

## 大規模計算は科学や技術をどう変えたか

東洋大学計算力学研究センター長  
東京大学名誉教授

矢川 元基



ご紹介いただきました矢川でございます。本日は、このあとの萩原先生と私で計算科学技術に関する講演をしたいと思います。先ほど開会ご挨拶の中にもありましたが、計算科学技術は一般の方々には馴染みがなくて、なかなかわかりにくいといろいろな方が思われているかもしれません。今日はできるだけ多くの方々にもわかりやすい講演にしたいと考えています。

いま台風14号が接近していて、皆様方も今日は早く帰らなくてはいけないかなと心配なさっているかもしれませんが、たぶん今日は大丈夫で、明日かあさって関東地方にも接近すると聞いています。詳しい日には忘れませんが、今年の春ごろに台風1号が接近しました。そのときの様子が朝日新聞の記事に出ていました。5月3日の午前9時にフィリピンの東で発生した台風が、8日の午前9時にはここに動いたという実際の経路と、同じ台風に対するコンピュータ進路予測が比較されていました。この中に、この記事をご覧になられた方もおられるかと思いますが、コンピュータによるシミュレーションはよく合うと思われた方、合わないと思われた方といろいろおられると思います。私は、10年前に比べると、最近の台風

とか天気の前報がずいぶん当たようになったと思います。これぐらい合うようになったので、それなりに使い物になるという時代になってきているのではないかと思います。

ご存じの方も多いかと思いますが、図1はフリー百科辞典のウィキペディアに載っている世界最初のコンピュータの写真です。世界最初のスーパーコンピュータはエニアックと呼ばれ、1946年に完成しました。このコンピュータは、日本との戦争に有利になるためにアメリカが開発したもので、弾道計算を目的としてつくられたようです。日米戦争は1945年に終わったので、実際の目的には使われませんでしたでしたが、それなりに歴史的なコンピュータです。

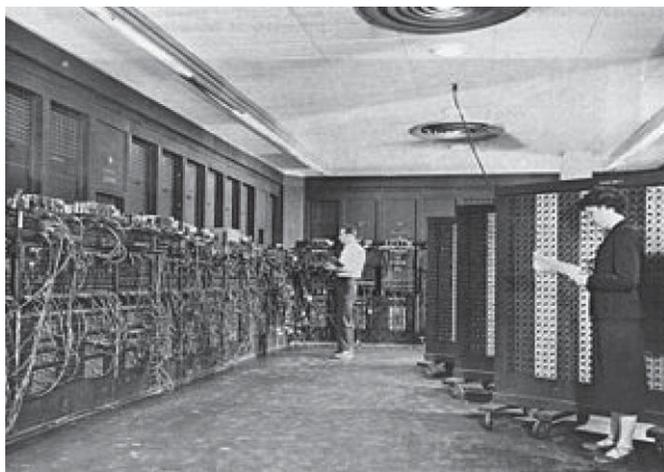


図1 世界最初のコンピュータ「エニアック」  
(ウィキペディア：フリー百科事典から)

もちろんその当時は半導体やトランジスタはありませんでしたので、これは真空管でつくられています。エニアックは、17,468本の真空管で構成されており、幅24m、高さ2.5m、奥行き0.9m、総重量30トンと大掛かりな装置で、設置には倉庫1個分のスペースを要したようです。消費電力は150kWですから、相当な熱を発していたと思います。いずれにしましても、これが歴史的に世界で最初のコンピュータと言われていて、コンピュータの歴史を語るときは、必ずこれが引き合いに出されるわけです。

エニアックのあと、いろいろなコンピュータが世界中でつくられました。最初はアメリカとヨーロッパと日本が競争してコンピュータをつくっていましたが、ヨーロッパは、ある時期、経済的に合わないということで脱落して、いまはアメリカと日本がコンピュータの開発競争をしています。最近では、中国などもコンピュータ開発に乗り出してきています。

先ほどのエニアックが完成した1946年から半世紀以上たった2002年に地球シミュレータというスーパーコンピュータがわが国でつくられました。これは、いま海洋研究開発機構

の横浜の研究所に置いてありますが、世界中にきわめて大きなインパクトを与えました。日本がこれを完成させたときに、ニューヨークタイムズという有名な新聞は、スプートニクをもじってコンピュータと書きました。意味はおわかりでしょうか。冷戦時のソ連がスプートニクによって宇宙開発でアメリカを追い越したとき、アメリカは大きなショックを受けたわけです。それをもじって、ニューヨークタイムズはこの日本の地球シミュレータをそれに匹敵する大事件としてコンピュータと呼んだのです。このコンピュータは、それぐらいアメリカにショックを与えました。

