

東京大学

先端科学技術研究センター 情報物理システム分野

「高性能・低消費電力・高信頼性
コンピューティングを目指して」

教授 なんや たかし
南谷 崇

1 東大先端研とは

東京大学先端科学技術研究センター（先端研）は1987年5月に、先端的科学技術分野における萌芽的、先導的研究と大学システム改革への果敢な挑戦を使命として、東京大学の工学部、医学部、経済学部、教養学部、生産技術研究所など、多くの部局の協力を得て駒場リサーチキャンパス（東京都目黒区駒場：昔の宇宙航空研究所跡地）に設立されました。東京大学で12番目にできた最も若い附置研究所です。2001年には、総合科学技術会議の決定に基づいて実施されることとなった「戦略的研究拠点（スーパー COE）育成プログラム」の対象研究機関第1号に選ばれ、これまで5年間に亘り、国際的に魅力ある卓越した研究拠点の創出に向けて組織運営、人事制度、研究環境改革の先駆的試みを展開してきました。例えば、今では全国の大学に（当初の理念とは離れた形態ではあるが）普及した感のある「特任教員」制度も、それまでの国立大学人事制度の基本であった講座制の制約を克服し、流動性を向上させるために2001年に先端研が導入し、それを東京大学評



正門から見た先端研



「戦略的研究拠点：先端研の挑戦」の表紙

議会在正式に承認して制度を定めたのが最初です。

先端研の大きな特徴の一つは学際性であり、設立当初から情報、生命、物質、環境などのいわゆる理系分野と社会システム、科学技術論、経済学、法律学などのいわゆる文系分野の融合した研究者集団です。そのような異分野の研究者同士の熱い議論の中から文理融合の様々なプロジェクトが立ち上がり、優れた成果を生み出しています。また、大学の使命の一つとして産学連携の重要性を早くから認識し、今では東京大学全体の TLO へ成長した（株）先端科学技術インキュベーションセンター（通称 CASTI）を1988年に設立しました。また、CASTI が承認 TLO であるが故にカバーできない様々な産学連携／起業支援事業を行うために先端科学技術エンタープライズ株式会社（通称 ASTEC）を2001年に設立しました。いずれも主として先端研教員有志の出資による株式会社であり、まだ非公務員型の国立大学法人化が決まる前の当時としては画期的な挑戦でした。

2 情報物理システム分野

理系、文系が入り交じる多様な研究者の集団である先端研にあって、私たちの研究室は情報物理システム分野と呼ばれ、コンピューティングの情報と物理、すなわち、ソフトウェアとハードウェアの接点に立って次世代のコンピューティングシステムの研究を進めています。

現在の研究室メンバーは、筆者と中村宏（助教授）、今井雅（特任助教授）、近藤正章（特任助手）の研究スタッフの他、技術



研究室メンバー

職員1名、事務職員1名、学振外国人特別研究員1名、博士課程学生8名(内、社会人3名、外国人2名)、修士課程学生8名、研究生1名という構成です。修士課程の学生は情報理工学系研究科システム情報学専攻に所属しています。東京大学の計数工学科出身者が比較的多数ですが、入学試験は出身大学を全く区別せず、他大学からの学生も広く受け入れています。一方、博士課程学生は工学系研究科先端学際工学専攻所属の学生が多く、社会人学生も広く受け入れています。

3 研究テーマ

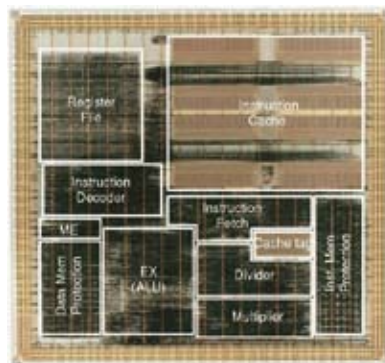
高度情報化社会が安心して依存できる高性能かつ低消費電力でデペンダブルな計算システムの実現を目指し、非同期事象駆動原理による並列分散計算システムとVLSIアーキテクチャ、デバイスからOSまで多様なシステム階層を統合するフォールトトレランス技術、高性能低消費電力マイクロプロセッサ、ソフトウェア/ハードウェア設計を総合するVLSIシステム設計方法論、これらの技術を用いた生命情報科学の高速・高精度処理に関する研究などを行っています。

