

Activity Report 2020

Computing Research Center

目次

第 I 部 研究活動

1. Geant4	3
1.1 Geant4 コラボレーションの運営	3
1.2 講習会の開催	3
1.3 MPEXS の開発	3
2. 素粒子理論における高次補正計算	5
2.1 はじめに	5
2.2 複素質量 1 ループ積分	5
2.3 数値計算関連の研究	6
3. 格子ゲージ理論シミュレーション	7
3.1 格子ゲージ理論の大規模シミュレーション	7
3.2 計算科学のためのアルゴリズムとシミュレーション手法の研究	8
4. 中性子用オブジェクト指向データ解析システム	10
4.1 データ解析フレームワーク “Manyo Library” の研究開発	10
4.2 ソフトマターのシミュレータの研究開発と高分子基礎物性	11
5. 統計的手法の物理解析への応用とシミュレーション	12
5.1 はじめに	12
5.2 拘束条件付き確率過程サンプリング法	12
6. メニコアプロセッサ演算システムにおけるシミュレーションのプログラムの研究開発	14
7. データ収集システム	16
7.1 攪乱順列データからのリアルタイム欠損抽出	16

第 I 部
研究活動

1. Geant4

佐々木 節、尼子 勝哉、岡田 勝吾、陳 叶、村上 晃一

Geant4 の維持、開発は、世界中の研究機関共同による Geant4 コラボレーション組織の下で行われている。計算科学センターは、日本グループの活動のホストとしての役割を果たしている。また、ユーザサポートとして、研究会や講習会などを定期的で開催している。研究開発面では、Geant4 の高速化への取り組みや、医学応用など学際分野への展開を行っている。

1.1 Geant4 コラボレーションの運営

Geant4 コラボレーションでは、様々な委員会のもと、コラボレーションの運営が図られている。計算科学センターからは、佐々木、村上が Steering Board の委員、尼子が Oversight Board の委員、佐々木が Geant4-DNA の副スポークスパーソン、岡田が Geant4-DNA の Steering Board の委員となっている。2020 年度は Geant4 v10.7 のリリースと 3 件のマイナーパッチを公開した。

1.2 講習会の開催

ユーザサポート活動として、研究会や講習会を定期的で開催している。2020 年度は九州大学での開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染症の影響のため、対面での講習会の開催は延期した。2020 年度は講習会資料の公開のみとし、Geant4 v10.6 に準拠した講習会資料と演習資料を作成し、公開した。

1.3 MPEXS の開発

2017 年度から 4 年間の研究期間で、科研費基盤研究 (A)「放射線シミュレータの革新」(研究代表者 佐々木)の研究課題が採択され、研究を行っている。GPU を使った放射線シミュレーションの高速化と、その成果の応用的展開を継続して実施している。また、MPEXS の応用として、放射線治療装置のシミュレーションに関して、2 社 (継続 1 件、新規 1 件) の企業と共同研究を実施している。

1.3.1 DNA 損傷の簡易数理モデル構築

マイクロドジメトリ・シミュレーションでは、細胞核内部で起きる荷電粒子の電離反応や、水和電子やラジカルといった活性種の化学反応をシミュレートする。荷電粒子および活性種と DNA 分子との相互作用点を計算し、鎖切断等の DNA 損傷の定量的評価を行う。MPEXS を用いて、DNA の放射線損傷の定量的評価に取り組んでいる (MPEXS-DNA)。

DNA の鎖切断には、荷電粒子が直接 DNA 分子を電離することが起因する直接効果と、OH ラジカルと DNA 分子との化学反応で生じる間接効果が知られている。MPEXS-DNA では、二重螺旋構造を必要としない簡易モデルにより DNA 損傷の定量的評価の数理モデルを構築している。実際の DNA の二重螺旋はヒストンと呼ばれるタンパク質に巻き付いており、そのヒストンは凝縮状態にある (図 1)。これにより DNA は OH ラジカルからの攻撃に守られ、ヒストンの凝縮度に応じて DNA 損傷の程度が変化する。簡易モデルではヒストンの凝縮状態までは考慮しておらず、MPEXS-DNA で算出した DNA の鎖切断の頻度は実験値を数倍程度上回っていることが分かった。そこで、ヒストンの凝縮状態による DNA 損傷の低減効果を調整パラメータの形で導入することにした。DNA 損傷の詳細な定量的評価をモンテカルロ・シミュレーションで行っている PARTRAC グループの結果に、MPEXS-DNA が一致するようにパラメータ値を決定した。図 2 はヒトの細胞を用いた DNA 二重鎖切断の実験値と MPEXS-DNA によるシミュレーション結果との比較である。ヒストンの凝縮状態を考慮することで、より実験値に近い結果を得られた。引き続き、Geant4-DNA グループと協力してこの簡易モデルの検証を進めていく。

