

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT CENTER TOPICS

2000.3.NO.52

目 次

長期地質変動シミュレーションの研究.....

長期地質変動シミュレーションの研究

1. はじめに

わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する（核燃料サイクル開発機構：以下 JNC, 1999）」ものと定義されており、各種の天然現象に対して長期的に安定な地下深部環境（岩盤、地下水、熱等の特性）が求められている。しかし、同時に「わが国が地質学的な変動帯（地震、火山、隆起・侵食活動が盛んな地帯）に位置している（JNC, 1999）」ことも事実であり、処分場の選定や設計に求められる地質環境の長期安定性に対して、実際の地質変動の合理的な調査・評価が、技術的観点から求められている。

こうした地層処分における地質の長期安定性評価に対する技術的要請が明確化される一方で、社会的には GPS(Global Positioning System)観測網の整備・活用が進み、短期的な地質変動（地震）に対する土木構造物の耐震性基準が見直されるなど、地盤や地質の安定性の定量的評価への取り組みがなされてきている。地層処分を含む放射性廃棄物処分事業を円滑に推進するためには、国民の関心が高い地質の変動と安定性に関する定量的評価・

明示（手法の確立を含めて）の重要性は益々高まっている。

（財）原子力環境整備センターでは、通産省の委託により平成3年度～11年度までの9カ年にわたって、1万年間の『長期地質変動シミュレーションの研究』（（財）原子力環境整備センター：以下 RWMC、1997,1999-1,1999-2）を実施し、前記の定量的評価・表示に取り組んできた。本稿は、同研究の実施内容・基本的な考え方・成果・課題の概要を、取りまとめたものである。

2. 目 的

本研究は、「地下に建設される放射性廃棄物処分場周辺の地質が、長期にわたって力学的に安定しているかどうかを評価するツールを整備し、視覚的に分かりやすく表示する。」ことを目的とした。ここで、 に対して「1万年間の地質変動シミュレーション」を、また に対しては「シミュレーションモデル等の CG 化（コンピュータ・グラフィクス）」を用いて目的を達成しようとしたものである。

3. 実施体制

実施体制は、前記 に対して地質の専門家（理学分野）と岩盤シミュレーションの専門家（工学分野）、 に対して情報処理の専門家（工学分野）があたり、3 分野の専門家が有機的に連係して、現段階でなし得る定量的な評価・表示を目指して作業を進めてきた（図-1）。

情報処理の専門家の解析・処理に提供し、パラメータスタディによってモデル形状・境界条件・物性値にフィードバックして、シミュレーション結果・評価の最適化を図ってきた（図-2）。作業過程で得られた解析・評価手順の知見や成果は、「理学と工学の連携」の好例と考えるものである。

4. 実施フロー及び実施工程

(1) 実施フロー

本研究では、地質の専門家が事例地域の地質データを整理して、岩盤シミュレーション及び

(2) 実施工程

本研究の実施工程を表-1 に示す。9 カ年の検討の中で、中間年にあたる平成 7 年度には全体計画見直しとともに中間報告会を開催し（RWMC,1997）、以降はパラメータスタディによりモデル精度の向上とシミュレーション結果

