

1. はじめに

1.1. 目的

文部科学省においては、多様な利用者のニーズに応える革新的な計算環境として、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（以下「HPCI」という）を構築するとともに、スーパーコンピュータスーパーコンピュータを利用した研究開発や社会課題への対応を推進してきた。現在、生成AIの技術革新をはじめとする計算資源の需要は大きく変化しており、今後HPCIのさらなる高度化が検討されている。

本業務では、国際的なスーパーコンピュータを利用した研究開発の潮流を調査するため、「スーパーコンピュータ整備や利用推進に係る国際情勢等に係る調査業務」として、主要国のスーパーコンピュータを運用する計算科学分野の研究開発機関（以下「スーパーコンピュータセンター」という）の運営状況、スーパーコンピュータ開発の動向、アプリケーションの潮流、スーパーコンピュータを利用した研究開発への支援の状況等を調査し、今後のスーパーコンピュータを利用した研究開発の振興方策等の検討に活用できる情報を提供する。

1.2. 調査項目

本節における①～⑤は、文部科学省の仕様書における以下の項目に該当する。

- ① 主要国の代表的なスーパーコンピュータセンターに係る調査
- ② 主要国のフラッグシップスーパーコンピュータに係る調査
- ③ 主要国の加速部対応に関する調査
- ④ 国際的なスーパーコンピュータを利用した研究開発への公的機関の支援に係る調査
- ⑤ 各分野での代表的なアプリケーションと、利用課題ごとの規模感

仕様書に示された項目①～⑤に基づき、以下の二つの視点で成果の目標を設定する。前者は「技術的要素」に関する情報、後者は「運営および支援の仕組み」に関する情報である。この二つの視点から、項目①～⑤の調査内容を総合的に分析し、最終的に「スーパーコンピュータを活用した研究開発の振興策」に資する実用的な情報を提供する。

1.3. 調査方法

本業務における調査方法は、文献調査およびヒアリングを通じて実施し、以下の具体的な手法を活用した。

- ・ 文献調査
 - 文献および文献データベース検索による情報収集を実施した。
 - WEB調査を通じて最新情報を収集した。
- ・ ヒアリングおよび関連調査

- 欧米等のスーパーコンピュータセンターに対して 3 件のヒアリング、および、1 件のヒアリングと同等の内容に対する回答より情報を得た。
- SC24 へのオンライン参加から得た情報を報告書に反映させた。

なお、文献データベース検索には国立研究開発法人科学技術振興機構が国内外の技術文献をもとに作成している「JDreamⅢ」を利用した。

1.4. 本書の構成

本書は、主要国のスーパーコンピュータセンターおよびフラッグシップスーパーコンピュータに関する調査結果をまとめたものである。第 1 章では、本調査の目的、調査項目、方法を示し、本書の全体構成を概説する。第 2 章では、欧米およびアジアの主要スーパーコンピュータセンターの概要を整理し、各施設の特徴を比較する。第 3 章では、主要国のフラッグシップスーパーコンピュータの概要を紹介し、TOP500 ランキングの推移や最新の動向を分析する。第 4 章では、加速部の技術動向を調査し、GPU の導入状況や今後の市場予測を示す。第 5 章では、公的機関によるスーパーコンピュータの支援策を整理し、各国の HPC 戦略を比較する。第 6 章では、代表的なアプリケーションを紹介し、それぞれの利用規模や課題を明確にする。最後に、第 7 章では本調査の結論を述べた。

2. 主要国の代表的なスーパーコンピュータセンターに係る調査

2.1. 調査内容

国際的なスーパーコンピュータを用いた先進的な研究開発を実施しているスーパーコンピュータセンターについて、その組織体制や人員、予算規模、所有および設置予定のスーパーコンピュータのシステム構成、主な研究開発内容などを調査する。また、国内のスーパーコンピュータセンターと比較し、考察を行う。調査は主に文献調査を通じて実施した。

調査対象として、米国、中国、欧州の代表的なスーパーコンピュータセンターを以下に示す。米国では、DOE の予算を基に国立研究所に設置された複数のスーパーコンピュータセンターが存在し、ORNL、LLNL、ANL、LANL、LBNL、SNL などが該当する。さらに、TACC、NASA エイムズ研究センター、PPPL、SDSC、PNNL についても調査を行った。

欧州では、EU 主導の EuroHPC プロジェクトにより HPC インフラの強化が進行中である。本プロジェクトを中心に、BSC、JSC、GENCI、CSCS、HLRS、LRZ、CEA、EPCC、CSC、PSNC、CINECA、SURFなどを調査した。

中国においては、情報が限定的であるものの、National Supercomputing Center について、公開された文献を通じて調査を行った。また、オーストラリアやシンガポールのスーパーコンピュータセンターについても、調査対象とした。

2.2. 調査対象としたスーパーコンピュータセンター

次の表のスーパーコンピュータセンターを調査対象とした。米国、中国、欧州、オーストラリア、シンガポールを含む約 30 のスーパーコンピュータセンターに対する文献調査を実施する。これらのセンターを中心に、ハードウェア、運用されているアプリケーション、運用体制に関する情報を収集し、情報の整理・分析を行った。

表 2.1 調査対象としたスーパーコンピュータセンター

地域	国名	英文名または仏文名	略称	上部組織
EU	フィンランド	IT Center for Science Ltd.	CSC	
	スペイン	Barcelona Supercomputing Center	BSC	
	ドイツ	High-Performance Computing Center Stuttgart	HLRS	
	ドイツ	Jülich Supercomputing Centre	JSC	
	ドイツ	Leibniz Supercomputing Centre	LRZ	
	フランス	Très Grand Centre de Calcul du CEA	TGCC	CEA
	フランス	Grand Equipement National de Calcul Intensif	GENCI	
	イタリア	Interuniversity Consortium for Automatic Computing in North East Italy	CINECA	
	オランダ	SURF cooperative	SURF	
	ポーランド	Poznan Supercomputing and Networking Center	PSNC	
欧州 (EU 以外)	英国	Edinburgh Parallel Computing Centre	EPCC	
	スイス	Swiss National Supercomputing Centre	CSCS	
米国	米国	Argonne National Laboratory	ALCF	ANL
	米国	Oak Ridge Leadership Computing Facility	OLCF	ORNL
	米国	Los Alamos National Laboratory	LANL	
	米国	Lawrence Livermore National Laboratory	LLNL	
	米国	Sandia National Laboratories	SNL	

	米国	High-End Computing Capability	HECC	NASA-AMES
	米国	Pacific Northwest National Laboratory	PNNL	
	米国	National Energy Research Scientific Computing Center	NERSC	LBNL
	米国	Princeton Plasma Physics Laboratory	PPPL	
	米国	San Diego Supercomputer Center	SDSC	UCSD
	米国	Texas Advanced Computing Center	TACC	UT Austin
	米国	Pittsburgh Supercomputing Center	PSC	CMU, Pitt
アジア太平洋	オーストラリア	Pawsey Supercomputing Centre	Pawsey	
	オーストラリア	National Computational Infrastructure	NCI	
	シンガポール	National Supercomputing Centre	NSCC	
	シンガポール	A*STAR Computational Resource Centre	ASTAR	
	中国	NSCC National SuperComputer Center in Tianjin	天津	
	中国	National Supercomputing Center in Shenzhen	深圳	
	中国	National Supercomputing Center in Changsha	長沙	
	中国	National Supercomputing Center in Guangzhou	広州	
	中国	National Supercomputing Center in Jinan	済南	
	中国	National Supercomputing Center in Wuxi	無錫	
	中国	National Supercomputing Center in Zhengzhou	鄭州	

2.3. 欧州のスーパーコンピュータセンター一覧

本節では、下記のスーパーコンピュータセンターに関する情報をまとめた。

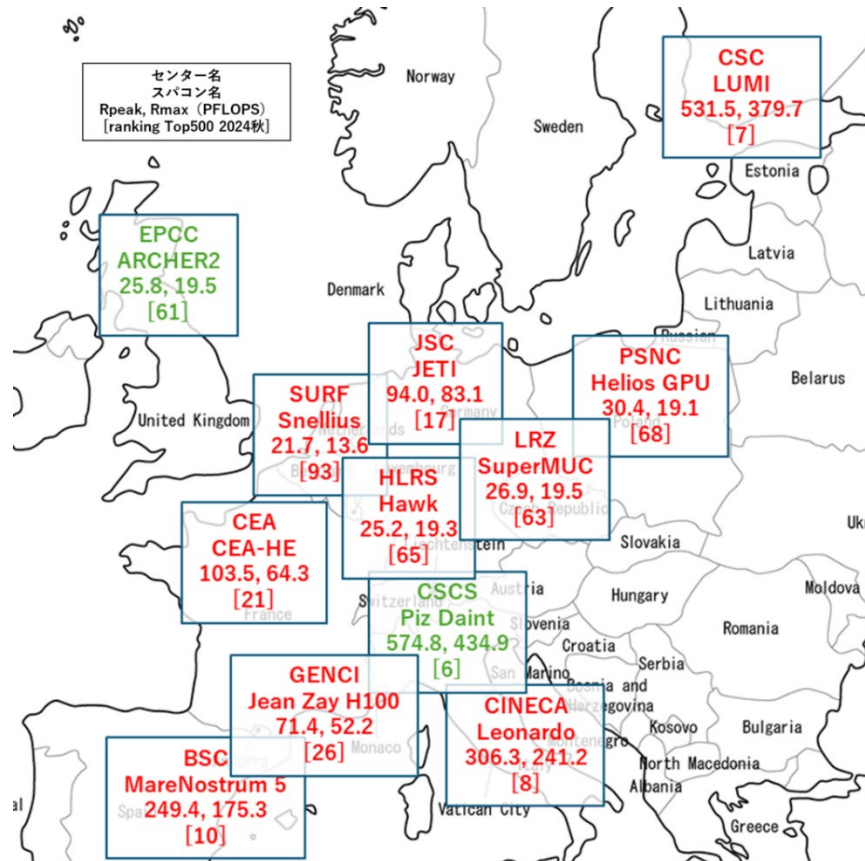


図 2.1 調査した 欧州のスーパーコンピュータセンター（赤字：EU、緑字：EU 以外）

- ・ IT Center for Science Ltd.(フィンランド)
- ・ Barcelona Supercomputing Center(スペイン)
- ・ High-Performance Computing Center Stuttgart(ドイツ)
- ・ Jülich Supercomputing Centre(ドイツ)
- ・ Leibniz Supercomputing Centre(ドイツ)
- ・ Très Grand Centre de Calcul du CEA(フランス)
- ・ Grand Equipement National de Calcul Intensif(フランス)
- ・ Interuniversity Consortium for Automatic Computing in North East Italy(イタリア)
- ・ SURF cooperative(オランダ)
- ・ Poznan Supercomputing and Networking Center(ポーランド)
- ・ Edinburgh Parallel Computing Centre(英国)
- ・ Swiss National Supercomputing Centre(スイス)

2.3.1. CSC (フィンランド)

本節は、CSC: IT Center for Science and Open OnDemand Sebastian von Althaus SC23, および The EuroHPC Flagship Supercomputer of the North, CSC – IT Center for Science, Finland を情報源としている。

※ CSC は、元々のフィンランド語の名称 "Tieteen tietotekniikan keskus" から来ており、直訳すると "Science's Information Technology Center" という意味になる。このフィンランド語名称を英語に直訳し、さらに略称にしたものが CSC (Center for Science and Computing) である。

<https://csc.fi/en/>

(1) 組織体制・人員

CSC-IT センター (CSC - IT Center for Science Ltd., フィンランド語では CSC - Tieteen tietotekniikan keskus Oy) はフィンランド政府とフィンランドの高等教育機関によって所有される非営利組織である。CSC は、国際的な EuroHPC 共同事業の一環として、LUMI スーパーコンピュータを運営しており、これは欧州全体の科学者や産業、公共機関に計算資源を提供することを目的としている。組織体制は、科学技術のディレクターを中心に、HPC、人工知能 (AI)、データ解析、量子計算といった専門分野に特化したチームが配置されている。さらに、Puhti や Mahti といった他の国家スーパーコンピュータも運用し、ユーザーの利便性を向上させるため、Web インターフェースを通じたアクセスも提供している。また、LUMI Consortium という 10 カ国から成る独自のコンソーシアムを組織し、資源の配分と運用を行っている。

(2) 予算

予算については、EuroHPC と LUMI コンソーシアムの投資を基に運営されている。LUMI の予算の 50% は EuroHPC からの資金で賄われ、残りは参加国の投資によって支えられている。また、これらの資金は、HPC インフラの拡充やデータ解析の強化、再生可能エネルギーの利用に関する技術開発に重点的に使用されている。特に、LUMI データセンターは 100% 水力発電による電力供給と、廃熱の再利用による CO2 削減を達成しており、持続可能な運営がなされている。

※ [2020 年 5 月 20 日 HPCwire より抜粋] LUMI スーパーコンピュータは、欧州連合の EuroHPC と 9 つの欧州諸国の共同プロジェクトであり、投資額は合計で約 200M ユーロ (320 億円) に上る。資金の半分は欧州連合から、残りの半分は参加国から提供されている。データセンターの建設は、欧州連合の欧州地域開発基金とカインー地域評議会からも支援を受けている。

※ [2022 年 11 月 15 日 HPCwire より抜粋] Lumi は、100% 再生可能エネルギー (水力発

電)を使用したグリーンデータセンターであることが特徴である。その廃熱は、ホストタウンが年間に必要とする地域暖房の約 20%に利用され、その結果、年間 13,500 トンの CO2 換算によるネットマイナスカーボンフットプリントを実現している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、HPE Cray EX を基盤とした LUMI が中核である。LUMI は、GPU パーティション (LUMI-G)、CPU パーティション (LUMI-C)、データ解析用のインタラクティブパーティション (LUMI-D)、加速ストレージ (LUMI-F)、オブジェクトストレージ (LUMI-O)、量子計算用パーティション (LUMI-Q) など、細かく分かれたモジュール構成を採用している。特に、AMD Instinct MI250X GPU を 10,240 基搭載し、309PFlops の HPL 性能を持ち、世界でもトップクラスの処理能力を誇る。また、量子コンピューティングや AI、データ解析をシームレスに統合できる HPE Slingshot 技術を用いている。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、多岐にわたる分野にわたっている。気候研究では、より精緻な気候モデルの構築やデジタルツインの開発が進行中である。また、ライフサイエンス分野では、タンパク質の機能解析や分子動態のシミュレーションが行われている。さらに、材料科学では、エネルギー効率の高い材料や太陽電池、触媒材料の開発に向けた量子力学的シミュレーションが進められている。社会科学や人文科学の分野でも、自然言語処理や大規模データ解析を活用した社会現象のモデリングが実施されている。これらの研究は、LUMI の強大な計算能力を駆使し、欧州の科学技術力の向上と社会課題の解決に寄与している。

LUMI, the most powerful supercomputer in Europe

processed computing time requests for **25** research projects in 2024

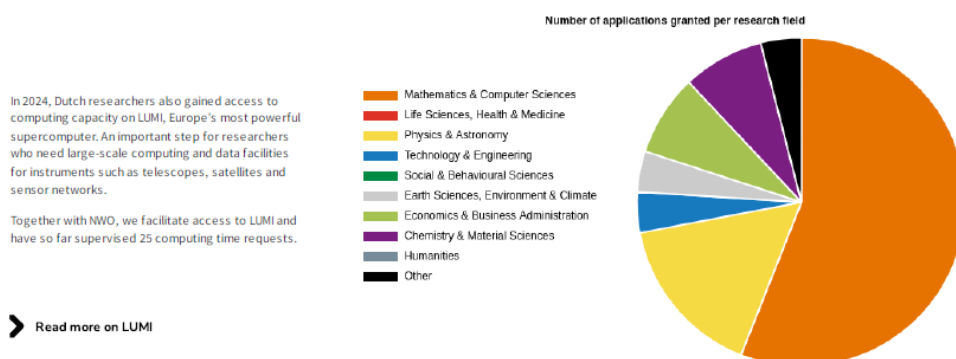


図 2.2 LUMI の利用分野 (「2024 年のスーパーコンピューティング: オランダの研究を牽引する Snellius と LUMI」より) ※この図のみ、出典は SURF in 2024

2.3.2. BSC (スペイン)

本節は、Barcelona Supercomputing Center Centro Nacional de Supercomputacion SUMMARY 2023 を情報源としている。

※ BSC は、スペイン全土のスーパーコンピュータセンターを結ぶネットワーク Red Española de Supercomputación (RES) の中心的役割を担っている。RES を利用して、BSC は、Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) などの地域スーパーコンピューティングセンターや、カナリア諸島の Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) とも協力し天体物理学や宇宙研究のための大規模データ解析を支援し、アラゴン州の Universidad de Zaragoza (UNIZAR) もエネルギーやバイオサイエンスなどの分野で連携して計算科学研究を行っている。

<https://www.bsc.es/>

(1) 組織体制・人員

バルセロナ・スーパーコンピューティング・センター (BSC) は、スペイン政府、カタルーニャ自治政府、バルセロナ工科大学 (UPC) の共同出資によって運営される研究機関である。BSC の組織体制は、施設長を頂点とし、コンピュータサイエンス、ライフサイエンス、地球科学、応用科学などの専門分野ごとに分かれた研究部門で構成されている。また、職員は 1,000 人以上に達し、そのうちの 40%以上が外国籍であり、国際色豊かな環境が特徴である。ジェンダーの平等にも力を入れており、女性研究者の比率を高めるための取り組みも進められている。

(2) 予算

予算については、スペイン政府と EU のフレームワークプログラムからの助成金を主な財源とし、2023 年には予算規模が 100M ユーロ (160 億円) を超えた。特に、欧州 HPC エコシステムの中核として、EU のフラッグシッププロジェクトへの積極的な参加が目立ち、Horizon Europe や EuroHPC などからの資金調達が行われている。また、産業界との共同研究も重要な財源となっており、企業との連携によって応用研究の拡大と資金の多様化が図られている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、MareNostrum シリーズが中心であり、現在は MareNostrum 4 が稼働中である。このシステムは、Intel Xeon プロセッサと NVIDIA GPU を搭載し、13.7PFlops の処理能力を誇る。また、次世代システムである MareNostrum 5 は、200PFlops を超える性能を目指して開発が進んでおり、エネルギー効率や冷却技術の面でも大幅な改善が図られている。さらに、量子コンピューティングや AI

アクセラレータを統合したハイブリッドアーキテクチャを採用し、多様なワークロードに対応できる柔軟な構成が特徴である。

(4) 研究開発内容

研究開発内容は、気候変動の予測、バイオ医薬品の開発、エネルギー効率の最適化など、多岐にわたる。特に、気候モデルの高度化や新薬開発に向けた分子シミュレーション、再生可能エネルギーの効率化技術に注力している。また、AI と HPC を組み合わせた大規模データ解析による病理診断や自動運転技術の研究も進行中である。さらに、欧州全域の研究機関との連携を強化し、オープンサイエンスの推進や共通データ基盤の構築にも積極的に取り組んでいる。これにより、BSC は欧州におけるスーパーコンピューティングのハブとしての地位を確立し、科学技術の最前線で重要な役割を果たしている。

Multidisciplinarity

The subject area chart is based on the Scopus All Subject Journal Classification (ASJC); a publication may appear in more than one subject area. Therefore, if you add up the percentages in the pie or doughnut charts, they will add up to more than 100%.

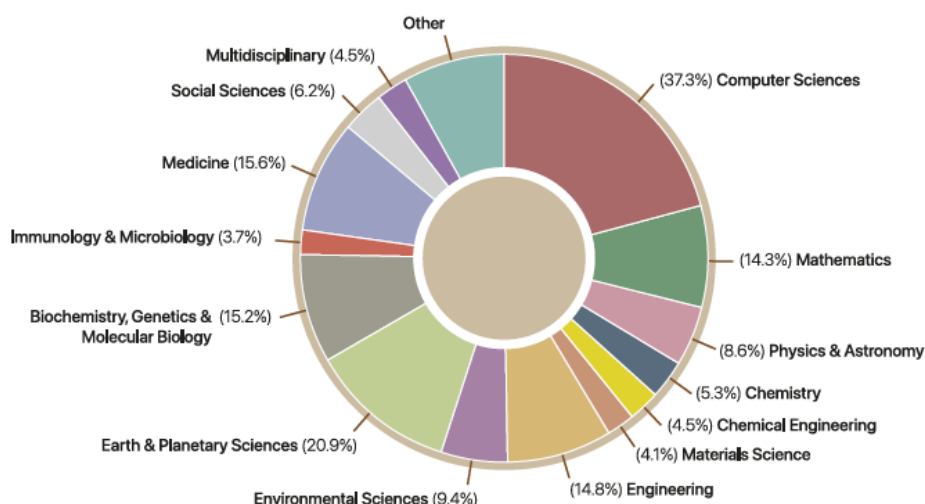


図 2.3 BSC で利用されているアプリケーション分類

2.3.3. HLRS (ドイツ)

本節は、HLRS ANNUAL REPORT 2023 を情報源としている。

※ HLRS の正式名称は High-Performance Computing Center Stuttgart (ドイツ語では Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart) である。HLRS という略称は、ドイツ語の正式名称の頭文字を取ったものであり、直訳すると「シュトゥットガルト高性能計算センター」を意味する。

<https://www.hlrs.de/>

(1) 組織体制・人員

ハイパフォーマンスコンピューティングセンター・シュトゥットガルト（HLRS）は、1996年にドイツ初の国立 HPC センターとして設立され、シュトゥットガルト大学に所属している。HLRS は、学術および産業分野のユーザーに計算資源を提供し、Gauss Centre for Supercomputing（GCS：GCS については、後述する 2.3.13 節を参照のこと）の創設メンバーでもある。組織体制は、施設長を頂点に HPC、AI、データ解析、量子計算などの専門分野ごとの研究チームで構成されている。また、HLRS はヨーロッパ全域の HPC ネットワークを支える役割も果たしており、EuroHPC のプロジェクトにも積極的に参画している。2023年には130以上の研究プロジェクトを支援し、その成果は国際的な会議や出版物で発表されている。

(2) 予算

予算については、ドイツ連邦教育・研究省（BMBF）およびバーデン＝ヴュルテンベルク州の科学・研究・芸術省からの助成金を主な財源としている。2023年には、次世代スーパーコンピュータ「Hunter」と「Herder」の導入に向けて115Mユーロ（184億円）の予算が確保された。これらの費用は、GCSを通じて50%ずつ分担されている。また、HLRSは産業界との共同研究や外部資金プロジェクトを通じて資金の多様化を図っており、2023年には産業向けの利用が約3億コア時間に達した。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、現在稼働中の「Hawk」を中心に、2025年に導入予定の「Hunter」と2027年に稼働予定のエクサスケールシステム「Herder」によって強化される予定である。HunterはHPE Cray EX4000を基盤に、AMDのAPU（CPUとGPUを統合した加速処理ユニット）を搭載し、39PFlopsの性能を誇る。Herderはエクサスケール級の性能を持ち、1エクサフロップス以上の処理能力を実現する予定である。これらのシステムは、HPC、AI、データ解析の複合的なワークロードに対応できる設計となっている。また、エネルギー効率にも配慮されており、HunterはHawkに比べて最大80%の電力削減が可能である。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、気候変動予測、バイオ医薬品の開発、エネルギー効率の向上など、幅広い分野にわたっている。特に、CIRCEプロジェクトでは、デジタルツインを用いて洪水リスクの予測や危機管理を支援している。また、CASE4Medプロジェクトでは、HPCとAIを組み合わせた医療ソリューションセンターの設立が進行中である。さらに、AIとHPCの融合によるデータ解析手法が強化されており、AIを活用したリアルタイムのデー

タ処理や物理ベースの機械学習手法も積極的に研究されている。これらの取り組みを通じて、HLRS はエクサスケール時代の HPC 技術の先駆者としての地位を確立している。

System Usage by Scientific Discipline

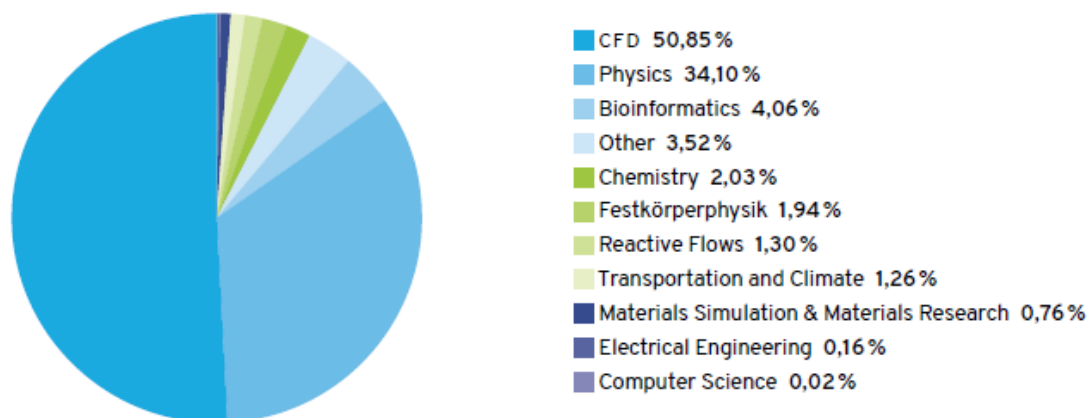


図 2.4 HLRS で利用されているアプリケーション分類

2.3.4. JSC (ドイツ)

本節は、JÜLICH SUPERCOMPUTING CENTRE (JSC) INTRODUCTION, NOV 11, 2024 を情報源としている。

※ JSC の正式名称は Jülich Supercomputing Centre (ドイツ語では Jülich Supercomputing Centre am Forschungszentrum Jülich) である。

※ Forschungszentrum Jülich (ユーリッヒ研究センター) の中に、IAS (Institute for Advanced Simulation) があり、その中の組織として JSC (Jülich Supercomputing Centre)がある。IAS の研究分野は、スーパーコンピューティング (JSC)、材料シミュレーション、バイオシステムとシミュレーション、理論ナノエレクトロニクス、プラズマ物理と核融合、シミュレーション科学の方法論等である。

<https://www.fz-juelich.de/en/ias/jsc>

(1) 組織体制・人員

JSC は、GCS の一員として、ドイツ国内および欧州の研究者に計算資源を提供している。組織は、運用、HPC 研究開発、サービス、トレーニングを担当する 600 人以上の職員で構成されている。また、John von Neumann Institute for Computing (NIC) が計算資源の割り当てを評価し、独立した科学委員会によって CPU 時間が分配される。JSC は、教育や訓練プログラムを通じて人材育成にも力を入れている。

(2) 予算

JSC の予算は、ドイツ政府および EU の資金提供により支えられている。2024 年度には、JUWELS や JURECA-DC などのシステムに対して、CPU および GPU 時間の割り当てが行われた。JUWELS においては、Earth System scientists 向けに ESM パーティションが 20%、AI 向けに HAICORE※1 および HDAI※2 が 2.5% 割り当てられている。また、GCS プロジェクトや EU プロジェクトへの支援も行われており、資源の 80% 以上がプロジェクトに配分されている。

※1 : HAICORE (Helmholtz AI Computing Resources) は、ドイツの最大の研究機構の一つである Helmholtz 協会 (Helmholtz Association) が推進する AI 向け HPC リソースの構築プロジェクトである。AI 研究や応用を加速するため、Helmholtz センターにおける HPC リソースを AI 用に拡張する。

※2 : HDAI (Helmholtz Data Federation for Artificial Intelligence) は、Helmholtz 協会による AI 研究のための分散データ基盤を整備するプロジェクトである。AI モデルの訓練や解析に必要な巨大かつ多様なデータを分野横断的に共有・活用する。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

JSC は、JUWELS と JURECA-DC という二つの主要なスーパーコンピュータシステムを運用している。JUWELS は、モジュラー型のスーパーコンピュータであり、Intel Skylake ベースのクラスタと NVIDIA A100 ベースのブースターで構成されている。クラスタは 12PFlops の性能、ブースターは 75PFlops の性能を有し、合計で 100 ペタバイトのディスクと 300 ペタバイトのテープストレージを備えている。また、JUPITER というエクサスケール級のモジュラーシステムが計画されており、量子コンピューティングやニューロモルフィック計算などの新技術を取り入れる予定である。

※ JSC に JUPITER について (詳細は EuroHPC の infrastructure pillar へ、5.2.6 節) この新しい EuroHPC スーパーコンピュータは、EuroHPC とドイツの政府機関によって、最大総予算 500M ユーロ (800 億円) で共同出資される。この総額のうち、250M ユーロ (400 億円) は EuroHPC によって提供され、さらに 250M ユーロ (400 億円) が、ドイツ連邦教育研究省 (BMBF) とノルトライン＝ヴェストファーレン州文化・科学省 (MKW NRW) によって等分に提供される。

① 2025/01/17 お試し期間 (2025/01/17～2025/03/17) 開始、AI コンペ

<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/jupiter-supercomputer-to-power-ai-research-in-new-gauss-ai-compute-competition/>

② 2025/11/19 完成予定の 8% のシステム構成で 83PFLOPS を達成 (top500 の 18 位) → 1 EPLOPS を達成できるだろう (8bit で 70EFLOPS を達成できる)

<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/new-jupiter-module-strengthens-leading-position-of-europes-upcoming-exascale-supercomputer/>

③ 2024/05/13 最初のひとつのモジュールが green500 の 1 位

<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/jupiter-exascale-supercomputer-claims-1st-place-in-green500/>

④ 2023/02/10 EUroHPC と JSC が契約、総額€500M（EuroHPC50%、連邦政府 25%、州政府 25%）

<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/jsc-announces-important-milestones-for-jupiter/>

(4) 研究開発内容

JSC では、AI と HPC を組み合わせたビッグデータ解析、量子情報処理、気候シミュレーション、計算材料科学などの研究が行われている。特に、AI パーティションでは深層学習やリモートセンシングのための機械学習が活発に行われている。また、Exascale Labs において、IBM や Intel、NVIDIA と共同でエクサスケール向けのアーキテクチャ設計や最適化が進められている。さらに、JUWELS 上での気候変動シミュレーションや医学、材料科学など、多岐にわたる研究分野に対応している。

JUWELS (CLUSTER + BOOSTER): GCS RESEARCH FIELDS

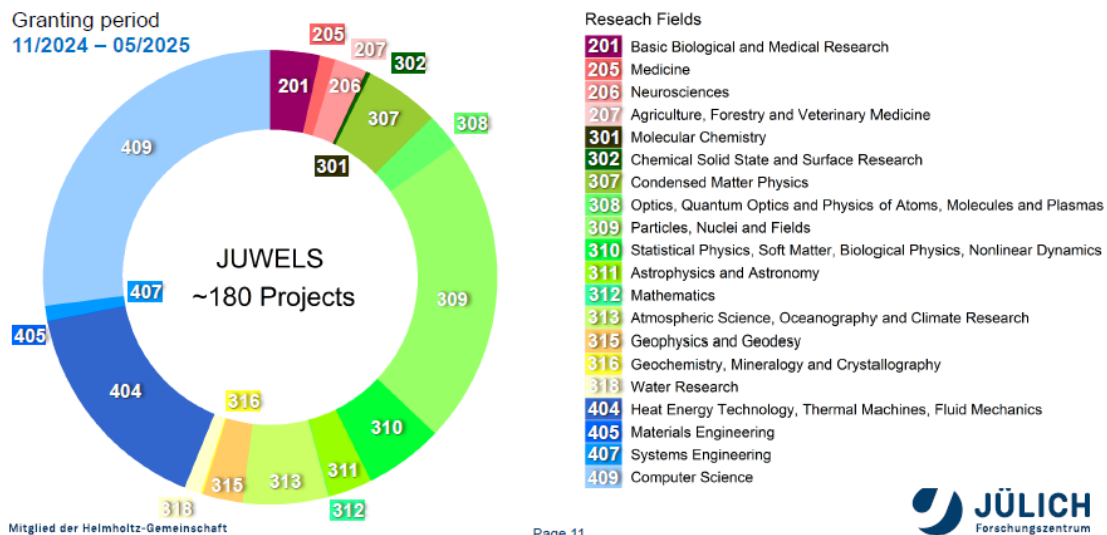


図 2.5 JSC で利用されているプロジェクトの分野別分類

2.3.5. LRZ（ドイツ）

本節は、Computers and Intelligent Machines Introduction to Multiuser Cluster Systems at LRZ, April, 8th 2024 の内容を情報源としている。

※ LRZ は、Leibniz-Rechenzentrum という名前で、バイエルン科学アカデミーの管理下にある。

<https://www.lrz.de/english/>

(1) 組織体制・人員

ライプニッツ・スーパーコンピューティング・センター（LRZ）は、ドイツにおける HPC とスーパーコンピュータ運用の中核を担う機関であり、特に人工知能（AI）と機械学習（ML）のワークフローに特化したインフラを提供している。LRZ は、バイエルン州とドイツ連邦政府の支援を受けた公共の研究機関であり、多数の大学および研究機関と協力して運営されている。主に HPC、HPDA（高性能データ解析）、HPAI（高性能人工知能）に関連するマルチユーザクラスタシステムの開発と運用を行っている。これには、システム管理、ソフトウェア開発、ユーザーサポートを専門とする技術者や研究者が多数従事している。

(2) 予算

LRZ の HPC および AI インフラの運用は、ドイツ連邦政府およびバイエルン州の予算によって支えられている。特に、最新の AI スーパーコンピュータシステムや専用の AI アクセラレータ（例: Cerebras Systems の CS-2 や NVIDIA H100 GPU）の導入には、多額の資金が投入されている。また、エネルギー効率やセキュリティ強化のための予算も確保されており、これにより最新技術の採用が加速している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

LRZ は、SuperMUC-NG をはじめとする大規模スーパーコンピュータを運用しており、これには Intel Xeon プロセッサと NVIDIA H100 GPU が搭載されている。特に、SuperMUC-NG は 26.9PFlops の計算能力を誇り、直接水冷システムにより高いエネルギー効率を実現している。また、Cerebras Systems の CS-2 など、AI 向けの特種なハードウェアも導入されており、これによりディープラーニングや大規模データ解析が高速に実行可能である。さらに、エッジコンピューティングやクラウドベースの HPC サービスも提供され、これにより分散処理とリソースの柔軟な利用が可能となっている。

(4) 研究開発内容

LRZ は、AI と HPC の融合に重点を置いた研究開発を行っている。特に、PyTorch や

TensorFlow といったフレームワークを用いたディープラーニングのワークフローの最適化、エネルギー効率の向上、セキュアコンピューティング (Confidential Computing)、連合学習などの技術開発が進められている。また、Cerebras や FPGA、TPU などの特徴あるハードウェアを活用し、大規模な AI モデルのトレーニングや推論の高速化を図っている。これに加えて、説明可能な AI (Explainable AI) の研究も行われており、信頼性の高い AI システムの構築を目指している

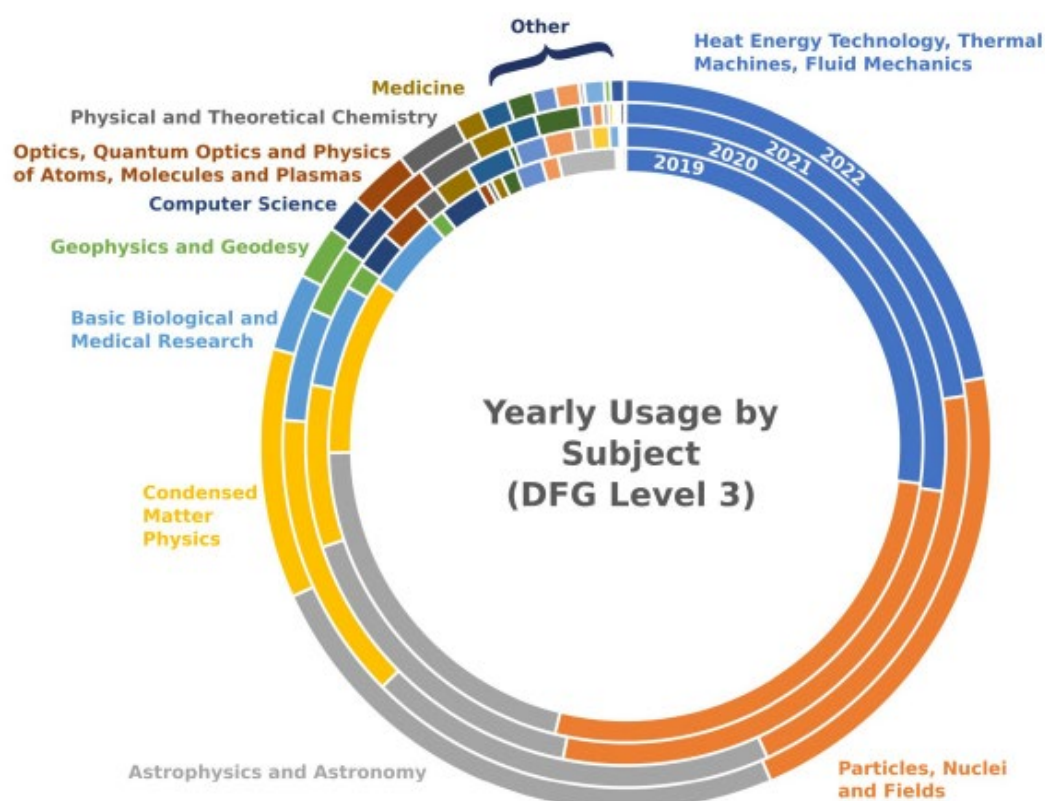


Figure 2: Detailed yearly usage of SuperMUC-NG by subject (level three of the DFG classification scheme).

図 2.6 LRZ で利用されているアプリケーション分類

2.3.6. TGCC (フランス CEA/DAM)

本節は、TGCC public Documentation, Release 2025-02-07.1101 を情報源としている。

※ CEA/DAM Île-de-France は、フランスの原子力庁 (CEA) の軍事応用部門 (DAM) の一部で、Île-de-France 地域に位置している。CEA/DAM は、核兵器の安全性、信頼性、性能を確保するための研究開発を行っており、シミュレーションや HPC を活用して核実験を行わずに核兵器の管理を行っている。また、エネルギー、セキュリティ、計算科学の分野でも先端的な研究を進めている。

※ DAM は、フランスの核兵器の設計、維持、評価を行うための複数の専門施設で構成されている。各施設は、HPC、材料科学、核物質の管理、電磁波対策など異なる専門分野を担当している。DAM Île-de-France は HPC とシミュレーション、Valduc は核弾頭の管理、Le Ripault は材料科学、Bruyères-le-Châtel は HPC とプラズマ物理、Gramat は電磁波研究といった役割分担がされている。

<https://www-hpc.cea.fr/fr/TGCC.html>

(1) 組織体制・人員

TGCC (Très Grand Centre de Calcul du CEA) は、フランスの CEA が運営する高度なスーパーコンピュータを収容する計算センターである。この組織は、将来的な高性能計算システムに対応できる柔軟かつモジュール式の施設であり、科学イベントの開催やデータの保存・解析に特化している。また、フランスの全国的な計算インフラである GENCI や、欧州の PRACE インフラの一部としても機能している。

(2) 予算

予算に関しては、計算資源の利用はコミュニティごとに分配されており、CCRT パートナーは自動的に計算資源の一部を取得できる。フランスの研究チームは GENCI を通じて、また産業界や学術機関の研究者は PRACE を通じて資源の申請が可能である。特定のソフトウェアやライセンス製品については、ライセンスサーバの運用や特定グループへの使用制限が行われており、ライセンス取得の手続きには事前の見積もりや申請が必要である。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、複数のパーティションで構成されている。標準の計算ノードには、 2×64 コアの AMD Rome CPU や、RAM/ノード 228GB が搭載されており、合計で 292,608 コアを有している。GPU コンピューティング向けには、NVIDIA Tesla V100 や Pascal P100 を搭載したハイブリッドノードが用意されている。また、共有メモリを大量に使用する計算に対応したファットノードや、AI 向けの V100 シリーズノードなど、用途に応じた多様なノードが存在する。これらのノードは、高速 I/O を実現する Lustre ファイルシステムに接続され、階層型のデータ保存システムを通じてペタバイト級のデータ管理が可能である。

(4) 研究開発内容

研究開発内容としては、分子動力学シミュレーション、量子化学、機械学習、AI などの多岐にわたる分野での利用が進んでいる。例えば、AlphaFold によるタンパク質構造予測や、OpenFOAM による流体解析、TensorFlow を用いた機械学習モデルのトレーニングが行われている。また、並列計算を支援するために、MPI や CUDA、OpenMP などの開発環境

が整備されており、最適化のためのツール群も充実している。これにより、科学技術計算から産業応用まで広範なニーズに対応している。

2.3.7. GENCI（フランス）

本節は、ANNUAL REPORT 2023 - GENCI を情報源としている。

※ GENCI の正式名称である Grand Équipement National de Calcul Intensif は、フランス語での意味は「国家規模の高性能計算設備」という意味である。

<https://www.genci.fr/en>

(1) 組織体制・人員

GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif) は、フランス政府および欧州連合の支援を受けて設立された非営利団体であり、フランス国内外の科学、学術、産業研究のために HPC 資源を提供している。組織体制は、5 つの株主 (CEA、CNRS、Inria、CPU、MESRI) によって構成され、CINES、IDRIS、TGCC の 3 つの計算センターを運営している。各センターは、それぞれ異なる専門分野に特化し、データ解析や量子計算、人工知能 (AI) などに対応している。GENCI は、科学技術の発展と欧州におけるデジタル主権の確立を目指し、欧州の EuroHPC イニシアティブにも積極的に参加している。

(2) 予算

予算については、フランス政府の高等教育・研究省 (MESRI) および France2030 投資計画による資金を基に運営されている。2023 年には、Jean Zay スーパーコンピュータの能力拡張に向けた 40M ユーロ (64 億円) の投資が決定され、これにより新世代 GPU の導入と AI モデルの訓練が強化される予定である。また、EuroHPC からの助成を受けて、Jules Verne コンソーシアムを通じたエクサスケール・スーパーコンピュータの導入が進められている。このプロジェクトは、フランス国内の研究者だけでなく、欧州全域のユーザーが利用できるオープンリサーチプラットフォームを目指している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、CINES の Adastra (77.9PFlops)、IDRIS の Jean Zay (36.2PFlops)、TGCC の Joliot-Curie (22PFlops) の 3 つが中核である。Adastra は、エネルギー効率に優れ、Green500 で世界 3 位にランクインしており、Jean Zay は AI と HPC の融合に対応するため、GPU パーティションを強化している。また、Jules Verne プロジェクトでは、エクサスケール級の性能を持つ新しいスーパーコンピュータが 2025 年末までに稼働予定である。これにより、シミュレーション、データ解析、量子計算が統合されたハイブリッド環境が提供される見込みである。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、気候変動の予測モデル、バイオ医薬品の開発、エネルギー効率の向上など、多岐にわたる。特に、NumPEx プロジェクトを通じて、エクサスケールシステム向けのアルゴリズムとソフトウェアスタックの開発が進められている。また、量子技術に関しては、TGCCにおいてPasqal社の量子システムの導入が計画されており、これにより量子計算とHPCのハイブリッド運用が可能となる見込みである。さらに、CLUSSTERプロジェクトでは、フランスと欧州の主権を強化するためのクラウド基盤が構築されており、HPC、AI、量子計算のインフラを統合したデジタルエコシステムが形成されている。GENCIは、これらの取り組みを通じて、フランスおよび欧州の科学技術力の強化とデジタル主権の確立に貢献している。

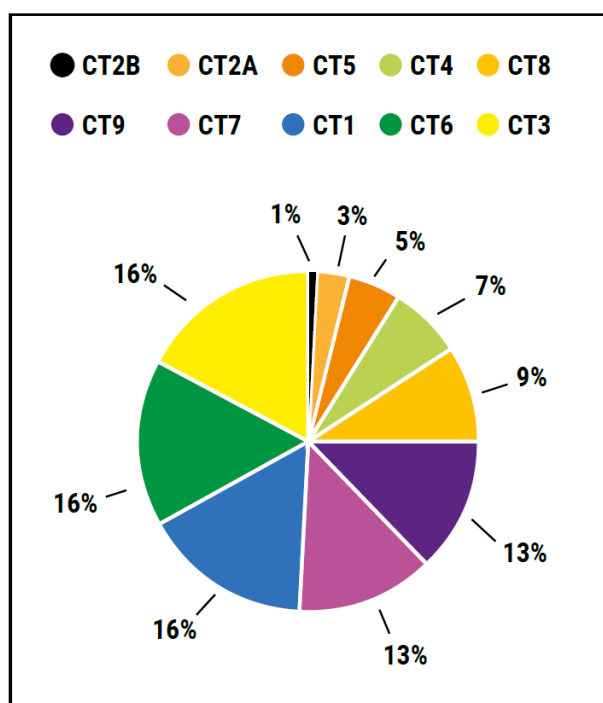


図 2.7 GENCI の AI プロジェクトで利用されているアプリケーション分類

※ CT1:気候モデリング,CT2A:CFD（再生エネルギー）, CT2B:CFD（脱炭素化プロジェクト）、CT3:生物と健康、CT4:地球物理学と天体物理学、CT5:理論物理学とプラズマ物理学、CT6:アルゴリズムと数学、CT7:分子モデリングと生物学、CT8:量子化学と分子モデリング、CT9:物理学、化学、材料

2.3.8. CINECA（イタリア）

本節は、Cineca HPC Report 2023-2024 を情報源としている。

- ※ CINECA の正式名称は **Consorzio Interuniversitario per il Calcolo Automatico dell' Italia Nord Orientale**（イタリア語）であり、英語では **Inter-University Consortium for Automatic Computing in North-East Italy** である。CINECA は、イタリアの大学、教育機関、および研究機関による非営利のコンソーシアム であり、イタリア教育大学研究省（MIUR: Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca）の支援を受けて運営されている。
- ※ CINECA という略称は、イタリア語の正式名称である **Consorzio Interuniversitario per il Calcolo Automatico dell' Italia Nord Orientale** から来ている。この名称は、「イタリア北東部の大学による自動計算のためのインター大学コンソーシアム」を意味して、「Interuniversitario（インター大学）」と「Calcolo Automatico（自動計算）」という核心部分が含まれているため、役割をよく反映している。当初は、イタリア北東部（Nord Orientale）の大学のための計算資源を提供することが目的であり、その地域性を反映して「Nord Est」という単語が含まれている。

<https://www.hpc.cineca.it/>

(1) 組織体制・人員

CINECA はイタリアの主要な科学計算センターであり、HPC インフラを提供している。CINECA の HPC 部門には 160 名が勤務しており、ボローニャに 126 名、ミラノに 11 名、ローマに 22 名、ナポリに 1 名が配置されている。また、HPC 部門はさまざまな国際プロジェクトに参加し、研究機関や大学とのパートナーシップを強化している。これにより、科学計算やビッグデータ、人工知能に関するイベントや教育活動を展開している。

(2) 予算

CINECA は、EuroHPC や ISCRA などの欧州および国内の公募を通じて、計算資源を配分している。2023 年には約 19.57 億コア時間の HPC リソースが提供され、そのうち 18.94 億コア時間が割り当てられた。これらの資源は、欧州および国内の研究者によるピアレビューを経て配分され、産業やプライベートユーザー向けには特別な契約によって提供される。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステム構成については、CINECA は複数の Tier-0 および Tier-1 クラスタを運用している。特に、Leonardo (Booster) は ATOS の BullSequana XH2000 アーキテクチャを採用し、3456 ノード、110,592 コア、13,824 GPU を備え、ピーク性能は

353 PFLOPS に達する。また、Galileo100 は Intel CascadeLake プロセッサと NVIDIA Volta 100 を搭載し、636 ノード、26,592 コア、72 GPU を持つシステムである。これに加えて、廃止された Marconi100 は IBM Power AC922 と NVIDIA Volta 100 を採用し、980 ノード、31,360 コア、3,920 GPU を備えていた。Marconi A3 は、Intel SkyLake プロセッサを搭載し、3,124 ノード、149,952 コアを持ち、これらのシステムは HPC の要として重要な役割を果たしている。また、OpenStack ベースの ADA クラウドや専用の CEPH ストレージを備えたインフラも運用されており、柔軟な計算環境を提供している。

(4) 研究開発内容

研究開発内容においては、CINECA は HPC とクラウドインフラを活用して様々な分野の研究を推進している。特にバイオインフォマティクスとゲノム解析においては、GPU 加速された解析ツールや分子シミュレーションのための高度なアルゴリズムを開発している。また、気候科学と地球環境分野では、ChEESA-2P プロジェクトを通じて性能移植性の向上や、OpenMP や SYCL などの HPC ツールの適用が進められている。さらに、量子コンピューティング分野では、イタリア初の量子コンピュータの導入準備とゲートモデルシステムの開発が進行中である。産業応用においては、EXCELLERAT P2 や exaFOAM プロジェクトを通じて、エクサスケール対応の CFD（計算流体力学）ツールの開発が進められている。

