はしがき

本冊子は，平成 9 年度—13 年度の 5 年間にわたり実施された，未来開拓学術研究推進事業理工領域「計算科学」研究分野の 1 プロジェクトである「次世代超並列計算機開発」プロジェクトの研究成果をまとめたものである。

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，東京大学を拠点として実施し，重力 / クーロン力専用計算機 GRAPE-6 を中心とする開発製作を行った。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 を実現する予定である。

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。

以上の成果は，本プロジェクト開始当初の計画目標を達成するものであり，特に高性能ヘテロジニアス・マルチコンピュータを実現し，その有効性を実証したことは，次世代の超高速科学技術シミュレーションプラットフォームを切り開く成果と考えている。

本冊子には，以上の研究成果の概要と主要論文等がおさめられている。ご高覧を頂き，ご批判とご意見を頂ければ幸いである。

最後に，本プロジェクトの 5 年間を通じてご支援頂いた「計算科学」推進委員会の矢川委員長をはじめ推進委員及び関係各位に厚くお礼を申し上げる。

平成 14 年 3 月 31 日

プロジェクトリーダ	筑波大学副学長	岩崎　洋一
コアメンバー	筑波大学物理学系教授	宇川　彰
コアメンバー	東京大学大学院理学系研究科助教授	牧野　淳一郎
コアメンバー	筑波大学電子・情報工学系助教授	朴　泰祐

目 次

1 研究組織 **7**

2 研究経費 **8**

3 研究成果発表 **9**

3.1 「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト 9

3.1.1 学術雑誌論文 9

3.1.2 国際会議発表論文 10

3.1.3 著書 11

3.1.4 特許 12

3.1.5 国内学会・研究会における口頭発表 12

3.2 「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト 13

3.2.1 学術雑誌論文 13

3.2.2 国際会議発表論文 15

3.2.3 著書 19

3.2.4 特許 19

3.2.5 国内学会における口頭発表 20

3.3 ヘテロジニアス・マルチコンピュータシステムの開発 23

3.3.1 学術雑誌論文 23

3.3.2 国際会議発表論文 23

3.3.3 著書 23

3.3.4 特許 23

3.3.5 国内学会・研究会における口頭発表 23

3.4 新聞等による紹介 24

3.5 ホームページによる紹介 29

4 研究成果概要 **30**

4.1 研究目的 30

4.2 研究計画 31

4.3 「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト 32

4.3.1 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 32

4.3.2 並列入出力・並列可視化システム PAVEMENT 39

4.4 「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト 47

4.4.1 GRAPE-6 システム 47

4.4.2 新しい高速化アルゴリズム 50

4.4.3 ゴードン・ベル賞 51

4.5 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 53

4.5.1 HMCS のシステム構成 53
4.5.2 HMCS におけるアプリケーション 55
4.6 まとめと展望 57

5 主要論文別刷 58

5.1 「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト 58
1. Preeti Ranjan Panda, Hiroshi Nakamura, Nikil D. Dutt, and Alexandru Nicolau, "Augmenting Loop Tiling with Data Alignment for Improved Cache Performance" 58
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" 58
3. 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" 58
4. 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" 58
5. 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" 58
6. 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" 58
7. Preeti Ranjan Panda, Hiroshi Nakamura, Nikil D. Dutt, Alexandru Nicolau, "A Data Alignment Technique for Improving Cache Performance" 58
8. H. Nakamura, K. Itakura, M. Matsubara, T. Boku, and K. Nakazawa, "Effectiveness of Register Preloading on CP-PACS Node Processor" 58
9. M. Matsubara, H. Numa, and T. Boku, "Commodity Network based Parallel I/O System for Massively Parallel Processors" 58
10. H. Nakamura, H. Okawara, T. Boku, M. Kondo, and S. Sakai, "SCIMA: A Novel Architecture for High Performance Computing" 58
11. M. Kondo, H. Okawara, H. Nakamura, T. Boku, and S. Sakai, "SCIMA: A Novel Processor Architecture for High Performance Computing" 58
12. M. Kondo, H. Okawara, H. Nakamura, and T. Boku, "SCIMA: Software Controlled Integrated Memory Architecture for High Performance Computing" 58
13. H. Nakamura, M. Kondo, and T. Boku, "Software Controlled Reconfigurable On-Chip Memory for High Performance Computing" 58
14. K. Kurata and H. Nakamura, "Novel Method for Primer/Probe Design and Sequence Analysis" 58
15. T. Boku, M. Matsubara and K. Itakura, "PIO: Parallel I/O System for Massively Parallel Processors" 58
16. M. Fujita, and H. Nakamura, "The Standard SpecC Language" 58
17. N. Hosaka, K. Kurata, and H. Nakamura, "Comparison of Methods for Probe Design" 58
18. M. Kondo, M. Fujita, H. Nakamura, "Software-Controlled On-Chip Memory for High-Performance and Low-Power Computing" 58

19. H. Susa and M. Umemura, "A Simulation of Galaxy Formation by Radiation-SPH" 58
20. H. Susa and M. Umemura, "Galaxy Formation in the Presence of Ultraviolet Background Radiation Field – a Simulation by Radiation-SPH –" 58
21. A. Ukawa, "The CP-PACS parallel computer" 58
22. Y. Iwasaki, "The CP-PACS Project and the Future" 58
23. K. Kanaya, "Elementary Particles on a Dedicated Parallel Computer" 58
5.2 「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト 58
1. A. Kawai, T. Fukushige, M. Taiji, J. Makino, and D. Sugimoto, "The PCI interface for GRAPE systems: PCI-HIB" 58
2. K. Takahashi and S. F. Portegies Zwart, "The Disruption of Globular Star Clusters in the Galaxy: A Comparative Analysis between Fokker-Planck and N-body Models" 58
3. E. Kokubo, K. Yoshinaga and J. Makino, "On a Time-Symmetric Hermite Integrator for Planetary N-Body Simulation" 58
4. J. Makino, T. Fukushige, Y. Funato, and E. Kokubo, "On the Mass Distribution of Planetesimals in the Early Runaway Stage" 58
5. S. F. Portegies Zwart, J. Makino, S. L. W. McMillan, and P. Hut, "Star Cluster Ecology III. Runaway Collisions in Young Compact Star Clusters" 58
6. A. Kawai, J. Makino, "A Simple Formulation of the Fast Multipole Method: Pseudo-Particle Multipole Method" 58
7. A. Kawai, T. Fukushige, J. Makino, "$7.0/Mflops Astrophysical N-Body Simulation with Treecode on GRAPE-5" 58
8. T. Nakano and J. Makino, "On the Origin of Density Cusps in Elliptical Galaxies" 58
9. T. Nakano and J. Makino, "On the Cusp around Central Black Holes in Luminous Elliptical Galaxies" 58
10. T. Sensui, Y. Funato, and J. Makino, "Evolution of Clusters of Galaxies: Mass Stripping from Galaxies and Growth of Common Halos" 58
11. Yoko Funato and Junichiro Makino, "Change in Mass and Energy of Galaxies through Mutual Encounters" 58
12. Koji Takahashi, Simon F. Portegies Zwart, "The Evolution of Globular Clusters in the Galaxy" 58
13. T. Hamada, T. Fukushige, A. Kawai and J. Makino, "PROGRAPE-1: A Programmable, Multi-Purpose Computer for Many-Body Simulations" 58
14. A. Kawai, T. Fukushige, J. Makino and M. Taiji, "GRAPE-5: A Special-Purpose Computer for N-Body Simulations" 58
15. S. F. Portegies Zwart, J. Makino, S. L. W. McMillan, and P. Hut, "How Many Young Star Clusters Exist in the Galactic Center?" 58

16. A. Kawai and J. Makino, "Pseudoparticle multipole method: A simple method to implement a high-accuracy treecode" 58
17. T. Fukushige and J. Makino, "Structure of dark matter halos from hierarchical clustering" 58
18. T. Fukushige and Y. Suto, "The mean pairwise peculiar velocity in cosmological N-body simulations: time variation, scale dependence and stable condition" . . . 58
19. T. Ebisuzaki, J. Makino, T. G. Tsuru, Y. Funato, S. F. Portegies Zwart, S. L. W. McMillan, P. Hut, S. Matsushita, H. Matsumoto and R. Kawabe, "Missing link found? The "runaway" path to supermassive black holes" 58
20. S. F. Portegies Zwart, J. Makino, S.L.W. McMillan, and P. Hut, "The Lives and Deaths of Star Clusters near the Galactic Center" 58
21. Koji Takahashi, Tomohiro Sensui, Yoko Funato, Junichiro Makino, "Collisional Evolution of Galaxy Clusters and the Growth of Common Halos" 58

5.3 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 58

1. 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" 58
2. 岩崎洋一, 宇川彰, 朴泰祐, "21 世紀の超高速科学技術計算プラットホーム" 58

1　研究組織

平成 14 年 3 月 31 日現在

「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

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

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

2　研究経費

	連続体 サブプロジェクト	多粒子系 サブプロジェクト	年度別合計
平成 9 年度	110,162 千円	105,558 千円	215,720 千円
平成 10 年度	103,055 千円	118,939 千円	221,994 千円
平成 11 年度	104,611 千円	97,361 千円	201,972 千円
平成 12 年度	102,463 千円	100,067 千円	202,530 千円
平成 13 年度	160,295 千円	132,054 千円	292,349 千円
合計	580,586 千円	553,979 千円	1,134,565 千円

3 研究成果発表

3.1 「連続体向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト

3.1.1 学術雑誌論文

[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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] S. Aoki, R. Burkhalter, K. Kanaya, T. Yoshie, T. Boku, H., Nakamura and Y. Yamashita, "Performance of lattice QCD programs on CP-PACS", Parallel Computing 25, No. 10-11, 1243-1256, 1999.

[9] A. Ukawa, "Lattice QCD results from the CP-PACS parallel computer", Parallel Computing 25, No. 10-11, 1257-1280, 1999.

[10] H. P. Shanahan et al., "Heavy Quark Physics in $N_f = 2$ QCD", Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)73, 375-377, 1999.

[11] T. Manke et al., "Hybrid Quarkonia on Asymmetric Lattices", Phys. Rev. Lett. 82, 4396-4399, 1999.

[12] A. Ali Khan et al., "Heavy Quarkonia from Anisotropic and Isotropic Lattices", Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.) 83, 319-321, 2000.

[13] A. Ali Khan et al., "Heavy Light Spectrum and Decay Constant From NRQCD with Two Flavors of Dynamical Quarks", Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)83, 265-267, 2000.

[14] T. Manke, "Exotic Quarkonia from Anisotropic Lattices", Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.) 86, 397-400, 2000.

[15] T. Manke et al., "Sea Quark Effects on Quarkonia", Phys. Rev. D62, 114508, 2000.

[16] A. Ali Khan et al., "Decay Constants of B and D Mesons from Improved Relativistic Lattice QCD with Two Flavors of Sea quarks", Phys. Rev. D64, 034505, 2001.

[17] T. Manke et al., "Hybrid Quarkonia with Dynamical Sea Quarks", Phys. Rev. D64, 097505, 2001.

[18] A. Ali Khan et al., "B Meson Decay Constant from Two Flavor Lattice QCD with Non-relativistic Heavy Quarks", Phys. Rev. D64, 054504, 2001.

3.1.2 国際会議発表論文

[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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

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

[9] 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.

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

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

[12] 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.

[13] 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).

[14] 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).

[15] Y. Iwasaki, "The CP-PACS parallel computer project", Proc. International Conference on "Multi-Scale Phenomena and Their Simulation", eds. F. Karsch, B. Monien and H. Satz, World Sci., 80-90, 1997.

[16] Y. Iwasaki, "The CP-PACS project and computational physics", Proc. International Symposium on "Parallel Computing in Engineering and Science", Science and Technology Agency, 1997.

[17] A. Ukawa, "The CP-PACS parallel computer", Selected papers from the International Conference on Computing in High Energy Physics (CHEP'97), Berlin, Germany April 7-11, 1997, Computer Physics Communications 110, 220-224, 1998.

