

ものづくりに新しい価値を創造する 計算科学



東京工業大学大学院理工学研究科教授 萩原 一郎

本日は大変名誉ある講演会にお招きいただきましてありがとうございます。本日の内容ですが、第1部と第2部に分けています。第1部は、計算科学によって、自動車の開発スタイルが変わったという例です。それからシミュレーション技術の変革を衝突解析を例にして述べます。第2部は、最近のトピックスとして、日本伝統の折り紙を洗練して、ものづくりの最前線に利用する例。それから学会で計算科学シミュレーションと工学設計分科会が設けられていますが、そこでマルチスケール・マルチフィジックス、心と脳が二つのキーワードということで、こういった新しい領域への科学技術シミュレーションの役割などについて紹介したいと思います。

まず第1部の設計プロセスのイノベーションです。これは新車開発のプロセスです。簡単に説明しますと、たとえばブルーボードとか商品が決まると、イメージスケッチして、クレイモデルをつくり、クレイモデルを3次元レイアウトマシンなどで計測しこれを元に外板の3次元CADをつくります。これと並行して内板、シャシー、エンジンは直接機能設計から入り、それでこれらの部品を合

体設計して試作し、実験して、生産準備、生産というスタイルでつくられていたわけですが、この直列型の開発スタイルでは実験して、目標未達ならまた設計に戻るということで、開発時間が相当かかっていました。計算科学を用いることによって、図1に示しますようにクレイモデルをつくらずに最初から3次元のCAD、試作車の代わりにコンピュータ上で詳細なデータモデルをつくる、実験の代わりにコンピュータシミュレーションを行う、こういうスタイルに変わってきた。これはフィジカリー・ベースト・グラフィックスといって、コンピュータ上で車を走らせて性能をチェックすることで開発期間を非常に短くする。これを実現する三つの要素として、幾何

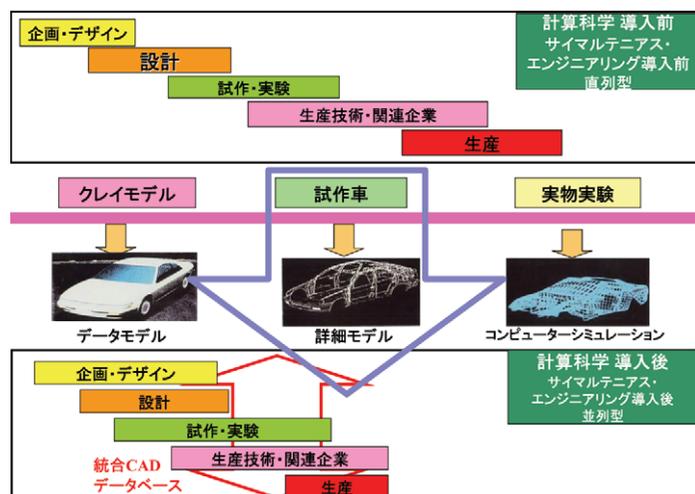


図1 開発スタイルのイノベーションイノベーション
(物理モデルからデータモデルへ(直列型から並列型へ))

学モデリング、シミュレーション、そしてポスト処理のようなビジュアライゼーションがあります。計算科学を使うことによって、図1に示しますように直列型から並列型の開発スタイルが取れ、設計初期段階で生産まで検討するというスタイルに変わっている。こういう自動車開発スタイルの変革によって、企画してから市場に出るまで40~60カ月かかっていたのが、図2に示しますように12~20カ月と大幅に開発期間は短縮されています。

ソフト／ハードの時代といえますか、思いつきだけでは新しいものはなかなかつかれない。ソフトに裏付けられたハードというものが重要になってきています。こういう計算科学シミュレーションですが、日本のメーカーが最も上手に使う。たとえば日本の自動車メーカーのモデルと海外のメーカーのモデルとでは、段違いに日本のメーカーのモデルのほうが精細ですばらしいということになっています。その結果、もちろんそれ以外の要素もありますが、自動車業界の新しいハードはいまや70~80%は日本の自動車メーカーから誕生しているかと思えます。

これは昔のもので見にくい面がありますが、ご容赦願います。これをざっと流していきます。これはデザイナーがイメージスケッチしているものです（図2左上）。そのイメージスケッチしたもものから、クレイモデルをつくっていました。車というのは性能だけでなく、外観品質も商品性にかかわってくるので、ダイノックスフィルムというのを張ります。これは実際の車に近い光沢を出すものです。こういうダイノックスフィルムを張るのは時間が非常にかかります。このようにかなり丁寧につくる必要があります。これができた後、たとえばヨーロッパで販売する場合は、ヨーロッパに近いような風景のところに持って行って、人間が車の周りぐるぐる回って見栄えをチェックするといったことをやっていたわけです。

これはエクステリアのモデリングです。インテリアとエクステリアのコンビネーションを見ているところです。最近ではコンピュータを使って、たとえば身長175センチの人の前方視界がどのような状況であるかも事前にチェックします。



図2 計算科学による自動車開発期間の大幅な削減の様子

これはエンジンルームのレイアウトです。いまはボンネットを開けても容易には見られませんが、電子制御がよく使われていますので、非常にたくさんの油圧ホース類が実際エンジンルームの中にあります(図2右中央)。これら油圧ホース類の特徴ですが、取り付け点が決まっても、納まり形状という言葉で呼ばれていますが、形状がなかなか定まらないということで、取り付けてみないとよくわからなかったのですが、こういったことも計算科学シミュレーションで事前検討が可能となったことも開発期間を短くしています。

これは風洞実験ですが、このように大規模な風洞装置を使って空力特性が検討されます。空気抵抗が大きい場合、高速で走ると揚力が大きく不安定になるので非常に重要だということと、デザイン性に関係するので、かなり早い時期からチェックされます。いまは図3に示しますように風洞実験の代わりに車体周りの計算科学シミュレーションで検討されるケースが通常となっています。これは数値風洞ともいえます。渦の発生状況などをチェックします。後ろのほうにこのような渦があると、高速で走ると浮き上がるということで、リアスポイラーを置いて、その効果を見ている。こういうのもシミュレーションで行われ

ます。

これはエンジンルームの熱流動解析ですが、エンジンルームの中は非常に高温です。高温の場合は実験も難しいということで、シミュレーションでしか検討できないケースも多々あります。計算科学シミュレーションによって、こういったことも事前にチェックできるようになったわけです(図4左上)。

それから車の衝突ですが、市販車は300万円ぐらいだとしても、試作車になると5,000万円とか1億円ぐらいします。しかも衝突実験は1台の車両で1回しかできない。また安全のレギュレーションはどんどん厳しくなっていますので当初高価なスーパーコンピュータ購入に及び腰だった自動車メーカーもスーパーコンピュータを用いた計算科学シミュレーションに頼らざるを得ない状況になったわけです。たとえば前面衝突の場合は、客室が大変形すると非常に危険ですので、車両前部構造で運動のエネルギー吸収を図るわけです。この前部構造ですが、エンジン、サスペンション、ボディーからなっていて、実はエンジンとかサスペンションは変形しないので、ボディーの変形でエネルギーを吸収する。ボディーは建築構造物と同様、パネル類とメンバー類からなっていて、メンバーが最も大きな

寄与をしています。メンバーは、簡単に確認できますが、曲げには非常に弱い。ところが圧潰には強いということで、前後方向に走るサイドメンバーがある意味では命綱です。前面衝突とかオフセット衝突というのは、サイドメンバーのエネルギー吸収特性に左右されるということです。これがサイドメンバーです(図4右上)。これは前面衝突解析のシミュレーションで応力状況を見たものです。前部構造に変形が集中しており良い設計です。いまは衝突シミュレ

