

VCAD普及の取り組み

～ ものづくり支援ツールとしての適用推進 ～

Activities to promote VCAD system in manufacturing industry

須長 秀行*, 高村 正人*, 三好 雄司*, 村井 哲郎*, 秋山 真太郎*, 見原 俊介*, Pham Mai Khanh*,
Dinh Tien Dung*, 安藤 嘉珠*, Truong Thi Thuy Trang*

* (独) 理化学研究所 知的財産戦略センター VCADシステム研究プログラム 普及推進チーム
sunaga@riken.jp

1. 概要

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。

従来のものづくり支援としてのシミュレーション技術は、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、及び均質な材質を仮定したものが中心であった。しかし実際の製品には不均一な物性や内部欠陥が生じており、それらの情報を考慮したシミュレーションが望まれている。また、試作あるいは量産の段階で設計通りの製品ができているかどうかを検証することも極めて重要である。このような要請は新規分野の製品開発や多数の部品から構成される複雑なアセンブリ品において顕著である。そこでVCADシステムでは、X線CTスキャナーなどにより得られた内部情報を含む測定データを利用して、計算機上にモデルを構築し、構造解析を実施するためのシステムを開発することでこれらのニーズに応えることを目指している。

この研究成果をものづくりの現場の中で広く利用できる現物・現場型の支援ツールとするために、普及推進チームでは、実際の工業製品にVCADシステムを適用しながら、ソフトウェア使用環境向上等、実用面での技術開発を行っている。また、さまざまな研究者、技術者がVCADに直接触りながらVCADを知ることができる場として、開発されたソフトウェア群の中で基盤となるものは、誰もが自由にインターネット上から無償でダウンロードして実際に試すことができる一般公開サイト[1]を提供している。

本報では、X線CTスキャナーを利用した現物（実物）測定データを基とした仮想実験の適用事例をもとに、本システムの技術的特長及び一般公開ソフトウェアを紹介する。

2. VCAD構造解析システムを構成する要素技術

2.1. X線CTスキャナーによる測定

鋳造品等の実工業製品の内部構造及び外形形状全体を取得する測定方法として、X線CTスキャナー装置を使用した例を紹介する。この装置では、X線源と検出器間に設置した測定対象物を回転させて全方位（360度の方向）からのX線照射により取得される各方向でのX線吸収度合を示すデータをもとに、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撮像を取得する（図1参照）。次に、厚さ方向に連続した2次元断面撮像画像に厚さ情報を付加して3次元ボクセルデータに変換する。さらに、ボクセルの輝度値などをもとに画像処理による領域抽出を行い、3次元構造モデルが作成される。

御されたモデルから元形状との切断点と法線，セル頂点の媒質IDのみを使用して高速にメッシュ生成を行うものである。

VCADデータは，ボクセルで制御された多くの情報を保持しており，構造解析だけでなく流体解析，機械加工などに直接用いることができる．一方で，V-Struct用の有限要素モデルを生成するボクセルベースの手法に特化して考えると，必要となる情報はごく一部である．例えば境界面を高精度に再現するKittaCube面や，ボクセルベース流体計算で重要になる開口率，体積率などは必要ない．そこで，有限要素メッシュ生成に特化した，「セル切断点と法線」「媒質ID」のみからなるシンプルかつ軽量のボクセルデータ構造（Point VCAD）を新たに定義し，メッシュジェネレータに接続することにより，大規模な有限要素モデルの高速生成が可能となった．図2は，エンジンプロックの測定データを丸ごとVCADデータ化した例である．測定データの細かい特徴まで再現できる解像度を実現していることがわかる．図3は，VCADデータからV-DualGridを用いて生成された縮退六面体有限要素メッシュの断面拡大図である．有限要素メッシュの生成まで一般のPCで数分にて計算可能である．