[18] Y. Iwasaki, "The CP-PACS Project and Lattice QCD results", Proceedings of the Fifth International Conference on Computational Physics, Kanazawa, Japan, October 11-13, 1999, Eds. Y. Hiwatari et al., Progress of Theoretical Physics Supplement No. 138, pp.1-10, 2000.

[19] Y. Iwasaki, "The CP-PACS Project and the Future", Proceedings of the International Conference on Science Frontier from Tsukuba 999 (SFT999), Tsukuba, Japan, November 17-19, 1999, Ed. L. Esaki, Universal Academy Press, pp. 465-474, 2000.

[20] K. Kanaya, "Elementary Particles on a Dedicated Parallel Computer", 18th Humboldt symposium "100 Years Werner Heisenberg – Works and Impact", Bamberg, Germany, Sept. 26-30, 2001 to appear in Fortschritte der Physik.

3.1.3 著書

該当なし

3.1.4 特許

該当なし

3.1.5 国内学会・研究会における口頭発表

[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.

[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.

[4] 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.

[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 '99 ポスター，pp.214, 1999 年 5 月.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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)

[17] 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)

[18] 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)

3.2 「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト

3.2.1 学術雑誌論文

[1] T. Endoh, T. Fukushige, and J. Makino *Gravothermal Expansion in N-Body Systems*, *Publications of Astronomical Society of Japan*, 49, No 3, 345-352 (June 1997).

[2] A. Kawai, T. Fukushige, M. Taiji, J. Makino, and D. Sugimoto, *The PCI interface for GRAPE systems: PCI-HIB*, *Publications of Astronomical Society of Japan*, 49, No.5, 607-618 (October 1997).

[3] K. Takahashi and S. F. Portegies Zwart, *The Disruption of Globular Star Clusters in the Galaxy: A Comparative Analysis between Fokker-Planck and N-body Models*, *The Astrophysical Journal*, 503, L49-L52 (August 1998)

[4] E. Athanassoula, A. Bosma, J.-C. Lambert, and J. Makino, *Performance and accuracy of a GRAPE-3 system for collisionless N-body simulations*, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 293, 369-380 (February 1998).

[5] E. Kokubo, K. Yoshinaga and J. Makino, *On a Time-Symmetric Hermite Integrator for Planetary N-Body Simulation*, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 297, 1067-1072 (July 1998).

[6] J. Makino, T. Fukushige, Y. Funato, and E. Kokubo, *On the Mass Distribution of Planetesimals in the Early Runaway Stage*, *New Astronomy*, 3, No.7, 411-417 (August 1998).

[7] S.F. Portegies Zwart, J. Makino, P. Hut, and S. L. W. McMillan, *On the dissolution of evolving star clusters*, *Astronomy and Astrophysics*, 337, 363-371 (September 1998).

[8] T. Nakano and J. Makino, *On the Origin of Density Cusps in Elliptical Galaxies*, *The Astrophysical Journal*, 510, 155-166 (January 1999)

[9] T. Nakano and J. Makino, *On the Cusp around Central Black Holes in Luminous Elliptical Galaxies*, *The Astrophysical Journal*, 525, L77-L80 (December 1999)

[10] T. Fukushige, P. Hut, and J. Makino, *High-Performance Special-Purpose Computers in Science*, *IEEE Computing in Science and Engineering*, 10, No. 2, 12-13, (March 1999)

[11] T. Sensui, Y. Funato, and J. Makino, *Evolution of Clusters of Galaxes: Mass Stripping from Galaxies and Growth of Common Halos*, *Publications of Astronomical Society of Japan*, 51, No. 6, 943-954 (December 1999)

[12] Yoko Funato and Junichiro Makino, *Change in Mass and Energy through Collisions of Two Identical Galaxies*, *The Astrophysical Journal*, 511, 625-638 (February 1999)

[13] Keiko Yoshinaga, Eiichiro Kokubo and Junichiro Makino, *Stability of Protoplanet Systems*, *Icarus*, 139, 325-335 (June 1999)

[14] Junichiro Makino *Yet another fast multipole method without multipoles — Pseudo-particle multipole method*, *Journal of Computational Physics*, 151, 910-920 (1999)

[15] T. Fukushige and D. C. Heggie, *The Time Scale of Escape from Star Clusters*, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 318, 753-761 (November 2000)

[16] Koji Takahashi, Simon F. Portegies Zwart, *The Evolution of Globular Clusters in the Galaxy*, ApJ, 535, 759-775 (June 2000)

[17] Koji Takahashi, Hyung Mok Lee, *Evolution of multimass globular clusters in the Galactic tidal field with the effects of velocity anisotropy*, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 316, 671-683 (August 2000)

[18] A. Kawai, T. Fukushige, J. Makino and M. Taiji, *GRAPE-5: A Special-Purpose Computer for N-Body Simulations Publications of Astronomical Society of Japan*, 52, No. 4, 659-676 (August 2000)

[19] T. Hamada, T. Fukushige, A. Kawai and J. Makino, *PROGRAPE-1: A Programmable, Multi-Purpose Computer for Many-Body Simulations*, *Publications of Astronomical Society of Japan*, 52, No. 5, 943-954 (October 2000)

[20] E. Kokubo, S. Ida and J. Makino, *Evolution of a Circumterrestrial Disk and Formation of a Single Moon*, *Icarus*, 148, 419–436 (December 2000)

[21] S. F. Portegies Zwart, S. L. W. McMillan, P Hut, and J. Makino, *How Many Young Star Clusters Exist in the Galactic Center?*, *The Astrophysical Journal Letters*, **546**, L101–L104 (January 2001)

[22] S. F. Portegies Zwart, S. L. W. McMillan, P Hut, and J. Makino, *Star cluster ecology - IV. Dissection of an open star cluster: photometry*, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, **321**, 199-226 (February 2001)

[23] A. Kawai and J. Makino, *Pseudoparticle multipole method: A simple method to implement a high-accuracy tree code*, *The Astrophysical Journal Letters*, **550**, L143–L146 (April 2001)

[24] T. Fukushige and J. Makino, *Structure of dark matter halos from hierarchical clustering*, *The Astrophysical Journal*, **557**, 533–545 (August 2001)

[25] T. Fukushige and Y. Suto, *The mean pairwise peculiar velocity in cosmological N-body simulation: time variation, scale dependence and stable condition*, *The Astrophysical Journal*, 557, L11-L14 (August 2001)

[26] T. Ebisuzaki, J. Makino, T. G. Tsuru, Y. Funato, S. F. Portegies Zwart, S. L. W. McMillan, P Hut, S. Matsushita, H. Matsumoto and R. Kawabe, *Missing link found? The "runaway" path to supermassive black holes*, *The Astrophysical Journal Letters*, **562**, L19–L22 (November 2001)

[27] E. Kokubo, *Planetary Accretion: From Planetesimals to Protoplanets*, Reviews in Modern Astronomy, 14, 117-132 (August 2001)

[28] S. F. Portegies Zwart, J. Makino, S.L.W. McMillan, and P. Hut, *The Lives and Deaths of Star Clusters near the Galactic Center*, *The Astrophysical Journal*, **565**, 265–279 (January 2002)

[29] Koji Takahashi, Tomohiro Sensui, Yoko Funato, Junichiro Makino, *Collisional Evolution of Galaxy Clusters and the Growth of Common Halos Publications of Astronomical Society of Japan*, **54**, No 1, 5–20 (February 2002)

3.2.2 国際会議発表論文

[1] J. Makino, *GRAPE-6*, Joint-Discussion No. 15, International Astronomical Union Kyoto General Assembly, Kyoto, Japan, August 22, 1997.

[2] K. Takahashi, *Anisotropic Fokker-Planck Models of Globular Cluster Evolution*, Joint Discussion No. 15, International Astronomical Union Kyoto General Assembly, Kyoto, Japan, August 22, 1997.

[3] T. Fukushige, J. Makino, and M. Taiji, *Highly-Parallelized Special-Purpose Computer for N-body Simulation: GRAPE-5*, Joint Discussion No. 15, International Astronomical Union Kyoto General Assembly, Kyoto, Japan, August 22, 1997.

[4] A. Kawai, T. Fukushige, M. Taiji, J. Makino,and D. Sugimoto, *The PCI interface for GRAPE systems: PCI-HIB* , Joint Discussion No. 15, International Astronomical Union Kyoto General Assembly, Kyoto, Japan, August 22, 1997.

[5] J. Makino, *Stellar Dynamics on 100 Tflops special-purpose computers*, International Symposium on Supercomputing, Tokyo, Japan, Sept 1-3, 1997, in: eds. T. Ebisuzaki, and J. Makino, New horizons of computational science, Proceedings of the international symposium on supercomputing (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), 2001, pp 39-48

[6] M. Taiji, *Special-Purpose Computer for Classical Particle Simulations*, International Symposium on Supercomputing, Tokyo, Japan, Sept 1-3, 1997. in: eds. T. Ebisuzaki, and J. Makino, New horizons of computational science, Proceedings of the international symposium on supercomputing (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), 2001, pp 117-128

[7] T. Fukushige and J. Makino, *N-body Simulation of Halo Formation Using GRAPE-4* , International Symposium on Supercomputing, Tokyo, Japan, Sept 1-3, 1997. in: eds. T. Ebisuzaki, and J. Makino, New horizons of computational science, Proceedings of the international symposium on supercomputing (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), 2001, pp 229-232

[8] K. Takahashi, *Anisotropic Fokker-Planck Models for Globular Cluster Evolution*, International Symposium on Supercomputing, Tokyo, Japan, Sept 1-3, 1997. in: eds. T. Ebisuzaki, and J. Makino, New horizons of computational science, Proceedings of the international symposium on supercomputing (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), 2001, pp 285-288

[9] J. Makino, *Timestep-Symmetrized integrators and their applicattion to classical N-body problems*, SCICADE97, Grado, Italy, Sept. 15-19, 1997

[10] Y. Funato, *A meta-algorithm to symmetrize any one-step time-integration scheme*, SCICADE97, Grado, Italy, Sept. 15-19, 1997

[11] K. Takahashi, *Anisotropic Fokker-Planck Models of Star Clusters*, Numerical Astrophysics 98, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998, in Numerical Astrophysics, ed. S. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Kluwer), pp 77-78 (1999)

[12] T. Hamada, T. Fukushige, A. Kawai, and J. Makino, *PROGRAPE-1: A Programmable Special-Purpose Computer for Many-Body Simulations*, Numerical Astrophysics 1998, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998. in Numerical Astrophysics, ed. S. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Kluwer), pp 427-428 (1999)

[13] T. Fukushige, and J. Makino, *N-body Simulation of Dark Matter Halo Formation using GRAPE*, Numerical Astrophysics 1998, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998. in Numerical Astrophysics, ed. S. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Kluwer), pp 427-428 (1999)

[14] J. Makino, *Special-Purpose Computer for GravitationalN-body System: GRAPE*, Numerical Astrophysics 1998, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998. in Numerical Astrophysics, ed. S. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Kluwer), pp 407-414 (1999)

[15] T. Hamada, T. Fukushige, A. Kawai, and J. Makino, *PROGRAPE-1: A Programmable Special-Purpose Computer for Many-Body Simulations*, poster session No. 1, 6-th IEEE

FCCM'98 Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, California, USA, April 15-17, 1998.

[16] K. Takahashi, S.F. Portegies Zwart, *Dynamical Evolution of Tidally Truncated Star Clusters*, Galaxy Dynamics ,Rutgers University, USA, August, 1998 in Galaxy Dynamics (ASP Conf. Ser., Vol. 182), ed. D. Merritt, J. A. Sellwood, M. Valluri (ASP), pp 107-108 (1999)

[17] T. Nakano and J. Makino, *The Structure and Origin of Density Cusps in the Central Regions of Ellipticals*, Galaxy Dynamics, Rutgers University, USA, August 8-12, 1998 in Galaxy Dynamics (ASP Conf. Ser., Vol. 182), ed. D. Merritt, J. A. Sellwood, M. Valluri (ASP), pp 100-101 (1999)

[18] E. Kokubo, S. Ida, and J. Makino, *High-Resolution N-Body Simulation of Lunar Accretion from an Impact-Generated Disk*, Origin of the Earth and Moon, Monterey, USA, December 2, 1998.

