

# ポリゴンエンジニアリングの実現に向けた 理化学研究所との共同研究

Collaborative Research on Polygon Engineering with RIKEN

谷本茂樹

**要約** 3次元計測装置で採取したデータを、エンジニアリングシステムで利用するニーズが急速に高まっている。しかし、計測データはポリゴンモデルとして扱われるのに対し、従来のエンジニアリングシステムでは曲面モデルが使われているため、計測データをエンジニアリングシステムで有効に使えないという問題がある。これを解決するために、ポリゴンモデルを中心に置き、計測とCAD/CAM/CAEを統合する新しいエンジニアリングシステムの開発を構想した。このシステムの実現に必要な要素技術を研究するために、理化学研究所と日本ユニシス・エクセリュージョンズは、「計測情報処理研究チーム」を理化学研究所内に設立し、「ポリゴン用図形処理」「断層画像処理」の共同研究を始めた。この研究と連携し、産業界の計測データ処理の課題を解決することを目的として、VCADシステム研究会に「ポリゴンエンジニアリング分科会」を発足させた。ポリゴンモデルを中心に置くエンジニアリングシステムが実現すれば、製造業の設計品質向上や工数削減が望めるとともに、医療などの分野の可能性を拓く新しい技術基盤を提供できるようになる。

**Abstract** There is a fast growing need for utilization of the data collected by three-dimensional measuring equipment in engineering system. However, surface model is used in the conventional engineering system though measurement data is treated as polygon model, so there is a problem that measurement data is not useful in the system. To solve it, UEL Corporation conceived development of new engineering system that integrates measurement and CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design/Manufacturing/Engineering) centering on polygon model. RIKEN and UEL Corporation co-founded "Measurement Information Laboratory" in RIKEN to collaboratively research component technology necessary for this system implementation and started investigation of "Geometric processing for polygon" and "Tomographic image processing". "Polygon Engineering Subcommittee" was formed in VCAD System Consortium to interact with this research and to resolve issues of measurement data processing in industry. When the engineering system that centers on the polygon model comes off, design quality improvement and reduction of man-hour in manufacturing can be expected and new technology base that opens the possibility of medical services field can be provided.

## 1. はじめに

X線CT装置や非接触型計測器など3次元計測装置で採取される計測データをエンジニアリングシステムで有効に使いたいという要求が、製造業や医療分野など広い範囲で急速に高まっている。現実世界の物体を3次元計測装置で測定し、計算機の仮想空間に物体の形状モデルを構築する。その形状モデルを使って、距離や表面積の測定、シミュレーション、模型作成、曲面モデルの変形、金型切削経路計算など計測データの実用化が始まっている。

計測データは三角形の集まりで物体表面の形状を表現する。この表現方法はポリゴンモデルと呼ばれる。計測データをCAD/CAM/CAE (Computer Aided Design/Manufacturing/Engineering: コンピュータ支援設計/製造/解析) などのエンジニアリングシステムで利用する場合、ポリゴンモデルのままでは処理できないか、できても十分な計算精度が得られないことが多い。

この課題を解決するために、ポリゴンモデルを直接CAD/CAM/CAEで扱うポリゴンエンジニアリングシステムの開発を着想した。このシステムの実現に必要な要素技術を研究するために、独立行政法人理化学研究所(理研)と日本ユニシス・エクセリューションズ株式会社(UEL)は、「ポリゴン用図形処理」「断層画像処理」の共同研究を開始した。また、この共同研究と連携して、特定非営利活動法人VCADシステム研究会内にポリゴンエンジニアリング分科会を設立した。本稿では、計測データ処理の課題、ポリゴンエンジニアリングの構想、理研との共同研究、VCADシステム研究会の活動について述べる。

## 2. 計測データの利用

計算機の仮想空間に作られた形状モデルを現実世界の物体にするには、NC工作機械や3Dプリンタを利用する方法がある。逆に、現実世界の物体を計算機内の3次元形状モデルとして転写するには、3次元計測装置が使われる(図1)。計測する対象は、生体、工業製品、芸術作品、建築物、地形など広い範囲にわたる。エンジニアリングシステムは、設計者の意図する製品形状を計算機内に作り、それをシミュレーションしたり、現実世界の金型などに変換したりする道具として発展してきた。計測により、現実世界の物体の形状を計算機に取り込めば、CADで作成した形状と同様にエンジニアリングシステムの計算対象にできる。すなわち、計測されたデータに対して、計算機内で形状の変更、評価やシミュレーション、工具経路計算ができる。計測から始まるデータ処理は、従来のエンジニアリングシステムとは逆の流れであり、リバースエンジニアリングとも呼ばれている。

