

プッシュ的な情報であり、その正確さや再生産性の点で信頼に欠ける。こうした問題に対して、「時間」の要素を加えることで、特定の時間毎に微分して導関数を取ることができ、重要となる指標を加速させるような要素を抽出して観察することが可能になる。さらに、測定の尺度を年から四半期、特定の日時という形でスケールダウンすることで、多岐に複雑化する市場状況の中でも事業パフォーマンスに影響を与えるファクターの因果関係を検証することができる⁹。データ主導型コンピューティング技術は、こうした複雑化するデータの網羅的な処理を高速で実行することを可能にするわけである。

(2) エクサスケール・コンピューティング(Exascale Computing)の発展

メモリ主導型コンピューティングの実現の過程で注目されてきたのが、エクサスケール・コンピューティングという新たな先進コンピューティング技術である¹⁰。この先進コンピューティング技術により、メモリ、ストレージそしてコンピューティング能力を急激に加速させることができる。こうした技術革新は、エネルギー分野での生産や貯蓄そして移行、さらには素材科学、3D プリンティング技術を含むアディティブ・マニュファクチャリング(Additive Manufacturing)、真相学習やマシンラーニング、癌の医療研究・治療等々様々な新興科学技術分野での応用が期待されている¹¹。したがって、エクサスケール・コンピューティングは、国家安全保障、経済安全保障、エネルギー安全保障や新素材の研究そしてヘルスケアという多様な社会課題分野での革新的な技術革新を可能にする潜在力のある先端コンピューティング技術といえることができる。一般にエクサスケール・コンピューティングは以下のような性能を持つ HPC と定義される¹²。

- ピーク時のパフォーマンス : Exaflops (浮動小数点演算を 1 秒間に 100 京回行う)
- Linpack 性能 : >60%
- メモリ容量: 10 petabytes
- ストレージ : エクサバイト規模のストレージが可能
- エネルギー効率: 30 GF/w.
- インターコネクタ帯域幅(bandwidth) : > 500 Gbps.

⁹ Bresnaker, Kirk M., et. al., "Adapting to thrive in a new economy of memory abundance."

¹⁰ Hewlett Packard Enterprise, 「エクサスケール: 未来の HPC をめぐる競争 コンピューティングの新時代」(テクニカルホワイトペーパー)
<https://www.hpe.com/content/dam/hpe/japan-office-locations/pdf/servers/exascale-hpc-next-generation-jpn.pdf?cc=jp&ll=ja>

¹¹ "Overview of the ECP." *Exascale Computing Project*. Retrieved from
<https://www.exascaleproject.org/about/>

¹² Qian, Depei, and Zhongzhi Luan. "High performance computing development in china: A brief review and perspectives." *Computing in Science & Engineering* 21(1) (2018): 6-16.

エクサスケールシステムは、大容量のシステムマネージメントとリソーススケジューリング、パラレルなプログラミング環境、システムモニタリング、フォルトトレランス (fault tolerance) そして大規模かつ多様なアプリケーションのサポートを提供し得るものと一般には解説される。

メモリ主導型コンピューティングとの関連で言えば、エクサスケール・コンピューティングは、ビッグデータの発展と合わせて理解されるべきだという見解が Daniel Reed と Jack Dongarra らが 2015 年に発表した論文 “Exascale Computing and Big Data” でも強調されている。したがって、実際のドメイン毎の実装においては、コンピューティング技術とデータアナリティクス技術の統合が不可欠であり、データ移行や複雑なコンピューター計算の実装が技術的課題とされてきた。こうしたエクサスケール・コンピューティング技術に欧米はいち早く注目しており、米国は国防省やエネルギー省そして国立科学財団が中心となり技術開発に着手。また欧州でも欧州連合 (EU) 内で the Collaborative Research into Exascale Systemware, Tools and Applications (CRESTA) や Dynamical Exascale Entry Platform (DEEP) といった先進的なプロジェクトが進められてきた¹³。2018 年までに「Big Data and Exascale Computing (BDEC) プロジェクト」の下で、ビッグデータとエクサスケール・コンピューティングに関する技術研究ワークショップが米国、EU そして日本が連携する形で複数回実施され、国際社会における新たな技術トレンドとなりつつある。また、本プロジェクトで執筆された論文でも、より大規模かつ多様化するデータとそれら进行分析するメソッドが科学コンピューティングの世界を一新するという見解が示されており、ビッグデータ時代におけるエクサスケール・コンピューティングへの注目が高まっていることがわかる¹⁴。

2. 先進コンピューティング技術のマルチユース

エクサスケール・コンピューティングに代表される先進コンピューティング技術は、極めてマルチユース性が高い先端科学技術であり、製造技術、工学分野や医療分野そして金融に加えて、エネルギー分野や交通運輸分野に至るまで官民を横断する幅広い技術・産業分野で活躍している (図 1-4)。例えば、先端素材分野では、新たな素材の発見にエクサスケール・コンピューティング技術が貢献している。後述するが米国では「科学における新発見」(Science discovery) のためにエクサスケール・コンピューティング技術を利用する例が顕著に増えており、エネルギー省とテック企業が協力することで、新素材の発見にエクサスケール・コンピューティング技術を利用

¹³ Reed, Daniel et. al., “Exascale computing and big data.”

