

KEK大型シミュレーション研究外部評価委員会  
評価報告書

KEK大型シミュレーション研究外部評価委員会

2009年2月1日

## 評価委員会について

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、国内における高エネルギー加速器科学および関連する分野の大規模シミュレーションを支援する共同利用プログラム「大型シミュレーション研究」を実施している。KEK は世界でも有数のスーパーコンピュータを整備しており、その使用はこのプログラムにもとづく研究の公募によって進められる。応募課題の審査は「大型シミュレーション研究審査委員会」によって行われ、課題の採否と計算時間の配分が決定される。2003 年度から 2008 年度にかけて、のべ 118 のプロジェクトがこのプログラムで採択され、多くの研究成果が発表されている。本評価委員会は、2003 年度から 2008 年度にかけて大型シミュレーション研究によって得られた研究成果を評価し、改善すべき点を指摘することで、KEK が今後とるべき方針の指針とすべく KEK 機構長が設置したものである。

KEK 機構長によって本評価委員会に課された任務は以下のものである。

- 本プログラムのもとでなされた研究活動に関する評価
- 本プログラムの組織・運営に関する評価
- 本プログラムの短期、中期および長期の施設更新計画に関する評価

本評価委員会のメンバーは以下の通りである。

早川尚男	京都大学基礎物理学研究所
Piet Hut	プリンストン高等研究所
伊藤聡	東芝研究開発センター
川合光	京都大学大学院理学研究科
二宮正夫 (委員長)	岡山光量子研究所
土岐博	大阪大学核物理研究センター
Peter Weisz	マックス・プランク物理学研究所
山本均	東北大学大学院理学研究科

本評価委員会は、2008 年 12 月 4 および 5 日に開催された。大型シミュレーション研究の研究プロジェクト責任者からの研究成果に関するヒアリングを行い、本プログラムの運用に関して KEK の担当者から説明を受けた。

# 目次

<b>1</b>	<b>「大型シミュレーション研究」の目的</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>研究成果について</b>	<b>4</b>
2.1	格子 QCD	4
2.2	原子核理論	7
2.3	弦理論	8
2.4	加速器におけるビーム-ビーム効果のシミュレーション研究	8
<b>3</b>	<b>将来計画に関する勧告</b>	<b>9</b>
3.1	短期的戦略に関する勧告	9
3.2	中期および長期的将来計画に関する勧告	10
<b>4</b>	<b>まとめ</b>	<b>11</b>

# 1 「大型シミュレーション研究」の目的

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、加速器科学およびその関連分野の研究所であり、素粒子・原子核物理などを主な研究対象としている。このため、KEK は高エネルギー物理学実験のための加速器や検出器を維持運転すると同時に、高エネルギー物理学の研究に必要な計算機施設も有している。スーパーコンピュータはその中でも欠くことのできない主要な部分となっている。

KEK のスーパーコンピュータシステムは、共同利用プログラム「大型シミュレーション研究」を通じて利用されている。このプログラムでは、素粒子・原子核物理学および関連分野から、KEK でスーパーコンピュータを使って実施する研究プロジェクトを公募する。応募できるのは、国内の大学や研究所に所属する研究者、あるいは機構長が必要と認めた者である。

本委員会は、素粒子・原子核物理学において計算機を用いた研究がますます重要になってきていると考える。こうした研究は明らかに KEK の研究プログラムにおいて欠くことのできないものである。量子色力学 (QCD) は強い相互作用の性質を記述していると広く考えられているが、このことは深い意味をもっている。人類が今や、強い相互作用の基礎理論として非常に確かな候補を手にしており、しかもそれが非常に単純な数式で表されるというのは驚くべきことだ。基礎となる式は非常に単純な形をしているにもかかわらず、量子色力学は非常に強い非線形性を持ち、数値計算を使わないと理論を解くことはできない。QCD のシミュレーションは、質量生成のメカニズムやクォークとグルーオンの閉じ込めの性質を精密に計算してみせることができるようになるだろう。さらには、KEK で進められている B ファクトリー実験や将来のスーパー B ファクトリー実験の対象である B 中間子崩壊の物理など、素粒子現象論の解析に欠かせない情報を与えることになる。

