

第3章 第9世代数値解析予報システム

3.1 概要¹

本章では2012年(平成24年)中に予定されているスーパーコンピュータシステム更新(以下、計算機更新)に伴い稼働を開始する第9世代数値解析予報システム(NAPS9)の概要について述べる。なお計算機更新については現在のところ2012年(平成24年)の稼働開始を予定している。

本節ではNAPS9の概要について述べる。より詳細について、第3.2節では数値解析予報システムの開発計画、第3.3節ではアプリケーションの開発計画を、それぞれ紹介する。第3.4節では導入するスーパーコンピュータシステムについて、述べる。

3.1.1 はじめに

2005年(平成17年)3月に更新された気象衛星センター計算機システム、および2006年(平成18年)3月に更新された第8世代数値解析予報システム(NAPS8)(竹内 2005)のスーパーコンピュータは、予測精度の向上と防災気象情報の高度化を目的として、NAPS9へ2012年中の更新を予定している。中核のスーパーコンピュータの理論ピーク性能は約850TFlops(テラフロップス)、すなわち1秒間に850兆回の浮動小数演算を実行できる性能をもつ。これは現NAPSの性能と比較して約30倍である。新旧スーパーコンピュータの比較を表3.1.1に示す。

3.1.2 数値解析予報システム更新の概要

数値解析予報システム更新にあたっては、現在運用しているモデルや解析などのシステムをそのまま移行する。加えて、水平分解能 2km の局地モデル・局地解析の本運用を計算機更新後速やかに開始する。局地モデルの本運用では当初、現在の試験運用の仕様(永戸ほか 2010, 本研修テキスト第2.1節)のまま、すなわち東日本領域を対象として9時間予報を、3時間毎に1日8回実行する。

アプリケーションについても現在運用しているものをそのまま移行する予定である。

3.1.3 将来の開発課題

数値解析予報システム更新後、改善に向けた開発に取り組んでいく。更新1年後を目処に運用する計画の予報モデル、解析システムの仕様をそれぞれ表3.1.2, 表3.1.3に示す。

メソモデル(MSM)については主に北海道・南西諸島の精度改善と、メソモデル予報値を側面境界値と

して利用する局地モデルの精度向上を目的に、予報領域を拡大する。さらに飛行場予報の支援を強化するために、予報時間をこれまでの15時間・33時間を1日3回ずつ交互に実行する仕様から、すべての初期時刻について36時間に変更する。また物理過程の改善やデータ同化の高度化による精度向上を目的に、鉛直層数を50層から75層に増強する。

また更新を機に本運用を開始する局地モデル(LFM)については、東京国際空港を離着陸する航空機の運航支援をはじめとする予報作業を支援できるように予報領域を日本全体に拡大し、実行頻度を3時間毎(1日8回)から毎時(1日24回)に高める。

全球モデル(GSM)について、水平解像度は20km相当のまま変更しないものの、メソモデルと同様、物理過程の改善やデータ同化の高度化による精度向上を目的に、鉛直層数を60層から100層に増強する。

週間アンサンブル予報システム(WEPS)については水平分解能は現在の60km相当から40km相当へ、鉛直層数についても現在の60層から100層へと増強する。また、実行頻度を1日1回(12UTC初期値)から1日2回(00UTC, 12UTC初期値)に変更するとともに、メンバー数を見直し、高頻度の資料を提供することによって予報作業の支援を強化する。さらに予報時間について、一部メンバーについて2週間に延長し、週間天気予報と1か月予報の2週間目、および異常天候早期警戒情報を一体的に支援することも計画している。

台風アンサンブル予報システム(TEPS)については、メンバー数を25に増強し予測不確実性情報の精度向上を図るとともに、週間アンサンブル予報モデルと同様、水平分解能は現在の60km相当から40km相当へ、鉛直層数についても現在の60層から100層へと増強する。

メソアンサンブル予報システムについては、NAPS9導入後開発を本格化させ、NAPS9中に試験運用を開始する予定である。システムの仕様など詳細は未定であり、別の機会に報告することとしたい。

アプリケーションについては、予報モデルの変更にあわせてガイダンスの仕様を変更する。

3.1.4 まとめ

2005年3月に更新された気象衛星センター計算機システム、および2006年3月に更新された第8世代数値解析予報システム(NAPS8)について、予測精度の向上と防災気象情報の高度化を目的として、2012年

¹ 室井 ちあし

に第9世代数値解析予報システム(NAPS9)への更新を予定している。

更新と同時に局地モデルの本運用を開始し、東日本領域を対象とした予測資料の充実を図る。

さらに計算機更新1年後を目処に、メソモデルの予報領域拡張と予報時間の変更、全球モデルの鉛直層数増強などさまざまな改良を行うほか、全球関係のアンサンブル予報の統合やメソアンサンブル予報システムの試験運用を目指して開発を行っていく。

参考文献

永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 石水尊久, 平原洋一, 幾田泰醇, 福田純也, 石川宜広, 吉本浩一, 2010: 局地モデルの試験運用・局地数値予報システムの概要. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁

予報部, 1-3.
竹内義明, 2005: 概要. 平成17年度数値予報研修テキスト「第8世代数値解析予報システム」, 気象庁予報部, 1-9

表 3.1.1 新旧スーパーコンピュータの比較

項目	現スーパーコンピュータ	新スーパーコンピュータ
機種	Hitachi SR11000/K1 (80 ノード)×2 (数値予報業務用) Hitachi SR11000/J1 (50 ノード)×1 (衛星データ処理業務用)	Hitachi SR16000/M1 (432 ノード) ×2
最大浮動小数点演算速度	27.5TFlops(10.75TFlops × 2 + 6.08TFlops×1)	847TFlops (423.5TFlops×2)
主記憶容量	13.1Tbyte(5.0Tbyte × 2 + 3.1Tbyte ×1)	108.0TByte (54.0Tbyte ×2)
磁気ディスク容量	36.2TByte	348TByte
大容量記憶装置	2.0PByte (磁気テープ)	2.9PByte

表 3.1.1.2 NAPS 更新前後の予報モデルの比較 (太字は変更点)

	現予報モデル	新予報モデル (更新1年後を目的)	利用目的
全球モデル (GSM)	支配方程式系	プリミティブ方程式系	短期予報、量的予報、台風予報、週間天気予報、空域予報 メソモデルの側面境界値
	水平解像度	20km	
	水平格子点数	1920 (赤道付近) - 60 (極付近) × 960	
	鉛直層数	60 層 (地上~0.1hPa)	
	初期時刻	00,06,12,18UTC	
	予報時間	84 時間(00,06,18UTC) 216 時間(12UTC)	
	鉛直層数	100 層 (地上~0.01hPa)	
週間アンサンブル予報 システム (WEPS)	支配方程式系	プリミティブ方程式系	週間天気予報、異常天候早期警戒情報
	水平解像度	60km	
	水平格子点数	640 (赤道付近) - 48 (極付近) × 320	
	鉛直層数	60 層 (地上~0.1hPa)	
	初期時刻	12UTC	
	予報時間	216 時間	
	初期摂動作成手法	SV 法	
	メンバー数	51 メンバー	
	支配方程式系	プリミティブ方程式系	
	水平解像度	60km	
	水平格子点数	640 (赤道付近) - 48 (極付近) × 320	
台風アンサンブル予報 システム (TEPS)	鉛直層数	60 層 (地上~0.1hPa)	台風進路予報
	初期時刻	00,06,12,18UTC	
	予報時間	132 時間	
	初期摂動作成手法	SV 法	
	メンバー数	11 メンバー	
	支配方程式系	プリミティブ方程式系	
	水平解像度	60km	
	水平格子点数	640 (赤道付近) - 48 (極付近) × 320	
	鉛直層数	100 層 (地上~0.01hPa)	
	初期時刻	00,06,12,18UTC	
	予報時間	432 時間 (13 メンバー) 216 時間 (14 メンバー)	
初期摂動作成手法	SV 法		
メンバー数	27 メンバー		
支配方程式系	プリミティブ方程式系		
水平解像度	60km		
水平格子点数	640 (赤道付近) - 48 (極付近) × 320		
鉛直層数	100 層 (地上~0.01hPa)		
初期時刻	00,12UTC		
予報時間	432 時間 (13 メンバー) 216 時間 (14 メンバー)		
初期摂動作成手法	SV 法		
メンバー数	25 メンバー		

