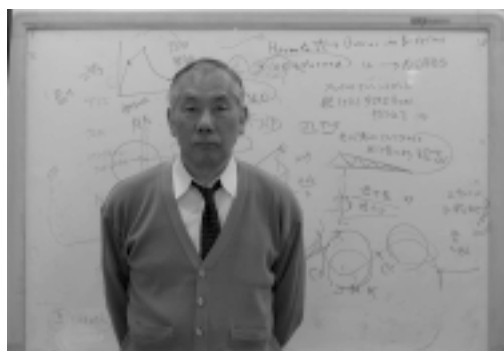




先進的なものづくりを目指して

萩原 一郎 研究室 ~ 機械物理工学専攻



萩原 一郎 教授

萩原先生は企業で自動車の開発に携わってきた経験を活かし、自動車の軽量化をテーマにした研究を行っている。中でも、衝突対策としての適用を考え研究が進められている「折り紙構造」は注目されている。この折り紙構造はデジタル設計技術を用いて開発された。現在は折り紙構造だけでなく、人工物の大半はデジタル設計技術によって開発されている。そのため、それを推進する「リバーズエンジニアリング」という技術も非常に注目されている。今回は「折り紙構造」と「リバーズエンジニアリング」の研究について紹介しよう。



デジタル設計技術によるモノ開発

今、自動車は軽量化が進んでいる。これは自動車に対する省エネルギーのための環境対応方策である。自動車の環境対応方策で注目を浴びているのは電気自動車とハイブリッド車だが、電気自動車は多くの課題を残しており、ハイブリッド車は電気とエンジンの二種類の動力を使うために重量が増す。そのため、製造から廃却までのトータルでの資源・エネルギー消費を考慮すると、軽量化が最も有効だと萩原先生は考えている。そのため、萩原研究室では車体の軽量化をテーマにおいた多様な研究が行われている。まずは研究の基礎となる車の開発スタイルを紹介しよう。

現在主流となっている開発スタイルはCAD (Computer Aided Design) やCAE (Computer Aided Engineering) などのデジタル設計技術を用いたものであり、人工物の大半がデジタル設計技術を用いて開発されている。CAD・CAEとはコンピュータによる設計をする際に用いられるソフトのことである。簡単に言うと、CADは形を作るもの、CAEは製品の強度やメカニズムなどの機能や性能を確認するためのコンピュータシミュレーションを行うものである。

次に車が完成するまでの開発の流れをみてみよう。これまでの開発スタイルは、イメージスケッチをしてそれを基にクレイモデルという粘土のモデルを作るというものであった。それを計測して代表的な座標を拾い三次元のCADデータにし、CADデータから試作車を作る。そしてCADデータや試作車から実験・解析シミュレーションを行い、機能や性能と様々な状況下での動作を確認してから生産を開始する。つまり、試作と実験を幾度も繰り返して製品の性能などを確かめていたのだ。これに対し、現在では最初から最後まで全ての工程をデータで行い、実験はその確認のためにだけ行うといった模擬実験、模擬製造で開発を行っている。このような開発スタイルの変化はモノベースの開発スタイルからデータベースの開発スタイルへの変革といわれる。

データベースの開発スタイルへと変化したことによる一番の利点は開発期間（企画してから市場に出るまでの期間）が短縮されたことである。実際に車を試作してから市場に出るまでの期間がこれまででは約40ヶ月であったが、現在では12～15ヶ月になっている。



折り紙構造による衝突対策

まず、折り紙工学について説明しよう。折り紙工学とは日本の伝統である折り紙を工学的に利用しようというものであり、京都大学の野島先生が提唱した。子供の頃に遊んでいた折り紙だが、その折りたたみ方を基にしてもつくりをするというのが折り紙工学の考え方である。

先ほども述べたとおり、萩原研究室では自動車の軽量化をテーマにした研究を行っている。中でも衝突安全性や強度の高い部材開発に力を入れている。なぜなら自動車を軽量化することで、強度が低くなりエネルギー吸収特性が悪化するからである。萩原研究室では折り紙工学を利用した、軽量で耐久性の高いパネル構造である「コア構造」と、**図1中央**の反転螺旋型円筒折り紙構造の螺旋角度によってつぶれ方が変わってくる「折り紙構造体」の研究を進め、自動車の衝突対策に使うことを提案している。