このコンピュータは、このような経緯で2002年当時世界一となったわけですが、世界一の座をキープしたのはほんの2~3年だけです。そのあとすぐにアメリカに追いつかれて、あっという間にこのコンピュータ性能の世界のランキングは、2ケタ台まで下がってしまいました。コンピュータ競争でトップの座を維持するのはほんの数年です。すぐ追い越されるという激烈な競争の世界です。

図2が地球シミュレータですが、大きさは、50m×70mとあるのでだいたい体育館ぐらい

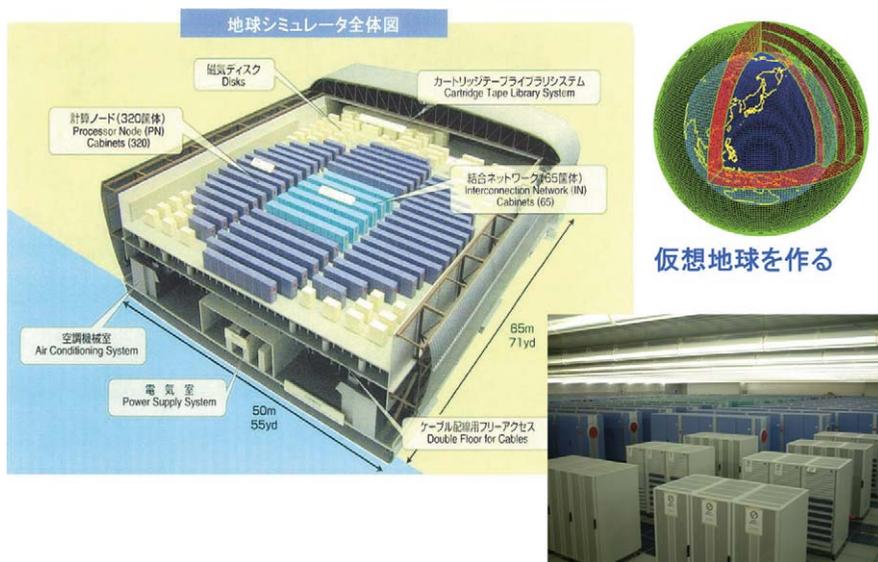


図2 日本独自技術による地球シミュレータの開発



図3 次世代スーパーコンピュータ施設のイメージ

のサイズですが、ここにコンピュータ本体やメモリー、ネットワークなどいろいろな装置が入っています。地球シミュレータは地球をシミュレート、すなわち地球を解析、分析するコンピュータという意味ですが、実際には地球シミュレーションのみならず、いろいろなところに使われています。

先ほど申し上げたように、日本は2002年に地球シミュレータで世界一を取って、2年強トップを維持しましたが、そのあとだらだらと負けてしまって、夢よう一度ということで、いま次世代スーパーコンピュータをつくらうとしています。場所は関西に移って、神戸に図3のようなイメージの建物を建てて、その中に入れるコンピュータの設計、製造を始めています。これが完成するのは2～3年後になると思いますが、ぜひ世界一を奪還したいということで関係者が頑張っています。アメリカも日本がこういうコンピュータをつくることを熟知していて、日本に絶対負けなようにいろいろな情報を取って、これを超すようなコンピュータを同じように開発しているので、神戸に次世代スーパーコンピュータができたときに、日本が本当に世界一に

なれるかどうかは誰にもわかりません。大変な神経戦になっているかと思います。まだ完成していないのでどれぐらいのものになるかはわかりませんが、ぜひ世界一になってほしいと思います。なお、次世代スーパーコンピュータは理化学研究所が、先ほどの地球シミュレータは海洋研究開発機構が開発の母体となっています。両方とも文部科学省の研究機関です。

さて、コンピュータの能力は一般に計算速度で示されます。図4のように計算速度の単位はフロップスと呼びます。フロップス

**コンピュータの計算速度は  
OO FLOPS という。1秒間に何回  
足し算ができるかということで示される。**

10の 3乗(キロ)FLOPS	50年前
10の 6乗(メガ) FLOPS	40年前
10の 9乗(ギガ)FLOPS	20年前
10の12乗(テラ) FLOPS	10年前
10の15乗(ペタ) FLOPS	2年後
.....	

