

「富岳」のシステム開発 事後評価結果

令和 4 年 2 月
情報委員会

情報委員会 委員名簿

(敬称略、50音順)

主査

安浦 寛人 九州大学名誉教授
国立情報学研究所学術基盤チーフディレクター／特任教授

委員

相澤 彰子 国立情報学研究所教授
井上 由里子 一橋大学大学院法学研究科教授
奥野 恭史 京都大学大学院医学研究科ビッグデータ医科学分野教授
川添 雄彦 日本電信電話株式会社常務執行役員／研究企画部門長
小池 麻子 株式会社日立製作所ライフ事業統括本部企画本部副本部長／ヘル
スケア事業成長戦略本部副本部長
後藤 厚宏 情報セキュリティ大学院大学学長
後藤 吉正 国立研究開発法人科学技術振興機構参与
佐古 和恵 早稲田大学基幹理工学部情報理工学科教授
田浦 健次郎 東京大学情報基盤センター長
瀧 寛和 和歌山大学名誉教授／前学長
塚本 恵 キャタピラージャパン合同会社代表執行役員／渉外・広報室長
長谷山 美紀 北海道大学副学長／大学院情報科学研究院長／教授
引原 隆士 京都大学図書館機構長（(兼)附属図書館長）／情報環境機構長
深澤 良彰 早稲田大学理工学術院教授
星野 崇宏 慶應義塾大学経済学部教授
※ 美濃 導彦 国立研究開発法人理化学研究所理事
八木 康史 大阪大学産業科学研究所教授
若目田 光生 一般社団法人日本経済団体連合会デジタルエコノミー推進委員会
企画部会データ戦略ワーキンググループ主査
株式会社日本総合研究所リサーチ・コンサルティング部門兼創発戦
略センター上席主任研究員

(令和4年2月現在)

※：利害関係者のため審議には加わらない

H P C I 計画推進委員会 委員

(敬称略、50音順)

- | | | |
|---|--------|--|
| | 伊藤 公平 | 慶應義塾 塾長 |
| | 伊藤 宏幸 | ダイキン工業株式会社・テクノロジー・イノベーションセンター リサーチ・コーディネーター |
| | 上田 修功 | 理化学研究所 革新知能統合研究センター 副センター長／NTT コミュニケーション科学基礎研究所機械学習・データ科学センター 代表 |
| | 梅谷 浩之 | 株式会社トヨタシステムズ制御解析本部シミュレーション技術室 室長 |
| | 喜連川 優 | 情報・システム研究機構国立情報学研究所 所長 |
| ○ | 小林 広明 | 東北大学大学院情報科学研究科 教授／東北大学サイバーサイエンスセンター センター長特別補佐／東北大学総長特別補佐 (ICT 革新担当) |
| | 田浦 健次朗 | 東京大学情報基盤センター センター長 |
| | 高橋 桂子 | 早稲田大学 総合研究機構 グローバル科学知融合研究所 上級研究員・研究院教授 |
| | 常行 真司 | 東京大学大学院理学系研究科 教授 |
| | 中川 八穂子 | 株式会社日立製作所研究開発グループデジタル PF イノベーションセンター シニアプロジェクトマネージャ 兼 技術戦略室 チーフデジタルオフィサー |
| | 平田 貞代 | 芝浦工業大学大学院理工学研究科 准教授 |
| ◎ | 藤井 孝藏 | 東京理科大学工学部情報工学科 教授 |
| | 朴 泰祐 | 筑波大学計算科学研究センター センター長 |

(令和3年5月現在)

◎ : 主査 ○ : 主査代理

「富岳」のシステム開発の概要

1. 背景等

- 平成 26 年度から事業を開始し、令和 3 年 3 月から共用を開始したスーパーコンピュータ「富岳」のシステム開発について、事後評価を行う。
- 具体的には、政策的位置づけや意義（必要性・有効性・効率性等）を総括するとともに、中間評価時（平成 30 年度）における留意事項等への対応状況等について確認・評価を行う。また、「富岳」の運営に向けて今後の課題を明らかにする。

※ なお、本事業は平成 30 年度の中間評価実施時まで「ポスト「京」のシステム開発」という課題名で扱ってきたが、「ポスト「京」」の名称は、令和元年度に実施した一般公募により「富岳」に決定しているため、本資料においては、当時の記述の抜粋を含めて、「ポスト「京」」をすべて「富岳」と表記している。

2. 事業目的・事業概要等

（1）課題実施期間及び評価実施期間

平成 26 年～令和 2 年度

平成 25 年 事前評価、平成 30 年 中間評価

（2）研究開発概要・目的

本事業は、我が国の科学技術の発展、産業競争力の強化に資するため、イノベーションの創出や国民の安全・安心の確保につながる最先端の研究基盤として、世界最高水準の汎用性のあるスーパーコンピュータの実現を目指し、最大で「京」の 100 倍のアプリケーション実効性能及び 30～40MW の消費電力を達成することを目標として開始したものである。

（3）研究開発の必要性・有効性・効率性（事前評価、中間評価時）

- ・ 必要性については、事前評価においては、世界最高水準のスーパーコンピューティング技術は、科学技術の振興、産業競争力の強化、安全・安心の国づくり等の実現に不可欠な技術である等と評価された。中間評価においても、Society 5.0 の実現のために、新たな価値創造の基盤としてのスーパーコンピュータが必要不可欠である等と評価された。
- ・ 有効性については、事前評価においては、我が国の計算科学技術及び計算機科学技術全体を発展させて国際的にも優位性を維持するのみならず、行政施策決定の迅速化・高度化や経済的価値の創出などに貢献することが期待される等と評価された。中間評価においても、システムとアプリケーションとの Co-design により両者の最適化の方

