

令和4年度

超大型X線CT装置を活用した

産業のデジタル化技術の開発等に係る調査事業

調査報告書

令和5年2月

サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合

目次

第1章 事業の概要	1
1-1 事業の背景・目的及び目標	2
1-2 体制	4
1-3 成果概要	5
第2章 本論	8
2-① X線CT／デジタル化拠点及び超大型X線CTシステム技術に関する 課題調査	9
2-①(1) X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査	9
2-①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査	44
2-② 超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術の高度化調査	78
2-②(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査	83
2-②(2) データプラットフォームに関する調査	133
2-③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査	172
2-③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査	172
2-③(1)-1 X線CTによる金属 AM(付加製造) 部品の欠陥検出 および形状計測	172
2-③(1)-2 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決	197
2-③(2) XCC(Xray Car Crash)に関する海外技術調査	216
第3章 まとめ	225

第1章 事業の概要

1-1 事業の背景・目的及び目標

日本のモノづくりは、これまで熟練技術者等の現場力で支えられてきた。具体的には、設計図通りの部品であっても、完成製品として組み立てる過程で部品に歪みなどが生じるが、製造現場の熟練技術者等がその都度、最適化させることで、高品質な完成製品を世の中に送り出してきた。しかし、そうした熟練技術者等の高齢化・引退が進んでいる。熟練技術者から若手技術者への技術・技能の伝承にも限界が見られる。

一方で、ドイツは、インダストリー4.0を掲げ、設計から製造までのDX化にいち早く取り組み、モノづくりの競争力の維持・向上を図っている。米国は、インダストリアルインターネットのようにデジタルデータ利用環境の仕組みづくりでリードを図ろうとしている。中国は、世界の工場としてサプライチェーンを抑えつつあり、日本は欧米中の後塵を拝することも予想される。

日本において、他国に対し優位性を有し、また熟練技術者等の現場力が結実するインテグラル型製品の生産プロセスを重点として、令和5年4月に設立予定の福島国際研究教育機構(以下、新機構)でサイバー・フィジカル・エンジニアリング(以下、CPE)技術による製品ライフサイクル全体でのモノづくりDXを進める予定である。

CPE技術は、産業用X線CT装置(CT:コンピュータ断層撮影)等を用いて、完成製品等現物の3Dデジタル計測から現物モデルをつくり、この現物モデルを用いた物理シミュレーション等を行うものである。これによって、現場力で解決してきた様々な課題を顕在化させ、熟練技能継承の問題を解決でき、設計から製造までの生産性と付加価値を飛躍的に向上できると期待される。また、CPE技術は、欧米製CAD/CAEでは十分に支援できなかった日本のものづくりにとって重要な製品開発領域(品質、精度、信頼性、寿命、環境、感性、UX等)のDXを進めるものであり、日本のものづくりのための日本発のDX技術となることが期待される。

現物モデルを構築するには、製品丸ごとの3DデジタルデータをX線CT装置等によって計測し、さらに様々な試験方法によって取得した特性データ(材料特性、電気的特性等)をそれに統合化する。このような特性データをもつ3Dの現物モデルを用いることにより、製品開発においては、構造解析から熱・流体解析、電磁界解析までの多様な物理シミュレーションを実施して設計品質を向上させ、一方、生産工程においては、現物モデルによる製造シミュレーションを実施し、工程を改善することができる。

例えば、仕掛品を組み立て工程ごとにX線CT装置で丸ごと計測し、それぞれの現物モデルを用いた製造シミュレーションを行うことで、従来非常に難しかった現場の擦り合わせによる組立工程における累積公差・累積変形の管理を定量的に行い、公差・変形の原因究明などより高度な擦り合わせにつながる技術開発が可能となると考えられる。

また、製品全体のデジタルデータの共有により、全体を知った上での最適な部材の提案を可能とするなどの同業種内での川上から川下までの意識改革および異業種との連携による新産業創出

を容易にするなどの大きな変革を起こすことも期待される。一連の膨大な3D デジタル情報を蓄積し続けることと合わせて、デジタルツイン(サイバー空間でフィジカルを再現)のプラットフォームを形成し、日本型 DX を実現することを目指している。

こうした中、新機構における超大型 X 線 CT および CPE 技術の研究開発として、下記の項目の実施が予定されている。

①超大型 X 線 CT システム技術の研究開発

世界初の高エネルギー・ガントリー式超大型 X 線 CT 装置を開発する。ガントリー式の利点は、大型検体(自動車、ドライコンテナ、大型タイヤ等)や長尺検体(ヘリコプターや風力発電機のブレード等)を姿勢を変えずに撮像できる点にある。大型製品に対する 3D 計測を、この規模の装置で高精度に(目標:画像分解能 300 μ m、表面抽出精度数 10 μ m) 行うための技術課題を解決する。

②超大型 X 線 CT 装置のための画像処理基盤技術の高度化

超大型 X 線 CT 装置による CT 画像(断層画像・3 次元画像)を、CPE 等の多様な目的で活用するためには、CT 画像を高画質化することが最も基本的に重要であり、その基盤となる画像処理技術を研究開発する。また、CPE での応用に必要な情報を CT 画像から抽出するための、様々な画像分析・測定・検査技術や 3D CAD やシミュレーションのためのモデリング技術について研究開発及び人材育成を行う。

③現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化

我が国のものづくりで使われている IT ツールは、世界各国でも利用されている欧米製システムとなっている。これらのツールは、部品の設計図面を元にした理想的状態の CAD モデルをベースにしているため、現物製品のもつ擾乱(形状偏差、変形、組付偏差、欠陥、劣化等)が無視されていた。現物の測定データを元にした CPE 利活用技術を開発することで、日本のものづくりの特徴を活かした従来の理想モデルでは不可能であった、様々な設計や製造のノウハウ蓄積等の問題解決が可能となる設計開発環境が構築できる。それにより我が国の製造現場の高いものづくり力を現物モデルを通して活用できる産業界(企業)人材の育成により、日本型 DX を実現する。

本事業は、新機構発足後の技術開発実施のために、先行的に進める調査として経済産業省の公募事業「令和4年度超大型X線CT装置を活用した産業のデジタル化技術の開発等に係る調査事業」として行ったものである。関連する個別テーマも含め、下記のボードにした7項目について調査を行った。

① X 線 CT/デジタル化拠点および超大型 X 線 CT システム技術に関する課題調査

①(1) X 線 CT 技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査

①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査

- ② 超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術の高度化調査
 - ②(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査
 - ②(2) データプラットフォームに関する調査
- ③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査
 - ③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査
 - ③(1)-1: X線CTによる金属AM(付加製造)部品の欠陥検出および形状計測
 - ③(1)-2: 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決
 - ③(2) XCC(Xray Car-Crash)に関する海外技術調査

1-2 体制

それぞれの項目の担当責任者は下記のとおり。また、本調査委託事業の実施体制を図 1-2-1 に示す。

責任者

全体 サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合(以下、CPE 組合)

テーマ①(1) B 研究所

テーマ①(2) C 製作所

テーマ②(1) D 大学

テーマ②(2) CPE 組合・E 社

テーマ③(1)-1 F 社

テーマ③(1)-2 G 社

テーマ③(2) CPE 組合・H 社

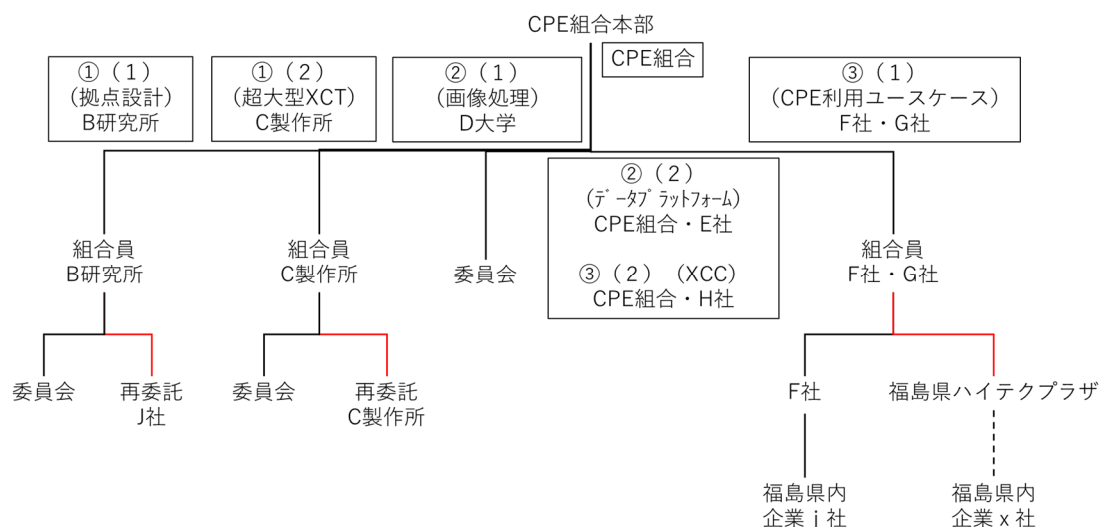


図 1-2-1 事業体制図

委員会で調査することとなっている3つのテーマ(①(1)、①(2)、②(1))に関しては、全体委員会を福島 XCT/CPE 拠点検討委員会とし、全員を委員会委員として委嘱した。全体の委員会は令和4年11月17日にオンラインで開催し、テーマごとに分科会を設置し、分科会長が取りまとめることとなった。下記に設置した委員会・分科会と委員長・分科会長を示す。

福島 XCT/CPE 拠点検討委員会 委員長 CPE 組合

XCT/CPE 拠点中長期事業化検討分科会 (①(1)) 分科会長 B 研究所

超大型 XCT 装置検討分科会 (①(2)) 分科会長 C 製作所

X 線 CT 画像処理基盤技術検討分科会 (②(1)) 分科会長 D 大学

1-3 成果概要

今回の調査委託事業は、令和5年4月に設立される新機構における研究に引き継がれる。それぞれの項目ごとに行われたこと、得られた成果の概要について示す。

① X 線 CT/デジタル化拠点および超大型 X 線 CT システム技術に関する課題調査

①(1) X 線 CT 技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査

国内の産業用 X 線 CT の研究者、装置開発企業、装置を活用したサービスを提供する企業、建築・設備の関係者を中心に、新機構の機能として予定されている超大型 X 線 CT 装置を有する拠点の中長期事業化へあり方を検討した。具体的には国内で本テーマに関連する有識者へのヒアリング・既存施設の視察・文献調査、海外研究機関との連携を基に、本拠点の建築・設備・構造

に関わる基本要件と利便性、将来拡張性、セキュリティなど多面的な要素を考慮したレイアウト案を検討した。

①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査

超大型 XCT 装置検討分科会として、超大型X線CT装置の設計に係る、X線源、検出装置、ガントリー装置等の要素技術に関する国内外の最先端の技術動向を文献調査やX線CT装置に関する知識を有する研究者等へのヒアリング及び討論等を行い、技術的課題を抽出し、令和5年度以降に新機構で行う研究開発計画を作成した。

また、被検体の重量が大きく、かつ、長尺な被検体を CT 撮像ができる装置が求められるという特徴を持つ超大型 X 線 CT 装置の基本設計として、1)超大型 X 線 CT 装置の構成、2)超大型 X 線 CT 装置の性能仕様、3)超大型 X 線 CT 装置を構成する各機器の装置仕様について報告書にまとめた。

② 超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術の高度化調査

②(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査

超大型 X 線 CT 装置による CT 画像(断層画像・3次元画像)を、欠陥検出やシミュレーション等の多様な目的で活用するためには、CT 画像を高画質化することが基本的に重要であり、その基盤となる画像処理技術を研究開発する必要がある。また、形状幾何測定や、リバースエンジニアリングなどの応用で必要な情報を CT 画像から抽出するためには、様々な画像分析・測定・検査技術やモデリング技術について研究開発を行う必要がある。

本調査事業では、このような画像処理の高度な基盤技術開発の研究動向について、文献を中心に調査し、令和5年度以降の新機構における研究計画を策定した。全委員により、画像処理技術に関する研究動向調査、CT 技術の応用における有識者を招いてのセミナーとディスカッションを行った。加えて、コアメンバで CT 技術に関連する業務を行っている企業を訪問し、現場で必要とされている技術のヒアリングを行った。以上の調査を基にして、新機構における研究計画と教育活動を策定した。

②(2) データプラットフォームに関する調査

新機構の中にできる超大型 X 線 CT 装置等を用いた現物データ起点の大量のデータの利活用を行うために不可欠と考えられるデータプラットフォームに関して、国内外の動向・現状についての調査を行った。GAIA-X などに代表される欧米勢先行のデータ流通基準に対し、日本の製造業を再生させるための新たなデータ連携の仕組みについて調査し、そのあるべき姿として検討が必要な事項などについて提言としてまとめた。

③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査

③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査

③(1)-1 X線CTによる金属AM(付加製造)部品の欠陥検出および形状計測

現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査の一環であるX線CTデータを基にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査として、福島県内企業と共同し、同社で取り組んでいる金属AM製造における課題における、X線CTによる金属AM(付加製造)部品の欠陥検出および形状計測に関しての調査を行った。本調査により、AM金属部品サンプルのX線CT撮像を行い、取得したCTデータに対し、簡単な学習を行うことで内部欠陥を3次元的にかつ自動で検出できることの確認、CTデータから抽出されたサンプル表面の3次元点群データから設計モデルとの寸法形状比較評価を行えることの確認、3Dデジタルデータの活用が作成したサンプルの品質保証において極めて有用であることの確認が成果として得られた。熱交換器のように、さらに、内部に複雑かつ微細な構造を持つ部品の品質保証には3Dデジタルデータの活用が不可欠であること、またCAE解析により設計性能の検証が可能となり有用性が高いことを示した。

③(1)-2 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決

福島県ハイテクプラザに、福島県内企業から、電気炉を使った高温における精密な温度制御での課題が持ち込まれていた。本ケースにおける課題は、シース熱電対の製造上のばらつきにより、計測温度に差が生じることでであると推定されたため、当該製品および模擬製品を用いて、X線CT撮像によってデジタル化し、シミュレーションの適用を実例として行うことで、現物測定によるシミュレーションでの機能・現象の予測の有効性を示すこととした。ハイテクプラザでの実験および保有のX線CT撮像・モデル化とシミュレーションと並行して、CPE組合においても、組合員企業の持つ産業用X線CTでの撮像・モデル化とシミュレーションを実施した。課題内容の検証には、こうした現物のX線CTによる撮像からのデータを元にしたコンピュータシミュレーションが有用であることがこのユースケースから明確になった。

③(2) XCC(Xray Car-Crash)に関する海外技術調査

XCC(Xray Car-Crash)に関する海外技術調査を実施した。XCCとは、X線を利用し車両の内部を可視化することで、車両衝突時の現象を解析する装置と技術である。このXCC装置を保有するI研究所を訪問し、実機を視察することにより装置仕様、運用、アプリケーションについて知識、理解を深めることを調査の目的とした。

調査の結果、基本的な装置の仕様や構成、技術要素を認識でき、XCCに対する理解を深めることができた。特に最新技術であるLinacや高速フラットパネルの運用は興味深かった。また、同装置およびI研究所主軸の技術であるX線による高速動画のアプリケーションについての認識質疑や意見交換も行い、今後の協業の可能性についても探ることができた。国内におけるヒアリング・文献調査などから、国内産業界からの要望も高いことが分かった。

第2章 本論

2－① X 線 CT/デジタル化拠点および超大型 X 線 CT システム技術に関する課題調査

2－①(1) X 線 CT 技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査

1. はじめに

本報では、建築設計実務者の観点から、視察・有識者ヒアリングより建屋検討において留意すべき内容を整理するとともに、設備・施設要件をとりまとめ、当該拠点のレイアウト案とパース案を提示する。加えて、中長期事業化を見据え、外部へも開かれた施設拠点とするために、国内外の研究拠点について事例調査し、今後の拠点基本設計において参考とすべき観点、最新技術等を示す。

なお、現段階では当該施設の建設予定地や新機構における研究テーマの連携・施設の方針が未定である。したがって、本検討の前提として、新機構における本事業の研究拠点は他テーマと一の敷地内に建設されることとし、アメニティ施設(食堂、集会室、宿舍等)は全体計画に準ずるものとして検討対象外とした。一方で、当該技術研究において独自に必要な設備・建屋について、安全性と情報セキュリティに配慮した独立建屋群のレイアウトを示し、他テーマとの施設共用の可否について、諸室機能ごとに整理した。

2. 実施概要

2.1 実施体制

実施体制を以下に示す。建築設計実務経験を有する建屋検討チームを構成し、中長期事業化検討分科会と連携して要件整理、建屋及びレイアウト案を取りまとめた。

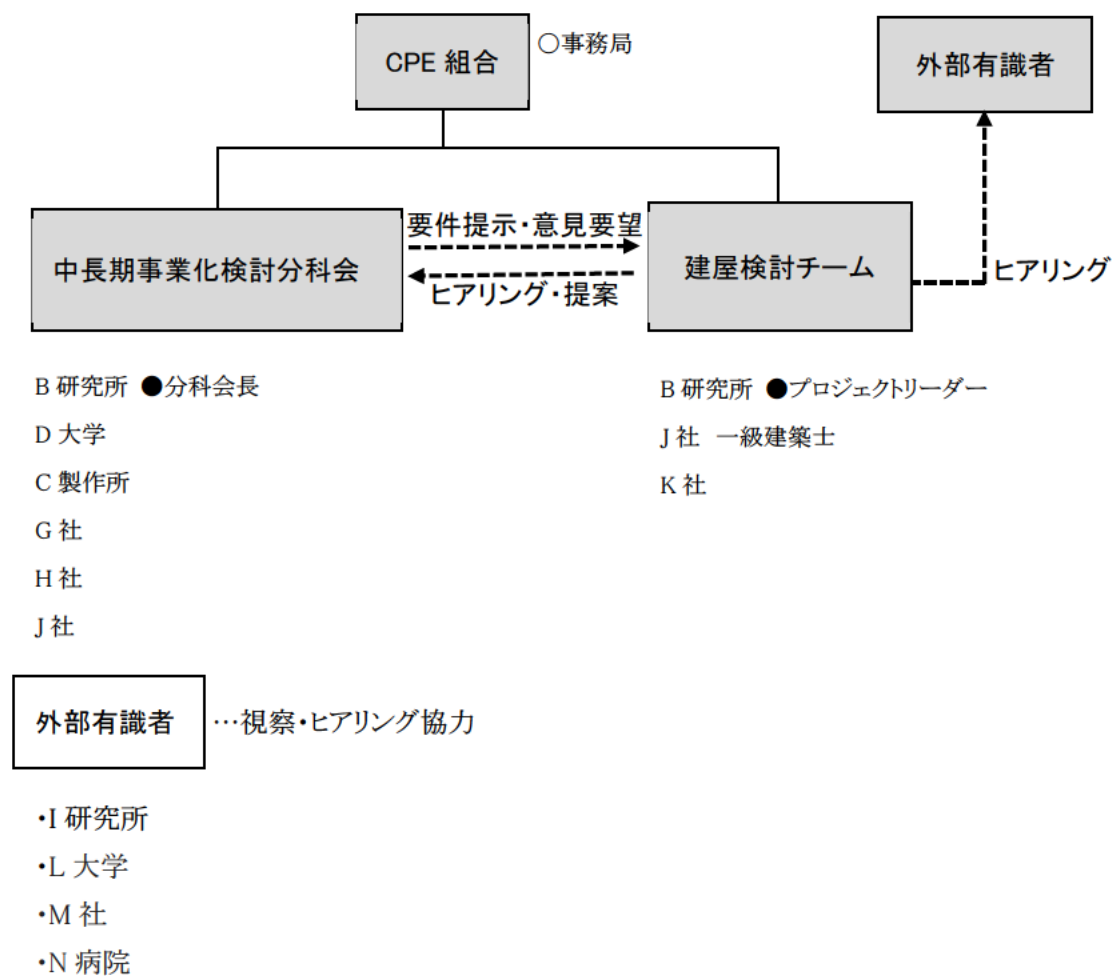


図 2-1-1-1 実施体制

2.2 実施の基本方針と実施内容

取り組み方針は以下の３点とした。

- ① 超大型 X 線 CT 装置の設置、運用が実現可能な施設建屋の要件を抽出、整理する。
- ② 中長期事業化を見据えて、新機構の施設のあるべき姿を議論する。
- ③ レイアウト原案および建物パースを作成し施設イメージの共有をすることで R5 年度の新機構の研究開発の参考とする。

実施内容および実施スケジュールを表 2-1-1-1 に示す。

表 2-1-1-1 実施内容および実施スケジュール

年 月	実 施 内 容	
	中長期事業化検討分科会	建屋検討チーム
R3 年 10 月	○ 研究所視察	実施計画の策定
R3 年 11 月	第 1 回分科会(11 月 29 日)/ 視察・ヒアリングへの対応/施設建屋要件 整理	国内外事例調査/視察・ヒアリング/ 技術的調査項目の抽出
R3 年 12 月	第 2 回分科会(12 月 19 日)/ 建屋要望の抽出/ 復興庁 情報共有会(12 月 13 日)	技術的調査項目の調査/必要性能の 検討/建屋レイアウト案の検討
R4 年 1 月	第 3 回分科会(1 月 27 日)/ 提案に対するフィードバック/ 復興庁 情報共有会(1 月 17 日)	建屋レイアウトおよびパースの検討/ 事例調査/拠点の在り方検討
R4 年 2 月		報告書の作成

2.3 参考資料

- ・「産業用大型 X 線 CT 装置の導入に関する戦略策定 報告書」平成 30 年 3 月
一般社団法人機械システム振興協会/委託先 一般社団法人研究産業・産業技術振興協会

3. X線CT関連施設の視察・ヒアリング

3.1 視察・ヒアリング実施一覧

XCT技術と稼働に要する設備及び建屋について知見を収集するために、CPE組合及び外部で関連施設を有する拠点の視察およびヒアリングを実施した。

表 2-1-1-2 に活動の一覧を示すとともに、付録にて各施設の概要や調査結果をまとめる。

表 2-1-1-2 視察・ヒアリング実施一覧

調査番号	実施日	調査対象	場所
1	R3.10.24,25	超大型XCT建屋および研究施設全体構成の見学	O 研究所
2	R3.11.21	高エネルギーCT装置及び専用遮蔽建屋の見学	C 製作所
3	R3.11.29	小型CT計測室、3次元計測機器の見学	G 社
4	R3.11.30	CT装置および建屋設計について	H 社(オンライン面談)
5	R3.12.14	CT撮像および画像処理の活用、拠点在り方について	D 大学(オンライン面談)
6	R3.12.15	高エネルギーCT装置及び専用遮蔽建屋の見学	M 社
7	R4.1.19,25	大型ガントリー装置(陽子線治療器)の見学	N 病院
8	R4.1.26	小型X線源見学	D 大学
9	R4.2.8	大型ガントリー装置の見学	L 大学
10	-	施設運用・設備要件等に関するヒアリング	メールおよびオンライン面談

4. 設備・施設要件の整理

4.1 必要設備・諸室

必要諸室リストについて以下に示す。

表 2-1-1-3

事務棟				①事務棟： 事務室・研究室等 100名前後の計画
事務室	5室	80㎡×5室=400㎡ 一般執務室 5～8㎡/人	総務、経理、施設管理、放射線管理、情報管理、 所長室、副所長室—50～75名仮定	
研究室	30室	20㎡×30室=600㎡	・研究員：10名+α ・助手/オペレータ：20名+β	
大会議室	1室	3.0㎡×30名=90㎡	30名	
中会議室	2室	2×3.0㎡×15名=90㎡	15名	
小会議室	7室	7×3.0㎡×6名=126㎡	6名	
倉庫	3か所	研究棟に含む	研究室向け：各階2か所 実験棟向け：大型1か所	
コピールーム	1室	同上		
実験棟				②実験棟： 小～中型計測ルーム サーバー、解析室 荷受け倉庫 電源設備など
計算機ルーム（サーバールーム）	1室	同上		
解析ルーム	1室	同上		
実験棟—中小型CTルーム	1室	10m×10m	450kVを入れる、床耐荷重が必要	
実験棟—3次元計測ルーム兼整備場	1室	20m×20m×5m、2層吹抜け	車両の非接触3次元計測をするので、車両が入る シャッター要	
実験棟—材料試験ルーム	1室	10m×15m×5m、2層吹抜け	床耐荷重必要	
実験棟—分析ルーム	2室	10m×10m	免振構造	
荷受け準備室	1室	10m×20m	実験棟に1つ	
電源設備、非常用発電機施設	1か所		負荷の大きい実験棟に設置	

—中型を中止、XCC建屋に変更—				
専用建屋				③専用建屋： 超大型XCT建屋など 荷受け倉庫
高エネルギーCT600	専用建屋建設	サイズ：14mW×10mD×8mH（コンクリート遮蔽含む外側寸法）	専用遮蔽（コンクリート2m）、クレーン設備	
高エネルギーCT1900	専用建屋建設	14mW×10mD×8mH（コンクリート）	専用遮蔽（コンクリート2m）、クレーン設備	
XCC建屋	専用建屋	60mL×20mW×10mH	専用遮蔽（コンクリート50cm）、動的なデータ計測	
超大型X線CT建屋 +計測中の待機室を加える	専用建屋建設	地上部：35mW×30mD×14mH 地下部：11mW×11mD×6mH（深さ6mの穴）	専用遮蔽（コンクリート2m）、クレーン設備 超大型2台を建設できるように、スペースは確保しておく（左記スペース×2）。	
荷受け準備室	1室	10m×20m	超大型の隣に1つ	④付属棟： 駐車場 屋外変電設備 危険物倉庫 排水処理棟など
付属棟・外構				
駐車場		30m×50m×1.2=1,800㎡	販賣：50台 来客：25台	
危険物倉庫	1か所	5m×10m	化学薬品等の危険物置き場	
ポンペ室	1か所	5m×5m		
変電設備施設	1か所		実験棟（あるいは研究棟地下）内もしくは別棟として設置（電源設備と一緒？）	⑤その他： 特記が必要な設備 インフラ 環境モニタリング セキュリティなど
電源設備、非常用発電機施設	1か所			
排水処理施設	1か所			
空調設備				
衛生設備、工業用水、市水				
運搬設備			フォークリフト	
免振設備			超大型高エネルギー	
放射線環境モニタリングシステム				
物理セキュリティ				
ネットワーク光回線				

4.2 建築・設備・構造要件のまとめ

4.2.1 建築要件

a) 建屋の法的な位置づけ

特定の人が利用する事務所等に相当し、準耐火ロー2建築物と想定される。10m 程度のスパンが必要な実験室が多数あることから鉄骨造を基本とするが、放射線遮蔽に必要な部位に関しては RC 構造を採用し、混構造建築とする。防火区画(1500 m²以下)、排煙区画(機械排煙を基本とし、小部屋・非居室は告示免除を適宜応用)、避難階段(歩行距離 40m 以下)を適切に計画する。

b) 規模計画

諸室リストに基づき、それらの規模を合算した面積を基本とする。左記に加え、廊下やトイレ、防災センターや機械室等、建物機能に必要な付帯施設を見込んだ規模とする。将来の規模拡大・増築が行われても、建物機能が大きく阻害されないように配慮したゾーニング計画とする。

c) ゾーニング計画

外部:職員やゲストが自家用車等で乗り入れ、歩道を通り建屋に入場する「歩行者ゾーン」と、計測物等を搬入する大型車両や、設備メンテナンス車両が乗り入れる「車両ゾーン」に明確にゾーニング分けする。上記に即した建屋配置とし、歩行者動線と車動線が交錯することがないよう、最大限の配慮を行う。

内部:施設の特性上、情報の秘匿性・管理が重要になることから、下記のゾーニング分けを行う。見学者等が訪問する「一般立入ゾーン」、職員のみが入ることのできる「職員立入ゾーン」、実験作業を行う人のみが入ることのできる「権限者立入ゾーン」、秘匿性の高い実験作業を行う「PJ 関係者立入ゾーン」に明確に分ける。

d) 動線計画

車・搬入:一般車の入場するゲートと、搬入用の大型車両の入場するゲートの2つに分ける。一般車入場ゲートは駐車場やエントランス底下へのアクセス性に配慮する。搬入ゲートに接続する敷地内通路は、大型トレーラーが通行するのに十分な幅、転回スペースを確保する。

人:別棟で計画すべき建屋(危険物保管庫、排水処理棟、衝撃音の発生する建屋等)を除き、庇付きの屋外通路もしくは屋内通路で諸室を接続し、利便性に配慮する。研究者の日常動線を極力短くすることができるよう、行き来の多い諸室同士の隣接性に配慮する。

e) 諸室配置・居住性・デザイン

諸室配置:合理的なスパン計画となるように部屋の配置を行う。天井高さが必要な部屋は2層

にまたがるものとして、合理的な断面計画となるように配慮する。

居住性:居室に関しては、屋外が見える、自然光の取り入れ、テラス等、居住性に配慮した設えを積極的に採用し、より多くの人が気持ち良く働くことのできる環境とする。

デザイン:機能性に配慮したシンプルな建物デザインを基本としつつ、大きな建物規模から生じる圧迫感・殺風景な印象を和らげ、周辺景観に馴染みの良い形状、素材感に配慮する。

f) セキュリティ計画

上記のゾーニング項に即して、入場者権限の管理を適切に行う。特に、不特定多数の人の出入りが想定される、設備系のメンテナンス諸室は、外部の搬入路から直接の出入口を設ける等、セキュリティゾーンに立ち入ることなくアクセス可能な計画とする。また、同じく不特定多数の人の出入りが想定されるゲストエリアは、セキュリティ区画の容易な管理が可能な、見通しの良い空間とする。

4.2.2 電気設備要件

a) 受変電設備

引き込みは2回線受電とし、構内柱にPASを設置。2か所より管路にて引き込む。

(1) 受配電設備

受配電設備を付属棟エリアに設置する。

※建屋内に収めるか屋外キュービクルタイプとするか

受電盤(本・予備)、母連盤・高圧配電盤(2面)、コンデンサ盤、所内盤、予備スペース

必要スペース:15m*5mもしくは10m*10m(建屋の場合 H:4m)

実験棟に受変電設備を設置し高圧供給する。

将来拡張用に高圧分岐フィーダー及びコンデンサ増設スペースを設ける。

(2) 受変電設備

受変電設備(キュービクルタイプ)を実験棟屋上電気室に設置

今回予定の施設への電源供給用とする。

受電盤、低圧配電盤(6面)、非常電源盤(2面)、予備スペース

必要スペース:15m*6m*H4m

将来施設については別途将来施設に設置受配電盤より高圧配電とする。

b) 発電設備

非常電源(防災負荷)の確保及び一般停電時の保安負荷の電源供給を目的とし、非常用ディーゼル発電機を実験棟屋上に設置する。少量危険物の範囲での運用として燃料小出し

槽、給油ポンプを計画する。給油ポンプ室は、1 階道路側に面した部分に設け、給油管を立ち上げる。

ポンプ室必要スペース 3m*2m

発電機の仕様は、電源出力を3相3線 210V、250KVA 程度長時間型.使用燃料を軽油とし 950Lの燃料層を併設する。(今回施設対象)

将来施設については別途将来施設に設置を前提

必要スペース:11m*4m*H4m (受変電設備と隣接したい)

c) 幹線設備

- ・屋上キュービクルより各所動力制御盤、電灯分電盤、専用実験盤までの幹線ケーブル、ケーブルラックをEPS、天井内に敷設し電源供給を行う。
- ・各階EPSは上下共通の場所で共用エリアに確保し、強弱共用EPSとして計画する。電灯盤、弱電盤などを設置し W:6m*D2.0m(できればフロアー中心あたり)また、メンテナンスについては共用部から点検可能な計画とする。
- ・高圧引き込みケーブル及び専用建屋の電源供給ルートは別 EPS とし建屋間は埋設管路とする。
- ・また事務棟への渡りは設備架台及び地下とする。

d) 蓄電池設備

受変電設備の操作用として電気室に設置する。

e) 太陽光発電設備

屋上屋根に太陽光パネルを設置し、関連盤及びバッテリー盤を屋上電気室に設置しシステムを構築する。20KW 対応で設置面積 21m*10m

f) 動力設備

空調・衛生および防災負荷等への動力負荷に対して動力制御盤(機械室及び EPS)、専用実験盤を設置し、盤以降の配管配線の敷設を計画する。また、専用実験盤は、実験用途エリア毎に盤を設置し電源管理を行う。

g) 電灯・コンセント設備

照明・コンセント負荷等への電灯負荷に対して電灯分電盤、専用実験盤を設置し、盤以降の

配管配線の敷設を計画する。また、専用実験盤は、実験用途エリア毎に盤を設置し電源管理を行う。

一般照明は、省エネ、ランプ交換を含めた保守性を考慮し、LED 器具を基本に計画を行う。照度設定は、JIS基準に準じて計画する。また、照明制御は各部屋に個別にスイッチを設置し、必要に応じて照明センサー(昼光利用、初期照度補正)、人感センサー、タイマー制御の導入を計画する。

非常照明・誘導灯は、建築基準法・消防法に準拠し、共用専有部の必要箇所に設置する。また、器具はバッテリー内蔵型を基本に計画を行う。

h) 構内交換設備

- ・インフラ引込は、構内柱で引き込み、構内地中埋設にて光ケーブル、メタルケーブルを事務所棟 1 階 MDF 室に引込む計画とする。

- ・1階MDF盤より、各階の端子盤を経由しケーブルを敷設し、各諸室の電話コンセントの設置、電話コンセント迄の配管配線の敷設を計画する。

- ・MDF 室には電話交換機、UPS を設置する。

- ・将来用スペースを確保する計画とする。

必要スペース:3m*4m

i) 構内情報通信網設備

- ・インフラ引込は、構内柱で引き込み、構内地中埋設にて光ケーブル、メタルケーブルを事務所棟 1 階通信機械室に引込む計画とする。

- ・1階通信機室サーバーより、各階の端子盤を経由しLANケーブルを敷設し、各諸室の情報コンセントの設置、情報コンセント迄の配管配線の敷設を計画する。

将来用機器設置スペースを確保する計画とする。

必要スペース 3m*4 MDF 室と合わせて 6m*4m とする

j) テレビ共聴設備

- ・屋上にUHFアンテナ及びCS／BS110° アンテナを設置し、U・BS／CS-IF混合伝送方式により、各諸室のテレビ端子の設置、配管配線の敷設を計画する。

- ・屋上に特殊用途用のアンテナ基礎を用意しておく。

k) 防災防犯設備

事務所棟 1 階に防災センターを設け次の設備を設置する。

自動火災報知設備受信機、非常・業務兼用アンプ、監視カメラ設備、入退管理設備、機械警備それぞれ将来分の予備及びスペースを確保する計画とする
守衛所にそれぞれの設備の副装置を置くものとする。

k)-1. 拡声装置

非常・業務兼用放送として、非常放送対応、館内呼出・案内・BGM放送を目的とし、各所にスピーカー及びアッテネーター等の設置、配管配線の敷設を計画する。また、主装置(AMP)は1階防災センターに設置し、操作を行う。

将来施設の対応として増設スペースを確保する計画とする。

k)-2. インターホン設備

来訪者の受付用としてカラーカメラ付き玄関子機を通用口に、1階管理部門に親機を設置し、直通通話が可能な計画を行う。

k)-3. 監視カメラ設備

施設全体の状況の把握を目的として、屋外(特に出入口)、各階通路・ELV ホール等にITVカメラを設置。主装置、モニターを防災センターに設置する。将来増設分対応可能な容量・スペースを確保する。

k)-4. 入退出管理設備

主要場所への入退出管理を目的とし、入退場ゲート、主要管理エリアに非接触ICカードリーダーや顔認証システムによる電気錠の設置、配管 配線の敷設を計画する。又、主装置は1階管理部門に設置し監視を行う。

k)-5. 機械警備設備

夜間・休日における機械警設備については、各所にパッシブセンサー等の設置を想定し、各階EPSから機器迄の空配管の敷設を計画する。

k)-6. 自動火災報知・防排煙連動設備

火災の早期発見、火災場所確定、消防活動の支援を目的とし、消防法に準拠した自動火災報知設備を計画する。R 型システムとし感知器はアナログタイプを設置。関係設備との連携を図る。

将来の増設を可能な点数を持たせる。

l) 12. 中央監視設備

中央監視装置のセンター装置及び付属装置を中央監視室に設置する。

※防災センター及び中央管理室合わせて必要スペース 6m*6m
(必要に応じて区分する。)

表 2-1-1-4 必要電力量の仮定

電力負荷想定(案)

2023. 1.10

	負荷分類	想定面積 ㎡	一般(KW) (50W/㎡)	空調動力(KW) (120W/㎡)	その他動力(KW) (20W/㎡)	実験電力(KW) (50W/㎡)	大型実験電力	小計	発電機	備考
今回	実験棟	3500	175	420	70	175		840	84(10%)	
	研究棟	3000	150	360	60	150		720	72(10%)	
	XCT専用建屋	600	30	72	12	30	200	344	15(10%)	装置電力除く
	その他施設	400	20	10	4			34	90	防災負荷
	小計		375	862	146	355	200	1938	261	
将来	超大型X線CT(将来)	400	20	48	8	20	100	196		
	食堂	300	15	36	60			111		
	大講堂	150	7.5	18	3			28.5		
	ゲストハウス	3000	150	300	60			510		
	研究員寮	3000	150	150	30			330		
	XCC建屋	1200	60	144	24	60	100	388		
	電波室	100	5	12	2	5		24		
	ロボットCT建屋	400	20	48	8	20	100	196		
	その他							100		予備
	小計		427.5	756	195	105	300	1884		

想定契約電力 今回 $1938 \times 0.4 = 775.2$

将来(今回含む) $(1938 + 1884) \times 0.35 = 1337.7$

※負荷容量は現段階では全くの想定であるが、実験装置の電気容量が大きくなったとしても、将来を含め特高受電の必要性はないと考える。

4.2.3 機械設備要件

【前提事項】

現段階では計画地の特性(インフラや近隣特性等)や基本方針が把握出来ていない為、不確定要素が多く含まれる。計画の進捗に伴い、設備概要も大きく軌道修正される可能性がある。

a) 給排水衛生設備

(1) 給水設備

(1)-1. 上水給水設備

- ・水道本管より給水管を引き込み、水道局取引メーター(貸与品)を介して敷地内へ引き込む。
- ・引き込んだ給水は受水槽(事務棟1階に機械室を配置)に貯水し、加圧給水ポンプにて各給水利用対象へ供給する。

※上水受水槽の配置は日常的に設備管理を行う職員が在する棟に配置することが望ましい。

※上水受水槽や上水加圧給水ポンプを設置する機械室の必要面積は、人員数、特別な給水対象の有無、BCP方針、等の与条件が整理された後の算定となる。

(1)-2. 雑用水給水設備

- ・屋根面の降雨水、空調ドレン、井水等を原水として雑用水を造水する場合は、上水とは別に雑用水供給設備を設ける。
- ・雑用水受水槽は事務棟の地下ピットを利用するものとし、直上の1階レベルに機械室を配置して、加圧給水ポンプにてトイレ洗浄水や屋外の自動灌水設備等、誤飲の恐れが無い系統かつ、清涼な水を必要としない給水対象へ供給する。

※上水受水槽同様に雑用水受水槽の配置は、日常的に設備管理を行う職員が在する棟に配置することが望ましい。

※上水受水槽や上水加圧給水ポンプを設置する機械室の必要面積は、人員数、特別な給水対象の有無、BCP方針、等の与条件が整理された後の算定となる。

(2) 給湯設備

- ・給湯に使用する一次エネルギーを電気式とするがガス式とするか選択することとなるが、「計画地のインフラ整備状況」や「地球環境への配慮に関する基本コンセプト」に左右される。
- ・現段階の情報によれば大量の給湯を使用する用途は存在しないと思われるため、現段階では以下の通り仮定しておく。

1)各所 トイレ手洗用:小型貯湯式電気温水器

2)各所 給湯室:小型貯湯式電気温水器(飲料用・洗い物用出湯対応)

3)研究員寮 浴室 :ヒートポンプ給湯器+貯湯槽

4)研究員・来客用・クラブ 厨房:ガス瞬間給湯器

※2)3)については、都市ガス供給地域なら「ガス式瞬間給湯器」も選択対象となる。

(3) 排水通気設備

- ・公共下水道が整備されている場合、各建物で発生する排水は自然流下(重力排水)にて公共下水道本管へ放流する。公共下水道が整備されていない場合は、合併浄化槽を設置し、計画地において規定される放流水質にて河川放流や敷地内浸透処理となる。

※計画地が浄化槽+敷地内浸透処理が必要となる地域だった場合、浄化槽の設置や浸透施設を設けるスペースとコストを計画に盛り込む必要がある。

- ・建物内の排水方式は汚物搬送能力が高い「合流式」とし、汚水と雑排水を同一の排水管で排出する方式とし、屋根面の降雨水や特殊排水(実験系)は単独系統として屋外へ排出する。
- ・特殊排水の水質によっては排水するために水処理設備を設ける必要が生じるため、今後のヒアリング項目となる。
- ・各厨房にはその用途や排水量に応じ、適切なグリース阻集器を設置する。

(4) 衛生器具設備

- ・各所(厨房、トイレ、浴室、給湯室、その他)の水廻りブロックに対し、適切な各種衛生器具を設置する。なお、経年による更新時における調達の容易さ、コスト面を重視し、外資メーカーは採用せず、国内大手メーカー製品を対象とする。
- ・男子・女子トイレに設置する器具は、洋風大便器(暖房機能付温水洗浄便座付)、壁掛小便器(低リップ)、アンダーカウンター式洗面器、掃除流し、ハンドドライヤーとし、数量は建築プランの進捗に伴い決定する。
- ・多目的トイレに設置する器具は、バリアフリースイック(オストメイト対応汚物流し有り)、ベビーシート、ハンドドライヤーとする。
- ・湯沸室に設置する器具は、湯水混合栓(シングルレバー)、給湯栓とし、ステンレス流し(建築工事)とする。
- ・外構及び屋上には包括半径 20m程度毎にメンテ用水栓を設置する。メンテ用水栓は逆流によるクロスコネクションを防止するため、バキュームブレーカー付とし、形状はドーム型(鍵付)とする。また、凍結防止対策として水抜栓を各々併設する。

(5) 消火設備

- ・消火設備は計画建物が消防法施行令別表1に掲げる「防火対象物」の分類により、備えなければならない消防設備が変動するが、大型X線CT施設という業務件名から推察すると、「(12)項:工場・作業場」又は、「(15)項:事務所等、その他の事業場」に該当するものと推察される。
- ・前記「防火対象物」が特定され次第、必要な消防設備を定め、計画に盛り込むこととするが、現段階の規模感からは、消火器と屋内消火栓の設置を仮定しておく。

(6) 厨房機器設備

- ・各厨房に設置する厨房機器を用途(洋・中・和)や食数に応じて今後計画する。
- ※工事区分を建築とするか機械設備とするかは未定。

b) 空気調和換気設備

(1) 空調設備

- ・セントラル熱源を持つか個別分散熱源とするかは、建物規模や費用対効果、予算、環境配慮に対する方針により変動するが、ここでは規模感より「個別分散熱源方式」と仮定する。
- ・省エネ性・個別運転性に優れ、ローコストな高効率ヒートポンプ式マルチパッケージ空調機を採用し、室内機は搬送動力を最小化できる天井カセット型を中心に採用する。
- ※意匠性を重視する共用部や部屋はダクト接続タイプとし、天井の意匠に応じたライン型制気口等を用いてダクティングを行う。
- ・比較的大空間となる部屋や温湿度精度を求められる用途の部屋に対しては空冷ヒートポンプ空調機を採用し、精度の高い空調が行えるように配慮する。
- ・室外機は全て屋上設置とし、日除けのための遮蔽版を設け、直射日光及びショートサーキットによる能力低下を抑制する。
- ・室外機の系統は、冷房と暖房を季節によって切り替える運用を行う系統と、通年を通して冷房・暖房のどちらでも行える系統に分類し、その選択は今後のヒアリングによって決定する。

(2) 換気設備

- ・外気導入負荷を削減するため、居室(主に空調室)系統は全熱交換型換気扇を採用する。
- ・全熱交換型換気扇には滴下気化式加湿器を内蔵する。
- ・その他、厨房・トイレ・給湯室・倉庫・ゴミ置場等については、用途の特性に応じて、新鮮外気の供給、臭気除去、熱の除去、湿度の除去、浮遊粉塵の除去を目的に積雪な換気設備を

設ける。

(3) 自動制御設備

・以下に示すような各種設備機器を適切に運用するため、ローカル側の各種制御及び警報発報を行う。

- 1) 空調機廻り制御(空冷HP空調機系統)
- 2) PAC廻り制御(マルチタイプ系統)
- 3) PAC廻り制御(マルチ以外系統)
- 4) 給排気ファン廻り制御
- 5) 受水槽＋加圧給水ポンプ廻り制御(上水系統)
- 6) 受水槽＋加圧給水ポンプ廻り制御(雑用水系統)
- 7) 実験排水槽ポンプ廻り制御・水位警報・水質警報
- 8) 湧水排水槽ポンプ廻り制御・水位警報
- 9) 雨水貯留槽ポンプ廻り制御・水位警報
- 10) 雨水流出抑制槽ポンプ廻り制御・水位警報
- 11) 緊急排水貯留槽ポンプ廻り制御・水位警報
- 12) 漏水検知等、その他各種警報
- 13) 各種連動・インターロック制御
- 14) 各種監視(建築・電気・関連設備の監視を含む)
- 15) 各種計量(建築・電気・関連設備の計量を含む)
- 16) 各種計測(建築・電気・関連設備の計測を含む)

※各種設備の遠方監視(発停・状態監視・警報)は電気設備の中央監視側機能とし、その通信配管配線は本設備の範囲内とする。

4.2.4 構造要件

a) 概要

本項では、建設候補地(福島県双葉郡浪江町周辺)の被災履歴や地盤環境の調査に基づき、拠点計画における構造安全上の配慮事項に示す。また、特殊構造物である超大型 X 線 CT 建屋の計画に関する留意事項を挙げる。

b) 拠点全体における安全性に対する構造計画

(1) 耐震性の確保

建設候補地は、過去に大規模地震による震度 6 強以上揺れを観測している。建築・防災計画策定にあたっては、再び大きな自然災害に見舞われることを前提として、ロバスト性を持たせた計画とすることが重要である。

建屋の耐震性に関しては、事業継続性に配慮した耐震性能を有することが望ましい。

- ・観測記録や地震環境調査に基づく設計用地震動(サイト波)を作成し、地震応答解析による地震被害の推定と、設計目標の設定を行う。
- ・非構造部材(建築、設備)の耐震設計を適切に行う。

耐震性能の例と想定する被害程度

(1)① 稀に発生する地震動時【小破以下】

- ・構造躯体：弾性範囲内(無損傷)、層間変形角 1/400 以内 (XCT 建屋除く)
- ・設備：無固定あるいは不安定な器具や什器の転倒
- ・事業継続性：設備・建屋機能維持。点検後、数日程度で復旧

(1)② 極稀に発生する地震動【中破】

- ・構造躯体：弾塑性範囲内、層間変形角 1/200 以内
- ・設備：器具転倒や移動あり
- ・事業継続性：一部の設備配管等で修理や交換要。数週間程度で復旧

(1)③ 天井クレーンや重量機器等の耐震性

- ・落下や衝突、転倒が無いように支持部材の剛性を確保するとともに、クリアランスや固定アンカー等の設計に配慮する。

(1)④ サーバー関連の耐震性

- ・免震構造(建屋免震、床免震)とし、極稀地震において無被害

(1)⑤ XCT 関連の耐震性

- ・機器転倒の防止措置
- ・地震計設置にて、放射線発生装置の自動停止システムを稼働させる

(2) 浸水・津波対策

建設候補地は請戸川と高瀬川の河川流域に位置し、令和 2 年度の地域防災ハザードマップでは広域で 0.5～3m あるいは 3m 以上の洪水予測が示されている。また、海溝型地震による津波予測では、国道 6 号線より東側の地域で最大 20m 未満の津波浸水が予想される一方で、F-REI 本拠地の計画敷地である浪江駅西側は津波浸水予想範囲外とされている。

浸水に対する配慮事項として以下を示す。

- ・機械設備の故障リスクを回避するため、サーバー、機械室並びに研究に関わる重要設備機器類は、嵩上げあるいは 2 階以上に設置するなどの配慮が望ましい。
- ・建屋内部への浸水被害を低減するために、外壁躯体の立ち上り(→津波荷重に対しても配慮)や防水シャッターを計画することが望ましい。
- ・基礎には湧水ピットを設ける。地上からの浸水に備えて排水処理機能を備える必要がある。

(3) 基礎・地盤に関する配慮事項

- ・浪江駅周辺(常磐道より東側)の地盤は新生代 第四紀 完新世の河川・海岸平野堆積物であり、軟弱な砂質地盤が連続している。大地震発生時の揺れの増幅や液状化による地盤沈下等の恐れがある。
- ・液状化による地盤不陸や浸水対策に配慮すると、基礎躯体は鉄筋コンクリート造の 2 重床で計画することが望ましい。また、研究室や実験室の積載荷重は、平均で 500kgf/m²程度を想定している。以上より建屋重量が大きくなるため杭基礎による計画が前提となる。
- ・大地震時においても杭基礎の性能を担保するために、低層や鉄骨造の場合に基礎コストの比率が増大することがやむを得ないと判断する。
- ・事前の地盤調査では支持層の不陸を想定して計画敷地内に複数のボーリング調査を計画する。また、地震応答解析による検討を見据えて、工学的基盤深さの確認、常時微動測定等も実施する。
- ・平屋の倉庫や実験施設の計画では、土間コンクリートを計画する可能性もあるが、地盤沈下や液状化による不陸・不具合のリスクが大きい点に配慮が必要である。
- ・研究対象の搬出入は大型トレーラーやフォークリフトにより行われ、敷地内の車路は日常的に大きな荷重が想定される。地盤沈下による段差、振動発生による対象物が破損リスクや、スムーズな運搬動線に支障をきたす懸念に対し、敷地全体の地盤強度に配慮する必要があるか、議論することが望ましい。

c) 超大型 X 線 CT 計測建屋の計画

超大型 X 線 CT 計測建屋は放射線しゃへい計算に基づく区画が必要であり、本計画では厚さ 2m のコンクリート壁による管理区域の遮蔽が検討されている。

- 管理区域の内部は内法 20mD×17mW×9mH の大空間である。基本計画段階より、施工方法や工程計画について実績のある施工技術者と十分に協議する必要がある。
- 大型ガントリー式 X 線 CT 装置は撮像対象物を極力水平移動のみで設置するために、深さ約 5m の地下ピットへ構築する。ピットは浸水の恐れがあるため、別途排水ピットを計画する等の対策が必要である。
- 管理区域に付属した前室、制御室等は鉄骨造で計画するのが合理的であると考ええる。その場合、建屋重量差による影響等が考えられるため、建屋のエキスパンションジョイントや配管・配線の余長確保などに配慮する。

5. 建屋レイアウト検討

5.1 パース



図 2-1-1-2

建屋及びレイアウトの原案のポイント

- ・必要諸室と、建物機能に必要な付帯施設(機械室・トイレ等)を見込んだ規模計画
- ・フロント(人の通行等)とバック(資材搬入等)が明確に区分けされ、人と車の交錯を避けた配置計画
- ・機能性に配慮したシンプルな形状を基本としつつ、周辺景観に馴染む形状・素材に配慮したデザイン
- ・居住性に配慮した設えを積極的に採用し、より多くの人が気持ち良く働くことのできる環境づくり

5.2 レイアウト案

・規模

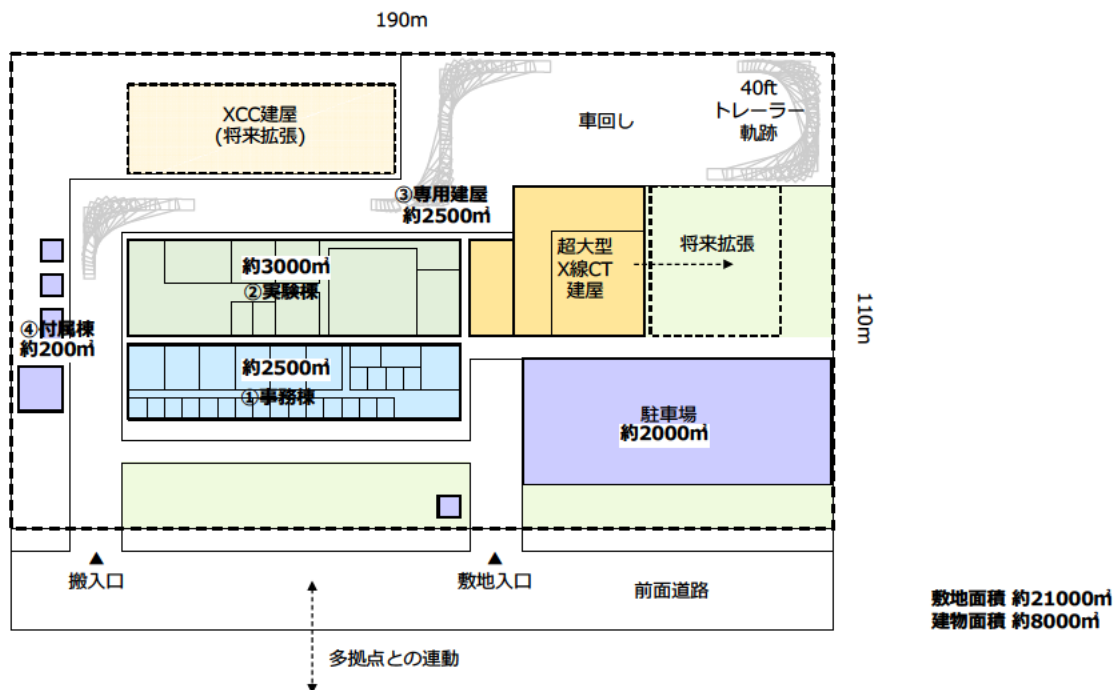


図 2-1-1-3

・動線計画

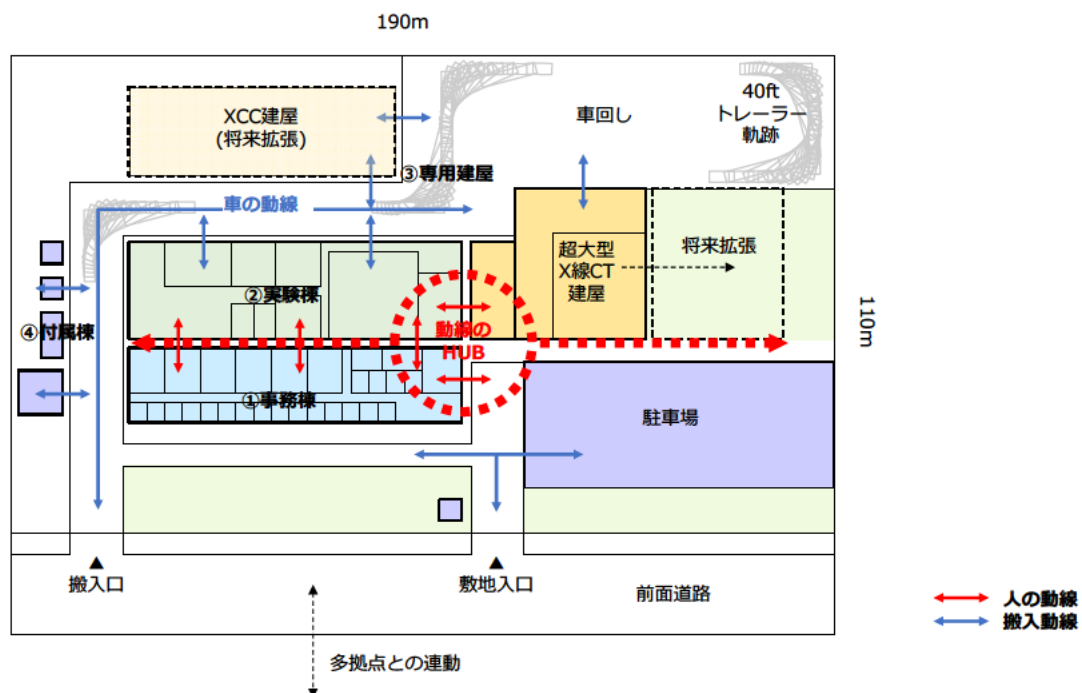


図 2-1-1-4

・セキュリティ

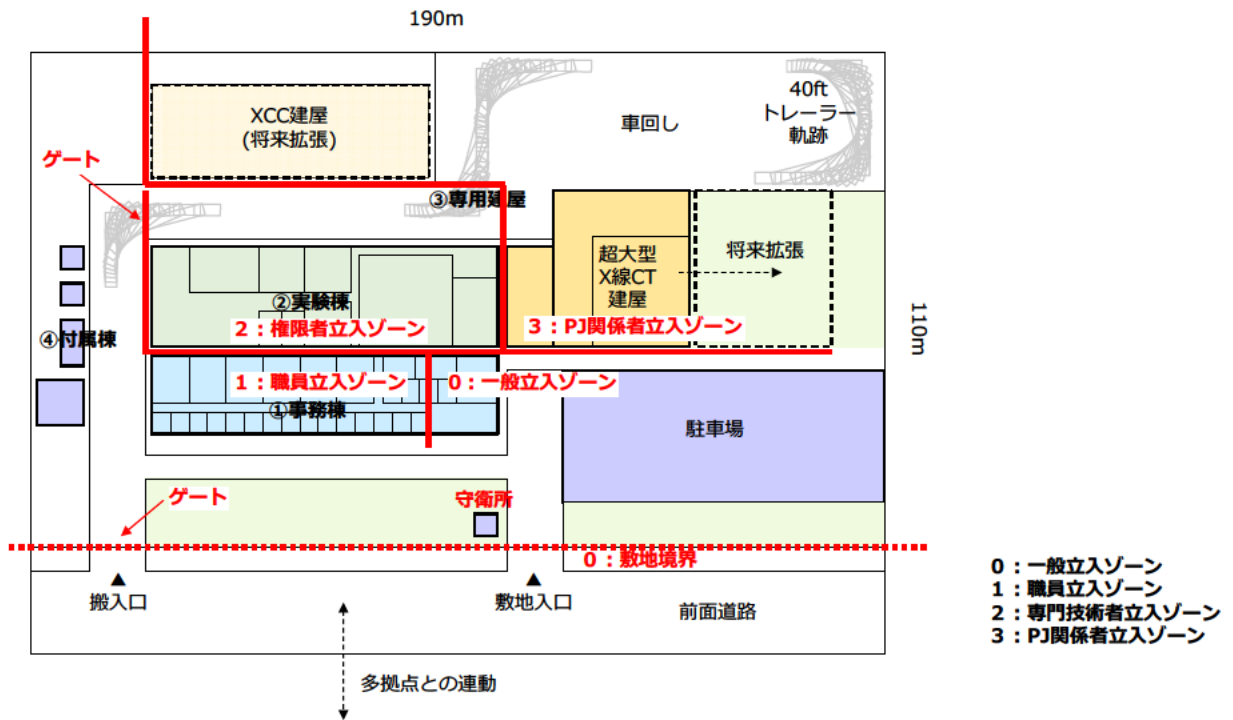


図 2-1-1-5

・居室・実験室

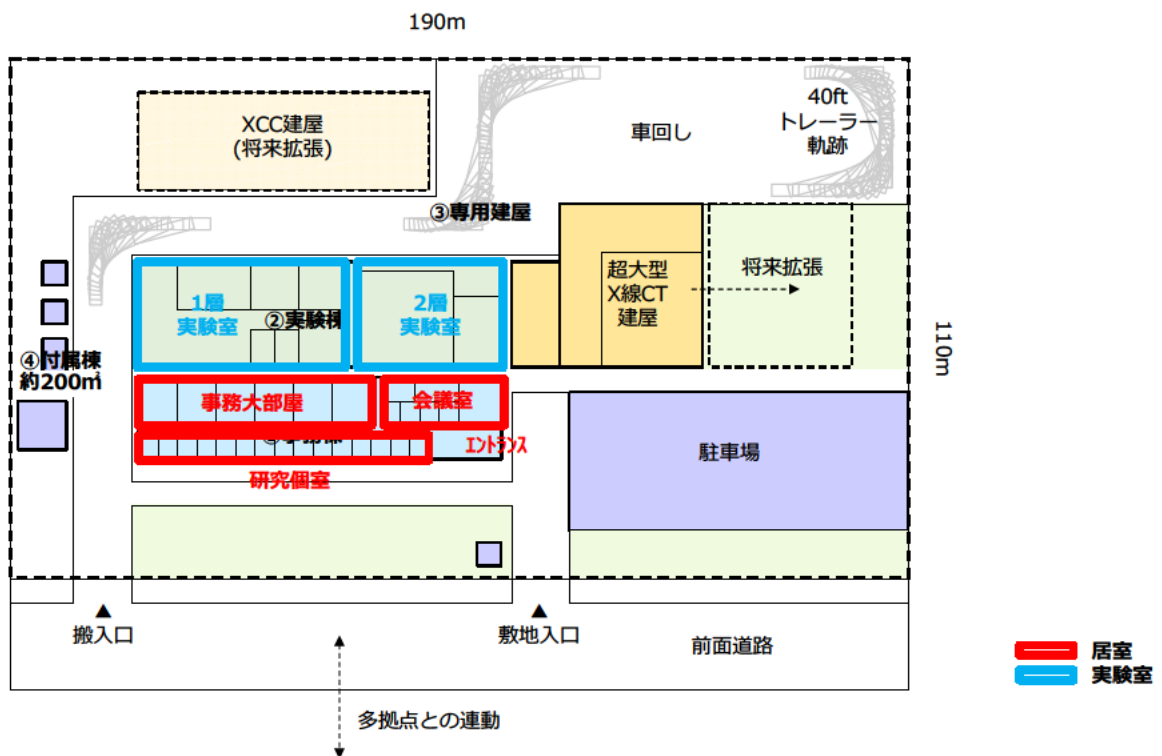


図 2-1-1-6

・構造

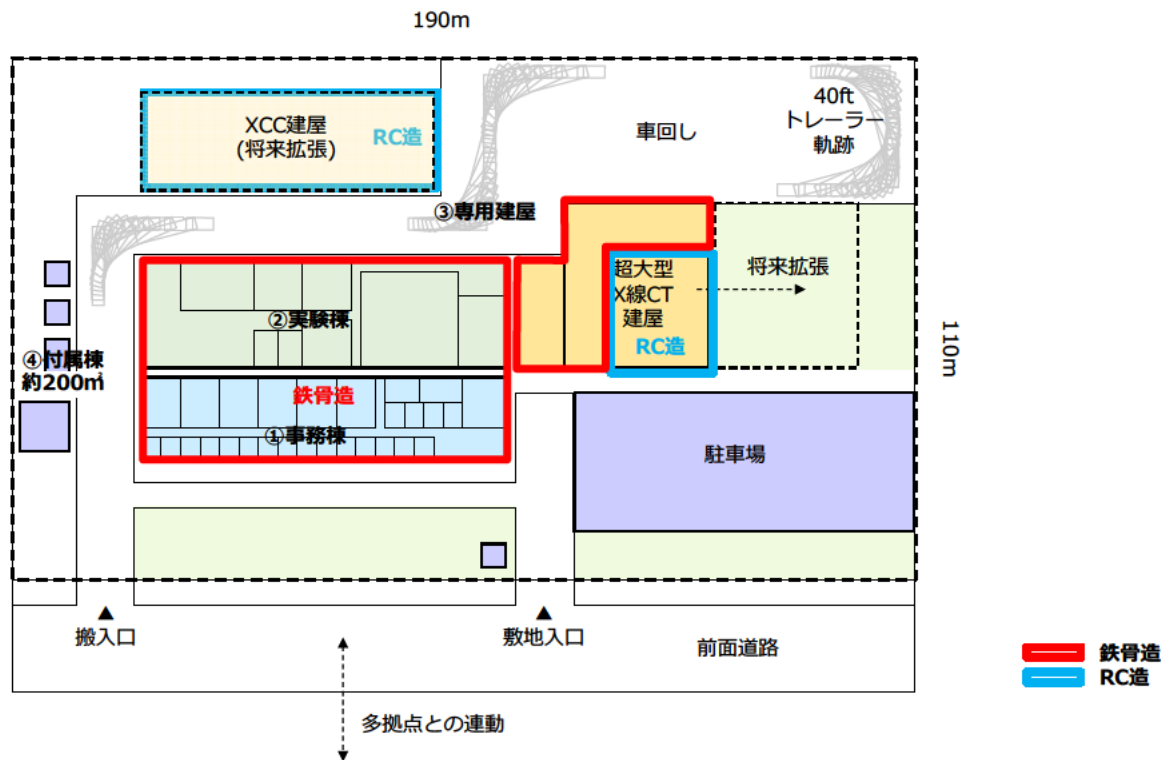


図 2-1-1-7

・電気設備

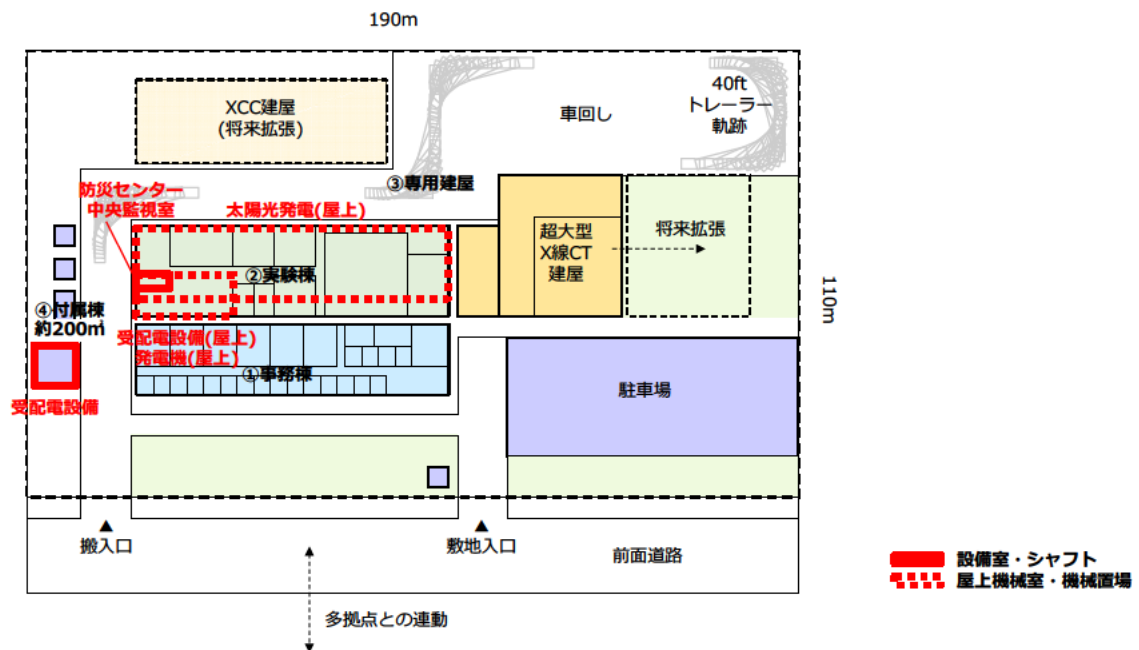


図 2-1-1-8

・機械設備

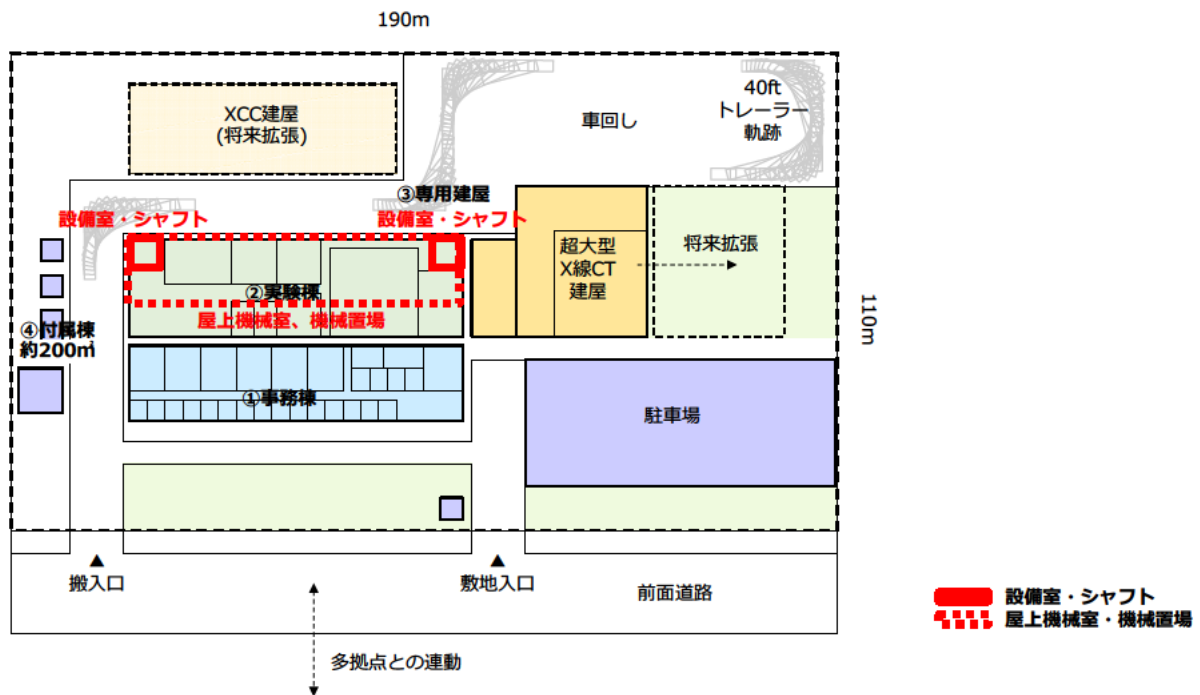


図 2-1-1-9

6. アンケート・ヒアリング調査

調査期間: 令和4年12月20日～令和5年2月9日

調査方法: 超大型X線CT施設に関するアンケート調査及びヒアリング調査

(①測定物、②利用目的と利用頻度、③利用形態、④設備施設への要望)

