

博士論文

断層運動等の自然事象が周囲に及ぼす影響の  
超長期予測に関する研究

Study on super long-term prediction of effects of natural phenomena  
such as active fault movement upon surrounding environments

秋 山 隆



## 論文要旨

社会資本整備は、国民が安全・安心に暮らし豊かな生活を実感するために、効率的に実施していく必要がある。特に地震国であり自然災害の可能性が高いわが国においては、専門的知識と経験に基づき、社会と十分な対話を実施し理解を得ながらプロジェクトを推進していくことが、土木技術者に定められた技術倫理であると考えている。関連技術の進展や費用削減に繋げていくためにも、社会との十分な合意形成は必要であり、プロジェクトの遅延を防止する効果などを期待できる。

本研究では、自然災害への懸念が払拭されず社会からの理解が得られていないことが原因で遅々として進捗しないプロジェクトを取り上げ、計画段階における自然事象への理解方法やそれをわかりやすく第三者へ説明する方法を考えてみることにした。

高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトは、数十万年以上という超長期にわたる施設の機能維持を前提としているため(本論では評価期間を 100 万年に仮設定)、自然事象が持つ不確実性への対処方法に対して社会から十分なコンセンサスを得られていないことがあり、停滞しているプロジェクトの代表格となっている。よって本稿では、地層処分プロジェクトを事例として取り上げ、筆者が社会からの理解を得るために必須であるとする自然事象からの影響の不確実性に対する独自の対処手法やプロセスを述べ、それらを利害関係者へ説明し説得するツールとして評価結果の可視化を提案することとする。

地層処分施設は、原子力発電所の運転に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を、将来の人間の管理に委ねずに済むように、地下深くの安定した岩盤に閉じ込め、人間の生活環境から隔離するための処分施設である。2000 年に原子力発電環境整備機構が設立され、処分地選定や建設操業を行う実施主体に位置付けられた。以降、処分地選定調査の受入れを自治体からの公募による方式で進めてきたが、現状において調査の実施には至っていない。

一方で国は、国民や地域の理解と協力を得るために、地域の科学的特性を国から提示するための審議会を経済産業省内に立ち上げ、2017 年 7 月に科学的特性マップを公表した。科学的特性マップは、地層処分に関する科学的特性を、活断層、火山、地盤の隆起侵食などの自然事象に関する既存の全国データに基づき、一定の要件・基準に従って客観的に整理し、全国地図の形で示したものである。マップの提示にあたっては、リスク要因として放射性物質の閉じ込め機能の損失、あるいは人間の生活環境からの隔離機能の損失などを考慮対象として、要因に応じた対策を施している。閉じ込め機能に影響を与える事象として、断層のずれを考慮対象の一つとし、地下施設内に存在する断層がずれると人工バリアの一部が破壊される可能性があることから、活断層に破砕帯として断層長さの 1/100 程度(断層の両側合計)の幅を持たせた範囲を好ましくない範囲としている。破砕帯以外にも断層の伸展・分岐が発生する可能性がある領域などを避けるべき範囲としているものの、具体的な評価方法は示されていない。活断層以外では、生活環境からの隔離機能

の喪失の可能性として、著しい隆起侵食を考慮対象の一つとしている。地下深部に設置した処分施設が岩盤と一緒に隆起し地表が侵食されることによって、徐々に人間の生活環境と廃棄物との距離が接近し隔離機能が喪失する可能性があることから、今後十萬年内に隆起量が政令で定められた設置深度(300m以深)を超えるような場所を好ましくない範囲と定めている。

我が国における活断層・活褶曲等の活動を支配するテクトニックな応力状態は、数十萬年～数百万年という時間スケールの中で一定の傾向を保ちつつ進行していると思われる。よって、10 萬年オーダーの将来予測では現在のテクトニクス継続性を想定した決定論的な評価が可能とみられるが、一方で自然事象の影響範囲について決定論的な評価手法は確立されていない。そして、影響範囲を検討するにあたっては、断層パラメータなどに内在する誤差が生じると考えられ、プレート活動が一定と仮定してもなお残るバラツキの定量化が必要と考えられる。

そこで、本研究で提案する影響範囲予測手法においては、現在知られている我が国の活断層の地域性・断層タイプ等の活動特性、加えて隆起侵食に関するデータを活用し、向こう 100 萬年間の自然事象の影響範囲を提示するための考え方を示すこととする。さらに、事例分析に使用した基礎データが少ないことから幾つかの仮定を含むものの、提案した影響範囲予測手法を用いた具体的な確率論的数値指標を提示する。

活断層に関しては、その活動が施設の破壊や地質環境の悪化を招く恐れがあることから、断層活動による影響範囲を定量的に示す独自のモデルを開発した。活断層による影響範囲の分析においては、我が国に存在する横ずれ断層・逆断層・正断層それぞれについて計 37 箇所の断層を用いた解析、検討を実施した。既知の活断層における、断層延長方向への伸展と断層の側方方向への分岐や派生による影響を平面的に検討した上で、活断層が処分施設へ及ぼす影響を決定論的あるいは確率論的に評価する手法を考案した。

断層延長方向の伸展距離に関する検討では、断層長と累積変位量の間関係を断層タイプ・地域ごとに分析し、両者の関係式を導くに至った。この関係式に従って断層長が時間とともに伸展するという仮定に基づき 100 萬年後の断層長を見積もることができる。さらに、断層長と累積変位量の間関係は両者の関係式に対して誤差を示すことから、断層長の誤差分布を表す確率密度関数として対数正規分布を設定し、ここから伸展長の誤差を理論解として導くことにより確率論的な伸展長も得る手法を考案した。

断層側方の影響範囲に関する検討では、主断層とその側方に分岐・派生した断層との離間距離を活断層分布図上で計測し基礎データを整理した。整理したデータ群を統計解析することで、影響幅/断層長比の平均値を決定論的な予測値として与えることが可能となった。計測による影響幅/断層長比のヒストグラムは、正規分布の片側確率密度関数により近似されることから、断層タイプごとに確率密度関数を設定し、これにもとづく確率論的な影響幅を得た。なお、ここで得られる確率は、断層周辺に位置する任意の地点を基準として、「将来断層に分岐が生じた場合に、当該地点がその影響範囲に入る確率」を意味する。

隆起・侵食については、地下施設が隆起により地表へ接近し同じ量が侵食されるとすれば、地層による放射線の閉じ込め性能を期待できなくなる。このことから、海成段丘の分布高度や隆起速度を指標として、将来にわたる影響を決定論的あるいは確率論的に予測する独自のモデルを開発した。

沿岸域においては最終間氷期最盛期(約 12.5 万年前)の海洋酸素同位体ステージ(MIS5e)に形成された海成段丘の形成年代や標高が高い精度で知られていることから、地形的に読み取られる旧汀線(段丘面上の過去の海岸線を示す地形)と形成時の海面高度との差から精度良く隆起速度を知ることができる。しかし、この手法においても平均隆起速度等の想定には、データ不足や地層の風化などの侵食に伴う様々な誤差を含むと考えられる。そこで、本研究では、特に海成段丘の旧汀線高度の認定精度を事例から検討し、確率論的評価手法により評価期間における施設の隆起量を提示するモデルを構築した。

具体的には、MIS5e 相当海成段丘を隣接地点における MIS5c(約 10 万年前、南関東の小原台面相当)に相当する海成段丘と比較し、両者の隆起速度が等しいという前提のもとに MIS5e 相当海成段丘における旧汀線高度の認定誤差を統計的に検討した。それぞれの旧汀線高度を組み合わせた値をグラフにプロットした時、そのプロットを近似する直線は形成年代の比を示すことになり、近似直線に対する偏差を検討すれば最終間氷期海成段丘の旧汀線高度の認定誤差を見積ることができる。

本研究により開発した活断層や隆起による影響範囲予測手法は、特に確率論の解に関しては直感的に判断することが大変難しい。そして、新規火山の発生確率など他の自然現象の影響範囲を併せて考えるためには、可視化の技術が必要不可欠と思われる。そこで北海道を例とした活断層の将来的な影響範囲の可視化を試みるとともに、地層処分の技術要件として必要となる他の自然事象の影響範囲も含めてそれらの影響を視覚的にかつ空間的に把握するための、リスク影響範囲を可視化する手法について検討した。将来にわたる自然事象の影響範囲を可視化する手法は、高レベル放射性廃棄物の立地場所の検討やスクリーニングする際に非常に有益な判断資料となる。そして社会に対する説明資料としても、効果を発揮するであろう。

我が国では、自然災害が社会的な問題となることが多く、特に重要な土木構造物の構築においては、予め自然事象による影響を避けた場所に計画することが望ましい。社会資本を効率的に整備していく使命を帯びている土木技術者として、プロジェクトの手戻りをなくし地点選定の透明性を高めるためには、まずは机上のデータから一定以上の自然リスクを免れる地域を抽出する手法を開発せねばならないと考えた。

本研究成果を用いることにより、超長期にわたる断層活動の影響範囲、あるいは隆起侵食の影響を想定することが可能になる。つまり、自然事象からの影響を最小限にするべき施設において、施設に相応しい候補地の領域を地域ごとに事前に想定することが可能となり、現地を詳細に調査する段階での候補地変更のリスクを大きく低減することができる。

また、成果を応用すれば、シビアアクシデントの検討などに用いる確率論的な自然事象に係るデータを提示することも可能になる。加えて、一般構造物においても、設計者は活断層を避けるだけでなく、施設の重要度や事業者が許容するリスクとの関連で施設の計画を避けるべき範囲を知ることができる。換言すると、影響範囲に施設を計画するのであれば、十分な地質調査／影響評価／対策が必要になることを事前に認識し、必要な手立てを当初から準備することが可能となり、コスト削減にも寄与すると考えられる。

## 目 次

### 第1章 序論

1.1 はじめに	1
1.1.1 本研究の背景	1
1.1.2 地層処分を取り巻く状況の変化	2
1.1.3 科学的特性マップの概要	6
1.1.4 諸外国における地層処分の状況	9
1.1.5 本研究の目的	18
1.1.6 本研究の実施概要	18
1.2 既往の研究と本研究の位置付け	19
1.2.1 断層の評価	19
1.2.2 隆起・侵食の評価	19
1.2.3 火山評価	19
1.2.4 自然事象の評価時間スケール	19
1.2.5 評価対象とする施設	20
1.2.6 本研究の特色	20
1.3 本論文の構成	20
第1章の引用文献	22

### 第2章 断層のリスク評価

2.1 はじめに	25
2.2 検討方法と流れ	26
2.2.1 評価の考え方	26
2.2.2 評価の対象とする断層と評価期間	28
2.3 断層延長方向の伸展距離に関する評価	35
2.3.1 断層の成長	35
2.3.2 断層運動の地域性	36
2.3.3 断層運動から見た水平最大圧力方位と地震の発震機構	38
2.3.4 断層長と累積変位量の関係	41
2.3.5 具体的事例の収集・整理	43
2.3.6 伸展距離の決定論的評価手法	45
2.3.7 伸展距離の確率論的評価手法	48
2.4 断層側方の分岐・派生に関する評価	53
2.4.1 断層長と分岐・派生の関係	53
2.4.2 断層タイプ別事例の収集・整理	54

2.4.3	分岐・派生に関する評価の事例	64
2.4.4	分岐・派生の決定論的評価手法	67
2.4.5	分岐・派生の確率論的評価手法	95
2.5	まとめ	97
	第2章の引用文献	100
第3章	隆起・侵食のリスク評価	
3.1	はじめに	105
3.2	決定論的手法	105
3.2.1	評価の考え方	108
3.2.2	評価手法の検討	111
3.3	確率論的手法	116
3.3.1	海成段丘の旧汀線高度による隆起・侵食量の決定論的評価の問題点	116
3.3.2	最終間氷期の海成段丘に関する基礎的知見	118
3.3.3	最終間氷期の海成段丘による隆起・侵食量の 確率論的評価に関する検討の考え方	120
3.3.4	検討対象とした最終間氷期の海成段丘	121
3.3.5	旧汀線高度の誤差と隆起・侵食量の確率論的評価	122
3.4	まとめ	125
	第3章の引用文献	127
第4章	リスク影響範囲の可視化	
4.1	はじめに	129
4.2	自然現象のリスク領域の可視化手法	130
4.3	大局的なリスク評価の可視化の試算	135
4.3.1	断層の影響範囲の具体的計算手法	135
4.3.2	既往資料に基づいた具体的な試算例	138
4.3.3	火山のリスク影響評価の可視化	195
4.3.4	大局的なリスク評価の可視化	198
4.4	まとめ	201
	第4章の引用文献	202
第5章	結論	203
	謝辞	207



## 図表のキャプション

### 第1章

- 図-1.1 多重バリアシステムの概念図<sup>9)</sup>
- 図-1.2 地層処分施設の概念図<sup>10)</sup>
- 図-1.3 3段階の処分地選定プロセス<sup>7)</sup>
- 表-1.1 地質環境特性及びその長期安定性確保に関する要件・基準<sup>19)</sup>
- 図-1.4 地表地震断層のさまざまな出現形態<sup>20)</sup>
- 図-1.5 起震断層長さの1/100の範囲の作図例(那岐山起震断層の場合)<sup>20)</sup>
- 図-1.6 隆起・侵食の概念図<sup>20)</sup>
- 図-1-7 諸外国における地層処分プロジェクトの進捗状況
- 図-1-8 サイト確定調査における調査地域の選定・絞り込み(フィンランド)<sup>22)</sup>
- 図-1-9 処分場のサイト選定の経緯(スウェーデン)<sup>22)</sup>
- 図-1-10 サイト選定の状況(フランス)<sup>22)</sup>
- 表-1-1 9段階で構成されるサイト選定プロセス(カナダ)<sup>22)</sup>
- 図-1-11 地層処分場のサイト選定と許認可プロセスの流れ(スイス)<sup>22)</sup>
- 表-1-2 地球科学的な除外基準(ドイツ)<sup>22)</sup>
- 表-1-3 地球科学的な最低要件(ドイツ)<sup>22)</sup>
- 表-1-4 第2段階スクリーニングの基準(英国)<sup>22)</sup>
- 図-1-12 2014年白書に基づく新たなサイト選定プロセス(英国)<sup>22)</sup>
- 図-1-13 ブルーリボン委員会によるサイト選定の流れ(米国)<sup>22)</sup>

### 第2章

- 図-2.1 断層活動に伴う分岐・伸展とその評価の概念
- 図-2.2 断層活動の確率論的評価に関する検討の流れ
- 図-2.3 プレート運動と地震活動 A: 内閣府中央防災会議<sup>6)</sup>より引用 B: (社)全国地質調査業協会連合会編<sup>7)</sup>に加筆して引用
- 図-2.4 地震波速度構造と地震発生のメカニズム 長谷川<sup>8)</sup>より抜粋して引用
- 図-2.5 日本列島における今日の断層活動の開始時期 A: 佐藤・平田<sup>9)</sup>に加筆して引用, B: 松田ほか<sup>3)</sup>に加筆して引用 東北や九州・南西諸島に比較して, 活動開始年代が新しいとされる中部・近畿・中国地方の32の横ずれ断層について, 松田ほか<sup>3)</sup>では第四紀の変位量と平均変位速度から, 活動開始時期を推定している. 同文献では断層の活動開始時期を大略100万年前としているが, 新しいものは50万年前程度であり, この年代が我が国において最も若い活断層の年齢とみることができる.
- 図-2.6 インバージョンテクトニクス概念 (産総研地質図のホームページ<sup>14)</sup>より抜粋して引用)

- 図-2.7 対象構造物による断層活動の評価期間の考え方
- 図-2.8 高レベル放射性廃棄物の特徴 (NUMO<sup>2)</sup>による)
- 図-2.9 レファレンスケースについての線量の変化 (NUMO<sup>2)</sup>による)
- 図-2.10 活断層研究会(1991)<sup>23)</sup>のデータによる日本列島の活断層図<sup>24)</sup>  
(200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ(2000)による)
- 図-2.11 プレートの運動と断層タイプの関係 A: Seno<sup>26)</sup>に加筆して引用 B: 産総研地質図のホームページ<sup>14)</sup>より抜粋して引用
- 図-2.12 陸上活断層から求めた水平最大圧力方位の分布<sup>23)</sup>
- 図-2.13 地震の発震機構 (岡田・安藤, 1979)<sup>27)</sup>
- 図-2.14 活断層帯の主な方向分布(地域別)<sup>25)</sup>
- 図-2.15 A: 松田<sup>30)</sup>による断層長と変位量の関係 B: 松田ほか<sup>3)</sup>による横ずれ断層のパラメータの比較
- 図-2.16 断層の長さLと最大累積すべり量Dの関係<sup>16)</sup>
- 表-2.1 断層延長方向の伸展距離を検討した断層とパラメータ
- 図-2.17 断層タイプ・地域別の断層長と累積変位量の関係とその近似式
- 図-2.18 断層タイプ・地域別の断層長と累積変位量の関係とその近似式 (両対数グラフを用いないケース)
- 図-2.19 近似線に対する断層長の誤差分布と対数正規分布を想定した確率密度関数  
 $L_0' / L_0$ は現在の累積変位量に対する断層長と近似線上の断層長の比を示す。
- 図-2.20 将来の断層長(L')と累積変位量(D')の関係
- 図-2.21 検討対象とした37断層の将来100万年間の片側伸展長とその偏差
- 図-2.22 中部地方の横ずれ断層における断層長と累積変位量の関係
- 図-2.23 逆断層の分岐・派生に関する模型実験の例 (上田ほか<sup>47)</sup>に加筆)
- 図-2.24 北由利断層帯における前方転移の例<sup>48)</sup> 反射法地震探査・石油坑井資料の解析による北由利断層帯の大規模な前方転移の推定。陸域の断層は約165万年前までに活動を停止し、現在は海域の断層が活動している。
- 図-2.25 バランス断面法により解析された横手盆地東縁断層帯での前方転移<sup>49)</sup>
- 図-2.26 逆断層に伴う副次的断層・層面すべり断層の概念図<sup>50)</sup>
- 図-2.27 正断層の形成実験の事例 A: McClay<sup>52)</sup>によるリフトの形成実験。B: 狩野・村田<sup>51)</sup>が紹介している正断層の形成実験。いずれの模型実験においても、主断層(赤矢印)の沈降側に多数の副次的断層群が生じ、傾動域が形成される。
- 図-2.28 正断層系における主断層と副次的断層の概念<sup>46)</sup>
- 図-2.29 半地溝(ハーフグラaben)と地溝(リフト)の反射断面の事例 Twiss・Moores<sup>46)</sup>に紹介されたハーフグラaben(A)とリフト(B)の反射断面。Cは地震調査研究推進本部<sup>32)</sup>が公開している別府湾の反射断面であり、SBは三波川帯、RBは領家帯に相当し、MTL(中央構造線; 加筆)に相当する主断層が北へ傾斜する。

- 図-2.30 横ずれ断層の変形の進行に関する模型実験事例 A；狩野・村田<sup>53)</sup>に紹介されているリーデルせん断実験 B；上田<sup>54)</sup>による模型実験装置と実験結果
- 図-2.31 横ずれ断層のステップオーバーに伴うフラワー構造の概念<sup>55)</sup> I)：横ずれ断層のステップオーバーに伴う構造概念 II)：右横ずれ断層の左ステップによって生ずる正のフラワー構造の概念 III)：フラワー構造の反射断面の例
- 図-2.32 フラワー構造を形成する活構造の事例 A：鳥取県西部地震の震源域において地表位置で約3km離れた2条の断層が併走し、フラワー構造が認められた測線(阿部<sup>56)</sup>原図に断層位置(↓)を加筆). B：藤森<sup>57)</sup>による諏訪湖のプリアパートベイゼンの概念図.
- 図-2.33 地震断層周辺の地盤の隆起・沈降量<sup>58)</sup>
- 図-2.34 主断層からの距離に応じた小断層の分布密度(光明断層の例)<sup>58)</sup>
- 図-2.35 だいち2号干渉SARによる解析の結果結果(上下成分)<sup>60)</sup>
- 図-2.36 だいち2号干渉SARによる解析の結果結果(東西成分)<sup>60)</sup>
- 図-2.37 最大離間距離の計測方法の概念図
- 図-2.38 丹名断層帯の計測記録
- 図-2.39 牛首断層帯の計測記録
- 図-2.40 跡津川断層帯の計測記録
- 図-2.41 高山断層帯の計測記録
- 図-2.42 境峠断層の計測記録
- 図-2.43 阿寺断層帯の計測記録
- 図-2.44 根尾谷・揖斐川・武儀川断層帯の計測記録
- 図-2.45 長良川上流断層帯の計測記録
- 図-2.46 郷村・山田断層帯の計測記録
- 図-2.47 上林川・三峠断層の計測記録
- 図-2.48 山崎断層帯の計測記録
- 図-2.49 岩国断層帯の計測記録
- 図-2.50 菊川断層帯の計測記録
- 図-2.51 横手盆地東縁断層帯の計測記録
- 図-2.52 青森湾西岸断層帯の計測記録
- 図-2.53 津軽山地西縁断層帯・黒石断層の計測記録
- 図-2.54 函館平野西縁断層帯の計測記録
- 図-2.55 函館平野西縁断層帯の計測記録(「第四紀逆断層アトラス」<sup>11)</sup>併用部)
- 図-2.56 黒松内低地断層帯の計測記録
- 図-2.57 別府一万年山断層帯の計測記録
- 図-2.58 雲仙断層群の計測記録
- 図-2.59 布田川一日奈久断層帯の計測記録
- 図-2.60 出水断層帯の計測記録

- 図-2.61 水縄断層帯の計測記録
- 図-2.62 分岐断層の計測データと片側最大離間距離/断層長比の比較 (1) (2)
- 図-2.63 断層長と幅/断層長の関係
- 図-2.64 横ずれ断層の  $W/L$  比の補正相対度数と確率密度関数の比較 図上の計測は 0.5km 単位で行ったため、断層長が比較的短い 30km 程度の断層では  $W/L=0.017$  が計測限界である。
- 図-2.65 断層タイプおよび隆起側・沈降側別の  $W/L$  比の正規分布片側確率密度関数 逆断層（隆起側）と正断層（沈降側）の標準偏差 ( $\sigma$ ) が偶然類似していることに注意
- 表-2.2 本研究による評価パラメーター一覧表 <sup>62)</sup>

### 第3章

- 図-3.1 海成段丘ができる仕組み(a)と房総半島の海成段丘(b) <sup>2)</sup>
- 図-3.2 最終間氷期(約 12.5 万年前)に形成された段丘の旧汀線高度(単位m) <sup>3)</sup>
- 図-3.3 陸域の隆起速度の頻度分布 (NUMO<sup>1)</sup> に加筆)
- 図-3.4 隆起速度・沈降速度の継続性 出典;太田ほか編 <sup>5)</sup>
- 表-3.1 隆起・沈降速度の評価に使用される手法 <sup>6)</sup>
- 図-3.5 100 万年間の最大侵食量の簡易評価の概念
- 図-3.6 サイクリックな海面変動を支配するミランコビッチサイクル(出典;町田ほか<sup>7)</sup>) 地球公転軌道の離心率等の天文学的サイクルが汎世界的な気候変動を支配し、気温の変化が海洋酸素同位体の変化として海底堆積物や氷床などに保存される。海成段丘の高度と海洋酸素同位体の変化にもとづいて、海水準変動曲線が描かれる。
- 図-3.7 核燃料サイクル機構<sup>10)</sup>の整理による海水準変動曲線と古海水準に関する関連資料 関連資料1は米倉ほか編<sup>9)</sup>から抜粋、関連資料2は小池・町田編<sup>8)</sup>から抜粋
- 図-3.8 簡易評価による最大侵食量と法定深度との関係
- 図-3.9 各種の海水準変動曲線と最終間氷期以降の海成段丘の名称 A: 核燃料サイクル機構<sup>10)</sup>により整理された異なる手法によって推定された海水準変動曲線。B: 貝塚<sup>12)</sup>による隆起速度の推定の説明。●: パプアニューギニアのヒュオン半島のサンゴ礁段丘から得られた海面高度。□: 深海底コアの海洋酸素同位体ステージ( $\delta^{18}O$ )による海面変化曲線。海進・海退ピークを表わす海洋酸素同位体ステージと南関東の海成段丘の名称(記号)が付記されている。古海面高度とそれに対応する現在の海成段丘の旧汀線高度を結ぶ直線の勾配が平均隆起速度を示す。
- 表-3.2 検討に用いた海成段丘(MIS5e・MIS5c 相当)の旧汀線高度出典はすべて「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>による。同文献において MIS5e 相当海成段丘が 2 面(高位・低位)識別されている場合には低位の段丘を MIS5e' とした。
- 図-3.10 MIS5c 海成段丘の旧汀線高度を指標とした MIS5e 海成段丘の旧汀線高度 A, B ふたつの図の解釈については本文参照
- 図-3.11 MIS5e 海成段丘の旧汀線高度の決定論的評価式に対する相対誤差と正規分布確率

密度関数による近似データ数は17, 正規分布確率密度関数の標準偏差は6.51mとなる.

図-3.12 100 万年間の総侵食量に関する確率論的評価の概念

第4章

図-4.1(1) 断層の影響確率算出手法その1 断層のモデル化から計算グリッドの設定まで  
上記の概念図では片方の断層端から上盤のみの表示を行っている実際には上盤と下盤をそれぞれ両端から行っている

図-4.1(2) 断層の影響確率算出手法その2 計算グリッド内の計算手法

図-4.1(3) 断層の影響確率算出手法その3 任意地点 (X, Y) における断層影響確率

表-4.1 具体的な計算に用いた活断層セグメントの情報一覧 (産総研活断層 HP より)

図-4.2(1) モデル化した活断層セグメント位置図

図-4.2(2) モデル化した活断層セグメントと新編日本の活断層<sup>1)</sup>との比較

図-4.3 モデル化した活断層セグメントの伸展方向 確率の計算を片側100kmまで実施

図-4.4(1) 羅臼岳活動セグメントならびに古多糠活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(2) 峰浜活動セグメントならびに開陽活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(3) 養老牛活動セグメントならびに網走湖東方活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(4) 士幌活動セグメントならびに途別川活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(5) 音更活動セグメントならびに光地園活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(6) 東問寒別活動セグメントならびに富良野活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(7) 麓郷活動セグメントならびに下金山活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(8) 吉住活動セグメントならびに荻伏活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(9) 幌延活動セグメントならびに増毛山地東縁活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(10) 当別活動セグメントならびに馬追活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(11) 勇払活動セグメントならびに軽舞活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(12) 黒松内活動セグメントならびに旭浜活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(13) 函館西活動セグメントならびに沼田一砂川活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(14) 野幌活動セグメントならびにサロベツ北活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(15) サロベツ南活動セグメントならびに八雲活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.4(16) 尻別川活動セグメントの1Ma後の伸展確率

図-4.6(1) 羅臼岳活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

図-4.6(2) 古多糠活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

図-4.6(3) 峰浜活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

図-4.6(4) 開陽活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

図-4.6(5) 養老牛活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

図-4.6(6) 網走湖東方活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

図-4.6(7) 士幌活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

- 図-4.6(8) 士幌活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(9) 音更活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(10) 光地園活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(11) 東問寒別活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(12) 富良野活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(13) 麓郷活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(14) 下金山活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(15) 吉住活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(16) 荻伏活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(17) 幌延活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(18) 増毛山地東縁活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(19) 当別活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(20) 馬追活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(21) 勇払活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(22) 軽舞活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(23) 黒松内活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(24) 旭浜活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(25) 函館西活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(26) 沼田-砂川活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(27) 野幌活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(28) サロベツ北活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(29) サロベツ南活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(30) 八雲活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.6(31) 尻別川活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図
- 図-4.7 北海道における断層の影響範囲確率図 水色の塗りつぶしの領域が計算した領域
- 図-4.8 北海道の第四紀火山分布位置図と解析範囲 第四紀火山は第四紀火山カタログによる
- 図-4.9 北海道の第四紀火山の新規発生確率 (1Ma 間)
- 図-4.10 北海道における断層と第四紀火山の影響確率図 (1Ma 間)
- 図-4.11 北海道における断層と第四紀火山の影響確率 (1Ma 間) ならびに第四紀火山から半径 15km 円内の範囲

# Chapter 1

## 序 論

### 1.1 はじめに

#### 1.1.1 本研究の背景

地震など自然災害の可能性が高い我が国においては、原子力発電所をはじめとする重要施設における耐震設計手法<sup>1)</sup>に代表されるように、綿密な現地調査と詳細な解析に基づき自然事象からの施設への影響被害を避けねばならない。加えて東日本大震災以降において、次世代型ハザードマップに向けたシミュレーション／被害予測の高度化<sup>2)</sup>など、様々な災害への取組み方が求められているところである。国内では様々な大型プロジェクトが計画されているが、国民の生活向上の観点から必要性が認められるものに対しては、最先端の技術や知識を結集させてプロジェクトを推進していかなければならない。またこれらのプロジェクトは、長期的な展望や戦略をもって、社会や国民の理解や支持を得た上で着実に進めていくべきと考える。

しかしプロジェクトの種類によっては、地域住民への負の影響が懸念されるケースがあり、その際には住民や関係者の安全・安心のために、プロジェクトの意義から始まって、なぜこの地域でプロジェクトが検討されているのか、どのようなアプローチ、プロセスでこれまで検討が実施されてきたのか、将来的な影響はどのようなものが想定されるのかなどを、具体的かつ平易な言葉で説明してい

く必要がある。

近年は、地震活動に対する社会の関心が急速に高まっている。大型プロジェクトの推進に際しては、専門家あるいは専門家に近い知識を有する方々にもおいても納得感のある課題を抽出し、解決のためのアプローチやプロセスを、透明性を併せ持って説明していくことが求められている。

社会から理解を得る難易度は、プロジェクトの重要度、影響度が大きくなればなるほど上がってくるであろう。もちろんプロジェクトが影響する空間的範囲や、設備の機能維持が期待される時間スケールによっては、不確実性と相俟って難易度は雪ダルマ式に増えてくる。

このような状況のなか本研究では、重要施設、自然災害への懸念が払拭されず社会からの理解が得られがたい施設あるいは超長期の評価が必要な施設として地層処分施設<sup>3)</sup>を検討対象例とし、将来的にプロジェクトが地点不適合により白紙撤回されるリスクを軽減するための、計画段階における超長期にわたる自然事象(断層活動および隆起侵食)からの影響範囲予測手法を考えてみることにした。断層への備えとしては、回避・低減・移転・保有があるとされるが<sup>4)</sup>、回避を目指すものである。

なお地層処分とは、地層が本来持っている閉じ込め能力を利用し、長期に渡って安全に放射性物質を人間の生活環境から隔離しようとするものであり、火山や断層活動などの影響を受けない場所を選び、処分に適した地層に人工バリアを加えて処分すれば、放射性物質を長期にわたって閉じ込めて、人間の生活から隔離することが可能という概念に基づくプロジェクトである。人間が利用している深度はせいぜい数十メートル程度であり、地層処分では地下深部(日本の場合、300m以深)に埋設するので、放射性物質を人間の生活環境から隔離することが可能と考えられる。

### 1.1.2 プロジェクトを取り巻く状況の変化

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、我が国のエネルギー政策はゼロベースで見直すこととなった。我が国のエネルギー自給率は4%としかなく、将来にわたる安定供給、コスト競争力、地球温暖化対策の観点から、有識者の議論が進むことを期待したい。

一方、今後の原子力発電の取り扱いがどうなろうと、既に国内には原子力発電に伴う多量の使用済み燃料が保管されているのが実状であり、高レベル放射性廃棄物の処分方法ならびに処分地の選定は、避けて通れない問題になっている。

ここで高レベル放射性廃棄物の概要と斯界の動き<sup>3)</sup>を記載する。

高レベル放射性廃棄物とは、再処理で使用済み燃料からウラン、プルトニウム等の有用物を分離後に残存する放射能レベルの高い廃棄物であり、国の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」(最終処分計画)<sup>5)</sup>によれば、2020年頃までには総量約4万本のガラス固化体に相当する使用済み燃料が発生すると見込まれている。

高レベル放射性廃棄物の処分については、30～50年間貯蔵冷却した後、安定な地下深部(地下300m以深)に搬送・定置するものであり、人工的に設けられる複数の障壁(人工バリア)と天然の地層(天然バリア)とを組み合わせた「多重バリアシステム」により、高レベル放射性廃棄物を生活環境から隔離することを基本としている<sup>6),7),8)</sup>。



図-1.1 に、わが国において考えられている高レベル放射性廃棄物地層処分(多重バリアシステム)の概念図を示す。この多重バリアシステムは、放射能の高い廃液をガラスで固めたもの(ガラス固化体)を金属製のオーバーパックと呼ばれる容器に封入した後、地下深部の安定で好ましい条件を有する地質環境に定置、その周囲にベントナイトを主成分とする緩衝材を敷設することによって形成される。

高レベル放射性廃棄物の処分施設は、地上施設と地下施設に分けられる。地上施設は、ガラス固化体の受け入れ検査やオーバーパックへの封入等ガラス固化体を地下施設に搬入するための準備をする施設等で構成され、一方、地下施設は、ガラス固化体が埋設される処分坑道をはじめ、処分坑道を取りまく主要坑道、連絡坑道、さらにこれらの坑道と地上施設とを結ぶアクセス坑道等から構成される。

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の概念図を図-1.2 に示す。

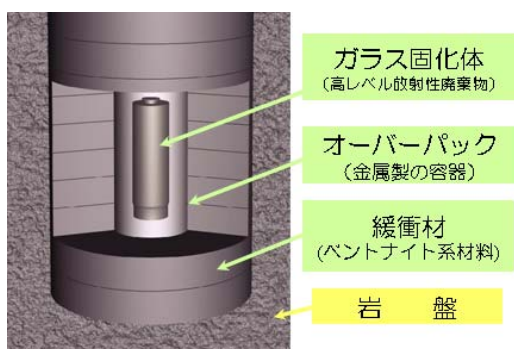


図-1.1 多重バリアシステムの概念図<sup>9)</sup>

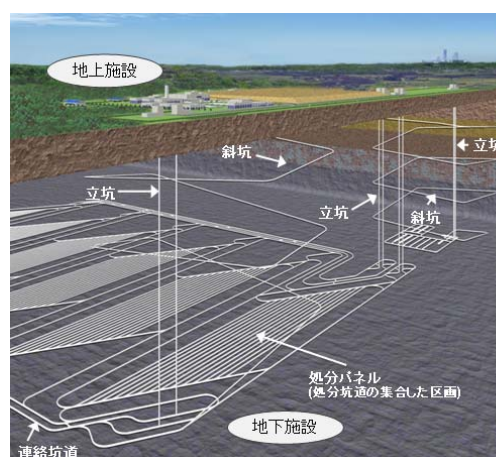


図-1.2 地層処分施設の概念図<sup>10)</sup>

地層処分の事業化については、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」<sup>7)</sup>(特廃法)において、実施主体、資金調達方法、処分地選定プロセスの枠組み等が定められ、この法律に基づき、実施主体である原子力発電環境整備機構(NUMO)が2000(平成12)年10月に設立された。処分事業は、国の基本方針および計画に基づいて行われる。これらの「国の基本方針」<sup>5)</sup>および「最終処分計画」には、「特廃法」で定められた3段階の処分地選定プロセス(図-1.3)とその後の建設・操業に至るスケジュールが示されており、概要調査に基づく精密調査地区の選定を平成20年代中頃目途に実施し、最終処分の開始を平成40年代後半目途に実施することとされている。この基本方針・計画に基づきNUMOは、2002(平成14)年12月全国市町村を対象に「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」<sup>10)</sup>の公募を開始した。2007(平成19)年1月高知県東洋町から応募があったものの、2007(平成19)年4月に応募は撤回され、現時点において文献調査の実施に至っていない。

地層処分に関する技術開発については、1970年代半ばより日本原子力研究開発機構(JAEA)(当時は動燃事業団)において開始され、1997(平成9)年4月に原子力委員会原子力バックエンド

対策専門部会より示された「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方」<sup>11)</sup>等の国の方針に基づき、1999(平成 11)年 11 月に「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」(以下、「第 2 次取りまとめ」という。<sup>12)</sup>が JAEA(当時は核燃料サイクル開発機構)から示された。このレポートは、わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分についての技術的な成り立ちと信頼性を提示したものである。「第2次取りまとめ」以降についても、2000(平成 12)年の原子力長期計画<sup>13)</sup>や 2005(平成 17)年の原子力政策大綱<sup>14)</sup>等に示された役割分担に沿って、実施主体と国の関係研究機関等において技術開発が進められている。

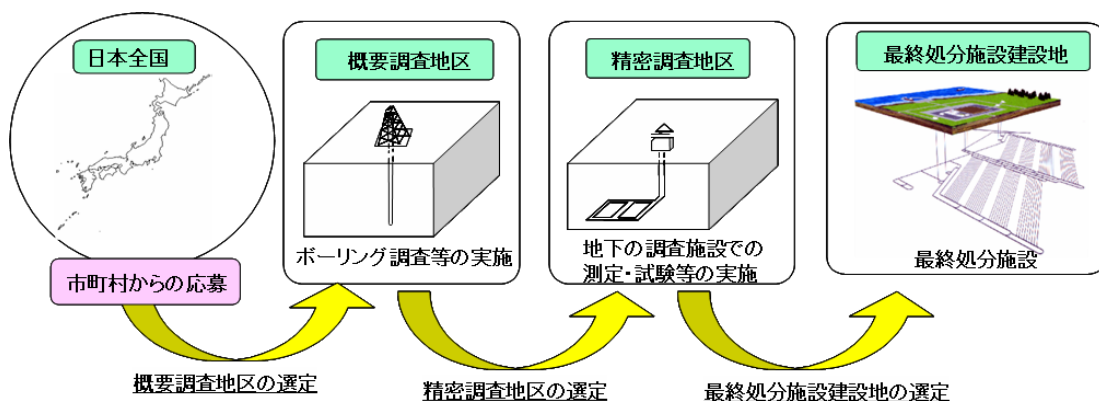


図-1.3 3段階の処分地選定プロセス<sup>7)</sup>

地層処分の安全性の面からは、埋設した廃棄物を処分場閉鎖後、長期間、安全に隔離することを示す必要がある。このことから、土木学会原子力土木委員会の地下環境部会では、火山・火成活動や地震・断層活動、隆起・侵食、気候・海水準変動といった変動事象が多重バリアシステムに影響を及ぼし安全性を損なうことがなく(地質環境の長期安全性の確保)、天然バリアの核種移行抑制機能が期待され人工バリアの設置に適した地質環境を有する(多重バリアシステムの成り立ちの確保)地域を選定することを想定して、処分システムに影響を及ぼすと考えられる項目、考慮すべき要件、その評価手法と必要な情報を得るための調査等を検討して報告書<sup>15),16)</sup>をとりまとめており、原子力安全委員会が環境要件を取りまとめる<sup>17)</sup>際に参考にされている。さらに同部会では、オーバーパックや緩衝材の設計・製作、地下施設の設計・施工、処分場の操業・閉鎖(廃棄物と緩衝材の搬送・定置、地下施設の埋め戻し等)、地下水流動解析等の核種移行解析、人工バリア材料の長期挙動およびニアフィールドにおける相互作用(力学的、化学的)、坑道安定性、シーリング性能等、処分技術・安全評価の技術に関しても知見を取りまとめている<sup>18)</sup>。また、JAEAでは、岩種の異なる2地点(北海道幌延町、岐阜県瑞浪市)において深地層の研究施設を保有しており、その研究施設を活用し、坑道掘削に必要なモニタリング技術、坑道内で行う坑道周辺の地質調査技術などの開発といった基盤研究開発が進められている。NUMOにおいては、文献調査や概要調査等の段階に必要な調査技術・評価手法や人工バリアの設計、処分システムの性能評価手法等の体系的な整備を展開しており、関係機関の技術開発の成果も含めて2010(平成 22)年度ま

での成果を技術レポートとして取りまとめて公表した。

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による未曾有の自然災害が発生後、国は最終処分政策の見直しを行うため、2013 年に総合資源エネルギー調査会に有識者からなる放射性廃棄物ワーキンググループと地層処分技術ワーキンググループを設置した。前者ではサイト選定に向けた取り組みの改善に関する検討が行われた。後者では地層処分の技術的信頼性に対する再評価の一環として、第2次取りまとめ以降の最新の科学的知見を反映し、わが国の地質環境特性やその長期安定性について審議が行われた。この結果、「地層処分システムに必要とされる機能を発揮させるうえで好ましい地質環境特性が熱環境、力学場、水理場、化学場の観点で整理されるとともに、おのおのの好ましい地質環境特性を有する地域がわが国に広く存在するであろう」こと、および「段階的なサイト調査を適切に行うことにより、おのおのの好ましい地質環境とその地質環境の長期安定性を確保できる場所を選定できる見通しが得られた」ことがあらためて確認された<sup>19)</sup>。

国は、こうした審議会の成果などを踏まえて、2015 年 7 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」(以下、最終処分基本方針という)を改定し、以下のことが明記されている。

- ① 現世代の責任の明確化と将来世代の選択可能性の確保(将来世代に負担を先送りしないよう地層処分を確実に進める、可逆性・回収可能性を担保する、代替オプションを含めた技術開発などを進めるなど)
- ② 全国的な国民理解、地域理解の醸成(丁寧な対話を重ねるなど)
- ③ 国が前面に立った取り組み(国が科学的により適性が高いと考えられる地域(科学的有望地)を提示する、調査などへの理解と協力について関係自治体に申入れを行うなど)
- ④ 事業に貢献する地域に対する支援(地域の主体的な合意形成に向け「対話の場」を設置するなど)
- ⑤ 推進体制の改善など(NUMO の体制を強化する、信頼性確保のために原子力委員会の関与を明確化し継続的な評価を実施する、原子力規制委員会は安全確保上の考慮されるべき事項を順次提示するなど)

この改定を受け、特に上記②、③の観点から、地層処分を行う場所を選ぶ際にどのような科学的特性を考慮する必要があるのか、それらは日本全国にどのように分布しているかといったことを大まかに俯瞰できるよう、国が全国マップの形で国民に情報を提供し、地層処分についての国民の関心や理解を深めていくこととなった。この方針のもと、地層処分技術 WG によって、既に存在する全国的なデータに基づき、地球科学的・技術的な観点から、地域の科学的な特性の提示にかかわる要件・基準が 2017 年 4 月に取りまとめられた。これを踏まえて、国は 2017 年 7 月、日本全国を以下の四種類の地域に分けた「科学的特性マップ」<sup>20)</sup>を公表した。

- ・火山の近傍や活断層の近傍など、地下深部の長期安定性などの観点から好ましくない特性があると推定される地域
- ・油田・ガス田などの鉱物資源が存在し、将来の掘削可能性の観点から好ましくない特性があると推定される地域
- ・上記の好ましくない要件・基準のいずれにも該当しない好ましい特性が確認できる可能性が相対

的に高い地域

・好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域のうち、特に輸送面でも好ましい地域

現在、国と NUMO は科学的特性マップに基づいて、地層処分事業に対する国民理解を深めるための対話活動を進めている。

更に NUMO は、2018.11 に、実施主体としてどのようにサイトの調査を進め、安全な処分場の設計・建設・操業・閉鎖を行い、閉鎖後の長期間にわたる安全性を確保しようとしているのかについて、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合して包括的に説明するため、「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ケースの構築－」（レビュー版）<sup>21)</sup>を取りまとめた。報告書は、今後、日本原子力学会および海外の第三者機関による技術的なレビューを受けることになっている。

### 1.1.3 科学的特性マップの概要

2015 年 5 月、高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する新たな基本方針が策定された。現世代の責任で地層処分を前提に取り組みを進めることや、国民や地域の理解と協力を得ていくため、地域の科学的特性の提示がすること等の方針が決められた。

ある場所が地層処分に相応しいかどうかを見極めるためには、火山活動や断層活動といった自然事象の影響や、地下深部の地盤の強度や地温の状況など、様々な科学的特性を総合的に検討する必要がある。表-1.1 には、国がまとめた地質環境特性及びその長期安定性確保に関する要件・基準<sup>19)</sup>を示す。

「科学的特性マップ」<sup>20)</sup>は、詳しくは現地調査を行って把握する必要があるが、既存の全国データから分かることを客観的に整理し、全国地図の形で示すものである。

具体的には、断層活動については、破碎帯の幅は断層長さの 1/350～1/150 程度（断層の両側合計）に概ね収まることが経験上示されているとして、断層活動の影響が生じる可能性が高い範囲と考えられる破碎帯幅の目安として、活動セグメント及び起震断層の長さの 1/100 程度（断層の両側合計）を好ましくない場所の基準としている。図-1.4 には地表地震断層のさまざまな出現形態、図-1.5 には起震断層長さの 1/100 の範囲の作図例（那岐山起震断層の場合）を示す。またその他留意点として、次の 4 項目が示されている。

- 1) 数万年以上の長期にわたり考慮すべき地下環境の安定性に係る事項である。
- 2) 地上・地下で活断層の位置が異なる可能性や、地上に表れていない断層が地下に存在する可能性があるため、地下に存在する活断層等は処分地選定調査の中で注意深く調査することが必要となる。
- 3) 基準に示す範囲の外側であっても、断層周辺には微小割れ目等が密度高く存在することが知られているため、これらについては、処分地選定調査の中で地下水流動に係る影響を評価していく必要がある。
- 4) 処分地選定調査では、断層の伸展・分岐の発生の可能性や断層面、破碎部、亀裂等の透水性等を評価し、安全評価を行うことにより問題がある場所は避ける必要がある。

表-1.1 地質環境特性及びその長期安定性確保に関する要件・基準<sup>19)</sup>

	要件	分類	基準	マップの提示に用いることが適切と考えられる文献・データ
火山・ 火成活動	マグマの処分場への貫入と地表への噴出により、物理的隔離機能が喪失されないこと	直接指標	第四紀火山の中心から 15 km 以内 第四紀の火山活動範囲が 15 km を超えるカルデラの範囲 ※火山中心の精査が必要なものについて留意が必要	日本の火山（第3版）（産業技術総合研究所, 2013） 日本の第四紀火山カタログ（第四紀火山カタログ委員会, 1999）
隆起・侵食	著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近により、物理的隔離機能が喪失されないこと	直接指標	過去 10 万年における最大侵食量が 300m を越えたことが明らかな範囲	（利用可能な文献がないため、代替指標で設定） 日本列島と地質環境の長期安定性 付図 5 最近約 10 万年間の隆起速度の分布（日本地質学会地質環境の長期安定性研究委員会編, 2011）
		代替指標	全国規模で体系的に整備された文献・データにおいて、将来 10 万年間で隆起と海水準低下による侵食量が 300m を超える可能性が高いと考えられる地域（具体的には、海水準低下による最大 150m の侵食量が考えられる沿岸部のうち、隆起速度最大区分（90 m 以上/10 万年）のエリア）	
地熱活動	処分システムに著しい熱的影響を及ぼす地熱活動により、閉じ込め機能が喪失されないこと	直接指標	処分深度で緩衝材の温度が長期に 100°C を大きく超える範囲	（利用可能な文献がないため、代替指標で設定） 全国地熱ポテンシャルマップ（産業技術総合研究所, 2009）
		代替指標	処分深度において緩衝材の温度が 100°C 未満を確保できない地温勾配の範囲 ※第 2 次取りまとめにおける検討を参照すると、約 15°C/100m より大きな地温勾配の範囲	
火山性熱水・ 深部流体	処分システムに著しい化学的影響を及ぼす火山性熱水や深部流体の流入により、閉じ込め機能が喪失されないこと	直接指標	処分深度に火山性熱水または深部流体が存在し、かつ化学場への影響が明らかな範囲	（利用可能な文献がないため、代替指標で設定） 全国地熱ポテンシャルマップ（産業技術総合研究所, 2009）
		代替指標	地下水の特性として、pH4.8 未満あるいは炭酸化学種濃度 0.5mol/dm <sup>3</sup> (mol/L) 以上を示す範囲 ※エリアで表現することが困難であることに留意が必要	
断層活動	断層活動による処分場の破壊、断層のずれに伴う透水性の増加等により閉じ込め機能が喪失されないこと	直接指標	活断層に、破砕帯として断層長さ（活動セグメント長さ）の 1/100 程度（断層の両側合計）の幅を持たせた範囲	活断層データベース（産業技術総合研究所ウェブサイト）
		代替指標	活断層に、破砕帯として断層長さ（起震断層長さ）の 1/100 程度（断層の両側合計）の幅を持たせた範囲	
鉱物資源	現在認められている経済的価値の高い鉱物資源が存在することにより、意図的でない人間侵入等により地層処分システムが有する物理的隔離機能や閉じ込め機能が喪失されないこと	直接指標	現在稼働中の鉱山あるいは残存鉱量が大きな閉山鉱山や未開発見込み鉱床が存在する範囲	（利用可能な文献がないため、代替指標で設定） 日本油田・ガス田分布図第 2 版（産業技術総合研究所, 1976） 日本炭田図第 2 版（産業技術総合研究所, 1973） 国内の鉱床・鉱微地に関する位置データ集（第 2 版）（内藤, 2017）
		代替指標	鉱業法で定められる鉱物のうち、全国規模で整備された文献データにおいて、技術的に採掘が可能な鉱量の大きな鉱物資源の存在が示されている範囲（ただし、当該地域内においては、鉱物の存在が確認されていない範囲もあり、調査をすればそうした範囲が確認できうることに留意する必要がある。） ※炭田については、鉱量が示されているか否かに留意が必要 ※金属鉱物については、エリアで表現することが困難であることに留意が必要	

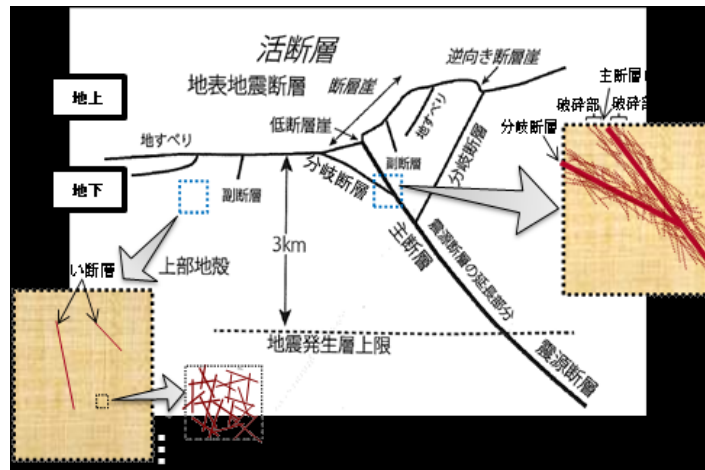


図-1.4 地表地震断層のさまざまな出現形態<sup>20)</sup>

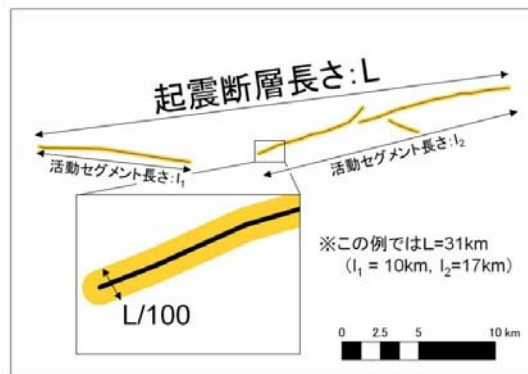


図-1.5 起震断層長さの 1/100 の範囲の作図例(那岐山起震断層の場合)<sup>20)</sup>

また、隆起・侵食については、著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への接近を避けて物理的隔離機能が喪失されないことを要件としており、沿岸で 90m/10 万年以上の隆起量を示す場所は、海水準変動を考慮すると隆起量が 300m を超える可能性があることから好ましくない場所としての基準を設定している。図-1.6 に、隆起・侵食の概念図を示す。

