

# 高度計算機科学を活用した 中性子ビジュアルセンシング技術

## Neutron Visual Sensing Techniques Making Good Use of Computer Science

(独)日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門  
核工学・炉工学ユニット 原子力センシング研究グループ  
呉田 昌俊

中性子ビジュアルセンシング技術は中性子を利用して物質内部を可視化・計測する技術である。基幹技術は中性子ラジオグラフィであり、X線ラジオグラフィ（レントゲン）と相補的な特長を活かして、従来技術では可視化や計測が困難であったエンジン内の潤滑オイルの可視化などに利用されている。本稿では、著者らが高度計算機科学を活用して開発を進めている中性子ビジュアルセンシング技術の現状について、特に高度計算機科学との融合領域に焦点をあてて紹介する。また、大強度陽子加速器施設J-PARCの稼働が始まり、中性子利用に大きな期待が寄せられていることに鑑み、今後の開発計画と期待を述べる。

### 1. はじめに

中性子の透過特性を利用してX線ラジオグラフィ（レントゲン）と相補的なイメージングを行う技術として中性子ラジオグラフィ技術がある[1]。近年、周辺技術の高度化が進み、また様々な撮影技術の開発が進み、投影静止画像の取得を目的とした中性子ラジオグラフィ技術の枠を超えた新技術の開発・利用が精力的に行われている。この拡張された技術は中性子イメージングと呼ばれている。例えば、高速度撮像技術、中性子CT技術、エネルギー選択型分光器的撮影技術、パルス撮影技術、フェーズコントラスト撮影技術、偏極・磁気イメージング技術などがこの中性子イメージングに含まれる。著者らは、中性子をプローブとしてボイド率（二相流中の気相の体積割合）や流体速度などの計測を目的として、中性子イメージング技術を更に発展させた中性子ビジュアルセンシング技術の開発を進めている。拡張した点は、透過画像のみならず画像処理により定量化処理を行うことでボイ

ド率等重要な物理量を計測し、その結果を可視化する点にある。

ビジュアルセンシングは、近年使用され始めた用語であり一般には、カメラデータなど様々な実データや数値解析結果から有意な情報を計測する技術、また関連する可視化計測技術の総称である。例えば、高速道路を走る車両の数やナンバープレートを読み取る道路交通システムやCT-PET装置など医療診断システムがこの代表である。ビジュアルセンシングは、極めて大量の情報をデータとして扱う特徴があり、近年特にデータ量が爆発的に増加している。このため、いかにデータを効率的に処理できるかが、その技術の実用性を決定していると言える。具体的には、①データ転送の高速化、②処理の高速化、③データの圧縮化が大きな課題となっている。

中性子ビジュアルセンシング技術開発において、扱うデータ量がTBクラスに増加しているため、著者は①データ転送の高速化を実現するため、高速度ビデオデータを当時

IEEE1394規格で転送していた時代に光転送技術を高速ビデオカメラに組み合わせる改造を施し、更にデータ保存用計算機も高速書き込みを可能とするため複数のHDDをRAID 0(ストライピング)とする独自システムを構築した。②の処理の高速化については、高速処理アルゴリズムを開発すると共に、MPI技術を用いたマルチMPU/CPUによる並列処理、GPGPU技術を用いたマルチGPUによる超高並列処理技術を開発した。この処理の高速化については後述する。また、③データの圧縮化については、階層的圧縮アルゴリズムをデータ処理に応用し、データ劣化量と圧縮率を調整可能な圧縮機能を組み込んだデータ解析ソフトウェアを開発した。このデータ処理の圧縮化も後述する。この様に、高度計算機科学は大量のデータ処理に欠かせない技術となっている。

また、中性子ビジュアルセンシング用可視化・計測装置の設計にも、高度計算機科学を活用した粒子線シミュレーションコードによる理論的検討が不可欠となっている。従来から、人体への被ばく量管理の視点から遮蔽計算にシミュレーションコードが用いられてきたが、著者らは積極的に装置開発と結果の評価を目的としてコードを用いている。粒子数を増やすなどして計算量が多くなると、大型計算機の利用が必要となり、高並列計算による高速化と大規模データを容易に可視化するためのビューアが必須となる。そこで、著者らは大型計算機上で動作する3次元可視化も行えるビューアを開発した。

本稿では、中性子ビジュアルセンシングの特徴と基本原理を記した後に、本技術の実用化に欠かせない著者が開発したシステムに関して、代表的な実験例を示し、その中で特に高度計算機科学との融合点について詳しく紹介する。

## 2. 中性子ビジュアルセンシング

### 2.1 特徴

中性子の大きな特徴は、電氣的に中性であることから原子核と直接相互作用し、透過率を決定する断面積が原子核毎に異なる点にある。特に、中性子は水素原子核(陽子)に対して大きい断面積をもつ特徴を生かして、水、オイル、冷媒などの混相流を選択的に見ることができるところが原子力機器や産業機器の設計・開発・評価上魅力となっている。特に得意とする対象物は、アルミニウムやマグネシウムなど軽元素製容器の中に存在する有機物など水素化合物である。このような対象物はX線イメージングが苦手とするため相補的な関係として魅力がある。このため、超音波画像法や核磁気共鳴画像法等他のイメージング法も含めて従来技術による内部の可視化や計測をあきらめていた対象物に対して、本技術が適用できる場合には、大きな技術的飛躍に繋がる事が期待できる。

なお、母材物質の中性子透過率が低く厚い場合(例:1 cm厚以上の炭化硼素)や、中性子透過率の小さい材料同士の組み合わせ(例:硼素と水)では低輝度かつ低コントラストとなり不得意である。このため、必要に応じて他の技術と複合的に使い分けることがユーザーにとって有効な活用方法と考えられる。

### 2.2 基本原理

類似技術であるX線イメージングでは、物質内を透過する際の強度(X線束密度) $I$ の減弱を以下の式で表現することができる。そして、物質毎の透過のし易さを表す質量減弱係数 $\mu_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]は、原子番号に対して単調に増加する傾向を示す。

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot \delta) = I_0 \exp[-(\mu_m \cdot \rho) \cdot \delta] \quad (1)$$

なお、 $I$ 、 $I_0$ 、 $\mu$ 、 $\rho$ 、 $\delta$ は、透過X線束密度[ $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]、入射X線束密度[ $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]、線減弱係数[ $\text{cm}^{-1}$ ]、密度[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]、物質厚

さ[cm]とする。一方、中性子イメージングでは、原子核毎に相互作用が異なるため、中性子断面積で物質内を透過する際の強度の減弱を表す。特に、X線の線減弱係数 $\mu$ に対応する巨視的断面積 $\Sigma$  [cm<sup>-1</sup>] (微視的断面積 $\sigma$  [barn]: [10<sup>-24</sup>cm<sup>2</sup>]と原子数密度 $\rho$ の積)を用いて、物質内での中性子の減衰を近似的に以下の式で表して簡易的に用いる事が多い。

$$\phi = \phi_{th} \exp(-\Sigma \delta) \quad (2)$$

なお、 $\phi$ 、 $\phi_{th}$ 、 $\delta$ は、透過熱中性子束 [n/(cm<sup>2</sup>·s)]、入射熱中性子束 [n/(cm<sup>2</sup>·s)]、物質厚さ [cm]とする。質量減弱係数が低いアルミ合金は中性子の透過性が高く、質量減弱係数が大きい水素化合物である水、オイル、冷媒などは透過性が低いため、結果として両者のコントラストがつきやすく良好なイメージが得られる。

