

# SC08 参加報告書

齋藤貴之\*

国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 研究員

2008 年 12 月 5 日

## 概要

2008 年 11 月 15 日から 21 日にかけて、アメリカ合衆国テキサス州オースチンで開催された、Supercomputing 2008 (以下 SC08) に理化学研究所 (理研)SC08 レポーターとして派遣されました。これはそのときのレポートです。

## 1 はじめに

2008 年 11 月 15 日から 21 日にかけて、アメリカ合衆国テキサス州オースチンで開催された、SC08 に参加してきました。これはそのときの報告書です。

背景として私自身のことを述べますと、北海道大学物理学科を卒業後、北海道大学大学院理学研究科に進学し宇宙物理学研究室に所属しました。大学院では、一貫して粒子シミュレーションによる銀河形成研究をおこなってきました。大学院修士では、北海道大学の大型計算機センターの HP Exemplar V2500 と日立の SR8000 を使って並列シミュレーションをおこなっていました。その後大学院博士では、国立天文台の重力多体系専用計算機 GRAPE-5/6 を使ったシミュレーションをおこなっていました。GRAPE は自己重力計算が非常に高速であるため、当時リアルで計算していましたが、世界で最大の銀河形成シミュレーションを達成しました。その後ポスドクとして国立天文台に移り、超大規模高精度銀河形成シミュレーションにより天の川銀河の成り立ちを明らかにする、天の川創成プロジェクトを推進してきました。このプロジェクトで私は、GRAPE をもちいた超並列銀河形成シミュレーションコード ASURA を開発し、現在これをもちいて銀河シミュレーションをおこなっています [4]。今回、SC08 に参加する権利をいただくことが出来たのはこの ASURA の成果になります [5] (図 1)。

主な興味は複雑な銀河形成過程の解明であり、そのためのツールとしてシミュレーションコードを開発してきました。専用計算機をつかったシミュレーション経験と、MPI をもちいた超並列シミュレーションコードの開発経験がありますが、ハードウェアに特に強いわけはありません。

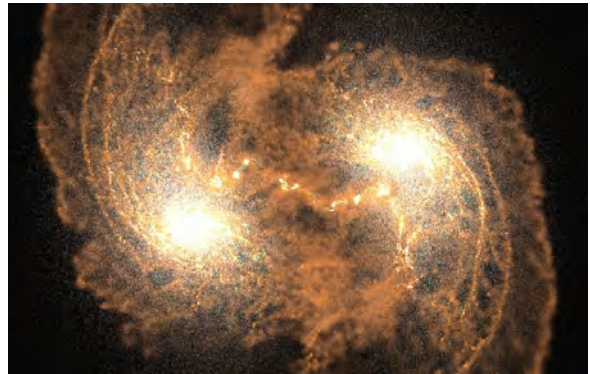


図 1 銀河衝突の超大規模シミュレーションで、「次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2008」のポスター最優秀賞をいただきました。可視化には武田隆顕さん (国立天文台) が開発した可視化ソフト Zindaiji を使っています。

このレポートでは、普段自主開発ソフトウェアで天文学研究をしている、SC08 の参加者としては若干偏っているかもしれない、私 (齋藤貴之) が、SC08 で見て、聴いて、そして考えたことを纏めた報告書になります。なるべく正確な記述になるように努めました。筆の誤りがあるかもしれませんが、その場合はご指摘頂ければと思います。

## 2 SC08 聴講レポート

ここでは、会場で聴講した講演について報告します。

### 2008/11/18-

2.1 Exhibitor Forum: How the MaxPlanck Institute for Gravitational Physics Built the World's Fastest Ethernet Compute Cluster using the Woven Systems Ethernet Fabric

重力波検出装置のための ATLAS cluster の、特に Woven 社の開発した Ethernet Fabric について Woven 社の人々がプレゼンテーションをしていました。Fat tree

\* saitoh.takayuki at nao.ac.jp



図2 SC08 レポーター三人。左は萩田克美さん(防衛大学校)、右は牧野浩二さん(高度情報科学技術研究機構)

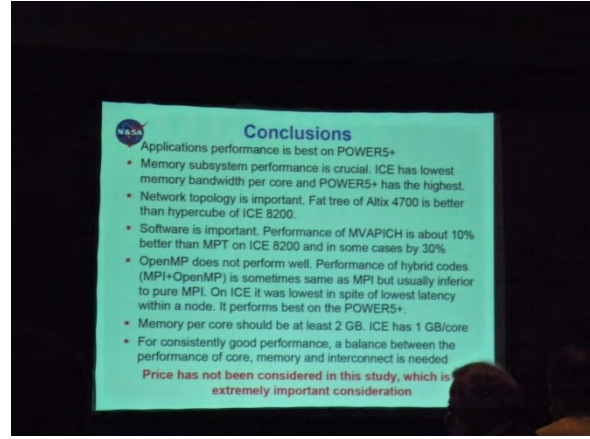


図3 実アプリを三つのシステムで性能評価し、その結果を纏めたスライド。

の元で dynamic reordering をおこなうことがポイントのようです。

今回 MaxPlank はこのシステムを ~ 1.8 M EUR で構築したそうです。システムの性能は ~ 32.8 Tflop/s で、今期 Top 500 の 58 位。Linpack で 63 % の実効性能を出すことに成功し、Giga bit Ethernet を使ったシステムでは、最も高いパフォーマンスだそうです。(Top 500 に乗るような) 平均的な Giga bit Ethernet 接続のシステムの平均パフォーマンスは 53 % だとか。

ところで私は、これは重力多体系シミュレーション専用のシミュレータである、と勘違いして聞きに行っていました。

## 2.2 Papers:Scientific Application-based Performance Comparison of SGI Altix 1700, IBM POWER5+, and SGI Altix ICE 8200 Supercomputers

実アプリで計算機性能を評価しようという論文です。もちいた計算機は、SGI Altix 4700、SGI Altix ICE 8200、そして IBM POWER5+ システムの三つです。計測には、ベンチマークソフトの他に 4 つの流体シミュレーションコードがもちいられていました (OVERFLOW-2、CART3D、USM33D、ECCO)。

結果の幾つかを書くと、ハイパーキューブネットワークよりも Fat tree の方が高速であること、MPI ライブラリの選択も重要、MPI と OpenMP をもちいたハイブリッド並列では、MPI 単独での並列よりも劣ることが多いこと等が結果として得られていました (図 3)。

## 2.3 Birds-of-a-Feather:The 2008 HPC Challenge Awards

申し訳ありません、勉強不足で”HPC CHallenge Awards” [12] というものの存在を知りませんでした。二つのクラスがあり、Class 1 は、よりよい性能を出し

たシステムが表彰され、Class 2 は、性能以外に技巧を凝らしたかどうかを重要視して表彰するそうです。

Class 1 では、Oak Ridge の Cray XT5 と、Argonne の BlueGene/P が二つずつ表彰されていました。Class 2 は、Cray の Chapel、IBM の Unified Parallel C と X10、そして、MathWorks が Parallel Matlab で競い合っていました。Class 2 は、どうやら並列化言語によるの競争なのですね。

## 2.4 Papers:50.5 Mflops/dollar and 8.5 Tflops Cosmological N-body Simulation on a GPU Cluster

タイミング悪くポスター会場で直接お話を伺うことが出来ませんでしたが、日本から出ている GPU クラスタを使った重力多体シミュレーションについての論文です。長崎大学の濱田剛さんたちのグループです。

従来から、その計算の重さにより、GPGPU の格好のパフォーマンス材料とされていた重力多体問題ですが、これまでは直接法のみでした。これは粒子数  $N$  に対して計算量が  $N^2$  になります。無衝突系 (銀河とか宇宙論的計算) で実際にもちいられている近似法をもちいた場合、計算量が減ることにより CPU を使った方が速いということがしばしば起きていました。たとえば、重力計算の代表的な近似法であるツリー法をもちいた場合、計算量は  $N \log N$  になるからです。彼らは、ツリー法を GPU 上に実装することに成功し、高速な演算を実現しました。かれらはわずか 1700 万円で 128 台 8.5 Tflops のシステムを構築することに成功したそうです。

また、NVIDIA のブースでは著者らの名前がクレジットされたシミュレーションが流されていました (§3.4)。

## 2.5 Birds-of-a-Feather:Top 500 Supercomputers

この SC08 の前の金曜日に結果が報じられていたようでしたので基本的には Top 500 の表彰式です。今回の話題はもっぱら Oak Ridge の Jaguar が、前回初登場 1

Price of the GPU cluster			
Elements	Number of elements	Price (JPY)	Price (\$)
GPU's	128	6,080,000	\$ 26,411
Host PCs	128	10,716,032	\$ 70,429
Network switch	3	483,600	\$ 2,918
Total		17,279,632 JPY	\$ 168,172

図4 濱田さんたちの GPU クラスタの価格と性能。

位だった Los Alamos の Roadrunner を抜くことが出来るか、あるいは Roadrunner が引き離すか、でした。結果はご存じの通り、わずか 5% ほどの差で Roadrunner が 1 位を死守しました (図 5)。ブースで配られていた Top 500 のチラシの見出しは、”Jaguar Chases Roadrunner, but Can't Crab Top Spot on Latest List” でした。そのほか特に驚いたのは上海スーパーコンピュータセンター (中国) の計算機が第 10 位にランクインしたことでした。OS はマイクロソフト Windows HPC 2008 でした。

Rank	Site	Manufacturer	Computer	Country	Cores	Peak (Tflop/s)	Power (kW)
1	DOE/NNSA/LANL	IBM	Roadrunner - BladeCenter QS22U321	USA	128608	10.4	2.48
2	Oak Ridge National Laboratory	Cray Inc.	Jaguar - Cray XT5 QC 2.3 GHz	USA	190152	10.0	2.94
3	NASA/Ames Research Center/MAS	SGI	Plexos - SGI Altix ICE 8200EX	USA	97200	4.0	1.86
4	DOE/NNSA/LANL	IBM	eServer Blue Gene Solution	USA	212902	4.7	2.32
5	Argonne National Laboratory	IBM	Blue Gene/P Solution	USA	163348	4.5	1.26
6	Texas Advanced Computing Center/ Univ. of Texas	Sun	Ranger - SunBlade x8420	USA	62970	4.0	2.0
7	NERSC/ILBNL	Cray Inc.	Franklin - Cray XT4	USA	38942	2.6	1.15
8	Oak Ridge National Laboratory	Cray Inc.	Jaguar - Cray XT4	USA	38976	2.6	1.04
9	NNSA/Stanford National Laboratories	Cray Inc.	Red Storm - XT3/4	USA	38308	2.4	2.0
10	Shanghai Supercomputer Center	Dawning	Dawning 5000A, Windows HPC 2008	China	34720	1.8	0