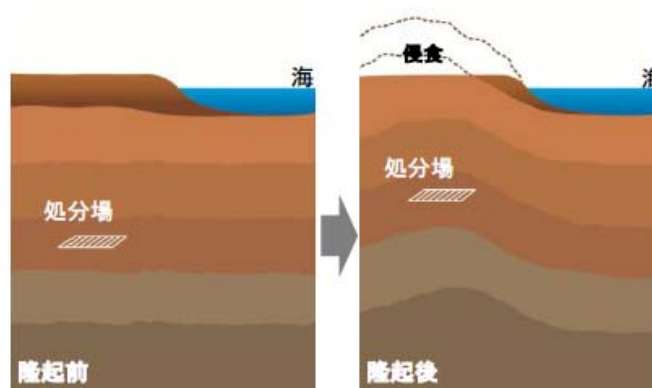


図-1.6 隆起・侵食の概念図<sup>20)</sup>

### 1.1.4 諸外国における地層処分状況

高レベル放射性廃棄物は、極めて長期にわたり生活環境から遠ざける必要があり、その方法として地下深くの安定な地層中に処分する地層処分が最も好ましい処分方法であることが、国際的に共通の認識となっている。諸外国の経験から学ぶ上では、放射性廃棄物を長期にわたって管理するという共通の目標があっても、各国の文化・政治及び歴史的な状況を反映して、地層処分の実現に至る取組みには似ているところと異なるところが必然的に生じている。諸外国における地層処分プロジェクトの進捗状況を図 1-7 に示す。

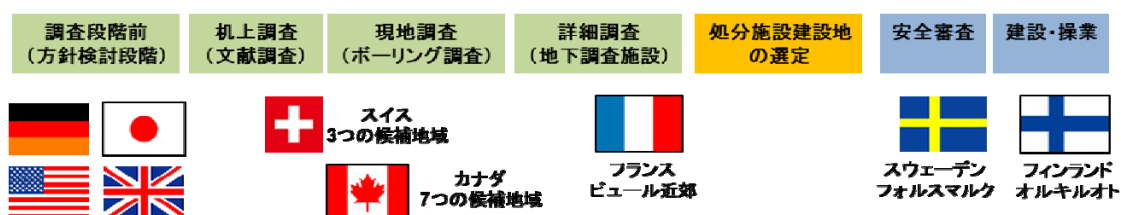


図-1.7 諸外国における地層処分プロジェクトの進捗状況

諸外国における地層処分の状況については、毎年、経済産業省資源エネルギー庁によってまとめられており<sup>22), 23)</sup>、処分地選定に関する事項を中心に以下に要約する。

#### ○フィンランド

フィンランドでは、原子力発電から生じる使用済燃料を再処理せず、高レベル放射性廃棄物として処分する方針であり、処分前は各原子力発電所で中間貯蔵している。

フィンランドでは1983年から、高レベル放射性廃棄物の最終処分場のサイト選定に向けた調査がスタートした。次の通り、サイト調査を3段階で進めることを規定した。①サイト確定調査(1983～1985年)、②概略サイト特性調査(1986～1992年)、③詳細サイト特性調査(1993～2000年)。

1983年からのサイト確定調査では、大規模な亀裂帯を回避し、安定な基盤岩ブロックを選定するために、最初に航空写真や地形図等の文献調査が行われ、フィンランド全土から100～200km<sup>2</sup>の大きさからなる327カ所の目標地域が選定された。次に、基盤岩の大きさや地形等の地質学的要因や、人口密度・使用済燃料の輸送等の環境要因に関する文献調査により目標地域の絞り込みが行われ、5～10km<sup>2</sup>の大きさからなる102カ所の調査地域が選定された(図1-8参照)。その後、調査に対して自治体から同意を得る等のプロセスを経て、最終的に5カ所で地表からのボーリング等による概略サイト特性調査が行われた。その後、より適した場所と考えられた4カ所で、実施主体であるポシヴァ社が詳細サイト特性調査を行い、併せて最終処分場の地上施設と地下施設を建設・操業する場合の環境影響評価も実施した。

これらの経緯を経て、1999年5月、ポシヴァ社はオルキルオトを最終処分地に選定して処分場建設計画を進めることとし、原子力法に基づく原則決定の申請を世界で初めて政府に行った。

オルキルオトにおいては、2004年6月から地下特性調査施設(ONKALO)の建設が開始されている。ポシヴァ社はこの建設作業と並行して必要な研究開発や設計を実施し、さらに詳細な地質環

境データの取得が行われている。処分場の建設・操業許可申請においては、これらの研究成果に基づいて処分の安全性が評価されることになると記載されている。

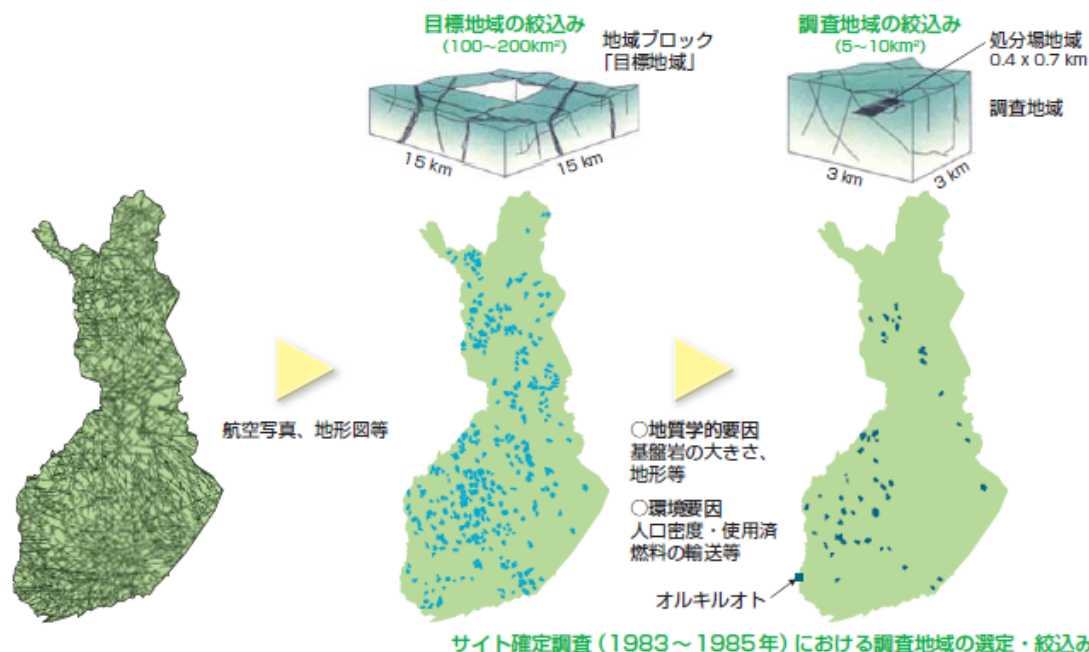


図-1.8 サイト確定調査における調査地域の選定・絞込み(フィンランド)<sup>22)</sup>

#### ○スウェーデン

4カ所12基ある原子力発電所で発生した使用済燃料は、取り出し後約1年冷却した後、国内で1カ所に集めて集中貯蔵されている。スウェーデンでは、使用済燃料を地下約500mの結晶質岩中に、キャニスタ、緩衝材(ベントナイト)及び地層という多重のバリアシステムにより廃棄物を隔離し直接処分する計画である。選定作業としては、総合立地調査、フィージビリティ調査、サイト調査、詳細特性調査という4種類の調査を設定し、2段階で選定を進める構成としている。1995年に政府は、第1段階の調査は5～10の自治体で、第2段階の調査は少なくとも2カ所で実施するという条件を設定した。なお、詳細特性調査は処分場の建設段階に含まれており、建設許可が出された後に実施される。処分実施主体のSKB社は、エストハンマルとオスカーシャムの2カ所で第2段階のサイト調査を実施し、エストハンマル自治体のフォルスマルクを処分場の建設予定地として選定して2011年3月に処分場の立地・建設の許可申請を行った(図-1.9参照)。

スウェーデンは、フェノスカンジア盾状地と呼ばれる古い大陸性の地殻の上に位置しており、地層処分場の建設予定地であるフォルスマルクを含むスウェーデン南東部の岩盤は、19.5～17.5億年前(古原生代)に形成された結晶質岩である。約4～2.5億年前には、大西洋側のプレート運動の圧力によってノルウェーとの国境となっているスカンディナビア山脈が形成されるとともに、スウェーデン南東部の岩盤にも大規模な断層が生じている。また、約200万年前以降の新生代第四紀には、山脈の東山麓に氷河が何度も形成された跡が残っている。ウルム氷期として知られる



最終氷期は約 11 万前から始まり、最盛期にはスカンディナビア半島全体が氷で覆われ、氷床の厚さは最大で 3km に達したと推定されている。この氷の重さのために地殻が沈み込み、スウェーデンとフィンランドの間にできた窪みが現在のボスニア湾にあたる。氷床の成長・後退につれて岩盤にかかる荷重が変化するので、断層が動いて地震が発生することもある。氷期が終わった約 1 万年前から現在まで、沈降した地殻が元に戻ろうとしてゆっくりとした隆起が続いている。現在のフォルスマルクは海岸に面しているが、紀元前 8800 年頃には海面下 150m のところにあり、紀元前 500 年頃に陸地になった。表層 5 ～ 6m の土壌は、氷床の動きによって岩盤が侵食されて運ばれた氷成粘土や礫の堆積物である。処分場の建設予定地であるフォルスマルクにも大規模な断層がある。そのような断層の近くでは、その動きによって結晶質の岩石が引きちぎられ、細かく破碎しているが、そのことによって一定以上離れた所の岩体は相対的に安定となり、レンズ状の塊となって残っている部分がある。そのような岩体は「構造レンズ」と呼ばれており、フォルスマルクの地下約 500m のところには、これまでのプレート活動や氷床荷重の変動による影響を受けていない、構造レンズが存在することがボーリング調査で確認されていて、処分場はこのような構造レンズ内の結晶質岩に建設されると記載されている。

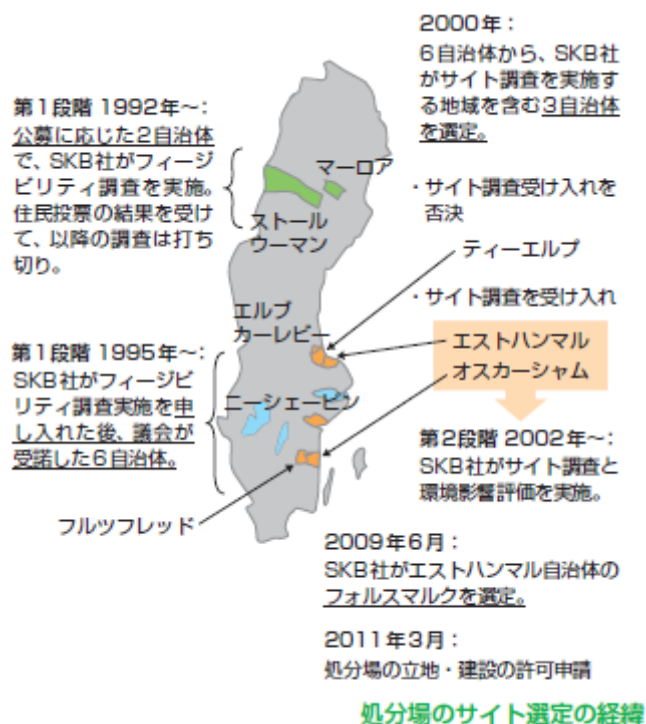


図-1.9 処分場のサイト選定の経緯(スウェーデン)<sup>22)</sup>

## ○フランス

フランスでは、原子力発電(58 基 2014 年末)で発生する使用済燃料を再処理し、再処理等に伴って発生する高レベル放射性廃棄物等は「可逆性のある地層処分」を行う方針を定めている。

1991年に制定された放射性廃棄物管理研究法のもと、地域からの自発的立候補を原則として、地下研究所の設置のためのサイト選定が進められ、1999年に粘土層を有するビュールが選定された。その後、2006年の放射性廃棄物等管理計画法では、処分場の設置許可申請が行えるのは、地下研究所による研究の対象となった地層だけとされている。

詳しくは以下のとおりであり、1987年に実施主体である放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が地層処分場のサイト選定を目的として、岩塩、粘土、頁岩(けつがん)、花崗岩という4つの地質媒体を有するサイトで調査を開始した。しかし、地元で反対運動が起こり、1990年2月に政府は一時的に現地調査を停止することになった。その後、地質学的に適した一定数のサイトについて政治的及び社会的合意を得るために受け入れに関心を示した28件の申請に対して、地質学的な特性評価などを踏まえて申請地域が属する10県を選定した。そのうちの8県で地元との協議を行い、1993年には4県のサイトが予備的な地質調査対象として提案された(図-1.10参照)。ANDRAは1994年から2年間にわたって予備的な地質評価作業を実施し、その結果、ビュール(ムーズ県/オート=マルヌ県)、ガール、ヴィエンヌの3カ所のサイトを提案したうえで、最終的にはビュールが選定された。設置許可の発給後に操業の可逆性と安全性を実証するパイロット操業フェーズが始まると記載されている。

調停官による提案区域		予備的調査後に ANDRA より提案されたサイト
県名	区域規模	
ガール県	北東部の小郡規模	シュクラン近傍(ガール県内)
オート=マルヌ県	北東部の5郡	ビュール近傍(ムーズ県内のオート=マルヌ県との県境)
ムーズ県	同県全域	
ヴィエンヌ県	南部の2つの小郡	ラ=シャベル=バトン近郊(ヴィエンヌ県内)

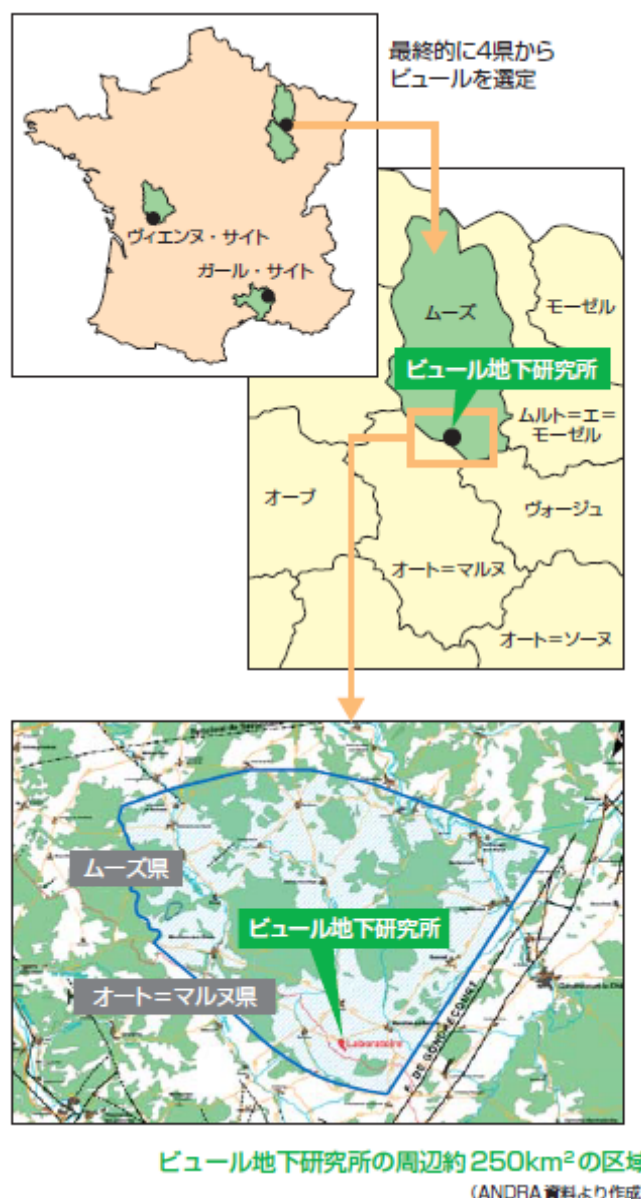


図-1.10 サイト選定の状況(フランス)<sup>22)</sup>

## ○カナダ

カナダでは、カナダ型重水炉(22基の CANDU 炉)から発生する使用済燃料を再処理せずに高レベル放射性廃棄物として当面 60 年間はサイト貯蔵または集中貯蔵を実施し、最終的には地層処分するという「適応性のある段階的管理」が実施主体である核燃料廃棄物管理機関(NWMO)により長期管理アプローチがなされている。「適応性のある段階的管理」では、地層処分場の候補岩種として、カナダ盾状地の結晶質岩(約 45 億年前～ 5.4 億年前に形成)、もしくはオールドビス紀の堆積岩(約 4 億 5,000 万～5 億年までの間に形成)が考えられている。

NWMO は 2010 年から 9 つの段階で構成されたサイト選定プロセスを開始した。このサイト選定手続きは、自治体や地域を公募し、地層処分プロジェクトに対し関心表明を行った地域の中から処分場候補地を選定していくものである。サイト選定における検討事項として安全性を確保するための基準のほか、社会、経済、文化等の安全性以外の要素を評価するための基準も提示している。22 の自治体がプロセスに関心表明を行い、初期スクリーニングをパスした 21 自治体の多くで予備的評価が実施され、2017 年 12 月時点でオンタリオ州の 5 自治体がサイト選定プロセスに残っており、一部でボーリング調査が進められていると記載されている(表-1.1 参照)。

表-1.1 9 段階で構成されるサイト選定プロセス(カナダ)<sup>22)</sup>

### 9段階で構成されるサイト選定プロセス

(段階数は参加している自治体に対してのみ言える点に注意)

準備段階	カナダ政府及び州政府、国と州の先住民の自治組織・規制機関などとの協議した後、NWMO が最終版としたサイト選定計画を公表する。
第 1 段階	NWMO は、サイト選定プロセスを開始し、処分事業及びサイト選定計画についての情報提供、質疑応答等によりプロジェクトとサイト選定プロセスに対するカナダ国民の意識を高める。 意識啓蒙活動は、サイト選定プロセスの全期間にわたって継続する。
第 2 段階	詳しく知りたい自治体に対して、NWMO が詳細な情報提供を行う。初期スクリーニングを実施する。 自治体からの要請があれば、NWMO が初期スクリーニング基準に基づいて自治体の潜在的な適合性を評価する。(1～2カ月)
第 3 段階	関心を示した自治体に対して、潜在的な適合性の予備的評価を実施する。 NWMO は自治体との協力の下で、自治体内のサイトが処分事業の詳細要件を満たす可能性があるかについてのフィージビリティ調査を行う。(1～2年)*
第 4 段階	関心のある自治体に対して、影響を受ける可能性のある周辺自治体を参加させるとともに、詳細なサイト評価を完了する。 NWMO は、地域調査や複数年におよぶサイト評価に対する関心を正式に表明した自治体から一つ、もしくは複数のサイトを選定する。NWMO はサイト調査をサポートする専門技術センターを開発する。関心のある自治体とともに、影響を受ける可能性のある周辺自治体、先住民の政府、州政府の参加を得て、広域を対象とした環境影響評価を行う。(約 5年)
第 5 段階	適合性のあるサイトの存在が確認された自治体(複数)が、処分場の受入意思があるかどうかを決定し、プロジェクトを進める条件を提示する。
第 6 段階	好ましいサイトのある自治体(1つ)と NWMO が処分場受入に関して正式に合意する。
第 7 段階	規制当局は、独立した正式な公的プロセスを通じて処分事業の安全性を審査し、全要件が満たされる場合、事業を進めることを承認する。 環境評価、サイト準備、建設及び操業に関する許認可プロセスを通じ、規制機関によるレビューが実施される(使用済燃料の輸送に関する規制機関の承認も必要とされる)。
第 8 段階	地下実証施設の建設・操業 NWMO はサイトの特性を確認するための地下実証施設の活動をサポートする専門技術センターを開発する。
第 9 段階	地層処分場の建設・操業

○スイス

スイスでは、多重バリアシステムにより長期間にわたって放射性廃棄物を人間環境から隔離するという通常の地層処分概念に、回収可能性の考え方を取り入れた処分概念である「監視付き長期地層処分」が、2005年2月に施行された原子力法及び原子力令で採用されている。原子力令では、放射性廃棄物処分場のサイト選定は、連邦政府が策定した特別計画「地層処分場」で取り決めた3段階のプロセスで進められることが定められている(図1-11参照)。

実施主体として処分責任を有するNAGRA(放射性廃棄物管理協同組合)は、当初スイス北部の結晶質岩に注目して検討を進めていたが、必要な大きさを備えた母岩を見つけ出せない可能性があるとして堆積岩も調査対象にした。その後は既存の地質情報に基づきスイス全土から絞り込む形で粘土質を多く含む岩種に着目し、約1億8,000万年前のジュラ紀に形成されたオパリナス粘土を対象に深さ400～900mの場所に処分場を設置することを検討している。

現在は第2段階の取りまとめに進んでおり、地層処分場の母岩となる不透水のオパリナス粘土が十分な厚さで存在し、氷河等による侵食の影響を受けず、長期に安定する放射性廃棄物の安全な閉じ込めが実現できるエリアとして、「ジュラ東部」、「チューリッヒ北東部」「北部レゲレン」を第3段階に進む候補エリアとしている。他方、NAGRAはサイト選定第3段階の実施に向けて、ボーリング調査の準備を進めており、許可申請書を連邦エネルギー庁へ提出したと記載されている。



図-1.11 地層処分場のサイト選定と許認可プロセスの流れ (スイス) 22)

○ドイツ

1979年からゴアレーベンにおける約2億6千万年前の岩塩ドームにおいて、高レベル放射性廃棄物の処分場候補地として探査が続けられてきた。ゴアレーベンの岩塩ドームの規模は長さ約14km、幅が最大約4kmあり、岩塩層が一番深いところでは地下約3,500mまで続いており、処分深度として地下約840mから1,200mの範囲で考えられてきた。しかし、2013年に高レベル放射性廃棄物処分場サイト選定に関する法律が制定され、公衆参加型の手続きによりサイト選定をやり直すことになった。これに伴い、ゴアレーベンでの探査は2012年11月に中断された。ゴアレーベンについては、今後のサイト選定手続きで再度検討対象となる可能性は否定できないが、その際も他のサイトと同列に扱うとされる。

ドイツでは、放射性廃棄物を隔離する上で天然バリアが最も重要な役割を果たすとの考えから、岩塩層での処分可能性が注目されてきた。岩塩については100年以上

の採掘経験があり、岩塩層では特別な支保なしで数十年間自立する地下空間を掘削できること、長期的にはクリープ現象で開削空間が閉じられていくことが確認されている。また、岩塩は熱伝導度が高く、廃棄物から発生した熱を周囲に逃がすことができる。

2017年3月に改正されたサイト選定法に基づくサイト選定では、実施主体となるBGE(連邦放射性廃棄物機関)が提案する複数の候補から、地上探査、地下探査、最終的なサイトの比較を経て、段階的に絞り込みが行われる。これらの各段階における重要な決定は、連邦議会において連邦法を制定し確定される。現在のスケジュールでは、2031年を目標として最終的なサイトを決定する予定である。サイト選定法の改正では、サイト選定基準や公衆参加の枠組みを含む高レベル放射性廃棄物処分委員会の勧告の多くが法制化されたと記載されている(表1-2, 表1-3参照)。

表-1.2 地球科学的な除外基準(ドイツ)<sup>22)</sup>

広域的な垂直運動	年平均1mm以上
活動的な擾乱域	スタンプ階(3,400万年前頃)から現在に至るまで、運動を起こしたことが証明できるか、その可能性が高い断層が存在する。
現在または過去の鉱山建設活動の影響	現在及び過去の鉱山建設活動により、最終処分場エリア)のある岩盤の応力状況と透水係数に悪影響が生じていることが懸念される。
地震活動	一定レベルの地震活動が存在する。
火山活動	第四紀に火山活動が生じているか、将来火山活動が予想される。
地下水の年代	バックグラウンド・レベルと比較して年代の新しい地下水であることが示されている。

表-1.3 地球科学的な最低要件(ドイツ)<sup>22)</sup>

岩盤の透水係数	10 <sup>-10</sup> m/s以下
閉じ込め機能を果たす岩盤領域*の厚み	100m以上
閉じ込め機能を果たす岩盤領域の深度	300m以深
閉じ込め機能を果たす岩盤領域の広がり	処分場建設に可能な面積を有している
閉じ込め機能を果たす岩盤領域の健全性	100万年にわたり維持されることが疑問視されていない

○英国

英国では、政府が高レベル放射性廃棄物等の処分における放射性廃棄物管理方針の決定、サイト選定の実施などを行っている。放射性廃棄物管理の実施主体である NDA(原子力廃止措置機関)と子会社 RWM(放射性廃棄物管理会社)は、地層処分を含む研究を行うとともに、放射性廃棄物の長期管理に関する政府の政策を実施している。

2008年6月の英国政府白書『放射性廃棄物の安全な管理—地層処分の実施に向けた枠組み』において、公募方式に基づく6段階から成るサイト選定プロセスや適用すべき基準が示された。英国政府が好ましいサイトを選定するまでは、自治体が選定プロセスから撤退する権利を行使できるとされている。第2段階では、明らかに不適格な地域を予め除外するためのスクリーニングの基準が設けられた(表-1.4 参照)。サイト選定が開始されたが、2013年1月に、関心表明を行っていたカンブリア州西部3つの自治体がサイト選定プロセスからの撤退を表明した。

英国政府は2014年7月、高レベル放射性廃棄物等の地層処分施設の設置に向けた新たなサイト選定プロセス等を示した白書「地層処分—高レベル放射性廃棄物等の長期管理に向けた枠組み」を公表した。新たなサイト選定プロセスでは、3つに分けてサイト選定活動を行っている」と記載されている(図 1-12 参照)。

表-1.4 第2段階スクリーニングの基準(英国)<sup>22)</sup>

除外基準として適用すべき項目	理由/説明及びコメント
天然資源	
石炭	資源が100m以上の深さにある場合に限り、深部への侵入リスクがある。
石油及びガス	深部への侵入のリスクがある。
油頁岩	深部への侵入のリスクがある。
金属鉱石(一部の鉱石)	深部、すなわち100m以上で採鉱される場合に限り、侵入のリスクがある。
廃棄物の処分/ガスの貯蔵	深度100m以上で実施する意向が表明されている、あるいは既に承認されている場合のみ該当する。
地下水	
帯水層	地層処分施設の母岩の全体または一部が帯水層内にある場合に〔除外基準として〕適用される。
浅部透水性地層	地層処分施設の母岩の全体または一部が将来合理的に開発され得る透水性地層である場合に〔除外基準として〕適用される。
特定の複雑な水文地質学的環境	深部カルスト地形及び既知の温泉の原岩

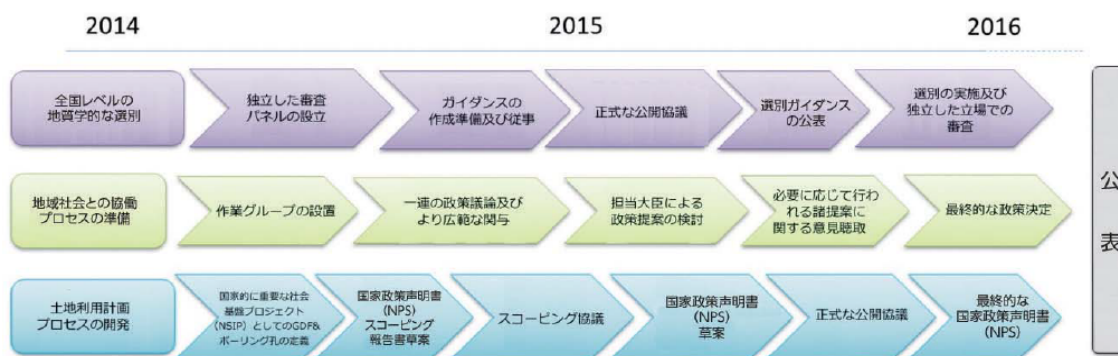


図-1.12 2014年白書に基づく新たなサイト選定プロセス(英国)<sup>22)</sup>

2016年4月に実施主体であるRWMは、地質学的スクリーニングのガイダンスを公表した。このガイダンスにおいて、RWM社は地層処分施設の長期安全要件に関して考慮すべき5つの地質特性として、①岩種、②岩盤構造、③地下水、④自然プロセス、⑤資源に着目し、過去に英国で実施された採鉱活動に関する情報などに基づいて、スクリーニング作業を実施している。なお、現在は英国のEU離脱問題による政情不安定を受け、サイト選定プロセスが遅延していると記載されている。

### ○米国

米国における商業用の原子力発電所は全部で85カ所あり、そのうち62カ所にある100基の原子炉が運転中である。なお、29カ所にあった32基の原子炉は既に閉鎖されている。

米国では、1987年に法律によりネバダ州のユッカマウンテンが高レベル放射性廃棄物の唯一の処分候補地としてサイト特性調査が行われ、2002年に法律で処分場サイトとして指定された。ユッカマウンテンの岩盤は、約1,100～1,400万年前の一連の噴火によって生じた火山灰が堆積した凝灰岩である。年間の降水量が少なく蒸発量が多い砂漠地帯にあって、地下水面は地表から500～800mと深いところにあり、地表から200～500mの深さに地層処分する方針である。

2009年に発足したオバマ政権は、ユッカマウンテン計画を中止し代替案を検討する方針を示し、特別委員会(ブルーリボン委員会)でバックエンド対策が検討された。ブルーリボン委員会の勧告では、同意に基づくサイト選定プロセス(図-1.13参照)など、これまで進められてきたユッカマウンテン計画とは異なる処分場開発が示されたものの、地層処分は必要との結論が示されている。また、処分場の母岩については、これまで研究が進められてきた岩塩、結晶質岩、粘土層、頁岩、凝灰岩、玄武岩など様々な岩種で処分が可能であり、岩種自体よりも地質環境と定置方法の選択が重要との見解が示された。

2017年1月に誕生した共和党のトランプ政権は、ユッカマウンテン計画を継続する方針を示しているが、政策の実施に必要な法整備ができない状況が続いていると記載されている。

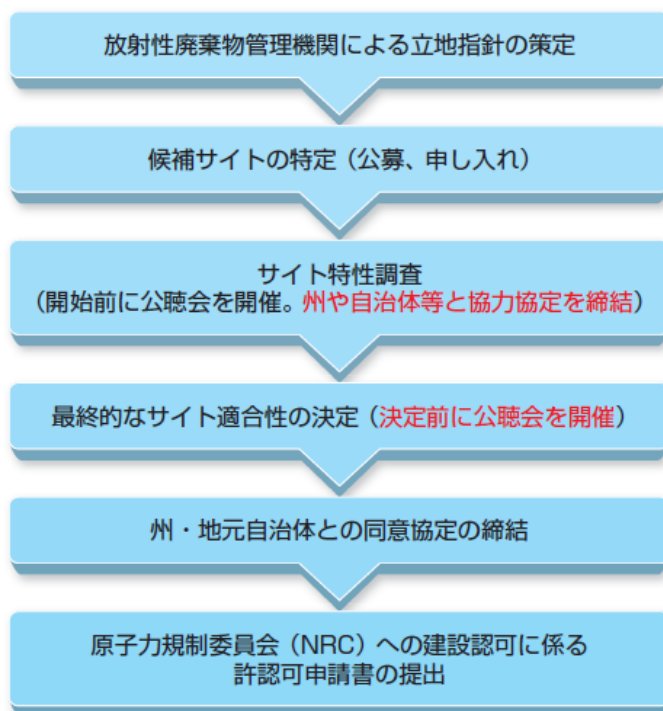


図-1.13 ブルーリボン委員会によるサイト選定の流れ(米国)<sup>22)</sup>

### 1.1.5 本研究の目的

本研究では、断層活動などの自然事象からの影響について、事前に社会からの理解を得るための技術的観点から必要な説得手法の構築を目指しており、本稿ではその題材として高レベル放射性廃棄物の地層処分を取り上げるものである。

現状では、地層処分プロジェクトの実施主体を法律により原子力発電環境整備機構 (NUMO) と定め、2000 年から種々の広報活動、技術検討を実施してきている。処分地の選定においては、立地市町村からの公募方式を原則としており、高知県東洋町など一時誘致の動きを見せたこともあったが、結果としてこれまで 1 件の応募もなされていない。

これは地層処分の技術の安全性について信頼感が醸成されていないこと、地域にとって信頼できる情報がどれなのかわからないこと、選定プロセスについても透明性や公平性が見えていないことが大きな原因と筆者は考える。

また仮に市町村から処分地建設への応募があったとしても、件数が皆無に等しい状況の中での応募では、処分地としての適格性を自然条件から調査・分析・評価するに当たっての評価手法については、高い説明性が求められるであろう。背景には、我が国における自然災害の頻度を鑑みたとき、地層処分の安全性について、地震国の日本で大丈夫か、地下水による移流は問題ないのか、何十万年かの間の変化を予測できるのかなど、様々な不安を抱くことがある。

ちなみに海外に目を向けると、フィンランド (オルキルオト) とスウェーデン (フォルスマルク) は既に処分地が決まっており、順調に進捗した両者に共通しているのは、予めその国の地質などの状況に応じてまずは候補地点を選んだ後に、住民に説明の機会を多く設けて信頼関係を保ちながら慎重に地点を絞っている点にある。

筆者は、国民に納得していただけるプロセスとして、処分地として有望な地域をまずは明確に示すべきと考えた。不適切なエリアを除外できれば、それ以降は公募方式でも国からの指名方式でも構わないので、地層処分を受け入れてくれる市町村で概要調査や精密調査を実施して、最終的に技術的成立性を判断していけばよいのである。図-1.3 に示した 3 段階の処分地選定プロセスを実施する前に、処分地に適さない場所を除外して有望な地域を精度よく示す手法を開発しその内容をわかりやすく視覚に訴えて説明するツールがあれば、社会からの理解は格段に得やすくなると考えている。

### 1.1.6 本研究の実施概要

本稿では、自然事象からの影響の不確実性を考慮しつつ、高レベル放射性廃棄物の処分地として不適切なエリアを抽出するモデルを示していくこととする。

まず、数十万年間という処分期間を考えると、地層処分においては地質安定性が最も重要な要件となる。地質安定性が確保されるとは、断層、火山の大きな影響を受けないということであり、そして将来にわたって地盤が隆起して処分施設が地表に露出しないということなどを意味する。

次章以降では、地層処分を行う際に前提となる地質状況が安定している領域を抽出する手法を検討する。具体的には、断層、火山、隆起・侵食の 3 項目に着目し、それらの地質現象の影響範



囲を将来にわたり予測する手法を開発することである。このようなスクリーニングを経れば、不適切なエリアをまずは真っ先に除外できると考えている。

## 1.2 既往の研究と本研究の位置付け

既往の研究で超長期にわたる地質の影響評価を横断的に実施した研究事例は少なくとも筆者の知る限り存在しない。なぜならば数十万年間という超長期の間、機能保持を求められる事例がなかったからだと思う。

超長期わたる地質現象を決定論的そして確率論的に取り扱い、その不確実性なども含めて定量的に評価していくことが求められている。本研究では、定量的に影響範囲を評価するための独自のモデルを構築した。

なお筆者が開発したモデルは、具体的な調査が実施されていない段階での既往情報に基づいて、地層処分における地点の適格性を判断するものであり、将来実施される概要調査や精密調査の結果が思わしくなく手戻りが発生することを防ぐものである。開発モデルの適用は、以下に述べる前提条件の下で実施されるものである。

### 1.2.1 断層の評価

本論で取り扱う断層とは、既往文献ならびに資料で知られている断層ならびに活断層であり、それらが取り扱っていない断層は対象外とする。

### 1.2.2 隆起・侵食の評価

本論で取り扱う隆起・侵食は既往文献ならびに資料で知られている隆起量をもとに算出するものであり、段丘面などの対比に基づくあらたな段丘面高度の評価を実施するものではない。また、隆起量の不確実性については、段丘高度の調査がよく実施されている地域を選定した上で、それらのデータを流用する。

### 1.2.3 火山評価

本論で取り扱う第四紀火山とは、既往文献ならびに資料で知られている火山であり、一部海底火山も含めるものとする。なお、それらが取り扱っていない火山は対象外とする。また、火山の新期発生確率に際しては、既往文献による計算に基づいた算出を行い、新期火山発生確率の計算手法そのものの妥当性についての検討は行わないこととする。

### 1.2.4 自然事象の評価時間スケール

本論で取り扱う超長期とは、含有する核種の半減期や海外での評価事例などを考慮して、保守的にきりのよい数字である 100 万年間と仮定する。実際に自然事象の検討に必要な評価期間は、少なくとも安全評価上必要な評価期間を上回るべきと考えるが、詳細は今後の原子力分野の研究

に委ねることとする。

### 1.2.5 評価対象とする施設

処分施設とは、地上施設、地下施設ならびにそれらを結ぶアクセストンネルの一連の施設群を指す。地上施設とアクセストンネルについては、廃棄体搬入や埋め戻し期間を考えると、その健全性を通常想定される供用期間において担保すれば良いと考えられるため、本論ではその安全性について取り扱わない。

つまり本論で述べる超長期の地質安定性とは、地下施設の周辺環境に対する評価である。

### 1.2.6 本研究の特色

本研究は、自然事象からの影響をリスクと認定し、その不確実性を考慮しつつ、高レベル放射性廃棄物の処分地として不適切なエリアを抽出するモデルを示していくものである。

次の前提に基づいている。

- ・本論で取り扱う、リスクとは地層安定性の健全性を損なうハザードとその発生確率の積で求められるものである
- ・本論で取り扱う、地層安定性の健全性を損なうハザードとは、断層の伸展・分岐が予想される領域、火口の新期形成が予想される領域、新期火山が発生すると予想される領域、地層処分場が地表にまで隆起すると予想される領域を指すこととし、それ以外の要因は本論では取り扱わない。
- ・本論で取り扱う、影響評価は断層、火山、隆起・侵食の3項目のみであり他の項目は本論では触れない。
- ・本論は、上記3項目の全国を俯瞰した場合の評価手法であり、個々の地点に対応するものではない。

## 1.3 本論文の構成

・第1章では、本研究の背景を述べ、高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトを題材として、プロジェクトの特徴を踏まえ、たうえでどのような方法論でプロジェクトを推進させていくべきかを記述する。

・第2章では、超長期にわたる断層活動の影響範囲を定量的に評価するために開発した手法を紹介する。

活断層からの影響範囲としては、①活断層の幅(断層破碎帯)及びその外側の変形帯に含まれる範囲、②活断層の分岐等の可能性が高い範囲、③顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲が考えられる。

活断層による影響を評価するには、活断層のタイプや地域性を考慮する必要があることから、我が国に存在する活断層をカテゴリー別にデータ収集、分析をする。これらのデータを活用して、断層延長方向の伸展距離の予測、あるいは断層側方の影響範囲の予測を試みる。

- 第 3 章では, 処分施設が超長期にわたる隆起侵食により地表に接近するリスクを防ぐため, 処分施設の必要な埋設深さを決定論, 確率論的な観点から述べることとする.
- 第 4 章では, 自然事象による影響範囲を可視化する手法の検討を実施する. 高レベル放射性廃棄物の処分地の適地を示すためには, それぞれの自然事象の影響範囲を視覚的かつ空間的に可視化することが望ましい. 位置情報として GIS を活用した可視化に取り組む.
- 第 5 章では, 結論として各章ごとに内容と課題をまとめる.

## 第 1 章の引用文献

- 1) T. Akiyama (2007) 筆者: Evaluation Method of Seismic Stability of Foundation / Slope at Nuclear Power Plants in Japan, T5 Keynote Lecture 11th International Society for Rock Mechanics (ISRM)
- 2) 佐竹健治・堀宗明(2012):東日本大震災の科学, 第 8 章構造物と都のシミュレーション, 東京大学出版会, pp. 219-243
- 3) (公社) 土木学会(2017):「日本土木史 平成 3 年～平成 22 年 -1991～2010-, p877～p881 (筆者執筆:放射性廃棄物)」
- 4) 谷和夫(2017):断層変位のリスク対応および有効な対策技術の考え方, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 岩の力学連合会
- 5) 経済産業省:特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画, 2008 年 3 月 14 日閣議決定
- 6) 経済産業省:特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針を定めた件, 2008 年 3 月 14 日閣議決定
- 7) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(平成 12 年法律第 117 号), 2000 年 6 月公布
- 8) 原子力発電環境整備機構:「考えよう, 地層処分のことー地球環境, 原子力エネルギーの未来のためにー」発表資料, 2010. 3.
- 9) 原子力発電環境整備機構:安全研究フォーラム 2010「地層処分事業の安全確保方策の検討状況について」発表資料, 2010. 2.
- 10) 原子力発電環境整備機構:高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料, 2002. 12.
- 11) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会:高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について, 1997. 4.
- 12) 核燃料サイクル開発機構: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ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー, 1999. 11.
- 13) 原子力委員会:原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画, 2000.
- 14) 原子力委員会:原子力政策大綱, 2005. 10.
- 15) 社団法人土木学会原子力土木委員会地下環境部会:概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方, 2001. 8.
- 16) 社団法人土木学会原子力土木委員会地下環境部会:精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 2006. 1.
- 17) 原子力安全委員会:高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件, 2002. 9.
- 18) 社団法人土木学会原子力土木委員会地下環境部会:高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上に向けてー土木工学に係わる技術を中心としてー,

2004. 6.

- 19) 総合資源エネルギー調査会 (2014) : 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価  
ー地質環境特性および地質環境の長期安定性についてー, 総合資源エネルギー調査会  
電力・ガス事業分科会 原子力小委員会地層処分技術 WG.
- 20) 経済産業省資源エネルギー庁 : 科学的特性マップ, 2017. 7. 28
- 21) 原子力発電環境整備機構 (2018) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の  
実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー (レビュー版)
- 22) 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について (2018 年版) 経済産業省資源  
エネルギー庁発行
- 23) 諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて (2018 年版) 経済産業省資源  
エネルギー庁電力ガス事業部放射性廃棄物対策課



# Chapter 2

## 断層のリスク評価

### 2.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地下処分施設および廃棄体が、断層活動により直接破損することを避ける観点から、まずは施設が、断層活動により直接破損することを避ける観点から、既知の活断層・活褶曲等の分岐・伸展に伴う影響範囲を適切に評価せねばならない<sup>1)</sup>。原子力発電環境整備機構(以降 NUMO と略す)<sup>2)</sup>は、概要調査地区選定段階において評価する事項として、文献によって認められる活断層がある場所を排除するとともに、その影響範囲として、①活断層の幅(断層破砕帯)及びその外側の変形帯に含まれる範囲、②活断層の分岐等の可能性が高い範囲、③顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲を挙げている。しかし、影響範囲に関する具体的な数値指標は提示されていない。

一方、地層処分による長期的な安全性の確保を図る時間スケールとして、「過去数百万年～数十万年程度の記録から、将来 10 万年程度の期間における自然現象の活動を地球科学的に検証する」<sup>2)</sup>とされているが、より高い安全性を確保する観点から、将来 100 万年程度の安全性を視野

に入れた評価が求められる可能性もある。

我が国における活断層・活褶曲等の活動を支配するテクトニックな応力状態は、数十万年～数百万年という時間スケールの中で、一定の傾向を保ちつつ進行していると考えられている。10 万年オーダーの将来予測では現在のテクトニクス継続性を想定した決定論的な評価が可能とみられるが、100 万年オーダーの将来予測に際しては、決定論的な評価に用いるパラメータに内在する誤差を見積る必要がある。つまり、プレート運動が一定と仮定してもなお残るバラツキの定量化が必要と考えられる。したがって、本研究において「100 万年間の超長期を想定」する際には、1) 評価の対象とする断層、2) 断層の影響範囲の広がり(変形帯・分岐・活褶曲や活撓曲の分布範囲等)についての考え方を、超長期の断層活動史に関する知見にもとづいて整理し直す必要があると考えられる。

本研究で提示する評価手法は、事例分析に使用した基礎データが少ないこと、および考え方に数多くの仮定を含むものの、現在知られている我が国の活断層の地域性・断層タイプ等の活動特性を考慮し、向こう 100 万年間の活断層の影響範囲について具体的な確率論的数値指標を提示しようとするひとつの試みである。

## 2.2 検討方法と流れ

### 2.2.1 評価の考え方

本研究における活断層の影響評価は、既知の活断層の断層延長方向への伸展と、断層側方への分岐・派生による影響を考慮した二次元的な確率の組み合わせにより、活断層周辺地域および地下処分施設に断層の影響が及ぶ確率を評価するものである(図-2.1)。基礎的パラメータである断層長や断層側方への分岐量は、いずれも平面的な地表形状であり、深度方向の影響範囲は考慮しないこととした。

本評価手法の検討の流れを図-2.2 に示す。

事例分析の対象とした断層は、我が国に存在する活断層の断層タイプを考慮し、横ずれ断層・逆断層・正断層それぞれについて代表的な断層を抽出した。横ずれ断層については、松田ほか<sup>3)</sup>によりすでにパラメータが整理されている中部・中国地方の断層を対象とした。しかし、同文献で中部地方と中国地方ではパラメータに系統的な相違が認められていることから、別個のグループとして扱い統計的検討を行った。逆断層は近畿地方以東に多数分布するが、東西性の圧縮応力場で活動し、活動開始時期に一定の共通性が認められている垣見ほか<sup>4)</sup>の地震地体構造区分「東北日本弧内帯」に属する断層を抽出した。正断層の分布はほぼ九州地方に限定されているため、この地域の断層を対象とした。

断層延長方向の伸展距離に関する検討では、断層長と累積変位量の関係を個々の断層タイプ・地域ごとに検討してその関係式を求める。この関係式に対して変位量の増大分を平均変位速度と評価期間の積として代入することにより、今後 100 万年間の断層の決定論的な伸展長を見積もる。断層長は関係式に対して誤差を持つことから、誤差分布を表す確率密度関数を検討し、この



関数から得られる確率論的な伸展長を導いた。

一方、断層側方の影響範囲に関する検討では、主断層とその側方に分岐・派生した断層との距離を活断層分布図上で計測し、影響幅/断層長で表される比の平均値を決定論的な影響範囲とするとともに、影響幅/断層長比の頻度から確率密度関数を算出することにより、断層側方の確率論的影響範囲を導いた。

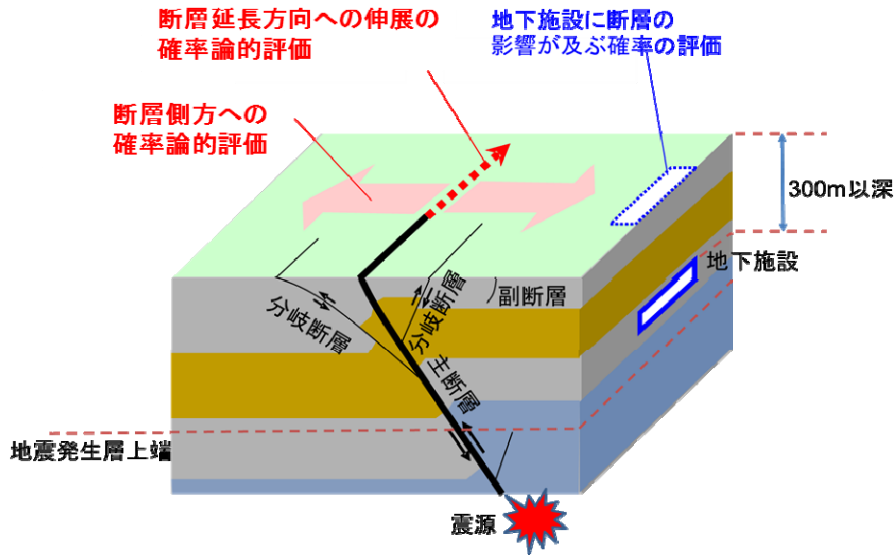
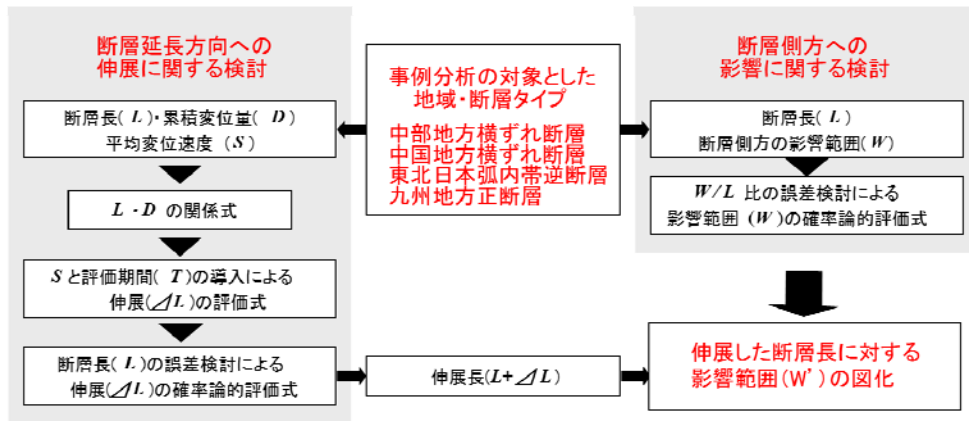


図-2.1 断層活動に伴う分岐・伸展とその評価の概念



注) 日本国内において、断層パラメータが整理されている代表的な37箇所の活断層データを活用

図-2.2 断層活動の確率論的評価に関する検討の流れ

## 2.2.2 評価の対象とする断層と評価期間

NUMO<sup>2)</sup>による「活断層」とは、中田・今泉編<sup>5)</sup>等による、概ね中期更新世以降(数十万年前以降)の活動が認められる断層であり、本評価により対象とする「概ね中期更新世以降(約 50 万年前以降)の活動が否定できない断層」とほぼ同義である。

上記のような活断層の活動は、プレート運動と地震活動の関係(図-2.3)や、プレート運動に関連して引き起こされる内陸部での火成活動・地震発生メカニズム(図-2.4)に示されるような日本列島周辺のテクトニクスに起因している。日本列島周辺において現在の地震・断層活動を支配するテクトニクスの成立は、数十万年前から数百万年前という時間スケールを持っている。その時期は地域的に異なり、活断層の活動開始時期の最も新しいもので 50 万年前程度である(図-2.5)。すなわち中田・今泉編<sup>5)</sup>等による活断層は、「日本列島が置かれている現在のテクトニクスのもとで活動している断層」と言い換えることができる。

一方、100 万年間という超長期の想定においては、過去のテクトニクスのもとで活動し、現在のテクトニクスのもとでは活動を休止している断層(「地質断層」と称す)であっても、今後再び活動する可能性を考慮する必要がある。このような地質断層が再活動する例は、「インバージョンテクトニクス」として近年広く知られるようになった。例えば現在東北日本で逆断層として活動している断層の多くは、千数百万年前の日本海拡大時には正断層として活動していたとされている(図-2.6)。

以上のような「活断層」と「地質断層」に対する評価の概念を、地上原子力施設の耐震安全性評価の概念と比較し、図-2.7 に示す。

地上原子力施設の耐震安全性評価では、数十年程度の施設の耐用年数に対応して活断層が現在の位置で活動することを想定しており、後期更新世以降(最終間氷期以降)の活動が否定できないものを評価の対象としている。

地下施設における超長期の断層活動の評価では、現在のテクトニクスが成立して以降(少なくとも約 50 万年前以降)活動してきた断層を評価の対象とし、活断層が現在の位置にとどまらず分岐・伸展することを想定する。すなわち「活断層」の超長期の評価は、「活断層が現在のテクトニクスのもとでどのように影響範囲を拡大してきたか」を検討することにより、将来の断層活動の影響範囲の拡がり方についての想定を行うことを意味する。

一方、「地質断層」の超長期の評価は、活動休止中の断層がテクトニクスの変化に対応して活動を再開する際の影響範囲の想定を意味する。しかし最近知られるようになった断層の再活動に関する知見はごく初歩的であり、無数に存在する地質断層のうち、どの断層が将来活動するのかを予測することは困難である。したがって評価にあたり、「地質断層」の将来の活動に伴う影響範囲の拡がりについては想定していない。

NUMO<sup>2)</sup>の「個別地区ごとに評価する事項」による断層の影響範囲は、「個別地区ごとに評価する事項」の①～④のうち、②活断層の幅(断層破碎帯)及びその外側の変形帯、③活断層の分岐等の可能性が高い範囲、④活褶曲や活撓曲の分布範囲である。しかし影響範囲について、例えば活断層からの離隔距離などの具体的な数値指標は示されていない。

一方, 100 万年オーダーでの活断層の活動史に関する最近の知見として, 後述するように, 逆断層の数 km におよぶ大規模な前方転移の事例や, 横ずれ断層延長の数 km~十数 km におよぶ伸展が知られるようになった. 本研究では, このような知見にもとづいて前述した図-2.1 の概念図に示すような断層の分岐・伸展に関する具体的な数値指標を検討・提供し, これに基づく評価を行う.

