

平成 22 年度 国立情報学研究所 市民講座 第 5 回

「計算機の建築学—コンピュータ世界でのアーキテクチャとは?—」

講師： 鯉渕 道紘（国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系准教授）

◆ 講 義 ◆

鯉渕／本日は、このように多くの方にお越しいただき、誠にありがとうございます。計算機の建築学について、皆さんと 1 時間 15 分一緒に勉強したいと思います。

・スライド 2「何のために勉強しますか？」

まずはじめに、1 つ、問いかけをしたいと思います。

皆さん、何のためにこれまで勉強してきましたか？

もっと具体的に申し上げますと、何のために計算機の建築学について勉強しますか？

いきなり、このような問いかけをされると、ビックリされる方も多いと思います。

ですがせつかくの機会ですので、少し考えてみたいと思います。

日本人の方は特に、照れ屋さんが多いので、こういう問いかけをすると「時間が余ったから」或いは、「無料であるから」という方もいるかと思います。

きっかけはそれでもいいと思います。

ただしその時に、自分自身に対しても、もう今一度、「なぜ来るのか？」と。

つまり、無料であっても家に帰って。お酒を飲んで、ご飯を食べて、テレビを見ればそれなりに楽しい時間が過ごせるわけです。

ですが、本日は、計算機の建築学を勉強するために皆さん、ここに来ているわけです。そこで今一度「なぜ？」と問いかけてみて下さい。

そうすると例えば、現在自分が毎日パソコンを使ってインターネットを見て、それによって旅行先を決めたりしている、と。

なので、コンピュータについて分かったと何かいいことが有るかも知れない。そう思う方もいるかも知れません。

では、コンピュータが使えると良いと、そのために勉強しますか？と。

おそらくもう一度、ここで問いかけると、さらに先に進むと思います。

例えばコンピュータを知っておくと今後生活がもっとよくなるかも知れない。

そうすると自分の生活が、自分が快適になるかもしれない。では、自分の生活が快適になるために勉強するのかと。

ここでもう一度「なぜ」と問いかけると、もしかしたら人によっては、自分が 10 年後どうなっているのか知りたい、或いは社会が 30 年後、どうなっているのか知りたい、そういう人が多いのではないかと思います。

また逆に自分がここまでどういう位置付けでやったのか、自分は何者なのか、そう、辿り着く人もいるかも知れません。

これは強制するつもりはございませんが、我々、10 年～20 年くらいの教育を受けてきましたけれども、つまるところやはり、どこで人はどこから来て、どこへ行くのか、こ

れを勉強、探求しているのではないのでしょうか。

こう考えますと、例えば歴史学でみてみますと、浅学非才な私が言うのもなんですけれども、過去を理解して、そこで何が分かったか、それによって何が見えてくるのかと。或いは生物学であれば、生命や生物現象を理解する、それによって自分の寿命がいくつかというのが分かってしまうのはあれかもしれませんけれども。

自分がどう進むのか、あるいは自分の子孫に、どのような未来が待っているのか、そこがやっぱり知りたいのではないか。

また、心理学の場合ですと、例えば、自分が平凡な人間か、天才かといった時にはですね、基本的には人とのコミュニケーションで人と違いがある、その場合についてはその人は普通ではない、もしかしたら天才かも知れないし、特殊な人かもしれない。それによって自分が何者か理解する。このように考えていきますと、これまでの学問ってというのは、我々は理解できるわけです。

そこででは情報学とはどういう貢献をしているのか、或いはそれを支えるコンピュータの建築は何をしているかとよく考えますと、そもそも歴史は 100 年もありません。だけれども、我々はコンピュータやインターネットによって自分の生活がこう快適になってきている。或いは、それに期待していけば、もっといいことが起こるかも知れないと淡い期待をもてるわけです。

・スライド 3「第三の波」

学問の一つの問い「人はどこから来てどこへ行くのか？」に対してですね、計算機の建築学、あるいは情報学がどのような影響を与えているかということについて、ここで少し考えたいと思います。

ただし、浅学非才な私が大きなことを語るのはなかなか難しいので、名著『第三の波』を借りてですね、お話ししたいと思います。

この中で『第三の波』という本、読んだことがある方いらっしゃいますか？

あっ、結構いらっしゃいますね。

これは 1980 年頃に出た本でございまして。

実は私が学生時代、これを見て、情報通信技術の可能性を感じて大変刺激を受けた本でございまして。

ここで著者のトフラーさんは、生活・社会構造の変化というのはこれまで我々人類は 3 回あったというような趣旨の話をされています。

1 つ目は、紀元前、第一の波、縄文時代の中期後期ぐらいからですね、我々狩猟民族から農耕民族に変わってきたわけです。それによって定住できて、生活、あるいは、寿命に大きな影響が出てきたわけです。

そしてその後、18 世紀にイギリスで産業革命が起こる。

で、これによってですね、これまでの生活観、価値観が大きく変わるわけです。

つまり、大量生産をして、ものを規格化することによってですね、大量生産で安価なも

のを作る。その物質によって我々が豊かになっていくと。このようなモデルができあがって社会が進んできたという見方ができます。

続きまして、第三の波です。

これは、1990 年と書いてありますが、実際、トフラーさんは 80 年の段階で書かれています。第三の波はコンピュータ、通信技術による IT 社会だと。

産業革命以後、ものが豊かにあふれてきた、ものを豊かにたくさん作ることによって、我々は豊かになってきたという。これに対して、第三の波では情報という、形になかないもの、だけれども、それによって我々は大きく変わっていくと。そういう物質でないものによって生活が変わっていくという、劇的な変化を受けてきたわけです。