図5 Top 500 リストの上位 10 位。第 10 位に上海スーパーコンピュータセンター (中国) の計算機がランクしている。

Top 3 サイトの関係者には表彰と T シャツが送られていましたが、何が面白いのかわかりませんでした (図 6)。なにか意味のある T シャツだったので、私以外の人は喜んでいました。アジアで第 1 位となった上海スーパーコンピュータセンターが表彰されたのですが、関係者が会場にいなかったため、マイクロソフトの人が賞状を受け取っていました。

その他データを使った統計の議論。外挿をすると 2020 年頃、1 位の計算機の演算性能は 1 Eflops を突破することになる (図 7)。私が大学院で数値シミュレーションを始めた頃、研究室の先輩に最初に教えられた「外挿は危険だ」という言葉を思い出す。



図6 表彰状をもった人たち。顔と名前は私には区別が付きません。第 10 位の中国の計算機の関係者が会場にいなかったため、マイクロソフトの人が賞状を受け取っていました。

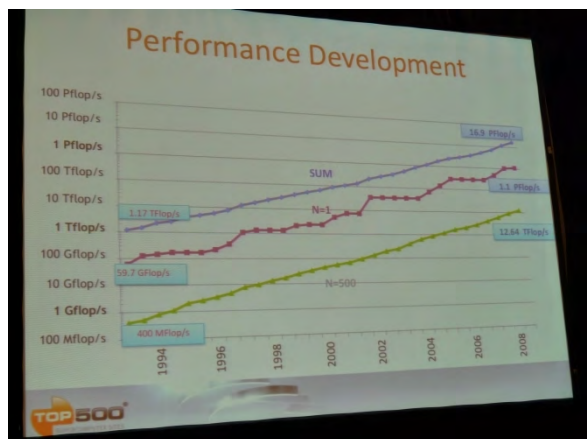


図7 Top 500 の 1 位と 500 位と総和の時間進化。exp で延びている。順調に進化すると、2020 年頃、1 位の計算機は 1 Eflops を突破する。

アジアで Top 500 にランクインしている計算機の数。日本の計算機がほぼまっすぐに減少しているのと、2001-2002 年あたりから日本以外のアジアの国々がランク入りし始め、アジアとしての総数を保っている状態。

会場ではその他の統計量についての議論や、Linpack Benchmark の問題点についても議論がされていました。

## 2008/11/19-

2.6 Panels: Will Electric Utilities Give Away Supercomputers with the Purchase of a Power Contrast?

スーパーコンピュータのエネルギー効率についてのパネルでした。より効率のよいシステムのために、どういところでエネルギーが消費されているか、どこを効率化するかが話題にあがっていました。

ちょっと面白かったのは、消費電力当たりの性能は、Top 500 リストの上位ほど良いということでした (図

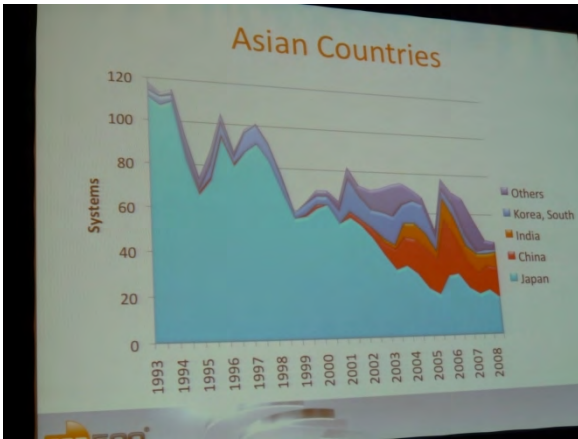


図 8 アジアの計算機で Top 500 にランクインしている計算機の数。

9)。上位に近いほど新しいものであり、新しい計算機ほど効率を考えたシステムになっているということですね。

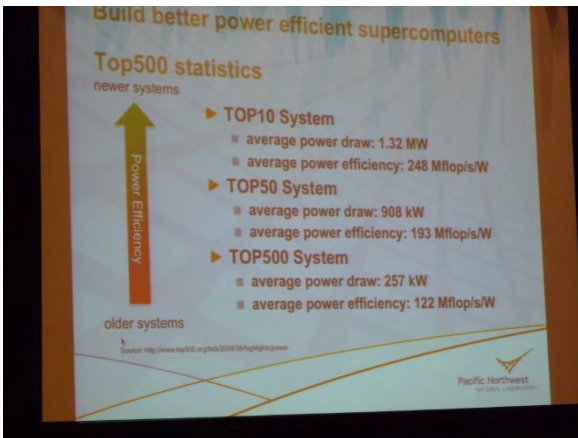


図 9 消費電力当たりの演算性能は Top 500 リスト上位ほど良い。

## 2.7 Exhibitor Forum:Cray: Growing a Greener HPC Future

たぶん高効率化によって環境に優しいことを目指す Green コンピューティングについて、Cray の取り組みが紹介されていました。Cray の液冷システム (Cray XT5 に搭載されている) の ECOphlex では、従来に比べて冷却系のエネルギーコストを大幅に減らすことが出来るようです (図 10 と 11)。

続いて、効率を上げるという意味で、CPU の他に FPGA や GPGPU を積極的に使ったシステムの可能性について紹介がされていました。名目ピークは上がるでしょうが、なかなか使いこなすのは難しい、あるいはごく限られた人にしか名目ピークに近い性能で使えないのであれば、ちょっと困ってしまいます。そのようなアプ

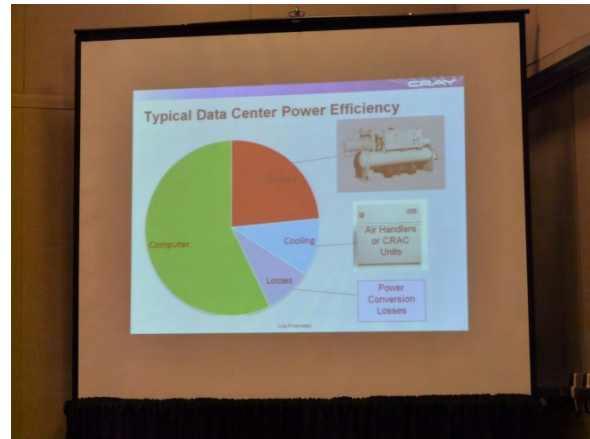


図 10 データセンターのエネルギー利用割合。

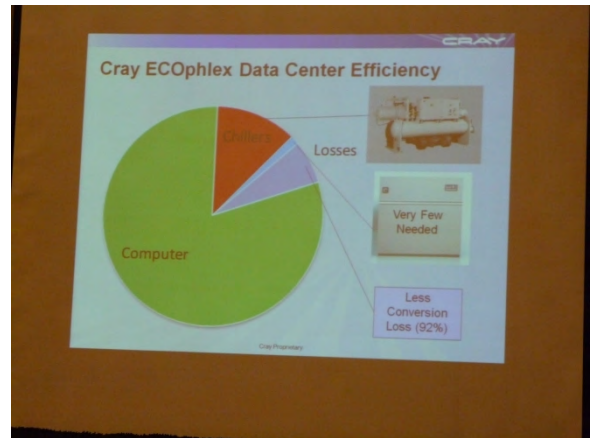


図 11 ECOphlex により冷却系のコストを大幅に減らすことが出来る、ということらしい。

ローチと同時に、(たぶん歴史上存在したことがない) 賢いコンパイラが望まれます。

## 2.8 Papers: The Role of MPI in Development Time: A Case Study

今回の講演の中で、私が最も興味をもったものでした。MPI での並列コードの開発には難しくコストが高いアプローチであると思われるが実際にどうであろうか、ということ Flash のレポジトリのデータから調べて報告したものです。たとえば、新たな並列化スキームにより超並列シミュレーション用コードを今の 10 倍の効率で開発できるようなことがあるのか、という問いかけになります。

Flash は、シカゴ大学で開発されている、MPI で並列化された並列 AMR シミュレーションコードです (図 12)。一般公開されています。メッシュ生成分割部分には、PARAMESH ライブラリをもちいているため、Flash 自身でメッシュを生成しているわけではありません。図 13 は、Flash のソースコードを 2 次元にマップしたものです。聞き漏らしましたが、面積はサイズに対応して

いるでしょう。このうちオレンジの部分が PARAMESH に関係した部分です。そして、コード全体のうち MPI に関係する部分のほとんどは、PARAMESH からもたらされたものです。今回の解析では、PARAMESH は含みません。

レポジトリの解析によると、ファイルコミットのうちの約 30% が MPI に関係するもの、バグフィックスのうち約 30% が MPI に関係するものという結果が示されました。また、ユーザごとについても解析していて、そのうち特に興味深かったことは、MPI に関する更新する人はとても限られているということでした。まあ、そうでしょう。

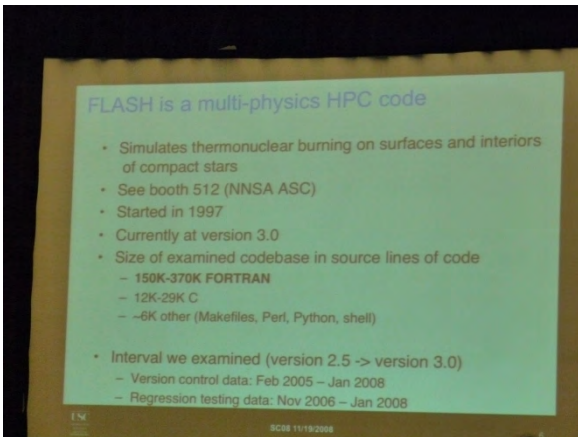


図 12 Flash コード。



図 13 コードを 2 次元マップした図。オレンジの部分が PARAMESH に関係するもの

さて、MPI コードの開発に特有の作業量を定量化するために、更新記録から MPI に関係するバグがあがってきてから解決されるまでの時間を調べます。その結果、MPI に関係するバグフィックスにかかった時間は、全体の 25% に過ぎないという結果が示されました。つ

