ISSN 0286-7419

TOHOKU
UNIVERSITY

東北大学
サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報

SENAC

Vol.42 No.1 2009–1





Supercomputing System
Cyberscience Center
Tohoku University
www.isc.tohoku.ac.jp

SENAC 2009–1

大規模科学計算システム関連案内

〈大規模科学計算システム関連業務は、サイバーサイエンスセンター本館内の情報部情報基盤課が担当しています。〉

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3　　http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/

階	係・室名	電話番号(内線) e-mail	主なサービス内容	サービス時間 月～金
一階	庶務係(受付)	022-795-3406(3406) FAX:022-795-6099 uketuke@isc.tohoku.ac.jp	各種申請書、講習会、センターへの質問や要望の受付等	8:30～17:15
	庶務係	022-795-3407(3407) FAX:022-795-6099 syomu@isc.tohoku.ac.jp	庶務に関すること	
	利用相談室	022-795-6153(6153) sodan05@isc.tohoku.ac.jp	計算機利用に関するプログラミング、ライブラリ、アプリケーション、統計解析、ネットワーク等の相談	14:00～16:00
	利用者談話室	(3444)	各センター広報の閲覧	8:30～21:00
	利用者入出力室	(3443)	大判プリンタ、DAT装置等の利用	8:30～21:00
三階	会計係	022-795-3405(3405) kaikei@isc.tohoku.ac.jp	会計に関すること、負担金の請求に関すること	
	システム管理係	022-795-6251(6251) 022-795-6252(6252) sys-sec@isc.tohoku.ac.jp	計算機システムに関すること	
	ネットワーク係	022-795-6253(6253) net-sec@isc.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	
四階	研究開発部	022-795-6095(6095)		
五階	端末機室	(3445)	PC端末機(X端末)	8:30～21:00

(　)内は東北大学内のみの内線電話番号です。青葉山・川内地区以外からは頭に 92 を加えます。

本誌の名前「SENAC」の由来

昭和 33 年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメトロン式計算機の名前で SENAC-1(SENdai Automatic Computer-1)からとって命名された。

［巻頭言］

センター長就任のごあいさつ



平成 20 年 4 月 1 日から、サイバーサイエンスセンター長に就任いたしました。着任からすでに 8 ヶ月余をすぎましたが、改めてセンターの運営方針について述べさせていただき、ご挨拶と代えさせていただきます。

サイバーサイエンスセンターは、全国共同利用施設として高性能計算やネットワークなど先端学術情報基盤の整備・運用と、これら先端学術情報基盤を活用した新しい科学(サイバーサイエンス)の創造に関する教育・研究を推進することを目的として、前身である情報シナジーセンターの発展的改組を行い、平成 20 年 4 月から活動を開始しております。

本センターは、3 つの重要なミッション、1)全国共同利用としての先端的大規模科学計算環境の提供、2)学内情報基盤整備の推進、3)先端学術情報技術に関する実践的教育・研究の推進、を持っております。全国共同利用の要であるスーパーコンピュータセンターとしては、全国の利用者の皆様から高く評価されているベクトル並列型スーパーコンピュータのさらなる強化と、利用者・センターの教職員・ベンダー技術者が一体となって取り組む高速化支援体制の充実をはかり、併せて、2010 年から活動を開始する次世代スーパーコンピュータセンターと有機的連携体制を構築し、研究の初期段階の萌芽的研究に対する大量の小規模計算からペタスケールの超大規模計算に至るまでスムーズな利用が可能となる高性能計算基盤の整備に努めて参ります。全国共同利用を支える先端学術ネットワーク基盤整備に関しては、国立情報学研究所や他大学基盤センター連携し SINET の安定運用に取り組むとともに、TOPIC に特徴づけられる地域ネットワークコミュニティーとの連携をさらに強化し、我が国の学術ネットワーク基盤の安定運用、発展に貢献していきたいと思います。学内情報化推進に関しては、情報シナジー機構の中核的部局として安全・安心なユビキタスキャンパスネットワークの整備・研究開発に取り組んで参ります。教育・研究に関しては、情報科学研究科と医工学研究科の協力講座として、当該分野で活躍できる人材育成に取り組んで参ります。

学術情報基盤である高性能計算技術やネットワーク・認証技術は、先端科学研究ばかりでなく、事務機能や教育を支える重要な役割を担っております。サイバーサイエンスセンターは常に我が国をリードする優れたサービス機能を提供できるよう全力で取り組んで参りますので、今後とも皆様の御理解と御支援を賜りますようお願い申し上げます。

サイバーサイエンスセンター
センター長　小林広明

SENAC Vol. 42, No. 1 (2009. 1)

白

SX-9導入披露＆SENAC50周年記念式典・講演会

「SX-9 導入披露＆SENAC50 周年記念式典・講演会開催報告」

東北大学　サイバーサイエンスセンター長
小林広明

― 記念式典 ―

「日本の情報科学・工学の黎明期と SENAC-1 の開発」

財団法人仙台応用情報学研究振興財団　理事長
東北大学名誉教授
野口正一

「SENAC-1(NEAC-1102)開発秘話　―科学技術用計算機開発に命をかけた日々―」

元 NEC 支配人・常務理事
創価大学名誉教授
渡部和

「NEC の HPC への取組み」

NEC 執行役員常務
伊藤行雄

「東北大学サイバーサイエンスセンター　～新スーパーコンピュータシステム SX-9～
～全国共同利用施設としての活動とサイバーサイエンスを推進する
全国共同利用・共同研究拠点形成に向けて～」

東北大学　サイバーサイエンスセンター長
小林広明

― 記念講演会 ―

「スーパーコンピュータの技術開発と次世代スーパーコンピュータプロジェクト」

理化学研究所次世代スーパーコンピュータ開発事業本部
プロジェクトリーダー
渡辺貞

「光通信の最前線　―ソリトン伝送におけるスパコンの役割を含めて―」

東北大学電気通信研究所教授
中沢正隆

SX-9導入披露＆SENAC50周年記念式典・講演会開催報告

東北大学サイバーサイエンスセンター長　小林広明

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、最新のベクトル型スーパーコンピュータSX-9を世界に先駆けて昨年3月末に導入したことと、センターの前身である大型計算機センターの初代センター長である大泉充郎先生が、NECと共同でパラメトロン型電子計算機SENAC-1を完成させてから50年になることを記念し、SX-9導入披露・SENAC50周年記念式典を平成20年11月14日に開催しました。

東北大学が導入したSX-9は、シングルコアで初めて100Gflop/sを超える性能を有するプロセッサ256台から構成され、スーパーコンピュータの国際的な性能評価指標であるHPCチャレンジベンチマークの28項目中19項目で世界最高性能を達成しました。SX-9の開発には、当センターとNECとの間で行われた高性能に関する共同研究の成果も生かされています。また、SENAC-1は、諸外国に後れを取っていた我が国のコンピュータの研究開発の状況を打破し国産コンピュータ技術の確立を目的として、本格的なコンピュータの設計・開発を東北大がNECと共同で行い、開発されたものです。SENAC-1は、NECがNEAC-1102として出荷した第1号のコンピュータであり、NECにおけるコンピュータ開発の原点としても位置付けられます。また、SENAC-1の開発を通して、数多くの研究者・技術者が育成され、学界・産業界へ多大な貢献をもたらしました。

式典では、センターを代表して式辞を述べた後、東北大学井上明久総長からご挨拶を頂き、その後、文部科学省研究振興局情報課長舟橋 徹様、NEC代表取締役社長矢野 薫様、東北大学電気通信研究所所長矢野雅文様、同大学院情報科学研究科長西関隆夫様、大阪大学サイバーメディアセンター長竹村治雄様、ドイツシュトゥットガルト大学高性能計算センター長マイケルレッシュ様からご祝辞をいただきました。

また、SENAC開発の思い出について、その当時開発に携わった東北大学名誉教授野口正一先生とNEC元支配人、創価大学名誉教授渡部 和先生にお話しいただきました。両先生からは、寝食を忘れてそれこそ命がけで取り組んだ開発の様子をユーモアを交えながらお話しいただきました。

さらに、NEC執行役員常務伊藤行雄様からは、「NECのHPCへの取り組み」と題し、NECの電子計算機およびスーパーコンピュータ開発の歴史と東北大学とNECの産学連携の取り組みについてのご講演があり、最後に、当センターから、SX-9の紹介とHPCチャ

レンジベンチマークの成果報告、さらには全国共同利用施設であるサイバーサイエンスセンターの高性能計算に関する活動報告をおこないました。

式典終了後、引き続き特別講演会を開催し、理化学研究所次世代スーパーコンピュータ開発事業本部プロジェクトリーダ渡辺 貞様から、NEC 在職時に取り組まれた SX シリーズの開発秘話や 2010 年に世界に先駆けて 10Pflop/s の性能を有するスーパーコンピュータの稼働を目的として我が国が取り組む次世代スーパーコンピュータ研究開発プロジェクトに関するご講演と、本学電気通信研究所中沢正隆教授から世界中の高速光ファイバ 通信ネットワークに革命をもたらした光伝送技術の研究開発に関する興味深いご講演をいただきました。

東北大学サイバーサイエンスセンターは、これまで多くの方々に支えられて発展してきましたが、今後とも全国共同利用施設として研究室レベルをはるかに超える最高・最新鋭の計算機システムを設置して、最先端の学術研究を強力に支援・推進してまいりたいと思います。東北大学サイバーサイエンスセンターに対し、皆様の格段のご理解とご支援を賜りますようお願い申し上げます。









日本の情報科学・工学の黎明期と SENAC-1 の開発

財団法人仙台応用情報学研究振興財団
理事長　野口　正一

【1】SENAC-1 の開発

日本の情報科学・工学（IS, IT）の黎明期は昭和 20 年代の後半から始まる。当時の IS, IT の研究者は、ほとんど大学、公的研究機関に属し、その数は非常に少なかった。

この中で東北大学の電気・通信系は古くよりアンテナ工学、伝送工学、電波伝播等の通信工学の基礎を確立し、東北大学のグループには新しい情報科学・工学の流れに適合する環境が生まれつつあった。この中でこの新しい分野を牽引したリーダーは、大泉充郎、本多波雄、喜安善一であった。

当時、日本の IS, IT 分野の研究者に大きいインパクトを与えたものに、次の 3 つがある。
第 1 が ENIAC
第 2 が C. E Shannon と W. Weaver による通信理論（1949）
第 3 が N. Wiener による Cybernetics（1947）　である。

この 3 つから発展した新しいコンセプトは、日本の研究者に将来の技術革新による通信とコンピュータの融合により、人類の夢である「人工頭脳」がいずれは構築できるという可能性を与えた。この夢の実現のための最も直接的なターゲットとなる研究開発プロジェクトが、高性能のコンピュータの開発・設計であり、それを実際に稼動させることであった。

一方当時の日本には国産商用機を含めて本格的に稼動するコンピュータは外国産を除いて存在していなかった。
このような状況の下で、昭和 30 年の初頭、大泉教授は文部省に対し、国産最大のコンピュータの構築を目指す提案書を申請し、学内での支援は、ほぼ孤立状態の中で積極果敢に攻めの交渉を行い、ついにこの申請が認められることになった。
当時としては、破格の予算を獲得した。

これにより、東北大学は国内の複数のコンピュータ開発に強い関心を持つ企業と交渉を行い、特に積極的な協力体制をとって頂いた NEC との間で学産連携によるプロジェクトが推進されることになった。

この学産連携は東北大学と NEC が全く同等の形でプロジェクトを推進し、その目的は浮動小数点演算機能をもつ当時日本のコンピュータのどれよりも能力の高い、そして商用にも耐えるコンピュータの構築であった。このプロジェクトには多くの開発者が参画したが、その中核を担ったのが、東北大（小野寺、野口）、NEC（渡辺、山本）の 4 名であり、1 年間以上全くの共同生活の中で設計を行った。

当時、コンピュータ設計に関するいくつかの個別的データは収集可能であったが、本格的な設計資料は皆無であり、すべて 0 ベースからの開発であった。

このコンピュータ設計の決定すべき基本要素について、当プロジェクトに関係した多くの人々によって極めてホットな議論が時間をかけて行われ、その結果開発すべき基本項目は次のものであった。
（1）基本アーキテクチャの決定
（2）命令セットの設計

（３）浮動小数点、固定演算における数の表現、特に、浮動小数点演算における指数部と数値部のビット長の決定及び 0 の表現
（４）高速演算のための演算器、制御方式の設計
（５）記憶装置、入出力装置の設計

（１）については、当時日本電信電話公社の室賀三郎氏がもつ ILLIAC の基本アーキテクチャを参考にして決定した。
（２）の問題は、多くの議論を経て 230 個の命令セットを定めた。
（３）は多くの理論的数値シミュレーションの後、指数部 8 ビット、数値部 40 ビット計 48 ビット長の長さに定まった。
（４）の中で特に重要なのは、全く独自の立場から三つの新しい制御方式を導入したことである。(a) パイプライン制御、(b) 先回り制御、(c) 入出力高速化のための時分割共通バス方式であり、このすべてが実装された。この考え方は今でも基本となるコンピュータ設計のアーキテクチャである。
（５）は大問題であった。当時、コンピュータをベースに作られた記憶装置も入出力装置もなく、これは NEC 以外から調達しなければならなかった。結局は北辰電機（当時）の作った磁気ドラムと谷村製作所 (当時) の入出力用の装置を導入し、多くの調整の後で、コンピュータに接続した。

一方、コンピュータ設計の実装の上で最も重要な問題は、基本素子の決定である。当時、候補となったのが、真空管、トランジスタ、パラメトロンである。トランジスタの将来に関しては多くの可能性を見出したが、設計当時のトランジスタは信頼性の上で採用できる状況でなかった。その結果、基本素子として、当時最も動作の信頼性の高いパラメトロンが選ばれた。

このコンピュータは昭和 34 年に稼動し、SENAC-1 と名づけられ東北大学大型計算センターの最初のコンピュータとして学内の研究者に解放され、有効に広く活用された。また、NEC ではこのコンピュータを NEAC1102 として商品化した。

【２】SENAC-1 の研究開発から得られたもの

SENAC-1 の研究開発から次の世代に向けての多くの技術的課題が誘引され、それが学会、産業界を介し日本のコンピュータ開発の上で多くのインパクトを与えられたことは重要な成果である。また、SENAC-1 の研究開発は東北大学における IS, IT の研究の方向に大きな影響を与えることになる。
これは次に述べることにして、別の観点で SENAC-1 の研究・開発が与えたいくつかの成果を述べたい。

第一に重要なのは、革新的な学産連携による共同研究開発の実施である。
現在に至るまで、数多くの学産連携実施の報告があるが、当時我々が行ったプロジェクトに相当するものが幾つあるであろうか。

本プロジェクトの特色は次の形で総括できる。
（１）研究目標は極めて明確
（２）目的達成のための土壌は不完全
（３）目的を達成するための強固な中心的メンバーによる学産の連携の確立（研究開発者は 100%このプロジェクトにすべての知的、物理的資源を投入、プロジェクト以外何も考えるな）
（４）プロジェクトに要した総合的なマンパワーは、数百～数千人月の大プロジェクト
（５）トップレベルのプロジェクトマネージャーが不在

（6）このプロジェクトに対して外部からの支援はほとんど無し

このような状況の中で、SENAC-1 プロジェクトが確たる成果を残し得たのは、中心的グループの献身的な努力によってなされたものであると確信できる。

さて、改めて SENAC-1 プロジェクトの進行について考えてみると、次の 2 つの大きいフェーズに分けられる。

第 1 が基本設計とその詳細化のフェーズ

第 2 が第 1 フェーズの成果をベースに実際にシステムとして実装するフェーズである。

特に大きい問題は第 2 フェーズの実行であった。実装の問題解決は当然 NEC 側が中心となって行う仕事である。しかし第 1 フェーズの内容を十分に理解し、これをベースに第 2 フェーズとして実現できる開発者は当然といえば当然であるが、NEC の中に当時はいなかった。実際のシステム構築の上で最も重要な問題の一つが電源問題の解決であり、これについて本格的に取組んだ開発者は一人もいなかった。例えば、9,600 個のパラメトロンを 2MHz で一様に共振させる分散型電力供給システムの設計は恐らく当時としては画期的なシステムである。この実装には多くの難問が山積しており、その解決のために多くの時間が費やされた。

多くの問題を含む第 1 フェーズと第 2 フェーズの仲介役は当時としては渡部和氏を置いて他になく、この分野でも彼は NEC の現場との折衝で大変に苦労されたと思う。

最後に SENAC-1 のプロジェクトを通して、今後の大型プロジェクトを実行し、成功させる大事な教訓について述べたい。

結論としていえば、トップレベルのリーダーの存在が絶対に必要ということである。これによりプロジェクトの内容はより強力なものになり、その成果は一段と大きくなる。

トップレベルのリーダーが持つべき能力には多くのものが要求されるが、特に次の二つは不可欠である。

第 1 が広くプロジェクト全体が関係する基盤技術について十分な知識を有すること。

第 2 にプロジェクトが関連する技術の将来の方向性、社会的インパクト、また必要があれば､プロジェクトが直接関係するマーケットに対しての深い洞察力を持つことである。

日本が今まで国として、また企業全体として関係した数多くのプロジェクトが実施されたが、現在の時点で評価してみればその多くの成果は成功していなかった。その理由は上に述べたトップリーダーの不在であった。一つの例を挙げれば、日本におけるインターネットの研究・開発がアメリカに比較して 2 年以上遅れた事実である。

【3】SENAC-1 の開発が東北大学の IS，IT 研究に与えたもの

昭和 30 年の中ごろまでに SENAC-1 のプロジェクトは終了したことになるが、この開発を通して今後解決すべき多くの問題が提起された。

第 1 がコンピュータ設計のための確たる理論体系を構築すること。

第 2 にコンピュータの抽象化理論の研究である。

（1）コンピュータ設計の理論体系の研究について

この問題の解決のためには、極めて広範囲の研究・開発が不可欠であり、一つの研究室単位の規模では限られたものになる。この中で、我々が選択した研究項目は、コンピュータシステムのモデル化と、これをベースにコンピュータの性能評価を理論的に確立することである。これらについて多くの研究が我々のグループの中で行われたが、その一つの例が Time Sharing System の研究である。

1970 年代に入って、当時の高価なコンピュータを有効に活用する方法として、Stanford 大学のマッカーシー教授により Time Sharing（TSS）方式が提案され、多くのコンピュータシステムに採用された。しかしながら、与えられた多くの条件のもとで実際に稼動する TS システムがどのような性能を与えるかは十分に理解されていなかった。

この問題に強く関心を持ったのが、東北大学と NEC のグループである。その中で両者の間に共同研究の体制が組まれ、東北大（野口、坂田）、NEC（水野、川村）が中心となってプロジェクトを展開した。その成果の一つが M/G/1 のもとでの TSS の性能解析である。

性能評価について多くの研究が我々のグループで行われたが、東北大学全体ではコンピュータシステムに関する研究者は、他にはあまりいなかった。
そのため現在最も残念に思われることは、当時ソフトウェア工学に対する研究がほとんど東北大学では行われなかったことである。

当時、ソフトウェア工学は単にコンピュータを動かすプログラム技術の延長と考えられたことも大きい要因であり、この状況は当時の日本の多くの大学でも同様であった。つまり、当時の日本にはソフトウェアの持つ重要性について十分な洞察力を持ったトップリーダーがいなかったことである。

（2）コンピュータの抽象化理論の研究

1960 年代の後半頃より、コンピュータの抽象化理論であるオートマトン・言語理論の研究が世界的に広く行われるようになった。
この研究の中で一つの重要な考え方は、オートマトン理論で得られた成果を具体的にコンピュータシステムの構築にどのように適用できるかということである。この立場をベースに我々のグループを含む東北大学の若手研究者は特に代数的オートマトン理論、セル構造オートマトン理論の研究に積極的に参画し、多くの重要な成果を導いた。これによりこのグループは東北大学派と呼ばれ、この分野で一つのポジションを作った。

この成果の主たるものは、有限オートマトンの特性化理論、セル構造オートマトンの特性化、計算の完全性に関する研究等であり、数多くの論文が発表された。

本報告では、研究成果の具体的内容については触れないが、SENAC-1 の研究・開発が出発点となってこの分野の研究が東北大学に構築され、日本のこの分野の研究者に多くのインパクトを与えたことだけを述べておきたい。

【むすび】

SENAC-1 の研究・開発はその後、日本の各大学のコンピュータ開発に多くの影響を与え、各大学が精力的にそれぞれのコンピュータを開発し、稼動させていった。
この意味で SENAC-1 の開発は、日本の大学のコンピュータ開発の一つの重要な原点として考えることができる。

一方、SENAC-1 の実践的研究から出発して、抽象化の世界であるコンピュータサイエンスの新しい研究の流れが早くから東北大学に生まれ、この研究グループは学会を通して CS，IS 研究の発展に大きく寄与することになった。

さて、昨今の IS，IT の研究の流れを見てみると、特に ICT をベースとした研究の流れはすさまじく速い。この流れの中での大きな問題は、IS，IT の分野の間でその研究成果の十分な相互活用、それに基づく新しい理論、システム構築の理論や実装の研究が行われていないように見えることである。この問題の解決は今後の大きい課題であろう。

日本の情報科学・工学の黎明期とSENAC-1の開発

財団法人仙台応用情報学研究振興財団
理事長　野口正一

昭和20年代後半、東北大学は日本における重要な情報科学・工学研究の拠点

先導的リーダー

大泉　充郎、　本多　波雄、　喜安　善一

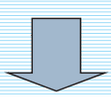
1950年代に日本の情報･通信関係の研究者に与えた三つのインパクト

第1がENIAC

第2がC. E ShannonとW. Weaverによる通信理論(1949)

第3がN. WienerによるCybernetics(1947)

20世紀の末までに人工頭脳の構築は可能か



高性能のコンピュータの研究開発が第1目標

昭和30年代初頭における大泉教授の積極的な
Project推進のプロモーション

↓

文部省に対しての予算の獲得

↓

孤軍奮闘の末成功！

目標：商用に耐える国産最大のコンピュータの
開発を稼動を含めて3年以内に完成

↓

コンピュータ開発に強い意欲のある企業との折衝

↓

最終的にNECとの間で学産連携による
共同開発がスタート

↓

東北大学の情報科学関係の研究者の結集

東北大：大泉･本多･桂･松尾･小野寺･野口
ＮＥＣ：出川･石井･遠藤･渡辺･山本



コアメンバーによる研究開発

東北大：小野寺･野口
ＮＥＣ：渡辺･山本

SENAC-1設計のためのスペックの決定

(1)基本アーキテクチャの決定

(2)命令セットの設計

(3)浮動小数点、固定演算における数の表現、
特に浮動小数点演算における指数部と数値部のビット長の決定及び0の表現

(4)高速演算のための演算器、制御方式の設計

(5)記憶装置、入出力装置の設計

SENAC-1のスペック

（1）アーキテクチャ：ILLIACを参照

（2）230個の命令セット

（3）指数部8、数値部40

（4）パイプライン制御、先回り制御、時分割共通バス制御

（現在コンピュータ設計の基本アーキテクチャとなっている）

（5）記憶装置　：北辰電気（1024W）

入出力装置：谷村製作所

コンピュータの基本素子の決定

真空管、トランジスタ、パラメトロン

TACの失敗（真空管）、

トランジスタ（point contact）の不安定性

⇩

パラメトロンに決定

⇩

閾素子関数をベースの基本関数

マシュー関数から導かれる半周波の波の活用（共振回路）

2MHzの励振で1MHz⇒10波程度の波を利用

SENAC-1の開発

第1フェーズ：基本設計と詳細設計

きつくも充実した開発期間

第2フェーズ：実装に向けての作業

第3フェーズ：システム全体の調整

第2、第3フェーズは悪戦苦闘の連続

実務担当者の多くの人々、特に渡辺和氏の苦闘

SENAC-1の開発プロジェクトの特色

（1）本格的な学産連携

（2）基礎から実際の稼動までの一貫した大型プロジェクト



今後の日本における大型学産連携の在り方に対して多くの教訓を与えた

SENAC-1開発プロジェクトの特色の総括

（1）研究目標は極めて明確
（2）目的達成のための土壌は不完全
（3）目的を達成するための強固な中心的メンバーによる学産の連携の確立
（研究開発者は100%このプロジェクトにすべての知的、物理的資源を投入、プロジェクト以外何も考えるな）
（4）プロジェクトに要した総合的なマンパワーは、数百～数千人月の大プロジェク ト
（5）トップレベルのプロジェクトマネージャーが不在
（6）このプロジェクトに対して外部からの支援はほとんど無し

中心的グループの献身的努力によって成功

大型プロジェクト推進のための重要な必要条件

プロジェクト全体を確実に管理できる
マネージャーの存在が不可欠

求められる資質
（1）プロジェクト全体が関係する基盤から応用技術に対して十分な知識と知見
（2）プロジェクトが関連する技術の将来の方向性、社会的インパクト、マーケット（必要があれば）に対しての深い洞察力を十分持つこと

SENAC-1の開発の中での重要な反省点（Bottom-up方式）

このプロジェクトを統括できるトップマネージャーが不在

↓

全体システム構築の上で基本となる総合グランドデザインがなかった

例：システム構築の最も重要な基本要素である電源と配線のLayoutの設計者なし

9,600個のLC回路としてのパラメトロン全体を2MHzで励起する分布型システムのための電力供給システムの設計

特に重要な大規模プロジェクトにおける、トップレベルのマネージャーの不在は、大きな悲劇を招く

この例は、国家プロジェクト、日本企業のプロジェクトの中に多くの例を見る

例・なぜ日本のインターネットの研究開発は2年以上遅れたのか

・第5世代コンピュータ研究開発は、日本のコンピュータ産業の発展に何を与えたのか

現時点での問題点

・日本のICT産業を発展させるための国家戦略は機能しているのか

・ICTによる地域活性化プログラムは機能しているのか

・国際的に認められる高度ICT人材育成プログラムは日本にあるのか

SENAC-1の開発が東北大学のIS，ITの研究にどのようなインパクトを与えたのか

（1）コンピュータ設計のための理論体系の構築

（2）コンピュータの抽象化理論の研究

（Ⅰ）東北大学とNECとの共同研究

Time Sharing Systemの研究

東北大（野口、坂田）、NEC（水野、川村）

Round Robin SchedulingにおけるM/G/1の解析

（Ⅱ）コンピュータの抽象化理論

1960年代の後半から発展したオートマトン理論との出会い

中心的研究テーマ
（a）代数的オートマトン理論
（b）セル構造オートマトン理論

⇩

多くの若手研究者の参画

⇩

東北大学派の成立

SENAC-1の開発が日本のコンピュータ，IS分野に与えたインパクト

（1）日本の各大学でのコンピュータ開発の急速な立ち上げ

↓

日本のコンピュータ開発の
一つの重要な原点となった

（2）日本のIS，IT研究のひとつの原動力

（3）問題点：日本のソフトウェア研究開発のための基盤が構築できなかった（トップレベルマネージャーの不在）

日本における過去･現在におけるIS，ITの研究開発の問題点

↓

ISとITとコミュニケーションの技術をどう融合させるのか

ICTの開発に直結するCSの成果を見出す
目利きの存在が不可欠

白

SENAC-1(NEAC-1102)開発秘話

―科学技術用計算機開発に命をかけた日々―

渡　部　和

数値計算－それは理論と実際を隔てる絶望的な断崖絶壁

昭和29年(1954年)の秋、日本電気(NEC)玉川工場で毎晩深夜まで真っ暗な工場棟の片隅で一箇所だけ電気スタンドに照らされた机がありました．そこには、当時日本では珍しかった米国製電動計算器を操作して我を忘れて数値計算に明け暮れていた若い社員がいました．それは前年(1953年)にNECに入社し伝送通信技術部に配属され濾波器の設計を命ぜられた私でした．

今日のディジタル時代では濾波器と言ってもピンと来ないでしょうが、当時のアナログ通信では周波数という資源を濾波器（フィルタ）によって必要な周波数帯域だけ切り出し、それらをあたかも煉瓦のように積み上げて多重化する周波数分割多重化技術が通信の先端技術でした．そこでは、周波数資源を無駄なく利用するために急峻な遮断特性を持つ濾波器を実現することが急務でした．

その濾波器設計を命ぜられた私は無我夢中で回路網理論の研究と濾波器設計法開発に没頭し、従来の理論をさらに発展させた新しい設計理論を着想しました．設計理論は頭脳をふり絞って数学的に考えれば道は開けましたが、その理論に忠実に従って実際に設計するには、伝達関数の決定、回路網S行列の導出、その因子分解などの膨大な高精度数値計算を次々に実行しなければなりません．それらの数値計算を実行して実際の製品を実現する事は困難を極める大問題でした．

私は電動計算器にしがみつき幾晩も徹夜で数値計算に明け暮れましたが、それは絶望的なほど困難な道でした．そのとき理論と設計の間には『数値計算』という険しい断崖絶壁が存在する事を骨の髄まで思い知らされ、眼前に切り立つこの絶壁を乗り越えなければ、どんな美しい理論を構築しても絵に画いた餅に過ぎないことを身に沁みて悟りました．優れた製品を産み出すためには、その設計の基礎となる精緻な理論を構築すること（科学）が大切であることは当然ですが、その理論を実際に適用して製品を実現すること（技術）はさらに重要です．私は理論の実用化が如何に困難であっても、その壁を乗り越えなければ科学技術に未来はないと思いつめました．

絶望的な絶壁を克服するには数値計算の自動化しかない

私は眼前に立ちはだかる「数値計算」と言う絶望的な断崖絶壁を乗り越える唯一の方法は数値計算を自動化するしかないことを悟り、命を賭けても自動計算機を開発しようと固く心に誓いました．そう決心して、あらためて昼夜兼行で実行していた数値計算を見直してみると、次の三種類の極めて単純な操作を繰り返しているに過ぎないことに気が付きました．

①計算用紙に記載した数値を読み取り、電動計算機のレジスタに打ち込む．
②計算手順に従って電動計算器の加減乗除の機能ボタンのどれか一つを選択して押す．
③電動計算器のレジスタの上に現れた数値（答え）を読み取り、計算用紙に書き移す．

私は昼夜兼行でこの三つの単純な操作を何千回も繰り返していたのでした．

電動計算器を「演算装置（加算器)」、計算用紙を「記憶装置」、そして計算手順に従って加減乗除ボタンを押している操作を「制御装置」と考えて見れば、「数値計算」とは①「記憶装置(計算用紙)」から数値を読み取り、「演算装置(電動計算器)」に入力し、②「制御装置(機能ボタン)」から計算指示を与え、③「記憶装置(計算用紙)」に出力を書

き込むことだったのです．そして、電動計算器は歯車の回転回数を数えて単純な加算を行っている加算器で、私自身はそれらの単純な操作を適切な順序（プログラム）で繰り返している制御要素（プログラム実行）に過ぎないことに気がつきました．これを自動計算機と言うなら、私には自動計算機の仕組み(アーキテクチャー)は自然に頭の中に浮かび上がり、その設計図が明瞭に見えて来ました．

その時考えた仕組み(アーキテクチャー)は自分自身が数値計算で苦闘した体験をそのままそっくり構造化したもので、演算装置と記憶装置が共通母線(Bus)で接続され、別に備えられた制御装置が計算手順に従ってそれぞれの入力と出力の門（Gate）を順序良く開閉するというもので、今日の計算機の基本構造そのものでした．また、膨大な数値計算に苦しんだ経験からその計算機は浮動小数点方式2進64ビット(指数部8ビット＋仮数部56ビット）と定め、社内設計自動化計算機として提案しました．しかし、当時どこにもない夢のような計算機構想は到底許されるものでなく誰からも支持してもらえませんでした．

そこでやむを得ず48ビット（指数部8ビット＋仮数部40ビット）まで縮小し、必要に応じて浮動/固定切り替えスイッチ命令によって固定小数点演算も可能としました．しかし、密かに内部構造では48ビット浮動小数点演算部を二組設置し、仮数部40ビットと指数部8ビットの二組の母線に接続して、必要に応じて二組の演算部を連結して仮数部80ビットの加算器を構成して高精度浮動小数点計算が出来るようにしました.また、80ビットの加算器を活用して1回のシフト動作で乗算が出来る新形式の高速乗算器を構成しました．このとき考えた見かけは48ビットで内部は48ビット二組（仮数部80ビット、指数部8ビット二組）という構成については社内の誰にも話さない秘密でした．論理素子としては丁度その頃(1954年)発表されたパラメトロンを用いることにしました．

この計算機開発はいくら上司に懇願しても入社二年目の（研究職でもない）設計担当者の夢が直ちに会社の公認業務になる筈はありませんでした．やむを得ず私は工場の正門前のアパートに移り、昼間は工場現場の隅で濾波器設計（本務）と回路網理論研究（半公認)、帰宅後はアパートの自室で計算機開発（非公認）に没頭する三重生活を約二年間続け、遂に1957年初頭にその全体設計と論理回路を完成しました．しかし、夜なべでたった一人で設計した計算機は社内では誰もその真価を理解してもらえず、相変わらず非公認のままで一向に会社公認の正規開発プロジェクトとはならず、一日も早く社内自動設計専用機を実現したい私の悲願は目に見えない分厚い壁に阻まれたまま進展しませんでした．

天佑神助は東北大学から

その頃東北大学では大泉充郎先生の主導の下にパラメトロンを論理素子として世界一の科学技術用計算機を創ろうという意欲的な計画が進められていました．この計画は大泉先生の熱意と努力で昭和32年度の文部省予算として認可され、NECへ発注されました．東北大学が発注者でNECが製造業者として受注する形式でしたが、実際には東北大学とNECが共同設計し、NECが製造を担当することになっていました．この計画がNEC社内に知らされたとき、当時NECの研究所ではパラメトロン計算機の研究開発を進めていたので、当初はそれを基礎として東北大学からの開発受注を受ける方向に進んでいました．

私はその計画を知り、私が非公認で開発していた計算機を是非採用して頂くよう上司に強く懇願しました．そのとき、私が全体設計から論理回路まで略々完成した計算機が非公認から公認プロジェクトに浮上する千載一遇の好機であると思いました．幸いその願いが認められ、私の原案に基づいて東北大学の計算機プロジェクトに対応することになり、私はその論理システム、アーキテクチャーを担当することになりました．

昭和32年度には東北大学計算機プロジェクトが正式に決定し、大泉先生を中心とし

て学内の若手精鋭の先生方による開発チームが結成されました．論理システムは桂重俊助教授、論理・演算・制御は小野寺大助手、野口正一大学院生、電子回路は松尾正之助教授、全体システム総括は本多波雄助教授という錚々たる陣容で、早速東北大学と NEC との共同開発の会議が始められました.その席で双方からこの計算機に対する開発方針、設計基本構想の意見交換が行われ､私は昭和 29 年の秋以来非公認で進めて来た基本設計を説明しました．

すると東北大学側の論理システムを担当された桂先生も浮動小数点方式、倍長演算機構など殆ど同様な基本構想を持っておられ、双方が全く同じ想いで計算機の基本構想を固めていたことが分かったのです．桂先生は統計物理学の研究で複雑な数値計算で大変苦労された経験があり、その経験を計算機の基本設計に生かされたのでした．桂先生と私はともに数値計算で本当に苦労したものだけが知り得た体験を分かち合える者同士だったのです．それまで社内では数値計算用計算機開発の技術問題を誰とも相談することなく、たった一人で考えて開発して来た私にとっては初めて真に分かりあえる方と邂逅したのでした．将に「徳不孤必有隣」と強く感じました．双方の腹蔵ない熱心な討議を通じて東北大学の計算機構想と私が非公認で独自開発した計算機の基本案とは合致することが確認されました．東北大学から受注した形式となったことで私の長い間の夜なべ非公認開発は晴れて会社の「正式業務」となりました．このことは私にとっては将に「天佑神助」であり、東北大学は救いの神でした．

火のような熱意に燃えた共同設計作業

この計算機の基本設計について合意に達した東北大学と NEC は､アーキテクチャー、命令構成及び論理回路構成について徹底的に設計検証をすることになりました.そこで、昭和 32 年の盛夏の 6 月から 8 月までの足掛け三ヶ月に亘って東北大学側からシステム・アーキテクチャーと論理回路を担当される本多先生、桂先生、小野寺さん、野口さんは日電玉川工場付近の宿屋「鈴半」に合宿され、NEC 側から私が参加し、産学の区別なく全員一丸となって世界一の科学技術用計算機の創造を合言葉として、連日連夜火の出るような熱意で綿密な共同設計作業に没頭しました．

この共同設計作業によってアーキテクチャーはより洗練され、数々の機能の改良、拡充が行われました．短いプログラム行数で複雑な計算を実行できるように命令構成に工夫を凝らし、サブルーチン呼び込み、論理演算、倍長計算、整数処理などの演算命令には他に類を見ない独特な機能が盛り込まれ、そのため命令の種類は当時の常識を超えた 230 種にもなりました．

この共同設計で桂先生は常に緻密な論理的思考で設計を検証され、私の原案の問題点を論理的に明快に解明され、さらに広い方向に発展されました．また小野寺さん、野口さんとは年齢が近いこともあり、発注者（大学)、業者（会社）の差別なく学生気分のまま口角泡を飛ばして議論しました．こうして玉川工場及び旅館「鈴半」で冷房もないひと夏を共に苦闘した共同設計は 8 月下旬に完成しました．この合宿によって完成したシステム構成を図 1 に示します．

共同設計が終わった 8 月の下旬以降には私一人で昼夜兼行でパラメトロン素子 9,600 個から成る論理回路の論理動作を一つ一つ確認しながら克明に論理回路図にまとめ、鉛筆で大型方眼紙数十枚に書き込んで製造図面を仕上げました．11 月末頃に製造図面が仕上がるや否や直ちに計算機の製造、組み立て、配線作業が始まりました．

昭和 33 年の 3 月には全ての部品の取り付け組み立てが終わり､いよいよ電源を入れ動作試験を始めようとした時､会計検査など事務手続きの都合で､昭和 33 年会計年度初日（4 月 1 日）には本体が東北大学に設置されなければならないことが確定的となり、3 月下旬に計算機はそのまま仙台に向けて出荷されました．そして私は現地調整の責任者として 4 月から東北大学に長期出張することになりました．

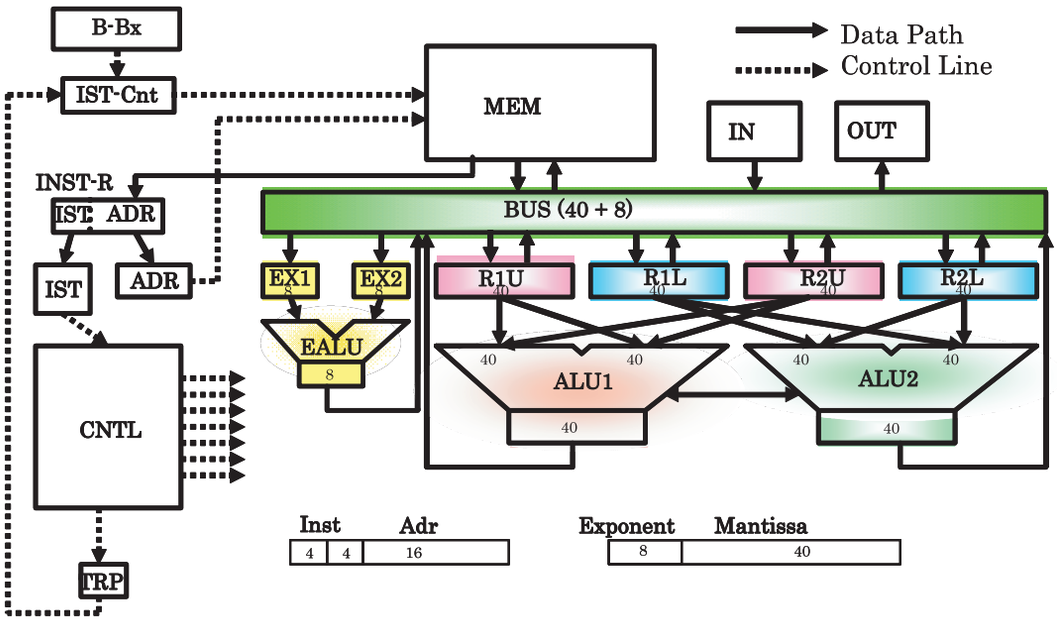


図１　共同設計した計算機の基本構成
（二組の 48 ビット浮動小数点演算部を装備し、倍長精度計算が可能）

前人未到の大型計算機の調整作業、それは悪戦苦闘の修羅場

昭和 33 年 4 月に東北大学通信研究所の一室に設置された計算機では早速電源の調整作業が始りました.ところが 9600 個のパラメトロン全てに電力が十分に供給できないという大きな問題に遭遇しました．論理設計だけに没頭していた私は、まさか電源が不具合とは夢にも思わなかったので愕然としました.

調べてみると、2MHz 高周波電源と負荷（多数のパラメトロンを串刺しにしたリアクタンス分布定数線路）とのインピーダンス不整合と分かり、負荷となっているリアクタンス分布定数線路のリアクタンス成分を相殺する進相コンデンサを装荷することになりました．そのことは論理演算を位相差で実行するパラメトロン論理回路では全てのパラメトロンの励振位相を揃えるためにも必要な処置でした．私は市内のラジオ屋に飛んでいってチタン酸バリュムコンデンサー（チタコン）を山のように買い込み、パラメトロンの励振位相を一つ一つ観察しながら線路上に多数のチタコンを（リアクタンス成分相殺のための）進相コンデンサとして分布的に装荷し、全ての励振位相を揃えました．これによってやっと負荷のリアクタンス成分が消え、電源と負荷の整合がとれ高周波電力が供給されるようになりました.

電源と負荷が整合し電力が供給されるようになると､今度は 2MHz 高周波電源のパワー不足が明らかになりました．そこで電力増幅器を全部取り外しパワー増強の改造を行いました．すると今度は安定化電源が不規則な脈流を発生し計算機に誤動作を与えるという現象が発生しました．いろいろ調べて最後に分かったことは発電機のスリップリングの損傷でした．そのリングを再研磨したらやっと直りました．これらの技術問題は本来工場で通電試験を済ませておけば簡単に解決できたことで事務処理上の問題で工場出荷が早まったことが悔やまれます.

こんな障害が次々と起こり、やっと私の本来の任務である論理回路の調整を開始することが出来たのは予定より 3 ヶ月遅れて暑い盛りの 7 月半ばとなりました．論理動作の確認調整はすべての命令を一個ずつ論理条件を変えながら実行し、制御パルスの行方をシンクロスコープで確認するという原始的な方法で行いました．制御パルスの動作が

設計通りでないと配線ミスを探索し修正したり、論理設計ミスを発見しその修正や回路の改良作業を行ったりする調整作業を連日徹夜で強行しました．私が一人で仕上げた手書き設計の論理回路には残念ながら細かいバグが潜んでおり、これらすべてを検出して修正（回路変更）する作業は気が遠くなるほど綿密で過酷な作業でしたが、工場からの支援もなく、システムと論理回路のすべてを設計した者としての責任を負って調整作業に立ち向かった悪戦苦闘の日々でした．

昭和 33 年の夏は猛暑で、計算機室にはまだ冷房もなく、毎朝大きな氷柱が部屋の中央に運び込まれましたが少しも涼しくなりませんでした．また、磁気ドラム式記憶装置の動作も不安定で調整は苦労の連続でした．担当した NEC の同僚山本淳三氏も何度か倒れるほどでした．このとき東北大学も NEC もなく、小野寺さん野口さんもわれわれ NEC 社員も心を一つにして全員一丸となって計算機室で連日連夜徹夜作業を続けました．それを支えたのは世界一の計算機を実現して技術革新の扉を開くのだという研究者技術者魂でした．

10 月半ばには苛酷な調整作業も終わる見通しが立ち、いくつかのテスト計算が稼動し始めました．そこで東北大学として 11 月 28 日に大学、文部省の関係者を招いて完成披露式典を行うことになりました．運転公開には安全のためグラフ木探索や素数探索といったプログラム行数（ステップ数）は少ないが計算結果は見栄えがするテスト計算を選びました．ところが前夜になって動作が安定せずエラーを起こして停止する回数が増えたのです．原因は電源の安定性不良であるらしく、当日は思い切って計算機の背後のカーテンの陰に多数のバッテリーを積み上げて直流駆動で運転しました．お陰で公開運転は無事に開始しプリンタから計算結果が出力されて好評裡に終了しました．

SENAC-1 の完成公開の後、全ての命令の完全動作を確認し機器の安定化を進め無事に東北大学に引き渡した後、1 年間に及ぶ私の長期出張が終わり、仙台から引き上げたのは昭和 34 年 3 月末でした．

世界一の科学技術用計算機を目指した信念と情熱

東北大学の計算機開発計画が文部省で認可されたのは昭和 32 年でしたが、翌 33 年に完成に漕ぎつけたのは計算機黎明期の当時としては異例の早さでした．それが可能となったのは東北大学と NEC が世界一の科学技術用計算機を創造しようという熱い情熱で結ばれ、互いに英知を出し合い努力を惜しまなかったからでした．双方とも科学技術用計算機を完成し、理論と現実の間の障壁を克服して真の技術革新への道を開くという信念に燃えていました．その信念と情熱だけが前例を見ない大型計算機を短期間のうちに開発し稼動させるという筆舌に尽くし難い難関を克服できた原動力でした．

この経験が産学共同で技術革新を開拓する先例となり伝統となったとすれば、半世紀昔に東北大学の先生方とともに苦闘した一人としてこの上ない喜びです．

エピローグ

その頃防衛庁技術研究所は最高性能の科学技術用計算機を設置することを計画し、当時国内で稼動または開発中の全ての計算機を調査した結果、科学技術用としては SENAC-1 (NEAC-1102)が最も優れているとの結論に達し、NEC に NEAC-1102 の後継機を発注しました．この事実は東北大学と NEC が一致協力して創り上げた SENAC-1(NEAC-1102)は当時の世界の水準を抜く科学技術用計算機であったことを客観的に証明したものといえましょう．

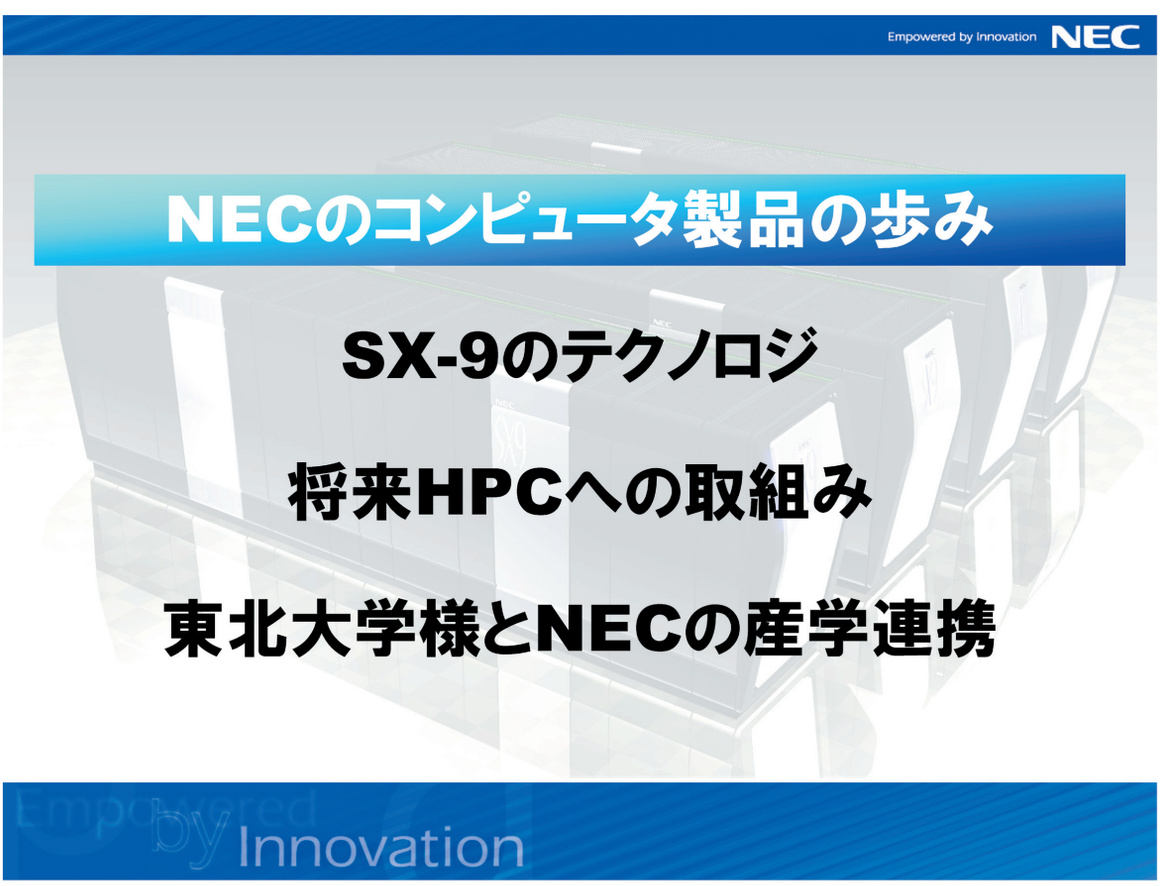
その受注を受けて NEC は後継機 NEAC-1103 を防衛庁向けと社内の設計自動化用の 2 台を同時に製造し、そのうちの 1 台は 1960 年正月に社内に設置され、遂に私の悲願は成就しました．

[参考文献]
[1]渡部和“私の研究遍歴(その２)”信号処理学会誌 Vol.9,No.5, 2005 p363-380.
[2]渡部和“行く手を阻む絶壁と悪戦苦闘した日々－計算機れい明の頃の秘話－”電子情報通信学会誌 Vol.91, pp10-12, No.1, 2008

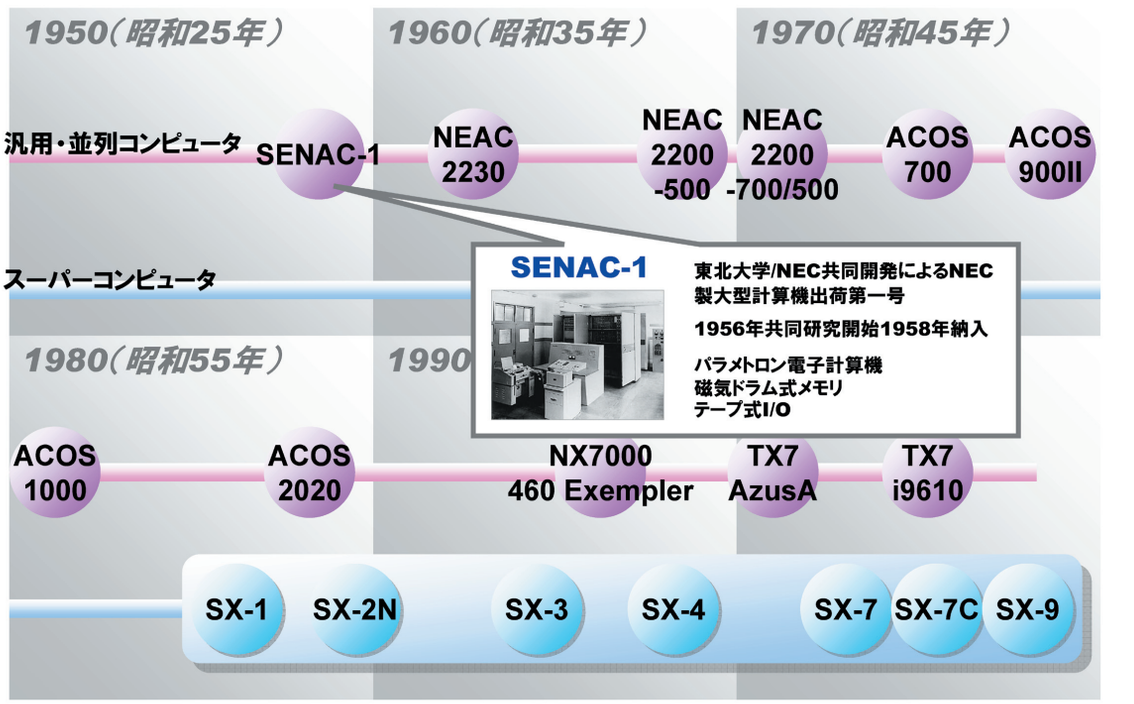
渡部和略歴：
1953 年京都大学工学部電気工学科卒、NEC に入社. 伝送通信技術、研究所、情報処理の各部門を経て 1991 年創価大学教授、工学部長等を歴任し 2005 年同大学名誉教授. 電子情報通信学会稲田賞、論文賞 3 回、著述賞、IEEE Fellow, IEEE 百年賞、同 3rd 千年紀賞、同 CAS- VanValkenberg 賞、情処学会名誉会員、電子情報通信学会フェロー. 工博.