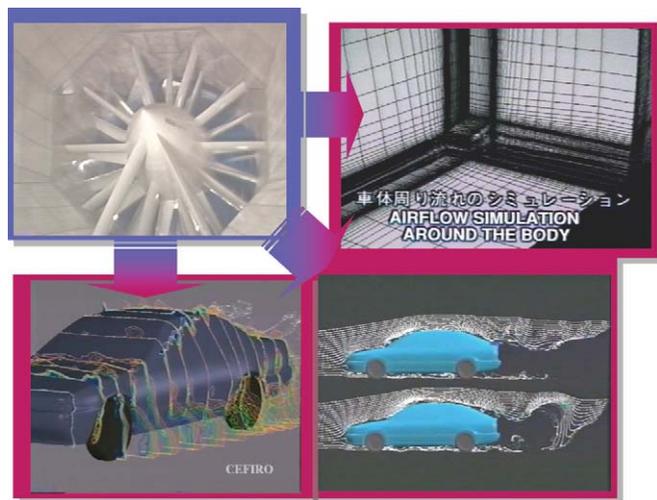


図3 実機風洞実験から数値風洞実験へ

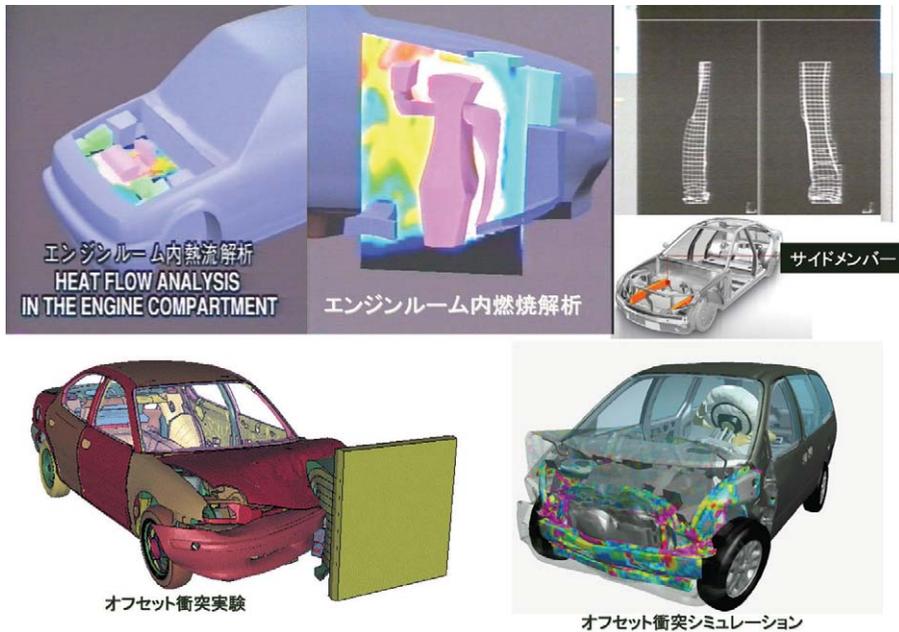


図4 500種類以上の車両モデルの一例

設計モデル例

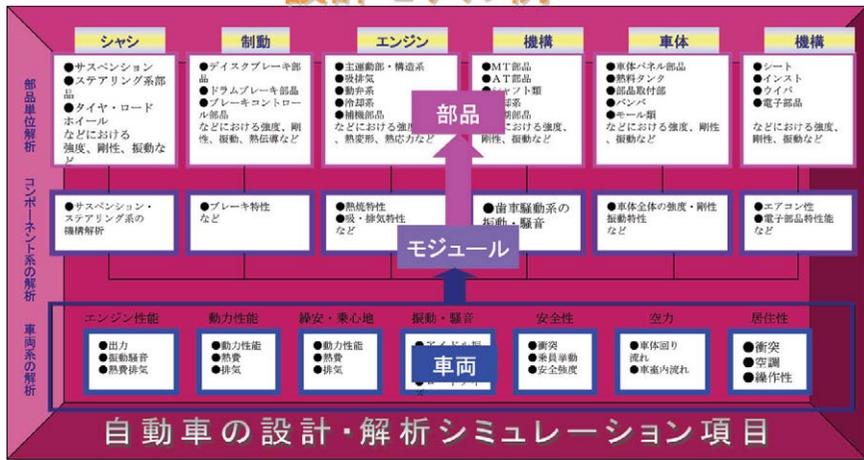


図5 車両モデル、モジュール、部品、各段階での設計モデル (車両全体→モジュール→部品への性能の落とし込み)

シミュレーションで検討を行い実験は最後の確認にだけ行う。また乗員の他、エアバックやシートベルトなどの乗員拘束装置も組み入れた大規模モデルでシミュレーションは行われています。車の安全のレギュレーションも、前面衝

突、後面衝突、サイド衝突、オフセット衝突と、どんどん増えてきています。これはオフセット衝突の例(図4下)ですが、車同士で実験するのではなく、アルミハニカムのバリアに衝突させるという実験をやっている、そ

れに対応するシミュレーションです。

このように車を市場に出すために、部品単位、コンポーネント系、車両系、そして性能も動力性能、操安、乗り心地、振動、騒音、安全性、空力など、試験項目が400以上あります（図5）。こういったものを実験していると大変ですが、計算科学シミュレーションで設計段階でできるようになったということです。また計算科学によって並列型の開発ができるということで設計の初期段階で図6に示しますように製造、組み付け、塗装等の検討も行なわれるようになっていきます。

それから自動車の特徴として、たくさんの性能がそれぞれトレードオフの関係にあります。たとえば質量を下げると、騒音、振動、安全性が悪くなります。ところが燃費はよくなる。こういった非常にたくさんのトレードオフの関係にある性能を高いレベルで両立させる、これが設計の難しさということになります。

ここで物づくりの計算科学を牽引した衝突

解析の歴史と計算科学の発展の経緯にふれてみたいと思います。衝突解析は、1967年に米国の連邦安全基準ができたのが発端となりました。1967年という、ちょうど米国が日本車を警戒しだしたというところからです。このころはまだ日本メーカーはGMとかフォードに水をあけられていて、とてもいまのような状況は想像できなかったわけですが、米国政府もちょっとおかしいと心配しました。日本車は小型車、米国車は大型車ですから、両方が衝突すると必ず大型車が勝つということで、レギュレーションを厳しくすると日本車が撤退するだろうとも言われていました。

これは前面衝突の例ですが、ハンドルの付け根がダッシュのところにあって、衝突するとエンジンがダッシュに突っ込んできます。それで時速30マイルで剛壁面に前面衝突したとき、ダッシュ上のステアリングの付け根の後退量が2.54センチ以内という、非常に厳しい条件が課されました。しかし、こういう難しい基準が設けられると、だいたい日本のメ

