列外参照がデバッグオプションで検出できない範囲で起こっていることまでは特定できたが、それ以上のことはわからないままであった。NECに調査を依頼している間にOpenMPに関してスレッド数による動作の変化を調べていた所、スレッド数を1に限定すればモデルは正常に動作することが判明する。さらに気象庁のGSM開発担当部署に相談したところ、最適化レベルを下げるように助言を得たことから、最適化レベルを-02までに下げてジョブを走らせたところ、OpenMPのスレッド数を1よりも大きく設定してもモデルが動作することがわかった。これにより、ES4CPUでは最適化レベルを-03以上にするるとモデルは正常に動作しなくなる(途中までは動作するが、不具合が発生する可能性が高くなる)ことが決定的となった。GSMは様々なプラットフォームで動作させることを前提としているが、標準のコンパイル最適化レベルは-03と設定されている。つまり、ES4CPUではこの動作するはずの標準設定でモデルが動作しなかったため、原因の特定が難航し、モデルを動作させるまでに時間がかかったと考えられる。

GSMはES4CPUでは1ノード(合計2CPU、128コア、16MPI、8スレッド並列)でDAシステムと変わらない計算速度を得ることができた。GSMではOpenMPを有効にした場合、同じ条件のジョブでも結果が一致しない問題が発生したが、この問題は気象庁担当部署での調査結果から、インテルコンパイラのオプションにおいて-fp-model=strictを指定することで問題を回避することができることが分かった。

5. ES4CPUの利用上の問題点

ES4CPUで一番問題となったのは、コンパイル時の最適化レベルが02よりも上げられないことである。つまりSIMDが有効になる最適化レベル03のメリットは少なくとも受けられない。近年はコストパフォーマンスの観点からIntel CPUではなくAMD CPUがスパコンに採用されることも少なくないが、fortranコンパイラはIntelコンパイラがスカラー型スパコンのほぼ標準のコンパイラと言ってよく、AMDのチップを採用した場合、コンパイラはAMDチップ用に最適化されておらず(Intel oneAPIは汎用性があるとはいえ)、適用できる最適化のレベルは限定されてしまう。もし03以上を適用しようとするれば、気象庁GSMで見られたようにプログラムは動作不良を起こしてしまう。

さらにintel AVX命令が使えなくなったことで、システムは更新されたにも関わらず、実際の計算速度はDAシステムとほぼ変わらない結果となった。海外のコミュニティ大気・海洋モデルはベクトルプロセッサ用に最適化されてはいないが、流体計算を行うことには変わりがないため、DAシステム上ではAVX命令を有効にすることで高速化が実現できていた。しかし、ES4CPUではCPUがインテル製ではないため、AVX命令を有効にすることは推奨

されておらず、この高速化の効果は失われてしまった。今後のシステム導入にあたってはコンパイラにある程度の汎用性があるといっても、以上に示したように最適化・高速化には難があるため、少なくともコンパイラに最も適したCPUを選択するべきである。

また、ES4CPUではデバッグキューが用意されているものの、優先順位はSキュー系ジョブと変わらないため、混雑時のデバッグには長い待ち時間を必要とした。例えば混雑時には5分のジョブを回すために1~2時間ほど待たなければならないという状況が多発した。DAシステムではデバッグキュー用にノードが用意されていたためこのような状況は発生していなかった。つまり開発環境としてはDAシステムに比べてES4は悪化していると言える。すでに動作するプログラムに関してはジョブ実行までの時間がかかるのは仕方ないが、まだ動かないプログラムのデバッグに関してこのように実行に時間がかかるのは、開発環境として不適切である。開発環境改善のために、システム設定の変更を希望する。

謝辞

ESサポートデスクにはライブラリのインストール、コンパイル方法、ジョブの実行に関して多大な支援・協力をいただいた。ここに謝意を示す。

文献

- [1] Baba, Y., "Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model", *Clim. Dyn.*, 52, 309-334, (2019).
- [2] Baba, Y. et al., "Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid", *Mon. Weather Rev.*, 138, 3988-4005, (2010).
- [3] Masson, S. et al., "Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model", *Clim. Dyn.*, 39, 681-707, (2012).
- [4] Maddec, G., "NEMO ocean engine, version 3", In: *Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace 27*. Guyancourt, France: Institut Pierre-Simon Laplace, p. 209, (2008).
- [5] Valcke, S., "The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software", *Geosci. Model Dev.*, 6, 373-388, (2013).
- [6] Roeckner, E. et al., "Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model", *J. Clim.*, 19, 3771-3791, (2006).
- [7] Japan Meteorological Agency (JMA), "Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency (Appendix to WMO technical progress report on the global data-processing and forecasting system and numerical weather prediction)", (2019).
- [8] Baba, Y. "Shallow convective closure in a spectral cumulus parameterization", *Atmos. Res.*, 233, 104707,

(2020).