Empowered by Innovation NEC
NECのHPCへの取組み
日本電気株式会社
伊藤行雄
2008年11月14日
Empowered by Innovation

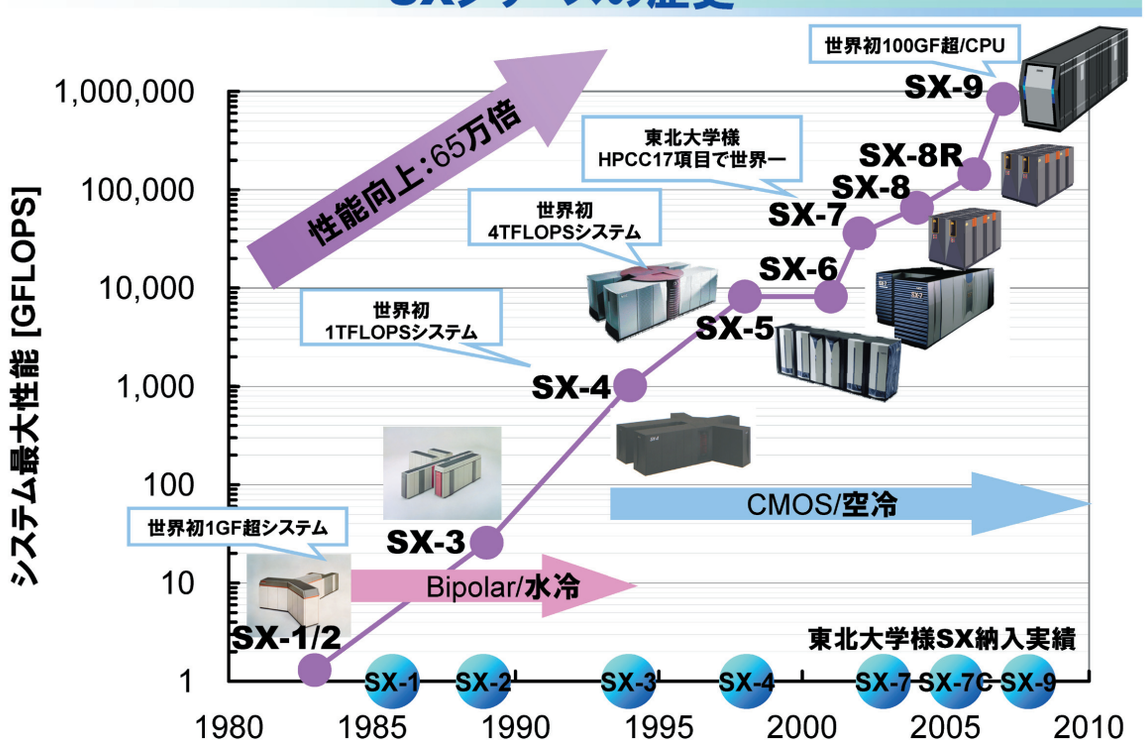

Empowered by Innovation NEC
NECのコンピュータ製品の歩み
SX-9のテクノロジ
将来HPCへの取組み
東北大学様とNECの産学連携
Empowered by Innovation

東北大学様とNECの歩み



3　© NEC Corporation 2008　Empowered by Innovation NEC

SXシリーズの歴史



4　© NEC Corporation 2008　Empowered by Innovation NEC

Empowered by Innovation NEC

NECのコンピュータ製品の歩み

SX-9のテクノロジ

将来HPCへの取組み

東北大学様とNECの産学連携

Empowered by Innovation

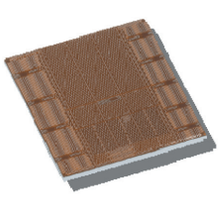
SX-9

“高性能” と “使いやすさ” の両立

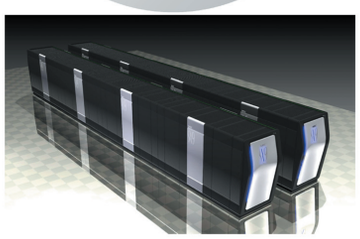
CPU
プロセッサ演算性能で
世界一のパワフルCPU
演算性能102.4GF
メモリバンド幅256GB/s

ノード
フラットな大規模共有メモリ
自動並列化と高性能を実現
演算性能1.6TF
共有メモリ容量1TB

マルチノード
スケーラブルシステムで
超大規模問題に対応
通信バンド幅128GB/s x2
システム演算性能838.9TF



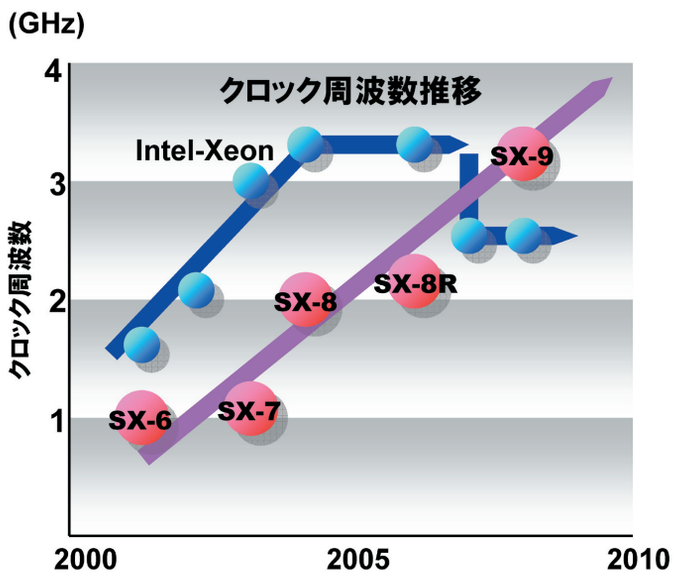




© NEC Corporation 2008

CPUの高速化技術

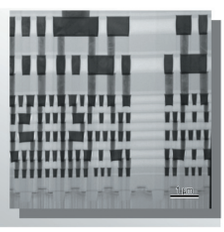
最先端LSI技術を採用し、クロック周波数の高速化を実現



高速トランジスタ
電子移動速度
高速化

PLL用LC発振器
コイルによる
LC共振発振器

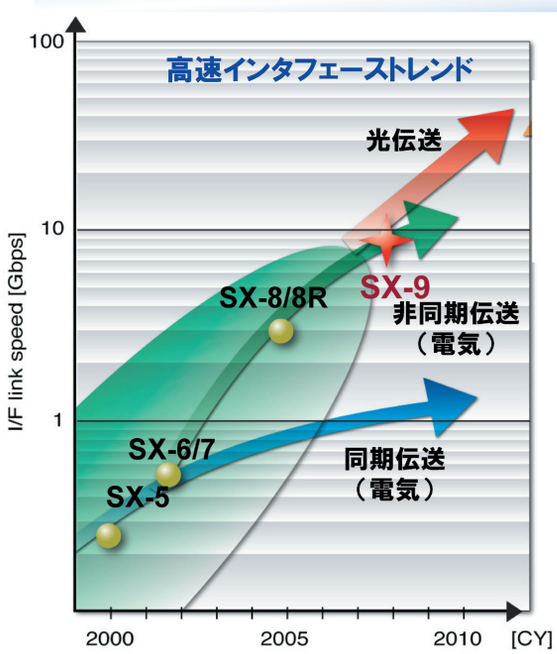
Low-k
インタコネクト
低キャパシタンス
配線の実現
配線層での
平行平板容量

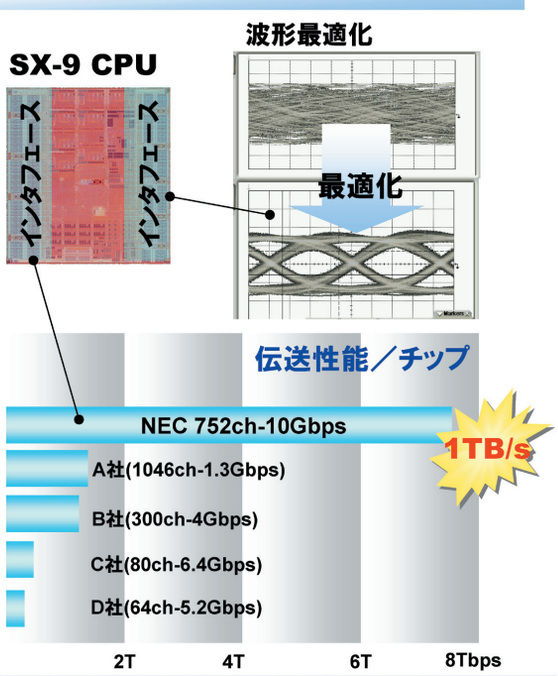


7　© NEC Corporation 2008　Empowered by Innovation NEC

高速伝送技術

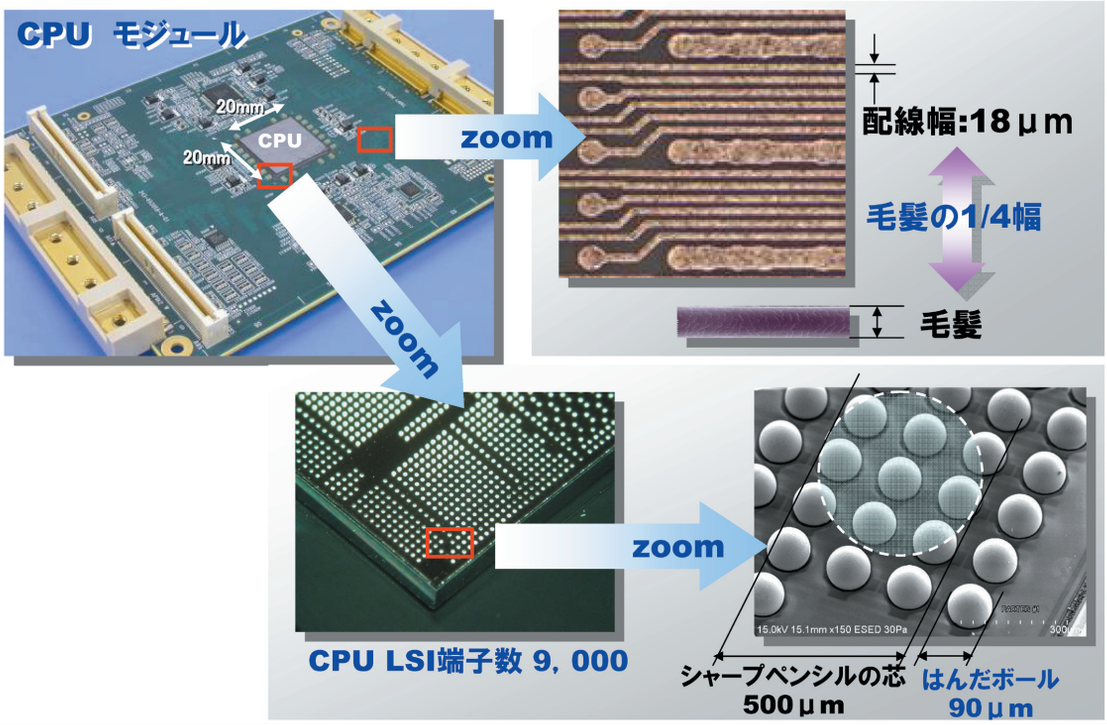
世界最高速レベルのインターフェース回路で超高速インタフェース実現



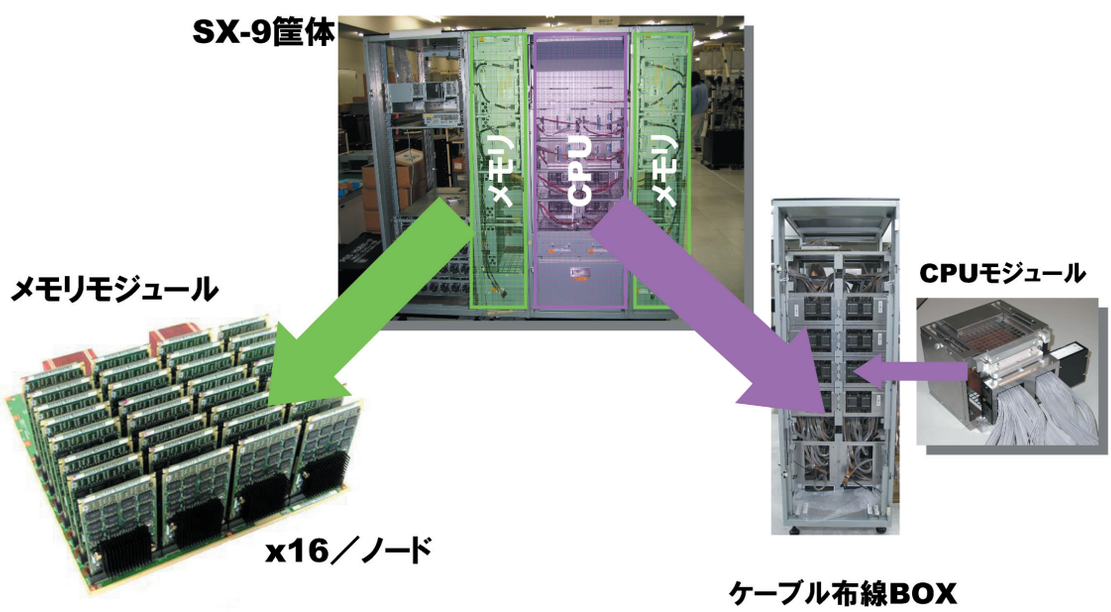


8　© NEC Corporation 2008　Empowered by Innovation NEC

高いメモリバンド幅を実現する高密度実装技術



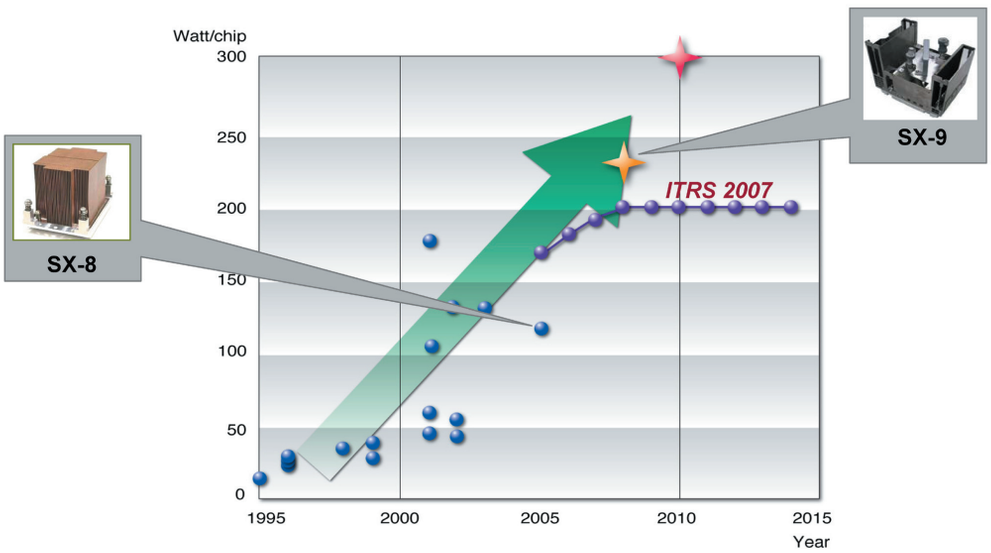
高いメモリバンド幅を実現する高密度実装技術



30cm角のメモリモジュールに約800個、
ノードあたり12,000個以上のメモリチップを実装

14,500本の差動同軸ケーブルを収納

システムを支える最先端冷却技術



ITRSでは、冷却性能がチップの消費電力を
制限する主要ファクターと予測

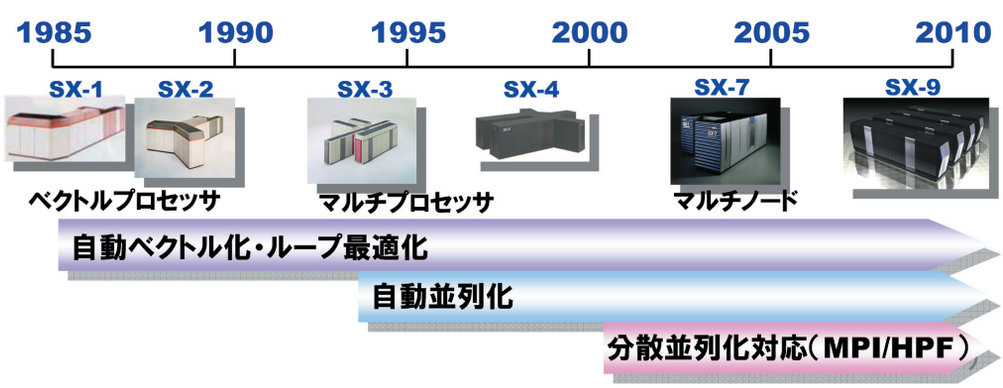
 © NEC Corporation 2008

コンパイラ

■ SXのHW性能を最大限に引き出すFortran、C/C++コンパイラ

- オプションひとつで動作する自動ベクトル化・ループ最適化・自動並列化
- アーキテクチャ、言語仕様、アプリケーションプログラムの進化に対応して
  20年間強化を継続

全ての人がSXの高性能を簡単に享受



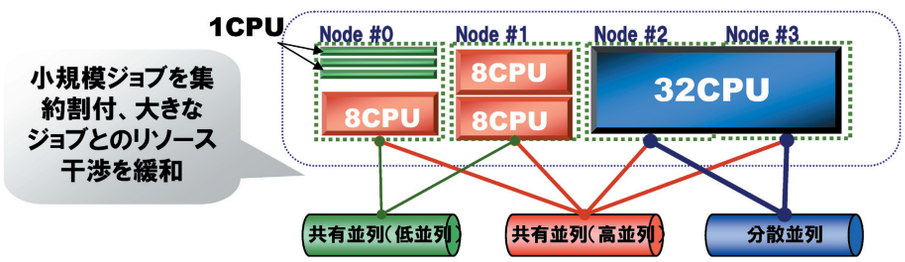
 © NEC Corporation 2008

運用管理

■多種多様な運用シーンでHW資源を最大限有効に活用するジョブ管理機能
- 大規模計算センター運用に適したジョブ管理機能
- 東北大様の運用ポリシーおよび運用実績のフィードバックを反映し強化

◆ 利用するHW資源が異なる大小ジョブが混在した運用でマルチノードシステムの高稼働率を実現





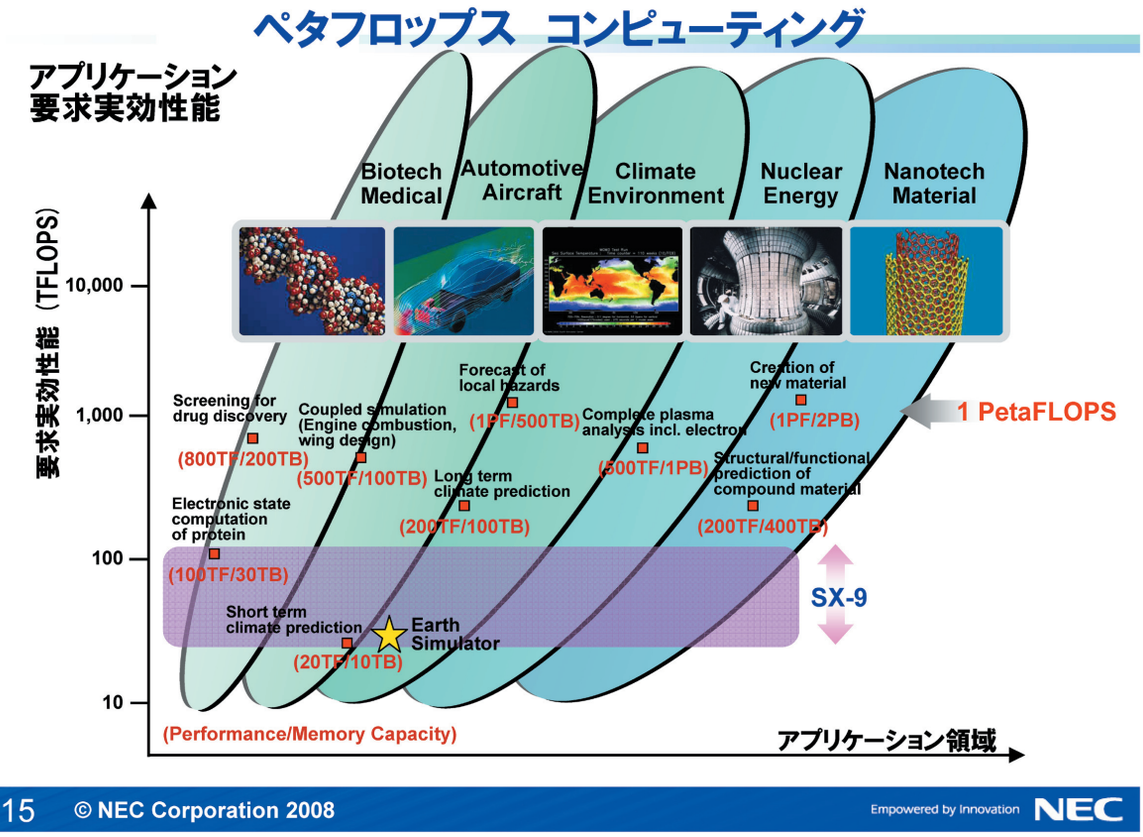
 © NEC Corporation 2008

NECのコンピュータ製品の歩み

SX-9のテクノロジ

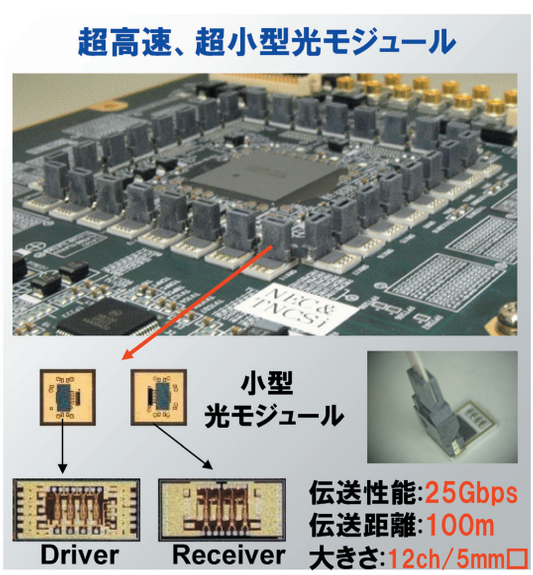
将来HPCへの取組み

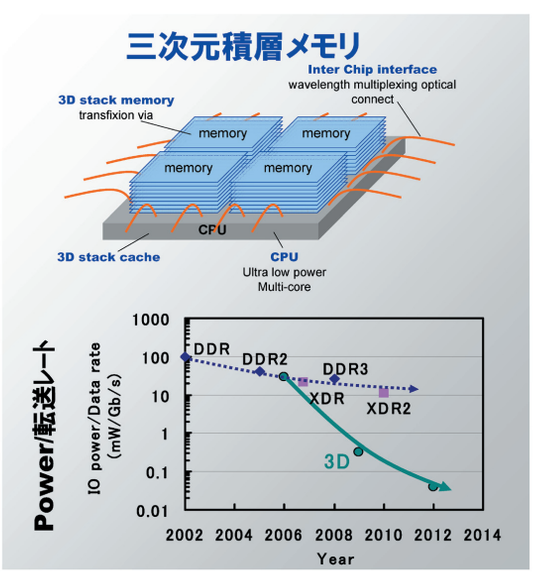
東北大学様とNECの産学連携



ペタフロップス時代へ向けたHPC技術

さらなる広帯域メモリバンド幅、低消費電力を目指し研究開発推進中





Empowered by Innovation NEC

NECのコンピュータ製品の歩み

SX-9のテクノロジ

将来HPCへの取組み

東北大学様とNECの産学連携

Empowered by Innovation

東北大学様とNECの産学連携

1958
SENAC1完成
1956年から東北大学／NECの共同開発

東北大学電気通信研究所
NEC

デバイスレベルからシステムレベルまで、
広範囲な技術開発において産学連携を実施

現在

東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

東北大学 サイバーサイエンスセンター
大規模科学計算システム

東北大学工学研究科・工学部
School of Engineering, Tohoku University

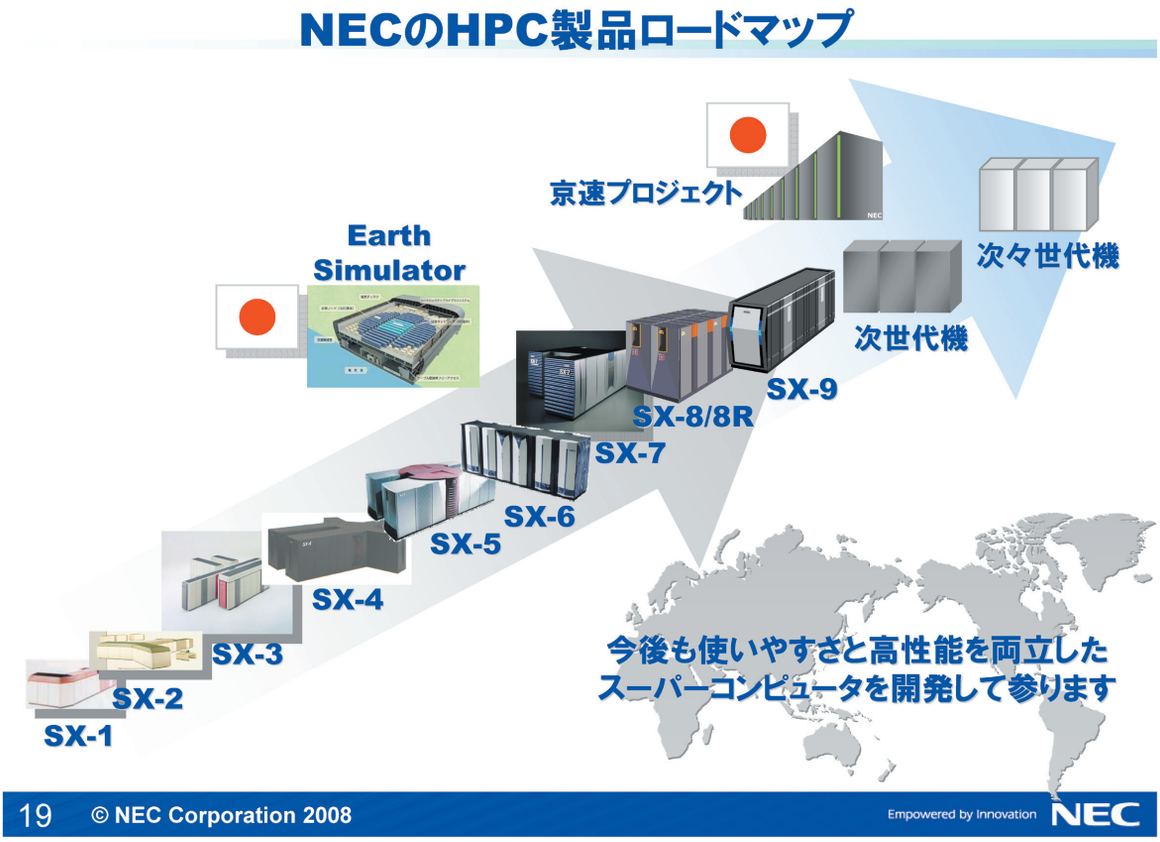
GSIS　RIEC

超高速演算方式
超高速光スイッチ材料開発
超高速通信ワイヤレスデバイス
磁性体エレクトロニクス実装技術
ネットワーク運用管理
ネットワーク認証基盤
インターネット音声通信技術

NEC

- ITプラットフォームBU
  - ハードウェア製品開発
  - ソフトウェア製品開発
- 官庁・公共・金融・通信ソリューション
  - システム構築
- 中央研究所
  - システムプラットフォーム研
  - システム実装研
  - ナノエレクトロニクス研
  - デバイスプラットフォーム研
  - システムIPコア研

© NEC Corporation 2008



Empowered by Innovation

NEC

東北大学サイバーサイエンスセンター
~新スーパーコンピュータシステムSX-9~
~全国共同利用施設としての活動とサイバーサイエンスを推進する全国共同利用・共同研究拠点形成に向けて~

小林広明
センター長
東北大学サイバーサイエンスセンター
koba@isc.tohoku.ac.jp

SX-9披露式典・SENAC 50周年記念式典
2008年11月14日

東北大学

新スーパーコンピュータシステムSX-9
~システム概要とその性能評価~

東北大学

東北大学

サイバーサイエンスセンターの歴史

- 1969年日本で2番目の大型計算機センターとして設立
  - 汎用大型計算機の運用
- 1985年よりスーパーコンピュータサービスを開始
  - 大規模科学計算システムとしてベクトル型のスーパーコンピュータを導入・運用


SENAC-1 in 1958

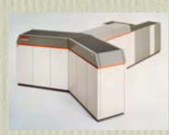


First Computer in 1969

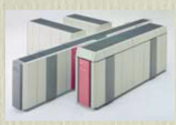

ACOS 1000 in 1982


SX-1 in 1985


SX-4 in 1998


SX-2 in 1989


SX-7 in 2003

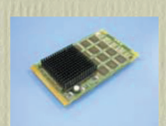

SX-3 in 1994


SX-7C in 2006

東北大学サイバーサイエンスセンター　3

東北大学

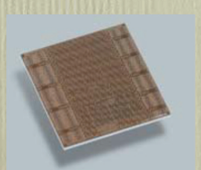
新スーパーコンピュータシステムSX-9の導入

2008年3月
世界初の導入

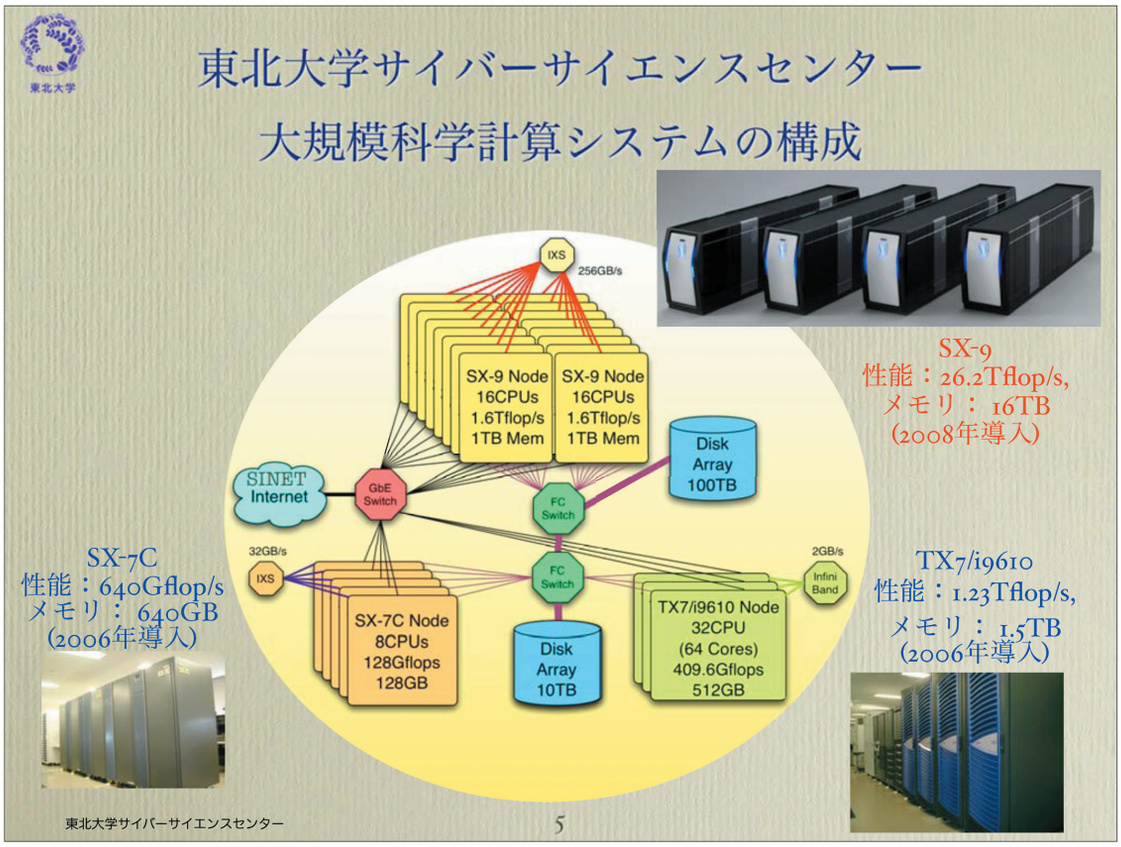







東北大学サイバーサイエンスセンター　4

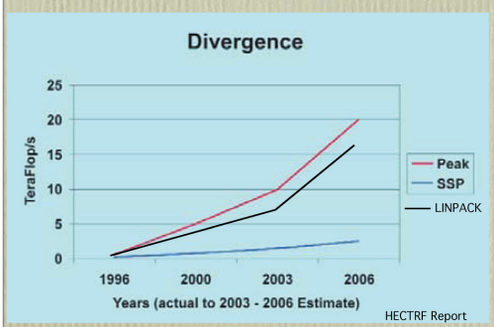




		SX-7 (2003年)	SX-9 (2008年)	向上率
プロセッサ単位	動作周波数	1.1GHz	3.2GHz	2.9x
	演算性能	8.83Gflop/s	102.4Gflop/s	11.6x
	メモリデータ転送性能	35.32GB/s	256GB/s	7.3x
ノード単位	演算性能	282Gflop/s	1.6Tflop/s	5.8x
	メモリ容量	256GB	1TB	4x
	メモリデータ転送性能	1.13TB/s	4TB/s	3.5x
	メモリバンク数	16K	32K	2.0x
	ノード間通信性能	32G/s*	256GB/s	8.0x
システム全体	演算性能	2.1Tflop/s	26.2Tflop/s	12.5x
	メモリ容量	2TB	16TB	8x

HPC チャレンジベンチマークによる性能評価

LINPACK性能(Top500ランキング)と実アプリ実行時の実効性能との乖離



新しい性能評価指標HPCCの誕生

- HPCSプログラム（2010年）の目指す「高生産性ｺﾝﾋﾟｭｰﾀｼｽﾃﾑ」の性能評価を狙った新ベンチマーク
- 米国政府(DoD/DARPA)からの資金援助
- LINPACK開発者のJack Dongarra博士（ﾃﾈｼｰ大学）を中心に開発中
- LINPACKによる演算能力(flop/s)計測に加えて、メモリバンド幅およびネットワーク性能、基本カーネル性能を含み、実際のアプリケーションを意識した、多面的な計測指標を提供
- ７カテゴリ、28の詳細項目から構成
- 日本からは東北大(NEC SX-7)が2004年に初登録
  - ☑ 16項目で世界最高性能を達成

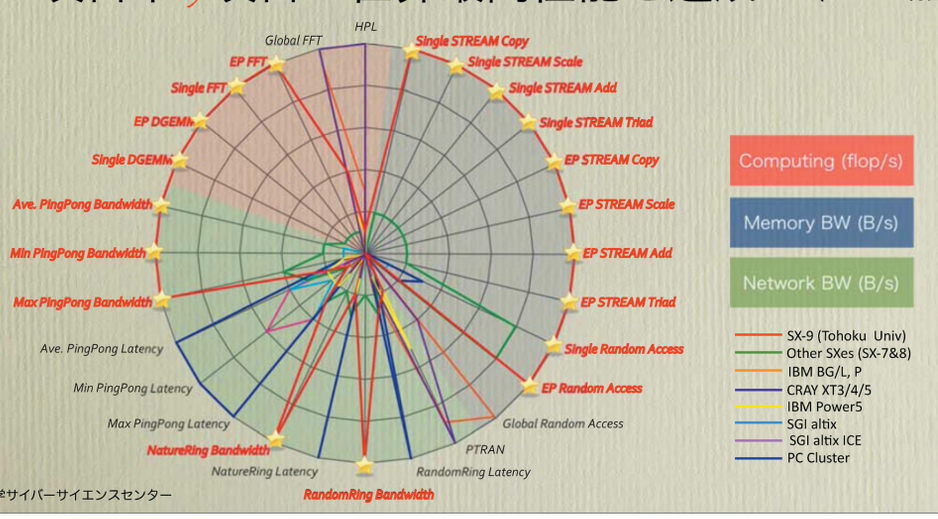
DARPA HPCCHALLENGE HPCS

東北大学サイバーサイエンスセンター

DARPA HPCCHALLENGE HPCS

HPCチャレンジベンチマーク結果

28 項目中19項目で世界最高性能を達成！ (2008.11.18現在)



東北大学サイバーサイエンスセンター

G-FFT の結果:東北大SX-9の高い実効性能

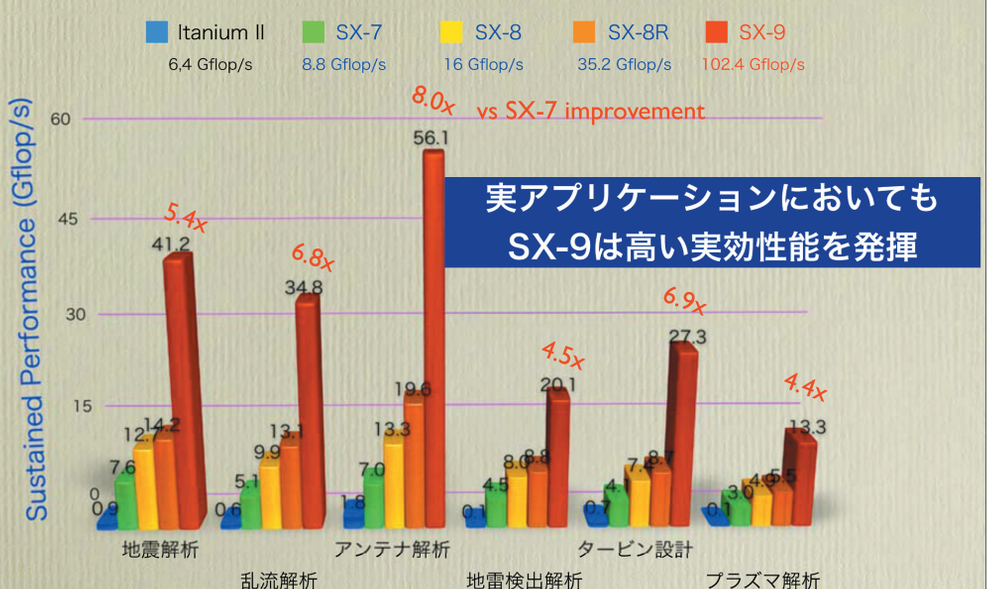
(As of 2008.11.18)

RANK	System	Institution	Peak Perf. (Tflop/s)	CPUs (Cores)	G-FFT Results (Tflop/s)	Efficiency
1	Cray XT5	Oak Ridge National Lab.	1381.6	37544 (150176)	5.8	0.4%
2	BlueGene/P	Argonne National Lab.	557	32768 (131072)	5.1	0.9%
3	Red/Storm/XT3	Sandia National Lab.	124.4	12960 (25920)	2.9	2.3%
4	SX-9	Tohoku Univ.	26.2	256 (256)	2.3	9.1%

52.7x　587x　Only 2.5x!　23x

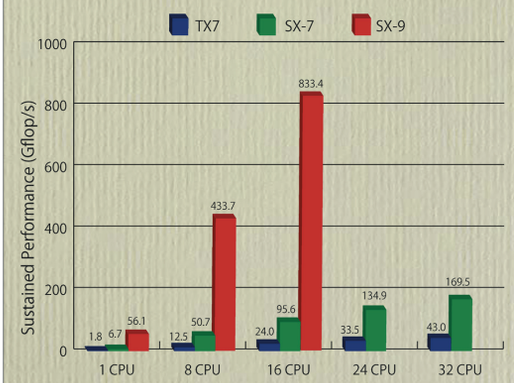
東北大学サイバーサイエンスセンター　9

実アプリケーションによる性能評価 (1-CPU)

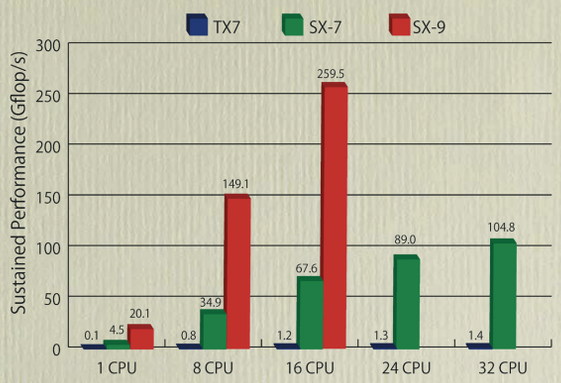


東北大学サイバーサイエンスセンター　10

実アプリケーションによる性能評価
(1ノード性能)



Antenna

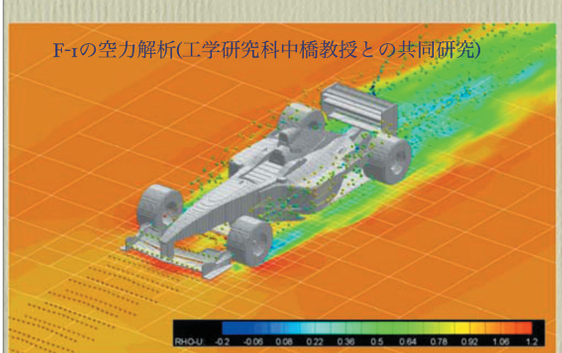


Land Mine

ノード内の高いスケーラビリティ

東北大学サイバーサイエンスセンター　11

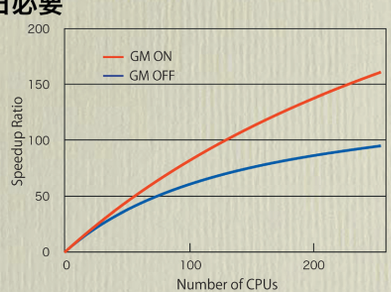
実アプリケーションによる性能評価
(16ノード性能)



- **99.9 % のベクトル化率**
- **2億セルの計算を実現**
- **256CPU（16ノード)で161倍の性能向上率を達成**
- **SX-9 1CPUで6日、16ノードで50分の計算時間**
- **ItaniumIIプロセッサ(1CPU)では128日必要**

TX-7/i9610スカラ機との比較

	TX7(Itanium)		SX-9		
Cores	1	64	1	16	256
Peak Perf.	6.4GF (1x)	409.GF (64x)	102.G (16x)	1.6TF (256x)	26TF (4096x)
Sustained Speedup	1x	36x	21x	316x	3460x

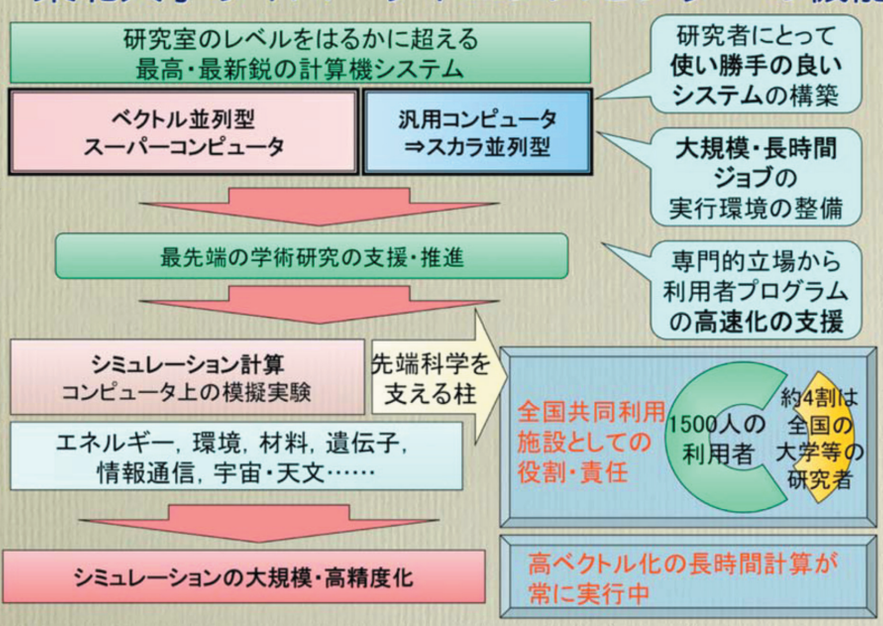


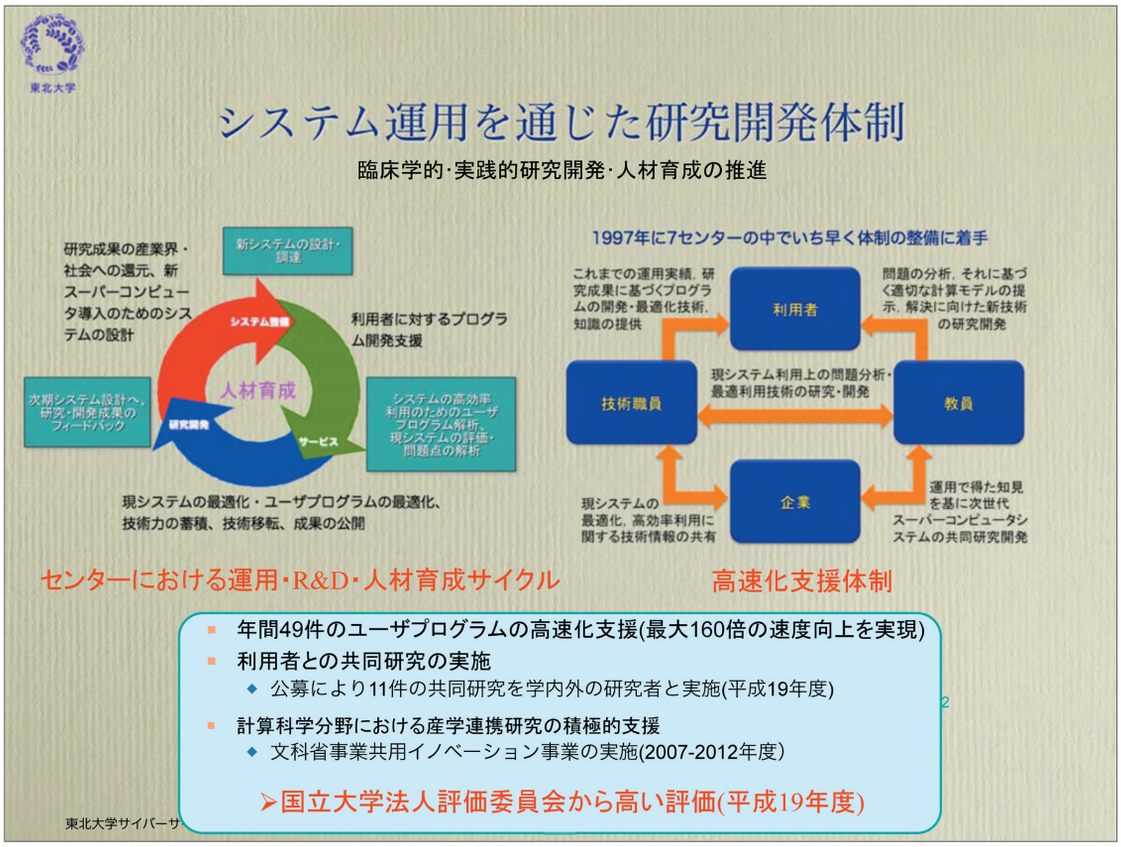
東北大学サイバーサイエンスセンター　12

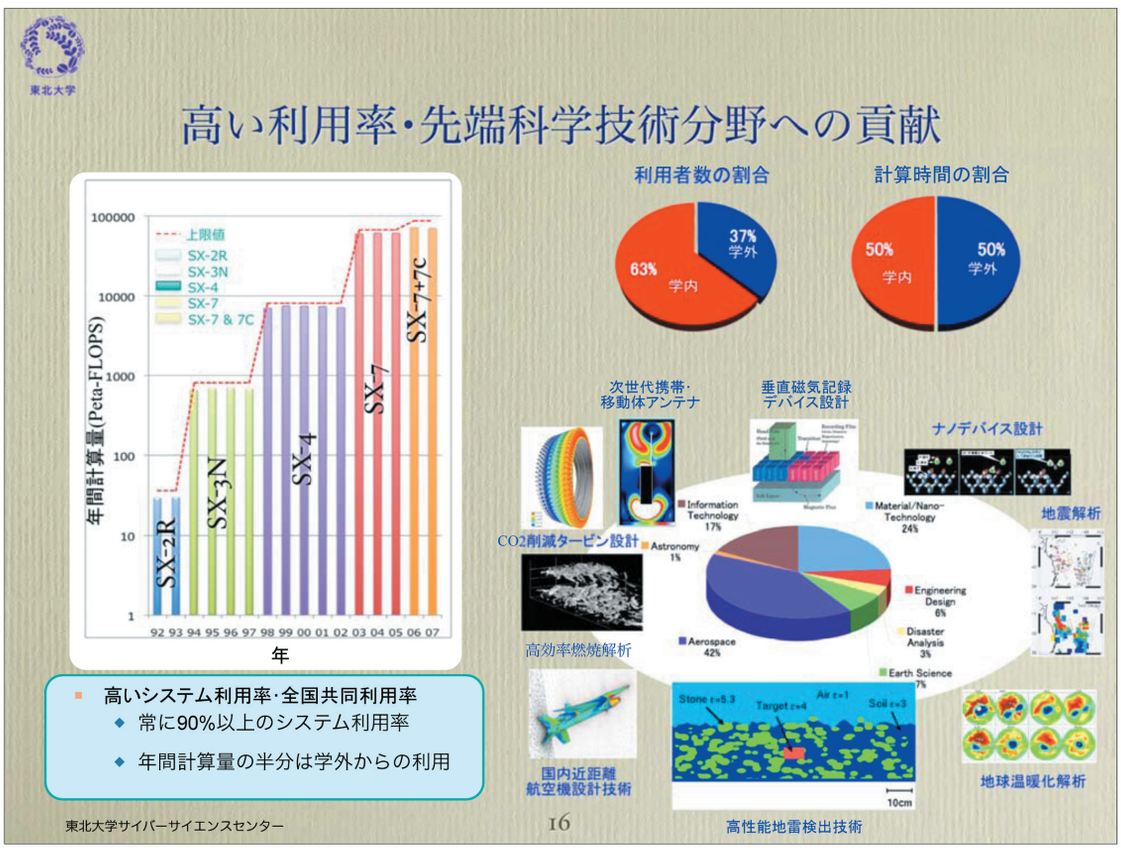
サイバーサイエンスセンター
大規模科学計算システムの運用・研究開発

東北大学

高性能計算に関する全国共同利用研究施設としての東北大学サイバーサイエンスセンターの機能

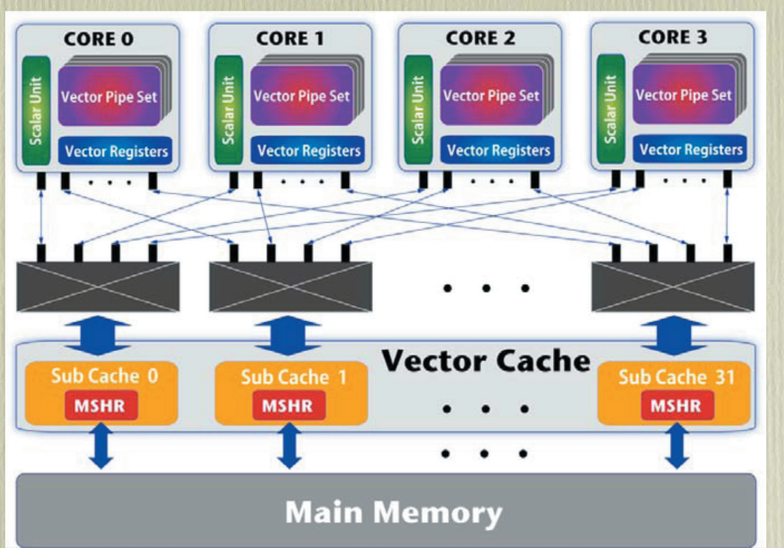



東北大学
システム運用を通じた研究開発体制
臨床学的·実践的研究開発·人材育成の推進
研究成果の産業界・社会への還元、新スーパーコンピュータ導入のためのシステムの設計
新システムの設計・調達
利用者に対するプログラム開発支援
システム整備
人材育成
サービス
研究開発
次期システム設計へ、研究・開発成果のフィードバック
システムの高効率利用のためのユーザプログラム解析、現システムの評価・問題点の解析
現システムの最適化・ユーザプログラムの最適化、技術力の蓄積、技術移転、成果の公開
1997年に7センターの中でいち早く体制の整備に着手
これまでの運用実績，研究成果に基づくプログラムの開発・最適化技術，知識の提供
利用者
問題の分析，それに基づく適切な計算モデルの提示，解決に向けた新技術の研究開発
技術職員
現システム利用上の問題分析・最適利用技術の研究・開発
教員
企業
現システムの最適化，高効率利用に関する技術情報の共有
運用で得た知見を基に次世代スーパーコンピュータシステムの共同研究開発
センターにおける運用·R&D·人材育成サイクル
高速化支援体制
年間49件のユーザプログラムの高速化支援(最大160倍の速度向上を実現)
利用者との共同研究の実施
公募により11件の共同研究を学内外の研究者と実施(平成19年度)
計算科学分野における産学連携研究の積極的支援
文科省事業共用イノベーション事業の実施(2007-2012年度)
➢国立大学法人評価委員会から高い評価(平成19年度)
東北大学サイバーサ


東北大学
高い利用率·先端科学技術分野への貢献
年間計算量(Peta-FLOPS)
上限値
SX-2R
SX-3N
SX-4
SX-7
SX-7 & 7C
92 93 94 95 96 97 98 99 00 01 02 03 04 05 06 07
年
利用者数の割合
37% 学外
63% 学内
計算時間の割合
50% 学内
50% 学外
次世代携帯·移動体アンテナ
垂直磁気記録デバイス設計
ナノデバイス設計
CO2削減タービン設計
高効率燃焼解析
地震解析
Information Technology 17%
Material/Nano-Technology 24%
Astronomy 1%
Engineering Design 6%
Disaster Analysis 3%
Earth Science 7%
Aerospace 42%
国内近距離航空機設計技術
高性能地雷検出技術
地球温暖化解析
高いシステム利用率·全国共同利用率
常に90%以上のシステム利用率
年間計算量の半分は学外からの利用
東北大学サイバーサイエンスセンター
16

東北大学

次世代情報基盤の要素技術の研究開発
-次世代ベクトルプロセッサ研究開発-



A.Musa, Y.Sato, T.Soga, R. Egawa, H. Takizawa,H. Kobayashi,
“Caching for A Chip Multi Vector Processor,” To be presented at SC08, 2008.