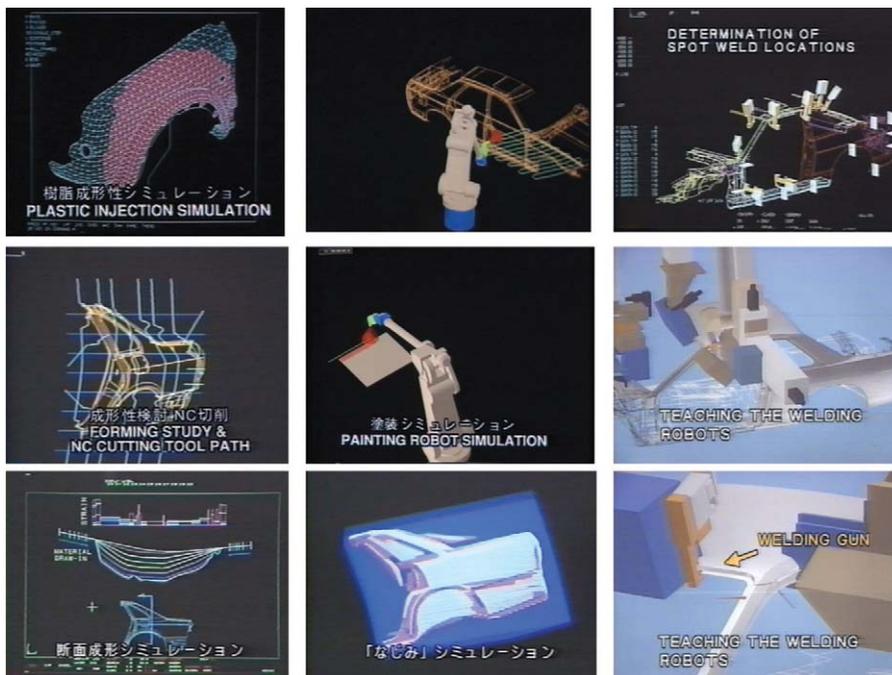


図6 設計初期段階での製造・組みつけ・塗装検討

ーカーが先に対応します。当時コンピュータはそれほど大きなものではなく今日のような有限要素法（FEM）による大規模な計算技術もなかったので、図7に示しますように自動車そのものをマスとバネに分ける。ある意味では1次元のシミュレーションで日本のメーカーによって真っ先に対応がなされました。ところがレギュレーションは前面ばかりでなく後面、側面、オフセットと多様にまたどんどん厳しくなるに従って、マスバネの1次元解析だけでは対応が難しくなり、有限要素法とか差分法が利用されたり、それからサイドメンバーというのはある意味では真直材に近いので、真直材の圧潰実験などで検討されていました。

このころはコンピュータからの制約もありますが、解析技術的にもシェル要素の衝突シミュレーションは非常に難しかった。せいぜいできたのはメンバー、梁要素です。われわれも梁要素で開発していました。ところが、梁要素の場合は、圧潰するときに、梁の屈曲部の断面積が非常に小さくなります。そうい

ったことに対応できないので、どうしてもシェルモデルで計算する必要があったわけですが、とてもできなかった。

図7に示しますのは代表的なモデルですが、80年ぐらいまではせいぜいマスバネでした。これが最初の日産自動車が開発されたマスバネモデルです。それから梁のモデルです。

いまはシェルで行われていますが、それは困難で上述のように多くの挑戦をはね続けました。ところが同じく図7に示しますように、1987～89年にPAM-CRASHとかDYNA3D、HONDOといった衝突専用の市販ソフトが出てきました。これらはシェル要素で、われわれができなかったものができてきたということで、どうしてうまくいったのか、われわれのほうで図8のように分析をしたわけですが、どうしてそれがうまくいったのかというと、まず数値理論からの逸脱でした。有限要素法のソフトというのはもちろん厳密な数学理論に基づいて開発されるわけですが、逸脱してつくられている。どうして逸脱してよかったのかというのは格好の研究テーマとなり、結

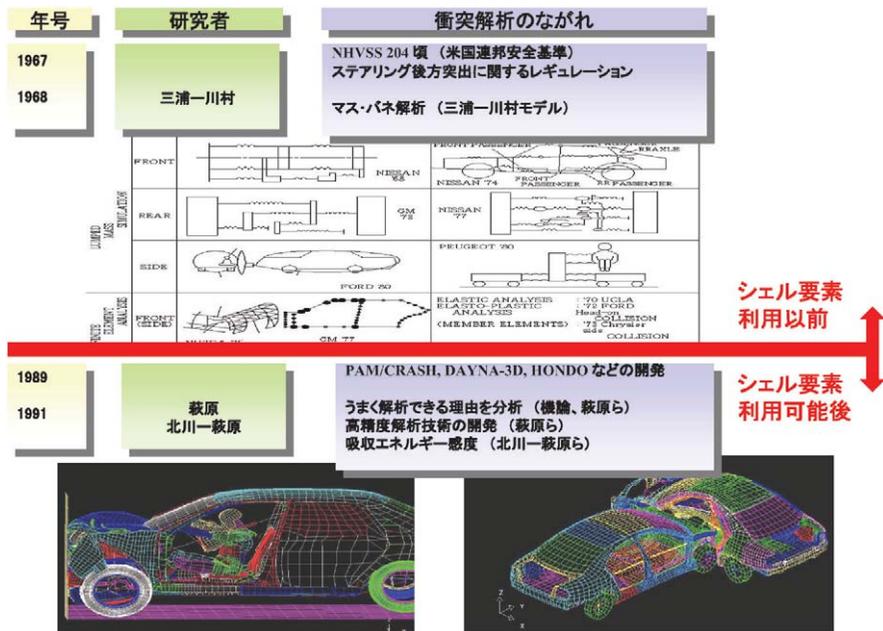


図7 衝突解析の歴史/シェル要素実現前と実現直後とモデルの変遷

多くの挑戦をはね続けた現在の有限要素法シェルモデルによる車両の衝突解析の成功の秘訣

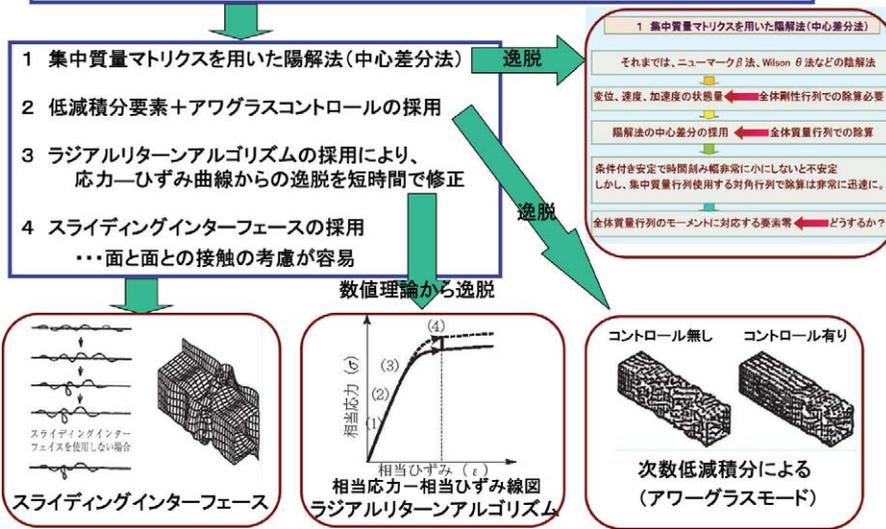


図8 シェル要素による衝突解析成功の秘訣

果オーライの場合は必ず後でそれなりの理由が付けられるわけですが、次の三つの逸脱したものがあったということです。

これは専門的になりすぎるのでざっと説明するだけにしたいと思います。まず、集中質量マトリクスを用いた陽解法の中心差分法の利用でした。それまでは精度と安定性が保証されているニューマークβ法とかウィルソンθ法などの陰解法が使われていました。

衝突のような動的というか過渡的な現象は、衝突の瞬間を時刻ゼロとして微小時間刻みごとに逐次的に変位、速度、加速度などの状態量を解いていきます。ステップnまで求めたとし次のステップ(n+1)の状態量を求める時、陰解法、陽解法ともに左辺にステップ(n+1)の状態量があるわけですが、陰解法では、右辺にもステップ(n+1)の状態量があるため繰り返し計算が必要でその計算は、剛性マトリクスで割り算するようなイメージです。有限要素法の剛性マトリクスは対称でゼロ成分が多いという極めて良好な特性を有していますが、それでも逆マトリクス

を求めるのは相当に大変です。それに対し陽解法の中心差分法ですと、右辺にはステップnまでの状態量しかなく質量マトリクスの割り算で一発でステップ(n+1)の状態量が求まります。しかも、質量マトリクスは、集中質量マトリクスを使うと対角マトリクスになるので、計算時間は非常に短い。ところが、集中質量マトリクスのモーメントの項はゼロです。それで数値的に不安定が生じますが、そこをある意味では数値の理論からはみ出してやったということです。

