

## 第 1 部 平成 30 年間の数値予報技術の変遷

### 1.1 平成 30 年間の数値予報技術の変遷

#### (1) 気象庁スーパーコンピュータ<sup>1</sup>

平成の 30 年間(1989～2019 年)に気象庁で現業運用されたスーパーコンピュータシステムは NAPS5 から NAPS10 の 6 世代にわたる。各 NAPS 世代のスーパーコンピュータの仕様をまとめたものを表 1.1.1 に示す。NAPS2(1967 年運用開始)以降、NAPS9 まで日立製作所のスパコンが利用されてきたが、昨年運用開始の NAPS10 において 51 年ぶりに他社(米国クレイ社)のスパコンに更新された(システム受注者は引き続き日立製作所)。

表 1.1.1 NAPS5 から NAPS10 までのスーパーコンピュータ仕様

	NAPS5	NAPS6	NAPS7	NAPS8	NAPS9	NAPS10
運用期間	1987-1996	1996-2001	2001-2006	2006-2012	2012-2018	2018-2024?
機種名	S-810/20K	S-3800/480	SR8000E1	SR11000/K1 (サブシステム 2,3) SR11000/J1 (サブシステム 1)	SR16000M1 (主系・副系)	クレイ XC50 (主系・副系)
理論性能	630 MFlops	32 GFlops	768 GFlops	21.5 TFlops 6.08 TFlops	847 TFlops (主副合計)	18.16 PFlops (主副合計)
CPU	ベクトル (日立開発 LSI)	ベクトル (日立開発 LSI)	日立開発 PowerPC	IBM POWER5+ IBM POWER5	IBM POWER7	Intel Xeon 8160
ノード数	1	1	80	160 50	864	5,632
CPU 数	1	4	640	2,560 800	3,456	11,264
CPU コア数	1	4	640	2,560 800	27,648	270,336
メモリ量	64 MB ES 512 MB	2 GB ES 12 GB	640 GB	10 TB 3.1 TB	108 TB	528 TiB
ストレージ (高速)	35 GB	205.7 GB	2.7 TB	13.6 TB	348 TB	9.6 PB
ストレージ (大容量)	40 GB (光ディスク)	2.12 TB (磁気テープ)	80 TB (磁気テープ)	36.2 TB 2 PB (磁気テープ)	2.9 PB	25.1 PB 80 PB (磁気テープ)
スパコン OS	VOS3/ES1	VOS3/AS	HI-UX/MPP	IBM AIX 5L	IBM AIX 7	CLE6.0 SUSE12.2

<sup>1</sup> 片山 桂一(プログラム班長)

初代 NAPS (IBM704) から NAPS10 までの性能向上の状況を図 1.1.1 に示す。

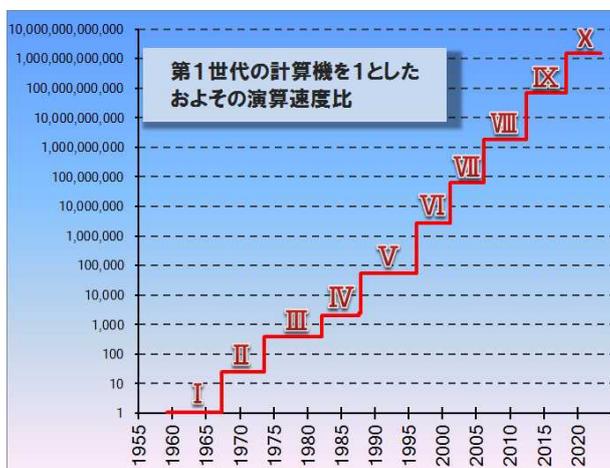


図 1.1.1 歴代 NAPS の性能。初代 NAPS (IBM704) を1とした演算性能比を示す。

理論性能で見ると NAPS10 (XC50) は主系及び副系それぞれ 9 PFlops、合計 18 PFlops あまりに達し、NAPS5 (S-810) の 2,880 万倍の性能アップとなっている。日本の気象庁だけではなく、諸外国の気象機関もほぼ同様のスパコン更新状況となっている (図 1.1.2)。

