

付録 H 並列化

H.1 MPI

第 2 章で仮定したとおり、ATM で扱うトレーサーは現在、相互作用を考えていない。そのため、ATM はトレーサーの初期分布に対して重ね合わせの原理が成り立つ方程式系に基づいているという意味で線形モデルであるといえる。すなわち、2つの初期値から別々に計算した予測結果を合わせたものと、それら2つの初期値を合わせた1つの初期値から計算した予測結果は一致する¹。

このような線形モデルは、並列化されたプロセス間のデータの受け渡し（通信）が基本的には不要であるため並列化の実装が容易である上に計算効率が上がりやすい²。ATM を利用した予報業務においては、現象発生時の迅速な情報発表のために予測計算を高速に行うことは、速報性（第 1.2 節）の観点から重要である。そこで、供給源モデルと ATM 本体にはメモリを共有しない複数プロセスによる並列化である MPI を用いて並列計算を実装³し予測計算の高速化を図っている。ここでは ATM における並列化について説明する。

Figure H.1 に ATM の並列計算の概念図を示す。この例では、分割数は 5 である。各プロセスが扱うトレーサー数は全トレーサー数を均等に配分するため、トレーサー数が 100,000 とすると 1 プロセスあたり 20,000 のトレーサーの計算を行うことになる。この場合、各プロセスは 20,000 のトレーサーの予報結果しかもっていないため全トレーサーの結果を出力するために特定のプロセスに各プロセスからデータをまとめて出力する必要があり、Figure H.1 の例だとプロセス 0 にデータをまとめている（図中の黄色と緑色の領域に対応）。したがって、プロセス 0 とプロセス 0 以外は出力の有無という点で異なる処理をしており、出力を担当するプロセス 0 は他のプロセスに比べて負荷が高い。一方で、GPV や初期値の読み込みについては全プロセスで読み込み、「読み込み専用プロセス」などは用意しておらず負荷は均等である。また、GPV の読み込むタイミングは、利用する GPV によって異なり、例えば、LFM の場合は 1 時間ごとである（Table 4.1 参照）。

ATM で MPI 並列計算を行う際の注意点を最後に述べておく。上述したように、トレーサーに対して ATM はトレーサーに対する線形モデルであるから、並列化によって予測値は変化しないはずであるが実際には、並列数を変えると擬似乱数（付録 G）の順番が異なるため計算結果が完全には一致しない。その差は物理的に意味のない差であるものの、開発の際にはこの差には注意が必要である。すなわち、開発中には「予測結果を変えない些細な変更」を行うことは頻繁にあり、そのような場合は変更前の結果との一致を確認し想定外の修正をしていないことを確認する。その際、万が一、異なる並列数で実行した結果を比較すると結果は一致しない。したがって、一致を確認する必要がある場合は、必ず並列数を合わせて計算を行う必要がある。

¹方程式系としては一致するべきであるが、実際の数値計算上では計算の順序による違いや乱数シードの設定によって擬似乱数の順番が異なるため計算結果が完全に一致することはない。しかし、その違いは物理的に意味のない差である。

²出力やモニタのために最低限の通信は必要となる。

³ATM は非 MPI 環境でも実行可能である。その場合、付録 A の Mpi にある MPI ライブラリの呼び出しをまとめた `mpi_control.f90` に換えて、空の MPI ライラリ `mpi_fake.f90` でコンパイル実行する。後述するログは、ジョブ全体のログに集約して 1 つだけ出力される（MPI 計算の場合はプロセス内とジョブ全体のログが各 1 出力）。