東北大学

国際研究交流・成果発表

- 国際共同研究の推進
  - スタンフォード大学およびシュッツトガルト大学の研究者との高性能計算に関する国際共同研究の実施
- 国際的な情報発信
  - 国際会議teraflop workshopの主催
    - 毎年秋に東北大で開催
    - 高性能計算に関する国内外の研究者、センター教員、およびセンター利用者による最新の成果発表
    - Springer-Verlagから成果報告書を毎年出版
  - 国際会議SCでの研究展示
    - 東北大学としてサイバーサイエンスセンター・流体研・金研との合同研究展示











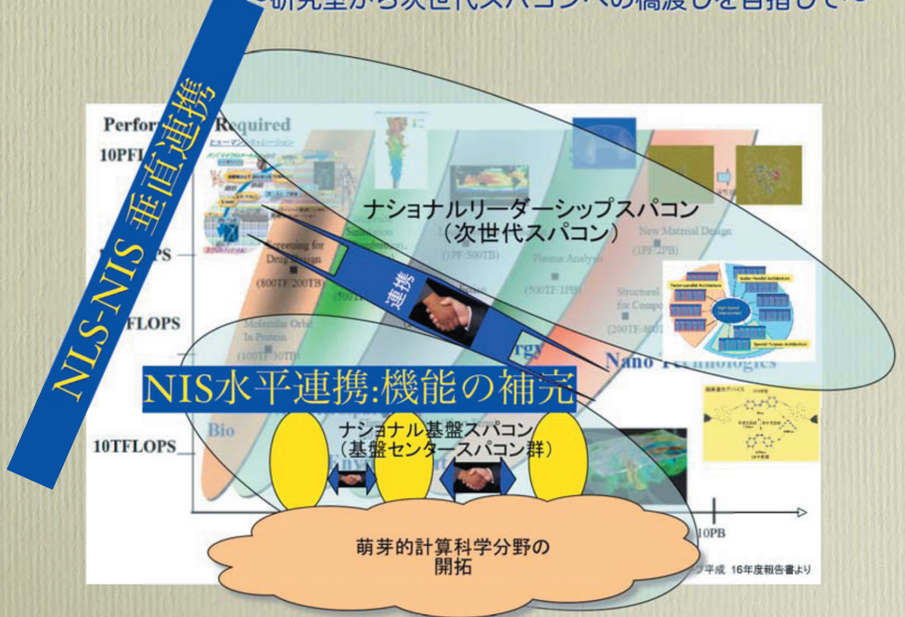
全国共同利用・共同研究拠点形成に向けて

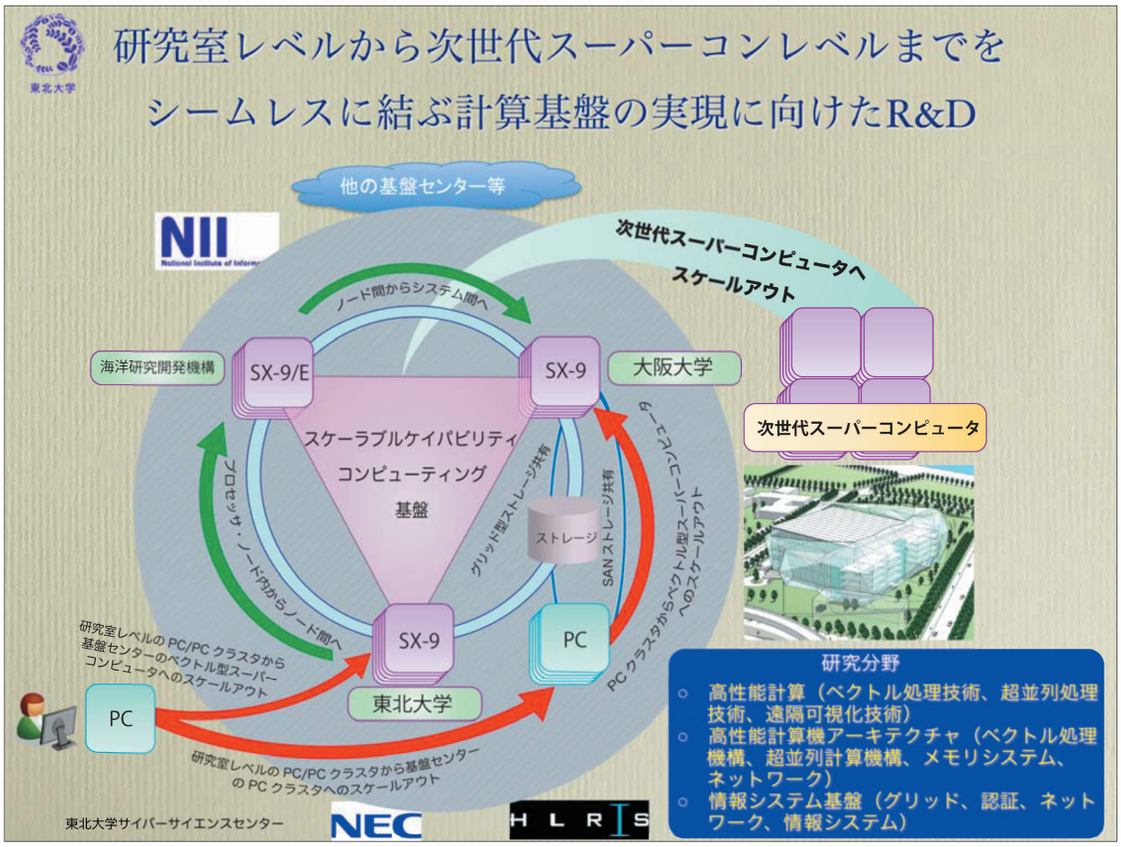
東北大学

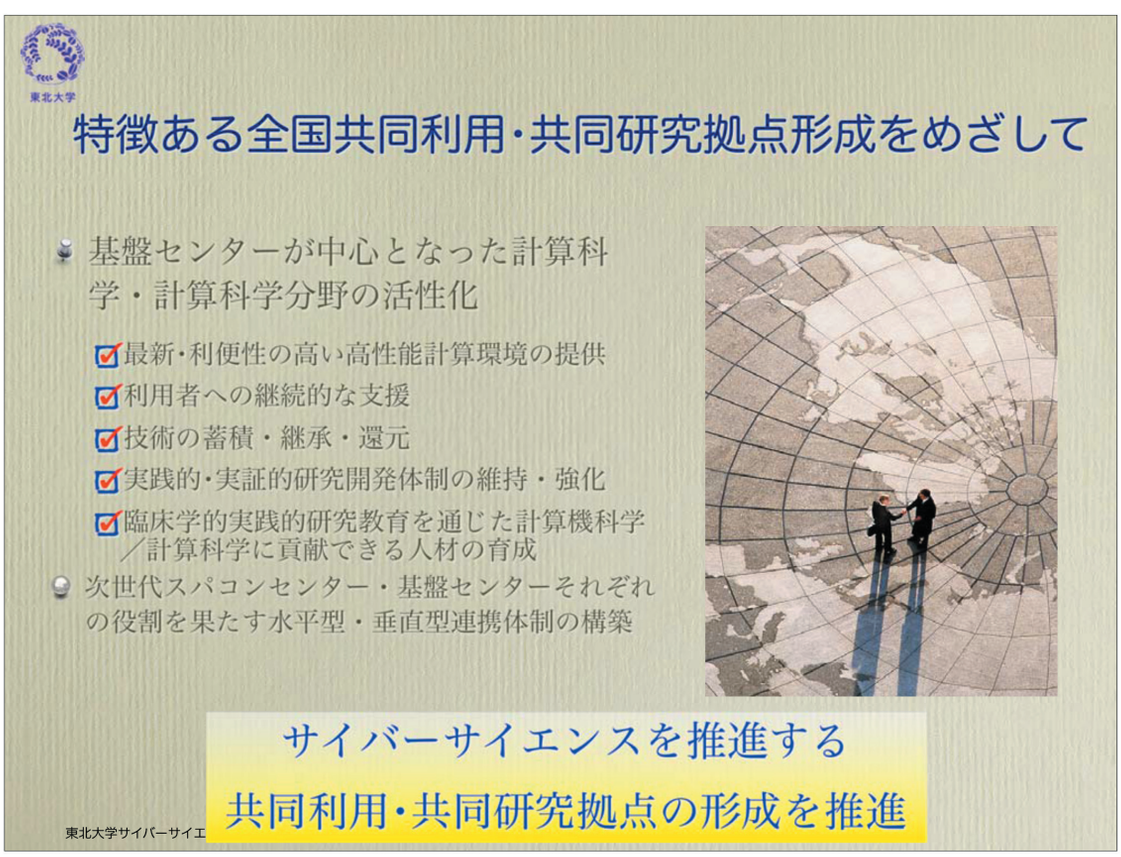
東北大学

基盤センター連携・次世代スパコン連携の強化

～研究室から次世代スパコンへの橋渡しを目指して～




研究室レベルから次世代スーパーコンレベルまでを
シームレスに結ぶ計算基盤の実現に向けたR&D
他の基盤センター等
NII
次世代スーパーコンピュータへ
スケールアウト
ノード間からシステム間へ
海洋研究開発機構
SX-9/E
SX-9
大阪大学
次世代スーパーコンピュータ
スケーラブルケイパビリティ
コンピューティング
基盤
プロセッサ・ノード内からノード間へ
グリッド型ストレージ共有
ストレージ
SANストレージ共有
PCクラスタからベクトル型スーパーコンピュータへのスケールアウト
研究室レベルのPC/PCクラスタから
基盤センターのベクトル型スーパー
コンピュータへのスケールアウト
SX-9
PC
PC
東北大学
研究室レベルのPC/PCクラスタから基盤センター
のPCクラスタへのスケールアウト
東北大学サイバーサイエンスセンター
NEC
HLRIS
研究分野
高性能計算（ベクトル処理技術、超並列処理技術、遠隔可視化技術）
高性能計算機アーキテクチャ（ベクトル処理機構、超並列計算機構、メモリシステム、ネットワーク）
情報システム基盤（グリッド、認証、ネットワーク、情報システム）


特徴ある全国共同利用・共同研究拠点形成をめざして
基盤センターが中心となった計算科学・計算科学分野の活性化
最新・利便性の高い高性能計算環境の提供
利用者への継続的な支援
技術の蓄積・継承・還元
実践的・実証的研究開発体制の維持・強化
臨床学的実践的研究教育を通じた計算機科学／計算科学に貢献できる人材の育成
次世代スパコンセンター・基盤センターそれぞれの役割を果たす水平型・垂直型連携体制の構築
サイバーサイエンスを推進する
共同利用・共同研究拠点の形成を推進



HPC チャレンジベンチマーク

LINPACK 性能（TOP500 ランキング）と実アプリケーション実行時の実効性能との乖離

新しい性能評価指標 HPCC の誕生

- HPCS プログラム (2010 年) の目指す「高生産性コンピュータシステム」の性能評価を狙った新ベンチマーク
- LINPACK 開発者の Jack Dongarra 博士（テネシー大学）を中心に開発
- 米国政府 (DoD/DARPA) からの資金援助

HPC チャレンジベンチマークの特長

・LINPACK による演算能力 (flop/s) 計測に加えて，メモリバンド幅およびネットワーク性能，基本カーネル性能を含み，実際のアプリケーションを意識した多面的な計測指標を提供

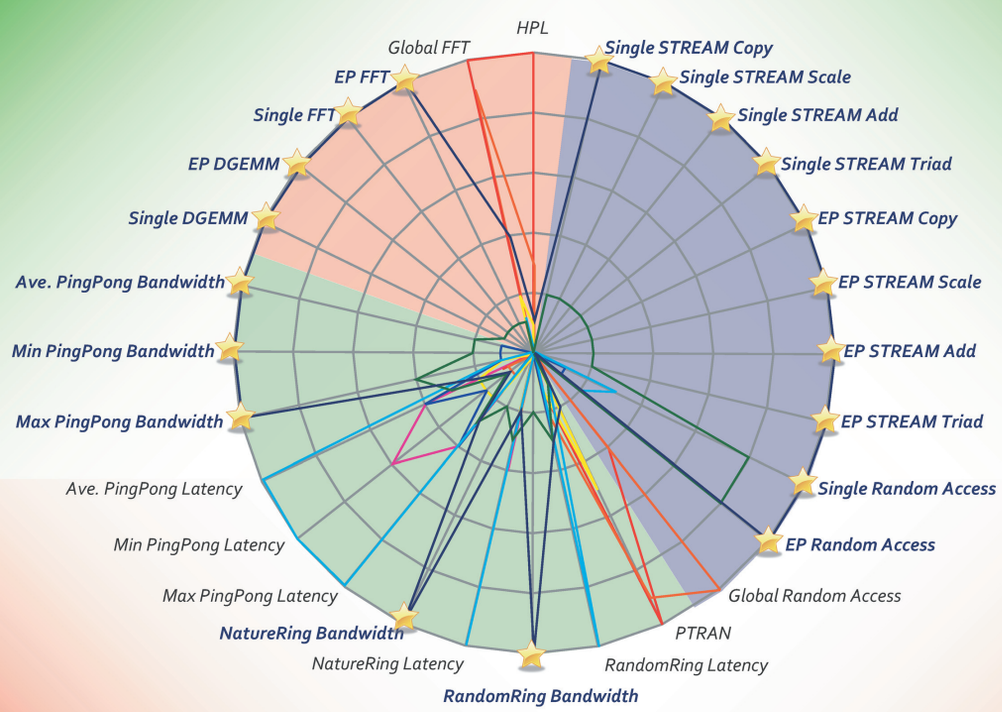
・7 カテゴリ，28 項目から構成

演算能力
　HPL, DEGEMM
メモリバンド幅
　STREAM, Random Access
ネットワーク性能
　PTRANS, Communication BW and latency
基本カーネル性能
　FFTE

・日本からは東北大学 (NEC SX-7) が 2004 年に初登録

16 項目で世界最高性能を達成

SX-9 評価結果 (2008 年 11 月 19 日現在)



28 項目中 19 項目で世界最高性能を達成



Cyberscience Center, Tohoku University　URL : http://www.isc.tohoku.ac.jp/english/　E-mail : uketuke@isc.tohoku.ac.jp

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SX-9導入披露＆
SENAC完成50周年記念式典

スーパーコンピュータの技術開発と次世代スーパーコンピュータプロジェクト

平成20年11月14日

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
プロジェクトリーダ
渡辺　貞

1

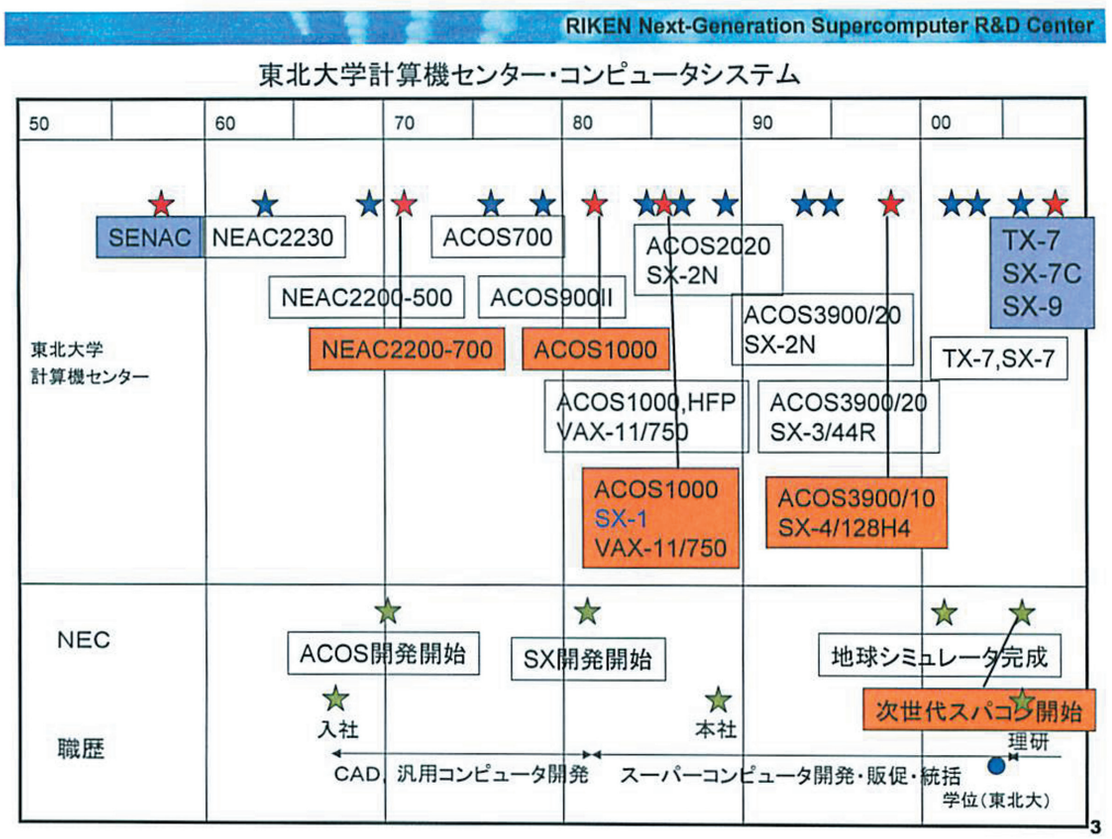
RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

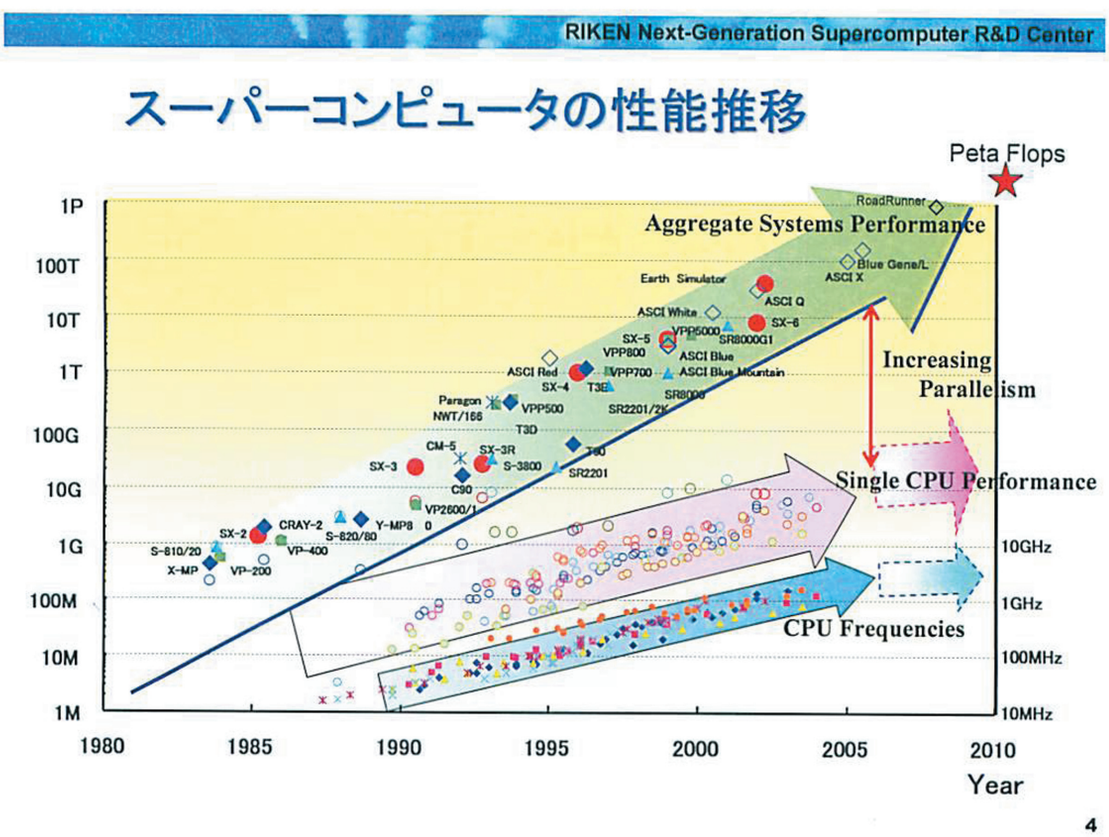
内容

- スーパーコンピュータの技術開発
- 次世代スーパーコンピュータプロジェクト

（資料提供：NEC）

2


RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center
東北大学計算機センター・コンピュータシステム
50
60
70
80
90
00
SENAC
NEAC2230
ACOS700
ACOS2020
SX-2N
TX-7
SX-7C
SX-9
NEAC2200-500
ACOS900II
ACOS3900/20
SX-2N
東北大学
計算機センター
NEAC2200-700
ACOS1000
TX-7,SX-7
ACOS1000,HFP
VAX-11/750
ACOS3900/20
SX-3/44R
ACOS1000
SX-1
VAX-11/750
ACOS3900/10
SX-4/128H4
NEC
ACOS開発開始
SX開発開始
地球シミュレータ完成
次世代スパコン開始
入社
本社
理研
職歴
CAD, 汎用コンピュータ開発
スーパーコンピュータ開発・販促・統括
学位(東北大)
3


RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center
スーパーコンピュータの性能推移
Peta Flops
Aggregate Systems Performance
Increasing
Parallelism
Single CPU Performance
CPU Frequencies
RoadRunner
Blue Gene/L
ASCI X
Earth Simulator
ASCI Q
ASCI White
SX-6
VPP5000
SR8000G1
SX-5
VPP800
ASCI Blue
ASCI Red
VPP700
ASCI Blue Mountain
SX-4
T3E
SR8000
Paragon
NWT/166
VPP500
SR2201/2K
T3D
CM-5
SX-3R
T90
SX-3
S-3800
SR2201
C90
VP2600/1
SX-2
CRAY-2
Y-MP8
S-820/80
S-810/20
VP-400
X-MP
VP-200
1P
100T
10T
1T
100G
10G
1G
100M
10M
1M
10GHz
1GHz
100MHz
10MHz
1980
1985
1990
1995
2000
2005
2010
Year
4

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

70年代と現在のスーパーコンピュータ



Cray-1（1976）



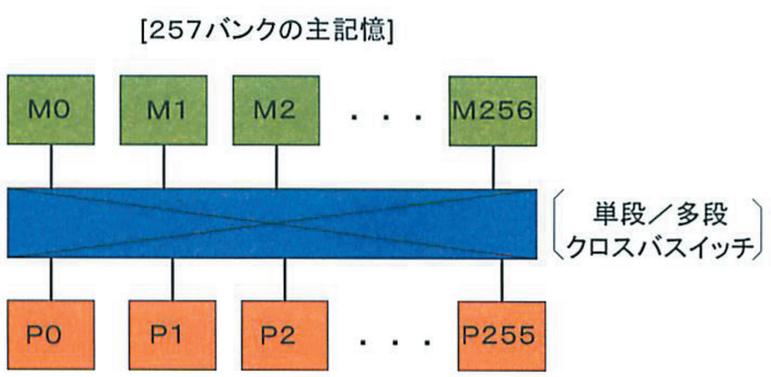
地球シミュレータ（2002）

Sourced from http://www.thocp.net/hardware/cray_1.htm

5

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

最初に検討したシステム

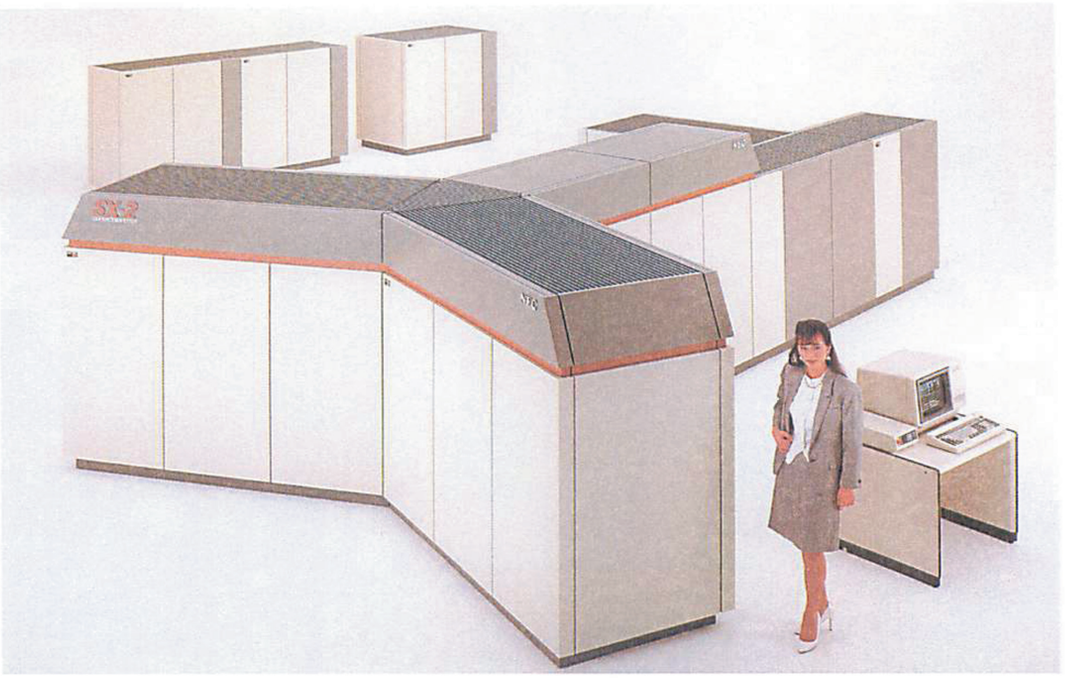


コンフリクトフリー・並列処理システム

6

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

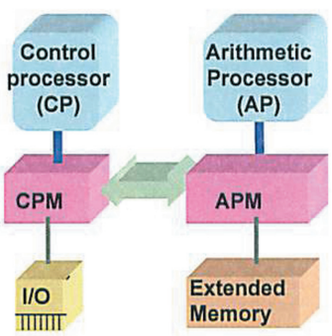
SX-2



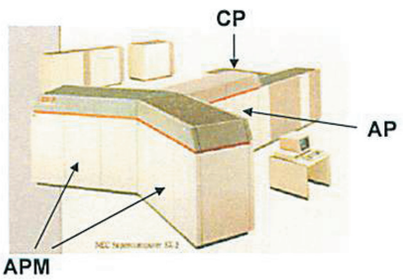
7

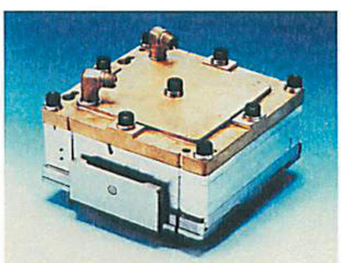
RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SX-1/SX-2 システム構成



- Heterogeneous Multiprocessing Architecture
- 1.3GF Peak Vector Performance
- 1GB(APM) + 64MB(CPM) Memory Capacity (APM:SRAM, CPM:DRAM)
- 11GB/s Memory bandwidth
- 192MB/s I/O Bandwidth
- Power Consumption 160kVA
- Space 6.4m*4.3m



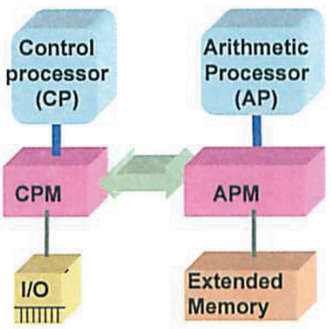


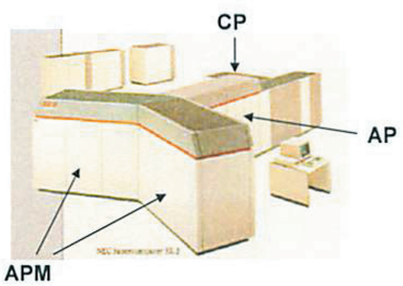
Liquid Cooling Module

8

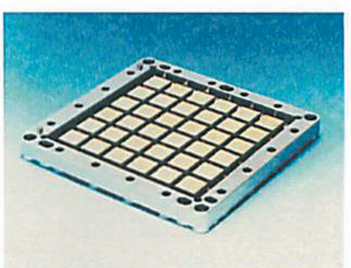
RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SX-1/SX-2 システム構成





- Heterogeneous Multiprocessing Architecture
- 1.3GF Peak Vector Performance
- 1GB(APM) + 64MB(CPM) Memory Capacity (APM:SRAM, CPM:DRAM)
- 11GB/s Memory bandwidth
- 192MB/s I/O Bandwidth
- Power Consumption 160kVA
- Space 6.4m*4.3m



Multi Chip Package

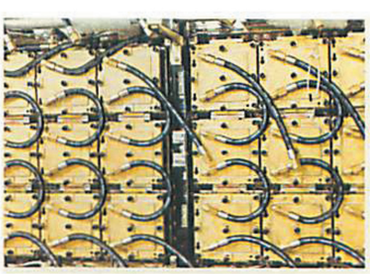
9

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SX-1/SX-2 システム構成

Control processor (CP)
Arithmetic Processor (AP)
CPM
APM
I/O
Extended Memory
CP
AP
APM

- Heterogeneous Multiprocessing Architecture
- 1.3GF Peak Vector Performance
- 1GB(APM) + 64MB(CPM) Memory Capacity (APM:SRAM, CPM:DRAM)
- 11GB/s Memory bandwidth
- 192MB/s I/O Bandwidth
- Power Consumption 160kVA
- Space 6.4m*4.3m

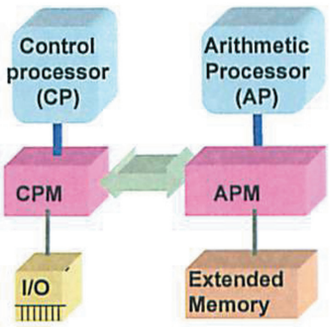


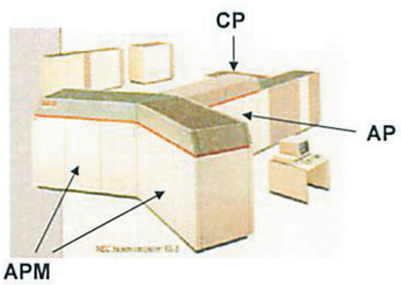
Liquid Cooling Modules

10

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SX-1/SX-2 システム構成





- Heterogeneous Multiprocessing Architecture
- 1.3GF Peak Vector Performance
- 1GB(APM) + 64MB(CPM) Memory Capacity (APM:SRAM, CPM:DRAM)
- 11GB/s Memory bandwidth
- 192MB/s I/O Bandwidth
- Power Consumption 160kVA
- Space 6.4m*4.3m

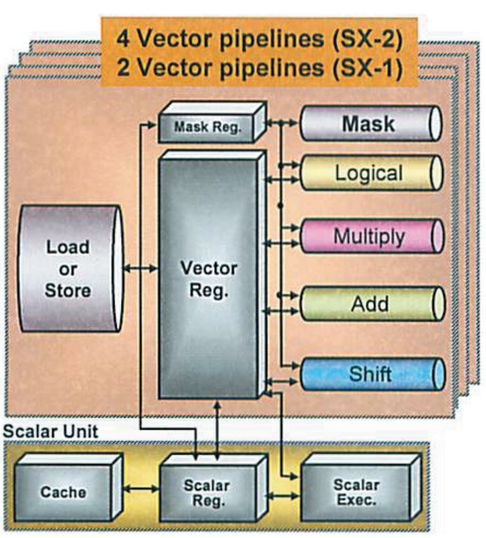


Liquid Cooling Modules

11

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SX-1/SX-2 CPU アーキテクチャ

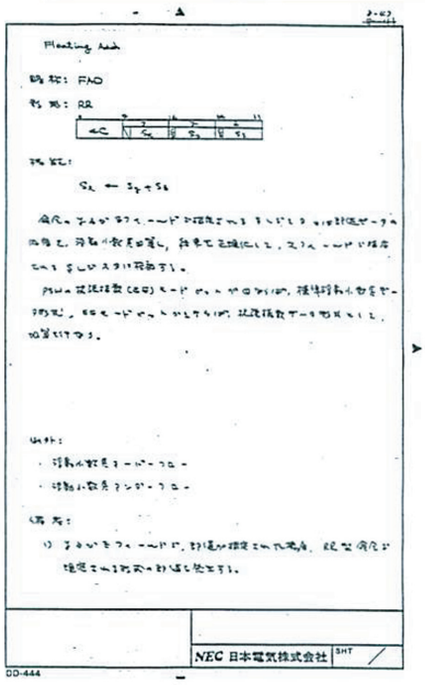


- 6ns Machine Cycle(167MHz)
- Vector Peak Performance 1.3GFLOPS/670MFLOPS
- Memory Bandwidth 11GB/s / 5.3GB/s

12

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

ISA (Instruction Set Architecture)

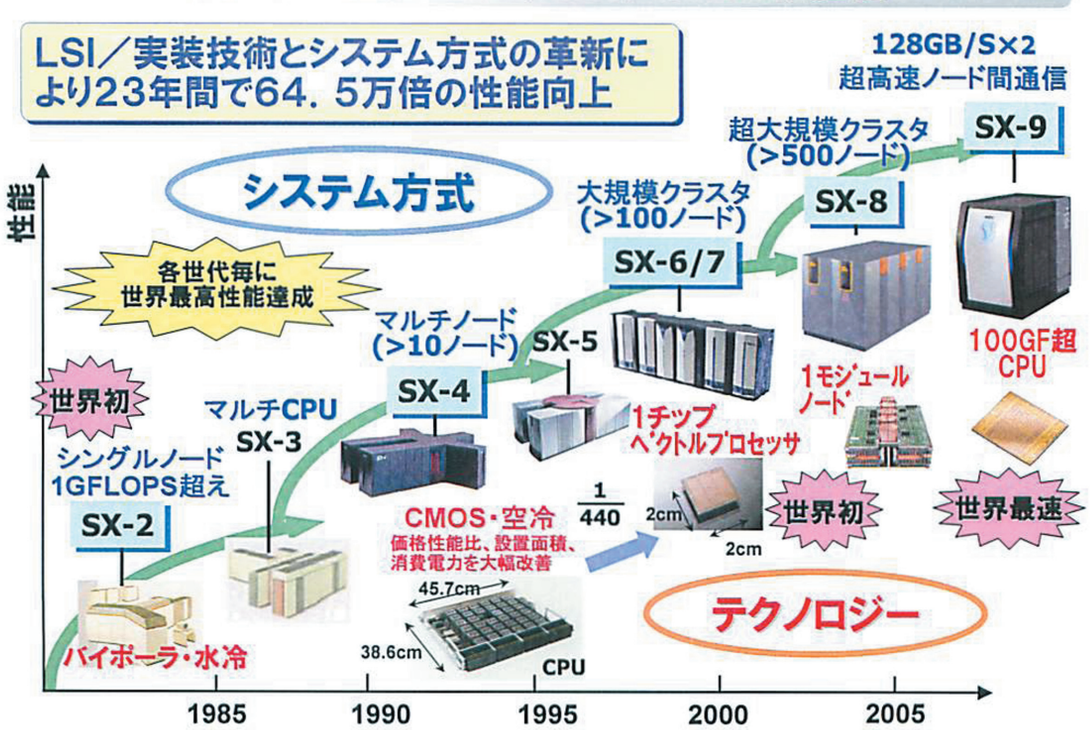


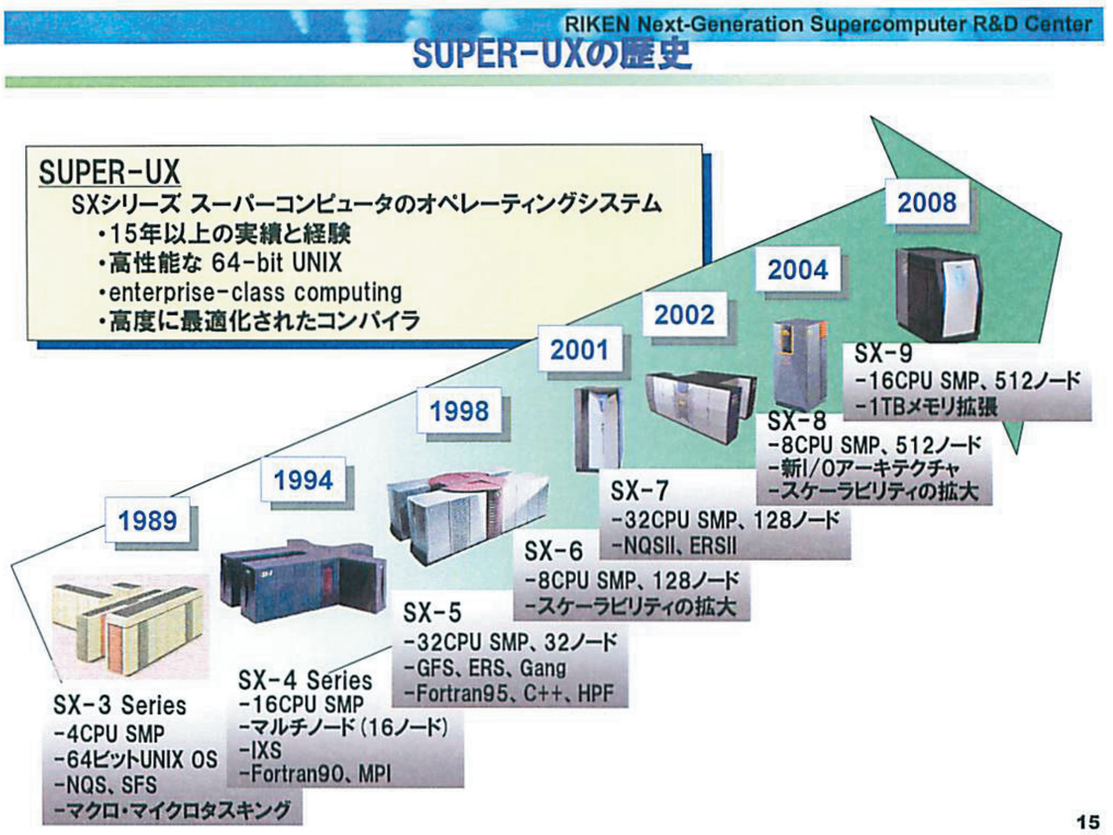
RISC with Vector Feature

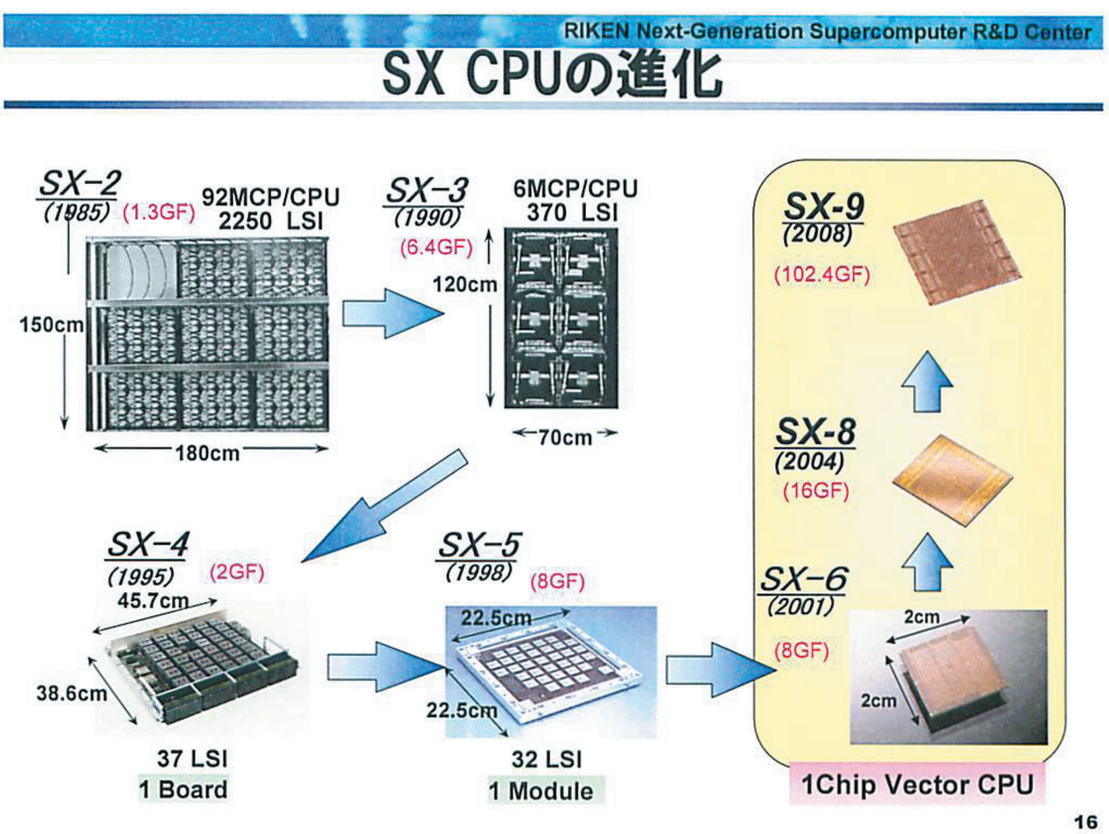
Scalar Register	64b/w x 128
Vector Arithmetic Register	256w x 8
Vector Data Register	256w(reconfigurable) x 32
D/I – Cache	64KB
I – Cache	2KB
Paged Memory Addressing	
Out-of-order Execution	
Branch Prediction	

13

スーパーコンピュータSXシリーズの進化

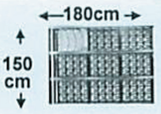
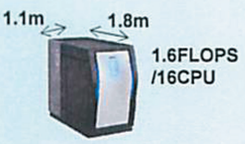



RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center
SUPER-UXの歴史
SUPER-UX
SXシリーズ スーパーコンピュータのオペレーティングシステム
・15年以上の実績と経験
・高性能な 64-bit UNIX
・enterprise-class computing
・高度に最適化されたコンパイラ
2008
2004
2002
2001
1998
1994
1989
SX-9
-16CPU SMP、512ノード
-1TBメモリ拡張
SX-8
-8CPU SMP、512ノード
-新I/Oアーキテクチャ
-スケーラビリティの拡大
SX-7
-32CPU SMP、128ノード
-NQSII、ERSII
SX-6
-8CPU SMP、128ノード
-スケーラビリティの拡大
SX-5
-32CPU SMP、32ノード
-GFS、ERS、Gang
-Fortran95、C++、HPF
SX-4 Series
-16CPU SMP
-マルチノード(16ノード)
-IXS
-Fortran90、MPI
SX-3 Series
-4CPU SMP
-64ビットUNIX OS
-NQS、SFS
-マクロ・マイクロタスキング
15


RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center
SX CPUの進化
SX-2
(1985) (1.3GF)
92MCP/CPU
2250 LSI
150cm
180cm
SX-3
(1990)
(6.4GF)
6MCP/CPU
370 LSI
120cm
70cm
SX-4
(1995)
(2GF)
45.7cm
38.6cm
37 LSI
1 Board
SX-5
(1998)
(8GF)
22.5cm
22.5cm
32 LSI
1 Module
SX-9
(2008)
(102.4GF)
SX-8
(2004)
(16GF)
SX-6
(2001)
(8GF)
2cm
2cm
1Chip Vector CPU
16

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

SXシリーズ23年間の技術革新

	'85(SX-2)	'08(SX-9)	(SX-9/SX-2)
CPU Performance	1.3GFLOPS	102.4GFLOPS	78.8倍
System Performance	1.3GFLOPS	838TFLOPS	64.5万倍
# of CPUs	1	8192	8,192倍
Total Memory Capacity	256MBytes	512TBytes	210万倍
CPU Size			6,750分の1
#of chips per CPU	2,250chips	1chip	2,250分の1
System Size			51,700分の1

17

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

次世代スーパーコンピュータプロジェクトの概要

18

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

国家基幹技術の着実な推進

国家の総合的な安全保障の向上、世界最高の研究機能の実現を目指す国家基幹技術について、国家的目標と長期戦略を明確にして研究開発を推進する。

宇宙輸送システム

我が国が必要な時に宇宙空間に人工衛星等を打ち上げる能力を確保・維持



基幹ロケット「H－ⅡA」

海洋地球観測探査システム

衛星や海洋探査技術による全球的な観測・監視技術の開発を行うとともに、これらの観測データを統合してユーザーに提供



地球深部探査船「ちきゅう」

高速増殖炉サイクル技術

ウラン・プルトニウム等の核燃料の再利用による長期的なエネルギーの安定供給を確保



高速増殖原型炉「もんじゅ」

次世代スーパーコンピュータ

最先端・高性能汎用の次世代スーパーコンピュータ(1秒間に1京回の計算性能)を平成22年度の稼働、平成24年の完成を目指して開発するとともに、利用のためのソフトウェアの開発を推進



次世代スーパーコンピュータ施設のイメージ

X線自由電子レーザー



X線自由電子レーザーの一部

原子レベルの超微細構造や化学反応の超高速動態・変化を瞬時に計測・分析が可能な世界最高性能の研究施設を整備し、欧米に先んじる成果を創出

5

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

「次世代スーパーコンピュータ」プロジェクト

平成２０年度予算　：　１４５　億円
平成１８～２４年度（総事業費）：　１，１５４　億円

１．目的 世界最先端・最高性能の次世代スーパーコンピュータの開発・整備及び利用技術の開発・普及

２．概要

理論、実験と並び、現代の科学技術の方法として確固たる地位を築きつつある計算科学技術をさらに発展させるため、長期的な国家戦略を持って取り組むべき重要技術（国家基幹技術）である「次世代スーパーコンピュータ」を平成２２年度の稼働（平成２４年の完成）を目指して開発する。

今後とも我が国が科学技術・学術研究、産業、医・薬など広汎な分野で世界をリードし続けるべく、

（１）世界最先端・最高性能の「次世代スーパーコンピュータ（注）」の開発・整備

（注）１０ペタFLOPS級
（１ペタFLOPS：1秒間に１千兆回の計算）

（２）次世代スーパーコンピュータを最大限利活用するためのソフトウェアの開発・普及

（３）上記（１）を中核とする世界最高水準のスーパーコンピューティング研究教育拠点（ＣＯＥ）の形成を文部科学省のイニシアティブにより、開発主体（理化学研究所）を中心に産学官の密接な連携の下、一体的に推進する。

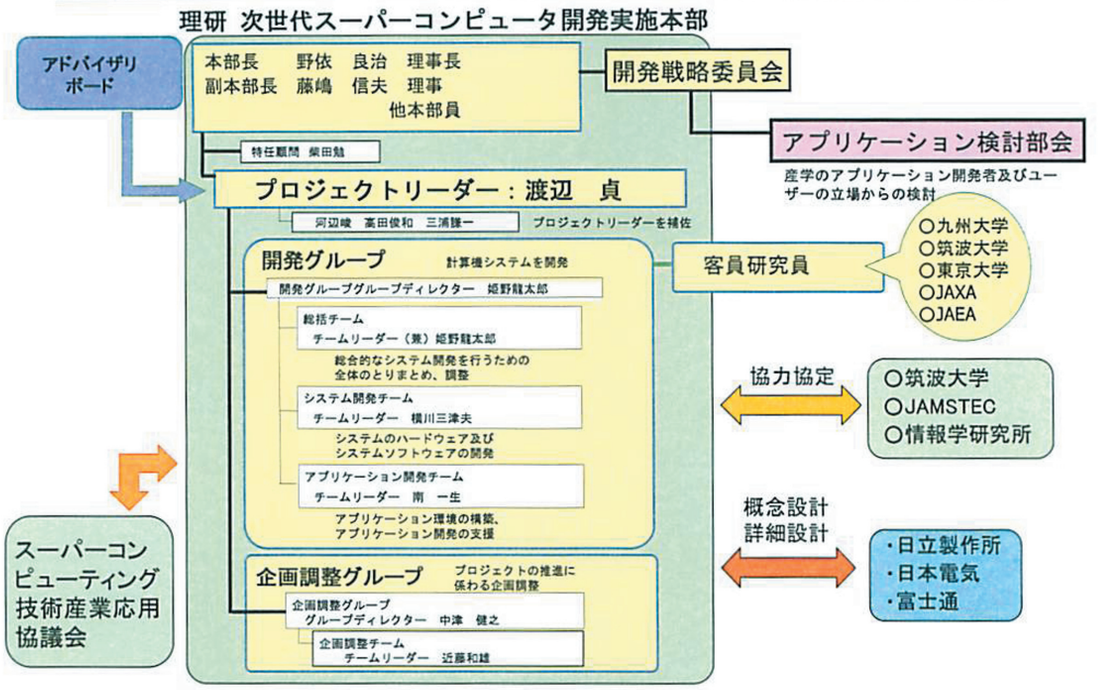
３．体制

（１）開発主体である独立行政法人理化学研究所を中心とした産学連携体制を構築。
（２）特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律を整備し（平成１８年７月施行）、産学官の研究者等に幅広く開かれた共用施設として位置付け。

20

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

開発体制

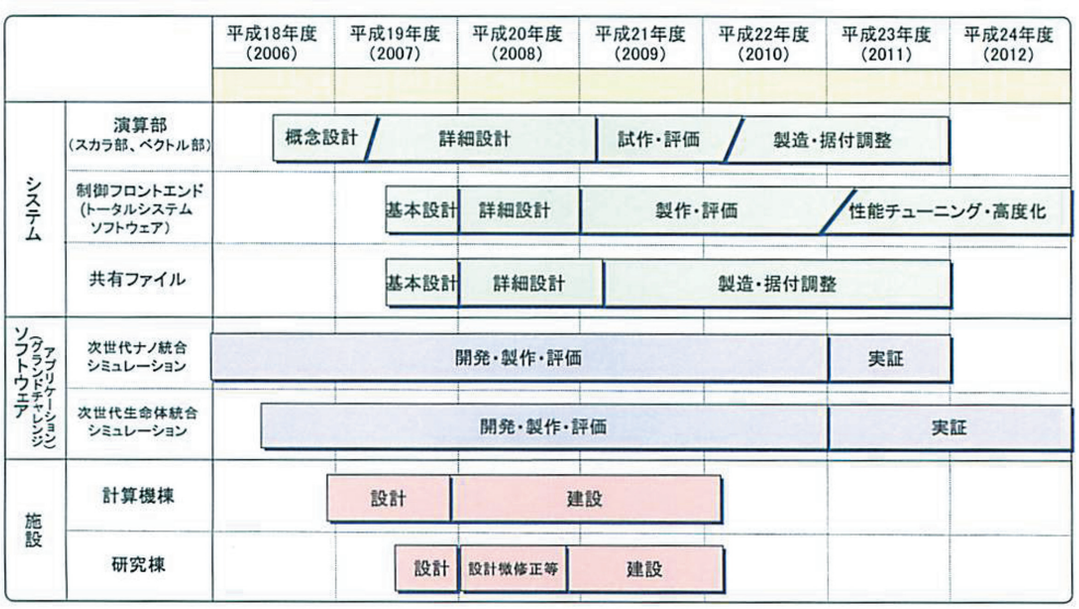


平成19年7月17日現在

21

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

開発日程



22

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

次世代スーパーコンピュータ施設の立地地点





所在地	兵庫県神戸市中央区港島南町7丁目 (ポートアイランド第2期内) ポートアイランド南駅より徒歩約1分 (JR新神戸駅から25分)

23

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

次世代スーパーコンピュータ施設の整備

施設の建設

・平成20年3月着工、平成22年度に完工予定。

整備の基本方針

(1) 次世代スーパーコンピュータの性能を最大限引き出す設備・能力の確保

(2) 世界最高水準のスーパーコンピューティング研究教育拠点(COE)として相応しい研究・教育環境の整備

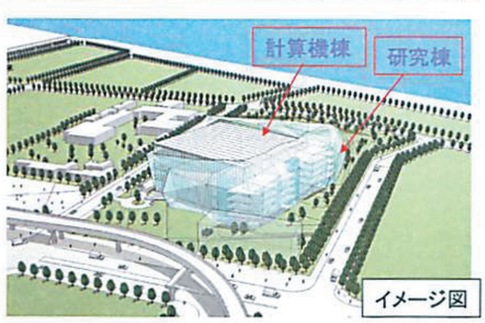
(3) ランニングコストと環境負荷の低減化

施設の特徴

(1) 計算機の性能を常時保証できる床耐荷重及び免震構造とするとともに、必要な電源設備及び冷却設備を整備

(2) 共用施設としての運用上の利便性を高めるとともに、研究交流や多様な知識の融合を促進するため、計算機棟と研究棟を一体的に整備

(3) 廃熱利用の推進や排水処理への配慮などによりランニングコストと環境負荷の低減を実現

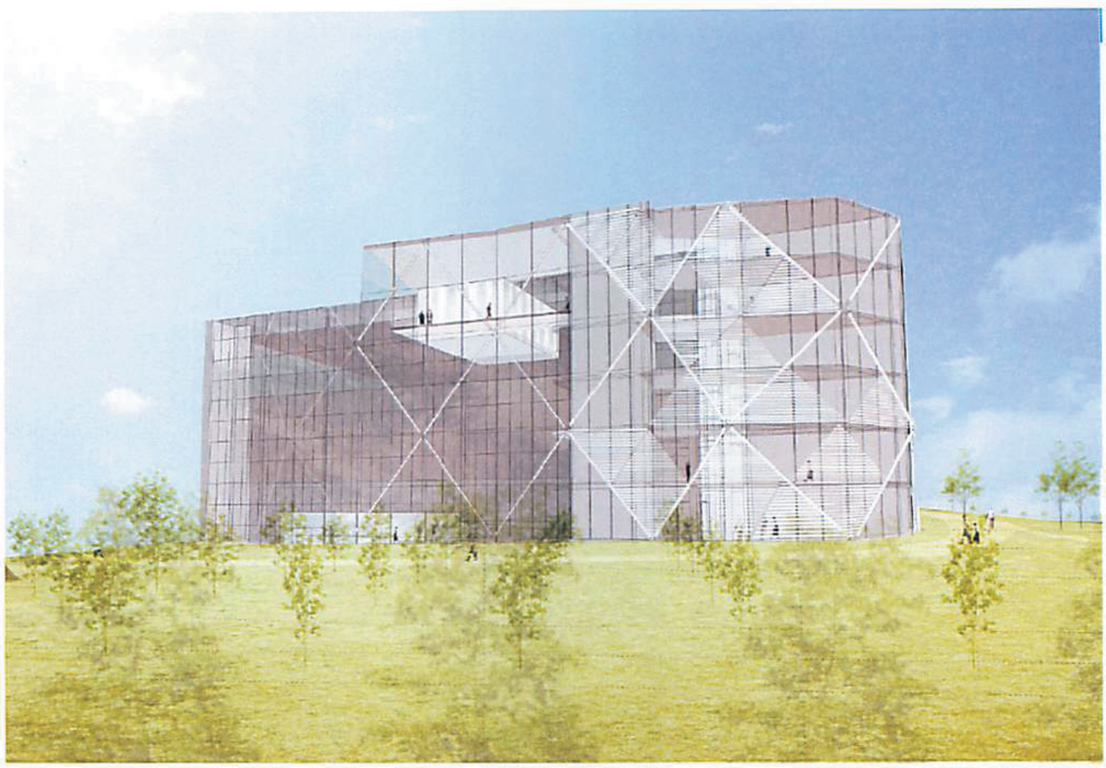


【計算機棟】
○延床面積　約10,500㎡
○建築面積　約4,300㎡
○構造　鉄骨造り地上3階地下1階

【研究棟】
○延床面積　約8,500㎡
○建築面積　約1,900㎡
○構造　鉄骨造り地上6階地下1階

その他、電源を供給する特高受変電設備、計算機棟の空調機を冷却する冷却設備、及び環境負荷低減のためのCGS(自家発電)設備等を設置

24



北からエントランスロビー側を見る

25

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

建屋建設の状況









2008年10月撮影

27

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

次世代スーパーコンピュータを最大限利活用するためのソフトウェアの研究開発（グランドチャレンジアプリケーション）

	ナノテクノロジー分野 （次世代ナノ統合シミュレーション ソフトウェアの研究開発）	ライフサイエンス分野 （次世代生命体統合シミュレーション ソフトウェアの研究開発）
概要	ナノ電子デバイスの設計やバイオ燃料生成用の酵素設計等に役立つシミュレーションソフトウェアを研究開発	タンパク質分子の反応や、細胞・臓器の働きの詳細な解析により、製薬・医療に役立つシミュレーションソフトウェアを研究開発
応用例	10万原子 ナノ電子デバイス 現状 2千原子程度（デバイスの一部）の計算が可能 ⇩ 次世代スパコン 10万原子（デバイス全体）の計算が可能 ⇩ アウトカム 高速、低消費電力のナノ電子デバイスの実現を加速	様々な薬剤候補物質 現状 150年の計算時間 ⇩ 新薬設計 ⇩ 次世代スパコン 6ヶ月（更なる短縮を検討） ⇩ タンパク質の活性部位 アウトカム 新薬候補物質の最適化を効率化し、新薬開発の期間短縮及びコスト削減を実現
体制	分子科学研究所を中核に、東京大学物性研究所、東北大学金属材料研究所、産業技術総合研究所等と連携した研究開発体制を構築	理化学研究所を中核に、東京大学医科学研究所、慶應義塾大学等、13機関と連携した研究開発体制を構築

