

VCAD システム

計測から評価・予測へとつなぐ技術

須長 秀行*

*理化学研究所 イノベーション推進センター VCAD システム研究プログラム
sunaga@riken.jp

1. はじめに

VCAD システムは、ものづくりにおける設計、計測、シミュレーション等を統合することを目指して（独）理化学研究所にて開発されたソフトウェアであり、3次元空間において物体の形状だけでなく内部構造、欠陥、物性等が正確かつ統一的に扱えることを特長としている。

従来のものでづくり支援を主体とした情報技術（CAD/CAE/CAM）は、あくまでも設計形状、すなわち CAD で表現された理想的な形状、及び均質な材質で構成されていることを仮定したものが中心であった。しかし、実際の製品は設計通りの外形形状ではなく、不均一な物性や内部欠陥が生じる。さらに、多数の部品から構成される複雑なアSEMBリ品では、溶接部の内部欠陥や各部品わずかな寸法誤差の積み重ねにより機能不具合が発生する。また、製品が長年使用されると、錆びや疲労による亀裂等の発生により製品機能が劣化する。そのため、試作、量産及び使用の各段階で設計通りの製品であるかどうかを評価できることが、安全性及び耐久性等の面から極めて重要となっている。

一方、実際の測定技術は、接触式及び非接触式計測器の高度化により外形形状を精度良く測定できるようになってきた。しかし、複雑な内部構造や内部欠陥の様子を測定して評価する「見える化」技術、さらに、内部構造の様子を考慮して現象を予測するシミュレーション技術が十分に確立されていないのが現状である。

VCAD システムでは、X線 CT スキャナー等で外形形状と同時に内部構造・欠陥形状を測定し、その計測データをもとに計算機上に内部情報を保持したモデルを構築して、熱流体や構造解析等さまざまなシミュレーションが実施できるシステムを開発し、現物・現場にもとづく新たなニーズに応えることを目指している。

本報では、X線 CT スキャナーを利用した現物（実物）測定データをもとにした構造強度に関する適用事例より、本システムの技術的特長を紹介する。

2. VCAD システム概要

2.1 計測技術

ものの内部構造を測定する方法を表 1¹⁾に示す。主に工業製品を対象とした測定では、据え置き型の X線 CT 装置が用いられている。この装置は、X線源と検出器間に設置した測定対象物に対して全方位（360度の方向）から X線照射を行ない、各方向で取得された X線吸収度合を示す撮像データをもとにコンピュータ上で断層画像を再構成することにより断面画像を取得する。10 μm の分解能を持つマイクロ CT が実用化されているが、密度の比較的大きい鋼材等の素材で厚みを有する部材で構成される測定対象物では、X線の吸収が大きくなるために撮像の取得が難しくなる欠点を持つ。

また、実物の形状を保持しておくことは不可能となるが、実際に測定対象物を切断してその断面の観察を繰り返すことにより内部構造が観察できる 3次元内部構造顕微鏡が開発されている。この装置は、蛍光観察や元素分析等の測定法と組み合わせて使用することにより、サブ μm の分解能で試料内部の 3次元構造を観察することができる。

表1 内部構造測定方法¹⁾

観察方法	分解能	観察範囲	観察原理	問題点
X線CT	十 μ m	m	X線透過率	検出能, 判別能, 透過量
超音波	mm	cm	超音波反射率	分解能, 判別能
MRI	mm	mm	核磁気	磁性体不可, 空間の歪み
CLSM	μ m	mm	蛍光	試料の透明度, 観察範囲
連続切片作成	μ m	mm	切片	切片の変形, 精度, 労力
3次元内部構造顕微鏡	μ m	m	自動断層撮影	破壊検査

2.2 モデル化技術

X線CTやMRI等により取得された厚み方向に連続した2次元断面撮像画像に対して、厚み情報を付加することにより3次元ボクセルデータに変換できる。さらに、ボクセルの輝度値等をもとに画像処理による領域抽出を行なうことにより、領域毎に各ボクセルにタグを付した「領域情報付きボクセルデータ」が作成できる。VCADシステムでは、これらの処理を統合して行なうツールとして、V-Catソフトウェアの開発²⁾を進めている。