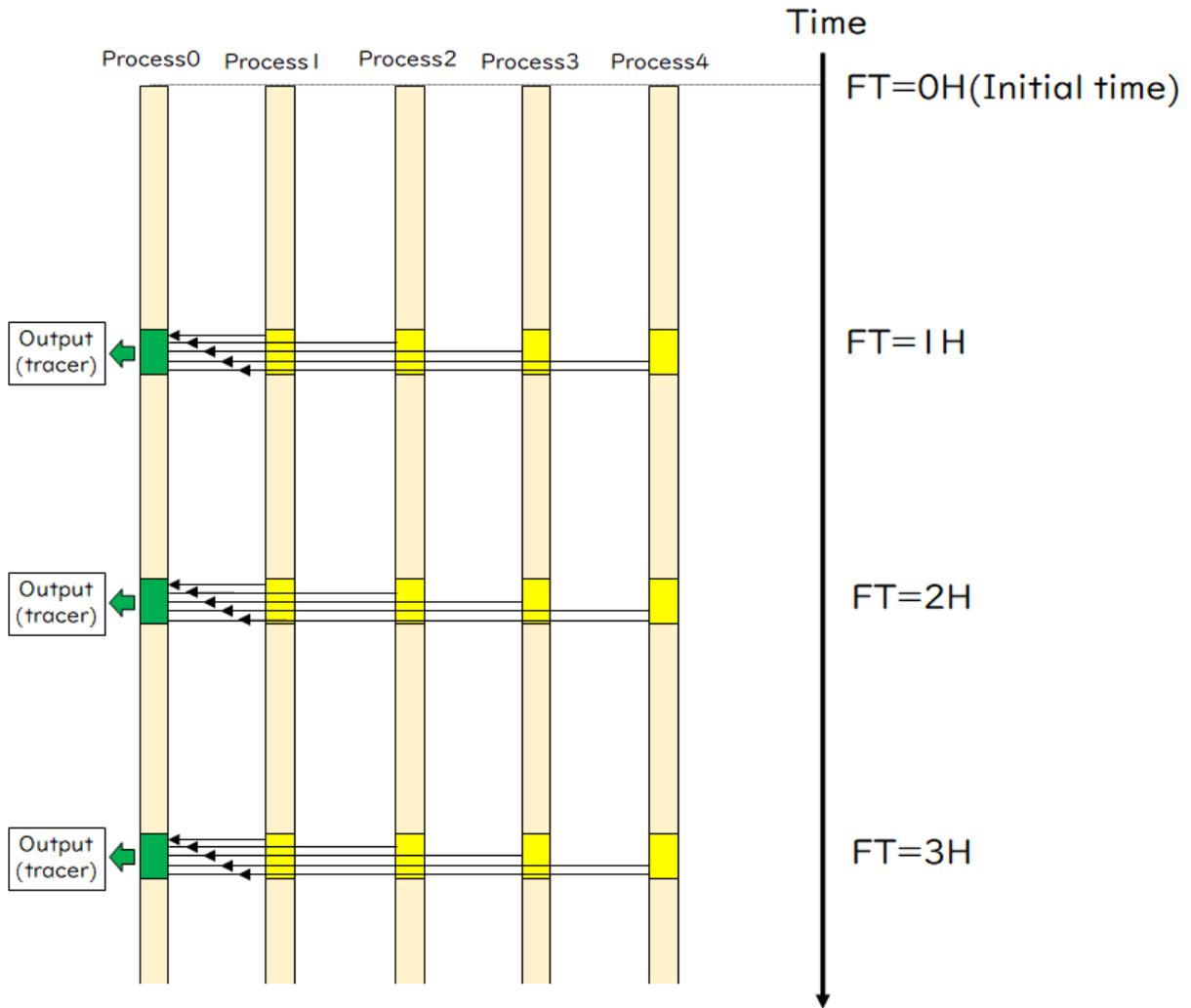


Figure H.1 Image of MPI parallel computing in the JMA-ATM

H.2 実行時間

MPI 並列化におけるプロセス数とトレーサー数の違いによる ATM の実行時間について、気象研究所スーパーコンピュータシステムで調査した結果⁴を Figure H.2 に示す。プロセス数を増やしても実行時間は頭打ちし、トレーサー数に応じて最適なプロセス数が変わることに留意する。MPI 並列化は粒子数を並列化処理しており、粒子数によらない処理（GPV の読み込みなど）に費やす時間は MPI 並列化によって変わらない。そのため、並列化数を大きくしていくと、粒子数によらない処理に費やす時間が支配的になり、ある値に漸近していくと考えられる⁵。したがって、どの箇所が計算時間に対して支配的かは粒子数に依存し、また同じ粒子数であってもタイムステップなどの計算の設定や入力する GPV の格子数にも計算時間は依存する。