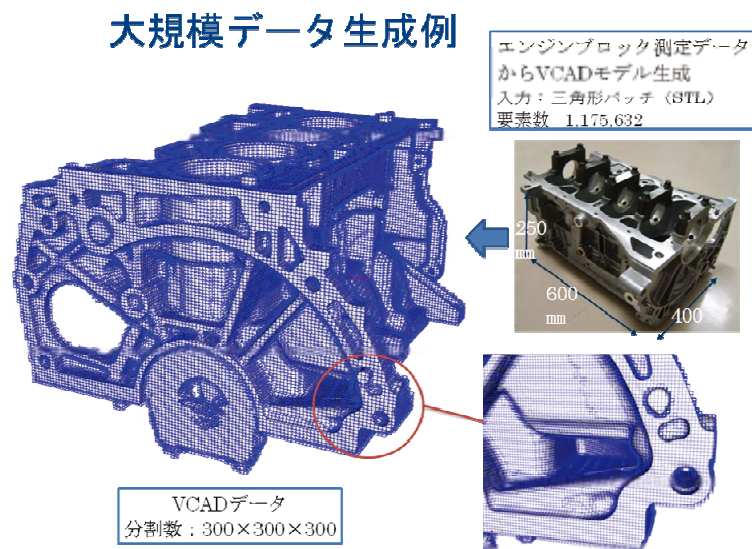


図2 大規模データ生成例

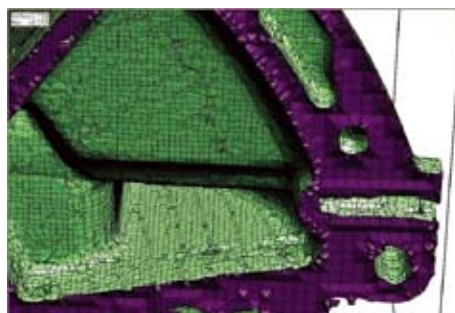


図3 生成された有限要素モデル

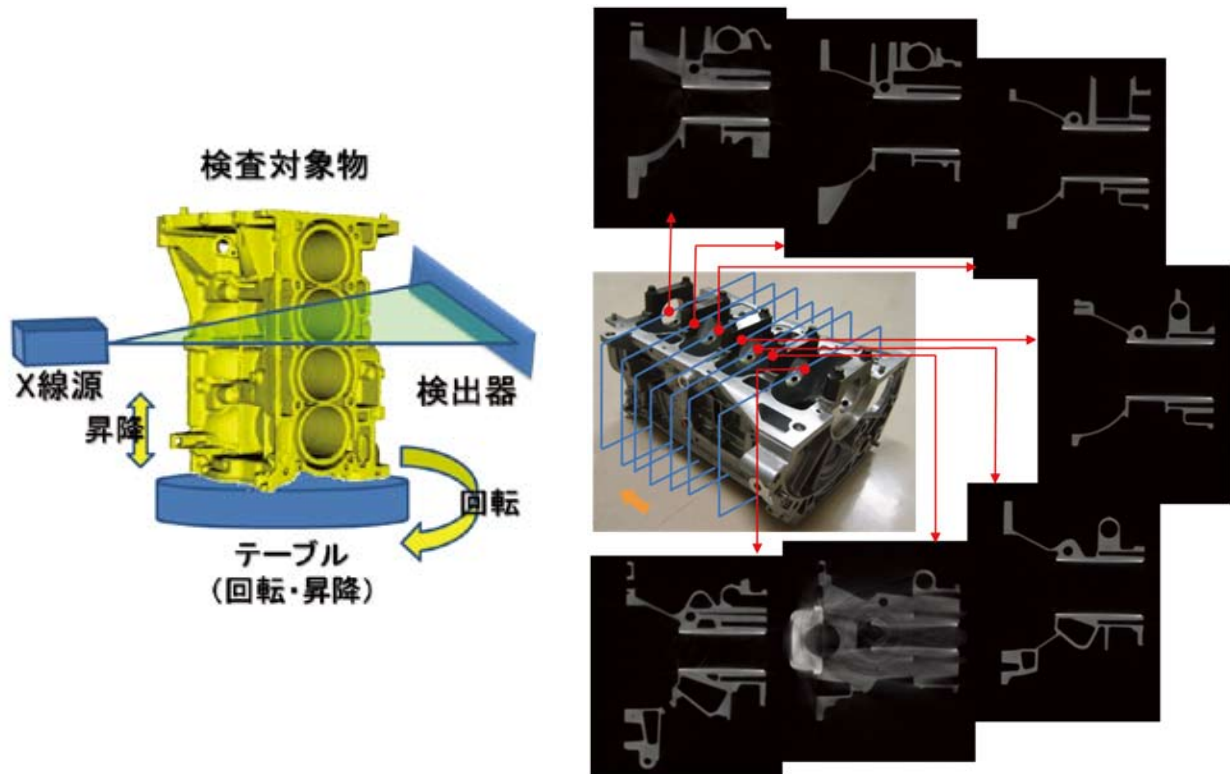


図1 断面撮像例

2.2. プリポスト

前節で示した方法でX線CTスキャナーにより得られた3次元モデルは一般に巨大で複雑なデータとなるため、システムは以下の要件を満たす必要がある。

1. 大規模入力データへの対応
2. 高解像度モデルの生成および可視化
3. 高解像度モデルの解析

本節では、このうち1. 大規模入力データへの対応及び2. 高解像度モデルの生成および可視化についての取り組みを紹介する。

2.2.1. 大規模入力データからのVCADモデル生成

VCADは、物体の外形形状だけではなく複雑な内部構造や内部欠陥も同時に表現できるデータ構造を持っており、設計形状から実部品データまでを同じデータ構造で取り扱うことが可能となっている。一方で、その豊富なデータ量ゆえに大規模モデルを取り扱う際には計算負荷も大きい。現在の一般のPCの能力では、測定データでは珍しくない数十万要素のVCADモデル生成にもかなりの時間がかかるのが現状である。そこで、VCADのすべてのデータを利用するのではなく、構造解析に特化したデータを取り扱うことにより、大規模測定データからでも高速に構造解析用メッシュを生成できる手法を開発した。

VCADシステムではいくつかの構造解析ソフトウェアがあるが、本システムにおいては通常の有限要素法を用いた構造解析ソフトウェアであるV-Structを使用する。V-Structに入力される有限要素モデル生成方法としては、双対格子を利用したV-DualGridによる六面体データ生成、およびIsosurface Stuffing[2]による四面体データ生成手法が開発されている。これらの手法は、いずれもボクセルで制

・面抽出による境界条件付与機能

測定データから構築されたモデルは、設計データ（CADデータ）と違い面情報などを持っていないため、特定の面全体に境界条件を付与するような場合はユーザーが手作業で面を構成する要素を選択する必要があった。これを避けるために、選択した要素からユーザーが指定する二面角以内で連結される要素を抽出し、面グループを形成する機能を追加した。図5は、測定データからの面グループ抽出例である。この機能により、測定データのような複雑かつ面情報を持たないモデルに対しても実用的な境界条件を付与することが可能となった。