イメージング化は、シンチレータ板 (コンバータとも呼ぶ) の中で中性子が<sup>6</sup>Liと反応し {<sup>6</sup>Li(n,  $\alpha$ )<sup>3</sup>H核反応} 放出された2.05MeVの $\alpha$ 線が蛍光物質であるZnS(Ag)を発光させ生じる可視光を集めて映像化する。照度 $L$ は、透過中性子束 $\phi$ に通常使用範囲ではほぼ比例する。

$$L = k\phi = k\phi_{th} \exp(-\Sigma \delta) \quad (3)$$

この映像を著者らは図1に示すようにCMOS素子を内蔵した高速度ビデオカメラに画像強度増幅器 (image intensifier :I.I.)

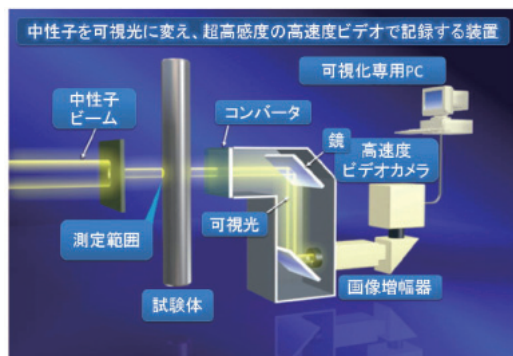


図1 実験装置の概略

を接続し高感度化して記録している。現在使用している高速度ビデオカメラ (Photron製カスタム品) は、1024×1024画素を10bit:1024階調の輝度データとして記録できる。主として1回の撮影で連続して記録可能な情報量が2GBのカメラを用いており、この際記録されるファイルの総容量は3.2GB/1回となる。なお、別の最新カメラを用いると総容量/1回は43GBにもなる。このため、データ転送の高速化と圧縮が実用上の重要な課題となっている。

オリジナル映像から定量化処理を施し、例えばボイド率などを計測する場合にはシステム特性に起因するオフセット補正や中性子の時間変動補正、空間歪みの補正等様々な補正処理を必要とする [2,3]。

### 3. 原子力機構が開発した中性子ビジュアルセンシング技術

中性子を利用することで様々な対象物や現象の可視化や計測が可能であるが、本稿では特に混相流の計測とその可視化を目的として開発した技術に関して記す。1997年からボイド率の計測技術として開発に着手し、2次元、2次元の時間変化、3次元、3次元の時間変化の可視化・計測へと計測の次元を上げてきた。基本的な注意点として、計測の次元が低いほどデータの質は高く、次元が高くなると劣化する傾向がある。このため、オリジナルデータの質を向上させる努力と、データ処理による劣化を最小限に抑える努力が常に求められている。図2に技術開発のロードマップを示す。開発のニーズは変化しており、特に混相流用数値解析コードの発展とともに必要とされるデータの次元が上がってきた。本技術はコードが要求する次元で検証データが取得できる事を目標として技術開発を進めてきた。

また、高速度ビデオカメラ等撮像系も進化しており、1997年当時は256×256画素、256階



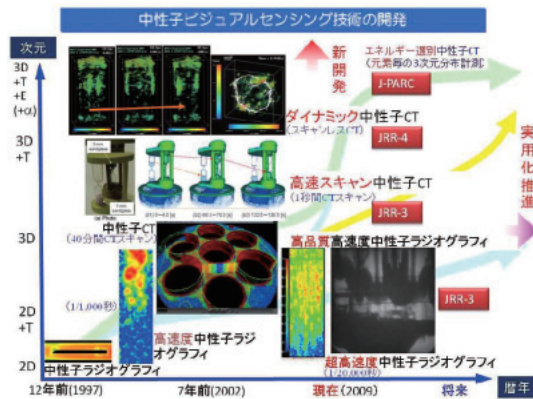


図2 技術開発ロードマップ

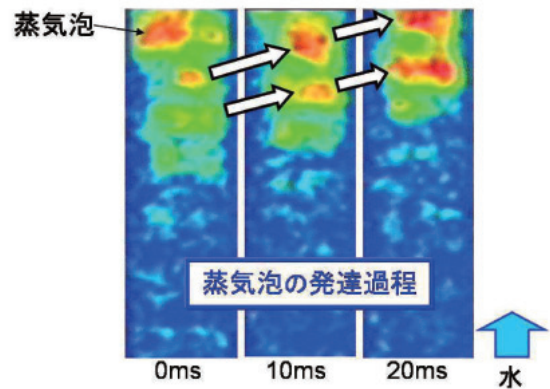


図4 未飽和沸騰流の瞬時ボイド率の時系列計測 (1/1000フレーム/秒)

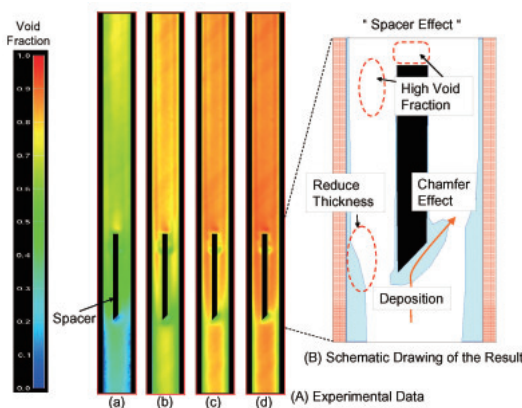


図3 障害物入り発熱円管内沸騰二相流の時間平均ボイド率分布 ((a) - (d)の順に発熱量が増加)

調 (8 bit) であったCMOS素子が現在は1024 × 1024画素、4096階調 (12bit) まで情報量が増加している。なお、3次元 (3D) CTに用いていた素子はCCDであり、これは16384階調 (14bit) であった。

### 3.1 2D中性子ビジュアルセンシング

1997年当時、加速器の固体ターゲットや将来型軽水炉の燃料集合体内を流れる水および沸騰流の可視化とボイド率計測が、これら原子力機器の安全設計の観点から必要であった。従来技術の適用が困難であったため、2次元 (2D) ボイド率計測システムを構築した後、高速度撮像中性子イメージングシステム、3次元 (3D) CTシステムを構築した。開発の意義は、実現象 (3次元の時間変化、4D)

を2Dボイド率の時間変化と時間平均3Dボイド率の組み合わせにより把握し、熱設計用シミュレーションコードの検証データベース整備に寄与することであった。

#### 1) 時間平均2Dボイド率の計測

図3に発熱する障害物入り円管内を沸騰二相流が流れ、この時間平均2Dボイド率分布を計測した結果を示す。本実験は、原子燃料集合体内のスペーサの効果を実量的に可視化するとともに数値解析コードの検証用データを得る事を目的として実施した。本実験結果は、CCDカメラで約1秒間の積算平均像を記録した後、定量化処理を行い、可視化した結果である。青色は水が多い領域、赤色は蒸気が多い領域を示している。本実験結果から、障害物の先端に液が付着した後、切り欠きに沿って液膜が吹き飛ばされ、円管内に再付着する現象などが解明できた。この当時は、2Dデータであるため高度な計算機科学は不要であった。