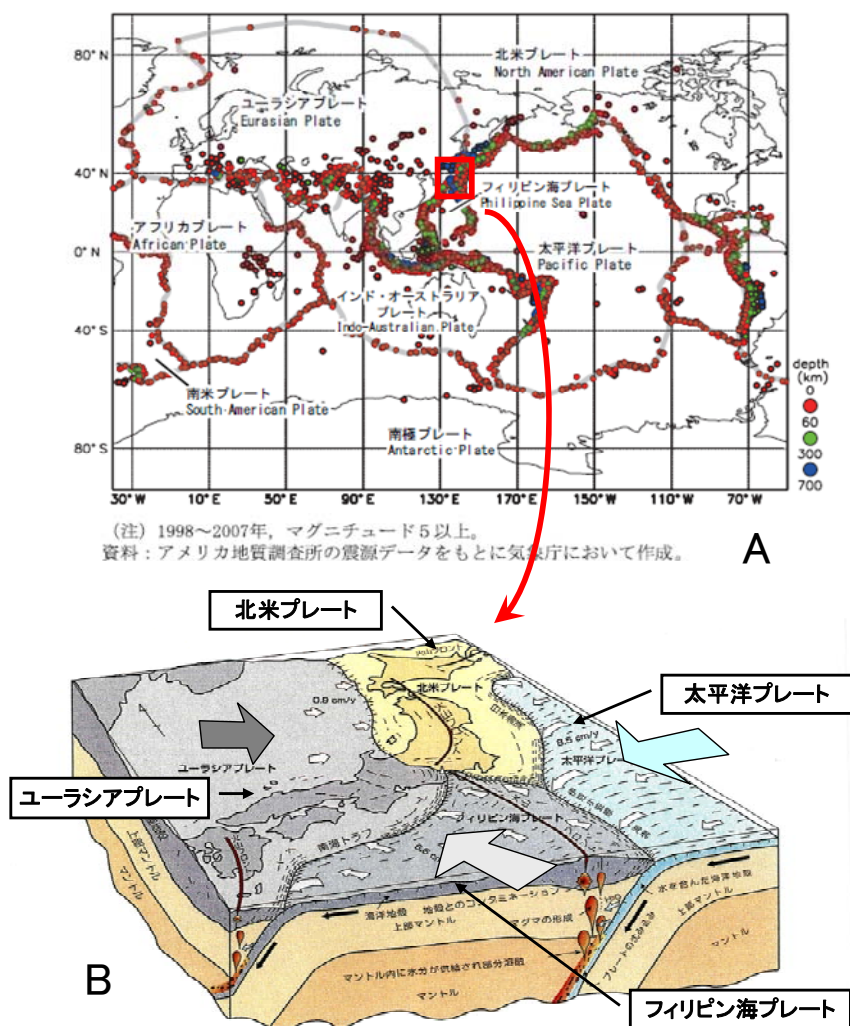


図-2.3 プレート運動と地震活動

A: 内閣府中央防災会議<sup>6)</sup>より引用

B: (社)全国地質調査業協会連合会編<sup>7)</sup>に加筆して引用

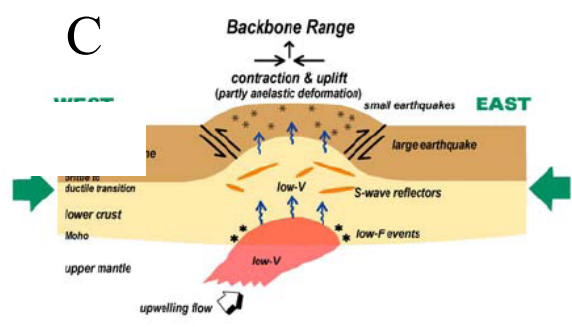
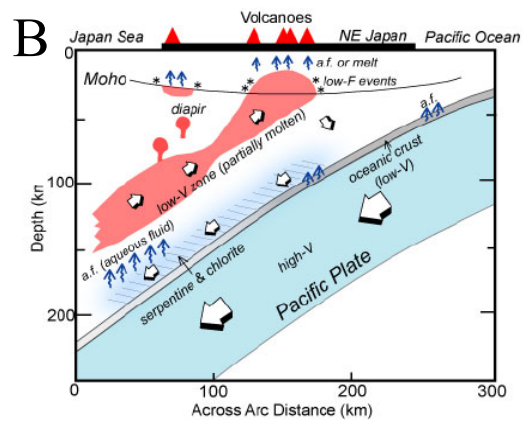
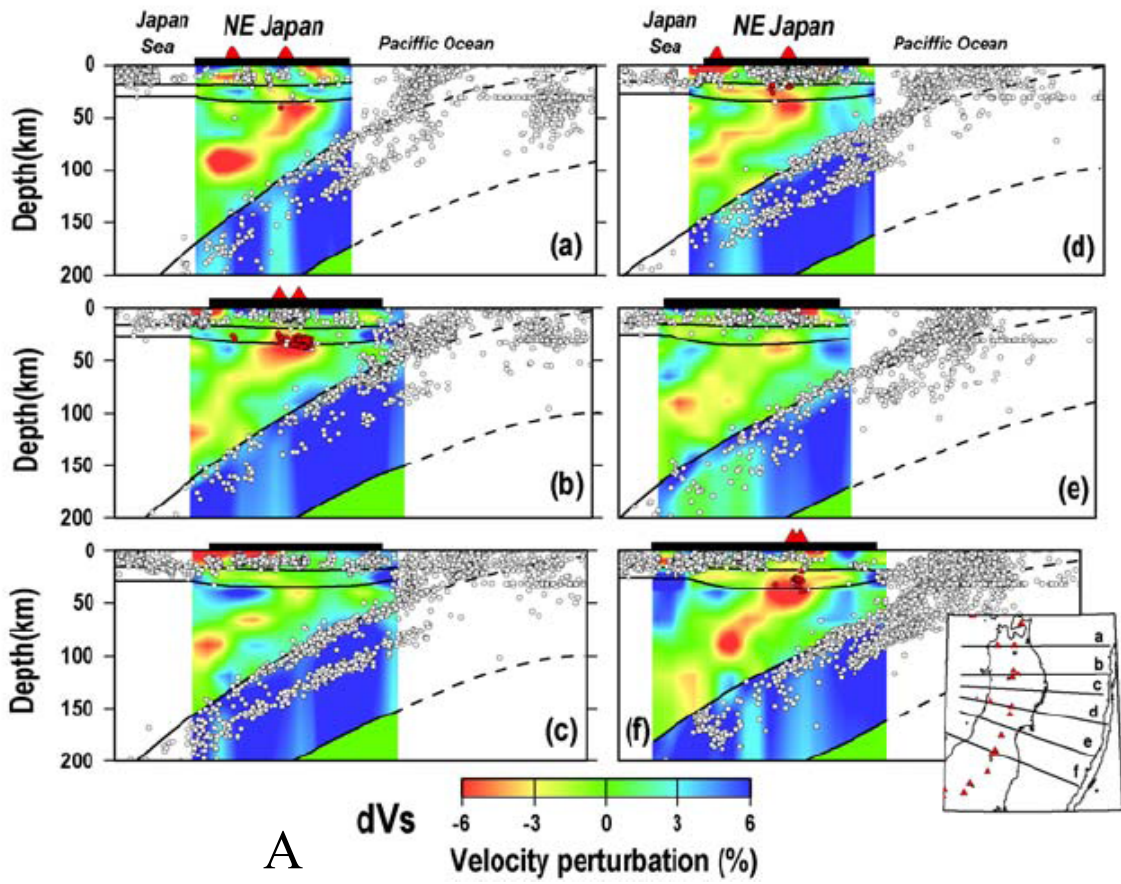
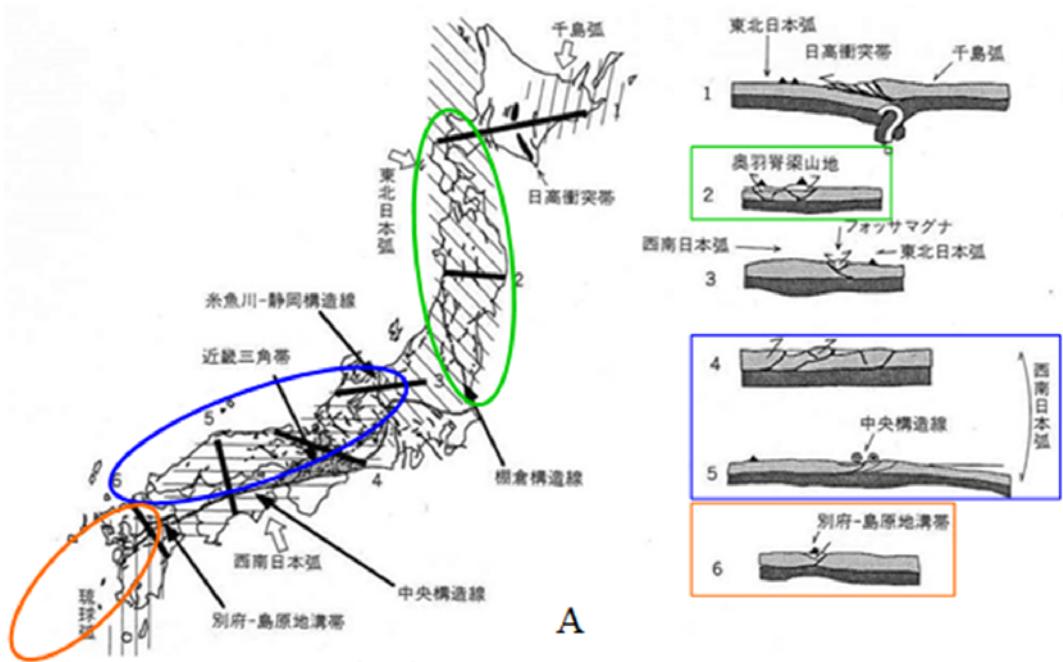


図-2.4 地震波速度構造と地震発生のメカニズム

長谷川<sup>8)</sup>より抜粋して引用



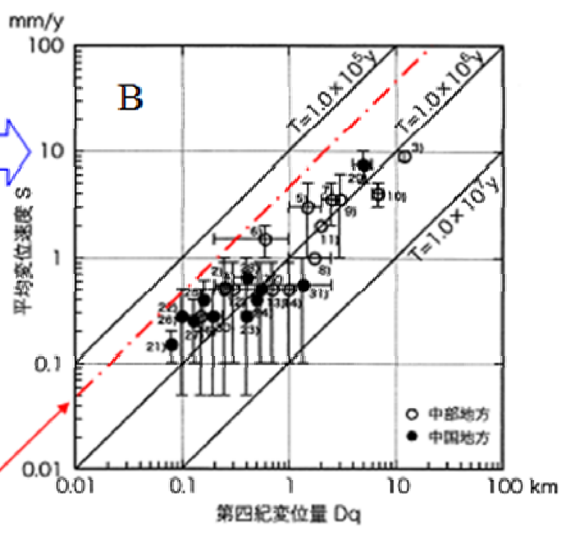
**各地域のテクトニクスの成立時期**

**東北**：3.5Ma以降東西圧縮場へ転じ、奥羽脊梁の逆断層は2.4Ma以降の強い圧縮場で活動開始。  
 狩野・村田<sup>1)</sup>など

**中部・近畿・中国**：東西圧縮場にあり、主要活断層は1-2Ma以降活動開始。  
 池田ほか<sup>1)</sup>など  
 近畿・中国地方の活断層の活動開始は大略100万年程度  
 松田<sup>3)</sup>ほか

**九州・南西諸島**：1.5-2.0Ma以降、沖縄トラフの拡大。  
 木村<sup>1)</sup>  
 1.5Ma以降火山フロント出現。  
 鎌田<sup>1)</sup>

**最も若い活断層の活動開始時期  
 50万年程度**



第四紀変位量Dqと平均変位速度Sの関係および第四紀活動の開始時期T  
 ○ 中部地方 ● 中国地方

図-2.5 日本列島における今日の断層活動の開始時期

A：佐藤・平田<sup>9)</sup>に加筆して引用，B：松田ほか<sup>3)</sup>に加筆して引用

東北や九州・南西諸島に比較して、活動開始年代が新しいとされる中部・近畿・中国地方の32の横ずれ断層について、松田ほか<sup>3)</sup>では第四紀の変位量と平均変位速度から、活動開始時期を推定している。同文献では断層の活動開始時期を大略100万年前としているが、新しいものは50万年前程度であり、この年代が我が国において最も若い活断層の年齢とみることができる。

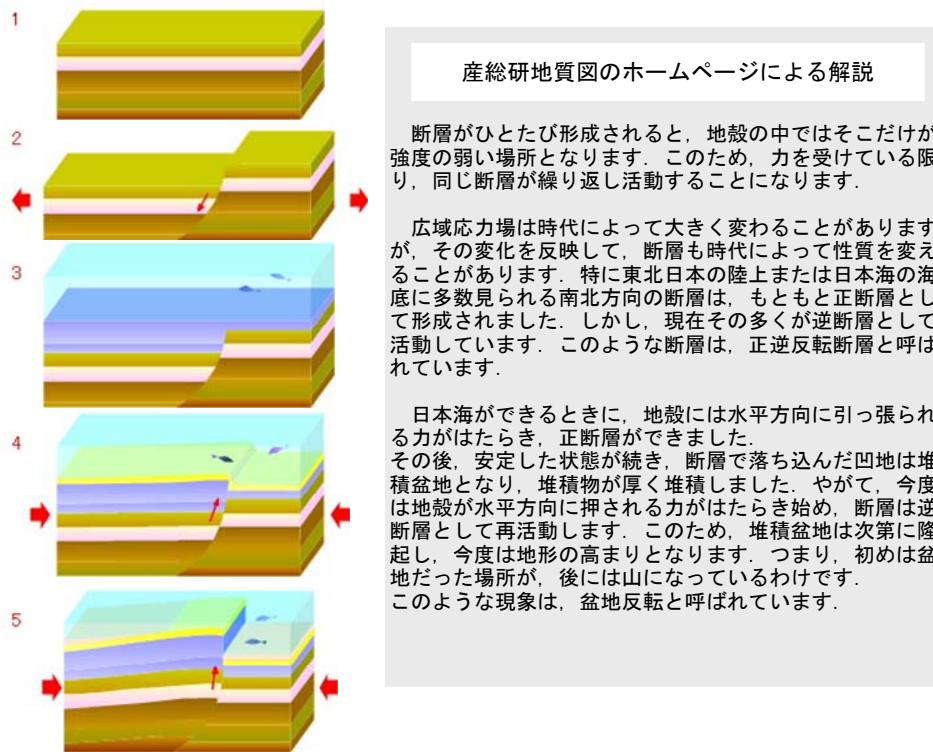


図-2.6 インバージョンテクトニクス概念

(産総研地質図のホームページ<sup>14)</sup>より抜粋して引用)

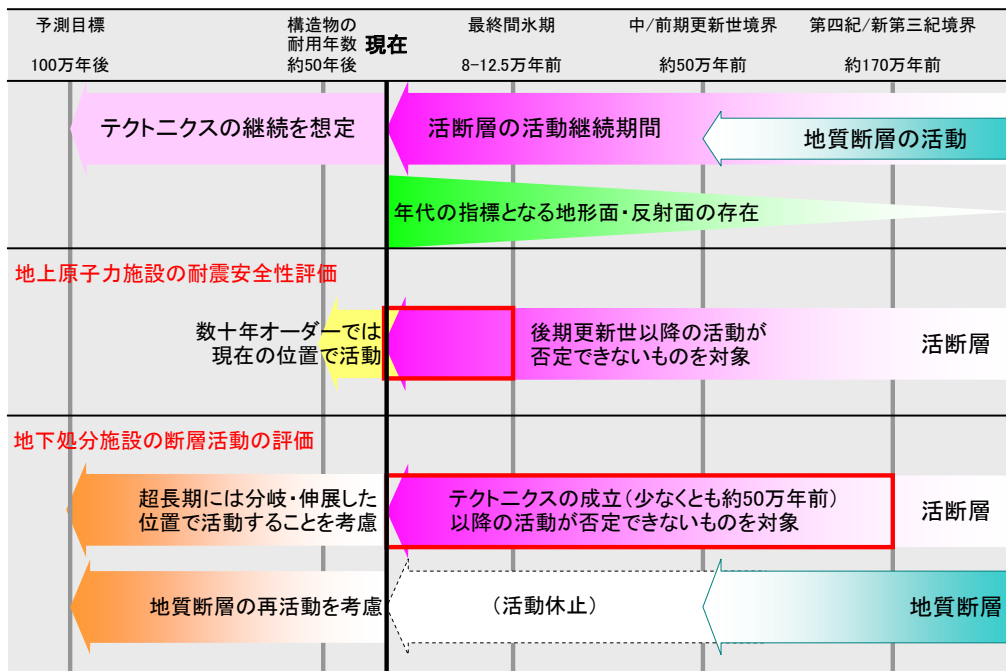
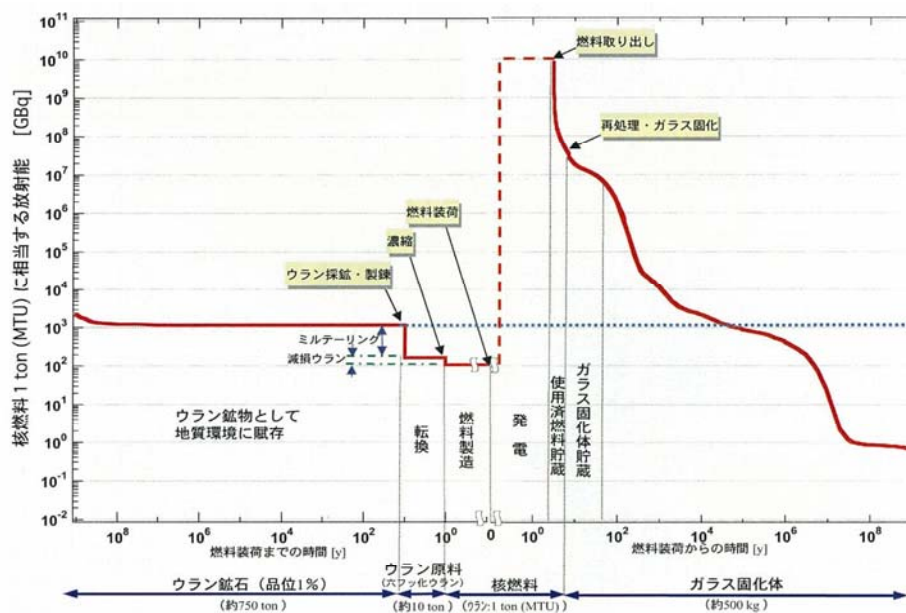


図-2.7 対象構造物による断層活動の評価期間の考え方

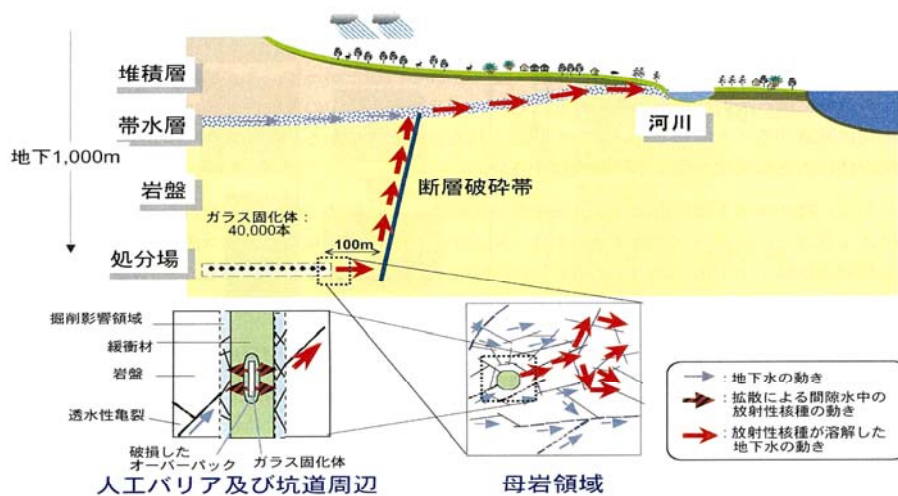
地質環境の長期安定性に関わる評価期間は、NUMO<sup>2)</sup>による「概要調査地区選定上の考慮事項」に体系的に述べられている。この中で特に「地震・断層活動」・「隆起・侵食」の評価に関しては、基本的に「今後10万年程度」を想定し、「全国一律に評価する事項」と「個別地区ごとに評価する事項」が整理されている。これまで「今後10万年程度」という想定がなされている背景には、高レベル放射性廃棄物の特徴として、「ウラン鉱石を利用することにより発生したガラス固化体の潜在的危険性については、少なくともウラン鉱石が本来有している潜在的危険性と同程度まで低下する数万年という長い時間を考慮しなければならない」とする考え方<sup>2)</sup>による(図-2.8)。また、過去数百万～数十万年間の地質環境の記録から、将来10万年程度の期間における自然現象の活動を検証することは可能と考えている<sup>2)</sup>ことも背景にあるとみられる。

しかし、その一方で核燃料サイクル開発機構の核種移行に関する各種シナリオにおける線量評価では、10万年を上回る80万年という時間スケールで線量がピークとなることを示している(図-2.9: 図はNUMO<sup>2)</sup>を引用)。その線量は、我が国の自然放射線レベルに比較して低い水準ではあるが、変動帯に位置する我が国の地質環境の複雑さと、これに起因する核種移行シナリオの多様性を勘案するならば、絶対値ではなく変動傾向が問題であり、安全を期して超長期の評価をすることが妥当と考えられる。したがって、今後100万年という超長期を視野に入れた評価を行うことが望ましい。以上のような観点から、本研究では「今後100万年程度の超長期の評価」を視野に入れ、法定要件等に関する評価を行うこととする。

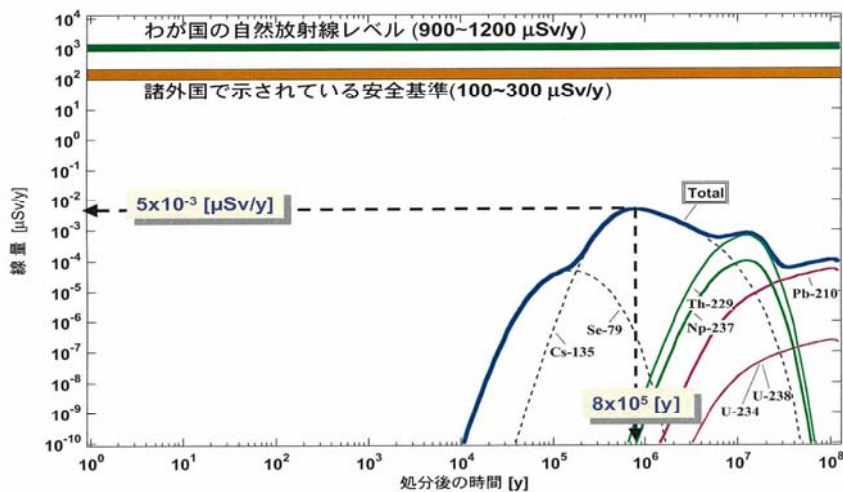


放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴  
(濃縮度4.5%の核燃料1MTU相当) (核燃料サイクル開発機構, 1999a)

図-2.8 高レベル放射性廃棄物の特徴 (NUMO<sup>2)</sup>による)



第2次取りまとめの地下水シナリオレファレンスケースで想定したシステム  
(核燃料サイクル開発機構, 1999a を一部修正・加筆)



(4万本の廃棄体について、すべてのオーバーバックが処分後1,000年で閉じ込め機能を失うことを想定)

長期安全性の予測解析結果の例 (第2次取りまとめレファレンスケース)  
(核燃料サイクル開発機構, 1999a を一部修正・加筆)

図-2.9 レファレンスケースについての線量の変化 (NUMO<sup>2)</sup> による)



## 2.3 断層延長方向の伸展距離に関する評価

### 2.3.1 断層の成長

地震予知においては、固有地震説をベースに実施されることが多い。ある断層において、ほとんど同じ間隔と規模でもって周期的に地震が繰り返し発生するという考え方である。実際の地震では、地震発生層のどの部分から破壊が始まりどこまで破壊が広がるのか、前回の地震における応力降下量やそれ以降の経過時間と固着の進展度など、さまざまな要因により種々の地震が発生する可能性がある。しかしその理論の単純明快なことから、少なくとも次の地震など短期の予知においては、使い勝手の良い考え方であろう。松澤は、‘固有地震説に存在する異なる定義のモデルをすべり量・震源域・すべり分布・再来期間の視点から整理し、地震発生層をすべて破壊するような地震の場合、固有地震的な挙動を示す可能性が高いと述べるとともにアスペリティモデルの再考を促している’<sup>15)</sup>。

一方 Scholz は、長大な断層系は一度の地震破壊で形成されるのではなく幾度もの地震の繰り返しの伴い成長する<sup>16)</sup>と述べている。断層の成長に関しては、青地・安藤<sup>17)</sup>によって以下の文献が示されており、‘巨視的な断層形状の変化である断層の成長における力学的・物理科学的・地質学的に複雑で因果関係を明らかにするには観測や実験を統合化させた大規模シミュレーションが必要’、と述べている。

・Cowie and Scholz(1992)<sup>18)</sup>：断層の地表変位の性状から、孤立した断層の先端が1回の地震に伴い伸びる長さのごくわずか。

・Lockner et al(1991)<sup>19)</sup>：室内実験では無垢の岩石が载荷とともに即座になめらかな一枚の破壊面を作ることはなく、まず微小破壊が試料全体で生じそれが徐々に局在化し、最終的にその面が動的に破壊するという経過をたどる。

・Segall and Pollard(1983)<sup>20)</sup>：地質学的観察では、近接した小断層が結合して断層が長大化する。

断層の成長における微視的な視点においては、断層面における動的破壊現象が重要で、Coulomb の破壊基準で説明される<sup>18)</sup>と考えられる。しかし一方で、‘ある特定のスケールの面だけが Coulomb 基準に従うと考えるのも不自然で、粒子性に影響されて系全体より小さな亀裂の先端の応力場とその伸展方向は明瞭ではなく連続弾性体との関係も厳密では明らかではなく、再現するにはより大規模で困難な数値計算を行う必要がある’と Hori et al.(2005)<sup>21)</sup>に記載されている。

このような状況を鑑み、筆者は、次の地震ではなく百万年という超長期の評価期間において百回程度は繰り返されるであろう断層運動を考えるにあたっては、断層の成長を考慮することは必須であり、その予測に当たっては断層運動を巨視的に捉え複雑な挙動を工学的判断のもとで単純化したうえで実施していく必要があると考えた。断層運動の予測はその影響範囲を知るためであり、その結果は地層処分に適する地点のスクリーニングに用いるという視点を忘れてはならない。

### 2.3.2 断層運動の地域性

活断層研究会編(1980)<sup>22)</sup>および(1991)<sup>23)</sup>により、日本列島における活断層が同一の認定基準によりまとめられている。図-2.10は、200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ(2000)が抽出した確実度Ⅰ、Ⅱの活断層を、デジタルマップ化したものである<sup>24)</sup>。

活断層研究会編<sup>22)・23)</sup>により、日本列島の活断層には、分布密度や変位様式に著しい地域性があることが明らかとなり、概要は以下の通りである。

#### (1) 活断層の分布密度<sup>23)</sup>

活断層の分布密度は、非常に密なところからほとんど無いところまであり、その差が大きい。

分布が密な地域としては、中部から近畿北部が挙げられる。中部山地-近畿北部の活断層系には、北東-南西方向のものとして信濃川に沿うもの、伊那谷に沿うもの、木曾谷に沿うものなどがあり、北西-南東方向のものとしては松本盆地南部から甲府盆地に至るフォッサマグナ西縁沿いのもの、飛騨高原の阿寺断層帯、根尾谷断層帯、敦賀湾-伊勢湾線沿いのものなどがある。この種の断層系としては、他の地域では、東北地方脊梁山地東縁のもの、近畿から四国北部を経て九州の熊本南方に至る中央構造線沿いのものが目立ち、特に後者は日本で最長の活断層系をなしている。このような線状のものに対して、中部九州の火山地域では活断層の分布は密であるが、短小な上に群をなしている。これらは正断層の群で日本の陸上では特異な存在である。

一方、活断層の少ない地域としては、北海道北部、北上山地-阿武隈山地-関東平野と連なる東北日本弧外帯、および赤石山地-紀伊山地-四国山地-九州山地と連なる西南日本外帯があげられる。中国地方から北九州にかけての陸域も活断層が少ない。

また、活断層の長さの分布にも地域差がある。陸域では、50kmより長いものはほとんど中部山地-近畿北部と中央構造線(活)断層系に限られる。長くかつ直線的にのびるのはほとんど横ずれ断層で、縦ずれ断層は概して屈曲してきれぎれで長くつづかず、近接して並走することが多い。もっとも横ずれ断層でも、一本が長く続くのは比較的まれであり、変位を近接する断層にのりかえつつ、全体として直線状の帯をなすのが一般的である。

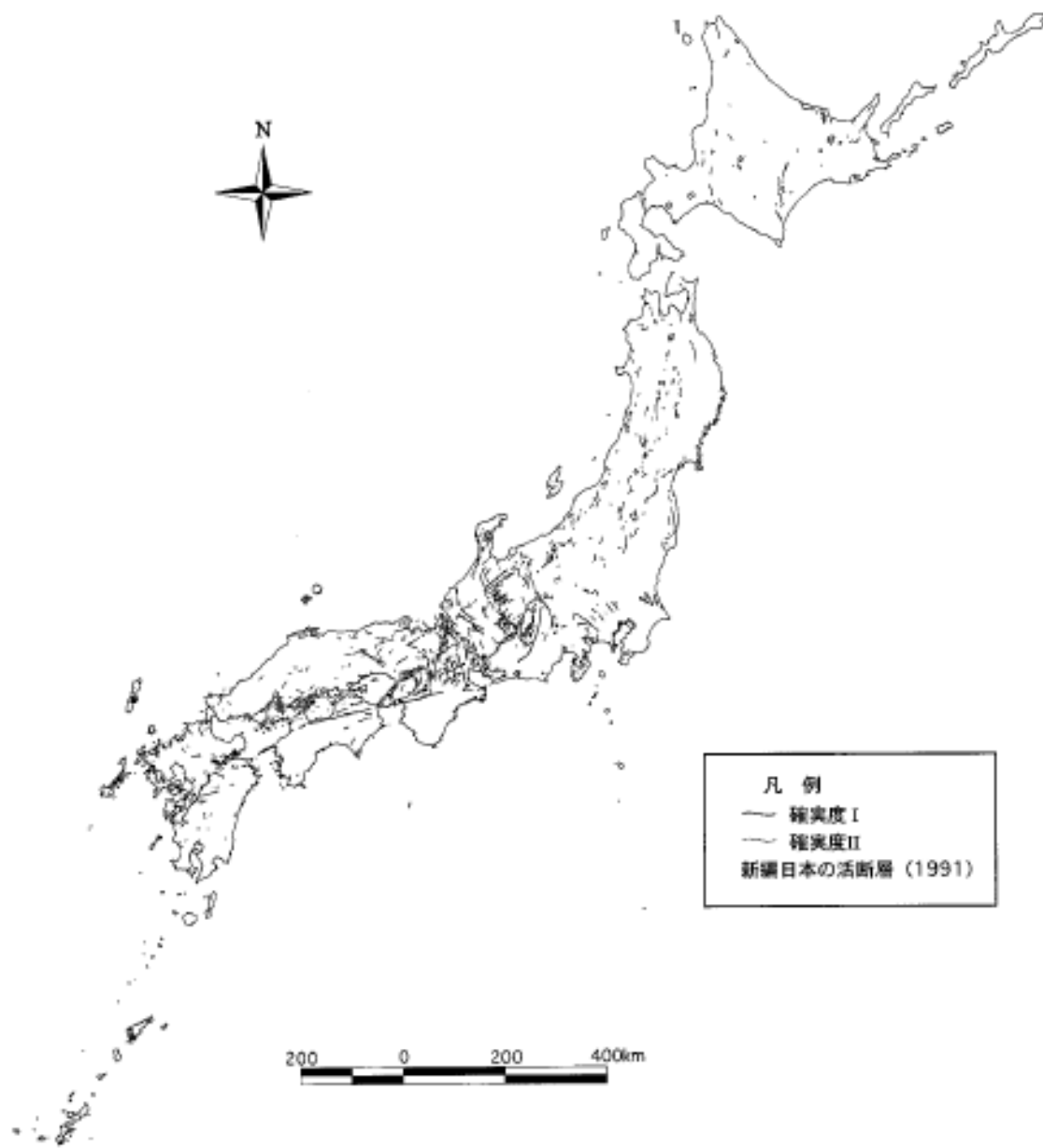


図-2.10 活断層研究会(1991)<sup>23)</sup>のデータによる日本列島の活断層図<sup>24)</sup>  
 (200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ(2000)による)

(2) 走向・変位様式<sup>23)</sup>

活断層の走向も地域的に異なっており、それは正断層・逆断層・右ずれといった変位のタイプ(断層型)と深くかかわっている。全国的に概観すると、以下のとおりである。

北海道から東北地方にかけての活断層は、おおまかに言えば南北にのびている。東北地方についてやや詳しくみると、活断層の走向は東北日本弧の弓なりの形、あるいは東北日本弧の火山フロントないし日本海溝の軸の方向にかなりよく沿っていて、北部では

南北方向、南部になるほど北北東－南南西方向となる。それらのほとんど全部が逆断層と考えられている。例外的なのは阿武隈山地東縁の双葉断層で、これは南北にのび北部では左ずれ成分をもっている。双葉断層は第三紀以前に起源をもち、それが第四紀に再活動したものであり、それが他の活断層と走向が違いかつ横ずれ成分をもつゆえんとされている。

中部山地の活断層は、概ね3方向をとるとされている。第1のものは飛驒高原と両白山地における阿寺断層帯・根尾谷断層帯で代表される北西－南東方向のものであり、ほとんどが左横ずれ断層である。第2のものは飛驒高原北部にある跡津川断層で代表される北東－南西方向のものであり、ほとんどが右横ずれを示す。第3のものは能登半島、富山・金沢周辺や木曾谷・伊那谷に認められるもので、東北地方の西南部とほぼ同様の北北東－南南西方向をもち、ほとんどが逆断層である。

近畿地方北部においてもおおまかに言って、方向とタイプを異にする3系統がある。もっとも数多いのは南北ないし北北東－南南西方向をとる逆断層で、ほとんどが山脈と盆地の境界にあり、鈴鹿山脈や生駒山脈の山麓を限るものはその代表的なものである。第2のものは兵庫県の中南部を北西－南東方向にのびる山崎断層を代表格とする、ほぼ同方向をとる左横ずれ断層で、兵庫県と京都府の北部に多い。第3のものは北北東－南南西から東北東－西南西まで方向に幅があるがいずれも右ずれの活断層であり、比良山脈の西を限る花折断層や六甲山地の南を画するもの、あるいは中央構造線活断層系の東部に当たる和泉山脈南篤のものを代表とする。

伊豆半島とその北部周辺である丹沢山地・関東山地・三浦半島などの活断層は、東北地方や中部山地と異なって、北西－南東方向のものが右横ずれで、北東－南西ないし南北方向のものが左横ずれのタイプとなっている。また関東山地東縁の縦ずれ断層である深谷断層や立川断層は北西－南東方向をもち、東北南部から中部にかけての縦ずれ断層の走向が北東－南西方向であるのと大きく異なっている。

中国地方と九州の北部・中部では、中部山地・近畿北部と同じく北東－南西方向のものが右横ずれで、北西－南東方向のものが左横ずれという一般性をもっている。縦ずれ断層についてみると、近畿北西部から中国地方をへて北九州に至る地域には、いろいろな走向をとるものがあって方向が揃っていない。この地域では活断層が少なくかつそれらの活動度も小さいことから推察されるように、第四紀の地殻応力で新しく形成された活断層よりも、第四紀以前からの断層に規制された形で活断層運動が生じていると推定される。なお、中部九州の火山地域に多い東西性の縦ずれ断層はほとんどが正断層と考えられており、日本の四大島の中では特異な地域をなしている。

### 2.3.3 断層運動から見た水平最大圧力方位と地震の発震機構

ある地域にみられる断層の走向と変位のタイプから、その地域の断層を発生させた応力方位をおおよそ知ることができ、この種の研究は1960年代後半から始まりとくに中部・近

畿・東北・伊豆半島周辺で方位図が描かれている 25)。

図-2.11 はプレートの運動と断層タイプの関係を示したものであり、一般的に主応力の大小関係により逆断層・正断層・横ずれ断層の3つの断層タイプが考えられる。

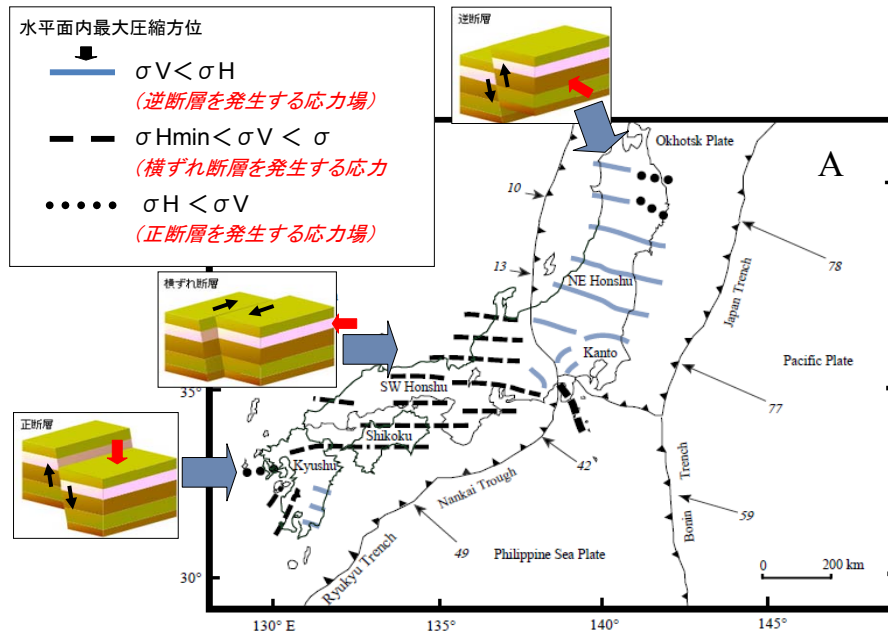


図-2.11 プレートの運動と断層タイプの関係

A : Seno<sup>26)</sup>に加筆して引用 B : 産総研地質図のホームページ<sup>14)</sup>より抜粋して引用

図-2.12 は、断層と水平最大応力方位の関係によって、全国の活断層分布図をもとに、分量によって水平最大応力方位を求めたものである。この図によれば、水平最大圧力方位は多少のばらつきはあるにしても地域的にかなり揃っていて、次のような傾向があるとされている<sup>23)</sup>。

- ・北海道ではおおよそ東西方向が卓越するが、日高山脈の南部では北東-南西方向になる。
- ・東北地方では北部で東-西、南部で西北西-東南東であり、ほとんどが島弧ないし火山フロントに直交している。
- ・中部地方の大部分は、東北地方南部と同様、西北西-東南東の方位を示すが、近畿北部ではほぼ東西となる。しかし、伊豆半島とその北の丹沢山地・関東山地での水平最大圧力方位は南北に近く、関東山地東縁では北東-南西となって異常である。
- ・中国地方と北九州では水平最大圧力方位を決めるに足る資料が少ないが、ほぼ東西の傾向にあり、中九州の火山地域ではほぼ東西にのびる正断層群の存在から水平最大圧力方位もほぼ東西とみられる。

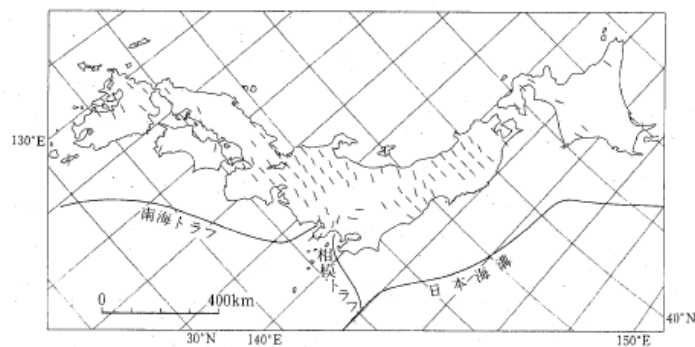


図-2.12 陸上活断層から求めた水平最大圧力方位の分布<sup>23)</sup>

図-2.13 に、岡田・安藤による 1926 年以降の M6.5 以上の地震の発震機構<sup>27)</sup>を示す。4象限の形は横ずれ断層、黒が中央に位置するものを逆断層、白が中央に位置するものが正断層であり、図-2.12 と調和的である。



図-2.13 地震の発震機構 (岡田・安藤, 1979)<sup>27)</sup>

また今泉ら<sup>25)</sup>は、図-2.14に示す通り、地域別に活断層帯の主な方向分布を22.5度ごとに区分した頻度を示しており、従来の地域性に関する見解が裏付けられたとしている。

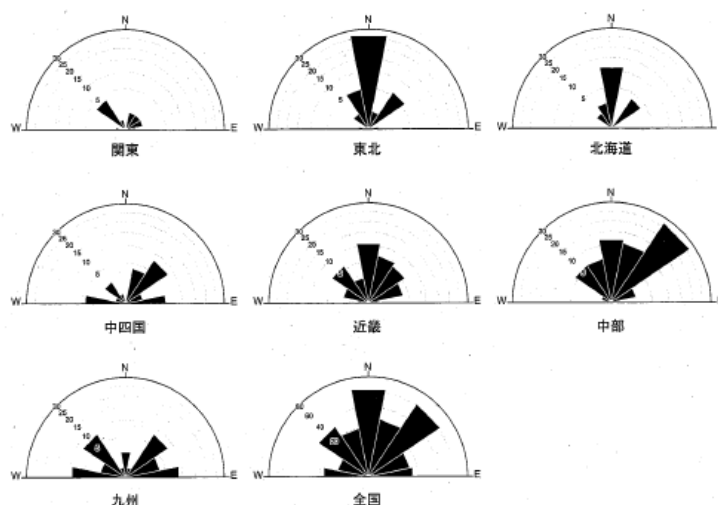


図-2.14 活断層帯の主な方向分布(地域別)<sup>25)</sup>

本研究における断層の分岐・伸展に伴う影響範囲の想定にあたっては、日本列島周辺の広域的な応力状態の地域性に起因する断層の活動性、断層タイプとその分岐・伸展特性を考慮し、各地点の評価に適した指標を検討する。

### 2.3.4 断層長と累積変位量の関係

NUMO<sup>2)</sup>は、「活断層の長さの伸展に関しては、[第2次取りまとめ]<sup>28)</sup>において松田(1988)<sup>17)</sup>の式による計算にもとづき、1,000年あたりの変位量を0.1~10mとした場合、10万年間に増加する活断層の長さは0.1~10kmとしているが、伸展した断層の事例は紹介されていない」としている。[第二次取りまとめ]<sup>28)</sup>によるこの考え方は、Ranalli<sup>29)</sup>による活断層(横ずれ断層系)の長さ( $L$ )と累積変位量( $\Sigma D$ )の関係式を、松田(1988)<sup>30)</sup>が近似的に $\Sigma D = 10^{-1}L$ で与えられるとしたことに基づいている。すなわち、「断層は活動開始から平均変位速度に応じてその10倍の一定速度で延長方向へ伸展する(図-2.15 A)」という概念として理解される。

その後松田ほか<sup>3)</sup>は、中部・中国地方の横ずれ断層帯27例について、断層長・第四紀の累積変位量・断層の活動開始時期等のパラメータを整理した(図-2.15 B)。これを当初の関係式( $\Sigma D = 10^{-1}L$ )と比較することにより、この関係式の日本国内の横ずれ断層に対する適用性を、実際の事例にもとづいて検証することが可能である。

地震と断層の力学については、‘The mechanics of earthquakes and faulting’ (Scholz1990)によってまとめられており、その2002年には改訂版が出されている<sup>16)</sup>。そこでは断層の成長と発達について、図-2.16に示すとおり、断層の長さ最大累積すべり量との間に線形なスケーリングが成り立つことが示されている。

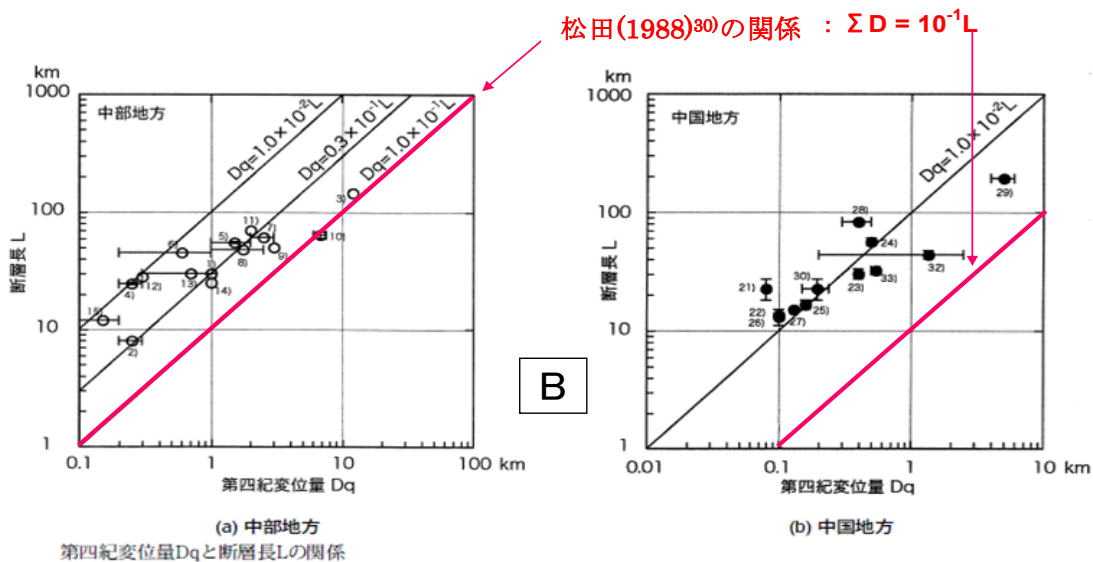
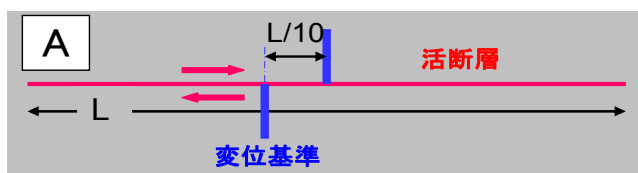


図-2.15 A: 松田<sup>30</sup>による断層長と変位量の関係

B: 松田ほか<sup>3)</sup>による横ずれ断層のパラメータの比較

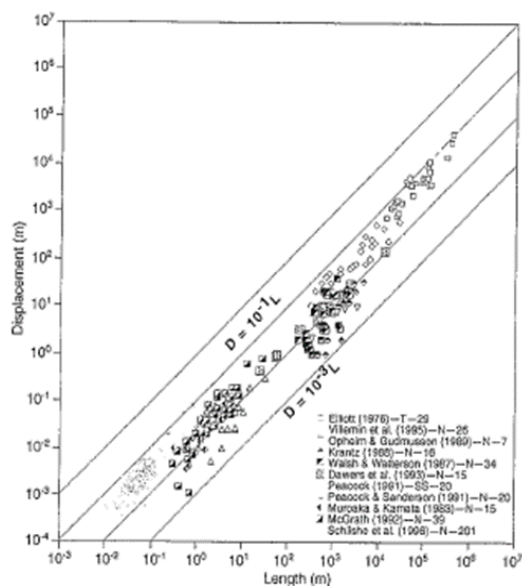


図-2.16 断層の長さLと最大累積すべり量Dの関係<sup>16)</sup> (Schlische et al., 1996<sup>31)</sup>にもとづく)

さまざまなテクトニクス環境にある断層のデータが含まれている



### 2.3.5 具体的事例の収集・整理

我が国における断層長と累積変位量の関係を把握するため、表-2.1 に示す断層を抽出した。

検討に必要なパラメータのうち、断層長と平均変位速度は各種の活断層分布図やデータベース類に記述されているが、累積変位量は特に調査データが豊富な断層を除き、一般には知られていないことが多い。したがって、地形学的・構造地質学的な知見にもとづく仮定を置いて推定せざるを得ない。

松田ほか<sup>3)</sup>により抽出された横ずれ断層には、白亜紀以降の活動が推定されるものがあり、同文献では活断層としての累積変位量を「第四紀変位量( $Dq$ )」とし、白亜紀地質体の変位量とは区別している。「第四紀変位量」は、新第三紀後期の準平原形成期の水系と思われる比較的大きな谷の屈曲量とされている。したがって、変位基準となる年代そのものに数十万年オーダーの誤差を含むとみられる。一般に横ずれ断層は逆断層・正断層に比較して変位基準となる地形の年代精度が低く、平均変位速度が「活動度」で表示されるような対数オーダーの誤差を含むこともある。なお松田ほか<sup>3)</sup>が抽出した断層のうち郷村断層帯は、地震調査研究推進本部による評価<sup>32)</sup>では、丹後半島北部沖合海域の断層の長さを含むことからこれに従うこととした。

逆断層・正断層の断層長は地震調査研究推進本部による長期評価<sup>32)</sup>を使用した。長期評価による断層のうち、一部複数の断層が併走し、断層長に重複が生じる場合には、長期評価<sup>32)</sup>による断層分布図から断層帯全体の断層長を計測して用いた。平均変位速度についてはネット値が記されている産業技術総合研究所の活断層データベース<sup>33)</sup>を使用した。

逆断層・正断層の場合にも活動開始時期からの累積変位量が知られている事例はごく限られているため、活動開始時期に一律の想定を行い、累積変位量を仮置きした。逆断層では東北日本が強い圧縮応力場に転じたとされる時期からの年数(2.4Ma)<sup>10)</sup>がバランス断面法の解析から推定される横手盆地東縁断層帯・千屋断層の活動開始時期<sup>34)</sup>にほぼ一致することから、個々の断層の平均変位速度にこの年数を乗じて算定した。また正断層の累積変位量は、沖縄トラフ形成の開始時期が1.0 – 2.0Maとされていること<sup>35)</sup>、および九州地方の正断層では右横ずれ変位を伴うことが多く、別府湾が1.5Ma以降の右横ずれ変位によるプルアパートベイズン形成期に形成されたと解釈されていること<sup>36)</sup>から、個々の断層の平均変位速度にこの年代を乗じて算定した。

