

V-FEM統合システムの開発と非線形構造解析への適用

Development of V-FEM Integrated System and Its Application to Non-linear Structural Analysis

高村 正人*, 村井 哲郎*

Masato Takamura*, Tetsuro Murai*

*VCAD System Support Team, VCAD System Research Program, RIKEN
takamura@riken.jp

Abstract

V-FEM is a group of FEM simulation software developed to meet diverse CAE needs in industry by making use of the results achieved by VCAD research activities in the field of structural analysis. V-FEM Integrated System (“V-Femis”) is a newly developed system, which allows the use of all V-FEM utilities and the handling of large-scale measured data including multi-material and internal structures. An outline of the non-linear structural analysis solver “V-Struct” and examples of its applications are also presented in this article.

1. はじめに

V-FEMは、VCADで扱う形状データ（vobj形式、vcad形式等）を入力とする構造解析系の有限要素法（Finite Element Method, FEM）ソフトウェアの総称であり、下記のような対象への適用を想定して開発されている。

- (1) 板成形等の塑性加工シミュレーション
- (2) 金属の座屈現象等を想定した大変形構造解析
- (3) 腐食や亀裂の発生等、経年劣化を経た構造部材の強度解析
- (4) 鋳造過程の凝固及び熱収縮シミュレーション
- (5) 材料設計のための多相材料の弾塑性構造解析
- (6) 人体の骨と筋肉の動作解析

V-FEMは、上記の各解析対象を扱うために大変形や接触が考慮できるFEMソルバー、VCADの特長である内部欠陥やマルチマテリアルを使えるメッシュャーとその関連ツール、及びそれらすべてを扱える統合環境としてのV-FEM統合システム（V-FEM Integrated System, 以下「V-Femis」とする）により構成される。本稿では、V-Femisのコンセプトと主な特長を述べるとともに、V-FEMソルバー群の中のひとつとして上記（1）～（3）の用途に適用することを目的に開発された有限要素法ソフトウェアV-Structについて解説する。

2. V-Femisの概要

2.1. V-Femisのコンセプト

VCADシステムでは、従来CAEで使われている設計CADデータのみならず、X線CTなどによるボリューム測定データを直接扱うことが出来る。VCADを用いた有限要素法解析でも、ボリュームデータからのダイレクト有限要素メッシュ生成技術（Vcat2hex, Vcat2tets）や、マルチマテリアル対応のメッシュ簡略化技術（Simptets）、内部構造、マルチマテリアルといった測定データ特有のモデルに対応した有限要素法ソルバー（V-Struct, V-Shrink, V-MultiMat, V-Biomech）など、ボリューム測定データを見据えた要素技術が開発されている。

これらの要素技術を実問題に適用するには、各要素技術を連携させ、メッシュ生成条件、解析条件の付与や結果の可視化などの処理を行うプリ・ポストシステムが必要となる。しかし、ボリューム測定データを扱うプリ・ポストシステムには、「非常に大規模なボリュームデータのハンドリング」「マルチマテリアル、内部構造の詳細な取り扱い」「測定データからのデータマッピング」など、従来のCAEとは異なる特徴的な機能が要求されるため、VCAD専用の有限要素法解析用プリ・ポストシステムの開発が必要不可欠となっている。

また、メッシュ生成やソルバーなどの各要素技術は現在も精力的に研究開発が進められており、バージョンアップや新ソフトウェアのリリースが頻繁に行われている。VCADシステムの実問題への適用を常に最新の研究成果を用いて行うには、各要素技術の変更、追加に迅速に対応できる拡張性、汎用性の高い統合システムが望ましい。

これらの要求を踏まえ、現在普及推進チームでは、以下のコンセプトのもとにVCAD専用有限要素法解析用プリ・ポスト統合システムV-Femisの開発を行っている。

- VCADの特徴であるマルチマテリアル、内部構造をもつ大規模ボリュームデータを主対象とし、扱いに必要な機能を備えていること。
- VCADで開発された有限要素法解析の要素技術が連携、統合化されたシステムであること。
- 各要素技術の変更、追加に迅速に対応できる柔軟な統合化を実現すること。

