

筑波大学計算物理学研究センター  
外部評価報告書

平成 12 年 3 月

筑波大学計算物理学研究センター  
外部評価委員会

## まえがき

筑波大学計算物理学研究センターは、計算物理学とそれに関わる計算機工学の研究を推進するための全国共同利用施設として、平成4年4月に、10年時限を付して設置された。平成7年度からは、「卓越した研究拠点」(COE)の指定を文部省より受けている。

センターでは、平成4年度から8年度まで5ヶ年にわたり、「学術の新しい展開のためのプログラム」(略称新プログラム)の研究課題「専用並列計算機による「場の物理」の研究」が、岩崎洋一を研究リーダーとして実施された。この研究課題により、計算物理学に適した超並列計算機 CP-PACS (Computational Physics with Parallel Array Computer System) が開発製作され、平成8年9月にその完成を見た。センターでは、CP-PACS を最大限に活用して、素粒子物理学、宇宙物理学、物性物理学における物理学の基本的な重要問題の数値的研究を推進し、また平成9年度からは、原子核物理学を加えた4分野を対象として、CP-PACS の全国共同利用を行っている。さらに、平成9年度からは、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業「計算科学」のプロジェクト「次世代超並列計算機開発」において、CP-PACS の次に来るべき超並列計算機を目指した基礎研究を行っている。

平成11年度は、センター設立8年目にあたり、年度末には時限満了まで2年という時期を迎えた。この重要な節目を控え、センターでは、将来の方向を検討する活動の一環として、現在迄の研究活動及びセンターの今後について、平成11年度に第三者による外部評価を受けることとした。

外部評価は、素粒子物理学、宇宙物理学、物性物理学及び計算機工学の各分野にわたり、国内6名と国外2名、合計8名の委員から構成される外部評価委員会によって、外部評価資料及び実地調査に基づいて行われた。実地調査は、平成11年11月9日と10日の二日間にわたって実施された。

外部評価委員会報告書(英文を原文とし、その日本語逐語訳が付された)では、現在までのセンターの研究活動について高い評価を受け、また将来のセンターの方向について貴重な御意見と御提言を頂いた。御多忙の中を本センター外部評価の為に多くの時間と労力を割いて下さった、菅原寛孝外部評価委員会委員長はじめ、外部評価委員各位に厚く感謝を申し上げますとともに、今回の外部評価を貴重な糧として将来計画に取り組み、今後の研究活動の一層の発展を目指す所存である。

平成12年3月

計算物理学研究センター長  
宇川 彰

## 目次

<b>I</b>	<b>外部評価委員会委員名簿</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>外部評価実施経緯</b>	<b>5</b>
<b>III</b>	<b>外部評価実地調査日程</b>	<b>9</b>
<b>IV</b>	<b>Report of the Review Committee 外部評価委員会報告書（英語原文）</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>General comments</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Evaluation of individual field</b>	<b>20</b>
3.1	Particle physics . . . . .	20
3.2	Astrophysics . . . . .	22
3.3	Condensed matter physics . . . . .	23
3.4	Computer science . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Further comments especially regarding the Future</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>26</b>
<b>V</b>	<b>外部評価委員会報告書（日本語訳）</b>	<b>27</b>
<b>1</b>	<b>序</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>一般的コメント</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>各分野の評価</b>	<b>34</b>
3.1	素粒子物理学 . . . . .	34
3.2	宇宙物理学 . . . . .	35
3.3	物性物理学 . . . . .	36
3.4	計算機工学 . . . . .	36

4	追加コメント、特に将来について	37
5	結論	39
<b>VI</b>	<b>外部評価資料</b>	<b>41</b>
1	序	45
2	沿革	45
2.1	設置経緯及び目的	45
2.2	主要日誌	45
3	組織と運営	48
3.1	組織の概要	48
3.2	センター長	49
3.3	センター教官	49
3.4	研究員	49
3.5	センター教官及び研究員数の推移	51
3.6	運営	53
3.7	人事	58
3.8	卓越した研究拠点 (COE)	58
4	建物	59
5	計算機システム	60
5.1	システム概要	60
5.2	システムの整備	62
5.3	システムの運用	64
5.4	システムの利用と稼働の状況	65
5.4.1	登録ユーザ	65
5.4.2	CP-PACS 稼働統計	66
6	研究活動	69
6.1	概要	69
6.2	CP-PACS プロジェクトの概要	69
6.3	CP-PACS の開発・製作	72
6.3.1	CP-PACS の設計方針と基本仕様	72
6.3.2	ノードプロセッサ	72

6.3.3	プロセッサ間相互結合網	75
6.3.4	並列入出力装置	77
6.3.5	擬似ベクトル処理向けコンパイラ	77
6.3.6	システムソフトウェア	79
6.3.7	物理応用計算における実効性能	79
6.4	CP-PACS による計算素粒子物理学	82
6.4.1	クエンチ近似におけるハドロン質量スペクトル	82
6.4.2	完全な QCD のハドロン質量スペクトル計算	84
6.4.3	クォーク質量	86
6.4.4	重いハドロンの物理の研究	87
6.4.5	有限温度 QCD	88
6.5	CP-PACS による計算宇宙物理学	90
6.5.1	宇宙再電離の 6 次元輻射輸送計算	90
6.5.2	T タウリ型星フラットスペクトルの 5 次元輻射輸送計算	91
6.6	CP-PACS による計算物性物理学	93
6.6.1	第一原理計算による物性予測	93
6.6.2	高温超伝導	93
6.6.3	スピン系	93
6.7	未来開拓研究「次世代超並列計算機の開発」	95
6.7.1	並列入出力・並列可視化機構	95
6.7.2	プロセッサ・メモリ融合型 LSI	99
<b>7</b>	<b>共同利用</b>	<b>103</b>
7.1	大規模数値シミュレーションプロジェクト	103
7.1.1	趣旨	103
7.1.2	実施状況	103
7.2	センター主催研究会	105
<b>8</b>	<b>国際交流</b>	<b>106</b>
8.1	センターにおける研究への参加	106
8.2	COE 外国人研究員	106
8.3	国際会議開催	106
<b>9</b>	<b>主要研究業績リスト</b>	<b>107</b>
9.1	概要	107
9.2	CP-PACS プロジェクト	108
9.2.1	CP-PACS プロジェクト報告書	108

9.2.2	CP-PACS プロジェクト全般	108
9.2.3	CP-PACS のアーキテクチャとソフトウェア	109
9.2.4	CP-PACS の性能評価	111
9.3	CP-PACS による計算物理学	116
9.3.1	学術誌及び国際会議発表論文 (素粒子物理学)	116
9.3.2	国内学会・研究会口頭発表 (素粒子物理学)	120
9.3.3	学術誌及び国際会議発表論文 (宇宙物理学)	123
9.3.4	国内学会・研究会口頭発表 (宇宙物理学)	124
9.4	未来開拓研究	126
9.4.1	年次報告	126
9.4.2	並列入出力・並列可視化	126
9.4.3	プロセッサ・メモリ融合型 LSI	126

第 I 部

# 外部評価委員会委員名簿

# 外部評価委員会委員名簿

## 委員長

菅原 寛孝      素粒子物理学      文部省高エネルギー加速器研究機構・機構長

## 委員

荒船 次郎      素粒子物理学      東京大学宇宙線研究所・教授

Norman Christ      素粒子物理学      Department of Physics,  
Columbia University・教授

島崎 眞昭      計算機工学      京都大学大学院工学研究科  
電気工学専攻・教授

杉本 大一郎      宇宙物理学      放送大学・教授

田中 英彦      計算機工学      東京大学大学院工学系研究科  
電気工学専攻・教授

寺倉 清之      物性物理学      通産省工業技術院  
産業技術融合領域研究所・首席研究官

Jack Dongarra      計算機工学      Department of Computer Science,  
University of Tennessee・教授

## 第 II 部

# 外部評価実施経緯

# 外部評価実施経緯

平成 10 年 12 月 25 日 平成 10 年度運営協議会

センターの将来計画を検討する活動の一環として、平成 11 年度に、外部評価を受けることを検討中であることが報告された。

平成 11 年 3 月 2 日 平成 10 年度第 6 回運営委員会

平成 11 年度に、外部評価を受けることが提案され、承認された。

同評価実施のための「外部評価実行委員会」の設置が承認され、センター長を委員長、センター運営委員を構成委員とすることとなった。

外部評価実行委員会の構成は次のとおりである。

委員長	宇川 彰	物理学系（計算物理学研究センター）教授
委員	梅村 雅之	物理学系（計算物理学研究センター）助教授
	朴 泰祐	電子・情報工学系（計算物理学研究センター）助教授
	梁 成吉	物理学系教授
	谷津 潔	物理学系教授
	押山 淳	物理学系教授
	山口 喜教	電子・情報工学系教授（平成 11 年 7 月 1 日より）
	板野 肯三	電子・情報工学系教授
	星野 力	機能工学系教授
	和田 耕一	電子・情報工学系（計算物理学研究センター）教授
	金谷 和至	物理学系（計算物理学研究センター）助教授
	吉江 友照	物理学系（計算物理学研究センター）助教授

平成 11 年 5 月 18 日 第一回外部評価実行委員会

外部評価の目的と、外部評価委員会による評価の方法及び日程に関する原案が審議され、承認された。

外部評価委員会委員長に、菅原寛孝機構長（素粒子物理学）を選任することが承認された。

平成 11 年 7 月 13 日 第二回外部評価実行委員会

外部評価委員会委員として、荒船次郎教授、Norman Christ 教授（以上素粒子物理学）、杉本大一郎教授（宇宙物理学）、寺倉清之首席研究官（物性物理学）、島崎眞昭教授、田中英彦教授、Jack Dongarra 教授（以上計算機工学）の 7 名が選任されたことが報告された。

外部評価実地調査の日程が平成 11 年 11 月 9 日・10 日と決定したことが報告された。

平成 11 年 9 月 7 日 第三回外部評価実行委員会

外部評価資料原案が回覧され、関係資料と共に外部評価委員に前もって送付することが了承された。

平成 11 年 10 月 12 日

外部評価実地調査に先立ち、以下の 4 点の資料が各委員あて発送された。

- 筑波大学計算物理学研究センター外部評価資料
- 筑波大学計算物理学研究センター研究業績リスト
- 筑波大学計算物理学研究センター「専用並列計算機を用いた「場の物理」の研究」報告書（平成 9 年）
- 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」平成 10 年度成果報告書（平成 11 年 2 月）

平成 11 年 11 月 9 日・10 日

外部評価委員会による実地調査が、センターにおいて開催された。

実地調査では、センター関係教官により、センター組織と運営、センター設置以来の研究成果（素粒子物理学・宇宙物理学・物性物理学・並列計算機工学各分野）、センターの今後の方向についての報告があり、それぞれについて外部評価委員との質疑応答が行われた。

また、二日目午後には、施設見学の他、未来開拓研究で開発されている並列入出力・可視化システムによるデモが行われた。

平成 11 年 11 月 -12 月

実地調査終了後、外部評価報告書の取りまとめ作業が行われた。

平成 12 年 1 月

菅原寛孝外部評価委員会委員長より宇川センター長へ外部評価報告書が送付された。

## 第 III 部

# 外部評価実地調査日程

# 外部評価実地調査日程

日時：平成 11 年 11 月 9 日及び 10 日

場所：筑波大学計算物理学研究センター 2 階セミナー室

第 1 日	平成 11 年 11 月 9 日 (火)
9 : 30 - 10 : 00	評価委員会打ち合わせ
10 : 00 - 11 : 30	センター概要説明 (宇川 彰)
11 : 30 - 12 : 30	研究活動報告 I
11 : 30 - 12 : 30	CP PACS の開発・製作 (朴 泰祐)
12 : 30 - 14 : 00	昼食
14 : 00 - 15 : 45	研究活動報告 II
14 : 00 - 14 : 45	CP PACS による計算素粒子物理学 (吉江友照・金谷和至)
14 : 45 - 15 : 15	CP PACS による計算宇宙物理学 (梅村 雅之)
15 : 15 - 15 : 45	CP PACS による計算物性物理学 (押山 淳)
15 : 45 - 16 : 15	休憩
16 : 15 - 17 : 00	研究活動報告 III
16 : 15 - 17 : 00	未来開拓プロジェクト (和田 耕一)
第 2 日	平成 11 年 11 月 10 日 (水)
9 : 30 - 10 : 00	評価委員会打ち合わせ
10 : 00 - 11 : 00	センターの今後 (宇川 彰)
11 : 00 - 12 : 00	質疑応答
12 : 00 - 13 : 30	昼食
13 : 30 - 14 : 30	施設見学と研究成果デモ (実時間並列可視化システム (朴 泰祐・梅村 雅之他)、実時間顔認証システム (安永 守利他))
14 : 30 - 15 : 00	休憩
15 : 00 - 17 : 00	評価委員会評価作業

第 IV 部

**Report of the Review Committee**  
**外部評価委員会報告書（英語原文）**

**January 2000**

# Report of the Review Committee of the Center for Computational Physics, University of Tsukuba

November 9 and 10, 1999

## 1 Introduction

Representing the review team were Prof. Jiro Arafune, University of Tokyo, Prof. Norman Christ, Columbia University, Prof. Jack Dongarra, University of Tennessee and Oak Ridge National Laboratory, Prof. Masaaki Shimasaki, Kyoto University, Prof. Hiro-taka Sugawara, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Prof. Daichiro Sugimoto, University of The Air, Prof. Hidehiko Tanaka, University of Tokyo, Prof. Kiyoyuki Terakura, National Institute for Advanced Interdisciplinary Research. Presenting from the Center for Computational Physics were Akira Ukawa, Taisuke Boku, Tomoteru Yoshie, Kazuyuki Kanaya, Masayuki Umemura, Koichi Wada, and others.

The day began with an overview of the Center by Akira Ukawa followed by a set of technical talks that described work in the Center and interdisciplinary activities. A brief caucus of the site visitors brought out some issues to be explored more fully. Several issues were identified by the reviewers, and were addressed by the investigators in written material and presentations at the site visit. In general, the investigators responded well to all issues raised by the site visitors.

Role of Center : The presenters made a persuasive case for the Center for Computational Physics. The CP-PACS project has served the community well over the past eight years.

Capability of the Team : The participants involved in the effort make up an excellent team with skills well matched to the project; this group assembles a unique team for world-class leadership in this area. Under the leadership of Akira Ukawa the researchers in particle physics, astrophysics, condensed matter physics, and computer science provides the expertise needed for this challenging project.

Applications : The applications presented involve long collaborations among the collaborators in other departments and universities in Japan. The applications and computational resources, while dedicated to specific areas, provide benefit to other areas as well. The future of the center rests on the development of the next generation of CP-PACS computer. It will continue to be used as a national facility for the areas of particle physics, astrophysics, condensed matter physics, and computer science. In addition the work will

be extended to wider fields such as computational biology and nuclear physics. While the application investigators will have to adapt their software to the next generation of computer equipment, this should provide a means of creating new methods, approaches, and algorithms that match highly parallel systems and the challenging applications.

Management : The management of the center, beginning with Yoichi Iwasaki and continuing with Akira Ukawa, has done an excellent job of providing a world-class facility in computational physics.

Briefing : In our wrap-up at the end of the visit, the overall impression was that the project is excellently conceived and the team is capable of continued success. The activities of the center are extremely important to advancing knowledge in the areas of particle physics, astrophysics, condensed matter physics, and computer science. The investigators are developing approaches and computer systems that allow applications to expand the frontiers of science. While there are a large number of investigators world wide with similar goals, the University of Tsukuba has one of the world's best combination of experts in these areas. The activity is extremely well conceived and organized; the components have been thought out and fit well together. The overall research atmosphere provides an excellent environment for these areas of research. The results of this will be broadly used and will continue in the future. Benefits also include results from the specific application research projects that will be enabled by this effort. The research is exciting, the need for the computing infrastructure is unusually clear as what is being proposed involves a collective coordination of computing, storage and network resources with various applications. Several of the investigators have outstanding records of research. The commitment to computer science research is strong and enthusiastic. We recommend that this effort be continued; the project would clearly persist to have a major impact on work being done in these areas as well as new areas that are planned for the future. The investigators have an excellent record in parallel algorithm/software research and the proposal has a very good research focus on what they want to achieve through their infrastructure. We like their application-driven approach in setting up their research and development agenda. We are confident that the project is positioned to continue to have a significant impact on the research community and the various application domains.

Application and Mathematical Software : The presentation addressed the design issues for the current computing system as well as what would be needed for the next generation. It seems to well fit the need of applications. As a result, it is very promising that they can demonstrate benefits of such a system for real applications. The applications presented have a good connection with the existing strong computer science research components on computer architecture, algorithms, and software. The CP-PACS computing facility

represents a unique tool for computational physics that has provided an unmatched window into the domain specific areas. This work has been possible by collaboration between theoretical physics, computational physics, and computer scientists. Collaboration with Hitachi was also significant in the development of the computer architecture for CP-PACS. This approach of computer vendor/researcher collaboration is critical in providing a state of the art computing system for domain specific applications. In a project of this nature it is critical that there be a close symbiosis between hardware and software in the system. The development of Pseudo-Vector Processor Sliding-Window, flexible contention free communication, and remote DMA has made the resulting computing system extremely efficient and suitable for various fields of scientific calculations. The close collaboration with the computer scientists and computational physics community has greatly aided the development of the hardware and software systems. The nature of the computer hardware and the underlying architecture, together with the applications has resulted in the algorithms and software being designed from the ground level. A number of innovative features that were architected into the computer have greatly aided the performance of the underlying applications. The CP-PACS system was designed and put into use with software standards for highly parallel systems. Today there are a number of standards that will permit software components to have a life beyond the existing hardware. Standards such as MPI, OpenMP, MPI-IO and other should be used in the next generation of software systems and algorithms that are implemented. The Research for the Future Program is important in the development of new ideas and concepts for the next generation of systems. The use of visualization and computational steering in conducting computational experiments will play an increasing important role in the future.

## **2 General comments**

### **Comment No. 1**

The large-scale use of high performance computers in leading edge scientific research is a relatively new activity, perhaps only 20 or 25 years old. This is to be contrasted with the use of the familiar tools of classical mathematics which derives from a tradition of many centuries. Consequently much is still to be learned as to how to most effectively apply these new methods to advance scientific knowledge.

The CP-PACS project represents an important new direction in the application of high performance computing to fundamental scientific problems. First an unusual collaboration of physicists, computer scientists and industrial computer experts designed and built an extremely powerful and well conceived computer that provided an important product

for the Hitachi Company and an extremely powerful computer for the use of the scientists in the Center for Computational Physics. Next a rather large group of experts in particle physics and the numerical treatment of problems in low energy quantum chromodynamics, centered at Tsukuba, began to use this very powerful machine to address a few central problems in particle physics. Finally, significant computer resources and assistance were provided to a few carefully selected new fields allowing this style of research to be attempted (with apparent successfully) in other areas of physics.

This experiment has been an impressive success, setting a pattern for other activity and future expansion in computational science at Tsukuba. While considerably more expensive than some other large-scale computational projects, for example the GRAPE machines in Japan or the lattice QCD efforts at Columbia, the added expense has led to important advantages. While the GRAPE machines are targeted at a very specific numerical algorithm and astrophysics problem, the CP-PACS is a remarkably general purpose computer able to support the complete range of particle physics calculations and a variety of others in astrophysics and condensed matter physics. The less expensive machines at Columbia required much more effort from the physics team which built them and do not approach the commercial standards of software or hardware that would be needed for the purposes of Hitachi. While the size and cost of the CP-PACS project may be closest to the APE project in Italy, CP-PACS is presently much more successful, finishing on time and mounting a very well organized and effective physics program. This can presumably be explained by the quality of the Tsukuba team and the expertise of Hitachi.

## **Comment No. 2**

### 1. Past activities

Achievements of the CCP are worth being appreciated in the following points.

- a) They completed the CP-PACS project despite a limited number of the staffs and a limited amount of the budget.
- b) Close collaboration of computer scientists and computational scientists is realized, which is rare in computers in industry. The demands from and the analysis done by the computational scientists was realized by the computer scientists: the PVP-SW (Pseudo-Vector Processor based on Slide-Windows Register), 3D HXB (3-Dimensional Hyper-Crossbar), and RDMA (Remote DMA Transfer) should be noted, in particular.

- c) Such advanced machine was realized in close collaboration with industry, and established close cooperation with Hitachi Ltd. Co.
- d) They advanced their former lattice QCD in quenched approximation to full QCD calculation with different and small lattice spacing.
- e) It contributed to extend the use of CP-PACS, a high performance massively parallelized machine, to a wider field of science including the condensed matter physics and astrophysics.

## 2. Limitations as seen from wider standpoints and strategic viewpoint

The virtues as stated in the preceding section has, at the same time, brought about some problems when we consider strategies for the future of the computational science. The PAX/QCDPAX project preceded the CP-PACS project. In the former they aimed specifically at the lattice QCD computations. There were similar groups in Columbia University, in Italy (APE project), and also in IBM (GF11 project).

Since the lattice QCD was too much computer intensive to be handled with a general purpose machine, they tried and some of them continue to try the computer dedicated to QCD. The CP-PACS continued to keep its main aim to solve the lattice QCD but changed its intention to a machine for wider applications. It was, in a sense, compelling due to the budget situation and due to the collaboration with the industry looking for a wider market (Almost the same machine was sold to a university).

As a result, the CP-PACS is not specifically but partly tuned to the QCD calculations. Its sustained performance is several times effective as compared with the case of the general-purpose machine. Such situation should be compared with the GRAPE project (University of Tokyo). By dedicating to gravitational many-body problems, it attained a 1 Tera-flops-equivalent (GRAPE-flops because of limited applicability to different problems) performance already in 1995 with a much smaller budget.

If we regard the role of the CCP a development of HPC (high-performance computer) in general, it does make a sense since the computer industries are now losing their interest in the HP-computing because of a smaller market. On the other hand, there is a national project of Earth Simulator which looks for a direction of a huge computer of ordinary parallel computer. Now, we have to discuss what should be the role of the institute of size associated with a university, and how the flexibility of such institute should be applied for a new paradigm, concepts, and breakthroughs.

### **Comment No. 3**

There are a couple of unique and excellent features in the past activities in the Center for Computational Physics (CCP) of Tsukuba University. Some examples are listed below. Construction of new parallel computers through collaboration between high-energy physicists and computer scientists also in collaboration with Hitachi company.

Challenging work in QCD contribution to computational science community and in the fields of astrophysics and condensed matter physics through providing rich computer resource which is roughly an order of magnitude more than that provided by ordinary computer centers with achievements, CCP can be regarded as a real center of excellence in computational as well as computer science.

The start of new project (RFTF) seems to be very timely. Considering the fact that the earth simulator project is the only big national project for the challenging next generation supercomputer, we believe the activity of CCP will contribute to stimulation of systematic planning of future supercomputers. We strongly hope that the CCP activity may be continued with even a larger scale.

### **Comment No. 4**

Achievements of this center are great in the meaning that it explored the computational physics and led the computer architecture technology for the area. The computer CP-PACS, which commercialized as a super parallel computer system gave a big impact to the development of commercial high-speed machines. The achievement should be emphasized because this center contributed in depth to the system development by analyzing the application programs and the bottlenecks, and by proposing the key technologies for it. More than that, it has led the research society by using the big machines and producing innovative results for the computational physics. So, this center of computational physics is really a Center of Excellence in the sense.

## **3 Evaluation of individual field**

### **3.1 Particle physics**

The group centered at Tsukuba has played an important role in QCD-related research for many years. They have used a series of computers ranging from large commercial computers at KEK to the specially built QCD-PAX machine. The reputation in the theoretical physics community of the physicists who have been part of this effort is excellent and much important work has been accomplished. However, the CP-PACS project

represents a very significant enhancement, even above the previous achievements of this group.

The Center for Computational Physics and allied physicists in the Institute for Physics at Tsukuba University provide a critical mass of theoretical physicists, expert in particle physics and numerical methods. The size of the group is similar to perhaps only three other international efforts: the MILC collaboration in the U.S., the UKQCD collaboration in the UK and the Italian group centered about the APE projects in Rome. However, in contrast with these other distinguished efforts, the Tsukuba group has had the use of a 600 Gigaflops computer since 1996. This combination of a very fast machine and a relatively large group of talented physicist has lead to series of important physics results from the Tsukuba group which have to a considerable degree dominated the field of lattice QCD for the past three years.

Professors Iwasaki and Ukawa and their collaborators have chosen to focus most of the available computer resources on one very important class of problems, the calculation of the masses of the low energy hadrons, particles that have been studied experimentally for the past forty years. This research serves two objectives. First, by attempting to reproduce experimentally known results, a critical test is made of both the underlying theory and the numerical methods used. Second, such a mass calculation necessarily determines the masses of the quarks that make up the hadrons. Because of the ‘confinement phenomena, individual quarks are always bound inside these more complex particles and these calculations are the only ab initio method known to determine the quark masses. Since the quarks and leptons are the building blocks of all matter, the task of determining the quark masses is a very important one in particle physics.

The CP-PACS machine has been used to tackle this problem in two stages. The first uses an ad hoc approximation in which virtual quark-antiquark pair production is neglected. This quenched approximation to the hadron masses had been studied previously by many groups. The most extensive previous results are those of the GF11 collaboration at IBM. They had found agreement with experiment to within 6% accuracy. The group at the CCP did a much more thorough job, examining lighter quark masses and smaller lattice spacings, allowing a more accurate extrapolation to the continuum and light quark limits. This calculation was the first to definitively establish disagreements between the quenched approximation and experiment, showing clearly the size of errors introduced.

One of the significant discrepancies with experiment found in the quenched approximation is the failure of a single value of the strange quark mass to predict both the masses of the K and phi mesons. This is an important failure of this approximation and a critical impediment to computing the mass of the strange quark, giving inconsistent

values ranging between 116 and 144 MeV. The next stage in the PC-PACS research program begins the systematic calculation of the hadron masses including the full effects of quark-antiquark pairs. The present results suggest that this difficulty with the quark mass is being nicely resolved, yielding a much smaller and less uncertain strange quark mass between 75 and 90 MeV. This is a very important result, addressing a fundamental issue in particle physics.

Of course, the CP-PACS program in particle physics contributes to answering a number of important questions beyond that discussed above. They have obtained new results in heavy quark physics, improved understanding of the U(1) problem, carried out more extensive studies of the character of the QCD phase transition and recently performed work addressing the new domain wall fermion approach to chiral symmetry for a discrete field theory of fermions. The group has used their remarkable computational resources very effectively, producing a world-leading research effort in computational particle physics.

Given the success of the present CP-PACS project both in advancing our understanding of QCD and in setting a direction for the application high performance computing to leading-edge problems in science, Professors Iwasaki and Ukawa should be encouraged to refine and vigorously pursue their plans for a successor project. The construction of a new highest-performance machine which they envision will have significant benefit for particle physics and for computational science more generally, both in Japan and internationally.

### **3.2 Astrophysics**

Only with two staff members, they are developing the code for radiation hydrodynamics. Its importance in astrophysics has been stressed long times, but the actual computations have been difficult because it is a six-dimensional problem (3 for coordinates in configuration space, 2 for the direction of radiation ray, and 1 for the energy of a photon) even only for the radiation transfer in extended medium of varying physical conditions in space. It is appreciated that they have succeeded, for the first time in the world, in solving such problem without any simplifying approximations.

It can be applied to propagation of the light in the universe where the effect of hydrodynamics is little affected by the radiation. In addition to it, there are many explosive phenomena of celestial bodies, say supernova explosion and astronomical jet ejection, where the radiation essentially drives the dynamics of the gas. Their code should be extended to include the coupling with hydrodynamics. It will open so many applications not only in astrophysics but also in inertially-driven nuclear fusion, experiments with high-beam laser, as well as meteorological sciences.

In this sense, the project for the radiation hydrodynamics has been successful and

should be continued. However, we have to ask what the CCP's role for it. It seems that the CCP's main role was simply to provide them with a huge computer power that would not have been available in other universities, research institutes, and computer center either.

### **3.3 Condensed matter physics**

CCP has been making significant contributions to computational science community even outside the field of QCD. The actual subjects of condensed matter physics treated in CCP are very important. Study of strongly correlated electron systems is certainly regarded as the most important and fundamental theme in condensed matter physics. The problem has significant common features to QCD and a very suitable subject to the CCP activity. On the other hand, hydrogen solid under high pressure is rather a specific problem than a general subject. Nevertheless, it has been regarded as an important and fundamental problem in the condensed matter physics and now the most advanced technique, the first-principles path-integral molecular dynamics method has been applied to solve the problem. As this method requires a huge amount of computer resource, the support from CCP was crucially important.

### **3.4 Computer science**

This research is welcome as it is one of the major topics for the next generation machines. The size of machine will be roughly the same as the current one. However, the improvement of clock cycle is large enough to give big impact to the machine architecture. The number of clock delay for the end-to-end message transfer must increase substantially. We may face the change of system architecture by utilizing the merit of higher throughput rather than concentrating only to the shortening of latency. We need the assessment from application programs point of view. The merit of fiber optic is not limited to the higher throughput, but the easiness of wiring and error correction mechanism. The center can lead the research toward the adoption of fiber optic for the super high performance machines. The global network technology may be independent of the network technology of the next generation cluster technology. Almost all of the scientific computation use the precision of 64 bit for the representation of each value. However, we have such areas as molecular dynamics and computational biology in which we face the shortage of precision. We need to evaluate the need of 128 bit of precision, as it requires broader bandwidth between processor and memory in spite of the fact that the bandwidth is always the bottleneck for the high performance machines.

## 4 Further comments especially regarding the Future

### Comment No. 1

1. It would be good if the involvement of computer scientists continued beyond the design of the hardware. Involving professionals in general numerical methods in the development of computational algorithms might be mutually beneficial. While this is not very common internationally, the computational physics group at Bielefeld has been quite successful at doing this and groups in the U.S. are certainly trying.
2. The Center for Computational Physics has been very successful in encouraging international collaboration. Even more important than the senior visitors that they have hosted are the group of extremely good international postdocs who bring much expertise and an important variety of research style to the effort in Japan.
3. The architectural enhancements invented for the CP-PACS: sliding windows, hyper crossbar switch and remote DMA transfers are very significant. They give a considerably higher level of performance (perhaps 50% utilization compared to 15-25%) than is normally achieved on standard, commercial massively parallel computers.
4. The next project that is currently being planned is very aggressive and calls for a level of resources which will require great efforts to secure. In the meantime it is difficult to carry out meaningful development efforts. The studies of various architectures, schemes for exploiting embedded memory and ideas for improving graphics and I/O capability are certainly of value. However, the really significant work must be on a lower engineering level addressing the challenges presented by a particular, concrete approach, perhaps again in the context of the technology that collaborating vendors would like to use. Unfortunately, this must apparently wait until further steps in the project approval process have been taken.

