

放射線シミュレーションのためのツールキット Geant4

高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター	佐々木 節
高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター	村上 晃一
高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター	尼子 勝哉
高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター	岡田 勝吾
神戸大学・先端融合研究環	藏重 久弥
立命館大学・情報理工学部	田中 覚
足利工業大学・工学部	木村 彰徳
富山高専・電子情報工学科	阿蘇 司
鳴門教育大学	吉田 肇
兵庫県立粒子線医療センター	山下 智弘
名古屋市陽子線治療センター	歳藤 利行
名古屋市陽子線治療センター	大町 千尋
SLAC国立研究所	浅井 慎

Geant4, a toolkit for simulating interaction between particles and matter

T. Sasaki^{a*}, K. Murakami^a, K. Amako^a, S. Okada^a, H. Kurasige^b, S. Tanaka^c, A. Kimura^d, T. Aso^e, H. Yoshida^f, T. Yamashita^g, T. Toshito^h, C. Omachiⁱ and M. Asaiⁱ

^a *Computing Research Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, 305-0801*

^b *Kobe University, Organization of Advanced Technology and Science, Nada, Kobe 657-8501, Japan*

^c *Ritsumeikan University, College of Information Science and Engineering, Kusatsu, Shiga 525-8577*

^d *Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga, Tochigi 326-8558*

^e *National Institute of Technology, Toyama College, Imizu, Toyama 933-0293*

^f *Naruto University of Education, Naruto-shi, Tokushima 772-8502*

^g *Hyogo Ion Beam Medical Center, Tatsuno, Hyogo, 679-5165*

^h *Nagoya Proton Therapy Center, Nagoya 462-8508*

ⁱ *SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA*

*e-mail: Takashi.Sasaki@kek.jp

Geant4 is a software toolkit for simulating interactions between particles and matter. The Geant4 collaboration develops and maintains it. The Japanese group played a very important role even before the beginning of the collaboration. The history, unwritten background information and the recent status of Geant4 are described in the Japanese developers' point of view.

1. はじめに

Geant4(ジアントフォー)は、1994年に開発が開始された放射線シミュレーションのためのソフトウェアツールキットである。現在、様々な分野で広く利用されており、世界で最も普及している放射線シミュレータである。開発の背景や設計思想を紹介することで、Geant4に対する理解をより深めて頂けるはずであるが、これまでその機会に多くは恵まれなかつ

た^{1,2)}。国際共同開発のため、日本語でGeant4を紹介する機会も少ないので、この機会を与えて頂いたことに感謝する。

2. Geant4前夜

2.1 歴史的背景

1990年代初頭、大型加速器計画が米国およびヨーロッパで並行して進んでいた。米国では、

SSC(Superconducting Super Collider)³⁾の建設がテキサス州で進められており、ヨーロッパでは、スイスのジュネーブにあるCERN(欧州原子核研究機構)で、LHC(Large Hadron Collider)⁴⁾建設に向けた研究開発が行われていた。SSCは、新たに加速器トンネルを掘削する計画だったのに対し、LHCは、既存のトンネルを再利用する計画だったため、ほぼ同時期に実験を開始する予定となっていた。日本の研究者は、SSCで行われる実験の一つであったSDC(Solenoidal Detector Collaboration)に参加し、加速器、測定器、ソフトウェアの研究開発を行っていた。

当時、測定器のシミュレーションには、CERNが開発したGEANT3が標準的に利用されており、SSCおよびLHCで行われる予定であったすべての実験の測定器シミュレータがGEANT3を基に開発がすすめられていた。SDC測定器のシミュレータの開発には、日本グループも、大きく寄与していた。

一方、国内では、高エネルギー加速器研究機構(当時は、高エネルギー物理学研究所)がB-FactoryであるKEKB加速器の計画を進めており、Belle測定器のシミュレータも、GEANT3を基に開発が進められていた。

2.1 GEANT3の問題点

GEANT3は、GEANT(GEometry ANd Tracking)シリーズのversion 3としてCERNによって開発された測定器シミュレーションのためのソフトウェアである。

GEANT3の開発は、1982年に開始され、1994年に終了した。FORTRAN77で記述されており、主要な部分のソースコードは、約40万行ある。可視化やヒストグラムの機能を含めたCERNLIB全体では、100万行程度であった。Geant4がリリースされるまでは、多くの高エネルギー実験で利用されていた。

高エネルギー実験では、測定器シミュレータの開発も分業が進められる。各検出器では、線量分布、時間など様々な量がデジタル化されて記録される。物理量を観測量に変換する検出器の詳細な仕組みを知らずにソフトウェアの開発を行うことは不可能だからである。最終的には、各担当者が個々に開発した検出器をシミュレーションするためのソースコードをまとめ上げ、測定器全体のシミュレーションを行えるようにする作業が生じる。このために膨大な作業量が必要であった。各検出器の担当者は必ずしも、ソフトウェア開発に長けているとは限らず、バグが多発しただけではなく、FORTRAN77の仕様由来の問題にも苦しめられた。COMMON BLOCKは、複数の変数や配列を持つが、そのメモリ空間上の大きさがサブルーチンごとに自由に変更でき、内容も自由に書き換えられる仕様である。この仕様を

意図的に利用し、効率的なプログラムを書く熟練したプログラマーもいたが、未熟なプログラマーは、不用意に数値を書き換えたり、関係ないメモリ空間を破壊したりすることがよくあり、それが大規模なソフトウェアを分業して開発することを困難にした。SSC、LHC、Belle実験に向け、GEANT3で検出器シミュレータを開発するなか、様々な問題点が露呈した。