2.2. XMLベースのマルチマテリアル対応共通形状データフォーマット

V-Femisでは、形状データフォーマットとしてXMLを用いたVTXと呼ばれる独自方式を新たに採用している。VTX形式はXMLの柔軟性を生かして様々な情報を保持することができ、拡張も容易である。形状データに加えて解析条件や材料定数、データの作成履歴などもXMLで記述されており、項目の追加、変更があった場合もXMLの枠組みで自由に拡張することが可能である。また形状データとともにマテリアルIDを基本情報として保持しており、全ての処理はマテリアル単位で行うことが可能である。

2.3. コンポーネントベース構成とXML制御ファイルによる動的な動作制御

V-Femisでは、特定のソルバー専用の機能は用意されていない。より抽象度の高い機能部品（コンポーネント）の集合が用意されており、各ソルバーはXML制御ファイルを用いてどのコンポーネントをどのように用いるかを指示する。例えば「節点に変位境界条件を与える」という機能は、XML制御ファイルに変位境界条件として「節点に1x3配列の実数値を与える」というコンポーネントを使用する、と記述することにより動的に実現される。これにより、XML制御ファイルを編集するだけでプログラム本体を一切変更することなく機能の追加、変更が可能である。XML制御ファイルは図1に示すようにソルバーごと、メッシュャーごとに定義されており、またコンポーネントはメッシュパラメータ設定から解析条件設定、可視化方法定義まで用意されている。ソルバー、メッシュャーの追加やバージョンアップがあった場合も基本的にXML制御ファイルの編集だけで対応可能であり、非常に拡張性、汎用性の高い構成となっている。

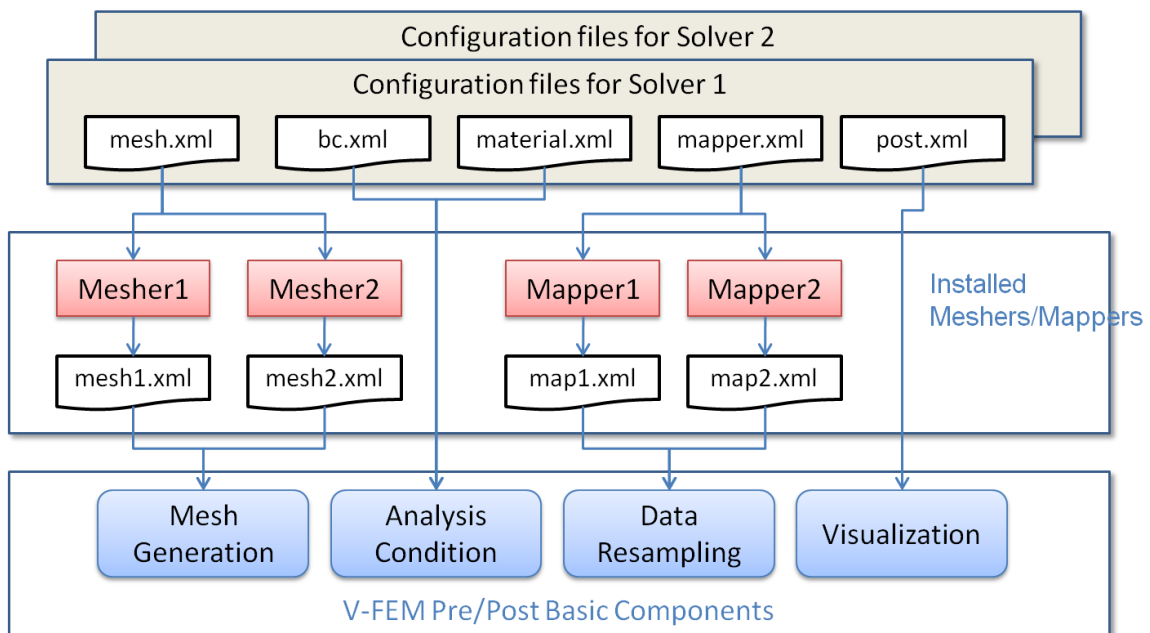


図1 V-Femis 構成図

1.4. データリサンプリング支援機能

ものの形状、内部構造および物性を統一的に扱うVCADでは、用途に応じたデータ変換の際に、外形だけでなく内部場をも引き継ぐ必要がある。例えばX線CTデータをもとに有限要素法解析を行う場合、CT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でCTデータのリサンプリングを行うことにより、内部物性が反映された解析を行うことができる。このようなリサンプリング機能はボリュームデータを扱うVCADにおいて特徴的な要素技術であり、V-Femisではリサンプリング実行支援コンポーネントとして、「複数ボリューム、点群、有限要素メッシュの同時表示」「位置合わせ用一時移動機能」などを用意している。リサンプリング処理プログラム自体は他の要素技術と同様、XML制御ファイルを介して外部ソフトウェアとして組み込まれる。図2は、CTデータより形状を作成した有限要素メッシュにCT値をマッピングした例である。左がCTデータ、右が有限要素メッシュである。

