

No.131
November 20, 2006

Information

講 演

2006年7月5日（水）・第151回談話サロン（東京・弘済会館）

講師・演題

佐藤 哲也：地球シミュレータと未来社会革命

社団法人
日本工学アカデミー
THE ENGINEERING ACADEMY OF JAPAN

日本工学アカデミーの使命

社団法人日本工学アカデミーは、広く学界、産業界及び国の機関等において、工学及び科学技術並びにこれらと密接に関連する分野に関し、顕著な貢献をなし、広範な識見を有する指導的人材によって構成されており、工学及び科学技術全般の進歩及びこれらと社会との関係の維持向上を図るため、下記の諸活動を通じて、我が国ひいては世界の発展に資することを目的とする。

記

- 1) 国内外の工学・科学技術政策、教育等に関する調査研究、提言活動を積極的に行う。
- 2) 国内外における学際・業際的及び新技術領域の活動を推進することに資する調査研究等の諸活動を積極的に行う。
- 3) 国内外の工学、科学技術の健全な進歩発展に寄与するための教育活動、及び一般に対する普及、啓発活動を推進する。
- 4) 上記の諸活動を効果的に実施するため、国内外の諸団体、特に海外の工学アカデミーとの連携を強化し、共同事業等を推進する。
- 5) 上記の一環として国際工学アカデミー連合の主要メンバーの一員として、特に近隣諸国における工学アカデミーの設立に対して、良きアドバイザーとしての責務を果たす。

2000年7月19日理事会

地球シミュレータと未来社会革命



佐藤 哲也 (さとう てつや)

1939年12月生まれ
1967年5月 京都大学大学院工学研究科博士課程退学
1967年6月 京都大学理学部助手（物理第一教室）
1974年7月 東京大学理学部講師（地球物理研究施設）
1976年4月 東京大学理学部助教授（地球物理研究施設）
1980年8月 広島大学教授（核融合理論研究センター）
1989年5月 核融合科学研究所教授、理論・シミュレーション研究センター長
1995年4月 核融合科学研究所副所長
2002年4月 (独)海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター長
核融合科学研究所名誉教授・総合研究大学院大学名誉教授
工学博士、仁科記念賞（1986年）、Dawson国際賞（2005年）等

司 会（隈部英一専務理事） それでは、第151回
談話サロンを開催させていただきます。きょうの
演題は「地球シミュレータと未来社会革命」とい
うことで、海洋研究開発機構の佐藤先生にお話し
いただきます。

本日の開催の趣旨ですが、ご案内状にありまし
たように、海洋研究開発機構地球シミュレータセ
ンターでは、世界に先駆けてこの大型地球シミュ
レータの実用化に成功されて、地球上の各地の自
然現象とかの解析予測に多大な実績を示されてい
るわけです。また、それ以外の分野にも利用を広
め、現在大いに活躍されておられるところでござ
います。明年、実はCAETS（国際工学アカデミ
ー連合）の2007年Convocationというのを、この
日本のアカデミーが主催し、東京で開催いたしま
す。「環境と持続的成長」という題ですが、それ
に向けましても、きょうのご講演、我々にとって
大変に役に立つのではないと思うわけでござい
ます。

それでは、皆さんご存じとは思いますが、本
日の講師、佐藤先生のご略歴をごく簡単にご紹
介させていただきます。

昭和38年に京都大学工学部電子工学科をご卒
業になり、昭和45年に京都大学から工学博士を

授与されておられます。ご職歴ですけれども、42
年から京都大学理学部の助手を、49年からは東
京大学理学部の講師、助教授を務められました。
55年からは広島大学、国立の核融合科学研究所
の創設にお力を注がれ、平成元年創設とともに、
そこの教授をされまして、理論・シミュレーショ
ン研究センター長を併任され、平成7年には副所
長に任命されました。平成13年に海洋研究開
発機構の地球シミュレータセンター長に就任、現在
に至っておられます。この地球シミュレータにつ
いて大変広いご見識をおもちでございます。

それでは、先生、よろしく願いいたします。
佐藤哲也 ただいまご紹介にあずかりました地球
シミュレータセンターの佐藤でございます。今日
は雨だから大分聴衆は少ないかなと思ったのです
が、たくさん来ていただきまして、ありがとうござ
います。

地球シミュレータというのは、皆さん、名前は
多分ご存じでしょうし、小林敏雄先生はこの地球
シミュレータに関しては私以上にご造詣が深いわ
けですけれども、地球シミュレータが運転を開始
して、もう既に4年たちました。ご存じのように、
特に大きなシミュレータといいますか、スーパー
コンピュータというのは寿命があります。我々人

間の寿命の大体10分の1ぐらいの寿命だろうと思います。そういうことからいいますと、5年目に入ったということで、そろそろ老化が始まるかなと思っておりませんが、意外と健康でして、初めてのころとほとんど変わらない形でいろいろとプロダクションをしております。このままだとまだ数年は十分生き延びていくでしょうし、かわいがれば10年は十分やっていけると思いますが、そのうちにより大きな、よりプロダクティブなシミュレータができると思います。それまでの間のフォアランナーといいますか、そういう形で地球シミュレータはこれから使われていくだろうと思います。

きょうは、どういう題目にするかと尋ねられまして、何か未来のことをいった方がいいだろうということで、「地球シミュレータと未来社会革命」という非常に壮大なるタイトルをつけましたけれども、少しでもこの未来の社会の変革といいますか、そういうものに地球シミュレータが役立っているのかなという感触をもていただければ、お話しした甲斐はあったと、自分でそう思いたいと思っております。

先ほど来られた一人の方が、こういう会合は雨の日にはしないでほしいとおっしゃっていましたが、その中で、雨が降るのは予測できるのかという話もありました。まさにそういう話が一つの主題です。論理的といいますか、科学的には予測はできると申し上げてよいと思います。では実際にできるのかといいますと、できるようになるように皆さんと一緒に努力していく、現在はそういう時代であり、地球シミュレータによって、その予測の信頼性というのはかなりふえたのではないかというお話も中に入れば、私としては満足であると思っております。

これは釈迦に説法かもしれませんが、コンピュータ・シミュレーションというのをもう一度振り返ってみましょう。我々がどういう働きをするのかをみたいという一つのシステムを取り上げます。我々が対象とするシステムがどういった科学的な法則、物理法則、あるいは化学法則で動くかということを考えます。その法則を与えてやれば、その法則に従ってそのシステムの振舞いというも

スライド1

システムの振る舞いを記述する法則を与え、コンピュータでその展開を追跡するのがコンピュータ・シミュレーション。

システムの法則として、自然界の法則(物理)を与えた場合が、科学のシミュレーションで、人が人工的法則与えた場合が、ゲーム(AI)のシミュレーションである。

のが原理的には解けます。もう一度いいますと、あるシステムを考える。そのシステムの運動、発展を記述する何らかの法則というものが与えられていると仮定しますと、その振舞いの仕方をコンピュータの中に、コンピュータ・ランゲージに置きかえてやれば、あとは、その初期条件を与え、あるいは境界条件を与えることによってその展開というものが追跡できるはずで。そうしますと、あるシステムの振舞いということのをどれぐらい正確に与える法則があるか、そしてその法則を、どれほど誤差を少なくして解くアルゴリズムがあるか、それを実行するコンピュータがあるか、どれだけ確かなものがそのシステムの未来に対して予測できるか、そういったことがわかることになります。こういったプロセスをコンピュータ・シミュレーションと呼んでいます。コンピュータ・シミュレーションを実社会に応用していこうとしたときに、システムの自然法則という物理法則がわかっているような場合を物理のシミュレーションといいますか、あるいは科学的なシミュレーションと呼んでいます。

それに対して、システムの動きというものを人間が勝手に与えることができるような、あるいは、その法則はわかっていないけれども、何かこういう法則に従っているのであろうと予測できるような、そういった法則性を人間が与えて、それに従って方程式を解いていく。例えばサッカーゲームをシミュレーションする場合を考えましょう。中田がどういうときにはどういう反応をするという、そういった振舞いのルールを我々人間が与えてやる。そして11人のプレイヤーの振舞い、相手方11人の振舞いを与えて、最初のキックオフ

を初期条件として与える。そういう形で解いてやるようなシミュレーションもできるわけです。社会現象というものは大体我々がこういう法則に従っているであろうということを期待するといひますか、そういう形で与えてやる。そういうシミュレーションをゲームのシミュレーション、あるいはAI、人工知能的シミュレーションといひてもいいかもしれません。そういう種類のシミュレーションがあります。社会現象というものは必ずしも物理法則がはっきりわかっていない。そういったものに対してこういう働きをするであろうという、これは経験則でもいいですけれども、そういうルールを与える。あるいは勝手にロボットの、こういう振舞いをするということを人間が与えて、コンピュータで解かせるというシミュレーションです。

きょうお話ししますのは科学的な法則がわかっている、物理シミュレーションに一応限定いたします。科学のシミュレーションです。ゲームのシミュレーションは主題にはしない。もちろん、コンピュータがありますと、そのコンピュータは、どちらにでも使えるわけですけれども、きょうはサイエンティフィック・シミュレーションを主題にしていきたいと思ひます。

先ほどいいましたように、釈迦に説法かもしれませんが、シミュレータ、スーパーコンピュータの歴史というものを恐らく皆さん知っておられると思ひますが、それとシミュレーションの関係について触れたいと思ひます。実はスパコンというのができたのはまさにシミュレーションという、

特に科学的シミュレーションをやる、そのための道具として発達してきたと言ひます。そう考へていただいた方が正確ではないかと思ひます。

まず、その歴史的なものをひもといひてみますと、数学的なチューリングの定理（1936）がもちろんベースになっているわけですが、実際の機械として最初にできたのはENIACというコンピュータです。これは戦争中にアメリカが武器開発のためという名目でつくり上げたわけですが、例えば大砲の弾道がどのように飛んでいくであろうといったことをシミュレーションする。そういう具体的にももの物理法則に従ってそれがどのような振舞いをするかということをもて、大砲の設計をしようということが意図されていたのです。

そして戦後になってトランジスタというものが発明され、それまでのENIACは真空管でできていましたが、コンピュータを半導体でつくる。小さなものでつくるということで、ここにおられる皆さんが指導してこられたと思ひますが、LSIがどんどん発達していく。コンピュータの能力というのはエクスポネンシャルに増大していく。大きくなっていく。その増大則としてムーアの法則というのが知られているわけです。

コンピュータが大きくなってきますと、最初は使い物になるようなしろものかどうかという形で発展してきましたが、1960年代に入りますとかなり大きなコンピュータができて、具体的な問題、役に立つような問題、特に学術界においてそれを用いようというムードがふえてきました。私自身も1963年ごろの、まだ市販のものができていないころから、コンピュータをつくる方ではなく使う方でしたけれども、それを用いて科学の問題を解いていくということを始めておりましたが、1960年代後半になって、かなり学術界への浸透が進展してきた。そして、浸透はしてきたけれども期待した程役に立たないとわかってきた。非常に革命的なものはそこから出てくるわけではなかったのです。

そういったときにシーモア・クレイが出てきて、1976年にクレイ I といひますか、ベクトル方式というものをを用いた、要するに、これまで

スライド2

シミュレーションとシミュレータの相乗関係

- ENIACの開発(大戦後期米国)
- 武器開発のシミュレーション…シミュレーションの始まり
- トランジスターの発明(1948)
- LSIによる性能の指数関数的増大…ムーアの法則
- シミュレーションの学術界への浸透…1960年代
- ベクトル方式の発明(1976年)…シーモア・クレイ
- 繰り返し演算の高速化…科学の方法論として定着
- 並列方式の普及(1995年～)
- 米国計算機メーカーの企業戦略とピーク性能増大の両立性
- 地球シミュレータの登場(2002年)
- 科学技術の新領域開拓…部分から全体シミュレーションへ

の演算を手仕事の、一つずつ自分の仕事台に部品（データ）をもってきて、別のパーツをもってきて、そこで組み立てて、横に置いておいて、また別のパーツをもってきてそれに加工を施していくという、非常に時間のかかる、効率の悪いことをやっていた。それをオートメーション化しようというのがベクトル化だと思います。データをベルトコンベアに入れて、順番に運んでやる。演算する科学的な計算は大体同じ演算、しかしデータは徐々に変わってくる。例えばグリッドごとに違うデータが入っている。しかし、各グリッド上の演算はみんな一緒だということで、ベルトコンベアでグリッドの順番を決めておいてそれに合わせてデータを送り込み計算する。そうするとオートメーション化ができるということで、非常に速くなる。要するに、パーツ、データをもってきて、ストアするといいますか貯蔵する、そういう時間がほとんどむだにならない。計算している間に、こちら側ではそのパーツをベルトコンベアに載せてやる。そういう形で、非常に速い形でベクトル式というのが風靡するようになるわけです。

これによって、科学的な方法論としてスパコンが使える。このクレイマシンのできて初めてスーパーコンピュータという名前が出てきたわけですが、1970年代後半からいわゆるスーパーコンピュータというものが、特に非線形、非平衡の問題に対して非常に強力な科学的な方法論、道具となり得るということがだんだんと浸透してきました。しかし、使いこなしてみると思ったほど役に立たないと皆さん思われたわけで、鳴り物入りで出てきたわけですが、意外と、ベクトルマシンといえども、特に科学者の要求するような問題をなかなか解いてくれない。研究者の方も、売る方も恐らく嫌気がさしてきたのだろーと思います。余り研究者の方が喜んでくれないものだから、なかなか売れない。

ということで、アメリカでは、ベクトルみたいな、非常に生産性はいいかもしれないけれども、設備投資のたくさん要するような高いものはつくるのをやめようと、そしてシミュレーションというのが停滞していく、そういう時代があったと思います。1990年前後はそういう時代であったと私

