第5章　第10世代数値解析予報システム

5.1　概要[1]

我が国における数値予報の歴史は1959年（昭和34年）に遡る。気象庁は同年に官公庁として初めて科学計算用の大型コンピュータを導入し、数値予報業務を開始した。その後、コンピュータの技術革新の成果を反映させるべく、段階的にコンピュータシステムを更新するとともに、数値予報技術の開発を継続的に行い、今日では数値予報は気象予報業務の根幹となっている。例えば、平成27年7月にとりまとめられた交通政策審議会気象分科会提言「「新たなステージ」に対応した防災気象情報と観測・予測技術のあり方（提言）」では、「新たなステージ」として捉えるべき気象現象のうち、わが国に大きな災害をもたらす集中豪雨及び台風について、引き続き数値予報による予測精度向上を図る必要があると指摘されている。現在利用しているスーパーコンピュータシステムは2012年（平成24年）6月に更新され、第9世代数値解析予報システム (NAPS9)[2]として稼働させている (室井 2011)。

このような状況等を踏まえて、早めの防災対策に必要な気象予測のため、集中豪雨の予測技術の向上と、台風強度予報の強化を目的として、計算能力を強化したスーパーコンピュータシステムを整備することとした。これにより、2018年（平成30年）にスーパーコンピュータシステムを更新し、第10世代数値解析予報システム (NAPS10) の運用を開始する予定である。

新しいスーパーコンピュータ本体は現スーパーコンピュータと比較して、理論演算性能はおよそ22倍であり、実効性能はおよそ10倍と評価されている。詳細は第5.4節をご覧いただくこととして、開発においては、外国現業気象機関の成果を参考にすることもあることから、ここでは、それらのスーパーコンピュータとの比較を簡単に紹介する。欧州中期予報センター (ECMWF)、英国気象局 (UKMO)、米国環境予測センター (NCEP) におけるスーパーコンピュータ本体の1台あたり[3]の理論演算性能は、それぞれ4249 TFLOPS (ECMWF), 3019 TFLOPS (UKMO), 2037 TFLOPS (NCEP) である[4]。NAPS10のスーパーコンピュータ本体の1台あたりの理論演算性能は9083 TFLOPSであるから（第5.4節）導入時期の違いがあるものの、これらの気象機関と概ね同程度の計算機が当庁に導入されると言える。

NAPS10で予定している数値予報モデル等の仕様の変更や開発計画の概要を本節では簡単に述べる。向上したスーパーコンピュータの能力を活かして、数値予報モデル等において、新規システムの運用開始や多くの仕様向上（水平分解能の高解像度化、鉛直層数の増強、アンサンブル予報システムにおけるメンバー数の増加、予報時間延長等）を予定している。特に大きな変更として、現在部内試験運用を行っているメソアンサンブル予報システム (MEPS) の本運用開始及び全球モデルの水平分解能の向上（約20 kmから約13 kmへ）が挙げられる。前者は、メソモデル (MSM) の予測に対して信頼度・不確実性等の情報を付加し、複数の予測により大雨等の顕著現象の可能性を早い段階で予測することを目指すものである。後者は、台風周辺の降水や風等の予測の詳細化、精度向上を目指すものである。集中豪雨をもたらす線状降水帯や台風の強度の予測は困難な課題であり、スーパーコンピュータの能力を最大限活かして精度向上に努めていきたい。これらの新規システムの運用開始や仕様向上に対して、以下の方針で取り組む予定である。

- 計算機更新時には現在運用している仕様変更を行わずに移行する（この方針は2012年のNAPS9への更新時と同じ）。
- 予報時間延長の一部は計算機更新後速やかに実施する。
- 計算機更新の1年後にMEPSの運用を開始する。
- 仕様向上に向けた開発は完了したものから順次導入する。

NAPS10における計画の詳細や開発の方向性については、第5.2節をご覧いただきたい。

アプリケーション（ガイダンス）についても同様に計算機更新時には現在運用している仕様をそのまま移行し、計算機更新後には数値予報の仕様向上にガイダンスを対応させる。また、MEPSといった新規システムに対応する新たなガイダンスについても開発が完了したものから順次導入する。詳細については第5.3節で紹介する。

参考文献

室井ちあし, 2011: 概要. 平成23年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 56–60.

---

[1] 石田 純一

[2] 数値解析予報システム (NAPS) という名称は、現在ではスーパーコンピュータシステムの正式名称では無いが、ここでは世代を明確に表現するためこの名称を用いる。

[3] これらの気象機関においても当庁と同様に正副2台構成としている。

[4] 2017年6月発表のTOP500 (`https://www.top500.org`) による世界のコンピュータの性能ランキングより。

5.2 数値予報[1]

5.2.1 数値予報の改良計画

数値予報の精度改善のためには、計算機更新後も継続的、段階的に改良を実施する必要がある。ここでは、第 10 世代数値解析予報システム (NAPS10) の運用中に予定している計画と今後の開発の方向性について紹介する。なお、ここで紹介する計画等は本原稿執筆時点（ 2017 年 9 月）のものであるが、最新の知見や開発の進捗に応じて内容やスケジュールの変更がありうることに留意いただきたい。

5.2.2 仕様変更や新規システム導入に係る改良計画

NAPS10 では強化された計算機能力を活かして数値予報モデル等の高解像度化や予報時間の延長等を計画している。以下にその詳細について述べる。表 5.2.1 に現行システムの仕様（ 即ち、計算機更新直後の仕様）、計算機更新の約 1 年後の仕様及び次期システムの最終仕様を一覧としてまとめた。

(1) 全球モデル・全球アンサンブル予報システム

全球モデル (GSM) については、台風強度の予報期間が現在は 3 日先までであるところを 5 日先まで延長することに対応するため、現在の 84 時間予報（ 00, 06, 18UTC 初期時刻）を 132 時間予報へ延長する。その後さらに、現在は 17 時発表の週間予報の作成においては、全球アンサンブル予報システム (GEPS) のみが利用可能であるところ、GSM も併用できるようにするため、00UTC 初期時刻に対しては 12UTC 初期時刻と同じく 264 時間予報へと延長する。発表予報を改善するためには、予報時間を延長した数値予報の精度や特性を把握する必要があることから、発表予報等の改善に先立って予報時間延長を行う計画である。特に、132 時間予報への延長は計算機更新後早期に実施する計画である。