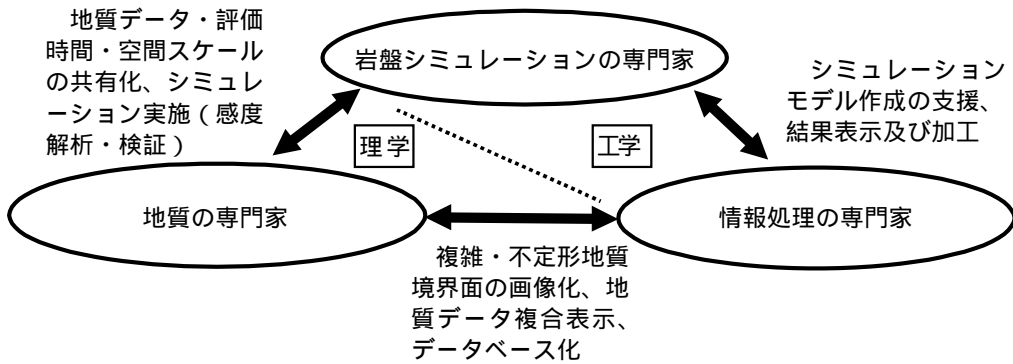


図-1 長期地質変動シミュレーション研究の実施体制と分野間の共同作業項目

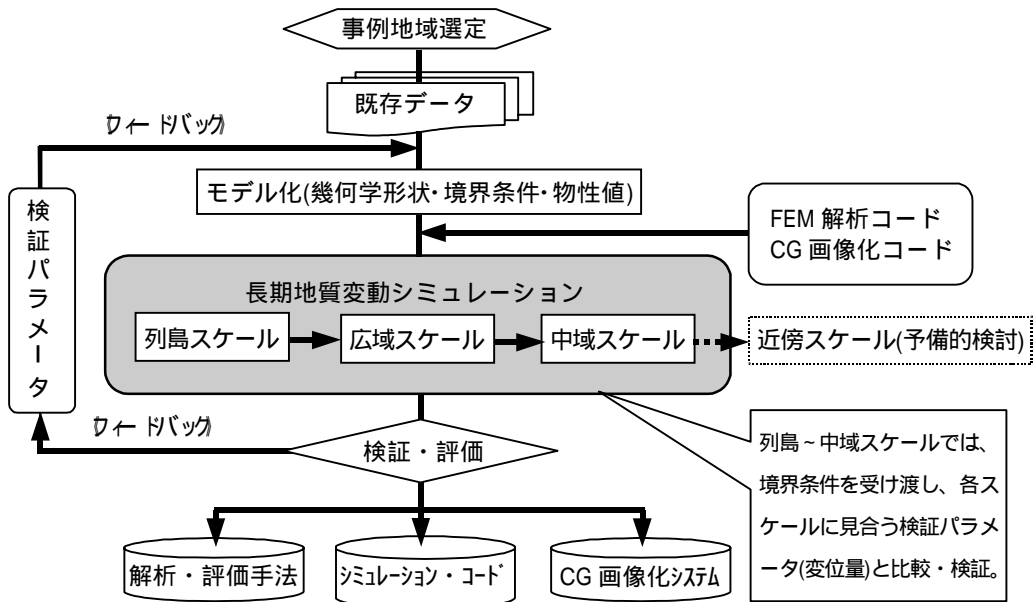


図-2 長期地質変動シミュレーション研究の実施フロー（最下段の3つが最終成果）

表-1 長期地質変動シミュレーション研究の実施工程

年度	1991(H3)	1992(H4)	1993(H5)	1994(H6)	1995(H7)	1996(H8)	1997(H9)	1998(H10)	1999(H11)
1. 全体計画・準備	全体計画立案				全体計画見直し				最終成果の整理
2. 地質データの調査・解析		事例地域の選定・地質データ収集	地質構造・物性構造モデルの作成、シミュレーション結果の評価・検証			地表変動要因の検討(定量化手法含む)			
				コア物性試験データ収集		兵庫県南部地震データ収集			
3. 地質変動シミュレーションコードの検討		基本仕様検討			断層の進展の検討、岩盤への水・熱の影響検討(文献)				成果のとりまとめ
		単一断層モデルの検討		地質変動シミュレーション(パラメータスタディ、2・3次元)					
				シミュレーションコードの作成・改良(2・3次元)					
4. CG画像化の検討		CG画像化の表現・仕様検討		画像化支援ツール(FACE)作成			表示コードの検討(アニメーションの検討を含む)		
			画像化コード作成(I-DEAS)	間(AVS)		3次元領域区分解析手法検討			
5. 地質データベースの作成		データベース仕様検討・選定					インターネット対応データベースシステムの作成		
							フォーマット、検索・表示コード作成、データ入力		
6. 総合評価(PAの検討)					中間報告会				最終報告会
								PA事例検討	PA用CD-ROM