針が同時に得られ、成果普及の取組も十分なされる見込み等と評価された。

- ・ 効率性については、事前評価においては、「京」の開発・利用の過程で蓄積した技術・経験・人材やアプリケーションを活用した効率的なプロジェクトの推進や成果創出が可能である等と評価された。中間評価においても、開発主体と開発担当企業間の定期的なレビュー、外部有識者によるレビュー、政府における累次の評価などを行い、PDCAサイクルが適切に機能している等と評価された。

(4) 予算(執行額)の変遷*

年度	H26(初年度)	H27	H28	H29	H30	H31/R1
予算額	1,206 百万 ^{※1}	3,972 百万	6,700 百万	6,700 百万	26,490 百万	24,310 百万
(内訳)	「富岳」開発 1,150 百万 アプリ開発 55 百万円	「富岳」開発 3,524 百万 アプリ開発 448 百万円	「富岳」開発 3,797 百万 アプリ開発 2,683 百万円	「富岳」開発 3,855 百万 アプリ開発 2,845 百万円	「富岳」開発・製造 23,645 百万 アプリ開発 2,845 百万円	「富岳」開発・製造 21,708 百万 アプリ開発 2,602 百万円
執行額	1,130 百万	3,859 百万	5,997 百万	7,536 百万 ^{※2}	26,388 百万	24,251 百万
(内訳)	R-CCS 1,078 百万 独法・大学等 49 百万	R-CCS 3,416 百万 独法・大学等 421 百万	R-CCS 3,322 百万 独法・大学等 2,628 百万	R-CCS 4,696 百万 独法・大学等 2,819 百万	R-CCS 23,600 百万 独法・大学等 2,765 百万	R-CCS 21,649 百万 独法・大学等 2,523 百万

年度	R2	総額
予算額	38,464 百万	107,842 百万
(内訳)	「富岳」開発・製造 38,464 百万	
執行額	38,603 百万 ^{※3}	107,764 百万
(内訳)	R-CCS 38,603 百万	

※ 千円単位で計算した後、百万円単位で四捨五入した金額

※1 当初予算、補正予算の合計額を記載

※2 繰越や予備費を含むため、執行額が予算額を超えることがある

※3 額の確定実施中の為、暫定額を記載

(5) 課題実施機関・体制

【特定高速電子計算機施設設置者】

理化学研究所 計算科学研究センター (R-CCS)

事後評価票

(令和4年2月現在)

1. 課題名 「富岳」のシステム開発

2. 研究開発計画との関係

施策目標：未来社会を見据えた先端基盤技術の強化

大目標（概要）：ICTを最大限に活用し、サイバー空間とフィジカル空間（現実世界）とを融合させた取組により、人々に豊かさをもたらす「超スマート社会」を未来社会の姿として共有し、その実現に向けた一連の取組を更に深化させつつ「Society 5.0」として強力に推進し、世界に先駆けて超スマート社会を実現していく。このため、国は、超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要な基盤技術及び個別システムにおいて新たな価値創出のコアとなり現実世界で機能する基盤技術について強化を図る。

中目標（概要）：我が国が世界に先駆けて超スマート社会を形成し、ビッグデータ等から付加価値を生み出していくために、産学官で協働して基礎研究から社会実装に向けた開発を行うと同時に、技術進展がもたらす社会への影響や人間及び社会の在り方に対する洞察を深めながら、中長期的視野から超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要な基盤技術の強化を図る。

重点的に推進すべき研究開発の取組（概要）：

「次世代アーキテクチャと革新的なハードウェアの研究開発」

様々なモノがインターネットにつながるIoT社会を迎えて、ますます重要となる次世代モバイル技術やクラウドデータセンター技術にも展開可能なアーキテクチャ及びデバイス技術の持続的発展を図るために、新しい動作原理を含む革新的アーキテクチャ及びデバイスの研究開発を推進する。また、多様なニーズに応える革新的な計算環境を構築し、その利用を推進することで、我が国の科学技術の発展、産業競争力の強化、安全・安心な社会の構築に貢献する。

本課題が関係するアウトプット指標：

- ターゲットアプリケーションの実効性能
- 「富岳」システムの消費電力性能

本課題が関係するアウトカム指標：

- エコシステムの構築
- 新たな科学技術分野における利活用

3. 評価結果

(1) 課題の達成状況

<概要>

スーパーコンピュータ「富岳」(以下、「富岳」という。)は、平成25年の科学技術・学術審議会等での事前評価を踏まえて、平成26年に開発プロジェクトが開始された。平成28年、最先端の半導体技術開発の世界的な遅延に伴い、開発スケジュールを修正したが、コストや開発目標は引き続き堅持され、平成30年の中間評価においても「富岳」の製造・設置を推進していくことが適当と認められた。