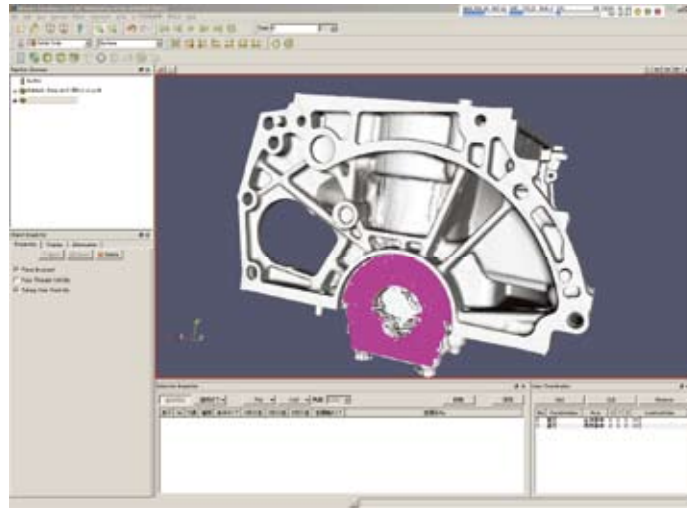


図 5 面グループ抽出例

(3) 今後の展開

ParaViewベースの開発により、VTKライブラリ及び面抽出技術を用いて大規模測定データに対しても適用可能なプリポストシステムの構築が可能であることが示された。しかし、ParaViewをベースにしているためユーザーインターフェースは可視化用プログラムとして設計されており、解析用プリポストとして最適とは言い難い。そこで、現在普及推進チームでは、VTKライブラリをベースにVCADに適したユーザーインターフェースを備え、大規模測定データに対応可能な新バージョンプリポストシステムの開発を行っている。新バージョンは既存のソフトウェアをベースにするのではなく、新たにVCAD専用に設計されているため、よりユーザビリティの高いシステムとなることが期待される。

2.3. 構造解析ソルバー

VCADシステムでは、様々な分野への適用を可能とするため、各種構造解析用アプリケーションソルバーの開発に取り組んでいる。その内容は、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、介在物などミ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、人体軟組織などを扱うための超弾性解析などである。いずれも、2.2.1.で示したメッシュ生成手法の特長を生かすと同時に弱点を補完しあい、トータルなシステムとしての完成度を高める方向で開発が進められている。

線形方程式ソルバーとしては現在のところ扱いが容易な直接法スパースソルバーを採用しているが、扱えるモデルの規模に限界（メモリー容量の面でも計算時間の面でも）がある。複雑な内部構造をもつモデルを想定した場合、本ソルバー群で扱えるものよりはるかに大規模なモデルを扱うことになることが想定される。そのような場合は分散メモリー環境で反復解法を用いることが考えられるが、反復解法がうまく機能するかどうかはメッシュの品質に大きく依存する。そのため、メッシュ品質を保証するメッシュ生成技術と線形ソルバーでロバストに解く技術の両面から大規模化に対応していく予定である。