調査先: 10社・校(自動車:4社、自動車部品:2社、重機・航空機:1社、電気部品:2社、大学:1校)

調査結果概要

自動車関連、航空機等大型製品・コンポーネントを製品とする企業は超大型 X 線 CT の有用性を認識し、自動車では O 研究所に測定委託している。輸送時間・コスト等より活用ではドイツに先行を許していると考えられる。一方航空機 AM 等では米 Phenix 施設利用が考えられるが、部品等の国外持ち出し制限のため、開発のハンデとなっている。

また、超大型 X 線 CT 装置の個社保有での負担は大きいことから、我が国での公的機関施設が望まれている。

企業の情報管理の面から、施設の撮像及びデータの秘密保持が必要とされている。更に、複数の企業が、超大型 X 線 CT 装置による形状計測、欠陥計測のみならず、高精度計測、材料計測の併設や近隣施設の組み合わせ、計測データの CAE への自動化等を展開として要望している。

以下に、各項目の要点を記す。

① 測定物

- ・ 自動車は長さ 5.5m×幅2m×高さ2mの車両全体(0.1~0.5mm の解像度)。
- ・ EV 用バッテリー等のモジュールに関しては、一高い解像度(0.05~0.4mm)を期待。
- ・ 航空機企業では2m×2m×1.5mのジェットエンジンコンポーネント(0.2mm 解像度)。

② 利用目的と利用頻度

- ・ 一次利用目的は自社開発、組立製品の品質検査、リバース評価、バッテリー等の納入モジュールの形状は・品質検査等。利用頻度はコスト数百万円では10回/年・社程度、数十万円では数十回/年・社とコストによって頻度は異なっている。

③ 利用形態等

- ・ 開発車両・部品となるため、秘匿管理が必須(モノ・データ両方)として、自社(含関連会社)での計測。リバース等では撮像委託が中心となる。

④ 設備施設への要望

- ・ 装置への要望:
 - 撮像範囲を絞った μ フォーカス機器開発、XCC や光学測定、材料特性測定機器等の隣接

- ・ 拠点整備要望:
 - 機密対応:計測準備エリア、計測エリア、データエリア(国内サーバー使用)
- ・ サポート体制:
 - 技術者の計測指導や意見交換
 - 計測後のデータ分析
 - 撮像データの CAE モデル化

7. 既往の拠点/研究施設事例の調査

7.1 調査の趣旨

X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査として建屋や建築計画(研究施設)および地域との連携含めた拠点(研究拠点)における先行事例を調査し、本計画の今後の施設の在り方や建築計画提案への観点として整理を行った。

調査項目は拠点/施設の目的やそのための建築計画、運営面での工夫について調査を行った。以降に調査を行った拠点/施設の一覧を示し、本編では特徴的な事例について記載を行う。

7.2 研究拠点

研究拠点として国内外 6 箇所を選定、調査した。その中で、鶴岡サイエンスパーク及び沖縄科学技術大学院大学(OIST)の内容について、本文中に詳細内容の記載を行う。

多くの事例においてまちづくりと連携して、建築等のハード面と、教育プログラム等のソフトを組みこんだ仕組みとして、研究やそこから生まれる人、産業、地域を活性化しようと取り組んでいる。

その際、地域との交流や、同拠点内での研究者同士の交流が生まれることを目指した配棟計画や建築内部の空間レイアウトを計画している。関連研究者の日々の生活や来訪者の宿泊等のインフラとして住戸や保育施設、商業施設等も整備された拠点として計画が行われている。

柏の葉国際キャンパスタウン等は国際キャンパスを中心としたひとつの街を作る構想であり、研究施設と周辺環境との関係や目的によって具体的な施策や計画規模が異なるため、今後の施設の在り方の想定を基にした具体的な計画が必要となる。

事例 1【鶴岡サイエンスパーク】

山形県と鶴岡市の行政の支援をベースに慶應義塾大学先端生命科学研究所(以下「慶應先端研」)の誘致から、大学、民間企業(ベンチャー企業含む)、市民を巻き込んだ世界的なバイオサイエンスの拠点「街」である。サイエンスパークの施設の企画・建設・運営はまちづくり会社が担っている。

○拠点の目的

- ・次の時代を担う人材と産業の基盤づくり。
- ・慶應先端研を中心とした拠点地区としてサイエンスパークを位置づけ、企業、試験研究機関、業務機能等を誘致して、世界レベルの科学技術開発拠点とする。

○拠点運営/建築計画における施策事例

・高校生、大学生の研究教育プログラムを展開。

例)地元の高校生を研究助手や特別研究正として受け入れ、研究活動を支援。

例)「高校生バイオサミット in 鶴岡」等の開催等。

・関連施設の整備

例)企業や研究機関が実験や研究用として活用できる貸室施設/研究機器装置の提供。

例)研究開発に集中できる充実した施設・サポート環境の提供。

・シングルタイプ・ファミリータイプのマンションの整備。

・短中期宿泊滞在型複合施設「SHONAI HOTELSUIDEN TERRASSE」

・子育て支援施設「KIDS DOME SORAI」

様々な素材や道具を使ってアートやものづくりができるアトリエ、創造力を掻き立てる本を集めた図書室等「遊び」を通じた学びの場を提供。

引用元:

山形県 鶴岡サイエンスパーク紹介 HP

<https://www.pref.yamagata.jp/020026/kensei/shoukai/yamagatamonogatari/sangyou/sciencepark.html>

一般社団法人 鶴岡サイエンスパーク HP

<https://tsuruoka-sp.jp/>

事例2【沖縄科学技術大学院大学(OIST)】

日本政府によって設立された沖縄県国頭郡恩納村字谷茶に本部を置く5年一貫制の博士課程を有する大学院大学である。

○拠点の目的

- ・世界最高水準の科学技術に関する教育研究拠点。
- ・沖縄の振興及び自立的発展ならびに世界の科学技術の発展に寄与する。

○拠点運営/建築計画における施策事例

- ・個々の研究の促進と研究者間の分野を越えた交流を促す仕組み/環境づくり。

例)平面計画における機能分け

窓側に自然環境を見ながら集中できる空間を設け、内側に向かうに従って、個人の実験スペース、廊下や共用スペースを配置し役割を明確に分けられている。

例)メインエントランスからの動線

各研究棟への動線に際し、メインエントランスから約100mのトンネルをくぐり、センター棟と呼ぶ施設を通過してから個々の研究棟に移動する計画とし、必然的に顔を合わす工夫をされた。

例)共用空間・施設による交流の場

電子顕微鏡や質量分析装置といった複数の研究分野で用いる研究機器を施設管理者側が共有設備として管理して研究者なら誰でも使えるよう計画され、それらを共用機器室に配置されている。また階段の周りや建物の端部に休憩スペースを設けて、日常的なイベント交流がうまれるよう工夫された。

また秘書のワークスペースも1カ所に集め、教員同士の交流も促す計画となっている。

例)研究開発に集中できる充実した施設・サポート環境の提供

研究者とその家族が居住できる戸建て住宅や集合住宅を、恩納村というリゾート地の環境をいかし研究棟の近隣に計画されている。集合住宅を設ける建物内にはコンビニエンスストアや保育施設を設けられている。ソフト面においてもカーシェアリングやマイクロバス等の配備も計画されている。

引用元:OIST HP:<https://www.oist.jp/ja/research>

日経 Xtech 2023.02.09 記事:<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00154/01656/?P=5>

7.3 研究施設

研究施設として国内5箇所選定し、調査した。その中で福島ロボットテストフィールド研究棟及びD 大学研究所の内容について、本文中に記載を行う。

多くの研究施設において、日々の研究や実験等に関する施設と新たな発想、成果の発信等の交流の場を融合させた建築計画が行われている。具体的には同室における機能の使い分けやコアスペースをベースとした室配置計画によって、交流と機密性の両方を確保する等の計画が行われている。

事例 1【福島ロボットテストフィールド研究棟】

「福島イノベーション・コースト構想」の中核施設であり、これからの生活に必要な「ロボット」という新たな価値の創造を通して、地域に人を呼び戻し、街を復興するためのものとして位置づけられている。

テーマ:「Value Co-creation とともに新しい価値を創造し未来をつくる」

共同して価値を生み出す象徴的な場:テフロン膜と張弦梁で覆われた 2 層吹き抜けの内外に連携するアトリウム

研究の機密性と交流性の両立:上記アトリウムを中心に全ての施設を内柔外剛の口の字型一体的配置として計画された。外周部は通風採光を確保する横連窓とスリット窓により海風や季節風を防ぐとともに、限定されたゲートを設けて機密性を確保されている。

「見る-見られる」による交流:1 階:事務管理・ラウンジ等、2 階:研究・研修用途と明解な機能構成とし、それらを繋ぐ交流の場をアトリウムに面して設け、研究者同士及びこの施設を使う人同士の交流を促す計画となっている。

引用元:<https://www.fipo.or.jp/robot/>

2020.9;新建築 2020 年 9 月号 p.152; 株式会社新建築社

事例 2【東京大学生産技術研究所 千葉実験所研究実験棟】

大学研究施設における先端技術の試作の場「中間工場」としての機能をより純化した形態によって探求された施設である。

大型実験を可能にするフレキシブルで自由な大空間を実現するために、11 の研究室が用意され、それらをつなぐ大きな屋根が計画されている。大屋根の下には、大型 XY クレーン、振動台、独立基礎、試験線路などの施設が一体となっている。

研究室棟間の随所に設けられたボイドスペースは、日々の研究活動の搬入出及び内部の大空間を見学する窓となり、大空間を見ながらディスカッションできる場ともなる。また大空間の室内環境は大規模なコンクリート基礎を用いたクールチューブおよび小屋組内のデリバントファンと有圧扇によって、合理的に制御されている。

引用元:今井公太郎、本間健太郎、矢野寿洋;2019.3 作品選集 2019 巻号 1722 p50-51;一般社団法人日本建築学会

8. 中長期事業化在り方への提言

9.1 まとめ

本検討業務では、国内の産業用 X 線 CT に関わる研究者、装置開発企業、装置を活用したサービスを提供する企業、建築・設備の関係者を中心に、新機構の機能として予定されている超大型 X 線 CT 装置を有する拠点の中長期事業化へあり方を検討した。具体的には国内で本テーマに関連する有識者へのヒアリング・既存施設の視察・文献調査、独 O 研究所など海外研究機関との連携を基に、本拠点の建築・設備・構造に関わる基本要件と利便性、将来拡張性、セキュリティなど多面的な要素を考慮したレイアウト案を検討した。

本章では前章までの検討を踏まえた上で、新機構をより魅力的な拠点にするため、周辺景観、機能性、超大型 X 線 CT 装置を鑑みた外観デザインの検討案と、高い利便性を目指した IoT 技術・デジタル技術の活用案を紹介する。

9.2 周辺景観、機能性、施設特色を鑑みた外観デザイン検討

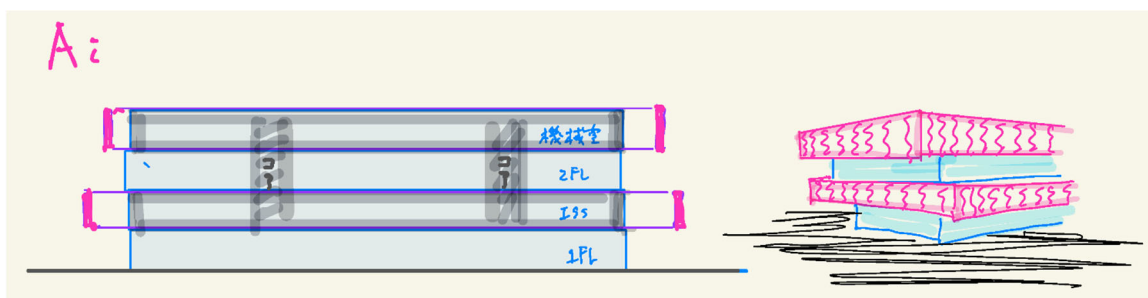


図 2-1-1-10 A:天井裏の設備エリアの存在を外観でも表現する案

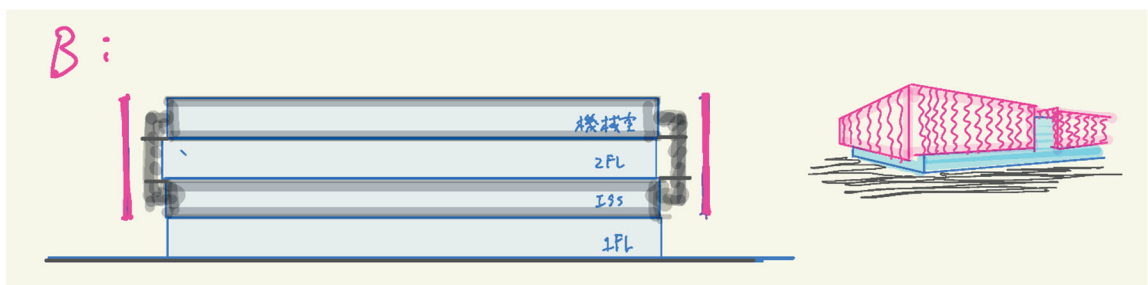


図 2-1-1-11 B:各階の天井裏から延びる設備配管の目隠しと外装ルーバーを兼用する案

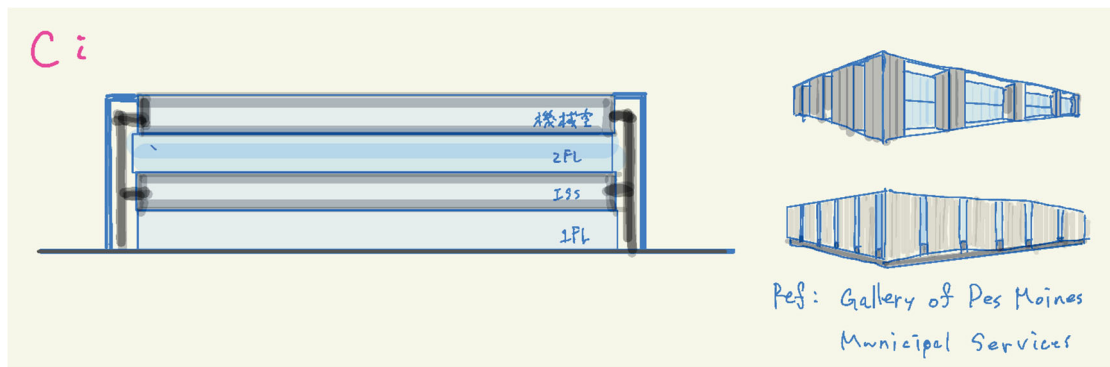


図 2-1-1-12 C:配管スペースを1階から通して想定し、外観のモチーフとする案

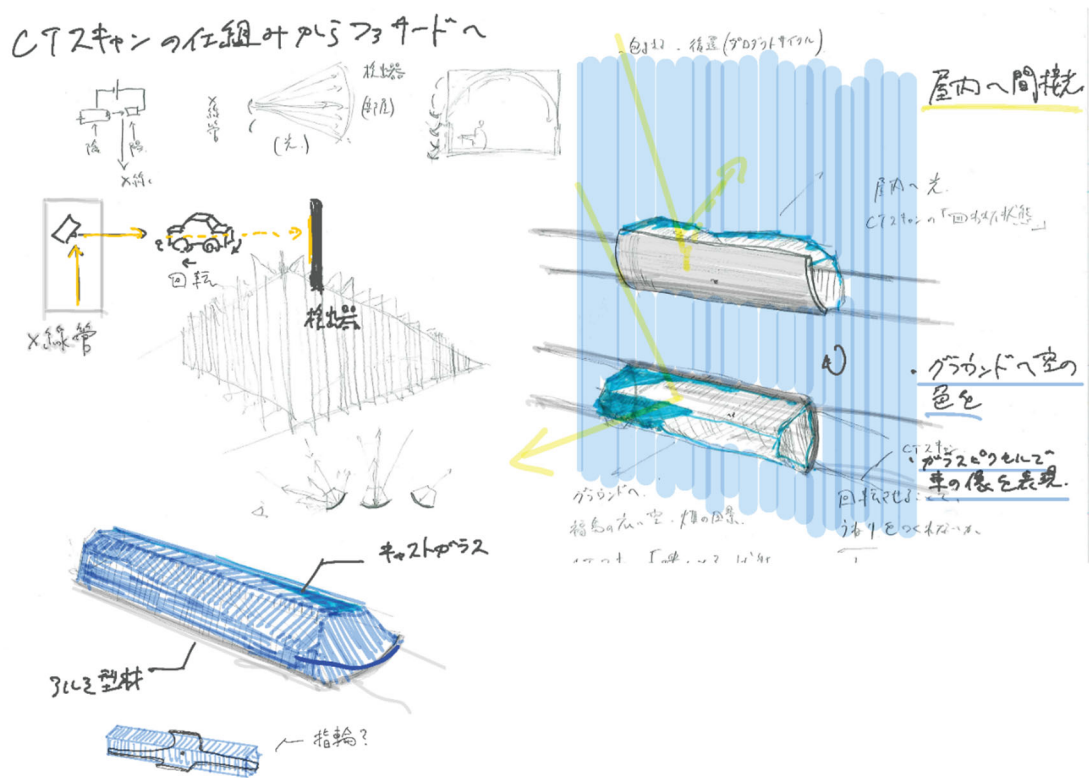


図 2-1-1-13

施設の根幹技術である CT スキャンの仕組みを分析し、外装ルーバーのアイデアとする過程。研究所のアイデンティティを表現しつつ、周辺環境を映しこみ、景観になじむデザインとする。

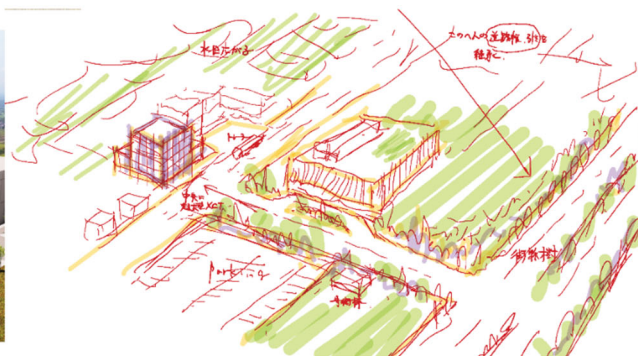


図 2-1-1-14

今回の想定ボリュームに外装ルーバーを配し、施設からの周辺環境への眺め等を調整する検討過程。以上のような検討を軸に、本計画では、周辺景観、機能性、施設特色を鑑みた外観デザインを基本とする。

9.3 IoT 機器を活用したアクセスコントロール

本施設の特徴上、情報の秘匿性・管理が重要となることから、入館者の属性ごとのゾーニング分けを計画する。

ゾーニング分けされた区画内施設の入退室管理、アクセスコントロールを、電子錠(スマートロック)を用いて、入館者ごとに発行された ID やカードにより管理することで実現できる。

臨時の入館者の管理についても、事前にオンラインで登録し ID を発行しておくことで、守衛所での入館手続き、パスカードの発行が不要となり、省人化に資すると考えられる。

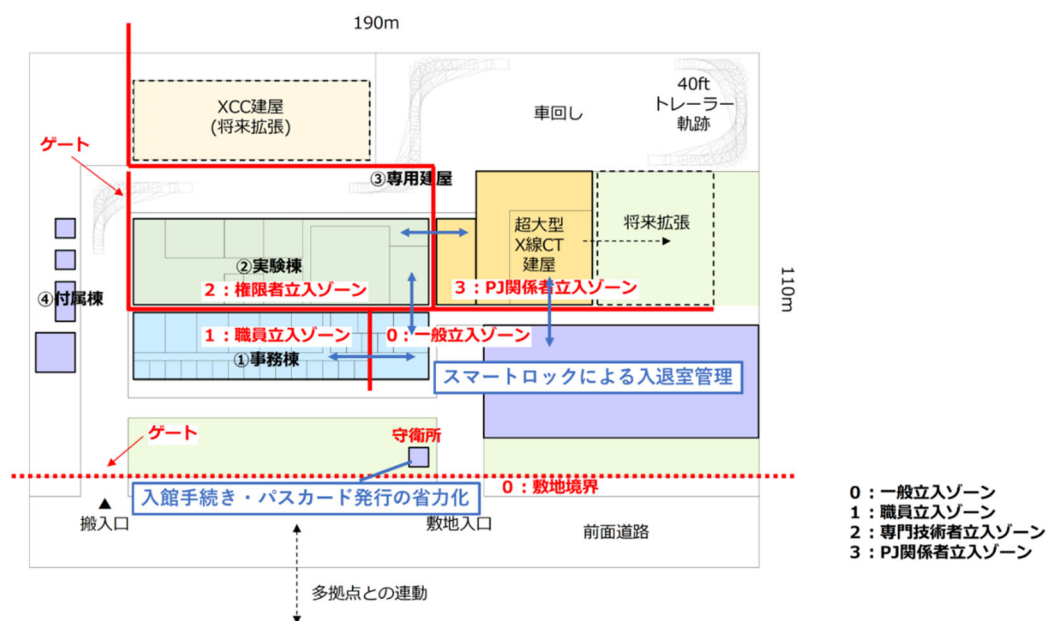


図 2-1-1-15



図 2-1-1-16

9.4 デジタル技術を活用した施設・設備情報の公開・維持管理の効率化

本施設には世界初の超大型 X 線 CT 装置をはじめ、多くの計測・実験設備が導入される予定であり、保有する設備を活用した外部機関・民間企業に対する委託試験・計測のニーズが高いと想定される。現状は委託試験・計測の計画や検討を行う際に、現地に赴き試験担当者と試験設備本体と仕様の確認、試験対象の搬入・搬出ルート、治具を含めた試験体の収まりなどの多くの確認作業が発生する。

この現地における確認作業を省略・効率化するため、近年国内外で活用が進んでいるデジタル技術を用いてクラウド環境に本施設・設備の3次元情報を再現(デジタルツインの構築)し、様々な情報と紐づけて公開することで、遠隔から質の高い確認作業が可能となる。これによって、本施設に委託試験・計測を依頼するユーザーの利便性向上が期待される。また、この施設設備の3次元情報を定期的に更新することで、常に最新の状況を把握・共有することが可能となり、今後発生する維持管理業務や施設拡張の際の計画・検討資料としても有効活用出来ると考える。

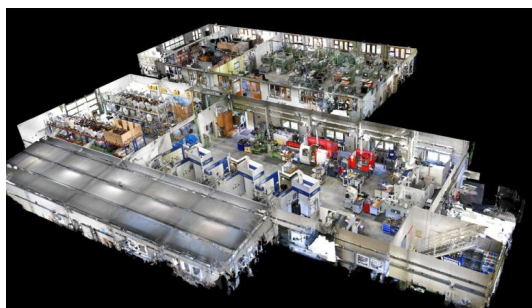


図 2-1-1-17 施設の3次元情報の再現

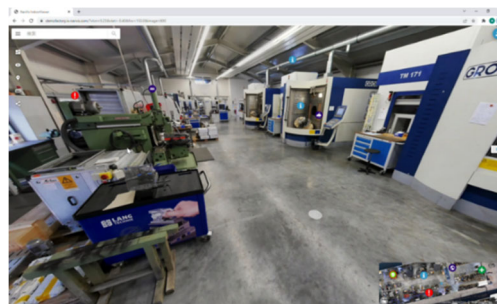


図 2-1-1-18 施設内部のウォークスルー



図 2-1-1-19 設備3次元情報の仕様書の紐付け

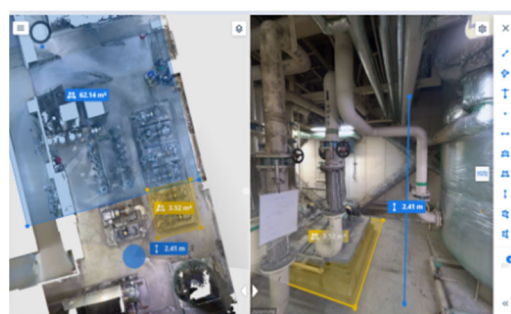


図 2-1-1-20 施設の面積・寸法計測

2-①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査

超大型X線CT装置の設計に係る、X線源、検出装置、ガントリー装置等の要素技術に関する国内外の最先端の技術動向を文献調査やX線CT装置に関する知識を有する研究者等へのヒアリング及び討論等により行い、技術的課題を抽出するため、福島XCT/CP E拠点検討委員会の下に超大型XCT装置検討分科会を設置した。

また、分科会で議論された開発を盛り込み、超大型X線CT装置の基本設計を実施した。

1. 分科会活動

1.1 分科会委員

分科会会長：C製作所 全体まとめ、X線検出器関係
U大学 X線源関係
C製作所 ガントリー関係
産業技術総合研究所 ガントリーたわみ計測関係
産業技術総合研究所 ガントリーたわみ計測関係
産業技術総合研究所 検出器関係
C製作所 画像再構成関係

1.2 分科会開催日時

第一回：令和4年11月28日（月）10:00～12:00 リモート会議
第二回：令和4年12月21日（水）15:00～17:00 リモート会議
第三回：令和5年1月12日（木）15:00～17:00 リモート会議
第四回：中止

1.3 見学会開催日時

1/19：N病院
1/25：N病院
1/26：D大学

2. 超大型X線CT装置における開発課題の概要

超大型X線CT装置の設計に係る技術開発について、その課題の開発目標の設定、開発内容・スケジュールについて分科会（超大型XCT装置検討分科会）を設置し議論をしてきた。

超大型X線CT装置の技術開発に関する課題は、平成29年度に実施された「産業用大型X線CT装置の導入に関する戦略策定」報告書（以下、H29戦略策定報告書、と略す）に既に記載があり、本分科会では、この報告書に記載のある技術課題を出発点として、令和5年度以降に実施する技術開発について議論を実施した。

2.1 技術課題と開発目標

H29戦略策定報告書に記載された技術課題を出発点にし、超大型X線CT装置における技術的な課題を改めて議論した。その結果として、X線源、回転ガントリー装置、X線検出関係、再構成関係に技術課題があることを改めて確認した。

その議論の中で、超大型X線CT装置の構成要素が超大型X線CT装置のどのようなCT性能に影響するのかを議論し、開発項目を選定した。

2.1.1 X線源装置

表 2-1-2-1 X線源装置の仕様項目と、超大型X線CT装置の性能影響表
(○印のついた項目が影響ある箇所)

N o	項目	透 過 能 力	空 間 分 解 能	画 像 SN 比	計 測 時 間	再 構 成 時 間	耐 久 性	メン テ 性	装 置 サイ ズ
1	エネルギー	○		○			○		
2	マイクロ波 バンド						○	○	○
3	照射線量率	○	○	○			○		
4	照射角度 (ファンビーム 角度)			○					○
5	多方向照射						○	○	

6	パルス幅	○		○					
7	パルスレート				○				
8	焦点サイズ		○				○		

以下、分科会での議論を纏める。

- ・X線源装置については、電子を加速するマイクロ波のバンドについての議論があった。現状のX線源のマイクロ波周波数はSバンドと呼ばれる周波数帯(3ギガヘルツ(GHz)帯(2-4GHz:波長75-150ミリメートル))を使っているが、これをXバンドと呼ばれる周波数帯(9GHz帯(8-12GHz:波長25-37mm))を使ったX線源とすることで、X線源の小型化・軽量化が可能となる。X線源は、回転ガントリー装置に搭載し、現状のX線源で約3トンの重量がある。このX線源の小型化、軽量化ができれば、ガントリーのゆがみ低減につながる。
- ・空間線量率については、CT画像のノイズ低減の観点で増大への期待がある。しかし、線量率増大のためには、ターゲットの熱負荷が大きくなる問題があり、この点をクリアにすることが重要である。
- ・照射角度(ファンビーム角度)については、広いとガントリーサイズを小さくできるが、ビームの端に行くほど線量率が1/4~1/5と少なくなり、CT画像のノイズ影響が懸念される。今回の先行研究で実施した基本設計では、超大型X線CT装置のサイズを小さくするために照射角度を40度とし、H29戦略策定報告書の35度に比べ照射角度を広げた形で検討を進めた。
- ・多方向照射については、X線源が回転ガントリー装置に搭載され、X線照射中に姿勢が一回転するという特異性がある。通常の非破壊検査では、X線源の照射時の姿勢が変わることはあるが、照射をしながら姿勢を変えることはない。しかし、ドイツのV大学では、大型ガントリーCTを建設している最中であり、9MVのX線源を回転ガントリーに搭載し、X線源の姿勢を変えながら照射をする。おそらく姿勢を変えながら照射するという世界最初の事例かと思われる。
- ・パルス幅については、空間線量率と同様、CT画像のノイズ低減の観点でパルス幅を長くしたいという期待がある。しかし、ターゲットの熱負荷が大きくなる問題があり、この点は照射線量率を増大する際の問題と同じである。
- ・パルスレートについては、超大型X線CT装置の計測時間に直結し、最大パルスレートを上げたいという期待が大きい。しかし、単に最大パルスレートを上げるだけでは計測時間の短縮はできず、回転ガントリー装置の最大回転速度を上げるも出てくるため、システムとしての検討も必要となる。
- ・焦点サイズについては、一般的に焦点サイズが小さい方がCT画像の空間分解能の向上が図れるが、超大型X線CT装置では、X線源と検出器の距離が約5mと長いので、焦点サイズを小さくしても分解能向上の効果は小さい。

これらの議論の結果、X線源装置の開発課題を以下の様に設定した。

表 2-1-2-2 X線源装置の開発項目と開発目標

開発項目	開発目標
1) 線量率アップ	現状 9MV、30Gy/min、300PPS を、9MV、400PPS の条件で線量率 60Gy/min とする。 パルスレート Up と線量率増大を目標とする。
2) 多方向照射試験	X線源の姿勢を変えてのビーム性能試験を実施し、照射安定性を確認する。 その試験のための、事前の要素試作も実施する。
3) X線源軽量化	SバンドとXバンドによる装置重量を比較し、Xバンドとした場合の軽量化程度を明確にする
4) 加速器の具体的デザイン	・ガントリー回転速度：1.2rpm⇒1.6rpm ・X線源の焦点は、ガントリー回転中心に対して半径 3.8 m の円周上を動く 上記二点、及び加速周波数も考慮に入れ、X線源（加速器）の具体的なデザインを実施する
5) X線源の耐久性評価	年間照射時間を 3,000 時間として、X線源の寿命を評価するとともに、メンテナンス方法について検討する。

2.1.2 ガントリー装置

表 2-1-2-3 回転ガントリー装置の仕様項目と、超大型X線CT装置の性能影響表
(○印のついた項目が影響ある箇所)

N o	項目	透 過 能 力	空 間 分 解 能	画 像 SN 比	計 測 時 間	再 構 成 時 間	耐 久 性	メ ン テ 性	装 置 サ イ ズ
1	運転方法(回転走査／スライド走査)		○	○	○		○		
2	回転速度				○		○	○	
3	スライド速度				○		○	○	

4	回転のたわみ／ スライドのたわ み		○	○					
---	-------------------------	--	---	---	--	--	--	--	--

以下、分科会での議論を纏める。

- ・運転方法については、H29 戦略策定報告書で回転走査とスライド走査で提案がされており、この運転方法については先行研究の中の基本設計にて検討を実施し、本分科会ではその概要の確認を実施した。検体の長さ、F O V 選択の大きさに応じて、計測時間の観点で回転優先走査が有利なモードとスライド優先走査が有利なモードがある。
- ・回転速度については、その最大回転速度が大きいと計測時間を短くできるので良いが、現実レベルはどの程度かという議論となった。このため、回転ガントリーの類似品を確認するため、粒子線がん治療装置の実機見学を実施した（N病院）。この回転ガントリー装置は、その大きさも超大型X線C T装置の回転ガントリー装置と似ているため、見学の対象として選んだ。
- ・粒子線がん治療装置の場合、回転ガントリーに搭載する機器重量は約30トンで、これを1rpmで回転している。超大型X線C T装置では、回転ガントリーに搭載する機器重量は約十数トンと粒子線がん治療装置に比べ軽量であるため、これを1.2rpmで回転する（開発目標は、1.6rpmとした）。・また、粒子線がん治療装置の回転ガントリーと超大型X線C T装置の回転ガントリーで最も大きな違いは、その稼働回数である。粒子線がん治療装置の回転ガントリーの稼働回数は一日に十数回の回転に対して（一日の治療患者数による）、超大型X線C T装置では自動車一台の全体撮像をするだけで5000回転、モードによっては10000回転が必要となり、回転数が桁違いに多いことも分かった。この稼働回数の違いは、回転ガントリー装置の耐久性に大きく影響し、ガントリーの総回転数が減らせるスライド優先モードの方が良いとの意見もあった。
- ・回転ガントリー装置のたわみについては、その回転中のたわみが大きいとX線源と検出器の位置関係が変わり、検出器にX線が入らなくなる。このためC T画像の空間分解能や、画像S N比に関係し、さらにたわみが大きい場合には、アーチファクトの発生も懸念される。

これらの議論の結果、回転ガントリー装置の開発課題を以下の様に設定した。

表 2-1-2-4 回転ガントリー装置の開発項目と開発目標

開発項目	開発目標
1) ガントリー回転速度 の最適化	回転速度：1.2RPM⇒1.6RPM、 加減速時間：10 秒⇒5 秒以下

2) ガントリーたわみ評価	X線源重量3トン、検出装置重量4トンとして、カウンターバランスまで含めてガントリーたわみを最小化するガントリー構造を、シミュレーションを用いて検討する
3) たわみ計測手法	ガントリーたわみによるX線源位置、検出装置位置の変位をリアルタイムで測定し、その結果を再構成演算にフィードバックする
4) スライド機構の構造成立性	検体重量5トンを、ガントリー内にスライドする機構のたわみ量を最小化する構造を、シミュレーションを用いて検討する。
5) ガントリー機構の耐久性評価	ガントリー回転稼働率を 1200 回転/日として、ガントリー寿命を評価するとともに、メンテナンス方法について検討する

2.1.3 検出装置

表 2-1-2-5 検出装置の仕様項目と、超大型X線CT装置の性能影響表

(○印のついた項目が影響ある箇所)

N o	項目	透過能力	空間分解能	画像SN比	計測時間	再構成時間	耐久性	メンテナンス性	装置サイズ
1	積分時間	○		○	○				
2	コリメータ		○	○					
3	スライス可変コリメータ		○	○					
4	検出器個数（検出器ピッチ）		○		○	○		○	
5	素子サイズ		○	○					
6	ダイナミックレンジ	○		○					
7	AD変換スピード				○				

以下、分科会での議論を纏める。

- ・コリメータについては、その設置有無を検討することが必要である。コリメータは、C

T画像の空間分解能を決定し、CT画像への散乱線の影響を無くすることができる。分科会では、要素技術だけでなく全体システムとしての開発が不可欠であるとして、超大型X線CT装置全体のCTシミュレータの開発が必要との議論となった。

- ・散乱線除去については、コリメータの有無でアプローチが異なり、コリメータが有る場合には、散乱線の影響は小さく、ソフト的な除去処理不要の可能性がある。一方、コリメータが無い場合には、散乱線の影響が大きく再構成でのソフト除去必須になる。フラウンホッフでは、量子モンテカルロ計算により散乱線を予測し、それを除去する手法の発表があった。ただし、計算量が膨大であり、実用的か否かについては不明瞭である。
- ・AD変換スピードについては、このスピードが速くなることでX線源のパルスレートを上げることができ、計測時間の短縮につながる。

これらの議論の結果、検出装置の開発課題を以下の様に設定した。

表 2-1-2-6 検出装置の開発項目と開発目標

開発項目	開発目標
1) 設計仕様検討用CTシミュレータ整備	ガントリー型高エネX線CTのCTシミュレータの開発（公開されているシミュレータをカスタマイズすることも視野に入れる）
2) コリメータ有無の評価	検出器側のコリメータ有無によるCT画像劣化度合いを、要素試験とシミュレーションを用いて検討
3) 次世代の検出器開発	CdTe、シンチレーション検出器(GOS:Pr, LYSO, GAGG)などの次世代高エネルギーX線検出器の開発 二次元検出器の開発

2.1.4 再構成関係

表 2-1-2-7 再構成関係の仕様項目と、超大型X線CT装置の性能影響表
(○印のついた項目が影響ある箇所)

N o	項目	透 過 能 力	空 間 分 解 能	画 像 SN 比	計 測 時 間	再 構 成 時 間	耐 久 性	メ ン テ 性	装 置 サ イ ズ
1	画素サイズ		○			○			
2	画像サイズ					○			
3	再構成アルゴリズム					○			
4	ソフト補正			○		○			

以下、分科会での議論を纏める。

- ・画素サイズ、画像サイズについてはX線CTの原理から、超大型X線CT装置として最適なものがある。
- ・ソフト補正については、回転ガントリー装置のゆがみ補正が新規の開発項目となる。
- ・3Dモデル化に適した再構成手法の活用として、D大学で開発されたエッジ境界が明瞭に再構成モデル化できる手法を検討すべきである。
- ・再構成演算の演算時間は、最新のGPU活用並列スパコンを使えば、相当の時間を短縮できる。この検討もR5以降の早い時期に実施すべきである。

これらの議論の結果、再構成関係の開発課題を以下の様に設定した。

表 2-1-2-8 再構成関係の開発項目と開発目標

開発項目	開発目標
1) ゆがみ補正	X線源位置、検出装置位置の変位を繰り込んで画像再構成するアルゴリズムの開発
2) 散乱線除去	コリメータなく散乱線の影響が無視できない場合に備えて、散乱線をソフト補正するアルゴリズムの開発
3) 再構成演算の高速化	最大画像サイズ 12,000×12,000 のCT画像を、2分以内に演算するアルゴリズムとハードウェアの開発

4) 3Dモデル化に適した再構成手法の活用	既にあるエッジ強調再構成アルゴリズムの、超大型CTへの適用検討
-----------------------	---------------------------------

3. 超大型X線CT装置における開発内容

3.1 X線源に関する開発項目・開発目標・開発内容

3.1.1 線量率アップ

(1) 開発目標

被検体が大きくなるほど、それらを透過するために高いエネルギーのX線が必要となる。被検体の材質によっても異なるが、X線が最大の透過力をもつのは数 MeV から数十 MeV のエネルギーである。自動車などに多く用いられる鉄の場合、約 9 MeV で透過力は最大となる。12 MeV を超えるようになると、物質中における電子対創成の割合が増加するため透過力は増えず、さらに被検体の放射化の問題も生じてくる。X線の線量率は得られる画像の解像度に直接的に影響し、線量率が大きいほどその解像度は向上する。本研究開発ではX線エネルギー9 MeV、線量率 60 Gy/min(400 PPS)を可能とするX線源の開発を目標とする。

(2) 開発内容

X線発生源では専用の加速器で加速した電子ビームを金属ターゲットに照射することでX線を生成する。X線のエネルギーは加速した電子ビームのエネルギーに比例することから、9 MeV と大きな高エネルギーX線を得るために、マイクロ波で動作する電子線形加速器と金属ターゲットを開発する。

電磁場シミュレーションソフトを利用し、電子線形加速器の形状や全長、必要電力、ビームサイズを決定し、9 MeV の加速器のデザインを最適化する。9 MeV の電子ビームによるターゲットでの発熱は kW のオーダーに達する。このことはターゲットの破損につながるため、効率的な冷却機構の開発が必要となる。熱・構造解析のシミュレーションにより冷却効率のよいターゲットの構造を決定する。加速器、ターゲットの結果に基づき、発生可能なX線量をシミュレーションにより検証する。

3.1.2 多方向照射試験

(1) 開発目標

ガントリー式CTではX線源はガントリーに固定され、被検体の周囲を回転する。そのため、X線源の姿勢は重力方向に対して一定ではなくなるが、その姿勢に依存せず一定のX線を供給できることが望まれる。本開発では、重力方向に対するX線源の姿勢を変えて、ビーム試験を実施し、照射安定性を検証する。

(2) 開発内容

X線源の姿勢を回転させつつビーム照射ができるX線源回転装置の設計ならびに試作を行う。X線源回転装置単体での動作試験を繰り返す。回転させながらのビーム照射に目

途がつき次第、X線源を回転装置に組み入れ、全体をくみ上げる。X線源の姿勢を変化させながらビーム性能試験を行い、照射安定性を検証する。

3.1.3 X線源軽量化

(1) 開発目標

X線源はガントリーに取り付け、回転させる必要があるため、X線源はガントリーの強度に大きな影響を及ぼさない程度に小型かつ軽量の必要がある。X線源の大きさ、重量は加速に用いるマイクロ波周波数の帯域に大きく依存し、周波数が高いほど、小型軽量化が可能となる。マイクロ波周波数の帯域として、一般に多く用いられているSバンド(2～4 GHz)とより周波数の高いXバンド(8～12 GHz)を用いた場合の装置重量の比較を行う。Sバンドについては市販品とも比較し、軽量化程度を明確にする。

(2) 開発内容

X線源を構成する各部品の重量について、Sバンド、Xバンドで大きく異なるものを整理する。それぞれのX線源ならびに市販されているSバンドX線源とも総重量の比較を行う。Sバンドについては軽量化程度を明確にする。それらを踏まえて使用周波数帯域を決定し、「1) 線量率アップ」に記載した加速器シミュレーションを行う。

3.1.4 加速器の具体的デザイン

(1) 開発目標

ガントリーの回転速度は1.6 RPMを予定しており、X線源はガントリー回転中心に対して、3.8 mの円周上を動く。上記2点およびマイクロ波周波数も考慮に入れ、ガントリーに実装可能なX線源の具体的なデザインを決定する。

(2) 開発内容

諸条件を整理し、全体設計を行う。諸々の試験結果に基づき設計を見直し、ガントリーに実装可能な最終デザインを決定する。

3.1.5 X線源の耐久性評価

(1) 開発目標

自動車1台をスキャンするには5日程度(120時間)かかる見込みであり、年間20数台のスキャンを見込んでいる。そこで年間照射時間を3000時間と仮定して、X線源の寿命を評価するとともに、メンテナンス方法について検討する。

(2) 開発内容

試験結果に基づきX線源の寿命を評価する。寿命を決定しているのは、マイクロ波源やターゲットと予想され、それらの交換やメンテナンス方法も検討する。

3.2 ガントリーに関する開発項目・開発目標・開発内容

3.2.1 回転速度の最適化

(1) 開発目標

回転速度；Max. 1.6rpm(9.6° /sec)、加減速時間；5 秒以下

(2) 開発内容

本開発の超大型X線CT装置で撮像可能な最大検体サイズはドライコンテナを予定しており、必要なガントリー開口サイズは約 $\phi 3.7\text{m}$ 以上と想定される。さらに、3.7mの開口サイズを有し、十数トンの線源・検出機器やカウンターバランスを搭載し、高い剛性を維持しながら360度回転できるガントリー構造体の大きさは1.5～2倍程度の直径が見込まれる。このサイズ感を有した回転体は起動及び停止の際に大きな衝撃力や遠心力を発生するため、機械保護や周囲環境の安全等も考慮し、可能な限り緩やかに起動及び停止出来る速度設定が望ましい。

一方で、X線CT装置としての画像構成に必要なフレームレートの確保や高スループットな撮像が不可欠となる。

よって、本開発ではX線CT装置としての性能やスループットを最大に出来るガントリー構造の回転速度の最適化を行う。

3.2.2 ガントリーたわみ評価

(1) 開発目標

X線源重量3トン、検出装置重量4トンとして、カウンターバランスまで含めてガントリーたわみを最小化するガントリー構造体を、シミュレーションを用いて検討する。

(2) 開発内容

本開発の超大型X線CT装置で使用されるガントリーは、回転方向に関わらず360度あらゆる位置でX線源と検出装置が常に同じ位置関係を保持しながら回転する必要がある。特に本開発で使用されるガントリーは開口サイズ $\phi 3.7\text{m}$ を有した大径の構造物になるが、回転中心から数m離れた位置に搭載されるX線源や検出装置の付近で構造体が数ミリメートルのたわみが生じただけで、撮像性能に影響が発生することになる。

一方でたわみを抑制するためには、構造を構成する材料の板厚を厚くすることで、容易にたわみを抑制する効果を得られるが、質量だけでなく慣性モーメントもアップすることで、必要となる駆動や制動能力の増大や機構の大型化に繋がる。

よって、本開発の超大型XCT装置で使用されるガントリーは、軽量かつ高剛性な構造の最適化設計を行うことで、高い性能とスループットを実現可能となる。さらには、可能な限り軽量化することで、長寿命化への影響も大きくなる。

3.2.3 たわみ計測手法

超大型X線CT装置ではX線源と検出器の対の位置が、測定中に装置内で移動する。この移動に伴ってガントリーのフレームにたわみが生じ、1測定中におけるSRD（線源・検体距離）、SDD（線源・検出器距離）、照射角度が変動する。超大型X線CT装置ではX線源及び検出器の重量が大きいため、この変動量を軽視することはできない。正確なX線CT測定のためには、これらの変動を補正して再構成を行う必要がある。

令和4年度事業では、このたわみを検出する方法、もしくは、たわみがX線CT測定に与える影響を検出する方法について調査と検討を行った。ここではたわみ（ないし、その影響）の計測方法を、大きくオフライン計測とリアルタイム計測に分け、それぞれの方法について超大型X線CT装置に適用可能な手法があるか、を検討した。変動の系統的な成分はオフライン計測で事前に捕捉し、測定ごとに発生するランダムな成分はリアルタイム計測で捕捉することを狙う。

オフライン計測では事前に、ガントリー上でX線源と検出器を移動させ、これに伴ってガントリーのフレームにどのような三次元的な変形が生じ、X線源および検出器の位置、姿勢が理論上の位置から変化しているかを測定し、記録しておく。そのデータを使用して、X線CT測定の各撮像時の測定対象、X線源、検出器の相対位置関係を補正し、再構成計算に反映させる。

ガントリーフレームの変形を検出するには、フレーム上に設定した参照点の変位を計測する。同様に、X線源および検出器の筐体に参照点を取り付け、その変位を計測すれば、これらの位置、姿勢を求めることができる。X線源および検出器を含む超大型X線CT装置全体をレーザスキャナでデジタル化する方法についても考察した。しかしレーザスキャナの三次元座標測定精度は10 mの距離に対して2 mm程度と低く、本事業で要求される性能を満たせないと考えられたため、オフライン計測の手法の候補からは除いた。

ガントリーフレーム上などの参照点変位測定に使用可能なシステムの一つとして、レーザトラッカがある。レーザトラッカの三次元座標測定精度は、10 mの距離に対して50 μ m程度を達成しているものもある。レーザトラッカを使用する場合、リフレクタと呼ばれるレーザ光反射素子を参照点に取り付ける。レーザトラッカによる測定では、トラッカ本体からリフレクタまでの間に視線を遮るものがないことが必要である。そのため、ガントリーフレーム全体を測定するためには、一台のレーザトラッカを複数の位置に移動して測定を行うか、複数台のレーザトラッカによるネットワークを構築する必要がある。このような測定はレーザトラッカの運用において珍しいものではなく、実際の超大型X線CT装置の測定に適用可能である。

- 参考：B. Muralikrishnan 他, Laser Trackers for Large Scale Dimensional Metrology: A Review, *Precision Engineering*, Vol. 44, pp. 13-28, 2016.

参照点変位測定に使用可能なレーザトラッカ以外のシステムとして、英国 NPL が開発したシステム (OPTIMUM) がある。このシステムは 10 m 立方程度の領域に対して、50 μm 程度の不確かさで三次元測定を実現することを目的として開発されたものである。レーザトラッカが一度に 1 つのリフレクタの位置しか測定できないのに対して、OPTIMUM は複数のターゲットの位置を同時に測定できる。このシステムの性能についてはドイツ PTB のレーザトラッカ校正用設備を使用して検証され、50 μm 程度の不確かさが達成されたと報告されている。

- 参考：

<https://www.3dmc.events/modules/static/archive/media/files/2017/PPT%20D%20-%20NPL%20OPTIMUM%20-%20Tracking%20using%20Multilateration%20-%20Campbell-M.pdf>

これらとは別に、本来はモーションキャプチャなどの用途に開発されたものであるが、10 m 立方程度の空間内におけるターゲットの三次元位置を 100 μm 程度の精度で測定可能なシステムが市販されており (例：Optitrack Prime X41)、建築物の変形測定などで利用されている。

- 参考：<https://optitrack.com/cameras/primex-41/>

これらのシステムを使用することにより、超大型 X 線 CT 装置のフレーム、X 線源および検出器の位置、姿勢、変位を 100 μm より高い精度で測定することは可能であると考えられる。

リアルタイム計測では実際の X 線 CT 測定時に、各撮像時における測定対象と X 線源、検出器との相対位置変化を何らかの方法で検出し、再構成計算に反映させる。今年度はガントリーフレームの変形 (回転系の外殻変動) をリアルタイムに検出するシステムと、各撮像時における回転中心軸の変動 (回転系の内部変動) を検出するシステムとを分けて検討した。

フレーム変形のリアルタイム観測は、測定機や工作機械の高精度化を目的として行われている例がある。そのような用途に使用されているシステムの例として、装置の外側に設けた参照フレームや多軸レーザを用いて、装置上の基準点間距離の変動を測定する方法がある。多軸レーザを用いるシステム (例：ETALON LINECAL、同時測定 24 ch) では、測定可能な基準点間距離は 3 m までであるものの、測定精度 (不確かさ) は 0.3 $\mu\text{m}/\text{m}$ と高く、外部からの三次元測定よりも高精度でフレーム変形を捕捉できる可能性がある。

- 参考：大岩 他、パラレルメカニズム形機械のフレームの変形補正に関する研究（アップベの原理に基づく補正装置の改良）、日本機械学会論文集C編、79 巻 808 号 p. 5103-5116、2013
- 参考：<https://www.etalonproducts.com/en/products/linecal/>

各撮像時における回転中心軸の変動を検出できるシステムとして、産業技術総合研究所で開発された自己校正型ロータリーエンコーダシステム（SelfA）がある。このシステムは角度の国家標準（特定標準器）にも使用されており、取り付けられた回転軸の回転誤差だけでなく、中心位置の振れ（検出能力 1 μm 以下）をリアルタイムに検出できる機能を有している。

これまでに製品化されている自己校正型ロータリーエンコーダシステムは、非常に高い精度が要求される回転テーブル向けのため、直径数百 mm のものである。しかし、このシステムに用いられている原理は大型の回転構造物でも実現可能であり、超大型X線CT装置による撮像時の回転中心軸変動の補正に利用できる。

- 参考：<https://regcol.aist.go.jp/data/outcome/3-06.pdf>
- 参考：<https://www.e-motionsystem.biz/company-profile/history/>

超大型X線CT装置のたわみを検出する方法、もしくは、たわみがX線CT測定に与える影響を検出する方法についての検討を行った。ガントリーフレームのたわみ、X線源および検出器の位置、姿勢の測定については、外部の三次元測定システムによって数十 μm 程度の精度でオフライン測定が可能であり、その結果を再構成計算に反映させることで、X線CT測定の精度向上が期待できる。また、実際の撮像時にランダムに発生するフレームのたわみや回転中心軸の変動については、フレーム上の基準点間距離変動をリアルタイムに計測するシステムや軸ぶれ検出機能付き自己校正型ロータリーエンコーダシステムを超大型X線CT装置に組み込むことにより、検出、補正が可能である。来年度以降の事業では、これらのシステムを実際に試用し、高精度X線CT装置を構築するにあたってどのシステムを採用するかを検証を行う。

3.2.4 スライド機構の構造成立性

（1）開発目標

検体重量5トン、ガントリー内にスライドする機構のたわみ量を最小化する構造を、シミュレーションを用いて検討する。

（2）開発内容

本開発の超大型X線CT装置で使用するスライド機構は、約5トンの検体を約6.5mスライドさせる構造体を想定している。求められる機能として、検体をガントリー回転軸

方向に並行かつ、重力方向の上下動なく、一定ピッチでスライドさせることである。この機能を撮像性能に極力影響のないようにするためには、高剛性で高精度なスライド構造が必要となる。特に、剛性については、線源及び検出装置を搭載したガントリー開口を貫通する必要があることから、回転構造体に干渉しない支持構造の採用や、回転と同期出来る支持構造の採用が必要になるものと考ええる。更には、スライド速度についても、X線CT装置としての性能を確保する上で、細かいスライドピッチが必要になること、スライド距離が長くなることから、本装置のスループット向上の観点からも可能な限り速くスライド出来ることが望まれる。

よって、本開発の超大型X線CT装置で使用するスライド機構は、たわみ量を最小化した剛構造のスライド構造が高精度、かつ高速移動可能な装置開発が必要となる。

3.2.5 ガントリー機構の耐久性評価

(1) 開発目標

ガントリー回転稼働率を 1200 回転／日として、ガントリー寿命を評価するとともに、メンテナンス方法について検討する。

(2) 開発内容

本開発の超大型X線CT装置で使用するガントリーが、高精度の回転を長期間維持するためには、大径かつ長寿命の摺動部品の選定が重要となる。 $\phi 3\text{m}$ 以下の軸径を持つ摺動部品であれば、比較的バリエーションも豊富で、長寿命製品の入手も可能である。しかしながら、本開発の回転ガントリーにおいては、開口サイズが $\phi 3.7\text{m}$ 以上になることから、標準品での対応が難しいだけでなく、特別生産でも対応が難しいサイズとなる。

また、摺動部品の寿命に関しては、本来の構造によるものだけでなく、定期的なメンテナンスによる要素も大きく、メンテン性の検討も重要な要素となる。万が一の場合でも、交換が可能な構造を採用可能に出来ることで、長寿命化も図れる。

よって、本開発では市場調査も含めて広く要素部品を検討した上で、最適な摺動部品の選定を行う。

3.3 検出装置に関する開発項目・開発目標・開発内容

3.3.1 設計仕様検討用CTシミュレータ整備

(1) 開発目標

超大型X線CT装置では、回転ガントリー装置のたわみによるX線計測の変動があり、このたわみの大きさによってCT画像にどのような影響があるかを事前に検討する要請がある。このため、超大型X線CT装置のCTシミュレータを開発し、X線源、回転ガントリー、検出装置、再構成での要素技術開発のそれぞれに対して、開発の成果をCTシミュレータにより評価をする。

(2) 開発内容

CTシミュレータとしては、いくつか公開されているものもある。以下に参考情報を示す。

- 参考：<https://www.artist.bam.de/>
- 参考：
https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/336_Kasperl_Rev1.pdf
- 参考：<https://tomopedia.github.io/software/>

公開されているCTシミュレータは、大きく二つに大別される。ひとつは、X線透過をシミュレーションするもの、もうひとつは再構成の方に重点があるものになる。

超大型X線CT装置でのCTシミュレータとしては、以下の事象をシミュレートする必要がある。

- ・ X線源：X線スペクトル（単色ではなく連続スペクトルを模擬）
線源サイズ：X線焦点として、分布のある焦点を模擬
照射線量率：X線スペクトルと合わせて、発生X線光子数を模擬
- ・ 検体：大型検体のX線透過を模擬（自動車サイズを想定）
散乱線：検体からの散乱線を計算。散乱線の有無で切り替えが必要
- ・ 検出器：検出器サイズ、検出効率を模擬
放射線計測における統計的な事象を模擬
- ・ 回転ガントリー：X線源位置、検出器位置を、ガントリー回転角度毎に設定できる。
(たわみのシミュレートに必要)
- ・ 再構成：たわみ補正を実装した再構成シミュレータ

これらの超大型X線CT装置のCTシミュレータに要求される機能が、公開されているCTシミュレータで実現できる、もしくはカスタマイズできるのであれば、そのCTシミュレータを使うこともできるが、そうならない場合には超大型X線CT装置に特化したCTシミュレータの新規開発を実施する。

その後、CTシミュレータとしての検証試験を経て、実機シミュレーションを実施し、超大型X線CT装置でのCT画像の画質評価に活かす。

3.3.2 コリメータ有無の評価

(1) 開発目標

検出器側コリメータの有無を決定する。

(2) 開発内容

9 MV の高エネルギー X 線の散乱線除去のため検出器側のコリメータが必要であるが、一方で、検出器側のコリメータがあると回転ガントリーのたわみによる X 線源と検出器の相対位置がゆらぎ、検出器側コリメータが遮へい材となり検出器に X 線源が入射しない可能性がある。検出器コリメータを有無により、どの程度 X 線計測に影響がでるのか、要素試験とシミュレーションにより評価をする。

さらに、検出器側コリメータの有無による散乱線シミュレーションを実施し、この結果を 1) で開発する超大型 X 線 CT 装置の CT シミュレータと合わせ、検出器コリメータの有無による CT 画像への影響を検討する。

3.3.3 次世代の検出器開発

(1) 開発目標

高エネルギー X 線用検出器開発

(2) 開発内容

大型ガントリー CT の高エネルギー X 線の検出で問題となるのが物質との相互作用によって発生する散乱線の影響による空間分解能の劣化である。検査対象物内部で散乱した X 線は、エネルギーと進行方向が変化するため、検出器に斜めから入射した X 線が透過画像の劣化を引き起こす。また、一般的に低エネルギーの CT で使用されているフラットパネル型検出器 (FPD) は低エネルギー X 線での空間分解能を優先した結果、検出器の厚みが 250～400 μm しかなく、高エネルギー X 線の検出効率が低いことも実効空間分解能の低下に影響する。本研究で開発する検出器は、散乱線のイベントと透過 X 線によるイベントの弁別が不可欠となる。本研究ではシリコン検出素子と、一般的に高エネルギー X 線に適していると言われている CdTe 検出素子の比較検討を行った。シミュレーションの結果、CdTe 素子は質量減弱係数・密度が全体的に高く、検出効率は全体的に向上するが、図 2-1-2-1 (質量減弱係数) に示すとおりその傾向は 200 keV 以下の低エネルギー X 線に対して顕著であり、1 MeV 付近の X 線の検出の相対値を比較すると、散乱線の N とし、直接線を S とした時に、Si と CdTe では Si の方が S/N 高くなるということが分かった。このため厚い被写体を透過してきた X 線は、Si 素子を用いることで電子対生成などにより S/N 比の高いものとなることが示唆される。Si 素子は C 製作所の CT でも実績があり、大型ガントリー CT でも有用であると考えられる。

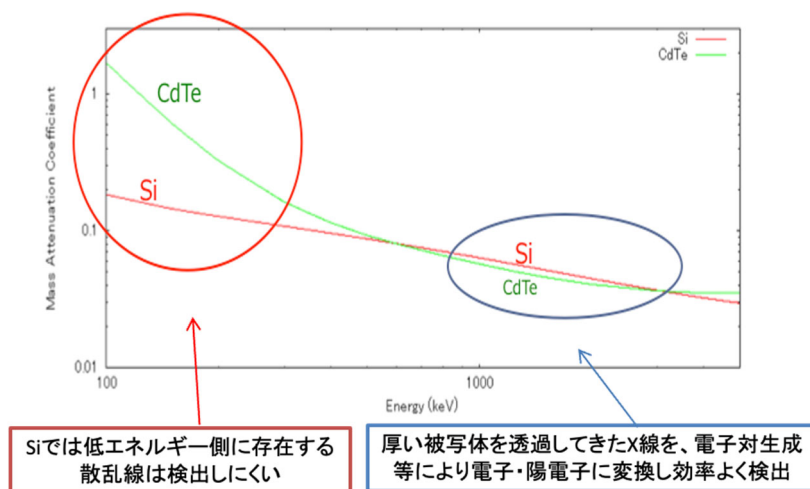


図 2-1-2-1 CdTe と Si の質量減弱係数の比較。

図 2-1-2-2 は 3 MeV の光子を CdTe 素子、Si 素子に入射させた時のイベントを比較したものである。シミュレーションには GEANT4 を用いた。CdTe 素子では 2 回以上散乱するコンプトンイベントが大幅に増えており、このシミュレーション結果からも Si 素子の方が S/N 比は優れていることが示唆された。現在、半導体素子を中心に調査しているが、今後はシンチレータも比較に加えて検出器開発を進めていく。

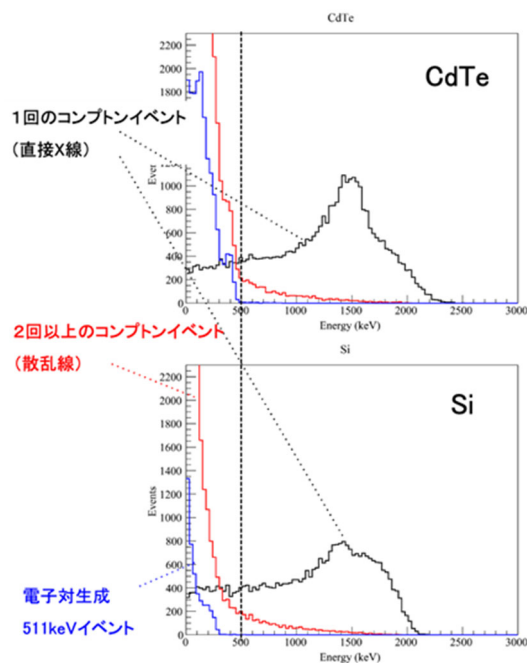


図 2-1-2-2 GEANT4 を用いたシミュレーション結果

厚さ 5 cm の検出素子に 3 MeV の光子が入射した場合のイベントを比較した。Si に比べ CdTe 素子は直接線のイベントに対し、散乱線のイベントが多くなることが示唆された。

3.4 再構成に関する開発項目・開発目標・開発内容

3.4.1 「ゆがみ補正」を考慮した再構成アルゴリズムの開発

(1) 開発目標：

X線源位置、検出器位置の変位を繰り込んで画像再構成するアルゴリズムの開発

(2) 開発内容：

①計測変位量（ゆがみ）に基づく検出器入射フォトン量補正方法の構築

②補正効果検証基礎試験

③CTシミュレータを用いた変位補正を考慮した画像再構成評価

本開発の超大型X線CT装置では、X線源・検出器が一体となったガントリー機構が回転、並進駆動を繰り返す事によりCT画像再構成に必要な投影データを取得する。この駆動時に、ガントリー機構のゆがみが発生すると、ガントリー機構に組み込まれているX線源と検出器の位置関係に当初の設定からずれが発生する。

図2-1-2-3に二次元に簡略化したX線源と検出器の位置関係及び検出器に入射するX線強度分布を示した。検出器は、ライン検出器配列の中央、X線源のX線発生位置から真向かいにある検出器を示している。図2-1-2-3(a)が正常な設定時の状態を模式しており、X線源の発生時の中央点と対抗する検出器厚み幅の中央は、これら両点を結ぶ中心軸上にある。この時、検出器に入射するX線強度分布は、ピーク位置が検出器の中央にくる。

図2-1-2-3(b)には、ガントリー機構のゆがみにより、X線源の発生時中央点と対抗する検出器厚み幅の中央が幅 d ずれた場合の模式図を示した。このずれ幅 d により検出器に入射するX線強度分布のピーク位置が d ずれるために、検出器に入射する全フォトン量積分値に差が発生する。そのため、ずれ幅 d が発生した場合に、計測されたずれ幅 d からX線強度分布のずれによる検出器に入射するフォトン量の差分量比の関係式を導出する。この関係式の導出ではCTシミュレーション及び基礎実験体系での計測データをベースとする。

超大型X線CT稼働時には、ガントリー機構のひずみ計測値から前述の関係式を用いて、実際の検出器により計測される入射フォトン量を補正する。

図2-1-2-3(b)は、配列中央の検出器の二次元的なずれを模擬しているが、ガントリー機構のゆがみが3次元的な場合は、X, Y, Z各方向に対するずれ量を計測し、これらの3次元でのずれ量から検出器に入射するフォトン量を補正する。