令和元年、「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」(平成6年法律第78号、以下「共用法」という。)に基づく特定高速電子計算機施設の設置者である理化学研究所計算科学研究センター(R-CCS)へ、開発された筐体の搬入が開始された。新型コロナウイルス感染症の世界的流行により、令和2年4月には、本格稼働開始前ではあったものの、その時点で稼働できる筐体のみを用いて試行的運用を開始し、新型コロナウイルス感染症対策に資する研究に緊急的に取り組んだ。令和2年6月には、試行運用段階中にも関わらず、世界のスーパーコンピュータランキング(TOP500、HPCG、HPC-AI、Graph500)において1位を獲得し、「富岳」の総合力の高さを国内外に示した(その後令和2年11月、令和3年6月、令和3年11月にも同様に4部門で1位を獲得し、世界初の4期連続4部門1位を実現している)。令和3年3月からは本格稼働を開始し、今後様々な分野における成果創出を期待されている。

「富岳」は、システムとアプリケーションの協調的な開発(Co-design)により、前身であるスーパーコンピュータ「京」(以下、「京」という。)の最大100倍のアプリケーション実効性能を有しつつ、消費電力を30MW以下に抑えている点が特徴として挙げられる。また、命令セットアーキテクチャとして、世界中の産業機器や家電製品などのCPUにおいて広く使われているArmアーキテクチャを採用した。OSはRed Hat Enterprise Linux 8とし、ソフトウェアパッケージ管理システムSpackを導入することで、世界中で使われている多くのHPCのオープンソースソフトウェアが容易にインストールできるようになり、多様な分野のユーザの使い勝手を考慮した汎用スーパーコンピュータを実現した。さらに、半精度浮動小数点演算も可能なCPU設計とすることで、AIの計算やビッグデータ解析の研究基盤としてSociety 5.0社会の推進に大いに貢献することも期待される。

なお、「富岳」の運用に関する評価は、運用期間の終了後に実施するものであり、本評価においては「富岳」の開発を中心に評価を行うものとする。

<必要性>

評価項目

国費を用いた研究開発としての意義(国や社会のニーズへの適合性、国の関与の必要性・緊急性)

評価基準

「富岳」により、独創性、優位性の高い成果が期待できるか。

「富岳」のシステム開発の必要性について、①事前評価及び中間評価において示された評価結果を再確認し、②中間評価以降の状況変化を確認することで追加の評価項目・評価基準があるかどうかを確認し、③事後評価を実施した。その結果、「富岳」がなければ実現できないような独創性・優位性の高い成果が期待できること、その成果が上記の評価項目を十分に満たしうることを確認した。したがって、本事業はその必要性が高いものであったと結論した。

① 事前評価及び中間評価の確認

- ・ 事前評価（平成 25 年度）においては、以下の項目等を考慮し、本事業が研究開発としての意義を十分に有しているとされた。
 - 世界最高水準のスーパーコンピューティング技術は、科学技術の振興、産業競争力の強化、安全・安心の国づくり等の実現に不可欠な技術であることから、第 4 期科学技術基本計画（平成 23 年度～平成 27 年度）で国家安全保障・基幹技術に位置付けられるとともに、国際的にもスーパーコンピュータの開発・利用が積極的に進められている。
 - 世界最高水準のスーパーコンピュータの開発は、国内産業への波及効果を持つことから、我が国において継続的にスーパーコンピュータを開発していくための技術力を維持・強化することが重要である。
 - 我が国が直面する社会的・科学的課題の解決に資する成果を迅速に創出するためには、ハードウェアの開発と協調して、当該ハードウェアの能力を最大限活用するアプリケーションを開発することが重要である。
- ・ 中間評価（平成 30 年度）においても、以下の項目等を考慮し、引き続き本事業の必要性は変わらないことが示された。
 - 第 5 期科学技術基本計画における「超スマート社会」(Society 5.0) の実現のために、新たな価値創造の基盤としてのスーパーコンピュータが必要不可欠である
 - システムとアプリケーションを協調的に開発 (Co-design) することで、最大で「京」の約 100 倍のアプリケーション実効性能及び 30-40MW の消費電力を達成する見込みである
 - 量子コンピュータ等の急速な進展はあるものの、汎用的な計算が可能な基盤の構築には時間を要する

② 中間評価以降の状況変化

- ・ 中間評価以降、必要性に関する大きな状況変化は以下の点がある。
 - 新型コロナウイルス感染症の世界的な流行により、その予防や治療のための研究開発を早急に進める必要性が増大
 - 線状降水帯や台風による被害の甚大化により、その予測実現や精度改善のための研究開発を早急に進める必要性が増大

- ・ 上記の状況変化を踏まえると、事前評価や中間評価の時点と比較して、現在では社会的・経済的意義がより強く要求されるようになっている。したがって、既にある評価基準に加えて、以下の社会的・経済的意義という観点からも検討する必要がある。
 - 社会的・経済的意義 感染症や気象災害への対応など、国民にとって安全・安心な社会を目指すために必要な研究開発という観点

③ 事後評価

- ・ システムとアプリケーションを協調的に開発 (Co-design) することを通して、獨創性・優位性の高い成果が期待される以下の5領域9分野において、ターゲットアプリケーションを定めて開発を行った。各アプリケーションに対してターゲット問題を設定し、それぞれが想定される利用に適した条件下においてその計算時間を「京」と比較する方法により性能評価を実施した結果、目標性能倍率を表1のとおり達成した。

