

2023年4月5日

文部科学省 研究振興局

参事官（情報担当）工藤雄之 様

参事官（情報担当）計算科学技術推進室 各位

ポスト「富岳」世代の計算物質科学の展望に関する提言書

計算物質科学協議会(CMSF)は、我が国の最先端の計算物質科学技術を振興し、世界最高水準の成果創出と、シミュレーション技術、材料情報科学技術の社会実装を早期に実現するために、2020年5月に設立されました。CMSFは計算物質科学技術に関わる全ての方々に開かれており、2023年3月末時点で産学官の機関からの参加者118人(内企業他会員20人)、参画機関数52機関(大学・国研等:38機関、民間企業:14社)の会員で構成されています。運営は、物質科学分野向けのスーパーコンピュータ共同利用・共同研究拠点である、東北大学金属材料研究所、東京大学物性研究所、自然科学研究機構分子科学研究所と、教育拠点である大阪大学エマージングサイエンスデザインR³センターの4機関が担っています。主な活動としては、我が国の学術振興と産業発展において、計算物質科学界が果たす役割と進むべき方向性について議論を重ねて意見集約を行い、国や関係諸機関への提言活動を実施しています。

スーパーコンピュータ「富岳」が稼働し、成果創出加速プログラムの発足、さらには共用利用が開始され、物質科学シミュレーションとAI・データサイエンスの融合により、新たな知識・価値の創造が益々期待されていた2020年度8月に、CMSFより文科省に提言書を提出しました。そこでは、「富岳」をはじめとした高性能・大規模計算資源を活用した膨大な高精度物性データの創出、日本で開発されている最先端の計算物質科学シミュレーション手法やソフトウェア群、また、データ駆動の材料情報科学技術を、学界や産業界が一体となって迅速に開発し、活用することの重要性について述べました。さらに、2021年度3月には、計算物質科学界における世界と日本のデータリポジトリの情勢や「富岳」を用いた大規模計算による材料データの自動創出の重要性に関して述べました。

近年、材料シミュレーションを用いることによる新材料開発やデバイス設計の研究スピード向上が大きな注目を集めています。材料シミュレーションを活用することによる候補材料の高速スクリーニングや、実験では直接観察の難しい微視的構造とデバイス性能の相関関係の解明などがアカデミアのみならず、実際の産業界においても実行される状況となってきています。我が国日本においても、これら材料シミュレーションの更なる活用と普及は、ものづくり力強化にとって極めて重大な課題となっています。材料シミュレーショ

ンコードを開発することは、今や材料開発の基盤構築を行っていることと言っても過言ではない状況となっています。日本においては、国産の材料シミュレーションコードも多く開発され、アカデミアを中心にそれらコードの更なる改良と高速化、高機能化が進められています。特に、国内での材料開発現場において、シミュレーションを導入する際に、コードの微調整や所望物理量の解析への対応には、小回りの効く国産の材料シミュレーションコードを保有していることは大きな意義があります。日本のものづくり力強化のためには、材料シミュレーションコードの多様性とそれらの更なる高機能化のサポートは不可欠となっている状況であります。CMSF では、国内の計算物質科学界の更なる活性化を目指すべく、実際に最前線で計算材料手法開発やコード開発を担っている若手や企業の研究者を中心としたワーキンググループを立ち上げ、材料シミュレーションコード開発者を取り巻く現状の環境把握と、次世代計算機アーキテクチャへの対応状況に関する調査を行い、CMSF 運営委員会での審議を経て、新たな提言書をまとめました。これから日本が世界の計算物質科学界をリードするためにどのような課題があるのかをまとめています。本提言が、今後の政策立案の一助となることを祈念しております。

ワーキンググループにおいては、2回に渡る勉強会（2022年9月16日、2023年2月10日）の開催と、材料シミュレーションコードのユーザーに対してアンケートによる調査を実施いたしました。勉強会においては、国産コード開発者や、CMSF アドバイザーの先生方を中心に33名（第一回目）、23名（第二回目）の方にご参加いただき、意見交換を行いました。これら調査結果から、更なる発展に際していくつかの課題が明らかとなりました。日本の材料シミュレーションコードを開発・維持し、かつ海外製のソフトウェアとの開発競争の激化を勝ち残るためには、現在の計算機ハードウェアの加速度的な発展に対応を取り続けるための、これまで以上のコストを払う必要があること、さらにはコード開発者自身のキャリアパスに対する危機感を解決しなければならないこと、長期的な支援やサポートの必要性を指摘しております。本提言書では、調査結果を紹介し、その後どのような課題が明らかになり、どのような対応をとっていかなければならないかを述べさせていただきます。