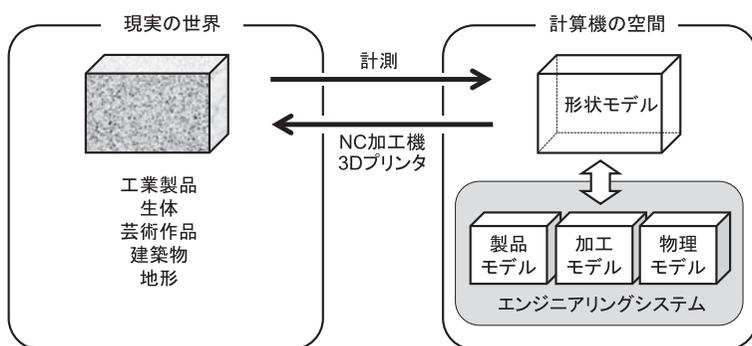


図1 現実世界と計算機空間

計測データを計算機で利用する取り組みや要望、期待は、様々な分野に広がり、しかも急速に高まっている。以下に、計測データの利用例を挙げる。

- 1) 自動車のスタイルデザインで作られるクレイモデルを計測して、外板面の作成や、車両全体のシミュレーションを行う。

- 2) プレス成型や樹脂成型で金型から部品を作る場合、スプリングバックや凝固収縮など様々な理由で、金型と全く同じ形には成型されない。そのため、試作部品を計測し、製品 CAD モデルとの違いを検査する。許容誤差以上の差異がある場合は、計測データをもとに金型の CAD モデルを修正する<sup>[1]</sup>。
- 3) 工作機械で切削した金型に、手作業で修正を加え、他の工場でもその手修正後の金型を複製して利用したいことがある。その場合、金型を計測して、計測データから工具経路を求める、または計測データをもとに手修正部分を金型の CAD モデルに反映して工具経路を求めることにより複製金型を作成する。
- 4) 人体を X 線 CT 装置や MRI で計測し、オーダーメイドの人工関節などのインプラントを作成したい。現在、計測データ処理の操作に多くの時間が掛かるため、オーダーメイドのインプラントはほとんど作られておらず、レディメイドのインプラントを使用している。対象部位の表面形状を簡便に取り出すことができれば、オーダーメイドのインプラントを作ることができる。その他、医療用途では、計測データから骨や臓器の表面形状を取り出し、治療用器具を作成することや、手術方法検討のために模型を作製すること、応力計算などのシミュレーションを行うこともある。
- 5) 遺跡から出土した遺物を計測する。空気に触れることによる劣化を防ぐため実物を保管し、計測データを対象に調査を行う。腐食などにより損傷している個所を計算機内で補修したり、割れた破片を組み立てたりして元の形を復元することもできる。

### 3. 計測データ処理の課題

計測データをエンジニアリングシステムで利用するための処理の流れを図 2 に示す。このように、計測データ処理は、計測装置で採取されたデータからポリゴンモデルを作成する工程と、ポリゴンモデルを編集・利用する工程に分けられる。