PA: Public Acceptance (社会的受容)、ここでは放射性廃棄物処分場の立地に係わる地質の安定性解析手法・結果の社会的受容を指している。

の評価/検証及びPA(Public Acceptance: 社会的受容)の検討を主体として実施してきた。

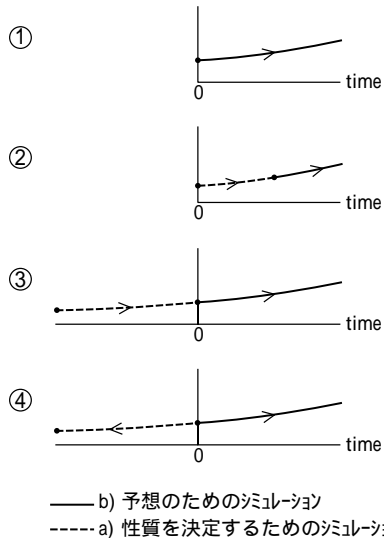
5. 基本的考え方

(1) 将来予測手法の選択

大久保ら(1998)は、岩盤工学や岩盤力学分野での岩盤挙動の長期予測シミュレーションにおいて、対象(となる岩盤)の性質を実測値として得ることが困難な場合が多いことから、a)性質を決定するためのシミュレーションを行い、その後b)将来予測のためのシミュレーションを実施するケースが増えているとした。また、a)とb)の組合せから4種類のシミュレーション実施方法の概念図(図-3)を示している。

ここで、シミュレーションの「対象の性質」とは、岩盤の幾何学形状・岩盤の物性・境界条件の3つである。本研究で1万年間の将来を予測するにあたって、現在得られる幾何学形状・物性値を用い、過去の変動から求めた境界条件(具体的には最終間氷期段丘面の形成時期12.5万年前~現在までの垂直変位量から求めた1万年間の平均変位等)を用いている。つまり、現在の形状の解析モデルに対して過去の変動傾向を与えてシミュレーションしているが、次に示す理由から、シミュレーション結果は将来1万年後を指しているとするものである。

すなわち、シミュレーション結果が評価範囲全体にわたって変動傾向(地域性と幅)を概ね再現できていると判断した場合には、現時点で



時刻0より計算、破線部分は性質を決定するための計算、過去より時刻0までは、性質を決定するために計算、現時点より過去に向かってまず計算し性質を決める。

図-3 岩盤挙動シミュレーションの実施方法の概念図(大久保ら、1998)

得られる地質データの精度・密度の不十分性を考慮すれば、a)性質を決定するシミュレーションとして「対象の性質の組合せ」を受け入れて良いと考える。さらに、境界条件(平均変位)が将来1万年についても継続すると仮定したと

表-2 将来予測手法の分類と事例（田中ら,1996 を基に作成）

将来予測手法	確率論による手法	外挿による手法	類推による手法	モデルによる手法
手法の考え方 と 留意事項	変動発生の可能性を数量的に見積もり、発生確率を予測する方法。高精度の発生データ集積要す。	将来の変動傾向が現在と変わらないという前提で将来に延長・予測する方法。現象の変動特性把握が重要。	対象現象の類似現象のデータから、将来の変動を類推する手法。	現象のメカニズムの概念モデルを構築して、数値解析によって将来の変動を予測する手法。
事 例	<ul style="list-style-type: none"> ・日雨量予測 ・気象予報 	<ul style="list-style-type: none"> ・土木構造物強度 ・材料強度 ・地質変動:本研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・ナチュラルアナログ ・火山災害予測 	<ul style="list-style-type: none"> ・気候温暖化の予測 ・流体移動（津波等） ・地質変動:本研究