それからアワグラスコントロールです。有限要素法の剛性マトリクスを求めるときに、数値積分をしますが、ガウスの数値積分理論というのがあって、被積分項は基本的に多項式になるわけですが、次数によって必要な積分点数が決まります。実はそのとおり積分点を設けると、ロッキング現象といって、塑性域に達した後剛すぎるという状況が生じました。それに対して積分点数を減らす次次低減積分シェル要素は、数値理論から逸脱するものの、ロッキング現象がなくなった。どうし

でなくなったのはその後の研究で明らかにされました。その数理理論を犯した代償として、アワグラスモードといって、変形など関係のない砂時計のようなモードがときどき出てしまう。出ないようにするためにアワグラスコントロールパラメータがあらたに採用されています。

さらにラジアルリターンアルゴリズムです。弾塑性解析の難しいのは、材料特性として、相当応力—相当ひずみの構成方程式で材料特性を与えますが、ステップ (n+1) で、要素の一部が弾性域から塑性域に初めて移行するとしますと、これらの要素上で使用される相当応力—相当ひずみの関係はもとの構成方程式からこのように上にはみ出し、次のステップ以降、実力以上の強度となってしまいます。この対応が弾塑性解析で非常に難しいわけですが、構成方程式から逸脱したら次のステップで強引に構成方程式上に戻してしまうというラジアルリターンアルゴリズムも厳密には許されないわけですが、こういったもので成功したということです。

このようにブレイクスルーは、ただ教科書

通りの対応ではやはり難しいという教訓にもなりました。以上の分析を元に市販ソフトをベースに新しい機能を加え、より良いシステムの開発もすぐに行いました。ほかで成功したらずぐキャッチアップして抜くという心意気でやっていたわけです。

実験だけだとなかなかわからなかったのですが、開発したシステムを使って図9に示します真直材の圧潰の現象に関し次のようなことが初めて明確にわかりました。

サイドメンバーというのは矩形断面で軽量化のため中空断面となっていて、これが圧潰していくのですが、部材全体が圧潰するのではなく、折り畳まれるようにある間隔で規則正しく局部的に圧潰していきます。これも計算科学シミュレーションによって明確にわかったわけです。矩形断面の縦横長さをaとbとします。荷重が負荷されると、最初は荷重と変位の関係は線形です。あるとき、図9に示しますように上端から $a+b/2$ の断面上、一番弱い壁の中央で面外方向にぺこっと変形します。このように変形の間が突然変わるので座屈といっていますが、座屈が生じて、荷

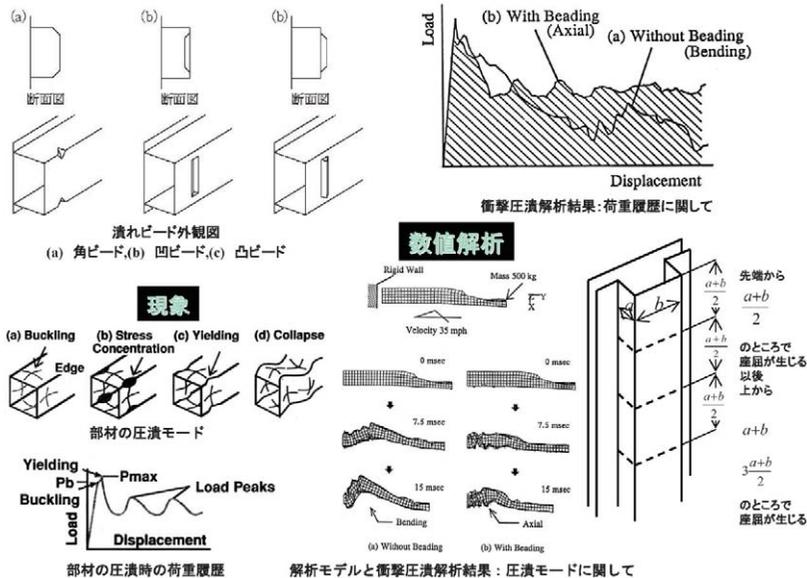


図9 衝撃解析シミュレーションの基本となる薄肉開断面真直部材の圧潰解析と現象

重一変位線図の傾きが少し寝てきます。上端から $a + b / 2$ の断面上の4つの角部が最後までがんばりそれらが屈服すると荷重は急激に下がります。次に上端から $a + b$ の断面が頑張りだして、再び荷重は上がっていきます。こういうアコーディオンのような変形をさせることによって、衝突エネルギーをできるだけ多くサイドメンバーで吸収させるということを目指した設計がなされます(図9)。

それから圧潰後の断面形状が実は3種類に分かれますが、こういったことも計算科学シミュレーションによって明確になりました。

衝突実験では微妙なところで再現性がなく、自社内で実験するとうまくエネルギー吸収したのに、輸出先のテストではうまくいかないことも耳にしたことがあります。これはどうしてかといいますと、衝突実験というのは精密機械のような極めて精密な実験をしているわけではなく、時速30マイルで剛壁面に衝突させるというもので、片当たりするようなこともあります。そうすると再現性がない場合もある。それで本来座屈するところで確実に座屈するように、その断面上につぶれビードを置くというのが我々の特許で日本車のサイドメンバーはだいたいこういう形式になっていて、この特許は91年に米国でも基本特許となりました(図9左上)。これもソフト／ハードといいますか、思いつきだけではなく、きちんとした計算科学シミュレーションによって、こういう新しい構造もつくる時代になっていると考えられます。

潰れビードを設けないと先端から順番に $(a + b) / 2$ 、 $(a + b)$ 、 $3(a + b) / 2$ 、…と規則正しくアコーディオンのように潰れるのは困難で途中で折れ曲がりそれ以降後続の断面の貢献がなくなり荷重が下がるのみで再び上がってきません。計算科学シミュレーション技術の進歩によって、潰れビードの適切な形状と配置が得られ、これにより再現性も十分に得られるという状況になっています。

ここで製品開発期間の短縮ですが、1980年代は2.5年間、ちょっと言い過ぎかも知れま

せんが2000年代は1年未満。1980年代は、設計して試作し実験し、だめだったらもう一度設計し直す。この周期をロットと称しますがこれを5ロットぐらい繰り返したわけです。1990年代は3ロット、いまは1ロット、計算科学シミュレーションで性能をつくり、あと一発の実験で確認する、そういう時代に入っているかと思います。このように、計算科学シミュレーションを核とするCAD／CAM／CAEの進歩によって、製品開発期間が短くなってきているということです。

昔は日本で設計したものを海外でつくるときは、図面を持って行って、その図面でつくる。しかし、もう図面を持っていく必要はなく、データの送受信で世界どこでも同時に全く同じものが造れる。

以上のようにCPUのキャパシティーの増加とともに、試作車台数も減ってきています。

この開発期間が短くなったのはもう一つ、リバースエンジニアリングも非常に重要な役割を担っています。たとえば現在はCADデータからものを造るというのが基本ですが、CADデータがないとき、他社の車の性能を解析で確認したり、自社製品でも前の型のエンジンを使うとか、製造されたエンジンは実は元のCADデータと微妙に違っています。製造技術の問題で、CADデータどおり造れていない。計測すると、おびただしい数の点群が得られます。それを基に構造再構成してCADデータを造る。こういうリバースエンジニアリングというのも、ものづくりに非常に役立っています。

次に、最近のトピックスですが、折り紙という、私のやっているものを少し紹介させていただきますと思います。図10に示しますように少し注目して頂いています折紙工学というのがキーワードとなっています。JSTのサイトに2008年度から日本の科学技術の紹介のコーナーがあって、折紙工学も掲載いただいています(<http://sciencelinks.jp/content/view/656/260/>)。これは日本の伝統的な手工芸である折り紙の技術を科学的に研