NAPS10 におけるその他の大きな仕様の変更として、予測精度向上を目指して GSM 及び GEPS の水平分解能の高解像度化及び鉛直層数の増強を計画している。現在の GSM は水平格子間隔が約 20 km、鉛直層数は 100 層である。これを水平格子間隔を約 13 km、鉛直層数を 128 層へと変更する計画である。また、GEPS は GSM と比較して水平分解能をおよそ半分とし、鉛直層数を揃えて運用している。この考え方は NAPS10 でも変更せず、GEPS については水平格子間隔約 27 km、鉛直層数を 128 層へと変更する計画である。さらに全球解析における 4 次元変分法のインナーモデルの水平分解能も高解像度化する計画である。また、GEPS のメンバー数を現行の 27 から 51 へと増強する。水平分解能の高解像度化及び鉛直層数の増強により、より小さなスケールの現象が表現可能となり、また、分解能の制限に起因する誤差が減少することから、予測精度向上につながることが期待できる。しかし、石田 (2017) で述べたとおり、パラメタリゼーションに対して解像度に応じた新たな扱いを検討する必要があること等の理由により、仕様向上による効果を適切に引き出すためには多くの開発が必要になる。また、水平分解能の高解像度化の効果を発揮させるために、より高精度かつ安定なスキームが必要であること、さらに、高解像度化により力学過程で多用するノード間通信の比重が増して計算速度が遅くなる可能性があることから、力学過程の開発も行う必要がある。このような理由から、水平分解能の高解像度化や鉛直層数の増強に対しては、着実に開発を進め、NAPS10 の運用期間の後半で導入する予定である。

(2) メソモデル・メソアンサンブル予報システム・局地モデル・毎時大気解析

メソモデル (MSM) についても予報時間の延長を予定している。MSM は 1 日 8 回 39 時間予報としているが、39 時間より予報時間が長い予報や情報（ 現在は GSM を用いている）に対して、予報期間前半から後半まで MSM による一貫した数値予報資料をも利用可能にすることを目的として、1 日 2 回（ 00UTC 及び 12UTC）については予報時間を 51 時間に延長する。これにより、まず、5 時及び 17 時に発表する天気予報での利用が考えられる。特に 5 時に発表する天気予報（ 12UTC 初期時刻の数値予報資料を利用することを想定）では、現在の 39 時間予報では明日予報の全ての時間をカバーすることができないが、51 時間予報に延長することによりカバーすることが可能となる。また、航空予報においては、運航用飛行場予報 (TAF) の作成の際にさらに先の時間まで確認できるようになる利点や、台風など顕著現象が予想される場合に、TAF の予報時間である 30 時間より先の量的予想を求められる際に利用することが考えられる。なお、MSM では予報後半には境界条件を与える GSM と予測特性が類似してくることが知られている (原 2016; 越智・石井 2013)。予報時間を延長した MSM でも同様あるいはそれ以上に予測特性が類似すると考えられることに注意が必要である。MSM の予報時間延長は、実行スケジュールの確認や予測特性の確認（ 前述した想定とあまりにも異ならないか等）が済んだ後に導入を図る。

局地モデル (LFM) は主として航空交通管理のための気象情報の提供での利用を念頭において、予報時間を 9 時間から 10 時間に延長する予定である。首都圏での気象情報の提供においては、通常は 6 時間先までの予測を提供しているが、時間帯によっては 8 時間程度先までの予測を求められることがあり、現在の 9 時間予報ではやや足りないといった事情があるためである。LFM の予報時間延長は、GSM の予報時間の 132 時間化と同様に計算機更新後早期に導入予定である。

[1] 石田 純一

表 5.2.1 主要な現業数値予報モデルの仕様等に係る改良計画。現行システムから変更になる部分を太字で示した。

	現行システム	次期システム （更新の約 1 年後）	次期システム （最終時点）
全球モデル (GSM)	20 km, 100 層 264 時間予報：1 回/日 (12UTC) 84 時間予報：3 回/日 (00, 06, 18UTC)	20 km, 100 層 264 時間予報：1 回/日 (12UTC) **132 時間予報**：3 回/日 (00, 06, 18UTC)	**13 km, 128 層** 264 時間予報：**2 回/日** **(00, 12UTC)** **132 時間予報：2 回/日** **(06, 18UTC)**
全球アンサンブル 予報システム * (GEPS)	40 km, 100 層 27 メンバー 264 時間予報：2 回/日 (00, 12UTC) 132 時間予報：2 回/日 ** (06, 18UTC)	40 km, 100 層 27 メンバー 264 時間予報：2 回/日 (00, 12UTC) 132 時間予報：2 回/日 ** (06, 18UTC)	**27 km, 128 層** **51 メンバー** 264 時間予報：2 回/日 (00, 12UTC) 132 時間予報：2 回/日 ** (06, 18UTC)
メソモデル (MSM)	5 km, 76 層 39 時間予報：8 回/日 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC)	5 km, 76 層 39 時間予報：8 回/日 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC)	5 km, **96 層** **51 時間予報：2 回/日** **(00, 12UTC)** **39 時間予報：6 回/日** **(03, 06, 09, 15, 18, 21UTC)**
メソアンサンブル 予報システム (MEPS)	5 km, 76 層 11 メンバー 39 時間予報：1 回/日 (18UTC) 部内試験運用	5 km, 76 層 **21 メンバー** 39 時間予報：**4 回/日** **(00, 06, 12, 18UTC)** **本運用**	5 km, **96 層** **21 メンバー** 39 時間予報：**4 回/日** **(00, 06, 12, 18UTC)** **本運用**
局地モデル (LFM)	2 km, 58 層 9 時間予報：24 回/日	2 km, 58 層 **10 時間予報**：24 回/日	2 km, **76 層** **10 時間予報**：24 回/日
毎時大気解析	5 km, 48 層 24 回/日	5 km, 48 層 24 回/日	**2 km, 76 層** **48 回/日**
備考	* ここでは、台風情報及び週間天気予報への支援に関わる情報のみを記述した。 ** 全球アンサンブル予報システムの 06, 18UTC 初期時刻は 1 日 2 回を最大として、全般海上予報区（赤道～北緯 60 度、東経 100~180 度）内に台風が存在する、または同区内で 24 時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または、全般海上予報区外に最大風速 34 ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24 時間以内に予報円または暴風警戒域が同区内に入ると予想された場合に実行される。		