#### 2) 高速度計測

図4に片面が発熱する矩形流路内を熱的に非平衡な沸騰二相流 (未飽和沸騰流) が流れ、この2D瞬時ボイド率の時間変化を約1000fps (フレーム/秒) で計測した結果を示す。本試験体は、加速器の固体ターゲットを模擬して

いる。撮像系は、I.I.で高感度化したCMOS高速度ビデオカメラであり、256×256画素、256階調(8bit)で時間解像度が1msに設定してある。オリジナルデータの画質は低く、ノイズ低減化処理等を考案することにより蒸気泡の発生、合体を鮮明に観察可能として、沸騰開始点を統計的に計測することを通じて限界熱流束の物理的予測モデルを構築できた[4,5]。

### 3.2 3D中性子ビジュアルセンシング(3DCT)

中性子3DCTは試験容器を回転装置(ターンテーブル)と接続して、中性子の投影角度毎の透過画像を記録し、画像再構成により高さ分の断面像を計算する技術[6]である。研究用原子炉JRR-3の熱中性子ラジオグラフィ施設(thermal neutron radiography facility: TNRF)[7]のユーザーは共用の冷却型CCDカメラを用いた中性子3DCT実験が可能である。図5に発熱する稠密7本バンドル試験体の中を飽和沸騰流が流れ、試験体出口近傍のボイド率分布を計測した結果[8]を示す。本試験体は、低減速軽水炉の燃料集合体を模擬

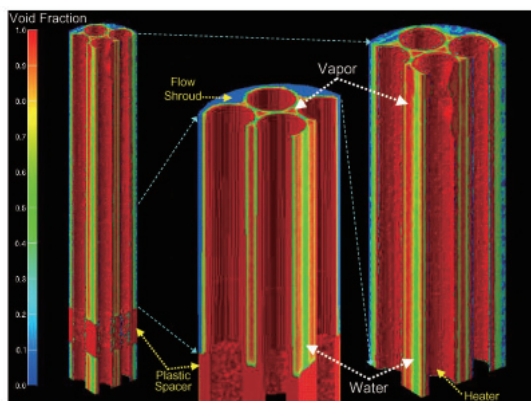


図5 飽和沸騰流の3次元ボイド率分布

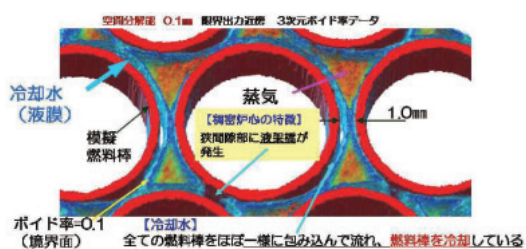


図6 液膜の3次元分布を可視化した例

しており発熱棒の間隙は1.0mmである。空間解像度は $100\mu\text{m}$ である。本実験では、CCDカメラを用いて $180^\circ$ を $1^\circ$ 刻みで $180$ ステップの投影数で記録した。この投影像から著者が開発した中性子3DCT用データ処理プログラムNIPPONを用いてフィルター補正逆投影法(FBP)でCT再構成計算を行った。FBP法は逆投影が1回で済む比較的高速なCTアルゴリズムである。投影数が $180$ でFBP法である場合、3次元CTに必要な計算量は2D計測と比較して多くなるため、原子力機構の大型計算機を用いた。開発は1MPU版から開始しマルチMPUに対応したMPI版を開発し、並列処理により実用性を高めた。なお、図5の結果は詳細数値解析コードの検証用データとして活用される[9]とともに、液膜が発熱棒をほぼ一様に冷却していることなど現象の把握に役立てた[10]。

図6に計測結果をボリュームレンダリング表示し、液膜の3次元分布を可視化した例を示す。この結果から、液膜が架橋現象を生じる事などより詳しい冷却水の分布が解明できた。3Dデータは、適切に可視化をしなければデータが持つ本質を理解することができない。このため、2Dデータのプロットと比較して高度なデータ可視化手法を用いて、様々な可視化を試み、重要な現象を表示することが求められる。著者は、AVS Express Developer[11]を可視化基盤ライブラリとして用いて、中性子3DCT用ビューアJIPANGを開発した。図5、図6は本ビューアによる可視化例である。

### 3.3 高速度撮像技術の高度化とエンジン内オイル観察への適用

高速度撮像技術の課題は、空間解像度、時間解像度、画質の向上であった。具体的には、約 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ の空間を $1000$ 画素 $\times 1000$ 画素(空間解像度 $0.2\text{mm}/\text{画素}$ )で $1/2000$ 秒毎の高画質動画を記録できる技術の開発を目

指した。このため、高輝度のシンチレータ板（コンバータ）、高解像度かつ高輝度の増幅率可変の画像強度増幅器と大型CMOS素子を内蔵する高速度ビデオカメラと画像強度増幅器を光学的に接続するリレーレンズ、そして専用イメージセンシングソフトの開発が必要であった。シンチレータは、市販品と比較して発光強度が数倍程度高い原子力機構の片桐の開発品とし、画像強度増幅器の最大映像増強度は約5百万倍とし、大型CMOS素子との接続のため拡大リレーレンズを製作し、システムとして構築した。

開発した技術を日産自動車との共同研究で、運転中のエンジン内潤滑オイルの挙動の観察に適用した。エンジンはアルミニウム合金で容器が作られており、中性子の透過性は高い。この中に中性子の透過性が低い潤滑オ