### Comment No. 2

The current situation requests thorough and comprehensive discussions for the strategy of the CCP from the standpoint of promoting physical science and computer science in this country. Though even a simple extension of the present CCP will produce a fruitful result, it is not clear whether it is the best prospect. In other words, the CCP should prove if the simple extension to a bigger CP-PACS would be a best strategy for its future.

### Comment No. 3

Three features have been considered.

1. next generation CP-PACS (RFTF project)
2. challenge in QCD
3. contribution to computational science in general

All of these features may be meaningful and important. However, the third one may require some careful consideration. If CCP expands the territory, identity of CCP may be lost. Nevertheless, there may be possible ways for CCP to extend its territory. Like in the present management, it is important to keep the uniqueness of CCP. Only a limited number of projects will be selected and ample amount of computer resource will be provided to each of them. In order to make such activities really meaningful, selection of subjects and research groups has to be made with great care. The Steering Committee or Steering Council of CCP may be responsible to this selection. We are afraid of the shortage of human resource in CCP for doing this job. It will be more meaningful to have close contact with related institutions. For example, ISSP (Institute for Solid State Physics) may be a suitable one for condensed matter physics and IMS (Institute for Molecular Science) and RIKEN may be for bioscience. They will make proper suggestions for subjects and groups for the projects in CCP. By doing this, CCP can keep good relations with these institutions and moreover promotion of important research fields can be made in a coherent way throughout Japan.

#### **Comment No. 4**

Nice characteristics of this center is that it has very strong cooperative relationship between the researchers of computational physics and of computational science. It is rare in other places whether they are universities or laboratories that such close cooperation does exist. Accordingly, the important role of this center is to clarify the needs of computer architecture and software for the coming new super high performance computers based on the latest device technologies, while the major objective is to produce some scientific nice results in the area of computational physics. However, as the total number of researchers is not so big and the budget for the development of the next generation supercomputer requires more than 10Byen, it seems that the following is required. Show the requirements and direction for the new computer architecture. Show the expectation of market for the super high performance computers. Amplify the number of the cooperative researchers. We can enumerate such actions as follows. Propose the computer system structure of clusters + network for the next generation machines. Propose processor architecture such as next generation Emotional Engine enriched with built-in memory, study the network

transmission media such as slim coaxial cable and fiber optic and supply the technological data for the architecture design.

Target Areas for the center have a few choices such as, (1)Computational Physics, (2)Computational Science-engineering and (3)Applications. (1) is too weak to justify the huge amount of money. (3) is good if it is limited within one university. We can gather the human resources from several related field in Tsukuba University. However, if the center should be unique nationwide, the area must overlap with the area of other laboratories such as Molecular Science laboratory and Medical Science laboratory. In this case, we must face to the unification of the laboratories. But, as the needs for the computational power is big enough to justify several super high performance machines, we recommend the area of (2) as the conclusion.

Research of Internal Architecture of Processor Elements is a well-timed topic and very interesting from the viewpoint of the usefulness. We hope that the researchers develop this topic and evaluate it with the codes of computational physics. If the research can merge with the development activity of next generation Emotional Engine, we can expect the big improvement of the feasibility of next generation CP-PACS in terms of the chip development cost, as the architecture requirement around Arithmetic Logic Unit is roughly the same as the one of Emotional Engine.

Research of PIO and Visibility topics may nicely match the requirement of high speed computational applications, but they are not unique to the center. It is for the current CP-PACS. The result of these topics can be used in many fields. However, we think we can expect that they will be more persuasive if the research is directly turned to the computational physics and if it presents the results of requirement analysis for the IO, network and visual technology.

## 5 Conclusion

1. Past activities were highly appreciated by the committee members. The collaboration of the physicists and the computer experts is rarely existent outside of this center.
2. We recommend this trend to be continued in the future. But the center must proceed extremely cautiously when the scale of the project goes beyond 100 Oku yen both in terms of the relation to the industry and also in relation to the academic community.

第 V 部

## 外部評価委員会報告書（日本語訳）

平成 12 年 1 月

# 筑波大学計算物理学研究センター

## 外部評価委員会報告書

平成 11 年 11 月 9 日 – 10 日

### 1 序

外部評価委員会は、荒船次郎教授（東京大学）、ノーマン・クリスト教授（コロンビア大学）、ジャック・ドンガラ教授（テネシー大学及びオークリッジ国立研究所）、島崎眞昭教授（京都大学）、菅原寛孝教授（高エネルギー加速器研究機構）、杉本大一郎教授（放送大学）、田中英彦教授（東京大学）、寺倉清之教授（産業技術融合領域研究所）から構成された。計算物理学研究センター側は、宇川彰、朴泰祐、吉江友照、金谷和至、梅村雅之、和田耕一他であった。

第一日目は、宇川彰によるセンター概要説明により開始され、引き続きセンターの活動及び学際的活動についての技術的報告が行われた。評価委員間での短い討議により、より深く検討すべき幾つの点が指摘された。評価委員により幾つかの問題点が同定され、センター側からは評価用資料及び実地調査における報告において応答がなされた。評価委員により指摘された諸点に対するセンター側の回答は、全般的に満足すべきものであった。

センターの役割：センターからの報告者等は、計算物理学研究センターの意義について、説得力のある報告を行った。CP-PACS プロジェクトは、過去 8 年間にわたり、当該分野に極めて大きな寄与を為した。

チームの能力：この努力に参加した研究者等は、プロジェクトに相応しい技能を持った極めて優れたチームを構成している。このグループは、当該分野において世界的に指導的な役割を果たしうる特色あるチームである。宇川彰の指導の下、素粒子物理学、宇宙物理学、物性物理学及び計算機科学の分野の研究者等が、この挑戦的なプロジェクトに必要な専門的能力を提供している。

応用：報告された応用は、他学部及びわが国の大学の研究者との間での長い共同研究を含んでいる。これらの応用と計算資源は、特定の領域に向けられたものではあるが、他の領域にも有益である。センターの将来は、CP-PACS の次世代の計算機の開発にかかっている。それは、全国共同利用施設として、引き続き、素粒子物理学、宇宙物理学、物性物理学及び計算機科学分野において使われるであろう。これに加えて、計算生物学や原子核物理学分野へも研究が拡大されるであろう。応用分野の研究者はソフトウェアを次世代の計算機に

適合させる必要があるが、これは同時に、高い並列性を持ったシステムと挑戦的な応用に相応しい、新しい方法、アプローチ、アルゴリズムを創造する機会となるであろう。

運営：センターの運営は、岩崎洋一に始まり宇川彰に引き継がれたが、世界第一級の設備を計算物理学に提供する上で極めて優れた実績を納めた。

報告：実地調査の最後の纏めにおいて、全体的な印象は、プロジェクトが極めて良く考え抜かれたものであり、チームは引き続き成功を遂げる能力があるとのものであった。センターの活動は、素粒子物理学、宇宙物理学、物性物理学及び計算機科学分野の知識を深める上で極めて重要である。センター研究者等は、科学のフロンティアを拡大しうるアプローチと計算機システムを開発している。同様な目標を持った研究者は世界中に多数存在するが、筑波大学は、これらの領域の専門家の、世界最高の組み合わせを持つものの一つである。センターの活動は極めて良く計画され組織されている。部分部分は考え抜かれ、相互に良く組み合わせられている。全体的な研究の雰囲気は、これらの研究領域のために、極めて優れた環境を提供している。その結果は広く使われ、また将来にも続くであろう。その成果には、この努力により可能とされる特定の応用研究プロジェクトの結果も含まれる。追求されている研究は刺激的であり、提案が、計算・データ保管・ネットワークの各資源を、多様な応用計算に対して全体的に調整することを含むものであることから、計算インフラストラクチャの必要性は例外的に明白である。研究者のうち幾人かは、抜群の研究歴を持っている。計算機科学研究への意図は強くまた活発である。我々は、この努力が続けられることを推奨する。このプロジェクトは、これらの分野で行われている研究及び将来に計画されている新たな分野での研究に多大の影響を与え続けることは明らかである。研究者等は並列アルゴリズム/ソフトウェアの研究に優れた業績を挙げており、提案は、そのインフラストラクチャを通して達成すべき目標について、極めて明確に焦点が絞られている。我々は、研究者等が研究開発計画を立てる上で取った、応用を出発点とする方法を評価する。我々は、このプロジェクトが、研究者グループと多様な応用領域に顕著なインパクトを持ち続ける位置にあることを確信している。

応用と数学ソフトウェア：報告では、現在の計算機システムのデザイン上の課題と次世代システムに必要とされる要素が検討された。それは応用のニーズに良く適合しているようである。その結果、センター研究者等がそのようなシステムの実際の応用に対する有効性を示すことができたのは極めて有望である。報告された応用は、計算機アーキテクチャ、アルゴリズム、ソフトウェアについての、既存の強力な計算機科学研究分野と密接な関係がある。CP-PACS 計算機システムは、特定の領域において、それまでと比較にならない能力の道具を、計算物理学に提供した。これは、理論物理学、計算物理学、計算機科学の研究者の共同研究によって可能となったものである。日立製作所との協力も、CP-PACS の計算機アーキテクチャの開発に重要であった。計算機メーカーと研究者の協力というアプローチは、特定領域の応用のために最新技術に基づく計算機システムを提供する上で決定的に重要である。このようなプロジェクトでは、システムのハードウェアとソフトウェアの間に

密接な協調 関係がなければならない。スライドウィンドウ疑似ベクトルプロセッサ、柔軟な競合関係のない通信、リモートDMA 等の開発により、非常に効率が高くまた多様な科学計算に適した計算機システムが実現された。計算機科学者と計算物理学者の密接な協力は、ハードウェアとソフトウェアの開発において大きな力となった。応用と同時に、計算機ハードウェアとその基礎となるアーキテクチャの性格から、アルゴリズムとソフトウェアはその基礎的レベルからデザインされた。計算機に組み入れられた多数のアーキテクチャ上の革新は、目標とされた応用に対する高い実効性能を達成する上で重要な要素となった。CP-PACS システムはデザイン及び実用の両面で超並列計算機のソフトウェア標準に適っている。今日では、ソフトウェアが、現存するハードウェアを越えた寿命を持つことを可能とする標準が存在する。次世代のソフトウェアシステム及びそこで実現するアルゴリズムにおいては、MPI、OpenMIP、MPI-IO 等の標準が使われるべきである。未来開拓事業は、次世代システムのための新たなアイデアや概念を開発するために重要である。計算機実験を行う上で、可視化と計算操舵の果たす役割は、将来一層重要性を増していくであろう。

## 2 一般的コメント

### コメント No. 1

最先端の科学研究における高性能計算機の大規模な利用は比較的最近の動向であり、おそらく 20 年から 25 年しか経っていない。これは、何世紀もの伝統に基づく、良く知られた古典的数学の方法の適用と大きく異なる点である。従って、これらの新しい方法をどのように適用すれば、科学の知識を推進するため、最も有効であるかについては、未だに学ぶべきことは多い。

CP-PACS プロジェクトは、高性能計算を科学の基礎的な問題に適用することについて、重要且つ新たな方向性を示すものである。第一に、物理学者、計算機工学者、産業界の計算機専門家の例外的な協力により、極めて強力且つ良く考えられ計算機が開発・製作されたが、これは、日立製作所にとって重要な製品となり、また、計算物理学研究センターの科学者達は極めて強力な計算機を得ることになった。次に、筑波を中心とした、素粒子物理学と低エネルギーの量子色力学 (QCD) の問題の数値解法の専門家のかんりの規模のグループが、素粒子物理学における幾つかの中心的課題に対して、この極めて強力な計算機を用い始めた。最後に、かんりの計算資源と助力が、注意深く選択された少数の新たな分野に対して提供され、このような研究スタイルが、物理学の他の分野において (明らかに成功裡に) 試みられることを可能とした。

この実験は、印象的な成功を収め、筑波における計算科学の他の活動と将来の拡張の先例となるものとなった。他の幾つかの大規模計算プロジェクト、例えば日本における GRAPE 計算機やコロンビア大学における格子 QCD 計算機に較べて、かなり高額であるが、余分な費用は重要な長所を導いている。GRAPE 計算機は、極めて特定の数値アルゴリズムと宇

宇宙物理学の問題を目標としているが、CP-PACS は驚くほど汎用性を持った計算機であり、素粒子物理学における全ての範囲の計算のみならず、宇宙物理学及び物性物理学における、他の多様な計算をも実行することができる。コロンビア大学のより安価な計算機は、それを開発した物理学者のチームの遥かに多大な努力を必要とし、日立製作所にとって必要とされるソフトウェア及びハードウェアの製品としての業界基準に及ばない。CP-PACS プロジェクトの規模と費用は、イタリアの APE プロジェクトと最も近いが、予定どおり開発を終え、良く組織され効率の良い物理学の研究プログラムを実施している点で、現在までのところ、CP-PACS プロジェクトは遥かに成功している。これは、おそらく筑波チームの質と、日立の技術力により説明されるものである。

## コメント No. 2

### 1. 現在までの活動

計算物理学研究センターの成果は、以下の諸点について評価に値する。

- a) 限られた教官数と予算にも拘らず CP-PACS プロジェクトを完成したこと。
- b) 計算機工学者と計算物理学者の緊密な協力を実現したこと。これは企業の計算機では稀である。計算物理学者の分析とそれに基づく要求が、計算機工学者により実現された。特に、PVP-SW（スライドウィンドウレジスタに基づく擬似ベクトルプロセッサ）、3DHXB（3次元ハイパークロスバー）、RDMA（リモート DMA 転送）は注目すべきである。
- c) このような先端的計算機が企業との密接な協力により実現され、日立製作所との密接な協力関係が築かれたこと。
- d) 格子 QCD を従来のクエンチ近似から、より小さい格子間隔での完全な QCD へ推し進めたこと。
- e) 高性能超並列計算機である CP-PACS の使用を、物性物理学及び宇宙物理学を含むより広い科学の分野へ拡大することに貢献したこと。

### 2. より広い観点及び戦略的視点から見た限界

前節に記した長所は、計算科学の将来を考えた場合、同時に幾つかの問題を引き出した。CP-PACS プロジェクトは、PAX/QCDPAX プロジェクトから引き継がれたものである。後者は、格子 QCD に目標を特定した。同様のグループは、コロンビア大学、イタリア（APE プロジェクト）、また IBM（GF11 プロジェクト）に存在した。格子 QCD は汎用計算機で処理するには計算が膨大すぎるため、これらのグループは QCD 専用の計算機を試み、幾つかのグループはこれを継続している。CP-PACS は、格子 QCD の解決を中心目標とし続けているが、その意図をより広い応用のための計

算機へと変えた。これは、ある意味では、予算の状況とより広い市場を目的とする企業との協力のため（ほぼ同一の計算機がある大学に納入された）、必要なことであった。

この結果、CP-PACS は QCD 計算に、専用ではなく、部分的にチューニングされた。その実効性能は、汎用計算機の場合に較べて数倍である。この状況は GRAPE プロジェクト（東京大学）と比較すべきである。そこでは、重力多体問題に特化することにより、1 テラフロップス相当（異なる問題への応用の限界のため、GRAPE フロップスと言うべきであるが）の性能を 1995 年に遥かに少ない予算で実現した。

もし、計算物理学研究センターの役割を HPC（高性能計算）一般の推進とするならば、それは、計算機業界が市場規模の小ささから高性能計算に興味を失いつつある現在、意味のあることである。一方で、通常の大規模計算機の方角を希求する「地球シミュレータ」国家プロジェクトがある。大学附置規模の研究所の役割が何であるべきか、このような研究所の柔軟性を、どのようにして、新たなパラダイム、概念、突破口を産み出す手がかりとすべきか、検討しなければならない。

### コメント No. 3

筑波大学計算物理学研究センターの現在までの活動には、幾つかのユニーク且つ優れた特徴がある。その幾つかの例は以下のとおりである。

高エネルギー物理学者と計算機工学者、さらに日立製作所との協力による新しい並列計算機の開発。

計算科学における QCD 分野及び宇宙物理学・物性物理学での優れた成果。これらは、通常の優れた計算機センターが提供可能な計算資源の約 10 倍を超える資源を提供することにより可能となった。計算物理学研究センターは、計算機工学は言うに及ばず計算科学における真の卓越した研究拠点（COE）と見ることができる。

新たなプロジェクト（未来開拓 RFTF）は極めて時宜を得たものである。地球シミュレータプロジェクトが、次世代スーパーコンピュータを目指す唯一の大きな国家プロジェクトであることを考えれば、計算物理学研究センターの活動は、将来のスーパーコンピュータを系統的に計画するための刺激になると信ずる。同センターの活動がより一層大きな規模で継続することを強く希望する。

### コメント No. 4

このセンターの偉大な成果は、計算物理学を推進し、この分野における計算機アーキテクチャ技術を牽引した点にある。CP-PACS 計算機は超並列システムとして商品化されて、商用高速計算機の発達に大きなインパクトを与えた。センターが、応用プログラムとその計算上のボトルネックを解析し、それを解決するための鍵となるテクノロジーを提案することによって、システム開発に深い寄与を為した業績は強調されるべきである。これに加えて、

センターは大規模計算機を用いて計算科学の独創的な成果を生み出すことにより研究を牽引した。このように、計算物理学研究センターは実に真の意味の卓越した研究拠点である。

### 3 各分野の評価

#### 3.1 素粒子物理学

筑波を中心とするグループは長年にわたり QCD 関係の研究において重要な役割を果たしてきた。このグループは、KEK の大きな商用計算機から専用開発された QCD-PAX 計算機にいたる一連の計算機を使ってきた。この努力を担ってきた物理学者達は、理論物理学者社会の中で、極めて高い評価を得ており、多くの重要な成果が達成されてきた。しかし、CP-PACS プロジェクトは、このグループの以前の業績を上回る、極めて大きな拡大である。

計算物理学研究センターと、それに関係する筑波大学物理学系の物理学者グループは、素粒子物理学と数値計算法の専門家からなる、人数的に閾値以上の理論物理学者のグループを形成している。このグループのサイズに比較しうるのは、おそらく以下の三つの国際的グループのみである：米国の MILC グループ、英国の UKQCD グループ、ローマの APE プロジェクトを中心としたイタリアのグループ。しかしながら、これらの良く知られた努力に比して、筑波グループは 1996 年以來 600GFLOPS 計算機を使用してきた。この、非常に高速の計算機と、かなり大規模の優秀な物理学者の組み合わせは、筑波グループによる一連の重要な物理学上の結果に繋がり、それは過去 3 年間の格子 QCD 分野を殆んど支配するものとなった。

岩崎教授、宇川教授とその協力者達は、使用できる計算資源の殆どを、過去 40 年間にわたり実験的に研究されてきた粒子である、低エネルギーハドロンの質量の計算という、非常に重要な問題群に集中することを拵んだ。この研究は二つの目的を達する。第一に、実験的に既知の結果を導出することにより、その基礎となる理論および数値計算法双方のクリティカルなテストとなる。第二に、このような質量計算は、ハドロンを構成するクォークの質量を必然的に決定する。閉じ込めの現象により、個々のクォークは常にこれらのより複雑な粒子の内部に束縛されており、このような計算がクォーク質量を決定する唯一の第一原理に基づく方法である。全ての物質はクォークとレプトンから構成されているから、クォーク質量を決定することは、素粒子物理学において、非常に重要な問題である。

この問題を解決するために CP-PACS 計算機は 2 段階にわたって用いられた。最初の段階では、仮想クォーク・反クォーク対生成を無視する近似が用いられた。ハドロン質量に対するこのクエンチ近似は、従来から多くのグループにより調べられてきた。その最も包括的な結果は IBM の GF11 グループによるものである。彼らは、6% 以内で実験値との一致を見出した。計算物理学研究センターのグループは、より小さなクォーク質量と格子間隔を調べ、それによって連続極限及び軽いクォーク質量極限へのより正確な外挿を行って、遥かに完璧な研究を行った。この計算は、クエンチ近似と実験値の不一致を初めて明確に確立した

ものであり、近似による誤差の大きさを明瞭に示すものとなっている。

クエンチ近似において見いだされた実験との際立った不一致の一つは、 $K$  中間子とファイ中間子の質量を正しく与えるストレンジクォークの質量が同一ではないという点である。これはクエンチ近似の重大な欠陥であり、 $116\text{MeV}$  から  $144\text{MeV}$  にわたる矛盾した値を与えるために、ストレンジクォークの質量を計算する上での決定的な障害となる。CP-PACS の研究プログラムの第二段階では、クォーク・反クォーク対の効果を全面的に取り入れたハドロン質量の系統的な計算が始められた。現在の結果によれば、このクォーク質量についての困難は見事に解決され、 $75\text{MeV}$  から  $90\text{MeV}$  の間の、遥かに小さく且つ不定性の小さい値となることを示唆している。これは素粒子物理学における基本課題に応える非常に重要な結果である。

勿論、素粒子物理学における CP-PACS プログラムは、以上に述べた問題以外にも多くの重要問題を解決することに寄与している。重いクォークの物理、 $U(1)$  問題のより深い理解、QCD 有限温度相転移の性質についてのより幅広い研究などに新しい結果が得られ、また最近実施された研究では、フェルミオンについての離散な場の理論のカイラル対称性についての新しいドメインウォールフェルミオンの方法が調べられた。このグループは自らの注目すべき計算資源を極めて有効に用いて、計算素粒子物理学における世界的に先導的な研究努力を生み出している。

現在の CP-PACS プロジェクトが、我々の QCD に対する理解を深めたこと、また高性能計算を先端的な科学の問題に適用する上での一つの方向を示したこと、これらの成功に鑑みて、岩崎教授、宇川教授は、次期プロジェクトの計画を洗練し、積極的に追求するよう励まされるべきである。彼らの構想する新たな最高速計算機の建設は、素粒子物理学及び計算科学全般に対して、また日本および国際的に、非常に有益であろう。

### 3.2 宇宙物理学

教官数は 2 名に過ぎないが、彼らは輻射流体力学のプログラムを開発している。その宇宙物理学における重要性は長い間強調されて来たが、6 次元問題（配位空間の 3 次元、輻射光線の方向 2 次元、光子のエネルギー 1 次元）であるために、空間における広がった媒質中の様々な物理条件下での輻射輸送ですら、実際の計算は困難であった。彼らが、世界で初めて、どのような簡単化の近似も行わずに、このような問題を解決することに成功したことは評価される。

これは、宇宙における光の伝播に応用できるが、そこでは流体の効果は輻射にはほとんど影響されない。これに加えて、超新星爆発や宇宙的なジェットの噴出等、輻射が本質的にガスの運動を決定するような、天体の爆発的現象は多くある。彼らのプログラムは流体力学との結合を取り入れるよう拡張すべきである。それは、宇宙物理学のみでなく、慣性核融合、高密度レーザ実験、惑星科学などに多くの応用を見出すであろう。

この意味で、輻射流体力学プロジェクトは成功であったし、継続すべきである。しかしな

がら、計算物理学研究センターの役割は何であったか訊ねる必要がある。計算物理学研究センターの主要な役割は、他の大学、研究センター、計算機センター等では得られなかったような大規模な計算力を提供したに過ぎないように思われる。

### 3.3 物性物理学

計算物理学研究センターは、QCD 分野以外の計算科学コミュニティにおいても多大の寄与を行っている。計算物理学研究センターにおいて取り扱われている物性物理学の実際のテーマは非常に重要である。強相関電子系の研究は言うまでもなく物性物理学の最も重要且つ基本的なテーマと見なされている。この問題は QCD と非常に共通の性格を持ち、計算物理学研究センターの活動課題としてまことに相応しい。これに対して、高圧下での固体水素の問題は、一般的というよりは特殊な問題である。しかしながら、それは物性物理学における重要且つ基本的問題とみなされて来ており、それを解くために、第一原理経路積分分子動力学法という最も進んだ方法が適用された。この方法は膨大な計算資源を必要とするため、計算物理学研究センターのサポートは決定的に重要であった。

### 3.4 計算機工学

この研究は、次世代計算機の主要課題の一つであるので、歓迎される。計算機のサイズは、現在のものとほぼ同じであろう。しかし、クロック周波数の向上は十分に大きく、計算機アーキテクチャに大きなインパクトを与えるものである。端点間データ転送におけるクロック遅れの数は大幅に増加するに違いない。レイテンシを小さくすることのみに集中する代わりに高いスループットの利点を利用するようなシステムアーキテクチャの変更に直面するかもしれない。応用プログラムの観点からの評価が必要である。ファイバーオプティックの利点は高いスループットにのみ限られているわけではなく、配線及び誤り訂正機構の容易さにもある。センターは、超高性能計算機におけるファイバーオプティックの採用へ向けての研究を主導することができる。グローバルネットワーク技術は、次世代のクラスタ技術のためのネットワーク技術とは独立なものとなるかも知れない。ほとんどすべての科学技術計算はそれぞれの値の表示に 64 ビット精度を用いる。しかしながら、分子動力学や計算生物学等、精度の不足に直面している分野もある。高性能計算においてはバンド幅が常にボトルネックであった。128 ビット精度はプロセッサとメモリ間のより太いバンド幅を必要とするため、128 ビット精度の必要性を評価する必要がある。

## 4 追加コメント、特に将来について

### コメント No. 1

1. 計算機工学者の協力がハードウェアのデザイン以降も継続することが望ましい。計算アルゴリズムの開発のために、一般的な数値方法の専門家の協力を得ることは相互に有益である。これは国際的にあまり広く行われていることではないが、ビーレフェルトの計算物理学グループはこれに大きな成果を収めており、アメリカのグループも確かに努力を払っている。
2. 計算物理学研究センターは国際協力を進める上で非常な成功を収めてきている。センターに滞在した年配の訪問者以上に重要なのは、非常に優秀なポストドクター達であり、彼らは多くの専門的スキルと重要な研究スタイルの多様性を日本における研究努力にもたらした。
3. CP-PACS の為の開発されたアーキテクチャ面での向上、スライドウィンドウ、ハイパークロスバースイッチ、リモート DMA 転送は非常に注目すべきである。それらは、標準的な商用の超並列計算機において通常達成されるよりレベルに比べて、際立って高い水準（15-25% に比べおそらく 50% の効率）の実効性能を与える。
4. 現在計画されている次期計画は非常に野心的であり、その確保には非常な努力を要するであろう水準の資源を必要とする。それまでの間有意義な開発の努力を実施することは難しい。種々のアーキテクチャや、混載メモリを利用するスキーム、グラフィックスと I/O 能力の改善のアイデアの検討等は確かに有用である。しかしながら、真に根本的な作業は、より基礎的な工学的レベルにおいて、特定の具体的なアプローチの提起する問題に、恐らくは協力メーカが用いる技術の枠組みの中で、どのように取り組むかということになるであろう。残念ながら、このためには、プロジェクトの承認過程の次の諸ステップが取られる必要があるようである。

### コメント No. 2

現在の状況は、わが国において、物理学と計算機科学を推進する立場から、計算物理学研究センターの戦略に関する徹底的かつ包括的な議論を必要とする。現在の CP-PACS を単に拡大しても有意義な結果は得られるであろうが、それが最善の方向であるかどうかは明らかでない。言葉を換えて言えば、計算物理学研究センターは、より大きな CP-PACS への単純な拡張がその将来にとって最善の戦略であることを証明すべきである。

### コメント No. 3

3つの局面が考察された。

### 1. 次世代 CP-PACS (RFTF プロジェクト)

### 2. QCD のチャレンジ

### 3. 計算科学全般への寄与

これらの局面は全て意義があり重要であるかもしれない。しかし、第三番目は注意深い考慮を必要とするかもしれない。もし計算物理学研究センターが領域を拡大すれば、その固有の性格は失われるかもしれない。それにも拘わらず、センターがその領域を拡大する道は可能であるかもしれない。現在の運営におけるように、センターのユニークさを保つことは重要である。限られたプロジェクトのみを選択し、十分な計算資源をその一つ一つに配分する。このような活動を十分意義のあるものとするには、研究課題と研究グループの選択は非常に注意深く行われなければならない。センターの運営委員会あるいは運営協議会がこの選択に責任を持つことも可能である。この事業には、センターの人的資源は不足であることを恐れる。関係する研究施設と密接な接触を保つことがより妥当であろう。例えば、物性物理学には ISSP（物性研究所）が相応しく、生科学には IMS（分子科学研究所）と理研がありうる。これらは、センターのプロジェクトについて、その研究課題と研究グループについて適当な提案を行う。このようにすれば、センターはこれらの研究施設と良好な関係を保つことができ、さらに重要な研究分野の推進が日本全国にわたり調和をとって行うことができる。

#### コメント No. 4

このセンターの優れた特徴は計算物理学と計算科学の研究者の間に非常に強い協力関係があることである。大学であろうと研究所であろうと、このような密接な関係が存在する所は他には稀である。従って、このセンターの重要な役割は、最新のデバイス技術に基づいた来るべき超高性能計算機に対する、計算機アーキテクチャ及びソフトウェア上の課題を明確にすることであり、一方センターの主要な目標は、計算物理学分野において科学的に優れた成果を生み出すことである。しかし、研究者の総数はあまり多くなく、次世代スーパーコンピュータの開発には 100 億円以上必要であるから、以下の事が必要のように思われる。新しい計算機アーキテクチャの要件と方向性を示すこと。超高性能計算機に対する市場の期待を示すこと。企業側研究者の数を増加すること。このようなアクションは以下のように数え上げることができる。次世代計算機に対するクラスタとネットワーク構造の計算機システム構造を提案すること。メモリ混載次世代 Emotion Engine といったプロセッサアーキテクチャを提案し、スリム同軸ケーブルやファイバーオプティックといったネットワーク伝送媒体を研究し、アーキテクチャデザインのために技術的データを提供すること。

センターの目標とすべき領域は、(1) 計算物理学、(2) 計算科学技術、(3) 応用といった幾つかの選択肢がある。(1) は多大の予算を正当化するには弱過ぎる。(3) は一大学内に限られているならば良い。幾つかの関係した分野の人的資源を筑波大学に集めることはで