まり、アムダールの法則によると、

$$\frac{1}{1 - 0.2} = 1.25 \quad (1)$$

なので、開発負担が零になるような、夢の並列化方法が実現したとしても、25% の開発効率の向上にしか繋がらないという結果になります。そして、発表者は、MPI 開発負担を過剰評価しているのではないかと、将来的にも大きな開発効率の向上が得られないのではないかと、としてトークを終えました (図 14)。

これは若干直感に反しますし、実際トーク終了後活発な議論がおこなわれました。この場合一番問題になるのは、MPI 部分の大半を PARAMESH に負っているのに、その部分を評価していない点でしょう。そのため、ある程度基礎的な技術が確立してライブラリを有効利用出来る場合であれば当てはまることだと思いますが、要素技術そのものを開発しつつスクラッチから起こしている場合には当てはまらないのではないかと考えます。これは従来の枠組みを超えて新しいサイエンスに向かうときにはしばしば起き得る状況でしょう。もちろん、今回は Flash でだったので、このような解析になったのだと思います。スクラッチから起こしたプログラムで、同様の定量化がおこなわれ比較されるのとよいのですが。適当なものがあるでしょうか。

その他質疑の中で印象的だったのが、「バグフィックスの時間で評価したが、私はたった一文字のタイポのデバッグに 6 週間かかったことがある」というものでした。こういうのは良くやります。プログラミングやデバッグの効率は人に強く依存するため、なかなか定量化が難しそうです。

私自身が MPI をもちいてフルスクラッチでコード開発をしているため、このトークは大変興味深く面白いものでした。

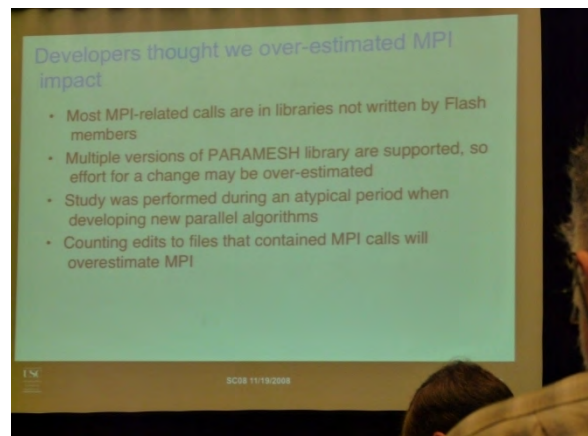


図 14 まとめのスライド。タイトルは "Developers thought we over-estimated MPI impact"

## 2.9 Papers: An Adaptive Cut-off for Task Parallelism

タスク並列をおこなう言語において、効率的なタスク分割方法を効率的に求めようという研究だったようです。

2008/11/20-

## 2.10 ACM Gordon Bell Finalists: 0.374 Pflop/s Trillion-particle Particle-in-cell Modeling of Laser Plasma Interactions on Roadrunner

Particle-in-cell コード VPIC を Roadrunner に最適化して、レーザープラズマの超大規模シミュレーションをおこなったという研究 (図 15)。ハイブリッドなシステムにあわせてチューニングするのは相当大変だったのでしょう。0.374 Pflop/s という表記に自信の表れを感じます。発表者も大変自信を持ってプレゼンテーションをしていたのですが、若干プレゼンテーションが難しかったかなという印象でした。

Roadrunner の売りはなんといっても、高い演算性能を持つ Cell/B.E. を搭載していることです。Cell/B.E. 部分のピーク性能は単精度だと 3 Pflop/s になります。この研究でも Roadrunner にあわせて様々な点でチューニングを施していましたが、Cell/B.E. が一番大きな性能のゲインになったはずです。

さて、Cell (こちらは Sony PlayStation3) を使った研究では、大変興味深い研究が富田賢吾さん (総合研究大学大学院/国立天文台) と山崎秀輔さん (大阪大学) によってなされています [6, 11]。この研究は、Cell に対して無衝突重力多体問題計算プログラムを実装し、その性能と精度を評価したものです。ここで無衝突系とは粒子同士の近接相互作用 (散乱など) が重要ではない系のことです (具体的には銀河や銀河団など)。論文では高い性能を発揮できたことが示されています。しかし、この論文で一番重要になるのは、Cell の丸め処理が切り捨てになっており、四捨五入と定めている IEEE754 に準拠していないことによるエラーを見積もったことです。エラーのオーダーは二体間相互作用で  $10^{-6}$  程度なので、無衝突系では問題なくもちいることができますが、高精度計算が必要な系のシミュレーションでは注意が必要であると指摘されています。今回の計算では、Particle-in-cell ですからおそらく問題ないことを確認されていると思います。

## 2.11 ACM Gordon Bell Finalists: 369 Tflop/s Molecular Dynamics Simulations on the Roadrunner General-purpose Heterogeneous Supercomputer

Gordon Bell ファイナリストで、こちらは Roadrunner で分子動力学計算をおこなった研究です (図 16)。

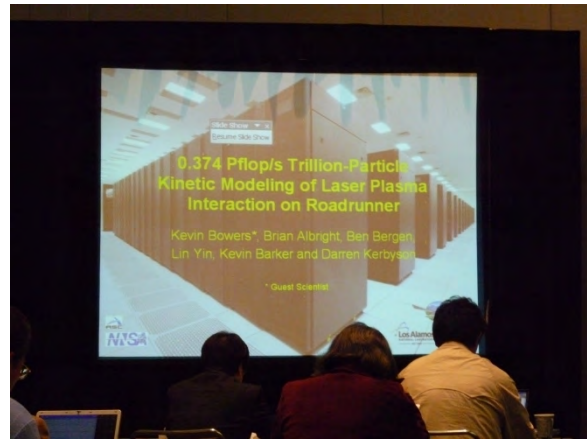


図 15 0.374 Pflop/s Trillion-particle Particle-in-cell Modeling of Laser Plasma Interactions on Roadrunner

直接法による相互作用計算は Cell/B.E. で、通信を伴う境界に関する計算やチェックポイントなどは Opteron で、と分けているそうです。こちらの計算では、倍精度をつかっており、その理由の一つとして単精度浮動小数点演算の丸め処理が切り捨て (通常は四捨五入) であることを気にしています。

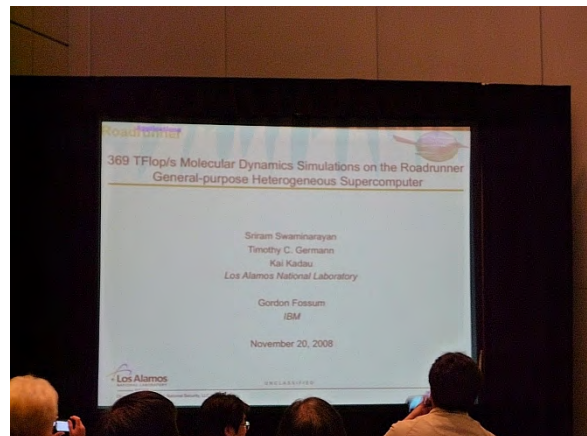


図 16 369 Tflop/s Molecular Dynamics Simulations on the Roadrunner General-purpose Heterogeneous Supercomputer

## 2.12 Papers: Scalable Load-Balance Measurement for SPMD Codes

良いスケラビリティを得るためには、ロードバランスを取らなければいけません。しかし、実際にはなかなかそうはいきません。バランス調整するひつようがありますが、そのためにはどのようにロードバランスが進化したのかを実際の計算の中で把握する必要があります。とりあえず全ノードから実際に情報を書き集めるのが速いのですが、それはそれで負荷が大きくなりかねません。この論文では、データに Wavelet 変換をかけ、そ

の後さらに圧縮をかけることで、4000 コア程度までスケラビリティを落とさず、パフォーマンスを落とさずに、そこそこの精度でデータ解析をおこなうことが出来ると示されました。

世界の HPC 業界の裾野の広さを感じる研究でした。

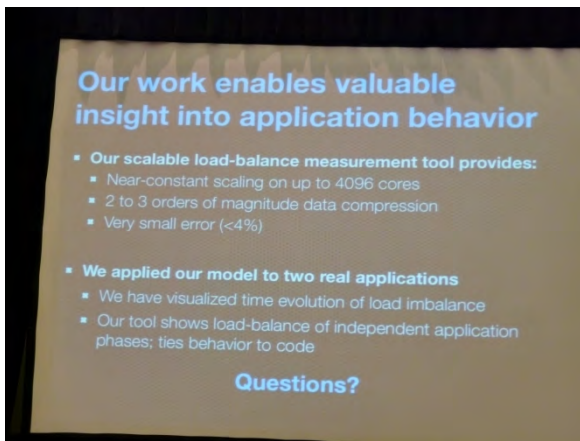


図 17 Scalable Load-Balance Measurement for SPMD Codes

2.13 Papers: A Scalable Parallel Framework for Analyzing Terascale Molecular Dynamics Trajectories  
すみません、よく分かりませんでした。

### 3 天文学関係

天文学は古くからコンピュータシミュレーションによる研究が盛んになされてきた、計算機業界となじみの深い分野です。この理由として、(1) 天体現象はタイムスケールが非常に長い (2) 天体の構造と形成は実験が難しい、(3) 天体形成は自己重力、ガス力学、輻射輸送、磁場などが強度に関係した本質的に非線形現象であること等が挙げられると思います。ここでは、SC08 の会場で見られた天文関係のコンテンツについて、私の気が付いた範囲でとりあげて報告します。

