

地層処分における概要調査地区選定後の作業内容とその意義 -活断層の識別・評価を例に-

山崎晴雄*

地質環境はさまざまな時間・空間スケールでの変動を累積して受けしており、処分場周辺の地質環境の安定性評価においてもそれを区別して把握する必要がある。日本でもっとも変動の激しい伊豆半島周辺でも、ローカルな地殻変動の原因となる広域応力場の変化には数十万年の時間がかかるのである。10万年の評価期間のうちに急激な変化が起きる可能性は低い。

概要調査地区における活断層調査では既存調査による活断層分布の把握の精度が低いため、その有無についての見直し、確認は絶対に必要である。小規模な断層、割れ目については、工学的な対応を検討すべきである。また、断層のない地域に突然新たな断層が発生することは考えにくいが、近隣の断層の動きによって岩石中に新しい割れ目が生じる可能性は、クーロン破壊応力変化(ACFS)などを用いて検討する必要がある。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物(HLW), 地層処分, 地質環境, 活断層, 概要調査地区

Geological environment has cumulatively received diverse crustal movements having various time and spatial scales in the long earth history. For the HLW disposal, the geological stability around the investigation site should be examined and assessed in each individual time and spatial scales. Along the northern margin of Izu Peninsula where the highest rate of crustal movement is observed in Japan, the change of extensive stress field affected to local tectonics had taken for several hundred thousand years at the collision of Izu block in early Pleistocene. Therefore, there is little potential of sudden occurrence of new disturbance in the evaluation period of a hundred thousand years.

The active fault survey in the preliminary investigation areas should indispensably reexamine the existence of the faults because of the low reliability of previously published active fault maps. Engineering answer should be requested for the accommodation to small fault and fractures in the host rocks. Although there is little potential for the occurrence of a new active fault in the non-faulted region, it is necessary to check the potential of new fracture occurrence in the stress concentrated region using the distribution of coulomb failure stress change.

Keywords: high-level waste, geological disposal, geological environment, active fault, preliminary investigation area

1 地層処分における地質環境変化と時間スケールの関係

1.1 地質環境の安定性とは何か -地質環境は絶えず変化している-

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、廃棄物の特性上、処分場周辺の地質環境の長期的な安定性を評価する必要がある。この安定という意味は、全く静止していて変化しないということではない。地質環境はけっして不動ではなく、刻一刻変化し続けているのである。火山噴火や断層運動による大地震の発生は、安定な状態を続けてきた地質環境を壊す突発的な現象のように見えるが、じつは地下に一定の割合で蓄積してきたマグマや地殻歪みが、ある間隔でまとめて放出されているだけのことで、周期的に発生する現象である。したがって、地質環境の安定性評価とは、このような定常的に変化し続ける地質環境が、そのような状態をいつまで保ち続けるかを予測することである。

われわれが認識できる地質現象は日々の事柄から数十億年前の事柄まで、幅広い時間スケールにわたっている。そして、古い時代ほど資料が少なく、時間的な分解能が悪くなるので、取り扱う時間軸を対数にして考えることが多い。地史や地殻変動に関しても、完新世、更新世、鮮新世、そして中新世など、対数軸的な時代区分に基づいて比較

されることが多い。だが、1つの言葉であらわされたそれぞれの地質時代は、1万年から数千万年までの時間幅をもっている。したがって、10万年までの時間スケールで認識される更新世の現象と数百万年の時間スケールに亘る鮮新世の現象は同一レベルで比較できるものではない¹⁾。後者の現象は前者の変動を積分した姿であり、前者は後者の運動の1コマと見ることができる。

かつて、地殻の応力場の変化などについて、「鮮新世と更新世後期では方向が違うので途中でプレート運動に変化があった」という議論がなされたことがあった。しかし、これは鮮新世と更新世の時間の長さの違いを無視した議論である。上記の考え方にしてば、ある時期からプレート運動が急に変化したと考えるより、数百万年かかる現在の方向へ徐々に運動が変化している、あるいは、大きな変化の方向に対して最近の変動が少し揺らいでいる(その原因は局地的なものかも知れない)と見るほうが自然である。