折紙工学は、Nature、米国数学会誌、日刊工業新聞、朝日新聞、外務省トレンズインジャパン、NHKサイエンスゼロで、そして科学技術振興機構のサイエンス・リンクス・ジャパンサイトの用語コーナーで紹介される。

NATURE 26 July 2007

日刊工業新聞
2007年10月9日

朝日新聞
2007年12月17日

日刊工業新聞
2007年11月19日



Trends in Japan March 12, 2007



図10 注目される折紙工学

究して工学に応用しようとする学問ということで、私のほうで日本応用数理学会に研究会を立ち上げました。

こういう折り紙がどのように車に入ってくるのかを見てみたいと思います。いまエネルギー危機でCO₂の問題などがあって、軽量化が非常に重要なファクターとなっています。私は、運輸分野における基礎的研究推進制度(H19~H21)(鉄道・運輸機構)で図11に示しますように「超軽量車両実現の突破口となる技術の基礎的研究」という題目で車両重量を半減するという目標を検討しています。容易に軽量化できない理由が二つあります。一つは車体の問題で、騒音・振動とか衝突特性が非常に悪くなるということです。あと一つはあまり軽くすると、突風等で容易に横転するという事です。人間は身長によって体重がだいたい決まるように、車も容積が決まると、基本の重量があって、半減などかなり逸脱するといろんな問題が生じます。それを生じないようにするのにプレイクスルー

が必要となってきます。

横風への対応として、われわれは機械式ではなく、電気式のステアバイワイヤというものを開発しています。これは今日の本題ではないのでこれだけにおきますが、あとは折り紙を使って車体を軽量化する。車体が軽量化されると、車体を支えるサスペンションも軽くできる。車体とサスペンションが軽くなると、馬力も少なくて済むということで、車の軽量化はまず車体からスタートします。折り紙というのはどんなに複雑でも2次元ですが、3次元折り紙を初めて開発し、それをメンバーに使おうとしています。パネル類は、対重量比で強度が一番高いのはハニカムコアですが、ハニカムコアに代わるトラスコアというものを発明、開発しています。

まずパネルの軽量化です。ダイアコア、トラスコアと言ったりしていますが、こういったものを開発しています。実際、フロアパネルなどをつくっています(図11)。

折り紙というのは日本の伝統文化として世

界から尊敬され、いまや「Origami」と英語にもなっているわけです。ただ、産業応用となると、英国のエンジニアによって日本の七夕飾りを参考に造られたといわれているハニカムコアだけしかない。ハニカムコアというのは蜂の巣のような構造となっていて、縦方向の剛性は非常に強いですが、せん断に弱いということで、上下面にパネルを貼り付けサンドイッチ構造にする必要があります。これはハニカムコアの製造法で、展張式とコルゲート式の二つの方法があります。

ハニカムコアは航空機を中心に利用されています。ただし、コルゲート式も展張式も基本的に糊付けされるなど非常に複雑な工程となっているので、高価です。したがって、図12に示しますように自動車車両ではレーシングカー、列車では新幹線に应用されていますが、まだ乗用車などには滅多に利用されない。

これまで開発されたコアパネルのほとんどは角柱あるいは円柱の集合体の形状をしており形状に対する幾何学的な考察や体系化がなされることはありませんでした。既存の枠組みに捉われない新しい軽量コアパネルを創製するためには、コアパネルの形そのものに対する研究が不可欠であり古典的な幾何学に立ち返ることが必要であると考えます。どのような図形が平面、空間を

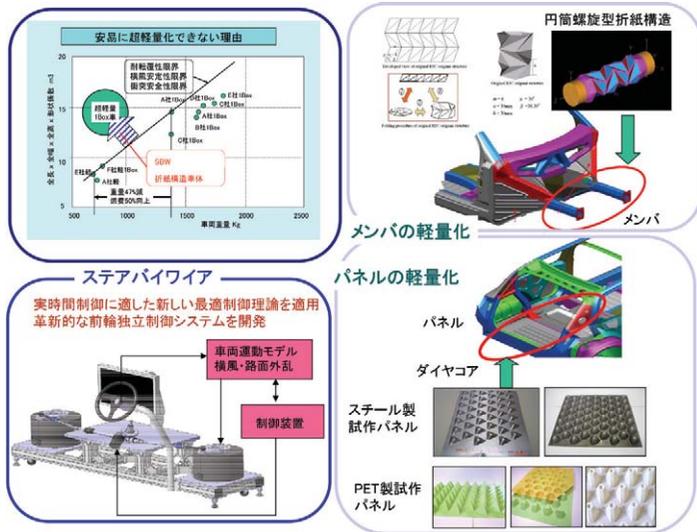


図11 容易に軽量化できない理由とその対策 (超軽量車両実現の突破口となる技術の基礎的研究)

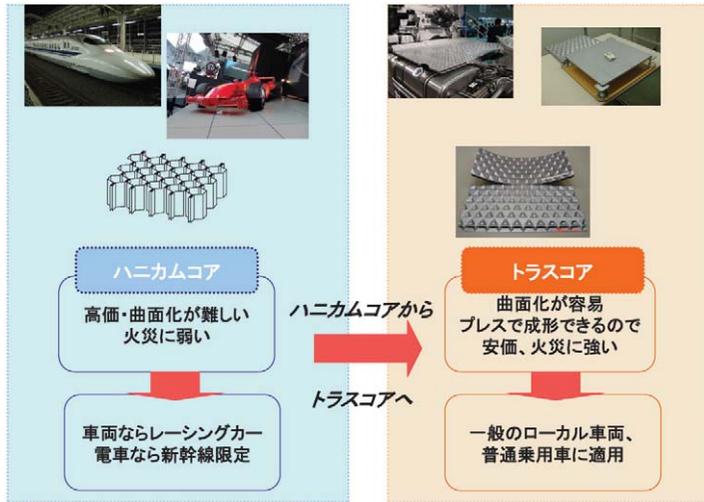


図12 ハニカムコアとトラスコアの比較

隙間なく充填できるのかそれらのパターン自体は、芸術や建築の分野で残されてきた様々な模様の中に、はるか昔から見るができます (図13)。これらの平面、空間図形のパターン群が、その神秘的な美しさだけでなく、優れた構造的、機械的性質を持つことは、米国の建築家バックミンスター・フラーが設計した様々な建築物の中に見ることができます。

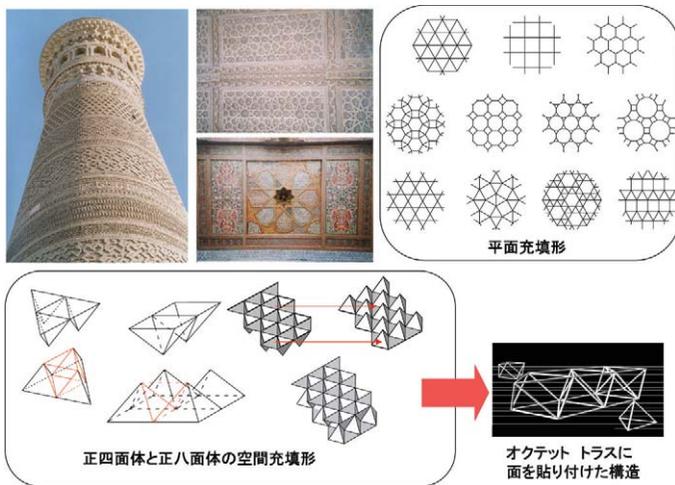


図13 平面充填形と建築構造物への利用例／空間充填幾何学から創生されるトラスコア

でオクテットトラスというのが非常に安定しているということで定評がありますが、トラスコアはオクテットトラスに面を貼り付けた形状となっています。さらにこの空間充填で得られたトラスコアから切り隅とか面離とか日本人得意のいろんな折り紙操作によって、多くのバリエーションが得られる。例えば適当に空をつくることによって、このような形状もできる。これはカーボンナノチューブの形状です（図14右上左）。

