13　計算物性物理学

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や、高温超伝導に関係した低次元強相関電子系の研究、さらには様々の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。センターでは、CP-PACS を用いた研究、さらには汎用スーパーコンピュータを用いた研究が行われた。

13.1　CP-PACS による物性物理学

CP-PACS を用いた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。第 4 章の表 15 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。

13.1.1　超高圧下の固体水素の相構造

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圧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 150GPa 以下で比較的高温の I 相、150GPa 以下で低温の II 相、150GPa 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。

13.1.2　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、電気的性質と磁気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。

13.1.3　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。

13.2 炭素系新物質の物性解明

量子力学の第一原理に立脚した非経験的電子状態計算 (密度汎関数理論) は、分子、固体の構造、電子物性を解明する上で強力な手段である。さらに、今日注目を集めている、ナノスケールマテリアルにおいては、そのサイズに起因する端、界面での量子効果が本質であり、量子力学的アプローチが必要不可欠となる。

岡田等は上述の手法を用いて、最近、合成が報告されている、フラーレン内包カーボンナノチューブ (炭素ピーポッド :peapod) の電子状態と安定構造の解明を行った [5] [図 26(a)]。その結果、C_{60} 内包に対して、最大のエネルギー利得を与えるチューブの半径は約 7Å であり、(10,10) と呼ばれる金属的ナノチューブの半径にほぼ一致することをあきらかにした [図 26(b)]。さらに、チューブ-C_{60} 間の相互作用、すなわち C_{60} のエネルギーギャップ近傍の π 状態と、ナノチューブの比較的高いエネルギーを持つ空状態 (自由電子的状態) 間の軌道混成により [6]、C_{60} の π バンドが低エネルギー側へシフトし、ピーポッドは伝導チャンネルに特異性のある 1 次元金属である事が明らかになった [図 26(c)]。

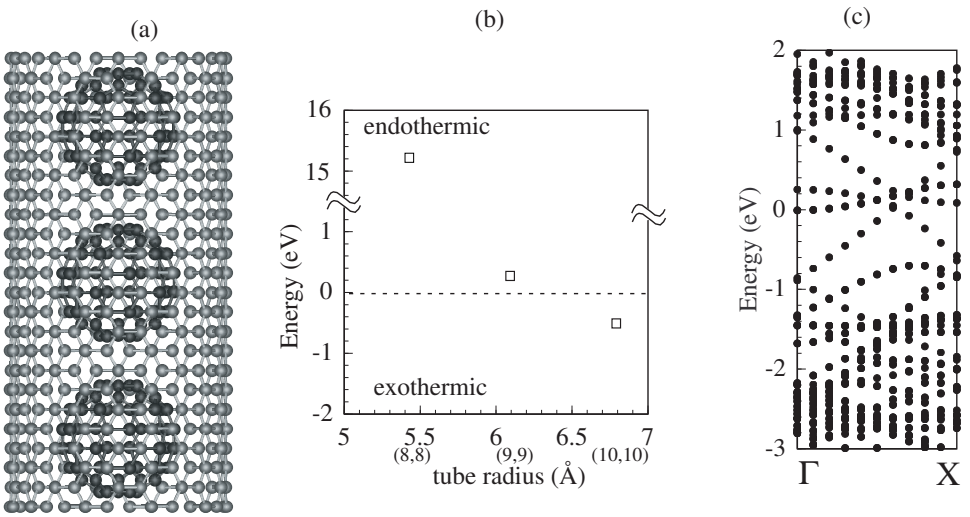


図 26: (a) 最適化された C_{60} 内包 (10,10) ナノチューブ。(b) 内包過程のエネルギー論:$(n, n)\mathrm{tube} + C_{60} \rightarrow C_{60}@(n, n) - \Delta E$. (c) C_{60} 内包 (10,10) ナノチューブのバンド構造。フェルミエネルギーが原点である。

13.3 炭素系新物質の物質設計

一方、非経験的電子状態計算を用いる事により、未だ合成がなされていない新規物質の物質設計と新機能発現の探索を計算機内において同時に行う事が可能である [3]。これまでに、岡田等は密度汎関数理論を用いて、有限幅のグラファイトリボンにおいて、その端に極在する π 状態が強磁性秩序を誘起する事示してきた。さらに h-BN とグラファイトの界面において、h-BN リボン、グラファイトリボン各々のエッジ状態が混成することにより、新たな界面局在状態、すなわち “Border state”が出現する事を報告した [4]。この border state は、一般的な界面状態と著しく異なり、そ

の界面局在性を逆格子空間のある限られた波数領域においてのみ示し、その領域において平坦なバンドを形成する。

ここでは、図 27 に示すような、一般の界面形状を持つ BNC ヘテロ構造の下で、border state に起因する新たな物性、特に系の磁気的性質に着目し、BNC ヘテロシートの電子状態計算を密度汎関数法理論を用いて明らかにした [5]。その結果、B 原子数 ($N_{\rm B}$) と N 原子数 ($N_{\rm N}$) に差が出るような界面形状の下では、$\Delta = |N_{\rm B} - N_{\rm N}|$ 個の分散の小さなバンドがギャップ中に出現することが明らかになった。さらに、この分散の小さなバンドが同数の電子によって占有されている為、各スピンのバンドはスピン分極に起因する分裂をおこす。この事から、シートが何らかの磁気秩序を示している事が示唆される。そこで、各スピンに対する電荷分布の計算を行うと、図 27 に示すようにフェリ的な秩序が発現していることが明らかになった。また、分極する電子スピンの個数は平坦なバンドの個数と一致し、その Γ 点における波動関数の空間分布は、h-BN とグラファイトの界面に沿って 1 次元的に拡がっている事が明らかになった。すなわち、B, N, C と等の非磁性軽元素のみからなるヘテロ構造において、その界面ネットワークトポロジーの制御により磁気秩序を誘起させる事が可能である事を明らかにした。

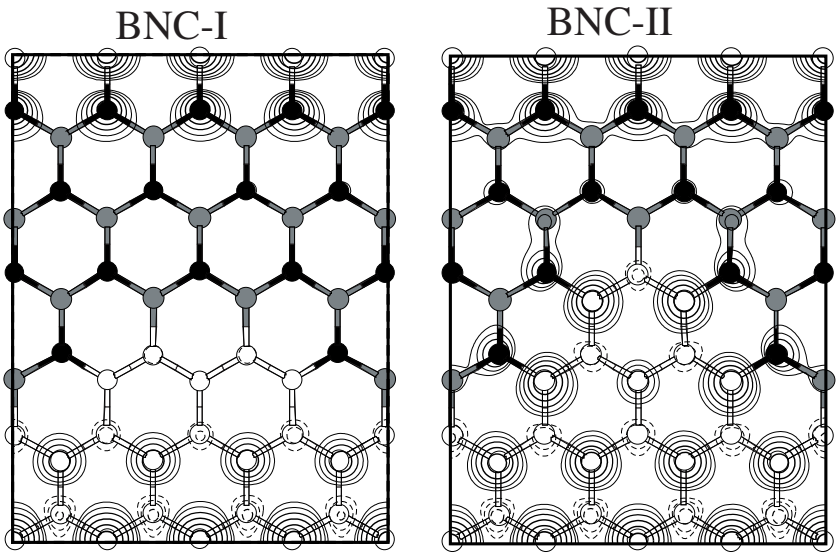


図 27: BNC ヘテロシート上のスピン密度の形状及び等高線。スピン密度の正負は実線あるいは点線で示されている。白、灰色、黒の丸は、それぞれ、C 原子、B 原子、N 原子。等高線はスピン密度が 2 倍 (あるいは半分) になる度に引いてあり、最低値は $5.27 \times 10^{-3} e$ / Å^3 である。

参考文献

[1] 大規模数値シミュレーションプロジェクト (平成 9-10 年度)「 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 (東京大学物性研究所) 他; H. Kitamura, S. Tsuneyuki, T. Ogitsu, T. Miyake, Nature **404** 259 (2000).

[2] 大規模数値シミュレーションプロジェクト (平成 9-10 年度)「 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 」横山寿敏 (東北大学大学院理学研究科) 他; K. Kobayashi

and H. Yokoyama, Physica B 259-261 606 (1999); S. Watanabe and H. Yokoyama, J. Phys. Soc. of Jpn. 68 vol.6 (1999).

[3] 大規模数値シミュレーションプロジェクト (平成 9-10 年度)「電子機構超伝導模型の計算物理的研究」; (平成 11 年度)「高温超伝導体の d-p 模型に関する計算物理的研究」; (平成 12 年度)「高温超伝導体の超伝導相図の研究」山地邦彦 (電子技術総合研究所) 他; K. Yamaji, T. Yanagisawa, S. Koike, J. Phys. and Chem. of Sol. 62 237 (2001); Physica B 284-288 415 (2000).

[4] 大規模数値シミュレーションプロジェクト (平成 9-10 年度及び平成 11 年度)「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」高山一 (東京大学物性研究所) 他; K. Kato, S. Todo, K. Harada, N. Kawashima, S. Miyashita, H. Takayama, Phys. Rev. Lett. 84 4204 (2000); S. Todo and K. Kato, Phys. Rev. Lett. 87 047203 (2001); C. Yasuda, S. Todo, K. Harada, N. Kawashima, S. Miyashita, H. Takayama, Phys. Rev. B 63 140415 (2001).

[5] S. Okada, S. Saito, and A. Oshiyama, Phys. Rev. Lett., **86**, 3835 (2001).

[6] S. Okada, A. Oshiyama, and S. Saito, Phys. Rev. B, **62** 7634 (2000).

[7] S. Okada, S. Saito, and A. Oshiyama, Phys. Rev. Lett., **83**, 1986 (1999).

[8] S. Okada, M. Igami, K. Nakada, and A. Oshiyama, Phys. Rev. B, **62**, 9896 (2000).

[9] S. Okada and A. Oshiyama, Phys. Rev. Lett., **87**, 146803 (2001).

14　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った．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 年度より平成 13 年度まで，5ヶ年計画で進められた．

14.1　プロジェクトの概要

計算科学の近年の飛躍的な発展の背景には，高速計算機の驚異的な発達がある．本プロジェクトでは，計算科学の基礎となる超並列計算機の計算性能を，プロジェクト発足当時の 1996 年時点での到達性能である約 1TFLOPS から，100TFLOPS レベルに引き上げるための開発研究を行った．

科学技術の対象とする物理系は，連続体と多粒子系，さらにはこれらの複合系として特徴付けられる．連続体は一般に近接相互作用に支配され，各種の演算が可能な汎用プロセッサによる超並列処理が必要である．一方，多粒子系は重力を代表とする普遍的な遠隔相互作用で支配され，専用プロセッサによる高速化が極めて有効である．従って，本研究では二つのサブプロジェクトを設け，それぞれ，連続体向けの超並列計算機と，多粒子系向けの超並列計算機の研究開発を推進することとした．

次世代の計算科学では，個々の連続体，多粒子系のみならず，両者が結合した複合系の超高速シミュレーションが重要な課題である．このような新たなシミュレーションを実現するために，本プロジェクトでは，最終年度において，上記二つのサブプロジェクトの研究開発を総合し，連続体向け汎用超並列計算機と多粒子系向け専用超並列計算機を結合した「ヘテロジニアス・マルチコンピュータ」を構築することを，最終目標とした．

「連続体向けの超並列計算機の開発」サブプロジェクトは，筑波大学計算物理学研究センターを拠点として実施し，高速化の基本となるメモリ混載型次世代プロセッサアーキテクチャSCIMA の開発とノード結合網の検討，柔軟で高速な並列入出力・可視化システム PAVEMENT の開発を行い，100TFLOPS クラスのピーク性能を実現する次世代汎用超並列計算機アーキテクチャを具体化した．

「多粒子系向けの超並列計算機の開発」サブプロジェクトは，東京大学において牧野淳一郎氏を中心として実施され，重力 / クーロン力専用計算機 GRAPE-6 を中心とする開発製作が行われた．この間，1999 年には GRAPE-5 により，2000 年には GRAPE-6 プロトタイプにより Gordon Bell 賞を受賞した．さらに，プロジェクト最終年度の平成 13 年 6 月には，ピーク性能 32TFLOPS，宇宙物理学の実用計算において 11.55TFLOPS の世界最高性能を実現し，同年 11 月の SC2001 国際会議において，2001 年 Gordon Bell 賞を受賞した．GRAPE-6 システムは，最終的に，ピーク性能 64TFLOPS を実現している (平成 14 年 3 月) .