¹⁴ Asch, Mark, et al. “Big data and data ecosystem for scientific inquiry.” *The International Journal of High Performance Computing Applications* 32.4 (2018): 435-479.

用する Exascale Computing Project (ECP)が進められてきた¹⁵。これは再生可能エネルギー分野で利用価値のある新たな素材を発見することも目的としている研究であり、先進コンピューティング技術の貢献が期待されている。医療分野では、特に癌治療の研究においてこのエクサスケール・コンピューティング技術の利用が期待されている¹⁶。製造業でもエクサスケール・コンピューティング技術が利用されつつある。特にアダプティブ・マニュファチャリング (Adaptive manufacturing: AM)技術分野において、エクサスケール・コンピュータを用いたより高度でかつ高速のシミュレーションを行うことが可能になる¹⁷。

| Industry | Average Revenue per HPC Dollar Invested | Average Profit or Cost Savings per HPC Dollar Invested |
|--------------------|---|--|
| Defense | \$75.00 | \$18.80 |
| Financial | \$641.70 | \$47.40 |
| Insurance | \$175.70 | \$280.00 |
| Life Sciences | \$205.60 | \$40.90 |
| Manufacturing | \$216.50 | \$28.40 |
| Oil and Gas | \$416.00 | \$53.70 |
| Telecommunications | \$210.70 | \$30.40 |
| Transportation | \$1,804.30 | \$15.60 |
| TOTAL | \$452.10 | \$37.60 |

(図 1-4 先進コンピューティング投資における産業毎のリターン¹⁸)

図 1-4 でも明らかな通り、交通運輸産業での先端コンピュータへの投資は特に高い収益を上げている。特にとりわけ航空宇宙産業では、エクサスケール・コンピューティング技術を用いた AM 技術が大きな技術革新を齎している。ボーイング社をはじめとした米国の航空機メーカーはすで

¹⁵ Turczyn, Coury, “Discovering and extreme-scale computing: Pathways to convergence-toward a shaping strategy for a future software new materials at exascale speed.” *Exascale Computing Project*. August 11, 2022. <https://www.exascaleproject.org/qmcpack/>

¹⁶ Bhattacharya, Tanmoy, et al. “AI meets exascale computing: Advancing cancer research with large-scale high performance computing.” *Frontiers in oncology* 9 (2019): 984.

¹⁷ “EXAAM.” *Exascale Computing Project*. <https://www.exascaleproject.org/research-project/exaam/>

¹⁸ *ibid.*, p. 11.

に先進コンピューティング技術とAM技術を導入が進められており、短時間かつ低コストで飛行機のパーツを製造することに貢献してきた¹⁹。米国航空宇宙局(NASA)も High-End Computing (HEC) プログラムを立ち上げ、極めて性能の高い先進コンピューティング技術が宇宙ミッションの遂行をサポートしている。最近では、米国GEに代表されるエンジンメーカーが次世代ジェットエンジンの開発に先進コンピューティング技術を利用している。これによりより燃費の良いジェットエンジンの開発に成功しており、二酸化炭素の排出量低減にも貢献している。このように、先進コンピューティング技術は、幅広い分野でマルチユースが可能な技術であり、経済安全保障上重要なエネルギーや航空宇宙分野はもちろん、医療や製造業に至るまで極めて広範囲な産業技術分野に革新を齎している。



図 1-5 GE のジェットエンジンの開発²⁰

3. 米国におけるエクサスケール・コンピューティング技術とその開発動向

米国は近年注目されているエクサスケール・コンピューティング(Exascale Computing)分野で国家主導の研究開発を進めてきた。米国の先進コンピューティング技術開発で大変興味深いのは、従来こうした情報科学やコンピューター技術開発に携わってきた国立科学財団(National Science Foundation)や国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: NIST)のみならず、エネルギー省(Department of Energy: DoE)や国防省(Department of Defense: DoD)といった軍事・経済安全保障の問題に直接携わる政府機関がその研究開発においても主導的な地位にあるということである。

¹⁹ Nossokoff, Mark, Sorensen, Bob and Joseph, Earl, *To out-compute is to out-compete: Competitive threats and opportunities relative to U.S. government HPC leadership*. (Hyperion Research, 2022).