		現予報モデル	新予報モデル (更新1年後を目処)	利用目的
メソモデル (MSM)	支配方程式系	完全圧縮方程式系	←	短期予報、防災気象情報、航空予報、台風予報(降水、風) 高潮予測、大気汚染予測への入力 局地モデルの側面境界値
	水平解像度	5km	←	
	水平格子点数	721 × 577	817 × 661	
	鉛直層数	50層(地上～約40hPa)	75層(地上～約0.1hPa)	
	初期時刻	00,03,06,09,12,15,18,21UTC	←	
	予報時間	15時間(00,06,12,18UTC) 33時間(03,09,15,21UTC)	36時間	
		(試験運用。計算機更新後速やかに本運用開始。)	完全圧縮方程式系	
局地モデル (LFM)	支配方程式系	完全圧縮方程式系	完全圧縮方程式系	航空予報、防災気象情報(降水短時間、雷、突風を含む) 降灰予測への入力
	水平解像度	2km	2km	
	水平格子点数	1581 × 1301	1581 × 1301	
	鉛直層数	60層(地上～約30hPa)	60層(地上～約30hPa)	
	初期時刻	毎正時	毎正時	
	予報時間	9時間	9時間	

※このほかに、メソアンサンブル予報システムの試験運用を予定している、仕様は未定。

表 3.1.3 NAPS 更新前後の解析モデルの比較 (太字は変更点。括弧内の数字は、解析値と第一推定値の差を計算するために用いる低解像度モデルの仕様)

	現解析モデル	新解析モデル (更新1年後を目標)	利用目的
全球解析 (GA)	解析手法	4次元変分法	全球モデル、週間・台風アンサンブル予報モデルの初期値
	第一推定値	解析時刻の6時間前を初期値とする 全球モデル予報値	
	水平解像度 (低解像度モデルの水平解像度)	20km (60km)	
	水平格子点数 (低解像度モデルの水平格子点数)	1920 (赤道付近)・60 (極付近)×960 (640×320)	
	鉛直層数	60層 (地上~0.1hPa)	
	解析時刻	00,06,12,18UTC 速報解析とサイクル解析を実施	
	鉛直層数	100層 (地上~0.01hPa)	
メソ解析 (MA)	解析手法	4次元変分法	メソモデルの初期値
	第一推定値	解析時刻の3時間前を初期値とする メソモデル予報値	
	水平解像度 (低解像度モデルの水平解像度)	5km (15km)	
	水平格子点数 (低解像度モデルの水平格子点数)	721×577 (241×193)	
	鉛直層数	50層 (地上~約40hPa)	
	解析時刻	00,03,06,09,12,15,18,21UTC (試験運用。計算機更新後速やかに本運用開始。)	
	鉛直層数	817×661 (409×331)	
局地解析 (LA)	解析手法	3次元変分法	局地モデルの初期値
	第一推定値	解析時刻で利用可能な最新のメソモデル予報値	
	水平解像度	5km	
	水平格子点数	633×521	
	鉛直層数	60層 (地上~約30Pa)	
	解析時刻	毎正時	
	鉛直層数	100層 (地上~0.01hPa)	
全球積雪深解析	解析手法	最適内挿法	全球モデル、週間・台風アンサンブル予報モデルの初期値
	第一推定値	気候値と前日の解析値平年差	
	水平解像度	1°	
	水平格子点数	360×181	
	鉛直層数	1層	
	解析時刻	18UTC	

3.2 数値解析予報システム¹

3.2.1 数値解析予報システムの改善計画

本節では、計算機更新後に予定している数値解析予報システムの改善計画を紹介する。

数値解析予報システム(NAPS)では、最新の開発成果を取り入れ、また入手できる観測データを速やかに反映させるため、計算機更新後も計画的・継続的に開発を実施していく。第8世代数値解析予報システム(NAPS8)から第9世代数値解析予報システム(NAPS9)への更新後に予定している、あるいは着手が計画されている開発課題のうち主要なものについて、予報モデル・解析システムにわけて紹介する。図3.2.1に計算機更新前後の予報モデルの主な改善計画を示す。

なおここで紹介している開発計画は平成23年11月現在のものであり、NAPSのスーパーコンピュータ導入スケジュールや開発計画の進捗により、内容やスケジュールが変更になる可能性がある。詳細な内容や予報精度への影響については、来年度以降の研修テキストで報告したい。

3.2.2 予報モデルの改善計画

(1) 全球モデル(GSM)

全球モデルについては、計算機更新1年後を目処に、鉛直層数を60層から100層に増強し、鉛直層のトップは現在の0.1hPa から 0.01hPa に上げることを計画している。水平解像度や予報時間など他の仕様は変更せず、引き続き明日、明後日

の天気予報、台風進路・強度予報、週間天気予報を高解像度全球モデルで統一的に支援することにより、一貫した天気予報・量的予報の基盤構築を行っていく。

鉛直層数増強・モデルトップ引き上げの目的は、対流圏および成層圏の表現を精緻化することであり、後述する全球解析での衛星データのより効率的な利用とあわせて、全球モデル全体の予報精度向上を狙っている。このためには全球モデルの改良として、鉛直格子間隔が細くなることから、安定に時間積分ができるように力学過程を改良する必要がある。さらに境界層、雲、積雲対流、放射スキーム、陸面など物理過程の改良も実施する必要がある。さらに重力波抵抗スキームの見直しを含めて、検討を進めていく(北川 2009)。図3.2.2に鉛直レベルの配置案を示す。

海洋混合層結合モデルの導入については、大気と海洋混合層との相互作用を考慮することにより、台風周辺の海面水温低下やそれに伴う海面からのフラックスを抑制する効果で台風強度を弱め、モデルの台風強度予報を改善する効果があることがわかっている。しかし同時に、大気に対する影響が相当大きいこともわかっており、上述の大気の鉛直層数増強・物理過程の改良とあわせて、慎重に導入を検討していきたいと考えている。

このほかにも、エーロゾル気候値の更新、浅い対流の導入による降水分布の改善(小森 2009)、陸面過程の改良などを予定している。また、大気中下層の上昇流に不自然な波状パターンが見ら