湯川秀樹の 1935 年の先駆的な研究から 70 年をへて、核力の計算が QCD のシミュレーションによってついに可能になったのは大変すばらしいことだ。計算で得られた核力の情報は核構造の研究へのインプットとなる。このような形で、シミュレーションは素粒子物理と原子核物理の間のギャップを埋める働きができるようになった。

本委員会は、物理学における普遍性の重要性も強調しておきたい。実際、格子 QCD の創始者の Kenneth Wilson は、二次相転移の研究でノーベル賞を受賞した。本委員会の見るところ、多くの研究プロジェクトは非平衡統計力学の研究とも共通の関心を持てる課題のようであった。この意味で、本委員会としては、他分野の研究者との共同研究をより積極的に進めるよう奨励したい。

2008 年のノーベル物理学賞は、3 人の日本人素粒子物理学者に与えられたが、このことは純粋科学の重要性を再認識させるものといつてよいだろう。将来は、純粋科学においてもますます複雑な問題を扱わなければならないのは明らかで、本委員会は、数値的方法がより重要あるいは本質的にすらなると確信する。KEK の大型シミュレーション研究のもとで行われている研究は、まさにこの方向にあるもので、さらに推進すべきものである。この分野でこのような最先端の研究を実施するのに必要な計算資源は莫大なものになり、個別の研究グループが導入し維持してい

くのはほぼ不可能である。その意味で、素粒子原子核研究のコミュニティは、KEK が世界をリードするスーパーコンピュータを提供していることを高く評価している。

本委員会としては、大型シミュレーション研究の対外的活動や広報活動の役割も無視することはできない。これらは、より広いコミュニティからの継続的な理解や支援を受けるためにぜひとも必要なことである。このプログラムで得られた研究成果については、すでにトップレベルの専門誌に発表され KEK のアニュアルレポート等でも紹介されているが、このプログラムが扱う基礎科学の分野では、非専門家にもわかる形で情報を発信していくことが重要である。この意味で、研究成果を定期的に新聞などのマスメディアに発表していくことが非常に重要になる。このような研究成果の発信を計画し実施していくためには、KEK 広報室の役割は非常に重要で、サイエンティフィック・コミュニケーターの役割をするスタッフを増員するなどの措置を取ることが望ましい。大型シミュレーション研究での研究成果も、当然その中でカバーしていくべきものであろう。

本研究プログラムで得られた研究上の知識や技術上の経験を有効に使うために、開発されたソフトウェアを他の研究グループが自由に使えるようにすることも検討すべきである。

## 2 研究成果について

20 世紀、理論物理学は驚くほどの速さで進歩したが、なお解かれていない重要な問題も数多い。その多くは非線形性の強い問題で、そこでの計算物理の果たすべき役割はますます重要になってきている。QCD のシミュレーションはその典型的な例であろう。基礎となる方程式は非常に単純であるにもかかわらず、その解を得るには大規模な数値シミュレーションが必要となる。KEK の大型シミュレーション研究で扱われている研究は、格子 QCD にとどまらず、超弦理論、原子核物理、加速器設計など、加速器科学に関連する広い分野にまたがっている。本評価委員会では、それらのうち 6 つの研究グループから研究報告を受けた。

### 2.1 格子 QCD

量子色力学 (QCD) は、強い相互作用の基礎理論の候補となっているものである。自然界には他に、弱い相互作用、電磁相互作用および重力相互作用があり、QCD はそれらを含む自然界の基礎理論の有効理論でしかないが、量子電磁力学 (QED) とは違って数学的にも無矛盾な理論であり、ハドロンの物理をあらゆるエネルギースケールで記述できるものだと考えられている。前章ですでにのべたが、クォークとグルーオンの複雑なダイナミクスが QCD の単純な基本相互作用で要約されているのは驚くべきことである。

QCD のもつ漸近自由性という性質のために、ハロン反応の高エネルギーでの振る舞いは QCD の摂動論を使って計算することができる。理論と実験との一致は、

深非弾性散乱の構造関数のスケーリングやジェット生成など、知られているあらゆる場合で、10%以下のよい精度で確認されている。しかし、これだけではQCDを強い相互作用の基礎理論として確立するには不完全だ。そのためには、低エネルギーでの安定粒子のスペクトル、共鳴状態、散乱振幅などの検討が必要となる。それには非摂動的手法が必要であり、これまでのところ、理論を時空格子上に定義して計算機シミュレーションで計算する格子QCDだけが系統的手法として知られている。格子QCDではその莫大な数の自由度、近似によって生ずる系統誤差の制御、そして独立な統計サンプルを得るのに必要なCPU時間のために、スーパーコンピュータのもたらす計算能力が本質的に重要である。