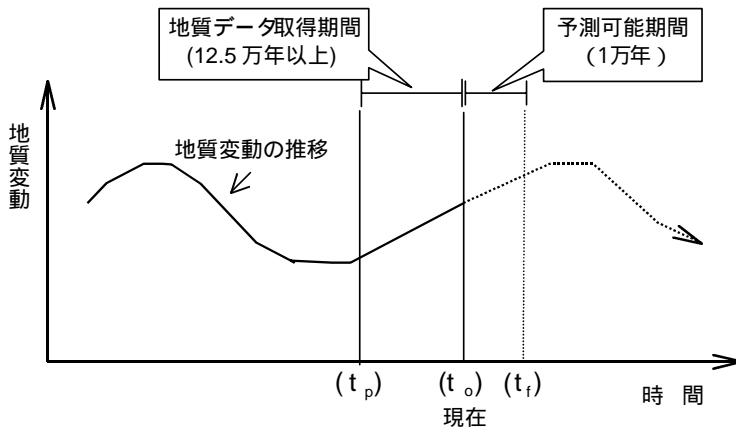


図-4 地質変動の線形区間と将来予測可能期間（RWMC，1999-1 に加筆）

き（地質学的に確度が高い場合）には、決定された「対象の性質」を用いて現在の幾何学形状から出発したシミュレーションは、b) 予想のためのシミュレーション結果（ここでは将来1万年後のシミュレーション結果）として受け入れて良いと考える。

シミュレーションを過去の幾何学形状を復元して開始できれば問題はないが、現時点では形状復元できるだけの地質データの精度は得られないので困難である。以上の制約・仮定を踏まえれば、本研究で実施したシミュレーション結果は、図-3 に示した方法のうちの ① にあたる。

次に、田中ら（1996）は、将来的な地質変動予測手法を4つ（確率論による方法、外挿による方法、類推による方法、モデルによる方法）に整理している（表-2）。本研究では、図-4 に示したように、解析対象期間（1万年）については、過去～現在～未来にわたって応力場の変化がなく、地質変動が線形的であると仮定した。

その上で、過去の地質変動データから境界条件等を設定し（図-4 の $t_p \sim t_0$ ）、地質変動メカニズムに基づき将来変動予測 ($t_0 \sim t_f$) を数値解析で行っているため、「外挿による手法」と「モデルによる手法」の併用を特徴としている。ちなみに、本研究で扱った地質変動現象は、隆起・沈降現象と断層活動であり、田中ら(1996)の分類で、それぞれ「持続的な変動」と「発生は間欠的であるが、長期的には変動速度で説明される現象」の2つで、いずれも線形的な変動として扱うことが可能である。

(2) 事例地域の選定

事例地域は、シミュレーション結果を検証しやすい場所を選定する方針に基づき、断層や褶曲等の活発な地質変動が調査されており、地質データが多数蓄積されている次の2地域に設定した。

事例地域1：東北地方の仙岩地域中心（地熱

地域、物探、深層ボーリングデータ等が豊富)

事例地域 2 : 近畿地方の淡路 - 六甲地域中心 (測地データ、深層ボーリングデータ等が豊富)

6. 長期地質変動シミュレーションの研究事例 (東北地方・近畿地方)

(1) 事例地域での地質変動シミュレーション結果の概要

表-3 には、事例地域 (東北・近畿) で実施した長期地質変動シミュレーションの概要を、データ収集から検証までの実施フローに沿って、採用したシミュレーション結果を中心に整理し

た。

活断層に関して見れば、東北では断層なしモデルで 2 次元解析した結果として活断層分布の必然性を示すことができ、近畿では断層ありモデルで 3 次元解析し、断層に挟まれたブロックの 1 万年間の相対変動を、それぞれの事例で示すことができた。また、それぞれの地質構造に応じた解析モデルの設定や、変動特性やモデルのスケールに応じた検証パラメータの設定と、これに整合する結果を得ることができた。