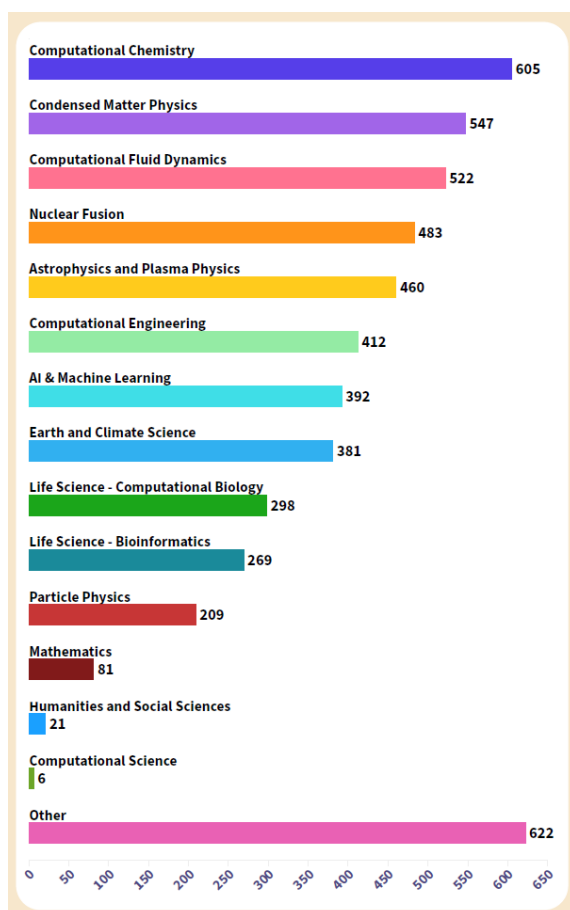


図 2.8 CINECA のプロジェクト割合

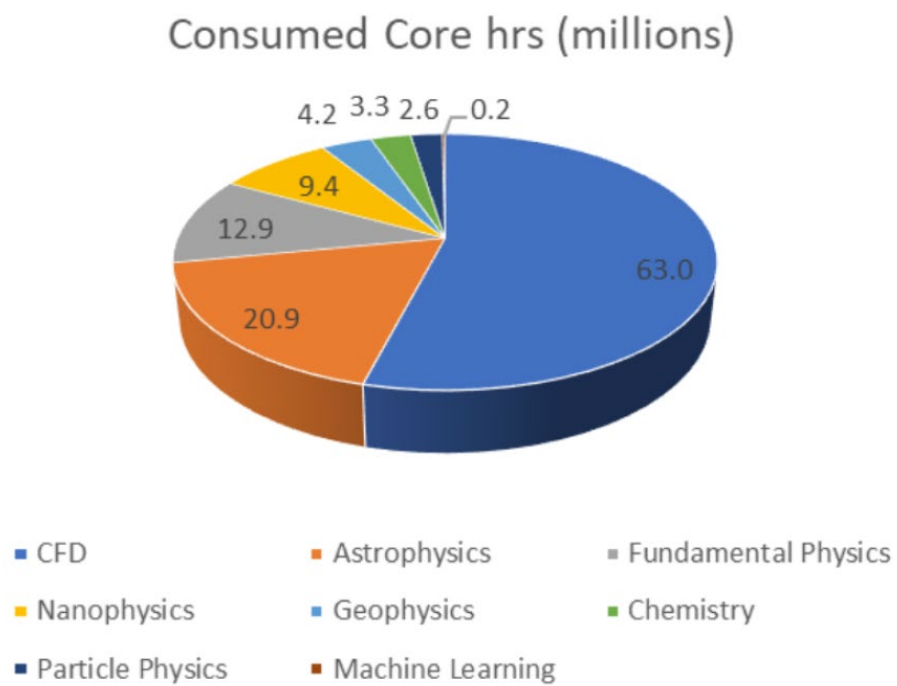


図 2.9 CINECA で利用されているアプリケーション分類

2.3.9. SURF（オランダ）

本節は、SURF in 2024 を情報源としている。

※ SURF の正式名称は SURF Cooperative (SURF coöperatie) である。SURF は、オランダの高等教育機関と研究機関による非営利の協同組合 である。SURF は、オランダ語の Samenwerkende Universitaire Reken Faciliteiten の略である。英語に直訳すると Cooperating University Computing Facilities という意味になる。SURF という名称は、「オランダ国内の大学が共同で運営する計算資源施設」という設立当初の役割を反映している。

<https://www.surf.nl/en>

(1) 組織体制・人員

SURF は、オランダの教育と研究機関向けに ICT サービスを提供する協同組合であり、その組織体制は Coöperatie SURF U.A.という形式で構築されている。SURF は、会員である大学や研究機関によって所有されており、全ての活動は SURF B.V.という単一の事業会社のもとで実施されている。2023 年時点で、SURF のグレートマネジメントチーム (GMT) は 18 名で構成されており、組織は主に戦略と経営、サービス提供、イノベーションの 3 つの主要部門に分かれている。さらに、SURF には 487 名の職員が勤務しており、その内訳は管理職 15 名、チームメンバー 469 名である。

(2) 予算

予算に関しては、2023 年の総資産は約 112.91M ユーロ（181 億円）に達し、前年の 96.35M ユーロ（154 億円）から増加している。また、Npuls プログラムとしてオランダ政府から約 70.90M ユーロ（113 億円）の補助金を受けており、ICT インフラとデジタル教育の推進に向けた取り組みが展開されている。この補助金の一部は、特定のプロジェクトに割り当てられており、成果に基づいて精査される仕組みになっている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステム構成については、SURF はオランダ国内における HPC の中核を担っており、Snellius というスーパーコンピュータを運用している。Snellius は 2024 年にアップグレードされ、大量のデータ処理能力が強化された。また、オランダの研究者たちは、欧州で最も強力なスーパーコンピュータである LUMI へのアクセスも可能となり、大規模なシミュレーションや AI モデルのトレーニングに活用している。SURF は、これらの HPC インフラを通じて、年間 992 件の研究プロジェクトに対して計算資源を提供している。

(4) 研究開発内容

研究開発内容においては、SURFはAIやビッグデータの分野で積極的に取り組んでいる。特に、BuildAI プロジェクトを通じて、AI を活用した設計支援や言語モデルの開発を進めており、GPT-NL というオープンなオランダ語モデルの提案も行っている。また、GAIA-X プロジェクトを通じて、欧州のデータ主権確立に貢献しており、プライバシーやデータ管理に関する厳格な方針を採用している。これに加えて、SURFはPRACEやGÉANTといったヨーロッパのHPCネットワークにも加盟しており、国際的な研究連携を強化している。

Snellius, the national supercomputer

processed computing time requests for **992** research projects in 2024

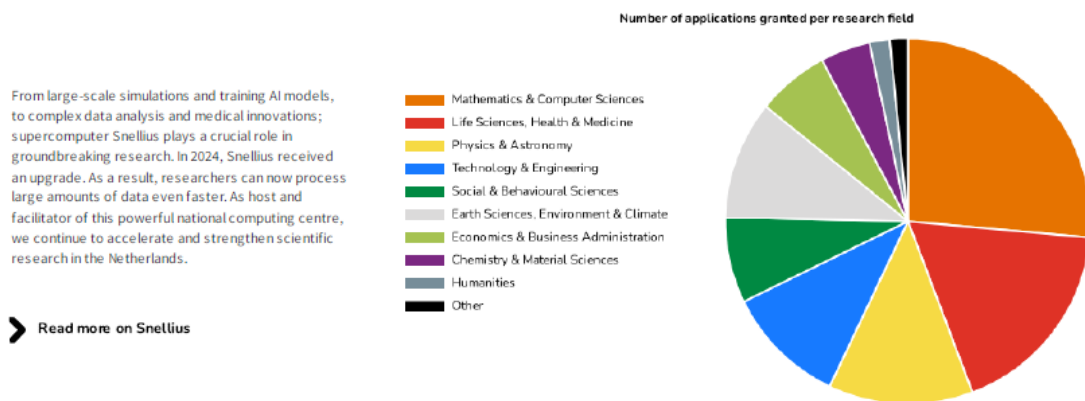


図 2.10 SURF 研究で利用されているアプリケーション分類

2.3.10. PSNC（ポーランド）

本節は、PSNC 2023 Annual Report（ポーランド語版）を情報源としている。

※ ポズナン超高速コンピュータネットワークセンター（PSNC）は、ポーランド語で「ポズナン超高速コンピュータ・ネットワークセンター」を意味する「Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe（PCSS）」の英語表記である。つまり、PSNC と PCSS は同じ組織を指しており、言語による名称の違いである。PSNC は、ポーランドの Institute of Bioorganic Chemistry of the Polish Academy of Sciences（ポーランド科学アカデミー 生物有機化学研究所, ICHB PAN）に所属している。

(1) 組織体制・人員

ポズナン超高速コンピュータネットワークセンター（PCSS）は、ポーランドのインスティテュート・オブ・バイオオーガニック・ケミストリーの一部として運営されており、約 500 人の職員が 20 の技術部門と 6 つの管理部門に所属している。組織体制は、データ処理技術部門、アプリケーションおよび大規模サービス部門、HPC 新アーキテクチャ部門、エネルギー効率技術部門など、多岐にわたる専門部門で構成されている。また、PCSS の指導には、戦略的研究プログラムやインフラ開発を推進する指導委員会が存在し、その議長はヤン・ウェングラズ教授が務めている。

(2) 予算

PCSS の予算に関しては、欧州連合の支援を受けたプロジェクト（例：EuroHPC、PRACE-LAB、PRACE-LAB2）の運営や、多くの国際共同研究プロジェクトへの参加が示されている。これらのプロジェクトを通じて、PCSS は HPC インフラの拡充や量子計算技術の導入に注力している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステム構成については、PCSS は Altair および Eagle といったスーパーコンピュータを運用しており、その計算能力は合計 5.9 PFLOPS に達している。これらのシステムは 262,059,777 コア時間と 63,360,300 TB のメモリを使用している。また、フォトニック量子コンピュータ ORCA や、IBM Q の超伝導キュービット技術を活用した量子コンピュータも導入されている。さらに、PCSS は欧州の GÉANT ネットワークと接続され、最低 100 Gb/s の通信帯域を確保している。

(4) 研究開発内容

研究開発内容においては、PCSS は HPC を基盤とした幅広い分野での応用に取り組んでいる。特に、量子計算、人工知能、機械学習、シミュレーション、ビッグデータ解析といっ

た領域に注力している。また、PRACE-LAB および PRACE-LAB2 を通じて、HPC as a Service (HPCaaS) の提供や、エネルギー効率の高いクラウド技術の開発が進められている。さらに、量子計算に関しては、EuroQCS-Poland の一環として、クラシカルな HPC システムとのハイブリッド運用が可能な量子コンピュータの設置が進行中である。



図 2.11 PSNC で利用されているアプリケーション分類

(Wykorzystanie mocy obliczeniowej w podziale na dziedziny)

Mechanika kwantowa 量子力学 26%、Fizyka 物理学 17%

Dynamika molekularna 分子動力学 15%、Chemia organiczna 有機化学 13%

Biologia obliczeniowa 計算生物学 11%、Genomika ゲノミクス 6%、Chemia 化学 5%、

Fizyka cząstek 素粒子物理学 4%、Technika 工学 1.5%、Astronomia 天文学 1.5%

2.3.11. EPCC（英国 UoE）

本節は、Supercomputing at EPCC:discovery, knowledge,impact, EPCC News, AUTUMN 2024 を情報源としている。

※ EPCC はエディンバラ大学 UoE（University of Edinburgh）に所属し、正式名称は Edinburgh Parallel Computing Centre である。

<https://www.epcc.ed.ac.uk/>

(1) 組織体制・人員

EPCC は、Mark Parsons 教授をディレクターとし、約 100 人の専門家チームで運営されている。2024 年には、女性の HPC 分野への参画を支援する「Women in HPC (WHPC)」が SC24 において第 20 回国際ワークショップを開催し、ダイバーシティとインクルージョンの推進に注力している。また、若手研究者や学生向けのインターンシッププログラムも活発に行われており、次世代の HPC 専門家の育成に力を入れている。

(2) 予算

EPCC は、英国政府の資金および欧州の PRACE プログラムからの支援を受けている。2024 年には、エネルギー効率向上と持続可能な計算インフラの開発を目指す「CONTINENTS」プロジェクトのために、EPSRC※からの資金を確保し、NCAS（National Centre for Atmospheric Science：英国大気科学国立センター）および NCAR（National Center for Atmospheric Research：アメリカ国立大気研究センター）との国際共同研究を開始した。また、Exascale に向けた GPU トレーニングやソフトウェア開発への投資も継続している。

※ EPSRC（Engineering and Physical Sciences Research Council、工学・物理科学研究会議）は、英国の主要な研究助成機関の一つで、エンジニアリング、数学、物理学、ICT などの分野を対象に研究資金を提供している。UKRI（英国研究・イノベーション機構）の一部として、大学や研究機関、産業界と連携し、先端技術の開発や人材育成、イノベーションの促進に貢献している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

EPCC の主力スーパーコンピュータは「ARCHER2」であり、750,080 コアを持つ HPE Cray EX システムである。ピーク性能は 28PFlops に達し、主に AMD EPYC プロセッサを採用している。また、EPCC は PRACE の Tier-0 および Tier-1 の HPC システムにもアクセス可能であり、世界最高水準の計算資源を提供している。さらに、GPU ベースの計算に対応するため、ARCHER2 においては AMD Instinct MI210 GPU を導入し、Exascale に向けた準備を進めている。

(4) 研究開発内容

EPCC は、エネルギー効率の向上を目指す「CONTINENTS」プロジェクトや、量子コンピューティングの実用化に向けた研究を推進している。特に、航空機の CO2 排出削減を目的とした量子アルゴリズムの開発や、風力タービンのシミュレーションを効率化する取り組みが注目されている。2024 年には、量子コンピューティングの分野で Quantum Base Alpha との共同研究が進展し、航空機の CO2 排出削減を目指した量子アルゴリズムの開発が行われた。また、新たに設立された MSc プログラム「Imaging, Vision, and High Performance Computing」では、Heriot-Watt 大学と共同で、イメージングとコンピュータビジョン分野における HPC 技術者の育成が進められている。また、女性や若手研究者の育成に力を入れており、SC24 での国際会議やインターンシップを通じて次世代の HPC 専門家を支援している。

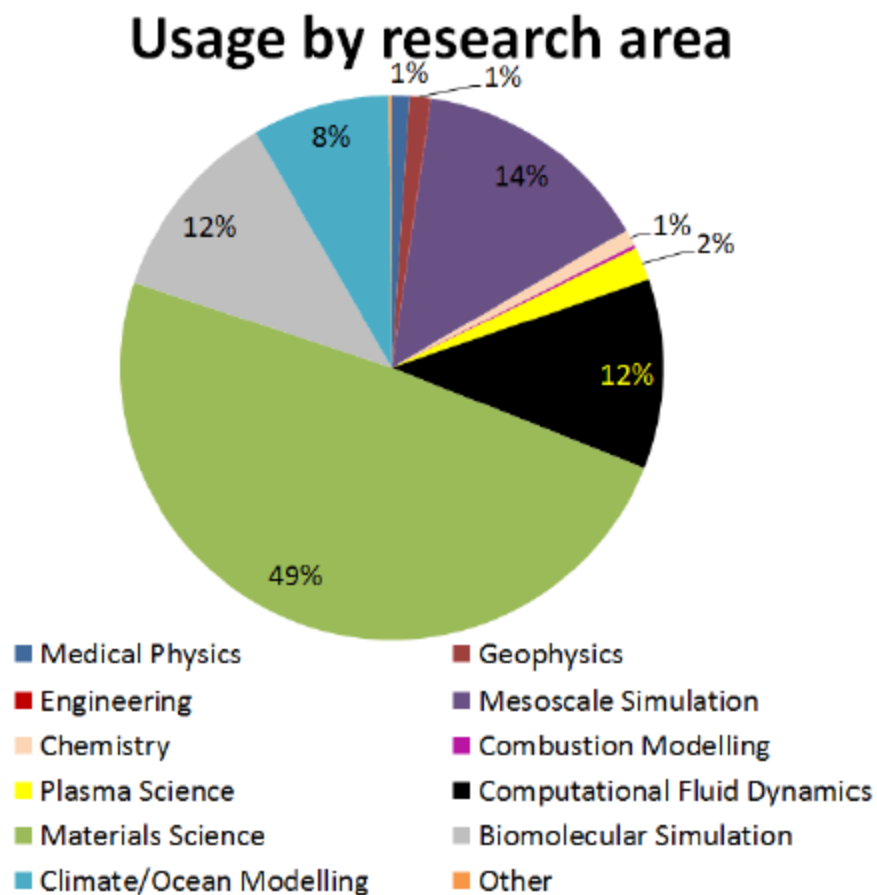


図 2.12 EPCC で利用されているアプリケーション分類

2.3.12. CSCS (スイス)

本節は、CSCS Annual Report 2022 を情報源としている。

※ CSCS の正式名称は Swiss National Supercomputing Centre (ドイツ語では Schweizerisches Nationales Hochleistungsrechenzentrum, イタリア語では Centro Svizzero di Calcolo Scientifico) である。CSCS という略称は、イタリア語の名称である Centro Svizzero di Calcolo Scientifico から来ている。

<https://www.cscs.ch/>

(1) 組織体制・人員

CSCS (スイス国立スーパーコンピューティングセンター) は、スイス連邦工科大学 (ETH Zurich) の一部として運営され、スイスおよび国際的な科学研究の支援を行っている。組織体制は、施設長を中心に、計算科学、データ解析、システム管理、ユーザーサポートなどの専門チームで構成されている。2022 年には、119 名の職員が在籍し、ヨーロッパやその他の地域の研究機関および産業界と密接に連携している。また、多様性とインクルージョンの推進にも力を入れ、教育プログラムやインターンシップを通じて若手人材の育成を図っている。

(2) 予算

予算については、主にスイス政府および国際的なプロジェクトの助成金によって支えられている。2022 年度の運営費は約 29.9M スイスフラン (CHF) (51 億円) であり、その多くはスーパーコンピュータの運用とメンテナンス、次世代計算資源の開発に充てられている。また、EU の Horizon Europe や PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe) といったプログラムからの資金援助もあり、これにより国際共同研究プロジェクトへの参加が可能になっている。エネルギー効率と持続可能性の向上にも予算が配分されており、再生可能エネルギーの利用とデータセンターの省エネ化が進められている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、「Alps」や「Piz Daint」などが中核である。特に、Piz Daint は Cray XC50 を基盤とし、NVIDIA Tesla P100 GPU を搭載し、30PFlops 以上の性能を誇る。また、新世代の「Alps」は、HPE Cray EX プラットフォームを採用し、AMD EPYC プロセッサと NVIDIA A100 GPU を使用している。これにより、シミュレーションと AI、データ解析の複合的なワークロードに対応可能である。ストレージシステムは、Lustre ベースで 35 ペタバイト以上の容量を有し、高速なデータ入出力が可能である。これらのシステムは、エネルギー効率を高めるために水冷システムが採用されており、CO2 排出削減にも寄与している。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、気候変動モデル、材料科学、天文学、バイオ医薬品開発など多岐にわたる。特に、Square Kilometre Array Observatory (SKAO)のためのデータ解析、ヨーロッパの気候予測システムの開発、そして材料の特性評価のための第一原理計算が進められている。また、AI と HPC の融合によるリアルタイムデータ解析や、デジタルツイン技術を用いた工業プロセスの最適化も研究テーマの一つである。さらに、欧州の HPC ネットワークとの連携を強化し、データの相互運用性と標準化を進めることで、オープンサイエンスの促進にも寄与している。CSCS はこれらの取り組みを通じて、スイスおよび欧州全体の科学技術力の強化に貢献している。

User Lab Usage by Research Field

Research Field	Node h	%
Chemistry & Materials	12 746 893	29
Physics	12 458 975	28
Life Science	7 358 629	17
Earth & Environmental Science	6 273 935	14
Mechanics & Engineering	4 886 911	11
Computer Science	683 728	2
Total Usage	44 409 071	100

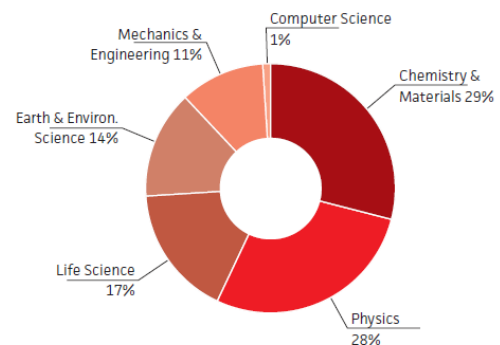


図 2.13 CSCS で利用されているアプリケーション分類

2.3.13. GCS (ドイツ HLRS・LRZ・JSC を統括)

本節の情報は、GCS のホームページから得た。<https://www.gauss-centre.eu>

Gauss Centre for Supercomputing (GCS) は、ドイツにおける HPC の推進を担う組織であり、3つの主要なスーパーコンピュータセンターを統括している。これらは、シュトゥットガルト高性能計算センター (HLRS)、ユーリッヒスーパーコンピューティングセンター (JSC)、ライプニッツスーパーコンピューティングセンター (LRZ) である。

GCS の理事会 (Board of Directors, BoD) は、GCS の最高意思決定機関の一つであり、HPC の戦略的運営を担当する。GCS の理事会は、これら 3 センターの代表者によって構成されており、現在の理事は

- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. h.c. Prof. E.h. Michael M. Resch (HLRS センター長、GCS 理事会議長)
- Prof. Dr. Dr. Thomas Lippert (JSC センター長、GCS 理事会副議長)
- Prof. Dr. Dieter Kranzlmüller (LRZ センター長、GCS 理事副議長)

である。

また、GCS の運営委員会 (Steering Committee) は、GCS の戦略立案と指針設定、HPC リソースの利用ルール策定の策定、計算時間の割り当て審査プロセスの管理を担う。また、科学運営委員会 (Scientific Steering Committee) からの計算時間割り当て勧告を審査し、最終的な決定を下す責任を持つ。

GCS は、下記の連邦政府および州政府の複数の省庁からの共同資金提供を受けて運営されている。

- ・ ドイツ連邦教育研究省 Federal Ministry of Education and Research(BMBF)
- ・ バーデン＝ヴュルテンベルク州 科学・研究・芸術省 Ministry of Science, Research and the Arts of the German State of Baden-Württemberg
- ・ バイエルン州 科学・芸術省 Bavarian State Ministry of Science and the Arts
- ・ ノ르트ライン＝ヴェストファーレン州 文化・科学省 Ministry of Culture and Science of the State of North Rhine-Westphalia

BMBF は GCS の運営資金の約 50%を提供し、バーデン＝ヴュルテンベルク州 科学・研究・芸術省は HLRS の資金を提供し、バイエルン州 科学・芸術省は LRZ の資金提供を担当し、ノ르트ライン＝ヴェストファーレン州 文化・科学省は JSC の資金を提供している。例えば、HLRS では新たなスーパーコンピュータ「Hunter」と「Herder」の導入が決定されており、総予算は 115M ユーロ（184 億円）に達する。この資金の半分はドイツ連邦教育研究省によって提供され、残りの半分はバーデン＝ヴュルテンベルク州の科学・研究・芸術省から供給される。

2.4. 米国のスーパーコンピュータセンター一覧

本節では、下記のスーパーコンピュータセンターに関する情報をまとめた。

- ・ Argonne National Laboratory
- ・ Oak Ridge Leadership Computing Facility
- ・ Los Alamos National Laboratory
- ・ Lawrence Livermore National Laboratory
- ・ Sandia National Laboratories
- ・ High-End Computing Capability
- ・ Pacific Northwest National Laborator
- ・ National Energy Research Scientific Computing Center
- ・ Princeton Plasma Physics Laboratory
- ・ San Diego Supercomputer Center
- ・ Texas Advanced Computing Center
- ・ Pittsburg Supercomputing Center
- ・ Tri-lab の活動 (LANL, LLNL, SNL)

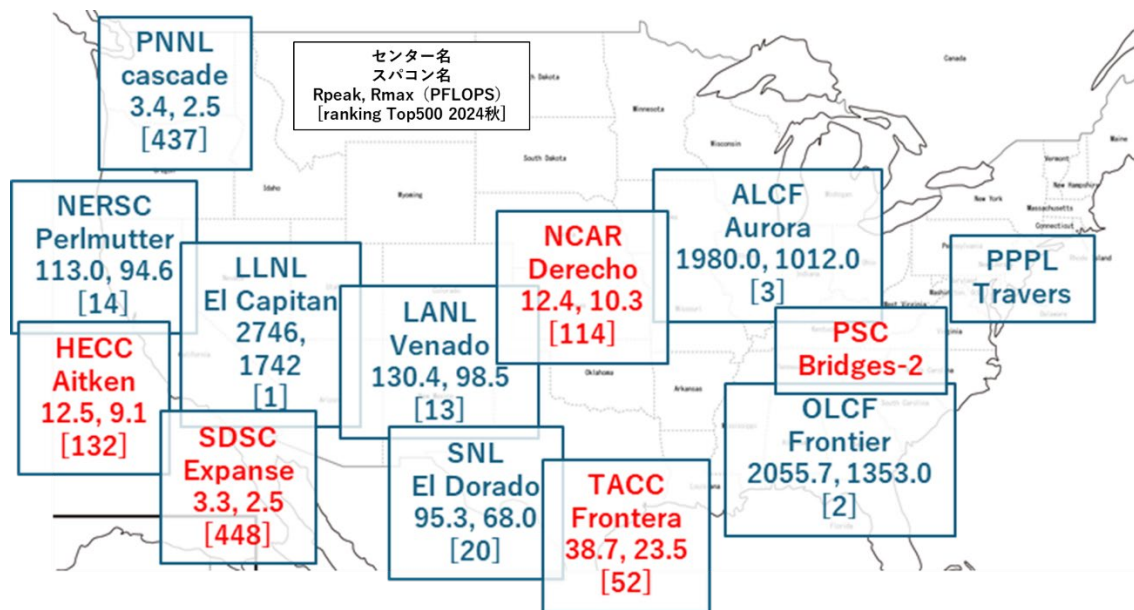


図 2.14 調査した 米国のスーパーコンピュータセンター (青 : DOE、赤 : NSF)

2.4.1. ALCF (ANL)

本節は、ALCF CY 2023 Operational Assessment Report および ALCF CY 2023 Science Report を情報源としている。

※ ANL (Argonne National Laboratory) のスーパーコンピュータセンターの正式名称は Argonne Leadership Computing Facility (ALCF) である。

<https://www.alcf.anl.gov/>

(1) 組織体制・人員

アルゴンヌ国立研究所のリーダーシップ・コンピューティング・ファシリティ (ALCF) は、米国エネルギー省 (DOE) の高度科学計算研究プログラム (ASCR) の一環として、最先端の計算資源をオープンサイエンスコミュニティに提供する目的で設立された。ALCF は、アルゴンヌとオークリッジの 2 つの世界的な計算センターを運営し、多様なスーパーコンピュータシステムを導入している。ALCF の組織体制は、施設長を中心とした専門スタッフにより構成されており、ユーザーサポート、運用、リスク管理、環境・安全管理、セキュリティなどの部門ごとに分かれている。2023 年には、1,600 人以上のユーザーを支援し、240 本以上の論文が発表された。また、ユーザーアドバイザリー・カウンスル (UAC) が設置され、政策提言やフィードバックを通じて運営の改善に寄与している。

(2) 予算

予算については、DOE からの資金に基づき、2023 年には Theta および Polaris システムの運用、Aurora の設置および早期利用プログラム (ESP) の支援に注力した。特に、Aurora システムは 10,624 ブレードの設置を完了し、AI と計算科学の両面での活用が見込まれている。2023 年の稼働率は、Theta が 93.9%、Polaris が 93.8%と高水準であり、効率的な予算運用がなされている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムは、Intel ベースの Cray XC40 システム「Theta」(11.7PFlops)、AMD と NVIDIA を基盤とする HPE Apollo 6500 Gen10+システム「Polaris」(44PFlops)、そして Intel と HPE によるエクサスケール・スーパーコンピュータ「Aurora」から構成される。Theta はデータ解析と AI トレーニングを統合したプラットフォームで、Polaris は Aurora の準備を目的とした性能最適化に利用されている。Aurora は、1 兆パラメータ規模の大規模言語モデル (LLM) の訓練を含む多様な用途に対応可能である。

※ 「Theta」は、2023 年末に退役した。Theta は 2017 年 7 月に稼働を開始し、600 以上の研究プロジェクトに 202 百万計算時間を提供し、材料発見、超新星シミュレーショ

ン、科学分野における AI の活用など、多岐にわたる分野での画期的な研究を支援した。

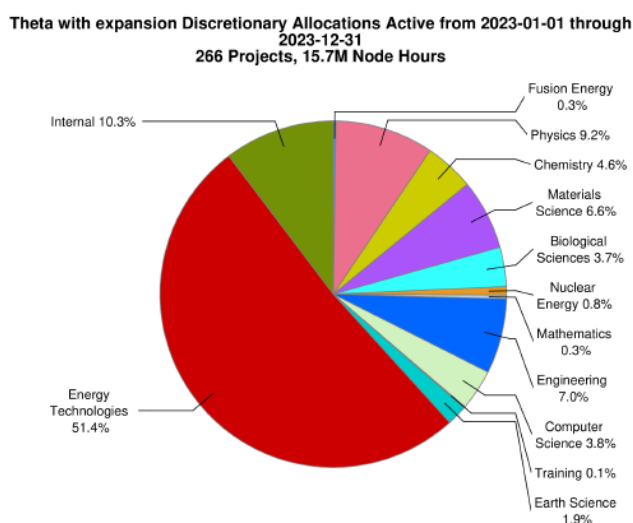


Figure 3.7 Theta with expansion CY 2023 DD Allocations by Domain

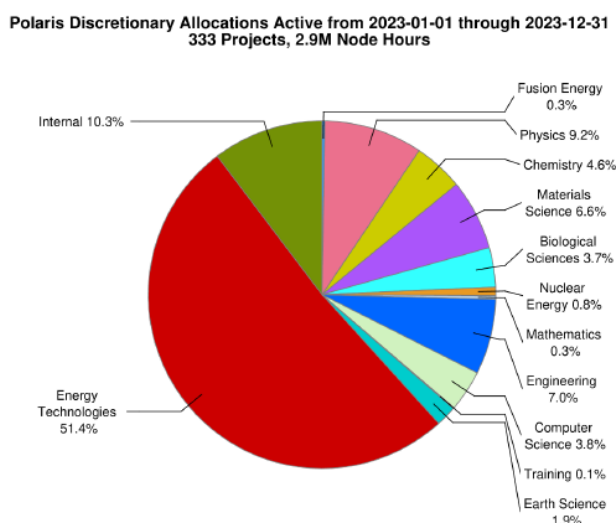


Figure 3.8 Polaris CY 2023 DD Allocations by Domain

図 2.15 ALCF で利用されているアプリケーション分類（その 1）

(4) 研究開発内容

研究開発内容としては、HPC と AI の融合による次世代科学技術の推進を柱に据えている。具体的には、DNA の高エネルギープロトンへの応答解析や、複雑なタンパク質動態の反応座標の特定、X 線実験データのリアルタイム解析を支援する「Argonne Nexus」プロジェクトがある。また、Polaris を用いた即時計算や、分散型非同期オブジェクトストア（DAOS）の活用により、効率的なデータ処理と保存を実現している。さらに、AI テスト

ベッドの拡充や、GitLab CI を用いた HPC/AI アプリケーションの展開効率化など、技術革新への取り組みが進められている。ALCF はこれらの活動を通じて、エクサスケール時代の計算科学と AI の最前線での役割を強化している。

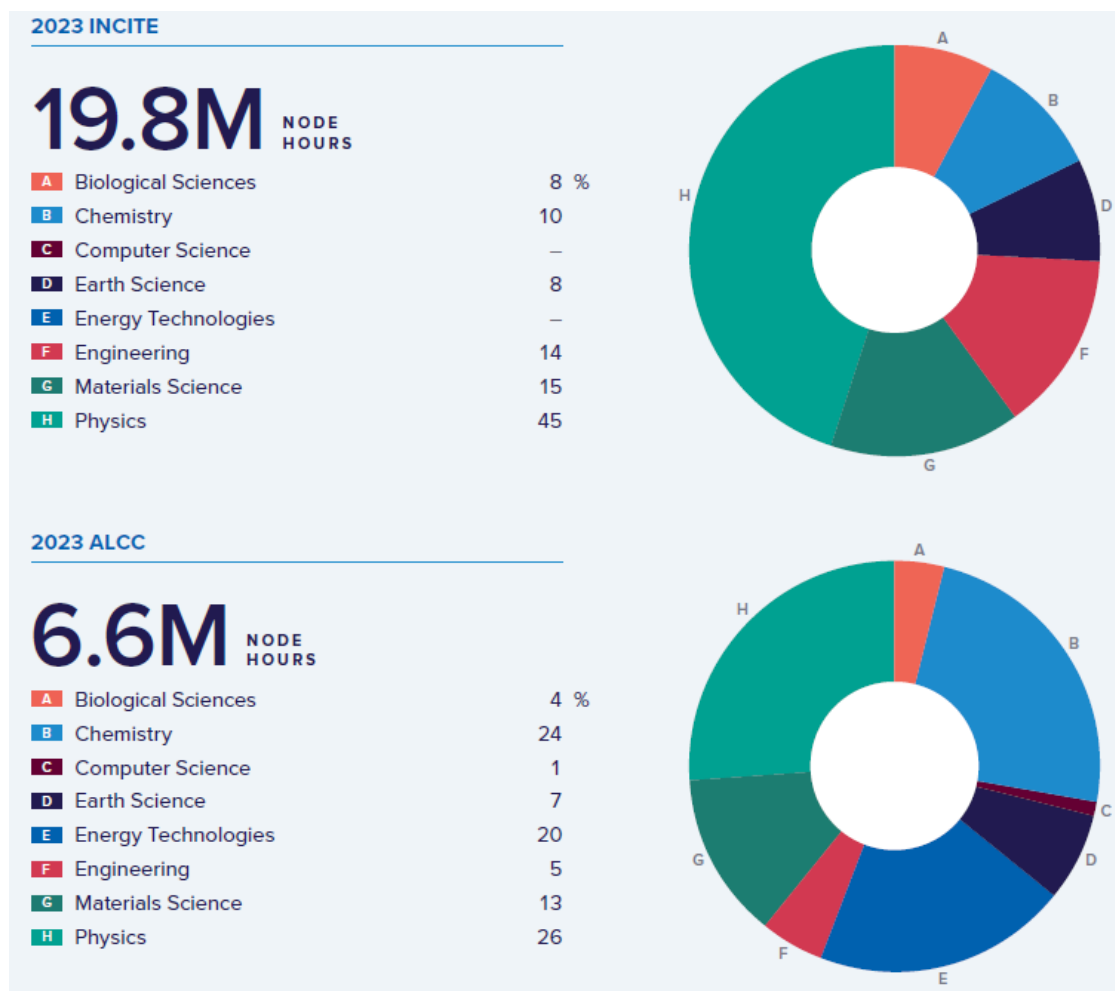


図 2.16 ALCF で利用されているアプリケーション分類（その 2）

2.4.2. OLCF (ORNL)

本節は、US Department of Energy, Office of Science, High-Performance Computing Facility, 2023 Operational Assessment, Oak Ridge Leadership Computing Facility, April 2024 の内容を情報源としている。

※ ORNL (Oak Ridge National Laboratory) のスーパーコンピュータセンターの正式名称は Oak Ridge Leadership Computing Facility (OLCF) である。

<https://www.olcf.ornl.gov/>

(1) 組織体制・人員

オークリッジ・リーダーシップ・コンピューティング・ファシリティ (OLCF) は、米国エネルギー省 (DOE) の科学局によって運営され、最先端の計算資源を提供している。組織体制は、施設長を頂点とし、HPC、AI、データ解析、量子計算の各分野に特化した専門チームで構成されている。2023 年には、1,676 人のユーザーと 598 のプロジェクトを支援し、ユーザーサポートの満足度は 5 点中 4.5 点と高い評価を得ている。また、OLCF は、ユーザーサポートの向上を目指して、トレーニングやデータ可視化のイベントを開催しており、科学コミュニティとの連携を強化している。

(2) 予算

予算については、DOE およびエクサスケール・コンピューティング・プロジェクト (ECP) からの資金を基に運営されている。2023 年には、次世代スーパーコンピュータ「Frontier」の運用に向けて大規模な予算が確保され、システムのメンテナンスと拡張、データ管理システムの改善に注力された。特に、「Kronos Nearline Storage」システムの導入により、高性能なデータ管理と長期保存が可能となり、データの安全性と可用性が向上している。また、2023 年度の OLCF の総合的な可用性は 96%を超え、安定した運用が行われている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、「Frontier」「Summit」「Alpine」「Orion」といった多層的なシステムから成り立っている。特に、Frontier は HPE Cray EX を基盤に構築され、AMD EPYC CPU と Instinct MI250X GPU を搭載し、2 エクサフロップス以上の性能を持つエクサスケール級のスーパーコンピュータである。Summit は IBM AC922 を基盤とし、125PFlops の処理能力を有している。さらに、データ管理には「Alpine」(GPFS ベース) と「Orion」(Lustre ベース) のファイルシステムが使用されており、合計で 150 ペタバイトを超えるストレージ容量が提供されている。これにより、大規模データの解析やリアルタイム処理が可能である。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、気候変動の予測、バイオ医薬品の開発、エネルギー効率の向上、天文学、核融合シミュレーションなど、多岐にわたる。特に、Frontier を用いたプロジェクトでは、気候モデルの精度向上や新薬開発における分子シミュレーションが進められている。また、AI 技術を駆使したデータ解析手法が強化されており、実時間処理やデジタルツインの開発にも取り組んでいる。2023 年には、Gordon Bell 賞を受賞した 2 つのプロジェクトがあり、一つは気候モデルの高速化、もう一つは金属合金の分子動態シミュレーションである。これらの成果は、エクサスケール・コンピューティングの実用化と、科学技術の最前線での活用に向けた重要な一歩である。OLCF はこれらの取り組みを通じて、HPC と AI の融合による次世代科学技術の推進を図り、エクサスケール時代の科学技術のフロンティアを切り開く役割を果たしている。

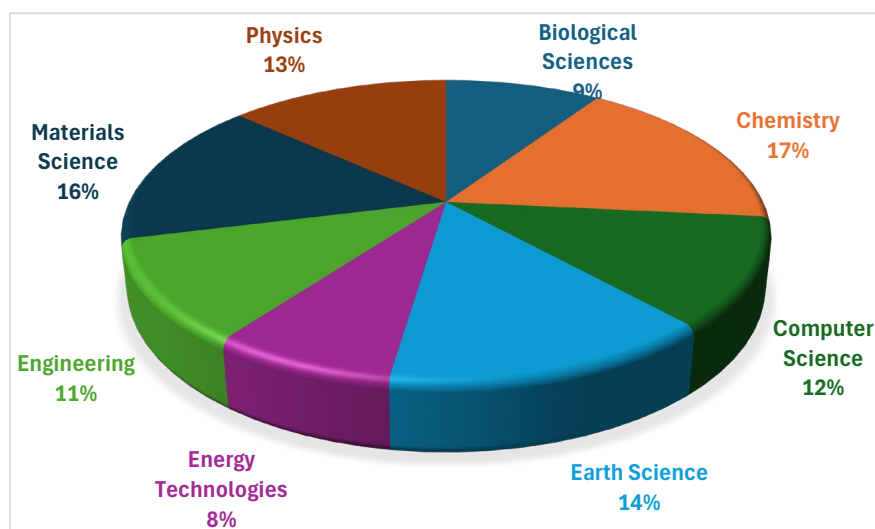


図 2.17 OLCF プロジェクトの分野別割合（情報源の巻末の 128 プロジェクトを分類）

表 2.2 情報源の巻末の 128 プロジェクトをアドバンスソフトが分類したデータ

分野	数	概要
Biological Sciences	12	分子生物学、バイオメディカルシミュレーションなど
Chemistry	22	量子化学、分子モデリング、触媒化学など
Computer Science	15	AI、機械学習、データ解析、HPC 最適化など
Earth Science	18	気候モデリング、地球物理学、環境科学など
Energy Technologies	10	再生可能エネルギー、核融合シミュレーションなど
Engineering	14	流体力学、材料工学、構造解析など
Materials Science	20	ナノ材料、半導体設計、超伝導材料など
Physics	17	素粒子物理、宇宙論、プラズマ物理など

2.4.3. LANL

本節は、つぎの3つの内容を情報源としている。

- ・ Advanced Simulation and Computing, FY25 IMPLEMENTATION PLAN, Version 0, August 5, 2024
- ・ Los Alamos National Laboratory, Laboratory Directed Research and Development Program, FY23 Annual Progress Report
- ・ Lab Agenda, Los Alamos National Laboratory, January 2024

※ LANL の部署である High Performance Computing (HPC) Division が、LANL 内の HPC インフラを管理し、科学および国家安全保障関連の大規模シミュレーションとデータ解析を担当している。LANL 内の HPC システムを集中的に配置している施設は、Strategic Computing Complex (SCC)と呼ばれている。

<https://www.lanl.gov/engage/organizations/aldset>

(1) 組織体制・人員

LANL (Los Alamos National Laboratory) は、NNSA (National Nuclear Security Administration) の ASC (Advanced Simulation and Computing) プログラムにおいて重要な役割を担っている。同組織は、多様な分野の専門家と高度な技術を擁し、データサイエンス、AI、次世代コンピューティング技術の研究開発を進めている。LANL の人員には、システムソフトウェアとツールの開発、システム管理、施設運営などに精通した技術者や研究者が含まれる。

(2) 予算

LANL の予算は、特にスーパーコンピュータシステムの導入と維持に多くが割かれている。例えば、Crossroads (ATS-3) システムの取得には約 1,150 M ドル (1,725 億円)、ATS-5 システムの取得には 250M ドル (375 億円) が見込まれている。また、SCC 電源アップグレードや CTS-3 設置など、インフラ強化のための数十 M ドル (数十億円～100 億円) 規模の投資も行われている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムについては、ATS-5 および Crossroads (ATS-3) に加え、Venado プラットフォームを導入している。これにより、HPC と AI を活用したデータ解析、3D マルチフィジックスシミュレーションが可能である。また、共通コンピューティング環境 (CCE) の整備や、電力供給と冷却設備の強化が進められている。

(4) 研究開発内容

研究開発内容は、データサイエンス、AI、量子情報科学、次世代コンピューティング技術にわたる。特に、「Critical Outcome: Computational & AI Breakthroughs」という目標の下、革新的な計算プラットフォームと手法の開発を通じて、核抑止、信頼性の高い運用、技術的リーダーシップを支えている。FY23 には、Crossroads の受け入れ試験目標を達成し、ATS-5 および ATS-7 の施設計画を策定した。FY24 には、AI を活用した武器シミュレーションのワークフローや、量子アルゴリズムの開発、データ管理戦略の強化など 11 の支援イニシアティブが進行中である。

2.4.4. LLNL

本節は、Advanced Simulation and Computing, FY25 IMPLEMENTATION PLAN, Version 0, August 5, 2024 の内容を情報源としている。

※ LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) のスーパーコンピュータセンターの正式名称は Livermore Computing (LC) である。

<https://hpc.llnl.gov/>

(1) 組織体制・人員

LLNL は、ASC プログラムを通じて、HPC およびスーパーコンピュータの運用・管理を行っている。組織体制は、システム管理やソフトウェア開発、ユーザーサポートを含む多岐にわたる。特に、Tri-lab 体制 (LLNL, LANL, SNL の 3 機関の協力体制) のもと、HPC システムの開発と運用を進めている。また、HPC サポートチームは、AI ワークフローの最適化やトレーニング環境の提供を行い、専門家の人材を確保している。

(2) 予算

予算については、DOE と NNSA からの助成金が主な財源であり、2023 年度は、エクサスケールスーパーコンピュータ「El Capitan」の導入を含む大規模なインフラ投資が行われた。El Capitan は、2 エクサフロップス以上の処理能力を持つ予定であり、核兵器の性能評価や AI、気候変動シミュレーションに活用される。また、エネルギー効率の向上と持続可能な運営のため、約 100M ドル (150 億円) の施設アップグレードも実施された。これにより、NNSA のストックパイル維持プログラムや、新型核弾頭「W80-4」「W87-1」の開発が進められている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、Sierra、Lassen、El Capitan の 3 つが中核であ

る。Sierra は 125PFlops の性能を持ち、主に核兵器のシミュレーションに使用されている。また、El Capitan は 2024 年稼働予定で、AMD と HPE が開発を担当している。これらのシステムは、HPC、AI、データ解析を複合的に処理できる設計であり、特に El Capitan は AI と HPC の融合を意識したアーキテクチャを採用している。加えて、データセンターは効率的な冷却技術と再生可能エネルギーの活用を進めており、エネルギー効率の面でも世界トップクラスである。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、核兵器の性能評価、バイオ医薬品の開発、気候変動の予測など多岐にわたる。特に、2022 年 12 月には、National Ignition Facility (NIF) において慣性閉じ込め核融合の点火に成功し、エネルギー利得を達成した。この成果は、核兵器のストックパイル維持とエネルギー問題の解決に向けた大きな一歩である。また、AI を活用したシミュレーションや、HPC と組み合わせたデータ解析によって、新薬の開発期間短縮や気候モデルの高度化が進んでいる。さらに、材料科学では、カーボンナノチューブを用いたエネルギー貯蔵技術や、水素貯蔵システムの開発も進行中である。LLNL は、これらの取り組みを通じて、エクサスケール時代における科学技術のフロンティアを切り開く役割を果たしている。

2.4.5. SNL

本節は、SANDIA NATIONAL LABORATORIES, 2023 HIGH PERFORMANCE COMPUTING ANNUAL REPORT を情報源としている。

※ SNL (Sandia National Laboratories) のスーパーコンピュータセンターの正式名称は Computational Simulation and Analysis Center (CSAC) である。また、特に HPC に関連しては、Sandia's Center for Computing Research (CCR) も主要な役割を果たしている。

<https://hpc.sandia.gov/>

(1) 組織体制・人員

サンディア国立研究所 (Sandia National Laboratories) は、米国エネルギー省 (DOE) の管理下で運営され、国家安全保障および科学技術の進展を目指す研究機関である。組織体制は、施設長を中心に、HPC、人工知能 (AI)、サイバーセキュリティ、量子計算などの専門チームで構成されている。職員数は約 1 万人で、多様な研究者と技術者が参加している。また、産業界や他の研究機関との協力を推進し、共同研究を通じて科学技術の発展を支えている。特に、国家安全保障ミッションを支えるための HPC とデータ解析技術の開発が注力されている。

(2) 予算

予算については、DOE および国家核安全保障局（NNSA）からの資金を主な財源としている。2023 年度の予算は、エクサスケール・スーパーコンピュータ「El Capitan」の開発や、再生可能エネルギーと持続可能な HPC インフラの整備に充てられている。また、産業界との共同研究を通じて外部資金の確保も行っており、2023 年には特に AI とサイバーセキュリティ分野での投資が増加した。これにより、研究プロジェクトの拡大と新しい計算資源の整備が進められている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、「Frontier」「Sierra」「Skybridge」などが中核である。特に、Frontier は HPE Cray EX を基盤に、AMD の EPYC プロセッサと Instinct MI250X GPU を搭載し、2 エクサフロップス以上の処理能力を誇るエクサスケール級のスーパーコンピュータである。また、Skybridge は Intel Xeon プロセッサをベースにしたクラスタ型システムで、大規模データ解析や AI ワークロードに最適化されている。これらのシステムは、シミュレーション、データ解析、AI、量子計算といった多様な計算ニーズに対応しており、高いエネルギー効率を実現している。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、気候変動の予測、核融合エネルギー、バイオ医薬品の開発、宇宙科学、サイバーセキュリティなど多岐にわたる。特に、Arctic Coastal Erosion（ACE）モデルを用いた北極圏の沿岸浸食のシミュレーションや、AI を活用した材料設計、デジタルツイン技術を用いた爆発物のシミュレーションが進行中である。また、エネルギー効率の向上を目指し、可逆計算（Reversible Computing）の研究も行われている。これにより、サンディアは、HPC と AI の融合による次世代技術の開発と、国家安全保障への貢献を目指している。研究成果は、国際学会や論文を通じて発信されており、2023 年度には複数の Gordon Bell 賞受賞プロジェクトがあった。これらの活動を通じて、サンディアはエクサスケール時代における HPC 技術のフロンティアを切り開いている。

2.4.6. HECC（NASA, AMES）

本節は、HECC Annual Report FY23 の内容を情報源としている。

- ※ Ames 研究センター内の NAS 部門が、HECC プロジェクトを通じて NASA 全体の HPC インフラを提供し、これにより NASA の多岐にわたるミッションや研究活動を支えている。
- ※ Ames 研究センターは、カリフォルニア州モフエットフィールドに位置し、NASA の主要な研究施設の一つである。このセンター内に設置されている NAS 部門は、NASA の HPC リソースを提供し、航空宇宙研究、地球科学、宇宙探査など、多岐にわたる

NASA のミッションを支援している。HECC プロジェクトは、NAS 部門が運営するプロジェクトであり、NASA の科学者やエンジニアに対して、最先端の計算、ストレージ、および関連サービスを提供することを目的としている。このプロジェクトを通じて、NASA のさまざまなミッションに必要な大規模シミュレーションやデータ解析が可能となっている。

(1) 組織体制・人員

NASA の High-End Computing Capability (HECC) プロジェクトは、NASA のあらゆるミッション領域を支援するために 2008 年に設立された。HECC は、NASA の科学、工学、技術活動の基盤として機能し、高度な計算能力を提供することで、ミッションの成果を飛躍的に向上させている。HECC は、NASA の各センターや外部機関と連携し、航空宇宙研究、地球科学、宇宙探査、気候モデリングなどの幅広い分野に計算資源を提供している。HECC の運営は、NASA Advanced Supercomputing (NAS) Division により統括されており、エンジニア、科学者、データ分析専門家、システム管理者が協力してプロジェクトの運営にあたっている。

(2) 予算

HECC の計算資源は、NASA のさまざまなミッションディレクターによって活用されており、2023 年度には 160 億 SBU (Standard Billing Units) 以上が消費された。HECC の主力スーパーコンピュータである Aitken の拡張には、モジュール型スーパーコンピューティング施設 (MSF) の建設費用が含まれており、新しい計算モジュールの開発に投資が行われている。特に、2023 年度には新たに Cabeus GPGPU システムが導入され、データポータルの強化も進められた。こうした予算は、NASA の長期的な計算インフラ戦略の一環として策定されている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

HECC では、複数のスーパーコンピュータを運用し、それぞれ異なる計算ニーズに応じたシステムを提供している。NASA の Ames Research Center に設置された Aitken スーパーコンピュータは、AMD Milan プロセッサを搭載しており、2023 年には新たに HPE Apollo 9000 ラックが追加され、モジュール型スーパーコンピューティング施設 (MSF) に統合される予定である。また、2023 年に導入された Cabeus は、HECC 初の GPGPU 専用スーパーコンピュータであり、512 基の NVIDIA A100 GPU と 128 基の AMD Milan CPU を搭載している。このシステムは、AI や機械学習、データ解析、流体力学のシミュレーションに特化し、NASA の計算能力を大幅に強化した。さらに、Pleiades と Electra は長年にわたり NASA の計算科学を支えてきたシステムであり、気象予測、気候シミュレーション、航空宇宙システムの設計などに利用されている。特に、Pleiades の Broadwell ノードは

1SBU あたり 1 時間の計算資源を提供する標準的なベンチマークとして使用されている。HECC はまた、InfiniBand Fat Tree ネットワークの構築により、Aitken スーパーコンピュータの I/O 性能を向上させ、NASA のデータネットワークインフラを強化している。

(4) 研究開発内容

HECC の計算資源は、NASA のさまざまな研究分野で活用されており、航空宇宙研究では超音速ジェットの騒音予測や X-57 Maxwell の高忠実度シミュレーション、垂直離着陸機 (VTOL) 設計の解析が行われている。これらのプロジェクトでは、CFD (計算流体力学) シミュレーションを活用し、新しい航空機設計の安全性と効率性を向上させるための研究が進められている。宇宙探査の分野では、アルテミス計画や商業有人宇宙飛行プログラム (CCP) を支援するため、オリオン宇宙船や SpaceX Dragon、Boeing Starliner の空力解析が実施されており、NASA の宇宙船の安全性向上に貢献している。地球科学と気候モデリングでは、NASA の Goddard Earth Observing System (GEOS) を用いた気象・気候シミュレーションが行われており、特にハリケーンや極端気象現象の予測精度向上に役立てられている。天文学の分野では、銀河進化のシミュレーション、超新星の爆発解析、太陽の内部ダイナミクス解析などが進められている。例えば、NASA の Pleiades スーパーコンピュータを利用して、銀河のガスの流れを解析し、宇宙の形成過程を解明する研究が進行中である。また、惑星防衛の研究として、小惑星の地球衝突リスクを評価するためのシミュレーションが行われている。NASA の SETI 研究所は、人工知能を用いた流星の自動検出アルゴリズムを開発し、衛星のデータから隠れた流星イベントを識別する技術を向上させている。

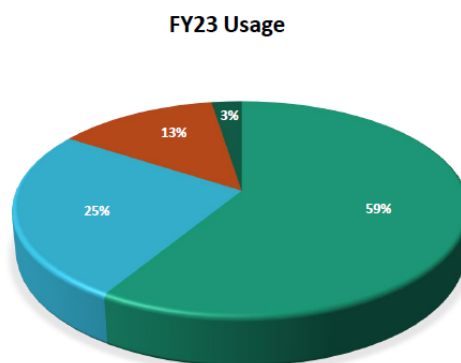
HECC FY23: Aeronautics Research Mission Directorate

- **Total Usage: 43,191,839 SBUs***

- Number of Projects: 153
- Agency Reserve: 8,611,419 SBUs
- Share: 30,887,396 SBUs
- Usage as Percent of Share: 140%
- Usage as Percent of Share + Agency Reserve: 109%

- **By ARMD Program**

- **Transformative Concepts:** 29,046,567
- **Advanced Air Vehicles Program:** 12,636,914
- **Integrated Aviation Systems Program Office:** 1,121,141
- **Aeronautics Evaluation and Test Capabilities:** 367,198

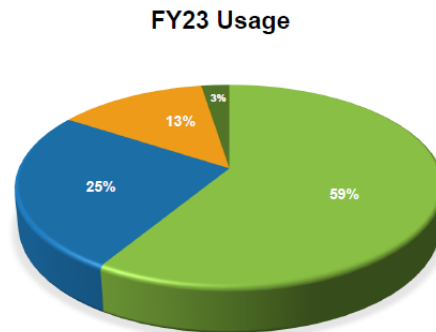


*1 SBU equals 1 hour of a Pleiades Broadwell 28-core node.