もう一つの研究の方向性としては、QCDを基礎理論として受け入れた上で（それには確かにもっともな証拠がある）、ハドロン形状因子や弱い相互作用に現れる演算子の行列要素などの非摂動的な予言を与えるという進み方がある。これらは小林益川行列要素など、標準模型のパラメータを決定する上で不可欠なものである。

KEKで研究している格子QCDのグループとしては複数のグループがある。最大のグループ(scqcdグループ)の目標は上記の行列要素を計算し提供することである。実際、前回の評価委員会報告でも欠かれている通り、このグループの $B_B$ パラメータの計算は大きなインパクトをもち多くのグループに使われた。だが、それだけではなくほとんどすべてと言ってもよいくらい多くの重要なトピックがKEKの格子計算プロジェクトのなかで行われてきた。例えば、閉じ込め機構の研究、散乱における共鳴状態の研究、重イオン衝突実験に関係する有限温度・密度の物理、有効核力の研究、中性子電気双極子モーメントの研究など、非常に多彩なものである。KEKで行われた研究はこれらのすべての分野で顕著な貢献をしてきた実績をもつ。これらの質の高い研究成果をあげるうえで、KEKのスーパーコンピュータがもたらした計算能力が不可欠だったことは明らかだが、いくつかは研究者らの革新的アイデア（それを得るうえでも計算能力が影響を与えたのかもしれない）や以下でのべるような新しい計算手法、scmelqcdグループが使った最大エントロピー法のようなデータ解析手法の改善も、成功の要因だと言えるだろう。

KEKの格子QCDグループは、世界的にもトップを競うグループである。彼らは影響力がありよく引用される論文を数多く出版し、セミナーや国際会議でも多くの発表をしてきた。実際、今年(2008年)の格子QCDの大きな国際会議においても、橋本省二氏(KEK)がプレナリー講演に招かれ、その前の年は松古栄夫氏(KEK)がプレナリー講演をしている。

本評価委員会の会合では、3つの格子QCDグループ(scqcd, scnfqcdおよびscmelqcd)から報告を受けた。ここ数年では、初めの2つのグループがハイライトともいえる研究成果をあげ、広く認められており、本委員会も強く印象づけられた。これらの成果は以下で詳しくのべるが、これらの大きな進歩があったとはいえ（あったからこそ、と言うべきか）KEKはこれらの重要な基礎研究に対して手厚いサポートを続けるべきだということをここで強調しておきたい。

scqcd scqcdグループは、この期間、KEKスーパーコンピュータの最大のユーザグ

ループであった。このグループの最近の大きな成果は、QCDが自発的対称性の破れという現象を起こすことを明らかな形で示すことに成功したことであろう。この現象は、パイ中間子の質量が小さいことを説明し、カイラル摂動論という低エネルギー有効理論の基礎となるものである。このグループが成功した理由は、ギンスバーグ・ウィルソンあるいはノイバーガー・フェルミオンと呼ばれる厳密なカイラル対称性を保つ非常に特殊な格子フェルミオン定式化を用いたことにある。これは厳密なカイラル対称性をもつ唯一の現実的な格子定式化である。他の定式化はこの対称性を壊しているために、明示的な対称性の破れと自発的な対称性の破れを区別することが非常に困難になる。KEKのグループは、この定式化による初めての本格的なシミュレーションを行うことに成功した。これまでのところ、このエレガントな定式化は、他の格子フェルミオン定式化のおよそ30倍もの余分な計算コストを要し、特別大きな計算資源を必要とする。

この数年で、このグループは、パイ中間子の電磁形状因子、電子陽電子散乱に現れるカレント相関関数など、多くの物理量の計算を行った。また、パイ中間子の崩壊定数など、カイラル対称性の破れにともなう様々なパラメータを計算し、カイラル対称性が予言する恒等式を確かめることにも成功し、カイラル凝縮の計算をさまざまな方法で行ってすべて一致することも示した。また、彼らの特に独創的な研究として強調しておきたいのは、無限体積でのトポロジに関係する性質が有限体積でのトポロジを固定したシミュレーションから得られることを示したことである。