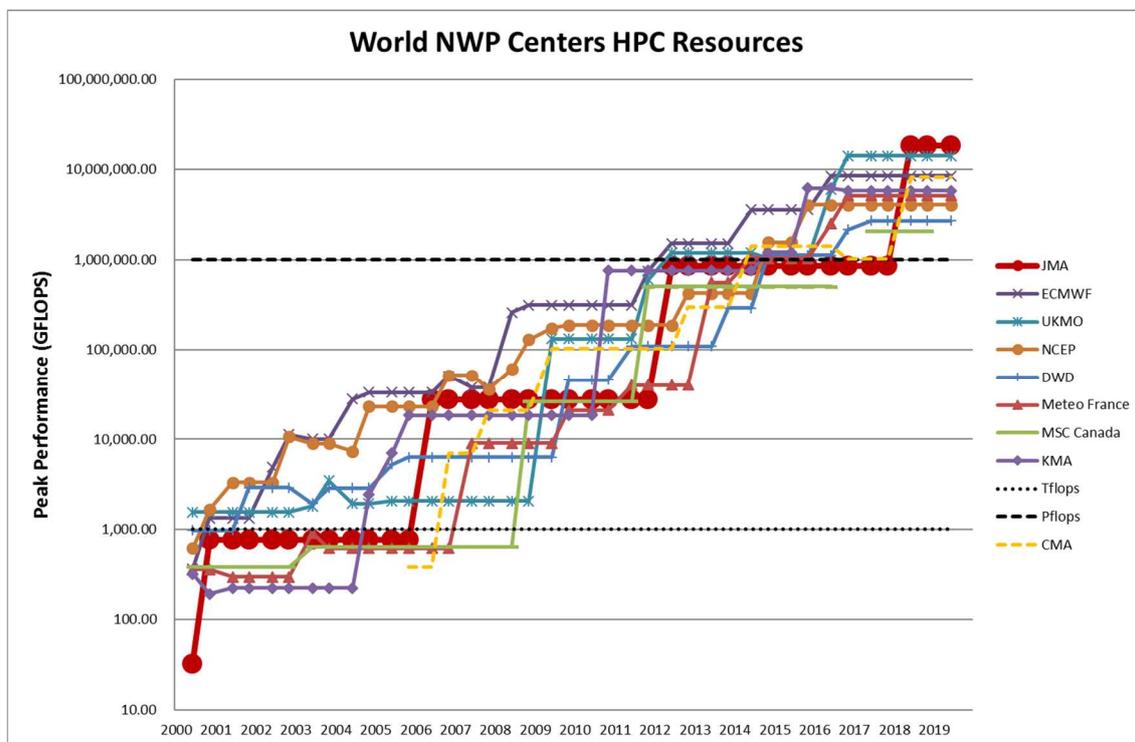


図 1.1.2 各国数値予報センターのスパコン性能比較 (Top500 ランキングのデータより作成)

この30年間、スパコンのアーキテクチャは大きく変化し、これに合わせて数値予報ルーチンのプログラムの書き換えも相当な規模で実施されてきた。ここではスパコンのハードウェア、ソフトウェア、プログラミング開発環境、そして数値予報ルーチン構築・運用のために開発されたライブラリ・ツール類等について簡単に振り返る。

(a) スパコンのハードウェア

NAPS5(1987年12月運用開始)で導入されたS-810は日立最初のスーパーコンピュータとして登場<sup>2</sup>したベクトル型の計算機であった<sup>3</sup>。ベクトルプロセッサは日立開発のカスタムLSIを41個配置したロジックボードで構成されていた<sup>4</sup>。S-810は「高速演算装置」として導入されたが、このほか大型汎用機のM-680Hが「バッチ処理装置」として運用された。

NAPS6(1996年3月運用開始)で導入されたS-3800は、S-810/S-820シリーズを性能アップした上位互換のベクトル型スパコンであった。4台までのマルチプロセッサ構成とすることが可能で、NAPS6スパコンもこの最大構成であった。主記憶を4台のプロセッサで共有する共有メモリ型並列のプログラムを実行することで高速計算が可能であった。

2000年代に入ると各メーカーのスパコンは次々と並列スカラ計算機に切り替わっていった<sup>5</sup>。

NAPS7(2001年3月運用開始)で導入されたSR8000はPowerPCベースの日立開発RISCプロセッサを用いた並列コンピュータであった。実行性能を向上させるために「協調型マイクロプロセッサ機構」及び「疑似ベクトル処理機構」を採用し、ノード間の通信を高速化するために「多次元クロスバネットワーク」を搭載した。

NAPS8(2006年3月運用開始)で導入されたSR11000はIBM開発のPOWER系プロセッサを搭載した並列コンピュータであった<sup>6</sup>。NAPS8から衛星データ処理システムと一体整備することとなり、衛星データ高度処理システム(サブシステム1、SR11000/J1)が1台先行納入され、翌年NAPSスパコン(サブシステム2及び3、SR11000/K1)が2台整備された。

NAPS9(2012年6月運用開始)で導入されたSR16000はIBM開発のPOWER7を搭載した並列コンピュータであった。

SR11000及びSR16000はIBM製のCPUを搭載し、OSもIBM AIXを採用していることから、内容はほぼIBMのスパコンであった<sup>7</sup>。

NAPS10(2018年6月運用開始)ではスパコンメーカーがクレイに切り替わり、XC50が導入された<sup>8</sup>。米国クレイのXCシリーズのスパコンはすでに各国の数値予報センターにおいて導入