A) GEANT3には、設計に関する資料がないので、新たな機能を追加することが難しかった。具体的には、以下のような機能改善は困難であった。

- (1) 新しい基本物体形状の追加
- (2) 新しい物理プロセスを追加
- (3) 物理プロセスの計算アルゴリズムの改善
- (4) 2次粒子スタックを改善し、順番を制御

B) GEANT3は、CERNが開発して保守をしており、ユーザの開発した新しい機能や改善点を積極的に取り込む体制にはなっていなかった

C) ソースコードの読解が困難な部分が多々ある
これらの問題点は、各実験の測定器シミュレータの開発担当者が共通して感じていた。

2.2 オブジェクト指向技術

SSCやLHCにおける実験は、準備期間を含めると数十年継続することが予定されていた。開発者の世代交代を考慮に入れ、長期間利用可能なソフトウェアの開発が望まれていた。高エネルギー実験では、準備期間から開始直後は、多数の研究者が活動的に実験に参加するが、徐々に次の計画に研究者が移り、ソフトウェアを再度作り直すために必要な人的資源を確保することは簡単には望めない。この問題解決のため、ソフトウェアの開発方法論から見直す必要に迫られた。

オブジェクト指向プログラミングの歴史は古く、オブジェクト指向の概念は、1950年代末に発明され、最初のオブジェクト指向言語は、1960年代半ばに開発されたSimula67⁵⁾だと言われている。C++という名前が与えられたのは1983年⁶⁾であったが、オブジェクト指向言語として1979年に最初のC++言語の仕様⁷⁾が発表された。1989年にC++ 2.0の仕様⁸⁾が公開され、普及が加速した。多くのプラットフォームで、C++言語が利用可能となり、better Cとしても認知されて、C言語の代わりに利用されるようになった。

一方、1990年代初頭には、オブジェクト指向ソフトウェア開発方法論が相次いで発表され、分析や設計の結果を可視化する方法が利用可能となった。

KEKでは、1992年にXiling Zhou氏を招聘し、オブジェクト指向プログラミングに関する勉強会⁹⁾を開始

した。この勉強会に続き、GEANT3を置き換えるソフトウェアの開発を目指し、測定器シミュレータのオブジェクト指向分析、設計が開始された。CERNでも、GEANT3グループの中で、GEANT3のジオメトリ記述に関する部分をオブジェクト指向分析、設計を行う試みが開始され、情報の交換も行われた。

3. Geant4の開発開始

Geant4開発開始のきっかけは、1993年10月のSSC計画の中止である。SDCに参加していた日本グループは、その後、LHCで行われるATLAS実験に参加することになる。それに先立ち、1994年4月にSan Franciscoで開かれたComputing in High Energy Physics (CHEP) 1994において、KEK¹⁰⁾およびCERN¹¹⁾それぞれから、オブジェクト指向法を用いた測定器シミュレータの開発に関する講演が行われた。この会議中に、CERNのGEANT3開発チームの代表者であるRune BrunとKEKグループの代表である尼子勝哉の間で両方のグループが合流して、次世代の測定器シミュレータの開発を行うことに合意したのである。この直後、CERN内の政争の結果、Rene BrunはGEANT3チームを去り、ROOTプロジェクトを後に開始することになる。その後、CERNでの測定器シミュレータの開発はSimone Gianiがリーダーとなる。CERNとKEKはそれぞれの関連機関に参加を呼びかけ、RD44と呼ばれた測定器シミュレータの開発プロジェクトを立ち上げ、CERN R&D委員会に支援申請を行った。プロジェクト申請の時点で、目的とする測定器シミュレータの名前をGeant4とすること、それをツールキットとして開発すること及びプロジェクト代表者をSimone Gianiにすることが参加者の間で合意された。RD44は1994年に正式にCERN R&D委員会で承認された。CERNではGEANT3チームのメンバーがGeant4開発へ移行され、予算の手当てもされた。Rune Brunとの関係は、現在に至るまで、様々な困難を生むことになり、日本グループの関知しない所での政争の結果、多くの時間を無駄にした⁹⁾。日本ではRD44開始に当たり、Geant4日本グループを結成することになり、1995年に東京都立大学で最初の会合を行った。都立大学、京都大学、広島工業大学、福井大学、岡山大学、新潟大学など多くの大学から研究者及び大学院生がGeant4日本グループに参加し、初期のGeant4の開発に大きな寄与をした。4年間のRD44期間中に、ESA(European Space Agency)など高エネルギー実験以外の分野からも研究者が参

加し、多くの分野で利用可能な放射線シミュレーションのためのソフトウェア開発環境が形成された。RD44を始めるにあたり、いくつか重要な決定が行われた。

- A) Geant4は、Geant4であって、GEANTのversion 4ではない。
- B) プログラミング言語は、C++言語を採用する
 - (1) FORTRANと違って小文字も使えるので、大文字小文字を混ぜてGeant4と表記する
- C) KEKで続けられていたBooch法¹²⁾によるオブジェクト指向分析、設計の成果を基に開発する
- D) GEANT3を比較対象とする

4. Geant4の設計思想

Geant4の設計の根幹は、成果物をツールキットとして開発することにある。各実験は、測定器シミュレータを独自のソフトウェアフレームワークに組み込むことを想定し、実行可能なメインプログラムを提供するのではなく、各自のソフトウェアに組み込み可能なソフトウェア部品を提供することにした。Geant4の利用者を次の3つにカテゴライズすることにした。