#### 3.1 Cray: 超新星爆発シミュレーション

Cray のブースでは日に数回 15 分程度の Cray の計算機を使った最新の成果を研究者が紹介するというイベントがありました。私が通りがかったときには Oak Ridge の研究者が超新星爆発のシミュレーションの結果の紹介をやっていました。歴史的には、超新星爆発の研究は一次元球対称を仮定し、様々な関連する物理を考慮してゆく形で研究が進んできました。結局 1 次元シミュレーションで最終的に得られた結論は、1 次元シミュレーションでは超新星爆発が起きえないということでした。最近では多次元のシミュレーションがおこなわれ、ここでは軸対称と非軸対称の不安定性モード (SASI) が立つことにより、超新星爆発が起きることが指摘されて

います (この辺については、私の所属する国立天文台の固武さんらの一連の仕事があります)。ここでは、流体力学、核反応、ニュートリノ相互作用を考慮したシミュレーションコード CHIMERA をもちい、3 次元の超新星爆発のシミュレーションをおこなった結果を紹介していました。内容が詳細に及んでいたため、私には十分フォローすることは出来ませんでした。

現在では、超新星爆発は多次元性が本質的であることが明らかになっていますが、それは同時にもの凄い膨大な計算資源を投入しない限りこの種の問題を扱えないことを示唆しています。計算資源が圧倒的に負けている現時点の日本の研究者はなかなか厳しい立場にあるかもしれません。次世代スパコンで挑むべきよいテーマになるでしょう。

ちなみに、このシミュレーションには Oak Ridge の Jaguar の 11552 コア (Jaguar Cray XT5 だとすると一割程度) をもちいて 6 日かかったそうです。固武さんに伺ったところ、この計算時間だと輻射を近似無く解いたとは思えないということで何かしら近似があったのかもかもしれません。

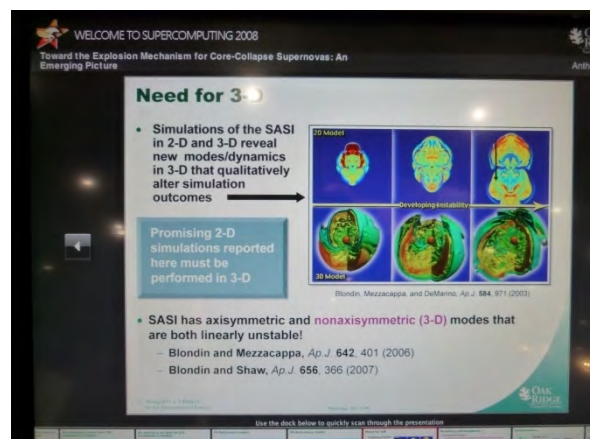


図 18 Oak Ridge のブースにあったスライド。トークの内容と同じものでした。

#### 3.2 NASA: 銀河形成シミュレーション

NASA のブースでは、いくつかのデスクを用意しており、そこに研究者が張り付いてサイエンスの成果を報告していました (図 19)。その中にひとつ、銀河形成シミュレーションがありました。どこかで見た気がするなとおもったら、今年 5 月にアーカイブサーバにあがっていた、銀河形成シミュレーションの論文 "Galaxy Size Problem at  $z=3$ : Simulated Galaxies Are Too Small" の元になったシミュレーションでした [2]。幸いにもデスクには、著者の一人である、Cen, Renyue さんがおられましたので、論文の内容について以前読んだときに疑問に思ったことについて伺うことができました。

特に、銀河形成シミュレーションでは従来から、シミュレーションから得られた銀河と観測銀河の角運動量が著しく異なるという「角運動量問題」があるということが知られています。従来ガスのシミュレーションには粒子法が使われていたのですが、グリッド（メッシュ）法をもちいた場合に、どの程度変わりうるのか興味をもちていました。一様メッシュでは銀河形成のようなダイナミックレンジの広い問題を扱うのは困難だったのですが、Cen さんらのシミュレーションでは Adaptive Mesh Refinement コード ENZO をもちいることでこの困難を解決し、銀河形成シミュレーションをおこなっています。もっとも、シミュレーションは赤方偏移 3 まで、つまり宇宙が現在のサイズの 1/4 だった時代まで打ち切っており、現在までシミュレートしたわけではないのですが、この計算では、本質的に同じ問題を抱えており、これは従来の粒子系シミュレーションと同様に超新星爆発の効率が低いことが問題だろうと Cen さんはおっしゃっていました。Cen さんの素晴らしいシミュレーションは彼の web ページ [8] でみることが出来ます。



図 20 Roadrunner Universe。

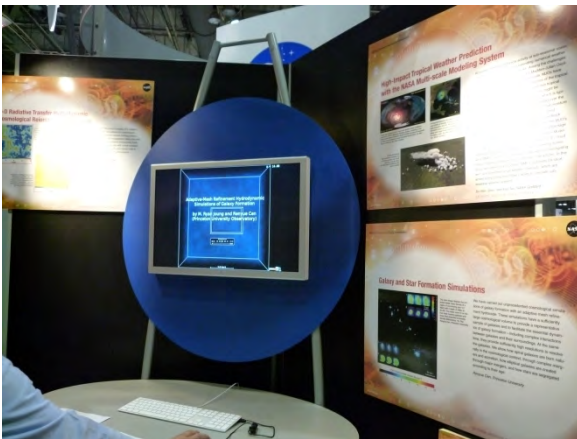


図 19 NASA のブースで流れていた銀河形成シミュレーション。

### 3.3 大規模宇宙論シミュレーション

会場では、幾つかの大規模な宇宙論シミュレーションの結果が張り出されており、人目を（いえ、私の目だけだったかもしれませんが）引いていました。Los Alamos は、ブースの背面全面を使った巨大なポスターを出していました。

さらに、CEA（フランス）のブースには、The Horizon Simulation [14] の成果が展示されていました（図 21）。こちらは、ソルバが Adaptive Mesh Refinement コードである RAMSES になっています。このシミュレーションは、RAMSES の開発者の Teyssier, R. がおこなったのでしょうか。ブースの人に聞いたところ彼の名前が出てき

ました。

バルセロナスーパーコンピューティングセンター（スペイン）のブースでは、このシステムを使っておこなわれた超大規模シミュレーションである、MareNostrum シミュレーション [7] の成果が紹介されていました（図 22）。これは非常に広い空間の  $N$  体/SPH シミュレーションをおこなう The MareNostrum Universe と、それよりは空間が狭くなる代わりにより多くの物理を考慮したシミュレーションをおこなう The MareNostrum Galaxy Formation Simulation の二本立てになっており、宇宙の構造過程、銀河の形成過程を探ろうというものです。どちらも、既存のシミュレーションコードをもちいており、割とお手軽に実行している印象を受けます。ちなみにこの MareNostrum シミュレーションと上述の Horizon Simulation は The Horizon Project [13] という一つのプロジェクトの下に動いているようです（すみません、この関係はあまりちゃんと認識していませんでした）。このほかに、Oak Ridge のブースにも宇宙論的  $N$  体シミュレーション（図 23）と銀河の暗黒物質の分布を高分解能で解いたシミュレーションが展示されていました。



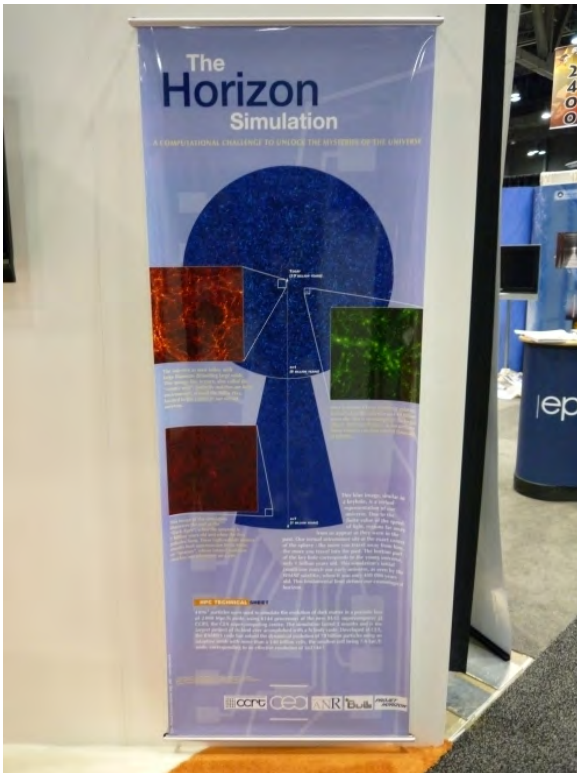


図 21 CEA のブースにあった The Horizon Simulation の紹介。

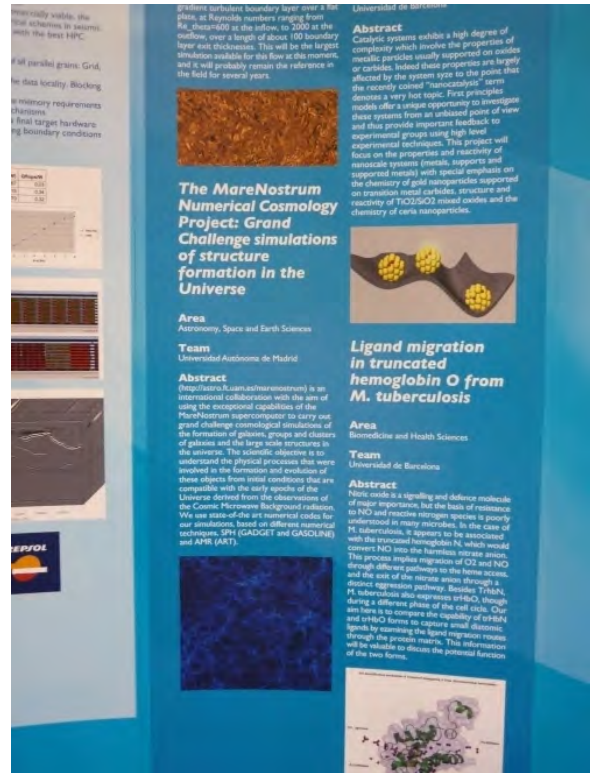


図 22 バルセロナスーパーコンピューティングセンターのブースにあった、MareNostrum Numerical Cosmology Project の紹介。

### 3.4 NVIDIA:GPGPU による大規模 $N$ 体シミュレーション

NVIDIA は Tesla をもちいたパーソナルスーパーコンピューティングを前面に押し出していました。この NVIDIA のブースでは、長崎大学の濱田さんの大規模な  $N$  体シミュレーションのシミュレーションが表示されていました(図 25)。かくかくと回転していたという感じでしたが、スナップショットを表示させていただきでしょうか。表示を見ると 1342 Mega year (宇宙年齢 13 億年) とプレゼンテーションに使うにはずいぶん半端な時間になっているので、実は実際にその場でシミュレーションをしていたのかもしれませんが。その結果がかくかく動いているように見えたのかも。ただの  $N$  体シミュレーションとはいえ本当に 1400 万粒子の重力計算をしていてそれがほぼリアルタイムで動いていたのだたらすごいことです。あまりそれがわかる展示だったとは思えなかったのは勿体なかったかもしれません。