[19] A. Kawai, J. Makino, *A New Method to Implement High Accuracy Barnes-Hut Treecode: Pseudo-Particle Multipole Method*, Workshop on 'The GRAPE Users Community' Tokyo, Japan, January 28-29, 1999

[20] Junichiro Makino, *Stellar Dynamics and special-purpose computer: GRAPE project*, The Chaotic Universe, Roma, Italy, February 1-5, 1999, in The Chaotic Universe, eds V. G. Gerzadyan and R. Ruffini (World Scientific, Singapore), pp 441-454, (2000)

[21] A. Kawai, J. Makino, *A Simple Formulation of the Fast Multipole Method: Pseudo-Particle Multipole Method*, the Ninth SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, Texas, USA, March, 1999

[22] K. Takahashi, S. F. Portegies Zwart, *The Dynamical Evolution of Globular Clusters in the Galaxy*, The Galactic Halo: From Globular Clusters to Field Stars, Belgium, July, 1999, in The Galactic Halo : From Globular Cluster to Field Stars, Proceedings of the 35th Liege International Astrophysics Colloquium, eds A. Noels, P. Magain, D. Caro, E. Jehin, G. Parmentier, and A. A. Thoul (Institut d'Astrophysique et de Geophysique, Liege), pp 581-582 (2000)

[23] Y. Funato and J. Makino, *Is the Hubble expansion accelerating, or are we looking through a chaotic universe ?* Gravitational Lensing : Recent Progress and Future Goals, Boston, USA, July, 1999. in Proceedings of Gravitational Lensing : Recent Progress and Future Goals, eds Brainerd, T.G. and Kochanek,C.S. (ASP Conf Ser. 237), pp 143–144 (2001)

[24] A. Kawai, J. Makino, *A Simple Formulation of the Fast Multipole Method: Pseudo-Particle Multipole Method*, Proceedings of the Ninth SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (SIAM, in CD-ROM, 1999)

[25] A. Kawai, T. Fukushige, J. Makino, *$7.0/Mflops Astrophysical N-Body Simulation with Treecode on GRAPE-5*, SC99, Portland, USA, November, 1999, in Proceedings of SC99 (ACM, in CD-ROM, November 1999)

[26] Junichro Makino and Eiichiro Kokubo, *SPH simulation of giant impact*, International Symposium on Planetary Impact Events and their Consequences on Earth, Yamaguchi, Japan, September, 1999

[27] Junichoro Makino, *GRAPE Project: A decade of special-purpose computers for many-body simulations*, The 5th International Conference on Computational Physics, Kanazawa, Japan, October, 1999.

[28] J. Makino, *Direct Simulation of Dense Stellar Systems with GRAPE-6*, Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, Heidelberg, Germany, March 20-24, 2000, in Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, eds S. Deiters, B. Fuchs, A. Just, R. Spurzem and R. Wielen (ASP Conf Ser. 228), pp 87–98 (2001)

[29] T. Fukushige, A. Kawai, and J. Makino, *Star Clusters Simulations Using GRAPE-5*, Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, Heidelberg, Germany, March 20-24, 2000, in Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, eds S. Deiters, B. Fuchs, A. Just, R. Spurzem and R. Wielen (ASP Conf Ser. 228), pp 434–436 (2001)

[30] Y. Funato and J. Makino, *On the disruption time-scale of sub star systems*, Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, Heidelberg, Germany, March 20-24, 2000, in Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, eds S. Deiters, B. Fuchs, A. Just, R. Spurzem and R. Wielen (ASP Conf Ser. 228), pp 437–439 (2001)

[31] Koji Takahashi, *The Dynamical Evolution of Globular Clusters and the Stellar Initial Mass Function*, Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, Heidelberg, Germany, March 20-24, 2000, in Star 2000: Dynamics of Star Clusters and the Milky Way, eds S. Deiters, B. Fuchs, A. Just, R. Spurzem and R. Wielen (ASP Conf Ser. 228), pp 69–74 (2001)

[32] J. Makino, *N-body simulations on GRAPE-6*, Stellar Collisions, Mergers and their Consequences, New York, USA, May, 2000.

[33] S. Portegies Zwart, J. Makino, S. L. W. McMillan, and P. Hut, *Runaway Collisions in Star Clusters*, Stellar Collisions, Mergers and their Consequences, New York, USA, May, 2000.

[34] J. Makino, *GRAPE Project: special-purpose computers for many-body simulations*, Formal Methods for HW/SW design for Grand Challenge Scientific Applications, Ischia, Italy, June, 2000.

[35] T. Fukushige and J. Makino, *Structure of Dark Matter Halo through Hierarchical Clustering*, Constructing the Universe with Clusters of Galaxies, Paris, France, June, 2000

[36] T. Sensui, Y. Funato, and J. Makino, *Evolution of Clusters of Galaxies: Growth of Common Halos* The Physics of Galaxy Formation, Tsukuba, Japan, July, 2000

[37] T. Nakano and J. Makino, *On the Cusps around Central Black Holes in Elliptical Galaxies*, The Physics of Galaxy Formation, Tsukuba University, Japan, July, 2000

[38] Y. Funato, *On the disruption time scale of galaxies in cluster environment*, The Physics of Galaxy Formation, Tsukuba University, Japan, July, 2000 in The Physics of Galaxy Formation, (ed. Umemura, M., and Susa, H.), ASP Conf Ser. 222, 161–166. 2001.

[39] T. Fukushige, *The Structure of Cold Dark Matter Halos* VC3: Victria Computational Cosmology Conference, Victoria, Canada, August, 2000

[40] J. Makino, T. Fukushige and M. Koga, *A 1.349 Tflops simulation of black holes in a galactic center on GRAPE-6*, SC2000, Dallas, USA, November, 2000. (ACM, in CD-ROM, November 2000)

[41] E. Kokubo, *Lunar Formation from a Circumterrestrial Disk*, Astrophysical Ages and Time Scales, Hilo, USA, February, 2001.

[42] Y.Funato *Evolution of galaxies in clusters*, IAU Symposium No. 208, Astrophysical supercomputing using particles, Tokyo, Japan, July 2001

[43] E. Kokubo, *Lunar Accretion from an Impact-Generated Disk*, IAU Symposium No. 208, Astrophysical supercomputing using particles, Tokyo, Japan, July 2001

[44] J. Makino, *The GRAPE project: Current Status and Future Outlook*, IAU Symposium No. 208, Astrophysical supercomputing using particles, Tokyo, Japan, July 2001

[45] K. Takahashi, T. Sensui, Y. Funato, J. Makino, *Collisional Evolution of Galaxy Clusters*, IAU Symposium No. 208, Astrophysical supercomputing using particles, Tokyo, Japan, July 2001

[46] J. Makino, *GRAPE Project* The 15th Toyota Conference, Mikkabi, Japan, October 2001

[47] J. Makino and T. Fukushige *A 11.55 Tflops simulation of black holes in a galactic center on GRAPE-6*, SC2001, Denver, USA, November 2001 (ACM, in CD-ROM, November 2001)

[48] J. Makino, *Are intermediate-mass Black Holes really the "Missing links" between stellar and supermassive black holes? — A view from a stellar dynamicist*, JGRG11, Tokyo, Japan, January 2002

3.2.3 著書

[1] J. Makino and M. Taiji, *Scientific Simulations with Special-Purpose Computers — The GRAPE Systems*, 1998, (John Wiley and Sons, Chichester).

3.2.4 特許

該当なし

3.2.5 国内学会における口頭発表

[1] 高橋広治, 銀河の潮汐力を受けた球状星団の進化, 日本天文学会 1997 年秋期年会 宇都宮 1997 年 9 月。

[2] 中野太郎, 牧野淳一郎, 楕円銀河中心部の密度カスプの性質, 日本天文学会 1997 年秋期年会 宇都宮 1997 年 9 月。

[3] 牧野淳一郎, 福重俊幸, 船渡陽子, 泰地真弘人, サブペタフロップス専用計算機 GRAPE-6 計画の概要, 日本天文学会 1997 年秋期年会 宇都宮 1997 年 9 月。

[4] 吉永恵子, 小久保英一郎, 牧野淳一郎, Hermite 積分法の誤差の解析, 日本天文学会 1997 年秋期年会 宇都宮 1997 年 9 月。

[5] 増田信之, 福重俊幸, 牧野淳一郎, MD-GRAPE による SPH 法の加速, 日本天文学会 1997 年秋期年会 宇都宮 1997 年 9 月。

[6] 牧野淳一郎, 福重俊幸, 船渡陽子, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 の演算 LSI, 日本天文学会 1998 年春季年会 八王子 1998 年 3 月。

[7] 船渡陽子, 楕円銀河における Violent relaxation 後の分布関数について, 日本天文学会 1998 年春季年会 八王子 1998 年 3 月。

[8] 福重俊幸, 牧野淳一郎, 銀河の潮汐力を受けた球状星団の進化, 日本天文学会 1998 年春季年会 八王子 1998 年 3 月。

[9] 濱田 剛, 福重俊幸, 川井敦, 牧野淳一郎, PROGRAPE-1:プログラム可能な超高速多体シミュレーション専用計算機, 日本天文学会 1998 年春季年会 八王子 1998 年 3 月。

[10] 高橋広治, Lee, H.M., 銀河の潮汐力の影響を受けた球状星団の力学進化, 日本天文学会 1998 年春季年会 八王子 1998 年 3 月。

[11] 高橋広治, Portegies Zwart, S.F., The Disruption of Globular Star Clusters in the Galaxy, 日本天文学会 1998 年秋季年会 山形 1998 年 10 月

[12] 川井敦, 福重俊幸, 牧野淳一郎, 泰地真弘人, 重力多体シミュレーション専用計算機 GRAPE-5 の開発, 日本天文学会 1998 年秋季年会 山形 1998 年 10 月。

[13] 福重俊幸, 牧野淳一郎, 重力多体シミュレーション専用計算機 GRAPE-6 の開発, 日本天文学会 1998 年秋季年会 山形 1998 年 10 月。

[14] 牧野淳一郎, 高速多重極展開法とツリーコードの新しい実現法, 日本天文学会 1998 年秋季年会 山形 1998 年 10 月。

[15] 小久保英一郎, 井田茂, 牧野淳一郎, 周地球円盤からの月集積, 地球惑星科学関連学会 東京 1998 年 5 月。

[16] 小久保英一郎, 井田茂, 牧野淳一郎, 周地球円盤からの月集積 II, 日本惑星科学会秋季講演会 神戸 1998 年 10 月。

[17] 牧野淳一郎, 高速多重極展開法とツリー法—多体シミュレーションのための高速算法—$O(N)$ は $O(N \log N)$ より速いか？ 第 48 回理論応用力学講演会 東京 1999 年 1 月。

[18] 小久保英一郎, 井田茂, 牧野淳一郎, 月の起源–巨大衝突により形成された周地球円盤からの月集積–, 日本天文学会 1999 年春季学会 京都 1999 年 3 月

[19] 泉水朋寛，船渡陽子，牧野淳一郎，銀河団内の銀河の進化，日本天文学会 1999 年春季学会 京都 1999 年 3 月

[20] 高橋広治, Portegies Zwart, S. F., 銀河に生まれた球状星団の運命, 日本天文学会 1999 年春季年会 京都 1999 年 3 月

[21] 中野太郎, 牧野淳一郎, 楕円銀河の密度カスプの位相空間構造, 日本天文学会 1999 年春季年会 京都 1999 年 3 月

[22] 福重俊幸, D. C. Heggie, The Time Scale of Escape from Star Clusters, 日本天文学会 1999 年春季年会 京都 1999 年 3 月

[23] 船渡陽子, 牧野淳一郎, 銀河団における銀河の質量と速度分散の関係の進化について日本天文学会 1999 年春季年会 京都 1999 年 3 月

[24] 牧野淳一郎, 古賀勝基, 川井敦, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 のプロトタイプシステム, 日本天文学会 1999 年春季年会 京都 1999 年 3 月