HECC FY23: Space Technology, Exploration, & Operations

- **Total Usage: 42,138,326 SBUs***
 - Total Number of Projects: 93
 - Share: 35,375,708 SBUs
 - Usage as Percentage of Share: 119%

- **By Mission Directorate:**

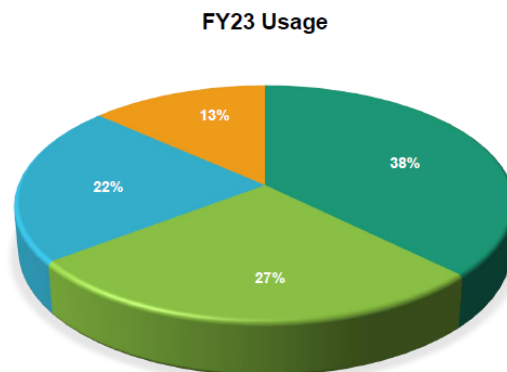
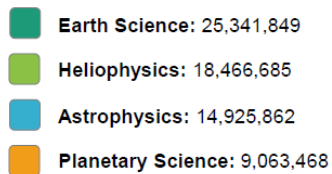


*1 SBU equals 1 hour of a Pleiades Broadwell 28-core node.

HECC FY23: Science Mission Directorate

- **Total Usage: 67,797,882 SBUs***
 - Total Number of Projects: 548
 - Agency Reserve: 8,611,419 SBUs
 - Share: 58,213,190 SBUs
 - Usage as Percentage of Share: 116%
 - Usage as Percent of Total Available Time: 86%

- **By Program:**



*1 SBU equals 1 hour of a Pleiades Broadwell 28-core node.

図 2.18 HECC の 3 部門の分野別利用割合

2.4.7. PNNL

本節は、Department of Energy FY 2025 Congressional Justification, Science を情報源としている。

※ PNNL の正式名称は Pacific Northwest National Laboratory である。PNNL は、アメリカ合衆国エネルギー省（DOE, U.S. Department of Energy）に所属している国立研究所であり、特に Office of Science の管轄下で運営されている。

<https://www.pnnl.gov/high-performance-computing>

(1) 組織体制・人員

PNNL（Pacific Northwest National Laboratory）は、エネルギーと環境に関する科学研究を推進するため、米国エネルギー省（DOE）の支援のもとで運営されている。PNNL の組織体制は、多様な専門分野の研究者と技術者から成り立っており、2025 年度の科学的雇用は 3,375 人（博士号取得者 1,785 人、ポスドク 470 人、大学院生 685 人、その他の技術スタッフ 435 人）である。これにより、幅広い分野の研究と開発が支えられている。

(2) 予算

予算に関しては、PNNL の Microbial Molecular Phenotyping Capability (M2PC) プロジェクトに対しては、2025 年度に 117M ドル（175 億円）の総見積コスト（TEC※）が計上されており、総プロジェクトコスト（TPC※）は 122M ドル（183 億円）とされている。また、運用とメンテナンスのための年間コストは 0.7M ドル（1 億円）で、ライフサイクル全体で約 34.95M ドル（52 億円）が見積もられている。

※ 米国の HPC プロジェクト予算において、TEC（Total Estimated Cost）は建設や設備など、物理的インフラにかかる直接的な費用を指すものである。一方、TPC（Total Project Cost）は TEC に加え、設計、管理、研究開発、試運転、人材育成など、プロジェクト全体に必要なすべての費用を含む総事業費である。TEC は主にハード面の支出に限定されるが、TPC はより包括的な予算評価に用いられる指標である。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成については、PNNL は高度な計算資源を備えており、特に HPC とデータ処理のインフラに注力している。DOE の Advanced Scientific Computing Research (ASCR) プログラムを通じて、スーパーコンピュータやデータセンターの建設と運用が支援されており、これには大規模データ解析を支援するための「Hub and Spoke」モデルのインフラ整備が含まれる。また、HPC は、エッジアプリケーションやストリーミングデータの処理を強化し、耐障害性と高可用性を備えたデータセンターの

設計が進められている。

(4) 研究開発内容

研究開発内容としては、PNNL はバイオエネルギーや環境モデリング、高スループットの実験設備を用いた分子フェノタイピングに焦点を当てている。M2PC プロジェクトでは、最大で 1 週間に 2,000 件の実験と、1 ヶ月に最大 300 万件のマルチモーダル解析を実施できる能力を持つ。さらに、DOE の Integrated Research Infrastructure (IRI) を活用し、データ、ユーザーファシリティ、および計算資源をシームレスに統合することを目指している。これにより、AI 技術とエクサスケール計算を組み合わせた新しい解析手法や、リアルタイム実験データ処理が可能になっている。

2.4.8. NERSC (LBNL)

本節は、National Energy Research Scientific Computing Center, 2023 ANNUAL REPORT の内容を情報源としている。

※ LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) のスーパーコンピュータセンターの正式名称は National Energy Research Scientific Computing Center (NERSC) である。NERSC は、アメリカ合衆国エネルギー省 (DOE) の Office of Science に所属しており、エネルギー、環境、基礎科学の分野での大規模シミュレーションとデータ解析を支援している。

<https://www.nersc.gov/>

<https://it.lbl.gov/service/scienceit/high-performance-computing/>

(1) 組織体制・人員

NERSC (National Energy Research Scientific Computing Center) は、アメリカ合衆国エネルギー省 (DOE) の科学局 (Office of Science, SC) の高性能計算施設であり、Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) が管理している。約 10,000 人のユーザーが全米および世界中から利用しており、その内訳は大学関係者が 60%、DOE 関連施設が 28%、産業界が 4% などである。研究支援には約 800 のプロジェクトが含まれ、スタッフも AI や量子コンピューティングの専門家を含む多様な分野の技術者で構成されている。

(2) 予算

NERSC は DOE の Office of Science Advanced Scientific Computing Research Office の予算によって運営されており、主に基礎エネルギー科学 (38%)、高エネルギー物理学 (17%)、核物理学 (12%)、融合エネルギー科学 (14%)、生物学・環境研究 (15%) などの分野に割り当てられている。また、2023 年には 57 億計算時間と 283 ペタバイトのデー

タストレージを提供した。ユーザーからのフィードバックは好評で、2023 年のユーザー調査では 6 点中 5.21 点の評価を得ている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

NERSC の主力システムは、Perlmutter と退役した Cori である。Perlmutter は HPE Cray Shasta システムで、AMD EPYC プロセッサと NVIDIA A100 GPU を組み合わせた 1,536 ノードを備え、ピーク性能は 140PFlops。2023 年には利用率が 95%に達し、約 670 万件のジョブを処理した。また、2026 年に稼働予定の次世代システム NERSC-10 も計画されており、エンドツーエンドのワークフロー性能向上を目指している。加えて、HPSS テープアーカイブで 200 ペタバイトのデータを管理し、Burst Buffer や高速インターコネクト技術も採用している。

(4) 研究開発内容

2023 年には、AI と統合研究インフラ（IRI: Integrated Research Infrastructure）の開発が進展した。AI 関連では、MLPerf HPC v3.0 で新しいベンチマークを公開し、Perlmutter は大幅な性能向上を示した。また、量子コンピューティングでは、QIS@Perlmutter プログラムを通じて量子情報科学の研究を強化し、QuEra との共同研究を開始した。さらに、NESAP (NERSC Science Acceleration Program) は、新技術の導入を支援するための Pathfinding プログラムを開始し、ユーザーの技術支援を強化した。気候モデリング、融合エネルギー、バイオインフォマティクスなどの分野で画期的な成果を上げ、2023 年には 2 つの Gordon Bell 賞を獲得した。これらの取り組みにより、NERSC はエネルギー、気候、バイオサイエンスといった幅広い分野での科学的発見を加速している。

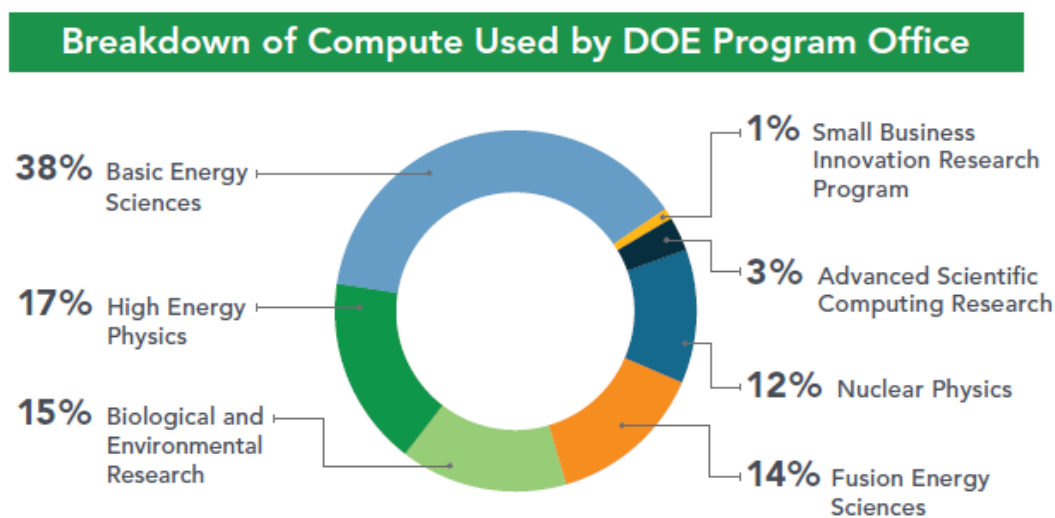


図 2.19 NERSC で利用されているアプリケーション分類

2.4.9. PPPL

本節は、下記の HP を情報源としている。

<https://www.pppl.gov/research/computational-sciences>

※ PPPL (Princeton Plasma Physics Laboratory) のスーパーコンピュータセンターの正式名称は Princeton Plasma Physics Laboratory Computing Center または単に PPPL Computing Center として知られている。PPPL は、プリンストン大学 (Princeton University) に所属している。しかし、運営と資金提供は、アメリカ合衆国エネルギー省 (DOE) の Office of Science が行っており、特に Fusion Energy Sciences (FES: 核融合エネルギー科学部門) の支援を受けている。

(1) 組織体制・人員

PPPL は、DOE の支援を受けて、HPC およびスーパーコンピュータを活用した計算科学と核融合エネルギーの研究を推進している。充実した予算と最新のスーパーコンピュータ・インフラ、そして AI 技術を組み合わせることで、プラズマ物理学の分野でのブレークスルーを目指している。PPPL の計算科学部門は、プラズマ物理学とエネルギー応用のための先端的な計算手法の開発を担っている。特に、核融合エネルギーの開発を目指し、全装置モデル (whole-device modeling) やトカマクおよびステラレータ (擬じれた形状の核融合装置) のシミュレーションに注力している。計算物理学者たちは、プリンストン大学の HPC 研究センターに設置された計算クラスタ「Stellar」や「Traverse」を用いて、実験データに基づくコードのテストと微調整を行い、その後、国立スーパーコンピュータでの本格的な計算を実施している。このように、PPPL は高度なスーパーコンピュータ運用と専門的な人材を擁している。

(2) 予算

PPPL の HPC およびスーパーコンピュータの運用は、DOE の ASCR (Advanced Scientific Computing Research) および ARPA-E (Advanced Research Projects Agency-Energy) のプログラムからの資金で支えられている。特に、エクサスケール・コンピューティングの導入や高性能コードの開発、エネルギー効率化を目指した技術開発に対して多額の投資が行われている。また、核融合エネルギー研究のための計算リソースの確保と、AI を活用した解析のための予算も充実している。これにより、HPC インフラの拡充と最新技術の採用が進められている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

PPPL は、主に「Stellar」および「Traverse」という 2 つの計算クラスタを運用している。Stellar は、コードのテストとチューニング用に使われ、国立スーパーコンピュータでの計

算に先立ち、効率的なシステム管理が行われている。一方、**Traverse** は GPU (Graphics Processing Unit) を搭載しており、人工知能 (AI) 向けの計算に特化している。これにより、GPU を用いた AI コードの高速実行が可能である。また、**PPPL** は、エクサスケールコンピュータの導入を進めており、全装置モデルのシミュレーションを可能にするための準備が進行中である。これらのシステムは、トカマクおよびステラレータの物理現象の予測と最適化に不可欠である。

(4) 研究開発内容

PPPL の研究開発は、HPC と AI を融合した高度なシミュレーション技術に焦点を当てている。特に、トカマクやステラレータにおけるプラズマの全体シミュレーション (**whole-device modeling**) は、これまでの部分的なシミュレーションを超えた画期的な手法である。このモデルは、エクサスケールコンピュータを用いて、プラズマの形状やエネルギー吸収・放出のメカニズムを包括的に解析できる。また、機械学習を利用したトカマクの異常検出と予測、さらには量子材料とデバイスのシミュレーションも行われている。これにより、核融合エネルギーの効率的な開発が期待されている。

2.4.10. SDSC (UCSD)

本節は、SDSC Annual Report, 2023 – 2024 を情報源としている。

※ SDSC は、カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UC San Diego, UCSD) の一部として運営されている。

<https://sdsc.edu/>

(1) 組織体制・人員

サンディエゴ・スーパーコンピュータ・センター (SDSC) は、カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) に設置され、HPC とデータ集約型計算の分野で先進的な役割を果たしている。組織体制は、施設長を務める **Frank Würthwein** を中心に、データ科学、サイバーインフラ、持続可能な科学ソフトウェア、研究データサービスなど 7 つの専門部門に分かれている。2023 年度には、293 名の職員とボランティアが所属し、40,570 人の学生にオンラインコースを提供するなど、教育と人材育成にも注力している。また、産業界や他の研究機関との連携を強化し、幅広い分野の研究支援を行っている。

(2) 予算

予算については、2023 年度の年間収入が 64M ドル (96 億円) で、そのうち 36M ドル (54 億円) は助成金、8M ドル (12 億円) は産業界からの収入である。特に、米国科学財団 (NSF) からの支援が大きく、AI とデータインフラの拡充、クラウドコンピューティングへの投資が進められている。Expanse スーパーコンピュータや Voyager の導入には、NSF

の Advanced Cyberinfrastructure Coordination Ecosystem: Services & Support (ACCESS) プログラムからの資金が充てられた。また、Fusion Data Platform の開発には、DOE から 7.4M ドル（11 億円）の助成が行われている。これにより、データ共有と再現性のある AI モデルの開発が加速されている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステムの構成は、Expanse、Voyager、Triton Shared Computing Cluster (TSCC)、Comet など多岐にわたる。Expanse は、Dell と SDSC によって設計されたピーク性能 5.16PFlops のシステムで、AMD EPYC プロセッサと NVIDIA V100 GPU を搭載している。また、Voyager は AI と深層学習に特化した実験的システムで、Habana Gaudi プロセッサを 336 基搭載し、膨大なデータセットに対応可能である。ストレージには、Lustre ファイルシステムで 12 ペタバイト以上が確保されており、高速なデータ処理が可能である。これらのシステムは、地震予測や気候変動シミュレーション、バイオ医薬品の開発など、幅広い分野の研究を支えている。

(4) 研究開発内容

研究開発の内容は、AI と HPC の融合によるデータ解析とシミュレーションが中心である。特に、WIFIRE Lab は、森林火災の予測と管理のために AI とサイバーインフラを活用した BurnPro3D プラットフォームを開発しており、カリフォルニア州の防災に貢献している。また、エネルギー分野では、Fusion Data Platform を通じて、核融合研究のための高精度なデータ解析が進行中である。さらに、宇宙科学では、Voyager を用いた大規模な AI モデルの訓練が行われており、宇宙データの解析やシミュレーションの効率化が図られている。SDSC はこれらの取り組みを通じて、データ駆動型の科学研究と社会課題の解決に向けて重要な役割を果たしている。

2.4.11. TACC (UT Austin)

本節は、NATIONAL SCIENCE FOUNDATION FY 2025 Budget Request to Congress を情報源としている。

※ TACC の正式名称は Texas Advanced Computing Center である。TACC は、テキサス大学オースティン校（The University of Texas at Austin, UT Austin）に所属している。TACC は、テキサス大学システムの一部門として運営されている。

<https://tacc.utexas.edu/>

(1) 組織体制・人員

テキサス先進コンピューティングセンター（TACC）は、テキサス大学オースティン校に拠点を置き、NSF（米国国立科学財団）の支援のもと、HPCとデータ解析能力の提供を通じて科学技術研究の推進を行っている。TACCの組織体制は、主に Frontera システムと Leadership-Class Computing Facility（LCCF）を中心に展開されており、これらの施設は全国の研究者に対してオープンなアクセスを提供している。LCCFには、コア処理能力を提供する Horizon という計算システムと、分散科学センター（DSCs）が含まれ、これにより専門知識とエッジコンピューティングサービスが提供されている。

(2) 予算

予算面では、LCCF プロジェクトの総費用は約 520M ドル（780 億円）と見積もられており、そのうち 2025 年度には 154M ドル（231 億円）の予算が要求されている。LCCF の運用費用は年間約 40M ドル（60 億円）とされ、初期の 5 年間、その後さらに 5 年間の延長が計画されている。また、Frontera システム自体にも NSF からの支援として 60M ドル（90 億円）の取得予算と運用・保守費用がそれぞれ提供されている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

スーパーコンピュータシステム構成については、Frontera は現在全米の学術キャンパスで最も強力なスーパーコンピュータであり、その後継機である Stampede3 も導入されている。LCCF の Horizon は、Frontera を大きく上回る計算能力を持ち、分散型アーキテクチャを採用している。また、Distributed Science Centers（DSCs）は、NCSA、PSC、SDSC といった拠点に設置され、AI やデータ集約型計算の技術を活用している。これらのシステムは、AI ベースの解析、超大規模シミュレーション、インタラクティブ計算など、多様な利用形態に対応している。

(4) 研究開発内容

研究開発内容に関しては、TACC はリーダーシップクラスの計算能力を活用して、ブラックスホールの合体シミュレーションや高解像度の地震リスクモデルの開発、AI を用いた遺伝子研究など、広範な科学技術分野での応用が進んでいる。また、Frontera は学術研究者向けに年間 250 以上の計算リソース配分を実施しており、その成果の一つとして、Science 誌に掲載された人間の骨格を形作る遺伝子の特定に成功した研究がある。さらに、教育とアウトリーチ活動も強化されており、学生や若手研究者への HPC トレーニングやワークショップが実施されている。

2.4.12. PSC (CMU, Pitt)

本節は、下記のホームページを情報源としている。

※ Pittsburgh Supercomputing Center (PSC) は、カーネギーメロン大学 (CMU) とピッツバーグ大学 (Pitt) による共同研究機関であり、1986年に設立された。

<https://www.psc.edu>

(1) 組織体制・人員

PSC は、科学と研究の発展を支援することを使命とし、計算科学の最先端技術を提供することに注力している。この活動は、全米科学財団 (NSF)、ペンシルベニア州政府、民間企業などの支援を受けており、大学、政府機関、産業界の研究者に計算資源を提供している。また、サイバーインフラストラクチャの開発と運用においても重要な役割を果たしている。PSC は、影響力、包摂性、革新性、協力、誠実性、信頼性という価値を掲げ、科学技術の進歩に貢献している。

(2) 予算

PSC の活動は、連邦政府、州政府、民間企業の資金提供により支えられている。主力スーパーコンピュータである Bridges-2 は、全米科学財団 (NSF) から 10M ドル (15 億円) の助成を受けて運用されている。また、バイオ分子シミュレーション向けの特化型スーパーコンピュータである Anton は、D.E. Shaw Research (DESRES) により開発・提供され、運用は国立衛生研究所 (NIH) の支援を受けている。これらの支援により、PSC は世界最先端の計算資源を研究者に提供し続けている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

PSC は、複数のスーパーコンピュータを運用しており、その主力システムとして Bridges-2、Anton、Neocortex がある。Bridges-2 は 2021 年に稼働を開始したペタスケールスーパーコンピュータであり、HPC、人工知能 (AI)、ビッグデータを統合した計算環境を提供している。このシステムには AMD EPYC 7742 CPU、192 基の NVIDIA V100 GPU、100TB のフラッシュストレージが搭載されており、データ集約型研究に最適化されている。Anton は、分子動力学シミュレーション専用のスーパーコンピュータであり、生体分子の長時間シミュレーションを可能にする特化型アーキテクチャを持つ。2025 年に稼働予定の Anton 3 は、従来のスーパーコンピュータでは難しかった大規模分子系の解析を可能にする。Neocortex は、AI を活用した科学的発見の加速を目的としたシステムであり、Cerebras CS-2 プロセッサを搭載している。このシステムは、人工知能 (AI) やグラフ解析の高速処理を可能にするものであり、科学技術分野における機械学習の発展に貢献している。これらのスーパーコンピュータは、高速ネットワークシステムである Mellanox

HDR-200 InfiniBand や高性能ストレージである Cray ClusterStor E1000 を備えており、最先端の研究を支えている。

(4) 研究開発内容

PSC では、物理学、化学、バイオインフォマティクス、地球科学、エネルギー技術、人工知能、データ解析など、幅広い研究分野において計算資源を提供している。バイオ医療研究では、Anton を利用してタンパク質の折りたたみや分子相互作用、疾患のメカニズム解析を行い、特にウイルスやリボソームの動態解析など、生体分子の動きを原子レベルで解析可能にしている。天文学や物理学の分野では、宇宙論的シミュレーションや素粒子物理学の研究が推進されており、ダークマターの挙動やミュー粒子の磁気モーメント測定のための計算が行われている。材料科学や化学の分野では、新材料の開発、半導体設計、触媒反応の最適化などに計算機シミュレーションが活用されており、量子化学計算を用いた高性能材料の特性解析も進められている。エネルギー技術の分野では、再生可能エネルギー技術の最適化や核融合シミュレーション、エネルギー効率向上のためのシステム解析が行われている。さらに、人工知能とデータ科学の分野では、AI を用いた意思決定支援や医療診断支援、言語処理技術の発展に寄与しており、Neocortex を利用した最先端のディープラーニングモデルの開発が進行中である。

2.4.13. Tri-lab の活動（LANL, LLNL, SNL）について

「tri-lab」は、ロスアラモス国立研究所（LANL）、ローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）、およびサンディア国立研究所（SNL）の3つの研究所が共同で取り組むプロジェクトである。本節は、NNSA の Advanced Simulation and Computing, FY25 IMPLEMENTATION PLAN, Version 0, August 5, 2024 の内容を情報源としている。これらの活動は、核兵器の安全性と信頼性を確保するためのシミュレーションや解析、および新しい計算技術の評価を中心に行われており、NNSA の戦略的目標に沿った取り組みとなっている。

(1) AI インフラの構築（Tri-lab AI Infrastructure Project）

Tri-lab は、AI モデルの効率的かつ迅速なトレーニングと推論を可能にするため、専用のAIリソースとインフラを導入している。具体的には、LLNLがIntel x86 CPUs と NVIDIA H100 GPUs を搭載した専用AIシステムを調達した。また、LANLでは機密ネットワーク向けにAIシステムを調達し、2025年度に展開を予定している。さらに、SNLはCerebras社と契約し、70B パラメータのモデルをトレーニングするためのCerebras CS-3システムの導入を進めている。

(2) データ共有と転送 (Tri-lab Data Runner)

Tri-lab は、3 つの HPC センター間でのデータ共有と転送を効率化するため、Tri-lab Data Runner を開発している。このプロジェクトでは、POSIX ファイルシステムや S3 エンドポイントの利用が検討されており、小規模なデータセットの転送と共有機能の設計が進められている。また、データ転送ツールの実装に加え、セキュリティ面での評価も行われている。

(3) 共通コンピューティング環境 (Common Computing Environment - CCE)

Tri-lab では、3 つのラボ間で共通のソフトウェアスタックとツールを整備し、運用の効率化を図っている。具体的には、Tri-lab Linux Capacity Cluster (TLCC) システムが導入されており、コンテナ技術を活用してアプリケーションの移植性を向上させている。また、CharlieCloud や GitLab、MPI 統合といった技術を用いて、ソフトウェアの移植性と管理性を高めている。さらに、クロスサイト認証とリソース管理にはSARAPEシステムが用いられている。

(4) 高性能計算環境の統合 (HPC Environment Integration)

Tri-lab は、シームレスな HPC 利用を実現するために、クロスサイトでの認証やデータ転送インフラの整備を行っている。具体的には、100Gbps のデータ転送能力を持つ暗号化ネットワークが導入され、Tri-lab 間でのデータ共有が迅速かつ安全に行えるようになっている。また、SARAPE システムを通じて、リモートアクセスの管理やセキュリティ強化が図られている。

(5) 次世代計算技術 (Advanced Technology Systems - ATS)

Tri-lab は、将来の高性能コンピュータ技術の評価と導入に向けて、ATS-5およびATS-6システムの設計と導入計画を進めている。また、「メモリの壁」と呼ばれる性能ボトルネックの克服に向けた技術研究も行われている。これには、ベンダーとの協力を通じた技術検証や評価が含まれる。

(6) 遠隔コンピューティングの支援 (Remote Computing Enablement - RCE)

Tri-lab は、リモートでの HPC 利用体験を向上させるために、ネットワークの改善やソフトウェアの統合、ストレージの最適化を進めている。また、リモートアクセス用の認証強化とデータ転送の効率化が図られており、安全かつスムーズな遠隔利用が可能になっている。

(7) メモリ技術の研究 (Advanced Memory Technologies - AMT)

Tri-lab は、高性能計算のボトルネックであるメモリ問題の解決を目指し、新しいメモリ技

術の研究開発に取り組んでいる。具体的には、CXL (Compute Express Link) を用いたメモリの評価と活用が進められており、次世代メモリ技術の採用が検討されている。

(8) ベンダーとの連携 (Vendor & Multi-Agency Collaborations)

Tri-lab は、国内外のベンダーと協力し、次世代技術の推進を行っている。具体的には、Micron や Cerebras などとの共同プロジェクトが進められており、ベンチマークの開発や次世代メモリ、ネットワーク技術の評価が行われている。また、ベンダーからの技術フィードバックを基に、トレーニングと実装が進行している。

(9) コンテナとソフトウェアのポータビリティ

Tri-lab は、コンテナ技術を活用してアプリケーションの移植性を確保している。特に、CharlieCloud をベースにしたコンテナ化が進められており、Crossroads や El Capitan といった HPC システムでの事前テストが行われている。これにより、アプリケーションの開発と移行が容易になり、運用コストの削減にも寄与している。

2.5. 中国のスーパーコンピュータセンター一覧

本節では、下記のスーパーコンピュータセンターに関する情報をまとめた。

- ・ National SuperComputer Center in Tianjin(国家超算天津中心)
- ・ National Supercomputing Center in Shenzhen(国家超算深圳中心)
- ・ National Supercomputer Center in Changsha(国家超算長沙中心)
- ・ National Supercomputer Center in Guangzhou(国家超算広州中心)
- ・ National Supercomputing Center in Jinan(国家超算済南中心)
- ・ National Supercomputing Center in Wuxi(国家超算無錫中心)
- ・ National Supercomputing Center in Zhengzhou(国家超算鄭州中心)

※ 各センターの名称において、SuperComputer と Supercomputing の違いはホームページの英文標記に合わせた。

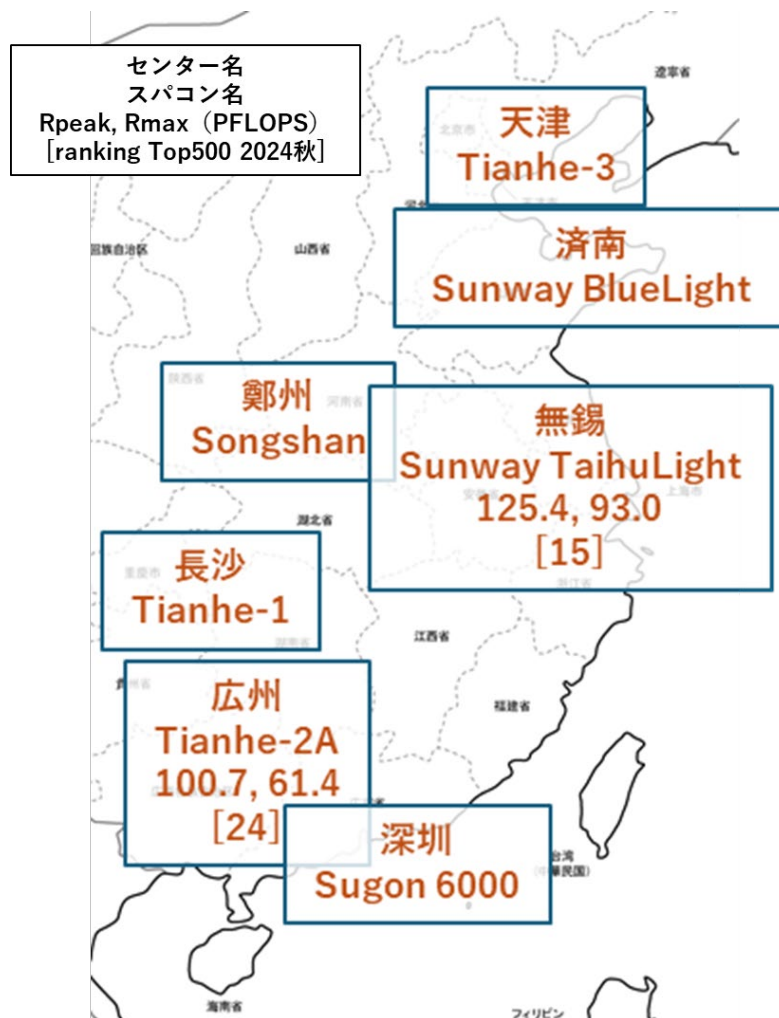


図 2.20 調査した 中国のスーパーコンピュータセンター

つぎの表は、下記のページの情報（新聞記事および github の内容であり、センターからの公式な情報ではない）をまとめたものである。また、2.5.1 以下の記載は情報が古い可能性があるが、公式ページからまとめた内容である。

- ・ <https://www.nextplatform.com/2022/03/11/pondering-the-cpu-inside-chinas-sunway-oceanlight-supercomputer/>

表 2.3 中国のスーパーコンピュータセンター一覧

名称	略称	設立年	場所	スーパーコンピュータ名称	用途
天津	NSCC-TJ	2009 年	天津市	天河一号 天河三号 天河三号 E 级	気象予測、石油探査、 バイオインフォマティクス
深圳	NSCC-SZ	2009 年	広東省 深圳市	曙光 6000 Sugon 6000	AI、ビッグデータ、 金融、製造業向けのクラウド型超算サービス
長沙	NSCC-CS	2010 年	湖南省 長沙市	天河一号 A	科学研究、エネルギー探査、金融業
広州	NSCC-GZ	2011 年	広東省 広州市	天河二号	気象予測、医療データ解析、エネルギー分野
済南	NSCC-JN	2011 年	山東省 済南市	神威・藍光	海洋、エネルギー、環境分野
無錫	NSCC-WX	2016 年	江蘇省 無錫市	神威・太湖之光 神威・海洋之光※	気象予測、創薬、産業設計など、幅広い分野で活用
鄭州	NSCC-ZZ	2016 年	河南省 鄭州市	嵩山	デジタル経済、精密医療、AI、バイオテクノロジー分野

※設置場所は非公開のため推定

表 2.4 中国のスーパーコンピュータセンター一覧（性能は TOP500 より）

場所	名称	英文名称	Rmax[PFlops]	Rpeak[PFlops]
天津	天河一号	Tianhe-1	2.57	4.70
	天河三号 E 级	Tianhe-3E	—	3.15
深圳	曙光 6000	Sugon 6000	—	1.27
長沙	天河一号	Tianhe-1	0.56	1.21
広州	天河二号	Tianhe-2	33.86	54.9
済南	神威・藍光	Sunway BlueLight	—	1.1
無錫	神威・太湖之光	Sunway TaihuLight	93.02	125.44
	神威・海洋之光	Sunway OceanLight	1220	1300
鄭州	嵩山	Song Shan	—	100
昆山	—	—	—	300
成都	—	—	—	100

※ 本情報は下記より（天河三号の性能については、3.3.2 節も参照）

<https://github.com/Chaosers-Ib/ConcurrentComputing/blob/main/Parallel/Computers/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%9B%BD%E5%AE%B6%E8%B6%85%E7%BA%A7%E8%AE%A1%E7%AE%97%E4%B8%AD%E5%BF%83.md>

2.5.1. 国家超算天津中心

国家スーパーコンピューティング天津センター（以下、天津超算）のホームページは最新の情報が反映されていないが、ホームページの「中心介绍」「新闻」「工作动态」における業績と 2025 年 1 月 5 日の「国家超级计算天津中心创新发展 2024 年工作亮点」と 2024 年 5 月 22 日の「《人民日报海外版》 | 中国超算：拓展应用场景 澎湃强劲动力（科技名家笔谈）」の情報をまとめたものである。本センターの英文の正式名称は、National SuperComputer Center in Tianjin である。

<https://www.nsccl-tj.cn/>

天津超算は、国家重点研究開発計画、国家 863 計画、国家科学技術支援計画、国家自然科学基金委員会、国家発展改革委員会のハイテクサービス業特別プロジェクト、国家公共サービスプラットフォーム建設特別プロジェクト、国家工業情報化部の情報化と工業化の融合特別プロジェクト、新世代人工知能産業革新の重点任務公募プロジェクト、天津市科学技術計画重点プロジェクト、天津市スマート製造特別プロジェクト、天津新世代人工知能試験区建設の重大プロジェクトなど、各種の横断的および縦断的プロジェクトに累計で 100 件以上を担当または参画している。

(1) 組織体制・人員

天津超算は、党および国家、天津市政府、国防科技大学の指導のもとで運営されている。天河計算機シリーズを中核に、計算力とデータ処理能力の向上を目指し、幅広い社会の支援を受けている。組織は「革新+応用」の二重主体体制を採用し、天河計算機会社および天河数科会社を通じて、コンピュータネットワークの全国展開や基金管理会社設立など、多方面で事業を拡大している。人員面では、年間で約 40 名の中高級技術者が新たに採用され、国際的人材も積極的に誘致している。また、10 名以上が国家レベルの研究プロジェクトを担当し、1 名が「天津発展・人材先鋒」の候補に選ばれた。

(2) 予算

天津超算は、国および地方政府、企業からの多方面の資金支援を受けている。特に、天河数科会社を通じて設立された 2 億元規模の基金は、計算資源エコシステムの構築を加速している。また、天河次世代スーパーコンピューティングシステム（天河新一代超算系統）

の二期プロジェクトも、科学技術部の評価を経て完成し、計算力の強化に向けた投資が行われた。さらに、スーパーコンピュータによる地域経済への貢献は累計で 700 億円を超え、産業および企業との協力を通じて経済効果を拡大している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

天河次世代スーパーコンピューティングシステムは、15000 個の汎用プロセッサを中心に構成されており、最新の国際 Graph500 ランキングで「ビッグデータ処理効率」のトップに輝いた。このシステムは、計算力・人工知能計算・ビッグデータ処理の統合機能を持ち、超大規模の人工知能計算クラスタを形成している。また、天河天元大規模言語モデル（天河天元大模型）を基に、自然言語処理やデータ解析、生成 AI の開発にも力を入れている。システムの拡張により、気象予測、石油探査、医療診断、人工知能の分野での応用が進んでいる。

(4) 研究開発内容

研究開発面では、天河シリーズを基に、先進材料開発、航空宇宙、医療、エネルギーなど多岐にわたる分野で成果を上げている。特に、「天河天元大模型」を用いた AI 応用研究では、公安、医療、保険などでの実証実験が進行中である。また、GalaxyEDS シミュレーションソフトの 4.0 バージョンが発表され、航空、兵器、エネルギー分野での国産化を推進している。さらに、AI とビッグデータを活用した「AI+算力+データ」の新しいモデルが北京や山東省の病院で導入され、臨床診断の効率化を実現している。これらの取り組みを通じて、天津超算は、国家の重要技術装備や戦略的プロジェクトを支える役割を強化している。

2.5.2. 国家超算深圳中心

国家スーパーコンピューティング深圳センター（以下、深圳超算）のホームページは情報が最新となっていない可能性があり、ホームページの「新闻公告」の 2025 年 1 月 27 日の記事から下記の概要を作成した。本センターの英文の正式名称は、National Supercomputing Center in Shenzhen である。

<http://www.nscsz.cn>

(1) 組織体制・人員

深圳超算は、2009 年 5 月に科学技術部の認可を受けて設立された中国中南部初の国家超算センターである。「十一五」計画に基づき、国家 863 計画、広東省、深圳市の重大プロジェクトとして建設された。深圳超算は、深圳科学技術生態圏の核心である西麗湖国家科技教育城に位置し、建築面積は 4.34 万平方メートルに及ぶ。2015 年末には博士後研究ステーションが認可され、2020 年には独立して博士後研究員の採用と育成が可能となった。現在、

博士後研究ステーションには国家超算 ISC Fellow である于宇教授をはじめ、専門の科学者や技術者が協力し、約 30 名の博士後研究員を育成している。

(2) 予算

深圳超算の予算は、国家および地方政府の資金に支えられている。特に、超算二期プロジェクトは光明科学城の大科学装置核心区に位置し、建築面積 11.68 万平方メートル、200PFlops の超算システムを導入するために巨額の資金が投じられている。さらに、2024 年には国家、省、市の各種科研プロジェクト 13 件が採択され、契約金額は 2,500 万元を超えた。特に国家自然科学基金の青年プロジェクトで 4 件の採択を受け、採択率は 44%と全国平均の 15.5%を大きく上回っている。また、エネルギー効率の向上と消費削減のためのシステム管理能力の改善にも予算が充てられている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

深圳超算は、一期と二期の両方で世界トップクラスのスーパーコンピュータシステムを運用している。超算一期では、世界 TOP500 で第 2 位を記録したシステムが導入され、ピーク性能は数十 PFLOPS に達する。二期では、200PFLOPS の性能を持つ新世代超算システムが導入され、科学計算、エンジニアリング計算、ビッグデータ処理、インテリジェント超算の応用サービスを提供している。システムは、異なるアーキテクチャとストレージ形態を統合した超融合型であり、データ処理とストレージ能力も大規模である。特に、半精度+SVE 混合アルゴリズムや SME 地震モデリング技術を採用し、1024 コア環境で 50 分以内に地震解析を完了するなど、計算効率に優れている。

(4) 研究開発内容

深圳超算は、人工知能 (AI)、ビッグデータ、気象、生命科学、エネルギーなど幅広い分野で研究開発を行っている。特に、宇宙と地上の統合型リモートセンシング大モデル「A2MAE」は、4 分以内に地球上の任意の場所の変化を解析でき、スマートシティやデジタル経済の発展を支えている。また、37 年間の夜間灯光データセットの公開や、NTLSTM および DeepLight といった AI アルゴリズムを用いたデータ解析で、都市化や環境管理の分野に貢献している。さらに、医学人工知能革新プラットフォームも構築され、第三者の大規模モデルとの連携で、医療のデジタル化や AI 応用を促進している。疾患防疫分野では、蚊媒病原体のメタゲノムデータを公開し、ウイルスの遺伝子解析や感染拡大の予測に役立っている。

2.5.3. 国家超算長沙中心

国家スーパーコンピューティング長沙センター（以下、長沙超算）のホームページは下記であり、本情報と合わせの下記の情報をまとめたものである。本センターの英文の正式名

称は、National SuperComputer Center in Changsha である。

<https://nsc.hnu.edu.cn/index.htm>

追加情報

<https://www-en.hnu.edu.cn/info/1010/1973.htm>

<https://www.datacenterdynamics.com/en/news/changsha-supercomputing-center-launches-200-petaFLOPS-tianhe-supercomputer/>

<http://en.people.cn/n3/2024/1126/c90000-20246529.html>

(1) 組織体制・人員

長沙超算は、2014 年に正式に運用を開始した、中国で 3 番目の国家スーパーコンピュータセンターである。湖南大学が設計と運営の中心を担い、国防科学技術大学（NUDT）の技術支援を受けている。施設は湖南大学のキャンパス内に位置し、Tiansuan Platform（天算プラットフォーム）、R&D センター、Tianhe Square（天河広場）の 3 つの主要部分で構成されている。Tiansuan Platform は主に計算業務を担当し、R&D センターは研究開発を行う施設である。さらに、天河広場は集積回路の形状に設計されており、学生向けの科学普及とネットワーク革新の場として機能している。研究者や技術者の具体的な人数は公開されていないが、NUDT からの専門家や湖南大学の研究者が多数所属していると考えられる。

(2) 予算

長沙超算の建設には、総額 7 億元（約 110 億円）を超える投資が行われている。予算は主に国家および湖南省政府からの資金で構成されており、ハードウェアの導入や施設の建設に充てられた。また、持続可能な運用を実現するために、エネルギー効率向上や新技術導入のための追加資金も投入されている。さらに、2022 年には河南省の「第 14 次五カ年計画」に基づき、超算能力の強化と資源利用率 70%の達成に向けた追加投資が発表された。これにより、長沙超算は AI、ビッグデータ、精密医療、バイオテクノロジーなどの分野での応用が加速している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

長沙超算の中核を成すのは、ピーク性能 200 PFLOPS、ストレージ容量 20 ペタバイト（PB）を持つ最新世代の天河スーパーコンピュータである。電力消費はピーク時で 8MW に達する。冷却には浸没式相変液冷技術を採用し、電力使用効率（PUE）は 1.04 未満と非常に高効率である。このシステムは、国防科学技術大学が開発した新世代の技術を基盤としており、FP64（倍精度浮動小数点演算）での性能は世界トップレベルにある。また、Tiantu ソフトウェアシステムを採用し、グラフ処理性能では最新の Small Data Green Graph 500 ランキングで 1 位を獲得している。このランキングは MTEPS/W（1 ワット当

たりの毎秒百万エッジトラバース数)を基準とし、エネルギー効率と計算性能の両面での優位性を示している。

(4) 研究開発内容

長沙超算は、デジタル経済、精密医療、バイオ育種、高度装備、人工知能（AI）などの分野での応用に注力している。特に、AI のモデルトレーニング、大規模ゲノム解析、精密医療におけるビッグデータ解析、農業における遺伝子編集技術などで顕著な成果を上げている。また、スーパーコンピューティングのエコシステムを構築し、産業界や学術機関との連携を強化している。国防分野においては、Phytium の FeiTeng チップをベースにした独自開発のプロセッサを採用しており、米国の制裁によって Intel 製チップが利用できなくなった後も独立した技術基盤を維持している。さらに、天河広場は学生や市民向けの科学普及の場として、集積回路のデザインを取り入れたインタラクティブな体験型施設となっており、次世代の技術者育成にも貢献している。

2.5.4. 国家超算広州中心

国家スーパーコンピューティング広州センター（以下、広州超算）のホームページは情報が最新となっていない可能性があり、ホームページの「新闻公告」の 2023 年 12 月 28 日の記事（これ以降の記事には全体的な内容の記述はなかった）から下記の概要を作成した。本センターの英文の正式名称は、National Supercomputer Center in GuangZhou である。

<http://www.nscg-gz.cn>

(1) 組織体制・人員

広州超算は、「十二五」計画に基づき、国家科学技術部の支援を受け、広東省人民政府、広州市人民政府、国防科技大学、中山大学の共同で設立された。中山大学のキャンパス内に位置し、建物の総面積は 42,332 平方メートル、うち機械室や付属施設は 17,500 平方メートルを占めている。組織体制は「開放、協力、共進、革新」を理念とし、科学研究、学科育成、技術革新、人材育成、交流協力の五つの支援プラットフォームを構築している。人員は、中山大学や国防科技大学の研究者を中心に構成されており、超算の応用拡大と技術革新に注力している。

(2) 予算

広州超算は、国家科学技術部や地方政府からの資金援助を受けている。特に、「天河二号」および新世代超算システム「天河星逸」の開発には、国家の重点プロジェクトとして巨額の予算が投入されている。また、2023 年には「粤港澳超算应用インターネット」の構築が発表され、広東省や通信企業との協力を通じて、計算資源とネットワーク資源を統合する

ための追加投資が行われた。これにより、超算技術の応用拡大と産業化が加速している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

広州超算の中核は、「天河二号」と新世代の「天河星逸」である。「天河二号」は、ピーク性能 10.07 PFlops、実行性能 6.14 PFlops、メモリ容量 3PB、ストレージ容量 19PB を誇る。「天河星逸」はこれをさらに強化し、高性能のマルチコアプロセッサと高速ネットワーク技術、大容量ストレージを採用している。この新システムは、AI の大規模モデル、ビッグデータ解析、高性能計算の三つの分野で高い処理能力を持つ。また、「星光」という国産の多モード超算融合支援プラットフォームを開発し、複数分野での応用を推進している。

(4) 研究開発内容

広州超算は、科学研究と産業応用の両面で積極的に活動している。特に、AI と超算の融合による新しい応用技術の開発に注力しており、「天河星逸」を用いた高性能計算プラットフォームを構築している。具体的には、気象予測、デジタルツイン、エネルギー探査、医療診断などの分野での応用が進んでいる。また、国家超算インフラ「CNGrid-NG」の構築に参加し、中国全土での超算技術の普及と標準化を目指している。さらに、「天河之星」という優秀な応用成果を表彰する制度を通じて、新技術の実用化と人材育成を強化している。これらの取り組みにより、国家超算広州中心は、国家および地域の戦略的発展に向けた重要な技術支援基盤として機能している。

2.5.5. 国家超算済南中心

国家スーパーコンピューティング済南センター（以下、済南超算）のホームページは情報が最新となっていない可能性があり、ホームページの「新闻公告」の 2024 年 12 月 31 日の記事から下記の概要を作成した。本センターの英文の正式名称は、National Supercomputing Center in Jinan である。

<https://nsccjn.cn>

(1) 組織体制・人員

済南超算は、2011 年に国家科学技術部の認可を受けて設立された総合的な研究センターである。主に知能計算および情報処理技術の研究と計算サービスを行っており、完全に自主開発された CPU を用いた超算システム「神威藍光」の開発地でもある。済南超算は、山東省政府および済南市政府の支援を受け、山東大学と連携して運営されている。2019 年末時点で、職員は 180 名以上、うち研究者が 142 名、研究支援者が 25 名である。また、正高級専門技術者 26 名、副高級専門技術者 58 名が所属し、11 名が国家級または省級の称号を有している。さらに、計算機修士学位の学科拠点と、山東省初のサイバーセキュリティ