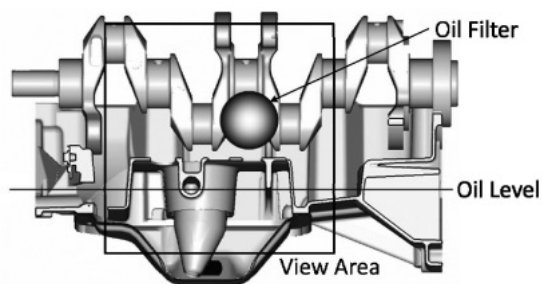


図7 エンジンの可視化領域

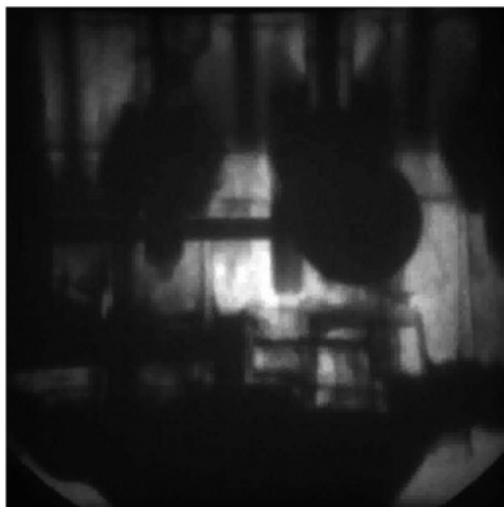


図8 高速回転中のエンジン内オイルの高速可視化例

イルが封入されている。この様な構成は、中性子ビジュアルセンシングが得意とし、オイルの挙動を把握するには高速度撮像技術を必要とした。

本研究は、エンジンから排出されるCO<sub>2</sub>を低減させるため燃費向上を目指した取り組みである。クランクシャフトなどがエンジン内で高速に回転する際に潤滑オイルと相互作用して発生する自己損失エネルギーをエンジンのフリクションロスと呼び、燃費向上にはこのフリクションロスの低減が課題の一つとなっている。日産自動車と原子力機構は、フリクションロスが少ない低燃費エンジン開発への寄与を目指して、高速度撮像技術によるエンジンの可視化実験を実施している[12]。図7にエンジン可視化実験において可視化した領域の一例を示す。この位置にはピストン下部にあるクランクシャフトやオイルパンがあり、運転中は潤滑オイルがエンジン内の各所に供給されている。図8に高速度で回転しているエンジン内の潤滑オイルの挙動を数1000フレーム/秒で可視化した結果を示す。なお、エンジンの回転数は外部からモーターで制御され、動画と回転数の関係は記録されている。本高速度可視化実験から動作中のエンジン内のオイル挙動をスローモーションで観察できる事が確認され、フリクションロスの低減に向けて、エンジン内の構造物の更なる最適化やオイルの供給状況および分散の様子を把握できることが分かった。

なお、1データは約1000画素×1000画素×2バイトの画像が数1000枚程度あり、時間軸に沿って各種補正計算を行うには高性能な計算機を必要とする。

### 3.4 高速スキャン3D/4DCT

2005年頃から、実現象と同じ次元である4Dデータの取得ニーズが高まり取得手法の開発が求められた。また同時期に様々な分野への応用展開も求められていたことから、高速ス



キャン3D/4DCTシステムと高速増殖炉の液体金属流動4D速度データ取得を目的としたマルチビーム4DCTシステムの開発を行ってきた。また、前述の中性子3DCTは、投影数が多いほど再構成結果に生じるアーチファクトノイズが少なくなる反面、中性子の照射時間が長くなり試料の放射化が問題となっていた。著者が標準的に実施した中性子3DCT実験では約40分間の時間平均CT値分布を計算することから、混相流の時間変化は不明であった。このため、秒オーダーやミリ秒オーダーで変化する混相流現象用3D/4DCT技術の開発が必要であった。

高速スキャン中性子3D/4DCTは著者が発案したシングルビームのスキャン型CT技術[13]である。図9にシステムの概略図を示す。本技術は、ターンテーブル上に試験体を固定し、その透過像を前述の超高感度高速度ビデオカメラで連続撮影をする事により、従来約40分間必要であったスキャン時間を1秒間程度に短縮できることが最大の特長である。

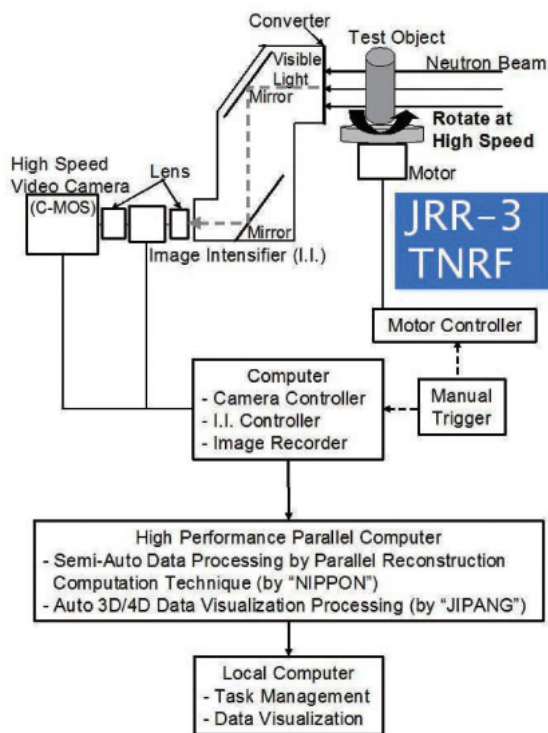


図9 高速スキャン3D/4DCTシステムの概略

例えば、ターンテーブルを1秒間/回転の速度で回転させて、2000fpsで記録すると、2000投影数で、1024×1024×1024 voxelの3DCTが1秒間のスキャン時間で終了し、高品質な3DCTが実現できる。また連続して記録を続けることにより、時間変化を追跡できるため秒オーダーで変化する混相流現象に対しては4DCTが実現できる。更に、4DCT実験における中性子照射時間は数分間程度であるため従来と比較して試料の放射化が無視できる点が大きな魅力となる。

図10に漏洩が問題となった手動弁を本技術で内部構造を可視化した結果を示す。本3DCT像を取得するために必要な中性子照射時間は1秒間であり、1回転の間に2000投影像を記録した。本結果から、内部に窠が生じている可能性が高いことがわかった。

次に、流動の時間的変化の可視化計測を目

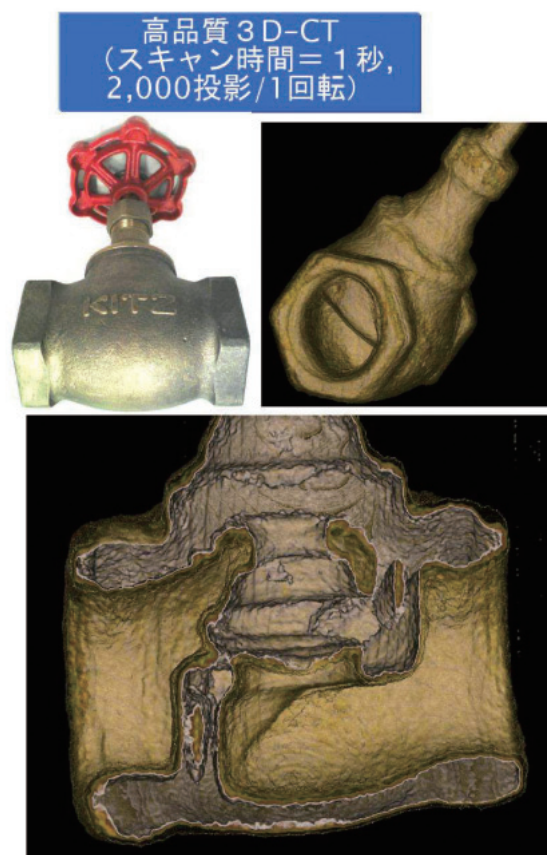


図10 高速スキャン3DCTによる手動弁の内部非破壊検査例

標として開発した高速スキャン中性子4DCT技術の原理実証を行った。図11に、原理実証のため砂時計を用いた基礎実験の結果の一例を示す。試験体は砂時計の1分計と3分計であり、顔料で着色された砂がガラスの中を流下する。砂の主成分はガラスと同じSiO<sub>2</sub>であり、中性子の断面積は小さく透過性が良い材料である。しかし、顔料中に水素が含まれているためコントラストが付いた画像が取得でき、流下する砂を4次元で可視化できる。このように高速スキャン中性子4DCTによ

