



地層処分施設の数値モデル構築過程の自動化

飯田, 健太
竹山, 智英
高山, 裕介
橘, 伸也

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 29:1-12

(Issue Date)

2025-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100496645>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496645>



地層処分施設の数値モデル構築過程の自動化

Automation of the process of building numerical models of geological disposal facilities

飯田 健太¹⁾

Kenta Iida

竹山 智英²⁾

Tomohide Takeyama

高山 裕介³⁾

Yusuke Takayama

橘 伸也⁴⁾

Shinya Tachibana

概要: 地層処分事業の進展に伴い, 地層処分施設の安全評価を目的とした解析が進められているが, これらの解析モデルの多くは現在も手作業で構築されている. 今後, 多種多様な条件を考慮した複雑な解析が求められる中で, 解析モデルの構築作業の自動化は重要な課題の一つである. 本研究では, 多種多様な形式のデータを自動で適切に変換・統合する技術である DPP(データ処理プラットフォーム)を用いて, 有限要素法での計算のための地層処分施設(高レベル放射性廃棄物処分場)を再現したモデルを自動生成するプログラムを開発した. これにより, 包括的技術報告書で検討されているような標準的な地層処分施設であれば, プログラムに詳しくない技術者であっても3次元モデルを自動生成できるようになった. また, 限定された条件下ではあるが, 開発されたプログラムによって生成されたモデルを用いた有限要素法での計算が可能となった.

キーワード: 地層処分施設, DPP(データ処理プラットフォーム), 有限要素法

1. はじめに

原子力発電は温室効果ガスなどによる地球温暖化問題などの観点から, さらに他国に依存しないエネルギー保有の観点から地球環境に優しい発電方法として脚光を浴びてきた. 2011年3月11日の東日本大震災およびそれに伴い発生した福島第一原子力発電所の事故以降, 日本での発電電力における原子力発電が占める割合は減少したものの, 原子力発電は未だエネルギー供給源として重要な役割を果たしている.

原子力発電に関する難しい問題の一つとして, 発電後に発生する放射性廃棄物をどのようにして処理するかという問題がある. 放射性廃棄物とは, 放射能物質を含む廃棄物の総称であり, 高レベル放射性廃棄物および低レベル放射性廃棄物に大別される. 日本では, 高レベル放射性廃液とガラス固化体を高レベル放射性廃棄物と呼んでいる. 高レベル放射性廃液は, 原子力発電で使い終えた燃料を再処理し, 回収したウランやプルトニウムなどを再び燃料に加工して有効利用するための再処理工程にて発生する. この廃液をガラス原料に混ぜ合わせて高温で融かし, ステンレス製容器に入れて固めることでガラス固化体となる.

高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体を人間環境への影響がないように永久的に隔離するために様々な方法が提唱されてきたが, 人間が容易に接近できない地下深くに埋設する方法が基本方針とされてき

た。高レベル放射性廃棄物については、数万年以上といった長期にわたり人間の生活環境から隔離する必要があることから、地下 300m より深い地層中での地層処分が計画されている。

現在、地層処分事業の進展に伴い、処分場の閉鎖前および閉鎖後の長期的な安全評価を目的とした解析が進められている。安全な地層処分を実現するためには、今後、多種多様な条件を考慮した解析や、広範囲を対象とした複雑な解析が必要となる。しかし、このような解析を行う際には、モデルの構築に多くの時間と労力がかかることが予想される。そのため、地層処分施設のモデル構築過程を自動化することは、今後の重要な課題の一つである。

以上の背景を踏まえ、本研究では、地層処分施設(高レベル放射性廃棄物処分場)を再現した有限要素法での計算のためのモデルを自動生成できるプログラムの開発を目的とする。プログラムの開発には DPP(データ処理プラットフォーム)¹⁾を用いた。DPP とは、理化学研究所によって開発されたデータ変換に特化したプログラム群のことであり、多種多様な形式のデータを自動で適切に変換・統合し必要な出力を得るシステムの開発が容易であるといった特徴がある。これまで、国土交通データプラットフォームでダウンロード可能なボーリングデータや基盤地図情報ダウンロードサービスの数値標高モデルなどのデータを自動で変換・統合し、汎用的な地盤モデルを作成、有限要素モデルを出力するプログラム²⁾や、橋梁やトンネル、港湾構造物の 2 次元 CAD 図面から 3 次元モデルを自動構築するプログラム³⁾⁴⁾などが DPP を用いて開発されている。

2. プログラム概要

本プログラムでモデルを自動生成する流れを図 1 に示す。

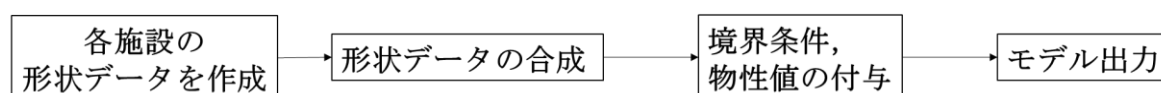


図 1 プログラムでの処理の流れ

まず、包括的技術報告⁵⁾で検討されている施設の形状を参考に、地層処分施設の各施設の形状データを作成する。その後、作成された形状データを合成する。その後、境界条件や物性値を付与し、データを出力したい形式へと変更することでモデルが出力される。

これらの処理のうち、データ形式を変更してモデルを出力する処理は DPP の機能に含まれている。そのため、本研究では新たに各施設の形状データを作成する関数、それらの形状データを合成する関数、境界条件や物性値を付与する関数を作成した。

形状データの作成方法について述べる。本プログラムでは、2 種類の方法を併用することで形状を作成し、3 次元モデルを構築している。

1 つ目は、DPP に既存の関数を利用する方法である。DPP には、面の形状データやその面を押し出す軌道を定義することで形状を作成し、3 次元モデルを構築する機能がある。この方法を用いた場合、DPP が自動でデータ変換を行うため、形状データを作成するためのプログラム開発時間の短縮が可能となる。しかし、作成できる形状には限りがあり、複雑な形状の作成には不向きである。本プログラムでは、この方法を用いて、円柱で表現可能なガラス固化体など、単純な形状の施設の形状データを作成している。