[25] 川井敦, 福重俊幸, 牧野淳一郎, GRAPE-5 システム上のツリーコードの実現, 日本天文学会 1999 年秋季年会, 1999 年 10 月

[26] 泉水朋寛，船渡陽子，牧野淳一郎，銀河団内における common halo の形成と銀河の進化，日本天文学会 1999 年秋季学会，1999 年 10 月

[27] 高橋広治, Portegies Zwart, S. F., 銀河に生まれた球状星団の力学進化, 日本天文学会 1999 年秋季年会 福岡 1999 年 10 月

[28] 船渡陽子, 牧野淳一郎, 多重重力レンズ効果による遠方の超新星の光度変化について日本天文学会 1999 年秋季年会 福岡 1999 年 10 月

[29] 牧野淳一郎, 古賀勝基, 川井敦, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 のプロトタイプ, 日本天文学会 1999 年秋季年会 福岡 1999 年 10 月

[30] T. Nakano and J. Makino, On the Cusps around Central Black Holes in Elliptical Galaxies, 「銀河形成の物理」研究会 筑波 1999 年 12 月

[31] T. Sensui, Y. Funato, and J. Makino, *Evolution of Clusters of Galaxies — Growth of Common Halos*,「銀河形成の物理」研究会 筑波 1999 年 12 月

[32] Y.Funato *The stripping rate of mass of galaxies in clusters*,「銀河形成の物理」研究会 筑波 1999 年 12 月

[33] 福重俊幸, 牧野淳一郎, ダークマターハローの構造, 日本天文学会 2000 年春季年会 東京 2000 年 4 月。

[34] 牧野淳一郎, 古賀勝基, 川井敦, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 のプロセッサボード, 日本天文学会 2000 年春季年会 東京 2000 年 4 月。

[35] 船渡陽子，泉水朋寛，牧野淳一郎，銀河団内におけるコモンハローの成長速度, 日本天文学会 2000 年春季年会 東京 2000 年 4 月。

[36] 泉水朋寛，船渡陽子，牧野淳一郎，銀河団内銀河の力学進化，日本天文学会 2000 年春季年会 東京 2000 年 4 月。

[37] 高橋広治, 泉水朋寛, 銀河団におけるコモンハローの成長: Fokker–Planck Models, 日本天文学会 2000 年秋季年会 伊勢崎 2000 年 10 月。

[38] 牧野淳一郎, 古賀勝基, 川井敦, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 の開発状況, 日本天文学会 2000 年秋季年会 伊勢崎 2000 年 10 月。

[39] 福重俊幸, 牧野淳一郎, ダークマターハロー形成のシミュレーション, 日本天文学会 2001 年春季年会 千葉 2001 年 3 月。

[40] 小久保英一郎, 井田茂, 惑星集積の N 体シミュレーション: 原始惑星の寡占的成長と原始惑星系の多様性 II 日本天文学会 2001 年春季年会 千葉 2001 年 3 月。

[41] 高橋広治, Hyung Mok Lee, Oleg Y. Gnedin 球状星団の進化に対する潮汐ショックの影響, 日本天文学会 2001 年春季年会 千葉 2001 年 3 月。

[42] 牧野淳一郎, GRAPE プロジェクトの 10 年 — 専用計算機は引き合うか? JSPP 2001, 京都 2001 年 6 月

[43] 小久保英一郎, 井田茂, 微惑星系から原始惑星系へ, 日本惑星科学会秋季講演会 岡山 2001 年 10 月。

[44] 福重俊幸, 牧野淳一郎, 銀河団スケールにおけるダークマターハローの構造, 日本天文学会 2001 年秋季年会 姫路 2001 年 10 月。

[45] 船渡陽子，質量の異なる銀河どうしの衝突による各銀河の構造変化について, 日本天文学会 2001 年秋季年会 姫路 2001 年 10 月。

[46] 船渡陽子，原始銀河の大きさに対する制限について, 日本天文学会 2001 年秋季年会 姫路 2001 年 10 月。

[47] 牧野淳一郎, J. B. Taylor, 14:48 B05a 高密度恒星系での中心ブラックホールの成長, 日本天文学会 2001 年秋季年会 姫路 2001 年 10 月。

[48] 牧野淳一郎, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 の開発状況, 日本天文学会 2001 年秋季年会 姫路 2001 年 10 月。

[49] 高橋広治, , 泉水朋寛, 船渡陽子, 牧野淳一郎, 衝突系としての銀河団の力学進化, 日本天文学会 2001 年秋季年会 姫路 2001 年 10 月。

[50] 小久保英一郎, 牧野淳一郎, A Modified Hermite Scheme for Planetary Dynamics, 日本天文学会 2002 年春季学会 水戸 2002 年 3 月

[51] 高橋広治, 中心ブラックホールをもつ高密度恒星系の Fokker－ Planck シミュレーション, 日本天文学会 2002 年春季学会 水戸 2002 年 3 月

[52] 台坂博, 牧野淳一郎, 衛星の影響を考慮した天王星楕円リングの N 体数値計算, 日本天文学会 2002 年春季学会 水戸 2002 年 3 月

[53] 福重俊幸, 須藤靖, 14:06 U13a 宇宙論的 N 体計算における平均特異速度場について, 日本天文学会 2002 年春季学会 水戸 2002 年 3 月

[54] 牧野淳一郎, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 の開発状況, 日本天文学会 2002 年春季学会 水戸 2002 年 3 月

3.3 ヘテロジニアス・マルチコンピュータシステムの開発

3.3.1 学術雑誌論文

[1] 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 年 1 月.

[2] 岩崎洋一, 宇川彰, 朴泰祐, "21 世紀の超高速科学技術計算プラットホーム", 学術月報 Vol.55, No.2, pp.10-14, 2002.

3.3.2 国際会議発表論文

[1] T. Boku, J. Makino, H. Susa, M. Umemura, T. Fukushige, A. Ukawa, "Heterogeneous Multi-Computer System: A new platform for Multi-Paradigm Scientific Simulation", 16th Annual ACM International Conference on Supercomputing (ICS2002), New York City, Jun. 2002 (to appear).

3.3.3 著書

該当なし

3.3.4 特許

該当なし

3.3.5 国内学会・研究会における口頭発表

[1] 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, 情処研報 HPC-88-10, pp.55-60, 2002 年 10 月.

3.4　新聞等による紹介

1999 年 8 月 17 日 毎日新聞

東京大大学院理学系研究科天文学専攻助教授
牧野淳一郎さん（36）

コンピューターシミュレーションで天体運動を研究する

究める

天体の動きをコンピューターシミュレーションで再現し、星や星団、銀河がどのようにできたのかを研究している。「天文学は本物で実験できない。だからシミュレーションは実験に等しい重要な手段です」という。

天体シミュレーションに必要なのは重力と流体力学に基づく計算だが、対象にする星の数と計算回数が膨大なため、計算に時間がかかる。汎用コンピューターの場合、数式計算には回路全体のほんの一部しか使われず、残りはデータの出し入れなどの間接的な仕事に費やされて無駄が多い。

そこで、1989年に演算装置を数式計算処理だけに特化させて効率を飛躍的に高めた専用コンピューター「GRAPE1」を開発した。その後も天体専用コンピューターの世界最速機を開発し続けている。最新の「GRAPE6」は大型コンピューターで数カ月から数年かかる計算を数日でこなす能力を持つ。

諸説ある月の形成過程のうち、外部から来た天体が地球に衝突してはじき出された物質が集まったとする理論がある。東京工大の研究者らと共同で、これを支持する計算結果を発表した。この理論が通説になるのを後押しする貴重な成果だ。

「そもそも宇宙はどのようにしてできたのか、という天文学界の最大目標に迫りたい」と夢を語る。【菊地正太郎】

1999 年 11 月 12 日 日経産業新聞

日経産業新聞 1999. Nov. 10 (Wed)
5

イノベーション市場発

先端技術

コンピューター、さらに高速化 ㊦

並列処理が主流に

特定用途で低コスト設計も

ニーズはここに

気象の変化を予測するなど複雑な科学計算には、短時間に多くの計算をこなすスーパーコンピューターが使われる。かつては一台の大型コンピューターが処理していたが、現在では多数のコンピューターをつないで手分けする並列処理が主流になってきた。低コストで優れた能力を引き出せるからだ。

一方、特定の用途に絞って最適化した専用コンピューターも開発されている。天体の動きを計算する専用機などでは、汎用のスーパーコンピューターを超える計算速度を持つものも登場した。さらに、並列処理技術を活用した高速機や、「DNAコンピューター」や「量子コンピューター」など新しい概念に基づく計算機の基礎研究も注目を集めている。

コンピューターは社会の情報化に大きな役割を果たしてきた。短時間でもっと大量のデータを処理する計算機への要求はますます高まるばかりだ。

二千八十二億九千八百四十三万ケター――この九月、東京大学情報基盤センターの金田康正教授らのグループが計算に成功した計算速度の記録だ。従来の記録だった五百三十五億ケタの四倍に当たる。この計算を遂行したのが、日立製作所のスーパーコンピューター「SR8000」だ。

このスーパーコンの演算性能は一テラFLOPS。一秒間にこなせた桁数が大きく、一テラFLOPSは一秒間にこなす浮動小数点演算の回数のことで、SR8000は一秒間に一テラ（一兆）回の計算ができる。米国の事例（十億）FLOPS、ハイパーコンピューターの応用範囲は広いで、世界第四位の速度を誇る。メモリーの大きさも一テラバイトを並列に百二十八台組み合わせたものだ。

計算できる問題の種類はそれぞれ異なる。一テラFLOPSの性能を持つコンピューターに匹敵する性能をもたせるには、専用の大規模集積回路（LSI）を独自設計してスーパーコンピュータ二千万台、同じ性能のスーパーコンピューターを購入するのに比べれば数十分の一で済んだ」と話す。

日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業のプロジェクトで、二〇〇一年の完成を目指す次世代型では五億円程度をかけて百テラFLOPSを超える計算機を作ることを目標にしている。

（川合慧氏）

東京大学が開発したスーパーコンピューター並みの速度を誇る「GRAPE4」

▼▼▼

地球規模の環境変動を予測する「地球シミュレーター」や宇宙飛行機のエンジン設計など、スーパーコンピューターの応用範囲は広い。科学技術計算には非常に多くの計算をしても正確に動作することが確かめられたことが大きい」（金田教授）という。

並列コンピューターは個々が安定して動作するか確かめるには、実際に難しい計算をさせて実験する必要がある。四則演算の計算はこの試験に最適だったわけだ。

▼▼▼

たコンピューターの開発も進んでいる。どんな計算でもできるというわけではないが、汎用性を犠牲にしてもコスト安で目的を達成したいという用途があるからだ。

東京大学は天体運動のシミュレーションを行う「GRAPE」という専用コンピューターを開発した。十年ほど前に研究を始め、現在は一テラFLOPSの性能を持つ「GRAPE4」を実現。

重力を高速に計算するという用途にしか使えない専用設計だが、牧野淳一郎助教授は「製作費用は一億四千万円。同じ性能のスーパーコンピューターを購入するのに比べれば数十分の一でなせる可能性がある。

ただし、このように参加者を募る方式ではさまざまの人の協力が必要で、現実にはまだ使いにくい。科学技術計算では用途に合わせて汎用のスーパーコンや専用型の超高速計算機を使い分けているのが現在の状況。」

（川合慧氏）

▼▼▼

また最近では、市販のパソコンを多数つないで計算をさせる試みも始まっている。インターネットを利用し、世界で計算を分担しながら暗号を解読するプロジェクトや、宇宙からの電波を受信して異星人からのメッセージが含まれていないかを探るプロジェクトなどが進められている。

それぞれの利用者がパソコンを使っていないわき時間を利用して処理を分担する仕組み。個々のパソコンの処理能力はスーパーコンに比べれば非力だが、多くを集めれば大量の計算をこなせる可能性がある。

ただし、このように参加者を募る方式ではさまざまの人の協力が必要で、現実にはまだ使いにくい。科学技術計算では用途に合わせて汎用のスーパーコンや専用型の超高速計算機を使い分けているのが現在の状況。」