この 20 年間を振り返ってみますと、我々はその大きな変革の中にいたので、なかなかそのことを実感できないかもしれません。

ただし、何十年後、100 年後を振り返ったときには、おそらく我々はこの大きなイノベーションの中にいたと、第三の波にいたということが言えると思います。

ではこの IT 社会、コンピュータによってどういうことが価値観が変わったかといいますと。例えば、一つは通貨が挙げられます。

通貨というのは、最初は通貨自体には価値がないものですから、例えば金貨を作ったりして通貨自体に価値を持たせるということをしました。

それで通貨自体に信用が出てきた場合には、通貨を例えば紙幣で作ったり、あるいは硬貨で作るといような、銅等、安い物質で作るということをしました。

この第三の波に何が起こったかといいますと。皆さん物質も紙もない。

銀行に預けたキャッシュカードと、通帳に書かれた通帳に書かれたですね金額、これを見て皆さん安心してお金をやりとりできる。

これは、とんでもない価値観の変化でございます。つまり、ものを所有しなくても銀行に預けたコンピュータの計算した値を信じることができる。

最近に至っては、e-Tax で、インターネットで納税までしてしまうと。

つまり、この IT 化によって我々、通貨や納税などのものを物質的になくても仮想的に情報という、そのみで扱えるようになってきた。

更に、今後は仮想空間と現実空間の融合が進むと言われています。

これはどういうことかといいますと、例えば今私がここでしゃべっていること。これが、例えば、誰かが撮影していれば、その撮影した内容がすぐ Web に公開されてですね、或いはこの内容を、誰かが掲示板にリアルタイムに書き込めば、今鯉渕がどこで、何をやっているかわかるわけです。そういうものがどんどんリンクされて、またありとあらゆる街に設置されたカメラ等が情報を連携すると、現実空間に起きていることと、ネットワークの中の仮想的に起きていることの差というのがなくなってきた、境界がなくなってくると、それによってまた新たな価値観が生まれてくるかもしれない。

そして、これらをすべて支えているのはコンピュータでございます。

そして今日のトピックというのは、これらですね、支えているコンピュータをどう作

ってきたのか。また、これはこれまで 10 年間で 100 倍という劇的な性能向上を続けてまいりました。

第四の波が 2050 年にくるとしたら、そのときには IT 技術というのは非常に社会に溶け込んでいて、成熟しているということが言えると思います。

・スライド 4「概要」

本日の話題であります計算機の建築学の話に詳細に入っていきたいと思います。

内容は 4 つから構成されます。

1 つは、コンピュータの成長と可能性。

今後、コンピュータはどのくらいの能力を持つのか。これについてなるべく具体的なデータをお見せしながら説明したいと思います。

そして、2 番目にそのコンピュータの成長を支えるためには何が必要なのか、どういうテクノロジーを考えなければいけないのかというグランドチャレンジについてご説明いたします。

そして 3 番目に、現在起こっているトレンド。

さらには 4 番目はですね、今日「建築学」という言葉を使っています。

これは、若干意識でございまして、コンピュータの建築様式をコンピュータアーキテクチャといいますけれども、これは建物の建築様式のところから借りてきた言葉でございます。

では最後のトピックとしてはですね、建物の建築とコンピュータの建築はどう違って何が同じなのかについてみていきたいと思います。

・スライド 5「コンピュータ（計算機）とは？」

いきなり難しい話をしてしまっても、ビックリしてしまうと思うので、簡単な話をいたします。

コンピュータとは何でしょうか。

難しく考えると、何か大きな演算をして結果を格納して何かやるという、つまりスーパーコンピュータをイメージされる方もいると思います。ただし研究者の中ではコンピュータというとロジック、データを変換する部分。それと、そのデータを格納するメモリ。またそのデータを他所に移すための通信機構、この 3 つをブロックで構成されたデジタルシステム。これを一般的にコンピュータと指すことが多いです。

ですから例えば、 4×5 を計算したいというと、まずロジックの部分で、4 と 5 という入力に対して、「20」というふうにデータを変換します。これを「計算します」という言い方をします。出てきた値、「20」、これを今度はメモリに格納します。そして、そのデータを、「20」という値を我々に返すことによって、 4×5 の演算ができると。それをするものがコンピュータでございます。

こう見てみますと、皆さまの周りにあるものというのは、ほぼすべてがコンピュータです。携帯電話、例えば地デジのついたテレビ、あるいはアナログのテレビもそうですけれども。そういったものもそうなります。

何個あるか。試しに数えてみましょう。これも数えてみるといろんな答えが出てきます。なぜならば、もうコンピュータは身近なものになりすぎていてですね、我々にとって見えない存在となっているからです。

例えば、この部屋の中にもいろいろな機器、コンピュータが入っていると思います。一昔前では、「そういうが入っている」と宣伝して、ここでは何とか制御している、空調制御をしているコンピュータが入っているとかですね、いろいろ言ったものですが、最近は当たり前になってきていて。

この結果、我々、身の回りに、10、20 個のレベルではなく、100 個、あるいは 1000 個のプロセッサを一人あたり使っているというようなデータもございます。

つまり、コンピュータというのはなにも難しいものではなくて、データを格納する。データを変換して、変換した値を格納する。それを移す、あるいは表示すると。そういったものすべてでございます。

そのコンピュータの中で。一番代表的なものとしては、パーソナルコンピュータが挙げられます。いわゆる、皆さんが 10 万円、あるいは 20 万円払うと入手できる、あのパソコンですね。ここでは代表的なコンピュータ、パーソナルコンピュータがどの程度今後成長していくのか、ということについて見ていきたいと思います。