- A) Geant4ツールキット開発者
- B) シミュレーションソフトウェア開発者
- C) エンドユーザ

Geant4そのものに機能の追加や改善を行う利用者也想定し、詳細な設計図やドキュメントを残すことにした。シミュレーションソフトウェア開発者は、対象となる検出器や必要な物理に十分な知識を持っていることを前提とし、エンドユーザは、シミュレーションソフトウェア開発者が支援するというサポートモデルである。広い分野への適用を考える上で、誤ってGeant4を利用し、その結果、生命や財産への危害を与える可能性についても議論された。必要とされる物理学の知識なしに利用されることを避けるために、敢えて、エンドユーザフレンドリーにはしないことになった。しかし、利用者の範疇が広がり、様々な分野で利用されるようになると、このサポートモデルは見直しを迫られた。責任回避に関しては、ソフトウェアライセンスに盛り込み、十分な知識を有していないユーザでも、学びながらソフトウェアを開発し、必要なシミュレーションを行えるように方針を転換した。ほかの分野では、高エネルギー実験ほど分業が進んでいないこと、医学や工学など、物理学を専門とはしないが、放射線シミュレ

れ、GEANT3と比較し、Geant4は3倍遅いと根拠なく記されている。

⁹⁾René Brun, Frederico Carminati, Giuliana Galli-Carminati, "From the Web to the Grid and Beyond: Computing Paradigms Driven by High-Energy Physics, Springer Science & Business Media, 2012 の26ページには、"GEANT 4"と大文字で記し数字の前に空白を入

ーションを行いたいユーザが多数いることを考慮することになった。LHCで行われる実験の測定器シミュレータを開発するためにGeant4の開発を急がなければならなかったことと、分析・設計に参加したのは高エネルギー実験出身者が主であったことから、ほかの分野における要求要件を十分に取込みなれたことは事実である。Geant4内部の実行の単位として、RunやEventがあるのも、加速器実験からの大きな影響があったことを示している。

5. Geant4の基本設計

Geant4を設計するにあたり、放射線シミュレータというものを根本から分析してソフトウェアを開発するのか、GEANT3を分析して設計すべきなのかで議論された。GEANT3からGeant4への移行を容易にするために、概念的なキーワードや、基本的な構造を維持したほうが良いということとなり、GEANT3を分析し、オブジェクト指向法で再設計するアプローチが取られた。分析と設計には、Booch法を採用したが、後にUnified method¹³⁾に開発方法論が統一されたので、Unified methodに転換した。

Fig.1にGeant4のクラスカテゴリーダイアグラムを示す。クラスカテゴリーは、Booch法で採用されている設計概念で、お互いに密接に関係するクラスの集合体を表現する。異なるカテゴリーに属するクラス間の関係は疎となる。この概念により、クラスカテゴリー単位で独立した開発が可能となり、これはソフトウェアの国際分業の基本単位として重要な役割をはたした。それぞれのカテゴリー間の関係が図示されている。これらのカテゴリー毎に複数の開発者がワーキンググループを作り、分業して開発に従事している。主なカテゴリーが実現している機能は以下となる。

- Global
 - 単位、定数、数値、乱数
- Materialsと Particles
 - 粒子の物理学的な性質および物質の記述
- Geometry
 - 幾何学的な構造記述と効率的な粒子輸送
- Track
 - 次のProcessで利用されるTrackとStep
- Processes
 - 全ての物理事象及び一般化されたプロセス
- Tracking
 - Trackの状態変化管理と有感領域に対する情報の伝達
- Event

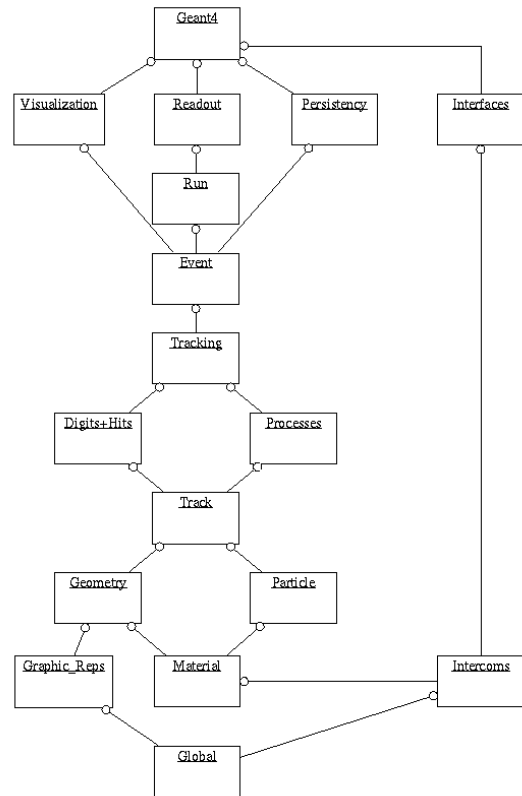


Fig. 1 Geant4 クラスカテゴリーダイアグラム

(http://geant4.web.cern.ch/geant4/OOAandID/class_category_diagram/architecture.html)

- Trackの集合体
- Run
 - 共通のビームと測定器に対するイベントの集まり

Geant4におけるTrackの概念は、ほかの放射線シミュレータと異なるかもしれないが、ある瞬間にその粒子 (particle) が持っているシミュレーションを行うために必要な情報のことである。