1. 世界のスーパーコンピュータの現状と今後の見通し
2. 世界のアーキテクチャの趨勢に対する国産コードの対応と周辺技術の変化への対応の現状（第1回勉強会、一部第2回の内容も含める）
3. 物質科学分野で求められるアーキテクチャ及びフラッグシップマシン及び第2階層を含めたHPCIに求めるもの

1. 世界のスーパーコンピュータの現状と今後の見通し

現在の世界のスーパーコンピュータの性能比較するものとして、Top500、HPCG、Green500、Graph500 が挙げられます。これらに富岳も結果が投稿されています。Top500 はメディアでも取り上げられる最も有名なランキングですが、これは線形代数の数値計算、特に密行列計算のライブラリである HPLinpack(HPL)の処理速度を競うものです。HPCG では、疎行列を対象として処理速度を競うものであり、Graph500 ではネットワーク構造(グラフ)探索性能ベースのベンチマークテストの評価で、ビッグデータ処理の評価をするものです。Green500 は、HPL 性能ベンチマークの値を消費電力で割った値で、計算の電力効率をランキングにしたものです。Top500、HPCG、Green500 は <https://www.top500.org/> のサイトに結果がまとめられており、Graph500 は <https://graph500.org/> に示されています。かつては HPC チャンレンジベンチマーク(HPCC)(<https://hpcchallenge.org/hpcc/>)があり、HPL、DGEMM、STREAM、PTRANS、RandomAccess、FFT、Latency/Bandwidth の7つのベンチマーク¹で評価するものがありましたが、2016年で終了しました。したがって、現在の性能評価で評価されているのは、密行列演算速度、疎行列演算速度、消費電力あたりの密行列演算速度と、グラフ探索によって通信容量と計算力の両面を評価する Traversed Edge per Second(TEPS)による評価となる。²

Top500 ランキングの最新の11月の結果では1位と3位は共にAMDのGPUが搭載され、4位、5位、6位、8位、9位はNVIDIAのGPUが搭載されています。HPCG ランキングの最新では、1位の富岳以外の2位から10位までが全てGPUが搭載されています。Green500ではTop500のランキングでは下位であっても電力効率の良いものがある。

¹ HPLは連立一次方程式の求解、線形代数における逆行列を求めるLINPACK TPPベンチマークで、システムの浮動小数点演算性能の負荷のテスト、DGEMMは、倍精度実数の行列の積を求め、浮動小数点演算性能を測定するもの、STREAMはプロセッサのキャッシュの効率を反映させないように、非常に大きな配列間のロード/ストアの性能を測定するもので、持続可能なメモリの帯域幅を測定するもの、PTRANSはCPU間での1対1同時通信により転置行列を計算し、ネットワークの総データ通信容量を測定するもの、RandomAccessはメモリのランダム更新速度を測定するもの、FFTは高速フーリエ変換の処理能力を測定するもの、Latency/Bandwidthは多数のノード間など複雑性の高い通信パターンでの通信の遅延と帯域を測定するものである。

² 密行列演算速度、疎行列演算速度、消費電力あたりの密行列演算速度がFLOPS(Floating-point Operations Per Second)及び(G)FLOPS/wattsであるのに対し、TEPSは通信が考慮されているが、HPCCで評価されていたものが全て含まれていない。

りますが、Top500 で 1 位の Frontier は 6 位、3 位の LUMI は 7 位と、電力効率と密行列演算速度の両立を実現しているものもあります。Graph500 は富岳が 1 位を取り、4 位に Wisteria、5 位に TOKI-SORA と富岳の商用版の FX1000 で構成されたマシンがランクインしていますが、このランキングはそもそものエンタリー数が 200 台程度と Top500 などと比べて少ないため、評価には注意が必要です。

以上のランキングの状況から、GPU を搭載したスーパーコンピュータが非常に多くなり、しかもランキングの上位を占める状況は今後の方向性としてはゆるぎないと思われます。それは、現在の CPU のみで上記ランキングの指標の軸の数値を伸ばす事が、電力の問題として困難であることが一番の要因であり、電力効率の良いアーキテクチャを搭載することが避けられないと思われます。GPU を一つの解としつついろいろな可能性が研究されていると思われますが、当面は GPU という解が有力と思われます。