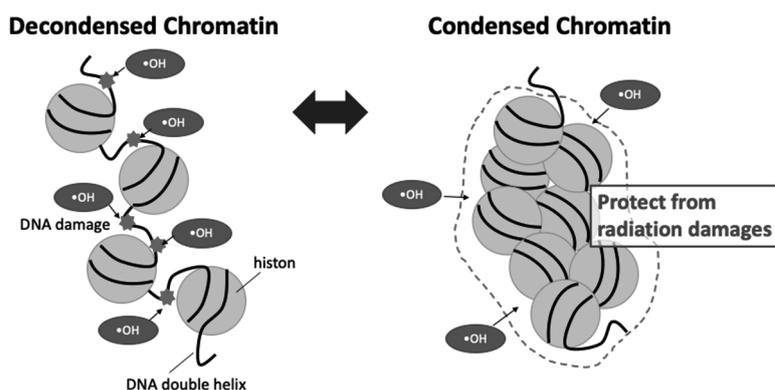


図 1 ヒストンの非凝縮状態 (左) と凝縮状態 (右)。凝縮度が高いほど OH ラジカルからの攻撃から DNA 分子は守られ、DNA 損傷は低減する。

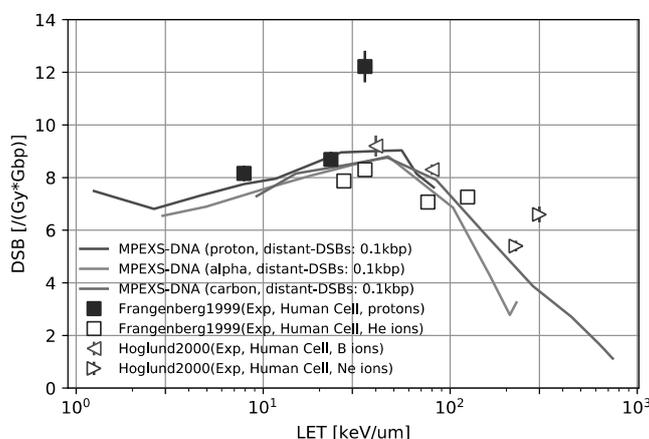


図 2 二重鎖切断の生成と LET (線エネルギー付与) との相関 (MPEXS-DNA) と実験値との比較

2. 素粒子理論における高次補正計算

金子 敏明、石川 正

2.1 はじめに

素粒子物理学では、標準模型やそれを超える模型などが提唱され、物質の元となる素粒子の性質や時空の理解を進めようとしている。高エネルギー加速器による素粒子実験のデータを理解するため、これらの素粒子の模型を使って素粒子物理学の場の理論に基づき Lattice QCD のような非摂動的な扱いを行う方法と、摂動的に行う方法等があり、コンピュータを用いた理論的研究が進められている。我々は与えられた物理模型（ラグランジアン）から、摂動論的に素粒子衝突反応の断面積を計算機で自動的に数値計算を行うためのシステム開発を行ってきた。近年の加速器実験（LHC、ILC）においては、高エネルギー衝突で起こる様々な現象を高精度で測定し、標準模型の厳密な検証や標準模型を超えた物理を探索することが期待されている。実験データを解析して素粒子の性質などを精密に分析するためには、多様な素粒子衝突反応の高次補正を含む精密な大規模な理論計算が不可欠で、自動計算システムの構築が進められている。自動計算システムでは、場の理論の記号処理的な取扱いから数値計算法まで様々な要素技術が必要で、これらは計算科学にも密接に関係するため計算科学センターにおいて研究開発を行っている。

摂動論で取り扱うのは、ファインマングラフの計算であり、高次の場合には、ファインマンループ積分が出現する。この積分に関する研究としては、ループ積分をマスター方程式にリダクションする部分積分方法、特異性を抽出するセクター分解法、Mellin-Barnes 変換する方法、マスター方程式を微分方程式にする方法、最も一般的な形である超幾何関数で表現する方法などがあり、世界中の多くの研究者が研究を進めている。

ここでは、「精密時代」に突入した加速器実験に対応できるよう、計算科学センターで進めている高次の輻射補正計算の数理的方法の拡張と数値計算法等について述べる。

2.2 複素質量 1 ループ積分

不安定粒子が含まれるループ積分を計算する場合には、それらの粒子の質量を複素数とし、有限の虚部を持つものとして扱う必要がある。こうした計算は、多くの場合数値積分により実行することができるが、解析的な計算を行いそれに基づきライブラリとして用意しておくことが計算効率と一般性の点で望ましい。また、解析的な計算により特異点付近での漸近的振る舞いなどの情報を得ることができる。

実数の質量をもつ粒子の場合にはループ積分の被積分関数は、通常導入される $(-i\epsilon)$ の項のために積分領域内で発散することはないが、質量を任意の複素数とした場合には被

積分関数は積分領域内に特異点を持ち、多重積分の途中で多価関数となる。特異点付近の寄与を分離すると同時に、複素平面にカットを入れ、多価関数を一価関数にした上で積分する必要がある。こうした特異点と不連続性を持つカットは、運動量や質量の実部・虚部の値の大小により変化する幾何学的な構造により、出現場所やその寄与が変化する。これらに対応した解析的積分結果を求め、数値計算ライブラリとして整備することが求められる。

今年度は、1 ループ vertex 関数に対して解析的積分結果を求めた。その結果は、数値積分が収束する場合に一致をみている。しかしながら解析的結果には多くの階段関数が現れるため、数値計算プログラムとしては、階段関数の境界の計算精度が問題になり、その扱いの精密化が必要である。また、数値計算ライブラリとして実用化するためには、少なくとも 1 ループ box 関数に対し同様のことを行う必要がある。

2.3 数値計算関連の研究

摂動論の高次補正の計算に現れるファインマン積分は多次元積分であり、被積分関数は多変数の有理関数となっている。スカラー積分の場合は

$$\mathcal{I} = \frac{\Gamma(N - \frac{nL}{2})}{(4\pi)^{nL/2}} (-1)^N \int_0^1 \prod_{r=1}^N dx_r \delta(1 - \sum x_r) \frac{C^{N-n(L+1)/2}}{(D - i\epsilon C)^{N-nL/2}}$$

で与えられる。ここで、 L はループの数、 N はループの内線の数、 n は時空の次元数で、 $n = 4$ あるいは $n = 4 - 2\epsilon$ をとする。 C および D はファインマン変数 x_r の多項式で、 C はファインマン変数のみから成り、エネルギーや運動量などの量は D のみに含まれる。この積分は、物理的な条件により被積分関数の分母が 0 となることによる発散、赤外発散および紫外発散などをもつ場合があり、これを取り扱う処方が必要となる。我々は、ループ積分を解析的な方法を用いず全てを数値計算で行う方法 (DCM : Direct Computation Method、直接計算法とよぶ) の研究開発を進めている。

計算機環境としては、GPU や PEZY のアクセラレータ、本機構のベクトル計算機および独自に開発した多倍長専用システムを用い、積分方法に関しては、Quadpack, QMC, Double Exponential Transformation などを使いそれぞれのシステムでの高速化を図っている。2020 年には国際会議 ICCSA2020 および日本物理学会で 5loop までの計算などの報告、応用数理学会で数値計算方法等についての報告を行った。また 2loop 補正計算の物理応用に関しても研究を進めている。これらの研究は、湯浅富久子 (KEK 名誉教授)、E. de Doncker (ウェスタンミシガン大学)、加藤潔 (工学院大学)、台坂博 (一橋大学)、中里直人 (会津大学)、安井良彰 (東京経営短期大学) と石川が共同で進めている。

3. 格子ゲージ理論シミュレーション

松古 栄夫

3.1 格子ゲージ理論の大規模シミュレーション

素粒子であるクォークの間に働き、原子核を形作る核力の源である強い相互作用は、量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) によって記述される。QCD はその結合の強さが距離とともに増大するため、結合定数によって展開する摂動論は低エネルギー領域で破綻し、解析的な計算が困難となる。このため、ハドロンの性質や粒子衝突におけるハドロン散乱振幅などを定量的に調べるには、なんらかの非摂動論的手法が必要である。格子 QCD は場の理論としての QCD を 4 次元立方格子上で定式化したもので、経路積分を数値的に実行することにより、第一原理である QCD に基づいた計算を可能にする。

近年の理論的進展、計算機の発達、アルゴリズムの改良などによって、格子 QCD シミュレーションの精度や信頼性は大きく向上し、素粒子・原子核の物理現象を理解する上で重要な役割を果たしている。既に物理的クォーク質量での計算が実現し、フレーバー物理に現れるハドロン行列要素の精密計算が進んでいる。また格子ゲージ理論は、標準理論を構成する QCD のみならず、他の場の理論の解析にも適用できる。標準理論を超えた物理の候補として注目されている、超対称性理論やテクニカラー理論に対しても応用が進められている。