運用で利用する際は、実際に ATM を実行する環境で運用を想定した設定やデータを使用して確認しておく必要がある。その際は、付録 H.3 の MPI ログに出力される計算時間が参考になるだろう。

⁴2020 年 3 月 2 日更新前の FX100 による。実行時間は、使用する計算機の演算性能やノード数・コア数などの設定により変化する。

⁵逐次実行時間に対して並列化できる割合と MPI プロセス数の関係については「アムダールの法則」が有名である。

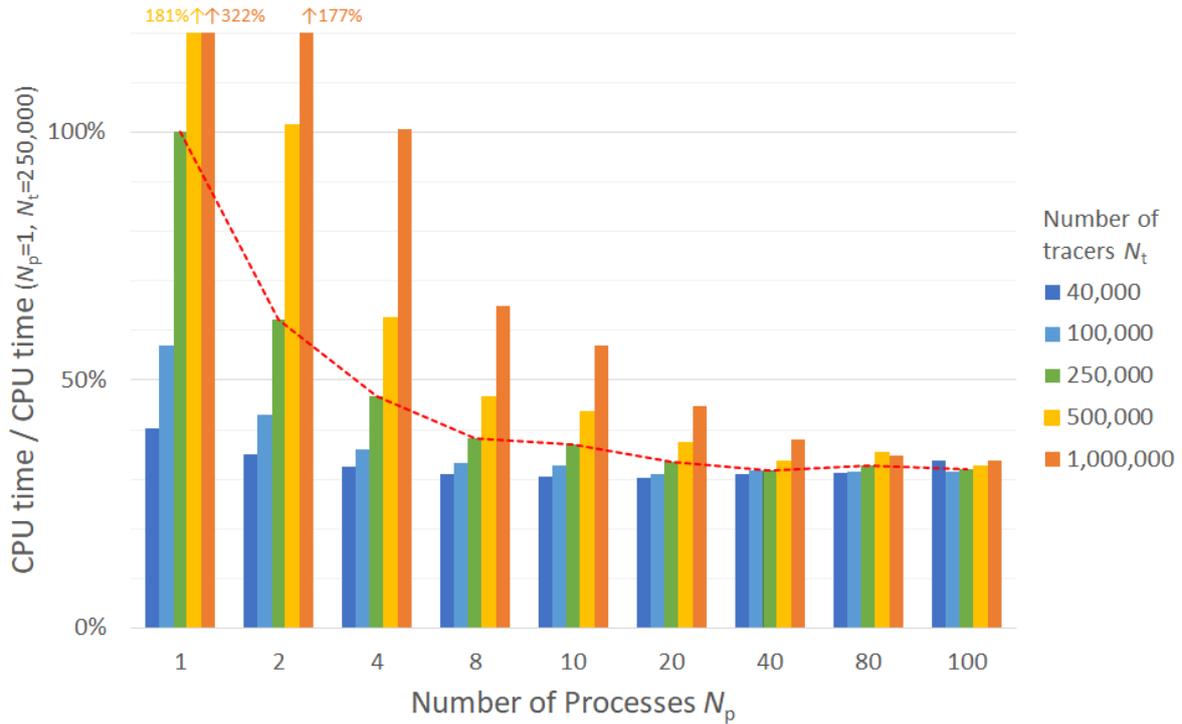


Figure H.2 Relation between CPU time and MPI processor number. An example of ATM 6-hour prediction with input GPV of LFM. The numerical calculation was executed by the MRI supercomputer.