これを踏まえて、既に海外製の計算コードにおいては GPU の対応が進んでいるのが現状であります。さらには、量子コンピュータの研究開発も世界中で熱気を増してきております。今後も、世界の潮流として計算加速器の搭載という流れは続いていく可能性が高いと予想されます。その中で、HPCI 利用者の動向を調査すると、GPU 対応の材料計算ソフトウェアのほとんどは外国製のものとなっているという現状があります。勉強会では、国産コードの対応状況、さらには今後の日本のフラッグシップマシンとしてどういう姿を取るべきか、について議論がなされました。実際に講演の中から、計算加速器に対する国産コードの検討に関して出てきた議論をいくつか紹介いたします。

2. 世界のアーキテクチャの趨勢に対する国産コードの対応の現状

ユーザーに対するアンケート調査を行ったところ、改めて明確になったこととして、ユーザーとコード開発者との間で明確な分業体制ができているという事実です。ユーザーとしては、コードの更なる高速化や高機能化をコード開発者に託している状況が明確に理解されました。ユーザー側の意識として、計算コードの GPU 対応や、「富岳」における SIMD 化対応は全てコード開発者に委ねているという状況で、その中で高速化された計算コードを国産、外国産問わずに使用しているという実態でありました。つまり、現在の国産材料シミュレーションに焦点を当てると、外国製ソフトウェアと戦いながら、一部のコード開発者が日本全体の材料計算ユーザーを支えている状況である実態が如実に明らかになりました。このことは言い換えれば、一部のコード開発者への負荷が増す一方で、そこを頑張り抜けばその波及効果は日本全体のユーザーに及ぶということを意味します。他方で、コード開発者には SIMD 化への対応においても相当な負担となり、対応しきれていない現状も明らかとなりました。

次に、勉強会による講師から出たコメントをいくつかご紹介いたします。特に、勉強会においては、計算加速器（GPU を中心として、一部、量子コンピュータ）への国産コードの対応状況が大きな焦点の一つとなりました。

・RSDFT コード（国産コード）においては、NVIDIA による GPU 化支援を受け、一部に GPU 化が実装されているとの状況説明がありました。特に、RSDFT の差分計算部分において、GPU との相性がよく、同じ 1 ノードで比較を行った際には、100 倍の高速化が実現された、との紹介がありました。また、10 年ほど前に GPU 化実装を行った時と比べて、ハードウェアもコンパイラも格段の進化をしており、GPU の最新状況の継続的な動向チェックが不可欠であると、紹介がありました。（東工大/Quemix、岩田先生）

・AkaiKKR（国産コード）では、初期の頃に NVIDIA からの支援を得て GPU 化の実装と検討を行ったが、AkaiKKR では小さいサイズの行列を多く扱うという性質上、GPU マシンの性能を引き出すことは難しいと、事例を含めて紹介いただきました。（アカデメイア/大阪大学、赤井先生）

・ABINIT-MP（国産コード）は全系をフラグメントに分割して計算する FMO 法に基づく各種方法が実装されており、基本的には小さなフラグメント二量体までの計算で大規模系の計算が実行できます。その一部である自作のミニアプリを抽出し、量子化学計算(Hartree-Fock 計算) に対して NVIDIA による支援の下、GPU 化の検証を行ったところ、6—8 倍程度の加速が確認され、量子化学計算の更なる加速に希望が持てる結果であったとの報告をいただきました。また、当該コードの GPU 化の計画についても紹介いただきました。（立教大、望月先生）

・SALMON（国産コード）において、筑波大学の計算機科学専攻の博士学生との共同研究により実行を行った結果、非常によい連携が出来、その学生も専攻で評価されて学位を取得できました。GPU 化については共同研究先の企業に委託していますが、コンパイラのバージョン依存性があり、GPU 版のリリースには至っていません。（筑波大学、矢花先生）

・機械学習ポテンシャルを用いたシミュレーションが急速に進展しつつあるが、ポテンシャル作成のための第一原理計算が必要であり、計算コストが大きな第一原理計算プログラムの GPU 対応が必要であるとの意見でした。（大阪大学、南谷先生）

・NTChem（国産コード）は、まだ GPU 対応は進めていない状況のようですが、密度行列のスパース性を利用した DFT 計算の $O(N)$ 法が開発され、ドラッグデザインにも適用できるプログラム開発が行われています。（理研、中嶋隆人 G、William Dawson 博士）

