

HPC 研究を振り返って

島崎 真昭†

国産のベクトル計算機が登場して 20 年以上が経過したが、この間の HPC システムは著しい発展を遂げた。本稿では、個人的見解をまじえて (1) 性能評価、(2) 言語とライブラリを中心に HPC の発展の経過を振り返り、今後を展望を試みる。

A Retrospective Study of High Performance Computing

MASAAKI SHIMASAKI†

HPC systems have made a remarkable progress since advent of vector supercomputers in Japan. We briefly trace and discuss progress of HPC systems, mainly from the view points of performance evaluation of HPC systems and programming languages/libraries for linear algebra including personal experiences in HPC with perspectives in future.

1. はじめに

我が国にいわゆるスーパーコンピュータ登場して 20 年以上が経過しているが、この間の HPC 関連の進歩は著しい。2. で HPC の発展の経過を振り返り、3. で HPC システムの性能評価について、4. で HPC システムのプログラム言語とライブラリについて、5. でアルゴリズムと計算複雑さと線形方程式の反復法について触れる。

2. HPC の歴史的発展経過

2.1 HPC システムの発展経過

HPC (high performance computing) システムの定義は漠然としたものになるが、ここではその時代の汎用的な計算機と比較して高性能の計算機システムのこととする。近年は科学技術計算のみならず、ビジネス用にも HPC システムが用いられているが、本稿では科学技術計算用システムを対象に考える。計算機システムの観点からは HPC システムは、1) 演算パイプラインベクトル計算機 (伝統的スーパーコンピュータ)、2) MPP (massively parallel processor)、3) SMP (Symmetric multiprocessor)、4) NOW (network of workstations)、5) Grid 環境に分けることができる。時代区分をどのように取るかは立場により異なるが、文献¹⁾にあわせて、CRAY-1 以前と CRAY-1 以降の 1976-1985、それ以降を 5 年毎に区切って考える¹⁾。文献²⁾では 1999 年までの日本のスーパーコンピュータを 4 世代 (第 1 世代: Hitachi S-810, Fujitsu VP-50/100/200/400, NEC SX-1/2, 第 2 世代: Hitachi S-820, Fujitsu VP2000 series, NEC SX-3 series, 第 3 世代: Hitachi S-3800/S-3600, Fujitsu VPP500, NEC SX-4) に分類している。各時代の代表的システムとその特徴は文献^{1), 2)}に見ることができる。ベクトル計算機以外の HPC システムおよび文

献²⁾以降の日本の HPC システムとして Hitachi SR2201, SR8000 series, SR8000/MPP, SR11000 series, Fujitsu VPP5000 series, VPP 300/700/800, Primepower 1500, 2500, NEC SX-5, SX-6, SX-7, TX-7 series, SX-8 が登場した。

2.1.1 ~1976

CRAY-1 以前の時代の HPC システムとして IBM7090, CDC6600, CDC7600, IBM360/195 等があり、我が国のシステムとしては FACOM 230/75 AP の他、Hitachi, NEC の IAP (Integrated Array Processor) があげられる。この時代は CRAY-1 に代表される演算パイプラインベクトルの前段階的なものとも考えることもできる。

2.1.2 1976-1985

1976 年に出現した Seymour Cray の CRAY Research の CRAY-1 ベクトル計算機、および 1980 年代前半の登場した我が国のベクトル計算機 (Hitachi, Fujitsu, NEC) はその時代の汎用機と比較し格段に性能を向上させたシステムであり、スーパーコンピュータとして注目を集めた。我が国のシステムでは汎用機と共通の技術が使用され、研究開発経費の面で CRAY と比較しての優位性が指摘された。特に我が国のベクトル計算機では Array Processor ないし IAP の時代の技術的蓄積が実って完成度の高い自動ベクトル化コンパイラが活躍した。

2.1.3 1985-1990

1985-1990 年はベクトル計算機の黄金時代であり、我が国のスーパーコンピュータの国際的な存在感が増大した。この時代から CRAY-XMP の後継としての CRAY Y-MP などの並列ベクトル計算機やミニスーパーコンピュータ、MPP も出始めた。

2.1.4 1990-1995

米国を中心に本格的な MPP が登場した。1993 年から TOP500³⁾ の統計が公表されるようになり、この統計で見て、1990 年代前半から HPC に用いられる半

† 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻
Graduate School of Engineering, Kyoto University