私が何か補足すると、所詮、鯉淵が言っていることだから嘘か本当かわからないということもあるかも知れませんが、1 つ文献を紹介したいと思います。

・スライド 6「コンピュータ能力の向上」

この図は、このスライドにあります URL からダウンロードすることができます。

これは何を表しているかといいますと、文字が小さくて恐縮なんですけれども、横軸、は年数を表しております。

ですから 1890…1900 年から始まってですね、2050 年、2100 年と続いているわけです。でこれに対して、縦軸は計算能力を表しております。

縦軸は、特殊な係数でございまして。目盛がありますけれども、1 つ目盛が進むごとにですね、10 の 5 乗のオーダーで大きくなっていきます。

つまり、コンピュータというのは劇的に高速化していると。それがずっと続いてきた、と。

そしてこの図が表していることは、恐ろしい、ビックリすることに、このまま成長すると、2050 年…、2030 年頃には我々人類の脳と同じだけの演算をパーソナルコンピュータで出来ると。これが進むと 2050 年には 90 億人、世界中の全員の脳の計算能力と同じだけの演算能力をパーソナルコンピュータが持つという計算になります。

これが本当に当たるのかといわれると、2050 年にはならなきゃ分かりません。

ただし、これまで何十年の歴史を見た時にこのような予測は当たってきました。

これは例えば、経験則に基づく値、ものとして、「ムーアの法則」というのがございます。これはですね、簡単に言ってしまうとコンピュータのプロセッサの性能というのは 18 か月から 24 か月で 2 倍になると。ですから 10 年続くと、1.5 年から 2 年で 2 倍になっていきますから、100 倍以上になるという計算になります。これをずっと続けて来ました。

スーパーコンピュータにいたってはですね、10年で1000倍程度の性能向上が近年続いております。

・スライド7「スパコンの推移」

次のスライドでは、このスーパーコンピュータ、これの性能を表しております。この図で、私が主張したいことは、コンピュータの性能というのは結果論で見ると非常に予測はできるものであったといえるものでございます。

この図も、横軸は年数、縦軸はコンピュータの性能を表しております。

スーパーコンピュータランキングが始まったのは1990年代ですので、スタートラインが1993年となっておりますけれども。この図を見ていえることは、コンピュータは規則正しく性能向上してきたということでございます。

ちょっと説明をさせてください。この図ですけれども縦軸は、コンピュータが何回演算できるのかということを表しております。

ちょっと文字が小さくて恐縮なんですけれども。例えば縦軸の一番下のところ1ギガ…1GFlops（1ギガフロップス）と書いてあります。これは何を表しているかといいますと、1秒間に1G、ギガですね、1ギガ回の浮動小数点の演算ができる。これが1GFlopsになります。

ですから、1993年ぐらいですと、スーパーコンピュータと言っても1秒間に1ギガ回の浮動小数点演算ができるという、その程度のものでした。

これが、年を追う毎に劇的に上がって行きます。そして現在では、だいたい世界のトップ500番のスーパーコンピュータにランキングされるものと、1秒間に24テラ回の浮動小数点の演算ができるというものでございます。

テラという単位はですね10の12乗回でございます。

・スライド12「エクサスケールコンピュータの挑戦」

このスライドの右側に単位が書いてありますけれども、コンピュータの単位というのは天文学的に大きくなっていきます。ですから、キロというと10の3乗、1000がキロですけれども、1000のその1000倍がメガ、その1000倍がギガ、その1000倍がテラ、その1000倍がペタとなっていくわけです。

現在トップ500のスパコンに至っては、テラの回数まで、浮動小数点演算を1秒間にできるというレベルでございます。（スライド戻ります。）

・スライド7「スパコンの推移」

ここで皆さんに一つお伝えしたいことがございます。

それはですね、スーパーコンピュータ、例えば、事業仕分けで去年話題になった京速コンピュータですけれども、1200億円程度の予算が付いて進めております。

私はこれに関わっておりませんから、何も思うところはございませんが、そのようなものというのは、大体15～20年ぐらい経つと、パーソナルコンピュータにスケールダウンされてきます。

例えば、この図ですと、赤いところで棒線をひっぱってあります。これが大体、10GFlops

くらいの性能のコンピュータのところで線をひいたんですけれども、これは現在の 10 万円程度で買えるパーソナルコンピュータの計算能力です。ですから、我々がデスクトップサイズにおさまっているパーソナルコンピュータというのは、1997 年世界トップ 500 のスーパーコンピュータで、非常に高価なものであったわけです。ですので、この分野というのは初期投資は非常に大きくみえます。例えば、スパコン 1 台を作るのに、1000 億円だったり、1 億円だったりします。ですけれども、15 年から 20 年程度で、皆さんに実際のところフィードバックがかかってきたと言うことができます。

ただし、現在、一時期は、スーパーコンピュータというと日本のお家芸でしたけれども、現在予算の状況は非常に厳しい等とありまして、現在は世界のトップ (500) ランキングの中で、日本のスーパーコンピュータ、日本にあるスーパーコンピュータはたった 22 台、シェアは 3.6%しかございません。つまり、18 台です。そして、日本はたかだか 22 位が最高でございます。

これは特殊な状況でございまして、世界各国は国を挙げてスパコンを作っています。中国やインドにいたっては、わが国を抜いてアジア 1 位の座を争っているという状況でございます。