表1 ターゲットアプリケーションの目標性能倍率達成状況

	アプリケーション	目標性能 (平成26年時点)	性能 (令和3年3月時点)
重点1 健康長寿社会の実現 生体分子システムの機能制御による革新的創薬基盤の構築	GENESIS (分子動力学計算)	100倍	131倍
重点2 健康長寿社会の実現 個別化・予防医療を支援する統合計算生命科学	Genomon (がんのヒト全ゲノム関連データ解析)	15倍	23倍
重点3 防災・環境問題 地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築	GAMERA (地盤地震動シミュレーション)	15倍	63倍
重点4 防災・環境問題 観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化	NICAM+LETKF (地球大気の物理モデルシミュレーションと観測データを融合)	75倍	127倍
重点5 エネルギー問題 エネルギーの高効率な創出、変換・貯蔵、利用の新規基盤技術の開発	NTChem (大規模分子の第一原理的電子状態計算)	40倍	70倍
重点6 エネルギー問題 革新的クリーンエネルギーシステムの実用化	Adventure (構造解析プログラム)	15倍	63倍
重点7 産業競争力の強化 次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成	RSDFT (第一原理電子状態計算および構造最適化計算)	35倍	38倍
重点8 産業競争力の強化 近未来型ものづくりを先導する革新的	FFB (流体アプリケーション)	20倍	51倍

設計・製造プロセスの開発			
重点 9 基礎科学の発展 宇宙の基本法則と進化の解明	LQCD (素粒子標準模型の理論に 基づく格子QCDアプリケーション)	50 倍	38 倍※
相乗平均		約 32 倍	約 58 倍以上

※ 基本設計時（平成 27 年）のシステム構成変更等により、目標倍率との単純比較は困難だが、当初計画していた課題（大体積の LQCD 計算によるハドロン間相互作用の解明）の解決に十分な性能を達成している。

- ・ これらアプリケーションの活用により、具体的には以下のような、「富岳」でなければ実現できないような独創性・優位性の高い成果が期待されている。実際の成果創出に関する取組として、令和 2 年度より「富岳」成果創出加速プログラムを実施しており、今後様々な成果が期待される。
 - 健康長寿社会の実現
高速・高度な創薬シミュレーションの実現による新薬開発加速化／医療ビッグデータの解析と生体シミュレーションによる病気の早期発見と予防医療の支援の実現
 - 産業競争力の強化
次世代産業を支える新デバイスや材料の創成の加速化
 - 防災・環境問題
気象ビッグデータ解析により、竜巻や豪雨を的確に予測／地震の揺れ・津波の侵入・市民の避難経路をメートル単位でシミュレーション
 - エネルギー問題
太陽電池や燃料電池の低コスト・高性能化や人工光合成を実現／電気自動車のモーターや発電機のための永久磁石を省レアメタル化で実現
 - 基礎科学の発展
宇宙でいつどのように物質が創られたのかなど、科学の根源的な問いへの挑戦
- ・ 「富岳」の開発を通じて、国内外の大学等教育機関や研究機関が連携し、以下に示した観点を通じて技術の波及や計算科学・計算機科学の人材育成、国際連携等が着実に進んだ。
 - 半導体設計技術（Arm アーキテクチャの実装、最新メモリ技術の採用など）
 - プログラミング環境の整備（HPC 向けソフトウェアパッケージ管理システム Spack の導入、深層学習のためのフレームワークの導入など）
 - アプリケーション開発（「京」などのスーパーコンピュータを用いたアプリ開発により約 1,100 人の研究者が雇用、今後 Society 5.0 を支える人材として活躍が期待）
- ・ 令和 2 年 4 月から試行運用を開始し、新型コロナウイルス感染症対策に資する研究を緊急的に進めることで、ウイルス作用機構の解明や治療薬探索、飛沫シミュレーションといった様々な成果を創出した。特に飛沫シミュレーションについては、飛沫・エアロゾル感染についての理解と対策の重要性を科学的知見に基づいて啓発し、人々の行

動変化に貢献したことが評価を受け、2021年ゴードン・ベル賞のCOVID-19研究特別賞を受賞している。

- ・このような緊急時の機動的な対応が可能となったのは、システムとアプリケーションを同時に開発するCo-designを実施した効果であるといえる。さらに令和3年3月の本格共用開始以降は、甚大化する気象災害への対応として、線状降水帯の予測に資する研究やゲリラ豪雨の予測に関する研究も実施しており、中間評価以降の状況変化である社会的・経済的意義という観点からも、「富岳」が必要性を満たしているとは評価できる。

<有効性>

評価項目

新しい知の創出への貢献、研究開発の質の向上への貢献

評価基準

- ・世界を先導する成果の創出が期待できるか。
(Co-designにより蓄積したノウハウを対象外の汎用的アプリケーションにも展開し、成果の早期創出を図ったか、Society 5.0において重要となるビッグデータ、AI等のアプリケーションについても、高い性能を有することを確認したか。)
- ・ユーザの利便性向上、戦略的な利活用の促進及び成果の発信に努めたか。

「富岳」のシステム開発の有効性について、①事前評価及び中間評価において示された評価結果を再確認し、②事後評価を実施した。その結果、実現した「富岳」の高い性能により高度な計算が可能となり、かつ幅広い分野のユーザに供することを可能としたことで、「富岳」を活用した研究成果が上記の評価項目・評価基準を十分に満たしうることを確認した。したがって、本事業はその有効性が高いものであったと結論した。