表-2.1 断層延長方向の伸展距離を検討した断層とパラメータ

A: 中部・中国地方の横ずれ断層

出典		松田ほか(2004)の第1表(a),(b)の一部を転載・加筆											
断層(帯)名	断層長				第四紀変位量				平均変位速度				
	L(km)			log L	D <sub>q</sub> (km)			log D <sub>q</sub>	S(mm/y)			log S	
	最小値	最大値	平均値		最小値	最大値	平均値		最小値	最大値	平均値		
中部	丹名断層帯			30.0	1.48			1.00	0.00			2.00	0.30
	糸魚川-静岡構造線			145.0	2.16			12.00	1.08	8.0	10.0	9.00	0.95
	信濃坂断層帯	24.0	25.0	24.5	1.39	0.2	0.3	0.25	-0.60	0.05	1.0	0.53	-0.28
	牛首断層帯	54.0	56.0	55.0	1.74	1.0	2.0	1.50	0.18	1.0	5.0	3.00	0.48
	茂住断層帯			45.0	1.65	0.2	1.0	0.60	-0.22	1.0	2.0	1.50	0.18
	跡津川断層帯			61.0	1.79	2.0	3.0	2.50	0.40	2.0	5.0	3.50	0.54
	高山断層帯			48.0	1.68	1.0	2.5	1.75	0.24			1.00	0.00
	境峠断層帯			50.0	1.70			3.00	0.48	1.0	6.0	3.50	0.54
	阿寺断層帯	60.0	68.0	64.0	1.81	6.0	7.5	6.75	0.83	3.0	5.0	4.00	0.60
	根尾谷断層帯			70.0	1.85			2.00	0.30			2.00	0.30
	武儀川断層帯			28.0	1.45			0.30	-0.52	0.1	0.9	0.50	-0.30
	長良川上流断層帯			30.0	1.48	0.3	1.1	0.70	-0.15	0.1	0.9	0.50	-0.30
	揖斐川断層帯			25.0	1.40			1.00	0.00	0.1	0.9	0.50	-0.30
奥川並断層帯			12.0	1.08	0.1	0.2	0.15	-0.82	0.05	0.5	0.28	-0.56	
中国	上林川断層帯	18.0	27.0	22.5	1.35			0.08	-1.10	0.1	0.2	0.15	-0.82
	郷村断層帯			34.0	1.53			0.10	-1.00	0.05	0.5	0.28	-0.56
	山田断層帯	27.0	33.0	30.0	1.48			0.40	-0.40	0.05	0.5	0.28	-0.56
	三峠-亀岡断層帯	52.0	60.0	56.0	1.75			0.50	-0.30	0.3	0.5	0.40	-0.40
	植生断層帯	15.0	18.0	16.5	1.22	0.15	0.17	0.16	-0.80	0.2	0.6	0.40	-0.40
	雨滝-釜戸断層帯	11.0	15.0	13.0	1.11			0.10	-1.00	0.05	0.5	0.28	-0.56
	鹿野断層帯			15.0	1.18			0.13	-0.89	0.1	0.4	0.25	-0.60
	山崎断層帯	80.0	85.0	82.5	1.92	0.3	0.5	0.40	-0.40	0.3	1.0	0.65	-0.19
	中央構造線(四国)			192.0	2.28	4.0	6.0	5.00	0.70	5.0	10.0	7.50	0.88
	宍道断層帯	18.0	27.0	22.5	1.35	0.15	0.24	0.20	-0.71	0.05	0.5	0.28	-0.56
	岩国断層帯	40.0	47.0	43.5	1.64	0.2	2.5	1.35	0.13	0.1	1.0	0.55	-0.26
菊川断層帯			32.0	1.51	0.5	0.58	0.54	-0.27	0.1	0.9	0.50	-0.30	

注1 断層長は、断層帯末端を結ぶ直線距離

注2 第四紀変位量は、主に準平原形成期(新第三期後期)の水系と思われる比較的大きな谷の屈曲量

注3 郷村断層帯の断層長は、丹後半島北部沖合い海域の断層長を含める。

注4 各パラメータがレンジとして示されている場合には、その平均値を用いた。

B: 東北日本弧内帯の逆断層

出典		地震調査研究推進本部		産総研 活断層データベース			
断層(帯)名	断層長		第四紀変位量		平均変位速度		
	L(km)	log L	D(km)	log D	S(mm/y)	log S	
黒松内低地断層帯	32.0	1.51	2.40	0.38	1.00	0.00	
函館平野西縁断層帯	24.0	1.38	0.96	-0.02	0.40	-0.40	
津軽山地西縁断層	16.0	1.20	0.72	-0.14	0.30	-0.52	
黒石断層	23.0	1.36	0.48	-0.32	0.20	-0.70	
青森湾西岸断層	31.0	1.49	1.92	0.28	0.80	-0.10	
横手盆地東縁断層帯	56.0	1.75	1.92	0.28	0.80	-0.10	

C: 九州地方の正断層

出典		地震調査研究推進本部		産総研 活断層データベース			
断層(帯)名	断層長		第四紀変位量		平均変位速度		
	L(km)	log L	D(km)	log D	S(mm/y)	log S	
別府-万年山断層帯	92.0	1.96	4.65	0.67	3.10	0.49	
雲仙断層群	59.0	1.77	4.50	0.65	3.00	0.48	
布田川-日奈久断層帯	101.0	2.00	1.35	0.13	0.90	-0.05	
出水断層帯	20.0	1.30	0.45	-0.35	0.30	-0.52	
水縄断層帯	24.0	1.38	0.30	-0.52	0.20	-0.70	

### 2.3.6 伸展距離の決定論的評価手法

#### 1) 考え方

断層長( $L$ )と累積変位量( $D$ )の関係を表す一般式として、(2.1)式が広く用いられる<sup>29),37),38),39)</sup>.

$$D = cL^n \quad (2.1)$$

(2.1)式における $c$ と $n$ は、対象とする断層群に固有の値である。このうち $n$ は関数の次数を示し、両対数グラフに複数の断層の断層長と変位量をプロットすることにより、グラフ上の勾配として求めることができる。(2.1)式を変形すると、断層長は変位量の関数として、両対数グラフ上において直線式(2.2)として表現される。

$$\log L = 1/n \log D - 1/n \log c \quad (2.2)$$

前述の松田<sup>30)</sup>による活断層(横ずれ断層系)の長さ( $L$ )と累積変位量( $\Sigma D$ )の近似的な関係式( $\Sigma D = 10^{-1}L$ )は、(2.1)または(2.2)式において $c = 0.1$ 、 $n = 1$ というパラメータ設定を行ったケースに相当する。しかし、図-2.15に明らかなように、プロットの分布が示す勾配に対して、この関係式は必ずしも良好な近似を示していない。

海外の事例では $n \geq 1$ であり、 $n=1$ であれば変位量の増加に対して断層がこれに比例して成長することを示すが、 $n$ が大きいほど変位量の増加に伴って断層が次第に伸び悩むような成長過程を示す<sup>37),38),39)</sup>。断層の成長速度が伸び悩むメカニズムとしては、例えば断層活動に先行して存在していた伏在断層の存在、あるいは断層先端部の相互作用の影響を考慮した”alternative growth model”<sup>38)</sup>が提案されている。一方、 $n=1$ の時の $c$ の値は、臨界せん断ひずみ(critical shear strain)<sup>39)</sup>とされており、断層を生じた地殻や岩盤の物性を反映したパラメータと考えられる。すなわち $c$ と $n$ は、いずれも断層タイプ・地域性に依存するパラメータと考えられることから、この式を用いて我が国の活断層の伸展を予想する際には、我が国の断層事例により断層タイプや地域ごとに設定されたパラメータを使用する必要がある。

ところで、(2.1)ないし(2.2)式に従って断層が成長し、将来の伸展長を求めようとする際、将来増大する累積変位量は、現在知られている断層の平均変位速度( $S$ )と将来の活動期間(すなわち評価期間; $T$ )の積で与えられると考える。現在の断層長と累積変位量の関係は(2.1)式で与えられるが、上記の考えにより将来の断層長( $L'$ )と累積変位量( $D'$ )の関係は、(2.3)式で示される。

$$D' = D + ST = cL'^n \quad (2.3)$$

(2.1),(2.3)より、伸展長( $\Delta L$ )を求める決定論的な評価式(2.4)が得られる。

$$\Delta L = L' - L = (L^n + ST/c)^{1/n} - L \quad (2.4)$$

実際に平面図上で断層の伸展長を図示する際には、断層両側端部からの伸展が想定されるため、(2.4)式による $\angle L$ の1/2を片側伸展長として用いる。

## 2) 決定論での評価

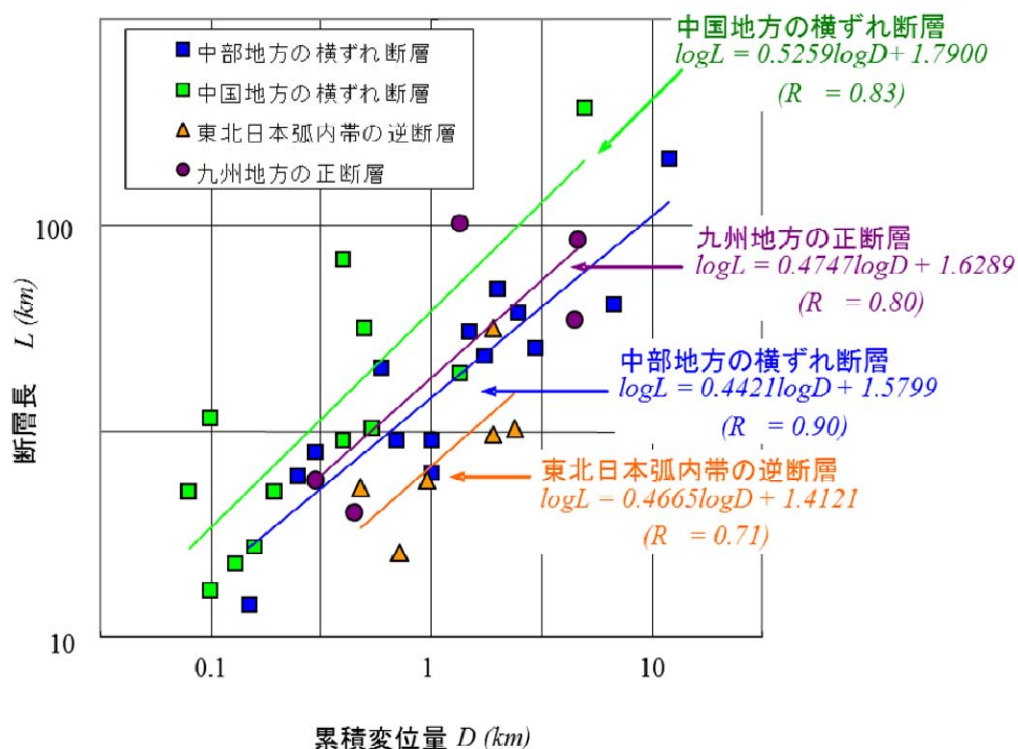
抽出・整理された断層長と累積変位量の両対数グラフ上のプロットと、その近似式を図-2.17に示す。各断層タイプ・地域グループのプロットの近似式は以下のとおりである。

$$\text{中部地方横ずれ断層} : \log L = \log 0.442D + 1.580 \quad (D = 0.000267L^{2.26}) \quad (2.5)$$

$$\text{中国地方横ずれ断層} : \log L = \log 0.526D + 1.790 \quad (D = 0.000395L^{1.90}) \quad (2.6)$$

$$\text{東北日本弧内帯逆断層} : \log L = \log 0.467D + 1.412 \quad (D = 0.000940L^{2.14}) \quad (2.7)$$

$$\text{九州地方正断層} : \log L = \log 0.475D + 1.629 \quad (D = 0.000370L^{2.11}) \quad (2.8)$$



R(相関係数)からみた相関関係  
 0.0~±0.2 ほとんど相関がない  
 ±0.2~±0.4 やや相関がある  
 ±0.4~±0.7 相関がある  
 ±0.7~±0.9 強い相関がある  
 ±0.9~±1.0 きわめて強い相関がある

図-2.17 断層タイプ・地域別の断層長と累積変位量の関係とその近似式

各断層タイプ・地域グループのプロットの相関係数は、最も大きい中部地方横ずれ断層で 0.90, 最も小さい東北日本弧内帯逆断層で 0.71 という値を示しており, 活断層を対象としたパラメータとしては比較的良好な相関を示す. 特に同じ手法で断層長と累積変位量が抽出された中部地方と中国地方の横ずれ断層が, 図上において独立したトレンドを形成することは松田ほか<sup>3)</sup>により指摘されているところであるが, 活断層の伸展特性の地域性を示すものと考えられる. なお, 各断層タイプ・地域グループごとではなく, 全体をまとめてプロットした場合の相関係数は0.76であることから, 断層タイプや地域性を考慮することにより検討の精度が高まることが期待できる.

なお, 図-2.17 は Ranalli<sup>29)</sup>, 松田<sup>30)</sup>, Schlische<sup>31)</sup>など既往の文献で用いられている Log-Log の両対数グラフにより結果をまとめたものである. 参考までに対数を用いずに整理したグラフを, 図-2.18 に示す. 中国地方や中部地方では, 相関がやや良くなる点があるものの, 全体的にみると相関係数が0.71とやや低下しており, 加えて長大な断層のデータが少ないことからグラフ上のデータ分布がいびつな形となっている. よって本研究においては, 両対数グラフで用いた断層長と累積変位量の関係式を採用し提案することとする.

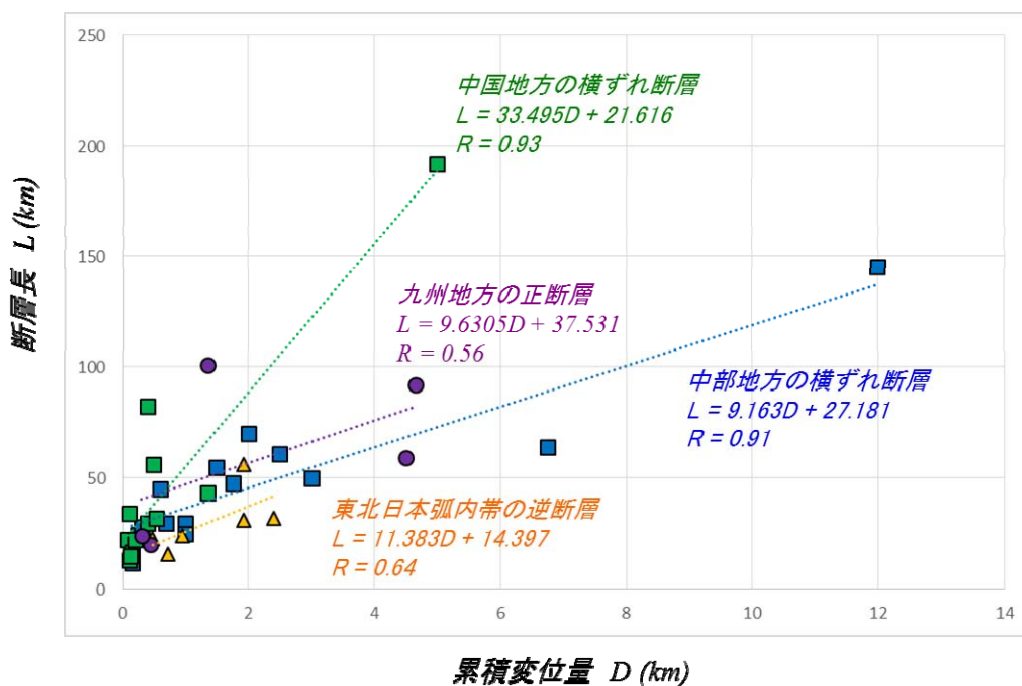


図-2.18 断層タイプ・地域別の断層長と累積変位量の関係とその近似式  
(両対数グラフを用いないケース)

### 2.3.7 伸展距離の確率論的評価手法

図-2.17 において各断層タイプ・地域グループのプロットは、それぞれの近似線に対してばらつきを示している。このようなばらつきの原因として、個々の断層の活動性が示す各断層タイプ・地域グループの平均的な活動性に対する偏差(断層自身による偏差)とともに、累積変位量を想定した際の平均変位速度の想定などによる偏差(技術的な測定精度の偏差)が含まれている。

近似線に対する断層長の誤差分布(対数軸上では断層長比の誤差分布)が示す確率密度関数は、個々の各断層タイプ・地域グループにより異なるが、本研究によるデータセット数では、東北日本弧内帯逆断層や九州地方正断層の数点のプロットに示されるように、統計的な検討を行うことが難しい。そこで、全プロットがそれぞれの近似線に対して示す偏差をヒストグラムに示すと、対数正規分布の確率密度関数として取り扱うことが可能と考えられる(図-2.19)。このことから各断層タイプ・地域グループの近似線に対する偏差も、データがそれぞれの近似線に対して示す標準偏差をパラメータとする対数正規分布に従うものと仮定した。

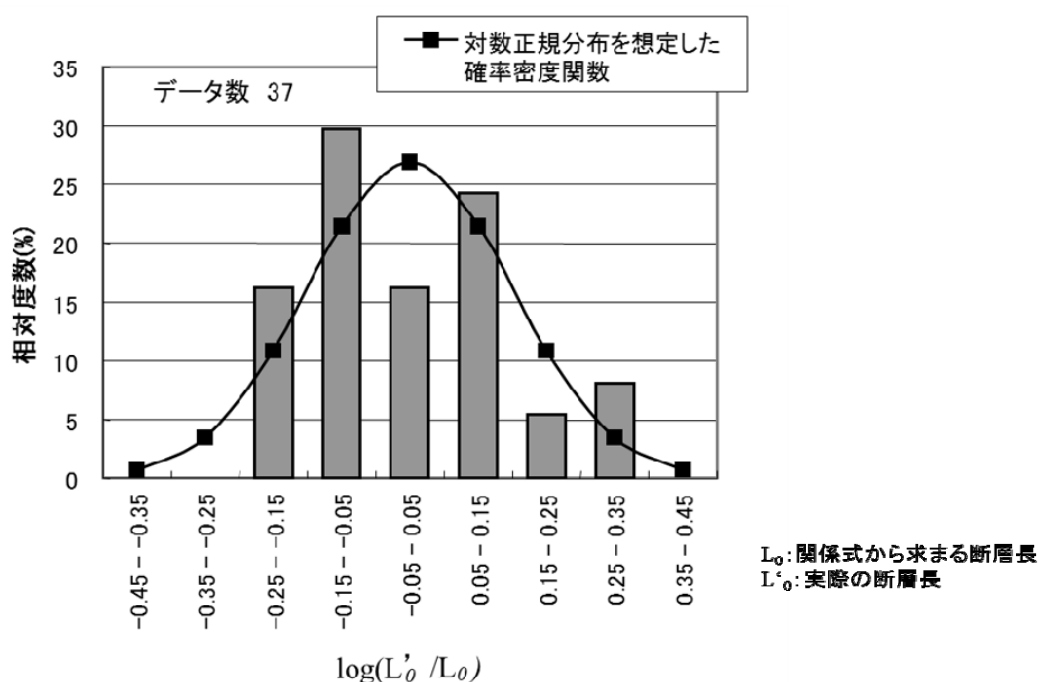


図-2.19 近似線に対する断層長の誤差分布と対数正規分布を想定した確率密度関数

$L'_0/L_0$ は現在の累積変位量に対する断層長と近似線上の断層長の比を示す。

対数正規分布における各断層タイプ・地域グループのプロットの近似式に対する標準偏差( $\sigma$ )は以下のとおりである。

$$\text{中部地方横ずれ断層} : \sigma = 0.115 \quad (2.9)$$

$$\text{中国地方横ずれ断層} : \sigma = 0.187 \quad (2.10)$$

$$\text{東北日本弧内帯逆断層} \quad : \quad \sigma = 0.128 \quad (2.11)$$

$$\text{九州地方正断層} \quad : \quad \sigma = 0.196 \quad (2.12)$$

なお、すべての 37 断層をまとめて評価した場合の標準偏差( $\sigma$ )は、2.26 であった。よって、各断層タイプ・地域グループごとに評価していくことの必要性が、ここでも見て取れる。

ところで図-2.17 および(2.9)~(2.12)式における近似線に対する偏差は、いずれも断層長の偏差であり、伸展長の偏差を示すものではない。断層長と累積変位量の関係を表す両対数グラフ上において偏差( $N\sigma$ )が存在する近似直線により伸展長を求める時、偏差が断層の伸展長に与える影響は以下のとおりである。

近似直線上における現在の断層長( $L_0$ )と 100 万年後の断層長( $L_{100}$ )、および近似直線に平行で偏差( $N\sigma$ )を示す直線上における現在の断層長( $L'_0$ )と 100 万年後の断層長( $L'_{100}$ )には、以下の関係がある。

$$L'_0 / L_0 = L'_{100} / L_{100} = 10^{N\sigma} \quad (2.13)$$

伸展長の偏差は、偏差( $N\sigma$ )が存在する時の伸展長( $\Delta L'$ )と、近似式による伸展長( $\Delta L$ )の差で表されることから、(2.14)式が得られる(図-2.20 参照)。

$$\begin{aligned} \Delta L' - \Delta L &= (L'_{100} - L'_0) - (L_{100} - L_0) \\ (2.13) \text{ より} &= 10^{N\sigma}(L_{100} - L_0) - (L_{100} - L_0) \\ &= (10^{N\sigma} - 1) \Delta L \end{aligned} \quad (2.14)$$

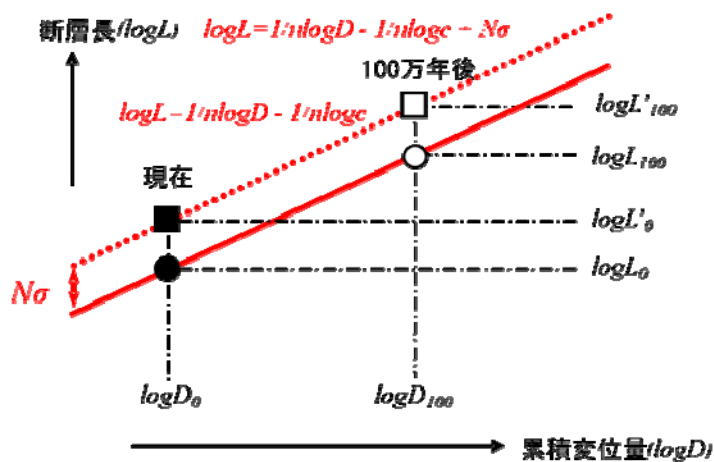


図 2-20 将来の断層長( $L'$ )と累積変位量( $D'$ )の関係

(2.5)~(2.8)式から得られた  $n$  と  $c$  を(2.4)式に代入して得られる断層片側の伸展長と, (2.9)~(2.12)の標準偏差( $\sigma$ )を(2.14)式に代入して得られる断層片側の伸展長の偏差を, 検討対象としたすべての断層について求めると図-2.21 の試算結果が得られる.

本研究による試算では, (2.5)~(2.8)の近似式の係数の違いから, 中国地方横ずれ断層の伸展長が大きく, 東北日本弧内帯逆断層の伸展長が小さい. 同じ各断層タイプ・地域グループの中では, 現在の断層長が短く, 平均変位速度が大きい断層ほど大きな進展長が得られる. 伸展長の誤差は対数正規分布に従い,  $+2\sigma$ では決定論的な伸展長の概ね 2 倍となる.



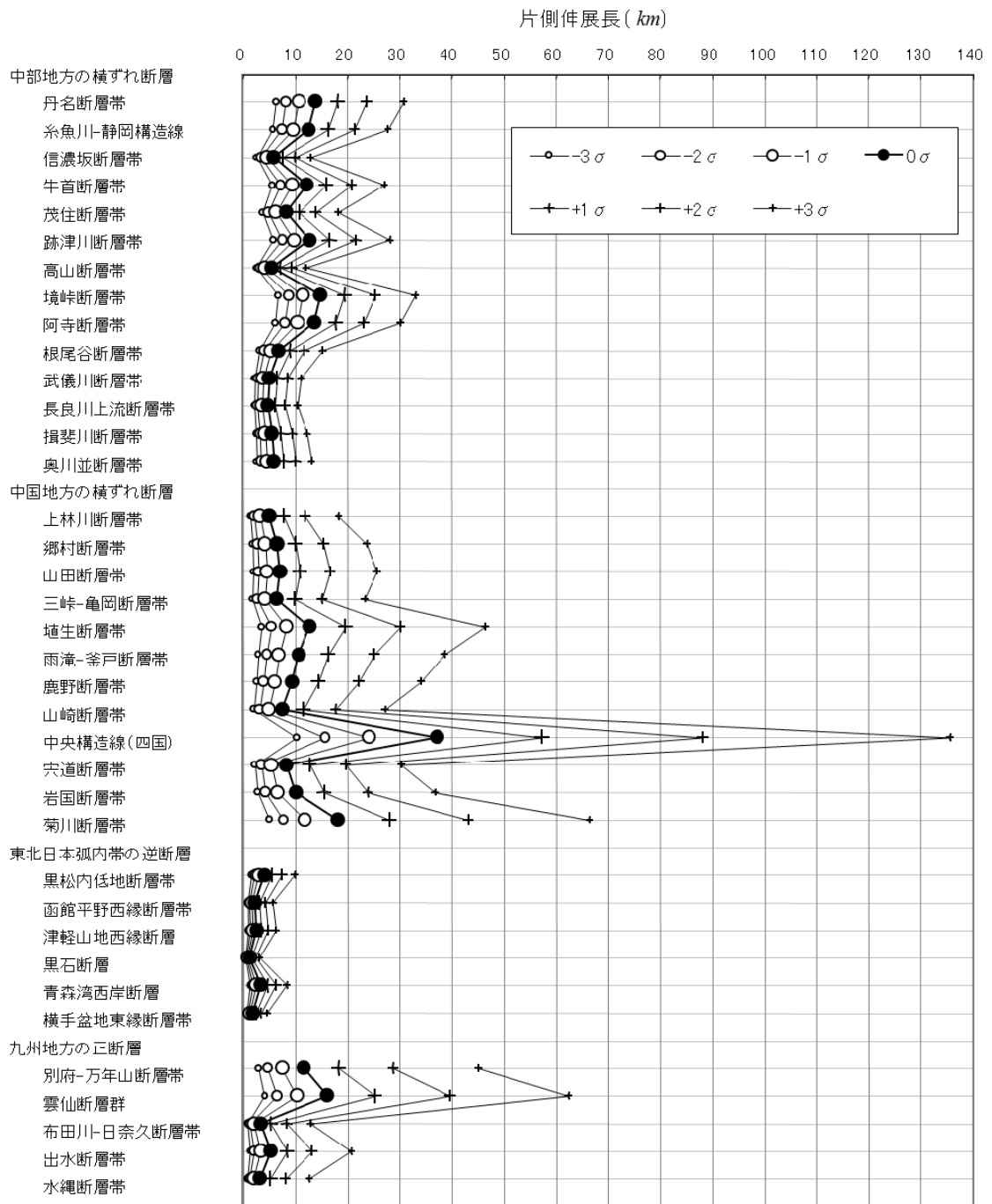


図-2.21 検討対象とした 37 断層の将来 100 万年間の片側伸展長とその偏差

なお、最も事例数が多い中部地方の横ずれ断層(14箇所)を例に、関係式と断層ごとの値を両対数グラフにプロットしたのが、図-2.22である。その際、同じ地域・断層タイプの次数  $n$  (傾き) は一定と推定すると、そのばらつきは個々の断層がもつ  $c$  (係数) の違いにより生じたことになる。

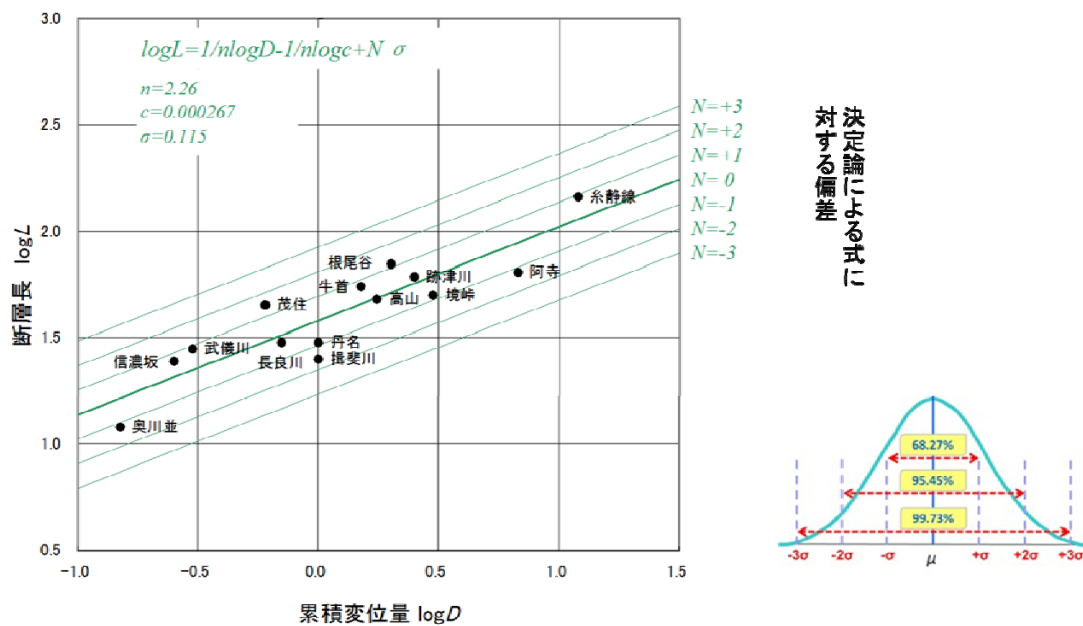


図-2.22 中部地方の横ずれ断層における断層長と累積変位量の関係

## 2.4 断層側方の分岐・派生に関する評価

### 2.4.1 断層長と分岐・派生の関係

#### 1) 断層側方の影響幅と断層長の関係

断層活動に伴い断層側方に形成される破砕帯・プロセスゾーンなどの変形域の幅は、断層長に対して概ね比例関係にあることが知られている。

Ogata<sup>40)</sup>は、電力施設の基礎岩盤調査から得られた断層幅(複数の破砕帯を含む領域の幅:FW)と断層長(L)の経験的關係式を示したが、これを指数関数で示すと下式<sup>41)</sup>となる。

$$FW = 1.65 \times 10^{-3} L^{1.15} \quad (2.15)$$

断層の周囲に形成されるプロセスゾーン<sup>42)</sup>(破砕帯やカタクレースイト帯などの断層岩から構成されるゾーンと、その周囲に形成される母岩に比べて節理や二次的なせん断割れ目などの密度が高いダメージゾーンを含む領域)の幅(PW)と断層長(L)の間には、以下の関係があることも知られており、日本国内の3つの断層(跡津川断層<sup>41)</sup>・臼木谷断層<sup>41)</sup>・阿寺断層<sup>43)</sup>)もこの傾向に一致することが知られている。プロセスゾーンの幅はOgata<sup>40)</sup>による断層幅の約10倍である。

$$PW = 1.6 \times 10^{-2} L \quad (2.16)$$

これらの経験的關係式は、活断層とその周囲に生じた分岐断層の関係を示すものではないが、断層の幾何学的形状を示す基本的な性質として注目される。本研究における断層側方への分岐・派生による影響範囲の想定に際しても、単純に影響範囲の幅(W)によって評価基準を設定するのではなく、影響範囲の幅と断層長の比(W/L)を用いることにより、断層形状の幾何学性質に合致した定量的な評価に結びつくことが期待される。

#### 2) 断層タイプの考慮

以上例示した断層幅・プロセスゾーンの幅と断層長の関係は、横ずれ断層において検討された例が多い。横ずれ断層における側方への分岐は、ステップオーバーとこれに伴うフラワー構造、および断層末端部におけるスプレー状の分岐構造<sup>例えば 44)</sup>などが良く知られており、このような構造は国内の横ずれ断層にも普通に認められる。一方、日本国内の逆断層では、沈降側に前方転移が生じた事例、および隆起側にバックスラストが形成されている例などが多数報告されている<sup>例えば 45)</sup>。また正断層では、沈降側に幅広い半地溝・地溝が形成され、その内部に副次的なシンセティック・アンティセティック断層が多数形成される傾向がある<sup>例えば 46)</sup>。

分岐断層の形態の相違は、断層タイプにより断層周辺の応力分布が異なることに起因するため、その影響範囲の想定も断層タイプごとに異なることが予想される。さらに逆断層と正断層の場合には、隆起側と沈降側における応力分布と分岐のメカニズムが異なるとみられることから、隆起側と沈降側に個別の評価を与えることも検討する必要がある。このような断層タイプによる分岐形態について、次節において実際の断層調査と実験的研究による具体的事例にもとづいて確認する。

## 2.4.2 断層タイプ別事例の収集・整理

### 1) 逆断層

逆断層の分岐特性に関する代表的な研究例として、以下のような事例が挙げられる。

- (1) 上田ほか<sup>47)</sup>による模型実験によれば、変形の進行に伴って隆起側に正断層を発生する一方、沈降側には向斜構造・背斜構造の形成に伴い逆断層を生じている(図-2.23)。
- (2) 池田ほか<sup>45)</sup>「第四紀逆断層アトラス」等の文献には、逆断層の隆起側にバックスラストを伴う事例や、主断層が沈降側に移動(前方転移と呼ばれる)した事例が複数紹介されている。同文献の中で、前方転移が発生する時間スケールが知られている事例として、十勝断層帯の前縁に位置する光地園断層が数十万年前に形成されたことが推定されている。また北由利断層近傍の石油坑井データの解析から、佐藤ほか<sup>48)</sup>は、165万年前以降に前方転移が発生したとする検討例を報告した(図-2.24)。さらに野原ほか<sup>49)</sup>は、横手盆地東縁断層帯のバランス断面法による解析から、同断層帯を構成する6断層のうち、半数が240万年前以降に前方転移を発生したと推定している(図-2.25)。
- (3) 吉岡<sup>50)</sup>は新潟地域の撓曲断層の検討にもとづいて、逆断層や逆断層型の撓曲変形に伴って発生する副次的な断層の形態を整理・紹介している。逆断層隆起側に地溝状の正断層やバックスラストが形成されるケースとともに、撓曲変形に伴って隆起側・沈降側に層面すべり断層が形成されるモデルを、具体的な事例とともに紹介している(図-2.26)。

以上のような逆断層の分岐特性を整理すると、a) 隆起側に正断層・バックスラストを形成する、b) 数十～数百万年オーダーで沈降側に前方転移する、c) 撓曲断層では隆起・沈降側に層面すべり断層を発生するという特徴があり、隆起側と沈降側の変形特性が異なっている。

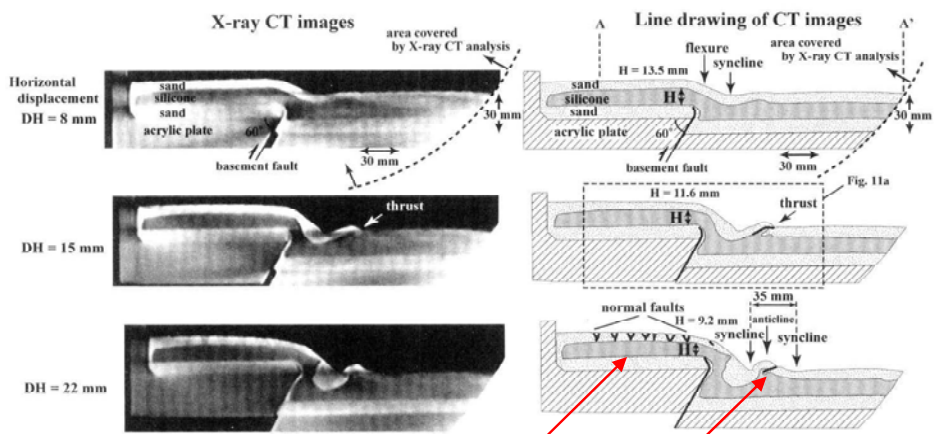


Fig. 6. Sequential series of CT images of the model (Case 1) and line drawing of the images. Thick lines in line drawings represent shear zones. A-A' corresponds to the deformation profiles of the top surface of the model shown in Fig. 8. Location of Figure 11a is indicated by the dashed rectangle.

隆起側での正断層の発生  
 沈降側での逆断層の発生

図-2.23 逆断層の分岐・派生に関する模型実験の例 (上田ほか<sup>47)</sup>に加筆)

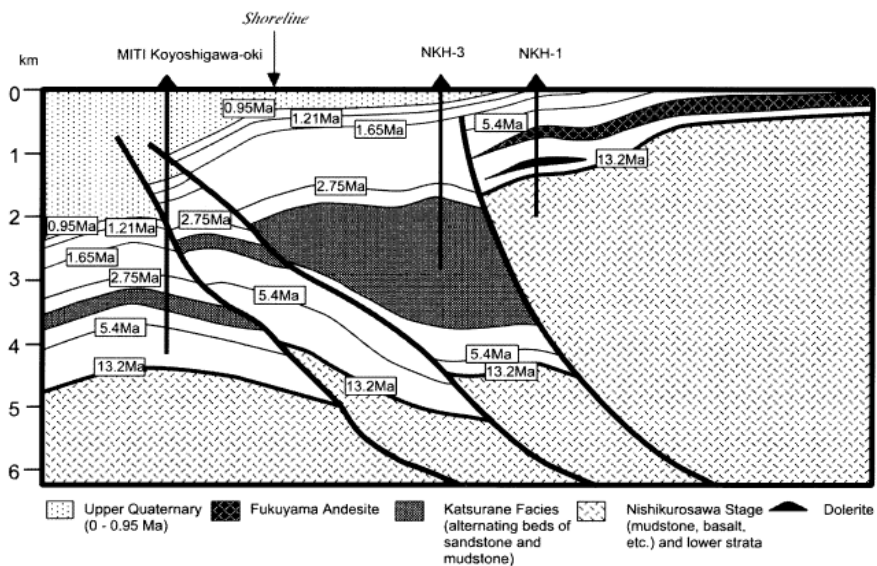
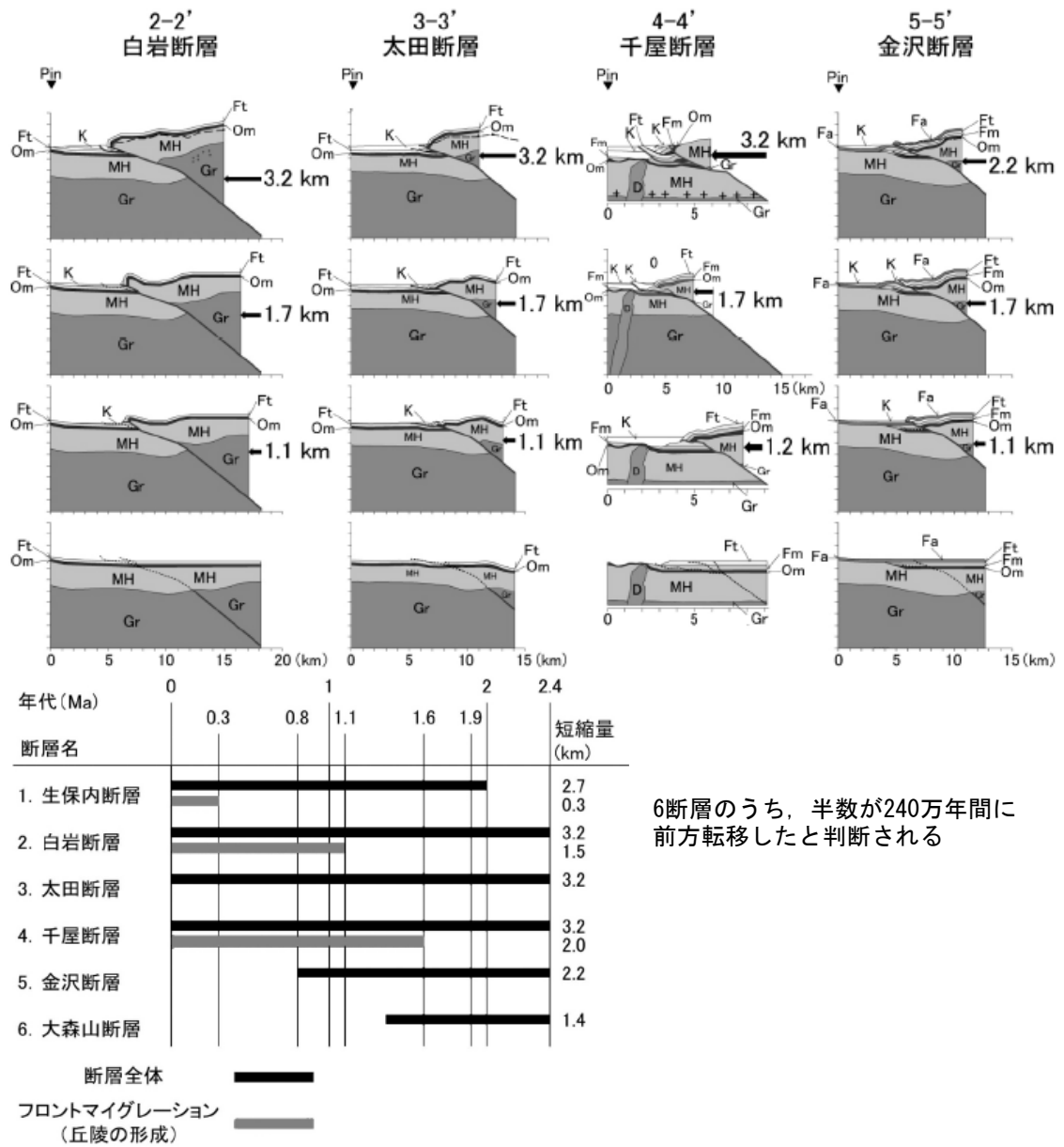


図-2.24 北由利断層帯における前方転移の例<sup>48)</sup>

反射法地震探査・石油坑井資料の解析による北由利断層帯の大規模な前方転移の推定。  
 陸域の断層は約165万年前までに活動を停止し、現在は海域の断層が活動している。



6断層のうち、半数が240万年間に前方転移したと判断される

図-2.25 バランス断面法により解析された横手盆地東縁断層帯での前方転移 <sup>49)</sup>

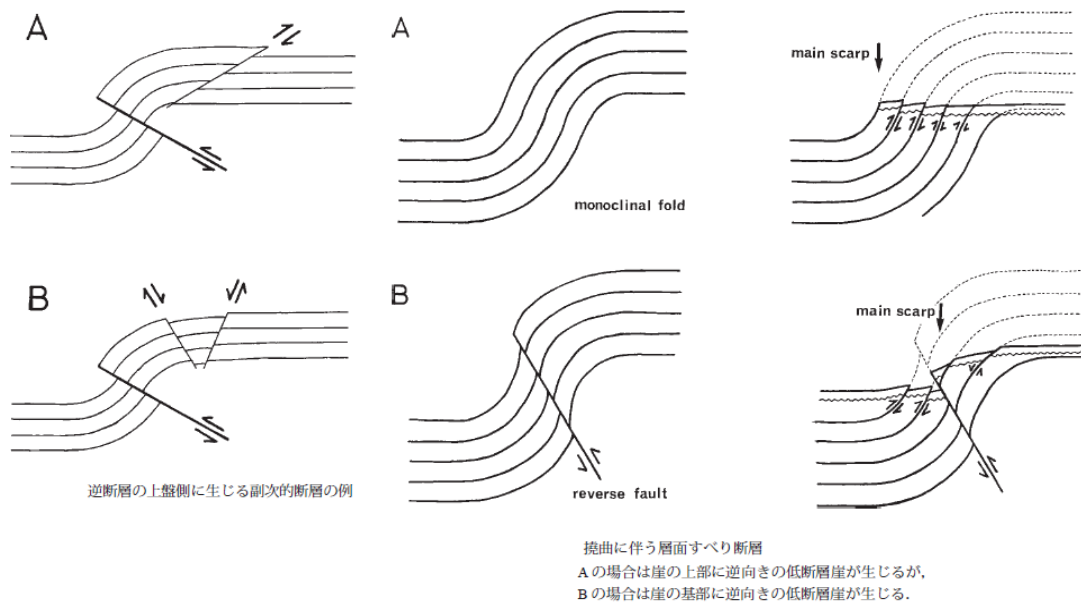


図-2.26 逆断層に伴う副次的断層・層面すべり断層の概念図 50)

## 2) 正断層

正断層の分岐特性に関する代表的な研究例として、以下のような事例が挙げられる。

- (1) 正断層・リフト（地溝）の模型形成実験<sup>51),52)</sup>によれば、主断層に対して沈降側に多数の副次的な断層群が発生する傾向があり、隆起側に比較して沈降側の変形領域が広い。また沈降側には隆起側へ傾斜した傾動域が出現する（図-2.26）。
- (2) Twiss・Moores<sup>46)</sup>は、地溝（グラーベンまたはリフト）・半地溝（ハーフグラーベン）・地壘（ホルスト）等の正断層系の構造概念を提示している。この概念によれば、深部へ向かって低角化するリストリック正断層の上盤に位置する地溝・半地溝の内部には副次的な正断層が伴われ、安定的な地壘部分と対照的である。また地溝・半地溝の内部の地塊は隆起側へ傾斜した傾動域となっている（図-2.27）。
- (3) Twiss・Moores<sup>46)</sup>に紹介された地溝・半地溝の反射断面や、地震調査研究推進本部<sup>32)</sup>が公開している別府湾地溝（形態的には半地溝に近い）の反射断面では、上記の模型形成実験・模式図に調和的な深部形状が認められる。正断層の沈降側には多数の副次的な断層群が認められ、傾動域が出現している（図-2.28）。

以上のような正断層の分岐特性を整理すると、a) 隆起・沈降側ともに正断層を派生する、b) 沈降側に広く派生断層が分布する傾向がある、c) 沈降側に傾動域が形成されるという特徴があり、隆起側と沈降側の変形領域の規模や変形特性が異なっている。

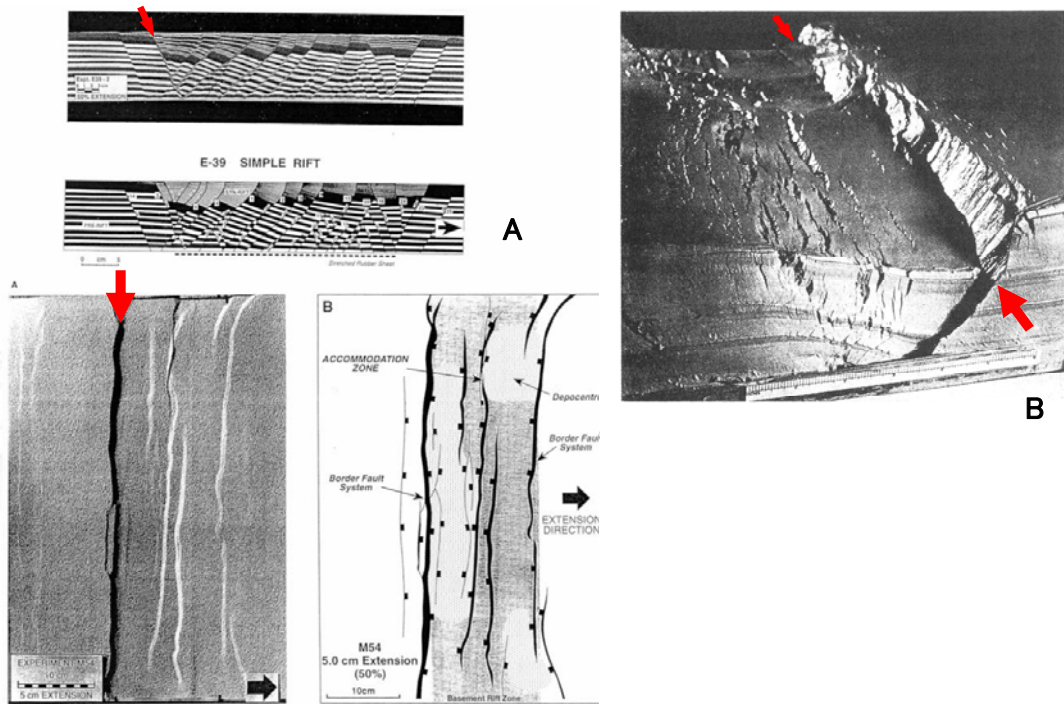


図-2.27 正断層の形成実験の事例

A ; McClay<sup>52)</sup>によるリフトの形成実験.

B ; 狩野・村田<sup>51)</sup>が紹介している正断層の形成実験.

いずれの模型実験においても、主断層（赤矢印）の沈降側に多数の副次的断層群が生じ、傾動域が形成される.

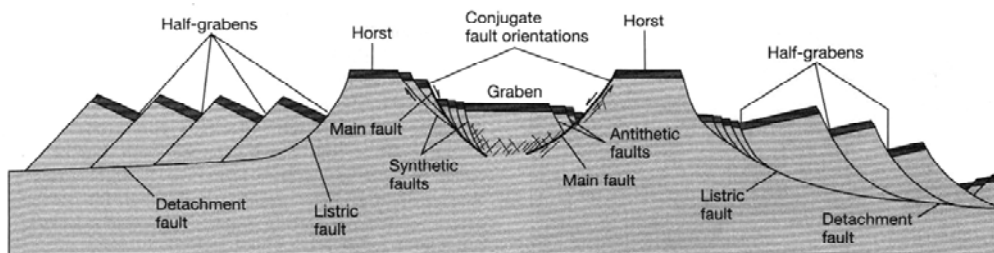


Figure 5.4 Systems of normal faults commonly are characterized by a main fault with associated subsidiary faults and by low-angle detachment faults with imbricate fault blocks in the hanging wall block.