コア構造の一つの例として、自動車のパネルへの適用が検討されているダイアコアモデルを紹介しよう。これは前述の野島先生と共同で開発しており、萩原先生は側面からの衝突対策として使えると考えている。ダイアコアモデルとは折り紙構造に従い平板に正四面体型の凹凸をつけたものである。そしてその2枚の平板を、正四面体型の稜線が接合するように組み合わせることで変形しに

くくなっている**(図1左)**。このダイアコアモデルは、現在主流となっているハニカムコア構造(2枚の平板内に蜂の巣状の穴が開いている平板が入っているもの)よりも高い強度を持ち、はるかに安価で製作することができる。また、ハニカムコア構造は曲面に使用することができないが、ダイアコア構造は曲面でも使用可能である。そのため、ダイアコアモデルはハニカムコア構造に代わるパネル構造として期待されている。

次に自動車の前面もしくは後面からの衝撃吸収の研究を紹介する。自動車の衝撃吸収では、サイドメンバーという車体前端から車体の車軸方向に通っている二本の骨格の変形が重要になってくる。なぜなら、人が乗っている座席部分の変形を最小限に抑えるには、自動車の前部構造を変形させ、衝突のエネルギーを吸収しなければならないからだ。だが、自動車は前部構造にエンジンやサスペンションがあり、それらは硬く変形しない。よって、サイドメンバーの変形特性が衝突のエネルギー吸収特性に大きく影響を与え、そのためにサイドメンバーの変形の仕方を制御することが重要なのだ。しかし、それは車体設計で最も困難なことであると言われている。理論的にはサイドメンバーが先端から順にアコーディオン状に変形していく場合が最良の衝突エネルギーの吸収特性と

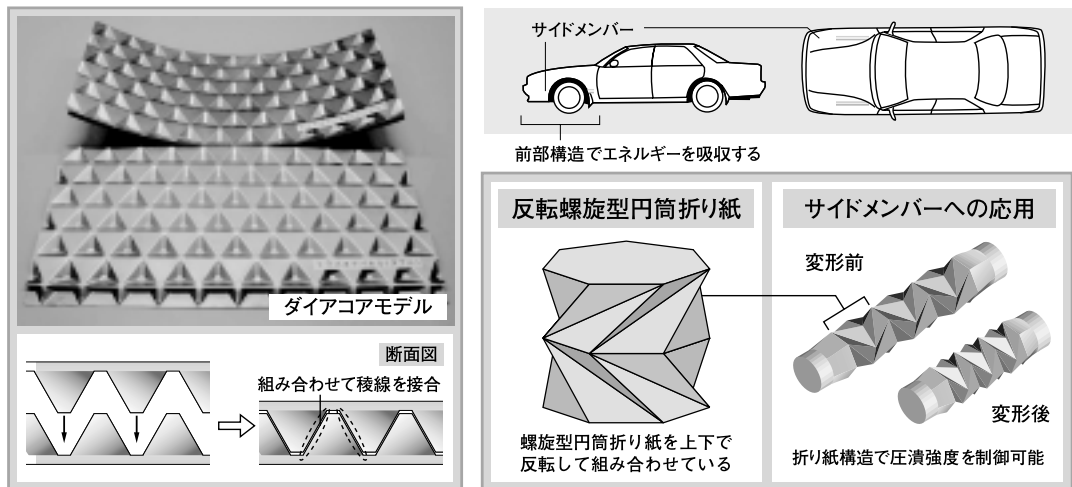


図1 折り紙構造(パネル及び部材)