① 事前評価及び中間評価の確認

- ・事前評価（平成25年度）においては、以下項目等を考慮し、本事業が十分な有効性を有しているとされた。
 - － 我が国の計算科学技術及び計算機科学技術全体を発展させて国際的にも優位性を維持するのみならず、行政施策決定の迅速化・高度化や経済的価値の創出などに貢献することが期待される。
 - － 我が国として必要な技術や経験を継承・発展させ、それを支える人材を育成・確保していくことが期待される。
 - － 我が国IT産業の競争力を高めるのみならず、国内産業への様々な波及効果を有することが期待される。
 - － ハードウェアの開発と協調的にアプリケーションを開発することにより、世界最高水準のスーパーコンピュータの能力を最大限活用して社会的・科学的課題の解決に資する成果を迅速に創出することが期待され、また、アプリケーション開発に係る

技術の継承や人材の育成、開発したアプリケーションの商用展開も期待される。

- ・ 中間評価（平成 30 年度）においては、以下の項目等を考慮し、本事業が十分な有効性を有しているとされた。
 - システムとアプリケーションとの Co-design により両者の最適化の方針が同時に得られ、成果普及の取組も十分なされる見込み
 - CPU を柔軟な高性能ベクトル演算処理が可能な命令体系としつつ、FP16 を導入することで、Deep Learning 等の AI を含む幅広い応用に適用できるような設計を実現
 - 新たなメモリデバイスの導入と CPU 側のメモリ技術により、他のシステムに対する国際的な比較優位性を有する可能性があり、また、国際的に広く使われている Linux ディストリビューションを採用してオープンソースコミュニティと協力することで、ソフトウェアの充実を図るなど、他国等との国際協調を実現

② 事後評価

- ・ 当初目標として掲げた、最大で「京」の 100 倍のアプリケーション実効性能、消費電力 30-40MW という開発目標については、以下の通り達成でき、「富岳」が高い性能を有することが示された。
 - 総演算性能 537 ペタフロップス（京の約 47.5 倍）、総メモリバンド 163PB/s（京の約 32 倍）を実現。
 - ターゲットアプリケーションの実効性能については、Co-design の取組が効果を発揮し、9つのアプリケーションソフトに対して、それぞれが想定される利用に適した評価方法により最大で京の 131 倍、平均で京の 58 倍を実現。また、このターゲットアプリケーションは各分野の代表的な計算手法を網羅したものであり、今後他のアプリケーションに応用されていくことが期待される。
 - 消費電力は、9つのアプリについて基本的な電力制御モードで 4 パターン測定し、最大で 29MW、通常時は 18MW 程度で運用できることが確認された。これは当初目標を超えた省電力性を実現した。
- ・ CPU には、利用者が使いやすいソフトウェア開発環境を実現するために、命令セットアーキテクチャとして、世界中の産業機器や家電製品などの CPU において広く使われている Arm アーキテクチャを採用した。更に CPU 開発において Arm 社との合同研究チームを形成し、命令セットアーキテクチャをスーパーコンピュータ向けに拡張した SVE (Scalable Vector Extension) の仕様策定に取り組み、その成果を採用した高性能 CPU 「A64FX」を開発した。その際、当初線幅 10nm の半導体を使用する予定だったところ、技術の進展に伴って 2017 年以降に利用可能になると想定されるようになった線幅 7nm の半導体への切り替えを実施するという技術的にチャレンジングな取組を実施し、成功させたことは評価できる。また、AI やデータ科学に活用できる半精度浮動小数点演算も可能な機構も実装することで、Society 5.0 の実現に向けて重要となるビッグデータ、AI 等の研究開発にも活用できる CPU を開発した。
- ・ 半導体技術の高度化の頭打ちにより、米国、中国におけるスパコン開発計画に遅延が

生じる中、「富岳」については、開発終盤に新型コロナウイルス感染症の感染が拡大する中においてもスケジュール通りに目標性能を達成し、国際優位性を確保した。また、HPC 向けソフトウェアパッケージ管理システム Spack の導入など、国際協調の観点から有効な取組を実施した。また、戦略的利活用に関しては、整備したクラウド機能を活用して「富岳」のクラウド的利用を試行的に実施しつつ、クラウドサービス事業者との共同研究により種々の高度な付加価値的機能に関する効果の実証を行っている。

- ・ 「富岳」の開発を通じて、国内外の大学等教育機関や研究機関が連携し、技術の波及や計算科学・計算機科学の人材育成、国際連携等が着実に進んだ。
- ・ 既に創出された研究成果としては、必要性の項目で示したものに加え、太陽の自転の再現など基礎科学の発展を目的とする研究成果や、リアルタイムのゲリラ豪雨予測や、「富岳」で構築した AI モデルによる津波浸水予測といった我が国が直面する課題の解決に繋がる研究成果など、世界を先導する成果が迅速に創出されている点が評価できる。
- ・ 加えて、「富岳」の全系を用いた研究として、大規模数値流体シミュレーションで「京」の 70 倍以上の高速化を実現する革新的アルゴリズムの開発、世界の気象機関と比較して 500 倍規模の全球気象シミュレーションとデータ同化を組み合わせた複合計算の実現、宇宙大規模構造におけるニュートリノの運動に関する大規模シミュレーションに成功した、これらの研究は 2020 年及び 2021 年のゴードン・ベル賞の最終候補に選出された。また、先述したとおり、飛沫シミュレーションが 2021 年ゴードン・ベル賞の COVID-19 研究特別賞を受賞しており、「富岳」によって世界的にも卓越した成果が生み出されているといえる。
- ・ 令和 2 年 6 月には、試行運用段階中にも関わらず、世界のスーパーコンピュータランキング (TOP500、HPCG、HPC-AI、Graph500) において 1 位を獲得し、「富岳」の総合力の高さを国内外に示した。その後令和 2 年 11 月、令和 3 年 6 月、令和 3 年 11 月にも同様に 4 部門で 1 位を獲得し、世界初の 4 期連続 4 部門 1 位を実現している。これにより、「富岳」の総合力の高さを証明するとともに、「富岳」が AI の計算やビッグデータ解析の研究基盤として Society 5.0 社会の推進に大いに貢献し得ることを証明した。
- ・ 令和 2 年 7 月には、HPCI 計画推進委員会の審議を経て「富岳」の利活用に関する基本方針を策定し、令和 3 年 3 月に予定を前倒して共用を開始した。基本方針においては「京」を踏襲する利用枠に加え、新たに、Society 5.0 の実現に資する研究開発課題への取組に優先的に計算資源を配分する、「Society 5.0 利用推進枠」を設け、「富岳」全体資源のうち 5 % 程度を割り当てることとし、令和 3 年 9 月より公募を開始した。