自身は定義しております。そういったときにアメリカは、官庁といいますか、政府関係の特殊な機関だけで、コンピュータというものを、スパコンをつくっても大して売れない、もっと民衆に売れるものの方が金もうけになると。そういう考えのもとにパソコンが出てきて、一般大衆、需要の方が非常に多くなるということで、特にIBMあたりはパソコンをつくるという形で、コンピュータというものがスパコンからパソコンに移っていった。そして科学の大きなシミュレーションをやる人たちは何となくフラストレーションを起こしている。それが1990年代の初めごろだったと思います。

そういったフラストレーションがたまってきた、やはり大きなシミュレーションもやりたい、大きな仕事もやりたいとアメリカが考え出したのは、スパコンの構造にも大量生産方式を使おうと。パソコンという一般に売れるものをつくっておいで、それをずらっと並べればいいじゃないかと。それをケーブルでつなげばいいじゃないか、100倍の性能をつくりたければ、パソコン100台つなげば100倍になるではないか。10万倍欲しければ10万個並べればいいではないかと。そういう比較的単純な考え方で大量生産方式、いわゆる並列、マスパラレルプロセッシングシステムというものができてきた。そしてアメリカのメーカーを中心にスカラを並列につなぐといういわゆる並列方式、スカラパラレル方式というものが、シミュレーション界といいますか、コンピューテーショナルサイエンスの方に入ってくる。そういう傾向が1995年からかなり強くなってきました。

そういった時代でやってきて、いわゆるベクトル機というのが値段が高い、しかもそれほど役には立たない。そういった中で、もう亡くなられましたけれども、旧科学技術庁系の航技研を出られた三好甫さんが、もっとシミュレーションとして本当に役に立つものをつくろうと、長い間いろいろと働きかけをされた。日本はアメリカと違ってベクトルをずっと維持していましたから、そのベクトル機という、高価であるけれども非常に効率のいい、科学計算にいいもの、それをアメリカ方式のパラレルにすればいいではないかと、ベクト

ルパラレル機というもので、アメリカが考えていたよりも3桁ぐらい大きなコンピュータをつくらうということで地球シミュレータプロジェクトが始まり、2002年の3月にその地球シミュレータが稼動し始めました。

この地球シミュレータが有名になったわけは、いわゆるリンパック。ベンチマークによるトップ500の中のナンバーワンになり、日本人たちはそれが地球シミュレータの一番大きな役割、世界でダントツのトップになったと、そういうことを地球シミュレータのシンボルだと思っておりませんが、私は実はそう思っておりません。1番であろうが2番目であろうが、そんなことは別に大した問題ではなく、むしろシミュレーションというものに対して革命を起こし得るものだったかどうかと、そういう観点から私は地球シミュレータをみています。

私は地球シミュレータそのものの開発には全く携わっておりません。それが開発されていること自体、私も実は知らなかったのです。核融合科学研究所で理論・シミュレーション研究センターというのを平成元年につくりまして、そのセンター長になってずっと十何年やっておりまして、私自身は、シミュレーションをどうすべきか、そういう立場からスパコンは構成されるべきだということで考えておりましたので、ばかでかいコンピュータができればいいというふうには余り思っておりませんでした。余り関心がなかったというのが本音ですけれども、突然、三好さんが2001年の秋に、その地球シミュレータセンター長を引き受けてほしいといわれました。そして、オペレーションを始めたときはあんたに任せるからやってくれというのでした。ある意味では青天の霹靂であったわけですが、そういう三好さんからの申し出があって、そのうちいつかそのポジションにつけばいいかなと思っていました。

当時は私も現役の核融合科学研究所の理論・シミュレーションセンター長をやっておりましたので、まだ定年まで少し時間がありますから、今すぐ公務員をやめると、卑近な話ですが、退職金がぐっと減りますからね。それほど重要なことではないですが、とにかく定年になったころ

そのポジションが来ればまあいいかなと思って、では引き受けましょうと三好さんにお話ししたわけですが。その2カ月後に三好さんが亡くなられるとは私も夢にも思いませんでした。2カ月後に突然亡くなられて、JAMSTECの方から、もう核融合研をやめて早くこちらに来るように、とせかさされ、当時は兼任でもよいということで、定年前でしたけれども切りのいいところで、センター長になったわけですが。2002年4月1日から、核融合研を退職して、専任になるという形でやってきました。実はどういうコンピュータか全くそのポジションにつくまでみたこともないし、どこにあるかも、まさか横浜のああいいうところにあるということも知りませんでした。

来てみると、街の中の大きなマンションと工場との間の、ばかでかい建物の中に入っておるということで非常に驚きました。来て、それ自体をみて、動かしているというか、そういう状況をまのあたりにして、これはいけると実は思いました。いけると思ったのはどういうことかといいますと、今までのシミュレータといいますか、スパコンですと、一度に取り扱うデータ量が非常に少ない。私自身の核融合研でもっていたのでも、一度に扱えるデータ量、情報量が非常に少ないために、どうしても物事を部分的に、あるシステム全体の問題を解きたくても、分解能といった問題からどうしても部分だけをとってこないといけない。あるいは決まったファンクションだけとってないとシミュレーションできない。

シミュレーションというのはリアリティに近づけるということが本来の目的でありながら、リアリティからぐんと離れたところで、アイデアといいますか、理想化された部分しか取り扱えなかったわけですが、この地球シミュレータというのは、システムの全体を扱うことができるぐらい分解能のいいデータを同時に扱える、それほど大きな容量、メモリをもっている。しかも速い。ということで、これは革命を起こすぞとほくそえんだわけです。我々シミュレーションをやっている人間がずっと望んできた、本当に欲しかった、いわゆる部分ではなく全体を扱える、そういうものがやっと手に入ったということです。この

地球シミュレータのもたらした一番大きな効果といえますか、皆さんは、税金を400億もつぎ込んで高いっておられたわけですが、この表題にありますように、未来社会革命を行うだけの、それを迎えるそういう道具であるということ、この地球シミュレータは最初のステップとして示してくれた、私自身、そういうところにある意味では驚きといえますか、そういうものを感じました。

そして、このコンピュータの優秀さといえますか、いわゆる革命性、そういったシミュレータを2002年3月から稼動し始めました。8月に実はアメリカ、ヨーロッパに行脚をしました。アメリカのDOEとかNOAA、NASAとかNSFとか、それからカナダの気象庁、あるいは、イギリスの気象庁、フランスのCNRS、そういったところをずっと回って、この地球シミュレータは社会に対して革命を起こすぞと見栄を切ってきました。リンバックで一番になったというのは多分その一つの証だけであって、それ自体本質ではない。やっとこれまで我々が望んでいた、丸ごとシミュレーションができる。要するにシステムを丸ごと扱えるということはシステムの将来発展をみられる。あるいは産業製品ですと、丸ごと何か新しいものをシミュレーションによって開発設計ができるようになった、その最初のきっかけをつくった機械だぞと。これは学术界においても産業界においても、あるいは社会のあり方に関してもかなり大きな変革をもたらすということを吹いて回ったんです。

それが多分、アメリカのガバメントをしているんな省庁を超えた形のチームをこしらえて、日本にこぞってやって来て、例えば、この工学アカデミーの関連としてアメリカの工学アカデミーの人たちが日本のコンピュータ事情を調べにこられたというのが3年前でしたか、あったと思いますが、単にリンバックで一番になったということだけならばアメリカも簡単に、要するにそれを超えるようなものをつくれればいいわけだから、それほど難しい問題でなかっただろうし、それほど政府が、大統領が上に立ってやるような問題ではなかったんだろうと思います。メーカーに任せておけばいい。でも、そういう社会に対してかなり大きな新

しい改良をもたらすというところに共鳴したと思います。アメリカ、ヨーロッパの人たちは恐らく科学の行き詰まりを感じていた、どこかに何かエポックメイキング、何かブレイクスルーというものがないかということはかなり真剣に探していたと思います。だから、話をしたときには物すごくレスポンスが、どこに行っても強く、すぐに何らかの形でニュースに書いてくれるということもあって、科学に革命をもたらす、あるいは社会に革命をもたらすという論調が書かれて、それがかなり地球シミュレータというものの名前を持ち上げ、そしてアメリカ、あるいはヨーロッパを含めていわゆるコンピュータに対する物すごい意気込みといえますか、期待が出てきたのだろうと自負をしております。

スライド3

シミュレータの性能

機械の性能:

- ★演算速度(フロップス)
- ★主記憶容量(バイト)
- ★データ交換時間(レイテンシー等)

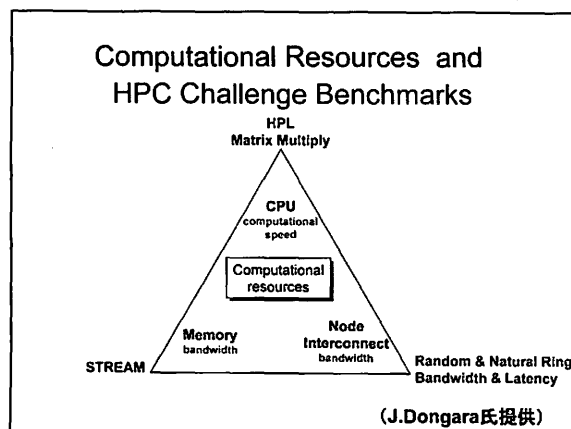
シミュレーションの性能:

- ★ジョブ完了に要する実時間
- ★取り扱えるスケールの大きさ

地球シミュレータの性能というものに関して、実は、今までトップ500というリンバックは、ベンチマーク評価としては、これまでのワンノードコンピュータシステムに関して1秒間に何回演算できるかという、それ自体の演算、そういうリンバックはよかったと信じています。でも、パラレル化された時代においては、もうそれだけではだめであるということを、そのときも大分いって回ったわけですが、シミュレーションといいますが、コンピュータというものの性能というのは、速さは確かに重要です。でも、ジェット戦闘機F1とジャンボ機とをみたときに、これは速さだけをみたのでは性能はわからない。例えば人間の輸送をどれだけするかという観点からはジャンボ機が優れている。爆弾をどう運ぶかというのなら戦闘機の方がいいかもしれない。そういう意味で、何に使うかによって、同じスピードであった

としてもその価値が違ってくる。コンピュータ、あるいはシミュレーションする機械という形でみれば、速さとどれだけの情報量を同時に扱えるかという、いわゆるメインメモリの大きさとデータ、演算機との間の効率性の良いデータのやりとり、それから、今のように、一つでもものすごく大きなのができないとして、パラレル化するならば、ノード間といいますか、その間のインターコネクション、データをトランスファーする、いわゆる輸送量、輸送の速さが重要になる。演算してデータをプロダクションする、どれだけのプロダクションが出てくるか、どれだけの仕事ができるか、どれだけデータをプロダクションするか、そして各プロセッサノードがデータをプロダクションする中で、ワンノードでできないので、多くのノードで共同作業する。共同作業するノード間の情報の交換が、いかに迅速かということが非常に重要になってくる。

スライド4



その三つのバランスがとれて初めて真のシミュレータだということを当時から主張してきました。このスライドは古い私のファイルから持ち出してきたものですが、その三つのバランスがとれないとだめである。そして初めてシミュレーションの性能が評価できるのだということを大分海外で強調しまして、例えばリンパックをこしらえたドンガラ博士だとか、あるいは今のトップ500を扱っているアメリカのDOE研究所のホルス・サイモン博士だとか、あるいはドイツのハンス・モイヤー先生、そういった人たちにこれを吹いて回って、リンパックはもうやめなさい、変え

なさいということをいったわけです。

コンピュータというのはいろいろな目的があって、いわゆるデータマイニング、あるいはデータプロセスをするためのコンピューティング、それと科学的なシミュレーションをするコンピューティング等がある。例えば、わかった物理法則の中で、システムがどのように発展していくか、あるいは新しい製品をつくるためにはどういった部分をどのように設計していけばいいかといったものを扱っていく物理シミュレーションを行うコンピューティングの性能はどう評価されるか、地球シミュレータというものは速さ、メモリ、データ交換の三つのバランスが非常にとれた最初の機械で、しかも情報量がたくさん扱えるということで、システム全体を一度に扱える。そこで未来の天気予報も含めて、初めて、シミュレーションで予測が可能になるということを証明した最初の機械である。

先週、ドイツのドレスデンで国際ナショナル・コンファランス・オン・スーパーコンピューティング (ISC) という会合がありましたが、そこでドンガラ氏が非常に新しい主張を講演の中でされておりました。それはどういうことかということ、今までのリンパックでトップ500を決めることはもうこれでやめます。これはむしろスパコン界をミスリーディングしていく可能性があるということで、新しい方法を自分たちはこれから採用します。そして、8つの異なったファンクション、シミュレータのファンクションをみていくために、8つのベンチマーク、問題をこしらえた。これからのトップ500に関してはそれを用いて、8つのファンクションに対してどれくらいの性能かをみて審査をする。そして、これまでのように速さだけでナンバーワンとか、そういうことはもうやめます。そして、もちろん順番づけはやりますが、三つのカテゴリーでこれからは賞を出しますと宣言しました。

一つは、今までと同じように、ここに書いてありますが、スピードです。フロップス値。実効的に線形代数方程式を解いてどれくらいの速さか。これは一つの速さの目安になりますから。もう一つは、ここにMemoryと書いてありますが、メモ