2020 年度には、以下のような研究について進展があった。

(1) 複素ランジュバン法による有限密度系の研究

格子 QCD の有限密度系は、フェルミオン作用が複素数となることによる複素位相問題のため、モンテカルロ法の適用が困難であった。近年、複素ランジュバン法というアルゴリズムが開発され、有限密度系を扱える可能性が出てきた。この複素ランジュバン法を適用可能な条件を理解し、カラー超伝導相などの有限密度系に応用する研究を、KEK 素粒子原子核研究所の西村淳氏らとの共同研究で進めている (公表論文 1 編)。

(2) 格子 QCD コード Bridge++ の開発

C++ 言語で記述されたオブジェクト指向デザインによる格子 QCD コード Bridge++ を開発している。2012 年 7 月に最初の公開版を ver.1.0 としてリリースしたが、その後も継続的にデザインの改良、機能拡張、高速化、ドキュメントの整備等を進めている。2020 年度末現在の最新版は ver.1.6.0 である。2020 年度には、理化学研究所のスーパーコンピュータ富岳 (A64FX) 向けの実装と高速化を進めた。A64FX アーキテクチャは SIMD 機構に適した実装と、理研で開発された QWS (QCD Wide SIMD) ライブラリを利用するインター

フェースの開発を行った。既に開発済みの Intel AVX-512 SIMD 向け実装、A64FX 向け実装、GPU クラスタ向け実装に対して、マルチグリッド法による線形方程式解法のアルゴリズムを実装した。

Bridge++ サイト : <http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>

3.2 計算科学のためのアルゴリズムとシミュレーション手法の研究

これまで HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」、ポスト京重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」において、計算科学の推進を図る活動として、数値計算アルゴリズムの分野横断的応用・開発、種々の計算機アーキテクチャの性能を十分に引き出すための手法の開発、計算科学に必要なデータグリッド (JLDG: Japan Lattice Data Grid) や格子 QCD 共通コードの開発などを行ってきた。これらは素粒子・原子核・宇宙のそれぞれの分野で培った技術を分野横断的に応用し、計算機科学や応用数学の専門家と連携・協同して計算手法を発展させてゆくことを目的としている。2020 年度には以下のような研究を進めた。

1. 超新星爆発の大規模シミュレーション

これまで並列化や線形アルゴリズムの改良で共同研究を行った、超新星爆発シミュレーションのプロジェクトに引き続き参加し、研究を行っている。本研究は沼津高専の住吉光介氏、早稲田大学の山田章一氏、岩上わかかな氏、大川博督氏、プリンストン大の長倉洋樹氏、東大宇宙線研の原田了氏らとの共同研究である。2次元、3次元空間での流体力学方程式と結合した Boltzmann 方程式によるニュートリノ輻射輸送方程式を用いて、JCAHPC の Oakforest-PACS 等を利用した大規模計算を進めている。(論文 3 編)。

2. 超新星爆発シミュレーションコードの GPU による高速化

球対称近似でのシミュレーションは、爆発には至らないことが知られているが、観測データとの比較や 2,3 次元での計算の基礎として重要であり、高精度化が必要とされている。このようなシミュレーションコードを GPU 等のアクセラレータを利用して高速化する研究を、沼津高専の住吉光介氏との共同研究として行っている。2020 年度には GPU に加えて、Pezy-SC プロセッサを利用するコードの開発を進め、国際会議論文としてまとめた。

3. ポスト京フラッグシップ 2020 プロジェクト・コデザイン

コデザインポスト京重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」の活動の一環として、ポスト京フラッグシップ 2020 プロジェクト・コデザイン分野 9 サブグループに参加し、格子 QCD のコード開発に関する活動を行った。

4. 高性能計算物理勉強会

素粒子・原子核・宇宙物理の分野において不可欠な研究手法である計算科学的アプローチに関して、分野を越えた研究者間の情報交換や協力体制構築を進めるため、高性能計算物理勉強会(HPC-Phys)を2018年に開始した。この活動は計算基礎科学連携拠点(JICFuS)が主催する活動として行っており、松古はアドバイザーとして参加している。2020年度は計4回の勉強会をオンライン開催した。

HPC-Phys 勉強会サイト：<http://hpc-phys.kek.jp/>

5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)

JLDG は計算素粒子物理および関連する分野のためのデータグリッドであり、グリッドファイルシステム Gfarm を利用して、国立情報学研究所が運営する SINET 上に構築されている。JLDG の運用チームに参加し、KEK サイトの運用と、JLDG の利便性向上のための開発研究を行っている（スーパーコンピュータ利用の章も参照）。

JLDG サイト：<https://www.jldg.org/>

4. 中性子用オブジェクト指向データ解析システム

鈴木 次郎、真鍋 篤

4.1 データ解析フレームワーク “Manyo Library” の研究開発

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で建設し、運用をしている施設である。J-PARC の物質生命科学研究施設 (Materials and Life Science Facility: MLF) は、陽子ビームから得られるパルス中性子／中間子ビームを用いて物質科学と生命科学実験を行う実験研究施設であり、世界最高強度の 1MW での運転を目指している。MLF には、23 の中性子実験用のビームラインが整備され様々な研究分野 (結晶、磁性体、ソフトマター、中性子物理など) に対応する分光器が設置され運用されてきている。MLF における実験装置の計算機やストレージ、ネットワーク環境は MLF 計算環境検討グループによって整備され、運用がなされている。KEK 計算科学センターは CROSS 東海のメンバーらとともに MLF 建設期から協力してきている。オブジェクト指向データ解析システム (Manyo-Lib) は MLF 計算環境のうち、各ビームラインにおいてデータ解析システムの中核となるフレームワークである。また、次に紹介する高分子用シミュレータは、ソフトマター分野の中性子実験の結果をシミュレートし、解釈を与えるものとして研究開発を行っているものである。

Manyo-Lib は、中性子実験で共通に使用する機能 (データコンテナ、ネットワーク分散処理環境、並列化機能、データ解析演算子) を提供し、各ビームラインにおいて個々の分光器の仕様や実験対象物、研究者の目的に合致したデータ解析ソフトウェアの構築の基盤として利用がされてきている。このような基盤ソフトの整備は、物質科学分野の研究施設では初めての試みであり、メンテナンスを含めて運用されている。Manyo Lib がサポートするデータフォーマットは HDF (Hierarchical Data Format) を基盤とした NeXus (A common data format for neutron, x-ray and muon science, <http://www.nexusformat.org/>) で、物質科学の散乱実験のデータフォーマットとして国際的に策定が行われているものである。Manyo Lib の開発者は NeXus International Advisory Committee (NIAC) の委員として MLF の要望を提案するとともに、国際規格の策定に貢献をしている。2020 年度は隔年で行われる full-meeting がドイツのハンブルク (NOBUGS のサテライトミーティング) で行われる予定だったが、コロナウイルスの影響でオンラインに切り替えて開催された。