きる。しかし、センターが全国的に特色のあるものであるとすると、その領域は分子科学研究所や医科学研究所などの他の研究所の領域と重なるに違いない。この場合、我々は研究施設の統合に直面することになる。しかし、計算力に対する要求は複数台の超高性能計算機を正当化するに十分であるので、我々は結論として(2)を推奨する。

プロセッサ素子の内部アーキテクチャの研究は極めて時宜を得ておりまた有用性の観点からも非常に興味深い。我々は、研究者達がこのトピックを発展させ、計算物理学のプログラムにより評価することを期待する。もしこの研究が、次世代 Emotion Engine の開発事業と合同することができれば、ALU 周辺のアーキテクチャ上の要求は、Emotion Engine のそれとほぼ同じであるので、チップ開発コストの面から、次世代 CP-PACS の現実性は大きく向上することが予想できる。

PIO と可視化の研究は高速計算の応用からの要求に良く適合するが、これはセンターに固有のものではない。それは現在の CP-PACS に対するものである。これらのトピックの成果は多くの分野で利用することができる。しかし、もし研究の焦点が計算物理学に直接絞られており、I/O とネットワークおよび可視化技術に対するその要求の解析結果を提示することができれば、それらはより説得力のあるものになると期待できると考える。

## 5 結論

1. センターの現在までの活動は委員会メンバーにより高く評価された。物理学者と計算機専門家の協同関係は、このセンター以外では滅多にないほどのものである。
2. 我々は、この方向性が将来に継続されることを推奨する。しかし、計画の規模が 100 億円を超えるような場合には、企業との関係、また研究コミュニティとの関係、双方について、センターは極めて慎重に進まなければならない。

## 第 VI 部

# 外部評価資料

筑波大学計算物理学研究センター  
外部評価資料

平成 11 年 10 月

筑波大学計算物理学研究センター

## 1 序

この資料は、平成 11 年 11 月 9 日 -10 日に予定されている筑波大学計算物理学研究センター外部評価委員会実地調査に先立ち、センター設立以来の活動と成果についての資料をまとめたものである。

外部評価の目的は、センター設立の目的に照らして、現在までの研究活動が十分なものであったかについて調査を受け、その結果に基づく提言を、センター将来計画に反映させることにある。従って、本資料においては、研究成果（第 6 章）を中心として、センターの沿革（第 2 章）、組織と運営（第 3 章）、建物（第 4 章）と計算機システム（第 5 章）に代表される研究設備、さらに全国共同利用（第 7 章）及び国際交流（8 章）の状況をまとめた。また主要研究業績リストは第 9 章に収録した。

## 2 沿革

### 2.1 設置経緯及び目的

平成元年の学術審議会建議に基づき、平成 2 年度から「学術の新しい展開のためのプログラム」（略称新プログラム）が発足した。このプログラムの実施テーマの一つとして「専用並列計算機による「場の物理」の研究」（研究代表者 筑波大学物理学系教授岩崎洋一（職名は当時））が採択され、平成 4 年度より 5 カ年計画で実施されることとなった。

筑波大学計算物理学研究センターは、同研究課題の推進母体としての役割を果たし、同時に、計算物理学とそれに関係する並列計算機工学の研究を推進することを目的として、平成 4 年 4 月に、10 年時限の全国共同利用施設として、筑波大学に設置されたものである。

### 2.2 主要日誌

新プログラム研究課題「専用並列計算機による「場の物理」の研究」は、計算物理学に適した超並列計算機を開発・製作し、それをを用いて素粒子物理学・物性物理学・宇宙物理学分野の重要問題の解決を図ることを目的とした。この課題によって開発・製作された超並列計算機は CP-PACS(Computational Physics by Parallel Array Computer System) と名付けられ、これを取って研究課題自体も、CP-PACS プロジェクトと呼ばれている。

本センターの最初の 5 年間の研究活動は、CP-PACS プロジェクトの推進にその主力が費やされた。超並列計算機 CP-PACS は、平成 8 年 9 月に予定どおり完成し、理論ピーク性能で 614Gflops、Linpack ベンチマークで 368.2Gflops という、その時点での世界最高性能を実現した。これにより、同年 11 月に米国ピッツバーグで開催された SuperComputing'96 国際会議において、CP-PACS は、「世界の高速度計算機 Top 500」の第一位に登録された。

以上の活動に並行して、センター設備の充実も進められた。センター建物は平成 5 年度（計算機棟）と 6 年度（研究棟）に分けて建設され、計算機室の空調設備及び CP-PACS 用の

無停電電源装置の整備が平成7年度までに行われた。また、CP-PACSのフロントエンドとなるフロント計算機システムの整備が3回(平成5年度・6年度・9年度)に分けて行われた。

CP-PACSの完成に伴い、平成8年度からはそれを用いた計算物理学の研究が本格化した。現在までに、素粒子物理学を中心に、宇宙物理学、物性物理学における大規模計算が進められ、その成果が発表されている。

平成9年3月には、新プログラム研究の最終年度にあたり、素粒子物理学分野における格子量子色力学をテーマとする国際会議「Lattice QCD on Parallel Computers (並列計算機による格子量子色力学)」がセンターにおいて開催され、CP-PACSの開発・製作とそれによる素粒子物理学上の最新の成果が報告された。

平成7年4月には、本センターは文部省の卓越した研究拠点(COE)の一つに指定され、平成7年度以来、それに伴う予算措置を基礎として、国際交流の強化、設備の充実、若手研究者の育成等が図られている。

計算物理学と並列計算機工学の分野は、世界的に極めて進歩が早い。従って、センターが最先端の研究水準を保つには、CP-PACSを超える次世代超並列計算機を目指した基礎研究を早い時期から進める必要がある。このような認識に立った研究プロジェクト「次世代超並列計算機の開発」が、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」の一つとして認められ、平成9年度より5か年計画で実施されている。

センターは全国共同利用施設として設置されており、平成4年度以来、毎年研究会が開催されてきた。さらに、CP-PACSの順調な稼働により、平成9年度からは、CP-PACSを用いて始めて可能な大型計算を全国公募する「大規模数値シミュレーションプロジェクト」が開始され、CP-PACSの計算力を全国の研究者に提供している。

平成10年度には、CP-PACSの開発・製作とそれによる計算物理学の成果に始まり、未来開拓研究プロジェクト「次世代超並列計算機の開発」に至る、センターの研究活動と成果が、SuperComputing'98国際会議のResearch Exhibitに出展された。

表1に、本センターの主要日誌をまとめる。

計算物理学研究センター主要日誌		
平成4年	4月1日	新プログラム研究「専用並列計算機による「場の物理」の研究」(CP-PACSプロジェクト)開始(5ヶ年計画)
	4月10日	計算物理学研究センター設置
	7月3日	計算物理学研究センター開所式
平成5年	8月26日	センター建物第一期工事(計算機棟)竣工
	11月18日	QCDPAX 移設
平成6年	3月1日	FCS(フロント計算機システム)第一期レンタル開始
	8月3日	「新プログラム研究」中間評価(現地調査)
平成7年	3月1日	FCS(フロント計算機システム)第二期レンタル開始
	3月30日	センター建物第二期工事(研究棟)竣工
平成8年	4月1日	卓越した研究拠点(COE)指定
	3月25日	CP-PACS(1024PU)完成設置
	5月21日	CP-PACS(1024PU)完成披露式
	9月18日	CP-PACS(2048PU)完成設置
	9月27日	CP-PACS(2048PU)がLinpackベンチマークに対して368.2Gflopsを記録(11月発表「世界の高速計算機 Top 500」第一位)
	11月19日	CP-PACS(2048PU)完成記者会見
	平成9年	3月10日-15日
3月31日		新プログラム研究(CP-PACSプロジェクト)終了
4月1日		未来開拓研究「次世代超並列計算機の開発」開始(5ヶ年計画)
平成10年	3月1日	FCS(フロント計算機システム)更新
	3月1日	CP-PACS全国共同利用「大規模数値シミュレーションプロジェクト」開始
平成11年	11月9日-13日	SuperComputing'98 Research Exhibit 出展
	3月25日	QCDPAX 稼働停止

表 1: 計算物理学研究センター主要日誌

### 3 組織と運営

#### 3.1 組織の概要

計算物理学研究センターの組織を、図1に示す。センター長の下に、研究部門と事務部門があり、また、センター運営のための審議機関として、運営委員会、運営協議会が置かれている。

研究部門は、計算素粒子物理学・計算宇宙物理学・計算物性物理学・並列計算機工学の4部門からなる。教官定員は、教授3・助教授3・講師4の計10名、また客員教官定員は、教授1・助教授1の計2名である。事務部門の定員は2名である。

表3.1に、センターの定員数及び平成11年度現員数をまとめる。

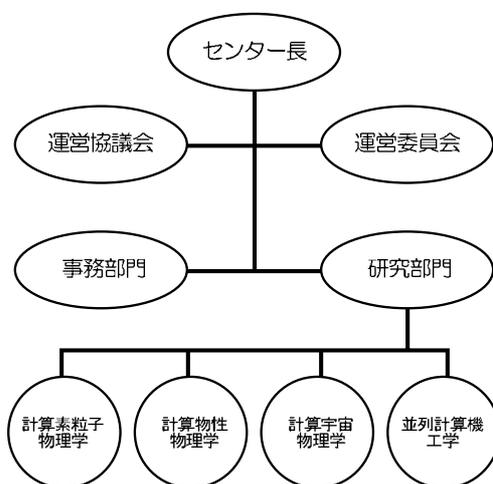


図1: 計算物理学研究センター組織

計算物理学研究センター定員						
教授	助教授	講師	助手	技官	事務職員	計
3 (1)	3 (1)	4			2	12 (2)
平成11年度現員数						
2 (1)	4 (1)	1	5	2	4	18 (2)

表2: 計算物理学研究センター定員及び平成11年度現員数（括弧内は客員数）

### 3.2 センター長

センター長は、筑波大学の専任の教授を資格とし、筑波大学研究審議会の推薦を経て、学長が任命する。任期は2年である。表3にセンター長の氏名及び在任期間をまとめる。

計算物理学研究センター長			
氏名	所属	職	在任期間
岩崎 洋一	物理学系	教授	H4.4.10–H8.3.31
岩崎 洋一	物理学系（計算物理学研究センター）	教授	H8.4.1–H10.3.31
岩崎 洋一	（センター長事務取扱）	副学長	H10.4.1–H10.4.15
宇川 彰	物理学系	教授	H10.4.16–H11.3.31
宇川 彰	物理学系（計算物理学研究センター）	教授	H11.4.1–現在

表 3: 計算物理学研究センター長在任期間

### 3.3 センター教官

筑波大学では、全ての教官はいずれかの学系に所属することとなっている。従って、センター教官についても、所属先の学系があり、勤務先がセンターという形態を取る。この点の明示が必要な場合は、「…学系（計算物理学研究センター）」と表記する。

表4に平成11年度センター教官一覧を、表5にセンター設立以来在職した教官一覧を掲げる。

### 3.4 研究員

センターの研究活動は、センター教官及び各種の研究員により行われている。研究員には以下の4種類がある。

- 共同研究員

センターにおける計算物理学及び計算機工学の研究を共同で推進することを目的に、学内外の研究者に学長より委嘱するもの。

CP-PACS プロジェクトは総勢約30名の研究者により実施されたが、センター教官以外のプロジェクトメンバーについては、「共同研究員」に委嘱し、緊密な共同研究を可能とした。表7に、平成11年度の共同研究員一覧を掲げる。

- COE 研究員

平成7年度よりセンターは「卓越した研究拠点（COE）」の指定を文部省より受けており、それに基づく若手研究者養成のための研究員制度である。身分は非常勤講師。

平成 11 年度計算物理学研究センター教官一覧				
職	氏名	所属	分野	就任年月日
教授	宇川 彰	物理学系	素粒子物理学	H11.4.1
	和田 耕一	電子・情報工学系	計算機工学	H11.7.1
助教授	金谷 和至	物理学系	素粒子物理学	H4.4.10
	吉江 友照	物理学系	素粒子物理学	H9.9.1
	梅村 雅之	物理学系	宇宙物理学	H5.11.1
	朴 泰祐	電子・情報工学系	計算機工学	H8.4.1
講師	千葉 滋	電子・情報工学系	計算機工学	H9.8.1
助手	石塚 成人	物理学系	素粒子物理学	H8.4.1
	中本 泰史	物理学系	宇宙物理学	H8.4.1
	郡司 茂樹	物理学系	物性物理学	H8.4.1
	青木 保道	物理学系	素粒子物理学	H9.4.1
	Burkhalter Rudolf	物理学系	素粒子物理学	H10.4.9
客員教授	小柳義夫	東京大学大学院理学系研究科	計算機工学	H6.4.1
客員助教授	根本幸児	北海道大学大学院理学研究科	物性物理学	H7.11.1

表 4: 計算物理学研究センター教官

計算物理学研究センター設立以来在職教官一覧					
職	氏名	所属 (当 時)	分野	在職年月日	現職
教授	岩崎 洋一	物理学系	素粒子物理学	H8.4.1–H10.3.31	筑波大学副学長 (研究担当)
	小柳 義夫	東京大学理学部 (併任)	計算機工学	H5.1.16–H6.3.31	東京大学大学院理学系研究科教授
助教授	坂井 修一	電子・情報工学系	計算機工学	H8.10.1–H10.3.31	東京大学大学院工学系研究科助教授
講師	吉江 友照	物理学系	素粒子物理学	H4.4.10–H9.8.31	センター助教授
客員教授	中村 卓史	京都大学理学部	宇宙物理学	H4.12.1–H6.3.31	京都大学基礎物理学研究所教授
客員助教授	観山正見	国立天文台	宇宙物理学	H4.11.16–H5.3.31	国立天文台教授
	宮下精二	大阪大学理学部	物性物理学	H5.7.1–H7.3.31	東京大学大学院工学系研究科教授

表 5: 計算物理学研究センター設立以来在職教官

採用は原則として公募による。任期は1年で、2年目まで継続を認めている。  
表8に現在までの在職者一覧を掲げる。

- COE 外国人研究員

同じくCOE指定に基づく、国際交流を目的として、外国人研究者をセンターに招聘するための制度。滞在期間は3カ月以上を条件とする。

表9に現在までの滞在外者一覧を掲げる。

- 日本学術振興会研究員

日本学術振興会の公募による、特別研究員(DC・PD)と外国人特別研究員に加えて、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業に基づく研究員がある。

表10に現在までの研究員一覧を掲げる。

### 3.5 センター教官及び研究員数の推移

表6に、センター設立以来のセンター教官及び各種研究員数の推移をまとめる。

教官数については、平成7年度までは、学内関連学系(主として物理学系及び電子・情報工学系)所属のまま、共同研究員としてセンターの研究活動に携わる教官が複数あったが、平成8年度にはこれらのセンター勤務への配置換えが行なわれ、センター教官数が定員枠に見あったものとなっている。

共同研究員については、当初より新プログラム研究「CP-PACSプロジェクト」推進のための重要な要素として多数を擁していた。その他の研究員についても、年を追って充実してきている。なかでもCOE外国人研究員については、毎年第一級の研究者が滞在し、センターの研究活動に大きく寄与している。

年度	センター教官	共同研究員		COE 研究員		学術振興会研究員		
		学内	学外	国内	国外	DC・PD	外国人	未来開拓
平成4年度	3+(2)	8				2		
平成5年度	4+(2)	10	10			1		
平成6年度	3+(2)	12	10					
平成7年度	3+(2)	13	11		1	1	1	
平成8年度	9+(2)	10	15	1	3	2	3	
平成9年度	11+(2)	8	18	2	3	1	2	1
平成10年度	10+(2)	7	18	2	5	5		3
平成11年度	12+(2)	7	18	2	5	6	1	3

表6: 計算物理学研究センターにおける研究者数の推移(括弧内は客員教官数)

平成 11 年度計算物理学研究センター共同研究員			
氏名	所属・職	分野	委嘱年月日
押山 淳	物理学系・教授	物性物理学	H8.4.1
白川 友紀	機能工学系・教授	計算機工学	H4.10.1
星野 力	機能工学系・教授	計算機工学	H4.10.1
青木 慎也	物理学系・助教授	素粒子物理学	H4.10.1
安永 守利	電子・情報工学系・助教授	計算機工学	H7.4.1
山下 義行	機能工学系・助教授	計算機工学	H5.5.1
川合 敏雄	千歳科学技術大学光科学部・教授	計算機工学	H5.5.1
川合 光	京都大学大学院理学研究科・教授	素粒子物理学	H5.5.1
中澤 喜三郎	明星大学情報学部・教授	計算機工学	H4.10.1
中田 育男	図書館情報大学・教授	計算機工学	H4.10.1
中村 卓史	京都大学基礎物理学研究所・教授	宇宙物理学	H7.4.1
福来 正孝	東京大学宇宙線研究所・教授	素粒子物理学	H5.5.1
宮下 精二	東京大学大学院工学系研究科・教授	物性物理学	H7.4.1
観山 正見	国立天文台・教授	宇宙物理学	H5.5.1
森 正武	京都大学数理解析研究所・教授	計算機工学	H5.5.1
渡瀬 芳行	高エネルギー加速器研究機構・教授	計算機工学	H5.5.1
一井 信吾	東京大学大学院数理科学研究科・助教授	計算機工学	H5.5.1
今田 正俊	東京大学物性研究所・教授	物性物理学	H5.5.1
大川 正典	高エネルギー加速器研究機構・助教授	素粒子物理学	H5.5.1
坂井 修一	東京大学大学院工学系研究科・助教授	計算機工学	H10.4.1
中村 宏	東京大学先端科学技術研究センター・助教授	計算機工学	H4.10.1
中村 文隆	新潟大学教育学部・助教授	宇宙物理学	H8.10.1
小柳 義夫	東京大学大学院理学系研究科・教授	計算機工学	H5.5.1
根本 幸児	北海道大学大学院理学研究科・助教授	物性物理学	H8.4.1

表 7: 計算物理学研究センター共同研究員

計算物理学研究センター COE 研究員			
氏名	分野	在職年月日	現職
青木 保道	素粒子物理学	H8.4.1–H9.3.31	センター助手
長井 敬一	素粒子物理学	H9.4.1–H10.3.31	日本学術振興会特別研究員 (PD)
江尻 信司	素粒子物理学	H9.4.1–H10.3.31	日本学術振興会特別研究員 (PD)
金児 隆志	素粒子物理学	H10.4.1–H10.9.30	高エネルギー加速器研究機構 COE 研究員
菊地 信弘	宇宙物理学	H10.4.1–現在	

表 8: 計算物理学研究センター COE 研究員

### 3.6 運営

センターの研究活動は、「新プログラム」研究、「未来開拓」研究等の長期にわたる大型プロジェクト研究の推進、CP-PACS を用いた計算物理学及び並列計算機工学の研究、そのための CP-PACS を中心とする計算機システムの稼働と運用、これらの研究活動を支える諸設備の購入計画の立案と調達、研究会の開催など、多岐にわたる。これらの活動を支えるためのセンターの運営は、センター長の統括の下に、次の三つの会議における審議と報告を基礎として、事務部門の協力を受けて行われている。それぞれの名称・構成・役割は次のとおりである。

- 研究員会議

センター教官及び共同研究員を構成メンバーとする会議で、センター長を議長として、毎月第一土曜日に開催される。研究活動上の事項及びそれに関係する予算事項について、実施状況の報告と今後の方針の検討・立案が行われる。

- 運営委員会

学内関連学系教官及びセンター教官から構成され、センター長を委員長として、2カ月に1回開催される。

センターの組織の新設・改廃の発議、教官人事、予算案・決算案等のセンターの運営に関わる重要事項を審議する。表 11 に、平成 11 年度の運営委員会委員氏名を掲げる。

- 運営協議会

学外の学識経験者、学内の関連学系教官及びセンター教官から構成され、センター長を委員長とし、年1回開催される。

センターの研究計画・事業計画の基本方針及び共同研究・共同利用に関する重要事項を審議する。

表 12 に、平成 11 年度の運営協議会委員氏名を掲げる。

計算物理学研究センター COE 外国人研究員				
氏名	所属・職	国名	分野	滞在年月日
de Forcrand Philip	チューリッヒ工科大学・教授	スイス	素粒子物理学	H8.3.1–H8.5.31
Mackenzie Paul	フェルミ国立加速器研究所・上級研究員	米国	素粒子物理学	H8.6.11–H8.9.10
Zenkin Sergei	ロシアアカデミー原子核研究所・上級研究員	ロシア	素粒子物理学	H9.1.16–H9.7.15
Toussaint Douglas	アリゾナ大学理学部・教授	米国	素粒子物理学	H9.5.12–H9.8.19
Petersson Bengt	ビーレフェルト大学物理学科・教授	ドイツ	素粒子物理学	H10.2.3–H10.5.2
Gavai Rajiv	タター基礎研究所・準教授	インド	素粒子物理学	H10.4.24–H10.7.23
Slavnov Andrei	ステクロフ数学研究所・主任研究員	ロシア	素粒子物理学	H10.5.1–H10.7.31
Sharpe Stephen	ワシントン大学物理学科・準教授	米国	素粒子物理学	H10.10.1–H10.12.31
Wittig Hartmut	オックスフォード大学物理学科・研究員	英国	素粒子物理学	H11.2.15–H11.6.24
Karsch Frithjof	ビーレフェルト大学物理学科・教授	ドイツ	素粒子物理学	H11.5.24–H11.8.23
Ying He-Ping	浙江大学現代物理学研究所・準教授	中国	素粒子物理学	H11.10.15–H12.1.14

表 9: 計算物理学研究センター COE 外国人研究員

特別研究員				
氏名	分野	在職年月日	現職	備考
菊川 芳夫 (PD)	素粒子物理学	H4.4.1-H5.3.31	名古屋大学理学部 助教授	新プロ枠
石塚 成人 (DC)	素粒子物理学	H4.4.1-H5.3.31	センター助手	新プロ枠
蔵増 嘉伸 (DC)	素粒子物理学	H5.4.1-H6.3.31	高エネルギー加速 器研究機構助手	新プロ枠
中村 文隆 (PD)	宇宙物理学	H7.4.1-H8.9.30	新潟大学教育学部 助教授	新プロ枠
榎 昌吾 (DC)	素粒子物理学	H8.4.1-H9.3.31	(株)情報数理研 究所	新プロ枠
須佐 元 (PD)	宇宙物理学	H9.4.1-H12.3.31		
江尻 信司 (PD)	素粒子物理学	H10.4.1-H13.3.31		
大須賀 健 (DC)	宇宙物理学	H10.4.1-H13.3.31		
長井 敬一 (PD)	素粒子物理学	H10.7.1-H13.3.31		
田尻 祐紀子 (DC)	宇宙物理学	H11.1.1-H13.3.31		
岡本 昌高 (DC)	素粒子物理学	H11.4.1-H14.3.31		
外国人特別研究員				
氏名	分野	在職年月日	現職	備考
Bock Wolfgang	素粒子物理学	H7.10.1-H8.9.30	フンボルト大学物 理学科研究員	新プロ枠
Burkhalter Rudolf	素粒子物理学	H8.9.1-H10.3.31	センター助手	新プロ枠
Boyd Graham	素粒子物理学	H8.11.1-H10.1.16	P & G Ltd. 研究員	新プロ枠
Shanahan Hugh	素粒子物理学	H11.10.19-H13.9.18		
未来開拓研究員				
氏名	分野	在職年月日	現職	備考
Shanahan Hugh	素粒子物理学	H10.2.1-H11.1.31	学振外国人特別研 究員	
Manke Thomas	素粒子物理学	H10.6.1-H12.5.31		
Ali Khan Arifa	素粒子物理学	H10.9.1-H12.8.31		
板倉 憲一	計算機工学	H11.4.1-H13.3.30		

表 10: 日本学術振興会研究員

平成 11 年度計算物理学研究センター運営委員会委員					
選出区分	所属	職名	氏名	任期	備考
規則第 5 条 第 1 号	物理学系 (計算物理学研究センター)	教授	宇川 彰	—	委員長
第 2 号	物理学系 (計算物理学研究センター)	助教授	梅村 雅之	H10.5.1–H12.3.31	
	電子・情報工学系 (計算物理学研究センター)	助教授	朴 泰祐	H10.5.1–H12.3.31	
第 3 号	物理学系	教授	梁 成吉	H10.5.7–H12.3.31	
	物理学系	教授	谷津 潔	H10.4.1–H12.3.31	
	物理学系	教授	押山 淳	H11.4.1–H13.3.31	
第 4 号	電子・情報工学系	教授	山口 喜教	H11.7.1–H13.3.31	
	電子・情報工学系	教授	板野 肯三	H11.4.1–H13.3.31	
第 5 号	機能工学系	教授	星野 力	H10.4.1–H12.3.31	
第 6 号	電子・情報工学系 (計算物理学研究センター)	教授	和田 耕一	H11.7.1–H13.3.31	
	物理学系 (計算物理学研究センター)	助教授	金谷 和至	H10.5.1–H12.3.31	
	物理学系 (計算物理学研究センター)	助教授	吉江 友照	H10.5.1–H12.3.31	

- 選出区分 (1) センター長  
(2) センターの維持管理に係る教員のうちからセンター長が推薦する者 2 人  
(3) 物理学系から選出される教員 3 人  
(4) 電子・情報工学系から選出される教員 2 人  
(5) 機能工学系から選出される教員 1 人  
(6) その他センター長が推薦する本学の教員 若干人

表 11: 平成 11 年度計算物理学研究センター運営委員会委員

平成 11 年度計算物理学研究センター運営協議会委員					
選出区分	所属	職名	氏名	任期	備考
規則第 7 条 第 1 号	物理学系 (計算物理学研究センター)	教授	宇川 彰	—	委員長
第 2 号	物理学系 (計算物理学研究センター)	助教授	梅村 雅之	H10.5.1–H12.3.31	
	電子・情報工学系 (計算物理学研究センター)	助教授	朴 泰祐	H10.5.1–H12.3.31	
第 3 号	物理学系	教授	押山 淳	H11.4.1–H13.3.31	
	物理学系	教授	谷津 潔	H10.4.1–H12.3.31	
	電子・情報工学系	教授	板野 肯三	H11.4.1–H13.3.31	
	機能工学系	教授	星野 力	H10.4.1–H12.3.31	
第 4 号	東京大学宇宙線研究所	教授	荒船 次郎	H10.4.1–H12.3.31	
	東京大学大学院理学系研究科	教授	小柳 義夫	H10.4.1–H12.3.31	
	高エネルギー加速器研究機構	機構長	菅原 寛孝	H10.4.1–H12.3.31	
	明星大学情報学部	教授	中澤 喜三郎	H10.6.1–H12.3.31	
	図書館情報大学	教授	中田 育男	H11.4.1–H12.3.31	
	京都大学数理解析研究所	所長	森 正武	H11.4.1–H13.3.31	
	広島大学情報教育研究センター	教授	中村 純	H10.4.1–H12.3.31	
	東京大学物性研究所	教授	高山 一	H10.4.1–H12.3.31	
	京都大学基礎物理学研究所	教授	中村 卓史	H10.4.1–H12.3.31	
京都大学基礎物理学研究所	所長	益川 敏英	H10.4.1–H12.3.31		
第 5 号	電子・情報工学系 (計算物理学研究センター)	教授	和田 耕一	H11.7.1–H13.3.31	
	物理学系 (計算物理学研究センター)	助教授	金谷 和至	H10.5.1–H12.3.31	
	物理学系 (計算物理学研究センター)	助教授	吉江 友照	H10.5.1–H12.3.31	

選出区分 (1) センター長

(2) センターの維持管理に係る教員のうちからセンター長が推薦する者 2 人

(3) 物理学系、電子・情報工学系、機能工学系の教員のうちから当該学系長が推薦する者 若干人

(4) 学長が学外の学識経験者のうちから委嘱する者 若干人

(5) その他センター長が推薦する本学の教員 若干人

表 12: 平成 11 年度計算物理学研究センター運営協議会委員

### 3.7 人事

センター教官人事は、筑波大学全体の人事選考規定に則り、筑波大学人事委員会の管轄の下に行われる。センターにおける審議は、運営委員会を中心に以下の順序に従う。

- 専門分野の決定  
センター運営委員会において、センターの研究目的、研究分野のバランスなどを考慮し審議した上で決定し、配置要望を行う。
- 候補者の選出  
候補者の選出は原則として公募によるが、諸般の事情により、学内外研究者の意見を広く聴取した上で公募を経ずに選出する場合もある。候補者の予備選考は、運営委員会で選出された教授 5 名により構成される人事小委員会において行われる。論文査読を含め、研究業績、教育業績、人格等について、広くその適性が審査される。予備選考において候補者が確定した場合には、運営委員会の議を経て、人事委員会に選考発議が行われる。
- 関連組織との間での調整  
所属予定学系の了承を得て、候補者の選出を含めた人事選考を進める。

### 3.8 卓越した研究拠点 (COE)

センターは、平成 7 年度より卓越した研究拠点 (COE) の指定を文部省より受けている。これに伴う予算措置には、既に第 3.4 節に記したように、非常勤研究員 (COE 研究員) 経費、外国人研究員経費がある。

非常勤研究員経費は、若手研究者養成に用いられており、現在までの在職者は表 8 に掲げたとおりである。

外国人研究員経費は、3 カ月以上の長期にわたり、諸外国の研究者をセンターに招聘して、情報交換・共同研究等を行ない、国際交流の推進を図る制度である。表 9 に示したとおりの滞在者実績がある。

以上の研究員制度の予算措置に加えて、平成 10 年度には研究設備の整備を目的とする先導的研究設備費が交付され、小型並列計算機 pilot-3 の能力強化に用いられた。