---

<sup>2</sup> NAPS5以前に導入された日立Mシリーズは大型汎用機という扱いである。

<sup>3</sup> S-810の発表が1982年だが、この頃IBM PCやMacintosh等のパソコンも登場している。

<sup>4</sup> 現在のCPUのように1チップではなく、多数のLSIの組み合わせでベクトルプロセッサを構成。

<sup>5</sup> NECだけは現在でもベクトル型スパコン(SX-Aurora TSUBASA)を開発・製造している。

<sup>6</sup> モデルH1はPOWER4+、モデルJ1にはPOWER5、モデルK1にはPOWER5+が搭載された。

<sup>7</sup> ノード(マザーボード基板)や実装技術は日立製。日立のカタログには「世界最高クラスの実装技術」と記述されていた。

<sup>8</sup> システムインテグレーターは引き続き日立。日立はスパコンの新規開発が止まった状態のよう。

済みであり<sup>9</sup>、気象庁に納入されたマシンも運用開始後の障害はこれまでの世代の NAPS スパコンに比べて非常に少ない<sup>10</sup>。NAPS10 の XC50 ではインテル製 CPU の Skylake-SP(Xeon Platinum 8160)を搭載し、高速ストレージとして DDN 社の Lustre ファイルシステムを採用した。クレイスパコンではフロントパネルのデザインを特注することが通例となっており、日立専属デザイナーと打合せを重ね、主系に静止衛星観測データのカバレッジマップ、副系に大型台風接近時のひまわり可視画像をプリントすることとした(図 1.1.3)。

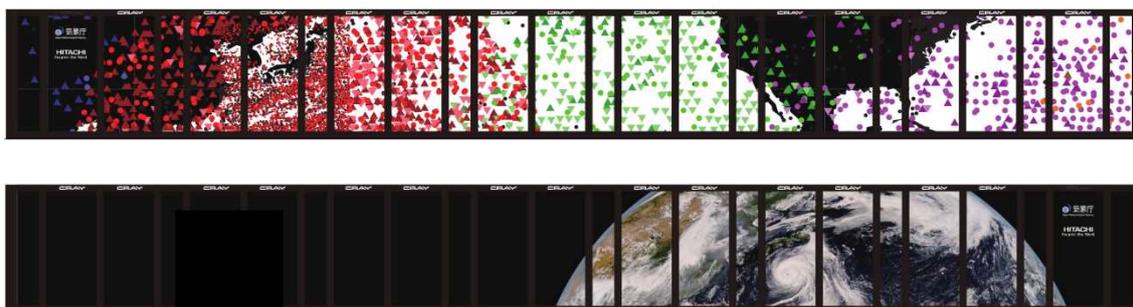


図 1.1.3 NAPS10(クレイ XC50)のフロントパネル。日立製作所のデザイン画より。上段が主系、下段が副系。(スパコンの横幅は約 18 m あるため、計算機室内でこのような写真の撮影は不可能。)

NAPS6 からは世界のスーパーコンピュータ性能ランキングである Top500 に登録を行っており<sup>11</sup>、初回登録時は NAPS6 が 28 位、NAPS7 が 18 位、NAPS8 が 45 及び 46 位、そして NAPS10 が 25 及び 26 位と上位の順位を獲得してきた。(図 1.1.4)

スパコンシステムは NAPS5 までは東京都千代田区大手町の気象庁本庁(3 階)に整備されたが、NAPS6 以降については東京都清瀬市の気象衛星センター及びシステム運用室に設置されている。(図 1.1.5)

日立製スパコンについては気象庁 NAPS と同じ機種が、東京大学において先行導入されることが多かった(表 1.1.2)。東大で運用された経験による改良(バグ取り)を経ることが、気象庁現業スパコンの安定稼働に結びついていたことは無視できない。

<sup>9</sup> ECMWF、Met Office、NCEP、DWD、BoM、KMA、カナダ、スイス、インド、ロシア及び南アフリカなど非常に多くの気象機関へ納入されている。

<sup>10</sup> ノード数・CPU 数が多いことから部品故障はしばしば発生するが即時にシステムから切り離し、部品を交換するため、業務影響は非常に少ない。