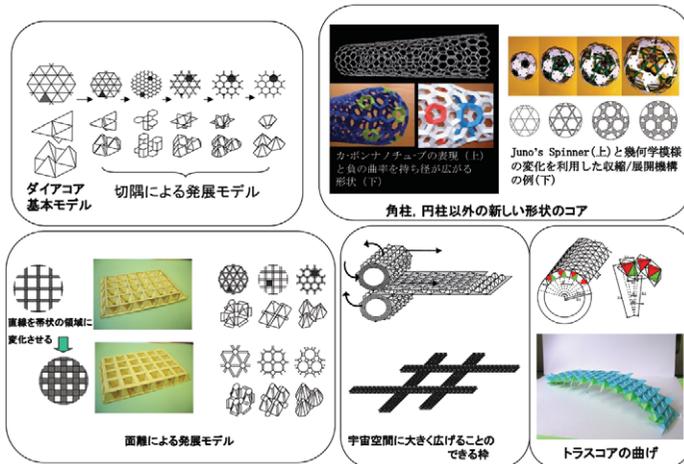


図14 トラスコアの折紙操作による菱形とトラスコアの特性

これはジュノのスピナー（図14右上右）で、建築で非常に有名なものらしいですが、こういったものが出てきます。少し変わった適用例ですが、このようにロケットのフェアリングなどの小さな場所に丸めて収納し宇宙ステーションなどで展開し上下を合わせることによって宇宙空間に大きく広がる枠に使えないか検討しています（図14右下左）。それからハニカムというのは曲面化が難しいですが、トラスコアは曲面化ができる（図14右下右）。トラス

また蜂の巣や珊瑚，有孔虫等にみられる幾何学模様は、これらの優れた特性を生物が進化の過程で取り入れてきた結果であるといえます。

図13に示しますようにトラスコアもこの空間充填の幾何学を利用して開発しています。この四面体と八面体はそれぞれ単独ではこのように容易に曲がりますがこれを図のように合わせるとほとんど変形しない。建築構造物

コアというのは非常に安定ですが、空を適当につくることによって、収縮・展開も利用できるというように検討もしています。ハニカムコアは糊付けするので、熱に弱いということで、たとえば高層ビルのフロアなどには使えない。トラスコアはプレスで造れます。これはプレス成形の解析モデルです。コア高さが高いといきなりトラス形はつくれないという

ことで、まず球形にして、それから三角形にする多段階のプレス成形解析シミュレーション技術を開発しています（図15）。このような製造の計算科学シミュレーションは非常に難しいですがこういうシミュレーション技術がないと、せっかく新しいものを考えても安価に製造できず世の中に出ないということになります。

ハニカムコアがすでに数兆円の産業となっていますから、トラスコアはそれ以上の産業になるのではないかと期待しています。

そしてこれを車に利用するわけですが、これが平板の共振周波数ですが、同じ重量でも、数倍周波数が上がっています。トラスコアがフロア構造に適用されると、低周波の振動が小さくなるということがいえます。

次にメンバーの軽量化です。これは図16の反転螺旋型円筒折り紙構造（以下、簡単に反転螺旋型）といって3次元折り紙です。左と右が一致する、それから展開できるという条件で、 α と β を決めます。 α は多角形の辺数を決めます。 β がこの範囲にあると、簡単に収縮します。ところがこれを逸脱すると、

回転しながら収縮し反力も相当期待できる。この性質を自動車のエネルギー吸収部材に利用できないかという研究です。実際この構造を利用すると、いままでにない非常に優れた特性が得られています。それをお見せしたいと思います。

いまのサイドメンバーというのは、われわれのほうで1991年に出した特許を基にして、上述のようにビードを設けています。これを設けないと途中で容易に折れ曲がり特性の再現性もない。ビードを設けることによって初めて理想的な圧潰モードと再現性が得られる。いまのサイドメンバーはかなり苦勞して造られているわけです。

それに対して、これはハイドロフォーミングで成形した反転螺旋型です。実際のサイドメンバーは、完全なアコーディオン型ではなく、だいたいこんな感じです。サイドメンバーはできるだけ潰したいですが、自らのかさばりのために70%で変形は止まります。ところが折り紙構造の反転螺旋型ですと、確実にぺしゃんこになります。そういったことで変形量も長くなる。それから最初の荷重が高す

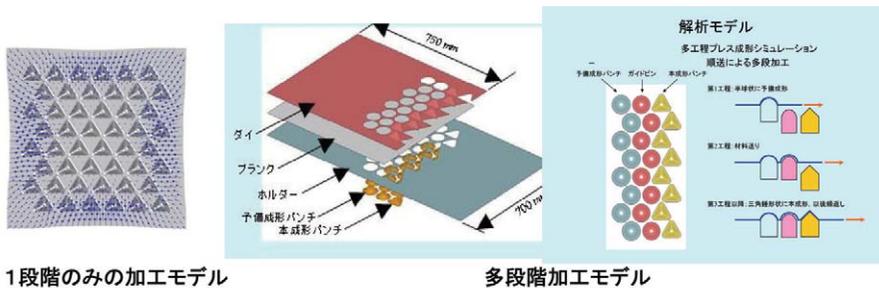


図15 多段階解析モデルと多段階成形によるフロア構造

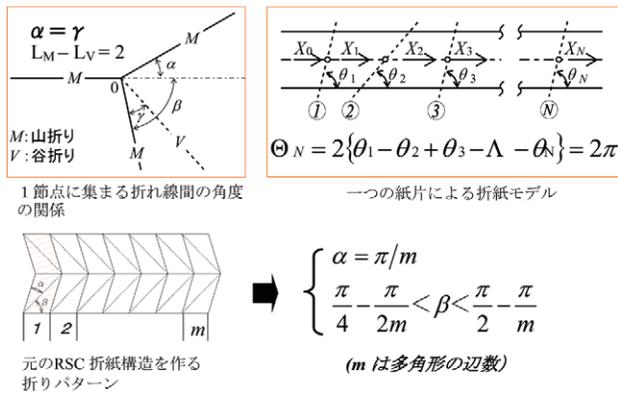


図16 反転螺旋型円筒 (RSC) 折紙理論

ざると、人体にはあまりよくない。理想はフラットな荷重—変位特性ですが、反転螺旋型構造の場合、図17下左に示しますようにフラットにかなり近い荷重—変位特性が出ています。こちらが従来のもの、こちらが反転螺旋型です。回転しながら圧潰していく様子が見られます。このように確実に理想的に潰れます。潰れる時間も反転螺旋型のほうが長い。衝突というのはだいたい3ミリセックで終わるわけですが、少しでも衝突時間を長くする

ことが乗員のダメージを削減することにつながり有利となります。

次に、第21期学術会議、矢川先生が委員長の総合工学委員会に、「計算科学シミュレーションと工学設計分科会」が設けられ(萩原が分科会長)そこに四つの小委員会を設けています。これら四つの小委員会の位置づけですが、計算科学シミュレーションは工学設計にすでに大きな寄与をしています。さらにその効

率を上げるために、ものづくり支援シミュレーション検討小委員会を設けています。それから工学設計で培われた計算科学シミュレーションを「イノベーション25」の実現に寄与する。「イノベーション25」では、ライフサイエンス分野、情報通信分野、環境分野、ナノテクノロジー・材料、環境、社会基盤、フロンティアの実現がうたわれていますが、そのキーワードはマルチスケール・マルチフィジックスと心と脳が考えられ、この二つの小