さらに、ライン配列された全ての検出器に対し、上記の補正を実施し、再構成に為の投影データとする。

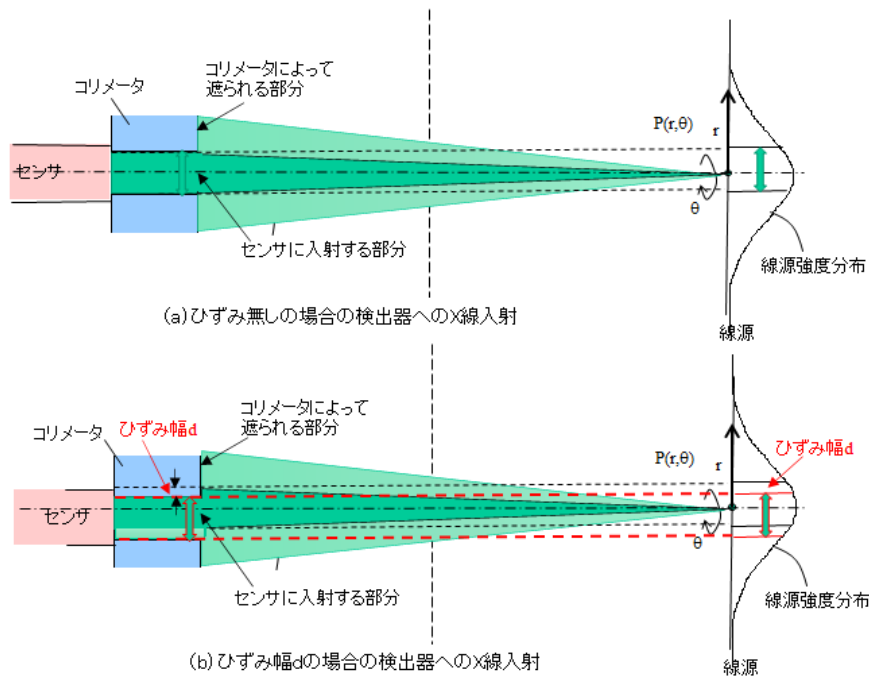


図 2-1-2-3 ひずみ幅 d が発生した場合の検出器への X 線入射状況模式図

3.4.2 散乱線除去手法の開発

(1) 開発目標：

コリメータが無く散乱線が無視できない場合に備えて散乱線をソフト的に除去するアルゴリズムを開発する

(2) 開発内容：

- ①散乱線除去手法の調査
- ②コリメータなしの構成で発生する散乱線の種別、発生量の予測評価
- ③適切な散乱線除去手法の選択とその効果の予測

(ア) 散乱線の概要

散乱線(Scattering)とは、X線など放射線が物体を透過する際に、被検体と放射線エネルギーの相互作用で発生し、主たる事象は光電効果とコンプトン散乱である。光電効果は入射光子(フォトン)が原子の軌道電子を光電子として放出し、光子はエネルギーを失い消える現象である。コンプトン散乱では入射光子が物質内の電子との相互作用により反跳電子を放出し、その分エネルギーが減衰した光子が入射方向とは異なった方向に分布する。このような入射方向とは異なった方向に進む放射線が散乱線と呼ばれる。産業用のCTやDRで用いる200keV以上のX線エネルギーレベルではコンプトン散乱が主となる。

図 2-1-2-4 に、厚み t の被検体に X 線を照射した場合の散乱線の発生模式図を示した。透過する X 線の他に、被検体内部で進行方向が変化する 1 回散乱 X 線、多重散乱 X 線、後方散乱 X 線が存在する。これらを総称して散乱線と呼ばれる。

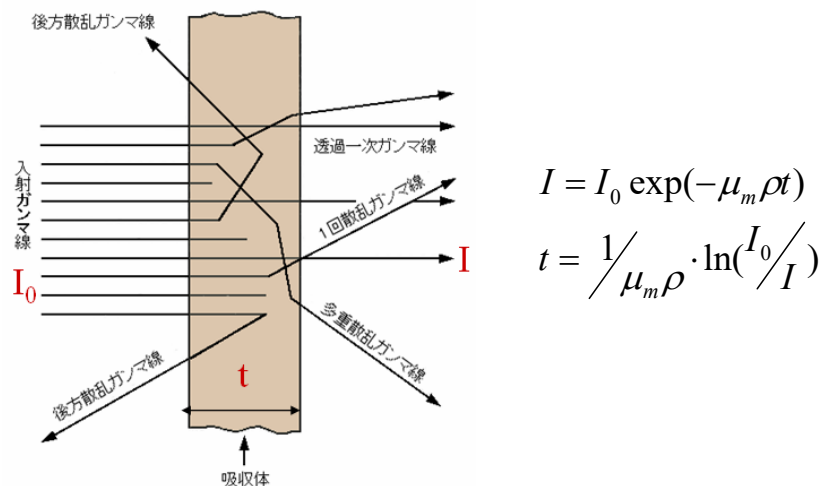


図 2-1-2-4 厚み t の被検体に X 線を照射した場合の散乱線の発生模式図

(イ) 従来の散乱線の再構成時における主な低減手法

これまで、医療及び産業用の X 線 CT/DR システムにおいて、種々の散乱線防止方法が開発されている。装置構成（ハード）での散乱線低減のアプローチが多く見られるが、検出器から出力される投影データから最終的な画像を得るまでの画像生成の各プロセスで散乱線を低減化させる手法も数多く提案されてきている。表 2-1-2-9 に画像生成の各プロセスでの主な散乱線防止方法を纏めた。今後、これらの散乱線防止方法の詳細を調査し、今回の超大型 X 線 CT 装置に最適な手法を選定および高度化して活用する。

表 2-1-2-9 画像生成の各プロセスでの主な散乱線防止方法

大分類		中分類	内容	主な文献
画像再構成プロセスでの散乱線低減対応方法	2-①	画像再構成段階での対応 (投影データの補正)	ファントム撮像による散乱線成分の定量化と除去	[1][2][3]
			原画像及びシミュレーションによる散乱線成分の定量化と除去	[4][5][6][7]
			ウェーブレット変換の多重解像度解析による散乱線成分除去	[8]
			点広がり関数(PSF)を用いたコンボリューション フィルタリング処理法	[9][10]
	2-②	画像再構成アルゴリズムでの散乱線低減	緩和型画像再構成アルゴリズム	[11]
	2-③	画像生成後の散乱線成分低減	ファジイ合成	[12]
			コントラスト強調処理	[13]
			ニューラルネットでの画像修正	[14]
			デジタルグレースケール法(DGF)	[15]

① 投影データ補正後の画像再構成

撮像により各検出器素子の投影データが得られるが、この投影データで散乱線成分を除去する手法が複数、提案されている。

- (i) 事前ファントム撮像による散乱線成分の定量化と除去
- (ii) 原画像およびシミュレーションによる散乱線成分の予測と除去
- (iii) 点広がり関数(Point Spread Function)を用いた畳み込みフィルタ法

② 画像再構成アルゴリズムでの散乱線低減

前述までの各種手法においては、CTにおける投影データ補正後の画像再構成は、既に確立されたFBP(Filtered Back Projection)法が用いられているが、S.Kasperlらは、逐次緩和法(Iterative Method)を用いて散乱線の影響低減を図っている^[11]。逐次緩和法は、各画素に適当な初期値を与え、透過X線ビームの投影データとビーム上に対応する再生画像の各画素の総和との誤差を求め、これを補正值として加算し、逐次再生画像の精度を高めてゆく再構成手法である。S.Kasperlらは、緩和計算における投影データ補正の過程で散乱線の効果を考慮し、最終画像で散乱線の影響を、ある程度まで除去している。

③ 画像生成後の散乱線成分低減

画像が得られた後に各種画像処理により散乱線成分を低減する試みもなされている。

- (i) コントラスト強調処理
- (ii) ファジイ合成処理
- (iii) デジタルグレイスケール法(DGF)

(ウ) 最新の量子モンテカルロ計算を用いた乱線の低減手法

A.Shiromaらは、X線源からの照射X線のスペクトル分布、検出器系のモデル化を実施し、さらに撮像対象被検体の3次元CADモデルを用いて、量子モンテカルロ計算により各検出器に入射するX線特性を詳細にシミュレーションする手法を開発している【16】。図2-1-2-5に、シミュレーションフロー図及びCT画像への適用例を示した。同図では、散乱線を低減したT画像が生成される事により、これらのCT画像から生成される3Dモデルにおいて欠落の無い完成度の高いモデルが得られることが示されている。本手法では、量子モンテカルロ計算に多大な計算機資源を必要とするためシミュレーション手法のみならず本手法の計算を実現させる計算機環境の構築が必須となる。

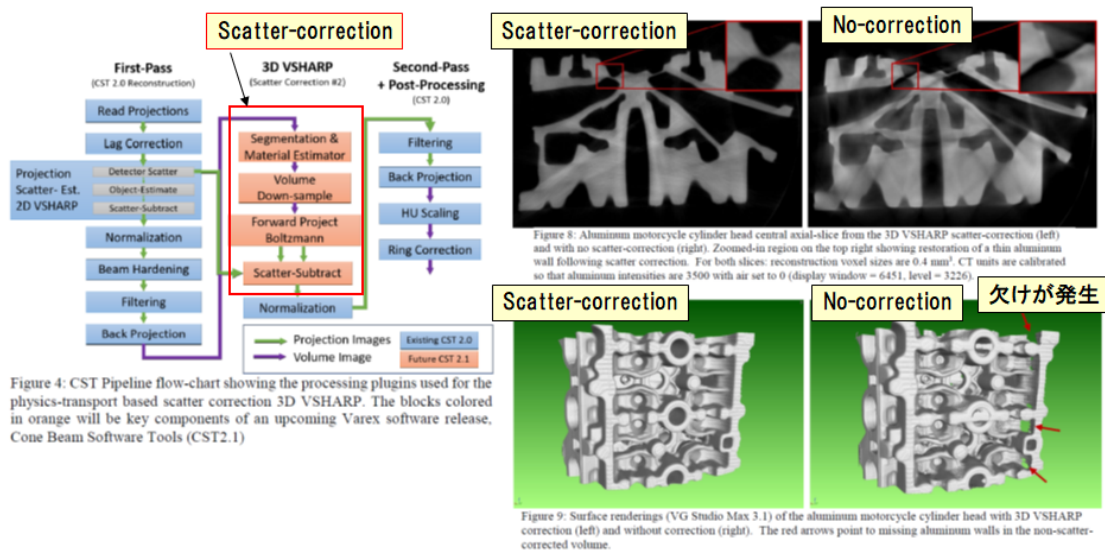


図 2-1-2-5 量子モンテカルロシミュレーションによる散乱線低減手法

- 【1】 Ergun, D.L., 他 5 名: Single-exposure dual-energy computed radiography-Improved detection and processing: Radiology, 174 (1), pp.243-249 (1990)
- 【2】 Hanna Goszczynska, 他 3 名: Estimation of the X-Ray Scatter and Veiling Glare Rate in Coronarographic Densitometric Measurements: Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc., Vol.22nd, No.Vol.3, pp.1714-1716 (2000)
- 【3】 Atila Ersahin: A Digital Filtration Technique for Scatter-Glare Correction Based on Thickness Estimation: IEEE Trans Med Imaging, Vol.14, No.3, pp.587-595 (1995.09)
- 【4】 haw, C.G., 他 2 名: A technique of scatter and glare correction for videodensitometric studies in digital subtraction: Radiology, 142 (1), pp.209-213 (1982)
- 【5】 Hanna Goszczynska, 他 3 名: Estimation of the X-Ray Scatter and Veiling Glare Rate in Coronarographic Densitometric Measurements: Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc., Vol.22nd, No.Vol.3, pp.1714-1716 (2000)
- 【6】 Frederic C. Wagner, 他 2 名: Effects of scatter in dual-energy imaging: An Alternative analysis, IEEE Trans Med Imaging, Vol.8, No.3, pp.236-244 (1989.09)
- 【7】 加藤秀起: デジタルX線画像の後処理による散乱線成分除去法: 日本放射線技術学会雑誌, Vol.62, No.9, pp.1359-1368 (2006.09.20)
- 【8】 塚本和也、他 5 名: コーンビームCT画像への散乱線の影響と画質改善: 医用画像情報学会誌, Vol.16, No.1, pp.20-28(1999,01)
- 【9】 馬場里香、他 4 名: コーンビーム3次元X線計測技術の開発、Medix, Vol.31, pp.42-47(1999.09)

【10】植田健、他 6 名：三次元機能で X 線診断治療を確信するコーンビーム CT 技術の開発と応用：日立評論、Vol. 88, No. 09, pp. 694-695 (2006. 09)

【11】S. Kasperl、他 3 名：Qualitätsverbesserung in der industriellen 3D Computertomographie: Presentation Material in Fraunhofer, (2004. 10)

【12】安井正一：パソコンによる核医学従事者から見た画像処理 ファジィ合成処理：日本放射線技術学会雑誌、Vol. 54, No. 7, pp. 919-923 (1998. 07)

【13】Christiaan Fizez、他 4 名：Multi-resolution contrast amplification in digital radiography with compensation for scattered radiation: Proc Int Conf Image Process 1996, Vol 1, pp. 339-342 (1996)

【14】Boone, John M., 他 2 名：Neural network scatter correction technique for digital radiography: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1231, pp. 462-471 (1990)

【15】R. Cowen、他 6 名：Digital grey-scale fluorography: A new approach to digital radiographic imaging.、Br J Radiol、Vol. 57, No. 678, pp. 533-538 (1984. 06)

【16】A. Shiroma, et al、Scatter Correction for Industrial Cone-Beam Computed Tomography (CBCT) Using 3D VSHARP, a fast GPU-Based Linear Boltzmann Transport Equation Solver、Proceeding of 9th Conference on Industrial Computed Tomography, Padova, Italy (ICT 2019)

3. 4. 3 再構成演算の高速化

(1) 開発目標：

最大画素サイズ 12,000×12,000 の CT 画像を 2 分以内で計算する再構成アルゴリズムとハードウェアの開発

(2) 開発内容：

① 最新再構成アルゴリズムの調査と選定

② 再構成演算ハードウェアの選定

③ 仮想投影データによる演算速度検証

超大型 X 線 CT 装置で得られる投影データを元に CT 画像を再構成する手法は大きく分けると以下の手法がある。

(1) 代数的再構成法 (Algebraic reconstruction technique: ART)

(2) フィルター補正逆投影法 (Filtered back projection: FBP)

(3) 逐次近似画像再構成法 (Iterative reconstruction: IR)

これらの中では、フィルター補正逆投影法が元も普及し、医療用/産業用ともに CT 画像再構成手法として用いられている。代数的再構成法、逐次近似画像再構成法ともフィルター補正逆投影法より計算時間を必要とするが、それぞれノイズ低減効果に特徴があり、前述の散乱線低減の観点からも再構成手法をせんとくする必要がある。さらに、近年、再

構成演算を高速化させるために、にグラフィックプロセッシングユニット）を用い、その性能を引き出すための特別な並列計算アルゴリズムを用いる再構成プログラムも現れている。超大型X線CT装置に用いる画像再構成手法としては、これらの研究開発状況を十分に調査し、仮想投影データによる演算速度検証により最適な再構成手法を選定してゆく。

3.4.4 3Dモデル化に適した再構成手法の活用検討

(1) 開発目標

既にあるエッジ強調再構成アルゴリズムの超大型X線CT装置への適用検討

(2) 開発内容

エッジ強調再構成アルゴリズムソフトによる再構成演算テスト

超大型X線CT装置では自動車全体撮像など、産業製品のCT撮像から各種CAE活用するための3Dモデル化が重要な計測データ処理プロセスになる。この観点から、大竹らは、CT撮像データからの3Dモデル化において、エンジニアリング的に重要となるエッジ部を高精度でモデル化可能な再構成手法を提案している【17】。本開発では、このエッジ強調再構成アルゴリズムソフトを超大型X線CT装置の画像再構成に適用し、得られた3DモデルのCAE活用における効果を、その他の再構成手法と比較検証する。

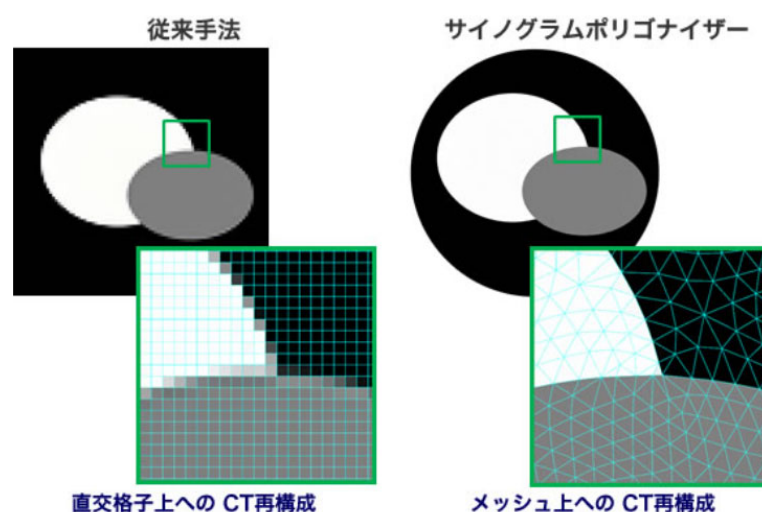


図 2-1-2-6 エッジ強調再構成アルゴリズムによる画像再構成例

【17】長井超慧、大竹豊、鈴木宏正、CT値の解析的微分によるCTボリュームからの高精度な表面抽出法、精密工学会学術講演会講演論文集 2019S (0), 105-106, 2019-03-01

4. 超大型X線CT装置における開発スケジュール

開発期間とスケジュールに関して、それぞれの項目について試算した結果を以下に示す。

4.1 X線源に関する開発スケジュール

表 2-1-2-10 X線源に関する開発スケジュール

開発項目	開発内容	R5/1Q	R5/2Q	R5/3Q	R5/4Q	R6/1Q	R6/2Q	R6/3Q	R6/4Q	R7/1Q	R7/2Q	R7/3Q	R7/4Q
1) 線量率アップ	①全体設計												
	②加速器シミュレーション												
	③ターゲット熱シミュレーション												
	④放射線シミュレーション												
2) 多方向照射試験	①要素設計												
	②要素試作												
	③全体組み立て												
	④ビーム性能試験												
3) X線源軽量化	①比較項目の整理												
	②加速器シミュレーション												
4) 加速器の具体的デザイン	①設計条件の整理												
	②全体設計												
	③試験結果に基づく設計見直し												
5) X線源の耐久性評価	①試験結果に基づく評価・検討												

4.1.1 線量率アップ

電子線形加速器の形状や全長、必要電力などを、電磁場シミュレーションソフトを利用して決定する。熱・構造解析のシミュレーションにより冷却効率のよいターゲットの構造を決定する。加速器・ターゲットのシミュレーションと並行して、放射線シミュレーションを進める。十分な線量率が得られるまで、加速器・ターゲット熱・放射線シミュレーションを繰り返す。これら三つのシミュレーションは初年度末をめどに終了させる。

4.1.2 多方向照射試験

初年度後半から二年目中頃にかけてX線源の姿勢を回転させつつビーム照射ができるX線源回転装置の設計ならびに試作およびX線源回転装置単体での動作試験を行う。三年目にはX線源を回転装置に組み入れ、全体をくみ上げる。X線源の姿勢を変化させながらビーム性能試験を行い、照射安定性を検証する。

4.1.3 X線源軽量化

初年度当初から、Sバンド、Xバンドについて項目の整理・比較を始め、半年を目途に終了させる。使用周波数が決定次第、「1) 線量率アップ」の加速器シミュレーションに反映させる。

4.1.4 加速器の具体的デザイン

初年度当初から、諸条件の整理を開始し、半年を目途に終了させる。初年度後半から二年目末にかけて全体設計を行う。三年目には諸々の試験結果に基づき設計を見直し、ガントリーに実装可能な最終デザインを決定する。

4.1.5 X線源の耐久性評価

X線源の寿命評価を三年目途中からに開始し、三年目末に評価する。

4.2 ガントリーに関する開発スケジュールとマイルストーン

表 2-1-2-11 ガントリーに関する開発スケジュール

開発項目	開発内容	R5/1Q	R5/2Q	R5/3Q	R5/4Q	R6/1Q	R6/2Q	R6/3Q	R6/4Q	R7/1Q	R7/2Q	R7/3Q	R7/4Q
1) ガントリー回転速度の最適化	①回転速度限界値と妥当性評価 ②速度起因の制約とリスクの抽出 ③機器及び制御機器の構想設計 ④妥当性確認												
2) ガントリーたわみ評価	①搭載機器と要件(機能・制約)の整理 ②搭載機器の配置検討 ③構想図の作成 ④解析シミュレーション												
3) たわみ計測手法	①三次元測定システムの選定・試用 ②X線線源位置推定法の開発 ③ガントリたわみ・検出装置位置模擬測定実験 ④リアルタイム測定実証実験												
4) スライド機構の構造成立性	①要求仕様の検討 ②検討項目の整理 ③基本構造・材料の検討 ④構想図の作成 ⑤解析シミュレーション												
5) ガントリー機構、スライド機構の耐久性評価	①高寿命摺動部品の市場調査 ②寿命評価と摺動部品の選定 ③メンテナンス項目抽出 ④メンテナンス方法の検討												

4.2.1 ガントリー回転速度の最適化

ガントリー回転速度の最適化のために、まずは回転速度限界値とその妥当性の評価を実施し、限界速度を決定している制約の洗い出し、また、リスク評価実施する。これにより回転ガントリー装置を構成する機器類や制御機器への要求事項が明確にできる。その後、

回転ガントリー装置の構想設計に反映し、最終的に妥当性確認を経て、回転ガントリー装置の詳細設計へとつなげる。

4.2.2 ガントリーたわみ評価

ガントリー回転速度の限界値が明確になった段階で、ガントリーのたわみ評価を進める。たわみ評価をするために、回転ガントリー装置に搭載される機器とそれら機器の制約要件（重量、サイズ、配線物量、など）をまとめる。その後、回転ガントリーに搭載する機器とカウンターバランスを含めた配置検討を実施する。その際、重心評価はもちろんであるが、回転する際の干渉チェックも重要となる。回転ガントリー装置と搭載機器を含めた構想設計を実施しながら、解析シミュレーションによるたわみ評価をし、たわみ補強を含めた最適な構造と搭載を検討する。

4.2.3 たわみ計測手法

ガントリーCT装置ではX線源と検出器の対の位置が、測定中に装置内で移動する。この移動に伴ってガントリーのフレームにたわみが生じ、1測定中におけるSRD、SDDが変動する。超大型X線CT装置ではX線源及び検出器の重量が大きいので、この変動量が無視できない。正確なX線CT測定のためには、これらの変動を補正して再構成を行う必要がある。

この補正では、測定中にガントリーフレームのたわみやX線源位置、検出器位置をリアルタイムに三次元測定して記録し、それぞれの撮像時におけるX線源と検出器の相対位置、SRD、SDDなどを求める必要がある。これらのデータを取得するシステムを構築するため、以下の開発を行う。

① 三次元システムの選定と試用

ガントリーのような構造物の三次元的な変形や、空間中の構造物位置・姿勢を測定するシステムは市販製品、開発中のものを含め複数存在している。これらは実際に土木、建築、防災、航空宇宙、造船などの分野で利用されている。これらのシステムのうち、超大型X線CT装置のたわみによって発生するX線源位置および検出装置位置の変化をリアルタイムに測定できるシステムを選定する。

令和5年度に、市販されている三次元測定システムのうちで以下の条件を満たすものを候補として選定し、リースなどによって試用する。

- 測定機本体から遠隔で三次元測定が可能
- 想定される大型ガントリーのリング程度のサイズを測定可能
- 測定分解能が、再構成演算の品質向上に必要となる変位測定精度の1/10より高い

ガントリーを稼働させながらフレームの変形などの三次元測定を行うために、フレームのたわみやX線源位置などを測定するための参照マーカと測定システムとは、物理的に分離されていることが望ましい。また、一台の測定システムだけでは、ガントリーの稼働時に参照マーカがシステムの死角に入ることが避けられない。そこで複数台の測定システムによるネットワークを構築し、X線CT測定中に参照マーカが必ず測定システムのネットワークで捕捉できるようにする。また測定システムのネットワーク化によって測定範囲を拡張し、大型ガントリーのリング全体を測定可能とする。

候補となるシステムによる参照マーカの三次元測定精度は、他のシステム（大型CMM、レーザトラッカなど）によって検証する。具体的には、構造物に取り付けた参照マーカ位置を大型CMMなどで測定し、その結果と三次元測定システムで測定した結果とを比較することで、測定精度を検証する。必要な変位測定精度を満たすことが期待されるシステムを、模擬測定実験に使用する。

模擬実験によって、実際の超大型X線CT装置のたわみ測定の実施する際の必要な運用条件（測定システムの台数と配置、参照マーカの数と配置、ガントリー設置場所での測定システムのキャリブレーションなど）および技術的問題点の洗い出しを行い、令和5年度末に三次元測定システムの最終的な選定を行う。

② X線源位置推定法の開発

再構成演算の品質向上のためには、X線源（点光源）の位置を推定しなければならない。ここで計算上の線源位置は線源装置の内部にあり、外部からその位置を直接測定することができない。超大型X線CT装置で使用されるX線源装置の図面が開示された場合、線源装置の外形と線源位置との大まかな位置関係を求めることができる。しかしその場合でも、装置部品の加工寸法誤差や組付け誤差（許容される公差）の影響により、正しいX線源位置は設計位置に対して誤差を持つ。そのため線源装置の筐体上に取り付けた複数の参照マーカの位置データから、その内部にあるX線源位置を高い精度で推定する方法を開発する必要がある。

令和5年度に、参照マーカが取り付けられたX線源装置筐体と内部X線源のモデルを構築する。三次元測定システムで取得した参照マーカの位置データから線源筐体の6自由度位置、姿勢を算出し、筐体上に設定された座標系におけるX線源（点光源）の位置を推定する方法を開発する。

③ ガントリーたわみ・検出装置位置測定模擬実験

事前の検討で候補とした測定システムを使用して、ガントリーフレームのたわみ及び検出装置位置の測定を模擬した実験を行い、選定した測定システムが超大型X線CT装置の補正に使用可能かの検証実験を行う。実際に大型構造物を変形させる実験には多大なコストを要するため、参照マーカを取り付けた小型ステージを超大型X線CT装置が設置され

る環境と類似した環境（工場建屋など）に設置し、小型ステージを駆動して参照マーカに変位を与え、これを三次元測定システムで検出する実験によって代替する。

令和５年度中に最初の検証実験を行い、候補である測定システムの実用性、実効性について追加検討を行う。使用する測定システムを再検討して決定した後、令和６年度前半に追加の検証実験を行い、選定したシステムがオフライン測定による超大型X線CT装置の補正に使用可能かを確認する。

④ リアルタイム測定実証実験

令和６年度後半より、超大型X線CT装置を模した設備を使用して、補正のためのリアルタイム測定が実行可能かの実証実験を行う。実証実験に使用する模擬設備のフレームのたわみなどは、事前に選定した三次元測定システムによってオフライン測定を行い、補正テーブルを作成しておく。

フレーム変形検出システムおよび回転中心軸変動検出システムを組み込んだ模擬設備を使用し、補正データ取得のためのリアルタイム測定実験を行う。模擬設備は実際に制作される超大型X線CT装置よりも小さいため、模擬設備で発生するフレーム変形および回転中心軸変動の大きさも実際の超大型X線CT装置より小さい。そのため実証実験では模擬設備に外力を加え、超大型X線CT装置で発生が想定される大きさの変形、変動を再現してリアルタイム測定を行う。

令和７年度末までに実証実験を完了し、実際に作成される超大型X線CT装置上でのフレーム変形検出システムの運用方法および回転中心軸変動検出システムの組み込み方法を決定し、超大型X線CT装置の作成に反映させる。

4.2.4 スライド機構の構造成立性

まずスライド機構を構成する機器類の要求仕様を検討する。スライド機構については、何種類かの実現方法があるが、それぞれの方法によって要求仕様に対応した検討事項を整理する。また、スライド機構はガントリー内の開口部で分断される構造をもつため、その剛性確保が重要な技術開発事項の一つであり、剛性を確保するための基本構造とスライド機構の材料選定を実施する。これらの検討の後、解析シミュレーションのための構造図を作成し、解析シミュレーションを実施しながら、より詳細に剛性確保のための検討を実施する。

4.2.5 ガントリー機構の耐久性評価

まず初めに、回転ガントリー装置の高稼働を支える摺動部品に対して、高寿命の物を市場調査し、寿命評価と選定を実施する。その後、回転ガントリー装置、スライド機構に対するメンテナンス項目の抽出とメンテナンス方法を検討し、それぞれの機器の詳細設計に繋げる。

4.3 検出装置に関する開発スケジュールとマイルストーン

表 2-1-2-12 検出装置に関する開発スケジュール

開発項目	開発内容	R5/1Q	R5/2Q	R5/3Q	R5/4Q	R6/1Q	R6/2Q	R6/3Q	R6/4Q	R7/1Q	R7/2Q	R7/3Q	R7/4Q
1) 設計仕様検討用CTシミュレータ整備	① 既存シミュレータの調査	■	■										
	② CTシミュレータの選定		▲										
	③ CTシミュレータのカスタマイズ 又は新規開発			■	■	■	■						
	④ CTシミュレーション試験							■	■	■	■		
	⑤ 実機シミュレーション										■	■	■
2) コリメータ有無の評価	① 検出器への散乱線混入試験 (要素試験)	■	■	■									
	② シミュレーションによる要素試験 の追従				■	■	■						
	③ 散乱線シミュレーション					■	■	■	■				
	④ CTシミュレーション試験									■	■	■	■
3) 次世代の検出器開発	① 検出器の動向調査	■	■										
	② 次世代検出器の高エネルギー評価 (シミュレーション)			■	■	■	■						
	③ 次世代検出器の高エネルギー評価 (要素試験)							■	■	■	■	■	■

4.3.1 設計仕様検討用CTシミュレータ整備

設計仕様検討用CTシミュレータを整備するにあたり公開されているCTシミュレータの調査をR5年度初期に開始し、CTシミュレータを選定する。選定したCTシミュレータに対して超大型X線CT装置に適用するためのカスタマイズを約1年かけて実施する。一方、超大型X線CT装置の開発に使用できるものが無い場合は、CTシミュレータの新規開発を実施する。CTシミュレータ完成後、そのCTシミュレータの検証を実施し、シミュレータとしての信頼性を確認する。その後、実機シミュレーションを実施する。

4.3.2 コリメータ有無の評価

コリメータ有無の評価をするために、高エネルギーX線を用いた散乱線混入試験（要素試験）を実施し、その後、シミュレーションによる要素試験の再現をする。シミュレーションでの再現ができるようになった後、超大型X線CT装置での散乱線シミュレーションを実施し、その結果をCTシミュレータに入力することで散乱線がある場合の画質評価が可能となる。コリメータの有無、すなわち散乱線の有無による画質を比較し、最終的にコリメータを実装するか、また効果的なコリメータ構造を検討し、実機製作に反映する。

4.3.3 次世代検出器の開発

次世代検出器の開発にあたって半導体による検出器だけでなくシンチレータを含めた技術動向調査を実施、高エネルギーX線であって、かつ、超大型X線CT装置に適用可能性

のある検出器を選定する。次に、それらの検出器についての検出器特性を、シミュレーションを用いて評価し、さらに要素試験により検出器特性を確認していく。

次世代検出器に関しては、その後も開発を継続し、超大型X線CT装置の次世代機での適用を図っていく予定である。

4.4 再構成に関する開発スケジュールとマイルストーン

表 2-1-2-13 再構成に関する開発スケジュール

開発項目	開発内容	R5/1Q	R5/2Q	R5/3Q	R5/4Q	R6/1Q	R6/2Q	R6/3Q	R6/4Q	R7/1Q	R7/2Q	R7/3Q	R7/4Q
1) ゆがみ補正	①計測変位量に基づく検出器入射フォトン量補正方法の構築												
	②補正効果検証基礎試験												
	③CTシミュレータを用いた変位補正を考慮した画像再構成評価												
2) 散乱線除去	①散乱線除去手法の調査												
	②コリメータなしの構成で発生する散乱線の種別、発生量の予測評価												
	③適切な散乱線除去手法の選択と除去効果の検証												
3) 再構成演算の高速化	①最新再構成アルゴリズム調査と選定												
	②再構成演算ハードウェアの選定												
	③仮想投影データによる計算速度検証												
4) 3Dモデル化に適した再構成	①エッジ強調再構成アルゴリズムソフトによる再構成演算テスト												

4.4.1 ゆがみ補正

ゆがみ補正を考量した再構成手法の構築では、まず、①計測変位量に基づく検出器入射フォトン量補正方法の評価式導出と簡易プログラムによる検証をR5年度で実施し、R6年度前半で実用プログラムを構築する。その後、この構築手法を②補正効果検証基礎試験によりR6年度後半からR7年度で実証する。並行して、R7年度には③CTシミュレータを用いて変位補正を考慮した画像再構成システムを検証する。

4.4.2 散乱線除去

散乱線除去方法の開発では、まず、R5年度前半で①最新の散乱線除去方法の調査を実施する。その後、②コリメータ無しの構成で想定試験体に対して発生する散乱線の種類の識別、発生源の予測評価をシミュレーションにより実施する。①、②で得られた結果を基に③適切な散乱線除去手法の選択と効果の検証をR6年度後半以降に実施する。

4.4.3 再構成演算の高速化

再構成演算の高速化では、まず、R5年度前半で①最新の再構成アルゴリズムの調査と今回の超大型X線CT装置に適した手法を選定する。その後、選定手法に最適な再構成演算ハ

ードウェアを設定する。R5 年度からは、選定した再構成アルゴリズムとハードウェア装置により、C Tシミュレータにより得られる投影データを用いて再構成演算速度を検証する。

4.4.4 3Dモデル化に適した再構成手法の活用

3 Dモデル化に適した再構成手法の活用では、再構成ハードウェア装置導入後、エッジ協調型再構成アルゴリズムにより再構成演算テストとその効果を評価する。

2-② 超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術の高度化調査

超大型X線CT装置により得られたCT画像(断層画像・3次元画像)を、欠陥検出やシミュレーション等の多様な目的で活用するためには、CT画像を高画質化することが基本的に重要であり、その基盤となる画像処理技術を研究開発する必要がある。また、形状幾何測定や、リバーズエンジニアリングなどの応用で必要な情報をCT画像から抽出するためには、様々な画像分析・測定・検査技術やモデリング技術について研究開発を行う必要がある。

本事業では、このような画像処理の高度な基盤技術開発の研究動向について文献を中心に調査を行い、令和5年度以降の新機構における研究計画を策定する。

2-②(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査

本調査を実施するにあたり、12名の委員からなる分科会を組織した。以下のリストに示す通り、委員は画像分析・測定・検査技術やモデリング技術に関する研究者である。

- W学校： 画像処理、画像解析、画像評価
- D大学[分科会委員長]： 形状処理、CG、X線CT
- X大学： CG、形状モデリング、可視化、機械学習
- D大学： 形状モデリング、生産・設計工学、X線CT
- Y大学[分科会幹事]： 形状モデリング、X線CT、計算幾何学
- X大学： 物理シミュレーション、最適化計算
- X大学： CG、並列計算、機械学習
- X大学： 形状モデリング、CG、偏微分方程式
- 産業技術総合研究所： 幾何形状計測、X線CT、不確かさ評価
- 理化学研究所： 形状モデリング、画像処理、大規模データ処理
- Z大学： 実時間レンダリング、形状処理、機械学習
- X大学： ソフトウェア工学、メタデータ、プログラミング言語、文化財

全委員により、画像処理技術に関する研究動向調査(1.)、CT技術の応用における有識者を招いてのセミナーとディスカッション(2.)を行った。加えて、コアメンバでCT技術に関連する業務を行っている企業を訪問し、現場で必要とされている技術のヒアリング(3.)を行った。以上の調査を基にして、新機構における研究計画(4.)と教育活動(5.)を策定した。

1. 画像処理に関する研究動向調査

各委員において、その専門分野に関連した画像処理技術に対しての研究動向調査を行った。以下、12分野に関する調査報告である。

1-A CT再構成法に関する研究調査報告

CT再構成とは、ワークを回転させながらX線投影を行うことにより得られるX線投影データを入力として、CT画像を出力する計算手法である。CTスキャンには必須技術であるため、古くから研究されている。特に医用CTにおいては、低被ばくCTスキャンを実現するために現在でも盛んに研究が行われている。

本報告では、産業用CTへの応用も視野に入れつつ、CT再構成法の最新アルゴリズムに関する調査を行った。対象とした研究は一貫して、少数投影(X線投影数が少ない状況)とノイズ(X線の露光時間短縮)への頑健性向上を目的としている。具体的には、以下の4つの研究に関しての調査を行った。

1. 最適化手法の改良による高速化
2. 機械学習を用いた再構成法
3. 研究2に類する技術の産業用CTへの有効性の実証
4. CT再構成結果をニューラルネットワークで表現する手法

1. TV 正則化CT再構成計算の高速化

[キーワード: 逐次CT再構成法、TV 正則化、計算の高速化、ラグランジュ双対性]

Hiroyuki Kudo, Fukashi Yamazaki, Takuya Nemoto, and Keita Takaki, “A very fast iterative algorithm for TV-regularized image reconstruction with applications to low-dose and few-view CT”, Proc. SPIE 9967, Developments in X-Ray Tomography X, 996711, 2016.

TV (Total Variation) とは、画像勾配の 2-ノルムの総和であり、画素値が区分的に一定(ノイズが小さく、かつエッジが鮮明)な時に小さくなるため、画質の評価値としてよく用いられる。TV を小さく保って(TV 正則化)CT再構成を行うことにより、高い画質のCT画像を得ることができる。低被ばく医用CTのみでなく、例えばドイツ大型産業用CTである XXL-CT でも、投影数を少なくしてスキャン時間を短縮する目的で採用されている手法である。

TV 正則化を考慮したCT再構成法は最適化問題として定義され、その最小化には反復計算が必要となる。これまでに数多くのアルゴリズムが提案されてきているが、多くの繰り返し計算が必要であり、時間的計算コストが高いことが問題視されている。その問題解決のために、本論文では最適化手法の一種であるラグランジュ双対性に基づく最適化アルゴリズムを新た

に提案している。CT画像に対しての最小化問題、およびラグランジュ未定乗数に対する最大化問題を同時に行う立式がなされており、2種類の変数を交互に更新することにより劇的に少ない反復回数で高い精度の解が得られている。論文中では、2次元CTスキャンのデータを用いて、十分な数の投影数でノイズが多い状況、投影数が少ない状況において、比較実験が行われておりその有効性が実証されている。

超大型X線CT装置で得られた画像への適用を考えた際の問題点としては、変数の追加による計算スペースの増大が考えられる。ただし、そのサイズは投影データに比例しており、少数投影問題においては大きな障害にはならない。また、コーンビーム型三次元CTへの適用も可能であると考えられる。

2. 機械学習手法を用いたCT再構成法

[キーワード: ラドン逆変換、CT再構成、事前学習、深層学習による画質向上]

Ji He, Yongbo Wang and Jianhua Ma, "Radon Inversion via Deep Learning," IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 39, no. 6, pp. 2076-2087, 2020.

CT再構成法で最も多く採用されている手法は、フーリエスライス定理により導出されたフィルタ補正逆投影法 (FBP) であり、並列計算により高速に計算可能である。ただし、十分な投影数が必要であり、ノイズへの頑健性も低い。本論文では、再構成の頑健性向上を目的として、FBP を模したネットワークによる機械学習手法を導入している。加えて、再構成結果のノイズを減らすために、CT画像に対しての深層学習による画像処理ネットワークも追加して出力画像を得る。

投影データから一時CT画像を再構成するネットワークが本手法の独自性であり、1層の全結合を二つ組み合わせたものとなる。各ネットワークはそれぞれ、回転ボケ除去フィルタ (Ram-Lak フィルタなど) を模擬した検出器方向の全結合、検出器から再構成画素への逆投影 (1 回転分の積分) を模した全結合となっており、FBP を一般化したものとなる。後段の画像処理ネットワークは、畳み込みと活性化層を連ねたごく一般的なネットワーク構成となっている。計算機実験においては、FBP と TV 正則化法との比較を行っており、FBP からの精度向上、および短時間で TV 正則化法と同等精度の結果を得ることができた点が主張されている。また、前段の再構成ネットワーク構成に関しては二つの全結合一層のみでなく、他のネットワーク構成を採用した場合の議論もなされている。

本手法の超大型X線CT装置で得られた画像処理への有効性は期待できるものではあるが、事前学習が必要であり、学習データに結果が左右されることが懸念点である。また、後段の深層学習ネットワークを 3D 化した場合には、その計算コストが非常に大きくなることが予想される。

3. 研究 2 に類する技術の産業用CTへの有効性の実証

[キーワード: 深層学習、寸法測定、X線顕微鏡]

Herminso Villarraga-Gómez, Andriy Andreyev, Matthew Andrew, Hrishikesh Bale, Ravikumar Sanapala, Masako Terada, Allen Gu, Bruce Johnson, Lars Omlor, and Christoph Graf vom Hagen, “Improving scan time and image quality in 3D X-ray microscopy by deep learning reconstruction techniques”, 36th ASPE Annual Meeting, vol 75, pp. 361-366, 2021.

本研究は先に述べた機械学習技術によるCT再構成法を産業用CTで採用した報告である。n社の三次元X線顕微鏡へ組み込みを予定した再構成手法であるため、残念ながらその詳細なアルゴリズムは不明であるが、その有用性が実証されている。特にCTスキャンを高解像度で行う場合には、X線の焦点サイズを絞るためX線の照射量を抑える必要があり、投影データのノイズが大きくなる。それを避けるためには、露光を長時間行うこととなるが、スキャン時間が長くなることを避けるために、なるべく少数の投影データから高品質なCT画像を得る技術の需要は高い。

本手法はコーンビーム型三次元CTスキャンでの実験結果が示されており、三次元版のフィルタ逆投影であるFDKとの比較がなされている。FDKでの難しい少数投影データから高品質なCT再構成を実現しており、またボリュームレンダリング結果より形状抽出の精度向上も期待できる。

4. CT再構成結果をニューラルネットワークで表現する手法

[キーワード: CT再構成、機械学習、適合的空間分割]

Darius Rückert, Yuanhao Wang, Rui Li, Ramzi Idoughi, and Wolfgang Heidrich, “NeAT: Neural Adaptive Tomography”, ACM Transactions on Graphics, vol.41, no. 4, article no.: 55, pp 1-13, 2022.

本研究ではMLP(Multi Layer Perceptron)を八分岐用いてCTボリュームを表現し、X線透過像列からのCT再構成を実現する手法である。加えて、計算の効率化のために八分木構造を用いる点も特長となっている。なお、本手法は機械学習法の一つであるが、自己教師付き学習法に分類されるため、トレーニングされたMLPは入力のX線透過像列からの再構成に特化しており、他の入力に転用することは前提となっていない。

論文中の検証実験においては、上記のTV正則化CT再構成法よりも正解に近い再構成結果を得ることができている。また、角度制限スキャンにおいても優れた再構成能力を有していることが示されている。

1-B X線CTデータ可視化のための伝達関数設計に関する研究調査

一般的に、CTなどから得られるボリュームデータの可視化には ray-casting 手法が使われるが、その質はボクセルの値から色と不透明度に変換をする伝達関数の設計をどのように行うかに大きく依存する。手による伝達関数の設計は、その解の探索空間が膨大であるため、データに対する知識がない人にとっては非常に難しい。そのため、伝達関数設計の自動化は、可視化分野における重要な技術的問題のひとつとされており、長きに渡って研究が進められている。

伝達関数設計手法は、大別して画像駆動手法とデータ駆動手法がある。画像駆動手法は、可視化結果画像を用いて伝達関数設計を行うもので、ユーザーが所望の可視化画像を選択すると、それを参照して良い可視化画像を探索する進化計算を用いたものが例である。近年の機械学習を用いたものは画像の学習を用いるものが多く、画像駆動手法に大別されることが多い。これに対して、データ駆動手法は、ボリュームデータ解析を介して伝達関数設計を実現するもので、特にデータの特徴抽出などを介した構造セマンティクスを意識した手法が多々提案されている。

さらに、対象のボリュームデータのカテゴリに応じた伝達関数設計手法も、検討されている。特に可視化分野では、CTなどで得られる計測データやシミュレーションを介して得られるシミュレーションデータなどは、様々な手法が提案されている。これに対して、CAD などの設計分野で得られるモデルデータは、部品などの特徴を意識した伝達関数設計の研究があまり多くないのが現状である。

以下は、様々な手法で得られるボリュームデータの特徴をセマンティクスとしてとらえる伝達関数設計について調査を行った。

1. ボリュームデータの構造的セマンティクスをもちいた伝達関数設計インタフェース

[キーワード: 伝達関数設計、構造的セマンティクス、データ駆動アプローチ]

C. R. Salama, M. Keller, P. Kohlmann, “High-Level User Interfaces for Transfer Function Design with Semantics,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 12, No. 5, pp. 1021-1028, 2006.

ボリュームデータ可視化において、熟練者が設計した個別の特徴を強調する伝達関数から、構造的セマンティクスを反映するパラメータを定義することで、伝達関数設計のパラメータ調整の自由度を効果的に低減している。具体的には、ある特徴を強調する複数の伝達関数テンプレートをそれぞれパラメータの高次元ベクトルで表し、主因子分解により得られる主軸方向に限定してパラメータ値を制御することで、少ない自由度で個々のボリューム特徴を強調可能な伝達関数を定義した。

本手法は、伝達関数を定義する可視化パラメータを、特徴に適応的に対応する少ない数のパラメータに変換することで、その自由度を効果的に削減している。結果、ユーザーが少ない数のパラメータを調整することで、特徴を強調できる伝達関数設計を実現している。

2. スペースコーディングを用いたボリューム可視化手法

[キーワード: 伝達関数設計、スパースコーディング、データ駆動アプローチ]

Tran Minh Quan, Junyoung Choi, Haejin Jeong, Won-Ki Jeong, “An Intelligent System Approach for Probabilistic Volume Rendering using Hierarchical 3D Convolutional Sparse Coding,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 24, No. 1, pp. 964-973, 2018.

入力ボリュームデータを、前処理で予め多重スケールの畳み込みフィルターを用いてスパースな特徴ベクトルを計算し、ボクセルごと分類クラスを表す辞書を作成する。そして、ユーザーが指定したボリューム部分領域から、ランダムフォレストを用いて、必要なクラスを含むボクセル集合を求め、可視化結果を出力する。特徴クラスごと色と不透明度を指定する伝達関数が用いられ、従来手法よりも可視化結果におけるノイズの低減を実現できる。

3. 深層学習による対話的ボリューム可視化手法

[キーワード: 伝達関数設計、深層学習、画像駆動アプローチ]

Fan Hong, Can Liu, Xiaoru Yuan, “DNN-VolVis: Interactive Volume Visualization Supported by Deep Neural Network,” in Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis 2019), pp. 282-291, 2019.

ボリュームデータ可視化結果を、伝達関数を陽に設計することなく、深層学習を用いた敵対的生成ネットワーク(GAN)を基本モデルとして採用した手法を提案している。このモデルは、視点位置と伝達関数の情報をもつ2つの画像から可視化画像を出力する畳み込みネットワーク(CNN)が含まれる生成ネットワーク(generator)部分と、視点位置と伝達関数の2つの指標の模倣の質に加えて可視化画像そのものの質を判定する3つの識別ネットワーク(discriminator)で構成されている。

本手法の特筆すべき点として、(1) ResNet で見られるような、ニューラルネットワークの層を飛び越えて画像特徴をエンコーダからデコーダを直接送る skip connection を生成ネットワークに導入していること、(2)視点位置を指定する画像、伝達関数を指定する画像に加えて、生成ネットワークで得られる画像の3つの画像情報から3つの識別ネットワークが連動して可視化画像の質を高める仕組みがあることが挙げられる。

4. 畳み込みネットワークによるラベル学習を用いた画像ベース伝達関数色割り当て手法

[キーワード: 伝達関数設計、伝達関数ラベル学習、画像駆動アプローチ]

Seokyeon Kim, Yun Jang, Seung-Eock Kim, “Image-Based TF Colorization with CNN for Direct Volume Rendering,” IEEE Access, Vol. 9, pp. 124281-124292, 2021.

画像を分割して得られる小区画に対応する特徴ラベルを、畳み込みネットワークを用いて学習する。その後、輝度値と勾配による2次元の伝達関数の定義域のグリッド区画ごとに、学習済みネットワークを用いてラベルを対応付ける。同時に参照画像を小区画に分割し、学習済みネットワークを用いてそれぞれのラベルに分類して、ラベルごとに主要な色を対応付け

る。以上の手順で得られた、グリッド区画ごとの色伝達関数を用いて、対象ボリュームデータの可視化画像を生成する。

可視化画像を生成するための伝達関数における色や不透明度を決定する際、グリッド小区画ごとにラベルを振ることで、与えられたボリュームデータのセマンティクスを理解できる点において、完全なブラックボックス化した手法ではないことと、画像駆動手法とデータ駆動手法の両方の側面をあわせもつ点が、本手法の特徴として挙げられる。

1-C 高エネルギーX線CTに関する研究調査

高エネルギーX線を用いたCTスキャンでは、その透過力により、今まで扱えなかった高密度素材や大型の物体の計測が可能である。本報告では、高エネルギーかつ大規模なCTスキャンを実現する装置であるXXL-CTに注目し、装置の概説と、得られるCT画像の特徴に関する論文を紹介する。また、高エネルギーCTの観点から、アーチファクト、計測精度を保証するための専用器物、CT再構成法、計測物の姿勢を固定する治具について論じた文献を紹介する。

1. 航空宇宙産業の応用に向けた高エネルギーX線イメージング

[キーワード High energy X-ray, Computed Tomography, LINAC (Linear Accelerator)]

Michael SALAMON, Gerald ERRMANN, Nils REIMS, Norman UHLMANN, “High Energy X-Ray Imaging for Application in Aerospace Industry,” Proc. 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012, Tu.4.A.2, 2012

<http://2012.ndt-aerospace.com/Portals/aerospace2012/BB/tu4a2.pdf>

これまで一部の非破壊検査でしか利用されてこなかった高エネルギーのX線源が一般的に利用できるようになってきた。エネルギーの低いX線源では透過力不足であったために限定的であった産業用X線CT分野に適用することによりCTの利用範囲が大きく広がる可能性がある。高エネルギーX線源を用いた超大型の高エネルギーX線CT 装置を持つ、O 研究所のXXL-CTについて、その装置の概要を説明し、また、試撮した結果によって高エネルギーX線の有用性を評価している。

2. 高エネルギーCTシステムを用いた応用と方法論

[キーワード High energy X-ray, Computed Tomography, beam hardening artifact, metal artifact]

Michael SALAMON, Michael BOEHNEL, Nils REIMS, Gerald ERMANN, Virginia VOLAND, Michael SCHMITT, Norman UHLMANN, Randolph HANKE, “Applications and Methods with High Energy CT Systems”, Proc. 5th International Symposium on NDT in Aerospace 2013

https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/36_Salamon.pdf

高エネルギーX線CTの撮像能力について、線源のX線スペクトルと物質の線源弱係数のエネルギー依存性との関係から、CT画像における線質硬化アーチファクトやメタルアーチファクトの低減について論じている。高エネルギーX線源は数 MeV の帯域のスペクトルをもつ。この帯域では、線源弱係数はエネルギーに対してかなりフラットな特性、すなわちエネルギーに対してコンスタントな性質を持つ。したがって、ビームハードニングが起きにくくなり、また線源弱係数を表すCT値も、密度の小さい材料から大きい材料に対して忠実な値を取るようになる。一方、散乱による減弱が支配的になるため、撮像においては散乱線対策が重要となる。このようなXXL-CTの特徴に加えて、多種類の材質の部品を含む例などによって、その有効性を

実証している。

3. 大規模高エネルギーCTシステムの定量的特徴付けのための方法論

[キーワード: High energy X-ray, Computed Tomography, metrology, dimensional measurement]

Michael BÖHNEL, Andreas GRUBER, Nils REIMS, Michael SALAMON, “Methods for Quantitative Characterization of Large-Scale High Energy Computed Tomography Systems,” , Proc. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague 2014, Oct 6-11 (ECNDT 2014), 2014

<https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=16704>

産業用X線CTでは、非破壊検査に加えて部品の寸法計測は重要な応用である。そのためには、CT画像から寸法を求めるだけでは不十分で、その寸法値の確からしさ、つまり、寸法値の精度(誤差)を見積もることが必要になる。具体的には、高精度で作成した器物を用意し、その寸法を高精度な接触式測定器などによって測定した寸法値とX線CTで測定した寸法値を比較して精度を評価する。このような器物は、一般の産業用X線CTには用意されているが、本研究では高エネルギーX線CT である XXL-CT の評価のための器物を提案し、その評価結果について示している。水平方向については、数 mm 程度の誤差、高さ方向に浮いては数 100 μ m 程度の誤差であることを示している。

4. 高エネルギーCTによる超大型物体の効率の良いスキャンと再構成の戦略

[キーワード High energy X-ray, Computed Tomography, Compton scattering, multi-material objects]

Nils Reims, Tobias Schoenb, Michael Boehnela, Frank Sukowskia and Markus Firschinga, “Strategies for Efficient Scanning and Reconstruction Methods on Very Large Objects with High Energy X-ray Computed Tomography,” Developments in X-Ray Tomography IX, edited by Stuart R. Stock, Proc. of SPIE Vol. 9212, 2014

[doi: 10.1117/12.2062002](https://doi.org/10.1117/12.2062002)

高エネルギーX線CT XXL-CTで超大型の物体を計測する際には、コンプトン散乱が減弱の主要因であることを示し、その対策として、1次元検出器は上下方向の散乱線をカットするために有効であることを議論している。散乱線をカットすることにより、減弱が透過長と密度の積に比例するようになることから、物体が複数の材質を持つ場合の画像生成に有効であることを述べている。

その一方で、1次元検出器では、物体を1断層ずつスキャンするので、その時間が大きくなる問題がある。その問題を解決する方法の一つとして、ビュー数を減らすことが有効であるがアーチファクトが発生する問題があった。本研究では、XXL-CTの撮像に対して Compressed Sensing 法によりビュー数を減らしても画質が改善できることを示しており、具体的には SRAT

(simultaneous ART (algebraic reconstruction techniques) 法を適用した結果を示している。

5. 現代の電気自動車の検査に対する XXL-CT の能力

[キーワード: High energy X-ray, Computed Tomography, EV battery, scanning orientation]

Michael SALAMON, Nils REIMS, Michael BÖHNEL, Katrin ZERBE, Michael SCHMITT, Norman UHLMANN, Randolph HANKE, "XXL-CT capabilities for the inspection of modern Electric Vehicles," Proc. International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography - DIR2019, 2019

<http://www.ndt.net/?id=24754>

高エネルギーX線CT 装置である XXL-CT においては、近年、電気自動車をスキャンする要望が高くなっている。これまでは車両を水平に平置きしてスキャンすると、X線の透過長が長くなり、車両の底部は金属部品が多いので画質が劣化する。特に電気自動車をスキャンする場合には電池などの観察が難しくなってしまう。そこで、車両をフレームに入れて垂直に立ててスキャンする方法を提案し、それによって画質が向上し、電池などの撮像が可能になったことを示している。

1-D 教師なし深層学習による画像データのノイズ除去法

画像データには、その取得方法に応じて、不可避免的にノイズが生じるため、そのノイズの除去法は、デジタル画像の入手が可能となった 1900 年代後半から信号処理分野における中心的な研究の一つである。近年では、教師付きの深層学習だけでなく、教師を必要とせず、ノイズ付きの画像だけでニューラルネットを訓練するノイズ除去手法が大きな注目を集めている。本報告では、その分野の先駆的研究である Deep Image Prior 法（論文番号 1）および Noise2Noise 法（論文番号 4）について、その概要と近年発表された発展的手法について紹介する。

[キーワード: 深層学習, 教師なし学習, 画像補正, ノイズ除去]

※前置き

本報告では、複数の画像を訓練に用いるが、正解となるノイズなし画像を用いない手法に「教師なし学習」とラベル付けしてある。その中で、学習データセットのような複数画像を使うのではなく、処理対象となる 1 枚のノイズ付き画像だけを扱うものには「単一画像のみ利用」とラベル付けしている。

1. 単一画像のみを入力とした CNN による画像補正（単一画像のみ利用）

Dmitry Ulyanov, Andrea Vedaldi, and Victor Lempitski, “Deep Image Prior,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018
[\[arXiv\]](#)

本論文では、このような特徴を利用することで、畳み込みニューラルネット(CNN)がノイズのような構造を持たない特徴よりも、自然画像に現れるような一定の特徴を早く学習するという特徴を利用して、ノイズ画像 1 枚だけを入力としたノイズ除去を実現している。通常、CNN はデータの学習によって獲得された畳み込みカーネルを画像全体に適用する。従って、このようなカーネル関数は画像全体に普遍的に現れるような特徴量を取り出すようなものでなくてはならず、その結果、一定の構造を持つような特徴を早く学習するという特徴がある。本論文ではノイズ除去だけでなく、この特徴が、画像の補完や超解像にも利用可能であることを示している。

2. Langevin Monte Carlo 法を用いた DIP 法の収束安定化法（単一画像のみ利用）

Zezhou Cheng, Matheus Gadelha, Subhransu Maji, and Daniel Sheldon, “A Bayesian Perspective of the Deep Image Prior,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019 [\[arXiv\]](#)

本論文では、DIP 法の課題であるノイズへの過剰適合を、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)の一種である Langevin Monte Carlo 法により解決している。本論文では、DIP 法をベイズ的な枠組みで見ると、ノイズ除去結果がニューラルネットによる推定画像と画像の事後

確率密度分布による期待値と等価であることが述べられており、このような積分は MCMC により計算できる。提案法では、この積分の計算に Langevin Monte Carlo 法を用いることで、元の確率的最急降下法の計算をほとんど変化させることなく、より良好なノイズ除去結果を得ることに成功している。

3. Stein’s unbiased risk estimator (SURE)による DIP の過剰適合抑制ならびに収束判定に関する研究 (単一画像のみ利用)

Yeonsik Jo, Se Young Chun, and Jonghyun Choi, “Rethinking Deep Image Prior for Denoising,” in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2021 [\[arXiv\]](#)

本論文では、DIP がノイズに対して過剰適合しているということを「訓練時の誤差」と「テスト時の誤差」の差であると定義し、その差が Stein’s unbiased risk estimator (SURE)の枠組みで言うところの「自由度」と等価であることを利用して、新たな DIP 法のための誤差関数を提案している。この誤差関数では、ノイズ付きの入力と、ニューラルネットからの出力が近くなるべき、という最小二乗誤差に加え、正則化項として上記の自由度を下げる項を導入している。この自由度関数はニューラルネットの入力に関する勾配計算が必要で時間がかかるため、提案法では確率的な勾配関数の近似法を用いて計算を効率化している。さらには、元の DIP で提案されていた noise regularization (入力画像に適当なノイズを加えてニューラルネットに入力することで過剰適合を防ぐ工夫)を今回の SURE を用いた枠組みに拡張した Stochastic temporal ensembling も提案している。

4. ノイズ画像だけを教師データとした CNN によるノイズ除去法 (教師なし学習)

Jaakko Lehtinen, Jacob Munkberg, Jon Hasselgren, Samuli Laine, Tero Karras, Miika Aittala, Timo Aila, “Noise2Noise: Learning Image Restoration without Clean Data,” in Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML), 2018 [\[arXiv\]](#)

本論文では、正解となるノイズなし画像を利用することなく、ノイズ付きの画像を学習するだけで、ニューラルネットがノイズ除去能力を獲得できることを示している。これは、ニューラルネットを学習データによって訓練して得られる最適パラメータが、データセットに含まれるデータの期待値のみに依存しており、そこに平均が 0 であるノイズが付加されたとしても、最適パラメータが変化しないことを利用している。このような、ノイズ画像だけを使う学習は、ノイズのない正解画像が容易には得られない対象、例えば MRI や CG のレンダリングなどに有効だと主張している。

5. 訓練データのノイズの独立性を必要としない教師なし学習による画像ノイズ除去法（教師なし学習）

Alexander Krull, Tim-Oliver Buchholz, and Florian Jug, “Noise2Void - Learning Denoising from Single Noisy Image,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019 [\[arXiv\]](#)

本論文では、ニューラルネットの訓練に用いる画像ペアが Noise2Noise のように独立したノイズでなかったとしても利用可能なノイズ除去のための CNN の学習法を提案している。前述の Noise2Noise はニューラルネットを訓練する際、入力となるノイズ画像と、損失関数の評価に用いるターゲット画像が、独立したノイズである方が好ましく、そうでない場合にはニューラルネットが恒等写像を学習してしまうことがあった。これに対して提案法は、とある画像断片において、中心画素以外のノイズを含む画素値から中心画素の画素値を予想するというタスクで CNN を訓練することで、恒等写像が学習できないように工夫している。

6. ドロップアウト層の応用による単一画像のみを入力とした画像補正（単一画像のみ利用）

Yuhui Quan, Mingqin Chen, Tongyao Pang, Hui Ji, “Self2Self With Dropout: Learning Self-supervised Denoising from Single Image,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020 [\[CVF Open Access\]](#)

本論文では、確率的に隠れ層の特徴を無視するドロップアウト層を含むニューラルネットが、確率的な揺らぎを持ったデータを出力できることに注目し、確率的な性質の異なる複数の画像をニューラルネットに入力して、その出力の平均がノイズなし画像とできることを示している。具体的には、ドロップアウト層を含むニューラルネットを、ベルヌーイ分布により作成された複数の異なるマスクで覆われた画像を入力として学習させる。このネットワークに、学習時に利用したものとまた別のマスクを欠けて画像を入力し、得られた複数の出力画像を平均するという処理を取っている。

7. ノイズ付き訓練データへの人工的なノイズ付加による広範なノイズに対応可能な画像ノイズ除去手法（教師なし学習）

Jun Xu, Yuan Huang, Ming-Ming Cheng, Li Liu, Fan Zhu, Zhou Xu, Ling Shao, “Noisy-As-Clean: Learning Self-supervised Denoising from the Corrupted Image,” IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 29, pp. 9316–9329, 2020 [\[arXiv\]](#)

本論文では、Noise2Noise 法などの従来法が抱えていた「画像が含むノイズは平均が 0 でなければならない」という問題を解決するための入力データの加工方法について紹介している。提案法では、ノイズを含む訓練データに対して、さらに正規分布やポアソン分布などに従う人工的なノイズを付加したものをニューラルネットに入力する。こうして得られ出力画像と元のノイズ付き画像との間で誤差関数を計算し、その誤差を最小化するようにニューラルネットを学習する。

このとき、人工的に付加するノイズの平均と分散が実際の平均と分散におおよそ近ければ、所望のノイズに対して良好なノイズ除去結果が得られることが示されている。なお、実験的には人工的に付加するノイズが厳密に実際のノイズと同一である必要はなく、ガウスノイズやポアソンノイズを適当に組み合わせたノイズを付与することで実用的には十分な性能が出ると述べられている。

8. 入出力に追加付与するノイズに一定の性質を仮定することで教師付き学習と等価な結果を得られることを示した研究（教師なし学習）

Tongyao Pang, Huan Zheng, Yuhui Quan, and Hui Ji, “Recorrupted-to-Recorrupted: Unsupervised Deep Learning for Image Denoising,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021 [[CVF Open Access](#)]

本論文では、Noisy-as-Clean が入力だけに追加付与していたノイズを入力と出力の両方に付与する。元々、Noise2Noise の枠組みが正しく動作していた理由として、訓練に使う入出力のペアが独立なノイズを持っていることがあった。この研究では、正規分布から得られたノイズに異なる線形代数的な操作を行うことで、無相関なノイズを計算的に作り出し、それらを入出力に付与して、ニューラルネットを学習すると、Noise2Noise のように無相関なノイズが含まれていることを仮定しなくても、学習が上手く動作することを理論的・実験的に示している。

9. 画像のサブサンプリングと制約項の導入により Noise2Noise と等価な条件でノイズ除去を可能とする研究（教師なし学習）

Tao Huang, Songjiang Li, Xu Jia, Huchuan Lu, and Jianzhuang Liu, “Neighbor2Neighbor: Self-Supervised Denoising from Single Noisy Images,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021 [[arXiv](#)]

本論文では、入力となる 1 枚のノイズ付き画像から画素をサブサンプリングすることで、(サイズの小さな)無相関ノイズとある程度の視覚的類似性を持った 2 枚の画像を得る。この画像を入出力のペアとしてニューラルネットを訓練することで Noise2Noise と同様にノイズ除去を実現するネットワークを得ることができる。この論文で特に注目すべきは、上記の画素サンプリングを行った場合には、サンプルされる画素の偏りにより、ノイズの平均が 0 でなくなる可能性があるため、そのような場合でも正しくノイズ除去を学習できるような制約項を新たに導入している。

10. Generalized Anscombe Transform を応用したポアソン・ガウス両ノイズを含む画像に帯する効率的なノイズ除去法（教師なし学習）

Jaeseok Byun, Sungmin Cha, and Taesup Moon, “FBI-Denoiser: Fast Blind Image Denoiser for Poisson-Gaussian Noise,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021 [[arXiv](#)]

本論文ではポアソンノイズとガウスノイズの両方を含むような画像に対する効率的なノイズ除去法を提案している。このような両ノイズのいくつかのパラメータが既知である場合には Generalized Anscombe Transform (GAT) という画素ごとの単純な数値変換により、画像を分散が 1 のノイズを含む信号へと変換することができ、この画像に従来のガウスノイズ。従来法の BP-AIDE では、GAT に必要ないくつかのパラメータを計算効率の悪いニューラルネットで推定していたが、今回の提案法では、パラメータ自体の推定は比較的単純なニューラルネットにより行い、GAT によって変換された信号が、分散が 1 となるように誤差関数を導入して、GAT のパラメータ推定とノイズ除去の二つのタスクを同時に学習することで、従来法の 10 倍以上高速によりよいノイズ除去性能を実現した。

1-E ボリュームデータの扱いに関連したシミュレーション技術の調査

工業部材の作成や、耐久性、寿命の予測については、学術的産業的な興味から、研究機関や企業等で多くの研究、技術開発が行われてきた。その中にはすでに産業応用されて成功している例も多い。この報告では、離散的な点やCTによる内部情報からシミュレーションをする状況を想定した技術を主に紹介する。また、それらを実際に応用したソフトウェアについても紹介する。

1. 長田パッチを使った表面形状再構築 (2 件)
2. 長田パッチに対する交差判定など、シミュレーションへの応用 (4 件)
3. 構造解析シミュレーション技術・関連ソフトウェア (5 件)
4. 鋳造シミュレーション技術・関連ソフトウェア (1+13 件)
5. ガラスのプレス成型シミュレーション技術 (4 件)

[キーワード: 衝突計算、構造解析、プレス成形、鋳造、内部構造、材料不均一性、ソフトウェア]

1. 長田パッチを使った表面形状再構築

[キーワード: 表面形状再構築, 2 次曲面パッチ, 特徴線, 特徴点]

Takashi Nagata, “Simple local interpolation of surfaces using normal vectors”, Computer Aided Geometric Design, Vol.22, No.4, pp.327-347, 2005.

Takashi Nagata, “Smooth Local Interpolation of Surfaces Using Normal Vectors”, Journal of Applied Mathematics, Volume 2010, 952420, 2010.