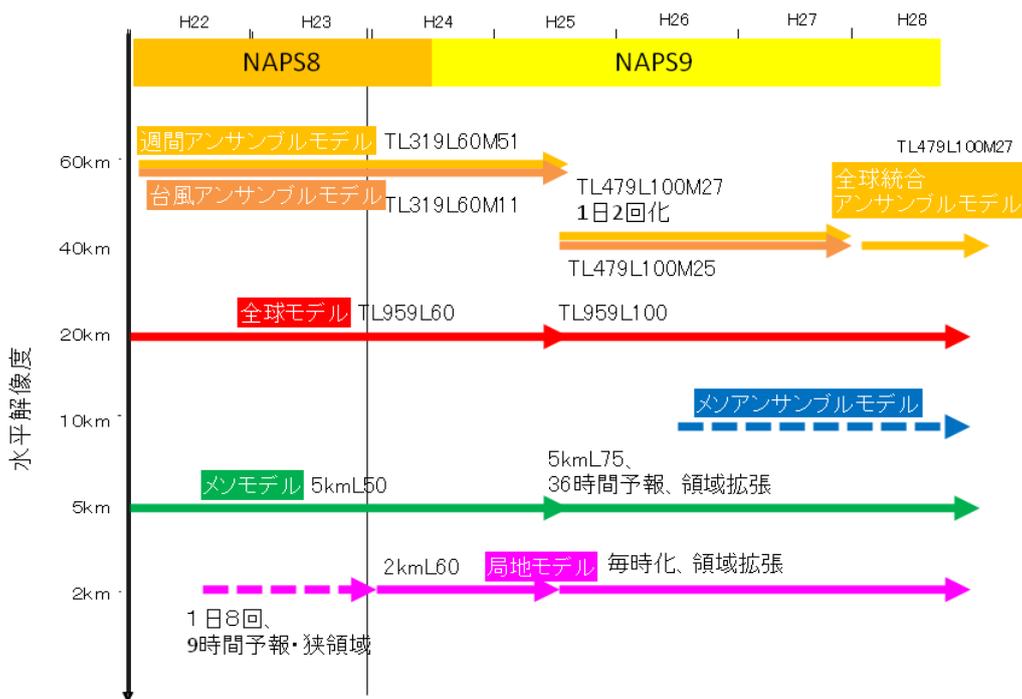


図 3.2.1 計算機更新に伴う予報モデルの主な改善計画 (点線は試験運用)

れる問題や、雲量の過少あるいは下層で不連続な層状雲があらわれる問題（小野田 2009）などの解消に取り組んでいく。

後述のとおり、メソモデルでも鉛直層数の増強を予定しており、統一的な手法で効率的に開発を行うべく、全球モデルとメソモデルについては物理過程の開発を連携して実施していく。またモデルの予報精度向上にあたっては、近年のモデルの高度化・複雑化により、モデルのひとつの過程を改良することで精度向上を達成することが困難になりつつある。モデルの改良とあわせて、データ同化の特性の把握や観測データとの評価検証を総合的に実施することが今後の改良を着実に進める大きなポイントと考えており、そのような観点でのモデルの評価を行っていききたい。

(2) メソモデル(MSM)

メソモデルについては、計算機更新1年後を目処に予報領域を拡張し、予報時間を現在の15時間(00,06,12,18UTC 初期値)、33時間(03,09,15,21UTC初期値)から、36時間(すべての初期時刻)へと変更する。さらに鉛直層数を50層から75層に増強する計画である。これにともない、境界層を含む大気下層を高解像度化するとともに、鉛直層のトップを現在の約20km(約40hPa)から60~70km(約0.1hPa)に引き上げることを計画している。水平解像度については変更しない。図3.2.3にメソモデル(後述の局地モデルも含む)の予報領域案を、図3.2.4に鉛直レベルの配置案を、それぞれ示す。

予報領域拡張と予報時間の延長により、主に北

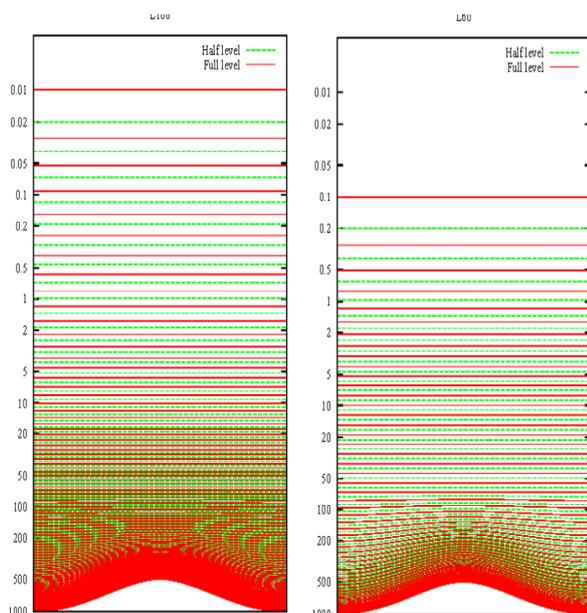


図 3.2.2 全球モデルの鉛直レベルの配置(左:新全球モデルの案、右:現在の全球モデル)

海道や南西諸島での予報精度向上を図るとともに、飛行場予報の支援強化、短期予報支援を充実させる計画である。メソモデルの予報領域を拡張することは、さらに内側の局地モデルへより適切な側面境界値を提供できるメリットもある。

鉛直層数増強・モデルトップを引き上げる目的は、全球モデルと同様、対流圏および成層圏の表現を精緻化することで、後述するメソ解析での衛星データのより効率的な利用とあわせて、メソモデル全体の予報精度を向上させることである。

物理過程については、全球モデルと同様に、データ同化の特性把握や観測データとの評価検証を総合的に実施し、鉛直層数増強とあわせて進めていく。このうち、メソモデルの主要な役割の一つである降水量の予測精度を向上させるため、降水過程の開発・改良は重要な課題である。積雲対流パラメタリゼーションの改良に引き続き努めるとともに、雲微物理過程の開発・高度化にも取り組む。

さらに、地表要素の予測精度に影響が大きい陸面過程についても、全球モデルと同様の高度な陸面モデルをメソモデルにも導入すべく開発を行うとともに、土壌雨量指数や流域雨量指数へ融雪の効果をもより精度良く反映させるべく、鉛直1次元でのオフライン型陸面モデルの開発にも、予報課と協力しながら取り組んでいく。

(3) 局地モデル(LFM)

局地モデル(永戸ほか 2010a)については更新後速やかに本運用を開始する。ただし開始当初は現在の試験運用のまま、すなわち3時間毎に9時間予報を、東日本領域を対象に実行する。そして計

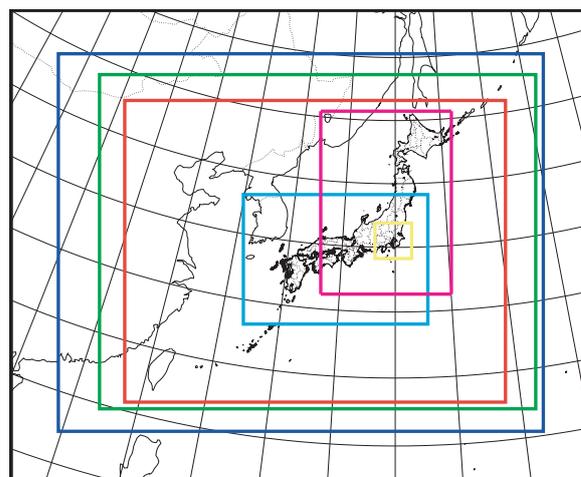


図 3.2.3 メソ関連モデルの計算領域。現行 MSM(緑)、MSM 拡張案(青)、LFM 試験運用:西日本領域(水色)、LFM 試験運用:東日本領域(赤紫)、LFM 試験運用:プロダクト提供領域(黄)、LFM 日本領域案(赤)をそれぞれ示す。

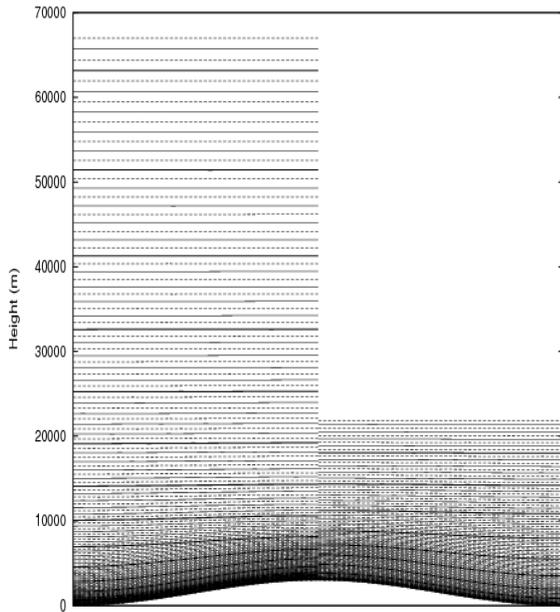


図 3.2.4 メソモデルの鉛直レベルの配置 (左：新メソモデルの案、右：現在のメソモデル)