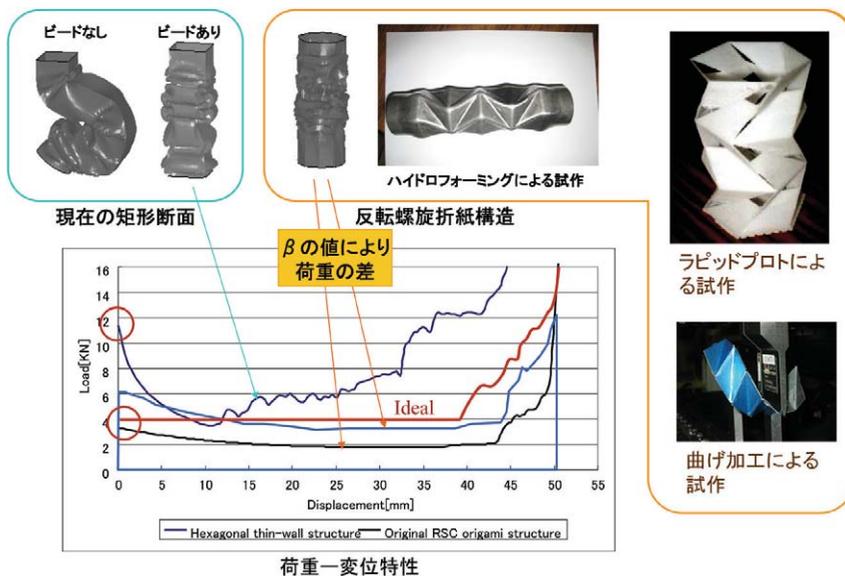


図17 反転螺旋型円筒 (RSC) 折紙構造の圧潰特性と試作例

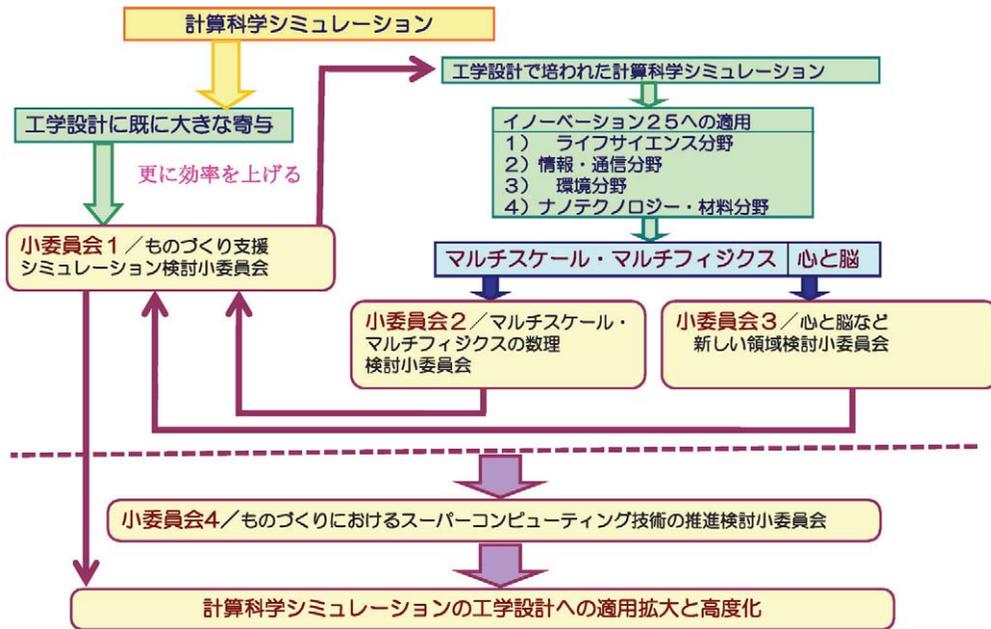


図18 第21期学術会議「計算科学シミュレーションと工学設計分科会」の各小委員会の位置づけ

委員会が設けられています。これら3つの課題に対し2012年稼働予定の次世代スーパーコンピュータをどのように最大限利用できるようにするかが第4の小委員会です(図18)。

まずマルチスケール・マルチフィジクスですが、一つはJSTにCREST(戦略的創造研究推進事業)というのがあって、矢川先生が研究総括をされています。先ほどのトラスコアを例にしますと、コアが高いほど、剛性が高い、しかしコア高さを高くしようとすると、成形が難しい。成形をうまくするために、材料組成まで考える(図19)。そうすると、機能とか成形とかマクロなものと材料組成というミクロなものを同時に扱って初めて理想的なコアができるなど、マルチスケール・マルチフィジクスはまさに今後の、いまや計算科学の進んだ現状では極めて身近な課題になってくると考えられます。

それから心と脳など新しい領域検討小委員会ですが、自動車为例にしますと、衝突とかほとんどの特性は初期設計段階で最適設計ができる時代になっています。残された課題は、

乗り心地とか操縦安定性、音質といった人間特性にかかわるものです。この人間特性にかかわるものの共通点は、人によって好み異なる。そこで、顔の表情で満足度を判断したらどうかという研究も進んできています(図20)。

人と機械の協調には、静的協調と動的協調があると思われます(図20左上)。人間特性にかかわるものは、人種とか性別、年齢によって好みが違う。従って人間特性にかかわるものを設計しようとするときに一番重要なのは、まずターゲットユーザーを決めます。たとえば次のブルーバードは40歳代の日本人の男性を対象にする。そうするとだいたい好みが決まります。その好みに合うような設計をするというのが静的協調です。動的協調というのは、同じターゲットユーザーでももちろん人によってより細かい所で好みが変わってくる。その表情を見て、性能を調整します。これが動的協調でこういう研究も今後ますます重要となってきます。