### 3.5 東京大学:CosmoGrid

東京大学のブースでは、GRAPE-DR プロジェクトについて展示されていました。GRAPE-DR は東京大学と国立天文台で開発されている、ある程度汎用性を持たせた GRAPE の後継機です。すでに動きつつあり、今年度内には国立天文台でも一般共同利用サービスが開始できるかもしれません。

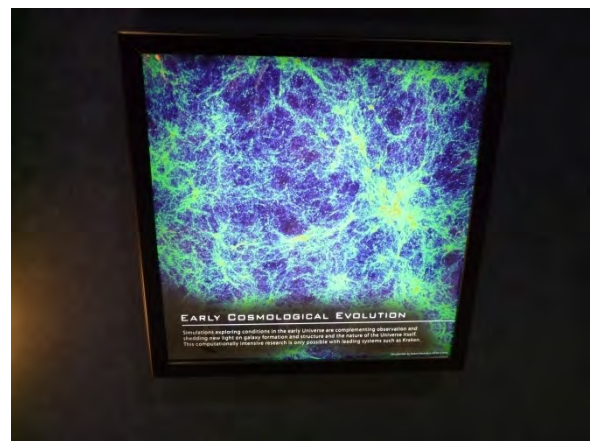


図 23 Oak Ridge のブースにあった、宇宙論的  $N$  体シミュレーション。

ブースの壁面には、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト [9] の Cray XT4 とオランダアムステル大学の Huygens<sup>\*1</sup>(IBM Power6) を接続して宇宙論的  $N$  体計算をおこなった CosmoGrid のポスターがありました(図 26)。これは、実際にシミュレーションをおこなった石山智明さん(東京大学大学院/国立天文台)に

\*1 これはオランダ語で、我々の知っているところの 'ホイヘンス' だとか。発音はもっと難解らしい。藤井通子さん(東京大学大学院/国立天文台)に教えて頂きました。



図 24 Oak Ridge のブースにあった、銀河の暗黒物質の高分解能シミュレーション。

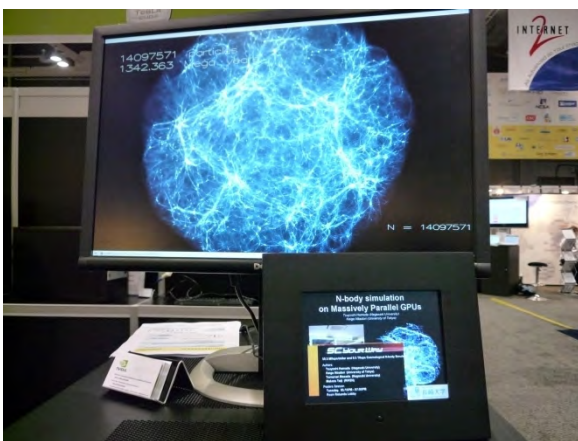


図 25 NVIDIA のブースで流れていた GPGPU による  $N$  体シミュレーション。

話を聞いていたのですが、そうはいつでもこのように提示されると“これはすごい”と思ってしまいます。たとえば重力計算は演算がものすごく重たいといっても、このようなシミュレーションがネットワーク越し（アメリカを経由して!）に出来てしまうというのが驚異です。もちろん、普通はローカルに計算するものだと思いますが、ある種のシミュレーションではこのようなことがすでに実現可能なようです。

### 3.6 筑波大学:Phantom-GRAPE

筑波大学のブースには、PACS-CS (図 27) と T2K 筑波の計算ノードが置いてありました。1 ノードに 16 コア搭載された Appro の計算機である T2K 筑波の計算ノード上で SSE による最適化高速化された重力計算ライブラリ、Phantom-GRAPE [10] をもちいた銀河衝突のデモンストレーションが行われていました。このライブラリを使わない場合と並べてありましたので、その性能向上度合いが大変わかりやすくなっていました。私も国立天文台の Cray XT4 上で計算するときには、この

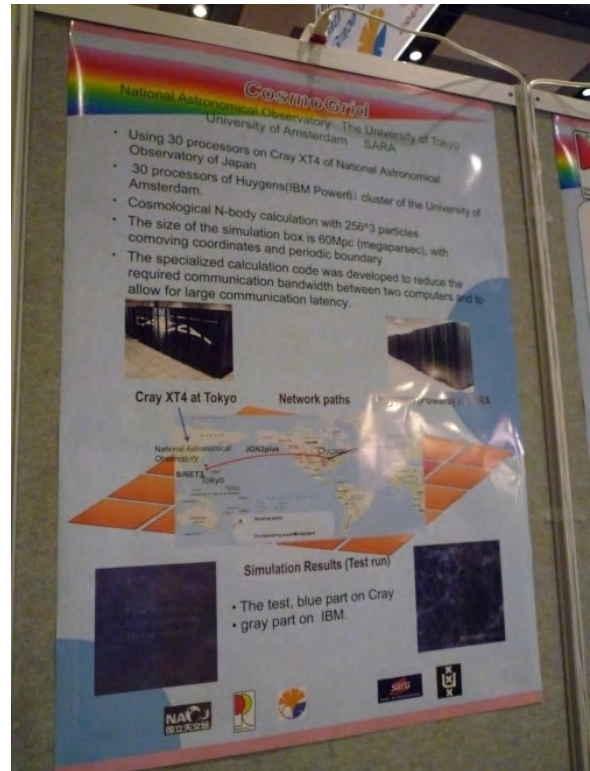


図 26 東京大学 GRAPE-DR のブースに張ってあった CosmoGrid のポスター。

Phantom-GRAPE を使っています。

たまたま天文学の研究者の中にアセンブラレベルで関数をチューニングする技術を持っている人がいたからよかったという話ですが (Phantom-GRAPE の開発は、似鳥啓吾さん (東京大学大学院/国立天文台) や吉川耕司さん (筑波大学) が開発をしている)、本来的にはコンパイラにもうちょっとがんばってもらいたいところです。次世代スパコンでは今のところハードの方が話の端に上りやすい気がしますが、ハードの性能を極限まで引き出すようなコンパイラ、あるいはライブラリとそれを作成する人材を用意することが望まれるのではないかと思います。

## 4 SC 20th Anniversary History Museum

今年は SC が 20 周年を迎えるということで、これまでの SC を振り返る展示がされていました。1988 年の第一回から、その年の SC で注目された計算機、アーキテクチャ、言語などを記述したパネルが掲示されており、その下には関連する計算機部品 (CPU/計算ボード/計算ノード)、マニュアル類、SC ノベリティーグッズ等が展示されていました (図 28、29、30)。私のわかる範囲で簡単に紹介したいと思います。主に日本のスパコンや、市販の計算機になります。

まず展示場の入り口には、おそらく普通の人がみんな



図 27 筑波大学のブースにあった PACS-CS。



図 29 SC 20th Anniversary History Museum 全体の様子 2。



図 28 SC 20th Anniversary History Museum 全体の様子。

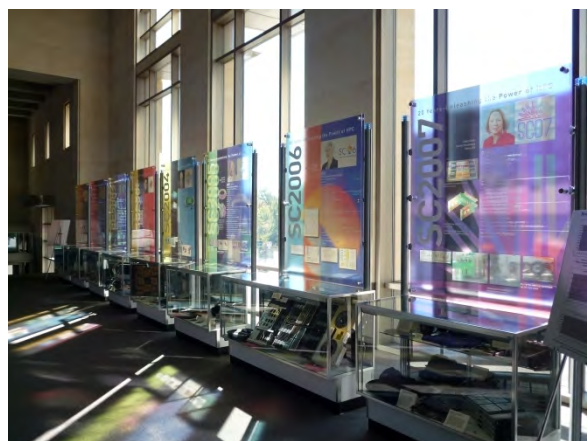


図 30 SC 20th Anniversary History Museum 全体の様子 3。

思い浮かべる、いわばスーパーコンピュータのアイデアであるところの Cray-1 が展示されていました (図 31)。私の身長と大して変わらず、思ったより小さいという印象でした。内部は大量のケーブルで接続されており、手作り感を感じます。また、20 周年記念展示の周りや会場廊下には、Gordon Bell 賞の受賞者が紹介されていました。

SC1988 から SC1992 まで (図 32): すみません、この時代のコンピュータやアーキテクチャは私にはほとんどぴんときませんでした。SC1989 では Notable systems として NEC が現在も開発を続けている SX シリーズの一つ SX-3 が紹介されていました。

SC1993 から SC1997 まで (図 35): SC1994、倍精度版重力多体系専用計算機 GRAPE-4 が登場します。また、この年、Notable processors で今は無き DEC Alpha の初代である 21064 が登場します。

SC1996 にて、Notable systems に NEC の SX-4 と航空宇宙技術研究所の数値風洞 (NAL Numerical Wind Tunnel) がともに紹介されています。