導体技術が ECL から CMOS に急速に移行してゆく様子が見られた。1993 年には航空宇宙技術研究所の NWT (Numerical Wind Tunnel) が完成し、1993/11, 1994/11, 1995/06, 1995/11, 1996/06, 1996/11 のリストで TOP500 の 1 位であった。商用版の Fujitsu VPP は大学等に導入された。分散メモリ方式並列ベクトル計算機であり、並列記述用言語としては VPP Fortran があり、メッセージ通信ライブラリとして PVM や MPI があった。

2.1.5 1995-2000

1994 年以降、SGI, Digital, SUN などから SMP システムが出て注目された一方、IBM は分散メモリ方式の SP2 システムで産業界も含め広く注目された。1996 年 CP-PACS⁵⁾ が筑波大学の計算物理学者、計算機科学者、産業界 (Hitachi) の密接な協力により開発され、1996 年 11 月のリストで TOP500 の第 1 位を占めた。擬似ベクトル機能、高速 3 次元クロスバスイッチを特徴とした、Hitachi SR2201, SR8000 は商用機である。

2.2 2000-2005

2002 年地球シミュレータが完成し、2002/6~2004/6 の期間 TOP500 の第 1 位となり、ベクトル演算方式の高い実行効率を示した⁶⁾。2004/11 の TOP500 のリストでは IBM BlueGene/L が TOP500 の第 1 位となったが、このシステムは消費電力、設置床面積の点で高効率を達成し、注目された。2004 年米国の WTEC が地球シミュレータを含め日本の HPC の状況を調査しており、その報告書⁴⁾ は我々が読んでも興味深いものである。

2.2.1 2005-

2006 年 6 月筑波大学で超並列クラスター PACS-CS (Parallel Array Computer System for Computational Sciences, 10.35TFlops)⁷⁾ が稼動を開始した。コモディティのプロセッサ、ネットワーク、ソフトウェアを用いている。マザーボードは新規開発が行われ、ノード間には 3 次元ハイパクロスバ網が使われ、高性能を実現している。OS は Linux+SCore となっている。

2006 年 4 月に導入された東京工業大学の TSUBAME (Tokyo-tech Supercomputer and Ubiquitously Accessible Mass-storage Environment)⁸⁾ は 2006 年 6 月の TOP500 のリストで地球シミュレータを抜いて第 7 位となった。Sun Fire X64 Cluster, Opteron 2.4/2.6 GHz, Infiniband を用いた NEC/Sun によるシステムで、利用者の拡大を目標としていることが大きな特徴といえる。

2.3 HPC に関する普及活動および HPC のフロントティア拡大活動

1980 年代前半にわが国にベクトル計算機が登場した頃これを導入した計算センターはそれぞれ講習会などにより普及に努めた。特に不特定多数の、また広範囲の研究分野の利用者を対象とする 7 大学大型計算機センターはそれぞれ特別の努力を払った。筆者が所属した京都大学大型計算機センターでの努力については京都大学大型計算機センター二十年史⁹⁾ に記述したが、利用者を中心とした VP ユーザセミナー、ベクトル計算機応用シンポジ

ウム (1985-1988 年 1 回計 4 回) を開催し、利用者のノウハウの交換、関連学術の最新情報の普及に努めた。1986 年秋に、連立一次方程式の反復型解法である ICCG 法¹⁰⁾ の創始者であるオランダの当時デルフト工科大学の van der Vorst 教授を日本人学術振興会の外国人招聘研究者として約 1ヶ月間京都大学大型計算機センターに招聘したが、教授の帰国直前の 1986 年 11 月 4 日に行われた第 12 回の VP ユーザー・セミナーで京大滞在中の研究成果も含めて講演していただいたことが記憶に残っている。七大学大型計算機センターを中心とした活動では、当時東京大学大型計算機センター長であった後藤英一先生の大変積極的なご支援を頂き、計算機科学者、先進的利用者、センター関係者で次の科研費総合研究を実施した。

年度	研究課題 (研究代表者)
S63~H1	スーパーコンピュータの高度利用に関する総合的研究 (京都大学 星野 聡)
H3~H5	スーパーコンピュータの性能評価に関する総合的研究 (九州大学 島崎 眞昭)

筆者は人事異動で 1989 年 6 月に九州大学大型計算機センターに移ったが、1990 年から文部省で大学主催の国際会議開催支援の制度が開始され、当時の牛島和夫九州大学大型計算機センター長のご指導の下に九州大学として応募し採択され 1991 年 ISS91 を実施した。また性能評価に関する上記科研の研究者が協力して、1993 年、1995 年に国際ワークショップおよび大学主催国際シンポジウムを開催した。会議録等については参考文献にあげる^{11)~14)}。