Manyo Lib は現在 MLF にある 23 の分光器のうち、16 のビームラインでインストールされ利用され実験データ解析の基盤環境となっている。一方で Manyo-Lib は 2003 年より研究開発がされているが、2020 年度は大幅な拡張はなくメンテナンスが MLF の中性子の分光器グループによって行われた。

4.2 ソフトマターのシミュレータの研究開発と高分子基礎物性

ソフトマターは一般に、高分子やタンパク質などの分子それ自体が柔らかいもので、小さな外場によって分子の変形がおこる。「ソフトマターの科学」の歴史は100年ほどで、比較的新しい研究分野であり基礎物性の研究は発展途上であるが、一方で有機ELやコンデンサーなどを始めとして様々な電子デバイスなどに最先端の技術として当たり前のように応用されている。

ここで研究開発をしているモンテカルロシミュレータは、高分子材料の中性子散乱実験データの解析を目的とするもので、J-PARC/MLFの解析環境に接続できるシミュレータの1つになる。中性子散乱実験は他の粒子線ビーム（光，X線，電子ビーム）と比較して波長が長く（エネルギーが低い）、分子の大きなソフトマターの構造や応答を調べるには適した方法である。このシミュレータを利用して、5つの異なる種類の高分子を連結したペンタブロック共重合体が湿すマイクロ相分離構造の考察を行った[1-2]。シミュレータからはアルキメデスタイリングの一種である3.3.4.3.4タイリングが非常に広い組成領域で安定して得られた。この構造は二次元準結晶の近縁構造であることが知られており、ソフトマターの準結晶構造が安定的に得られる可能性を示した。

- [1] ABCBD型ペンタブロック共重合体による二次元タイリング構造，2020年度高分子基礎物性研究会・高分子計算機科学研究会 合同討論会（オンライン）
- [2] “A New Cylindrical Structure from ABCBD Pentablock Quadpolymer Melt Studied by Monte Carlo Simulation” Jiro Suzuki, Atsushi Takano and Yushu Matsushita, *Macromolecular Theory and Simulations* 29, 2000029 (2020). <https://doi.org/10.1002/mats.202000029>

5. 統計的手法の物理解析への応用とシミュレーション

柴田 章博

5.1 はじめに

統計的手法、特にベイズ統計学に基づく方法論は、データサイエンスの基礎をなすものであり。データマイニング、機械学習 (AI) においても重要な役割を果たす。高エネルギー実験などの解析においてもデータマイニングや数値統計で開発された様々な技術が広く活用されてきた。数値統計の理論・方法論は、情報処理・データサイエンスの基礎をなすものであり、本プロジェクトは、主としてベイズ統計に基づく数値統計の技術・手法の研究をおこなう。また、複雑なデータ構造もった大規模データの解析が必要とされており、データベース技術や数値的な方法によるデータ解析が重要であり、研究遂行のためシミュレーション技術や可視化技術の開発を合わせて行う。

2020 年度は、昨年度に引き続き自己駆動系のシステムであるインターネットの通信ログの解析、及び、渋滞形成実験データの解析についての研究を行った。さらに、確率過程サンプル法の多重の拘束条件をもつ高次元システムへの応用と数値シミュレーションアルゴリズムの開発を行った。

5.2 拘束条件付き確率過程サンプル法

モンテカルロ法は、乱数を用いた多次元空間の数値積分やシミュレーションを行う技術である。電子陽電子の衝突実験における素粒子の反応課程における微分断面積の計算や反応イベントの生成、統計物理やそれらを基礎とする量子色力学 (QCD) の第一原理計算など様々な数値解析やシミュレーションに用いられている。これらシミュレーションでは、問題のパラメータに従った確率で事象を発生させて実験や観測を模擬することが求められる、それぞれの問題に応じて様々なアルゴリズムが開発されている。

ある種の問題ではモデルパラメータや事象変数の定義域の制限に加えて、変数同士の関係式が満たす必要がある。メトロポリス法は汎用性のあるアルゴリズムではあるが高次元のモデルに対しては効率が悪い、より高速なサンプリング法が求められる。本研究では、拘束条件をもつ確率過程サンプル法にもとづきアルゴリズムの開発を行う。図 1 は確率過程サンプル法を 3 次元 CG に応用したものである。 $F(\mathbf{x})=0$ の陰関数曲面で定義された物体の表面上の点を陰関数面上のランダムウォークによってサンプリングを行った。左パネルは異なるトポロジー (穴の数) 物体の表面を一樣にサンプリングできていることを示している。右パネルは 緑と青の 2 色で塗り分けられた物体の衝突点 (赤) の検出とその

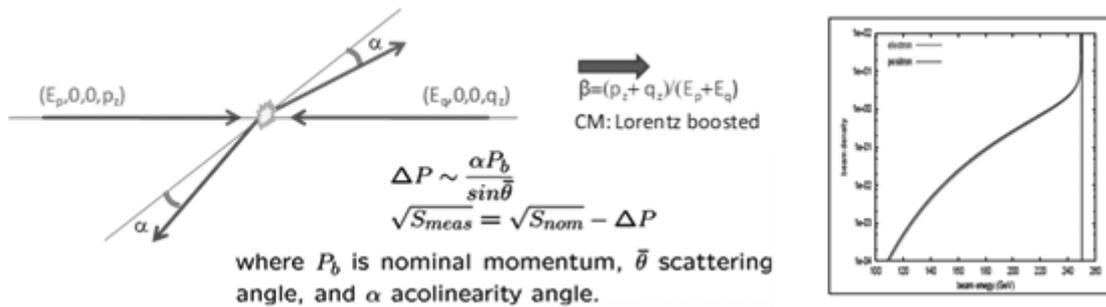


図 1 陰関数曲面上のランダムウォークによる形状理解と可視化

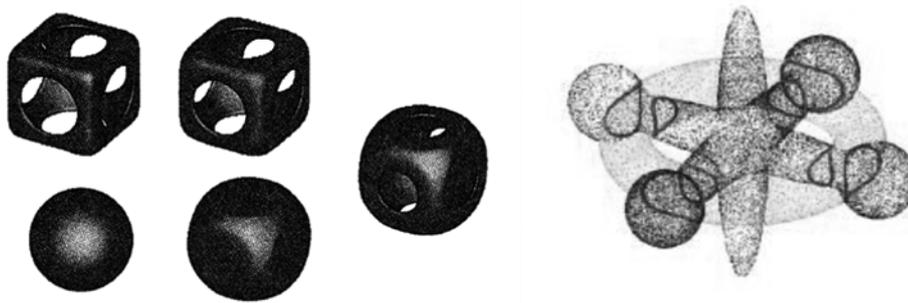


図 2 電子陽電子線形加速器における Babar 事象（弾性散乱）

可視化を行ったものである。衝突点は、2つの拘束条件を同時に満たす場合であり3次元CGではループとして毛出される。また、確率過程サンプル法では、ポテンシャルを導入することで、サンプリングの確率密度を制御することができる。