メソアンサンブル予報システム (MEPS) は MSM の予測に対して信頼度・不確実性等の情報を付加することを目的 (小野 2016) として、これまで部内試験運用を行ってきたが、NAPS10 において本運用を開始する。本原稿執筆時点（2017 年 9 月）では、部内試験運用として、1 日 1 回（18UTC 初期時刻）で 39 時間予報を 11 メンバーで実施している。その目的のため、MEPS のコントロールランは MSM と完全に同一とし、摂動ランの仕様（予報領域、水平格子間隔、鉛直層数、モデルのスキームやパラメータ等）をコントロールランと同一とし、初期値摂動のみが異なるものとしている。本運用では増強された計算機資源を活かして、現在の 1 日 1 回から 1 日 4 回 (00, 06, 12, 18UTC) と高頻度化するとともに、メンバー数を 21 とする予定である。これは計算機更新後 1 年後に導入を予定している。

その他の仕様向上として、精度向上に向けて MSM と LFM の鉛直層数を増強する。現在の MSM は 76 層であるところを 96 層に増強し、LFM の 58 層を 76 層とする。現時点では適切な鉛直層配置を検討しているところであるが、鉛直層数増強の狙いとして、MSM のモデルトップを上げること、最下層から 76 層までは MSM と LFM の鉛直層配置を一致させることを考えている。前者はデータ同化において、現在の MSM のモデルトップよりも高い高度に感度のあるチャンネルを持つ衛星データの有効活用を図るためである。後者については MSM と LFM の物理過程開発の効率化が理由として挙げられる。多くの物理過程は鉛直 1 次元で構成されており (原 2012)、鉛直 1 次元モデルによる

開発を重視している。しかし、鉛直層配置の違いが予測特性に大きな影響を及ぼすことが近年明らかになってきた。MSMと LFMでは多くの物理過程を共用しているため、両者の鉛直層配置が異なると開発が非効率である。そこで、鉛直層配置を同一とすることにより、鉛直 1 次元モデルによる開発成果を MSMと LFMの双方に反映させやすくなることをねらっている。また、鉛直層配置を同一とすることは、MSMから LFMに第一推定値や境界値を与える際の鉛直内挿に伴う誤差を軽減させることにもつながる。

毎時大気解析については水平格子間隔を 5 kmから 2 kmに、鉛直層数を 48 層から 76 層に、実行頻度を 1 日 24 回から 1 日 48 回にそれぞれ仕様を増強する予定である(NAPS10の運用期間の後半で実施予定)。

5.2.3 NAPS10での開発の方向性

本項では、NAPS10内での導入を検討している開発項目及び開発の方向性について紹介する。

(1) 数値予報モデル

物理過程の開発においては、各過程が相互に影響を及ぼし合うことや石田 (2017) で述べられている compensating errorsを考慮して、開発された複数の物理過程を組み合わせて実験・評価・議論を反復して全体をブラッシュアップしていく開発を実施している。また、力学過程の開発項目も同様に組み合わせの対象となる。このような開発手法は GSMにおいては米原 (2016) や第 1.1 節で、MSMにおいては第 2.1 節で述べられているように、気象庁において徐々に定着しつつあり、着実に成果を挙げている。この開発手法は他の現業数値予報センターでも実施され(例えば、英国気象局については氏家 (2017) を参照のこと)、成果を上げていることも踏まえて引き続き取り組んでいく。一方、複数の物理過程や力学過程の開発においては、単一の変更の効果と組み合わせた効果の全てに対して実験・評価・議論を行うことから、多くの計算機資源及び開発時間を要することとなり、計画的に開発を実施する必要がある。また、数値予報モデルの変更により予測特性が大きく変わることがあり、ガイダンスを含めた精度向上を達成するためには、ガイダンスで用いられる係数の再作成等のために長期間の実験が必要(第 5.3 節) となるが、そのためにも多くの時間を要する。そこで、例えば 1 年に 1 回の改良といった定期的な開発サイクルを構築することが必要と考えている。これにより、精度向上(及び場合によっては特性変化) が計画的に実施されることとなり、利用者にとっても有益であると考えられる。なるべく早期に確立させるべく、現時点では開発サイクルの構築に向けた検討を行っている段階である。

(2) データ同化

数値予報課ではデータ同化手法として主に変分法を用いている。ここでは、第一推定値(予測値) の持つ誤差(背景誤差) と観測値の持つ誤差(観測誤差) の双方を考慮して、その時点で得られるもっとも確からしい値として解析値を作成する。そこで、精度向上のためには背景誤差と観測誤差を適切に与えることが重要となる。現在の背景誤差は過去のある期間の予報モデルの誤差から統計的に求めている(これを気候学的背景誤差という)。しかし、背景誤差は本来は一定の値ではなく、その時々の場に依存した誤差(流れ依存の背景誤差) であることから、この情報を利用することによる精度向上が期待できる。流れ依存の背景誤差はアンサンブル予報を利用することにより見積もることが可能であり、さらにアンサンブルカルマンフィルタと呼ばれるデータ同化手法を用いると、解析予報サイクルにより流れ依存の背景誤差を引き継ぐことができる。そこで、この 2 つのデータ同化手法を組み合わせたハイブリッド同化の開発を進めている。これは、解析そのものは変分法を用い、背景誤差については気候学的誤差にアンサンブルカルマンフィルタによる流れ依存の背景誤差を付加する手法である。

流れ依存の背景誤差を求めるためにはアンサンブル予報が必要となるが、より精度良く誤差を見積もるためにはメンバー数が多い方が望ましい。一方、この目的のためにはそれほど長い予報時間は必要ではない。そこで、GEPS, MEPSとして確率的情報等を提供するアンサンブル予報とは別に、データ同化用に短い予報時間で多くのメンバーを利用したアンサンブル予報システムの構築を行うことを予定している。これは、非常に複雑なシステムとなることから多くの開発時間を要すると考えられ、計画的かつ着実に開発を進めることにより、なるべく早期の導入を目指す。