CTにより取得した離散的な点情報をもとにして構造解析などのシミュレーションを行う場合、物体同士の接触を扱うために交差判定や相互に働く外力の計算が必要になり、その際に表面形状が何らかの方法で決められている必要がある。三角形メッシュのような素朴な線形補間で形状を決めることはできるが、より高精度に表面の形状を再現し計算を行うために、曲面パッチを使う方法が考えられる。

1 件目の論文で提案されている C0 連続 Nagata Patch は局所的に 2 次の補間であり、Bezier や NURBS との違いとして、直線との交差判定には代数的な解を得ることができるという特徴がある。Nagata Patch は頂点座標と、頂点に対する法線ベクトルの情報があれば構築することができるため、三角形メッシュを入力として曲面パッチを当てることができる。また、三角形メッシュと同様に、局所的であり稜線や頂点のような法線ベクトルが不連続になる箇所も自然に扱うことができる。線形補間である三角形メッシュの場合に、三角形の辺の長さの 2 乗の速さで正確な形状に収束する一方、Nagata Patch では 3 乗から 4 乗の速さで収束することが示されている。また、稜線に沿って法線ベクトルのねじれがある場合は 3 次の補間が必要になるため、パッチ形状が不安定になる欠点があり、三角形の細分化で対応することが提案されている。2 件目の報告では G1 連続な拡張をした Nagata Patch も提案されている。

2. 長田パッチに対する交差判定など、シミュレーションへの応用

[キーワード: 交差判定, 衝突計算, Nagata パッチ, 高速化, 高精度化]

T. Hama, T. Nagata, C. Teodosiu, A. Makinouchi, and H. Takuda, “Finite-element simulation of spring back in sheet metal forming using local interpolation for tool surfaces,” *Int. J. Mech. Sci.* 50, 175 - 192, 2008.

T. Hama, M. Takamura, A. Makinouchi, C. Teodosiu, and H. Takuda, “Formulation of contact problems in sheet metal forming simulation using local interpolation for tool surfaces,” *J. Comput. Sci. Technol.* 2, 68 - 80 , 2008.

D.M. Neto, M.C. Oliveira, L.F. Menezes, and J.L. Alves, “Improving Nagata patch interpolation applied for tool surface description in sheet metal forming simulation,” *Computer-Aided Design* 45, pp. 639-656, 2013.

S. Morita, Y. Nishidate, T. Nagata, Y. Yamagata, and C. Teodosiu, “Ray-tracing simulation method using piecewise quadratic interpolant for aspheric optical systems”, *Applied Optics* 49(18), pp. 3442-3451, 2010.

シートメタル成型(薄板圧縮成形)は大変形と塑性変形を伴うため、シミュレーションには材料的幾何的非線形性を考慮に入れた FEM が使われる。文献の 1 つ目と 2 つ目は、その際のツール形状の表現に Nagata Patch を使った研究で、Nagata Patch と直線の交差判定や外力の計算方法を提案し、実際にシートメタル成型シミュレーションに応用している。3 つ目の文献では、シートメタル成型のシミュレーションについて、線形補間の三角形パッチと Nagata パッチの場合の形状誤差の比較をしている。また、Nagata パッチを作る際の法線ベクトルを、三角形メッシュから推定した場合と、CAD の表面形状モデルから取得した場合について比較を行い、大きな差が無いことが報告されている。

また、3 件目の報告では、光線追跡の際のレンズやミラーなどの光学素子表面の表現に Nagata Patch を適用する方法が検討されており、その中で Nagata Patch の bounding box を求めて、バケットサーチによる交差判定の高速化、さらに交差を求める 4 次式の解を必要なものだけに絞って高精度化する方法が提案されている。

3. 構造解析シミュレーション技術・関連ソフトウェア

[キーワード: 構造解析, 非線形, シミュレーション, パワーモジュール, 寿命予測, ソフトウェア]

一般社団法人 FrontISTR, “オープンソース大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラム: FrontISTR”, <https://www.frontistr.com/>.

奥田洋司, 稲垣和久, 竹内光秀, “非線形並列有限要素法 FrontISTR の理論・実装・応用”, 丸善出版, 2022.

株式会社 先端力学シミュレーション研究所, “汎用構造解析ソフトウェア ASU/ISTR”, <https://www.astom.co.jp/software/>.

大浦賢一, 伊勢谷健司, “焼結銀接合した高耐熱パワー半導体モジュールの寿命予測シミュレーション”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 25, No. 6, 569-576, 2022.

株式会社 先端力学シミュレーション研究所, “パワーモジュール寿命予測システム ASU/PM-Lifetime”, <https://www.astom.co.jp/software/>.

構造解析を行う際のシミュレーション技術については多くの研究があり、中でも FEM は多くの実用例があり、CTで得られた内部構造や材料の不均一性などを扱う際にも、要素ごとに弾性や塑性に関わる材料の特性を与えることで、汎用の解析ソフトウェアを使うことができる。汎用の解析ソフトウェアとしては、ANSYS、ABAQUS、LS-DYNA など、多くの実績がある海外製のソフトウェアがあるが、ここでは、国内の構造解析シミュレーションソフトウェアについていくつか報告する。

1 つ目は FrontISTR というオープンソースの大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラムで、D 大学などが開発に関わり産業分野からの開発参加者もあり、応用もされている。線形解析だけでなく、幾何的、材料的な非線形性も扱うことができる。ソースコードは github において MIT ライセンスで公開されており、実装の詳細を見することもできる。また、2 つ目の情報にあるように、内部で使われている技術や使用方法をまとめた書籍も最近出版された。また、パーソナルコンピュータだけでなく、スパコンを利用した大規模並列化も想定されている。このソースコードをもとにした、市販の構造解析ソフトウェアもあり、例えば、3 つ目の情報にあたる、先端力学シミュレーション研究所が提供する ASU/ISTR は、FrontISTR を元に独自の拡張やユーザーサポートを行っている。

EV などに使われる、小型で高耐熱なパワーモジュールの設計には、温度負荷サイクル試験などの耐久性、信頼性を高める必要がある。一方で現在主に使われている鉛フリーのはんだは高温では使用できないため、焼結金属による接合方法がさかんに研究されている。4 つ目の文献では、伝熱-構造の連成解析を使ってパワーモジュールの寿命予測や設計支援を行う方法について紹介されており、これらの研究成果の応用として 5 つ目の情報にある ASU/PM-Lifetime というソフトウェアが市販されている。

4. 鋳造シミュレーション技術・関連ソフトウェア

[キーワード: 鋳造, 湯流れ, 凝固, シミュレーション, ソフトウェア]

前田 安郭, “特集「鋳造シミュレーションパッケージソフト最前線」によせて”, 鋳造工学, 第 86 巻第 12 号, p.905, 2014.

鯉渕 卓也, 茅根 佳孝, 山県 司, “鋳造シミュレーションシステム ADSTEFAN”, 第 86 巻第 12 号, p. 906-910, 2014. など、同巻同号の p. 906-969 までの一連の 13 件の技術報告記事

鋳造は工業部材の作成に多く使われており、鋳型設計や鋳造条件の決定には、鋳造のシミュレーションが利用されている。鋳造のシミュレーションには、湯流れなどの流体の計算、冷却による部材の温度変化、凝固による引け、材料の密度変化、残留応力の計算など、多くの

技術要素を考える必要がある。

CTで得られた情報から、工業部品の再現をする際、鋳造シミュレーションを利用することが考えられるが、国内外の企業で鋳造シミュレーションソフトウェアを開発、販売している企業等によるソフトウェアの紹介が特集で取り上げられており、それぞれの記事でソフトウェアの特長が述べられている。

例えば、日立産業制御ソリューションズの ADSTEFAN の場合、湯流れに Constrained Interpolation Profile(CIP)法や Multi-interface Advection and Reconstruction Solver(MARS) 法を使って計算し、凝固ソルバでは、冷却による凝固で発生する引け巣の形状、大きさを予測することができる。他には、AnyCasting, CAPCAST, Flow-3D CAST, JSCAST, MAGMAsoft, NOVA Flow&Solid, ProCAST, TopCAST, JMatPro, Arena-Flow, MAGMA C+M, Particle Works など、それぞれの記事内で紹介されている。

5. ガラスのプレス成型シミュレーション技術

[キーワード: ガラス, プレス成型, 粘弾性, ガラス物性計測, シミュレーション, ソフトウェア]
株式会社 インテグレーションテクノロジー, “ガラスモールド成形シミュレーションツール V-Glace”, <https://www.int-tech.co.jp/cae/>.

Z. SUN, C. TEODOSIU, M. TAKAMURA, and A. MAKINOCHI, “3 次元弾塑性 FEM 解析のための複合要素の開発”, 日本機械学会論文集(A 編) 77 巻 773 号, 10-0614, 2011.
山形豊, 小林晃平, 近藤孝, 森田晋也, 石山英二, 中林啓司, 船田浩良, “ガラスプレス成型シミュレーションコード V-Glace のための物性計測”, 2021 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p. 527, 2021.

福田達也, “ユーザー視点から見た V-Glace”, VCAD システム研究会 光学素子分科会, 3 月 8 日, 2022.

ガラスのプレス成型では、高温で柔らかい状態のガラスを金型で圧縮して形を作り冷却するため、粘弾性材料の大変形や温度分布を扱う必要がある。また、ガラスの物性は非公開であったり、シミュレーションに必要な情報を、材料を販売する企業自体が持っていないこともあり、解析が難しい。

一つ目の情報である、インテグレーションテクノロジー社による V-Glace は、最近リリースされたガラスプレス成型シミュレーションソフトウェアである。V-Glace は、理化学研究所 VCAD システム研究プログラムの成果であるシートメタル成形過程のシミュレーションプログラムである ITAS3D や、静的陽解法や縮退 6 面体要素を用いた弾塑性構造解析ソフトウェア V-Struct(2 つ目の文献)をもとにして、さらにガラス成型向けに粘弾性や大変形に対応している。

ガラスプレス成型シミュレーションを行うためには、ガラスの物性が必要になる。ソフトウェア標準のデータベースとして、ガラス物性があらかじめ用意してあれば使い勝手が良いものになる。弾性率や密度、熱膨張率などは、検査会社などが保有する装置を使って計測できる場合が多いが、3 つ目の文献では、計測が難しいクリープ特性と高温下での摩擦の計測方法につ

いて報告している。また、4 つ目の報告では、V-Glace を実際に使った企業からの使い勝手や要望について書かれている。

1-F 画像生成(レイトレーシング、ボリュームレンダリング)に関する研究調査

X線CT等で得られたデータから画像を生成する方法についての調査を行った。これには Marching cube 法などによってポリゴンへ変換してから画像生成を行う方法と、データから直接画像を生成する方法の2通りが存在する。下の論文1は前者、論文2以降は後者と関連している。近年では、ニューラルネットワークを用いて画像生成や3次元形状復元を行う試みが盛んである(論文4, 5)。

[キーワード: レイトレーシング, ボリュームレンダリング, 並列処理, GPU, ニューラルネットワーク]

1. バウンディングボリューム階層構築のための局所的な順序による並列クラスタリング

[キーワード: レイトレーシング、階層的物体構造、凝集クラスタリング、並列処理、GPU]

Daniel Meister, Jiri Bittner, “Parallel Locally-Ordered Clustering for Bounding Volume Hierarchy Construction”, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 24, No. 3, pp. 1345-1353, 2018.

ポリゴンなどの物体からなるシーンに対してレイトレーシングによる画像生成を行う場合、光線と物体の交差計算が大量に必要になるが、この計算を高速化するために近年最も多く利用されているのがバウンディングボリューム階層(BVH)である。BVHはシーンからの自動生成が可能であるが、この際、生成された階層の良さと生成時間の短さの両立が求められる。本論文の発表以前は、物体集合の再帰的分割に基いたトップダウンのBVH生成が一般的であったが、本論文では凝集クラスタリング(agglomerative clustering)に基づいたボトムアップ手法を用いている(下図群)。そして、効率的な並列計算により、GPUを用いた場合の総計算時間がシーンによってはトップダウン手法に比べ4割程度削減され、最悪の場合でもほぼ同等であることを示している。

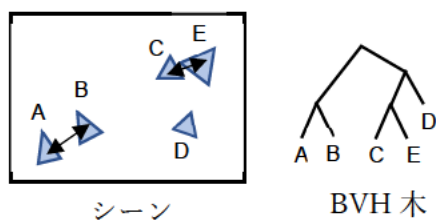


図 2-2-1-1: 凝集クラスタリングによる BVH 構築

まず各物体について最も近くにある物体を探索し、そこから互いに最も近いという関係にある対(例では A と B、および C と E)を見つけてそれらをクラスタとする。この処理は、クラスタを新たな物体とみなして繰り返され、最終的に1つのクラスタに合った時点で BVH 木を出力して終了する。

2. GPU ベースのボリュームレンダリングにおける高速化技法

[キーワード: ボリュームレンダリング, GPU]

J. Krüger, R. Westermann, “Acceleration Techniques for GPU-based Volume Rendering”,

Proc. of IEEE Visualization 2003, pp. 287-292, 2003.

3次元フィールドを可視化する基本的な方法の一つにレイキャスティング(1次光線のためのレイトレーシング)がある。これは光路上において等間隔にサンプリングを行い、後ろから前へ向かって(或いは少し工夫して前から後ろに向かって) α ブレンディングによって順に合成することによって各画素の色を求めるものである。GPUを用いてこれと等価な処理を行う方法の一つは、光線開始点から同距離にあるサンプル点で構成される面を、3次元テクスチャを利用しながら、ポリゴンとして順に重ね書きしていく手法である。しかし、この方法は、隠れて見えない部分や空白部分に対しても3次元テクスチャへのアクセスがあるため効率が悪い。本論文では early Z test と呼ばれる GPU の機能を使ってこれらの問題を解決し、単純な実装と比較して最大で 3.3 倍、平均で 2.5 倍の性能を達成している。

Early Z test. GPU ではポリゴンのラスタライズ後、各画素(フラグメント)に対して色を計算するためにシェーダプログラムを実行するが、多くの GPU では、効率化のために予め Z 値(深さを表し、本論文では深いほど小さい値)をフレームバッファの値と比較し、隠れている画素についてはシェーダプログラムを起動しないようにしている。

Early ray termination. 前から後ろに向かって合成していく過程において、途中で不透明のサンプル点に遭遇した場合、その先の追跡は無駄になる。本論文の手法では、重ね書きをしてゆき、不透明な画素に対しては Z 値を最大値に設定している。これにより、以降その画素については、ラスタライズは行われるもののシェーダプログラムは実行されなくなる。

Empty-space skipping. 無色透明なサンプル点は画像に貢献しないため、できるだけ処理をスキップしたい。本論文では、分解能を各軸 1/8 に落としたボクセルデータを作成しておき、8 ステップごとにまずこのボクセルデータを調べ、無色透明の部分については一時的に Z 値を最大値に設定して、該当する高解像度の処理をスキップしている。

3. Sphere Tracing の改良

[キーワード: レイトレーシング、ボリュームレンダリング、SDF]

Benjamin Keinert, et al., “Enhanced Sphere Tracing”, Proc. of Smart Tools and Apps for Graphics (STAG), 2014.

形状表現法の1つに符号付き距離関数(signed distance function, SDF)によるものがある。 $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ を SDF とするとき、それが表す面 $f^{-1}(0)$ と光線との交点を効率良く求める方法として Sphere Tracing が知られている。この方法では、各点における f の値をステップ幅として次の点を順に求めてゆき、 f の値がスレッショルドを下回った時点で交点を出力する。この方法がうまく働くのは、各点において f の値を半径とする球内には面が存在しないことが保証されているからである。

本論文では、Sphere Tracing の効率を更に高めるために、加速パラメータ ω ($1 \leq \omega < 2$) を導入し、ステップ幅を $f \cdot \omega$ としている。加速を行っても球がオーバーラップしている限りは正しい結果を与える。オーバーラップしないことが判明した場合は、通常の Sphere Tracing と同じ位置まで戻って追跡を続ける。この技法により、性能改善があることが報告されている。

なお、本論文では上に述べた技法の他に、追跡を途中で打ち切った場合のアーティファクトの軽減方法、スクリーン上での球の大きさを基準に追跡を打ち切る手法、2 次光線を発射したときに光線が開始点で面と交差するのを避ける方法、交点の不連続性を軽減する手法、および、物体内部における効率的な追跡手法が示されている。

4. NeRF: 任意視点画像合成のための Neural Radiance Field によるシーン表現

[キーワード: ボリュームレンダリング、形状表現、ニューラルネットワーク]

Ben Mildenhall, et al., “NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis”, Proc. of ECCV 2020, pp. 405-421, 2020.

Neural Radiance Field (NeRF) は、様々な位置、角度から撮影した画像を用いてニューラルネットワークの学習を行い、それによって別の視点から見た画像を合成するための手法であり、その合成画像の質の高さから大きな注目を集めている。また、画像合成だけでなく、3次元形状推定やボリュームデータの圧縮への利用も期待される。

ニューラルネットワークは、位置と方向の情報を入力とし、その位置のボリューム密度と、その位置からその方向へ放出される光の色を出力とする。光路上の各サンプル点についてこれらの出力を取得し、それらを合成すれば、任意の視点から見た画像を生成することが可能である。学習の際には、このようにして生成した画像とカメラから得た画像の差分によってロス関数を計算し、レンダリング過程を含めて back propagation を行う。画質向上のための工夫として、3次元ベクトルをネットワークに入力する際には位置エンコーディング(positional encoding)を施している。また、光路上のサンプリングは、高解像度用と低解像度用の2系統のネットワークを使い、画像への影響度が大きい部分を重点的に細かくサンプリングするようにしている。

5. 多解像度ハッシュエンコーディングによる高速な Neural Graphics Primitive

[キーワード: ボリュームレンダリング、ニューラルネットワーク]

Thomas Müller, et al., “Instant Neural Graphics Primitives with a Multiresolution Hash Encoding”, ACM Trans. on Graphics, Vol. 41, No. 4, Article 102, 2022.

NeRF では、3 次元ベクトルをネットワークに入力する際に、下式のような位置エンコーディングを各成分に施して画質の向上を図っている。

$$(\sin 2^0 x, \cos 2^0 x, \sin 2^1 x, \cos 2^1 x, \dots, \sin 2^{L-1} x, \cos 2^{L-1} x)$$

本論文は上の位置エンコーディングに代わるものとして多解像度ハッシュエンコーディングという手法を提案している。その結果、学習時間が大幅に短縮され、画質も向上している。なお、この手法は NeRF に限らず、例えばニューラルネットに基づいた SDF など、座標値を入力とする他のネットワークに対しても適用可能である(論文ではそのようなネットワークを総称して Neural Graphics Primitive と呼んでいる)。

多解像度ハッシュエンコーディングの仕組みを考えている。入力座標に対して、解像度の異なる複数のグリッド(16 レベル)について整数座標を求め、それをもとにルックアップテーブルのインデックスを決定する。ルックアップテーブルには学習可能な(つまり、back propagation によって更新される)2 次元の特徴ベクトルが格納されており、その特徴ベクトルは線形補間された上でニューラルワークの入力となる。ルックアップテーブルの大きさを抑えるため、整数座標はハッシュ関数を用いて 2^{14} から 2^{24} 未満の値に圧縮される。解像度の異なる複数の座標値が互いに欠陥を補うため、ハッシュ衝突に伴う処理は不要としている。

1—G Survey on distance function approximations for shape modeling

The distance function (signed or unsigned) to the boundary (curve or surface) of a given domain is a useful tool in geometry processing, shape modeling and related domains. It has numerous applications, such as, surface reconstruction, meshing, fluid dynamics, shape interrogation, computational physics, and mechanics. In this brief survey, we review several recent variational methods for computing approximations of the distance function.

1. Geodesics in Heat: A new approach to computing distance based on heat flow

[Keywords: geodesic, heat diffusion]

Crane, K., Weischedel, C. and Wardetzky, M., “Geodesics in Heat: A new approach to computing distance based on heat flow”, In *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, Issue 5, Article No. 152, pp. 1–11, 2013.

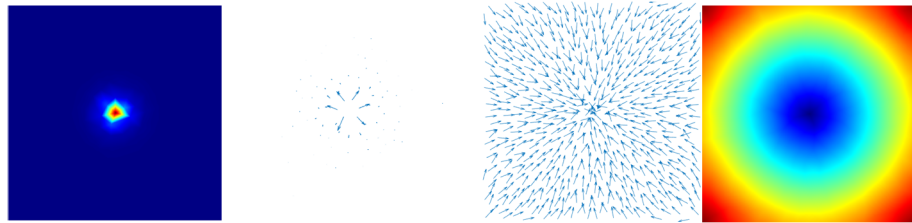
The Geodesics in Heat approach is based on a theorem by Varadhan that connects the heat kernel $K()$ with the geodesic distance $d()$ on a manifold

$$\lim_{t \rightarrow 0} -4t \log K(t, x, y) = d(x, y)^2$$

Thus, one can approximate the distance function (from the point x to any point y) by solving the (linear) heat equation for a small time-step. Numerically, the result is not very stable, so the authors propose to use instead the following numerical scheme

- 1) Integrate the heat flow $\dot{u} = \Delta u$ for t
- 2) Compute the vector field $X = -\nabla u / |\nabla u|$
- 3) Solve the (linear) Poisson problem $\Delta \varphi = \text{div } X$

The solution to the final Poisson problem delivers a smooth approximation to the distance function. While this approach was initially designed for computing geodesics, it can be easily adapted to compute the distance to a curve / surface.



⊠ 2-2-1-2: One step of heat diffusion u , the gradient ∇u , the vector field X , and the solution to the Poisson problem φ

2. On variational and PDE-based distance function approximations

[Keywords: distance function, variational problems, iterative schemes]

Belyaev, A. G., and Fayolle, P. A., “On variational and PDE-based distance function approximations”, In *Computer Graphics Forum*, Vol. 34, No. 8, pp. 104–118, 2015.

This work proposes several, loosely connected, approaches for computing smooth approximations of the distance to boundary function based on variational approaches. One of the discussed approaches relies on the fact that solving the non-linear eikonal equation $|\nabla u|=1$ is numerically difficult and considers instead the relaxed problem

$$E(u) = \int_{\Omega} (|\nabla u(\mathbf{x})| - 1)^2 d\mathbf{x} \rightarrow \min \quad u = 0 \text{ on the boundary}$$

Numerical solvers based on splitting and on the Alternating Direction of Multipliers Method (ADMM) are proposed.

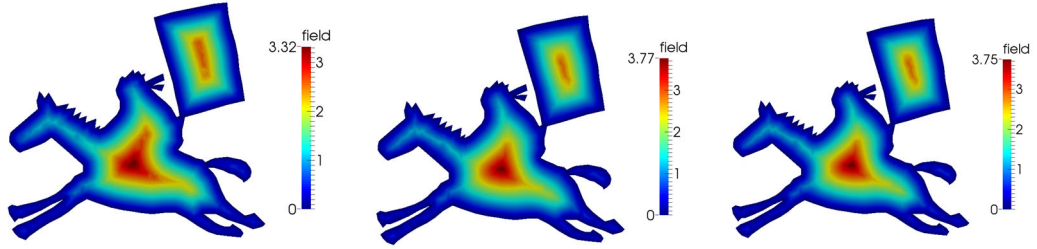


Fig 2-2-1-3: The exact distance, the result after 5 iterations, the result after 20 iterations.

3. p-Laplace diffusion for distance function estimation, optimal transport approximation, and image enhancement

[Keywords: p-Laplacian, diffusion, ADMM]

Fayolle, P. A., and Belyaev, A. G., “p-Laplace diffusion for distance function estimation, optimal transport approximation, and image enhancement”, In *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 67, pp. 1–20, 2018.

The solution to the p-Poisson problem

$$\Delta_p u \triangleq \operatorname{div}(|\nabla u|^{p-2} \nabla u) = -1 \text{ in } \Omega, \quad u = 0 \text{ on } \partial\Omega,$$

delivers a smooth approximation of the distance to the boundary $\partial\Omega$. Furthermore, the approximation can be made more accurate near the boundary with the normalization

$$v(\mathbf{x}) = -|\nabla u|^{p-1} + \left[\frac{p}{p-1} u + |\nabla u|^p \right]^{\frac{p-1}{p}}$$

This work proposes an efficient numerical solver based on a variational problem equivalent to the p-Poisson problem above and solves it numerically by ADMM.

This work also shows that the same variational framework and numerical solver can be used to approximate solutions to the optimal transport problem and be used for image processing tasks (structure+texture extraction, dehazing, low-light image enhancement, ...)

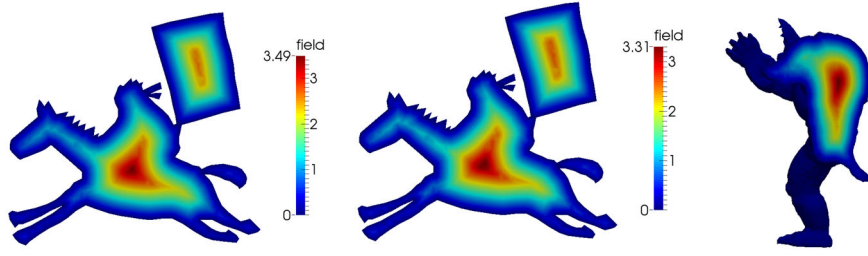


图 2-2-1-4: The p-Poisson distance for p=15, p=100 and for a 3D model.

4. An ADMM-based scheme for distance function approximation

[Keywords: distance function, variational problem, ADMM]

Belyaev, A. G. and Fayolle, P. A., “An ADMM-based scheme for distance function approximation”, In *Numerical Algorithms*, Vol. 84, pp. 983–996, 2020.

Solutions to the p-Poisson problem

$$\Delta_p u \equiv \operatorname{div}(|\nabla u|^{p-2} \nabla u) = -1 \quad \text{in } \Omega \quad u(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{on } \partial\Omega$$

satisfy the variational problem

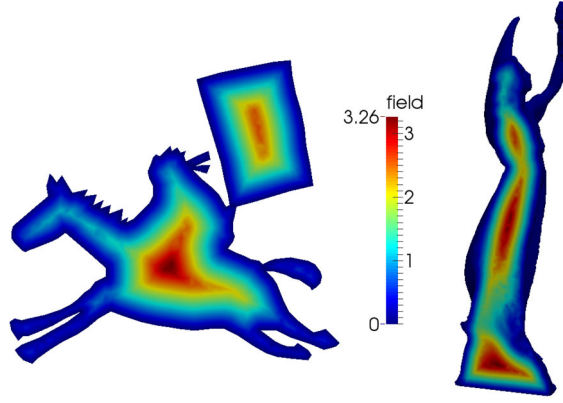
$$\int_{\Omega} \phi d\mathbf{x} \rightarrow \max, \quad \text{where } \|\nabla \phi\|_{L^p} \leq 1 \quad \text{and } \phi(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{on } \partial\Omega$$

Letting $p \rightarrow \infty$ gives the following

$$\int_{\Omega} \phi d\mathbf{x} \rightarrow \max, \quad \text{where } \max_{\mathbf{x} \in \Omega} |\nabla \phi| \leq 1 \quad \text{and } \phi(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{on } \partial\Omega$$

which is satisfied by the distance function. Numerically, it is solved by ADMM, with the advantage that the constraint involving the L^∞ -norm constraint is easier to deal with numerically than the L^p -norm constraint of the p-Poisson problem above (it involves projection on the unit ball rather than numerically solving a polynomial).

This framework leads to one more numerical approach for computing the distance function.



⊠ 2-2-1-5: The distance Φ for a 2D and a 3D model.

5. Signed Lp-distance fields

[Keywords: double layer potential, distance function, asymptotic]

Belyaev, A., Fayolle, P. A., and Pasko, A., “Signed Lp-distance fields”, In *Computer-Aided Design*, Vol. 45, No. 2, pp. 523–528, 2013.

This work considers the use of generalized double layer potentials to deliver smooth approximations of the distance function

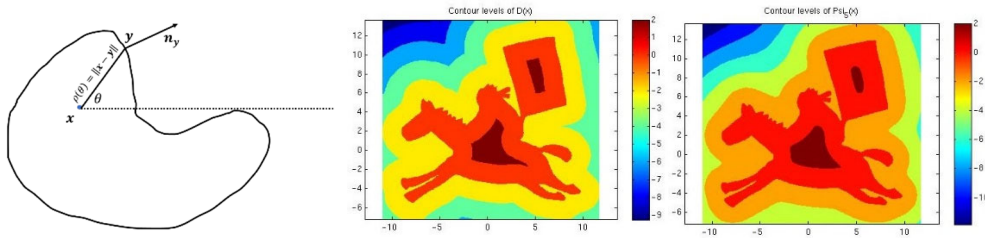
$$\varphi_p(\mathbf{x}) = \int_S \frac{\mathbf{n}_y \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{x})}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^{n+p}} dS_y = \int \frac{d\Omega_y}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^p}$$

$$\psi_p(\mathbf{x}) = [1/\varphi_p(\mathbf{x})]^{1/p}$$

$$\psi_p(\mathbf{x}) \xrightarrow{p \rightarrow \infty} \text{dist}(\mathbf{x}, S)$$

One advantage of this approach is that the potentials $\varphi_p(\mathbf{x})$ can be expressed in closed form for the cases where the surface (resp. curve in 2D) is represented by a triangle mesh (resp. polygon curve in 2D).

Normalization schemes to improve the approximation near the boundary are also provided.



⊠ 2-2-1-6: Left: Notations used. Middle: Exact distance. Right: ψ_5 .

1-H 3D データのアーカイブ化と活用に関する研究調査

X線CT等などを用いて生成した3D データをアーカイブ化する技術について調査を行った。実世界の物体をデジタル化しアーカイブとして記録/活用することは文化財の保護や継承の分野で盛んである。データの有効利用はメタデータに左右されるが、対象が文化/歴史と関係するため、物体の形状など外見上の情報に加え文化的意味を記録する必要性からオントロジーやメタデータの統一が難しく、相互運用性に重点が置かれている。一方、手頃なスキャナーの普及により3D データの生成は質より量が先行している傾向が見られる。

[キーワード: オントロジー、メタデータ、文化財、相互運用性]

1. 文化財のためのオントロジー

[キーワード: オントロジー、相互運用性、変換]

Martin Doerr, “Ontologies for Cultural Heritage”, Handbook on Ontologies, International Handbooks on Information Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 463-486, 2009.

本論文は、文化財の保護や継承に適した現時点で最も洗練されたオントロジーとして CIDOC Conceptual Reference Model (CRM) (ISO21127)を取り上げ、他のオントロジーとの比較と関連性を論じている。データを説明する目的で使われる“メタデータ”に対して、CRM のような形式的オントロジーは複数のスキーマにまたがる共通概念を記述するために用いられ、異なるメタデータの対応関係を明らかにしたり変換したりすることができる。文化財保護の分野では複数のオントロジーが使われているがいずれも主なものは CRM と対応することが確認されている。一方、具体的なスキーマで用いる用語体系としては Art & Architecture Thesaurus が最も安定し多くの概念をカバーしているとしつつも、標準化は不十分であると評価している。WordNet などの意味関係の語彙データベースを使った自動変換も試みられているが、先進の IT 技術の活用が必要であると述べている。

2. 3D データのメタデータ要件

[キーワード: デジタル資産、ライフサイクル、メタデータ]

J. Blundell, J. L. Clark, K. E. DeVet, J. L. Hardesty, “Metadata Requirements for 3D Data”, in 3D Data Creation to Curation : Community Standards for 3D Data Preservation, ACRL, 2022 <https://bit.ly/ACRL3Ddata>.

本論文では、3D データをデジタル資産として有効に保全と再利用のために、その生成時に記録すべきメタデータを提案している。デジタル化手法としてX線CTも対象としており、3D データを、Create、Manage、Distribution and Publication、Access and Reuse、Archive の五段階のライフサイクルに分け、それぞれで必要となる情報を分析している。まず、必要なドキュメントの種類とレベルはプロジェクトの意図と出来上がったモデルがどのように使用されるかに強く影響されるため、メタデータの検討はプロジェクトを計画する段階から始めるべきと述べて

いる。特に、Create では、装置のパラメータやユーザー定義の設定を記録することに加え、計測手順とデータ処理の方針も重要である点は特筆される。さらに、データ処理のメタデータとして、用いたアルゴリズムと入力データなどについて記録することが、データの理解や再利用に必要であると主張している。

3. 3D 文化財のデータ取得と処理のためのメタデータスキーマとオントロジー

[キーワード: オントロジー、セマンティックウェブ、データ品質、メタデータ、3D スキャン]

Homburg, T., Cramer, A., Raddatz, L. et al. “Metadata schema and ontology for capturing and processing of 3D cultural heritage objects”, *Heritage Science*, 9, 91, 2021

<https://doi.org/10.1186/s40494-021-00561-w>

3D データと利用できるレポジトリが増える中、デジタル化のプロセスや使用機材が異なるプロジェクトや作成者の3D データを組み合わせた二次利用(データ分析など)は困難である。本論文は、それらの相互運用性を高める手段として、3D スキャンによるデジタル化プロセスの技術的情報を記録するためのメタデータとオントロジーを提案する。対象は3D スキャナーによる3D データに限定されるが、異なるスキャン手法およびメーカーの機材に対応し、異なるワークフローにも対応し、相互運用性を示している。本論文のオントロジーは W3C の PROV-O を拡張したもので、CIDOC CRM とも互換性が保たれている。(CIDOC CRM は PROV-O に文化財の表現に必要な拡張したものであるため)本論文の特長は、記録するメタデータを使用する機器やツールによって自動的またはほぼ自動的に記録できるものに限定することで3D データの技術的仕様を確実に入力されるようにしたことである。一方、データの相互運用性は技術的なものに限定され、文化財固有の情報はその限りではない。

4. HBIM のための知識ベースデータエンリッチメント:セマンティックウェブを用いた高品質モデルの探索

[キーワード: データの標準化、分類法、相互運用性、オントロジー、共有パラメータ、表現ワークフロー]

Ramona Quattrini, Roberto Pierdicca, Christian Morbidoni, “Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web”, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 28, 2017, Pages 129–139, ISSN 1296–2074,

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.004>.

Building Information Modeling (BIM)は、計画、設計、建設、運用、保守、解体段階を含む建築プロジェクトのライフサイクル全体を通して、多分野の情報を保存、共有、交換、管理するための手法である。具体的には、建物のイメージ図、2D 図面、3D モデル、強度計算やシミュレーションなどの異なるメディア/データ/情報について関連性を維持して管理することができる。文化財保護の分野では、これを歴史的建造物の記録に用いる Historical BIM (HBIM)に 10 年ほど前から取り組んでいる。本論文では、Level of Definition (LOD)と Grade を用いて文

化財特有の意味情報をその他建物データと統合的に扱えるようにしている。意味情報に用いるオントロジーはより一般的なセマンティックウェブの技術である IFC-OWL オントロジーに変換できるようにすることで相互運用性を維持している。

5. スミソニアン 3D メタデータモデル

[キーワード: デジタルアーカイブ、メタデータ、博物館、3D スキャン]

Digitization Program Office, “Smithsonian 3D Metadata Model”, Smithsonian Institute,

<https://dpo.si.edu/index.php/blog/smithsonian-3d-metadata-model>, last visited:

Jan.20,2023.

米国スミソニアン博物館が進めるデジタルアーカイブプロジェクトで使用しているメタデータが Smithsonian Institution 3D Metadata model である。最新バージョンは v0.6 である。現状、3D スキャナーによるデータ作成(外形のメッシュモデルとテクスチャビットマップ)のみであるが、専門のチームが規程のワークフローとメタデータを用いてデジタル化を進めている。生成されたデータは Web サイト(<https://3d.si.edu/>)で閲覧できる。本プロジェクトのメタデータの特長は、3D スキャンのワークフロー、特にスキャンの方法を詳細に記述できる点にある。また、文献2で推奨されている項目を概ね含んでおり、データの後処理で用いたソフトウェアやアルゴリズム等を記録することも可能である。相互運用性については確認できていない。

1-1 大規模ボリュームデータ処理に関する研究調査

大規模な画像処理は、扱うデータサイズがボトルネックとなり、1TB を超えるメモリが比較的容易に使用できるようになった現在でも課題の一つである。大規模画像処理のポイントは、プログラムのピークメモリ使用量を減らすことであり、大きく分けて 2 つのアプローチがある。一つは、アルゴリズムはそのままに、八分木やランレングス符号化など圧縮したデータ表現を採用したり、不要なメモリ領域を直ちに解放するなど、メモリ管理を厳密にしたりすることでメモリ使用量を抑える方法である。圧縮した分扱えるサイズは大きくなるものの、根本的な問題は解決されるわけではない。もう一つは、小さな問題に分割して解く方法である。逐次的にデータを読みつつ処理するストリーミング処理や、HDD を中間データ保存先として利用する”Out-of-Core”な方法が例として挙げられる。部分的な問題を解くため、データ構造の工夫がいるだけでなく、並列化なども重要なトピックになる。本報告では、データ構造、各種アルゴリズムについて大規模画像処理に資する研究事例について報告する。

[Keywords: 分割統治法, ストリーミング, 連結成分ラベリング, 空間ハッシング, 距離場, スケルトン抽出]

1. 外部ストレージを利用した大規模コンテナおよびアルゴリズムライブラリ

Dementiev, R., Kettner, L. and Sanders, P. (2008), STXXL: standard template library for XXL data sets. *Software: Practice and Experience.*, 38: 5389–637.

<https://doi.org/10.1002/spe.844>

DL: http://algo2.iti.kit.edu/dementiev/files/stxxl_spe.pdf

本論文では、C++ STL の vector や map などといったコンテナ構造とそれを操作する関数（ソートなど）を、外部メモリを使用することで大規模処理できるよう拡張した論文である。STXXL は、データベースで用いられているモデルを導入して、3層（OS 依存部の非同期 I/O、データブロック管理、API）からなるモデルを提案している。API 層は、C++STL のインタフェースを模した STL-user レイヤーと、パイプライン処理に基づく遅延処理によって I/O を減らした stream レイヤーからなる。論文では、メモリが 512MB に制約された環境下における、100 億本のエッジを持つグラフの最大独立集合(maximum independent set)計算のベンチマークにおいて、既存法(LEDA-EM)よりも高速かつ I/O 処理が少ないことを示しており、特にストリーミング処理の計算速度が4倍程度であることを報告している。また、応用例として suffix array の構築、幅優先探索、最小全域木、連結成分ラベリングなどが触れられている。実装は、OSS として <http://stxxl.org> として公開されている。

2. 疎なボリュームデータを圧縮するデータ構造

Sylvain Lefebvre and Hugues Hoppe. 2006. Perfect spatial hashing. *ACM Trans. Graph.* 25, 3 (July 2006), 579–588. <https://doi.org/10.1145/1141911.1141926>

DL: <https://hhoppe.com/perfecthash.pdf>

本論文は、多次元データを対象とした完全な空間ハッシングの方法について述べた論文である。非0の要素が疎なボリュームデータ(画像)において、ハッシングによって、入力データよりもはるかに小さいボリュームデータに圧縮することを実現している。提案手法は、2つの異なるハッシュ関数(単純な剰余計算) h_0, h_1 を用いて、 $h(p) = h_0(p) + \Theta(h_1(p))$ によってハッシュ値となる座標値が与えられる。ここで Θ は、オフセットテーブルの値(移動量)を指し、1つのハッシュ関数だけでは発生するハッシュ値の衝突を避けている。論文では、メッシュ上での流体計算、3D テクスチャや、干渉計算などメッシュの例が示されているが、2値化したボリュームデータの圧縮用途での利用が考えられる。大規模ボリューム処理においては、薄板部品のようなデータに対する処理等で利用できると考えられる。

3. 連結成分ラベリング

Martin Isenburg and Jonathan Shewchuk, “Streaming Connected Component Computation for Trillion Voxel Images,” MASSIVE Workshop, June 2009.

<https://www.cs.unc.edu/~isenburg/papers/is-sccctvi-09.pdf>

本論文は、連結成分ラベリングをストリーミング処理で行う手法を提案した論文である。提案手法は、ランレングス表現された2値画像を一般的な連結成分ラベリングアルゴリズムである union-find 法をストリーミング化させることで低メモリ化を実現している。具体的には、各行(3Dの場合は各層)について、そこに存在するラン(ランレングス表現されたデータ)とノード(連結成分を表すデータ)のみを保持し、union-find によって連結成分を探索する。各連結成分の面積、体積であれば1回、ラベルの付与には2回の走査で計算が可能である。ランダムに前景ボクセルを発生させたデータ(サイズ: $10,000^3$)のデータに対して15時間程度、350MBのメモリ使用量で計算できたことを示している。

4. 距離場算出

C. R. Maurer, Rensheng Qi and V. Raghavan, “A linear time algorithm for computing exact Euclidean distance transforms of binary images in arbitrary dimensions,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, no. 2, pp. 265–270, Feb. 2003, doi: 10.1109/TPAMI.2003.1177156.

本論文は、 n 次元の2値画像から距離場、前景ボクセルを母点とするボロノイ図を生成する手法について述べている。提案手法は、各行、各断面で局所的なボロノイ図を考えることで距離場およびボロノイ図を構築している。2次元画像を例に取ると $y=b$ におけるサンプリング点 (x, b) の Y 方向の距離による最近点を計算した後、 XY 平面における距離値の更新を実施する。アルゴリズムは、ボクセル数に対して線形で計算が可能であるとともに並列度も高い。また、ストリーミングによる計算も可能であるため、大規模3次元画像であっても2断面分のメモリ量で計算可能である。

5. 距離場算出 2

T. Michikawa, K. Tsuji, T. Fujimori, and H. Suzuki, “Out-of-core distance transforms,” in *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Solid and physical modeling*, 2007, pp. 151-158.

本論文は、距離変換を分割統治法によって解いている論文である。提案手法は、入力データを小さなブロック(cluster)に分割し、各ブロックに対して局所的な距離場を計算し、隣接ブロックに伝播させることを繰り返すことで距離場を計算する。この時、ブロックの計算順序にブロック内で更新された最小の距離値を用いることで距離場計算が収束することを示している。HDD への読み書きが多い分、ストリーミング法と比較してスピードは劣るが、ストリーミング法では困難な測地線距離や非ユークリッド距離場の算出が可能な手法である。

6. スケルトン抽出

Yiyao Chu and Wencheng Wang, Out-of-core Extraction of Curve Skeletons for Large Volumetric Models, *Computer Graphics Forum*, 41, 7, 2022.

<https://diglib.eg.org/bitstream/handle/10.1111/cgfl4652/v41i7pp001-012.pdf>

本論文は、大規模なボリューム空間でスケルトン構造を抽出する手法について述べている。手法は、距離場の構築、中立面の構築、縮退によるスケルトンの抽出からなり、全てにおいてブロックに分割したデータに対して計算を実施する”out-of-core”な処理を実施している。中立面の構築では、距離値の大きい点からサンプリング(prominent vertex)した後、その頂点間の連結性を点間の距離及び距離値から算出してエッジを構築するとともに中立面構造を抽出する。えられた中立面から不要なエッジを指標に基づき枝刈りするとともに、Brush fire 法に基づき中立面を縮退させスケルトン構造を計算する。例題では5億ボクセル程度(512x512x2048)のデータのスケルトンを既存手法に品質の面でやや劣るものの、100MB 未満のメモリ使用量で計算できていることを示している。

1-J X線CTによる幾何形状計測に関する研究調査

X線CTは内部情報を非破壊で取得できることから、取得したボリウムデータに対して計測を行うことで、従来の測定機で測定不可能であった箇所の幾何形状計測が可能となることから製造現場への導入が進んでいる。X線CTでの幾何形状計測分野での近年の傾向としては、装置能力の評価方法に関するもの、装置の改良による性能向上に関するもの、測定結果の評価に関するもの、自動・インライン・リアルタイムといった目的に特化させるもの、などの方向性が盛んである。ただし、測定結果の信頼性を保証するためには、より信頼性が高い標準と比較することでトレーサビリティを確保することが課題である。

[キーワード: 寸法計測、トレーサビリティ、不確かさ、性能評価、リアルタイム計測]

1. X線CT装置のトレーサビリティと性能評価の進展について

Dewulf W, Bosse H, Carmignato S, Leach R. Advances in the metrological traceability and performance of X-ray computed tomography. CIRP Annals 2022;71:693-716.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.001>.

本論文では、X線CT計測結果への影響要因とそれに対する先行研究のレビューがまとめられている。まず、影響要因について、一覧にまとめられており、要因(装置自身、環境、測定対象物、測定条件、データ処理)ごとに先行研究がある。次に、装置の性能評価法については、複数のテスト項目(Pテスト、Eテスト、構造分解能)があり、それに合わせて器物が提案されている。さらに、測定不確かさ算出法に関して、GUM(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)に従った積算方法およびISO 15530 シリーズの3種類の手法(比較測定、シミュレーション、多数回測定の分散分析)について述べられている。

2. 器物測定によるX線CT装置の寸法測定能力評価

Zwanenburg EA, Williams MA, Warnett JM. Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems. Precision Engineering 2022;77:179-93.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.05.005>.

CMMの受入検査規格:ISO 10360 シリーズをX線CTに適用するためのドイツのガイドライン: VDI/VDE 2630-1.3:2011 に規定された方法に従って、同一器物を異なる装置で測定することで、共通の基準で性能評価した。CMMで校正済みの器物(異なる倍率用に2水準)を共通の条件と各装置の最適条件で測定した結果を比較した。いくつかの装置ではカタログスペックを超える誤差が確認された。

3. 寸法計測のための装置改造

Bircher BA, Meli F, Küng A, Thalmann R. A geometry measurement system for a

dimensional cone beam CT. Proceedings of the 8th Conference on Industrial Computed Tomography 2018:7.

スイスの国立標準研(METAS)における計測用CTの開発についての報告。各要素については続報が別個に論文として報告されている。レーザ干渉計を各測定位置に取り付けることで線源-回転軸-検出器間の位置関係を常時正確に測定することで倍率誤差などを低減している。ステージの機械精度、線源の位置安定性などを評価した結果についても報告されている。これらの評価された結果を再構成計算に利用できればより正確な測定結果を取得できる。

4. 測定時間の短縮

Rossides C, Towsyfy H, Biguri A, Deyhle H, Lindroos R, Mavrogordato M, et al. Effects of fast x-ray cone-beam tomographic measurement on dimensional metrology. Metrologia 2022;59:044003. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac7926>.

寸法測定精度を損なわずに高速なCT測定を実現するため、2つのアプローチ:少ない投影枚数での測定、短い露光時間での測定、について調べた研究。これらの悪条件下で画像の質を上げるために、再構成アルゴリズムについても FDK 法以外に反復法である CGLS 法、FISTA 法の調査を行った。FISTA>CGLS>FDK の順に直径が大きめに測定されることが示された。画像としては綺麗に見えても直径測定結果にはバイアスが生じる場合がある。

5. リアルタイム(インライン)計測

Warnett JM, Titarenko V, Kiraci E, Attridge A, Lionheart WRB, Withers PJ, et al. Towards in-process x-ray CT for dimensional metrology. Meas Sci Technol 2016;27:035401. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/3/035401>.

空港の手荷物検査用のスキャナー(real Time Tomography: RTT)の寸法測定能力を評価するために、プラスチック製の 3D プリンタ造形物を測定した。270 mm の長さを 1.08 秒でスキャンできるが検査用なのでスケールリングが必要。通常のCT装置と比べて表面偏差(95%)が 0.60 mm 以内でサブボクセルオーダーであると示された。

1-K X線CT画像の画質評価に関する研究調査

画質は、画像システム側の要因(入力, 画像形成等, 出力)だけではなく, それを観察する人間側の要因も関係している。そのためX線CTにおける画質評価ではCT値の標準偏差やコントラスト, 解像力などの物理指標の他に, 観察者の識別可否に関する心理物理評価や医療CTの場合には診断精度の評価などが行われる。X線CT装置の品質管理のための画質の評価指標については現在までに大きな違いは見られない。近年では, 超解像技術によるX線CTの高画質化の取り組みや, 深層学習によって単一エネルギーCTからデュアルエネルギーCTを合成する取り組みが行われており, その検証のためにフーリエ変換に基づく解像力評価や, 画像の類似度に基づく評価が適用されている。

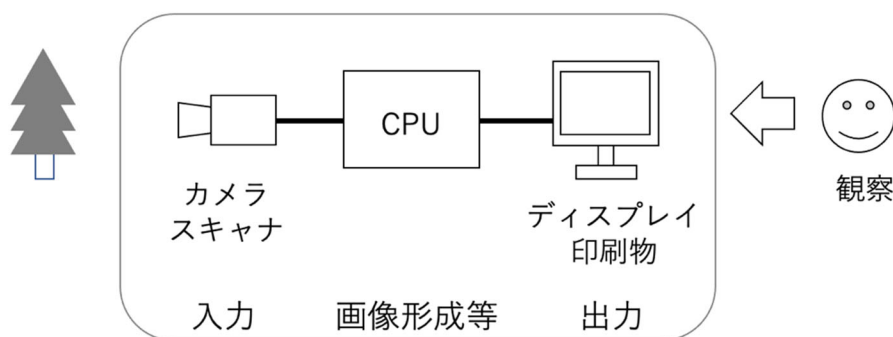


図 2-2-1-7: 画像システムの構成

[キーワード: X線CT, 画像品質, 品質評価, 客観評価, 主観評価]

1. CTの画品質最適化のための画質評価手法

[Keywords: image quality, measurements, Diagnostic accuracy, Diagnostic efficacy, Objective image quality, Subjective image quality, CT]

Francis Zarb, Louise Rainford, Mark F. McEntee, “Image quality assessment tools for optimization of CT images”, J Radiography, 16, 147-153, 2010.

<医療X線CT>

X線CTにおいて, 画像から最大の診断情報を得るためにCTシステムの適切な品質保証が重要である。特に医療診断のためのX線CTシステムでは, 画質は, 最終的な診断業務のしやすさを含めた主観的な尺度であるため, 物理的テストの他にも心理物理的テスト, および診断精度の観点からの評価が行われている。本論文では, それらの基礎的な評価指標についてレビューしている。物理的テストには以下のものがある。

均一性(Uniformity, 水は 0HU, 空気は 1000HU): CT値の経時的な安定性

直線性(Linearity): CT値とスキャン対象の減弱係数の直線性

ノイズ(Noise): 均一な関心領域におけるCT値の標準偏差

検出量子効率(Detective Quantum Efficiency, DQE): 入出力の SN 比の 2 乗比

変調伝達関数(Modulation Transfer Function, MTF): 細部の再現性(空間分解能)

コントラスト解像度(Contrast Resolution, CR): 濃淡の再現性

また, CT画像は最終的に観測者が見て診断をするため, 画像基準と比較して可視性を評価する VGA (Visual grading analysis) や, 実際の診断精度を評価する ROC 解析 (Receiver Operating Characteristic analysis) がある。ROC 解析で有意な結果を得るためには, 微妙な病状を伴う多くの画像が必要等の制約はあるが, 放射線医学における評価ではよく用いられている。

2. 単一の病院センターで臨床的に使用されている頭部 CT イメージング用の 5 つの異なるスキャナーの物理的画像品質の包括的な評価 - ファントム研究

[Keywords: algorithms, Humans, Phantoms, Imaging, Signal-To-Noise Ratio, Tomography Scanners]

P Barca, F Paolicchi, G Aringhieri, F Palmas, D Marfisi, ME Fantacci, D Caramella, M Giannelli, “A comprehensive assessment of physical image quality of five different scanners for head CT imaging as clinically used at a single hospital centre-A phantom study”, PLoS ONE 16(1): e0245374. 2021.

<医療X線CT>

放射線被ばくを低減するためCT装置の設定最適化を行う。そのための指標として物理的画質指標を利用し, 3 つのメーカー製の 5 つのX線CT装置の画質の包括的な評価をファントム実験により実施した。物理評価として以下の各項目。各指標は 5 回の繰り返し実験での平均値と標準偏差を求めた。測定の結果, 線量に関して同等になるプロトコルで撮影した 5 台のX線CT装置の画質に大きな違いが確認された。

ノイズレベル: 均一な領域内のCT値の標準偏差(画素ごとのCT値のばらつき)

パワースペクトル(Noise Power Spectrum, NPS): ノイズの空間周波数分布(画像の外観(テクスチャ)に関連)

コントラスト対ノイズ比(Contrast to Noise Ratio, CNR): 背景のCT値の標準偏差に対する対象と背景のCT値の差

変調伝達関数(Modulation Transfer Function, MTF): インパルスレスポンス(画像のぼけ関数)の周波数応答(小さい対象を検出する性能)。MTF の 50%, 10%になる周波数で比較

低コントラスト検出性(Low Contrast Detectability, LCD): 画像の様々な位置, サイズでの関心領域における平均CT値のばらつき(それぞれ領域サイズで違いを判別できるコントラスト値)

不均一性指数(Non-Uniformity Index, NUI): ファントム全体を小領域に分割したときの各小領域内の平均CT値の標準偏差(マクロなCT値のばらつき, ビームハードニングなどの影響を反映)

3. X線CTのためのヒストグラムに基づく画質測定尺度の評価

[Keywords: X-ray computed tomography, image quality measure, histogram]

M Reiter, D Weiß, C Gusenbauer, M Erler, C Kuhn, S Kasperl, J Kastner, “Evaluation of a histogram-based image quality measure for X-ray computed tomography”, 5th Conference on Industrial Computed Tomography, 25-28, 2014.

<産業X線CT>

X線CT画像の画質評価において、あらかじめユーザーが指定した関心領域内の SN 比やコントラスト対雑音比 CNR が用いられることが多いが、関心領域の指定では局所的なアーチファクトの影響を避けるために専門知識が必要になる場合がある。本報告では、最適化のために専門知識を有する作業をせずにノイズやアーチファクトによる品質低下を考慮した全体的な品質尺度としてグレイ値ヒストグラムを用いた尺度を提案している。

産業用X線CTのスキャン品質は主に、ビームハードニングや散乱アーチファクト、ノイズ、画像ぼけの影響を受ける。これらはCT値のばらつき(ヒストグラムの広がり)に影響を及ぼす。画像中に2つの領域(1つの材料による対象物と空気など)があるとき、ヒストグラムに存在する2つの分布の平均 μ_i 標準偏差 σ_i ($i=1,2$)とすると、画質を $Q = |\mu_2 - \mu_1| / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ で表す。Q 値の導出に関心領域の設定は不要。Q 値には各種の画像劣化要因が反映される。ただし複数の素材が含まれる場合はヒストグラムの分類アルゴリズムが必要となる。

4. 超解像によるX線断層像の解像度向上

[Keywords: computed tomography, Super-resolution, Image quality]

T Dreier, N Peruzzi, U Lundström, M Bech, “Improved resolution in x-ray tomography by super-resolution”, Applied Optics, 60(20), pp. 5783-5794, 2021.

<産業X線CT>

2 軸方向に電磁的に移動可能なマイクロフォーカス X 線スポットを用いて超解像技術により高解像度化を行う。シンチレータベースの CCD では、幾つかの画素にまたがる点広がり関数(Point Spread Function, PSF)により画像にぼやけが生じるため、CT画像の空間分解能は PSF により制限される。光子計数型検出器(Photon counting detectors)は個々のピクセルで光子をカウントし、単一ピクセル相当の PSF を実現するものだが、ピクセルサイズが比較的大きいという欠点がある。超解像技術は、わずかにシフト撮影された低解像度画像から高解像度画像を推定する技術である。このためには、相互相関により画像間のシフトを正確に推定し画像を高解像度グリッド上に再構築する必要がある。本論文では、光子計数型検出器を用いて超解像を行うことでX線CTの空間分解能を向上するために有効であることを示した。

超解像による解像度の向上を示すため、に画像中のエッジ部から求めた変調伝達関数(Modulation Transfer Function, MTF)の 10%値や、フーリエ環相関(Fourier ring correlation, FRC)を採用した。FRC は、投影データを偶数番目と奇数番目に分けてそれぞれ画像を作

る。両者は同じ画像になるため有意な情報を有する低周波帯での帯域ごとの相関係数は1に近くなるが、解像限界を超えた帯域は有意な情報を持たないため相関係数が小さくなる。このFRC曲線からしきい値基準との交点によって解像限界を得る。

5. キロボルトCTと深い畳み込み敵対的生成ネットワークを用いたデュアルエネルギーCTにおける単色CT画像の合成

[Keywords: deep learning, artificial Intelligence, dual-energy CT, image synthesis]

D Kawahara, S Ozawa, T Kimura, Y Nagata, “Image synthesis of monoenergetic CT image in dual-energy CT using kilovoltage CT with deep convolutional generative adversarial networks”, J Appl Clin Med Phys, 22(4), pp.184-192, 2021.

<医療用X線CT>

同じようなX線吸収を持つ領域はCT値が同じになり画像上で見分けることが難しいが、2つの異なるエネルギーによるX線吸収率の変化は物質固有であり、これを利用してCT値が同じ物質を見分けることができるデュアルエネルギーCT (Dual Energy CT, DECT)がある。DECTで様々なエネルギーの単色CT画像を作ることができる。エネルギーが低いほど軟部組織のコントラストが向上し、エネルギーが高いほどビームハードニングアーティファクトが減少する。本論文では、敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network, GAN)を用いてDECTの画像を学習し、これを用いて単一エネルギーCT (Single Energy CT, SECT)画像からDECTで生成した仮想単色CT画像を合成した。ここでは、28人の患者からDECT18,084枚の画像を収集し、ここから40, 70, 140keVの単色CT画像と、120kVpのSECT画像を再構成し学習データとした。本手法により、SECTからDECT相当の画像を作ることができ、イメージングコストとデータ処理時間の大幅な削減につながる。小さな構造の再現性の向上は今後の課題である。

合成した単色CT画像と実際の単色CT画像との比較のために、画像の類似度の尺度としてMAE, MSE, RMSE, SSIM, MIが用いられた。

MAE (relative Mean Absolute Error) : 2画像の差の絶対値に基づく尺度

RMSE (relative Root Mean Square error) : 差の二乗に基づく尺度

PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) : 最大値と差の二乗和に基づく尺度

SSIM (Structural SIMilarity index) : 明るさ, コントラスト, 構造 (共分散) に基づく尺度

MI (Mutual Information) : 2画像のCT値の組み合わせが発生する確率に基づく尺度

1-L X線CT(形状抽出)に関する研究調査

本報告では、X線CTボリューム(3次元画像)から表面メッシュ等の形状データを取得するのに必須の技術である「セグメンテーション(領域分け)」と、形状認識に有用な「中心軸の抽出」に注目した。3次元物体の中心軸とは、シート状・線状の要素を用いて物体の骨格のような構造を表し、位相や形状の厚み・詳細度を把握するのに役立つ。今回紹介する手法はいずれも位相幾何学的精度または位相的精度を重視した手法であり、特に、XXL-CTスキャンデータのような大規模データの処理可能性、実スキャンデータには避けられないノイズ耐性、複雑形状への対応可能性について論じている。通常サイズのCTデータからの形状抽出は従来より多く研究されており、良好な結果が多数報告されているが、大規模実CTデータへの適用にはデータの量・質ともに解決すべき課題が複数あり、アーチファクトやノイズへの耐性や軽減・計算量の少ないアルゴリズムの開発が求められている。

[キーワード: X線CTボリューム、大規模CTデータ、セグメンテーション、中心軸抽出、高精度、高速]

1. 大規模データ処理可能、機械学習を利用した対話的セグメンテーション

Thomas Lang and Tomas Sauer, AI-Supported Segmentation of Industrial CT Data, In Proceedings of 11th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2022), Poster Presentation (I) Wed 17:50, online (Wels, Austria), Feb., 2022.

https://www.ndt.net/article/ctc2022/papers/ICT2022_paper_id211.pdf

[キーワード: 大規模CTデータ、セグメンテーション、機械学習、対話的操作、高精度]

1つのデータ量が数ギガバイト(GB)～数テラバイト(TB)と大規模なCTデータは、アルゴリズムによってはメモリ不足・処理時間増大のため、処理不能に陥る。本論文では、局所特徴量を用いた機械学習により、ボクセル数に対し線形時間のセグメンテーション法を提案する。ユーザーはボクセル数個に抽出対象か否かのラベルを与える。その周辺領域に対する特徴量を算出し、それにより訓練したサポートベクターマシンを用いて、データ中の各ボクセルが抽出対象である確率を算出する。必要に応じ、これを複数回行う。車・植物等のCTボリュームに適用し、数GBのデータを十数分程度で処理できること、低コントラスト画像も良好に処理できること等を示した。

2. XXL-CTボリュームへの Flood Filling Networks によるセグメンテーションの適用

Roland Gruber, Stefan Gerth, Joelle Claußen, Norbert Wörlein, Norman, Uhlmann and Thomas Wittenberg, Exploring Flood Filling Networks for Instance Segmentation of XXL-Volumetric and Bulk Material CT Data, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 40, Article number: 1, 2021.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-020-00734-w>

[キーワード: 大規模CTデータ、薄板、セグメンテーション、Flood Filling Networks]

最大 $10,000^3$ ボクセル＝数 TB にもなる XXL-CT のような装置による計測データには、手動のセグメンテーションは現実的でない。また、従来の自動セグメンテーションは、産業用 X 線 CT では計測物が多岐にわたること (詳細不明な場合もある)、撮影時のアーチファクト等の理由で、適用が難しい。そこで本論文では、CT データ中の物体領域情報でなく物体間の境界情報を用いる Flood Filling Networks (FFN) を適用し、抽出対象ごとにその境界を得ることを繰り返すことを提案している。XXL-CT による航空機の実スキャンデータも適切にセグメンテーションでき、FFN がアーチファクトを含む大規模データにも有効であることを示した。FFN の利点はクラス自体の情報を用いないことであるが、今回の実験では、別種の計測物や異なる CT 装置による CT データに基づいて訓練したモデルが常に転用可能とは言えない結果になった。また、XXL-CT データ用の学習には 30 日を費やした。学習データは、通常サイズの CT ボリュームであれば既存の画像処理＋手作業で修正した。XXL-CT の場合は小領域に分けて手動で作成したため 350 時間を要した。学習データ生成の自動化が必須である。

3. ボクセルデータから高精度に中心軸を算出

Yajie Yan, David Letscher, and Tao Ju, Voxel Cores: Efficient, robust, and provably good approximation of 3D medial axes, ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 44 (August 2018), 13 pages.

<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3197517.3201396>

[キーワード: ボクセルデータ、中心軸、精度保証、高速、ホモトピー同値]

ある形状の中心軸とは、その形状の骨格を表すような低次元の構造であり、分岐・穴の空き方などの構造的性質がその形状と同じ (ホモトピー同値、位相的構造が等しい) ものである。形状の認識や工学的応用に有用な構造であるものの、その計算は、表面の微細な変形の影響を受けるなど不安定であった。本論文では、計算効率が高く、頑健で、真の中心軸から 1 ボクセル未満しか相違がないことが保証された近似的中心軸 (ボクセルコア) を提案する。ボクセルコアは、ボクセル集合で表現された 3 次元形状 O の表面点に対するボロノイ図の構成要素のうち、 O の内部にあるものの集合として定義する。計算量は O の表面上の点数に関して平均的に線形であるため、大規模データにも適用可能である。近似精度はボクセルサイズに依存するので、正確な中心軸を求めるには高解像なボリュームデータが必要である。一般に CT データでの中心軸算出は、境界がいかに正しく少ノイズで抽出できているかが肝要であったが、本手法ではノイズの影響緩和も実現されており、実スキャンデータに対してもよい結果が出ると期待される。

4. 植物の根のボリュームデータから、高速に、根の構造を階層化・形状解析

Dan Zeng, Mao Li, Ni Jiang, Yiwen Ju, Hannah Schreiber, Erin Chambers, David Letscher,

Tao Ju and Christopher N. Topp, TopoRoot: A software pipeline for computing branching hierarchy and fine-grained traits of maize (corn) root crowns from X-ray CT images, Plant Methods volume 17, Article number: 127, 2021.