以上のように、国内のコード開発者の間でも GPU 化検討が始まっている様子を見ることができました。ただ、重要なことに、材料計算コードのアルゴリズムの違いにより、GPU 化による恩恵の程度に違いがあることがわかりました。いずれにしても、最新の GPU ハード・ソフトの両面での日進月歩の進展を常に動向調査を行う必要があることが共有されま

した。また、それと同時に、安易な計算コードの GPU 化に対しては非常に多くの懸念点と課題があることも指摘されました。以下では指摘のあった項目を示します。

- ・ GPU 化検討を行っているコードも結局は全て NVIDIA 等への外部委託であるということ。つまり、自主的に運営できる体制ができていないわけではないこと。
- ・ GPU 化のチューニングを行えば行うほど、コンパイラ依存性が大きくなり、コンパイラのバージョンアップのごとに対応を要求され、維持管理コストが非常に高くなること。(筑波大、矢花先生)
- ・ 計算コード開発者の中にメーカーや、計算機科学研究者、計算工学研究者がいないと、計算コードの GPU 化を継続的に維持することができないこと。
- ・ GPU に対する知識、支援するプロジェクト、スキルを持ったポスドク、教育が行えるスタッフをそろえていく必要があるが、現状そのような環境が何一つ整っていないこと。(阪大、濱田先生)
- ・ 計算コードの GPU 化は、学生の学位としては認められないのが現状であり、計算コード開発を行える学生の育成が難しいこと。(阪大、濱田先生)

以上のように、常に最新の計算機アーキテクチャの情報を収集・検討し、計算コードを維持していくためには、継続的で長期的な国策としての戦略が必要であり、それが整っているとは言い難い現状の日本においては国産コードの GPU 化を大きく阻んでいる理由となっていると考えられました。それには、資金的な側面の問題だけではなく、コード開発者のコード開発業務に対する評価やポジションの確保が十分とは言い難い課題がさらに拍車をかけている状況がわかりました。重要なこととして、これら多くの問題は GPU 化に限った課題ではないことも同時に明らかであると考えます。国産コードの GPU 化が進まない背後には、材料計算コードの開発者が本質的に抱える大きな問題が存在しています。この現状が続く限り、どのような次世代計算機アーキテクチャにおいても、国産コードの対応は世界をリードすることが難しいのではないかと考えられます。

勉強会では、最近の進展のコンテナ技術に関する紹介もありました。コンテナ技術とは、仮想環境上での計算実行環境を構築する技術であり、コードのコンパイル及び実行に必要なライブラリも含めてイメージ化し、それをコンテナ環境が用意された計算機にインストールすることで、開発者の環境と同じ動作をする環境そのままをインストールできる方法です。コンテナ化によりユーザー側は開発者の環境をそのまま利用でき、スーパーコンピュータの運営側は個別ユーザー毎に対応する必要がなくなり、両者の負荷が大きく低減される技術となっております。一方で、この負荷もコード開発者側に追わせられてしまうこと、そして現在、国産の材料計算コードにおいてはほとんどコンテナ化が進んでおらず、またコンテナ利用でのパフォーマンスの変化の調査がないとの報告もありました。一方で、海外ソ

フトに関してはコンテナ化が進んでいる状況です。NVIDIA のサイトには、多くに有名ソフトのコンテナのライブラリが用意されており、それ以外にも独自でソフトウェア毎にコンテナイメージを提供しているものもあります。この点では海外に大きく後れを取っており、コード開発者側への過大な負荷は、更なる対応の遅れを生み、巡り巡ってユーザー側にその影響が及んでくることとなると考えます。

このように、コード開発そのものに加えて開発環境の新しい技術も取り入れていかなければいけない現状であるにもかかわらず、それらが評価されず人材も予算も費やせない現場では、最先端の情報に追随することも十分できない現状があります。京の戦略プログラムでは、理研 R-CCS にチューニングを支援する部門があり、そこで行われた内容は業績として学会で報告されただけでなく、書籍としてもまとめられ、特に「計算科学のための HPC 技術 2 (下司雅章編)」と、その英語版である「The Art of High-Performance Computing for Computational Science Vol.2 (Ed. Geshi)」にまとめられ、広く公開されました。しかし、富岳以降このような部門がなくなり、次期フラッグシップマシンのプロジェクトでも、そのような支援がないように思われます。開発企業が全面的に支援する体制が確保できるならよいかも知れませんが、その場合その技術情報は公開されるのかも重要で、公開されないならば技術として将来に継承できるものにはならないかもしれません。国のプロジェクトとしてこのようなことは適切なのか疑問が生じるかもしれません。