開催年	会議名 (開催場所)
1991	International Symposium on Supercomputing (福岡市)
1993	Workshop on Benchmarking and Performance Evaluation in High Performance Computing (東京都)
1995	International Symposium on Parallel and Distributed Supercomputing (福岡市)

1980 年代中頃は商用機としては演算パイプライン方式のみであったが、計算機科学の研究者の間では並列計算機時代の到来が予想され、並列処理、HPC に関する研究活動、学会活動が盛んになっていった。規模の大きな会合として情報処理学会の JSPP (Joint Symposium on Parallel Processing), 九州から始まった SWoPP (Summer United Workshops on Parallel, Distributed and Cooperative Processing), Hokke (「ハイパフォーマンスコンピューティングとアーキテクチャの評価」に関する北海道ワークショップ), ISHPC 等が多くの人材を育ててきている。

1992 年当時はベクトル計算機の黄金時代であり、その年横浜で開催された JSPP92 のパネル討論¹⁵⁾ のタイトルは「並列計算機の実用化商用化を逡巡させる諸要因とは—その徹底分析と克服— (司会: 富田眞治, パネリスト: 稲上泰弘, 小柳義夫, 笠原博徳, 島崎眞昭, 高橋延匡,

瀧 和男, 山田 実, 吉岡 顕)」で並列処理の時代に向
け活発な議論が行なわれた。

1990 年代中頃からベクトル計算機でも分散記憶方式の
導入が予想され, NOW を含めた分散記憶環境での使い
やすさの向上の必要性を感じていたところ, 日本学術振
興会未来開拓学術研究推進事業のプロジェクト研究を引
き受けることとなり, 早稲田大学, 九州大学, 和歌山大
学, 東京大学, 広島大学, 岡山大学, 豊橋技術科学大学,
京都大学, 奈良女子大学, 奈良先端大学の研究者と集まり
「分散並列スーパーコンピューティングのソフトウェアの
研究」を行った¹⁶⁾. 基礎理論やスケジューリング特にス
レッド・スケジューリングの研究, タスク・スケジュー
リングのためのベンチマークセットの設定, 分散メモリ並列
計算機のための並列化コンパイラの研究, ソフトウェア
DSM (Distributed Shared Memory), ソフトウェアの可
視化の研究が行われ, SC98(Orland), SC99(Portland),
SC2000(Dallas) で研究展示, デモを行い, また特にスケ
ジューリングに関しては, ACM ICS のワークショップと
して 1999 年 6 月にワークショップを行った¹⁷⁾.

HPC の広がりを考えようとするとき次世代を担う研究
者・技術者の育成が重要である. 1994 年から学生を対象
として並列処理を奨励するための PSC(Parallel Software
Contest) が産業界の協力を得て開催され, 上位入賞者の
中から HPC の優れた研究者が多く育った. 筆者もベン
ダーおよび研究グループのメンバーとて PSC2001 のサイ
ト運営を行い, ボランティア的な活動の大変さを経験す
ると同時に社会的意義の大きさも認識できた.

2003 年から JSPF に変わるものとして SACSIS (Sym
posium on Advanced Computing Systems and Infras
tructures) が始まり, 2005 年より, PSC に変わり新たな
狙いをもってグリッドチャレンジ¹⁸⁾ が行なわれており,
優れた研究者・技術者が育つことが期待される.

3. HPC システムの性能評価

3.1 性能評価

計算機システムの性能評価は計算機科学の基本的な
研究課題のひとつであるが, HPC システムの場合性能を
重視するシステムのため, 実用のシステムについては計算
機設計者・研究者, 製造会社, 計算センター, 利用者から
注目される. 計算機システムの調達に関連すると技術的
な事項以外も考慮の対象になるため事情が複雑化し易い.

性能評価といっても, 単一のジョブの場合の入出力を含
めた経過時間の評価を目的とするか, システムのスルー
プットを問題にするか等の違いがある. システムのスルー
プットに関してはジョブクラスの設定や計算機システム
負荷に関する統計や計算機システム運用のポリシー, ス
ケジューリング等が深く関係し, 計算機システムの運用
上重要であるが, ここでは cpu-bound の単一のジョブに
関する性能評価を念頭に考えることとする.