<効率性>

評価項目

計画・実施体制の妥当性、目標・達成管理の向上方策、費用構造や費用対効果向上方策の妥当性

評価基準

研究開発プログラムの実施方法、体制、費用対効果向上方策について、見直しが適切かつ効率よく行われているか

「富岳」のシステム開発の効率性について、①事前評価及び中間評価において示された評価結果を再確認し、②中間評価以降の状況変化を確認し、③事後評価を実施した。その結果、「富岳」の開発にあたり作成した計画や設置した組織が十分妥当であり、目標達成レベルの向上や費用対効果に資する成果をあげ、上記の評価項目を十分に満たしうることを確認した。したがって、本事業はその効率性が高いものであったと結論した。

① 事前評価及び中間評価の確認

- ・ 事前評価（平成 25 年度）においては、以下項目等を考慮し、本事業が十分な有効性を有しているとされた。
 - 「京」の開発・利用の過程で蓄積した技術・経験・人材やアプリケーションを活用した効率的なプロジェクトの推進や成果創出が可能
 - 計画・立案段階において、開発主体が提示する計画内容等を有識者が精査したうえで開発主体を決定しており、効率的な推進を担保
 - 平成 24 年、平成 25 年の「将来の HPCI システムのあり方に関する調査研究」を実施しており、この結果を計画に反映させることで効率的な推進を可能とする
 - 事業開始後も、多様なユーザで構成される HPCI コンソーシアムの意見を踏まえつつ、有識者で構成される HPCI 計画推進委員会の評価を受けながら進めることから、効率的なプロジェクト管理が可能
- ・ 中間評価（平成 30 年度）においては、以下の観点から進捗確認を行い、本事業が研究開発としての効率性を十分に有しているとされた。
 - 開発主体と開発担当企業間の定期的なレビュー、外部有識者によるレビュー、政府における累次の評価などを行い、PDCA サイクルが適切に機能
 - 導入コスト削減のため、調達 of 適切な工夫を実施
 - 運用コスト削減のため、消費電力の制御や最適化を可能とする機能の導入
 - 「京」で得られた体制及び知見の継承

② 中間評価以降の変化

- ・ 中間評価以降、効率性に関する大きな状況変化は以下の点がある。
 - 新型コロナウイルス感染症の世界的な流行により、半導体等の海外の製造工場が閉鎖した結果、水平分業化していた各国の精密機器製造のサプライチェーンが機能不全を起こし、半導体不足などが顕在化
- ・ この変化を踏まえると、世界的な半導体不足という状況下で、どのような取組の工夫を行って開発計画を円滑に進めたか、という観点が追加の評価項目として考えられる。

③ 事後評価

- ・ 目標達成管理に関しては、開発主体と担当企業との定期・不定期の会合における緊密

な連携に加え、外部有識者会議等における適切なレビュー、政府における事前評価、中間評価、基本設計評価、コスト・性能評価、そして各評価段階における指摘を踏まえた再評価を行うなど、PDCA サイクルを適切に実施した。

- ・ 調達に関しては、理研、担当企業、サプライヤー等の関係者間で工程管理に関する密接な情報共有・協議を実施してリスク管理を行い、さらに部品ごとの納品時期などを適切に管理するなどの工夫を行うことで、半導体不足の状況下においても予定通りの調達を実施できたことは評価できる。
- ・ CPU の消費電力性能に関しては、アーキテクチャレベルから回路レベルにわたり省電力の工夫を行い、さらに電源装置に対しても省電力機能を実装し、当初目標である消費電力 30MW-40MW を達成した。また、Co-design によりアプリケーションを最適化することで、それぞれの課題における最適な消費電力に制御できるよう開発を実施した。さらに、パワーノブ機能や省電力モードを活用することで更なる省電力を可能とする機能も導入しており、今後の運用実績をふまえて運用コスト削減が期待できる。
- ・ 「京」で得られた体制・知見の継承に関しては、システム開発やアプリケーションソフトウェア開発における技術継承、神戸の「京」の設置施設」の有効利用のほか、地元自治体からの支援の継続など、人的・物的関係を継承し、効率的に開発を実施した。
- ・ 半導体技術の高度化の頭打ちにより、米国、中国におけるスパコン開発計画に遅延が生じる中、「富岳」については、開発終盤に新型コロナウイルス感染症の感染が拡大する中においてもスケジュール通りに完成した。また、開発に要した国費は総額で約 1,078 億円であり、当初予定額の範囲内（約 1,100 億円）で開発を実現したことから、各種コスト削減に適切に取り組んだ成果であると評価できる。

