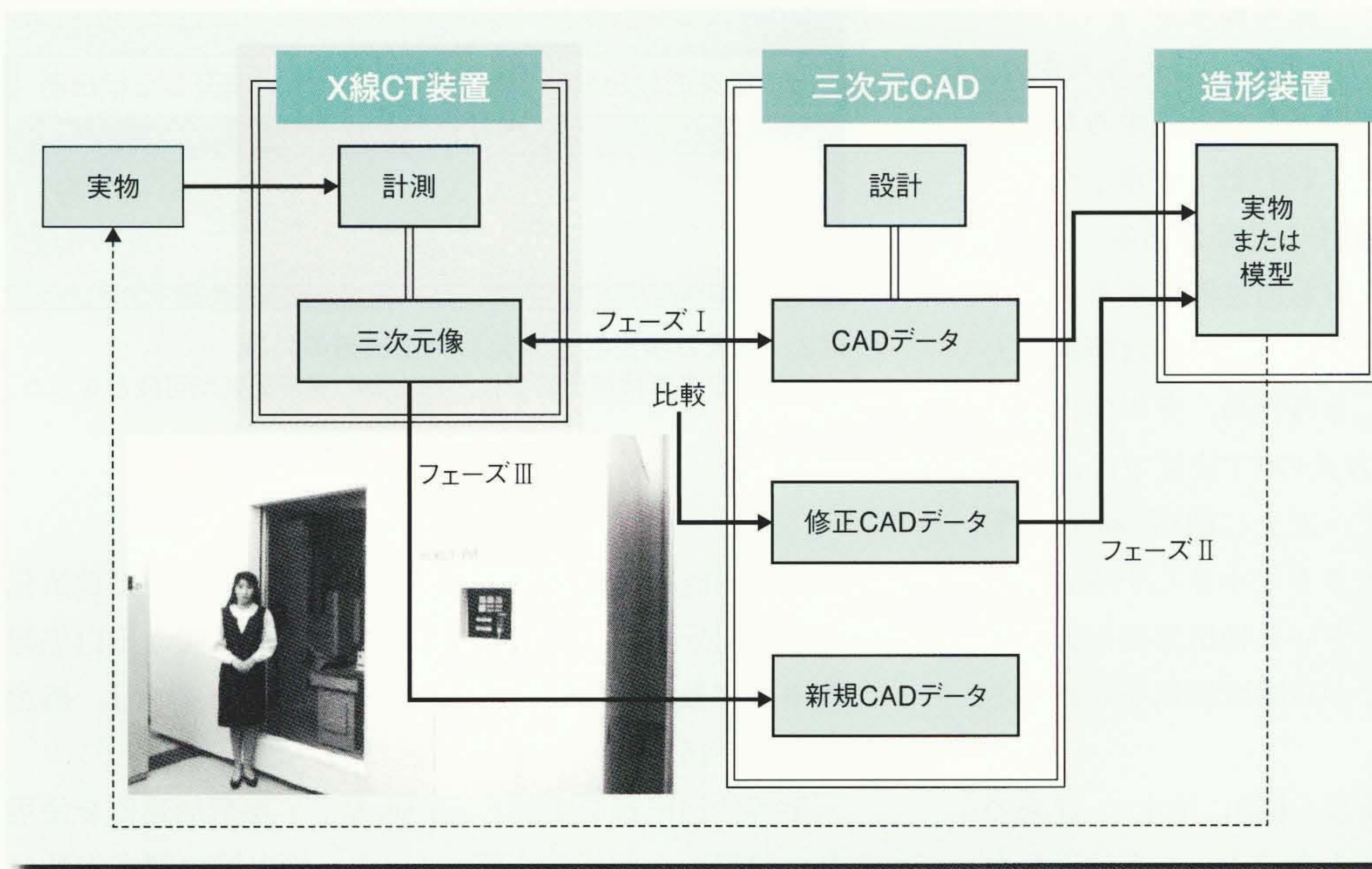


産業用X線CTとそのデジタルエンジニアリングへの適用

Industrial X-ray Computed Tomography and Its Applications to Digital Engineering

佐藤克利 Katsutoshi Satô 出海 滋 Shigeru Izumi
高木太郎 Tarô Takagi



注：略語説明
CT (Computed Tomography ;
コンピュータ断層撮影)