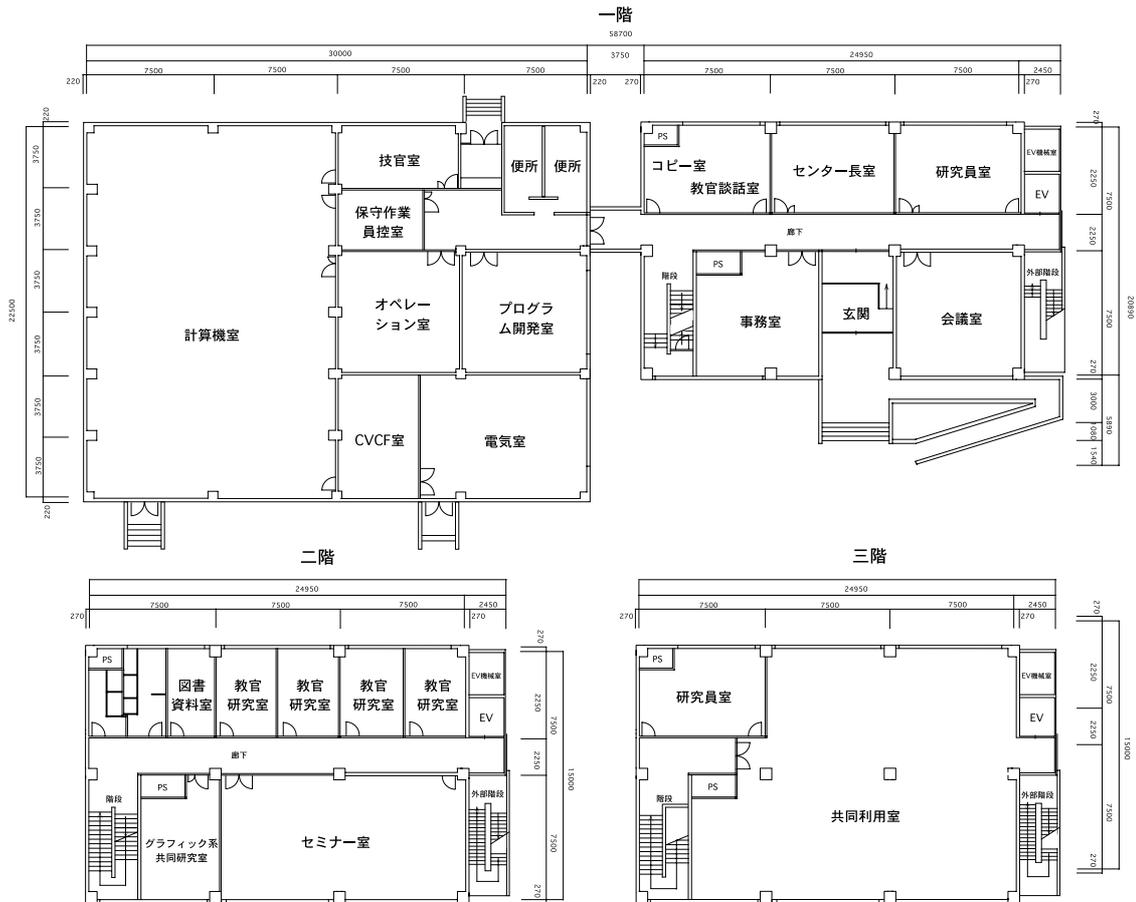


図 2: 計算物理学研究センター建物平面図

#### 4 建物

センター建物は、計算機棟である第 1 期分 ( $698m^2$ ) が平成 5 年夏に竣工し、研究棟である第 2 期分 ( $1090m^2$ ) が平成 7 年春に竣工した。図 2 に、計算機棟及び研究棟平面図を示す。

## 5 計算機システム

### 5.1 システム概要

計算機システムは、センターの中心設備であり、

- 超並列計算機 CP-PACS
- 並列プログラム開発等を目的とする小型並列システム Pilot-3
- CP-PACS のフロントエンドとして機能するフロント計算機システム (FCS)
- 一般用及び「未来開拓」研究用のワークステーション群

から構成されている。表 13 に、センター計算機設備の諸元を示す。図 3 に、システム概要を示す。図 4 に、計算機棟におけるシステム機器配置を示す。

FCS の中心となるのは、CP-PACS のジョブ制御を行うホスト計算機 (ccpfcs) である。ホスト計算機には、容量 354Gbyte の磁気ディスク装置、2103 巻 (21Tbyte) の 10GByte テープを収容するカートリッジ磁気テープライブラリ装置などの大容量外部記憶装置が接続されている。計算結果の解析のためには、ファイルサーバ・解析サーバ・ワークステーションクラスタと、それに接続された磁気ディスクアレイや光磁気ディスク装置、可視化のためのグラフィックワークステーションと画像 VTR 装置などが整備され、これらの間は高速なデータ転送を可能とする FDDI により結ばれている。

CP-PACS プロジェクトの礎となった並列計算機 QCDPAX は平成 2 年度に完成したが、同機も平成 5 年 11 月にセンターに移設され、平成 11 年 3 月に稼働を停止するまで素粒子物理学のシミュレーションに用いられた。同機は、平成 11 年 10 月 5 日に解体撤去されている。

大型計算機群				
ホスト名等	演算性能	主記憶容量	ディスク容量	備考
CP-PACS	614Gflops	128GByte	595GByte (Raid-5)	
Pilot-3	29Gflops	24GByte	256GByte(Raid-5)	
フロントホスト	250Mflops	512MByte	354GByte	
ワークステーション群				
種別	台数	主記憶容量等	ディスク容量	備考
ファイルサーバ	2	—	229GByte (Raid-5)	
解析サーバ	2	1GByte	602GByte(Raid-5)	
計算用クラスタ	7	—	—	
並列プログラム 開発	2	—	—	
管理用	2	—	—	
一般利用	16	—	—	
未来開拓関連	4	—	—	
大容量外部記憶装置				
種別	媒体	媒体巻数	総容量	備考
磁気テープライ ブラリ	カートリッジ型 磁気テープ (10GByte/ 巻)	2103	21TByte	
光磁気ディス クライブラリ	光磁気ディスク (2GByte/ 枚)	192	384GByte	

表 13: 計算物理学研究センター計算機システム諸元

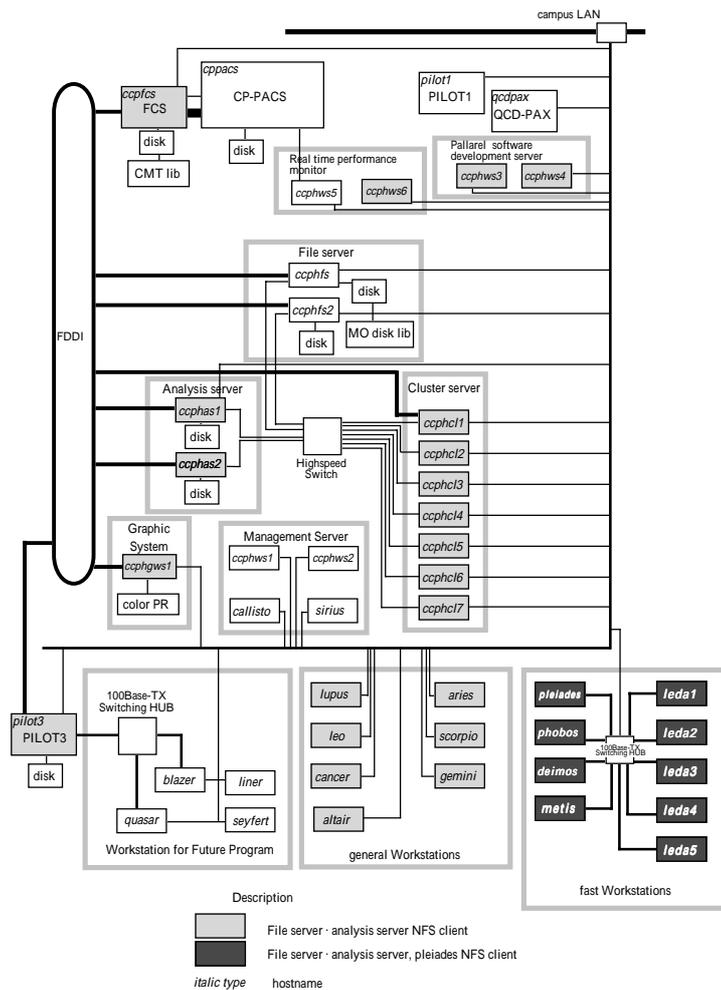


図 3: 計算物理学研究センター計算機システム

## 5.2 システムの整備

フロント計算機システムは、センター予算の電子計算機等借料によるレンタルにより、平成 5 年度・6 年度の二期に分けて整備され、平成 9 年度にはその更新が行われた。表 14 に整備の進行状況の概要を示す。

また、計算機システムのための電源、空調、無停電装置などの付帯設備も、平成 4 年度から 7 年度にかけて整備された。表 15 に、これらの整備状況と最終規模を示す。

機器	第1期 (H6.3.1)	第2期 (H7.3.1)	更新 (H10.3.1)
<b>ホスト系</b>			
フロントホスト	250Mflops 128MB	250Mflops 1 GB	250Mflops 512MB
磁気ディスク	50GB	354GB	354GB
磁気テープライブラリ		989 巻 × 800MB =791GB	2103 巻 × 10GB =21TB
<b>ワークステーション系</b>			
ファイルサーバ		1(90GB)	2(229GB)
解析サーバ			2(602GB)
計算用クラスタ		7	7
並列プログラム開発		2	2
管理用	2	2	2
グラフィック用	1	1	1
光磁気ディスクライブラリ		192 巻 × 2GB =384GB	192 巻 × 2GB =384GB
<b>ネットワーク系</b>			
ETHERNET	計算機棟 (1)	計算機棟 (2)	計算機棟 (2)
FDDI		研究棟 (1) 計算機棟 / 研究棟共通 (1)	研究棟 (1) 計算機棟 / 研究棟共通 (1)

表 14: フロント計算機システム整備 (B:Byte)

	平成5年度	平成6年度	平成7年度	全体
電源	KVA	KVA		KVA
計算機用	500	300		800
一般用	100			100
空調用	300	300		600
空調 台数 (24,000Kcal)	4	2	6	12
無停電装置 500KVA 5分間			設置完了	

表 15: 建物付帯主要設備

筑波大学 計算物理学研究センター 計算機システム配置図

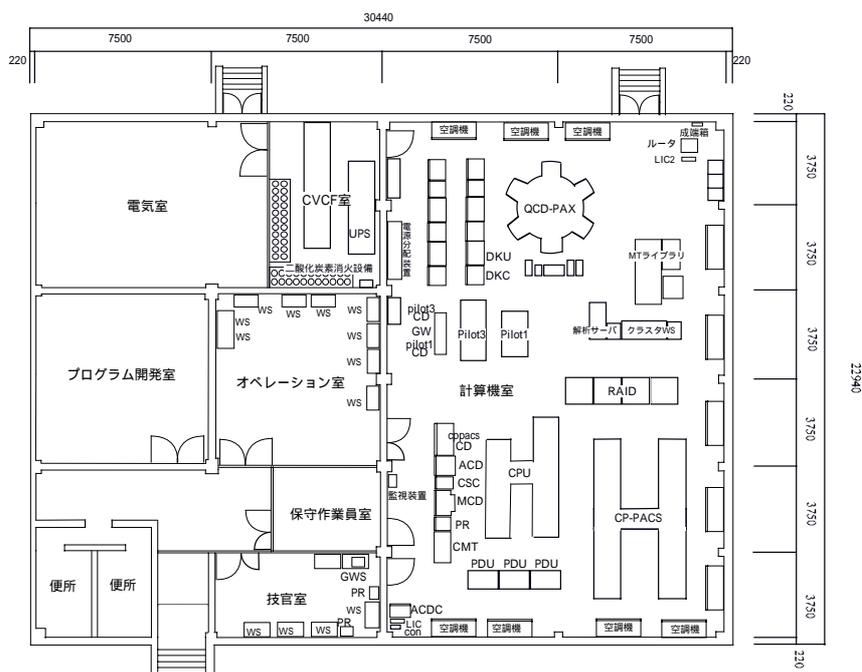


図 4: 計算物理学研究センター計算機器配置

### 5.3 システムの運用

計算機システムの運用は、センター教官及び技官から構成される計算機システム運用委員会によって行われている。運用委員会は、システム運用方針を定めるとともに日々の運用に責任を持つ。表 16 に、平成 11 年度運用委員会委員を掲げる。

センター計算機システムの安定稼働のためには、稼働状況の監視、故障時の対処、定期保守が必要である。センターでは CP-PACS 等主要設備に自動監視装置を設置し、遠隔監視及び保守業務の契約を専門業者と交わしている。フロント計算機システムについては、レンタルにより導入したものであるため、その保守及び故障時の対処についてはレンタル契約に盛り込まれている。

運用委員会では、システムの運用について、CP-PACS 保守契約業者及びフロント計算機システム納入業者との間で、「計算機システム運用連絡会」を毎月 1 回開催している。この連絡会は、運用委員会主査を議長とし、運用上生じた問題事項の検討・整理、システム改善のための技術情報の交換、運用日程の調整等を行っている。

また、CP-PACS の共同利用（第 7 章参照）に対応するため、運用委員会では共同利用担当及び共同利用担当主査を定めている（平成 11 年度分については、表 16 を参照）。共同利用者の技術的相談に応えるためには、CP-PACS の使用経験のある大学院学生をプログラム相談員としてアルバイト雇用している。

計算物理学研究センター計算機システム運用委員会委員			
氏名	所属	職	備考
宇川 彰	物理学系（計算物理学研究センター）	教授	共同利用担当
梅村 雅之	物理学系（計算物理学研究センター）	助教授	共同利用担当
金谷 和至	物理学系（計算物理学研究センター）	助教授	共同利用担当主査
千葉 滋	電子・情報工学系（計算物理学研究センター）	講師	
朴 泰祐	電子・情報工学系（計算物理学研究センター）	助教授	共同利用担当
吉江 友照	物理学系（計算物理学研究センター）	助教授	運用委員会主査
富田 雅	計算物理学研究センター	技官	
野澤 昭夫	計算物理学研究センター	技官	

表 16: 計算物理学研究センター計算機システム運用委員会委員

#### 5.4 システムの利用と稼働の状況

##### 5.4.1 登録ユーザ

センターの計算機システムはCP-PACSを中心とするものである。CP-PACSプロジェクトの進行中は、同プロジェクト関係者にユーザ登録が制限されていた。平成9年度からは、CP-PACSの全国共同利用が開始されるに伴い、「大規模数値シミュレーションプロジェクト」（第7章参照）の採択課題研究者について、登録を行っている。表17に、平成6年度以来の登録ユーザ数を示す。

計算物理学研究センター計算機システム登録ユーザ数										
年度	物理学			計算機工学			共同利用			計
	教官	研究員	学生	教官	研究員	学生	教官	研究員	学生	
平成6年度	8		9	11		8				36
7年度	9	2	10	11		22				54
8年度	9	7	5	13		27				61
9年度	11	20	8	16		29	14	2	14	114
10年度	11	25	8	17	2	25	20	5	16	129
11年度	11	29	8	17	7	19	10	3	2	106

表 17: 計算物理学研究センター計算機システム登録ユーザ数

#### 5.4.2 CP-PACS 稼働統計

表 18に、平成 8 年 3 月に CP-PACS(1024PU) が完成設置されて以降、2048PU システムが稼働を開始するまでの、CP-PACS の主要な日誌を掲げる。

CP-PACS を含む計算機システムは、定期保守（フロント計算機システムは 1 カ月に 1 回・CP-PACS については 6 カ月に 1 回・空調機は 3 カ月に 1 回）を除き、年間を通じての連続運転を原則としている。

CP-PACS の 2048 台の PU は分割して運転できる。現在は、1024PU、512PU、256PU、64PU を主な分割の単位として、日々の計算需要に応じ最も適当な分割形態を取って運用を行っている。

図 5に、平成 8 年 4 月以来の CP-PACS の稼働状況を月毎の稼働時間及び稼働率で示す。

ここでいう稼働時間とは、ジョブの実行開始から終了までの CP-PACS における計測時間に、そのジョブの使用した PU 台数を乗じ、これをジョブ全てについて積算したものである。従って左縦軸の単位は 100 万時間という大きな値になっている。この時間数を総 PU 数 2048 で割り、さらに日数に換算したのが、右縦軸である。この単位が、1 カ月あたり、実際の計算がどの程度行われたかの目安となる。

稼働率は、各月の全日数を分母に取り、上に定義した稼働時間（日数単位）を分子に取った比である。平成 8 年 10 月 4 日に 2048PU で稼働を開始して以来、平成 11 年 7 月末日までの約 3 年間の統計で、全経過日数に対する平均稼働率は 82% である。全経過日数から、保守のための日数を差し引き、これを分母に取ると、平均稼働率は 87% となる。

表 19に、図 5の数値を掲げる。

CP-PACS 主要稼働日誌		
平成 8 年	3 月 25 日	CP-PACS(1024PU) 完成設置
	4 月 4 日	同運用開始
	8 月 20 日	同 2048PU 化のため運用停止
	9 月 18 日	CP-PACS(2048PU) 完成設置
	9 月 27 日	Linpack ベンチマークにて 368.2Gflops/2048PU を達成
	10 月 4 日	CP-PACS(2048PU) 運用開始

表 18: CP-PACS 主要稼働日誌

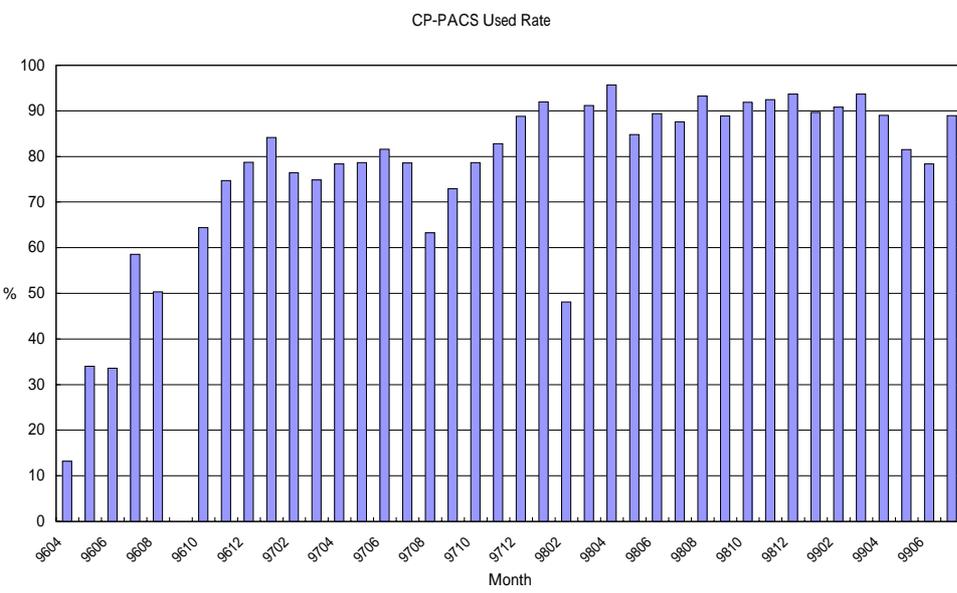
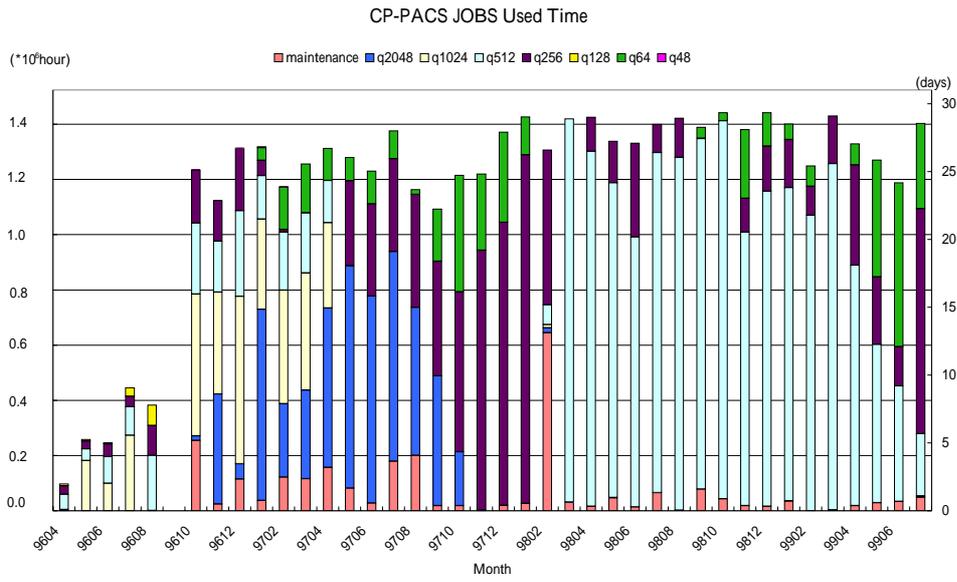


図 5: CP-PACS 月間稼働時間及び稼働率

システム構成 1024PU

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合計
1996年	94.75	253.04	241.43	435.40	373.87	0.00	1,398.49
[%]	13	34	33	58	50	0	38

システム構成 2048PU

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	年間合計
1996年							478.93	537.55	585.56	625.72	513.51	556.60	3,297.87
[%]							64	74	78	84	76	74	75
1997年	564.00	585.13	587.31	584.44	470.43	524.67	584.71	596.09	660.49	683.82	323.25	678.26	6,842.60
[%]	78	78	81	78	63	72	78	82	88	91	48	91	78
1998年	688.75	630.39	643.51	651.48	693.49	639.86	683.12	665.33	696.47	666.67	610.00	696.69	7,965.76
[%]	95	84	89	87	93	88	91	92	93	89	90	93	90
1999年	640.45	606.01	564.14	661.29									2,471.89
[%]	88	81	78	88									84
合計													20,578.12
[%]													82

表 19: 月別 CP-PACS 稼働統計 (上段は月別稼働時間 (ジョブ実行時間×使用 PU 台数の総和を 2048 で割った時間数)・下段は稼働率 (%) (上段稼働時間数の各月全時間数に対する比率))

## 6 研究活動

### 6.1 概要

センターにおける研究活動の重点は、その目的と時期により、以下のように大別することができる。

- CP-PACS プロジェクトの実施（平成4年度～8年度）
- CP-PACS を用いた計算物理学の研究（平成7年度～現在）
- CP-PACS を超える次世代超並列計算機の基礎研究（平成9年度～現在）

平成4年度からの5年間は、CP-PACS プロジェクト（第6.2節）の推進にセンターの全力が注がれた。特に平成7年度末に、1024PU 構成機が完成設置されるまでは、超並列計算機 CP-PACS の開発・製作（第6.3節）が、計算機工学分野・計算物理分野を問わず、センター関係研究者の最重点目標であった。

CP-PACS プロジェクトは、CP-PACS の開発・製作と同時に、それを用いた大規模数値計算により、計算物理学の研究を飛躍的に推進させることも目標としている。CP-PACS 用の物理応用計算並列プログラムの開発は、CP-PACS の完成に先立ち、平成7年度後半から本格的に行われた。その結果、物理応用計算は、CP-PACS の設置と同時に、平成8年度初頭から開始された。

物理応用計算の実行は、平成8年秋の2048PU 構成の CP-PACS の最終的な完成と共に本格化した。現在までの3年間の間に、最も重点が注がれたのは、素粒子物理学における格子量子色力学の計算である（第6.4節）。また、それと並んで、宇宙物理学における輻射流体力学の計算が遂行された（第6.5節）。物性物理学については、平成9年度に開始された全国共同利用「大規模数値シミュレーションプロジェクト」により多数の計算が行われた（第6.6節）。

CP-PACS を始めとして、超並列計算機のピーク演算性能は現在約1Tflops に達しており、これによって、計算物理学は大きな進歩を遂げたが、より高い計算力を必要とする問題は数多く残されている。従って、計算物理学の手法により、我々の自然界の理解を一層深めるには、CP-PACS を越える超並列計算機の開発研究が極めて重要と考えられる。このような問題意識に基づいて、センターにおいては、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」分野の一プロジェクト「次世代超並列計算機の開発」が平成9年度に開始され、5か年計画で、次世代の超並列計算機の要素技術の基礎研究が行なわれている（第6.7節）。

### 6.2 CP-PACS プロジェクトの概要

高性能計算機の急速な発達により、科学技術分野において、数値的な方法による研究が飛躍的な進歩を遂げてきたことは良く知られている。この発展は、1970年台初頭のベクトル

研究組織構成図（平成8年度）

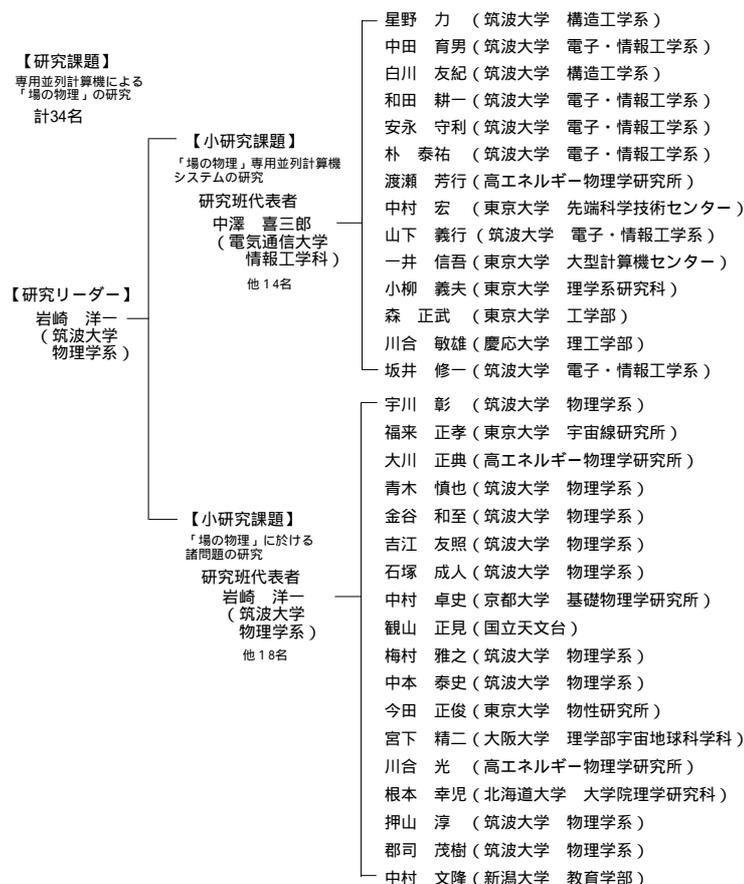


図 6: CP-PACS プロジェクト平成 8 年度研究組織機構図

型スーパーコンピュータの登場により本格的に始まり、1980 年台後半以降の並列計算機の進展により一層加速された。

このような発展のなかで重要な役割を果たしてきたのが専用並列計算機の開発である。物理学、特に素粒子物理学分野では、この方向は1980 年台初頭から追求されてきた。筑波大学においては、星野力等により1970 年台から進められて来た並列計算機 PAX シリーズの5 台目である QCDPAX が、素粒子物理学用として開発・製作され、1990 年の完成時点で、世界最高速に部類する 14Gflops を達成した。

CP-PACS プロジェクトは、QCDPAX の成果を受け継いで、飛躍的高性能の並列計算機 CP-PACS の開発・製作を行ない、それを用いて計算物理学の難問題の解決を図ることを目的として構想された。CP-PACS は Computational Physics with Parallel Array Computer System の略称である。同プロジェクトは、文部省「学術の新しい展開のためのプログラム」の研究課題「専用並列計算機による「場の物理」の研究」として、岩崎洋一（筑波大）を研

究代表者として採択され、平成4年度から8年度にわたり、5か年計画で実施された。

CP-PACS プロジェクトの実施、特に超並列計算機 CP-PACS の開発・製作のための財源は、科学研究費補助金（創成的基礎研究費）により、総額 22 億円が措置された。また、本センターが、同プロジェクトの推進母体として設置されたことは、既に述べたとおりである。

CP-PACS プロジェクトは、平成4年度当初、7機関20名からなる研究者グループにより発足したが、最終年度平成8年度には、研究者数は、9機関34名に増加した。図6に、平成8年度の研究組織機構を示す。

CP-PACS プロジェクトの特徴は、図6からも明らかなように、物理学者と計算機工学者が緊密な共同研究を実施した点にある。これは、QCDPAX プロジェクト以来の伝統を受け継いだものであり、実際の物理応用計算に高い効率を発揮する計算機を開発・製作する上で、非常に重要な役割を果たした。

CP-PACS プロジェクトの詳細は、計画実施半ばの平成6年夏の間中評価に際して作成された「進捗状況報告書」[1]及び計画終了後に作成された「報告書」[2]に詳述されている。また、「情報処理学会誌」37巻に総合報告[3]が掲載されている。

## 参考文献

- [1] 「専用並列計算機による「場の物理」の研究」進捗状況報告書（筑波大学計算物理学研究センター：平成6年12月）
- [2] 「専用並列計算機による「場の物理」の研究」研究成果報告書；同付属資料（筑波大学計算物理学研究センター：平成9年11月）
- [3] 特集『計算物理学と超並列計算機－CP-PACS計画－』，情報処理 37 (1996):  
中村 宏，「特集『計算物理学と超並列計算機－CP-PACS計画－』の編集にあたって」，p.10.  
岩崎 洋一，宇川 彰，梅村 雅之，「計算物理学と CP-PACS 計画」，p.11-17.  
中澤 喜三郎，中村 宏，朴 泰祐，「超並列計算機 CP-PACS のアーキテクチャ」，p.18-28.  
中田 育男，山下 義行，小柳 義夫，「超並列計算機 CP-PACS のソフトウェア」，p.29-37.  
青木 慎也，金谷 和至，吉江 友照，「超並列計算機 CP-PACS の計算物理学分野における実効性能の予測」，p.38-42.