SC1997 では Notable systems に SGI の Origin 2000 があげられています。この計算機は私が所属していた北海道大学理学部物理学科に導入されていたため懐かしく感じます。もっとも私自身はこの計算機を使う機会はほとんどなかったのですが。Notable processors では、DEC Alpha 21164 が。この CPU を用いた計算機は私がかつて所属していた研究室 (北海道大学大学院理学研究科宇宙物理学研究室) に導入されていたと記憶しています。パネルでは、見事に可視化された  $N$  体シミュレーションの結果が紹介されていました。この年の Gordon Bell 賞の受賞者は Warren, M. S. (Los Alamos) と Salmon J.K. (Caltech) の超大規模  $N$  体シミュレーションでしたので、おそらく彼らの計算結果だったのでしょう (図 34)。このシミュレーションは  $322,000,000$  ( $\sim 685^3$ ) 粒子を用いたツリー法による  $N$  体シミュレーションだったようです。当時から 10 年を経た現在であれば、 $512^3$  粒子の計算は標準的になっており、最近の粒子数の大きい計算は  $4096^3$  粒子をもちいて行われ

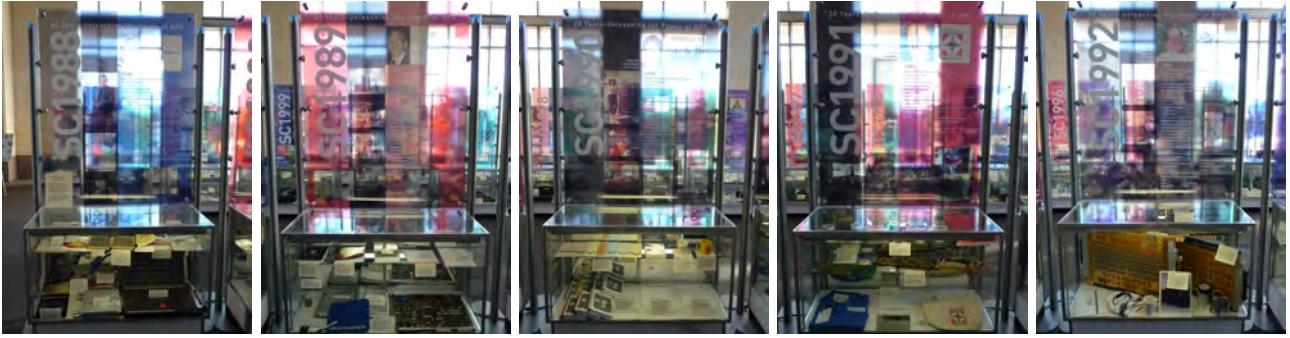


図 32 SC1988 から SC1992 まで。SC1989 のパネルには NEC SX-3 が出ています。SC1992 の Gordon Bell 賞は Warren, M.S.(Los Alamos) と Salmon, J.K.(Caltech) が  $N$  体シミュレーションで受賞しています (図 33)。



図 31 Cray-1。さすがに座らせてくれとは言えない雰囲気。

た Horizon Project [13] になります。単純な外挿を行うと、さらに 10 年したらこの程度の計算が平均的な計算になるのでしょうか。

SC1998 から SC2002 まで (図 37): SC1998 Notable programming languages として MPI-2/MPI-IO と Open MP が紹介されています。下部のショーケースに展示されているのは、ジョージ・ルーカス (George Lucas) のサインの入った Foundry の 1GbE スイッチが展示されていました。Star Wars I Phantom Menace を作る時に使われたものらしい。

SC1999 では、Notabel systems で、Hitachi SR8000 が、Notable processors では DEC Alpha 21264 と単精度版重力多体系専用計算機 GRAPE-5 があげられていました。GRAPE-5 はこの年 Gordon Bell 賞を受賞しています。また私の所属している国立天文台では 2001 年 1 月より、GRAPE-5 が一般共同利用として共されました。当時北海道大学の大学院生だった私は、銀河形成シミュレーション研究をこの国立天文台の GRAPE-5 をつかって研究していました。この計算機のおかげで当時の平均的なシミュレーション規模を一桁以上上回る



図 33 Warren, M.S.(Los Alamos) と Salmon, J.K.(Caltech) の Gordon Bell 受賞についてのパネル。

大規模なシミュレーションに成功しました。いい計算機でした。Hitachi SR8000 は北海道大学の大型計算センターに入っており、大学院生時代に二年ほどお世話になった記憶があります。

SC2000 では、Notable systems として倍精度版重力多体系専用計算機 GRAPE-6(GRAPE-4 の後継)(図 38) と分子動力学用の専用計算機 MDMWINEGRAPE-2 (原理的には GRAPE と同様で、周期境界と支配方程式をファンデルワールス力に対応したものでした。Gordon Bell 賞は、GRAEP-6 (東大)(図 36)

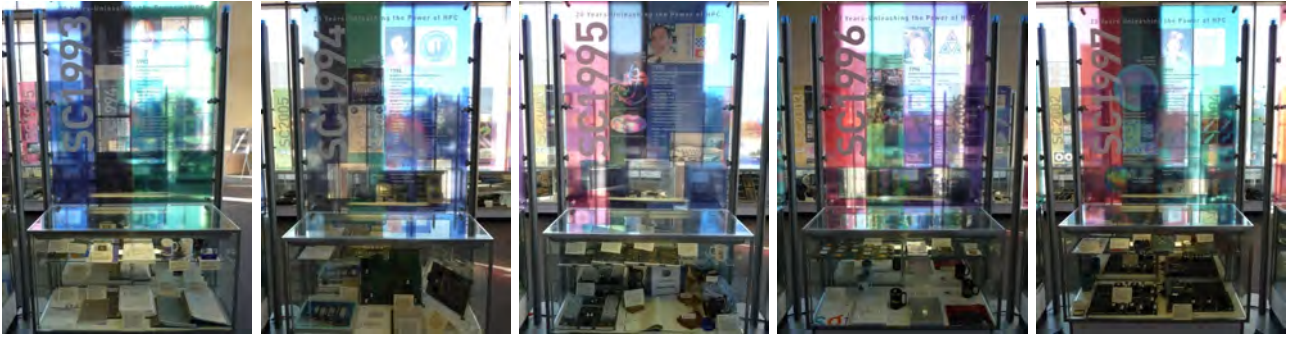


図 35 SC1993 から SC1997 まで。SC1994、GRAPE-4 が登場。SC1996 には、NEC SX-4 と航空宇宙技術研究所の数値風洞が。SC1997 のパネルには、 $N$  体シミュレーションが出ています。この年の Gordon Bell 賞も Warren, M. S.(Los Alamos) と Salmon J.K.(Caltech) の大規模  $N$  体シミュレーションです。

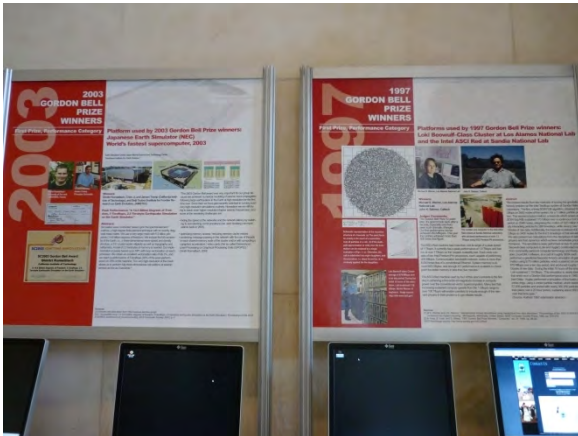


図 34 右は 1997 年 Gordon Bell 賞は Warren, M.S, (Los Alamos) と Salmon, J.K.(Caltech) が受賞した。常連ですね。左は 2003 年地球シミュレータをもちいて Gordon Bell 賞をした方々。



図 36 2000 年 Gordon Bell 賞を受賞した福重さんと牧野さん。

と MDMWINEGRAPE-2 (理研) が受賞しています。GRAPE-6 も国立天文台で一般共同利用に供されており、今現在も現役で恒星同士の散乱が重要になる星団進化の研究などに用いられています。Notable processors に Intel Pentium III があげられています。長らくお世話になりました (自宅で使っていました)。

SC2001 では、Intel Pentium 4 と Itanium の登場しています。WINE-2 system ボードの写真がありました。Adaptive mesh refinement を用いた星形成のシミュレーションの絵もありました (出展がないですが、Abel, T. のシミュレーションではないかと)。Fukushige, T. & Makino, J. が GRAPE-6 を用いた銀河中心のブラックホールの高精度シミュレーションで Gordon Bell 賞を受賞しています。

SC2002、Notable systems に Athlon MP/XP、Intel Xeon、そして Earth simulator (地球シミュレータ) です。この年の、地球シミュレータを用いたシミュレ

ションがその圧倒的な性能により Gordon Bell 賞を獲得しています。その 6 年後の今、Top 500 のトップ 10 に日本の計算機はなく、アジアのトップも中国の計算機が取るようになりました。未だ Top 500 の 73 位に位置する地球シミュレータは驚異的です。

SC2003 から SC2007 まで (図 40): SC2003、Notable systems に NEC SX-7 があります。Intel Itanium II はこの年の Notable processors。Research machines の項目に MDGRAPE-3 がみられます。Topics のなかでは、FPGA があげられています。私になじみのある GRAPE ですと、最初の FPGA 版である GRAPE-7 のプロトタイプが、東京大学で開発されていた頃ではないでしょうか。当時東京大学助手だった福重さんが FPGA の強みを活かして、SPH のパイプラインを載せる工夫などもしていました。

SC2004 では、Notable processors に AMD Opteron



図 37 SC1998 から SC2002 まで。SC1998 のケースに展示されているのは、ジョージ・ルーカス (George Lucas) のサインの入った Foundry の 1GbE スイッチ。Star Wars I Phantom Menace を作る時に使われたものらしい。SC1999 の Gordon Bell に GRAPE-5 をもちいたシミュレーションが、そして SC2000 の Gordon Bell では、GRAPE-6 をもちいたシミュレーションがあがっています (図 36)。SC2000 のケースには GRAPE-6 ボードが展示されています。SC2001 のパネルには WINE-2 system ボードが見受けられます。SC2002 は地球シミュレータの年でした。GRAPE-6 の写真もパネルに見られます。