学院を設立している。

(2) 予算

済南超算の予算は、国家および地方政府からの資金に支えられている。特に、超算科技园の建設には総投資額 108 億元が投じられ、総建築面積は 69 万平方メートルに達する。さらに、エクサスケール級のスーパーコンピュータプラットフォーム、人工知能プラットフォーム、工業インターネットプラットフォーム、大データプラットフォームの構築に向けて、2019 年から 2022 年にかけて継続的に資金が投入されている。また、山東省全域をカバーする「山東算網」の構築にも予算が充てられ、16 の地市と 100 以上の拠点を結び、総計算能力 6000 PFlops 以上を実現している。これにより、山東省のデジタルインフラの強化と産業応用の加速が図られている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

済南超算は、2011 年に中国初の完全に自主開発された CPU を搭載した PFlops 級スーパーコンピュータ「神威藍光」を導入した。このシステムは、ピーク性能 1 PFlops を超え、エネルギー効率に優れた設計となっている。2018 年にはエクサスケール計算のプロトタイプ機を構築し、現在はエクサスケール級のスーパーコンピュータを中心としたプラットフォームの開発が進められている。さらに、「山東算網」を通じて、省内外の計算資源とネットワーク資源を統合し、効率的な計算サービスを提供している。また、工業インターネットや AI トレーニング向けに最適化されたストレージとネットワーク技術を採用している。

(4) 研究開発内容

済南超算は、エネルギー、環境、医療、スマートシティなど多岐にわたる分野で研究開発を行っている。特に、エネルギー分野では、シェールガスや石油の探査においてシミュレーション技術を駆使し、採掘効率の向上に貢献している。環境分野では、「黄河流域データ立方」という基盤施設を構築し、流域管理や環境保護に活用されている。医療分野では、中医学をベースにした「扁鵲中医大モデル」の開発や、医療データの相互運用ネットワークの構築が進んでいる。さらに、スマートシティの分野では、交通管理、環境監視、災害予測の高度化を図っている。特筆すべきは、独自開発の「山東大モデル革新工場」により、産業応用向けに最適化された AI モデルの開発と実装が進んでいる点である。また、国際協力にも積極的で、「量超融合」プロジェクトを通じて、量子計算とスーパーコンピューティングの融合研究を進めている。

2.5.6. 国家超算無錫中心

国家スーパーコンピューティング無錫センター（以下、無錫超算）のホームページは情報が最新となっていない可能性があり、ホームページの「首页 > 新闻公告 > 新闻动态」の2024年4月の記事（これ以降の記事には全体的な内容の記述はなかった）から下記の概要を作成した。本センターの英文の正式名称は、NSCC National Supercomputing Center in Wuxi である。

<https://nscewx.cn>

(1) 組織体制・人員

無錫超算は、無錫市政府および国家の戦略的指導のもとで運営され、地域戦略技術の中核を担っている。中心は無錫市の「465 次世代産業クラスター」計画の一環として、人工知能（AI）、データ、算力、アルゴリズムの三つの要素に重点を置いている。また、無錫市の大データグループと連携して、都市全体の算力資源（スーパーコンピュータ、クラウドコンピューティング、知能計算など）の統合を進めている。人員面では、先端技術の研究者や専門家が多数所属し、「神工坊」（坊：workshop）などの専門チームを通じて、多学科統合計算や高性能計算技術の開発に取り組んでいる。

(2) 予算

無錫超算の予算は、国の重点研究開発計画「十四五」や無錫市の人工知能産業振興政策からの資金支援によって成り立っている。2024年には、無錫市が新たに発行した「算力券（Computing Power Voucher）」によって、企業が低コストで算力資源を利用できる仕組みが導入された。さらに、国有企業との協力によって369.3億元の投資が行われ（「合作金額達369.3億元」）、未来都市（未来城）人工知能算力センター（Future City AI Computing Power Center）の建設や、上流のチップ開発から下流のAIアプリケーションまでの広範な支援が行われている。また、高性能計算技術企業のインキュベーションを支援するために、専用のファンドも設立されている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

無錫超算には、「神威・太湖之光 Sunway TaihuLight」世界初のピーク性能10 PFlops超えのスーパーコンピュータが設置されている。これは、40台の計算機と8台のネットワーク機器から成り、民用航空機の多学科統合設計やAIの大規模モデルトレーニング、ビッグデータ解析に利用されている。システムは「一雲多芯(One Cloud, Multiple Chips)」、「一雲多核(One Cloud, Multiple Cores)」、「一雲多中心(One Cloud, Multiple Centers)」という新型都市型算力センターのコンセプトに基づいて設計され、超算力、クラウド算力、知能算力の統合的な提供が可能である。また、先端技術として、超大規模並列計算や多学科

統合計算、超算移植加速技術が取り入れられている。

(4) 研究開発内容

国家超算無錫中心は、航空機やエネルギー、医療分野を中心に、次世代 AI と高性能計算技術の研究開発を進めている。特に、民用航空機の開発効率向上と精度強化を目的とした「多学科統合設計と超算移植加速」プロジェクトでは、西北工業大学や中国商飛などと協力し、パラメータ統一化と大規模並列計算の技術的課題に取り組んでいる。また、算力を活用した AI の普及にも力を入れており、無錫市全体で AI の産業応用を推進している。これには、算力供給プラットフォームの構築や、算力券による企業支援、AI モデルの開発といった具体的な施策が含まれる。さらに、未来都市人工知能算力センターを通じて、無錫市全域への算力供給の効率化と AI 技術の普及が図られている。これらの取り組みにより、国家超算無錫中心は、無錫市のデジタル経済発展の基盤を強化し、持続可能な新興産業の育成を目指している。

2.5.7. 国家超算鄭州中心

国家スーパーコンピューティング鄭州センター（以下、鄭州超算）のホームページは下記であり、追加情報を含め情報をまとめた。本センターの英文の正式名称は、National Supercomputing Center in Zhengzhou である。

<https://www7.zzu.edu.cn/nscczz/index.htm>

追加情報

<http://www.zhengzhoucity.gov.cn/en/impression/20220315/9090.html>

(1) 組織体制・人員

鄭州超算は、2016 年に国家科学技術部の承認を受けて設立された、中国で 7 番目の国家スーパーコンピュータセンターである。河南省の鄭州高新区に位置し、鄭州大学と密接に連携して運営されている。鄭州大学は、科学研究と教育の両面で中心的な役割を果たしており、同大学の科学技術パークも超算センターの一部として機能している。職員数についての具体的な情報は公開されていないが、AI、ビッグデータ、バイオインフォマティクスなど、多様な専門分野の研究者が所属していると考えられる。また、今後の拡張計画には、さらに多くの研究者や技術者の採用が見込まれている。

(2) 予算

鄭州超算の建設と運営には、国家および地方政府からの巨額の資金が投じられている。特に、「第 13 次五カ年計画」と「第 14 次五カ年計画」の中で、鄭州超算は河南省の新型インフラ建設の中核として位置付けられている。総投資額は公表されていないが、サーバー設備、液冷システム、データセンターの建設、AI およびビッグデータ処理能力の向上に向け

た予算が充てられている。また、2022 年の「河南省新型インフラ建設計画」に基づき、計算能力の強化と資源利用率の向上に向けた追加投資が行われている。これにより、計算資源の利用率を 70%以上に高める目標が設定されている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

鄭州超算の中核をなすのは、理論ピーク性能 100 PFlops (PFLOPS)、ストレージ容量 100 ペタバイト (PB) を誇るスーパーコンピュータ※である。このシステムは、最新の「浸没式相変液冷技術」を採用し、電力使用効率 (PUE) は 1.04 未満とされている。これは世界的にもトップレベルのエネルギー効率である。また、実測における連続計算性能でも世界トップクラスの位置にある。このシステムは、従来の科学計算だけでなく、人工知能 (AI)、ビッグデータ処理、高度なシミュレーションにも対応している。FLOPS (浮動小数点演算能力) の観点では、1 日あたりの計算処理能力は通常のコンピュータの 1 万年以上に相当する。この性能により、膨大なデータ解析や高精度のシミュレーションを短時間で実行できる。

※ 嵩山 (Songsshan) :

- ・ 高性能計算ノード数 : 3,800 個
- ・ プロセッサ : 中国製の海光 (Hygon) X86 CPU
- ・ 加速器 : 曙光 (Sugon) 製
- ・ 理論ピーク性能 : 100 PFLOPS

(4) 研究開発内容

鄭州超算は、河南省のデジタル経済、精密医療、生物育種、高度装置製造、人工知能といった重点分野での応用に特化している。特に、AI モデルのトレーニング、大規模なゲノム解析、精密医療におけるビッグデータ解析、農業における遺伝子編集技術などでの利用が進んでいる。また、スーパーコンピューティングをより「地に足の着いた」形で産業に活用するため、産業界との共同プロジェクトが数多く展開されている。さらに、鄭州超算は、全国レベルでのスーパーコンピューティング応用のハブとなることを目指し、「スーパーコンピューティング革新エコロジープロジェクト」を複数展開している。これには、AI を用いた交通管理、スマートシティのインフラ管理、エネルギー効率の最適化などが含まれる。また、エネルギー消費を削減し、持続可能なデータセンター運営を実現するための技術開発も進められている。

2.6. アジア太平洋地域のスーパーコンピュータセンター一覧

本節では、下記のスーパーコンピュータセンターに関する情報をまとめた。

- ・ Pawsey Supercomputing Centre(オーストラリア)
- ・ National Computational Infrastructure(オーストラリア)
- ・ National Supercomputing Centre(シンガポール)
- ・ A*STAR Computational Resource Centre(シンガポール)

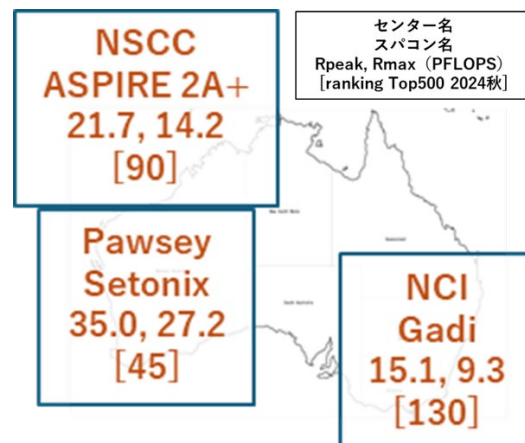


図 2.21 調査したシンガポールとオーストラリアのスーパーコンピュータセンター

2.6.1. Pawsey (オーストラリア)

本節は、Pawsey の 2022 年の Annual Report である下記の Accelerating Discovery2022 を情報源としている。

※ Pawsey の正式名称は Pawsey Supercomputing Research Centre である。Pawsey は、オーストラリア政府の Australian Government' s National Collaborative Research Infrastructure Strategy (NCRIS) の支援を受けて運営されており、特に CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) を中心とした複数のオーストラリアの研究機関の共同体によって管理されている。

<https://pawsey.org.au/>

(1) 組織体制・人員

Pawsey は、エグゼクティブディレクターの Mark Stickells と会長の Tim Shanahan によって指導されている。オーストラリア国立科学機関 CSIRO や西オーストラリアの 4 つの主要大学 (The University of Western Australia, Curtin University, Edith Cowan University, Murdoch University) との連携が特徴である。また、専門家チームは約 100 名

以上で構成されており、HPC とデータ解析の分野で世界的に評価されている。Pawsey は Diversity and Inclusion Committee を設置し、全職員の 24%、インターンの 30%が女性であるなど、多様性と包摂を推進している。

(2) 予算

Pawsey は、オーストラリア政府からの 70M 豪ドル（67 億円）の資金提供を受け、次世代スーパーコンピュータ「Setonix」の導入と技術基盤の刷新に充てている。さらに、2022 年には 5 億 5,900 万コア時間が 158 の研究プロジェクトに割り当てられ、年間予算は約 100M 豪ドル（95 億円）に達している。これには、国家共同研究インフラ戦略 (NCRIS) からの支援も含まれる。また、企業や国際的な HPC センターとの協力により、追加資金と技術サポートも確保している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

Pawsey の主力は「Setonix」であり、HPE Cray EX アーキテクチャを採用し、AMD Milan CPU と NVIDIA GPU を搭載している。総ストレージ容量は 130PB に達し、これは世界最大級の研究データストレージの一つである。また、世界初の常温動作が可能なダイヤモンドベースの量子コンピュータを導入しており、古典コンピューティングと量子コンピューティングの融合を進めている。さらに、エネルギー効率向上のために地熱冷却システムと太陽光パネルを活用し、エネルギー消費を 50%削減している。

(4) 研究開発内容

Pawsey は、天文学、エネルギー資源、バイオインフォマティクス、ヘルスサイエンスなど幅広い分野の研究を支援している。特に、SKA プロジェクトを通じた電波天文学の研究や、COVID-19 の疫学モデル、がん治療法の 3D ビジュアライゼーション、量子アルゴリズムの開発などが注目される。年間 3,219 人の研究者がアクセスし、400 本以上の論文が発表された。さらに、年間 6,394 時間のトレーニングを提供し、次世代の研究者と技術者の育成にも力を入れている。こうした取り組みを通じて、Pawsey はオーストラリアの HPC 分野における中核的役割を果たしている。

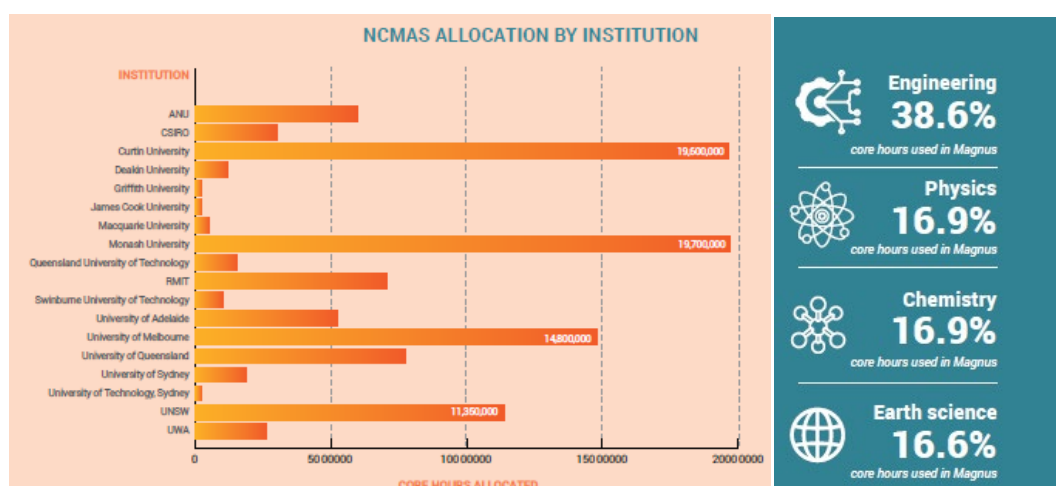


図 2.22 豪州 Pawsey における分野別の計算資源割当

- ※ 出典は Pawsey Supercomputing Centre Annual Report 2019-2020, A New Era of HPC, Accelerating Australia's, scientific outcomes and impacts より（古い）
- ※ 図中にある NCMAS（National Computational Merit Allocation Scheme）とは、オーストラリアにおける国家規模の高性能計算資源の配分制度であり、研究者が HPC）を利用するためのアクセス権を申請・取得するための枠組みである。

NCMAS（National Computational Merit Allocation Scheme）は、オーストラリア連邦政府が主導する、全国規模の高性能計算資源の公平かつ効率的な配分を目的とした制度である。大学や研究機関に所属する研究者が、卓越した科学的・技術的提案に基づき、審査を経て HPC リソースの使用権を得ることができる。配分対象には、Pawsey Supercomputing Centre や NCI Australia など、国内主要スーパーコンピュータ施設が含まれる。NCMAS は、競争的なピアレビュー方式を採用し、優れた研究への資源集中を図ることにより、オーストラリアの研究力と国際競争力の強化に寄与している。

2.6.2. NCI（オーストラリア）

本節は、ANNUAL REPORT 2022-23 を情報源としている。

- ※ NCI の正式名称は National Computational Infrastructure である。NCI は、オーストラリア国立大学（Australian National University, ANU）に所属し、オーストラリア政府の Australian Government's National Collaborative Research Infrastructure Strategy (NCRIS) の支援を受けて運営されている

<https://pawsey.org.au/>

(1) 組織体制・人員

National Computational Infrastructure（NCI）は、オーストラリア国立大学（ANU）が

運営し、オーストラリア政府の教育省が資金を提供している。NCI の組織は、3 つの主要部門に分かれ、ビジネス開発とユーザーサポート、HPC とデータイノベーション、革新的なコンピュータ環境の管理に特化している。NCI アドバイザリーボードは、独立した議長、NCI ディレクター、および主要なコラボレーターからの代表者で構成されており、戦略的な方向性を決定している。また、NCI は、CSIRO、気象局、Geoscience Australia などの国家科学機関や、大学との協力によって成り立っている。

(2) 予算

2022-2023 年度の NCI の総収入は約 21.67M 豪ドル (21 億円) であり、主な財源は NCI コラボレーションによるもの (79%)、NCRIS (National Collaborative Research Infrastructure Strategy) からの資金 (19%)、およびその他のプロジェクト収入 (2%) である。支出の約 47%は設備投資、24%は人件費、14%は施設の維持費に充てられている。また、HPC の更新費用に関しては、非資本的な支出として約 65,540 豪ドル (623 万円) が計上されている。これにより、Gadi スーパーコンピュータのアップグレードや電力供給の増強が進められている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

NCI は、Gadi スーパーコンピュータを中核とし、Nirin クラウドおよび 20 ペタバイト規模の Gdata6 ファイルシステムを運用している。Gadi は、Intel の Sapphire Rapids プロセッサを追加することで、74,880 のプロセッサコアと 360 テラバイト以上のメモリを備え、40%以上の性能向上を達成した。また、NVIDIA DGX GPU ノードを利用し、AI や機械学習のワークフローに対応している。Nirin クラウドは、データ処理、可視化、コード開発のための柔軟な環境を提供し、Gadi との統合を強化している。これにより、地球科学やゲノム解析などの複雑なシミュレーションが効率的に行われている。

(4) 研究開発内容

NCI の研究開発は、気候変動、バイオメディカルデータ、AI を三本柱とするフラッグシッププログラムに焦点を当てている。気候・地球科学の分野では、NARClIM2.0 プロジェクトを通じて地域気候シミュレーションを実施し、政策立案に貢献している。また、ゲノム解析では、PrOSPeCT プロジェクトを通じて癌治療のためのゲノム情報の解析と臨床試験を支援している。さらに、AI 技術の分野では、深層学習モデルを用いたゲノム解析や量子コンピューティングのシミュレーションを推進している。これにより、AI を活用した新素材の発見や医療分野での革新が加速している。

2.6.3. NSCC（シンガポール）

本節は、NSCC Singapore e-newsletter, NEWSBYTES, January 2024～February 2025 の news letter を情報源としている。

※ NSCC の正式名称は National Supercomputing Centre である。NSCC は、シンガポールの A*STAR（Agency for Science, Technology and Research）とシンガポール政府の National Research Foundation (NRF) の支援によって設立された。

<https://www.nscg.sg/>

(1) 組織体制・人員

NSCC シンガポールは、Dr. Terence Hung を最高経営責任者 (CEO) とし、約 50 名の専門家チームで運営されている。国家研究財団 (NRF) や科学技術研究庁 (A*STAR)、ナショナル・クアンタム・コンピューティング・ハブ (NQCH) などと連携し、HPC と量子コンピューティングの研究を推進している。また、15 カ国以上の国際的な HPC センターとの協力関係を築いており、アライアンス・オブ・スーパーコンピューティング・センターズ (ASC) のメンバーとして国際会議にも参加している。

(2) 予算

NSCC シンガポールは、国家研究財団 (NRF) から 270M シンガポールドル (302 億円) の資金提供を受けている。この予算は、HPC インフラの強化、研究開発、および HPC 人材の育成に充てられている。さらに、国際的なパートナーシップやプロジェクトへの参加を通じて、年間約 50M シンガポールドル (56 億円) 相当の追加資金や技術サポートを確保している。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

NSCC シンガポールの主力は ASPIRE 2A+であり、TOP500 で第 90 位にランクインしている。システムは NVIDIA DGX SuperPOD と 40 台の NVIDIA H100 システム、計 320 基の GPU を搭載し、ピーク性能は 21.73 PFlops に達する。また、400Gb/s の NVIDIA インフィニバンドネットワークと、27.5PB のホームストレージおよび 2.5PB のスクラッチストレージを備えている。さらに、エネルギー効率を最適化するための EcoTuner ツールも導入されており、最大で 30%の消費電力削減を実現している。

(4) 研究開発内容

NSCC は、気候科学、バイオメディカル、人工知能、量子コンピューティングなどの分野での研究を支援している。例えば、アンモニア燃焼のシミュレーションには約 2,000 万 CPU 時間が割り当てられ、GPU を活用した大規模シミュレーションが行われている。また、ナショナル・クアンタム・コンピューティング・ハブ (NQCH) との協力により、年間

5,000 時間以上の量子シミュレーションが実施されている。さらに、年間 30 回以上のワークショップやトレーニングを通じて、約 500 人の学生や専門家に HPC 技術の教育を提供している。こうした取り組みにより、NSCC シンガポールは国内外の HPC コミュニティにおける重要な役割を果たしている。

2.6.4. A*STAR (シンガポール)

本節は、下記の IMPACT THROUGH INNOVATION ANNUAL REPORT, APRIL 2023 - MARCH 2024 を情報源としている。

※ A*STAR の正式名称は Agency for Science, Technology and Research である。

A*STAR は、シンガポール政府の Ministry of Trade and Industry (貿易産業省, MTI) に所属している国立研究機関である。

※ A*STAR と ACRC について (<https://www.a-star.edu.sg/acrc/home>)

A*STAR Computational Resource Centre (ACRC)は、シンガポールの科学技術機関 A*STAR の研究者コミュニティ全体に対して、HPC リソースを提供している。ACRC のビジョンは、「A*STAR コミュニティが ACRC のサービス価値を最大限に活用できるようにする」ことであり、ミッションは「すべての A*STAR の科学的計算ニーズを満たすこと」である。現在、ACRC は数百人規模のユーザーコミュニティの HPC ニーズを支え、複数の高性能計算機と急速に増加するデータストレージ資源を管理している。

ACRC は、シンガポールの新たな科学技術拠点である One-North 地区の Fusionopolis にデータセンターを構え、HPC サービスを提供している。組織は、i) 計算システム、ii) ストレージ、iii) ネットワーキング、iv) オペレーションの 4 つの機能領域に分かれている。また、ACRC は HPC ユーザーのサポートを重要視しており、将来の高性能ハードウェアの要件計画や、入札および調達プロセスも担当している。これにより、A*STAR 全体の研究活動を強力に支援している。

(1) 組織体制・人員

A*STAR (Agency for Science, Technology and Research) はシンガポール政府の主要な研究機関であり、科学技術の進展と経済成長を推進する役割を担っている。組織体制としては、最高経営責任者 (CEO) の Frederick Chew 氏を中心に、科学技術政策や国際連携、バイオメディカル研究、工学研究など多岐にわたる分野の専門家たちが指導層に名を連ねている。A*STAR は 5,900 名以上の科学者や技術者を擁し、研究開発や商業化支援に従事している。

(2) 予算

予算面では、A*STAR は 2023 年度に産業向け R&D 支出として約 354.6M シンガポールドル（397 億円）を計上しており、RNA 医薬品開発には 97M シンガポールドル（109 億円）、フラットオプティクスとシリコンフォトニクスの研究には 180M シンガポールドル（202 億円）が投資されている。また、ディープフェイク対策やオンラインの偽情報対策には 50M シンガポールドル（56 億円）、AI 技術の産業応用には 60M シンガポールドル（67 億円）が割り当てられている。

(3) スーパーコンピュータシステム構成

研究開発内容としては、A*STAR はバイオメディカル、エレクトロニクス、持続可能エネルギー、ロボティクスといった多岐にわたる分野での基礎研究と応用研究を推進している。特に、AI と量子技術を活用したスマート製造や、再生可能エネルギーの効率化、RNA 医薬品や次世代半導体の開発が注目されている。また、産学官連携によるイノベーション促進にも力を入れており、国内外のパートナーシップを通じて技術の商業化を進めている。さらに、海事分野での AI 活用や衛星技術、持続可能な都市計画に関連するプロジェクトも推進されており、シンガポールの産業競争力強化に寄与している。

(4) 研究開発内容

研究開発内容としては、A*STAR はバイオメディカル、エレクトロニクス、持続可能エネルギー、ロボティクスといった多岐にわたる分野での基礎研究と応用研究を推進している。特に、AI と量子技術を活用したスマート製造や、再生可能エネルギーの効率化、RNA 医薬品や次世代半導体の開発が注目されている。また、産学官連携によるイノベーション促進にも力を入れており、国内外のパートナーシップを通じて技術の商業化を進めている。さらに、海事分野での AI 活用や衛星技術、持続可能な都市計画に関連するプロジェクトも推進されており、シンガポールの産業競争力強化に寄与している。

2.7. 欧米と日本の比較

本節では、欧米およびアジアのスーパーコンピュータセンターと日本のスーパーコンピュータセンターを比較し、それぞれの特徴や今後の方向性について考察する。

(1) 組織体制・運営の比較

欧米や中国のスーパーコンピュータセンターは、多くの場合、政府、大学、民間企業が協力して運営している。例えば、米国の OLCF や ALCF は、エネルギー省（DOE）の支援を受け、基礎研究や国家プロジェクトに活用されている。また、欧州の BSC や CSC などは、EU の HPC 戦略の一環として機能し、複数の国や機関が共同で運営する仕組みを持っている。

一方、日本のスーパーコンピュータは、理化学研究所（R-CCS）が運営するスーパーコンピュータ「富岳」が代表例である。日本のスーパーコンピュータは政府（文部科学省）主導であり、大学や民間企業との連携も進んでいるが、欧米のような国際的なコンソーシアムの形態は少ない。そのため、日本のスーパーコンピュータは国内の研究者や産業向けの活用が中心となり、グローバルな共同研究の機会は相対的に少ない傾向にある。

(2) 予算・資金調達の比較

米国や欧州では、スーパーコンピュータの開発・運用に多額の公的資金が投入されている。例えば、米国の DOE は、エクサスケール・コンピューティングの実現に向けて、「Frontier」（2EFlops）や「Aurora」「El Capitan」の開発それぞれについて 1,000M ドル（1,500 億円）を超える規模の予算を投じている。また、EU の「EuroHPC イニシアティブ」は、各国が資金を拠出し、HPC インフラの強化を進めている。

日本では、「富岳」の開発費用は 1,300 億円規模であり、日本の HPC 予算は文部科学省主導であるが、産業界からの資金提供は限定的である。一方、米国では IBM、Intel、AMD、NVIDIA などの企業との共同開発が活発に行われており、民間からの投資も積極的に進められている。日本においても、安定した資金確保のために、産業界とのさらなる連携が求められる。

しかし、日本でもフラグシップスーパーコンピュータ開発（「京」、「富岳」の例など）においては、設計段階を中心に官民分担による出資が求められるなど、担当ベンダーにとっては相応の資金負担であり、参画には経営上のインパクトも考慮が必要である。

(3) スーパーコンピュータの性能・技術の比較

米国の「Frontier」、中国の「天河三号」、欧州の「LUMI」など、各国ではエクサスケール時代を見据えたスーパーコンピュータの開発が進んでいる。これらのスーパーコンピュータは、AMD や NVIDIA の最新 GPU を活用し、AI や量子計算との統合を目指している。日本の「富岳」は、ARM ベースの Fugaku A64FX を採用し、従来の x86 アーキテクチャとは異なる設計によって高い電力効率を実現している。これにより、「富岳」は汎用計算や産業用途に強みを持つが、GPU を活用したディープラーニングや AI 分野では、米国や中国のスーパーコンピュータと比較して課題がある。特に、AI と HPC を融合させる流れが加速する中で、日本のスーパーコンピュータの技術戦略が問われている。

(4) 研究開発・応用分野の比較

欧米のスーパーコンピュータセンターでは、気候変動、エネルギー、医療、生物学、物理学、材料科学など幅広い分野で HPC が活用されている。特に、米国の OLCF や ALCF では、核融合研究、宇宙物理、AI を活用した創薬など、国家的なプロジェクトに重点が置かれている。欧州の BSC や JSC では、エネルギー効率の高いスーパーコンピュータ開発

が進められており、持続可能な HPC インフラの構築に取り組んでいる。

日本では、「富岳」が COVID-19 対策のシミュレーション、地震・津波予測、創薬シミュレーションなどに活用された。しかし、国際的な共同研究の比率は欧米と比べて低い傾向にある。日本のスーパーコンピュータは、国内の産業応用や防災研究に特化する傾向があり、AI や量子計算との連携が進む欧米の潮流とは異なる方向性を持っている。

ただし、日本でも、「AI for Science」など、スーパーコンピュータと AI の融合を目指す動きがある点、また量子コンピューティングとの連携の機運もある点は今後発展すると思われる。

(5) エネルギー効率・環境対策の比較

欧州の「LUMI」などは、再生可能エネルギーを活用した HPC インフラの構築が進んでいる。例えば、フィンランドの「LUMI」は水力発電による電力供給を受け、エネルギー効率の最適化が図られている。日本の「富岳」も、エネルギー効率には優れており、Green500 ランキングでは上位にランクインするほど省エネ性能が高い。しかし、日本国内の電力事情を考慮すると、再生可能エネルギーをスーパーコンピュータに活用する取り組みは、欧米に比べて発展途上である。今後、HPC の持続可能な運用を目指し、環境負荷を低減する技術の開発が求められる。

(6) 今後の展望

日本のスーパーコンピュータは、技術力や電力効率の面で世界トップレベルにあるが、国際的な共同研究の推進、AI・GPU を活用した計算、産業界との連携、エクサスケール時代への対応など、さらなる課題も存在している。特に、米国や欧州が AI・量子計算と HPC を統合する動きを進めている中で、日本も同様の方向性を強化する必要がある。

また、スーパーコンピュータの開発には長期的な資金確保が不可欠であり、政府だけでなく産業界からの投資拡大も重要である。さらに、欧州のような国際共同プロジェクト（EuroHPC のような枠組み）への参加を強化し、日本の技術力を世界的に活用することが求められる。

今後、日本が HPC 競争でリードし続けるためには、エクサスケール・スーパーコンピュータの開発、AI や量子計算との統合、国際的な研究ネットワークの強化が不可欠である。また、海外との比較に関しては、スーパーコンピュータ応用研究を推進する上での高度専門性を有する支援人材層が、特に米国など海外と比較して日本は層が薄いこと、そのため日本では研究者自身が プログラム開発やスーパーコンピュータへの適合性確保のための業務を自ら行う必要がある点を改善する必要がある。これらの課題を克服することで、日本のスーパーコンピュータは引き続き世界の最前線で活躍できる。

2.8. まとめ

欧米には多くのスーパーコンピュータセンターが存在し、科学研究、産業、国家安全保障の分野で最先端の計算リソースを提供している。欧州では EuroHPC による共同事業のもと、各国のセンターが連携してエクサスケール・コンピューティングの推進や HPC インフラの整備を進めている。一方、米国ではエネルギー省（DOE）や国家核安全保障局（NNSA）を中心に、核兵器シミュレーション、気候変動解析、医療分野の研究などで HPC 技術を活用している。

欧州にはドイツ、フランス、フィンランド、スペイン、イタリア、オランダ、ポーランド、英国、スイスなどの国々に主要なスーパーコンピュータセンターがある。例えば、フィンランドの CSC は LUMI スーパーコンピュータを運用し、グリーンデータセンターとして 100%再生可能エネルギーを使用。スペインの BSC は MareNostrum シリーズを運用し、欧州 HPC ネットワークの中核を担う。ドイツの JSC や HLRS、LRZ は Gauss Centre for Supercomputing（GCS）の一員として、エクサスケールシステムの開発を進めている。フランスの TGCC や GENCI も、量子計算や AI 活用に向けた新技術開発を推進している。

米国では DOE 管轄の国立研究所が中心となり、超大規模シミュレーションや AI 活用の研究を進めている。オークリッジ（OLCF）では世界初のエクサスケール・スーパーコンピュータ「Frontier」を運用し、気候モデリングや新薬開発に活用。ロスアラモス

（LANL）やローレンスリバモア（LLNL）は国家安全保障ミッションのためのシミュレーションを担当し、次世代核兵器の評価や AI 活用の最前線を担う。アルゴンヌ（ALCF）ではエクサスケールマシン「Aurora」が登場し、機械学習や大規模データ解析が可能に。NASA の HECC は宇宙探査や航空宇宙分野の HPC 利用を促進している。

欧米の HPC センターは、エクサスケール・コンピューティング、AI との融合、エネルギー効率の向上といった課題に取り組んでいる。AI の活用では、HPC と組み合わせた機械学習や量子コンピューティングの実験が進み、核融合エネルギーのシミュレーション、ゲノム解析、創薬、宇宙科学など多岐にわたる分野で応用が進む。また、各国で HPC のカーボンフットプリント削減に向けた取り組みが進み、グリーンデータセンターの構築が進められている。

HPC の開発・運用では国際協力が欠かせない。欧州では EuroHPC のもとで共同のスーパーコンピュータが整備され、米国との連携も深まっている。また、ドイツの GCS、米国の DOE ラボ、NASA などは産業界とも協力し、次世代 HPC 技術の標準化とソフトウェアエコシステムの確立を進めている。今後、ポストエクサスケール時代の計算技術、HPC と AI のさらなる融合、持続可能なスーパーコンピューティングが、欧米のスーパーコンピュータセンターにとっての重要なテーマとなる。

以下に本章で収集した情報をスーパーコンピュータセンター毎にまとめた。

表 2.5 スーパーコンピュータセンター一覧（その1）

所在国	略称	日本語訳	都市・所在地
フィンランド	CSC	フィンランド科学計算センター	エスポー（ウーシマー県）
スペイン	BSC	バルセロナ・スーパーコンピューティングセンター	バルセロナ（カタルーニャ州）
ドイツ	HLRS	シュトゥットガルト高性能計算センター	シュトゥットガルト（バーデン＝ヴュルテンベルク州）
ドイツ	JSC	ユーリッヒ・スーパーコンピューティングセンター	ユーリッヒ（ノルトライン＝ヴェストファーレン州）
ドイツ	LRZ	ライプニッツ・スーパーコンピューティングセンター	ガーヒング（バイエルン州、ミュンヘン近郊）
フランス	TGCC	超大規模計算センター	ブリュイエール・ル・シャテル（パリ郊外）
フランス	GENCI	国家集約型高性能計算機関	パリ（イル＝ド＝フランス地域圏）
フランス	CEA	フランス原子力・代替エネルギー庁	パリ（イル＝ド＝フランス地域圏）
イタリア	CINECA	イタリア大学間自動計算コンソーシアム	ボローニャ（エミリア＝ロマーニャ州）
オランダ	SURF	SURF（オランダ国立スーパーコンピュータセンター）	アムステルダム（北ホラント州）
ポーランド	PSNC	ポズナン・スーパーコンピューティング・ネットワークセンター	ポズナン（ヴィエルコポルスカ県）
英国	EPCC	エディンバラ並列計算センター	エディンバラ（スコットランド）
スイス	CSCS	スイス国立スーパーコンピューティングセンター	ルガノ（ティチーノ州）
米国	ALCF	アルゴンヌ先端計算施設	アルゴンヌ（イリノイ州）
米国	OLCF	オークリッジ先端計算施設	オークリッジ（テネシー州）
米国	LANL	ロスアラモス国立研究所	ロスアラモス（ニューメキシコ州）
米国	LLNL	ローレンス・リバモア国立研究所	リバモア（カリフォルニア州）

米国	SNL	サンディア国立研究所	アルバカーキ（ニューメキシコ州）
米国	HECC	NASA 高度スーパーコンピューティング部門	マウンテンビュー（カリフォルニア州）
米国	PNNL	パシフィック・ノースウェスト国立研究所	リッチランド（ワシントン州）
米国	NERSC	国立エネルギー研究科学計算センター	バークレー（カリフォルニア州）
米国	PPPL	プリンストン・プラズマ物理学研究所	プリンストン（ニュージャージー州）
米国	SDSC	サンディエゴ・スーパーコンピューターセンター	サンディエゴ（カリフォルニア州）
米国	TACC	テキサス先端計算センター	オースティン（テキサス州）
米国	PSC	ピッツバーグ・スーパーコンピューティングセンター	ピッツバーグ（ペンシルベニア州）
米国	NCAR	米国大気研究センター	ボルダー（コロラド州）
豪州	Pawsey	ポージー・スーパーコンピューティング研究センター	パース（西オーストラリア州）
豪州	NCI	豪州国家計算基盤	キャンベラ（オーストラリア首都特別地域）
シンガポール	NSCC	シンガポール国家スーパーコンピューティングセンター	シンガポール
シンガポール	A*STAR	シンガポール科学技術研究庁	シンガポール
中国	天津	国家スーパーコンピュータ天津センター	天津市（直轄市）
中国	深圳	国家スーパーコンピュータ深圳センター	広東省 深圳市
中国	長沙	国家スーパーコンピュータ長沙センター	湖南省 長沙市
中国	広州	国家スーパーコンピュータ広州センター	広東省 広州市
中国	済南	国家スーパーコンピュータ済南センター	山東省 済南市
中国	無錫	国家スーパーコンピュータ無錫センター	江蘇省 無錫市
中国	鄭州	国家スーパーコンピュータ鄭州センター	河南省 鄭州市

表 2.6 スーパーコンピュータセンター一覧（その2）

所在国	略称	英文名称または現地名称	現地表記の名称
フィンランド	CSC	Center for Scientific Computing	Tieteen tietotekniikan keskus (CSC)
スペイン	BSC	Barcelona Supercomputing Center	Centro Nacional de Supercomputación
ドイツ	HLRS	High Performance Computing Center Stuttgart	Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart
ドイツ	JSC	Jülich Supercomputing Centre	Jülich Supercomputing Centre (Jülich Forschungszentrum)
ドイツ	LRZ	Leibniz Supercomputing Centre	Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
フランス	TGCC	Très Grand Centre de Calcul	Très Grand Centre de Calcul (TGCC)
フランス	GENCI	Grand Équipement National de Calcul Intensif	Grand Équipement National de Calcul Intensif
フランス	CEA	French Alternative Energies and Atomic Energy Commission	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
イタリア	CINECA	Interuniversity Consortium for Automatic Computing	Consorzio Interuniversitario per il Calcolo Automatico
オランダ	SURF	SURF	SURF (旧 SURFsara)
ポーランド	PSNC	Poznań Supercomputing and Networking Center	Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe
英国	EPCC	Edinburgh Parallel Computing Centre	Edinburgh Parallel Computing Centre
スイス	CSCS	Swiss National Supercomputing Centre	Centro Svizzero di Calcolo Scientifico
米国	ALCF	Argonne Leadership Computing Facility	Argonne Leadership Computing Facility
米国	OLCF	Oak Ridge Leadership Computing Facility	Oak Ridge Leadership Computing Facility
米国	LANL	Los Alamos National Laboratory	Los Alamos National Laboratory
米国	LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory	Lawrence Livermore National Laboratory
米国	SNL	Sandia National Laboratories	Sandia National Laboratories

米国	HECC	NASA Advanced Supercomputing Division	NASA Advanced Supercomputing Division
米国	PNNL	Pacific Northwest National Laboratory	Pacific Northwest National Laboratory
米国	NERSC	National Energy Research Scientific Computing Center	National Energy Research Scientific Computing Center
米国	PPPL	Princeton Plasma Physics Laboratory	Princeton Plasma Physics Laboratory
米国	SDSC	San Diego Supercomputer Center	San Diego Supercomputer Center
米国	TACC	Texas Advanced Computing Center	Texas Advanced Computing Center
米国	PSC	Pittsburgh Supercomputing Center	Pittsburgh Supercomputing Center
米国	NCAR	National Center for Atmospheric Research	National Center for Atmospheric Research
豪州	Pawsey	Pawsey Supercomputing Research Centre	Pawsey Supercomputing Research Centre
豪州	NCI	National Computational Infrastructure	National Computational Infrastructure
シンガポール	NSCC	National Supercomputing Centre Singapore	National Supercomputing Centre Singapore
シンガポール	A*STAR	Agency for Science, Technology and Research	Agency for Science, Technology and Research (A*STAR)
中国	天津	National Supercomputing Center in Tianjin	国家超级计算天津中心
中国	深圳	National Supercomputing Center in Shenzhen	国家超级计算深圳中心
中国	長沙	National Supercomputing Center in Changsha	国家超级计算长沙中心
中国	広州	National Supercomputing Center in Guangzhou	国家超级计算广州中心
中国	済南	National Supercomputing Center in Jinan	国家超级计算济南中心
中国	無錫	National Supercomputing Center in Wuxi	国家超级计算无锡中心
中国	鄭州	National Supercomputing Center in Zhengzhou	国家超级计算郑州中心

表 2.7 スーパーコンピュータセンター一覧（その 3 a）※ 青字は公式資料以外の記事等を参照

所在国	略称	スーパーコンピュータ名	Rmax [PFlops]	Rpeak [PFlops]	Top 500	予算/年 現地通貨等	予算 \$M	スタッ フ数[人]	ユーザー 数[人]	論文数	プロジェ クト数
フィンランド	CSC	LUMI	531.5	379.7	7	€74M	80	660	3000	245	2200
スペイン	BSC	MareNostrum 5	249.4	175.3	10	€71.2M	77.3	976	1,194	325	160
ドイツ	HLRS	Hawk	25.2	19.3	65	€7.3M	7.9	153	1,000	37	131
ドイツ	JSC	JETI	94.0	83.1	17	€948M	1011	300	200 機関		
ドイツ	LRZ	SuperMUC-NG	26.9	19.5	63	€31.5M	34	170	100,000		100
フランス	TGCC	JOLIOT-CURIE	12.0	7.0	161				3,000		
フランス	GENCI	Jean Zay H100	71.4	52.2	26	€39M	42	24	10,000		867
フランス	CEA	CEA-HE	103.5	64.3	21	€58M	63			4000	300
イタリア	CINECA	Leonardo	306.3	241.2	8	€100M	109	1030	5308	558	2317
オランダ	SURF	Snellius Phase 3 GPU	21.7	13.6	93	€200M	213	400	32,000		992
ポーランド	PSNC	Helios GPU	30.4	19.1	68			506	1,000	243	76
英国	EPCC	ARCHER2	25.8	19.5	61			70	3,500		
スイス	CSCS	Piz Daint	574.8	434.9	6	CHF122.4M	139	139	2441		103
米国	ALCF	Aurora	1980.0	1012.0	3	\$215M	215	128	1624	240	417
米国	OLCF	Frontier	2055.7	1353.0	2	\$260M	260		1800		
米国	LANL	Venado	130.4	98.5	13	\$209M	209		1000	2090	490
米国	LLNL	El Capitan	2746.4	1742.0	1	\$222M	222				
米国	SNL	El Dorado	95.3	68.0	20	\$198M	198		1000		
米国	HECC	Aitken	12.5	9.1	132	\$74M	74		1200	30	840

表 2.8 スーパーコンピュータセンター一覧（その 3b）※ 青字は公式資料以外の記事等を参照

所在国	略称	スーパーコンピュータ名	Rmax [PFlops]	Rpeak [PFlops]	Top 500	予算/年 現地通貨等	予算 \$M	スタッ フ数[人]	ユーザー 数[人]	論文数	プロジェ クト数
米国	PNNL	cascade	3.4	2.5	437	\$1490M	1490	6000	1000		
米国	NERSC	Perlmutter	113.0	94.6	14	\$146.5M	146.5		11000		1000
米国	PPPL	Travers				\$210M	210	750	312		
米国	SDSC	Expanse	3.3	2.5	448	\$64M	64	296	3,000		
米国	TACC	Frontera	38.7	23.5	52	\$247M	247	172	15,000		
米国	PSC	Bridges-2				\$16.5M	16.5	70	1,000		
米国	NCAR	Derecho partition CPU	12.4	10.3	114	\$38.2M	38.2	761	1900	270	
豪州	Pawsey	Setonix – GPU	35.0	27.2	45	AUD16M	16	100	1600	400	158
豪州	NCI	Gadi	15.1	9.3	130	\$21.67M	22	70	6700	400	146
シンガポール	NSCC	ASPIRE 2A+	21.7	14.2	90	SGD90M	90	50	1,000		
シンガポール	A*STAR										
中国	天津	Tianhe-3						200			
中国	深圳	Nebulae						30	30,000		
中国	長沙	Tianhe-1A									
中国	広州	Tianhe-2A	100.7	61.4	24						
中国	済南	Sunway BlueLight MPP									
中国	無錫	Sunway TaihuLight	125.4	93.0	15						
中国	鄭州	Songshan									

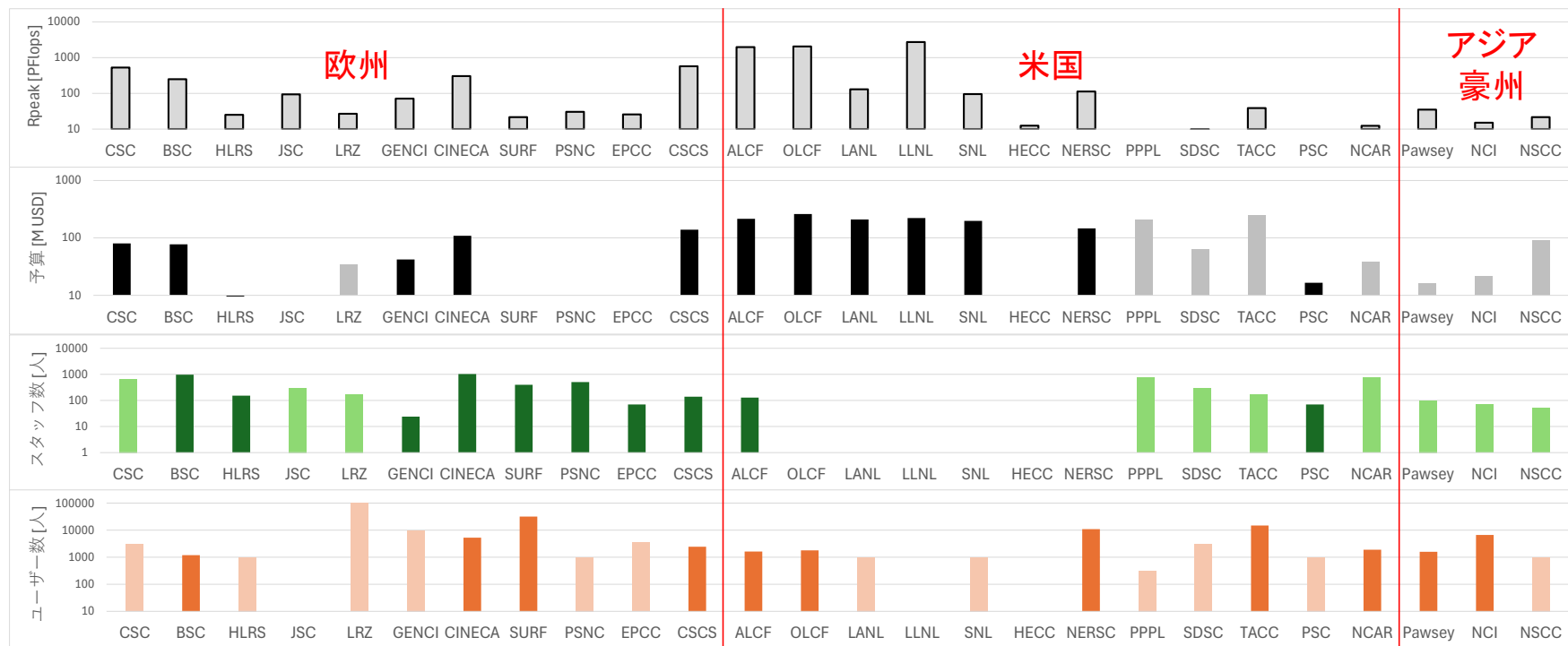


図 2.23 スーパーコンピュータセンターの年間予算・スタッフ数・ユーザー数

※ Rpeak 以外について、濃い色の部分の出典は各機関の Annual Report 等の公式資料であり、公式資料以外から収集した情報は色を薄くしている。また、情報が取得できていないセンターは棒グラフがない。

3. 主要国のフラッグシップスーパーコンピュータに係る調査

3.1. 調査内容

主要国の代表的なスーパーコンピュータセンターの中で特に優れた計算能力を持つスーパーコンピュータ（以下、フラッグシップスーパーコンピュータという）に注目して、その概要について過去（運用中のものを含む）のシステムについてまとめる。また、フラッグシップスーパーコンピュータの性能については、過去約 20 年間（2004～2024 年）の TOP500 ランキングにおける各国地域（日本・米国・欧州・中国）の 1 位の性能推移を辿った。ただし、中国は TOP500 にエントリーされていないシステムが存在するため、公開されている中国国内 TOP100 の情報と論文やインターネット上の記事からフラッグシップスーパーコンピュータの性能情報を取得して補正を行った。さらに過去約 10 年間（2013～2024 年）については、TOP500 ランキングのうち上位 50 位に注目して、各国地域の登録件数とベンチマークの性能、ハードウェアに関する情報としては、CPU、GPU 等の加速部、製造者（ベンダー）について、それぞれが占める件数と割合の推移を確認することでトレンドの変化を見た。

さらに直近の国際会議 Supercomputing 2024（SC24）における November 2024 TOP500 セッションからも近年の特徴を探った。また、米国・欧州の次期フラッグシップスーパーコンピュータについても調査を行った。

3.2. 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの概要

3.2.1. 日本のフラッグシップスーパーコンピュータ

日本のフラッグシップスーパーコンピュータは、「富岳」であり、理化学研究所と富士通によって開発された。「富岳」は、Arm アーキテクチャを採用した世界初の大規模スーパーコンピュータであり、プロセッサである富士通 A64FX は 高エネルギー効率と大規模並列計算に最適化されている。また、「富岳」は新型コロナウイルス対策、創薬、材料科学、気候モデリング、AI 研究などの幅広い分野で活用されている。