本システムにおいては、大規模測定データの構造解析という目的に特化し、VCADデータが保持する情報のうち構造解析に必要なものだけを取り出すことによって計算負荷を減らし、大規模、高速化を実現した。VCADの豊富なデータ構造を実際の問題に適用するには、今後もこのような目的別に特化した利用方法が必要になると考えられる。

2.2.2. 大規模データに対応したプリポストシステムの開発

(1) 従来技術の問題点

生成された大規模メッシュに対して実際に解析を行うには、解析条件の付与などの前処理を行うプリシステム及び解析結果の可視化を行うポストシステムが必要となる。大規模測定データ対応のプリポストシステムとしては、「大規模データの可視化」及び「複雑なデータに対する適切な境界条件付与」の機能が必要となる。

従来のVCAD構造解析システムで用いていたプリポストシステムは、オープンソースのCADフレームワークであるOpenCascade[3]をベースに開発を行ってきた。OpenCascadeはIGESなどのCADデータを取り扱うことができるため、設計データからの解析用プリポストシステムとして適していた。しかし計算機内部で取り扱うデータ量が大きいため、大規模なデータの取り扱いにはあまり向いておらず、今回の目的には合致しない。そこで、本開発においてはCADデータを入力対象とせず、より大規模なデータの処理が可能な可視化用ライブラリであるVTK[4]を用いたプリポストシステムの構築を行った。

(2) ParaViewベースプリポストシステムの開発

VTKはオープンソースの高機能3Dグラフィックスライブラリであり、VTKをベースにやはりオープンソースの可視化ソフトウェアParaView[5]がフリーで公開されている。ParaViewは元々可視化に特化したソフトウェアであるが、オープンソースの特性を生かして独自開発コードを追加し、VCADプリポストシステムとして必要な機能を実装した。追加された機能は以下である。

・VCAD構造解析データ入出力機能

VCADモデルを用いて生成される四面体および縮退六面体メッシュデータの読み込み機能、解析用データの出力機能、及び解析結果データの読み込み機能を実装した。図4は、エンジンプロックのCT測定データより生成した縮退六面体メッシュ（4,202,774要素）の可視化例である。400万要素を超える巨大モデルであるが、通常のPCで十分に可視化可能である。また、ParaViewの可視化ソフトとしての機能を利用することにより解析結果の物理量の様々な表示方法に対応しており、直観的な結果の把握が可能となっている。

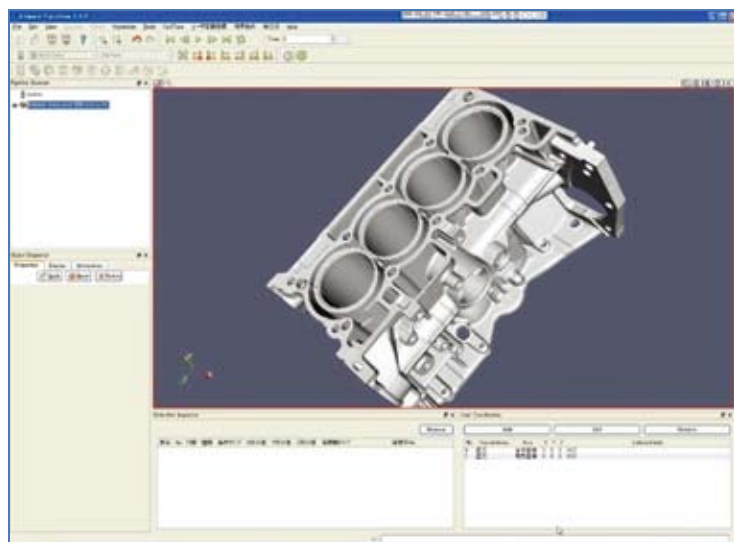


図 4 大規模モデルの可視化例

3.2. メッシュ生成

3次元ボクセルデータに対して2.2.1.で述べた直交格子ベースのメッシュ生成技術を適用した例を示す。

図8は前節の測定結果に対して四面体メッシュ生成技術を適用した例である．ここでは見やすさを考慮して内部欠陥（鑄巣）を第2の媒質として扱い、この部分に対してもメッシュ分割を実施している．実際は空孔なので、構造解析を実施する際はこの部分のメッシュを削除することになるが、空孔ではなく介在物などの場合は、マルチマテリアルとして扱うことも可能である。

部品は異なるが、マルチマテリアル対応の例として、バイクのエンジンブロックに対して同様の手順で四面体メッシュを生成した例を図9に示す．本モデルはアルミ鑄造品のエンジンブロックと、鉄製のライナーによって構成されており、それらが2つの媒質として認識された上で自動でメッシュ分割がなされている。