図 38 SC2000 のケースに展示されていた GRAPE-6。

が見受けられます。前年にデビューしています。Opteron シリーズにはずいぶんお世話になっています。私どものグループが開発した GRAPE-7 クラスタ [1] の宿主計算機に搭載されていた CPU は Opteron 250 でした。また、国立天文台が今春 (2008 年 4 月) より導入した超並列計算機 Cray XT4 でもオプテロンが採用されています [9]。Topics の中には GPU という文字が見えます。“ベクトルアーキテクチャとスーパースカラアーキテクチャの比較” というのもあったようです。現在ベクトル計算機を作っているのは NEC と Cray ぐらいになってしまいました。たとえば私の研究テーマである銀河形成過程は、コンピュータシミュレーションしようと思うと、典型的な時間スケールが大幅に異なるもの同士の相互作用を扱う必要があります。そのため、粒子ごとに異なる時間刻みを持たせる独立時間刻み法の利用が必須です。このような計算は、どうしてもとにかく演算性能が高いこと、が必要になりなかなかベ

クトル計算機では性能を出すのは難しいところです。その他の研究テーマでどのような手法が用いられているか、広く理解しているわけではないですが、異なる階層を同時に扱うシミュレーションが盛んに行われているようですし、本質的に同様の問題を抱えているのではないかと思います。次世代スーパーコンピュータでは、ベクトル型とスカラ型のハイブリッドシステムになるようですが、これは一つの解になるのでしょうか。今後の動向が興味深いです。

パネルには、Yin-Yang グリッドの絵がありました [3]。地球シミュレータセンターで独自開発された格子系で、通常の極座標グリッドでタイトになる極でのクーラン条件を大幅に改善することに成功しています。全球を、高分解能で計算する、という必要性に迫られて開発されたのでしょうか。未踏領域に踏み込み、そこであがいたからこそその成果だと思います。なんだかとても素晴らしいです。

SC2005 では NEC SX-8 や Apple XServe などが Notable systems に、Intel Pentium M (初代ではない)、NVIDIA GeForce 7800/7800GTX、ATI 9800XT/X800XTPE などが Notable processors にあげられています。Topics のところでは、power saving のための動的電圧と周波数スケールが目にとまりました。ごくごく最近の CPU だと回路を閉じたりなど、かなりアグレッシブに制御していますね (Intel Deep Power Down テクノロジーや AMD Shanghai コアにおける Smart Fetch テクノロジー)。電力消費の抑制とシステム全体としての電力効率の向上は今回参加した SC08 でもたびたび話題としてあがっていました。

SC2006 の Notable systems には Cray Black Window/XT3/Red Storm の三つ (もう一つは IBM SP5)

が、Notable processors には Opteron、Pentium 4/D、Sun UltraSPARKIV(?) 等に並んで NVIDIA 7900 GX と、IBM Cell/B.E. があがっています。特筆すべきは Cell/B.E. で、これは今回の Top 500 で前回に続いて 1 位を防衛した RoadRunner の演算部の大半を担っている部分です。ケースに展示されていた ASCI Purple の計算ノードはなんだかとてもばかどかい (図 39)。

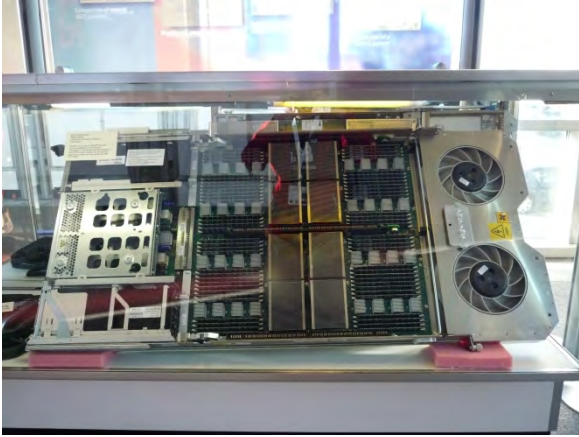


図 39 SC2006 のケースに展示されていた ASCI Purple の計算ノード。基本的には、現在では実験の出来ない核兵器の維持のための計算機。

SC2007 の Notable systems には、国立天文台にも導入されている Cray XT4 があります。世界的には、Oak Ridge National Laboratory の Jaguar の一部として用いられていることで有名でしょう。Oak Ridge のシステムは今回の Top 500 で、RoadRunner とぎりぎりの競争の結果惜しくも 2 位でしたが、Cray XT5 単独での結果でした。Cray XT4 の部分は独立に 8 位になっています。Notable processors には、AMD/Intel/Sun の CPU たちに並んで、NVIDIA の GeForce 8800 があります。

全体を通して気が付いたのですが Notable programming languages の項目をみると様々な Fortran が開発 (拡張) されてきたことがわかります。やはり、大規模シミュレーションの分野では現在でも Fortran で書かれることが多いのでしょうか。私は、開発を C 言語 (C99) と MPI を使っておこなっているため、次世代スパコンでは、かつてよく言われていたような C 言語のコンパイラの開発は後回し、が起きなければよいと願います。

この 20 年間の計算機の進化の足跡なぞる立派な展示でした。その中で日本の計算機業界が確実に世界の計算機の進化の中に足跡を残していることは誇らしく感じます。自分になじみの深い日本の天文コミュニティーで開発された GRAPE シリーズ、理研の MDGRAPE、そして今のスパコン界の高活性状態の直接の引き金になっ

たと思われる地球シミュレータと。一方で、2002 年の地球シミュレータショック以降の主にアメリカには強力なスパコンが次々に導入されていますが、世界的に見て上位に来るスパコンの数が日本ではなかなか寂しい現状があります。次世代スーパーコンピュータが導入されたとき、それ以外にそれに比類するシステムが存在しないとか、それが長く更新されずに維持され続けるのであれば、2002 年から今までに起きたことを繰り返してしまうのではないかなといらぬ心配をしてしまいます。もちろん大学の計算機の増強/更新が順次進むのであれば杞憂でしょうが。些か筆が滑ったようですが、一人のユーザとしての素朴な感想でした。

## 5 その他、会場の様子

その他会場の様子を写真で報告します。



図 41 理化学研究所次世代スーパーコンピュータ開発実施本部のブース。



図 42 会場はとてつもなく広い。



図 40 SC2003 から 2007 まで。SC2006 のケースに展示されているなんだかとても大きいものは ASCI Purple の計算ノード。



図 43 左から順に、東大 (左上)、筑波大学 (右上)、JAXA(左下)、そして一緒に SC レポーターとして参加した牧野さんの所属する高度情報科学技術研究機構 (右下)。

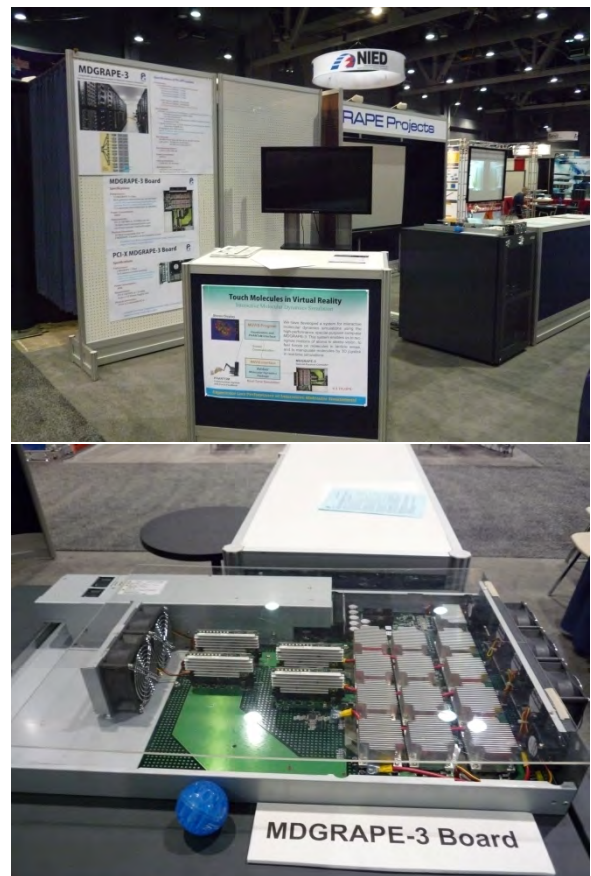


図 44 もう一つの理研のブース。こちらは MDGRAPE でした。





図 45 NASA のブース。このデスクに研究者が張り付いている。



図 47 Oak Ridge のブース。表側。なんだかとてもかっこいい。しかも二階建て！カウンターの人に話しかけると T シャツをもらえた。



図 46 Appro のブースには F1 カーが置いてあった。



図 48 Oak Ridge のブース。裏側。垂れ幕がかっこいい。

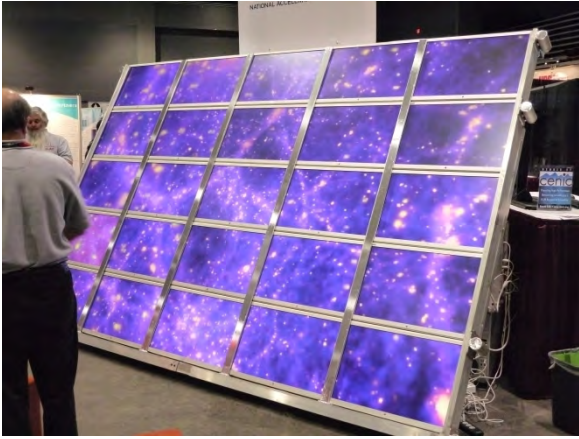


図 49 会場で見かけた巨大な  $N$  体シミュレーションの可視化。“巨大”がかかるのはシミュレーションとディスプレイの両方です。どちらのブースだったか失念。シミュレーションは Millenium シミュレーション？それとも別なものか？