(3) 観測データの利用

初期値の精度向上のためには観測データの有効利用が重要であり、特に近年では衛星観測データの重要性が増している。今後も多くの新規衛星が打ち上げ・運用されると考えられることから、引き続き衛星の運用開始から観測データの入手及び数値予報での利用開始までの時間を短縮できるように幅広かつ早期に情報収集を行っていく。一方、既に利用している衛星データの利用方法の高度化も重要である。特に精度向上が得られる見込みが高いものとして、全天域での衛星輝度温度データ(現時点では晴天域のみで利用) が挙げられる。このデータの利用にあたっては、観測データの品質管理手法の開発のみならず、予報モデルのバイアス等をより軽減するための開発やデータ同化システムの変更も必要となる大きな課題であり、着実に開発を進めていきたい。また、高頻度・高密度観測データへの対応も重要である。現在のデータ同化手法では観測誤差

同士の相関がないことを仮定していることから、この誤差相関が無視できる程度に観測データを大きく間引く必要がある。そこで、このような制限を緩和する手法も可能な限り早期に導入を図っていく。また、GNSS視線遅延量や水蒸気ライダーといった水蒸気の情報が得られる観測への対応も将来的には進めていく必要がある。一方、高層観測や航空機観測といった従来型観測の重要性も依然として薄れてはいない。高層観測のように世界の各気象機関で運用している観測データは気象機関毎に品質や通報形式が異なりうることから、個別に丁寧な対応を行う必要がある。

5.2.4 最後に

本節では計算機更新後に予定している数値予報の仕様向上等と今後の開発の方向性について述べた。GSM及びLFMの予報時間の延長とこれまでに試験運用を行ってきたMEPSは早期に導入を図るとともに、水平分解能の高解像度化や鉛直層数の増強といった予測精度向上の見込まれる仕様向上については、その性能を最大限に引き出すべく開発を進めて導入を行いたい。数値予報モデルの各過程は相互に影響を及ぼし、また、データ同化の誤差（解析誤差）や数値予報モデルの誤差（予測誤差）は解析予報サイクルを通じて互いに影響を及ぼす。数値予報を構成するあらゆるコンポーネントにおいて、一つ一つの誤差は軽微であったとしても、それらが積み重なると大きな誤差となりうることから、第5.2.3項で述べた優先的な課題を念頭におきつつも、そうでない課題にも人的資源・計算機資源を割いて総合的に精度向上に努めていきたい。本節で示した開発課題の一部は気象研究所で開発が進められており、気象研究所等との連携もより一層進めていく必要がある。また、今日では数値予報は気象庁が発表する予報の根幹技術となっている。最終的に発表予報の精度向上につなげるためには、数値予報の精度向上がガイダンス等のアプリケーションの精度向上につながること及び利用者に特性を把握してもらうことが重要であり、引き続きそれらを念頭において開発を進めていきたい。

参考文献

石田純一, 2017: 数値予報システム開発のプロセス. 数値予報課報告・別冊第63号, 気象庁予報部, 4–10.

氏家将志, 2017: 英国気象局における全球モデルの開発プロセス. 数値予報課報告・別冊第63号, 気象庁予報部, 11–16.

越智健太, 石井憲介, 2013: 予報時間を39時間に延長したMSMの初期時刻別統計検証. 平成25年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14–17.

小野耕介, 2016: メソアンサンブル予報システムの開発状況. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 100–113.

原旅人, 2012: 理想実験による物理過程の評価. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 130–137.

原旅人, 2016: メソ数値予報システムの特性の変化. 平成28年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 30–35.

米原仁, 2016: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成28年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–3.

5.3 アプリケーション [1]

本節では、計算機更新後に予定しているガイダンスの改良計画に関して、数値予報モデルの改良への対応、アンサンブル予報等を利用したガイダンスの開発、新たなガイダンスの開発の各々について現時点で計画している事項について紹介する。

(1) 数値予報モデル改良への対応

第 5.2 節で述べたように、GSM 及び MSM（ MSM は 00, 12UTC 初期値のみ）の予報時間延長が計算機更新後速やかに実施される予定である。これらに対応し、GSM ガイダンスの予報時間を 84 時間から 132 時間まで、MSM ガイダンス（ 00, 12UTC 初期値）の予報時間を 39 時間から 51 時間まで延長する予定である。ガイダンスの予報時間延長の開発を進め、GSM 及び MSM の予報時間延長後なるべく早く対応する予定である。また、次期計算機では、GSM の水平･鉛直高解像度化、MSM の鉛直高解像度化等が予定されており、これらの変更に伴うガイダンスの精度への影響や特性の変化を調査し、必要に応じて事前学習や係数再作成等の対応を行う。特に GSM の水平高解像度化ではモデル標高や海陸分布が変化するため、特性が大きく変わる格子点があると考えられ、ガイダンスの対応を行う予定である。

(2) アンサンブル予報等を利用したガイダンスの開発

次期計算機では、メソアンサンブル予報システム (MEPS) が本運用開始となり、明日までの予報作業に初めてアンサンブル技術に基づく予測資料が登場することとなる。現在、数値予報課と予報課で MEPS の予報作業での利用方法を検討しており、ガイダンスについても降水量、降雪量、気温、発雷確率、風、視程、雲及び乱気流等のガイダンスを試験的に作成している。現時点で、気温や乱気流などの MEPS ガイダンス（ アンサンブル平均等）は MSM ガイダンスの精度を上回ることを確認している。また、MEPS ガイダンスによって予測信頼度の情報を取り出す調査も進めている。図 5.3.1 は、2016 年 11 月 24 日東京で初雪になった事例での MEPS 気温ガイダンスの例である。22 日 18UTC 初期値の MEPS 気温ガイダンスの予測からは、24 日はスプレッドが小さく、どのメンバも東京で 0 ℃程度になる予想をしており、雪となる可能性が高いことを示している。当事例のようにスプレッドと信頼度に良い関連性がある事例だけではないが、今後、予測の信頼度を示す有効な情報となり得る可能性がある。

また、各モデルのガイダンスを組み合わせた統合型ガイダンスの調査･開発を進める予定である。気温では、MEPS ガイダンスは MSM ガイダンスの精度を上回ることを述べたが、さらに GSM ガイダンスを加えて単に平均しただけでも精度が向上することを確認している。各ガイダンスの予測精度及び得意な気象パターンを考慮した高度な統合方法を開発できれば、現在のガイダンスの精度を大きく上回る可能性がある。ドイツや米国などでは既に統合型ガイダンスの開発を進めて運用を開始しており (Reichert et al. 2017; Ruth et al. 2017)、気象庁としても MEPS ガイダンスの運用に合わせて統合型ガイダンスの取り組みを進めていく必要がある。