<https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-021-00829-z>

[キーワード: ボクセルデータ、植物、根、中心軸、形状解析、位相誤差低減、階層構造]

植物の根は細長く密集しており、部位により中に空洞があるなど、CTボリューム上での位相の判断が難しく、形状解析の自動化が困難であった。本論文では、位相の誤差少なく、根の特徴量を算出可能な手法を提案する。根の中空は、最初に画像処理と大域的最適化でそれを充填することで、単一の根として抽出できるようにする。それを VoxelCore 法・次元削減により曲線構造のみの中心軸に変換し、さらに位相を修正する。このように処理した中心軸はグラフ構造になっており、階層構造を与えることができる。最後に、各階層において特徴量を算出する。中心軸の計算・階層構造の付与・算出する特徴量には、植物の形態解析で実績のある手法・指標を採用したが、これらは同様の他手法を用いてもよい。実験では、 400^3 ボクセルの CT データに対し、数分程度で植物の形態学的形状特徴を算出できた。

5. 入れ子構造の位相簡略化

Dan Zeng, Erin Chambers, David Letscher, and Tao Ju, Topological Simplification of Nested Shapes, Computer Graphics Forum (Proc. SGP 2022), 41(5), pp. 161–173, August 2022.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cgf.14611>

[キーワード: ボリュームデータ、入れ子構造、位相簡略化、幾何的特徴保存、最適化]

入れ子状の形状に対し、凹凸等の幾何的特徴にはなるべく手を加えず、入れ子構造を保ったまま位相を簡略化する手法を提案している。既存の位相簡略化は単一の形状を想定しているため、入れ子の構成要素に対し独立に適用すると、その結果は入れ子を成さなくなるおそれがある。本手法は入れ子構造を保存するものとしては初の位相簡略化法である。この方法は、island・handle・cavity の 3 種の位相的特徴を除去することで位相を簡略化する。入れ子を構成する各要素に対し、入れ子構造を維持する制約の下、位相的複雑度・入力形状からの幾何的变化量の 2 つの項に関する大域的最適化問題を解く。この問題は、形状の各点に関し、cutting と filling という 2 種の形状操作のいずれを行うかを決めるラベリング問題となる。本手法は、脳や植物の根など自然界における多層構造はもちろん、入れ子状の工業製品の形状認識・解析にも有用であると考えられる。

2. CT技術の応用に関するセミナー

分科会において、CT技術の実務的な応用に関する有識者によるセミナーを2回開催した。

2-A 医工連携・分析・シミュレーションにおけるCT画像活用

開催日時：2023年1月20日10:00-10:40

a社より、ボリュームデータ処理ソフトウェアsimpleware による医工連携・製造業への活用例をご紹介いただいた。Simpleware はo社による、3次元画像(X線CTボリューム、MRIなど)データ用の高機能イメージデータプロセッシングソフトウェアである。本セミナーでは、機能の概要紹介と、実例紹介があった。その後委員とのディスカッションが行われた。

医療分野での実用例として、人体のボリュームデータを、骨・臓器などにセグメンテーションした画像が示された。この作業は数分程度で完了するとのことである。また、破断のシミュレーションと解析を行った事例、熱交換器のボリュームデータの解析事例の紹介があった。熱交換器は金属積層造形技術で製造されたものであり、その性能を調査するためにsimplewareを利用したとのことであった。

現時点における商用ソフトウェアがどのような機能をどの程度の性能で提供しているか、また、望まれる画像処理・形状処理技術にはどのようなものがあるかを把握することができた。

以下にご紹介いただいた機能と実例を記す。

【CTボリューム操作】

- ・セグメンテーション(領域分割):アセンブリ製品・人体のCTボリュームに適用。人体なら自動セグメンテーションも可能。産業用CTに発生しやすいアーチファクト対策可能な補間セグメンテーション。
- ・CTアーチファクト対応:ノイズ除去、各種フィルター処理によりアーチファクトの影響を軽減。

【解析】

- ・厚み計測
- ・繊維素材:配向テンソル算出、中心線算出、破断シミュレーション。
- ・異種データの扱い:CTボリュームとCADデータの位置合わせ。
- ・ボイド抽出・分析:鋳造品のボイド検出例の紹介。
- ・CADデータとの偏差分析:形状偏差の算出。simpleware上で流体シミュレーション可能。

【可視化】

- ・繊維配向可視化:複合材の解析事例。繊維上でカラーマップ表示。

【出力】

- ・データ変換:ボリュームデータから、3Dプリンティング用表面データ(色情報あり)・有限要素解

析用の複数マテリアルの四面体メッシュ・各部品の表面メッシュ・CADデータ生成。
・表面メッシュの高品質化。

2-B 二輪車製造におけるX線CT装置の活用 ～形状計測への適用～

開催日時：2023年1月23日17:00-17:50

b社より、製造業におけるCT技術の活用事例を中心に紹介があった。b社では、計測技術を用いたプロセス技術のデジタル化を推進しており、下記の4項目に関して説明がなされた。

1. 二輪車製造の工法と特長

二輪車はエンジンやフレームが外から見えるため、それらの外観品質(見栄え)と性能の両立が求められており、加えてコンパクト化・軽量化も重要となる。その中で、メインパーツであるエンジンやフレームの部品を成形するための鋳造技術の開発において、薄肉化、形状複雑化、材料・工法変更の要求を満たすためにX線CTは必須のツールとなっている。内部欠陥削減・変形抑制・肉厚精度向上のレベルアップを目指し、デジタルエンジニアリングの活用をすすめている。具体的には、シミュレーションによる事前検証とCTスキャンによる実物検証を素早く行うことを目指しており、サイバー・フィジカル空間の融合が進むことを期待している。

2. 形状測定装置の種類と活用

X線CTのみでなく、接触式・非接触の測定機も目的に応じて使い分けており、単に検査目的ではなく品質改善のためのデジタル化ツールとして用いている。接触式は、機械部品の重要寸法を確認するために用いており、最近では測定結果をわかりやすく可視化することも求められており。非接触式は、小さなものから大きなものまで多数の機種があり、メートル単位の測定物を迅速に測る需要も増えてきている。装置の進歩が進んでおり、可搬型の装置で測定対象のある場所で測定を行うことにより、時間短縮も達成できている。

X線CTも複数の機種を所有しており、寸法計測用途や内部欠陥検査用途など、目的と測定時間とのバランスで利用する機種を決めている。医療用CTは、鋳造品の内部状態の確認を迅速に行うために使っている。一般的な産業用CT装置は、形状測定や内部欠陥の詳細解析に用いている。計測用CTに関しては、導入検討中であるが、調査によれば画質向上がかなり進んでおり、小さなアルミ部品であれば接触式の代わりに使うことも可能であると思われる。MeV クラスの大型超高出力CTは、エンジンや二輪車を丸ごと測定する要望はあるが、費用対効果の面では検討が必要で、得られるデジタルデータの有効活用が今後のキーとなる。

3. X線CTによる寸法検査・リバースエンジニアリング

鋳造品をCTで3次元形状データを取得し、鋳造巣の分布解析のみでなく、肉厚分布や簡易的な寸法検査を実施、鋳造条件出し・型修正・CAE精度向上に利用している。ただし、詳細な寸法測

定は、接触式座標測定機が今のところメインとなっている。三次元データは、設計者と製造担当者と共有し、設計・製造のサイクルにおける重要なコミュニケーションツールとなりつつある。

リバースエンジニアリングでは、CADデータのない古い機種エンジン部品からデジタルデータを作成し、設計の修正や、燃焼解析シミュレーションを実施したこともある。測定精度を求められる部品に関しては、接触式で寸法測定を併用した。内部構造の可視化の用途もあり、例えば、ガスの充填状態に関して、シミュレーションとの比較し予測精度向上にも役立てている。エンジンアセンブリを丸ごと測定もしており、内部状態の可視化や組付け精度の解析への展開も計画している。

4. X線CTに対して今後期待すること

- ・X線CTを用いて、量産品の内部欠陥の検査のみならず、寸法測定もインラインで全数検査を行いたい。
- ・大型高出力CTによる車体やエンジン丸ごとデジタルデータ化には、品質保証や不具合調査のみならず、複雑な解析の精度向上を図りたい。
- ・アセンブリ品の解析のために、複合部品や材料を自動分割する画像処理技術は必須であり、特に専門的な知識がなくとも誰でも使えるようなツールの開発が望まれる。
- ・コロナの影響で、マリンエンジンの需要が伸びており、大型の部品・製品のCTスキャンに対する要望は広がっている。

3. ヒアリング

分科会の一部のメンバーでCT技術に関連する業務を行っている企業2社を訪問し、現場で必要とされている技術のヒアリングを行った。

3-A c社訪問調査報告

訪問先:c 社

日時:2023 年 12 月 27 日 13:30~16:30

訪問者:D 大学、Z 大学、CPE 組合

1. 企業概要

従業員 8 名の会社。創業は 2007 年で半導体の非破壊検査などを業務としていたが、その中で X線CTのサービスに商機を見出し、2015 年に c 社を設立した。当初は、X線CT撮像を外部に委託していたが、p 社製の 230KV と 450KV の装置を導入し、サービスを行っている。特に、リバースエンジニアリングを得意とし、業務が拡大している。

2. 装置の特徴

q社製の 230KV の開放管のX線源をもつ装置は 16 インチ FPD 搭載のマイクロフォーカス型で、特に大きな撮像エリアをもつ。450KV の装置は、密封管のミリフォーカスのX線源で、2つのラインセンサーと 16 インチフラットパネルをもつ。p 社製の装置は、撮像パラメータを細かく設定することができ、最適な撮像条件を実現できるとともに、その知見の蓄積が同社の強みとなっている。また光学式スキャナーATOS Core も所有しており、CTで上手くスキャンできない場合には、このデータと合成することもある。精度保証はリングゲージを使って行っている。ユーザーの中には、フォレストゲージのようなファントムを持ち込んで検証を行う場合も、稀にはある。

3. リバースエンジニアリングサービス

CT撮像する技術者(1 名)と、データ処理を行うオペレータ(4 名)を分けている。一般的には両方を同じ人が行う企業が多いように思われるとのことであった。工数の大きいリバース作業を分担して行うことによって、サービスに要する時間を 2 週間から 3 週間にできている。

依頼を受けるサンプルは様々であり、作業見積もりを行うことは困難であるため、同社では、基本的には依頼を受けたサンプルをまずは測り、その結果に基づいて顧客との意見交換を行い、見積もりを出している。90%は受託できるが、10%程度は、スキャンしても受託できない場合がある。CT スキャンだけのサービス料金はかなり低めに設定しており、データ処理で課金する料金体系になっている。実際、スキャンだけの委託は少ない。

データ作成では、顧客の使えるデータを作成することを最優先している。例えば、STL としては水密化するとか、CAE のデータであれば、機械加工による平面部や円筒穴などは、データ処理によって平面・円筒面に加工したり、同じ穴径の穴が多数あった場合は、それらを同じ径にしたりする。また、CT画像から作成するとどうしても生じてしまう段差やギャップを埋めることもある。処理は様々なソフトを使いまわして行っている。ソフトの機能が十分でないところが多いが、それはマニュアル作業でカバーしている。

4. 受託案件の特徴

自動車メーカーや自動車部品メーカー、機械部品メーカーからの受託が多い。単品の部品だけでなく、アセンブリの受託も増えている。リバースのレベルは様々で、対象の一部のみを対象とするケースもあれば、全体を材質毎に分けて形状抽出することもある。ユーザー企業の中には、自社で撮像して、リバースエンジニアリング業務のすべてを同社にアウトソースしているようなところもある。目的としては、他社品のベンチマーキングが目的の受託が多い。例えば、カタログ値などでは分からない他社部品の実力を CAE で検証することなどがある。

5. 動向

自動車関連としてはエンジンが多いが、それに関しては現在の方法で対応できていると考えている。現在 EV 関係の e-axle や電池などが増えてきている。今後は、重量の大きい電池を搭載した車体の歪みなどを見たいというような要求は出てくると思われる。また、EV 車のエアコン効率評価のため、車体全体のCTデータを断熱性のチェックなどにも活用できる可能性も考えられる。さらに、製造業だけでなく、建築の 1/100 モデルをスキャンして、様々なシミュレーションをすることもできる。

3-B H 社訪問調査報告

訪問先:d社日時:2023 年 1 月 27 日 13:00~15:30

訪問者:D 大学、Z 大学

1. 企業概要

同社は非破壊検査装置の販売を事業としており、現在はX線装置、特にCT装置のカスタマイズが中心である。以前は海外企業の装置の代理店をしていたが、2016 年以降代理店契約はなく、ユーザーの要望に応じて様々なメーカーのX線源や検出器を組合せた H 社製のX線CT装置を製作・販売している。装置は、エネルギーの低い 90kV から高エネルギー450kV が中心で、更には 9MeV の LINAC を用いた装置を 2010 年に e 社に導入した実績もある。また、450kV, 300kV, 225kV のX線源による撮像サービスも実施している。

検出器は主にf社製のラインセンサーとフラットパネル検出器で、f社が買収したg社のものも提供している。低エネルギー用では、h社製の CMOS の検出器を使うことがある。X線源はf社製が多い。

2. 装置開発の特徴

様々なユーザーのニーズに対応するカスタマイズの装置開発となるので、開発段階では、ユーザーと綿密に打ち合わせる。まずは、どのような物の、どのような画像を取得したいか、などの要求を聞き、それに対してX線CTの特性を説明しながら慎重に仕様決めと設計を行っていく。本技術研究組合で使用した M 社のX線CT装置はかなり特殊な装置であるが、同社の手によるものである。数メートルサイズの CFRP 製プロペラの非破壊検査を目的とした大型装置で、H 社として初めてパネルシフト(+検出器の回転)を採用したり、再構成ソフトを拡張したりするなど、同社のカスタマイズ能力を示す装置となっている。

3. 最近のX線CTの動向

- 近年、計測目的のCT利用が増えているが、非破壊検査のためのCT使用の経験のないユーザーが、直接計測のためにCTを利用し始めるケースが多い。そのようなユーザーは、直接に計測ソフトを使用して作業を進め、CT画像自体を「見ない」傾向にあるなど、ユーザーの特性も変わってきている。それだけ、計測CTやソフトが普及して来ていると言えるかもしれない。
- 計測に対する精度保証の要求が多い。ISO 規格制定が遅れているために、社内の運用規則を定めている代用しているケースがある。特に、社内・グループ企業内で検査が完結する場合には、対象部品毎に CMM で計測した結果と、多数の部品をCTで計測した結果から求めた寸法値のバラツキを表す正規分布を求め、その標準偏差の値に基づいて計測精度を見積もっている。同社としては、Dimensional X線CT装置の製造はしていないし、上記のような手法のコンサルティングも行っていないが、実用的な精度保証の方法については、ユーザーに対

して簡単な説明を行っている。Dimensional X線CTは、基本的には一般の装置度と大きな違いはなく、装置剛性が高いことと、温度管理であると考えている。

- 高エネルギーX線CTについても要求が多くなって来ている。単一の大型部品に加えて、部品を組み合わせたユニットが対象となる。業界としては、自動車メーカーや部品メーカーが多い。例えば、エンジン車ではソレノイドで駆動するバルブユニットの例がある。おそらく耐久試験において経時変化を観察したいのではないかとと思われる。
- EV への対応としては、電池の撮像がある。従来は、単一のセルやユニットで、例えば端子の状態などを検査していた。最近に、床下を埋めるような大型の電池を計測したいという要望があったが、対応できていない。なお、日本企業の電池の製造拠点が東南アジアに置かれ始めており、CT装置を現地に設置したいというユーザーがいるが、H 社としては保守ができないので断っている。e-axel については、ケースは水冷のウォータージャケットがあり、エンジンと同じような構造をしているのでスキャンされているが、モーターを含む全体については、撮像事例はない。
- 撮像サービスにおけるデータ処理は i 社のソフトで対応できるところは実施している。一方リバースエンジニアリングについては、モデリングのセンスのある技術者が必要であり、同社では受託していない。
- 福島ハイテクプラザの装置も同社製の 300kV である。2021 年に導入され、キャビネットがオープン型で、特に測定器を撮像野に導入する in-situ 計測では使い勝手がよい。
- ヒアリングの後に、CT装置(450kV+300kV)の見学を行った。

4. 研究計画立案

上述の分科会で行ったCT画像処理技術に関する研究動向調査、セミナー、ヒアリングを基にして、当該技術に関して新機構で行う研究開発の中期計画(令和5年度から10年度)の立案を行った。令和5年度、6年度は研究環境の整備や体制構築を中心としながらも、下記の計画に沿って順次研究開発を開始する。そして令和7年度からの4年間で本格研究を行う。

4.1 研究内容

研究は次の三つのテーマについて行う。

【CT画像処理技術先端研究】

一般的な画像に対する処理技術は長年研究されてきている分野であり、現在でもAI技術の適用により新技術の研究が盛んにされている。本グループでは、それら最新画像技術を基にして、X線画像や再構成後のCT画像に対しての処理技術を中心に研究を進めていく。また、CT画像は3次元画像であり、データサイズも膨大となる。それらデータの利用を産業応用につなげるためには、高効率かつ高精度なデータ処理技術の開発が必須であり、AI技術などの活用によるブレイクスルーが必要となる。具体的な研究テーマを以下に挙げる。

- CT再構成計算の高効率化
- CT画像評価手法の確立と画質向上
- CTアーチファクト低減による画質向上
- CT画像セグメンテーションの自動化
- 形状計測精度の向上

【CT画像応用高度化研究】

デジタルエンジニアリング分野でCT技術の活用は進んできているものの、現状においてそのデータ活用は限定的なものに留まっている。例えば、複数材料で構成された部品やアセンブリ品のスキャンデータは、2次元断面画像の観察・解析が中心となっている。また、リバースエンジニアリングのための形状抽出や変形手法も、その多くは自動化されていない。そこで、本グループでは、以下の項目を中心として、複雑なアセンブリ形状のスキャンデータをフル活用するための技術を研究開発していく。

- アセンブリ形状の高精度部品形状抽出
- 3次元シミュレーションの自動生成
- 大規模3次元データの効率的かつ分かり易い可視化手法
- 陰関数曲面法を応用した3次元画像データ中の形状変形手法
- 3次元画像中の形状特長(厚みや隙間など)の評価手法

【CT画像活用新分野開拓】

デジタルエンジニアリングにおいては、成形品の検査、現物ベースシミュレーション、寸法測定が現在の主な活用先である。本グループの研究では、それらの延長線に留まらず、新たな活用先となるユースケースを模索し、そのユースケースのための課題の抽出と、課題解決のための技術開発を行い、さらに実際にユースケースに適用することによってその有効性を実証していく。加えて、デジタルエンジニアリングのみでなく、CT技術の応用分野を開拓していき、新たな産業創出へ貢献する。下に、このようなユースケースの例を挙げる。

- ・積層造形品のCT測定による製造品質・精度の向上
- ・3次元CT画像を用いたデジタル教育コンテンツの作製
- ・農業や林業におけるCT技術の活用法
- ・文化財や工芸品のデジタルアーカイブ
- ・大量のCTデータに対するアノテーション手法

4.2 研究実施体制

本研究テーマは、CT画像処理技術の先端研究を進めることによる、我が国の科学技術力・産業競争力の強化が目的である。同時に、得られた研究成果を利用する応用技術の高度化、またデータ活用における新分野の開拓も行うことにより、福島における新たな産業の創出も重要なミッションである。上記の研究テーマを実施するために、それぞれのテーマに対して下記のように研究グループを組織する。

- ・CT画像処理技術先端研究グループ
- ・CT画像応用高度化グループ
- ・CT画像活用新分野開拓グループ

3つのグループは、図 2-2-1-10 のように技術の供与と要望を行う立場となり、互いに関連して研究開発を行っていく。グループ間の連携を強化する目的で、各メンバーは複数のグループに所属するものとする。研究実施者としては、新機構の研究者が中心となり、それに、本分科会にも参加した D 大学、福島県の X 大学、W 学校等の研究者が連携講座、委託研究、共同研究、クロスアポイントメントなどの制度を利用して参加することを想定している。また、O 研究所などの海外研究機関との共同研究や、外国人研究者の招聘等によって国際連携を進めていく。同時に人事育成として、地元の学生や企業人に対する出前講義、セミナー、インターンシップ生の受け入れ等も行い、特に本施設を活用した魅力あるプログラムを提供していく。



図 2-2-1-10: 研究実施体制の概略図

5. 講義シラバス案

5.1 講義の目的

放射線の産業利用分野では、X線CT等によって製品の3D画像を主とする計測データを取得し製品構造の非破壊検査・測定を行う技術や、計測データをシミュレーションに適用することによって製品の安全性や機能性を評価する技術を開発する。その中で超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術を高度化することは重要なテーマであり、その研究開発を行う人材育成が必要となる。そこで、人材育成のための導入的な講義のシラバスについて検討を行い、素案の作成を行った。人材育成事業としては、高等専門学校等との連携によるものや、福島県内企業と連携した特に若い人材に対するものを念頭に置いている。本来は、それぞれに異なるシラバスが必要となるが、ここではそれらを個々に策定するのではなく、それらのシラバスを作成するための基本となるものとして「学部大学生レベルの講義シラバス」の案を作成した。高等専門学校生や企業人材などに向けた講義については、それぞれに適したものを、このシラバス案をベースに調整して用意することを想定している。

5.2 講義の概要

本講義は、産業用X線CT装置の基礎と応用の習得を目的としたもので、特に画像処理技術にフォーカスしたものである。講義は3部構成となっている。X線CT画像はデジタル画像の一種であるので、第Ⅰ部ではその処理技術の基礎を学習する。第Ⅱ部では、X線CTの撮像の原理について、まずX線の減弱を中心とした物理現象の概要を紹介し、X線透過像からCT画像を生成する再構成の理論とアルゴリズムについて紹介する。さらに、近年主流となっている3次元CTについて、同様に理論とアルゴリズムを示す。このような知識を取得した後に、実際にX線CT装置を用いた撮像実習を行う。第Ⅲ部では、CT画像の応用として、産業応用上重要であると思われるテーマについて紹介する。第Ⅲ部については、産業界などからの講師による、現場のCT応用も含めた講義をオムニバス方式で実施する。

構成

- ・講義題目:産業用X線CT画像処理の基礎と応用
- ・コマ数:1 学期分 90 分×14コマ(実習 2 コマを含む)

5.3 シラバス

I 部:デジタル画像処理基礎

1. イントロダクション

産業用X線CT装置の概要について、事例を中心に紹介し、そこで利用されている画像処理技術について概観する。それを受けて、本講義の目的とスケジュール等について説明する。

2. デジタル画像処理基礎

産業用X線CT装置では、ほぼグレースケールの画像のみが使用されているので、グレースケールのデジタル画像を題材として、以下のような内容について説明する。

- ・画像の構成(ピクセル、画素値など)
- ・画像の性質(ヒストグラム、コントラスト、先鋭度、ノイズなど)
- ・画素ごとの濃淡変換処理

3. 領域に基づく濃淡変換(空間フィルタリング)

主として畳み込みフィルターによる平均化処理(ノイズ除去)、微分処理(エッジ強調)などについて説明する。

4. 周波数領域におけるフィルタリング

まず 1 次元フーリエ変換でフーリエ変換の概念を紹介する。その上で、画像に対する 2 次元フーリエ変換を紹介し、周波数領域でのフィルタリングについてガウシアン平滑化などを紹介する。さらに、空間フィルターとの間の関係として畳み込み定理を紹介し、空間領域と周波数領域のフィルターの関係について議論する。

II 部:X線CT基礎

5. X線CTによる撮像原理

X線CTでは、X線源からのX線が物体を透過した透過像が最も基本的なデータとなる。そのために、透過像に関係する、X線の減弱(Lambert-Beer 則)、線源弱係数について説明する。さらに、透過像を Log 変換することによって得られる投影像(サイノグラム)が、線源弱係数の分布の Radon 変換になっていることを示し、その逆変換によって断層画像を再構成する理論を、周波数領域の中心断面定理に基づいて説明する。さらに、実際にコンピュータで計算するための再構成アルゴリズムとして、逆投影法、フィルター逆投影法、FBP(Filtered Back Projection)法を紹介する。さらに、これらが第1世代と呼ばれるスキャン方式に対するものであるため、さらに進んだ第2世代や第3世代のスキャン方式についても説明する。

6. 3次元CT

5で説明したものは、2次元の断層画像を撮像するためのCT技術であったが、近年では3次元のボリューム画像を再構成するコーンビーム型CTが主流である。ここでは、そのような装置の構成や再構成法(Feldkamp 法)について紹介する。また、ボリューム画像処理についてはI部で紹介した2次元のデジタル画像に対する手法を拡張できることを示す。

7. 撮像実習(2コマ)

X線CT装置を使って、簡単なサンプルを計測し、透過像や再構成像を確認する。また、撮像では、管電圧や管電流を変化させてX線を変化させ、X線が物体を透過する現象についての理解を深める。

8. 撮像実習(2コマ)

X線CT装置を使って撮像したCT画像に対して、様々なI部で紹介したような画像処理を適用して実験し理解を深める。

III部 X線CT画像応用

9. 2値画像処理と応用

CT画像を2値化することによって行われる応用について紹介する。まずは、2値化のための閾値決定法について示す。最も簡単な応用としては体積やモーメントなどの質量属性の計算がある。また、画像から物体の特徴を検出するための距離変換や中立軸の計算、さらにはボイド検出のためのモルホロジーについて紹介する。

10. 境界と領域の抽出

産業応用において物体の寸法や形を計測するには、グレースケールのボリューム画像から物体の表面を抽出することが必要になる。その方法として、等値面やエッジ検出を紹介する。さらには、表面を表すメッシュを生成する方法や、物体が複数の領域の組合せになっている場合に、その境界を抽出するセグメンテーションについても触れる。

11. X線の減弱とアーチファクト処理

X線CTでは、CT画像に様々なアーチファクトと呼ばれる像が発生し、応用上の問題となる。代表的なものに、ビームハードニングや散乱線によるものがあり、それらのアーチファクトを補正する技術が重要である。ここでは、まずアーチファクトとその原因について説明し、さらにはアーチファクトを補正(除去)する方法について示す。

12. 技術動向

講義の最後に、最新技術についての紹介を行う。装置技術としては、例えば検出器ではphoton counting型の検出器がある。また画像処理技術としては、深層学習を適用したアーチファクト補正などがある。本分野への一層の興味をもってもらうために、産業界でのCT利用の問題点や、それを解決する技術開発などについても紹介を行う。

2-②(2) データプラットフォームに関する調査

1. はじめに

この文書は新機構が整備する超大型 X 線 CT 装置等を用いた現物データ起点の大量のデータの活用を行うために不可欠と考えられるデータプラットフォームに関しての国内外の動向・現状および将来のあるべき姿についての調査資料である。ここで定義するデータプラットフォームとは、GAIA-X などに代表される欧米勢先行のデータ流通基準¹に対し、日本の製造業を再生させるために新たなデータ連携の仕組みを、欧米に先駆けた技術で実現しようとするものである。

欧州主体で始まっている GAIA-X 等、データプラットフォームの標準化・基準化プロジェクトでは製品の詳細な情報を製品ライフサイクル全体にわたり、すべてのステークホルダー(製造業者、販売業者、保守業者、使用者、廃棄業者など)で流通させ共有させる仕組みである。これはユーザー段階で発生する様々なデータを、他段階で多様なサプライヤーを含む産業機構全体で共有し、運用保守サービスの向上、同時に製品ソフトウェアの設計業務や運用保守業務品質の向上、設計品質の向上と生産性向上を図ることが目的である¹。現在、GAIA-X はヨーロッパ委員会が提唱する地域標準であるが、日本でも採用が検討されるなど、コンソーシアム標準としての国際標準として扱って良いと考えられる。

データプラットフォームを設計するにあたり、業務的要件を調査し、その実現性についての技術的背景をまとめ、今後のシステム化検討等の基本となることを期待している。

2. データプラットフォームとは

データプラットフォームとは、データの収集・格納・処理・活用するための IT 基盤である。製造業に関わる企業や組織が保有するデータの円滑な移動や操作を実現しデータエンジニアやデータサイエンティストの作業効率を図ることを目的とする。ここでは、データプラットフォームを製造業の活性化を実現するための、仕組みと位置付けている。

昨今のデジタル化した企業が所有するシステムやプロセス、インフラストラクチャから生成されるデータを取り込んで処理し、分析して提示する包括的なソリューション環境がデータプラットフォームである。ポイントソリューションや専用アプリケーションの多くが、パズルのように複雑なデータ群の一部、またはいくつかの部分効率よく管理するのに対し、正しく設計されたデータプラットフォームはデータをエンドツーエンドで管理可能にするものである。

¹ https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727_1

データプラットフォームは、単なるビジネスインテリジェンスプラットフォームではない。ビジネスインテリジェンスプラットフォームがビジネス上の意思決定に関連するデータを取り込み、意思決定の質を向上させるのに対し、データプラットフォームは、セキュリティやプライバシー、コンプライアンス確保のためのデータから、設計・製造に関するデータを企業連合にわたる業務の中で共有し、生成される多様な技術情報および構造のデータを幅広く管理し、流動性を上げることを目的とする。

今日、製造業は何千ものアプリケーションやサービスから自社固有のニーズにあったインフラストラクチャを選択し、構築することが可能である。しかしながら、それぞれ独立した設計・製造ソリューションを企業間で効果的に統合できないことが多い。そのため、規模の大きな組織や取引関係を超えて、他の企業と共有できず別の目的のために転用できないデータセット(「サイロ」)が形成されている。

サイロは、ビジネス上の課題やチャンスを特定する製造の力をひどく鈍らせるものである。データプラットフォームを使用することで得られるメリットは数多くあるが、データの一元管理もその1つで、企業連合全体で単一のプラットフォームを使うことによりサイロ化を防ぐことが可能になる。そして、それにより企業連合全体のデータを視野に入れながら実践的な知見を得ることが可能になる。

これを実現するには、それを利用することで余計な複雑さが持ち込まれることを防ぎながら、ほぼあらゆるソースからデータを取り込むことができるプラットフォームであることが必要である。簡単に言えば、データプラットフォームは、企業連合があらゆるデータから学び、行動していく能力を後押しするものでなければならないものである。

3. データプラットフォームの現状

3.1 GAIA-X²

GAIA-X は、ヨーロッパのデジタル主権の確保を目的に開放性、透明性、接続性を確保したデジタル・エコシステムの構築を図っている。これにより、各ビジネス分野でイノベーション・プラットフォームの作成が可能になり、GAFAM、BATなどのB2CプラットフォームがヨーロッパのB2Bビジネスに進出するのに対抗できると考えている。デジタル主権の上位概念としてデータ主権がある。これは各データにどの利用者がどこから、いつ、アクセスできるかを管理し、不正アクセスや攻撃から保護することを主体的に行えることを意味する。デジタル主権とは、デジタル・プロセス・インフラ・データ移動がどのように構造化・構築・管理されるかについて決定を下す力とされている。この二つの主権が無いと、産業の活性化はおろか、自国のデータ保護さえ危うくなる。

製造業における GAIA-X においては製品の詳細な設計情報(素材の性質や設計要件など)を

² GAIA-X:分散型のデータ交換プラットフォーム。データの開示・非開示や域外へのコピー保護など「データ主権」の保護とデータ流動性向上の両立を狙っている。

https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727_1

製品ライフサイクル全体、つまり製品の活用、運用・保守を行うユーザーの段階でも共有することが狙いである。さらにはユーザー段階で発生するさまざまなデータを、多段階で多様なサプライヤーを含む産業機構全体で共有し、運用・保守サービス水準の向上を図り、同時に製品・ソフトウェアの設計業務や運用保守業務品質の向上、設計品質の向上と生産性向上を図ることも目的としている。

データプラットフォームを自立分散型の連携の仕組みとしているのが GAIA-X である。これは、GAFAM のようなプラットフォームマーに対抗することを意識しているためである。欧州は基本的に、プラットフォームマーがデータを独占するのは独占禁止法違反に相当し、データ主権はデータの発生源にあるという GDPR³の考え方を意識しており、GAIA-X はプラットフォームマーに対するアンチテーゼとしての構想と捉えて良い。

巨大なデータを取り扱うことを想定している GAIA-X でのデータ連携プロセスは人間の判断を挟まず、いわゆる M2M (Machine to Machine) で自動的にを行うことを想定しており、このための手順、プロトコルや法制度が同時に検討されている。GAIA-X は、産業別に分化・組織された IDS⁴というコンソーシアムで詳細な応用領域や業務プロセス、いわゆるユースケースが検討されている。業種別のドメイン知識を活用したデータの概念辞書(オントロジー)をあらかじめ合意しておくことがデータ連携には必須だからである。

このため、GAIA-X には自己記述とグラフによるデータ構造化の概念が持ち込まれている。各データはノード毎に Id、名前、ステートメントが自動で記述され、証明(Proof)を含めた構造がスキーマに示される方法で管理される。(図 3-2-2-1)

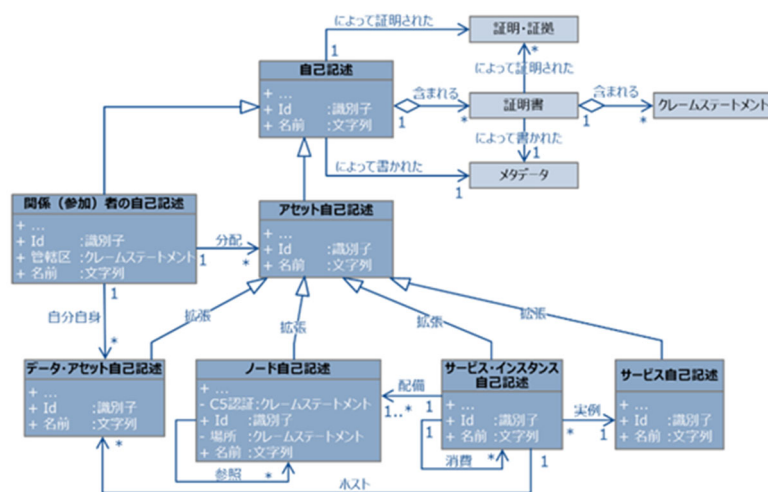


図 3-2-2-1: GAIA-X のデータ構造

³ General Data Protection Regulation: 一般データ保護規則

⁴ IDS の規格化: IDS 自体は DIN SPEC27070:2020 としてドイツ標準になっている。国際標準としては、ISMS を検討する ISO/IEC JTC 1/SC27 で検討されているが、GAIA-X で扱われる継承構造のような上位データ構造を規定している訳ではない。

このような形でデータプラットフォームの開放性・透明性・接続性が確保され、オープン・インターフェースと標準が具備されることでイノベーション・プラットフォームが作られると主張しているのである。

航空産業では Skywise というデータ連携サービスが稼働している。航空機材のユーザーである全世界のエアライン、航空機メーカー(エアバス)、各種の部品メーカー、ソフトウェア企業などが、各機材の運航ごとの航空機材・部品などの状態変化と通過した天候情報等、運航状況の詳細な情報を共有できる仕組みであるいわば「巨大な産業エコシステム」が出現しているといえる。

3.2 日本の現状⁵

日本の製造業幹部の GAIA-X への典型的な反応は以下の通りである。

- ・ 何故そこまで企業間のデータ連携が重要なのか。
- ・ GAFA が個人顧客の購買行動に関するデータを収集しマーケティング情報に活用するのは理解できるが、B2B の製造業でのデータ連携は、何故重要なのか。
- ・ もともと弊社の製品は品質がよく、あまり壊れないので、“手離れがよく”保守サービスの必要すらないのが価値だと考えている。

典型的な考え方のひとつとして、「製品販売、製造物責任までがメーカーの責任範囲で、循環経済や部品の再利用まで、もしくは最終ユーザーがその製品を活用してどのように生産性を向上させようとしているのか」まではまだ視野には入っていないことが多いようである。

日本におけるデータ共有を推進する機構として、2021 年 4 月に設立された「データ社会推進協議会(DSA:Data Society Alliance)」がある。同機構は、企業・産業を超えたデータ連携の在り方の定義、標準・ルール策定を実施しており、170 を超える企業・組織が参加している。参加企業を見ると、NTT データ、NEC、富士通、電通国際情報サービス、日本オラクル、日本アイ・ビー・エム、日本マイクロソフト、グーグル、アマゾンウェブサービス ジャパンなど、大手企業がいくつも参加していることが分かる。

CPS⁶時代では仮想空間と現実空間をデータが行き来するようになる。DSA としてはデータの流通・共有が業界を超えて産学官で行われることで、新たなイノベーションを創出することを目指している。また、従来までは幅広いデータを活用して意思決定に生かすことは多くのデータを有する大

⁵ https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/lst/2022/iis/fujino/0727_1
<https://www.sbbt.jp/article/cont1/94752>

⁶ CPS とは、実世界(フィジカル空間)にある多様なデータをセンサーネットワーク等で収集し、サイバー空間で大規模データ処理技術等を駆使して分析／知識化を行い、そこで創出した情報／価値によって、産業の活性化や社会問題の解決を図っていくものがある。
(<https://plaza.rakuten.co.jp/kawauchi75/diary/201606020000/>より)

企業に限られていたが、中小企業も含めて幅広い主体が共有し活用できる仕組み作りが重要であると捉えている。「DATA-EX」とは、分野を超えたデータ連携を実現するために、DSA が行う取り組みの総称だ。具体的活動としては下記の 3 つとなる。

- ・ 分野を超えたデータ連携に関わる基盤構築(標準化、基準策定など)
- ・ 分野を超えたデータ利活用サービスの創出(各種実証、ベストプラクティス共有など)
- ・ 分野を超えたデータ連携に関わる社会実装支援(開発支援ツール提供、人材育成など)

先行する欧州では産業を超えた連携だけでなく、スマートシティをはじめ都市・社会など範囲が幅広くなったことにより、データ連携の主体の多様化が進んでいる。こうした中、日本においてはデータの競争領域・協調領域の振り分けが進んでおらず、自社や限られた企業間で囲い込む傾向にあった。また、コロナ禍でも政府・自治体や関係組織間でのデータ連携の課題が浮き彫りとなったのが現状である。

これら課題をクリアすべく、DSA では取引相手の信用度や与信、データ記録、データ取引市場の形成などによりデータ共有の経済的インセンティブを生み出し、それによって CPS 時代におけるデータ流通を促進する考えだ。

また、DSA は IDSA や GAIA-X などと国際標準化に向けた提携を行っている。IDSA や GAIA-X との連携においては、日本版のハブの設立も発表されている。今後、日本国内とともに、グローバルでのデータ共有の仕組み作り・標準策定に取り組む方針だ。

3.3 GAIA-X のつまずき⁷

「GAIA-X のゴールは、米国のハイパースケーラー/大手クラウドサービス事業者に代わる信頼性の高いデータインフラを構築し、欧州企業に向けて標準クラウド基盤を提供することである。」

この目的の背景には、既存のクラウドサービスでは欧州諸国が法的だけでなく、運用面に関しても思いどおりにコントロールしたいと考えている節があった。「欧州の、欧州人による欧州のためのデータインフラ」ということになるだろう。国境にないインターネット環境でそのようなことが成立するのは、至難の業である。インターネットに強制力を維持できる国であればまだしも、インターネットをブロックしたネットワークでの経済活動や技術連携の活動はあり得ないことである。

「プロジェクト開始当初の数カ月は対象範囲と最終目的を決めるのに多大な労力と時間を要した」ということは容易に想像できる。例えば「クラウドのエアバス」「欧州の主権下のクラウド」「クラウドの連合体」「メタクラウド」などが想像できる。

この例から得られる知見は、「データプラットフォームを成功させる鍵の一つは、ステークホルダ

⁷ <https://it.impress.co.jp/articles/-/23216>

一の利益構造を整理して納得されること」と言える。次世代データプラットフォームは、この構造についての検討と普及を丁寧に行うことが重要と言える。

GAIA-X に関してはすでにいくつかの懸念が示されている。一つは米国企業、あるいは中国の企業が参加を表明していることだ。これらの企業が連携する欧州の企業⁸を「トロイの木馬」として使用し、多額の補助金を得る可能性があること、GDPR に代表される越境移転規則が米国クラウド法と矛盾する事態が発生するのではないかということ、EU 域外の企業と技術が導入されることで、ヨーロッパの同種ビジネスが危機に陥るのではないかという疑念だ。これを嫌って GAIA-X の仕組みから離脱する企業も出てきている⁹。

3.4 Catena-X¹⁰

国連が掲げる SDGs 実現に向けた有効な手段の一つである「サーキュラーエコノミー」や EU 委員会による EV 化シフト。Catena-X は、こうした中で始まった取り組みである。中心メンバーはドイツの自動車 OEM、サプライヤー、素材メーカー、各種研究機関で構成されている。オープンコンソーシアムのため日本企業もメンバーに名を連ねている。

サーキュラーエコノミーは「循環型経済」とも訳され、これまで環境問題の課題解決策だったリサイクルやリユースを、経済発展や産業拡大に積極的に生かそうというものである。根底には資源保護、環境保護、気候変動対策、生物多様性維持へのソリューションという考え方がある。だが、資源枯渇や環境破壊が経済活動の現実的な脅威となりつつある現在において、資源を消費して使わなくなったものを廃棄するだけの経済は成立しない。今後の生産・消費活動、国や企業の成長戦略の中には、資源や廃棄物の再利用、再活用を組み込む必要があるという考え方だ。

GAIA-X 単独での運用に比べて、ステークホルダーの利益・ベネフィットは重要視され、合意が形成されやすい分野でもある。次世代データプラットフォームは、この考え方に沿って連携可能な形で実現すべきである。

3.5 Data-EX

欧州、米国、中国など、グローバルで企業を超えたデータ共有の取り組みが進む中、日本の取

⁸ 「Gaia-X の創設メンバーの多くが、OpenStack や Kubernetes などの米国およびアジアのテクノロジーに依存している」とされる (EURACITV: Gaia-X: A trojan horse for Big Tech in Europe 2020 年 11 月)

⁹ Scaleway: 2021 年 11 月にプロジェクトからの撤退を表明 (EURACTIV: Cracks appear as Gaia-X celebrates its progress 2021 年 11 月)

¹⁰ Catena-X: データプラットフォーム「GAIA-X」上に構築される自動車産業向けのデータ共有サービス。受発注、部品物流、テスト、品質、保守・保全などの情報フォーマットが定められ、効率的にサプライチェーンが機能するように工夫されるほか、持続可能性 (SDGs) に配慮された仕様になっている。

り組みである DATA-EX にもまだまだ課題が多い。日本においてはデータの競争・協調の振り分けが進んでいないことや、企業間連携においても契約や連携の範囲などが明確でないことが多く企業を超えたデータ連携が進みづらい要因となっている。

日本企業として、(1) 自社の競争力の源泉としてクローズドにする情報と、(2) 他社と共有することによって新たな価値を生み出す情報、を振り分け、他社とのデータ連携を加速していくことが求められる。今後これらのデータ共有基盤の取り組みで開発・実装されているコネクタを介したデータ共有が国際標準として浸透していくことが想定されており、これらへの対応が遅れた国が出てくる場合には、グローバルでデータの活用や連携に支障が生まれる可能性がある。

ドイツ産業界、とくに自動車 OEM やサプライヤーが中心となって、業界サプライチェーンの全体最適を目指すコンソーシアムは要注意である。OEM やサプライヤーは、独自に資源の再利用や廃棄物削減に取り組んでいるが、Catena-X では、リサイクルに向けたトレーサビリティ実現や工場ライン稼働の向上・平準化などを、サプライチェーン全体で実現することを目的に、必要な情報を収集し共有するための共通の基盤づくり、及びルールづくりを志向している。

日本政府が推進する Society5.0 もインダストリー4.0 との連携が前提となっていることから、DATA-EX も GAIA-X との連携の検討に着手している。¹¹

近年の欧州新車発表では、エネルギー効率のクラス表示、内外装にリサイクル素材を使ったものの、環境負荷の少ない塗装、土壌分解が可能な素材などがアピールされている。工場稼働においてもカーボンニュートラルや水資源を節約する、汚さない点が指標のひとつになっている。CASE 車両においては、バッテリーのセルやパックの再利用のみならず、レアアースの「都市鉱山」活用も急務である。

OEM とサプライヤーの関係が入り組んでいる欧州では、サプライチェーン全体で、素材や部品のトレーサビリティ情報、環境負荷情報、生産量や需要、工場の余剰生産力といった情報を協調領域として、共通化、共有するルールづくりの意義がある。

また、国際会計基準では、CO2 削減量や環境負荷に関する情報開示が義務付けられる。サーキュラーエコノミーは環境団体が叫ぶ理想論ではなく、ビジネスマターとしてとらえる必要がある。

その上で、それらを使いこなした各社の競争領域の部分や具体的なユースケース策定においてはじめて、日本の強みを発揮する議論を行っていく姿勢が重要だ。東南アジアをはじめとした海外に対する日本の強みの出し方のポイントは協調領域と競争領域の間にある。

¹¹ 「データ戦略の推進状況」デジタル庁 令和4年9月

4. デジタル時代のデータプラットフォーム¹²

MaaS (Mobility as a Service)とは、自動車の新しい使い方であり、ユーザーが自動車を使うトリップ単位のニーズに対応してサービスを一括して行う新しい事業形態である。MaaS の実現及び提供には、スマートフォンやデジタルインフラの整備・普及のほか、鉄道やバスの運行情報、タクシーの位置情報、道路の交通情報などの移動・交通に関する大規模なデータをオープン化し、整備・連携することが必要である。ユーザーの経路検索・改札通過等の移動履歴や支払い情報などのパーソナルデータの活用、ドライバー不足を補うための自動運転やコンパクト・モビリティ、電気自動車(EV)などのクルマのイノベーション、効率的な移動手段を分析、提案、改善するための AI の活用など、今急激に発展しつつある各種の技術が交差するサービスといえる。

自動車産業にとっては、MaaS が実現した社会は、車を所有するというよりも、サブスクリプション(以下、サブスク)やカーシェアリングという新しい自動車の使いかたに対応していくことがとても重要である。音楽に始まり、宅食デリバリーなど、様々なサービスのサブスクが定着しつつある現代では、カーシェアリングや車両のサブスクに対する抵抗感は大きく低下している。

カーシェアリングやサブスクのメリットは、駐車場代、保険料、税金などの維持費を払う必要がないこと。コンパクトカーや SUV のほかミニバンや憧れのプレミアムカーなど利用したいシーンに応じて必要な車を選べることがある。このような時代、車を持つという考えよりも、移動手段のサービスを購入するという形に乗用車のマーケットは確実に変貌する。

この先進事例が Skywise である。Skywise は、様々な航空会社や航空機を運航する企業からの情報を集約するオープンプラットフォームである。そこでは、航空機に搭載された数多くのセンサーの情報を収集し Skywise のデータプラットフォームへデータを集約している。

集積されたデータは分析され、メーカーであるエアバスの知見も組み合わせたデータ分析を行うことで、航空機会社は、様々な視点から分析し整理されたデータの入手が可能になっている。これにより航空機保守において、故障予防を可能にし、運航データの分析を可能にしている。その結果、より効率的に航空機を活用することが可能になり、必要な報告書作成についても簡易化を実現した。

メンテナンスにおいてはエアバスのエンジニア 2 万人の知見が詰まっているといい、広報担当者が言うには「このデータ分析による予防保守の結果、航空機が地上にいる時間をゼロにし、整備のための時間を取られないこと実現できている」と主張している。

このプログラムの優れている点は、まず航空機の安全が間違いなく増すということ、故障が少なくなり機材稼働率が上がることが挙げられる。また、乗客にとっても運行の安全性が高まることと、欠航が少なくなることで利便性が向上する。

デジタル時代のデータプラットフォームはこの事例を参考にすべきである。サブスクやカーシェア

¹² <https://unistyleinc.com/techniques/1364>

リング利用される車両にも、航空機と同様に様々なセンサーを搭載しユーザーが車両を利用している状況を把握すると同時に、あらかじめ故障を予測し予防的保守を行うことが可能になる。その結果、サブスクやカーシェアリングのユーザーは使いたいときにクルマを利用できる利便性と同時に、故障の予測や事前保守という新たなサービスを享受することが可能になる。

「車を持つ」という時代は、事前保守という考え方はユーザーにとって受け入れがたい考え方であった。しかし、サブスクやカーシェアという車を使うことに関心が向くと、事前保守という考え方は、非常に受け入れやすいものに変質する。

サービスの提供と事前保守を原則とすると、部品の品質について新たな考え方が導入可能である。つまり、交換を前提とすると、耐久性に関する品質を考え直すことが可能になる。ユーザーは、自動車を所有している意識はなく、受けるべきサービスが必要な時に提供されることを重視するので、費用がかからない部品交換には寛容になる。これは、新興国などで立ち上がろうとしている自動車産業にとっては、有利に働く。そして、これは日本の自動車産業にとっての危機でもある。

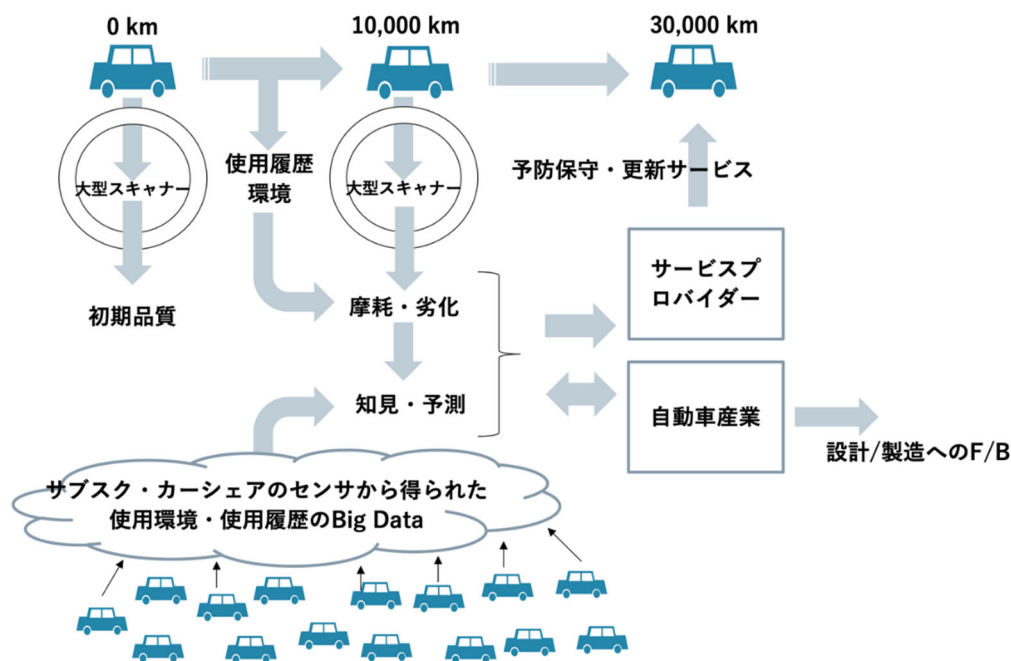


図 2-2-2-1 データプラットフォームの役割

サブスクやカーシェアなどからサンプルを抽出し、定期的にスキャナーによって車両の劣化状況を監視し、摩耗や劣化の状況を把握、そしてそれに基づいて得られた知見により、市場で利用されている車両の故障を予測するなどのサービスを提供することが可能になる。そのデータは、サブスクのプロバイダーや自動車産業の設計や製造へ提供される仕組みを構築する。

カーシェアやサブスクによるサービスの普及は、車から得られたデータがビジネスをドライブする原動力となる可能性が高いはずである。家電量販店の普及により、製品開発と価格の決定力がメーカーから販売店に移ったように、自動車産業も主体もサービスプロバイダーに取って代わられる

時が来るかもしれない。

今後、こうしたサービス中心に変わる自動車産業の中で、日本の自動車が優れていることを示すデータの供給源が必要と考えられる。

EV 化は、電池とモーター、そして充電インフラがあれば可能な技術とも言える。もはや、精密で壊れないエンジンという車の最大の付加価値部品を日本は失ったのである。それでも、日本の自動車産業はリードを保っていられたはずだったが、市場の形が変化している。つまり、車を持つというモノ中心から、使うコトに中心が移動した。これが意味するもうひとつのことは、「(部品が)壊れない」という価値が変わってしまったことである。壊れたとしても、MaaS 契約の中で代替手段が提供されれば問題ないという、新しい顧客とマーケットが出現したことになる。

そういったマーケットの中で、壊れない製品や部品を作れるという日本の自動車産業の存在意義は大きく低下している。むしろ、安くて簡単に交換できる製品と部品が途上国から供給される製品が市場の勝ち馬となる可能性が高いという現実と直面している。しかも、途上国の製造ノウハウは、日本が移植したモノであり、ブーメランのように日本の自動車産業の脅威となっている。

日本の自動車産業は、そういった流れの中で繁栄して開くためのキーポイントは、市場にある車両の品質についての情報を集めて、設計の上流に戻すためのデータ連携が必要である。

部分モジュールを提供しているメーカーでは、全てのユーザーの現実を再現する実験はできていないし、そのデータを集める手段は極めて限られている。このため、実際に担当している製品企画・設計開発者は、活用時のリアルデータを手に入れ、設計へ活かしたいと本来望んでいるはずである。

4.1 データプラットフォームの必要性¹³

今現在、日本製造業がデータプラットフォームで扱うべきエリアは、「製品が活用され価値を創造する現実社会における巨大な実験データ」である。

設計段階で検討される「ユーザーが要求する仕様」が妥当かどうかはデータで裏付けられるべきであるが、実験室での実験はユーザーが当該製品を活用する環境全てをカバーするものではなく、あくまで限られた範囲での実験に過ぎない。自動車の OEM は、市場にあるトラブルを集めて、これを回避する対策を設計基準や知識を用いて解決してきたのが現実である。特に、「日本車は安くて壊れない」という評判をもとに、世界の自動車市場を席卷した。

しかしながら、欧米の先進国は意図しているか不明だが、日本の自動車産業の強みとなったハイブリッドを排除し、EV へと大きく舵を取っている。精密な内燃機関を使ったハイブリッドの技術は、自動車産業の大きな参入障害であったが、EV 化によってこれが消滅した。この参入障害の喪失は、新興国にとっても、自動車産業という国を支える基幹産業に参入する大きなチャンスと捉えられた。

今後は、メーカーは単なる製品販売モデルから顧客へのサービス提供(サービタイゼーション)

¹³ https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/lst/2022/iis/fujino/0727_1

モデルへと進化していく。MaaS 化が進展する今後の自動車業界は、製品の信頼性を高く保つことはあまり重要ではなく、必要な時に、必要な機能を提供できることが重要である。日本の自動車産業は、もはや高品質で壊れず再販価値の高い製品である優位性が、世界市場において重要ではなくなる時代に直面している。

MaaS 化を前提とすると、もはや耐久性に優れた製品であることの優位性はなく、いかに部品の寿命を予測し適切な交換部品を用意するなど、プロビジョニングの考え方が重要である。「プロビジョン(Provision)」とは、「準備」「提供」「対策」といった意味を持つ英単語である。「プロビジョニング(Provisioning)」はその現在分詞で、「必要なものを準備すること」を示す。これを転じて、IT 分野ではシステムやサービスの需要に応じて、サーバーやネットワークなどの IT インフラ設備を調達・設定することを「プロビジョニング」と呼んでいる。

元来プロビジョニングとは、通信事業者が申込に応じて回線を提供することを指す言葉として用いられていた。しかし現在では、インターネット回線の提供や、ユーザーアカウント発行や権限付与なども含む、非常に幅広いシーンで使われる言葉となっている。特に、サーバープロビジョニングと呼ばれるものは、クラウド環境下で変動するサービス要求に対して、あらかじめ十分なシステム資源を準備しておき、必要に応じて提供する仕組みである。

航空産業では、航空機の部品について点検と運航時のモニタリングを行い、部品の交換時期を予測し、航空機の行き先に部品を運んで交換するなどの考え方を「部品プロビジョニング」と呼び、GE はこのようなサービス事業で利益を得ているのが実態である。

MaaS 時代では、このようなサービスの考え方は当然の如く視野の中に含まれている。バッテリーは典型的なプロビジョニング部品で、その使用状況や能力低下度合いをもとに、交換や充電のサービスを実施するようになる。プロビジョニングを考えると、特にこれまでデータが可視化されていなかった運用フェーズでのデータ収集が極めて重要である。その結果、部品の劣化や破損状況を把握して、部品交換の手配を事前に行うなどの活動が付加価値の源泉となる時代が来るはずである。

MaaS 化の時代、ユーザーの利用環境自体から発生するデータを収集し、使用環境や耐久性などを共有する仕組みを構築することが、日本の自動車産業にとってとても重要である。その結果、車両がどのような状態であるかを把握すること、経過を観察できること、そしてサービスをキャリーしている車両から効率よく利益を生み出すメカニズムがとても重要である。

4.2 データプラットフォームの意義

ここでいうデータプラットフォームとは自動車の市場にある実際に製造製品のデータを蓄積→加工→分析し設計にフィードバックするためプロセスを、一貫して実現するためのデータ分析基盤と定義する。

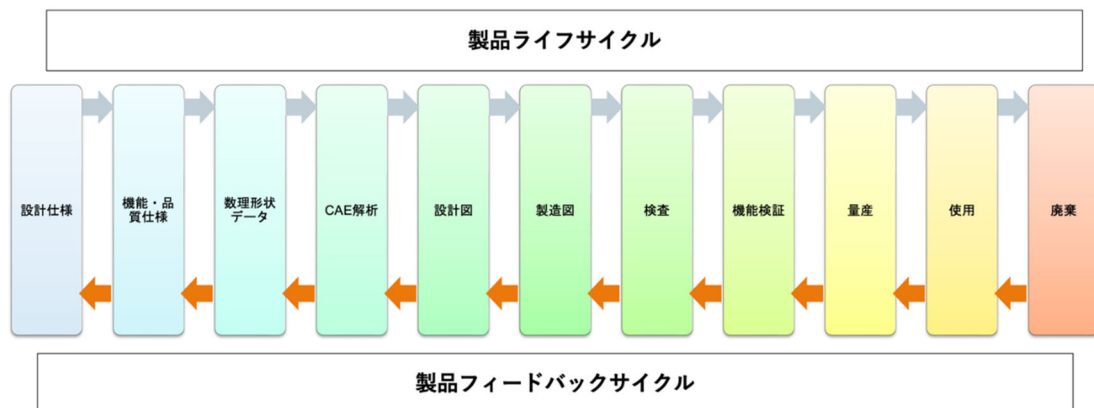


図 2-2-2-2

製品のライフサイクルに対し、実際に市場にある製品のデータを直接収集できれば、各製品ライフサイクルの適切な場所にフィードバックすることが可能になると考えられる。「製品ライフサイクル」に対し「エンジニアリング・フィードバックサイクル」と名づけるのが適切であろう。ここで言うデータとは以下のようなものを想定する。

- ・ 生データ
- ・ 生データによって得られたインフォメーション
- ・ インフォメーションをもとに抽象化された知識
- ・ 知識を抽象化した知見

これらをここでは、データ資産と定義する。データ資産は、DATA-EX の考え方に準拠し、以下のカテゴリー分類する。

- ・ 固有データ: 自社の競争力の源泉としてクロードにする情報
- ・ 共有データ: 他社と共有することによって新たな価値を生み出す情報

生データは以下のような種類を定義する。

- ・ 製品を直接観測して得られたデータ(CT スキャンのデータ等)
- ・ 車両製品の利用状況を集積したデータ
- ・ SNS などから収集したビッグデータ
- ・ MaaS などから収集した運用データ

データプラットフォームでは、ビッグデータを除き製品を直接観測した得られたデータを中心に、フ

ードバックのサイクルの確立を目指す。おおまかなユースケースとしては、以下のものを想定する。

1. リバーズエンジニアリング：ライバルとなる国外製品(車両)を分析し、どのような設計方法・製造方法を実施しているかの検証
2. ベンチマーキング：ライバルとなる国外製品(車両)と自社製品(車両)の比較を行う
3. 耐久品質評価：車両の使用状況に応じて CT スキャンを取ることで、製品寿命の算定を行いプロビジョニングの参考とする

4.3 データプラットフォームの戦略

データプラットフォームは日本製造業の根幹であり、用意周到に計画し、実現し、なおかつ適切に維持することが必要である。エンジニアリング・データとそれから得られる知見を蓄積・販売・流通することで日本の製造業の競争力を向上させることが目的であり、データプラットフォームの戦略は、これに目的を実現する手段である。

＜データプラットフォームで保持したいと考えられるもの＞

形をもつもの

- ・ 形：複雑な形（自動車エンジンなどボリュームを持つもの:3D 及び 2D マニフォールド形状）
- ・ 構造：境界、破断面、結晶構造、鑄造巣、パーティクル、フィラー混入、積層材構造、骨量構造
- ・ 物性：連続的な分布、不連続な分布

形を持たないもの

- ・ 空気、水、油、溶けたポリマーや金属
- ・ 機能と機能の構成(モノとモノの構成)
- ・ プロセスとプロセスの構造(コトとコトの構成)

上記のライフサイクル

- ・ 設計時点から実際に製造されるまでの形状的及び形質的变化
- ・ 市場運用に伴う劣化および故障発生の状況

初期段階のエンジニアリング・データの主役は、現実の製品の解析によって実現する。したがって初期の現物のデータは、現実的には、光学スキャンであったり X 線 CT スキャンのデータであったりする。X 線 CT の特徴は、製品を分解することなくの内部の構造を分析することが可能である点である。形状を持つものであればそれがどのように設計され、どのように組立てられているかの分析

を行うことができる。実際の設計データがあれば、実際に作られたものと設計データの差異などを分析することが可能である。

さらに、実際に使用された車両の CT スキャンを行うことで、使用された後の状態を把握し、車両の劣化状態および部品の形状的な劣化状態を測定することができる。実際に使用された後の CT スキャンデータを用いて、構造解析を実施することは、劣化した後の製品寿命を予測するのにとても有効である。

製品寿命予測には、実際にどのように製品が使われたかといった使用履歴のデータが必要である。使用履歴のデータには個人情報も含まれる可能性があるため、収集と利用については特別な考慮が必要である。またビッグデータの集め方にも特別な考慮が必要で、ビッグデータの利用によるエンジニアリングフィードバックサイクルの実現は第二段階とする。

4.4 データプラットフォームのゴール

データプラットフォームの計画策定するにあたり、以下のゴールを設定する。

1. データプラットフォームのステークホルダーの情報ニーズを理解しサポートする
2. エンジニアリング・フィードバックデータを取得し、保管し、保護し、健全性を担保する
3. エンジニアリング・フィードバックデータとインフォメーションの品質を担保する
4. エンジニアリング・フィードバックデータのステークホルダーが保有するデータの秘匿性と機密性を確保する
5. 不正または不適切なエンジニアリング・フィードバックデータとインフォメーションへのアクセス、操作・使用を防止する
6. エンジニアリング・フィードバックデータのステークホルダーが付加価値を創造するためにデータを効率的に利用できるようにする

データプラットフォームの計画策定にあたり、上記の基準に基づいてシステム化の計画と設計を実施し、データ運用の設計を実現する。

4.5 データプラットフォームが管理対象とするデータ資産

データプラットフォームで管理するデータの資産は、以下のカテゴリーに分類する。カテゴリー別に分類されたデータは、それに基づいて資産として管理されるものとするが、詳細な定義は、メタデータの定義時に確定し必要に応じて改訂するものとする。

1. エンジニアリング・フィードバックデータ: データは、車両の形状や物理的な構造・機能を直接表現しているものである。設計結果であったり、計測結果であったりするが、コン

コンピュータシステムで保管されているものと定義する。このデータのフォーマットは規格、または業界標準であることを前提とする。システムの立ち上がり時点では、特定のフォーマットに限定し、随時取り扱うフォーマットの種類を追加していく。

2. インフォメーション：データ同士の関係を記述したものをインフォメーションと CPE では定義する。データ同士の関係は技術的に付加されたものを想定する。
3. ナレッジ：データ同士の関係を集めて評価した結果をナレッジと定義する。ナレッジは特定の条件と結果ないしは結論から構成されるものとする。
4. 知見：知見はナレッジから引き出された再利用可能な原理・原則と定義する。

データを資産と呼ぶことはそれに価値があることを意味する。データの定性的および定量的な価値を測定する手法はあるが、その為の基準はまだ存在しない。もしステークホルダーがデータにまつわる意思決定の質を向上させたいのなら、データの価値を定量化する一貫した方法を考え出さなければならない。その際、低品質のデータにかかるコストと、高品質のデータから得る利益の両方を測定する必要がある。

また、データが目的に沿っていることを保証する必要がある。それがデータプラットフォームにおけるデータ管理の主な目標である。データの品質を管理するためには、ステークホルダーの品質要求事項を理解しデータがその要求に応えているかどうかを測定する必要がある。

データの管理には、その資産自体に関するデータが必要である。データを管理し利用するためのデータをメタデータと呼ぶ。データは手に持ったり増えたりすることはできないため、データの内容と使いかたを理解するためにはメタデータの形式でデータを定義しデータに関する知識を持つ必要がある。

5. データプラットフォームにおけるデータ管理

データプラットフォームでは、全てのデータを資産として扱うことを原則とする。データ資産は二種類存在し、ひとつは国あるいは民間のデータ管理団体等が一括管理するもの、もうひとつはデータ管理団体にサービスを委託した企業のものである。前者が共有データであり、後者が固有データという位置付けになる

- ・ 固有データ: サービスを委託した企業の競争力の源泉としてクローズドにする情報
- ・ 共有データ: 他社と共有することによって新たな価値を生み出す情報

資産としての管理をする以上、管理責任者の存在が前提である。固有データと共有データの扱いについては、厳格な基準の制定が必要である。データ管理団体として独自に取得した共有データは、関係する企業・機関の間では、共有のものとして扱われるのが普通である。エンジニアリング・データをもとに取得されたインフォメーション、ナレッジ、知見については、特別な取り決めがない限りデータ管理団体の資産として取り扱うものとなる。もし、利用価値があるとすれば、それを販売してデータ管理団体の継続的な運用に資するものとする。

固有データについては、サービス契約の性質にもよるが、サービスを委託した企業の資産になり、瑕疵担保期間だけデータ管理団体で保存するのが順当であると考えられる。瑕疵担保期間の終了に伴いデータは破棄されるのが原則と考えられる。ただし、エンジニアリング・データをもとに取得されたインフォメーション、ナレッジ、知見については知的資産として特別な配慮が必要である。

データ資産としての価値は経済的観点で評価し、年次で評価し、計画と実績に基づいて報告がなされるものとする。データ資産にはその特性に応じて、ライフサイクルを想定し、作成時から改訂、廃棄に至るまでの標準ステージを設けて管理されるものとする。

データ資産に関するリスクの管理もデータマネージメントの一部とする。

5.1 データプラットフォームにおけるデータマネージメントの課題

データプラットフォームにおけるデータ資産の課題を整理する。

1. データプラットフォームでは、測定データとそれから得られたインフォメーション、ナレッジ、知見が基本的な資産である
2. データプラットフォームの利用企業は、上記の資産を利用する権利を持つとするが、一定の制限がされるものとする
3. データ資産の所有権については、原則としてデータの作成元に属するが、場合によっては、顧客資産となる可能性があり、それらは顧客との契約に基づくものとする

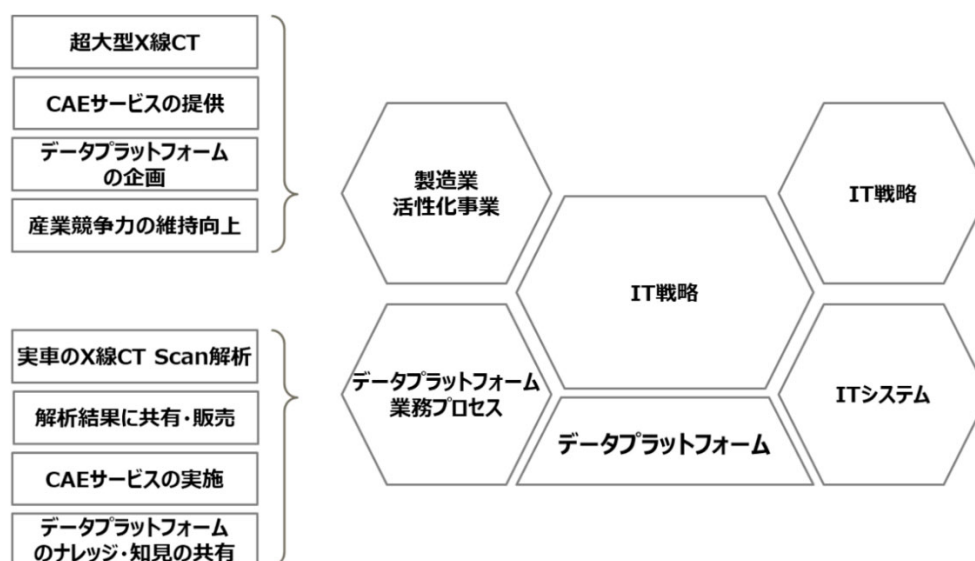
4. データ資産の価値について算定する規程を設けることとする
5. データ資産の販売についての規程や所有権、利用権などの運用規定が定められるものとする
6. データ資産の自由な流通は原則として制限されるものとする

データプラットフォームでは、データ資産についての評価を以下の指標を用いて管理する¹⁴。

1. データ資産の取得と保存に関するコスト
2. 事故等により喪失したデータ資産を復元するコスト
3. データ資産が欠落した場合のインパクト
4. データ資産に関するリスク軽減コストとリスクを抱えることの潜在的コスト
5. データ資産の改善にかかるコスト
6. 改善された高品質なデータ資産から受ける恩恵
7. 競合他社がデータ資産の取得に支払う価値
8. データ資産の売却により得られる価値

5.2 データプラットフォームとデータマネジメント

データプラットフォームにおけるデータマネジメントの位置付けを整理する概念図をあらかじめ整理しておく。整理することによって、データプラットフォームにおけるデータ資産、および IT 戦略と IT システムの位置付けを明確にする。