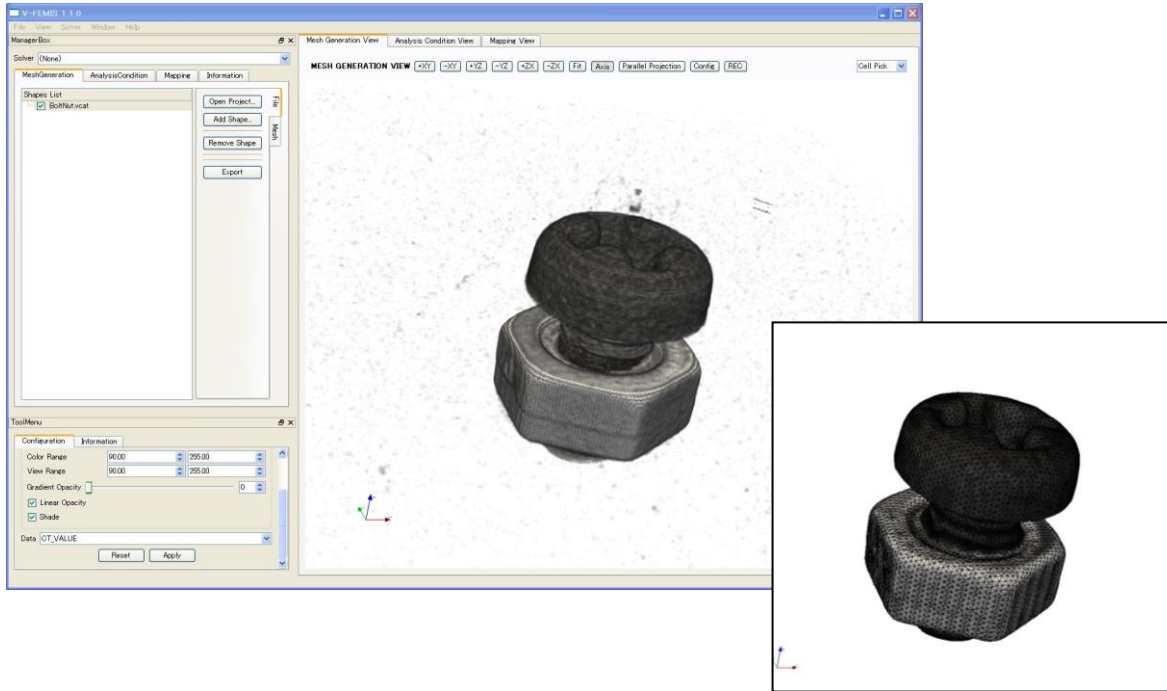


図2 CTデータからのリサンプリング例

3. 非線形構造解析ソルバーV-Struct

3.1. 概要

V-Structは、1980年代以降理化学研究所にて開発されてきたプレス成形シミュレーション技術[1]において採用されている静的陽解法に基づく有限要素法ソルバーであり、概要は以下のとおりである。

弾塑性大変形問題を取り扱うためにUpdated Lagrangianに基づいた定式化を基礎式としており、速度形の静的釣り合い方程式及び力学的境界条件が仮想仕事の原理式により表現される。Cauchy応力テンソルのJaumann速度 $\dot{\sigma}^J$ とストレッチングテンソル D の関係は、関連流れ則に基づく異方性構成式で記述される。時刻 t から $t+dt$ までの間の小さな時間増分の間は応力速度、ひずみ速度が一定であると仮定して、

$$du = vdt, d\sigma^J = \sigma^J dt, dD = Ddt \quad (1)$$

が成り立つとすると、有限要素による離散化過程を経て最終的に増分形の線形方程式、

$$KdU = dF \quad (2)$$

が得られる。ここで、 K は弾塑性の接線剛性マトリクスである。式(1)で表される線形性が保たれるための時間増分量は、 r_{\min} 法[2]により求められる。