(3) 新たなガイダンスの開発

ガイダンスは、予報業務の高度化及び予報現場の要望に応じ、継続的に新たな要素の提供を開始してきた。次期計算機でも、運用開始直後に LFM 降水量ガイダンスの提供を開始し、降水 15 時間予報（ 仮称）[2] 及び予報作業に利用される予定である。当ガイダンスは 1 時間毎の平均･最大降水量の予測を提供するが、平成 29 年 7 月九州北部豪雨では LFM の降水予測が MSM に比べてより実況に近かったことから、大雨時での当ガイダンスの有効利用が期待できる。また、LFM 風ガイダンスについても開発を進めており、具体的な提供時期は未定であるが、次期計算機で運用開始する予定である。これによって、局地風などの予測精度向上が期待できる。その他、48, 72 時間最大降水量ガイダンスなど、予報現場の要望に基づいた新たなガイダンスの開発も進める予定である。

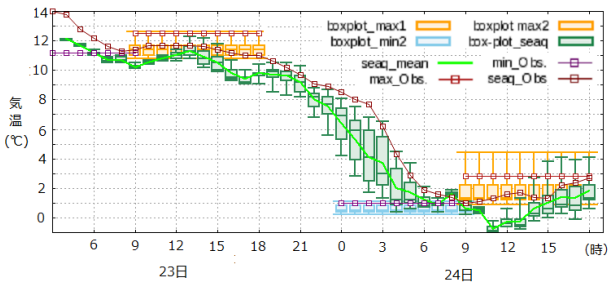

図 5.3.1 2016 年 11 月 22 日 18UTC 初期値の MEPS 気温ガイダンスの予測。11 メンバの時系列気温の予測を緑色の線及び箱ひげ図、日中の最高気温を橙色の線及び箱ひげ図、朝の最低気温を水色の線及び箱ひげ図で示している。それぞれ、線はアンサンブル平均、箱の下端は第 1 四分位、上端は第 3 四分位を示す。四角のマーカーを付加した細実線は実況値（ 時系列（ 茶色）、最高気温（ 赤色）、最低気温（ 紫色））を示す。

参考文献

Reichert, B., R. Hess, T. Hirsch, P. James, C. Lenhart, J. Paller, W. Raatz, T. Schleinzer, G. Schroder, and R. Thehos, 2017: The operational warning decision support system Au-

[1] 高田 伸一

[2] 平成 29 年度現在、降水短時間予報として 6 時間先までの 1 時間毎の詳細な降水量予測を提供しているが、平成 30 年度から 7 から 15 時間先をカバーする降水 15 時間予報（ 仮称）の提供を開始する予定である。

toWARN for forecasting and nowcasting severe weather at DWD. *EMS Annual Meeting : European Conference for Applied Meteorology and Climatology 2017, Dublin, Ireland*, **14, EMS2017-849**, http://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2017/EMS2017-849.pdf.

Ruth, D. P., D. T. Myrick, and M. Peroutka, 2017: Developing the National Blend of Models for National Weather Service operations. *97th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, WA.*, https://ams.confex.com/ams/97Annual/webprogram/Paper313249.html.

5.4 計算機（スーパーコンピュータシステム）[1]

5.4.1 更新の経緯

2017年現在運用中の第9世代スーパーコンピュータシステム（以下、NAPS[2]9）(西尾 2011)は、東日本大震災の影響などにより、運用開始予定の2012年3月から3か月延期し、2012年6月5日から運用を開始した。第10世代となる次期スーパーコンピュータシステム（以下、NAPS10）の検討はこの直後の2013年から始まった。検討の結果、機器を設置する清瀬第三庁舎[3]の電気設備の整備期間などを勘案し、NAPS9の運用期間を当初予定の5年間から1年延長し、2018年6月からNAPS10の運用を開始する予定である。2016年4月にNAPS10の供給業者が日立製作所に決定した。

5.4.2 次期スーパーコンピュータシステムの概要[4]

(1) 全体概要

次期スーパーコンピュータシステムは、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[5]、ストレージ等から構成されるシステムである（図5.4.1）。加えて、今回の更新に伴い、新規に数値予報ルーチンBCP業務を大阪管区気象台で実施する。また、現在別システムで整備されている、衛星データの集信処理を実施する静止気象衛星画像作成システム (GSS[6]; 浜田ほか 2016)も統合される予定である。このため、スーパーコンピュータシステムは気象庁本庁、清瀬庁舎に加えて大阪管区気象台にも機器を整備する。

主要な機器は、清瀬第三庁舎1階に設置され、気象庁本庁および大阪管区気象台とはWANで接続する。また、気象情報伝送処理システム（アデス）などの他システムとの接続用スイッチや運用監視端末などを清瀬第一庁舎や第二庁舎にも設置する。

NAPS9とNAPS10の大きな違いは、スーパーコンピュータおよび各課業務処理関係機器などのCPUがIntelアーキテクチャに統一されたことで、スーパーコンピュータシステム内でのプログラムの可搬性が向上したことである。

(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、同一機種の主系と副系で構成される。通常時は主系で数値予報ルーチンを実施し、副系では開発業務を実施する。主系がメンテナンスや障害の際には副系で数値予報ルーチンを継続する。数値予報ルーチンを実施する系（稼動系）で作成されるデータは、JG[7]の単位でもう一方の系の高速ストレージにコピーされ、稼動系の切り替えが発生しても速やかに数値予報ルーチンを再開可能である。なお、スーパーコンピュータを含めて全ての機器は無停電電源装置 (UPS)で保護されるが、商用電源停電時に発動発電機で電力が供給されるのは、スーパーコンピュータ本体以外全てと、スーパーコンピュータ主系の約4割のノード[8]である。

スーパーコンピュータ本体はCray社製のXC50であり、大きく分けると計算ノードとI/Oノード等からなる。

計算ノードは2816ノード（加えて16ノードの予備ノードがある）で構成され、それぞれはIntel Xeon Platinum 8160（2.1 GHz, 24コア）を2ソケットと96 GiB[9]のDDR4メモリを搭載する。理論演算性能は1ノードあたり3.2256 TFLOPS[10]、スーパーコンピュータ1台あたりでは9083 TFLOPSであり、NAPS9の404 TFLOPS（計算ノードのみ）と比べて約22倍の性能であるが、業務を行うプログラムを実行した時の性能（実効性能）は理論演算性能ほど向上しておらず、実効性能ではNAPS9の約10倍程度と評価している（表5.4.1）。