デジタルエンジニアリングにおけるX線CTの位置づけ

X線CT装置と三次元CADを結合することにより、情報のフィードバックループが形成できる。X線CTは、実物を情報に変換する技術である。日立製作所はフェーズ I で開発を完了し、製品化している。フェーズ II では光造形装置に関しては開発を終え、現在、フェーズ III の開発に注力している。

三次元CADを中核とする「ものづくり」のデジタル化が急速に進展している。設計のデジタル化は「ものづくり」の方法を根幹から変え、「コンカレントエンジニアリング」や「リバースエンジニアリング」ということばで代表される、これまで理念的とされてきた「ものづくり」の手法が具体化されるようになってきた。このような流れの中で、最後に残っている課題が「実物のデジタル化」である。

従来の三次元計測器では、任意の自由形状を确实、高精度にデータ化することができなかった。これに対してX線CTの技術は、これに一つの解を与える。X線CTでは撮像対象物の空間的な密度分布を計測し、これから三次元像を構成する。すなわち、「形」の情報を取り出すことが可能である。この情報と三次元CADデータとの比較や、CADデータを修正することにより、実物と情報をシームレスに結合することができる。この技術を応用したX線CT装置は、デジタルエンジニアリング分野でのさまざまな適用に有用である。

1 はじめに

X線CT (Computed Tomography : コンピュータ断層撮影) は、X線を使用して計測対象物の断面の密度分布 (正確には線吸収係数分布) を計測する技術である。計測では、対象物の断面にX線をさまざまな方向から照射して、それを透過してくるX線の強さを計測し、得られたデータを基に断面の密度分布を再構成する。

日立製作所の産業用X線CTの特徴は、(1) 高エネルギーX線の使用による優れた透過能力と、(2) 第三世代方式と呼ばれる走査方式を採用した高速撮影にある。これらの特徴により、アルミや鉄の鋳造品をはじめとする多くの産業構造物の三次元像を短時間に構成することが

できる (三次元像は、断層像を多数積層することで構成する)。

このため、画像利用では従来の二次元から三次元へと大きな展開が可能となる。特に、X線CTで取得した三次元像は対象物の三次元密度分布を表現している。この三次元密度分布から、密度不連続点の軌跡である輪郭を抽出することにより、三次元的な形状計測が可能となる。これは、測定対象物の外観形状はもちろんのこと、内部形状に関しても多くの情報を提供する。

ここでは、日立製作所が開発、実用化した小型高感度半導体検出器を採用した第三世代方式の産業用X線CT装置と、その画像利用としてのデジタルエンジニアリングへの適用について述べる。

2 高エネルギーX線CT装置

X線CT装置の基本構成を図1に示す。産業用分野，特に鑄造分野の測定対象物は，一般に密度が高く（アルミ：2.7 g/cm³，鉄：7.8 g/cm³），また，形状も大きい。このような高密度・厚物を断層像として計測するためには，透過能力の高い高エネルギーX線（数メガ電子ボルトから十数メガ電子ボルト）を使用する必要がある。

高エネルギーのX線は，電子線形加速器を使うことで容易に得られる。しかし，高エネルギーX線は透過能力が高く，検出器もすり抜けてしまうため，その検出は容易ではない。また，第三世代方式のCT装置では，解像度を向上させるために検出器を一次元に稠（ちゅう）密配列をするので，検出器個々の大きさを小さくする必要がある。一方，検出器の体積が小さいと検出感度が低下する。このため，小型化を図りながら感度確保を達成することが必要となる。

開発した検出器と従来の検出器を図2に示す¹⁾。従来の検出器は，シンチレータとフォトダイオードを結合したものである。シンチレータはX線を光に変換する結晶であり，フォトダイオードが発生した光を検出している。一方，開発した検出器では，半導体でX線を電気信号に直接変換する。半導体検出器はその厚みが非常に薄いので（～0.5 mm），稠密実装に優れている。従来の検出器を一次元に配列する場合，その配列間隔は5～10 mmに制限されるが，半導体検出器では，約1 mmで配列が可能である。