本プロジェクト最終年度には，以上二つの技術開発を総合して，連続体向け超並列計算機 CP-PACS (0.6TFLOPS，1996 年 11 月「世界の高性能計算機トップ 500」リスト第一位) と多粒子系向けの専用超並列計算機 GRAPE-6 (8 ボード，8 TFLOPS を実装) を並列ネットワークで結合し，統合演算性能 8.6TFLOPS の強力なヘテロジニアス・マルチコンピュータの実用システムを構築した．さらに，このシステムを用いて，従来困難とされてきた，宇宙物理学における輻射と物質の相互作用を取り入れた銀河形成シミュレーションを実現し，ヘテロジニアス・マルチコン

ピュータ・コンセプトの実現性と有効性を実証した．

以下，本センターにおいて実施した連続体向け超並列計算機開発の基礎研究と HMCS の開発についてまとめる．本研究に関する文献リストは，第 14.8 節にまとめる．

14.2 研究目的

本プロジェクトにおいて研究目的としたところは以下のとおりである．

計算科学の最近の発展は，超並列計算機による計算機の能力の向上と強く結びついている．超並列計算機は，ベクトル型計算機と比較してそのアーキテクチャが多様であり，従って，問題を明確に設定することによって初めて，最先端の半導体技術を駆使した超高性能なシステムを実現できる．この点の好例は，計算科学者の主導により遂行された，先の CP-PACS プロジェクト，GRAPE プロジェクトに見ることができる．

一方，計算科学の分野を横断的に連続体，多粒子系に 2 分することが可能である．前者には，流体力学，格子量子色力学，後者には，多体天体系，高分子系などが含まれる．CP-PACS プロジェクトは連続体に焦点をあて，GRAPE プロジェクトは粒子系にターゲットを絞って，高性能な超並列計算機の開発に成功した．

本プロジェクトでは，超並列計算機の計算速度を，プロジェクト開始当時の約 1TFLOPS から 100 倍向上させるための研究開発を行った．計算科学の対象が，連続体と多粒子系に大別されることに対応して，二つのサブプロジェクトを設け，それぞれ，連続体向け超並列計算機，多粒子系向け超並列計算機の開発を行うと共に，高速かつ柔軟な入出力機構・可視化機構・マンマシンインターフェースを実現することを目標とした．さらに，今後の科学技術計算においては，連続体と多粒子系の自由度が複雑に結合した複合系の超高速シミュレーションが極めて重要な課題であることから，最終年度において，連続体向け超並列計算機と多粒子系向け超並列計算機を結合したヘテロジニアス・マルチコンピュータを構築し，連続体・多粒子系複合システムの超高速シミュレーションを実現することを，本プロジェクトの最終目標とした．

連続体向け超並列計算機開発においては，CP-PACS プロジェクトにおける知見を基に，超高速並列計算の課題である多量の計算データの並列入出力及び並列可視化のための規範となりうるシステムを実現し，さらに超並列計算機の演算性能そのものの飛躍的増大のために，有望な方法と考えられているプロセッサ・メモリ融合型 LSI の開発研究を行った．多粒子系向け超並列計算機開発においては，GRAPE プロジェクトの成果を基に，この種の問題に最適化した専用プロセッサを開発し，100TFLOPS 級の計算速度が達成可能であることを実証することを目標とした．さらに，再構成可能論理 (FPGA，Field Programmable Gate Array) により，より広い応用範囲を持つ多用途粒子系プロセッサの開発を試みた．

これらの技術開発を最終年度に総合し，柔軟な並列入出力・並列可視化装置を持ち連続体に適した超並列計算機と多粒子系の専用計算機を組み合わせ，多粒子・連続体混合系に適用可能なヘテロジニアス・マルチコンピュータ (Heterogeneous Multi-Computer；HMCS) を構築することを目指した．

このような統合的システムは，素粒子・宇宙物理学等の学術研究のみならず，地球規模の気候変動シミュレータ，大規模計算力学，物質科学解析，蛋白質立体構造解析等，今後社会的にますます重要度を増すと予想される問題の解決に有用な役割を果たすと期待され，また産業界が開発するコンピュータのプロトタイプともなり得ると考えられた．

14.3 研究計画

以上の研究目的達成のために立案した研究計画は以下のとおりである．

本プロジェクトは「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクトと「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクトにおいて実施する．

「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクトは，筑波大学計算物理学研究センターを中心に実施する．連続体を対象として， 高速な超並列計算機とその結果の解析・可視化を行う外部処理系の間を柔軟且つ高速に結ぶための並列入出力・並列可視化の研究と，演算性能そのものの高速化を目的とするプロセッサ・メモリ融合型 LSI の開発研究を行う．

前者については，計画前半に，小規模並列システムとグラフィック計算機クラスタを高速スイッチで結合した評価用システムを構築して結合実験・性能評価を行う．計画後半には，この基礎研究の知見に基づいて，超並列計算機と並列入出力・並列可視化装置の結合を行ない，これを評価すると共に，ソフトウェアの開発を進めて，実用に耐えるシステムを構築する．

プロセッサ・メモリ融合型 LSI の研究開発に関しては，計画前半は，基本方式の検討ためのシミュレータ開発・それを用いてのシミュレーション評価にあて，続いて後半には回路設計，コンパイラ開発を行う．

「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクトは東京大学において実施する．多粒子系を対象として，重力・クーロン相互作用に専用化した，ピーク性能 100 テラフロップス程度の専用プロセッサを開発するとともに，粒子系に専用化したアーキテクチャを持つが，一般の相互作用を計算するパイプラインを FPGA (再構成可能論理) で実現した多用途粒子系プロセッサを開発する．このプロセッサの性能は，応用にもよるがテラフロップス程度を目標とする．

以上の二つのサブプロジェクトの研究開発を総合し，計画最終年度には，並列入出力・並列可視化装置を持つ超並列計算機と多粒子系専用並列機，それらの中間的性格を持つ FPGA による多用途粒子系プロセッサを結合し，連続体・多粒子系をはじめそれらの混合系にたいしても高い性能を発揮するヘテロジニアス・マルチコンピュータを実現し，素粒子物理学に於ける場の理論シミュレーション，天体シミュレーション，分子動力学計算，粒子的アプローチでの流体計算などに応用する．

14.4 研究組織

本研究の組織を次に示す．役割分担及び所属等は平成 14 年 3 月 31 日時点のものである．

「次世代超並列計算機開発」プロジェクト

リーダー	岩崎 洋一	筑波大学副学長 (研究担当)	

「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト（筑波大学計算物理学研究センターにて実施）

コアメンバ	宇川 彰	筑波大学物理学系教授・計算物理学研究センター長	
コアメンバ	朴 泰祐	筑波大学電子・情報工学系助教授	
	梅村 雅之	筑波大学物理学系教授	(AIOV)
	金谷 和至	筑波大学物理学系教授	(AIOV)
	坂井 修一	東京大学大学院情報理工学系研究科教授 （平成 9 年度–11 年度コアメンバー）	(MOC)
	佐藤 三久	筑波大学電子・情報工学系教授	(IOV)
	須佐 元	筑波大学物理学系助手	(AIOV)
	白川 友紀	筑波大学機能工学系教授	(IOV)
	高橋 大介	筑波大学電子・情報工学系講師	(IOV)
	千葉 滋	東京工業大学大学院情報理工学研究科講師	(IOV)
	中村 宏	東京大学先端科学技術研究センター助教授	(MOC)
	中本 泰史	筑波大学物理学系助手	(AIOV)
	安永 守利	筑波大学電子・情報工学系助教授	(IOV)
	吉江 友照	筑波大学物理学系助教授	(AMOC)
	和田 耕一	筑波大学電子・情報工学系教授	(MOC)
	青木 慎也	筑波大学物理学系教授	(AMOC)
	大川 正典	広島大学大学院理学研究科教授	(AIOV)
	中澤 喜三郎	明星大学情報学部教授	(MOC)
	中田 育男	法政大学情報科学部教授	(IOV)
	星野 力	筑波大学機能工学系名誉教授	(IOV)
	山下 義行	佐賀大学理工学部知能情報システム学科教授	(IOV)
	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)
	板倉 憲一	日本学術振興会研究員（平成 11 年度–12 年度）	(IOV)
	Hugh Shanahan	日本学術振興会研究員（平成 9 年度–10 年度）	(AIOV)
	Thomas Manke	日本学術振興会研究員（平成 10 年度–12 年度）	(AIOV)
	Arifa Ali Khan	日本学術振興会研究員（平成 10 年度–12 年度）	(AIOV)
	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	

「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト（東京大学大学院理学系研究科にて実施）

コアメンバ	牧野 淳一郎	東京大学大学院理学系研究科助教授 重力 / クーロン力専用計算機開発
	蜂巣 泉	東京大学大学院総合文化研究科助教授 応用ソフトウェア開発
	泰地 真弘人	統計数理研究所助教授 プロセッサチップ論理設計
	船渡 陽子	東京大学大学院総合文化研究科助手 応用ソフトウェア開発
	福重 俊幸	東京大学大学院総合文化研究科助手 重力 / クーロン力専用計算機開発，FPGA システム開発
	小久保 英一郎	国立天文台助手 応用ソフトウェア開発
	高橋 広治	日本学術振興会研究員（ポストドクター） 応用ソフトウェア開発

14.5 「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト

連続体向け超並列計算機の開発における研究成果は大きく以下の 2 つの項目に分かれる．

- オンチップメモリを用いた高性能プロセッサアーキテクチャ SCIMA (Software Controlled Integrated Memory Architecture) の開発とそれに基づく超並列計算機の基本設計
- コモディティネットワークに基づく並列入出力機構及び並列可視化システム PAVEMENT (Parallel I/O and Visualization Environment) の開発及び実装

以下，それぞれについて述べる．

14.5.1 オンチップメモリを用いた高性能プロセッサアーキテクチャSCIMA の開発

次世代連続体向け超並列計算機における要素プロセッサにおいて最も重要な要件は，近年ますます拡大しつつあるプロセッサ速度とメモリ速度のギャップ，いわゆる memory wall problem をいかにして解決するかである．特に超並列計算機の構成を考慮すると，単体ノードプロセッサに従来のハードウェアベクトル処理方式をそのまま適用することは，ハードウェア量と実装密度の両面で不可能に近い．従って，限られたメモリバンド幅をいかに有効利用し，プロセッサチップ内でのデータ再利用性を上げられるかが重要なポイントとなる．オンチップメモリの有効利用という観点から見ると，キャッシュのような比較的単純なアルゴリズムによって自動的に制御することには性能の限界があり，これをよりアグレッシブに制御し，さらにそのデータにとって最も効率的なサイズ及びアクセス方法でオンチップ・オフチップのトラフィックを制御することが必要となる．

我々は以上のコンセプトに基づき，ソフトウェア制御可能なオンチップメモリに基づく新しいプロセッサアーキテクチャSCIMA (Software Controlled Integrated Memory Architecture) を提案し，その特性と性能向上を計算機シミュレーションによって確認した．さらに，実際のプロセッサチップ設計上で最も重要になるデータパスとキャッシュを含むオンチップメモリ制御系に重点を置いたハードウェア記述レベルでの設計を行い，SCIMA における新しいデータ処理パスを追加しても，全体のクロック周波数 (クリティカルパス) への影響がほとんどなく，各種アプリケーションにおける実質的な性能を大幅に向上させることが可能であることを示した．以下，SCIMA に関するサブテーマ及び連続体向け次世代超並列計算機のあるべき姿に関して述べる．

SCIMA アーキテクチャの概要　SCIMA の構成図を図 14.5.1 に示す．シングルチップ内にロジック部および 1 次キャッシュだけでなく，アドレス指定可能な高速なオンチップメモリ (以下，SCM: Software Controlled Memory) を搭載する．一般の科学技術計算における大容量のデータセットに対応するため，チップ外にもメインメモリとして DRAM を配置する．

SCM と従来のキャッシュとの相違点は，データアロケーションとリプレースメントの制御がキャッシュでは自動的に行なわれるのに対し，SCM ではその制御をソフトウェアで明示的に行える点である．ハードウェア制御のキャッシュでは，ユーザが意図しないデータアロケーション，リプレースメントによるキャッシュミスが発生することによる性能低下が問題となる．SCM を採用する狙いは，多くの科学技術計算がデータアクセスに規則性を持つことを利用し，ユーザ (あるいはコンパイラ) が明示的にデータアロケーションとリプレースメントを行なうことでこの問題を回避することである．

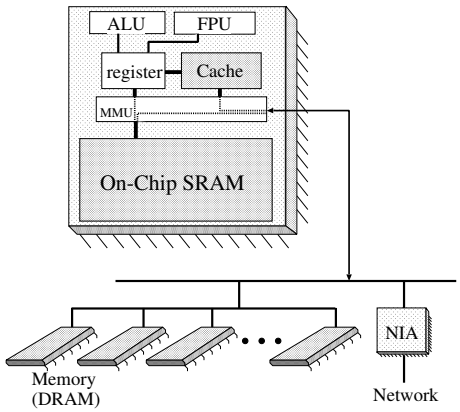


図 28: SCIMA のブロックダイアグラム

SCIMA では，従来のアーキテクチャに対して，メモリ階層に関して以下の拡張を行う．まず，浮動小数点レジスタを増やす．これは，集積度の向上による搭載可能演算器の増加と，キャッシュ / SCM が提供する高いチップ内バンド幅を活用するためである．オンチップメモリ上でのデータアロケーションとリプレースメントの制御をソフトウェアに解放するため，SCM は論理アドレス空間上に定義する．但し SCM 領域は uncacheable とするので，キャッシュとの包含関係は生じない．

上記のメモリ階層の拡張を有効に利用するため以下の命令を追加する．

- `load-multiple`, `store-multiple`: SCM の連続アドレス上と，連続するレジスタ間で複数データの転送を行う命令．オンチップメモリとレジスタの間に 1000 bit 程度のデータパスを設けることは将来的には可能と考えられるため，この命令の転送サイズとしては 2，4，8，16 double-word 程度を想定している．

- `page-load`, `page-store`: オフチップメモリと SCM 間でデータ転送を行なう命令．データ転送はページ単位で行う．この転送とチップ内部の計算処理とを重畳化することで，オフチップメモリアクセスのレーテンシを隠蔽する．また，ブロック幅とストライド幅を指定するブロックストライド転送の機能を付け加える．この機能により，オフチップメモリ上の不連続領域のデータをパッキングして，SCM に持ってくることを可能にする．

SCIMA では 2 種類のデータアクセス方法が提供される．すなわち，(1) レジスタ ↔ SCM ↔ オフチップメモリと，(2) レジスタ ↔ キャッシュ ↔ オフチップメモリ，である．SCIMA のデータ処理性能が最も効果的に現れるのは，アプリケーションが定型的なループ処理及びデータアクセスパターンを持つ場合であり，データアクセス領域の形状に応じてコンパイラが適当な page-load/page-store 命令を生成し，ループ処理に応じてこれを発行する．

我々が先に開発した超並列計算機 CP-PACS では，擬似ベクトル命令と呼ばれる，メモリからキャッシュをバイパスして直接レジスタにデータをロード / ストアする命令が用意されていた．これらの命令はメモリアクセスの遅延時間を隠蔽するものの，チップ内のデータ局所性はレジスタに限られ，メモリスループットの節約には結びつかなかった．SCIMA ではデータのパターンが連続 / ストライドのどちらの場合でも，SCM のデータ局所性を生かし，メモリアクセス回数及びデー

タ転送量を最小限に抑えることが可能である．このようにして，データ転送粒度及びデータ転送量の両者を最適化することが SCIMA の目的である．

ただし，アプリケーションによっては，データアクセスパターンが読み切れず，これらの最適化が難しい場合も存在する．このような場合に備え，SCIMA では従来型のキャッシュも用意されている．我々は，オンチップ上で SCM 領域とキャッシュ領域を統合的に扱い，アプリケーションによって両者の容量バランスを調整する仕組みも提案している．