## 6.3 CP-PACS の開発・製作

### 6.3.1 CP-PACS の設計方針と基本仕様

CP-PACS の基本設計においては、各種計算物理学を中心とする大規模科学技術計算を高速に処理するために、単体プロセッサの演算処理性能とそれらを結合する相互結合網の両者に対し、実問題を対象とした最適化がなされるよう注意を払った。システム全体の要求仕様には、その規模の計算機上で計算可能な実問題に基づく各種目標パラメータが設定され、当時の技術レベルでそれを達成するための様々な工夫が行なわれている。

単体プロセッサの設計・開発においては、単純なピーク性能追及だけでなく、実問題におけるベクトル処理をマイクロプロセッサ上で効率的に処理するための擬似ベクトル処理機構が最も重要な要素技術として研究開発された。また、相互結合網においては、各種問題に柔軟に適応可能なハイパクロスバ網の実装を目指し、プロセッサの実効性能に見合ったデータ転送性能を実現した。その他にも大量のデータを高速に記憶するための並列入出力装置、擬似ベクトル処理を活用するためのコンパイラ技術等、システムの各部において高性能化の実現を目指した。表 20 に CP-PACS の基本仕様を示す [4, 2]。

### 6.3.2 ノードプロセッサ

ノードプロセッサ単体での実効性能を追及することは CP-PACS における最重要課題であった。当時のハードウェア実装技術で数百 GFLOPS の全体性能を達成するには、数千台のマイクロプロセッサによる分散メモリ型並列処理が最も現実的な手法であったが、キャッシュに頼った単純な RISC 型プロセッサでは大規模科学技術計算における十分な効率が見込めない。このため、CP-PACS では当時のスーパーコンピュータで実現されていた、ハードウェアパイプラインによるベクトル処理をスーパスカラ型の RISC プロセッサで実現する機構として、スライドウィンドウによる擬似ベクトル処理機構 (PVP-SW: Pseudo Vector Processor based on Sliding Window) が提案され、導入された [1]。

単体プロセッサにおける高速なベクトル処理を実現するには、十分なメモリバンド幅を確保し、さらにメモリアクセスの遅延を隠蔽する必要がある。前者に関しては高密度実装されたメモリを複数バンクに配置することにより、パイプラインメモリを実現することで達成している。また後者に関しては、浮動小数点レジスタ数を従来のプロセッサに比べ大幅に増やし、演算対象となるデータを予めレジスタにロードする命令を十分に早い段階で先行発行することにより達成している。また、基本となるプロセッサアーキテクチャに対し、レジスタ数を拡張しつつ互換性を保つために、スライドウィンドウの概念を導入した。

図 7 に PVP-SW の原理を示す。この図では一般的な PVP-SW の構成を示しているが、CP-PACS のノードプロセッサの場合、総レジスタ数  $m$  は 128 で、グローバルレジスタ数  $g$  は 8, 12, 16 の 3 種類からソフトウェア指定できるようになっている。PVP-SW は原理的にあらゆるスーパスカラ方式の RISC 型プロセッサに適用可能であるが、CP-PACS では基

表 20: CP-PACS の基本仕様

総ピーク性能	614.4 GFLOPS	
総主記憶容量	128 GB	
並列処理方式	分散記憶型 MIMD 方式	
演算プロセッサ数	2048 台	
単体プロセッサ	アーキテクチャ	PA-RISC1.1 仕様 + 擬似ベクトル処理機構
	浮動小数点レジスタ数	128
	クロック周波数	150 MHz
	理論ピーク性能	300 MFLOPS
	キャッシュメモリ	L1: 16 KB (I) + 16 KB (D) L2: 512 KB (I) + 512 KB (D)
	主記憶バンド幅	1.2 GB/sec
相互結合網	トポロジ	3次元ハイパクロスバ (8 × 17 × 16)
	リンク当たり転送バンド幅	300 MB/sec
	総バイセクションバンド幅	614 GB/sec
	ルーティング方式	固定ルーティングによる wormhole 転送
	転送プロトコル	リモート DMA による高速転送
	その他の機構	ハードウェアバリア同期、ハードウェア放送、ブロックストライド転送
入出力装置	入出力プロセッサ数	128 台
	ディスク装置	RAID-5 構成、総容量 0.6 TB
	外部ネットワーク	HIPPI, 10base-T Ethernet

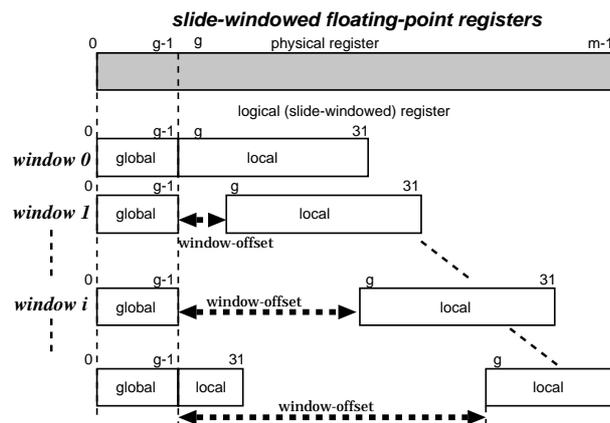


図 7: PVP-SW(擬似ベクトル処理機構) の概念図

本プロセッサとして PA-RISC 1.1 を採用し、これに対する機能拡張という形で PVP-SW を実現している。

物理的なレジスタ空間は複数の論理的なウィンドウに分割される。1つの論理的なウィンドウ内のレジスタ数は、拡張前のアーキテクチャで定義される数(図7では32)と等しい。ウィンドウの位置は window-offset で与えられる。各ウィンドウは global 部と local 部にわかれ、global 部のレジスタは全てのウィンドウに共通である。ある時点ではただ1つのウィンドウのみがアクティブであり、拡張前のアーキテクチャにおける命令は全てこのアクティブウィンドウ内のレジスタのみを用いる。一方、ソフトウェアにより、このアクティブウィンドウを物理的ウィンドウ空間内で自由に移動(スライド)することが可能である。このようにして、上位互換性を維持しながら多数のレジスタを利用可能となる。

このようなアーキテクチャの上で、データ処理は基本的に

- 将来必要となるデータに対するメモリからレジスタへの先行ロード
- 既にロード済みの、アクティブウィンドウ内のレジスタ上のデータの演算処理
- 演算処理済みのレジスタからのメモリへのストア

の3つのステップで処理される。第一及び第三のステップのために、全物理レジスタをデータ転送対象レジスタとして指定可能な特殊なロード / ストア命令として、プリロード命令とポストストア命令が追加される。これらの命令は「置いてきぼり処理」によりプロセッサの演算パイプラインを停止させない。上記処理をスーパスカラ的に同時発行・処理し、適当なタイミングでデータのプリロードとアクティブウィンドウの切り替えを行うことにより、ベクトル計算機と同等の処理をスーパスカラプロセッサ上で実現可能となる。

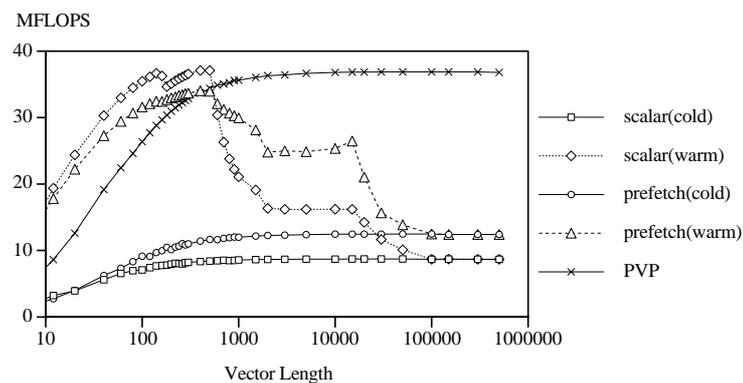


図 8: ベクトル加算における PVP-SW の性能

図 8 に、ベクトル加算処理における PVP-SW と、代表的なメモリ遅延隠蔽手法であるキャッシュプリフェッチとの性能比較を示す。これにより、PVP-SW がキャッシュサイズを上回るデータ量に対しても、効率的なベクトル処理を実現していることがわかる [3]。

### 6.3.3 プロセッサ間相互結合網

CP-PACS ではプロセッサ間相互結合網としてハイパクロスバ網 (HXB: Hyper-Crossbar Network) と呼ばれるトポロジを採用した。典型的な大規模科学技術計算では隣接プロセッサ間の無衝突データ転送が必要となる (QCD 計算もこれに含まれる)。すなわち、全プロセッサが一斉に同一方向の隣接プロセッサに対してメッセージを転送した場合、それらのメッセージはネットワーク上で互いに衝突することなく、ピーク性能に近いスループットで転送される必要がある。HXB 網ではプロセッサ台数に無関係に、論理的に近接配置されたプロセッサ間でこのような転送を実現することが可能であり、さらにより複雑なデータ転送パターンにも対応可能な柔軟なトポロジを持つ。これは、QCD 以外の広汎な科学技術計算にも柔軟に対応可能な計算機的设计を目指すことにつながる [2]。

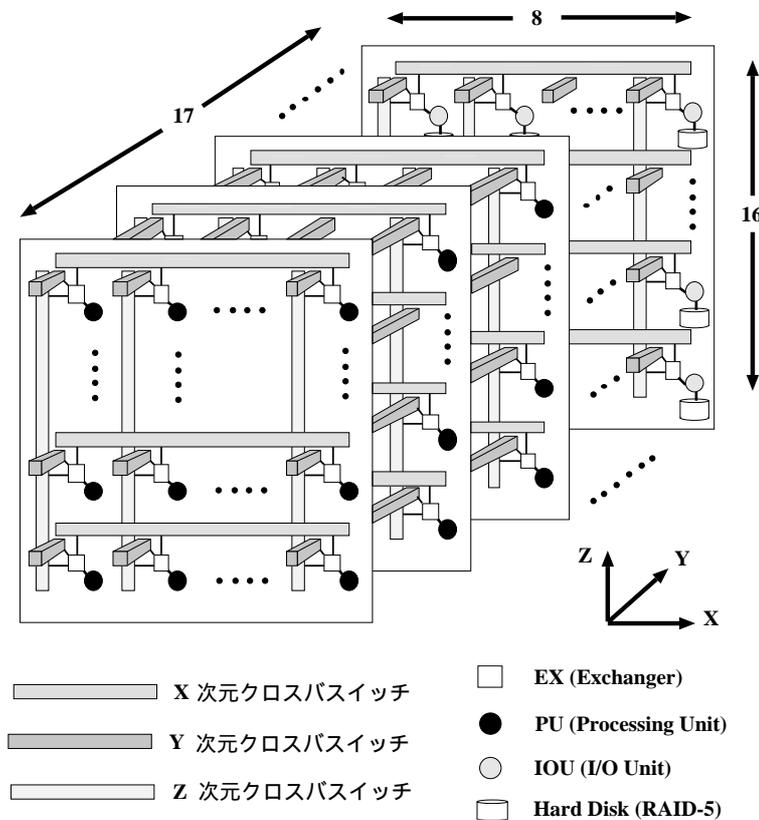


図 9: CP-PACS の全体構成図

図 9に CP-PACS におけるプロセッサ間相互結合網を示す。HXB のトポロジは  $n$  次元の超立方体の概念を拡張した形としてとらえることができる。ここで次元数  $n$  は任意に選択可能であるが、CP-PACS 実装時の実装技術を想定した結果、3次元の構成が妥当であると考えた。次に、各次元のプロセッサのサイズを決定する。これは全プロセッサを3次元の直方体の形に配置することに相当し、例えば 2048 ノードの場合、典型的な構成は  $8 \times 16 \times$

16 という形になる (直方体であるため、各次元のサイズが一致している必要はない)。実際の CP-PACS では、演算プロセッサ 2048 台 + 入出力プロセッサ 128 台という構成のため、全体では  $8 \times 17 \times 16$  の構成になっている。

CP-PACS における 3 次元 HXB では、高速なメッセージ転送を行うため、Wormhole 方式のメッセージ転送方式を行う。これは、中継点の各プロセッサが一旦メッセージを蓄えるのではなく、その位置のプロセッサを経由せず、ある XB から別の XB へのメッセージの直接転送を行うことにより、上記 3 ステップの転送を一気に行う方法である。このために、各プロセッサと XB を結合する部分に EX (Exchanger) と呼ばれるルータスイッチを置く。

Wormhole 方式の HXB には以下のような特徴がある。

- 通信距離が短い。これは短いメッセージを頻繁に転送する際に有利である。
- 同一サイズの正方格子結合 (Mesh/Torus) を直接無衝突でエミュレートできる。さらに、サイズあるいは次元数が異なる場合でも、総ノード数が等しいか小さければ、それをエミュレートできる。
- Binary-n-Cube ネットワークの部分的なエミュレートが容易である (同ネットワークで無衝突で行なえる転送パターンの多くが、同様に無衝突で実現できる)。
- 各 XB の出力を全開放にすることにより、ブロードキャスト転送が容易に行える (通常の 1 対 1 転送と同じ時間で可能)。
- ランダム転送 (送受信のノードの対が動的にランダムに決定するような通信) におけるスループットが、他のネットワークに比べ非常に高い。

CP-PACS では高速なメッセージ転送立ち上げを実現するために、ユーザアプリケーションから直接ネットワークへのメッセージ転送起動が行えるように、特別な機構を用意した。この機構を用いる転送を RDMA (Remote Direct Memory Access) 転送と呼ぶ。RDMA モードによるデータ転送では、予めシステム登録された送受信双方のユーザアプリケーションの特定メモリ領域間で、OS を介在させない完全なゼロコピー通信が実現され、最小限の遅延・処理時間で大量のデータ転送を実現可能で、特に大規模科学技術計算においてその実力が発揮される [5]。

図 10 に、プロセッサ間で完全なランダム転送を行なった場合の 3 次元 HXB 網の総スループットを示す。これからわかるように、HXB 網ではどのようなデータ長のメッセージも、無衝突時のリンク当たりピーク性能 (300 MB/sec) の約 30% 程度の実効性能で転送できている。(同サイズの 3 次元トラス網では、ピーク性能の約 10% 程度まで性能は落ちる)

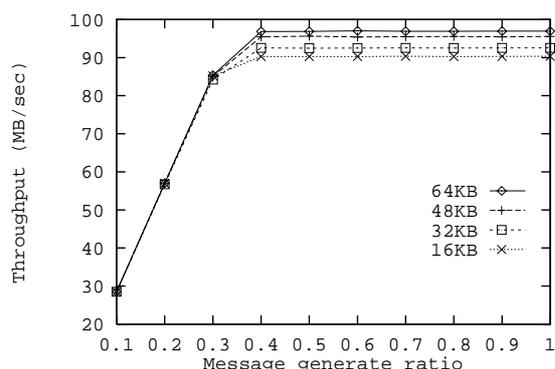


図 10: ランダムなデータ転送における HXB 網の性能

### 6.3.4 並列入出力装置

大規模科学技術計算の結果生じる大量の中間データ及び最終データを保持するために、CP-PACS には大規模分散ディスク装置が設置されている。これは大量のディスク装置の集合体であり、エラー対策のために RAID-5 による冗長管理が行なわれている。

また、ディスクへの大量のデータの高速アクセスを可能にするために、128 台の入出力プロセッサ (演算プロセッサ 16 台に対し 1 台の割合) を別途用意し、各入出力プロセッサに独立な RAID-5 ディスクシステムを接続した。これにより、最大 128 のデータストリームが一斉にディスクに書き込まれ、入出力の効率的な並列処理が実現されている。これらの入出力プロセッサは、演算プロセッサと 3 次元 HXB 網で結合されており、全てのプロセッサからのデータ入出力処理を高速に転送・処理することが可能である。

図 9 において、 $y$  次元方向の最も奥に位置しているプロセッサ群が、ディスク装置を伴った並列入出力プロセッサ群である。この他にも、並列入出力プロセッサは、HIPPI インタフェースを通じたフロントエンド計算機とのデータ転送においても、ディスク装置に対する並列アクセスにより演算開始・終了時の大量のデータ転送を高速化している。

### 6.3.5 擬似ベクトル処理向けコンパイラ

PVP-SW を効率的に利用するためのコンパイラの基本アルゴリズムは、ソフトウェアパイプラインングの手法を利用したものである [6]。基本アルゴリズムを例を用いて示す。図 11 に示すプログラム片は、2 命令同時発行可能なスーパースカラプロセッサでは図 12 のような目的コードへ変換される。ただし、命令を読みやすくするために、通常の機械語表現ではなく、代入文に模した表記を用いた。また、ここには定常的な繰り返し部分 (カーネル部) だけ示してある。最後の命令 CondBranch はループのインデックスを増加し終了判定をする命令である。なお、ここでは簡単のため、遅延分岐は考慮していないが、実際のコンパイラ

では勿論それも考慮している。

```
for(int i = LOW; i < HIGH; i++){
    tmp = c[i]*(tmp+d[i-1]);
    a[i] = tmp;
    b[i] = d[i];
}
```

図 11: 擬似ベクトル処理対象のソースコード

実行サイクル		同時に実行される命令
0: b[i-1]:= R(30)		R(29):= R(28)+R(30)
1: a[i-1]:= R(28)		
2: R(125):= c[i+47]		R(30):= R(31)*R(29)
3: R(124):= d[i+46]		
4: Slide += -2		
5: CondBranch		

図 12: 擬似ベクトル処理の目的コード

このプログラムは以下のような考えで生成されている。まず、もとのプログラムのループ 1 回分の実行命令を考えてみる。最初に、次の 2 つの preload 命令で、現在のウィンドウでは見えていない遠くのレジスタに  $c$  と  $d$  をロードする ( $R(0)$  から  $R(31)$  までが見えているレジスタである)。この後で、ウィンドウをスライドさせる命令「Slide += -2」を 1 回実行すると、上の命令の対象となっているレジスタの論理番号は  $R(125)$ 、 $R(124)$  から  $R(123)$ 、 $R(122)$  へと変化する。スライド命令を 47 回実行したときに、これらは  $R(31)$ 、 $R(30)$  となってウィンドウの中に入るので「 $tmp = c[i]*(tmp+d[i-1]);$ 」の演算を実行することが出来る (メモリのレーテンシが相当大きくてもそれまでにはロードが完了しているはずである)。その命令が「 $R(29):= R(28)+R(30)$ 」と「 $R(30):= R(31)*R(29)$ 」である。ここでは、加算のレーテンシは 2 としている。前者の命令の  $R(30)$  は  $d[i-1]$  の値であり、後者の命令の  $R(30)$  は  $tmp$  のレジスタである。この  $R(30)$  はスライド命令を 1 回実行すると  $R(28)$  となる (それが前者の命令で  $R(28)=tmp$  として使われている)。したがって「 $a[i]=tmp;$ 」は次のスライド命令を実行してから「 $a[i]:= R(28)$ 」とすればよい。

以上の命令の繰り返し実行を滞りなく実行するためには、 $c[i]$  などに関してこれらの計算をすると同時に、後の繰り返しのために  $c[i+47]$  の preload 命令等を発行し、前の繰り返し

で計算した tmp の値を a[i-1] に poststore する必要がある。それらを、命令の同時発行の可否、発行のタイミング等を考慮の上、詰め込んだものが前記のプログラムである。

### 6.3.6 システムソフトウェア

CP-PACS のオペレーティングシステム (OS) は、Mach 3.0 マイクロカーネルに基づく UNIX OSF/1 を採用している。2048 台のプロセッサとメモリ等の資源を効率良く運用し、アプリケーション実行中のプロセッサ間通信のコストを最小限に抑えるためには、各プロセッサの OS コアはマイクロカーネル化することが理想である。CP-PACS では各演算プロセッサではマイクロカーネルのみが稼働し、入出力プロセッサでは UNIX の入出力機能インタフェースレイヤが稼働するようになっている。全てのユーザ及びシステムメッセージは、3次元 HXB 上で RDMA 転送を用いた高速なマイクロカーネル間通信メッセージとして処理される。

全てのマイクロカーネル及び UNIX 入出力レイヤは、システム中の特別な入出力プロセッサ (SIOU: Supervisor Input/Output Unit) によって制御され、システム全体は単一システムイメージを持つ一つの UNIX システムとして運用される。ここではファイルシステム、ユーザプロセス等が全て単一システムとして管理されるため、ユーザはアプリケーションの並列プロセスがどのプロセッサ上で実行されるかを意識することなく、自由な並列プログラミングが可能である。

コンパイラとしては、先述のアルゴリズムを用いた擬似ベクトル処理機構用コンパイラ (Fortran90, C, C++) が用意されている。このコンパイラは自動並列化機能はサポートしておらず、基本的に各ノードプロセッサの演算の最適化を行なう。従って、並列プログラミングは分散メモリシステム上での SPMD (Single Program Multiple Data) 型プログラミングを基本とする。CP-PACS 上でのセルフコンパイラ他に、外部ワークステーション上で稼働するクロスコンパイラも用意されている。

この他のシステムソフトウェアとしては、CP-PACS システム全体の稼働状況をモニタするリアルタイム性能モニタ、バッチ型ジョブ制御を可能にする NQS システム、外部環境との直接入出力を行なう X-window システム等が用意されている。

### 6.3.7 物理応用計算における実効性能

CP-PACS の完成稼働開始後、物理応用計算プログラム、特に格子 QCD プログラムについては、精密な実効性能測定が行われ、その結果に基づいて、プログラムの最適化さらには通信ライブラリ及びコンパイラの改善が行われた。

表 21 に、格子 QCD 計算の基本プログラムの実効性能を示す [7]。red/black MR 法プログラムは、クォーク行列を係数とする連立一次方程式の解を求めるものである。この計算は格子 QCD 全般にわたり基本的であるので、コア部分は PVP-SW 機構を可能な限り活用し

たアセンブラにより書かれており、単体性能で 191Mflops (ピーク性能 300Mflops) を実現した。このプログラムは通信性能についても、210MByte/sec (ピーク性能 300MByte/sec) を実現し、通信を含めた実効性能で、ピーク性能比 53% を達成している。その他の Fortran のみで書かれたプログラムについても演算性能はピーク性能の 30–40% 以上、通信の割合は 10–20% となっており、QCD 計算に対する PVP-SW 機構の有効性と、CP-PACS の演算性能と通信性能のバランスの良さを示す結果となっている。

program	MFLOPS/PU			coding	size	# PU
	calc.	comm.	total			
R/B MR solver (Wilson action)	191(83%) 99(84%)	(17%) (16%)	159 84	assembler+F90 F90	$64^3 \times 112$ $48^3 \times 84$	2048 1024
CG solver(KS)	139(90%)	(10%)	125	F90	$32^3 \times 128$	256
Pure gauge update	134(95%)	(5%)	127	F90	$64^3 \times 112$	2048
HMC (full QCD)	113(90%)	(10%)	102	assembler+F90	$24^3 \times 48$	512

表 21: 格子 QCD プログラム実効性能 (括弧内は全計算時間に対する演算と通信の割合を % で示す)

## 参考文献

- [1] H. Nakamura, H. Imori, K. Nakazawa, T. Boku, I. Nakata, Y. Yamashita, H. Wada, and Y. Inagami, "A Scalar Architecture for Pseudo Vector Processing based on Slide-Windowed Registers", Proceedings of ACM International Conference on Supercomputing '93, pp.298-307, Tokyo, Jun. 1993.
- [2] T. Boku, K. Itakura, H. Nakamura, K. Nakazawa, "CP-PACS: A massively parallel processor for large scale scientific calculations", Proceedings of ACM International Conference on Supercomputing'97, pp.108-115, Vienna, Jul. 1997.
- [3] H. Nakamura, T. Wakabayashi, K. Nakazawa, T. Boku, H. Wada, and Y. Inagami, "Pseudo Vector Processor for High-speed List Vector Computation with Hiding Memory Access Latency", Proceedings of IEEE TENCON'94, pp.338-342, Singapore, Sep. 1994.
- [4] K. Saito, M. Hashimoto, H. Sawamoto, R. Yamagata, T. Kumagai, E. Kamada, K. Mastubara, T. Isobe, T. Hotta, T. Nakano, K. Nakazawa, "A 150 MHz Superscalar

RISC Processor with Pseudo Vector Processing Feature” Proceedings of Hot Chips VII('95), pp.197-205, 1995.

- [5] K. Itakura, T. Boku, H. Nakamura, K. Nakazawa, ”Performance evaluation of CP-PACS on CG benchmark”, Proceedings of HPC Asia'97, pp.678-683, Seoul, Apr. 1997.
- [6] 山下 義行, 中田 育男, ”ループ中に条件分岐を含む場合の最適なソフトウェア・パイプラインング”, 並列処理シンポジウム JSPP'94 論文集, pp.17-24, 1994.
- [7] S. Aoki, R. Burkhalter, K. Kanaya, T. Yoshié, T. Boku, H. Nakamura, Y. Yamashita, ”Performance of lattice QCD programs on CP-PACS” (to be published in Parallel Computing) hep-lat/9905036.

## 6.4 CP-PACS による計算素粒子物理学

自然界には、原子核を構成する陽子と中性子やそれらを結びつける中間子を始めとして、ハドロンと総称される多種類の粒子が存在し、それらの間には「強い相互作用」とよばれる力が働いている。ハドロンはさらに基本的な素粒子であるクォークから構成されており、その成り立ちとハドロンの強い相互作用は、量子色力学 (QCD) と呼ばれる場の量子論により記述されると考えられている。QCD は、低エネルギー領域で結合が強くなることを特徴とする理論である。このため、ハドロンの質量スペクトルをはじめ、強い相互作用の低エネルギー領域の諸性質を QCD に基づいて理解するには、現在のところ、時空を格子化した QCD (格子 QCD) の数値シミュレーションが唯一の系統的な方法である。

CP-PACS における素粒子物理学の研究は、以上の背景を基に、ハドロンとその強い相互作用の重要な諸現象を、格子 QCD の大規模シミュレーションを手段として理解することを目標に進められている。主なテーマは以下のとおりである。

- ハドロンの物理

ハドロンの物理は多岐にわたるが、格子 QCD の立場からの第一の目標はハドロンの質量スペクトルの理解である。質量は、クォーク複合系としてのハドロンを特徴付ける最も基本的な量であり、これを QCD の第一原理から導くことは QCD の基本的な検証を与える。また、 $\eta'$  中間子の質量と U(1) 問題など、ハドロンの物理には長年の懸案があり、これらを QCD に基づいて解決することも目標の一つである。

- 電弱相互作用遷移行列要素

QCD は、電弱相互作用を記述する Weinberg-Salam 理論と共に、素粒子の標準模型を形作っているが、電弱相互作用には、CP 非保存を中心とする未解決の問題が残されている。ハドロンの電弱相互作用遷移行列要素への強い相互作用補正を QCD に基づいて求めることは、この問題の解決に極めて重要である。特に b クォークを含む中間子の行列要素の研究は、B Factory での実験と直接関係して重要である。

- 有限温度 QCD

高温・高密度の下で、QCD はハドロンの状態からクォーク・グルオン・プラズマへの相転移を预言する。クォーク・グルオン・プラズマは宇宙初期には存在した筈であり、また高エネルギー重イオン衝突実験により、この状態を人工的に創り出す試みも進められている。クォーク・グルオン・プラズマの物理特性とそれへの相転移の特徴を理解することも重要な目標である。

### 6.4.1 クエンチ近似におけるハドロン質量スペクトル

ハドロンの質量スペクトルを QCD から直接計算することは、QCD が正しい理論である事を示す、最も重要な証拠となる。このため、1981 年に初めて格子 QCD によるスペクトル

年	1981	1985	1988	1993(*)	1998(**)
最大格子サイズ	$8^3 \times 16$	$12^3 \times 24$	$24^3 \times 48$	$36^3 \times 42$	$64^3 \times 112$
空間サイズ (fm)	0.8	1.2	1.7	2.5	3.0
最小格子間隔 $a$ (fm)	0.1	0.1	0.1	0.07	0.05
最小クォーク質量 $m_q$ (MeV)	100	100	40	40	20
統計数	20	20	50	200	800
計算量	1	10	$8 \cdot 10$	$7 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^5$

(\*) GF11 のシミュレーションパラメータ

(\*\*) CP-PACS のシミュレーションパラメータ

表 22: 格子 QCD のクエンチ近似シミュレーションの推移

ル計算が試みられて以来、数多くの研究が行われてきた。

後述するように、質量スペクトルを QCD の完全なシミュレーションによって求めるには膨大な計算時間が必要となる。このため、第一のステップとして、真空中のクォークの対生成・対消滅の効果を見捨てるクエンチ近似を採用し、この近似の範囲内で精度の高い結果を求めることに、多くの努力が払われてきた。しかし、格子 QCD から信頼性の高い結果を導くことは、クエンチ近似を採用しても、簡単なことではない。格子 QCD 計算特有の系統誤差、即ち、格子サイズや格子間隔が有限である事による誤差を、無限大の格子サイズや、連続極限（格子間隔ゼロの極限）への外挿によって、取り除く必要がある。また、技術的理由によって、現実世界の軽い  $u, d$  クォーク質量でのシミュレーションが困難であるので、比較的重いクォーク質量で得られた計算結果を、軽いクォーク質量へ外挿することが必要であり、これも系統誤差の原因となる。

表 22 に、1981 年以降の典型的なクエンチ近似シミュレーションのパラメータを示す。従来の研究では、主として計算機能力の不足のために、十分大きな格子サイズ、十分小さな格子間隔、十分軽いクォーク質量でのシミュレーションが困難であった。特に 1988 年以前の計算では、計算に用いられた格子サイズが、典型的なハドロンのサイズ 2 fm 程度と比較してかなり小さく、これによる大きな系統誤差が含まれている。

CP-PACS に先行する計算の中で最も優れたものは、D. Weingarten らにより、自己開発の専用並列計算機 GF11（ピーク性能 11GFlops）を用いて 1992–1993 年にかけて行われた。彼らは、クォーク質量の外挿と格子間隔に関する外挿を組織的に行ない、これに有限サイズ補正を行って、連続極限での質量スペクトルを求めた。その結果、10% 程度と評価される計算誤差の範囲内で、クエンチ QCD でのハドロン質量は、実験値と無矛盾であると結論された。

我々は、クエンチ QCD での質量スペクトルの最終結果を得る事を、CP-PACS での計算の目標とした。即ち、誤差の大きさを数 % 以下に抑えた高精度のスペクトル計算により、

上記の結果を確認し、同時に、実験的なスペクトルとの比較によりクォークの対生成・対消滅効果の大きさ（クエンチ近似による誤差の大きさ）を明らかにすることである。

シミュレーションパラメータはこの目標を念頭において選ばれ、格子サイズ、格子間隔、クォーク質量の範囲、統計量の、何れについても、GF11のそれらを凌駕するものになっている（表 22 参照）。即ち、格子サイズは 1.3 倍、最小の格子間隔は 0.7 倍、最小のクォーク質量は 0.6 倍である。計算には、CP-PACS を約 1 年間用いた。これは、GF11 の計算の約 100 倍の計算量に相当する。

以上の大規模シミュレーションと、それにより生成されたデータの注意深く且つ詳細な解析により、中間子に対しては 1-2% の、重粒子に対しては 2-3% の誤差でクエンチ近似のハドロン質量を得ることに成功した [1]。図 13 に、 $\pi$ 、 $\rho$ 、 $K$  中間子質量を実験値に固定したときの、他のハドロン質量の予言値を示す。参考のため、GF11 グループによって得られた結果も再掲した。我々の計算では、誤差が格段に小さくなっていることがわかる。