地殻変動だけでなく、気候変動も同様な時間・空間スケールの違いに応じてのさまざまな変動の組み合わせで変化が生じていると考えられる。ただ、気候変動は岩石よりもずっと動きやすい大気や海洋水の大循環を介して行われるので変化の速度が速く、発生する頻度も高い。

Fig.1は第三紀以降、海底に堆積した石灰質プランクト

Survey contents and their significance to the Preliminary Investigation Areas for the HLW geological disposal: In the case of identification and assessment of active faults in the survey area by Haruo Yamazaki (yamazaki@comp.metro-u.ac.jp)

* 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻 Department of Geography, Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University
〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1

1) 数千万年とか数十億年とかという数字は言葉としては分かっても、その意味はなかなか実感しにくい。10万年と100万年はどう違うかを考えるとき、「年」を「円」に換えてみると意味の違いが良くわかるようになる。

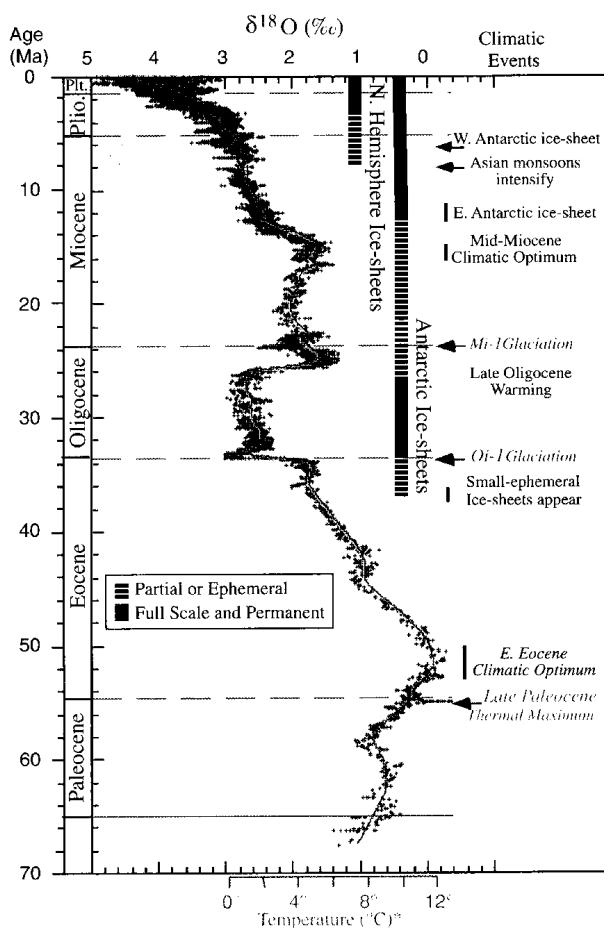


Fig.1 History of the Cenozoic climate change and glacial development suggested by the $\delta^{18}\text{O}$ contents of fossil benthos foraminifer. (Zachos, et al., 2001)

ン（底生有孔虫）化石の殻に含まれる安定酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）の変化を示したものである[1]。これは地球に大規模大陸氷床が発達する以前（35Ma以前：Maは100万年を示す）の時期については海水の温度指標であり、それ以後は南極と北半球の氷床の発達の程度を示す指標である。いずれにせよ海底での $\delta^{18}\text{O}$ の増加は地球の寒冷化を示している。これによると、地球の気候は、白亜紀以降大陸の動きが超大陸形成に向かっているため、大きく見ると寒冷化を示している。しかし、その中により短い時間スケールでの周期的な変動やステップ状の変動が認められる。これらは、惑星軌道の周期的な変動による地球放射量の変化（ミランコビッチフォージング）、大気大循環や海洋水大循環、あるいはそれらと地殻変動の複合等によって形成されたものである。