本年度は、高エネルギー衝突実験における素粒子の反応過程のシミュレーション、及び、ゲージ不変な質量項をもつヤンミルズ理論の格子シミュレーションの2つの系についてアルゴリズム検討とコード開発を行った。

図2は電子陽電子線形加速器における Babar 事象の例を示している。高輝度電子・陽電子線形加速器では、エネルギーをそろえて加速しても、ビーム制動放射によってルミノシティは広がったスペクトラムを持つ。そのために重心系がブーストされ電子・陽電子の散乱は角度 α だけ非対称散乱となる。従来の方法では重心系エネルギー毎に全断面積と散乱の角度分布の計算が必要で膨大な計算となる。本件研究では、エネルギー・運動量の保存則を拘束条件とし、微分断面積を導出するポテンシャル力をもつ確率過程サンプル法を適用することで、事象生成の高速化を狙う。

6. メニーコアプロセッサ演算システムにおけるシミュレーションプログラムの研究開発

石川 正、松古 栄夫

超並列でかつ超低消費電力のメニーコアプロセッサによる素粒子関連のプログラムの研究開発を行い、高性能なアルゴリズムとチューニング技術確立し、同時にシステムの消費電力を評価することを目的として、ExaScaler 社との共同研究を 2014 年 8 月に開始した。このため PEZY Computing 社のメニーコアプロセッサ PEZY-SC を搭載した「Suiren Blue (青睡蓮)」、第 2 世代の PEZY-SC2 を搭載した「Suiren2 (睡蓮 2)」の運用を行っている。これらのシステムは液浸冷却によって低消費電力、高密度実装を実現している。

Suiren2 は 2017 年 11 月に HPL プログラム 788.2 TFLOPS の実行性能で消費電力 47.0 kW を記録し、Green500 リストで 2 位にランキングされた。

Suiren2 主な諸元

最大理論性能	1,082 TFLOPS
プロセッサあたりの理論性能	2.8 TFLOPS
ノード数	48
ノードあたりのプロセッサ数	8
総メモリ容量 (PEZY-SC2)	24 TB
総メモリ容量 (ノード内)	1.5 TB



Suiren2 システム

PEZY-SC プロセッサは通常の CPU (ホスト) に対し、アクセラレータ (演算加速デバイス) として働く。従って、ホスト上で実行するコードからボトルネックとなる部分を抜き出し、デバイス上のメニーコアで多重並列実行する、ヘテロジニアスな計算を行うことで高速化される。そのためには、ホストとデバイス間でデータの転送が必要であり、これを最小化するアルゴリズムの採用が不可欠である。またデバイス上では多数のコア (PEZY-SC2 の場合 1984 個) 上でコアあたり 8 スレッドによる並列実行となり、高速化の

ためにはループ分割、メモリアクセス、スレッド交換、スレッド同期などを最適化する必要がある。PEZY-SC プロセッサに対しては OpenCL に準拠した PZCL というライブラリを利用して、このようなオフロードのためのコードの開発を行う。

Suiren2, Suren Blue システムを使用して、以下のような研究開発を行っている。

(1) ファインマンループ積分に関する数値計算の研究

既存の C/C++ 言語から指示文で PEZY-SC2(PEZY-SC) で演算する部分のコードを自動的に生成する開発環境を整え、いくつかの 3 ループのセルフエネルギーのファインマンループ積分 (6 次元、7 次元積分) を実施して研究を進めた。

(2) 格子 QCD のシミュレーション

格子 QCD 計算において最も時間を要するフェルミオン行列に対する線形方程式解法の PEZY-SC プロセッサへのオフロードを既に行っている。フェルミオン演算子は疎行列であり、デバイスのメモリ帯域幅に律速されるが、そこから予測される性能値を実現するにはメモリ上のレイアウトや演算の配置について最適化することが不可欠である。引き続き PEZY-SC 及び PESY-SC2 プロセッサに対して高い並列効率を得るための評価研究を行った。

(3) 重力崩壊型超新星爆発シミュレーション

重力崩壊型超新星爆発の数値計算では、ニュートリノに対する Boltzmann 方程式と高密度物質の流体方程式を結合して解く必要があるが、ニュートリノ輸送を記述する前者が律速となる。これまでに球対称系でのシミュレーションコードに対し、(1) 陰解法における発展方程式の係数行列に対する線形方程式の反復解法、(2) ブロック密行列の逆行列の解法、(3) Boltzmann 方程式の衝突項の計算、について PEZY-SC プロセッサへオフロードするコードを開発し、最適化と性能評価を行った。本年度は更に、多次元 Boltzmann 方程式への拡張として上記 (1) に対応するコードのオフロードを同様の手法で行い性能を評価した。これらの結果について、プロシーディング論文として公表した。

なお前年度までの研究成果に関しては、文部科学省次世代領域研究開発「ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学」論文集 (2020 年 3 月) で報告されている。

7. データ収集システム

鈴木 聡

Belle2, T2K のデータ収集システムの開発・運用に計算科学センターから鈴木が参加している。

7.1 攪乱順列データからのリアルタイム欠損抽出

Belle2 実験ではピクセル検出器 (PXD) からのデータ量が多いため、PXD 以外の全ての検出器からのデータを結合してオンラインファーム (High Level Trigger, HLT) で処理し、PXD の特定の区域のデータだけを抽出してから結合するような 2 段階のデータ結合を行っている。HLT は PXD に対しては抽出に必要な情報 (Region of Interest, ROI) のみを送信し、データ記録側にはデータの本体を送信するという 2 系統の出力を行う。HLT は 1000 個を超える CPU コアで並列処理を行っているため、データは微視的にはデータの発生時間順にならず、攪乱順列 (自然数の順列において、 i 番目の要素が i とは限らない順列) になる。

このため PXD 検出器の読み出しシステムは、ハードウェア的に発生したデータを一旦メモリに蓄積し、ROI の到着を待ち、ROI の内容に基づいて該当領域のデータを下流に送信する動作になっている。前述のように HLT の処理結果はデータの発生時間順ではないので、事象発生順に採番されるトリガー番号をキーとしてメモリを走査し該当するデータを出力する。この仕組みは FPGA ハードウェアで実装されており、非常に高速に動作する。しかしメモリ量には制限があり、HLT が処理を一部送信し損ねるなどの理由で ROI に欠損があった場合、出力出来なかったデータが徐々にメモリ量を圧迫していき、最終的にはデータ収集を一旦停止してメモリを空にしなくてはならない。メモリ量と HLT の処理時間の按配から、HLT の処理時間は 4 秒を超えないことが求められている。