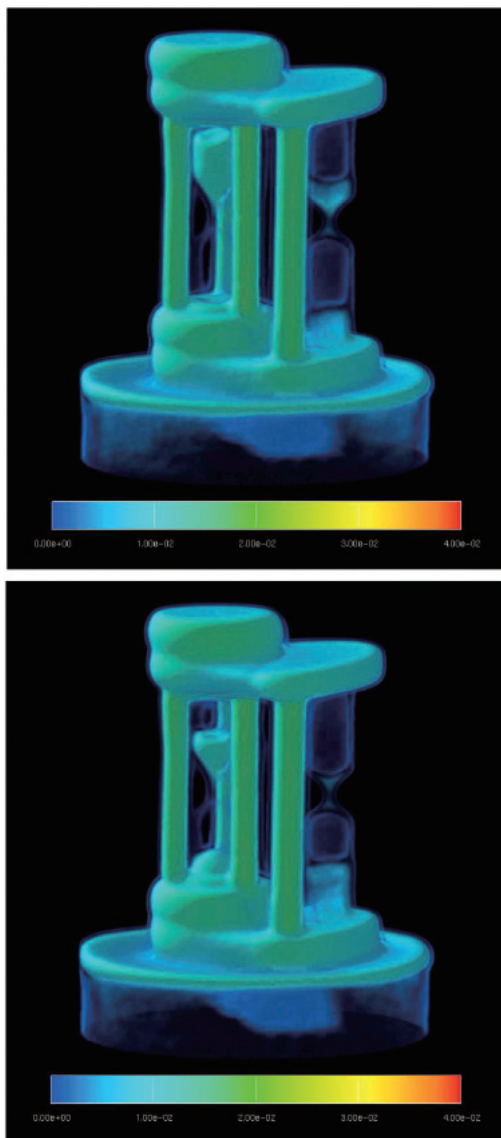


図11 砂時計を用いた4DCTの原理実証結果（砂の流下現象を立体的動態変化として可視化）

り、秒～分オーダーで変化する混相流を4次元的に観察できることを実証できた。

本技術は、特にターンテーブル上に固定できる固液混合体や粉体流動装置などの4次元観察への応用に適している。現在、セメントコンクリート分野の大学研究者と共同研究体制で、建築分野への応用が始められている。

### 3.5 処理の高速化

3D/4DCT技術では再構成演算の量が膨大となるため、処理の高速化を検討しなければ実用上の問題が生じる。このため、著者は、大型計算機に搭載された高性能MPUを複数同時にCT演算に使用するマルチMPUによるCT演算技術と、最新技術である画像処理専用素子（GPU）を科学技術計算に利用するGPGPU技術を基盤としたマルチGPUによるCT演算技術を開発した。

マルチMPUを用いる技術としてMPI（Message Passing Interface）を選択し、データ処理プログラム内のCT演算部としてMPIに対応した関数を開発した。このため、大型計算機上の64bitMPUを複数個（最高128個でテスト）使用したり、PCクラスターで32bitCPUを複数個使用したり、マルチコアCPUで4個または8個のコアを並列に使用したりすることで、CT演算速度を高速化させた。図12に処理速度の比較結果を示す。ここで、膨大な量のデータを大型計算機等の上で効率的に処理するため、IT分野で標準となりつつある

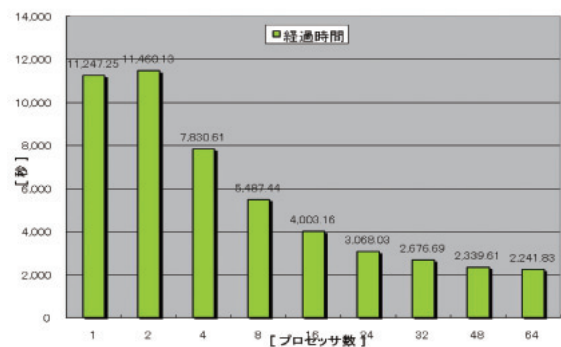


図12 MPIによる高速化評価結果



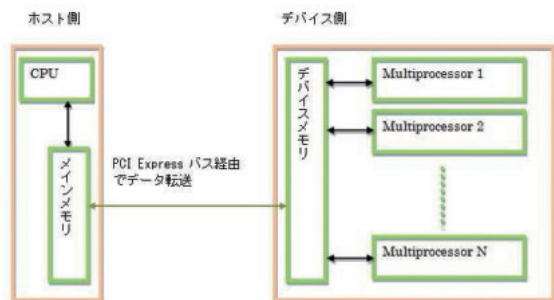


図13 GPUコンピューティングの概念

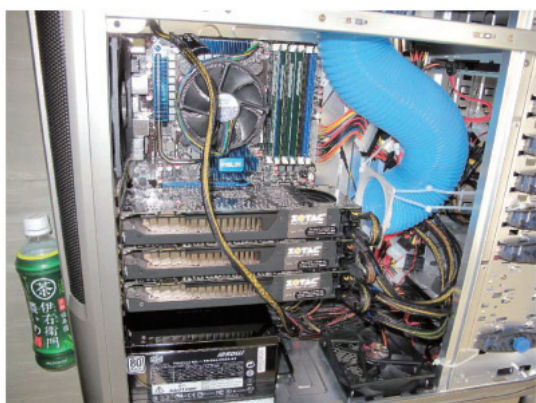


図14 GPUを6個搭載したCT専用計算機

XML言語を実験データ処理に応用した。このXML言語の使用により処理の設定を極めて効率的にできるようになった。

マルチGPUを用いる最新技術は、GPUコンピューティングやGPGPUと呼ばれている[14]。GPUに内蔵されているストリーミングプロセッサ数は数100個あり、これを同時並列して計算に用いる。図13にGPUコンピューティングの基本となるシステム概念を示す。著者は、中性子3D/4DCTのため、図14に示すCT演算専用計算機を製作し、また、マルチGPUに対応したCT演算関数を開発した。図15に最高6GPU (1440並列演算可能)を用いて、演算速度を評価した結果を示す。基準とした速度は、大型計算機128MPU上のMPIで並列計算した時に必要であった時間であり、6GPUを用いた場合には約1.9倍の高速性を達成していることを確認できた。この結果から、CT演算に関してはGPUコンピューティングの活用が効果的であることが

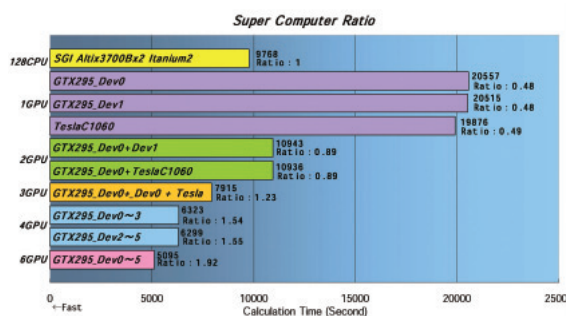


図15 マルチGPUによるCT演算時間の計測結果

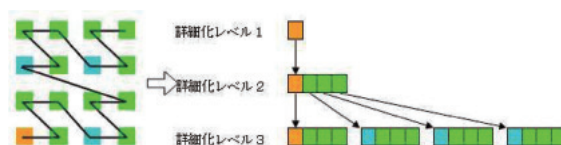


図16 階層化圧縮・展開アルゴリズム (Z-Order曲線による空間補充方法)