• 非同期計算システムに関する研究

クロックを使用せず、局所的な事象生起の因果関係だけを駆動原理とする非同期式システムは、性能が平均的な信号伝播遅延のみで定まるため、計算と通信の局所性をフルに活用したアーキテクチャの採用によって素子の速度向上をそのまま直線的にシステムの性能向上に反映させることができます。また、その動作原理から「いかなる遅延変動に対しても正常動作が保証される」という特性を持ち、設計変更、プロセスパラメータのばらつき、電源電圧変動、温度変動など、様々な局面で生じ得る予測不能な遅延変動の影響を受けません。さらに必要な時に必要な場所でしか信号遷移(電力消費)が起きないことから、システム電力消費を低減できる余地が大きいと考えられます。

私たちは10年ほど前に、商用RISCマイクロプロセッサMIPS-R2000と互換の非同期式マイクロプロセッサ

TITAC-2を世界に先駆けて実現し、非同期式VLSI設計スタイルの有効性を実証しました。しかし、その時点で非同期式設計を支援するCAD環境がなかったことと、同期式システムのクロック周波数が向上し続けたことが、非同期式設計スタイルの普及、実用化を妨げてきました。



非同期式マイクロプロセッサ：TITAC2

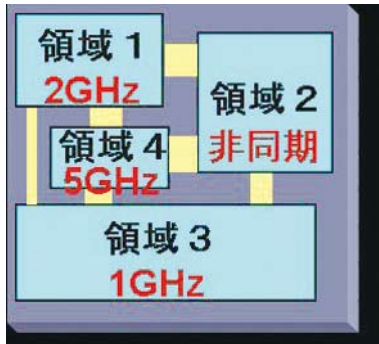
そこでVLSIシステムの高品質設計環境を実現するため、現行の同期式設計と融合あるいは代替可能な非同期式VLSI設計スタイルの確立に向けて、チップアーキテクチャ、回路設計、論理合成、設計検証、テスト、レイアウト支援技術などの研究を行っています。

ITRS2005ロードマップによれば、今後、プロセスパラメータ、電源電圧、発熱温度などの変動、ばらつきが増加してこれらが遅延変動の要因になり、またチップ内で配線遅延が支配的要因になります。このため、今後、異なる周波数の相互作用や配線遅延変動に対して高い信頼性を確保するのに非同期式設計スタイルが有効になると考えています。

• 計算システムのフォールトトレランスに関する研究

今日、我々の社会では、日常生活、エネルギー供給、健康・医療システム、交通輸送手段、生産工場、流通市場、金融・保険業務、ビジネス・企業経営、政府機能など、子供の遊びから国家安全保障に至るまで、人と社会のあらゆる活動が情報システムに依存しています。この情報システムに、万一、障害が発生し、期待するサービスが提供されなくなったり想定しなかった事態が起きると、個人や社会の活動が混乱したり、尊い人命や貴重な財産が失われたり、場合によっては国家安全保障が脅かされる可能性があります。情報システムにこのような障害を引き起こす原因をフォールト(fault)と言います。

今日の情報システムには、半導体・実装部品の経年劣化、電磁波の影響、ソフトウェアやLSIの設計ミス、システムの操作ミス、不正侵入、ウィルス感染、サイバーテロ、異なるシステム同士の相互作用や人間とシステムの相互作用がもたらす予期しない複合的なフォールトなど、様々なタイプのフォールトが生じるリスクが常に存在しています。いかなる手段を講じたとしても、これらのフォールト発生