り部分に関してどれぐらいの大きなものを同時にシミュレーションにおいて扱えるかということを見る。彼はSTREAMというコードをベンチマーク化しています。もう一つはインターコネクション。ノード間のデータ伝送がいかに速いかです。一つのトランスファーレートはコンピュータの並列化の中のノード間のトランスファーレート、それがインターコネクションレートです。もう一つは、そのデータをそこに蓄えていく、押し出していく、そういうデータフローがあるわけです。いわゆるリンパックという演算速度の速さ、どれだけの大きさの仕事ができるかというメモリ容量、それから、並列化しますから、並列の間で、演算に比べてどれぐらいのスピードでデータを交換し得るかがコンピュータの性能にとって重要です。

例えば、仕事の方は非常に速い。しかし、昔の江戸と京の間である共同作業していたとします。江戸の職人と京の職人が別々のものをつくって、それで一つのものをつくり上げようという国家プロジェクトだったとすると、江戸であるところまでできたときの情報が、飛脚でもって延々と京まで来て、それから初めて京の人たちが次のステップをすませる。次のステップができると、それが京から江戸に行って、江戸の人たちがその情報をみて次のステップへ。江戸と京の間がものすごく情報の時間が長いわけです。そうしますと、共同作業でやる仕事というのは、そのほとんどが通信といえますか、飛脚が走っている時間で決まる。それではスパコンの本来の役割からいうと非常に効率が悪い。

そういうことをあらわすために新しいベンチマークをつくり出す。そして実際には、三角形で書いていますが、三点を結ぶ円を書くわけです。円上に、三角形のトップの間に二つか三つか中間のファンクションをあらわすような、そういうベンチマークをつくらせて、全体で8つにして、8つの性能をみんな出しなさいと。だから、出てきた結果はこういう星状の円グラフで、それでもって皆さん評価してくださいということです。この11月、タンバで開かれるスーパーコンピューティングコンファランス（SC）からはそういう形で評価されます。今までの、きのうも産業経済新聞か

に、そのトップ500の1番から10番、地球シミュレータは10番ですと書いてあったと思いますが、それは全部、この一番上の速さ性能のところだけです。だから、真ん中に中心点を書きますと、中心点から垂直に上がった長さがどれぐらいかということのみに着目したものです。これからは新聞記者さんも時代遅れにならないようにしていただきたい。

これからはそういうのではなくて、三方に向かった形で、賞も独立に三つ与える形になります。それで皆さんは、だからどれがトップワンというわけではなく、何に対してトップワンかという、そういう形に変わるということが3日か4日前に宣言された、ということを知ったことになります。少し別のことをいいますと、日本のコンピュータで次の世代をつくろうとしている。それに対して一人の中心的人である国情研の三浦謙一さん、ここにおられるかもしれませんが、ドンガラさんに質問をしました。もしそうならば、特殊計算機というもののデータを出したときは受けつけてくれるのですかと。すると、“ノー”であると、“それはいたしません”とドンガラ先生ははっきりと否定されておりました。

ただし、出してくれるのは構いません。勝手に出してください。記録としては残してはおきますけれども、評価の対象にはいたしませんということをはっきり言われています。日本の今のプロジェクトの人たちは非常に困っているのではないかと思います。それを目指すという形でつくるけれども、それは評価されないという。そういうことがはっきり言われてしまったということで、少しショックではないかと思います。

それからもう一つ、最近のコンピュータの方向として、これまでは一つずつの半導体をいかにチップの中にたくさん詰めるかという、その中での素子の、絶縁体の長さといいますが、それをいかに小さくするかが課題だったわけです。地球シミュレータの素子は150ナノメートルです。それでチップの演算能力を高くする。それが今はもう65ナノですか、それくらいまでできています。次に45ナノをつくろうとしています。そういう方向はアメリカでは、余り重要ではないというこ

とを認識しております。アメリカのメーカーはどうかということをしているかというと、それをやっても、どんどん小さくなれば物すごく熱が発生する。その発生する熱をどう処理するかの方がほとんど不可能になってきている。だから、そちらの方向で詰めるという。一つの演算機的能力をいかにデンスにするかという、LSI化するかということはどうやめると。今で十分である、ではどうして性能を上げていくかということで、別の方向をとろうとしています。どうしているかという、今はもうすべて一つのチップの中に、先ほどいいました演算とメモリと通信、それをみんなパックにして入れてしまおうとしています。そういう方向に完全にしております。

これはドンガラさんの出しているグラフですが、一つの中に、今まではシングルコアだった、それを二つのファンクションを入れたものを一つのチップにする。あるいは現在四つがもう出てきています。それを8つにすることを考えています。これも無限にはいかないわけですが、こういう形で、セミコンをどれだけ小さくするかということは、もちろん最高のものを使うわけですが、そこにのみ活路を見出すのではなく、チップの中に、先ほどいった三つのファンクションをいかにコンパクトに詰めていくかという、そういう方向に進んでいます。こういうことに関して日本の人

はわりあい鈍感であると、前から思っていました。アメリカ、ヨーロッパに関しては完全にこの方向にいているというのが事実であるということ認識すべきです。恐らく日本の中で一番最初に皆さんがそういう情報を得られたグループであると自負していただいてもいいと思います。コアに関してもこういう方向に今進もうとしているという、こういうことをむしろここで知っていただくことが一番大切だと思い、かなり時間をとってしました。

スライド6

科学的予測って本当に出来るのか？

自然の営みは確立論に従って生起しているのではない。

自然の営みは自然の法則に則って生起している。

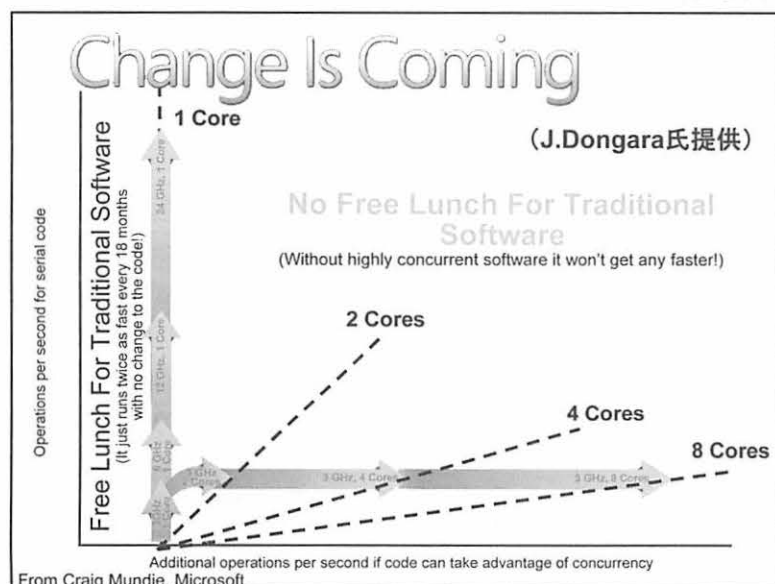
自然現象は厳密には「一期一会」である。

自然の営みの法則は20世紀までの西洋近代科学でほぼ解明されている。

従って、基本的には、その法則を解く手段があれば自然の営みは科学的に予測することができる。

ここから本論で、先ほどの、なぜ雨の予測がなかなか当たらないのかという話になるわけですが、科学的な予想が本当にできるのかということですが、自然界というものをみてみますと、これは確率論で動いているのではない。現在の気象庁はどちらかというと確率論で予測しています。た

スライド5



んのパラメータ、いろんな異なったデータで、シミュレーションして、そして平均してやるという形をとっているわけです。これは非常にやりやすい方法です。やりやすいことが自然をあらわしているわけではないのです。確率論に沿って自然法則が動いているわけではない。自然法則というのは一期一会であります。一回きりのものです。台風であっても一回きり。ことしの台風3号は一回しかありませんし、次の4号が来ればそれも一回きりなわけです。そういう意味では、確率論によるという考え方をもう捨ててもいい時代が来て

います。それぐらい、シミュレータというものの性能はよくなってきているということです。初期条件は大事ですが、初期条件という観測をしっかりと、シミュレーションの解像度よりも詳細な観測をして、そのデータを与えてシミュレーションを行う。そういう形にこれからは変えていくべきだろうと私自身は思っております。

だから観測、即ち最初に与えるべき初期条件とシステムの発展を記述する法則・原理、この二つを与えることによって予測は原理的には可能であります。もちろん、まだディスカバーされていない法則があれば、その部分は正しく解くことはできないわけで、そういう意味でのアンビグイティというのは必ず残りますが、できるだけ現実に近い形で物事の予測をすることができる。これがこれからの科学の一つのあり方であろうと思います。これまでの科学というのは、できるだけ単純化して、そして過去をみていく、いわゆる観測主導型ですから、例えば望遠鏡をみても、これは絶対未来がみえないわけで、必ず過去になるわけです。百数十億年前をみて、宇宙の成り立ちをみていこうという考え方が今までの科学のあり方でした。

それに対して未来をみていく道具は、残念ながら西欧科学はつくってこなかったわけです。要するに複雑であるからわからない。わからないから、わかりやすくするためにできるだけシステム全体をみるのではなく、全体を要素に分けていきましよう。で、わかるところまで要素に分けて、その一つずつの法則性をみていきましょう。単純化し、わかりやすくし、その基礎的な法則を見出していましようというのが今までの西欧科学のあり方だったわけです。

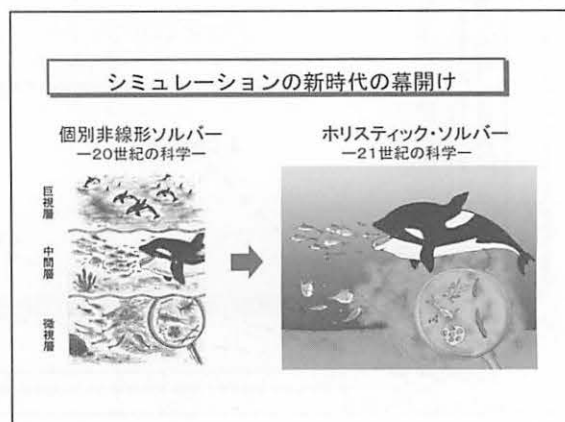
現在までの宇宙の成り立ちは、ビッグバンから、素粒子の宇宙から現在の宇宙までは大体法則は見出された。しかし、未来というものはこれが複雑に絡み合って、デカルト的に考えると、人間が、こんな複雑なものは解けないから、できるだけ要素に還元して、そこから基本的なものだけを取り出していこうという方式であった。20世紀までにその行き着くところまでいったと思います。ほとんどの基礎方程式がわかった。では、次は何を

するのか。理科離れが進んだのは恐らく、もう科学は行き着くところまでいった。ここにおられるほとんどの方は、まだよき時代で、科学がまだまだ完成していなかった。我々は容易に問題を見つけていろいろと楽しんで論文を書いたり、あるいはものをつくって仕事できたわけですが、現在の若い人たちは、小さなもの、余りおいしくないものまでみんなほじくって食べてしまったから、ほとんどなくなっているわけです。だから新しいものをやろうとしたらおいしいものが見当たらない。その辺が一つの科学離れの原因ではないかと私は思っているわけです。現在から過去に向かった問題は、特にサイエンティフィックな問題はほとんどわかってしまった。

残された問題は、未来がどうなるかを知ることだと思います。未来を予測する時代になったのではないのでしょうか。そうするとこれは、複雑なものが絡み合った形で発展していくわけで、社会もそうだし、宇宙もそうだし、もちろん地球もそうだし、生命もそうだし、そういう意味では発展していくものをみられる道具、それはシミュレータしかない。そのシミュレータが今までは小さ過ぎて役に立たなかった。そして一時はあきらめていたのが、地球シミュレータができて全体を扱えるから、未来をみていく望遠鏡、道具というものを我々人間がやっと手にすることができた。そういう意味では、日本が次の新しい科学をつくっていく使命を負っていると思っています。そういう時代に来たというのが現在であると思います。

そういう意味で、シミュレータというのは未来

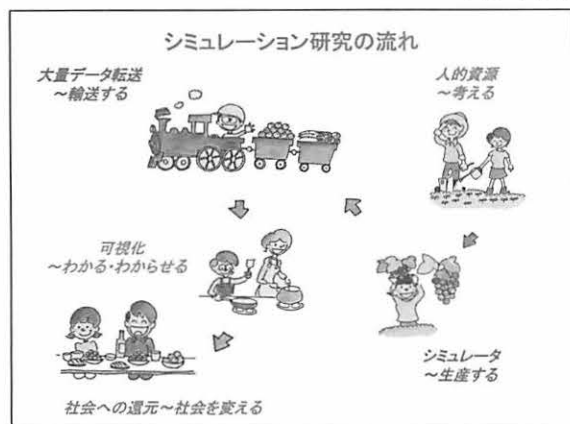
スライド7



の社会を革命するだろうと考えて、きょうのタイトルをつけました。先ほどいいましたように、過去は、シミュレーションをやるにしても、部分だけを取り出して、その部分だけを追跡していく。わからないところはみんな境界条件、初期条件といったところに押し込んでしまう、そういう方法をやっていたわけです。全体のシステムのフィードバック、ミクロからマクロ、マクロからミクロが織り成していく自然というものを扱うのが本来のシミュレーション。地球シミュレータはその未来のシミュレーションの役割に向かう最初のシミュレータになったわけです。そういう道具ができ、シミュレーションに対する考え方が変わってきた。現在はちょうどそのターニングポイントにあります。