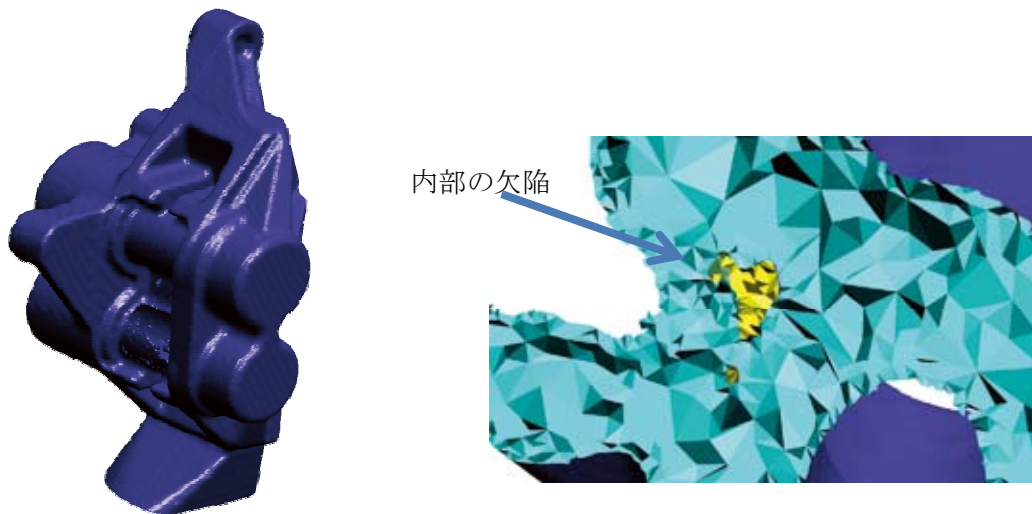


図8 ブレーキキャリパー四面体メッシュ

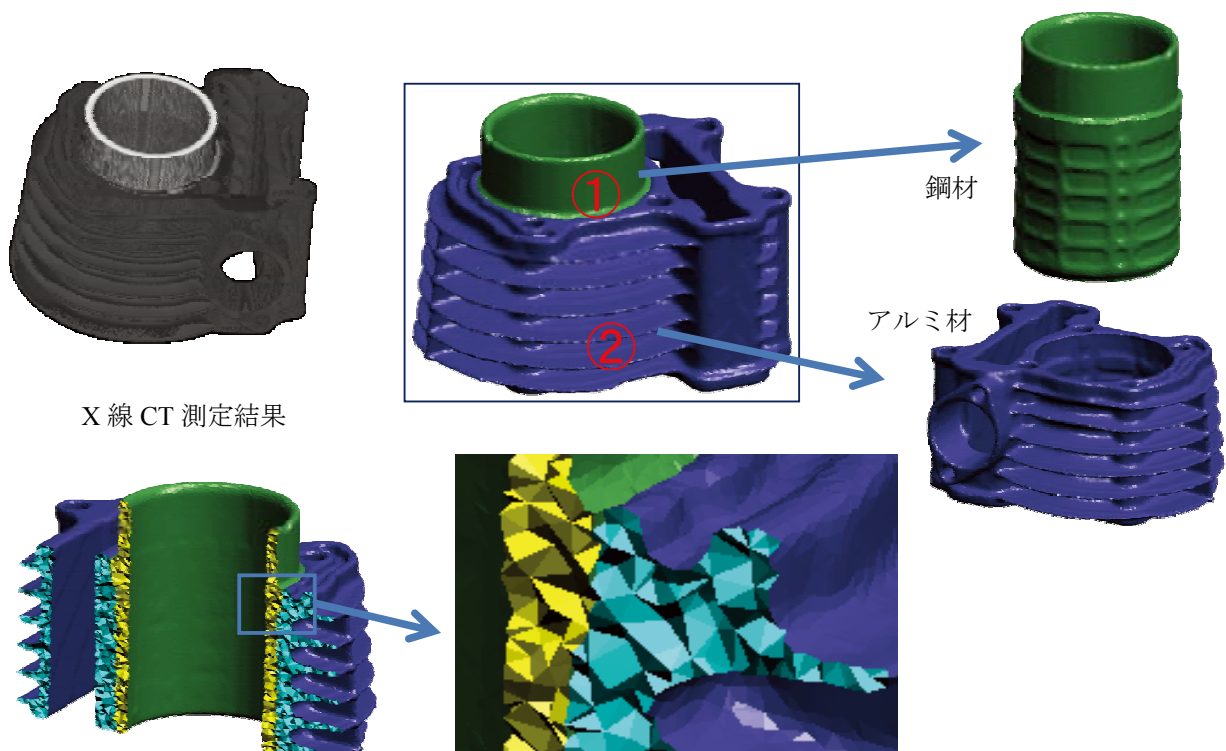


図9 エンジンブロックのメッシュ生成例

3. 適用事例

本章では、モーターバイク部品（ブレーキキャリパー部品ケース）を題材として、実工業製品の測定データから出発してV-Structによる構造解析シミュレーションを実施した事例を示す。図6に部品の概観を示す。この部品は、ブレーキディスクにブレーキパッドを押さえ込む安全上重要なパーツで、アルミ合金を用いた鋳造品である。