図4 コンピュータの計算速度の変遷

(FLOPS) とは、Floating Point Operations Per Secondを略したもので、簡単に言うと1秒間に何回足し算ができるかということです。2けた、3けたではなくて長いけた数の足し算を1秒間に何回できるかということと思ってください。

50年前のコンピュータは、10の3乗でキロ、1秒間に1,000回足し算ができました。そのあと10年たって40年前になると、10の6乗でメガ、すなわち1秒間に100万回の計算ができるようになりました。20年前ぐらいになると、10の9乗で10億回、10年前は、10の12乗でテラ、1兆回となっています。次が15乗でペタ。すなわち、キロ、メガ、ギガ、テラ、ペタと続きます。さらにペタの1,000倍はエクサですが早くも米国ではその辺のコンピュータのことを議論しています。

それで、先ほどの2年後に神戸にできる次世代スーパーコンピュータがペタの速度をねらっているの、別の名前でペタコンピュータあるいはペタコンと呼びます。ペタとかテラというけたの数字をざっとごらんいただくと、コンピュータは10年ごとにざっと1,000倍ぐらいの速度で速くなっています。皆様方がお使いのパソコンも、4～5年すると新機種ができて新しいのが欲しくなります。10年で1,000倍とすると、5年で軽く10倍以上は違ってくるわけですから、大変な計算速度の差です。ですから、5年前のパソコンを使い続けるのが嫌になって、新機種に買い替えたいくなるのはそういうことです。

## コンピュータの計算速度は人間の何倍？

### 人間の計算速度は0.1 FLOPS程度

### 地球全人口50億人の計算速度は？

$$5,000,000,000 \times 0.1 \text{ FLOPS} = 500 \text{ メガFLOPS}$$

これは20年前のコンピュータに相当

図5 コンピュータと人間の計算速度の比較

試しにコンピュータの計算速度は人の計算速度の何倍ぐらい速いか比べてみました(図5)。1人の人間の計算速度を、非常に雑駁な数字として、仮に0.1フロップス程度としておきます。0.1フロップスというのは、数けたの足し算が10秒に1回。10秒に1回でも結構大変で、暗算とかができる方は一瞬でできると思いますが、普通の人は10秒かかるとすると、その人の計算能力は0.1フロップスということになります。

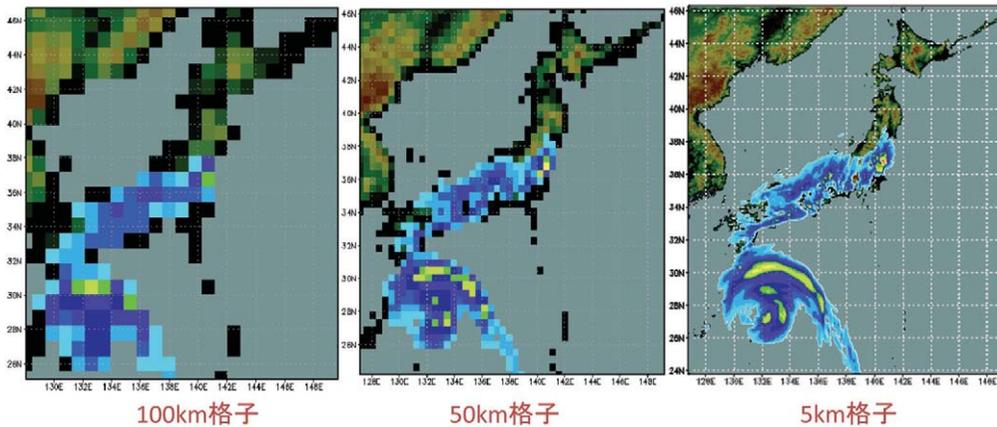
全世界の人口を仮に50億人とします。子ども、大人、赤ちゃんも含めて世界の50億人全員の頭脳を計算機とすると、50億人×1人の能力(=0.1フロップス)=5億フロップス、すなわち500メガフロップスということになります。これは、先ほどのコンピュータの進歩から言うと、おおよそ20年前ころのコンピュータです。20年前のコンピュータ1台の能力と、いまの世界の全人口50億人の計算能力がほぼ同じだということです。これは非常にラフな数字ですが、大差はないと思います。皆様はどのようにお感じでしょうか。コンピュータはすごいと思われるか、大したことはないと思われるかはそれぞれお考えがあるでしょうが、現実にはこんなことになっています。