なる。しかし、これが実現できてもサイドメンバー自体の重なりによるかさばりで変形量が制限され、理論値どおりのエネルギーを吸収させることができない。

そこで萩原先生は**図1中央**にあるような反転螺旋型円筒折り紙構造というものを自動車のサイドメンバーに応用することを考えた。なぜなら折り紙構造を使って折りたたむときは、それ自体のかさばりが少ない状態で折りたたむことができるからだ (**図1右下**)。実際にシミュレーションを行い変形率を調べると、現在の四角柱のサイドメンバーでは70%だったのに対し、反転螺旋型折り紙構造体を使ったサイドメンバーでは90%に上がり、効果的にエネルギーを吸収できるということがわかった。これは、折り紙構造体へ軸方向に力

を加えると、規則的に折りたたまれるためである。

このように折り紙構造を使って上手くつぶれるものが作れるということから、萩原先生は角を丸く設計した折り紙構造をペットボトルに利用できないかとも考えている。折り紙構造をペットボトルに利用すれば、飲み干したペットボトルを簡単につぶすことができ、そのために輸送効率が上がり、リサイクルコストやエネルギーの低減にもつながるのである。折り紙構造の角を丸くする理由は、持ちやすく、外観品質が良いという二つの条件を満たすためである。外観品質は見た目のことで、製品化するものの設計では機能とともに重要な要素である。こうした機能を保持したまま変形するというのも、デジタル設計技術を用いるからこそ可能となるのだ。



リバースエンジニアリングの開発

次にリバースエンジニアリングを紹介する。現在はCADデータからものが作られているが、リバースエンジニアリングはそれとは逆に、実物を三次元データへ変換する技術のことである。

現在の製造技術ではCADデータ通りのものが作れないので、CADデータからとった実験・解析シミュレーションの結果と実際の製品の間に誤差が生じてしまう。リバースエンジニアリングを行うことで、実際の製品と誤差がないCADデータが得られ、正確なシミュレーションが可能となる。その他にも、二つのCADデータを比較してどれだけ誤差が生じているかを知ることができる。そのため、今の製造技術の精度を知ることができるので、リバースエンジニアリングは製造技術向上に役立っている。

他にもリバースエンジニアリングの使用目的には、もともとCADデータがない製品のCADデータを作れるということなどがある。そのためリバースエンジニアリングの応用先は工学的分野だけにはとどまらない。例えば考古学では遺跡から出てきた土器などをデジタルデータとして保存するために使われている。本物は劣化してしまうが、デジタルデータとして保存すれば劣化などが起きずに、発掘された状態のまま保存することができる。また現在、航空測量はレーザーで行われているが、その測量結果から三次元の地図を作るのに

必要なCADデータを作ることができる。

リバースエンジニアリングの手順は**図2**の通りである。そしてリバースエンジニアリングを行った後にFEMモデルを使用して解析を行う。FEMモデルはCADデータから、三次元構造体は四面体や六面体に、二次元構造とみなせるものは三角形や四角形にメッシュ分割したものである。そしてFEMモデルの各要素に材料特性（モデルが何でできているのかといったこと）や、荷重条件（どこに力が働いているのかといったことや重力の大きさ）、拘束条件（どの節点のどの自由度を拘束するか）を与えると、必要な特性が得られる。このFEM (Finite Element Method) というのは有限要素法という解析方法であり、CAEにおいて行われているシミュレーションの代表的な方法である。FEMモデルを使って解析を行うと、熱特性や強度特性といった通常の品質のほかに、振動や騒音が小さいといった付加価値の品質を調べることができるので、製品をさらに高品質にしていける。

では、詳しく工程を説明しよう。まず、実際の製品を計測する。計測は製品が板上のものであれば、CCDカメラやレーザー光を使い、立体的なものであればX線やCTスキャンなどを使う。その結果としておびただしい数の点群データが得られるのでそこからSTL (STereo Lithography) デー

タを作成する。STLデータとは計測によって得られた点群を結んでできた三角形面で表面を表すという、最も自然な方法で表現されたものである(図2右STLデータ)。STLデータを作るとき実際の製品を計測した結果の点群にはノイズという実際の形状とは関係のない点が取られており、それが結果に悪影響を及ぼすので取り除いていく必要がある。また、STLデータの簡略化といってデータを簡易化するために三角形面を少なくして表現することもある。この操作はSTLデータの作成と同時にに行われている。