マシンサイクル・レベルのシミュレーションができれば
正確な実行時間の予測が可能である. 代表的なプログ

ラムからキーとなる部分を抽出したカーネルプログラム
についてアーキテクチャ・パラメータと性能との関係が研
究されてきた. 計算機システム開発の場合製造に先立ち,
マシンサイクル・レベルの性能評価も行なわれているよ
うである. 実用規模の応用プログラムについてはこのレ
ベルの評価は計算機負荷が大きく, 手軽に実行というわ
けには行かない. 一般的には次のように言える.

- (1) 計算機システムのモデルを設定し, モデルの測定
可能なパラメータを用意する.
- (2) プログラムのモデルとサイズなどのパラメータを
用意する.
- (3) プログラムをモデルの計算機上で実行させたとき
の実行時間の予測値を計算機およびプログラムの
パラメータの関数として表現する. 予測の時間が
実際の実行時間に近ければ評価関数は有用である.

古典的なパイプライン演算方式ベクトル演算器に関し
ては Hockney のモデル¹⁹⁾ がある. $n_{\frac{1}{2}}, r_{\infty}$ の概念が導入さ
れた. 日本の演算パイプライン方式ベクトル演算器の特徴
は多重パイプライン方式で Fujitsu VP100/200 に見られ
るようにモデルによって多重度が変わっていた. Hockney
モデルは多重度に関するベクトル演算性能の性能評価に
有効で, さらに行列積演算のアルゴリズム (jki 法, ijk 法)
の性能評価ならびにループ・アンローリングの段数と性
能の評価に有効であった²⁰⁾.

最近ではキャッシュを含めメモリ, レジスタなどハー
ドウェアの構造が複雑になっており簡単なモデル化は困
難である. しかし性能評価の努力は必要であり, 米国で
の地道な努力の継続は注目に値する. たとえば SDSC の
Performance Modeling and Characterization (PMaC)
laboratory²¹⁾ や The Performance Evaluation Research
Center (PERC)²²⁾ がある. PERC には国立研究所 LBNL,
LLNL, ORNL, ANL および大学の関係者が参加している.

3.2 ベンチマーク

計算機システムの性能評価が必ずしも容易でないこと
から, 計算速度といった性能を定量的に比較するため, 計
算機作業負荷を代表するような基準的プログラムによって
計算速度を実測, 比較するベンチマークテストがよく用い
られる. 計算機システムの主な処理がトランザクション処
理か数値計算を主とする科学・技術計算か入出力が多いか
などによりベンチマークの設計も大きく影響されるが, こ
こでは数値計算を主な処理として考える. 数値計算に関す
るベンチマークとしては 1) 核レベルのプログラム
によるベンチマーク, 2) ライブラリ・レベルのプログラ
ムによるベンチマーク, 3) 応用プログラムによるベンチ
マークに分けることができる²³⁾. 核レベルのプログラ
ムで歴史的に著名であったものとしてリバモア²⁴⁾ 14
ループおよび 24 ループとがあった. 複数のループの性能
の算術平均を取るべきか幾何平均をとるべきかなどにつ
いて議論があったことも思い出される. ライブラリレベル
のベンチマークとして LINPACK があり, 初期は連立一
次方程式の未知変数の数を 100 に限定していた. 現在は

サイズが自由化され最大性能の出るサイズとともに性能が報告され、そのデータベースは TOP500 としてベンチマークの代表的なものとなった。最大性能を実現するには計算、通信その他をバランスさせる必要があり、単独のプログラムで測定するものとして適当なもののみなされていること、大抵の計算機システムに関する測定データが集積されていることから、注目されるようになったと言えるであろう。長期間の継続的努力は大きな力となることを示しているといえる。その他著名なベンチマークプログラムとして、イリノイ大学の CSRD の Perfect Benchmarks²⁵⁾、NAS Parallel Benchmarks²⁶⁾ がある。また Purdue 大学の R. Eigenmann を中心として産業界と共同で 1988 年以来活動している SPEC(Standard Performance Evaluation Corporation) のベンチマーク²⁷⁾ も標準的なベンチマークの一つとなっている。

我が国では、ベクトル計算機を対象として、東京大学のグループにより 6 個のベンチマークが提唱された²⁸⁾。最近、理研の姫野氏の Himeno Bench²⁹⁾ に関する報告を見ることが多くなった。