これからは次第に計算科学のお話に入っていきます。図6は、先ほどの地球シミュレータを用いて海洋研究開発機構 高橋桂子氏の研究グループで計算したものです。降雨、雲のシミュレーションを100キロ、50キロ、

5キロの格子を用いた計算でござんいただくと、それなりに結果がまともなのは5キロ格子のシミュレーションです。100キロ格子では状況がほんやりして結果がよくわかりません。50キロでもなかなかわかりにくい。5キロぐらいの格子にして精度が上がると、ようやく現象がはっきりしてきます。

ここにあるように、台風だと数千キロの範囲を計算しなければいけません。10キロや100キロの範囲だけを見てい

## Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG)による シミュレーション結果 / 海洋研究開発機構



数1000 km 規模の台風全体を高精度解析するには、5 km 程度の細かい格子が必要。

図6 台風のシミュレーション (海洋研究開発機構地球シミュレータセンター 高橋桂子博士からの提供)

でも台風のシミュレーションはできないのです。また、台風を高精度に解析するには、上述したように5キロ程度の細かい格子が必要です。地球シミュレータで、ようやくこのような計算が可能になり、最初に述べたような正確な予報ができるようになりました。

ちょっと話題が変わりますが、問題解決のための手法を考えてみましょう(図7)。世の中には解決すべき問題がたくさんありますが、それには解析分析的な問題、原因探求的な問題、予測の問題という分類の仕方がありそうです。問題のタイプがそれぞれ違います。

まず、ある条件が与えられたときそれに対する単純な答えを出すというのは解析分析的なものです。先ほどの気象解析も、予測ではなくただ計算するだけなら、流体力学解析などになります。これは順問題と呼ばれます。一方、原因探求的な問題や予測は逆問題です。逆問題、順問題というのはちょっと難しい言葉ですが、順問題は、ある

条件が与えられて単純に答えを出す、逆問題は、答えがあって逆に元の条件や問題そのものの条件を求めるといった方法です。ものづくり、設計などは逆問題です。これら逆問題は順問題に比べて扱いが一般に難しいと考えられます。

図にありますが、単純な分析、解析の場合、難度は小。難度小といっても比較の問題ですが、この三つの中ではあまり難しくありません。もちろん、順問題のなかにも難問はたくさんありますのでこれはあくまでも一般論とと思って

問題	難度	分類	例
解析・分析	小	順問題	応力解析 流れ解析
原因探索	中	逆問題/ 内挿型	ものづくり設計 事故解析 病因発見 欠陥発見
予測	大	逆問題/ 外挿型	経済予測 環境予測

図7 問題解決のための手法とその分類

ください。原因追求的な問題は中程度の難度です。この中には、ものづくり、事故解析、病気原因発見、欠陥発見があります。欠陥発見は機械の中の介在物などの欠陥を発見すること、病気原因発見は病院に行って検査をしたり、お医者さんが顔色が悪いなど患者さんを診断して、どの内臓が悪いなど病気の原因を特定することに相当します。

一番難しいのは、逆問題としての予測です。予測というのは、経済予測、環境予測などです。昨年起こった経済危機は誰も予測できませんでした。100年後に温暖化がどれぐらい進むかという環境予測も、すごく難しいです。いま環境問題が騒がれていますが、100年後に温度の上昇が2度だ5度だといろいろな人がいろいろな予測を立てています。2度と5度ではその影響は大違いです。このようなことを実際に予測するのは、難しさがたくさんあります。なぜ難しいかということ、簡単に言うと過去に例がないからです。外挿型と呼んでいるのはそういう意味です。過去に例がないことを予測するのは大変です。過去に例があって、その原因を探求する内挿型は中ぐらいの難しさです。たとえば病因発見は、お医者さんは過去いろいろな患者さんの症例を見ているので、だいたいどこかに当てあてはまって見当がつくわけです。これは内挿型ということで、過去に経験があるから比較的易しい。これは雑談ですが、夏目漱石の『それから』に、まさに逆問題のことを言っている文章が出てきたのでその部分を取っておきました（図8）。100年も前に書かれた小説ですが、次のようなシーンが出てきます。「写真は奇