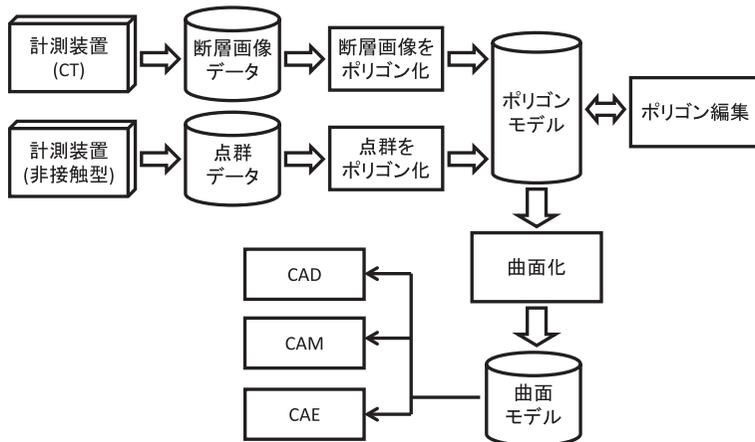


図 2 計測データのエンジニアリングシステムでの利用

#### 3.1 ポリゴンモデルを作成する上での課題

X 線 CT などの計測装置を用いて得られる断層画像データから、測定対象物の表面形状をポリゴンモデルとして取り出す処理の主な課題を挙げる。

- 1) 表面形状をポリゴン化するのに、格子点に CT 値を持つ VOXEL モデルを断層画像から作り、VOXEL モデル上で表面形状を抽出する方法が一般に採られている。対象物の表面位置を決めるのに格子点間を補間計算するため、得られる表面形状の精度が悪く、滑らかさにも欠ける。
- 2) アーチファクトと呼ばれる実際の測定対象物とは異なる画像が、様々な原因で採取される。アーチファクトを補正する必要がある。
- 3) 測定対象物が複数の材料を組み合わせて作られていると、異なる物質が合流する箇所、ポリゴンデータの欠損が生じやすい。

### 3.2 ポリゴンモデルを編集・利用する上での課題

従来のエンジニアリングシステムは、物体の表面形状の表現に、主に CAD の曲面モデルを使用している。曲面モデル（立体モデルも含む、境界表現法による複数面モデル）は、図 3(a) のように、NURBS などの数式で表現された四辺形曲面から必要な部分を切り出し、その部分曲面（構成面）を繋ぎ合わせて全体の形状を表現する。一方、計測から得られるポリゴンモデルは、図 3(b) のように、三角形を敷き詰めて表面形状を表現する。形状モデルの表現方法が異なるため、計測から得られるポリゴンモデルを、そのままエンジニアリングシステムで利用することはできない。

そのため、多くの工数をかけて、ポリゴンモデルから曲面モデルを作成することが多い。この曲面化を、自動/半自動で行うソフトウェアも市販されているが、利用者の意図とは異なる領域に構成面分割されることや、作られる曲面と境界線の品質に問題があると言われている。

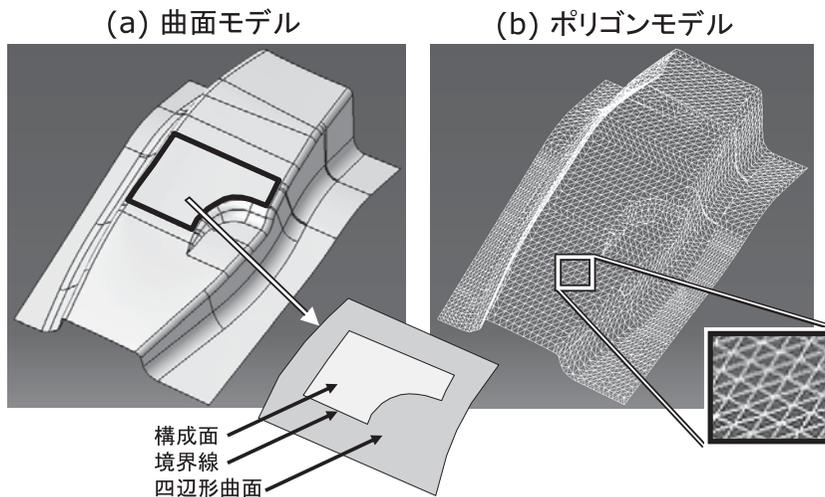


図 3 曲面モデルとポリゴンモデル

### 3.3 ポリゴンモデルを入力にする CAE と CAM の問題点

ポリゴンモデルを STL ファイルの形式で入力できる CAE や CAM のシステムも存在する。有限要素法による解析では、有限要素メッシュの節点（有限要素の頂点）や辺の並びが、解析結果に大きな影響を与える。無秩序に節点が並ぶより、節点や辺が形状の特徴を反映するよう