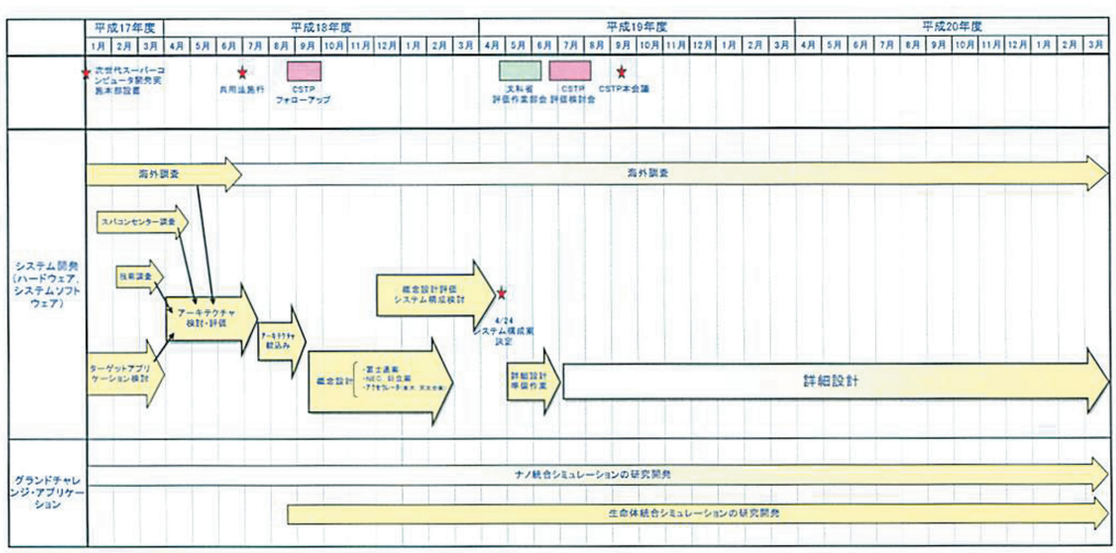
28

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

システム開発

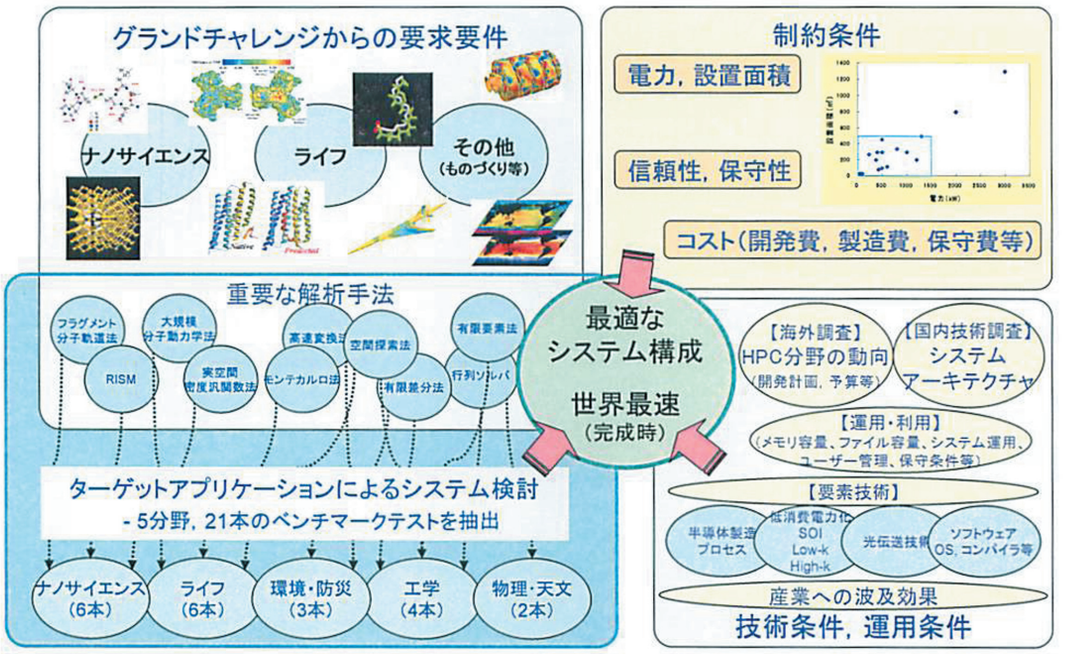
29

システム開発経緯と状況



RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

システム最適化の考え方



RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

システム構成について(概念設計の実施)

【世界最速のシステム】 ⇒1秒間に1京(ケイ＝10の16乗)回の計算性能
(現最速計算機の約36倍)

【 汎用システム 】 ⇒科学技術・産業で用いられる多様なアプリケーションやこれまで不可能だった複雑かつ大規模なシミュレーションが実行可能

【革新的なシステム 】 ⇒先端技術の積極的導入により、画期的な省電力、省スペースを実現
理化学研究所とメーカー3社(NEC、日立、富士通)による共同開発・共同負担により、日本の技術力の総力を結集して開発

[検討経緯]

平成18年4月	理化学研究所において、システム構成案の検討を開始
平成19年4月	NEC・日立及び富士通の提案を基礎に、理化学研究所においてシステム構成案を作成。
平成19年3～6月	文部科学省において、概念設計評価作業部会を設置し、理化学研究所のシステム構成案について評価を実施
平成19年6～9月	総合科学技術会議において評価を実施
平成19年9月	文部科学省及び総合科学技術会議の評価を踏まえ、理化学研究所においてシステム構成を正式決定
平成19～20年度	詳細設計

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

システム構成と特長

＝ 多様なシミュレーションの実行に最適な計算環境を
提供する汎用スーパーコンピュータ ＝

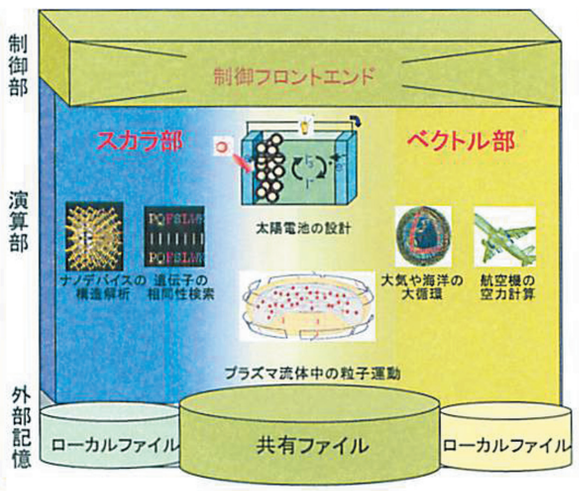
- シミュレーションの特性に応じた最適な演算部で計算を実行
- スカラ部とベクトル部の活用により、従来困難だった複雑かつ大規模なシミュレーションも実行可能

【スカラ型】

・大きなデータを細分化して処理する(ナノデバイスの構造解析や、遺伝子の相同性検索等の計算が得意)
・世界的主流となっている技術

従来のスカラ型計算機
・比較的低速なCPUを多数接続

本システムのスカラ部
・CPUの高速化及び新規ネットワーク技術による超大規模接続の実現



【ベクトル型】

・大きなデータをまとめて処理する(大気や海洋の大循環や、航空機の空力等の計算が得意)
・我が国が強みを持つ技術

従来のベクトル型計算機
・比較的高速なCPUを接続

本システムのベクトル部
・CPUの省電力及び光を用いた革新的ネットワーク技術による大規模接続の実現

33

RIKEN Next-Generation Supercomputer R&D Center

システム開発状況と今後の予定

【システム開発状況】

- 平成19年度
  - 演算部(スカラ部，ベクトル部)
    - ハードウェア ― 基本機能／構成を決定
    - システムソフトウェア ― 基本機能決定
  - 制御フロントエンド部：基本設計を完了
- 平成20年度
  - 演算部(スカラ部，ベクトル部)
    - ハードウェア
      - CPU／ネットワーク用チップの内部論理を設計中
      - 半導体プロセスを評価中
      - 電源，冷却，実装構造を設計中
    - システムソフトウェア
      - ファイルシステム，運用ソフトウェア，言語・コンパイラ，ライブラリ等を設計中
  - 制御フロントエンド部
    - 基本設計に基づく，詳細設計を実施中

【今後の予定】

- 平成21年度 2Q　詳細設計完了
- 平成21年度　試作・評価(ハードウェア：チップ・実装等の試作・評価，ソフトウェア：製作)
- 平成22年度　製造開始(ハードウェア：製造，ソフトウェア：製作・評価)
- 平成22年度－平成24年度　システム搬入，調整・評価，システム統合

34

END

東北大学サイバーサイエンスセンター
SX-9導入披露&SENAC完成50周年記念式典
平成20年11月14日

光通信の最前線
―光ソリトン伝送におけるスパコンの役割を含めて―

中沢　正隆

東北大学　電気通信研究所

〒980-8577 仙台市青葉区片平2－1－1

RIEC
Research Institute of Electrical Communication

講演内容

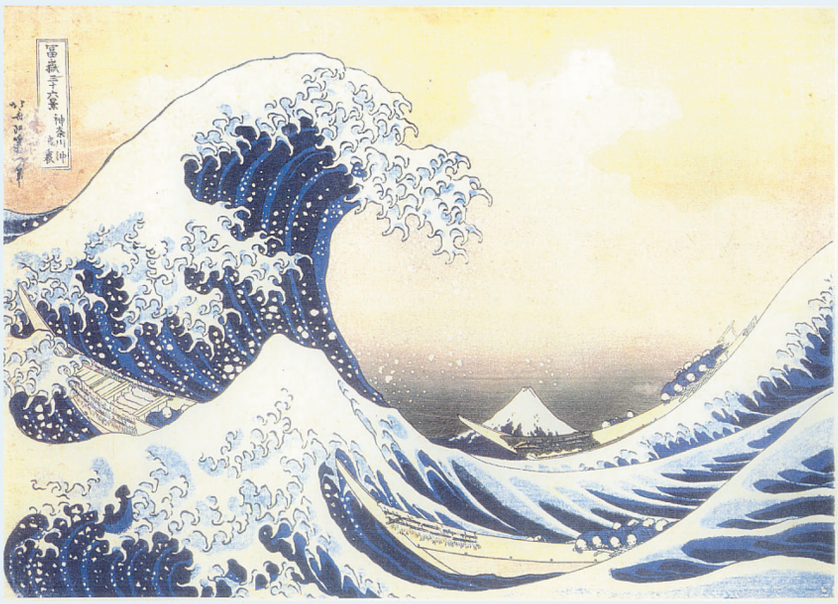
(1) 光ソリトン伝送技術
- ・光ファイバ中のソリトンとは
- ・スプリットステップフーリエ法によるソリトン伝搬の計算機解析

(2) 超高速光伝送技術
- ・ETDM, OTDM伝送技術
- ・時間領域光フーリエ変換を用いた超高速無歪み伝送

(3) 光と無線の融合技術（第2世代コヒーレント光通信）
- ・周波数利用効率拡大のための多値変調技術
- ・周波数安定化レーザを用いたコヒーレントQAM伝送

(4) まとめ

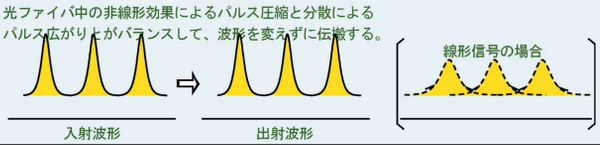
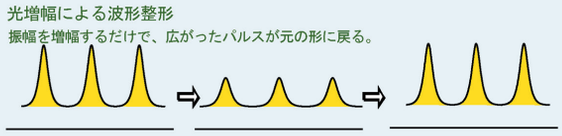
海のソリトン（葛飾北斎、神奈川沖浪裏）



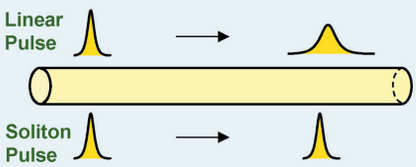
光ソリトンの特徴

ソリトンの発見：浅い水の表面を伝わる孤立波の観測 (solitary wave)の観測 (1834年)
英国人　John Scott-Russel　造船学者・流体力学者
馬に引かれて運河を進んできた船が急に停船した時、船の舳先に盛り上がっていた水が船から離れて前進し始め、しかも形を変えないで進んだ。



光ソリトンの特徴	信号伝送上の利点
無歪みの信号伝搬（無損失の場合） 光ファイバ中の非線形効果によるパルス圧縮と分散によるパルス広がりとがバランスして、波形を変えずに伝搬する。  	・超高速光信号伝送が可能 ・光の領域で自動等化
光増幅による波形整形 振幅を増幅するだけで、広がったパルスが元の形に戻る。  	・電子回路を使用しない全光伝送システムを実現可能 ・超高速フォトニックネットワーク／スイッチングへの応用

光ソリトン (Optical Soliton)



Fiber	Normal Single-Mode Fiber	Dispersion-Shifted Single-Mode Fiber
$P_{N=1}$	0.35 W	2.5~10 mW
	τ=12 ps |D|=16 ps/nm/km n_2=3.2 x 10^{-16}cm^2/W A=1 x 10^{-6} cm^2 λ=1.55 μm	|D|=0.4~1 ps/nm/km A=3~5 x 10^{-7} cm^2

Nonlinearity ⟷ Dispersion

$|u|^2u$ $\quad$ $\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}$

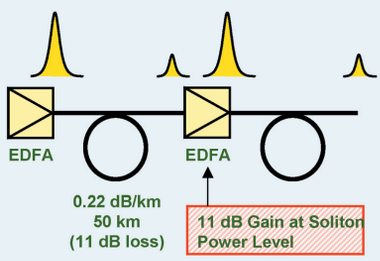
Self Phase Modulation（自己位相変調効果） Group Velocity Dispersion（群速度分散）

Nonlinear Schrödinger Equation
（非線形シュレディンガー方程式）

$$(-i)\frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u$$

Soliton Power $P_{N=1}$

$$P_{N=1} = 0.766\frac{\lambda^3}{\pi c n_2}\frac{|D|}{\tau^2}A$$



EDFA:エルビウム添加光ファイバ増幅器

スプリットステップフーリエ法(SSFM)による非線形シュレディンガー方程式の計算機解析（その1）

スプリットステップフーリエ法 (SSFM: Split Step Fourier Method):
伝搬方向を微小区間に分け、FFTを用いて波形の伝搬を逐次求めていく方法

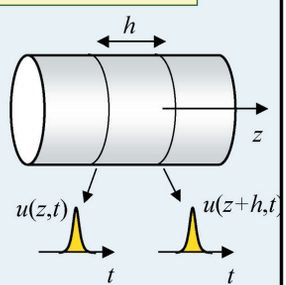
非線形シュレディンガー (NLS)方程式 $-i\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + |u|^2 u$

- 非線形効果を表すオペレータ $\hat{N} = i|u|^2$
- 線形効果を表すオペレータ $\hat{D} = i\frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}$

を用いると

$$\frac{\partial u}{\partial z} = (\hat{N}+\hat{D})u \longrightarrow u(z+h,t) = \exp\{(\hat{N}+\hat{D})h\}u(z,t)$$

形式的な解



Baker-Hausdorffの公式

$$\exp(\hat{N}h)\exp(\hat{D}h) = \exp\left(\hat{N}h + \hat{D}h + \frac{1}{2}[\hat{N},\hat{D}]h^2 + \frac{1}{12}\left[(\hat{N}-\hat{D}),[\hat{N},\hat{D}]\right]h^3 + \cdots\right)$$

を用い、微小区間hの中では非線形性と線形性が独立に働く（すなわち$[\hat{N},\hat{D}]=0$）とする。

⇨ NLS方程式の近似解 $u(z+h,t) \cong \exp\left[\int_z^{z+h}\hat{N}(z')dz'\right]\exp(\hat{D}h)u(z,t)$

SSFMによる非線形シュレディンガー方程式の計算機解析(その2)

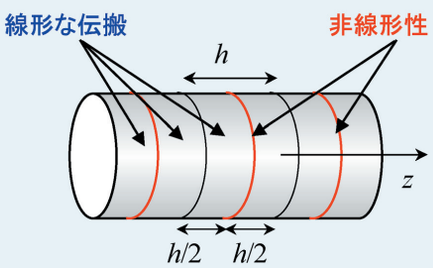
NLS方程式の近似解 $u(z+h,t) \cong \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z')dz'\right] \exp(\hat{D}h)\, u(z,t)$

線形オペレータの部分　$\exp(\hat{D}h)$　→ FFTを用いて周波数軸上で計算

非線形オペレータの部分　$\exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z')dz'\right]$　→台形則を用いて時間軸上で積分を計算

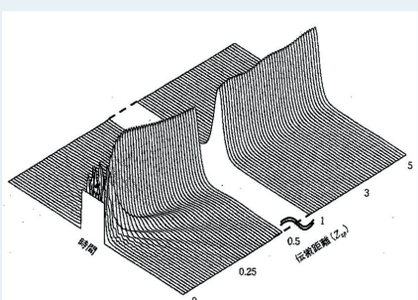
非線形性を微小区間hの中央に持ってくると

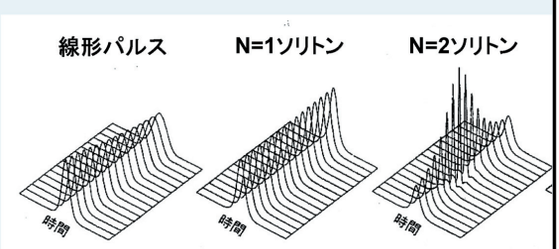
$$u(z+h,t) \cong \exp\left(\hat{D}\frac{h}{2}\right) \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z')dz'\right] \exp\left(\hat{D}\frac{h}{2}\right) u(z,t)$$



計算誤差 ∝ h^3

非線形シュレディンガー方程式によるソリトン伝搬の解析例





方形波を入力した場合の波形変化

・任意の波形を入力しても十分な非線形性があればソリトンが形成
・ソリトンの形成に寄与しない成分は分散波として散逸

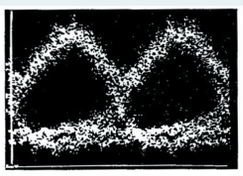
線形パルスと基本・高次ソリトンパルスの伝搬

・線形パルス：分散の影響でパルスが広がる
・基本ソリトン(N=1)：分散と非線形性が釣り合い波形変化しない
・高次ソリトン(N=2)：波形が周期的に変化しパルス圧縮が起こる

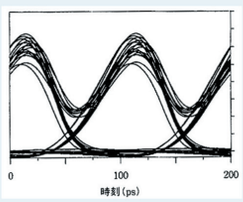
ソリトン伝送のシミュレーション

光増幅器雑音、光変調器、光フィルタなどの効果を加味し、擬似乱数パターンのパルス列の伝搬を計算して伝送特性を評価

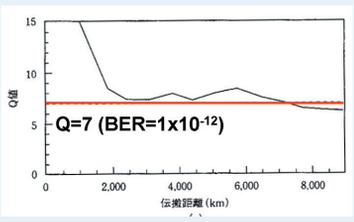
10 Gbit/s-10,000 kmソリトン伝送



伝送後のアイパターン
（実験結果）

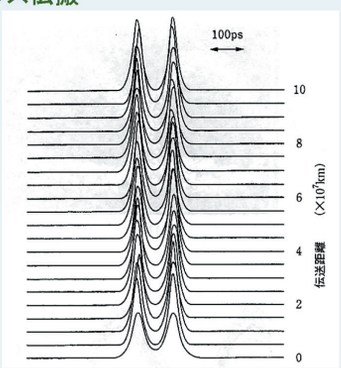


計算機解析結果



伝送距離とQ値の関係
（解析結果の統計処理により算出）

ソリトン制御を用いた10 Gbit/s-1億km
パルス伝搬



・ソリトン制御（波形の自己形成作用）により光増幅器を多段通過しても雑音の累積が抑制
・周回実験により1億8000 kmの伝送を実証
（パルス伝搬時間500秒）
・計算機解析でも実験結果を再現
（CRAY-2でCPU時間100万秒）

講演内容

(1) 光ソリトン伝送技術
- ・光ファイバ中のソリトンとは
- ・スプリットステップフーリエ法によるソリトン伝搬の計算機解析

(2) 超高速光伝送技術
- **・ETDM, OTDM伝送技術**
- **・時間領域光フーリエ変換を用いた超高速無歪み伝送**

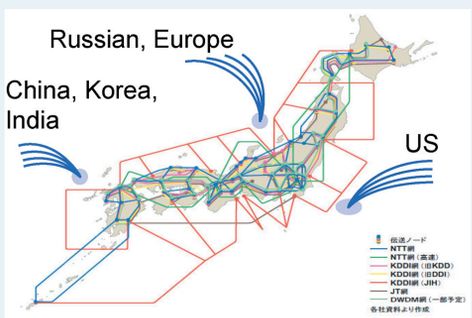
(3) 光と無線の融合技術（第2世代コヒーレント光通信）
- ・周波数利用効率拡大のための多値変調技術
- ・周波数安定化レーザを用いたコヒーレントQAM伝送

(4) まとめ

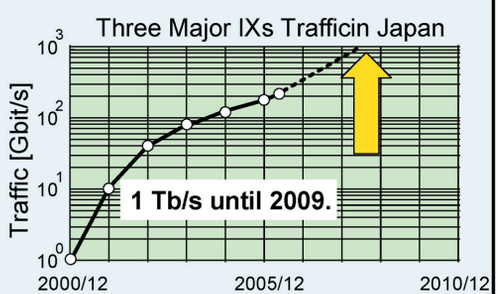
我が国のインターネットトラフィックの増加

2009年までに全トラフィックは 1 Tbit/sに達する。
2030年頃には 年率40%の伸びで計算すると1 Peta bit/s（1000倍）が現実的になる。

今の技術でペタビットのトラフィックを不自由なくやり取りすることは困難

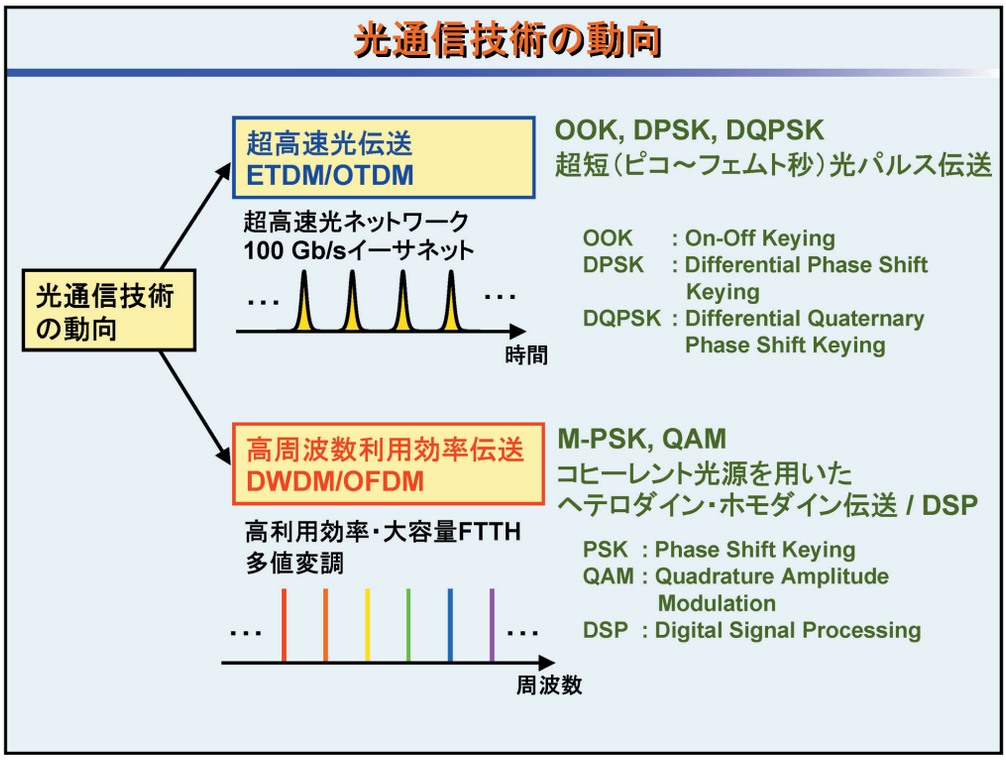


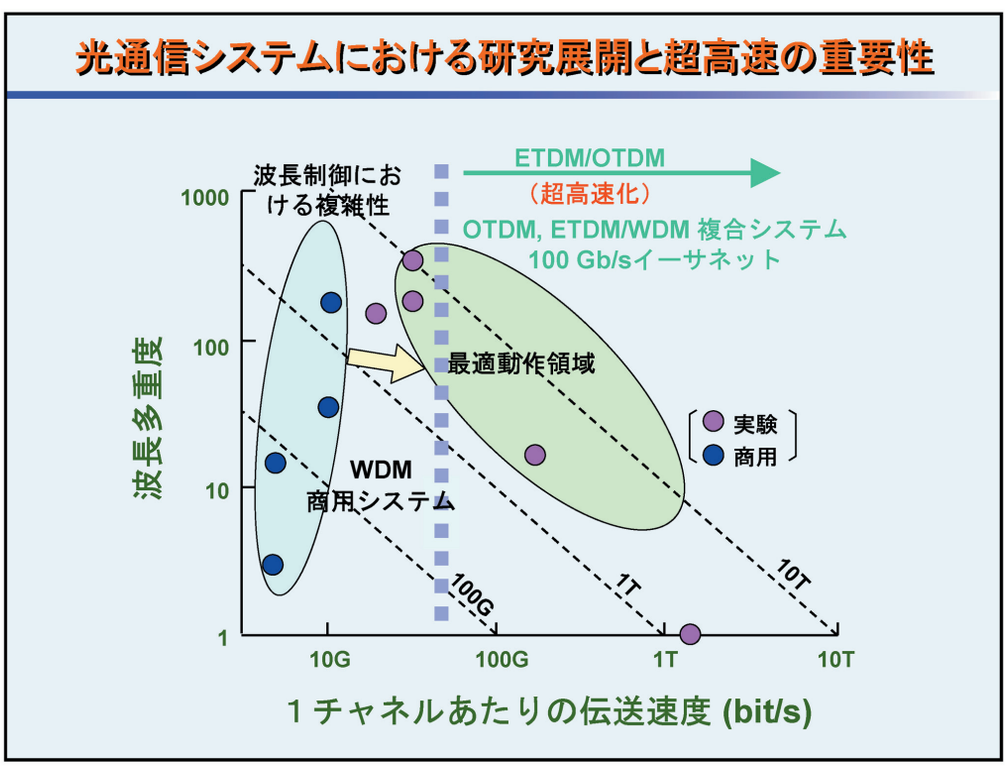
Current Backbone Optical Network



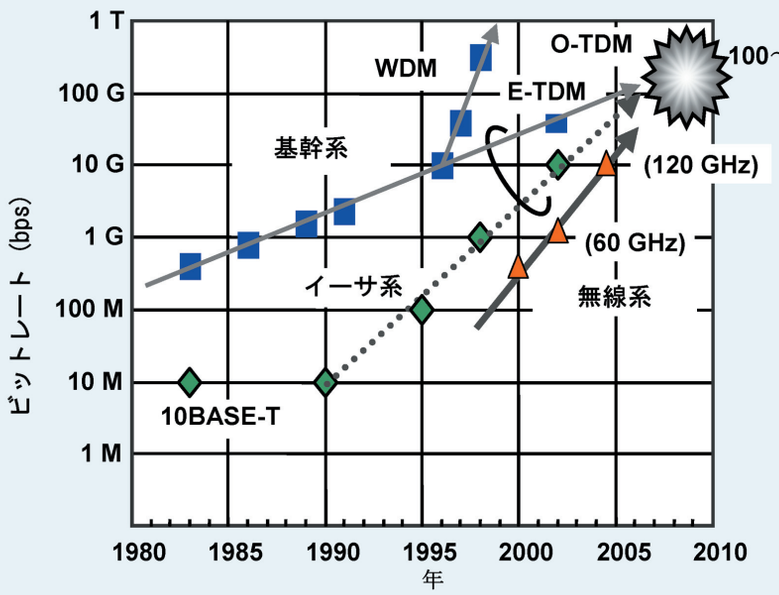
次世代のインフラを支えるバックボーン光ネットワーク



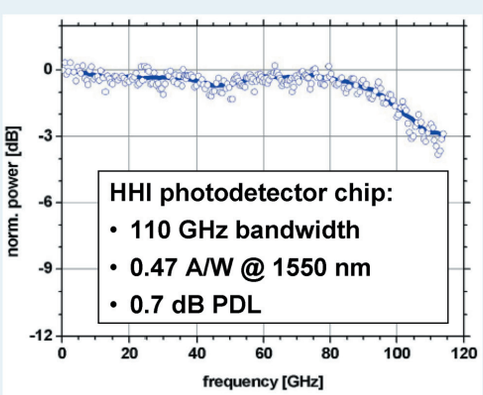

光通信技術の動向
光通信技術の動向
超高速光伝送
ETDM/OTDM
超高速光ネットワーク
100 Gb/sイーサネット
時間
OOK, DPSK, DQPSK
超短（ピコ～フェムト秒）光パルス伝送
OOK : On-Off Keying
DPSK : Differential Phase Shift Keying
DQPSK : Differential Quaternary Phase Shift Keying
高周波数利用効率伝送
DWDM/OFDM
高利用効率・大容量FTTH
多値変調
周波数
M-PSK, QAM
コヒーレント光源を用いた
ヘテロダイン・ホモダイン伝送 / DSP
PSK : Phase Shift Keying
QAM : Quadrature Amplitude Modulation
DSP : Digital Signal Processing


光通信システムにおける研究展開と超高速の重要性
波長制御における複雑性
ETDM/OTDM
（超高速化）
OTDM, ETDM/WDM 複合システム
100 Gb/sイーサネット
最適動作領域
実験
商用
WDM
商用システム
100G
1T
10T
波長多重度
1000
100
10
1
10G
100G
1T
10T
1チャネルあたりの伝送速度 (bit/s)

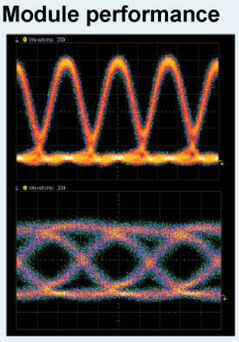
各種通信システムにおけるビットレートの変遷



110 GHz photodiode



Module performance



80 Gb/s

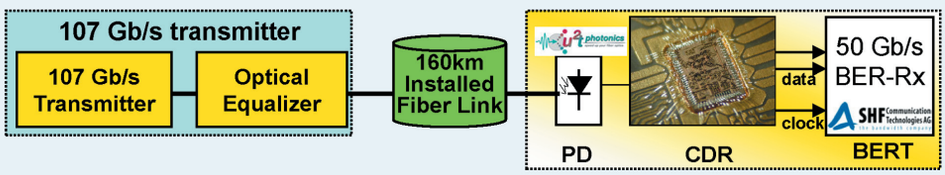
160 Gb/s

Input pulse 1.7ps, 2^7-1,
Popt.:+10.8dBm,
160 Gb/s RZ-NRZ, Vp:350mV

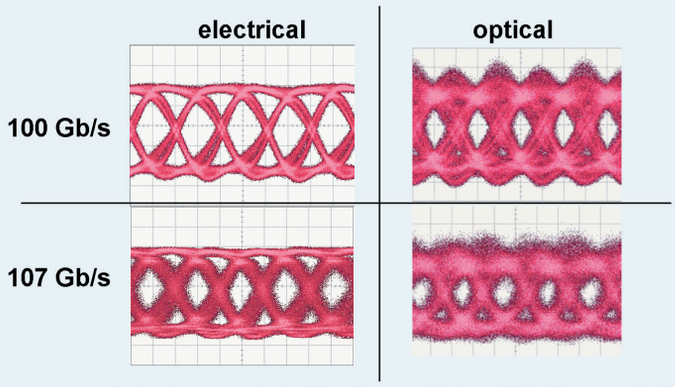
Heterodyne measured bandwidth > 85 GHz, Single pulse: low ringing,
FWHM ~6.8ps, Responsivity: 0.63 A/W, PDL: 0.64 dB, Vpd: 2.5V

H-G. Bach et al, ECOC 2004, Tu3.1.2
A. Beling et al, OFC 2005, OFM1

Full ETDM 107 Gb/s over 160 km installed fiber

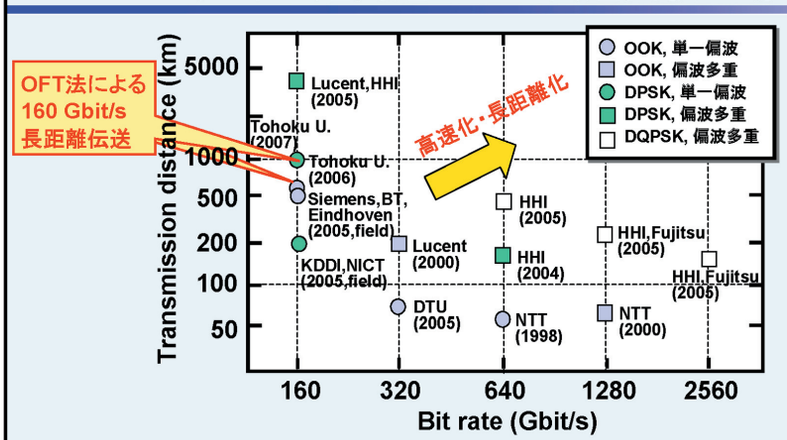


- Tx, Modulator directly driven by 107G SHF- MUX, Optical equalizer
- Rx, Complete SiGe CDR on single Chip directly driven by PD



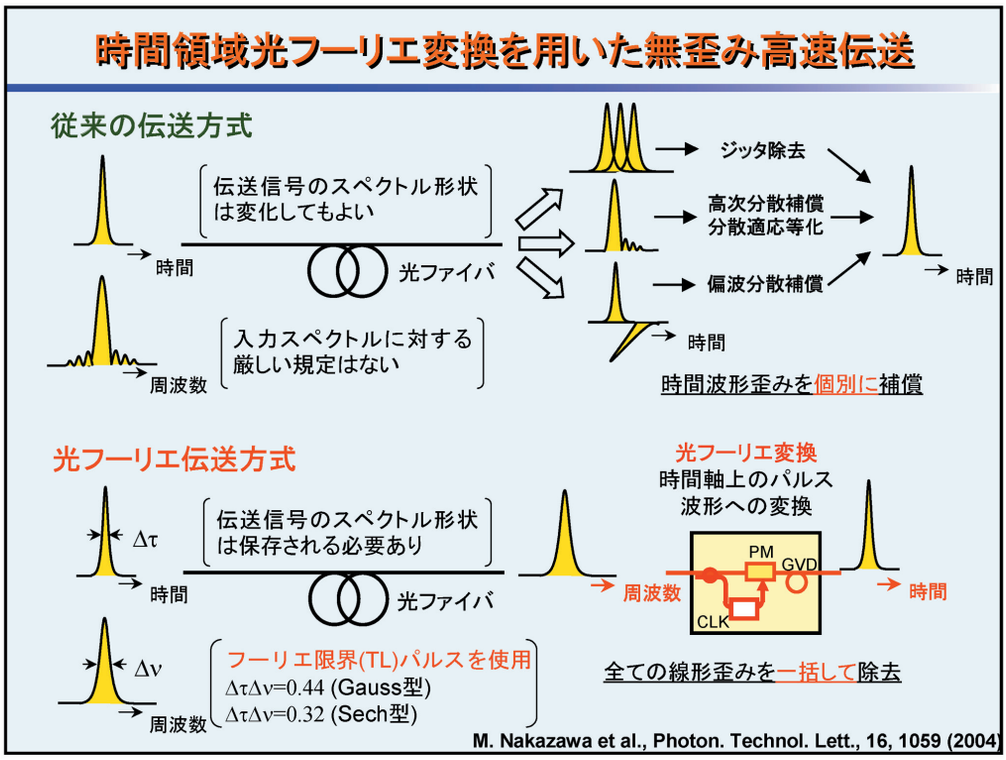
S. L. Jansen et al. (Eindhoven Univ., HHI, Siemens), OFC2007, OWE3.

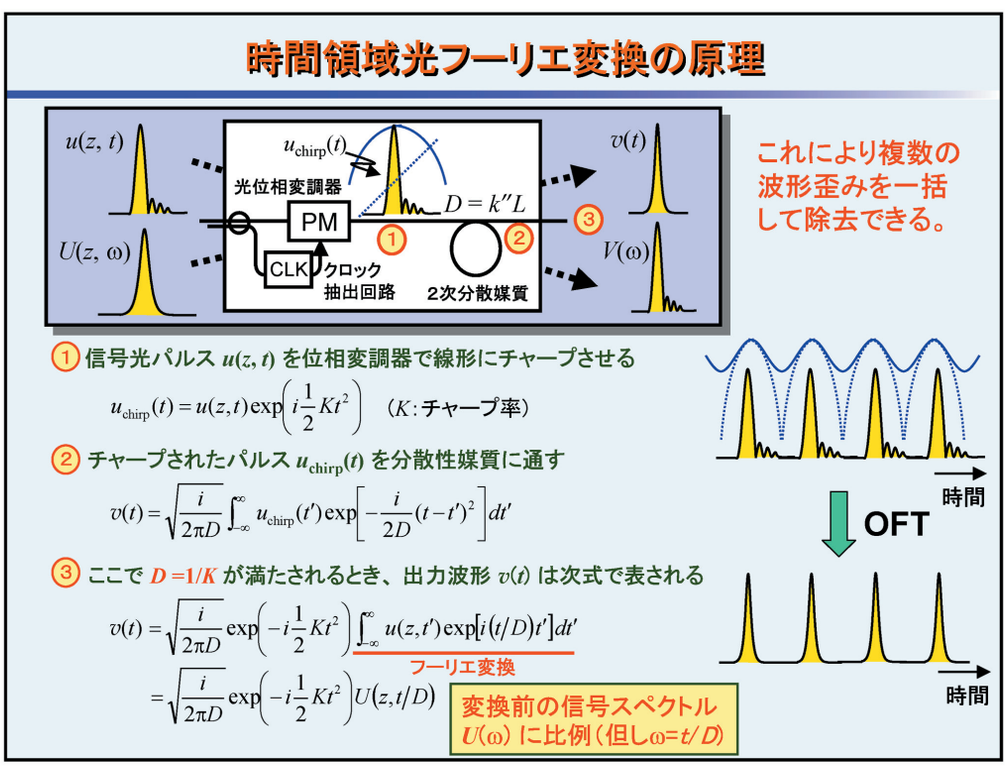
近年の超高速OTDM伝送実験の動向

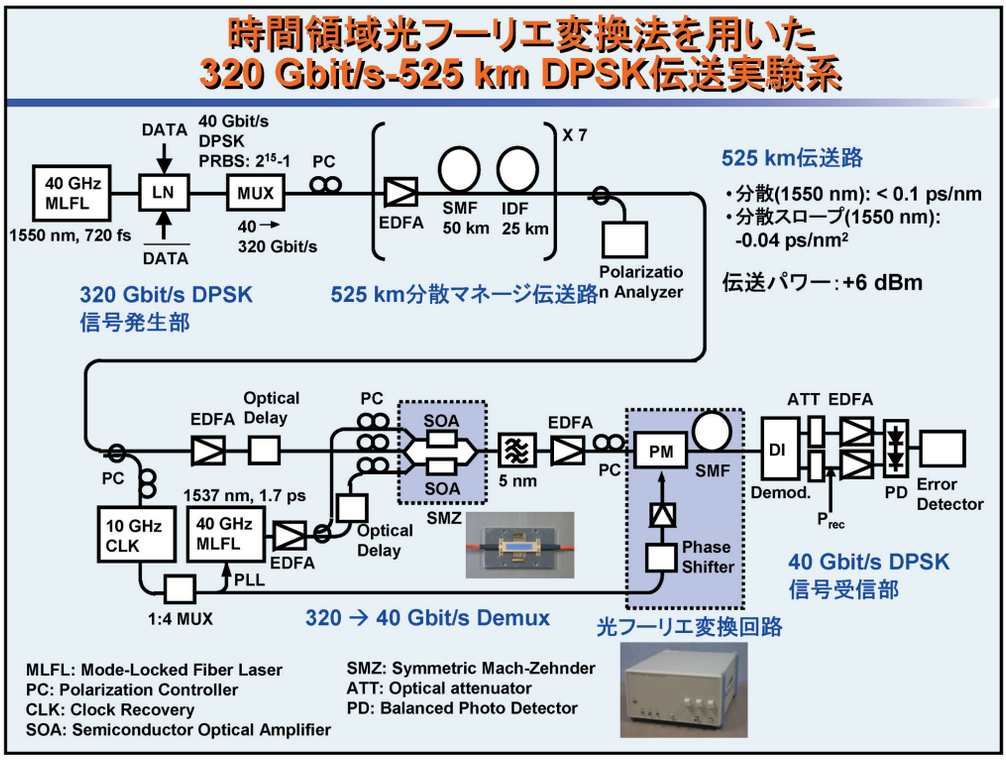


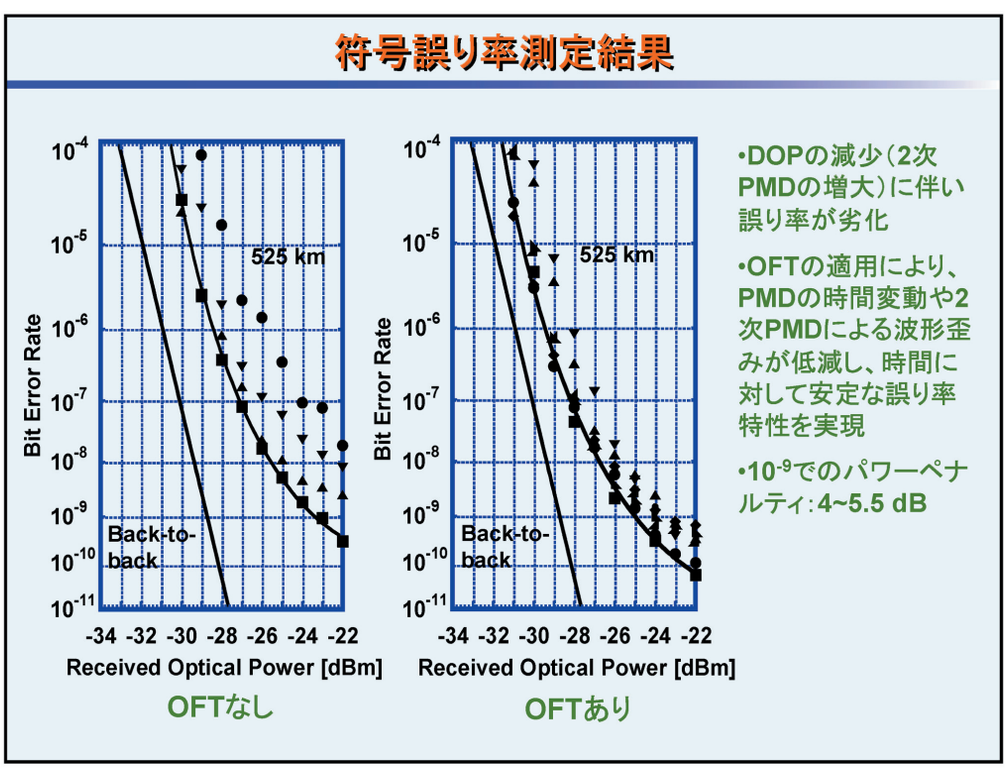
- DPSKにより160 Gbit/sで500 kmを超える伝送実験が多数報告され、敷設ファイバを用いたフィールド伝送も実現。
- 次のターゲットとして、320 Gbit/sを上回るOTDM伝送への取り組みが加速。
- しかし、このような高速信号の長距離伝送においてはPMDが大きな障害となる。

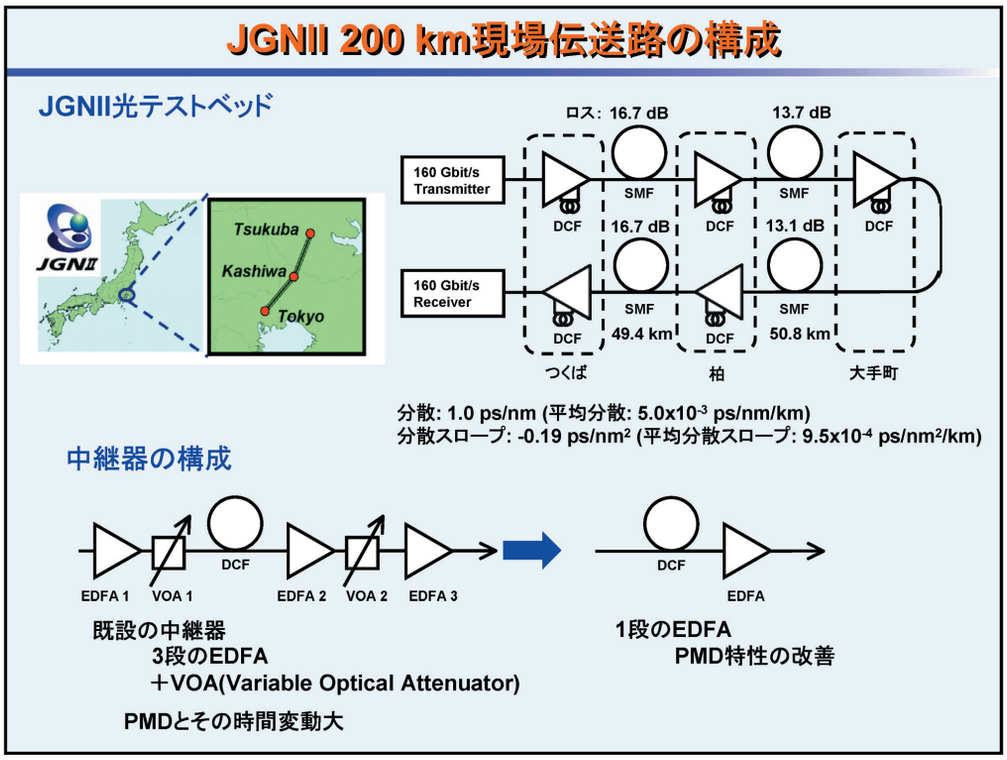
320 Gbit/s DPSK伝送にOFT法を適用しPMDを補償することにより、単一偏波で525 kmの長距離伝送を実現

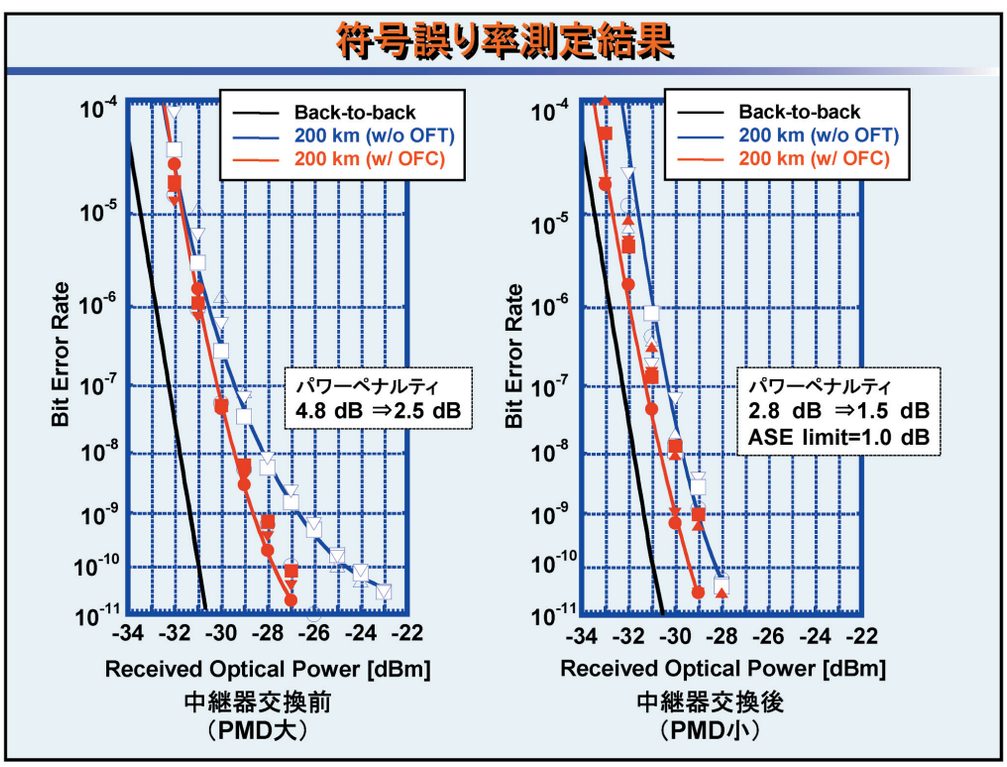

時間領域光フーリエ変換を用いた無歪み高速伝送
従来の伝送方式
伝送信号のスペクトル形状
は変化してもよい
時間
光ファイバ
入力スペクトルに対する
厳しい規定はない
周波数
ジッタ除去
高次分散補償
分散適応等化
偏波分散補償
時間
時間
時間波形歪みを個別に補償
光フーリエ伝送方式
Δτ
伝送信号のスペクトル形状
は保存される必要あり
時間
光ファイバ
Δν
フーリエ限界(TL)パルスを使用
ΔτΔν=0.44 (Gauss型)
ΔτΔν=0.32 (Sech型)
周波数
光フーリエ変換
時間軸上のパルス
波形への変換
PM
GVD
CLK
周波数
時間
全ての線形歪みを一括して除去
M. Nakazawa et al., Photon. Technol. Lett., 16, 1059 (2004)


時間領域光フーリエ変換の原理
u(z, t)
U(z, ω)
u_chirp(t)
光位相変調器
PM
CLK
クロック
抽出回路
D = k″L
2次分散媒質
v(t)
V(ω)
これにより複数の
波形歪みを一括
して除去できる。
① 信号光パルス u(z, t) を位相変調器で線形にチャープさせる
u_chirp(t) = u(z,t) exp(i (1/2) Kt²)　(K: チャープ率)
② チャープされたパルス u_chirp(t) を分散性媒質に通す
v(t) = √(i/2πD) ∫ u_chirp(t′) exp[−(i/2D)(t−t′)²] dt′
③ ここで D =1/K が満たされるとき、出力波形 v(t) は次式で表される
v(t) = √(i/2πD) exp(−i (1/2) Kt²) ∫ u(z,t′) exp[i(t/D)t′] dt′
= √(i/2πD) exp(−i (1/2) Kt²) U(z, t/D)
フーリエ変換
変換前の信号スペクトル
U(ω) に比例（但しω=t/D）
時間
OFT
時間


時間領域光フーリエ変換法を用いた
320 Gbit/s-525 km DPSK伝送実験系
DATA
40 Gbit/s
DPSK
PRBS: 2^15-1
PC
40 GHz
MLFL
LN
MUX
1550 nm, 720 fs
DATA
40→
320 Gbit/s
EDFA
SMF
50 km
IDF
25 km
X 7
Polarization Analyzer
525 km伝送路
・分散(1550 nm): < 0.1 ps/nm
・分散スロープ(1550 nm):
-0.04 ps/nm²
伝送パワー:+6 dBm
320 Gbit/s DPSK
信号発生部
525 km分散マネージ伝送路
Optical
EDFA
Delay
PC
SOA
SOA
5 nm
EDFA
PC
PM
SMF
ATT
EDFA
DI
Demod.
PD
Error
Detector
P rec
PC
1537 nm, 1.7 ps
10 GHz
CLK
40 GHz
MLFL
EDFA
Optical
Delay
SMZ
Phase
Shifter
PLL
1:4 MUX
320 → 40 Gbit/s Demux
光フーリエ変換回路
40 Gbit/s DPSK
信号受信部
MLFL: Mode-Locked Fiber Laser
PC: Polarization Controller
CLK: Clock Recovery
SOA: Semiconductor Optical Amplifier
SMZ: Symmetric Mach-Zehnder
ATT: Optical attenuator
PD: Balanced Photo Detector


符号誤り率測定結果
Bit Error Rate
10^-4
10^-5
10^-6
10^-7
10^-8
10^-9
10^-10
10^-11
525 km
Back-to-back
-34 -32 -30 -28 -26 -24 -22
Received Optical Power [dBm]
OFTなし
OFTあり
•DOPの減少(2次PMDの増大)に伴い誤り率が劣化
•OFTの適用により、PMDの時間変動や2次PMDによる波形歪みが低減し、時間に対して安定な誤り率特性を実現
•10^-9でのパワーペナルティ:4~5.5 dB


JGNII 200 km現場伝送路の構成
JGNII光テストベッド
JGNII
Tsukuba
Kashiwa
Tokyo
ロス: 16.7 dB
13.7 dB
160 Gbit/s Transmitter
160 Gbit/s Receiver
SMF
DCF
16.7 dB
13.1 dB
49.4 km
50.8 km
つくば
柏
大手町
分散: 1.0 ps/nm (平均分散: 5.0x10-3 ps/nm/km)
分散スロープ: -0.19 ps/nm2 (平均分散スロープ: 9.5x10-4 ps/nm2/km)
中継器の構成
EDFA 1
VOA 1
EDFA 2
VOA 2
EDFA 3
EDFA
既設の中継器
3段のEDFA
＋VOA(Variable Optical Attenuator)
PMDとその時間変動大
1段のEDFA
PMD特性の改善


符号誤り率測定結果
Back-to-back
200 km (w/o OFT)
200 km (w/ OFC)
Bit Error Rate
パワーペナルティ
4.8 dB ⇒2.5 dB
パワーペナルティ
2.8 dB ⇒1.5 dB
ASE limit=1.0 dB
Received Optical Power [dBm]
中継器交換前
（PMD大）
中継器交換後
（PMD小）

講演内容

(1) 光ソリトン伝送技術
・光ファイバ中のソリトンとは
・スプリットステップフーリエ法によるソリトン伝搬の計算機解析

(2) 超高速光伝送技術
・ETDM, OTDM伝送技術
・時間領域光フーリエ変換を用いた超高速無歪み伝送

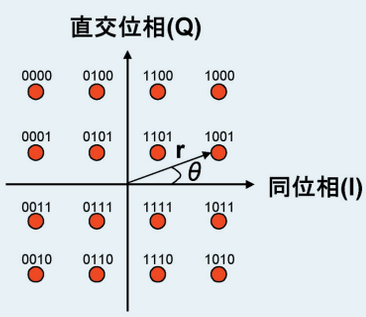
(3) 光と無線の融合技術（第2世代コヒーレント光通信）
・周波数利用効率拡大のための多値変調技術
・周波数安定化レーザを用いたコヒーレントQAM伝送

(4) まとめ

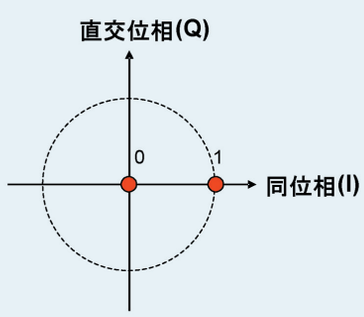
QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 伝送とは?