X線CTの基本性能は，透過能力，解像度，および撮影時間（計測時間と演算時間の合計）の三つで評価でき

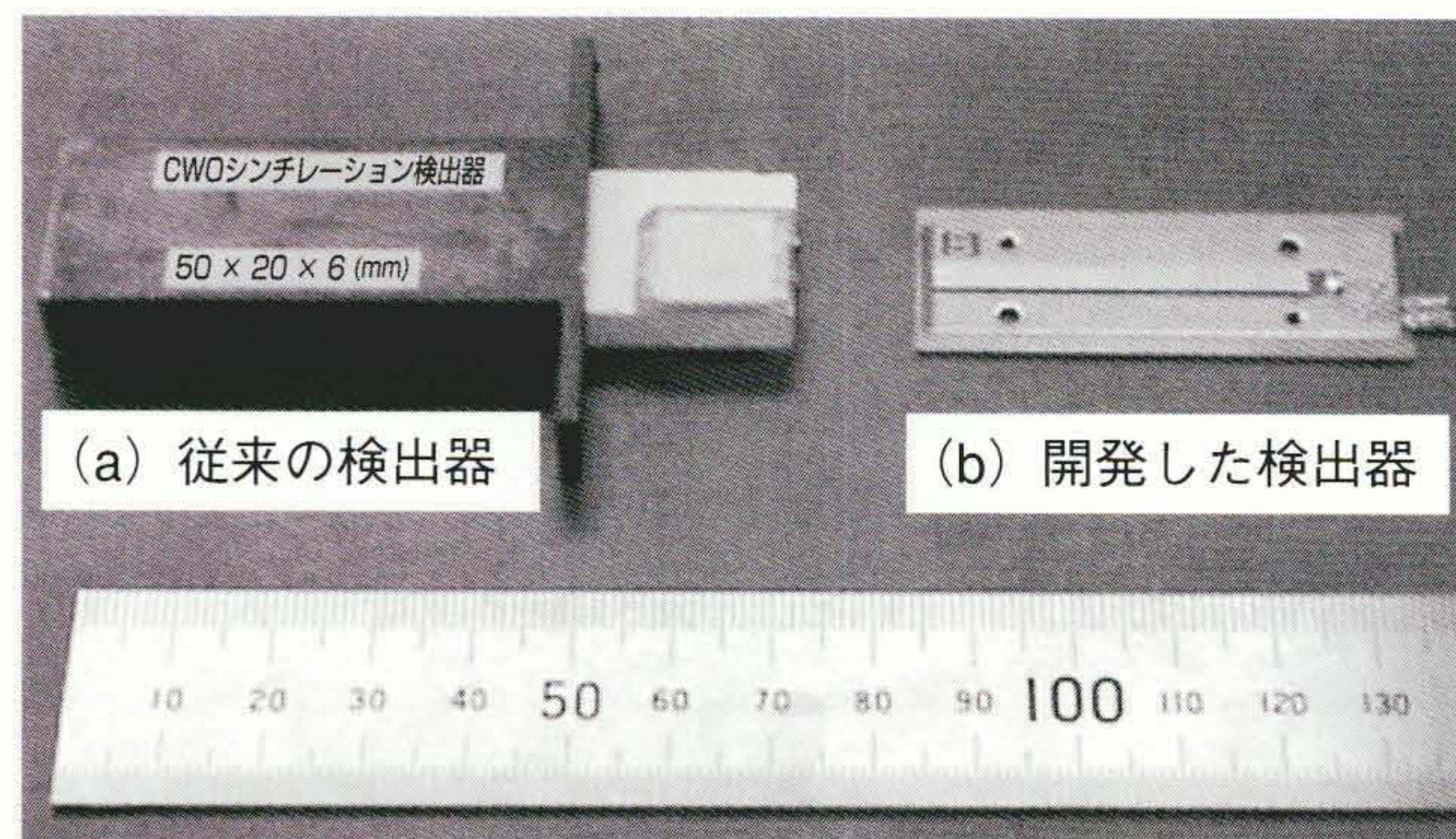


図2 従来の検出器と開発した検出器の外観

開発した半導体検出器では，検出器の稠密配列が可能となった。

る。透過能力は透過可能なアルミニウムの厚さで数値化し，空間分解能は，1 cm当たりで分解識別できる白黒線の本数で数値化する〔単位はLp (Line Pair)/cm〕。撮影時間は，1分当たりの撮影可能枚数である。

半導体検出器を実装し，1 MeV電子線形加速器を使用した装置の主要性能を図1に示す。検出器の稠密実装により，従来装置と比較して，開発装置では解像度を維持したままで計測時間が大幅に向上したことがわかる。なお，この計測時間の向上とともに，演算時間も向上している。これは，像再構成演算アルゴリズムの並列化を実施したためである。