<sup>11</sup> NAPS9 を除く。NAPS9 がエントリーしなかったのはベンチマークを実行する時間的な余裕がなかったため。

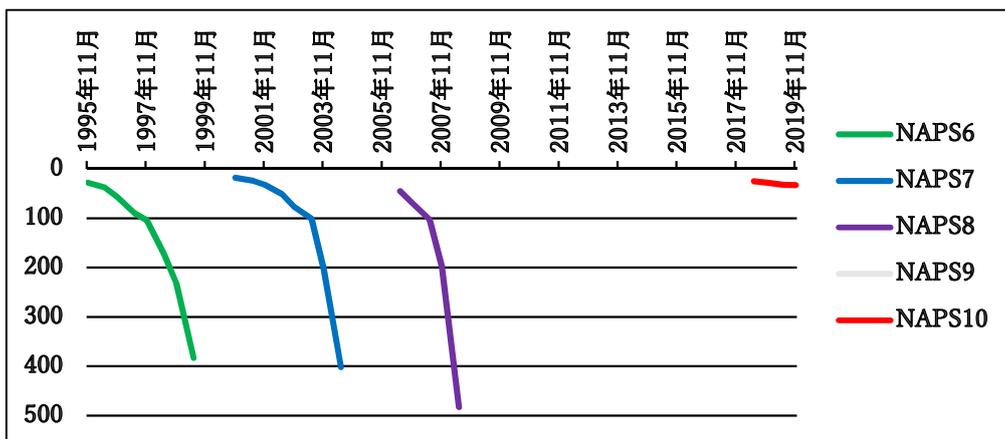


図 1.1.4 NAPS6 から NAPS10 までの Top500 ランキングの変遷  
(Top500 ランキングリストは毎年 6 月と 11 月の年 2 回公表される。)

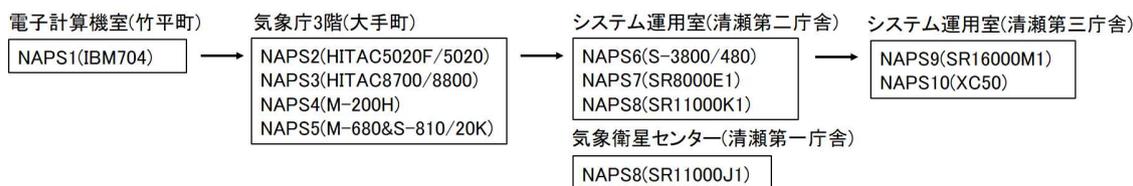


図 1.1.5 NAPS スパコン設置場所の変遷

表 1.1.2 気象庁と東京大学の日立製スパコンの導入時期(年)

	気象庁	東京大学
S-810	1987	1983
S-820	—	1988
S-3800	1996	1993
SR2201	—	1996
SR8000	2001	1999
SR11000J1	2005	2005
SR16000M1	2012	2011

(気象庁は運用開始年、実際には半年程度先行して設置・移行作業開始となる。)

(b) スパコンのソフトウェア

NAPS6 (S-3800) までのベクトル計算機時代では OS に日立の VOS3 が採用されていた。ジョブ制御スクリプトの JCL や端末上で動作するエディターソフトの ASPEN (アスペン)、浮動小

数点形式が IEEE 形式ではなく、M 形式<sup>12</sup>など現在の UNIX 系 OS 搭載スパコンと比較すると異なること(使いづらいこと)は多い。なお、JCL については後述の数値予報ルーチンツールの「JCL」の起源となっている。

NAPS7(SR8000)以降は UNIX 系 OS がスパコンに搭載されている。利用可能なエディターも vi や emacs 系統が使えるようになり、操作性は格段に向上した。その反面、コマンドの利用やシェルスクリプトの記述等柔軟性が高いことから、数値予報ルーチンの申請スクリプト等が様々なスタイルとなっていたため、ルーチンの管理には一定の制限が必要ということで、後述の数値予報ルーチンツールが徐々に整備されていくことになる。

UNIX 系スパコンでは高速なファイル入出力を達成するためにファイルシステムの選択が重要になる。NAPS7(SR8000)では日立独自の「ストライピングファイル機構<sup>13</sup>」、NAPS8(SR11000)では GPFS<sup>14</sup>、NAPS9(SR16000)では HSFS<sup>15</sup>、NAPS10(XC50)では Lustre が採用されている。

UNIX 系スパコンにおける OS は、NAPS7(SR8000)が日立製 HI-UX、NAPS8(SR11000)及び NAPS9(SR16000)が IBM 製の AIX、そして NAPS10(XC50)は SLES(SUSE Linux Enterprise Server)<sup>16</sup>と徐々に世界的に広く使われている UNIX や Linux に移り変わってきている。

#### (c) プログラム開発環境

計算機と同様にコンパイラについても NAPS2(HITAC5020)から NAPS9(SR16000)までの約 50 年間にわたって日立製の(最適化)Fortran コンパイラが利用されてきた。

NAPS5(S-810)では FORTRAN77 規格の「FORT77/HAP」、NAPS6(S-3800)ではこれに自動並列化機能がサポートされた。

NAPS7(SR8000)では「最適化 FORTRAN77」と「最適化 Fortran90」が提供された<sup>17</sup>。

NAPS8(SR11000)と NAPS9(SR16000)では引き続き「最適化 Fortran90」が提供された<sup>18</sup>。

NAPS10(XC50)では Cray コンパイラ、Intel コンパイラ及び GNU コンパイラの 3 種類の開発環境が利用可能となり、必要に応じて使い分けができるようになった<sup>19</sup>。また日立製コンパイラから他社コンパイラへの初の書き換えとなり、移植作業に相当な時間を必要とした<sup>20</sup>。