算機更新1年後を目処に、毎正時に日本全体を対象に実行するように仕様を変更する。これにより、航空機の運航支援ならびに降水短時間予報の支援を本格的に行うことをめざす。予報領域については図3.2.3を参照いただきたい。

局地モデルの物理過程はメソモデルと多くは共通であるが、モデルが表現可能なスケールによって異なるものがある。例えば、局地モデルにおいては積雲対流パラメタリゼーションを用いて

いない。格子スケールの過剰な降水が表現されることから改善が必要と考えており、その改良にも取り組んでいく。

また、毎時の運用をより安定かつ高速に行うために、計算安定性が高い新しい力学過程を採用したモデル *asuca* の開発も進めており (河野ほか2011)、上述の仕様変更時に局地モデルへの導入を目指している。

(4) 週間アンサンブル予報システム(WEPS)

週間アンサンブル予報システムについては、更新1年後を目処に、予報時間の変更、1日2回化、メンバー数の変更を行う。さらに水平解像度を60kmメッシュから40kmメッシュへと高解像化を行い、鉛直層数についても全球モデルと同様、60層から100層へと増強を実施する。

初期時刻について、従来は週間天気予報作成作業スケジュールを考慮して1日1回 12UTC のみ実行していたが、TIGGE(THORPEX 双方向グランド全球アンサンブル)の取り組みにおける諸外国の動向や、高頻度での不確実性情報の提供との観点から、1日2回に変更する。これに合わせて、これまでの1回あたり51メンバー (1日あたり最大51メンバー) から、27メンバー (1日あたり最大54メンバー) へ変更する。1回あたりのメンバー数は減少するが、1日あたりのメンバー数ではわずかに増加する。

予報時間について、27メンバー中の13メンバーについては216時間から432時間へと延長し、週間

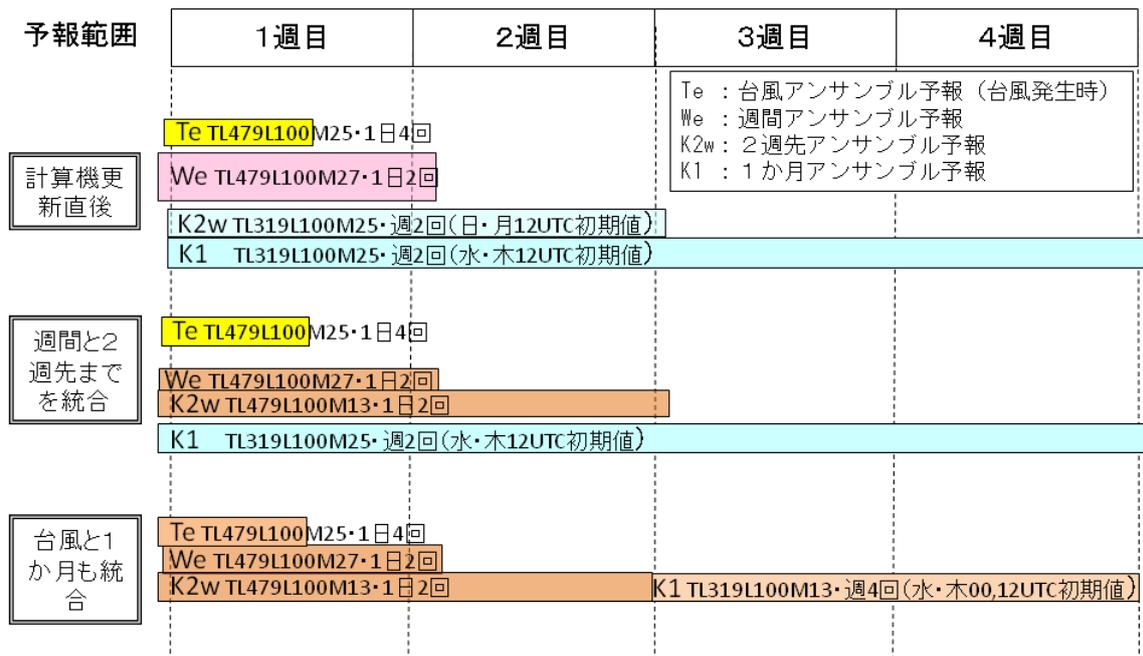


図 3.2.5 週間・台風・1か月アンサンブル予報の統合計画案

天気予報から季節予報（1か月予報の2週目までと異常天候早期警戒情報）の支援を統一的に行う。

さらにNAPS9運用中に、台風アンサンブル予報・1か月アンサンブル予報システムとの統合について計画している。統合に向けた開発計画案を図3.2.5に示す。これまでは、同じ大気解析値を用いてそれぞれ初期摂動を計算し、必要なメンバー数だけの初期値を作成、予報を実行していた。まず、週間アンサンブル予報と2週先までの季節予報を支援するアンサンブル予報の統合を実現する。次の段階として、台風アンサンブル予報や1か月アンサンブル予報との統合を実現する。これにより、週間天気予報から台風、2週先、1か月予報までについて一貫性のあるプロダクトを提供することができる。

統合化後のモデル開発においては、予報結果を多角的に検証することになり、総合的な評価検証を初期摂動作成法や予報モデルの改良につなげるという点からも、統合化は望ましいと考えられる。しかし一方で、週間天気予報、台風情報、季節予報（1か月予報）という幅広い業務の支援や改善をひとつの予報システムで目指すこととなるため、各業務への影響を踏まえながら慎重に取り組む必要もある。これらの開発は気候情報課と共同で実施していく。

週間アンサンブル予報関係では、再予報（ハインドキャスト）を活用した顕著現象発生のポテンシャル予測可能性調査も検討している。再予報とは、最新の数値予報技術で多数の過去事例を対象とした予報実験を行うことで、統計的な評価を可能とするものである。すでに季節予報ではこのシステムを導入して、予測精度の確認や系統誤差補正の統計量、確率形式のガイダンス作成の基礎データとして現業で活用されている。これを週間天気予報にも導入することで、例えば急激に発達する擾乱に伴う暴風などの顕著現象の発生可能性調査などを行う計画である。

(5) 台風アンサンブル予報システム(TEPS)

台風アンサンブル予報システムについては、メンバー数を現在の11メンバーから25メンバーに増強するとともに、水平解像度を60kmメッシュから40kmメッシュへと高解像度化を行い、鉛直層数についても全球モデル・週間アンサンブル予報システムと同様、60層から100層へと増強を実施する。これにより台風進路予報とその不確実性に関する情報の精度向上を図る。

さらにNAPS9運用中に、週間アンサンブル予報・1か月アンサンブル予報システムとの統合について計画しているのは、前述のとおりである。

台風アンサンブル予報システムでは、現在は熱帯擾乱周辺の摂動を考慮したアンサンブル予報の初期値を作成している(付録A.1.2参照)が、予報後半については熱帯・中緯度域といったより広範な初期摂動を考慮したシステムの方が望ましいと考えられる。

3.2.3 解析システムの改善計画

(1) 全球解析(GA)