ヘテロタイミング LSI

の可能性をゼロにすることはできないと考えるべきです。

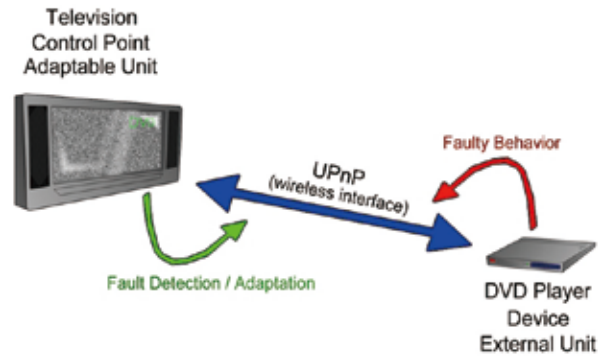
そこで我々はフォールトの存在を前提に、たとえフォールトが要素に発生したとしてもシステム全体としては期待どおりのサービスを提供するフォールトトレランスを実現するシステム設計方法論とアーキテクチャの研究、特に計算機クラスタのフォールトトレランスやネットワークにおけるフォールトトレランスに力を入れて研究を進めています。

● 高性能低消費電力プロセッサに関する研究

マイクロプロセッサを始めとする最先端 LSI システムは、現在、その電力消費／発熱問題によって、現行技術の延長ではこれまで進めてきた高性能化の限界に直面しつつあります。これまで維持されてきた「チップ上のトランジスタ数は18ヶ月で2倍に増加する」とする Moore の法則にとって、微細化の限界より先に消費電力の過密化による発熱が致命的な問題になっています。また、特にモバイル／組込み機器、携帯端末などでは、バッテリー寿命が重要な要求仕様の一つであり、そのまま製品の品質に直結します。このように低消費電力化は、機器自体の高性能化、高品質化



計算機クラスタ



ネットワーク情報家電

に直接貢献し、新応用分野の開拓を通じた産業技術の国際競争力強化に結びつく可能性が高いと考えられます。

「超低消費電力化」を実現するためには、要求される情報システムのサービス品質を必要最小限の電力消費で提供するためのシステム技術、あるいは与えられた環境で使用可能なエネルギー量で、サービスの品質レベルを適応的に管理する制御技術を開発する必要があります。

私たちの研究室では、アーキテクチャからデバイスまでの技術を融合し、コンパイラとアーキテクチャの協調最適化手法も用いたプロセッサの開発、さらにそのプロセッサを数千台規模で結合させることで極めて高い処理能力を達成する超並列計算システムの実現に関する研究を行っています。



低消費電力化並列計算システム

4 産学連携と大学の役割

筆者が東大先端研のシステム改革に着手し、大学の研究成果のインキュベーションを含む新しい形の産学連携を進める恒常的な仕組み作りを開始した2001年から丸5年経過し、各地で成功事例と共に様々な失敗事例も明らかになってきています。法人化後の国立大学に産学連携本部ができた結果、知的財産の取り扱いなどに関する産学の互いのスタンスに齟齬が生じたり、本末転倒と思われるような問題もあちこちで起きていているように見えます。大学はあくまでも人材育成と基礎研究の場であるという基本をもう一度確認する必要があると思います。その上で、積極的に産学が連携し、我が国の産業の国際競争力強化に貢献していけることを願っています。