4. HPC 用プログラム言語とライブラリ

4.1 HPC 用プログラム言語

演算パイプライン方式ベクトル計算機が登場した頃、新しいプログラム言語の試みもあったが、Fortran プログラムのコンパイラによるベクトル化方式の研究および製品化が進行し、自動ベクトル化方式が一般化した。その後並列計算機の登場に伴い、まず共有メモリ並列計算機に対する自動並列化の研究・実用化が進んだ。我が国の貢献は大きく、各社のコンパイラは国際的に評価が高かった。膨大な研究が行われ、簡単にまとめることもできないのでここではサーベイ論文³⁰⁾、解説³¹⁾、複数の専門書^{32),33)}、その後の我が国のプロジェクト^{34),35)} に関する情報を参考文献に示すにとどめる。

大規模分散メモリ並列計算機に対する HPC 用プログラム言語の研究として米国では HPF、わが国では VPP Fortran、HPF-JA の研究がある。HPF に関して、米国 Rice 大学の Kennedy のグループ等の精力的な研究と成果があったが、現在では利用者の性能に対する要求に対して満足を与えることができなかつたとみなされ、米国での HPF に対する興味は失せてしまったと言われている⁴⁾。分散メモリ並列ベクトル計算機用の VPP Fortran は海外では利用が広がらなかったこともあり、地球シミュレータプロジェクトに関連して、故三好氏の提唱で 1997 年 Fujitsu、Hitachi、NEC が参加して JAHPF (Japan Association of High Performance Fortran)³⁶⁾ が作られ、HPF-JA の仕様決定、実装の努力が行われた。現在核融合関係などで利用者の拡大の努力が行われている。プログラム言語については、ソフトウェアの流通の観点から、言語の国際的な互換性が重要であり、米国での HPF への興味の消失が気になるところである。

米国では HPF は成功しなかつたが、高水準言語への関

心は高く、応用ソフトウェアの生産性を引き上げる目標を掲げて、DARPA の HPCS(High Productivity Computing System)³⁷⁾ の中で新言語のプロジェクトが活動している。現在候補言語として Cray による Chapel³⁸⁾、IBM による X10³⁹⁾、Sun Microsystems による Fortres⁴⁰⁾ が提案されている。この関係の米国の研究者と話をしたとき、たとえ新言語が普及しなくても、このようなプロジェクトは計算機科学の研究を援助するという意味で意義が大きいということを強調していたことが印象に残っている。HPC に関連する計算機科学への研究支援に関する米国の意気込みが伺える。

4.2 HPC 用ライブラリ

言語の研究とライブラリの研究とは計算機科学的には専門分野として別分野になるが、応用プログラムの立場から見た場合、言語そのものの機能と利用可能なライブラリの集合とが全体として使いやすさや表現力を決めることになる。言語の機能やコンパイラの能力が十分でない場合機能の充実したライブラリによってシステムの使いやすさを向上させることはよくある。1979 年線形代数に関するソフトウェアから内積演算など 38 個の基本演算を抽出し個々の計算機最適化したライブラリを用意し、高性能で移植性の高いソフトウェアを構築しようという考えの下に BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms)⁴¹⁾ が提唱され、当初 CDC 6600/7600、Burroughs 6700、Honeywell 6000、IBM 360/67、370/195、PDP10 に対して BLAS が開発された。ベクトルに関する演算を対象とし、後にレベル 1 BLAS と呼ばれるものである。1980 年代前半我が国に演算パイプライン方式ベクトル計算機が登場したとき、大型計算機センターの利用者の間では BLAS は普及しておらず、一方 Fortran 自動ベクトル化コンパイラの能力は高く、IF 文を含むループのベクトル化のほか一部多重ループのベクトル化等も行なわれており、BLAS が使用されていないことはコンパイラにとってはむしろ好都合であり、利用者にとっても好都合であった。しかし既に BLAS が普及していた米国ではベクトル計算機、階層構造のメモリシステムを持つ計算機における性能向上のため、ベクトルと行列の演算を対象としたレベル 2 の BLAS^{42),43)}、行列と行列の演算を対象としたレベル 3 の BLAS^{44),45)} が定義され広まった。レベル 3 BLAS によりキャッシュによる階層構造を持つ記憶装置の詳細を隠蔽することに成功したといえる。