写真は奇体なもので、まず人間を知っていて、そのほうから、写真の誰彼を決めるのは容易であるが、その逆の、写真から人間を定めるほうはなかなかむずかしい。これを哲学にすると、死から生を出すのは不可能だが、生から死に移るのは自然の順序であるという心理に帰着する。

—夏目漱石「それから」より—

図8 夏目漱石「それから」に見出される逆問題

体なもので、まず人間を知っていて、そのほうから写真のだれかれを決めるのは容易であるが、その逆の写真から人間を定めるほうはなかなか難しい」と言うくだりです。写真というのは結果です。結果からその人の性格等を見つけるのは難しいと言っています。これはまさに逆問題の難しさを言っているのです。さらに、「これを哲学にすると、死から生を出すのは不可能だが、生から死に移るのは自然の順序であるという真理に帰着する」というのにも私は感心しました。死から生を出すのは不可能です。だけど、生きている者はすべて死ぬというのは順問題です。このような逆問題にちなむ部分があったので紹介させていただきました。

計算科学技術の大本は、やはり1,600年代のニュートン力学と、20世紀の最初にはじまった量子力学です（図9）。これらを料理する方法として理論、実験、計算の三つがあると言われていています。一昔前は、計算機がなかったか、あっても頼りなかったので計算は入っておらず、理論と実験のみでした。関連して、実験科学、理論科学という言葉をご存じだと思えます。たとえば湯川秀樹の研究は、理論科学と呼ばれるものでしょう。紙と鉛筆で、とよく言われます。それから、実験科学は大きな装置をつくったりして実験し、新しい現象を発見するというアプローチです。これらに続く第3の科学が計算科学で、計算機がある程度発達してから、科学に仲間入りするようになったと言われていています。

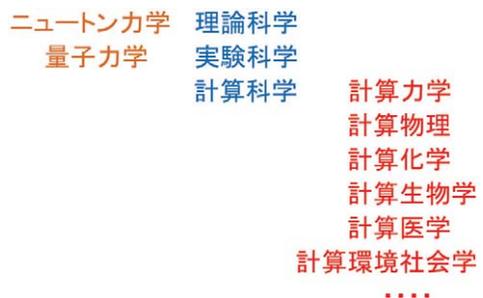


図9 力学とその解明のための手法

- 1960年代 黎明期(基礎)
- 1970年代 原子力(高速炉)、  
重厚長大産業(非線形、破壊力学など)
- 1980年代 自動車、半導体産業へ  
(実用化、流体力学など)
- 1990年代 あらゆる産業へ(大規模並列)
- 2000年代 バイオ、ナノへ  
(連続体から量子力学まで)
- 2010年代 環境、人(心)へ

図10 計算科学(計算力学)の変遷

計算科学の中身はさらにいろいろ分類されて、計算力学はどちらかというものづくり等に使われます。計算物理学は文字どおり物理学に使われます。それから、化学、生物学、最近では医学にも使われています。すなわち診療や治療にも計算機が使われます。さらに、人間の行動等も方程式にして、社会的な問題にもいろいろ使われるようになってきています。それぞれが個別の学会になっているぐらい広がってきています。

一つの例をとって、計算力学の変遷を申しますと、これまでいくつかの山がありました(図10)。一般の技術者や科学者がコンピュータを使えるようになってすぐの60年代に最初の基礎ができました。この当時、ボーイングという飛行機会社が初めてコンピュータを使って飛行機を設計しました。そういう意味で、ボーイングは計算科学、計算力学をものづくり、この場合は飛行機設計に応用した最初の例です。70年代は、ちょうどこれから原子力という時代でしたし、土木、建築、造船等の重厚長大産業にいろいろ使われました。

80年代になると、自動車産業、半導体産業でコンピュータを使うようになりました。これはあとで萩原先生から詳しいお話があるはずですが、90年代になって大規模並列計算というのができてくると、あらゆる産業で使われ

はじめ、食品産業までもが計算科学技術や計算力学を使うようになってきました。いまは、バイオ、ナノが花盛りです。ここでは、ニュートン力学から量子力学等まで使うようになってきています。今後は、環境問題、人とか社会への応用がこれから出てくるのではないかと思います。

応用分野(図11)については何度も申し上げていますようにいろいろありますが、一番下にあるスポーツ、芸術等にも使われています。ご存じのように、スポーツ選手が使う道具、たとえばプロのマラソンシューズにも計算科学、計算力学が使われています。もち