計算ノードは、ハードウェア的には同一だが、主に大規模な並列計算を実施する2741台のESM[11]ノードと1ノード内に閉じる計算を実施する75台のMAMU[12]ノードに分けられる[13]。

I/Oノード等で計算ノードと同じハードウェア構成のものは、計算ノードにプログラミング環境を提供するTier2ノードが8ノードある。

また、Intel Xeon E5-2699v4（2.2 GHz, 22コア）とDDR4メモリ128 GiBを搭載する以下のI/Oノード等がある。

---

[1] 栗原 茂久

[2] 数値解析予報システム (NAPS)という名称は、現在ではスーパーコンピュータシステムの正式名称では無いが、ここでは世代を明確に表現したいためこの名称を用いる。

[3] 清瀬庁舎は東京都清瀬市にあり、第一庁舎に気象衛星センターが、第二庁舎および第三庁舎に予報部システム運用室がある。

[4] ここで記載する内容は、2017年9月時点での情報であり、運用開始までに変更される場合がある。

[5] スーパーコンピュータシステムでルーチン業務を実施する機器（サーバ）のうち、スーパーコンピュータ、衛星データ処理関係機器を除いたもの。

[6] Geostationary meteorological Satellite image data reception and processing ground System

[7] 数値予報ルーチンではバッチジョブを投入する単位をJobと呼んでいる。Jobを業務単位（例えば全球予報）にまとめたものをJG (Job Group)と呼んでいる。

[8] 1つの基本ソフト (OS)が動作している演算ユニット (CPU)や主記憶装置の単位を言う。

[9] gibibyteの略。2^{30} (= 1024^3) Bを表す。一方GBはSI単位系では10^9 Bを表すため区別して記載している。同様にTiBは1024^4 Bを表す。

[10] FLoating-point Operations Per Secondの略。1秒間に実行出来る浮動小数点演算の数。ここで示している値は、倍精度浮動小数点演算の数である。