本計算で得られた結果は膨大であるが、重要な結果は、以下の様に要約できる。

- クエンチ近似のハドロン質量には、実験値との間に最大で  $7\sigma$  にのぼる明白な差が見られるが、その大きさは最大で 10% 程度であり、クエンチ近似に対する系統誤差として理論的に予想された範囲内である。
- クエンチ近似による実験値との差異には、以下の特徴がある。
  - 中間子の超微細質量差 ( $K - K^*$  の質量差) は、実験値より 10% 程度小さい。
  - 8 重項の重粒子 ( $N, \Lambda, \Sigma, \Xi$ ) の質量は、実験値より組織的に小さい。
  - 10 重項間の質量差は、実験値より小さい。
- パイ中間子質量のクォーク質量依存性は、クエンチ近似の効果に関するカイラル摂動理論の予言と一致する。

我々の計算により、クエンチ近似による系統誤差の大きさが確立し、それを大きく上回る精度でハドロン質量が得られた。従って、quenched QCD の質量スペクトルの最終結果が得られたと考えることができる。

#### 6.4.2 完全な QCD のハドロン質量スペクトル計算

格子 QCD で計算されるハドロン質量に、クエンチ近似そのものに由来する実験値からのずれが存在する事が明らかになったので、次のステップは近似無しの QCD 計算（しばしば full QCD と呼ばれる）を行なうことである。この目標に向って、我々は、軽い  $u, d$  クォークの対生成・対消滅効果を取り入れた QCD のシミュレーションを行っている。比較的重い  $s$  クォークはクエンチ近似で取り扱う。

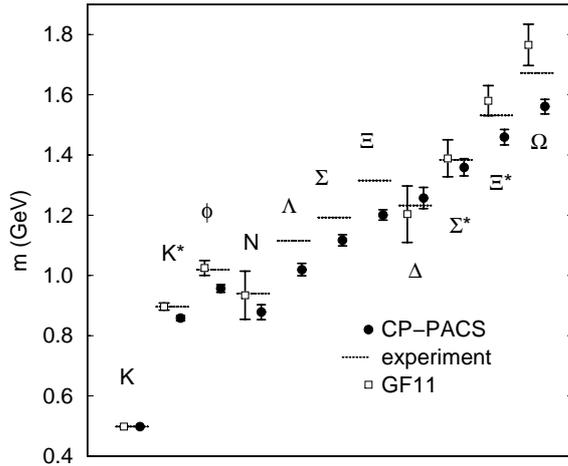


図 13: クエンチ QCD 計算による、ハドロン質量の結果。GF11 グループの結果、及び、実験値、と比較した。

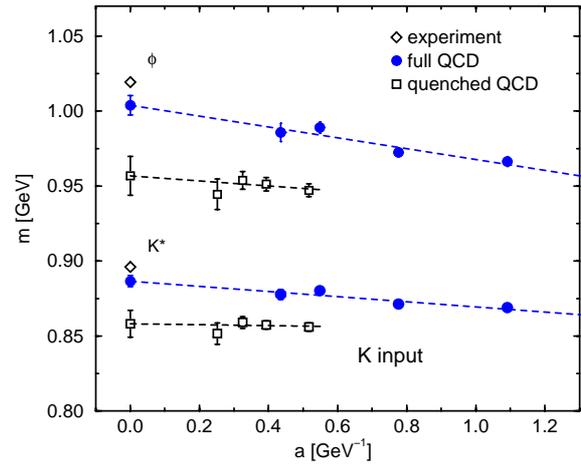


図 14: 中間子質量の格子間隔 ( $a$ ) 依存性と、連続極限への外挿。フル QCD 計算とクエンチ QCD 計算の結果を相互に、また、実験値と、比較した。

full QCD のシミュレーションは、フェルミオンであるクォークの効果を取り入れる必要のため、quenched QCD より少なくとも 100 倍以上計算時間を必要とする。従って、上述のクエンチ近似計算を単純に full QCD 計算に置き換えて繰り返すことは、事実上不可能である。この問題を解決するため、我々は「改良された作用」を用いている。改良された作用とは、格子間隔がゼロでないことに由来する誤差が小さくなるように修正された格子作用で、計算量は増大するが、連続極限への外挿に伴う系統誤差を押さえる上で有効であると期待されている。種々の改良された作用を用いた予備的計算によれば、繰り込み群によって改良されたグルオン作用と摂動的に改良されたクローバークォーク作用を用いれば、格子による離散化の誤差を、「標準作用」と比較して、格段に小さくできる事が判明し [2]、本格的な計算では、これらの作用の組を用いている。

full QCD の質量スペクトルの系統的計算は、現在進行中である [3]。既に、クォークの対生成・対消滅の効果が、幾つか明らかになった。図 14 は、full QCD における中間子質量の格子間隔依存性を、クエンチ近似計算の結果と比較したものである。連続極限（格子間隔  $a$  がゼロの点）で、クエンチ近似で見られた  $K^*$ 、 $\phi$  中間子質量の実験値との大きなズレが、大幅に縮小している事がわかる。

U(1) 問題つまり、 $\eta'$  中間子の質量が  $\pi$  中間子質量に比べて著しく大きい事実を説明することは、素粒子物理学の長い間の課題の一つである。 $\eta'$  の質量はクエンチ近似では求めることができず、full QCD 計算が本質的に必要である。 $s\bar{s}$  擬スカラー中間子との混合を無視した近似ではあるが、 $\eta = u\bar{u} + d\bar{d}$  擬スカラー中間子（本計算の近似で  $\eta'$  中間子に相当する）の質量計算を行って、 $\eta'$  中間子の実験値に近い値が得られている [4]。図 15 に、 $\eta$  質量の格子間隔依存性と、連続極限への外挿を示した。

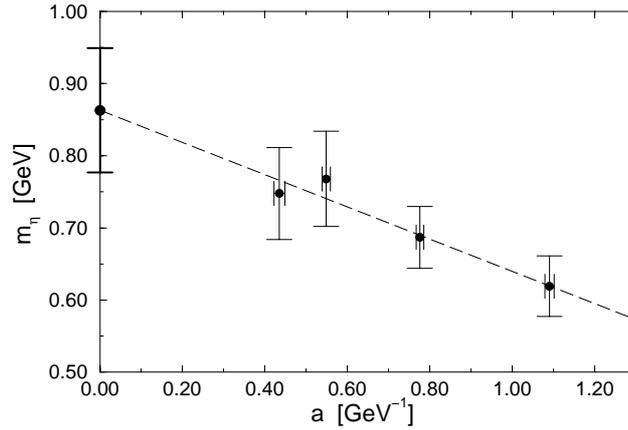


図 15:  $\eta$  質量の格子間隔 ( $a$ ) 依存性と、連続極限への外挿。

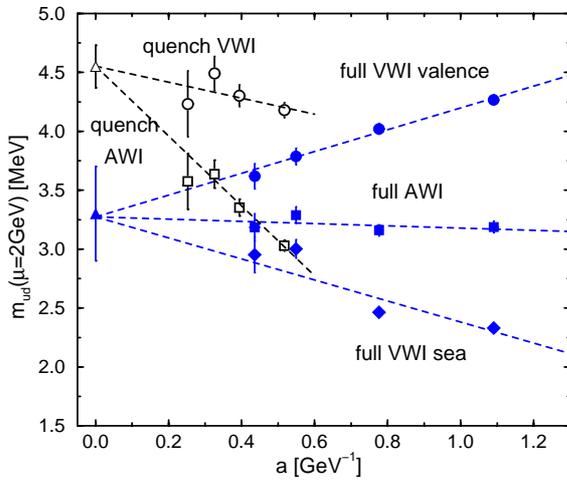


図 16:  $u, d$  クォーク質量の格子間隔 ( $a$ ) 依存性と、連続極限への外挿。

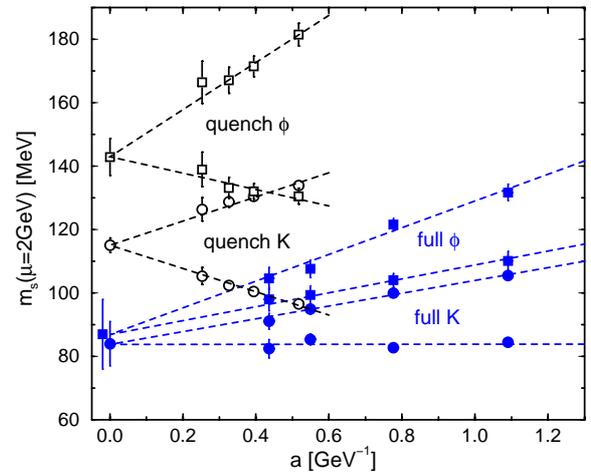


図 17:  $s$  クォーク質量の格子間隔 ( $a$ ) 依存性と、連続極限への外挿。

### 6.4.3 クォーク質量

クォーク質量は QCD の基本パラメータであり、特に  $s$  クォークの質量を精密に決定することは、弱い相互作用の現象論を構成する上で重要である。クォークはハドロン中に閉じ込められているので、実験でその質量を決めることは出来ず、QCD の種々の現象論的モデルを用いてその値が推測されている。一方、格子 QCD によれば、クォーク質量を第一原理である QCD から直接計算することができる。しかし、これまでの格子上の計算では、十分な精度が得られていなかった。

我々は、クエンチ近似及び full QCD で、クォーク質量の精密計算を行った [1, 3]。図 16 に  $u, d$  クォーク質量の、図 17 に  $s$  クォーク質量の、格子間隔依存性を示す。また、表 23 に、現時点での我々のクォーク質量の結果を示す。本計算によって新たに得られた知見は、以下の通りである。

	$m_{u,d}$ (MeV)	$m_s$ (MeV) ( $m_K$ より)	$m_s$ (MeV) ( $m_\phi$ より)
quenched QCD	4.57(18)	115.6(2.3)	143.7(5.8)
full QCD	3.3(4)	84(7)	87(11)

表 23: クォーク質量の結果

1. 格子計算では、クォーク質量の計算に何種類かの方法がある。異なった方法（図 16 では、quenched VWI, quenched AWI, full VWI valence, full VWI sea, full VWI と示した）は、有限格子間隔では異なった値を与えるが、連続極限では値が一致する。これは、我々の解析の信頼性が高いことを意味する。
2.  $s$  クォーク質量は、 $K$  中間子、又は、 $\phi$  中間子質量の実験値を用いて計算される。クエンチ近似計算では、図 17 に示した様に、連続極限においても  $s$  クォーク質量の値が、何れの中間子質量を用いるかによって異なる。これは、クエンチ近似による系統誤差である。
3. 一方、full QCD 計算では、その差異が著しく小さくなり、図 17 に示した様に、 $K$  中間子、又は、 $\phi$  中間子質量のどちらを用いた場合でも、85 MeV 程度の値を与える。また、その値自身も、クエンチ近似の場合に比べ、大幅に小さい。

full QCD 計算で得られた  $s$  クォーク質量は、クエンチ近似の場合の値や現象論的モデルによる評価値より著しく小さい。小さい  $s$  クォーク質量は、弱い相互作用における CP 非保存のパラメータ  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$  に対して、既存の予想値より大きな値を与える。実際、最近の実験によって、 $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$  のかなり大きな値が得られており、我々の  $s$  クォーク質量は、それらの実験結果と矛盾しない。

#### 6.4.4 重いハドロンの物理の研究

重い  $b$  クォークを含む  $B$  中間子、 $B_s$  中間子の崩壊定数などは、実験から弱い相互作用の基本パラメータである小林・益川混合行列要素を決定する際必要となる、重要な物理量である。今日までクエンチ近似での計算は数多く行われてきたが、full QCD での組織的計算は計算力の不足のためにほとんど行うことができなかった。我々は、前節で述べた full QCD 計算で生成したグルオン配位の上で崩壊定数を計算し、軽い  $u, d$  クォークの対生成・対消滅の、崩壊定数への効果を調べている [5]。予備的な結果ではあるが、崩壊定数はこの効果によって、クエンチ近似の値より 10% 程度大きくなることが示された。あわせて、重い  $b$  クォークを含む中間子や重粒子の full QCD 質量スペクトルの計算も進行中である。

QCD によれば、クォーク 2 体の束縛状態である中間子や 3 体の束縛状態である重粒子以外に、主にグルオンのみから構成されるグルーボールや、クォーク 2 体とグルオンの束縛状

態であるハイブリッドメソンが存在する可能性がある。我々は、クォーク 2 体の束縛状態では実現しない量子数を持った、重いハイブリッドメソンの質量計算をクエンチ近似で行って、高精度の結果を得た [6]。クエンチ近似による系統誤差を含んではいるものの、実験でハイブリッドメソンを見つける為の、有効な手がかりである。

#### 6.4.5 有限温度 QCD

宇宙初期あるいは重イオン衝突実験で生成が期待されるクォーク・グルオン・プラズマ状態について、その最も基本的な物理特性は、相転移の次数と温度及び状態方程式（エネルギー密度や圧力の温度依存性）である。これらを格子 QCD から求めることは、宇宙初期の元素合成や、重イオン衝突実験などの研究に、重要な情報を与える。

改良された作用を用いた純グルオン理論及び full QCD のシミュレーションによるこれらの問題の研究も、進行中である [7]。

#### 参考文献

- [1] CP-PACS Collaboration, “Quenched Light Hadron Spectrum” (hep-lat/9904012), Phys. Rev. Lett. に投稿済み。
- [2] CP-PACS Collaboration, “Comparative Study of full QCD Hadron Spectrum and Static Quark Potential with Improved Actions” (hep-lat/9902018), Phys. Rev. D 印刷中。
- [3] R. Burkhalter for the CP-PACS Collaboration, “Recent Results from the CP-PACS Collaboration”, Nucl. Phys. B (Proc.Suppl.) 73 (1999) 3; CP-PACS Collaboration, “Light hadron spectrum and quark masses in QCD with two light dynamical quarks” (hep-lat/9909050).
- [4] CP-PACS Collaboration, “Eta meson mass and topology in QCD with two light flavors” (hep-lat/9909045).
- [5] CP-PACS Collaboration, “Heavy-light spectrum and decay constant from NRQCD with two flavors of dynamical quarks”; “Heavy-light decay constants from clover heavy quark action in QCD with two flavors of dynamical quarks” (hep-lat/9909052).
- [6] CP-PACS Collaboration, “Hybrid Quarkonia on Asymmetric Lattices”, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 4396.

- [7] CP-PACS Collaboration, “Equation of state for pure SU(3) gauge theory with renormalization group improved action” (hep-lat/9905005), Phys. Rev. D 印刷中 ; “Equation of state in finite-temperature full QCD with improved action” (hep-lat/9909075).

## 6.5 CP-PACS による計算宇宙物理学

宇宙における様々な天体現象は、重力相互作用、流体力学、電磁輻射などの物理過程が複雑にからみ合った非線形現象である。これらは解析的に扱うことは難しく、超高速計算機による数値シミュレーションが極めて重要になる。宇宙物理グループでは、重力、流体ばかりでなく、輻射場を同時に解く多次元輻射流体力学を推進している。輻射場の伝播を記述する方程式は輻射輸送計算とよばれ、光子のボルツマン方程式をローレンツ変換したものである。この方程式は、電磁波の方向やエネルギーの自由度を持ち、3次元実空間内で6次元自由度を持つ。意味のある計算を行うためには、総計100GB以上の主記憶が必要であり、演算量はペタ( $10^{15}$ )を越える。この高次元性が、多次元輻射輸送計算の実現を阻んできたが、CP-PACSは、大規模な多次元輻射輸送計算を可能なものにした。以下に、宇宙の再電離ならびに原始星のフラットスペクトルについて、CP-PACSで行った多次元輻射輸送計算の結果を示す。

### 6.5.1 宇宙再電離の6次元輻射輸送計算

ビッグバンからおよそ10万年、宇宙はそれまでの電離状態から中性の状態へと転移した。これを宇宙の「晴れ上がり」という。しかし、キューサーのスペクトルを調べると、宇宙空間の中性ガスで起こるはずの光の吸収が見られない。この観測が意味するところは、宇宙は「晴れ上がり」（宇宙年齢10万年）から10億年の間に、もう一度どこかで電離したということである。

非一様な宇宙が電離されていく様子を調べるために、CP-PACSによって3次元空間の紫外線の伝播に関する6次元輻射輸送計算を行った[1, 2, 3]。計算の結果を口絵10ページの図に示す。これは、 $128^3$ の実空間格子点について、輻射輸送を解いたものである。ここでは、中性原子の割合を色で示している。赤から黄色の領域が、ほぼ中性の領域である。宇宙年齢2.3億年( $Z=15$ )の頃には、自己遮蔽効果によって中性の高密度領域が、網の目状に広がっているのがわかる。その他の領域では、水色から青色にかけて電離度が高くなっている。宇宙年齢4.7億年( $Z=9$ )の頃になると、中性領域も次第に紫外線で侵食されていき、宇宙年齢10億年( $Z=5$ )では、ほぼ全体が再電離された宇宙になる。しかし、ここで注目したいのは、この時点で宇宙の電離状態はどこでも同じではなく、電離度が3桁以上違う領域が混在しているということである。中性原子の割合は高い所で千分の一、低い所では百万分の一以下になっている。宇宙が、このような電離構造をもっていると、キューサーのスペクトルには、電離度が相対的に低い(中性原子が多い)領域に対応していくつもの吸収線が見えることになる。これと観測されているスペクトルを直接比較することにより、宇宙の再電離の歴史を知ることができる。様々なモデルパラメーターについて数値計算した結果、宇宙再電離の時期は、 $6 < Z < 10$ である可能性が高いことがわかった。

### 6.5.2 T タウリ型星フラットスペクトルの 5 次元輻射輸送計算

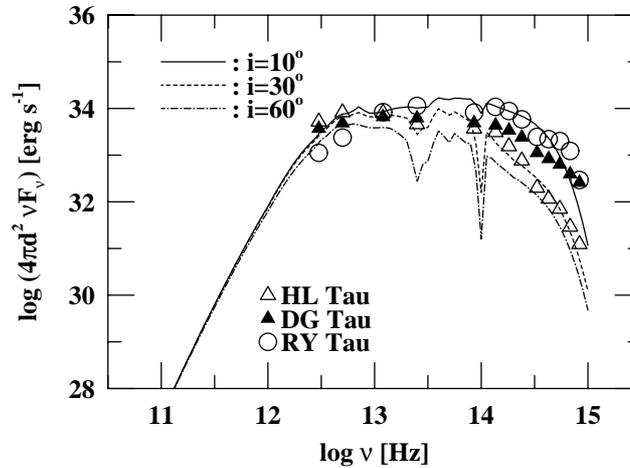


図 18: 計算の結果得られたモデル輻射スペクトル。見込み角 ( $i$ ) を変えて求めた。三角や丸は、実際のフラットスペクトル T タウリ型星の観測結果。

昨今、ハッブル宇宙望遠鏡などの大型観測装置により、星形成の現場が捉えられてきている。これらが提供してくれる分解能の高いデータを用いて、星形成の現場の物理状況を解明するためには、輻射輸送計算によりスペクトルを生成し、観測と直接比較することが極めて重要である。この目的で、我々は、星形成現場の現象論的なモデル化を行っている。中心星とその周囲の密度分布や放射源分布を仮定し、輻射輸送方程式を解く。新たな高精度計算法を開発した結果、2次元軸対称系で5次元輻射輸送と物質温度を無矛盾に計算することに成功した [4]。

T タウリ型星と呼ばれる誕生しつつある若い星の中に、‘フラットスペクトル T タウリ型星’と呼ばれる特異なスペクトルを示す星々がある。この‘フラットスペクトル’の成因は従来より謎であった。我々はこの天体に対し、‘中心星 + 星周ディスク + ハロー’という構成のモデルを考えた。ハローは前二者を包み込む密度の薄いガス雲であるが、このハローの存在が私達のモデルの特徴である。そして各々の性質をいろいろに変えながら輻射スペクトルを計算した結果、ある状態で‘フラットスペクトル’がうまく再現されることを見出した (図 18)。そのときのハローは、長波長の輻射 (電波や遠赤外線) には透明であるが、短波長輻射 (可視光) には不透明であるような密度になっている。この密度は、輻射スペクトル以外の観測結果とも調和的である。こうした計算の結果、直接撮像出来ないハローや星周ディスクの様子 (図 19) が明らかとなり、一連の星形成過程における‘フラットスペクトル T タウリ型星’の意味も明らかになった。すなわちそれは、‘原始星’から‘T タウリ型星’への遷移期に位置する天体である。この成果は、星形成の進行に関する物理的理解において極めて貴重な情報を与えるものである。

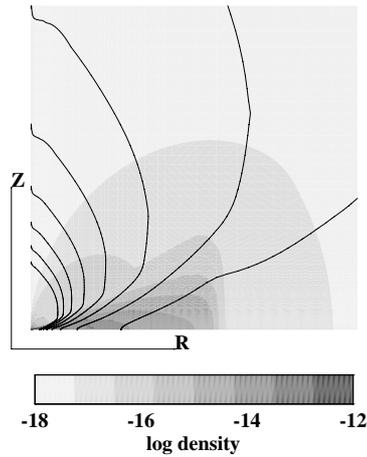


図 19: 計算の結果得られた温度の空間分布 (等高線)。外側 (右側) より , 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100K. グレースケールは , 与えた密度分布 ( $\text{g cm}^{-3}$  単位).

## 参考文献

- [1] T. Nakamoto, H. Susa, and M. Umemura, “Photoionization of a Clumpy Universe”, International Symposium on Supercomputing, *New Horizon of Computational Science*, in press (1997)
- [2] M. Umemura, T. Nakamoto, and H. Susa, “3D Radiative Transfer Calculations on the Cosmic Reionization”, *Numerical Astrophysics 1998*, eds. S. M. Miyama, K. Tomisaka, & T. Hanawa (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), 43-44 (1998)
- [3] T. Nakamoto, M. Umemura, and H. Susa, “The Effects of Radiative Transfer on the Reionization of an Inhomogeneous Universe”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, submitted (1999)
- [4] N. Kikuchi, T. Nakamoto, and K. Ogochi, “Disk-Halo Model for Flat Spectrum T Tauri Stars”, *Publ. Astron. Soc. Japan Letters*, submitted (1999)

## 6.6 CP-PACS による計算物性物理学

CP-PACS による物性物理学の研究は、主として共同利用「大規模数値シミュレーションプロジェクト」によって実施された。物性物理学の研究分野は、物質の磁性に関係したスピン系、高温超伝導に関係した低次元強相関電子系をはじめ、様々な物質の性質を量子力学の第一原理に忠実な計算により理解しようとする分野まで、幅広く且つ多様である。第7章の表25に見られるように、これを反映して、共同利用プロジェクトで採択された物性物理学の課題は、多岐のテーマにわたっている。

### 6.6.1 第一原理計算による物性予測

原子集団の基底状態を量子力学の第一原理に立脚した大規模計算により決定する方法により、物質の構造の理解や新たな現象の予言に大きな進歩が生まれている。

常行ら [1] は、この方法により、60 年以上にもわたって研究されながら未だに謎の多い超高压化での固体水素の構造決定を行なった。この問題では、電子状態のみならず原子核をも量子力学的に取り扱う必要がある。これに対する方法として、第一原理経路積分分子動力学法が用いられ、バンドおよび経路積分についての二重並列化により CP-PACS を用いた効率の良い大規模計算が可能となった。実験的に示唆されている、圧力 150 GPa 以下で比較的高温の I 相、150 GPa 以下で低温の II 相、150 GPa 以上の III 相それぞれについてシミュレーションが行われその特徴が明らかにされた。

### 6.6.2 高温超伝導

高温超伝導は、その 1986 年の発見以来既に 10 年以上を経ているが、いまだに完全な理論的解決を見ていない問題である。この問題については、電気的性質と磁氣的性質の双方に理解を要する多くの現象があり、このことから、 $t$ - $J$  模型などの基本的な電子系模型からスピン自由度のみに着目した模型まで、様々なモデルを対象にした研究が行われている。

横山ら [2] は、高温超伝導体の擬スピンギャップに関連して、一次元スピンギャップ系の物理量を厳密対角化法及び密度行列繰り込み群を用いて調べ、磁性不純物効果の機構を分析した。

山地ら [3] は、ハバード模型に対して超伝導凝縮エネルギーを変分モンテカルロ計算により求めることを試みた。

### 6.6.3 スピン系

スピン系の統計力学は古くて新しい問題である。高山ら [4] は、ランダムネスと量子効果が絡む問題として 2 次元希釈反強磁性量子ハイゼンベルグ模型のシミュレーションを行った。その結果、絶対零度においては、ネール秩序が消失する濃度は古典スピン系のそれと一

致するが、臨界指数はスピン  $S$  に依存することを見出した。スピンの大きさに依存する相転移特性が検証されたのは初めてであり、量子相転移の多様性の一例と考えられる。

## 参考文献

- [1] 常行真司（東京大学物性研究所）他、「第一原理経路積分分子動力学法による高圧下における固体水素の研究」
- [2] 横山寿敏（東北大学大学院理学研究科）他、「厳密対角化法及び密度行列繰り込み群によるスピンギャップ系の研究」
- [3] 山地邦彦（電子技術総合研究所）他、「電子機構超伝導モデルの計算物理的研究」
- [4] 高山一（東京大学物性研究所）他、「二次元ランダムハイゼンベルグ反強磁性体における量子スピンゆらぎ」

## 6.7 未来開拓研究「次世代超並列計算機の開発」

CP-PACS に続く、計算物理学に適した次世代超並列計算機の研究開発は、センターの重要なテーマである。そのための基礎研究が、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業「計算科学」分野のプロジェクトの一つである「次世代超並列計算機の開発」により、平成9年度より進められている。このプロジェクトは、本センターで実施する「連続体系向け超並列計算機の開発」と、東京大学で実施する「多粒子系向け超並列計算機の開発」の二つのサブプロジェクトからなる。センターでは、連続体系向け次世代高性能計算機においては、以下の二つが極めて重要な要素技術となるものと考え、これらの研究を推進している。

- 並列計算機によって生成される膨大な計算データを高速かつ柔軟に処理する並列入出力・並列可視化機構・マンマシンインターフェースの規範の確立
- ピーク演算性能数百 Tflops が必要と予想される次世代超並列計算機のためのプロセッサ・メモリ融合型高性能 LSI アーキテクチャの開発

表 24 に、平成 11 年度のプロジェクト研究組織を示す。本プロジェクト推進にあたっては、要素技術毎にサブワーキンググループを設置し、詳細な技術検討を行っている。さらに、月一回の全体ワーキンググループにおいて、各サブワーキンググループでの研究進捗状況の連絡、方針の討議を行っている。以下に、それぞれの目標に関して、概要と現在までの進捗状況、および今後の研究計画を述べる。平成 9 年度及び 10 年度の研究成果については、それぞれ「計算科学」分野の報告書に詳しく述べられている [1, 2]。

### 6.7.1 並列入出力・並列可視化機構

**研究目的** 超並列計算機における科学技術計算の過程で生じる大量のデータに対する入出力処理の高速化と、計算の中間及び最終結果に対し、その正当性・妥当性の直感的理解を助けるデータの可視化は、超並列計算機の有効性を左右する重要な技術的要件である。これらを実現するために、本研究では、高性能かつ柔軟で、しかも安価な超並列計算機向け入出力システム、および可視化システムを構築することを目的としている。特に、超並列計算機が備えている多数の入出力プロセッサを並列運用し、かつユーザからはそれらの並列性を特に意識せずに、外部環境との柔軟なやりとりを容易に実現できるアプリケーション・インタフェースの開発を目標とする。また、ハードウェア開発にコストと時間をかけず、近年の commodity 化したネットワーク媒体や接続技術を積極的に利用することにより、性能価格比に優れたシステム構築手法を発見することも重要な目標である。

並列入出力・並列可視化システムの構成概念図を図 6.7.1 に示す。超並列計算機と並列ディスクサーバ及び並列ビジュアライゼーションサーバの間を、100base-TX スイッチング HUB を経由して複数本の 100base-TX イーサネットにより並列結合した構成を予定している。

リーダー	岩崎洋一	筑波大学副学長 (研究担当)	
コアメンバ	宇川彰	筑波大学物理学系教授	(AIOV)
	金谷和至	筑波大学物理学系助教授	(AIOV)
	青木慎也	筑波大学物理学系助教授	(AMOC)
	吉江友照	筑波大学物理学系助教授	(AMOC)
	梅村雅之	筑波大学物理学系助教授	(AIOV)
	中本泰史	筑波大学物理学系助手	(AIOV)
	大川正典	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所助教授	(AIOV)
コアメンバ	坂井修一	東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻助教授	(MOC)
	朴泰祐	筑波大学電子・情報工学系助教授	(IOV)
	山下義行	筑波大学電子・情報工学系助教授	(IOV)
	和田耕一	筑波大学電子・情報工学系教授	(MOC)
	安永守利	筑波大学電子・情報工学系助教授	(IOV)
	千葉滋	筑波大学電子・情報工学系講師	(IOV)
	星野力	筑波大学機能工学系教授	(IOV)
	白川友紀	筑波大学機能工学系教授	(IOV)
	中村宏	東京大学先端科学技術研究センター助教授	(MOC)
	渡瀬芳行	高エネルギー加速器研究機構計算科学センター教授	(IOV)
	中澤喜三郎	明星大学情報学部教授	(MOC)
	中田育男	図書館情報大学図書館情報学部教授	(IOV)

( ) は主な役割分担 ; AIOV: 物理応用計算における並列入出力・並列可視化  
 AMOC: 物理応用計算におけるプロセッサ・メモリ混載型 LSI  
 IOV: 並列入出力・並列可視化  
 MOC: プロセッサ・メモリ混載型 LSI

表 24: 平成 11 年度未来開拓研究組織図

**プロトタイプシステムの構築** これまでに、並列計算機としては CP-PACS の小型機である Pilot-3 を使い、並列ディスクサーバとして 8 プロセッサの Origin-2000、並列ビジュアライゼーションサーバとして 2 プロセッサ + 1 ラスタマネージャの Onyx2 を、それぞれ 4 本ずつの 100base-TX イーサネットにより並列結合したプロトタイプシステムを開発し、この上で、並列入出力・可視化ソフトウェア開発及び基礎性能評価を行った。