カテゴリーの名前を見ても、静的なもの、動的なものが入り混じっており、抽象性の低さを露呈している。日本グループは、主として、Geant4のソフトウェアフレームワークに相当する部分および可視化の開発を担当した。日本の研究者が責任者を勤めたカテゴリーは、Visualization(可視化)、 Run, Event, Tracking, Track、 Process, Particle, Digits+Hits, Persistency(オブジェクトの永続化)、 Interfacesであった。

様々な要求要件が発生しうる可視化、永続化、解析、グラフィカルユーザーインターフェースなどでは開発チームが予測できない将来的な技術上の進展が考えられたので、Geant4のカーネルは特定の外部パ

パッケージに依存しないという方針を激論の末に決定した。これにより、開発者は自分の持つ技術をGeant4に繋ぐためのインタフェースを提供すればよい。

Geant4が提供するあまりに多様な機能を前にして、それらを必要としないユーザには導入の敷居が高いと受け取られがちである。20年の歴史を経た現在ではユーザの第一選択は絞られており、利用目的を明確に持つユーザには導入は容易になってきた。

詳細な要求要件分析の結果であるUser Requirement Document¹⁴⁾ ソフトウェアの設計図に相当するclass diagram, scenario diagramなど¹⁵⁾が残されている。

2004年ごろまでは、情報がアップデートされていたが、近年は、大きな設計変更等もあったにも関わらず、アップデートされていない。原因は様々あるが、開発者の入れ替わりや、スポークスパーソンの交代が主たる原因になり、残念ながら、当初の理想が失われつつあるのかもしれない。

6. Geant4の実装

Geant4の実装は、C++言語で行われた。プロジェクト開始後、クラスカテゴリー間のインタフェースだけ約束し、分業で開発したプロトタイプをCERNに持ち寄りインテグレーションをする作業を行った。

FORTRANでの苦しみから開放され、何の問題もなく一体として稼働するコードを作成することが出来た。言語及び設計手法の選択が大規模ソフトウェア開発プロジェクトの効率化に重要であることを実感したのである。FORTRANに長けた開発者は、C++の採用に懐疑的であったが、この一件で、転向することになった。コーディングルールに関する議論も行われたが、ファイル名の命名法や、変数名に関する規則など最低限のこののみが決められた。並行して進んでいた他のプロジェクトがコーディングルールを決めるまでに長い時間を要していたので、議論に無駄な時間を使うのを避けたためである。その後、Geant4のユーザから、コードが非常に読みにくいとの苦情を多数受けることになった。コーディングルールの問題もあったが、FORTRANプログラマを即席でC++プログラマにコンバートしたことも原因となっている。物理プロセスに関して深い知見を持っていたのは、長年、FORTRANでプログラムをしていた人たちであった。コードを見やすく現代的に書き換える検討も行われたが、書き換えたコードを大元の開発者が保守できないという理由で実施されていない。しかし、初心者が頻繁に参照する例題が読みにくいのは教育的ではないので、例題作成に関して

は、コーディングルール¹⁶⁾が明文化され、修正が行われた。

ほかの放射線シミュレータとは、大きく異なる設計と実装が行われた点がいくつかGeant4にはある。

- ユーザが数値を与える場合には、常に単位付きで与える。内部で持っている数値の単位は知る必要がない。
- 粒子は、運動エネルギーがゼロになるか、ユーザが必要なくなるまで追跡する。設定されない限りエネルギーで一律にカットすることはない。代わりに、生成される粒子の最低エネルギーを設定する。
- 粒子と物質の相互作用のみならず、位置の変更なども一般化されたプロセスとして扱う。複数のプロセスをまとめて一つのプロセスとして扱うことも可能である。

開発者の多くはGEANT3の開発者やユーザであったので、その経験が盛り込まれている。また、国際共同開発の結果、クラス名や変数名が英語としては不自然なものがいくつかあるのはご愛嬌である。

7. Geant4の可視化

シミュレーションが正しく行われているかを確認するだけではなく、プレゼンテーションの印象を高めるためにも、可視化は重要である。福井大学の川口湊・田中覚グループは、Geant4開発開始以前から、高精細に3次元画像を表示するためのアルゴリズムとソフトウェアの開発を行っていた。特に論文に載せる図として十分な精度のポストスクリプトファイルを出力できることが特徴であった。開発開始当初、分析設計に2年近くを要したので、完成予想図として、なにか見せられるものが必要であった。福井大学の大学院生がATLAS実験の提案書から読み取った数値で可視化した図を完成予想図として利用し、大変助けられた。その後、同グループ^{*)}の開発したDAWN¹⁷⁾ (Drawer for Academic Writings) を利用するためのインタフェースがGeant4の一部として開発され、出力された図が多くの論文で利用された。今でも、Fukui Renderという名前がGeant4の内部には残っている。Fig2にDAWNによるATLAS検出器可視化の例を示す。この図は、多くの出版物やwebページに収録されている。VRMLインタフェースも田中等が開発したものであり、同様に多くのプレゼンテーションや論文執筆に利用されてきた。

^{*)}田中覚が立命館大学に異動し、福井大学には最早関係者はいない

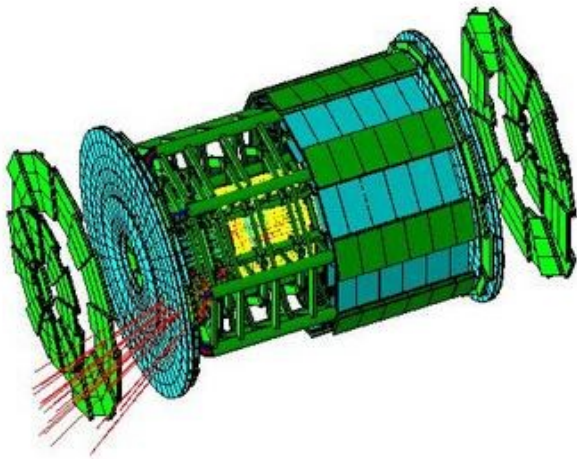


Fig. 1 DawnによるATLAS測定器の可視化
(http://geant4.kek.jp/~tanaka/DAWN/About_DAWN.htmlより)