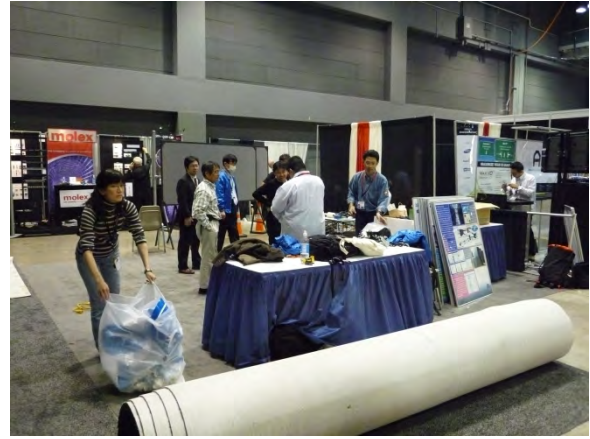


図 50 お片づけをする理研のみなさま。お疲れ様でした！

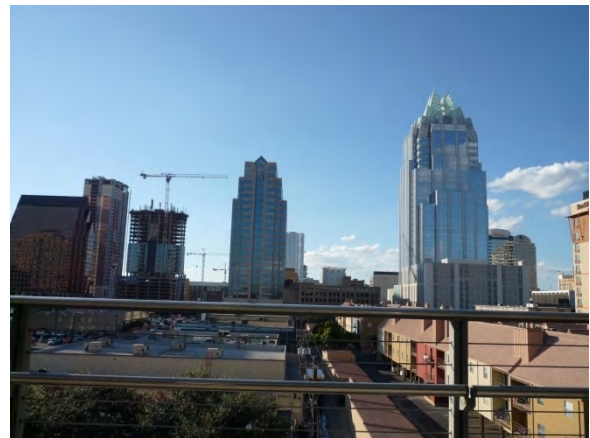


図 51 Austin Convention Center から市の中心方向を眺めた。印象的な形状のビルが見える。

## 6 アメリカ！テキサス！！オースチン！！

今年度の SC はアメリカ合衆国テキサス州オースチンで開催されました。お昼休みの時間をつかって市内をみる事が出来ましたので、その辺について。実は、恥ずかしながらオースチンがテキサス州の州都であることをついて三日たつまで気が付いていませんでした。道が広く、一部の高層ビルを除いて建物の背が低く、大変のどかな町並みです。

会場は、繁華街に位置する Austin Convention Center でおこなわれていました。市の中心からわずかに離れているだけで、すぐそばにはヒルトンが位置するような場所です。市全体の道幅が広いことと建物の背が低いことから、空が綺麗に見えて散策するにはとても気持ちよい街でした (図 51、52、53、54、55、56、57)。

二日目 (11/19) のお昼に、Texas state capitol building にいってきました。ルネッサンス様式で建造されたらしい立派な建物で、内部は無料で見学です (図 58)。

内部には、とても高い吹き抜け (外から見たときのドーム (図 60) の位置に対応) があり、両脇には州議会上院と下院の議会場があります (図 61)。図書館なども併設されていました。ホールの回廊には、歴代州知事の肖像画が掲げてありました。元 Texas 州知事といえばというあの人の肖像画もあったはず。おや、とおもったのは肖像画についてた肩書き。テキサス共和国時代には President だったのですね。私が訪ねたときはたくさんの子供と観光客が訪れており大変にぎやかでした。

今回用意して頂いたホリデーインレイクタウンは、コロラド川沿いに位置するホテルでした。ホテルから会場へは、毎日行き帰りのシャトルバスが出ていましたが、歩いていくことも十分可能な距離でした。ちょうどホテルの裏手から川沿いに移動することで簡単に会場に着くことが出来ます。川があり木がの心地よい散策路で、ウォーキングをしている人、ジョギングしている人、犬の散歩をしている人などたびたびすれ違いました (図 62、63、64)。木の上からがさがさと音がしたのでよく見てみるとリスがいました。かわいい (図 65)。



図 52 さっきのビルに近づいてみた。大きい!!



図 53 ビルから会場を振り返ってみる。左側の青く四角い建物が Austin Convention Center.

が、近くで見るとなんだかとても巨大なリスです。こちらのリスはルートビアでも飲んでいたりするのでしょうか。今回確信したのですが、愛くるしい動物でもそれが巨大だったときに感じる感情は、“恐怖”です(図 66)。

事前にアメリカ出張経験のある友人に聞いていて覚悟したのですが、食事はだめでした。サンドイッチもピザも大変不思議な味わいで、一週間ぐらい耐えられるだろうと思っていた自分が甘かったと現地で深く反省しました。お昼は一人で行動していたのでレストランに行かなかったのが敗因かもしれません。



図 54 道路はとても広い。



図 55 (たぶん) 東西方向に走っている通りは番号で呼ばれている。わかりやすい。

## 7 最後に

SC08 を通じて、私が普段接することがない最新の HPC について直接触れることが出来、その動向を知ることが出来ました。今後の研究を展開する上で貴重な経験になったと思います。このような機会を設けてくださり、本当にありがとうございました。レポーターと一緒に参加した萩田克美さん(防衛大学校)、牧野浩二さん(高度情報科学技術研究機構)のおかげで楽しい会議でした。ありがとうございます。とくに、萩田さんとの往復の旅は生涯忘れることの出来ない衝撃的なものでした。またいつかどこかでお会いできることを楽しみにしています。

## 参考文献

- [1] 台坂 博、Unix Magagine、2005 年 9 月号-2006 年 4 月号
- [2] Joung, M. K. R., Cen, R. & Bryan, G. 2008, arXiv:0805.3150

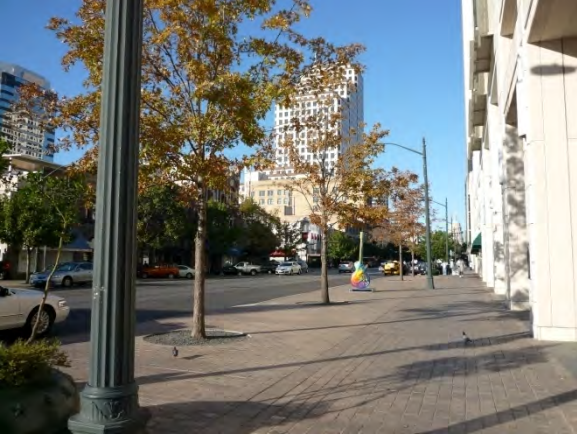


図 56 先ほどの辻から (図 55) Texas state capitol building を眺めた。ずっと先に見えます。真ん中には、極めてユニークな色遣いのギターがある。この街は音楽の街らしい (すみません、本当に何も知りません)。



図 57 E 10th 通りと Brazos 通りの辻にあった立派な建物。どういいうわれのある建物かは残念ながら知りません。



図 58 Texas state capitol building。内部を無料で見学することが出来ます。

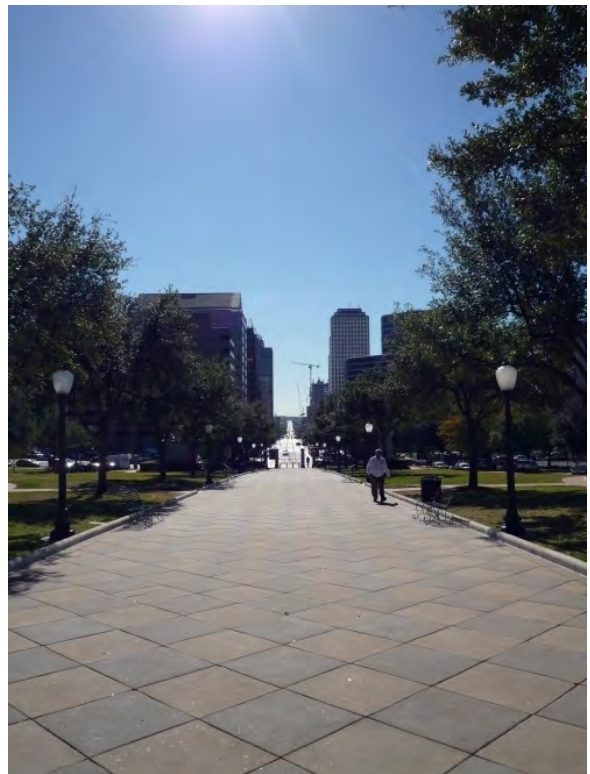


図 59 Texas state capitol building から振り返って街を見る。

- [3] Kageyama, A. & Sato, T. 2005, Geophys. Geosyst., 5, 1
- [4] Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., & Yoshida, N. 2008, PASJ, 60, 667
- [5] Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., & Yoshida, N. 2008, arXiv:0805.0167, PASJ submitted.
- [6] 富田賢吾、山崎秀輔、「Cell Broadband Engine に対する重力多体問題計算の最適化」 2008, SACSIS2008
- [7] <http://astro.ft.uam.es/marenostrum/>
- [8] <http://www.astro.princeton.edu/~cen/>

- [9] <http://www.cfca.nao.ac.jp>
- [10] <http://grape.mtk.nao.ac.jp/~nitadori/phantom/>
- [11] <http://www.hpcc.jp/sacsis/2008/cell/outputs.html>
- [12] <http://www.hpcchallenge.org/>
- [13] <http://www.projet-horizon.fr/>
- [14] <http://www.projet-horizon.fr/article323.html>



図 60 吹き抜けのホールで天井を見上げる。五角形の星に "T"、"E"、"X"、"A"、"S" とある。



図 62 ホテルの裏手。



図 61 州議会議場。

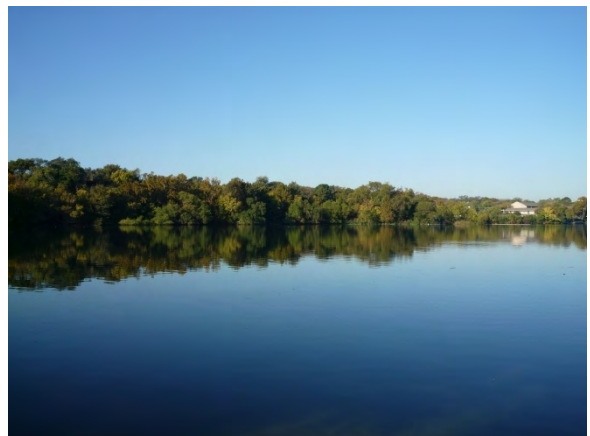


図 63 コロラド川。岸沿いには小魚が結構いました。



図 64 心地よい散策路。ジョギングしている人、犬の散歩をしている人などとたびたびすれ違う。



図 66 きょだいなリスが現れた。思っていた以上にでかい。どうする？



図 65 リス。かわいい。