過去の日本のフラッグシップスーパーコンピュータには、以下のようなものがある。

(1) Earth Simulator（2002 年）

地球温暖化や地殻変動の研究など地球規模でのシミュレーションを目的に旧・宇宙開発事業団（現・JAXA）、旧・日本原子力研究所（現・JAEA）、旧・海洋科学技術センター（現・JAMSTEC）によって開発（製造は NEC）されたベクトル型のスーパーコンピュータ。現在は、第 4 世代のシステムが運用されており、AMD EPYC プロセッサと NEC の SX-Aurora TSUBASA または NVIDIA A100 が搭載されている。

(2) TSUBAME2.0 (2010 年)

東京工業大学（現・東京科学大学）が構築したスーパーコンピュータであり、Intel Xeon プロセッサと NVIDIA Tesla M2050 を組み合わせたヘテロジニアスなアーキテクチャが採用された。エネルギー効率と計算性能を両立させ、研究者向けの高性能計算環境を提供した。

TSUBAME2.0 以降の動きは下記の通りである。TSUBAME 3.0 は 2017 年に稼働を開始し、NVIDIA Tesla P100 GPU を多数搭載し、AI やビッグデータ解析に強みを持つ。後継の TSUBAME 4.0 は 2024 年に稼働を開始し、最新の GPU アーキテクチャを採用しており、HPC と AI の融合利用を強力に推進する設計となっている。

(3) 京 (2011 年)

理化学研究所と富士通によって開発されたスーパーコンピュータで流体力学、材料科学、医薬研究、気候モデリングなど幅広い分野で利用された。SPARC ベースの SPARC64 VIIIfx を採用し、Tofu と呼ばれる 6 次元メッシュ・トーラスのインターコネクトなど独自技術が採用されている。性能が向上された SPARC64 IXfx を搭載した PRIMEHPC FX10 は国内外に販売された。

日本のフラッグシップスーパーコンピュータは 2010 年に登場した TSUBAME2.0 を除くと、過去から現在に至るまで単一のアーキテクチャが採用されてきたが、以下に示すように近年のフラッグシップスーパーコンピュータの潮流は、ヘテロジニアスなアーキテクチャから成るシステムとなっている。次世代の日本のフラッグシップスーパーコンピュータでは、独自のアーキテクチャを採用するとしても従来の CPU 単独の構成から、GPU 等の加速部を活用したシステムへの移行が求められている。

3.2.2. 米国のフラッグシップスーパーコンピュータ

現在、米国のフラッグシップスーパーコンピュータは El Capitan であり、ローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）に設置されている。El Capitan は、主に核兵器の安全性評価や先端科学研究のために設計されており、米国エネルギー省（DOE）の国家核安全保障局（NNSA）が運用するスーパーコンピュータである。El Capitan は、AMD EPYC プロセッサ（Genoa）と AMD Instinct MI300A を搭載し、HPC と AI の統合計算を強化した最新のアーキテクチャを採用している。これにより、従来のスーパーコンピュータと比較して大幅なエネルギー効率の向上が期待されている。

過去（運用中のものを含む）の米国のフラッグシップスーパーコンピュータには、以下のようなものがある。

(1) ASCI White (2000 年)

IBM 製の IBM POWER3 プロセッサを採用したスーパーコンピュータであり、ローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) に設置された。核兵器の安全性評価のためのシミュレーションを主目的として開発された。

(2) Blue Gene/L (2004 年)

IBM が開発した PowerPC 440 プロセッサを搭載されたエネルギー効率の高い並列計算に特化したスーパーコンピュータ。主に生物学、物理学、材料科学の分野で活用された。

(3) Roadrunner (2008 年)

ロスアラモス国立研究所 (LANL) に設置された、世界初の PFlops 級スーパーコンピュータ。IBM が開発し、AMD Opteron プロセッサと Cell Broadband Engine (PlayStation 3 向けに開発されたプロセッサ) を組み合わせたヘテロジニアスなアーキテクチャを採用した。これは、今日の CPU と GPU から成るシステムの先駆けとも言える設計であり、計算生物学や核兵器シミュレーションなどに利用された。

(4) Titan (2012 年)

HPC 向け GPU アクセラレーションを活用した初の大規模スーパーコンピュータであり、エネルギー効率の向上を目指した設計で AMD Opteron プロセッサと NVIDIA K20X を組み合わせたシステムとなっている。

(5) Summit (2018 年)

AI および機械学習の最適化を重視したスーパーコンピュータで、がん研究、創薬、エネルギー研究などに広く活用された。IBM POWER9 プロセッサと NVIDIA Volta V100 が搭載されている。

(6) Frontier (2022 年)

オークリッジ国立研究所 (ORNL) にて稼働している。Frontier は、HPC と AI の統合に特化した最先端プラットフォームであり、科学シミュレーション、気候モデリング、薬剤開発、材料科学などの幅広い研究に貢献している。AMD の EPYC プロセッサと AMD Instinct MI250X を搭載し、従来のシミュレーションだけでなく、ディープラーニングやビッグデータ解析にも対応している。

(7) Aurora (2023 年)

アルゴンヌ国立研究所 (ANL) に設置されたエクサスケール級スーパーコンピュータ。Intel Xeon CPU Max Series と Intel Data Center GPU Max を搭載し、大規模科学計算と

AI 向けに最適化されている。

3.2.3. 欧州のフラッグシップスーパーコンピュータ

現在、欧州のフラッグシップスーパーコンピュータは、フィンランドに設置された LUMI であり、欧州全体の HPC 戦略である EuroHPC の一環として運用されている。LUMI はエクサスケール級のスーパーコンピュータとして、気候モデリング、医療、AI 研究、エネルギー最適化、天文学など多岐にわたる分野で利用されている。LUMI は、AMD EPYC プロセッサと AMD Instinct MI250X を搭載し、Frontier と同様に最新の高性能計算技術を採用している。

過去（運用中のものを含む）の欧州のフラッグシップスーパーコンピュータには、以下のようなものがある。

(1) JUGENE (2007 年)

ドイツのユーリッヒ研究センター (FZJ) に設置され、流体力学や量子シミュレーションで活用された。IBM Blue Gene/P プロセッサが採用された。

(2) SuperMUC (2012 年)

ドイツのリュートヴィヒ・マクシミリアン大学に設置され、医学研究、エネルギー工学などに貢献。Intel Xeon プロセッサが搭載されていた。

(3) Piz Daint (2013 年)

スイス国立スーパーコンピューティングセンター (CSCS) に設置され、気候科学やデータ解析分野で活用。Intel Xeon プロセッサと NVIDIA Tesla P100 を組み合わせたシステムであった。

(4) MareNostrum4 (2017 年)

スペインのバルセロナ・スーパーコンピューティングセンター (BSC) に設置され、遺伝子解析、量子化学、社会科学研究にも使用されている。Intel Xeon Platinum プロセッサが搭載されている。

3.2.4. 中国のフラッグシップスーパーコンピュータ

現在、中国のフラッグシップスーパーコンピュータは、Sunway OceanLight (「神威・海洋之光」) であり、国家スーパーコンピューティングセンター (NSCC) に設置されている。Sunway OceanLight は、中国の独自開発のスーパーコンピュータであり、エネルギー効率の高い設計と高度な並列計算能力を特徴とする。プロセッサには、中国が独自開発してきた Sunway シリーズの最新プロセッサ SW26010-Pro を採用することで計算能力の向

上と低消費電力を両立している。従来のスーパーコンピュータと比べ、AI 研究、気候モデリング、生物学シミュレーションなどの分野で最適化されており、中国の技術自立を象徴する存在となっている。

過去（運用中のものを含む）の中国のフラッグシップスーパーコンピュータには、以下のようなものがある。

(1) Tianhe-1A（2010 年）

「天河一号 A」とも呼ばれる。中国で最初のトップレベルスーパーコンピュータで、国家スーパーコンピューティングセンター（NSCC）で運用されていた。Intel Xeon プロセッサと NVIDIA Tesla M2050 を組み合わせたヘテロジニアスなアーキテクチャを採用した。「天河一号」と比べると大幅に性能が向上した。

(2) Sunway BlueLight（2011 年）

Sunway SW1600 プロセッサを採用し、国内技術の自立を促進するために開発された。「神威・藍光」とも呼ばれる。

(3) Tianhe-2（2013 年）

「天河二号」は当時、世界最速のスーパーコンピュータとして登場し、遺伝子解析、気候シミュレーションなどに活用されている。Intel Xeon プロセッサと Intel Xeon Phi が搭載されていた。その後、Intel Xeon Phi を独自開発のアクセラレータ Matrix2000 に置き換えた「天河二号 A」（Tianhe-2A）となりシステム全体の性能が向上した。

(4) Sunway TaihuLight（2016 年）

Sunway SW26010 プロセッサを採用し、省エネ性能と計算能力の両面で優れる。「神威・太湖之光」とも呼ばれる。

(5) Tianhe-3（2021 年）

「天河三号」は Tianhe シリーズの最新システムであり、大規模シミュレーションや AI 計算で使用されている。FTP Arm チップ Phytium 2000+ と MTP アクセラレータ Matrix 2000+ を搭載している。

3.3. TOP500 の推移

3.3.1. 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの性能

本節では、日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの性能を概観し、2004～2024 年における TOP500 における各国地域 1 位の Rmax（HPL Benchmark の実測性能）

と Rpeak（理論性能）の性能推移をグラフ化して確認する。全体の状況としては、米国の優位な状況が継続しているものの、中国の急成長と独自開発のシステム（TOP500 に未掲載のシステムも追加で考慮）による追い上げが見えてくる。また、欧州も持続的な成長が続いている。日本については、運用開始時には世界トップの性能を達成しているが、新システムの運用開始までの期間が長くなっていることが分かる。

(1) 日本

日本は、2002 年運用を始めた地球シミュレータ（初代）以降は、TOP500 のランキングでは、米国・欧州の後塵を拝していたものの、2010 年に TSUBAME2.0 を皮切りに 1PFLOPS/s を超えシステムが登場し、翌年の 2011 年に「京」で TOP500 のトップを奪還した。しかし、米国・中国の急成長もあり、後継の「富岳」が 2020 年に再びトップになるまでは、順位が後退した。2024 年 11 月時点でも「富岳」は TOP500 のランキングではトップ 10 以内を維持しているが、次期システムが待たれる状況となっている。しかし、「京」「富岳」とともに CPU のみの構成であるため、Rmax と Rpeak から計算した実行効率は他のシステムよりも高く（80～90%）、倍精度（FP64）を必要とするアプリケーションにおいては世界トップクラスの性能を持っている。

(2) 米国

米国は、2004 年に登場した Blue Gene/L 以降、Roadrunner（2008 年）、Titan（2012 年）と 4 年ごとに新しいフラッグシップスーパーコンピュータの運用が開始されるなど、世界をリードする成長を遂げている。また、Roadrunner 以降のアーキテクチャはヘテロジニアスな構成を一貫して採用している。倍精度の演算性能が重視される TOP500 における実行効率は 60～70%台と日本の「富岳」と比べて低いものの、単精度（FP32）、半精度（FP16）も含めた混合精度のベンチマーク（HPL MxP）では 2022 年（Frontier）、2023 年（Aurora）と相次いで登場したシステムにおいて、10EFLOPS/s を超える性能を達成している。今後もゼタスケールへの移行を見据えて HPC と AI の統合計算を強化したシステムの登場が続くと考えられる。

(3) 欧州

欧州は、米国や中国のような急成長は見られないものの、持続的な性能向上が見られる。2004 年の時点で 20TFLOPS 程度の性能であったが、2008 年には約 10 倍に性能が向上している。現在のフラッグシップスーパーコンピュータである LUMI は日本の「富岳」と同程度の性能を有している。欧州のフラッグシップスーパーコンピュータの特徴は、環境負荷を抑えた設計やエネルギー効率の最適化に重点を置いている点にある。EuroHPC プログラムのもと、フランスに設置される Alice Recoque などのエクサスケール級スーパーコンピュータの開発が進められており、持続可能な HPC 技術の確立を目指している。

(4) 中国

中国は 2004 年時点においては、数～10 TFLOPS に過ぎないシステムしか有していなかったが、2010 年代以降、急速な成長を遂げた。特に 2013 年の「天河 2 号」、2016 年の「神威・太湖之光」は、米国のフラッグシップスーパーコンピュータを一時的に超える性能を達成した。中国の戦略として特徴的なのは、独自技術の採用と政府主導の開発である。特に、米国との技術摩擦が激化する中で、自国製の半導体を使用し、スーパーコンピュータの独立性を高める動きを見せている。2016 年以降も TOP500 にエントリーされない形で開発が進められている。実用性は高くはないと見る向きもあるが、TOP500 以外の情報からは米国に次ぐ性能に加えて実行効率の高いシステムを有していると思われる。

(5) Rmax と Rpeak の性能推移のグラフ

TOP500 のデータから日米欧中の各国地域の中で 1 位のシステムをフラッグシップスーパーコンピュータとして抽出して過去 20 年間の推移をグラフ化した。全部で 4 つのグラフがあり、それぞれは

- ・日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの Rmax の推移：図 3.1
- ・日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの Rpeak の推移：図 3.2
- ・日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータが Rmax に占める割合の推移：図 3.3
- ・日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータが Rpeak に占める割合の推移：図 3.4

となっている。ただし、ここでは TOP500 で公表されたデータのみをベースとしている。次節では中国国内 TOP100 等による補正を試みた。

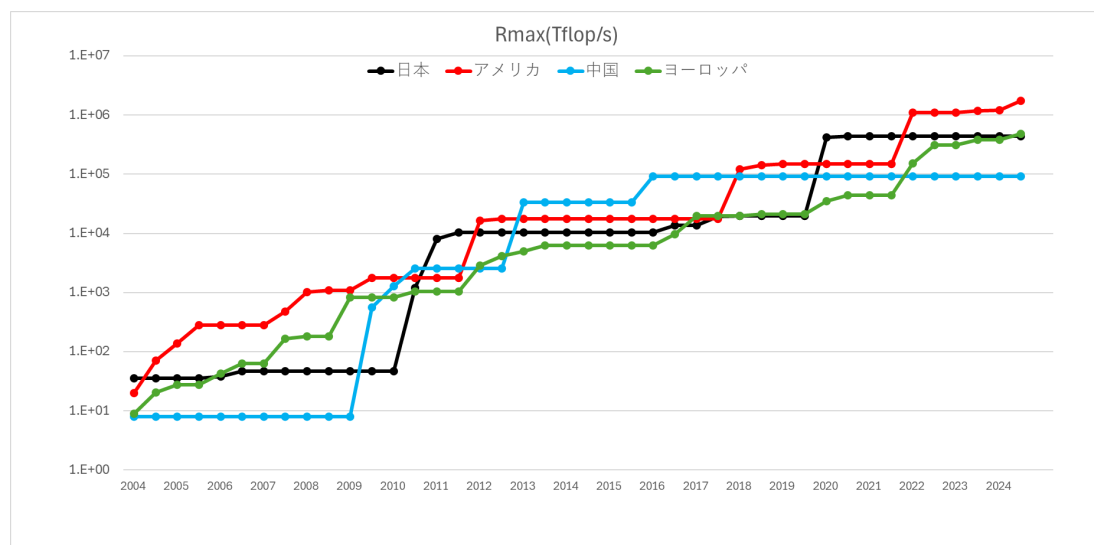


図 3.1 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの Rmax の推移

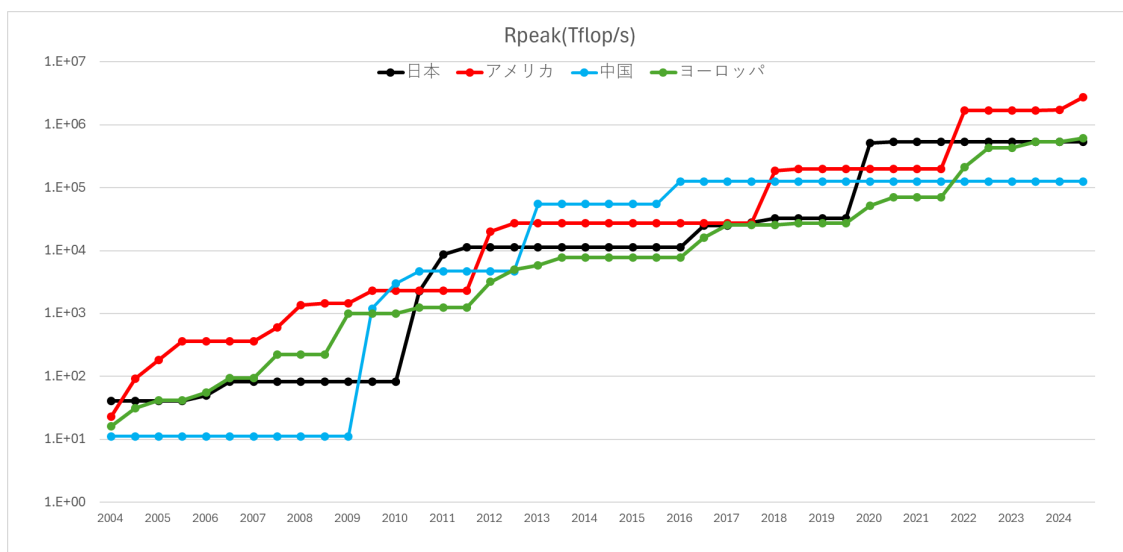


図 3.2 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの Rpeak の推移

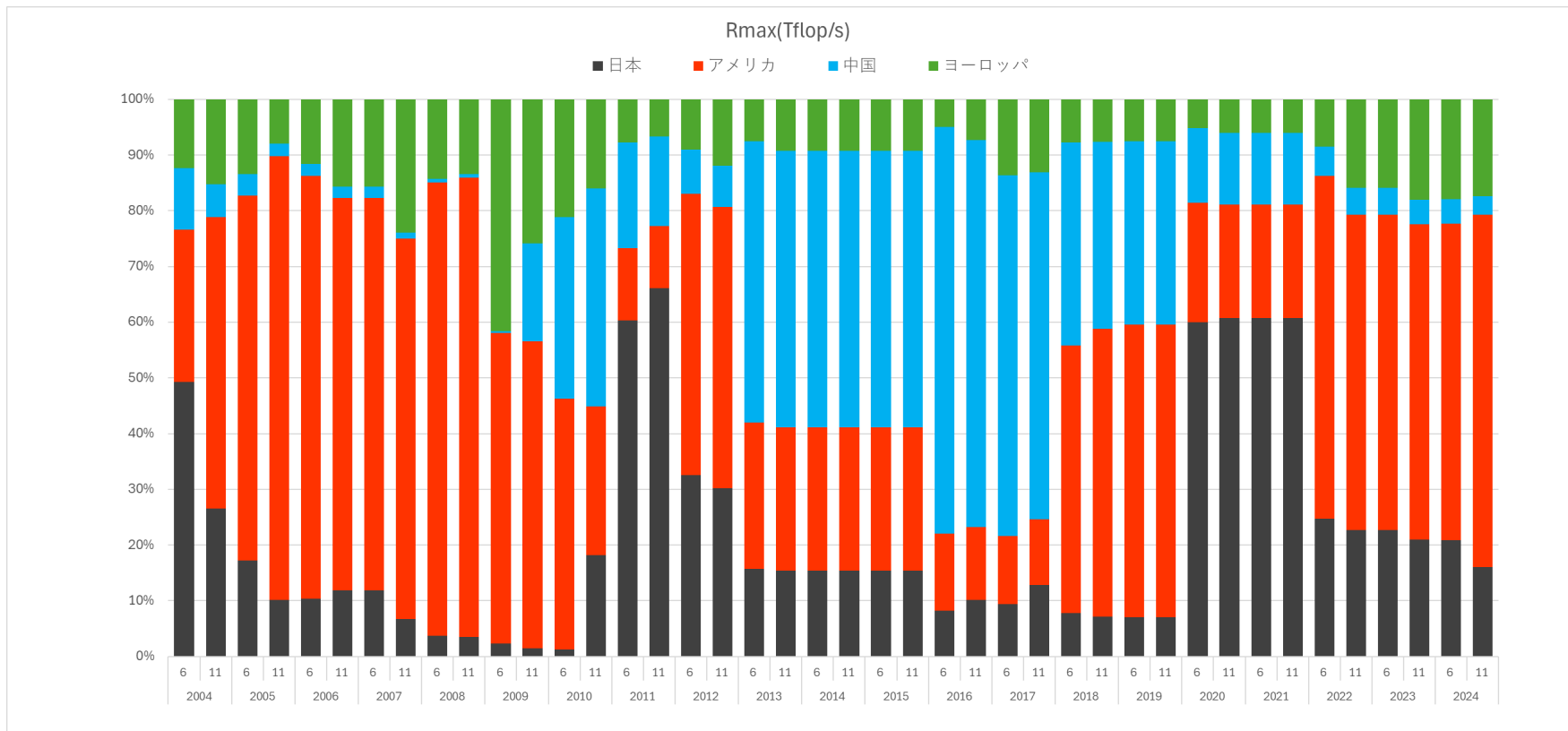


図 3.3 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータが Rmax で占める割合の推移

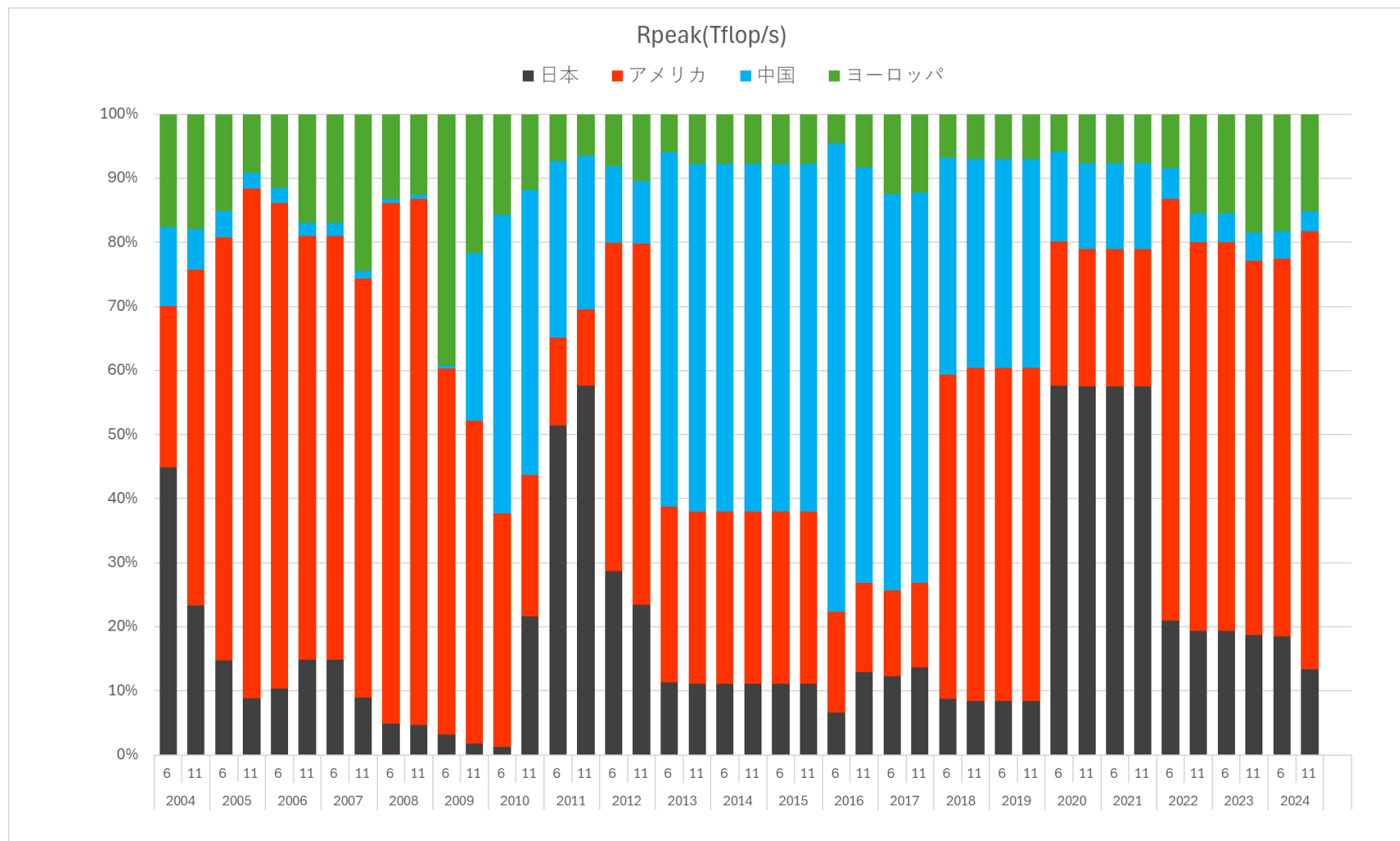


図 3.4 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータが Rpeak で占める割合の推移

3.3.2. 中国 TOP100 等による補正

公開されている中国国内 TOP100 の情報に加えて、論文やインターネット上の記事からフラッグシップスーパーコンピュータの性能情報を取得して補正を行った。情報源と現在のフラッグシップスーパーコンピュータの HPL 性能の検討について記す。

(1) 情報源

情報源として下記の URL の情報を利用した。

- ・ <http://www.hpc100.cn/>
- ・ <https://www.nextplatform.com/2024/02/09/the-mystery-of-tianhe-3-the-worlds-fastest-supercomputer-solved/>
- ・ <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/china-publishes-list-of-its-most-powerful-supercomputers-with-no-exascale-systems-to-be-found/>
- ・ <https://chipsandcheese.com/p/chinas-newish-sw26010-pro-supercomputer-at-sc23>
- ・ <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3581784.3607030>

(2) HPL の性能の検討

上記の情報源から得られる HPL の性能は下記の通りである。

Sunway Oceanlight (2021 年)

1.22 EFLOPS (Rmax)

1.30 EFLOPS (Rpeak)

Tianhe-3 (2022 年)

1.57 EFLOPS (Rmax)

1.70 EFLOPS (Rpeak)

Sunway Oceanlight (2023 年) ※HPL MxP の性能

5.048 EFLOPS (Rmax)

5.92 EFLOPS (Rpeak)

Sunway Oceanlight (2023 年) については、HPL MxP の性能となっており、2021 年の HPL の性能から考えても、HPL の性能としては Tianhe-3 の方が高いと推測されるが、念のため、ハードウェア構成からも計算してみた。Sunway SW26010-Pro の 1 プロセッサ当たりの理論性能は、SC2023 の論文によると半精度 (FP16) で約 55.3TFLOPS となっている。システム 全体では総プロセッサ数が約 106,000 なので、55.3 TFLOPS×

106,000 で 5862 PFLOPS (5.862EFLOPS) となる。これは HPL MxP に近い値である。HPL の性能は HPL-MxP の 10% ~20% に収まる傾向があるので、0.5~1EFLOPS 程度となる。かなり楽観的な値として 30%としても 1.5EFLOPS なので、HPL の性能としては、Tianhe-3 の方が高いと考えられる。なお、HPL MxP の実行効率でみると約 85%で日本の「富岳」(約 93%) に次ぐ性能となっている。中国国内 TOP100 では、Sunway TaihuLight を超える性能を持つシステムが 3 つ存在 (HPL の性能で 487.94PFLOPS, 208.26PFLOPS, 125.04PFLOPS) するが、民間が運用するものであるため、今回の補正からは除外した。

上記の議論を踏まえて、図 3.1~図 3.4 を補正したものを図 3.5~3.8 に示す。

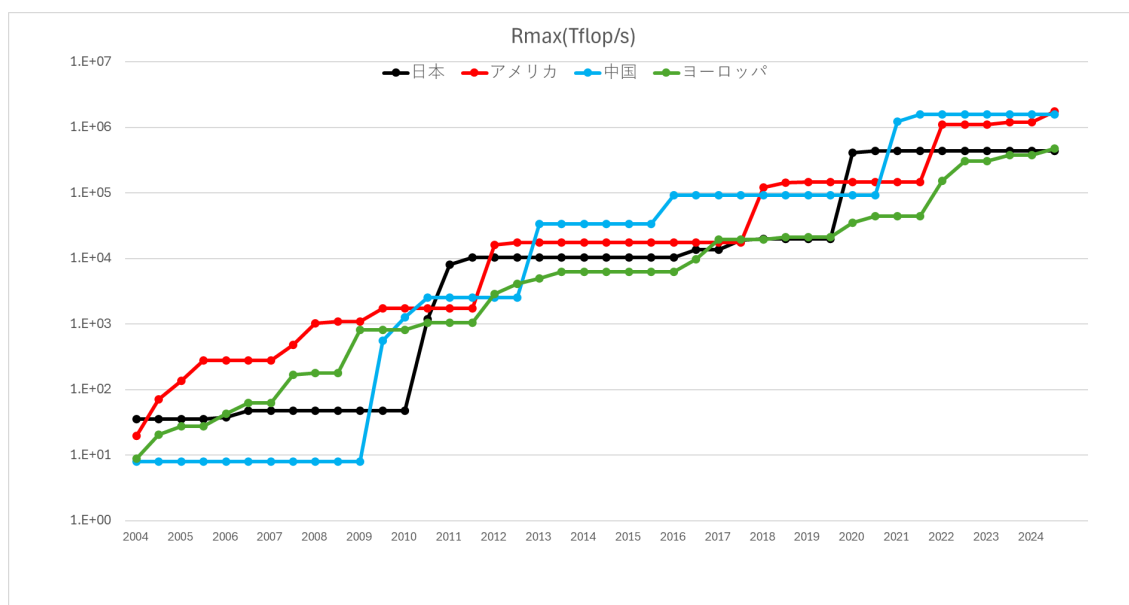


図 3.5 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの Rmax の推移 (中国補正)

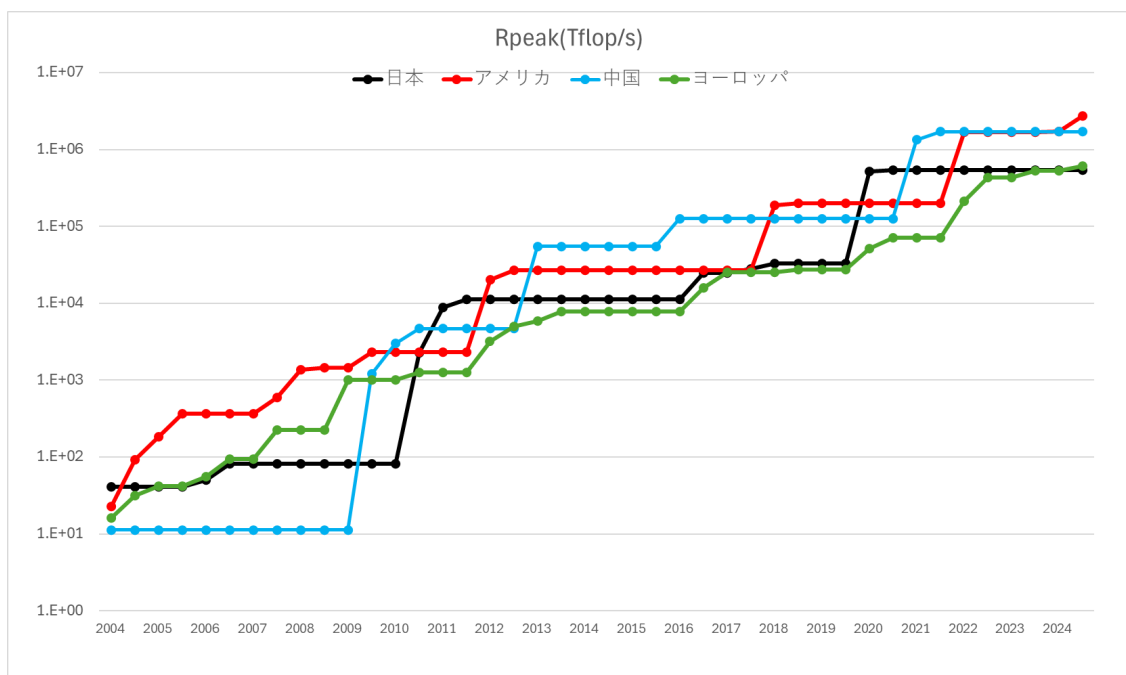


図 3.6 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの **Rpeak** の推移（中国補正）

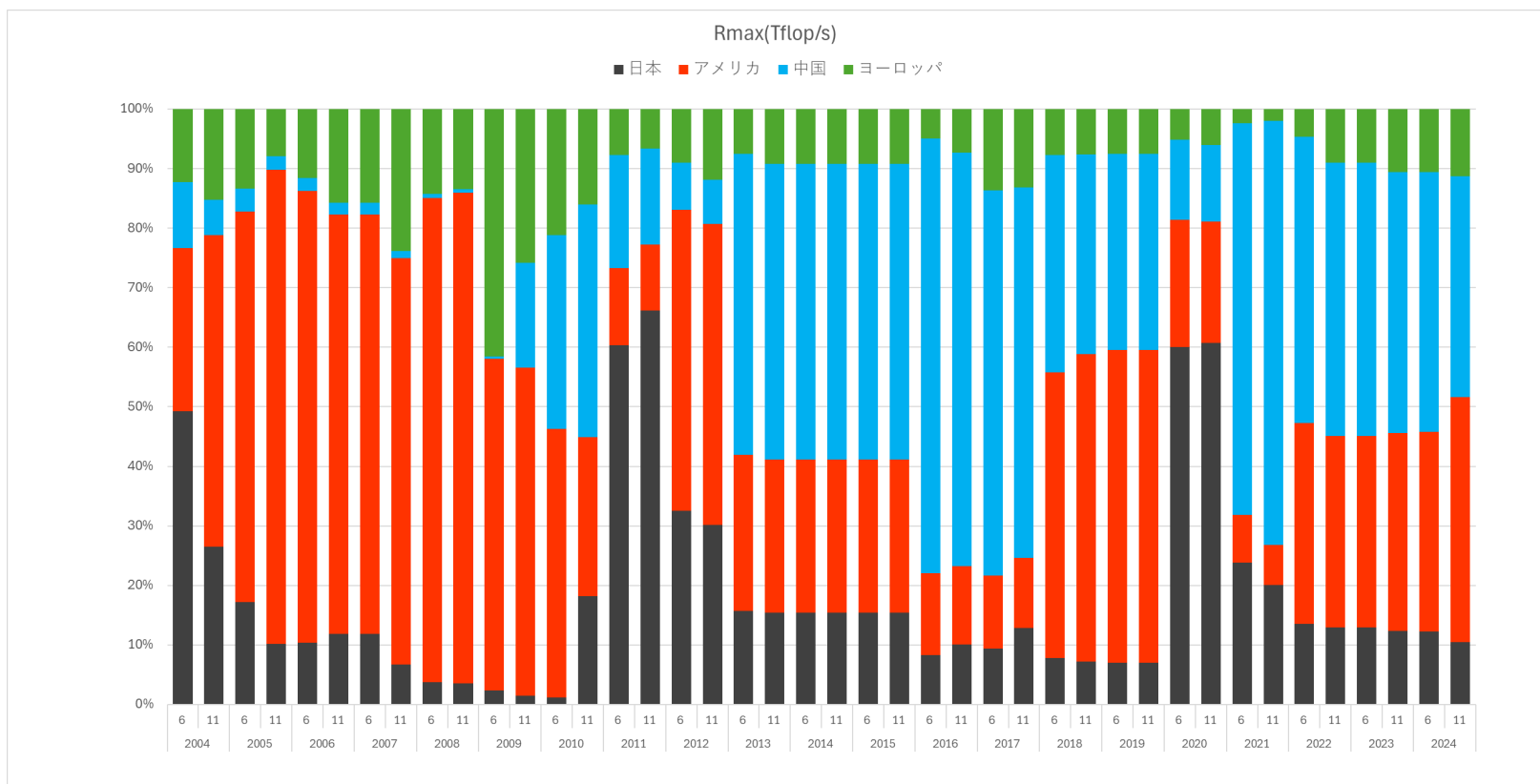


図 3.7 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータが **Rmax** に占める割合の推移（中国補正）

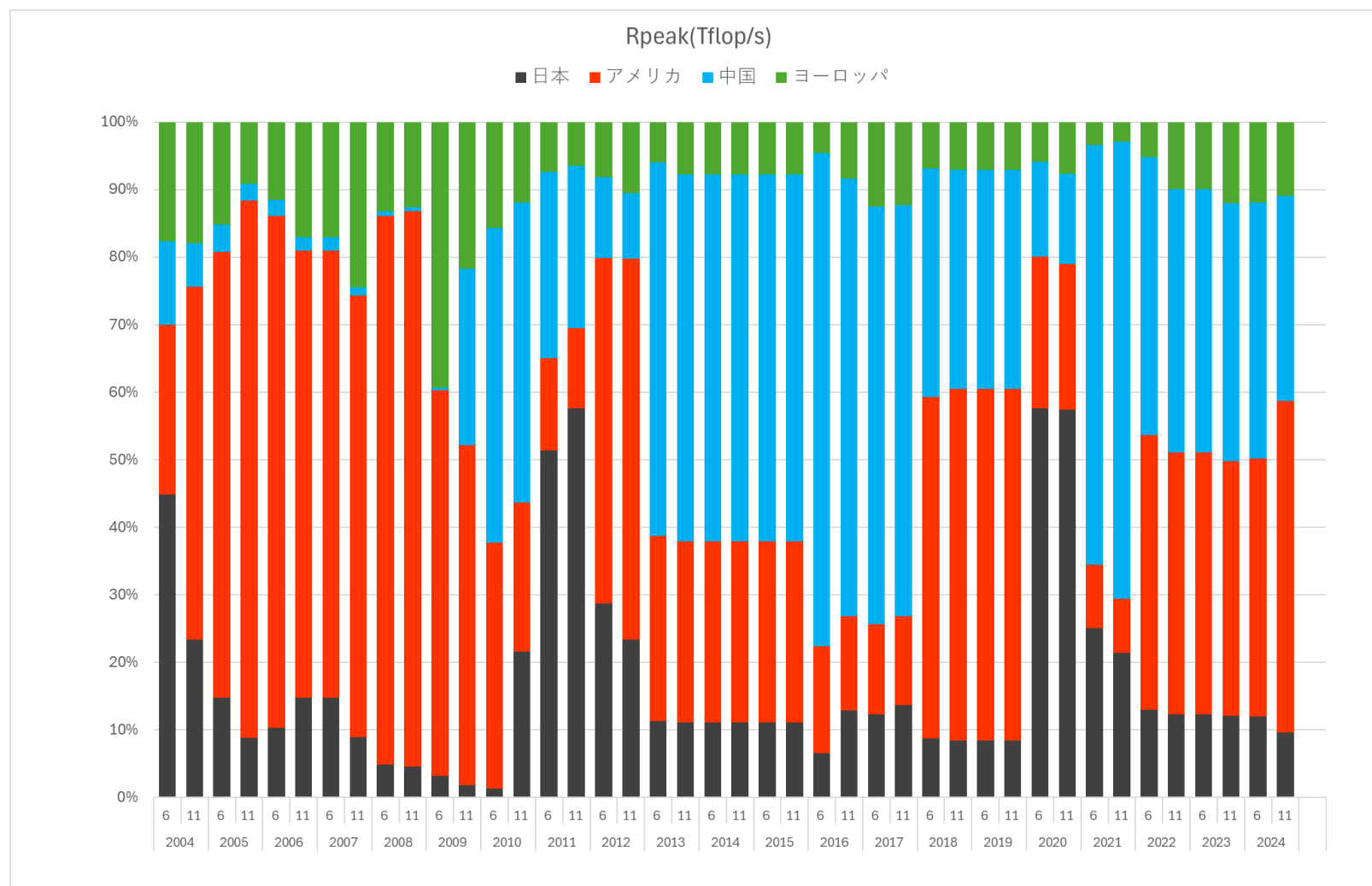


図 3.8 日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータが **Rpeak** に占める割合の推移（中国補正）

3.3.3. 上位 50 位におけるトレンドの変化

上位 50 位におけるトレンドの変化を見るために、各国地域の登録件数とベンチマークの性能（Rmax と Rpeak）、ハードウェアに関する情報としては、CPU プロセッサ、GPU 等の加速部、製造者（ベンダー）について、それぞれが占める割合の推移（2013～2024 年）を確認した。それぞれの結果を図 3.9～3.20 に示す。なお、ベンチマークの性能については、前節で示したグラフと同様に中国については補正を行った（上位 50 位とするため、補正により追加されるものと、除外されるものがある）。

まず、各国地域のエントリー数とベンチマークの性能の推移について見ると、中国について補正する前のグラフ（図 3.9, 3.11, 3.13）からは、米国はエントリー数・性能シェアともに安定したリーダーとしての地位を維持していることが分かる。特に 2020 年以降、中国のシェア低下に伴い再び影響力を拡大している。一方、中国は 2015 年から 2018 年にかけて急成長したが、2019 年以降はエントリー数・性能シェアともに減少し、存在感が低下している。日本のエントリー数は一定しているが、2020 年以降は「富岳」の影響で性能シェアが拡大し、世界的に見ても重要な存在になっている。欧州は安定したプレゼンスを維持し続けているが、米国と比べるとシェアの伸びは控えめである。また、その他の国々のシェアはわずかに増加傾向にあるが、依然として主要プレイヤーには及ばないことなどが読み取れる。しかし、中国について補正を加えたグラフ（図 3.10, 3.12, 3.14）を見ると、全く異なる様相が見えてくる。米国は依然としてスーパーコンピュータのリーダーではあるが、中国の非公開のスーパーコンピュータを考慮すると、Rmax シェアは圧倒的ではなく、公式のランキングでは中国のエントリー数が増えずシェアが回復したように見えたが、実際には競争が続いていることが分かる。中国から見ると、公式ランキングにはエントリーしていないが、実際にはアメリカと同等以上のスーパーコンピュータを保有していることが示唆され、さらに 2017 年～2020 年のピーク時にはスーパーコンピュータ数・性能シェアともにアメリカを超えていた可能性があり、2021 年以降も影響力は大きく、現在もアメリカと拮抗していることが分かる。日本は「富岳」などの存在によって一定の Rmax シェアを確保しているが、中国の非公開のものを考慮しても全体の中でのシェアは大きく変わらないが、アメリカや中国ほどの影響力は持っていないと言える。また、欧州に対して、近年では劣後している。

次にハードウェアとして CPU プロセッサ、GPU 等の加速部、製造者（ベンダー）について、グラフの推移からトレンドを分析し、技術的な変化について述べる。まず、CPU プロセッサについて見ると、2013～2017 年にかけて、TOP500 の上位 50 システムでは Intel Xeon 系列が圧倒的なシェアを誇っていた。しかし、2018 年以降は減少が顕著（Intel Xeon Phi や IBM POWER シリーズも同様）になり、Intel Xeon Gold, Platinum のシェアも徐々に縮小していることが分かる。一方、2020 年以降、AMD EPYC（第 1～3 世代）が急速に採用され始め、2022 年には Intel Xeon 系列を追い越す勢いとなっている。特にエ

エネルギー効率やコア数の多さが評価され、HPC システムにおける選択肢として主流になりつつあり、2023 年には Intel Xeon MAX が登場したものの、AMD 製プロセッサの優位性が継続している。注目すべき点としては、2024 年には大きな技術的変化が見られる。具体的には、AMD EPYC 第 4 世代の急速な普及によるシェアの更なる拡大が起きている。また、Arm ベースの NVIDIA Grace CPU (Fujitsu A64FX も Arm ベースである) の増加により、異種アーキテクチャがより多様化している。その分、Intel Xeon 系列の減少が進んでいる。今後も AMD 製のプロセッサや Arm をベースとするプロセッサが HPC 市場での影響力をさらに強めるものと思われる。2025 年以降に AMD EPYC 第 5 世代や NVIDIA Grace Next の登場でさらなる市場拡大が見込まれる (Intel 製プロセッサの巻き返しや、RISC-V やカスタムプロセッサが新たに台頭してくる可能性もあるかもしれない)。

GPU 等の加速部のトレンドを見てみると、2013~2017 年くらいのエントリー数では CPU のみの構成がほとんどであり、加速部を持たないものが支配的であった。しかし、性能面では、エントリー数が少ない加速部を有するシステムが半分くらいを占めており、GPU 等の加速部を搭載したシステムの伸張が予感される。実際に 2016 年ごろから加速部を搭載したシステムが増加し、2020 年までに CPU 単体のシステムは約半数まで減少している。もう少し細かく見てみると、2015 年以降に NVIDIA 製の Tesla シリーズ (P100、V100) が HPC システムに広く採用され始めている。さらに、2020 年以降は A100 が市場を席巻したこともあり、多くの新規システムで採用され、2023 年には、H100 が登場して、次世代 HPC 向けアクセラレータとしての地位を確立しつつあることが読み取れる。一方、2024 年では、AMD 製の Instinct MI250X、Instinct MI300A の採用拡大が見えることから、H100 と競合する形になっている。NVIDIA については、Grace CPU と対になる Hopper GPU の採用も見られる。他は Intel 製のアクセラレータについては、GPU Max シリーズがあるが、採用は限定的ではある。中国についても言及しておく、独自開発の Matrix-2000 がある。グラフには含まれていないが、後継の Matrix 2000+があり、その動向も気になる。

製造者 (ベンダー) のトレンドについても簡単に見てみると、2013~2016 年は IBM、Cray、SGI が主要ベンダー (ただし、天河シリーズの登場で中国メーカーも出現) である。Dell や Lenovo、ヨーロッパのベンダー (Atos, Bull, Eviden) も一定のシェアを持っている。しかし、その後 (2017 年以降)、HPE が SGI と Cray の買収を機に台頭していく。富士通は「富岳」の成功により、日本で確固たる地位を築いたが、海外市場までには拡大できなかった。2020~2024 年では、HPE の拡大と NVIDIA の台頭が見られる。また、Microsoft の登場は興味深い。これは HPC 向けのクラウドサービスの拡大を予感させる。

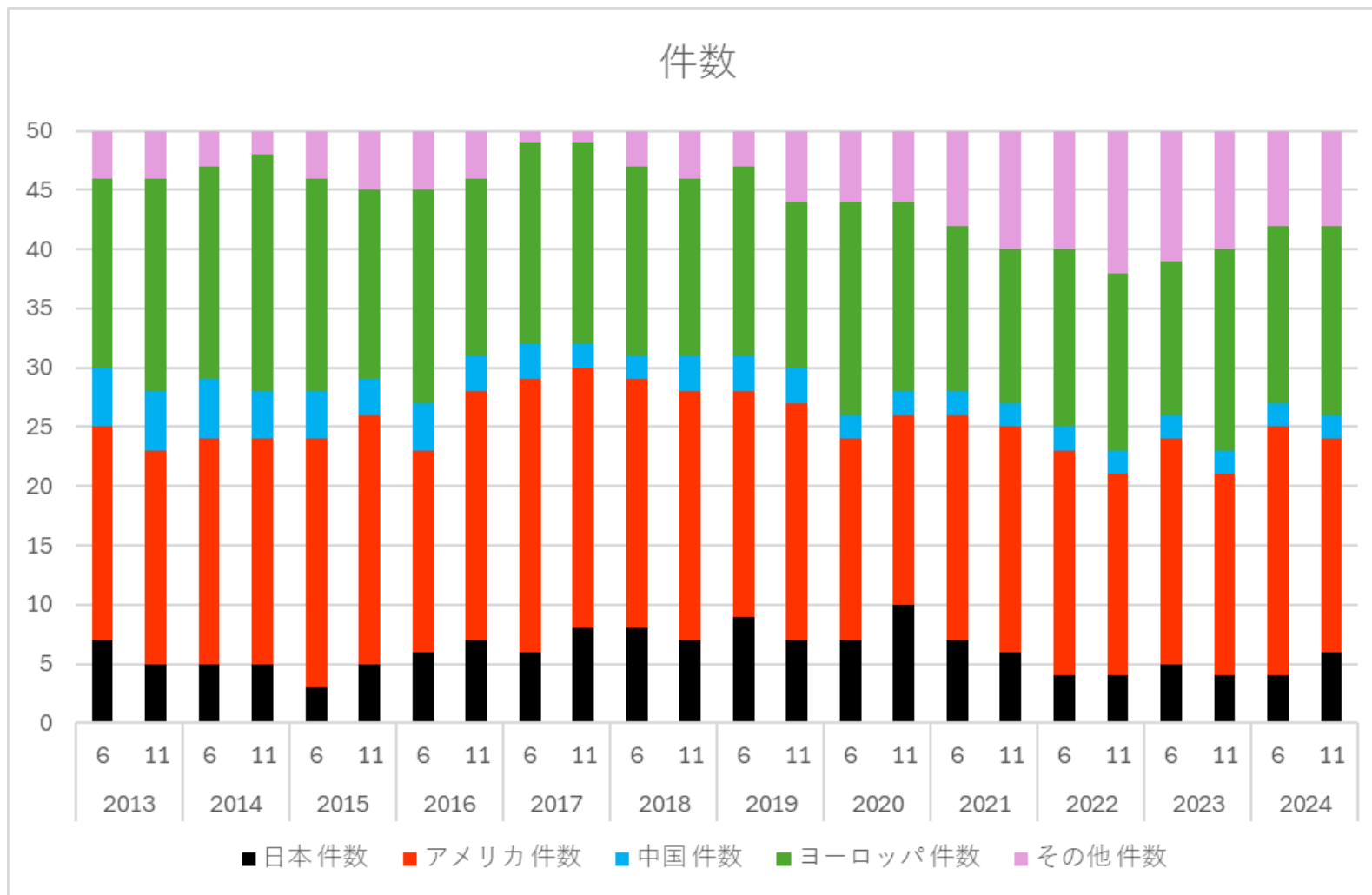


図 3.9 日米欧中とその他の国々における TOP500 上位 50 位のエントリー数の推移 (2013~2024 年)