（川合慧氏）

1999 年 11 月 25 日 日経産業新聞

H11 11.25
（土曜・日曜休刊）
日経産業新聞
発行所 日本経済新聞社

ゴードン・ベル賞
東大グループが受賞

世界最大の学術研究団体、米国電気電子技術者協会（IEEE）のコンピューター部門は「ゴードン・ベル賞」の九九年度受賞者を、東京大学の牧野淳一郎助教授らに決めた。この賞は並列コンピューターを使った科学技術計算の分野で優れた成果を残した研究に与えられる。米ポートランドで開かれたスーパーコンピューティング国際会議で発表した。

授賞対象になったのは天文シミュレーションの専用コンピューター「GRAPE5」。総額四百七十万円のシステムで、実効性能五・九二ギガ（一ギガは十億）FLOPS（一秒にこなす浮動小数点演算の回数）を達成するという高い価格性能比が評価された。

2000 年 6 月 2 日 日経新聞

銀河誕生解明
目指し米で研究
東大スーパーコン貸与

【ニューヨーク1日 共同】東京大学が開発した世界最速の天文学専用スーパーコンピューターを使って、米国の研究者が星団や銀河の形成、進化を解明する日米共同プロジェクトが一日発足し、ニューヨークのアメリカ自然史博物館で米側に貸与されるスーパーコンGRAPE6が公開された。

GRAPE6は東大の牧野淳一郎助教授（天文学）らが開発、多数の星の間に働く重力を計算できる。二〇〇一年には現存する世界最速の汎用（ほんよう）コンピューターの十倍の計算速度を達成する見通し。

米側はインターネットを通じて日本にあるGRAPE6を使うほか、今回貸与された小型GRAPE6で多数の恒星間に働く重力の相互作用を計算する。

ニューヨークの自然史博物館でスーパーコンを披露する東大の牧野淳一郎助教授（右端）ら一共同

大家が3Aで
77球完全試合

【ニューヨーク1日 共同】米大リーグ、レッドソックス傘下の3Aポータケットの大家友和投手（24）が一日（日本時間二日）、本拠地のロードアイランド州ポータケットでのシャーロット（ホワイトソックス傘下）戦で完全試合を達成した。

百十七年の歴史を持つインターナショナル・リーグでの完全試合は四十八年ぶりで史上二人目。ポータケ

2001 年 7 月 10 日 朝日新聞

天文学的な最速コンピューター ▶▷▶▷▶▷ これまでの2.5倍、東大が開発

東京大学は９日、世界最速の天文計算用コンピューターを開発したと発表した。主に銀河や太陽系の形成過程のシミュレーションに使う。分子運動や構造力学の解析にも利用できるという。開発したのは牧野淳一郎・助教授（天文学）らのグループ。1024個の大規模集積回路（ＬＳＩ）を並列につなぎ、約35万個の演算機を同時に動かせる。

これまで最速は米ローレンス・リバモア国立研究所の計算機で、１秒間に12兆８千億回の浮動小数点計算が可能。東大の計算機はその2.5倍の性能を達成した。ただし、米国の計算機はさまざまな分野で幅広く活用できる。

牧野さんは「50万個の星から成る球状星団の形成シミュレーションなら1日でできるようになる」と話す。

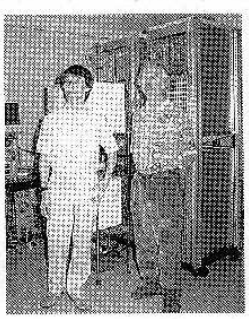
2001 年 7 月 10 日 毎日新聞

◆世界最速のコンピューター開発

最新のパソコン2万台分の性能に匹敵する、世界最高の計算速度を持つスーパーコンピューターを東大の牧野淳一郎助教授（天体物理学）らと米プリンストン高等研究所のグループが開発し、９日発表した。

コンピューターは「グレープ６」と名付けられた。グループは、従来より演算能力を向上させた1ミリ角のＬＳＩ（大規模集積回路）チップを設計し、これを１０２４個並列に作動させることで、ピーク時に32テラフロップス（1秒間に32兆回）の計算性能を実現した。この速度は米ローレンス・リバモア研究所が昨年完成した「アスキー・ホワイト」が持つ12・8テラフロップスの２・５倍に当たる。開発費は約５億円で、１２０億円以上といわれる「アスキー・ホワイト」に比べ破格に安い。

2001 年 7 月 10 日 日経新聞



ップス（一テラフロップスは一秒間に一兆回の計算速度）。米国立ローレンス・リバモア研究所で昨年完成し、世界最高速だった「ＡＳＣＩ（アスキー）ホワイト」の約二倍。

◎…ＧＲＡＰＥ６は、多数の粒子が重力を及ぼし合う状況下で、どのような現象が起きるかをシミュレーションで探る専用計算機。銀河の中心にあるブラックホールの形成過程などの解明に役立ちそうだ。

◎…世界最速の計算速度を誇る宇宙物理学研究のための専用コンピューター「ＧＲＡＰＥ（グレープ）６」が完成し、九日、東大・本郷キャンパスで初公開された＝写真。

◎…速度は二十二テラフロ

2001 年 10 月 4 日 朝日新聞

ブラックホール巨大化に新理論

「中質量」が次々合体

太陽の１００万倍以上という質量を持つ巨大ブラックホール誕生の仕組みを説明し、宇宙の進化にも応用できそうな理論が、4日から兵庫県姫路市で始まる日本天文学会で提唱される。星団内で多数の星が合体してできる中質量（太陽の百ー千倍）のブラックホールが、今度は銀河の中心で次々と合体し、巨大に成長するというシナリオだ。

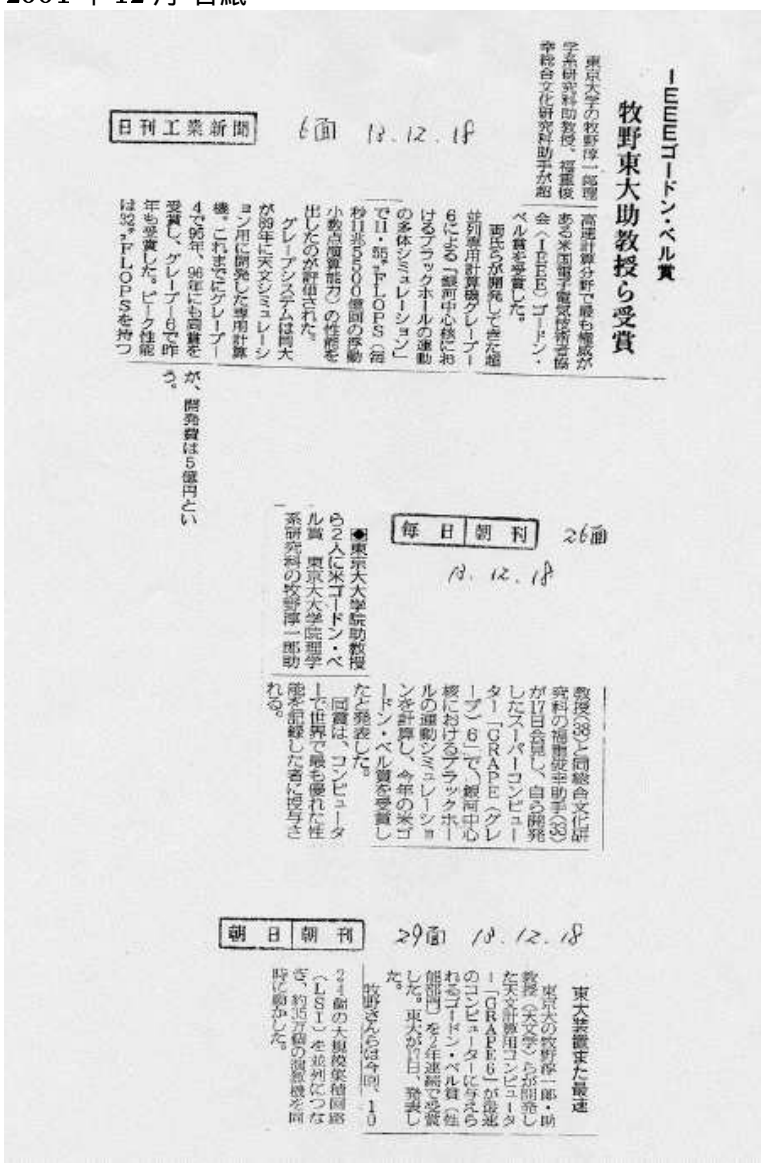
新理論を提唱したのは、理化学研究所の戎崎俊一部長や京都大の嶋剛・助教授、東京大の牧野淳一郎助教授らのグループ。新理論によると、銀河同士の衝突などで誕生した星団内では、高密度の星同士の際際で、重い星が星団の中心に集まり合体する。その結果、太陽の１００ー２００倍の中質量ブラックホールが生まれる。

銀河の中の多数の星団内で同じことが起きており、その結果、中質量ブラックホールを抱えた重い星団が銀河の中心に集まる。このブラックホールが中心部で合体を繰り返すと、太陽の１００万ー10億倍もある巨大なブラックホールへと成長する、というのが今回提唱された理論だ。

昨年、京大などのグループが世界で初めて中質量ブラックホールを発見したのをきっかけに新理論が構築された。これまでに観測されている太陽の10ー20倍程度の小質量ブラックホールでは、巨大星に成長するのに宇宙の寿命より長い時間がかかり不可能だが、中質量なら可能とコンピュータ解析で分かった。

戎崎部長は、「爆発的に星形成中の銀河、非常に明るい高光度赤外線銀河、活動的なクエーサー銀河など様々な種類の銀河を別々に研究してきたが、みなブラックホールの形成過程に沿って進化してきていると考えれば、統一的に説明できる」と話す。

2001年12月 各紙



IEEEゴードン・ベル賞

牧野東大助教授ら受賞

東京大学の牧野淳一郎理学系研究科助教授、福重俊幸総合文化研究科助手が超高速計算分野で最も権威がある米国電子電気技術者協会（IEEE）ゴードン・ベル賞を受賞した。

両氏らが開発してきた超並列専用計算機グレープ6による「銀河中心核におけるブラックホールの運動の多体シミュレーション」で11・55ﾃﾗﾌﾛｯﾌﾟｽ（毎秒11兆5500億回の浮動小数点演算能力）の性能を出したのが評価された。

グレープシステムは同大が89年に天文シミュレーション用に開発した専用計算機。これまでにグレープ4で95年、96年にも同賞を受賞し、グレープ6で昨年も受賞した。ピーク性能は32ﾃﾗﾌﾛｯﾌﾟｽ（FLOPS）を持つが、開発費は5億円という。

日刊工業新聞　6面　13.12.18

毎日朝刊　26面　13.12.18

◆東京大大学院助教授ら2人に米ゴードン・ベル賞　東京大大学院理学系研究科の牧野淳一郎助教授(38)と同総合文化研究科の福重俊幸助手(33)が17日会見し、自ら開発したスーパーコンピューター「GRAPE（グレープ）6」で、銀河中心核におけるブラックホールの運動シミュレーションを計算し、今年の米ゴードン・ベル賞を受賞したと発表した。

同賞は、コンピューターで世界で最も優れた性能を記録した者に授与される。

朝日朝刊　29面　13.12.18

東大装置また最速

東京大の牧野淳一郎・助教授（天文学）らが開発した天文計算用コンピューター「GRAPE6」が最速のコンピューターに与えられるゴードン・ベル賞（性能部門）を2年連続で受賞した。東大が17日、発表した。

牧野さんらは今回、1024個の大規模集積回路（LSI）を並列につなぎ、約35万個の演算機を同時に動かした。

3.5　ホームページによる紹介

連続体向け超並列計算機の開発

http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/future/

多粒子系向け超並列計算機の開発

http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp/pub/people/makino/grape6.html

http://www.astrograpе.org/

4　研究成果概要

4.1　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う。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にする。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する。

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 の開発研究を行う。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。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を開発する。

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。

4.2　研究計画

本プロジェクトにおいて、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。

本計画の目指す超並列システムは，連続体から多粒子系にわたり，汎用性と専用プロセッサの高速性を実現する。さらに，フロントエンドとしてして柔軟なグラフィック処理システム・並列入出力システムと，バックエンドとしての超並列計算機を有機的に結合させる。これによって，高速性と同時に汎用性・柔軟性を持ち，さらにユーザフレンドリな超並列システムが構築されるが，これは現在のところ世界でも他に例を見ないものである。