しかしビーム運転時に PXD 側でメモリ払底が観測されており、そもそも欠損が発生しているのか、しているならばどのような条件で、どこで発生しているかを特定する必要があった。前述のように HLT を通過したデータは時間順になっていないため、欠損は処理中に失われたのか、まだ処理中なのか判断することは外部からはほとんどできない。下流側で常時「今後到着するべきことが確実だが、いまだ到着していない (すなわち HLT で処理中であるはずの) トリガー番号」を 1 事象毎に更新し、この数の変動を見張ることにした。もしこの番号の最小値がいつまでも増えないことがあれば明らかに欠損である。もしくは最小値は増えていくものの処理中の事象数が単調増加であれば欠損ではないが、これは HLT の処理能力の限界と考えることが出来る。

Belle2 実験では平均事象発生頻度が 30kHz であり、最大 4 秒の遅延を仮定することから、

120,000 要素の攪乱順列から十分に短い時間で欠損を抽出する必要がある。また、これが動作する機器は大量のディスク I/O が発生してディスクキャッシュでメモリが圧迫されているため、メモリ使用量も小さい仕組みが必要である。

そこでデータ本体ではなくトリガ番号を含む 64 ビットの整数値を C++ の標準テンプレートライブラリ (STL) の「set」で格納することで欠損抽出を実装した。STL の set は集合を取り扱うためのテンプレートであるが、ほとんど全ての場合は同じく STL の別のテンプレート「sorted_vector」の方が効率的である。ただし、非常に限定的な場合に限り setの方が高速 (sorted_vector は $O(N)$ であるが set は $O(\log N)$ である) かつ省メモリである [1]。本件に関してはこの条件に合致させる実装が可能であった。2020 年初より実装をはじめ、2020 年度は本稼働システムに組み込んで動作確認を行った。当初は HLT からデータ本体の出力に対してのみ欠損検出を適用していたが、同じアルゴリズムが PXD への ROI 配送経路のモニタにも採用され、二重チェックが可能になった。最終的に特定の条件を満たした事象に関して HLT の処理結果が PXD に送られていないことが確認され、問題が解決された。

[1] Why you shouldn't use set (and what you should use instead), Matt Austern
<http://lafstern.org/matt/col1.pdf>

第 III 部
資 料

15. 著作

15.1 論文

15.1.1 査読有り

- H. N. Tran, J. R. Mendez, W. G. Shin, Y. Perrot, B. Faddegon, S. Okada, M. Karamitros, M. Davidkova, V. Stepan, S. Incerti, C. Villagrasa, “Assessment of DNA damage with an adapted independent reaction time approach implemented in Geant4 - DNA for the simulation of diffusioncontrolled reactions between radio - induced reactive species and a chromatin fiber” , Medical Physics 48 (2021) 890-901, DOI:10.1002/mp.14612
- K. Baba, T. Kusumoto, S. Okada, R. Ogawara, S. Kodaira, Q. Raffy, R. Barillon, N. Ludwig, C. Galindo, P. Peaupardin, M. Ishikawa, “Quantitative estimation of track segment yields of water radiolysis species under heavy ions around Bragg peak energies using Geant4-DNA” , Scientific Reports 11 Article number: 1524 (2021), DOI: 10.1038/s41598-021-81215-6
- J. Ramos-Mendez, W.-G. Shin, J. Domínguez-Kondo, S. Incerti, H. Tran, C. Villagrasa, Y. Perrot, V. Stepan, M. Karamitros, S. Okada, E. Moreno-Barbosa, B. Faddegon, “Independent Reaction Times method in Geant4-DNA: implementation and performance” , Medical Physics 47 (2020) 5919-5930, DOI: 10.1002/mp.14490
- Tamon Kusumoto, Rémi Barillon, Shogo Okada, Tomoya Yamauchi, Satoshi Kodaira “Improved criterion of the mechanism for forming latent tracks in poly(allyl diglycol carbonate) based on the number of interactions induced by secondary electrons” , Radiation Measurements (2020), 106445-106445, DOI: 10.1016/j.radmeas.2020.106445
- Tamon Kusumoto, Shogo Okada, Hisaya Kurashige, Kazuo Kobayashi, Michel Fromm, Quentin Raffy, Nicolas Ludwig, Masato Kanasaki, Keiji Oda, Yoshihide Honda, Sachiko Tojo, Jean Emmanuel Groetz, Ryo Ogawara, Satoshi Kodaira, Rémi Barillon, Tomoya Yamauchi, “Evidence for a critical dose above which damage to carbonate ester bonds in PADC appear after gamma ray and ultra soft X-ray exposures” , Radiation Physics and Chemistry (2020), DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.108628
- T. Ueda, T. Kaneko, B. Ruijl and J.A.M. Vermaseren, "Further developments of Form", J. Physics: Conf. Ser., 1525 (2020) 012013, doi:10.1088/1742-6596/1525/1/012013
- Seikou Kato, Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo,

- “Double-winding Wilson loops in SU(N)SU(N)SU(N) lattice Yang-Mills gauge theory” , *Phys.Rev.D* 102 (2020) 9, 094521,
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.094521>, 2008.03684 [hep-lat]
- A. Harada, H. Nagakura, W. Iwakami, H. Okawa, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, H. Matsufuru, S. Yamada,
“ The Boltzmann-radiation-hydrodynamics Simulations of Core-collapse Supernovae with Different Equations of State: The Role of Nuclear Composition and the Behavior of Neutrinos” ,
Astrophys.J. 902 (2020) 2, 150, DOI:10.3847/1538-4357/abb5a9
 - W. Iwakami, H. Okawa, H. Nagakura, A. Harada, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, H. Matsufuru, S. Yamada,
“ Simulations of the Early Postbounce Phase of Core-collapse Supernovae in Three-dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport” ,
Astrophys.J. 903 (2020) 2, 82, DOI:10.3847/1538-4357/abb8cf
 - Y. Ito, H. Matsufuru, Y. Namekawa, J. Nishimura, S. Shimasaki, A. Tsuchiya, S. Tsutsui,
“Complex Langevin calculations in QCD at finite density” , *JHEP* 10 (2020) 144, DOI:10.1007/JHEP10(2020)144.
 - R. Akaho, A. Harada, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, W. Iwakami, H. Okawa, S. Furusawa, H. Matsufuru, S. Yamada,
“Multidimensional Boltzmann Neutrino Transport Code in Full General Relativity for Core-collapse Simulations, *Astrophys.J.* 909 (2021) 2, 210, DOI:10.3847/1538-4357/abe1bf
 - E de Doncker, F Yuasa, A Almulih, N Nakasato, H Daisaka, T Ishikawa,
“Numerical multi-loop integration on heterogeneous many-core processors” ,
Journal of Physics: Conference Series 1525(2020)012002
doi:10.1088/1742-6596/1525/1/012002
 - E. de Doncker, F. Yuasa, O. Olagbemi, T. Ishikawa,
“Large Scale Automatic Computations for Feynman Diagrams with up to Five Loops” , *ICCSA 2020, LNCS* 12253, pp.145-162, 2020
doi:10.1007/978-3-030-58814-4_11
 - Makoto Suzuki, Jiro Suzuki, Atsushi Takano, and Yushu Matsushita,
“Hexagonally Packed Cylindrical Structures with Multiple Satellites from Pentablock Quarterpolymers of the AB1CB2D Type and Their Blends with Homopolymers *ACS Macro Letters*” ,
ACS Macro Lett. year=2021, vol=10, page=359
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acsmacrolett.1c00012>