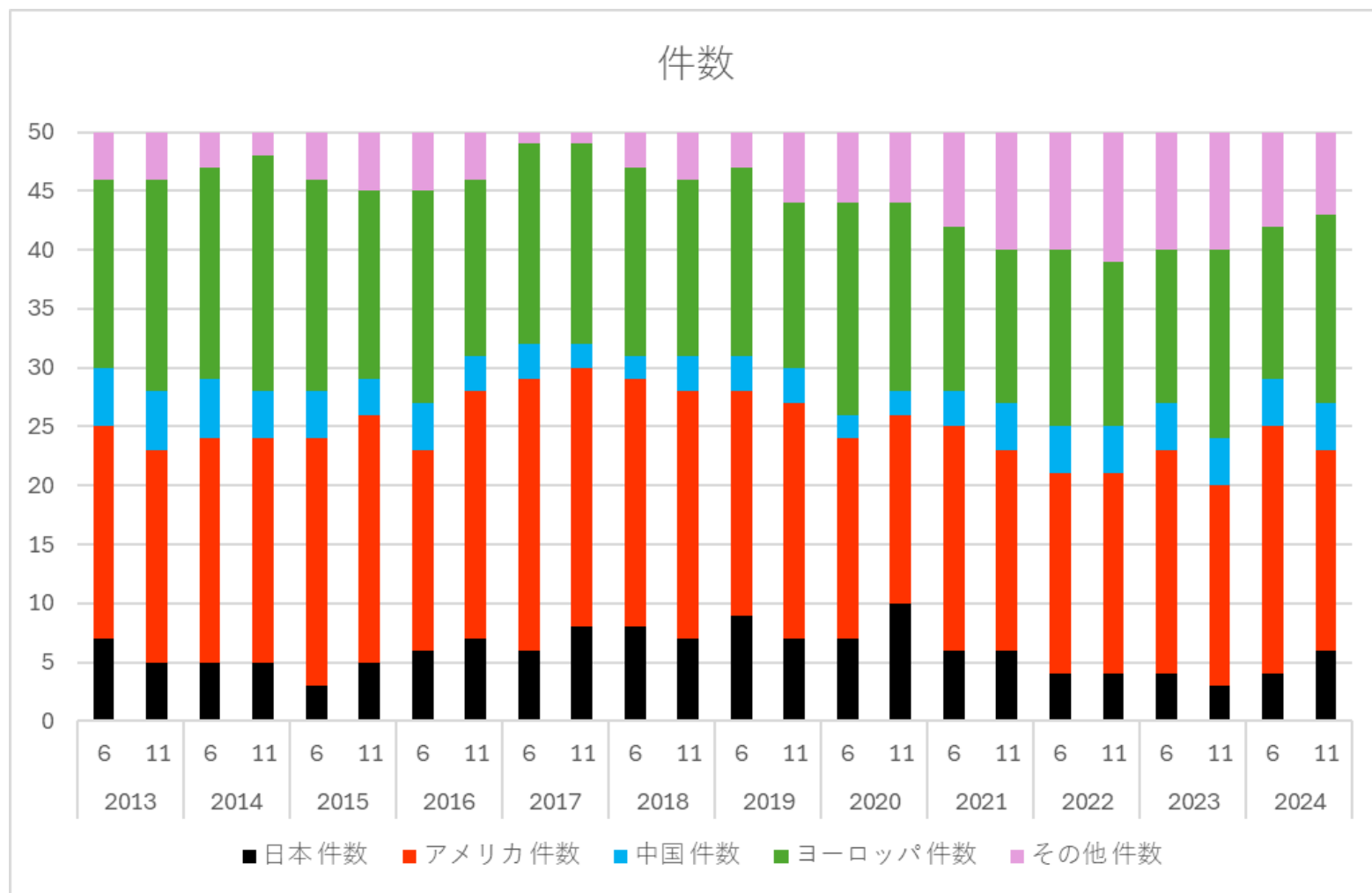


図 3.10 日米欧中とその他の国々における TOP500 上位 50 位のエントリー数の推移 (2013～2024 年, 中国補正)

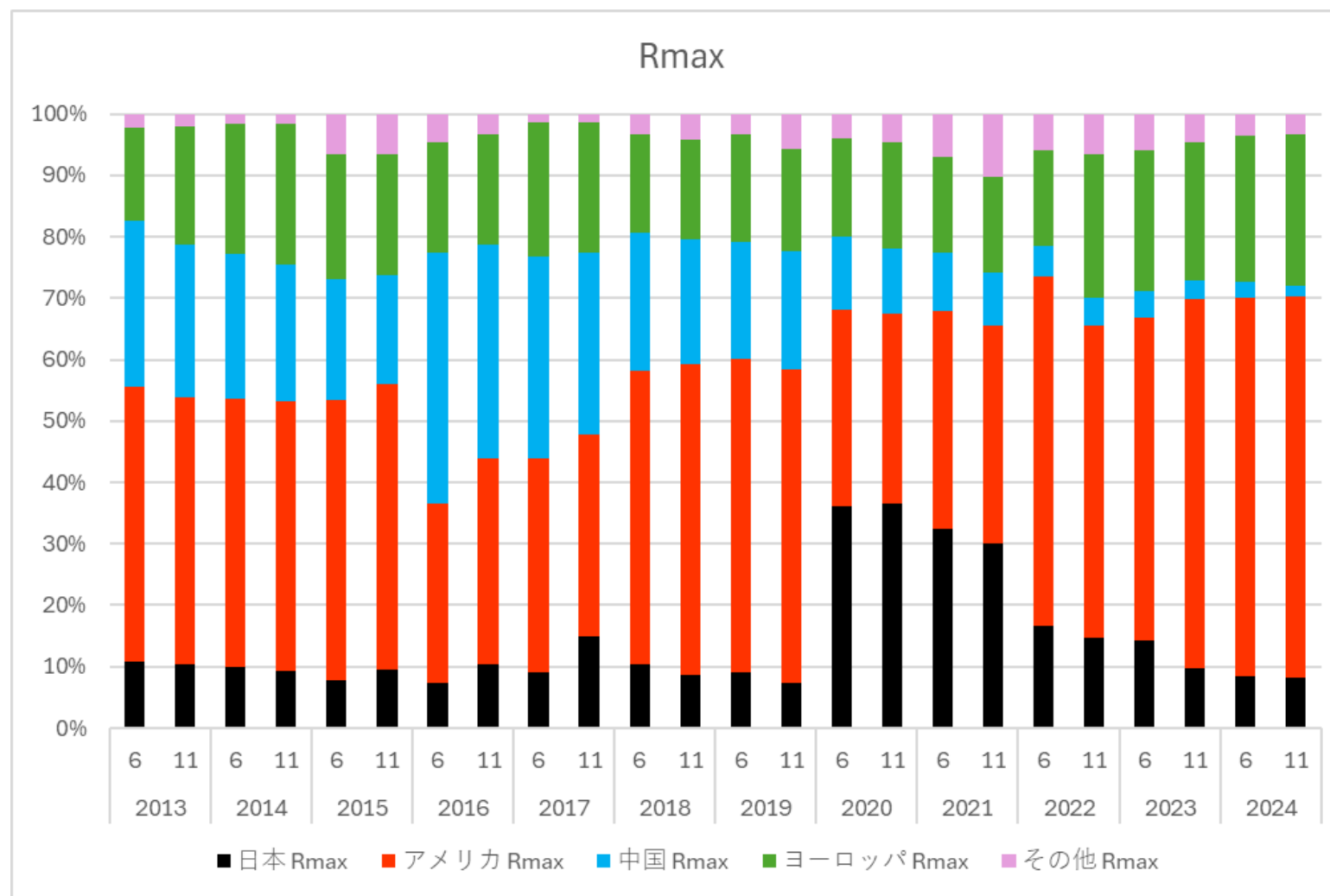


図 3.11 日米欧中とその他の国々における TOP500 上位 50 位の Rmax の合計に占める割合の推移 (2013~2024 年)

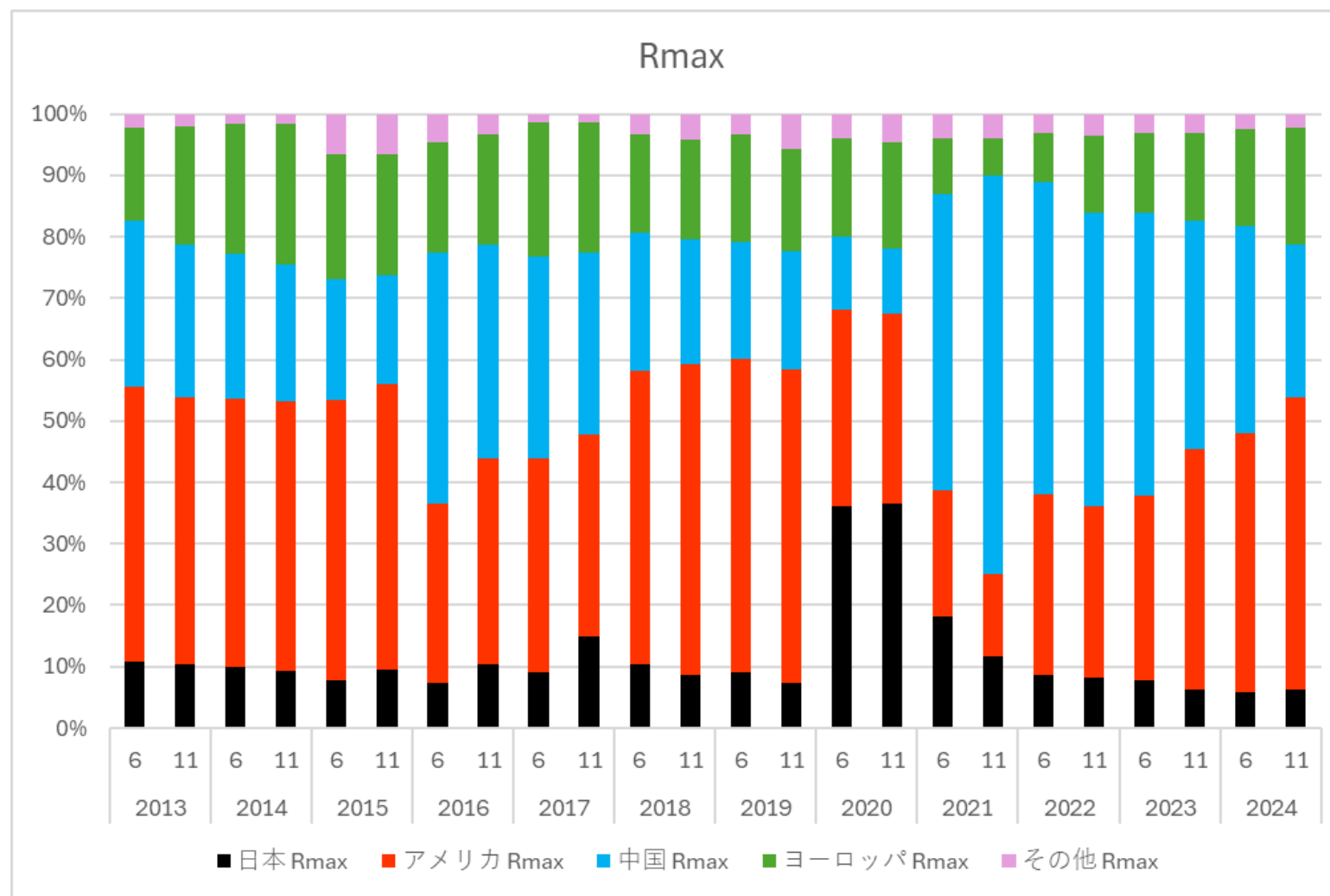


図 3.12 日米欧中とその他の国々における TOP500 上位 50 位の Rmax の合計に占める割合の推移 (2013~2024 年, 中国補正)

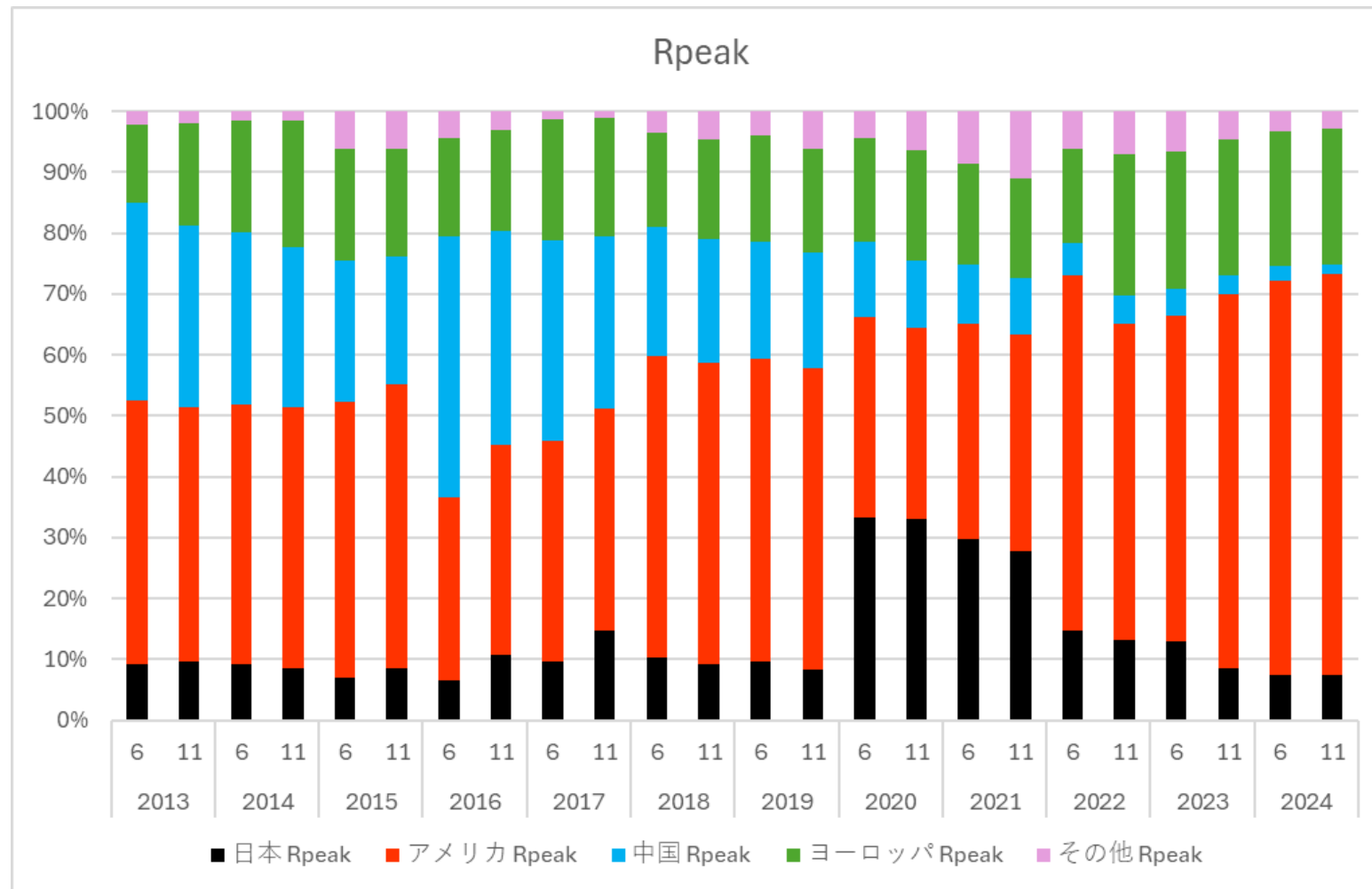


図 3.13 日米欧中とその他の国々における TOP500 上位 50 位の Rpeak の合計に占める割合の推移 (2013~2024 年)

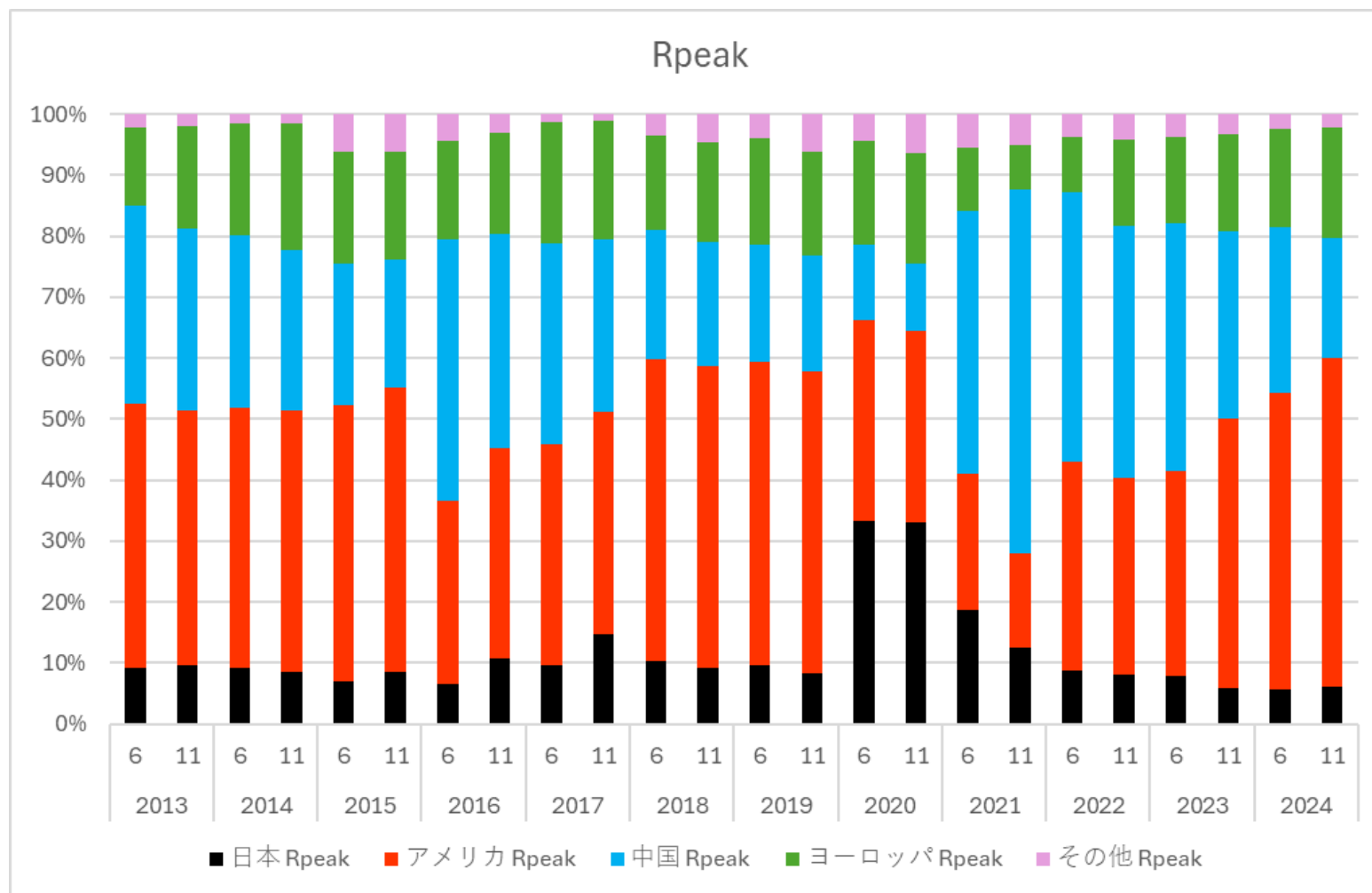


図 3.14 日米欧中とその他の国々における TOP500 上位 50 位の Rpeak の合計に占める割合の推移 (2013~2024 年, 中国補正)

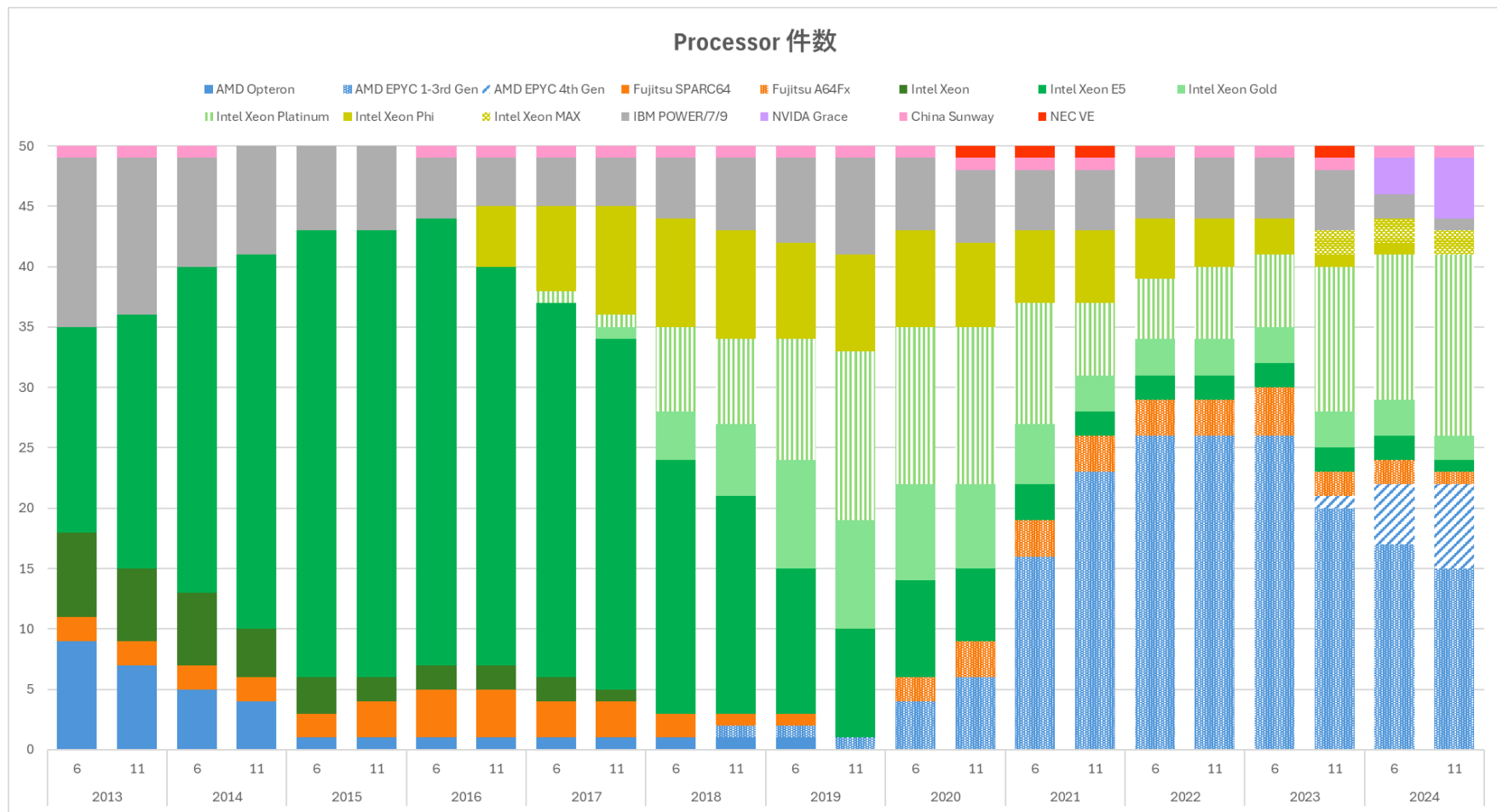


図 3.15 TOP500 の上位 50 位までの CPU プロセッサ別の件数

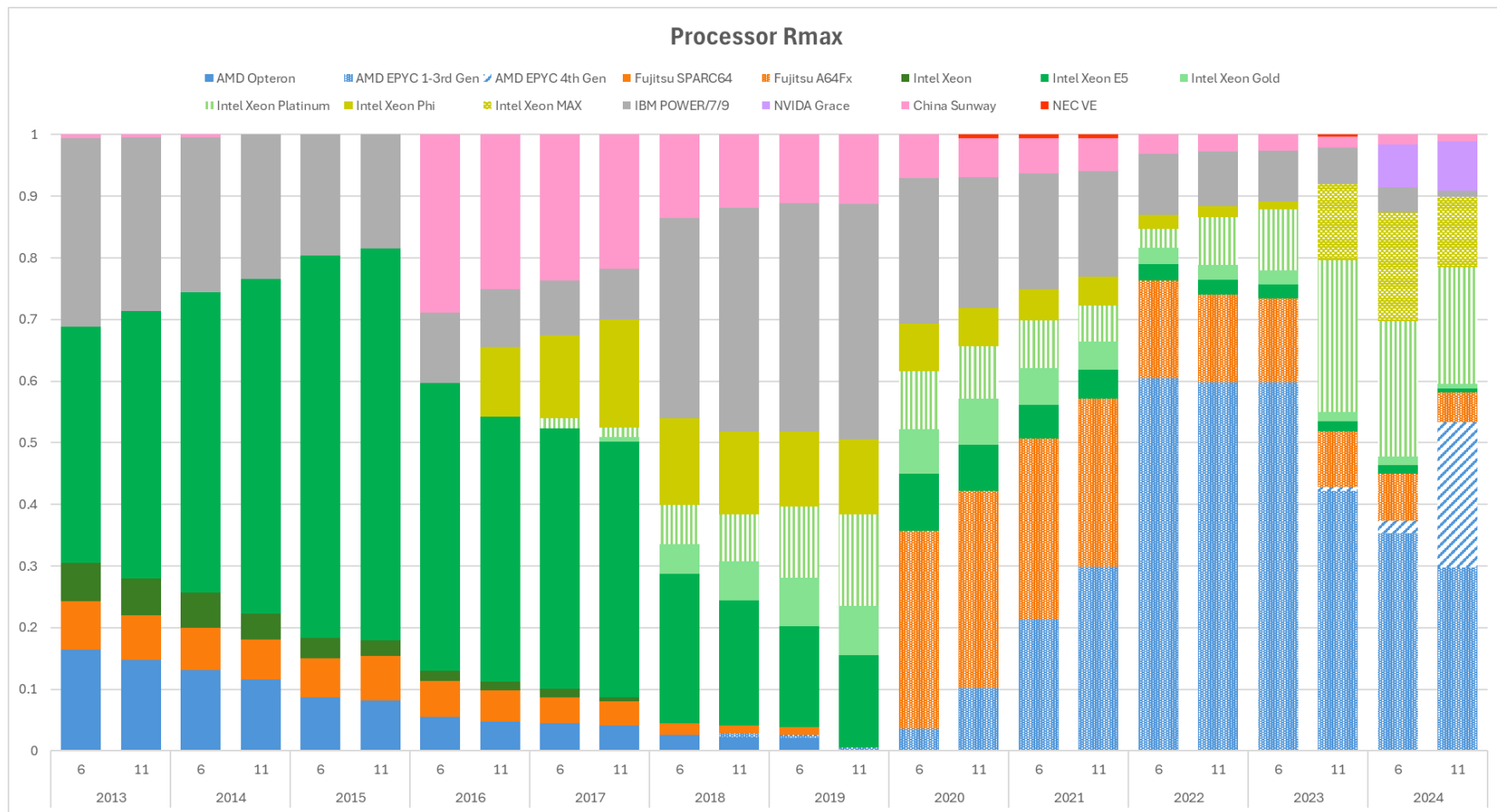


図 3.16 TOP500 の上位 50 位までの CPU プロセッサ別の Rmax に占める割合

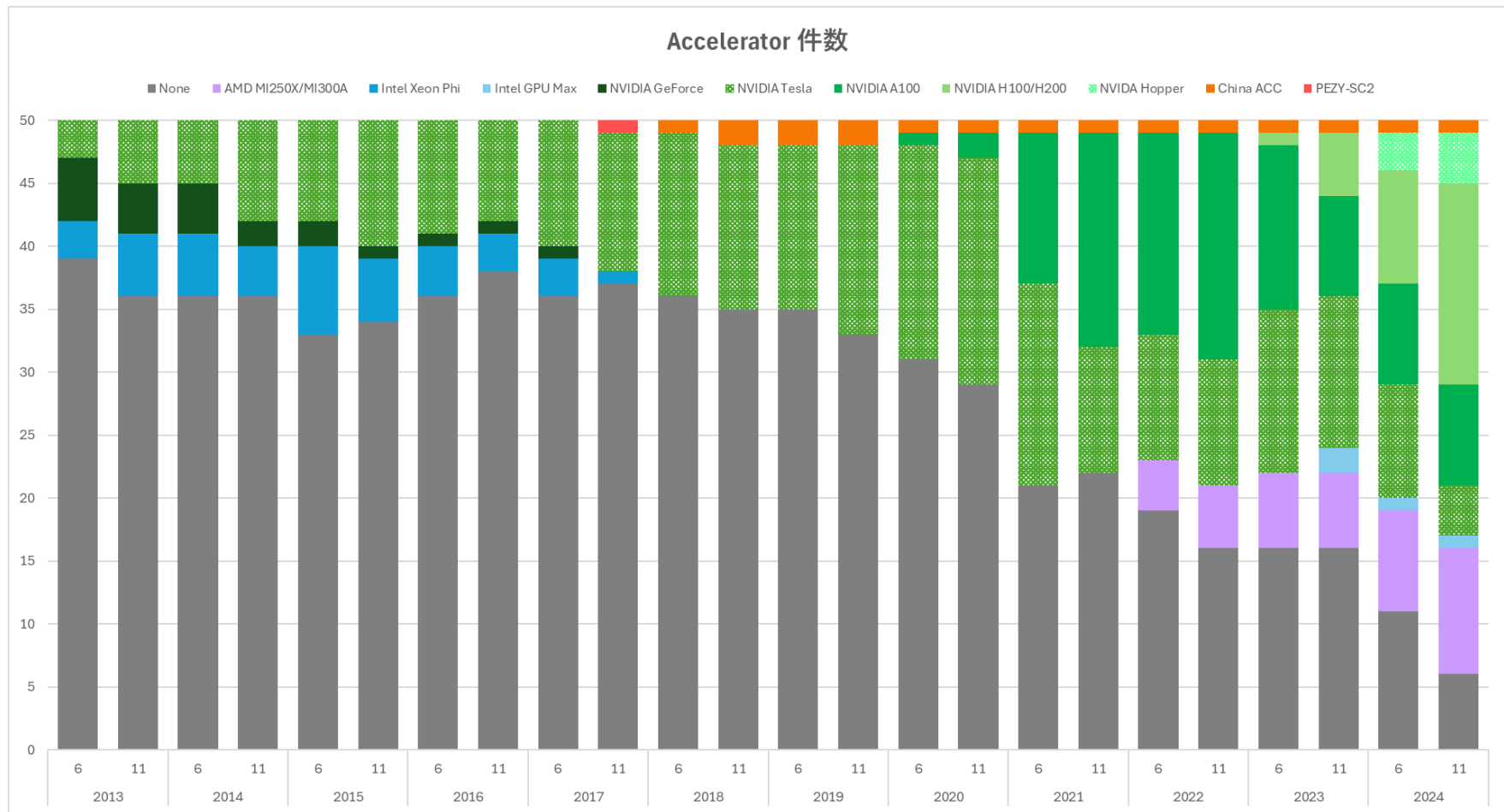


図 3.17 TOP500 の上位 50 位までの加速部別の件数

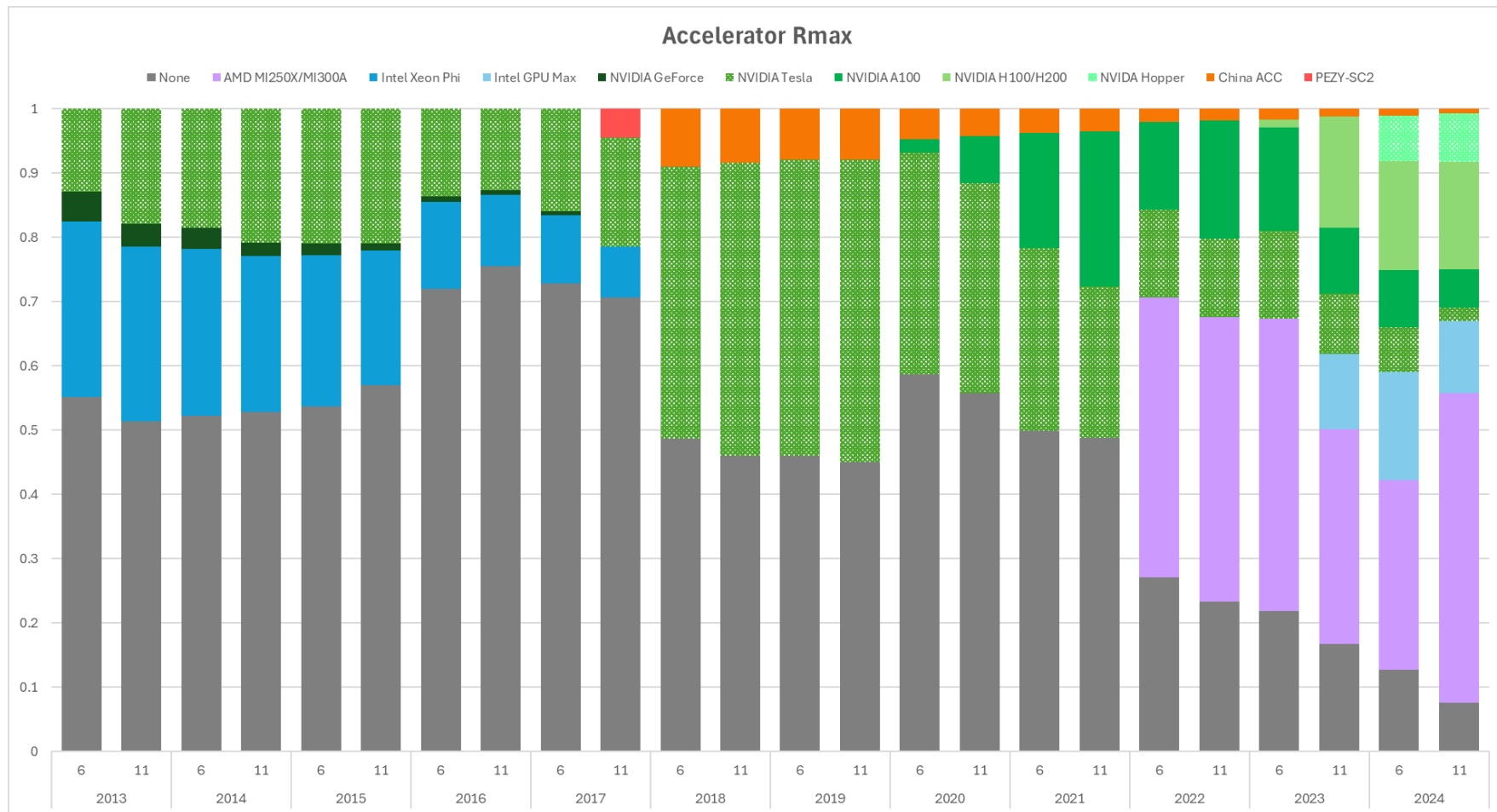


図 3.18 TOP500 の上位 50 位までの加速部別の Rmax に占める割合

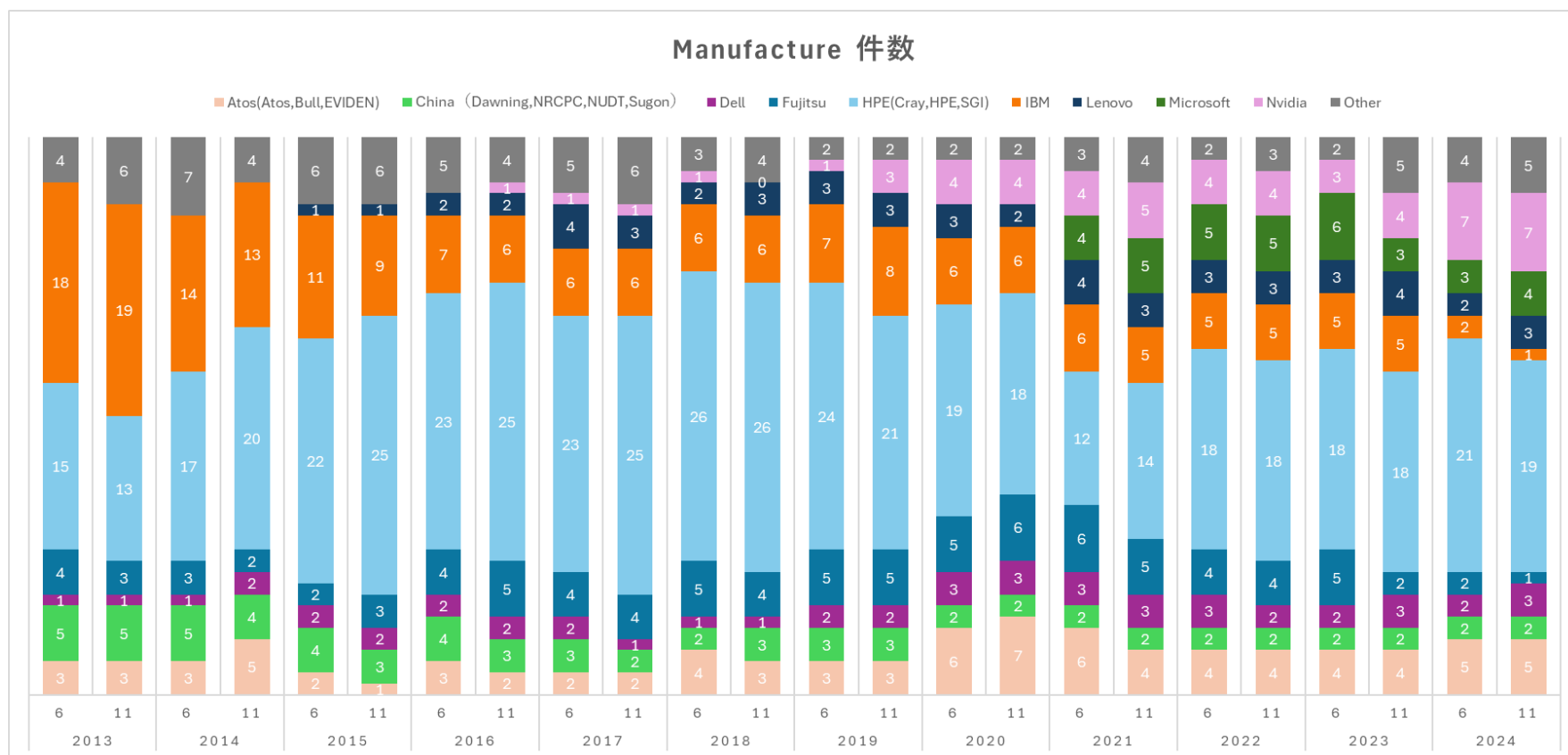


図 3.19 TOP500 の上位 50 位までの製造者（ベンダー）別の件数

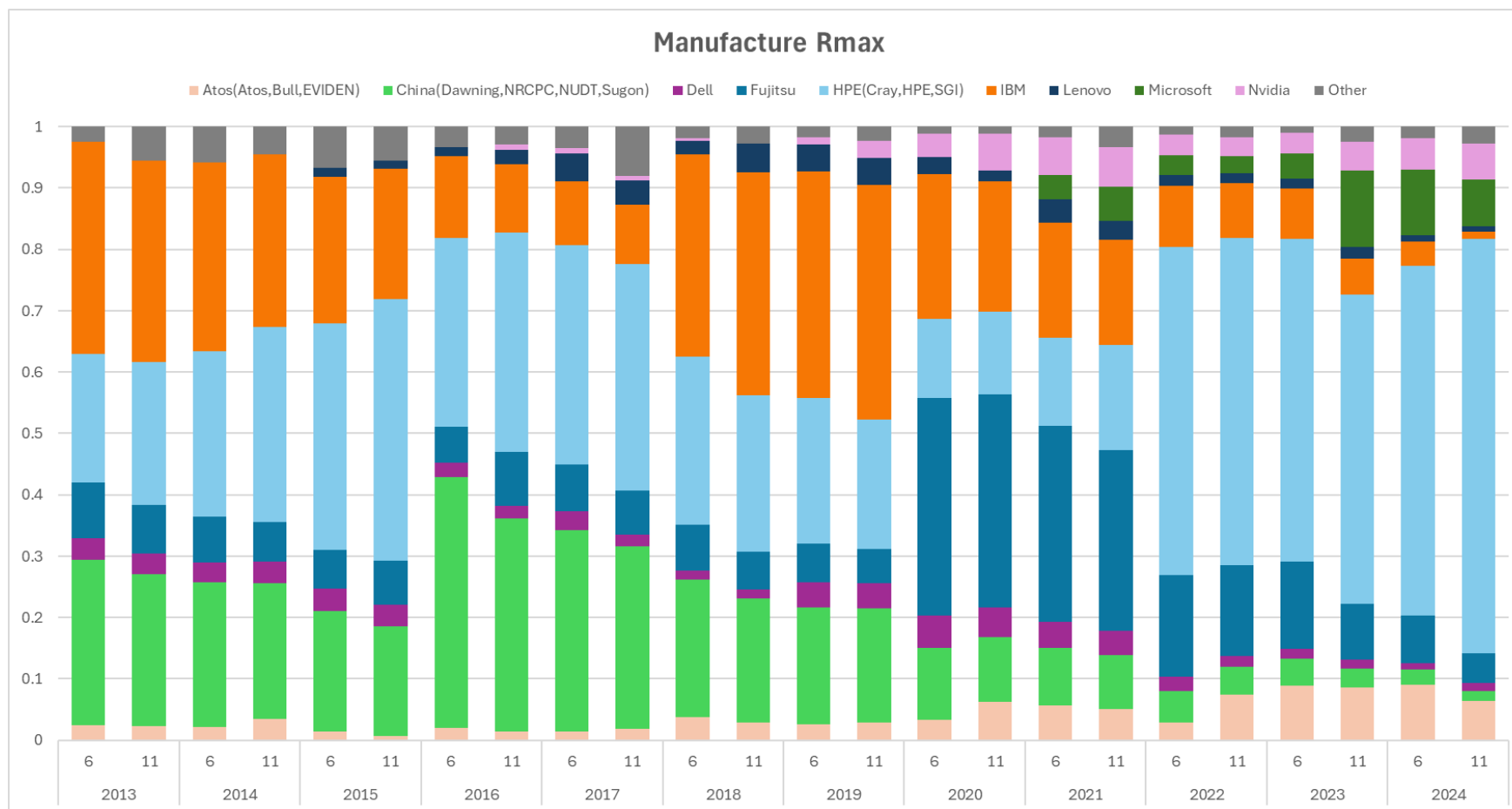


図 3.20 TOP500 の上位 50 位までの製造者（ベンダー）別の Rmax に占める割合

3.4. November 2024 TOP500 の特徴

3.4.1. 近年の特徴

本節では、直近の国際会議 SC24 (Supercomputing 2024) の TOP500 のセッションから近年の特徴について述べる。2024 年 11 月に開催された SC24 において、HPL ベンチマークのランキングである November 2024 TOP500 が発表された。今回のランキングでは、エクサスケールシステムの拡大、米国の圧倒的優位、クラウドベース HPC の台頭、エネルギー効率の向上などいくつかの重要な傾向が見られた。これらの動向は、スーパーコンピュータがどのように進化しているのか、また今後どの方向に発展していくのかを考える上で極めて重要である。

(1) エクサスケール時代の本格到来

今回の SC24 では、米国の El Capitan が初登場で第 1 位を獲得し、世界で 3 番目のエクサスケール・スーパーコンピュータとなった。すでにランキング入りしている Frontier や Aurora に続き、1EFLOPS を超えるシステムが増加していることから、スーパーコンピュータが新たな時代に突入したことが明確になった。エクサスケールシステムの登場によって、これまで不可能だった超大規模シミュレーションや AI 解析、気候モデリング、創薬シミュレーションが可能となり、科学技術の発展が加速している。特に、ディープラーニングや生成 AI の需要が増加する中で、エクサスケールシステムは AI モデルのトレーニングを大規模化し、さらなる精度向上や高速化を実現する役割を担っている。

また、AI 向けには Rmax (実測性能) と Rpeak (理論性能) の差が小さい混合精度の性能も注目される。また、エクサスケールシステムではソフトウェア最適化が進み、ハードウェアのポテンシャルを最大限に引き出せるようになってきた。この傾向は、今後のスーパーコンピュータ開発において、ハードウェアとソフトウェアの統合設計がますます重要になることを示している。

(2) 米国の圧倒的優位

今回の TOP500 では、米国のスーパーコンピュータが引き続き優勢を保ち、上位 5 位のうち 4 つが米国のシステムによって占められた。特に、ローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL)、オークリッジ国立研究所 (ORNL)、アルゴンヌ国立研究所 (ANL) といった米国エネルギー省 (DOE) 管轄の研究機関が最先端のシステムを保有している。これは、米国政府がスーパーコンピュータの開発を戦略的に推進していることを示しており、特にエネルギーシミュレーション、核兵器シミュレーション、気候変動解析といった国家的に重要な研究プロジェクトにおいて、スーパーコンピュータが不可欠な役割を果たしている。

一方で、中国のスーパーコンピュータが今回のランキングにも登場しなかったことは注

目される。中国は過去に「天河二号」や「神威・太湖之光」を開発し、TOP500 でトップを占めた時期もあったが、最近は技術情報を公開しない傾向が強まっている。これは、米中技術摩擦の影響や、国家安全保障上の理由から、中国が自国のスーパーコンピュータの詳細な性能を公開しなくなっているためと考えられる。実際には、中国でもエクサスケールシステムが稼働しているが、それが公式ランキングに反映されていないのが現状である。

(3) クラウドベースの HPC が躍進

今回のランキングで特筆すべき点の一つが、クラウドベースのスーパーコンピュータが上位にランクインしたことである。特に Microsoft Azure が提供する Eagle は 4 位にランクインした。これは、クラウド環境での HPC の更なる拡大を示唆する。従来の HPC では、政府機関や大学、研究所に設置されるオンプレミスのシステムが主流であった。しかし、クラウド技術の進化により、研究者がオンデマンドで高性能な計算リソースを利用できるようになり、スーパーコンピュータの利用形態が変化しつつある。AI の計算負荷が増大していることもあり、クラウド環境での HPC はオンデマンドでリソースを拡張できる強みを持っているために、今後も普及する可能性が高い。しかし、利用コストや HPC 向けのアプリケーションのサポートが弱いといった課題もあるため、従来のオンプレミスのシステムとの棲み分けは今後も続いていくものと思われる。

(4) エネルギー効率の向上

スーパーコンピュータの性能向上に伴い、エネルギー消費量の問題がますます重要になっている。今回の TOP500 では、エネルギー効率 (Flop/Watt) の向上が顕著であり、El Capitan は 58.89 Gflop/W、Frontier は 52.93 Gflop/W という高い値を記録した。この成果は、GPU やアクセラレータの活用、冷却技術の向上、ソフトウェアの最適化によるものである。特に、El Capitan では、AMD の最新の APU (AMD CPU コアと GPU を組み合わせたもの) である Instinct MI300A を採用し、従来と比較して飛躍的なエネルギー効率を達成した。今後、スーパーコンピュータがゼタスケールの領域に突入する中で、消費電力の抑制がますます重要な課題となる。

(5) 今後の展望

SC24 で発表された TOP500 のランキングからは、エクサスケール時代の本格化、米国の圧倒的優位、クラウド HPC の成長、エネルギー効率の向上という 4 つの大きなトレンドが浮かび上がった。今後、スーパーコンピュータはゼタスケール時代へ向かうと予測される。各国とも次世代スーパーコンピュータの開発を進めており、HPC 競争はさらに激化していくことが予想される。また、AI の高度化に伴い、HPC の利用分野が更に拡大し、より多様な分野で活用されると考えられる。スーパーコンピュータは、単なる計算速度の競争を超えて持続可能性や多用途性が求められるエコシステムの時代へと移行している。

3.4.2. CPU プロセッサおよび加速部における最新の動向と期待

2024 年 11 月の TOP500 ランキングでは、NVIDIA Grace Hopper Superchip や AMD Instinct MI300A を搭載したスーパーコンピュータが新たにランクインしたことで、最近の動向を浮かび上がらせた。特に、Arm ベースのプロセッサや CPU-GPU 統合型アーキテクチャが増加しており、従来の x86 ベースのスーパーコンピュータ市場に変革をもたらしている。NVIDIA Grace Hopper Superchip は、Arm Neoverse コアを採用した Grace CPU と Hopper GPU を統合し、高帯域メモリを直接接続することでメモリボトルネックを解消している。これらを採用したスーパーコンピュータでは HPC と AI ワークロードの両方に最適化されたシステムを構築している。一方、AMD Instinct MI300A は、Zen 4 CPU コアと CDNA3 GPU を統合した APU (Accelerated Processing Unit) であり、HPE Cray EX255a システムに搭載され、NVIDIA Grace Hopper Superchip を搭載したシステムと同様に AI と HPC のハイブリッドワークロードに適した性能を発揮するようにしている。また、NVIDIA H100, H200 を採用したシステムが引き続きランキングに登場し、クラウドベースの HPC システム (Microsoft Azure の ND H200 v5 など) も注目を集めている。このことから、オンプレミスのスーパーコンピュータとクラウドベースの HPC の融合が加速していると言えるのではないか。

このような技術の進展を踏まえると、「富岳」の次期システムである次世代スーパーコンピュータ「富岳 NEXT」への期待としては、現行の「富岳」が世界で初めて Arm ベースのプロセッサ (A64FX) を採用し、高帯域メモリを活用したシステムとして、TOP500 ランキングに大きな影響を与えたように「富岳 NEXT」でも、Arm ベースの技術が生かされ、NVIDIA Grace Hopper Superchip や AMD Instinct MI300A のような CPU-GPU 統合設計の導入、メモリの強化、省電力技術の高度化により HPC と AI の融合が一層進むことが求められる。商業的な成功という意味では、クラウドベースの HPC への展開ができるかが鍵になるだろう。

3.5. 米国と欧州の次期スーパーコンピュータに関する情報

3.5.1. 概要

欧州、米国を中心に、2026 年以降に稼働を予定する新たなスーパーコンピュータプロジェクトがいくつか発表されており、それぞれの国が異なる戦略を持ちながら計算能力の飛躍的向上を目指している（表 3.1）。本節では、米国のエネルギー省（DOE）管轄の ATS-5、ATS-6、および国立科学財団（NSF）管轄の Horizon と EuroHPC の Alice Recoque、また、EuroHPC とは別にドイツで計画されている Herder と Blue Lion について、背景とともに述べる。また、本節で記述する内容は、表 3.2 に示す情報源をまとめたものである。