図-2.28 正断層系における主断層と副次的断層の概念<sup>46)</sup>



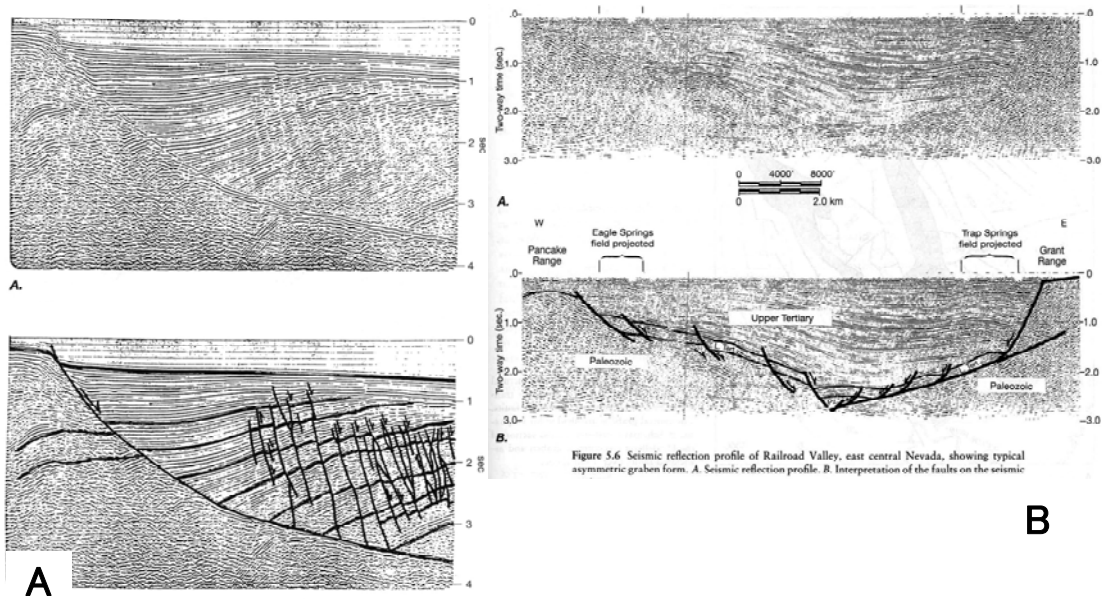


Figure 5.6 Seismic reflection profile of Railroad Valley, east central Nevada, showing typical asymmetric graben form. A. Seismic reflection profile. B. Interpretation of the faults on the seismic

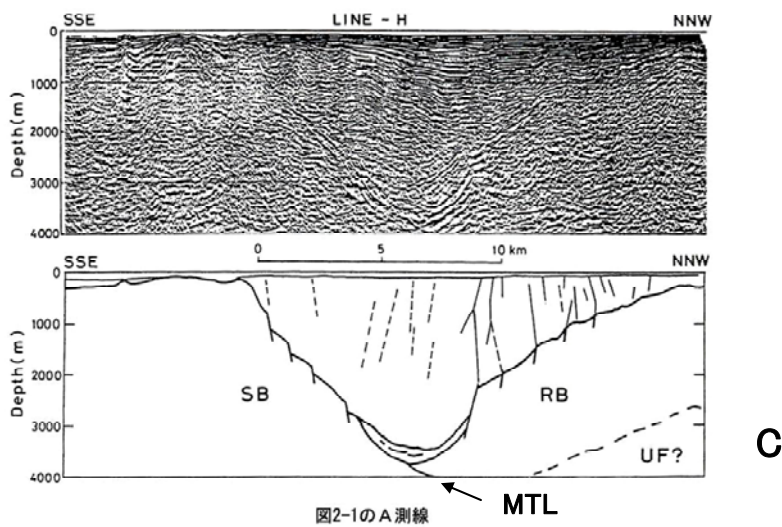


図2-1のA測線

図-2.29 半地溝（ハーフグラベン）と地溝（リフト）の反射断面の事例

Twiss・Moore<sup>46)</sup>に紹介されたハーフグラベン(A)とリフト(B)の反射断面。

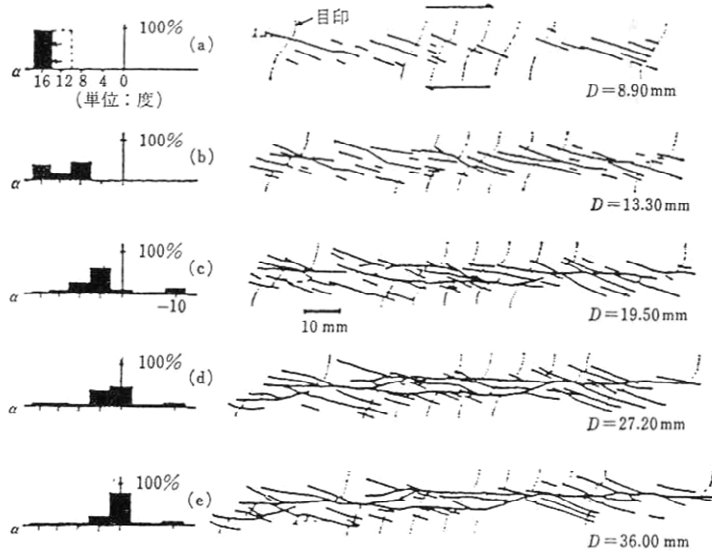
Cは地震調査研究推進本部<sup>32)</sup>が公開している別府湾の反射断面であり，SBは三波川帯，RBは領家帯に相当し，MTL（中央構造線；加筆）に相当する主断層が北へ傾斜する。

### 3) 横ずれ断層

横ずれ断層の分岐特性に関する代表的な研究例として、以下のような事例が挙げられる。

- (1) リーデルによる古典的な模型実験<sup>53)</sup>や、最近の模型実験<sup>54)</sup>では、変形初期にリーデルせん断面と呼ばれる主せん断方向に対して斜交する複数の短い破断面を生じる。変形が進行すると、主せん断方向の破断面が形成され、初期の断層面は次第に連結されてゆく傾向がある。これに伴って活動的な断層面は次第に主断層方向に限定され、活動的な変形域の幅は、初期に形成されたリーデルせん断面が形成された領域に比較して、縮小傾向となる(図-2.30)。
- (2) Twiss・Moore<sup>55)</sup>などに紹介されている横ずれ断層のステップオーバーの概念によれば、横ずれ断層が大きく屈曲する部分や併走する区間には、しばしばフラワー構造と呼ばれる一種のデュープレックス(複瓦)構造が出現し、この部分に歪や変形が集中する。右横ずれ断層の左ステップや左横ずれ断層の右ステップ部分は圧縮領域となつて、正のフラワー構造と呼ばれる逆断層を伴う隆起域(圧力リッジとも呼ばれる)が生ずる。一方、右横ずれ断層の右ステップや左横ずれ断層の左ステップ部分は引張領域となつて、負のフラワー構造と呼ばれる正断層を伴う沈降域(プリアパートベイズンとも呼ばれる)を生ずる(図-2.31)。
- (3) 国内の横ずれ断層系においても、このようなデュープレックス構造が確認されている。例えば阿部<sup>56)</sup>による鳥取県西部地震震源域の反射断面では、地表位置で約3km離れて併走する断層が存在し、この部分にフラワー構造が認められている。また諏訪湖は糸魚川-静岡構造線活断層系の左横ずれ断層が約5km左ステップしている部分に形成されたプリアパートベイズンと考えられている<sup>57)</sup>(図-2.32)。

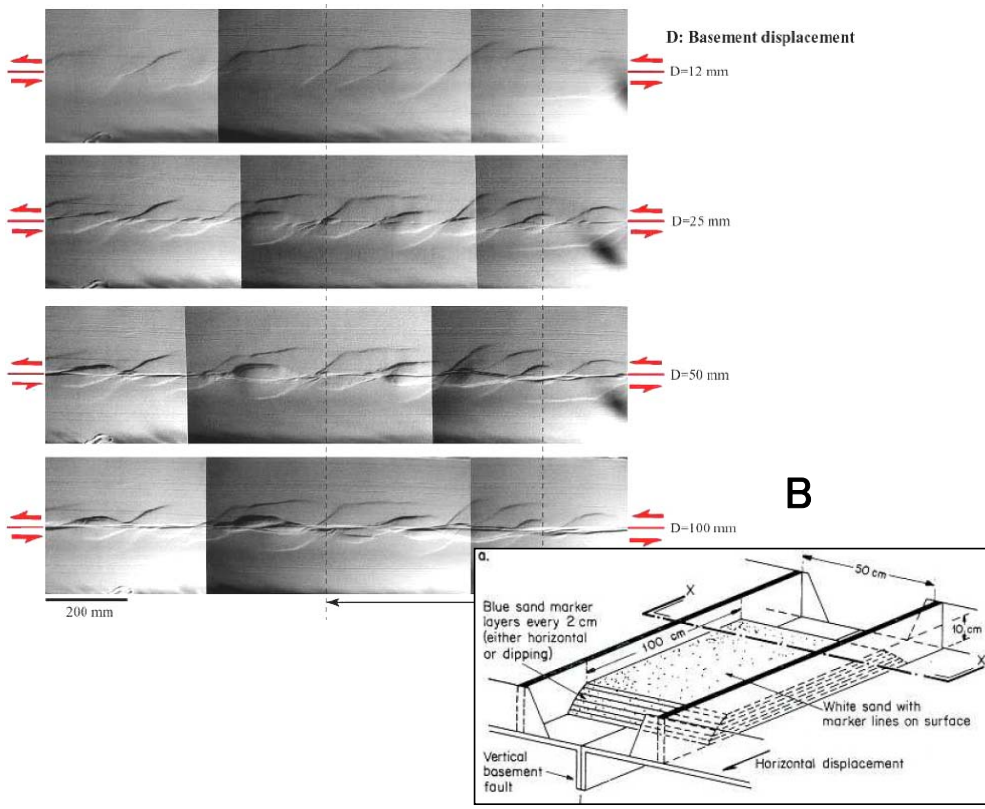
以上のような横ずれ断層の分岐特性を整理すると、a) 変形の進行に伴い破断面が連結し、破断面の角度が主せん断方向に近づくことから変形領域の幅は大きく拡大しない、b) 屈曲・ステップオーバーを伴う横ずれ断層では、デュープレックス構造を伴う変形領域が形成される傾向があり、これを影響幅として考慮する必要がある。



A

図VI.2-1 リーデル剪断実験による断層の成長過程(Tchalenko, 1970)

(a)から(e)へと右ずれ変位量を増大させたときの破断面の発達過程。左側のヒストグラムは破断面の方位別頻度分布, Dは変位量。



B

図-2.30 横ずれ断層の変形の進行に関する模型実験事例

A; 狩野・村田<sup>53)</sup>に紹介されているリーデルせん断実験

B; 上田<sup>54)</sup>による模型実験装置と実験結果

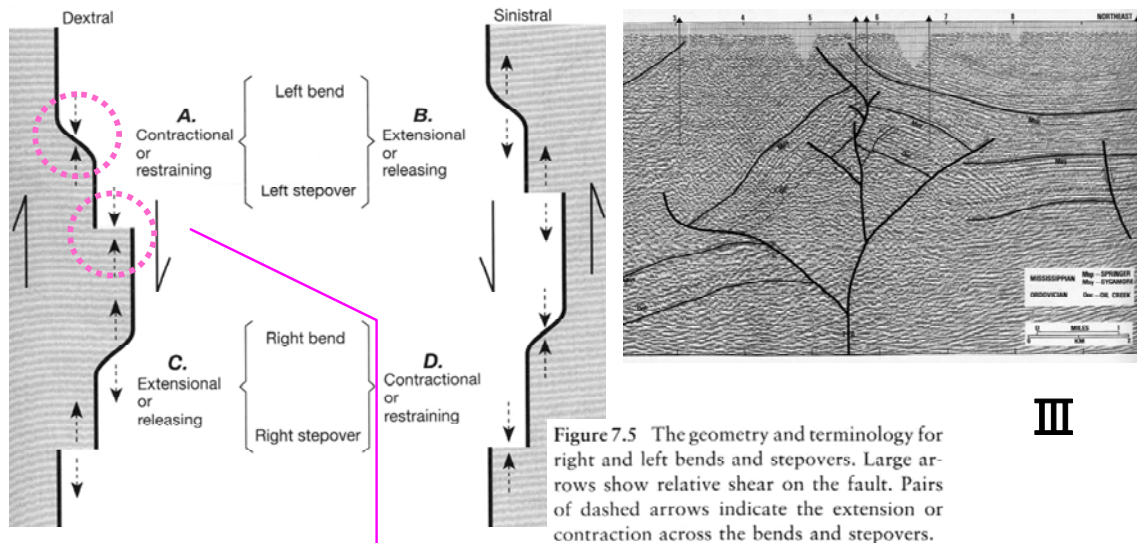
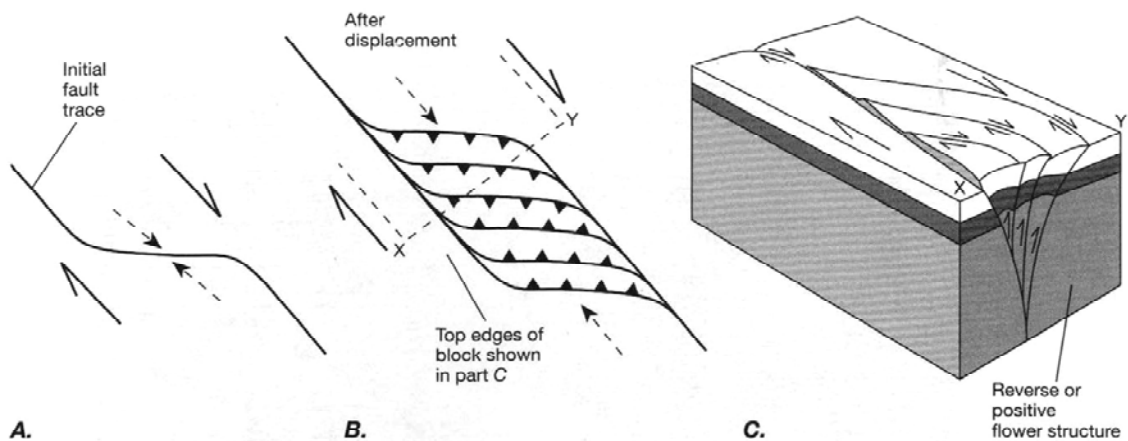


Figure 7.5 The geometry and terminology for right and left bends and stepovers. Large arrows show relative shear on the fault. Pairs of dashed arrows indicate the extension or contraction across the bends and stepovers.

III

I

右ずれ断層の左ステップオーバーにより形成される正のフラワー構造の例



A.

B.

C.

II

Figure 7.7 Formation of a contractional duplex at a contractional (restraining) jog. Large arrows indicate the dominant shear sense of the fault zone; small arrows indicate the sense of strike-slip and reverse components of motion on the fault splays. A. Contractional bend on a dextral fault. B. A contractional duplex developed from the bend in part A. C. A block diagram showing reverse, or positive, flower structure in three dimensions. The block faces are vertical planes along the dashed lines in part B.

図-2.31 横ずれ断層のステップオーバーに伴うフラワー構造の概念 55)

- I) : 横ずれ断層のステップオーバーに伴う構造概念
- II) : 右横ずれ断層の左ステップによって生ずる正のフラワー構造の概念
- III) : フラワー構造の反射断面の例



図-1 震源域周辺における深部地殻構造調査の概要  
震央(赤丸)は地形的リニアメント(青線)と同走向に分布している。

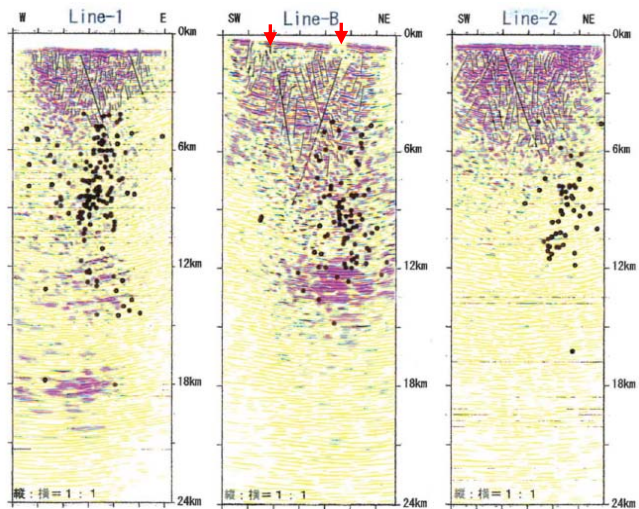
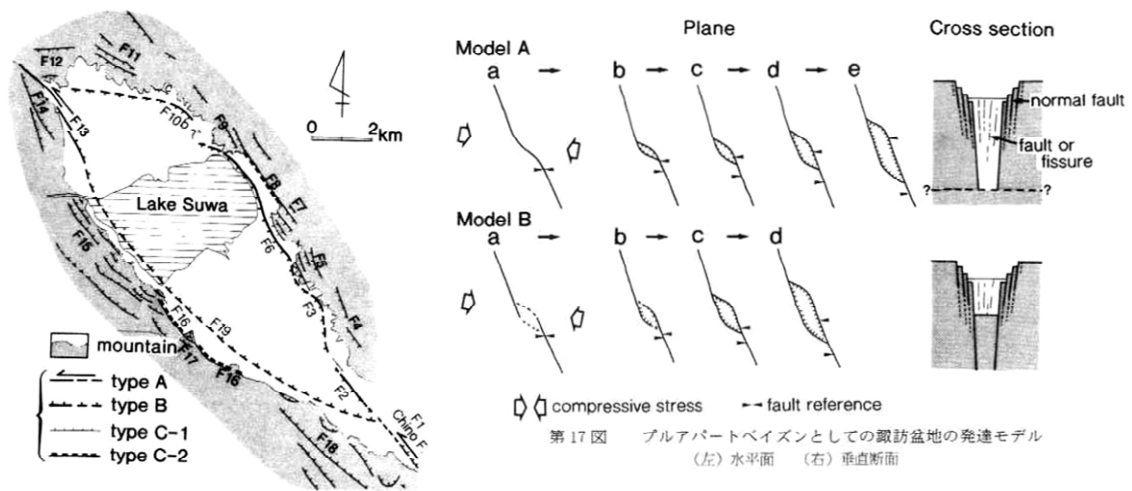


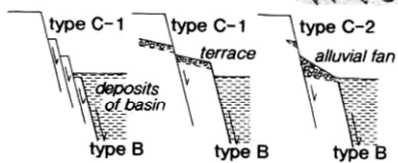
図-3 深部反射法地震探査記録断面に投影した震源分布(黒丸)

A



第 17 図 プルアパートベイゼンとしての諏訪盆地の発達モデル  
(左) 水平面 (右) 垂直断面

B



第 16 図 諏訪盆地周辺の断層のタイプ分け  
タイプA: 左横ずれをする主断層(諏訪盆地を開かせる) タイプB: 盆地と山地の境界をなす正断層 タイプC-1: 山地中にみられる二次的な正断層 タイプC-2: 二次的な正断層で、その前面に扇状地が形成されているもの

諏訪湖は左横ずれを示す糸魚川-静岡構造線活断層系の左ステップにより形成された負のフラワーステップ構造(プルアパートベイゼン)と考えられている。  
諏訪湖両岸の横ずれ断層は約5km離れている。

図-2.32 フラワー構造を形成する活構造の事例

- A: 鳥取県西部地震の震源域において地表位置で約 3km 離れた 2 条の断層が併走し、フラワー構造が認められた測線(阿部<sup>56)</sup>原図に断層位置(↓)を加筆。
- B: 藤森<sup>57)</sup>による諏訪湖のプルアパートベイゼンの概念図。

### 2.4.3 分岐・派生に関する評価の事例

土木学会原子力土木委員会地下環境部会は、2001年に概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方<sup>58)</sup>をまとめている。ここでは、考慮すべき要件に関する情報として、‘断層活動が周辺岩盤に及ぼす力学的、水理学的影響の範囲については、活断層から両側へ最大2km程度とみなすことができる。’と記載されている。

その根拠は、以下のとおり述べられている。

‘断層活動が周辺岩盤に及ぼす力学的、水理学的影響を検討する際には、断層活動により周辺岩盤に歪み・小断層・節理等を生じる範囲(プロセスゾーン: Vermilye and Scholz, 1998<sup>59)</sup>)を検討することが重要である。これに関する検討事例は少ない。1回の地震時において、活断層の変位に伴い断層周辺の地盤が垂直変位する量については、その著しい影響は、断層から約1km以内ではほぼ収束するとみなすことができる(図-2.33)。主断層周辺の岩盤中に小断層が分布する範囲は、光明断層、花折断層等、100万年以上の長い活動履歴をもち、長さが50kmを超える断層の事例で、断層から片側2km程度である(図-2.34)。また、プロセスゾーンの片側幅は、断層の長さに対して10<sup>-2</sup>のオーダーとされている(Vermilye and Scholz, 1998<sup>59)</sup>)。以上から、断層活動に起因する周辺岩盤への力学的変化、及び小断層・節理の発生による水理学的変化が生じる範囲については、将来的な影響範囲の拡大を考慮しても、活断層から両側へ最大2km程度以内とみなすことができる。ただしこの幅については、断層タイプや母岩の性質によってばらつきのあることを考慮する必要がある。’

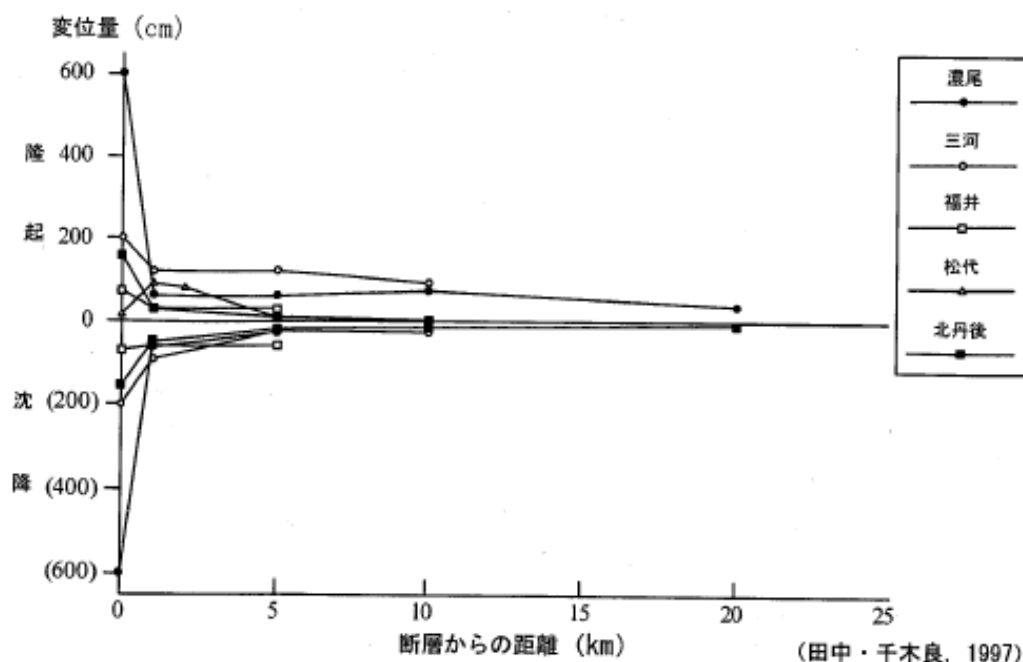


図-2.33 地震断層周辺の地盤の隆起・沈降量<sup>58)</sup>

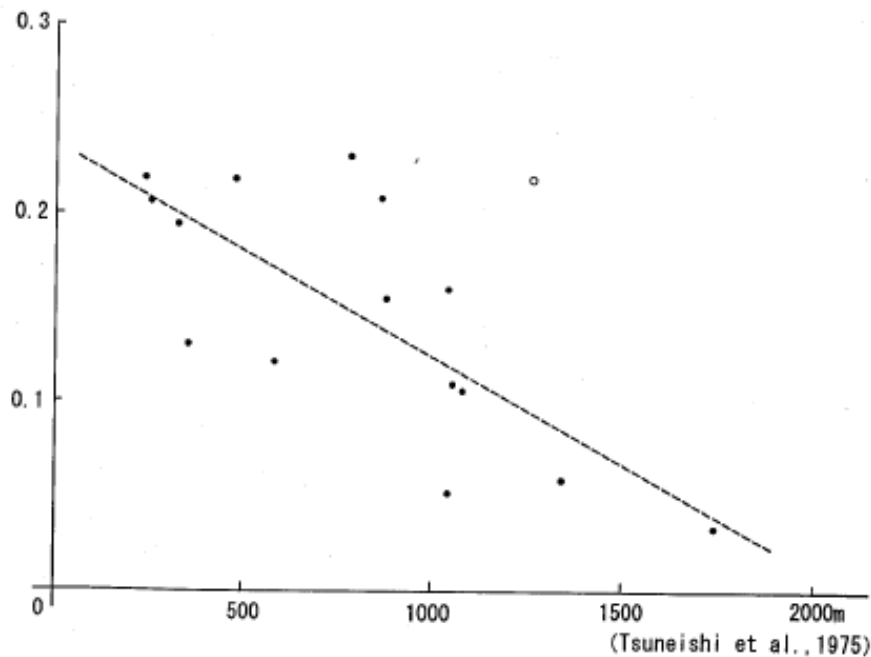


図-2.34 主断層からの距離に応じた小断層の分布密度(光明断層の例)<sup>58)</sup>

ここで、分布密度は水平距離 1 kmあたりの小断層の数を示す。

図-2.35, 図-2.36 は、国土地理院<sup>60)</sup>による、だいち 2 号の干渉 SAR データを使用した解析により求めた 2018 年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動である。北海道胆振東部地震は、2018 年 9 月 6 日に北海道胆振地方中東部を震源として発生した地震であり、地震の規模は Mj 6.7、震源の深さは 37 km とされている。震源が深く堆積層が厚かったこともあり地表には地表地質断層が見つかっていないが、地震前後の地形を比較することにより地震による地盤変状が求められている。だいち 2 号の測定精度は 2 cm 程度と言われているが、図-2.35, 図-2.36 からは、上下成分あるいは水平成分ともに 20-30 km 程度まで地震による地盤変状の影響があるように見受けられる。この影響範囲は、図-2.33 で田中・千木良(1977)が示す隆起・沈降の範囲と概ね合致している。

1 回の地震による地盤の隆起・沈降に関しては、活断層から離れていて全体的に変位するのであれば、そこに存在する施設は地盤傾斜による影響を照査しておけば殆ど問題になることはない。しかし本研究では 100 万年の評価期間を定めており、内陸活断層の周期が数千年から数万年ということ考虑すれば、100 万年の間に 100 回程度以上は地震が繰り返し発生することを想定すべきであり、地盤変状が認められる範囲において局所的な地盤内のすべり等によって副断層が発生することが否定できないと考えられる。後述する図-4.7 には、本研究で提案する影響範囲評価手法を用いて北海道地区で GIS を用いた試算を実施しているが、そこで示されている 20-30 km という影響範囲とも概ね合致している。

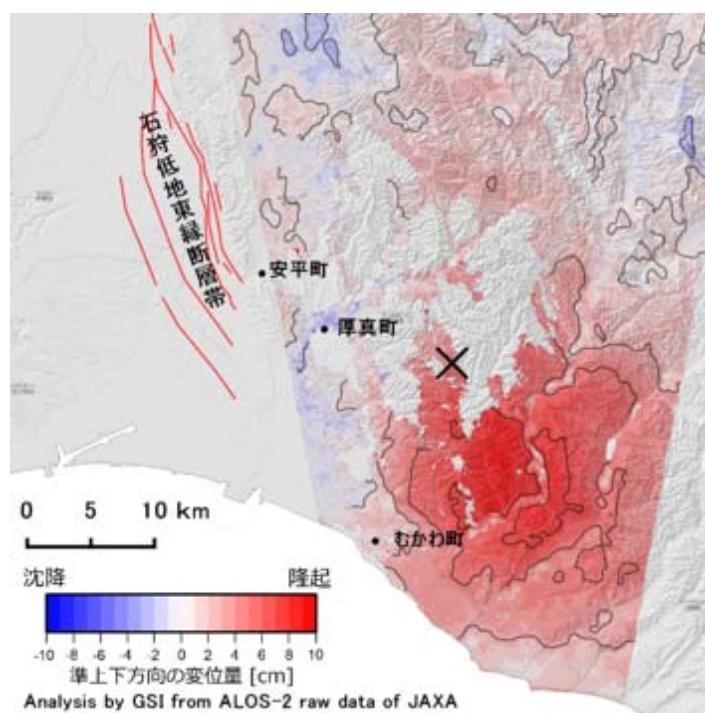


図-2.35 だいち 2 号干渉 SAR による解析の結果結果(上下成分)<sup>60)</sup>

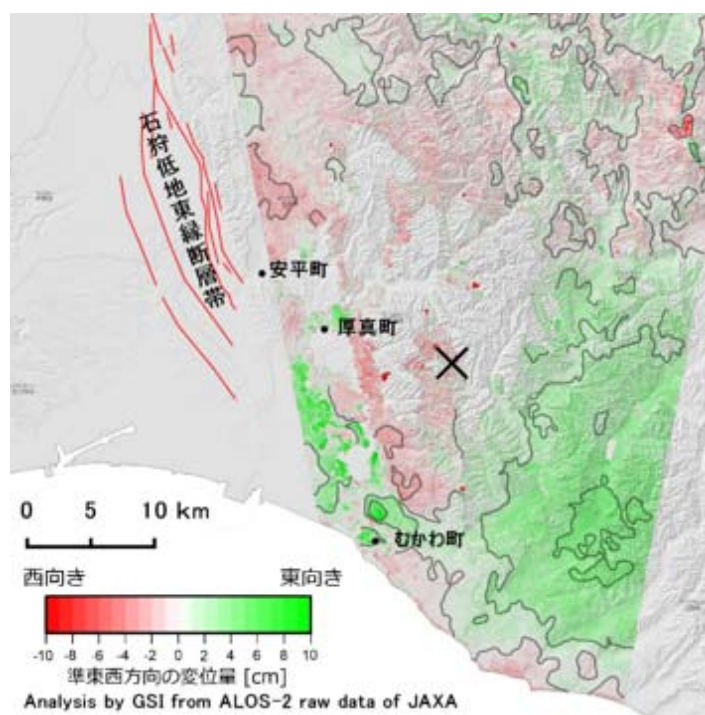


図-2.36 だいち 2 号干渉 SAR による解析の結果結果(東西成分)<sup>60)</sup>



#### 2.4.4 分岐・派生の決定論的評価手法

断層活動に伴い断層側方に形成される破砕帯・プロセスゾーンなどの変形域の幅は、断層長に対して概ね比例関係にあることが知られていることから、活断層とその周囲に生じた分岐断層の関係においても同様の関係が成立しているものと仮定し、断層タイプごとに影響範囲の幅と断層長の比( $W/L$ )を計測し、これにもとづいて影響範囲の決定論的な評価基準を設定した。

計測方法の概念を図-2.37 に示すとともに、各断層における分岐・派生断層との最大離間距離の計測記録を図-2.38～図-2.61 に示す。

以下に断層タイプごとに分岐・派生状況の特徴を詳述する。

##### 1) 横ずれ断層 (図-2.38～図-2.50)

松田ほか<sup>3)</sup>により抽出された中部・中国地方の横ずれ断層のうち、地震調査研究推進本部の長期評価<sup>32)</sup>による活断層分布図が公開されている断層を対象とした。ただし、中部地方の糸魚川・静岡構造線と中国地方の中央構造線(四国)については、他の活断層と比べて明らかに長大断層であるため割愛した。

横ずれ断層の分岐形態には、一般的な側方への分岐とともにステップ構造が認められることがあり、ステップ部の離間距離は断層片側の離間距離とした。複数の断層が併走して主断層が特定できないような形態を示す場合には、全体を断層帯の幅とみなし、その  $1/2$  を片側離間距離とした。また断層末端部や共役関係にある他の断層との交差部では、スプレー構造と呼ばれる幅広い放射状の分岐構造が出現することもある。このようなケースも全体を断層帯の幅とし、その  $1/2$  を片側離間距離としたが、特殊な応力状態で形成されたと考えられることから、これを区別して集計した。

##### 2) 逆断層 (図-2.51～図-2.56)

伸展距離の事例分析に用いた東北日本弧内帯逆断層を対象とした。計測に用いた活断層分布図は、いずれも地震調査研究推進本部の長期評価<sup>20)</sup>によるが、一部池田ほか<sup>33)</sup>を併用した。

逆断層は沈降側へ凸の弧状形態を示すことが多く、しばしば複数の弧状断層が併走することがある。併走する断層のうち、隆起側の断層は通称「山麓断層」、沈降側の断層は通称「前縁断層」と呼ばれ、「前縁断層」は「山麓断層」の前方転移により形成されたより新しい断層とされることが多い。そこで「前縁断層」と「山麓断層」の離間距離は、沈降側の片側離間距離とみなした。逆断層の隆起側には、主断層とは逆の変位センスを示す副次的断層が存在することが多く、バックスラストと呼ばれる。主断層とバックスラストの離間距離は隆起側の片側離間距離とした。

##### 3) 正断層 (図-2.57～図-2.61)

伸展距離の事例分析に用いた九州地方正断層を対象とした。計測に用いた活断層分布図は、いずれも地震調査研究推進本部の長期評価<sup>20)</sup>による。

正断層はしばしば幅広い地溝・半地溝を形成し、その内部に多数の副次的な断層を伴う。短い断層が多数分布し主断層の位置を想定できない事例もあるが、こうした事例を含め、断層群による

地溝帯・半地溝帯の幅は、すべて沈降側の片側離間距離とした。主断層が特定され、その隆起側に副次的な断層が分岐・併走するケースについて、隆起側の片側離間距離を計測した。

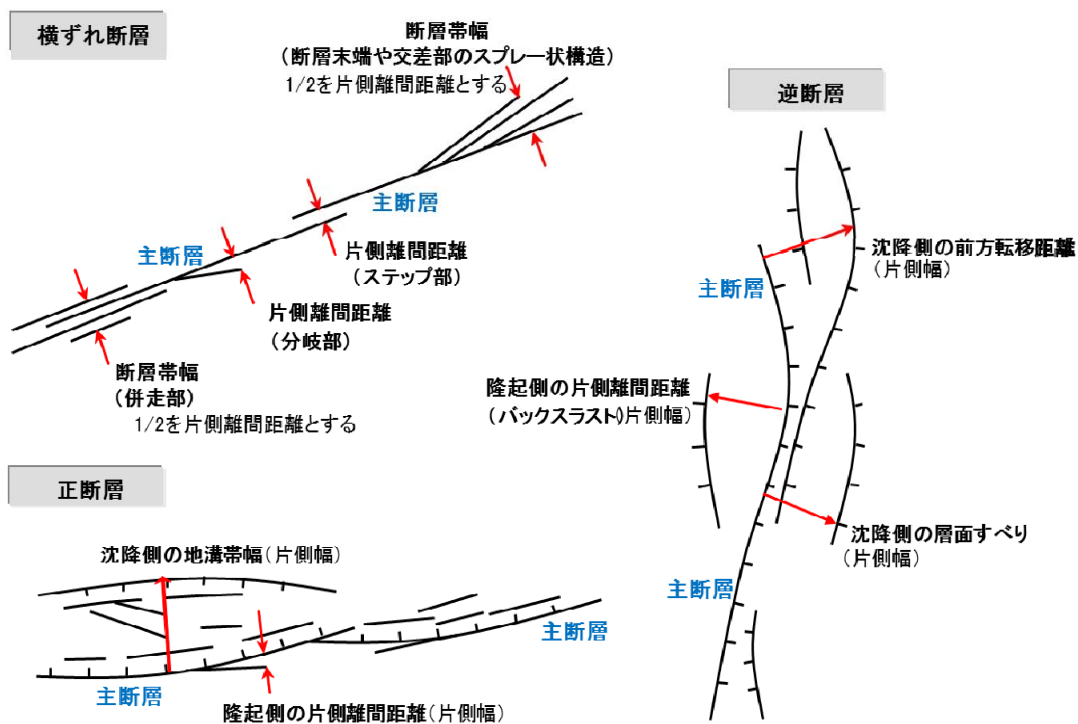
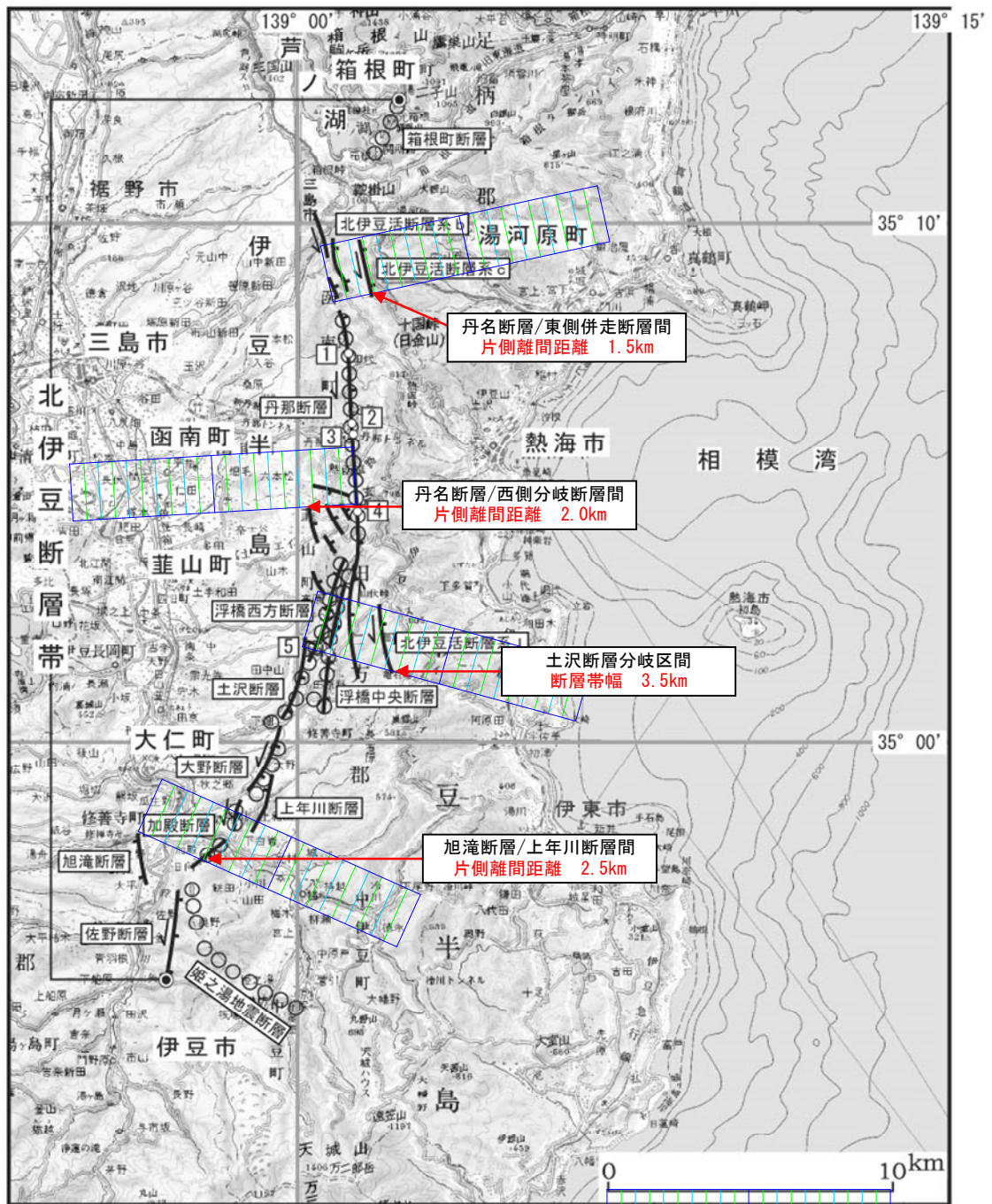


図-2.37 最大離間距離の計測方法の概念



1 : 田代地点    2 : 名賀地点    3 : 子乃神地点

4 : 大沢池地点    5 : 浮橋地点

◎ : 断層帯の両端と屈曲点    ○ : 1930年の地表地震断層

断層の位置は文献3に基づく。

基図は国土地理院発行数値地図200000「横須賀」「静岡」を使用。

図-2.38 丹名断層帯の計測記録

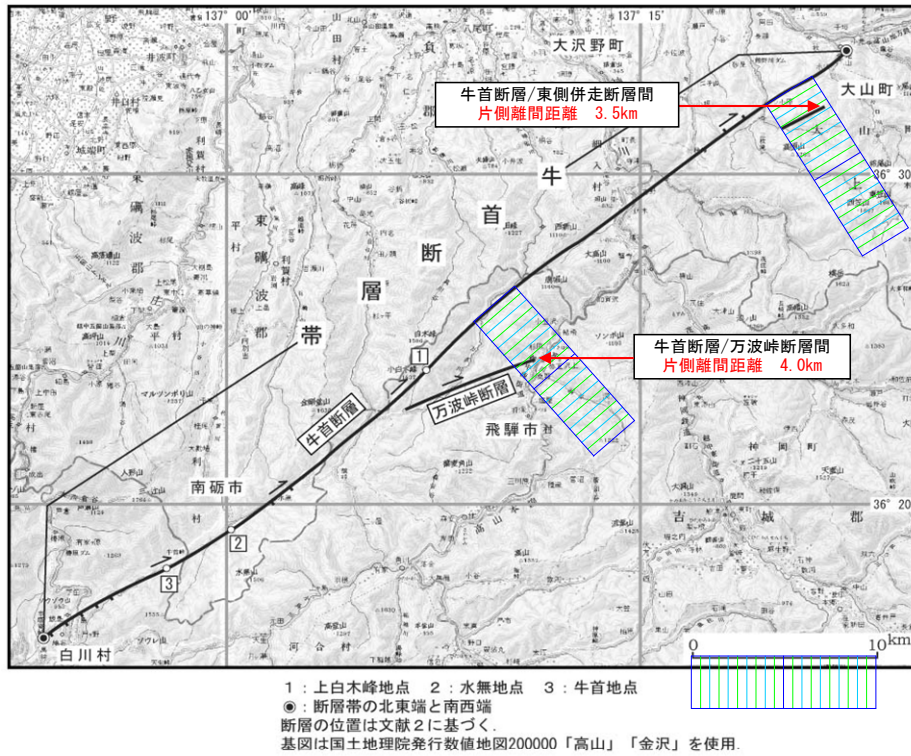


図-2.39 牛首断層帯の計測記録

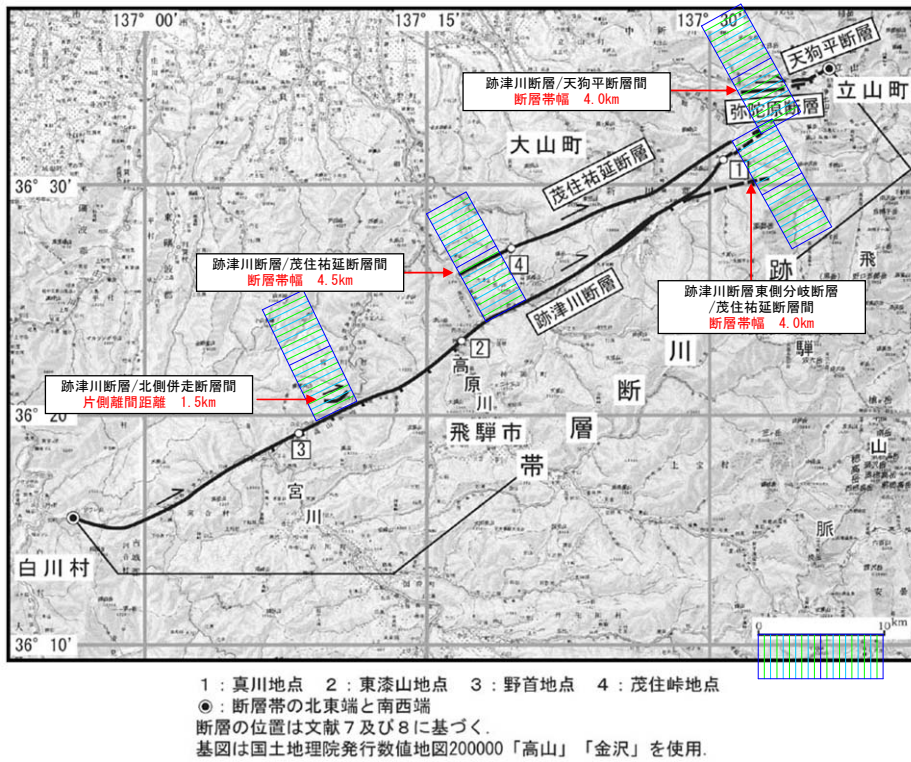
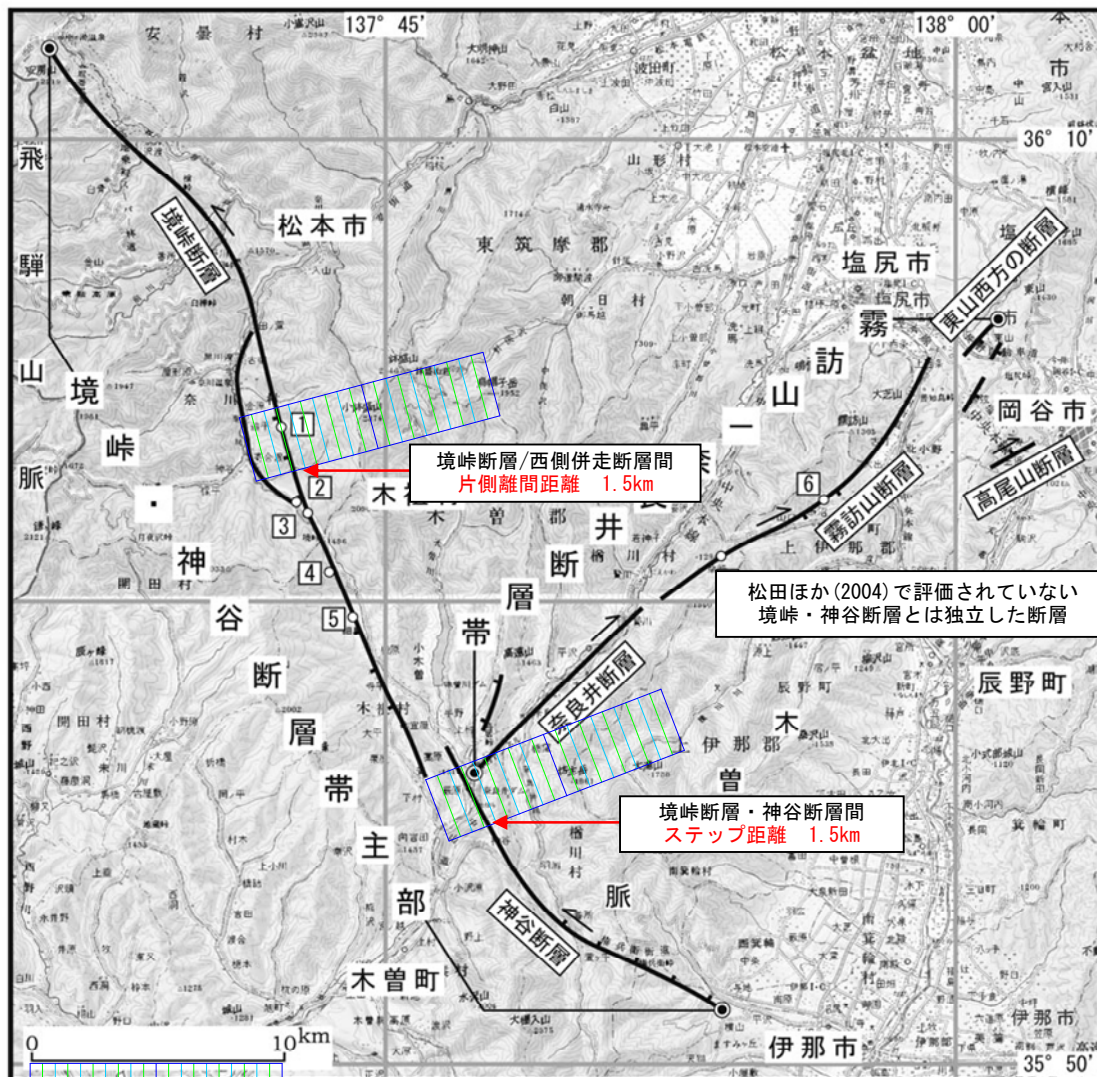


図-2.40 跡津川断層帯の計測記録





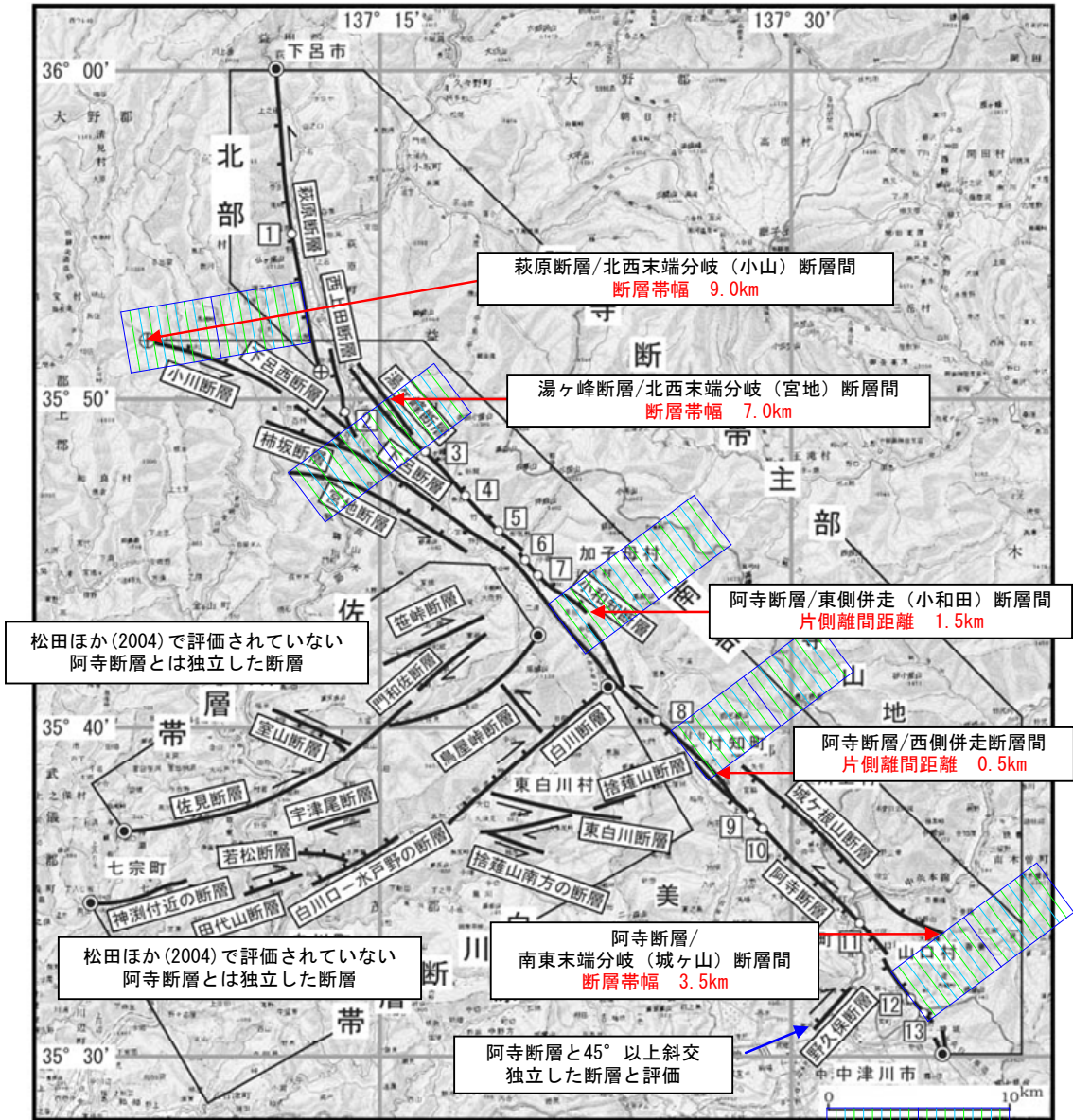
- 1: ソグラ沢地点 2: 野麦峠スキー場南方地点 3: 寄合渡地点  
 4: 上押出沢地点 5: 細島地点 6: 中村地点 7: 桑崎地点

◎: 断層帯の両端

断層の位置は文献2に基づく。

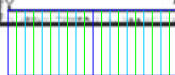
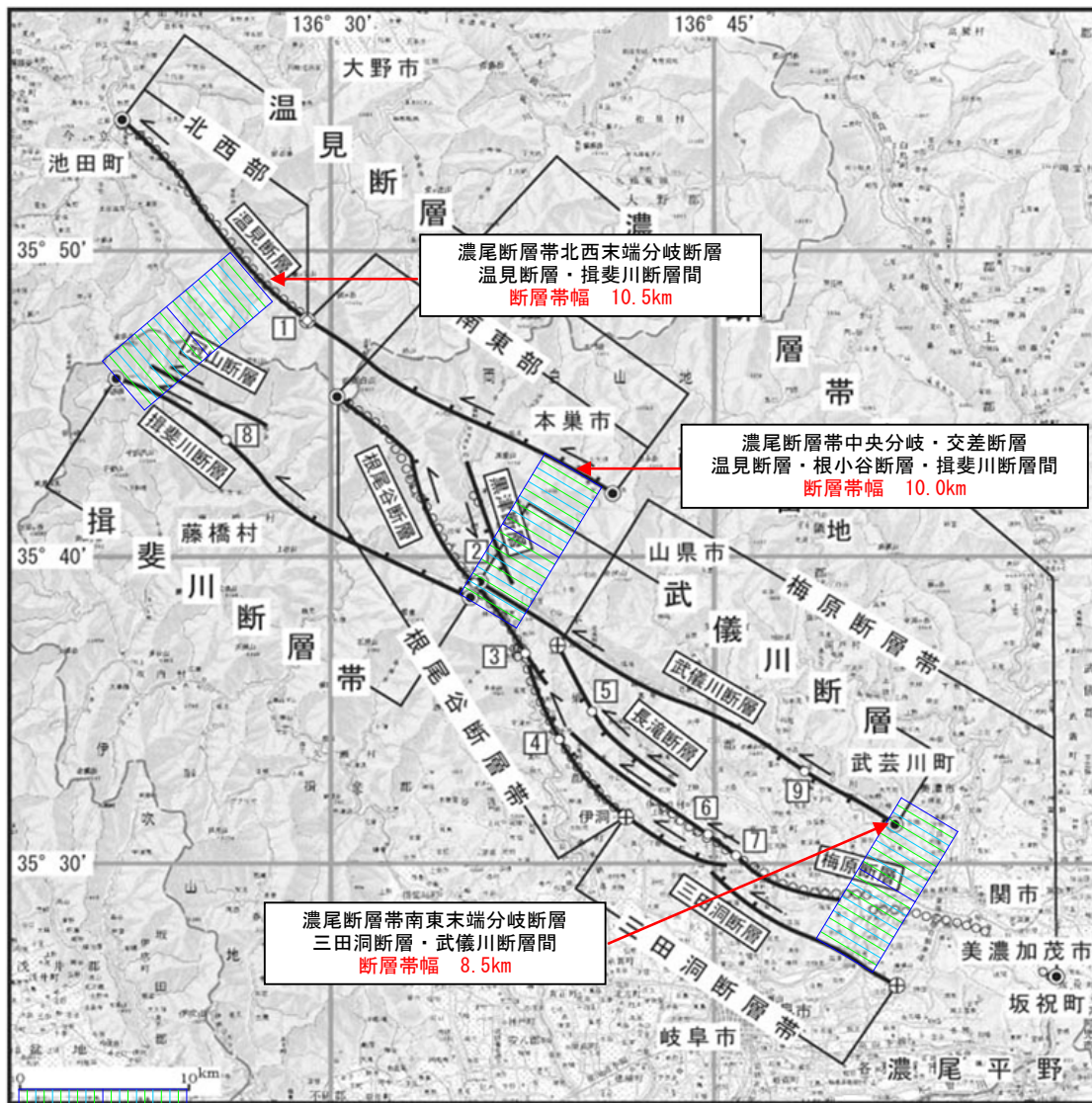
基図は国土地理院発行数値地図200000「長野」「甲府」「高山」「飯田」を使用。

図-2.42 境峠断層の計測記録



- 1 : 四美辻地点 2 : 西上田地点 3 : 大林地点 4 : 三ツ石地点 5 : 御厩野地点  
 6 : 小郷地点 7 : 小和知地点 8 : 倉屋地点 9 : 田瀬地点 10 : 小野沢峠地点  
 11 : 坂下地点 12 : 青野原地点 13 : 伝田原地点  
 ● : 断層帯の両端 ⊕ : 北部の南端及び南部の北端  
 断層の位置は文献 8, 10及び19に基づく.  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「高山」「飯田」を使用.