- ものづくり
- 事故分析
- 自然災害
- 気象予報・地球環境予測
- 固体地球
- 医療・治療
- 社会環境
- スポーツ・芸術、ほか

図11 計算科学技術の応用分野例

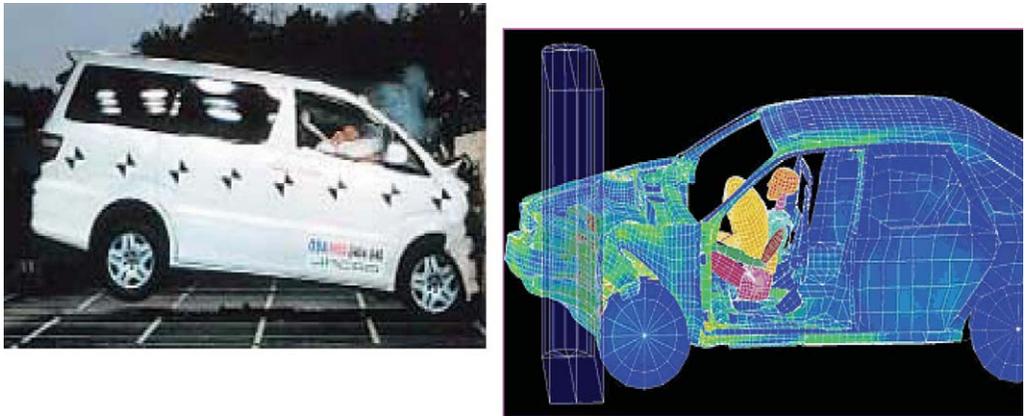


図12 自動車の衝突実験（左図）とシミュレーション（右図）



図13 自動車衝突シミュレーションに用いる人体のコンピュータモデル

ろん、ゴルフ道具、テニスラケットなども、高性能化のためにコンピュータで計算して設計されるようになってきています。

いまコンピュータが最も使われている産業は自動車産業です。昔は実際に衝突実験をやっていましたが、いまはコンピュータで仮想実験をやる時代になっています（図12）。車とともに中の人間も衝突時の挙動がどうなるかを計算します。図13はその場合に使う人体のモデルです。人体を頭の部分、胴体の部分と細かい格子やメッシュに切って計算しま

す。

図14は、原子力圧力容器です。1990年代の終わりから、アドベンチャープロジェクトという国のプロジェクト（リーダーは東大 吉村 忍教授）がスタートして、この当時初めて大規模な丸ごと計算がなされました。原子力圧力容器は、原子炉の中でもっとも大事な部品です。これは圧力容器のCADモデルで、原子炉燃料が中に入っており核分裂を起こして、非常に高温、高圧のお湯をわかし、ノズルから高温、高圧の蒸気を出してタービンを回すという仕組みになっています。気圧で言うと100気圧ぐらい、温度も300℃ぐらいになる高温、高圧の流体が入っているの、頑丈につくらな

ければいけません。この高さはだいたい20メートル、直径が7メートルぐらいで、肉厚が15センチぐらいの頑丈な鋼鉄でつくられています。しかし、中は非常に複雑な応力状態になるので、詳細に計算しなければいけないということで、ノズル部とかは細かいメッシュを配置します。下のポンプの部分も、細かいメッシュをつくって計算します。それから、たくさんのコンピュータを同時に使って計算するために、色分けされています。それぞれの部分に別のコンピュータを当てがう並列計算とい