表 3.1 欧州と米国の次期スーパーコンピュータ

地域	スーパーコンピュータ名称 (コード名)	資金源	設置国	稼働予定	備考
米国	ATS-5	DOE	米国 LANL	2026 年末 ～2027 年	
	ATS-6	DOE	米国 LLNL	2029 年 ～2030 年	
	Horizon	NSF	米国 TACC	2026 年	
欧州	Alice Recoque	EuroHPC, GENCI, SURF※	フランス GENCI	2026 年	Jules Verne(コン ソーシアム名)
	Hunter と Herder	連邦政府, 州政府※	ドイツ HLRS	2025 年 2027 年	資金は GCS 経由
	Blue Lion	連邦政府, 州政府※	ドイツ LRZ	2027 年	資金は GCS 経由

※ Alice Recoque と Hunter および Herder に関する資金源については、下記の項も参照のこと。

3.5.2. 米国 DOE:ATS-5

米国では、エネルギー省（DOE）の管轄のもと、次世代スーパーコンピュータの開発が進んでいる。特にロスアラモス国立研究所（LANL）とローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）の 2 つの施設で、それぞれ ATS-5 と ATS-6 という次期スーパーコンピュータが予定されている。

ATS-5 は、LANL に設置される予定で、現在の Crossroad の後継機となる。このスーパーコンピュータは 2026 年末の稼働を目指しており、特にシミュレーション技術の向上に重点を置いている。LANL は、核兵器のシミュレーションや先端材料科学の研究において

最先端の技術を開発しており、ATS-5 はこれらの研究のさらなる進展を支える計算基盤となる。

ATS-5 アーキテクチャは、El Capitan と相補的に機能し、最も複雑な備蓄管理上の課題を解決することを可能にしつつ、多様なワークロードのスループットを維持することを目的としている。ATS-5 のアーキテクチャ的進展と目標として、高複雑度の大規模シミュレーションおよびAI/MLの活用が挙げられる。具体的には、tri-lab アプリケーション向けのメモリ帯域幅性能の継続的向上によるメモリウォールの克服、プログラマーの生産性向上・エネルギー消費の削減・プロセッサの利用率向上による効率性の向上、複数の先進技術ソリューションによる高性能計算エコシステムの活性化、そして、NNSA の最も複雑かつ大規模なストックパイル（核兵器備蓄）シミュレーションにおける時間短縮の大幅な改善に向けた強スケーリングの推進を目指す。

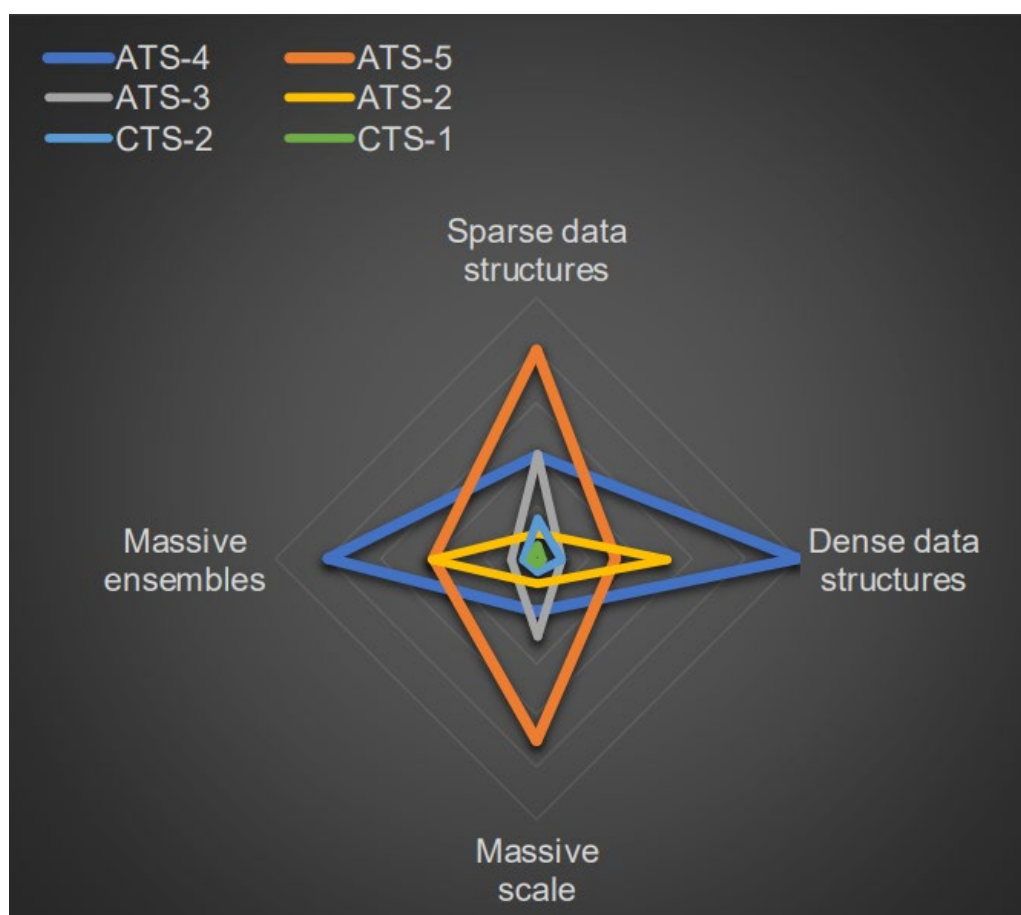


図 3.14 El Capitan (ATS-4) と相補的に機能する ATS-5 アーキテクチャ

出典 : Advanced Technology System 5 (ATS-5), August 28th, 2024,

https://cdn.lanl.gov/files/ats-5-offeror-guidance_74aa2.pdf

表 3.2 Crossroad の後継としての ATS-5 の相違点

Crossroads (ATS-3)	ATS-5	コメント
GPU 対応ベンチマークが少ない	すべてのプロキシベンチマークが GPU 実装済み	GPU 対応の充実が図られている
RFP では単一ノードベンチマークを使用	RFP では通信 (MPI) および IO (IOR) に限定したマルチノードベンチマークを使用。システム受け入れ時には、RFP ベンチマークに基づくマルチノードベンチマークを実施し、SOW※の一部としてベンダーと協議	提案には複数ノード構成と、それらを組み合わせて設計ニーズに応じられる能力を期待。提案評価にはスケーリングされた単一ノードの性能向上、受け入れには SSI を使用
ミニアプリと一部輸出管理対象のフルスケールアプリを使用	ミニアプリのみ使用 (すべてオープンソース)	フルスケールアプリは、El Capitan における複雑さに対して価値が低いと判断
機械学習は含まれていない	機械学習の推論と学習を追加	材料科学に関連するワークロードに焦点を当てている

※ SOW : Statement of Work (作業範囲記述書)

※ SSI : Scalable System Improvement

また、STS-5 については、下記の記事には、まだ、性能については未発表であることが述べられている。ただし、ATS-5 は 20 メガワット以下の電力を消費する。Frontier は 21 メガワット、El Capitan は約 30 メガワットの電力を消費するので、ATS-5 でのエクサスケールシステムの実現は難しいと思われる、との記載がある。今後、DOE は 2025 年 5 月に構築契約を締結し、システムは 2026 年後半または 2027 年初頭に納入され、2027 年 8 月または 9 月に稼働する予定で

<https://www.hpcwire.com/2025/01/13/uss-doe-details-the-next-major-supercomputer-a-companion-to-el-capitan/>

3.5.3. 米国 DOE:ATS-6

一方で、ATS-6 は LLNL に設置予定となっており El Capitan の後継機として 2030 年の稼働を予定している。LLNL のスーパーコンピュータは、主に国家安全保障や科学研究に貢献しており、ATS-6 もその流れを継承する。ATS-6 に関して注目すべき点は、その性能向上のスケール感である。開発に携わる国家核安全保障局 (NNSA) の Thuc Hoang 氏は「ゼタスケールとは言わないが…」と発言しており、ZFLOPS の性能には到達しないものの、エクサスケールを超える可能性が示唆されている。これは、計算科学の新たな時代を切り開くマイルストーンになると考えられる。

3.5.4. 米国 NSF:Horizon

米国の科学研究におけるスーパーコンピュータの新たな時代が始まる。米国最大の学術スーパーコンピュータ「Horizon」が、米国国立科学財団（NSF）のリーダーシップ級コンピューティング施設（NSF LCCF）の一環として、テキサス・アドバンスド・コンピューティング・センター（TACC）によって建設・運用されることが決定した。

NSF は 2024 年 7 月に TACC を LCCF の建設主体として選定し、この施設が全米の科学・工学研究者に向けた最先端の計算およびデータ解析能力を提供することを発表した。LCCF は、分散型のコンピューティング施設として、全米 6 つの主要研究機関と連携し、先進的な計算リソース、ソフトウェア、サービスを提供する。この取り組みは、科学的発見を飛躍的に加速させるものであり、その規模と重要性は、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡やアイスキューブ・ニュートリノ天文台と同等の国家的プロジェクトとして位置付けられている。

TACC が建設・運用する「Horizon」スーパーコンピュータは、2026 年初頭に稼働開始予定であり、現在米国で最も強力な学術スーパーコンピュータである「Frontera」（TACC 運用）と比較して約 10 倍の計算能力を持つ。Horizon は、従来の高精度な HPC 計算（64 ビット）を支えるだけでなく、人工知能（AI）向けに特化した低精度 GPU を大量に搭載するハイブリッドシステムとなる。この AI 向け GPU は、従来の CPU ベースの HPC システムと比べて大幅な省エネルギー化を実現し、より持続可能なコンピューティング環境を提供する。

Horizon の計算能力は、HPC として 400 ペタ FLOPS（Frontera の約 10 倍）、AI 用途では Frontera の 100 倍に達する見込みである。これにより、ピコ秒単位の原子レベルの現象から、数十億年に及ぶ宇宙規模のシミュレーションまで、幅広い科学的課題に対応可能となる。TACC は現在、テキサス州ラウンドロックにある Sabey Data Centers と協力して Horizon の建設を進めており、2026 年の運用開始を目指している。

また、NSF LCCF は、科学研究のみならず、高度な人材育成と教育プログラムにも注力する。Horizon の計算資源は、NSF Frontera と同様の割り当てプロセスを通じて学術研究者に提供される予定であり、モアハウス大学（Moorehouse College）をはじめとするパートナー機関と連携し、K-12（初等・中等教育）から大学院生までを対象としたワークショップ、インターンシップ、フェローシップなどのトレーニングプログラムを実施する。

さらに、TACC では、Horizon の運用開始までの間に、「Frontera」と「Horizon」をつなぐスーパーコンピュータとして、「Stampede3」「Vista」（2024 年導入）、「Lonestar6」（2022 年導入）を稼働させ、次世代のスーパーコンピュータ技術への円滑な移行を進めている。

3.5.5. EuroHPC（フランス）Alice Recoque

欧州では、EuroHPC による大規模なスーパーコンピュータ開発プロジェクトが進行中である。フランスに設置予定の Alice Recoque は、欧州で 2 番目となるエクサスケールのスーパーコンピュータであり、2026 年第 1 四半期の稼働を目指している。

Alice Recoque は、フランスの原子力・新エネルギー庁（CEA）の計算センターに設置される予定で、その計算能力は 25,000 基の NVIDIA H100 GPU 相当に達するとされている。これは現在のシステムと比較して飛躍的な性能向上を意味し、特に AI やデータ解析分野における HPC に大きく貢献すると期待されている。また、これまで米国や中国に後れを取っていたスーパーコンピュータ分野での独自技術確立を目指しており、その一環として Jules Verne プロジェクトを推進している。このプロジェクトの一環として開発される Alice Recoque は、HPC の分野における欧州の独立性を高める狙いがある。また、エネルギー効率の向上や環境負荷の軽減にも重点が置かれている。

Jules Verne コンソーシアムは、フランスが主導し、GENCI がホスティング機関として CEA と協力して進める。また、オランダの教育・研究機関の協力組織である SURF もコンソーシアムの一員として参加している。このプロジェクトの総予算は約 540M ユーロ（864 億円）と見積もられており、資金の 50% は EuroHPC から、残りの 50% はフランスおよびオランダの共同拠出によって賄われる予定である。

3.5.6. ドイツ Hunter と Herder（HLRS）

2023 年 12 月、シュトゥットガルト大学と Hewlett Packard Enterprise（HPE）は、シュトゥットガルト高性能計算センター（HLRS）における新たなスーパーコンピュータ「Hunter」と「Herder」の導入契約を締結した。

本計画は 2 段階で進められ、2025 年に「Hunter」が運用を開始し、2027 年にはエクサスケール級の計算能力を持つ「Herder」が導入される予定である。これにより、HLRS の計算能力は大幅に向上し、特にエネルギー効率の高い GPU ベースのアーキテクチャへの移行が図られる。Hunter は HPE Cray EX4000 を基盤とし、AMD Instinct™ MI300A APU を採用することで、従来の Hawk と比較して最大 80% の省エネルギー化を実現する。Herder は、1EFLOPS の計算能力を備え、2025 年末までに最終的な技術構成が決定される予定である。

本プロジェクトの総予算は 115M ユーロ（184 億円）に達し、GCS を通じて資金が提供される。資金の 50% はドイツ連邦教育研究省、残りの 50% はバーデン＝ヴュルテンベルク州科学・研究・芸術省が拠出する。

Hunter と Herder の導入により、ドイツおよび欧州のスーパーコンピューティング環境はさらに強化される。JSC が 2025 年に導入予定の「JUPITER」や、LRZ が 2026 年に計画する新システムと並び、GCS 全体の計算資源の最適化が図られる。シュトゥットガルト

の研究者にとって、この新たな計算インフラは、燃費効率の向上した車両の設計、より高性能な風力タービンの開発、新材料の研究、AIを活用した製造プロセスの最適化など、多様な応用分野で新たな可能性をもたらす。また、気候変動対策や環境に優しいモビリティの開発、さらには公共機関の危機管理支援など、社会課題の解決にも貢献することが期待される。HLRSのMichael Reschセンター長は、「HPEとの協力のもと、エクサスケール時代への移行を実現し、今後の技術的課題に対応する準備が整う」と述べている。

3.5.7. ドイツ Blue Lion (LRZ)

ライプニッツ・スーパーコンピューティング・センター (LRZ) は、次世代スーパーコンピュータ「Blue Lion」の導入を決定し、2024年12月13日にHewlett Packard Enterprise (HPE) との契約を締結した。「Blue Lion」は、Gauss Centre for Supercomputing (GCS) の一部として、ドイツ国内およびバイエルン州の最先端研究を支援するために設計された、革新的な高性能計算システムである。

この新しいスーパーコンピュータは、2027年初頭に稼働開始予定であり、現在のLRZのフラッグシップシステム「SuperMUC-NG」と比較して約30倍の計算能力を誇るプリ・エクサスケール (Pre-Exascale) システムとなる。総コストは250Mユーロ (400億円) に及び、ドイツ連邦教育研究省 (BMBF) およびバイエルン州科学・芸術省 (StMWK) が折半して資金を提供する。この予算には2032年までの運用費も含まれており、長期的なHPCインフラの維持と発展が見込まれている。

「Blue Lion」は、HPE Crayの次世代技術と、NVIDIAの最新プロセッサおよびアクセラレータを搭載し、従来のHPC (モデリング・シミュレーション) とAI技術を統合することが可能なアーキテクチャを採用している。気候モデリング、流体力学、量子物理学、ライフサイエンス、人文科学など、多様な研究分野での活用が期待されている。また、HPE Slingshot (400Gbpsの高性能インターコネクト) を活用することで、大規模な計算タスクの並列処理と高速データ転送を実現し、研究者のニーズに対応する。

本システムの導入に伴い、CPUとGPUの組み合わせによる新たな計算環境への適応が求められるため、HPE Crayプログラミング環境を導入し、コードの移植や最適化を支援する。LRZは2025年よりプログラミングワークショップや研修を開始し、研究者が新システムを効果的に活用できるようサポートする。また、Hewlett Packard Labsとの協力を強化し、新しいアルゴリズムやソフトウェア開発の支援体制を整える予定である。

「Blue Lion」は、環境負荷の低減と省エネルギー化を考慮し、100%液体冷却システムを採用する。最大40℃の温水を使用して冷却し、排熱をLRZのオフィスや近隣の研究機関の暖房に再利用する計画である。従来の空冷システムと比較して約94%のエネルギー削減を実現し、持続可能なスーパーコンピューティングのモデルケースとなることが期待される。また、サーバーラックの密度を高めることで、省スペース化と静音設計が可能となり、より効率的な運用が実現される。

3.5.8. 情報源

本節の情報源はつぎの通りである。

表 3.3 欧州と米国の次期スーパーコンピュータに関する情報源

名称	内容	URL
ATS-5	Enabling breakthrough improvements in time-to-solution in a post exascale era、公式ホームページ Advanced Technology System 5 (ATS-5), August 28th, 2024, https://cdn.lanl.gov/files/ats-5-offeror-guidance_74aa2.pdf	①
ATS-6	An Inside Look at El Capitan: Facts Beyond the Numbers HPC wire, 2024 年 11 月 19 日	②
	NNSA Advanced Simulation and Computing (ASC) Program 公式資料, 2024 年 9 月 26 日	③
Horizon	New Heights: The U.S. NSF Leadership-Class Computing Facility and Horizon TACC News, 2024 年 11 月 19 日	④
Alice Recoque	LEADING THE WAY IN EUROPEAN SUPERCOMPUTING TO EXASCALE AND BEYOND EuroHPC_SUMMIT2024, 2024 年 3 月 19 日	⑤
	MAKE FRANCE AN AI POWERHOUSE AI Action Summit, 2025 年 2 月 10-11 日	⑥
	National and European landscape of HPC, AI and quantum technologies ORAP (ORganisation Associative du Parallélisme) 30 years birthday, 2024 年 10 月 14-15 日	⑦
	What We Know about Alice Recoque, Europe's Second Exascale System HPC wire, 2024 年 6 月 24 日	⑧
	The Jules Verne Consortium Will Host the New EuroHPC Exascale Supercomputer in France EuroHPC Press release, 2023 年 6 月 20 日	⑨
Hunter, Herder	Exascale Supercomputing Is Coming to Stuttgart 2023 年 12 月 19 日	⑩
Blue Lion	HPE Tapped to Build LRZ's Next Flagship Supercomputer HPC wire, 2025 年 1 月 14 日	⑪
	Hewlett Packard Enterprise baut den nächsten Supercomputer am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften 13.12.2024 BAdW バイエルン科学人文アカデミーの公式プレス	⑫

① <https://www.lanl.gov/about/mission/advanced-simulation-and-computing/platforms/ats-5>

② <https://www.hpcwire.com/2024/11/19/an-inside-look-at-el-capitan-facts-beyond-the-numbers/>

- ③ <https://science.osti.gov/-/media/ascr/ascac/pdf/meetings/2024/NNSA-ASC-Overview-to-ASCAC-September-26-2024hoang.pdf>
- ④ <https://tacc.utexas.edu/news/latest-news/2024/11/19/new-heights-the-us-nsf-leadership-class-computing-facility-and-horizon/>
- ⑤ https://eurohpc-ju.europa.eu/document/download/ac0e568d-ca7b-4e1f-99b7-5a19e8687604_en?filename=JU%20session.pdf
- ⑥ <https://www.elysee.fr/admin/upload/default/0001/17/d9c1462e7337d353f918aac7d654b896b77c5349.pdf>
- ⑦ <https://orap.irisa.fr/wp-content/uploads/2024/10/15oct-03-P-Lavocat-Forum-30-ans.pdf>
- ⑧ <https://www.hpcwire.com/2024/06/24/what-we-know-about-alice-recoque-europes-second-exascale-system/>
- ⑨ https://eurohpc-ju.europa.eu/jules-verne-consortium-will-host-new-eurohpc-exascale-supercomputer-france-2023-06-20_en
- ⑩ <https://www.hlr.de/news/detail/exascale-supercomputing-is-coming-to-stuttgart>
- ⑪ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/hpe-tapped-to-build-lrzs-next-flagship-supercomputer/>
- ⑫ <https://badw.de/die-akademie/presse/pressemitteilungen/pm-einzelartikel/detail/hewlett-packard-enterprise-baut-den-naechsten-supercomputer-am-leibniz-rechenzentrum-der-bayerischen-akademie-der-wissenschaften.html>

3.5.9. 今後の展望

これらの次世代スーパーコンピュータの開発は、各国の技術的・戦略的な競争を反映している。米国は DOE による「ATS-5」「ATS-6」の開発を通じて国家安全保障や先端シミュレーションの領域でリーダーシップを維持しようとしている。また、NSF が主導する「Horizon」は、科学研究と AI 分野における革新を加速させる可能性が高い。一方、欧州は「Alice Recoque」を通じて米国・中国に対抗する独自技術の確立を目指している。

スーパーコンピュータの性能向上は、気候変動予測、医療研究、エネルギー開発、材料科学など、さまざまな分野に大きな影響を与える。特に、AI との統合が進むことで、これまでの計算科学とは異なるアプローチが可能となる。今後の課題としては、消費電力の増大への対策や、計算資源の持続可能な運用が求められるだろう。

2026 年以降、これらの次世代スーパーコンピュータがどのような成果を生み出し、世界の科学技術にどのような影響を与えるのかが注目される。欧州、米国を中心に展開されるスーパーコンピュータ競争は、今後も続いていくことが予想され、次の大きなマイルストーンとしては「ゼタスケール時代」の到来が待ち望まれている。

3.6. まとめ

日米欧中のフラッグシップスーパーコンピュータの概要をまとめ、TOP500 のランキングから各国地域のフラッグシップスーパーコンピュータの性能推移や上位 50 位までにおける割合などを確認した。また、CPU プロセッサ、加速部、ベンダーの推移からトレンドの変化を可視化し、SC24 の動向も踏まえて技術動向についてまとめた。近年の動向としては、特に GPU の導入やプロセッサのアーキテクチャの違いの進展が注目される。技術的には、処理性能の向上だけでなく、エネルギー効率や用途多様化といった観点も重視されていることが分かる。さらに、米国 DOE の次期スーパーコンピュータ（ATS-5、ATS-6）、NSF の Horizon、欧州の JUPITER や Alice Recoque など、次世代スーパーコンピュータに関する計画も取り上げ、今後の展望を示した。

4. 主要国の加速部対応に関する調査

4.1. 調査内容

2 章で調査を行った国のスーパーコンピュータセンターにおいて、加速部を導入した背景や、加速部に対応するために行われた取組、取組の主体（研究者ごとか、組織的なものか）、ベンダー等の民間企業の参画、国等の行政機関の支援及び関与、講習会等の加速部に対応するための教育、加速部に対応することで創出された主要な研究事例等を調査しまとめた。

加速部の導入については、米国では NVIDIA 製 GPU が広く利用されており、ORNL の Summit や Frontier といった HPC システムが代表例である。また、米国の主要スーパーコンピュータセンターは DOE や NSF の支援を受け、最新の GPU 技術を活用し、AI と科学計算を同時に進行させている。これにより、エネルギー効率の向上と高性能化が推進されている。欧州においても NVIDIA の GPU が広範に利用されており、EuroHPC プロジェクトの一環として、AI や気候変動などの高度な計算において GPU アクセラレーション技術が不可欠とされている。

これらの技術動向を総合的に踏まえ、加速部に関する調査を詳細に実施し、その結果をもとに、加速部対応のアプリケーションや運用体制に関する情報を整理する。

4.2. ヒアリング先一覧

次の一覧表に示す機関に対して、コンタクトを実施した。このうち、ヒアリングを実施した期間は、

- ・ Barcelona Supercomputing Center
- ・ High Performance Computing Center Stuttgart
- ・ National Supercomputing Centre Singapore

であり、

- ・ French Alternative Energies and Atomic Energy Commission

は、本調査からの質問に対して文書で回答をいただいた。また、EuroHPC と米国 DOE については、コンタクト済である。これらの情報および進捗については、文部科学省様と打ち合わせ・指示をいただきながら進めた。

国名	組織名	職位	状況
EU	EuroHPC	Head Of Unit at EuroHPC Joint Undertaking	コンタクト済
ドイツ	HLRS	Director	1/27 実施済
フランス	CEA	deputy at the CEA's Fundamental Research Department	質問回答あり
		Director at Maison de la Simulation	
		Head of TGCC	
スペイン	BSC	Senior Strategy Advisor	2/20 実施済
		Operations Director and CIO	
米国	ANL	Head of Communications, CELS	—
		Deputy Associate Laboratory Director/Director, ALCF	—
		Deputy Division Director & Project Director, ALCF-4	—
		Director of Science	—
	ORNL	Group Leader	—
		Division Director, NCCS	—
		OLCF Program Director	—
		Director of Science	—
	DOE	Director, Computational Science Research and Partnerships Division,	コンタクト済
シンガポール	NSCC	Director (Chief Operations)	2/28 実施済
		Deputy Director	

4.3. ヒアリング項目および方法

各機関のヒアリングに先立ち、下記の 6 項目の質問事項を送付した。ヒアリング当日においては、この質問事項にしたがって、回答いただき、議論する形でヒアリングを進めた。

1. 加速部を導入した背景
2. エネルギー効率について
3. GPU を利用したアプリケーション
4. ベンダーや民間企業の参画
5. 講習会など加速部に対応するための教育
6. 将来計画と展望

加速部を中心にヒアリングを実施したが、他のテーマについても全般的に広い範囲でヒアリングを行った。

表 4.1 各機関に事前に連絡した質問事項

<u>1. 加速部を導入した背景</u> ・現在のスーパーコンピュータで GPU を導入したきっかけや主要な要因は、および、エクサスケール等の次期プロジェクトでの GPU の計画は？ ・GPU を選択した理由と CPU と GPU の比率をどのように決定したか？ ・導入にむけて主体となったのは研究者か、機関全体もしくは企画部などか。 ・導入過程において困難だった点、問題点、課題などあればご教授ください。 ・導入中で GPU の利用目的はどこにおかれていたか。
<u>2. エネルギー効率について</u> ・現在のスーパーコンピュータおよび次期スーパーコンピュータのエネルギー効率についてはどのように考えたか。 ・エネルギー消費を抑えるための冷却技術やハードウェアの工夫は。 ・GPU ノードの保守管理や障害対応で特に注意している点は。 ・余剰電力の利用や、持続可能性のための取り組みは。
<u>3. GPU を利用したアプリケーション</u> ・GPU は主として AI に利用されているのか。AI 以外で GPU の性能を活かしているアプリケーションは。 ・CPU+GPU が必須のアプリケーションは何か。 ・物性物理学、量子化学、AI、気候、宇宙、原子力シミュレーションなどの分野では、CPU と GPU をどのように利用しているか。 ・GPU 活用のために必要なソフトウェアやツールは。CUDA の利用状況は。 ・GPU を有効利用するために設けられた開発体制や支援体制はあるか。 ・GPU を導入したことにより、どのような分野が最も恩恵を受けているか。 ・OpenACC を活用する可能性はあるか。
<u>4. ベンダーや民間企業の参画</u> ・スーパーコンピュータ導入に際して、ハードウェアベンダーやソフトウェアベンダーからの情報収集をどのように実施したか。ベンダーとはどのように連携していますか。 ・次期スーパーコンピュータ導入の際には、アプリケーションベンダーの意見を参考にしますか。

・応用ソフトウェアや導入後サービスに関して、民間事業者から、どのような関わりがあったか ・民間事業者との連携の必要性和課題について、どのように考えているか。 ・他機関との連携の取り組みの最近のトピックスを教えてください。 ・企業との連携はどのようにおこなわれていますか？連携では何を重視していますか？ ・その中で SMEs(中小企業)への普及の取り組みの課題について教えてください。
5. 講習会など加速部に対応するための教育 ・GPU を活用した研究者や開発者へのサポートやトレーニングの内容。 ・初めて GPU を使うユーザー向けのガイドライン等。 ・GPU リソースの公平な利用を確保するためのスケジューリングポリシーや課金モデルは。 ・関連機関との役割分担について教えてください。
6. 将来計画と展望 ・将来的にアクセラレータをどのようにしていく予定か（例；GPU を推進、次世代の量子プロセッサなど新たなアクセラレータに置き換えていく）。 ・エクサスケール・コンピューティングに向けた GPU の役割についての見解。 ・量子コンピュータ等の計画の状況について教えてください。 ・国際連携の状況を教えてください。

4.4. ヒアリング結果

4.4.1. HLRS（ドイツ）

HLRS（High-Performance Computing Center Stuttgart）の Professor Michel M. Resch にヒアリングを実施した。質問リストを基に Professor Michel M. Resch がご回答いただいた内容を以下に記す

表 4.2 ヒアリング実施日時

項目	内容
ヒアリング先	HLRS（High-Performance Computing Center Stuttgart）
ヒアリング対象者	Director, Professor Michel M. Resch
日時	2025 年 1 月 27 日 17 時 00 分～18 時 00 分 （ドイツ時間：9 時～10 時）
場所	オンライン（アドバンスソフト社内会議室より）
出席者	【HLRS】Professor Michael M. Resch 【アドバンスソフト】松原、高橋、富塚、高原（外部専門家）

(1) 加速部を導入した背景

- ・アプリケーションのベンチマークで高いパフォーマンスを達成するために GPU が採用されている。TOP500 で用いられる Linpack のような特定のベンチマークは重視しておらず、実アプリケーションで高いパフォーマンスを発揮させることを意識している。
- ・GPU は CPU と比較してエネルギー効率が高く、消費電力を大幅に削減できる。
- ・GPU 重視、期待するところ、消費電力が低い、次の調達でも GPU を入れる。

- ・短期的には2～3年では性能が上がるが、消費電力もあがる。

(2) エネルギー効率について

- ・HLRSは、従来のCPUに比べて20%の消費電力で同等のパフォーマンスを実現している。また、アプリケーションごとにクロック周波数を最適化することで、さらに10～20%の省電力化が可能である。
- ・HLRSは、水冷システムを採用しており、空冷は2%以下。
- ・HLRSは、2027年には、スーパーコンピュータから発生する熱を大学全体の暖房に利用する予定である。

(3) GPU を利用したアプリケーション

- ・HLRS (High-Performance Computing Center Stuttgart) では、GPUを主にコンピュータシミュレーションに使用しており、特に計算流体力学や素粒子物理学の分野で効果を発揮している。
- ・スーパーコンピュータの主な応用分野は、基礎科学、産業利用、環境シミュレーション、創薬開発などである。
- ・HLRSでは、計算流体力学(CFD)が50～60%、素粒子物理学が約20%の利用割合を占めている。
- ・NVIDIAのCUDAが広く利用されているが、OpenACCのような標準規格の普及には課題がある。NVIDIAがOpenACCに関心をもっていない。HPCコミュニティがOpenACCの活用は難度が高いと考えている。多様なコンピュータ言語への対応があまり進んでない。センターとしてはプッシュしている。

(4) ベンダーや民間企業の参画

- ・ベンダーのHPEと協力して、オンサイトでのGPUの保守と管理をおこなっている。
- ・AMDとHPEがよく連携している。
- ・HLRSは、中小企業(SME)へのサポートを目的とした十数年前に設立したSICOSという会社を設立し、産業界でのスーパーコンピュータの利用を促進している。
- ・50社程度が利用。
- ・ヒューマンリソースが足りない。
- ・産業界のAIユーザーが長期のシステム利用を必要とする場合のスケジューリングについても検討が必要である。
- ・HLRSはドイツのNCCのひとつであり、HLRSはHPC普及のために地方にある数十のセンターのsecond supportをしている。
- ・OpenなRISC-Vコンソーシアムを欧州ではやっている。

(5) 講習会など加速部に対応するための教育

- ・ GPU トレーニングプログラムが提供されており、ユーザーは GPU の仕組みとプログラミング方法を学ぶことができる。
- ・ NVIDIA と一緒にやっている。5 年間は必要だ。トレーニングプログラムに 700 人くらい参加した。初級者向けの教材はベンダーの教材を利用している。
- ・ HLRS は、産業ユーザーに対してのみ課金しており、研究ユーザーにはコスト情報を開示している。
- ・ HLRS は、PBS Pro というスケジューリングシステムを使用しており、データストレージは、中期ストレージを使用している限り無料であるが、長期保存には料金がかかる。

(6) 将来計画と展望

- ・ HLRS は、量子コンピュータや消費電力の少ない光ベースのプロセッサなど、新たな技術についても調査を進めている。
- ・ ヨーロッパでは、AI ファクトリーという新たなプロジェクトが開始され、AI 研究と AI 産業を支援するための資金が投入されている。
- ・ 国際協力の重要性が強調されている一方で、ハードウェアサプライチェーンにおける依存関係の課題も指摘されている。
- ・ GPU は今後 10 年間は主要な技術であり続けると予想されており、HLRS はさまざまなアクセラレータ技術を評価している。
- ・ GPU は、今後 2〜3 年で性能が 4 倍になると予想されるが、同時に消費電力も 4 倍になる可能性がある。
- ・ 中小企業への HPC 技術の普及が課題となっている。
- ・ GPU 技術の今後の進歩とエネルギー消費のバランスが重要である。
- ・ AI ファクトリーは 2024 年 12 月に採択された。Stuttgart (HammerHAI) も採択された。ここでは、AI で pre exa-scale から exa-scale を目指す。ハードウェアの更新についてマネジメントしており、AI ファクトリー全体に対して€650M が EC の HPC ファンドから出た。そのうち、HLRS 分は€85M の予定である。AI フレームワークだけに特化しているわけではなく、EC 全体の取り組みとともに、各国の取り組みもある（ドイツ、イタリア、オランダ）。

(7) 国際連携・サプライチェーンについて

- ・ サムソンと TSMC で作って、ドイツで組み立てる。
- ・ 従来から、欧州・米国・日本は連携して進めている。米国技術に依存しているところが大きいので、トランプ大統領の出方が心配だ。
- ・ ハードウェアは国ごとの技術だが、ソフトウェアでは国際連携が重要だ。
- ・ AMD、NVIDIA、NEC のベクトルを含めて 10 年間のロードマップを考えて進めている。

4.4.2. BSC (スペイン)

BSC (Barcelona Supercomputing Center)の Dr. Sergi Girona にヒアリングを実施した。
質問リストを基に Dr. Sergi Girona がご回答いただいた内容を以下に記す

表 4.3 ヒアリング実施日時

項目	内容
ヒアリング先	BSC (Barcelona Supercomputing Center)
ヒアリング対象者	CIO Sergi Girona
日時	2025 年 2 月 20 日 17 時 00 分～18 時 00 分 (スペイン時間：9 時～10 時)
場所	オンライン (アドバンスソフト社内会議室より)
出席者	【BSC】CIO Sergi Girona 【アドバンスソフト】富塚、高原 (外部専門家)

(1) 加速部を導入した背景

- MareNostrum 5 で GPU を導入したきっかけや主要な要因
 - 2020 年ごろ、通常の科学計算には標準的な CPU で十分だと考えられていたが、AI や特定のアプリケーションには GPU が優れていると考え、予算を CPU と GPU に分割した。
 - GPU の方が CPU よりもパフォーマンスが非常に高く、GPU:約 200 PFLOPS、CPU:約 45 PFLOPS (64bit sustained)。
- GPU (NVIDIA H100 など) を選択した理由と CPU と GPU の比率をどのように決定したか。
 - 競争入札で、スペース、性能、経済的な予算内で最高の機会を提供したため。
 - ヨーロッパレベルでの決定も影響。
 - ユーザーが GPU システムでパフォーマンスを発揮できないアプリケーションがまだ多数あると感じたため、GPU のみの選択はしなかった。
 - システムの寿命が 5 年であることも考慮。
- メモリについて特徴を教えてください。
 - NVIDIA のメモリと、1120 ノードの各ノードに 0.5TB の DDR5 を搭載。
 - GPU に十分なワークロードを与えるために必要な最小構成と判断。
 - HBM メモリの選択は、NVIDIA が価格とパフォーマンスに基づいて決定。
- GPU 導入のイニシアティブは、主に研究者、企画部門、または組織全体のいずれが主導したか？
 - キャパシティへのアクセスは競争的であり、ユーザーは GPU に移行することで時間とパフォーマンスを節約できることを理解しているため、迅速に

GPUに移行している。

- BSC がシステムの仕様、最小要件、改善点を準備し、HPC 技術者または専門家が承認。
- システムの構成に関する決定は BSC で行われた。
- 導入プロセス中に遭遇した困難、課題、または問題は？
 - ユーザーがテクノロジーを採用するには時間がかかり、アプリケーションの開発とテストに時間を要する。
 - 以前のシステム (MareNostrum4) での経験から、ユーザーが使用する必要のあるアプリケーションのほとんどが NVIDIA テクノロジーに移植されていたため、採用は容易だった。

(2) GPU を利用したアプリケーション

- GPU は主として AI に利用されているのか。AI 以外で GPU の性能を活かしているアプリケーションは。
 - システムは AI 専用に設計されたものではなく、完全なソフトウェアがインストールされているわけではない。
 - AI ファクトリーをインストールするための European Union managed by EURPC からの呼びかけに参加。
 - システムのかなりの部分が AI に使用されているが、通常の HPC の利用に近い。
- CPU+GPU 構成を必要とするアプリケーションは？
 - 大規模言語モデル (特に GPU)。
 - 気候変動シミュレーション (一部のモデルは GPU、一部は CPU のみで実行)。
 - 航空機を対象とした非定常流体シミュレーション
- GPU の利用を最大化するために必要なソフトウェアまたはツールは？ CUDA の使用状況は？
 - CUDA がベース。
 - NVIDIA との強力な合意があり、ユーザーがアプリケーションを GPU に対応させるのを支援するための共同ラボをサポート。
 - BSC だけでなく、スペイン全地域を対象としたユーザー支援プログラムを実施。
- GPU を有効利用するために設けられた開発体制や支援体制はあるか。
 - ヨーロッパのテクノロジーを開発することを推進。
 - 目標は、CUDA と NVIDIA から脱却し、独自のプロセッサとアクセラレータシステムを持つこと。

(3) ベンダーと民間企業の参加

- 導入に際して、ハードウェアベンダーやソフトウェアベンダーからの情報収集をどのように実施したか
 - テクノロジープロバイダーとの連携。
 - IBM (PowerPC システム開発)、NVIDIA との強力な協力。
 - AMD とも連携。
 - インテグレーターは、自社の市場を獲得しようとしている。
- 応用ソフトウェアや導入後サービスに関して、民間事業者から、どのような関わりがあったか
 - ベンダーはシステムのインストールとメンテナンスを担当。
 - システムが承認されると、ベンダーはシステムにアクセスできなくなる。
 - エネルギー対応リソース管理 (BSCTechnology) は、2016 年から 2017 年に他のスーパーコンピュータで開発および利用可能であったが、システムを維持するベンダーが必要なため、2024 年にシステムをインストール。
- 民間事業者との連携の必要性和課題について、どのように考えているか
 - インテグレーターは、NVIDIA などのプロバイダーからの独立性を持ち、新しいテクノロジーを採用する準備ができている必要がある。

(4) 講習会など加速部に対応するための教育

- GPU を活用した研究者や開発者へのサポートやトレーニングの内容。
 - GPU に関する教育とトレーニングの強力な歴史。
 - 2003 年以来、ヨーロッパレベルで CUDA 会議をバルセロナで開催。
 - NVIDIA との強力な協力により、ユーザーに教育とトレーニングを実施。
- 初めて GPU を使うユーザー向けのガイドライン等。
 - ほとんどのユーザーは GPU を初めて使用するユーザーではなく、GPU の使用に慣れている。
 - 初めて使用するユーザーは、大学または研究グループによって事前にトレーニングされている。
- GPU リソースの公平な利用を確保するためのスケジューリングポリシーや課金モデルは。
 - システムはイスラエルが提供する First Share を使用。
 - 欧州連合、スペイン政府、トルコ政府、ポルトガル政府に価格を提示。
 - 企業の R&D およびイノベーションへのアクセスは、システムの容量の最大 20% に制限。
 - 通常、企業に実際の実行アクセスは提供しない。

- o AI ファクトリーにも適用され、料金が発生。
- o 通常、年間割り当てに **First Share** を使用。
- o ユーザーは通常、システムの比例時間を使用。

(5) 将来の計画と展望

- 将来的にアクセラレータをどのようにしていく（例；GPU を推進、次世代の量子プロセッサなど新たなアクセラレータに置き換えていく）。
 - o 次世代システムを検討。
 - o Minostom 5 と同じストレージとファブリックに接続された、GPU と CPU のみのテクノロジーに基づく 2 つの小さなパーティション（2PFLOPS と 4PFLOPS）がある。
 - o NVIDIA の Grace と GraceBlack に基づく。
 - o 量子システムの実験から実用段階への移行を目指している。
 - o ジョブのコンポーネントを量子テクノロジーに送信できるワークフローシステムに統合。
 - o BSC が独自のベースプロセッサとアクセラレータシステムを推進。
- エクサスケール・コンピューティングに向けた GPU の役割についての見解。
 - o GPU アクセラレータの統合は、パフォーマンスを飛躍的に向上させるために不可欠。
 - o アプリケーションソフトウェアの改善とカスタマイズが必要。
 - o 高エネルギー消費に対する意識を高める必要があり、エネルギーコストを考慮したソリューションが必要。

4.4.3. CEA（フランス）

CEA（Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives、French Alternative Energies and Atomic Energy Commission）の Dr. France Boillod-Cerneux に質問を送付し、ヒアリングに先立ち回答をいただいたので、以下に記す。

表 4.4 ヒアリング実施日時

項目	内容
ヒアリング先	CEA（Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives、French Alternative Energies and Atomic Energy Commission）
ヒアリング対象者	BOILLOD-CERNEUX France, LARDJANE Nicolas, AUDIT Edouard
日時	2025 年 2 月 17 日
場所	文書での回答
出席者	—

(1) 背景

フランスおよびヨーロッパの HPC エコシステムは、いくつかの企業によって推進されている。CEA（フランス代替エネルギー・原子力庁）は、フランス国家とヨーロッパ、その経済、そして市民の利益のために 80 年間活動している主要な研究技術機関である。基礎研究に強固なルーツを持ち、以下の 4 つの主要分野における研究、開発、イノベーションにおける重要な役割を担っている。

- 低炭素エネルギー（原子力および再生可能エネルギー）
- デジタル技術
- 未来の医療技術
- 防衛と国家安全保障

CEA は、研究とイノベーション分野において、以下の 5 つの柱に基づいた独自の取り組みを採用している。

- フランスの防衛および国家安全保障戦略における歴史的な役割
- 原子の研究を通じた研究とイノベーションにおける画期的な戦略
- コンセプトの基礎的な発見から開発までのプロジェクトを処理する能力
- 画期的なイノベーションの開発を推進するスタートアップの強力なサポート
- さまざまな地域における地域に根ざした存在感、オープンな姿勢、協力的な精神

その定評のある専門知識を活かして、CEA はさまざまな学術および産業パートナーとの協力協定の設立に積極的に関与している。CEA はヨーロッパの研究地域に完全に統合されており、国際的な舞台での存在感を増し続けている。CEA は、過去 10 年間、平均以上のイノベーションパフォーマンスを実証してきた組織を評価する「Top 100 グローバルイノベーター」リスト (Clarivate ランキング) に選ばれている。また、欧州特許庁 (EPO) によると、ヨーロッパで最も多くの特許出願を登録しているフランスの組織でもある。

CEA の HPC 部門は、以下の目的のために、25 年以上にわたりパリ近郊に位置している。

- HPC ユーザーに最高のコンピューティングおよびストレージリソースを提供する
- HPC 技術を習得し、エネルギー効率を最適化する
- 技術的なブレークスルーを予測する
- HPC の専門知識を産業およびサービスに普及させる

この目的のために、CEA は HPC メーカー、ソフトウェア編集者、テクノロジープロバイダー、および産業ユーザーとの密接な関係を築いてきた。CEA の HPC 部門は、施設とそのインフラストラクチャを設計し、テクノロジーサプライヤー/ベンダーとの関係でスーパーコンピュータの部品を共同設計し、スーパーコンピュータを運用し、関連サービスを提供し、非常に幅広い計算ニーズの全体像を提供するチームである。

CEA のコンピューティングセンターは TGCC (CEA の超大規模コンピューティングセンター) である。TGCC は現在、学術研究用のスーパーコンピュータ (Joliot-Curie マシン) と、

独自のニーズおよび民間パートナー向けのその他のシステムをホストしている。Joliot-Curie スーパーコンピュータは GENCI が所有しているが、TGCC に設置され、CEA のチームによって運用されている。

Joliot-Curie スーパーコンピュータは、オープンな学術研究専用である。2017 年末に TGCC に第 1 フェーズが、2020 年に第 2 フェーズが設置された。スーパーコンピュータの第 1 フェーズは、Bull Sequana X1000 キャビネットで構成され、ピーク性能は約 9 PFlops で、以下のパーティションで構成されている：

- SKL Irene: 1,656 台のデュアルプロセッサ Intel Skylake 8168 ファインノード (2.7 GHz、プロセッサあたり 24 コア) で、合計 79,488 個のコンピューティングコアと 6.86 PFlops の性能、192 GB の DDR4 メモリ/ノード、Infiniband EDR インターコネクトネットワーク。
- KNL Irene: 828 台の Intel KNL 7250 メニーコアノード (1.4 GHz、プロセッサあたり 68 コア) で、合計 56,304 個のコアと 2 PFlops の性能、96 GB の DDR4 メモリ + 16 GB の MCDRAM メモリ/ノード、Bull eXascale Interconnect ネットワーク (BXI)。

2019 年末以降、Bull Sequana XH2000 キャビネットで構成される第 2 フェーズにより、以下のパーティションが追加された：

- ROME Irene: 2292 台のデュアルプロセッサ AMD Rome (Epyc) コンピュートノード (2.6 GHz、プロセッサあたり 64 コア) で、合計 293,376 個のコンピューティングコアと 11.75 PFlops の性能、256 GB の DDR4 メモリ/ノード、Infiniband HDR100 インターコネクトネットワーク。
- V100 Irene: 32 台のハイブリッドノード (Intel CascadeLake 20 コア 2.1 GHz プロセッサ 2 基と NVIDIA V100 GPU 4 基/ノード) で、合計 128 個の GPU と 1.13 PFlops の性能。

22 PFlops の処理能力を持つ Joliot-Curie は、欧州の PRACE 研究インフラストラクチャを通じて、フランスおよびヨーロッパの研究者のために利用されている。

2026 年には、Joliot-Curie スーパーコンピュータは、EuroHPC が所有するエクサスケールシステムである Alice Recoque スーパーコンピュータに置き換えられる。この新しいスーパーコンピュータをホストするために、TGCC で適応作業が進行中である (24MW の電力容量の追加、新しい温水冷却ループの作成、床容量の強化、GEANT ネットワークへの 2x100Gbit/s 接続)。Alice Recoque は、HPC と AI 専用のシステムである。

(a) GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif) :

GENCI (国立高性能計算設備) は、高性能計算によるデジタルシミュレーションの利用を促進するために 2007 年に設立された公共事業者であり、今日では AI の利用、そしてまもなくプロトタイプ量子コンピューティングデバイスの利用と関連付けられている。

GENCI は、フランスの高等教育・研究省が代表するフランス国家が 49%、CEA が 20%、CNRS が 20%、フランス大学が 10%、Inria が 1%を所有する民事会社である。

GENCI は、スーパーコンピュータやストレージ施設などの国の HPC リソースを取得している。GENCI は、主に大規模リソースの要求に対する 2 つの年間プロジェクト募集を通じて、計算時間を割り当てる。最後に、GENCI は、リソースを動員する科学的生産の強化とコミュニケーション活動を通じて、数値シミュレーションの推進に貢献する。

GENCI は、以下の 3 つのミッションを通じて、フランスの科学的小および産業競争力をサポートしている。

- フランスに高性能コンピューティング、ストレージ、および AI 技術と将来の量子コンピューティング技術に関連付けられた大規模データ処理リソースを装備するという国家戦略を実施し、フランスおよびヨーロッパのオープンな科学研究のために、3 つの国立コンピューティングセンターに依存する。
- 国内およびヨーロッパ規模で HPC、AI、および量子コンピューティングの統合エコシステムの創造をサポートする。
- 学術および産業のオープンリサーチチームのために、HPC によるデジタルシミュレーションを推進する。

(b) EuroHPC

EuroHPC は、2018 年に設立され、ルクセンブルクに拠点を置く、ヨーロッパのスーパーコンピューティングを主導するための法的および資金提供団体である。

EuroHPCにより、欧州連合およびEuroHPC参加国は、ヨーロッパをスーパーコンピューティングの世界リーダーにするために、その取り組みを調整し、リソースをプールすることができる。これにより、ヨーロッパの科学的卓越性と産業力を高め、経済のデジタル変革をサポートすると同時に、その技術的自律性を確保する。

EuroHPC の目的は次のとおりである。

- EU において、世界をリードする、フェデレーション化され、安全で、ハイパーコネクタされたスーパーコンピューティング、量子コンピューティング、サービス、およびデータインフラストラクチャエコシステムを開発、展開、拡張、および維持する。
- 中断のリスクを制限するコンポーネント、テクノロジー、および知識を確保するサプライチェーンに基づいた、需要志向型およびユーザー主導型の革新的で競争力のあるスーパーコンピューティングシステムの開発と導入、およびこれらのシステムに最適化された幅広いアプリケーションの開発をサポートする。
- そのスーパーコンピューティングインフラストラクチャの使用を多数の公共および民間ユーザーに拡大し、ヨーロッパの科学および産業向けの主要な HPC スキルの開発をサポートする。

- ヨーロッパで高度に競争力があり革新的な AI エコシステムの成長をサポートするために、EuroHPC スーパーコンピューティング施設周辺に AI ファクトリーを開発および運営する。

(2) アクセラレータ実装の背景

Joliot-Curie への GPU 導入の背景にある主な要因は何ですか？ エクサスケールプロジェクト (RHEA) における GPU の使用計画は何ですか？

TGCC では GPU は新しいものではない。Joliot-Curie の前に運用されていた Curie スーパーコンピュータは、すでに GPU を使用していた。Joliot-Curie システムは主に CPU 指向だが、チームの技術スキルを維持し、ユーザーのコンピューティングおよび AI ニーズを満たすために、小さな GPU パーティション (128 NVIDIA V100) がインストールされた。