STLデータができるとCADサーフェスで表面を作る(図2右CADデータ)。CADサーフェスとはCADデータの複合曲面からなる複雑な形状を曲面関数で表したもので、これによりSTLデータで三角形面だった表面がカーブで表現される。

以上のようにリバースエンジニアリングは、STLデータの作成技術、ノイズ除去技術、点群の削減技術、CADサーフェスを滑らかに接続する技術等からなっているが、萩原研究室ではそれぞ

れに独自の方法を用いて開発を進めている。以下STLデータの作成方法とCADサーフェスの曲面関数の表現方法において、萩原研究室がリバースエンジニアリングに使用している方法を標準的な方法と比較して説明する。

まず、STLデータを作成する方法について説明する。標準的な方法はドロウネ法といい、方法は次の通りである(図3上)。二つの三角形内にまだ結ばれていない点があるとする。既にある三角形の外接円内に点があったら、これらの三角形はなくし、なくした三角形の各頂点とその点とを結んで新しい三角形を作るというものである。一方、萩原研究室で開発された手法はMOA(Maximum Opposite Angulation)といい、その方法は次の通りである(図3下)。まず、任意の点を選び、その点から長さが最小となる点を点群から選んで結ぶ。そして三角形の残りの頂点として、新たにできる二辺のなす角が最大となる点を取る。そして新しく得られた三角形の各辺に対して同様に最大角となる点を新たな三角形の頂点と

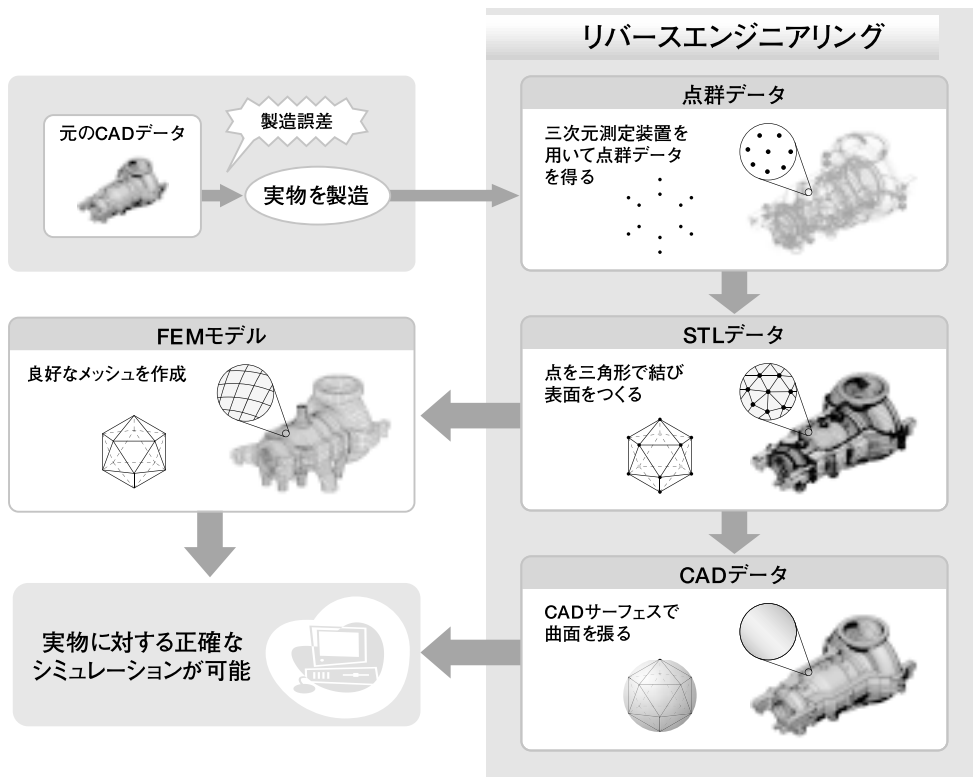


図2 リバースエンジニアリングの流れ

して選んでいくというものである。MOAだとアスペクト比（三角形の最小辺と最大辺の比）が1に近づくような三角形を最初から得ることができる。図3に示すような平面上の点ではドローネ法とMOAでは同じ結果が得られるが、複雑な曲面では、MOAのほうが簡単に精度良くSTLデータを作成することができる。