[11] Extreme Scalability Mode

[12] Multiple Applications Multiple User

[13] ESMノードとMAMUノードは変更可能であり、本文の値は2017年9月時点の暫定値である。

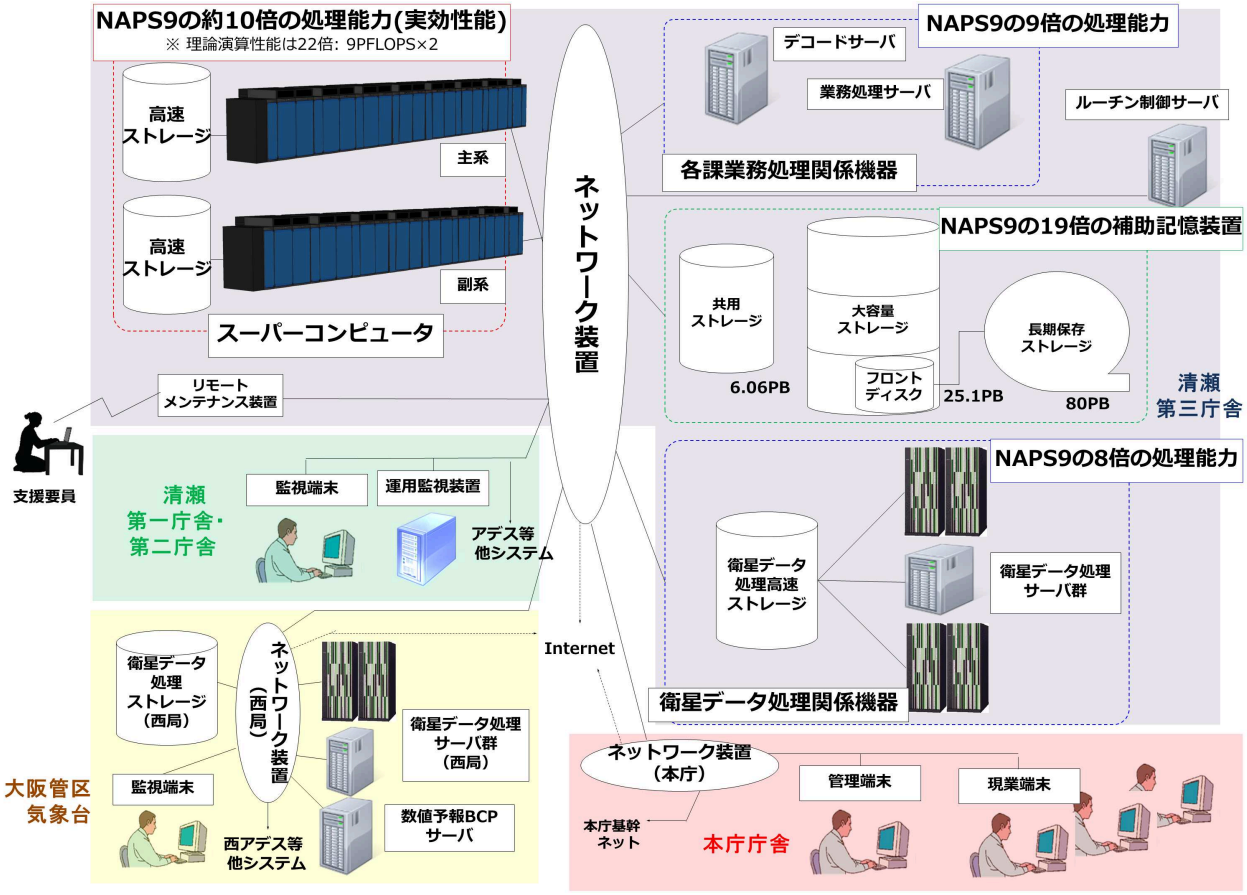

図 5.4.1 スーパーコンピュータシステムの機器概要

- SDB ノード（ 2 ノード）
  計算機資源の管理とバッチジョブのスケジューリングを行う PBS Professional のサーバが動作する。
- PBS_MOM ノード（ 4 ノード）
  ESM ノードで実行するバッチジョブのシェルスクリプト等を実行し、その中の並列計算プログラムを ESM ノードに割り当てる役割をする。
- ブートノード（ 2 ノード）
  スーパーコンピュータの各種ノードを起動する。
- ルータノード（ 2 ノード）
  スーパーコンピュータ内のノードと業務管理ネットワークを接続し、機器監視情報を運用監視装置に中継する。
- ネットワーク接続ノード（ 7 ノード）
  ストレージネットワークや清瀬幹線ネットワークに接続し、共用ストレージ、大容量ストレージとのデータのやり取りや他サーバとのデータコピーや転送のジョブを実施する。
- LNET ノード（ 15 ノード）
  高速ストレージと接続し、Lustre ファイルシステム [14] のサービスを各ノードに提供する。
- データ同期ノード（ 6 ノード）
  スーパーコンピュータ間ネットワークに接続し、主副のスーパーコンピュータやデコードサーバとのコピージョブを実施する。また、PBS_MOM ノードと同等の機能もある。
- ログインゲートウェイノード（ 2 ノード）
  ログインノードとスーパーコンピュータ内の他のノードとの通信を仲介する。また、PBS_MOM ノードと同等の機能もある。

これらのノードは、Aries[15] インターコネクトを用いて以下の階層構造で相互に接続される。

- ブレード　4 つのノードは 1 つのブレードに搭載され、同じ Aries ルータチップに接続される。
- シャーシ　16 枚のブレードで構成し、各ブレードの Aries ルータチップ間で直接接続される。
- グループ　6 つのシャーシは 2 つのキャビネットに収納され 1 つのグループを構成し、各シャーシの同じ位置にある Aries ルータチップと相互に接続される。
- システム　主系と副系のそれぞれのスーパーコンピュータは 8 つのグループで構成され相互に接続される。なお、8 番目のグループのみ 1 キャビネットで構成されている。

加えて、スーパーコンピュータのキャビネット筐体とは別に、Intel Xeon Gold 6148（ 2.4 GHz, 20 コア）

[14] オープンソースソフトウェアの並列ファイルシステム。メタデータサーバ (MDS) 、オブジェクトストレージサーバ (OSS) 、メタデーターゲット (MDT) 、オブジェクトストレージターゲット (OST) などから構成される。

[15] Cray XC シリーズのスーパーコンピュータで使用されているノード間の通信を行う半導体の名称。

表 5.4.1 新旧スーパーコンピュータの比較（ 1 台あたり ）

	NAPS9	NAPS10
機種名	日立 SR16000M1	Cray XC50
総理論演算性能（ 計算ノード のみ）	404 TFLOPS	9083 TFLOPS
総主記憶容量（ 計算ノード のみ）	51.5 TiB	264 TiB
ノード 数（ 計算ノード のみ）	412	2816
1 ノード 理論演算性能（ 計算ノード ）	980.48 GFLOPS	3225.6 GFLOPS
1 ノード 主記憶容量（ 計算ノード ）	128 GiB	96 GiB
CPU	IBM Power7 × 4 （ 3.83 GHz, 8 コア）	Intel Xeon Platinum 8160 × 2 （ 2.1 GHz, 24 コア）
OS	AIX 7	Cray Linux Environment
高速ストレージ容量	130 TB（ 主系） 210 TB（ 副系）	1.6 PB × 3（ 主副それぞれ）

を 2 ソケットと DDR4 メモリを 768 GiB 搭載するログインノードが 4 ノード配置される。ログインノードは清瀬幹線ネットワークやストレージネットワークに接続し、バッチジョブの起動やプログラムのコンパイル/リンクなどの端末処理を実施する。

ESM ノードの OS は Cray Linux Environment であり、不必要なプロセスを起動しないことで、ユーザのプログラムをより高速に実行させる。残りのノードの OS は一般的な SUSE Linux Enterprise Server である。

スーパーコンピュータはキャビネットあたりおよそ 100 kW の発熱がある。このために、キャビネットを連結し、端から端まで 15 キャビネットに送風することで冷却する。両端と 2 キャビネット毎に、暖められた風を冷却水で冷やすブロアキャビネットを配置して隣のキャビネットに送風している。

スーパーコンピュータの外部記憶装置として、主系、副系それぞれに実効容量 1.6 PB の高速ストレージが 3 台ずつ接続される。このストレージは DataDirect Networks (DDN) 社製の ES14KX Appliance 装置であり、Lustre ファイルシステムが使用されている。また、InfiniBand EDR (100 Gbps) でスーパーコンピュータの LNET ノードに接続され、それぞれのノードにマウントされる。

(3) 各課業務処理関係機器

各課業務処理関係機器は、業務処理サーバ（ HA 構成[16]、クラスタ構成）、デコードサーバ、数値予報 BCP サーバからなる。

業務処理サーバ（ HA 構成）は、2 台 1 組の HA 構成のサーバ 2 組で構成され、cron の起動処理やルーチン管理システム（ RENS; 河野 2017）の処理を行う。それぞれのサーバは 2 個の CPU（ Intel Xeon E5-2603v3 1.6 GHz, 6 コア）と 64 GiB のメモリを搭載する。

業務処理サーバ（ クラスタ構成）は、4 個の CPU（ Intel Xeon E7-8880v3 2.3 GHz, 18 コア）と 128 GiB のメモリを搭載したサーバ 12 台から構成され、各課ルーチンなどのバッチ処理やユーザのログイン環境を提供する。

デコードサーバは 2 台 1 組の HA 構成のサーバであり、アデスやインターネットからの観測データ取得やそのデータのデコード処理を行う。それぞれのサーバは 4 個の CPU（ Intel Xeon E7-8860v3 2.2 GHz, 16 コア）と 256 GiB のメモリを搭載する。それぞれのサーバには、独立した 20.7 TB の実効容量[17] を持つデコードデータストレージが接続される。

数値予報 BCP サーバは、大阪管区気象台に整備される 2 台 1 組の HA 構成のサーバであり、常時、米国環境予測センター (NCEP) から GPV データを取得し、FAX 図やガイダンスなどのプロダクトを作成する。清瀬庁舎が被災した場合に、通常清瀬庁舎で作成されるプロダクトの代わりにアデスなどに配信する。それぞれのサーバは 2 個の CPU（ Intel Xeon E5-2680v3 2.5 GHz, 12 コア）と 256 GiB のメモリを搭載する。稼動系のサーバには、20.7 TB の実効容量を持つ BCP 共有ストレージが接続される。