¹⁴ <https://qiita.com/zumax/items/dc84dc16724c2d245e0e>

図 2-2-2-3 データプラットフォームの位置付け

製造業活性化事業と業務プロセスに対するカテゴリーの説明をする。

1. **製造業活性化事業戦略:** 製造業活性化事業戦略は、超大型の X 線 CT スキャンを中心とした CAE サービスの提供が事業の中心である。技術研究組合という性格上、X 線 CT スキャンのデータを扱うデータプラットフォームの検討や、CT スキャンデータの利用技術の普及などを使命とする。また、製造業活性化で活動された内容を論文として発表するなどの社会貢献も事業戦略の一部として提供する。
2. **製造業活性化事業と業務プロセス:** 製造業活性化事業としての業務と業務プロセスについての詳細は決定されていないが、CT スキャンの実施とデータの提供、および解析結果の販売などが想定される。データ管理団体の中で共有されるものはデータ資産で、一部は販売も想定する。データ資産を作成するサービスも販売されるものとする。データプラットフォームに関する知見は関係者に対して提供されるものとする。
3. **データプラットフォーム:** データプラットフォームは、データ資産の価値を具現化し共有し、維持管理するための仕組みである。データプラットフォームが取り扱うデータの特性はトランザクションレコードの維持管理と異なり、データそのものが知的資産である。知的資産データは、多様な表現を必要とする他、予め固定されたメタデータスキーマを定義して運用することが難しい。そのため、データプラットフォームでは、データに関する構造的な制約を中心に扱える仕組みを必要とする。具体的なテクノロジーとしては UML などに代表されるモデル言語を規範とした、モデルベースの仕組みを採用する。モデル化にあたっての Knowhow 等はデータプラットフォームの知見としてデータ管理団体の中で共有されるものとする。
4. **IT 戦略:** データプラットフォームとしては、IT に関する独自組織を所有することは金額的にも難しいため、当面これを所持することはしない。データマネジメントに関するゴールを実現可能にする人材を十分に持った専任が設けられない以上、サービスを購入という選択肢を当面採用する。一方で、産業競争力の向上という観点から、最新の IT 技術を積極的に利用することは当然の使命である。量子コンピュータの新しい利用法など積極的に最新技術の利用に取り組んでいく必要がある。
5. **IT システム:** データを保存するためのサーバーシステムは、IT 戦略と整合するためにも、いずれパブリッククラウドの利用等による費用や人材に関するリスクを低減した運用にすることが望ましい。

5.3 データを取り扱う倫理規定

オープンプラットフォームという特性上、ある程度データ資産に関する倫理原則を定めておく必

要がある。倫理感を持ってデータ資産を処理することは当然であるが、明文化しておくことは問題の対処にあたってはとても重要である。とはいえ、倫理原則を持ってデータ資産を生成し、保管、管理、使用、廃棄することを原則とすることには変わりはない。

プラットフォーム事業の業務形態としては当面、膨大な顧客情報を保持することは考えにくい。ため、個人情報保護法に基づく規制については倫理規定に基づく取り扱いで十分である。むしろ委託測定業務や解析業務に伴うデータ資産については、顧客の権利を配慮し、害を与えないことを原則とすべきである。また、複数の顧客に対してもデータ資産の扱いについて公平であるべきとする。しかしながら、車両の使用履歴やビッグデータについては、個人情報であり、それを取り扱う段階ではもう一度セキュリティについて考慮する必要があるほか、法規を遵守するように考える必要がある。

6. データプラットフォームにおけるデータガバナンス

6.1 データガバナンス

データガバナンスの定義は、データ資産の管理に対して職務権限を通して統制することである。統制とは計画を立てて実行を監視し、徹底させることを指す。データの管理者が存在することを前提に、データガバナンスについての記載をする。データプラットフォームとしてのデータガバナンスの初案を下記に列挙する。

- ・ **戦略:** データプラットフォームとしての戦略は、データ資産としての価値を維持することであり、各種の業務を通じて、データ資産を増やすことである。
- ・ **ポリシー:** データプラットフォームで保持するデータ資産は、知的資産として取り扱う。知的資産に関するアクセス、利用、セキュリティと品質については、正当な許可手続きに基づいて実施され記録されるものとする。
- ・ **標準と品質:** データ資産カテゴリー毎に品質に関するレベルを定義し、それに基づいて利用や販売、公開などが実施されるものとする。特に、データ資産として最下層に位置するエンジニアリング・データについては、どうしてもデータフォーマットに基づく種類が存在する。全てのデータフォーマットを保持することは不可能であるが、一定の手続きを経て保持することを可能とする。知見やナレッジに属するカテゴリーのデータは、コンサルテーションや研究成果という特性もあり、品質についての規定は別途定義する。インフォメーションに属する種類と品質カテゴリーは、データの処理によって確定するものとする
- ・ **監督:** データ資産の品質、ポリシー、および現場でのデータ取り扱い作業については、現場で監査し補正を行う第三者を指定する。
- ・ **規制遵守:** データプラットフォームで法規制に触れる可能性のあるデータ資産には個人情報

がある

- ・ **課題管理**: データマネジメントに関する課題は、データ統括管理者(仮称)など担当責任者を決めて統括し、管理するものとする
- ・ **データ管理プロジェクト**: データマネジメント業務改善するためのプロジェクトは、組織的に承認されたものを進める。
- ・ **データ資産評価**: データ資産の評価は、データ統括管理者(仮称)など担当責任者が定期的に評価・棚卸しを行う。

6.2 データプラットフォームにおけるデータガバナンスの項目

データガバナンスはそれ自体が目的ではなく、データプラットフォームの戦略と業務プロセスと密接に関連しているため、以下の点に重点をおいて進めることとする。

6.3 リスクの低減

- ・ 一般的なリスク管理: データが引き起こす財務上の損失やデータ管理団体等の信用に対する一般的なリスクについては想定される問題を列挙し対策を定めておく
 - ・ データセキュリティ: 以下の項目についての規定を明示して管理する
- ① 可用性: データ資産を利用することができるのは、データプラットフォーム稼働日の例えば 9:00～17:00 を保証し、それ以外の時間帯については保証されない。また、一定の予告の元にシステムの利用を停止する時間が設定できるものとする。
 - ② 有用性: データ資産の有用性については、それが属する資産カテゴリーと品質のカテゴリーによって保証される。
 - ③ 健全性: データ資産の健全性については、有用性と同様に管理されるものとする。
 - ④ 一貫性: 人的作業に依存する場合、データ資産についての一貫性は必ずしも保証されないため、一貫性について確認する手段が存在することを保証する。
 - ⑤ 監査性: データ資産の扱いは、実施者と管理者(データ管理者)の 2 名が必ず存在して記録(Log)が残るようになっていること。記録は対象となるデータベースとは別のところに保管し、参照や改ざんが防止されていること、及び必要な記録(Log)が完全に取得されていることとする。記録は定期的にモニタリングし、必要な時に容易に参照できることとする。
 - ⑥ セキュリティ: (データ資産のセキュリティについては8. データセキュリティで説明)

7. データアーキテクチャ

アーキテクチャとは、ものを作るための実践と理論で、その成果の典型的なものは建築物であり、アーキテクチャは全体的な構造やシステムを支える構成要素を体系的に整理したものである。図 2-2-2-4 は、ビジネスとしての構造を図示したものである。

データ管理団体が担う役割には以下の 3 種類が存在する。これらが決まっていしないと、データプラットフォームの検討は不可能であるが、以下の仮説を設定して、検討課題を整理していく。

1. ビジネス戦略(仮説): データ管理団体等が組織を存続するためのビジネスが必要で、その戦略がビジネス戦略である。委託研究やデータの販売、および解析サービスなどが存在する。ただし、データ管理団体に技術研究組合になる場合には、データの販売は主たる業務にすることができないことには留意する必要がある。
2. テクノロジー戦略(仮説): 新たな関連するテクノロジーの開発も役割として重要である。欧米に先行された感のある、CA や解析技術などで製品の品質を高めるだけでなく、むしろ適切な品質を見極めて設計する技術などがこれにあたる。
3. データマネジメント戦略: 4.2 節参照

7.1 データプラットフォームにおけるデータアーキテクチャの目的と意義

データプラットフォームでは、超大型 CT スキャンが生み出すデータを元に、データ管理団体への知見の蓄積や販売などが主流とする。実際には、X 線 CT スキャンによって実施できる以下のようなコンサルティングの作業なども視野に入れるものとする。

- ・ 加工に伴う変形・欠陥の評価
- ・ 組み立て後の寸法評価
- ・ 各社製品の比較研究
- ・ 摩耗・腐食の評価
- ・ 密度およびテクスチャ分析(特に非破壊状態)
- ・ 設計用の形状データ取得
- ・ Voxel 解析のデータ
- ・ システム部品の構成
- ・ その他

データアーキテクチャとしては、これらのモノと業務上のプロセスとニーズの関係を維持管理する。

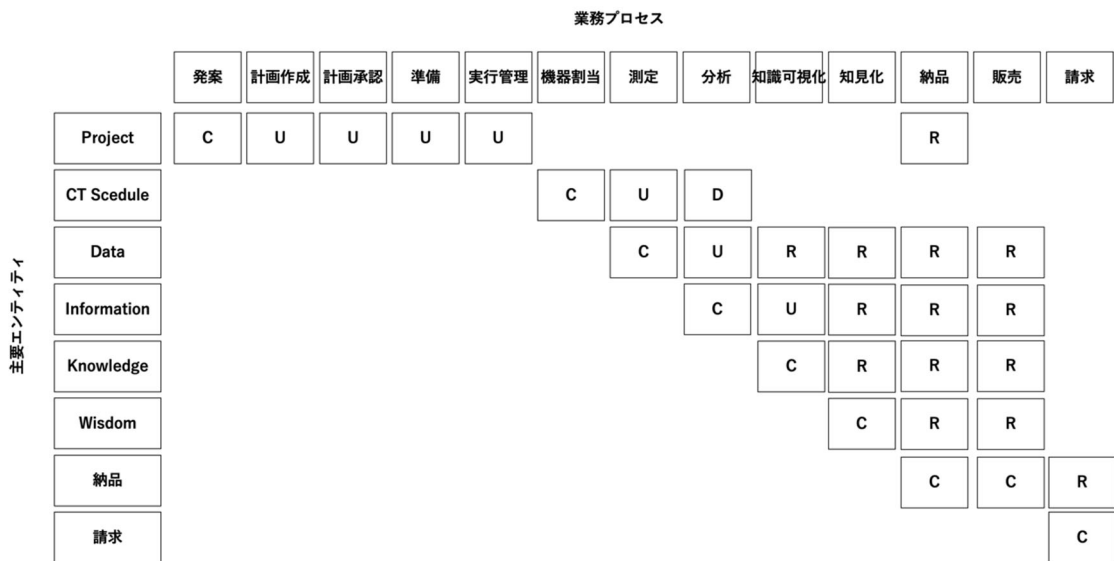


図 2-2-2-4 業務プロセスと CRUD

大型 CT スキャン装置で測定したデータを中心に業務を実施する。そのための、業務を管理する主要な Entity は以下のものである。

1. Project: Project は、Business Transaction を代表する Entity である。Project としての識別子を持つ。
2. CT Schedule: CT 装置の利用時間である。業務上必要とされる資源であり、限られた資源を有効に利用するための利用時間を割り当てることに利用する。
3. Data (データ): 「4.5 データプラットフォームが管理対象とするデータ資産」を参照
4. Information (インフォメーション): 「4.5 データプラットフォームが管理対象とするデータ資産」を参照
5. Knowledge (ナレッジ): 「4.5 データプラットフォームが管理対象とするデータ資産」を参照
6. Wisdom (知見): 「データプラットフォームが管理対象とするデータ資産」を参照
7. 納品 (物): 対価のあるプロジェクトについて、完了時に作られる書面
8. 請求 (書): 対価に関しての売掛金が存在することを示す書面

上記 Entity に対し、プロセスを CRUD¹⁵で表現している。

¹⁵ CRUD: データの作成 (Create)、読み出し (Read)、更新 (Update)、削除 (Delete) のこと

7.2 データモデル

データモデルについては、具体的なデータプラットフォームの設計時点で作成されるものとする。

8. データセキュリティ

データプラットフォームにおけるデータセキュリティは、以下の要素から構成する

- ・ セキュリティポリシーに関する立案と開発と実行
- ・ データ資産に対する適切な認証と権限の付与
- ・ アクセスを制御し監査すること

8.1 データセキュリティリスク

データの盗難や違反に対して、データ管理団体としてのセキュリティポリシーの設定と、IT に関わる業務の実行遂行と、データの分類、アクセス権限付与のルールなどを管理しなければならない。

セキュリティのアーキテクチャとプロセスを効果的に適用しないと、データの漏洩などの危険を除去するのが、一般企業にも増して難しくなることが想定される。セキュリティに関する個々人の倫理観は、特に寄り合い所帯で統一することは多くの場合困難である。また、技術研究組合という特性上、機密性の高いデータのため、外部からの攻撃にも晒されやすい。

まずは、データプラットフォームのセキュリティは以下のポイントからスタートさせる。

1. センシティブデータ¹⁶資産を識別し分類
2. データ管理団体が所持するセンシティブデータを把握
3. 各データ資産をどのように保護するかを決定
4. 情報と業務プロセスがどのように関連しているかを明らかにする

また、データそのものを分類するだけでなく、外部の脅威(ハッカーや犯罪者)や社内のリスク(組合員・従業員やプロセスによってもたらされるもの)を評価する必要がある。従業員・組合員の無知により、そのデータがセンシティブであることを認識せず、セキュリティポリシーが無視されることがある。その結果、多くのデータが失われ外部に流出する。特に請負業者が持つ PC の盗難などに備え、必要なデータは暗号化するなどの処置が必要である。

¹⁶ センシティブデータ: 個人情報のうち、カード番号、宗教、思想、病気に関してなど、特に知られたくないもの

8.2 データプラットフォームがデータセキュリティ活動として設定するゴール

データプラットフォームが利用するセキュリティについて設定するゴールは以下のものである。

- ・ データプラットフォームが利用する全データについて適切なアクセスを許可し不適切なアクセスを防止する。
- ・ 企業機密やプライバシーに関する規制とポリシーを遵守させる
- ・ 機密性に関するステークホルダーの要件が満たされていることを担保する

8.3 データプラットフォームのデータセキュリティ原則

データプラットフォームのデータセキュリティは以下の基本理念に従う

- ・ コラボレーション:データセキュリティは、データを扱うすべての組合員・従業員の共同作業である
- ・ 全社的アプローチ:セキュリティの基準とポリシーはデータプラットフォーム全体で一貫して適用される
- ・ 予防的措置:セキュリティ活動は予防的かつ機動的であること
- ・ 明確な責任:ロール(役割)と責任を明確に定義し、ロールや組織を超えてデータを管理する責任を全員が受け持つ
- ・ データカテゴリー主導:セキュリティの分類はデータのカテゴリーに基づいて決定され運用される
- ・ 露出の低減:システム外にデータ資産が露出することを最小限に抑える

8.4 データセキュリティのコンセプト

データプラットフォームで実現するコンセプトを整理する。

脆弱性: 脆弱性とは攻撃や侵害を成功させてしまうシステム上の弱点や欠陥である。一部の脆弱性は突破口とよばれる。サーバー環境は担当者をアサインすることで脆弱性を除去することが可能になる。問題は、クライアントとしてサーバーにアクセスする末端の PC に脆弱性が存在することである。

データプラットフォームは、サーバー環境だけでなくクライアントとして接続される PC に脆弱性が存在しないことを確認する手続きを用いるべきである。その他、計測用の PC や Network 機器、および IoT 機器などに脆弱性が存在する可能性がある。そのため、データプラットフォームとして全ての機器について脆弱性がないことを担保するコストはかなり高いことが想定される。

脅威： 脅威とはデータプラットフォームに対して起こり得る潜在的な攻撃行動である。脅威はデータプラットフォーム内外に存在し、それは常時存在するわけではない。しかしながら、無知な内部者も、知らないうちに攻撃的行動をしている場合がある。特定の脆弱性が脅威を招いているならば、その修復が急務となり、そのための体制の準備が必要である。

データプラットフォームのシステムは当面、一般に公開されている公共サービスのなものではないため、ネットワークサーバーを制圧する様な攻撃で、社会的なインパクトを与えることはないと考える。

リスク： リスクという用語は、損失の危険性と潜在的な損失をもたらす物事や状況のことである。脅威が発生するリスクはコストと表裏の関係にあり、リスクの脅威に関するリスクの算定を以下に示す。

- ・ 脅威が発生する確率と頻度
- ・ 評判への損害を含む、各脅威の発生が引き起こす危険性のある損害の種類と総額
- ・ 損害が事業活動の収益に与える影響
- ・ 発生時の被害を修復するためのコスト
- ・ 脆弱性を修復するなど、脅威を防止するためのコスト
- ・ 予想される攻撃者の目標や意図

リスクについては、データプラットフォームに対する潜在的な重大性と発生の危険性によって対応の優先順位を決定する。リスクの優先順位については、ステークホルダーが共有する正式なプロセスでの承認を経るものとする。

リスク分類： リスクの分類は、データのセンシティビティと悪意を持ってそれが入手される危険性によって分類される。データプラットフォームにおけるセキュリティの分類を以下の様に定める。

1. Critical リスク データ(CRD): データ資産として定義したデータ、インフォメーション、ナレッジ、知見は直接的な経済価値が存在するため、公開されていない状態のものは CRD に分類する
2. High リスク データ(HRD): 直接的な経済価値を持つ可能性があるデータ、データ管理団体の活動に関する情報および顧客に関する活動情報は、その競合相手にとっては価値があり、管理団体およびその顧客に対して経済的損失を与える可能性が存在する
3. Moderate リスク データ(MRD): 企業情報の中で不正に入手しても実質的な価値がほとんどないもの、ただしこの非公開情報がデータ管理団体に悪影響を及ぼす可能性がある

8.5 セキュリティの要件定義

データセキュリティの要件と手順については四つの A と呼ばれるグループに分類されてきた。

Access , Audit , Authentication , Authorization である。最近は、ゼロトラスト¹⁷と呼ばれる手法が認識されると、四つの A だけではなく、Entitlement(資格)という概念が導入されている。

Four A's and E

- ・ Access (アクセス): 権限を持つ個人がタイムリーにシステムにアクセス可能にすること。行為としてのアクセスは情報システムに積極的に接続してデータを操作することである
- ・ Audit (監査): セキュリティ対策とユーザーの活動を確認して規制の遵守とデータ管理団体の方針が適合しているかの確認。定期的にログと文書を専門家が Review してセキュリティの規制・ポリシー・基準への準拠を検証して公開する。
- ・ Authentication (立証): ユーザーへのアクセスを検証する。ユーザーがシステムに対するログインを試行すると、システムはそのユーザーが実際にその人であるかを検証する必要がある。パスワードはこれを行なうひとつの方法である。より厳格な認証方法として、ユーザーにセキュリティトークンを持たせたり、質問に答えさせたり、指紋を送信させたりする。認証中のすべての送信は認証情報の盗難を防ぐために暗号化される必要がある。
- ・ Authorization (権限付与): 割り当てられたロール(役割)に応じて、特定のビューを通じてデータにアクセスできる権限を個人に付与する。持つべき権限が決定された後、アクセスコントロールシステムは有効な権限トークンを持っているかどうかを、ユーザーがログインする都度チェックする。技術的にはシステムのアクティブディレクトリ内のデータフィールドへ権限が設定されることで、そのユーザーがある人からデータアクセス権限を付与されたことが示される。さらに、責任者がユーザーの業務を考慮して、このユーザーにこの権限を付与したことを示す。
- ・ Entitlement (資格): エンタイルメントとは、一度のアクセス権限付与によって、ひとりのユーザーに公開されるデータエレメントの集合である。このユーザーがこの情報に「アクセスする資格(エンタイルメント)がある」かどうかは、権限付与要求の発生時に、担当の管理者によって決定されなければならない。エンタイルメント関連の規制や機密要件を検討する際は、ひとつひとつのエンタイルメントによっても公開される全データのリストが必要になる。

監視

システムには潜在的なセキュリティ違反などの突発的なイベントを検出する監視コントロールが含まれている必要がある。機密情報を扱うシステムは通常、不審な行動や不適切なアクセスをセキュリティ管理者に警告する、アクティブなリアルタイム監視機能が必要とされる。また、特定のアクセスプロファイルに従わないアクティビティを能動的に遮断する必要もある。その際は、セキュリティサポート担当者が詳細を評価するまでアカウントやアクティビティはロックされたままにするなどの対応を

¹⁷ ゼロトラストとは 社内外のネットワーク環境における、従来の「境界」の概念を捨て去り、守るべき情報資産にアクセスするものはすべて信用せずその安全性を検証することで、情報資産への脅威を防ぐという、セキュリティの新しい考え方
(https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/lst/2022/iis/fujino/0727_1 より)

定めておく。

同時に、自動的な監視をするほか、定期的にシステムのスナップショットを取得し、動向をベンチマークなどの基準と比較することによって時間の経過に伴う変化を追跡することが必要である。その結果を、システムはデータを管理するデータ・スチュワードやセキュリティ管理者にレポートを送信することで、監視を実現する。能動的な監視は検出メカニズムであるが、受動的な監視は評価メカニズムであることに注意する必要がある。

データの完全性

セキュリティにおけるデータの完全性とは不適切な変更、削除、追加から完全に保護された状態を表す。

9. データプラットフォームが実施するドキュメントとデータ資産の管理

ドキュメントとコンテンツ管理にはリレーショナルデータベースに保存されていないデータとインフォメーションを取得保存アクセス利用の制御が伴う。ドキュメントと非構造化、半構造化インフォメーションの総合性を維持しアクセスできるようにすることに焦点を置き、リレーショナルデータベースのデータオペレーション管理と同様の管理を行う。

データプラットフォームにおけるデータ資産は、非構造化データと構造化データを持ち、お互いに直接的な関係を持つものとする。さらに多種のデータと同様にドキュメントがコンテンツも安全で高品質であることが期待されている。

セキュリティと品質を確保するにはガバナンス信頼性の高いメタデータを適切に管理することが必要である。

9.1 業務上の意義

ドキュメントとデータ資産の管理を行うことにより規制遵守と訴訟の要請に応え、事業継続性等の要件に対応できるようにする。優れたデータ管理機能により業務を効率化することができる。

オントロジーなどの構造を効果的に管理することで検索能力やナレッジ・知見の発見能力が高まり、顧客等の満足度を向上させる。また、電子メール、チャットウェブサイト、電子ドキュメントなどのレコードやデータ資産の生データとメタデータをどのように組織が積極的に管理しているかによって組織の対応能力が決まる。

9.2 目的と原則

データプラットフォームにおけるドキュメントとコンテンツ管理は以下の目的を実現することである。

- ・ 非構造化形式でデータ資産を効率的かつ効果的に取得し利用できるようにする
- ・ 構造化データと非構造化データ間の統合機能を実現する
- ・ 法的義務を重視し顧客の期待に応える

ドキュメントとデータ資産管理は以下の基本理念に従う。

- ・ レコード(データベース内データ)を作成利用検索処分するときは全員が既定のポリシーと手順に従わなければならない
- ・ レコードとデータ資産の取り扱いに関するポリシーと計画の立案には専門家が十分に関わらなければならない

9.3 維持管理の原則

ドキュメントとデータ資産の維持管理に関する原則は以下のものである。

- ・ 説明責任原則: データ統括責任者(仮称)等担当責任者を適切な個人に割り当てスタッフ指導方針と手順に従いプログラム監査能力を確保しなければならない
- ・ 完全性の原則: インフォメーション・ガバナンスプログラムによって組織(データ管理団体)が作成管理するドキュメントとデータ資産の信頼性と信憑性が合理的かつ適切に確保されるようにしなければならない
- ・ 保護の原則: インフォメーション・ガバナンスプログラムによって個人情報または保護が必要な情報に対する保護レベルが達成されているようにしなければならない
- ・ コンプライアンスの原則: インフォメーションガバナンスプログラムによって適用される法律やその他拘束力のある当局や組織の方針に準拠するようにしなければならない
- ・ 可用性の原則: 組織(データ管理団体)は必要な時に効率的かつ正確に検索できるように情報を維持しなければならない
- ・ 保持の原則: 組織(データ管理団体)はすべての運用上、法律上、規制上、財務上の要件および関連するすべての拘束力のある当局の要件を考慮してしかるべきときのために該当情報を保持しなければならない
- ・ 処分の原則: データプラットフォームはその方針が適用される法律規制その他拘束力のある当局の指示に従い情報を安全性適切に処分しなければならない
- ・ 透明性の原則: 組織はインフォメーションガバナンスプログラムを含めポリシー、プロセス、アクティビティを文書化しスタッフと適切な利害関係者がそれらを利用できるようにしなければならない

10. ドキュメントデータ資産管理の概念

10.1 ドキュメント

ドキュメントとは、ファイル・ドキュメントまたは web サイト内のデータを意味する。データ資産はドキュメントで表現された概念やドキュメントタイプステータスに基づいて関連管理されるものとする。データ資産にもライフサイクルがあると想定する。コンテンツの最終版はデータ管理団体にとっての資産として扱われ販売、もしくは成果物として納品することがある。

10.2 ドキュメントとデータ資産管理

ドキュメントとデータ資産管理にはそれらを整理・分類・構造化するプロセスや技法技術が含まれる。これにより様々な方法で情報資源が保管・公開・再利用できるようになる。ドキュメントとデータ資産管理のライフサイクルの中には統制されたプロセスを通じて毎日頻繁に作成変更されるものがある。一方でより静的な内容で軽微な変更が時折なされるものもある、ドキュメントとデータ資産は正式に管理されるかまたは非定期的な更新を通じて非公式に管理されることがある。

11. データプラットフォームのメタデータ管理

11.1 メタデータ¹⁸

メタデータの定義は、単純すぎて誤解を招きやすい。メタデータとして分類できる情報の種類は幅広い。

- ・ IT プロセス
- ・ 業務プロセス
- ・ データのルールと制約
- ・ 論理のおよび物理的なデータ構造

メタデータで記述されるものは以下のものである。

- ・ データ自体(データベース,データエレメント,データモデル)

¹⁸ <https://qiita.com/zumax/items/dc84dc16724c2d245e0e>

- ・ データが象徴する概念(業務プロセス、アプリケーションシステム、ソフトウェアコード、IT 基盤など)
- ・ データと概念の関係性を記述する

メタデータ管理はナレッジマネジメントの取り組みであるばかりでなくリスクマネジメントにとってもなくてはならないものである。メタデータは、組織が個人データや機密性やセンシティブ性の高いデータを識別し組織の利益のために使用するものである。また、データライフサイクルを監視コンプライアンス要件で満たしリスクの影響度を最小にするためにメタデータ管理は必要である。

信頼性の高いメタデータがない組織は、どんなデータがあり、そのデータが何を現しどこで発生しシステムの間をどう移動し、誰がアクセスできデータが高品質であることがどんな重要性を持つのかなどと把握していないことになる。

メタデータなしには組織はそのデータを資産として管理できないのは自明の理である。さらにいえばメタデータがないため組織がデータを全く管理できていない場合がある。他のデータと同様にメタデータには管理が必要である。

組織がデータを収集して格納する能力が増すにつれデータマネジメントにおけるメタデータの役割はますます重要になる。特に、車両の使用履歴などを扱う場合は、とても重要である。

11.2 メタデータ管理のビジネス上の意義

メタデータなしではデータを管理できない。さらにメタデータそのものを管理する必要がある。信頼性が高く管理されたメタデータにより以下のことが可能になる¹⁹。

- ・ データのコンテキストを提供、データ品質の測定を可能にしてデータへの信頼を向上させる
- ・ 戦略的な情報例えばマスターデータを多様な用途に利用できるようにし、その価値を高める
- ・ 冗長なデータとプロセスを特定し業務効率を向上させる
- ・ 古いデータや間違ったデータの利用を防止する
- ・ データを活用した調査に要する時間を短縮する
- ・ データ利用者と IT 専門家の間のコミュニケーションを改善する
- ・ 影響分析が正確になりプロジェクト失敗のリスクを減らせる
- ・ システム開発のライフサイクル時間を短縮し製品の市場投入を早める
- ・ データのコンテキスト履歴発生元すべて記録することによりトレーニングコストを削減しスタッフ交代の影響を軽減する

¹⁹ https://developers.gnavi.co.jp/entry/metadata_1/

- ・ 法規制遵守を支援する

11.3 メタデータ管理のゴールと原則²⁰

メタデータ管理は以下のことを目指している。

- ・ 利用する人々が一貫性を持ってデータコンテンツを理解しデータを利用できるようにするためにデータ関連の業務用語に関して組織が持つ知識を記録し管理する
- ・ 様々なソースからメタデータを収集して統合し、異なる部門で生成されるデータ間の類似点や相違点を理解できるようにする
- ・ メタデータの品質、一貫性、最新性、セキュリティを確保する
- ・ メタデータの利用者(人、システム、プロセス)に対してメタデータを利用するための標準的な方法を提供する
- ・ データ交換を可能にするメタデータ技術標準の方法を確立または強化する
- ・ メタデータ・ソリューションの導入を成功させるには以下の指針に従う必要がある
- ・ 組織のコミットメント: 全社の資産としてデータを管理する全体戦略の一環としてメタデータ管理に対する組織のコミットメントを得る
- ・ 戦略: メタデータの作成、維持、統合、アクセス方法を考慮したメタデータ戦略を策定する

この戦略は要件を左右するのでメタデータ管理製品の評価・購入・インストールをする前に定義する必要がある。

メタデータ戦略はビジネス上の優先順位に合致していなければならない

- ・ 全社的視点: 将来の拡張性を確保するために全社的視点を持つこと
- ・ ただし反復的かつ段階的に導入しながら価値を高める
- ・ ソーシャル化: メタデータの必要性和各種メタデータの目的を伝える
- ・ メタデータの価値を企業内に認識させることにより業務での利用が促進されさらに重要なこととして業務の専門知識自体の向上にも寄与する
- ・ アクセス: スタッフがメタデータにアクセスして利用する方法を知っていることを確認する
- ・ 品質: メタデータはしばしば既存のプロセスを通じて生成されることを認識しプロセスのオーナーがメタデータの品質に責任を持ち続ける
- ・ 監査: メタデータを容易に統合し有効に利用できるように標準を策定し適用し監査する
- ・ 改善: 間違っていたり最新ではなかったりするメタデータを利用者が管理チームに通知できるようにフィードバックの仕組みを作る

²⁰ <https://qiita.com/zumax/items/dc84dc16724c2d245e0e>

11.4 基本的な概念

章の冒頭で述べたように、メタデータも一種のデータであり同じように管理する必要がある。一部の組織が直面している問題の一つは、メタデータではないデータとメタデータであるデータとの間のどこに線を引くかである。概念的にはこの線はデータによって表される抽象化のレベルに関連している。経験則としてある人にとってのメタデータが別の人にとっては単なるデータである可能性がある。組織はメタデータを管理するために哲学的な判別に悩む必要はない。その代わりにメタデータの要件を定義すべきである。その際メタデータが何のために必要か以下の点に焦点を絞る。

- ・ 新しいデータを作成する
- ・ 既存のデータを理解する
- ・ システム間のデータ移動可能にする
- ・ データへアクセスする
- ・ データを共有する

11.5 メタデータの種類

メタデータはビジネス・テクニカル・オペレーションなどという三つのタイプに分類される。これらのカテゴリーによりメタデータ自体を包括する情報の範囲や、メタデータを生成する機能を人々が理解できるようになる。メタデータがどのカテゴリーに属するかを明確にするためには、メタデータがどこで発生するかという点からカテゴリーを考えるとよい。

11.6 ビジネス・メタデータ²¹

ビジネス・メタデータは主にデータの内容と状態に重点を置いている。ビジネス・メタデータには概念対象領域エンティティ属性に関する名称と定義が含まれる。この名称は IT から独立し、業務的に決定する必要がある。さらに属性のデータ型とその他の属性のプロパティ、取り得る値の範囲に関する説明計算方法、アルゴリズムと業務ルール、有効なドメイン値とその定義なども含まれる。ビジネス・メタデータには以下のようなものがある。

- ・ データセットテーブルおよびカラムの定義と説明
- ・ 業務ルール変換ルール計算方法および導出方法
- ・ データモデル

²¹ <https://qiita.com/zumax/items/dc84dc16724c2d245e0e>
<https://rakusui.org/metadata/>

- ・ データ品質の規則と測定結果
- ・ データが更新されるスケジュール
- ・ データの出所とデータリネージ(流れ追跡)
- ・ データ表示
- ・ データエレメントが依存するマスターレコード(データ)の指定
- ・ 有効値制約
- ・ ステークホルダーの連絡先情報(例えばデータ・オーナー、データ・スチュワード(管理人))
- ・ データのセキュリティ・プライバシーレベル
- ・ データに関する既知の問題
- ・ データ利用上の注意

11.7 テクニカル・メタデータ²²

テクニカル・メタデータはデータの技術的詳細データを格納するシステムおよびシステム内やシステム間でテクニカル・メタデータを起動するプロセスに関する情報を提供する。テクニカル・メタデータには以下のものがある。

- ・ 物理的データベースとカラムの名称
- ・ カラムのプロパティ
- ・ データベースオブジェクトのプロパティ
- ・ アクセス権
- ・ データ CRUD(作成、参照、更新、削除)のルール
- ・ データ・テーブルのキーインデックスなどを含む物理データモデル
- ・ データモデルと物理的資産の関係を示すドキュメント
- ・ ETL ジョブ²³の詳細
- ・ ファイルフォーマットのスキーマ定義
- ・ ソースからターゲットへのマッピングを示すドキュメント
- ・ 上流および下流への変更影響情報を含むデータイメージを記述するドキュメント
- ・ プログラムとアプリケーションの名称と説明
- ・ コンテンツ更新ライフサイクルのジョブスケジュールと依存関係
- ・ リカバリーとバックアップのルール

²² <https://qiita.com/zumax/items/dc84dc16724c2d245e0e>
<https://rakusui.org/metadata/>

²³ ETL とは、Extract(抽出)/Transform(変換)/Load(格納)の略で、広く使用されているデータの抽出とマイグレーションプロセスである

- ・ グループ別、役割別データのアクセス権

11.8 オペレーショナルメタデータ²⁴

オペレーションのメタデータはデータの処理とアクセスの詳細を記す。次のようなものがある。

- ・ バッチプログラムのジョブ実行ログ
- ・ データの抽出とその結果などの履歴
- ・ 運用スケジュールの異常
- ・ audit (監査)、バランス、コントロールなどの結果
- ・ エラーログ
- ・ レポートとクエリーのアクセスパターン頻度および実行時間
- ・ バッチとバージョン管理の計画と実行現在のパッチ適用レベル
- ・ バックアップ保存実行日付災害復旧などの規定
- ・ SLA²⁵の要件と規定
- ・ 容量の増減と利用パターン
- ・ データのアーカイブと保持ルールおよび関連するアーカイブ
- ・ 廃棄基準
- ・ データ共有ルールや合意事項
- ・ IT の役割と責務

²⁴ <https://rakusui.org/metadata/>

²⁵ SLA: Service Level Agreement 提供者と利用者で締結されるサービスのレベルについての合意

12. 考察

12.1 GAIA-X のセルフ・ディスクリプション機能

GAIA-X のデータ構造には大きな特徴が二つある。一つがメタデータの機械による書き込み、読み出しが可能なセルフ・ディスクリプション機能である。これは主に自己データの正統性(証明)と、説明を記述することを目的として、自己データの識別子や名前、クレームステートメントの他、整理に必要となるであろう情報を追記できるようになっている。

12.2 GAIA-X のスキーマ継承関係(構造化)機能

もう一つの特徴はそれら自己記述された情報が継承(クラス)関係で構造化されているということだ。自分のデータ構造(ツリー)がどうなっているのか、あるいは関係者の自己記述との関係がどうなっているのかがクラス～サブクラスの関係で記述することができる。これらにより、取り扱われ、関係するデータ群の正統性が「どこまで」、「何で」証明されるのかがデータ毎に管理できることになる。デジタル(データ)主権の確保を目指すヨーロッパのデータプラットフォームの技術的根拠となる仕組みになっている。

12.3 データプラットフォームのあるべき姿

価値創造のためのプラットフォーム

前記のスキーマ構造から予測できる課題もある。一つはデータ単独での流動しか想定されていないように見えることである。GAIA-X でのデータには手厚いメタデータ、アノテーションデータの記述がサポートされているものの、データとデータの関係や、データとコンテキストの関係、あるいはプロセスとデータの関係の記述する能力が低い。これは部品の構造のみを記述するには良いが、設計・製造・検査・販売・使用など、エンジニアリングチェーン、サプライチェーンのなかで、課題を抽出し、不足箇所や無駄部分などイノベーションにつながる構造(意味)を発見する能力が低いことを意味する。

プロビジョニング・プラットフォーム

また、本レポートに記載した「プロビジョニング」による時間、エネルギー、人的なリソースを効率的に使用し、生産性を上げようとした場合、プロセスを含めた組織的能力や測定・監査などとデータの連携がうまく評価できないことが問題になる。部品の「準備」は良いかもしれないが、「プロセス」の準備と評価のハードルは高い。

イノベーション・プラットフォーム

以上のような特徴と課題から、我々が目指すべきデータプラットフォームの姿が見えてくる。データをモノとコト、つまりマテリアルとプロセスの両面から記述し、管理できること。そして、それらの関係性、つまりはモノとモノ、モノとプロセス、プロセスとプロセス、そしてそれらの正統性(承認)が記述でき、オントロジー的な構造として扱うことができるような仕組みが必要になる。これらのことで、プロビジョニングを含めた仕組みの最適化や新たな価値構造の発見などイノベーションを促進することが期待できる。単なるクラウドの拡大版やデータ交換基盤などではなく、いわば「イノベーション・プラットフォーム」ともいうべきものを構築することが提案可能になると言える。

13. まとめ

13.1 調査の概要

この調査は当初、1. 調査スコープの設定、2. 従来型プラットフォームの調査、3. 先進プラットフォームの調査の3部構成で行う予定であったが、従来型プラットフォームとして GAIA-X を調査する中で、変更を行った。調査開始前は、GAIA-X はデータ開示条件をノード間に持たせるグラフ構造を基本に持つ従来型のデータ交換プラットフォームであると想定していたが、調査を進め、テクニカル・ドキュメントを解析するとさらに先進的なコンセプトと機能を備えていることが明らかになった。一つはセルフ・ディスクリプション(自己記述)と呼ばれるメタデータ構築技術、もう一つはスキーマ継承関係を中心としたメタデータ構造化技術である。この二つは CPE 組合のデータプラットフォーム委員会でも採用を想定していた次世代技術に近いものと推測されるため、より明確に差別項目を表現する必要が生じた。このことから海外、日本のプラットフォームの現状を述べたうえで、将来プラットフォームの構想をより具体的に記述した。

また、当初はデータ間の関係を記述するために「グラフ構造」と主語、述語、目的語を記述する「RDF」、それらを計算・解析で使用するための「述語論理」処理システムが必要になると考えられていた。そのため、述語論理システムでノーコード開発を実現しているビジネスルール記述システムである「Genexus」²⁷のウルグアイ現地での調査が必要だと想定していた。しかし、その後の調査で、Genexus が言うところの AI (Prolog) はビジネス制約(問題)の記述のみに使用されており、我々の要求するようなデータの「述語論理演算」や「形式的操作」がされておらず、さらにはシステム進化の予定がないと予想されることから、現地(ウルグアイ)の技術者ディスカッションの必要性が低下した。このため、海外調査は Catena-X や Skywise を実用化した上で今後の進化を公言している GAIA-X に絞ることとした。

13.2 海外の現状

GAIA-X は、ヨーロッパのデータ主権、デジタル主権の確保を目的に新技術、新概念を意欲的に取り込んで構想されたデータ交換プラットフォームである。自動車業界では Catena-X、航空機業界では Skywise がこのプラットフォーム上で動作している。ただし、米国企業が参加していることで、トロイの木馬化する疑念や、米クラウド法との矛盾も指摘されるなど今後調整が必要な分野もある。さらにはあまりに革新的なコンセプトのため、当初の狙いであったミッテルシュタント(独:中小企業)への導入が進んでいないなど、停滞も見られる他、離脱する企業も出現してきている。

²⁷ Genexus:業務内容の記述から実現方法を自動生成する超高速開発ツール。開発拠点はウルグアイ、モンテヴィデオ(中央オフィス)

13.3 日本の現状

日本産業のデジタル化の問題は現場が「困っていない」ことにある。全ての情報が系列内で処理され、設計データ・テストデータ・市場データが企業内で秘匿される状況においては、あえてリスクのあるネットワーク化にチャレンジする価値は低い。オープンにするデータとクローズにするデータが切り分けられておらず、メタデータ管理が不十分なまま欧米のネットワークに参画すると内部資源情報が流出する恐れがある。DSA などが推進する「DATA-EX」は分野を超えたデータ連携を目指しているが、上記の問題から普及には困難が予想される。

13.4 プラットフォームの構想と提案

今現在、日本の製造業は「現実社会を巨大な実験フィールド」と考えそのデータを如何に使うかが重要である。その方法は、1. プロビジョニングによる人的、時間的、エネルギー的リソースの効率的利用＝生産性向上と、2. データ構造化による付加価値パターンの発見・利用＝イノベーション・プラットフォーム化である。

そのため、メタデータ記述とデータ構造化が必要である。GAIA-X のスキーマ継承関係がどちらかというと正統性の証明に軸足が置かれているのに対し、モノとモノやプロセスとプロセスの関係構造から意味を見出す「オントロジー」を積極的に導入する継承関係とすべきである。GAIA-X に採用されている IDS コネクタと継承関係を含むアノテーションのコンセプトや M2M²⁸は次世代プラットフォームとして優れた考え方である。GAIA-X をベースとしながらも一部を改変し、モノとプロセスの関係を適切に表現し、オントロジーが積極的に利用できるプラットフォーム特性を実現することが、国際バリューチェーンと効率を両立させる手法となり得ると考えられる。

²⁸ M2M: Machine to Machine この場合、メタ情報の記述・読み出し・管理を機械が行うことを意味する

参考文献・引用文献

「データマネジメント知識体系ガイド(第二版): DAMA-DMBOK : DATA MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE(Second Edition)」 日経 BP

gaia-x-the-european-project-kicks-of-the-next-phase.pdf

<https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/gaia-x-the-european-project-kicks-of-the-next-phase.pdf>

gaia-x-a-pitch-towards-europe.pdf

<https://www.data-infrastructure.eu/GAIA/Redaktion/EN/Publications/gaia-x-a-pitch-towards-europe.pdf>

gaia-x-technical-architecture.pdf

https://www.data-infrastructure.eu/GAIA/Redaktion/EN/Publications/gaia-x-technical-architecture.pdf?_blob=publicationFile&v=5

gaia-x-driver-of-digital-innovation-in-europe.pdf

https://www.data-infrastructure.eu/GAIA/Redaktion/EN/Publications/gaia-x-driver-of-digital-innovation-in-europe.pdf?_blob=publicationFile&v=8

gaia-press-release-september-15th-de.pdf

https://www.data-infrastructure.eu/GAIA/Redaktion/EN/Downloads/gaia-press-release-september-15th-en.pdf?_blob=publicationFile&v=3

IDSA-Position-Paper-GAIA-X-and-IDS フラウンホーファー

https://internationaldataspaces.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/IDSA-Position-Paper-GAIA-X-and-IDS.pdf

https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727_1

<https://www.sbbbit.jp/article/cont1/94752>

<https://unistyleinc.com/techniques/1364>

<https://it.impress.co.jp/articles/-/23216>

<https://plaza.rakuten.co.jp/kawauchi75/diary/201606020000/>

<https://qiita.com/zumax/items/dc84dc16724c2d245e0e>

https://developers.gnavi.co.jp/entry/metadata_1/

<https://rakusui.org/metadata/>

2-③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査

2-③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査

2-③(1)-1:X線CTによる金属AM(付加製造)部品の欠陥検出および形状計測

1. はじめに

本事業は令和4年度超大型X線CT装置を活用した産業のデジタル化技術の開発等に係る調査事業の中で、現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査の一環であるX線CTデータを基にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査において、X線CTによる金属AM(付加製造)部品の欠陥検出および形状計測に関して調査を行ったものである。特に福島県内企業との連携の事例構築のため、福島県にあるj社と共同で同社が取り組んでいる金属AM製造における課題に向けての調査を行った。

2. 調査概要

2.1 目的

近年、AM(付加製造)の進歩・普及は著しく、精密金属部品の製造においても活用が始まっている。福島県においても、この技術にいち早く取り組み、自社製品の差別化や競争力向上を図る企業が出てきている。一方、AMは原理上、内部欠陥、形状不良がでやすく、機械的強度や耐久性の低下という大きな懸念があり、如何にその品質を保証するかということが大きな課題となっている。近年、X線CTはそのような欠陥・形状不良を非破壊で検査・計測する効果的な手法として広く認知されるようになってきているがAMで造形された部品検査での利活用が進んでいない。そこで県内中小・中堅企業と連携し、AM製品製造時の欠陥解析と形状計測に関する技術について調査する。さらに、設計意図を実現するため、得られた3Dデジタルデータを活用した製造工程の最適化を行い、その有用性や課題についても検討する。

2.2 技術の概要

技術の概要はX線CTデータから、AI(機械学習)を用いて簡単な操作でAM部品の欠陥を自動で3次元的に検出するものである。また、CTデータから抽出された3次元点群を用いて部品の内部および外部の形状計測を行い、設計モデルとの差異を評価するものである。

2.3 技術の現状

国内では、欧米に比して、製造業における金属 3D プリンタの導入自体が遅れているが、X 線 CT の活用はさらに遅れている。X 線 CT 装置の操作や取得した CT データの処理や解析などの操作に専門的な知識が必要なことが普及を阻む大きな原因となっている。

2.3.1 金属 AM の現状、動向

金属 AM は欧米を中心に進歩・普及が著しい。最近、大型化と量産化への進展が進んでいる¹⁾。前者は、主に航空宇宙産業で大きなロケット部品などを製造するためであり、1～1.5m の高さの造形が可能となっている。後者は、BJT (Binder Jetting) 方式の 3D プリンタの登場²⁾である。従来からの主流である L-PBF (Laser - Powder Bed Fusion) 方式に比して、50 倍高速に生産できるとの報告があり³⁾、従来はコスト面で困難であった自動車部品生産への適用が視野に入ってきている。

一方、国内に目を転じてみると、2019 年度の金属 3D プリンタの市場は、欧州と北米で世界に占めるシェアの 60% 以上の売上を占めるのに比べ、日本のシェアは 10% に満たない状況であり⁴⁾、産業競争力維持・向上の観点から大きな問題となっている。このような状況の中、福島県においては、金属 AM 技術に一早く取り組み、自社製品の差別化や競争力向上を図る企業が出てきている。このような先進的取り組みを行う企業に対して、如何に支援を行っていくかは重要である。

2.3.2 金属 AM の検査・測定における産業用 X 線 CT の現状、動向

AM の技術進歩・普及は著しいが、新しい造形方法ということもあり、材料管理、工程管理、品質管理などが十分に追いついていないのが現状である。造形に関する事例発表については枚挙に暇がないが、品質管理に関するものは少ない。樹脂、金属など AM 全般の品質問題について体系的にまとめたものとして Zanini らの報告がある⁵⁾。さらに金属 AM については、現在、主流の PBF (Powder Bed Fusion) 方式において、空孔 (porosity, void)、砂残り (trapped powder)、未焼結 (Lack of Fusion) などの内部欠陥が生じやすい他、十分な表面粗さが得られないという問題が報告されている⁶⁾。また、残留応力や材料の異方性による変形の問題なども指摘されている⁷⁾。

AM 部品は通常、単品もしくは少量で生産するので、これらの欠陥を非破壊で検査することが必須である。内部欠陥を非破壊で検査する技術としてはいくつかの技術があるが、部品深奥部の形状を比較的高い分解能で評価できるのは現状、X 線 CT だけである⁸⁾。

2.3.3 産業用 X 線 CT

産業用 X 線 CT については以下のような動向が挙げられる。

(1) 大型化、高エネルギー化

造形の大型化に伴い、X 線 CT 装置の大型化、高エネルギー化も対応が進んでいる。そのような装置の例として、Waygate 社 Phoenix Power|scan HE システムがある⁹⁾。この装置は、直径

2000mm、高さ 2000mm という大きな計測可能範囲を持ち、重量も 1 トンまで搭載可能である。X 線源としては 9 MeV LINAC と 450kV の二つを持ち、大型部品に対しても十分な透過力を持つ。

(2) 高精細化

切削加工などの除去加工では不可能な微細構造を部品内部に作成できるのも AM の大きな長所での一つである。そのため、内部の形状や欠陥を高精細に見たいという要求も多い。このような要求に応えるには、マイクロフォーカス X 線 CT 装置が必要となる。この装置は、X 線源の最小スポットサイズは 1 μm であり、撮像時の条件にもよるがミクロンオーダーでの画像取得が可能である¹⁰⁾。

(3) 形状計測への対応

内部の欠陥検査に留まらず、最近では内部の寸法や幾何公差などの測定に使用される場合も多くなってきた。すでに、いくつかのメーカーからは、測定値が精度保証された X 線 CT 装置が提供されており¹¹⁾、非破壊検査用途と区別するために、Dimensional X 線 CT (以下、DXCT) と呼ばれることがある。DXCT は三次元測定機など、従来の測定機では不可能だった内部形状測定が可能となるので活用が広がっている。

ドイツでは、DXCT の寸法測定精度評価方法に関するガイドラインを作成しており¹²⁾、ISO でも国際標準とし審議が続いている¹³⁾。

以上のように AM の進歩、普及に併せて、X 線 CT においても様々な改良、工夫がなされて来ているが、その普及は進んでいない。その理由としては以下が挙げられる。

(1) 装置が高価である。

(2) 装置の操作や撮像した CT データの処理、解析に専門的知識が要求される。

(1) については、X 線 CT 受託サービスを使用することで対応することが多い。国内の受託サービス量は増加の一途を辿っており、AM の普及に伴い、今後も伸びることが予測されている¹⁴⁾。

一方、(2) については、特に CT データの処理、解析が画像に関する操作となるので慣れていない人にとってはハードルが高い。また、空孔などの欠陥は通常、数多く存在するのでマニュアルで操作し、目視で確認を行うのは非常に多くの時間を費やすことになる。近年、画像処理、解析の自動化では AI の活用が進んでいるが、X 線 CT 画像の欠陥検出に AI を適用した例はあまり多く報告されていない。TOKIME らは X 線検査において深層学習 (Deep Learning) を用い、自動欠陥検出を行っているが、対象としているのは 2 次元の X 線投影画像であり、CT 画像 (3 次元) への適用は行っていない¹⁵⁾。深層学習で現在、主流となっているのは教師付き学習の一種であり、ニューラルネットワークモデル (Neural Network) を多層化した Deep Neural Network (DNN) である¹⁶⁾。DNN は適切に設定し、学習すればクラス (分類) 数、処理データが膨大な場合にも判断できる強力な手法である。しかし、学習データの準備に多大なコストがかかるという問題がある。すでに述べたように、AM では少量生産が前提となるので、事前に膨大な学習データを準備することは現実的ではない。これに対して、教師なし学習の一つである敵対的生成ネットワーク (Generative

Adversarial Network: GAN)を用いて金属 AM 部品の学習コストを大きく削減し、CT 画像取得から自動欠陥検出の時間を大幅に短縮したことが報告されている¹⁷⁾。

DNN のもう一つの問題は、判断のプロセスがブラックボックスであることである¹⁸⁾。DNN は層の構成が深いほど強力であるが、逆に説明はより困難なるため、実際の工程管理、品質保証に使用することは困難である。この問題に対し、画像特徴量の決定木と Random Forest 法を用いて自動的に欠陥検出、分類を行う手法が報告され¹⁹⁾、自動車のアルミ鋳造部品検査で使用が始まっている。決定木を用いているので、説明性が高い。前記のようにアルミ鋳造部品と同様に、金属 AM における内部欠陥の種類は数が限られているので⁶⁾、DNN に比べて実用的な方法であると言える。学習についても、数枚の断面画像に対して簡単な指示で行うので学習量が少なく低コストで済む。現在は、金属 AM 部品の CT 画像による自動欠陥検出の可能性 (FS) 調査に進もうとしている。

2. 4 課題

本技術の調査に取り組むに当たって解決すべき課題は以下の通りである。

- (1) X 線 CT データの簡単な学習 (AI) で AM 部品内部の欠陥を 3 次元で自動検出する技術についての FS 調査
- (2) X 線 CT データを用いて AM 部品形状計測を行い、設計モデルとの差異を評価する技術についての FS 調査
- (3) 上記解析データを含む 3D デジタルデータ活用の有用性および課題調査

2. 5 成果の概要

本調査により以下の成果を得た。

- (1) AM 金属部品サンプルを作成し、X 線 CT 撮像を行い、取得した CT データに対し、簡単な学習を行うことで内部欠陥を 3 次元的にかつ自動で検出できることを確認した。
- (2) CT データから抽出されたサンプル表面の 3 次元点群データから設計モデルとの寸法形状比較評価を行えることを確認した。
- (3) サンプルを破断し、断面の顕微鏡画像と CT 断面画像との比較評価を行い、埋め込み欠陥の形状、位置、姿勢は両者ではほぼ一致していることを確認した。
- (4) 3D デジタルデータの活用が作成したサンプルの品質保証において極めて有用であることを確認した。熱交換器のようにさらに、内部に複雑かつ微細な構造を持つ部品の品質保証には 3D デジタルデータの活用が不可欠であること、また CAE 解析により設計性能の検証が可能となり有用性が高いことを示した。

2.6 実施スケジュール

表 2-3-1-1 に実施スケジュールを示す。

表 2-3-1-1 実施スケジュール

実施項目等	令和4年度					
	担当	11月	12月	1月	2月	3月
全般事項		▽キックオフ			▽CPE納入	
進捗確認会議			▽	▽		
AMサンプル設計・製作	J社	←→				
X線CT撮像	G社		▽ 全体撮像 中解像	▽ 部分撮像 高解像		
欠陥検出、形状計測	F社		←→	←→		
破壊評価	J社			←→		
結果とりまとめ	F社			←→		
報告書作成	F社			←→		

3. 成果の詳細

3.1 金属 AM サンプルの設計、製作

サンプル製作に当たっては、k 社製金属 3D プリンタ M 290 が使用された。本調査の主な目的である欠陥検出および評価を行うために人工的に欠陥を埋め込んでいる。サンプルは 3 個作成し、このうち 2 個に欠陥を埋め込んだ。作成したサンプルを表 2-3-1-2 に示す。なお、材質はチタン合金 (64Ti) である。

表 2-3-1-2 作成したサンプル

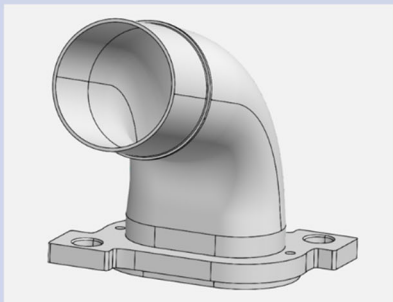
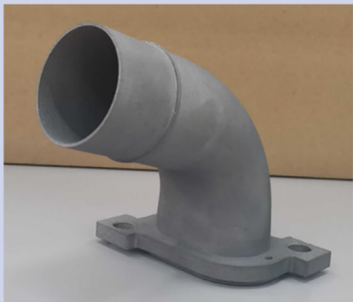
	欠陥埋めこみ	CADデータ	外観
サンプル #1	なし		
サンプル #2	あり		
サンプル #3	あり		

図 2-3-1-1 に金属 AM サンプルの図面を示す。また、図 2-3-1-2 に欠陥の設定位置、寸法を示す。

この設定に従ってレーザ照射をスキップすることで欠陥を生成している。スキップした領域には金属粉末が残留するが、封じ込めた後から再度、照射を始めると、残留金属粉の上部には蓋が形成される。レーザの熔融深さは 1 パス当たり 0.2～0.3mm に設定しており、形成された蓋は薄く脆いため、変形しやすく容易に割れが生じる。さらに、その際粉末が飛散することが経験的に分かっている。空孔と残留金属粉の量をコントロールできないという問題はあるが、確実に空孔を形成できるので、本調査ではこの方法を採用した。なお、埋め込み欠陥は、後に行う破壊評価を考慮して、通常、発生する欠陥より大きな領域 (長さ 5 mm×幅 3 mm×厚さ 0.5 mm) に設定している。

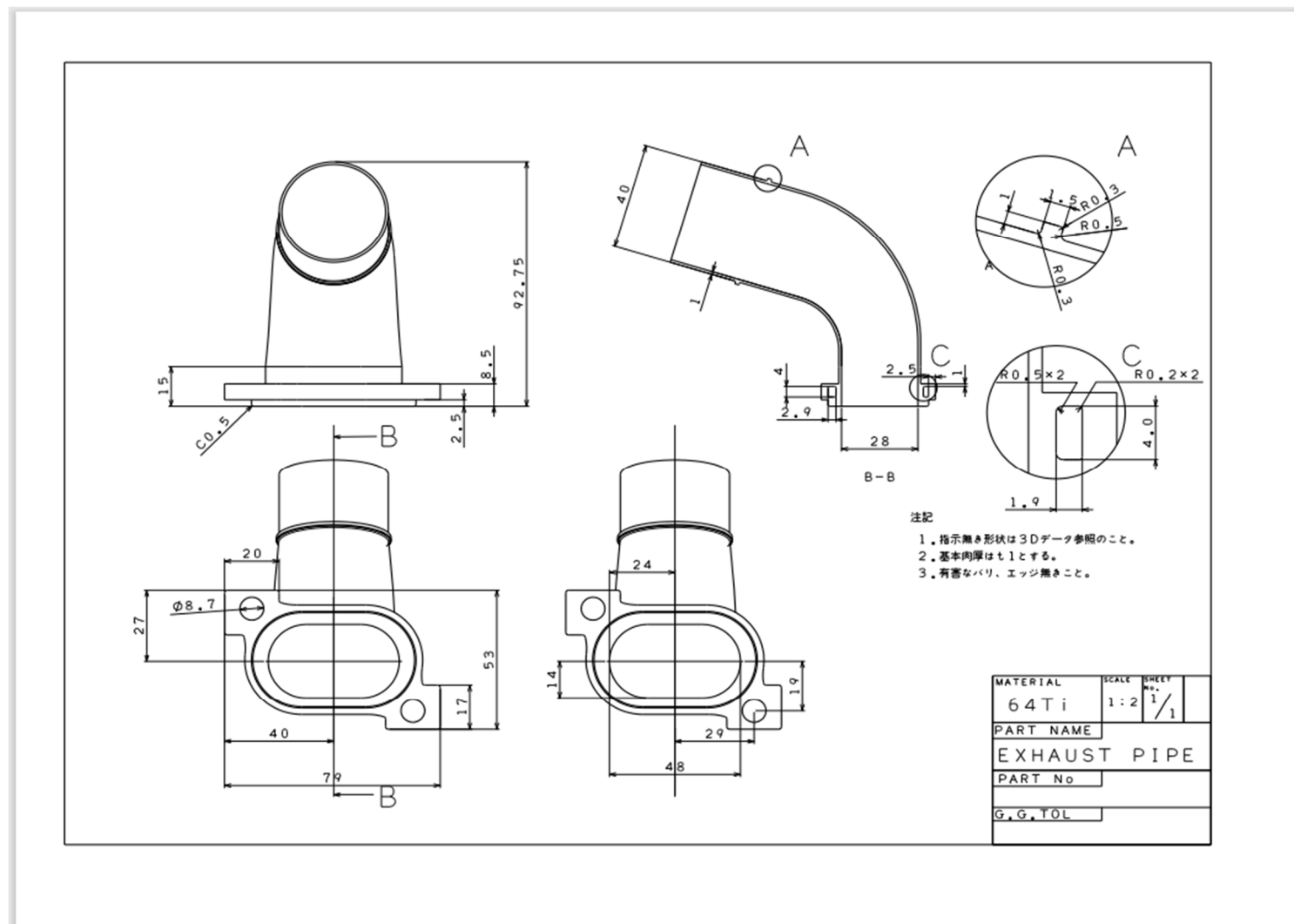


図 2-3-1-1 金属 AM サンプル図面

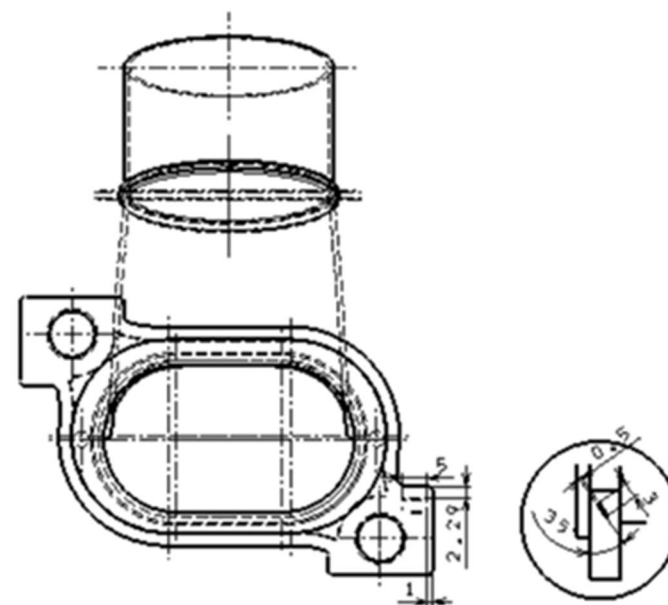
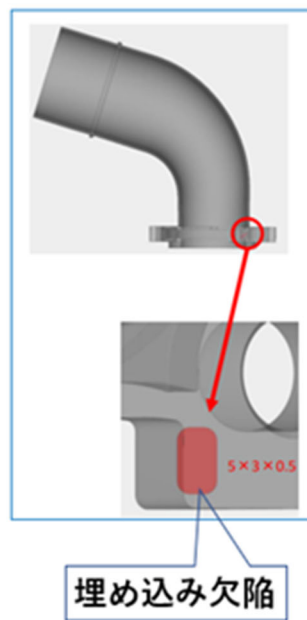


図 2-3-1-2 埋め込み欠陥の位置、寸法

3. 2 X 線 CT によるサンプルの撮像

3. 2. 1 撮像に使用した X 線 CT 装置

撮像には s 社製マイクロフォーカス X 線 CT 装置を使用した。どちらも高い解像力を持つが、データが大きくなると処理に時間がかかりすぎるため、まず XTH320 で全体を撮像し、次いで欠陥を埋め込んだ部位を中心に XTH225ST で解像度を上げて撮像した。なお、どちらの装置もリニア検出器 (CLDA) を搭載しているが、今回は平面検出器 (FPD) のみを使用した。撮像時の様子を図 2-3-1-4 に示す。



XTH320



XTH225ST

		XTH320	XTH225ST
X線源	最大電圧	320KV	225KV
	最大出力	450W	225W
	最小焦点サイズ	3 μ m	1 μ m
検出器	FPD	2880 x 2880	
	CLDA		
撮像範囲	最大回転直径	265mm	300mm

FPD : Flat Panel Detector
 CLDA : Curved Linear Data Array

図 2-3-1-3 撮像に使用した X 線 CT 装置 ¹⁰⁾

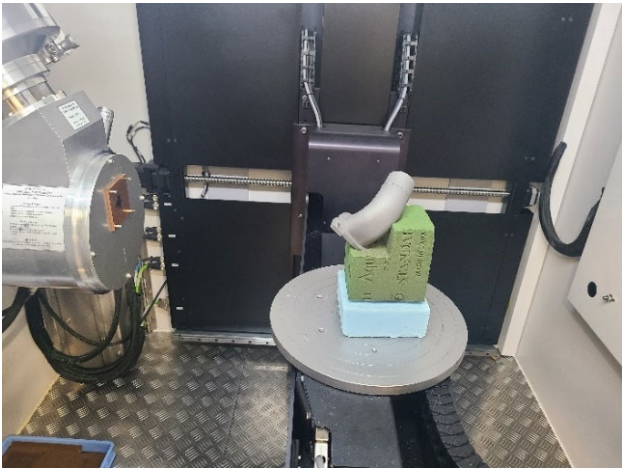


図 2-3-1-4 撮像時の様子

3. 2. 2 撮像データ

(1) サンプル全体データ

表 2-3-1-2 に示したサンプル 3 点に対し撮像を実施した。図 2-3-1-5 はサンプル#3 のボリューム画像(サンプル全体)である。画像についてのデータを表 2-3-1-3 に示す。

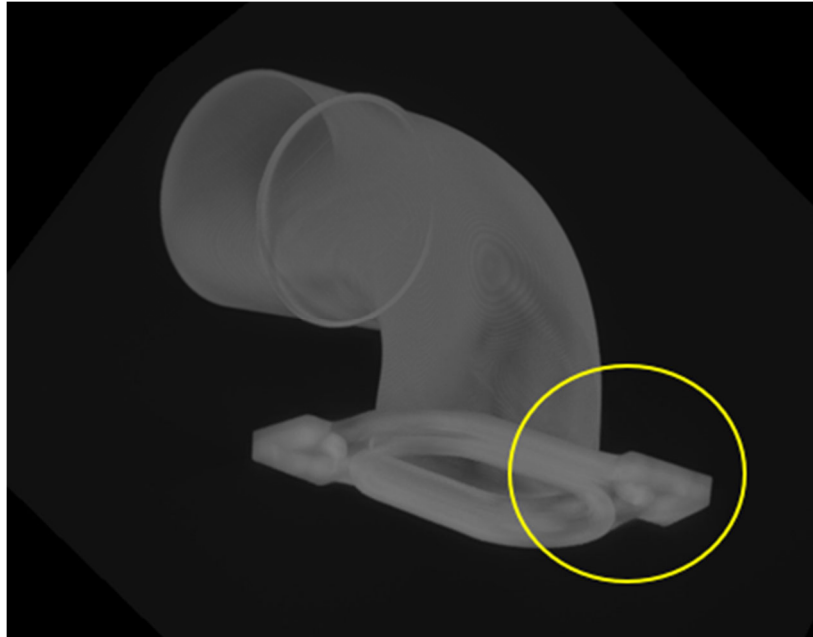


図 2-3-1-5 サンプル#3 のボリューム画像

表 2-3-1-3 画像データ

X 線 CT 装置	XTH320
画素数	1304×1746×1554
階調	16bit
データサイズ	6.64GB
ボクセルサイズ	0.077mm

(2) 部分拡大データ

サンプル #3 の埋め込み欠陥位置を中心に高解像で撮像したボリューム画像を図 2-3-1-6 に示す。図 2-3-1-5 の○で囲んだ部分である。画像についてのデータを表 2-3-1-4 に示す。X 線源のスポットサイズを極力絞り、X 線の出射点に極力、被検査物を近づけることで倍率を上げ、ボクセルサイズ $17\mu\text{m}$ という高い解像度を得ることができた。反面、データ容量は 26GB という膨大な大きさになり処理には多くの時間がかかる。高性能な PC を用いる必要があるなどの問題があり、注意が必要である。

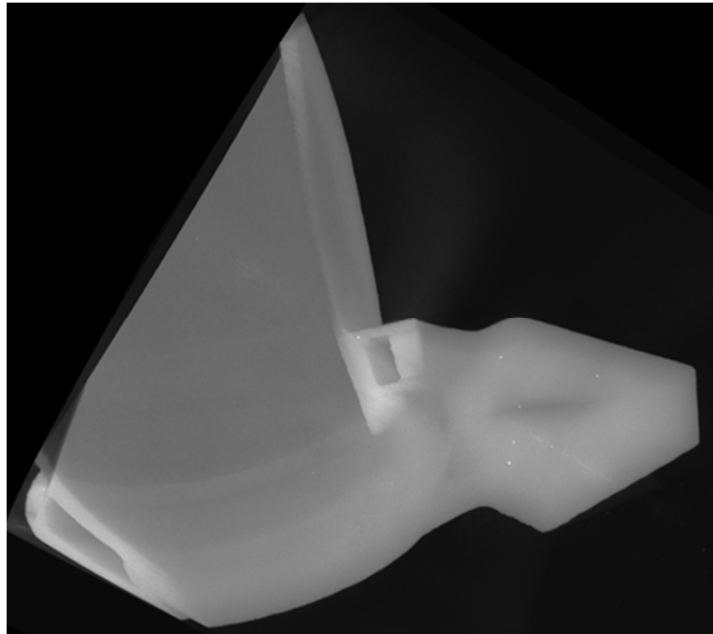


図 2-3-1-6 欠陥埋め込み位置付近の拡大画像

表 2-3-1-4 画像データ

X 線 CT 装置	XTH225ST
画素数	2443×2058×2597
階調	16bit
データサイズ	24.6GB
ボクセルサイズ	0.017mm

3. 3 撮像データの解析評価

3. 3. 1 解析システムの構成

撮像データの欠陥検出、解析には AIVIA²⁰⁾(Leica Microsystems 社製)を使用した。また、形状計測には Metrolog²¹⁾(Metrologic 社製)を使用した。