QAM(直交振幅変調)の特徴:

- **位相が90度異なる 2つの搬送波の振幅を独立に変調し、振幅と位相の両方に情報をのせて伝送**
- **2^N QAMにより1チャネルの帯域でNビットを伝送させることが可能であり、OOKに比べて周波数利用効率がN倍向上**

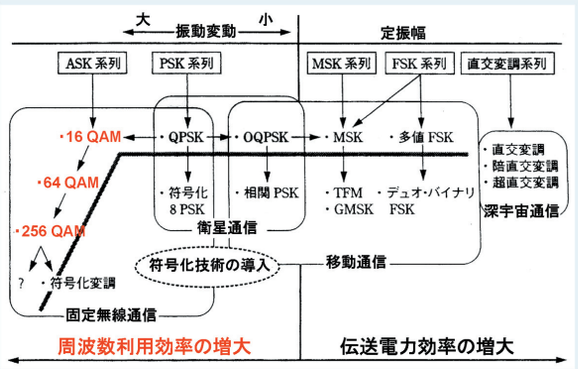


16 QAMのコンステレーションマップ
(4 x 4 = 2^4 行列配置)



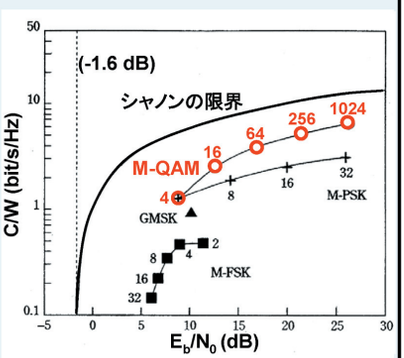
OOKの場合

位相を利用した各変調方式の特徴[1]



変調方式とその適用領域

図中の矢印は発展方向を示す。純粋な変調方式に直交符号化、相関符号化、誤り訂正符号化等の技術を導入して、送信電力効率や周波数利用効率の向上を図っている。



C: チャンネル容量 (bit/s), W: 周波数帯域幅 (Hz)
E_b/N_0: 1ビット当りのエネルギー対雑音電力密度比

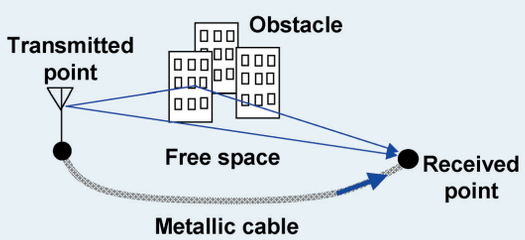
各変調方式の周波数利用効率

同期検波を前提として、BER=10^{-4}におけるE_b/N_0を示す。

[1] 斉藤洋一,「ディジタル無線通信の変復調」, 電子情報通信学会編

光を利用したコヒーレント光QAM伝送の特徴

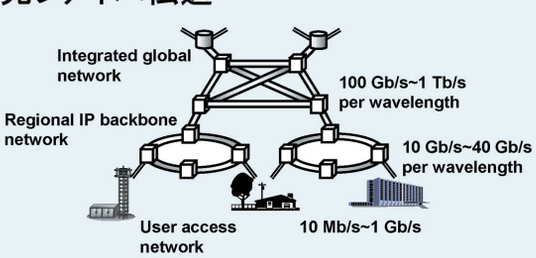
マイクロ波伝送



無線およびメタルケーブル伝送の問題点

- フェージングによる位相揺らぎ
- 伝送帯域が狭い

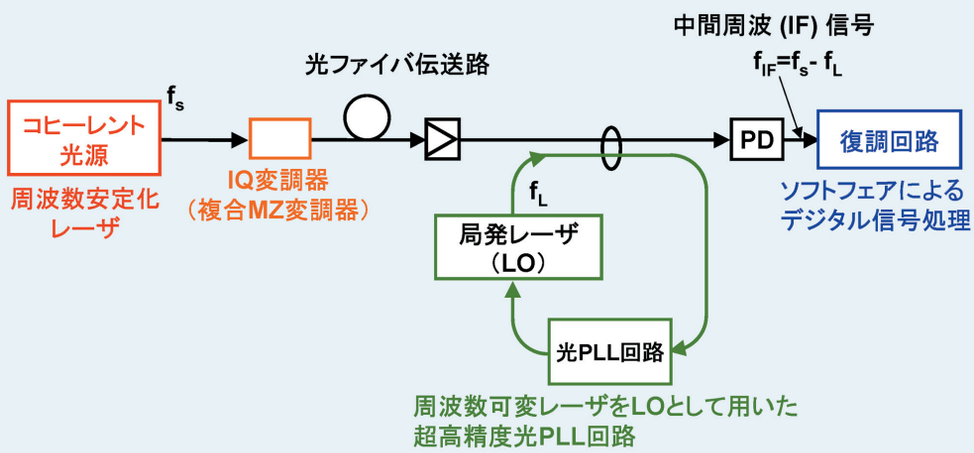
光ファイバ伝送



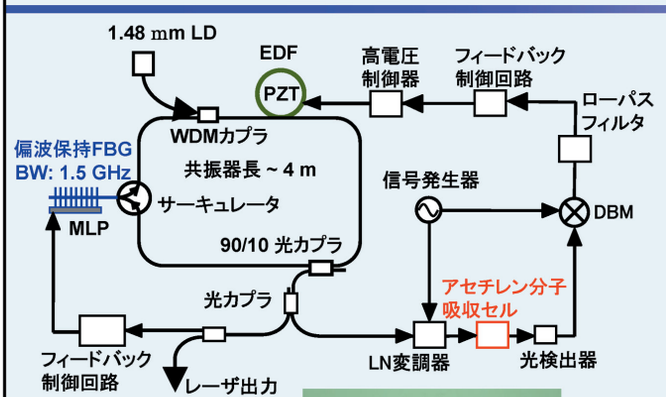
コヒーレント光QAM伝送の特徴

- フェージングが生じない
- 広い伝送帯域が実現可能

コヒーレント光QAM伝送系の構成

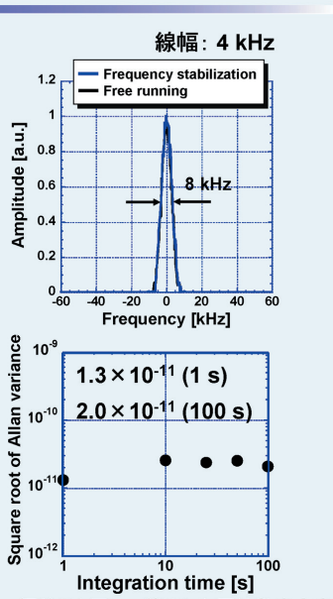


アセチレン分子吸収線を用いた周波数安定化ファイバレーザ[1]





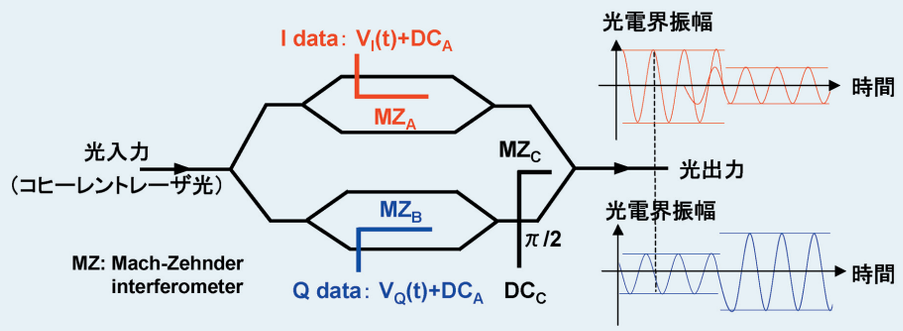
周波数安定化ファイバレーザの写真
（アドバンテスト研究所と共同開発）



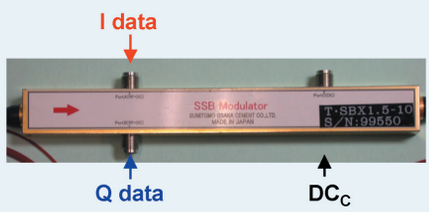
アラン偏差[2]を用いて算出した周波数安定度

[1] K. Kasai et al., IEICE ELEX., vol. 3, 487 (2006).
[2] D. W. Allan, Proc. IEEE, vol.54, 221 (1966).

IQ変調器の構成

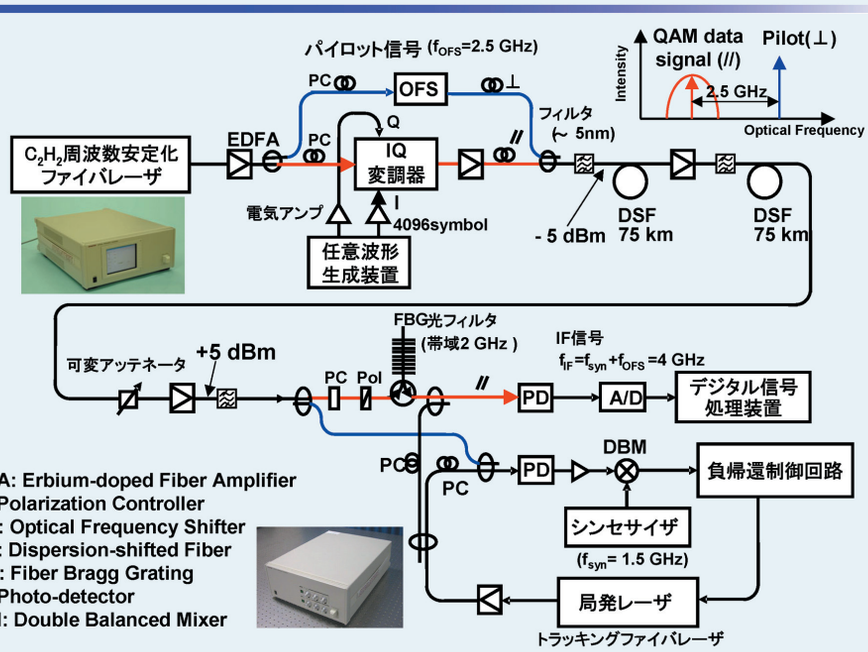


IQ変調器として用いた複合MZ変調器[1]の動作原理



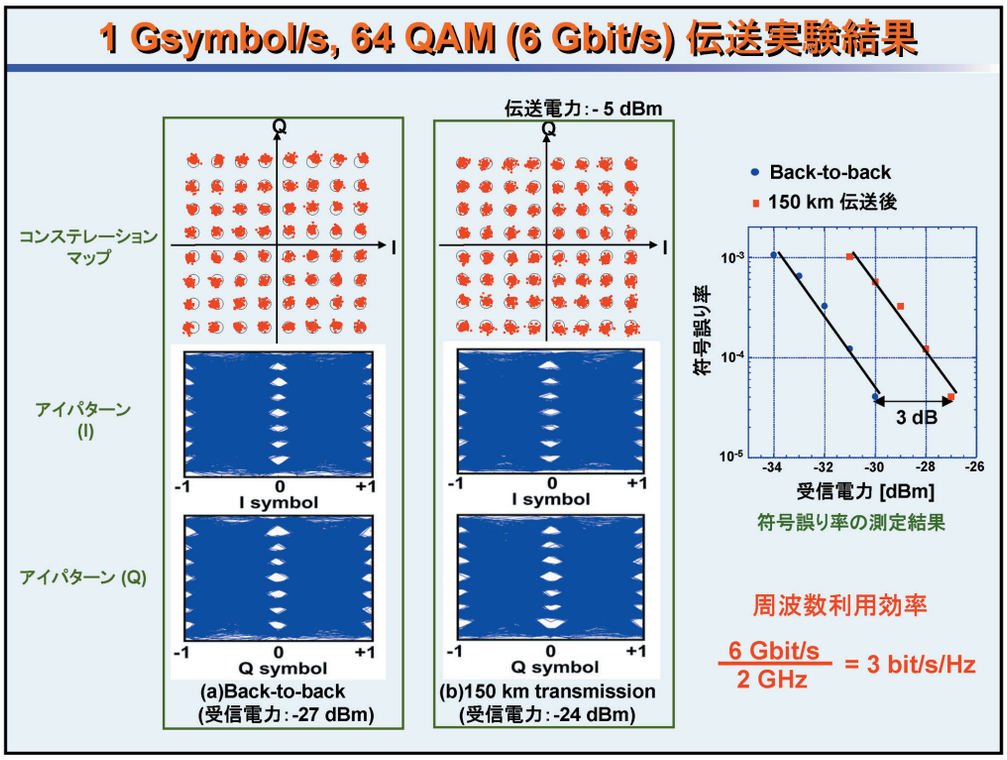
[1] S. Shimotsu et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, p. 364 (2001).

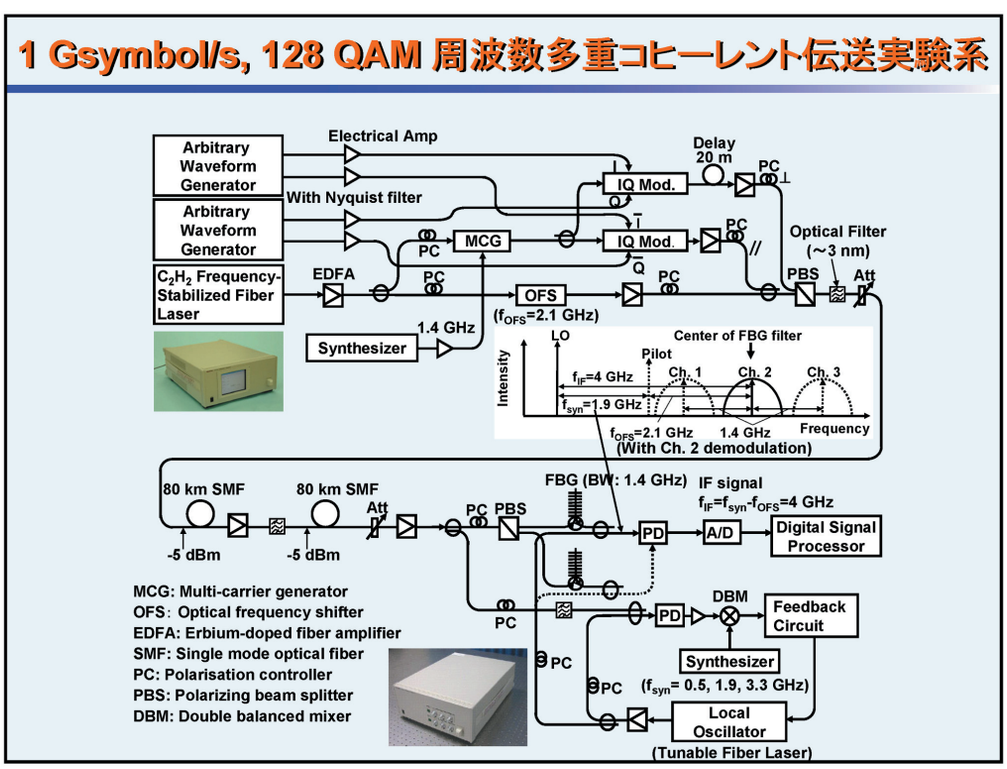
1 Gsymbol/s, 64 QAM (6 Gbit/s) 伝送実験系[1]



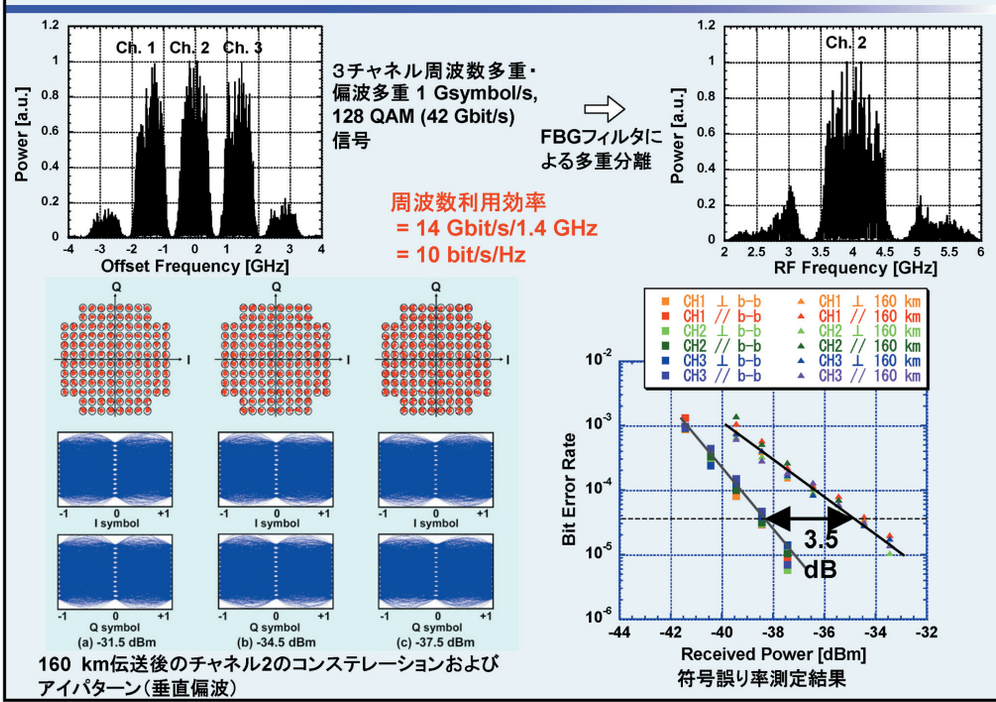
EDFA: Erbium-doped Fiber Amplifier
PC: Polarization Controller
OFS: Optical Frequency Shifter
DSF: Dispersion-shifted Fiber
FBG: Fiber Bragg Grating
PD: Photo-detector
DBM: Double Balanced Mixer

[1] J. Hongo, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, p. 638 (2007).


1 Gsymbol/s, 64 QAM (6 Gbit/s) 伝送実験結果
伝送電力：- 5 dBm
コンステレーション マップ
アイパターン (I)
アイパターン (Q)
I symbol
Q symbol
(a)Back-to-back
(受信電力：-27 dBm)
(b)150 km transmission
(受信電力：-24 dBm)
Back-to-back
150 km 伝送後
符号誤り率
3 dB
受信電力 [dBm]
符号誤り率の測定結果
周波数利用効率
6 Gbit/s / 2 GHz = 3 bit/s/Hz


1 Gsymbol/s, 128 QAM 周波数多重コヒーレント伝送実験系
Arbitrary Waveform Generator
Arbitrary Waveform Generator
With Nyquist filter
Electrical Amp
Delay 20 m
IQ Mod.
MCG
EDFA
OFS
(fOFS=2.1 GHz)
Synthesizer
1.4 GHz
Optical Filter (~3 nm)
PBS
Att
LO
Center of FBG filter
Pilot
Intensity
Ch. 1
Ch. 2
Ch. 3
Frequency
(With Ch. 2 demodulation)
80 km SMF
-5 dBm
FBG (BW: 1.4 GHz)
IF signal
fIF=fsyn-fOFS=4 GHz
PD
A/D
Digital Signal Processor
DBM
Feedback Circuit
Synthesizer
(fsyn= 0.5, 1.9, 3.3 GHz)
Local Oscillator
(Tunable Fiber Laser)
MCG: Multi-carrier generator
OFS: Optical frequency shifter
EDFA: Erbium-doped fiber amplifier
SMF: Single mode optical fiber
PC: Polarisation controller
PBS: Polarizing beam splitter
DBM: Double balanced mixer

128 QAM周波数多重伝送実験結果



160 km伝送後のチャネル2のコンステレーションおよびアイパターン（垂直偏波）

符号誤り率測定結果

まとめ

ソリトン伝送をイントロとして我々が取り組んでいる革新的な光通信技術を2つ紹介した。

（1）超高速光パルス伝送

- 時間領域光フーリエ変換法による160 Gbit/s-1,000 km伝送および320 Gbit/s-500 km伝送
- 640 Gbit/s以上の高速化の可能性

（2）コヒーレントQAM伝送

- 周波数安定化レーザおよび光PLLを用いた1 Gsymbol/s, 128QAM偏波多重(14 Gbit/s)伝送
- 多値度の増加による周波数利用効率のさらなる拡大の可能性(> 10 bit/s/Hz)

将来的には（1）と（2）を結びつけ、光の振幅（超高速性）と位相（コヒーレンシー）情報をフルに発揮する究極的な光通信技術を開発することが重要である。

キーワード：無線と光の融合、高速化と高密度化

［報告］

平成20年度全国共同利用情報基盤センター顕彰について

平成２０年度顕彰授賞式が行われました。

全国共同利用情報基盤センターの利用にあたって顕著な功績があった教員や技術職員の方々に授与される平成２０年度功績賞候補者として、先に本センターから推薦していた５名の方々の授賞式が行われました。

授賞式は、昨年１１月２７日（木）午前９時３０分から九州大学の当番により開催された、全国共同利用情報基盤センター研究開発連合発表講演会の冒頭で行われました。授賞式では、第１１回全国共同利用情報基盤センター長会議議長である東北大学サイバーサイエンスセンター長名の表彰状と副賞（楯）が、当番校の九州大学情報基盤研究開発センターの青柳睦センター長から、本センター推薦の５名の方々を含め、８名の受賞者の方々に手渡されました。

今年度本センターから推薦し、顕彰を受けられた方々のお名前と授賞理由は、次のとおりです。



○南部健一先生（東北大学名誉教授流体科学研究所）

南部先生は、α線電離イオン計測装置の研究開発のために、独自に開発した粒子シミュレーションコードの高速化に本センターの教職員と連携して取り組み、プログラムの高速化技術の開発に多くの貢献をされました。得られた成果は、次期システムを設計する上での貴重なデータとして活用され、本センターの大規模計算システム導入にも重要な貢献をされており、永年に亘り本センターとの共同研究を通じて本センターの研究開発及び運用業務への貢献が多大であることが、今回の授賞に至った理由になっています。

○広瀬喜久治先生（大阪大学名誉教授大学院工学研究科）

広瀬先生は、ナノプロセス技術や電子デバイスの研究開発において、独自に開発した量子力学の第一原理に基づく大規模シミュレーションコードの高速化に本センターの教職員と連携して取り組み、プログラムの高速化技術の開発に多くの貢献をされました。得られた成果は、次期システムを設計する上での貴重なデータとして活用され、本センターの大規模計算システム導入にも重要な貢献をされており、永年に亘り本センターとの共同研究を通じて本センターの研究開発及び運用業務への貢献が多大であることが、今回の授賞に至った理由になっています。（広瀬先生は、ご都合により、授賞式は欠席されました。）

○長谷川昭先生（東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター客員教授）

○有吉慶介先生（独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター海底地震・津波ネットワーク開発部リアルタイム情報発信グループ）

長谷川先生、有吉先生は、両先生らが推進する地震時のプレート境界すべりの解明に関する研究に

おいて、独自に開発したシミュレーションコードの最適化に本センターの教職員と連携して取り組み、プログラムの高速化技術の開発に多くの貢献をされました。その成果は次期システム設計をする上での貴重なデータでもあり、本センターの大規模計算システム導入にも重要な貢献をされており、永年に亘り本センターとの共同研究を通じて本センターの研究開発及び運用業務への貢献が多大であることが、今回の授賞に至った理由になっています。（長谷川先生は、ご都合により授賞式は欠席されました。）

○加藤昇技術専門職員（東北大学情報部情報基盤課システム管理係長）

加藤氏は、昭和６１年からの旧７大型計算機センター間で実施された共通利用番号制（これにより利用者はすべてのセンターを同じ利用者番号で利用が可能となった）導入の東北大学側の中核として、システムの設計、構築およびその後の運用に貢献されました。また、Gaussian、Marc、patran 等のアプリケーションおよびライブラリの整備、運用、更には稼動統計の作成等にも従事されてきたこと等、３９年の永きに亘り全国共同利用としての大型計算機の環境整備と運用管理に対する多大な貢献が、今回の授賞に至った理由になっています。

『受賞者代表挨拶』

東北大学名誉教授　　南部健一



東北大学の南部です。２年前に定年を迎え、今は、無為徒食の日々ですが、この度、はからずもこのような顕彰の栄に浴し、驚きまた喜んでおります。

私の研究分野は流体工学、特に宇宙船や人工衛星の周りの希薄な流れです。このような流れはボルツマン方程式に支配されます。この分野は、1967 年、アメリカ航空宇宙局(NASA)のアームストロング船長が月面に降り立ってから、過熱して来ました。宇宙の希薄な流れの研究には大規模計算が必要で、一時期、私は、東北大学・大計センター（大型計算機センター）の大口ユーザーNo.１になったこともあります。また、大計センター負担金の借金に苦しみもしました。

私の大型計算機の使い方は二つあります。一つは、皆さんのように数値計算による現象の解明です。実は私は理論家でして、もう一つの使い方は、紙と鉛筆で導き出した理論や法則を数値計算によって検証する、という使い方です。どうも、この後者の立場で行なった研究の方が、はるかに高い国際的評価を得たようです。

その一つが、1980 年、37 歳のときの研究で、あれほど熱くなったことは、後にも先にもありません。1980 年まで百年以上解法がなかったボルツマン方程式の一般解法を、私は、世界で初めて導くことが出来たのです。この解法が正しいことを証明するため、日に何度も大計センターに通いました。当時はファイルシステムがなく、カードにパンチされたプログラムとデータをジュラルミンのケースに入れ、恋人に逢いに行くかのように、いそいそと大計センターに通ったものです。

私の目的は、丁度その頃、百年ぶりにプリンストン大学の研究者が発見したボルツマン方程式の一つの厳密解を、私の解法を用いて再現することでした。大計センターで出力した印字紙を見ると、私の解はプリンストン大学の解と完全に一致しているではありませんか！興奮しました。周りに人がいたら、見知らぬ女性であっても抱き締めていたかもしれません。それにしても、数字の羅列を見て血湧き肉踊る研究者って、安上がりでいいですね。

定年まで 260 編あまりの論文を書きましたが、この 37 歳の時の論文の引用数は、群を抜いています。世界の 7 冊の専門書にも、『南部が世界で最初にボルツマン方程式の解法を導いた』と書かれています。

この後、私は、長いスランプに悩みましたが、17 年後の 54 歳のとき、久しぶりに燃えました。高密度プラズマ中での、電子の多体散乱の法則を発見したのです。この研究により、その３年後、60 年ぶりにランダウ・フォッカー・プランク方程式の解法を作ることが出来ました。

さて、話を 37 歳のときのボルツマン方程式の研究に戻します。この若い時の研究が文部科学省の目に止まり、今年の春、紫綬褒章をいただきました。この受章で一番よかったことは、個人的には、今まで私を研究バカの変人扱いしてきた家内が、少し軟化してきたことでしょうか。しかし私は、紫綬褒章受章の陰の功労者は家内ではなく、もう一人の伴侶、大計センター（今の、東北大学サイバーサイエンスセンター）だと思っております。センターは、常に時代の最先端の高性能かつ大型のコンピュータを導入し、私の研究を大いに助けてくれました。

思えば、1965 年、私が東北大学大学院入学と同時に飛びついた、東北大学計算センターの NEAC2230 以来、センターは、孤軍奮闘していた私に最も強力な助っ人、高性能大型コンピュータを次々に用意してくれました。

本日は、このような晴れがましい顕彰を受け、心から喜び、また感謝しております。ありがとうございます。

（後記）

私は、この功績賞に記された授賞者が、全国共同利用情報基盤センター長会議議長東北大学サイバーサイエンスセンター長小林広明教授であることを、特に嬉しく思います。

『東北大学関係受賞者のコメント』

大阪大学名誉教授　　広瀬　喜久治

このたび、東北大学大規模科学計算システムの高度利用技術に関する研究開発への貢献が評価され、功績賞をいただく光栄に浴すことになりました。このような賞を頂き大変嬉しく思います。私の研究テーマは、量子力学に基づき物質中の電子状態を計算する手法を開発するとともに、それを用いてナノ構造体の電気伝導特性などの諸物性を予測あるいは設計するというものでありました。それゆえ、私の研究は大規模計算機の利用なくしては、あり得なかったと言っても過言ではありません。理想的な研究環境を提供してくださいました東北大学サイバーサイエンスセンターのスタッフの皆様に、この場をお借りして感謝いたします。最後に、共同研究者として私を支えてくださった皆様、ならびにご指導ご援助を頂いた多くの方々に心よりお礼申し上げます。

東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センター客員教授　　長谷川　昭

地震は断層面に沿う急激な滑りです。近年、断層面における摩擦構成則の理解が進んで、ようやく計算機の中で、もっともらしい地震のシミュレーションが出来るようになってきました。しかし、観測結果と比較すべく地震の発生過程の詳細を計算機の中で再現しようとすると、膨大な計算時間がかかります。特に実際の地球内部を想定し３次元モデルでとなると、途端に気が遠くなるような計算時間になってしまいます。この計算時間の壁を何とか乗り越えなければ、観測結果と詳細な比較をし、地震発生機構をきちんと理解しようという我々の目的は達成できません。それを共同研究という形で助けてくださったのがセンターの皆様です。おかげさまで、スーパーコンピュータを使った地震発生

過程の３次元シミュレーションが可能となり、その結果、断層面に沿って伝播する「非地震性」の「ゆっくり滑り」の振舞いとそれが「アスペリティ（固着域）」に及ぼす影響について、かなりの程度理解が進みました。そしてそれは、現在海洋研究開発機構に勤務する有吉慶介君の博士論文としても結実しました。このたび功績賞を授与されるとうかがい大変光栄に思いますとともに、センターの皆様に深く感謝申し上げます。

(独) 海洋研究開発機構 海洋工学センター　　有吉 慶介



博士課程だった当時、前駆的変化に基づく東海地震の予測を数値シミュレーションから解析し、既存の水準測量や微小地震観測システムから検知することが可能であるかを調べていたのですが、観測データと定量的に比較するためにはモデルを２次元から３次元へと拡張しなければならない壁にぶつかりました。しかし、３次元モデル化には膨大な計算量が伴います。そこで何とかならないものかと、藁にもすがる想いでセンターとの共同研究の募集に申し込んだことが、本格的な利用を開始したきっかけでした。

共同研究では同じく受賞された長谷川先生との議論を通じて、地震発生後に震源域周辺に発生する地震計では捉えられないようなゆっくりしたすべり（余効すべり）の伝播過程について数値シミュレーションで再現することに成功しました。さらに、同じような発生時間間隔で同じような地震波を放出する地震（繰り返し地震）について、余効すべりが震源域を通過すると応力擾乱によって地震発生過程が通常とは異なることを数値シミュレーションから見出し、その結果を元に観測データを解析したところ実際にそうなっていたことを確かめました。これらの成果は地震予知研究推進を目指す国の計画である「地震予知のための新たな観測研究計画」にも盛り込まれ、充実したものになりました。

こうして研究に専念できたのも、サイバーサイエンスセンターの小林先生、大泉さんをはじめとする多大な支援があったお陰です。国内外のシミュレーション研究者との話を通じて実感するようになったことですが、サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピューターの計算処理能力が素晴らしいこともさることながら、スタッフの皆様からの親切なサポートがあってこそ、十分に性能を発揮されているように思いました。

これまでの経験は今の職場で地球シミュレーターを活用する上で大きな財産となっており、感謝の気持ちで一杯です。ありがとうございました。

東北大学情報部情報基盤課システム管理係　　加藤　昇

予想していなかった功績賞をいただき大変驚き、同時に嬉しく思っております。関係各位にこの場を借りてお礼申し上げます。旧大型計算機センター発足時から、数年ごとに導入する最新の大型コンピュータの管理・運用を行って、多くの利用者に利用していただきました。私たちは利用者に計算機を道具として利用していただき、研究成果をだしていただくことが一番ですので、先生方と共に利用しやすい環境となるように努めて参りました。

最近ではパソコン等の普及と高性能化により小規模な計算を行う利用者が減ってきておりますが、大型コンピュータで大規模な計算を行う需要がたくさんあります。そして、学外からの利用も増えてきており、計算機利用の約 50％が学外からの利用で占めるようになってきました。今後も全国共同利用として利用しやすいセンターとなるよう技術職員全員で努めたいと思います。ありがとうございました。

[報告]

第9回テラフロップワークショップ報告

東北大学サイバーサイエンスセンター　小林広明

サイバーサイエンスセンター（以下、本センター）は、大学院情報科学研究科とドイツシュトゥットガルト大学高性能計算センターとの共同主催で、2008年11月12日（水）～11月13日(木)の両日、今年も「計算科学の可能性と次世代スーパーコンピュータ研究開発動向を探る」をテーマに、第9回テラフロップワークショップ（9th Teraflop Workshop）を開催しました。本ワークショップは、国際的に活躍している計算科学・計算機科学の研究者・技術者を招いて、高性能・高効率大規模科学計算に関する最新の研究成果の情報交換を行うとともに、今後のスーパーコンピュータ設計の方向性を議論することを目的として、2006年以降、毎年シュトゥットガルト大学と東北大学で交互に開催されてきました(詳しくは、http://www.teraflop-workbench.org/index.htmを参照)。

第9回テラフロップワークショップは15の招待講演から構成され、次世代スーパーコンピュータシステムのハードウェア要素技術から異機種システム統合技術やスーパーコンピュータの利便性を高める利用環境技術などシステムソフトウェア技術、さらにはスーパーコンピュータを活用する流体力学、プラズマ物理、材料、海洋・気象などの分野から最新の研究成果発表がありました。また、国家プロジェクトとして進められている次世代スーパーコンピュータプロジェクトが現在検討しているペタレベルアプリケーション開発状況や、2008年度末に導入される次期地球シミュレータの概要と性能予測などの興味深い講演もありました。本センターからは、センターのSX-9がHPCチャレンジベンチマークの28項目のうち19項目で世界最高性能を達成したことと、センターユーザコードによるSX-9の詳細な評価結果の報告が行われました。

2日間のワークショップでは、延べ168名の参加者を得て、活発な議論が交わされました。第10回ワークショップは、2009年4月にシュトゥットガルト大学で行われる予定です。





SENAC Vol. 42, No. 1 (2009.1)

白

［大規模科学計算システム］

FORTRAN90/SX と C++/SX の新機能

横谷 雄司
日本電気株式会社 第一コンピュータソフトウェア事業部

SX のコンパイラ FORTRAN90/SX および C++/SX では、SX-9 のハードウェア性能をより引き出すため、最適化機能の強化、メモリアクセス高速化のためのベクトルデータ・バッファリング機能の追加を行っています。また、プログラム実行解析情報出力機能および簡易性能解析機能でより詳細な性能情報を表示する強化も行いました。本稿ではこれらの新機能についてご紹介します。

1. はじめに

スーパーコンピュータ SX-9 は、SX-7、SX-7C から大幅に強化された強力なハードウェア機構により、科学技術計算分野における大規模超高速演算のニーズに応える高い演算性能を実現しています。この SX-9 の強化されたハードウェアを使いこなし、高い演算性能を引き出すためにはコンパイラの能力が重要になります。従来の SX-7、SX-7C でもご利用いただいている Fortran コンパイラ FORTRAN90/SX および C、C++コンパイラ C++/SX も、SX-9 向けに最適化、自動ベクトル化、自動並列化機能が強化され、SX-9 の高い演算性能を容易に引き出すことができます。また、SX-9 で新しく追加されたハードウェア機構である ADB(Assignable Data Buffer)を利用するための機能も追加されており、これを用いることによりさらに高い演算性能を引き出すことも可能です。

以下では、新しいコンパイラで強化された主要な機能について説明します。

2. 最適化強化

最新の FORTRAN90/SX および C++/SX では、SX-9 のハードウェア向けの最適化強化を行うとともに、ループ最適化/インライン展開/自動並列化機能の解析/変換処理を大幅に見直し、従来と比較して、より多くのループの最適化/並列化、手続き呼び出しのインライン展開を可能とするように改善しました。とくに FORTRAN90/SX では、モジュール、構造型、ポインタ、割付け配列などの Fortran95 機能を使用したプログラムに対する解析能力が改善されています。また、SX-9 の高いベクトル演算性能を引き出すために 2 つの新しいループ最適化機能も追加しました。

以下ではこれらのループ最適化機能と SX-9 向けの命令並べ換え最適化について説明します。

2.1 IF 構文のメモリ参照最適化

SX-9 は 1CPU 内に 8 本のベクトル演算パイプラインを持ち、最大 102.4GFlops という非常に高い演算性能を実現しています。この SX-9 の演算能力を最大限引き出すためには、ベクトル演算パイプラインを遊ばせないようにループ内の演算比率を高める最適化が重要になります。

FORTRAN90/SX と C++/SX は、演算比率を高めるための新しい最適化として、ベクトル化可能なループ内の IF 構文の全ての THEN、ELSE ブロック内に同一配列要素への代入が現れる場合、その配列に対するベクトルストア回数を削減する機能をサポートしました。

この最適化は FORTRAN90/SX ではコンパイラオプション **-C hopt** 指定時、または新しく追加された詳細オプション **-Wf"-pvctl cond_mem_opt"** 指定時に有効となります。C++/SX ではコンパイラオプション **-Chopt**、または **-Caopt** 指定時に有効となります。

以下の Fortran プログラムの例で、本最適化について説明します。

例 1

```
DO I=1, N
   IF(X(I).NE.0.0) THEN
```

```
      Y(I)=X(I)*2.0
    ELSE
      Y(I)=0.0
    END IF
END DO
```

このループでは、IF 構文の THEN ブロックと ELSE ブロックの両方で配列 Y(I)への代入が行われています。このループをそのままベクトル化したときのベクトル命令列のイメージは以下のようになります。

ベクトル命令列のイメージ:

```
mask(1:N) ← X(1:N).NE.0.0                          ベクトルマスク生成
vr1(1:N)  ← X(1:N)*2.0 WHEN(mask(1:N))             ベクトルレジスタへの移送
Y(1:N)    ← vr1(1:N)   WHEN(mask(1:N))             ベクトルストア
vr2(1:N)  ← 0.0        WHEN(.NOT.mask(1:N))        ベクトルレジスタへの移送
Y(1:N)    ← vr2(1:N)   WHEN(.NOT.mask(1:N))        ベクトルストア
```

mask :　　ベクトルマスクレジスタ
vr1, *vr2* :　ベクトルレジスタ

生成されたベクトル命令列には、THEN、ELSE ブロック中の Y(I)への代入に対応した 2 個のベクトルストアが含まれています。

これに対し、本最適化を適用すると元のループは以下のように変形されます。

最適化による変形イメージ:

```
DO I=1, N
  IF(X(I).NE.0.0) THEN
    wky=X(I)*2.0          ! Y(I) を 作業変数 wky に置換
  ELSE
    wky=0.0               ! Y(I) を 作業変数 wky に置換
  END IF
   Y(I)=wky               ! wky の値を Y(I) へ代入
END DO
```

この変形により、以下のようなベクトル命令列が生成されます。

最適化されたベクトル命令列のイメージ:

```
mask(1:N) ← X(1:N).NE.0.0                          ベクトルマスク生成
vr(1:N)   ← X(1:N)*2.0 WHEN(mask(1:N))             ベクトルレジスタへの移送
vr(1:N)   ← 0.0        WHEN(.NOT.mask(1:N))        ベクトルレジスタへの移送
Y(1:N)    ← vr(1:N)    WHEN(.NOT.mask(1:N))        ベクトルストア
```

mask : ベクトルマスクレジスタ
vr　: ベクトルレジスタ

最適化前と比べるとベクトルストアが 1 個に削減されています。これにより、実行性能が改善されます。

2.2 ショートループ条件ベクトル化

総和や内積、最大値/最小値といったマクロ演算を含むループに対し、実行時にループ長をチェックし、最大ベクトルレジスタ長以下の場合に専用の高速なベクトルコードを実行するショートループ条件ベクトル化機能をサポートしました。

総和や内積、最大値/最小値などは科学技術計算でよく使用される演算です。これらの演算はループ

の1つ前の繰り返しで求めた値を用いて次の値を計算するため、加算や乗算などのような通常のベクトル命令では計算できません。しかし、SX では総和や最大値・最小値を求める専用の特殊なベクトル命令(マクロ演算命令)を持っているため、これらの演算もベクトル化して高速に実行できます。ただし、これらのマクロ演算命令は通常のベクトル演算命令と比べると低速なので、まず通常のベクトル演算命令を用いて、最大ベクトルレジスタ長(1 つのベクトル命令で処理できる最大要素数。SX では256)以下の個数の部分解を求め、最後にその部分解に対してマクロ演算命令を1回だけ用いて最終的な結果を求めるベクトルコードを生成します。たとえば例 2 に示す総和の場合、まずベクトル加算で最大ベクトルレジスタ長(MaxVL)個の部分和を求め、最後にその部分和についてベクトル総和命令を使い最終的な総和結果を求めます。

例 2　総和

```
DO I=1,N
  S = S + X(I)
END DO
```

ベクトルコードのイメージ:

```
vr(1:MaxVL)=0.0
DO I=1,N, MaxVL                    ! MaxVL 個毎に分割
  L = MIN(MaxVL,N-I)
  vr(1:L) = vr(1:L) + X(I:I+L)     ! ベクトル加算で vr の各要素に部分和を求める
END DO
S = S + VSUM(vr(1:MaxVL))          ! ベクトル総和命令で部分和の総和を求める
```

この例において、ループ長 N が MaxVL 以下 (ショートループ) の場合は、MaxVL 個毎に分割して部分和を求める処理を行わなくても、直接ベクトル総和命令を用いて結果が得られます。

ループ長が MaxVL 以下であることを、コンパイル時にコンパイラが認識できる場合は、部分和を求めるループを省略して総和を直接ベクトル総和命令により求めるショートループコードが生成されます。しかし、ループ長がコンパイル時に不明な場合は、ループ長が MaxVL 以上であっても正しい結果が得られるようにするため、部分和を求めるループを省略することはできません。

ショートループ条件ベクトル化は、ループ長が不明なループに対して、総和、内積、累積、最大値/最小値を直接マクロ演算命令で求めるショートループ用ベクトルコードと通常のベクトルコードの両方を用意し、実行時にループ長をチェックし、MaxVL 以下の場合はショートループコードを、ループ長が MaxVL を越える場合は通常のベクトルコードを実行するベクトル化を行う最適化です。

ショートループ条件ベクトル化は、詳細オプション**-pvctl altcode=short** を指定してコンパイルするか、ベクトル化指示オプション **ALTCODE=(SHORT)**をループに指定したときに適用されます。

以下に、Fortran プログラムでベクトル化指示オプション ALTCODE=(SHORT)を用いたショートループ条件ベクトル化の例を示します。

例 3 ショートループ条件ベクトル化

```
!CDIR ALTCODE=(SHORT)
      DO I = 1, N
         S = S + X(I)
      END DO
```

↓　***条件ベクトル化***

```
      IF(N.LE.MaxVL) THEN          ! ループ長 N が最大ベクトルレジスタ長以下か?
        S = S + VSUM(X(1:N))       ! ベクトル総和命令1命令で S の値を求める
      ELSE
```

```
      DO I = 1, N                    !N > 最大ベクトルレジスタ長の場合
        S = S + X(I)                 ! 通常のベクトル総和コードを実行
      END DO
    END IF
```

マクロ演算を含むループにおいて、ほとんどの場合はループ長が MaxVL 以下であるが、MaxVL を越えるケースが 0 ではないとき、このショートループ条件ベクトル化を適用することにより実行性能が向上します。

ループ長が MaxVL を越える比率が高い場合にショートループ条件ベクトル化を適用すると、ループ長判定のためのオーバーヘッドにより、性能改善が見られない、または逆に性能が低下してしまうことがありますので注意してください。また、ループ長が MaxVL を越えないことが保証できる場合は、

ALTCODE=(SHORT)ではなく SHORTLOOP 指示オプションを指定してコンパイラにそのループが常にショートループであることを教えたほうが、より効率のよいベクトルコードが生成されます。

2.3 SX-9 対応の命令並べ換え最適化

SX-9 は、乗算と加算をそれぞれ 2 個ずつ、論理演算 1 個、除算・平方根演算 1 個の合計 6 個のベクトルパイプラインを備えており、2 個の乗算と 2 個のベクトル加算、ベクトル論理演算、ベクトル除算(または平方根)の同時実行が可能です。SX-9 の性能を引き出すにはこれらのベクトルパイプラインを可能な限り並列動作させることが重要となります。

FORTRAN90/SX と C++/SX は、SX-9 のハードウェアの動作をシミュレートし、ハードウェア資源を最大限活用できるように命令列を最適な順番に並べ換えます。その際には、分岐命令をまたいだ広範囲の命令列を対象に命令を並べ換え、より多くの同時実行可能な命令を探し出すことができます。

たとえば、以下のような Fortran の配列代入文

```
X(:)= 2.0*ABS(A(:))+3.0*ABS(B(:))+4.0*C(:)
```

に対して生成されるベクトル命令列のイメージは以下のようになります。

ベクトル命令列のイメージ

```
vand   vt1,0x7fffffff,A
vfmul  vt2,2.0,vt1
vand   vt3,0x7fffffff,B
vfmul  vt4,3.0,vt3
vfadd  vt5,vt2,vt4
vfmul  vt6,4.0,C
vfadd  X,vt5,vt6
```

※ vand　：ベクトル AND (ABS に対応)
　 vfmul：ベクトル乗算
　 vadd　：ベクトル加算

この例では、配列代入文に対し絶対値 ABS を求めるための 2 個のベクトル AND、3 個のベクトル乗算、2 個のベクトル加算を含むベクトル命令列が生成されています。

コンパイラは、SX-9 のベクトルユニットの動作をシミュレートし可能な限り多くのベクトルパイプラインが同時に動作できるようにベクトルレジスタの割り当てと命令の並べ換えを行い、図 1 に示すように 1 つの AND 演算と 2 個の乗算、2 個の加算の合計 5 個のベクトル演算が同時に動作できるような命令列を生成します。

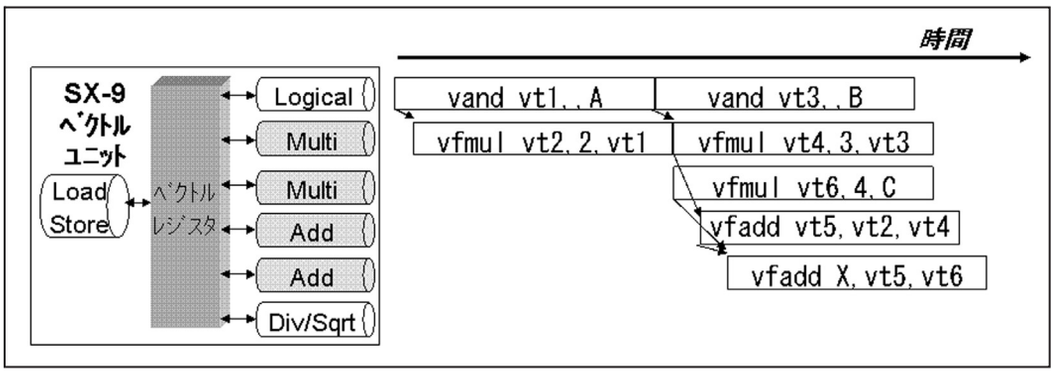


図 1　SX-9 でのベクトル命令列の動作イメージ

3. ベクトルデータ・バッファリング機能

SX-9 では、メモリアクセス高速化のために ADB (Assignable Data Buffer)と呼ばれるハードウェア機構が主記憶とベクトルレジスタの間に追加されました。ADB は主記憶より高速アクセスが可能な記憶領域です。FORTRAN90/SX と C++/SX は、この ADB をプログラムから利用するためのベクトルデータ・バッファリング機能をサポートしました。

3.1 ADB(Assignable Data Buffer)

ADB は通常のキャッシュとは異なり、選択的にデータをバッファリングできます。たとえば、他の配列や変数のアクセスによりデータが ADB から追い出されないように、頻繁にアクセスされる配列のみを ADB にバッファリングしておくことで、その配列を長期間にわたって高速にアクセスできるようになります。

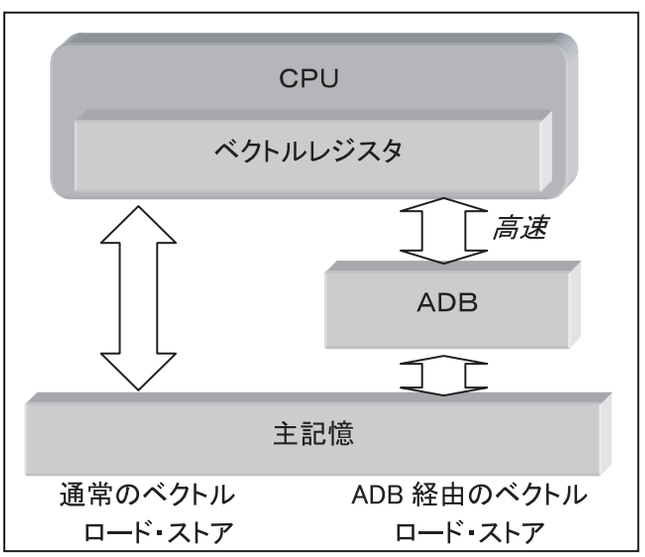


図 2　ADB(Assignable Data Buffer)

ある配列を ADB を使用してアクセスするように指定すると、その配列に対するベクトルロード、ベクトルストアは ADB 経由で行われます。そのとき、それらの最初のベクトルロード、または、ベクトルストアにおいて、データが ADB にバッファリングされます。そして、つぎにそれらのデータを利用するときには、ADB にバッファリングされたデータが使用されます。ADB からは、メモリからロードするより高速にデータをアクセスできるため、2 回目以降のベクトルロードを高速化できます。

3.2　ON_ADB コンパイラ指示オプション

ADB 経由でアクセスする配列の指定には、ON_ADB コンパイラ指示オプションを用います。
FORTRAN90/SX の ON_ADB コンパイラ指示オプションの形式は以下の通りです。

```
!CDIR ON_ADB[(配列変数指定)]
```

C++/SX での形式は以下の通りです。

```
#pragma cdir on_adb[(識別子)]
```

ON_ADB 指示オプションは、ループまたは Fortran の配列式の直前に指定します。配列変数指定や識別子で指定された配列のベクトルロード、ベクトルストアにおいて、定義・参照された配列要素のデータが ADB にバッファリングされます。配列変数指定や識別子が省略されたときは、ループまたは配列式内に現れるすべての配列のベクトルロード、ベクトルストアにおいて、データが ADB にバッファリングされます。

以下に ON_ADB 指示オプションの Fortran プログラムでの使用例を示します。

例 4　ON_ADB の指定例

```
      SUBROUTINE SUB
      COMMON A(4096),B(4096),C(4096)
!CDIR ON_ADB(A)
!CDIR ON_ADB(C)
      DO I=1,4096
            = A(I) + ...          ①
         C(I) = ...               ②
            = A(I) * ...          ③
      END DO
      ...
!CDIR ON_ADB(A)
!CDIR ON_ADB(C)
      DO I=1,4096
         B(I) = A(I) + C(I)       ④
      END DO
      END SUBROUTINE
```

①の配列 A のベクトルロード時に、配列要素 A(1)から A(4096)のデータが ADB にバッファリングされます。
②の配列 C のベクトルストア時に、配列要素 C(1)から C(4096)のデータが ADB にバッファリングされます。
③の配列 A の2番目参照では、①で ADB にバッファリングされた A のデータがベクトルロードされます。
④の 2 番目のループの配列 A、C の参照では、①②で ADB にバッファリングされた配列 A、C のデータがベクトルロードされます。
配列 B は ON_ADB 指示オプションで指定されていないため、ADB を経由せずメモリに直接ベクトルストアされます。したがって、配列 B のデータは ADB にバッファリングされません。

なお、多重ループの外側ループに ON_ADB 指示オプションを指定したときには、そのループに含まれる内側ループには効果は及びませんので注意してください。たとえば、例 5 に示す 2 重ループで配列 B を ADB にバッファリングしたい場合は、内側ループ DO I=1,500 に対して ON_ADB 指示オプションを指定する必要があります。

例 5　多重ループ

```
        DO J=1,100
!CDIR ON_ADB(B)
```

```
    DO I=1,500
      B(I,J) = A(I,J) + C(I,J)
    END DO
  END DO
```

4. プログラム実行解析情報出力機能／簡易性能解析機能強化

FORTRAN90/SXとC++/SXは、従来からプログラムのさまざまな性能情報を簡単に知ることができるプログラム実行解析情報出力機能(proginf)および簡易性能解析機能(ftrace)を提供しています。新しいコンパイラでは、メモリ性能指標のひとつであるバンク競合時間を CPU ポート競合時間とメモリネットワーク競合時間に分けて表示し、より詳しい情報を得られるよう強化されています。