スライド8はシミュレーションの流れを書いた図です。シミュレーションで一番大事なのは、人

スライド8

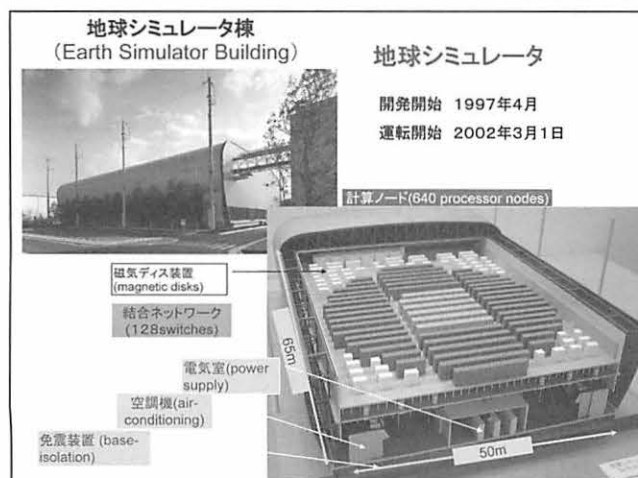


間は何をやりたいかということを決め、何を求めたいか、それに対していろいろ計画を立てることです。それがプログラミングだと思うんですが、そのプログラミングを与えて、例えばブドウをつくりたいとするならば、ブドウをつくる土壌はどのようなもので、いつごろに種をまいて水をまいてと、そういうことを決めるのがプログラミングで、それに従ってコンピュータがブドウをつくってくれる。そのできたブドウ（データ）をそのまま置いておくと次の新しい、今度はスイカをつくりたいと思っても、もうコンピュータが満杯ですから、そのデータをコンピュータから出してやらないといけない。そういう意味で、データをいかに早く外に出すか。そしてコンピュータは空っぽにして、次の新しい食べ物をつくってやる。別に食べ物でなくてもほかでもいいです。でも、データを一時倉庫に蓄えていけば、ここも糞詰まりになっていきますから、このデータを始末してやらないといけない。どんどんデータがたまってきますから、例えばインターネットシステムといったものを使ってデータを料理してもらわないといけない。この料理法がビジュアライゼーションです。こういうデータを使っておいしいものをつくってやる。それを国民の皆さんに、おいしいですからどうぞ食べてくださいと差し出す、そういう形で提供することによって社会に還元していくことができる。これが本当のシミュレーションの行うべき、やっている人たちの考えるべき、常に頭に置くべきプロセスだろうと思っております。

ここで初めて地球シミュレータが出てくるわけですが（スライド9）、地球シミュレータの建物が左の上に、右下にはその内部がかいてあります。65メートル、50メートル、17メートルという、今からいけばこんな大きなものは要りませんが、1997年当時はこういったものに入れないとできないようなコンピュータでした。我々が欲しい性能を得るためにはこれぐらいの大きさが必要でした。

地球シミュレータですが、ここにありますが計算をするところ。これはベクターマシンですが、ベクタープロセッサノードを640個、一つではできないので、毎年40テラ

スライド9



を出したいということで640個つないで、例えばこの辺のプロセッサノードは日本付近の気候の計算をしている。この辺はアメリカ、この辺はヨーロッパの計算をしている。でも、みんな関連していますから、お互いにデータを時々刻々、タイムステップごとに交換してやる。そのデータ交換を一番速くするために、交換スイッチ部を真ん中に置いて、プロセッサノードとの距離をできるだけ短くする。光の速さも演算のスピードに比べて非常に遅いですから、できるだけこれを短くしてやる。レイテンシーといいます、送られてきたデータを計算機の認識できるフォーマットに変えてやるために時間がかかる。レイテンシーなどもみんな含めて、できるだけデータの交換を速くするような形でデータ交換スイッチシステムができております。非常に交換が速くいくと、その演算に要する時間だけで仕事が終わる。そして出てきたデータを一時貯蔵庫（磁気ディスク等）に送り込んでやる。実際に2.5ペタバイトの外部記憶装置を我々はもっていますが、そこにどんどんデータを蓄えていく。

しかし、データを蓄えていっても、そのデータを外に取り出してくれないと、ここもやがて糞詰まりになりますから、外からここにアクセスをして自由にデータをとれるように工夫しています。この地球シミュレータから大容量外部記憶装置（MDPS）をデタッチして、地球シミュレータの介入なしで、LANを通してここに入ってきて、そしてデータを解析して、MDPSが満杯にならないように工夫している。ここに示されている地下部には電源、あるいは送風機が入っています。

先ほどいいました地球シミュレータの威力というのは社会のあらゆる面で変革をもたらす可能性を秘めています。非常に役立つということで、英国首相のブレアさんが来日した折（2003年）に、地球シミュレータセンターと共同研究しましょうといって、彼が帰った後でかなり日英協力のためのお金が出まして、現在、日本に3人の研究者が常駐しております。

これは地球シミュレータがいかにほかに比べていいかという話ですが、具体的には、2002年の初めにやったシミュレーションは、全地球を10

スライド10

英国首相及び外務大臣の日英共同研究に関する政府声明

ブレア首相（2003年7月）

気候モデリング分野の両国の専門家は、より正確な気候変動及びその影響の予測のために、日本国の地球シミュレータを共同で活用している。我々は、この発意を「未来技術に関する日英合同計画」として継続することを決定した。（後略）



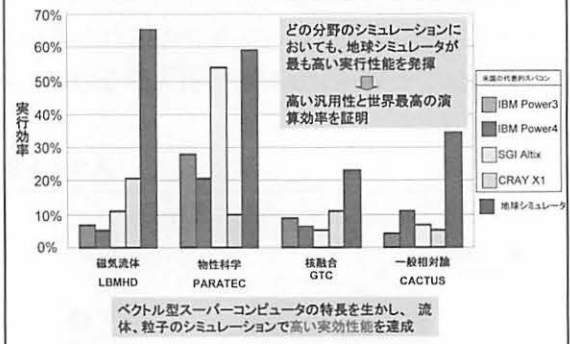
ストロー外務大臣（2005年1月）

我々は、気候変動科学に関する新しい大きな日英協力を今日ここに立ち上げる。（中略）

日本の地球シミュレータは、巨大にして複雑な地球システムのモデルを空前の正確さで取り扱える世界で最も強力なコンピュータの一つである。気候変動モデルの真の向上をもたらすと同時に、我々が直面している問題をより深く理解しなければいけない。このことによる恩恵は、我々二国を遙かに越えたものとなるだろう。（後略）

スライド11

米国立エネルギー研究科学コンピューティングセンターによる調査
各種シミュレーションプログラムを用いたベンチマークテスト



キロメートル間隔のメッシュで区切って、即ち、赤道方向には3,600メッシュ、そして南北に関してはその半分、1,800、そして高さ方向には100層ぐらい、これぐらいの解像度でシミュレーションが十分行えるだけの容量をもっている。

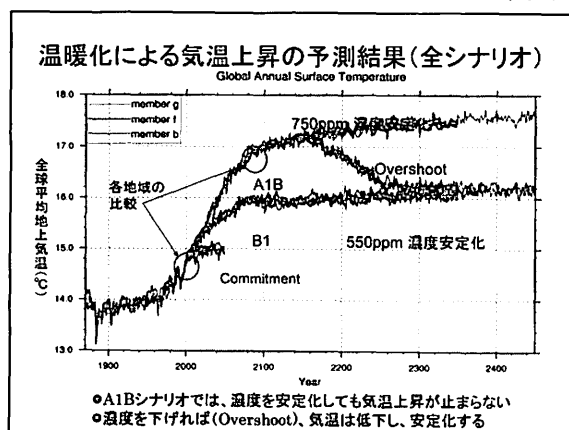
（スライド 省略）

実行したシミュレーションですが、余り詳述はしませんが、一つだけ大気のシミュレーションを示しますと、人工衛星でみるよりもきれいに大気の動きが再現されている。これは実際には雲ではなくて降水量を示しています。これは太平洋のあたりで、この辺に台風が起こって、これは4年前のシミュレーション結果ですが、台風が目が出て、最後はジェット気流で流されていきます。これは今の全球シミュレーションの日本近海部分を拡大したのですが、台風が起こって、これが九州を襲うというところがはっきりと見えています。これは二次元表示ですが、実際には三次元でやって

いますよということを示すために、三次元で台風がどうなっているかを示したのがこのアニメーションです。海面からずっと垂直に、コマのような形で台風が形成されているのがわかる。こういう立体的な構造というのはシミュレーションで初めて見ることができます。

そのほか海洋大循環とかいろいろやっています。時間の関係でそういう結果については割愛しますが、シミュレーションのみが未来の詳細を科学的にみることができる道具であるとわかっていただければと思います。したがって、地球シミュレータというものが、SFの世界であった未来の世界をやっと“サイエンスリアリティ”の時代にしたといえます。“サイエンス”とつけているのは非常に重要で、本当のリアリティではありません。やはりサイエンスというのはどこか未熟、欠けているところが必ずありますから、そういう意味では、リアリティだけでも、科学的なリアリティのものとして未来をみることができるようにした、そういう非常に重要な役割をしています。

スライド12



温暖化がどうなるかという話も、このような形で1900年から2400年まで計算して、どれぐらい炭酸ガス量を出せばどうなるかというシミュレーション結果も出ています。現在この辺ですが、ここから550ppmに2100年になって、そこでとめるというシナリオと、750ppmまでいってとめるというシナリオでやってみると、このような形で全地球の温暖化が起こりますよということは計算できる。しかし、これをそのまま鵜呑みにしてもら

っては困ります。テレビ等ではかなり鵜呑みにして、ツバルという島が沈みますよとか、センセーションを起こしていますが、実はまだ地球シミュレータといえども、私にとっては、シミュレーションとしてはサイエンスリアリティよりはまだサイエンスフィクションに近いのではないかと思います。

といいますのは、これはせいぜい100キロか200キロぐらいのメッシュ間隔でやっております。これは電中研とNCARとの共同作業の結果ですが、台風のような現象などがみんな抜け落ちているわけです。実際の温度上昇を知るためには、やはり台風がどうなっていくかということを本当は解かないといけない。でも、それは全部抜けているわけです。

植生も抜けています。木や森が炭酸ガスを吸ってという話とか、地表面で本当にどれだけ水が吸われて、どれだけ川に流れていくかということに関しては非常に粗っぱい、いわゆるパラメータモデルを使っている。だから、アンビギュイティが物すごいんです。だから、ここでシミュレーションした条件のもとで、炭酸ガスをこれぐらい年々ふやしていくとどうなりますかということに対してはかなり不確が残る。チームによって皆答えが違います。これは電中研だとせいぜい1度とか2度しか上がってないけれど、東大の気象センターがやると4～5度上がるわけです。チームによって、そういう大気の運動だけを解いているといっても非常に違うわけで、そういうことも考えますと、余り新聞等に発表して、NHKなどでやってもらって脅かす手に使う、サイエンティストがそれに乗ってはいけないと思うわけです。こういう条件を与えたときはこうなります、こういうモデルでやったときはこうなりますということに関しては、かなりはっきりしたことを公表しておかないと危険です。ということで、余りこの辺はこれ以上言わないことにします。

地震に関しても、かなりいろいろなシミュレーションができるようになり、震源が与えられると、何秒後にどのあたりにどれぐらいの震度の地震が起こるかという話はかなりはっきりしてきています。次頁スライド13は東海と南海の地震がお互

スライド13



いに誘発しながら起こったときにどうなるかというものです。茶色が強いほど大きな揺れが起きているのですが、このような形で地震波が何十秒後にはどうなりますということがわかると防災にも役立ちます。

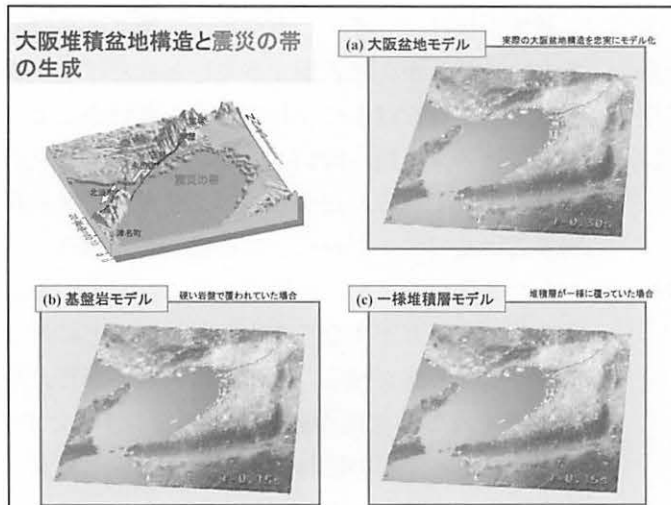
スライド14は阪神・淡路大地震。ここにフォールト（断層）があって、フォールトに沿って地震波は出ていきますが、それが大阪や神戸をどういう形で蹂躪していったかということがこれからかなりはつきりわかってきます。

スライド15は東京で直下の地震が、マグニチュード7ぐらいの地震が起こるとどうなるかということで、これは房総半島ですが、この青く塗ったところは実は堆積層で、緑に塗ったところは岩石層です。これをみていただくと、地震波というのは完全に岩石層ではね返って、堆積層に完全に集中してくる。そういう性格をもっているということがこれで一目瞭然、わかっていただけるのではないのでしょうか。だから、こういう都会に住んでいると非常に危ない、その危ないところに大体人類は住んでいるのですが、熊谷というところは岩石層です。