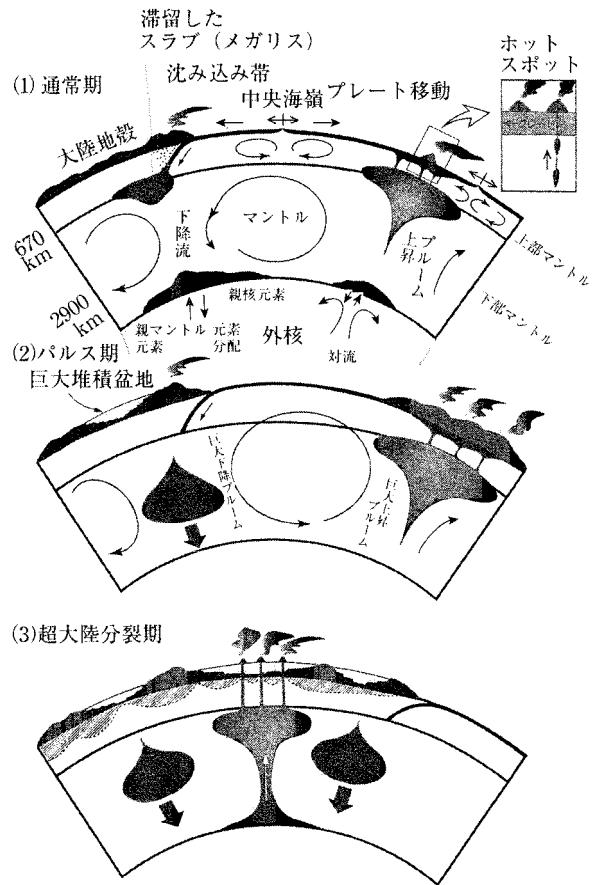


Fig.2 Buildup and breakup mechanisms of the super continent explained by the plume tectonics. (Maruyama and Isezaki, 1998)

Table 1 は地球上で認められるさまざまな環境変化（変動）とその時間スケール、変化の原因を示したものである。もっとも大規模な変化はブルームテクトニクスと呼ばれる、4億年程のサイクルで繰り返される変動である[2]（Fig.2）。原因はマントル対流の大きな変化であり、これによって大陸は集合・離散を繰り返し、それにともなって大規模な気候変化も起きた。超大陸形成期には地球全体が寒冷化し、海底では酸欠が起こって生物の大量絶滅が繰り返された。この大きな変動サイクルの中に、Table 1 に示すプレート運動などのより小さな時間と規模のスケールを持つ変動が累重しているのである。

気候変動も地殻変動と同様に、時間・規模のスケールに応じたさまざまな変化が生じている。しかし、気候変動の場合は地殻変動などのある現象（もちろんある程度の時間幅を持つ）が引き金になって汎地球的な変化が起こることがあるらしい。Table 2 には新第三紀以降の大規模な気候変

Table 1 Cycle and duration of major environmental changes in the various time scale of the earth history

現象	間隔	変化原因
大陸の集合離散（ウイルソンサイクル）	4億年	ブルームテクトニクス
プレートの絶対速度変化	数千万年	海洋プレートの成長・厚化
火成活動・背弧拡大	数千万～数百万年	プレート間カップリング強度
相対的な応力場	数百万～数十万年	プレートの相対的位置の変化
活断層の運動の盛衰	数十万～数万年	局地的な応力場変化

Table 2 Occurrence times of the major climatic change and their causes in the Cenozoic history.

気候変化の現象	時 期	理 由
南極氷床の形成	15Ma	ドレイク海峡の形成 周南極海流の形成
氷河サイクルの発生 (北半球に氷床形成)	2.5Ma	パナマ地峡の形成・北大西洋への暖流流入
10万年周期の氷期間氷期サイクル	1Ma から	ヒマラヤ・チベットの隆起 大気大循環・アルベドの変化

化とその時期、発端(原因)となった地殻変動などの原因をまとめた[3]。ここに示した例は、プレート運動などの地殻変動によって、海流や大気の流れが変わり、それによってドミノ倒しのように氷河期の繰り返しなどの地球全体に及ぶ気候変化が生じたことを物語っている。