## 60 Million DOF Mesh of ABWR Vessel Adventure Project

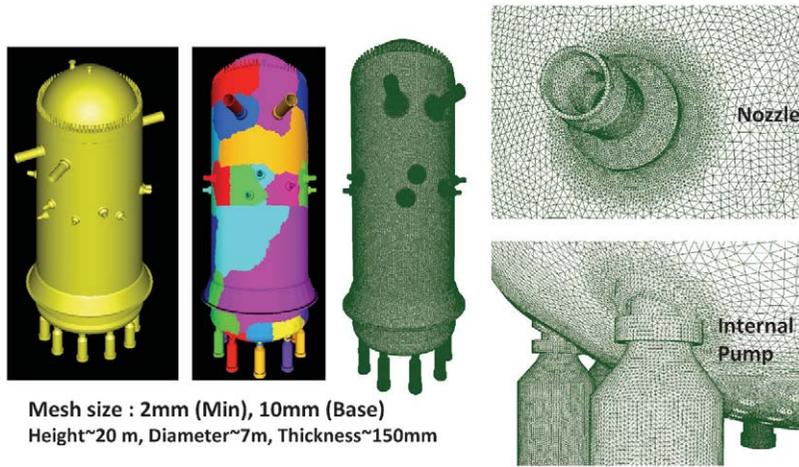


図14 原子炉圧力容器の健全性確認のためのシミュレーション

う技術がここで使われるわけです。

最近ではこのような大規模計算が日常的にできるようになりました。ちなみに60ミリオンDOFとありますが、6,000万の連立方程式を解くという意味です。連立方程式をコンピュータで解くわけですが、その連立方程式の元数が6,000万です。これはとても人間業では解けないので、コンピュータでいかにして速く解くかが勝負になります。

それから、地震の発生の予測には地球のプレートの長期的運動を知る必要があるということで、日本全体、あるいは全地球スケールのプレート運動にもこのような計算力学手法が使われます。図15は日本列島の北半分、南半分の解析用メッシュ、また図16は日本列島北部の変動の計算結果とGPSによる実測結果の比較です。日本は少しずつ動いて、アジア大陸と日本の位置関係が少しずつ変動し

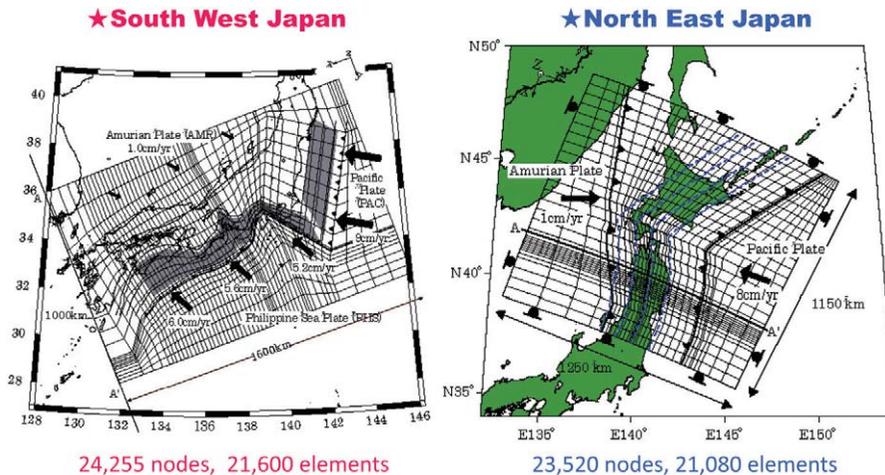


図15 日本列島変動シミュレーションに用いる有限要素法メッシュ

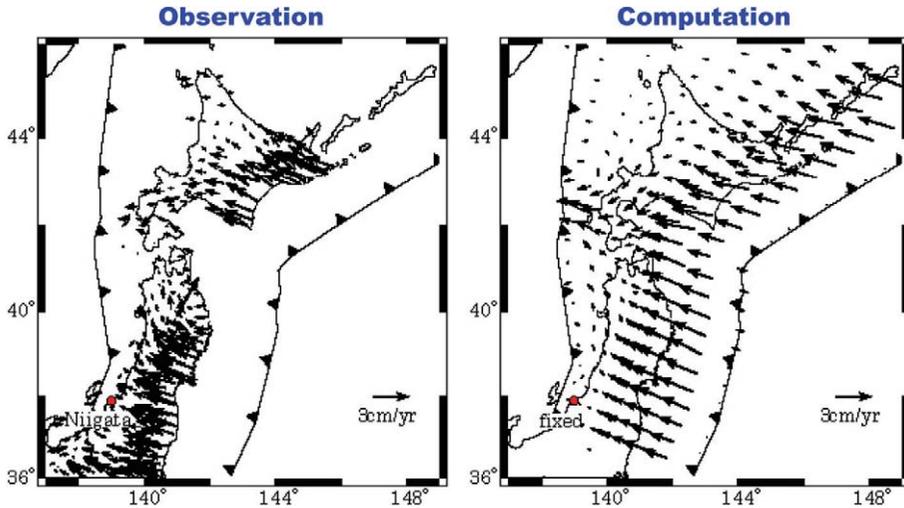


図16 日本列島の水平方向変動のシミュレーションと観測の比較

ています。日本列島は実際に西北へ向かって動いているのがおわかりでしょう。実際の測量と計算機シミュレーションは、少なくとも定性的にはかなり合っています。矢印の方向をごらんいただくと、西北へ向かっています。矢印の長さが移動距離です。この矢印の長さが1年間に3センチ移動しているということです。すなわち我々が住んでいる日本列島は爪が伸びるくらいの速さで北西に移動して、いずれはアジア大陸と一体化するかもしれないというお話になりますが、最近ではこのようなシミュレーションもできるようになりました。