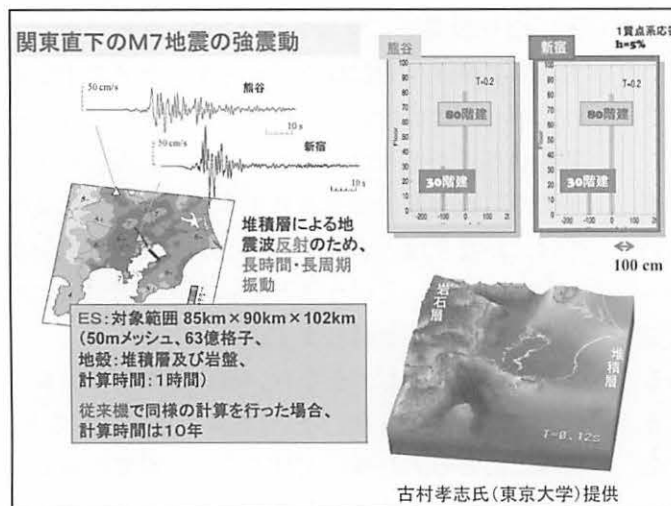
80階のビルが熊谷に建っていて、今のマグニチュード7の地震が起こると、50センチちょっと超えますが、大体それぐらいの揺れになります。同じもので新宿はどうなるかというと、2メートルぐらい動くわけです。だから、高いものは都心に建ててはいけないというのですが、皆さんは恐いところに高いのを建てているというのが現実ではないでしょうか。

そのほかいろいろな異常気象もどれぐらい予測できるのかとお思いになれるでしょう。例えば、おとし、今から2年前、東京で40度ぐらいになったのを覚えておられると思います。それはどうして起こるかということは、全地球のシミュレーションをやることによって、5日前からは大体予測できます。ここが日本、ここが地中海です。アラビア半島、この辺である異常な

スライド14



スライド15



高気圧が起こると、それがジェット気流に乗って、高気圧、低気圧、これがどんどん日本にやってきます。これは5日前からシミュレーションしたわけですが、地中海で出た異常高気圧がこういうジェット気流に乗って、チベット高気圧と太

平洋高気圧が一緒になり、非常に大きな高気圧になって日本を襲ってくる。その結果、運ばれた温かいやつがこの高い山の東側でフェーン現象を起こして非常に高い温度をこしらえるということです。これは気象庁の観測の7月20日かな、この5

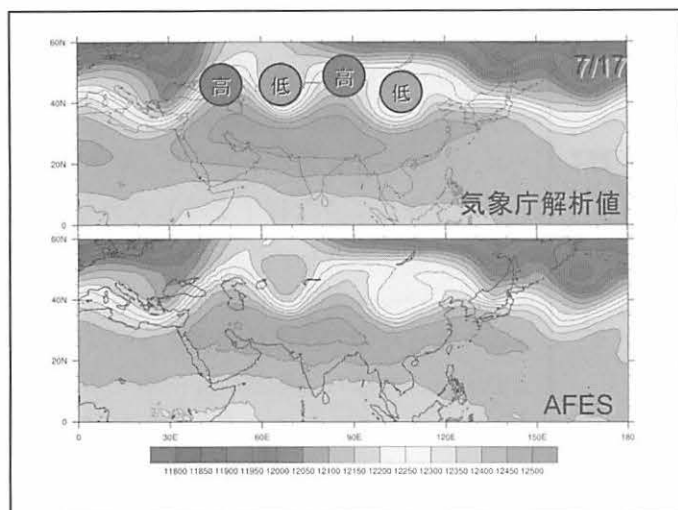
日前からシミュレーションをやったわけですが、シミュレーションの結果が上で、下が実際に観測された7月20日の気温図です。こういうところに40度近いのが出てくる。それに対してシミュレーションもちゃんと同じところに40度近いので出てきますよと、5日前でどの辺にこういった異常が起こるかということが、かなりはっきりとわかることになります。

そのほかいろいろなシミュレーションコードもこしらえております。

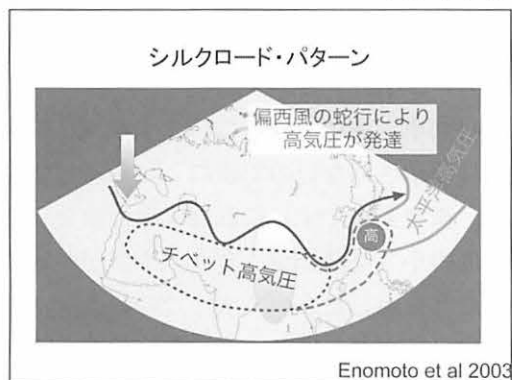
台風に関しても、5日ぐらい前からシミュレーションして、黒点が実際に、赤点がシミュレーションですが、ある程度の誤差はありますが、5日前から、かなりの確度でシミュレーション予測ができるような状況になっています。

次頁スライド20は、今のシミュレーションの結果として分解能依存性をみたわけですが、全地球を5.5キロ平均で覆ったときと1キロぐらいでやったときです。これはたしか3日前のシミュレーションで、台風に伴ってどこに大雨が降るかとい

スライド16

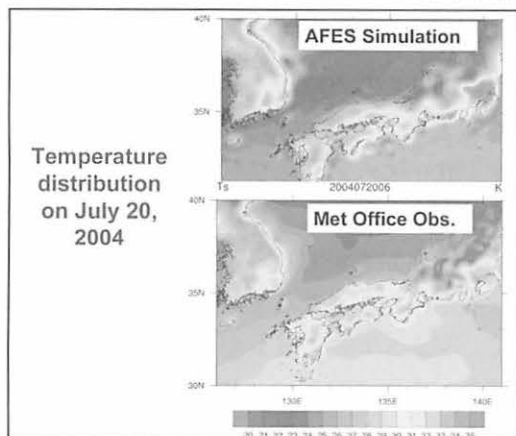


スライド17

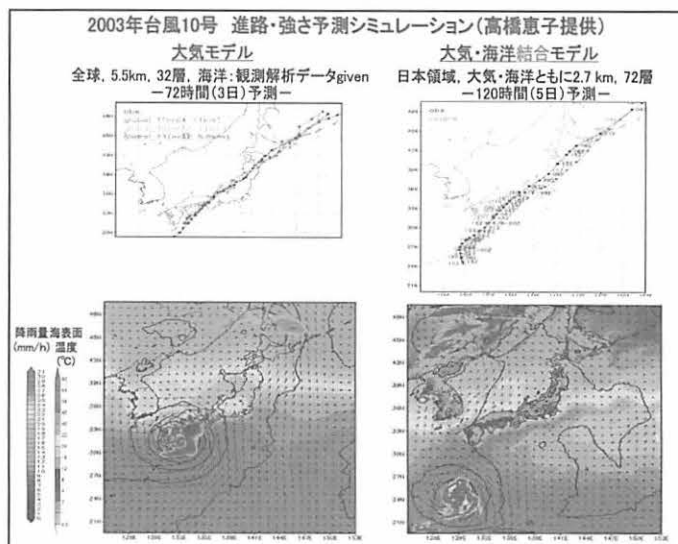


Enomoto et al 2003

スライド18



スライド19

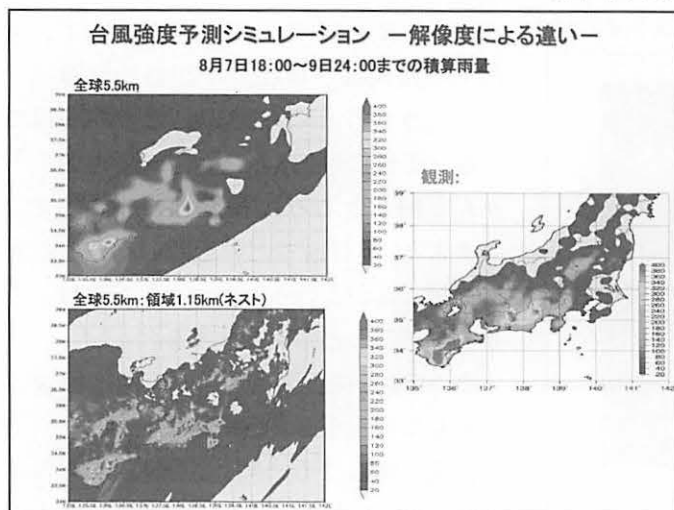


う結果です。観測結果は右の図です。5.5キロの分解能で全地球でやったときには大体同じようなところに同じような雨が降る。量は少し違いますが、大体よく一致している。これを1キロぐらい

でやりますと、現在の観測精度に比べればはるかに狭い範囲で、どこに大雨が降るかということが台風の3日ぐらい前から予測ができることを示しています。

(動画 省略)

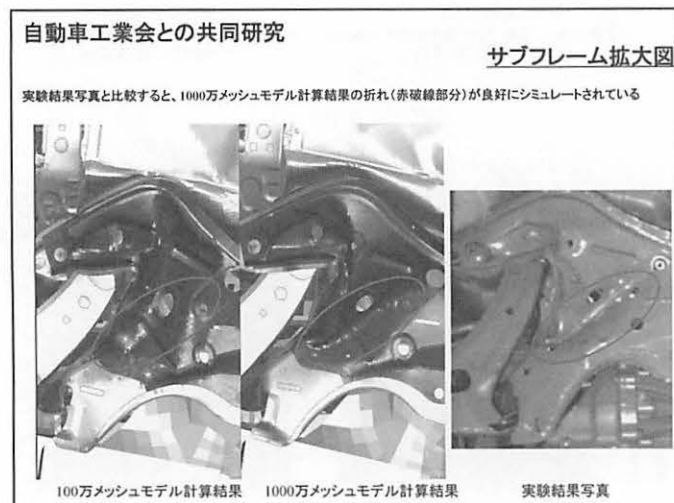
スライド20



スライド21



スライド22



そのほか、興味深いのでは、カトリーナももちろんやっております。別に全地球ですからどこをやってもいいわけで、これはカトリーナがユカタン半島に入ってきてどうなっていくかというものです。この辺がニューオーリンズですが、ニューオーリンズに上陸してきた様子を示しております。本当はもっとスムーズにアニメーションを作っているんですが、私の手元にあるのがこれだったので、これだけをもってきたのです。これはちょうどニューオーリンズに上陸したときの状態をぐるぐると回して見せておりますが、全地球の観測データさえ与えればどの台風もできるわけです。カ

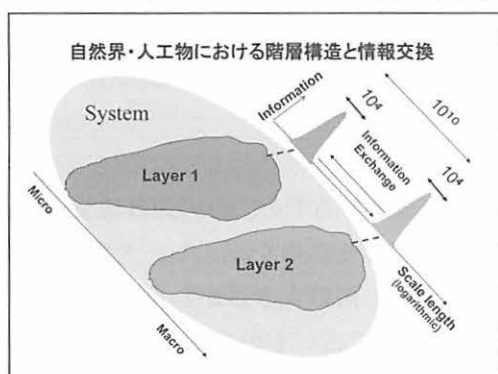
トリーナもこういったような形で予測シミュレーションができますということを示したものです。だから、これからもちろん、世界中の台風予測ができるわけです。

これは自動車工業会でやっていますが、この図しか我々に開示されないで常にこれを示しておりますが、衝突実験です。これは実車の衝突したところの底の小さな部分が、どういう傷がついたかということを示したものです。この白くなった

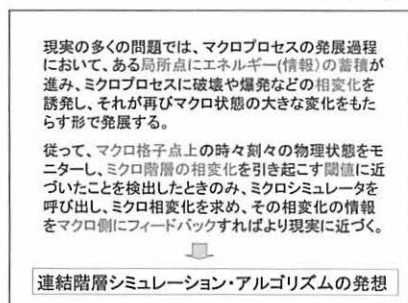
のは傷ですが、同じような条件でシミュレーションしています。従来のシミュレータですと100万メッシュくらいしかできなかったのが、地球シミュレータですと簡単に数千万メッシュでもできます。一応1,000万、あるいは500万メッシュ以上になってくるとかなりリアリティに近づいてきます。100万メッシュでやったのでは全くもとのとは違うところに傷がつくということです。小林先生がおられますから余り言うところが出るかもしれませんが、これで初めて、シミュレーションでかなり分解能を上げると衝突に対してデザインができるぐらいのものになってきますよ、ということが

明らかになりました。これをやる前までは自動車工業会も大分悲観的で、ひょっとしたら1億メッシュでやっても実測と全然違うのではないかと。そうすればもうシミュレーションはだめだという否定を与えることになるのではと、それを恐れていたみたいですが、これは希望が少しもてきたということを示す図です。ナノの話もできますし、あるいはバイオの話もできます。

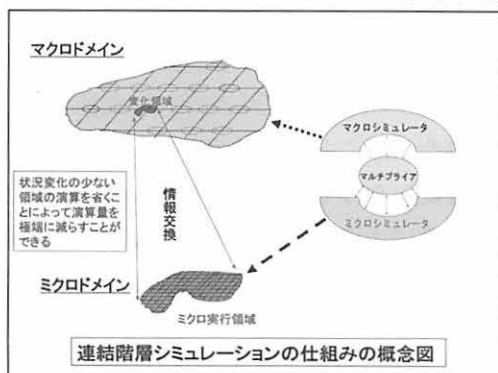
スライド23



スライド24



スライド25



もうそろそろ終わるんですが、では地球シミュレータは本当にあらゆるシステムの未来をみていけるのかということになるわけですが、実はそれ

はノーです。といいますのは、例えば台風とか、気候をみても、ナビアストークス方程式でしか解いていないんです。流体でしか解いていない。それはたとえ5キロメッシュという高分解能でシミュレーションしたとしても、5キロメッシュの内部でどうなっているかということはみんな網の目から落ちてしまっていますから、それより小さいスケールは全て因果関係に従って解いていけないわけです。しかし、その辺が実際には重要な働きをしているのです。