全球解析については、前述の全球モデルの変更とあわせて計算機更新1年後を目処に、鉛直層数増強・トップの引き上げを実施する。その目的のひとつは、衛星データのより効率的な利用である。衛星データによって対流圏や成層圏の様々な情報が得られているが、全球解析の鉛直層を十分高く、また細かく設定していないため、その情報が解析値すなわち予報モデルの初期値に十分反映されていない場合がある。鉛直層数増強・トップの引き上げにより、上層に感度のある衛星のチャンネル利用数を増加させることで、輝度温度の計算精度を向上させ、観測データのさらなる有効利用を目指す。

観測データの利用についてはこの他にも、ハイパースペクトル赤外サウンダの同化（岡本 2011b）、雲域衛星同化（計盛 2011；岡本 2011a）の開発を優先的に実施する。また地上GPS可降水量について、日本の国土地理院が整備したGPSデータはメソ解析での利用をすでに開始しているが、地上GPSデータの国際交換が積極的に検討されており、全球解析についても欧米のデータも含めて、地上GPSデータの同化を検討し、その開発を行っていく（吉本 2011）。また従来型観測データの利用法の見直しや台風ボーガスデータの改良等も進めていく。

(2) メソ解析(MA)

メソ解析については、前述のメソモデルの変更とあわせて計算機更新1年後を目処に、予報領域の拡張、鉛直層数増強・トップの引き上げを実施する。また、インナーモデルの高解像度化も計画している。トップが40hPaから0.1hPaへと大きく上昇することにより、これまで利用できていなかった衛星輝度温度データを活用し、初期値の精度向上を図る。

(3) 局地解析(LA)

局地解析については、局地モデルと同様、計算機更新後速やかに本運用を開始する。その後前述の通り、更新1年後を目処に、予報モデルの毎正時実行、予報領域の拡張を行うことから、局地解

析もそれに対応させる。

観測データの利用については、メソ解析で既に導入した衛星輝度温度データの直接利用（第1.2節）やレーダー反射強度データの利用（第1.3節）などについて、局地解析でも取り組んでいく。またその他の衛星データの利用可能性についても調査を進めていく（永戸ほか 2010b）。

(4) 毎時大気解析(QA)

毎時大気解析については、大きな変更を予定していないが、観測データの入電状況を調査してプロダクト提供時間を早めることが可能かどうか検討を行う。また新たに利用可能なデータがないか情報収集を行い、できるだけ利用するように努めていきたい。

3.2.4 長期的な開発計画

これまで、計算機更新後に予定している改善計画について述べてきた。ここではそれ以降、第10世代数値解析予報システムも視野に入れた開発計画について簡単に述べておきたい。

全球モデルの改良については継続して実施していく。中でも、上述の改善計画では見送った水平解像度の高解像度化については、全球モデルが世界各国間の競争にさらされる中、必須の課題であり、数年後に10～15kmメッシュ、その後さらに5～10kmメッシュの高解像度化を目指して開発に着手する。全球非静力学モデルも必要になってくると考えられるため、それにふさわしい計算手法・力学過程の検討が必要である。

アンサンブルカルマンフィルタによるアンサンブル予報システムの構築については、週間アンサンブル予報システムと台風アンサンブル予報システムの統合の中で検討を進めていく。この手法はアンサンブルの初期摂動作成手法として利用できるばかりでなく、データ同化手法としても有効と考えられている（藤田・太田, 2011）。また4次元変分法と組み合わせたハイブリッドデータ同化、アンサンブルデータ同化手法も提案されており、背景誤差を動的に設定できるなどメリットがあることから、開発に着手したい。

メソアンサンブル予報システムについては、短期予報に対して顕著現象の確率情報等を提供することを想定して開発を行っており、NAPS9中に試験運用を予定している。1日4回、39時間予報を実行することを検討しており、水平解像度については現在、5kmメッシュまたは10kmメッシュを想定、メンバー数についても計算コストを勘案して検討をしているところである。初期摂動作成手法についても、全球と同じSV法のほか、アン

サンブルカルマンフィルタによる方法も並行して開発を行っている。今後精度評価を実施し、予報作業支援を効率的に行えるアンサンブル予報システムの開発を目指していく。

参考文献

- 永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 石水尊久, 平原洋一, 幾田泰醇, 福田純也, 石川宜広, 吉本浩一, 2010a: 局地モデルの試験運用・局地数値予報システムの概要. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- 永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 佐藤芳昭, 2010b: 局地モデルの試験運用・今後の計画. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 25-27.
- 岡本幸三, 2011a: 赤外雲域同化. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 84-92.
- 岡本幸三, 2011b: ハイパースペクトル赤外サウンド. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 25-36.
- 小野田浩克, 2009: 雲. 数値予報課報告・別冊第55号, 気象庁予報部, 83-86.
- 計盛正博, 2011: 雲, 雨の影響を受けたマイクロ波輝度温度データの同化. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 77-83.
- 河野耕平, 荒波恒平, 原旅人, 北村祐二, 室井あし, 2011: 気象庁における非静力学モデル asuca の開発状況. 第13回非静力学モデルに関するワークショップ.
- 北川裕人, 2009: 鉛直高解像度化・上部境界. 数値予報課報告・別冊第55号, 気象庁予報部, 54-58.
- 小森拓也, 2009: 浅い対流スキームの開発. 数値予報課報告・別冊第55号, 気象庁予報部, 77-81.
- 藤田匡・太田洋一郎, 2011: LETKFの開発. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 130-143.
- 吉本浩一, 2011: GPS可降水量の全球解析での利用. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 63-69.

3.3 アプリケーション¹

スーパーコンピュータシステムの更新に際して各プロダクトの移行を確実に実施することを重視して、システム更新時点でのプロダクトの変更は行わない予定である。変更予定のプロダクトはシステムの更新が完了したあと、順次ルーチン化する予定である。

ここではシステム更新後ルーチン化を予定しているプロダクトおよび開発中のプロダクトについて簡単に紹介する。

(1)MSMの36時間化対応

システム更新が完了して1年後をめどにMSMの予報時間が現在の33時間（00,06,12,18UTC初期時刻は15時間）から36時間（全初期時刻）に延長される予定である。この延長に対応して、航空予報用ガイダンスを始めとして、MSMを利用したアプリケーションについて、予報時間の延長を行う予定である。

(2)ガストガイダンス、最大瞬間風速ガイダンス

ガストガイダンス（第1.7節参照）は飛行場予報のガストの予測を支援することを目的に開発しており、現在現業利用に向けた精度の確認を行っている。最大瞬間風速ガイダンスも開発を終えている。今年度府県情報へ最大瞬間風速を付加することの試行が行われており、情報発表作業への最大瞬間風速ガイダンスの利用方法が検討されている。数値予報課では来年度当初から現業作業で利用できるよう準備を行っている。

これらのガイダンスは近年の数値予報モデルの予報精度向上およびアメダスによる最大瞬間風速の通報が始まったことなどにより開発が可能となった。

(3)週間アンサンブル最大風速ガイダンス

週間予報で3～4日先の気象情報発表を支援する目的で、週間アンサンブル最大風速ガイダンスの開発を行っている。これは現行のGSM最大風速ガイダンスの予測手法を週間アンサンブル予報の各メンバーに適用したものである。現在、過去2年程度の予報結果を準備して、情報発表に利用可能なか調査が行われている。調査結果は本年度の週間予報技術検討会で検討される予定である（図3.3.1）。