RTL 設計　SCIMA は既存のスカラプロセッサへの拡張として設計されている．拡張は SCM の実装といくつかの新命令の追加のみであるが，この拡張がクロック周波数等に与える影響は調べなければならない．このため，我々は一般的なスカラプロセッサと，これを元にした SCIMA プロセッサの両者を設計し，比較した．対象としたプロセッサは MIPS R10000 マイクロプロセッサである．ただし，R10000 全体の設計を行うことは極めて難しく，またこの作業は本研究の目的に必ずしも合致しない．ここで重要なのは，データアクセス系に対してどのようなペナルティが生じるかということである．よって，我々は設計対象をこの部分に絞り，元のプロセッサのキャッシュ制御系と，SCIMA における SCM 及びキャッシュ制御系に着目し，この部分の設計を行い比較検討した．

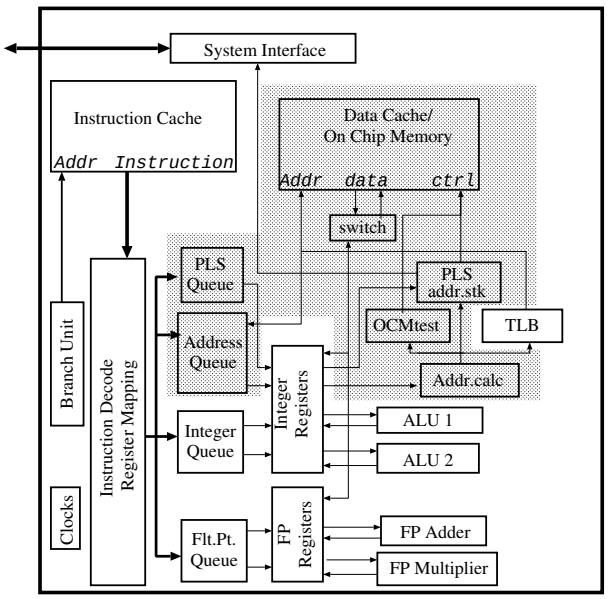


図 29: SCIMA におけるデータパス構造

図 29 に SCIMA のデータパス構造を示す．ここで，影付きの部分が元の R10000 に対して SCIMA で変更を加えた部分である．我々はこの図に示される部分全体に対し，R10000 と SCIMA の両者について，Verilog-HDL による RTL (Register Transfer Level) 設計を行った．その後，デザインコンパイラによってこの設計を合成した．合成には ROHM 社の $0.35\mu m$ CMOS テクノロジを用いた．

これらの設計を元に，クリティカルパスの遅延時間を予測した．クリティカルパスの場所には 2 つの可能性がある．1 つは，ある選択された命令に引き続き，実効可能な命令をキューから選択

表 34: 面積・遅延の評価 (速度最優先)

遅延 [ns]	R10000 モデル	SCIMA モデル
命令選択回路 & issue	6.11	6.48
キャッシュウェイ選択	3.31	3.50
(キャッシュアレイ自身のアクセスは含まず)		

する部分である．もう 1 つは，キャッシュアレイのアクセスに基づく，キャッシュのウェイ選択ロジックである．表 34 に R10000 及び SCIMA における，各パスの予測遅延時間を示す．この表からわかるように，もしキャッシュアレイアクセスの遅延が 2.8ns 以上であれば，キャッシュアクセスパスがクリティカルになる．どちらの場合にしても，SCIMA におけるクロック周波数の低下は 5%以内であり，これは SCIMA がもたらす同一クロックレベルでの性能向上に比べると無視し得る小さな値である．

SCM 利用の最適化　我々は SCM 領域を最大限に利用するための最適化手法を提案し，この方針に基づく基本的な性能評価をシミュレータによって行った．データ配列は，それらへのアクセスパターンに応じて分類される．図 30 に，SCM を有効利用するための戦略を示す．この図は，データアクセスの連続性 (連続，ストライド，不規則) と，データの再利用性 (再利用可能，再利用不能) の組み合わせに基づき，各々どのような方法を用いるべきかをまとめたものである．

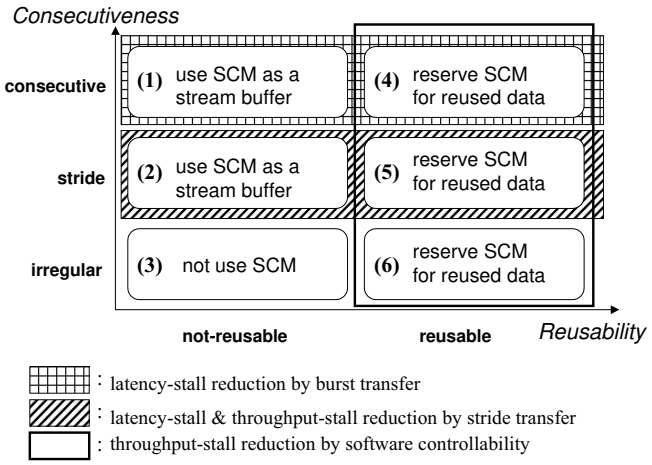
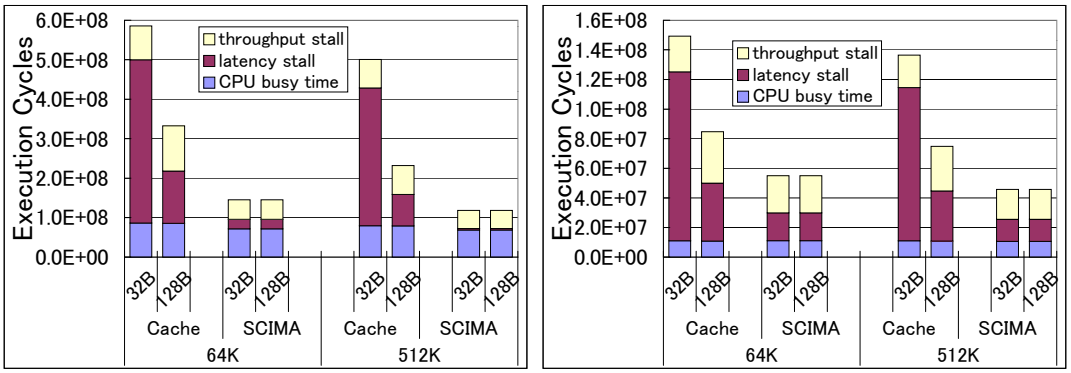


図 30: SCM 利用のための戦略

これらの戦略のうち，(1) と (2) はそれ以外に比べ特に効果的である．このような再利用不能な配列を疎粒度で転送することは，レイテンシに基づくストールを短縮するのに効果的である．よって，我々は戦略 (1) と (2) により高い優先度を置く．すなわち，SCIMA 最適化を適用するループ単位の中で，その中でアクセスされる様々なデータ集合に対し，まず (1), (2) に当てはまるものを選び，各々の戦略を適用する．その後，再利用可能な配列に対して，残りの SCM 領域を戦略 (4),(5),(6) に基づき利用する．

これらの効果を実際に解析するため，2 つのプログラムを用いたシミュレーションによる性能評価を行った．1 つは NAS Parallel Benchmarks の kernel FT (FFT 処理) であり，もう 1 つは QCD (Quantum ChromoDynamics) アプリケーションである．提案している戦略の有効性を確認するために，我々はキャッシュに基づく通常のプロセッサと，SCIMA の結果を比較した．なお，ループタイリングやループ交換のような，より高いレベルでの最適化は両者に対して予め適応済みとした．SCIMA に関しては，提案している戦略を手作業で適用した．性能評価の仮定は以下の通りである：オンチップ上のメモリ総容量は 64KB または 512KB，キャッシュラインサイズは 32B または 128B，キャッシュ/SCM のアクセススループットは 8B/cycle，オフチップメモリのアクセススループットは 1B/cycle，オフチップメモリのアクセス遅延時間は 160 cycle，キャッシュモデルにおいてはキャッシュプリフェッチを可能とした．

図 31 に各プログラム実行に要するサイクル数を示す．サイクルは，CPU ビジー時間，レイテンシの大きさに基づくストール，スループット不足に基づくストールの 3 つのカテゴリに細分化され，それぞれ T_b, T_l, T_t と示されている．この図からわかる通り，全ての仮定の組み合わせにおいて，SCIMA は両者のプログラムにおいてキャッシュモデルよりも高い性能を示す．これは，SCIMA がオフチップメモリへのトラフィックを削減しつつ，さらにレイテンシに基づくストールを劇的に縮めていることによる．この結果より，提案された戦略は極めて有効であることが示された．



(a) FT (b) QCD

図 31: 性能評価結果

SCIMA 向けコンパイラ　SCIMA プロセッサにおけるプログラムでは，オフチップメモリと SCM 間でのデータ転送を明示的に制御する必要がある．他の最新のプロセッサテクノロジと同様，この制御命令はコンパイラによって生成される必要がある．しかし，プログラム上でどのデータをどのタイミングで転送すべきかを完全に自動的に検出することは極めて難しい．この問題に対する研究基盤を提供するために，我々は SCIMA 用指示文 (directive) に対応した Fortran コンパイラを作成した．これらの指示文により，プログラマはデータ転送の対象とタイミングを簡単に指示できる．このコンパイラは，指示文を処理しつつ Fortran を C に変換するフロントエンド部と，任意のレジスタ数や SCM 容量に対応したアセンブリコードを生成するバックエンド部からなる．

フロントエンドコンパイラが対象とする指示文は SCIMA-directive と呼ばれる．このコンパイラの設計目的は，プログラマに細粒度な制御手段を提供しつつ，適度な抽象化を可能にすることである．これにより，より汎用なアルゴリズムに対するコンパイラのデータ処理最適化に関する

研究支援環境が提供される．

SCIMA-directive は，配列要素を SCM に動的にマッピングする際に用いられる．このマッピングはユーザからは隠蔽され，ユーザは SCM 上の要素に対して明示的なアクセスを記述する必要はない．コンパイラは Fortran から C に変換する際に，これらの SCM にマップされた領域への通常の配列アクセスを SCM へのそれに自動的に置き換える．

SCIMA-directive の使い方の例を以下に示す．

```
double precision sum
double precision a(N*2,N*2)
!$scm begin (a, N, N, 0, 0)
!$scm load (a, N + 1, N + 1, N, N)
sum = 0.0
do i = N + 1, N * 2
    sum = sum + a(i, i)
enddo
!$scm end (a)
```

!$scm で始まる行は SCIMA-directive である．begin と end で囲まれた領域において，配列 a に対する全てのアクセスは SCM へのアクセスに置き換えられる．load は，プログラムの実行がこの SCIMA-directive で示された部分に到達した際に，SCM にコピーされるべき配列要素を示す．

このフロントエンドコンパイラは新情報処理開発機構 (RWCP) で開発された Omni Compiler を元に作られている．生成された C のコードは通常の MIPS コンパイラと SCIMA 用バックエンドコンパイラのどちらでもコンパイル可能となっている．これにより，通常の MIPS 系プロセッサ用に最適化されたコードと SCIMA 用コードの比較も可能となっている．

現在のバックエンドコンパイラは SGI IRIX N32 ABI に基づき，MIPS R10000 命令セットを生成するように作られている．このコンパイラは，フロントエンドコンパイラの SCIMA-directive 処理に応じ，SCIMA 用特殊命令 (page-load/page-store) を生成する．また，任意の数のレジスタに対応した最適化コードが生成されるため，SCIMA プロセッサの実装のためのアーキテクチャ上の最適なレジスタ数を評価するために用いることができる．また，他の最適化コンパイラと同様，以下の処理における最適化が実装されている．

- common subexpression elimination, constant-folding, constant propagation
- loop invariant elimination, induction variable elimination, operator-strength reduction
- register coloring によるグローバルレジスタ割り当て

これらのコンパイラを用いることにより，SCIMA-directive に基づくコード最適化の研究，あるいはそれ自体を自動化するためのコンパイラの研究を推進可能である．また，SCIMA プロセッサアーキテクチャの SCM やレジスタの構成を最適化する研究にも用いることができる．

SCIMA の SMP 化　近い将来のプロセッサ性能を想定すると，100TFLOPS オーダーの演算性能を持つ超並列計算機を実装する際，利用するプロセッサ台数は 1 万台のオーダーに達する．これに対し，一般的に，ネットワークに接続可能なノード数の限界としては，接続ポートやスイッチ等のハードウェア量の制約から，数千ノード程度が限界と考えられている．従って，何らかの形で複数のプロセッサを 1 つのノードにまとめ，ノード単位でネットワークへの接続を行うことが必須となる．

我々はこのような状況の下，複数の SCIMA プロセッサを SMP (Symmetric Multi-Processor) 結合したものをノードとし，これをネットワークへの接続単位とすることを想定した．SMP 化された場合の SCIMA プロセッサの性能を評価するため，我々は SCIMA プロセッサ用クロックレベルシミュレータを改造し，任意の way 数での SMP 構成の性能評価を行えるシミュレータを開発した．なお，このシミュレータ自身もマルチスレッド化されており，並列ワークステーション上で高速実行可能になっている．

簡単な matrix-by-matrix 乗算プログラム及び NAS Parallel Benchmark kernel-CG 等を対象に，2-way から 8-way 程度の SCIMA プロセッサ SMP 構成についてシミュレーションを行った．結果として，SCIMA はレイテンシに基づくストールを大幅に低減できることから，SMP 構成にした場合に，より一層キャッシュモデルよりも性能向上が大きいことが確認された．

連続体向け次世代超並列計算機の構成　次世代の高性能 MPP (Massively Parallel Processor) においては，その膨大な計算性能をサポートするために，full-optical 結合によるネットワークが必要になると考えられる．しかし，現状ではこのような光結合のスイッチは極めて高価であり，そのスイッチング速度も，光リンクがもたらすバンド幅を十分に生かすような速度には達していない．この問題に対する 1 つの解は，適当なクラスタ構成を導入し，完全な光結合と，光・電気を取り混ぜた結合 (リンクに光を，スイッチに電気を用いる) とを階層的に混在させることである．クラスタ間結合には非常に高いバンド幅を提供しつつやや遅延時間の大きい光リンク及びスイッチを用い，クラスタ内の比較的短いメッセージ通信には従来通りの光・電気を利用したネットワークを用いる．クラスタ内のノード数に比べ，クラスタ数をかなり小さく設定することにより，クラスタ内から他の同一クラスタに転送される短いメッセージの集合はマージされ，光結合を効果的に利用可能な長いメッセージとして転送することが可能になる．このようなクラスタ構成は，full-optical ネットワークで問題となるバンド幅とレイテンシのトレードオフに対する 1 つの解となる．