4.1 バンク競合

SX-9 の主記憶は最大 32768 個のバンクで構成され、おのおののバンクに対して並列にロード、ストアを行うことができます。しかし、1つのバンクに対しては同時には1つのロード、ストア要求しか発行できないため、その要求が1つのバンクに重なると前の要求によるロード、ストアが完了するまで後の要求は待たされます。この性能低下をバンク競合と呼びます。バンク競合は競合の発生する場所により、さらに 2 種類に分類されます。SX における CPU と主記憶の接続の概念図は図 3 のようになります。

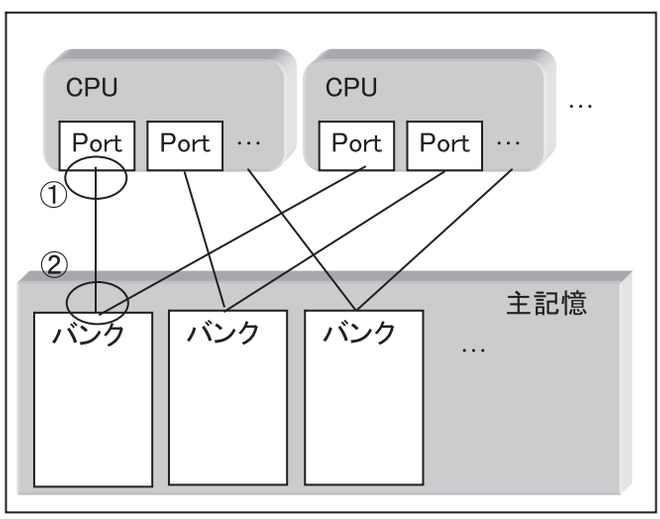


図 3 SX-9 の CPU と主記憶の接続

SX では CPU 内にある複数のポートと呼ばれる部分を通して主記憶と接続されています。ロード、ストアで主記憶の特定のバンクに対して要求が集中したとき、そのバンクに対応する特定のポートのみが使用され競合が発生します(①)。これを CPU ポート競合と呼びます。一方、主記憶側の接続部分②で発生する競合をメモリネットワーク競合と呼びます。

メモリネットワーク競合は、ひとつの CPU からのロード、ストアだけでなく、ノード内のほかの CPU から同一のバンクにロード、ストアの要求が集中したときにも発生します。たとえば、次のようなケースでも発生することがあります。

- 自動並列化、OpenMP 並列化されたプログラムの複数のタスクから同時に同一のバンクにアクセスしたケース。同一の配列要素、スカラ変数を複数のタスクで参照しているときなどに発生する。
- 同じノード上で実行されている別のプログラムが、たまたま同一のバンクに繰り返しアクセスするケース

一般的には、自動並列化、OpenMP 並列化されたプログラムの複数のタスクから同時に同一のバンク

にアクセスした場合にメモリネットワーク競合が発生しやすくなります。

4.2 プログラム実行解析情報

環境変数 F_PROGINF または C_PROGINF に DETAIL を指定した場合のプログラム実行解析情報の出力例を図 4 に示します。

網掛け部分の「CPU ポート競合（秒）」に CPU ポート競合時間が、「メモリネットワーク競合（秒）」にメモリネットワーク競合時間が、それぞれ秒単位で表示されます。

```
            ******  プログラム情報  ******
経過時間（秒）                  :          30.039067
ユーザ時間(秒)                  :          28.297595
システム時間（秒）              :           0.017765
ベクトル命令実行時間（秒）      :          28.263599
全命令実行数                    :       11892009287.
ベクトル命令実行数              :        6099457558.
ベクトル命令実行要素数          :     1528191109757.
浮動小数点データ実行要素数      :      880815869041.
MOPS 値                         :       54208.977057
MFLOPS 値                       :       31126.881228
平均ベクトル長                  :         250.545412
ベクトル演算率（%）             :          99.622385
メモリ使用量（MB）              :         512.031250
MIPS 値                         :         420.248061
命令キャッシュミス（秒）        :           0.002944
オペランドキャッシュミス（秒）  :           0.011593
バンクコンフリクト時間
  CPU ポート競合（秒）          :           0.455945
  メモリネットワーク競合（秒）  :           2.416176

開始時刻（日付）        :  2008年  9月 19日 金曜日 17:57:42 JST
終了時刻（日付）        :  2008年  9月 19日 金曜日 17:58:12 JST
```

図 4　プログラム情報の表示例

4.3 簡易性能解析機能

以下に簡易性能解析機能(ftrace)の出力例を図 5 に示します。

網掛けされた欄の「CPU PORT」に CPU ポート競合時間、「NETWORK」にメモリネットワーク競合時間が、それぞれ秒単位で表示されます。

```
*-------------------------*
  FLOW TRACE ANALYSIS LIST
*-------------------------*

Execution Date : Fri Sep 19 17:58:12 2008
Total CPU Time : 0:00'28"266 (28.266 sec.)

PROG.NAME  FREQUENCY  EXCLUSIVE       AVER.TIME     MOPS   MFLOPS V.OP  AVER.    VECTOR I-CACHE O-CACHE  BANK CONFLICT
                      TIME[sec](  %  )    [msec]                  RATIO V.LEN      TIME    MISS    MISS CPU PORT NETWORK

sub5           1275    23.255( 82.3)    18.239  61136.0  35800.2 99.62 250.2    23.248  0.0007  0.0036   0.034    0.911
sub3            500     4.784( 16.9)     9.567  20427.7   8298.5 99.69 256.0     4.781  0.0002  0.0010   0.061    1.840
sub7             24     0.147(  0.5)     6.124  72093.7  50785.4 99.93 250.3     0.146  0.0000  0.0005   0.001    0.006
main              1     0.039(  0.1)    39.140  47202.8   4145.6 99.52 256.0     0.029  0.0008  0.0040   0.000    0.001
sub3              9     0.031(  0.1)     3.432  49334.3  21004.3 99.79 256.0     0.031  0.0000  0.0000   0.002    0.013
sub6             24     0.007(  0.0)     0.301  67647.3  37418.1 99.57 256.0     0.007  0.0000  0.0000   0.000    0.002
sub4              1     0.003(  0.0)     2.501  43833.8  21628.6 99.80 250.3     0.002  0.0000  0.0000   0.000    0.000
sub10             1     0.001(  0.0)     0.892    150.6      1.8  0.96   7.6     0.000  0.0001  0.0002   0.000    0.000
sub8              1     0.001(  0.0)     0.563    150.5      0.8 39.48 244.1     0.000  0.0002  0.0002   0.000    0.000
sub1              1     0.000(  0.0)     0.245  18648.4      0.0 98.46 256.0     0.000  0.0000  0.0000   0.000    0.000
sub9              1     0.000(  0.0)     0.004    175.4     70.7 58.62  36.0     0.000  0.0000  0.0000   0.000    0.000
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
total          1838    28.267(100.0)    15.379  54268.1  31160.9 99.62 250.5    28.245  0.0020  0.0094   0.098    2.773
```

図 5　簡易性能解析情報の表示例

5. おわりに

本稿では、FORTRAN90/SX と C++/SX の新機能について紹介いたしました。ここで紹介した各機能が皆様のプログラムの開発やチューニングの一助となれば幸いです。

弊社は SX-9 のハードウェア性能をさらに引き出すため、今後も継続してコンパイラの最適化および言語機能の強化・改善を行っていく予定です。

参考文献

[1] 横谷雄司、工藤淑裕他,“SX-9 の言語処理系”,NEC 技報,Vol.61,No.4,pp.49-53,2008



［共同研究成果］

スーパーコンピュータSXと月探査
―「かぐや」による月地下構造探査―

小林敬生[1)]　小野高幸[2)]
[1)]韓国地質資源研究院　[2)]東北大学大学院地球物理学専攻

1.　はじめに

2007年9月14日、日本の月探査機 SELENE が無事打ち上げられ「かぐや」と名付けられた。「かぐや」は月の全球探査を実現するため極軌道を周回しており搭載された15の科学観測機器をつかって月の起源・進化の解明にせまるべく観測を続けている[1]。

搭載機器のひとつに我々のグループが担当している月レーダサウンダ(Lunar Radar Sounder: LRS)[2]がある。LRSは高度100kmの周回軌道から月の地下構造を観測するレーダである。観測中心周波数は短波（HF）帯の5MHzであり長さ30mの直交1対のダイポールアンテナでレーダパルスの送受信を行なう。最大探知深度は5kmと見積もられている。

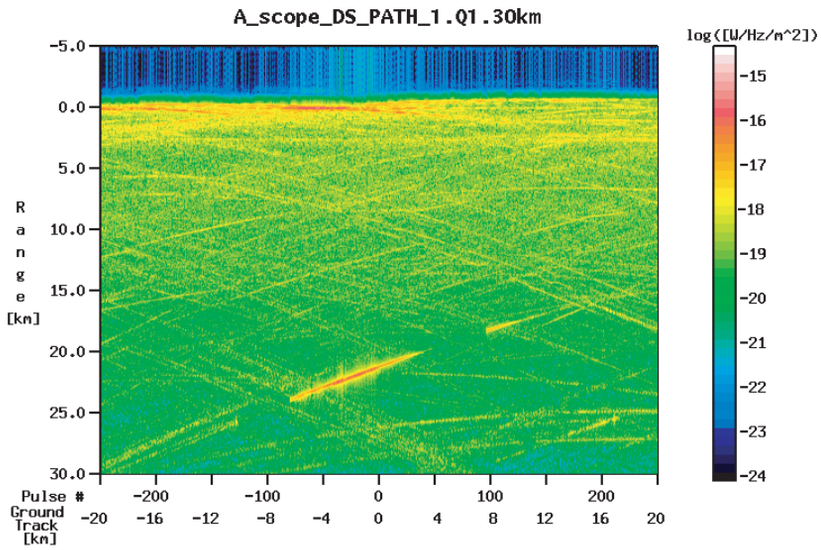
「かぐや」打ち上げ前のLRSの開発には東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータSXが深く関わってきた。そして現在進められているLRSのデータ解析でもSXが重要な役割を果たしている。本稿ではLRSの月地下構造探査研究におけるスーパーコンピュータSXの役割について紹介する。

2.　SXによるLRS観測シミュレーション

月・惑星探査機に搭載される機器は搭載前に試験を行ない、機器性能の確認とデータ取得に関わる一連の作業の確認を行なう。そして地上試験で得られたデータを利用してデータの処理・解析プログラムの開発を進める。LRSもその例外ではない。しかし、LRSの場合レーダ送受信機単体の試験はできるが、長さ30mのアンテナを展開して実際にレーダパルスを発射する観測試験をすることは不可能であった。そのままでは実際の観測が始まって観測データが届くまで、データ処理・解析プログラムの有効な開発ができなくなってしまう。この問題を解決するために我々はLRSの月地下構造探査の観測を精密に模擬するシミュレーションコードを開発することにした。

シミュレーションではシミュレーション空間内に数値的に模擬月面を構築し、その100km上空の軌道に沿って「かぐや」を移動させながらLRS観測を行なった[3]。観測データは1次処理を施してB-scan画像と呼ばれるものに編集する。B-scan画像とはレーダエコーを返すターゲットまでのレンジを縦軸にとり、横軸にレーダの移動距離をとったものでエコー強度をカラーコードで表したものである。図1はシミュレーションによって得られた「かぐや」LRS観測模擬データのB-scan画像と実観測で得られたB-scan画像の比較である。どちらもクレータ地形が卓越した高地領域を観測したものであるが、SXによるシミュレーションが実観測を非常によく模擬していることが分かる。図中に見える無数の引っ掻き傷のような双曲線模様は表面のクレータからの反射波によるものでLRSとクレータとの相対位置が「かぐや」の軌道運動によって変化することにより生じるパターンである。

現在実観測データの解析に使っている解析データの基礎は「かぐや」打ち上げ前、シミュレーションによって得られた模擬観測データを使って開発された。このシミュレーションは原理的に大きなメモリ空間が要求されるもので現実的な時間内に計算を終えるためにはスーパーコンピュータの利用が不可欠であった。



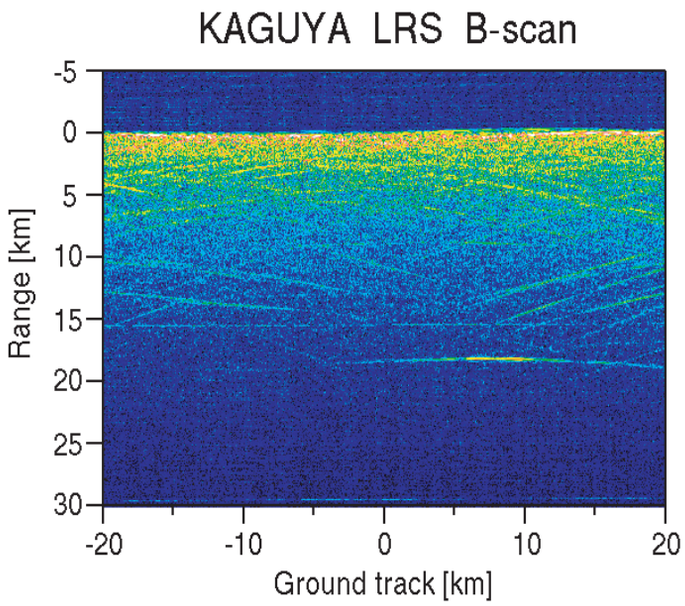


図 1　LRS B-scan 図の SX シミュレーション結果（上）と「かぐや」実観測データ（下）の比較．受信信号強度を表すカラーコードは共通．無数の曲線パターンは月表面のクレータからの反射によるものである．実観測データでは遠距離からのエコーがシミュレーション結果に比べて弱い．これは実際のクレータ地形がシミュレーションで作られたクレータ地形よりもなだらかなため、表面からの後方散乱波強度が弱いことによる．下図のデータは「虹の入り江」南西部の月面西経 42 度，北緯 38 度付近の観測で得られたものである．

3.　SX による LRS 観測データの合成開口処理

3.1　B-scan 画像による地下エコーの検出

LRS データの解析はこれまで B-scan 画像を解析することにより行なわれている。B-scan 画像に現れるレーダエコーのパターンを分析して地下構造を調べていくのである。地下からのレーダエコーは地下伝搬中に強く減衰するため実際のデータ解析の現場ではまずそれを検出することが重要である。

地下エコーの検出作業は目視で行なわれる。検出をできるだけ容易にするための平均処理や強調処理などの前処理はなされるものの、最終的な検出作業は目視による確認である。図２に観測で得られた B-scan 画像を示す。このデータは 2007 年 11 月 21 日に「雨の海」を観測して得られたものである。ランダムな表面クラッタを抑圧するため 10 パルスの平均をとっている。図 2 を見ると、まず緯度 38 度から 39 度までの間、深さ数百 m までの地下の浅いところに表面と平行に走る微かな地下エコーの存在が認められる。また緯度 39.5 度から 40 度までの間には数百 m までの深さにこれも微かではあるが複数の地下エコーの存在も認められる。

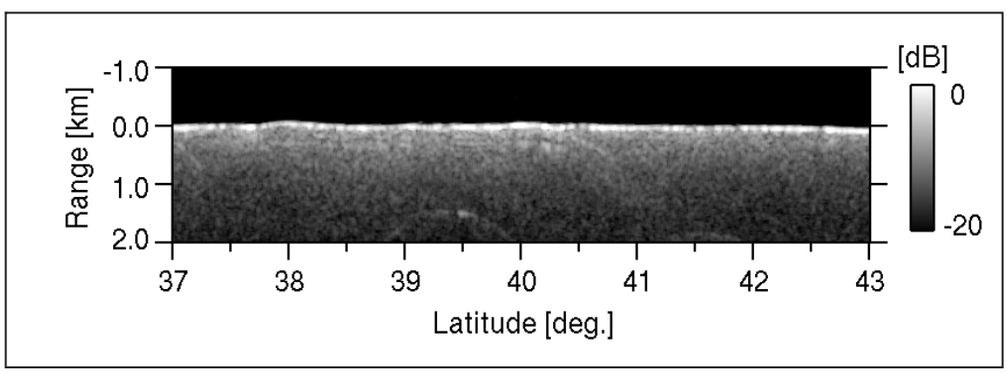


図２「かぐや」LRS 観測で得られた B-scan 図. 観測領域は「雨の海」北部.

3.2　SAR 解析による地下可視化

LRS は機器本体のノイズレベルが銀河背雑音レベルよりも低く抑えられた高性能のレーダシステムである。データの質としては現在望みうる最高の観測を実現している。それにもかかわらず、われわれの目標である地下エコーが元来弱い反射である上に地下伝搬中に著しい減衰を受けるため、実際のエコー検出作業は図２から容易に想像される通りなかなか大変な作業である。われわれはこの状況を改善するために合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）のアルゴリズム[4]を LRS データに適用して「かぐや」軌道直下点深さ方向の地下構造画像再構成を試みることにした。

SAR は地球観測では広く利用されており惑星探査でも「マゼラン」[5]による金星表面撮像や「カッシーニ」[6]による土星の衛星タイタンの表面撮像で活躍している。これらの SAR はすべて指向性アンテナを用いたマイクロ波レーダによる「表面撮像」を目的としている。われわれが試みる LRS-SAR は無指向性アンテナ（ダイポールアンテナ）を用いた短波帯レーダサウンダによる「地下構造可視化」であるという点でまったく新しい試みである。

通常、合成開口レーダではレーダ本体とともに「SAR プロセッサ」と呼ばれる SAR 信号処理に特化したハードウエアを作製して信号処理を行なう。しかし、LRS は「SAR プロセッサ」を装備していないためソフトウエアでそれを代替させる必要がある。ところが「SAR プロセッサ」アルゴ

リズムをそのままソフト化すればよいのかというとそうではない。LRS-SAR にはこれまでのマイクロ波 SAR と決定的に違う点がひとつある。それは可視化目標物が地下に存在しているという点である。つまり媒質の不連続（真空と地下媒質）と媒質境界面（月面）での電波の屈折を考慮しなければならないという点である。そのため、LRS-SAR アルゴリズムでは、まず表面を検出しそれから深さ方向に順次 SAR 処理を行なうこととした。このため、アルゴリズムは複雑になったが、おかげで表面直下点の地形が精度よく検出されることとなり地下構造の直観的把握の手助けが得られることとなった。

図３に図２の LRS データに SAR 処理を施した結果を示す。両図を比較すると SAR 処理の結果、地下構造の視認性が明らかに向上したことがわかる。特に図２では明白ではなかった微細構造、さらに図２では検知できなかった緯度 41° ～41.5° の地下構造が SAR 処理により浮かび上がってきたことに注目したい。

SAR アルゴリズムの最大の利点は衛星の運動方向の空間分解能が著しく向上する点にある。このおかげで厚い雲の下に隠されていた金星やタイタンの表面があたかも光学写真を見るかのごとく「見える」ようになったのである。SAR アルゴリズムにはもうひとつ大きな利点がある。それは、可視化される目標物からの信号だけが強調され，目標物信号に重畳して受信されるクラッタやノイズのレベルが抑圧されるという点である。これは、SAR アルゴリズムの原理が「予測される」目標物からの信号（参照信号）と観測データとの相関処理であることによる。すなわち、参照信号と同じ形をした目標物エコーが相関処理により強調され、参照信号と無相関なクラッタやノイズは相関処理のため抑圧されるのである。このおかげで地下エコーは強調される一方で地下エコーと重畳して受信される表面クラッタは抑圧され、図３に見られる通りコントラストが改善されて地下エコーの視認性が向上するのである。

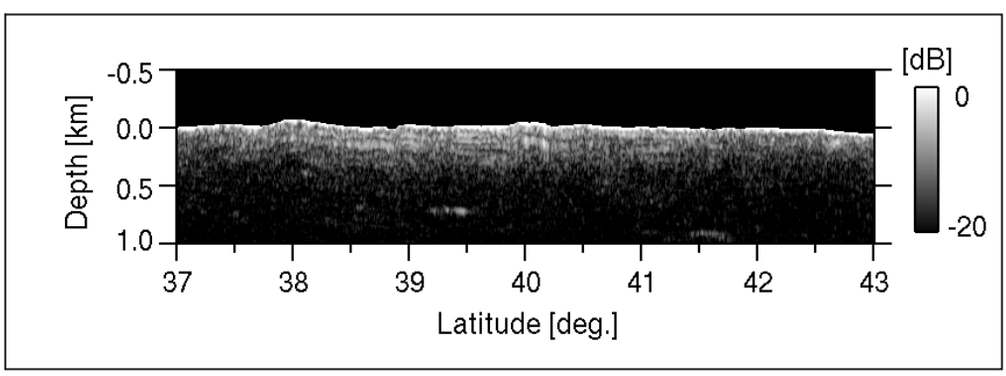


図 3 図 2 の観測データの SAR 処理画像．地下エコーの視認性が向上している．

3.3 SX によるデータ処理

当初 LRS データの処理は PC でも十分こなせるものと考えられてきた。図 1 に示した B-scan 処理だけならこれは正しい。しかし、SAR アルゴリズムの開発を進めてみると SAR 処理を PC 上で現実的な時間で終わらせることは無理であることがわかった。図２のデータから図３のデータを得るのに要する処理時間は PC で 15 分程度である。SAR 処理を待っているデータは各観測データセットの大きさが図２のデータの数倍程度（図２では緯度 7 度分の範囲が示されているが通常のデータセットは 20～25 度分の範囲をカバーする）、そしてこれまでに選ばれた月面の探査解析領域をカバーする観測（パス）数は 3000 を超える。PC で処理を行なう場合メモリの制限が厳しいので観測データを小分けにして SAR 処理をした後データの編集を行なうという作業も必要となる。

このため必要な処理時間はさらに膨らむ。PC での SAR アルゴリズム開発を離れてからは SX にあわせて最適化されるようアルゴリズムにかなり手を入れたので単純な比較はできないが、体感速度としては SX における SAR 処理速度は PC におけるそれの数十倍から 100 倍程度はあるように思える。律速段階となっているのはデータの読み書きである。読み込む LRS 観測データは通常 300MB 程度で書き出す SAR データは 100～150MB である。

4. むすび

スーパーコンピュータ SX を利用した月探査衛星「かぐや」の地下探査レーダ LRS の観測データの解析についてこれまで SX が「かぐや」計画の中で果たしてきた役割の簡単な紹介とともに SX を利用した最新の観測データの処理について紹介した。東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX は大学の研究の場で主にシミュレーションなどの数値解析・数値計算で活用されているが、本稿で紹介したように大量の自然観測のデータの高度処理・解析においても重要な役割を果たす。SX による LRS データの直下点地下構造 SAR 解析は着々と進んでいる。今後はこの SAR 解析が終了した後、側方視の SAR 解析[7]を行なうことを検討している。LRS で見える「表面」は光で見える「表面」よりも少し深いところであることがこれまでのデータ解析でわかってきた。このことから光とは異なる「表面」の様相が現れることが期待される。解析で明らかになる地下構造情報から月の進化の歴史を再構成することがこの LRS 観測研究の最終的な目標である.

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。

参考文献

[1] http://www.selene.jaxa.jp/index_j.htm
[2] Ono et al., Instrument and observation target of the Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft, Earth, Planets and Space, vol.60, pp. 321-332, 2008
[3] 小林 他, SELENE 計画　月レーダサウンダによる月地下構造探査の計算機シミュレーション, SENAC, vol.32, 1999
[4] Curlander and McDonough, Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing, Wiley: New York, 1991
[5] W. T. K., Johnson, Magellan imaging radar mission to Venus, Proc. IEEE, vol.79, pp.777-790, 1991
[6] Elachi et al., Cassini Titan radar mapping, Proc. IEEE, vo.79, pp.867-880, 1991
[7] Kobayashi and Ono, SAR/InSAR observation by an HF sounder, J.Geophys.Res, doi:10.1029/2005JE002576, 2007

白

［共同研究成果］

大規模非圧縮性流体シミュレーションの工学問題への応用

高橋　俊[*1]　　石田　崇[*1]　　中橋　和博[*1]
小林　広明[*2]　　岡部　公起[*2]
下村　陽一[*3]　　曽我　隆[*3*4]　　撫佐 昭裕[*3*4]
[*1] 東北大学大学院　工学研究科　航空宇宙工学専攻
[*2] 東北大学　サイバーサイエンスセンター
[*3] 日本電気
[*4] 東北大学大学院　情報科学研究科

1. 緒言

計算機を用いた流体シミュレーションが始められてから現在までを俯瞰すると，そこには幾度かの変遷があったように見受けられる．シミュレーションが行なわれ始めた当初は最も単純な等間隔の直交格子が広く用いられた[1]．それからさらに実用的な工学問題を扱う際に重要になったのが境界層を正確に解像することである．等間隔の直交格子を用いた場合，流れの Reynolds 数の約 4 分の 9 乗に比例して格子点が増加するが，大多数の実工学問題における Reynolds 数は 100,000～10,000,000 程度となるため，当初の流体シミュレーションでは計算資源上不可能であった．

そこで遠方で格子点を節約して解析することができる構造格子(境界適合格子)が直交格子に代わって用いられるようになった．これにより流体シミュレーションの実用性は大きく向上したが，さらに実用的な応用計算へと研究者たちの興味が移っていくと再度問題が生じた．それはより実際の工学製品に近い 3 次元複雑形状周りの格子生成にかかるコストである．実際の流体シミュレーションに必要なのは数時間から数日であるにも関わらず，その際に用いられる計算格子の生成に数週間から数ヶ月を要することもあった．対応策として重合格子法などにより多数の格子を重ね合わせて複雑形状を表現する手法も考案されたが，計算アルゴリズムが多くの内挿計算により煩雑化するなどの難点もあり，複雑形状周りのシミュレーションに構造格子法が向かないということは本質的に変わらなかった．

そこで注目されたのが非構造格子法である．形状融通性に富むこの手法はほぼ 3 次元の任意形状周りに格子を生成することができ，また格子の粗密制御も比較的容易なことから現在では世界中で用いられている．だがこの非構造格子法にも難点はある．まず，非構造格子は確かに形状融通性に富んでいるのだが，複雑形状周りの格子生成には熟練した技術が必要とされることである．さらに格子点の並びが不規則であるため高い空間解像度を実現することが難しく，解析プログラムも複雑になりがちである．

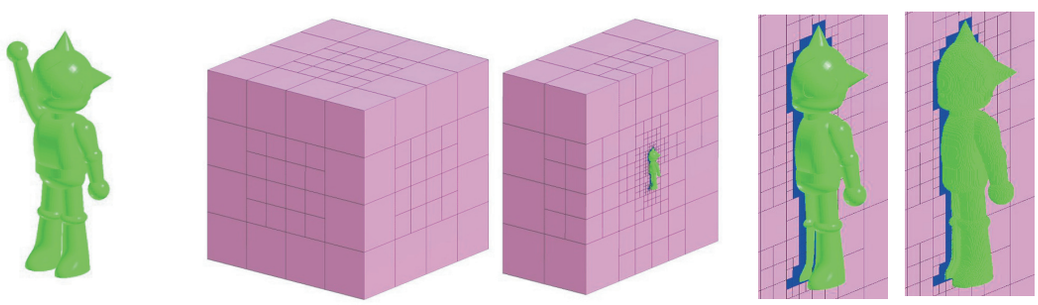
ここまで流体シミュレーションの中でも特に工学的なアプリケーションに使われる

格子の変遷を追ってきたが，今後果たしてどのように変化していくかを考えてみる．上に述べたように，今まで流体シミュレーションがより実用的な解析を目指して研究が進められてきた結果として，計算格子は直交格子から構造格子を経て非構造格子へと変わってきた．今後さらに高度な応用計算へと発展するとすれば，現在よりも複雑な形状周りの流れ場において，さらに空間解像度の高い解析が求められるであろう．それに対して，前述したように非構造格子法も個人のスキルによって格子の質が変化してしまう点と空間高解像度を達成することの難しさから，今後のより実用的な計算手法として採用するには若干の不安が残る．そこで一度は応用計算の舞台から降りた直交格子に目を向けてみると，前述の要求をほぼ満たしていることが分かる．直交格子法は格子生成が高速かつ容易で，容易に空間高解像度スキームを構築することができ，等間隔の直交格子を活かすことでプログラム構造も簡略化することができる．ただ一つ，格子点数が膨大になりやすいという難点がこの方法の大きな弱点であったが，今後さらに強力になっていく計算機資源を有効に活用すればこの点は解決することができる．このようなコンセプトに基づいて考え出されたのが本研究室で開発している Building-Cube 法(直交格子積み上げ法)である[2]．本研究では最先端のベクトル並列計算機である NEC SX-9 を用いて，現状の Building-Cube 法の性能を評価，検討し今後の開発に向けた課題を明らかにすることを目的としている．

2. Building-Cube 法

2.1. 計算格子

Building-Cube 法という名前は積み木を意味する Building-Block から付けられた．積み木を構成するパーツは直方体や三角柱だが，Building-Cube 法におけるパーツは大きさの異なる多数の立方体であり，これを本手法では cube と呼んでいる．そしてそれらの cube の中にはデカルト座標系の XYZ 軸に関して完全に等間隔の直交格子が切られており，これを本手法では cell と呼んでいる．



STL 形式の入力ファイル　　全体と物体周りの cube の分布図　　cell による物体のボクセル表現

図 1. Building-Cube 法における計算格子

図 1 に Building-Cube 法における計算格子の例を示す．cube の分布は非等間隔の直交格子に似ており，内部には等間隔の直交格子である cell が存在し，物体はこの cell を用いて図のようにボクセル的に表現されている．この計算格子生成手法に関する詳細は石田の文献[3]に譲るが，cube は八分木法により生成され，その際の交差判定には Tomas の方法が用いられている．この格子生成法を 64 ビットのマルチコアのパーソナルコンピュータ上で OpenMP を用いて並列実行すれば，数億 cell という巨大な計算格子であっても僅か数分で生成することができ，非常に高速かつロバストに格子生成を行なうことができる．またその際にユーザが指定するのは主に領域の大きさと最小格子幅のみであり，格子生成の熟練度に関わらず同質の計算格子を容易に生成することができる．

2.2. 流体計算手法

本計算では支配方程式に式(1)に示される非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い，スタガード格子配置を用いて離散化を行なう．

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \dfrac{1}{\mathrm{Re}}\nabla^2\mathbf{u} \\ \nabla\cdot\mathbf{u} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解くために本研究では MAC 型解法の一つである Fractional-step 法[4-6]を採用した．この手法では，非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を仮の速度場である $\mathbf{u}^*$の式，真の速度場 $\mathbf{u}^{n+1}$ の式，さらにそれら 2 つの式を，運動量方程式の両辺の発散をとることで求められた圧力の Poisson 方程式で関連付けて段階的に解く．

仮の速度場の式は以下のように記述される．ここで対流項を **A**，粘性項を **B** とおき，本研究ではどちらの項も Adams-Bashforth の 2 次精度陽解法で扱っている．対流項と粘性項はそれぞれ 3 次精度風上差分法[7]と 2 次精度中心差分法で離散化されている．

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = -\left(\frac{3}{2}\mathbf{A}^n - \frac{1}{2}\mathbf{A}^{n-1}\right) + \left(\frac{3}{2}\mathbf{B}^n - \frac{1}{2}\mathbf{B}^{n-1}\right) \tag{2}$$

真の速度場の式は以下の式のように書かれる．この真の速度場の式と仮の速度場の式を足し合わせると元の運動量方程式が導かれる．

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\nabla p^{n+1} \tag{3}$$

上記の 2 つの式を，運動量方程式の両辺の発散をとって導かれる以下の圧力の Poisson 方程式によって関連付ける．ここで右辺に表れる次の時間ステップにおける質量保存の

式の項が満たされると仮定する($\nabla\cdot\mathbf{u}^{n+1}=0$)ことで，質量保存則と運動量保存則を関連付けている．この方程式は 2 次精度中心差分法で離散化されており，ボクセル的に壁面に Neumann 境界条件を与えている[8].

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{1}{\Delta t}\nabla\cdot\mathbf{u}^{*} \tag{4}$$

また，Building-Cube 法における格子は前述したように等間隔の直交格子によるマルチブロック格子であるので，各 cube 間での情報交換が必要になる．そこで本手法では全ての cube に数 cell のオーバーラップ領域を持たせて，また隣り合う cube の幾何学的サイズが 2 倍以上の差にならないという制約を課している．これにより物体遠方などのサイズの異なる cube 同士間では 1 次精度の内挿が必要になるが，物体近傍の同じ幾何学的サイズの cube 同士の場合には完全に等間隔の直交格子上で高精度の計算を行なうことができる．

現在のプログラムの構造を図 2 のフローチャートに示す．各手続きはそれぞれ全ての cube に対して実行される．図 2 の中で interface と記されているのが cube のオーバーラップ領域の値を更新する手続きである．

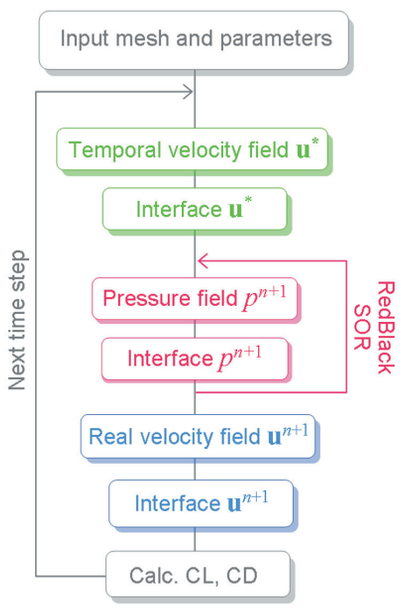


図 2. 計算プログラムのフローチャート

2.4. プログラムの最適化

本手法では今後さらに大規模化する計算機を効率的に活用するために，各 cube の中に配置されている等間隔の直交格子である cell の数を完全に同じにすることで，データ構造を簡略化している．これにより cube の数と同数のプロセスを使用すれば完全に均一の計算負荷で計算を行なうことができる特長を備えている．現在はまだそれだけのプロセスを使用することはできないが，等間隔の直交格子である cell のループに対して一次元化によるベクトル長の伸展など細かな最適化が施されている．また本研究のような MAC 型の解法においては圧力の Poisson 方程式を解く手続きに計算負荷の大部分が費やされるため，この部分のベクトル化が不可欠となる．そこで本手法では超平面法や Red-Black のカラーリングを適用した SOR 法でベクトル演算を活用している．結果として，現在ではシミュレーション全体で 99.9%のベクトル化率を達成するまで最適化が施されている．

3. 解析結果

3.1. Ahmed body 周りのシミュレーション

まず，自動車の簡易モデルとして実験的にも計算的にも広く研究が行なわれている Ahmed body 周りのシミュレーションを行なった[9-14]．計算格子は 32^3 の cell が含まれる 3,048 の cube から構成されており，総 cell 数は 99,876,864 である．Reynolds 数は主流方向の長さを基準長として 2.8×10^6 で，最小格子幅は 1.22×10^{-3} である．計算格子の全体像と物体近くを図 3 に示すが，これは効率的に可視化するために実際に計算に用いられた格子を 1/8 に圧縮したものである．外部の計算条件としては，床面に滑りなし境界条件を与えて他の外部境界では線形外挿を用いている．

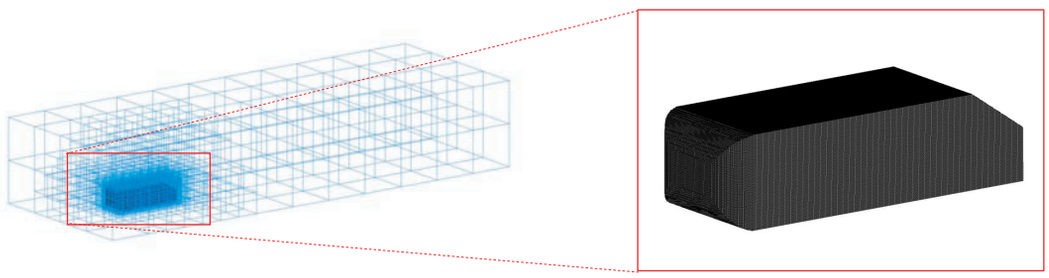


図 3. Ahmed body 周りの計算格子(1/8 に粗視化)

Ahmed body は後部の斜めの傾斜の角度によって様々な流れの様相を検討するために用いられるモデルであるが，一般的によく用いられるのは 25° と 35° のケースで，本計算では 35° のケースを用いて計算を行った．このケースでは後部で大規模な剥離が生じるのが特徴である．図 3 に流れが発達した後に得られた時間平均の結果を示すが，本計算でもその特徴が可視化図のようによく捉えられている．またモデルの中心の平面上における速度プロファイルに関して実験値との比較を行った．赤の線が本計算から得られた結果で，黒の円が実験結果を示しているが，比較的良好な一致が見てとれる．これらの結果から，現在のプログラムによって妥当な結果が得られることを確認した．

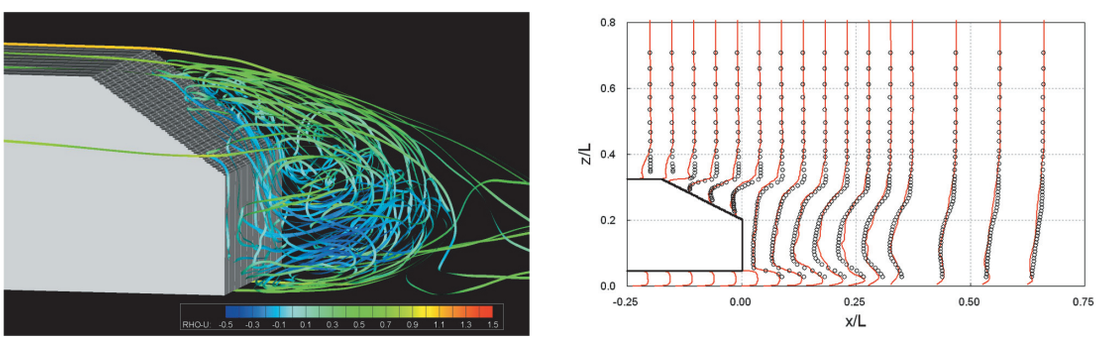


図 4. Ahmed body 周りの可視化結果と速度プロファイルの比較

3.2. フォーミュラカー周りのシミュレーション

前節で記した Ahmed body は比較的単純な形状であったが，次により高度な応用を目指してフォーミュラカー周りのシミュレーションを行なった[15]. 計算格子は 32^3 の cell が含まれる 5,930 の cube から構成され，総 cell 数は 194,314,240 である．Reynolds 数は主流方向の長さを基準長として 14.9×10^6，最小格子幅は 7.32×10^{-4} である．ちなみに総 cell 数が約 2 億という膨大な格子であるが，この格子も Windows のマルチコア PC により僅か数分で作成された．外部の計算条件としては，先ほどと同様に床面に滑りなし境界条件を与えて他の外部境界では線形外挿を用いている．図 5 に物体表面の cell による近似と，時間平均した結果の流線を示す．より現実的なシミュレーションにはタイヤの回転や床面を考慮する必要があり，今後はそれらに取り組む予定である．

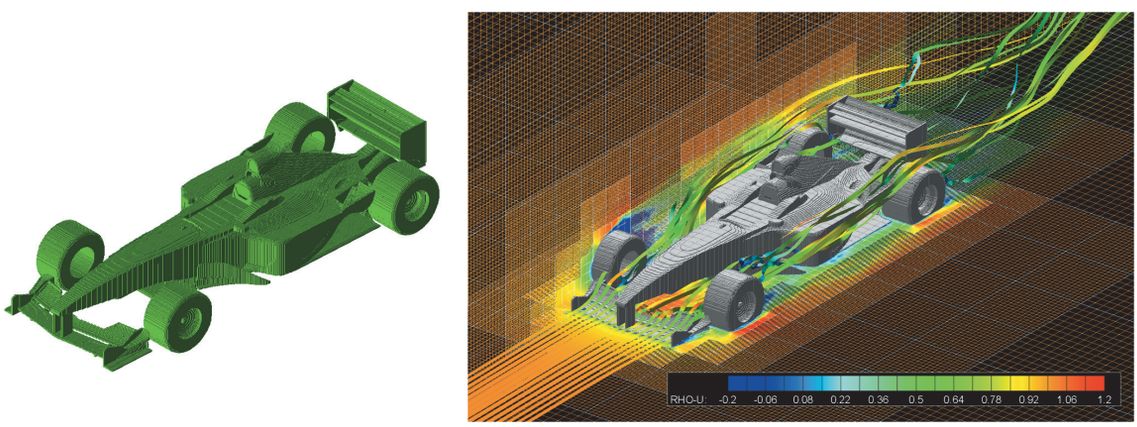


図 5. フォーミュラカー周りの格子と可視化結果(1/8 に粗視化)

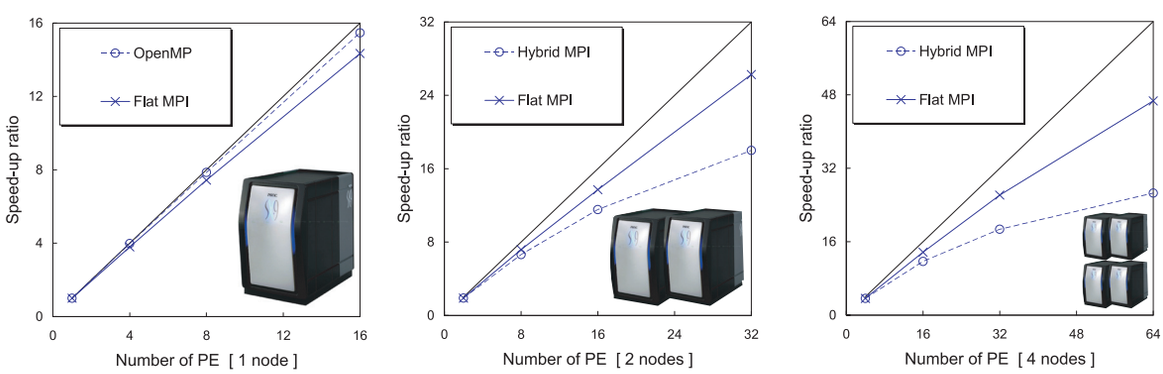


図 6. フォーミュラカー周りの並列シミュレーションにおける速度向上率

図 6 にこのシミュレーションで得られた速度向上率を示した．Flat MPI とは，計算格子を PE と等しい数の領域に分割し，MPI のみで並列計算を行なう処理を指し，一方で

Hybrid MPI とは，計算格子をノードの数に領域分割して各ノード間では MPI による並列計算を行ない, 同時に各ノード内では OpenMP により並列計算を行なう処理を指している．Flat MPI と比較して Hybrid MPI の効率が低いのは，格子の構造上本手法では領域分割を cube を基準として容易に行なうことができるのだが，現在はその領域分割において飛び地が発生することを許容していることと, Hybrid MPI の方が一つの領域に属する cube が多くなり MPI を用いた情報交換の量が Flat MPI よりも多くなっているためであると考えられる．これを解消するために，現在は各領域に飛び地を発生させない手法や通信の隠蔽など，より効率の良いアルゴリズムを模索中である．

4. 結言

今後の大規模化する計算機とより複雑化する工学問題への応用を踏まえて, 等間隔の直交格子法とボクセル法を基礎とした Building-Cube 法による非圧縮流体シミュレーションのコードを開発した．またそれをベクトル並列型のスーパーコンピュータである NEC SX-9 において実行し，妥当な解の精度と性能を確認することができた．今後，更に並列効率を高めて実アプリケーションに応用していく．

謝辞

本文中のシミュレーションは，東北大学サイバーサイエンスセンターにより，コードのベクトル化や並列化，そして様々なデータの測定などの多大な支援を頂いた．

参考文献

[1] Harlow, F. H. and Welch, E., “Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluids with Free Surface,” *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 2182-2189, 1965

[2] Nakahashi, K., “High-Density Mesh Flow Computations with Pre-/Post-Data Compressions,” AIAA paper, 2005-4876, 2005

[3] Ishida, T., Takahashi, S. and Nakahashi, K., “Efficient and Robust Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method,” *Journal of Computational Science and Technology*, Vol. 2, pp. 4, 2008

[4] Kim, J. and Moin, P., “Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 59, pp. 308-323, 1985

[5] Perot, J. B., “An Analysis of the Fractional Step Method,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 108, pp. 51-58, 1993

[6] Dukowicz, J. K. and Dvinsky, A., “Approximate Factorization as a High Order Splitting for the Implicit Incompressible Flow Equations,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 102, pp. 336-347, 1992

[7] Kawamura, T. and Kuwahara, K., “Computation of High Reynolds Number Flow around Circular Cylinder with Surface Roughness,” AIAA paper, 84-0340, 1984

[8] Akasaka, K. and Ono, K., “An Implementation of Boundary Condition of Incompressible Flow Solver for Complex Geometries on Voxel Method,” *Transactions of JSCES*, No. 20060024, 2006

[9] Ahmed, S. R., Ramm, G. and Faltin, G., “Some Salient Features of the Time Averaged Ground Vehicle Wake,” SAE paper, No. 840300, 1984

[10] Lienhart, H., Stoots, C. and Becker, S., “Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model),” In DGLR Fach Symposium der AGSTAB, 2000

[11] Fares, E., “Unsteady Flow Simulation of the Ahmed Reference Body using a Lattice Boltzmann Approach,” *Computers and Fluids*, Vol. 35, pp. 940-950, 2006

[12] Hinterberger, C., Garcia-Villalba, M. and Rodi, W., “Large Eddy Simulation of Flow around the Ahmed Body,” *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics / The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*, edited by McCallen, R., Browand, F. and Ross J., Springer Verlag, ISBN: 3-540-22088-7, 2004

[13] Krajnovic, S. and Davidson, L., “Large Eddy Simulation of the Flow around an Ahmed Body,” *Proceedings of HTFED04, ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*, July 11-15, Charlotte, North Carolina, USA, 2004

[14] Howard, R. J. A. and Pourquie, M., “Large Eddy Simulation of an Ahmed Reference Model,” *Journal of Turbulence*, Vol. 3, No. 12, 2002

［共同研究成果］

高度な乱流散逸構造の解像度を有するVector-Parallel DNSの研究

― High-resolution vector-parallel DNS study for turbulence dissipative structure ―

堀内 潔，齋藤 憲作
東京工業大学大学院 理工学研究科 機械宇宙システム専攻

1. はじめに

乱流のKolmogorovの-5/3乗則[1]は，大きなスケールから小さなスケールへとエネルギーが伝達されていく乱流のエネルギーカスケードを示す重要なスペクトルである．しかしながら、近年の高レイノルズ数DNSにおいては、-5/3乗スペクトルからの変動が見出されている[2]．また，-5/3乗則に加え非平衡・非定常性を表す-7/3乗のスペクトルが解析的なアプローチから導出されており，階層的な構造を有するエネルギースペクトルの存在が示唆される。このようなスペクトルに伴うエネルギー伝達機構を解明することは，新たな乱流制御手法の提案やlarge-eddy simulationの非平衡なsubgrid-scaleモデル開発等に役立てる事が可能である．そこで本研究では一様等方乱流のDNSデータを用いて-7/3乗のスペクトルを抽出し，乱流構造との相関及び非線形相互作用(triad interaction)によるエネルギー伝達機構の詳細を解明することを目的としている．

2. 一様等方乱流のDNS

本研究で対象とする流れ場は非圧縮性一様等方強制乱流であり，計算領域の長さを全方向に2π，格子点数を$N=512^3$，動粘性係数は$\nu=1.38\times10^{-3}$，時間刻みは$\Delta t=0.0005$として生成した．計算方法は空間の離散化には高い計算精度が得られるスペクトル法を用いエイリアシング誤差は3/2則を用いて除去した．時間積分には低記憶容量型3次精度Runge-Kutta法を用いた．外力は時間に関してデルタ関数の相関を持ち，統計的に等方性が成り立つように，各時間ステップごとに注入する．外力のスペクトル$E_f(k)$は，$1.0\leq k\leq 2.5$の波数については一定値c_fとし，その位相は$[0,2\pi]$の一様乱数により与えた[3]．$E_f(k)$の大きさはkによらず一定値c_fとしている．本研究では$c_f=0.0625$とした．外力は毎ステップごとに加え，8ステップごとにその値を更新した．表1に一様等方乱流の計算条件及びDNSにより得られた統計量，図1に乱流エネルギー及び散逸率の時間変動を示す．ここで，$\langle\cdot\rangle$は時間平均を示している．Phase 1,Phase 2については§4を参照されたい．

3. 乱流構造の抽出法と多重モードspiral vortex

乱流中の渦構造は旋回運動を伴う管状の構造を持つ渦管と層状の構造を持つ渦層に大別される．本研究においては渦管は速度勾配テンソルの第二不変量Qにより抽出した[4]．また，渦層の抽出法としてひずみ速度テンソルS_{ij}と渦度テンソルΩ_{ij}の積からなる$A_{ij}=-(S_{ik}\Omega_{kj}+S_{jk}\Omega_{ki})$項の固有値$[A_{ij}]_+\equiv[-(S_{ik}\Omega_{kj}+S_{kj}\Omega_{ki})]_+$を用いる[5]．2階テンソルの固有値$\sigma_i$に対しては，その固有ベクトルが渦度ベクトル$\omega$と最も平行なものを$\sigma_s$，残りの2つの固有値のうち大きいものを$\sigma_+$，小さいものを$\sigma_-$とする順序付けを行う．

Lundgren[6]は中心部の渦管とその周囲に存在する二葉の螺旋状の渦層とからなるspiral vortexのモデルを提案した．このspiral vortexは渦管と渦層上の渦度ベクトルの幾何学的な配向によって3つのModeに分類することができる．LundgrenはMode 1のspiral vortexは-5/3乗則に従うエネルギースペクトルを，Pullin and LundgrenはMode 3のspiral vortexは-7/3乗則に従うエネルギースペクトルを誘起することを解析的に示している[7][8]。

表 1　DNS データの統計量

$k_{max}\,\overline{\eta}$: grid resolution　R_λ: Taylor microscale Reynolds number
$\langle K \rangle$: average kinetic energy　$\langle \varepsilon \rangle$: average dissipation rate
L: integral length scale　λ: Taylor microscale
$\overline{\eta}$: average Kolmogorov length　T : eddy turnover time due to forcing
$\langle u_i f_i \rangle$: average rate of energy addition

	Total	Phase 1 ($\dot{\varepsilon} \geq 0$)	Phase 2 ($\dot{\varepsilon} < 0$)
$k_{max}\,\overline{\eta}$	2.27	2.27	2.28
R_λ	158.82	165.86	151.61
$\langle K \rangle$	1.423	1.494	1.350
$\langle \varepsilon \rangle$	0.399	0.403	0.394
L	1.147	1.160	1.134
λ	0.220	0.225	0.216
$\overline{\eta}$	0.008901	0.00864	0.008932
T	6.45	6.27	6.62
$\langle u_i f_i \rangle$	0.356		

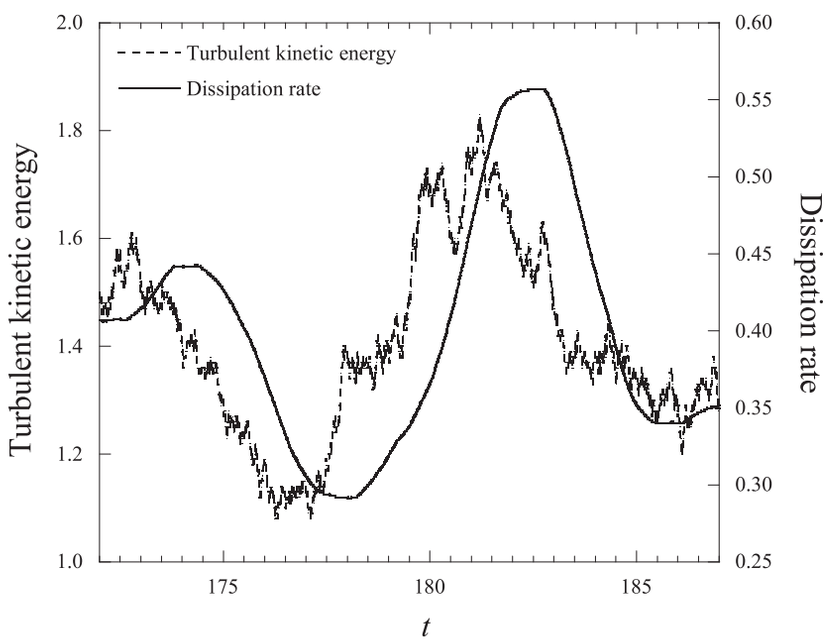


図 1　DNS データにおける乱流エネルギーと散逸率の時間変動
破線：乱流エネルギー　　実線：散逸率

4. 階層的エネルギースペクトルの抽出

Yoshizawa[9]はTSDIA(two-scale direct-interaction approximation)を用いてKolmogorovの-5/3乗スペクトルを基本解としたエネルギースペクトルの摂動展開を行い，次式のように-7/3 乗を含むスペクトルを得た．Woodruff and Rubinstein[10]は multi-scale 摂動法を一様等方性乱流におけるスペクトルの展開に用いられる Heisenburg model に適用した. Heisenburg model は様々な運動スケール間の乱流エネルギー伝達に対する非線形相互作用の役割を捉えた最もシンプルな closure である．Heisenburg closure ではエネルギー伝達スペクトル関数はエネルギースペクトルの汎関数である。このモデルを用いて Kolmogorov の-5/3 乗則を基本解としてエネルギースペクトルの摂動展開を行い次式が得られる．

$$E(k) \approx C_K \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} + C_1\, \dot{\varepsilon}\, \varepsilon^{-2/3} k^{-7/3} + C_3 \left[\ddot{\varepsilon}\, \varepsilon^{-1} - 2\dot{\varepsilon}^2 \varepsilon^{-2/3} \right] k^{-9/3} + \cdots \tag{1}$$

ここに，$\dot{\varepsilon}$ は ε の時間に関する微分であり，ここでは時間スケールとして $\dot{\varepsilon}/\varepsilon$ が用いられている．上式は階層的なスケール指数を含んだスペクトルであり，第二項と.第三項は散逸率 ε の変動によって誘起される．この式の長時間平均を取ると，第二項はゼロになる．さらに，散逸率 ε の 2 乗が小さいと仮定すると第三項は無視でき，Kolmogorov の-5/3 乗則エネルギースペクトル $E(k)$の長時間平均は

$$\left\langle E(k) \right\rangle \approx E_0(k) \tag{2}$$

と表せる．すなわち通常の長時間平均では定常性を仮定した-5/3 乗のスペクトルしか抽出することができない．ここで，散逸率の時間変動 $\dot{\varepsilon}$ の符号に条件付き平均を施し，散逸率 εの時間微分が正値をとる Phase 1 と負値をとる Phase 2 に分類することで以下のように表せる．

$$\begin{cases} E^+(k) = E_0(k) + E_1^+(k) & (when\ \ \dot{\varepsilon} < 0 : \text{Phase 1}) \\ E^-(k) = E_0(k) + E_1^-(k) & (when\ \ \dot{\varepsilon} > 0 : \text{Phase 2}) \end{cases} \tag{3}$$