---

<sup>12</sup> 日立のメインフレーム(M シリーズ)の形式なので M 形式、IBM のメインフレームと互換なので一般的には IBM 形式と呼ばれる。

<sup>13</sup> SR16000 以降の HSFS(Hitachi Striping File System)へつながる日立製ファイルシステム。

<sup>14</sup> IBM により開発された分散ファイルシステム。General Parallel File System。現在は ISS(IBM Spectrum Scale)という製品名。

<sup>15</sup> 運用開始までなかなか高速ストレージが安定しなかったことを覚えておられる方も多いはず。

<sup>16</sup> 計算ノード(ESM ノード)では CLE(Cray Linux Environment)というクレイによりカスタマイズされた Linux カーネルが動作している。

<sup>17</sup> Fortran90 が普及するにつれて有志による「気象庁コーディングルール」の検討が始まり、数値予報モデルのソースコードが FORTRAN77 からモジュールを利用できる Fortran90 へと書き換えられていった。

<sup>18</sup> C 言語については NAPS8 まで日立最適化 C が、NAPS9 では IBM XL C が提供された。

<sup>19</sup> NAPS10 においては全球モデル系が Cray コンパイラ、領域モデル系が Intel コンパイラを使用している。

<sup>20</sup> 2015(平成 27)年度に整備された首都圏ストレージ(首都圏空港及び周辺空域予報高度化開発用ストレージ)ではインテル CPU のサーバと Intel コンパイラ(及び PGI コンパイラ)が利用可能であったため、NAPS10 に先行して数値予報ルーチンのプログラムの移植及びテストが行われた。

NAPS6 (S-3800)以降はマルチプロセッサのスパコンとなり、プログラムを高速実行するためには並列化に対応することが必要となった。NAPS6 では DO ループに対する自動並列化や、指示行を挿入して複数の処理を並列で実行することが可能であった。

NAPS7 (SR8000)以降はMPIライブラリが利用可能となり、ノード間の並列処理(分散メモリ型並列化)はMPIが、ノード内の共有メモリ型並列化(スレッド並列)はコンパイラによる自動並列化またはOpenMPが使用された<sup>21</sup>。数値予報ルーチンは実行時間が決められており、高速なプログラム実行が求められるため、プログラム開発者は並列化プログラミングに関する知識も習得する必要がある。

スレッド並列化については、ノード内のCPU数・コア数が増加する傾向(NAPS7は8個、NAPS8は16個、NAPS9は32個、NAPS10は48個<sup>22</sup>)となっており、プログラムの並列化率を高めるためには様々な工夫が必要になってきている。

#### (d) NuSDaS

数値予報GPVのファイル形式については、NAPS6 (S-3800)まではGVD1(直接編成)及びGVS1(順編成)というフォーマットがルーチンで使用されていた。NAPS7についてはOSがUNIX系となることから、新たなGPVファイル形式の検討が2000年に開始された。

プログラム班により開発されたNuSDaS(Numerical Prediction Standard Dataset System)は定義ファイル(テキスト)とデータファイル群(バイナリ)を別のディレクトリで管理するデータセットで、読み書き用のライブラリ(API)により、データセットへの操作が容易に行える構造になっていた。NAPS7への移行期間中より利用可能となり、各ルーチンプログラムはNuSDaS向けに改修された。

最初のバージョンは日立のOSのみ動作がサポートされたが、その後数値予報課内の有志らによりインテルCPU(リトルエンディアン)への対応やネットワークNuSDaSの開発等が行われ、NAPSだけではなくアデス等他のシステムにも利用が広がった。最新のバージョン(1.4)ではデータ圧縮形式の追加(複合差分圧縮)等をサポートするなど、さらなる改良が続いている。

#### (e) 数値予報ルーチンツール

NAPS7 (SR8000)からOSがUNIX(日立HI-UX)となり、コマンドの操作性やスクリプト作成の自由度は増大したが、反面数値予報ルーチンではミスが多発することとなった。NAPS8の構築に向けて、ルーチン管理を効率化するJCL、PBF等のツール類が考案され、やがてこれらをまとめてリレーショナルデータベース(PostgreSQL)とバージョン管理(Subversion)で一括管理を行うシステム「RENS(Routine Environment for Numerical weather prediction System)」の開発が開始された(図1.1.6)。NAPS8以降、数値予報ルーチンの障害発生件数は激減し、現在に至っている(図1.1.7)。