[9] Baba, Y., Giorgetta, M.A., "Tropical variability in ICON-A with a spectral cumulus parameterization", *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2019MS001732, (2020).

[10] Baba, Y., "Diurnal cycle of precipitation over the Maritime Continent simulated by a spectral cumulus parameterization", *Dyn. Atmos. Oceans*, 91, 101160, (2020).

[11] Baba, Y., "Influence of a spectral cumulus parameterization on simulating global tropical cyclone activity in an AGCM", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 1170-1188, (2021).

[12] Baba, Y., "Improved intraseasonal variability in the initialization of SINTEX-F2 using a spectral cumulus parameterization", *Int. J. Clim.*, 41, 6690-6712, (2021).

Improving Prediction Model toward More Accurate Prediction for Extreme Weather Events

Project Representative

Yuya Baba Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Yuya Baba *¹

*¹Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Two atmosphere-ocean coupled models (regional and global models) and an atmospheric model (Global Spectral Model of Japan Meteorological Agency) used in the Data Analyzer (DA) system were ported to Earth Simulator 4 CPU environment (ES4CPU). Before porting the programs, it was necessary to install several libraries, and compiles of these codes had to be modified. It was also found that compile options regarding higher optimization and vectorization which were normally used for the intel architecture environments were unavailable in ES4CPU, since the ES4CPU consists of AMD CPU. Eventually, three models were ported successfully, but several problems were found in terms of use of ES4CPU in place of DA system.

Keywords : regional coupled model, global coupled model, global spectral model, heavy rainfall prediction, seasonal prediction

1. Introduction

Data Analyzer (DA) system was the only one scalar supercomputer available in JAMSTEC before Earth Simulator 4 (ES4) was installed. The DA system was very useful for developing oversea oriented numerical models and conducting demonstrative studies, but due to the recent budget reductions, it was determined that its operation will be end by the next fiscal year. Considering this situation, we had to port the programs used on DA system to ES4. In this project, we tried to port three programs, i.e., regional coupled model, global coupled model (SINTEX-F2), and global atmospheric model (GSM) of Japan Meteorological Agency (JMA).

2. Regional coupled model

The regional coupled model was developed aiming at predicting extreme weather events (especially for heavy rainfall prediction) around Japan with considering ocean prediction. The model comprises of nonhydrostatic atmospheric model [1] in which recently developed convection scheme [2] was implemented. The ocean model used in the model was NEMO (Nucleus European Modelling of the Ocean) ver.3.6 [3], and the atmospheric and ocean models were coupled by OASIS3 (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil coupler version 3)-MCT [4].

Since NEMO and other European models employ netcdf as the standard IO format, netcdf libraries were needed to port the above model. However, these libraries were not installed in ES4 (netcdf libraries linked with intel compiler), so we had to ask system administrators to install them. This installation involved parallel netcdf libraries, and the compile scripts of the source

code also needed modifications following to the newly installed libraries.

The regional coupled model which was compiled with suppressed optimization (the optimization level in the intel compiler was limited to -O2) successfully ran on ES4CPU. It worked as a 3-nodes job (total 6CPU, 384 cores) and its performance was almost same as that on DA system.

3. Global coupled model (SINTEX-F2)

SINTEX-F2 (Scale Interaction Experiment-Frontier version 2) [5] is a global coupled model used in seasonal prediction system. It consists of global atmospheric and ocean models, i.e., the atmospheric model is ECHAM5 of Max-Planck Institute of Meteorology [6], and ocean model is NEMO. They are coupled by previous version of OASIS3 coupler.