このグループの将来計画は、B中間子の物理に関する行列要素を、より大きく連続極限に近い格子を使って精密に計算するという野心的なもので、そのためにアルゴリズムと計算コードのさらなる改善を進めている。

このグループの研究の水準は極めて優れている。本委員会として、このグループの研究成果に対して大いに祝意を述べたい。

**scnfqcd** scnfqcdグループの目標は、量子力学的解析で使われる核子-核子ポテンシャルを第一原理計算で求めることである。2007年には、その目標に向かって大きな一歩を踏み出す研究を行った。それは、QCDで定義されるベーテ・サルペータ振幅を通して得られる有効ポテンシャルが、広く使われる現象論的ポテンシャルのもつ重要な性質をすべて満たしていることであった。つまり、長距離では湯川ポテンシャルに一致し、中間距離ではより引力的になる一方、近距離では強い斥力をもつ。この研究は、斥力芯の存在をクォークとグルーオン自由度を使った第一原理計算で初めて示したものと言えるであろう。この論文はNature誌によって、2007年のハイライト研究の一つにあげられた。計算自体はクエンチ近似にもとづくシミュレーションで行われたものだが、それでも計算すべき量が複雑なため、必要な計算能力は非常に大きい。

すでにテンソル力のポテンシャルも計算されており、現象論的ポテンシャルと

一致することが示された。ハイペロン・ポテンシャルの計算への拡張も非常に興味深い。

この手法は、確かに非常に有望である。ただし、手法が正しいことを実証するにはまだ調べるべきことも多い。すでにポテンシャルのエネルギー依存性の研究は進んでいるが、おそらくより重要なのは、斥力芯の性質が計算で使った演算子の形によらないかを調べることだろう。また、より一般的に、ベータ・サルペータ振幅と有効ポテンシャルとの理論的な関係の研究も重要である。

本委員会は、KEKがこの研究の重要性を認識し、グループの活動をさらに支援されるよう期待したい。

## 2.2 原子核理論

原子核物理には、陽子と中性子とからなる原子核を理解しようとする多様な研究がある。最終的には、基礎理論であるQCDで得られた核子-核子相互作用を使ってすべての原子核の統一的な理解を得ることが目標となるであろう。現に、このための理論的な手法を開発する研究は進んでいるが、今のところ完全ではない。当面、有効相互作用から出発して、原子核を数値的手法を用いて記述し、実験値と比較するのが主要な理論研究手法になっている。

本評価委員会では、原子核物理に関しては1件の研究報告があった。実際は、スーパーコンピュータを必要とする原子核物理研究プロジェクトは他にも数多くある。現状では、それらの多くは大阪大学核物理研究センター(RCNP)のスーパーコンピュータを用いて行われている。

ここで報告されたscamdグループの研究は、反対称分子動力学法(AMD法)による核構造および反応の研究である。AMD法は、核子を波束として記述し反対称化する手法にもとづいている(波束は通常ガウス型で、その位置と運動量が変分パラメータとなる)。この手法の利点は、一つだけ中心をもつ殻模型の原子核だけでなく、いくつか中心をもつクラスター型の原子核を、変分法を使って他の仮定をおくことなく扱えることにある。時間依存型の定式化を用いることで、このグループは原子核反応にかかわる多体シュレーディンガー方程式を解き、多粒子破砕片の質量分布を再現することに成功した。同時に、液体気体相転移の研究をし、AMD法の範囲内で明確な相転移の証拠を得た。これらの成功は、AMD法が、さまざまな質量数をもつ原子核の研究に適用可能であることを示唆するものだ。

強力なスーパーコンピュータを使うことで、これまでに質量数40という大きな原子核を計算することもできた。その基底状態は球対称だが、励起状態の中には $C_{12} + Si_{28}$ という形のクラスター構造をもつものもあり、その回転にともなうバンド構造も発見された。これは実験データで得られたバンド構造を再現するものである。これは、原子核構造研究におけるAMD法の大きな成果と言える。このような例は他にもさまざまな原子核において得られている。