計算物質科学協議会の運営委員会で意見交換を行ったところ、国産コードの GPU 化について下記のような意見がございました。(参考となる一部を抜粋) 運営委員には上記で示した国産コード以外の開発者の方も多くおられ、GPU に対する国産コード開発者の現在の印象が分かりやすく述べられています。

- ・ソフトによっては、現状では超並列計算の方が GPU よりも高速である。NVIDIA が開発した数値計算ライブラリが利用できるので、GPU 化は可能である。ボトルネックが限定されている場合には、GPU 化は比較的対応が可能である。しかし、実際には超並列計算が有利ということはある。

- ・物質科学分野のコードで重要である行列の対角化で比較すると、CPU512 コアの並列計算と 1GPU を比較すると、同程度か並列計算が速い。GPU は 1 ノードに収まるのでそのメリットはある。CPU が十分利用できる場合、GPU 化に強いモチベーションが働かない。GPU は最近高価なので、コストパフォーマンスを検討すべきと考える。計算がローカルでホットスポットがある場合は、GPU で高速化が期待できる。

- ・4 - 5 年前にソフト高度化で、コード 8 件程度を NVIDIA に GPU 化してもらったプロジェクトを実施したが、顕著には高速化されず、プロジェクトは継続しなかった。現在は状況が変わっているのかもしれないが、当時はポジティブな結果は得られなかった。

・GPUとの比較は経験がないが、開発している国産MDプログラムは、ボトルネックが複数あるので、対応するのが容易ではない。プログラムが超並列化した構造になっており、データの取り扱いも含めて元に戻して、GPU化するのは大変な作業である。

・平面波を利用しているが、周辺に様々な機能があり、GPU化は大変である。BLASやLAPACKを多用しているので、OpenBLAS等もあるので試してみたい。GPU化には、メモリの問題が先に来るので、この点を解決する必要がある。自分達がかかなり取り組まないとGPU化は困難である。

・RSDFTがGPUで速くなったが、様々な国産コードの現状を鑑みるとケースバイケースであることが分かった。フラッグシップが電力の制限の中で、対応するのであればGPUが有利である。計算物質科学が本質的な成果を出すためには、GPUに偏りすぎるのは良くないと考える。計算物質科学のサイエンスの将来の発展が重要である。物質科学には多様性があり、複数のアーキテクチャが必要と考える。

また、計算物質科学分野で国際的に利用されている汎用プログラムソフトについても、NVIDIAがGPU化に協力しているため、NVIDIA限定でGPU対応になっているソフトが多い状況です。一例として、VASP, Amber, QUANTUM ESPRESSOはNVIDIA限定でGPUに対応しています。これらのソフトをGPUに対応した汎用ライブラリとして実装する場合には、アーキテクチャを限定することになると考えられます。

3. 物質科学分野で求められるアーキテクチャ及びフラッグシップマシン及び

第2階層を含めたHPCIに求めるもの

また、勉強会においては、今後のフラッグシップマシンのあるべき指針である軸自体にも疑問提起がなされました。1. で述べたように、これまでのHPLでの評価でアーキテクチャを考えてしまうと、極めて使いにくいマシンになってしまうことは明らかです。多くの研究者が普段の計算機として利用しているx86系のものとは大きく異なるため、専用コードとして開発することになります。その負担が極めて大きくなることはこれまでの調査からも明らかです。そもそも、今回勉強会で講演頂いたRS-DFTとAkaiKKRの場合は、チューニングをGPU開発元のNVIDIAが行っています。NVIDIAのサイトでコンテナ化されたものももちろんNVIDIAが行っています。つまり、これらの負担はアーキテクチャの開発元が負っており、ユーザー側はほとんど何も行っていませんし、その詳細も十分開発者に理解されていません。GPUに対応するコードが増えている主たる要因はこのようなNVIDIA自身の活動の結果にあると考えられます。逆にA64FXのアーキテクチャが世界で広まらな

い理由は、富士通がこれをユーザーに追わせてしまっているためとも考えられます。A64FXはCPUであるため、GPU化ほどの開発の負担はないかもしれませんが、それでもCPU性能が向上しないという声は多く聞き、一部の有効な分野以外では性能向上がうまくいっていない現状があります。