例えば雲というのはどういうものかという、あんなワーツとしたものが出てきているわけではなく、みんな水滴の集まりでできている。水滴の大きさはどうかというと、海から蒸発したときはミクロンぐらい、 10^{-6} メートルぐらい、あるいは 10^{-7} メートルぐらいの大きさです。キロメートルというものではなくて、はるかに小さい。そしてそれがナビアストークスででてくる上昇気流に乗って温度が下がってくると凝結してくる。凝結という物理法則に従って水滴がどんどん大きくなっていく。凝結しながらそういうものがふらふらいっぱいあっちこちにいますから、お互いにつかり合って融合してもっと大きくなっていく。従来のシミュレーションではそういう融合プロセスとか、凝結プロセスは解いていません。凝結・衝突・融合プロセスを通して水滴はミリメートル程に成長する。ミリ以上に大きくなると、重力でみんな地上・海上に落ちていく。雨になるのです。だから、雨のプロセスはミクロンぐらいからミリメートルぐらいのスケールを扱えばいいことになります。10センチの雨滴は余りみたことない、だから、そこまで解く必要はないわけです。雨のできるプロセスはせいぜい 10^{-7} から 10^2 メートルぐらいなのです。従って 10^4 ぐらいのスケールの違いをカバーすれば大体雲や雨の形成シミュレーションができるのです。

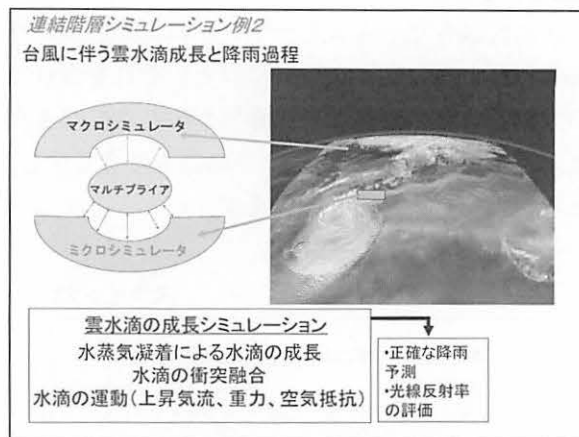
一方、対流は幾らでも分解能を小さくできますが、普通ですと、数キロメートルぐらいから地球の半径ぐらいまで、地球の大きさぐらいまでやればいいいわけです。それは大体 10^4 ぐらいのスケールの大きさです。地球1周が4万キロぐらいですから、それに対して何メッシュぐらいとればい

かということで最低のリゾリューションがきまる。そうすると、ナビアストークスは 10^4 ぐらいのスケールで解けるコンピュータがあればよい。そして雨も 10^4 ぐらいのスケールで解けるコンピュータがあれば解ける。ミリメートルから100メートルの間はほとんど有用な情報がないのです。だから解かなくてよいのです。自然界はみんなこういうふうに分かれているんだと思うのです。こんなところは解かなくていいのだという時空のスケール領域が存在する。だから、ここを解き、ここを解いて、そしてお互いにこれらの間の必要な情報だけ交換すれば、自然界の重要な営みはシミュレーションできる。こちらとこちらは無関係ではなく、ミクロ側に例えば相転移が起こるとか、あるいはトポロジカルな変化が起こるとマクロ側にも影響を及ぼすということで、そういう情報だけを交換してやれば、こちらの状況の中に入れてやれば自然の営みを模擬できるわけです。だから、そういう意味での情報交換をやればいいではないかということになります。

地震にしてもそうです。マントル対流で、プレートが沈み込んでエネルギーが摩擦で溜まる。溜まり過ぎるとローカルにその岩石がつぶれる。それが地震のあらわれになりますから、この部分は岩石の破壊ミクロプロセスを解けばいい。マントルはマントル対流というマクロプロセスを解けばいいということで、このようなマクロシミュレータとミクロシミュレータを合わせるということで、我々はいろんなシミュレーション、新しいアルゴリズムを開発しています。例えばマクロシミュレーションで大気大循環を解く、そして低気圧のところだけ取り出し、水蒸気が上昇し雲をつくり、雨が降らないところはミクロなプロセスをミクロシミュレータでシミュレーションを並行して行う。物すごい低気圧のところだけをミクロなシミュレーションの中からモニターして選び出し、雨の核が上昇気流に乗って雲となってやがて雨滴となる。そのミクロな雲のプロセスを解けばいい。雲ができ、それが大きく成長すれば、それ自体が太陽の熱を反射したり吸収したりして気候条件が変えられる。それをマクロシミュレーションの方に入れてやる。そういうプロセスを繰り返してや

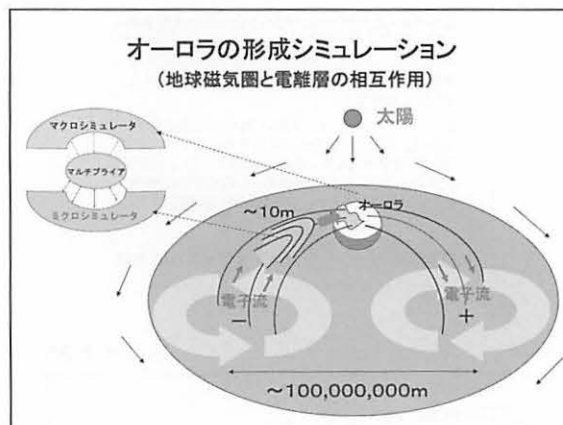
ればいいということで、先ほどの台風もより現実的な形で予測できる。

スライド26



台風ができている中の、この辺は低気圧で、それを取り出してミクロシミュレータで雲の形成、雨の降る場所、雨の大きさがわかることになる。(これは間違って古いものをもってきて、このパソコンに結合されていませんでした。すみません。)

スライド27



別の例を示すことにします。オーロラというのは、太陽からやってきた太陽風という風（プラズマ）が非常に大きなスケール、1億メートルのスケールが地球の磁場にぶつかって地球磁気圏に大きな対流を起こします。磁力線を横切ってこういう風にプラズマが動きますから、発電が起こり、磁力線に沿って地表面（電離層）に向かってディスチャージします。そのディスチャージの途中で電子がローカルな高さのところで、電子と周りにある陽子、プロトンとの間に相互作用が非常に小

さい領域のところで起こって、そこで物すごいショックがおきてデイスチャージする電子の加速が起こる、ということが理論的にわかります。これは数メートル程度の電子とイオンというミクロな粒子の相互作用プロセスで、ミクロシミュレーションによってのみ解ける。磁気圏から降ってきた電子、それではオーロラをつくらないのですが、これが加速されて1キロボルトとか10キロボルトぐらいに加速されます。これらの加速された電子が大気にぶつかって、酸素や窒素をエキサイトする。それでオーロラが光る。そしてオーロラが光れば電離層の密度が変わって電気抵抗が変わってくる。すると、全体の大きなマクロな対流、電流系の状況も変わる。そういうマクロプロセスとミクロプロセスのお互いのフィードバック、相互作用を解いてやった結果が次に示すアニメーションです。

スライド28



地球シミュレータを二つに分けて、一方がマクロ側、他方がミクロ側というふうにしてシミュレーションしてやりますと、こういった形で地上からオーロラが光るのがいかにも現実のオーロラの如く再現できる。赤くなっているのは非常に高いエネルギーの粒子がずうっとできて、低いところで酸素や窒素とぶつかる。上の方は比較的まだエネルギーが高いやつがエキサイトして緑色になる。このシミュレーションには実はパラメータは使ってないわけです。ちゃんとミクロなプラズマの動きを解き、マクロなプラズマの動きも解いています。人工衛星からみるとこれが地球で、ここが北極、先ほどはこの辺から空を見上げたんです

が、人工衛星から今のオーロラがどういうふうになってくるかという、その動きをみています。このような形で、ここにオーロラが光ったりあちちで光ったりという、そういうものが出てくるといっても、いわゆるパラメータリゼーションを使わずに、すべて物理現象をきちんと物理法則に従って解いて、この場合は、一番短いのは1メートル、一番長いのは1億メートルということで、1メートルから1億メートル、 10^8 か 10^9 ぐらいのスケールを全部解けたということになります。しかも三次元であるということ。だから実際にデータの無いところも解いていると考えれば、 10^9 の3乗、三次元ですから、そうすると 10^{30} ぐらいの格子点の変数を解いたのと同じぐらいのものができると、というのがこれでわかっていただけたと思います。弾性体の破壊だとか、あるいは燃焼、実際にケミカルリアクションも燃焼流体が動いていくのも、そしてそこからピストンを動かしていくのも、みんなひっくり回して一つのコンピュータシステムで解く、そういうアルゴリズムをつくっております。

こういうことをやっていきますと、恐らく人間の価値観は変わってくるだろうと。これまでの我々の価値観は西欧科学で毒されております。その西欧科学はできるだけ単純化する。複雑なものは自分の価値判断、自分の知識、自分の都合に基づいて、枝葉と思うものは切り捨てていく。そして物事の原因はすべて過去に求めていく。西洋科学の基本的な考え方は線形的な考え方です。即ち物事は微分で考える。現在物事は上昇傾向にあるか下降傾向にあるのか、そういう判断基準だけでその物事を考えていく。

スライド29

安心を与える日常語の魔力

安定、平衡、明瞭、的確、規則
秩序、等々、

不安定、非平衡、不明瞭、不的確、不規則
無秩序、等々、

言葉をみても、今までの科学の考え方は、安定で、平衡なことが自然だとする。大体、安定点、平衡点というものに目をつけて、そこからちょっとずれるという考え方、このような考え方ですが、実際の物事というのは必ず不安定で、非平衡で、不明瞭で、不確定で、不規則で、無秩序なものです。だから、日常の中に、これはunstable、これはnonequilibrium、これはunclearといいます。そういうunとかnonとかつけているということは、ついていないのが常態で、ついてるのが異常態を意味します。ところが、実際の自然界はそうではない。ついてるのが常態で、ついていないのが異常態。安定で平衡なというのは自然界には厳密にはないんです。でも、科学者は平衡・安定な解を探そうとする。

パラダイムが違っていただけで、日本人は、鴨長明がいうように、常にものは流れているんだと。一期一会といいますか、決してもののものには会わない。よどみに浮かぼうたかたは、かつ消えかつ結んでいるんだ、こういう考え方というのが科学には入らなかったわけです。でも、シミュレーションができるようになるとそれができる。そういう意味では、複雑なものはそのままリアリティ、そして未来というものです。そして、この未来を予測するということは積分です。微分と積分が逆になってしまいましたけれども、恐らく、これがこれからのビヨンド・アースシミュレータ、地球シミュレータを超えたシミュレータができることによって、複雑なもの、未来を我々が常時扱えるようになってくる。そうすれば、我々の考え方というのは、今まで我々の心の中に巣くっていた西欧的考え方から、恐らく東洋的といいますか、日本的考え方が中心になったもののパラダイム、科学のパラダイムができてくるのではないかと期待しています。

少し長くなりましたが、以上でございます。ありがとうございました（拍手）。

司 会 ありがとうございました。

4年ちょっとの間のお仕事の成果をお話いただきました。さらに未来の可能性というものについてもお話しいただいたわけですが、我々を取り巻くこの自然現象等がこういったことで解析、予

測ができるようになると大変にありがたいですし、経済的にも助かるのではないかと思います。

時間がありますのでご質問をお受けしたいと存じます。

小林敏雄 工学アカデミーの広報担当をしております小林でございます。大変おもしろい話をありがとうございました。今、地球シミュレータのたくさんの成果が出てきて、産業界にも使われ始めたということで大変うれしいことだと思います。

たくさん質問があるんですが、そのうち幾つかだけ。地球シミュレータはもともと汎用シミュレータとしてやはり開発されてきたと思った方がよろしいのでしょうか。

佐 藤 一つずつお答えした方がいいですね。

もともと三好さんが考えたのはジェネラル・パーパスです。別にどの分野でもよかったと思います。お金の出るところを探しておられた。たまたま1997年に京都会議が開かれ、その1年ぐらい前に地球温暖化というのが政治問題化した。そこに目をつけて気候問題という、グローバルな温暖化をやるということを旗印にすれば金が出てくるのではないかと考えた。ちょうど、第一次科学技術基本計画が出され、環境分野が入っていた。その環境のお金を使ってというのであれば開発できるのではと考えた。お金が来たのは完全に環境分野ということで、環境に特化したコンピュータだという考えをもっておられる方もおられるし、そうでないと思っておられる人も少しはおられると思います。

小 林 そうですね。多くの方は、地球シミュレータという地球の方に非常に重きを置かれて、多分、ユーザーの中でも結構環境の予測問題等には入りやすいけれども、ほかの分野ではなかなか入りづらいと最初思っておられたような感じがしています。

佐 藤 私自身は環境屋さんではなかったので、これはジェネラル・パーパスではないかというので大分苦労しました。それで広くいろいろな分野にも、産業界まで入れたのです。実は環境の人たちからブーイングで、おまえはなぜほかのところにやるんだと相当しかられました。私自身は、税

金でできたのだから、何も環境税でできたわけではない、というので大分抵抗して。だから、私は、環境屋さんには物すごく嫌われております。

小 林 それで、次世代の地球シミュレータ、計測コンピュータが計画されているわけですが、これも基本的には汎用コンピュータということだと思うんですが、先生のお考えは、地球シミュレータよりも1桁、2桁大きい桁のコンピュータでやっぱり汎用コンピュータなんですか。

つまり、さっきおっしゃっていた、丸ごとシミュレーションができるということが一つのシミュレーションのレボリューションだというお話で、それは確かに今の地球シミュレータではまだ第一ステップというような感じがするわけです。あと2桁ぐらいやはり大きいコンピュータというのを想定して、そこでそのレボリューションが完成するだろうと、そういう概念というかお考えというか、コンセプトでしょうか。