これらから、長期地質変動シミュレーション手法として、モデル作成手順や評価手法についても、後述するように多くの課題を抱えているものの、概ねその基礎は確立できたものと考えている。

表-3(1) 事例地域での長期地質変動シミュレーション結果 (広域・中域スケール、RWMC,1999-1)

(続 く)

事例地域		東北 (仙岩地域)	近畿 (淡路 - 六甲地域)
地質構造		<ul style="list-style-type: none"> 上部は新第 3 紀火山岩類、下部は花崗岩類の 2 層構造。 東西圧縮の応力場 (逆断層型) 南北配列の地質構造。 地熱地帯で熱構造変形が特徴。 	<ul style="list-style-type: none"> 上部は第 4 紀堆積層、下部は花崗岩類の 2 層構造。 東西圧縮の応力場 (横ずれ型) 横ずれ型活断層群による地質構造ブロックが特徴。
モデルのスケール		<ul style="list-style-type: none"> 広域スケール : 150km x 30km 中域スケール : 60 x 30km 	<ul style="list-style-type: none"> 広域スケール : 200km x 200km x 20km 中域スケール : 100 x 90 x 20km
シミュレーション手法		<ul style="list-style-type: none"> 2 次元断面解析 (断層なしモデル) FEM 粘弾性解析 (上部は弾性体、下部は粘弾性体) 	<ul style="list-style-type: none"> 3 次元解析 (断層ありモデル) FEM 弾性解析
シミュレーション対象の性質	幾何学形状 (データ)	<ul style="list-style-type: none"> 地表地質平面図、断面図、ボーリング柱状図、速度構造図、重力探査データ、キュリー点深度分布図 	<ul style="list-style-type: none"> 地表地質平面図、断面図、ボーリング柱状図、活断層分布図、地震探査データ、重力探査データ、震源分布図
	岩盤物性等	<p>【岩盤物性】</p> <ul style="list-style-type: none"> 密度 / ポアソン比 上部弾性体 : 2.3-2.7 / 0.30, 0.23, 下部粘弾性体 : 3.0 / 0.35, 0.4 弾性係数 (E0 ; E1) 上部弾性体 : 2000, 8000 下部粘弾性体 : 0 ; 5000, 0 ; 3000 熱構造解析 	<p>【岩盤物性】</p> <ul style="list-style-type: none"> 密度 / ポアソン比 : 表面 上部 : 2.0-2.2 / 0.25-0.35 下部 : 2.6 / 0.25 弾性係数 (E) 上部 : 200 下部 : 10000 <p>【断層物性】</p> <ul style="list-style-type: none"> 活動度の活発な断層 : せん断ばね $K_s=10^{-6}$, 面直ばね $K_n=1000$ (MN/m) 活動度のやや活発な断層 : $K_s=10^{-4}$, $K_n=1000$ (MN/m)
	境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 強制変位 (接点変位) (側方) 歪み速度 10^{-14}/sec を採用し、強制変位量に換算 (480m/1 万年)。解析モデル両側 (東西) に 240m ずつ配分。 (底面) 水平ローラー 断層運動を 1000 年を 1 ステップとして 10 回与えた。 粘弾性体部の応力緩和時間を 3000 年とした。 	<ul style="list-style-type: none"> 強制変位 外力を、1 ステップ 1 万年分を強制変位で一方から与えた。 (側方) 水平方向 300m/1 万年の強制変位、およびせん断方向 15m/1 万年の強制変位 (水平方向の 5%) (底面) 底面ばね : 1.0, 0.1 (MN/m) の 2 種類
検証パラメータ		<ul style="list-style-type: none"> せん断応力集中域の位置と形状 脊梁部と周辺部の地表垂直変位量 (10-30m/1 万年) 地表水平変位量 (GPS : 100-200m/1 万年) 及び三角点測量データ。 	<ul style="list-style-type: none"> 大阪ブロック構造の水平・垂直変位 (右横ずれによるブロックの回転と沈降傾向) と変位量 (水平 : 3~8m/1 万年、垂直 : -1 ~ -4m/1 万年) 水平主応力方向