²⁰ *ibid.*, p. 19.

こうした他省庁や研究機関との連携を可能にしたのは、2015年の7月に施行された大統領令 (Executive Order) 13702号「Creating a National Strategic Computing Initiative」である²¹。この法令では、経済的競争力と「科学における新発見」(Science discovery)を加速させるためのHPCの発展を最大限可能にするために米国政府がHPC研究における連邦政府としての戦略を策定することが定められている。これを政策根拠として、米国政府は政府機関全体を巻き込んだ包括的アプローチに基づいて、官民そして学の多様なステークホルダが連携した研究開発体制の構築を推進してきた。前述の通り、ここではDoE、DoDおよび国立科学財団がリーダーシップを発揮することが規定されており、各機関の役割は以下のように定められている。

エネルギー省 (DoE): エネルギー省科学局 (DoD Office of Science) 及び国家核安全保障局 (National Nuclear Security Administration: NNSA) は、エクサスケール・コンピューティングの研究プログラムを通じて、高度シミュレーションにフォーカスしたジョイント・プログラムを計画し実行する。

国立科学財団: 国立科学財団は「科学における新発見」(Science discovery) 及びそのためのHPCのエコシステムの構築そして人材育成において中心的な役割を担う。

国防省 (DoD): 国防省はデータ・アナリティクス・コンピューティングに注力し、当該研究ミッションをサポートする。

上記3つのリーディング機関はHPCのフロンティアの開拓を推し進め、米国をこの戦略的に重要な技術領域で常に最先端の地位を維持することを可能にする。これらの機関は基礎研究とも密接に連携しながら、開発に携わる機関やその技術展開に関わる関係機関とも連携を図り、革新的なコンピューティング技術の開発を支援する。この3つの機関と連携を取る形で、国立標準技術研究所 (NIST) や国土安全保障省 (Department of Homeland Security)、NASA (National Aeronautics and Space Administration) といった各応用分野の専門省庁や研究機関が基礎研究ならびにその技術展開を推進するという枠組みが取られている(図1-6)。

²¹ Executive Order 13702 of July 29, 2015 Creating a National Strategic Computing Initiative (Federal Register Vol. 80, No. 148).

Table 1: National Strategic Computing Initiative Agency Roles

| Type of agency | Agency |
|---------------------------------------|---|
| Lead | Department of Defense Department of Energy National Science Foundation |
| Foundational research and development | Intelligence Advanced Research Projects Activity National Institute of Standards and Technology |
| Deployment | Department of Homeland Security Federal Bureau of Investigation National Aeronautics and Space Administration National Institutes of Health National Oceanic and Atmospheric Administration |

(図 1-6 National Strategic Computing Initiative における関係政府機関の役割²²⁾)

その上で米国政府は、近年 2020 年度の戦略計画「Pioneering the Future Advanced Computing Ecosystem: A Strategic Plan (the 2020 Strategic Plan)」を策定しており、以下 5 つの戦略目標を提示している。