---

<sup>21</sup> SR8000を使い始めたころはMPI+自動並列化を選択する処理が多かったが、各数値予報モデルを他機関及び他機種種のスパコンで動かす機会が増えていったことから徐々にMPI+OpenMPの選択が行われるようになった。

<sup>22</sup> IBMのSMTやインテルのハイパースレッディングを使える場合はこの2倍のコア数となる。

•JCL (Job Control Language)

NAPS7 の中頃(2003 年ころ)に開発開始(JPP/JCL)。VOS3 の JCL に類似したジョブ制御言語。この言語で書かれたファイルをシェルスクリプトに変換するコマンド(jcl2sh)により UNIX で実行可能なスクリプトファイルを生成する。

•PBF(Program Build File-format)

PBF は一定の様式でソースファイル、ライブラリファイル及びインクルードファイル等を記述することで、NAPS での利用に適した makefile を自動生成し、コンパイルまで行うことが可能なツール。

•JDF(Job Definition File)

JDF は JG(ジョブグループ)やジョブの各種内容を記述したテキストファイル。実行開始時刻や先行ジョブ等の設定が可能。RensDB への登録・利用や、後述する ROSE で使用される。

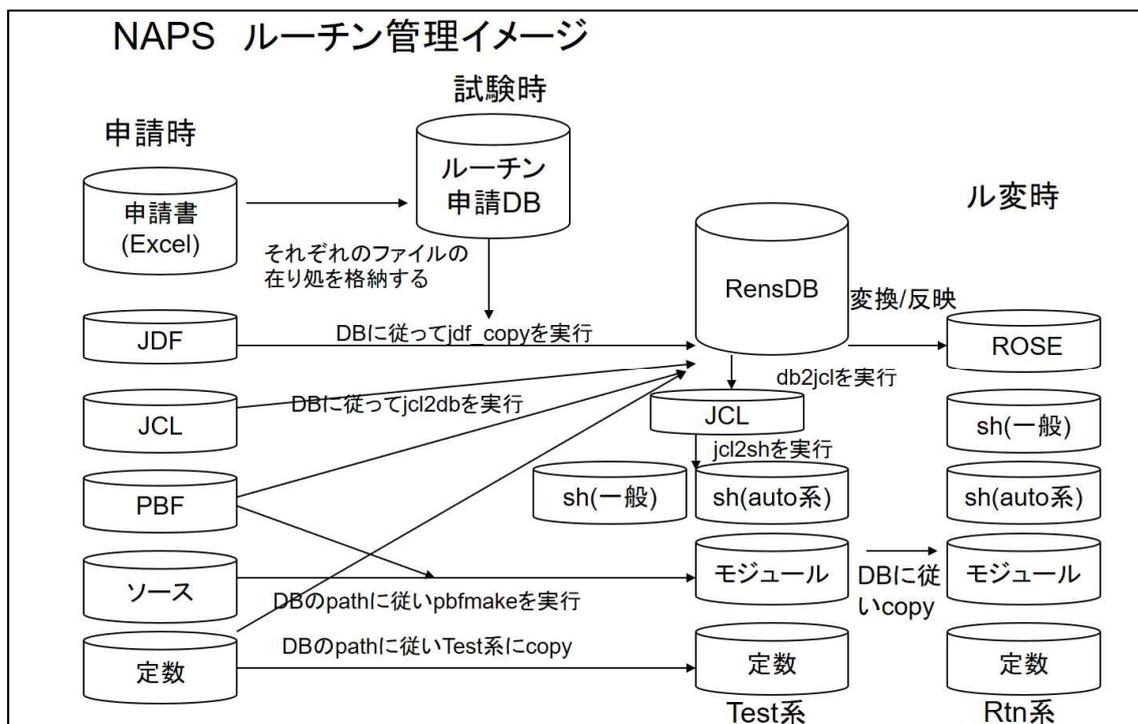


図 1.1.6 RENS による数値予報ルーチン管理のイメージ図

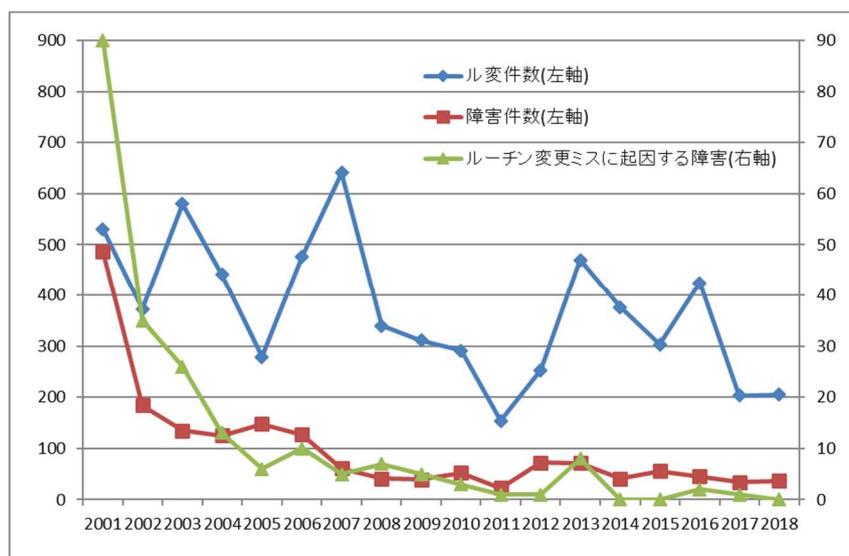


図 1.1.7 数値予報ルーチン障害発生数

数値予報ルーチンのジョブ制御には長い間、日立作成の「JNOS(JMA Nwp Operating System)」が運用されてきた。NAPS10 ではこれに替わり、プログラム班作成の「ROSE (Routine Operation and Scheduling Environment)」が利用されている(図 1.1.8)。