(4)下層悪天予想図

システム更新後1年をめどに、LFMが日本領域で運

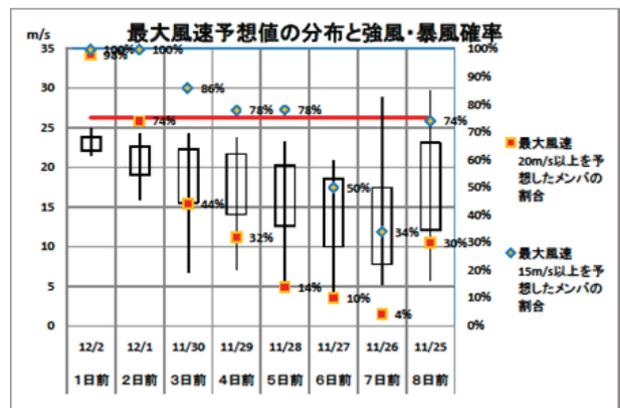
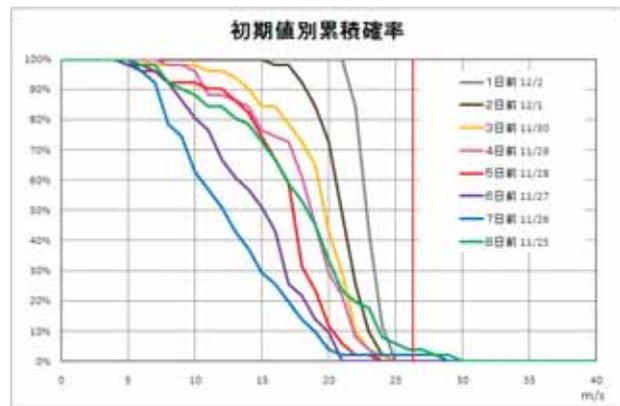


図 3.3.1 週間アンサンブル最大風速ガイダンスモニター

上図：ある地点の最大風速が閾値を超えるメンバーの割合をリードタイム別にグラフ表示、赤線が実況

下図：ある地点のターゲット日に予測された最大風速分布を箱ヒゲ図で表示、また最大風速 20m/s（オレンジ）および 15m/s（青）以上を予測したメンバーの割合を点で表示、赤線が実況

3～4 日先の気象情報発表支援への利用可能性を検討するために最大風速ガイダンスの確率的な表現力をモニターする。この例では、リードタイムが短くなるに従い強風を予測するメンバーが多くなっている。

用を開始する予定である。LFMの予測情報を有効に利用するプロダクトとして下層悪天予想図の開発を進めている。これは、航空機の運航に影響をおよぼす下層の悪天要素（雲底高度、シアライン、雷雨など）をLFMの出力から計算し1枚の図で一覧できる形で表示するプロダクトである。事前の検証結果ではLFMの予報精度向上を反映して、雲底高度の予測はTAFガイダンスと遜色ない精度を持つことが確認されている。ルーチン化の予定についてはまだ明確に決まっていないが、定期便の運航支援のみならず小型機などの一般航空²を支援する情報としての利用も期待される。（図3.3.3）

¹ 松下 泰広

² 定期便以外の航空機の運航

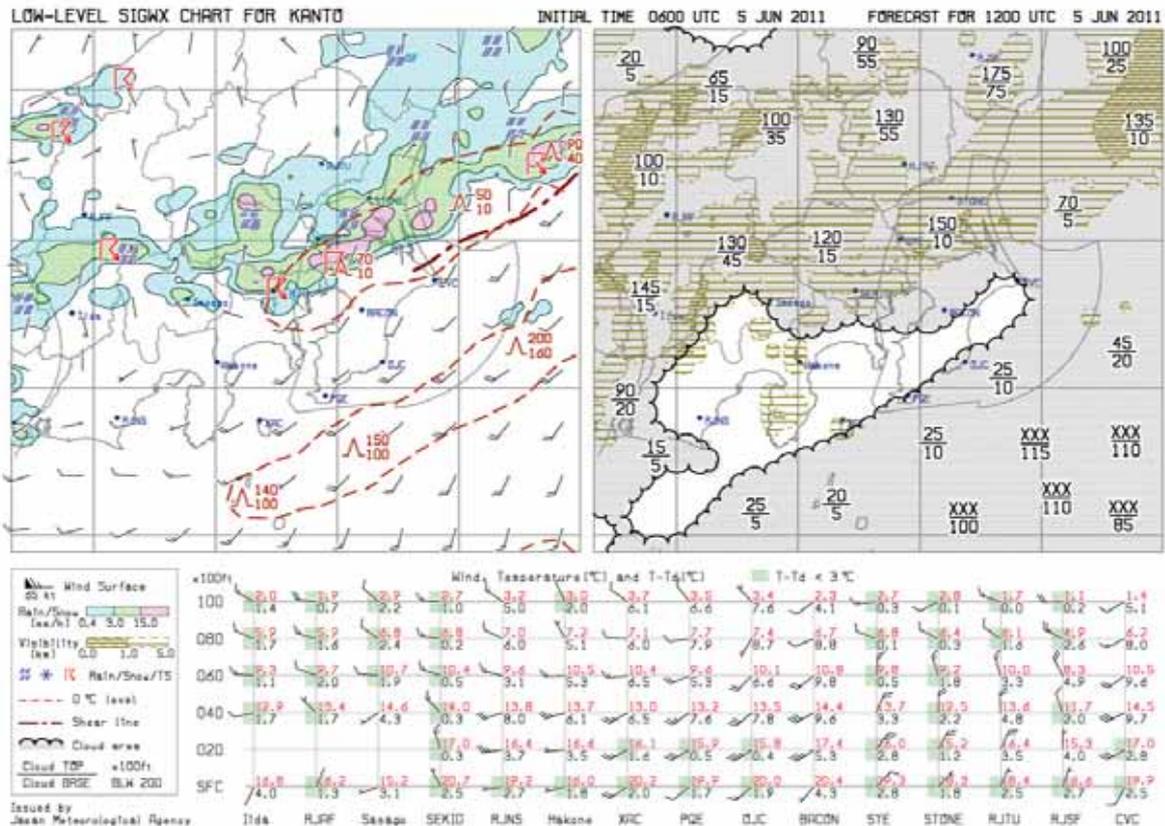


図 3.3.3 下層悪天予想図

航空機の運航に影響する雲底高度や積乱雲の情報を一覧できる形で表示している。

(5)WAFSの新しい格子点予報への対応

国際航空便の運航支援を行う目的で、世界空域予報組織 (WAFS) から提供される悪天情報を気象庁で受信してFAX図などを作成し、民間航空会社などのユーザーに提供している。システム更新とは直接関係しないが、このWAFS予報が、2013年からデータフォーマットが新しくGRIB2形式となり予報要素も一新される予定である。また、現在WAFSから提供される悪天情報は通信衛星からの放送を受信する形で取得しているが、2012年6月からこの衛星放送が中止され、インターネット経由の情報提供となる。これらの変更に対応して受信システムや対応するアプリケーションの変更を行ってゆく。

(6)数値予報モデルの予測精度向上を生かしたプロダクトの開発

近年の数値予報モデルの高解像度化および解析予報システムの高度化による予測精度向上の結果、数値予報プロダクトの開発にも変化が現れている。旧来の数値予報モデルは、現在のものに比較して予測精度が低かったため、多くの予報値について統計的な補正を強くかけてその予報誤差を減らして利用する必要があった。近年モデルの予測精度が向上

したことにより、統計的な補正をあまり加えずに、モデルの予報値をほぼそのまま目的変数に翻訳 (診断的な手法) しても実用的な予報精度を確保できるプロダクトが増加しつつある。航空用悪天GPVの積乱雲の雲頂高度(CBTOP)はモデルで表現されている不安定度を診断して直接積乱雲の雲頂高度に翻訳するプロダクトである。また、昨年度ルーチン運用を開始した、MSM視程分布予想 (第1.6節参照) は、モデルの予測する要素を直接、消散係数に変換して、統計的な補正をあまり加えず診断的に視程を計算している。MSM視程分布予想が実用化できたのはモデルの雲水量の予測精度が向上したことにより、観測値を利用して予測値に大きな補正を加えなくても実用的な精度の視程予測ができるようになったことによる。