3次元ボクセルデータを利用してFEM解析を行なうには、抽出された領域に従って3次元有限要素メッシュを生成する必要がある。しかし、実際に活用できる有限要素メッシュ生成技術としては、下記の要件を満足することが求められる。

- ① 複雑な外形形状を有する物体に対して自動で高速かつロバストにメッシュが生成できること。
- ② 品質のよいメッシュであること
- ③ 形状の再現性が良いこと
- ④ 多媒質からなる物体（マルチマテリアル）や多数の空孔を有する構造等に対応できること。

3次元CADモデルを対象とした上記①～③をほぼ満足させる実用的なメッシュ生成法は、Delaunay法やAdvancing front法等が既に存在する。しかし、④に示す内部構造を有する対象物に対しては、これらの手法では十分に対応できない。そこで、VCADシステムでは、直交格子を利用した手法を採用することにより、この問題に対応できるメッシュ生成技術を開発した。この手法では、3次元ボクセルデータに対して各マルチマテリアル領域を規定する判定関数を定義し、各体心立法格子点における値をサンプリングする。さらに、体心立法格子点をもとに領域全体に生成された4面体要素に対して、判定関数に従って領域境界面を通る要素を選び出し、境界面に沿って4面体要素を再分割することにより、表面メッシュ等を生成することなく直接かつロバストに領域分割されたボリュームメッシュを生成する。また、有限要素の総数が極端に増加する問題に対しては、辺縮約の繰り返し及びメッシュ形状の最適化（アスペクト比や2面角等で表現される有限要素メッシュの質向上）等のメッシュ簡略化手法により、領域境界を維持したままで要素数の大幅削減が可能である。この技術により、上記①～③を高いレベルで満たした上で④に対応できる有限要素メッシュ生成を実現している。

2.3 解析技術

VCADシステムでは、様々な分野への適用を可能とするため、各種アプリケーションソルバーの開発に取り組んでいる。特に、構造解析では、大規模線形構造解析、接触を伴う非線形解析、熱伝導との連成による熱収縮解析、介在物などマイクロな内部構造を考慮して材料特性を解明するマルチスケール解析、人体軟組織などを取り扱うための超弾性解析などがある。図1³⁾は、高張力鋼板の結晶構造モデルとして軟質なフェライト組織に硬質のマルテンサイトが散在する結晶モデルを仮定して、V-Multimat（マルチスケール解析）により延性破壊過程を解析した例である。コンクリート構造物のようにセメント、骨材、鉄筋等さまざまな素材で構成される部材における破壊過程の解析等への応用が考えられる。

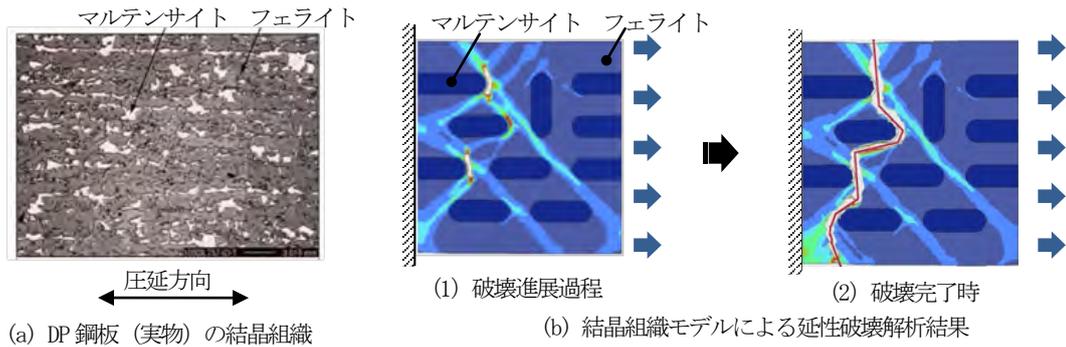


図1 DP(Dual Phase)鋼板の結晶組織モデルによる延性破壊シミュレーション解析³⁾

2.4 可視化技術

対象物の測定により取得された内部構造をもとに解析のために作成された3次元モデル、さらに解析結果はすべて数値情報であり、数値の羅列のままでは人が理解することは難しい。これらの情報を加工することにより人が判断できるようにする「可視化」が必要となる。VCADシステムでは、計測・モデル化・解析の各フェーズにて取り扱われるデータ（画像・ボクセル・有限要素データ等）に対して、物理情報も含めて3次的に内部構造及び領域毎に外形形状が表示できる可視化ソフトウェアを開発している。