地層処分において将来10万年程度にわたる地質環境の長期安定性を検討する場合、上記のような地質事象の規模と時間のスケールに応じた変化を区別して議論する必要がある。

1.2 地殻変動の変化に関する時間スケール -伊豆周辺の事例-

処分場の長期安定性評価で問題となる応力場や地殻変動の変化は、どのような時間スケールの中で取り扱えば良いのだろうか。1つの例として伊豆の衝突に伴う地殻変動の場の変化が、どのような時間スケールで生じているかを見てみよう。日本列島の中央部、南部フォッサマグナと呼ばれる地域はフィリピン海プレートの東端にある伊豆半島(伊豆・小笠原弧の一部の火山性地殻)がユーラシアプレートに属する本州に衝突しており、日本で最も激しい地殻変動域となっている。この地域の衝突運動は数百万年サイクルで繰り返し生じてきた定常運動だが、衝突域周辺ではそのたびごとにローカルな変動が生じている。最新の衝突運動は第四紀の半ば100~70万年前頃に発生し、それに伴って、広い範囲で応力場の変化が起き、新しい断層活動の発生、地殻変動の場の移動などの変化が生じた。

伊豆地塊の衝突後は新しい応力場のもと、再び定常状態が形成されているように見える。したがって、数百万年サイクルの変動の中で、急激な応力場や地殻変動の場の変化は数十万年間という時間スケールで生じたことになる。伊豆周辺は世界有数の地殻変動域であり、地殻変動の場の変化が短時間に速い速度で起きている地域である。しかし、そこでも新たな断層活動を発生させるような広域応力場の変化は数十万年の時間をかけて生じている。また、その後の定常状態のもとではプレート収束によって付加体が形成され、その中では覆瓦スラストの派生と成長、そして終息が繰り返され、結果として断層運動の場の移動(マイグレーション)が、場所によって異なるが数万~数十万年のサイクルで生じている[4-5] (Fig.3, Fig.4)。

このように、日本列島ではある程度の広域にわたる応力

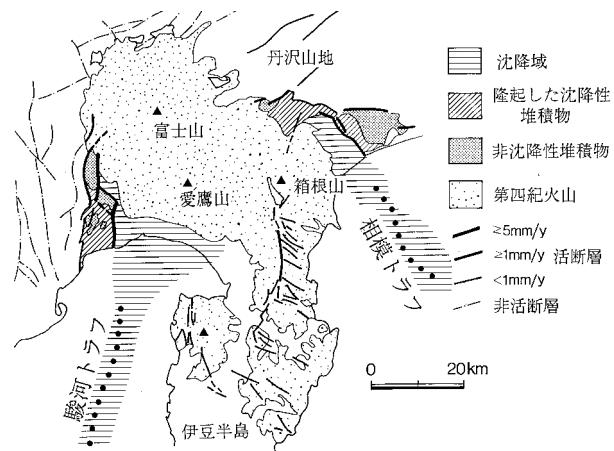


Fig.3 Quaternary tectonics around the northern tip of Izu peninsula, central Japan. (Yamazaki, 1993)

A boundary between the PHS and EUR plates runs through the onshore area of the northern tip of Izu peninsula. In this area, mountains and uplands divided by imbricate thrusts consist of uplifted and deformed accretionary deposits.

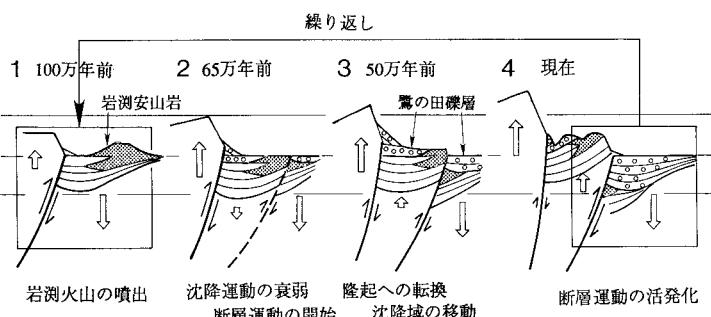


Fig.4 Development and migration of imbricate thrust in the accretionary prism around the northern tip of Izu peninsula. (Yamazaki, 1992)