- Jiro Suzuki, Atsushi Takano and Yushu Matsushita,
“A New Cylindrical Structure from ABCBD Pentablock Quadpolymer Melt Studied by Monte Carlo Simulation” ,
Macromolecular Theory and Simulations vol=29, page=2000029
year=(2020).
DOI: <https://doi.org/10.1002/mats.202000029>
- The Dang Vu, H. Shishido, K. Kojima, T. Koyama, K. Oikawa, M. Harada, S.Miyajima, T. Oku, K. Soyama, K. Aizawa, M. Hidaka, S. Y. Suzuki, M.Tanaka, A. Malins, M. Machida, and T. Ishida,
“Homogeneity of neutron transmission imaging over a large sensitive area with a four-channel superconducting detector” ,
Superconductor Science and Technology, Volume 34, Number 1
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abc2af>

15.1.2 査読なし

15.2 Proceedings

15.2.1 査読有り

- H. Matsufuru and K. Sumiyoshi,
“Acceleration of Boltzmann Equation for Core-Collapse Supernova Simulations on PEZY-SC Processors” , In: Gervasi O. et al. (eds)
Computational Science and Its Applications - ICCSA 2020, Lecture Notes in Computer Science, vol 12253. 177-192 (2020), DOI
https://doi.org/10.1007/978-3-030-58814-4_13.
- 今井 誠, 小原壮二, 小川唯史, 佐野隆章, 田尾陽一, 菅野宗夫, 高橋正二, 溝口 勝, 飯島和彦, 石川 正, 佐々木慎一,
“福島県における空間線量と個人線量の相関 II” , 第 22 回「環境放射能」研究会, KEK, 2021.3.10-12 online

15.1.1 査読なし

- 金子沙梨, 高瀬亘, 岡田勝吾, 村上晃一,
“ccPortal: オンライン申請ポータルサイトの開発” ,
情報処理学会 第 83 回全国大会講演論文集 4-349 2021 年 3 月

15.3 KEK 出版物

- Activity Report 2019 Computing Research Center, KEK Progress Report 2020-5, January 2021 D
- Editors board, N. N. T. Tran, T. Ishikawa, S. Sasaki, "Activities of KEK in the Measurements of Radiation Dose and Radioactivity in Iitate Village", 2021 Mar, KEK ARL.
- 加茂聡
“採用 2 年目の活動報告”、技術交流会・技術セミナー報告書

15.4 その他

なし

16. 会議発表

16.1 国際会議

- T. Nakamura, K. Murakami, S. Suzuki, G. Iwai,
“New KEKCC: spec, replacement schedule and strategy” ,
36th Belle II General Meeting 2020.6.22-26, online
- T. Nakamura, G. Iwai, K. Murakami, T. Sasaki, S. Suzuki, W. Takase,
“KEK Site Report” , HEPiX Autumn 2020 online Workshop, 2020.10.12-16
- T. Nakamura, G. Iwai, K. Murakami, S. Suzuki,
“KEKCC System Migration”, 37th Belle II General Meeting, 2020.11.2-13, online
- T. Nakamura, G. Iwai, S. Kaneko, K. Murakami, T. Sasaki, S. Suzuki, W. Takase,
“Upgrade of KEK Central Computing System and Grid service” ,
Asian Forum for Accelerators and Detectors 2021,2021.3.16-18, online (BINP)
- G. Iwai, S. Kaneko, T. Nakamura, T. Sasaki, S. Suzuki, and W. Takase,
“KEK Site Report” , HEPiX Spring 2021 online Workshop (2021)
- S. Okada, K. Murakami, K. Amako, Y. Chen, and T. Sasaki,
“Geaon4 applications in radiology” AFAD2021-WG3 Accelerator technologies
for industrial & medical applications, 2021.3.16-18
- Akihiro SHIBATA, Kei-Ichi Kondo, Ryutaro Matsudo, Shogo Nishino,
“The lattice Yang-Mills theory with a gauge-invariant gluon mass in view of
the gauge-invariant BEH mechanism towards confinement” ,
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) [333 participants]
Online 4-7 August 2020
- Seikou Kato, Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo,
“Double-winding Wilson loops towards flux tube interaction in SU(N) lattice
gauge theory” ,
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) [333 participants]
Online 4-7 August 2020
- Akihiro SHIBATA,
“Study of confinement mechanism based on the dual superconductivity” ,
12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by
Multidisciplinary Computational Sciences (CCS International Symposium 2020)
- H. Matsufuru (in collab. with K. Sumiyoshi),
“Acceleration of Boltzmann Equation for Core-Collapse Supernova Simulations
on PEZY-SC Processors “, International Conference on Computational Science
and Its Applications (ICCSA 2020), Workshop on Large Scale Computational

- Science,
Univ. Cagliari, Italy, 2020.7.1-4 (online)
- H. Matsufuru (for Bridge++ project),
“Implementation of Lattice QCD common code to large scale parallel supercomputer with manycore and GPU architecture” , CCS International Symposium 2020, Univ. Tsukuba, 2020.10.6(online)
 - Wataru Takase,
“KEK Grid CA Report” , 26th APGridPMA Meeting, 2020.12.4, online
URL: <http://indico3.twgrid.org/indico/conferenceDisplay.py?confId=973>
 - Sari Kaneko, Wataru Takase, Hiroyuki Matsunaga,
“KEK Grid CA Self Audit Report” , 27th APGridPMA Meeting, 2021.3.23, online,
<https://indico4.twgrid.org/indico/event/14/page/4>
 - Wataru Takase, Sari Kaneko, Shogo Okada, Koichi Murakami,
“Development of online application portal” , HEPiX Autumn 2020 online Workshop,
2020.10.12-16, online,
<https://indico.cern.ch/event/898285/contributions/4034148/>
 - Wataru Takase, Sari Kaneko, Shogo Okada, Koichi Murakami,
“ccPortal: KEK Computing Research Center online application portal” ,
International Symposium on Grids and Clouds (ISGC) 2021, 2020.12.4, online