並ぶ方が、実世界の現象に近いシミュレーション結果を得られるとされている。曲面モデルから有限要素メッシュを作成する場合は、構成面のパラメータ定線や境界線を利用して、形状の特徴に合う有限要素メッシュを作成できる。一方、計測から得られるポリゴンモデルは、小さな三角形を敷き詰めたモデルであり、頂点の並びに形状の特徴が必ずしも反映されるわけではなく、形状の特徴を表現する有限要素メッシュを作成するのは困難である。曲面モデルから計算した解析結果と、ポリゴンモデルから計算した解析結果に違いが生じると、その原因が形状の差異に起因するのか、メッシュの作り方によるのか不明である。そのため、解析精度が重要な場合は、ポリゴンモデルから曲面モデル作成を経て、有限要素メッシュが作られる。

ポリゴンモデルを入力にするCAMシステムでは、平らな三角形に対して工具との接触位置を計算し工具経路を作るため、ポリゴンが十分に細かくないと、ミラーボールのようななめらかではない加工物を作ることになる。そのため、ポリゴンモデルから曲面モデルを作り、工具経路を求めることが多い。

#### 4. ポリゴンエンジニアリング

前章で述べた課題を解決するために、ポリゴンモデルを中心に置くエンジニアリングシステムの実現を構想した(図4)。この章では、ポリゴンCAD, ポリゴンCAE, ポリゴンCAMの概要を説明する。

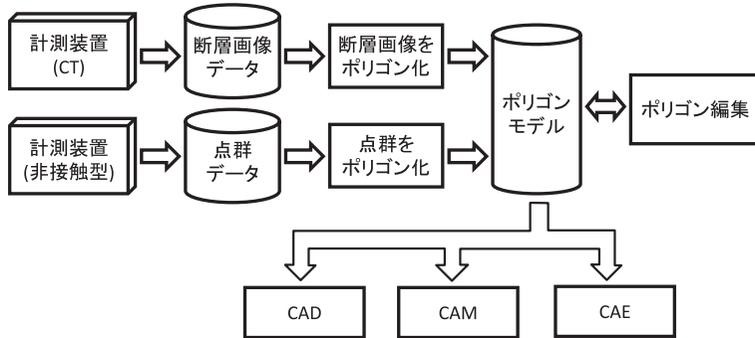


図4 ポリゴンエンジニアリング

##### 4.1 ポリゴンCAD

ポリゴンCADの主な機能を図5に示す。ノイズ除去や間引きなどポリゴン固有の編集機能はもちろんのこと、オフセット、集合演算、フィレット掛けなどのモデリング機能や、形状の評価機能も、CADシステムと同等の機能が必要になると考える。

曲面モデルはNURBSなどで表現される構成面を繋ぎ合わせるのに対し、ポリゴンモデルは、三角形の集合という簡潔な形状表現であるため、次のように従来のCADシステムの問題点を解決する性質がある。

##### 1) 曲面の図形処理の不安定さの原因である収束計算が不要

NURBSなどの自由曲面に対して、交点計算、交線計算、最近点計算などの図形処理を行う場合、直接に解を求めることができず、システムが推定する初期値から収束計算を用いて解を求めることが多い。ポリゴンモデルでは、三角形という有限平面を対象にする演算で

| ポリゴン編集    | ポリゴンモデリング | ポリゴン評価    | ポリゴンと曲線曲面 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 位置あわせ     | 切断        | 距離分布      | 曲面作成      |
| クリーニング    | 端部延長      | 曲率分布      | 曲面変形      |
| 穴埋め       | モーフィング    | 勾配角分布     | 曲線の投影     |
| 間引き       | フィレット     | 寸法測定      | 特徴線抽出     |
| ノイズ除去     | 集合演算      | 断面表示      | 図面作成      |
| 形状認識      | オフセット     | 3次元クリッピング | データ変換     |
| ポリゴン整形    | 板厚化       | 勾配角度分布    | STL       |
| セグメンテーション | 勾配掛け      | 干渉・隙間検査   | VRML      |
| セグメンテーション | 稜線化       | 肉厚検査      | OBJ       |
| 手動修正      | 穴の移動      | マスプロパティ   | JT        |