例えば，2048 ノードを持つ MPP システムは，各々が 256 ノードを包含する 8 つのクラスタの集合として構成可能である．クラスタ内ネットワークには例えば 16×16 の 2 次元ハイパクロスバ網等が適用可能である．クラスタ間ネットワークは光による完全クロスバを用いる．我々はこのような光・電気ハイブリッド型ネットワークの性能評価を簡単に行うことができるような特殊なシミュレータを開発した．このシミュレータではネットワークを構成するリンク及びスイッチのバンド幅とレイテンシを任意にプログラム可能であり，様々な高性能ハイブリッドネットワークの評価を，ランダム転送のような単純モデルや，実アプリケーションのデータ転送トレースデータを対象にして実行することが可能である．

このようなクラスタ構成を持つネットワーク性能の 1 つの指標は，クラスタ内トラフィックがどの程度外に漏れ出したところでクラスタ間ネットワークが飽和するかという，ネットワークの耐性を調べることによって得られる．先述の 2048 ノードを持つシステム構成において，クラスタ内ネットワークのバンド幅とクラスタ間ネットワークのそれの比が 1:100 の場合をシミュレーションした結果，ランダム転送においては全トラフィックの約 10%がクラスタ間に出て行くまでは，平均スループットはほとんど低下せずにすむ事が明らかになった．この値は多くの科学技術シミュレーションに適用可能な値である．図 32 は，このハイブリッド型ネットワークにおけるクラスタ間トラフィックの割合と平均スループットの関係を，数種類のノード間転送メッセージ長についてシミュレータにより評価した結果である．

このネットワークを拡張することにより，SCIMA プロセッサに基づく数千 ~ 数万プロセッサ規模の MPP の設計が可能である．8 GFLOPS の SCIMA プロセッサを 4-way SMP 結合することに

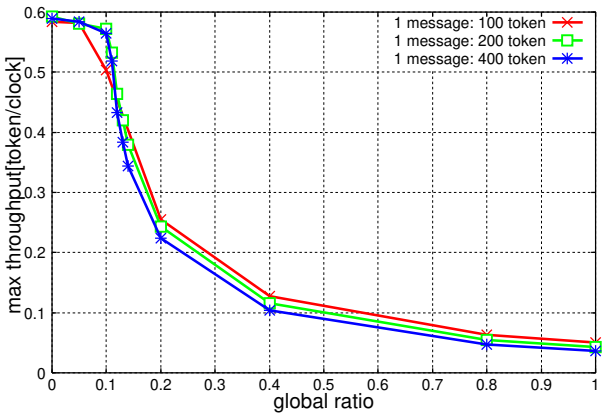


図 32: 光・電気ハイブリッド型階層ネットワークの性能

よってノードを構築し，クラスタ内 (16×16) プロセッサ，クラスタ数 16 の光・電気ハイブリッドネットワークを構築することにより，4096 台の SCIMA-SMP ノードからなるピーク演算性能 131 TFLOPS のシステムが実現できる．このハイブリッドネットワーク構成が，100TFLOPS オーダーの性能を持つ SCIMA ベースシステムの典型的な姿である．

14.5.2 並列入出力・並列可視化システム PAVEMENT

本サブテーマでは，次世代超並列計算機の利用形態が，従来の MPP のようなバックエンド計算のみに閉じず，その周辺環境との密接な相互処理に展開されることを想定し，コモディティベースの並列入出力システムとそれを用いた各種応用システムに関する研究を行った．このための具体的な実験システムとして，100base-TX FastEthernet を多数用いた並列ネットワーク実験プラットフォームを構築し，この上に超並列計算機 CP-PACS をはじめ，並列ワークステーション，クラスタシステム等を接続し，拡張性のある並列チャネルを提供するシステムソフトウェアによって制御するシステムを開発した．このシステムを PAVEMENT (Parallel I/O and Visualization Environment) と総称する．以下，PAVEMENT の各要素技術について述べる．

並列入出力システム PAVEMENT/PIO　次世代超並列計算機において，外部とのデータ交換を行う入出力機構の持つ役割は重要である．例えば現在のスーパーコンピュータのグリッド技術への適用を見てみると，多くの場合，圧倒的な計算能力を持つ超並列計算機が貧弱な外部ネットワークチャネルしか持っていないような例が数多く存在する．我々は，このような計算機こそ，スケーラビリティを持つ入出力チャネルを多数備える必要があり，さらにそれらを有効利用するソフトウェアシステムが必要不可欠であると考える．これは，本来超並列システムが持つ多数の入出力プロセッサを有効利用し，入出力データが特定のプロセッサに集中されることを抑え，さらに周辺のサブシステムも何らかの並列化されたシステム (並列ワークステーションやクラスタ等) であることを前提としたシステム構築を行わなければならないということを意味する．

以上のようなコンセプトの下，我々は MPP，並列ワークステーション，クラスタ等あらゆる並列計算機システムに対してポータブルな，コモディティベースの並列ネットワーク利用型入出力システムとして PAVEMENT/PIO (Parallel I/O system, 以下 PIO) を提案し，開発した．PIO が

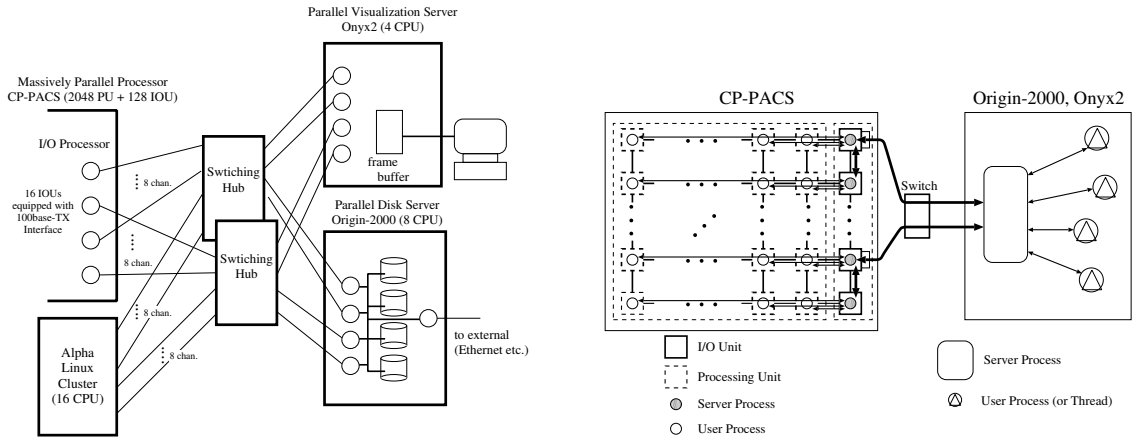
提供する機能は以下の通りである．

並列ネットワークによるバンド幅増強 複数のネットワーク接続を移植性の高い TCP/IP レベルで統合化し，アプリケーションから生成される並列なデータ流を並列ネットワークチャネルに分散させる．

簡便なユーザ **API** の提供 並列ネットワークの存在をユーザに意識させず，アプリケーションプログラム上で最適な自動データ並列化を可能にする．

動的負荷分散 アプリケーションの性質に応じ，安全で効率の高い静的負荷分散や，最小限のオーバーヘッドでデータ流の並列ネットワークへの割り当てを最適化する動的負荷分散機能を提供する．

実験システム環境　実験システム構築のため，超並列計算機 CP-PACS の 128 台の入出力プロセッサ (IOU: Input/Output Unit) のうち 16 台に対し，Fast (100base-TX) Ethernet インタフェースを実装し，これらを 2 台の Fast Ethernet Switching Hub を経由して，並列ファイルサーバ Origin-2000 及び並列ビジュアリゼーションサーバ Onyx2 に接続している．Origin-2000 及び Onyx2 には，各々8 ポート及び 4 ポートの Fast Ethernet ポートが備わっている (図 33(a) 参照)．このハードウェアの上に，PIO ソフトウェアを実装した．



(a) PIO 実験環境　　(b) ユーザプロセスとサーバの関係

図 33: PIO システム

PIO は各システム上のユーザプログラムに対する API (Application Programming Interface) ライブラリと，各システムを結合するデーモンプロセスからなる．API ライブラリは，簡便なインタフェースによってユーザが並列ネットワークを利用することを可能にする．デーモンプロセスは，ローカルな並列ユーザプロセス間通信を処理し，さらにリモートマシンのデーモンプロセスとの並列チャネル通信により，両システム上のユーザプロセス間の並列通信をサポートする．図 33(b) にそれらの関係を示す．API ライブラリ上及びデーモン上では，各種レベルにおいて何らかのデータバッファリングが行われている．特にローカルな API ライブラリとデーモン間では通信が速く，データ送信においては，ユーザアプリケーションからの高速なバッファリングが可能となり，制御が短時間でユーザプロセスに戻ってくるため，効率的な非同期通信プログラムを記述する

ことが可能になる．この特性は単方向データ転送において最大限に発揮される．すなわち，MPP 内の超高速通信によってバッファリングを迅速に行い，アプリケーションを通信フェーズから素早く解放し，実際のデータ転送は両システム間のリンクを最大限に利用して行うことが可能になる．

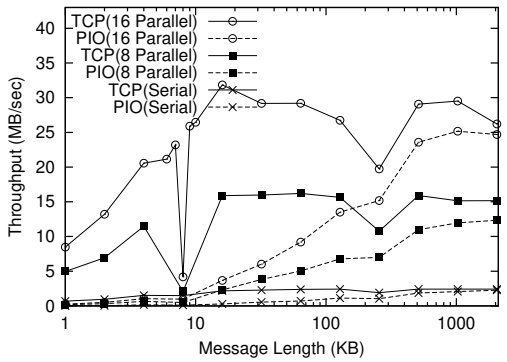
PIO の API は以下のような関数群からなる．

- PIO の初期化・終了
  `PIO_Init(), PIO_Exit()`
- データ入出力
  `PIO_Send(), PIO_Recv()`
- 各種情報取得
  `PIO_Getappinfo(), PIO_Gethostinfo(), PIO_Getconinfo()`
- 通信パートナー選択
  `PIO_Addpartner()`

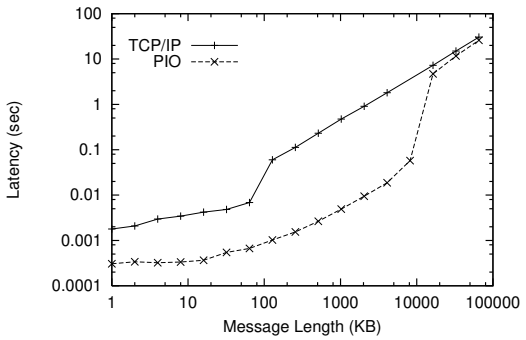
PIO では並列チャネルの明示的・暗示的利用や，通信相手のマシンの並列プロセスの属性取得，メッセージまたはデータストリームを意識した通信プロトコル選択等の機能が用意されている．例えば，PIO_Send では使用する並列チャネルを (1) 明示的に指定する，(2) そのプロセスの相対的な位置情報に基づき自動的に決定する (静的負荷分散)，(3) チャネル負荷状況に応じて動的に決定する (動的負荷分散)，の 3 種類からダイナミックに選択できる．また，データ送受信において，1 回の送信と受信を一対一対応させデータをパケットとしてやり取りするか (パケットモード)，データ流を想定してデータの任意の切れ目で送受信を行うか (ストリームモード)，のいずれかをダイナミックに選択できる．これらの組み合わせにより，アプリケーションに最適な並列チャネル通信を提供する．

PIO システムの性能評価　図 34(a) に簡単な pingpong 転送を行った場合の PIO の性能とスケーラビリティに関する評価をまとめる．ここに示した性能は，CP-PACS と Origin-2000 間で，並列チャネル数を 1, 8, 16 と変化させた場合の実効バンド幅である．それぞれに対し，裸の TCP/IP を直接使った場合と，PIO による制御を通した場合を比較している．この結果より，チャネル数の増加に伴い，それに応じたほぼ線形な性能向上が得られていることがわかる．また，データ長が長くなるにつれ，TCP/IP 本来の性能と PIO を介した性能の差が縮まっていることがわかる．しかし，データ長が短い場合は PIO の性能は良くない．これは，PIO の深いバッファリングにより，本来は単方向転送で性能が最大限発揮されるのに対し，pingpong という双方向転送を行っているためである．これに対する実験として，単方向転送を繰り返した場合の結果を図 34(b) に示す．これは，非同期送信を行うユーザプロセスにおいて，PIO 送信命令発行後どのくらいで制御が戻るかを測定したものである．TCP/IP に比べ PIO の速度が圧倒的に速いことがわかる．また，データ長が長くなるとバッファリング能力が限界に近づくが，その場合でも TCP/IP と同等以上のレスポンスが得られている．

次に，PIO が提供する動的負荷分散機能に関する評価結果を図 35(a) 及び図 35(b) に示す．これは，同様に CP-PACS と Origin-2000 間で 16 本のチャネル全てを用い，総容量 512MB のデータを長さがばらばらの (最大 2.5 倍の差を持つ) パケットで転送する実験の結果である．図 35(a) は，平均データ長に対する，全データ転送に要した時間を表している．ここで USER はプログラム上で予めわかっているデータ長の差を考慮して明示的にチャネルを指定した場合，STATIC は