2 つ目は、点・線・面・立体を定義する方法である。この方法では、点の空間座標、線を構成する点、面を構成する線、立体を構成する面をそれぞれ指定することで、形状データを作成している。この方法は自由度が高く、複雑な形状を作成することができるが、形状を構成する要素を全て定義する必要があるため、プログラム開発に時間がかかるという欠点がある。本プログラムでは、この方法を用いて、処分坑道など、既存の関数では形状を表現できない施設の形状データを作成している。

これらの方法を用いて作成された形状データを DPP に既存の関数を用いて合成することで、地層処分施設のモデルが構築される。

境界条件や物性値の付与について、本プログラムでは、有限要素法での計算に向けた第一段階として、地層処分施設の周辺岩盤のモデルに対して弾性解析を行うための境界条件や物性値を設定できるような仕様とした。

まず、変位境界条件として、岩盤のモデルの上面、側面、底面において、それぞれ水平方向、鉛直方向、奥行方向の変位を固定するかどうかを設定できる。また、応力境界条件として、モデルの上面に載荷する荷重の値を設定できる。さらに、物性値として、岩盤の密度や弾性係数、ポアソン比を設定できる。これらの弾性

係数とポアソン比を基に、以下の方法でラメ定数を計算する。

$$\tilde{\lambda} = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (1)$$

$$\tilde{\mu} = \frac{E}{(1 + \nu)} \quad (2)$$

ここに、 $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\mu}$:ラメ定数, E :弾性係数, ν :ポアソン比である。

3. 3次元モデルの出力

プログラムを実行すると、地層処分施設の3次元モデルが出力される。図2に示すように、モデルは支保工、埋め戻し材、人工バリア、岩盤の4つの要素から構成され、ユーザーが入力したデータをもとに廃棄体の定置方法や周辺岩盤の種類に応じた4種類の地層処分施設のモデルが自動生成される。

プログラムによって自動生成された3次元モデルを示す。図3、図4は廃棄体定置方法が縦置き・ブロック方式で岩種が深成岩類および先新第三紀堆積岩類の場合のモデル、図5、図6は廃棄体定置方法が縦置き・ブロック方式で岩種が新第三紀堆積岩類の場合のモデル、図7、図8は廃棄体定置方法が横置き・PEM方式で岩種が深成岩類および先新第三紀堆積岩類の場合のモデル、図9、図10は廃棄体定置方法が横置き・PEM方式で岩種が新第三紀堆積岩類の場合のモデルである。

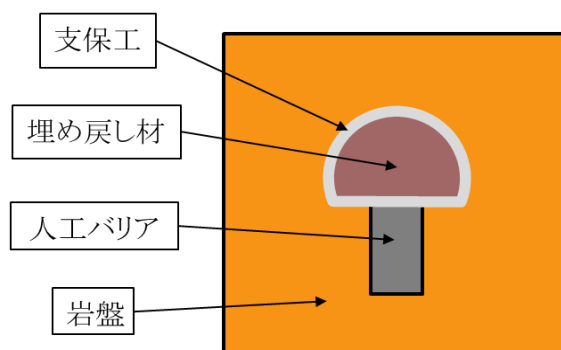


図2 地層処分施設モデルの構成

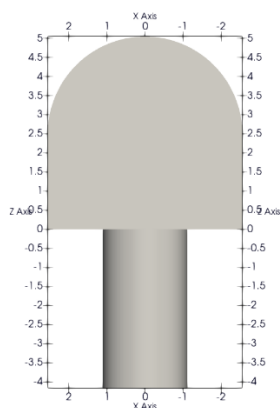


図3 モデル(岩盤以外、縦置き・ブロック方式、深成岩類および先新第三紀堆積岩類)

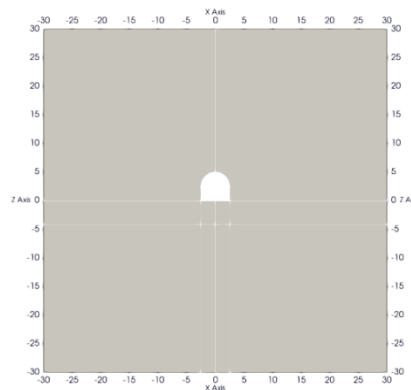


図4 モデル(岩盤、縦置き・ブロック方式、深成岩類および先新第三紀堆積岩類)

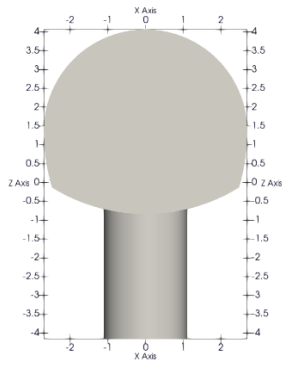


図 5 モデル(岩盤以外, 縦置き・ブロック方式, 新第三紀堆積岩類)

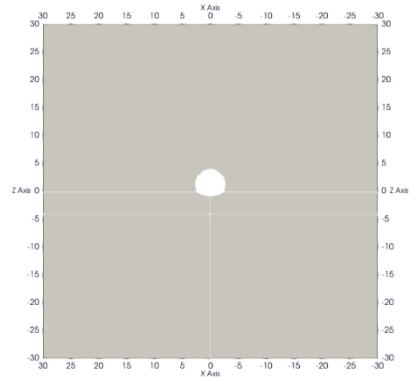


図 6 モデル(岩盤, 縦置き・ブロック方式, 新第三紀堆積岩類)

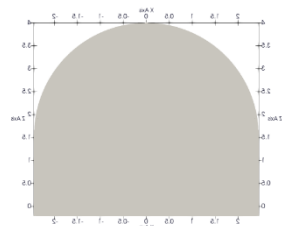


図 7 モデル(岩盤以外, 横置き・PEM 方式, 深成岩類および先新第三紀堆積岩類)