3 X線CTとデジタルエンジニアリング

3.1 コンセプト

画像利用技術として，今後大きく進展するデジタルエンジニアリングへの適用について以下に述べる。

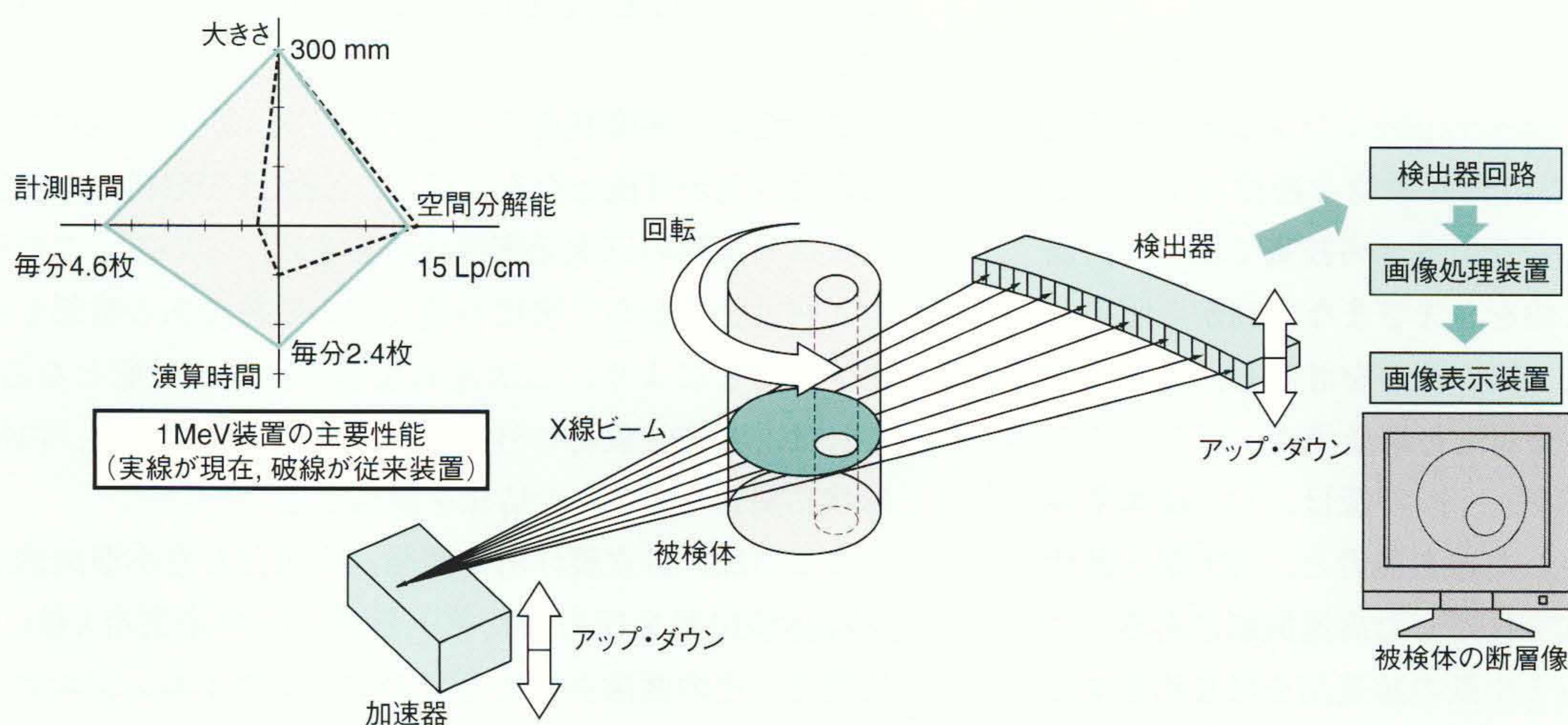


図1 X線CT装置の基本構成と主要性能

第三世代方式のX線CT装置では，被検体を1回転走査するだけで被検体の断層像が得られるので，従来装置と比べて計測時間の大幅な短縮を実現した。

デジタルエンジニアリングとは、三次元CADを中核とするデジタル情報を活用した「もの造り」の技術を指す(図3参照)²⁾。

ここで重要なのは、「実物設計」の概念である。これは、クレイモデルによる意匠設計や模型実験ベースの形状最適化に代表される、実物を使用する設計行為のことである。実際の設計業務では、実物設計に依存する部分が少なくない。この実物設計をCAD設計環境に融合させるためには、実物をデジタル情報として三次元CADにフィードバックする必要がある。