本委員会は、KEKがこのプロジェクトを将来においてもサポートすべきと考える。AMD法のさらなる発展においては、核子-核子や三体相互作用を取り入れること、また様々なクラスター現象を解析することが重要となるであろう。こうした研究では、明らかにより大きな計算能力が必要となる。

## 2.3 弦理論

超弦理論は、自然界の4つすべての相互作用を統一する理論として第一の候補であり、素粒子の標準模型に加えて重力を自然な形で含んでいる。理論は10次元の時空で定式化され、われわれの4次元時空は理論の帰結としてあらわれるものと考えられている。このことが、超弦理論が「すべてに関する理論」、つまり物質とその相互作用、さらには時空までもふくむすべてを説明する理論と言われる理由である。これまでのところ、超弦理論の自己完結的な定式化は存在しないが、いくつかの候補は知られている。ただし、弦の力学は極めて複雑なので、この理論から意味のある予言を導くには数値計算の役割が重要になると思われる。

本評価委員会では、sematrixグループが研究報告を行った。このグループは超弦理論の数値シミュレーションに関して世界をリードするグループの一つである。最近のこのグループの研究としては、いわゆるAdS/CFT対応のテストがあげられる。これは超弦理論の興味深い性質のひとつで、ある条件のもとでは量子場の理論と古典重力理論が同じ物理を記述しているとされる。この対応に関しては、これまで多くの例について確認されているため、より一般的な条件でも成り立つと期待されている。このグループは1次元ゲージ理論の強結合でのシミュレーションを行い、結果を対応する重力理論と比較した。結果はまさに予期した通り、この対応をよい精度で確認するものであった。

このグループの将来計画は4次元時空の導出にかかわるもので、本委員会としても強い印象をもった。4次元時空が数値シミュレーションで導くことができるかどうかは、極めて興味深い問題といえるだろう。本委員会は、このグループがこの方向でさらに研究をすすめることを奨励したい。KEKとしてもより強力な計算機を提供することで彼らの研究をサポートすべきである。

## 2.4 加速器におけるビーム-ビーム効果のシミュレーション研究

KEK Bファクトリーのような高輝度加速器では、ビームビーム効果が得られる輝度の制限をあたえることが多い。今のところ、ビームビーム相互作用を評価できる現実的な方法は、いわゆるストロング・ストロング・シミュレーションと呼ばれるものしか存在しない。これは、バンチ中の個々の粒子の動きを対向バンチが作る電荷分布の中で追いかけていくものである。現在のところ、 $10^5$ 個の粒子をまとめて一つのマクロ粒子として扱ったとしても必要なCPU能力はスーパーコンピュータを必要とする程度にまで達してしまう。ビームが有限の角度で交差する加速器にお

いては、輝度を最大化するためにクラブ交差と呼ばれる技術が使われるが、ここでもビームビーム効果を評価して可能な到達輝度を知るには、ストロング・ストロング・シミュレーションが用いられる。現在の KEK B ファクトリーに関しては、クラブ交差技術を用いない場合のビームビーム効果は実験とシミュレーションでよく一致しているが、クラブ交差技術を用いたときにはシミュレーションで期待される2倍程度の輝度向上効果に対して、実際の加速器では若干の向上しか得られていない。この問題を理解することは、KEK B ファクトリーだけでなく、将来のスーパー B ファクトリー計画においても死活的に重要である。これほどまでに重要な問題であるにもかかわらず、現在のところこの問題に割り当てられているマンパワーはあまりにも限られている。本委員会としては、今後より多くの人員がこの問題に対して割かれるよう期待したい。また、銀河の運動を研究しているグループとの共同研究は有益かもしれない。ここで得られるシミュレーション技術は、LHC, J-PARC, ILC 加速器でも有用であろう。

### 3 将来計画に関する勧告

#### 3.1 短期的戦略に関する勧告

大型シミュレーション研究のもとで行われた研究活動の成功は、本評価委員会としても強く印象に残るものであった。ここで行われた研究は、素粒子原子核物理の研究を新たなステージに導くものだが、KEK が提供してきた世界でもトップクラスの計算能力がなければ実現できなかったであろう。また、この研究活動のうち無視できない部分が、KEK 外の研究者によるものであることを考えると、計算資源を国内のコミュニティの共同利用に供するというやり方が効果的であることがわかる。