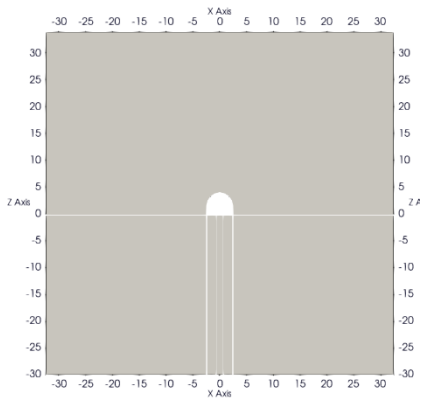


図 8 モデル(岩盤, 横置き・PEM 方式, 深成岩類および先新第三紀堆積岩類)

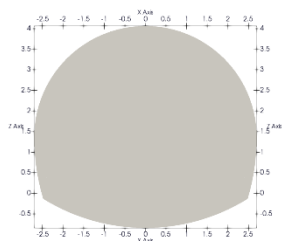


図 9 モデル(岩盤以外, 横置き・PEM 方式, 新第三紀堆積岩類)

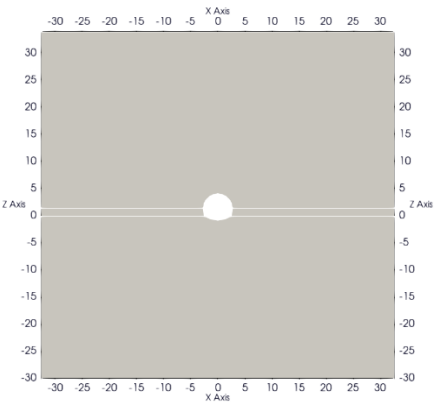


図 10 モデル(岩盤, 横置き・PEM 方式, 新第三紀堆積岩類)

4. 処分坑道の力学的解析

(1) はじめに

本研究で開発したプログラムにより, 地層処分施設を再現したモデルの自動生成が可能となった. 本章では,

生成された岩盤モデルを用いて有限要素法による処分坑道の簡易的な力学的解析を実施し、境界条件や物性値を反映した計算が正常に行えるかどうかを確認した。この結果を基に、力学的解析に対するモデルの有効性を図り、今後の高度な解析に向けた基盤を築くことを目的とする。

(2) 解析概要

本研究では、DACSAR-I4 を用いた処分坑道を対象とする力学的解析を行うことで、プログラムによって出力されたモデルの数値解析に対する有効性を評価する。DACSAR-I4 とは、メッシュ生成を目的としたオープンソフトウェアである Gmsh⁶⁾に対応した geo 形式のファイルを基にした非連成の 2 次元・3 次元弾性体の有限要素解析が可能なプログラムである。

本研究では、図 4、図 6、図 8、図 10 に示す処分坑道周辺岩盤のモデルをインプットファイルとして、DACSAR-I4 にてモデルの上面に荷重を載荷した場合の坑道周辺の変形量の計算を行った。本解析の主な目的は、構築されたモデルが数値解析に適用できるかどうかを評価することであり、このような簡易的な解析であったとしても目的は達成できると考えた。

(3) 解析条件

坑道の変形シミュレーションにおいて設定した解析条件を記す。

岩盤の物性値は、日本原子力研究開発機構(JAEA)による坑道の力学的検討に用いられた値⁷⁾を参考に、表 1 のとおり設定した。

解析領域については、空洞の最大幅に関わらず 60m に統一した。また、応力境界条件として、解析領域の上面に荷重を載荷する。載荷する荷重は深度 1000m に位置する岩盤に作用する荷重を想定し、その値を設定した。変位境界条件は表 2 に示すとおりとする。

表 1 岩盤の特性

パラメータ名	設定値
飽和密度 ρ (Mg/m ³)	2.67
弾性係数 E (MPa)	37000
ポアソン比 ν	0.25

表 2 変位境界条件

境界	水平方向	鉛直方向	奥行方向
上面	自由	自由	固定
側面	固定	自由	固定
底面	自由	固定	固定

(4) 解析結果

はじめに、図 4 に示した岩盤モデルをもとに解析を行った。その結果を図 11 に示す。図 11 では、変位量が色分けして表示されている。解析結果より、変位量が連続的な値を取っていることが確認できた。この結果から、メッシュ生成が適切に行われ、荷重を適切にモデルに反映させることができたようになったと考えられる。

続いて、境界条件が適切に付与されているかどうかについて確認した。まず、変位境界条件について、解析領域の上面、左側面、右側面、底面において、それぞれ水平方向、奥行方向、鉛直方向の変位量を確認することで適切に付与されているかどうか確認した。上面での各変位量を図 12、左側面での各変位量を図 13、右側面での各変位量を図 14、底面での各変位量を図 15 に示す。

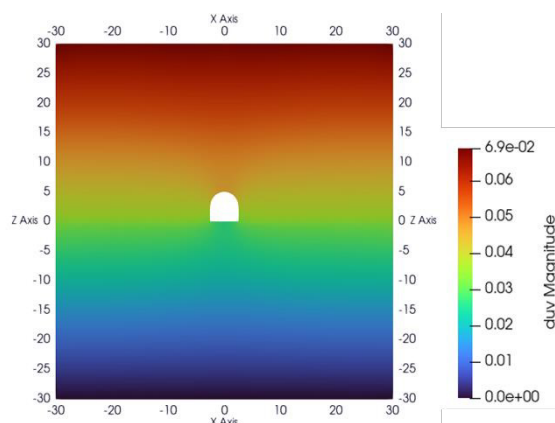


図 11 解析結果(縦置き・ブロック方式, 深成岩類および先新第三紀堆積岩類)