陽的な解法でありかつ静的つり合いを精度よく解くことができることから、後述するような高度な非線形性を有する構造解析においても、ロバストかつ精度よく解き進むことができる点が特長である。

有限要素としては、三角形（1次，2次），四角形の各シェル要素，四面体（1次，2次），六面体の各ソリッド要素それぞれに対して数種類の積分方法が用意されている。また，複合要素の導入により，次数の低い要素を用いて非圧縮性材料の解析を行う際の精度向上が図られている。

接触解析は，変形体同士及び剛体と変形体との間で可能であり，剛体との接触においては，長田パッチにより剛体の形状を精度よく再現することができる。

その他，節点変位拘束（強制変位），節点荷重，等分布荷重といった基本的な条件設定のほかに，MPC（Multi Point Constraint）やばね要素等，実用的な構造解析をサポートする機能も備えている。（本節で紹介した機能には，理研ベンチャー（株）トライアルパークより提供される商用版ソフトウェア「TP-STRUCT」限定の機能が含まれる）

3.2. 構造解析事例

V-Struct（TP-STRUCT）による油圧ショベル転倒時の変形シミュレーション事例を図3に示す。ここでは，前節で述べた様々な要素種や条件設定機能を活用するとともに，静的陽解法の特性を活かした短時間かつロバストな解析が実現できている。

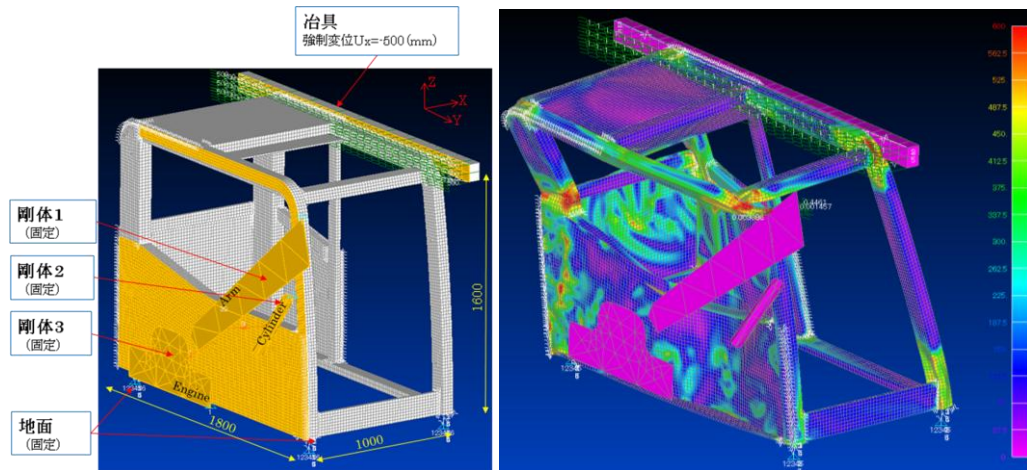


図3油圧ショベル転倒時変形シミュレーション（右は相当応力分布）

4. 今後の課題と展望

4.1. V-Femisの課題と展望

今後は長田パッチなど，最新の研究成果を取り入れたコンポーネントを増やしてさらなる機能拡充を図るとともに，ユーザビリティの向上を行う予定である。

4.2. V-Structの課題と展望

3.2節で紹介した座屈現象への適用等，他の汎用コードにはない強みをより確かなものにするための開発として，分岐座屈解析等の導入を図っていく。

4.3. まとめ

本稿で解説したソフトウェアの開発は，VCADプロジェクトの研究成果としての他にはない優れた要素技術を，企業等外部で活用するために必要十分な機能を持ったソフトウェアとして整備・統合することを基本コンセプトとしている。今後はより具体的な解析対象への適用事例を充実させるとともに，一般企業や理研ベンチャーへ普及と発展のバトンをつなぐことを目標としていく。

5. 引用文献

- [1] Banu, M., Takamura, M., Hama, T., Naidim, O., Teodosiu, C. and Makinouchi, A. : Simulation of Springback and Wrinkling in Stamping of a Dual-phase Steel Rail-Shaped Part, *J. Material Process. Technol.*, 173-2 (2006-4), 178-184.
- [2] Y. Yamada, N. Yoshimura and T. Sakurai, Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by finite element method, *Int. J. Mech. Sci.*, 10:343-354, 1968.