こうした非常に順調な研究活動を維持し、さらに発展させるためには、KEK のもつ世界でもトップクラスの計算能力を維持することが本質的に重要である。格子 QCD の分野を例にあげれば、KEK と筑波大を基盤とするグループは格子 QCD コミュニティのなかでも世界をリードする位置をしめている。KEK は、十分な計算資源を継続的に提供していくことで、こうした世界的に見ても強い研究を維持すべきである。計算機業界の進歩は非常に速いので、タイミングを外すことなく計算機を更新していくことが重要となる。2006 年に導入された BlueGene/L は、もはや格子 QCD の分野で世界的な競争をリードする位置にはいないとの報告を受けた。であるならば、2011 年に予定されている機器更新は、日本の研究活動の強い部分をのばすためには、まさに必須のものだと言わねばならない。

もう一点、本委員会が重要だと考える点がある。それは、計算物理が科学の領域を広げる可能性をもっているという点である。本委員会の会合でも、scnfqcd グループによる興味深い例が示された。このグループは格子 QCD を使って核力を計算することができるようになった。ここで得られた核力は核構造の研究にすぐに結びつくものだ。この研究を通じて、素粒子と原子核物理との非常におもしろい共同研究

が期待できる。この意味で、本委員会の会合で KEK のスタッフが報告した「計算基礎科学連携拠点」の構想は非常に時宜を得ており興味深い。この構想は、KEK が筑波大学および国立天文台と共同で計算物理学に関する新しい連携研究所を設立しようとするものだ。この構想は、素粒子、原子核および天文学宇宙物理の研究者による刺激をあたえ、高エネルギー物理の新しいフロンティアを開拓することになるであろう。本委員会は、上記の三機関が素粒子・原子核・天文学宇宙物理の間の共同研究を促進するためのあらゆる努力をするよう、強く勧告したい。

日本国内では、理化学研究所が神戸に 10 ペタフロップス級のスーパーコンピュータを建設する巨大な国家プロジェクトが進行している。建設は 2012 年ころ完了する予定である。このプロジェクトは、基礎科学を含むすべての計算科学の分野に対して大きなインパクトをあたえるものだ。これまでに格子 QCD 分野がスーパーコンピュータ開発で果たしてきた主導的な役割を考えれば、この分野がプロジェクトに参加してこれまでの経験を共有することは自然なことであろう。そうすれば、計算科学の分野はアルゴリズムや最適化手法など共有できる手法が多いので、すべてのコミュニティにとって利益になると思われる。この意味で、KEK は連携拠点の他の機関と共同で、この国家プロジェクトを通じて計算科学の他のコミュニティとより協力していくことを検討すべきである。

「大型シミュレーション研究」の短期的将来に関する本委員会の勧告をまとめる。2011 年に予定されているスーパーコンピュータの更新は時宜を逸することなく行うべきである。これは大規模シミュレーションにおいても世界に知られるようになった KEK が、世界をリードする位置を保ち続けるためには、必須である。連携拠点の計画は、計算科学（これまでの素粒子・原子核だけでなく他の分野も含めて）における KEK の役割をさらに高めることにつながるであろう。

### 3.2 中期および長期的将来計画に関する勧告

本評価委員会に与えられた役割は、KEK の計算科学に関する短期的な計画だけでなく、中期および長期的計画を評価し勧告を与えることも含まれる。

中期的将来に関しては、上記の連携がその領域を拡大していくことが望ましい。我々が提案したいのは、KEK-天文台-筑波大の共同研究で、その計算に最もマッチするような専用計算機を開発する可能性をさぐるための詳細な検討を行うことだ。ありうる方向としては、国立天文台の牧野淳一郎教授らが進めてきた GRAPE プロジェクトのような専用機があげられる。また、CP-PACS や PACS-CS 計算機を開発してきた筑波大学のグループの経験も非常に役に立つであろう。KEK、天文台、筑波大の長がそれぞれ連携拠点の設立に関して合意したが、今後は連携拠点独自の計算資源の設計および建設にむけて詳細な青写真を検討するのが自然ではなかろうか。そのためには、計算物理の専門家だけでなく計算機科学の専門家が協力することが必要であろう。