4.3 「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。

4.3.1 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 4.3.1 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

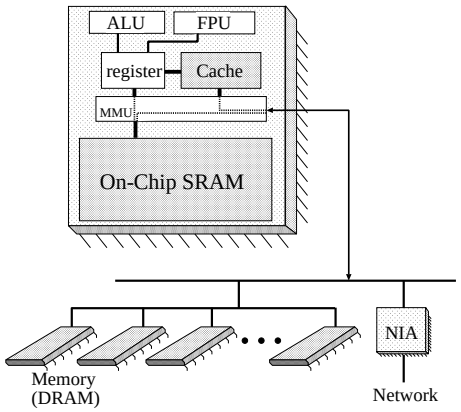


図 1: SCIMA のブロックダイアグラム

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。

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。

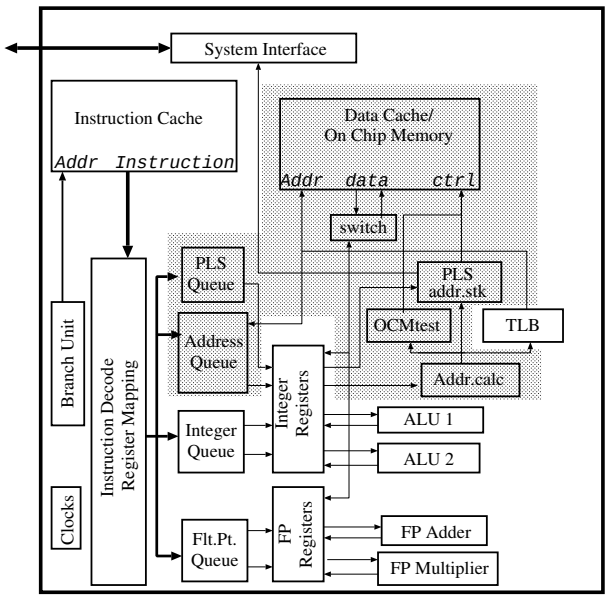


図 2: SCIMA におけるデータパス構造

図 2 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

表 1: 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)		

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 1 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 3 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。

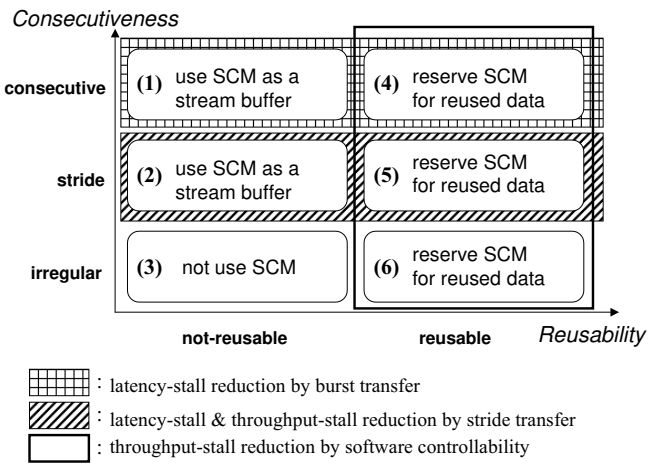
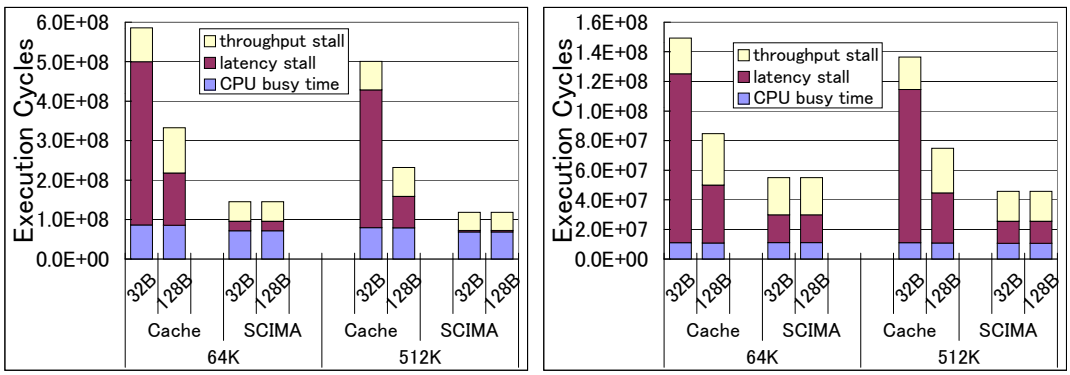


図 3: SCM 利用のための戦略

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 4 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 4: 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 5 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。

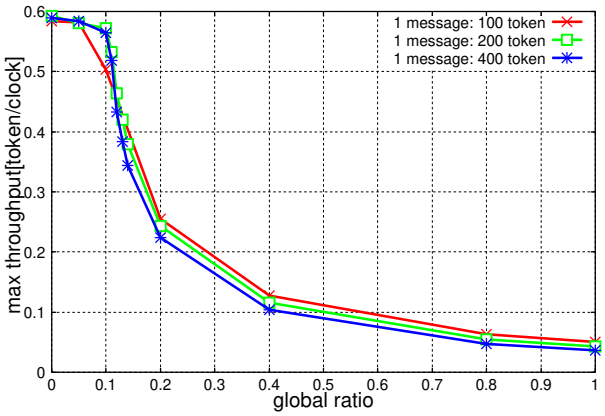


図 5: 光・電気ハイブリッド型階層ネットワークの性能

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。

4.3.2 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。

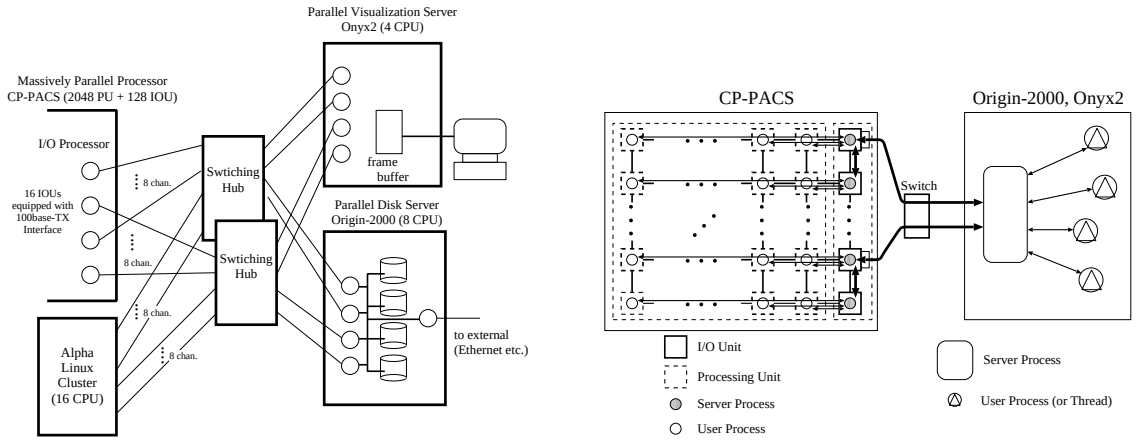
並列ネットワークによるバンド幅増強　複数のネットワーク接続を移植性の高い TCP/IP レベルで統合化し，アプリケーションから生成される並列なデータ流を並列ネットワークチャネルに分散させる。

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 6(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。

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 6(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



(a) PIO 実験環境　　(b) ユーザプロセスとサーバの関係

図 6: PIO システム

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。

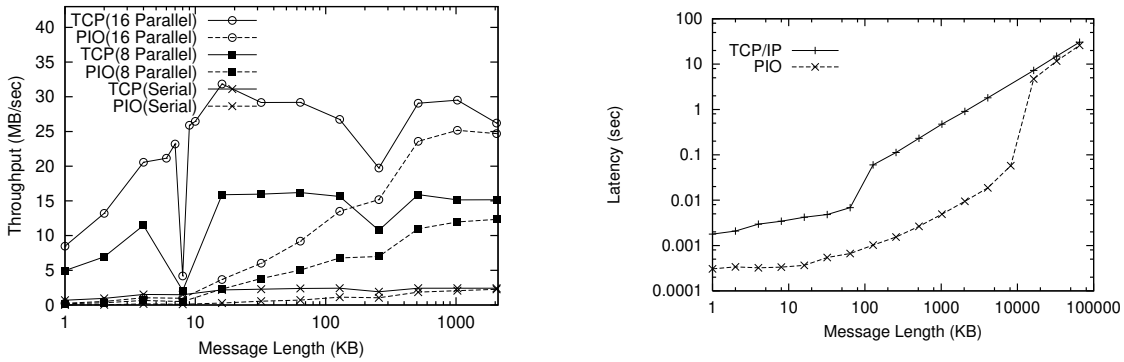
PIO の API は以下のような関数群からなる。

- 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。

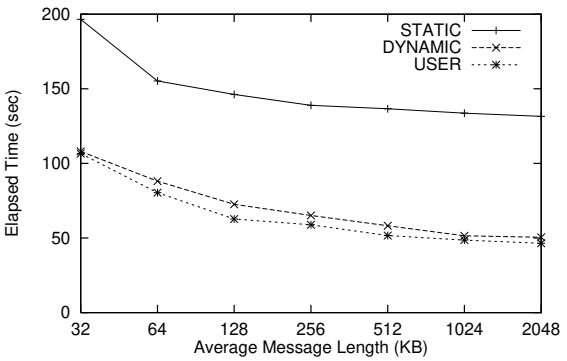
PIO システムの性能評価　図 7(a) に簡単な pingpong 転送を行った場合の PIO の性能とスケーラビリティに関する評価をまとめる。ここに示した性能は，CP-PACS と Origin-2000 間で，並列チャネル数を 1, 8, 16 と変化させた場合の実効バンド幅である。それぞれに対し，裸の TCP/IP を直接使った場合と，PIO による制御を通した場合を比較している。この結果より，チャネル数の増加に伴い，それに応じたほぼ線形な性能向上が得られていることがわかる。また，データ長が長くなるにつれ，TCP/IP 本来の性能と PIO を介した性能の差が縮まっていることがわかる。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 7(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。



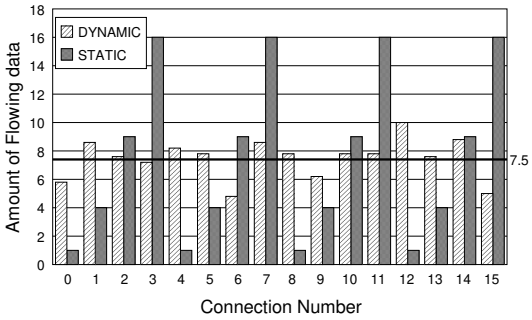
(a) pingpong 転送におけるスループット　　(b) 単方向転送におけるレスポンスタイム

図 7: PAVEMENT/PIO の基本的なデータ転送性能

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 8(a) 及び図 8(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 8(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 8(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



(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 8: PAVEMENT/PIO の動的負荷分散機能の性能評価