H.3 ログ

ATM 本体ではプロセスごとのログとジョブ全体に対するログの 2 種類のログが出力される。Figure H.1 の例だと並列数は 5 なので、合計 6 つ（プロセスごとのログが 5 つ、ジョブ全体に対するログが 1 つ）のログが出力される⁶。

プロセスごとのログの一例として一部を抜粋したものを Figure H.3 に示す。プロセスごとのログでは、各タイムステップにおける終端速度に関連した情報（30～35 行目）、地面に落下したトレーサーの情報（5 行目）などが記載される。また、このログには各ステップの値以外にもネームリストで指定した各種設定値や粒子の並列化の情報（各プロセスが何番目のトレーサーを計算しているかなど）、GPV の基本情報（水平格子数や格子間隔）、初期値の情報（放出場所や放出時刻）など様々な情報が記載されている。そのため、異常終了の原因調査などの際はこのログを優先的に確認する。また、このログの最後には計算時間の内訳が出力される（Figure H.4）。この計算時間の内訳は高速化を行う際の目安になり、また、粒子数など計算時間に影響する設定を変えたときや計算機資源を変えたときに、どの処理の時間が変化しているかなどが確認できる。なお、計算時間（Figure H.4 の `cpu(time)`）の単位は、システム（コンパイラ）に依存することに注意する⁷。

ジョブ全体に対するログの一例を Figure H.5 に示す。このログには、いくつかのトレーサーの各ステップの値（位置や終端速度、12～23 行目）と対象領域内の最高雲頂高度（34 行目）や最大濃度（37 行目）などの全トレーサーから計算される量が出力される。

⁶供給源モデルも同様である。

⁷気象研究所スーパーコンピュータシステム（CX2550 M5）で利用している Intel® Fortran コンパイラでは、0.1 ミリ秒単位で表示される。したがって、Figure H.4 の例の合計計算時間は、246.8363 秒である。なお、NAPS10 でも同コンパイラを利用する場合は同じ単位である。

```

1 *****
2 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      19 /      120 (      3420.0000 )
3 *****
4 SET_HORIZONTAL_FLAG: #OUT OF DOMAIN (HORIZONTAL) =          0 /          60493
5 JUDGE_FALLOUT: #UNDERGROUND TRACER =          1147 /          60493
6 TRACER2GRID: WEIGHT_DEPOSIT =      1.000000000000000
7 TRACER2GRID: WEIGHT_CONCENT =      1.000000000000000
8 TRACER2GRID: #FALLOUT          =          1168
9 TRACER2GRID: #DEPOSITED        =           9
10 TRACER2GRID: #WASHOUT(RAIN)    =           0
11 TRACER2GRID: #WASHOUT(SNOW)   =           0
12 TRACER2GRID: #WASHOUT(GRAUPEL) =           0
13 TRACER2GRID: #RAINOUT         =           0
14 TRACER2GRID: #STILL_ACTIVE     =          59346
15 SET_VERTICAL_FLAG  : #OUT OF DOMAIN (TOP)      =          0 /          59346
16 SET_VERTICAL_FLAG  : #OUT OF DOMAIN (BOTTOM)  =          32 /          59346
17 BELOW_CLOUD_SCAVENGING (RAIN)
18 #WASHOUT TRACER          =           0 /          59314
19 #WASHOUT TRACER (FORCED) =           0 /          59314
20 BELOW_CLOUD_SCAVENGING (SNOW)
21 #WASHOUT TRACER          =           0 /          59314
22 #WASHOUT TRACER (FORCED) =           0 /          59314
23 BELOW_CLOUD_SCAVENGING (GRAUPEL)
24 #WASHOUT TRACER          =           0 /          59314
25 #WASHOUT TRACER (FORCED) =           0 /          59314
26 DRY_DEPOSITION
27 #DEPOSITED TRACER =           9 /          59314
28 --- TFV MONITOR -----
29 -----
30      ID(N)          ALT[m]          PRES[hPa]          TEMP[K]          DENS[kg/m3]  VISCOS[muPa.s]
31      SIZE[mm]      TFV[m/s]      REYNOLDS_NUM  CUNNINGHAM_COR
32      30000         6924.100386         437.495426         262.270196         0.581076         16.637055
33      0.234732         1.343789         11.016914         1.001421
34      50000         10896.999265         253.520124         234.680512         0.376245         15.186895
35      0.049048         0.129211         0.157007         1.010136
36      60000         11815.128632         221.331332         227.337247         0.339120         14.788483
37      0.027668         0.045032         0.028571         1.019726
38      70000         11993.942197         215.506361         226.063309         0.332018         14.718806
39      0.006088         0.002483         0.000341         1.091388
40      100000        11931.432786         217.547177         226.505665         0.334512         14.743020
41      0.012097         0.009225         0.002532         1.045678
42 --- TFV MONITOR (END) -----
43 -----