場の変化には、いくら速くても数十万年の時間がかかる。地質環境の安定性評価の時間枠を10万年とするなら、その間に広域応力場の急速な変化が起きて新たな地殻変動が急に発生するということは、過去の事例を見る限りではきわめて考えにくいくことといえよう。このように、処分場の地質環境の長期安定性を考えるにあたって、10万年という時間は日本列島の地殻変動に関しては、現在の地質環境の状況に基づいて将来の変化を類推することのできる、すなわち、安定性を十分評価することができる時

間と考えられる。

2 概要調査で実施すべき調査・活断層・地殻変動を例に・

概要調査地区が選定され、現地調査が行われることの利点は計り知れない。中でも最大のメリットは、地質事象に関して観察・測定によって具体的な数値や情報が得られること、あるいは事象の存在の有無が確認されることで、解明すべき現象の不確実性が大幅に減ることである。地殻変動に関しては、概要調査によって隆起量やその速度、地層の年代データが取れるようになるとその地域固有の地史解明が可能になり、過去の変動史から将来の具体的な変動予測が可能になることである。シナリオやモデル構築でも今まで幅の広い一般論でしか議論できなかったことが、詳細個別のデータが得られることで地史の詳細な解明が可能となり、より精度と確実性の高いものが構築出来るようになるだろう。

このように、概要調査への期待は大きいが、では、そこでは実際どのような調査を実施する必要があるだろうか。ここでは、筆者の専門分野である活断層・地殻変動に関して、実施すべき調査を考えてみよう。

具体的には次の三つの課題が考えられる。

- (1)活断層の見落とし、未知の活断層の存在
- (2)既存の破断・割れ目が再活動して拡大する可能性
- (3)新たな断層・割れ目発生の可能性

(1)について、活断層は処分場選定の除外要件だが、実際には活断層分布の把握の精度が低いため多数の欠落や見落としがある。活断層分布は「日本の活断層」[6]刊行以来全国的な把握作業が続けられ、多くの分布図が公開されてきた。特に最近の分布図は高精度を売り物にしているが、

それは大縮尺のベースマップに、低断層崖などの分布を示しているものであって、逆に活断層の存在把握の難しい低活動度のB-C級断層については誤判読や見落としが少なくない。特に、最近は確実なデータのみを載せるということで、確実度の低い活断層情報が排除される傾向にある。2000年の鳥取県西部地震はこのような「活断層空白域」に存在する活断層が引き起こした大地震であった。つまり、現在の活断層分布図では、活断層図に記載の無い断層が再活動する可能性を排除しきれないものである。

したがって、概要調査では処分場周辺で活断層の有無を判断する調査が必要である。活断層は既存の断層の再活動なので、まず、処分場周辺でのリニアメント調査、地質調査、各種物理探査によって、断層および破碎帯等の存在を把握する必要がある。把握した断層等について、その周辺での地形発達史および第四紀層の分布等から変位の累積性の有無を判断し、必要に応じてトレンチ調査等を実施する。このような調査で、変位のないことが確認されれば、処分場における活断層の問題は以後考慮の必要がなくなる。小規模な活断層で、10万年間の累積性が小さいと予想される断層については、割れ目の拡大などを防ぐため工学的対処を考える必要がある。これは今後の大きな技術的検討課題である。

(2)については、断層活動の際、主活断層から数km以上離れたところでも副断層などが動き、主断層の変位量の10-20%のずれが生じる可能性がある[7] (Fig.5)。しかし、副断層は強い地震動や局地的な応力変化によって地層中の古傷が再活動するものである。したがって、概要調査地域以外の活断層分布、そして処分場周辺での断層・破碎帯を的確に把握することで将来の変位量などが予測でき、前述の小規模活断層と同様に工学的な対応が可能であろう。