また、MOAのもう一つの利点は、面と面の境となる部分を示す特徴線を自動的につかめるということである。ドローネ法でSTLデータを得ると、ノイズ除去やSTLデータの簡略化のために点を間引くときに特徴線がずれるという問題が生じる。特徴線がずれるということは計測したものの形が変わってしまうことにつながる。萩原先生はMOAを使うと特徴線が自動的につかめるということを利用して、点群から点を間引いていくときにも、特徴線から遠い順に間引いていくという独自の方法を使うため、特徴線がずれることなく点を間引くことができる。

次にCADサーフェスにおける曲面関数の表現方法を説明する。標準的な曲面関数の表し方はNURBSという方法である。NURBSにおいては（多項式）/（多項式）という複雑な有理式で曲面関数を表現している。だが多項式と三角関数で表現すると全ての形状を表現でき、CADサーフェ

スを表すのに最適であることが萩原研究室で発見された。この表現方法がC-curvesであり、NURBSに比べ式が簡易であり、表現が速くなる。例えば曲面関数を使って表すときに、全体を一つの式で表すことは困難なので、CADサーフェスは分割して求められている。自動車車体外板のように外観品質が強く要求される場合の接続の際にはC2連続といって曲面関数の二回微分が連続であるということが条件になってくるが、C-curvesでは式が簡易なためにC2連続を与えることが比較的容易である。一般に、データを自動的に分割し、CAD曲面を自動的に得ることは難しいといわれているが、萩原研究室では、MOAで特徴線をとらえ、これをもとに自動的に分割し、各区分の曲面を張り、必要な連続条件で隣接する曲面間を接続する研究を進めている。

萩原研究室で行っているCADやCAEなどのデジタル設計技術を用いた総合的な研究はリバーエンジニアリングの分野において先進的なものである。とはいえ、リバーエンジニアリングにはまだ発達余地があり、新たなリバーエンジニアリングの開発をすることでデジタル設計技術がさらに向上すると萩原先生は考えている。今後はさらに新しいCADやCAEソフトの開発に取り組み、先進的なものづくりを目指している。

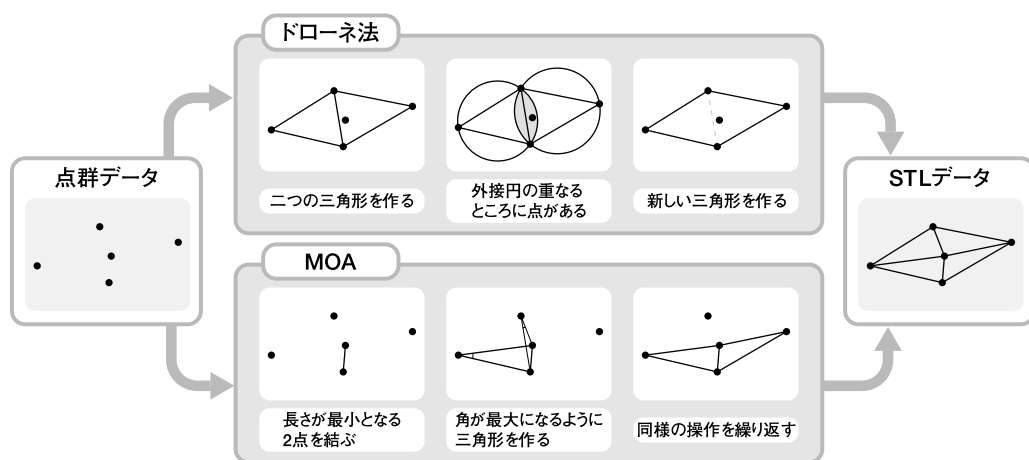


図3 ドローネ法とMOAの流れの相違

今回の取材では萩原先生から多数の研究のお話伺うことができ、大変勉強になりました。お忙し

い中、度重なる取材に快く応じてくださった研究室の皆様へ厚く御礼申し上げます。(藤根あゆみ)