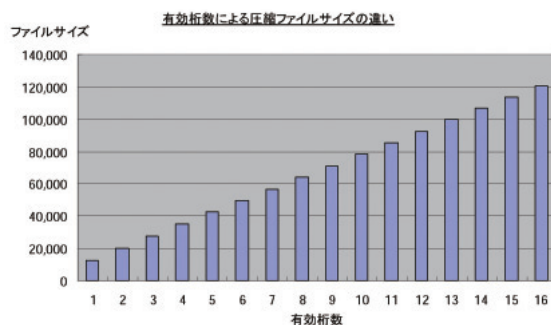


図17 有効桁数と圧縮データサイズの相関測定の結果

わかった。

また、データの量が数100MBからTBオーダーに達することからデータの圧縮が必要となると考えられた。このため、図16に示すような階層化圧縮・展開アルゴリズム[15]による圧縮関数とその部分展開関数を本技術用に開発した。圧縮アルゴリズムは可逆圧縮と非可逆圧縮を選択でき、可逆圧縮は圧縮後のデータサイズが大きく、非可逆圧縮は小さくなる。図17に有効桁数と圧縮データサイズの関係を調べた結果を示す。通常の実験データでは非可逆圧縮であっても可視化結果に及ぼす影響は無視できる程度に小さいことが確認され、非可逆圧縮でデータを保存することが

有効であることがわかった。

### 3.5 マルチビーム中性子4DCT

前述の高速スキャン中性子3D/4DCTは、1本の中性子ビームで容易に高品質な結果を得ることができる長所があるが、試験体を回転させなければならないため、高速に変化する現象には適用ができず、配管や配線が接続された試験体への適用が困難である点が難点である。これらの点を解決するために中性子ビームを複数本生成し、試料に同時照射するマルチビーム中性子4DCT技術を開発した[16]。

図18に4DCTを実現し、流体の速度を計測するための基本原理を示す。この技術では、複数本のビームを異なる角度から検査領域に同時照射し、これらの透過像を動画として同期して記録することにより瞬時の3DCT値分布を連続的に得る。そして、瞬時の3DCT値

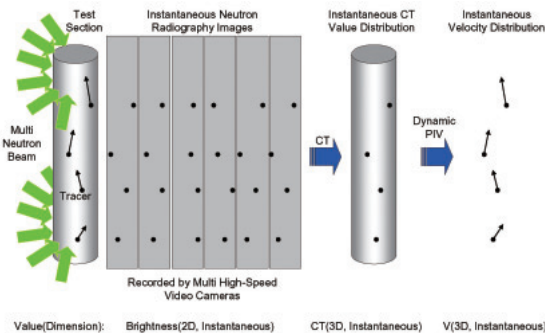


図18 マルチビーム4DCTの基本原理

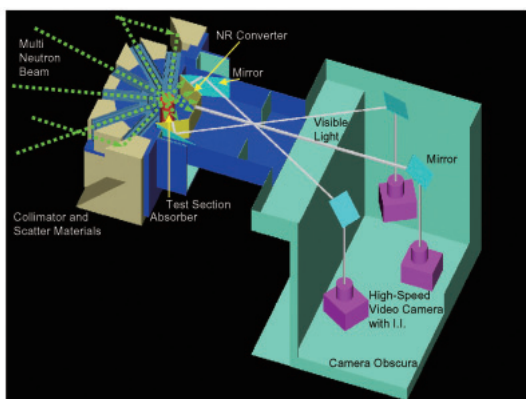
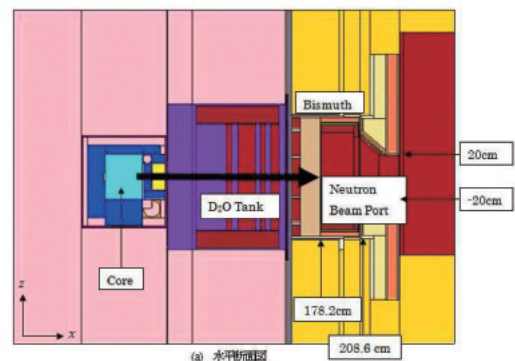


図19 マルチビーム4DCT装置

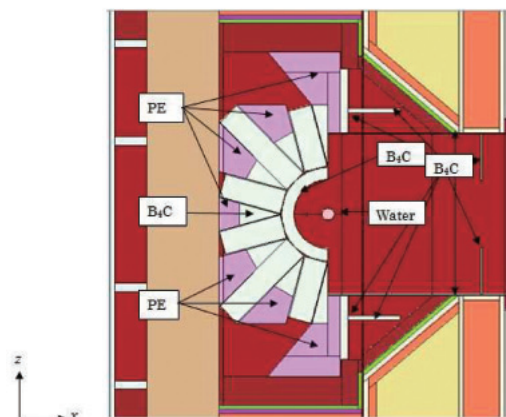
分布を時系列に表示すると4D可視化が実現できる。更にトレーサ粒子を入れることで粒子追跡法により速度や軌跡の計測が可能となる。

本技術の実現で最も難しかった点は、複数本の中性子ビームの生成方法である。そこで、大口径かつ熱外中性子強度が高い中性子ビーム施設（JRR-4の中性子照射室）を用いて、中性子の散乱現象を利用したマルチビーム中性子4DCT装置を考案した。図19に装置の概略を示す。試験体の背面には6ビームの透過像を生成するため3枚のNRコンバータを用いた。1枚のコンバータに2ビーム分の透過像を生成し、I.I.付の高感度高速度ビデオカメラで記録する。このため、ビデオカメラは3個ですむコンパクトな設計とした。