人間が自分の感情を表現するのは、言葉が

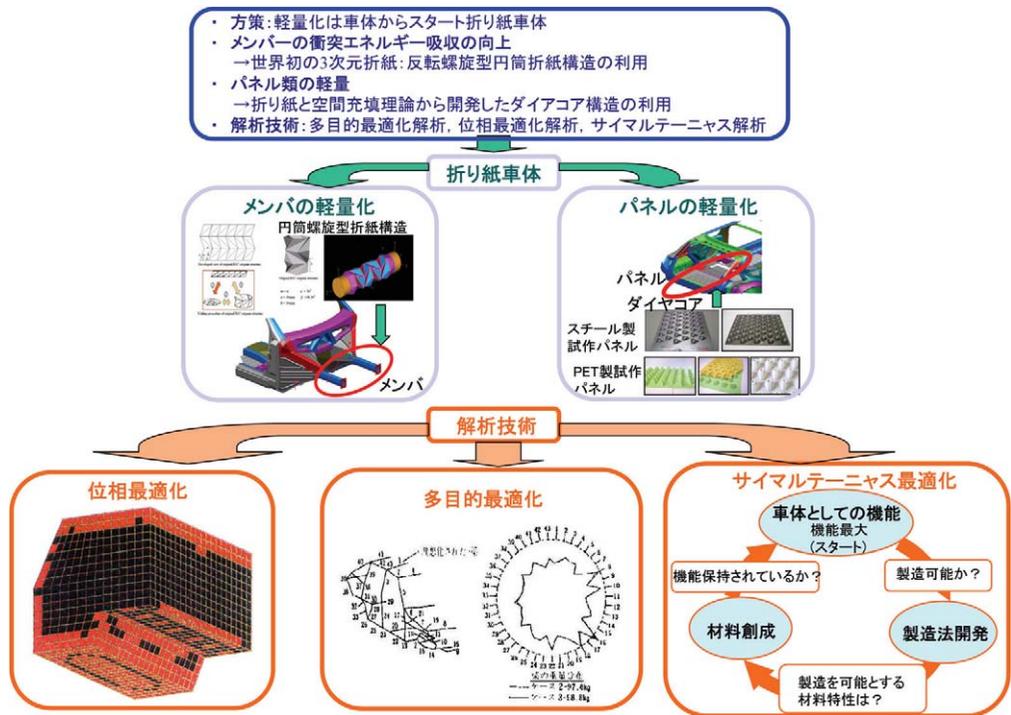


図19 マルチスケール・マルチフィジクスの物づくりの例

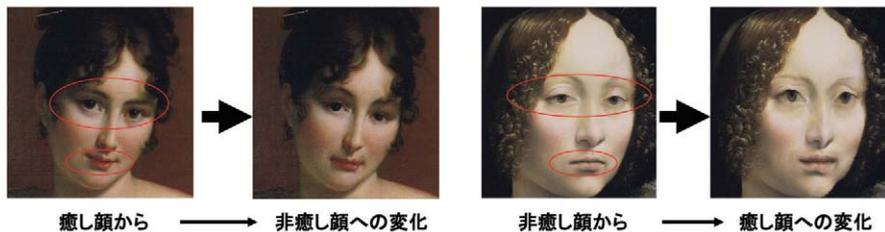
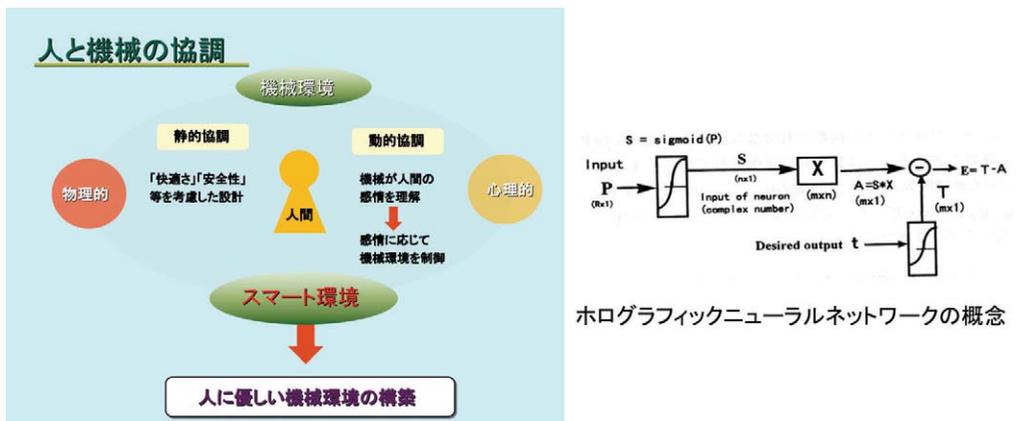


図20 癒し工学を利用した人と機械の協調の様子

7%、表情が55%といわれています。CCDカメラなどでドライバーの表情をうかがって、たとえば空調が利いていないようだったら空調を自動的に強くするとか、シートを軟らかくするとか、音質も変えてみよう、そういった人間特性にかかわる性能を動的協調で上げようという考えです。

表情というのが非常に重要となってくるわけですが、表情に関する言葉というのは古今東西400以上あります。ところが、エクマンという人が、これは本当かどうか疑う余地もあると思いますが、喜び、悲しみ、驚き、怒り、嫌悪、恐怖という6基本表情は、人種とか文化、性別などに関係なく、万国共通であると言っています。

フェーシャルアクションユニットといって、口をへの字に曲げる、眉毛をつり上げる、鼻をぴくぴくさせるなど表情を決める顔の動きには44あって、その組み合わせで喜びとか悲しみ、驚きなどを察知して、この人は満足しているといったものがわかることになっています。顔を2次元の平面として、30点のXY座標で60の変数を入力にして、喜び、悲しみといった六つをアウトプットにして、この入力に対して喜びなどと学習させて予測する、そういう研究もすでにあります。

ただ、機械工学で使われているニューラルネットワークというのは、ほとんどバックプロパゲーションニューラルネットワークです。これが入力層のニューロン、これが出力層のニューロン、それから中間層。システムが喜びと言っているのに、実際は悲しみであったとしたら、まず中間層と出力層間のバネ定数をそれに合うように変える。次に入力層と中間層の間のばね定数を変えるというように逆順に定数を修正していくことからバックプロパゲーションなどと称されていますが、中間層をいくつ設けるとか、中間層のニューロンの数をいくらにするとか、まだ決まりがないようなもので、なかなか難しいという面があります。そういったことで、この研究というのは実は止まっているとも考えられ

ます。それに対してわれわれはもう一度見直しました。心と脳に関する各研究項目の位置づけですが、まず脳の計測研究というのがあります。暗算するときは脳のどこかが光ったというような研究です。もう一つはロボットが人間の挙動を再現することによって初めて脳がわかるんだというロボット工学者の研究。それから音声とか身振り、動作、表情などを観測して、逆問題として脳の活動を把握する。大きく分けると、計測研究、ロボット工学的研究、バイオミメティックスの研究、この三つがいまのところ心と脳の主要な分野だと考えられます。これらを融合して、さらにいいものにしようというのが学術会議の一つの目的となっています。

私の研究室の北岡哲子研究員は癒やし工学というのを提唱しています。先ほどのバックプロパゲーションニューラルネットワークは非常に使いにくいということで、ホログラフィックニューラルネットワークというもので進めています。これはカナダのサザーランドという人が開発したのですが、ほとんど使われていない。ただ、一読して、これは使えると考えて、これを発展させたものです。

これは入力を複素領域に変換します。供試データも複素領域に変換します。複素領域に変換すると、フーリエ変換のように、脳が一つの伝達マトリクスで表現されるということで、複素数領域に変換された入力と伝達関数を掛けると、システムが打ち出すアウトプットが得られ、これと供試データとを比較して伝達関数を更新していきます。この場合、バックプロパゲーションの1,000倍ぐらいの速さで学習と予測ができます。

先ほどの例は顔を平面2次元として60を入力していますが、北岡研究員は元来心理学が専門で、目の傾きとか、心理を分析するときを使うようなデータを入力にしています。

たとえばこれを見て、癒やされる、少し癒やされる、癒やされないと感じるというのを選んでもらいます。被験者が六つの絵を見て判断すると、次の七つ目からこの人は癒やさ

れるか癒やされないか予測できる。それから
どういうところで癒やしとを感じるのか。被験
者Aは口のあたりを重要視しているとか、被
験者Bは目のところを重要視しているといっ
たことがわかります。これは癒やされる、こ
れは癒やされないとしたときに、その人の好
み、何をもって癒やしとを感じるのかがわか
りますから、それを利用すると、癒やされな
い表情から癒やされる表情に変えられること
が得られています。

もう一つ学術会議の委員会で非常におもしろ
いと感じたのは、早稲田大学の内藤健先生
が発表されたのですが、MRIで見た脳のしわ
画像とエンジンの燃焼室内流れの渦パターン
が非常によく似ている。これがMRI画像、こ
れがエンジンの燃焼室の中の流れです。これ
は内藤先生の結果で、私はそんなに詳しくな
いのでこれ以上のことは説明できないですが、
エンジンに流れのしわができる。それとMRI
画像がとてもよく似ているという説明がなさ
れました。これはどこまで正しいかどうかわ
かりませんが、計算科学シミュレーションで
いろいろ得られたものが脳のMRI画像などと
非常に似ているということもあながち間違っ
てはいないという感じもします。

まとめですが、まず第1世代は実験の代替
としての計算科学シミュレーション、第2世
代として、マルチスケール・マルチフィジッ
クス、心と脳がキーワードですが、こういっ
たもので新しい価値が誕生してくるのではな
いかと考えられ、計算科学シミュレーション
はさらに進化する。今後誕生する新しいハー
ドも未知の解明も計算科学シミュレーション
なしでは得られない、あるいは少なくとも新
しいハード、未知の解明は計算科学シミュレ
ーションによってより大きな可能性が得られ
ると感じています。

そして脳の研究も、計測、逆問題、ロボッ
トなどがキーワードですが、製品の最適化構
造と脳モデルとの相似性も一つのインパクト
になって、脳の研究がさらに進んでいくの
ではないかという感触も先日の学術会議の委員

会で感じましたので、紹介させていただきま
した。これで終わらせていただきます。どう
もご静聴ありがとうございました。