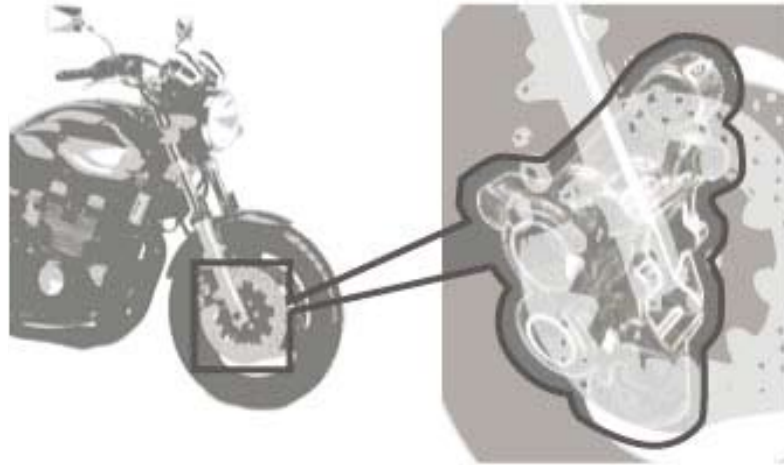


図 6 モーターバイク部品（ブレーキキャリパー部品ケース）

3.1. 計測

部品の概観、およびX線CTスキャナーにより外形形状と内部構造を測定した結果を図7に示す。測定データ（b）は、対象物を306断面（約0.5mmピッチ）に分割して撮影されたX線断層写真、およびこれらの断層写真を、3次元ボクセルデータに変換したものである。