私も特にペタコンのプロジェクトでは関わっておりませんので、ニュートラルな立場のつもりですけれども、1 つ言えることは、最先端技術は止められません。つまり、一度最先端技術の開発を止めた国というのは、またトップに踊り出るためには、大変な労力が必要となります。

従って、トップ 500 のスーパーコンピュータというのは予算をかければこの図のように性能は予測できて、それが皆さまのところに 20 年ぐらいでフィードバックされるというのが分かってはいるわけですが、なかなか難しい。できない。これはですね、現在のところではさほど問題、1~2 年の単位で見たときは問題は起きないと思います。ただし、1 つ言えることは、もしスーパーコンピュータの開発を止めてしまった場合、最先端の計算機は日本で手に入らない可能性が高いです。

というのも、アメリカは国防上の理由で、スーパーコンピュータをもし日本がそういう技術を持たない場合は、日本に売らない可能性があります。これは国防上の理由でオプションの一つになるということです。ただし、このスーパーコンピュータというのは、最後に一言申し上げたいところはですね、現在の科学の手段になっております。

昔の科学というと実際、計測したり、理論を作ったりしたことがありますけれども、今はもう複雑化しすぎていて、シミュレーションで確認する。あるいはあらゆるもの、あらゆるデータ解析を加えた手法による e-サイエンスなるものがないとできなくなっている。従って基盤として、やはりスパコンはなければならないというふうに私は思います。

・スライド 8「概要」

このようにコンピュータというのは劇的な進化を続けていると、しかもその性能はわりと予測できているという話をしましたが、次にその成長を維持するためには何が必要か

という、グランドチャレンジについてお話したいと思います。

・スライド9「コンピュータ建築のグランドチャレンジ：省電力」

コンピュータ、特にスーパーコンピュータにいたっては、10年で1000倍の性能向上しているという。ただし、これは研究者が並々ならぬ努力をしてきた結果でございます。そして、その問題点というのは、年とともに劇的に変わっていきます。

現在の問題点の一つは、消費電力の問題でございます。

今お見せしている表は、スーパーコンピュータ毎の電力を表しております。このランキングというのは世界のランキングでございまして、3つ目の項目、MFlops/Wというのは、1ワットで計算できる浮動小数点演算の回数でございます。このMというのはミリオン、100万です。

ですから、世界ナンバーワンの電力コストが高いスパコンというのは1ワットで773メガ回の浮動小数点演算ができます。そして、システム全体ではたった5万7000KWしか消費しません。

こういう数字がある一方、例えば、わが国の（旧）地球シミュレータのスパコンですけれども、一番下の欄でございますけれども1ワットあたり5.6メガ回、 5.6×100 万回の浮動小数点演算しかできません。その結果、消費電力というのは6メガワット、最大6メガワット消費するというこの非常に大きなバラツキをもっているというのが現状でございます。

ただし、コンピュータが10年で1000倍になると、そのまま、1000倍にしたらとんでもないことになります。例えば、この一番下の項目に書かせていただきましたが、現在、たくさんのコンピュータ機器を格納しているデータセンターというのがございます。この辺ですと、豊洲に非常に大きなものがございます。

詳細は、非常に危険、その情報自体が危険なものとなりますので、公開はされてはおりませんが、コンピュータを格納しているデータセンターは現在大きなものでは、数百メガワット、数百、100万ワット程度消費しているというふうに言われています。

数字が大きすぎて、皆さん実感が湧かないかもしれませんが、ちょっと生々しい例ですけれども、女川の原子力発電所というのは、最大は大体2000ワット、2174MW（メガワット）程度のものでございます。

これが意味しているのは、もし単純にこれを1000倍、スケールアップすると、1個何か大きなコンピュータセンターを作りたいというと原発を1個作らなければいけないという状況になります。これはテクノロジー的には可能かもしれませんが、ただし、もう国民のコンセンサスはとれません。

従って、コンピュータを作る上では、今後は消費電力をいかに抑えるかということをしなければなりません。

またなかなか、人によって理解していただけないことがあるんですけれども、電力を使うということは、CO2排出につながります。

というのは、わが国の電力というのは原子力発電のみならず、火力発電に大きく頼っている部分がございます。

つまり皆さんが、1KW/Hで、電源タップが、電源タップにものをフルに差し込んで使っ

ている状況を1時間使うと、大体0.44 kgのCO₂が出るという計算になります。

これはつまり電気を使うためには、火力発電所でがんがん燃やさなきゃいけない。その結果、CO₂が出てしまうという問題がございます。

従って、コンピュータをどんどん作って、何でもかんでも計算させてやれと言っても、CO₂の規制等の問題からなかなかできなくなってくると。

この2つの問題から、今、コンピュータの建築、設計をしている者としては、この省電力というのは非常に強く求められております。

私自身も、そのためにですね、これに関する研究をいろいろな補助をいただきながら進めております。

・スライド10「コンピュータ建築のグランドチャレンジ：電力密度」

2つ目のコンピュータ建築のグランドチャレンジでございますが。

電力密度の話でございます。青い図を見ていただきたいんですけども。

これも、インターネットに置いてあるところのものを使わせていただいております。横軸は、年数、1970年代から始まって、80、90、2000年、2010年。で、これに対して、縦軸はそのときごとに作っている代表的なプロセッサのチップ。これが、1平方cm当たり、何Wくらいの電力を消費しているのかということを表しております。つまり1cm当たりのプロセッサが100W消費しているということになると、そこから大量の熱が出るわけです。それを表しております。