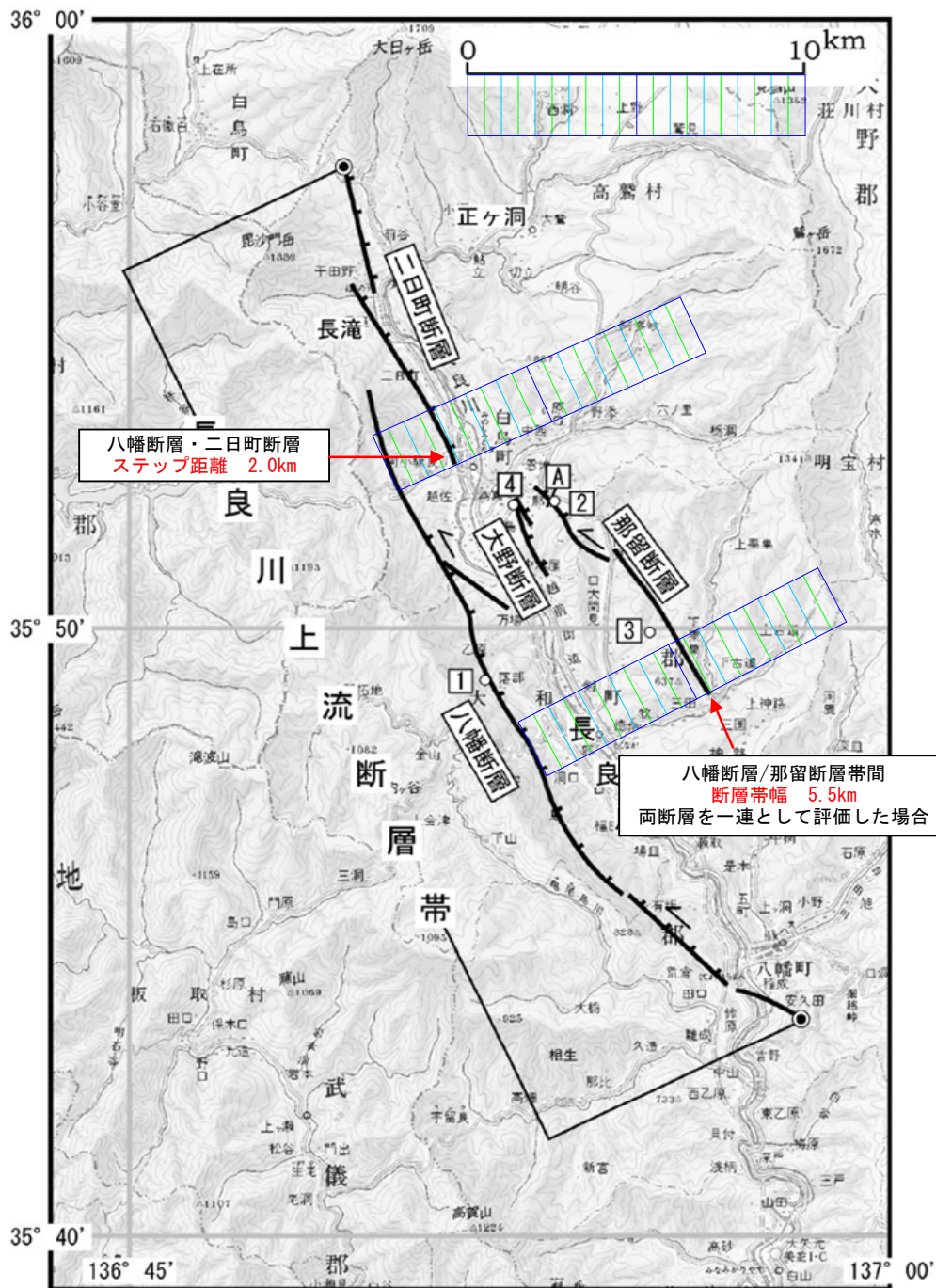
図-2.43 阿寺断層帯の計測記録



- 1: 温見地点 2: 門脇地点 3: 水鳥地点 4: 金原地点 5: 金原谷地点  
 6: 高田地点 7: 上洞地点 8: 塚地点 9: 中洞地点  
 ●: 断層帯の北西端と南東端 ⊕: 活動区間の境界  
 ○: 1891年の地表地震断層  
 断層の位置は文献4に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「岐阜」を使用。

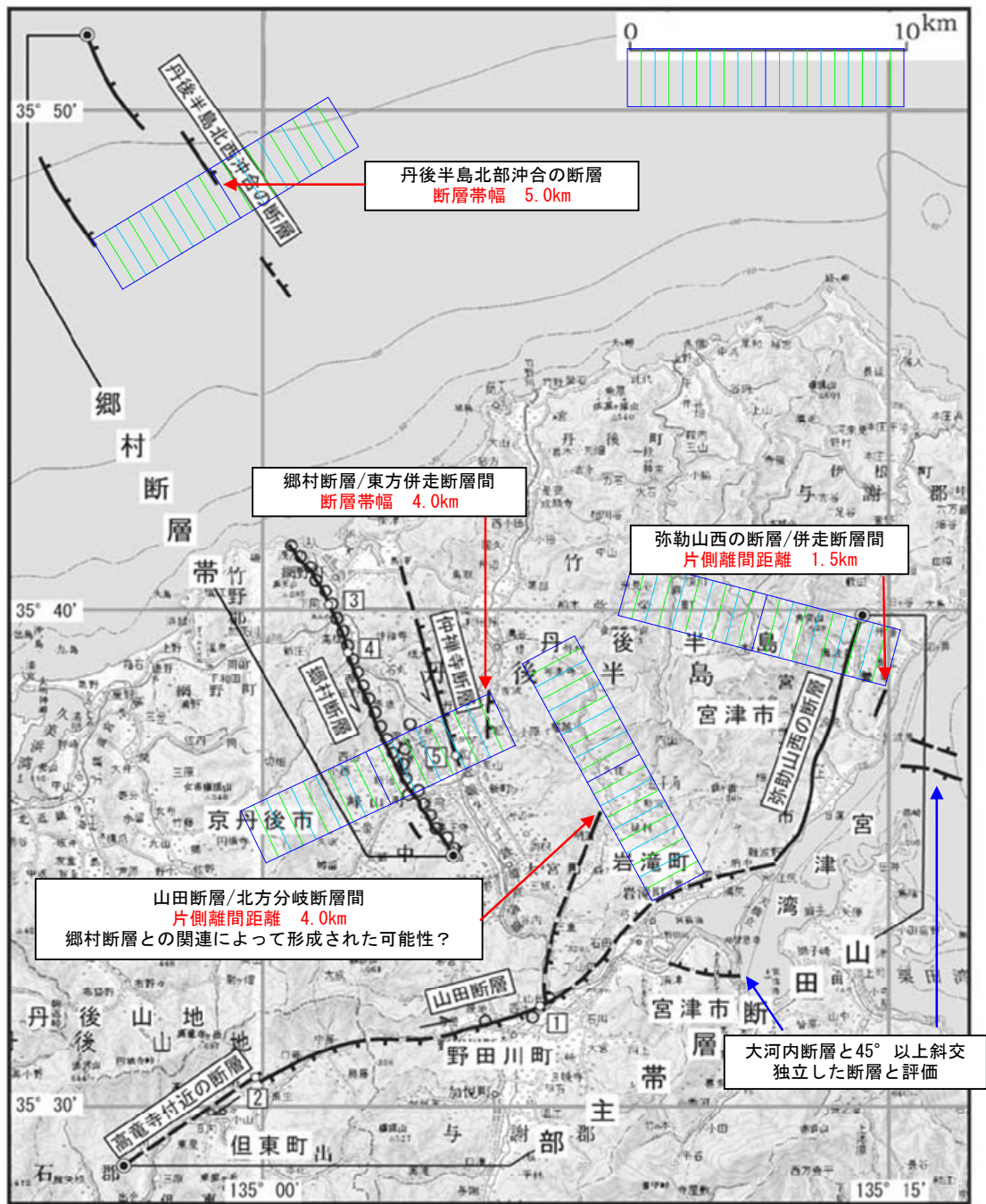
図-2.44 根尾谷・揖斐川・武儀川断層帯の計測記録





1 : 落部地点 2 : 那留地点 3 : 小間見地点 4 : 白鳥IC付近地点  
 A : 反射法弾性波探査測線 (文献 1)  
 ● : 断層帯の北端と南端  
 断層の位置は文献 2 及び 3 に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図 200000 「岐阜」を使用。

図-2.45 長良川上流断層帯の計測記録



1: 上山田地点 2: 坂野地点 3: 下岡地点 4: 郷地点 5: 矢田地点  
 ●: 断層帯の両端 (ただし、郷村断層帯の北西端については確認されている範囲)  
 ○: 1927年の地表地震断層  
 断層の位置は文献2, 3, 4, 6及び8に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「宮津」「鳥取」を使用。

図-2.46 郷村・山田断層帯の計測記録

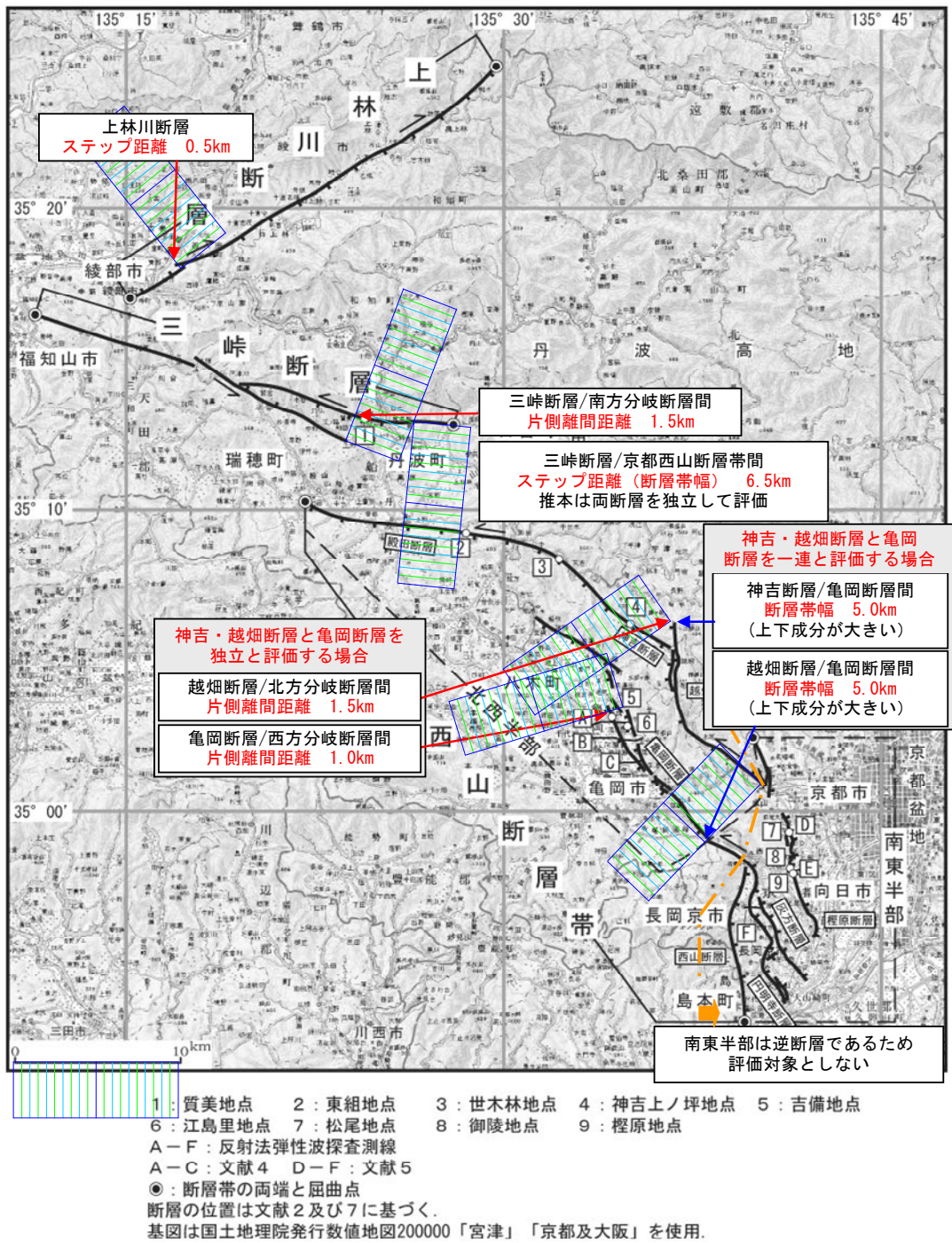


図-2.47 上林川・三峠断層の計測記録



図-2.48 山崎断層帯の計測記録

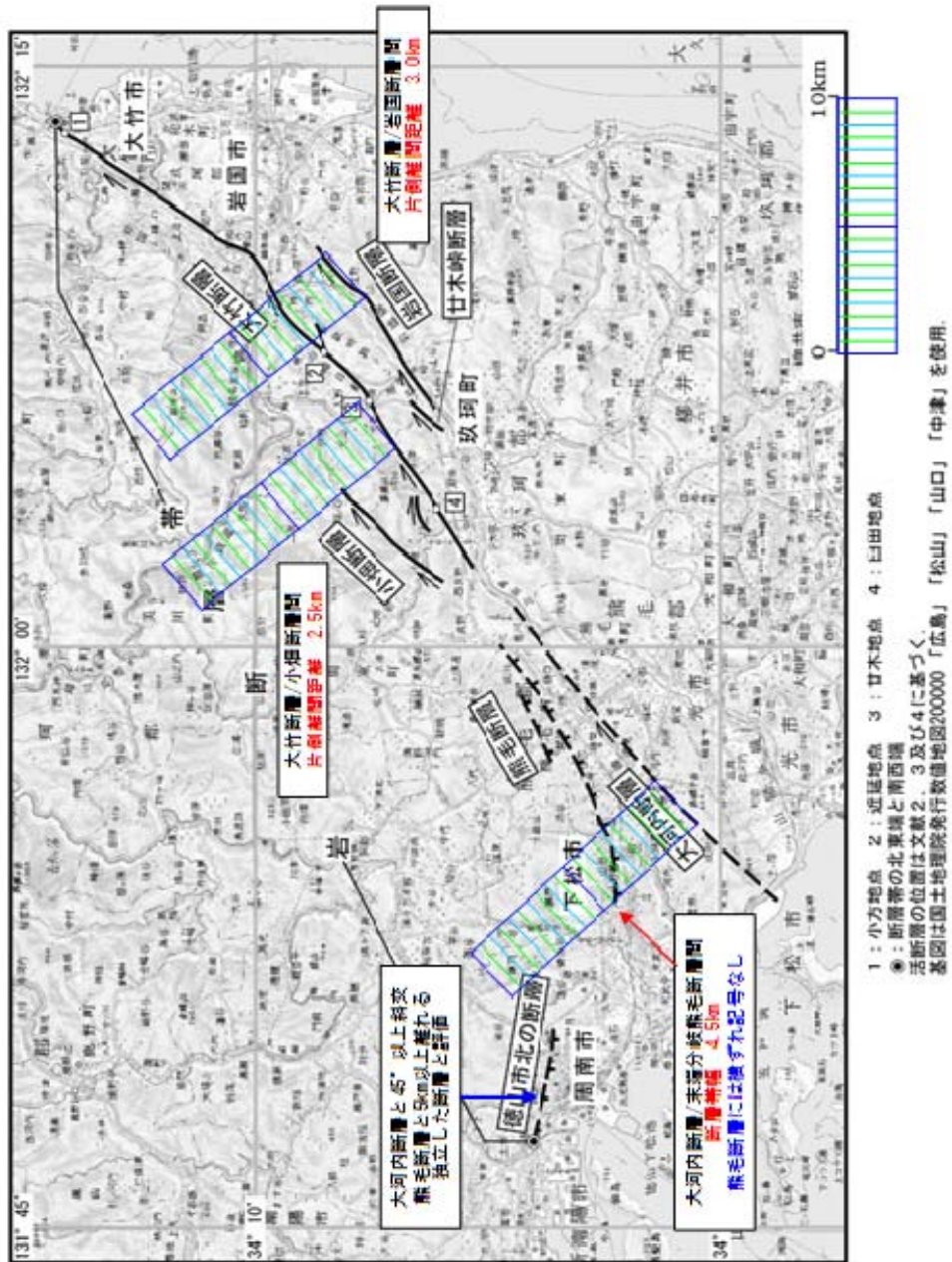


図-2.49 岩国断層帯の計測記録

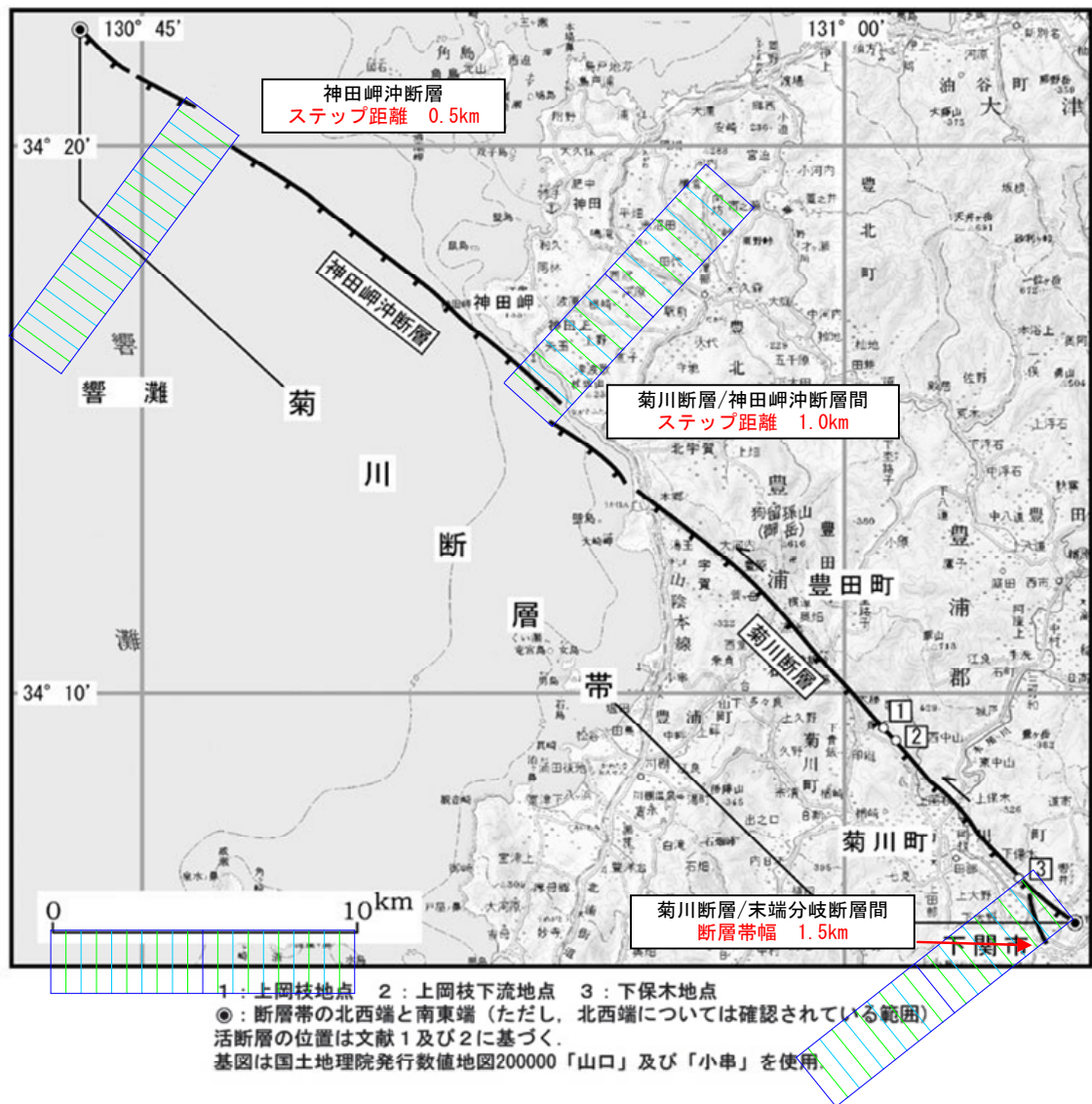
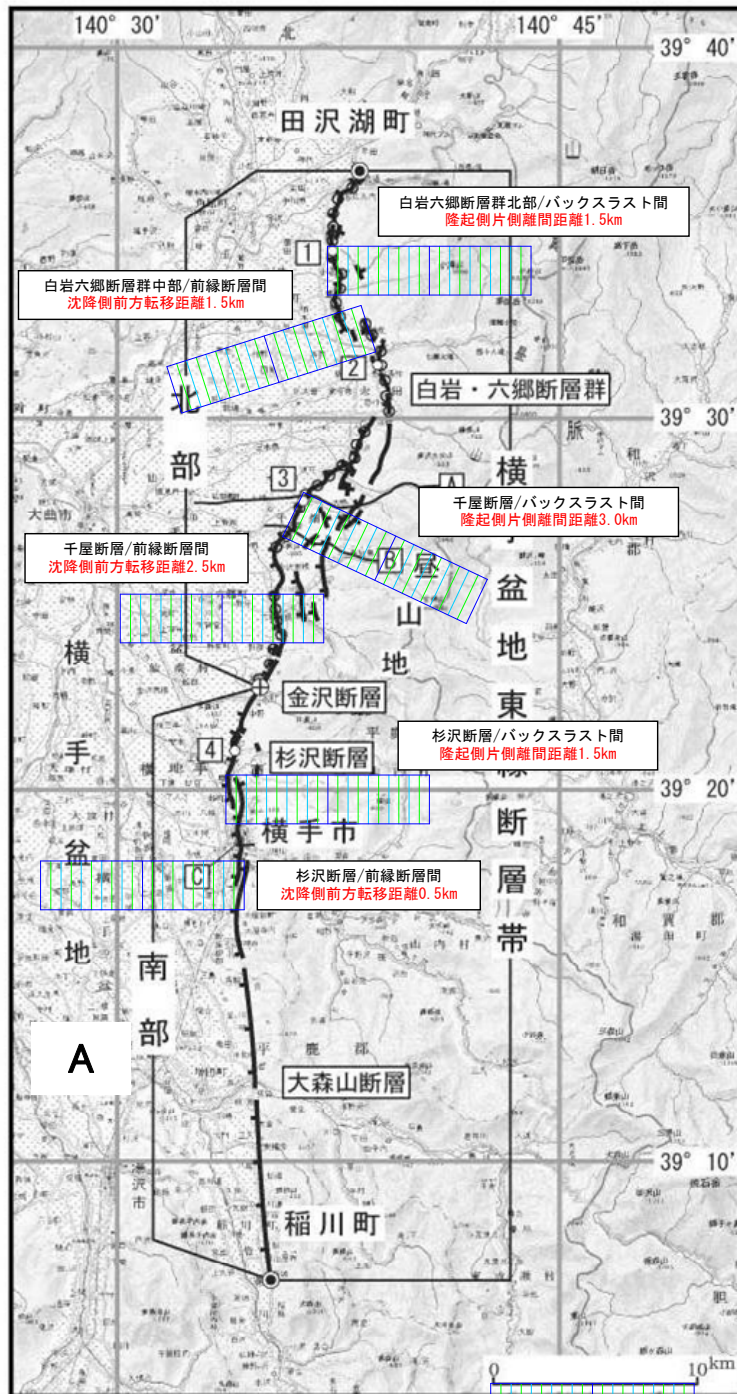


図-2.50 菊川断層帯の計測記録



1 : 十六沢地点 2 : 金井伝地点 3 : 一丈木・小森地点 4 : 谷地中地点  
 A-C : 反射法弾性波探査測線  
 A : 文献1 B : 文献9 C : 文献2  
 ● : 断層帯の北端と南端 ⊕ : 北部・南部の境界  
 ○ : 1896年陸羽地震の地表地震断層  
 断層の位置は文献6及び8に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「秋田」「新庄」を使用。

図-2.51 横手盆地東縁断層帯の計測記録



1 : 小館地点 A-C : 反射法弾性波探査測線 (文献1)  
 ● : 断層帯の北端と南端  
 活断層の位置は文献2に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「青森」を使用。

図-2.52 青森湾西岸断層帯の計測記録



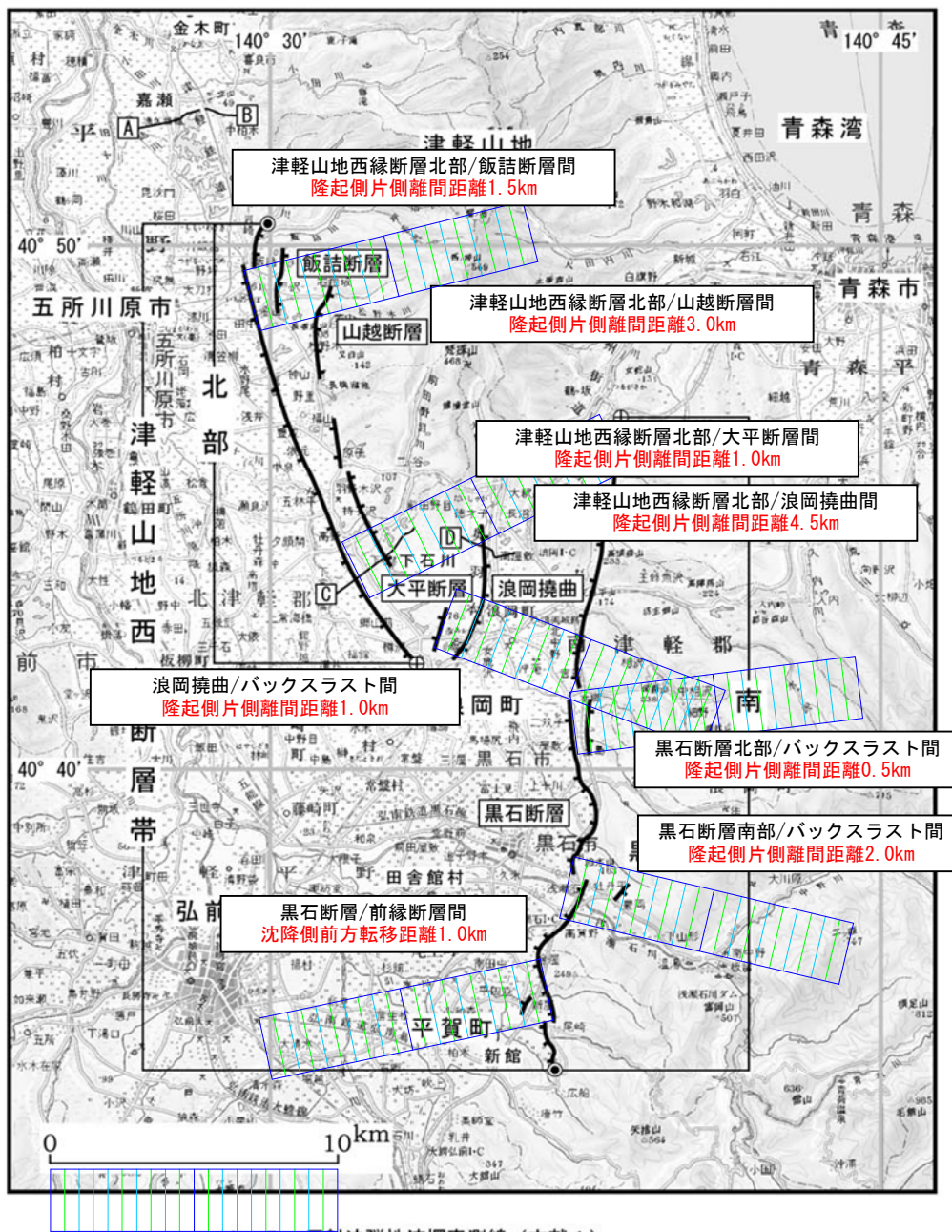


図-2.53 津軽山地西縁断層帯・黒石断層の計測記録



図-2.54 函館平野西縁断層帯の計測記録

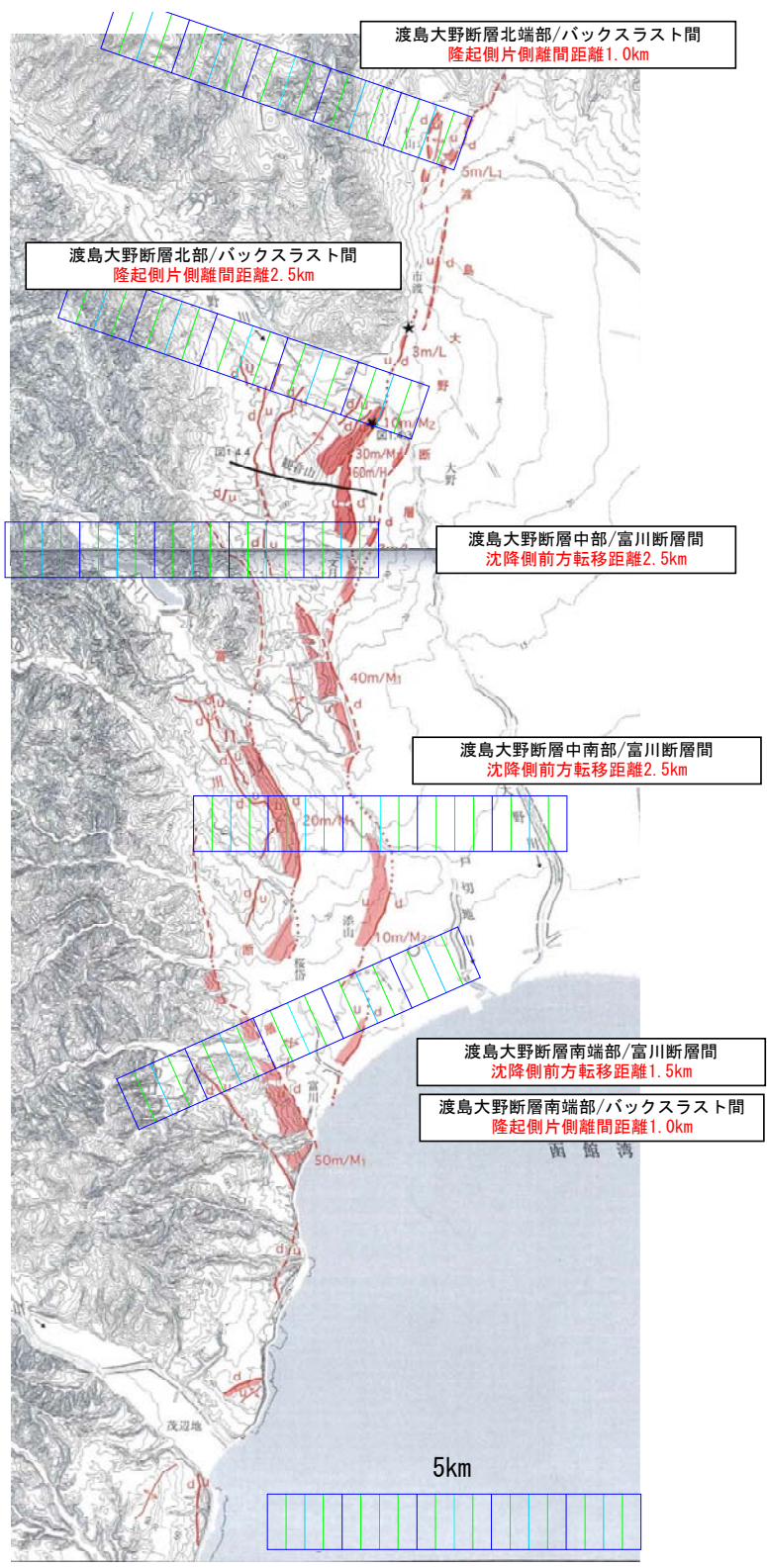


図-2.55 函館平野西縁断層帯の計測記録（「第四紀逆断層アトラス」<sup>19)</sup> 併用部）

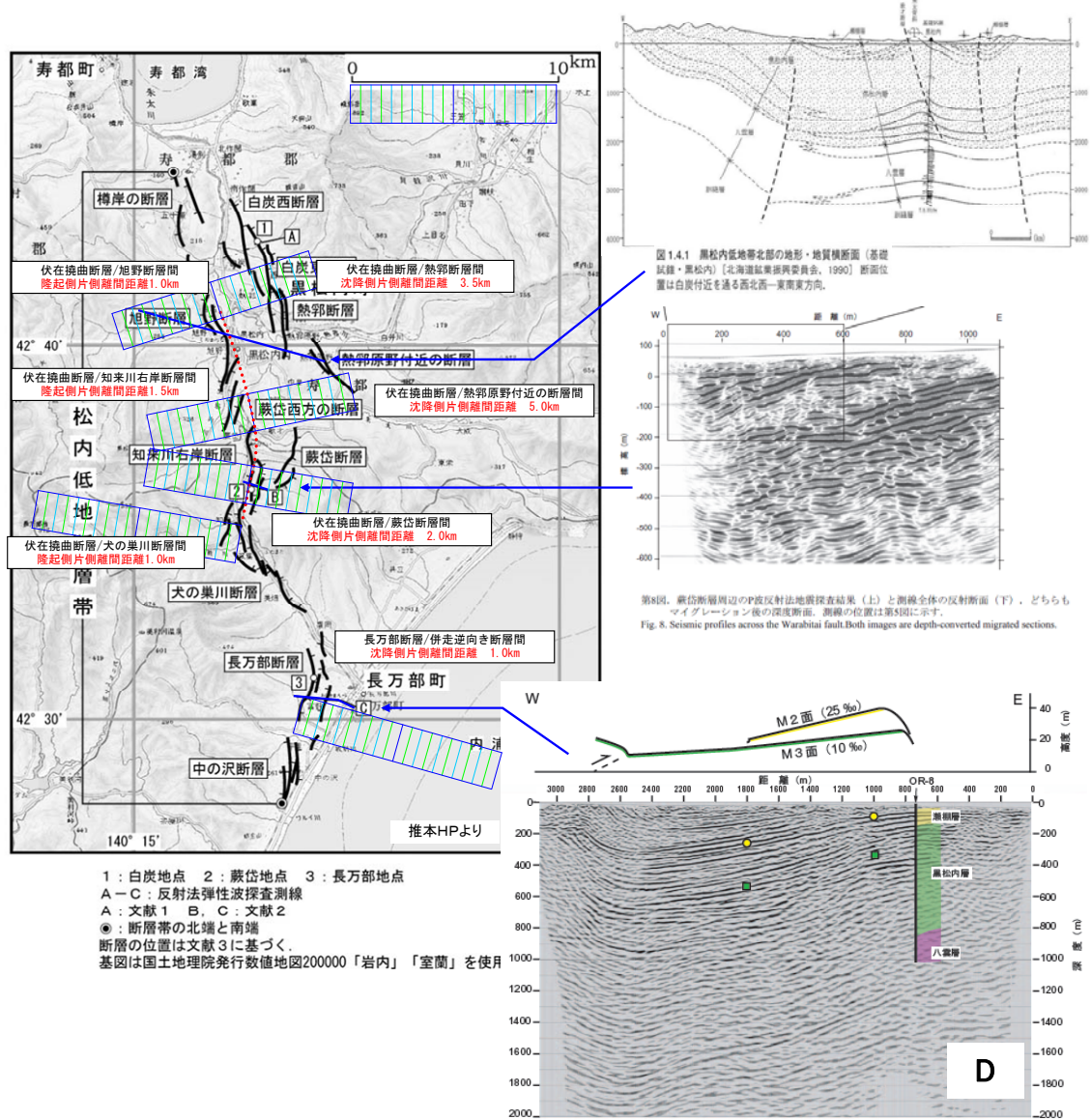
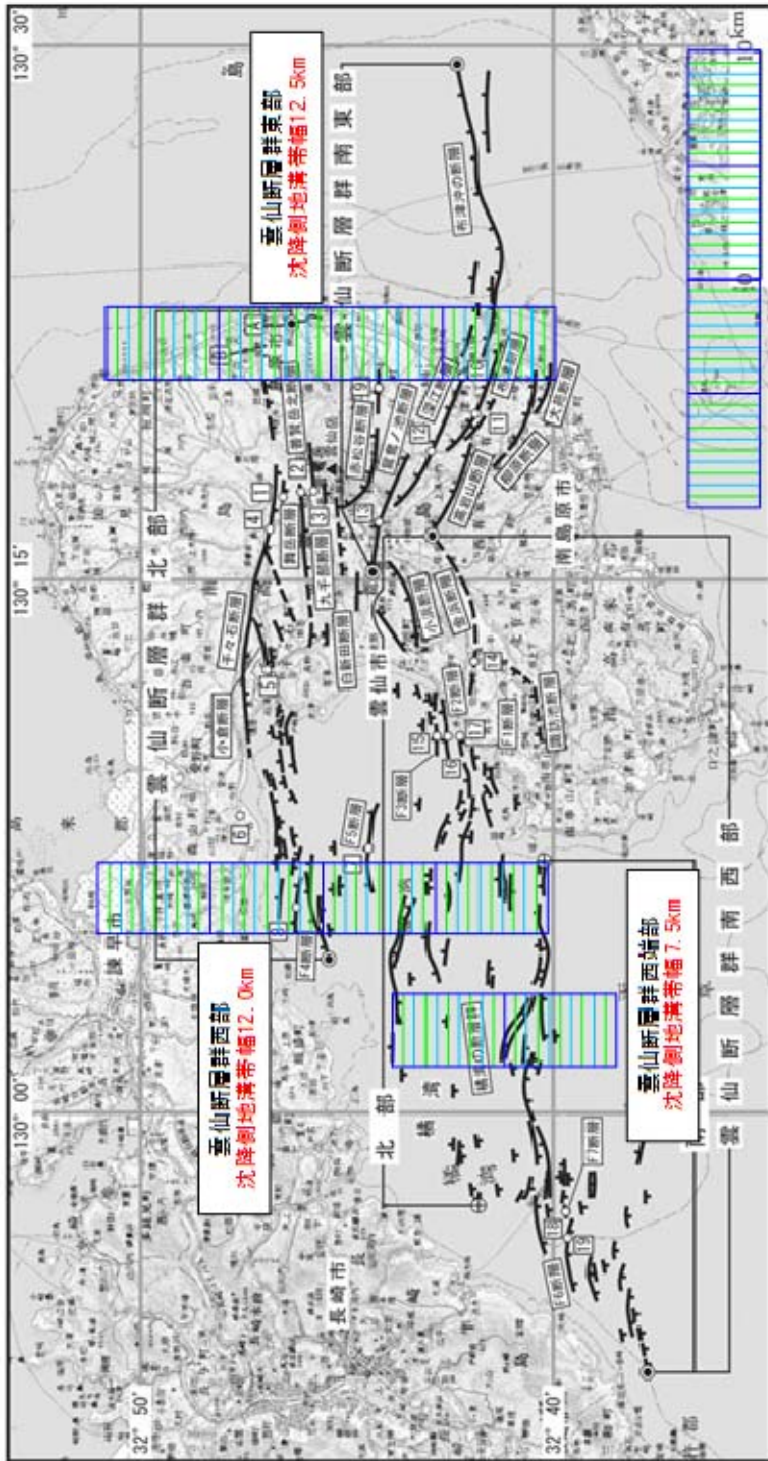


図-2.56 黒松内低地断層帯の計測記録





- 1 : 真岳南西地点 2 : 真岳南地点 3 : 舞岳林道終点地点 4 : 鳥甲山東方地点 5 : 橘神社地点  
 6 : 唐比地点 7 : 橋湾中央地点 8 : 有喜南方沖地点 9 : 大野木場地点 10 : 平之坂地点  
 11 : 柳地点 12 : 古江各地点 13 : 空地地点 14 : 茂無田地点 15-17 : 小浜一金浜沖地点  
 18-19 : 大崎東方沖地点  
 A, B : 反射法弾性波深層測線 (文献10)  
 ● : 断層群の東端と西端 ④ : 北部の西端, 南部の東端  
 断層の位置は文献2, 3, 4, 5, 7, 9及び10に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図2000000「熊本」「八代」「長崎」「野母崎」を使用。

図-2.58 雲仙断層群の計測記録

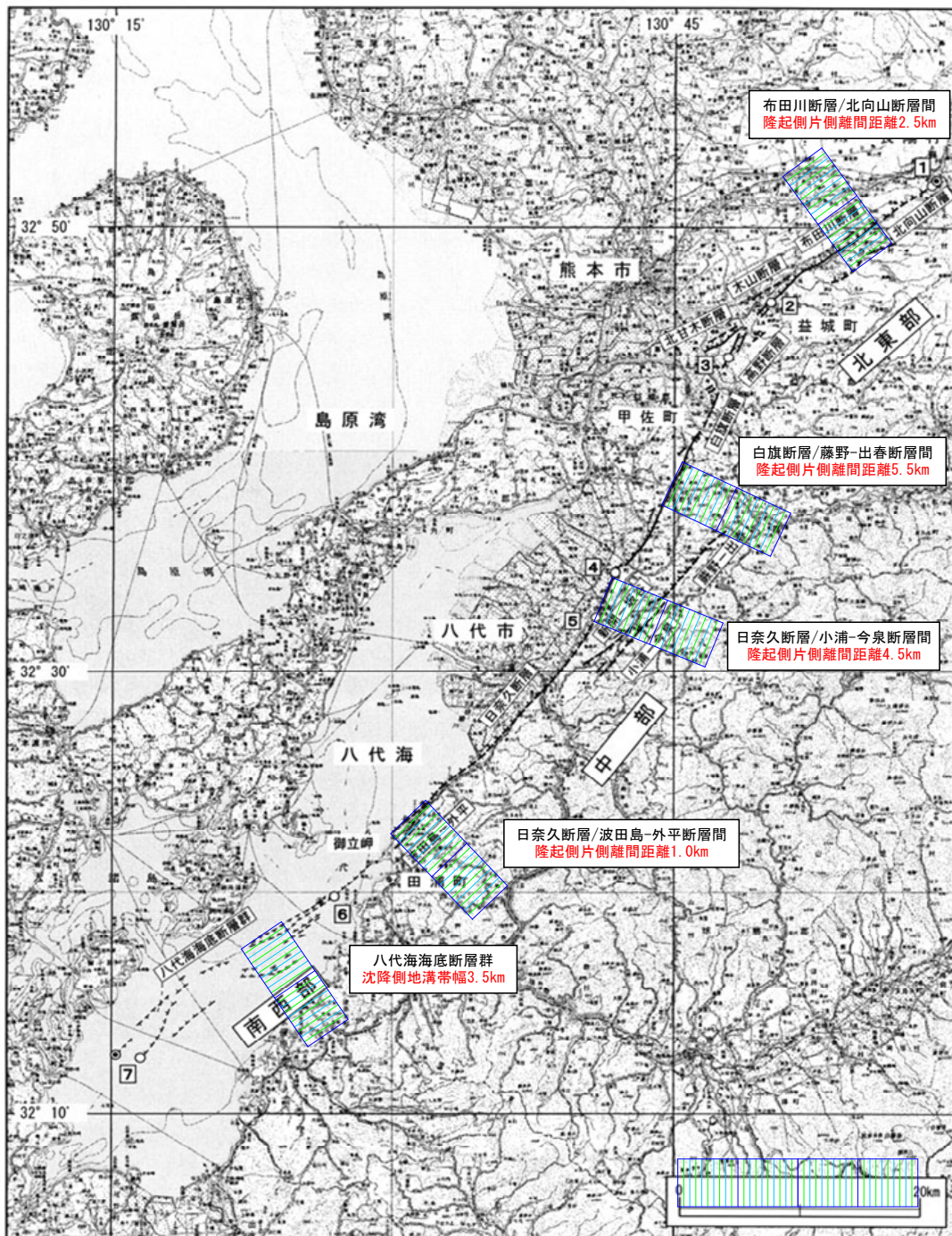
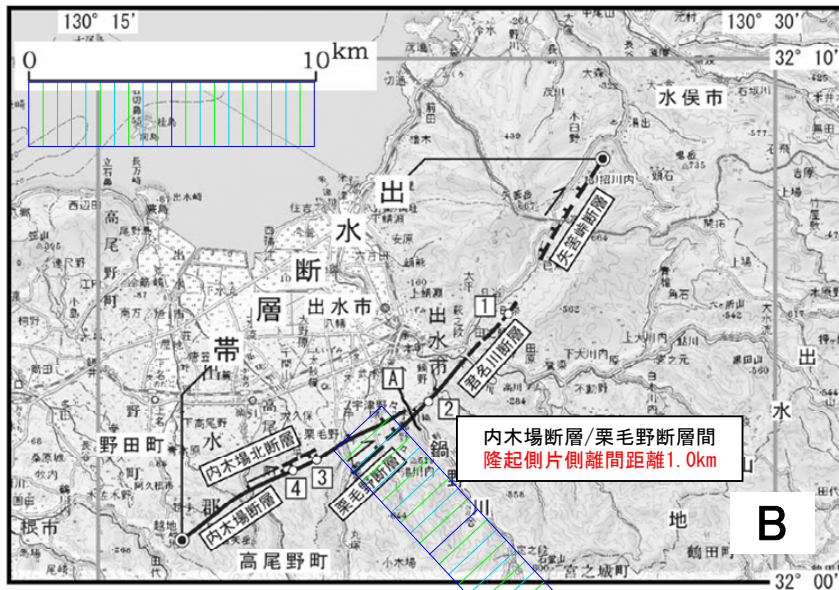
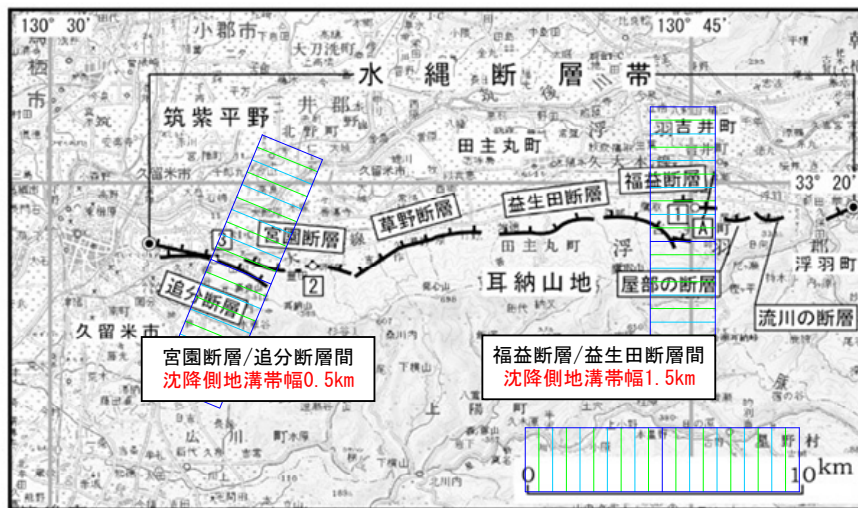


図-2.59 布田川—日奈久断層帯の計測記録



1：日添地点 2：君名川地点 3：内木場東地点 4：内木場地点  
 A：反射法弾性波探査測線（文献4）  
 ●：断層帯の北東端と南西端  
 断層の位置は文献5-7に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「八代」を使用。

図-2.60 出水断層帯の計測記録



1：福益地点 2：宮園地点 3：前田地点  
 A：反射法弾性波探査測線（文献4）  
 ●：断層帯の東端と西端  
 断層の位置は文献4及び6に基づく。  
 基図は国土地理院発行数値地図200000「福岡」「熊本」を使用。

図-2.61 水縄断層帯の計測記録



計測による片側最大離間距離と断層長の比( $Wmax/L$ 比)を、断層タイプ・地域別に整理した結果を図-2.62 (1) (2)に示す。この図では横ずれ断層の計測値を地域別に整理するとともに、断層末端部や他の断層との交差部に形成されたスプレー構造を区別して図示した。また逆断層と正断層は、隆起側と沈降側を区別して図示した。この図から以下の傾向を読み取ることができる。

- 1) 横ずれ断層の  $Wmax/L$  比には、中部地方と中国地方に差異が認められない。また断層末端部や他の断層との交差部に形成されたスプレー構造についても、その上限は他の分岐構造と同程度である。このことから横ずれ断層における影響範囲の評価では、中部・中国地方を区別せずに扱い、断層末端部などの特殊性も考慮する必要はないと判断される。
- 2) 逆断層の  $Wmax/L$  比は、隆起側・沈降側ともに横ずれ断層を上回る。隆起側と沈降側の  $Wmax/L$  比は平均的には同程度であるが、最大値では隆起側の方が大きいことから、評価にあたっては隆起側と沈降側を区別して扱う必要がある。
- 3) 正断層の  $Wmax/L$  比は、隆起側に比較して沈降側では3倍程度大きいことから、評価にあたっては隆起側と沈降側を区別して扱う必要がある。

以上のことから、断層側方の影響範囲の確率論的検討は、横ずれ断層・逆断層(隆起側)・逆断層(沈降側)・正断層(隆起側)・正断層(沈降側)それぞれについて行うこととした。