16.2 国内会議

- 柴田 章博
“双対超伝導描像に基づく高次元クォークの閉じ込め・非閉じ込め相転移”
KEK 理論センター研究会 “熱場の量子論とその応用” , 2020.8.4-26
- 松戸竜太郎, 柴田章博, 西野尚吾, 近藤慶一,
“場の分解の方法を用いて構成されるゲージ不変な質量項をヤン = ミルズ理論に加えた模型について” , 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催 (素核宇)
2020.9.14-17
- 柴田 章博, 近藤慶一, 西野尚吾, 松戸竜太郎,
“ゲージ不変な BEH 機構に基づくゲージ不変な質量項を有する SU(2)Yang-Mills 理論におけるクォークの閉じ込め” , 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催 (素核宇) 2020.9.14-17
- 石川 正

- “多倍長精度浮動小数点演算の素粒子物理学への応用”，
日本応用数理学会 2020 年度年会，2020.9.10 online
- 湯浅 富久子
“マルチスケール・マルチループのファインマン積分の数値計算 (II)”，日本物理学
会、2020 年秋季大会、2020.9.14-17, online
 - 鈴木次郎，高野敦志，松下裕秀
“ABCBD 型ペンタブロック共重合体による二次元タイリング構造”
2020 年度高分子基礎物性研究会・高分子計算機科学研究会・高分子ナノテクノ
ロジー研究会 合同討論会，2020.11.5, online (100 人規模)
 - 金子紗梨，高瀬亘，岡田勝吾，村上晃一，
“ccPortal：オンライン申請ポータルサイトの開発”，情報処理学会第 83 回全国大
会，2021.3.18-20, online
 - 高瀬亘，
“CI/CD による効率的な開発と品質の向上：電子申請ポータル開発への活用事例”，
総合技術研究会 2021, 2021.3.3-5, online 東北大学
 - 一井信吾
“ギーセン大学で何が起きたのか”
2020.05.14-15 情報処理学会インターネットと運用技術研究会第 49 回研究会，
online
“マーストリヒト大学で何が起こったか”
2020.07.10, 情報処理学会インターネットと運用技術研究会第 49 回研究会，
online
 - 金子紗梨
“KEK 計算科学センター利用申請のオンライン化 -ccPortal-”，令和 2 年度共通基
盤研究施設技術交流会，2021.2.17, KEK つくば online
 - 加茂 聡
“採用 2 年目の活動報告”，KEK 技術交流会，2020.11.18, KEK つくば，30 人規模

16.3 その他 広報等

- 村上 晃一，
“中央計算機システム・ストレージシステム事例紹介”，【IBM 事例】高エネルギー
加速器研究機構 (KEK) <https://ibm.co/3fWIs6K>
- 村上 晃一、
“新中央計算機システム運用開始”，
共通基盤研究施設 HP <https://www2.kek.jp/ar1/highlights/20200138.html>

17. 会議出席（招待、座長等）

17.1 国際会議（招待・座長）

- H.Matsufuru, F.Yuasa, (workshop chair)
International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2020), Workshop on Large Scale Computational Science, Univ. Cagliari, Italy, 1-4 July 2020 (online) <https://2020.iccsa.org/>
- T.Nakamura (session chair)
HEPiX Autumn 2020 online Workshop, 2020.10.12-16, online(CERN)
- T.Nakamura (session chair and Board member)
HEPiX Spring 2021 online Workshop, 2021.3.15-19, online (ASGC)

17.2 国内会議（招待・座長）

- 松古 栄夫
2020 年秋季大会（素核宇）9/14-17 (online) 素粒子論領域運営委員及び座長
2021 年第 76 回年次大会 3/12-15 (online) 素粒子論領域運営委員及び座長

18. 会議開催

18.1 国際会議開催

18.1.1 開催（主催者）

なし

18.1.2 組織委員会委員等

- T.Nakamura (International Convener)
Asian Forum for Accelerators and Detectors 2021, 2021.3.16-18, online (BINP)
- T.Nakamura (Program Committee)
International Symposium on Grids & Clouds 2021, 2021.3.22-26, online(ASGC)
- S.Ichii (Program committee and reviewer)
 - The 34th International Conference on Information Networking (ICOIN 2020)
 - 2nd International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC 2020)
 - 2020 International Conference on Advanced Technologies for

Communications (ATC-20)

- The 11th International Conference on ICT Convergence (ICTC 2020)
- 2020 7th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS'20)
- The 35th International Conference on Information Networking (ICOIN 2021)

18.2 国内会議開催

18.2.1 開催（主催者）

18.2.2 組織委員会委員等

- 柴田 章博（論文集エディター）
第 26 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム，2020.12.10-11,online（参加 72 名）
- 松古 栄夫（世話人）
高性能計算物理勉強会 (HPC-Phys: <http://hpc-phys.kek.jp/>)
第 7 回 勉強会：2020.6.17 online,
第 8 回 勉強会：2020.9.24 online,
第 9 回 勉強会：2020.12.4 online
- 中村 智昭（世話人）
粒子物理コンピューティング懇談会，2020.10.14, online
粒子物理コンピューティング懇談会，2021.3.14, online

18.3 講習会等開催

18.3.1 機構外対象

なし

18.3.2 機構内対象

- 一井信吾
 - 高エネルギー加速器研究機構 約款による外部サービス利用に関するガイドライン説明会 2020.8.28, 11.19
 - 高エネルギー加速器研究機構 DMZ ユーザー会 2020.12.24, 2021.1.13
- 新中央計算機システム・データ解析システム説明会
村上晃一，“新システム概要”，
村上晃一，“データ解析システム”，
高瀬亘，“データ移行”，

2020.7.21, KEK つくば online, <https://kds.kek.jp/event/34957/>

53 名

- 加茂 聡

2020 年度第一回 KEK CRC セキュリティ講習会 , 2020.9.18 KEK つくば online, 36 名参加 , <https://stw.kek.jp/stpg/directors/2020/08/25/150642/> 情報セキュリティ講習会 , 2020.11.25, KEK つくば online, 87 名参加 ,

https://stw.kek.jp/stpg/hso/anzeneisei_r2/

47 名参加

18.4 その他

18.4.1 参加組織

- つくば周辺の組織による情報セキュリティの情報交換会
2020.11.5、online, 人数 :15 名程度

18.4.2 展示等

- Super Computer 2020, KEK 展示ブース , Virtual Exhibits
<https://sc20.supercomputing.org/>