BLAS を用いて大規模線形計算ライブラリである LAPACK⁴⁶⁾ の開発も行なわれた。数値処理ソフトウェアへのソフトウェア工学的アプローチの採用例として見習うべき点が多い。分散メモリ並列計算機の登場に対応して、distributed-memory Dense BLAS の定義が BLAS Technical Forum⁴⁷⁾ で議論されたが、合意に至らず議論は Journal of Development ANNEX C.2 として残されている。これに対し Dongarra 等は分散メモリ並列計算機のために BLACS(Basic Linear Algebra Communication Subprogram)、PBLAS(Parallel BLAS) を定義し、分散

メモリ計算機用の LAPACK すなわち ScaLAPACK⁴⁸⁾ を開発した。HPF 用のインターフェースも用意された。分散メモリ構造を利用者に隠蔽することはできず、利用者はデータ分散を意識する必要がある。分散メモリ並列計算機に対する自動並列化コンパイラの難しさも同じことに起因すると言えよう。

近年 HPC のアーキテクチャの複雑化に対応し、自動チューニングライブラリの研究が進んでいる^{49),50)}。

5. アルゴリズムと計算複雑さ

連立一次方程式の解法において、密係数行列の場合、未知変数の数を n とするとき、計算量は $O(n^3)$ である。偏微分方程式の有限要素法による離散化において、係数行列が対称な場合、反復法 ICCG 法¹⁰⁾ では、収束までの計算量は大略 $O(n^{1.4})$ と考えられている。一方最近研究の進展しているマルチグリッド法^{51),52)} (幾何マルチグリッド法および代数マルチグリッド法) ではほぼ $O(n)$ の計算量となることが期待されている。したがって問題サイズの拡大を指向するときにはアルゴリズムの計算複雑さに注目することも大切であることがわかる。

線形方程式の反復法として現在最も一般的に使われているのは ICCG 法といえるが、ICCG 法には本質的に逐次計算で並列化しにくい前進および後退代入計算部分がある。我々を変数の順序付け法により並列化する手法の研究を行ってきた。またマルチグリッド法の計算量は理想に近いものであり、我々はマルチグリッド法の中でもライブラリ化に適するものとして代数マルチグリッド法の研究を進めてきた。これらについては文献を参照していただきたい^{53)~56)}。

アルゴリズムの研究は地味であるが、計算量のオーダーが変化する場合、影響が大きい。FFT が歴史的に有名であるが、近年 FMM(Fast Multipole Method)⁵⁷⁾ がいろいろな分野で大きな影響を与え始めている。

6. おわりに

HPC の発展の経過を振り返り、あらためて我が国の HPC の水準の高さを実感している。今後一層発展していくことを期待して本稿を終える。

謝辞 本稿をまとめる機会を与えていただいた筑波大学の朴委員長を始めとする HPC 研究会の役員の方々に謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Strohmaier, E., Dongarra, J.J., Meuer, H.W., Simon, H.D.: The market place of high-performance computing, *Parallel Computing*, Vol. 25, No. 13-14, pp. 1517-1544 (1999)
- 2) Oyanagi, Y.: Development of supercomputers in Japan: Hardware and software, *Parallel Computing*, Vol. 25, No. 13-14, pp. 1545-1567 (1999)
- 3) TOP500 Supercomputer Sites; (<http://www.top500.org/>) (LAD:06/09/06)