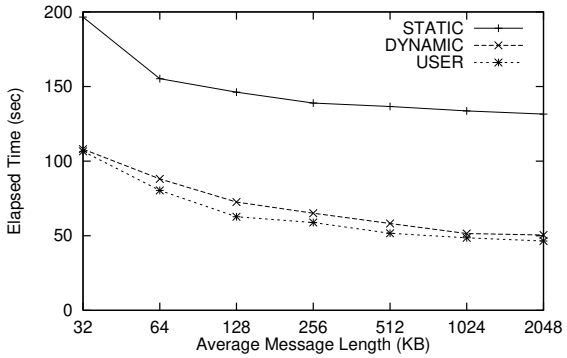


(a) pingpong 転送におけるスループット

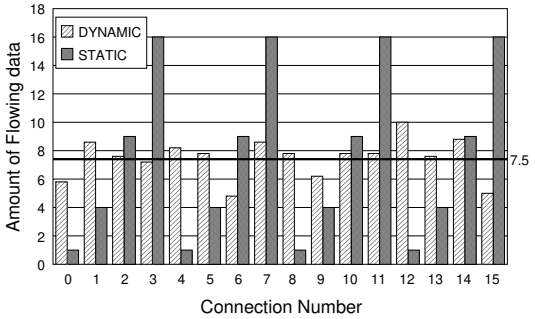


(b) 単方向転送におけるレスポンスタイム

図 34: PAVEMENT/PIO の基本的なデータ転送性能



(a) 動的負荷分散を用いた通信時間短縮の様子



(b) 16 のチャネル上の実際のデータトラフィックの分布

図 35: PAVEMENT/PIO の動的負荷分散機能の性能評価

静的負荷分散機能のみを使った場合，DYNAMIC は動的負荷分散機能を用いた場合の結果である．この図からわかるように，DYNAMIC の結果は，最適な方法である USER とほぼ同一の性能を示している．また，図 35(b) は，この実験を行っている最中の各チャネルのデータ流量を示している．水平に引かれた “7.5” の線は，USER による理論値，すなわち人工的な負荷分散を完全に吸収した場合の理想値を示している．これに対し，STATIC ではチャネル間のデータ流量が極端に異なるが，DYNAMIC では多少の誤差はあるものの，最大と最小の差が大幅に縮まっており，有効な動的負荷分散が実現できていることがわかる．

並列可視化システム **PAVEMENT/VIZ**　次世代科学技術計算において，膨大なデータの可視化技術は非常に重要な問題である．現状では，大規模な多次元データ配列に対する様々な可視化のアプローチが試みられているが，その多くはデータを巨大なファイルに蓄積し，計算後に長時間をかけて 3 次元ボリュームレンダリング等の手法で可視化している．将来的に，計算機性能が向上し，大量のデータが非常に短いターンアラウンドタイムで生成されるようになると，これに即した実時間可視化システムが必要になると考えられる．

PAVEMENT/PIO により，MPP から並列ワークステーションへの並列チャネルデータ転送が実現され，データ流入のスループット問題は解決される．そこで，我々は，並列高速ワークステーション上での実時間可視化(ここでいう「実時間」とは，可視化処理が MPP でのデータ生成に追いついていることを指す)を可能とする可視化システム PAVEMENT/VIZ (Parallel Visualization, 以下 VIZ)を開発した．VIZ のプラットフォームは PIO 接続されている Onyx2 及び Origin-2000 である．この上で，CP-PACS から生成されるデータのグラフィック化を行うシステムを構築した．

PIO 実験環境の Onyx2 は，4 台の CPU と 1 台のラスタマネージャ(画像生成エンジン)，さらに 4 チャネルの 100base-TX インタフェースを備えている．4 台の CPU を用いることにより，一連の可視化処理の負荷分散，例えば並列データ入力とその画像処理といった機能分散が可能であり，CPU 台数のさらなる増加にも対応できるようになっている．この上に，複数プロセッサによるマルチスレッド処理により，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 と名付けられる) を開発した．Binder は PIO の API に基づき，PIO デーモンとの共有メモリを介したデータ受け渡しを行ない，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．

VIZ では，画像生成のための制御用ソフトウェアとして，業界標準である AVS/ Express を用いる．オリジナルの AVS/Express 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 (ワークステーション) 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/Express のデータ入力モジュールを構築し直し，(1) ネットワーク環境における外部からのデータ供給，(2) 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/Express 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，MPP 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．この様子を図 36 に示す．

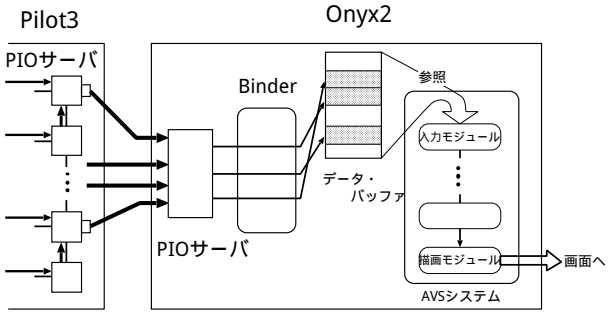
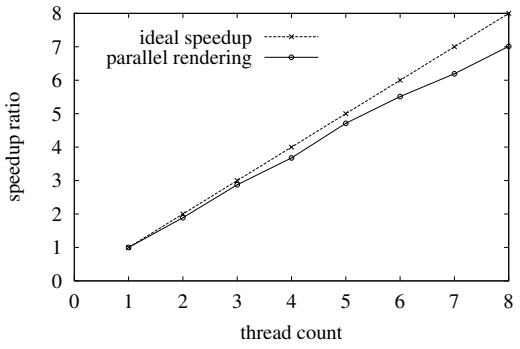
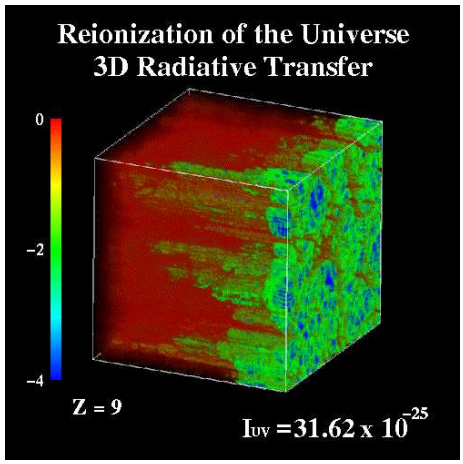


図 36: 並列入出力から並列可視化システムへのデータの流れ

この段階でデータ流入とそれに続く可視化処理が機能分散的に並列処理される．実際の可視化処理の中で，特に重くかつ実用上非常に多く用いられるのが，3 次元データに対するボリュームレンダリング (3DVR: 3-Dimensional Volume Rendering) 処理である．そこで，VIZ では共有メモリ型並列ワークステーションにおいて 3DVR 処理を高速化する，並列 3DVR モジュールを開発した．このモジュールも AVS/Express のモジュールとして，オリジナルの 3DVR モジュールとの置換が可能となっている．このモジュールは，3DVR における処理をほぼ完全に並列化しており，使用可能プロセッサ数にほぼ比例した非常に効率の高い並列処理を実現している．従来のソフト



(a) 並列ボリュームレンダリングモジュールにおける速度向上率



(b) 並列ボリュームレンダリングを用いた出力例

図 37: 並列可視化システムの性能評価

ウェアによる並列 VR の研究では，主として静止画像に対する高速 VR が研究されてきた．ここでは，医学等の応用分野において，一旦取り込んだ画像をいろいろなパラメータの下で高速描画することが目的になっている．しかし，我々が目指すのは動的に流入してくるデータ流のスナップショットに対する可視化であり，従来のデータ蓄積型・中間表現型のアルゴリズムが適用できない．その代わりに，3 次元データに対する補完作業を効率良く処理し，全体の負荷バランスを重視する実装を行なった．図 37(a) に，最大 8 スレッドを用いた場合の，VR 処理の速度向上率を示す (台数効果を見るため，8 プロセッサを持つ Origin-2000 上で AVS/Express を稼働させた)．このような高い並列処理効率により，例えば計算宇宙物理における 128^3 の空間データを 512^2 の 2 次元データに変換する 3DVR 処理において，約 1 秒/フレームの実時間描画が可能となった．

これまで述べた PIO システムと柔軟な制御性を持つ並列可視化システムを総合的に使用した例として，2048 台の全 PU を使用した CP-PACS 実機において，128 台の IOU 上での PIO サーバの稼働，16 チャネルの Fast Ethernet を経由した並列データ転送，ビジュアリゼーションサーバにおける並列データ入力及び並列可視化の全処理を，実際のアプリケーションを対象に実行した．対象アプリケーションは計算宇宙物理学における宇宙の再イオン化シミュレーション及び，大量のアルゴン分子に対する分子動力学法シミュレーションである．いずれも 2048 台の PU から生成されるデータストリームを，16 本の Fast Ethernet リンクで負荷分散しながら転送し，最終的に 1 秒/フレーム程度の 3DVR 及び描画を実現できた．これにより，超並列計算機における計算結果の実時間可視化が可能であることが確認された．宇宙の再イオン化シミュレーションを実行している際の並列可視化システムの出力画像を図 37(b) に示す．この例では，再イオン化の進行の様子が確認できるように，輻射が一方向のみから入射した場合を扱っており，全ての方向からの入射を取り扱う現実的シミュレーションの第一歩となっている．

さらに本モジュールに対し，日本における AVS/Express 販売元である KGT (Kubota Graphics Technologies) 社との共同研究により，3DVR 処理を行いつつ，画像のマニピュレーション (グラブ，回転，平行移動等) をオリジナルのモジュールと同様に行えるようなユーザインタフェースを実装した．完成したモジュールはオリジナルのモジュールとほぼ同等なインタフェース及びマニピュレーションが可能であり，加えて現在の可視化処理に割く並列スレッド数のダイナミックな

制御が可能となっている．これにより，アプリケーションのデータ生成タイミングとデータ量に応じ，並列ワークステーションの能力を，並列データ流入力処理と 3DVR 処理に適宜最適配分しながら処理を進めるような使い方も可能となっている．

並列ファイルシステム PAVEMENT/PFS　PAVEMENT/PIO のもう 1 つの応用例として，並列ファイルシステム PAVEMENT/PFS (Parallel File System, 以下 PFS) の開発を行った．PFS は SPMD 的な並列プロセスの集合に対し，単一の論理的なファイルへの SPMD 操作のイメージを提供するユーザレベルライブラリによるファイルシステムである．PFS では各 SPMD 並列プロセスが実際には仮想的な論理ファイルの担当部分をアクセスすることを前提とし，ファイルがローカルな分散ディスク上にある場合も，リモートなファイルサーバ上にある場合も同等に並列アクセスを行えるように設計されている．さらに，リモートアクセスに関して PIO が利用可能であるならば，これを最大限に利用する．図 38 に PFS のコンセプトイメージを示す．

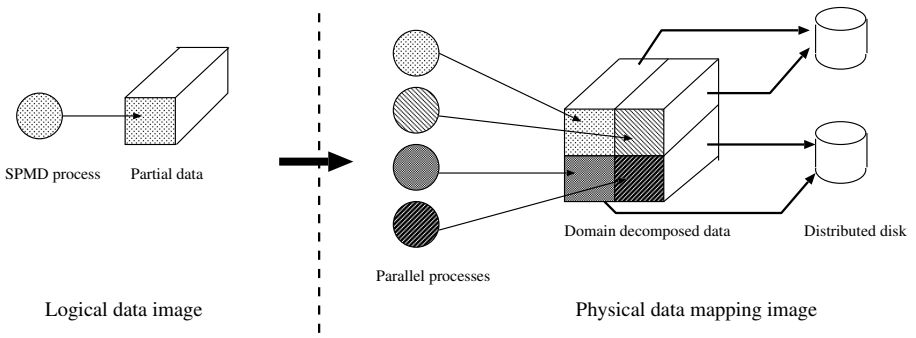


図 38: Parallel File System の概念図

PFS では並列プロセスから生成される並列ファイルデータストリームを自然な形でローカルな分散ディスクまたはリモートな分散ディスクに展開する．ここで重要なのは，SPMD モデルを前提とした単純化である．これに基づき，PFS では並列プロセスの数と，並列物理ファイルの数が必ずしも一致しない場合でも最適な並列アクセスを実現する工夫をしている．これは，例えばファイル生成時の並列計算機リソースと，ファイル消費時のそれが必ずしも一致しないという条件を吸収するのに役立つ．極端な例としては，例えば MPP によって分散生成されたファイル群を，単一プロセスによって逐次処理することも可能となっている．

14.6　ヘテロジニアス・マルチコンピュータシステム (連続体・多粒子系融合型超並列計算機) の開発

HMCS (Heterogeneous Multi-Computer System) は，連続体向け超並列計算機と多粒子系向け超並列計算機を結合し，次世代大規模シミュレーションにおいて求められる，異なる物理現象を組み入れた複雑な科学技術計算を効率的に行うことを目的とした統合化プラットフォームである．本システムでは連続体及び多粒子系の計算が混在したシミュレーションを，それぞれの処理を得意とする計算機システムによって機能分散し，片方のプラットフォームだけでは不可能だった複合計算を実現する．

HMCS の基本コンセプトは，問題と計算機システムの適応性を保ちつつ，複合処理の各フェーズを複数の計算機リソースに効率的に分散することである．研究の最終年度において，我々は 2048

プロセッサを持つ連続体向け超並列計算機 CP-PACS（0.6TFLOPS）と，8 ボードの多粒子系向け超並列計算機 GRAPE-6（約 8TFLOPS）を結合して，統合演算性能 8.6TFLOPS の HMCS を実装し，これらを結合するソフトウェアを開発した．さらに，この上で自己重力と輻射輸送を伴う SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションを実行し，銀河の初期形成シミュレーションを行うことに成功した．

以下では HMCS の実装，この上で行われたアプリケーションとその結果について述べる．

14.6.1 HMCS のシステム構成

図 39 に HMCS の全体像を示す．CP-PACS の持つ 16 台の入出力プロセッサには 100base-TX FastEthernet のインタフェースが各々実装され，GRAPE-6 クラスタ（後述）との間で PAVEMENT/PIO による複数チャネルネットワーク結合がなされている．PAVEMENT/PFS に基づく並列ファイルサーバ (Origin2000) と，PAVEMENT/VIZ を用いた並列可視化サーバ (Onyx2) が同じ PIO ネットワークに接続されている．CP-PACS の全プロセッサを用いた場合のピーク演算性能は 614GFLOPS であり，8 ボードの GRAPE-6(合計 256 チップ) を全て用いた場合の実効演算性能は約 8TFLOPS である．