表-3(2) 事例地域での長期地質変動シミュレーション結果 (広域・中域スケール、RWMC,1999-1)

(続き)

事例地域	東北 (仙岩地域)	近畿 (淡路 - 六甲地域)
モデル化	<ul style="list-style-type: none"> 既存地質断面図、3次元重力解析による基盤震度、キュリ一点深度、深部速度構造データにより作成。 物性により4層構造に区分(上位2層:弾性体、下部2層:粘弾性体)。 	<ul style="list-style-type: none"> 3次元地質図から、重力密度解析構造解析、地山区分(電研式岩盤分類)に対応する物性値設定 断層活動度の断層面への物性値への割り当て 物性により2層構造に区分し、断層物性との組合せた3次元物性構造モデル化
検証結果	<p>せん断応力集中域を断層破碎帯と考えれば、活断層位置とほぼ一致(深部形状の底角化は最近の理論に整合)。</p> <p>脊梁部の上昇量 18m/1万年はほぼ一致。波状褶曲構造が生じ、実変動に近い挙動。</p> <p>年間ひずみ量 3×10^{-7} は三角点測量の年換算値と一致。換算強制変位量 240m は、GPS データと一致。</p>	<p>沈降範囲をよく再現し、変位量(水平:2.8~4.7m, 垂直:-1~-6m/1万年)で実際の変位とよく一致した。</p> <p>原位置測定を考慮すると、定性的には整合。</p>
得られた知見	<ul style="list-style-type: none"> 層境界の幾何学形状のモデル化精度に解析結果は左右される。 層構造の粘弾性体の弾性係数 E_0 を 0 とした方が実現象に整合的挙動を示す。 2次元解析でのせん断応力集中域を活断層(2-4km幅)と考え、これを除いた安定範囲(3-10km幅)を解析的に示せる可能性がある。 地下深部のマグマ溜まりによる熱構造を加味した物性値設定で、脊梁部の隆起傾向が助長されることが示された。 	<ul style="list-style-type: none"> 変位量の大きい活断層の屈曲部に、最大せん断応力・歪みが集中する。これらは、断層の傾斜とは関係ないように見える。 地質構造の安定性指標として、最大せん断応力・歪み集中域、圧縮応力集中域を使える可能性がある。 荷重条件として、荷重を直接与えた場合よりも、強制変位の方が評価範囲全体の変形傾向と応力の伝達を実現象に近い形で表現できる。 断層周辺の破碎帯の物性を評価した物性条件の方が、活断層に囲まれたブロック間の相対変位をよく表現する。
今後の課題	<ul style="list-style-type: none"> 解析メッシュサイズの最適化と解釈精度の整合 変位量の絶対値の評価手法(安定/非安定の閾値設定) 	<ul style="list-style-type: none"> 地下深部の応力や変位データの取得 解析モデルの違いが解析結果に与える影響把握 安定/非安定の閾値設定

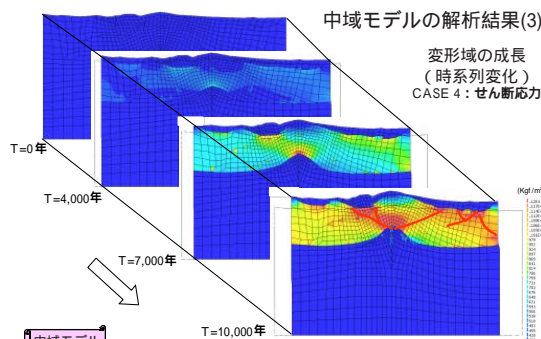


図-5 長期地質変動シミュレーション結果例 (東北地方、2次元粘弾性解析結果、1万年後までの変形増大分の予測)