前者は、顕微鏡画像を基に分子生物学などのデータ解析に実績あるソフトウェアであるが、三井 E&S システム技研㈱と共同で産業用 X 線 CT 画像の解析に適用を始めている¹⁹⁾。AIVIA は画像特徴量の決定木と Random Forest 法を用いており、説明性が高い。さらに学習が極めて簡単で低コストであるので AM 部品の欠陥解析には最適であると判断した。

後者は、三次元形状計測ソフトウェアとして豊富な機能を持つ。国内外で多くの使用実績があるので、CT データから抽出された点群データ(STL データ)を用いた形状計測に最適であると判断した。図 2-3-1-7 にシステムの構成図を示す。

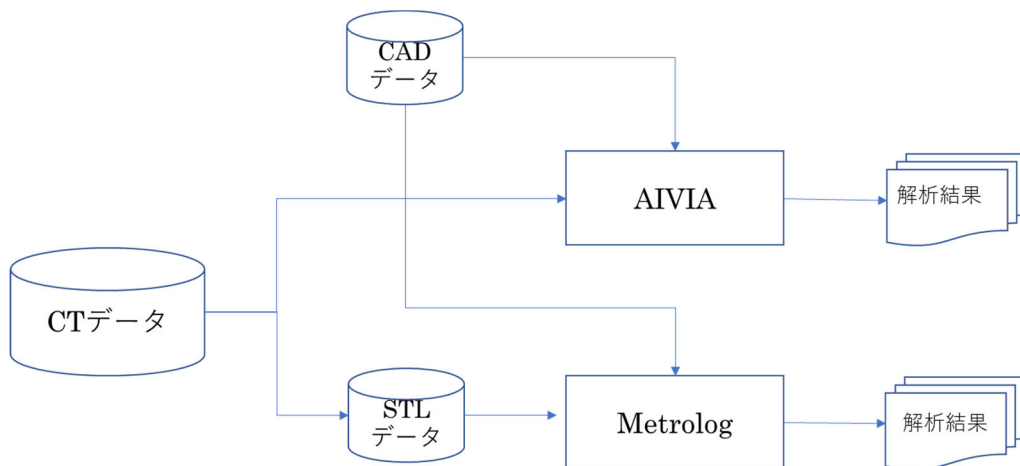


図 2-3-1-7 システム構成図

3. 3. 2 欠陥検出、解析

(1) 学習

AIVIA の学習は、CT 画像中の複数の断面画像に対して対話的に簡単な教示をすることで行う。図 2-3-1-8 に示す断面画像に対して、AIVIA で教示操作を行っている例を図 2-3-1-9 に示す。この例では、断面内でメタル部分、背景部分、欠陥部分(空孔)を簡単なマウス操作により人間が教えている。言うまでもなく、この操作は上記が正しいことを知っている人間が行う必要がある。

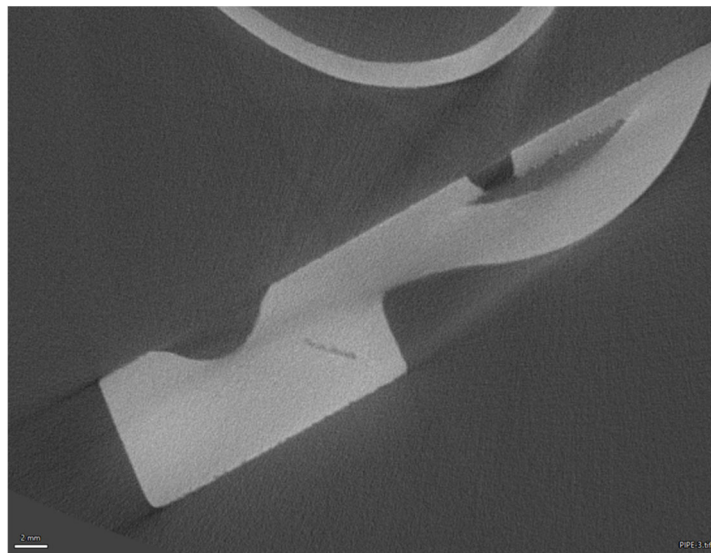


図 2-3-1-8 断面画像(教示前)

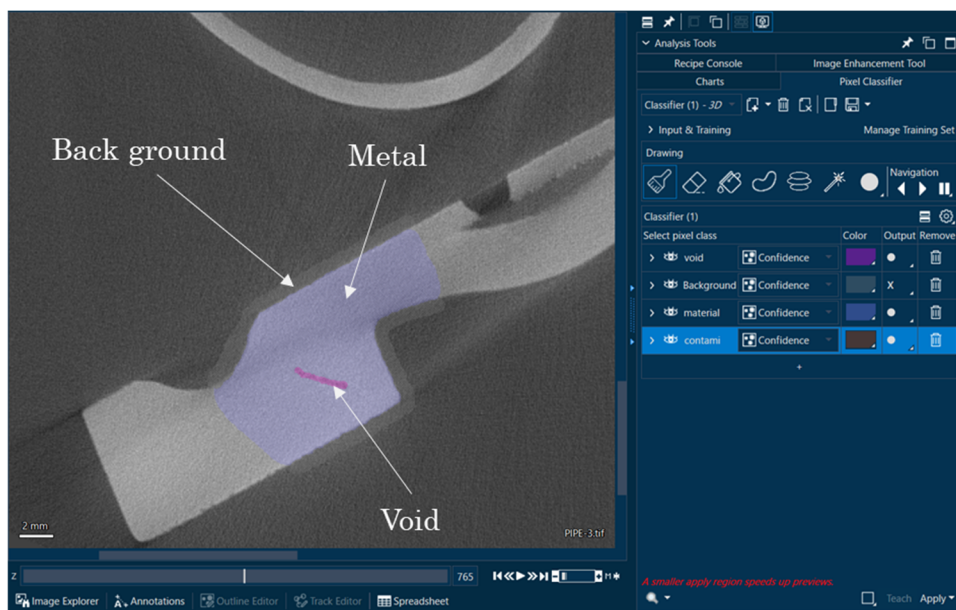


図 2-3-1-9 Aivia での指示操作例

(2) 欠陥検出、解析

① 埋め込み欠陥の抽出

図 2-3-1-10 はサンプル#3 の画像データ(表 2-3-1-3)から埋めこみ欠陥を抽出し、STL データで表示したものである。グレーの部分は空孔であり、空孔内側の黒い部分は金属であるが、焼結したものか残留粉なのかは画像データから読み取ることは難しい。寸法としては、長さ 5.18mm、幅 3.25mm、高さ 0.54mm(設定値:長さ 5 mm、幅 3mm、高さ 0.5mm)が得られている。ボクセルサイズが 77 μm とやや大きめであるので妥当な結果と考えられる。

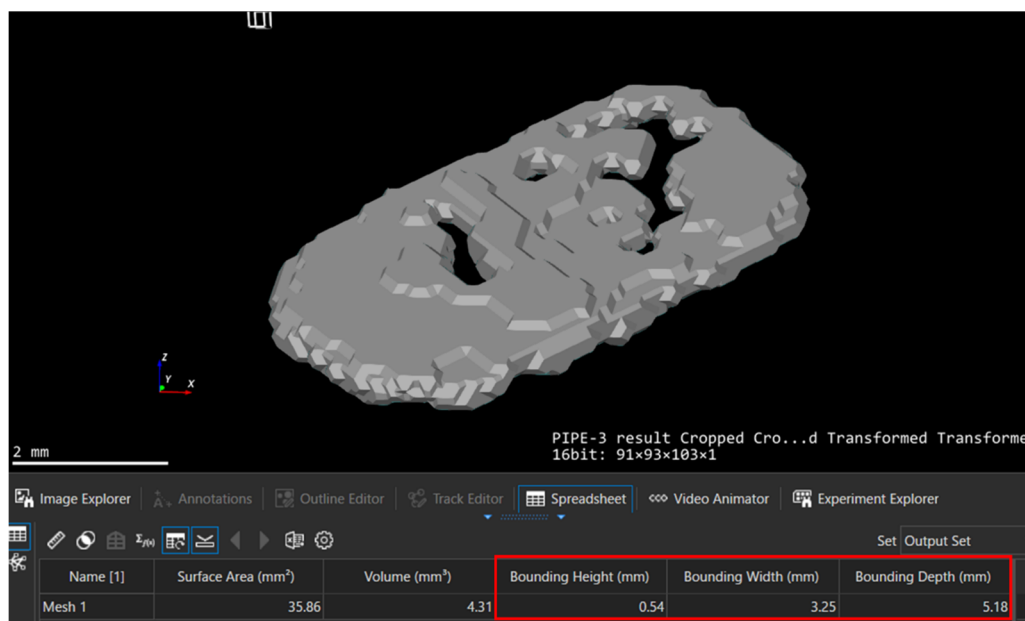


図 2-3-1-10 抽出された埋め込み欠陥

②埋め込み欠陥以外の検出、解析

サンプル#3 の部分拡大画像データ(表 2-3-1-4)に対して欠陥(空孔、異物)の学習を行い、検出を試みた。図 2-3-1-11 は検出された空孔の画像である。合計 16 個の空孔が検出されたが、大半が 0.1mm 程度の微細な空孔であり、性能に影響することはないと考えられる。

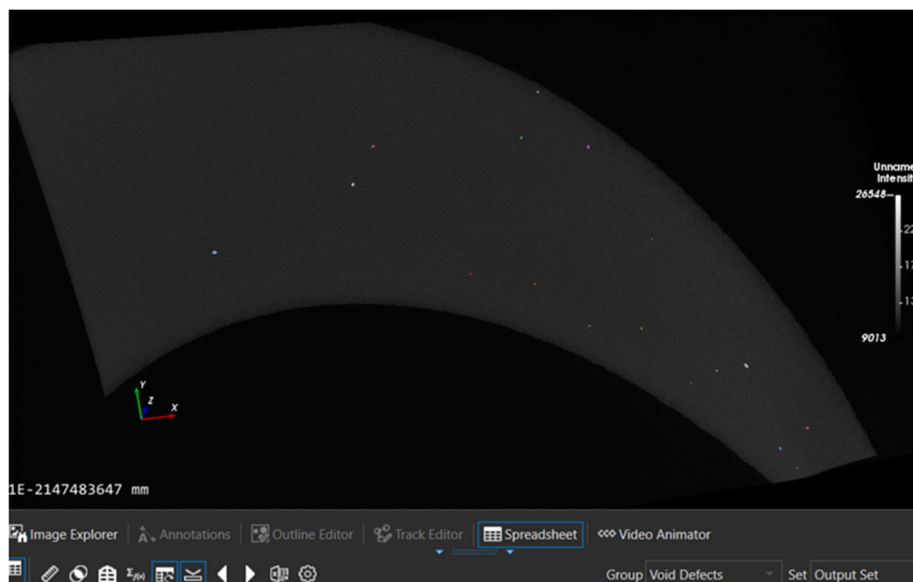


図 2-3-1-11 検出された空孔

同様に図 2-3-1-12 は検出された異物の画像である。右上部に見えているのは、埋め込み欠陥である。合計で 9 個の異物が検出されたが、空孔と同様に大半が 0.1mm 程度の微細な異物であり、性能に影響することはないと考えられる。

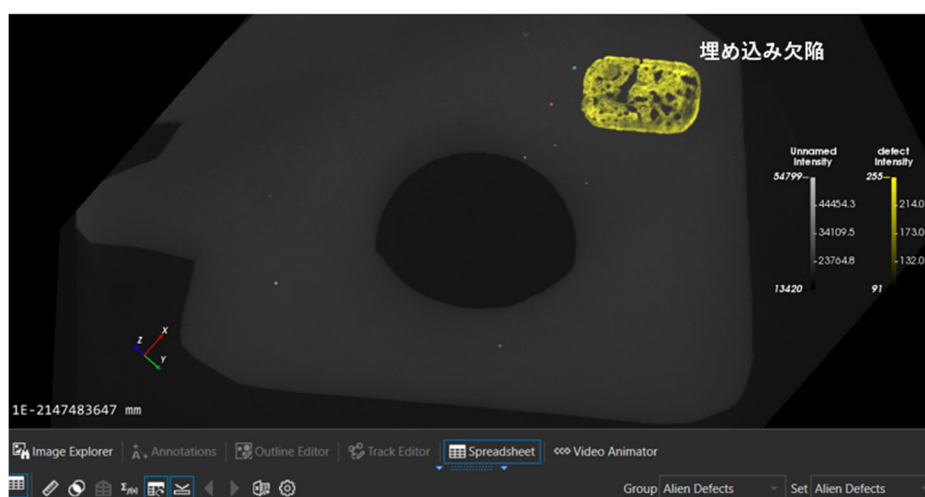
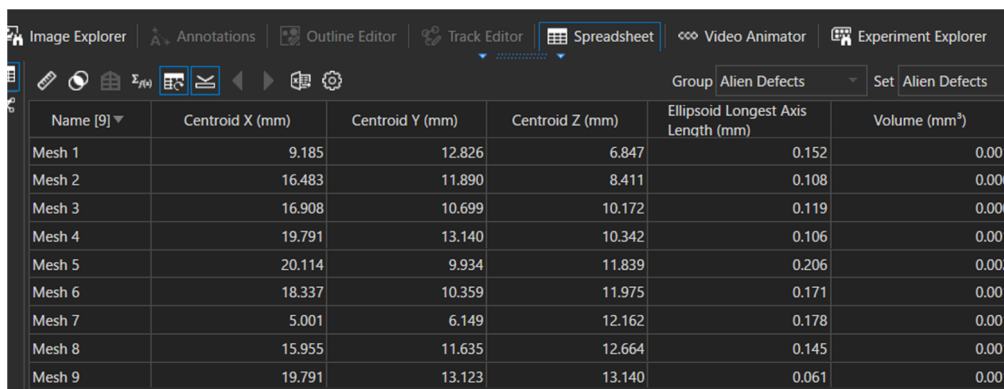


図 2-3-1-12 検出された異物

解析結果は表形式でも出力される。図 2-3-1-13 に異物の解析結果表を示す。



Name [9] ▼	Centroid X (mm)	Centroid Y (mm)	Centroid Z (mm)	Ellipsoid Longest Axis Length (mm)	Volume (mm³)
Mesh 1	9.185	12.826	6.847	0.152	0.001
Mesh 2	16.483	11.890	8.411	0.108	0.000
Mesh 3	16.908	10.699	10.172	0.119	0.000
Mesh 4	19.791	13.140	10.342	0.106	0.001
Mesh 5	20.114	9.934	11.839	0.206	0.002
Mesh 6	18.337	10.359	11.975	0.171	0.001
Mesh 7	5.001	6.149	12.162	0.178	0.001
Mesh 8	15.955	11.635	12.664	0.145	0.001
Mesh 9	19.791	13.123	13.140	0.061	0.001

図 2-3-1-13 解析結果表(異物)

空孔の発生する原因については、2. 3. 2ですでに述べているが、異物の発生については以下のような原因が考えられる。原料となる金属粉を生成する一般的な製法であるガス噴霧法 (Gas Atomisation)²²⁾は、溶融した金属に対して、不活性ガス(アルゴンガス、窒素ガスなど)を高圧で噴射することによって製粉する方法であるが、噴射の際に異物が混入することが考えられる。

なお、上記の空孔および異物の検出、解析結果については、破壊検査での検証は行っていない。0.1mm 程度の微細な欠陥の破壊検査は容易ではないためであるが、解析結果の確度は高いものと考えている。

3. 3. 3 形状計測

(1) 寸法評価

図 2-3-1-14～2-3-1-19 に CT データから抽出されたサンプル表面の 3 次元点群データから Metrolog を用いた寸法評価の結果を示す。点群データ(STL データ)は表 2-3-1-3 の CT データ(サンプル#1)から抽出した。なお、撮像に使用した CT は精度保証された前記 DXCT ではないが、撮像前にルビー球を用いて倍率補正を行っている。寸法の全項目ではないが、数箇所接触式三次元座標測定機(CMM)との比較をおこない、サンプル#1 の X、Y、Z 各軸方向で 30 μm 以内の差異であることを確認している。図に示したすべての寸法がこの精度内であることを保証するものではないが、参考値として提示する。なお、使用した CMM は t 社製である。

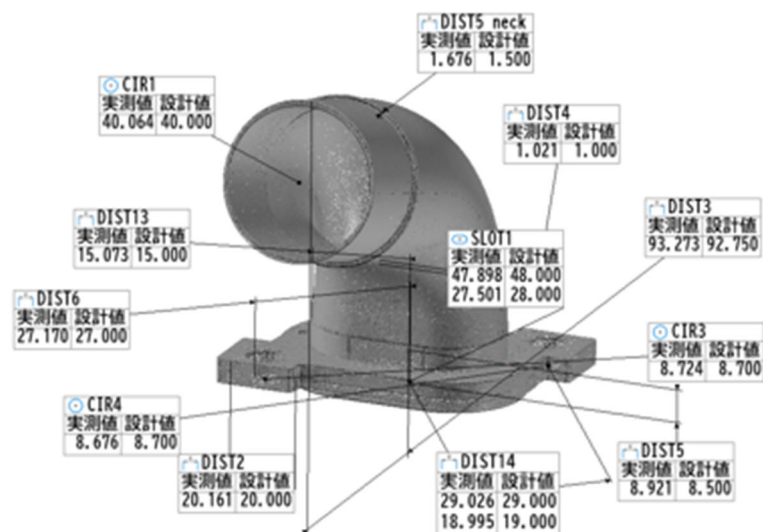


图 2-3-1-14 寸法評価結果 3D 表示

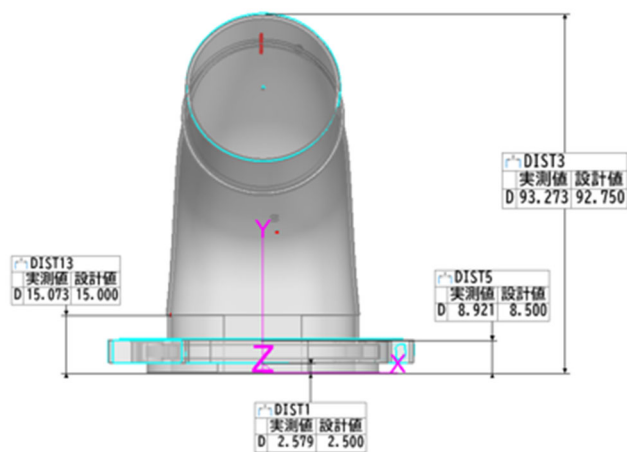


图 2-3-1-15 寸法評価結果 正面図

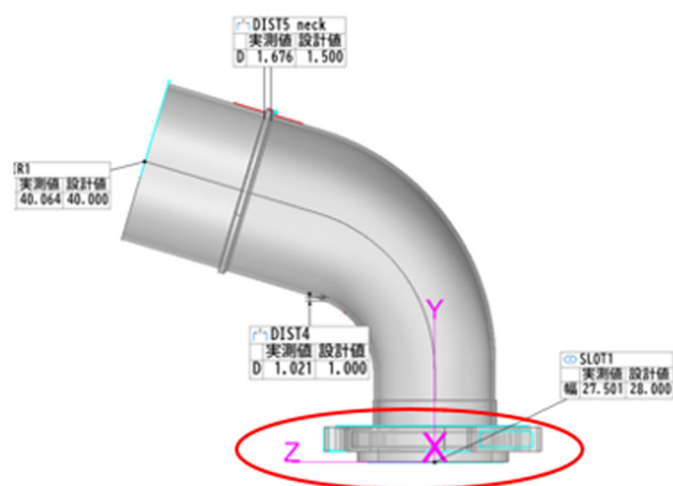


图 2-3-1-16 寸法評価結果 側面図

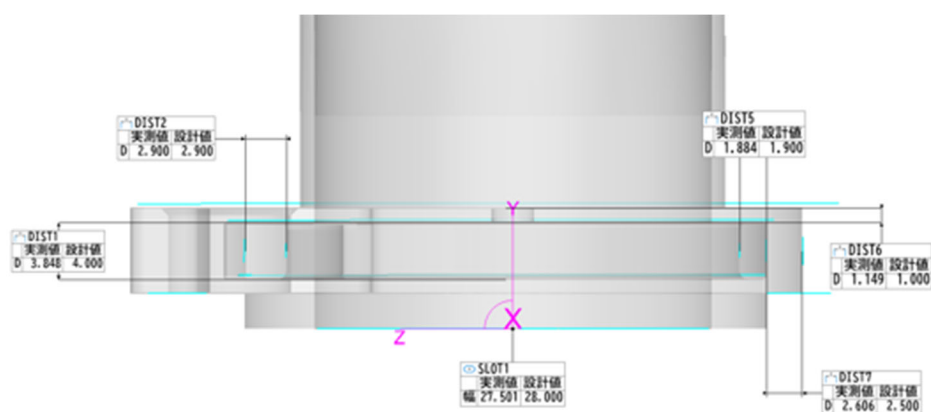


图 2-3-1-17 寸法評価結果 側面図赤枠部分拡大図

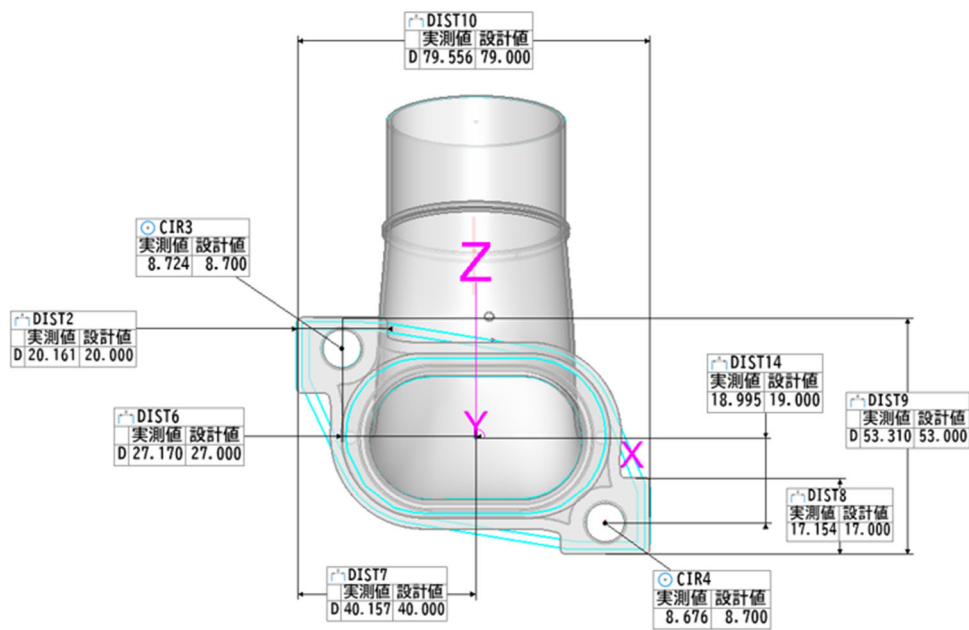


図 2-3-1-18 寸法評価結果 底面図(1)

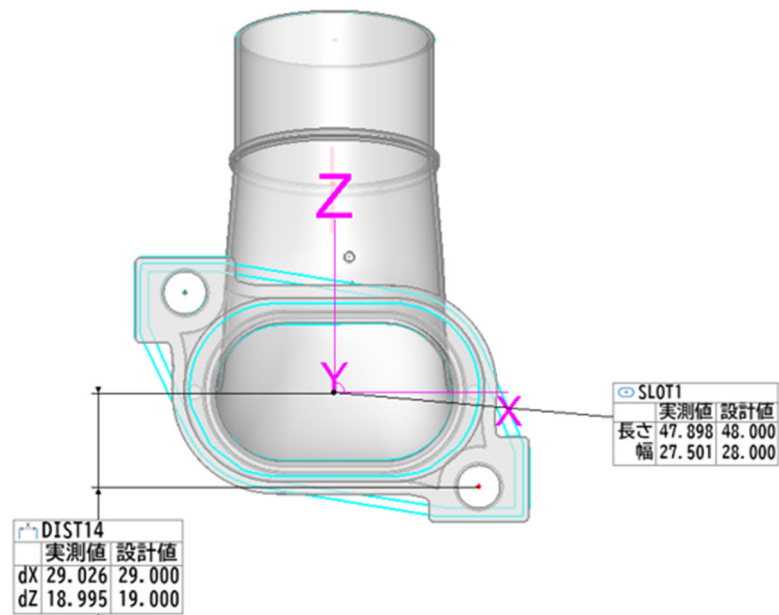


図 2-3-1-19 寸法評価結果 底面図(2)

(2) カラーマップ評価

設計モデルと計測データの比較評価を行った結果を図 2-3-1-20 に示す。右側の図はパイプを中央でカットして、内側の形状誤差をカラーマップで表示している。レーザスキャナなどによる計測では不可能な X 線 CT ならではの評価である。

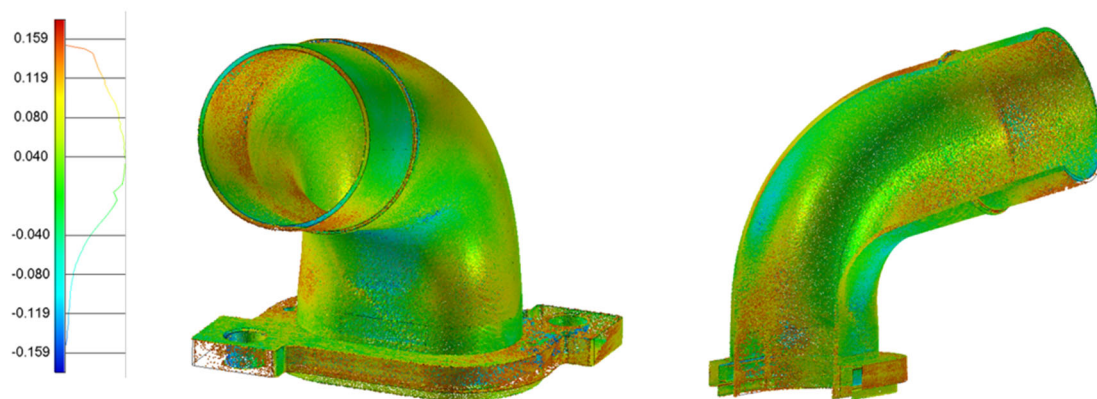


図 2-3-1-20 カラーマップによる CAD データとの比較

3. 4 破壊評価

破壊評価は図 2-3-1-21 に示すように、3 か所で破断し、研磨後顕微鏡で観察、計測した。さらに CT 画像(表 2-3-1-3 画像データ)と比較した。顕微鏡は、u 社製(倍率:100 倍)を使用した。表 2-3-1-5 に CT 断面と破断面の比較を示す。

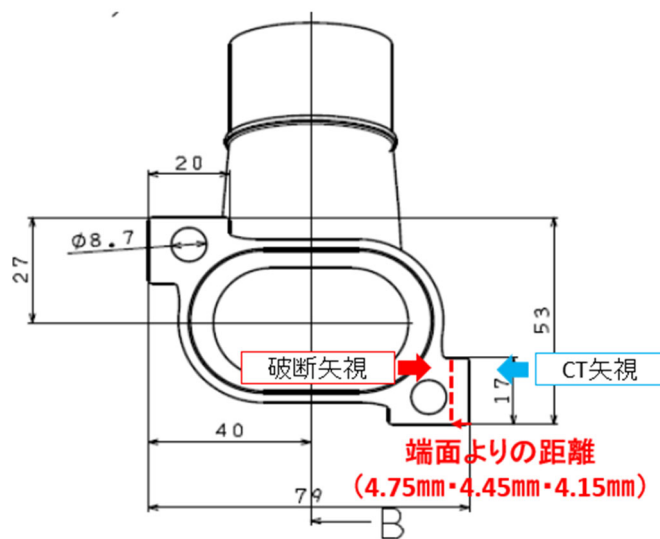
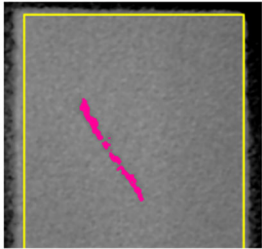
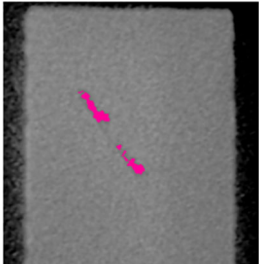
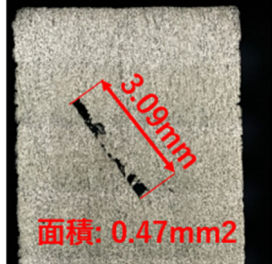
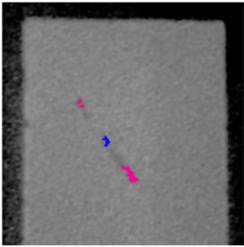


図 2-3-1-21 破断箇所

CT 画像のピンク部分は欠陥(空孔)を表している。欠陥の形状、位置、姿勢は両者でほぼ一致していることが分かるが、CT 画像と破断画像との見え方の違いがあるのは、埋め込み欠陥の作成の際に残留した金属粉の映り込みが原因すると考えられる。特に、破断位置 4.15mm で密度の違いが見られる。CT 画像では残留粉が空孔内部に封じ込められているが、破断評価の際には外部に飛散するためである。

表 2-3-1-5 CT 断面と破断面の比較

破断位置	CT 断面	破断面
4.75mm		
4.45mm		
4.15mm		

3. 5 3D デジタルデータ活用の検討

3. 5. 1 プロセスモニタ画像

3D デジタルデータ活用の検討を行う準備として、レーザ照射前後の粉末床画像データをプロセスモニタとして取得した。装置内上部に設置されたカメラより一層毎に画像を取得している。プロセスモニタ画像は合計で 9000 枚弱に及ぶ膨大な画像データであるが、図 2-3-1-22 には埋め込み欠陥作成前後の画像のみを示している。表 2-3-1-6 はレーザ照射後の粉末床画像のデータである。

表 2-3-1-6 画像データ

形式	JPEG
サイズ	1280×1024(102KB)
階調	8bit

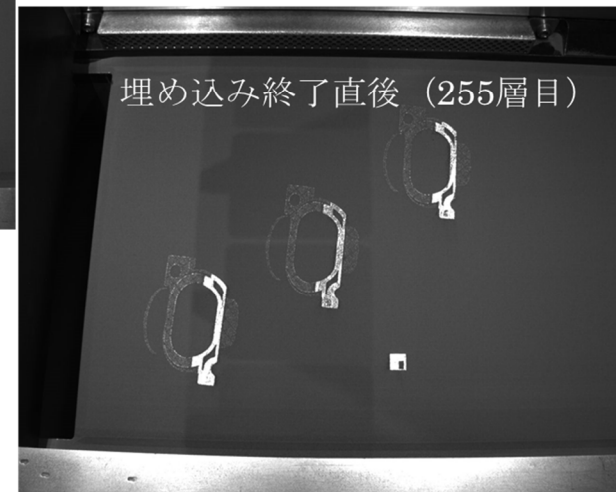
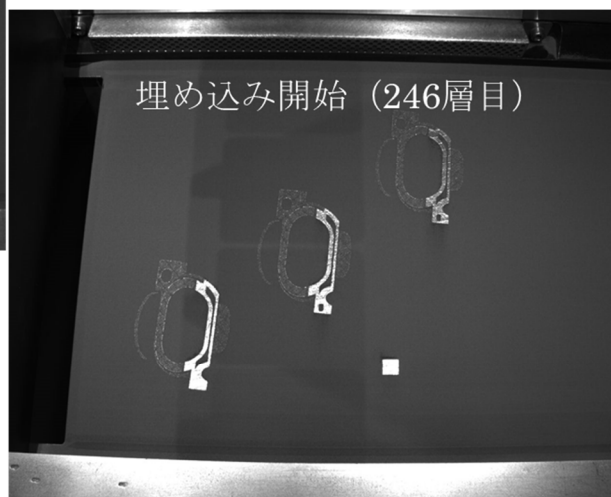
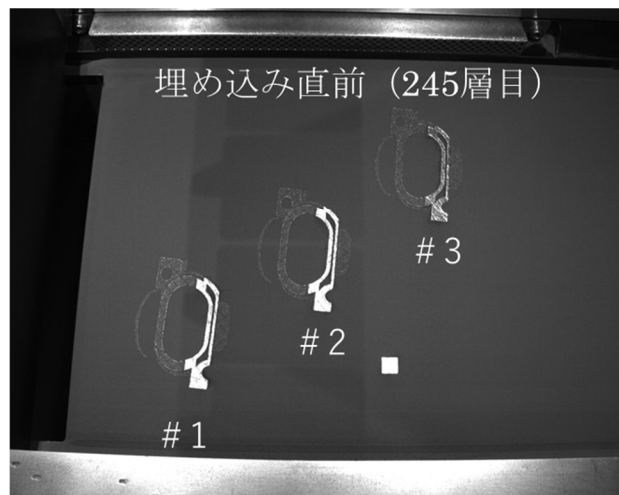


図 2-3-1-22 欠陥埋めこみ前後の様子

図 2-3-1-22 の画像から層毎に3個のサンプルを同時に造形していることが分かる。サンプル#1 には欠陥埋め込みはなく、サンプル#2、3 には 246 層目でレーザ照射がなくなり、欠陥埋め込みが開始されている。255 層目は欠陥埋め込み終了直後にレーザ照射が開始された様子が示されている。

3. 5. 2 データ活用 の 考 察

前項のプロセスモニタ画像と欠陥検出、解析で得られた 3D データとの比較を行い、造形条件へのフィードバックが可能かどうか検討した。しかし、埋め込み欠陥についての相関は明白だが、部分拡大 CT データから得られた微細な空孔(図 2-3-1-11)や異物(図 2-3-1-12)との相関は見られなかった。造形画像データの解像力が十分でないことと平面画像であることが原因と思われる。平面画像を用いて、3D データを再構成する方法も考えられるが、AM のプロセスモニタとしては形状データだけではなく、放射温度分布などのパラメータも必要となる。これらと CT により得られた 3D データの相関を取り、如何に最適な条件を得るかは重要な課題である。

本調査で作成したサンプルは排気パイプを模したものであり、比較的単純な形状をしているが、解析で得られた 3D デジタルデータを活用することが品質保証において極めて有用であることを確認した。3D デジタルデータの有用性がさらに期待できる造形アプリケーションの一例として熱交換器がある。従来の熱交換器は、製法上の制約からパイプや直線的な形状から構成せざるを得なかった。最近、AM により複雑かつ微細な内部構造を造形できるようになり、従来品に比べ、大幅な性能向上(排熱量 3 倍)、小型軽量化(長さ 22mm、重量 22%減)を達成した例が報告されている²³⁾。このようなケースでは、寸法形状の測定、欠陥検査には X 線 CT により得られた 3D デジタルデータの活用なくして品質保証は極めて困難になる。

さらには、3D デジタルデータを用いた現物 CAE による性能検証を行うことで、設計 CAE との差異を確認することが可能となる。現物モデルとしては、形状だけでなく空孔も考慮する必要があり、熱伝導解析により空孔がサンプル内部の熱伝導に与える影響を調査した例がある¹⁴⁾。AIVIA の欠陥検出サイズは、X 線 CT 装置の分解能に依存する。現物モデルのデータサイズは計算コストに大きく影響するため、微細な欠陥をどこまでモデル化するかは大きな課題である。

4. まとめ

4.1 成果まとめ

本調査により以下の成果を得た。

- (1) X線 CT データの簡単な学習 (AI) で AM 部品内部の欠陥を 3 次元で自動検出する技術についての FS 調査
人工的に欠陥を埋め込んだ AM 金属部品サンプルを作成し、X 線 CT 撮像を行い、取得した CT データを AIVIA (自動欠陥検出ソフトウェア) により解析を行った。簡単な学習で埋め込み欠陥およびその他の内欠陥 3 次元的にかつ自動で検出できることを確認した。
- (2) X 線 CT データを用いて AM 部品形状計測を行い、設計モデルとの差異を評価する技術についての FS 調査
CT データから抽出されたサンプル表面の 3 次元点群データから Metrolog (形状計測ソフトウェア) を用いて、設計モデルとの寸法形状比較評価を行えることを確認した。また、カラーマップを用いて、設計モデルと計測データの比較評価を行った。
- (3) 破断評価
サンプルを破断し、顕微画像と CT 断面画像との比較評価を行った。埋め込み欠陥の形状、位置、姿勢は両者ではほぼ一致していることを確認した。CT 画像と破断画像との見え方の違いについては、埋め込み欠陥の作成の際に残留した金属粉の映り込みが原因と推測する。
- (4) 3D デジタルデータ活用の有用性および課題調査
3D デジタルデータの活用が作成したサンプルの品質保証において極めて有用であることを確認した。プロセスモニタ画像と欠陥検出、解析で得られた 3D デジタルデータとの比較を行い、造形条件へのフィードバックの可能性を検討したが、埋め込み欠陥以外についての相関は見られなかった。熱交換器のように内部に複雑かつ微細な構造を持つ部品の品質保証には 3D デジタルデータの活用が不可欠であること。また CAE 解析により設計性能の検証が可能となり有用性が高いことを示した。

4.2 今後の課題

X 線 CT による測定検査はあくまで造形後となる。取得した 3D デジタルデータと造形中の画像、放射温度分布などのプロセスデータとの相関が取ればインプロセスで欠陥箇所を発見することが期待される。また、最近の CAE の進歩、普及は著しく、複雑な物理現象を扱う様々な解析機能が提供されるようになってきたが、現物による性能検証を行うためには、微細な欠陥を含めてどのようにモデル化するかが重要な課題である。

参考文献

- 1) Formnext2022 調査報告書、日本 3D プリンティング産業技術協会、
2022 年 12 月 16 日
- 2) 2021 preview: Metal 3D printing launches from GE, HP, Desktop Metal & a software firm comes out of stealth, 22 DECEMBER 2020,
<https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/2021-preview-ge-hp-desktop-metal-wayland-additive/>
- 3) Managing the industrialization process: Notes from Euro PM's seminar on the future of Additive Manufacturing, Metal Additive Manufacturing, Vol. 5 No. 4,141-147
- 4) <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000027.000035568.html>、日本能率協会、2021 年 2 月 25 日
- 5) Filippo Zanini, Simone Carmignato: Dimensional metrology & NDT for additive manufacturing, Special Interest Group Meeting: Quality Control for Additive Manufacturing 23 -24 January, 2017
- 6) Jess M. Waller: Nondestructive Testing of Additive Manufactured Metal Parts Used in Aerospace Applications, ASTM International Webinar, Feb. 2018
- 7) Anton Du Plessis et al.: X-Ray Microcomputed Tomography in Additive Manufacturing: A Review of the Current Technology and Applications, 2018, 3D Printing and Additive Manufacturing, Vol. 00, No.00, 1
- 8) Herminso V.G., et al, "The role of Computed Tomography in Additive Manufacturing, 2018 ASPE and euspen Summer Topical Meeting, Vol. 69
- 9) 9 MeV High-Energy CT Scanner Launched, August 6 2020,
<https://metrology.news/9-mev-high-energy-ct-scanner-launched/>
- 10) ニコン XTH シリーズ製品カタログ、
<https://industry.nikon.com/en-aom//wp-content/uploads/sites/20/2022/12/xth-series-en.pdf>
- 11) 例えば、MCT225 offering absolute accuracy for inside geometry, Nikon Metrology,
<https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/mct225>
- 12) VDI/VDE2630 Part2.1 (2015) Computed Tomography in dimensional measurement
- 13) ISO DIS 10360-11, Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 11: CMSs using the principle of X-ray computed tomography (CT)
- 14) 産業用 X 線 CT を活用したリバース・エンジニアリング: 一般財団法人製造科学技術センター、令和 3 年 3 月 16 日 (非公開)
- 15) Roger BOOTO TOKIME et. al: Automatic Defect Detection for X-Ray inspection: Identifying

- defects with deep convolutional network, Conference: Canadian Institute for Non-destructive Evaluation (CINDE), June 2019
- 16) 例えば、伊藤真:あたらしい機械学習の教科書、翔泳社、2019 年 7 月
 - 17) Deep learning makes X-ray CT inspection of 3-D printed parts faster, more accurate,
[https://www.ornl.gov/news/deep-learning-makes-x-ray-ct-inspection-of-3-d-printed-parts-faster, more accurate/](https://www.ornl.gov/news/deep-learning-makes-x-ray-ct-inspection-of-3-d-printed-parts-faster-more-accurate/)
 - 18) 例えば、原聡:「AI の説明」の現状とこれから、
https://www.soumu.go.jp/main_content/000587311.pdf
 - 19) 鋳造検査における 3D 検査はここまで来た！、鋳造オンライン 2022 コマーシャルセッション発表資料、2022 年 5 月 23 日
 - 20) AI Image Analysis Software Aivia, <https://www.aivia-software.com/aivia>
 - 21) METROLOG UNIVERSAL 3D MEASUREMENT SOFTWARE,
<https://www.metrologic.group/metrolog-x4/>
 - 22) An introduction to metal powders for AM: Manufacturing processes and properties,
<https://www.metal-am.com/articles/metal-powders-for-3d-printing-manufacturing-processes-and-properties/>
 - 23) Case Study: Our first patented design,
https://www.confluxtechnology.com/assets/Case+Study_CONFLUX+TECHNOLOGY_First+Patented+HX+Design_DEC21.pdf?updated=1641946827841

2-③(1)-2 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決

福島県内での中小・中堅企業が有する製品開発における課題について、福島県ハイテクプラザとの連携により、検討する。課題と考えられる当該製品の状況をX線CT撮像によってデジタル化し、シミュレーションの適用を実例として行い、そうした取り組みの有効性を示すことを目的とした。

福島県ハイテクプラザに、福島県内企業から、電気炉を使った高温における精密な温度制御での課題が持ち込まれていた。シース熱電対の製造上のばらつきにより、計測温度に差が生じるためと推定されている。熱電対の接点部(温度測定部)は金属製のシース内部にあるため、外観からは確認できない。X線CTにより内部構造をモデル化し、熱伝導解析により測定温度の差異を予測することを福島県ハイテクプラザ、CPE 組合双方で取り組むこととした。この結果を県内企業にフィードバックすることで、精密電気炉の機能向上に役立つことが推測でき、また、本成果は、X線CTによる3Dデジタルデータを利用したコンピュータシミュレーションの有効性を示す1例として新機構の広報等に利用できるものと期待される。

1. 背景

工業製品の高機能化に伴い、使用される部材には製造条件の厳密な管理が要求される。製品の処理温度についても、数℃単位の制御が要求されるものもある。このようなことから、厳密に温度を制御する製造設備が求められている。

厳密な温度制御を要求される炉を製造する現場において、炉内温度を計測する熱電対による影響が出ている事例がある。同じ型式にもかかわらず、個体により指示温度が異なる。この熱電対は高温、特殊雰囲気で使用されるため、熱電対の測温部が金属管(シース)によって保護される構造になっている。これまでの検討結果から、個体により熱電対内部の測温位置が異なることが分かっており、このことが熱電対の指示温度に影響を及ぼしている可能性がある。熱電対内部の温度が不均一であれば、測温位置の違いによって指示温度が変わる可能性がある。

そこで、本研究では熱電対の指示温度の違いに影響を及ぼす要因について検討した。

2. 実験

2.1 熱電対

福島県に工場のある炉の製造企業で実際に製品に使用している熱電対(R型)を実験に使用した。この熱電対は高温で特殊な雰囲気環境で使用されるもので、シースの材質がモリブデンである

という特徴がある。この熱電対2本 A-1、A-2 と区別し、実験に供した。

これとは別に、測温位置の違いを検証するため、シース型熱電対を作製した。アルミナ製の保護管(外径6mm、内径4mm)にK型熱電対(ガラス被覆、線径 0.5mm)を入れ、保護管と熱電対の隙間にアルミナ粉末(平均粒径8 μ m)を充填した。熱電対先端を意図的に変え、保護管先端に接触させたもの、先端より5mm 離れたものを、それぞれ B-0、B-5 とし、実験に用いた。

実験に用いた熱電対と概要をそれぞれ図 2-3-1-23、表 2-3-1-7 に示す。

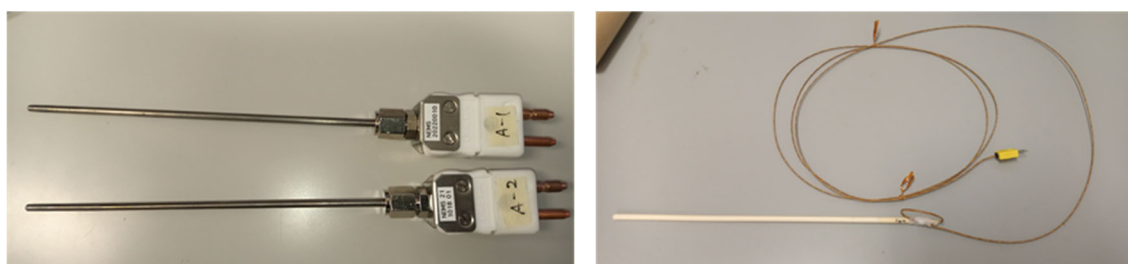


図 2-3-1-23: 実験に使用した熱電対(左:高温用熱電対(A-1,A-2)、右:検証用熱電対)

表 2-3-1-7: 実験に使用した熱電対の概要

	高温用熱電対	検証用熱電対
試料名	A-1、A-2	B-0、B-5
熱電対のタイプ	R 型	K 型
使用上限温度	1600℃	450℃
長さ	15.4mm	300mm
シース直径	3.2mm	6mm
シース材質	モリブデン	アルミナ

2.2 X 線 CT 観察

熱電対の内部構造を調べるため、福島県ハイテクプラザで保有する X 線 CT 観察装置(テスコ(株)製 TXS-CT300)で撮影した。撮影結果からシース内の構造を確認し、大まかな寸法情報(熱電対の測温位置、シースの内径など)を得た。

2.3 温度計測実験

加熱には電気炉(アドバンテック東洋(株)製 FUW230PB)を用いた。各熱電対は電気炉上部の排煙口から挿入した。炉内にステンレスブロック(50×50×50mm)を設置し、表面温度を測定する熱電対(K型熱電対、外径 0.5mm、ステンレス製シース)をこの側面に固定した。ステンレスブロック上面に熱電対とほぼ同じ直径で深さ約 10mm の穴をあけ、そこに実験対象の熱電対(A-1、A-

2、B-0、B-5)を挿入した。実験の様子と概要をそれぞれ図 2-3-1-24、25 に示す。

まず、電気炉の温度を 100℃に設定し、1時間以上放置してステンレスブロック表面と挿入した熱電対の指示温度がほぼ等しくなるようにした。続いて、電気炉の温度を 450℃に設定し、炉内温度を上昇させた。電気炉は 100℃から 450℃に達するまで約8分かかった。温度は昇温開始から2時間計測した。2つの熱電対の温度(ステンレスブロック、及び挿入した熱電対の指示温度)はデータロガーで同時に記録した。

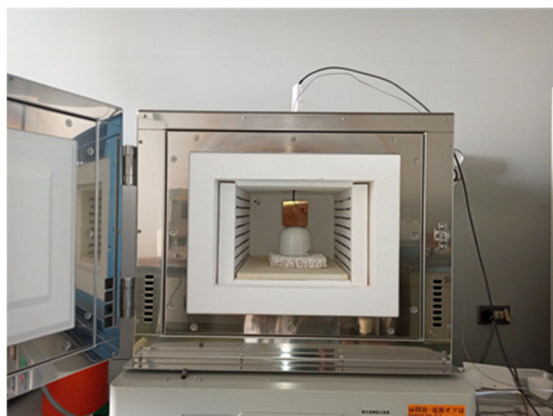


図 2-3-1-24: 実験の様子

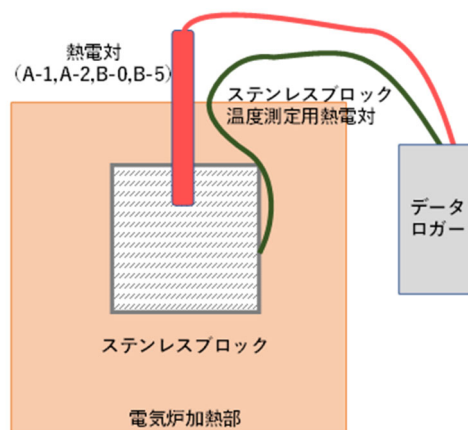


図 2-3-1-25: 実験の概要図(断面図)

2.4 CAE 解析

2.3 節で得られた実験結果を CAE 解析した。解析には CAE 解析システム(サイバネットシステム(株)製 ANSYS Mechanical)を使用した。2.2 節の X 線 CT 撮影結果から熱電対の寸法情報を取得し、CAE 解析用の CAD モデルを作成した。CAE 解析を安定させるため、熱電対の導線を省略し、測温位置のみモデル化した。解析は対称性を考慮し、対称面で4分割したモデルを用いた。

電気炉の温度を CAE 解析の条件とし、ステンレスブロック表面及び挿入した熱電対の指示温度が実験結果となるように解析条件を調整した。また、ステンレスブロックと熱電対の接触部分における熱伝導に関する条件を調整した。検証用熱電対のシースに用いたアルミナは粉末であり、固体とは物性値が異なる。このため、アルミナの熱伝導率を調整した。

3. 結果

3.1 高温用熱電対(A-1、A-2)の温度計測結果

A-1 の X 線 CT 撮影結果を図 2-3-1-26 に示す。この図から、A-1、A-2 の熱電対内部の測温位置は、熱電対先端からそれぞれ 4.5mm、2.5mm であった。A-1 と A-2 の測温位置は約 2mm の

差があった。また、熱電対の内部にはシースとは別な管があり、測温部はこの管の中にあることが分かった。撮影結果から材質が特定できないため、シースと同じモリブデンとして CAE 解析した¹⁾。

熱電対 A-1、A-2 の温度計測の結果を図 2-3-1-27、28、29 に示す。熱電対 A-1、A-2 の指示温度はいずれの経過時間においてもほぼ同じで、個体差はみられなかった(図 2-3-1-29)。ステンレスブロックと熱電対 A-1、A-2 の指示温度の関係を図 2-3-1-30 に示す。これより、熱電対 A-1、A-2 の指示温度の推移はほぼ同じであることが分かった。昇温開始から2時間後、ステンレスブロック表面の指示温度は 448℃であったのに対し、挿入した熱電対 A-1、A-2 の指示温度は 429 ℃であり、約 20 ℃の差が生じた。この後も温度計測を続けたところ、昇温開始から 5 時間後の熱電対 A-1、A-2 は 437 ℃を示した。

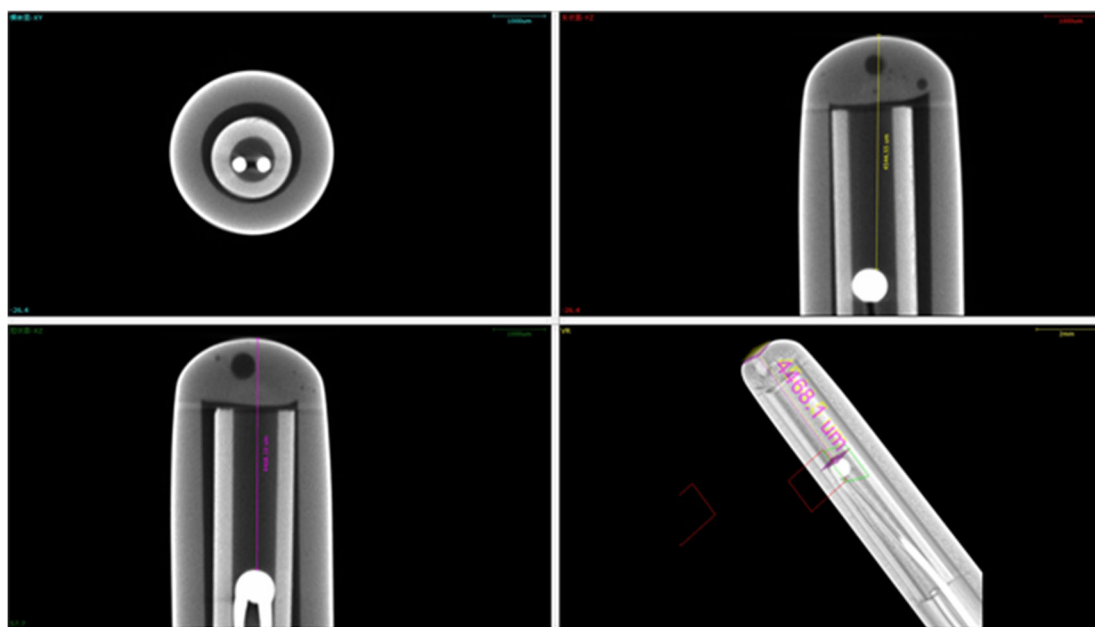


図 2-3-1-26: 熱電対 A-1 の X 線 CT 撮影結果

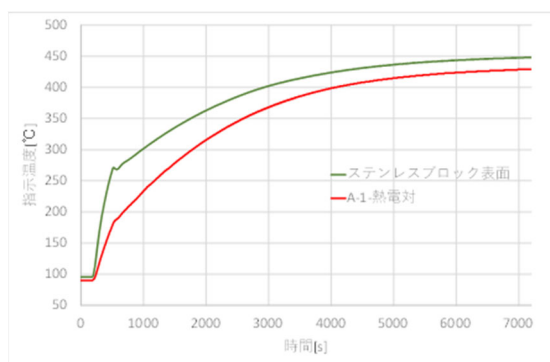


図 2-3-1-27: 熱電対 A-1 の指示温度変化

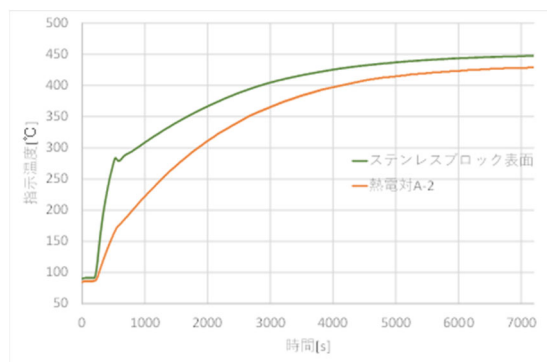


図 2-3-1-28: 熱電対 A-2 の指示温度変化

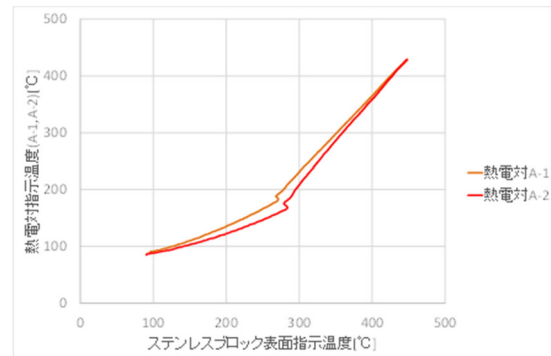
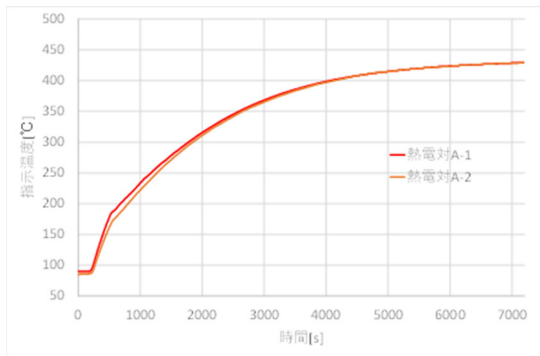


図 2-3-1-29: A-1、A-2 の指示温度の比較 図 2-3-1-30: ステンレスブロック表面と挿入した熱電対 A-1、A-2 の指示温度

3.2 検証用熱電対(B-0、B-5)の温度計測結果

B-0 の X 線 CT 撮影結果を図 2-3-1-31 に示す。この図から、B-0、B-5 の熱電対内部の測温位置は、シース内径の先端からそれぞれ0mm(シース内面と接触)、6 mm であった。また、B-5 は測温位置が中央ではなくシース内壁に近い位置にあった。この熱電対を用いて温度計測実験を行った。B-0、B-5 の温度計測の結果を図 2-3-1-32、33、34 に示す。熱電対 B-5 の指示温度はステンレスブロック表面の指示温度とほぼ一致した(図 2-3-1-33)。ステンレスブロック表面と挿入した熱電対 B-0、B-5 の指示温度の差を図 13 に示す。B-5 の傾きが1に近く、ステンレスブロック表面の指示温度とほぼ等しいことが分かる。昇温開始から2時間後、ステンレスブロック表面の指示温度と、挿入した熱電対 B-0、B-5 の指示温度はほぼ同じ値となった。

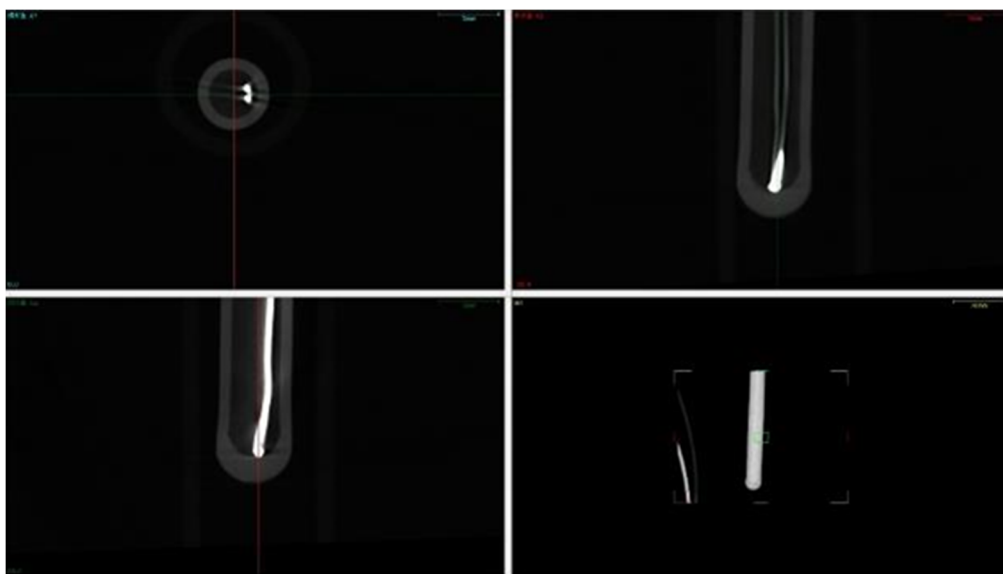


図 2-3-1-31: 熱電対 B-0 の X 線 CT 撮影結果

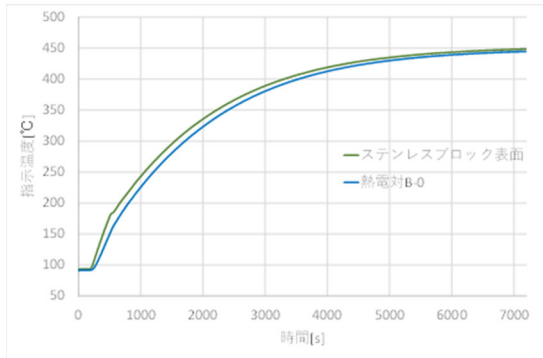


図 2-3-1-32: 熱電対 B-0 の指示温度変化

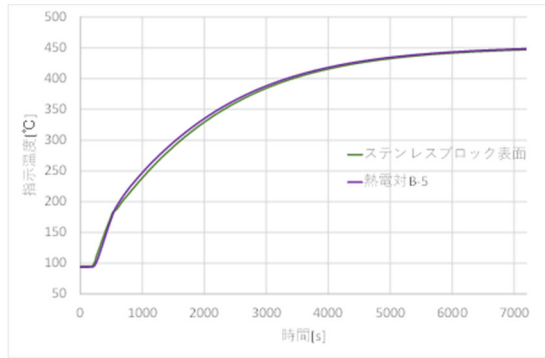


図 2-3-1-33: 熱電対 B-5 の指示温度変化

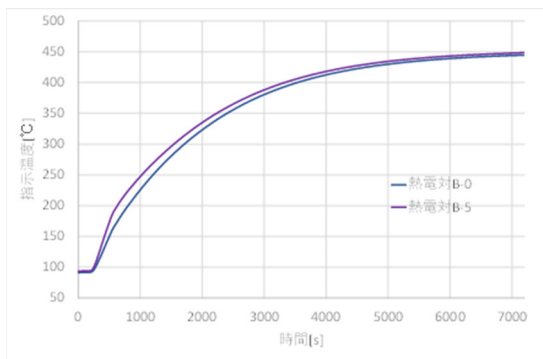


図 2-3-1-34: 熱電対 B-0、B-5 の指示温度の比較

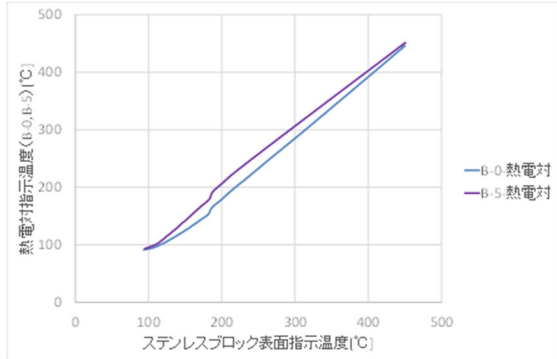


図 2-3-1-35: ステンレスブロック表面と挿入した熱電対 B-0、B-5 の指示温度

4. 考察

4.1 検証用熱電対内部の温度分布

検証用熱電対 B-0、B-5 について CAE 解析した。B-0、B-5 の実測値と、それらの CAE 解析結果の比較を図 2-3-1-36、37、38 に示す。検証用熱電対 B-0、B-5 の実測値と CAE 解析結果はよく一致し、ステンレスブロック表面と挿入した熱電対の指示温度を比較した結果も一致していることがわかる。解析結果から、熱電対中心部の温度分布を可視化した。2400 秒、7200 秒における熱電対中心部の温度分布を図 2-3-1-39 に示す。2400 秒の解析結果より、熱電対中心部には、先端からの位置より温度差があることがわかった。これより、測温位置により温度が異なる可能性が示唆された。今回の実験で生じた差はこの測温位置によるものであり、測温位置の重要性を示唆するものである。ただし、昇温開始から 2 時間後には内部の温度差が縮小するため、測温位置の違いによる影響は少なくなる(図 2-3-1-39 中、7200 秒)。

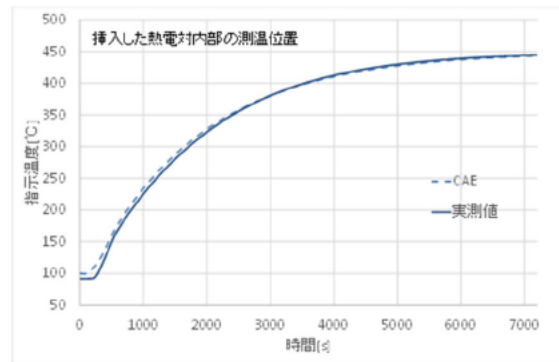
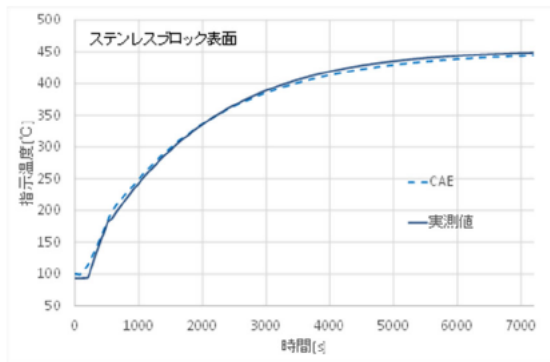


図 2-3-1-36: 熱電対 B-0 の実測値と CAE 解析結果の比較

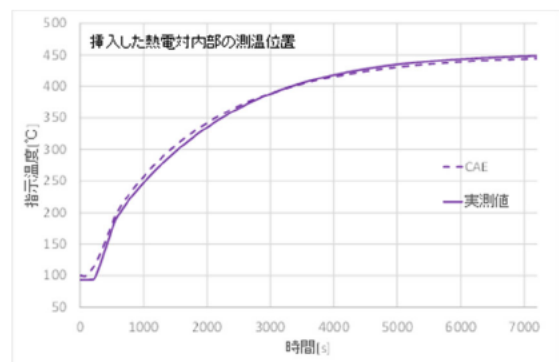
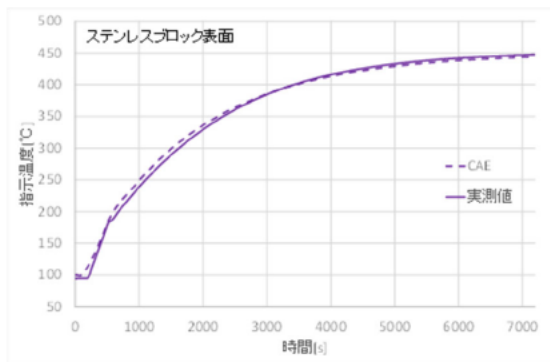


図 2-3-1-37: 熱電対 B-5 の実測値と CAE 解析結果の比較

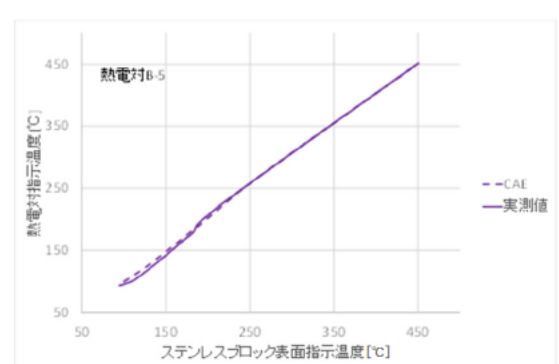
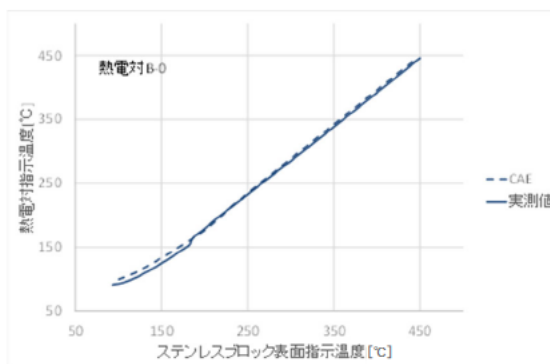