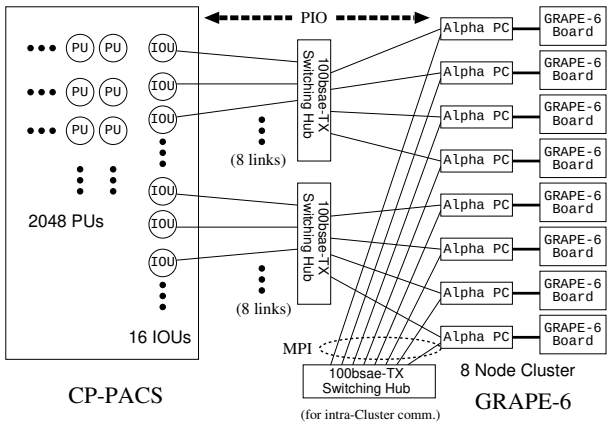


図 39: HMCS のブロックダイアグラム

8 ボードの GRAPE-6 を管理し，多数の粒子計算をこれらに分配するために，Alpha CPU を用いたクラスタを構築した．クラスタ上の各ノードには各々1 つの GRAPE-6 ボードが接続される．GRAPE-6 による重力多体計算の前に，全ての粒子のデータ（質量，位置等）は各 GRAPE-6 ボード上のメモリに格納されなければならない．その後，計算対象となる全粒子を 8 枚のボードに均等に分配し，GRAPE のパイプライン演算を実行する．このため，CP-PACS によって生成された全粒子データは PIO を経由してクラスタ上の全ノードに均一に分配され，その後で全ノード間で全対全通信によってブロードキャストされる．PIO はブロードキャスト通信をサポートしていないため，この処理が必要となるが，これは CP-PACS と GRAPE-6 クラスタ間のデータ転送量を最小化する最も良い方法である．この時点で全ノードは全粒子データを持ち，これを GRAPE-6 のメモリにセットする．計算結果（全粒子の加速度データ）は各ノードによって GRAPE-6 から取り出され，最初のデータ送信と逆の手順で CP-PACS に送られる．

HMCS のためのソフトウェアは，CP-PACS 上のアプリケーションプログラムから呼び出される API のライブラリと，GRAPE-6 のホストクラスタ内の制御と CP-PACS との PIO 通信を行うデーモンプログラムの 2 つの部分からなる．前者の API は g6cpplib と名付けられ，基本的には GRAPE-6 が直接接続されたホストでプログラミングするイメージを元に，必要な機能を簡潔に利用できるようになっている．これにより，アプリケーションプログラマは，あたかも CP-PACS に GRAPE-6 が直結されているような形でプログラムを記述することが可能である．

CP-PACS と GRAPE-6 クラスタは各々の処理を独立に行い，基本的には片方の処理中，もう一方は休止してしまう．しかし，我々の開発した HMCS 向け SPH アルゴリズム及びプログラムでは，GRAPE-6 に重力計算処理を依頼した後，SPH 側の処理の一部をこれとオーバーラップさせるように記述されている．GRAPE-6 側では，実際のデータセットアップ時間と粒子計算の時間は，CP-PACS 上の SPH 処理時間に比べ極めて短い．例えば，1024 プロセッサを用いた CP-PACS と 4 ボードの GRAPE-6 を用いたサブシステムでは，13 万粒子による自己重力と輻射輸送を伴う SPH 計算は，全体で 1 ステップ当たり 12.3 秒かかる．ここで全体の約 40%の時間は 2 つのシステム間の通信とその準備に費やされ，また GRAPE-6 における計算時間は約 0.5 秒である．しかし，これらの時間の一部は CP-PACS での処理とオーバーラップされる．表 35 に，GRAPE-6 クラスタ上のデーモンで計測した処理時間の内訳を示す．

表 35: HMCS の性能評価 (CP-PACS の 1024 プロセッサと 4 ボードの GRAPE-6 を用いた場合の 13 万粒子に対する 1 ステップの実行時間)

処理内容	時間 (sec)
粒子データ送受信	4.476
次のデータ待ち (CP-PACS の処理待ち)	6.118
クラスタ内での全対全通信	0.639
粒子データの GRAPE-6 メモリへのセット	0.609
重力計算	0.503
合計	12.345

このサイズの典型的なシミュレーションでは，意味のある物理データを得るためには約 25000 ステップを要する．これは上記構成のシステムで約 3 日間かかる．もし自己重力を含めた計算を CP-PACS のみで行おうとすると，計算時間の点で現実的にはほぼ不可能である．このため，GRAPE-6 側の処理時間が CP-PACS のそれに比べ非常に短くはあるが，HMCS がもたらす処理性能と計算科学における意義は非常に大きい．

14.6.2 HMCS におけるアプリケーション

現在，HMCS におけるアプリケーションとして，計算宇宙物理学における輻射流体方程式の計算が行われている．これは数値流体計算と輻射輸送を組み合わせたものである．

宇宙には星，ブラックホール，星団，銀河，銀河団といった様々な階層構造がある．しかし，これらの系を制御する基本的な物理は 3 つの過程だけからなる．すなわち，流体過程，重力，そして輻射である．宇宙物理における過程は極めて非線形性が強いため，数値計算においては非常に

ダイナミックレンジの広い流体計算が必要となる．このような広いダイナミックレンジを持つ系を処理する際，非常に有効な手段が SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) である．この処理での物理量は，それぞれが密度に応じたある大きさを持つ仮想粒子の集合として表現される．この意味で，SPH は数値流体計算におけるラグランジュ法に相当する．

重力に関しては，系の中の全ての仮想粒子によるニュートン重力計算が必要となる．この総和計算には N 個の粒子に対し，N^2 オーダーの計算コストがかかる．もし 10^5 個以上の粒子に対して CP-PACS でこれを処理しようとすると，計算のほとんどは重力の処理に費やされてしまう．この部分を複数ボードからなる GRAPE-6 クラスタに委ねることにより，高速な処理が可能となる．GRAPE を用いた SPH 計算は GRAPE-SPH とも呼ばれる．

輻射については，輻射輸送 (RT: Radiative Transfer) を扱うことが必要となる．しかし，輻射輸送は非常に複雑な物理過程であり，こちらもまた大量の計算を伴う．このため，これまで完全な輻射輸送を伴う宇宙流体計算は行われなかった．我々は SPH シミュレーションのための効率的な輻射輸送アルゴリズムを開発し，これを CP-PACS に実装し，最終的に HMCS における自己重力を伴う RT-SPH コードを完成させた．これは世界でも類を見ない輻射流体計算である．

我々は，HMCS 上の RT-GRAPE-SPH を用い，宇宙初期段階における銀河形成のシミュレーションを行った．宇宙は赤方偏移 5 において再イオン化され，多くの銀河はこの再イオン化の後で形成されたと一般的に信じられている．このため，紫外線背景輻射 (UV: Ultraviolet) を伴う銀河形成を調べる必要がある．銀河雲に対する背景輻射の浸透は輻射輸送によって制御される．従って，RT-GRAPE-SPH はこの問題に対する最適なアプローチとなる．我々はダークマターが支配的であった宇宙において，原始的密度の変動を発展的に調べるため，65536 のダークマター粒子と，同数の SPH 粒子からなるシミュレーションを行った．

銀河形成シミュレーション結果の時間発展の様子は，既出の図 23 に示されている．初期段階では，密度変動は低温のダークマターの分布に適合するように与えられている．宇宙膨張による拡散によって密度は薄まり，それと同時により小さなスケールでの密度変動によりフィラメント状構造が形成される．小さなフィラメント状構造は紫外線背景輻射による熱によって消散し，より大きなフィラメントが回転する雲へと凝縮されていく．この構造が銀河へと発展していく．このシミュレーションでは，背景 UV が銀河形成の最終形に対し非常に重要な影響を与えることが示されている．

これは HMCS における RT-GRAPE-SPH の最初のアプリケーションである．このシミュレーションを発展させていくことにより，将来的に宇宙の階層構造の源が明らかになることが期待される．

14.7 まとめと展望

本プロジェクトにおいては，科学技術が対象とする物理系の二大分類である，連続体と多粒子系に注目して，それぞれの計算を高速に処理しうる超並列計算機の開発研究を実施した．更に両者を統合して，連続体・多粒子系複合システムの高速な実行を可能とするヘテロジニアス・マルチコンピュータを開発し，その上で宇宙物理学における現実的応用計算を実行した．

本センターで行われた，連続体向け超並列計算機の開発においては，次世代汎用超並列計算機を実現する要素技術の開発を行った．特に，高速化の鍵となる超高速プロセッサアーキテクチャの開発とノード結合網の検討を行い，これに加えて柔軟且つ高速な並列入出力機構・可視化機構の開発を行った．

連続体の処理に必要な汎用プロセッサの最大の問題は，プロセッサとメモリの性能向上ギャップの克服である．本プロジェクトでは，プログラム制御可能なオンチップメモリを活用して，メモリ入出力を抑えることにより，プロセッサ性能を効率良く引き出す新たなプロセッサアーキテクチャSCIMA を提案し，従来のキャッシュアーキテクチャに較べて高い実行性能が実現できる事を実証した．また，複数の SCIMA プロセッサからなる SMP 構成のノードを，低レイテンシの電気的ネットワーク結合してクラスタを構成し，これらをさらに高バンド幅の光ネットワークで結合した並列システムを検討して，100TFLOPS クラスの性能を実現する汎用超並列計算機アーキテクチャを具体的に提示した．また，本プロジェクトで開発した，並列入出力・可視化システム PAVEMENT は，超並列計算機からコモデティPC クラスタまで，多様な並列プラットフォームに対して，柔軟で高速な並列入出力環境と大容量 3 次元データの並列可視化環境を提供するものである．

東京大学で行われた多粒子系向けの超並列計算機開発では，重力/クーロン力相互作用専用プロセッサと，多目的粒子計算用再構成可能論理プロセッサを開発し，これらから構成される多粒子系計算機 GRAPE-6 が開発製作された．プロジェクト期間中に，平成 11 年度には性能価格比でゴードン・ベル賞を受賞し，また平成 12 年度，13 年度には，絶対性能で同賞を得ている．特に平成 13 年度の受賞は，GRAPE-6 システムが，平成 13 年 6 月にピーク性能 32TFLOPS，宇宙物理学の実用計算において 11.55TFLOPS の世界最高性能を実現したことに対して，同年 11 月の SC2001 国際会議において，受賞が発表されたものである．GRAPE-6 システムは，最終的には，ピーク性能 64TFLOPS に増強されている．

以上の成果は，計算性能の大幅な向上を実現するものであるが，次世代の科学技術シミュレーションにおいて真のブレークスルーを達成するには，それだけでは十分でない．即ち，今後の大規模科学技術計算においては，複数のスケールによって特徴付けられ，連続体の自由度と多粒子系の自由度が複雑に結合したシステムの高速なシミュレーションが要求され，従って，全く異なる複数のタイプの計算を同時に高速に処理することが可能な計算システムが要求されるからである．

本プロジェクトで提唱したヘテロジニアス・マルチコンピュータシステム (HMCS) は，汎用超並列計算機と専用超並列計算機を結合することにより，このような要求に応える新たなアーキテクチャである．汎用超並列計算機は，柔軟で多様なプログラミングを必要とする連続体の処理を受け持ち，一方専用超並列計算機は多粒子系特有の，大規模ではあるが比較的単純な計算を超高速に実行する．HMCS は，これら二つのアーキテクチャの柔軟性と高速性を併せ持つシステムであり，連続体・多粒子系複合システムの処理において，連続体と多粒子系それぞれに特徴的な計算を，両システム間の最善のロードバランスを実現しつつ実行するものとなっている．

本プロジェクトでは，二つのサブプロジェクトの技術開発を総合して，連続体向け超並列計算機 CP-PACS （ 0.6TFLOPS，1996 年 11 月「 世界の高性能計算機トップ 500 リスト」第一位) と多粒子系向けの専用超並列計算機 GRAPE-6 (8 ボード， 8 TFLOPS を実装) を並列ネットワーク PAVEMENT/PIO を用いて並列結合し，統合演算性能 8.6TFLOPS の強力な HMCS 実用システムを構築した．さらに，このシステムを用いて，従来困難とされてきた，物質の重力相互作用と輻射輸送を同時に解く銀河形成過程のシミュレーションを実現した．これらの成果は，ヘテロジニアス・マルチコンピュータ・コンセプトの実現可能性と有効性を明確に実証するものである．

HMCS コンセプトは，さらに発展した幾つかの形態を考えることができる．本プロジェクトで実現した形態は，2 種類の異種計算機を近距離結合したものであり，HMCS-Local と称することができる．一方，10 ギガビットクラスのネットワークの実用化に伴い，異種計算機の結合は，遠距離に置かれたシステム間に行うことも十分に可能と考えられ，この形態は，HMCS-Remote と称

することが相応しい．HMCS-R の実現可能性は，平成 14 年 3 月に開通したばかりの広域ネットワーク「つくば WAN」を利用して実証された．この実証試験では，産業技術総合研究所計算科学センターの汎用超並列計算機 SR8000 (0.5TFLOPS) と筑波大学計算物理学研究センター設置の GRAPE-6 (8TFLOPS) が「つくば WAN」経由で接続され，銀河形成シミュレーションが実行された．

HMCS-L と HMCS-R は異種計算機システムをネットワーク結合することにより，強力な統合計算性能を実現しているが，複数システムを結合しているために，システム間のネットワーク経由のデータ転送とロードバランスがボトルネックとなり得る欠点がある．この問題を解決する最終的なアーキテクチャは，連続体向けの汎用プロセッサと多粒子系用の専用プロセッサを同一計算ノード上に実装し，これを単位とする並列システムを構成することである．我々は，このような連続体・多粒子系融合型アーキテクチャが，次世代の超高速科学技術シミュレーションのプラットフォームを提供するものであり，本プロジェクトにおける研究成果は，その実現に向かっての，大きななステップを実現したものと考えている．

14.8 未来開拓研究関係文献

14.8.1 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)
3. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」1999–2000 報告書, pp 9-20 (2000)
4. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」2000–2001 報告書, pp 73-84 (2001)
5. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」2001–2002 報告書, pp 27-36 (2002)

14.8.2 学術雑誌論文

【平成 10 年度】

1. 近藤正章, 早川秀利, 坂井修一, 朴泰祐, "プロセッサ・メモリ混載型 LSI およびオンチップマルチプロセッサに関する検討", 並列処理シンポジウム JSPP'98 論文集, pp.159-166, 1998 年 6 月.
2. Preeti Ranjan Panda, Hiroshi Nakamura, Nikil D. Dutt, and Alexandru Nicolau, "Augmenting Loop Tiling with Data Alignment for Improved Cache Performance", IEEE Transactions on Computers, Vol.48, No.2, pp.142-149, February, 1999.