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 9 に示す。

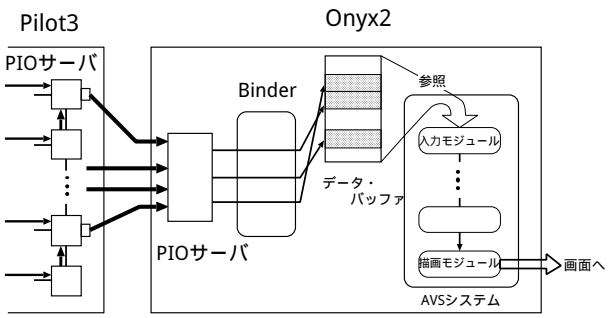
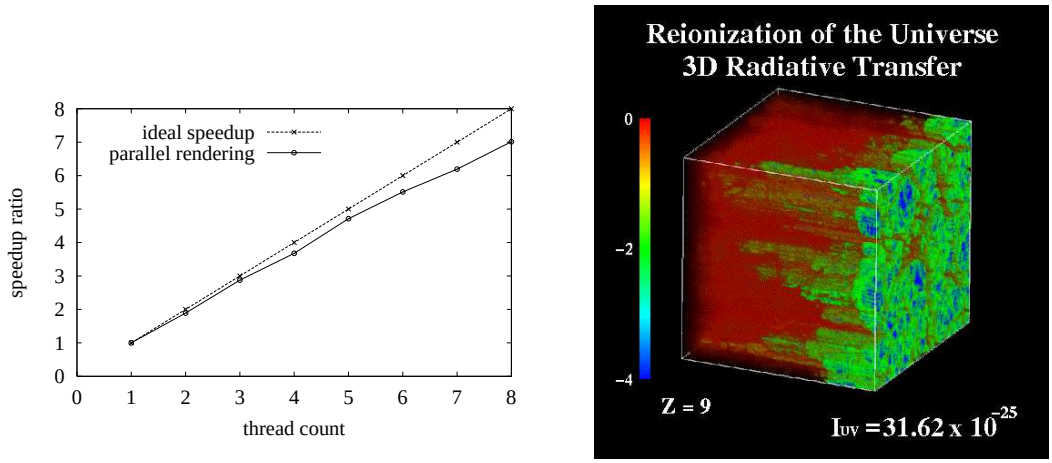


図 9: 並列入出力から並列可視化システムへのデータの流れ

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 10(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



(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 10: 並列可視化システムの性能評価

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 10(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 11 に PFS のコンセプトイメージを示す。

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

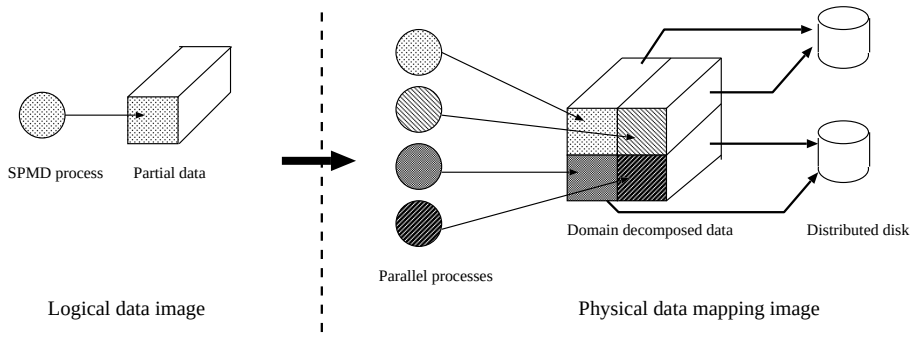


図 11: Parallel File System の概念図

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。

4.4 「多粒子系向け超並列計算機の開発」サブプロジェクト

本サブプロジェクトの主要な成果は以下の 2 つである。

1. ほぼ当初の計画にそった形で多粒子系向け超並列計算機である GRAPE-6 システムを完成させることができた。

2. 疑似粒子多重極法，2 次元並列化法などの多粒子系シミュレーションのための新しい高速化アルゴリズムを開発，実用化した。

これらの成果に付随して，科学技術応用における並列計算における卓越した達成に与えられる賞であるゴードン・ベル賞を 1999 年から 2001 年まで 3 年間連続で受賞した。以下，このそれぞれについて述べる。

4.4.1 GRAPE-6 システム

GRAPE-6 システムは，汎用のホスト計算機，重力/クーロン力相互作用専用計算機，多目的粒子計算機用再構成可能計算機の 3 パートからなるハイブリッドシステムである。以下，重力/クーロン力相互作用専用計算機，多目的粒子計算用再構成可能計算機のそれぞれについて述べる。

まず重力/クーロン力相互作用専用計算機についてまとめる。平成 9 年度には演算チップの基本仕様の決定と論理設計を行った。各半導体メーカーの製造技術の水準，設計ソフトウェアの実力等に関する総合的な評価を行なった上，目標仕様を表 2 のように定めた。

項目	目標仕様	備考
動作周波数	125 MHz	
相互作用パイプライン本数	6	
動作電圧	2.5 V	
消費電力	20W 以下	
粒子メモリ	内蔵せず	同期 SRAM 使用
粒子メモリインターフェース幅	64 bit	
粒子メモリインターフェース速度	125MHz	
データ入出力ポート幅	32bit × 3	入力 2，出力 1
データ入出力ポート速度	25 MHz	
位置，時刻データ形式	64bit	固定小数点
速度，内部表現データ形式	36 bit	浮動小数点，仮数 24 ビット

表 2: 重力プロセッサチップ仕様

重力プロセッサチップは予測子パイプライン 1 組と相互作用計算パイプライン 6 組を内蔵する。予測子パイプラインは以下の計算を行なう

$$\Delta t \quad = \quad t - t_j$$

$$\mathbf{x}_{\rm p} = \frac{\Delta t^4}{24}\mathbf{a}_0^{(2)} + \frac{\Delta t^3}{6}\dot{\mathbf{a}}_0 + \frac{\Delta t^2}{2}\mathbf{a}_0 + \Delta t\mathbf{v}_0 + \mathbf{x}_0 \tag{1}$$

$$\mathbf{v}_{\rm p} = \frac{\Delta t^3}{6}\mathbf{a}_0^{(2)} + \frac{\Delta t^2}{2}\dot{\mathbf{a}}_0 + \Delta t\mathbf{a}_0 + \mathbf{v}_0, \tag{2}$$

ここで， $\mathbf{x}_{\rm p}$ と $\mathbf{v}_{\rm p}$ は粒子 j の時刻 t での予測された位置，速度であり，$\mathbf{x}_0$, $\mathbf{v}_0$, $\mathbf{a}_0$, $\dot{\mathbf{a}}_0$ $\mathbf{a}_0^{(2)}$ は粒子 j の時刻 t_j での位置，速度，加速度とその一階，および二階導関数である。

また，相互作用計算パイプラインは以下の計算を行なう。

$$\mathbf{a}_i = \sum_j Gm_j \frac{\mathbf{r}_{ij}}{(r_{ij}^2+\epsilon^2)^{3/2}} \tag{3}$$

$$\dot{\mathbf{a}}_i = \sum_j Gm_j \left[\frac{\mathbf{v}_{ij}}{(r_{ij}^2+\epsilon^2)^{3/2}} - \frac{3(\mathbf{v}_{ij}\cdot\mathbf{r}_{ij})\mathbf{r}_{ij}}{(r_{ij}^2+\epsilon^2)^{5/2}}\right], \tag{4}$$

ここで

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, \tag{5}$$

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i. \tag{6}$$

であり， $\mathbf{x}_i$，$\mathbf{v}_i$，$\mathbf{a}_i$，$\mathbf{a}_i$，$\dot{\mathbf{a}}_i$，はそれぞれ粒子 i の位置，速度，加速度とその一階時間導関数，G は重力定数，m_j は粒子 j の質量である。また， ϵ はソフトニングパラメータと呼ばれる定数である。

すなわち，チップ全体としては，式 (1) および (2) をホーナーの公式を用いて計算するパイプライン (x, y, z の 3 成分のために 3 本) を 1 セット，式 (3) の重力と式 (4) のその導関数を評価するパイプラインを 6 セット持つものとなる。なお， $\mathbf{x}_i$ などの，そこでの重力を計算される粒子のデータは各相互作用パイプラインが持つレジスタに保持される。

ハードウェア記述言語 (VHDL) による論理設計はほぼ平成 9 年度のうちに終了した。平成 10 年度には，論理設計が終った回路のシミュレーションによるテストと，実際の LSI を作成するためのレイアウト等の作業を行なった。これらは特にプロセス微細化が進んだ近年では長時間を要する作業となっている。最初のサンプルチップは平成 10 年度末に完成した。しかしながら，チップの製造 (物理レイアウト設計を含む) を担当した東芝の作業に若干の問題があり，物理設計の変更が必要になったため，最終的に動作するチップが完成したのは平成 11 年 10 月である。さらに，この設計変更の後でも動作速度は十分ではなく，最終的には 90 MHz で動作させることになった。

平成 11 年度には，チップの製造・テストと平行して全体システムの詳細設計，具体的にはプロセッサモジュール，プロセッサボード，ネットワークボードの開発を進めた。

モジュールの構成は基本的には 2 つの G6 チップにそれぞれメモリをつけただけである。入力は 2 チップで共通であり，出力は並行して読み出して合計するために 2 本でている。なお，単一モジュールで動作試験を行うための評価用システムも開発した。

全体システムは最大 16 台のクラスタからなり，1 クラスタにプロセッサチップを 16 個 (プロセッサモジュールを 8 個) 載せた基板 (GRAPE-6 プロセッサボード， G6PB) を 16 枚収納する。基板サイズは 8U $\times$ 400 mm であり，GRAPE-4 の基板に比べ一回り小さくなった。

G6PB の外部へのインターフェースは，論理的には G6 チップのものと同じであり，入力 2 本と出力 1 本を持つ。入力はそれぞれ全チップにブロードキャストされ，出力はリダクションされて 1 本になる。

物理的には，G6PB の外部インターフェースは G6 チップのものとは大きくちがい， LVDS をを使ったセミシリアル転送になっている。これに対し，G6 チップのインターフェースは単に 36 ビット (32 ビット ＋パイトパリティ) の同期転送であるに過ぎない。

先に述べたように，全体システムは G6PB の上にコントロールボード (G6CB) がつき，それがホストにつながることによって構成される。G6PB の機能は基本的にはホストからの入力データのブロードキャストと G6PB からのデータのリダクションであり，4:1 のツリー構造をとる。すなわち，16 PB からなる 1 クラスタでは， CB が最上位 1 枚，中間層 4 枚の 5 枚必要ということになる。

この設計で各部を試作し，結合テストまでを行って全体として動作することを確認した。しかし，上に述べた動作クロックの問題に対応するため，以下に述べる設計変更を行った。設計変更の目的はボードあたりのプロセッサチップ個数を増やすことでトータルの製造コストを引き下げることである。これは，予定よりも低クロックの動作となった結果発熱密度が下がったために可能になった。プロセッサモジュール上に 2 チップではなく 4 チップを集積し，さらに結果を加算・回収するツリーネットワークの 1 段目を構成する FPGA まで集積した。これによりプロセッサボード上の回路はチップ数が 16 から 32 と増えたにもかかわらずかえって単純なものになり，製造コスト・不良率の双方を下げることができた。平成 12 年度にはこの変更版の試作・テストから量産までを行い，年度末にはネットワークボード 2 枚とプロセッサボード 8 枚からなるピーク性能 8 Tflops のシステムを動作させることができた。

平成 13 年度は 12 年度予算で調達したシステムの調整と 13 年度予算分の製造・調整を行った。12 年度分についてはホスト計算機も含めた全体システムの調整が夏には終了し，ピーク性能 32 Tflops のシステムとして動作するようになった。13 年度予算分については最終的な部品納入が平成 14 年 3 月となったためにこの報告書執筆時点 (平成 14 年 3 月末) ではまだ組み立て・調整が完了していないが，14 年夏にはピーク性能 64 Tflops のシステム全体が組み上がる予定である。

以上のように，100 Tflops 程度のピーク性能を持つ重力・クーロン力専用計算機を開発するという目標は達成できたと考えている。

次に多目的粒子計算用再構成可能計算機であるが，これについてはプロセッサボード，ネットワークボードなどの基本的要素は重力・クーロン力専用計算機と全く同一のものを使い，プロセッサモジュールのみを新たに設計することにした。プロセッサモジュールのハードウェアは大規模 FPGA チップに粒子メモリ用の SRAM チップをつけただけの単純なものである。重力・クーロン力専用計算機の完成が最終年度である平成 13 年度となるため，多目的計算機についても同時期に完成するようにした。これは，なるべく新しい FPGA チップを使うことで大規模なパイプラインが実装できるようにするためである。 最終的に選定した FPGA チップは Altera EP20K400 (公称 ゲート数: 400K) である。このモジュールを 40 枚製造した。 GRAPE-3 相当のパイプラインを実装した結果，30MHz 動作のパイプラインが FPGA チップ 1 つに 6 本入っており，チップ単体のピークで 7 Gflops，システム全体としては 274 Gflops 相当の速度が実現できている。パイプラインの動作速度等についてはまだ改善の余地があり，1.5 ないし 2 倍程度の性能向上は図れる。重力計算以外の具体的な応用ソフトウェアの開発はこれからであるが，多目的システムのハードウェアプラットフォームは完成したといえる。