それぞれの年代のところに、8086とかですね、386、486なんて数字がありますけれども、これはその当時のプロセッサの名前でございます。

i486のインテルのプロセッサであったり、そういったものでございます。これを見ていて一つ言えることはこの資料が若干古いんで必ずしも当たっているわけではないんですけども、例えば、2000年当時出たPentiumプロセッサ、これは今、秋葉原に行けば、100円ぐらいで売っていますし、まあ使っている人はいないと思うんですけども、これは電力密度の点で見ると、ホットプレートと同じくらいの熱を發します。つまりプロセッサを並べてですね、ホットケーキが焼けてしまうという、そういうものを我々はずっと運用してきたわけです。

ただし、我々それはコンピュータのプロセッサというのは我々が見えないところにあるから気づかないだけで、そういったものが。もしこのまま行くと仮定すると何が起るかということ2002年の資料なんで、今当たってはいないんですけども、

例えば2005年くらいには、電力密度の点で言えば、原子炉と同じになってしまう。

こんなものが、家の中に入ってくるかもしれない。

さらに、このままもし単純に技術がスケールしたとする、そのまま進んだとすると、近い将来ですね、プロセッサのチップの熱密度というのは太陽の表面と同じなものになってしまう。というとてもない話がインテルから出てます。現在のところ、実際はこのようなになっておりません。

これはさまざまな優秀な研究者が知恵を絞って、いかに電力密度を抑えて発熱を抑えるかという工夫、これによってこうなっておりませんが。

実際我々はこういう危機に直面して、それを乗り越えてきて、今このような10年で1000

倍の性能向上というのを実現しているわけでございます。

なお、詳細はここではお話できないんですけれども、電力密度を落とすやり方としてはですね、プロセッサの動作周波数を落とす。或いは電圧を落とす。

こうすることによって、劇的に落ちます。

そもそもこのコンピュータのプロセッサの消費電力というのは電圧の 2 乗と動作周波数に比例して決まりますので、少しでも動作周波数を落とす。或いは電圧を落とすことができれば電力密度を落とすことができる。

ですから皆さんがコンピュータを使っていて遅いなと感じないようにうまく制御をかけながら、できる限り動作周波数を落とすというようなことをして様々な技術がありますけれども、最近の研究・開発が進んでおります。

・スライド 11「コンピュータ建築のグランドチャレンジ：資源抑制」

続きまして、3 番目のグランドチャレンジとして、資源の抑制というのがあげられます。イメージ図として、JAMSTEC の地球シミュレータの絵を、ホームページからコピーさせていただいているんですけれども。

ざっとしたイメージで見ていただきたいんですが、左側の図のところは、左側の図が全体像でございまして。イメージですけれどもその中というのは大体このような右側の図のように、青いラックに囲まれていてパソコンが、コンピュータがたくさん入っていると。そして、全体をつないでですね、1 つのスーパーコンピュータとして動かすというのが、古典的だというか、スパコンの作り方でございますが。

今、何が起きているかと言うと、1 台のスーパーコンピュータ、これだいたい左側の図では体育館 1 つくらいの大きさでございます。

この中に、配線が 2500km 以上詰まっているという、すごい話でございます。

わが国では南北に大体 3000km の距離感に対して、それが 1 つの体育館の中にある配線だけで同じくらい、2500km 以上あると。

実際、これを、きちんと配線を間違えずに配線して動かしきるという技術もすごい、我々は持っているわけなんですけれども。そもそも根本的な話として、こんなに資源を使っているのだろうか。

ですから今後 10 年で、1000 倍スパコンを向上させたいのであれば、2500km からですね、もう 3 倍、何キロ…20 億キロですか、そのぐらいの距離を配線するのかと。これはやはり常識的な範囲からして、そんなものを作り続けてですね、いくというのはやはり限界があるだろう。従って、このようなことも考えなければいけない、と。

従って、繰返しになりますが、今後もコンピュータは早くなり続けると思いますけれども、その時にはこのような根本的な大きなチャレンジを我々解かなければいけない、いけない、という状況でございます。

ここまでテクノロジーとしてどういうチャレンジがあるかということについてお話しましたが、次にじゃあコンピュータのどの部分をきちんと開発すべきかということについてお話ししたいと思います。

・スライド 12「エクサスケールコンピュータへの挑戦」

現在、わが国で 2012 年の稼働を目指して、スーパー…京速コンピュータというスパコンの開発が進んでおりますが、アメリカではもうその先が動いております。具体的には 2019 年には 1 秒間にエクサ回、10 の 18 乗回の浮動小数点演算ができるスーパーコンピュータを作るという計画がございます。

そして、もう産官学一緒になって検討が進んでおります。

現在この、お見せしているスライドは、IBM の方のスライドを引用させていただいております。

この中で主張していることは非常に単純でございます。消費電力は今問題という話をさせていただきましたが、じゃあ実際どの部分が電力を食っているのか、と。

コンピュータは先ほど、ロジック、計算する部分、データを格納するメモリ、ネットワークという 3 つの部分で構成されると申し上げましたが。IBM の方の分類では、それをもう少し細かく分けていて、コンピュート、ロジック、紫色の部分…と濃い紫色の部分ですかね、のメモリ、また、肌色の部分でネット…インターコネクト、ネットワーク、またそれとは別にストレージというふうに分類しておりますけれども。

現在のスパコンはどうなっているかといいますと左側の図の 2010 年のところにあります通り、消費電力の 50%はプロセッサが消費している、と。そして、メモリというのは 4 分の 1 強、ネットワークにいたっては 2 割強程度。このような現状だと。