```

Figure H.3 Example of a part of a process log (time step)

```

1          ===== cpu time =====
2          subroutine                cpu(time)   cpu rate(%)   number
3          1  START                    1.00000      0.000         1
4          2  READ_NAMELIST             440.00000     0.018         1
5          3  INITIALIZATION           15584.00000    0.631         1
6          4  INPUT_CONST_GPV           2876.00000     0.117         1
7          5  READ_INITIAL_TRACER       32.00000      0.001         1
8          6  WRITE_TRACER_HEADER       13.00000      0.001         1
9          7  PREPARE_WORK_VARIABLE     118.00000     0.005         1
10         8  MAIN_LOOP_START           3.00000       0.000         1
11        11  PREPOST: SET_TIMESTEP      583.00000     0.024        121
12        12  PREPOST: ACTIVATE_TRACER   60.00000      0.002        121
13        21  PREPOST: FIND_GPV_IJ       252707.00000  10.238        121
14        22  PREPOST: INTP_ZS_TRACER    32635.00000   1.322        121
15        31  PREPOST: FALLOUT_JUDGEMENT 167.00000     0.007        121
16        32  PREPOST: POSITION_ADJUSTMENT 512.00000     0.021        121
17        33  PREPOST: FIND_ATM_IJ       88694.00000    3.593        121
18        40  PREPOST: TRACER2GRID       9575.00000     0.388        121
19        50  OUTPUT_ATM                 6023.00000     0.244        121
20        60  INPUT_GPV                 108552.00000   4.398        120
21        71  PRE: FIND_GPV_K            19072.00000    0.773        120
22        72  PRE: SET_INTP_TIME         879.00000      0.036        120
23        73  PRE: INTP_GPV             1899049.00000  76.936       120
24        99  RUN_LONG: DECAY             173.00000      0.007        120
25       110  RUN_LONG: WASHOUT           5622.00000     0.228        120
26       120  RUN_LONG: RAINOUT           53.00000       0.002        120
27       130  RUN_LONG: DRY_DEPOSITION    968.00000      0.039        120
28       140  RUN_LONG: HORIZONTAL_DIFFUSION 8153.00000    0.330        120
29       150  RUN_LONG: VERTICAL_DIFFUSION 2000.00000    0.081        120
30       200  RUN_LONG: SUM_TENDENCY_LONG 828.00000      0.034        120
31       510  RUN: HORIZONTAL_ADVECTION   3784.00000     0.153        120
32       520  RUN: VERTICAL_ADVECTION    135.00000      0.005        120
33       530  RUN: GRAVITATIONAL_FALLOUT 4524.00000     0.183        120
34       600  RUN: SUM_TENDENCY_PART      652.00000      0.026        120
35       700  RUN: SUM_TENDENCY          1213.00000     0.049        120
36       810  POST: TIME_INTEGRAL        1525.00000     0.062        120
37       900  DEALLOCATION                 1158.00000     0.047         1
38  -----
39          -- total cpu time -- 2468363.00000   100.0000