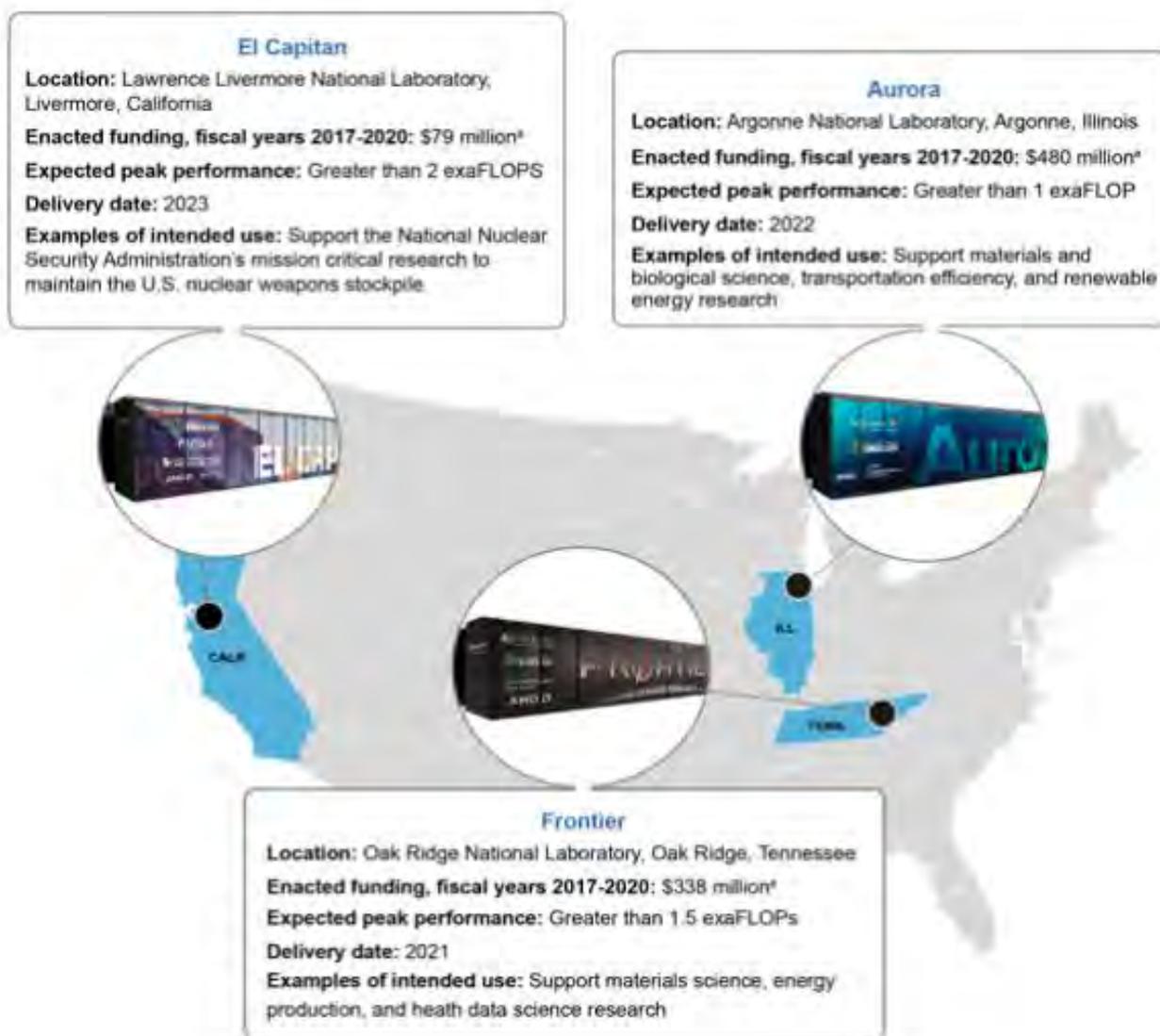
(1) 高度エクサスケール・コンピューティング開発のためのイニシアティブ

この戦略目標の達成にはエネルギー省が中核的な役割を担うことが期待されている。特に当該ミッションでは HPC のアプリケーションとソフトウェアの開発に主眼が置かれており、こうした技術開発は先端素材研究における「エネルギー省 基礎エネルギー科学プログラム」と地球科学分野における「エネルギー省 生物環境学研究プログラム」を支えることを目指している。エネルギー省は 2017 年から 2020 年にかけて、エクサスケール・コンピューターの開発に合計 897 百万ドルもの予算を投じており、革新的な HPC の研究開発に注力してきた。

こうした目標を定めた上で、エネルギー省は自らが主管する研究所において Frontier, Aurora そして El Capitan の 3 つのエクサスケール・コンピューティングシステムの開発を進めてきた (図 1-7)。Frontier は 2021 年の実装を目指して、テネシー州のオークリッジ国立研究所で 2019 年から Clay 社との契約の下本格的に研究開発が進められてきた。Frontier は現行のパソコンの 50 倍もの速さの計算速度を実現することで、「科学における新発見」やエネルギーレ

²² Government Accountability Office (GAO), *High-Performing Computing: Advances Made Towards Implementing the National Strategy, but Better Reporting and a More Detailed Plan Are Needed.* (United States Government Accountability Office, September 2021), p. 3

ジリエンス、経済競争力そして国家安全保障等の重要国家領域でのイノベーションを実現する²³。Aurora は 2022 年の実装を目指してイリノイ州のアルゴンヌ国立研究所で開発が進められてきたエクサスケール・コンピューターであり、素材科学や生物学、輸送技術そして再生可能エネルギーの研究への応用が想定されている。El Capitan は、同じくエネルギー省が所有するカリフォルニア州のローレンス・リバモア国立研究所で 2023 年の実装を目指して開発が進められている、こちらは主に核兵器の備蓄を維持するための核安全保障の研究開発に用いられることが期待されている。



(図 1-7 エネルギー省が研究開発を進める 3 つのエクサスケール・コンピューティング²⁴)

²³ Oak Ridge “National laboratory, U.S. Department of Energy and Cray to Deliver Record-Setting Frontier Supercomputer at ORNL” (May 7, 2019). Retrieved from <https://www.ornl.gov/news/us-department-energy-and-cray-deliver-record-setting-frontier-supercomputer-ornl>

²⁴ GAO., *High-Performing Computing*, p. 14.