ここで $E_1^-(k) \fallingdotseq - E_1^+(k)$であることに注意すると，$E_0(k)$，$E_1^+(k)$は

$$\begin{aligned} E_0(k) &= \frac{1}{2}\left\{ E^+(k) + E^-(k) \right\} \\ E_1^+(k) &= \frac{1}{2}\left\{ E^+(k) - E^-(k) \right\} \end{aligned} \tag{4}$$

と表される．図 2 に，この条件付き平均を用いて DNS データから抽出したエネルギースペクトルを示す．赤線は $E_0(k)$を，青線は $E_1^+(k)$の絶対値を示している．図中の低波数領域（$0 \leqq k\eta \leqq 0.2$；慣性領域）において，$E_0(k)$は-5/3 乗則に，$E_1^+(k)$の絶対値が-7/3 乗則に従うことが確認できる．ここで Kolmogorov 定数は $C_K \approx 1.61$ となり，Gotoh *et al.*[3]が得た結果と良く一致する．また，-7/3 スペクトルの定数 C_1 は Kolmogorov 定数 C_K より僅かに小さい．

図 3 に絶対値を取らない $E_1^+(k)$, $E_1^-(k)$の分布を示す. 青線が $E_1^+(k)$, 赤線が $E_1^-(k)$を表しており，$k\overline{\eta} \approx 0.2$ で $E_1^+(k)$は正から負に，$E_1^-(k)$は負から正に符号の反転が生じていることがわかる．次に長時間平均をとったエネルギースペクトル $E_0(k)$からの変動の等高線と，乱流エネルギーK 及び散逸率 εの時間変化との比較を図 4 に示す．ここで赤色に近いほど $E_0(k)$から大きく正値に変動しており，青色に近いほど大きく負値に変動していることを示している．散逸率 εの時間変化が正値の Phase 1 (178.0<t<182.0)において低波数領域(0<$k\overline{\eta}$ <0.2)で変動が正値を，高波数領域(0.2<$k\overline{\eta}$)では負値を示している．

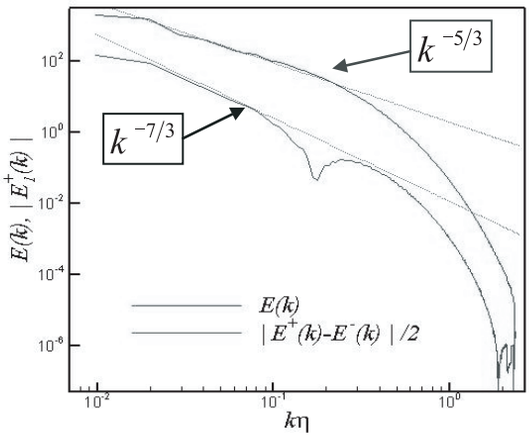


図 2　DNS データから得られたエネルギースペクトルの絶対値

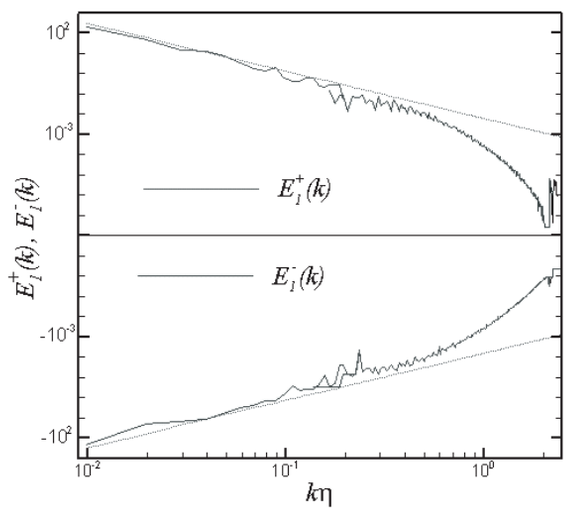


図 3　DNS データから得られたエネルギースペクトル
灰色の実線：$E_1^+(k)$，黒の実線：$E_1^-(k)$，破線：-7/3 乗の勾配

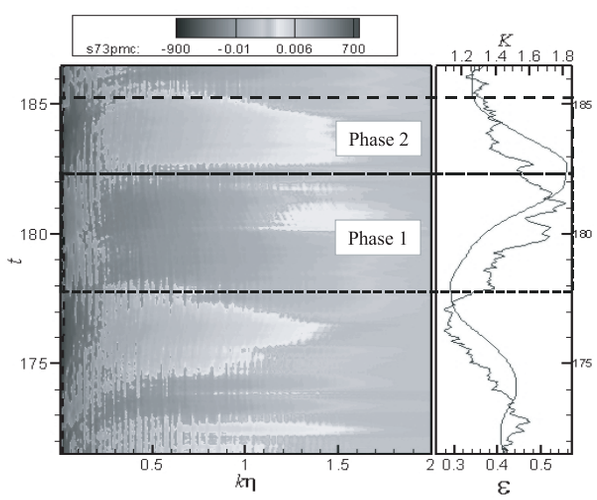
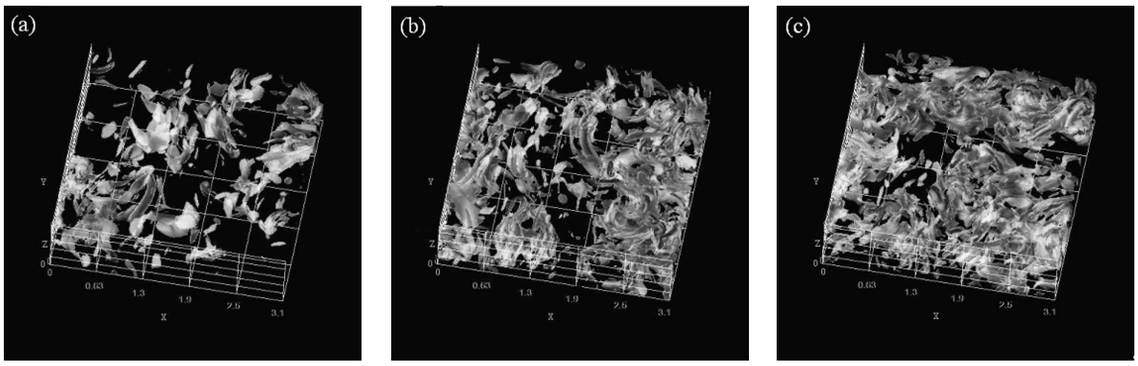


図 4　$E_1^+(k)$と $E_1^-(k)$の等高線（左枠）及び
乱流エネルギーK と散逸率 ε の時間変動（右枠）



(a) t = 180.0 (Phase 1)　(b) t = 182.0　(c) t = 183.0 (Phase 2)

図 5：乱流構造の時間変化　白色：渦層，$[A_{ij}]_+ = 900$，灰色：渦管，$Q = 753.0$

つまり Phase 1 においては大きなエネルギーを持つ大スケールの渦構造が発達し，乱流エネルギーが極大値をとる．また，散逸率 ε の時間変化が負値の Phase 2 (182.0<t<186.0)においては逆の傾向が示されており，低波数領域で変動が負値を，高波数領域では正値を示している．即ち、Phase 2 では小スケールの渦構造が発達し，乱流エネルギーは極小値をとる．ここで図 5 は DNS データから抽出した乱流構造を可視化した図であり，赤色の等値面は渦管を，灰色の等値面は渦層を示している．図 5(a)の t = 180.0 (Phase 1)においては，大きな渦構造が支配的であるが，(b) の t = 182.0, (c)の t = 183.0 と，Phase 2 に移行するにつれて小規模な構造が支配的となることが確認でき，エネルギースペクトルの変動とよく一致した結果が得られた．

Phase 1 においては、-7/3 乗則を生成する Mode 3 の spiral vortex が多数観察されたが、Phase 2 においては、これらの spiral vortex が-5/3 乗則を生成する Mode 1 に変換されることが確認された．この spiral vortex の遷移は、上述の-7/3 乗則スペクトルの時間発展と整合している．

5. Triad interaction の解析

エネルギーエネルギースペクトルの変動成分の符号変化は，乱流のエネルギーカスケード及び散逸と重要な相関関係があると考えられる．このエネルギー変動のメカニズムを解明するため，非線形相互作用(triad interaction)による波数 k のフーリエ成分のエネルギー増加を表すエネルギー伝達関数の解析を行った．

$$T(k) = \frac{1}{2}\,\mathrm{Im}\left[\sum_{k-1/2\le|k|\le k+1/2} \tilde{u}_n^*(\mathbf{k})\,\tilde{P}_{nlm}(\mathbf{k})\sum_{p}\tilde{u}_l(\mathbf{p})\,\tilde{u}_m(\mathbf{k}-\mathbf{p})\right] \tag{5}$$

ここで，$\tilde{u}(\mathbf{k})$ は速度ベクトルのフーリエ変換，*は共役複素数，$\tilde{P}_{nlm}$ は orthogonalising operator，$\mathbf{k}$ は波数ベクトルである[11]．図 6 に $\varepsilon\overline{\eta}$ によって正規化されたエネルギー伝達関数の時間平均からの変動成分である事に対する変化と乱流エネルギー及び散逸率の時間変化との比較を示す．この図から，$k\overline{\eta} \approx 0.5$ において図 4 のエネルギースペクトルの変動と同様に符号の入れ替わりが生じていることが見て取れる．Phase 1 (178.0≦t≦182.0)では低波数領域($k\overline{\eta} \le 0.5$)において強いエネルギーゲインが存在し，それが高波数へと伝達されていく顕著なエネルギーカスケードが確認される．しかし Phase 2 (182.0≦t<186.0)においては低波数領域($k\overline{\eta} \le 0.5$)のエネルギーゲインは減少し，負値が支配的となる．これは Phase 1 において大きなエネルギーを持つ大規模な構造が発達し，Phase 2 に移行するにつれてエネルギーが小スケールへの構造へと伝達されることを示しており，§4 のエネルギースペクトルの変動(図 4)及び乱流構造の可視化(図 5)とも整合している．

図 7 はより低波数領域における正規化されたエネルギー伝達関数と乱流エネルギー，散逸率の時間変化の分布，図 11 は主枠内で $1000\Delta t$ ($\approx\tau_K$)の時間平均を施したエネルギー伝達関数の分布を，

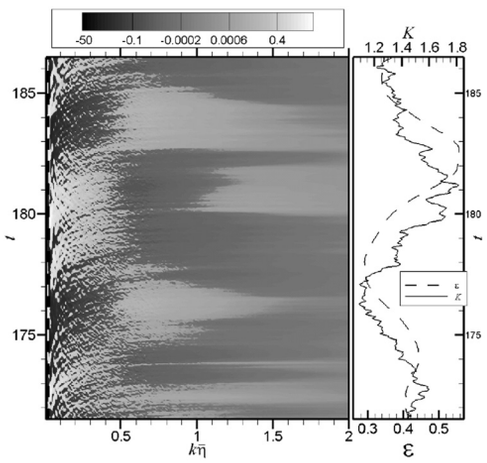


図 6　$\varepsilon\bar{\eta}$ によって正規化したエネルギー伝達関数の等高線（左枠）及び乱流エネルギー K と散逸率 ε の時間変動（右枠）

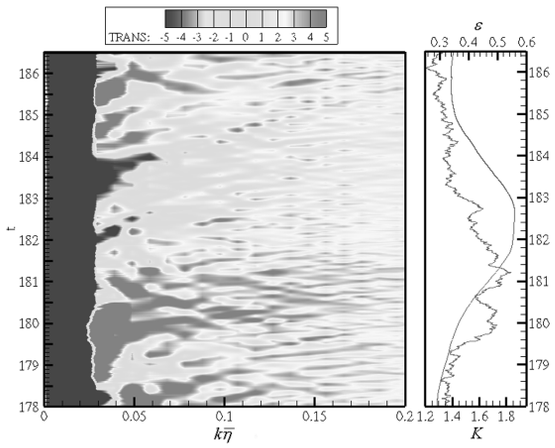


図 7　低波数領域における $\varepsilon\bar{\eta}$ によって正規化したエネルギー伝達関数の等高線（左枠）及び乱流エネルギー K と散逸率 ε の時間変動（右枠）

小枠内で全時間及び Phase 1 及び Phase 2 で平均を取ったエネルギー伝達関数の分布を示している．小枠から，エネルギーゲインのピークは Phase 1 において $k\bar{\eta} \approx 0.16$，Phase 2 において $k\bar{\eta} \approx 0.20$ に存在していることが示され，全時間平均したエネルギー伝達関数と比較して Phase 1 においては正の変動を，Phase 2 においては負の変動をとっていることがわかる．次に主枠より，t =179.5 において $k\bar{\eta} \approx 0.04$ に非常に大きなピークが存在し，時間の経過とともにピークが高波数へと移っていくことが確認できる．ここで乱流中の最大渦のスケールを示す積分長を L とすると，$k\bar{\eta} \approx 0.04$ は $L/4$ のスケールであり，積分長から小スケールへとエネルギーがカスケードされていくことを示している．この t=179.5 におけるピークが表れる前に，t=178.5 の $k\bar{\eta} \approx 0.06$ 前後において負値が存在し，時間の経過とともに $k\bar{\eta} \approx 0.04$ 付近にピークが形成される．ここで $k\bar{\eta} \approx 0.04$ は外力を注入している波数帯に近いため，このエネルギーゲインは外力の影響により生じたものとも考えられるが，図 7 の t = 178.5 から t = 179.0 の $k\bar{\eta}$ =0.05 付近において負値が低波数から高波数へと伝達されており，この波数帯におけるエネルギーの逆輸送にもよると考えられる．このゲインのピークは t=180.5 においては高波数に移っている．図 4 からわかるように，$t \approx 182.5$ において比較的短時間でエネルギーカスケードと Phase 1 から Phase 2 への遷移が生じるが，この Phase 1 – 2 の遷移に先立って $t \approx 181.5$ の $k\bar{\eta} \approx 0.06$ において再び負値が現れ，$L/5$ に値するスケールの $k\bar{\eta} \approx 0.05$ には弱い正のピークが生じる．このことからエネルギーは $L/5$ のスケールに注入され，このエネルギーが高波数領域へと伝達されていくことがわかる．その後，Phase 2 の $t \approx 183.0$ では $k\bar{\eta} \leq 0.08$ に存在するエネルギーが失われ，小さなスケールへと伝達される．

以上の結果をまとめると，エネルギースペクトルの変動及びエネルギー伝達関数の変動は散逸率 ε の時間変化が正値の Phase 1 において低波数領域で正値，高波数領域で負値を，ε の時間変化が負値の Phase 2 において低波数領域で負値，高波数領域で正値をとる．このような 2 つの Phase が交互に出現することで乱流中においてエネルギーが伝達されていくことが示された．

6. まとめ

本研究では一様等強制方乱流の DNS データを用い，散逸率　の条件付き平均を用いることで，長時間平均によって抽出される従来の Kolmogorov の-5/3 乗則に従うエネルギースペクトルに加え，非定常・非平衡性を表わす-7/3 乗のスペクトルが存在することを明らかにした．また，エネルギースペクトルの変動と多重モード spiral vortex の Mode 遷移との示し，triad interaction も用いてエネルーカスケード機構の詳細を明らかにした．

7. FFT ライブラリーの検証

本研究では、ASL/SX のライブラリー、特に高速フーリエ変換を利用したが、その計算におけるバンクコンフリクトの発生について検証し、以下を示した。

- ライブラリーDFR3BF においては、SX-7 では 2 飛びアクセスのバンク競合が発生するのに対し、SX-8 以降では 2 飛びアクセスが強化され競合がほとんど発生しなくなっている。
- データ長が奇数の場合、バンク競合の発生率が偶数の場合に比べて増加し、実行時間も増加する。これは、高速フーリエ変換ではなく離散フーリエ変換が用いられる事に起因しているものと考えられる。

謝辞

本研究は東北大学サイバーサイエンスセンター共同研究のもと行われ，同センターの大規模科学計算システムを大いに利用させていただいた．ここに謝意を表す．

参考文献

(1) Kolmogorov, A.N. 1941 The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. *C. R. Acad. Sci.* USSR **30**, 301–305.
(2) Kaneda Y. , Ishihara T., Yokokawa, M. Itakura, K. and Uno, K., Energy dissipation rate and energy spectrum in high resolution direct numerical simulations of turbulence in a periodic box. *Phys. Fluids* **15**(2003),L21-L34
(3) Gotoh T., Fukayama D. and Nakano T., Velocity field statistics in homegeneous steady turbulence obtained using a high-resolution direct numerical simulation., *Phys. Fluids*, **14** (2002), 1065–1081.
(4) Kida S. and Miura H., Identification and analysis of vortical structures., *Eur.J.Mech. B/Fluids*., **17**(1998), 471-488
(5) Horiuti K. & Takagi Y., Identification method for vortex filaments in isotropic turbulence. *Phys.Fluids*, **17**(2005),121703
(6) Bermojo-Moreno, I., Pullin, D.I. & Horiuti, K., Geometry of enstrophy and dissipation, grid resolution effects and proximity issues in turbulence. *J. Fluid Mech.*, **620** (2009), 121-166
(7) Lundgren T. S., Strained spiral vortex model for turbulent fine structure*., Phys. Fluids*, **25**(1982),2193-2203.
(8) Horiuti, K. & Fujisawa, T., The multi mode stretched spiral vortex in homogeneous isotropic turbulence. *J. Fluid Mech.*, **595** (2008), 341-366
(9) Lundgren T. S., A small-scale turbulence model. *Phys. Fluids A* **5**(1993),1472-1483.
(10) Pullin, D. I. & Lundgren, T. S., Axial motion and scalar transport in stretched spiral vorticies*., Phys. Fluids*,**13**(2001),2553-2563.
(11) Yoshizawa, A. , Nonequilibrium effect of the turbulent – energy -production process on the inertial-range energy spectrum. *Phys. Rev.* E**49**(1994),4065-4071.

(12) Woodruff, S.L. & Rubinstein, R. 2006 Multiple-scale perturbation analysis of slowly evolving turbulence. *J. Fluid Mech*. **565**, 95–103.
(13) Domaradzki, J.A. & Rogallo, R.S., Local energy transfer and nonlocal interactions in homogeneous,isotropic turbulence, *Phys. Fluids*, A **2**(1990),413-426.

［研究成果］

安定シラケテンイミンの合成と構造

岩本武明、阿部剛、甲千寿子、吉良満夫
理学研究科附属巨大分子解析研究センター、理学研究科化学専攻

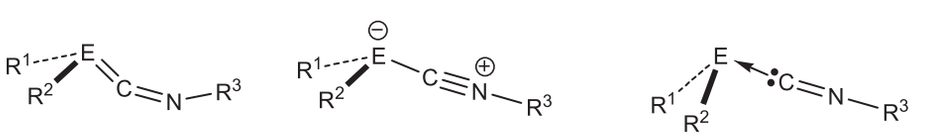
含ケイ素累積二重結合化合物であるシラケテンイミン($R_2Si=C=NR'$)を安定に合成し、これまでに知られている誘導体とは異なり、これらがケイ素－炭素－窒素間に連続した二重結合を持つアレン型構造をとることを明らかにした。また、シラケテンイミン骨格の構造が二重結合上の置換基に大きく依存することを、モデル化合物の理論計算で明らかにした。

はじめに

炭素－炭素多重結合を構成要素とする有機π電子系化合物は多様な骨格構造をもつ多数の分子が知られており、導電性材料や発光材料など機能性有機材料として各方面で応用されている。近年、炭素と同じ 14 族元素であるケイ素やゲルマニウムなど、高周期 14 族元素を多重結合に含む化合物が安定に合成されるようになった。これらの化合物は炭素を主構成要素とする有機π電子系化合物には見られない特異な構造と性質を持つことが明らかにされつつある。そのため、これらは新しい物性を示すπ電子系化合物として期待され、様々な構造をもつ新化合物の合成が精力的に進められている。

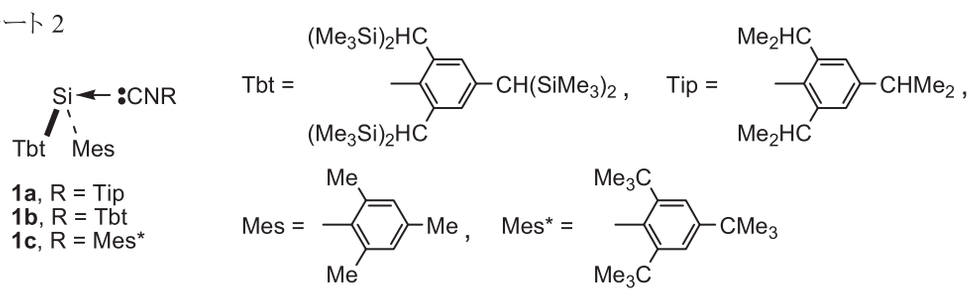
炭素－炭素－窒素間に連続した二重結合をもつ化合物であるケテンイミン($R_2C=C=NR'$)は、含窒素複素環化合物への有用な合成中間体である。このケテンイミンは末端の置換基の種類に依存して、２つの連続した二重結合（累積二重結合）をもつアレン型構造($R_2C=C=NR'$)や、炭素－炭素単結合と炭素－窒素三重結合を持ち、電荷が分離した双性イオン型構造($R_2C^{-}-C\equiv N^{+}R'$)をとる、構造上興味深い化合物である[1]。近年、このケテンイミンの末端炭素を高周期 14 元素であるスズや鉛に置き換えた化合物が合成されているが、いずれもアレン型構造や双性イオン型構造ではなく、二価化合物（メタリレン）にイソシアニドが配位した錯体として記述されるものである（チャート 1、E = Sn, Pb）[2]。また、末端炭素をケイ素に置換したシラケテンイミン($R_2Si=C=NR'$)については、時任らにより **1a-1c** が合成されているが、これらも各種スペクトルよりシリレン－イソシアニド錯体型構造であると結論されている(チャート 2)[3]。本研究では、新規ジアルキルシラケテンイミン **2a** および **2b** を合成し、これらがケイ素－炭素、炭素－窒素間に二重結合性を示すアレン型構造をとることを明らかにした。さらに、モデル化合物の理論計算から、ケテンイミンと同様にしてシラケテンイミンの安定構造が置換基に大きく依存することを見出した[4]。

チャート 1



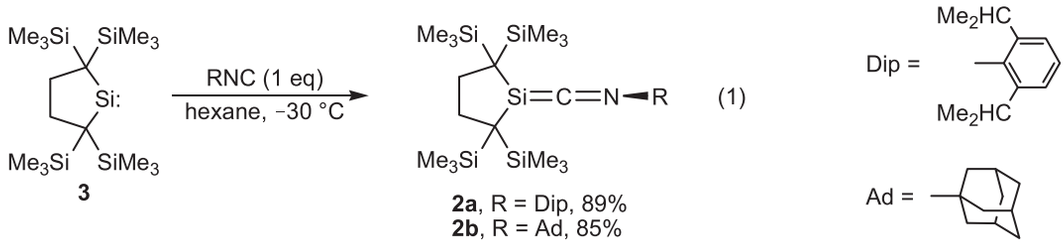
E = Si, Ge, Sn, Pb

チャート 2



安定シラケテンイミンの合成

シラケテンイミン **2a** および **2b** は先に我々が合成した安定ケイ素二価化合物シリレン **3**[5] に対して対応するイソシアニド RNC(1 当量)を付加させることで合成した(式 1)。これらのシラケテンイミンは窒素上の置換基 R により色が異なり、**2a** は青色結晶、**2b** は赤色結晶として得られた。



安定シラケテンイミンの構造

X線結晶構造解析で得られた **2a** および **2b** の分子構造を図 1 に、主な構造パラメータを表 1 に示す。シラケテンイミン **2a** および **2b** の Si–C 間距離は、それぞれ 1.794(3)および 1.782(2) Å であり、典型的な Si–C 単結合距離(1.86 Å)よりも顕著に短く、典型的な Si=C 二重結合距離(1.693-1.764 Å)[6] に近いものであった。一方、C–N 間距離は 1.203(3) (**2a**)および 1.210(3) Å (**2b**)であり、典型的なイソシアニドの CN 間距離(1.16 Å)[7] よりも伸長していた。また C–N–C 角は 146.3(3) º (**2a**)および 130.69(18) º (**2b**)であり、どちらも 180º から著しく狭くなっており、窒素原子は双性イオン型構造に特徴的な sp 混成よりもアレン型構造に特徴的な sp^2 混成に近くなっていた。これらの **2a** および **2b** の構造上の特徴は、これらがアレン型構造に近いことを示している。

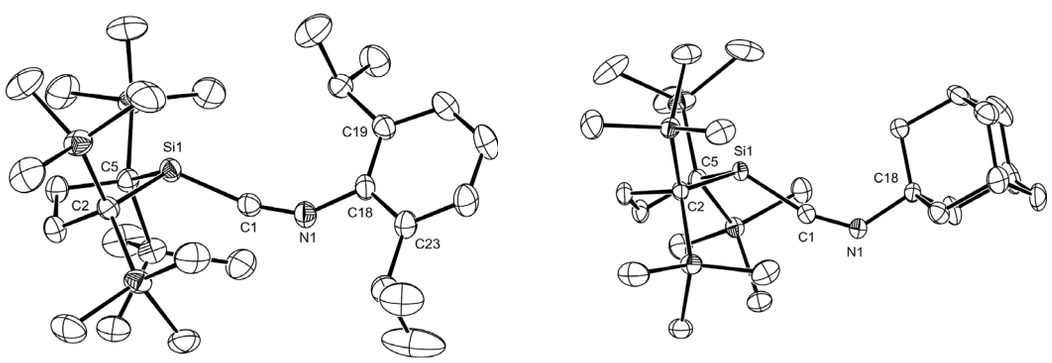


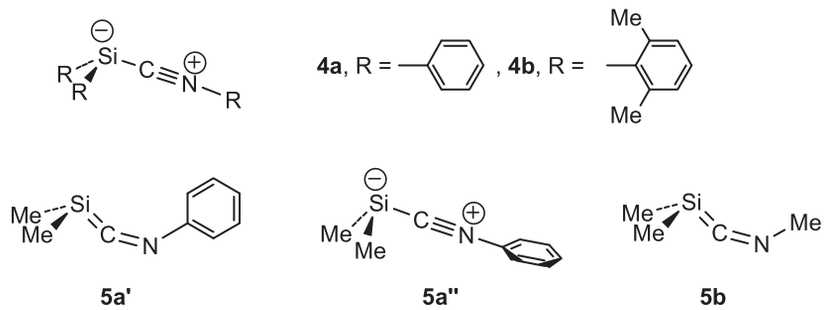
図 1.　X 線結晶構造解析で決定したシラケテンイミンの **2a**(左)および **2b**(右)の分子構造.

表 1.　シラケテンイミン **2a**, **2b**, および関連化合物の構造パラメータと化学シフト

化合物	原子間距離/Å		結合角/deg		化学シフト	
	Si–C	C–N	Si–C–N	C–N–C	δ_{Si}	δ_C
2a (exp.)[a]	1.794(3)	1 .203(3)	164.7(2)	146.3(3)	+15.9[b]	+214.6[b]
2b (exp.)[a]	1.782(2)	1. 210(3)	163.08(17)	130.69(19)	+23.9[b]	+221.3[b]
4a (calc.)[c]	1.882	1.180	163.4	180.0	–	–
4b (calc.)[c]	1.867	1.184	159.4	175.0	–	–
5a' (calc.)[d]	1.808	1.214	164.5	135.3	+3.1[e]	+233.6[e]
5a" (calc.)[d]	1.877	1.184	162.0	178.2	–26.8[e]	+186.4[e]
5b (calc.)[d]	1.809	1.210	162.6	131.4	+6.4[e]	+230.2[e]

a. 構造は X 線構造解析で決定した．b. δ_{Si} および δ_C 値は toluene-d_8 中で測定した．c. B3LYP/6-31G(d) レベル．文献 3.　d. B3LYP/6-31+G(d,p) レベルで構造最適化した．e. δ_{Si} および δ_C 値は GIAO/B3LYP/6-311+G(2df,p)//B3LYP/6-31+G(d,p) レベルで計算した．

チャート3



これらのシラケテンイミン **2a** および **2b** の構造上の特徴は、これまで報告されている芳香族置換基を持つ **1a-1c**(チャート 2)のものと顕著に異なっていた。シラケテンイミン **1a-1c** の X 線構造解析は行われていないが、理論計算によりシリレン－イソシアニド錯体であると結論されている。すなわち、芳香族基で置換されたモデル化合物 **4a** および **4b**[3](チャート 3)の Si–C 結合距離は、それぞれ 1.882 および 1.867 Å であり(B3LYP/6-31G(d)レベル)、これらは **2a** および **2b** のものに比べてかなり長い。さらに C–N–C 骨格は直線に近く、その C–N–C 角は 180.0 º (**4a**)および 175.0 º(**4b**)であった。これらに対して、**2b** のモデル化合物である、**5b** の B3LYP/6-31+G(d)レベルの DFT 計算では **2b** のアレン型構造をよく再現し、**5b** の最適化構造の構造パラメータは **2b** のものに近かった(表 1 および図 2 右)。興味深いことに、シラケテンイミンの窒素上が芳香族置換基の **2a** のモデル化合物 **5a** では、Si-C-N 骨格に対してフェニル基の向きの異なる 2 つの **5a'**および **5a"**が安定構造として求められた。**5a'**は **5a"**にくらべてわずか 0.7 kcal mol^{-1} だけ安定であるが、これらの構造上の特徴は顕著に異なっていた。すなわち、**5a'**は **2a** の構造に類似したアレン型構造であるに対して、**5a"**は双性イオン型構造であった(図 2 左と中央)。X 線構造解析で得られた **2a** の芳香環平面は Si=C=N 平面に対して 35 º ねじれており、Si=C=N 骨格周りの構造上の特徴は **5a'**のものによく一致している。以上の結果からシラケテンイミンの結合の特徴は鋭敏に置換基の影響を受けると結論される。すなわち、シラケテンイミンのケイ素上および窒素上の置換基が芳香族基の場合には双性イオン型であるのに対して、置換基がすべてアルキル基の場合にはアレン型である。そして、ケイ素上がアルキル基、窒素上が芳香族基の場合には芳香環の回転配座に依存してアレン型あるいは双性イオン型になる。以上の傾向は、シラケテンイミンのケイ素上の負電荷および窒素上の正電荷が安定化されるような置換基が導入されると、より双性イオン型構造が安定化されるものと理解できる。Wentrup らにより、ケテンイミン系の置換基効果が議論されているが[1]、それと類似の置換基効果がシラケテンイミンでも見られることが明らかになった。

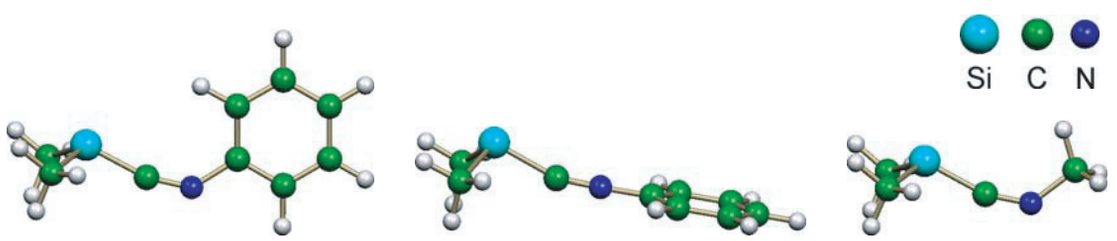


図 2.　DFT 計算により求められたモデル化合物 **5a'** (左)、**5a"** (中央)、および **5b**(右)の分子構造.

シラケテンイミン **2a** および **2b** が溶液中でもアレン型構造を持つことは、核磁気共鳴(NMR)スペクトルの化学シフトから明らかになった。核磁気共鳴は核スピンをもつ原子核を含んだ物質を磁場の中におき、これに共鳴条件を満足する周波数のラジオ波を加えたときにおこる共鳴現象である。共鳴周波数のずれを示す化学シフトは測定される核の結合状態に応じてある特定の範囲の

値を示すため、分子構造の決定に用いられる。最近は、計算機の性能が向上し、この化学シフトを非経験的に±20 ppm 程度の精度で再現できるようになり、化学シフトの計算は分子の構造決定に重要なツールとなりつつある。シラケテンイミン **2a** および **2b** の Si=C=N 骨格の ^{29}Si 核の化学シフト δ_{Si} はそれぞれ+15.9 および+23.9 であり、**1a-1c** のもの(–48 から–58)に比べると低磁場に観測された。一方、**2a** および **2b** の ^{13}C 核の化学シフト δ_C はそれぞれ+214.6 および+221.3 であり、**1a-1c** のものに比べて低磁場側に観測された。この **2a** および **2b** の δ_{Si} および δ_C は、双性イオン型構造を持つモデル化合物 **5a"**の計算値(δ_{Si} –26.8、δ_C +186.4)とは顕著に異なっているのに対して、アレン型構造を持つモデル化合物 **5a'** (δ_{Si}＋3.1、δ_C +233.6)および **5b**(δ_{Si}＋6.4、δ_C +230.2)によりよく再現され、**2a** および **2b** が溶液中でもアレン型構造を持つことが支持される。

安定シラケテンイミンの紫外可視吸収スペクトル

紫外可視吸収スペクトルは、化合物の光物性を理解するための基礎的なスペクトルの一つであり、化合物を材料として応用する際にも重要である。シラケテンイミン **2a** および **2b** は2つのπ→π*遷移に由来する吸収帯を示した(図 3、λ_{max}/nm (ε): **2a**, 647 (156), 374 (6.57 × 10^3); **2b**, 465 (109), 346 (5.65 × 10^3))。モデル化合物 **5a'**および **5b** の TD-DFT 計算より、**2a** および **2b** の吸収帯は長波長側からそれぞれπ(Si=C)→π*(C=N)およびπ(Si=C)→π*(Si=C)遷移による吸収帯と帰属される。また、窒素上に芳香族置換基を持つ **2a** のπ(Si=C)→π*(C=N)遷移による吸収帯の顕著な長波長シフトは、π*(C=N) –π*(aryl)共役による顕著なπ*(C=N)軌道準位の低下によるものと考えられる(図 4)。これらはアレン型構造をもつシラケテンイミンの紫外可視吸収スペクトル(電子スペクトル)を観測し、その性質を詳細に解析した初めての例となる。

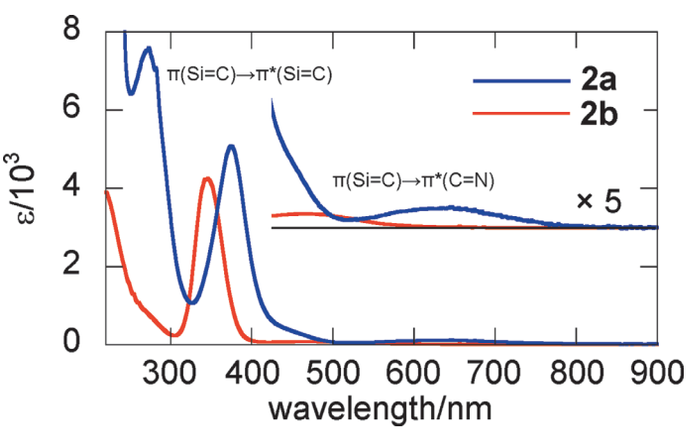


図 3. 化合物 **2a** および **2b** の紫外可視吸収スペクトル.

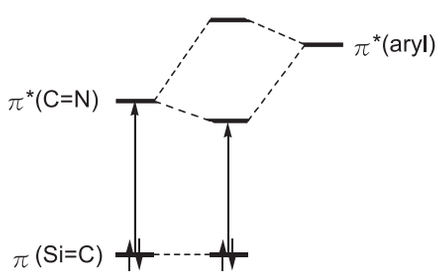


図 4. π*(C=N)–π*(aryl)共役による π*(C=N)準位の低下.

結論

シラケテンイミン **2a** および **2b** を合成し、X 線結晶構造解析および NMR スペクトルより、これらがアレン型構造を持つことを明らかにした。また、モデル化合物の理論計算により、シラケテンイミンの構造が置換基に依存して、アレン型あるいは双性イオン型になることを明らかにした。これらはケテンイミンのケイ素類縁体の構造が置換基に顕著に依存することを明らかにした初めての例である。また、アレン型構造をもつシラケテンイミンの紫外可視吸収スペクトルの詳細な帰属を行った。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金(No. 16205007 および 17002005)の支援により遂行されたものである。本研究で用いた理論計算の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンターの並列コンピュータ上の Gaussian 03 を利用した。

参考文献

[1] (a) Wolf, R.; Wong, M. W.; Kennard, C. H. L.; Wentrup, C. *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 6789. (b) Finnerty, J.; Mitschke, U.; Wentrup, C. *J. Org. Chem.* **2002**, *67*, 1084.

[2] (a) Grützmacher, H.; Freitag, S.; Herbst-Irmer, R.; Sheldrick, G. S. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1992**, *31*, 437. (b) Klinkhammer, K. W. In *The Chemistry of Organic Germanium, Tin, and Lead Compounds Vol. 2*; Rappoport, Z., Apeloig, Y., Eds.; John Wiley & Sons, Chichester, 2002, Chapter 4.

[3] (a) Takeda, N.; Suzuki, H.; Tokitoh, N.; Okazaki, R.; Nagase, S. *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 1456. (b) Takeda, N.; Kajiwara, T.; Suzuki, H.; Okazaki, R.; Tokitoh, N. *Chem. Eur. J.* **2003**, *9*, 3530.

[4] Abe, T.; Iwamoto, T.; Kabuto, C.; Kira, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 4228.

[5] Kira, M.; Ishida, S.; Iwamoto, T.; Kabuto, C. *J. Am. Chem. Soc.* **1999**, *121*, 9722.

[6] Müller, T.; Ziche, W.; Auner, N. In *The Chemistry of Organic Silicon Compounds Volume 2*; Rappoport, Z., Apeloig, Y., Eds.; John Wiley & Sons, Chichester, 1998, Chapter 16.

[7] (a) Fernandes, M. A.; Layh, M.; Omondi, B. *Acta Crystallogr.* **2002**, *C58*, o384. (b) Mathieson, T.; Schier, A.; Schmidbaur, H. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* **2001**, 1196.

白

[全国共同利用情報基盤センター研究開発論文集 No.30]より

スーパーコンピュータシステム SX-9の紹介と性能評価

大泉健治† 江川隆輔‡ 伊藤英一† 岡部公起‡ 小林広明‡
†東北大学 情報部情報基盤課システム管理係
‡東北大学 サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部

1. はじめに

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、2008年3月にスーパーコンピュータシステムSX-7を、最新鋭のベクトル型スーパーコンピュータSX-9(日本電気㈱製)にリプレースした。今回導入したSX-9システムは全16ノードで構成され、CPU単体で102.4Gflop/s、システム全体では26.2Tflop/sの理論性能を有し、並列処理はもちろん単一CPUでも高い性能を発揮するベクトルプロセッサを特徴としている。メインメモリは、1ノードあたり1Tバイト、システム全体で16Tバイトと圧倒的な大容量共有メモリを搭載し、大規模モデルの計算にも対応可能である。

本稿は、SX-9システムのハードウェア、プログラミングを支えるソフトウェアの紹介をはじめ、本センターの運用構成、そして実アプリケーションを用いた性能評価について説明する。

2. SX-9システムの紹介

2.1. ハードウェアの特徴

スーパーコンピュータSX-9(図1)は、前システムSX-7から引き続きベクトル型並列スーパーコンピュータを継承している。世界最速の1チップベクトルプロセッサは1CPUあたり102.4Gflop/sのベクトル演算性能を持ち、前システムに比べ大幅に性能向上している。これはCPUが3.2GHzの高い周波数で動作することや、ベクトルユニットが持っている浮動小数点演算器のうち加算器と乗算器が、それぞれ2器に増強されたことによる(図2)。この高い性能を持つCPUを16個搭載し1ノードを構成する。

メインメモリはノードあたり1Tバイトの巨大なサイズを登載しており、16個のCPUで共有するSMP(Symmetrical Multi Processing)構成をとる。また、CPUとメモリ間のデータ転送速度(メモリバンド幅)は1CPUあたり256Gバイト/秒の圧倒的に高い転送速度を持つため、大規模かつ高性能な演算を可能にしている。前システムのSX-7とSX-9の性能を表1に示す。

本センターのスーパーコンピュータシステムは16ノードのSX-9で構成されており、前システムのSX-7に比べて約12.5倍の性能向上を実現している。



図1 本センターの SX-9 システム

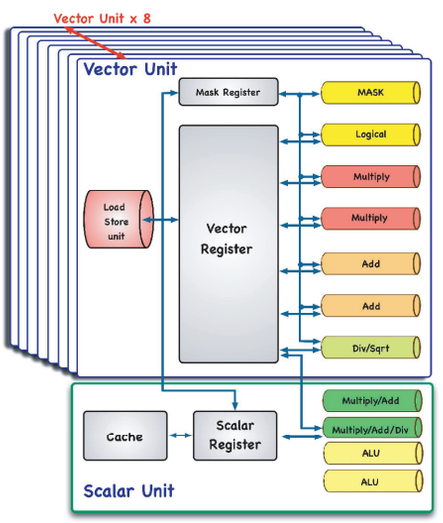


図2 SX-9 ベクトルユニット

表1　SX-7とSX-9の性能比較

		SX－7	SX－9	向上比
CPU	動作周波数	0.551 GHz	3.2 GHz	5.6倍
	ベクトル演算性能	8.83 Gflop/s	102.4 Gflop/s	11.6倍
	メモリバンド幅	64 GB/s	256 GB/s	4倍
SMP	ベクトル演算性能	282 Gflop/s	1.6 Tflop/s	5.8倍
ノード	メモリ容量	256 GB	1 TB	4倍
	メモリバンド幅	1.13 TB/s	4TB/s	3.5倍
	バンクサイズ	16 K	32 K	2.0倍
	ノード間通信速度	32 GB/s	256 GB/s	8.0倍
システム	ベクトル演算性能	2.1 Tflop/s	26.2 Tflop/s	12.5倍
	メモリ容量	2 TB	16 TB	8.0倍

2.2.　プログラミング言語と並列処理

プログラミング言語は、従来どおりFortranとC/C++を用意している。それぞれ自動ベクトル化機能、自動並列化機能を有しているので、既存の逐次処理プログラムを修正することなくベクトル化や並列化をコンパイラ任せで実行することができる。このため、ノード内の並列処理であれば比較的簡単に16並列までの並列処理が実現可能である。その他OpenMPによるノード内並列化にも対応している。また複数ノードを使用した並列処理も可能であり、この場合はMPIによる並列化プログラムを用い並列処理を行う。

表2　SX-9で扱えるプログラミング言語とMPI

Fortran90/SX　（日本電気）	ISO/IEC 1539-1:1997 自動ベクトル化、自動並列化、OpenMP対応
C++/SX　（日本電気）	ISO/IEC 14882:1998 自動ベクトル化、自動並列化、OpenMP対応
MPI/SX　（日本電気）	MPI-2仕様準拠

2.3.　システム構成

本センターのシステムは、今回導入したスーパーコンピュータシステムと既設の並列コンピュータシステムの2つのシステムから構成されている。

SX-9システムを利用するには、並列コンピュータシステム上でプログラミングを行う。ソースファイルの作成、コンパイル、ジョブの実行等、並列コンピュータで全ての作業が可能なようにSX-9向けプログラミング環境を構築してある。これはコンパイル等のプログラミングと演算実行の負荷を分散し、SX-9のパフォーマンスをジョブの実行に専念させるためである。

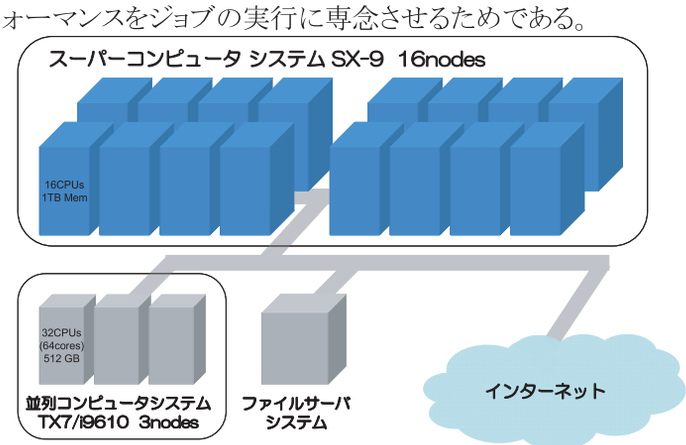


図2　大規模科学計算システムの構成

2.4. ジョブの運用

SX-9システムのジョブは、ジョブ管理システムNQSⅡ(Network Queuing System Ⅱ)で管理される。設定したジョブクラスは表3に示す6クラスである。基本的には、逐次処理と並列処理に大きく分けられ、並列処理の場合はさらに並列数でクラスを分けた。実行時間は従来どおり無制限としているので、制限にとらわれることなく長時間のジョブを実行できる。

sクラスとssクラスは、単一CPUで実行する逐次処理プログラムに用いる。ssクラスだけは唯一時間制限が設けてあり、経過CPU時間が1時間以内の短いプログラムの実行を目的としている。このため少ない待ち時間で実行状態に入ることができる。またデバッグ作業も想定しており、4並列までの並列処理も可能でメモリサイズも256GBと大きめに設定している。並列化プログラムは並列数に応じてp8,p16,p32,p64のいずれかのクラスに投入する。p8,p16クラスはノード内の共有メモリを利用できるため自動並列化、OpenMPそしてMPI並列化プログラムが実行できる。p32,p64クラスは複数ノードで実行するため、MPIによる並列化プログラムでノード間を並列処理する。

表3 SX-9システムのジョブクラス

クラス名	利用可能なCPU数	CPU時間制限	メモリサイズ制限
ss	4	1時間	256 GB
s	4	なし	32 GB
p8	8	なし	512 GB
p16	16	なし	1 TB
p32	32	なし	1 TB ×2
p64	64	なし	1 TB ×4

3. 性能評価

3.1. シングルCPU性能

前章ではSX-9システムの理論性能値について説明したが、この章では実効性能を評価することでその有用性を検証する。ここではSX-9のシングルCPUの実効性能について評価する。評価方法は6つの実アプリケーションをベンチマークプログラムとして用い、本センターのSX-9でコンパイル、実行することで行う。それぞれのアプリケーションは本センターで実際利用されているプログラムなので、他のプログラムを実行するときもひとつの目安として評価できるであろう。6つのアプリケーションは、Earthquake, Turbulent Flow, Antenna, Land Mine, Turbine, Plasmaを用いる。

はじめに、並列コンピュータシステムに搭載されているItaniumⅡとSX-7, SX-8, SX-9、それぞれの1CPUあたりの性能を評価する。図3の結果が示すとおり、全てのアプリケーションにおいてベクトル型プロセッサがItaniumⅡを上回ることが分かる。また、SX-9は、理論性能値どおり実効性能においても圧倒的な演算速度を有していることを確認できる。前システムのSX-7とは、最大で7倍、平均で約5倍の実効性能差がある。理論性能値の差ほど高速ではないが、容易に5倍から7倍高速に演算ができることが分かる。

つぎに、ItaniumⅡ 1CPUとSX-9 1CPU、ItaniumⅡ16CPUとSX-9 1CPUの比較を行う。理論性能値においては、表4が示すとおりItaniumⅡに対しSX-9は16倍の性能差があることになるが、図4では最大で158倍、平均でも約67倍の差が見られる。一方、ItaniumⅡ16CPUと比較した場合でも、理論性能値では102.4Gflop/sで全く等しいはずだが全てのアプリケーションでSX-9が上回っている。最大で28.5倍、平均で約9.5倍、SX-9が高速であることが分かる。

Land Mineで顕著に性能差が見られる(図4,図5)が、これはキャッシュヒット率が低く約90%以上をメモリアクセス時間が占めるためである。このようなメモリ転送に大きく依存しているアプリケーションは、SX-9のように高いメモリバンド幅を持つベクトル型計算機が有効であると言える。

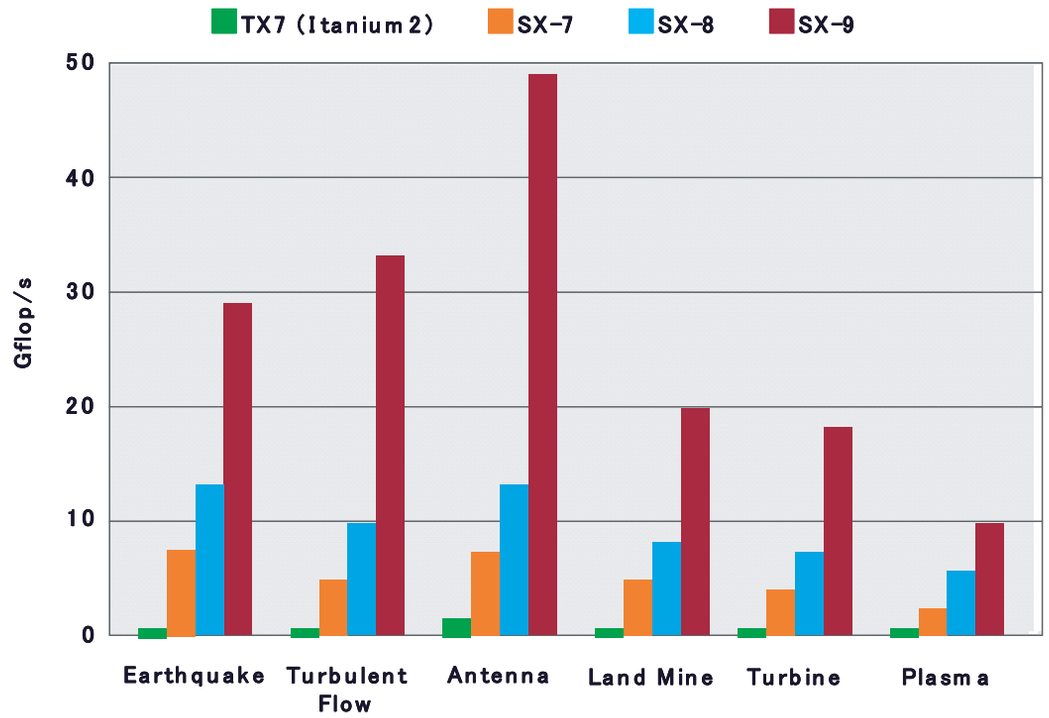


図3　SX-9とSXシリーズ、ItaniumⅡの1CPUあたりの性能

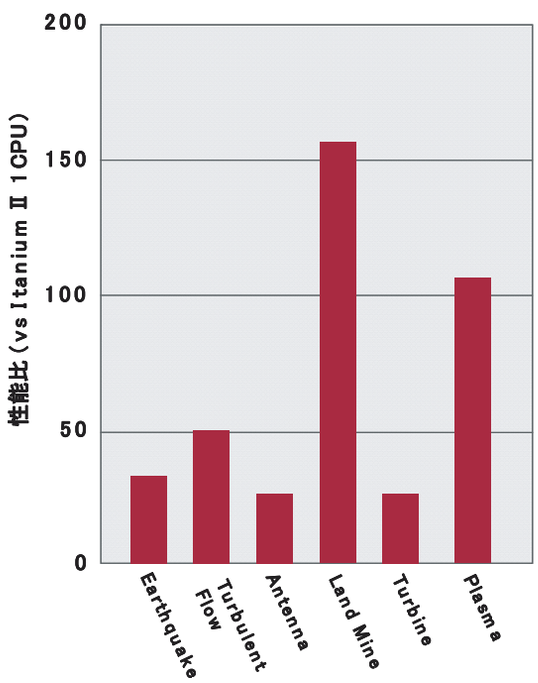


図4　SX-9とItaniumⅡ1CPU

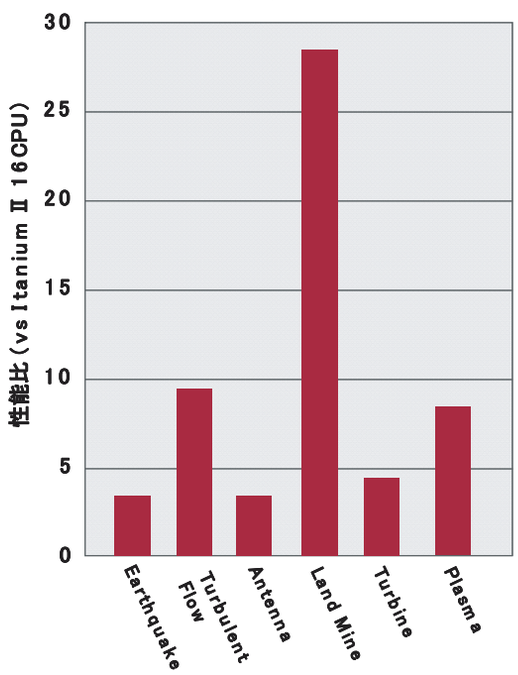


図5　SX-9とItaniumⅡ16CPU

表4　各プロセッサの理論性能

プロセッサ名	理論性能（1CPUあたり）	
SX-9 Vector	102.4	Gflop/s
SX-8 Vector	16	Gflop/s
SX-7 Vector	8.83	Gflop/s
ItaniumⅡ (Montecito)	6.4	Gflop/s

3．2．ノード性能

つぎに、SX-9のノード単位での実効性能について評価する。評価アプリケーションは、前節のAntennaを用いる。1ノードを構成しているCPU数はSX-9が16CPU、SX-7が32CPUのため、評価はSX-9の16CPU、8CPU、1CPUと、SX-7の32CPU、16CPU、8CPU、1CPUで行う。図6は、SX-7の1CPUでの測定値を1としたときの比率で表している。

ノードあたりの性能で見ると、SX-9のCPU数が半分にもかかわらず約5倍、同じCPU数では約10倍の性能を持つことが分かる。また、並列数を増やしたときの性能アップの割合もSX-9の方が大きいことが確認できる。このことからノード内並列処理においてもSX-7に比べ高速な処理が可能で、並列処理のスケーラビリティも高いことが分かる。SX-7用に最適化されたアプリケーションであれば、SX-9でも容易に高い実効性能を達成できると言える。

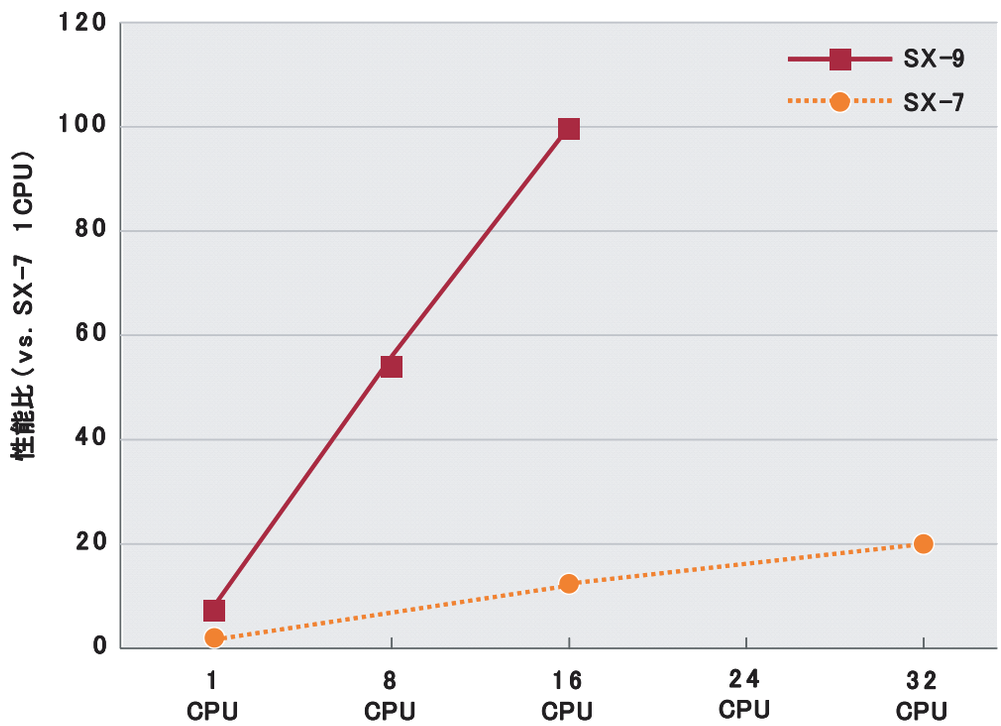


図6　SX-9とSX-7のノード性能

3．3．マルチノード性能

ここでは、SX-9を複数ノード利用した場合の性能評価を行う。より大規模なシミュレーションを行うためには、複数ノードを用いた並列処理が不可欠となる。評価には、東北大学工学研究科中橋研究室と共同研究により開発された非圧縮性流体シミュレーションを用いる。このアプリケーションは、全てのタスクをMPIで並列処理する方法(Flat MPI)と、ノード間はMPIを用いノード内はOpenMPで並列化するハイブリッド並列処理(Hybrid)の2通りの並列処理が可能である。Flat MPI方式とHybrid方式、それぞれの並列処理についてモデルサイズの小さい版(Coarse)と大きい版(Fine)の評価を行う。図7は、マルチノードの並列処理64CPU,32CPUで実行した場合と、シングルノードの16CPUで実行した場合の性能を、1CPUでの性能を1としたときの性能比として表している。

Coarse版，Fine版いずれのモデルにおいてもFlat MPI方式がHybrid方式より高い実効性能に達しておりスケーラビリティが高いことが分かる。64CPUにおいては、約48倍の性能を持つことが確認できる。Hybrid方式の場合、MPIとOpenMPそれぞれの通信処理が特定のタスクに集中してオーバーヘッド時間が大きくなるが、Flat MPI方式の場合は各タスクが並列に通信処理を行えるため効率の良い並列処理ができると言える。

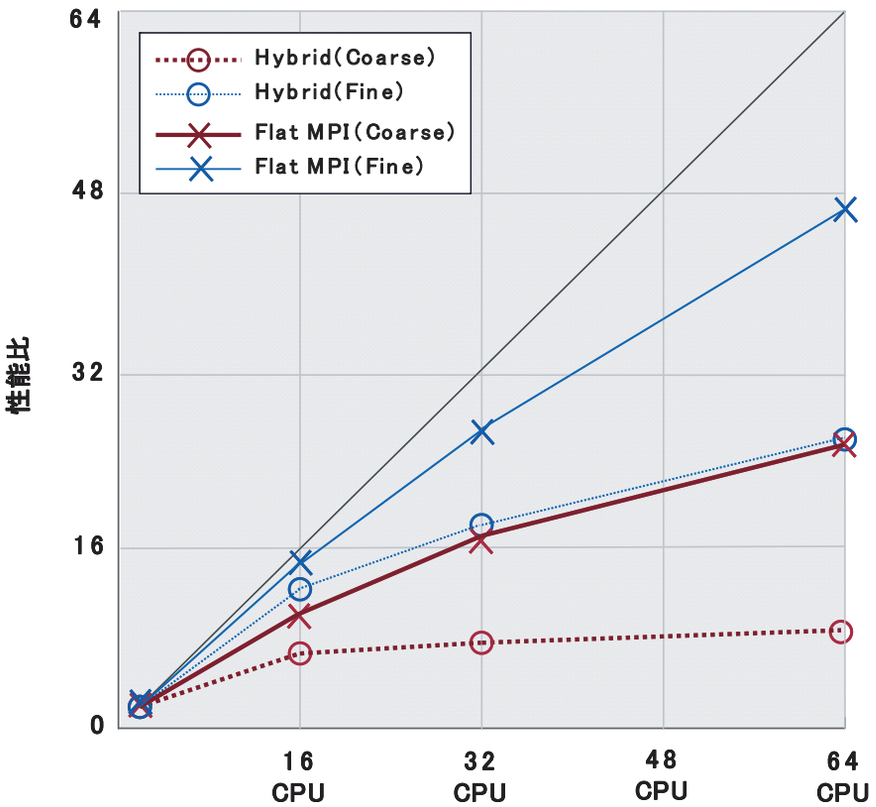


図7　SX-9のマルチノード性能

4. 終わりに

本稿では、今年3月に導入されたスーパーコンピュータSX-9について紹介し、当センターでの運用構成と性能評価について説明した。性能評価には、本センターで利用されている実アプリケーションをベンチマークに用い、前システムのSX-7に対してシングルCPU性能で5倍から7倍、ノード性能で約5倍高速に演算ができることを示した。実効性能を知ることで、利用者がプログラミングする際にも有用な指標となると思われる。

新機種が導入されたこの機会に、ぜひベクトル型スーパーコンピュータSX-9をお試しいただき、さらには研究の強力なツールとしてご活用いただけたら幸いである。

謝辞

本稿を執筆するにあたり多くの方々にご協力ご支援を賜わった。東北大学の長谷川昭教授、中橋和博教授、澤谷邦男教授、佐藤源之教授、山本悟教授、笹尾泰洋教授、土屋史紀教授、東京理科大学の塚原隆裕研究員、海洋研究開発機構海洋工学センターの有吉慶介研究員には評価プログラムを提供していただいた。また、日本電気㈱の撫佐昭裕様、NECシステムテクノロジーの曽我隆志様、塩田和永様、NECソフトウェア東北の下村陽一様にはシミュレーションにおいて多大なる協力をいただいた。皆様に心より感謝申し上げる。

参考文献

[1] 江川隆輔, ”新大規模科学計算システム スーパーコンピュータSX-9の性能評価”, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報SENAC, Vol.41, No.2, pp.11-18, 2008.