図5 ポリゴンCADの機能の例

あるため、解を安定的に求めることができる。

#### 2) 構成面間の隙間が原因で発生するトラブルを回避

曲面モデルは構成面を繋ぎ合わせて形状を表現するが、隣接する構成面同士は境界線で完全に一致するわけではなく、許容誤差の範囲内で離れている。集合演算やフィレット掛けなど、複数の構成面を対象にする形状処理では、発生するエラーの多くが、この構成面間の隙間を原因としている。ポリゴンモデルは、頂点を共有する三角形の集まりなので、この隙間の問題は生じない。

#### 3) 形状モデルの変形が容易

形状モデル上の1点を持ち上げる処理をする場合、指示点の周辺の面上点の移動量を、システムがあらかじめ定めた内部アルゴリズムにより決める。ポリゴンモデルでは、この移動量を頂点の座標値に反映するだけでよい。しかし、曲面モデルでは処理が複雑である。構成面ごとに、有効領域内の面上点の移動条件を満たすように、曲面式を再計算する。さらに、隣接する構成面との間の離れや折れなどの接続性も考慮する必要がある。その結果、変形後の面制御点の増加や面質不良、面の抜けなどが発生することも少なくない。ポリゴンモデルでは、高速かつ安定した変形処理が可能である。

#### 4) 並列計算が容易

ポリゴンモデルに対して、点との最近点、平面との交線などを計算することがよくある。この場合、多数の三角形に対して、点と三角形の最近点、平面と三角形の交線を計算する。これらの演算は逐次繰り返す必要はなく、三角形群に対して一斉に処理することができ、並列計算に適している。ポリゴン処理は、並列計算により、さらに高速に処理されることが期待できる。

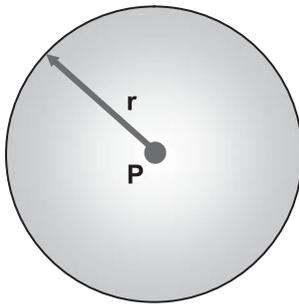
#### 5) 異なるCAD間で形状データのデータ交換が容易

CADシステム毎に、曲線、曲面の表現式、位相（隣接関係）の表現方法、許容誤差の扱い、不正形状の判別基準などが違うため、異なるCADシステム間でデータ交換をする際、様々な問題が発生している。ポリゴンモデルは三角形の集合という簡潔な表現のため、データ交換の問題は回避できる。

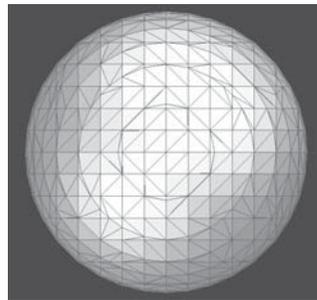
このように、ポリゴンモデルには好ましい性質がある。しかし、次のように、意匠形状や解析形状（球面や円錐面など）の表現に問題もある。

- ・ 意匠形状では、形状モデルに対して、曲率が穏やかに変化することが求められる。大域的な曲率の変化を考慮したポリゴンのふくらみ内挿計算が必要である。さらに、意匠性を保持したまま、ポリゴンモデルを変形することも求められる。
- ・ 解析形状の表現は、曲面式を使う方がポリゴン表現より正確に表現でき、高速に処理できる。球面を例にとると、曲面モデルでは中心と半径で表現できるが、ポリゴンモデルでは、頂点が球面上に分布した三角形群として表現することになる。三角形群から、このポリゴンモデルが球面を表現していると判断し、中心と半径を推定するのは、曲面モデルに比べて難しく、多くの計算が必要になる（図6）。

そのため、従来のCADをポリゴンCADで簡単には置き換えることができないと考え、ポリゴンモデルから曲面モデルを作成する機能も用意する。



(a) 球面の解析表現



(b) 球面のポリゴン表現

図6 球の表現

## 4.2 ポリゴン CAE

ポリゴン CAE の課題は、3.3 節で述べたように、形状の流れや特徴を反映した有限要素メッシュを作ることにある。そのために、ポリゴンモデルに対して、セグメンテーション<sup>[2]</sup>を行う。ポリゴンのセグメンテーションとは、ポリゴンモデルの法線や曲率の変化などの情報から、曲面モデルの構成面に相当する単位にポリゴンモデルを領域分割する処理である。セグメンテーションを実行した後、それぞれの領域に対して、曲率の変化の傾向を表すように、また大きさやアスペクト比が揃うようにポリゴンを再構成する。例えば、円錐形状であれば、円弧方向と、母線方向に頂点が並ぶようにする。