ただし、これが、2018 年のスパコンでどうなっているか、という点。

メモリの割合がもっと大きくなるというふうになっております。つまり、コンピュートの、計算ロジックの部分の、消費電力の割合が 50%を切って、代わりにメモリの消費電力が 5 割近くいくと。

ネットワークについては相対的には変わらない。これが意味しているところは、コンピュータの中でメモリの消費電力については何らか考えなきゃいけない。

これはコンピュータの建築、つまりどのようなものを組み合わせていくかということ以外にも、デバイスのレベルで MRAM（エムラム）であったり、いろいろな技術がありますけれども、新たなメモリ技術を使って何か考えなければ、どうしようもなくなってくる可能性が高いということを表しております。

では、じゃあ次の世代になった時に、値段はどうなるんだという話が当然出てきます。つまり、今スーパーコンピュータはある意味、国力を表すものでございますが、その時には当然、金銭感覚が要求されます。

その時に、では何にいくらをかけると、一番バランスがよいのか、という話が出て来ます。

・スライド 13「エクサスケールコンピュータへの挑戦」

これも、先ほどと同じようにコンピュート、計算する部分、データを格納するメモリの部分、ネットワークの部分について分類してみるとですね、IBM のこの報告ですと、2010

年には値段の大体3分の2強がメモリにかかっていると。実際、値段に関していえばプロセッサやネットワークの値段というのはさほど大きくないという報告がされています。

これが2018年にこのまま進むと、つまりまた性能がどんどん大きくなっていくわけですが、メモリが、スーパーコンピュータを作るうえでのボトルネックとなる可能性がより一層強く…鮮明になるとのことでございます。ですから、右側の図ですと、2018年には4分の3以上の部分の値段というのはメモリになっていくと。

これはおそらく皆さまの感覚とかなり違うと思います。

皆さま、普通にパーソナルコンピュータを買う時というのは、大体プロセッサの性能を見てですね、その値段でプロセッサが3万円のものを使っているのか、1万円のものなのか、それがかなり支配的な要因であって、メモリというのはまあ5~6千円で買うもの、というイメージが持っている方もいると思います。

ただしスーパーコンピュータではそうではなっていて、こういう結果が言えることは、もしかしたらですね、2018年にできたスーパーコンピュータというのは、20年後には20万円くらいのパーソナルコンピュータに落ちてきます。その時には大きくですね、価格レベルが違って来るかも知れない。ということが言えると思います。

・スライド14「概要」

ここまでわりと先を見据えた大きな話をしてきましたが、ここでじゃあ現在のトレンドはどうなっているか、という話についてさせていただきたいと思います。

・スライド15「コンピュータは分散配置？集中？」

今回の資料で…事前に公開した資料では、グリッドコンピューティングやクラウドコンピューティングについて、お話するというお話をさせていただきましたが、それは時間の関係で、このスライドで重点的にさせていただくという形にしたいと思います。では説明に入ります。

これまで、コンピュータというのは見たときにこれはどこにあるのか？というのがあってですね、当然の問いかけとしてでてきます。

昔、コンピュータが高かったころというのは、コンピュータはというと、集中管理していて、各研究所、各大学に1個あって、それを使うために予約をして使うという時代が続きました。それがいわゆるメインフレームと言われているものでございまして、長年続きました。

それに対して、1990年代、何が起こったかというと、パーソナルコンピュータ、これが規格化されて様々なベンダーが参入した結果、非常に安価に手に入るようになった。これによって、コンピュータというのはお金を持っている研究所、あるいは、企業にあるものではなく、我々の家にあるもの、つまり、分散して使うものという概念に変わってきました。

世の中これで決まりかなあと思ったら、この先にはもう一回イノベーションが起きました。それは何かというと、インターネットの登場です。2000年ごろですね、インターネットが爆発的に普及すると。

そうなってくると、自分のパソコンは貧弱かもしれないけれども、人のパソコンと併せて使うと、大きな計算が出来る、或いはですね、みんなで束になるといいことがあるというのがわかってきてですね、たくさんのパーソナルコンピュータを使って、一つのスパコンに見立てるような話もできます。

また同じように、旧帝国大学にある、基盤センターがスーパーコンピュータについても、1つの大学から、1つの地域で使うのみならず、それを連携させることによって、もっと大きなことが出来るんじゃないかということで、グリッドコンピューティングというのが出て来ました。これはテクニカル的に見てみますと様々な規格の、複数の規格をもつ、複数のインタフェースを持つものを、融通を利かせて、つないでですね、大きなことをさせるというものでございます。

従って、非常に安価に上手く動くというように、進むわけですがけれども、その一方で非常にやり取りが難しいと。つまり、自分のところにあるスーパーコンピュータと相手のところにあるコンピュータをつなぐときには、やはりセキュリティの担保が必要になってくるわけです。またはデータの扱い方や処理、計算の仕方も若干違ってきます。そうするといろいろ議論をして、標準化をして進める必要が出て来ます。これ、非常に困難な部分もございます。ですからグリッドコンピューティングというのは非常にうまく行った部分と、そういう交渉が難しいという規格の問題がありました。

そこで、グリッドコンピューティング、計算機をつなぐ、ある意味、中央的に集まってくる部分がでてくるわけですがけれども、その結果何が起こったか、というと。それだったら自分のところで大きなものを1つ持ってしまうと。ただし、1つの大きな計算機群を買うと非常にコストがかかるので、それを回収するモデルとして、一般のユーザにそれを公開するという。それが最後のクラウドコンピューティングでございますが、そういうのが出てきました。