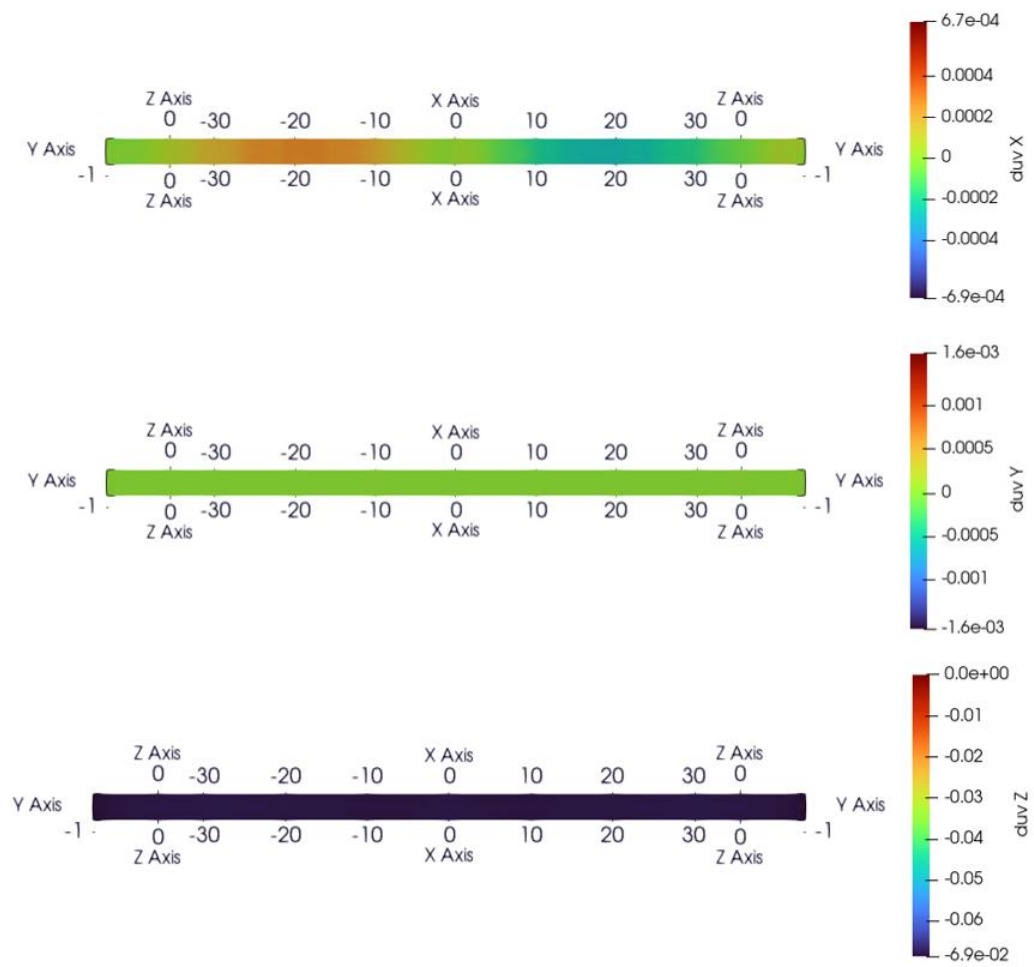


図 12 上面の変位量(上から水平方向, 奥行方向, 鉛直方向)

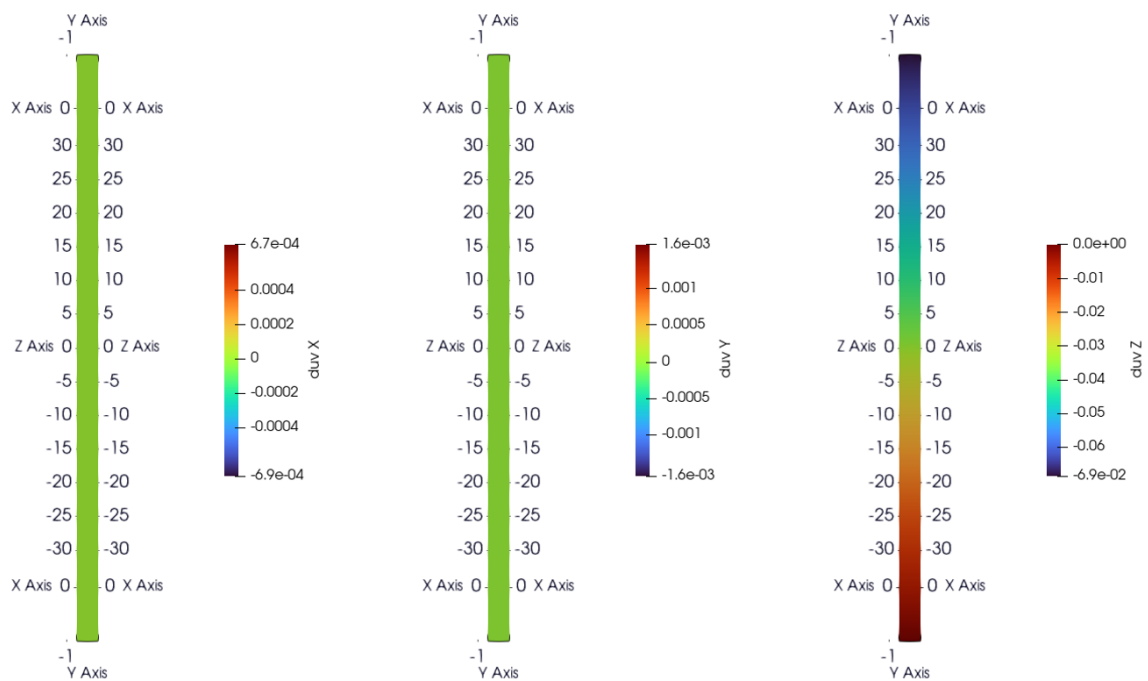


図 13 左側面の変位量(左から水平方向, 奥行方向, 鉛直方向)