2.5 V-FEM統合システム

メッシュ生成や解析ソルバー等の各要素技術が実際の問題に適用されるには、これらの要素技術を有機的に連携できるシステムの構築が必要不可欠であり、VCAD専用FEM解析用プリ・ポスト統合システムV-Femis⁴⁾の開発が行なわれている。V-Femisでは、XML制御を用いた動的なメニュー制御の採用により、VCADの中でFEMを採用している全てのソルバーが本システムを利用できる等非常に拡張性の高いシステムを実現している。

また、物の形状、内部構造及び物性を統一的に扱うことができるVCADの特長を生かすために、用途に応じたデータ変換を行なう際に、外形形状だけではなく内部の場も引き継ぐことができる機能を構築している。たとえば、X線CT測定データをもとにFEM解析を行なう場合、CT測定データから形状を抽出して有限要素メッシュを生成するとともに、有限要素メッシュの各節点に対してCT測定データや温度場データ等内部情報をリサンプリングすることにより、内部物性が反映された3次元有限要素モデルを作成することができる。(図2参照)

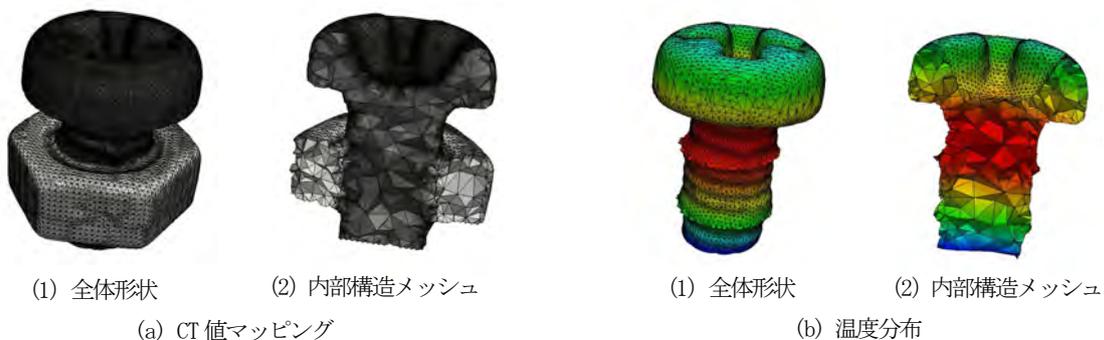


図2 リサンプリング実施例

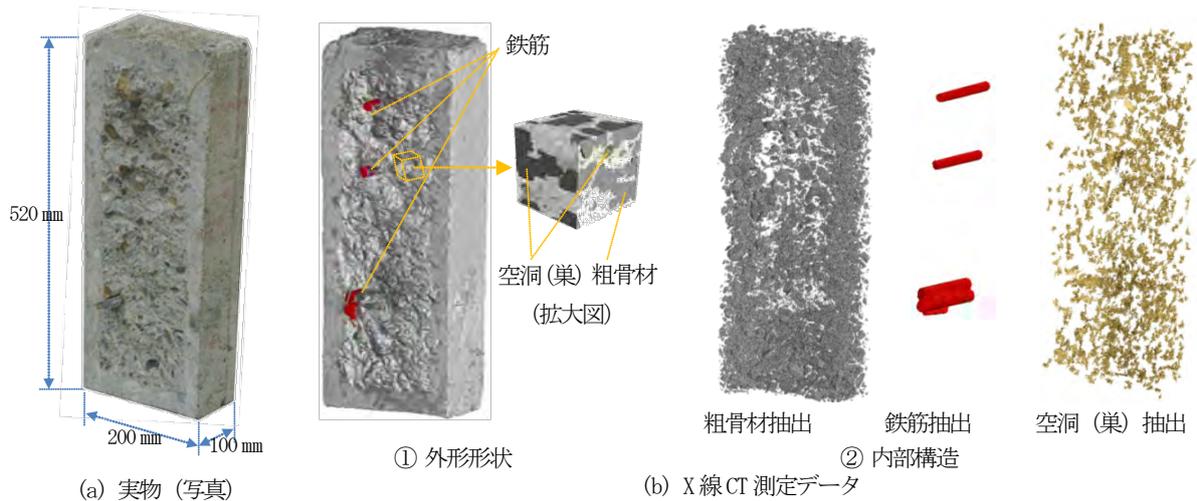


図3 セメントコンクリート部材の概観及び測定結果

3. 適用事例

本章では、木造住宅を支える基礎部分として使用された鉄筋コンクリート構造部材から切り出した部材（セメントコンクリート部材）、及び腐食した橋梁より切り出した鋼材に対して、測定データから構造解析シミュレーションを実施した事例を示す。