JNOS については日立開発であり、NAPS の毎更新時に相当なコストがかかっていたこと(その分をハードにかけたかったこと)、自前のジョブ管理ソフトがあればスパコンベンダーが変更になってもスムーズな移行が可能になること等の理由により、ROSE の開発は 2008 年ころに開始された。ROSE は BCP サーバ<sup>23</sup>や NAPEX (数値解析予報実験システム) 等で実績を積み、改良を重ねることで、NAPS10 において正式に業務利用されることになった<sup>24</sup>。

(f) NAPEX (数値解析予報実験システム)

2001 年の NAPS7 更新後、OS が UNIX に切り替わったことを契機として、解析・予報サイクル実験を効率的に行うために、ECMWF の事例を参考とした実験システムの構築が数値予報班の有志により開始された。これによりユーザーは用意されたシェルスクリプトを実行することで以前よりも容易にサイクル実験を行うことが可能となった。

NAPS8 ではルーチン管理ツールとして利用が開始された JCL 及び PBF を NAPEX でも利用可能とすることで、数値予報ルーチンの実行モジュールやシェルスクリプトをほぼそのまま用いてサイクル実験を行うことができるようになった。

NAPS9 ではさらにジョブ制御プログラムにプログラム班開発の ROSE を組み込むとともに、実験設定をデータベース管理することで、実験履歴の記録及び参照を可能とし、サイクル実験の再現性の向上を図った。

<sup>23</sup> 2008(平成 20)年度末に整備された。数値予報ルーチン障害時のバックアップとして NCEP の GPV をインターネットから取得し、各種 FAX 図を作成する環境をテスト的に構築した。

<sup>24</sup> 2019 年(令和元年)の気象記念日にて長官表彰をいただいた。

当初 NAPEX は全球モデルのみであったが、その後メソモデル及び局地モデルについても順次整備され、現在は各モデルのガイダンス作成処理に関しても組み込みが検討されている。NAPEX は数値予報モデル及びデータ同化を開発するための強力なツールとしてなくてはならないものに進化を遂げた。