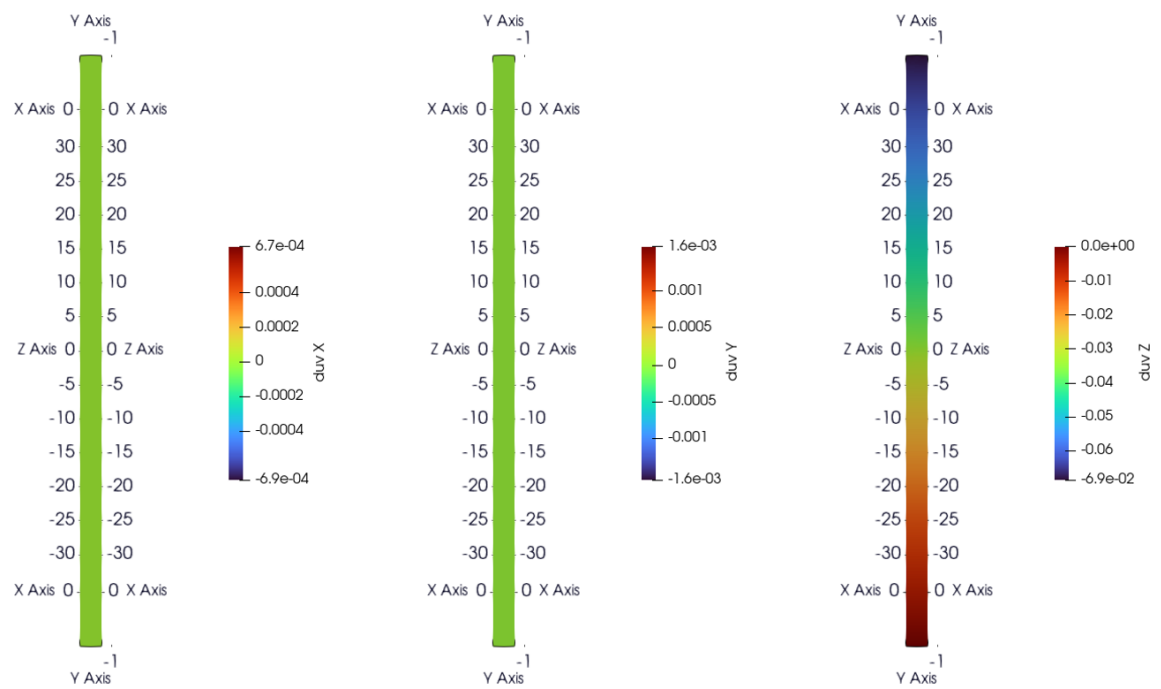


図 14 右側面の変位量(左から水平方向, 奥行方向, 鉛直方向)

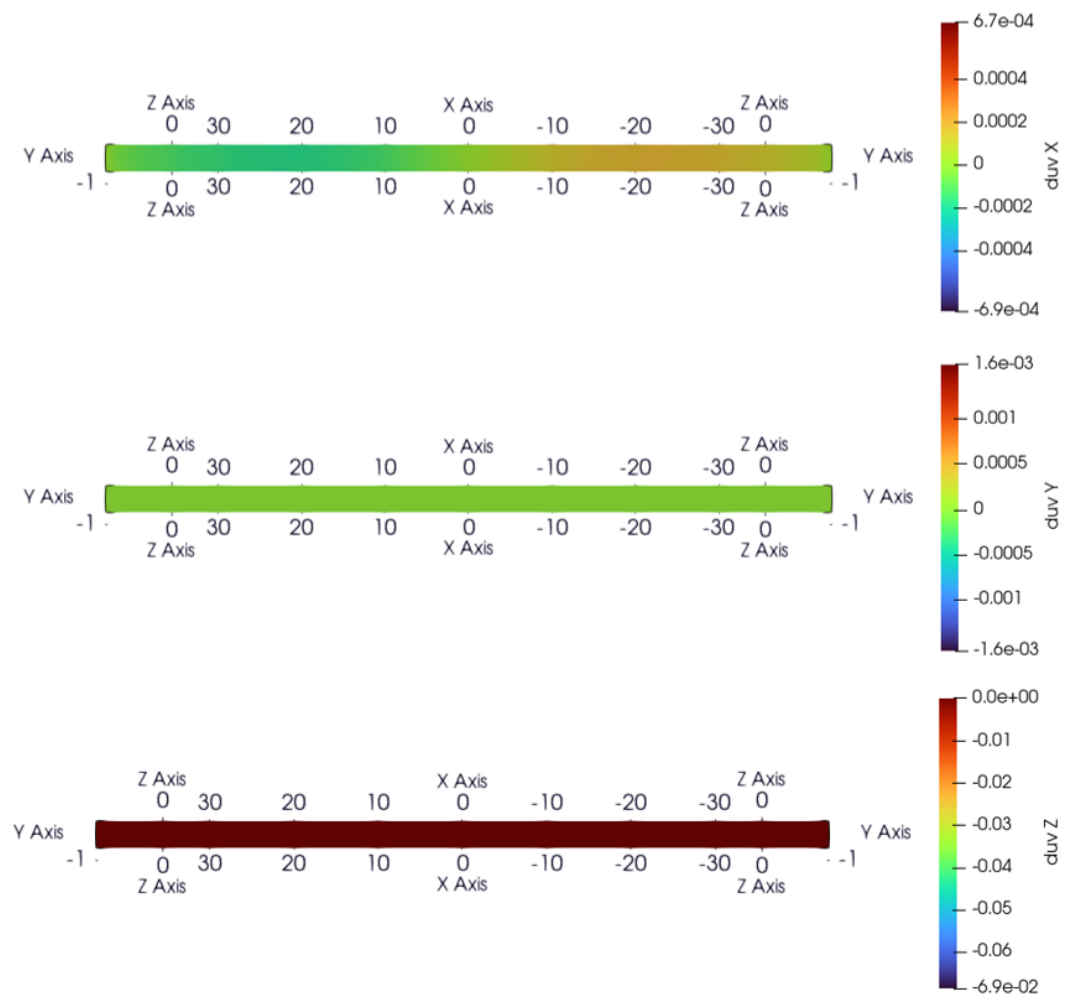


図 15 底面の変位量(上から水平方向, 奥行方向, 鉛直方向)

図 12 より, 上面では奥行方向の変位が固定されていることが分かる. 図 13 および図 14 より, 側面では水平方向と奥行方向の変位が固定されていることが分かる. 図 15 より, 底面では鉛直方向と奥行方向の変位が固定されていることが分かる. 以上の結果から, 適切に変位境界条件が付与されていることが確認できた.