図 2-3-1-38: ステンレスブロック表面と熱電対内部の指示温度

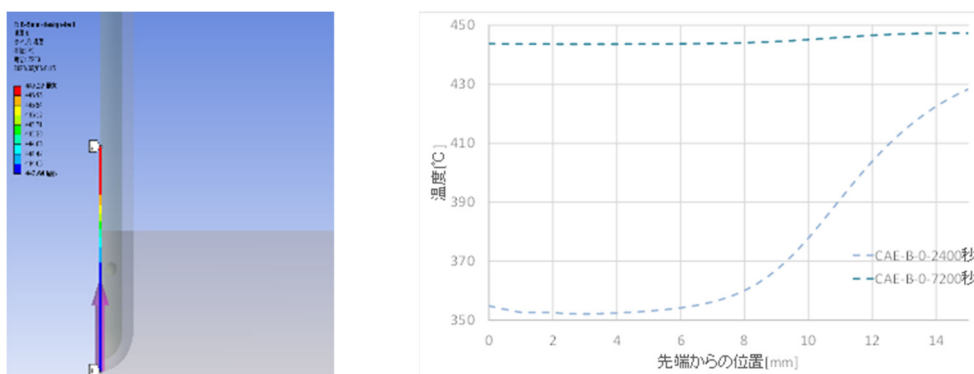


図 2-3-1-39:熱電対 B-0 内部の温度分布 (左:CAE 解析結果の図、右:熱電対内部の温度分布)

4.2 高温用熱電対内部の温度分布

4.1 節と同様の解析条件で A-1、A-2 について CAE 解析した。A-1、A-2 の実測値と、それらの CAE 解析結果の比較を図 2-3-1-40、41 に示す。CAE 解析結果と A-1、A-2 の実測値は、曲線は類似したが、温度差が大きかった。これはシース内の構造が複雑であること(内部に管があり、材質不明。)、シース内の部材間で熱伝導があり、CAE 解析に必要な情報が不足していることによるものと考えられる。CAE 解析の精度を上げるにはこれらの情報が必要であり、さらなる実験が必要となる。しかしながら、A-1 と A-2 は内部に使用されている部材が等しいと考え、CAE 解析結果の比較は可能である。熱電対 A-1、A-2 の CAE 解析結果を図 2-3-1-42 に示す。A-1、A-2 の CAE 解析結果はほぼ一致し、実測値と同じ傾向がみられた。A-1 の CAE 解析結果における熱電対内部の温度分布を図 2-3-1-43 に示す。熱電対中央部の温度分布をみると、A-1、A-2 の測温位置では約 1°C の差が見られた。R 型熱電対は高温の測定が可能である一方、温度分解能が低く、1°C 程度の測定誤差が生じる。今回の CAE 解析結果の差はこの範囲内であり、実験結果として現れなかったものと考えられる。熱電対内部の測温位置が大きく異なっていた場合、熱電対の指示温度はずれる可能性がある。

本実験において、2 時間後におけるステンレスブロック表面と挿入した高温用熱電対の指示温度は約 20°C 違いが見られた。ステンレスブロック表面の指示温度に着目すると、挿入した高温用熱電対 (A-1、A-2)、検証用熱電対 (B-0、B-5) とで違いがみられた。そこで、高温用熱電対 A-1 及び検証用熱電対 B-0 のステンレスブロックへの挿入の有無の差を比較した (図 2-3-1-44)。ステンレスブロックへ熱電対 A-1、B-0 のいずれも挿入せず、表面のみ計測した温度変化は、検証用熱電対 B-0 を用いた計測結果とほぼ一致した。一方、高温用熱電対 A-1 を用いた計測結果は温度上昇が早かった。これは熱電対 A-1 によって、ステンレスブロックが内部からも加熱されていることを意味する。つまり、高温用熱電対のシースとステンレスブロックとの間で生じる熱伝導が無視できないことが分かった。一方、本実験では熱電対 A-1、A-2、B-0、B-5 のコネクタ部は電気炉の外にあるため、シースの一部が外気によって冷やされている。これにより熱電対の測温部が冷やされ、ステンレスブロック表面と内部の指示温度が大きくずれたものと考えられる。そこで CAE の解

析条件において、熱電対すべてが炉内に存在する条件で解析すると、解析終了時の熱電対温度は 445 °C となった。この解析結果と A-1 の CAE 解析結果との比較を図 2-3-1-45 に示す。熱電対全体が均一に加熱されれば熱電対内部の温度分布は均一となり、測温位置による影響はなくなることが分かった。以上から、熱電対の設置状況が指示温度に影響を及ぼすことが示唆された。

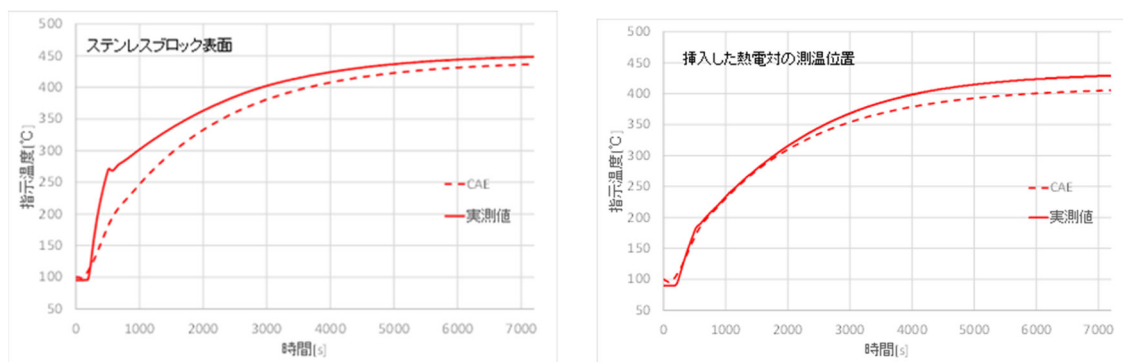


図 2-3-1-40: 熱電対 A-1 の実測値と CAE 解析結果の比較

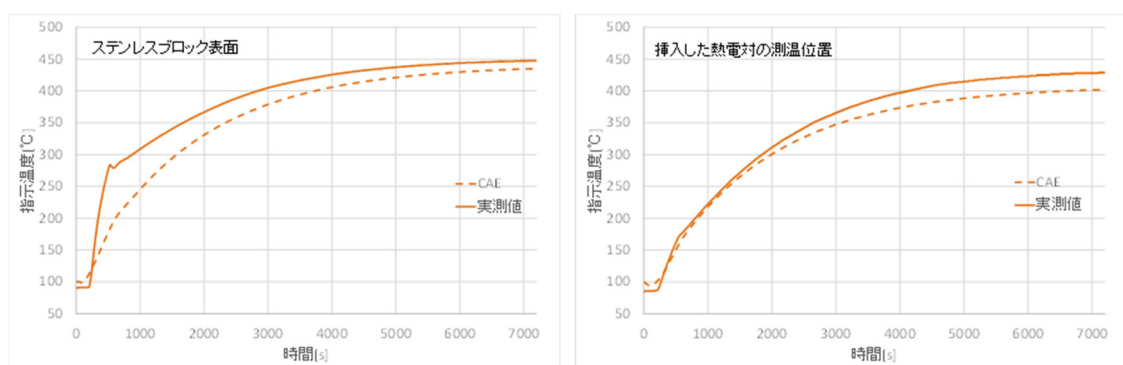


図 2-3-1-41: 熱電対 A-2 の実測値と CAE 解析結果の比較

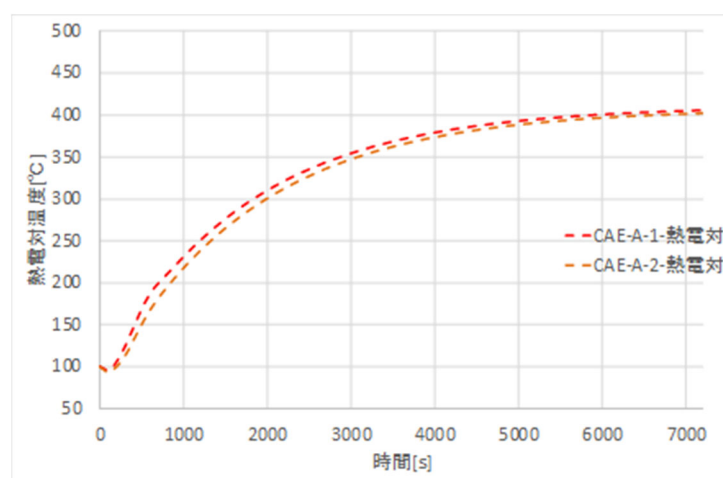


図 2-3-1-42: A-1、A-2 の CAE 解析結果の比較(熱電対の解析結果)

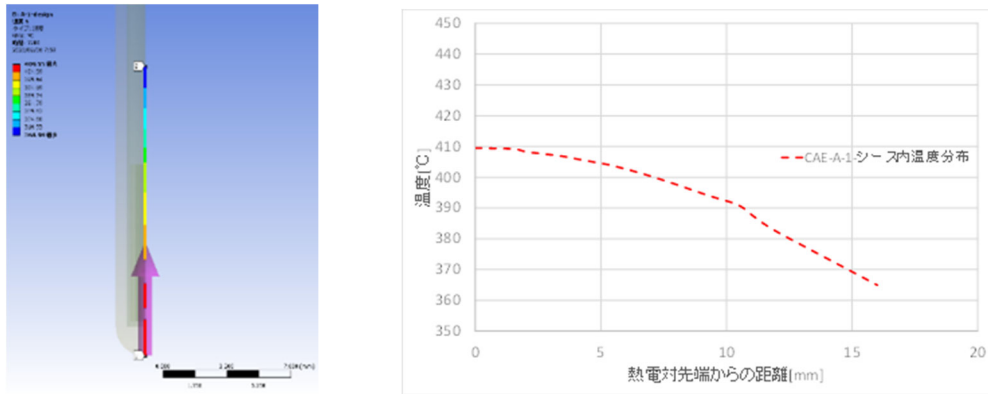


図 2-3-1-43: 熱電対 A-1 中心部の温度分布
(左:CAE 解析結果の図、右:7200 秒における A-1 の熱電対内部温度)

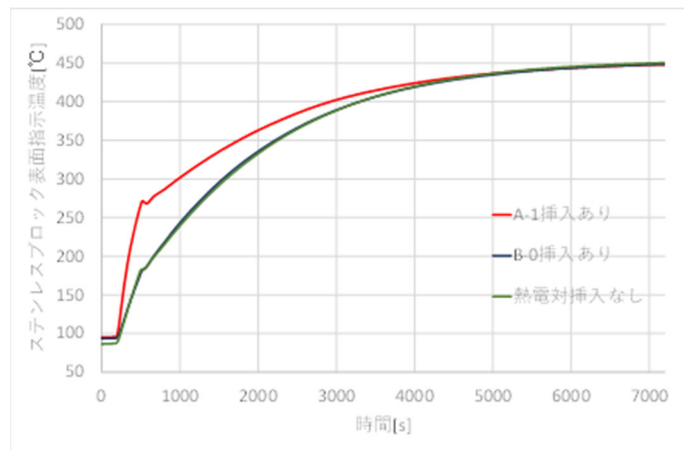


図 2-3-1-44: 熱電対 A-1、B-0 の挿入有無によるステンレスブロック表面の温度計測結果

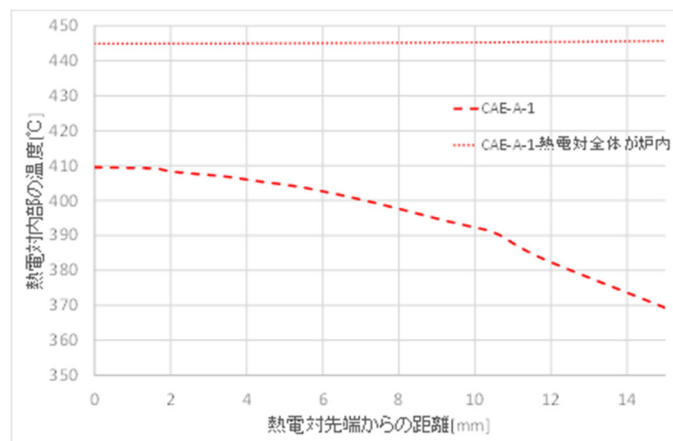


図 2-3-1-45: 熱電対 A-1 の設置状況による内部温度の比較
(7200 秒における A-1 の熱電対内部温度)

4.3 X 線 CT 撮影と CAE 解析の連携

CAE 解析は通常簡略化した CAD モデルを用いる。しかし、それは実際の形状とは異なる。そこで、近年、X 線 CT 撮影結果を CAD モデルに変換し、CAE 解析する手法が検討されている²⁾。本研究では、検証用熱電対 B-0 についてこの手法を適用した。本手法により 4.1 節と同じ解析条件で CAE 解析した結果を図 2-3-1-46 に示す。CAE 解析の結果は 4.1 節での結果と違いがみられた。これは CAE 解析ために省略した熱電対の導線が解析結果に影響を及ぼしているものと考えられる。CAE 解析の条件を修正することで、4.1 節と同じような CAE 解析結果を得ることは可能と考えられる。

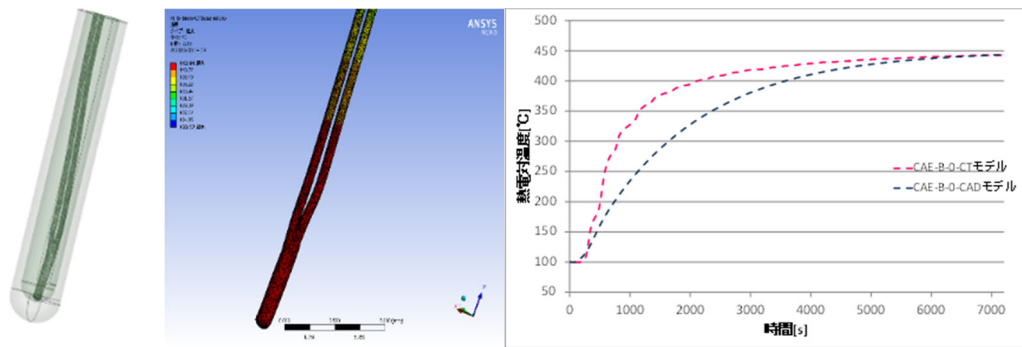


図 2-3-1-46: X 線 CT の撮影結果を利用した CAE 解析
(左:CAE 解析用 CAD モデル、中央:CAE 解析結果、右:CAE 解析結果の比較)

4.4 CPE 組合における X 線 CT 測定、モデル化および伝熱解析

福島県ハイテクプラザで実験および X 線 CT 解析等に用いたものと同じ熱電対に対して、CPE 組合で保有の産業用 X 線 CT 装置を用いて実測し CT データからシミュレーション対応の CAD データ/メッシュデータを生成した。それをもとにした CAE シミュレーション・解析を実施した。

4.4.1 CT 計測

CPE 組合でも組合員のもつ X 線 CT 装置を用いての撮像を行った。B-0、B-5 の熱電対の CT 計測結果を図 2-3-1-47 に示す。使用した CT 装置は、s 社製である。撮像はフラットパネル仕様の 4343FP を用い、電圧：100Kv であった。撮像の条件を表 2-3-1-8 に示す。今回の CT 撮像では、CAE 解析・熱伝導シミュレーションを実施するにあたって、全体内部構造が把握でき、計測センサ配置寸法が高分解能に得られることの2点をキーに撮像を実施している。現時点でのシミュレーションでは、全体構造把握、CT 計測性能の分解能とも十分な値を示していると判断した。

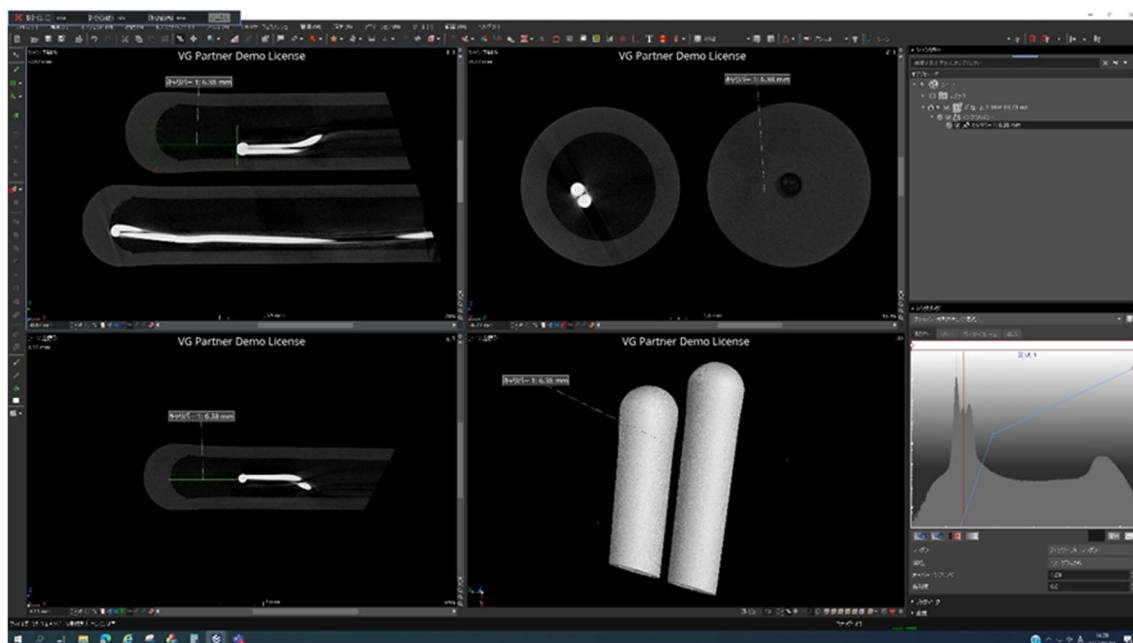


図 2-3-1-47: B-0、B-5 熱電対 CT 計測データ

表 2-3-1-8: CPE 組合での X 線 CT 撮像条件

	印加電流	拡大倍率	Voxel Size	CT 分割数	フィルタ
全体撮影時	125uA	1.65 倍	93um	2000	Cu 0.5mm
拡大時	150uA	15 倍	10um	2500	なし

4.4.2 CT 計測データからのシミュレーション対応の CAD データ/メッシュデータの生成

CT 計測データから CAE 用データの作成は、CT 計測⇒STL 生成⇒CAE メッシュ生成⇒CAE 取り込みの順に行った。B-0、B-5 の熱電対に対して STL 生成、CAE メッシュ生成を実施した(図 2-3-1-48)。今回のメッシュ生成にあたっては、材料ごとの閾値をもとにしたセグメンテーションする際、使用されている材料の種類数以上に設定しないと欲しいセグメンテーションの状態にならない問題が生じた。今回は場当たり的な設定をしたが、最適手法の研究の必要性があると考えられる。

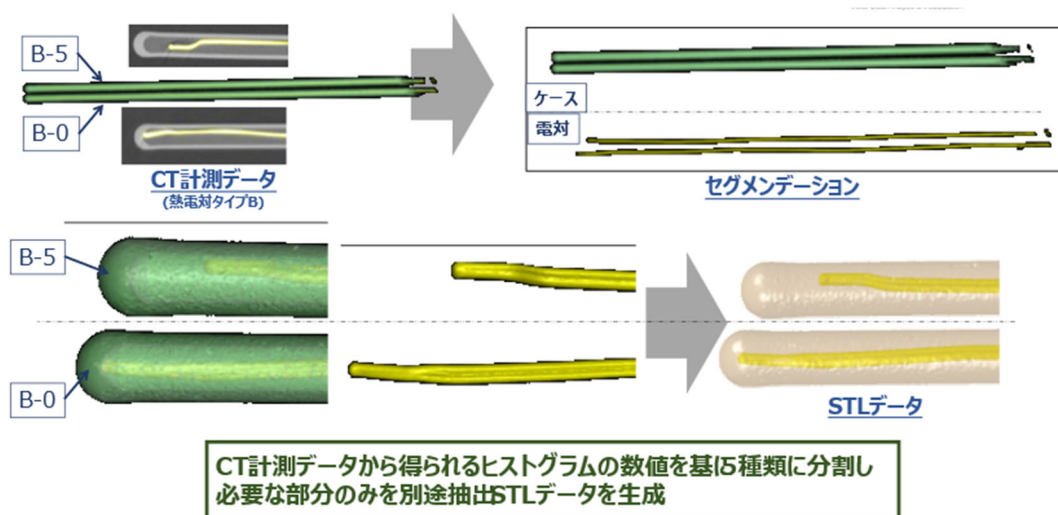


図 2-3-1-48: CAE 用データの作成の解析手順

4.4.3 CAE 解析モデルの構築

実施済みの実験条件に合わせて図 2-3-1-49, 50 のように解析モデルを構築した。各部品 material 物性値は、図中に記載のように設定した。なお、各部品の材料は一般的なものであり、物性値も一般的に使用されている値を使用した。が、接触部と絶縁体については実験結果と比較してチューニングしてある。

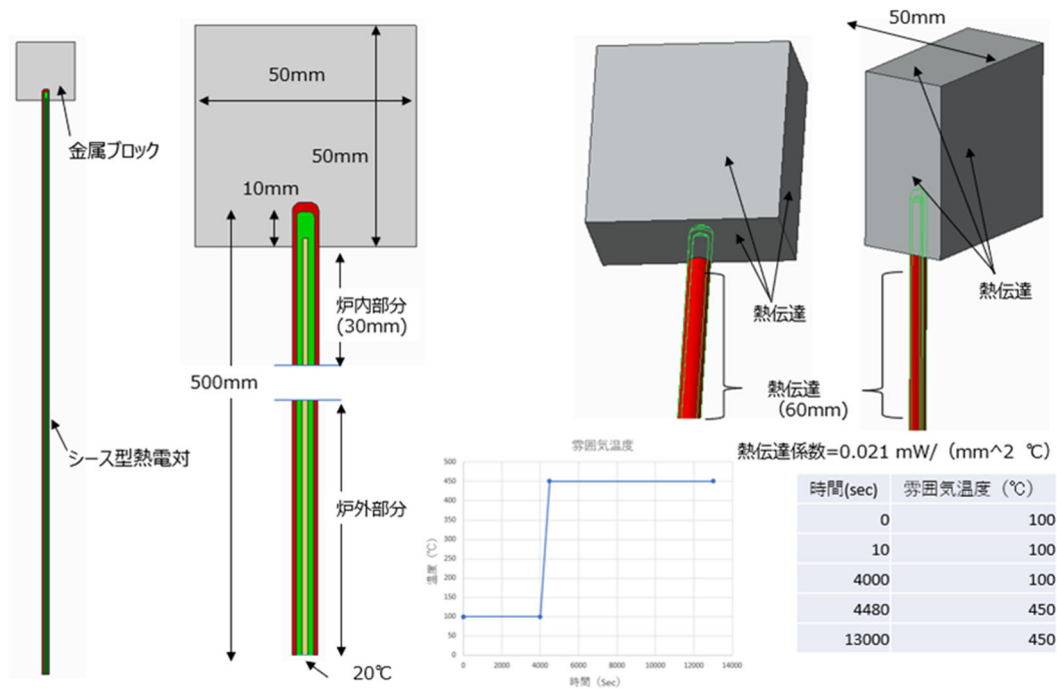


図 2-3-1-49: 解析条件設定

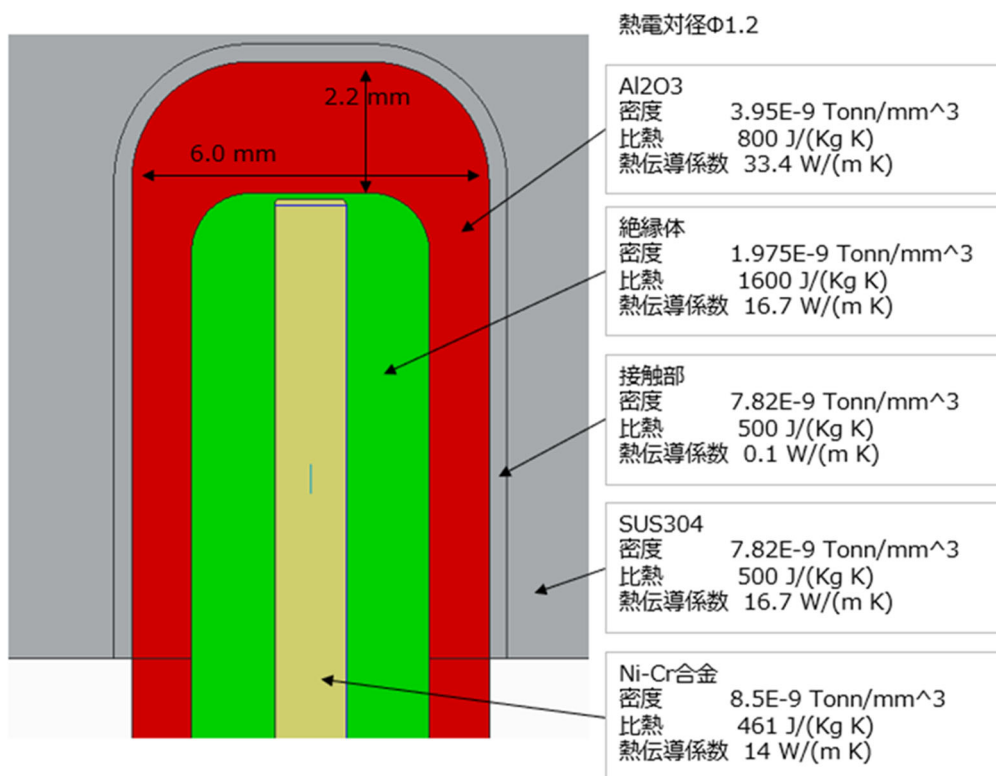


図 2-3-1-50: シミュレーションに用いたモデルおよび材料物性値

解析は、上記モデルで熱電対位置を変えたもの2種類(図 2-3-1-51)および、XCT で測定した 3D 形状を取り込み、CAD データ化したもの(図 2-3-1-52)の合計3パターンの形状について実施し、実験結果と併せて比較検討した。

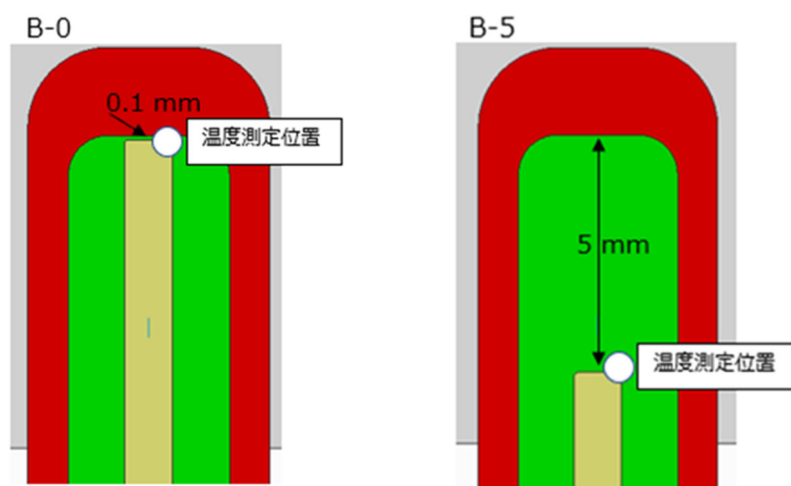


図 2-3-1-51: 解析形状 B-0 および B-5

B-5_XCT

XCTで測定した3D形状を取り込みCADデータ化して解析モデルに組み込んだ

解析モデルに組み込み

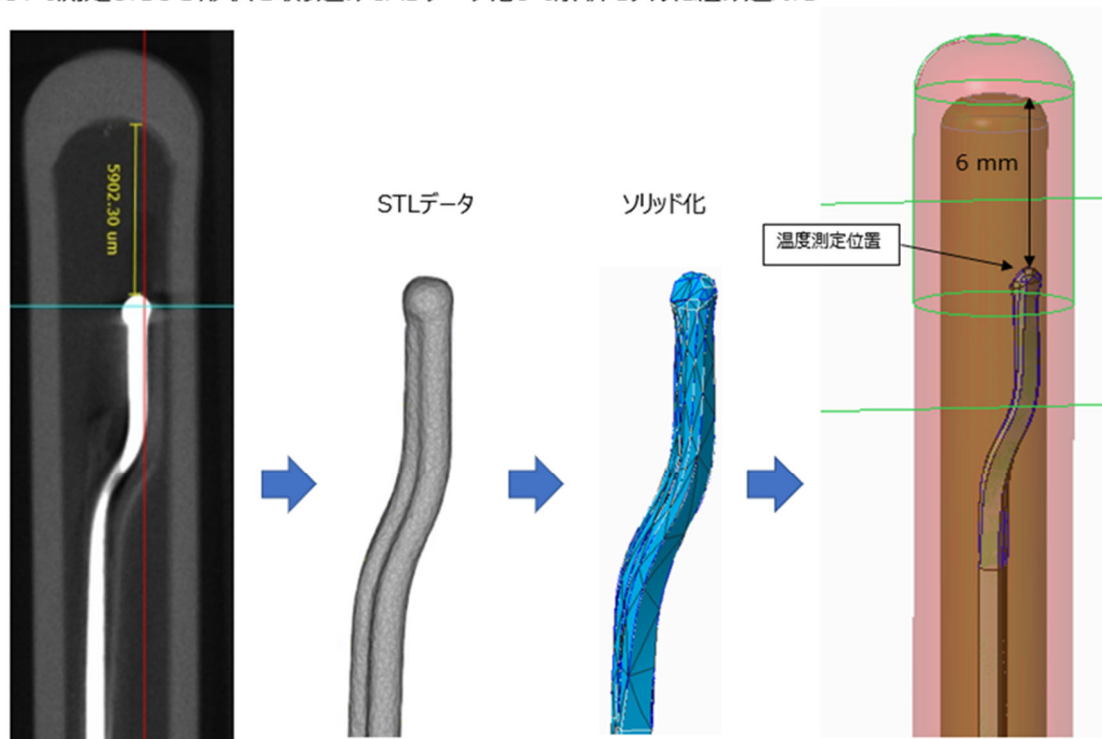


図 2-3-1-52: 解析形状 B-5_XCT

4.4.4 解析結果

全時間における解析結果と実験結果の比較を図 2-3-1-53 に示す。いずれの熱電対温度も最終的にはほぼ同じの温度に収束していることがわかる。

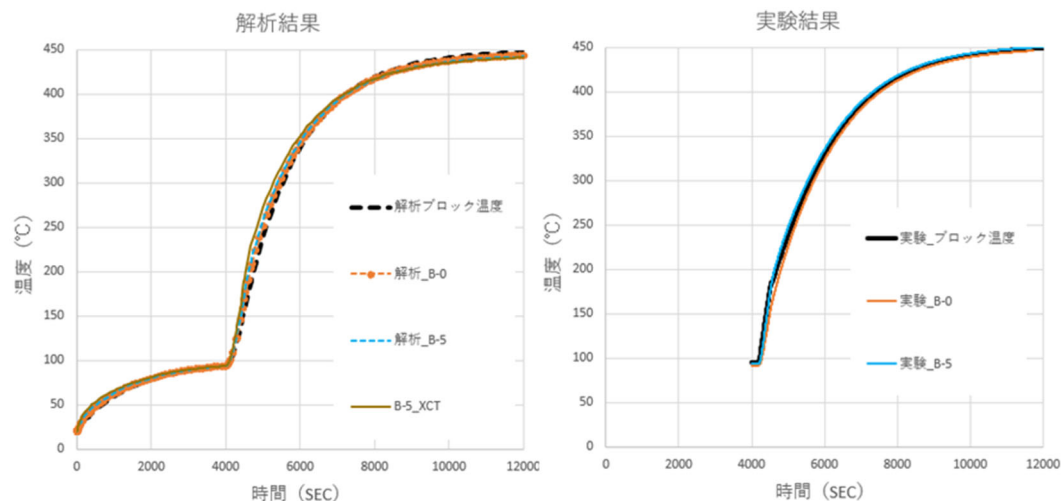


図 2-3-1-53: 解析結果と実験結果比較(全時間域)

昇温過程における温度変化を拡大したものを図 2-3-1-54 に示す。実験と解析結果が完全には一致せず、定量的には異なっている理由は、実現象では個体界面の条件が複雑であり、これが解析モデルに反映しきれていないこと、また、熱電対接点部位の接触条件が完全に解析モデルに表現されていないことが理由と考えられる。

ただし、実験と解析ともに熱電対センサ B-5(温度測定部が先端から6mm)が B-0(温度測定部が先端)よりも温度上昇が速くなっていることがわかった。また、X 線 CT 装置から得られた形状モデルを使った(B-5_XCT)での解析結果は、単純なモデル(B-5)より温度上昇が速い応答の傾向を示した。

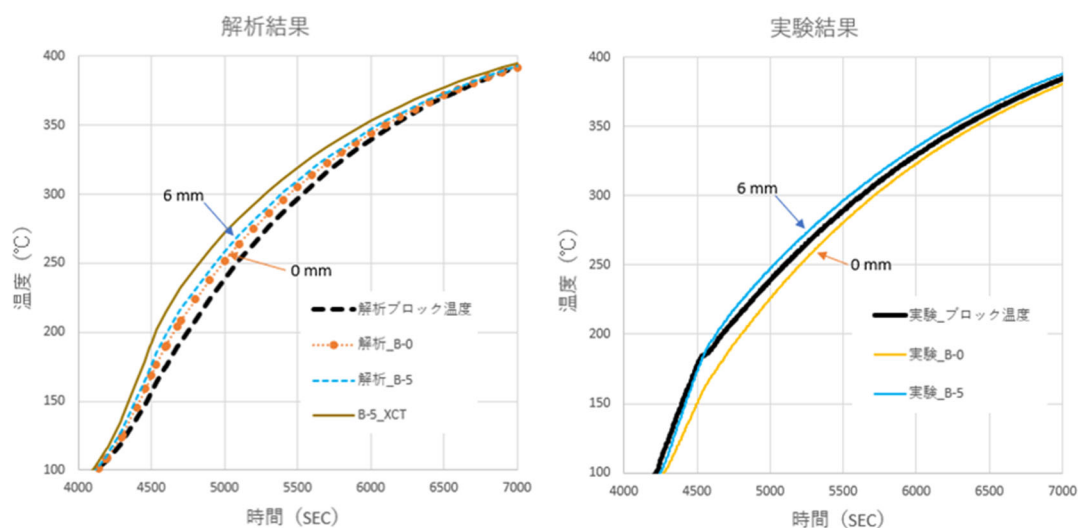


図 2-3-1-54: 解析結果と実験結果比較(部分拡大)

解析結果から、温度分布のコンター図の時間変化を見たものが図 2-3-1-55 である。これを見ると高温気体にさらされたシース露出部分がまず昇温していることがわかる。また、金属ブロックも表面側から昇温し、順次内部の温度が上昇している。これはシース露出部の熱容量が金属ブロックに対して小さいためであり、時間経過とともに両者はほぼ等温度に収束する。すなわち昇温初期にはシース露出部およびブロック表面でより速く昇温し、シースの内部でも温度分布があることを示している。これは、熱電対接点の位置により温度測定に違いが出ることを示しており、測定したい点での温度に誤差が生じることを意味している。

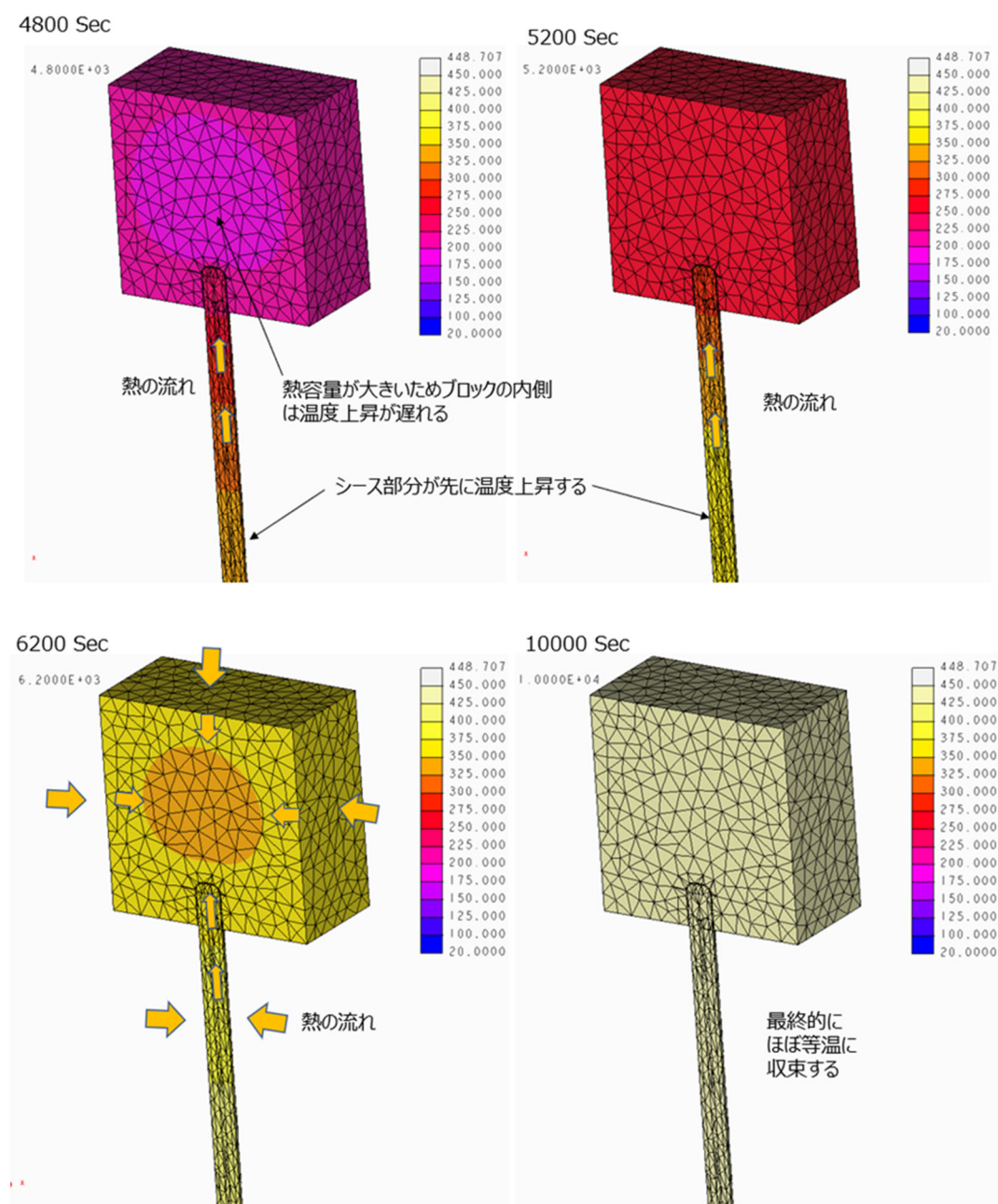


図 2-3-1-55: 金属ブロックとシースの周辺の温度分布の時間変化

4.4.5 検討結果

金属ブロックは熱容量が大きいいため昇温に時間がかかり、一方でシース管が露出している部分は熱容量が小さく温度は上がりやすい、このことから時系列で物質内の温度の不均一が発生していると考えられる。

これにより、実験結果で見られた、熱電対の温度測定部(接点)がシース管露出部に近い側(B-5)の方がB-0よりも昇温速度がことを意味していると考えられる。

いずれの条件においても時間経過とともに最終的には同じ温度に収束して行くが、実験では解析に織り込んでいない様々な要因が存在するため、必ずしも完全な再現性を得ることはできなかった。

X線CT装置から得られた形状を元にしたモデル(B-5_XCT)の結果はB-5の結果より速い応答の傾向を示したが、シース表面からダイレクトに入熱される経路の影響が出ているものと考えられる。より詳細な検討を行うことが必要と考えられる。

シース内部の熱電対接点の位置により測定温度に差異が生じる可能性があることが確認され、このことは内部の非破壊による形状確認が非常に重要であることを示している。

5. まとめ

シース型熱電対において、測温位置の違いが指示温度に及ぼす影響について、温度計測実験を行い、CAE解析により考察した。この結果、昇温過程において熱電対内部の測温位置が指示温度に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、熱電対のシース温度が長手方向に均一でない場合、指示温度が大きすぎる可能性が示唆された。このことから、熱電対の設置位置、長さや熱源までの距離など、熱電対周囲の温度分布を把握することが重要であると考えられる。熱電対の指示温度は、電気測定の結果を温度に換算しているため、これらの誤差(接続部の電気抵抗など)も含まれていることに注意が必要である³⁾。本研究においてはこれについて考慮していない。

実験結果をCAE解析することは、観測できない物性値(温度分布、流量分布、途中状態など)を可視化できるため、実験結果を検証する上で重要な役割を果たす。得られたCAE解析の条件は商品開発にも活用でき、試作及び実験回数の削減につながり、結果的に開発費用が削減できる可能性がある。

また、CPE組合でのX線CT撮像、モデル化とそれを元にしたシミュレーションと福島県ハイテクプラザで実施した実験結果との比較では、両者の結果には高い相関関係がある。このことは熱電対の温度センサ部分がシース内部のどの位置にあるかで計測温度に差異がでることを示していることが分かった。温度センサの内部位置計測にはCT計測が必要で、課題内容の検証にはコンピュータシミュレーションが有用であることがこのユースケースから明確になった。

X 線 CT 撮影結果を CAE 解析に用いることは、設計図と製品の寸法のずれや溶接部の曲面形状など、形状の違いが製品の特性に影響を及ぼす場合に有効な手法である。ただし、現状、X 線 CT 撮影の結果から CAD モデルに変換し、CAE 解析を行うには制約が多く、汎用的に適用できるものではない。CAD モデル作製ソフトと、CAE 解析ソフト間の連携の課題であり、今後の技術開発の進展が期待される。

参考文献

- 1) オメガエンジニアリング ホームページ <https://www.jp.omega.com/pptst/XTA-W5R26.html>
(参照 2023.2.6)
- 2) 鈴木宏正. 3 次元計測とデジタルエンジニアリングの融合. 精密工学会誌. 2005, vol.71, no.10, p.1205-1208.
- 3) 松山裕. 実用 温度測定. 財団法人省エネルギーセンター, 1998, p.181

2-③(2) XCC(Xray Car-Crash)に関する海外技術調査

1. 海外出張概要

XCC(Xray Car-Crash)とは、X線を利用し車両の内部を可視化することで、車両衝突時の現象を解析する装置と技術のことである。この装置はI研究所が唯一の公開保有者であり、日本国内にはこの規模のX線動画撮影装置は存在しない。

今回、この興味深い技術を海外技術調査対象としてI研究所を訪問し、同組織が有する設備の見学、双方の研究内容の情報共有の上、今後の連携について意見交換を行う事を目途に海外出張による訪問調査を行った。訪問は2023年2月6、7日の2日間の日程で、ドイツ・フライブルグ市にある拠点で行い、見学及びミーティングを実施した。なお、参加メンバーはI研究所、CPE組合である。

双方のプレゼンテーションにおいて、当方から事前に依頼したこともありI研究所側からは、X線を使ったアプリケーション例について、XCC装置の説明と現在取り組んでいる技術としてX線Radio Graph(2次元画像)技術、取得した画像データの活用としてCAEを用いたデータ同化技術などについて紹介を受けた。CPE組合側からは、事業の取り組みとCAEを積極活用したデジタルデータの利活用について紹介した。

Xray Car-Crash装置(以降XCC)は、I研究所が所有するドイツ・フライブルグ市に存在する車両衝突時の状況を、X線を利用して内部現象を撮影可能とする装置である。高エネルギーのX線を発生させることと衝突機構を有することから施設内での運用に限定されている。また施設は複数の建屋を持ち、X線撮影のための設備の他に様々な計測・検査設備といった関連機材を有した試験センタとなっている。

以降本調査報告では、同施設及びX線を利用した動的(および静的)な産業適用について調査を行った結果について報告する。

2. I 研究所について

2.1 m研究機構

m研究機構は、1949 年 3 月に設立されたドイツの応用研究機関である。基礎研究より重要な将来の関連技術を優先し、その発見をビジネスや産業で商品化することを目的とした機構である。現在は国際的な活動を行っており、世界中に拠点を持ち、各地の政府、大学、民間企業との共同研究を行っている。各研究所は I 研究所では積極的に民間企業の委託を受け入れており、この中には多くの日本企業も含まれる。凡そ3分の1がドイツ政府および州政府からの基礎的研究契約、残る3分の2が産業界からの研究契約である。

2.2 I 研究所

XCC の設備を保有している I 研究所は、m 研究機構 の 76 ある研究所の一つであり、高速度動的現象の研究を主目的とした研究所である。研究所はそれぞれ独立しており、運営そのものは個別に経営されている。

I 研究所の拠点はドイツ南西部にあるフライブルクにおかれ、3 つの事業所に分かれて活動している。XCC はその 1 つにある。高速度動的現象の研究所であることから防衛に属する委託研究も多い。m研究機構の多くの研究所で基礎的委託研究として国(軍を含む)および他の公的機関から全体の売上の 1/3 を受注している。

I 研究所にも様々な研究テーマがあるため多くの装置を保有している。X 線装置に関しても通常型の計測用 CT を含め 3 台保有している。(1 台は XCC であるが、残る 2 台は通常市販されているマイクロフォーカス、ナノフォーカスの CT 装置で多目的に使用している。)

現在 EV 用バッテリー解析のための専用建屋を新築しており、EV バッテリーに関して多くの委託研究が依頼されていると推察される。

今回の訪問においては X 線周りの技術にフォーカスしていたこともあり、他の研究テーマについて I 研究所側からの紹介はほとんど無かった。

3. XCC に関して

当該設備は実際に自動車(二輪車を含む)を動かして障壁等に衝突させ、衝突時の車の挙動を試験する機能を持つ。以下に詳細を記載する。

3.1 ファシリティ(設置建屋)

- ・ 建屋サイズ(概寸):幅 80m、奥行 20m、高さ 6m
- ・ 従来使用していた建屋を最近使用を開始した Linac での使用ができるように改修を実施。これによりコンクリート厚の増加、外部窓の撤去(壁へ変更)、マテリアル搬入口の遮蔽能力強化(85t のコンクリート扉へ変更)を行い、高エネルギー X 線対応としている。

3.2 設備(XCC 装置)

本装置の下記各部品は、多目的・多用途に柔軟に対応できるように固定はされておらず、撮影対象/目的により組み合わせて構成すると思われる。

3.2.1 衝突実験エリア及び衝突装置

実験設備は部屋の中央に設置されており、X 線は上方より照射するようになっていた。実車の押し出し軸はおよそ 50m、終端には可動壁が設置されている。XCC 装置に関して、下記の点が分かった。

- ・ 下部(床面)に X 線検知器を設置できるようにしている。そのため床下にピットが掘られており、ハウエアのセッティングはピットから行う。
- ・ コントロール室は人員用遮蔽扉で仕切り、安全を担保した隣接区画に設置されている。実験時には内部カメラを利用して状況確認を行なっている。
- ・ この衝突装置には v 社製の大型射出装置(実車を押す機構)を採用している。
- ・ 衝突させるエリアにフレームを設置し、任意の位置に X 線源を設置できる用にしている。今回従来のフレームに加えて SILAC 用のフレームが追加されていた。
- ・ 設置位置は可動領域を広く取っており、多様な設定ができるようにしている。
- ・ 衝突装置の近傍に計測装置も置いてあった。(可動タイプであり常設しているわけではないと思われる。)
- ・ 安全装備については、X 線関連は一般的な器具やインターロックを含む仕組みが用いられている。特別な消火設備はなく通常のものであった。
- ・ 国内の使用経験者のコメントとして車両衝突に関し、衝突条件の設定にもよるが車両を衝突させた際に残存エネルギーが大きく、実験エリアを実車をはみ出す可能性があるので特殊なバリアが必要とのこと。(例えば F1 で使用しているブロックみたいなもの)

3.2.2 X 線源

X 線源としては従来使用していた 8 連の 450KV 出力のユニットと 9MeV の w 社製 LANAC を使用できる構造にしている。

(1) 8 連型 450KV X 線管

この X 線源は非常にユニークであり、自社開発のユニットである。フラッシュ型 X 線源として大型キャパシターを電源として使用しており、小型化したチューブ 8 本を直径約 500 mm のアルミ鏡筒に全部格納し、一括で照射コントロールできるようにしている。

一つの X 線管のエネルギー総量は決まっているので、管電圧(照射時の透過力に関係)と管電流(照射時の線量に関係)を様々なサンプルに最適のように設定できる。標準での照射時間は 20ns である。また、キャパシターの放電時間から、微細時間での使用となる。

8 連ではあるが、それぞれで連続する静止画を撮影することになる。全撮像時間は標準撮影で 1.6ms となる。衝突時の車両の内部現象などを可視化するためには、必ずしも動画である必要はなく、時系列で整列された連続画像で十分に解析できることから、こうした X 線管を束ねたユニット構造をとっているものと考えられる。

(2) 8MeV Linac 線源

この線源は、ドイツの w 社で市販されている製品であり、未使用時は個別の格納部屋で保管している。エネルギーは 9MeV 設定である。特別なカスタマイズはしていないとのことであるが、一般的な Linac は 1000Hz でのパルス出力はできない。

3.2.3 X 線用フラットパネルディテクター (FPD)

この部材が本装置の高速度撮影における最重要アイテムである。現物確認はできなかったが、O 研究所で開発された FPD を使用している。このフラットパネルの特徴は 2000Hz(fps) の速度で撮影ができることで、これであれば上述した 20ns の時間分解能を持つ設定が可能となる。検知サイズは 400mmx400mm の通常の 16 インチサイズ相当の検知面を持つこと、100 万画素ピッチを持つ。現在の装置としてはこのフラットパネルを同時に 2 枚使って異なる二方向からの撮影することが可能である。

このフラットパネルと w 社製 Linac を組み合わせた場合、最小 1/1000 秒での動画撮影を可能とし、かつ相当の撮影時間を確保できるため、I 研究所では非常に活用範囲が広がると期待している。

通常型のフラットパネルを使用した場合、ここまで高速な製品はなく 15Hz 程度の製品が用いられているのだが、これが撮影速度限界となる。またこれらの製品は X 線透視撮影の画像を撮るためであるので、動画としたい場合は、動画撮影用のパネルを用いる。

また、現在の一般的な X 線動画撮影は、X 線の受光に関してイメージインテンシファイアを使用するが、この高速 FPD を使ったダイレクトコンバージョンの手法であれば、従来に比べると広い視野と高画質が得られる利点がある。

3.2.4 ソフトウェア

部材をシステム(装置)として制御するソフトウェアおよびデータ収集ソフトウェアは自作(I 研究

所自身もしくはソフトウェアや X 線を研究している m 研究機構の他拠点製である。重要なキーアイテムであるが詳細は非公開となっている。したがって、装置の肝である、制御系、データ収集系については情報が得られなかった。

3.2.5 他拠点からのサポート

前出した O 研究所は X 線装置に関わる主力研究拠点であり、高速フラットパネルの供給のみならず Silac や装置構築のアドバイスを貰うなどかなり密接な協力関係を構築している。また車両の衝突実験の際、撮影後の車両を O 研究所の拠点に運び込み、O 研究所で保有する大型 X 線 CT により CT 撮影を実施し、詳細な内部データの取得を行うなどの役割分担をしている。

3.3 試験フローの例

以下に標準的な試験フローを示す。

仕様確認(実現性の確認)

委託契約

要求内容の確認、スケジュールの確認、サンプルの提供

シミュレーションデータの準備

～上記が完了している場合は下記からスタート～

コンピュータシミュレーションによる撮影位置の検証

撮影条件の検討

ダミーによるリハーサル(複数回)

実実験

データの確認

データの整理

検証

3.4 アプリケーション例(開示可能なもの)

- ・ 車両の衝突 (多種のテストメソッドを実施) 動画の取得
- ・ 車両内部品の動的現象の動画取得
- ・ エアバッグの爆発
- ・ ブリットの貫通試験
- ・ 容器内爆発

- ・ バッテリー内部の爆発
(現在はフランスのシンクロトロンを利用しているが Silac への移行を予定)
- ・ この他自動車、エアロスペース、素材開発

4. 国内産業界からのヒアリング

海外出張に先駆けて、国内企業等に対しての超大型ガントリー型 X 線 CT 装置のヒアリングを行った際に、そのヒアリングと併せて、XCC についての要望・意見についても確認した。その結果、自動車会社を中心に強い興味が存在することが確認できた。その時に出了意見(順不同)は下記の通り。

- ・ 動的に内部の状況を計測出来ることは現象に有意義である。
- ・ 現存の設備では情報の取得ができないこともあり、より改良を加えた設備の構築が必要である。
- ・ 衝突については、安全性向上と言う各社共通点の目標項目であるので中立的な組織体による標準化を検討する必要がある。
- ・ 衝突現象だけでなく他の現象も内部構造の動的現象を可視化できれば良い。(例:サスペンションの挙動、エアバッグの破裂、バッテリーの破壊等)
- ・ 今後ますます重要となるシミュレーション(CAE 解析)の精度向上に実証実験の結果のフィードバックは欠かせない。
- ・ 現象の可視化に関しては、公的な標準化とは別に知的財産、情報安全保障と言った企業機密を非常に多く含む可能性があり秘匿性も必要である。

多くの興味寄せられている反面、身近に検証のできる環境・設備がないこともあり、もっと広範囲に意見を聞くには周知不足の状況であることは否めない。しかしながら、ベースとしては使用に肯定的であるとの感触を持てる。

導入効果としては、DX での中心となる CAE 解析の精度向上が図れ(FEM モデルへのフィードバック)、実機を使った試験に対し開発期間の短縮、コストの削減、安全性の向上をも足ることができる。今後内燃機関自動車から電気自動車への移行していくための日本の自動車産業にとって有用な設備であると考えられる(日本はこれから全く構造が違う電気自動車の開発を急ピッチで進めて行く上でデジタルデータ活用は必須である)。

経済安保を考える上でも国内に XCC と類似の拠点がある方が良いと考える。

5. 文献調査結果

下記の文献を調査した。

1. 中田杏里, 加瀬文俊, 橋本透, 柴田慎輔, Philipp Bösl, Yann Léost, Ines Butz, Thomas Soot, Malte Kurfiß, Stefan Moser, Jens Fritsch, Siegfried Nau, “Visualisation of body deformation during collision using X-rays”, FISITA World Congress 2021

概要：自動車開発において車体内部構造の変形を計測することが難しいが、本テーマでは衝突現象において注目される部品の変形を I 研究所が有する 8 連型 450KV の X 線源を用いて、動的に数値化している。この結果を衝突 CAE 結果と比較することで、計算モデルを修正し、衝突現象の予測精度を向上させている。衝突 CAE の精度はこの技術を採用することにより、実験結果をフィードバックできる。この効果はどの自動車会社も共通の利益であり、本邦への本技術の導入価値は大きいと考える。

2. 戸田浩之, 「X線CT 産業・理工学でのトモグラフィー実践活用」, 共立出版

概要：近年X線トモグラフィーを産業用ないし科学研究用に利用される機会が多いが、必要な技術をもれなくカバーするような専門書が少ないことから、各種構造・機能材料の研究開発などに携わる技術者向けに基礎から応用まで、物理から工学まで、ソフトからハードまで全てをカバーするX線トモグラフィーの指南書を目指した書籍である。

3. 近藤泰志、三田裕也, “100 万コマ/秒の高速ビデオカメラとその応用”, 日本画像学会誌, 第 44 巻 第6号(2005)

概要：独自の構造を持つ高速撮影専用の IS-CCD (画素周辺記録型撮像素子) を搭載した高速ビデオカメラ HyperVision HPV-1 を開発した。この装置は、最高撮影速度 100 万コマ/秒で連続 100 コマの超高速撮影が可能である。解像度は約 8 万 1 千画素であり、全ての撮影速度で解像度の劣化が無く、高画質な撮影を高感度で行うことができる。高速ビデオカメラ HPV-1 の紹介とこの高速ビデオカメラを用いた高速撮影の例についての解説となっている。

4. Malte Kurfiß, Stefan Moser, “New insights into the car crash with X-ray”, JSOL CAE Forum2022

概要：複雑化する自動車設計において、より高度な安全規格に適合させる新しい技術や早期導入のため、X線を用いた衝突試験での見えない部分の現象観察理解やシミュレーションへのフィードバック適用が紹介されている。

5. Brigit Bindnagel, “Crash test dummies for e-scooters”, フラウンホーファーニュース発表 Making the mobility of the future safe

概要：実用的で環境にやさしい電動スクーターは、優れた柔軟性を提供することされていることから、ますます多くの人々がこの形式の交通機関を利用している。しかし、この人気の高まりに伴い、重傷を負う事故が増加しており、関連するリスクは広くあるがこれに対応して、m研究機構の研究者が HUMAD プロジェクトの一環として、典型的な事故のシナリオと関連する傷害を調査し、ヘルメットと保護具の新しい素材もテストしたニュースリリースです。このような取り組みも興味深いと考える。

6. Anders Kullgren, Amanda Axelsson, Helena Stigson, Anders Ydenius, “Developments in Car Crash Safety and Comparisons between Results from Euro NCAP Tests and Real-world Crashes”, The European New Car Assessment Program (EuroNCAP)

概要：自動車衝突の安全性の発展は、現実世界の衝突の結果を分析することによって証明されることが望ましく、また、クラッシュテストの結果を使用して、クラッシュパフォーマンスの改善を示すことができる。ヨーロッパの新しい自動車評価プログラム (Euro NCAP) の消テストは、実際の衝突の結果を予測しているようですが、すべての事故シナリオの一部しか考慮していない。したがって、衝突安全性の発展を研究し、Euro NCAP テスト結果が現実世界とどのように相関するかを評価する研究は、自動車衝突安全性の発展を、実世界に基づいて示すことを目的としています。(技術者向けテクニカルペーパー)

文献以外にも、下記の公的資料を調査した。

独立行政法人 自動車事故対策機構 発出
フルラップ前面衝突安全性能試験方法
オフセット前面衝突安全性能試験方法
側面衝突安全性能試験方法
衝突被害軽減制動制御装置[対車両]性能試験方法

6. 施設/設備の構築について

現在世界で唯一の設備である I 研究所の設備について、日本国内に同様の設備を構築する計画について検討すべきと考えられる。そのため、装置の日本への導入の可能性とその場合の拡張性について検討した。

(1) 導入の可能性

本装置のコンセプトは大掛かりなものではなく、部材の入手が可能であれば導入は比較的容易である。日本国内の法令に適合するように建屋の建設、装置の構成を行う必要があるが、大きく異な

るものではない。ただしシステムとして動かすためのソフトウェア技術は必要である。

I 研究所に設置されている装置がリファレンスとしての現物になることから、同装置の日本への導入は重大な障害はないと考えられる。

(2) 拡張性

国内に導入するにあたり、機能の拡張性について検討し、具体的に下記の項目の実効性があると考えられる。

- ・ Linac の変更
- ・ フレームの拡大 撮影エリアを広く取り他のサンプル撮影用途への構成変更を可能とするフレームを用いる。
- ・ 大型線源のみならずマイクロフォーカス線源での高速動画撮影
- ・ 近傍に通常型 CT を設置し、衝突後すぐに個別部品の撮影。
- ・ 光学式 3D デジタイザーを近傍に設置し、連動外部形状計測。

7. 今後の I 研究所/O研究所との協業

I 研究所との協業は 2 つの活動において可能。

- (1) I 研究所へ委託検査を依頼する。(日本企業の仲介および本サービスのプロモーション)
- (2) 上記本装置本邦導入時のコンサルティング

8. 今後の展開

本装置の導入の検討を更に進めるのであれば事前段階として下記をまず行う。

- (1) X線動画撮影のプロモーション
- (2) I 研究所の設備を使つてのプロモーションデータの作成
- (3) 市場認知を高め実用性の裏付けを行う。

第3章 まとめ

① X線CT/デジタル化拠点および超大型X線CTシステム技術に関する課題調査

①(1) X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査

国内の産業用X線CTの研究者、装置開発企業、装置を活用したサービスを提供する企業、建築・設備の関係者を中心に、新機構の機能として予定されている超大型X線CT装置を有する拠点の中長期事業化へあり方を検討した。具体的には国内において関連する有識者へのヒアリング・既存施設の視察・文献調査、O 研究所など海外研究機関との連携を基に、本拠点の建築・設備・構造に関わる基本要件と利便性、将来拡張性、セキュリティなど多面的な要素を考慮したレイアウト案を提示した。また、超大型X線CTを含めた本施設が保有する設備のユーザーになりうる国内製造業へアンケート・ヒアリング調査を実施し、計測したいと考える対象・ニーズ・頻度・求めるサービスを明らかにした。また、より魅力的で利便性の高い施設にするため、周辺環境や超大型X線CTを鑑みた外観デザインと、昨今注文されているIoT 技術・デジタル技術の活用案も提示した。

①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査

超大型X線CT装置では、X線源装置、回転ガントリー装置、検出装置、再構成関係で技術開発要素があり、それぞれについて国内の研究者、装置開発企業の関係者を中心に議論を実施した。X線源装置と回転ガントリー装置については、国内の類似開発と装置を見学(X線源についてはD 大学、回転ガントリー装置についてはN 病院)し、超大型X線CT装置の開発計画に活かす知見を増やした。それぞれの開発要素に対して、開発項目、開発目標、開発内容、スケジュールを検討し、令和5年以降の3 か年で技術開発を実施する開発スケジュールを立案した。

また、超大型X線CT装置の基本設計を実施。この基本設計においては、1) 超大型X線CT装置の構成、2) 超大型X線CT装置の性能仕様、3) 超大型X線CT装置を構成する各機器の装置仕様をまとめた。特に、現段階の性能仕様に対して、技術開発完了後の性能試算を評価した。

② 超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術の高度化調査

②(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査

本調査事業では、このような画像処理の高度な基盤技術開発の研究動向について文献を中心とした調査を行い、令和5年度以降の新機構における研究計画を策定する。全委員により、画像処理技術に関する研究動向調査、CT技術の応用における有識者を招いてのセミナーとディスカッションを行った。加えて、コアメンバーでCT技術に関連する業務を行っている企業を訪問し、現場で必要とされている技術のヒアリングを行った。以上の調査を基にして、新機構における研究計画と教育活動を策定した。

②(2) データプラットフォームに関する調査

DX 時代のデータプラットフォームには、単にデータを格納、配布するというだけのプラットフォー

ムではなく、データを運用する中でそれ自体の価値が増し、流動性が上がる仕組みとなることが求められる。このため、将来の産業基盤となるべく計画されたものとして、欧州産業の核となるべく計画されている GAIA-X とその上に築かれるプラットフォーム構造を中心に、その将来性を含めた調査を行った。その結果、GAIA-X に採用されているアノテーションのコンセプトやマシンリーダブル・ライタブルなデータ構造は次世代プラットフォームとして高い発展性が望めるものであることが分かった。ただし、そのデータ構造は自身の正統性を記述することに主眼が置かれているため産業内で積極的なデータ流動を生み出す原動力となるには力不足とも考えられる。GAIA-X をベースとしながらも一部を改変し、モノとプロセスの関係を適切に表現し、オントロジーが積極的に利用できるプラットフォーム特性を実現することが、国際バリューチェーンと効率を両立させ、イノベーション・プラットフォームを実現させる手法となり得る。このようなデータ基盤を小規模であっても早期に実現し、知見を蓄積することで、標準化に向けて動くことを本調査では提言した。

③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査

③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査

③(1)-1 X線CTによる金属 AM(付加製造) 部品の欠陥検出および形状計測

福島県内企業と連携・役割分担をして、人工的に欠陥を埋め込んだ AM 金属部品サンプルの X 線 CT 撮像を行い、取得した CT データを AIVIA(自動欠陥検出ソフトウェア)による解析を行った。簡単な学習で埋め込み欠陥およびその他の内欠陥 3 次元的にかつ自動で検出できることを確認した。これらを通じて、3D デジタルデータの活用が作成したサンプルの品質保証において極めて有用であることを確認した。熱交換器のように内部に複雑かつ微細な構造を持つ部品の品質保証には 3D デジタルデータの活用が不可欠であること。また CAE 解析により設計性能の検証が可能となり有用性が高いことを示した。

X 線 CT による測定検査はあくまで造形後となるため、取得した 3D デジタルデータと造形中の画像、放射温度分布などのプロセスデータとの相関が取れるとインプロセスで欠陥箇所を発見することが可能になると期待される。また、最近の CAE の進歩、普及により、複雑な物理現象を扱う様々な解析機能が提供されるようになってきているが、現物による性能検証を行うためには、微細な欠陥を含めてのモデル化が重要な課題である。

③(1)-2 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決

県内企業の課題解決に向けて、福島県ハイテクプラザと CPE 組合で現物の X 線 CT 撮像とそのデータ化及びシミュレーション適用による現象推定を行った。具体的には、シース型熱電対において、測温位置の違いが指示温度に及ぼす影響について、温度計測実験を行い、CAE 解析により考察した。この結果、昇温過程において熱電対内部の測温位置が指示温度に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、熱電対のシース温度が長手方向に均一でない場合、指示温度が大きくなる可能性が示唆された。このことから、熱電対の設置位置、長さや熱源までの距離など、熱電対周囲の温度分布を把握することが重要であると考えられる。

X線CT撮影結果を CAE 解析に用いることは、設計図と製品の寸法のずれや溶接部の曲面形状など、形状の違いが製品の特性に影響を及ぼす場合に有効な手法である。ただし、現状、X線CT撮影の結果から CAD モデルに変換し、CAE 解析を行うには制約が多く、汎用的に適用できるものではない。CAD モデル作製ソフトと、CAE 解析ソフト間の連携の課題であり、今後の技術開発の進展が期待されることなどが明らかとなった。

また、実験結果を CAE 解析することにより、観測できない物性値や現象(温度分布、流量分布、途中状態など)を可視化できるため、実験結果を検証する上で重要な役割を果たす。得られた CAE 解析の条件は商品開発にも活用でき、試作及び実験回数の削減につながり、結果的に開発費用が削減できる可能性がある。

CPE 組合でのX線CT撮像、モデル化とそれを元にしたシミュレーションと福島県ハイテクプラザで実施した実験結果との比較により、ほぼ同様の結果が得られた。温度センサの内部位置計測にはCT計測が必要で、課題内容の検証にはコンピュータシミュレーションが有用であることがこのユースケースから明確になった。

③(2)XCC(Xray Car-Crash)に関する海外技術調査

XCC 装置を保有するドイツ、I 研究所を訪問し、技術調査を行った。XCC(Xray Car-Crash)とは、X線を利用し車両の内部を可視化することで、車両衝突時の現象を解析する装置と技術である。この装置は実車両での衝突実験を行う事ができる。この規模でX線透過画像を取得できる施設は日本には存在しない。

今回の実機視察により建屋を含む施設の要件、装置構成、装置のスケール感、運用時の注意点について種々の情報を取得できた。特に従来型 450KV のX線管を改良しての継続使用、高出力X線源である Linac の活用、超高速フラットパネルでの動画取得のポイント等、資料では見えてこない情報が認識できた。

X線による高速動画のアプリケーションについての質疑や意見交換では、前述のように最新技術でアプリケーションの幅を広げ、本来の車両衝突試験での利用のみならず、バッテリー破損やエアバッグの破裂などの現象を高速度透過画像で取得、解析が可能とし、またX線CT装置と組み合わせることにより 3D デジタルデータの取得にまで活用されていることが理解できたことが大きい。

今後は I 研究所との協業も視野に入れ、まだまだ知られていない日本国内企業にこの技術の周知を行う事、認識を高めていくことが課題と考える。