図上の計測により主断層から最大離間距離が得られたが、実際には分岐点から最大離間距離を計測した地点の間において、主断層と分岐断層の離間距離は連続的に変化する。平面図上で分岐断層の主断層からの分岐角度が一定し、断層が直線であると仮定すると、主断層に直交する一定間隔の測線上において、離間距離に応じた多数の仮想的な計測データが得られることになる。この考え方にもとづいて、最大離間距離の計測データを測線上の計測データに置き換える簡便な補正を行うと、ひとつの  $Wmax$ (最大離間距離)/ $L$  比のデータから、複数の  $W$ (離間距離)/ $L$  比が得られる。この複数の  $W/L$  比の平均値を決定論的な評価基準として、主断層からの影響範囲を以下のように設定した。

$$\text{横ずれ断層} \quad : \quad W/L = 0.0306 \quad (2.17)$$

$$\text{逆断層 (隆起側)} \quad : \quad W/L = 0.0665 \quad (2.18)$$

$$\text{逆断層 (沈降側)} \quad : \quad W/L = 0.0504 \quad (2.19)$$

$$\text{正断層 (隆起側)} \quad : \quad W/L = 0.0260 \quad (2.20)$$

$$\text{正断層 (沈降側)} \quad : \quad W/L = 0.0757 \quad (2.21)$$

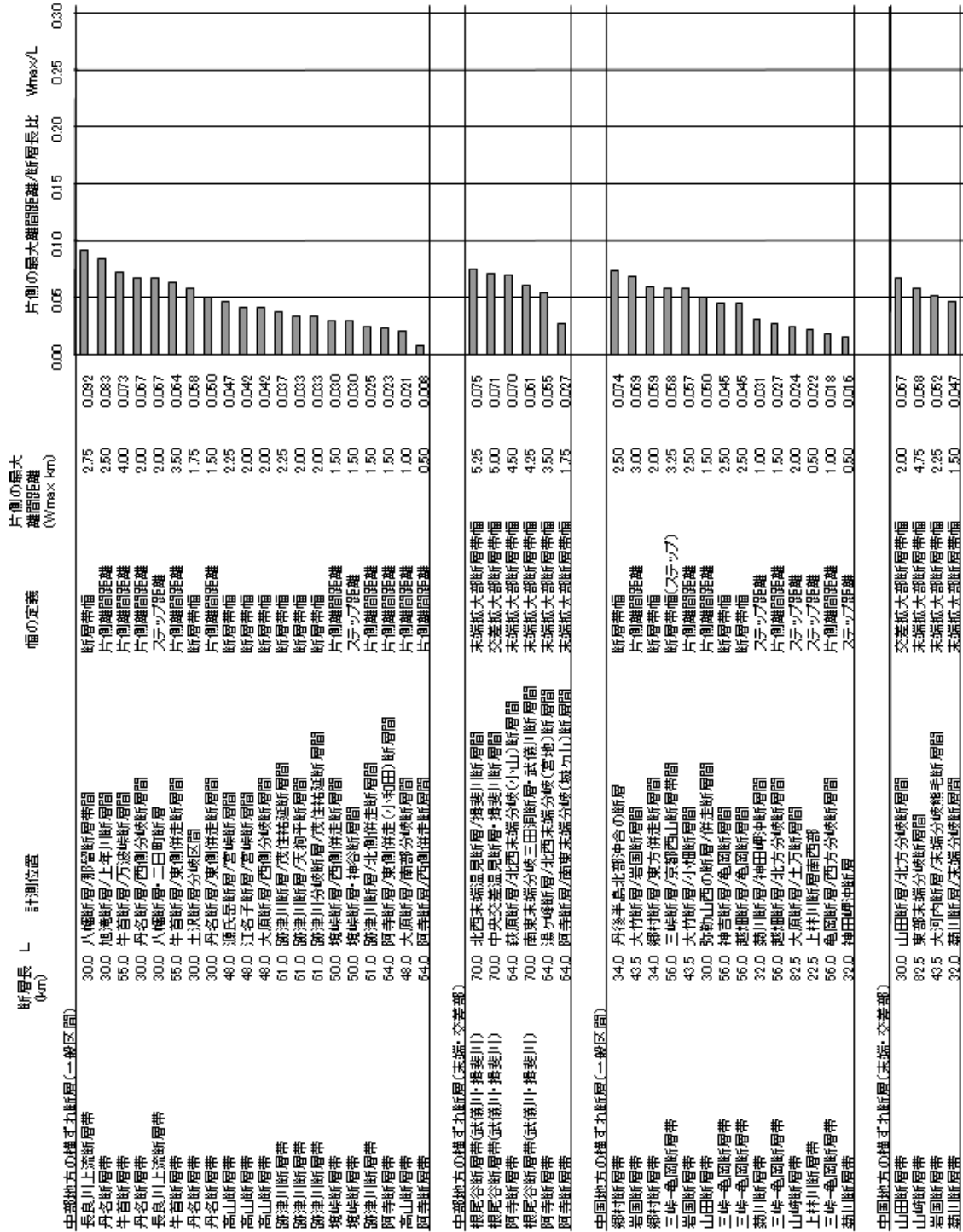


図-2.62 (1) 分岐断層の計測データと片側最大離間距離/断層長比の比較

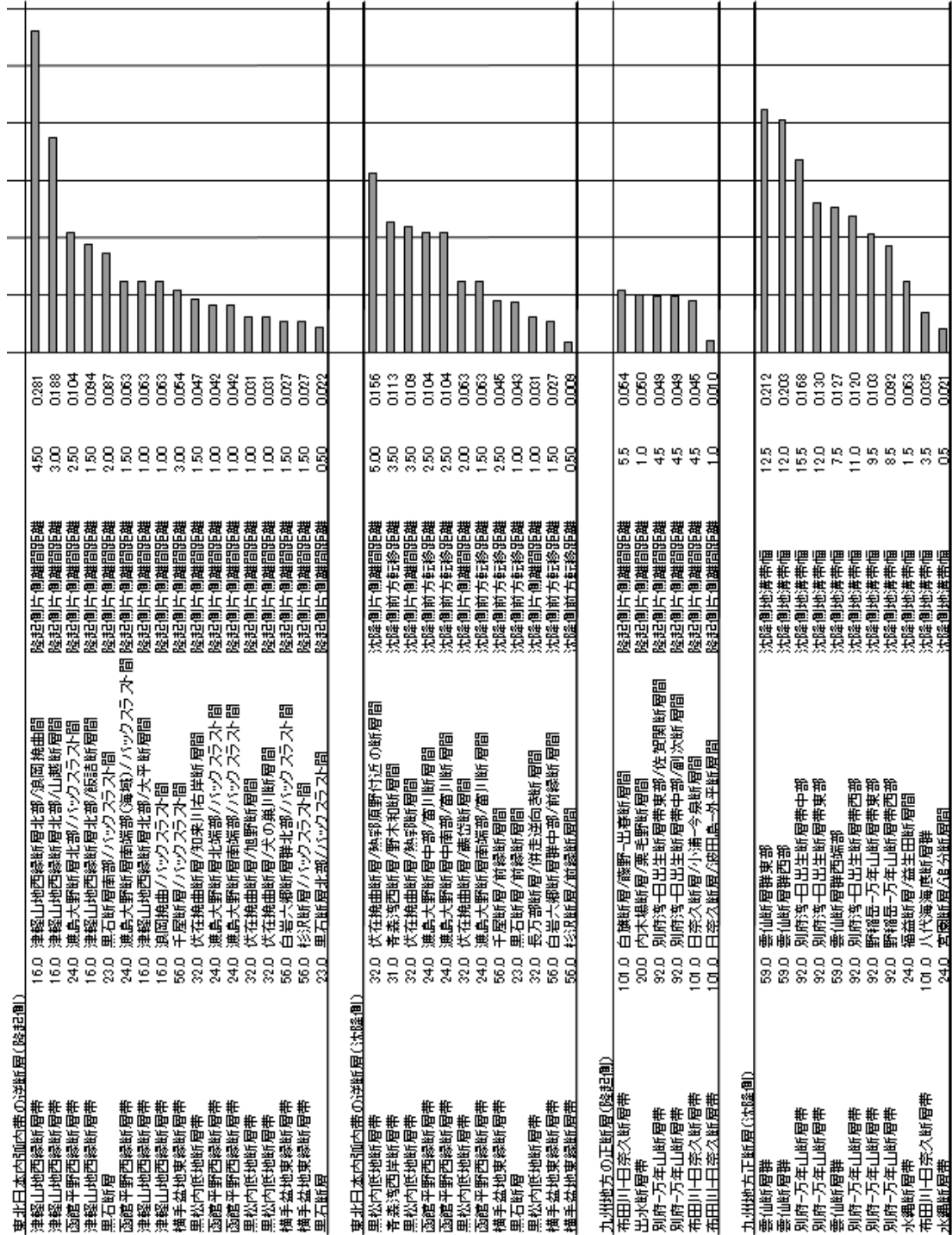


図-2.62 (2) 分岐断層の計測データと片側最大離間距離/断層長比の比較

更に得られた横ずれ活断層 44 個のデータを縦軸に幅/断層長を取り、横軸には断層長を取って整理した(図-2.61). 相関式はほぼ一定値を示すことから、断層長に応じて影響幅が変化することの傍証となる。但し相関係数は 0.2105 と低いことから、断層タイプの中を更に細分化したうえで再評価するか、あるいはばらつきを考慮した確率論的評価が必要と考える。

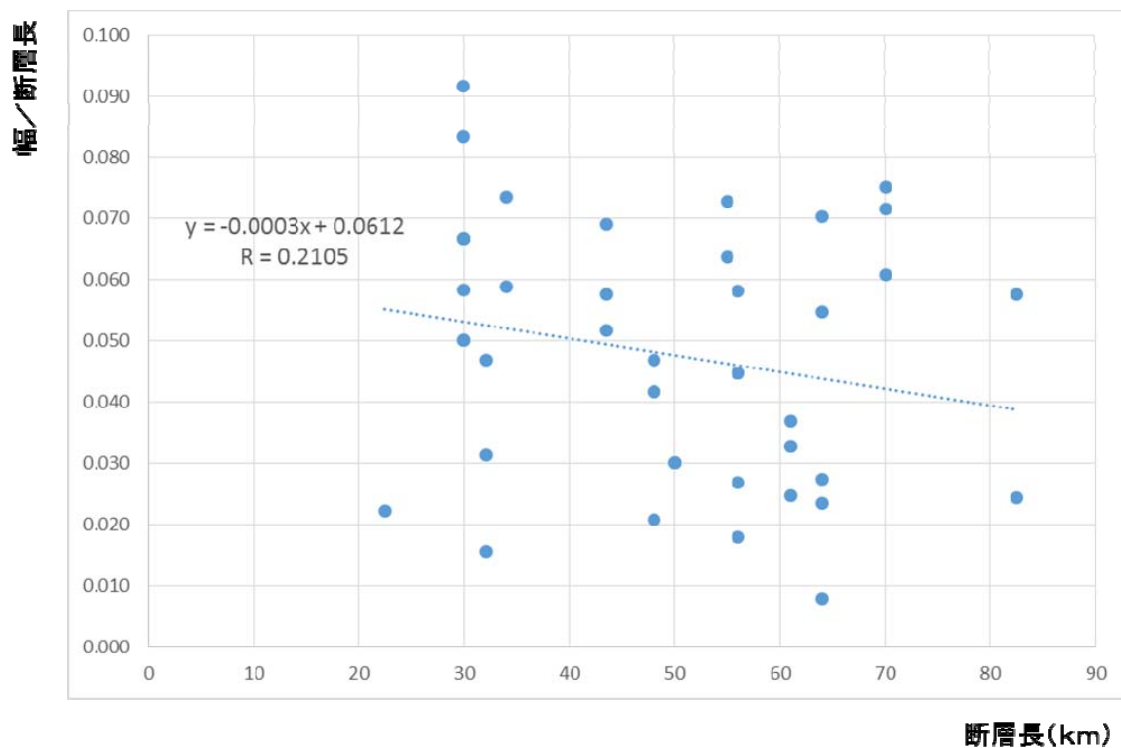


図-2.63 断層長と幅/断層長の関係

## 2.4.5 分岐・派生の確率論的評価手法

断層の側方における割れ目の分布密度は、断層からの距離に対して指数関数的な分布を示すことが知られている。Vermilye・Scholz<sup>59)</sup>は、断層の周囲に分布する微視的な割れ目の密度が、断層から数十 m という範囲で減少し、その関係を指数関数により近似している。また日本国内の断層のプロセスゾーンにおける露頭規模の割れ目の密度の計測データは、金折<sup>41)</sup>の臼木谷断層および吉田ほか<sup>43)</sup>の阿寺断層の事例に示されるように、断層から200~1,200mという範囲で、断層から離れるにつれて指数関数的減少傾向を示している。

活断層の周囲に分岐する副次的な活断層の分布密度が、例えば一定間隔の測線を設定するなど、統計的な観点から正確に計測されれば、分布密度を近似する確率密度関数として指数分布とする報告もあり、「一定の面積を持つ地下施設が断層活動により破損する確率」が評価される可能性もある。

ところで本研究の計測は、断層分布図上に認められる主断層と分岐断層の最大離間距離を計測したもので、断層の密度は計測していない。ここから得られる確率は「破損する確率」ではなく、「将来断層に分岐が生じた場合に、当該地点がその影響範囲に入る確率」を近似的に評価することを意味し、「分岐が生じる確率」は無視される。仮に「分岐が生じる確率」が考慮されると、より低い確率値が得られる。

確率密度関数の想定は、補正前の逆断層・正断層それぞれの隆起・沈降側の計測データ数は最大でも17であるのに対し、横ずれ断層は44であることから、横ずれ断層の補正相対度数にもとづいて行った(図-2.64)。横ずれ断層における  $W/L$  比の補正相対度数は、指数分布の確率密度関数に比較して、正規分布の片側確率密度関数に対して近似性が高いことを示している。このことから、逆断層・正断層においても  $W/L$  比の補正相対度数が正規分布の片側確率密度関数に従うものと仮定して確率密度を求めると、図-2.65 に示すような比較が得られる。

$W/L$  比の補正相対度数が正規分布に従うとした時の片側確率密度関数(定義域:  $W/L \geq 0$ )の標準偏差は以下のとおりである。

$$\text{横ずれ断層} \quad : \quad 1\sigma = 0.0369 \quad (2.22)$$

$$\text{逆断層 (隆起側)} \quad : \quad 1\sigma = 0.0939 \quad (2.23)$$

$$\text{逆断層 (沈降側)} \quad : \quad 1\sigma = 0.0624 \quad (2.24)$$

$$\text{正断層 (隆起側)} \quad : \quad 1\sigma = 0.0307 \quad (2.25)$$

$$\text{正断層 (沈降側)} \quad : \quad 1\sigma = 0.0927 \quad (2.26)$$

東北日本弧内帯逆断層の隆起側と九州地方正断層の沈降側は、 $1\sigma=0.09W/L$  程度の大きな

偏差を示し、東北日本弧内帯逆断層の沈降側も  $1\sigma=0.06W/L$  を超える偏差を示す。一方、中部・中国地方の横ずれ断層と九州地方正断層の隆起側は、 $1\sigma=0.03\sim0.04W/L$  程度の比較的小さい偏差を示している。

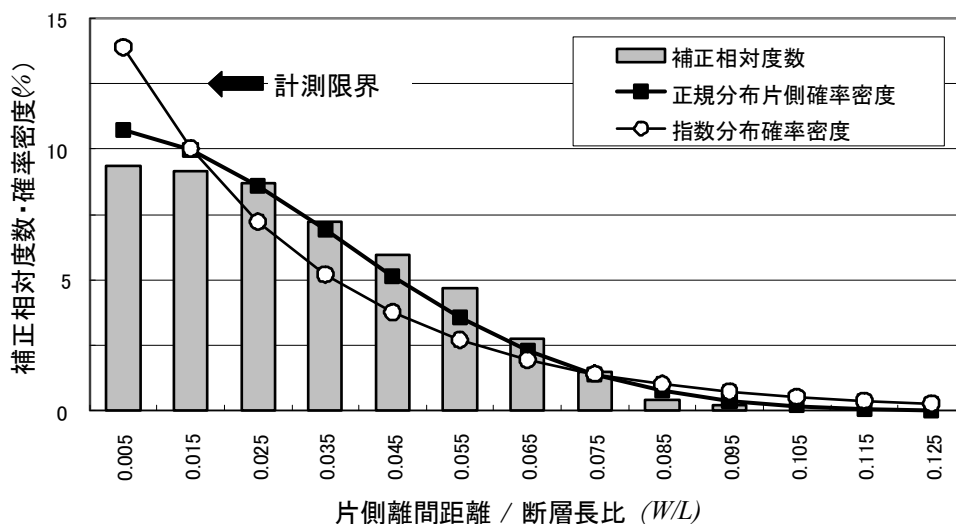


図-2.64 横ずれ断層の  $W/L$  比の補正相対度数と確率密度関数の比較

図上の計測は 0.5km 単位で行ったため、断層長が比較的小さい

30km 程度の断層では  $W/L=0.017$  が計測限界である。

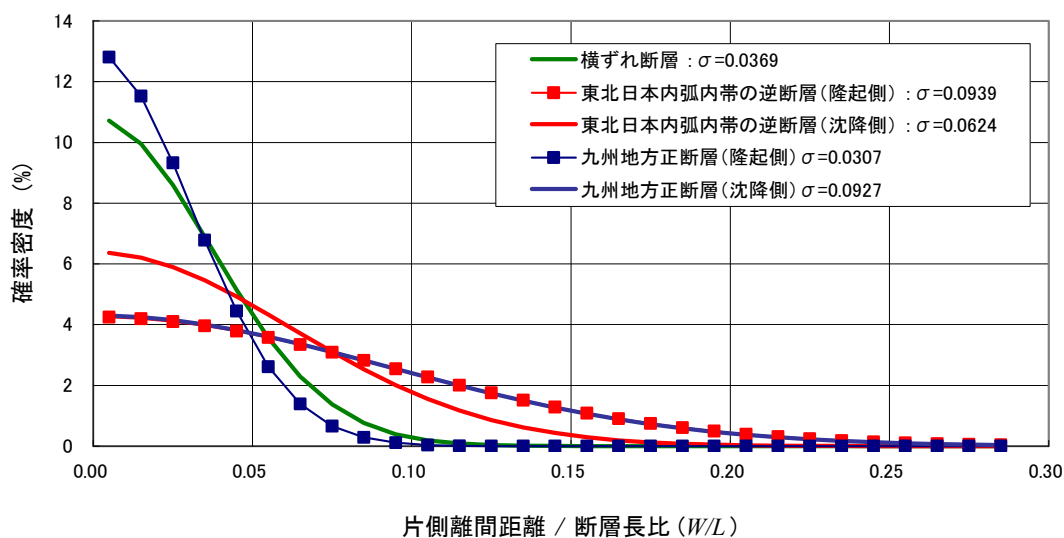


図-2.65 断層タイプおよび隆起側・沈降側別の  $W/L$  比の正規分布片側確率密度関数

逆断層（隆起側）と正断層（沈降側）の標準偏差( $\sigma$ )が偶然類似していることに注意

## 2.5 まとめ

以上の検討により得られた横ずれ断層・逆断層・正断層の決定論的・確率論的な評価パラメータを整理すると、既報のとおり<sup>62)</sup>、表-2.2 に示す数字となる。ここに導かれたパラメータは、横ずれ断層が中部・中国地方の断層、逆断層が東北日本弧内帯に属する断層、正断層は九州地方の断層から得られたものである。

断層延長方向の伸展における伸展長の予測式は、断層の成長論を前提として、断層長と累積変位量の関係を断層タイプ・地域ごとに検討して得られたものである。この予測式にしたがって断層長が時間とともに伸展すると推定したとき、今後 100 万年間の変位量の増大分は平均変位速度と評価期間の積として関係式に代入することにより求められるとし、100 万年後の断層長を見積もることができると考えた。

さらに、断層長と累積変位量の関係は両者の関係式に対して誤差を示すことから、断層長の誤差分布を表す確率密度関数として対数正規分布を設定し、ここから伸展長の誤差を理論解として導くことにより確率論的な伸展長も得る手法を考案した。

伸展長の推測には、入力値として当該断層の断層タイプ、断層長とともに平均変位速度が必要である。ここで知られる確率は、断層周辺に位置する任意の地点を基準として、「当該地点が将来断層延長範囲内に位置する確率」を意味する。

一方、断層の側方方向への分岐や派生における影響範囲の予測は、主断層とその側方に分岐・派生した断層との離間距離を活断層分布図上で計測し、それらのデータ群を統計解析することで、影響幅/断層長比の平均値を決定論的な予測値として与えることが可能と考えた。横ずれ断層におけるこの予測値は、中部地方と中国地方において有意な差が認められない。逆断層と正断層では、隆起側と沈降側とで分岐の様式が異なることから、それぞれの様式において影響幅/断層長比を求めた。

さらに、計測による影響幅/断層長比のヒストグラムは、正規分布の片側確率密度関数に近似されると考え断層タイプごとに確率密度関数を設定し、これにもとづく確率論的な影響幅を得た。なお、影響幅の見積りには、入力値として当該断層の断層タイプおよび断層長が必要であり、断層長は伸展距離の予測式から導かれる。また正断層・逆断層の場合には、断層の隆起側・沈降側が識別されている必要がある。ここで得られる確率は、断層周辺に位置する任意の地点を基準として、「将来断層に分岐が生じた場合に、当該地点がその影響範囲内に位置する確率」を意味する。

なお、得られた決定論的あるいは確率論的予測式は、筆者の知る限りにおいてこれまでに同様の類いのものは存在していない。またその実用性については、以下の点で既往の文献と合致する傾向を示していることから、提案式の根拠となるデータ数が少ないものの実用に耐えるものと考えている。

- 逆断層における上盤(隆起)側は, 下盤側と比較して偏差が大きい結果が得られた. このことは, 上盤側のほうが地質的安定性に欠けるという傾向<sup>60)</sup>に合致する.
- 正断層における下盤(沈降)側は, 上盤側と比較して偏差が大きい結果が得られた. このことは, 下盤側のほうが地質的安定性に欠けるという傾向<sup>60)</sup>に合致する.
- 決定論式における断層側方への影響範囲は  $W/L=0.03$  程度であり, 最大 2 kmを力学的水理学的影響範囲とみなしている既往の見解<sup>58)</sup>に概ね合致する.
- 確率論式における断層側方への影響範囲は, 後述する北海道地区での試算(図-4.7)からおよそ 20-30 km程度と考えられるが, だいち 2 号による地盤変状範囲など既往の見解<sup>58)</sup>・<sup>60)</sup>と概ね合致する.



表-2.2 本研究による評価パラメーター一覧表<sup>62)</sup>

	延長方向の片側伸展距離		片側影響範囲(片側幅)	
	決定論的予測値	確率の想定	決定論的予測値	確率の想定
評価基準の意味	断層長-累積変位の近似式に したがって予測される 片側伸展長( $\Delta L/2$ ) $\Delta L/2 = (S/c+L_0)^{1/n} - L_0/2$ S : 平均変位速度(km/My) L <sub>0</sub> : 断層長(km)	近似式の偏差( $\Delta\sigma$ )が 対数正規分布に従うことを 仮定した片側伸展長の偏差( $N\sigma$ ) $N\sigma = (10^{N\sigma} - 1) \Delta L/2$ $\Delta L/2$ : 片側伸展長(km) N $\sigma$ : 断層長プロットの偏差	断層長に対する 断層片側の分岐量の比(W/L)の 集計による平均値 W: 片側離間距離 L: 断層長	断層長に対する断層片側の分岐量が 正規分布(片側)に従うことを 仮定した偏差( $N\sigma$ )  W/Lの片側標準偏差
確率の定義		当該地点が将来断層側方に 位置する確率	将来断層に分岐が生じた場合に、 当該地点がその影響範囲に入る確率	
中部地方 横ずれ断層	$n = 2.26$ $c = 0.000267$	$\sigma = 0.115$	$W/L = 0.0306$	$\sigma = 0.0369$
中国地方 横ずれ断層	$n = 1.90$ $c = 0.000395$	$\sigma = 0.187$		
東北日本弧 内帯 逆断層	$n = 2.14$ $c = 0.000940$	$\sigma = 0.128$	隆起側 W/L = 0.0665 沈降側 W/L = 0.0504	隆起側 $\sigma = 0.0939$ 沈降側 $\sigma = 0.0624$
九州地方 正断層	$n = 2.11$ $c = 0.000370$	$\sigma = 0.196$	隆起側 W/L = 0.0260 沈降側 W/L = 0.0757	隆起側 $\sigma = 0.0307$ 沈降側 $\sigma = 0.0927$

## 第2章の引用文献

- 1) 國生剛治・大塚康範・堀宗朗(2016):活断層が分かる本, 技報堂出版, pp89-113
- 2) 原子力発電環境整備機構(2004): 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠  
ー「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料ー.
- 3) 松田時彦・岡田真介・渡邊トキエ(2004): 横ずれ活断層の累積変位量・断層長・破碎帯幅から見た断層の発達度 ー中国地方と中部地方の比較-, 活断層研究, No.24,pp.1-12.
- 4) 垣見俊弘・松田時彦・相田勇・衣笠善博(2003): 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分, 地震 第2輯, 55, pp.389-406.
- 5) 中田高・今泉俊文 編(2002): 活断層詳細デジタルマップ, 解説書, 2 活断層の定義と判断基準, pp.5-9.
- 6) 内閣府中央防災会議(2006): 我が国で発生する地震, 中央防災会議 HP.  
[http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku\\_gaiyou/pdf/hassei-jishin.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_gaiyou/pdf/hassei-jishin.pdf)
- 7) (社)全国地質調査業協会連合会編(2001): 日本の地形・地質 安全な国土のマネジメントのために, pp.3-4, 鹿島出版会.
- 8) 長谷川昭(2006): 東北日本沈み込み帯における地震発生と火山生成のモデル, 石油技術協会誌, Vol.71, No. 5, pp.425-434.
- 9) 佐藤比呂志・平田直(1998): 活断層の深部構造と日本列島の成立, 活断層の深部構造と日本列島の成立 (小特集 島弧・日本列島の新しい理解), 科学, Vol.68, No.1, pp.63-71.
- 10) 狩野謙一・村田明広(1998): 構造地質学 VI.5 東北日本弧の伸長・短縮テクトニクス, 朝倉書店, pp.256-262.
- 11) 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編(2002): 第四紀逆断層アトラス, 4,日本の第四紀逆断層帯の起源とテクトニックな背景, pp.12-18. 東京大学出版会.
- 12) 木村政明(1990): 沖縄トラフの発生と形成, 地質学論集, No.34, pp.77-88.
- 13) 鎌田浩毅(2002): 九州地方のテクトニクスと火山活動及びその将来予測の可能性, 原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全委員会 第3回ワークショップ, 配布資料.
- 14) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(2010):地質図のホームページ.  
<http://www.gsj.jp/geomap/>
- 15) 松澤暢(2001): 地震予知の戦略と展望, 地学雑誌 Journal of Geography110(6) 771-783 2001
- 16) 柳谷俊訳(2010), 地震と断層の力学, 古今書院: The Mechanics of Earthquakes and Faulting 2nd edition 2002 Scholz, Christopher H.の翻訳
- 17) 青地秀雄・安藤亮輔(2009): 断層の成長ーシミュレーションを通して再現, 予測される断層の変化ー, 地震 第2輯 第61巻 特集号 (2009), S403-S413 頁
- 18) Cowie, P.A. and C. H. Scholz, (1992): Growth of faults by accumulation of seismic

- slip, *J. Geophys. Res.*, 97, 11085-11095
- 19) Lockner, D. A., J. D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, and A. Sidorin (1991): Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite, *Nature*, 350, 39-42
  - 20) Segall, P. and D. D. Pollard (1983): Nucleation and growth of strike slip faults in granite, *J. Geophys. Res.*, 88, 555-568
  - 21) Hori, M., K. Oguni, and H. Sakaguchi, (2005): Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomena, *J. Mech. Phys. Solids*, 53, 681-703
  - 22) 活断層研究会(1980): 日本の活断層一分布図と資料 東京大学出版会 活断層研究会編 1980.2
  - 23) 活断層研究会(1991): [新編] 日本の活断層一分布図と資料 東京大学出版会 活断層研究会編 1991.3
  - 24) 中田高・今泉俊文編(2002): 活断層詳細デジタルマップ 東京大学出版会 2002.5
  - 25) 今泉俊文・宮内崇裕・堤浩之・中田高(2018): 活断層詳細デジタルマップ[新編] 東京大学出版会 2018.3
  - 26) Seno, T. (2005): Variation of downdip limit of the seismogenic zone near the Japanese island: Implication for the serpentinization mechanism of the forearc mantle wedge, *Earth and Planetary Science Letters*, No.231, pp.249-262.
  - 27) 岡田篤正・安藤雅孝(1979): 日本の活断層と地震, *科学*, 49, 158-169
  - 28) 核燃料サイクル開発機構(1999): 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.
  - 29) Ranalli, G. (1977): Correction between length and offset in strike-slip faults, *Tectonophysics*, 37, pp.T1-T7.
  - 30) 松田時彦(1988): 活断層の数的性質, 数理地震学 (Ⅲ) フラクタルと地震現象の数理共同研究成果報告書, フラクタルと地震現象の数理研究会統計数理研究所, pp.174-184.
  - 31) Schlische, R.W., and Anders, M.H. (1996): Stratigraphic effects and tectonic implications of the growth of normal faults and extensional basins, in Beratan, K.K., ed., *Reconstructing the Structural History of Basin and Range Extension Using Sedimentology and Stratigraphy: GSA Special Paper 303*, p. 183-203
  - 32) 地震調査研究推進本部(2010): 活断層の長期評価  
[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02\\_danso.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_danso.htm)
  - 33) 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター(2010): 活断層データベース, 起震断層・活動セグメント検索  
[http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/cgi-bin/search\\_map.cgi?search\\_no=j029&version\\_no=1&search\\_mode=0](http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/cgi-bin/search_map.cgi?search_no=j029&version_no=1&search_mode=0)
  - 34) 楢原京子・今泉俊文・宮内崇裕・佐藤比呂志・内田拓馬・越後智雄・石山達也・松多信

- 尚・岡田真介・池田安隆・戸田茂・越谷信・野田賢・加藤一・野田克也・三輪敦志・黒澤英樹・小坂英輝・野原壯(2006): 横手盆地東縁断層帯・千屋断層の形成過程と千屋丘陵の活構造, 地学雑誌, No.115, No.6, pp.691-714.
- 35) 木村政明(1990): 沖縄トラフの発生と形成, 地質学論集, No.34, pp.77-88.
- 36) Itoh, Y., Takemura K., Kamata H. (1998): History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan, *Tectonophysics*, 284, pp.135-150.
- 37) Cartwright, J. A., Trudgill, B. D., Mansfield C. S. (1995): Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah, *J. Struct. Geol.*, 17, pp.1326-1326.
- 38) Walsh, J. J., Nicol, A., Childs, C. (2002): An alternative model for the growth of faults, *J. Struct. Geol.*, 24, pp.1669-1675.
- 39) Cowie, P. A., Scholz, C. H. (1992): Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model. *J. Struct. Geol.*, 14, pp.1133-1148.
- 40) Ogata, S. (1976): Activity evaluation of fault in the basement terrain - characteristics of its fracture thickness and filled materials, *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, 17, pp.119-121.
- 41) 金折裕司(2001): 断層の影響はどこまで及んでいるか, 応用地質, 41, pp.323-332.
- 42) Vermilye, J. M., Scholz, C. H. (1988): The process zone: A microstructural view of fault growth, *J. Geophys. Res.*, 103, pp.12223-12237.
- 43) 吉田英一・大嶋章浩・吉田久美子・長友晃夫・西本昌司(2009): 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み—, 応用地質, 50, pp.16-28.
- 44) Twiss, R.J., Moores, E.M. (1992): *Structural Geology*, 7, Strike-Slip Faults, W. H. Freeman and Company, New York, pp.113-127.
- 45) 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編(2002): 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会, 254p.
- 46) Twiss, R.J., Moores, E.M. (1992): *Structural Geology*, 5, Normal Faults, W. H. Freeman and Company, New York, pp.74-95.
- 47) 上田圭一・井上大榮・鳥越祐司(2005): 2004年新潟県中越地震震源域における上部新生界の変形機構: 模型実験による基礎的検討, 地震 第2輯, Vol.58, pp. 309-327.
- 48) 佐藤比呂志・吉田武義・岩崎貴哉・佐藤時幸・池田安隆・海野徳仁(2004): 後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達 - 最近の地殻構造探査を中心として -, 石油技術協会誌, Vol.69, No.2, pp.145-154.
- 49) 野原壯・梅田浩司・笹尾英嗣・浅森浩一・花室孝広・守屋俊文・中司昇(2005): 地質環

- 境の長期安定性に関する研究,年度報告書,平成 17 年度,逆断層の三次元構造モデル,  
JAEA-Research 2007-087, pp.30-33.
- 50) 吉岡敏和(1989): 褶曲に伴う層面すべり断層, 活断層研究, No.7,pp.5-12.
- 51) 狩野謙一・村田明広(1998): 構造地質学 VII.9 正断層と伸長テクトニクス, 朝倉書店,  
pp.142-146.
- 52) McClay.K.R. (1996): Recent Advances in analogue modelling uses in section  
interpretation and variation, Geological Society of London Special Publication, 99,  
pp.201-225.
- 53) 狩野謙一・村田明広(1998): 構造地質学 VII.2 脆性破砕帯の形成過程, 朝倉書店,  
pp.113-117.
- 54) 上田圭一(2003): 横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程 -断層模型実  
験による検討-, 電力中央研究所報告 (原子力発電) , U03021.
- 55) Twiss, R.J., Moores, E.M. (1992): Structural Geology, 7, Strike-Slip Faults, W. H.  
Freeman and Company, New York, pp.113-127.
- 56) 阿部信太郎(2003): 2000年鳥取県西部地震震源域における深部地殻構造調査 -稠密微  
小地震観測と深部反射法地震探査-, 電力中央研究所,原子力研究の主要な成果(2002年  
版) pp.70-71.
- 57) 藤森隆俊(1991): 活断層からみたプルーアパートベイズンとしての諏訪盆地の形成, 地理  
学評論, 64A ,pp.665-696.
- 58) 社団法人土木学会原子力土木委員会地下環境部会(2001): 概要調査地区選定時に考慮す  
べき地質環境に関する基本的考え方, 2001年8月
- 59) Vermilye, J. M. and Scholz, C. H. (1988): The process zone: A microstructural view of  
fault growth, Jour. Geophys. Res., 103, 12,223-12,237
- 60) 国土地理院 HP: 平成 30 年(2018 年)北海道胆振東部地震に関する情報,  
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html#6>
- 61) 遠田晋次(2016): 活断層地震波どこまで予測できるか, 株式会社講談社, 2016.12
- 62) Takashi AKIYAMA(2011): Study on Prediction Technique of Influence Range from  
super long-term Natural Phenomenon, SSMS(International Symposium for Social  
Management System) 2011 Sri Lanka  
[https://ssms.jp/wp-content/uploads/PDF/vol7-issue1/sms11\\_3177.pdf](https://ssms.jp/wp-content/uploads/PDF/vol7-issue1/sms11_3177.pdf)



# Chapter 3

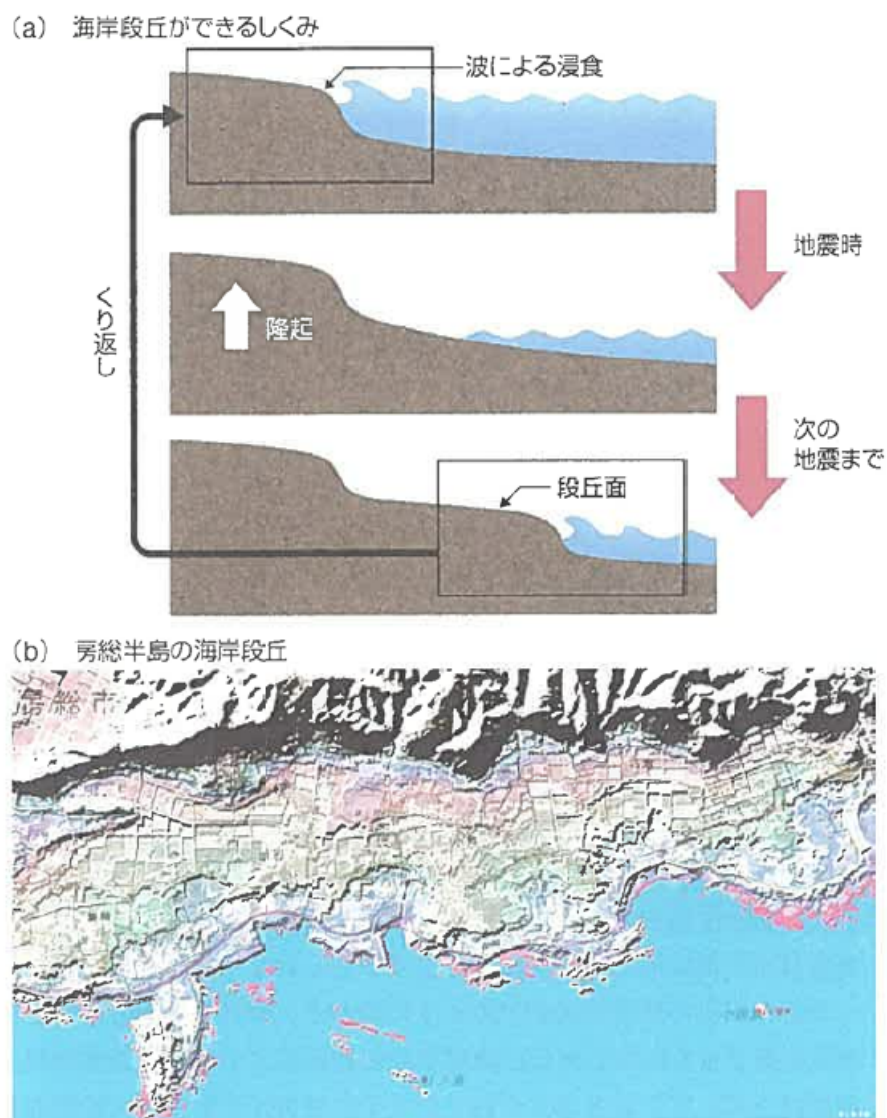
## 隆起・侵食のリスク評価

### 3.1 はじめに

地下施設が隆起・侵食作用により地表へ接近することを避けることを目的として、NUMO<sup>1)</sup>は、概ね今後 10 万年間の隆起作用とこれに伴う侵食作用を考慮し「過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超える」ことを「評価する事項」としている。一方、地層処分による長期的な安全性の確保を図る時間スケールとして、「過去数百万年～数十万年程度の記録から、将来 10 万年程度の期間における自然現象の活動を地球科学的に検証する」<sup>2)</sup>とされているが、より高い安全性を確保する観点から、将来 100 万年程度の安全性を視野に入れた評価が求められる可能性もある。

我が国における隆起・沈降を支配するテクトニックな応力状態は、断層活動と同様に、数十万年～数百万年という時間スケールの中で、一定の傾向を保ちつつ進行していると考えられている。したがって 10 万年オーダーの将来予測では現在のテクトニクス<sup>3)</sup>の継続性を想定した決定論的な評価が可能とみられるが、100 万年オーダーの将来予測に際しては、決定論的な評価に用いるパラメータに内在する誤差を考慮した確率論的な評価が求められる。

沿岸域における隆起速度の算定においては、海成段丘(図-3.1<sup>2)</sup>)の高度(正しくは段丘面上の過去の海岸線を示す地形、すなわち旧汀線の高度)を用いた手法の精度が高いことが知られている。



出典：国土地理院ウェブサイト (<http://www.gsi.go.jp/kanto/chiri001.html>)

図-3.1 海成段丘ができる仕組み(a)と房総半島の海成段丘(b)<sup>2)</sup>

中でも最終間氷期最盛期(約12.5万年前)の海洋酸素同位体ステージ(以下MISと略す)5eに形成された海成段丘は、形成時の海面高度が現海面+5~6mという高い精度で知られており、地形的に読み取られる旧汀線と形成時の海面との高度差から、精度良く隆起速度を知ることができる。図-3.2に太田(1999)<sup>3)</sup>による12.5万年前の旧汀線高度を示すが、当時の海面高度(現在比約+5m)を差し引いた値が過去12.5万年間の隆起量となり、



沿岸部についてはここから隆起速度を求めることができる。現状では、地震性隆起が生じている半島先端部などの一部の地域を除き、ほとんどの地域で隆起速度が1 mm/年以下（10万年間で100m以下）となっている。

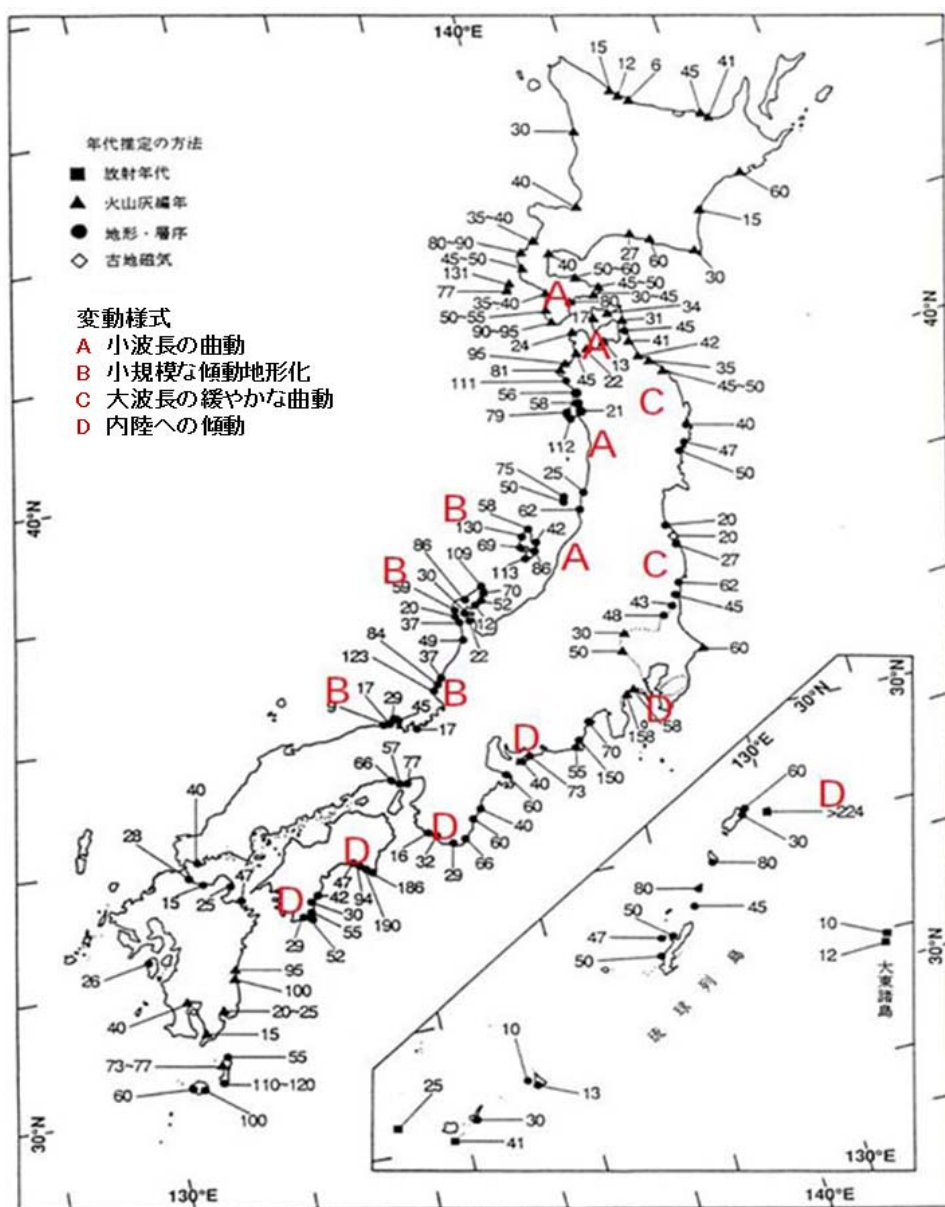


図-3.2 最終間氷期（約12.5万年前）に形成された段丘の旧汀線高度（単位m）<sup>3)</sup>

沿岸域に限定すれば、この手法により隆起速度を想定し、「地下施設が隆起・侵食作用により地表へ接近する」こと評価することができる。しかし、この手法においても平均隆起速度等の想定には様々な誤差を含むと考えられることから、本研究では、特に海成段丘の旧汀線高度の認定精度を事例から検討し、確率論的評価手法を提示する。

## 3.2 決定論的手法

### 3.2.1 評価の考え方

本研究における隆起・侵食の評価は、今後 100 万年間という超長期を想定し、この期間に地下施設が隆起・侵食作用により地表へ接近することを避けることを目的とする。NUMO<sup>1)</sup>は、概ね今後 10 万年間の隆起作用とこれに伴う侵食作用を考慮して「過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超える」ことを「評価する事項」としている。

また、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会地層処分技術WG(2017)においては、地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・好ましくない範囲として、次の通り記載している<sup>4)</sup>。

#### ◆要件<sup>4)</sup>

著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近により、物理的隔離機能が喪失されないこと

#### ◆好ましくない範囲（直接指標から確認される範囲）の基準<sup>4)</sup>

過去 10 万年における最大侵食量が 300 m を超えたことが明らかな範囲

※ただし、基準を適用する全国規模で体系的に整備された文献・データが存在しないことから、当該範囲を判断することができない。

#### ◆好ましくない範囲（代替指標から推定される範囲）の基準<sup>4)</sup>

全国規模で体系的に整備された文献・データにおいて、将来 10 万年間で隆起と海水準低下による侵食量が 300 m を超える可能性が高いと考えられる地域（具体的には、海水準低下による最大 150 m の侵食）

本研究においては、超長期にわたり隆起速度が一定していると仮定し、この好ましくない範囲の基準をそのまま「今後 100 万年間」の評価事項として拡大解釈すると、今後 100 万年間の隆起の総量が 300m を超える地域は、我が国の国土の半分程度以上を占めると推定される（図-3.3）。しかし各地点の隆起速度と日本付近における海水準変動の記録を考慮して、今後 100 万年間の最大侵食量を概略予想することができれば、処分施設が将来地表（海底）に接近しないような深めの設置深度に施設計画することもできる。

今後 100 万年間の最大侵食量の予想に際しては、過去 10 万程度の間形成された海成段丘の高度等の指標から知られる隆起速度が、今後 100 万年間一定して継続するという前提を伴う。図-3.4 には、山地の高度や盆地の堆積速度から知られる隆起・沈降速度の継続性の推定例を示す。この図から、日本海の拡大が終了して日本列島が成立して以降今日に至るおおよそ 1,500 万年間に、少なくとも隆起域（沈降域）が大きく沈降（隆起）に転じるようなことは起きていない。図-3.4 の出典である太田<sup>5)</sup>によれば、「隆起開始期や速度は山地によってかなり違うが、ほぼ共通するのは 5Ma ころから隆起傾向に入り、3Ma ないし 2Ma ころ（ほぼ第四紀に入って）から本格的になる」。また、「盆地における沈降・堆積は中期中新世から起こった場合もあるが、いったん穏やかになった後、鮮新世以降、とくに第四

紀に入って活発化したものが多い」としている。したがって隆起・沈降速度は全体として増加する傾向があり、六甲山地や屋久島の例のように 50～200 万年のオーダーでは、隆起速度が数倍程度増加した地域もある。このようなテクトニクスの変化に伴う 50～200 万年のオーダーでの隆起・侵食速度の変化を、個々の地点において予測することは困難である。本研究による隆起・侵食量の評価では、今後 100 万年間、隆起・沈降が一定速度で継続することを仮定せざるを得ないが、以降述べる「地下施設が将来地表（海底）に接近しないような設置深度」の評価手法には、数倍ないし数分の 1 というオーダーの誤差が内在する。

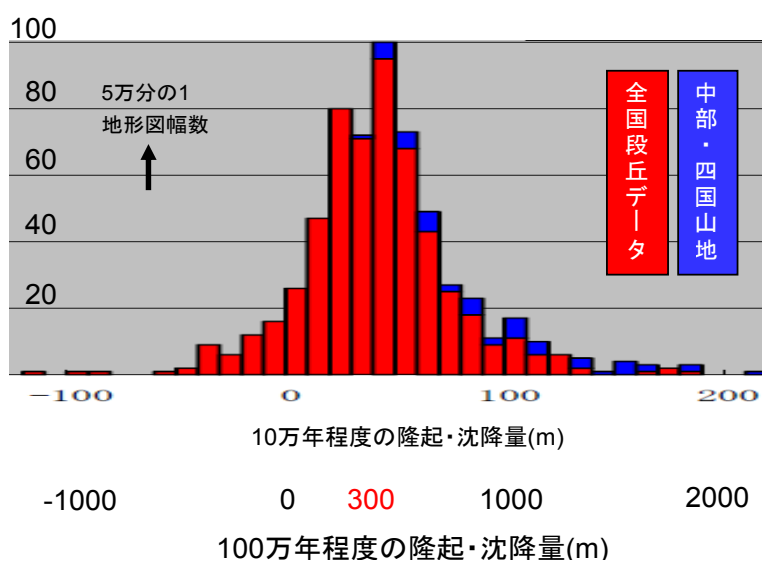
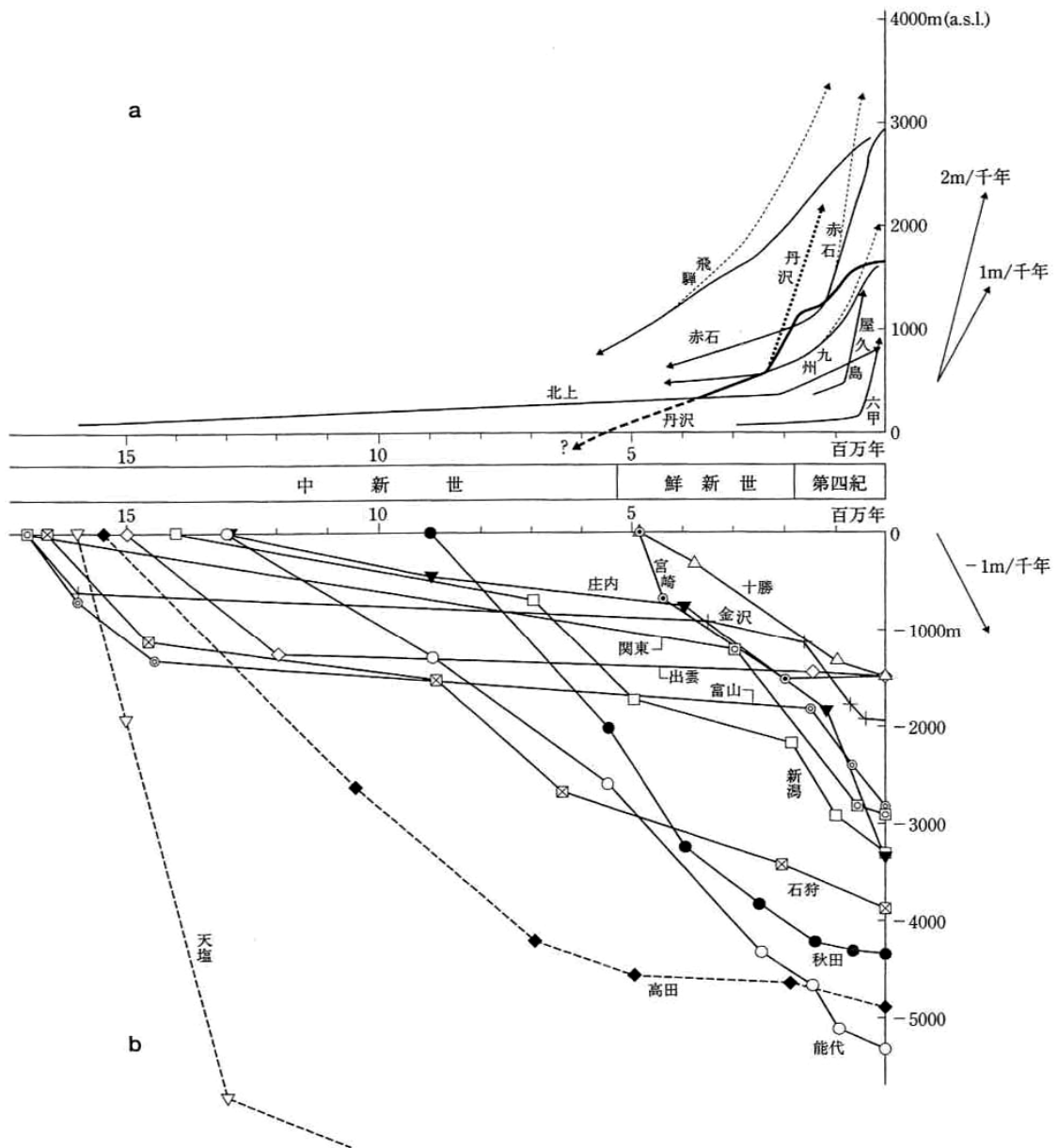


図-3.3 陸域の隆起速度の頻度分布 (NUMO<sup>1)</sup> に加筆)



日本におけるいくつかの山地と盆地の発達過程 [鎮西・町田, 2001] aの実線は各山地の山頂の平均的的最大標高, 点線は侵食による山頂の低下がないと仮定した場合の曲線, 破線は推定曲線. なおこの図では鮮新世と第四紀の境界を, 2009年からの新定義の2.6 Maではなく, 従来の約1.8 Maのままとしている.