大学院工学系研究科

「気合いをいれて時代を創れ！」

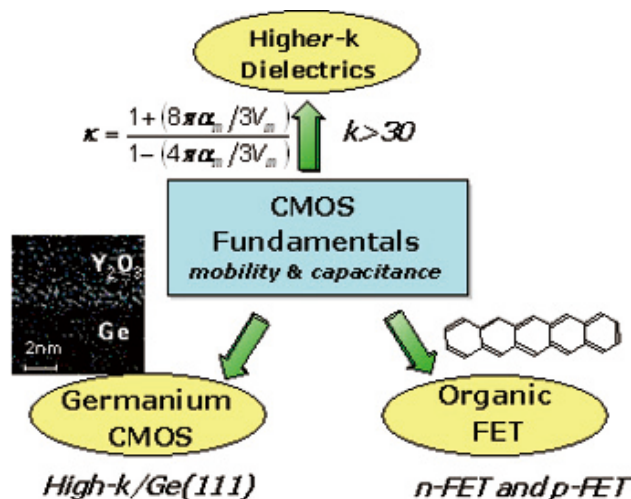
とりうみ あきら
教授 鳥海 明

大学に移って6年が経過した。当初の何も無かった研究室もいろいろなものがめいっぱいおかれている状態になっている。僕自身が使い方をわからないものがたくさんある。それでもまだ研究費は必要で、新しい装置が必要になり研究費を求めてプロポーザルをたくさん書くことになる。半導体の研究は、トップデータを出そうとすると、装置に依存した研究に“成り下がってしまう”部分が常にある。本誌をご覧になっている方は装置を開発している方が多いと思うが、この部分を言っているわけではない。出来合いの高度な装置を決められたレシピで作っている材料・プロセス技術に対する研究態度を言っている。しかし現実的には、より高真空の、より高精度の、より高純度の、ということをやろうとすれば、場所が大学だろうが企業だろうが、それ相応の装置が必要になってくる。ここにアイデアを使うことが求められているが、自作で完成度のレベルの低いものを求めて意味があるのだろうかとも思う。

一方で、とびきり良い装置を使った、そこでしか出せないタイプの研究もあり、論文はたくさん書けるが、研究のほとんどの部分がブラックボックスになってしまう恐れもある。我々の研究室はできるならそのようにしたくはないと思ってすすめてきた。ブラックボックス化せずに細かい部分を含めてよくわかっていて欲しいと思っている。素朴なアイデアを何とか試せる場にしたいと思っている。学生は単なる何人月のリソースではない。次の世代を担う人材である。学生が短い時間で考え方、研究のスタイルを身につける場としての研究室である。そこに本来の意味があると思う。一言で言えば、ものの考え方を身につける場として研究室が機能しているかどうかを最も重要な課題である。それを学ぶ題材としては、半導体は極めて有意義で、多くのことを学べる。ただし、大学は研究機関でもあるから、何かを学んでいてくれればよいという訳にはいかない。その部分の“駆け引き”で日夜戦っている。こちらも常に走りながら考えている。学生に負けてはいられない。

研究課題は、「マテリアルをベースにした新世代エレクトロニクスの開発」と言える。特に新材料のヘテロ界面に着目している。この研究課題はめっちゃめっちゃ面白いと思っている。でも面白がるには努力が必要であり、面白いと思っ

ているのは僕だけということもある。我々の研究テーマを大まかに図に示してみた。すべて基本的には電界効果を使ったFETと繋がっている。電界効果という概念はすばらしいと思っている。それぞれの“部品”の出口がどこにあるかと問われることが大学でさえある。どこかで見てきたような“ユビキタス社会云々”の一般論はともかくとして、部品はその可能性が未知であるところがまた面白い。予想外の部分に使われる可能性がある部分が面白い。一つ一つの部品の研究をつめていくと、さらに底知れない科学的な面白さもある。“Nエレキお仕合せの面白さ”ではなく、やっていて自分で妙なことを見つける面白さがまだまだ眠っている。



研究室の中では教員、学生も含め、情熱と誇りを (Passion and Pride) 常にもっていることが重要であると言っている。この部分を学生に伝えるのはなかなか難しい。こちらの情熱の空回りはよくある。「気合いを入れて時代を創れ」とのかけ声は、むなしく自分に返ってくるだけのことも多い。しかし、めげずに言っている。「Passion と Pride を持つことは忘れるな」。大学の研究者として、我々が持っている大きな武器は最後にはこれしかないだろう。たかが数年の大学院における研究というのは、決して一生の職を決めるわけでもないし、人生が見えたなどということもない。ただ、仕事のやり方、進め方の多くを学んでしまう場合が多い。研究をやる以上、何か一点でも違う点を、何か一点でも新しいことを、何か一点でも役に立つことを、やりたい。僕が学生に期待していることは、その部分に熱くなって欲しいということだ。学会で派手に発表するのもよいし、地味なデータの積み重ねでもよい、それが重要であり、これは俺しかやっていないものであるというプライドを持って欲しい。そこに熱くなって欲しい。最近の風潮である論文数や引用率などからは決して測れないものである。その上で、研究は成功が約束されたものではないということをいつも言っている。また、誰もやってもいないというのは意味が