（２）科学技術基本計画等への貢献状況

本事業は、文部科学省 HPCI 計画推進委員会や総合科学技術会議等の提言・評価を受け、様々な社会的・科学的課題の解決に資する演算性能 1 エクサフロップス（「京」の約 100 倍）レベルのスーパーコンピュータの開発・整備及びそれを活用するためのアプリケーションの開発を行うプロジェクトとして平成 26 年に開始された。第 4 期「科学技術基本計画」（平成 23 年 8 月閣議決定）では、世界最高水準のハイパフォーマンスコンピューティング技術が国家基幹技術として位置づけられ、平成 24 年 9 月には「京」が共用開始となった。その後継プロジェクトである「富岳」については、第 5 期「科学技術基本計画」（平成 28 年 1 月閣議決定）にて提唱された、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した「超スマート社会」である「Society 5.0」の実現に向け、中心的な情報基盤として活躍すべく、令和 3 年 3 月に本格共用開始となった。特に、令和 3 年 9 月には、計算資源の利用枠の 1 つとして「Society 5.0 利用推進枠」を設定し、Society 5.0 の実現に資する研究開発課題を募集開始した。今後、幅広い分野で Society 5.0 の実現に資する成果創出が期待され、科学技術の発展のために果たす役割は大きいと考えられる。

(3) 総合評価

本事業は、科学技術の振興、産業競争力の強化、国民生活の安全・安心の確保等に不可欠な「国家基幹技術」として、世界トップレベルの性能を有し、幅広い分野をカバーする最先端のスーパーコンピュータ（フラッグシップシステム）の開発を進めることを目的とした事業であった。特に、システムとアプリケーションを協調的に開発する Co-design のもとで、幅広い社会的・科学的課題に対応できる汎用エクサスケールシステムを実現すること、分野や組織の枠を超えた共創体制を構築すること、国際協力を戦略的に活用することなどを念頭に置きつつ、具体的な目標として、①アプリケーション性能で「京」の最大100倍の実効性能を有すること、②省電力性能を30~40MWとすることが掲げられた。

システムの製造・構築においては、汎用性を担保するために世界中で広く普及している Arm アーキテクチャを採用して高性能 CPU「A64FX」を開発したことにより、様々な分野のユーザが使いやすい環境を実現した。また、第5期科学技術基本計画において提唱された Society 5.0 の実現に向けて、AI やデータサイエンスにおける「富岳」の活用も想定されたことから、高性能な倍精度浮動小数点演算のみならず、半精度浮動小数点演算にも適する設計とした。開発にあたっては、例えば、当初線幅 10nm の半導体を使用する予定だったところ、技術の進展に伴って 2017 年以降に利用可能になると想定されるようになった線幅 7nm の半導体への切り替えを実施するなど、技術的にチャレンジングな取組を実施したことも評価できる。完成したスーパーコンピュータ「富岳」は、総演算性能 537 ペタフロップス（京の約 47.5 倍）、総メモリバンド 163PB/s（京の約 32 倍）、9つのターゲットアプリケーションで実効性能は最大で京の 131 倍、消費電力は最大で 29MW となり、所期の目標を十分に達成するものとなった。

また、世界的に流行が拡大した新型コロナウイルス感染症に対応するため、共用開始前の令和2年4月より、その時点で運転可能な計算資源を試行的に運用することで、新型コロナウイルス感染症対策関連の課題研究を積極的に進めた。このような緊急時の機動的な対応が可能となったのは、システムとアプリケーションを同時に開発する Co-design を実施した効果であると言える。その結果、ウイルス作用機構の解明や治療薬探索、飛沫シミュレーションといった様々な成果創出に成功した。さらに令和3年3月の本格共用開始以降は、線状降水帯の予測に資する研究やゲリラ豪雨の予測、津波浸水予測等国民の安全・安心に資する成果や基礎科学の進展に資する成果を着実に創出しており評価できる。加えて、試行運用段階ながら、令和2年6月には世界のスパコンランキングにおいて4部門で1位を獲得し、「富岳」の高い性能を証明するとともに、「富岳」がAIの計算やビッグデータ解析の研究基盤として Society 5.0 社会の推進に大いに貢献し得ることを証明した。なお、このスパコンランキングは令和2年11月、令和3年6月、令和3年11月にも続けて4部門で1位を獲得しており、4期連続4部門1位獲得は世界で初めての快挙であり高く評価できる。

さらに、「富岳」の開発を通じて、国内外の大学等教育機関や研究機関が連携し、技術の波及や計算機科学の人材育成、国際連携等が着実に進んだ。また、アプリケーションとの協調開発を通じて、各分野における計算科学の人材育成も進んだ。AI やデータ科学といっ

た新たな分野で活用するアプリケーションにも応用できるような、アプリケーション開発の知見も蓄積された。これらの技術の維持や人材の育成は、変化する国際情勢の中において経済安全保障の観点からも重要である。

先述したとおり、既に「富岳」を活用した成果が出ているところ、今後も引き続き、Co-designにより開発したアプリケーションを中心に活用した「富岳」成果創出加速プログラムにおいて、主要4領域における多くの成果創出が期待されるとともに、一般利用・産業利用・政策的利用などを通じた多様な研究ニーズに応え、我が国が直面する社会的・科学的課題の解決に貢献することが期待される。