佐 藤 いいえ、違います。違いますというのは、そういう考え方が間違っているというのが私の考え方です。大きいのは確かにいいけれども、例えばこの地球シミュレータは40テラですね。その100倍の4ペタができたとします。そうすると100倍ですね。多分メモリも100倍だと思うんです。3乗根でいいますと4ぐらいです。4倍。そうすると、地球シミュレータが 10^4 ぐらいのスケールを扱う。それに対して 4×10^4 になるということで、定量的には、今まで10キロだったのを2.5キロぐらいのメッシュで地球を覆えるという意味では確かに進歩ですが、レボリューションにはなり得ないというのが私の基本的な考え方です。単なる量的な改良にすぎない。それに対してやはりクオンタムジャンプをこせないといけない。

そうしますと、 10^4 のスケールです。恐らく 10^6 メートルぐらいの大きさの海面から蒸発した水蒸気ですね。それから地球円周の4万キロまでやろうとすると、 10^8 、 10^9 桁の違いがあるんです。すると4倍ぐらいの増強ではスケールがとても、もう問題にならない。ということで、今の地球シミュレータ、あるいは地球シミュレータの10倍ぐらいのもので、一体我々が欲しい 10^{10} ぐらいのスケールが扱えるのかという疑問がでます。 10^4 倍

ぐらいの能力が必要。即ち、 $10^4 \times 10^4$ 、 10^8 、掛け算でいかないといけない。パラレルという足し算ではもうとても無理だと。

我々が欲しいのは数倍ではなく、あるいは数百倍ではなく、数億倍ぐらいのもの。そうすると掛け算の論理しかないんです。それで私自身はできないとあきらめて、逐次大きいものを何十年かにわたって求めるかと自問したわけですね。そうしなくていいじゃないか、自然をみると。自然は階層化されている。それぞれの階層は別の物理だし別のスケールだから、地球シミュレータを二つもってきて、それぞれの階層をそれぞれのシミュレータで解かせる。二つの階層間の情報のやり取り部分だけを人間が考えればいいじゃないかというのが私のコンセプトです。そのためにはペタではなく一いや、ペタシミュレータはいいですよ。ペタはペタでもいいんですけども、そこに金をかけるよりも、今の地球シミュレータ程度のものを二つもってくればいいじゃないかと。

小 林 でも、そのためにはマルチスケール、マルチフィジックス、その辺の学問的な進展がやはり必要なわけですよ。

佐 藤 必要ないというのが私の考えです。日本のマルチスケール、マルチフィジックスという、あれは、僕はそれほど革新的なものではないと思います。なぜかという、昔の理論的な延長でやっておられるんです。例えば分子動力学の中に量子力学を入れたりとか、そのためにはどうするかという、分子動力学を中心にして、いかにクオンタムなものを取り込むかという考え方ですから、これはどうしても繰り込み理論、繰り込み的考え方なんです。それをやることはあまり大きなインパクトは得られないのではないかと。

せいぜい繰り込みだからパータベーション理論の延長です。そうすると、イブシロン、展開パラメータが1以下でないといけない。自然界はこっちとあっちの比率は1以下だということ、そういうハイラルキーはつくってない。マクロのものはマクロの中ですべて起こっているし、ミクロのものも別に相手に対して低いとか大きいとかではなくて、普通の営みをしている。そうすると、もう人間の編み出した数学では解けないというのが僕

の経験知なんです。マイクロプロセスは量子力学がわかっているではないか、マクロプロセスはレナード・ジョーンズポテンシャルがわかっているではないか。両方平行してシミュレータで解いて、その間の情報交換として何が行われているかということを見出してやる。そういうのが、理論屋さんのマルチフィジックスじゃなくて、シミュレーション屋さんのマルチフィジックスだと思うのです。

小 林 その二つの、力学系といわない方がいいかもしれませんが、あったとします。その間を結ぶものは例えばAIでもいいと。

佐 藤 AIでもいいです。

小 林 そういう考えでもいいということ。

佐 藤 そういうことです。ただ、そのときに、情報交換は恐らく、自然界をみている中で、マクロ側にしてみれば、例えば雨粒がどの位置にあるかなどというのはどうでもいいわけです。あるいは雨粒がどれぐらいの速さで運動しているかといった詳細な情報は、マクロ側にはほとんど要らない。マイクロシミュレータは雨粒になっていくプロセスだけを解いてやり、それが集まった固まりとしてどれだけ大きな密度の固まりか、ということだけをマクロシミュレータ側に与えてやればよい。雲による光の吸収だとか反射だとか、そういうものだけがマクロ側に必要だからです。マクロ側での低気圧の出てくるところだけを検出し、この辺りには出てきたぞ、次おまえの番だから、その上昇気流が起こってくるぞ、その上昇気流に乗った形で雨粒の成長をよくみろよという、そういう形でやればよいから、そんなに難しく考えなくていいだろうということです。

小 林 それは現実には、例えば交通事故のシミュレーションをやったときに、事故の状態に対して確率密度関数を与えるというやり方を当然とるわけですね。そのときに、ではその確率密度関数をどう与えるか、これが理論的にどうなのかということになるとまた元へ戻ってしまうので。

佐 藤 おっしゃる通り、確率論を取り込むと元の木阿弥になります。リアリティをみろと。そうすると、ぶつかるというためにはどれぐらい接近してきたかという情報のみ検出し、次の衝突はミ

クロシミュレーションに任せる。

小 林 だから、そこでリアリティに基づく観察結果を与えてやればいい。単純にいうとそういうことになりますね。

佐 藤 そういうことです。例えばマクロな動きをみていて、この辺とこの辺の自動車が近づいてきた。その近づいてきたあたりをみた段階で、あっ、これはクラッシュするぞと。接触した瞬間からそちらのマイクロシミュレータに移すわけです。そうするとどれぐらいつぶれたか。つぶれた段階があっちこっちに散らばったら、その状況をマクロなところに入れて、交通が止まったり、迂回路をつくったりとか、そういうふうにすればいいではないかというのが私の考えです。

小 林 そうですね。シミュレーション屋さんがもともとというマルチスケールは、必ずしも細かいメッシュ、細かいグリッドで全部計算しようというわけではなくて、その細かい計算と粗い計算との間をどう結びつけるか、そこにどういう手法を使うかであって、そこにAI的な要素を入れたとしても、それでもマルチスケールと呼んでいる方は多いようですから、マルチスケールという言葉を使われたときに、それは従来の延長であるというのは必ずしもそうではない、と僕は思っているんです。パートベーション的な、そういうようなことを必ずしも基本にはしてないと。

佐 藤 それで私は、ハードから考えろと。シミュレーションでやりたい目的を我々の頭で数学的に考えるのではなく、できるだけ機械でやれるものは機械にやらせろと、そういう考えです。だから、それに沿った形でシミュレーションする考え方が今後出てこない、こんなスケールは扱えないだろうということです。

小 林 そうですね。わかりました。ありがとうございました。もっとたくさんありますけれども、お返しいたします。

下郷太郎 今のお話に若干関連することですけれども、きょうのお話の中に初期条件とか境界条件というのは、どういうふうにして与えていらっしゃるのかを伺いたい。

佐 藤 具体的な例としては、例えば大気とか海の話か、それとも今の連結階層シミュレーション

か。

下 郷 何でも結構です。

佐 藤 例えば大気だとか海の場合、空と海とを結合したプログラムを我々ももっています。そういうのを開発しています。そうしますと、空と海のメッシュ点における初期の条件を与えないと解けないですね。だから、その初期の条件は観測しかないわけです。そうすると、海、あるいは空の観測データ中の一番解像度のいいものをもってきて、それを初期条件とする。例えばある日のある時刻に、全地球上の高さ方向の圧力分布だとか温度分布だとか、そういうものをできるだけ与えたい。しかし、そんなたくさん観測をしていないですね。すると、観測データの少ないメッシュ上の初期条件は内挿せざるを得ない。その内挿のアンビグイティがあるわけです。それがみんな、たとえシミュレーションをちゃんと解いても、そのエラーというものはむしろ伝播・増大していく。そうすると本当かどうかわからなくなる。

だから、こういう予測をするためには観測がシミュレーションでやるリゾリューション以上の、しかも取り扱う全地球上のメッシュ上の点の情報がないといけないわけです。それは我々のシミュレーションの方から、おまえらがしっかりしないからどうしたって予測はできない。もっとしっかりしろと。そういう人工衛星屋さんの方に我々が、あるいは、海洋観測屋さんに行き行って、もっともって海の中の情報をとってこいよと要求をする。メッシュ上のあらゆる点で初期条件を与えないといけない。今の場合、境界条件というのは空の上の方は余り影響ないですから、例えば空の上の方は温度が非常に低いものとして与える。だから、そこにまた誤差があるわけですが、100キロメートルぐらいのところにバウンダリーを置けば、1年ぐらいの大気や2年の大気は影響ないだろう。

ただ、光の、エネルギーのインプットを与えないといけません。境界条件として。それは太陽からやってくる光。これはわかっていますから、何月何日はどれぐらいの光がどのところにはどれぐらい入ってきているか、というのは与えられます。そういう意味での境界条件はわりあい確かに

与えられる。でも、すべては観測、あるいはわりあい正しく物理的に予測できるような境界条件、あるいは初期条件を与える。それしかしようがない。

下 郷 初期条件とか境界条件が変わりますと全部結果が変わってくるわけですね。ですから非常に重要な部分なんです。ところが、一般に物理現象としての、物理現象に限らないんですけども、初期条件とか境界条件というのは不確実なわけです。例えば、あしたの天気を予測するのにきょうの初期条件を入れるわけです。きょうのは観測すればわかります。あさっての天気を、あしたの天気を予測する、これは確率論的な考察をしないとできないんです。

佐 藤 いや、きょうのデータがある程度十分なものを与えられれば、記述できるだけの法則がわかっていれば、シミュレーションであさっての……。

下 郷 そうですね。今私が申し上げた例がちょっと悪いんですけども、一般に新しく何らかの初期状態から、それから先の状態を推定する場合、初期条件というのは非常に不確定なのが普通です。物理現象として。そのときに確率論的な考察が必要になるんですけども、幾ら観測データを使うにしてもですね、そのときにメッシュの切り方というのが非常に影響するわけです。メッシュが細かいほど不確実なんです。いわゆる不確定制限。その辺をこの地球シミュレータを使って非常に膨大な計算を速やかにできるとしても、その辺の基本的なところをどのようにして解決するか、あるいは解決することはできませんけれども、どういう方法をとっていらっしゃるか。そこを詳しく伺いたいと思います。

佐 藤 そういう意味では、現在はまだ観測条件もあやふやです。それだけではなく、コンピュータもそれほど有能ではない。そこによる両者のアンビグイティは必ずあります。だから、現時点においては常にそういうアンビグイティをどうミニマイズするかということで、おっしゃるように、確率論を入れている人もおります。あるいは、どうせわからないんだからいろいろなデータを、違う初期条件を与え、違う境界条件を与えて、そ

して走らせて、2日後にどうなるかということをもみんな集めてきて、それでアンサンブルアベレージをとって、これでしょうという。今の気象庁は大体そういうやり方です。

だから、現時点のもっている道具と初期条件で、観測データのアンビギュイティからみて、それをできるだけミニマイズするためにどういう方法論をとればいいのかということで、確率論的な方法を導入しているというのが一番多いです。ただ、それに頼っているのは、僕のいいたいのは、もっと先をいかないといけないということ。だからリアリティに近づけたいという気持ちを常にもっていないといけないだろうと思います。

観測データが悪かったら、観測データをもっと詳細にということで観測屋さんの方に注文をつける。シミュレーションはやっと観測屋に注文をつけられる時代になったというのが……。私の今の地球シミュレータの役割は、今までは常に実験、理論屋さんのスレイブといいますか、奴隷といいますか、手下だったわけです。こんなものが見つかったぞ、おもしろいだろう。おまえら、シミュレーションでこれの一番肝心な、直接的な原因だけを探せよ、という形で問題をもらう。理想化した境界条件、初期条件を与えて、これはこの物理プロセスにしたら、それがある程度再現できるので、これが一番物理的に働いた作用だから、はい、こうではいかがでしょうか、という形で実験屋さん、理論屋さんに渡していたんです。だから、我々の方から注文つけることはありませんでした。

ところが、地球シミュレータで全体のシミュレーションができるぐらいになってくると、ちょっと我々のシミュレーションの技術の方が進んどるぞ、おまえらの観測の方がおくれとるぞ、もうちょっとしっかりしてくれよ、やっと注文がつけられる。また、ひょっとするとこういうものが起こり得るぞ、今の我々の、アンビギュイティがあるけれども、こういうものが起こる可能性があるよ。ちょっとはかってくれよと。普通だったら観測屋さんが見逃してしまうようなところを、そこを集中してはかってくれよということによって、ああ、やっぱり出てきた、という新しい発見もあり得るわけです。やっと地球シミュレータ時代になって

観測理論屋さんに対等になったんです。今までは第三の方法、まさに第三であったけれど、今はみんな対等で、どれも一、一、一のそういう時代になった。おっしゃるように、アンビギュイティはずっと永遠に残ります。

下 郷 そこで、そのシミュレーションの結果を提示するときに、これはどの程度のリライアビリティがあるのかということは、やっぱりきちっと明記すべきだと思いますね。

佐 藤 はい。おっしゃるとおりですが、残念ながら、きちつというためにはきちつとした答えがわかってないといけません。そうすると、非線形で非平衡な問題、答えがわかってない。そうすると、きちつとものがいえない。いえないけれども、どうするかというと、いろいろなところで予測をして、当たるか当たらないか、それによってだんだん信頼度が出てくるだろうと。これからはその当てものの中の信頼度を上げていく。そして皆さんが、あしたは雨が降るから傘をもつてこうと、そういうところまで来たら、それはやっとシミュレーションの実用化であると。まだまだそこまでいっていません。正直言って。