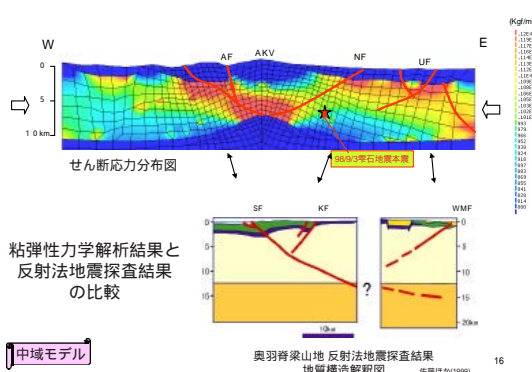


図-6 長期地質変動シミュレーション結果の解釈例 (東北地方、仙岩地域)

(2) 東北地方でのシミュレーション結果の画像化

図-5には、東北地方での1万年間の地質変動シミュレーションの結果を、時間の経過とともに4ステップに分けて示した。図の下半部の粘弾性体上面の凸形状が時間とともに成長し、それに応じて上部の弾性体の層に変形によるせん断応力が蓄積されていく様子が、よく分かる。

また、図-6には(表-3で説明した)せん断応力

集中域を地質学的な判断で断層破碎帯としてつなぐことによって、地表に露出している実際の活断層と位置・形状がよく一致することを示している。しかも断層の深部形状は、地震探査結果と同じように地下深部へゆくにつれて低角の断層へと変化して行く点も、表現できていると見させる。

(3) 近畿地方でのシミュレーション結果の画像化

図-7には、近畿地方の3次元弾性解析結果のうち、大阪湾を中心とする広域スケールでの大阪ブロックの沈降についての、パラメータスタディ結果を示した。境界条件であるモデル底面のパネの剛性とブロック境界の活断層群のせん断ばね剛性のパラメータのバランスを、地質学的な知見の許す範囲で変化させることにより、最終的に右側の大阪ブロックのみが沈降域となる結果（沈降量は最大で-0.6m/1000年、1万年で6mの沈降でオーダーとして測定データと整合している）を得ることができた。

また、図-8にはその大阪ブロックを中心とする中域スケールのシミュレーション結果のうち、活断層近傍の水平・垂直変位量（m/1000年）を検証した結果である。図の右側には測定データが示されており、既知の断層の水平変位量（ハコ囲みしていない数字）の実測値 0.4m、0.8m、0.8m に対して、シミュレーション結果では 0.2～0.9m の値が得られており、深さ 20km までをモデル化して実施した地質変動シミュレーション

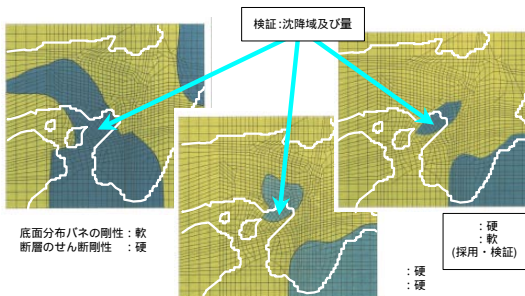


図-7 地質変動シミュレーションのパラメータスタディ実施例(近畿地方、3次元弾性解析)

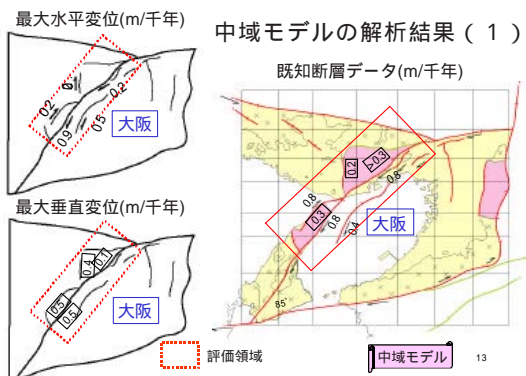


図-8 長期地質変動シミュレーション結果の検証例(近畿地方、3次元弾性解析、水平・垂直変位量)