日本は今後、スーパーコンピュータの性能評価基準として何を採用するのか、これは極めて重要な問題です。上で述べたベンチマークによる指標以外の可能性も含めて検討する必要があります。なぜなら、開発されたマシンは多くの科学的成果を創出することに貢献すべきであり、それが加速されるものであるべきだからです。ベンチマークで評価される指標は、科学的成果創出を加速することに直結するものではなく、開発コストが得られるメリットに見合うかどうか一概には分かりません。現状では開発コストが見合わないくらい大きい可能性が高いと思われています。また、それを調べるための研究もコストがかかりますが、それに相当するFSも十分とは言えず、この調査の負担すら開発者に大きく背負わされるのが現状です。

フラッグシップマシンは誰にとって使い易いマシンを考えているのか、フラッグシップマシンの作製は果たして製造企業側にとっても果たしてメリットがあるものになっているのか、ここで培われた技術は利益につながるのか、という問題提起もありました。開発前にアメリカなど10ヵ所以上に導入が見込まれる話がありましたが、そのような結果にはなっていない現状は見過ごすことはできません。上でも述べたように、ユーザーは各自の研究が推進できるコードを高速に利用出来ることを求めており、特に末端のコードを使うだけのユーザーは、高速にコードが利用できるサービスを求めているのであって、そこを負担することを望んでいません。開発者であってもそれを最小限にしたいと望んでいます。こういうことを理解した上で、フラッグシップマシンの開発は、製造企業のビジネスも成功することが極めて重要だと考えます。それが関わった人材のキャリアパス形成にもつながり、次の開発にも好影響を与え、分野の振興にもつながります。そのようなところまで計画した、発展的なプロジェクトにすべきです。(阪大、下司先生)

今後、どういった計算機アーキテクチャが出てくるのか？どういったプログラム言語が出現するのか？材料計算がそれらをうまく活用し、更なる計算の高速化を実現していかなければなりません。現在、その負担は計算コード開発者へと課されています。最新の加速度的に発展する計算機アーキテクチャとそれによる計算加速を常時ウォッチし続けなければならない、その負荷は増すばかりです。簡単などころからでは、コード開発者へ最新の情報を提供するサポート体制と、継続的なセミナーやスキルアップを行う場の提供を行う必要があります。さらに、新しい計算機アーキテクチャに対して積極的に有効性の検討を行うプロジェクトの充実があるべきだと考えております。また、これは計算物質科学者だけで解決す

ることは難しく、国内の計算機製造メーカーや、計算機科学者や計算工学研究者との交流の場の提供は不可欠であると考えます。もっと戦略的で継続的なコード開発体制を支援する必要があると考えられます。また何より、これから先の計算コードの管理というのは、維持を行わなければ消えてしまう、維持コストをかけなければ消えてしまうという認識をユーザーまで含めた上で、共有すべきであると考えます。海外では、国による継続的なサポート体制ができており、戦略的にコード開発が進められております。日本においても、海外を手本に体制の構築を検討していかなければならないと提言させていただきます。

【計算物質科学協議会・提言書作成ワーキンググループ】

松下雄一郎（東工大）リーダー
下司雅章（阪大、R³センター）副リーダー
井戸康太（東大）
岡崎圭一（分子研）
寺田弥生（東北大金研）
濱田幾太郎（阪大）
南谷英美（分子研、現在阪大）
鷺津仁志（兵庫県立大学）

【計算物質科学協議会・運営委員/相談役】

（アドバイザー）
片桐孝洋（名大）
茂本勇（ダイキン）
常行真司（東大）
藤堂眞治（東大）
江原正博（分子研）
森川良忠（阪大）
古宇田光（東大）

【協力者】

福島鉄也（東大）
吉見一慶（東大）
大谷優介（東北大）
佐伯昭紀（阪大）

旭良司（名大）
古山通久（信州大）
藤井幹也（奈良先端大）
小口多美夫（阪大）
尾崎泰助（東大）
川勝年洋（東北大）
川島直輝（東大）
久保百司（東北大）
齊藤真司（自然科学研究機構）
尾方成信（阪大）
天能精一郎（神大）
松林伸幸（阪大）
三宅隆（産総研）
赤井久純（アカデメイア）
岡崎進（東大）
田中功（京大）

以上