これらの診断的な手法を用いたプロダクトの特徴は、観測データの取得ができない場合でも、予測資料を作成することができることである。また、これらのプロダクトの予測精度は数値予報モデルの予測精度向上に強く依存することになるので、これらアプリケーションの利用範囲を広げてゆくためにも、数値予報モデルのさらなる予測精度向上が期待される。

3.4 計算機(スーパーコンピュータシステム)¹

3.4.1 更新の経緯

現在運用中のスーパーコンピュータシステム(以下、現システム)は、数値予報を実行する計算機としては8世代目にあたる。現システムを導入するにあたっては、同時期に気象衛星センターの計算機の更新計画があったことから、両者を一体のシステムとして整備を行い、衛星データ処理業務分は2005(平成17)年3月から、数値予報業務分は2006(平成18)年3月から運用を開始した。

運用開始時点では現システムは2011(平成23)年2月までの5年間(衛星データ処理業務分は6年間)の運用を想定しており、2006(平成18)年度末には早くも次期スーパーコンピュータシステム(以下、次期システム)の更新の検討が始まった。検討の中で、次期システムの消費電力が大幅に増加する見通しであること、清瀬庁舎の計算機室に十分なスペースが確保できないことが懸念されたが、システムの更新を1年遅らせ気象衛星センターの敷地内に建設される新庁舎に設置することで懸案を解決した。

入札の結果、2010(平成22)年6月に次期システムの供給業者が日立製作所に決定し、2012(平成24)年3月の運用開始に向けたシステム構築作業が始まった。なお2011(平成23)年3月に発生した東日本大震災の影響により、次期システムの運用開始時期について計画の見直しを行っているところである。

3.4.2 次期スーパーコンピュータシステムの特徴²

(1) 全体構成

9世代目となる次期スーパーコンピュータシステムの構成は、現システムと同様、スーパーコンピュータとその高速ストレージ、衛星データ処理関係機器、各課業務処理関係機器、ストレージ等がネットワークによって結合されたシステムである(図3.4.1)。

主要な装置は新設される清瀬第3庁舎(仮称)に設置される。本庁とはWANで接続されるが、本庁には端末とプリンタだけを設置し、利用者は清瀬の計算機をリモートで利用する。なお本庁各課室が独自に調達したサーバ類を本庁及び清瀬においてスーパーコンピュータシステムに直接または支線LANとして接続することができる。

(2) スーパーコンピュータと高速ストレージ

スーパーコンピュータは、同一仕様の2台(主系と副系)で一式を構成する。数値予報業務は通常時

は主系で実施し、主系のメンテナンスや障害の際には副系で実施することで、安定的なプロダクト提供を可能とする。副系は通常時は数値予報モデル等の開発や改良に利用される。

スーパーコンピュータの機種名は、スーパーテクニカルサーバSR16000モデルM1³である。このスーパーコンピュータは、次のような階層的構造をしている。

- IBM POWER7(3.83GHz、8コア)を4ソケット、DDR3メモリ128GBを搭載した「論理ノード」
- 論理ノード8つから構成される「物理ノード」
- 物理ノード最大4つから構成される「スーパーノード」
- スーパーノード最大16個から構成される「スーパーコンピュータ」
- 任意の論理ノード間で高速な通信を行うための「内部高速ネットワーク」

気象庁が導入するスーパーコンピュータは1台あたり、物理ノード54個⁴(論理ノード432個)から構成される。OSは論理ノード毎に起動されるので、スーパーコンピュータは432台の計算機の集合体と見ることができる(OSはAIX)。論理ノード432個は用途ごとに、計算専用の「計算ノード」が412個、ストレージ等との入出力を司る「I/Oノード」が10個、システム管理用の「サービスノード」が4個、計算ノード障害に備えた「スペアノード」が6個、として使われる。

理論演算性能は、1論理ノードあたり0.98TFLOPS⁵、スーパーコンピュータ1台あたり423.5TFLOPS(計算ノードだけで403.9TFLOPS)である。システム全体で比較すると、現システムの約30倍の性能である。

スーパーコンピュータの外部記憶装置として、主系に135TB、副系に210TBの専用の高速ストレージ(磁気ディスク、RAID5)が接続される。スーパーコンピュータのI/Oノードと高速ストレージは複数の光ファイバケーブルで接続され、HSFSと呼ばれるファイルシステムによる高速な入出力が可能である。また主系と副系間で高速にデータ転送ができるよう、スーパーコンピュータの主系と副系はデータ転送専用のネットワークでつながっている。

³ http://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/hpc/SR_series/sr16000/index.html