また、設計の高度化に伴って、部品の形状が複雑になり、自由曲面が多用されるようになった。これは、寸法検査の煩雑化につながっている。

三次元CADの設計データと計測対象物をシームレスに結合するという、このようなニーズに対して、X線CTは非常に有効である。

3.2 X線CTの三次元測定装置としての利点

X線CTは、外観形状に加え、内部形状に関しても多くの情報を取得できることや、突起やくぼみといった複雑な形状も計測できるといった、三次元計測装置として優れた利点を多く持つ。また、対象物の素材を選ばないことも利点である。計測の作業でも、対象物を回転テーブルに載せるだけで自動計測が可能である。

これらの利点は三次元計測に要求されるものであり、X線CT技術の優位性を示している。

3.3 形状計測の事例

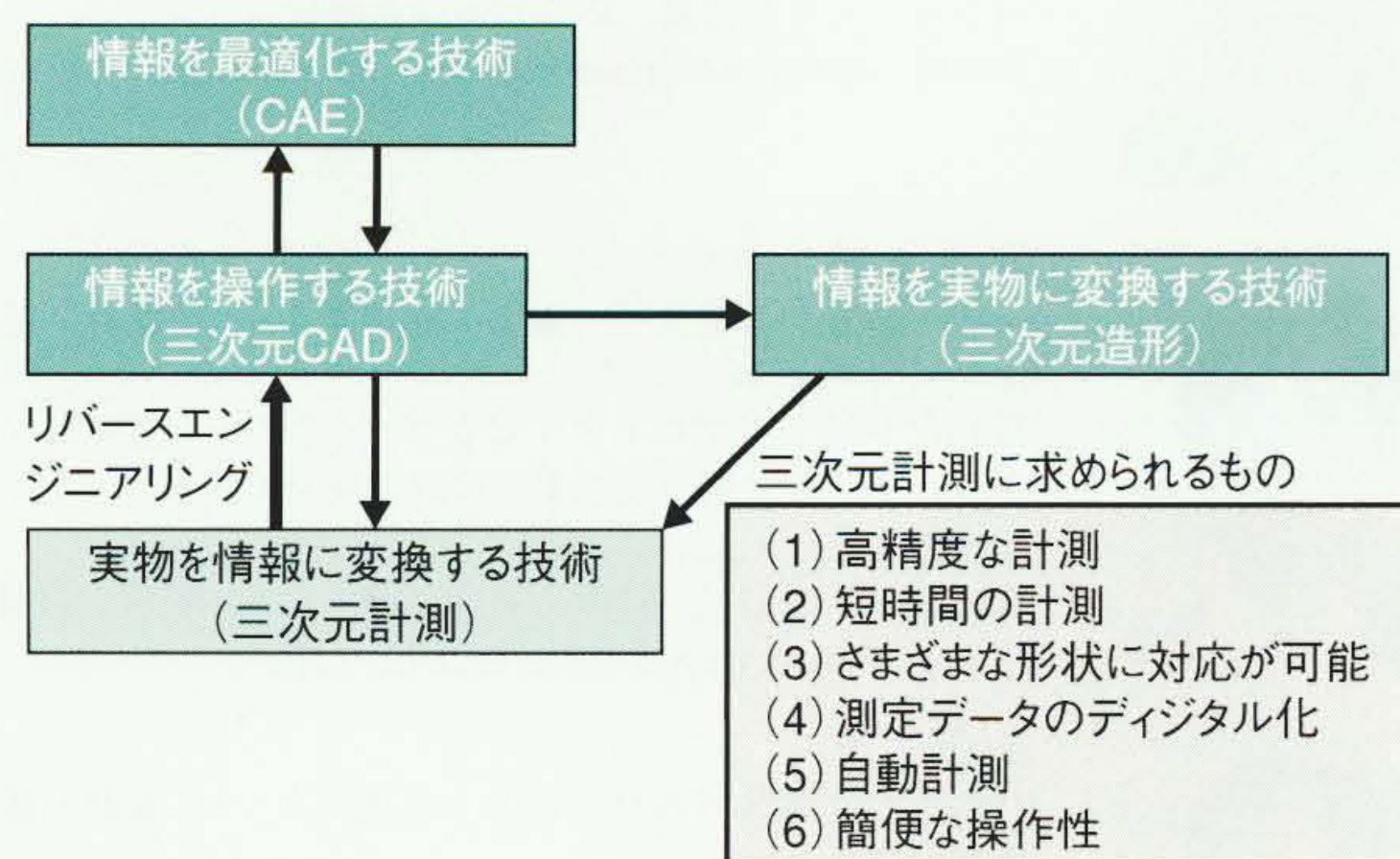
日立製作所の適用事例として、製作コストの低減と開発期間の短縮を目的にした、金属RP(Rapid Proto-