3.1 計測

図3 (a)に実際に適用した測定対象物（住宅基礎部材）の外観を示す。また、産業用X線CTスキャン装置を使用して住宅基礎部材を高さ方向に1mmピッチ毎に連続撮影した520枚のX線断層写真を全て重ねることにより外形形状と内部構造を表現した3次元モデルを図3 (b)に示す。測定結果より、住宅基礎部材を構成する粗骨材、セメントコンクリート部（砂及びセメント等）、鉄筋部材及び空洞が観察できていることがわかる。

3.2 メッシュ生成

図3 (b)に示すX線断層写真をもとに3次元ボクセルデータに変換し、四面体メッシュが簡単な操作で自動的に生成された結果を図4 (a)に示す。住宅基礎部材を構成する粗骨材、セメントコンクリート部（砂及びセメント等）、鉄筋部材及び空洞が、各領域境界面で節点を共有する条件のもとで分割されて、異なる媒質として認識できる条件にてメッシュ分割が行なわれていることが確認できる。なお、空洞（巣）も媒質の1つとして取り扱い、巣の部位に対してもメッシュ分割を行なっている。

3.3 解析

前述の住宅基礎部材に圧縮荷重がかかった状態を想定し、四面体メッシュモデルに境界条件を与えて構造解析を実施した結果（相当応力分布及び最小歪分布）を図4 (b)に示す。約525万自由度（約175万節点）を有する本モデルに対して、線形ソルバーは直接法スパースソルバーをスレッドパラレル化したものを使用して解析を実施した。

図5は、腐食した橋梁より引張試験片形状に切り出された鋼材を示す。この鋼材のX線CT測定により取得された長さ方向1mmピッチ毎のX線断層写真457枚をもとに四面体メッシュ生成を行なうことにより、腐食の影響を受けた外形形状（凹凸）を有する有限要素モデルを作成した（図6 (a)参照）。また、腐食による凹凸（減肉部位）のない初期板厚15mmを有する有限要素モデルをCADモデルより作成した（図6 (b)参照）。さらに、各有限要素モデルの両端に強制変位を与えることにより、引張試験を想定した弾