[2] Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, “The key frictional parameters controlling spatial variation in the speed of postseismic slip propagation on a sub-duction plate boundary,” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 256, pp.136--146, (2007)

[3] 塚原 隆裕, 岩本 薫, 河村 洋, “平行平板間乱流における流体線の直接数値シミュレーション”, 東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, Vol. 39, No. 1, pp. 47--58,(2006).

[4] Takagi, Y., H. Sato, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, and K. Sawaya, “Study of high gain and broadband antipodal fermi anetnna with corrugation,”*In proceedings of 2004 International Symposium on Antennas and Propagation, Volume 1,* pp. 69--27, (2004).

[5] Kobayashi, T., X. Feng, and M. Sato, “Fdtd simulation on array antenna sar-gpr for land mine detection,” *In Proceedings of SSR2003: 1st International Symposium on Systems and Human Science*, pp. 279--283, (2003).

[6]笹尾泰洋,堀田翼,山本悟,” タービン多段静動翼列流れの大規模並列計算を実現する数値タービンの研究, ” 東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, Vol. 40 No.3, pp.15--24,(2007).

[7] 加藤雄人, 小野高幸, 飯島雅英, ” 不均質媒質中でのプラズマ波動の伝搬についての計算機実験, ” 東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, Vol. 37, No.1, pp. 13 -- 19, (2004).

[8] Takahashi, Nakahashi, et al., “Large-Scaled computation of Incompressive Flows on Cartesian Mesh Using a Vector-Parallel Supercomputer,” *presented at Parallel CFD 2008*, Lyon France, 5/18-22, 2008



[全国共同利用情報基盤センター研究開発論文集 No.30]より

EtherIP を用いたセンター管理型キャンパス無線 LAN

大和 純一　若山 永哉　後藤 英昭　曽根 秀昭

東北大学 サイバーサイエンスセンター

1　はじめに

近年の無線 LAN 機器の普及に伴い，キャンパス内で学生や教職員などが各自の PC を無線 LAN で学内ネットワークに接続して，授業や研究に役立てたいといった要望が増加している．

無線 LAN では，キャンパス内のどこでも同じようにできることが望ましいが，無線 LAN 用のアクセスネットワークをキャンパス全体に新規に敷設することはコストが問題となる．また敷設済みの有線ネットワークを無線 LAN に利用する場合，無線 LAN と既存 LAN の通信が同一 LAN 上に混在することによるセキュリティ面での問題等が生じえる．さらに，管理面からはセンターで無線 LAN を集中管理することが望ましい．

そこで我々は，既設 LAN 上に EtherIP[1]を用いて無線 LAN 専用のアクセスネットワークを構築し，センター管理型のキャンパス無線 LAN を実現した．本稿では EtherIP を用いたキャンパス無線 LAN 用アクセスネット構築手法について報告する．

2　既設 LAN を活用した無線 LAN 用アクセスネットワークの提案

キャンパスネットワークの状況としては，既設の有線ネットワークの管理が部局単位での管理の部分とセンターでの管理の部分が混在し，構成も NAT/NAPT 等が使用されている場合や，機器の VLAN の使用可否等，構成・機器・管理体制が複雑になっている．このような状況でネットワークの管理コストを考慮した上で，学生・教職員がキャンパス内のどこからでも同じように無線 LAN を使用できるようにするためには，センターによる一元管理の無線 LAN 用アクセスネットワークを構築することが望ましい．

無線 LAN 用アクセスネットワークのために，新規の有線ネットワークを敷設することは，敷設工事・機器導入等の初期コストが問題となり実現が困難である．また，既設の有線ネットワークを活用し，VLAN を用い無線 LAN 用アクセスネットワークを実現する方法もあるが，VLAN 対応機器へのリプレースによる機器導入費用は避けがたい．また，既設の有線ネットワークを活用する場合，使用されているネットワーク環境の変更はユーザへの影響が大きく，そのため導入のハードルは高い．以上から，既設の有線ネットワークの使用法・機器・設定を変更せずに，無線 LAN 用アクセスネットワークを構築する方法が望まれる．

一方，学内全ての無線 LAN 機器をセンターで管理することを考えると，末端の機器の設定変更を行わず，センター内に設置した機器の変更のみで運用できることが管理コスト面からは望ましい．さらに，個々の機器の設定変更を要する場合でも，センターからリモートで設定変更が行えることが必須であろう．なお，学内への無線 LAN の導入手順としては，図 1に示すように，センターは導入機器の初期設定のみを行い，設置についてはサービスエリアを管理する部局に一任し，かつ，部局が行う設置作業も最小限となる方法を提案する．

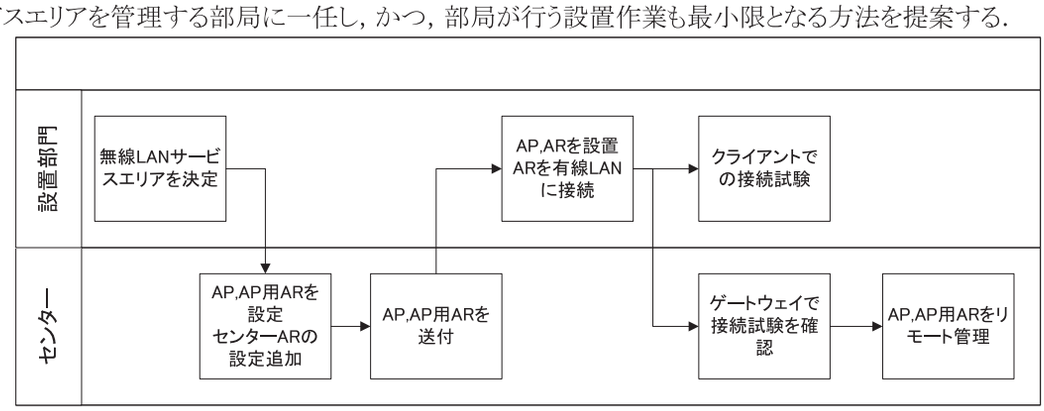


図 1 設置部局とセンターの役割分担

以上述べたような環境を考慮し，容易に導入できる無線 LAN 用アクセスネットワークの構築手法を提案する．提案する構築手法の要件を下記に示す．

- 既設有線ネットワークを活用し，既存のネットワークの使用方法・機器・設定の変更をせずに，無線 LAN 用アクセスネットワークを構成
- 無線 LAN 用アクセスネットワークは，センターで一元管理し，無線 LAN のサービスエリアの開設は，末端機器の設置は各部局に一任
- 無線 LAN サービスエリア開設にあたり，センターで機器の初期設定を行い，部局は最小限の作業で設置が可能
- 無線 LAN サービスエリアに設置する機器は，有線ネットワークの構成変更等の影響を受けず，リモート管理ができ，無線 LAN 用アクセスネットワークの設定変更は基本的にセンター内の機器の設定変更のみで実現

3　EtherIP

我々は，既設の有線ネットワークを活用し，既存のネットワークの使用方法・機器・設定の変更を要さない，無線 LAN 用アクセスネットの実現方法として L2VPN に着目した．L2VPN では，MAC フレームを IP パケットにカプセル化し，VPN のノード間で送受信を行う．

L2VPN を用いることで，IP 等の layer3 のプロトコルを限定せずに無線 LAN 用のアクセスネットワークを実現することが可能である．既設の有線 LAN に導入した場合，L2VPN で接続されたノード間で IP パケットの送受信が行えればよく，サービスエリアとセンターを L2VPN で接続する場合には，既存ネットワークの設定変更も少なく，既設有線 LAN としては，トラフィックの増加以外の影響がないと考えられる．

また，IEEE 802.1Q の VLAN-tag を透過させられる L2VPN 装置を使用することで，部局単位の無線 LAN や，学内共通の無線 LAN や，eduroam[2][3][4]のようなキャンパスネットワークローミングも，一台の無線アクセスポイント(以下，AP)で同時にサービスすることが可能である．この構成では 802.1Q 対応し複数の SSID をあつかい，SSID 毎に VLAN-tag を割り当てられる AP を用いる．

我々は L2VPN として EtherIP を選択した．

4　EtherIP を用いた無線 LAN 用アクセスネットワークの構成

次に，無線 LAN 用アクセスネットワークをセンターで一元管理するための構成について説明する．

無線 LAN サービスエリアとセンターを EtherIP で接続することで，無線 LAN サービスエリアで行われる無線 LAN を介した通信は，センターに全て転送される． さらに，キャンパスネットワークと無線 LAN 用アクセスネットワークとの接続を，センター内のゲートウェイで行うことで，ルーティングおよびフィルタリングを，センター内で一元的に管理する．これにより，キャンパスネットワークの利用ポリシーが変わった際，センター内のゲートウェイの設定変更により無線 LAN アクセスネットワークの利用ポリシーへの対応が可能となる．また，無線 LAN の利用状況をセンターで把握することも容易である．

無線 LAN 用アクセスネットワークのシステム構成を図 2に示す．

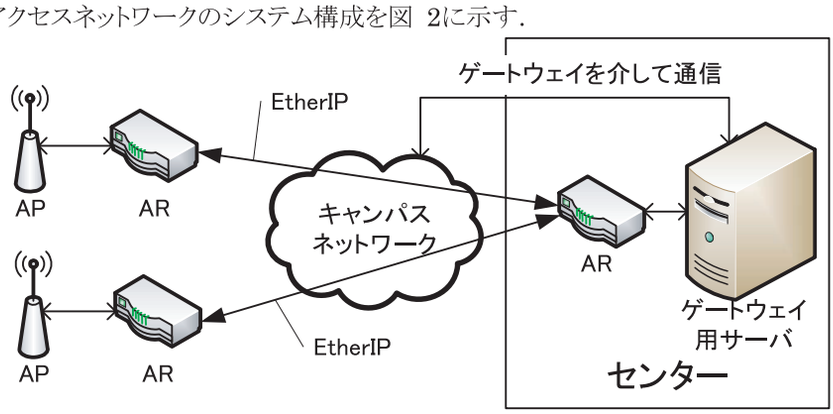


図 2 システム構成

なお，AP として 802.1Q に対応し，複数の SSID に柔軟にセキュリティ設定ができることからアライドテレシス社の AT-TQ2403 を使用した．この AP は EtherIP に対応していないため EtherIP が使用できるアクセスルータ(以下，AR)として，NEC 社の UNIVERGE IX2000/IX3000 シリーズを使用した．

4.1　センター用 AR

センター用 AR は，複数の AP 用 AR と接続する構成とし，大容量のもの（UNIVERGE IX3010 + 2GE-T カード）を使用した．

EtherIP のトンネルが使用するポートには，キャンパスネットのどこからでもアクセスできる固定の IP アドレスを設定し，キャンパスネットワークに接続した．また，ゲートウェイ用サーバとセンター用 AR の他のポートを直結した．センター用 AR では，各 AP 用 AR の IP アドレスを指定し，EtherIP のトンネルを設定し，ゲートウェイ用サーバと接続したポートと，これらトンネル群とをブリッジ接続するように AR を設定した．この構成により AP 用 AR とセンター用 AR を EtherIP で接続し，AP 群から送られてきた全パケットがゲートウェイ用サーバに送られ，ゲートウェイ用サーバから送られてきた全パケットが AP 群に送られる．

4.2　AP 用 AR

AP 用 AR としては設置の自由度を考慮し，小型の AR（UNIVERGE IX2005）を使用した．

EtherIP のトンネルが使用するポートは，センター用 AR と通信可能なように固定の IP アドレスを設定し，キャンパスネットワークに接続した．また，AP と AP 用 AR の他のポートを直結した．センター用 AR の IP アドレスを指定し，EtherIP のトンネルを設定し，AP と接続したポートと EtherIP のトンネルとをブリッジ接続するように AR を設定した．

なお，使用した AR は，内部のブリッジ設定に仮想インターフェースを割り当てる機能があり，これを使用することでセンターから EtherIP のトンネルを経由し，AP 側 AR を管理することが可能である．また， AP に無線 LAN 用アクセスネットからアクセス可能な，IP アドレスを設定することで，センターから EtherIP のトンネルを経由し，AP を管理することも可能である．

なお，図 2では AP 用 AR には 1 台の AP しか接続していないが，1 台の AR に複数の AP を接続することも可能である．

4.3　ゲートウェイ用サーバ

EtherIP を用いて形成した無線 LAN 用アクセスネットワークと，キャンパスネットワークを接続する本構成の要となるゲートウェイについて説明する．

無線 LAN 用アクセスネットワークと，キャンパスネットワークとのゲートウェイは，Linux が動作するサーバを用いて実現した．ゲートウェイ用サーバでは，キャンパスネットワークの運営方針に合わせたパケットのフィルタリングと，dhcp によるクライアントへの IP アドレス払い出しを基本機能として持つ．Linux サーバを使用することでさまざまな機能をゲートウェイ上に実現することが容易である．

また，今回実現した構成では，クライアントへ払い出す IP アドレスに private アドレスを使用し，無線 LAN 用アクセスネットワークとキャンパスネットワークは，NAPT を介して接続している．

5　対応環境の拡大

本章では、本構築手法が利用できる環境を拡大するために行った検討について説明する。4章で示した構成方法では，dhcp・NAT/NAPT を使用した環境には対応できず，多数の AP を 1 台のセンター用 AR でまかなう場合フラッディングが発生することが懸念され，クライアントと AP が IEEE 802.1X での認証にキャンパスネットワーク上の RADIUS[5]サーバを使用する場合，RADIUS サーバへのアクセスキーを全 AP で共通にしなければならないという課題がある．以下，各課題の解決策を示す．

5.1　dhcp・NAT/NAPT 対応

まず、dhcp・NAT/NAPT を使用した環境への対応に法ついて説明する。4章で示した構成方法では，

EtherIP のトンネルの設定で相手側の IP アドレスを指定しなければならないため，AP 用 AR も固定 IP アドレスでなければならない．また，EtherIP のトンネルが送信先 IP アドレスに直接パケットを送るため，AP 用 AR はセンター用 AR から直接パケットを受け取れなければならない．そのため dhcp が使用された LAN や，NAT/NAPT の内側の LAN に AP 用 AR を設置することができない．そこで，dhcp・NAT/NAPT 対応させる構成方法を検討した．

使用した AR の EtherIP では，配信プロトコルとして IPSec が使用でき，この IPSec が動的 IP に対応していた．そこで EtherIP + IPSec を用いることで，dhcp 環境に対応可能であった．また，動的 IP 側からコネクションを確立するため NAT/NAPT の内側からコネクションを張ることで，NAT/NAPT の内側の LAN に AP 用 AR を設置することが可能となった．なお，IPSec の通信での暗号化は AR の負荷等を考慮し行わない設定とした．

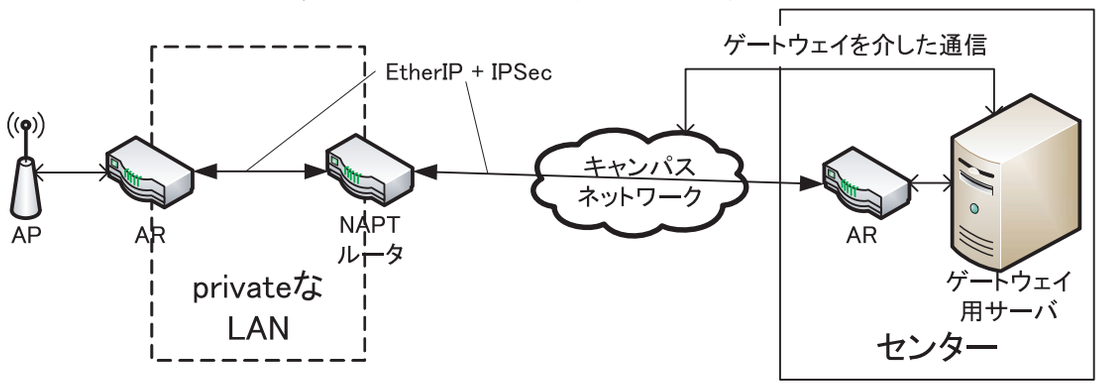


図 3 NAPT 内側に設置

この設定では，下記手順で AP とゲートウェイ用サーバが通信可能となる．すなわち，AP から LAN へのパケット送信を契機に EtherIP が使用可能となる．そのため，EtherIP 用のコネクションが確立していない状況ではセンター側から AP および AP 用 AR にアクセスができない．したがって，センターから無線 LAN が管理できない状態が発生しえる．

1. AP から LAN にパケットを送信
2. EtherIP の接続を開始
3. 無線 AP 側 AR が，センター側 AR と IPSec の接続を要求
4. センター側 AR と無線 AP 側 AR が認証
5. センター側 AR と無線 AP 側 AR で IPSec が確立
6. EtherIP の接続が確立
7. AP とゲートウェイ用サーバが通信可能となる

5.2　大規模対応

次に大規模環境への対応法を説明する。4章で示した構成方法では，センター用 AR で，全ての EtherIP 用トンネルとゲートウェイ用サーバの接続されたポートを，一つのブリッジとして設定したため，センター用 AR を介して，全ての AP 用 AR に，全てのパケットが送信される．そのため，各 AP 用 AR に不要なパケットが流れ，規模によってはフラッディングが発生しえる．この問題に対する対応策を説明する．

使用した AR では，トンネルのような仮想インターフェースも含めてインターフェース単位にパケットをフィルタリングする機能を持ち，VLAN-tag によるフィルタリングも可能であった．また本構成では，802.1Q 対応の AP を用いることから，AP で使用する VLAN-tag を変え，センター用 AR の各 EtherIP のトンネルに対応する VLAN-tag のみを通過させるフィルタを設定した．この設定により各 AP に関連しないパケットが送信されることを防ぐことが可能となる．なお，VLAN-tag を建物内のフロアーや建物単位で共通化することで，フロアー内の端末や AP が同一 LAN に接続され，情報の共有等が容易となる．

この構成では，ゲートウェイ用サーバも VLAN-tag に対応させ，VLAN-tag で識別できる LAN 単位で dhcp による IP アドレス払い出し，パケットのフィルタリング，NAPT を介したキャンパスネットワークとの接続を行わせた．

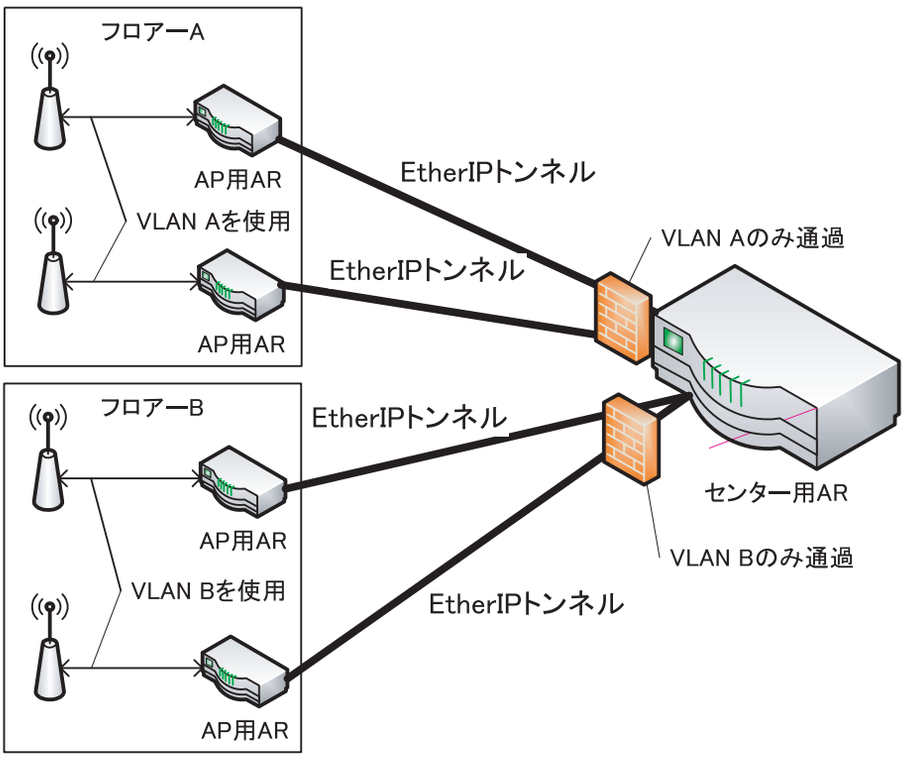


図 4 大規模対応のイメージ

5.3　RADIUS サーバアクセスキーの AP 個別化

最後に RADIUS サーバのアクセスキーを AP 個別に持たせる方法について説明する。4章で示した構成方法では，ゲートウェイ用サーバが NAPT を行っているため，キャンパスネット上からはクライアントや AP を個別に認識することができない．一方，クライアントと AP が IEEE 802.1X を用いた認証を行う場合，RADIUS を使用するが，RADIUS サーバは IP アドレスでクライアントを識別する．そのため，キャンパスネット上の RADIUS サーバを用いる場合，AP を個別に識別することができない．従って，RADIUS サーバにアクセスする際に必要となるアクセスキーを AP で共通化する必要が生じる．アクセスキーを共通化した場合，アクセスキー変更時の作業量が膨大となる．

この課題の対応策の一つとして，ゲートウェイ用サーバで RADIUS サーバを稼動させ，キャンパス内の RADIUS サーバとプロキシー接続し，各 AP はゲートウェイ用サーバの RADIUS サーバにアクセスする方法が考えられる．なお，この方法では，各 AP の RADIUS サーバへのアクセス設定はゲートウェイ用サーバで行うこととなる．

6　事例

現在，学内の一部であるがこの手法で AP を設置し，実際に運用を行っている．本章では，提案した構成法を用いた事例をいくつか紹介する．

6.1　AP 設置作業のセンター省力化（図書館）

まず，図書館に設置した際の事例を紹介する．この事例では，装置を図書館の担当者に送付し，設置と設置場所に合わせた設定を図書館の担当者が実施した．

本設置での役割分担は下記のとおりである．

- センター
  - ➢ dhcp・NAT/NAPT 対応で設定済み AP 用 AR を設定

- dhcp・NAT/NAPT 対応でセンター側 AP の設定を追加
- ゲートウェイ用サーバに図書館用 VLAN の設定(dhcp, フィルタリング)を追加

- 図書館
  - AP および AP 用 AR の設置
  - dhcp が使用されていなかった場合の AP 用 AR のキャンパスネットに接続するポートのネットワーク設定

dhcp・NAT/NAPT 対応で設定済み AP 用 AR を設定することで，センターで設置される有線ネットワークの詳細を把握せずに設置することが可能である．また，使用するネットワークで dhcp が使用されていた場合は，ネットワークケーブルと電源の接続のみで稼動させることが可能である．設置した AP と AR のセットを図 5に示す．

また，使用した AR に web ベースインターフェースがあり，これを用いることでポートのネットワーク設定（IP アドレスとゲートウェイアドレスの設定）が比較的容易であった．そこで，設定マニュアルを作成し，詳細な説明を要さず，AP と AR を設置していただけた．

なお，東北大学では VPN 認証の「どこでも TAINS」[6][7][8]と 802.1X を用いた「eduroam」を展開している．また，eduroam は VPN のみ使用を許可する VPN only ポリシーで運用している．VPN サーバをもたなければアクセスができないため，図書館のようにさまざまな人が使用する場では，無線 LAN の恩恵に預かれる人が限定される．そこで，専用の VPN サーバを用意し，図書館でテンポラリアカウントを払い出し，使用していただけるようにしている．なお，VPN サーバのテンポラリアカウントは VPN サーバの web インターフェースにより図書館員に管理していただいている．

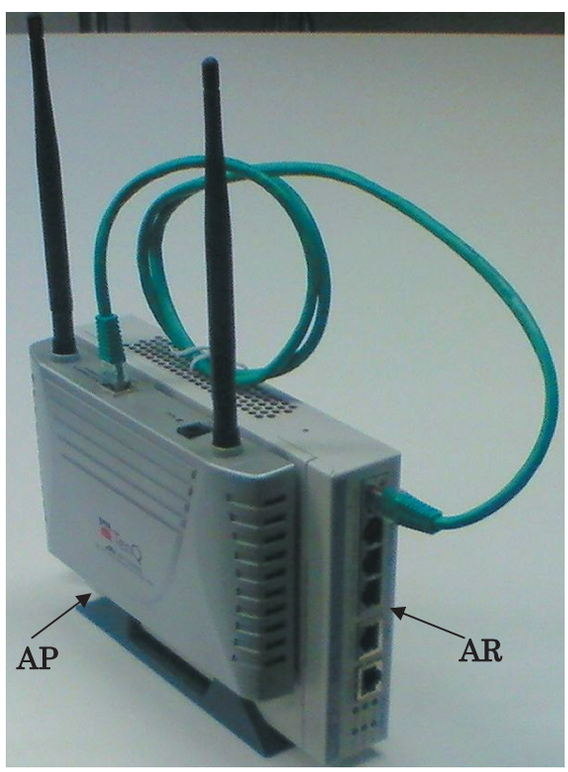


図 5 設置した AP と AR

6.2　VLAN-tag 対応ネットワークでの構築（電気系部局）

次に，電気系部局に設置した際の事例を紹介する．電気系部局では VLAN-tag が使用できるネットワークが構成されていた。

この事例での構成を図 6に示す．VLAN-tag が使用できるエリアに設置する AP 群には，既存のネットワークで使用されていない VLAN-tag を割り当て，1台の AP 用 AR で賄った．

この構成では AP 用 AR を集約でき初期コスト削減が期待できる．

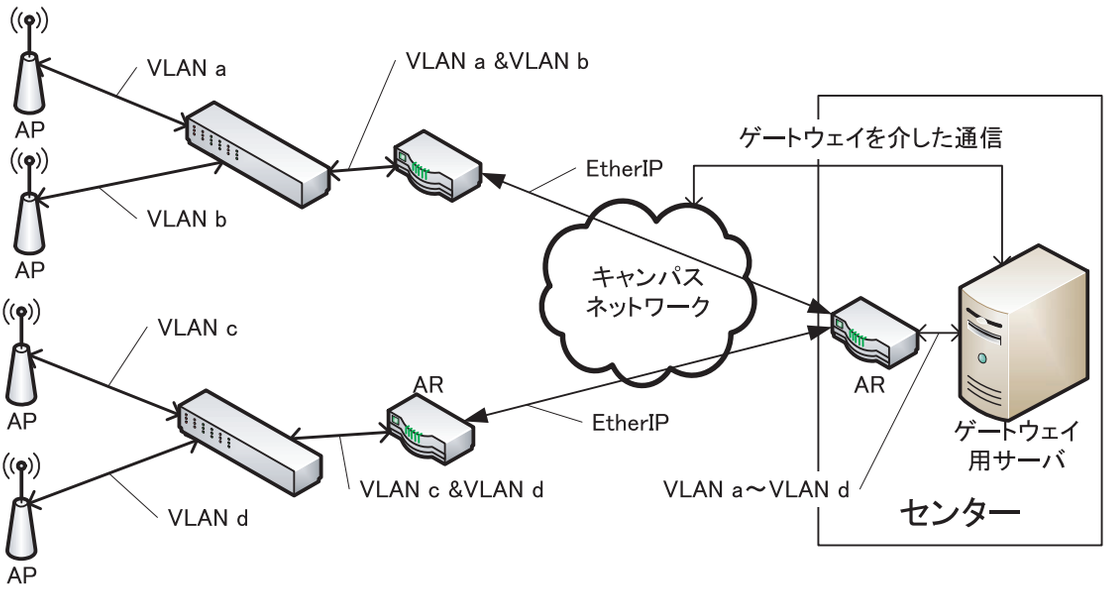


図 6 VLAN 対応 LAN を活用した構成

なお，情報共有等が容易となるため VLAN –tag をフロアー単位で共通化した．

6.3　学外に無線 LAN サービスエリア仮設

本構成の応用事例を紹介する．6.1と同様の構成の AP 用 AR を用い，センター用 AR を The Internet と直接通信できるよう構成することで，学外にある会議場等が有線で The Internet への接続をサービスしていれば，センター管理の無線 LAN サービスエリアを仮設することが可能である．

なお，これを実現する際には，設置先のネットワークで IPSec が通過できる必要がある．また，The Internet をパケットが通過するため，AP 用 AR とセンター用 AR 間を接続する IPSec に関しては暗号化を行うことが望ましいと考える．

7　課題

提案した構築手法を実施したことで見つかった課題を説明する．

- 設置の自由度が高くない
  AP と AP 用 AR をセットで設置するが，AR が IEEE802.3af PoE(Power over Ethernet)による給電に対応しておらず，AP は PoE 対応であるが，AR から AP に PoE での給電ができないため，設置場所に LAN ケーブルの AP 用と AR 用の電源が必要となる．
- IPSec を使用した場合の管理性低下
  dhcp および NAT/NAPT の内側に AP を設置するために IPSec により AP 用 AR からセンター用 AR にコネクションを張ったが，コネクションが確立していない状態では AP および AP 用 AR にセンターからリモートアクセスを行うことができない．これにより管理性が低下する．
- 規模見積もり
  1 台のセンター用 AR およびゲートウェイ用サーバで実運用可能な AP 数は確認していない．設置する AP 数と必要となるセンター用 AR およびゲートウェイ用サーバ数の見積もり手法が必要である．

また，AP 用 AR を LAN に接続しただけで運用ができるところまでは至っていない．今後，これら課題について検討する予定である．

8　まとめ

EtherIP を用いて既設の有線ネットワークを活用しながら，センターで集中管理できる無線 LAN 用の専用ネ

ットワークの構築手法について報告した. また, この手法で dhcp 環境や NAT/NAPT の内側に AP を設置する方法や, 大規模化への対応方法, および, いくつかの事例も報告した.

今後, センター用 AR およびゲートウェイサーバ一台あたりで実運用可能な AP 数の見積もり手法, AP 用 AR をネットワークに接続するだけで無線 LAN 用アクセスネットワークに組み込むことができる AR の設定手法の改良を行う予定である.

参考文献

[1] R. Housley S. Hollenbeck, ``EtherIP: Tunneling Ethernet Frames in IP Datagrams, '' IETF RFC3378, Sep. 2002.
[2] L. Florio, K. Wierenga, ``Eduroam, providing mobility for roaming users,'' EUNIS 2005, June 2005.
[3] 後藤, 今井, 曽根, ``eduroam とキャンパスユビキタスネットワーク,''東北大学情報シナジーセンター TAINS ニュース Vol.34, 2007. (http://www.tains.tohoku.ac.jp/news/news-34/0508.html)
[4] eduroam.jp ポータルサイト: http://www.eduroam.jp/
[5] C. Rigney, S. Willens, A. Rubens, and W. Simpson, ``Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS),'' IETF RFC2865, June 2000.
[6] 今野, 水木, 後藤, 曽根, ``TAINS/G における無線 LAN ローミングシステムの構築について, `` 東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算機システム広報 SENAC, Vol.38, No.1, pp.41-45, 2005. (http://www.cc.tohoku.ac.jp/refer/pdf_data/v38-1p41-45.pdf)
[7] 今野, ``TAINS/G における無線 LAN ローミング「どこでも TAINS」について,'' 東北大学情報シナジーセンター TAINS ニュース vol.33,2005. (http://www.tains.tohoku.ac.jp/news/news-33/0309.html)
[8] 後藤, 水木, 曽根, ``無線・有線 LAN ローミングシステム「どこでも TAINS 2」',東北大学情報シナジーセンター TAINS ニュース Vol.33, 2008. (http://www.tains.tohoku.ac.jp/news/news-35/0507.html)
[9] NEC インフロンティア, 「IX2000/3000 シリーズコマンドリファレンスマニュアル 第5版」, Feb. 2008.

[Web 版大規模科学計算システムニュース]より

大規模科学計算システムニュースに掲載された記事から転載しています。

大規模科学計算システムの WEB アドレスの変更について(No.81)

11 月 4 日（火）より、サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムのホームページの URL は、http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/ となります。しばらくは、旧アドレスもご利用なれます。ブックマーク等設定の方は早めに変更をお願いいたします。

（システム管理係）

フィルムスキャナの利用について(No.81)

1 階利用者入出力室にあるフィルムスキャナを更新し、設置しましたのでご利用ください。利用方法については、大規模科学計算システムウェブページ

http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/service/USE/Filmscanner/guide20081021.pdf

に記載しましたのでご覧ください。

（システム管理係）

文部科学省 先端研究施設共用イノベーション創出事業 2009年度第一期公募のご案内(No.83)

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、文部科学省が平成19年度から開始した「先端研究施設共用イノベーション創出事業」を通して、産学連携共同研究におけるサイバーサイエンスのスーパーコンピュータ学術利用支援を行っております。本センターでは、これまで計5件の課題が採択され、本イノベーション創出事業に参画しております。

現在、またはこれまで大学・民間企業との産学連携共同研究を推進しており、今後当センターのスーパーコンピュータの利用を予定している方、当センターのスーパーコンピュータを用いた新たな産学連携共同研究を予定している方には、是非、この「先端研究施設共用イノベーション創出事業」を有効に活用して戴ければと存じます。

現在行われている2009年第一期の公募締め切りは3月6日となっております。ご興味のある方は、是非サイバーサイエンスセンター・イノベーション窓口までご連絡ください。

2009年度　第一期公募日程

2月2日（月）	第一期公募　受付開始
3月6日（金）	第一期公募　受付締切り
3月下旬	第一期公募　採択通知
4月1日（水）	第一期公募　利用手続き開始

※先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】」の詳細は、下記Webサイトをご参照ください。

URL: http://kyoyo.itc.u-tokyo.ac.jp/

問い合わせ先
東北大学情報シナジー機構・情報シナジーセンター
情報部情報基盤課 庶務係　イノベーション窓口
電話 : 022(795)3407,　Fax: 022(795)6099
E-mail : innovation@isc.tohoku.ac.jp
(研究開発部、庶務係)

－ SENAC 執筆要項 －

SENAC のサイズは、今号 Vol.42,No.1 より B5 判から A4 判に変更になりました。

広報 SENAC は、広く利用者の便を計るために、下記の要項にしたがった投稿も記載いたします。

１．お寄せいただきたい投稿内容

次のような内容の投稿のうち、当センターで適当と判定したものを掲載します。その際に原稿の修正をお願いすることもありますのであらかじめご了承ください。

・一般利用者の方々が関心をもたれる事項に関する論説
・センターの計算機を利用して行った研究論文の概要
・プログラミングの実例と解説
・センターに対する意見、要望
・利用者相互の情報交換

２．執筆にあたってご注意いただく事項

(1)原稿は横書きです。
(2)術語以外は、「常用漢字」を用い、かなは「現代かなづかい」を用いるものとします。
(3)学術あるいは技術に関する原稿の場合、200 字程度のアブストラクトをつけてください。
(4)参考文献は通し番号を付し末尾に一括記載し、本文中の該当箇所に引用番号を記入ください。
　・雑誌：著者,タイトル,雑誌名,巻,号,ページ,発行年
　・書籍：著者,書名,ページ,発行所,発行年

３．原稿の提出方法

原稿のファイル形式は Word を標準としますが、PDF での提出も可能です。サイズ*は以下を参照してください。ファイルは電子メールで提出してください。

－Word の場合－
　・用紙サイズ：A4
　・余白：上＝30mm　下＝25mm　左右＝25mm　綴じ代＝0
　・標準の文字数（45 文字 47 行）

＜文字サイズ等の目安＞
　・表題＝ゴシック体 14pt 中央　・副題＝明朝体 12pt 中央
　・氏名＝明朝体 10.5pt 中央
　・所属＝明朝体 10.5pt 中央
　・本文＝明朝体 10.5pt
　・章・見出し番号＝ゴシック体 11pt～12pt
　　*余白サイズ、文字数、文字サイズは目安とお考えください。

４．その他

(1)執筆者には、希望があれば別刷 50 部を進呈します。50 部を超える分については、著者の実費負担とします。別刷の希望部数等は投稿の際に申し出てください。
(2)投稿予定の原稿が 15 ページを超す場合は以下まで前もってご連絡ください。
(3)初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
(4)原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内　情報部情報基盤課庶務係
e-mail　uketuke@isc.tohoku.ac.jp
TEL　022-795-3406　FAX　022-795-6099

編 集 後 記

私が初めてプログラムらしきものを作ったのは、8 ビット CPU の Z80 が載ったマイコンだったと思います。小学生から高校生までの間、Z80 はソフトもハード(自作)も遊びたおしました。当時の CPU は動作クロックを数えるのが楽だったので、機械語で作ったプログラムのループのクロック数を数えては、フロッピーディスクの回転数に間に合うようにカリカリに最適化してみる、といったこともやりました。後に i8086 や V30 でもアセンブラで似たようなことをして楽しんでいました。今思うとずいぶん生産性が悪かったのですが、当時は本当に楽しかったです。最近の CPU は、パイプラインやらキャッシュやらで、実際のクロックを机上で数えるのが難しくなりました。仕事ではもっぱら C/C++を使っているのですが、昔の癖なのか、ソースコードを書きながら「この分岐は飛んだ方が速いのか」とか「これだとレジスタ操作に無駄がありそう」などと、目的のためにはあまり重要でないことまで考えてしまいます。最近の高級な CPU と高級なコンパイラで育った若者は、いったいどんなことを想いながらプログラミングを楽しんで(?)いるのでしょうか。(H.G)

サイバーサイエンスセンターの真向かい（旧青葉山ゴルフ場）が、東北大学の新キャンパス用地です。昨年末から、本格的な整地作業が始まりました。3 階から上のベランダで眺めると、毎日のようにその姿を変化させています。「こんなに広かったのか。」と職員が皆同じような感想を漏らしています。目前には、サッカー場や、野球場もゆったり造れる様な広々とした敷地がひろがっています。木々なども一部伐採されて、芝生も消え全体が土色になっている姿が現在は少しさみしくもありますが、環境調和型の新キャンパスに徐々に生まれ変わっていく姿を毎日みることが今後の楽しみとなりそうです。順調に工事が進むと、農学研究科や電気通信研究所等が約 2 年後には移転して来る予定です。ご近所になる部局の方に、今まで以上にセンターを利用していただければうれしく思います。(K.S)

SENAC のサイズの変更について

昭和 43 年の発刊以来 SENAC のサイズは B5 判を採用してまいりましたが、編集部会にて約半年をかけ検討の結果、時代の趨勢、執筆者の便宜等もかんがみ今号（Vol.42,No.1）より A4 判に変更いたしました。

SENAC 編集部会

小林広明　曽根秀昭　水木敬明　後藤英昭　江川隆輔
伊藤英一　加藤　昇　山内　斎　斉藤くみ子

平成 21 年 1 月発行
編集・発行　東北大学
サイバーサイエンスセンター
仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
郵便番号　980-8578
印　刷　大成印刷株式会社

索　引

SENAC Vol.41 (No.1～No.4)　　2008.1～2008.10

項　目	No.	p.
お知らせ・報告等		
平成19年度全国共同利用情報基盤センター顕彰について	1	9
第7回テラフロップワークショップ報告　小林広明	1	11
センターの名称変更について	2	1
「大規模科学計算システムニュース」より		
スーパーコンピュータの更新について(1)〈No.69〉	1	1
スーパーコンピュータの更新について(2)〈No.70〉		
MATLABのバージョンアップについて〈No.70〉		
Taylor級数演算ライブラリのサービス〈No.70〉		
科学研究費補助金等による負担金の支払いについて〈No.71〉		
利用負担金（1月～3月分）について〈No.71〉		
平成20年度共同研究の募集について〈No.71〉		
平成20年度研究開発の公募について〈No.71〉		
研究成果リスト提出のお願い〈No.71〉		
Gaussian03のバージョンアップについて〈No.71〉		
文部科学省　先端研究施設共用イノベーション創出事業第二回公募のご案内〈No.71〉		
平成20年度講習会計画〈No.72 〉	2	3
利用負担金割引制度(試行)の実施について〈No.73〉		
大規模科学計算システムニュース(紙版)配布の終了予定とメールマガジンについて〈No.73,No.74〉		
計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供について〈No.74〉		
平成20年度の共同研究について〈No.74〉		
平成19年度研究開発公募の報告〈No.74〉		
平成20年度研究開発公募課題の採択について〈No.74〉		
平成20年度第二次研究開発の公募について〈No.74〉		
大規模科学計算システムニュース(紙版)配布の終了とメールマガジンについて〈No.75〉	3	83
平成20年度の利用相談について〈No.75〉		
利用相談室の夏季閉室について〈No.77〉		
平成20年度講習会案内（第8回～第14回）〈No.77〉		
利用負担金の表示コマンドについて〈No.76〉		
大規模科学計算システム利用負担金について〈No.77〉		
文部科学省2008年度先端研究施設共用イノベーション創出事業〈No.77〉		
費目別の請求書発行について〈No.79〉	4	48
利用負担金額の表示コマンドについて〈No.79〉		
第9回テラフロップ・ワークショップ開催のご案内〈No.80〉		
解説・資料		
ライブラリ・アプリケーションの紹介	2	35
利用者イーサネット・ジャックおよび無線 LAN システムの更新　後藤英昭　他	3	77
学内ローミングおよび国際ローミングに対応した情報科学研究科・新無線LANシステムの構築について　後藤英昭	4	37

項　目	No.	p.
共同研究成果		
木星磁気圏内でのピックアップイオンの熱化に関する計算機実験　加藤雄人　他	1	13
航空機の空力解析・設計におけるCFDの活用　中橋和博　他	1	21
FDTD 法による給電ケーブルで駆動されるプリント回路基板からの不要電磁放射解析　萱野良樹　他	1	31
円管流・層流乱流遷移モデル(3)：レイノルズの色素流入実験とヒステリシス曲線　神田英貞	2	63
遺伝アルゴリズムを用いた光機能性人工構造体の探索　岩長祐伸	3	43
高解像度直接数値シミュレーションによる乱流熱伝達の研究　小塚信　他	3	53
四面体有限要素法によるチャネル乱流解析　三浦慎一郎	3	65
台風に伴うスパイラルレインバンドの数値実験　沢田雅洋　他	4	1
スタッガード格子あるいはコロケート格子を適用した場合のSIMPLEの並列化特性の比較　松下洋介　他	4	9
対せき形フェルミアンテナアレーの3次元FDTD解析　佐藤弘康 他	4	21
波動関数の時間発展計算の高速化とナノ構造体の電子輸送特性シミュレーションへの応用　後藤英和　他	4	29
研究成果		
ホタルルシフェリンの化学発光反応に関与する中間生成物の吸収スペクトルの理論解析　酒井博則　他	2	87
全国共同利用情報基盤センター研究開発論文集 No.29より		
東北大学におけるサーバ証明書発行の試行運用についての報告　澤田勝己　他	1	45
ニュースの電子化について　小野敏　他	1	53
大学間無線LANローミングeduroam-JPの導入　後藤英昭　他	1	57
新スーパーコンピュータSX-9		
新大規模科学計算システムSX-9の性能評価　江川隆輔　他	2	11
スーパーコンピュータシステムSX-9利用ガイド	2	19
スーパーコンピュータSX-9のハードウェア　稲坂純　他	3	1
SX-9　FORTRAN90/SXの自動ベクトル化機能　横谷雄司	3	9
SX-9　FORTRAN90/SXの自動並列化機能　横谷雄司	3	25
利用相談室便り		
利用相談室便り	3	91
自己紹介と研究室の紹介　小玉知央	3	92
研究紹介と計算機環境　鈴木求	3	96
シミュレーションは地方大学の生命線か　高野勝美	4	44

システム一覧

計算機システム	ホスト名	機　種
スーパーコンピュータ	super.isc.tohoku.ac.jp	SX-9
並列コンピュータ	gen.isc.tohoku.ac.jp	TX7/i9610

サービス時間

利用システム名	利用時間帯
スーパーコンピュータ	連　続　運　転
並列コンピュータ	連　続　運　転
館 内 利 用	月曜日～金曜日は 8:30～21:00、 土・日・祝日は閉館

ジョブクラスと制限値

計算機システム	処　理	ジョブクラス	ＣＰＵ時間	メモリ容量
スーパー コンピュータ	会話型	(4cpu)	1 時間	8GB
	バッチ 処理	ss　(4cpu)	1 時間	256GB
		s　(4cpu)	無制限	32GB
		p8　(8cpu)	〃	512GB
		p16　(16cpu)	〃	1024GB
		p32　(32cpu)	〃	1024GB×2
		p64　(64cpu)	〃	1024GB×4
並列 コンピュータ	会話型	(4 並列)	1 時間	8GB
	バッチ 処理	as　(4 並列)	無制限	8GB
		am　(Marc 専用)	〃	8GB
		a8　(8 並列)	〃	64GB
		a16　(16 並列)	〃	128GB
		a32　(32 並列)	〃	256GB
		a64　(64 並列)	〃	512GB

目次

東北大学サイバーサイエンスセンター
大規模科学計算システム広報　Vol.42 No.1 2009–1

[巻頭言]
センター長就任のごあいさつ …… 小林広明 1

[SX-9導入披露＆SENAC50周年記念式典・講演会]
SX-9導入披露＆SENAC50周年記念式典・講演会開催報告 …… 小林広明 3
日本の情報科学・工学の黎明期とSENAC-1の開発 …… 野口正一 5
SENAC-1(NEAC-1102)開発秘話
—科学技術用計算機開発に命をかけた日々— …… 渡部　和 21
NECのHPCへの取組み …… 伊藤行雄 27
東北大学サイバーサイエンスセンター　～新スーパーコンピュータシステムSX-9～
～全国共同利用施設としての活動とサーバーサイエンスを
推進する全国共同利用・共同研究拠点形成に向けて～ …… 小林広明 37
スーパーコンピュータの技術開発と次世代スーパーコンピュータプロジェクト …… 渡辺　貞 49
光通信の最前線　—光ソリトン伝送におけるスパコンの役割を含めて— …… 中沢正隆 67

[報告]
平成20年度全国共同利用情報基盤センター顕彰について …… 85
第9回テラフロップワークショップ報告 …… 小林広明 89

[大規模科学計算システム]
FORTRAN90/SXとC++/SXの新機能 …… 横谷雄司 91

[共同研究成果]
スーパーコンピュータSXと月探査
—「かぐや」による月地下構造探査— …… 小林敬生、小野高幸 101
大規模非圧縮性流体シミュレーションの工学問題への応用
…… 高橋　俊、石田　崇、中橋和博 107
小林広明、岡部公起
下村陽一、曽我　隆、撫佐昭裕
高度な乱流散逸構造の解像度を有するVector-Parallel DNSの研究
…… 堀内　潔、齋藤憲作 115

[研究成果]
安定シラケテンイミンの合成と構造 …… 岩本武明、阿部　剛 123
甲千寿子、吉良満夫

[全国共同利用情報基盤センター研究開発論文集No.30]より
スーパーコンピュータシステムSX-9の紹介と性能評価
…… 大泉健治、江川隆輔、伊藤英一 129
岡部公起、小林広明
EtherIPを用いたセンター管理型キャンパス無線LAN …… 大和純一、若山永哉 137
後藤英昭、曽根秀昭

[Web版大規模科学計算システムニュース]より …… 145
大規模科学計算システムのWEBアドレスの変更について(No.81)
フィルムスキャナの利用について(No.81)
文部科学省 先端研究施設共用イノベーション創出事業2009年度第一期公募のご案内(No.83)

執筆要項 …… 147

編集後記 …… 148

PRINTED WITH SOY INK
再生紙と大豆の油を主成分とした
「ソイ・インキ」を使用しています。