次に, 応力境界条件が適切に付与されているかどうかを確認した. 確認方法として, 解析領域の上面に載荷する荷重を半分にして解析を実施し, 変位量がどのように変化するかを調べた. 解析結果を図 16 に示す. 図 11 と比較して, 変位量が半分程度に減少していることが確認できた. この結果より, 荷重がモデルに適切に載荷されていると考えられる. したがって, 応力境界条件についても適切に付与されていることが確認できた.

以上の結果から, 境界条件がモデルに適切に付与されていることが確認できた.

最後に, 他の坑道形状の岩盤のモデル(図 6, 図 8, 図 10)についても同様の条件の下で解析を実施した. 廃棄体定置方法が縦置き・ブロック方式で岩種が新第三紀堆積岩類の場合の解析結果を図 17, 廃棄体定置方法が横置き・PEM 方式で岩種が深成岩類および先新第三紀堆積岩類の場合の解析結果を図 18, 新第三紀堆積岩類の場合の解析結果を図 19 に示す. すべての形状のモデルにおいて, 変位量が連続的な値を取っていることが確認できた. また, 各モデルについて応力境界条件および変位境界条件が適切に付与されているかどうか確認した結果, すべてのモデルにおいて適切に境界条件が付与されていることが確認された.

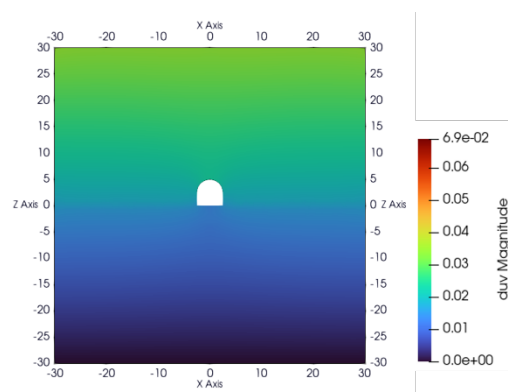


図 16 解析結果(荷重を半分にした場合)

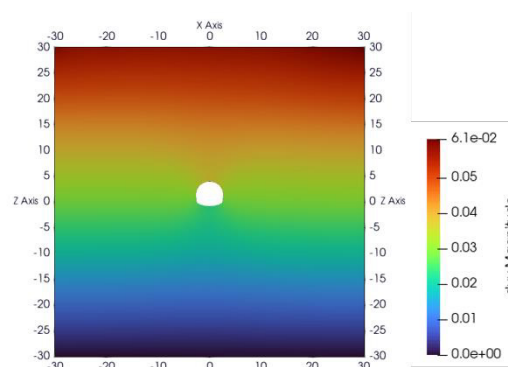


図 17 解析結果(縦置き・ブロック方式, 新第三紀堆積岩類)

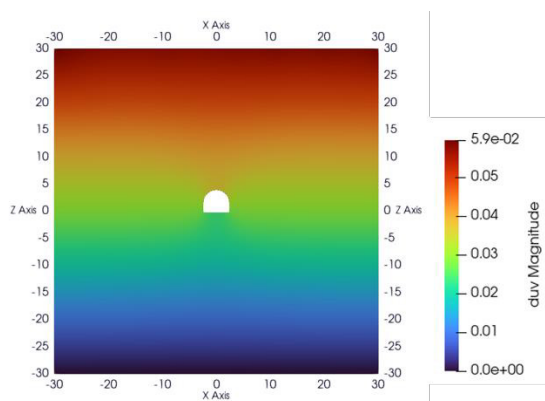


図 18 解析結果(横置き・PEM 方式, 深成岩類および先新第三紀堆積岩類)

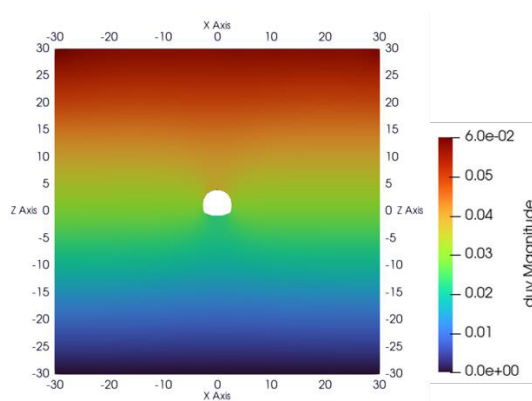


図 19 解析結果(横置き・PEM 方式, 新第三紀堆積岩類)

以上の結果より, 本プログラムを用いて自動生成された岩盤に関するモデルは力学的解析に適用できることが確認できた.

5. モデルの仕様変更の自動化

(1) はじめに

本研究で開発したプログラムにより, 有限要素法による計算が可能な地層処分施設のモデルを自動生成す

ることが可能となった。ところで、今後地層処分事業が進展するにつれ、様々な条件下での解析が求められると考えられる。また、現在の地層処分施設の仕様は暫定的なものであり、将来的に変更となる可能性がある。このような背景を踏まえ、本プログラムは、施設の形状や仕様を柔軟に変更できるよう設計した。これにより、ユーザーは工数をかけることなく仕様の変更を自動でモデルに反映させることが可能となる。以下に、本プログラムに付与した機能の一例を記す。

(2) 複数個の廃棄体の定置

本プログラムでは、処分坑道のモデルを構築する際、廃棄体定置数を設定することで、複数個の廃棄体を定置することを想定したモデルを出力することが可能である。

廃棄体定置方法が堅置き・ブロック方式であり、岩種が深成岩類および先新第三紀堆積岩類である場合のモデルにて、廃棄体を 5 つ定置することを想定した。このときのモデルを図 20、その断面図を図 21 に示す。廃棄体を複数個定置した場合でも、適切なモデルが出力されていることが確認できる。