以上により、「富岳」が計算科学及び計算機科学全体の発展に大きな役割を果たすことが期待される。

(4) 今後の展望

所期の目標を達成して完成した「富岳」を用いて、今後は「富岳」ならではの新しい科学技術が継続的に生みだされることが望まれる。「京」の運営事後評価（令和3年2月）の際に指摘され、今後の「富岳」の運営においても共通して期待される展望について、改めて以下の通り示す。

○ HPC 利用の裾野を拡大し、幅広い研究分野でのイノベーション創出に貢献する観点からは、より使いやすい制度、初級者等への手厚い支援、将来を担う若手人材の育成等に努めることを期待したい。「富岳」のみならず、HPCI 全体の計算資源を活用して、関係機関が連携の上、戦略的な対応を検討すべきである。

○ 従来の超大規模並列シミュレーションのみならず、AI・データサイエンスとの連携・融合による新たな手法を通じたブレイクスルーを各分野に生み出すとともに、共用法の趣旨である科学技術の振興に貢献することはもちろん、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムの実現など、我が国全体のイノベーションを推進する「Society 5.0」の実現に不可欠な情報基盤として運用されることを期待したい。

○ 「京」の運用時に蓄積されたノウハウを「富岳」で活用し、高い稼働率・ジョブ充填率等により、計算資源が最大限ユーザに配分できるように計算機科学の側面からも新しい挑戦を続けることを期待したい。幅広い利用分野で画期的な成果が創出されるよう、引き続き「富岳」の利用環境向上に努めることを期待するとともに、「富岳」の利用方法についても従来の利用方法のみならず、クラウド的利用についても引き続き検討を進めるべきである。また、消費される電気量の増大に伴う運用費増加が想定されるため、「京」運用時に引き続き、消費電力低減に資する取組が実施されることを期待したい。また、利用拡大を適切に図った結果として生じる自己収入の増加も含め、さらに効率・効果的な運用を期待したい。

○ 産業利用については、「Society 5.0」の実現に向け、様々なユーザが利用できるよう、引き続き丁寧な利用支援にあたりるとともに、得られた成果については積極的に広報されることを期待したい。

○ 「富岳」を含む我が国の情報基盤である HPCI が全体として引き続き緊密に連携され、

「富岳」での成果が我が国全体の計算基盤に対し、様々な形で還元されるとともに、大学情報基盤センター等の知見も「富岳」の運用に活用されることを期待したい。

さらに、令和3年3月の「富岳」本格稼働後の状況変化等を踏まえて、追加で期待される展望を以下の通り示す。

○ 令和3年11月のスーパーコンピュータランキングにおいて、「富岳」は4期連続の4部門1位を獲得したが、今後は世界的にも「富岳」と同規模又はそれを超えるマシンが登場してくることが想定される。しかし、「富岳」の強みは世界最高水準の性能のみならず、汎用性の高さやターゲットアプリケーションの協調開発により、様々なユーザが使いやすく、多様な分野で早期の成果創出が期待できる点にある。性能を求めることではなく成果が創出されることが最も重要であるという点を念頭に置き、今後もユーザーフレンドリーな利用環境を目指した改善や、他のアプリケーションへの展開を容易にする手順等を広く共有するなど、「使いやすさ」を重視したユーザ支援の取組を継続的に進めることが期待される。

○ 国費を投入して完成した「富岳」の成果について、論文や学会等を通じた情報発信を行うのはもちろんのこと、一般国民に対してもわかりやすい情報発信を行うことが重要である。特に共用法上の登録機関と「富岳」設置者である理化学研究所が適切に連携し、「富岳」の成果発信を通じて、「富岳」やHPCI全体のみならず、計算科学・計算機科学の重要性や有用性が広く国民に理解されるよう努めることが期待される。

○ 「富岳」以降に想定される次世代計算基盤の在り方については、現在行われている有識者会議における議論を踏まえて、令和4年度以降に調査研究を実施する予定である。「富岳」の開発に着手した平成26年とは異なり、現在では半導体技術の性能の高度化はますます高止まりの様相を呈しており（ムーアの法則の終焉）、従来の研究開発の延長線で考えるだけでは十分でないと言える時期に差し掛かっている。さらに、社会のデジタル化が進む中、新型コロナウイルス感染症の拡大等、国際情勢の変化により自国で社会情報基盤を開発・製造・運用できるという経済安全保障の観点が顕在化し、関連技術・人材の維持・育成は、ますます重要性が高まっている。急速に進化・変化する技術動向や周辺状況を見据えつつ、利用側のニーズの調査、要素技術の研究開発等の調査研究を行う必要がある。

○ 将来必要となるシステム構成技術は非常に複雑化しており、想定される利用分野はますます多様化していくと考えられるため、調査研究においては十分に幅広い範囲で様々な技術やニーズについて深掘りする必要がある。その際、経済安全保障の視点も含め、日本の強みとしてどのような技術に重点を置いて開発を進めるのかという観点も含めて考える必要がある。さらに、量子コンピュータなどの新たな計算原理に関する研究も近年急速に進展しており、従来型のコンピュータと新計算原理型のコンピュータとの連携についても調査をする必要がある。その際、「富岳」を活用してそのような新たな計算原理等の研究や検証がなされ、次世代計算基盤の議論に活かされることも期待したい。