ン結果としては、精度の高い検証結果になっていると考える。

7. まとめ

これまでに得られた研究成果は、下記の3点に要約される。

解析・評価手法の確立

a) 地質構造・変動を比較的単純な力学的モデルで表現し、FEM解析コードを用いたシミュレーションのパラメータスタディにより、地質データから得られた変動傾向を定性的に再現できた。

b) 1万年間の地質変動は、シミュレーション可能であることを示した。

FEM解析コード(シミュレーション・コード)の作成

a) 長期地質変動シミュレーションコード(FEM解析)のプロトタイプを作成した。

CG画像化コードの作成

a) 長期地質変動シミュレーションのモデル作成・結果表示のCG画像化システムを開発した。

8. 今後の課題

この9カ年の研究により、長期地質変動シミュレーション技術の考え方・手法(ツール)の基礎ができた。今後は、長期地質変動予測ツールとしての確度を高めるために、より現象の発生メカニズムに基づいた合理的な手法を練り上げ、計算・予測することを目指す必要がある。

そのためには、適用事例を増やして処分サイトの長期地質変動予測ツールとしての信頼度を高めるとともに、サイト選定に資する活断層周辺の安定/不安定の基準・範囲設定の検討ツールを目指し、適用場面を想定した技術全体の指向の明確化と各部分での精度向上が求められる。具体的に、各部分の主要な課題として、ここでは触れなかったCG画像化を含めて、以下のものが挙げられる。

(1) 地質データ精度に関わる課題

- 1) 実測や実験を通じた地下深部岩盤の物性値の取得
- 2) 地質現象・変動ストーリーに整合する物性パラメータ設定の精度向上(長期的な岩盤応力緩和や強度推移を含む)
- 3) 深部岩盤の地質情報データベースの汎用化



図-9 PA用CD-ROMのジャケット
(2000年4月から配布予定)

(2) シミュレーション実施に関わる課題

- 1) 解析モデル作成法の効率化・合理化による解析時間の短縮
- 2) 解析モデルの相違がシミュレーション結果に与える影響の把握

(3) シミュレーション結果の評価・検証に関わる課題

- 1) 過去の地質変動記録の時間的・空間的精度の向上(検証パラメータの精度向上)
- 2) 地質の長期安定性評価基準(最大せん断歪みや応力集中域採用の妥当性)の検討
- 3) 活断層の活動影響範囲の設定と検証への取り組み

(4) CG画像化に関わる課題

- 1) 深部岩盤の幾何学形状(断層・岩脈等)の効率的な推定(3次元領域区分解析の効率化)

また、本研究では「PAの検討」の最終成果として、予備知識のない一般の方(中・高生以上)にも成果内容を理解してもらえよう、キャラクターやCG動画も多用したPA用CD-ROMを制作した(2000年4月から配布予定、図-9)。これとともに、研究成果全体については、今年度作成する総括報告書にとりまとめ、公開・外部発表を積極的に行う予定である。

(田代寿春)

《引用文献》

- (財)原子力環境整備センター：RWMC
地殻の力学的安定性評価 原環センタートピックス No.40 (1997)
- (財)原子力環境整備センター
平成10年度低レベル放射性廃棄物処分可視画像化調査報告書 第1分冊 (1999-1)
- (財)原子力環境整備センター
長期地質変動シミュレーション研究発表会 - 発表資料集 - (1999-2)
大久保誠介・福井勝則
岩盤挙動の過去へのシミュレーション 資源と素材 114,p763-768 (1998)
田中和広・千木良雅弘
我が国の地質環境の長期的変動特性評価(その1)電力中央研究所報告 U96027 (1996)
核燃料サイクル開発機構：JNC
わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 総論レポート (1999)

編集発行

財団法人 原子力環境整備センター
〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号 第15森ビル
TEL 03-3504-1081 (代表) FAX 03-3504-1297
<http://www.rwmc.or.jp/>