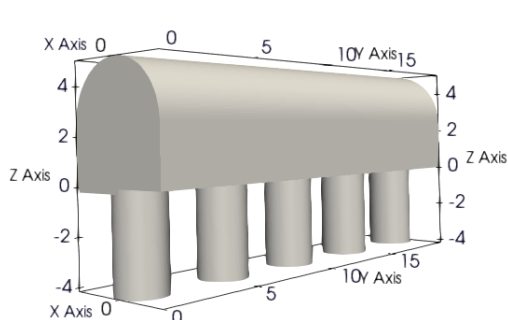


図 20 モデル(廃棄体を 5 つ定置)

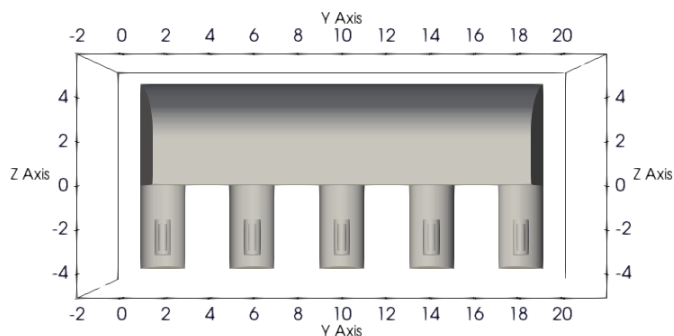


図 21 モデル断面図(廃棄体を 5 つ定置)

(3) 廃棄体定置間隔の変更

堅置き・ブロック方式では、一定の間隔で廃棄体を定置する必要がある。廃棄体定置間隔について、現在は深成岩類および先新第三紀堆積岩類で 4.44m、新第三紀堆積岩類で 6.66m と設定されている⁵⁾が、今後の技術開発などにより、この間隔が変更となる可能性がある。そこで、本プログラムは、廃棄体定置間隔を変更できる仕様とした。例として、廃棄体定置間隔を設定されている値の 3 倍の値に変更となった場合を考える。このとき出力されたモデルを図 22 に示す。定置間隔の変更前(図 20)と比較して、間隔が広がっていることが確認できた。

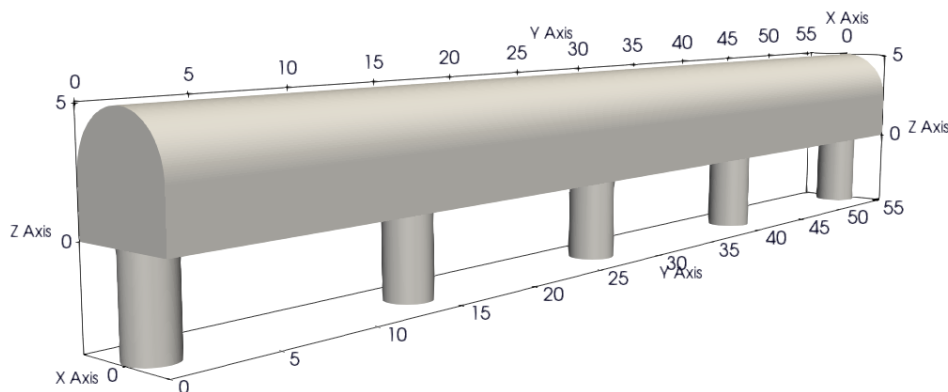


図 22 地層処分施設モデル(廃棄体定置間隔を 3 倍に変更)

(4) 施設の仕様変更

今後、廃棄体定置間隔と同様に、処分場の各施設においても寸法などの仕様が変更となる可能性がある。そのため、本プログラムでは、施設の大きさやコンクリートの厚さなどの施設の仕様を変更できる仕様とした。こ

れにより、施設の形状に大きな変更がない限り、若干の仕様変更については即座に対応することが可能となる。

施設の寸法などの仕様を変更したい場合、ユーザーは坑道の大きさなど出力したいモデルの仕様に関する情報を記述する必要がある。プログラムには初期条件として、包括的技術報告⁵⁾に記載されている施設の寸法が設定されており、値を入力せずにプログラムを実行した場合、包括的技術報告に記載されているものと同じ寸法のモデルが出力される。

仕様変更の例として、廃棄体定置方法が横置き・PEM 方式であり、岩種が深成岩類および先新第三紀堆積岩類の処分坑道にて、人工バリアの PEM 容器の厚さが変更となった場合を想定した。現在、PEM 容器の厚さは 28mm に設定されている⁵⁾が、これが 10 倍の 280mm に変更されたと仮定した。このとき出力されたモデルの断面図を図 23、PEM 容器の厚さ変更前のモデルの断面図を図 24 に示す。変更前と比較して、PEM 容器が厚くなっていることが確認できた。

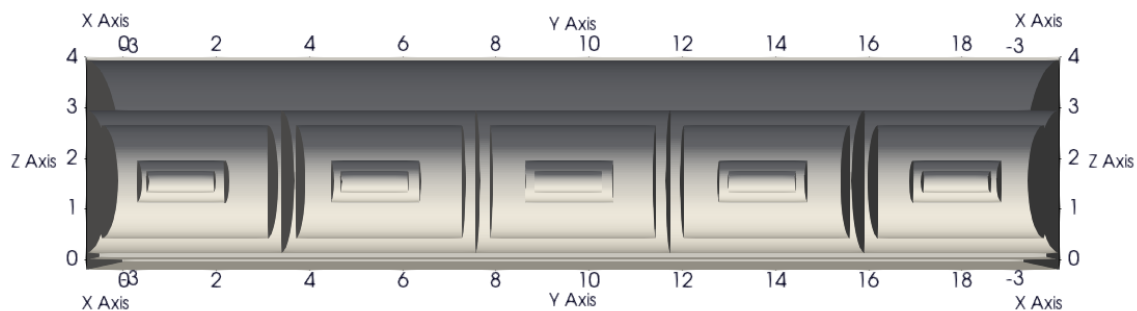


図 23 モデル断面図(PEM 容器厚さ 10 倍)