typing)による水力発電用バルブ水車翼の製作について以下に述べる^{3, 4)}。

バルブ水車翼は、その形状が性能に直結することから、設計どおりの形状を製作することが重要である。金属RPでは、最終的な製品となるまでの幾つかの工程のうち、特に、焼結とその後の溶浸の工程で形状に狂いが発生しやすい。

プロトタイプとして製作した翼に対して、焼結工程後と溶浸工程後の形状をX線CTで計測し、その形状の狂いを三次元CAD図面と比較した。その結果、焼結工程での形状変形は0.3 mm以内であるが、溶浸工程ではその十倍の変形が起きていることがわかった(図4参照)。これを基に、溶浸工程でさまざまな改善を実施し、溶浸工程後の形状変形を0.3 mm以内に抑えることができた。

この事例の形状測定では、撮影した画像と三次元CADデータとを直接比較している。測定のためのジグや測定ツールは必要なく、作業も要らない。従来のような2点間の寸法計測ではなく、曲面自体の測定であるという点がこの方法の大きな特徴である。



注：略語説明 CAE (Computer-Aided Engineering)

図3 三次元デジタルエンジニアリングの要素

X線CT装置は、三次元計測技術として、実物を情報に変換するキー技術の役割を担う。

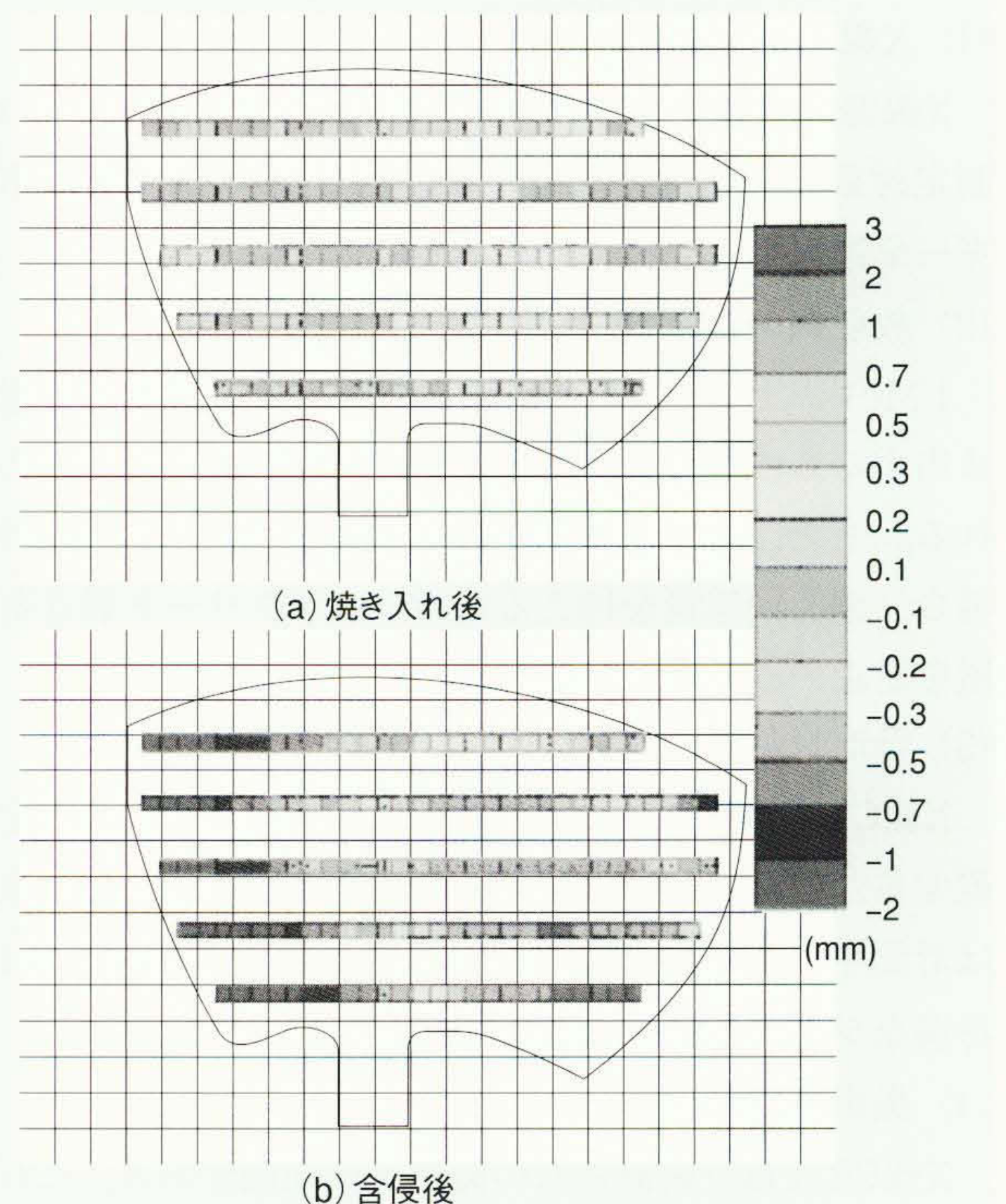


図4 形状測定結果

金属RP製水力発電用バルブ水車翼のX線CT装置による形状測定結果を示す。

3.4 リバースエンジニアリング実現への展開