【平成 12 年度】

1. 松原正純, 沼寿隆, 板倉憲一, 朴泰祐, "分散メモリ型並列計算機における並列入出力システム", 並列処理シンポジウム JSPP'2000 論文集, pp.75-82, 2000 年 6 月.

2. 松原正純, 沼寿隆, 板倉憲一, 朴泰祐, "分散メモリ型並列計算機における並列入出力システム", 情報処理学会論文誌ハイパフォーマンスコンピューティングシステム, Vol.41, No.SIG 5(HPS 1), pp.58-69, 2000 年 8 月.

3. 中村宏, 近藤正章, 大河原英喜, 朴泰祐, "ハイパフォーマンスコンピューティング向けアーキテクチャSCIMA", 情報処理学会研究会論文誌 HPS, Vol.41, No.SIG5(HPS1), pp.15-27, 2000 年 8 月.

【平成 13 年度】

1. 板倉憲一, 朴泰祐, 松原正純, "並列データ流に対する並列可視化", 並列処理シンポジウム JSPP'2001 論文集, pp.189-196, 2001 年 6 月.

2. 近藤正章, 中村宏, 朴泰祐, "SCIMA における性能最適化手法の検討", 情報処理学会研究会論文誌ハイパフォーマンスコンピューティングシステム, Vol.42, No.SIG12(HPS4),pp. 37-48, 2001 年 12 月.

3. 朴 泰祐, 牧野 淳一郎, 須佐 元, 梅村 雅之, 福重 俊幸, 宇川 彰, "Heterogeneous Multi-Computer System における重力効果を含む宇宙輻射流体計算", 2002 年 ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2002) 論文集, pp.17–24, 2002.

14.8.3 国際会議発表論文

【平成 9 年度】

1. Preeti Ranjan Panda, Hiroshi Nakamura, Nikil D. Dutt, Alexandru Nicolau, "A Data Alignment Technique for Improving Cache Performance", International Conference on Computer Design (ICCD '97), pp.587-592, Austin, Oct. 1997.

2. H. Nakamura, K. Itakura, M. Matsubara, T. Boku, and K. Nakazawa, "Effectiveness of Register Preloading on CP-PACS Node Processor", International Workshop on Innovative Architecture, pp. 83-90, Maui, Oct. 1997.

【平成 11 年度】

1. M. Matsubara, H. Numa, and T. Boku, "Commodity Network based Parallel I/O System for Massively Parallel Processors", Proceedings of PDPTA'99, pp.2424-2429, Las Vegas, Jun. 1999.

2. H. Nakamura, H. Okawara, T. Boku, M. Kondo, and S. Sakai, "SCIMA: A Novel Architecture for High Performance Computing", International Workshop on Innovative Architecture, pp. 45-53, Maui, Oct. 1999.

3. M. Kondo, H. Okawara, H. Nakamura, T. Boku, and S. Sakai, "SCIMA: A Novel Processor Architecture for High Performance Computing", High Performance Computing Asia (HPC-Asia '00), pp.355-360, Beijing, May 2000.

【平成 12 年度】

1. M. Kondo, H. Okawara, H. Nakamura, and T. Boku, "SCIMA: Software Controlled Integrated Memory Architecture for High Performance Computing", ICCD-2000, pp.105-111, Austin, Sep. 2000.

2. H. Nakamura, M. Kondo, and T. Boku, "Software Controlled Reconfigurable On-Chip Memory for High Performance Computing", LNCS 2107, 2nd Workshop on Intelligent Memory Systems (IMS 2000), (Springer-Verlag), pp.15-32, Nov. 2000.

3. K. Kurata and H. Nakamura, "Novel Method for Primer/Probe Design and Sequence Analysis", Genome Informatics 11, pp.331-332, Tokyo, Dec. 2000.

【平成 13 年度】

1. T. Boku, M. Matsubara and K. Itakura, "PIO: Parallel I/O System for Massively Parallel Processors", Proceedings of European High Performance Computing and Network Conference 2001 (LNCS-2110), pp.383-392, Amsterdam, Jun. 2001.

2. M. Fujita, and H. Nakamura, "The Standard SpecC Language", Proc. of ISSS2001, pp. 81-86, Oct. 2001.

3. N. Hosaka, K. Kurata, and H. Nakamura, "Comparison of Methods for Probe Design", Genome Informatics 12, pp.449-450, Tokyo, Dec. 2001.

4. M. Kondo, M. Fujita, H. Nakamura, "Software-Controlled On-Chip Memory for High-Performance and Low-Power Computing", HPCA-8 Work-in-progress Session, Jan. 2002.

5. H. Susa and M. Umemura, "A Simulation of Galaxy Formation by Radiation-SPH", IAU Symposium 208, Astrophysical Supercomputing using Particle Simulations (Tokyo), in press (2001).

6. H. Susa and M. Umemura, "Galaxy Formation in the Presence of Ultraviolet Background Radiation Field – a Simulation by Radiation-SPH –", Studies of Galaxies in the Young Universe with New Generation Telescopes, Japan-German Seminar 2001 (Sendai), in press (2001).

14.8.4 国内学会・研究会における口頭発表

【平成 10 年度】

1. 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, pp.81-88, 1999 年 1 月.

2. 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"，情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会, 情処研報 ARC-132-15 (HPC-75-15)，pp.85-90, 1999 年 3 月.

【平成 11 年度】

1. 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，情処研報 ARC-133-10，pp.55-60, 1999 年 5 月.
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", 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 情処研報 99-HPC-76-1, pp.1-6, 1999 年 5 月.
3. 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 '99 ポスター，pp.214, 1999 年 5 月.
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, 情処研報 99-HPC-77-10, pp.53-58, 1999 年 8 月.
5. 冨永憲一，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, 情処研報 99-HPC77-29, pp.167-172, 1999 年 8 月.
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"，情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会，情処研報 ARC-134-1，pp.1-6, 1999 年 8 月.
7. 大河原英喜，近藤正章，中村宏，朴泰祐，"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アーキテクチャの予備評価"，情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会，情処研報 ARC-136-3，pp.13-18, 2000 年 1 月.
8. 梅村雅之，中本泰史，朴泰祐，板倉憲一，松原正純，沼寿隆「並列入出力と AVS による並列可視化システム」次世代数値計算法研究会 (2000 年 1 月，国立天文台)
9. 中本泰史，梅村雅之，朴泰祐，板倉憲一，松原正純，沼寿隆「並列入出力システムと AVS による並列可視化」プラネットワークショップ 2000 (2000 年 3 月，登別)

【平成 12 年度】

1. 中村実, 岩下誠, 坂井修一, 田中英彦, "SCIMA アーキテクチャのためのソフトウェア手法の検討", 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, 情処研報 2000-HPC-82-20, pp.113-118, 2000 年 8 月.
2. 板倉憲一, 朴泰祐, 松原正純, "汎用可視化ツール AVS/Express の並列化とその性能評価", 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, 情処研報 2000-HPC-82-31, pp.179-184, 2000 年 8 月.
3. 岩本貢, 渡邊亮介, 近藤正章, 朴泰祐, 中村宏，"NASPB CG, FT における SCIMA の性能評価", 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, 情処研報 HPC-83-6, pp.31-36, 2000 年 10 月.

4. 梅村雅之，中本泰史，朴泰祐，板倉憲一，松原正純，沼寿隆「CP-PACS と並列入出力・並列可視化システム」第 6 回 NEXT 研究会 (2001 年 3 月 8 日，東京，国富生命ビル)

【平成 13 年度】

1. 大根田拓, 近藤正章, 中村宏，"SCIMA におけるメモリアクセス制御機構の検討", 情報処理学会アーキテクチャ研究会, 情処研報 ARC-144-29, pp.165-170, 2001 年 7 月.

2. 藤田元信, 近藤正章, 中村宏, 千葉滋, 佐藤三久，"ソフトウェア制御オンチップメモリのための最適化コンパイラの構想", 情報処理学会アーキテクチャ研究会, 情処研報 ARC-146-6, pp.31-36, 2002 年 2 月.

3. 大根田拓, 近藤正章, 中村宏，"SCIMA におけるメモリアクセス機構の設計と評価", 情報処理学会アーキテクチャ研究会, 情処研報 ARC-147-14, pp.79-84, 2002 年 3 月.

4. 朴 泰祐, 牧野 淳一郎, 須佐 元, 梅村 雅之, 福重 俊幸, 宇川 彰, "Heterogeneous Multi-Computer System: 連続体・多粒子系融合型超並列計算機システム", 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, 2001-HPC-88-10, 2001, pp.55-60.

15 Supercomputing Conferenceへの参加出展

計算物理学研究センターでは，超並列計算機 CP-PACS を中心としたセンターの様々な研究成果及び未来開拓研究などのプロジェクト成果の発表とプロモーションのため，1998 年と 2001 年の 2 回，米国における SC (Supercomputing) 会議における Research Exhibition への出展を行った．同会議はこれまで 14 年の歴史を持つ，高性能計算分野における最も大規模な国際会議及び展示として知られており，毎回約 4000 人の出席者が参加する．テクニカルセッションにおける原著論文発表も名高いが，企業からの Commercial Exhibition と，大学・研究機関が中心となる Research Exhibition では多数の企業・組織が最先端の製品・研究の発表を行い，毎年注目されている．

15.1 SC98

SC98 は 1998 年 11 月 7 日から 13 日にかけ，米国フロリダ州オーランドにおいて開催された．本会議における出展では，CP-PACS の完成とその上での研究成果の発表をメインテーマとした．CP-PACS のアーキテクチャ・ソフトウェア・アプリケーション，そして計算物理学における成果，さらに筑波大学を中心として約 20 年間続けられてきた PACS 研究の歴史等を展示し，これを通じて我々の研究活動を高性能計算分野の関係者にアピールすることが目的であった．3 日間の出典期間に多数の来客があり，電子化記帳装置に記録されただけでも約 150 名の訪問者に対し説明を行なった．(実際の訪問者数はこれを上回る)

展示内容　約 20 フィート四方のブースにおいて，以下の展示及び発表を行なった．

パネル展示
: 合計 14 枚のパネルを用い，PACS 研究の歴史，CP-PACS 計画とそのシステム，性能評価，計算物理学上の成果，未来開拓事業，計算物理学研究センターの沿革に関する展示を行なった．

実ハードウェアの展示
: CP-PACS の実物 PU 基盤 (8 プロセッサ) を展示し，CP-PACS を支えるハードウェア技術の詳細を示した．また，PACS の歴史の部門では，過去の PACS 計算機のプロセッサ基盤 3 枚を展示し，並列計算機技術の変遷等を解説した．

デモンストレーション
: 会場と計算物理学研究センターとをオンラインでネットワーク接続し，CP-PACS に関するデモンストレーションを行なった．一つは 64 ノードの CP-PACS(PILOT-3) を用いた QCD 計算のデモンストレーションで，計算結果のリアルタイムなグラフィックス表示を行ない，並列処理の様子を示した．もう一つは，2048 ノードの CP-PACS 実システムを 8 分割し，各パーティションのジョブ実行における性能をリアルタイム表示し，実システムの稼働状況をアピールした．

プレゼンテーション
: 隣接展示した電子技術総合研究所のブースと協力し，両者の間に簡単なプレゼンテーションスペースを設け，各種テーマに対するプレゼンテーションを行なった．CP-PACS のアーキテクチャ2 件と，応用 3 件の発表を行なった．

全ての展示は好評であり，システム側と応用側の並列処理関連研究者に対し，我々の活動をアピールできたと考えている．訪問者の中には著名な並列処理システム研究者及び応用研究者も多く，全体として大変有意義な出典であったと思われる．

15.2 SC01

SC01 は 2001 年 11 月 10 日から 16 日にかけ，米国コロラド州デンバーにおいて開催された．本会議における出展では，未来開拓学術研究推進事業における研究成果発表をメインテーマとした．展示はポスターをメインとし，未来開拓研究の 2 大テーマである SCIMA と PAVEMENT に関する研究成果，さらに HMCS に関する研究成果発表を中心に行った．この他，センターの概要と CP-PACS を中心とした各計算物理学研究分野での最新研究成果についても展示した．後述する事情により，前回に比べ訪問者数は減少し，3 日間の展示で約 50 名程度の訪問者があった．

背景 ~ 展示規模縮小　2001 年の SC は例年と全く異なる雰囲気で展示が行われた．すなわち，同年 9 月の同時多発テロの影響により，当初出展を予定していたブースの中で，特に日本からの Commercial Exhibition と Research Exhibition のキャンセルまたは大幅なブース規模縮小が相次ぎ，特に Research Exhibition では例年連続出展していた研究組織からのキャンセルが目立った．完全にブースを閉鎖し，出展関係者が来なかったブースも少なくなく，出展したブースでも規模や説明人数を大幅に削減したりしていた．このような状況下で，我々のブースも当初予定していた展示説明要因を約半数に減らし，これに伴い，オンラインデモンストレーション等も中止し，基本的にポスター展示のみとした．また，今年度は Research Exhibition の中で，アジアからの出展が全て Asian Village と呼ばれるセクションに固められ，地理的に他の (特に米国の) 出展ブースに比べ不利な位置に配置されていた．これらの影響により，他の日本からの出展ブースも含め，全体的に低調であった．しかし，そもそも展示ブース全体で例年より来客が少なく，我々のブースだけの問題ではないという印象を受けた．