実験装置は中性子モンテカルロ解析コードMCNPによる理論解析を繰り返し行い設計した。本装置は中性子の散乱現象とエネルギー



(a) 水平断面図



(a) 水平断面図

図20 MCNPによる装置モデル

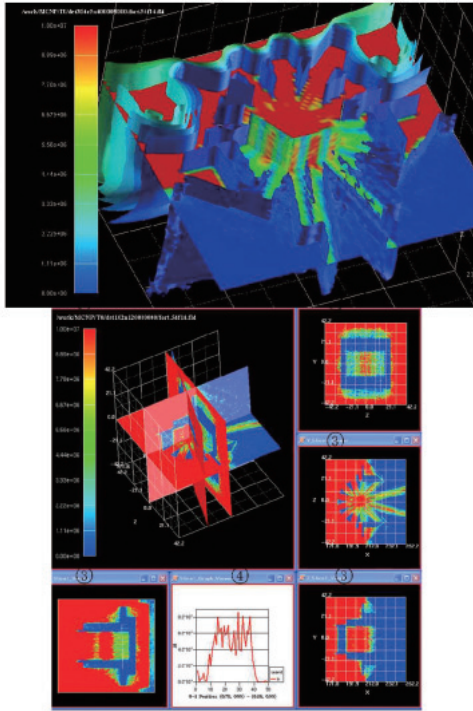


図21 熱中性子束の空間分布解析結果例

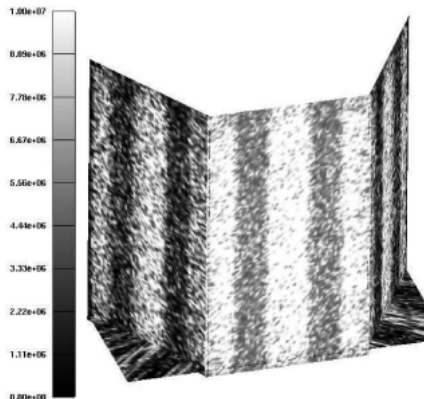


図22 コンバータ面上の熱中性子束分布解析結果

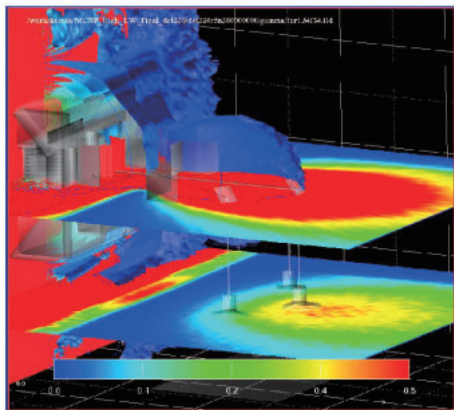


図23 カメラ周辺のガンマ線 (光子) の空間分布解析結果

ーの変化を活用するため理論解析を導入しなければ実現が困難である特徴があった。このため、図20に示すようにMCNPによる装置モデルを設計し、結果の予測、装置の放射化防止策、ノイズ低減策等の検討を行った。熱中性子束の空間分布を解析した結果の一例を図21に示す。図21からJRR-4炉心から生じる中性子を散乱させて6本のビームを生成でき、図22に示すようにコンバータ上に6投影像が記録できることが予測された。また、高速度ビデオカメラにガンマ線 (光子) が入射すると破損の原因となり、ノイズを生じることから、図23のようにガンマ線の空間分布も評価した。これらの理論解析結果を基に実験装置を製作した。

この技術は、原理は単純であるが様々なデータ処理を大量に実行しなければ4次元の可視化動画や速度などの計測を実現することは困難である。このためハードウェアの全て、専用のデータ解析用処理ソフト[17]、4次元ビューアを独自に開発する必要があった。この4DCTについても、MPIとGPUコンピューティングによるCT演算の高速化を適用した。

図24に原理実証試験体の概略を示す。この試験体は中性子に対して透過率が高いアルミニウムの円柱の中に中性子に対して不透明となるカドミウム棒と球を埋め込んでおり、最高1.5回転/秒で回転させた。これは、液

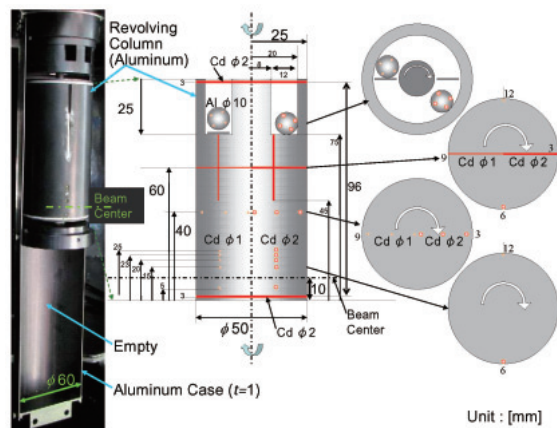


図24 原理実証試験体の概略



体金属流中のトレーサ粒子を模擬しており、トレーサ位置の速度は最高で0.24m/sと設定した。図25は125フレーム／秒で記録し、4DCTを実現した結果を示している。カドミウム棒が制御パターンと一致して回転している様子を3次元の動画として可視化できたことから、本技術が4次元可視化技術として使用できることが確認できた[16]。

図26に、本技術に適したトレーサ粒子の速度と軌跡の測定法を開発し、図25の条件で4DCT結果からトレーサ位置を求め、結果を可視化した例を示す。この図は、図25の上方からの視点で可視化した瞬時の結果である。本技術により速度場と軌跡の4次元計測が原

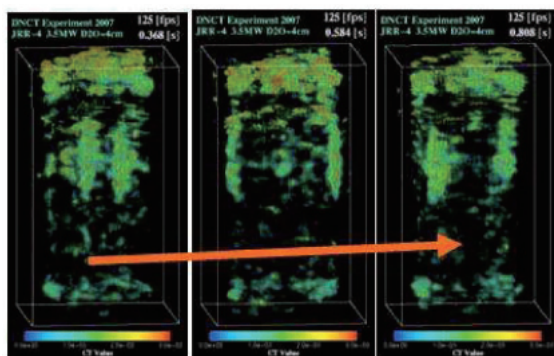


図25 4DCT原理実証実験の可視化結果

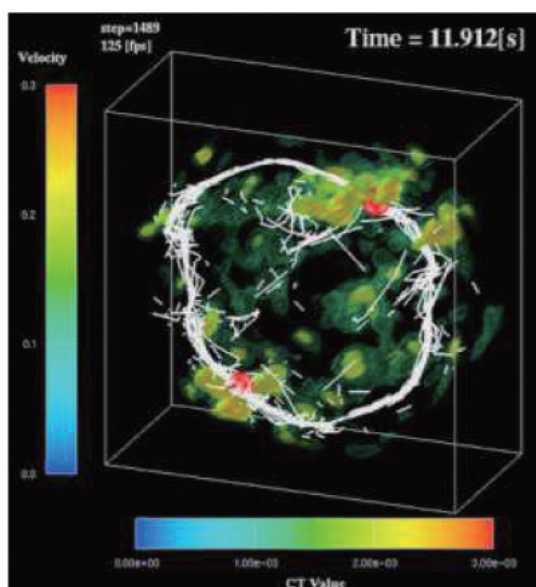


図26 トレーサの速度と軌跡計測の原理実証結果

理的にできることを実証できた。

#### 4. 今後の展望

上述の技術や実験は定常中性子源であるJRR-3やJRR-4を用いて、特に混相流現象の把握と計測を主目的として開発、実施したものである。技術水準が学術・産業利用目的に必要な水準に達しているこれらの技術に関しては、所期の目的を達成しているものが多く、将来は多様なニーズやJ-PARCなど新しい中性子源に適用させることで広く社会に成果還元をすべきであろう。このため利用可能なシステムに関しては他の学術分野のユーザーや一般ユーザーによる利用の促進を図る方針である。

また、定常中性子源を利用したボイド率や速度以外に、例えば特定物質の濃度変化を測定したいニーズや、より高い解像度や時間分解能を必要とするニーズなどに対しては、共同研究体制を組み追加開発をすることで経済的かつ効率的に課題の解決につながるであろう。