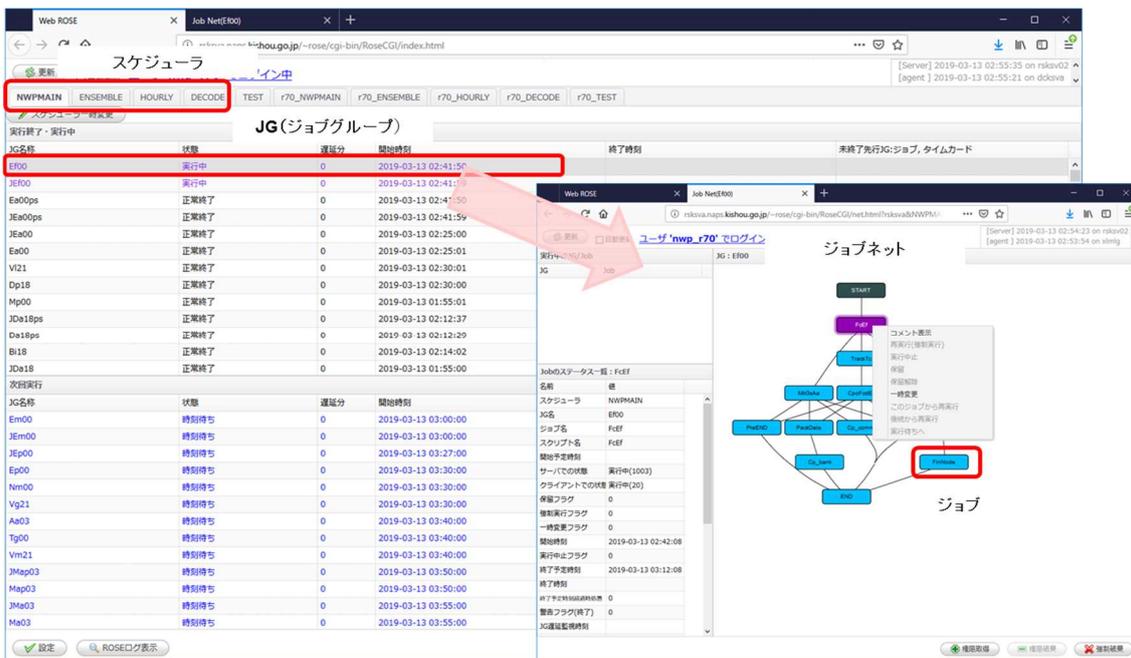


図 1.1.8 ROSE の操作画面例 (WebROSE)

(g) 今後の NAPS 更新に向けて

今後のスパコン更新において一番大きな課題は清瀬庁舎の電力量の制限である。NAPS10 の最大消費電力は片系 1.6MW で両系合わせると 3MW 程度の電力量を使用している。清瀬庁舎は特別高圧線を 2 本(本線:10MW、予備線:10MW)引いており、最高 20MW まで利用可能だが、現在の庁舎内設備でスパコンを常時安定稼働するための上限はおおむね 5~6MW 程度とみられている。またスパコンの冷却方法が水冷の場合、現在の屋上チラー(冷却水循環装置)の処理能力は 4.4MW となっているため、さらに電力量は制限される。

今後の NAPS 更新については大型データセンター等の外部施設の利用可能性についても調査・検討を進めているところである。

(h) (おまけ)NAPS 以外の開発資源

数値予報課では NAPS 更新でスパコンのハードウェア構成が大きく変わりそうな時期や、NAPS だけでは開発資源が不足する時期に、移行用・開発用の小規模な計算機を別途調達してきた<sup>25</sup>。ここではその主なものについて簡単にまとめておく。

<sup>25</sup> 飛行場予報プロダクト開発支援装置(飛行場ミニスーパー)以降は整備を情報通信課にお願いしている。

・並列同化実験装置

日立 SR2201 の 8 ノードマシンを本庁 3 階に設置。1999 年(平成 11 年)3 月利用開始。NAPS7 移行に向けて、数値予報モデルの UNIX 対応、MPI 並列化作業等に利用された。

・防災情報モデル開発システム(本庁ミニスーパー)

SR8000F1 の 8 ノードマシンを本庁 3 階に設置。2001 年(平成 13 年)7 月利用開始。本庁のメソモデル開発及び地方官署の NHM を使用した研究に利用された。地方官署からは 220 人以上のユーザーが登録され、活発な調査・研究活動が行われた。

・気象データ処理ソフトウェア開発支援装置(清瀬ミニスーパー)

SR8000F1 の 8 ノードマシンを清瀬庁舎に設置。2003 年(平成 15 年)10 月利用開始。主にセミラグランジュ全球モデルや全球 4 次元変分法の現業化に向けた開発作業に利用された。

・飛行場予報プロダクト開発支援装置(飛行場ミニスーパー)

NEC SX-9F3 の 3 ノードマシンを本庁 3 階に設置。2009 年(平成 21 年)3 月利用開始。主に LFM 現業化に向けた開発作業に利用された。なお東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)に伴う東京電力管内の電力不足により 2011 年 3 月 15 日から 4 月 27 日まで停止した。

・高分解能航空ガイダンス開発アーカイブ装置(航空アーカイブ)

日立 HA8000/RS210-h(Xeon E5-2690 x 2)の 8 台構成。清瀬庁舎に設置。2014 年(平成 26 年)2 月利用開始。共有ストレージは 1.2 PB。

・首都圏空港及び周辺空域予報高度化開発用ストレージ(首都圏ストレージ)

富士通 RX2540M1(Xeon E5-2670v3 x 2)の 24 台構成。清瀬庁舎に設置。2016 年(平成 28 年)3 月利用開始。共有ストレージは 9.6 PB。NVIDIA 製 GPU を 4 枚増設。

・下層ウィンドシアア予測情報作成装置

DELL R940xa(Xeon Gold 6138 x 2)<sup>26</sup>の 12 台構成。清瀬庁舎に設置。2018 年(平成 30 年)12 月利用開始。共有ストレージは 10.2 PB。NVIDIA 製 GPU を 4 枚増設。

航空アーカイブ、首都圏ストレージ及び下層ウィンドシアアについては、数値予報課共有ストレージとして NAPEX の実験データ等の保存に利用されるとともに、各種プログラムのインテル CPU への移植及び動作確認(ベンチマーク作成等)にも有効利用された。また、GPU 搭載サーバでは AI(機械学習、深層学習)に関する調査・開発が行われている。

---

<sup>26</sup> GPU 搭載の 1 台は 4CPU。