次はちょっと話題が変わりますが、英語で言うとコンピューティングパラダイム、コンピュータの使い方の基本が少しずつ変わりつつあるという事実があります。コンピュータそのものは、最初に申し上げたように10年でざっと1,000倍ずつぐらいい速くなっていますが、それとともに使い方にもいろいろな工夫があり、少しずつ動いています。

70年代、80年代、90年代以降と分けると、70年代は大きなコンピュータをみんなで使っていた。シェアードコンピューティングといいますが、一つのコンピュータを共有してい

ました。コンピュータを何基も買うわけにはいかないので、たとえば大学に計算機センターがあって、そこへ皆が自分のソフトやデータを持ちこんで、計算機にかけてもらって、結果を翌日にもらうというやり方をしていました。コンピュータが日本全体で三つ、四つしかない時代もあったので、大きな大学だけにコンピュータがあって、小さな大学の先生や学生はそれを使わせてもらっていました。

80年代になると、パソコンが出現しましたし、大きなコンピュータと小さなコンピュータをLAN、すなわちLocal Area Networkでつなぐクライアント・サーバー・モデルによって、自分の部屋からも計算できるようになりました。そのあとの時代から現在にかけては、ネットワークコンピューティングといって、世界のコンピュータをつないでみんなで使う状況になってきつつあります。

原子力研究開発機構がおこなった研究ですが、アメリカと日本をネットワークで結んで、日本側は粒子シミュレーションをおこなってその陽子ビームデータをアメリカに送って、アメリカはそのデータを患者さんのがん治療に使って、治療の効果を定量的に推定して、患部線量データを日本に送るというやりとり

をしながら、場所も分野も違う人たちが協力してそれぞれ得意なところを分担するという研究スタイルが、この10年ぐらい世界中で行われています。実験装置も共有できますし、いろいろなコラボレーション、共同研究が可能になります。

いま、がん治療などにコンピュータが使われるという話をしましたが、10年、20年後にはコンピュータで生命現象をすべて理解させようという研究が理研で進んでいます。まずは、血流、肝細胞など部分的な研究が進んで、10年から20年度には、コンピュータを駆使すると生命現象そのものまでもが理解できるようになるという夢のような計画を打ち立てています。これが実際にできると、医療革命を起こすぐらいになるのではないのでしょうか。いま神戸でつくっている次世代スーパーコンピュータの一つの利用形態は、こういうことにもあると言われています。

いま神戸につくろうとしているスーパーコンピュータがどういうところに応用されるかというところ、エンジニアリングやものづくり、ナノテク、先ほど理研の例にあったライフサイエンス、新材料開発、宇宙開発や次世代の飛行機の開発、環境問題、災害、安全・安心、宇宙の起源を調べる、原子力エネルギー開発などの例が挙げられています。これはサイエンスや技術が中心ですが、これ以外のあらゆる分野に次世代スーパーコンピュータが使われると言われています。

いろいろなコンピュータがいま開発されていますし、先ほどのアメリカとの日本のコンピュータをつなぐのはグリッドコンピュータと呼びますが、そういった様々なコンピュータの利用形態があって、それぞれの目的に応じて自由に使い分けられるようになるでしょう。昔は想像できなかったような分野にも次々とコンピュータが使われるようになっていきますので、10年先にどういう使われ方がなされているかとても予想が付きません。

それから、いままで私のお話をお聞きになって、その道の専門家ばかりがコンピュータ

をやっているのではないかと感じになったと思いますが、これからは、きっと一般の人たちがリアルタイムシミュレーションにも参加して、もっと身近になることであろうと思います。インターネットやメールは誰もが使っていますが、コンピュータシミュレーションも同じように一般に使われるようになるのではないかと思います。例えば、手元のパソコンからリアルタイムで自分が知りたい現象をシミュレーションできるようになると思います。このような時代は、それほど遠くないと思います。ご静聴ありがとうございました。