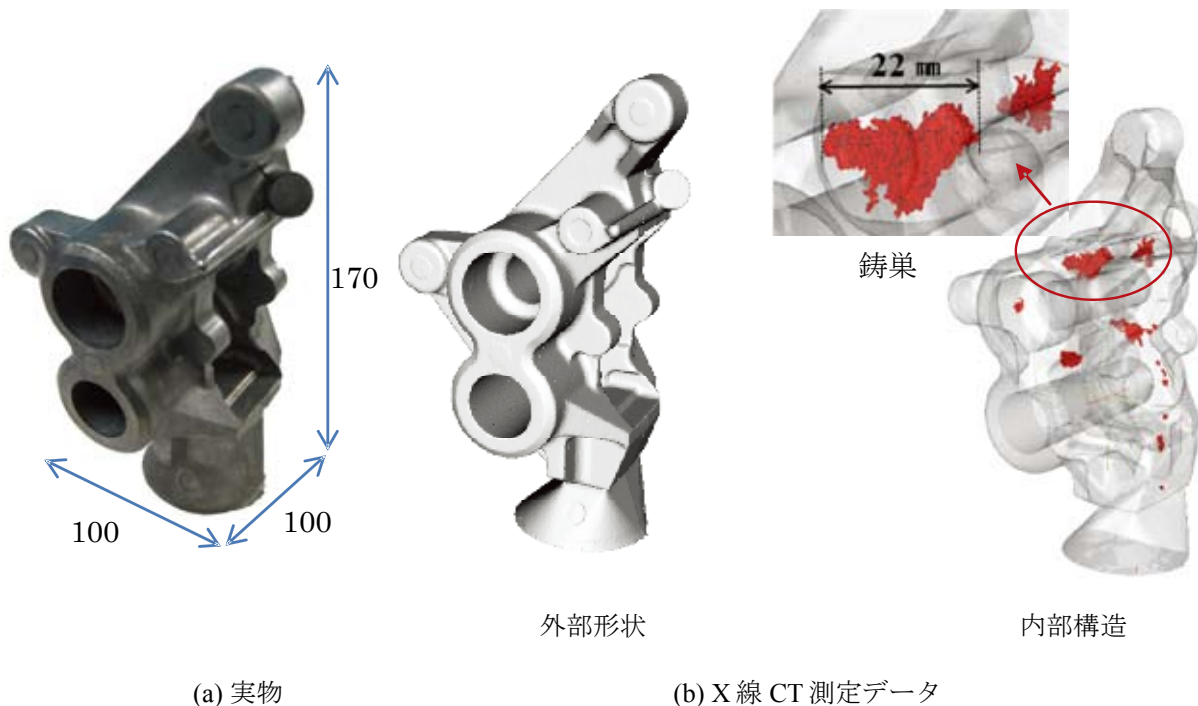


図 7 ブレーキキャリパーの概観及び測定結果

表 1 VCAD 公開ソフトウェア一覧表

VCAD Framework	このソフトウェアは、VCAD 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ます。実際にユーザーが VCAD Framework として用意されている API を組み合わせることにより、VCAD モデルを利用したさまざまなアプリケーションの開発が可能となります。
■データ変換	
V-ObjCreator	S-CAD（3次元ソリッド CAD）から IGES 形式を介して 3次元 CAD 形状を取り込み、VCAD モデル作成に必要なデータ（VOBJ）に変換するソフトウェアです。
■データ作成	
V-Cat	X 線 CT や MRI により取得された物体の三次元イメージデータから領域を抽出し、VCAD モデル用データ（VOBJ）を作成することができます。
V-Cam	VCAD 設計データから NC 加工機で加工データを生成する CAM ソフトウェアです。
■熱流体解析	
V-Sphere	複数のソルバーを統一的に扱うことを目的とした VCAD 対応の非定常物理シミュレーションフレームワークです。
V-Sphere::CBS3D_IC	FB クラスを基底クラスとして利用し、V-Sphere に実装した非定常非圧縮性熱流体 3次元ソルバーです。
V-Sphere::FlowBase	FB(FlowBase)クラスは、流体解析ソルバー開発に関する機能をクラスライブラリとしてまとめたものです。
V-Isio	V-Sphere を使用して開発された各種熱流体解析ソルバーの計算結果を可視化することができるソフトウェアです。
V-Xgen	形状データ（STL, Obj 形式）を読み込み、形状をブロックに近似しブロックのデータをファイルに出力することができます。
V-Xdc	形状データ（STL, Obj 形式）を読み込み、形状を修正することができます。
V-Xpp	V-Xgen で作成されたボクセルデータに対して、シミュレーションで利用する境界条件や物性データをタグ付けすることができます。
V-Flow2D	V-Flow2D Version 3.0 は、VCAD Framework 4.x に対応する二次元汎用流体シミュレーションソフトウェアです。
V-SDFlib	形状データから符号付き距離関数を作成するためのライブラリです。C++/Fortran プログラムからの利用が可能です。
■構造解析	
V-X3D	VCAD モデルに対応した拡張有限要素法（X-FEM）を用いた三次元線形構造解析ソフトウェアです。
V-DualGrid	VCAD 用データを読み込んで双対格子を生成することにより、三次元線形構造解析（V-Struct）に使用できる縮退要素を含む六面体メッシュを生成するソフトウェアです。
V-Struct	VCAD モデルに対応した有限要素法を用いた三次元線形構造解析ソフトウェアです。このソフトウェアは、V-DualGrid によって生成される縮退六面体メッシュに対応しています。
■成形解析	
V-Shrink	VCAD モデルに対応した鋳造凝固／熱収縮シミュレーションソフトウェアです。

3.3. 解析

ブレーキキャリパーの四面体メッシュモデルに物性値（アルミ材料）を与えた上でV-Structを使用して強度解析を実施した例を図10に示す．ここでは，鑄巣の存在の影響をみるために，あえて巣の部分を埋めたモデル（a）と巣が存在するモデル（b）の比較を行った．巣の存在が再現されていることにより，その周囲での応力分布が影響を受けていることがわかる．計算機にはIBM System p5 590を用いた．線形ソルバーとして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用いた．本モデルは約60万自由度（20万節点）を持ち，計算時間は約5分であった．