8. Geant4のリリース

1998年7月にベータ版を公開に引き続き、1998年12月にGeant4.0.0を公開してCERN RD44は終了した。RD44の成功は、その後の世界の高エネルギー実験分野でのソフトウェア開発手法に大きなインパクトを与え、FORTRAN77からオブジェクト指向のC++言語への移行が進行した。問題を局在化させることができるので、エンドユーザにとっても、大きなメリットがあることも後押しをした。RD44終了後、開発者はMoU (Memory of Understandings) を締結し、Geant4コラボレーションを結成した。1999年12月Geant4.1.0をリリースして以来、毎年一回のminor releaseを続けている。Geant4のバージョン番号は、Geant4.(major release number).(minor release number)と決められている。ユーザコードに変更が求められるアップデートをmajor releaseと呼ぶことにしている。2013年に行われたmajor releaseが現在最新となっている。この際には、multi-thread化を実現するために、大きな変更が必要となり、ユーザコードの変更の必要が生じた。バグに対する修正も随時配布しているが、バージョン番号の変更はしていない。現在も、毎年一回、開発者のワークショップを開催し、活発に開発が続けられている。新たな機能を追加したい新しい開発者も随時コラボレーションに参加している。当初の見込み通り、開発開始後20年以上が経過しても、開発と機能の拡張が続けられている。

9. 日本グループの国内における活動

9.1 医学応用

Geant4本体の開発及び保守と並行し、医学応用に注力してきた。2003年から2008年度の間、JST CRESTに「高度放射線医療のためのシミュレーション基盤の開発」¹⁸⁾が採択され、主として粒子線治療のシミュレーションに求められる精度を実現^{19),20),21)}し、必要な機能を開発^{22),23)}してきた。成果物としてのソフトウェアであるPTSIM²⁴⁾および可視化ソフトウェアgMocren^{25),26),27),28)}は、助成期間終了後も開発^{29),30),31)}が続けられている。PTSIMは、国内外の機関に配布され、兵庫県立粒子線医療センター³²⁾、名古屋市陽子線治療センター³³⁾³⁴⁾、福井県立陽子線がん治療センター³⁵⁾などの治療施設で利用されている。PTSIMは、必ずしもプログラミングの技術が十分になくとも利用できるように、ユーザが記述しなければならないC++のコード量を可能な限り減らす工夫がされている。物理プロセスの選択や各種パラメータの設定も、複数の施設で検証した結果、最適とも考えられるものが標準で組み込まれている。CTの出力であるDICOMや、治療装置とのインターフェースであるDICOM-RTの入出力にも対応しており、gMocrenまたは治療施設に既設の治療計画装置を用いて、線量分布を患者のデータに重ねて表示することが可能である。PTSIMを開発した際に、Geant4本体に改善と機能の追加が必要となった。粒子線治療のエネルギー領域における物理相互作用の整備とパラメータの調整が行われ、その結果は、Geant4にフィードバックされた。シミュレーション結果である線量などを容易に記録するためのScorerも開発され、その他のソフトウェア部品と合わせGeant4に寄付した。その結果、後発のGAMOS³⁶⁾やTOPAS³⁷⁾と言った海外のプロジェクトは大きな恩恵を受けることになった。特にTOPASは、PTSIMに大きな影響を受けている³⁸⁾。我が国では、研究開発の成果物の保守や拡張に対し、十分な資金的助成を受けられる制度がなく、CREST終了後は、国際競争力を失ってしまったことが残念である。

一方、gMocrenは、無料で使えるDICOMビューワであり、線量分布を重ねて表示することができる。同時に、粒子の飛跡を表示することも可能となっているが他に同様の機能を持つソフトウェアは存在していない。主として研究開発用途で利用されている。Fig. 2にgMocrenによる表示例を示す。

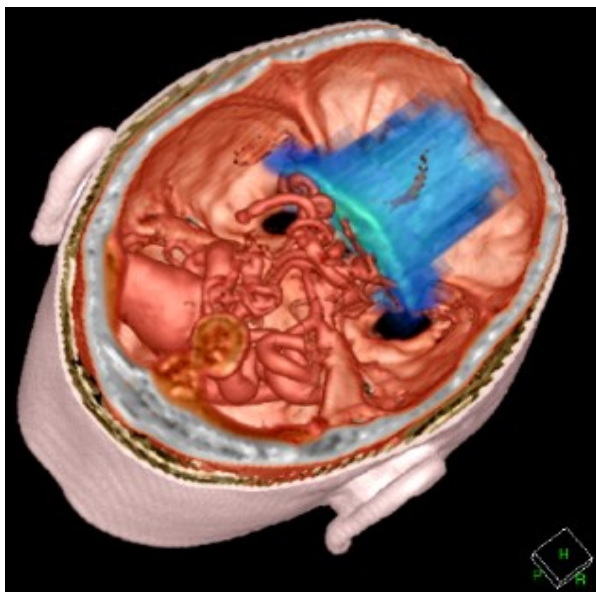


Fig. 2 gMocren による線量分布表示
(<http://geant4.kek.jp/gMocren/>より)