Ocean and coupler components of SINTEX-F2 are like those of the regional coupled model, so the compile of this model was successfully finished without any special modifications. However, it didn't work well when the model was executed as coupled mode. To identify the cause of this problem, each component (atmosphere and ocean models) was separated and execution environment for separated run was temporally constructed. Using this environment, it was found that intel Advanced Vector Extensions (intel AVX) operation was unavailable for AMD CPU of ES4 (not recommended, strictly), and the optimization should be limited to -O2 level. It was also found that version difference in the netcdf libraries could not be a cause of above problem (models worked with any versions of netcdf).

In addition to above system dependent errors, it was found that

the model didn't work with MPMD (Multiple Program Multiple Data) command with incorrect order of execution files. The old version OASIS3 coupler requires MPMD command to match the order of execution files with that specified in its namelist file (this is no longer necessary for newer version OASIS3 coupler).

SINTEX-F2 finally worked as a 2-nodes job (total 4CPU, 256 cores), but its performance does not become faster compared to that on DA system, because the AVX operation was unavailable on ES4.

4. JMA global spectral model (GSM)

JMA GSM is used for typhoon prediction and daily weather forecast [7]. To make use of the advantages of recently developed convection scheme developed by the author [8-12] in GSM, we implemented the convection scheme in GSM on DA system. In this project, the modified GSM was ported on ES4CPU.

The compile of GSM on ES4CPU was successfully conducted, but it didn't work well, for example, the computation was abnormally end with unknown errors (also without any concrete error description outputs). It seems that it was difficult for us to identify the cause of the error, so we asked NEC supports. However, NEC also could not specify the reason, they only found that unexpected memory access occurred when errors happened.

Meanwhile, we investigated the influence of OpenMP, and it revealed that OpenMP with thread number 1 enabled the model to run successfully. Also, JMA GSM developer teams recommended us to suppress optimization level from O3 to O2, then we found that optimization level O2 with OpenMP (thread number is larger than 1) worked correctly. This means that the optimization level O3 may cause unexpected model behaviors, and at the worst case, the model would be terminated abnormally.

5. Caveats for use of ES4CPU

CPU of ES4CPU was AMD, thus further optimization by intel compiler was not recommended. For example, level O3 optimization which involves SIMD operation on intel CPU was inappropriate on ES4CPU, as seen in the case of GSM. In addition, intel AVX operation, which is very useful to accelerate computational speeds for atmosphere and ocean models, is not supported for AMD CPU. The cost performance of AMD CPU was recently getting better than intel CPU, however, the best CPU for intel compiler was intel CPU, considering optimization in the compile, thus we hope intel CPU will be installed in the next ES system.

Acknowledgement

The author thanks ES support desk for their helpful supports during the porting the models, debugging, and running the jobs.

References

[1] Baba, Y. et al., "Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid", *Mon.*

Weather Rev., 138, 3988-4005, (2010).

[2] Baba, Y., "Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model", *Clim. Dyn.*, 52, 309-334, (2019).

[3] Maddec, G., "NEMO ocean engine, version 3", In: *Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace 27*. Guyancourt, France: Institut Pierre-Simon Laplace, p. 209, (2008).

[4] Valcke, S., "The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software", *Geosci. Model Dev.*, 6, 373-388, (2013).

[5] Masson, S. et al., "Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model", *Clim. Dyn.*, 39, 681-707, (2012).

[6] Roeckner, E. et al., "Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model", *J. Clim.*, 19, 3771-3791, (2006).

[7] Japan Meteorological Agency (JMA), "Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency (Appendix to WMO technical progress report on the global data-processing and forecasting system and numerical weather prediction)", (2019).

[8] Baba, Y. "Shallow convective closure in a spectral cumulus parameterization", *Atmos. Res.*, 233, 104707, (2020).

[9] Baba, Y., Giorgetta, M.A., "Tropical variability in ICON-A with a spectral cumulus parameterization", *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2019MS001732, (2020).

[10] Baba, Y., "Diurnal cycle of precipitation over the Maritime Continent simulated by a spectral cumulus parameterization", *Dyn. Atmos. Oceans*, 91, 101160, (2020).

[11] Baba, Y., "Influence of a spectral cumulus parameterization on simulating global tropical cyclone activity in an AGCM", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 1170-1188, (2021).

[12] Baba, Y., "Improved intraseasonal variability in the initialization of SINTEX-F2 using a spectral cumulus parameterization", *Int. J. Clim.*, 41, 6690-6712, (2021).