出展内容　前回同様，約 20 フィート四方のスペースを確保したが，今回はブース中央に大きな四角柱上のパネルスペースを設け，周囲に合計 12 枚のポスターパネルを配置した．先述したように，当初は PC やディスプレイを複数持ち込み，HMCS 等のオンラインデモンストレーションを行う予定であったが，これらは全て中止した．全体のほぼ 3/4 を未来開拓関連研究に充て，以下の研究について発表した．

SCIMA オンチップメモリを用いた高性能プロセッサアーキテクチャSCIMA の概要と主なベンチマークにおける性能評価を示し，SCIMA の潜在能力の高さと，従来のキャッシュベースのプロセッサアーキテクチャに対する優位性を示した．

PAVEMENT 並列ネットワークに基づく並列入出力・可視化システム PAVEMENT の概要と，並列入出力機構 PAVEMENT/PIO の性能スケーラビリティや負荷分散効果について示した．

HMCS 未来開拓研究の総まとめとして，連続体向け超並列計算機と多粒子系超並列計算機の融合システムである HMCS (Heterogeneous Multi-Computer System) のコンセプトと，CP-PACS と GRAPE-6 を用いたプロトタイプシステムの発表，さらにこれを用いて行った，重力効果を含む輻射流体計算に基づく銀河の初期形成シミュレーションの結果について展示した．

センター概要 計算物理学研究センターの概要と CP-PACS を中心とするリソース，さらにこれらを用いた最新の計算物理学研究成果について展示した．

前回に比べ，展示規模や訪問者数の点で必ずしも満足のいく出展とはならなかったが，先述した様々な要因を考えるとやむを得なかったと考えられる．しかし，どのような形であっても展示を継続し，本センターが世界に通じる先端研究を行っていることをアピールし続けることは極めて重要であると考える．

16　センター外部評価

計算物理学研究センターは 2 度にわたって外部評価を受けている．第一回目は平成 6 年度であり，筑波大学物理学系が，筑波大学として最初の外部評価を実施した際に，物理学系関連組織として受けたものである．この時点で，センターは発足 2 年を終えたばかりであったが，素粒子物理学分野における格子場の理論の研究の推進，宇宙物理学分野の立ち上げ，さらに進行中であった CP-PACS の開発製作などに，非常に高い評価が与えられた [1]．

第二回目は，平成 11 年度である．10 年時限の満了を 3 年後に控えて，センターの将来を構想するための重要事項として，文部科学省より研究評価促進経費を受けて，センター独自に 1 年がかりで実施された．実施に当っては，筑波大学の「外部評価実施のための指針」(平成 7 年 12 月 25 日学長裁定) に従い，センター運営委員会の下に，メンバーを同じくする「外部評価実行委員会」を設置して平成 11 年 5 月から準備作業を行った．

外部評価委員会は，分野別の観点及び国際的な観点を考慮して，表 36 に掲げるように，素粒子物理学，物性物理学，宇宙物理学，計算機工学分野の第一級の専門家 8 名 (日本人 6 名，外国人 2 名) から構成され，菅原寛孝高エネルギー加速器研究機構長が委員長を務めた．

外部評価委員会による実地調査は，平成 11 年 11 月 9 日・10 日に実施された．センターでは，これに先立ち，「筑波大学計算物理学研究センター外部評価資料」及び「筑波大学計算物理学研究センター研究業績リスト」を和文・英文の二様で作成し，CP-PACS プロジェクト関連資料，未来開拓プロジェクト関連資料とともに，外部評価委員に送付した．

表 37 に外部評価実地調査の日程を挙げる．第一日目には，冒頭のセンターの組織面での紹介に続き，計算機工学，素粒子物理学，宇宙物理学，物性物理学の各分野に分けて，センターに於ける研究活動の成果が報告された．第二日目には，センターの将来計画が説明され，センター教官と外部評価委員の間で質疑応答が行われた後に，CP-PACS を始めとするセンター計算機設備の見学，未来開拓プロジェクト成果のデモストレーションが行われた．以上の実地調査に於ける報告及び意見交換は，全て英語で行われた．

外部評価委員会では，センターの準備した資料及び実地調査に基づき，外部評価報告書を取りまとめた．報告書は英文を原文として，第一章 序論，第二章 一般的コメント，第三章 各分野の評価，第四章 特に将来についてのコメント，第五章 結論 から構成されている．報告書では，センターにおける研究成果に極めて優れているとの高い評価が与えられ，特に物理学と計算機工学の研究者の共同関係は滅多にないものであるとの評価が示された．さらに，センターのの今後に

筑波大学計算物理学研究センター外部評価委員会		
菅原　寛孝 (委員長)	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
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	放送大学学園・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

表 36: 筑波大学計算物理学研究センター外部評価委員会

筑波大学計算物理学研究センター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

表 37: 計算物理学研究センター外部評価実地調査日程

ついて，物理学と計算機工学が協力して進めてきた研究の方向を，今後もより一層推進すべきであるとの意見が示された．

外部評価委員会の報告書は，評価用資料と併せて，平成 12 年 3 月に公表された [2] ．

17　計算物理学研究センターの新設

センターの将来についての準備は，10 年時限満了を 3 年後に控えた平成 10 年度後半から二つの側面から開始された．第一の側面は，新たにセンターとして進めるべき学術研究の方向性の検討であり，もう一つは，組織面からの準備である．

学術研究の方向については，本センターの目的とした，素粒子・物性・宇宙という基礎物理学三分野の研究の今後の発展の方向性の検討に併せて，1990 年台後半から著しい進展を見せて来た物質科学，生命科学分野の研究動向が検討された．これらの検討を通じて，今後のセンターにおいては，素粒子・宇宙という基礎物理学分野の研究を一層推進すると同時に，物性物理学においてはナノ物質のシミュレーション，さらに，生命科学分野においては，タンパク質や DNA 等の生体高分子の構造と機能の解明に計算物理学の手法を展開することが重要な課題であるとの認識が深まった．さらに，これらの分野の重要課題の解決のために必要とされる計算性能の検討が行われ，CP-PACS の次に来るべき高性能計算機システムの性能として，100TFLOPS クラスが必要とされることが明らかとなった．このような計算機システムの実現に向けての基礎研究が，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」の「次世代超並列計算機開発」で進められたことは既に記したとおりである．

以上の検討に並行して，組織面からの準備も進められた．平成 11 年度には，センターの研究活動と将来に関する外部評価を実施した．その詳細は，第 16 章に記したとうりである．

筑波大学の研究センターは，研究審議会の下に置かれている．平成 11 年 10 月 7 日開催の第 277 回研究審議会に於いて「計算物理学研究センターの今後の在り方についての検討委員会」が設置された．委員会は，学内関係組織の教官 7 名及び計算物理学研究センター長から構成され，滝川紘治教授 (物理学系) が委員長を務めた．委員会では，センターにおける将来検討及び外部評価結果を資料として，センターの今後の在り方についての検討が行われ，10 年時限満了後は，基礎物理学及びより広範な科学分野における数値的研究とそのための高性能計算機の開発並びに計算機工学の研究を目的として，新たにセンターの再出発を図るべきであるとの答申がまとめられた．この答申は，平成 12 年 2 月 10 日開催の第 281 回研究審議会に報告され，その基本方針が承認された．

以上の手続きを経て，平成 12 年度と平成 13 年度にわたって，センター新設の概算要求が行われ，関係各位の理解を得て，平成 14 年 4 月から，名称を「計算物理学研究センター」に保って，新たに 10 年時限のセンターの設置が認められた．新センターは，計算物理学並びにそのための計算機工学の研究を行うこととされ，研究部門として，現センターの計算素粒子物理学，計算物性物理学，計算宇宙物理学，並列計算機工学の 4 部門に加えて，計算生命物理学研究部門が設置された．また，定員は，教授 4，助教授 4，講師 3，客員教授 2 (I 種 1，II 種 1)，客員助教授 1 (I 種)，事務官 2 に増員された．

参考文献

[1] 「筑波大学物理学関連組織評価報告書」1994 年 6 月

[2] 「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

18　付録

18.1　設置関係法令等

国立学校設置法施行規則 (抄)

昭和 39 年 4 月 1 日 文部省令第 11 号
最終改正 平成 13 年 3 月 31 日 文部科学省令第 57 号

(全国共同利用施設及びその長)

第 **20** 条の **4**　別表第 7 の 3 の上欄に掲げる国立大学に，学術研究の発展に資するための全国共同利用施設として，同表の中欄に掲げる施設を置き，当該施設の目的は，それぞれ同表の下欄に掲げるとおりとする．

2　前項の施設は，国立大学の教員その他の者で，当該施設の目的たる研究と同一の分野の研究に従事するものに利用させるものとする．

3　第 1 項の施設に長を置き，その施設の置かれる大学の教授をもって充てる．

別表第 **7** の **3** (第 20 条の 4 関係)

国立大学の名称	上欄の国立大学に置く全国共同利用施設	中欄の施設の目的
筑波大学	計算物理学研究センター	計算物理学に関する研究

18.2　学内規則等

筑波大学計算物理学研究センター規則

平成 4 年 3 月 19 日規則第 15 号
改正　平成 5 年 2 月 18 日規則第 5 号
平成 11 年 3 月 16 日規則第 4 号
平成 12 年 3 月 16 日泉則第 6 号

(目的)
第 1 条　計算物理学研究センター (以下「センター」という .) は，全国共同利用施設として，計算物理学に関する研究を行い，かつ，国立大学の教員その他の者で，この分野の研究に従事するものの利用に供することを目的とする．
(管理運営)
第 2 条　センターの管理運営は，センター長が行う．
(研究部門)
第 3 条 センターに，次に掲げる研究部門を置く．
(1) 計算素粒子物理学研究部門
(2) 計算物性物理学研究部門
(3) 並列計算機工学研究部門
(4) 計算宇宙物理学研究部門
(運営委員会)
第 4 条　センターの運営に関し，次に掲げる重要事項を審議するため，センター運営委員会 (以下「委員会」という .) を置く．
(1) 組織の新設，改廃の発議に関すること．
(2) 教員の採用，昇任，不利益処分等の発議に関すること．
(3) 予算に関すること．
(4) 施設の管理に関すること．
(5) その他センター長が必要と認める事項．
第 5 条 委員会は，次に掲げる委員で組織する．
(1) センター長
(2) センターの維持管理に関係する教員のうちからセンター長が推薦する者　2 人
(3) 物理学糸から選出される教員　3 人
(4) 電子・情報工学糸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
2　委員会に委員長を置き，センター長をもって充てる．
3　委員長は，委員会を主宰する．
4　委員長に事故があるときは，あらかじめ委員長の指名する委員がその職務を代行する．
5　委員会は，過半数の委員が出席しなければ，議事を開き，議決することができない．
6　委員会の議事は，出席した委員の過半数をもって決し，可否同数のときは，委員長の決するところによる．
(運営協議会)
第 6 条 センターの共同研究及び共同利用に関し，次に掲げる重要事項を審議するため，センター

運営協議会 (以下「 協議会 」という .) を置く .
(1) 研究計画に関すること .
(2) 事業計画に関すること .
(3) その他共同研究及び共同利用に関すること .
第 7 条 協議会は , 次に掲げる委員で組織する .
(1) センター長
(2) センターの維持管理に関係す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・情報工学系及び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
2　協議会に委員長を置き , センター長をもって充てる .
(任期)
第 8 条　第 5 条第 1 項第 2 号から第 6 号まで及び第 7 条第 1 項第 2 号から第 5 号までの委員の任期は 2 年とする . ただし , 再任を妨げない .
2　前項の規定にかかわらず , 任期の終期は , 委員となる日の属する年度の翌年度の末日とする .
(共同研究員)
第 9 条　学長は , 国立大学の教員その他の者で , 計算物理学に関する研究に従事するものを , 共同研究員として委嘱することができる .
2　共同研究員の委嘱の期間は 2 年とする . ただし , 更新を妨げない .
(事務)
第 10 条　センターに関する事務は , 研究協力部研究協力課が行う .
(細目)
第 11 条　この規則に定めるもののはか , センターの運営に閑し必要な細目は , 別に定める .

附　則
1　この規則は , 平成 4 年 4 月 10 日から施行する .
2　この規則は , 平成 14 年 3 月 31 日限り , その効力を失う .
附　則 (平 5 . 2 . 18 規則 5 号)
この規則は , 平成 5 年 4 月 1 日から施行する .
附　則 (平 11 . 3 . 16 規則 4 号)
この規則は , 平成 11 年 4 月 1 日から施行する .
附　則 (平 12 . 3 . 16 規則 6 号) 抄

(施行期日)
1　この規則は , 平成 12 年 4 月 1 日から施行する .

18.3　センター内規則等

筑波大学計算物理学研究センター共同研究員内規

（平成 5 年 3 月 23 日制定）
改正　平成 9 年 3 月 3 日

（目的）
1 この内規は，筑波大学計算物理学研究センター（以下「センター」）の共同研究員について，必要な事項を定めるものとする．
（共同研究員）
2　共同研究員は，センターの研究計画に基づき，専用超並列計算機を用いて計算物理学に関する研究・開発を行う者とする．
3　共同研究員は，センター内の施設，文献，資料等を利用することができるものとする．
（推薦）
4　共同研究員は，本学の教員並びに学外者のうちから運営委員会の議を得て，センター長が推薦をするものとする．
（任期）
5　共同研究員の任期は，2 年とする．ただし，再任を妨げない．
（雑則）
6　この内規に定めるもののほか，共同研究員に関し必要な事項は，センター長が別に定めるものとする．

附記
1　この内規は，平成 5 年 4 月 1 日から施行する．
2　この内規は，平成 14 年 3 月 31 日限り，その効力を失う．

附　記
この内規は，平成 9 年 3 月 3 日から施行する．

19　新聞・雑誌等記事

筑波大学計算物理学研究センター
UTCCP Report 02-1

発行日　平成 14 年 7 月 31 日
発行者　筑波大学計算物理学研究センター
　　宇川 彰
　　〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1
　　TEL 0298-53-6488
編集者　筑波大学計算物理学研究センター
　　宇川 彰
印刷所　株式会社 イセブ
　　〒 305-0005 茨城県つくば市天久保 2-11-20
　　TEL 0298-51-2515

Report of Center for Computational Physics
University of Tsukuba
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan
http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/