つまりこれまで、グリッドコンピューティングではみんなで助け合ってデータを公開して、計算資源を公開して、つなごうと言っていたのに対して。クラウドコンピューティングでは非常に、排他的にもうよそとはつながないけれども、うちのコンピュータを使ってくれたらこういうことができますよという提示をして、それでユーザを囲い込むというものでございます。

ですからグリッドコンピューティングというのはインターネットの登場によって加速したという言葉を使うのであれば、クラウドコンピューティングはある程度、規模の経済。つまり、1つのところにコンピュータをたくさん詰め込むと、そうするとコストの管理が若干減ってですね、非常にスケールメリットが出てくると。従って、スケールメリットが出てくるので強いところがどんどん強くなっていき。そして、小さな事業者等はコンピュータを持つのではなくて、そういうところから借りると。

具体的に申し上げますと、例えば Amazon であつたり、一部 Google だつたり、Microsoft なんかも持ってますけれども、そのような企業がこのようにやっていくと。

こうなってくると、プロフェッショナルな道具、つまり大きなコンピュータはプロしか持てない、つまり大きな企業しか持てないというふうに見えるかもしれませんが、私自身はこれはクラウドコンピューティングではすべて終わりだとは思っておりません。

歴史的に見ても、集中、分散、集中ときてますけれども、またどこかで分散が起こるかもしれないし、コンピュータ業界に関して言えば、これで決まりというものはありません。従って、今、クラウドコンピューティングを勉強することも非常に大切だと思いますが、我々はその先に何があるのかというのを常に問いかけながらやらなければいけないというのは現状だと思います。

・スライド 16「コンピュータをどこに置き、どう管理する？」

一寸先は闇と申しますが、その先はどうなるかわからないという 1 つの例を挙げさせていただきます。

今、皆さん、スーパーコンピュータを設置している部屋はどんな感じかというイメージとしては、現在のスライドの左側の写真のように、殺風景な大きな部屋にたくさんコンピュータが置いてあるというイメージをされている方が多いと思います。これはある意味、現状では当たっています。

そして、このようなものができれば、これをいかに 1000 倍、1 万倍、100 万倍するかということが当然技術として出てきます。

そうしますと、コンピュータの建築というのは、それに対して、ではどう 100 万倍するのかという答えを出すことが要求されるわけですが。

その一方で、全く逆のことも起こってきています。

お手元のスライドの右側の写真ですが、これは、トラックに積むようなコンテナの中にパソコンをたくさん詰め込んでおります。

それで、コンピュータのデータセンターを作ろうという試みでございます。ですから、この場合コンテナに詰め込むと、例えばコンピュータがたくさん熱を出して困っているというのであれば、そのままスキー場に持って行ってですね、ちょっと雪の力を借りて、冷やしてしまおうとかですね。或いは、今台風が来ていて、その地域の状況が、地形が危ないと、そうしたらそのコンテナごとにもっと安全な場所に移動すると。そうしますと、当然、過酷な中で使いますから壊れる可能性も出てくるかもしれない。けども、壊れたら、直すじゃなくて、その箱ごと取り替えてしまえと。こういうような技術も検討されております。これが意味するところは非常に恐ろしいものでございまして。我々日本人は何かものを作ろうとすると完璧なものをとにかく作ろうとします。ですから、例えばこの中にパソコンが 100 台あったら、それを次 100 万台詰め込むにはどうしたらいいか、そのためには電気をたくさん使って、空冷を入れて、またシステムエンジニアを 10 倍雇ってですね、完璧な整備をして、そのために何重にも防備を敷くということを考えますけれども。

そういうことをやろうとしてお金をつぎ込んだ結果、勝ち残った技術が、例えばこの、場合によっては、コンテナ型のデータセンターみたいなものが残るかもしれない。

これは、本当に恐ろしいことで、コンピュータの建築をする上で、1 つのことに注目をして、それだけを最適化すると、足元をすくわれる。正しく一寸先の闇の可能性はあるような話でございまして。

ですから現在、クラウドコンピューティングが非常に出てきておりますけれども、それも30年後、40年後どうなるのかということについては、まだわからないと思います。

・スライド17「概要」

最後、時間が5分くらいになってきましたが、簡単に、次の話題に移りたいと思います。建物の建築とコンピュータ建築の関係でございます。

・スライド18「『建物』建築と『コンピュータ』建築」

若干ネガティブな話となるんですけれども、私は建築学についての知識はほとんどございません。ですから、これについては隈先生の書かれた『負ける建築』という本に大きく影響をされたというか、そこに書かれていることを基にして話をさせていただきます。コンピュータは20世紀からの技術でございますから、20世紀建築とまず比べてみたいと思います。

20世紀建築というと、これもいろんな言い方があると思うんですけれども、1つの側面として「忌み嫌われるもの」という側面があると思います。

例えば、家の横にでっかいマンションが建って、日照権が非常に悪くなったとなれば、非常に不安になりますし、また景観も損なうかもしれない。

あるいは大きなビルができるとどこか威圧感があるといいますか、物質的に浪費しているんじゃないかという部分という心理的なものが働きます。

また、例えば50歳で家を買ったとすると、今もう、建物は60年70年もちますから、その人がそこに100年、死ぬまで住むわけです。この長寿というのは、いい面で言えば、安心してそこに住めるというかもしれませんが、現実には、場合によっては保有のもろさが出ることもある。例えば、9.11のですね、アメリカのテロの話、或いは阪神・淡路大震災の話で、完璧な非常に大きな、絶対的なものだと思っていた建物がいとも(簡単に)なくなってしまうと。