CAE 分野では、ポリゴン処理技術に対して、別の期待もある。解析結果の検討により、フィレット R を少し大きくしたいなど、有限要素メッシュの形状を変えて再度解析したいことがある。この場合、従来は CAD に立ち返り、曲面モデルに変更を加え、その曲面モデルから有限要素メッシュを再作成していた。有限要素メッシュ（シェル）をポリゴンモデルとしてとらえ、ポリゴン CAD の機能であるフィレット R 値の変更、勾配角の変更、リブの追加、厚みの変更、穴の移動などを有限要素メッシュに対して施すことができれば、解析準備作業の期間・工数が大幅に短縮でき、試行解析回数が増やせるので設計品質も向上すると考える。

### 4.3 ポリゴン CAM

ポリゴン CAM の課題は、なめらかな工具経路を作ることであった。ポリゴンと工具の接触計算時に、三角形内部を平面ではなく、周辺のポリゴンから計算されるふくらみを持った形状として扱えばよいと考える。細分割曲面<sup>[3]</sup>、陰関数曲面<sup>[4]</sup>、長田パッチ<sup>[5]</sup>などの研究により、ポリゴン内部のふくらみを周辺のポリゴンを使って計算することができる。

## 5. 理研との共同研究

理研には、企業と共同研究を行うための「産業界との融合的連携研究プログラム」という制度が用意されている<sup>[6]</sup>。理研と企業の研究開発能力を融合的に連携させて、研究成果を早期に実用化することにより、日本の産業技術の新しい展開に理研が貢献することを目的としている。

理研では、2000 年度から行ってきた VCAD の研究の中で、計測データ処理やポリゴン処理も研究してきた。一方、日本ユニシスグループは、40 年に及ぶ CAD/CAM システムの開発実績を持つ。理研の研究知財と日本ユニシスグループの開発技術を融合することにより、早期にポリゴンエンジニアリングシステムを社会に提供できると考えた。

2011 年秋、UEL はポリゴンエンジニアリングの実現を研究課題にして、この制度に応募した。審査の結果採用され、2012 年 4 月理研内に「計測情報処理研究チーム」が新設された。チームリーダーは筆者が務め、副チームリーダーは理研生物情報基盤構築チームの横田秀夫チームヘッドが兼務している。UEL から数名の技術者が客員研究員として参加し、理研からも数名の研究員が兼務参加して、6 月から活動を開始している。研究期間は、5 年を予定している。

この研究チームでは、ポリゴンエンジニアリングシステムの実現に必要な「断層画像処理」「ポリゴン用図形処理」の要素技術を研究する。研究成果は理研に属し、学会や次章に述べる VCAD システム研究会などを通して公表する。

## 6. VCAD システム研究会ポリゴンエンジニアリング分科会

ポリゴンエンジニアリングの研究では、計測データの断層画像処理、ポリゴン用図形処理、CAD、CAM、CAE との連携など多くの技術課題を扱う。また、計測データの利用範囲と要望、期待は急速に拡大し、それを支える学術研究、開発技術研究は発展が著しい。そのため、理研だけでなく、広く利用者、研究者、ベンダーが集まり、課題の解決を検討する必要がある。

理研の計測情報処理研究チームと連携をとる外部組織として、VCAD システム研究会にポリゴンエンジニアリング分科会を設立した。利用者、研究者、ベンダーが集まり、次の活動を行う (図 7)。

- 1) 計測データやポリゴンモデルを扱う上での問題点を抽出し、解決すべき課題としてまとめる。
- 2) 課題を解決する方策を検討する。
- 3) 検討結果に基づき、課題を解決するプロトタイプシステムの開発を依頼する。
- 4) 解決の方策やプロトタイプシステムが、課題を解決するか評価する。
- 5) 研究成果、開発技術、利用技術を普及させる。