9.3 国内における普及活動

Geant4を日本国内で普及させるために講習会や研究会を定期的開催している。国際コラボレーションによる開発のため、ドキュメント類やプレゼンテーションもすべて英語で用意されており、講習会の資料も英語のものを作成し利用していた。講習会参加者が若年化し、学部学生や修士課程の学生が増えてきたことから、2013年度からは、講習会の資料を全て日本語で用意することにした。海外の講習会で用いられているものを日本語に翻訳するのではなく、独自の内容となっている。例題も、日本独自のものを用意している。必要なソフトウェア一式をインストールしたVirtual machineを用意し、容易にGeant4が試せるようになっている。2016年度の講習会³⁹⁾は、11月29日から12月1日かけ、仙台市で開催された。会場や講師の都合で検出器コース40名、医学応用コース30名の定員で募集をしたがすぐに両コースとも満席となり、キャンセルする人がでて、すぐにまた満席となる状況であった。医学応用コースは、PTSIMを用いて、粒子線治療以外の放射線治療もシミュレーションできるように配慮されている。

10. Geant4の普及度

世界的にどの程度Geant4が使われているかを計る方法として、論文の引用数を見てみたい。過去にGeant4全体に関しては3篇の論文^{40),41),42)}が出版されている。このうち、2003年に出版された最初の論文を2016年10月3日にTHOMSON REUTERSの

Web of Scienceで調べたところ、被引用数が7191回あった。年毎の被引用数は様々な分野に渡り年々増えており、分野も広がりながら利用されている。他の放射線シミュレータの代表的な論文やマニュアルを検索してみたが、過去10年以内の件数は、Geant4が圧倒的に多数であり、世界一普及している放射線シミュレータであるといえる。Geant4は、オープンソースのプロジェクトで、ソースコードが自由にダウンロード可能なことが大きな原因となっていると考えている。米国の輸出規制が強まり、米国製の中性子をシミュレーションすることのできるソフトウェアのソースコードを米国外に持ち出せなくなったことも関係していると考えている。Geant4でも、中性子を高エネルギー実験に必要な精度でシミュレーションすることが可能であるが、核開発に必要なエネルギーにおけるシミュレーションに必要な断面積データ等は配布していない。被引用数の伸びは2011年から急激に増えているが、医学や宇宙分野における被引用数の伸びが大きい。

11. 次のステップへ

Geant4は、version 10以降、multi-thread化され、eventレベルにおける並列処理が行える。Xeon-Phiを用いたベンチマークテストでは、thread数に対して直線的に性能が伸びる⁴³⁾ことが示されている。MPIインタフェースも実装されており、多数のノードを同時に利用し、大規模な並列計算を行うことが可能となっている。今後、HPC用途に導入される所謂スパコンでも効率よく実行することが可能である。

一方で、医学用途では、線量計算を圧倒的に高速化したいという需要がある。また、細胞レベルでの放射線の影響を定量的に見積もるために、計算時間の大幅な短縮も望まれている。フランスのCENBG(Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan)が中心となって開発を行っているGeant4-DNA(<http://geant4-dna.org>)プロジェクトに日本グループも参加し、Geant4を基に細胞レベルにおけるシミュレータの開発を行ってきた。2013年度から2016年度にかけて、科研費(基盤A 25246044:次世代放射線シミュレーション基盤の開発)の助成を受け、Geant4の高並列化に取り組んだ。Xeon Phiを利用したマルチスレッド化のアプローチと、NVIDIA社のGPUを用いた超並列化アプローチを比較した結果、「貧者のスパコン」とも呼ばれるGPUによる並列化が非常に有効であることが分かった。Geant4に含まれる電磁相互作用の必要な部分

とGeant4-DNAが現時点で実装している全ての物理・化学過程をCUDA言語で再実装したプロトタイプを開発し、MPEXS⁴⁴⁾ およびMPEXS-DNA⁴⁵⁾と命名した。同じ機能を有するベンチマークテストをGeant4/Geant4-DNAおよびMPEXS/MPEXS-DNAで実装し、性能の比較を行った。性能向上のためのコードの最適化を行ったのち、Geant4をIntel Xeon E5-2643, 3.50 GHzで実行した結果とNVIDIA GPU Tesla K20c, 2496 cores, 706 MHzで実行した結果を比較したところ、K20c一基は、Xeon E5-2643の200コア分以上の性能を得た。この成果を文部科学省が後援するGTC Japan 2016

(<https://www.gputechconf.jp/>) においてポスター発表し、NVIDIA Award(最優秀ポスター賞)を得た。2016年に発売された新世代のGPUであるP100は、さらに多くのコアとメモリを搭載しており、さらに優位性が高まると予測される。コードの最適化も継続しており、さらに実行性能が向上すると期待している。

近年、中性子を使ったがん治療が注目されており、加速器を製造する企業から、治療計画を立てるためのシミュレーション時間短縮に関する要望を受けている。MPEXSをもとに陽子、炭素、中性子などを短時間にシミュレーションすることができれば、がん治療の高度化につながるだけでなく、遮蔽計算や宇宙空間における機器の放射線損傷の見積もりなど、様々な分野への応用が広がる。必要な物理過程を網羅した高速なシミュレータの実現が多くの分野で望まれている。今後、MPEXSに電磁相互作用に加えて、原子核相互作用および中性子の相互作用のシミュレーションに必要な機能の実装を予定している。Geant4と合わせて利用することにより、精度と計算時間に対する要求に同時に応えることが可能となる。