URL についてはアクセスできること確認した最新の日付を (LAD:yy/mm/dd) として示す。

- 4) World Technology Evaluation Center: High-End Computing research and Development in Japan (2004) (<http://www.wtec.org/hec/report/hec-report.pdf>) (LAD:06/09/05)
- 5) Boku, T., Itakura, K., Nakamura, H., Nakazawa, K.: CP-PACS: A massively parallel processor for large scale scientific calculations, *Proceedings of ACM International Conference on Supercomputing '97*, pp. 108-115, Vienna, Jul. (1997)
- 6) Special Issue: The Earth Simulator, *Parallel Computing*, Vol. 30, pp. 1277-1343 (2004)
- 7) PACS-CS: (<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/PACS-CS/file/press060627.pdf>) (LAD:06/09/05)
- 8) TSUBAME: (<http://www.gsic.titech.ac.jp/ccwww/tgc/bm/>) (LAD:06/09/05)
- 9) 島崎真昭: ベクトル計算機幕開きとセンターの活動, 京都大学大型計算機センター二十年史, 京都大学大型計算機センター, pp. 203-215(1989)
- 10) Meijerink, J.A., Van der Vorst, H.A.: An iterative solution method for linear systems of which the coefficient matrix is a symmetric M-matrix, *Mathematics of Computation*. Vol. 31, pp. 148-162 (1977)
- 11) *Proceedings of the International symposium on supercomputing*, Fukuoka, Japan, Nov. 6-8, 1991 Kyushu University Press (1991)
- 12) Shimasaki, M.(Ed.): WBPE: Workshop on benchmarking and performance evaluation in high performance computing, July 23, 1993, Tokyo Japan (1993)
- 13) Shimasaki, M., Sato, H.(Ed.): *Proceedings of the International symposium on parallel and distributed supercomputing*, Sept. 26-28, 1995, Fukuoka, Japan (1995)
- 14) Special issue on parallel and distributed supercomputing, *IEICE Trans. on Information and Systems*, Vol. E80-D, No. 4 (1997)
- 15) 稲上泰弘, 小柳義夫, 笠原博徳, 島崎真昭, 高橋延匡, 瀧和男, 山田実, 吉岡顕, 富田真治: 並列計算機の実用化商用化を逡巡させる諸要因とは—その徹底分析と克服—並列処理シンポジウム JSPP92 報告, 情報処理, Vol. 34, No. 4, pp. 457-482 (1993)
- 16) 平成 12 年度未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書概要: 「分散・並列スーパーコンピューティングのソフトウェアの研究」 (<http://www.jsps.go.jp/j-rttf/saishu/022-5-j.html>) (LAD:06/09/06)
- 17) XQ Cai, XQ, Shimasaki, M., Woeginger, G.(Ed.): Special Issue on Scheduling Algorithms in Parallel and Distributed Computing, *Journal of Scheduling*, Vol. 5, Issue 5 (2002)
- 18) 田浦健次朗: SACSIS2005 併設企画 Grid Challenge: 狙いと実現: (http://www.jpgrid.org/event/2004/pdf/showcase05_taura.pdf) (LAD:06/09/02)
- 19) Hockney, R.W., Jesshope, C.R.: *Parallel Computers*, Adam Hilger, Bristol (1981)
- 20) Shimasaki, M.: Performance analysis of vector supercomputers by Hockney's model, *Proceedings*