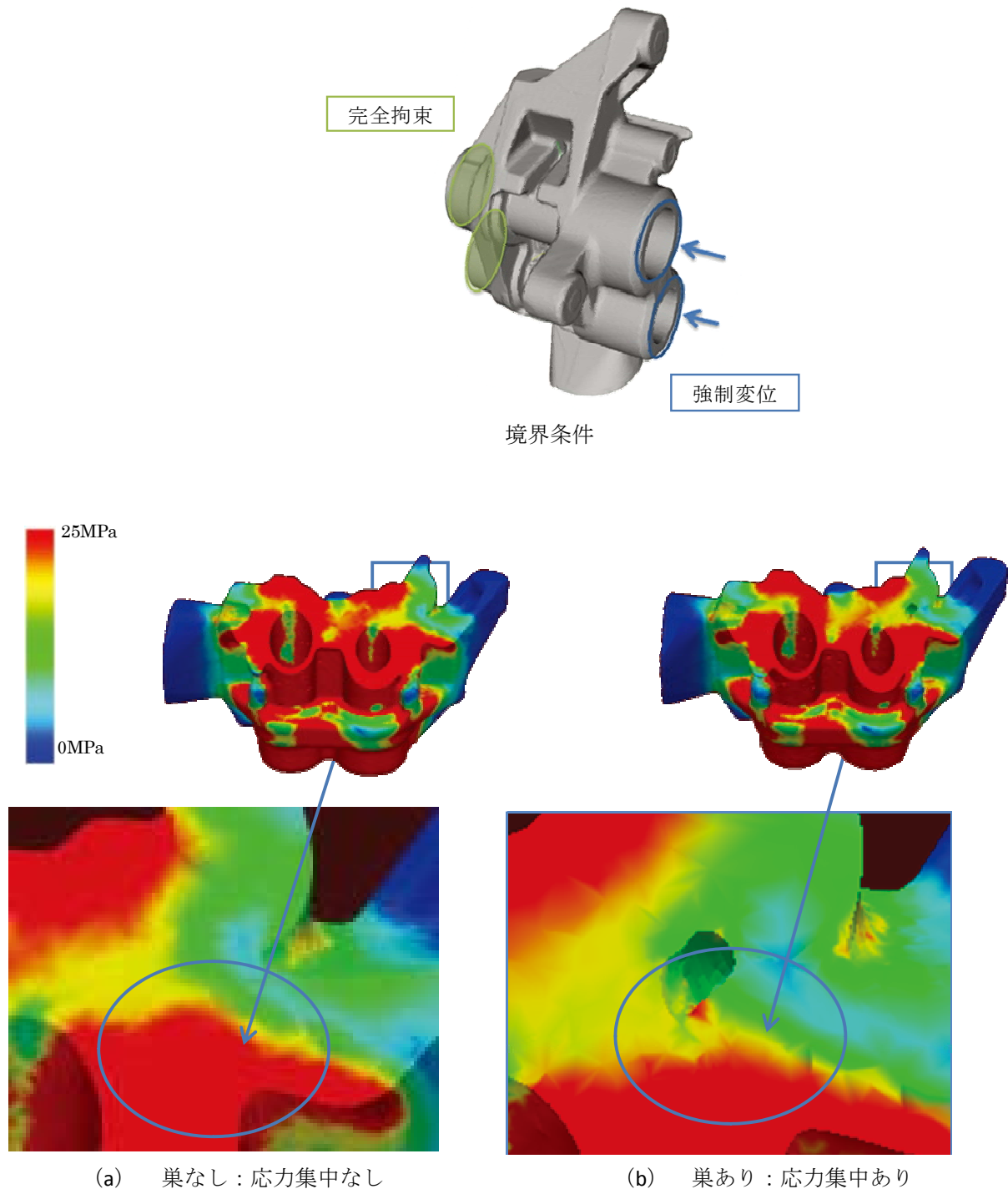


図 10 ブレーキキャリパー解析結果（相当応力分布）

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[1]を提供している。

現在、設計データ（IGES）及び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20本のVCADソフトウェア（表1参照）が無償公開されている。また、ウェブサイト上では、VCAD関連最新情報の掲載に加えて、VCAD利用者が自由に質問・情報交換できる「フォーラム」を運営している。

5. まとめ

本報では、VCADシステムにより実際の工業製品を用いて実物の外形形状及び内部構造を直接データとして取り込み、静的強度解析を実施した事例を紹介した。工業製品における技術革新は、製品やその製造工程の複雑化、ブラックボックス化を進行させ、その結果設計情報からのシミュレーションではなく、現物（の内部）の様子を知り、さらにそれが製品の品質や性能に及ぼす影響を知るためのシミュレーションを実施したいというニーズの拡大につながっていくと考えている。普及推進チームではそのようなニーズに応えられるよう、ものづくりへのVCADシステム適用を積極的に実施しながら利用ニーズに即した技術課題を解決していきたい。それにより、現物・現場型のものづくり支援ツールとしてVCADシステムが広く普及することを目指していく。

参考文献

- [1] <http://vcad-hpsv.riken.jp/>
- [2] F. Labelle and J.R. Shewchuk, “Isosurface Stuffing: Fast Tetrahedral Meshes with Good Dihedral Angles”, SIGGRAPH 2007.
- [3] <http://www.opencascade.org/>
- [4] <http://www.vtk.org/>
- [5] <http://www.paraview.org/New/index.html>