(4) 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のデータを共有するため、以下のストレージがある。

共用ストレージは、数値予報ルーチン、衛星ルーチンの計算結果の格納やユーザのホーム領域として利用する。ファイルシステムは ISS[18] であり、実効容量は 6 PB である。

大容量ストレージは、数値予報ルーチン、衛星ルーチンの長期保存と開発業務で利用し、3 式で構成している。ファイルシステムは ISS であり、それぞれの実効容量は大容量ストレージ 1 が 6 PB、大容量ストレー

[16] High Availability（ 高可用性）構成の略。サービスの停止をより少なくすることを考慮した構成のこと。

[17] ストレージに 1 つまたは複数のファイルシステムを構築し、df コマンドで表示される該当各ファイルシステムの利用可能ブロック数の総計をバイト単位に換算した値。

[18] IBM Spectrum Scale の略。以前は GPFS (General Parallel File System) とも呼ばれていた。

ジ 2 が 3 PB、大容量ストレージ 3 が 16 PB である。このうち、大容量ストレージ 3 は長期保存ストレージのフロントディスク [19] として働き、アクセス頻度が低いデータは長期保存ストレージに保存後、大容量ストレージ 3 から削除される。

長期保存ストレージは、およそ 8000 巻のテープを収納し、18 台のドライブでデータの読み書きを行う。格納容量はテープ 1 本あたり非圧縮で 10 TB、全体で 80 PB である。

(5) 衛星データ処理関係機器

衛星データ処理関係機器は、気象衛星ひまわり運用事業株式会社（ HOPE[20]; 佐々木 2016）からデータを受信する衛星データ受信サーバ、衛星画像を作成する衛星画像作成サーバ、衛星プロダクト作成サーバ、通報局データ編集サーバ等からなる。このうち衛星プロダクト作成サーバ以外は、清瀬庁舎と大阪管区気象台両方に整備される。ここでは、それぞれのサーバの詳細は省略する。

(6) ネットワーク

NAPS10 では目的別に多数のネットワークが存在する。以下に主要なものを示す。

- 清瀬幹線ネットワーク スーパーコンピュータシステム内の各機器を接続するとともに、アデスなど庁内の他システムとの接続を行う。
- ストレージネットワーク スーパーコンピュータ、一部の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および大容量ストレージを接続する。ストレージネットワークは NAPS9 の Ethernet (1–10 Gbps) から InfiniBand EDR (100 Gbps) を用いた接続に変更されており、従来よりも数十倍高速に接続される。
- スーパーコンピュータ間ネットワーク Ethernet (40 Gbps) で構成され、主系および副系のデータ同期ノードとデコードサーバを接続しデータのコピーを行う。
- WAN 本庁 – 清瀬間は、ルーチンで利用する 2 系統の帯域保証型の WAN (100 Mbps) と主に開発業務で利用するベストエフォート型の WAN (1 Gbps) で接続される。また、清瀬 – 大阪間にも 2 系統の帯域保証型の WAN (100 Mbps) を設置する。

ほぼ全てのネットワーク機器は二重化構成になっており、1 台の機器が故障しても業務には影響を与えないように設計されている。

(7) その他機器

数値予報ルーチン、各課ルーチン、衛星ルーチンを実施するために、ジョブのスケジューリングを行う 2 台 1 組の HA 構成のサーバが 8 組整備され、うち衛星ルーチンを行う 4 組のサーバ以外は、気象庁内製のジョブフロー制御ソフトウェア（ ROSE; 河野 2017）が搭載される。その他、運用監視装置、リモートメンテナンス装置、運用者や現業者向けの端末などがある。

5.4.3 数値予報ルーチンの制御方法の変更

2017 年現在、数値予報ルーチンでは 1 日におよそ 750 個の JG と 2 万個の Job を実行している。NAPS9 ではこの運用制御には供給業者が作成した、数値予報ルーチン業務運用支援ソフトウェア (JNOS[21]) が利用されている。JNOS はシステム更新のたびに作成していたが、製作コストや、工程遅延による更新スケジュールへの影響が懸念され、運用を開始すると仕様変更が困難であった。このため NAPS10 の数値予報ルーチンおよび各課ルーチンでは、ROSE を使ってジョブのスケジューリングを実施する [22]。ROSE は、スーパーコンピュータ等に搭載されるバッチ処理ソフトウェア (PBS Professional) と連携し、ジョブを決められた時刻に順序に従い実行させる。また、予め数値予報ルーチンの実行に必要なノードを計算し、開発ジョブの投入を制限する機能（ ノードスケジューラ）も併せて内製した。

5.4.4 課題

近年、スーパーコンピュータの消費電力は増大している。NAPS10 の定格消費電力は、主副のスーパーコンピュータだけで 4009 kVA（ 高速ストレージを含めると 4107 kVA であり、清瀬第三庁舎に設置される NAPS10 全体で 4379 kVA である。）で、NAPS9 の 1898 kVA（ 高速ストレージを含めると 1969 kVA）に比べて、倍以上の値になっている。消費電力の増大に伴い、電源および冷却のインフラ工事費や電気代も増大しており、これ以上の消費電力増加は困難なものになっている。次々世代のスーパーコンピュータシステムに向けて、電力効率が良いアーキテクチャや冷却方法の検討が必要であろう。

参考文献

河野正和, 2017: 活用例 (6)–システム管理. 数値予報課報告・別冊 63 号, 気象庁予報部, 59–61.

佐々木政幸, 2016: HOPE 地上システム. 気象衛星センター技術報告特別号, 気象衛星センター, 17–24.

西尾利一, 2011: 計算機 (スーパーコンピュータシステム). 平成 23 年度数値予報研修テキスト , 気象庁予報部, 68–70.

浜田浩, 柴卓, 木村裕之, 2016: 静止気象衛星画像作成システム. 気象衛星センター技術報告特別号, 気象衛星センター, 25–35.

[19] 階層型ストレージで、よりユーザ側に近いストレージ。キャッシュ的なもの。

[20] Himawari OPeration Enterprise corporation

[21] JMA Nwp Operating System

[22] 衛星ルーチンは ROSE で制御を行わず、日立製の JP1/AJS3 を使う。