```

Figure H.4 Example of a part of a process log (cpu time)

```

1 *****
2 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      18 /      120 (      3240.0000 )
3 *****
4 *****
5 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      19 /      120 (      3420.0000 )
6 *****
7 *****
8 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      20 /      120 (      3600.0000 )
9 *****
10 --- TRACER MONITOR -----
11 -----
12      ID(N)          TIME[sec]      LAT[deg]      LON[deg]      ALT[m]          SIZE[m]
13 SIZE[phi] DENS[kg/m3]      MASS[kg]  S_FLAG  R_FLAG
14      10000      2520.000000      32.951792      131.144074      691.092713      0.001097111
15 -0.133709862  1215.864286      15179.017796      0      11
16      20000      1080.000000      32.902729      131.098373      725.019541      0.006541098
17 -2.709532730  1041.536263      15179.017796      0      11
18      30000      3600.000000      32.884009      131.238591      6681.383993      0.000234732
19 2.090913132  1644.074866      15179.017796      1      1
20      40000      1080.000000      32.910958      131.105635      739.546145      0.003146646
21 -1.653814857  1083.665857      15179.017796      0      11
22      50000      3600.000000      32.880509      131.264081      10879.602368      0.000049048
23 4.349667633  2124.282146      15179.017796      1      1
24      60000      3600.000000      32.897585      131.252258      11809.397188      0.000027668
25 5.175658149  2229.863131      15179.017796      1      1
26      70000      3600.000000      32.913659      131.247070      11995.448547      0.000006088
27 7.359928359  2358.646038      15179.017796      1      1
28      80000      1980.000000      32.933710      131.109987      683.217676      0.000771565
29 0.374139986  1288.194755      15179.017796      0      11
30      90000      720.000000      32.892450      131.084545      732.602274      0.001110142
31 -0.150744525  1213.717254      15179.017796      0      11
32      100000      3600.000000      32.896682      131.248772      11931.815756      0.000012097
33 6.369247333  2320.152797      15179.017796      1      1
34      ID(N)          TIME[sec]      LAT[deg]      LON[deg]      ALT[m]          SIZE[m]
35 SIZE[phi] DENS[kg/m3]      MASS[kg]  S_FLAG  R_FLAG
36 --- TRACER MONITOR (END) -----
37 -----
38 --- ATM GRID MONITOR -----
39 -----
40
41 MAX: TDEP [kg/m2], GRID(SURF) =      0.156751821858989      263      247
42 MAX: FOUT [kg/m2], GRID(SURF) =      0.155755171629878      263      247
43 MAX: DDEP [kg/m2], GRID(SURF) =      9.966502291108054E-004      263      247
44 MAX: WOUT [kg/m2], GRID(SURF) =      0.000000000000000E+000      1      1
45 MAX: ROUT [kg/m2], GRID(SURF) =      0.000000000000000E+000      1      1
46 MAX: MAXD [ m ], GRID(SURF) =      9.591168592214949E-002      263      247
47 MAX: CTOP [m asl], GRID(SURF) =      12016.6716584730      264      247
48 MIN: CBASE[m asl], GRID(SURF) =      659.510310104424      263      247
49 MAX: TCLM [kg/m2], GRID(SURF) =      0.138224548475345      263      247
50 MAX: ACON [kg/m3], GRID( 2) =      6.923316699368353E-006      263      247
51 MAX: ACON [kg/m3], GRID(KMAX) =      9.102324543651221E-006      264      247
52 --- ATM GRID MONITOR (END) -----
53 -----
54 *****
55 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      21 /      120 (      3780.0000 )
56 *****
57 *****
58 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      22 /      120 (      3960.0000 )
59 *****
60 *****
61 TIME STEP (ELAPSE TIME) =      23 /      120 (      4140.0000 )
62 *****

```

Figure H.5 Example of a part of an ATM log