- of the Second International Conference on Supercomputing Vol. III, Supercomputer Design, Performance Evaluation and Education, pp. 359–368 (1987)
- 21) PMAaC; (<http://www.sdsc.edu/PMaC/>) (LAD:06/09/02)
 - 22) PERC; (<http://perc.nersc.gov/main.htm>) (LAD:06/09/05)
 - 23) 島崎真昭:数値計算におけるベンチマーク, 情報処理, Vol. 31, No. 3, pp. 313–320 (1990)
 - 24) McMahon, F.:The Livermore Fortran Kernels: A Computer Test of the Numerical Performance Range, Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-53745 (1986)
 - 25) Cybenko,G., Kipp,L., Pointer,L., Kuck,D.: Supercomputer Performance Evaluation and the Perfect Benchmarks, Technical Report 965, CSRD Univ. Illinois, Urbana, Illinois (1990)
 - 26) Bailey, D., Barton, J., Lasinski, T., Simon, H., (Eds.): The NAS Parallel Benchmarks, Technical Report RNR-91-02, NASA Ames Research Center, Moffet Field, CA 94035 (1991)
 - 27) Standard Performance Evaluation Corporation, (<http://www.spec.org/spec>) (LAD:06/09/02)
 - 28) Wong, W.F., Goto, E., Oyanagi, Y., Yoshida, N.,: Six Benchmark Problems for Number Clunchers, Proceedings of the International Symposium on Supercomputing, Fukuoka, Japan, Nov. 6–8, Kyushu University Press (1991)
 - 29) Himeno Benchmark; (<http://accr.riken.jp/HPC/HimenoBMT/>) (LAD:06/09/02)
 - 30) Shimasaki, M.: Compiling Techniques for Supercomputers, Advances in Software Science and Technologies 4, pp. 1–20 (1992)
 - 31) 島崎真昭:スーパーコンピューティング応用の現状と将来, 情報処理, Vol. 36, No. 2, pp. 125–131 (1995)
 - 32) Wolfe,M.J.: High Performance Compilers for Parallel Computing, Addison-Wesley, Redwood City (1996)
 - 33) Banerjee, U.: A Book Series On Loop Transformations for Restructuring Compilers,
Loop Transformations for Restructuring Compilers:The Foundations, Kluwer, Boston (1993)
Loop Parallelization, Kluwer, Boston (1994)
Dependence Analysis, Kluwer, Boston (1997)
 - 34) Omni OpenMP Compiler Project (<http://phase.hpcc.jp/Omni/home.ja.html>) (LAD:06/09/02)
 - 35) The Advanced Parallelizing Compiler Technology R&D Project 2000.10.13–2003.3.31 (<http://www.apc.waseda.ac.jp/pdf/gaiyou-e.pdf>) (LAD:06/09/05)
 - 36) JAHPF; (<http://www.tokyo.rist.or.jp/jahpf/>) (LAD:06/09/05)
 - 37) HPCS(high Productivity Computing System) ; (<http://www.darpa.mil/ipto/programs/hpcs/>) (LAD:06/09/05)
 - 38) Chapel; (<http://chapel.cs.washington.edu/>) (LAD:06/09/05)
 - 39) X10; (http://domino.research.ibm.com/comm/research_projects.nsf/pages/x10.index.html) (LAD:06/09/05)
 - 40) Fortress;(<http://research.sun.com/projects/plrg/>) (LAD:06/09/05)
 - 41) Lawson,C.L., Hanson,R.J.,Kincaid,D., Krogh,F.T.: Basic Linear Algebra Subprograms for FORTRAN usgae, ACM Trans. Math. Soft., Vol.5, pp.308–323 (1979)
 - 42) Dongarra, J.J., Croz, J. Du, Hammering, S., Hanson, R.J.: An extended set of FORTRAN Basic Linear Algebra Subprograms, ACM Trans. Math. Soft., Vol. 14, pp. 1–17 (1988)
 - 43) Dongarra, J.J., Croz, J. Du, Hammering, S., Hanson,R.J.: Algorithm 656: An extended set of FORTRAN Basic Linear Algebra Subprograms, ACM Trans. Math. Soft., Vol. 14, pp. 18–32 (1988)
 - 44) Dongarra, J.J., Croz, J. Du, Duff, I.S., Hammering, S., : A set of Level 3 Basic Linear Algebra Subprograms, ACM Trans. Math. Soft., Vol. 16, pp. 1–17 (1990)
 - 45) Dongarra, J.J., Croz, J. Du, Duff, I.S., Hammering, S., : Algorithm 679: A set of Level 3 Basic Linear Algebra Subprograms, ACM Trans. Math. Soft., Vol. 16, pp. 18–28 (1990)
 - 46) LAPACK; (<http://www.netlib.org/lapack/>) (LAD:06/09/05)
 - 47) BLAS Technical Forum; (<http://www.netlib.org/blas/blast-forum/>) (LAD:06/09/05)
 - 48) ScaLAPACK; (http://www.netlib.org/scalapack/scalapack_home.html) (LAD:06/0905)
 - 49) ATLAS project; (<http://www.netlib.org/utk/people/JackDongarra/PAPERS/atlas.pub.pdf>) (LAD:06/09/02)
 - 50) Katagiri, T., Kise, K., Honda, H., Yuba, T.: Effect of auto-tuning with user’s knowledge for numerical software, Proceedings of the 1st conference on Computing frontiers, pp.12–25 (2004)
 - 51) McCormick, S.F.(Ed.): Multigrid Methods, Frontiers in Applied Mathematics 3, SIAM (1987)
 - 52) mgnet; (<http://www.mgnet.org/>) (LAD:06/09/05)
 - 53) Shimasaki,M., Iwashita,T., Mifune,T.: Fast linear equation solvers in high performance electromagnetic field analysis, Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 149, pp. 341-349 (2002)
 - 54) Iwashita, T., Shimasaki, M.: Block red-black ordering: A new ordering strategy for parallelization of ICCG method, International Journal of Parallel Programming, vol. 31, pp. 55-75 (2003)
 - 55) Iwashita, T., Nakanishi, Y., Shimasaki, M.: Comparison Criteria for Parallel Orderings in ILU Preconditioning, SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 26, pp. 1234–1260 (2005)
 - 56) T. Mifune, T. Iwashita and M. Shimasaki : A Parallel Algebraic Multigrid Solver for Fast Magnetic Edge-Element Analyses, IEEE Trans. on Magn., Vol. 41-5, pp. 1660–1663 (2005)
 - 57) Greengard, L., Rokhlin, R.: A fast algorithm for particle simulations, Journal of Computational Physics, Vol. 73, No. 2, pp. 325–348 (1987)