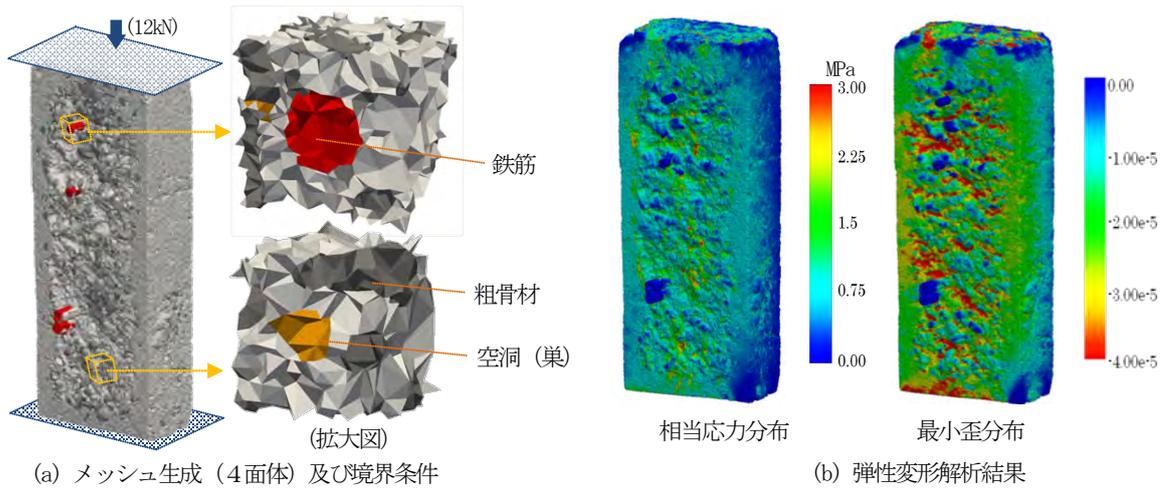


図4 セメントコンクリート部材のメッシュ生成及び解析結果

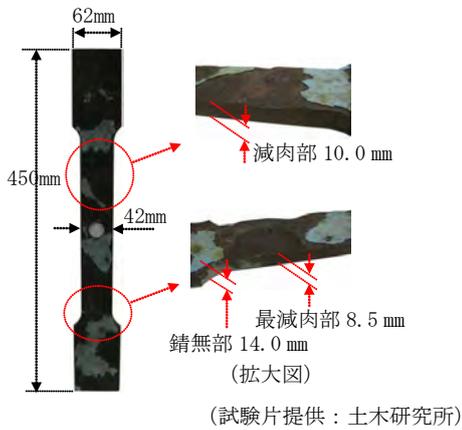


図5 腐食した橋梁より切り出した鋼材

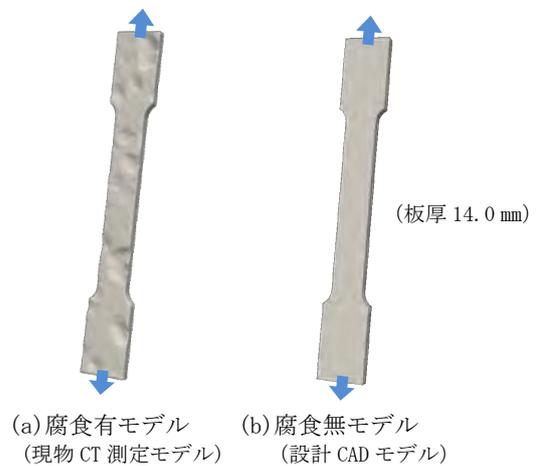
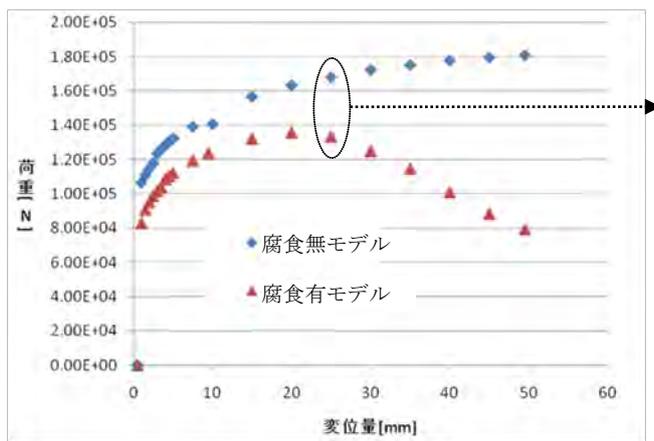
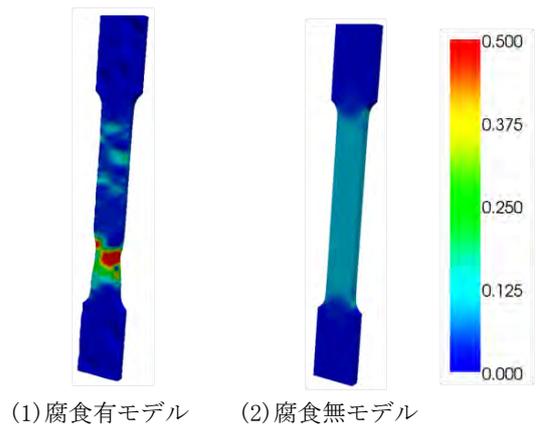


図6 引張試験片有限要素モデル



(a) 引張荷重対伸び量の推移比較



(b) 腐食有モデルくびれ発生直後の最大主歪分布

図7 腐食有無引張試験片モデルによる弾塑性解析結果

塑性解析を行なった結果を図7に示す。この結果より、腐食により板厚が最も薄くなった箇所で破断・くびれが発生しており、鏽有無モデルによる引張荷重の比較からも腐食が部材強度に直接影響を与えることがわかる。