また、20世紀の建物に関してはある意味持ち家政策を国が進めてきたと。

そうすると、例えば公共事業等で弱者のための救済という側面がどんどん進むと。そうすると今何が起こってきたかということと公共事業は、予算を減らすべきだという話がたくさん出てきています。つまり、20世紀建築とか20世紀のこういうものに対して非常に、今、悲観的な見方があるわけです。

さらに歪んだ…特殊な見方かもしれませんが、家を持った人というのは、統計的にこれまで非常に勤勉に働くと。さらに現在の政治体制が安定してほしいと思う人が多い結果、政治の安定化につながるということで、ある意味政治利用されてきた側面も若干あると。

このように20世紀建築というのは若干負の側面を持っていたと思います。

それは、今の世の中からある意味逆の方向に進んでいる部分があるわけです。

例えば現在は何か大きなものを作って、巨悪に勝つ、そういう考え方はあまりありません。

ただし、東西冷戦時代にはあったわけですが、現在はそれがありません。今何が起こっているかということ、負けによって、なにか批判をかわすようになってきている。

ですから何かやりたいんだけど、予算が無いからこれしかできませんとかですね、敷地が狭いからここが限界ですとか。大きくチェンジを迫られているところもあると思っています。

これに対して、コンピュータの建築は全く逆でございまして、非常に時代にマッチしているというのが私の意見でございまして。

・スライド 19 「コンピュータ」 建築

つまり建築が抱えている負の部分。これは、ちょうど東西冷戦終了後くらいから IT 技術が出てきて、注目された。しかも、パソコンを買うときには、パソコンを 10 年、20 年皆さん使わないわけです。多くの方は 5 年程度で替えるわけです。

これが意味していることというのは、時間的な弱さでございまして。

家に置く PC を選ぶときにそれを間違えたからといって、人生にそこまで影響しないと。この弱さを持っているもの。

また、世界ナンバーワンのスパコンでも体育館程度の大きさしかない。建物というのは、ある意味で大きなものを造れば、どんどん大きくなるわけですが、スパコンは非常に小さなもの、それに比べると小さなものと言えますし、またものについても規格化されております。パソコンにイーサネットという言葉聞いたことがある人もいらっしゃるかもしれませんが、こういったものはもう 1970 年代からもう進めているものでございまして、非常に長期化されています。

さらにですね、コンピュータに至っては、今のこの世相といいますか、負けによって批判をかわすような時代に非常にマッチしている部分もある。

去年事業仕分けで、スパコンについて非常にいろんな議論がございました。

このときに、国の財政が厳しいので、予算がないから止めてしまえとかですね、いろんな話がありましたけれども、予算を減らしてでも皆さんに開放できるこういう枠組みがありますと、或いは、民間企業の方が入りますと、そういうようなもの、様々なものを提示してですね、進めることによって結果的にいいものになってきたと。

また、絶対的な大きな存在として、我々の前に憚っているものではございません。つまり見えざる存在となっているので、今の世の中に、21 世紀のものに合っていると、そういう部分があつてですね、コンピュータはますます私は伸びていくものだというふうに、そういう部分も含めてですね、伸びる可能性が大きいというふうに思っております。

・スライド 20 「まとめと展望」

最後に、まとめと展望でございまして。

コンピュータは皆さんもう肌で感じていると思いますが、日常品として、生活必需品として現代社会の基盤となっているものでございまして。

このパーソナルコンピュータというのはこのまま進むと、もしかしたら 2050 年には、1 台の PC の能力が全人類の知能に匹敵する可能性もある。それぐらいの劇的な進歩が続けています。これらは、IT 技術の進歩、つまり 10 年で 100 倍以上の性能向上を達成する、スパコンにいたっては 10 年で 1000 倍以上と、これらは消費電力、或いは電力密度、或いは配線長、様々な問題、限界がございまして。まあ楽観的な見方をすれば、おそら

くこれまでの歴史を振り返っても限界を突破できるのではないかと。

そうなってくると今後は、あらゆるものはコンピュータの上ののってくるわけです。社会であったり、政府といったようなものがどんどん IT 基盤の上ののってきて、その中で活動する。そうなってくると IT 技術だけの話ではなくて、IT 技術によって様々なものを改良できるかもしれない。例えば食糧問題であれば、一番直感的なものとして、IT システムによる生産管理なんていうのは簡単にできますし、いろんなデータをとってですね、土壌の総合的に解析していくと、例えば4月の天候を見て、何の種を植えればいいかなんていうのもわかるというのもいろいろ言われております。

また別の IT の応用としては、例えば人口問題というのがあります。今後人口は90億人増えていきますし、都市化が進むと言われています。

ただし、我々狭い空間に、大勢の人がいるということはあまり得意としていないということが言えるんです。

つまり狭い空間に人が集まって長時間いると、おそらくケンカ等が起こったりします。そういう問題に対して、事前に避けるような何か制御をしてあげると、もしかしたら上手くいくかもしれない。

こういったところにも、IT 技術の可能性はあると思います。また我々は、現在、非常に平和な生活ができていると、これを維持することは非常に難しい、大変なチャレンジだと思いますけれども、この部分についても我々は情報を、何か重要な情報を得ると、それによって行動を変えて、あらゆる危険、危機を回避する能力をもっております。そういう部分についてもコンピュータで計算したことを、フィードバックをかけて何かできるかもしれない。

以上のことから、私はコンピュータを探究し続けることによって、最後のメッセージですけれども、情報社会という明るい未来が見えてくるのではないかと考えております。

以上で、「計算機の建築学」についての話を終わらせていただきます。

どうもありがとうございます。

(拍手)