エンジニアリングへのX線CT活用の最終目標は、実物から自動的に、自在に操ることが可能なCADモデルを構築することである。しかし、これには多くの解決すべき課題がある。その一つが、データ量の問題である。X線CTで計測した三次元像には膨大な情報が含まれており、これに基づいた三次元モデルもまた膨大なサイズとなる。モデルを作ることではできても、ファイルサイズが大きく、CADでは扱えないという現実がある(図5参照)。

また、CADデータに不可欠なフィーチャー(大域的な特徴)を自動生成することがきわめて難しい。球形を球形として記述するCADに対して、X線CTのデータには球という概念はない。

CTデータをCADデータに変換するためには、大量データの高速操作技術と、フィーチャー補完技術が不可欠である。日立製作所は、現在、これらの開発を急ピッチで進めている。

4 おわりに

ここでは、産業用X線CTとそのデジタルエンジニアリングへの適用に関して述べた。

最後に、X線CTを利用するうえでの注意点について述べることにする。

(1) X線エネルギーの選択

X線源は線形加速器であり、容易に交換できないため、測定対象物の密度と大きさに合わせた、適切なエネルギーを選択することが必要である。

(2) 放射線の管理

1 MeV以上のX線を使用する場合、放射線発生装置に該当するものとして、法令が定めた放射線管理が求められる。また、エネルギーが数メガ電子ボルトのX線源の場合、漏えい線量を抑えるため、コンクリート製遮蔽建屋を建設する必要がある。

(3) 計測対象物の固定

X線CTで計測する対象物は、回転テーブル上に固定設置する。CTの計測では、カメラ撮影と同様に、対象物は計測中に動いてはならない。この固定設置のために、特別なジグが必要となる場合がある。