長期的将来に関しては、この連携拠点を国を代表する計算科学のセンターへと発展させていくことが考えられる。理研が神戸で建設中のスーパーコンピュータは、応

用科学が主要な目標となっていることを考えると、この新しいセンターは純粋科学に焦点をあてるべきであろう。全体のコストを最小化するためにも、このセンターでは上記のような専用計算機の開発を真剣に検討すべきだ。100億円規模の予算が得られれば、世界をリードする規模のスーパーコンピュータを建設することも可能である。そうすれば、このセンターは純粋科学のシミュレーションで世界の研究を牽引するセンターとなるであろう。

中長期的将来に関してまとめる。KEKは、世界レベルのセンターを設立するポテンシャルを十分にもっている。そのスタッフの専門知識、使ってきたスーパーコンピュータの質、そして何よりこれまでにあげてきたすばらしい研究業績といくつかの学問上のブレークスルー。このどれをとっても、KEKが国立天文台や筑波大とともに純粋科学の新しいセンターを誘致するのに最適の場所だということを物語っている。このセンターがシミュレーションに関して世界をリードする場所になれば、世界中の研究者がこぞって集まるようになるであろう。

2008年のノーベル物理学賞は、日本人の理論物理学者に贈られたが、これは30年以上も前の業績に対するものであった。日本がこの優れた伝統を継承するには、2040年に顕彰されるような研究をささえる研究基盤を、いま整備することが必要である。一世代前の理論物理とは違い、現在の多くの研究は計算機シミュレーションを必要とするものになってきている。こうしたシミュレーションに関するハードウェアおよびソフトウェア開発で世界をリードする姿勢をもたなければ、たとえ個々の日本人研究者のレベルが高いとはいっても、日本が科学においてその卓越した地位を保つことはできないだろう。

## 4 まとめ

科学の進展の方向は、いま劇的に変わっているのかもしれない。KEK大型シミュレーション研究のもとで行われている研究の成果は、計算科学の手法が科学における新発見を生み出しうることを明らかに示している。いまや、QCDの微視的ダイナミクスを、厳密なカイラル対称性を保つことで、理論的にもっともきれいな形で調べることができるようになった。最近の格子QCDによる核力の計算は、素粒子と原子核物理の間に橋をかけることに成功した。この研究の目標は、原子核構造を最低限の仮定だけから出発して理解することだ。計算科学の手法は、超弦理論の非摂動的解析を通じてもっとも基本的なレベルでの私たちの宇宙に対する理解を広げることになるかもしれない。そして、KEKにとってもう一つの重要な応用はもちろん加速器シミュレーションである。これらすべての研究が、数値シミュレーションが科学における発見の方法を変革しつつあることを強く示唆しているように思われる。

KEKは、日本の素粒子原子核物理のコミュニティに最先端のスーパーコンピュータを提供することで、この分野における中心的な役割を担ってきた。実際、上にあげた新発見の数々を引き出したのはKEKが提供した計算資源であり、これらのコミュニティはみなKEKの貢献を高く評価している。したがって、本委員会は、KEK

がスーパーコンピュータシステムを時宜を逸することなく更新し、研究者らがさらなる発見を続けることができる規模の計算資源をもつことを強く勧告する。KEKのシステムの利用者は、確かにそうした新発見をもたらすだけの能力をもっている。

本評価委員会は、新たに設立する計算基礎科学連携拠点に関して説明を受けた。これは素粒子、原子核、天文学宇宙物理の研究者による共同研究を推進することで科学の進歩を加速しようとするものだ。これは、計算科学の方法が将来の科学全体の進歩を主導するという、興味深い例になるかもしれない。この新たな試みが成功するには、KEKの予算的あるいは人的な支援が重要になるだろう。

2008年、3人の日本人物理学者が、30年以上も前に行った純粋科学の仕事に対してノーベル賞を受けたが、将来の純粋科学においては、ノーベル賞を受ける研究の多くが計算機シミュレーションにその基盤を置くようになるのはほぼ疑いないと思われる。将来のために日本がいま、なすべきことは、純粋科学の研究者らが国際的な競争に勝てるような環境を用意することだ。