今後の大きな展望の一つとして、大強度パルス中性子源であるJ-PARCを利用して、新しい可視化や計測を実現するチャレンジングな研究開発が期待されていると感じている。定常中性子源と比較して、J-PARCは25Hzの周期で高いピーク強度のパルス中性子が発生する特徴がある。このため、TOF法で分光的な可視化・計測を行う方法やシステムを開発することにより、定常中性子源と補完的な関係で様々な活用が期待できる。例えば、対象物の大きさや物質に応じて適切な中性子エネルギーを設定することで、柔軟にコントラストを選択できるイメージングが可能となる。更に、高エネルギー側を活用した物質固有の共鳴吸収特性に着目した元素同定が可能となる。また、低エネルギー側を活用してブラッグカットオフ特性から結晶構造の変化を解明することが可能となる。加えて、従来の透過

法より高感度なイメージングを可能とする位相コントラストイメージング、偏極・磁場イメージングなどの革新的技術が潜在的な魅力としてある。このため、J-PARCが2008年末に完成しパルス中性子の共用利用が開始された今後数年間は特に、アイデアや多くの技術を持ち寄り、将来に繋がる基礎的基盤的な研究開発に優先的に取り組むことが重要だと考えている。特に、長期にわたりJ-PARCがCOEとして社会に継続的に貢献するためには、若い研究者が主体的に社会と強い接点を保ちながら研究開発に取り組むことが重要であろう。

## 5. 高度計算機科学とビジュアルセンシング

ビジュアルセンシング技術では、膨大な実空間での情報を扱う特徴がある。このため、大規模シミュレーション等の進化とともに高性能化が進められてきた大型計算機の活用や、高度計算機科学分野で研究開発された高度な手法や解析コード、プロトコル等とビジュアルセンシング技術を融合させる事により、従来は不可能と考えられていた可視化や計測が実現できるようになる。

先端技術の開発には、設計段階から、データ処理段階、結果の評価段階まで高度計算機科学の活用が不可欠な時代となっていると感じている。

また、撮影素子等の高性能化により情報量が増大し、高品質な結果が得られる反面、結果が得られるまでの時間が長くなり、保存法等にも問題が生じている。このため、従来にはないデータ量を圧縮できる装置開発、高速・安全データ転送法、保存法、データの管理・運用法を研究開発する必要がある、最新のIT技術と組み合わせて効率的で実用的なシステムを構築する事が重要と考えている。

## 6. おわりに

2009年6月末に特定先端大型研究施設に指

定されたJ-PARCや高性能定常中性子源として安定した運転実績を有するJRR-3などを利用した中性子利用技術は、将来、より多様な学術分野・産業分野での利用により科学技術水準の飛躍的向上に繋がることが期待されている[17]。また、IT技術は爆発的に進化している。中性子利用技術にも最先端のIT技術を積極的に取り込む事で、新しい可能性が生まれることから、中性子利用関係者とIT技術関係者が連携して新しいシステムを共同開発する研究スタイルが効果的かつ効率的であろう。その一技術である中性子ビジュアルセンシング技術の技術水準は、他の先行する医療用X線CT等ビジュアルセンシング技術と比較して成熟しているとは言えず、まだまだ未開拓領域が多く残されており、今後の取り組みに期待が寄せられている。

本技術にかかわらず、シーズ開発者である研究者とニーズをもつ学術・産業分野の担当者間の相互理解の推進を通じて、実際に社会に役立つ基盤技術を強化することが強く求められている時代になっていると感じている。

## 参考文献

- [1] “特集 中性子ラジオグラフィの動向”、放射線と産業、Vol.84、4-33 (1999).
- [2] Mishima, K. and Hibiki, T., “Quantitative Method to Measure Void Fraction of Two-Phase Flow Using Electronic Imaging with Neutrons”, Nucl. Sci. Eng., Vol.124, 327-338 (1996).
- [3] 呉田、日引、三島、秋本、“中性子ラジオグラフィ高速度撮像法の沸騰流計測への応用 (第1報 計測誤差評価とボイド率計測)”、日本機械学会論文集、B編、Vol.67-653、179-188 (2001).
- [4] Kureta, M., Akimoto, H., Hibiki, T. and Mishima, K., “Void Fraction Measurement in Subcooled-Boiling

- Flow Using High - Frame - Rate Neutron Radiography”, Nuclear Technology, Vol. 136, 241-254 (2001).
- [5] Kureta, M. et al., “Study on Point of Net Vapor Generation by Neutron Radiography in Subcooled Boiling Flow along Narrow Rectangular Channels with Short Heated Length”, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 46, 1171-1181 (2003).
- [6] Kureta, M., “Development of a Neutron Radiography Three - Dimensional Computed Tomography System for Void Fraction Measurement of Boiling Flow in Tight Lattice Rod Bundles”, J. Power and Energy Systems, Vol. 1 (3), 211-224 (2007).
- [7] Matsubayashi, M., “Fundamentals and Applications of Neutron Imaging, Neutron Sources for Neutron Imaging”, RADIOISOTOPES, Vol.56, 479-486 (2007).
- [8] 呉田, “中性子トモグラフィによる二相流計測技術”, 噴流工学, Vol.20-2, 24-31 (2003).
- [9] 吉田, 他5名, “大規模シミュレーションによる稠密炉心内気液二相流特性の解明 (IV)”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 4-2, 106-114 (2005).
- [10] Kureta, M., “Experimental Study of Three - Dimensional Void Fraction Distribution in Heated Tight-Lattice Rod Bundles Using Three-Dimensional Neutron Tomography”, J. Power and Energy Systems, Vol.1 - 3, 225 - 238 (2007).
- [11] [http://www.kgt.co.jp/feature/exp\\_dev/](http://www.kgt.co.jp/feature/exp_dev/)
- [12] Nissan Motor Co. and Japan Atomic Energy Agency, [http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2008/\\_STORY/081110-03-j.html](http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2008/_STORY/081110-03-j.html) (2008).
- [13] Kureta, M. and Iikura, H., “Development of an Ultra-High-Speed Scanning Neutron Tomography System for High-Quality and four-dimensional Visualizations”, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., A, Vol. 605, 81-84 (2009).
- [14] “特集 アクセラレータ、再びスペースコン化の切り札—”, 情報処理, Vol. 50-2, 93-139 (2009).
- [15] Pascucci, V. and Frank. R.J., “Global Static Indexing for Real - time Exploration of Very Large Regular Grids, Conf. on High Performance Networking and Computing archive”, Proc. of the 2001 ACM/IEEE conference on Supercomputing (2001).
- [16] Kureta, M., Kumada, H., Kume, E., Someya, E. and Okamoto, K., “Dynamic Neutron Computer Tomography Technique for Velocity Measurement in Liquid Metal Flow - Fundamental PTV Experiment-”, J. of Physics: Conference Series, Vol.147, 012087 (2009).
- [17] Kureta, M., Kumada, H., Kume, E., Someya, E. and Okamoto, K., “Data Processing Methods for Dynamic Neutron Tomography Velocimetry”, CD-ROM of the 3rd Int. Workshop on Process Tomography, No.64, Tokyo, Japan (2009).