**並列入出力システム** 並列入出力プログラミングを行うための API (Application Program Interface) である “PIO システム” の設計・実装を行った [3]。本 API は、入出力双方の計算機における並列性を前提として、ユーザの介在を最小限に抑えつつ、ユーザプログラムからの入出力要求を並列チャンネルのいずれかに自動的に割り振る機能を持つ。また、各種プラットフォームへの移植が簡便で、かつそのプラットフォーム上で最適な通信を行えるよう設計されている。

プロトタイプシステムを用いた PIO の性能評価結果を図 6.7.1 に示す。裸の TCP/IP 通

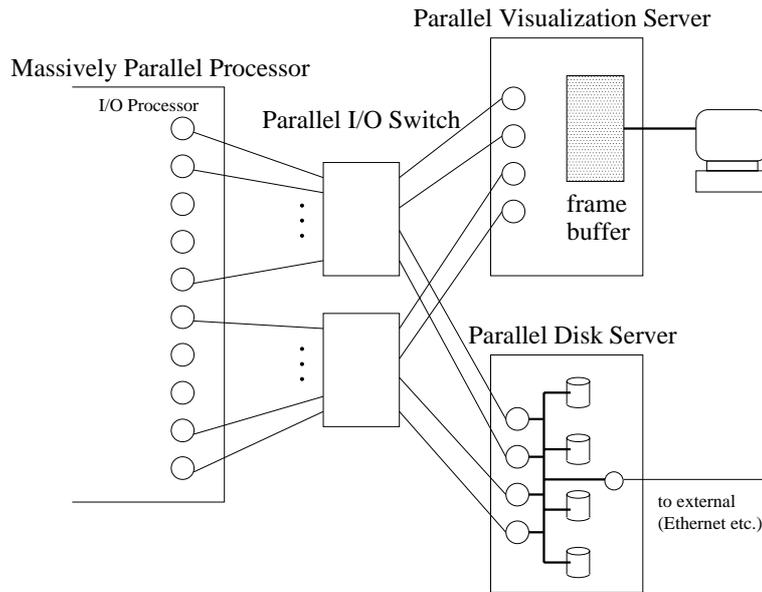


図 20: 並列入出力・可視化システム概念図

信に比べ、大型計算の入出力で重要な非同期一方向通信に対して、並列性を生かした非常に小さなレイテンシの入出力処理が実現されている。

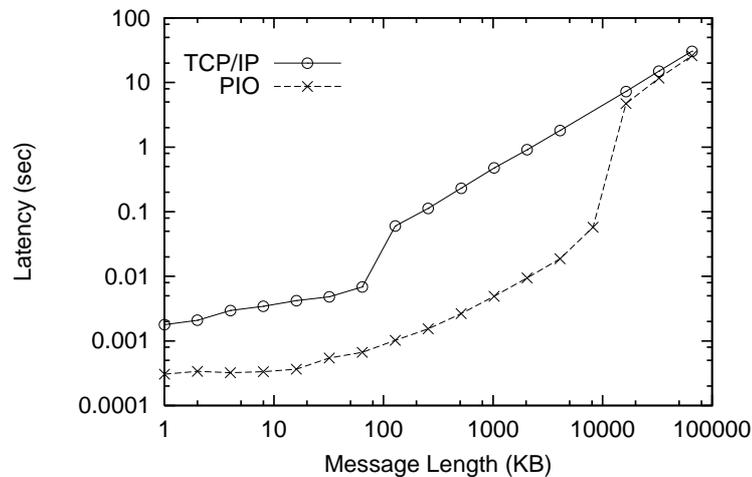


図 21: ユーザプロセスから見たレイテンシ (単方向通信)

並列可視化システム 並列可視化システムのうち、データ入力については、PIO システムを介してデータ生成システムから転送される並列データ流を、最終的な画像処理プログラムに渡すための単一流にまとめるプログラム ”Binder”を開発した。Binder はPIO のAPIに基づき、PIO デモンとの共有メモリを介したデータ受け渡しを行い、生成されたデータ

流を画像生成システムに渡す働きを担うものである。

本可視化システムでは、画像生成のためのソフトウェアとして、業界標準である AVS を用いる。AVS は単一プロセッサ上での動作を想定しており、さらにデータの供給がそのシステム上のファイル環境として閉じていることを前提としている。このため、そのままの形では我々の目的である、並列ネットワークを介したオープンな環境での利用に適さない。そこで、AVS のデータ入力モジュールを構築し直し、

- ネットワーク環境における外部からのデータ供給
- 共有メモリを利用した他プロセスからのデータ供給

の 2 機能を実現した。これらの機能は、AVS のユーザ・モジュールとして実装され、AVS システムの一部に取り込まれるようになっている。本データ入力モジュールを、先述の Binder と共有メモリを介して結合することにより、超並列計算機によって生成されたデータを並列入出力システムで転送し、画像処理の直前まで並列化されたデータ流を供給することが可能となっている。以上のデータの流れを図 22 に示す [4]。

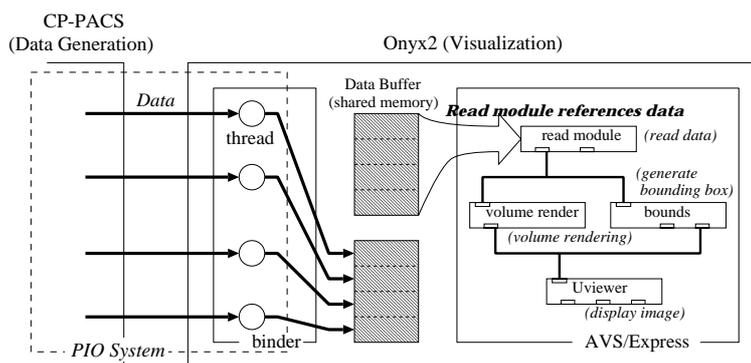


図 22: 並列入出力から並列可視化システムへのデータの流れ

以上の開発を総合し、平成 10 年度末には、データの並列生成 並列出力 実時間可視化に至る一連の連続動作を、簡単な分子動力学シミュレーション等に対して実証することができた。現在は、システム性能向上のための最適化を進めるとともに、実際の応用による実用試験を行なっている。

CP-PACS への実装と実用化 以上の開発に基づき、現在、CP-PACS への並列入出力システムの実装を進めている。CP-PACS の 128 台の IOU の内 16 台に 100base-TX イーサネットを接続し、これを 2 台のスイッチングハブを通じてディスクサーバ・ビジュアライゼーションサーバへ接続する予定である。また、本システムを素粒子物理、宇宙物理、物性物理等の実用計算結果の解析に応用し、システムの最終評価を行う予定である。

柔軟な入出力機能 並列計算機の将来の入出力システムにおいては、高性能性と同時に柔軟性も、重要な課題である。その一例として、高度に並列化されたニューラルネットワークモデルに基づき、認証用データの入力と高並列ニューラルネットワーク計算による認証判定作業及び結果出力を実時間で行なう「顔認証システム」の開発が行なわれている [5]。

### 6.7.2 プロセッサ・メモリ融合型 LSI

研究目的 CP-PACS を始めとする並列計算機の開発により、素粒子・宇宙・物性等、計算物理学の主要分野で利用可能な計算速度は、現在 1TFLOPS に達している。これによって大幅な進歩がもたらされているが、さらに数百 TFLOPS の計算性能の実現によりはじめて真に現実的な計算が可能となる問題も数多くある。本研究では、このような計算物理学の要求に応え、次世代の連続体向け超並列計算機の要素となる高性能プロセッサのアーキテクチャを明らかにすることを目指す。

大規模科学計算においては、十分な実効性能を発揮するには、演算装置のピーク計算速度のみならず、この性能に見合った記憶装置から演算装置へのデータ供給性能が保証されることが鍵である。これを満足する有力な方法として、プロセッサとメモリを同一チップ上に混載する方法がある。LSI の高集積化・高速化を中心とする計算機技術の発展は本研究のターゲットとする 21 世紀初頭において持続するものと考えられる。本研究では、2004 年前後に実現されるデバイス技術の予測に基づき、プロセッサ・メモリ融合型 LSI を用いたプロセッサアーキテクチャを考案し、それに対してシミュレーション評価及び詳細設計を行う。

基本方式 ここに検討するアーキテクチャの要点は、演算器の急激な高速化に対応して、主記憶と演算器間のデータ転送スループットを確保するためのメモリ階層の構成方法である。これについての検討の結果、主記憶を外付け DRAM で実現し、中規模の高速 SRAM をプロセッサ LSI に融合する方式とすることとした。その基本的考え方は、従来キャッシュとしてのみ利用されてきたオンチップ SRAM 領域を、アドレス指定可能な高速メモリとしてプログラム制御し、プロセッサとの間の高いバンド幅を活かしたデータの再利用アルゴリズムにより、データ転送スループットの問題を解決しようとするものである。我々は、このアーキテクチャを SCIMA (Software Controlled Integrated Memory Architecture) と呼ぶ。その具体化として、以下の方式を詳細に検討している。

- プロセッサ・ユニット：プロセッサ・メモリ融合型 LSI、外付け DRAM、ネットワーク・インターフェースから成る。
- プロセッサ：スーパスカラアーキテクチャを基本とし、64 ビット加算・乗算浮動小数点演算器のパイプラインを複数持つとする。

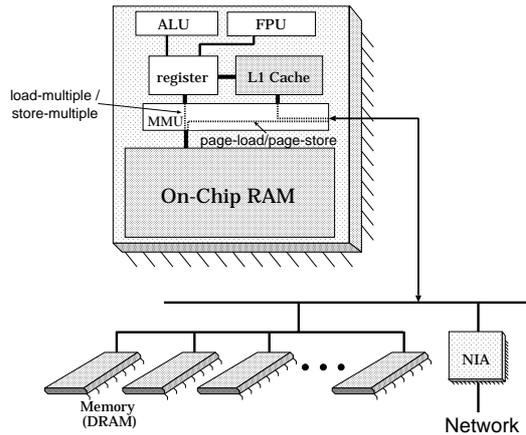


図 23: HPC 用メモリ混載プロセッサの構成

- 混載されるメモリ：数 MB から数十 MB 程度の高速 SRAM をオンチップメモリとして同一チップに混載する。

また、外付け DRAM・オンチップメモリ・レジスタから成る新たなメモリ階層に対して、以下の拡張命令を定義し、追加することとした。

- load-multiple 命令, store-multiple 命令  
レジスタとオンチップメモリ間のデータ転送を行う拡張命令。512 ビットを単位として高いスループットを実現するとともに、CP-PACS で提案・実装した疑似ベクタ処理機構を導入することで、前後の処理と重畳化し、メモリレイテンシを隠蔽する。
- page-load 命令, page-store 命令  
オンチップメモリと外付け DRAM の間のデータ転送を行なう拡張命令。転送はページ単位で行ない、前後のページに対する計算と重畳化することで、レイテンシを隠蔽する。

プロセッサユニットの基本アーキテクチャを図 6.7.2 に示す。

性能評価 以上の基本仕様の評価は、机上評価及び MIPS R10000 をベースとする独自のシミュレータ開発等により進めている。

まず、Linpack 等の基本ベンチマークについては、ハードウェア仕様として (i) 内部クロック 2GHz、(ii) I/O クロック 1GHz、(iii) 外付けメモリへのデータバス幅 512 ビット (64B)、(iv) 加算・乗算浮動小数点パイプライン 4 本 (ピーク 16Gflops) を仮定し、机上評価の結果、Livermore カーネル 1 に対して 8.2Gflops、Livermore カーネル 21 に対して 10.6 Gflops、Linpack に対して最高 15.6 Gflops という実効性能評価値を得た [6]。

また、応用プログラムに則した評価として、素粒子物理学の QCD シミュレーションの主要計算である、粗行列大次元連立一次方程式の反復解法 (BiCGStab 法) のループ部分のデー

タアクセスパターンを詳細に解析し、オンチップメモリを有効に利用することにより、データの再利用性、局所性を引き出すことができることを確認した [7]。

シミュレーション評価では、SPLASH, SPEC といった標準的なベンチマークに対して、メモリ混載によるバンド幅の拡大による性能向上について調べた。その結果、データがすべて混載メモリに乗って、メモリアクセス時間が大幅に減る場合には、最大で 70% 近い性能向上が得られることがわかった (Ocean ベンチマークの場合)。現在、データがより大規模になった場合のシミュレータを作成中である。

以上に並び、昨年度から、プロセッサ・メモリ融合型アーキテクチャ用の最適化コンパイラの開発を進めている。これは、メモリ系制御の新たな追加命令を利用して、本アーキテクチャを最適に活用するコード生成を行うものであり、今後予定する詳細仕様の決定及び評価に欠くことのできない技術開発項目である。

今後の計画 今年度中に、機能レベルシミュレータによる詳細な性能評価を行い、これに基づいて、Verilog/VHDL などの CAD を用いた LSI の回路設計を開始する。続いて来年度からは、回路設計の本格化とシミュレーションによる論理検証を行ない、LSI の詳細設計を進め、最終的に設計したプロセッサ・メモリ混載型 LSI の詳細評価を実施する。また、本年度後半からはプロセッサ結合網の検討を開始する計画である。

## 参考文献

- [1] 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」1997-1998 報告書
- [2] 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」1998-1999 報告書
- [3] M. Matsubara, H. Numa, and T. Boku, "Commodity Network based Parallel I/O System for Massively Parallel Processors", Proc. of PDPTA'99, pp.2424-2429, 1999.
- [4] 沼寿隆, 松原正純, 板倉憲一, 朴泰祐, "並列入出力機構を用いた可視化システムの提案", 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会 (SWoPP'99), 99-HPC-77-10, pp.53-58, 1999.
- [5] 富永憲一, 安永守利, "超並列計算機 CP-PACS を用いた並列自己組織化マップによる顔認証システム", 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会研究報告 99-HPC-77-29, pp.167-172, 1999.
- [6] 近藤正章, 坂井修一, 朴泰祐, 中村宏, "HPC 向けプロセッサのメモリ・アーキテクチャの基本構成", 情報処理学会アーキテクチャ研究会 (SWoPP'99), 99-ARC-134-1, pp1-6, 1999.

- [7] 大河原英喜, 中村宏, 吉江友照, 金谷和至, “ハイパフォーマンスコンピューティングに適したメモリ階層の検討”, 情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会, ARC-133-10, pp.55-60, 1999.

## 7 共同利用

センターは、全国共同利用施設である。共同利用活動としては、平成4年度の設立当初からセンター主催研究会を毎年開催してきた。これに加えて、CP-PACSが順調に稼働する状況になったことから、平成9年度より、CP-PACSの全国共同利用を行なっている。

### 7.1 大規模数値シミュレーションプロジェクト

#### 7.1.1 趣旨

このプロジェクトは、素粒子物理学・宇宙物理学・物性物理学の3分野を対象として、CP-PACSの高い計算性能を用いて始めて可能であるような大規模数値研究を全国公募するもので、平成9年度末より開始された。原子核物理学については、平成10年度後半より、素粒子物理学の関連分野として、応募を認めている。

プロジェクト1件あたりの計算時間は、平成9・10年度は、2048PU相当で100時間を上限としたが、平成11年度からは、これを200時間に引き上げ、また学問上の理由が明確なものについては、これ以上の申請も認めている。

公募は年2回、1月と7月に行われ、研究プロジェクトの採択は、上記3分野の外部委員と本センター関係者により構成される共同利用審査委員会により行われる。採択されたプロジェクトに対しては、年度末のセンター主催の研究会において、成果の報告を求めている。

#### 7.1.2 実施状況

本プロジェクトは平成9年末に開始されたが、同年度は実施期間が限られていたため、9年度と10年度をまとめて実施した。表25に平成9・10年度及び11年度の採択プロジェクトをまとめる。

平成9・10年度には9件（内2件は同一グループによる追加申請）を採択した。内訳は、宇宙1件・物性8件である。計算時間は、2048PU相当で800時間を配分した。これは、年間総稼働時間の10%にあたる。実施状況には採択課題によりばらつきがある。総使用時間は、2048PU相当で529時間であり、年間総稼働時間の6.6%であった。

内容面では、物性計算がその殆んどを占めた。固体水素の状態計算（番号3）、ランダムスピン系のシミュレーション（番号2、7）、強相関電子系の物性に関係した研究（番号1、6）に分類される。特に、固体水素の計算は、256PU及び512PUを数週間連続使用した計算であり、CP-PACSならではの研究が行なわれた。

平成11年度は、年度当初分として、素粒子・原子核1件、宇宙物理1件、物性物理3件が採択済みである。

大型数値シミュレーションプロジェクト一覧					
平成 9・10 年度					
番号	課題名	代表者氏名	所属・職	許可時間	備考
1	厳密対角化法及び変分モンテカルロ法によるスピンギャップ系の研究	横山 寿敏 他 5 名	東北大学大学院理学系研究科・助手	163840	
2	二次元ランダムハイゼンベルグ反強磁性体におけるスピンゆらぎ	高山 一 他 5 名	東京大学物性研究所・教授	204800	
3	第一原理経路積分分子動力学法による高圧下における固体水素の研究	常行 真司 他 4 名	東京大学物性研究所・助教	204800	前期分
4	差動回転円盤における磁気乱流とダイナモ	松元 亮治 他 5 名	千葉大学理学部・助教授	194560	後期分
5	短距離相互作用する不均一な古典粒子系の研究	樋渡 保秋 他 6 名	金沢大学理学部 計算科学科・教授	102400	
6	電子機構超伝導モデルの計算物理的研究	山地 邦彦 他 3 名	電子技術総合研究所・首席研究官	204800	
7	ベクトルスピングラスモデルの磁気異方性効果	福島 孝治 他 1 名	東京大学物性研究所・助手	153600	
8	モンテカルロ殻モデルによる核構造および電子系の研究	水崎 高浩 他 4 名	東京大学理学部 物理学教室・助手	204800	
平成 11 年度					
1	擬 2 次元 d-p モデルにおける超伝導揺らぎ効果	山田 耕作 他 1 名	京都大学大学院 理学研究科・教授	281600	
2	最大エントロピー法を用いた有限温度量子色力学におけるスペクトル関数の解析	浅川 正之 他 2 名	名古屋大学大学院 理学研究科・助手	204800	
3	二次元ランダムハイゼンベルグ反強磁性体における量子スピンゆらぎ	藤堂 眞治 他 4 名	東京大学物性研究所・助手	409600	
4	高温超伝導体の d-p 模型に関する計算物理的研究	山地 邦彦 他 3 名	電子技術総合研究所・首席研究官	143360	

表 25: 計算物理学研究センター大型数値シミュレーションプロジェクト一覧 (許可時間は、1 PU 換算の CPU 時間)

## 7.2 センター主催研究会

共同利用の一環であるセンター主催研究会は、平成4年より毎年実施している。表26にその一覧を挙げる。

平成4年度から8年度のCP-PACSプロジェクト実施中は、その進行状況がセンター主催研究会において毎年報告された。平成8年度にCP-PACSが完成して以降は、CP-PACSによる計算結果を含めて計算物理学を主テーマとする研究会、また、高性能計算機の現状と今後をテーマとする研究会等が開催されている。

研究会の記録としては、それぞれの終了後、講演スライドをまとめて写真複写製本し、会議録を作成配布している。

年度	研究会題目	開催日	参加者数
4	並列計算機と計算物理学	平成5年3月16日	85
5	天体物理学における輻射輸送過程	平成6年3月1日-3日	84
6	並列計算機と計算物理学	平成6年12月6日-7日	120
7	滞在型ワークショップ「銀河形成」	平成7年12月1日-6日	40
7	格子上の場の理論	平成8年3月5日-7日	60
8	クエーサー活動性と銀河形成の物理的関連	平成9年3月5日-7日	50
8	並列計算機による物理学	平成9年3月26日-27日	100
9	並列分散環境におけるハイパフォーマンスコンピューティング	平成10年3月23日-24日	60
9	計算物理学における超大型数値シミュレーションの技法	平成10年3月25日-27日	100
10	輻射輸送・輻射流体力学研究会	平成10年6月10日-12日	30
10	CP-PACSによる計算物理学	平成10年2月15日-17日	40

表 26: 計算物理学研究センター主催研究会一覧

## 8 国際交流

CP-PACS の開発・製作とそれを用いた計算物理学の成果は、並列計算機工学及び計算物理学の分野で、国際的に注目を浴びている。これを反映して、センターには、情報交換や共同研究を目的とする訪問・滞在希望が多く寄せられている。

計算物理学及び並列計算機工学の国際的な拠点として国際交流を推進することは、センターの重要な役割であり、各種の研究員制度の活用、国際会議の開催などにより、活発な国際交流を実施してきている。

### 8.1 センターにおける研究への参加

センターでは、日本学術振興会の外国人特別研究員制度や、未来開拓学術研究推進事業の研究員制度を活用して、外国人若手研究者を採用し、センターにおける CP-PACS を用いた研究に参加させている。これらの制度により現在までにセンターに滞在した研究者一覧は、表 10 に挙げられている。

### 8.2 COE 外国人研究員

よりシニアな外国人研究者からの訪問・滞在希望に応える制度として、COE 外国人研究員枠を用いて、毎年 3-4 名の外国人研究者を招聘している。外国人研究者の選択は、センター教官からの招聘と、国際的な公募によるものを併用している。

現在までに、この制度を利用してセンターに滞在した外国人研究者のリストは表 9 にある。

### 8.3 国際会議開催

CP-PACS プロジェクト最終年度の平成 8 年度に、文部省国際研究集会経費を受け、国際シンポジウム「Lattice QCD on Parallel Computers (並列計算機による格子量子色力学)」を、平成 9 年 3 月 10 日-15 日にわたり開催した。国外からは、当該分野の第一線の研究者を殆んど網羅した 23 名、国内からは 17 名、計 40 名を参加者とし、素粒子物理学における格子量子色力学をテーマとして、CP-PACS による最新の結果を含む分野全般の成果が報告・討議された。会議録は、オランダ Elsevier 社刊行の Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 60A 巻に収録されている。

## 9 主要研究業績リスト

### 9.1 概要

表 27に、平成 4 年度から、年度別・分野別に、センター関係教官による、学術誌掲載論文数・国際会議発表論文数・国内学会研究会発表数を挙げる。CP-PACS プロジェクト及び未来開拓研究の主要論文については、第 9.2 節以下に、テーマ別に分類して掲載する。

計算物理学研究センター研究成果発表統計						
年度	物理学			計算機工学		
	学術誌	国際会議	学会・研究会	学術誌	国際会議	学会・研究会
平成 4 年度	10	6	7	4	1	2
5 年度	13	12	24	4	1	3
6 年度	15	11	31	7	5	7
7 年度	12	9	52	15	9	10
8 年度	10	16	41	16	8	17
9 年度	16	17	37	15	17	19
10 年度	13	27	51	26	12	24
11 年度	20	35	27	9	9	34

表 27: 計算物理学研究センター研究成果発表統計

## 9.2 CP-PACS プロジェクト

### 9.2.1 CP-PACS プロジェクト報告書

1. 「専用並列計算機による「場の物理」の研究」進捗状況報告書  
(筑波大学計算物理学研究センター：平成6年12月)
2. 「専用並列計算機による「場の物理」の研究」研究成果報告書；同付属資料  
(筑波大学計算物理学研究センター：平成9年11月)

### 9.2.2 CP-PACS プロジェクト全般

1. Y. Oyanagi, “New parallel computer project in Japan dedicated to computational physics”, in Proceedings of Lattice '92 (Amsterdam, The Netherlands, 15-19 Sept., 1992), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 30 (1993) 229-232.
2. Y. Iwasaki, “Computers for lattice field theories”, in Proceedings of Lattice '93 (Dallas, USA, 12-16 Oct., 1993), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 34 (1994) 78-92.
3. A. Ukawa, “Status of the CP-PACS Project”, in Proceedings of Lattice '94 (Bielefeld, Germany, 27 Sept.-10 Oct., 1994), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 42 (1995) 194-200.
4. 特集『計算物理学と超並列計算機 – CP-PACS 計画 –』, 情報処理 37 (1996):  
中村 宏, 「特集『計算物理学と超並列計算機 – CP-PACS 計画 –』の編集にあたって」, p.10,  
岩崎 洋一, 宇川 彰, 梅村 雅之, 「計算物理学と CP-PACS 計画」, p.11-17,  
中澤 喜三郎, 中村 宏, 朴 泰祐, 「超並列計算機 CP-PACS のアーキテクチャ」, p.18-28,  
中田 育男, 山下 義行, 小柳 義夫, 「超並列計算機 CP-PACS のソフトウェア」, p.29-37,  
青木 慎也, 金谷 和至, 吉江 友照, 「超並列計算機 CP-PACS の計算物理学分野における実効性能の予測」, p.38-42.
5. 中澤 喜三郎, 「計算物理学研究用並列計算機: CP-PACS」, 応用数理, Vol.6, (1996) 17-28.
6. Y. Iwasaki, “Status of the CP-PACS Project”, in Proceedings of Lattice '96 (St. Louis, USA, 4-8 June, 1996), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 53 (1997) 1007-1009.

7. Y. Iwasaki, "The CP-PACS Parallel Computer Project", in Proceedings of International Conference "Multi-Scale Phenomena and Their Simulation", World Scientific (1997) 80-90.
8. Y. Iwasaki, "The CP-PACS project", in Proceedings of the International Workshop "Lattice QCD on Parallel Computers" (Tsukuba, March 10-15, 1997), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 246-254.
9. A. Ukawa, "The CP-PACS Parallel Computer", in Proceedings of CHEP'97 (Berlin, April 7-11, 1997) 595-600.
10. T. Boku, H. Nakamura, K. Nakazawa, Y. Iwasaki, "The Architecture of Massively Parallel Processor CP-PACS", in Proceedings of 2nd Aizu International Symposium on Parallel Algorithm/Architecture Synthesis (1997) 31-40.
11. T. Boku, K. Itakura, H. Nakamura, K. Nakazawa, "CP-PACS: A massively parallel processor for large scale scientific calculations", in Proceedings of ACM International Conference on Supercomputing '97 (1997) 108-115.

### 9.2.3 CP-PACS のアーキテクチャとソフトウェア

#### 【平成 4 年度】

1. 中村 宏, 位守 弘充, 伊藤 元久, 中澤 喜三郎, 「レジスタウィンドウとスーパスカラ方式による擬似ベクトルプロセッサの提案」, 並列処理シンポジウム JSPP'92 論文集 (1992) 367-374.
2. K. Nakazawa, H. Nakamura, H. Imori, S. Kawabe, "Pseudo Vector Processor based on Register-Windowed Superscalar Pipeline", in Proceedings of Supercomputing '92 (1992) 642-651.

#### 【平成 5 年度】

1. 位守 弘充, 中村 宏, 朴 泰祐, 中澤 喜三郎, 「スライドウィンドウ方式による擬似ベクトルプロセッサ」, 情報処理学会論文誌, 第 34 巻, 第 12 号 (1993) 2612-2623.
2. H. Nakamura, H. Imori, K. Nakazawa, T. Boku, I. Nakata, Y. Yamashita, H. Wada, Y. Inagami, "A Scalar Architecture for Pseudo Vector Processing based on Slide-Windowed Registers", in Proceedings of ACM International Conference on Supercomputing '93 (1993) 298-307.

3. 中村 宏, 中澤 喜三郎, 李 航, 位守 弘充, 朴 泰祐, 「スライドウィンドウ方式に基づく擬似ベクトルプロセッサ」, 情報処理学研究報告 93-ARC-101-11 (1993) 81-88.

#### 【平成 6 年度】

1. 山下 義行, 中田 育男, 「ループ中に条件分岐を含む場合の最適なソフトウェア・パイプラインング」, 並列処理シンポジウム JSPP'94 論文集 (1994) 17-24.
2. 中澤 喜三郎, 朴 泰祐, 中村 宏, 中田 育男, 山下 義行, 岩崎 洋一, 「CP-PACS のアーキテクチャの概要」, 情報処理学会研究報告 94-ARC-108-9 (1994) 57-64.

#### 【平成 7 年度】

1. 山下 義行, 中田 育男, 「ソフトウェア・パイプラインングにおける多重ループの最適化」, 並列処理シンポジウム JSPP'95 論文集 (1995) 185-192.
2. 斎藤 拓二, 橋本 眞宏, 澤本 英雄, 熊谷 多加史, 山縣 良, 釜田 栄樹, 松原 健二, 柏山 正守, 磯部 敏子, 堀田 多加志, 中野 哲夫, 清水 照久, 中澤 喜三郎, 「擬似ベクトル機構を有する並列コンピュータ向け RISC プロセッサ」, 電子情報通信学会技術研究報告 DSP95-104/ICD95-153 (1995) 1-6.
3. K. Shimamura, S. Tanaka, T. Shimomura, T. Hotta, E. Kamada, H. Sawamoto, T. Shimizu, K. Nakazawa, “A Superscalar RISC Processor with Pseudo Vector Processing Feature”, in Proceedings of ICCD'95 (IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors) (1995) 102-109.
4. K. Saito, M. Hashimoto, H. Sawamoto, R. Yamagata, T. Kumagai, E. Kamada, K. Mastubara, T. Isobe, T. Hotta, T. Nakano, K. Nakazawa, “A 150 MHz Superscalar RISC Processor with Pseudo Vector Processing Feature”, in Proceedings of Hot Chips VII('95), (1995) 197-205.

#### 【平成 8 年度】

1. 稜川 友宏, 添野 元秀, 山下 義行, 中田 育男, 「スライドウィンドウを考慮したレジスタ割付」, 日本ソフトウェア科学会第 13 回大会論文集 (1996) 201-204.

#### 【平成 9 年度】

1. 稜川 友宏, 添野 元秀, 山下 義行, 中田 育男, 「スライドウィンドウを考慮したレジスタ割付」, 情報処理学会第 54 回全国大会講演論文集 (分冊 1), (1997) 191-120.

【平成 10 年度】

1. 稜川友宏, 添野元秀, 山下義行, 中田育男, 「スライドウィンドウを考慮したレジスタ割付」, 情報処理学会論文誌, 39, 第 6 巻, (1998) 3684-3694.

【平成 11 年度】

1. 糸賀裕弥, 稜川友宏, 山下義行, 中田育男, 「条件分岐を考慮したソフトウェア・パイプラインにおけるレジスタ割付」, 並列処理シンポジウム JSPP'99 論文, 39-46 (1999).