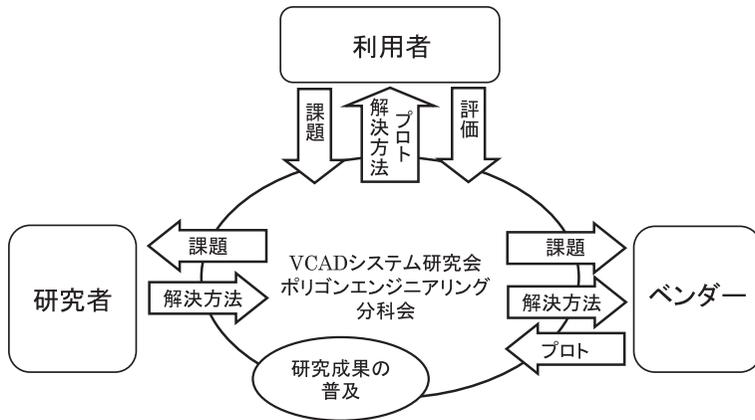


図7 ポリゴンエンジニアリング分科会

## 7. おわりに

ポリゴンモデルを中心に置くエンジニアリングシステムにより、計測データ処理とCAD/CAM/CAEは一つにつながるができる。ポリゴンエンジニアリングシステムが実現できれば、製造業の設計品質の向上や作業工数の短縮が期待でき、日本のものづくりに貢献できる。また、これまで作業期間の点でほとんど実現できなかった計測データをもとにしたオーダーメイドのインプラント作成など、高度な医療をはじめとする広い分野で、計測データを利用する新しい技術を拓く可能性がある。

利用面での有効性以外にも、構成面間の離れによる図形処理の不安定さなど、従来のCADシステムの問題が生じないという利点もある。ポリゴンエンジニアリングシステムは、意匠形状や解析形状の表現の課題を解決する必要があるが、既存のエンジニアリングシステムを置き換えることができると考えている。

現在、国内のエンジニアリングシステム市場を見ると、金型分野でこそ、CADmeisterが最大のシェアを得ているが、エンジニアリングシステム市場全体では、欧米のシステムに席卷されている状態である。ポリゴンエンジニアリングシステムは、エンジニアリングシステムのデータ表現の中心が曲面モデルからポリゴンモデルに移るというパラダイムシフトを引き起こし、エンジニアリングシステムの市場を大きく変える可能性がある。

ポリゴンエンジニアリングの研究では、計測データの断層画像処理、ポリゴン用図形処理、CAD、CAM、CAEとの連携など多くの技術課題を扱う必要がある。そのため、システムの利用者や、研究者、計測器メーカー、ソフトウェアベンダーなど幅広い分野の方々の協力を得て、研究を進める所存である。

参考文献 [1] 谷本茂樹, 「曲面の力学的変形とその応用」, ユニシス技報, 日本ユニシス, Vol.30 No.1 通巻104号, 2010年6月, P1~12  
 [2] 土江庄一, 星野力, 東正毅, 「意匠測定データに対する高品質セグメンテーション(第1報) -変分ベイズ法によるロバストな頂点クラスタリング-」, 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, 2012年9月, P267-268.  
 [3] 三浦憲二郎, 「細分割曲線・曲面理論」, 精密工学会誌, 精密工学会, Vol.69, No.4, 2003年4月, P477-481

- [4] 大竹豊, 「点群からの表面再構成」, 計算工学, 日本計算工学会, Vol.16, No.2, 2011年4月, P2523-2527
- [5] 長田隆, “三次元力学解析に関わる新しい要素技術”, 理研シンポジウム ものづくり情報技術統合化研究 第4回, 理化学研究所, 2004年, P75-86.
- [6] 「産業界との融合的連携研究プログラム」の2012年度(平成24年度)研究課題を募集, 理化学研究所, 2011年8月  
<http://www.riken.go.jp/r-world/info/info/2011/110831/index.html> (URL 確認: 2012年10月16日)

**執筆者紹介** 谷本茂樹 (Shigeki Tanimoto)

1977年日本ユニバック入社. 形状処理を中心にCADシステムの開発に従事. 2010年日本ユニシス・エクセリューションズに出向. 2012年理化学研究所計測情報処理研究チームリーダーを兼務. VCADシステム研究会理事. 精密工学会会員. 理学修士.