下 郷 それは初期条件とか境界条件の信頼度というものがはっきりしていないからそうになってしまうんですね。

佐 藤 それもあります。

下 郷 それからメッシュを細かくすればどの程度信頼度が落ちるかということもやっぱり考えなければいけません。

佐 藤 それに関してチェックはできるんです。メッシュを細かくすればどんどん。そういう技術的なものは全部チェックできますので、それに関してはこういうメッシュを使つてはいけませんとか、それはかなりサイエンティフィックにエバリュエーションが、評価ができると思います。ただ、おっしゃったような観測の問題、あるいは、今いった、例えばメッシュは細かくなっても、もっとその中で起こっている分子、あるいは原子レベルの問題がトリガーしている可能性があるわけです。そうなってくると、それは必ずしもメッシュの粗さ、観測の粗さとかではなく、本質的な問題です。そうすると、やっぱりこれはもっと本質的

な物理が入ってない、何かそこに新しいものを入れないといけないということで、シミュレーションがサイエンスをステイミュレートするというのか、刺激するというのか、そういうことにも役立ってくる。だから、シミュレーションは、これから今までのスレイブからやっとマスターに成長しようとしている。これから観測がもう少しいい形にしてほしい、あるいはこういうプロセスがひょっとしたら抜けているかもしれないから、理論屋さん、もうちょっと考えて下さいよというふうな形で刺激する。そういう刺激剤にもなるということは、これは正に一人前になったことだろうと思います。

永田 穰 先生がお使いになっているかどうか知りませんが、日立製作所でいわゆるLSIというのを研究してきて、それをつくるためのシミュレーションに随分お世話になったので、ある種の感動と身につまされる思いで伺いました。二つ質問があります。

一つずついきますと、かなり大きな規模で、例えば、東京の異常気象が5日ぐらい前からシミュレータで出たという話を伺って大変感動したんですけれども、今いったようなデータが入れられて計算されたわけですね。そうすると、一番正確なのは、第1日目の世界中の気象の条件はかなり正確だ。2日目はもうちょっと怪しくなってきた、5日目になると、その結果が日本で観測されたものと日本の異常気象が話題になったと。5日分の時間の経緯を計算されているわけですね。そういった意味では、5日前からわかったということは、その5日間の時間を計算して、しかも合っているということで、これはすごいなと思ったのですが、第1の質問は、そういう考えなら、第1日目の世界中の気象はどれぐらいシミュレーションできたのか。5日目がそうならば、10日目もどれぐらい予測できたんだろうかと。そういうことをちょっと教えていただきたいんです。

佐藤 非常に的を突かれた質問です。1日目、2日目、3日目というところはちゃんと比較しています。例えば低気圧、高気圧がどう分布しているか。そこに対しては、細かいところは別ですが。我々がみている部分での低気圧、高気圧、それが

どういうふうに動いていっているかということに関してはちゃんと再現性がある。そして5日目において、日本にはたまたまやってくる状況ですが、その状況の中で、フェーン現象の結果として温度が上がるというところまで出てきた。では、これがたまたま、今の5日前を10日前にしたときに、予測できるかというところまでできません。今は5日目がたまたま限界の作用。これが6日目になるとかなり違ってきます。このシミュレーションの分解能、あるいは観測のもっている分解能、その限界は今のところは5日ぐらいです。台風でもそうです。7日ぐらい前からやると全然合いません。あさっての方に台風の影響が……。

永田 つまり、だんだん怪しくなってきた5日目ですが、たまたま異常気象という非常に目につきやすい現象があったので、比較して話題になったと。それがごくごく普通のような気象の変化だったら、あるいは何もわからずに済んだかもしれない、そういうような考え、そういうレベルだということですね。

佐藤 と思っていただいて。40度という非常に大きいところであったために。みても、それが30度ではなかった。そういう意味での非常に顕著な現象であったからわかった、異常なものだったからやっと5日前でわかったと。そういうふうに理解していただいていいと思います。

永田 大変よくわかりました。

それから二つ目は、全然様子が違うんですが、シミュレータの性能で、三つの性能をよくしないといけないというお話がありました。さっきいったLSIをやっていたエンジニアからいいまして、演算速度は、我々、頑張れば速くなると。これは例えば倍、10倍とはいわなくても、2割増し、3割増し、5割増し、そのうちに2倍にして、さらに5倍にしてくれといわれたら、では頑張ってください。それから記憶装置も、やはり桁がぱっぱと違うわけにはいかないけれども、まあ2倍にしてくれといわれたら頑張ろうと思うんですが、データ交換時間というのは、ハードウェア量が大きくなるという、要するに図体が大きくなるという形になりますので、これは非常に技術的に難しそうだなと。もしこの三つのうち上の二つはかな

り順調にいったとして、一番下のが、例えば時間でいってリニアぐらいにしかよくなりませんけれども、それに近い形で頑張るとして、一番下のこれはせいぜいリニアぐらいだとした場合、シミュレーションにやはり非常に大きな問題になるのでしょうか。

佐 藤 ご専門だからご存知でしょうが、今まさにそこが一番問題になっているわけです。地球シミュレータぐらいのCPUとメモリをもつものに対して、それに見合うぐらいのインターコネクションスイッチというものをつくることができたために、これによるロスと、演算の速さとが、わりあい釣り合っていた、というのでかなり効率がよかったです。でも、アメリカのものは、例えばノード間インターコネクトのために、CPUの演算速度は今、1%出ればいいぐらいになっているんです。何万ノードをつないでいるとしますと、それで結合はNの2乗で効きますから物すごい数になって、ほとんどデータは電線上、ケーブル上を走っているだけだと。ほんの少しだけ計算しているという。今、この部分を速くするために、先ほどいった、演算部とメモリとデータ交換部をチップの中にまとめてやろうとしているわけです。今までだと別のところに置いてあるために、どうしても通信時間がかかる。だから一つのチップの中に通信部分も入れてしまいたいでしょうと、そういう形で今動いていて、2コアとか4コアといっているのは、その中に、今いったメモリも演算するトランジスタもそれから通信を行うスイッチもみんな入れてしまおうと。そうすると、少なくともそれが別個のところにあるよりは早くなるだろうという考え方です。

しかし、これにも私も限界があると思います。おっしゃるように、結局、8ぐらいまでいっても、恐らくそれ以上はいかないだろうと。今度はそこでとまってしまうのではないかと思いますので、今おっしゃったような、平坦に並列にする、同じものを並列で。一つのものをつくるために並列にしたやつというのはそれがボトルネックになってとまりますよと。それができないので、私はもうブロックでシミュレータごと一つにくくって二つ

にもってこいと。そうすると足し算ではなくて、掛け算でできる。そうなると、通信量が少ないので、今おっしゃったこの通信によるボトルネックというのか、オーバーヘッドがぐんと減る。

そういう考え方の一つの典型として出したのが連結階層、私自身がシミュレータを二つ連結して、独立したものとして結合すれば、お互いの交換情報量というものは非常に少なくて済む。そうすると、このインターコネクション部分が減るのではないかという、まさにスパコンをつくっていく上での一番重要なポイントが、そこにあると思います。それで、速さも、線間距離が45ナノとか、そこまでいってますから、一つのチップそのものを高速度化していくような方法では、プロセッサ自身をそれほど速くできなくなってしまったんです。もうエクスポネンシャルには上がらない。だから、メモリもそうだし、半導体を使う限りは。量子コンピュータとか、全然別のものができる。それまで待てないので、何とか逃げる方法を一生懸命考えているということです。

永 田 わかりました。ありがとうございました。
伊藤利朗 いいお話を伺いましてありがとうございました。三菱電機の伊藤でございます。

気象とかなんとかいうこと以前の問題として、先生のお考えをお聞きしたいのですが、ゲーデルの完全性定理、例えばユークリッド幾何学に一つの公理をつければ完全にすると。それからニュートン力学とか物理にもいろいろ、完全性定理が成立する分野がある。一方ではゲーデルの不完全性定理という、数学では解けない問題が、永久に解けない問題が永久に続くと。この二つの問題をどのように考えておられるのか伺います。

佐 藤 それは私にも一つのテーマなんです、コンピュータというのはあくまで完全性定理の方を追っていくということですね。そこで自然をすべて扱えないということを不完全性定理はいつている。だから、余り自然を、宇宙すべてを、こういうAIにしても、あるいはコンピュータにしても、それできると思っているはいけないというのか、それを否定したのがゲーデルの不完全性定理だろうと。ではその論理世界の外にあるものは何か。これはまた別の問題としてあると思いますが。

宅間正夫 日本原子力産業協会の宅間と申します。目がさめるような話で、大変ありがとうございました。

1点だけお伺いしたいのは、例えばこういうところでシミュレートしていきまると、どこの地域で将来どのように温暖化が起こる、それによってその社会が相当大きなインパクトを受ける。そういった場合に、その社会がそれではどういうように、要するに人文社会系にこれが応用できないだろうかと。そうすると、そこに、その国の例えば国民性だとか、あるいは隣の国との関係だとか、そういう過去の歴史を踏まえながら、どういうものが起こりそうかということが計算できないかなということですが、可能性はいかがでしょうか。

佐藤 可能性は私はわかりませんが、前のゲームのシミュレーションがまさにそうなんです。人間というのは、法則性は必ずしもしっかり物理のようにわかってない。そうすると、それに対して我々がモデルを使わざるを得ないですね。こういうモデルのときにはこうなりますという。普通のシミュレーションもそうですが、先ほどのデータの問題で一番重要なのは、過去のデータで再現性をまずチェックするんです。本当にそれが信頼が置けるかどうか。その過去のデータがなければ再現性もできないけれども、できるだけあるデータの中で再現性を試して、その次に未来をみていくという。

しかし、今の社会モデルの場合は逆で、むしろ人間社会の法則を見出していくためにシミュレーションを使うと。モデルを1回立ててみて、それでやって、再現性があったかどうかということを見て、ああ、再現性が非常にいいなと。だから人間の行動はこういう原理に従っているのではないかとということで原理の発見になっていく。そういう形でシミュレーションを使っていく。それで、ある程度原理が、再現性があるようになってくると、それを未来の予測に使えるようになるわけです。

ところが、人間というのは賢いといった方がいいのか、それによって学習しますから。株の投資でもうかったとなれば、それに人間がうまく反応して、結局状態を変えてしまいます。法則を変え

ます。そうすると、そういう法則を変えるところまでフィードバックするようなプログラミングにしないといけない。これはむしろAIの問題です。だから、大きなシミュレータは人間全体を扱っていくことによって、60億人なんて数は少ないです。60億人なんていうのは10テラバイトからいえば非常に少ないですから。一人の人間では100ぐらいのパラメータで記述できるんです。だから、地球シミュレータぐらいの大きさになってくると、全地球的な、地域的なものを含めてシミュレーションはできます。そのとき、再現性をみながら実験をし、よくなれば予測をする。金もうけもできるかもしれない。しかし、そうすると、またそれを破るような法則性が出てくる。そうするとそれも取り入れるという意味で、これから、イタチゴッコというのか、そういう形にはなると思います。

ただ一つおもしろいのは、未来をみていけるということが、今までの人間社会、我々の心のパラダイムというか、ものの考え方になかった。こういうシミュレーションである程度信頼のおける未来がわかるとなれば、逆にこうなればこうなる、ということが、単なる想像ではなく、かなり科学的に、次はどれを選択していくかという、そこがまさに教育の問題、パラダイムの問題ですね。戦争を起こす方の解をとるのか、豊かになる解をとるのかと。これはもう教育の問題になってくる。しかし、そういうことで未来がわかってくるとなると、人間は過去のいやらしいことにばかりこだわらずに未来をみていくようになるから、もっと人間の考え方が未来発展的な、先ほどの複雑志向、未来発展志向になっていく。そうすると、人間のパラダイムも変わってくる。そういう意味では、よくなるか悪くなるかという危険性はあるけれども、教育の問題と一緒にやれば非常にいい未来を、人間の未来を描いていくこともできると思います。未来社会革命という題をつけました。今のご質問はまさに私がいいたかったところです。

石川 宏 この絵とも関係あるのですが、今の地球シミュレータを大体10年前ぐらいの設計だとすると、きょう設計するとボリューム的にはどのぐらい小さくなるか。あるいは、あのボリューム

というか、あの建屋におさまるものを今の最新の技術でつくるとどのぐらいの性能になるんでしょうか。

佐 藤 その一番後の分は多分答えられないと思います。先ほどのインターコネクションの問題がありますので、非常にたくさんの数のプロセッサを並べることになり、これは完全にパラレルプロセッサです。そうするとインターコネクションがあるかどうかということで、それは非線形の問題だからわかりませんが、現時点で地球シミュレータぐらいの能力のものを現在のメーカーさん、日立でも富士通でもNECでもどこでもいい

んですが、そこがつくるとするならば、恐らく、10分の1とまでいかないけれども、4～5分の1には完全になります。だから、ごく片隅ぐらいに置けるぐらいのサイズで、これぐらいのものは十分できるぐらいに、半導体といいますか、LSI技術等は進んでおります。

司 会 ありがとうございます。

まだ質問をおもちの方がおられると思いますけれども、時間がまいりましたので、この辺で終わりにしたいと思います。先生にお礼の拍手をお願いします。(拍手)

2006年11月20日

編集発行

(社)日本工学アカデミー

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20

建築会館4F

Tel : 03-5442-0481

Fax : 03-5442-0485

E-mail : academy@ej.or.jp

URL : <http://www.ej.or.jp/>