12. 終わりに

Geant4の開発の背景と歴史、さらに次の発展に向けた展望を述べた。ヨーロッパの大研究機関との共同研究は、米国の機関との共同研究とは異なる苦労があった。世界史の教科書にもあるように、ヨーロッパでは、政治的な抗争が数十年という長期にわたることを実感として学ぶことになった。Geant4は、オープンソースのソフトウェアで商用利用も可能なライセンスを採用している。今後も長期に渡り開発と保守を続けるためには、中心機関であるCERN、KEK、SLACなどからの研究所としてのサポートが重要であるが、個々の開発者へのインセンティブも同時に考えなければならな

い。

Geant4の知見を利用したGPUを使ったシミュレータの開発を行い、若い研究者に放射線シミュレータに興味を持ってもらいたいと考えている。

日本は、放射線モンテカルロ大国であり、世界的に普及している複数のソフトウェアの開発を中心に行っている。少子化が進み、優秀な研究者の数も減っており、次世代の人材確保が課題となっている。人材を奪い合うのではなく、協力してすそ野を広げ、放射線シミュレーションへの理解が広まることを希望する。

13. 謝辞

Geant4の開発に様々な形でご支援をいただいた高エネルギー加速器研究機構の渡瀬芳行名誉教授及び近藤敬比古名誉教授に感謝します。Geant4の開発にご貢献頂いた、故川口湊福井大学教授、浜津良輔首都大学元准教授、中野逸夫岡山大学名誉教授、田村詔生新潟大学名誉教授、坂本宏東京大学教授に感謝します。Geant4につながる研究にご貢献頂いた高岩義信筑波技術大学元教授、神崎純一高エネルギー加速器研究機構講師に感謝します。Geant4およびその医学応用のための研究は、科学研究費(25246044、13740171、11694102、08740222、07640427)およびJST CRESTの助成を受け実施されました。

参考文献

1. 物理屋のためのインターネット講座(第28回)活動編 測定器シミュレーターの国際共同開発(1). 尼子勝哉、佐々木節. 3, 丸善, 1998年, Parity. 13(3), 70-74, 1998-03, 第13巻, ページ: 70-74.
2. 物理屋のためのインターネット講座(第28回)活動編 測定器シミュレーターの国際共同開発(2). 尼子勝哉、佐々木節. 4, 丸善, 1998年, Parity, 第13巻, ページ: 70-74.
3. *The Superconducting Super Collider Project*. Perl, Martin L. s.l.: SLAC, 1986, Vols. slac-pub-3943.
4. CERN. *The Large Hadron Collider*. [Online] <http://home.cern/topics/large-hadron-collider>.
5. Ole-Johan Dahl, Bjørn Myrhaug, and Kristen Nygaard. *Common Base Language*. s.l.: Norwegian Computing Center, 1970.
6. StroustrupBjarne. *The C++ Reference Manual*., AT&T Bell Labs Computer Science Technical Report No. 108, 1984.
7. StroustrupBjarne. *Communication and Control in Distributed Computer*. s.l.: Cambridge University, 1979.

PhD Thesis.