4.4.2 新しい高速化アルゴリズム

本プロジェクトの期間中に，粒子系シミュレーション用の高速化アルゴリズムとして疑似粒子多重極法，2 次元並列化法の 2 つを開発，実用化した。ここではそれぞれについて簡単に述べる。

重力，クーロン力の計算において，要求する精度がそれほど高くない場合には高速多重極展開法 (FMM) や Barnes-Hut ツリー法などの近似計算法が 1980 年代後半に提案され，特に Barnes-Hut ツリー法は標準的な方法の 1 つになっている。その詳細についてはここでは触れないが，どちらも，近傍の粒子からの寄与は直接計算し，遠方からの寄与はまとめて多重極展開の形で評価する。専用計算機を使えば近傍の分は高速化できるが，遠方からの寄与の計算の高速化は困難であった。

疑似粒子多重極法では，多重極展開を仮想粒子を使って表現しなおすことにより，遠方からの寄与についても専用計算機を利用することを可能にした。これにより，従来は計算コストの観点からツリー法や FMM を使うことは非現実的であった高精度を要求する問題に対してもツリー法や FMM を使えるようになった。ツリー法や FMM の一つの欠点は要求精度が高くなると必要メモリ，計算時間ともに急速に増大することであったが，専用計算機を使った実装では計算時間を最適化した時に汎用計算機上の実装より要求メモリが少なくなり，さらに計算速度の向上は要求計算精度が高いほど大きくなる。いいかえれば，専用計算機上の実装では必要メモリ，計算時間とも要求精度に対する依存が非常に弱くなっている。つまり，現実的な計算時間で高精度の計算を実現できるようになった。

疑似粒子多重極法は粒子数が非常に大きい場合に有効な方法であるが，2 次元並列化法は粒子数が比較的小さく，$O(N^2)$ の直接計算が適しているような問題を効率的に並列化する方法である。

従来知られていた並列化手法は基本的に以下の 2 種である。

- 各プロセッサが全粒子のコピーを持つ。
- 各プロセッサは自分が担当する粒子のみを持つ。ある粒子はプロセッサ 1 つにのみ存在する。

このどちらでも，粒子数 N を固定してプロセッサ数 p を増やした時，各プロセッサでの計算時間は p に反比例して減少するものの，プロセッサ間通信にかかる時間は p に無関係に一定である。このため，比較的小さなプロセッサ数で性能が飽和する。

GRAPE-6 では専用計算機側と汎用ホスト側との通信速度を確保するためにホスト側を並列化する必要があるが，上に述べた理由から従来の方法では並列化してもホスト間通信がボトルネックになり通信性能は向上しない。この問題を解決するために，GRAPE-6 では 2 次元ネットワークの構成をとった。

GRAPE-6 における 2 次元ネットワークでは，ホスト計算機 p 台を GRAPE p^2 台に接続する。

ホスト計算機側では従来通り全粒子を p 個のグループに分割し，各プロセッサが 1 グループを担当する。しかし，GRAPE の側では第 i 列第 j 行にあるプロセッサはグループ j の粒子からグループ i の粒子への力を計算する。このために，ホスト j は j 行の GRAPE プロセッサにデータを放送するネットワークを持つ必要があり，さらにホスト i は i 列に放送する上と直交するネットワークと，i 列の計算結果を縮約しながら回収するためのネットワークが必要になる。GRAPE-6 の当初計画ではこれらのネットワークは専用ハードウェアで実現する。

この 2 次元ネットワークでは，粒子数を一定とした時にホストの台数に反比例して通信時間を減らすことができる。台数に通信時間が依存しなかった従来の方法にくらべれば非常に大きな性能向上が実現できるようになった。

さて，今 GRAPE を使うことを忘れて，汎用計算機上の並列化を考える。汎用計算機の各ノードを GRAPE とみなせば，p^2 台のノードを論理的に 2 次元ネットワークを構成するとみなすことで全く同じアルゴリズムが実装できることがわかる。 これが 2 次元アルゴリズムである。この方法により，粒子数が小さな系でも非常に多数のプロセッサ上で効率的に並列化できるようになった。

なお，もう一度 GRAPE に戻ってみると，ホスト間の接続がホスト・GRAPE 間と同程度に高速化であれば，p^2 の GRAPE を p^2 のホストに直結し，ホストネットワークで GRAPE-6 の専用ネットワークをエミュレートすることで必要な性能が実現できることになる。 GRAPE-6 の最終形では部分的にこの考えを適用し， 64 枚のプロセッサボードを 8 台のホストにつなぐのではなく，16 枚のプロセッサボードを 4 台のホストに接続したユニットを 4 台作り，合計 16 台のホストはギガビットイーサネットで接続する構成をとった。 64 台のホストとしなかったのは設置面積とネットワークスイッチのコストを押さえるためである。

4.4.3 ゴードン・ベル賞

ゴードン・ベル賞は 計算機設計者として著名なゴードン・ベル氏が並列計算技術の推進のために 1987 年に創設した賞であり，米国電気電子学会コンピューター協会 (IEEE Computer Society) によって運営されている。毎年，並列計算機を実用的な科学技術計算に応用し，最も優れた性能を出した人々に与えられてきている。ここ数年は実効性能，価格性能比，特別部門の三つの部門があり，それぞれ応募があったものの中から審査で受賞者がきまる形をとっている。過去の受賞者やその達成した計算速度をみると，ほぼその時点で可能な最高速が実現されており，世界的にみた並列計算技術の最高水準を示しているといえる。

本プロジェクトでは，平成 11 年度から 13 年度までの 3 回にわたってこのゴードン・ベル賞にエントリーし，3 度とも受賞することができた。これは，本プロジェクトで開発した専用計算機システムの達成した性能が国際的にみても最高水準にあることを示したものであるといえるであろう。

平成 11 年度には GRAPE-5 を 2 台並列に動作させ，その上で Barnes-Hut ツリーアルゴリズムを使った宇宙論的 N 体計算で価格性能比部門の賞を獲得した。これは実効性能において \$7/Mflops という値を出したことが評価されたものである。GRAPE-5 チップは 1990 年に開発した低精度重力計算パイプラインチップである GRAPE-3 プロセッサチップの後継として開発したものであるが，GRAPE-6 プロセッサチップのための技術的なテストの意味も兼ねて新しい試みをとり入れた。チップ単体での演算速度は 4.8 Gflops 相当と GRAPE-3/4 のプロセッサチップの 10 倍を実現した。さらに，ハードウェア記述言語を使った設計の利点，問題点についても経験を積むことができた。この経験は GRAPE-6 チップの設計に非常に役立った。

平成 12 年度および 13 年度にはそれぞれその時点で動作していたプロトタイプ GRAPE-6 システム (12 年度はピーク 4 Tflops，13 年度は 32 Tflops) 上での銀河中心核のシミュレーションで実効性能部門にエントリーした結果，2 年続いて賞を授与された。 12 年度の達成性能は 1.349 Tflops

であり，この年はほぼ同じ性能を達成した理研の MD-GRAPE システムとの共同受賞となった。MD-GRAPE システムは GRAPE-6 とほぼ同程度のピーク性能を実現する粒子系向け専用計算機であるが，GRAPE-6 とは異なり分子動力学計算に専用化している。

13 年度の達成性能は 11.55 Tflops であり，この年は単独受賞となった。

ここ数年は ASCI プロジェクトや地球シミュレータ計画に代表されるように大規模な汎用並列計算機の調達コストは 100 億円を超える莫大なものになっている。 本プロジェクトの総予算は 5 億円であり，2 桁近い差がある。それにもかかわらず本プロジェクトで名目ピーク性能のみならず実際のアプリケーションで達成された実効性能でも大規模な汎用並列計算機を上回るものが実現できたことは，問題に特化した専用計算機というアプローチの有効性を実証したものといえるであろう。

4.5 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。

4.5.1 HMCS のシステム構成

図 12 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。

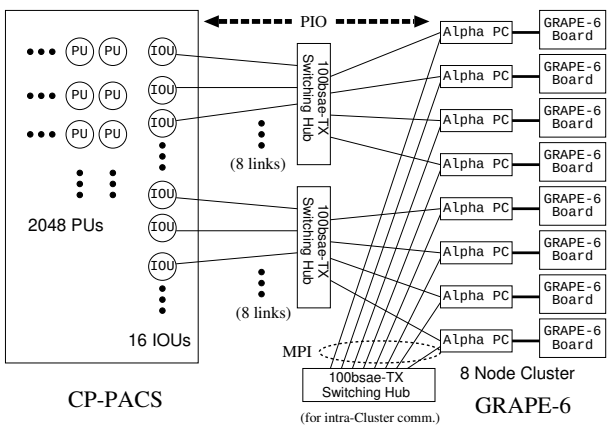


図 12: HMCS のブロックダイアグラム

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 3 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 3: 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。

4.5.2 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。

図 13 に銀河形成シミュレーション結果の時間発展の様子を示す。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。

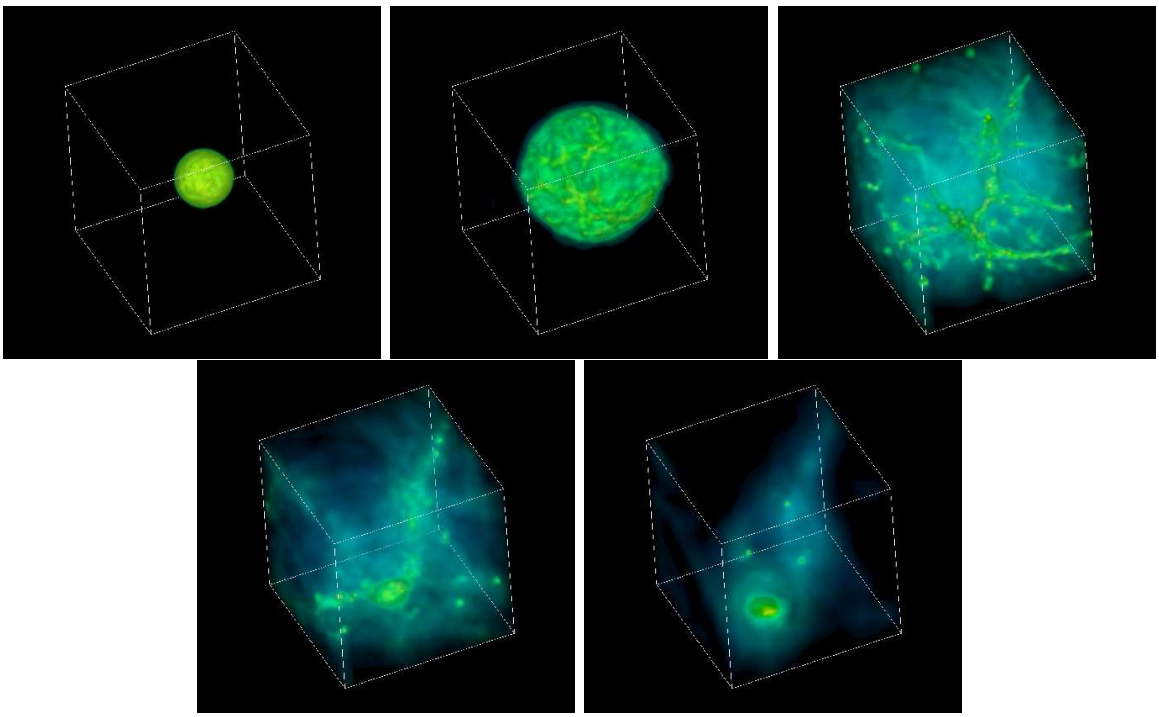


図 13: HMCS における RT-GRAPE-SPH による銀河形成シミュレーション

4.6　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。

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。

多粒子系向けの超並列計算機については，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の開発製作を行った。本プロジェクトの期間中，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ることができた。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に増強される予定である。

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するヘテロジニアス・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，大きなステップを実現したものと考えている。