4. VCAD ソフトウェア無償公開

本研究プログラムでは、研究者及び技術者の方々にVCADを知ってもらうだけではなく実際に使ってもらえるように、誰もが自由にウェブサイトからVCADソフトウェアをダウンロードして無償で試すことができる一般公開サイト⁵⁾を提供している。

現在、設計データ (IGES) 及びX線CT装置等による形状測定データを直接取り込み、シミュレーション解析、機械加工まで適用できるVCADソフトウェア (表2参照) が無償公開されている。

表 2 VCAD 公開ソフトウェア一覧表

入力部 (対象物形状の取り込み)	
V-objCreator	CAD データ (IGES) から物体形状を取り込み、離散化された法線付き 3 次元形状データ (VOBJ データ) に変換するソフトウェア。
V-Cat	X 線 CT や 3 次元内部構造顕微鏡により取得された物体の測定データ (三次元イメージデータ) から領域を抽出し、領域つきボリュームデータ (VCAT データ) と領域毎に区切る境界形状データを作成するソフトウェア。
モデリング部 (「もの」と「流体空間」の解析モデル生成)	
VCAD Framework	形状データから KittaCube セルモデルを生成するために必要となる各種 API 及びデータモデルから構成されているソフトウェア。
V-Xgen	形状データからボクセル (8 分木セルを含む) で近似したボクセルデータを生成するソフトウェア。(V-Xpp と連携)
V-PreFEM	規定された物体領域に対して体心立方格子法を用いて 4 面体要素を生成するソフトウェア。
直交八分木格子による解析ソフトウェア	
V-Flow2D	非圧縮性粘性熱流体解析ソフトウェア。(VCAD Framework と連携)
V-X3D	拡張有限要素法による構造解析ソフトウェア。(VCAD Framework と連携)
V-Sphere	熱流体を中心とした非定常物理シミュレーションフレームワーク。 ソルバーの開発環境及び実行環境を提供。複数のソルバーを同時に起動する連成問題や、並列化にも対応。
有限要素メッシュによる解析ソフトウェア	
V-Shrink	鋳造プロセスにおける凝固と熱収縮の連成過程をシミュレーションする 3 次元解析用有限要素法ソフトウェア。
V-Struct	有限要素法を用いた三次元弾塑性構造解析ソフトウェア。
V-BoneRemodeling	生体の骨梁表面における力学刺激量を算出し、骨構造変化を解析する骨梁リモデリングシミュレーションソフトウェア。
可視化ソフトウェア	
V-Isio	V-Sphere による熱流体解析結果のボクセルデータを可視化するソフトウェア。
超精密加工	
V-Cam	NC 工作機械で加工可能な G コード出力ソフトウェア。(VCAD Framework と連携)

5. まとめ

実際の工業製品（現物）は、図面通りには造られていない。そのため、現物の（内部の）様子を知り、それが製品の品質や性能に与える影響を理解することは製品の高度化に直結する。また、現物の繰り返し使用がももて生じる疲労や摩耗、さらに、経年劣化により生じる錆等は、現物を計測して図面では想定できない現象として評価することが求められる。特に、急速な高齢化が進む既設の道路橋では、内部構造の計測技術とともに、計測データをもとにした機能評価及び寿命予測の確立が必要不可欠となっている。今後、これらの利用ニーズに即した技術課題に取り組みながら、VCADシステムを発展させていくことにより、ものづくり支援に加えて、新たな現物・現場型の予防保全支援ツールとして提供できることが期待できる。

参考文献

- [1] 高村正人、横田秀夫、牧野内昭武：測定からの力学シミュレーション、精密工学会誌、74-12, (2008), p1249
- [2] <http://vcad-hpsv.riken.jp/jp/research/outline/team/05.php>
- [3] J. L. Alves, N. Esameili, C. Teodosiu : Numerical Simulation of the Ductile Fracture of Multi-Phase Materials by V-MultiMat, 理研シンポジウム VCADシステム研究2009, (2010) 64-65
- [4] 高村正人、村井哲郎：V-FEM統合システムの開発と非線形構造解析への適用, 理研シンポジウム VCADシステム研究2009, (2010) 41-44
- [5] <http://vcad-hpsv.riken.jp/>