8. The C++ Programming Language (2nd edition). : Addison-Wesley, 1991. ISBN 0- 201- 53992- 6.
9. ZhouXiling. An Introduction To Oop -- Object-oriented Programming --. : KEK-INTERNAL-92-16, 1992.
10. *Objet oriented analysis and design of GEANT based detector simulator*. Amako, Katsuya. San Francisco, USA , 1994. CHEP1994.
11. GEANT steps into the future., Rune Brun, San Franciso, USA , 1994. CHEP1994.
12. Booch, Grady. *Object-oriented Analysis and Design with Applications* . s.l. : Benjamin/Cummings Pub, 1991.
13. Rumbaugh, James, Jacobson, Ivar, Booch, Grady. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. s.l. : Addison-Wesley Longman, 1998.
14. Geant4 Collaboration. User Requirements Document.,1994,<http://geant4.web.cern.ch/geant4/OOAandD/URD.pdf>.
15. Object Analysis and Design. [Online] http://geant4.web.cern.ch/geant4/OOAandD/analysis/class_diags/index.html.
16. http://geant4.cern.ch/collaboration/working_groups/novice_extended_examples/coding_guidelines_final.txt.
17. http://geant4.kek.jp/~tanaka/DAWN/About_DAWN.html
18. 小特集「高度放射線医療のためのシミュレーション基盤の開発」, シミュレーション, Vol.28 No1, 2009,
19. *Verification of the dose distributions with GEANT4 simulation for proton therapy*. T Aso, A Kimura, S Tanaka, H Yoshida, N Kanematsu, T Sasaki, T Akagi. 2005, IEEE transactions on nuclear science, Vol. 52, pp. 869-901.
20. Measurements of total and partial charge-changing cross sections for 200-to 400-MeV/nucleon C 12 on water and. T. Toshito et.al. 2007, Physical Review C, Vol.75 pp2-40
21. Validation of New Geant4 Electromagnetic Physics Models., Toshiyuki TOSHITO et.al., 2011, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, 918-922.
22. GEANT4 based simulation framework for particle therapy system. Tsukasa Aso, Akinori Kimura, Satoru Kameoka, Kouichi Murakami, Takashi Sasaki, Tomohiro Yamashita. 2007, 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.
23. 放射線シミュレーションのためのツールキット Geant4 の医学応用. 佐々木節、大町千尋, 歳藤利行, 山下智弘, 阿蘇司, .2013年, 医学物理, 第 33 卷, ページ: 76-81.
24. T.Aso, et.al. PTSiM. [Online] <https://wiki.kek.jp/display/g4med/PTsim>.
25. A. Kimura, et.al. gMocren. [Online] <http://geant4.kek.jp/gMocren/>.
26. *A visualization tool for Geant4-based medical physics applications*. A. Kimura, S. Tanaka, T. Sasaki. 2006, Int. J. of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol. 1, pp. 462-463.
27. *DICOM Interface and Visualization Tool for Geant4-Based Dose Calculation*. A. Kimura, S. Tanaka, T. Aso, et al. 2005, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record., Vol. 2, pp. 981-984.
28. *DICOM Data Handling for Geant4-Based Medical Physics Application*. A. Kimura, T. Aso, H. Yoshida, et al. 2004, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record., Vol. 4, pp. 2124--2127.
29. Tsukasa Aso, Yoshikazu Maeda, Go Iwai, Wataru Takase, Takashi Sasaki, Yoshiyuki Watase, Tomohiro Yamashita, Takashi Akagi, Yuki Nakano., *Extension of the particle therapy simulation framework to hospital information systems and multi-grid*. s.l. : Computational Science and Engineering (CSE), 2012 IEEE 15th International Conference on, 2012.
30. *Geant4-based particle therapy simulation framework for verification of dose distributions in proton therapy facilities*, T.Akagi, T.Aso, G.Iwai, A.Kumura, S.Kameoka, S.B.Lee, Y.Maeda, N.Matsufuji, T.Nishio, C.Omachi, S.Park, T.Sasaki, T.Toshito, W.Takase, T.Yamashita, Y.Watase, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 4 (2014) pp.896-900.
31. *Common platform of Monte Carlo dose calculation on universal grid interface with Geant4 based particle therapy simulation framework*, G.Iwai, W.Takase, T.Aso, Y.Watase, T.Sasaki, T.Akagi, T.Yamashita, Y.Maeda, T.Nishio, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 489 (2014) 012001, pp.1-5.
32. *Effect of inhomogeneity in a patient's body on the accuracy of the pencil beam algorithm in comparison to Monte Carlo*. T Yamashita, T Akagi, T Aso, A Kimura, T Sasaki. 2012, Physics in medicine and biology, Vol. 57.
33. *A clinical use of Monte Carlo simulation in Nagoya Proton Therapy Center*, Chihiro Omachi, Toshiyuki Toshito, Kensuke Hayashi, Hiroki Shibata, Keisuke Yasui, Kenichiro Tanaka, Tomohiro Ueno, Shigeru Isoyama, Jun-etsu Mizoe, Hiroyuki Ogino, Hiromitsu Iwata, Japanese Journal of Medical Physics (Igaku Butsuri) , Vol. 33 Supplement No.1 p.175 April 2013
34. *Clinical experience of Monte Carlo dose calculation in proton therapy using spot scanning irradiation system in*

Nagoya Proton Therapy Center, Toshiyuki Toshiyuki, Chihiro Omachi, Keisuke Yasui, Kensuke Hayashi, Yoshiro Kibe, Hiroyuki Sugai, Kenichiro Tanaka, Eiki Nikawa, Kumiko Asai, Akira Shimomura, Hideto Kinou, Shigeru Isoyama, Hiroyuki Ogino, Hiromitsu Iwata, Jun'etsu Mizoe, *The 7th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics Abstract Book* 86, 2014

35. Estimation of an output factor using GEANT4-base Monte-Carlo dose calculation for proton therapy. Maeda Yoshikazu, 2014, *Igaku Butsuri. Supplement*; ISSN 1345-5362, vol 34

36. <http://fismed.ciemat.es/GAMOS/>

37. <http://www.topasmc.org/>

38. *The PTSim and TOPAS Projects, Bringing Geant4 to the Particle Therapy Clinic*, Takashi AKAGI, Tsukasa ASO, Bruce FADDEGON, Akinori KIMURA, Naruhiro MATSUFUJI, Teiji NISHIO, Chihiro OMACHI, Harald PAGANETTI, Joseph PERL, Takashi SASAKI, Daren SAWKEY, Jan SCHÜMANN, Jungwook SHIN, Toshiyuki TOSHITO, Tomohiro YAMASHITA and Hajime YOSHIDA, *Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 2, pp.912-917 (2011)

39. Geant4 講習会 2016. <https://wiki.kek.jp/display/geant4/Geant4+Japanese+Tutorial+2016>.

40. *Geant4-a simulation toolkit*. S. Agostinelli, et. al. 2003, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 506, pp. 250–303.

41. *Geant4 developments and applications*. J. Allison, et. al. 2006, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 53, pp. 270-278.

42. *Recent developments in Geant4*. Geant4 Collaboration. 2016, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. Volume 835, pp. 186-225.

43. Steven Farrell, Andrea Dotti, Makoto Asai, Paolo Calafiura, Romain Monnard Andrea. Multi-threaded Geant4 on the Xeon-Phi with Complex High-Energy Physics Geometry. 2016, <https://arxiv.org/abs/1605.08371>.

44. *A CUDA Monte Carlo simulator for radiation therapy dosimetry based on Geant4*. N. Henderson, et.al. *Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2013 (SNA + MC 2013)*.

45. Shogo Okada, Koichi Murakami, Katsuya Amako, Takashi Sasaki, Sébastien Incerti, Mathieu Karamitros, Nick Henderson, Margot Gerritsen, Makoto Asai, Andrea Dotti. GPU acceleration of Monte Carlo simulation at the cellular and DNA levels. *Innovation in medicine and healthcare* 2015. 2016, 323-332.