⁴ スーパーノードの数は14だが、物理ノードを2つしか持たないスーパーノードが1つある。

⁵ 演算性能の指標。1TFLOPSは1秒あたり1兆回の浮動小数点演算ができることを意味する。

¹ 西尾 利一

² この項で記述する各機器の仕様は執筆時点の情報に基づいているが、納入までに変更になる場合がある。

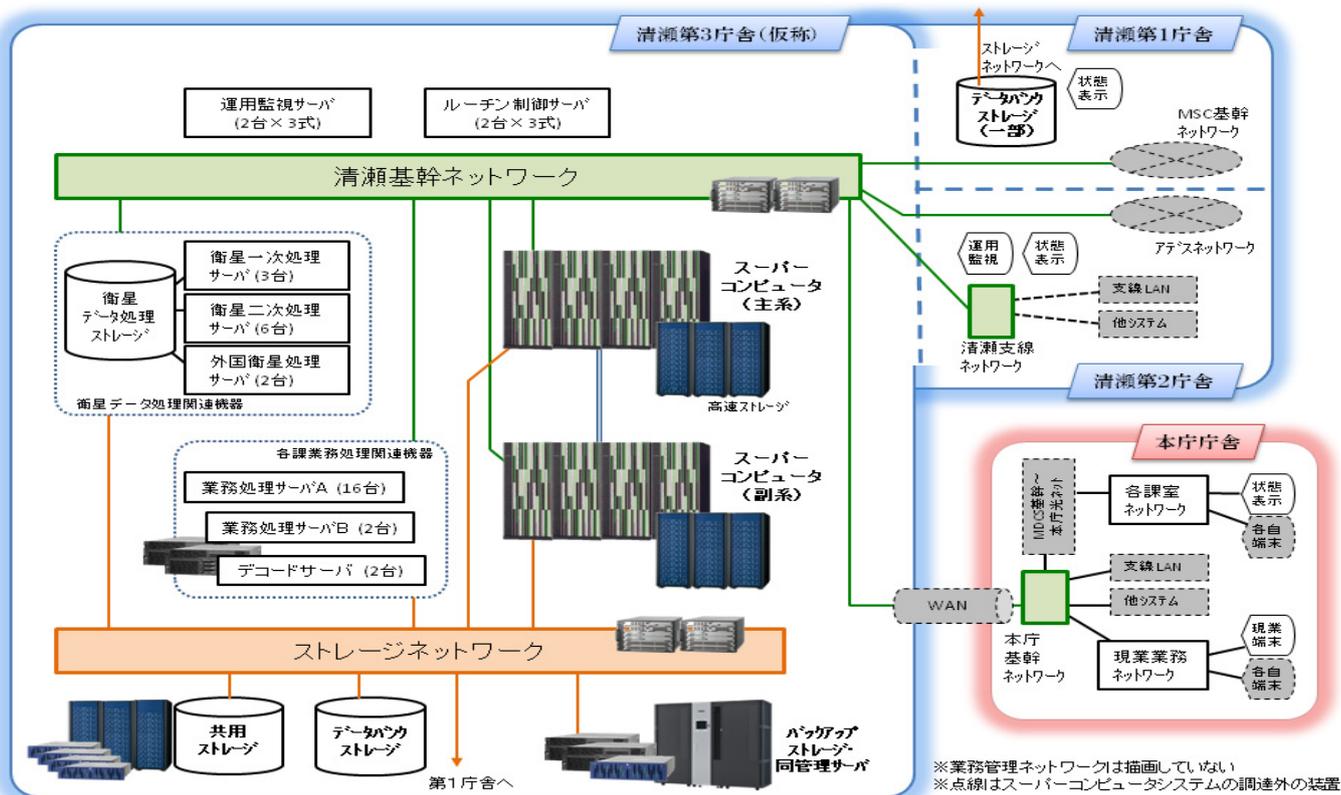


図 3.4.1 次期スーパーコンピュータシステム概念図

最近のコンピュータには省エネルギーが強く求められるようになってきているが、機器の消費電力だけでなく冷却にかかるエネルギーの削減も課題になっている。今回導入するスーパーコンピュータは、部品が高密度で実装され発熱も大きいため、プロセッサの発熱を冷却水により直接冷却するとともに、ラックのリアドアに冷却水を流すことで排気も冷却し、計算機室内への熱の放出を最小限に抑え計算機室の空調負荷を軽減している。

ちなみに、次期システムの定格消費電力⁶は2215kVAで、このうちスーパーコンピュータ本体（ストレージは含まず）が1883kVAである。（現システムはそれぞれ1145kVA、970kVA）

(3) 衛星データ処理関係機器

気象衛星センターの業務である衛星データ処理のための機器として、衛星一次処理サーバ、衛星二次処理サーバ、外国衛星処理サーバ、衛星データ処理ストレージがある。

(4) 各課業務処理関係機器

スーパーコンピュータの強力な計算性能を必要としない業務や開発のために、以下のサーバがある。

⁶ 提案書に記載された各装置の定格値による。なお実際の消費電力は定格値よりも小さくなる。

業務処理サーバAは、リトルエンディアンのプロセッサ (Intel Xeon E5640 2.66GHz クアッドコア) を2個搭載したサーバ16台からなるブレード型のサーバである。OSはLinux、主記憶は48GB/台。

業務処理サーバBは、ビッグエンディアンのプロセッサ (POWER6+ 4.7GHz、デュアルコア) を搭載したサーバ2台からなる。OSはAIX、主記憶は32GB/台。リトルエンディアン機への移植が難しいプログラムを移行させるためのサーバである。

デコードサーバは、ビッグエンディアンのプロセッサ (POWER7 3.0GHz、8コア) を2個搭載したサーバ2台からなる。OSはAIX、主記憶は64GB/台。数値予報ルーチンのデコード処理のためのサーバである。

(5) ストレージ

スーパーコンピュータ、衛星データ処理関係機器、各課業務処理関係機器でデータを共有するためのストレージとして、以下の3種類のストレージがある。

共用ストレージは、スーパーコンピュータ、衛星データ処理関係機器、各課業務処理関係機器上で実行されるプログラムが直接入出力する利用を想定したネットワーク接続ストレージ (NAS) である。RAID6構成の磁気ディスクで構成され、容量は

754TBである。

データバンクストレージは、データの長期保存を目的としたNASである。RAID6構成の磁気ディスクで構成され、容量は2932TBである。なお現スーパーコンピュータシステムが蓄積したデータを移行させるため、データバンクストレージの一部を清瀬第1庁舎に設置し2010（平成22）年10月より運用を開始した。

バックアップストレージは、データバンクストレージに格納したデータのうち特に亡失が許されないものを自動でバックアップするための装置で、テープライブラリとその管理サーバからなる。市販ソフトウェアにより、データバンクストレージの特定のディレクトリ下にあるデータを自動で複製する。テープライブラリが媒体を最大搭載した時の容量は1520TB（非圧縮時）である。

(6) その他の機器

数値予報ルーチン、衛星データ処理ルーチン、各課ルーチンを制御するためのサーバ（2台1組で一式）が1式ずつ（計3式）ある。これらのサーバで、後述するジョブフロー制御ソフトを実行する。

運用監視を行うためのサーバ（2台1組（一式）が3式）や、運用監視端末等がある。

(7) ネットワーク

清瀬基幹ネットワークは、スーパーコンピュータシステム内のスーパーコンピュータやサーバを接続するとともに、スーパーコンピュータシステムとアデスを始めとする庁内の他システムを接続するネットワークである。

ストレージネットワークは、スーパーコンピュータ、衛星データ処理関係機器、各課業務処理関係機器と、共用ストレージ、データバンクストレージ、バックアップストレージを接続する、スーパーコンピュータシステム内部のネットワークである。

清瀬～本庁間は2系統のWAN（各系統100Mbpsを予定）で接続される。本庁の利用者はこのWANを介して清瀬の計算機をリモートで利用できる。WANは、通常時は1系統が定常業務用、もう1系統が一般業務（開発等）として用いる計画である。

ネットワーク機器はそれぞれ二重化構成となっており、1台の機器に障害が生じても機能に影響がないよう設計されている。

(8) ソフトウェア（ジョブフロー制御ソフト）

数値予報ルーチン、衛星データ処理ルーチン、各課ルーチンでは、多数のジョブを定時に、また順序に従って自動実行する必要がある。その制御を行うために2種類のソフトウェアが提供される。

数値予報ルーチン（およびスーパーコンピュータで実行される各課ルーチン）のジョブの実行を制御するために、数値予報ルーチン業務運用支援ソフトウェア（JNOS）が提供される。

JNOSの機能には、スーパーコンピュータで数値予報ルーチンや各課ルーチンのジョブが実行されるときに確実にノードが確保できるよう、開発ジョブを実行できるノードを状況に応じて制御する機能（ノードスケジューラ）があり、これにより数値予報ルーチン、各課ルーチン、開発ジョブが混在した環境での確実な業務実行と開発ジョブによる計算機資源の有効利用が両立できる。JNOSはこのような気象庁独自の要件を実現するため、業者において市販ソフトをベースに製作される。JNOSの主要機能は数値予報ルーチン制御サーバで実行される。

衛星データ処理ルーチンおよび業務処理サーバで実行される各課ルーチンは、市販のジョブフロー制御ソフトをそのまま使用する。当該ソフトの主要機能はそれぞれ、衛星データ処理ルーチン制御サーバ、各課ルーチン制御サーバで実行される。

3.4.3 開発環境の改善

スーパーコンピュータでは従来より、数値予報ルーチンジョブが実行されないノードや時間帯を利用して、気象庁職員による数値予報モデル等の開発・改良が行われている。開発環境について、次期システムでは次の2点の改善を計画している。

- 従来より開発で使われてきた数値解析予報実験システム（NAPEX）を大幅に改良し、数値予報ルーチンと親和性の高い実験環境とすることで、ルーチン化にかかる負担を軽減し、開発者の作業効率向上を目指す。
- 個々の開発で予報成績の改善が確認された変更であっても、複数の変更を同時にルーチンに組み込むと予想外の改悪となることがある。このようなことを避けるため、次期システムでは、主要な数値予報モデルについて次に本運用とする候補のプログラムを準ルーチンとして常時実行する計画である。

3.4.4 おわりに

次期スーパーコンピュータシステムは、2012（平成24）年に運用を開始する予定である。

本節では次期システムのハードウェアを中心に説明を行った。世界の数値予報センターと比較して遜色のない性能の計算機が導入されるが、その性能を十分に引き出し数値予報の精度をさらに向上させるのが我々に課せられた責務であろう。