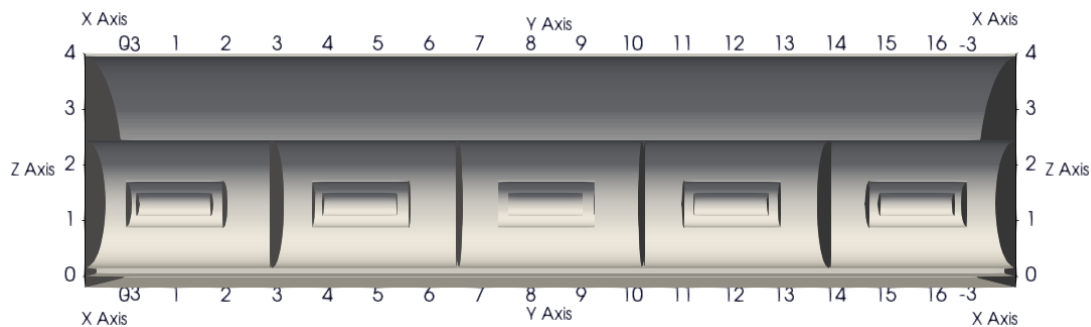


図 24 モデル断面図(PEM 容器厚さ変更前)

6. 結論と今後の展望

本研究では、DPP を用いて、地層処分施設(高レベル放射性廃棄物処分場)のモデルを自動生成するプログラムを開発した。その後、開発したプログラムを用いて、有限要素法による簡易的な力学的解析を実施した。その結果、数値解析が可能なモデルが正常に出力されることが確認できた。これにより、限定された条件下ではあるものの、ユーザーが自動的に地層処分施設のモデルを生成することが可能となった。地層処分施設を再現したモデルを自動生成するプログラムを開発するという本研究の目的については、一定の成果が得られたと考える。

今後の展望として、主に 3 つの課題に取り組みたい。

1 つ目に、処分坑道など岩盤以外の施設のモデルに対しても境界条件を設定できるようにしたい。現在、岩盤以外の施設のモデルには境界条件や物性値を設定できず、数値解析に利用できない。実施できる解析の幅を広げるために、これらのモデルにも境界条件を設定できるよう開発を進める必要がある。

2 つ目に、形状データを作成する関数の開発にかかる時間を短縮したい。現状、形状データを作成する際に DPP に既存の関数を使用しない場合、形状を構成する要素を一つずつ定義する必要があり、関数の開発

に多くの時間がかかっている。例えば、線の始点と終点の座標値を基に自動的に面や立体を定義できる関数を開発することで、形状データを作成する関数の開発時間を短縮し、プログラム開発の効率化を図りたい。

3 つ目に、より高度で実用的なモデルを自動生成できるプログラムの開発に取り組みたい。現状のプログラムでは、地層処分施設全体を再現したモデルなどは生成できない。このようなモデルも自動生成できるプログラムに改良することで、今後必要となる広範囲を対象とした複雑な解析などにも対応できる仕組みを整えたい。

参考文献

- 1) 大谷英之, 記述形式の自動変換に基づく異種データ連携における型定義の自動化に関する研究, 地理情報システム学会講演論文集, No.28, ROMBUNNO.F-5-4, 2019.
- 2) Takeyama, T., O-Tani, H., Oishi, S., Hori, M. and Iizuka, A., Automatic Construction of Three-Dimensional Ground Model by Data Processing, Transactions on Mechatronics, Volume:26, pp.2881-2887, 2021.
- 3) 大谷英之, 自然言語類似の情報表現を媒介とする異種データ連携における統合データとしてのナレッジグラフ自動構築手法の検討, 人工知能学会第二種研究会資料セマンティックウェブとオントロジー研究会, 2022巻, SWO-058号, pp.12-01-pp.12-04, 2022.
- 4) 伊藤輝, 大谷英之, データ変換・統合技術を用いた港湾構造物図面の3次元化技術, 土木学会論文集, Vol 79, No.18, 2023
- 5) 原子力発電環境整備機構 (NUMO), 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築—, 2021.
- 6) Christophe Geuzaine, Jean-Francois Remacle, Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, International Journal for Numerical methods in Engineering, Volume:79, 2009.
- 7) 日本原子力研究開発機構 (JAEA), わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概略的評価—直接処分第1次取りまとめ—, p.90, 2015.

筆者: 1) 飯田 健太, 工学研究科市民工学専攻, 学生; 2) 竹山 智英, 工学研究科市民工学専攻, 教授; 3) 高山 裕介, 都市安全研究センター, 准教授; 4) 橘 伸也, 都市安全研究センター, 教授

Automation of the process of building numerical models of geological disposal facilities

Kenta Iida
Tomohide Takeyama
Yusuke Takayama
Shinya Tachibana

Abstract

Geological disposal of radioactive waste generated during the operation of nuclear power plants and spent fuel reprocessing is being considered as a disposal method for radioactive waste that is buried deep underground. Various analyses have been performed in order to realize safe geological disposal. However, many analytical models are still created manually, which is time-consuming and labor-intensive. Automation of analytical model building is one of the most important issues to be addressed in the future, as analyses that take into account a wide variety of conditions and complex analyses over a wide area are required. In this study, I developed a program to automatically generate a model of a geological disposal facility using a Data Processing Platform (DPP). DPP is suitable for the development of programs that automatically generate models because it is characterized by the ease of developing a system that automatically converts and integrates data in a wide variety of formats and produces the necessary outputs. In addition, I verified whether the models generated by the programs are applicable to visualization and analysis. By evaluating the effectiveness of the model for visualization and analysis, I aim to lay the foundation for the automatic development of more advanced and practical models for geological disposal facilities.

©2025 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.