(4) 撮影可能範囲

X線CTでは、装置固有の撮影可能範囲がある。これよりも大きなものを載せると、X線透過データの集合が不完全となり、画像劣化を引き起こす⁵⁾。

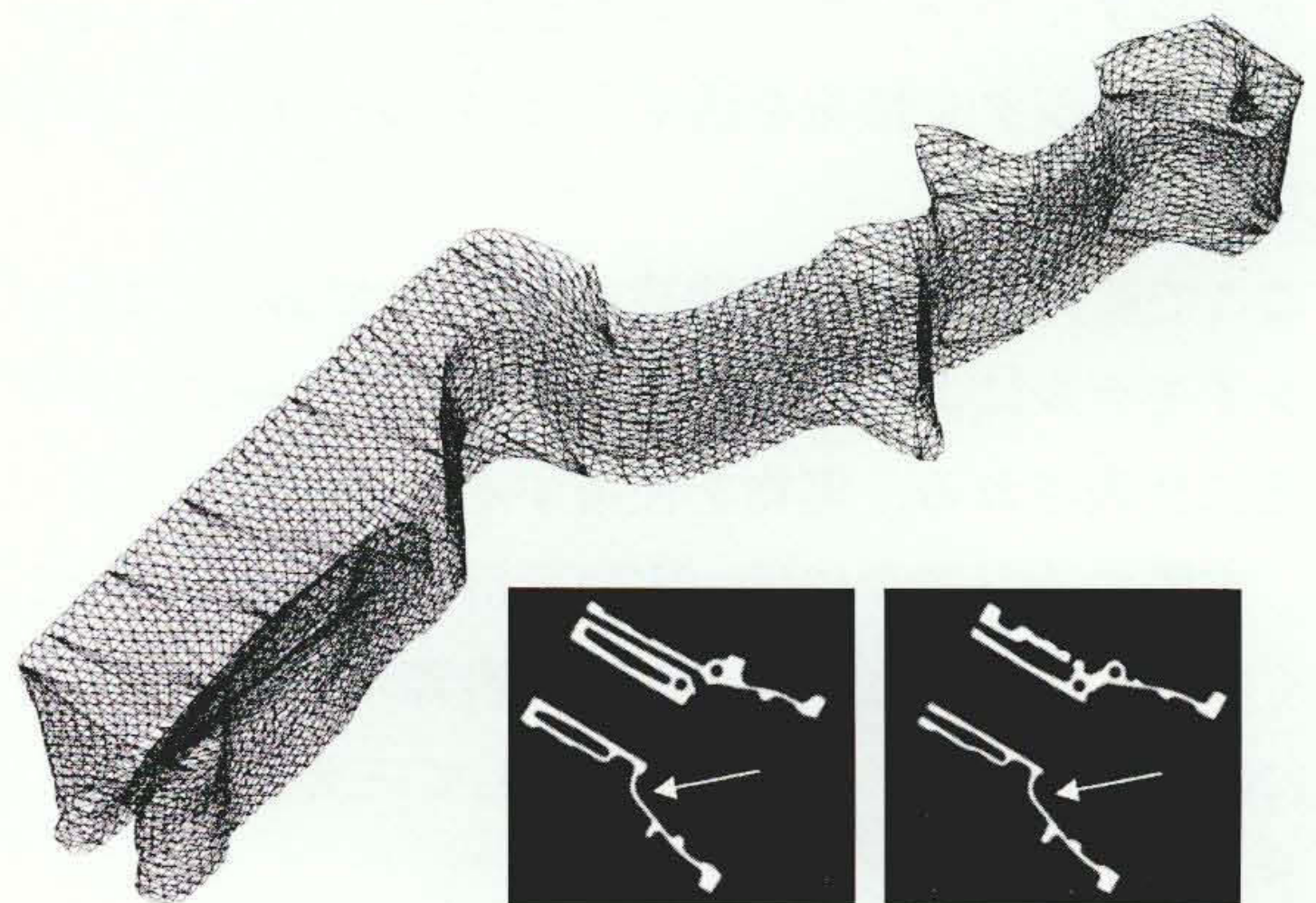


図5 自動車部品の三次元モデル例

X線CTで撮影した三次元画像の一部を三次元モデル化した例を示す。CAD化には、このモデルからフィーチャー情報を抽出し、データ量を縮小する必要がある。

参考文献

- 1) 出海：MeV領域工業用X線CT/DRの性能，非破壊検査，48，9，574～578(1999)
- 2) 佐藤，外：X線CTとRPを用いたコンカレントエンジニアリング，第15回ラピッド・プロトタイプング講演集，47～52(1998)
- 3) 佐藤：高エネルギー工業用X線CTの応用事例，非破壊検査，48，9，587～592(1999)
- 4) Sadaoka, et al.: Metal Selective Laser Sintering Technology Applied on Hydraulic Turbine Design, 8th International Conference on Rapid Prototyping (2000)
- 5) 佐藤，外：X線CTにおける関心領域撮影法を使った内部形状再構成，放射線，22，4，39～48(1996)

執筆者紹介



佐藤 克利

1989年日立製作所入社，電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 所属
現在，X線CTの設計に従事
日本原子力学会会員，応用物理学会会員
E-mail: katsutoshi-b_satou@pis.hitachi.co.jp



高木 太郎

1995年日立製作所入社，電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 所属
現在，ラピッドプロトタイプング，CTデータ処理用ソフトウェア，設計開発支援手法の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員，精密工学会会員，人工知能学会会員
E-mail: tarou_takagi@pis.hitachi.co.jp



出海 滋

1967年日立製作所入社，電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 所属
現在，X線CTをはじめとする放射線計測技術の研究開発の取りまとめに従事
工学博士
日本原子力学会会員，土木学会会員，日本非破壊検査協会会員
E-mail: shigeru_izumi@pis.hitachi.co.jp