無いからやっていないということもある。その判断が方向性を決めていく。ここは注意が必要だ。

毎週の進捗報告を書いてももらったり、個別に呼び出してフォローしたり、まるで企業でやっているような部分もある。その一方で、先日のSSDM（固体素子材料国際会議）の投稿に合わせてまとめていた結果がまったくNGであったので、新たな投稿テーマを考え、急遽三日間連続でサンプル作成から評価までを行って投稿までこぎ着けた。こういう時の学生の頑張りには目を見張るものがある。その積み重ねが集中してものを考えるスタイル（土壇場でしかものを考えないスタイルにならないことを祈るが）になると信じる。メリハリがついた学生には息抜きはOKだし休みがあってもよい。だからとさぼるやり方は認めない。このことは今の学生には厳しく映るかもしれない。また全員が研究者として生きていくわけでもない。しかし、そのおかれている場で精一杯背伸びをしてプロになろうとすることが、どのような領域で自分を生かしていくにしても必要だろう。学生とはいえ、そのプロの部分で熱い時間を共有できたら教育の場としての大学は最高だろう。そこに自ずと良い研究成果がついてくると信じている。

図に示した研究テーマに関しては、それぞれ取り組んでいる大学院生に話



してもらった。外国人留学生からのコメントも書いてもらった。そこから研究内容を理解していただければ幸いである。なお、ホームページは下記にあるので、研究内容などに興味のある方は覗いてみていただければ幸いである。

<http://www.adam.t.u-tokyo.ac.jp/top.html>



「従来研究されている high-k 材料を超える、いわば higher-k 材料を実現するため、複数の high-k 材料を組み合わせた三元系材料や、 HfO_2 に Si 原子をドーピングした Si doped HfO_2 (SDH) といった材料の研究を進めている。これらの研究は、 HfO_2 という材料の構造を意図的に変化させることでより優れた物性を引き出そうとする試みである。もちろんこれらの材料が実用化されるために克服すべき問題は多いが、我々のようなマテリアル・サイエンティストとしてのアプローチが high-k 材料の分野における問題を解決する第一歩になると信じて日々の研究を行っている。

(富田一行、D2)」



「有機 FET は構造的に柔軟であり、低温プロセス、低コストであることから……という枕詞はあるものの、実はその動作原理でさえあまり理解されていない。アプリケーションとして何ができるのか、と問われたときの明確な答えもない気がする。出口があるのかすら分からない迷路を歩くようなもので、不安な気持ちに襲われることも多い。しかし、だからこそ情熱を持てるし、やっていて面白いのだと思う。分かった振りをすることは簡単で、今すぐにでもできる。しかし、一つ一つ分からないことを誰よりも必死に考え立ち向かうことがプライドを持っている人間の行動であると考えており、またそうでありたいと思い日々努力している、つもりである。

(横山孝理、D1)」



「次世代デバイスとして注目される高性能 High-k/Ge MOSFET の実現を目指して研究を行っております。現在はその基幹技術となる High-K/Ge 界面の制御に目を向けて実験を進めています。High-k 材料として Ge との反応性の良い Y_2O_3 を、また Ge のメリットをさらに生かすために Ge (111) 基板を用いており他に類を見ない極めてオリジナリティーの高い研究となっています。自分自身の知見が深まるにつれ自分がやっている研究の面白さやオリジナリティーを強く実感するようになり、現時点では展開を予測しながら不覚にもワクワクしながら研究を進めております。

(能村英幸、M2)」



「私は中国の浙江の出身です。南京航空航天大学にて学士、浙江大学にて修士を取得し、上海華虹 NEC で CMOS のエンジニアとして 1 年半働いた後、博士課程で鳥海研究室に来ました。私は今 high-k ゲート絶縁膜の研究を行っています。鳥海教授からは自由な研究の場と的確な指導を頂いています。またチューターの富田君をはじめ多くのメンバーが、私が日本の生活に慣れるよう手助けをしてくれ、博士課程を取得するまでの間、楽しく過ごせると思っています。日本に来る前、コミュニケーションの手段である言語の重要性を知っていた私は心配でした。しかし、私の面倒を見てくれる先生と研究室の皆さんのおかげで安心を取り戻せた。日本語が苦手だから言いたいことがはっきり話せないが、先生や同じ研究室の仲間たちはいつも親切に話を聞いてくれて分かって、手伝ってくれます。この場を借りて、お世話になっている先生と研究室の皆さんに感謝します。

(趙毅、D2)」