9.2.4 CP-PACS の性能評価

【平成 4 年度】

1. 斎藤 哲也, 森本 貴之, 位守 弘充, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「超並列計算機のネットワークの実現可能性と性能評価」, 情報処理学会研究報告 92-ARC-95-4 (1992) 25-32.
2. 位守 弘充, 中村 宏, 朴 泰祐, 中澤 喜三郎, 「擬似ベクトルプロセッサによるリストベクトル処理とその評価」, 情報処理学会研究報告 92-ARC-96-17 (1992) 117-124.

【平成 5 年度】

1. 中村 宏, 位守 弘充, 中澤 喜三郎, 「レジスタウィンドウ方式を用いた擬似ベクトルプロセッサの評価」, 情報処理学会論文誌 第 34 巻, 第 4 号 (1993) 669-680.
2. 朴 泰祐, 斎藤 哲也, 板倉 憲一, 中澤 喜三郎, 中村 宏, 「ハイパクロスバ・ネットワークの性能評価」, 電子情報通信学会技術研究報告 CPSY-93-40 (1993) 41-48.

【平成 6 年度】

1. H. Nakamura, K. Nakazawa, H. Li, H. Imori, T. Boku, I. Nakata, and Y. Yamashita, "Evaluation of Pseudo Vector Processor based on Slide-Windowed Registers", in Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences 27 (1994) 368-377.
2. 朴 泰祐, 曾根 猛, 三島 健, 板倉 憲一, 中澤 喜三郎, 中村 宏, 「ハイパクロスバ・ネットワークにおける転送性能向上のための手法とその評価」, 並列処理シンポジウム JSPP'94 論文集 (1994) 121-128.

3. 曾根 猛, 三島 健, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「ハイパクロスバ・ネットワークにおけるバッファの利用法と転送性能について」, 電子情報通信学会技術研究報告 CPSY-94-53 (1994) 97-104.
4. H. Nakamura, T. Wakabayashi, K. Nakazawa, T. Boku, H. Wada, and Y. Inagami, “Pseudo Vector Processor for High-speed List Vector Computation with Hiding Memory Access Latency”, in Proceedings of IEEE TENCON'94 (1994) 338-342.
5. 板倉 憲一, 廣野 哲, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「ハイパクロスバ・ネットワークにおける NAS ベンチマークの評価」, 情報処理学会研究報告 94-HPC-52-20 (1994) 119-126.

#### 【平成 7 年度】

1. 朴 泰祐, 曾根 猛, 三島 健, 板倉 憲一, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「ハイパクロスバ網における適応ルーティングの導入とその評価」, 電子情報通信学会論文誌 第 J78-D-I 巻, 第 2 号 (1995) 108-117.
2. 板倉 憲一, 服部 正樹, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「超並列計算機 CP-PACS における NAS-PB の仮想評価」, 情報処理学会研究報告 95-HPC-55-7 (1995) 49-56.
3. 廣野 哲, 上野 幸樹, 中村 宏, 朴 泰祐, 中澤 喜三郎, 「マルチバンクメモリ上における擬似ベクトルプロセッサ PVP-SW の性能評価」, 情報処理学会研究報告 95-ARC-111-2 (1995) 9-16.
4. 曾根 猛, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「ハイパクロスバ・ネットワークにおける virtual channel の動的選択による適応ルーティング」, 並列処理シンポジウム JSPP'95 論文集 (1995) 249-256.
5. 朴 泰祐, 板倉 憲一, 曾根 猛, 三島 健, 中澤 喜三郎, 中村 宏, 「ハイパクロスバ・ネットワークにおける転送性能向上のための手法とその評価」, 情報処理学会論文誌 第 36 巻, 第 7 号 (1995) 1610-1618.
6. K. Itakura, M. Hattori, T. Boku, H. Nakamura, and K. Nakazawa, “Preliminary evaluation of NAS Parallel Benchmarks on CP-PACS”, Proceedings of PERMEAN'95 (International Workshop on Performance Evaluation and Analysis), (1995) 68-77.
7. 服部 正樹, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「CP-PACS パイロットモデルにおける NAS 並列ベンチマークの評価」, 情報処理学会研究報告 95-HPC-57-8 (1995) 43-48.

#### 【平成8年度】

1. T. Yoshié, “Benchmark test of CP-PACS for lattice QCD”, in Proceedings of International Workshop “QCD on Massively Parallel Computers” (Yamagata, Japan, March 16-19, 1995) Prog. Theor. Phys. Suppl. 122 (1996) 8-24.
2. 曾根 猛, 服部 正樹, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「CP-PACSパイロットモデルにおけるLINPACKベンチマークの高速化」, 情報処理学会研究報告 96-ARC-117-15 (1996) 83-88.
3. 添野 元秀, 山下 義行, 中田 育男, 「スライドウィンドウを考慮したレジスタ割り付け」, 情報処理学会第52回全国大会講演論文集(5), (1996) 13-14.
4. 曾根 猛, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「ハイパクロスバ・ネットワークにおけるVirtual Channelの動的選択による適応ルーティング」, 情報処理学会論文誌 第37巻, 第7号, (1996) 1409-1418.
5. 松原 正純, 服部 正樹, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「超並列計算機CP-PACSにおけるPVMの実装」, 情報処理学会研究会報告 96-ARC-119-3 (1996) 13-18.
6. 廣野哲, 中村宏, 朴泰祐, 中澤喜三郎, 「擬似ベクトルプロセッサにおける高速リストベクトル処理」, 情報処理学会論文誌 第37巻, 第10号, (1996) 1850-1858.
7. 板倉 憲一, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「超並列計算機CP-PACSのCGベンチマークによる性能評価」, 情報処理学会研究会報告 96-HPC-63-6 (1996) 31-36.
8. 村上 祥基, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「VHDLによるハイパクロスバ網用ルータチップの設計」, 情報処理学会研究会報告 96-ARC-121-3/96-DA-82-3 (1996) 17-24.
9. L. S. Yang, H. Machidori, T. Shirakawa, “BEM and BEM with SOR on the parallel computer QCDPAX”, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.18 (1996) 231-237.

#### 【平成9年度】

1. Y. Abei, K. Itakura, T. Boku, H. Nakamura, K. Nakazawa, “Performance Improvement for Matrix Calculation on CP-PACS Node Processor”, in Proceedings of HPC Asia'97 (1997) 672-677.
2. K. Itakura, T. Boku, H. Nakamura, K. Nakazawa, “Performance evaluation of CP-PACS on CG benchmark”, in Proceedings of HPC Asia'97 (1997) 678-683.

3. H. Nakamura, K. Itakura, M. Matsubara, T. Boku, K. Nakazawa, "Effectiveness of Register Preloading on CP-PACS Node Processor", in Proc. of Innovative Architecture for Future Generation High-Performance Processors and Systems (IWIA'97) (1997) 83-90.
4. 板倉 憲一, 松原 正純, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「超並列計算機 CP-PACS における NPB Kernel CG の評価」, 並列処理シンポジウム JSPP'97 論文集 (1997) 5-12.
5. M. Guo, Y. Yamashita, I. Nakata, "An Efficient Data Distribution Technique for Distributed Memory Parallel Computers", 並列処理シンポジウム JSPP'97 論文集 (1997) 189-196.
6. 稜川 友宏, 添野 元秀, 山下 義行, 中田 育男, 「レジスタ割付からみたスライドウィンドアーキテクチャの優位性について」, 情報処理学会第 55 回全国大会論文集分冊 1, (1997) 16-17.
7. 板倉 憲一, 安部井 嘉人, 松原 正純, 朴 泰祐, 中村 宏, 中澤 喜三郎, 「超並列計算機 CP-PACS の基本性能評価」, 情報処理学会研究会報告 97-ARC-123-4, (1997) 19-24.
8. 服部 正樹, 松原 正純, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 「超並列計算機 CP-PACS における分子動力学シミュレーション」, 情報処理学会研究会報告 97-HPC-66-2, (1997) 7-12.
9. 松原 正純, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 「超並列計算機 CP-PACS における空間分割法による分子動力学法シミュレーション」, 情報処理学会研究会報告 97-HPC-69-10, (1997) 55-60.
10. 吉田英嗣, 安永 守利, 「超並列計算機 CP-PACS によるニューラルネットワーク計算の高速化」, 情報処理学会研究会報告 97-HPC-67-5, (1997) 25-30.

#### 【平成 10 年度】

1. 板倉憲一, 松原正純, 朴泰祐, 中村宏, 中澤喜三郎, 「超並列計算機 CP-PACS における NPB KernelCG の評価」, 情報処理学会論文誌, 39, 第 6 巻, (1998) 1757-1765.
2. M. Matsubara, K. Itakura, T. Boku, "Large Scale Molecular Dynamics Simulations on CP-PACS", in Proceedings of HPC Asia'98 (1998) 321-331.
3. 吉田英嗣, 安永 守利, 吉原郁夫, 「遺伝的アルゴリズムを併用したニューラルネットワークの並列学習: 超並列計算機 CP-PACS への実装と評価」, 情報処理学会研究会研究報告, 98-HPC-73-10, 55-60 (1998).

4. M. Yasunaga and E. Yoshida, "Optimization of Parallel BP Implementation: Training Speed of 1,056 MCUPS on the Massively Parallel Computer CP-PACS", in Proc. IEEE and INNS Int. Joint Conf. on Neural Networks (1998) 563-568.

**【平成 11 年度】**

1. 松原 正純, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 「超並列計算機用多段結合網における転送性能の解析」, 情報処理学会論文誌, 40, 第 5 巻, 2172-2182 (1999).
2. M. Yasunaga, E. Yoshida and I. Yoshiyara, "Parallel Back-propagation Using Genetic Algorithm: Real-time BP Learning on the Massively Parallel Computer CP-PACS", in Proc. IEEE and INNS Int. Joint Conf. on Neural Networks, CD-ROM (1999).

### 9.3 CP-PACS による計算物理学

#### 9.3.1 学術誌及び国際会議発表論文 (素粒子物理学)

##### 【平成 6 年度】

1. Y. Iwasaki, “Computers for Lattice Field Theories”, in Proceedings of Lattice '93 (Dallas, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **34**, 78-92 (1994)

##### 【平成 7 年度】

1. A. Ukawa, “Status of the CP-PACS Project”, in Proceedings of Lattice '94 (Bielefeld, Germany), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **42**, 194-200 (1995).

##### 【平成 8 年度】

1. T. Yoshié, “Benchmark test of CP-PACS for lattice QCD”, in Proceedings of “QCD on Massively Parallel Computers” (Yamagata, Japan, March 1995, eds. A. Nakamura, K. Kanaya and F. Karsch), *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **122**, 8-24 (1996)

##### 【平成 9 年度】

1. Y. Iwasaki, “Status of the CP-PACS project”, in Proceedings of Lattice '96 (St. Louis, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **53**, 1007-1009 (1997)
2. A. Ukawa, “The CP-PACS Parallel Computer”, in Proceedings of CHEP'97 (Berlin, Apr. 7-11, 1997), 595-600 (1997)
3. Y. Iwasaki, “The CP-PACS Parallel Computer Project”, in Proceedings of International Conference of Multi-Scale Phenomena and Their Simulation (eds. F. Karsch, B. Monien and H. Satz, World Scientific), 80-90 (1997)
4. Y. Iwasaki, “The CP-PACS Project and Computational Physics”, in Proceedings of International Symposium on “Parallel Computing in Engineering and Science” (Tokyo, Japan, Science and Technology Agency) (1997)

##### 【平成 10 年度】

1. Y. Iwasaki, “The CP-PACS project”, in Proceedings of “Lattice QCD on Parallel Computers” (Tsukuba, Japan, March 1997), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **60A**, 246-254 (1998)

2. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “CP-PACS results for quenched QCD spectrum with the Wilson action”, in Proceedings of “Lattice QCD on Parallel Computers” (Tsukuba, Japan, March 1997), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **60A**, 14-25 (1998)
3. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “CP-PACS results for the quenched light hadron spectrum”, in Proceedings of Lattice ’97 (Edinburgh, UK), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **63**, 161-163 (1998)
4. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneno, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Hadron spectroscopy and static quark potential in full QCD: A comparison of improved actions on the CP-PACS”, in Proceedings of Lattice ’97 (Edinburgh, UK), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **63**, 221-226 (1998)
5. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Full QCD simulation on CP-PACS”, in Proceedings of “Lattice QCD on Parallel Computers” (Tsukuba, Japan, March 1997), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **60A**, 335-340 (1998)
6. T. Yoshié, “Light hadron spectroscopy”, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **63**, 3-16 (1998)

**【平成 11 年度】**

1. CP-PACS Collaboration: T. Manke, H.P. Shanahan, A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Hybrid Quarkonia on Asymmetric Lattices”, *Phys. Rev. Lett.* **82**, No.22, 4396-4399 (1999)
2. CP-PACS Collaboration: M. Okamoto, A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshié, “Equation of state for pure SU(3) gauge theory with renormalization group improved action”, *Phys. Rev. D* **60**, No.7, to be published (1999)

3. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Comparative study of full QCD hadron spectrum and quark potential with improved actions”, *Phys. Rev. D* **60**, to be published (1999)
4. Y. Kuramashi for the CP-PACS Collaboration, “CP-PACS results for light hadron spectrum in quenched and two flavor full QCD”, in Proceedings of APS meeting DPF '99 (Los Angeles, USA, January 1999), (1999)
5. R. Burkhalter for the CP-PACS Collaboration, “Recent results from the CP-PACS Collaboration”, in Proceedings of Lattice '98 (Boulder, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **73**, 3-15 (1999)
6. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Quenched Light Hadron Spectrum with the Wilson Quark Action: Final Results from CP-PACS”, in Proceedings of Lattice '98 (Boulder, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **73**, 189-191 (1999)
7. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Full QCD light hadron spectrum from the CP-PACS”, in Proceedings of Lattice '98 (Boulder, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **73**, 192-194 (1999)
8. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, “The static quark potential in full QCD”, in Proceedings of Lattice '98 (Boulder, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **73**, 216-218 (1999)
9. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, “Heavy quark Physics in  $N_f = 2$  QCD”, in Proceedings of Lattice '98 (Boulder, USA), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **73**, 375-377 (1999)
10. T. Yoshie, “Hadron spectroscopy from lattice QCD”, in Proceedings of KEK-Tanashi Symposium on “Physics of Hadrons and Nuclei” (Tokyo, Japan, Dec. 1998) *Nucl. Phys. A*, to be published (1999)

11. T. Yoshie, “Light hadron spectrum from the CP-PACS”, in Proceedings of PANIC ’99 (Uppsala, Sweden, June 1999), *Nucl. Phys. A*, to be published (1999)
12. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, H. P. Shanahan, A. Ukawa, T. Yoshié, “Eta meson mass and topology in QCD with two light flavors”, in Proceedings of Lattice ’99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (2000) to be published.
13. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, Y. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, T. Izubuchi, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, H. P. Shanahan, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshié, “Quenched QCD with domain-wall fermions on coarse lattices”, in Proceedings of Lattice ’99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (2000) to be published.
14. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, H. P. Shanahan, A. Ukawa, T. Yoshié, “Light hadron spectrum and quark masses in QCD with two flavors of dynamical quarks”, in Proceedings of Lattice ’99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (2000) to be published.
15. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, H. P. Shanahan, A. Ukawa, T. Yoshié, “Heavy-light decay constants from clover heavy quark action in QCD with two flavors of dynamical quarks”, in Proceedings of Lattice ’99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (2000) to be published.
16. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okamoto, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshié, “Equation of state for SU(3) gauge theory with RG improved action”, in Proceedings of Lattice ’99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (2000) to be published.

17. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okamoto, M. Okawa, H. P. Shanahan, A. Ukawa, T. Yoshié, “Equation of state in finite-temperature QCD with improved Wilson quarks”, in Proceedings of Lattice '99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (2000) to be published.
18. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, H. P. Shanahan, A. Ukawa, T. Yoshié, “Heavy quarkonia from anisotropic and isotropic lattices”, in Proceedings of Lattice '99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (2000) to be published.
19. CP-PACS Collaboration: A. Ali Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, T. Manke, K. Nagai, M. Okawa, H. P. Shanahan, A. Ukawa, T. Yoshié, “Heavy-light spectrum and decay constant from NRQCD with two flavors of dynamical quarks”, in Proceedings of Lattice '99 (Pisa, Italy, 29 June-3 July, 1999), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (2000) to be published.
20. T. Manke for the CP-PACS Collaboration, “Exotic quarkonia from anisotropic lattices”, in Proceedings of QCD '99 (Montpellier, France, 7-13 July, 1999), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (2000) to be published.

### 9.3.2 国内学会・研究会口頭発表（素粒子物理学）

#### 【平成4年度】

1. 岩崎 洋一, 「超並列計算機による素粒子物理の研究」, 理論化学若手研究会 (1992年7月)
2. 岩崎 洋一, 「計算物理学と超並列計算機」, 日立 HAS 研究会 (1992年11月)
3. 岩崎 洋一, 「計算物理学と超並列計算機」, 理論天文研究会 (1992年12月)

#### 【平成5年度】

1. 岩崎 洋一, 「並列計算機による計算物理学」, 計算物理学研究センター研究会「並列計算機と計算物理学」 (1993年9月, 筑波大学, つくば)

2. 岩崎 洋一, 「超並列計算機 CP-PACS」, 日本物理学会第 49 回年会 (1994 年 3 月, 福岡工業大学、福岡)

【平成 6 年度】

1. 吉江 友照, 「CP-PACS による計算物理学 計算性能評価」筑波大学計算物理学研究センター研究会「並列計算機と計算物理学」(1994 年 12 月, 筑波大学, つくば)
2. 青木 慎也, 「CP-PACS による計算物理学 素粒子物理研究計画」筑波大学計算物理学研究センター研究会「並列計算機と計算物理学」(1994 年 12 月, 筑波大学, つくば)
3. 吉江 友照, 「超並列計算機 CP-PACS」スーパーコンピュータ高度利用のための研究会 (1995 年 3 月, 高エネルギー物理学研究所、つくば)

【平成 7 年度】

1. 金谷 和至, 「CP-PACS プロジェクト」KEK スーパーコンピュータ ワークショップ「並列計算機による計算物理の進展」(1996 年 2 月, KEK, Tsukuba, Japan)
2. 岩崎 洋一, 「CP-PACS project」筑波大学計算物理学研究センター研究会「CCP Workshop on Lattice Field Theories '96」(1996 年 3 月, 筑波大学, つくば)
3. 吉江 友照, 「Light Hadron Spectrum」筑波大学計算物理学研究センター研究会「CCP Workshop on Lattice Field Theories '96」(1996 年 3 月, 筑波大学, つくば)
4. 吉江 友照, 「Hadron Spectrum and Meson Decay Constants with Clover Fermion Action」日本物理学会第 51 回年会 (1996 年 3 月, 金沢大学、金沢)

【平成 8 年度】

1. 吉江 友照, 「Quenched QCD Hadron Spectrum on CP-PACS」日本物理学会第 52 回年会 (1997 年 3 月, 名城大学、名古屋)
2. 金児 隆志, 「Numerical simulations in lattice QCD with improved actions on CP-PACS」日本物理学会第 52 回年会 (1997 年 3 月, 名城大学、名古屋)
3. 吉江 友照, 「Lattice QCD ハドロンスペクトロスコピー計算」筑波大学計算物理学研究センター研究会「並列計算機による物理学」(1997 年 3 月, CCP, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Japan)
4. 金谷 和至, 「CP-PACS による full QCD 計算」筑波大学計算物理学研究センター研究会「並列計算機による物理学」(1997 年 3 月, CCP, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Japan)

#### 【平成9年度】

1. Burkhalter, Rudolf, “Full QCD hadron spectroscopy – A comparison of improved actions” 日本物理学会 (1997年9月, 東京都立大学、八王子)
2. 吉江 友照, 「CP-PACS results for the quenched QCD spectrum with the Wilson quark action」 日本物理学会 (1997年9月, 東京都立大学、八王子)
3. 金児 隆志, 「Static quark potential in full QCD with improved actions」 日本物理学会 (1997年9月, 東京都立大学、八王子)
4. Burkhalter, Rudolf, 「Full QCD hadron spectroscopy from high statistics simulations on CP-PACS」 日本物理学会第53回年会 (1998年3月, 東邦大学・日本大学、船橋)
5. 吉江 友照, 「クエンチ格子QCDの軽いハドロン質量の連続極限」 日本物理学会第53回年会 (1998年3月, 東邦大学・日本大学、船橋)
6. 吉江 友照, 「CP-PACSにおける格子QCDプログラムの高速化」 筑波大学計算物理学研究センター研究会「計算物理学における超大型シミュレーションの技法」 (1998年3月, CCP, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Japan)
7. 金児 隆志, 「Full QCD static quark potential from high statistics simulations on CP-PACS」 日本物理学会第53回年会 (1998年3月, 東邦大学・日本大学、船橋)

#### 【平成10年度】

1. Burkhalter, Rudolf, “Dynamical quark effects on the light hadron spectrum” 日本物理学会 (1998年10月, 秋田大学、秋田)
2. 岡本 昌高, 「くりこみ群により改良された作用」を用いた Pure SU(3) gauge 系の熱力学の数値シミュレーション」 日本物理学会 (1998年10月, 秋田大学、秋田)
3. 金児 隆志, 「Dynamical quark effects on the static quark potential」 日本物理学会 (1998年10月, 秋田大学、秋田)
4. Burkhalter, Rudolf, 「Lattice QCD Results from CP-PACS」 筑波大学計算物理学研究センター研究会「CP-PACSによる計算物理学」 (1999年2月, 筑波大学計算物理学研究センター、つくば)
5. Burkhalter, Rudolf, 「Full QCD light hadron spectrum on CP-PACS」 日本物理学会 (1999年3月, 広島大学、東広島)

6. Burkhalter, Rudolf, “Lattice QCD Results from CP-PACS”, Sapporo Winter School in Niseko '99 (1999 年 3 月, 北海道)
7. 岡本 昌高, 「Pure SU(3) gluon thermodynamics with RG-improved action」日本物理学会 (1999 年 3 月, 広島大学、東広島)
8. 金児 隆志, 「Sea quark effects on the hadron spectrum」日本物理学会 (1999 年 3 月, 広島大学、東広島)
9. 江尻 信司, 「clover クォーク作用によるフレーバー数 2 の full QCD 熱力学」日本物理学会 (1999 年 3 月, 広島大学、東広島)

### 9.3.3 学術誌及び国際会議発表論文 (宇宙物理学)

#### 【平成 8 年度】

1. M. Umemura, “Radiation Hydrodynamics on a Massively Parallel Supercomputer”, *Numerical Astrophysics Using Supercomputers* (ed. Kohji Tomisaka), 2-7 (1996)
2. T. Nakamoto, “Radiation Hydrodynamics for Star and Protoplanetary Disk Formation”, *Numerical Astrophysics Using Supercomputers* (ed. Kohji Tomisaka), 11-13 (1996)

#### 【平成 9 年度】

1. M. Umemura and T. Nakamoto, “輻射流体力学による宇宙物理”, *日本流体力学会誌「ながれ」*, **15**, No. 6, 457-461 (1997)
2. T. Nakamoto, H. Susa, and M. Umemura, “Photoionization of a Clumpy Universe”, in *International Symposium on Supercomputing, New Horizon of Computational Science*, in press (1997)
3. T. Nakamoto, “Three-Dimensional Radiation Hydrodynamics”, *Numerical Astrophysics Using Supercomputers II* (ed. Kohji Tomisaka), 41-43 (1997)

#### 【平成 10 年度】

1. T. Nakamoto, “多次元輻射輸送計算コードの超並列計算機への実装: Multiple Wave Front 法”, *情報処理学会研究報告*, **98-HPC-74**, 43-48 (1998)
2. M. Umemura, “高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学: 3. 輻射流体力学 – 宇宙”, *Journal of Plasma and Fusion Research*, **74**, 1267-1274 (1998)

3. M. Umemura, T. Nakamoto, and H. Susa, “3D Radiative Transfer Calculations on the Cosmic Reionization”, *Numerical Astrophysics 1998*, eds. S. M. Miyama, K. Tomisaka, & T. Hanawa (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), 43-44 (1998)
4. T. Nakamoto, “A 3-D Radiative Transfer Solver using a Massively Parallel Computer”, *Numerical Astrophysics 1998*, eds. S. M. Miyama, K. Tomisaka, & T. Hanawa (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), 375-378 (1998)

**【平成 11 年度】**

1. T. Nakamoto, M. Umemura, and H. Susa, “The Effects of Radiative Transfer on the Reionization of an Inhomogeneous Universe”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, submitted (1999)
2. N. Kikuchi, T. Nakamoto, and K. Ogochi, “Disk-Halo Model for Flat Spectrum T Tauri Stars”, *Publ. Astron. Soc. Japan Letters*, submitted (1999)

**9.3.4 国内学会・研究会口頭発表（宇宙物理学）**

**【平成 8 年度】**

1. 梅村雅之, 「宇宙流体力学による可視化」情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会（1996年5月）
2. 梅村雅之, 「CP-PACS による計算物理学：輻射流体力学計算」筑波大学計算物理学研究センター研究会「並列計算機による物理学」（1997年3月）

**【平成 9 年度】**

1. 須佐元, 中本泰史, 梅村雅之, 「Photoionization of a Clumpy Universe (I)」日本天文学会 (1997年10月, 宇都宮大学)
2. 中本泰史, 須佐元, 梅村雅之, 「Photoionization of a Clumpy Universe (II)」日本天文学会 (1997年10月, 宇都宮大学)
3. 梅村雅之, 中本泰史, 須佐元, 「A Simulation on QSO Lyman Alpha Absorbers by 3D Radiative Transfer」すばる HDS 研究会 '97 「ファーストライトに向けて」 (1997年11月, 国立天文台三鷹)
4. 中本泰史, 梅村雅之, 須佐元, 「Photoionization of a Clumpy Universe (III)」日本天文学会 (1998年3月, 都立大学)

5. 中本泰史, 「多次元輻射輸送方程式の解法」 「計算物理学における超大型シミュレーションの技法」 研究会 (1998 年 3 月, 筑波大学計算物理学研究センター)

【平成 10 年度】

1. 梅村雅之, 「宇宙物理学における輻射流体力学の現状と課題」 計算物理学研究センター研究会「輻射輸送・輻射流体力学」 (1998 年 6 月, 筑波大学計算物理学研究センター)
2. 中本泰史, 「多次元輻射輸送方程式の解法」 計算物理学研究センター研究会「輻射輸送・輻射流体力学」 (1998 年 6 月, 筑波大学計算物理学研究センター)
3. 梅村雅之, 中本泰史, 須佐元, 「3D Radiative Transfer Calculations on the Ly $\alpha$  Absorbers」 日本天文学会 (1998 年 10 月, 山形大学)
4. 中本泰史, 梅村雅之, 「多次元輻射輸送方程式の新しい数値解法」 日本天文学会 (1998 年 10 月, 山形大学)
5. 中本泰史, 梅村雅之, 須佐元, 「非一様宇宙における再電離」 基研研究会「宇宙における第一世代天体形成」 (1999 年 2 月, 京都大学基礎物理学研究所)
6. 梅村雅之, 中本泰史, 須佐元, 「宇宙再電離と高赤方偏移 QSO 吸収線系」 基研研究会「宇宙における第一世代天体形成」 (1999 年 2 月, 京都大学基礎物理学研究所)
7. 梅村雅之, 「宇宙再電離と銀河形成過程」 RESCEU 「初期宇宙の探究」 研究会 (1999 年 2 月, 志賀高原ホテルサンルート)

## 9.4 未来開拓研究

### 9.4.1 年次報告

1. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」1997-1998 報告書, pp 36-47 (1998)
2. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」1998-1999 報告書, pp 9-20 (1999)

### 9.4.2 並列入出力・並列可視化

#### 【平成 10 年度】

1. 沼寿隆, 坂井修一, 朴泰祐, 「相互結合網におけるバッファ制御方式の改良」, 情報処理学会研究報告, ARCH-130-16, 91-96 (1998).

#### 【平成 11 年度】

1. M. Matsubara, H. Numa, T. Boku, “Commodity Network based Parallel I/O System for Massively Parallel Processors”, Proceedings of PDPTA '99, 2424-2429 (1999).
2. 松原 正純, 沼 寿隆, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 「コモディティネットワークに基づく並列入出力システム」, 情報処理学会研究会報告, 99-HPC-76, 1-6 (1999).
3. 沼 寿隆, 松原 正純, 板倉 憲一, 朴 泰祐, 「並列入出力機構を用いた可視化システムの提案」, 情報処理学会研究会報告, 99-HPC-77, 53-58 (1999).
4. 松原 正純, 沼 寿隆, 朴 泰祐, 中本 泰史, 梅村 雅之, 白川 友紀, 宇川 彰, 「超並列計算機のための Commodity Network に基づく並列入出力・可視化システム」, 電子情報通信学会計算機システム研究会信学技報, CPSY98-161, 81-88 (1999).
5. 富永憲一, 安永 守利, 「並列計算機 CP-PACS を用いた並列自己組織化マップによる顔認証システム」, 情報処理学会研究会研究報告, HPC-77-29, 167-172 (1999).

### 9.4.3 プロセッサ・メモリ融合型 LSI

#### 【平成 11 年度】

1. 近藤 正章, 坂井 修一, 朴 泰祐, 中村 宏, 「オンチップメモリを用いた HPC プロセッサの検討」, 情報処理学会研究会報告, 99-HPC-75, 85-90 (1999).

2. 近藤 正章, 坂井 修一, 朴 泰祐, 中村 宏, 「HPC 向けプロセッサのメモリ・アーキテクチャの基本構成」, 情報処理学会研究報告, 99-ARC-134, 1-6 (1999).
3. 近藤正章, 坂井修一, 朴泰祐, 中村宏, 「オンチップメモリを用いた HPC プロセッサの検討」, 情報処理学会研究報告, 99-HPC-132, 85-90 (1999).
4. 大河原英喜, 中村宏, 吉江友照, 金谷和至, 「ハイパフォーマンスコンピューティングに適したメモリ階層の検討」, 情報処理学会研究報告, ARC-133-10 (1999).
5. 大河原英喜, 中村宏, 吉江友照, 金谷和至, 「ハイパフォーマンスコンピューティングに適したメモリ階層の初期評価」, 並列処理シンポジウム JSPP'99 ポスター, 214 (1999).