2026 年に設置される予定の次期スーパーコンピュータである Alice Recoque では、主に GPU を使用する予定である。収束型 HPC または GenAI (トレーニング、ファインチューニング、推論) ワークロード、および従来の HPC または AI (ML または大規模推論) ワークロード向けの汎用コンピューティングリソースには、高いバイト/フロップ比が使用される。高速化されたリソースは、1 EFLOPS HPL (または HPL-MxP を使用して 10 EFLOPS に近い) を維持するというコミットメントを満たし、このスーパーコンピュータを EuroHPC 規則の定義に従ってエクサスケールとして認定する。

高速化されたコンピューティングリソースは構成の中核を成し、1 EFLOPS HPL の持続的なパフォーマンスを実現可能とする。これらのリソースは、量子化学、CFD、天体物理学、基礎物理学などの多様な分野における HPC ワークロードに加え、マルチモーダル基盤モデルまたはハイブリッド HPC/AI デジタルツインのトレーニング・ファインチューニングおよび推論にも対応する。GPU とそのホストプロセッサは、高帯域幅の内部ネットワークを介して緊密に結合されることが想定される。高帯域幅かつ低遅延のインターコネクタは、高度に並列化された HPC および AI ワークロードに対して優れたネットワーク機能を提供するとともに、ストレージバックエンドへの高速アクセスを実現する。

ノードのパフォーマンスと帯域幅の適切なバランスを確保するため、各 GPU には専用アクセスを備えた 400 Gbps 以上のリンクが必要とされる。AI および HPC ワークロードの双方を効率的に支援するには、GPU ならびに可能であればホスト CPU が、64 ビットから 4 ビットまでの浮動小数点形式 (BF16 および TF32 を含む) および 64 ビットから 8 ビットまでの整数形式をサポートする必要がある。HPC ユーザーが 64 ビットから混合精度への移行を円滑に行えるよう、適切なツールの提供が望まれている。

HPC コミュニティの広範なニーズに対応するためには、GPU などの高速化リソースへ移植されていない、あるいは今後も移植が見込まれない HPC ワークロードに対して、スカラーリソースが依然として重要な役割を果たす。これらのワークロードは、気候モデリング、核融合、レガシー化学アプリケーション、天体物理学のほか、一部の機械学習や推

論アプリケーションなど CPU がより適している分野に及ぶ。CPU バウンドおよびメモリバウンドのプロファイルが混在し、不規則なメモリアクセスパターンを持つアプリケーションの性質上、メモリシステムは特に重要な要素である。強力なバイト／フロップ比と最小限のエネルギー消費も不可欠である。ノードあたりのパフォーマンスと帯域幅の適切なバランスを確保するため、各 CPU にも GPU 同様に 400 Gbps 以上の専用リンクが必要とされる。

EuroHPC の要件および既存のマルチペタスケールスカラークラスタからのフィードバックに基づき、スカラーリソースの HPL パフォーマンス（高速化リソースと並列に構成された個別スカラーパーティション、またはいわゆる統合パーティション上のもの）は 30 PFLOPS に達することが見込まれる。メモリに関しては、デュアルソケット構成のコンピュータノードで 512 GB のメモリフットプリントが考慮され、DDR メモリと HBM メモリの併用も検討対象となる可能性がある。

Alice Recoque possible compute partitions	Typical node	Memory footprint	Injection bandwidth	Number of nodes
Accelerated resources	One (or two scalar) processor and 4+ next gen GPU (2026) tightly coupled	144+ GB HBM3	One 400+ Gbs link per GPU	4000 meaning 16k GPUs
Scalar resources (if two partitions)	Two 64+ core scalar processors	512 GB, mix of DDR and HBM	One 400+ Gbs link	2000 to 3000 scalar nodes
European technologies when possible				

コンピュータノードに加えて、一連のサービスノードが配置され、コンピューティングパーティションとユーザー、ならびに科学機器とのインターフェース機能を提供する。これらのサービスノードは、インタラクティブアクセス、プリ／ポストプロセッシング、データ転送機能、ならびにソフトウェアライセンス管理サービスを担う。従来のコマンドラインアクセスはログインノードを通じて提供され、グラフィカルなアクセスはリモート視覚化システムを介して実現される。また、ユーザーは JupyterHub などの Web ポータルを活用し、計算やワークフローの管理を行うことが可能である。

HPDA（High Performance Data Analytics）パーティションは、高性能な 3D レンダリングおよび視覚化機能、大容量のメモリフットプリント、ならびに高速なローカルストレージへのアクセスを要するインタラクティブまたはプリ／ポストプロセッシングタスク向けに特化したコンピュータノード群で構成される。これらのノードは他のコンピュータパ

パーティションと同様に、Slurm によって一元管理され、インタラクティブな利用を優先する専用のスケジューリングポリシーが適用されている。

クラウドパーティションは、OpenStack および Kubernetes に基づくマルチテナント型の IaaS/PaaS プラットフォームを支える一連のハイパーバイザーから構成される。本プラットフォームにより、ユーザーは科学ツールやデータをホストし、ユーザーグループ内または一般公開のサービスとして提供することが可能である。これには、科学データの公開・操作用 Web ポータル、科学ワークフロー管理ツール、協働作業環境、ならびに専用のトレーニング用リソースなどが含まれる。ハイパーバイザーにブロックストレージ機能を提供するには、このパーティションに分散ストレージシステムが不可欠である。このストレージは、HPC ストレージシステムのステータスに関係なく、クラウドプラットフォームの高い可用性を保証するとともに、クラウドパーティションでホストされるワークロードに高速で低遅延のストレージを提供することを目的としている。ただし、大規模なデータアーカイブは HPC オブジェクトストアに格納され、必要に応じてクラウドパーティションからアクセスできると予想される。データ転送ノードは、高速な入出力帯域幅を促進し、大規模なデータ転送を効率的に処理し、コンピューティングセンターの外部ネットワークリンクを最適化する。CEA が開発した `parallel-sftp` などのツールは、高帯域幅の暗号化された転送を可能にしている。さらに、ソフトウェアライセンスサービスは、コンピューティングセンター内でライセンストークンを必要とする商用アプリケーションの使用をサポートしている。すべてのコンピューティングパーティション（アクセラレータ付き、スカラー、インタラクティブ、量子など）は、OCEAN と呼ばれる統合されたオープンソース管理ソフトウェアスタック（CEA によって開発され、すでに TGCC で広く使用されている）によって管理されている。

システムは、データセントリックなアプローチにおける多層ストレージアーキテクチャに依存し、以下で構成されている。

- 単一の並列ファイルシステム。第一層と第二層の両方のストレージニーズをカバーし、以下で構成される。
 - > 高帯域幅と高 IOPS のフラッシュストレージ。このソリューションは、3 TB/s 以上の性能と、AI のような集中的かつ不規則な読み書き (R/W) パターンを処理できる極端な IOPS レートを実現し、30 PB 以上の使用可能容量を目指している。
 - > 非常に大容量と帯域幅をターゲットとした高容量ストレージ。ポストプロセッシングと中期のデータストレージに使用される。このソリューションは、1 TB/s 以上の性能と、集中的なプリ/ポストプロセッシングおよびデータ分析ワークロードに適した堅牢な IOPS レートを実現し、200 PB 以上の使用可能容量を目指している。
- 並列ファイルシステムに加えて、他のコードがファイルシステムを利用することによっ

て中断されることなく、安定した性能とコンピューティングコードへの高いパフォーマンスを提供するために、Alice Recoque はオンデマンドで専用スペースの割り当てを可能にする革新的なハードウェアおよびソフトウェアソリューションを提案する可能性がある。この一時ストレージは、100 TB の使用可能容量を持ち、スケラブルで再現性があり、低遅延の IO パフォーマンスをサポートするための高性能で柔軟な一時ストレージスペースを実装する必要がある。このストレージは、ユーザーのジョブ開始直後に利用可能になり、コンピューティングジョブの終了時に自動的に終了する必要がある。そのライフサイクルは、コンピューティングジョブのライフサイクルに関連付けられている。

- **Non-POSIX Namespace (ObjectSTORE):** この層は、S3 などのクラウドのようなプロトコルを通じてアクセス可能な多数のオブジェクトのストレージを提供し、10 PB 以上の使用可能容量を目指している。
- 長期データストレージ用のストレージライブラリ内の磁気テープに基づく第三層。初期容量は 400 PB を超え、ニーズに応じてスケラブルになるように計画されてる。

このアーキテクチャは、主に Lustre 並列ファイルシステムのオープンソースコンポーネントと、CEA が開発した Robinhood のようなデータムーバーおよびポリシーエンジンツールを使用する。Alice Recoque スーパーコンピュータは、多数の最新 GPU と高帯域幅低遅延インターコネクト、および高ストレージ容量を組み合わせることで、HPC と AI の両方のワークロードを処理できる汎用性の高いツールとなる。プロジェクトには最大限のヨーロッパの技術を含めることを期待しているため、SiPearl の Rhea プロセッサがその一部になると予想している。この ARM ベースのプロセッサは、高いフロップス/ワット比という利点がある。さらに、このバージョンは以前の ARM Fujitsu A64fx パーティションよりもはるかに簡単にプログラムできる。

GPU が選択された理由は何ですか。また、CPU 対 GPU の比率はどのように決定されましたか。

将来の Alice Recoque エクサスケール・スーパーコンピュータでは、EuroHPC からの 1 エクサフロップス HPL の要件を、合理的なエネルギー量と限られた数のラックで達成するために、GPU の使用が不可欠である。GPU 技術はまだ不明だが、予算内にも収まる必要がある。CPU 対 GPU の比率は上記の要因によって異なるが、1 対 4 の比率を予想している。

実装プロセスを主導したのは、研究者、機関全体、それとも企画部門でしたか。

GPU ニーズの全体的な定義は、国内のコンピューティングセンターで実行されている主要な科学アプリケーションから来ている。これらの全体的なニーズから、GENCI と CEA

のチームによって詳細な技術仕様が作成された。GPU でユーザーがコードを最適化するのに支援するために、特別に高度なサポートチームが専任されている。補完プロジェクトである PEPR NumPEx は、エクサスケールアプリケーション向けの新しいアルゴリズムとソフトウェアスタックの開発に専念している。

実装プロセスで直面した課題、困難、または問題は何でしたか。

Alice Recoque の技術的実装は 2026 年に実施される。エクサスケールシステムをホストする上での最初の主な課題は、デバッグやプロファイリングなどの最適化されたツールを備えた安定した環境を提供することである。高度な科学専門家、コンピュータ専門家、およびベンダーのスタッフのチームが協力して、高いレベルのパフォーマンスを達成する必要がある。2 番目の課題は、エクサスケールシステムをサポートできるようにコンピューティングセンターの施設をセットアップすることである。課題は、これらのシステムの重量 (DLC 冷却とシステム密度の増加による重量増加) をサポートするために建物をアップグレードすることだった。

GPU 利用の主な目的は何でしたか。

GPU 利用の主な目的は、HPC (気候モデリング、創薬、未来の医療、エネルギー最適化などの大規模な科学問題の解決) および AI (大規模モデルのトレーニング、ファインチューニング、データ処理など) である。

(3) エネルギー効率について

Joliot-Curie および次世代スーパーコンピュータのエネルギー効率に関してどのような考慮事項がなされましたか。

高いレベルのエネルギー効率を達成することは、我々の重要目的の一つである。この目的のために、スーパーコンピュータでの直接液体冷却の使用によってエネルギー損失を制限している。CPU、GPU、メモリなどは、このアプローチによって冷却される。Joliot-Curie スーパーコンピュータでは冷水ループが使用されていたが、Alice Recoque では PUE を 1.1 まで下げるために温水ループに移行する。可能な限り、地域暖房に熱を再利用しようとしている。

エネルギー消費を削減するためにどのような冷却技術またはハードウェアイノベーションが導入されていますか。

エネルギー効率の高いシステムを共同設計し、その効率を向上させるために、サプライヤーと密接な関係で作業しており、可能な限り DLC 技術を使用している。それ以外の場合は、空調電力を制限するためにコールドキューブコンテナを使用している。コンピューティングノードのインバーターの使用を避けるために、ウルトラキャパシタを使用している。

これらの技術は、数秒間の停電をサポートし、効率は 100%である。

GPU ノードの保守および故障管理のために、どのような特別な予防措置が講じられていますか。

他のコンピューティングノードと同様に、コンポーネントの健全性を監視するために、関心のある量を探針で監視している。故障を減らすために、いくつかの予知保全ツールが現在開発中である。

余剰電力の利用または持続可能性への取り組みはありますか。

前述のように、可能な限り熱の再利用をすでに試みている。さらに、エクサスケール Alice Recoque スーパーコンピュータでは、Time-to-Solution ではなく Energy-to-Solution で評価するようにし、GPU の周波数がわずかに制限される可能性がある。

(4) ベンダーおよび民間企業の参加

実装中、ハードウェアおよびソフトウェアベンダーからどのように情報を収集しましたか。ベンダーとはどのように協力していますか。

主要なハードウェアサプライヤーと GPU ベンダーすべてとの長年にわたる密接な関係のおかげで、技術情報を共有し、コミュニティが新しいテクノロジーに事前に備えることができる。

次世代スーパーコンピュータを導入する際、アプリケーションベンダーの意見を考慮しますか。

独立系ソフトウェアベンダーのことを指すのであれば、第一に考慮されることはない。マシンのベンチマーキングとサイジングには、社内またはオープンソース/コミュニティアプリケーションを使用する。実際には、スーパーコンピュータのサプライヤーがターゲットシステムで良好なパフォーマンスを証明する必要がある科学および AI ベンチマークのセットを定義する。

アプリケーションソフトウェアおよび導入後のサービスにおいて、民間企業はどのような役割を果たしてきましたか。

導入後のサービスについては、マシンを最大限に活用するための最新のスケーラブルなツールを提供することを企業に期待している。迅速に対応し、専門家と連絡を取る必要がある。

民間企業との協力の必要性和課題をどのように認識していますか。

民間企業との協力は、いくつかのレベルで非常に重要である。

- ベンダーとの戦略的な HPC コンポーネントの共同設計
- HPC サプライヤーだけでなく、最適な Energy to Solution 比を達成するために GPU ベンダーとも協力してエネルギー効率を最適化する
- スーパーコンピュータの運用中に CEA のチームを支援する
- トレーニングとユーザーサポートのために外部の専門家に頼る。利用側では、民間企業はオープンサイエンスおよび研究開発のために研究システムにアクセスできる。ここでは、他のユーザーと同じように見なされる。より特定のリソースと予約された割り当てを必要とする民間企業向けには、民間企業が共同出資した産業利用専用のスーパーコンピュータ (CCRT@TGCC) がある。近い将来、Alice Recoque には、システムを共同出資する一部の選ばれた産業向けに予約された割り当てが含まれる可能性がある。課題は CCRT と同様に、産業実行のための安全なアクセス、ジョブおよびデータ管理を保証するである。

CEA が中心的な役割を果たしている EuroHPC プロジェクトに関連する最新のトピックは何ですか。

CEA は、Alice Recoque スーパーコンピュータの定義、設置、運用において中心的な役割を果たしている。CEA は、ユーザーがこの非常に大規模なシステムを最大限に活用できるよう支援するためのいくつかの補完プロジェクト（例えば PEPR NumPEX）にも関与している。

企業とのコラボレーションはどのように行われていますか。これらのコラボレーションで優先される側面は何ですか。

Alice Recoque とは別の CCRT については、複数年の協力協定が CEA と締結されている。企業はシステムに共同出資し、その資金に見合う完全なサービス（サイクル、電気、スタッフ、サポート、トレーニングなどを含む TCO ベースのアプローチ）を受ける。パートナー間および CEA チームとの間で、経験の共有、専門知識と技術動向の共有が推奨され、CCRT によって組織されている。Alice Recoque については、一部の選ばれた産業をコンソーシアムパートナーとして含める可能性について、まだ議論が進行中である。

中小企業（SME）における GPU 導入を促進する上での課題は何ですか。

中小企業が特定の種類のソフトウェアを必要とする場合、その製品の GPU バージョンを促進するのはソフトウェアベンダーの役割です。ここでは詳細に述べませんが、中小企業が独自のコードを開発し、GPU への移植に助けが必要な場合は、支援を提供できる。フ

ランスおよびヨーロッパには強力なトレーニングコミュニティ (EuroHPC National Competence Centres and Centres of Excellence など) もあり、人々は GPU プログラミングスキルを向上させることができる。

(5) アクセラレータ利用のためのトレーニングと教育

GPU を使用する研究者および開発者向けにどのようなサポートおよびトレーニングプログラムが利用可能ですか。

コンピューティングセンターの無料の専任高度サポートチームを通じて、または特定の有料サービス会社を通じて、いくつかのレベルのサポートが利用可能である。国立コンピテンスセンター (<https://cc-fr.eu/cc-fr/>)、ヨーロッパのセンターオブエクセレンス、および多くのテーマ別イベントが、トレーニングとユーザーサポートのために存在する。

GPU を初めて使用するユーザー向けのガイドラインはありますか。

初心者向けに基本的なトレーニングを提供している。内容はスーパーコンピュータへのアクセス方法、TGCC 環境の特性、CPU または GPU での並列プログラムの開発方法などである。

GPU リソースの公平な使用を保証するために、どのようなスケジューリングポリシーまたは価格モデルが採用されていますか。

CPU/GPU/ストレージリソースへのアクセスは学術研究者専用であり、結果を発表する限り無料である。産業界もプライムユーザーとして、または学術チームとの協力においてアクセスできる。年間の異なるカットオフで、ユーザーは専用インターフェース (フランス語の場合は www.edari.fr) を通じて CPU/GPU リソースを要求できる。査読後、リソースは全部または一部が許可される。スーパーコンピュータで実行中には、フェアシェアメカニズムにより、リソースが均等に割り当てられるようになっている。

(6) 今後の計画と展望

アクセラレータの今後の方向性 (例: **GPU** の推進の継続、量子プロセッサなどの次世代アクセラレータへの移行) はどうですか。

CEA では、技術の進化を注視し、技術プロバイダーと緊密に協力して、あらゆる技術的ブレークスルーを予測している。GPU は現在非常に効率的であり、引き続き推進していくが、コンピューティングユニット (Cerebras、チップレットなど) や量子コンピューティングに関する新しいコンセプトも検討している。TGCC は実際、フランスの HQI イニシアティブの枠組みの中で、また EuroHPC との関係で、いくつかの量子コンピュータ (Eviden の Qaptiva エミュレータ、Pasqal の Ruby、Quandela の Lucy) をホストしている。これらのシステムは 2025 年にユーザーに提供される予定である。

光量子コンピュータ (Lucy) プロジェクトの現在の状況を教えてください。

Quandela の 12 量子ビット光量子コンピュータである Lucy システムは、2025 年第 2 四半期に TGCC に展開される予定である。クラウドアクセスはすでに利用可能。量子コンピューティングに関するトレーニングは、学術コミュニティおよび TGCC でいくつかのレベルで実施されている。

国際協力に関する最新情報を提供できますか。

CEA は、以下の国際協力に関与しており、関連する国や組織は CEA と多くの類似点 (主要な科学アプリケーションの開発、産業エコシステムとのハードウェアとソフトウェアの共同設計、最適化とベンチマーキングなど) を持っているため、私たちにとって関心のあるものである。

CEA/RIKEN: この二国間協力は 2017 年から継続している。この協力は、エクサスケール・コンピューティング (ミドルウェア、ソフトウェア、科学アプリケーションの開発、最適化、ベンチマーキング)、人工知能とビッグデータ、量子コンピューティング、および学校、トレーニング、ハッカソンに焦点を当てたトピックをカバーしている。この協力には両研究所から約 80 人の研究者が参加し、年に 2 回対面で会合している。RIKEN は、HPC、AI、QC に関して CEA の主要なパートナーの 1 つである。この協力のおかげで、研究者は富岳スーパーコンピュータに取り組み、いくつかの科学アプリケーションで大きなブレークスルーを達成した。

CEA と RIKEN の強力な協力関係を考慮して、CEA はヨーロッパで HANAMI というコンソーシアムを設立し、2023 年春に EuroHPC JU が募集するプロジェクトへの提案をおこなった。HANAMI プロジェクトは、気候、材料科学、生物医学に焦点を当てて、HPC に関するヨーロッパと日本の間の協力を強化および拡大することを目的としている。このプロジェクトには、ヨーロッパから約 90 人、日本から約 30 人の研究者が参加している。ADAC: ADAC は、ヨーロッパ、日本、および米国における主要な CEA パートナーを集めている。CEA は 2023 年に正式に (協定を通じて) ADAC に参加した。この協力は、量子コンピューティング、AI、エクサスケール・コンピューティングを扱っており、世界中から約 100 人の研究者が年に 2 回会合している。

JSC/ユーリッヒと TGCC は、大規模 HPC インフラストラクチャとスーパーコンピュータの展開と運用に関して、長年にわたるコンピューティングセンター間の二国間協力を結んでいる。

CEA は、エネルギー分野の EoCoE センターオブエクセレンス、量子分野の QEC4QEA センターオブエクセレンス、インターコネクト技術の NET4EXA、量子シミュレーションの HPCQS、欧州プロセッサイニシアチブなど、多くの HPC R&D ユーロッパ (EuroHPC) プロジェクトに参加している。

4.4.4. NSCC（シンガポール）

NSCC（National Supercomputing Centre）の Michael Sullivan にヒアリングを実施した。質問リストを基に Michael Sullivan がご回答いただいた内容を以下に記す。

表 4.5 ヒアリング実施日時

項目	内容
ヒアリング先	NSCC（National Supercomputing Centre）
ヒアリング対象者	Michael Sullivan
日時	2025 年 2 月 28 日 17 時 30 分～19 時 00 分 （シンガポール） 時間：16 時 30 分～
場所	オンライン（アドバンスソフト社内会議室より）
出席者	【NSCC】 Director (Chief Operations) Michael Sullivan 【アドバンスソフト】 松原、高橋、富塚、高原（外部専門家）

(1) 加速部を導入した背景

- ・ ASPIRE 2A への GPU 導入の主な要因：
 - 大規模言語モデル（LLM）や生成 AI の登場による GPU リソースの需要増加。
 - 従来の CPU 中心のシステムでは、AI 研究に必要なリソースが不足していた。
- ・ GPU 選択の理由と CPU 対 GPU 比率の決定方法：
 - 生成 AI の問題に対処するために GPU を選択。
 - 過去には、要求の少ない AI には CPU が使用されていた。
 - CPU 対 GPU の比率は、歴史的な経緯によるもので、元々は CPU を中心とする計画だったが、AI の登場により GPU 中心のシステムへと移行した。
- ・ 導入にむけて主体となったのは研究者か、機関全体もしくは企画部：
 - 実装は主に NSCC の努力によって推進された。
 - 研究者のニーズを調査し、NSCC が中心となって技術チームがシステムを構築した。
- ・ 導入過程において困難だった点、問題点、課題などあればご教授ください：
 - 政府の承認を得るのが困難だった。
 - 政府は AI とコンピューティングに精通しており、良い質問をしていた。
- ・ その中で GPU の利用目的はどこにおかれていたか。：
 - 東南アジアに特化した LLM の開発。
 - より単純なモデルを使用する AI for Science は、A100 GPU を使用する 2A システムで行われ、シミュレーションは CPU で行われる。

(2) エネルギー効率

- ・ ASPIRE 2A のエネルギー効率についてはどのように考えたか：
 - 赤道に近い立地のため、年間を通して高温であり、エネルギー効率が重視されている。
 - 天然資源が不足しているため、エネルギーは輸入に依存しており、政府はエネルギー効率を重視している。
 - データセンターの建設には許可が必要で、PUE（Power Usage Effectiveness）が 1.3 以下でなければならない。
- ・ エネルギー消費を抑えるための冷却技術やハードウェアの工夫：
 - Cool Logix のリアドアパッシブ冷却システムを使用。
 - このシステムは電気を使用せずに冷却するリアドアクーラーを使用し、重力によって冷却水を循環させる。
 - NCC トロピカルデータセンターと呼ばれるエリアには、冷却ユニットが設置されている。
 - 外気を利用してデータセンター内の熱を放散するシステムも使用されている。
- ・ GPU ノードのメンテナンスと障害管理に関する具体的な予防措置：
 - システムが比較的小規模であるため、メンテナンスや障害管理は比較的スムーズに行われている。
 - NVIDIA が故障したカードを交換している。
- ・ 余剰電力の利用や持続可能性への取り組み：
 - GPU への電力供給を調整し、エネルギー効率を最適化する研究プロジェクトが進行中。

(3) GPU を利用したアプリケーション

- ・ GPU の主な用途：
 - LLM トレーニングが主。
 - GROMACS、VASP、Quantum ESPRESSO などの非 AI アプリケーションも GPU の恩恵を受けている。
- ・ GPU を導入したことにより、どのような分野が最も恩恵を受けているか：
 - 材料科学、材料化学、触媒、生物学。
- ・ CPU と GPU の組み合わせが必要なアプリケーション：
 - 材料、材料化学、触媒、生物学。
- ・ NSCC が得意とする分野（精密医療、海洋工学、AI など）での CPU と GPU の利用方法：

- AI、特に東南アジア言語のマルチモーダル LLM。
 - 気候モデリング（主に CPU ベース）。
 - 材料科学（CPU と GPU の組み合わせ）。
- ・ GPU 利用に必要なソフトウェアとツール：
 - CUDA、PyTorch。
 - GROMACS、VASP、Quantum ESPRESSO。
- ・ GPU 利用を最大化するための開発またはサポート体制：
 - NSCC のスタッフがユーザーと協力して GPU 利用を改善。
 - ベンダー主導のセミナーやトレーニングプログラム。
 - オンラインのトレーニングライブラリ（Coursera、LinkedIn Learning、Udemy など）の構築を計画中。
- ・ OpenACC の活用可能性：
 - OpenACC は NVIDIA と AMD の両方のハードウェアで実行可能なコードを作成できるため、活用が検討されている。

(4) ベンダーと民間企業の参加

- ・ 実装中にハードウェアおよびソフトウェアベンダーからどのように情報を収集したか：
 - NVIDIA との共同投資により、ハードウェアの提供やエンジニアリングのサポートを受けた。
 - 入札プロセスを通じて、ベンダーから提案を募集し、要件に合致するシステムを選定。
- ・ 次世代スーパーコンピュータ導入時にアプリケーションベンダーの意見を考慮するか：
 - パフォーマンスの基準として、アプリケーションのベンチマークが適用される。
- ・ アプリケーションソフトウェアとポストインストールサービスにおいて、民間企業はどのような役割を果たしているか：
 - Fujitsu がヘルプデスクサービスやシステム管理機能を提供。
 - NVIDIA がハードウェアの効率的な利用を支援。
- ・ 民間企業との連携の必要性和課題：
 - ユーザーが単一のベンダーに依存しないように、コンピューティングの多様性を促進。
- ・ 企業とのコラボレーションはどのように行われるか：
 - ユーザーがハードウェアをテストし、トレーニングを受ける機会を提供。
 - 共同研究や技術支援を通じて、ユーザーのスキル向上を図る。

(5) アクセラレータ利用のためのトレーニングと教育

- ・ GPU を使用する研究者と開発者向けのサポートおよびトレーニングプログラム：
 - ベンダーとの協力、独自のコースの開催、大学との連携、オンラインコースの提供。
- ・ GPU を初めて使用するユーザー向けのガイドライン：
 - 大規模なジョブを推奨。
 - ノードや GPU を跨ぐジョブに高い優先度を与える。
- ・ GPU リソースの公正な利用を確保するためのスケジューリングポリシーまたは価格モデル：
 - キューイングシステムはフェアシェアシステムを使用。
 - 戦略的リソース配分委員会がプロジェクトの重要性を評価し、適切なプロジェクトにリソースを配分。
 - 承認されたプロジェクトには割引を提供し、承認されていないプロジェクトには高い料金を課す。

(6) 今後の計画と展望

- ・ アクセラレータの今後の方向性：
 - GPU の推進を継続し、量子プロセッサなどの次世代アクセラレータへの移行も検討。
- ・ エクサスケール・コンピューティングにおける GPU の役割についての見解：
 - GPU は、性能対電力効率において優れているため、エクサスケール・コンピューティングに不可欠である。
- ・ 国際協力の最新情報：
 - 理研、台湾、欧州のセンターとの協力関係。
 - Lumi との連携を発表予定。
 - ADAC (Accelerator group of people) コミュニティに参加。

4.5. 加速部に関する調査

本節では、まず、Top500 における GPU を分析し、そこで利用されている製品の概要を述べ、それぞれの GPU の今後の動向を考察した。また、これらの状況を踏まえ、今後のスーパーコンピュータ市場における GPU の動向をまとめた。

4.5.1. Top500 における GPU の分析

TOP500 リストにおけるアクセラレータの使用状況を表 4.1 に分析した。その結果を、TOP10 においては AMD が最も多く採用されていることが明らかになった。特に、AMD

Instinct MI250X が 3 システムで使用され、最も多く採用されたアクセラレータとなっている。加えて、MI300A も 2 システムに採用されており、TOP10 のうち 5 システム（50%）が AMD 製アクセラレータを搭載している。このことから、TOP10 では AMD が NVIDIA を上回るシェアを確保していることが分かる。

表 4.6 TOP500 の GPU に着目した分析

項目	TOP10	TOP30	TOP100
アクセラレータなし (None)	1	3	20
NVIDIA H100 シリーズ	2	8	30 以上
AMD Instinct MI250X	3	5	7
AMD Instinct MI300A	2	3	4
Intel の GPU	1	1	2
中国製 (Matrix-2000)	なし	1	1

一方、NVIDIA のアクセラレータは H100、GH200 Superchip、A100 SXM4 の 3 モデルがそれぞれ 1 システムずつ使用されている。TOP10 における NVIDIA のシェアは 30% にとどまり、AMD と比較すると少数派となっている。しかし、TOP30 に範囲を広げると、NVIDIA H100 シリーズの採用が急増し、TOP100 では 30 システム以上が H100 を搭載している。このことから、NVIDIA は TOP10 では AMD に押されているものの、ランキングが下がるにつれて H100 の採用が進み、全体の市場支配力は依然として強いことが分かる。

また、Intel の HPC 向け GPU (Intel Data Center GPU Max) は、TOP10 では 1 システムのみの採用にとどまっており、TOP100 においてもわずか 2 システムしか採用されていない。このことから、Intel は HPC 市場において NVIDIA や AMD と競争できるほどの影響力を持っていないことが示唆される。今後、Intel が HPC 市場で競争力を高めるためには、より革新的なアプローチが求められる。

さらに、TOP10 のうち 1 システム（10%）はアクセラレータを搭載せず、CPU のみで計算を行う構成となっている。この割合は TOP30 でも 10%（3 システム）、TOP100 では 20%（20 システム）に増加しており、ランキングが下がるにつれてアクセラレータなしのシステムが増加する傾向がある。このことは、特定の計算ワークロードでは GPU などのアクセラレータが必ずしも必要ではなく、CPU のみのシステムが依然として有効であることを示している。しかし、TOP10 のような最上位のランキングでは、スーパーコンピュータの性能向上が求められるため、アクセラレータの搭載が標準化される傾向が強い。

また、中国の独自アクセラレータの存在も確認された。TOP30 および TOP100 には、Matrix-2000 を搭載したシステムがそれぞれ 1 件ずつランクインしており、今後の中国市場におけるスーパーコンピュータ技術の発展が注目される。特に、中国が独自の HPC 技術を確立しようとしている兆候が見られることから、将来的にはグローバルな HPC 市場に影響を与える可能性がある。

総合すると、TOP10 では AMD が最も多く採用され、特に MI250X が主流となってい

る。一方で、NVIDIA は TOP30 以降で急速にシェアを拡大し、H100 シリーズが市場を支配する傾向がある。また、アクセラレータなしのシステムが今後も一定数存在し続けるが、ランキングが上がるにつれて GPU 搭載が標準化される傾向が強まる。Intel の HPC 向け GPU は普及が厳しく、シェア拡大には困難が伴うと考えられる。さらに、中国は独自のアクセラレータ技術を発展させ、市場の多様化を進める可能性がある。

今後の HPC 市場は、NVIDIA の H100 シリーズが引き続き主流となり、AMD は MI300A の採用拡大を目指す展開が予想される。また、アクセラレータなしのシステムも一定数維持されるが、上位ランキングでは GPU が標準化される流れが続くだろう。Intel の市場シェア拡大は困難であり、中国の技術発展が市場にどのような影響を与えるかも注目される。

このように、TOP10 の分析では AMD が市場をリードしているが、TOP30 以降では NVIDIA が H100 シリーズを中心に勢力を拡大し、今後の HPC 市場の競争がますます激化していくことが予想される。

4.5.2. 製品の詳細

(1) NVIDIA H100

NVIDIA H100 は、Hopper アーキテクチャを採用したデータセンター向けの GPU で、HPC（ハイパフォーマンスコンピューティング）や AI 推論・学習に最適化されている。特に、Transformer エンジンを搭載し、大規模 AI モデルのトレーニング速度を大幅に向上させる。また、第 4 世代 Tensor コアと第 2 世代 Multi-Instance GPU（MIG）を備えており、仮想化環境での運用も強化されている。NVLink によるスケーリングにより、クラスターレベルの並列処理性能も優れている。PCIe 版と SXM 版があり、SXM 版はより高いメモリ帯域幅を提供。HPC 分野では、スーパーコンピュータ「LUMI」や「Leonardo」などに採用され、AI、科学シミュレーション、気候モデリングなど多用途で活用されている。

(2) NVIDIA GH200 Superchip

NVIDIA GH200 Superchip は、Grace CPU と Hopper GPU を組み合わせたヘテロジニアスなプロセッシングソリューションで、データセンターや HPC、AI ワークロード向けに設計されている。NVLink-C2C インターコネクトを使用することで、高速なデータ転送が可能になり、従来の x86 アーキテクチャに依存しない設計を採用している点が特徴。最大 480GB の HBM3 メモリを搭載し、超大規模データセットの処理に対応。特に、メモリバウンドなワークロードに対して優れた性能を発揮し、エネルギー効率の向上も図られている。大規模 AI モデルの推論やデータ分析、量子シミュレーションなどの分野での活用が期待されている。

(3) NVIDIA A100 SXM4

NVIDIA A100 は、Ampere アーキテクチャを採用したデータセンター向けの GPU で、ディープラーニング、HPC、データ分析に適している。SXM4 は A100 のハイエンドバージョンで、PCIe 版よりも高いメモリ帯域幅と電力効率を持つ。Tensor コアの改良により、AI 演算の精度と速度が向上し、FP16/TF32 などの計算モードをサポートする。また、Multi-Instance GPU (MIG) 機能により、1 つの GPU を複数のユーザーが仮想化して利用可能。スーパーコンピュータ「Selene」や AI データセンターで広く採用されており、NVIDIA の H100 登場後も一部のシステムでは引き続き使用されている。

(4) AMD Instinct MI250X

AMD Instinct MI250X は、Aldebaran アーキテクチャを採用した HPC 向けアクセラレータで、AMD の CDNA2 技術を活用している。2 つの GPU ダイを持つ MCM (マルチチップモジュール) 設計を採用し、高い並列処理性能を実現。HBM2e メモリを搭載し、大規模データの演算に対応。特に、FP64 演算性能が優れており、科学計算や気象予測、シミュレーションなどの HPC 用途に最適化されている。世界最速クラスのスーパーコンピュータ「Frontier」に採用され、NVIDIA 製 GPU と競争しながら市場での存在感を示している。TOP500 の上位システムでの採用が増加中。

(5) AMD Instinct MI300A

AMD Instinct MI300A は、次世代の HPC 向けアクセラレータで、CPU と GPU を統合した APU (Accelerated Processing Unit) 設計が特徴。MI300A は Zen 4 ベースの CPU コアと CDNA3 ベースの GPU コアを 1 つのパッケージに統合し、メモリ共有を可能にすることで、従来の分離型 CPU-GPU システムよりも低レイテンシでのデータ転送が可能。HBM3 メモリを搭載し、メモリバウンドなワークロードに対して優れた性能を発揮。特に、HPC と AI ワークロードの統合が求められる分野での使用が期待されている。エネルギー効率の向上とシステム統合のメリットから、今後の HPC 市場での普及が進むと予想される。

(6) Intel Data Center GPU Max

Intel Data Center GPU Max は、Intel が HPC 市場向けに開発したデータセンターGPU で、Ponte Vecchio アーキテクチャを採用している。数十個のタイルを統合した MCM 構造を特徴とし、高密度な計算性能を実現。HBM メモリを搭載し、大規模シミュレーションや AI ワークロードに適している。CUDA や ROCm に対抗する形で開発された oneAPI を活用し、異種アーキテクチャ間での統一的なプログラミングが可能。TOP500 リストではまだ普及率が低いものの、HPC 分野における Intel のプレゼンス拡大を目指している。将来的には、AMD や NVIDIA と競争する製品として期待される。

(7) Matrix-2000 (中国製)

Matrix-2000 は、中国が独自開発した HPC 向けのアクセラレータで、主に国内のスーパーコンピュータで使用されている。詳細なアーキテクチャは公開されていないが、FP64 演算に対応し、科学計算や AI 処理をターゲットにした設計がされている。中国政府の技術自立戦略の一環として開発されており、輸出規制の影響を受けずに国内の HPC インフラを強化する目的を持つ。TOP500 では少数ながらランクインしており、今後の技術進化によってグローバル市場への影響を強める可能性がある。独自のソフトウェアスタックとの組み合わせがカギとなる。

4.5.3. 今後のスーパーコンピュータ市場における 7 つの GPU の動向

スーパーコンピュータ（スーパーコンピュータ）市場では、AI・科学計算・シミュレーションなどの計算負荷の高いタスクが求められるため、GPU の進化が競争を左右する重要な要素となっている。特に、NVIDIA、AMD、Intel、中国勢の競争が激化しており、各社の GPU がどのような影響を与えるのかが注目される。以下、7 つの GPU ごとに今後の市場動向を考察する。

(1) NVIDIA H100

NVIDIA H100 は、現在のスーパーコンピュータ市場において最も広く採用されているアクセラレータの 1 つであり、今後もこの地位を維持すると考えられる。特に、Hopper アーキテクチャと HBM3 メモリの組み合わせにより、AI 推論・学習の効率が大幅に向上している点が強みだ。TOP500 のランキングでも H100 搭載システムが急増しており、AI と科学シミュレーションの融合が進む中で、H100 の採用はさらに拡大すると見込まれる。特に、クラウド HPC や AI スーパーコンピュータの分野では今後数年間の主力製品となる可能性が高い。

(2) NVIDIA GH200 Superchip

GH200 は、CPU と GPU を統合したソリューションであり、従来の x86 ベースのスーパーコンピュータとは異なる新しい計算アーキテクチャを提案している。この Grace CPU との統合によって、従来のデータ転送のボトルネックを解消し、大規模なデータセットを高速に処理できる。スーパーコンピュータ市場ではまだ限定的な採用にとどまっているが、将来的には、特にメモリ集約型のワークロードを持つシステムでの普及が見込まれる。また、エネルギー効率が重要視される現代のスーパーコンピュータ市場において、消費電力と性能のバランスが評価されれば、次世代の HPC 環境での採用が進む可能性がある。

(3) NVIDIA A100 SXM4

A100 は Ampere 世代の主力 GPU であり、現在も多くのスーパーコンピュータで使用されている。しかし、H100 が市場に普及するにつれ、A100 のシェアは縮小すると予想される。特に、TOP500 にランクインするような最先端のシステムでは H100 への移行が進むだろう。ただし、A100 はコストパフォーマンスの面で優れており、ミドルレンジの HPC システムでは今後も一定の需要が続くと考えられる。企業や大学向けの小規模クラスターでは、しばらくの間 A100 が現役で使われ続ける可能性がある。

(4) AMD Instinct MI250X

MI250X は、特に FP64 演算性能に優れた GPU であり、科学計算向けに最適化されている。この特性から、HPC 用途での AMD のシェア拡大に大きく貢献しており、特に Frontier のようなエクサスケール級のスーパーコンピュータで採用されている点が大きな強みだ。しかし、NVIDIA の H100 が市場での影響力を増すにつれて、AMD は競争力を維持するために次世代モデル (MI300 シリーズ) への移行を加速させる必要がある。今後の HPC 市場では、AMD がどれだけエネルギー効率と性能のバランスを改善できるかが鍵となる。

(5) AMD Instinct MI300A

MI300A は、CPU と GPU を統合した APU として、従来のディスクリート GPU とは異なる設計を採用している。これは、データ転送のオーバーヘッドを減少させ、メモリ共有による低レイテンシ化を実現するものであり、HPC 用途では革新的な試みといえる。特に、今後のエクサスケール・コンピューティングにおいて、MI300A のアーキテクチャがどの程度評価されるかが重要になる。ただし、スーパーコンピュータ市場ではすぐに大規模な採用が進むとは限らず、MI300A が本格的に普及するには数年の時間がかかる可能性がある。

(6) Intel Data Center GPU Max

Intel は、スーパーコンピュータ市場でのシェアを獲得するために Data Center GPU Max シリーズを投入したものの、現状では NVIDIA や AMD に対して競争力が低い。特に、CUDA や ROCm と比べて、oneAPI のエコシステムが未成熟である点が課題となっている。Ponte Vecchio ベースの製品が HPC 向けにいくつか採用されているものの、広範な市場への浸透には時間がかかると考えられる。Intel が今後 HPC 市場で生き残るには、ソフトウェアの最適化と、より競争力のあるハードウェアを開発することが不可欠だ。

(7) Matrix-2000 (中国製)

Matrix-2000 は、中国が独自開発したアクセラレータであり、輸出規制の影響を受けず

に国内の HPC システムを構築できる点が強みとなっている。ただし、現状では TOP500 にランクインするシステムは限定的であり、NVIDIA や AMD の GPU に匹敵する性能を発揮できるかどうかは未知数だ。今後、中国が独自のソフトウェアスタックを確立し、性能向上を図れば、国内市場での普及が進む可能性が高い。特に、国家主導の HPC プロジェクトにおいて、Matrix-2000 のような国産アクセラレータが重要な役割を果たすだろう。

(8) スーパーコンピュータ以外の市場動向

HPC 市場における GPU の進化は、クラウドコンピューティング・AI・エンタープライズ向けデータセンターなどにも大きな影響を与えている。特に、NVIDIA の H100 や GH200 は AI モデルの学習に最適化されており、クラウド AI サービスの分野での採用が進んでいる。AMD も MI300 シリーズで AI 市場に参入しようとしているが、CUDA の優位性を持つ NVIDIA に対抗するのは容易ではない。一方、Intel の GPU は、エンタープライズ向けの計算負荷の軽い AI 推論用途で一定の役割を果たす可能性がある。

4.5.4. GPU 動向のまとめ

今後数年間のスーパーコンピュータ市場では、各社の GPU がどのように進化し、採用されるかが市場の趨勢を決める重要な要因となる。短期的には NVIDIA H100 が圧倒的に優勢であり、特に HPC 用途だけでなく、AI やデータセンター向けの需要拡大によって、NVIDIA の市場シェアはさらに強固なものになると考えられる。H100 の成功により、次世代モデルの開発スピードも加速し、NVIDIA はさらに AI 特化型のアーキテクチャを推進する可能性が高い。

一方で、AMD は MI250X の成功を踏まえ、MI300A を武器に次世代 HPC 市場でシェア拡大を狙う。特に、CPU と GPU を統合したアプローチがどれほどの競争力を持つかが鍵となる。エネルギー効率と統合アーキテクチャによって、従来の NVIDIA 支配構造に対抗できるかが注目される。

Intel は苦戦が続く可能性が高い。oneAPI エコシステムの成熟が進まない限り、開発者にとって魅力的な選択肢とはなりにくく、GPU 市場でのシェア拡大は困難だと考えられる。今後、Intel が HPC 市場において競争力を確保するためには、価格やパフォーマンス面で明確な優位性を示す必要がある。

中国は独自技術の開発を加速させると予想される。米国の輸出規制の影響を受け、NVIDIA や AMD 製 GPU の入手が困難になる中、Matrix-2000 のような国産 GPU を活用した独自のスーパーコンピュータ開発が進められるだろう。ただし、性能面やソフトウェアの成熟度ではまだ NVIDIA や AMD に及ばないため、中国の技術力がどの程度のスピードで向上するかが今後の市場動向を左右する。

総じて、短期的には NVIDIA が支配的な立場を維持し、AMD が次世代技術で対抗を試みる構図が続くが、中長期的には中国の独自技術が成長し、市場の多様化が進む可能性が

ある。Intel は苦戦が予想されるものの、価格競争や特定用途向けの最適化を進めることで市場に食い込める余地はある。今後の HPC 市場は、これまで以上に競争が激化し、エネルギー効率や統合アーキテクチャ、国ごとの戦略が重要なファクターとなるだろう。

4.6. まとめ

各スーパーコンピュータセンターは、GPU 導入を進めつつ、それぞれの強みを活かした独自の方向性を持っている。

- ① CEA（フランス）：AI/HPC 統合を進め、エクサスケール・コンピューティングに対応。
- ② NSCC（シンガポール）：AI と材料科学に特化し、エネルギー効率と GPU の最大活用を目指す。
- ③ BSC（スペイン）：AI・気候モデリング用途を重視しつつ、NVIDIA 依存からの脱却を目指す。
- ④ HLRS（ドイツ）：省エネを重視し、計算流体力学（CFD）や量子コンピューティングにも注力。

各センターがエネルギー効率向上、次世代技術の採用、ユーザー支援の強化を共通課題として取り組んでいる点が特徴的である。

表 4.7 ヒアリング回答のまとめ（その1）

機関名	アクセラレータ導入の背景	エネルギー効率	GPU を利用したアプリケーション
CEA フランス	・伝統的に CPU 主体の HPC 環境だが、AI や HPC 統合の流れを受け、GPU も一部導入。 ・次世代エクサスケールシステム「Alice Recoque」は GPU 中心。	・HPC 技術を習得し、エネルギー効率を最適化する ・TGCC では、24MW の電力容量の追加、新しい温水冷却ループの作成に適応中	・AI/HPC 統合ワークロード（量子化学、CFD、天体物理、基礎物理）。 ・AI 基盤モデルのトレーニング/推論にも活用予定。
BS スペイン	・AI や特定アプリケーションの性能向上のため、MareNostrum 5 に GPU を導入。 ・CPU のみでは不十分と判断し、バランスを取った構成を選択。	・エネルギー管理システム「BSCTechnology」を活用し、リソース効率を最適化。	・NVIDIA と強い連携を持ち、CUDA ベース ・大規模言語モデル、気候変動シミュレーション、航空機周りの非定常流体解析
HLRS ドイツ	・特定のベンチマークではなく、実アプリケーションのパフォーマンス重視。 ・エネルギー効率の高さも考慮し、将来的にも GPU を継続的に導入予定。	・CPU 比 20% の電力消費で同等のパフォーマンスを実現。 ・水冷システム採用。 ・2027 年にはスーパーコンピュータの排熱を大学暖房に活用予定。	・計算流体力学（CFD）、素粒子物理学、環境シミュレーション。 ・NVIDIA の CUDA が広く利用。
NSCC シンガポール	・大規模言語モデル（LLM）や生成 AI の台頭により GPU 需要が増加。 ・ASPIRE 2A では AI 研究用に GPU 導入。 ・CPU 主体の従来型 HPC からの移行を推進。	・天然資源が不足しているため、エネルギー効率は重要課題。 ・Cool Logix のリアドアパッシブ冷却システムを採用。 ・GPU への電力供給を調整し、エネルギー効率を最適化する研究プロジェクトが進行中。	・LLM トレーニングが主。 ・GROMACS、VASP、Quantum ESPRESSO など材料科学・生物学分野の計算にも活用。 ・スタッフがユーザーと協力して GPU 利用を改善。 ・ベンダー主導のセミナーやトレーニングプログラム。

表 4.8 ヒアリング回答のまとめ（その2）

機関名	ベンダーと民間企業の参加	アクセラレータ利用のためのトレーニングと教育	今後の計画と展望
CEA フランス	・ヨーロッパの技術統合を進める。 ・HPC メーカー、ソフトウェアベンダー、産業パートナーと連携。	・AI/HPC ユーザー向けツール提供。GPU 導入に伴い、ユーザーが混合精度計算に移行できるよう支援。	・2026 年にエクサスケールシステム「Alice Recoque」導入。 ・AI/HPC 統合を強化し、EuroHPC 規模の計算機能を提供。
BS スペイン	・IBM、NVIDIA、AMD と協力。 ・ベンダーはシステムのインストールとメンテナンスを担当。	・2003 年から CUDA 会議を開催。NVIDIA との協力により、ユーザー向け GPU トレーニングを強化	・独自の HPC プロセッサ・アクセラレータ開発を目指し、NVIDIA 依存からの脱却を進める。 ・エクサスケール対応を強化。
HLRS ドイツ	・HPE、AMD と連携。 ・中小企業向けの HPC 普及を推進する「SICOS」を設立（50 社が利用）。 ・企業が HPC やデータ分析、AI などの技術利用の促進を SICOS がサポート。	・NVIDIA と共同でトレーニングプログラムを実施（5 年計画）。	・GPU 技術の進化を見据えつつ、量子コンピューティングや光プロセッサの研究も進行。 ・GPU は今後 10 年間は主要な技術。 ・AI で pre exa-scale から exa-scale を目指す
NSCC シンガポール	・NVIDIA との共同投資、Fujitsu がシステム管理を担当。 ・コンピューティングの多様性を重視し、単一ベンダー依存を避ける方針。 ・共同研究や技術支援を通じて、ユーザーのスキル向上を図る。	・ベンダーとの協力、独自コース、大学連携。 ・オンライン学習プラットフォーム（Coursera、Udemy など）を整備中。	・GPU 推進を継続。量子プロセッサの実験的導入も視野に入れる。 ・富岳や Lumi との国際協力を拡大 ・ADAC（Accelerator group of people）コミュニティに参加