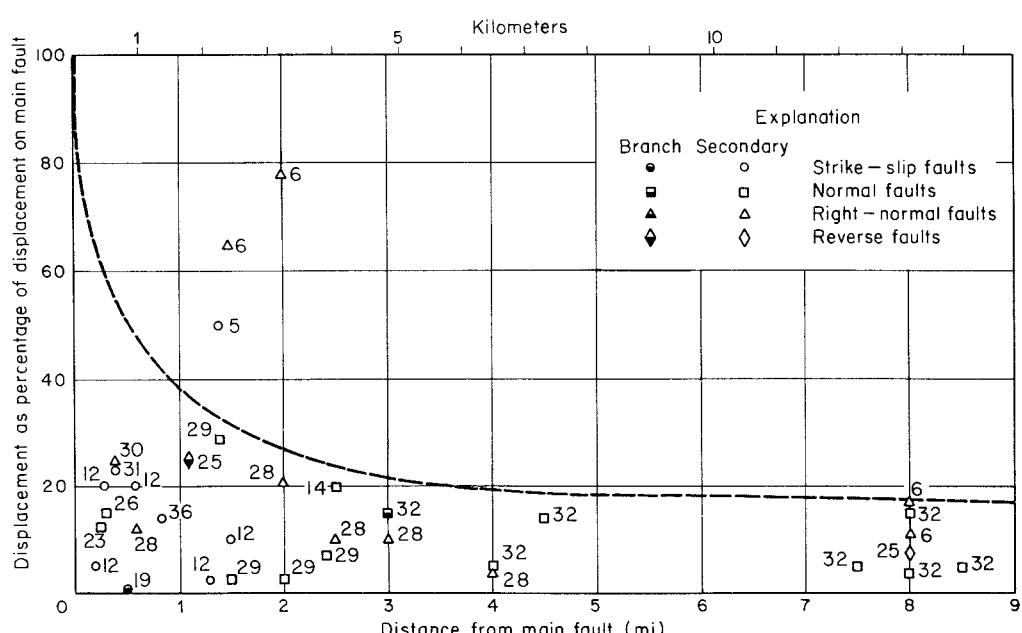


Fig.5 Relationship between the distance of subsidiary fault from main fault and its rate of displacement relative to the main fault. (Bonilla, 1970)

(3)について、断層の成長には、主断層近傍の岩石中に生じたひび割れが主断層の活動の繰り返しのたびに副断層として成長し、やがて応力集中域としての活断層に成長するというプロセスが考えられるので長期的な時間が必要である。したがって、断層のないところに短期間で活断層が生じることは考えられない。しかし、ひび割れなどの発生は否定できないので、クーロン破壊応力変化 (ΔCFS)などの手法[8-9]を用いて既存活断層の変位によって応力集中の起きる場所を予測し、そのような地域に重要施設の配置を避けると言った設計上の対応が考えられる。

何れにせよ、現地調査が可能になることによって、地質環境に関する不確実性は大きく低下すると考えられる。

参考文献

- [1] Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K.: Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* **292**, 686-693 (2001).
- [2] 丸山茂徳・磯崎行雄:生命と地球の歴史 (岩波新書), 岩波書店, 東京 (1998).
- [3] 町田 洋・大場忠道・小野 昭・山崎晴雄・河村善也・百原 新:第四紀学, 朝倉書店, 東京 (2003) .
- [4] 山崎晴雄:南関東の地震テクトニクスと国府津・松田断層の活動, 地学雑誌, **102**, 365-373 (1993).
- [5] Yamazaki, H.: Tectonics of a plate collision along the northern margin of Izu Peninsula, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **43**, 603-657 (1992).
- [6] 活断層研究会:日本の活断層-分布図と資料-. 東京大学出版会 (1980).
- [7] Bonilla, M.G.: Surface faulting and related effects. In: *Earthquake Engineering* (Wiegel, R.L. ed.) Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 21-74 (1970) .
- [8] 橋本学:兵庫県南部地震に伴う応力変化:断層モデルによるクーロン破壊関数の変化の修正再計算. 地震 **2**, 50, 21-28 (1997).
- [9] Toda, S., Stein, R.S., Reasenberg, P.A., Dieterich, J.H., Yoshida, A.: Stress transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24543-24565 (1998).