図-3.4 隆起速度・沈降速度の継続性

出典; 太田ほか編<sup>5)</sup>

### 3.2.2 評価手法の検討

表-3.1 に藤原ほか<sup>6)</sup>が整理した隆起・沈降速度の評価手法を示す。ここに挙げられた手法の中では、海成段丘の高度（正しくは段丘面上において過去の海岸線を示す地形，すなわち旧汀線の高度）を用いた手法の精度が高い。最終間氷期最盛期（海洋酸素同位体ステージ(MIS)5e, 約 12.5 万年前）に形成された海成段丘は、前述の通り古海面高度が現海面+5～6m という高い精度で知られていることから、地形的に読み取られる旧汀線と現海面との高度差から隆起速度を正確に知ることができる。またこの海成段丘は日本全国の沿岸域に広く分布することから、沿岸域の評価に適している。

表-3.1 隆起・沈降速度の評価に使用される手法<sup>6)</sup>

変動の基準	対象期間	年代推定法	事例（主な文献と場所）	日本列島での適用性と問題点
海成段丘	約 32 万年間	火山灰層序など	[4]など；全国を対象	◎：精度がよいのは 125ky まで
河岸段丘	約 10 万年間	火山灰層序など	[15, 21]など；全国を対象	○：山間部では誤差が大きい
前浜堆積物	主に完新世，又は約 12 万年間	<sup>14</sup> C 年代測定，火山灰層序など	[22, 23, 25]；房総半島	○：変動量の分解能は高い，海浜平野で有効
地層の堆積曲線	主に完新世	<sup>14</sup> C 年代測定	[26,27]；房総半島，[28]；濃尾平野	○：相対的海水準変動と地層の発達過程の正確な復元が必要
反射法断面	主に新第三紀以降	放射年代測定，微化石層序，火山灰層序など	[7]など；全国の平野や盆地	○：時間・空間分解能が必ずしも高くない

侵食作用が海面変動の影響下にある沿岸域においては、評価期間に地下施設が地表に露出しない深度（すなわち隆起速度から推定される最大侵食量）は、「最大海退期における河川の下刻作用に関する検討結果（海退という相対的な隆起効果に伴う侵食作用）も念頭に置き、最も厳しい場合を考慮して、隆起量と同じ量が侵食されるものと仮定）」<sup>1)</sup> して、図-3.5 に示す概念により、下式を用いて簡易評価される。

$$d \geq 100 \times R + h \quad (3.1)$$

ここで、 $d$ : 100 万年後までに地下施設が地表に露出しない深度(m)

$R$ : 平均隆起速度(m/10,000y)

$h$ : 氷期における海面低下に伴う相対的隆起分(120m)

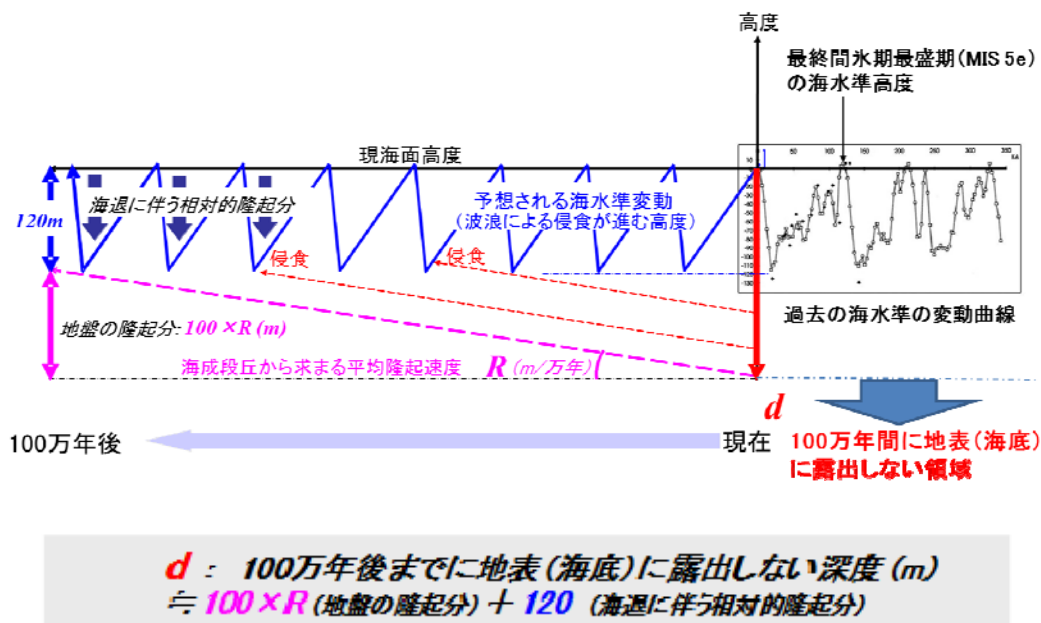


図-3.5 100 万年間の最大侵食量の簡易評価の概念

3.1 式では、沿岸域において波浪等による侵食作用を支配する海面変動は、図-3.6 に示すような天文学的気候変化説<sup>7)</sup>によるサイクルに支配されていることを想定し、今後 100 万年間継続するものと仮定している。

隆起速度の算定に使用する最終間氷期最高海面期の海面高度は、一般に現海面高度+5～6m とされているが、3.1 式では小池・町田編<sup>8)</sup>が垂直変動量の算出に使用した現海面高度(+5m)を用いている(図-3.7 の関連資料 2)。

一方、今後 100 万年間に出現する氷期最盛期の海面高度(氷期における海面低下量)は、ハイドロアイソスタシーの地域的効果や超長期におよぶ気象・天文学的变化を予測するが困難であるため、正確さに欠ける。そこで 3.1 式では以下の理由から、古海面高度を概略現海面-120m と仮定している。

- 1) 米倉ほか編<sup>9)</sup>が、国内での海底地形・地質からの推定値として文献記述から総括した最終氷期最盛期の海面低下量は、-80m～-140m の推定幅を示す(図-3.7 の関連資料 1)。
- 2) 同文献において最終氷期の大陸氷床の増加量に相当する世界的海面低下量は、112m あるいは 126m とされている(図-3.7 の関連資料 1)。
- 3) 小池・町田編<sup>8)</sup>により整理された過去 3 回の氷期最盛期の海面高度は、海洋酸素同位体ステージ 8, 6, 2 の順に、現海面-100m, -110m, -115m であり、やや低下傾向にある(図-3.7 の関連資料 2)。

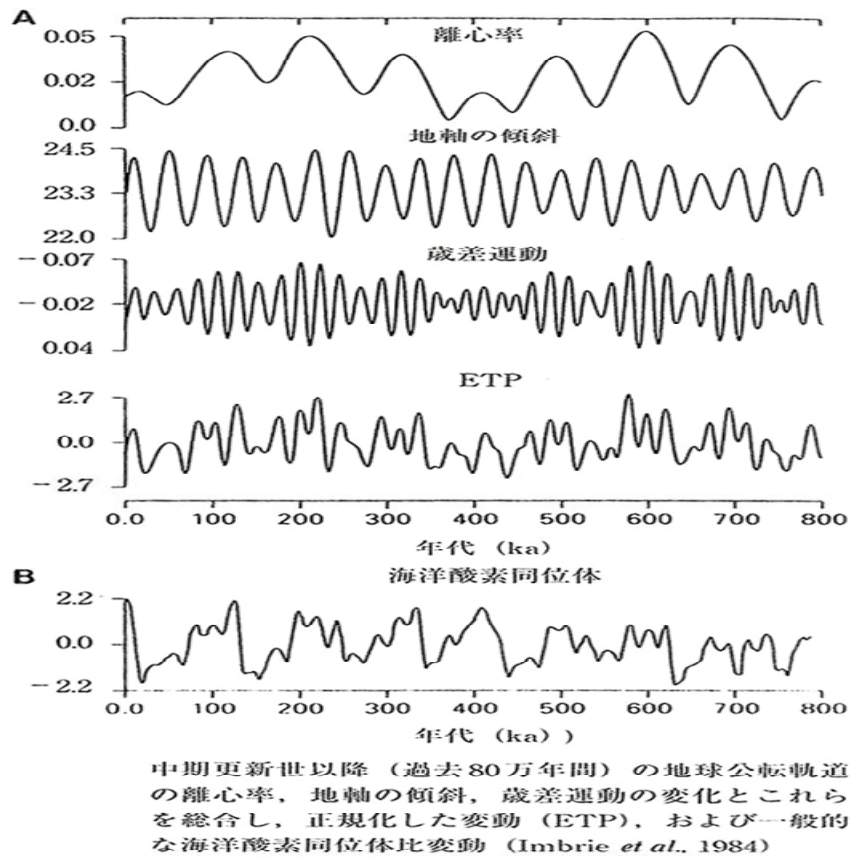
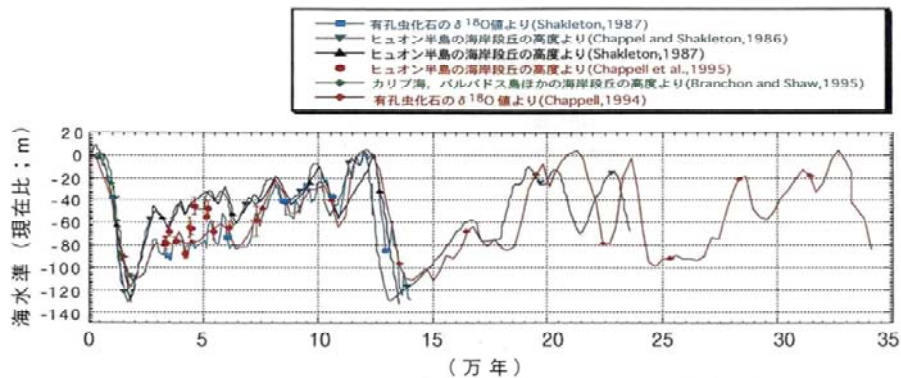


図-3.6 サイクリックな海面変動を支配するミランコビッチサイクル（出典；町田ほか<sup>7)</sup>）

地球公転軌道の離心率等の天文学的サイクルが汎世界的な気候変動を支配し、気温の変化が海洋酸素同位体の変化として海底堆積物や氷床などに保存される。海成段丘の高度と海洋酸素同位体の変化にもとづいて、海水準変動曲線が描かれる。



異なる手法により推定された海水準変動。各研究結果はおおむね一致しており、約10万年周期で、海水準の急激な上昇と段階的な低下が認められる。なお、海岸段丘（サンゴ礁）自体の隆起は補正してある。

関連資料1 米倉・貝塚・野上・鎮西編(2001;「日本の地形1 総説」)による最終氷期の海面高度に関する記述 (当該部分の執筆は太田陽子氏による)

3) 最終氷期・後氷期の海面変化

海面は、海洋酸素同位体ステージ5c以降一進一退を繰り返しながら、ステージ3の亜間氷期を経て、氷床が最も拡大した約2万年前の最終氷期極相期(ステージ2)に最も低下した。大陸棚の地形・地質から見た各地の海面低下量は、約80-140mと様々な推定がなされている。たとえば井関(1975)は、試錐で求められた沖積層基底礫層の深度に基づき、復元された河口位置までの距離を考慮して、約-140mという値が妥当とした。Kaizuka *et al.* (1977)は、東京湾沿岸地域で地殻変動の影響を除くと、当時の海面高度は-135mに達したとした。一方、海底地形の検討から-100~120mとする考えもある(たとえば茂木, 1981)。さらに、-80mとする見解(たとえば大嶋, 1990)もあるが、一般的には支持されていない(詳しくは海津, 1994参照)。

一方、最近の研究によると、大陸氷床の増加量に相当する世界的海面低下量は112m、あるいは126mと推定されている(Nakada *et al.*, 1991)。しかし、大陸氷床の増加量についての推定値にも幅があるので、海面低下量の見積もりにも幅が出てくる。世界各地で知られている大陸棚の地形・地質から見た海面低下量は、大陸氷床の増加による海面低下に加えて地球規模のアイスタシーや局地的なテクトニクスなどの影響で様々に異なる。日本列島周辺では、ハイドロアイスタシー\*の影響によって、最終氷期極相期(約2万年前)の海面高度には30mに達する地域差が生じたといわれる(Nakada *et al.*, 1991)。

ハイドロアイスタシー  
氷期・間氷期の繰り返しによる海水量の増減が海底に与える荷重の変化となってマントル流動が起り、陸地と海底とが相対的に昇降する現象。日本のような大陸縁辺部では、最終氷期以降の海水増加によって海底が沈み陸が盛り上がる現象となって表れる。

関連資料2 小池・町田編(2001;「日本の海成段丘アトラス」)が垂直変動量の算出に使用したユースタティックな変動による海水準高度

酸素同位体ステージ	年代値(万年前)	海水準高度(m)
1(1.1)	0.6	0
2(2.22)	1.8	-115
5e	12.5	5
6(6.2)	13.5	-110
7(7.3)	21.4	5
8(8.2)	24.9	-100

\*「海水準変動量は主としてChappel(1994)に基づいた。」としている

図-3.7 核燃料サイクル機構<sup>10)</sup>の整理による海水準変動曲線と古海水準に関する  
関連資料

関連資料1は米倉ほか編<sup>9)</sup>から抜粋、関連資料2は小池・町田編<sup>8)</sup>から抜粋



評価対象には沈降域と推定される海域も想定される。沈降域は「処分深度が増すという点に限定して言えば、有利な面が大きいと考えられるので、精密調査地区選定にあたっては考慮する必要はない（土木学会<sup>11)</sup>」。すなわち今後100万年間の最大侵食量として、氷期における海面低下量だけを考慮すれば良いことを示しており、地下施設の隆起・侵食による地表への露出の危険性は、法定深度300mを確保することにより担保される（図-3.8）。

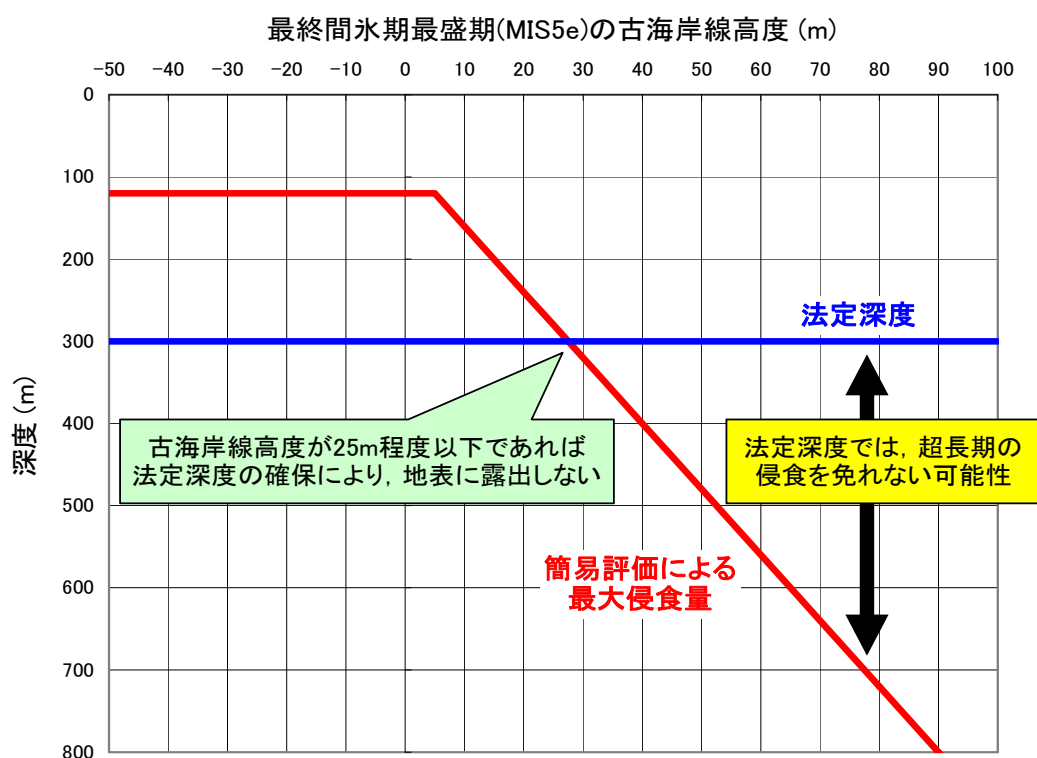


図-3.8 簡易評価による最大侵食量と法定深度との関係

### 3.3 確率論的手法

#### 3.3.1 海成段丘の旧汀線高度による隆起・侵食量の決定論的評価の問題点

評価期間に地下施設が地表に露出しない深度を定義する決定論的な評価式(3.1)は、MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度( $H5e$ )とその年代( $T5e$ )、および MIS5e の海水準高度( $h5e$ )を用いて表現すると、3.2 式のようなになる。3.1 式における平均隆起速度( $R$ :m/100 万年)は、3.2 式の( $H5e-h5e$ )/ $T5e$  の項に相当する。

$$d \geq (H5e-h5e)/T5e \cdot T + h \quad (3.2)$$

ここで、  
 $d$  : 評価期間に地下施設が地表に露出しない深度(m)  
 $H5e$  : MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度(m)  
 $h5e$  : MIS5e 海水準高度(5m)  
 $T5e$  : MIS5e の年代(12.5 万年)  
 $T$  : 評価期間(100 万年)  
 $h$  : 氷期における海面低下に伴う相対的隆起分(120m)

3.2 式から今後 100 万年間の隆起・侵食量を予測する場合には、以下のような原因により誤差を生じる可能性が考えられる。

- 1) 過去 12.5 万年間の平均隆起速度( $R$ )の今後 100 万年間の継続性
- 2) 今後 100 万年間の氷期における海面低下量( $h$ )の変化
- 3) 総隆起量と侵食量の相違
- 4) 最終間氷期海成段丘の年代対比 (編年) の誤り
- 5) 最終間氷期海成段丘の旧汀線高度( $H5e$ )の認定精度

#### 1) 過去 12.5 万年間の平均隆起速度の今後 100 万年間の継続性

3.2.1 に述べたように、テクトニクスの変化に伴う 50~200 万年のオーダーでの隆起・侵食速度の変化を、個々の地点において予測することは困難であり、今後 100 万年間、隆起・沈降が一定速度で継続することを仮定せざるを得ない。理論的には過去数十万年~数百万年間の隆起速度の変化の一般的な傾向を把握し、今後 100 万年間の隆起速度を予想することも考えられるが、そのためには過去数百万年間の隆起速度の変化を様々な年代と高度の指標を用いて把握する必要がある。しかし指標となる地形学的な基準面や地質学的な地層の層準は、その年代や形成高度の精度が低いこともあって、定量的な検討を行うことは難しい。

#### 2) 今後 100 万年間の氷期における海面低下量の変化

海面低下量に関しては、3.2.2 に述べたように、過去数十万年間に認められた氷期における海

水準の記録から、現海面-120m という想定はごく一般的に知られた値である。この値が大きく変化することがあるとすれば、その変化は海面高度を支配するミランコビッチサイクルと呼ばれる地球の公転軌道や自転に関連する天文学的サイクルの変化を意味するが、そうした天文学的变化を予測する地球科学知見は現在知られていない。

### 3) 総隆起量と侵食量の相違

侵食量については、3.1 式および 3.2 式において「隆起量と同じ量が侵食される」という最も厳しい条件が想定されている。これは氷期において大河川の河口部が海水準に一致するレベルでの侵食量を想定したものであり、一般の沿岸域での侵食量は、大河川流域に比較して緩和される。一般的な沿岸域における侵食量の大きさは、当該地域の具体的な気候条件・侵食条件を考慮した地形発達に関するシミュレーション等にもとづいて評価することが適切であり、確率論的検討は困難であると考えられる。

### 4) 最終間氷期海成段丘の年代対比（編年）の解釈の違い

海成段丘の年代対比（編年）の誤りは、テフラ（火山灰）の認定など段丘の編年に関連した様々なケースが想定される。MIS5e 相当海成段丘の場合には、後に詳述するように、この海成段丘がしばしば高位・低位の 2 面を形成するという特殊性を有することから、これに起因する段丘の年代対比の解釈の違いにより、隆起速度の見積が変わる懸念がある。しかし編年の解釈の違いによる誤差は、段丘の形成年代等が一律に変更されるような系統的な誤差を生むものであり、これも確率論的検討は困難であると考えられる。

### 5) 最終間氷期海成段丘の旧汀線高度の認定精度

旧汀線高度の認定誤差は、海成段丘が離水する前の海岸地形、および離水後の地形変化などの自然条件に起因する誤差と、旧汀線の認定に関する判定技術に起因する誤差により、隆起速度の見積りに誤差を生じることを意味する。例えば離水直前の海岸地形が崖海岸であれば、地形的な汀線は古海面より低い位置に認定される可能性があり、離水後に厚い火山灰が堆積すれば、地形的な汀線は古海面より高い位置を指示する可能性がある。ここで生じる誤差は、旧汀線高度の認定についての現地での詳細な調査（トレンチ調査・ボーリング調査など）が実施された段階では低減される可能性があるが、事前の机上調査段階での補正が難しいことから、確率論的に評価することが妥当とみられる。

以上のことから本研究では、東北北部～北海道南部の最終間氷期の海成段丘の高度に関する事例にもとづき、上記 1)～5)のうち 4)および 5)の誤差について検討を加え、さらに 5)の認定誤差に関する確率論的な評価を試みる。

### 3.3.2 最終間氷期の海成段丘に関する基礎的知見

最終間氷期以降の各種の海水準変動曲線<sup>10)</sup>と、海洋酸素同位体ステージおよび日本国内の模式地とされる南関東の海成段丘面の名称<sup>12)</sup>との関係を図-3.9に示す。

最終間氷期の海成段丘として、日本国内では MIS5a(南関東の三崎面相当, 約 8 万年前<sup>8)</sup>), MIS5c(南関東の小原台面相当, 約 10 万年前<sup>8)</sup>), および MIS5e(南関東の引橋面と下末吉面相当, 約 12.5 万年前<sup>8)</sup>)に相当する段丘の存在が広く知られている。各段丘形成時の海面高度は、概ね形成順に低くなることから、沿岸域では隆起速度が大きくなるにつれて、MIS5e→MIS5c→MIS5a の順に海成段丘が出現する。したがって MIS5e 海成段丘は日本国内沿岸域に広くみられるが、MIS5a 相当海成段丘は隆起速度が大きい地域に分布が限られる。

MIS5e 相当海成段丘は、この時期の海面高度が現海面+5~6m という高い精度で知られていることから、隆起速度の良好な指標となる反面、高位の下末吉面相当の段丘と低位の引橋面相当の段丘の 2 面が存在することが知られている。図-3.9A,B の海水準変動曲線では、低位の引橋面相当の海進ピークは明瞭に現れていないが、この点について貝塚ほか編<sup>13)</sup>は、「下末吉面形成後の海退期の途中で海面低下が中断した一時的安定期に形成された段丘と考えられる」とし、これに対比できる段丘が北海道地方や東北地方にも認められるとしている。

一方、MIS5c 相当海成段丘を形成した時期の海面高度については、様々な考えがあり一致をみていない<sup>9)</sup>。「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>は、隆起速度算定のための海面高度として現海面-15m と仮置きして与えているが、図-3.9A の各種の海水準変動曲線に示されるように、実際には現海面-5m~-25m の広いレンジの中に想定される。しかし、この段丘では「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>による日本国内の海成段丘のデータでは複数の段丘は認められてない(なお非常に隆起速度が大きい海外の事例では 2 面が識別されることがある<sup>6)</sup>)。

すなわち MIS5e 相当海成段丘は、形成時の海面高度が高い精度で知られている反面、2 面が識別されることに起因して年代対比(編年)の解釈の違いを生じる懸念がある。一方、MIS5c 相当海成段丘は、年代対比の解釈の違いを生じる懸念が少ない反面、形成時の海面高度の精度が低いという特徴がある。

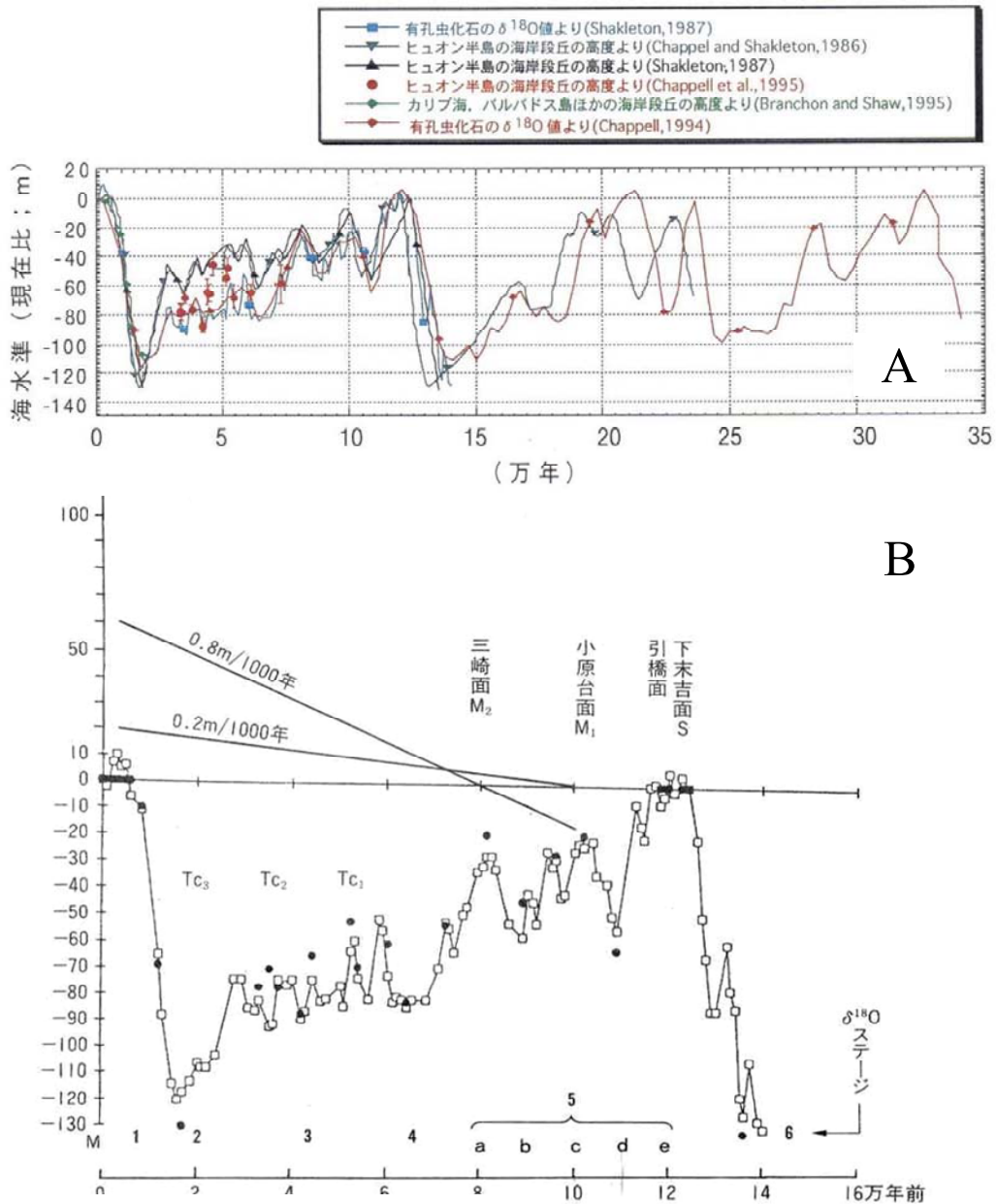


図-3.9 各種の海水準変動曲線と最終間氷期以降の海成段丘の名称

A: 核燃料サイクル機構<sup>10)</sup>により整理された異なる手法により推定された海水準変動曲線.

B: 貝塚<sup>12)</sup>による隆起速度の推定の説明.

●: パプアニューギニアのヒュオン半島のサンゴ礁段丘から得られた海面高度.

□: 深海底コアの海洋酸素同位体ステージ( $\delta^{18}O$ )による海面変化曲線.

海進・海退ピークを表わす海洋酸素同位体ステージと南関東の海成段丘の名称

(記号)が付記されている. 古海面高度とそれに対応する現在の海成段丘の旧

汀線高度を結ぶ直線の勾配が平均隆起速度を示す.

### 3.3.3 最終間氷期の海成段丘による隆起・侵食量の確率論的評価に関する検討の考え方

前述した MIS5e と MIS5c に相当する海成段丘の現れ方の違いを利用し、近接地点の MIS5c 相当海成段丘の旧汀線高度を指標として、MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度の認定誤差を統計的に検討する方法を以下に提案する。この方法は、菊地<sup>14)</sup>による「海成段丘の隆起速度と古海面高度の数学的解法」を応用したものである。

MIS5e と MIS5c に相当する海成段丘の高度、段丘の形成時期、形成時の海面高度、および隆起速度の間には以下の関係式が成り立つ。

$$R = (H5e - h5e) / T5e \quad (3.3)$$

$$R = (H5c - h5c) / T5c \quad (3.4)$$

ここで、

$R$  : 平均隆起速度

$H5e$  : MIS5e 相当段丘旧汀線高度

$h5e$  : MIS5e の古海面高度

$T5e$  : MIS5e の年代

$H5c$  : MIS5c 相当段丘旧汀線高度

$h5c$  : MIS5c の古海面高度

$T5c$  : MIS5c の年代

MIS5e と MIS5c に相当する海成段丘の旧汀線高度が、隆起速度が等しいとみられる隣接地点で計測されたとすると、(3.3)、(3.4)式より(3.5)式が得られる。

$$\begin{aligned} (H5e - h5e) / T5e &= (H5c - h5c) / T5c \\ H5e &= T5e / T5c \cdot H5c - T5e / T5c \cdot h5c + h5e \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.5 式に示される関係から、MIS5e と MIS5c に相当する海成段丘の旧汀線高度を両軸にプロットしたグラフを作成した時、そのプロットを近似する直線の勾配は両海成段丘の形成年代の比 ( $T5e / T5c$ )を示すことが判る。また、プロットの傾向や近似直線に対する偏差を検討することにより、前節 4)の最終間氷期海成段丘の年代対比(編年)の解釈の違いによる誤差と、5)の最終間氷期海成段丘の旧汀線高度の認定誤差を見積ることができる。

### 3.3.4 検討対象とした最終間氷期の海成段丘

以上の方法により海成段丘の旧汀線高度に関する認定誤差を検討するため、東北北部～北海道南部に分布する MIS5e, MIS5c 相当の海成段丘の旧汀線高度を「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>から抽出した(表-3.2).

この地域では、MIS5e 相当の海成段丘として高位の下末吉面相当と低位の引橋面相当の 2 面が識別されることがあり<sup>13)</sup>、さらに最終間氷期の海成段丘の旧汀線高度から知られる変動様式が「短波長で隆起速度 0.5～1m/ka の曲動地域」<sup>8)</sup>とされるほど MIS5e, MIS5c 相当の海成段丘の高度変化が大きい。したがって、隆起速度の異なる地域のデータを多数取得できるので、上記の検討に適している。ただし検討結果から得られる誤差に関する評価は、あくまでこの地域に固有のものであることを念頭に置く必要がある。

表-3.2 には近接地点で計測された MIS5e, MIS5c 相当の海成段丘の旧汀線高度のデータセットを提示したが、MIS5e 相当の海成段丘に 2 面が識別される場合には、低位の段丘を「MIS5e'」と標記した。

表-3.2 検討に用いた海成段丘(MIS5e・MIS5c 相当)の旧汀線高度

出典はすべて「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>による。

同文献において MIS5e 相当海成段丘が 2 面（高位・低位）識別されている場合には低位の段丘を MIS5e' とした。

図幅	位置	MIS 5c		MIS 5e' ※		MIS 5e	
		旧汀線番号	高度(m)	旧汀線番号	高度(m)	旧汀線番号	高度(m)
奥尻北部	滝ノ澗	5	84	-	-	13	122
	稲穂	6	90	-	-	15	124
	珠浦	8	70	-	-	17	105
大千軒岳	江良	5	45	4	75	3	95
	小平	9	45	8	75	7	90
松前	札前	3	50	2	88	1	111
	建石	8	40	7	65	6	90
函館	当別川	8	52	-	-	7	66
	サラキ崎	13	40	-	-	12	75
鱒ヶ沢	田野沢	7	55	-	-	6	90
深浦	広戸	4	55	3	86	2	97
	横磯	9	36	8	67	7	85
能代	畑谷	3	24	2	44	1	57
戸賀	北浦	10	47	-	-	16	79
	入道崎	9	44	-	-	15	78
飛島	法木	6	42	-	-	7	60
大間		-	20-25	-	35-40	-	50

### 3.3.5 旧汀線高度の誤差と隆起・侵食量の確率論的評価

#### 1) 年代対比（編年）に関する検討

表-3.2 に整理されたデータセットについて、MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度を指標として、MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度を以下の 3 種類に区分してプロットすると、図-3.10A に示すような関係が得られる。

- (1) MIS5e'(低位) : 南関東の引橋面相当とみられる相対的に低位の面の旧汀線高度
- (2) MIS5e (高位) : 南関東の下末吉面相当とみられる相対的に高位の面の旧汀線高度
- (3) MIS5e (未識別) : 2 面が識別されていない場合の旧汀線高度

MIS5e 相当海成段丘に 2 面が識別されている場合には、図上でひとつの MIS5e 相当面に対し、MIS5e'(低位)と MIS5e (高位)の 2 点がプロットされる。

この図から明らかなように、MIS5e'(低位)と MIS5e (未識別)は、一連のトレンドを形成する傾向があるのに対し、MIS5e (高位)はこれとは独立したトレンドを形成する傾向がある。これは MIS5e'(低位)と MIS5e (未識別)が同一時期に形成された海成段丘であり、MIS5e (高位)がこれとは別の時期に形成された海成段丘であることを示唆する。

一方、「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>は、MIS5e (高位)と MIS5e (未識別)に対して形成年代(12.5 万年)と古海面高度(現海面+5m)を与えて隆起速度を算定し、MIS5e'(低位)については隆起速度の算定を行っていない。すなわち MIS5e (高位)と MIS5e (未識別)を同一の段丘と認定している。すなわち「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>によるこの地域の年代対比（編年）の一部に解釈の違いがある可能性を示している。

この認定の解釈の違いは、プロットの近似線と 3.5 式に対応する理論直線を比較することにより、さらに定量的に把握することができる(図-3.10B)。

MIS5e (高位)の近似線と MIS5e'(低位)と MIS5e (未識別)を同一時期の海成段丘とみなした時のプロットは、それぞれ 3.6 式と 3.7 式により近似される。

$$H5e (H) = 1.65 \cdot H5c + 18.8 \quad (3.6)$$

$$H5e'(L) = 1.24 \cdot H5c + 17.2 \quad (3.7)$$

一方、「日本の海成段丘アトラス」<sup>8)</sup>が隆起速度の算定に用いた海成段丘の形成時期(MIS5e ; 12.5 万年, MIS5c ; 10.0 万年)と古海面高度(MIS5e ; 現海面+5m, MIS5c ; 現海面-15m)を(4.2.1.3)式に代入して得られる理論直線は 3.8 式である。

$$H5e = 1.25 \cdot H5c + 23.8 \quad (3.8)$$

理論直線(3.8)の勾配は、近似式(3.6)式より近似式(3.7)に近い値を示しており、3.7 式の勾配が



両海成段丘の形成年代の比( $T_{5e} / T_{5c} = 1.25$ )にほぼ一致することから, MIS5e'(低位)と MIS5e (未識別)が最終間氷期最盛期の MIS5e 相当の海成段丘に対比される可能性が高いことが判る.

ここでさらに, MIS5c の古海面高度が現海面-5m~-25m の広いレンジの中に想定されること<sup>10)</sup>を考慮して, これを仮に現海面-10m とすると 3.8'式が得られ, ほぼ 3.7 式に一致する.

$$H_{5e} = 1.25 \cdot H_{5c} + 17.5 \quad (3.8')$$

一方, この地域の MIS5e (高位)の段丘は, MIS5c との形成年代の比(1.65)が 1.25 を大きく上回ることから, 最終間氷期以前の海成段丘の可能性が高い.

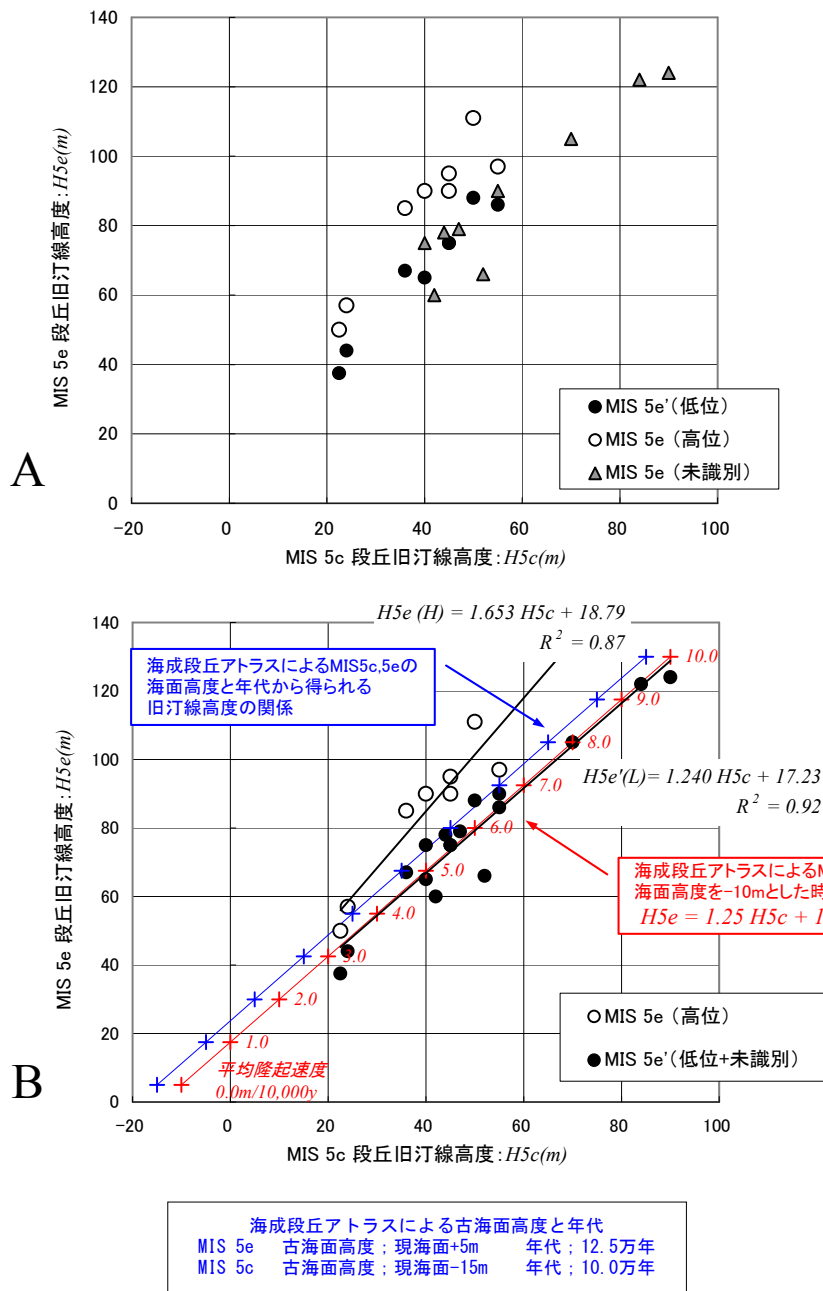


図-3.10 MIS5c 海成段丘の旧汀線高度を指標とした MIS5e 海成段丘の旧汀線高度

A,B 二つの図の解釈については本文参照

### 3.4 まとめ

以上の検討にもとづき、MIS5e'(低位)と MIS5e (未識別)を、同一の最終間氷期最盛期の MIS5e 相当の海成段丘とみなし、旧汀線高度の認定誤差と、そこから導かれる最大侵食量の確率論的評価を導く。

図-3.10B において MIS5e'(低位)と MIS5e (未識別)のプロットは、その近似線(3.7)に対して偏差を示している。ここでは近似的に MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度が真の値を示すと仮定して、この偏差を MIS5e 相当海成段丘の認定誤差とみなすこととする。

ここで近似線に対する偏差は、厳密には 1) MIS5c 相当海成段丘形成以降と MIS5e 相当海成段丘形成以降の平均隆起速度の差、2) 旧汀線高度を計測した 2 地点の隆起速度の差による誤差を含んでいるが、以下の理由からほぼ無視することができる。

- 1) 平均隆起速度の年代差については、MIS5c 相当海成段丘の形成年代が 10.0 万年前、MIS5e 相当海成段丘の形成年代が 12.5 万年前であることを考慮すると、その差 2.5 万年間に生じた平均隆起速度の変化は無視できるほど小さいと考えられる。
- 2) 平均隆起速度の地点差については、これが無視できないほど大きいとすると、近似式に対する偏差は、隆起速度の大きい地域ほど大きいはずである。しかし、図-3.10B において、各プロットの近似線に対する偏差の大きさは、隆起速度に特に依存しないことから、偏差はあくまで海成段丘が離水する前の海岸地形、および離水後の地形変化などの自然条件に起因する誤差と、旧汀線の認定に関する判定技術に起因する誤差を反映したものとみられる。

プロットの近似線に対する  $H5e$  軸方向の偏差を、MIS5e 相当海成段丘の旧汀線高度の認定誤差とみなしてヒストグラムに示した(図-3.11)。この図から、ヒストグラムは概ね正規分布確率関数 ( $\sigma = 6.51\text{m}$ ) により近似されるものと判断される。

旧汀線高度の標準偏差に対応する(3.2)式の 100 万年間の総侵食量の標準偏差は、 $52.1\text{m}(6.51\text{m} \times 1,000,000\text{y} / 125,000\text{y})$ である(図-3.12)。この値を旧汀線高度の認定誤差とみなし、「評価期間に地下施設が地表に露出しない深度」の確率論的評価に用いることが可能となる。

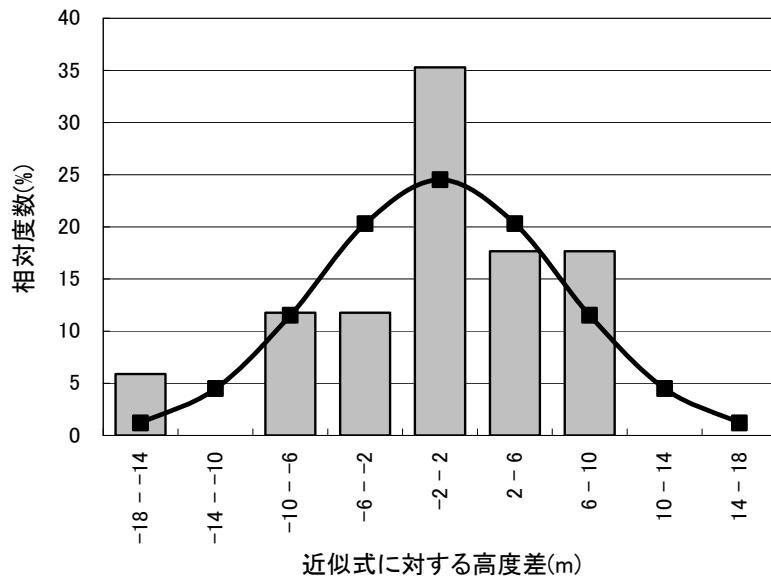


図-3.11 MIS5e 海成段丘の旧汀線高度の決定論的評価式に対する相対誤差と正規分布確率密度関数による近似  
データ数は 17, 正規分布確率密度関数の標準偏差は 6.51m となる.

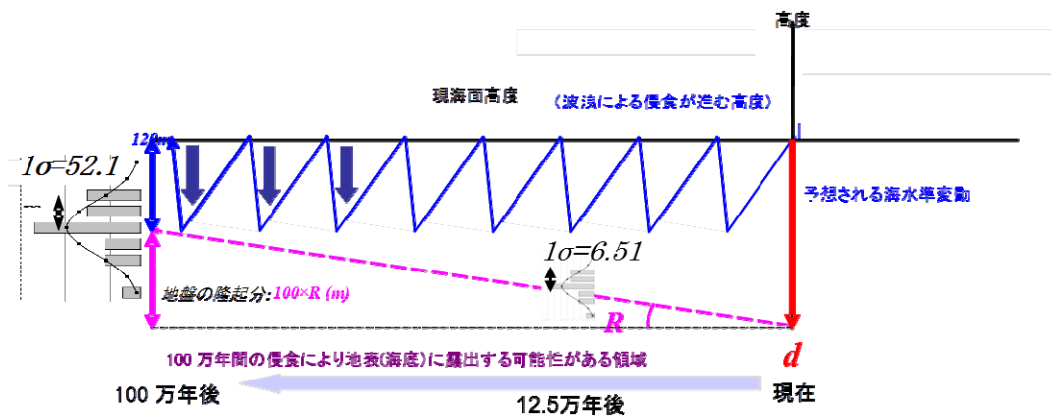


図-3.12 100 万年間の総侵食量に関する確率論的評価の概念

### 第3章の引用文献

- 1) 原子力発電環境整備機構(2004): 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料, 2004.6
- 2) 井出哲(2017): 絵でわかる地震の科学, 株式会社講談社, 2017.2
- 3) 太田陽子(1999): 変動地形を探る I-日本列島の海成段丘と活断層の調査から-, 公益社団法人東京地学協会 地学雑誌 108(6), 770-772, 1999
- 4) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術WG: 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術WGとりまとめ), 2018.4
- 5) 太田陽子・小池一之・鎮西清高・野上道男・町田洋・松田時彦編(2010): 日本列島の地形学, 東京大学出版会, pp.113-123.
- 6) 藤原治・柳田誠・三箇智二・守屋俊文(2005): 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.113-124.
- 7) 町田洋・大場忠道・小野昭・山崎晴雄・河村善也・百原新編(2003): 第四紀学, 朝倉書店, pp.6-10.
- 8) 小池一之・町田洋編(2001): 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会 (CD-ROM).
- 9) 米倉伸之・貝塚爽平・野上道男・鎮西清高編(2001): 日本の地形 1 総説, 東京大学出版会, pp.90-100.
- 10) 核燃料サイクル機構(1999): 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, 一地層処分研究開発第二次取りまとめ-, 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, pp. II-168-II-175.
- 11) 土木学会原子力土木委員会地下環境部会(2006): 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会, pp.39-45.
- 12) 貝塚爽平(1988): 発達史地形学, 東京大学出版会, pp.212-217.
- 13) 貝塚爽平・小池一之・遠藤邦彦・山崎晴雄・鈴木毅彦編(2000): 日本の地形 4 関東・伊豆小笠原, 東京大学出版会, pp.25-36.
- 14) 菊地隆男(1988): 最終間氷期以降の古海面高度—海成段丘の隆起速度と古海面高度の数学的解法—, 地形, 9, pp.81-104.



# Chapter 4

## リスク影響範囲の可視化

### 4.1 はじめに

断層の将来にわたる伸展，分岐・派生による影響範囲や隆起・侵食の影響範囲，新規火山形成の確率など，将来にわたる自然事象の影響範囲を可視化することは，それらの影響範囲を視覚的にかつ空間的に把握することが可能となり，高レベル放射性廃棄物の立地場所の検討やスクリーニングする際に非常に有益な判断資料となる。

例えば，前章で示した断層の影響範囲は，断層の伸展長とそのときの分岐・派生幅で求めることが計算上可能であることを示したが，実際の断層で検討をした際にどのあたりまでそれらの影響が及ぶかは，直感的に判断することが難しい。加えて，新規火山の発生確率など他の自然現象の影響範囲を併せて考えるためには，可視化の技術が必要不可欠となる。

断層の影響範囲の確率や新規火山発生の確率は，お互いの確率が独立して存在していると考えられるため，それらの影響範囲は個別に求めた上で空間情報の重ねあわせで総括的な確率の計算が可能となる。

このような計算結果を位置情報として空間的な広がりで見表するには GIS(Geographic

Information System)を用いた手法が最も適していると考えられる。

そこで、本章では、前章までに検討した自然現象の影響範囲を GIS により可視化する手法の検討を行った。

## 4.2 自然現象のリスク領域の可視化手法

### 1)断層の影響範囲の可視化手法

断層のリスク範囲は、断層の伸展確率と断層の分岐・派生確率によって求めることができる。

断層が伸展する確率  $Fault\_L(Pr)$ と断層が分岐・派生する確率  $Fault\_W(Pr)$ はお互いに独立しているため、任意地点における断層が影響する確率は、 $Fault\_L(Pr) \cap Fault\_W(Pr)$ で求めることが可能である。つまり、

$$\begin{aligned} Fault\_E(Pr) &= Fault\_L(Pr) \cap Fault\_W(Pr) \\ &= Fault\_L(Pr) \times Fault\_W(Pr) \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、

$Fault\_E(Pr)$  : 任意地点における断層の影響確率

$Fault\_L(Pr)$  : 現在知られている断層端からの任意期間における断層の伸展確率

$Fault\_W(Pr)$  : 断層長にともなう断層の分岐確率

である。

任意地点における断層の伸展確率は、2章で述べた(2.14)式で伸展確率を計算する。一方、断層の分岐・派生確率は(2.22~2.26)式で求めた断層長に伴う断層の分岐・派生比率から求まる分岐・派生確率で算出する。

両者の確率の積で任意地点における断層の影響確率の算出が可能となる。

### 2) 火山影響範囲の可視化手法

火山の新規発生に関する確率論的評価手法は、核燃料サイクル開発機構<sup>1)</sup>によると、空間モデルと時空間モデルの二つの計算手法が示されている。本研究では、火山の新規発生については、既往の研究成果を活用したうえでの可視化を考えることとする。

空間モデルは火山の分布密度をカーネル関数によって求め、単位時間あたりの火山の発生確率の分布を計算するものである。一方、時空間モデルは最近隣法によるモデルであり、地点 P の火山の分布密度と発生頻度を考慮した計算である。



空間モデルでは対象領域における火山の発生頻度を一律に仮定しているため、新しい火山と古い火山の確率に対する重み付けが等価である。これに対して最近隣法による時空間モデルは火山の分布密度と発生頻度の両方を考慮している（原子力発電環境整備機構<sup>1)</sup>）とされている。

#### ①空間モデルの計算式

空間モデルの計算式は、例えばある地点  $p$  の周辺に分布する火山までの距離を  $d_i$  とすると、地点  $p$  のカーネル関数は、

$$k(p) = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{d_i}{h}\right), \frac{d_i}{h} < 1 \quad (A)$$

となる。ここで、

- $k(p)$  : 任意地点  $p$  におけるカーネル密度
- $h$  : 取り込み半径 (smoothing coefficient)
- $d_i$  : 任意地点  $p$  から火山までの距離

である。

ここで、取り込み半径内に分布する火山 ( $n$  個) をすべて考慮すると、地点  $p(x,y)$  における単位面積あたりの火山の分布密度  $\lambda_{x,y}$  は、

$$\lambda_{x,y(p)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h^{-2} k(p) \quad (A)$$

となる。ここで、

- $\lambda_{x,y(p)}$  : 地点  $p(x,y)$  における単位体積あたりの火山の分布密度
- $n$  : 取り込み半径内に分布する火山の個数

である。

次に、地点  $p$  を中心とした  $a$  ( $\text{km}^2$ ) の領域において、時間  $t$  (年間) において、火山が発生する確率は、

$$P[N \geq 1] = \lambda_{x,y(p)} \cdot \lambda \cdot t \cdot a \quad (A)$$

となる. ここで,

- $P$  : 地点  $p(x,y)$  における火山の発生確率
- $\lambda t$  : 火山の発生頻度 (単位時間あたりに発生した火山の数)
- $t$  : 評価期間
- $a$  : 解析エリア

である.

## ②時空間モデルの計算式

時空間モデルの計算式は, 地点  $p(x,y)$  の周辺に  $m$  個の火山が存在する場合の単位時間・単位面積あたりの火山の分布密度 ( $\lambda_{x,y}(p)$ ) は,

$$\lambda_{x,y,t}(p) = \frac{m}{\sum_{i=1}^m u_i t_i}$$

となる. ここで,

- $\lambda_{x,y,t}(p)$  : 地点  $p(x,y)$  における火山の分布密度
- $m$  : 地点  $p(x,y)$  の周辺の火山数
- $u_i$  : 地点  $p(x,y)$  から火山までの最短距離を半径とする円の面積
- $t_i$  : 火山が発生してから現在までの時間

である.

さらに, 火山の発生する確率は, ポアソン分布を適用することにより

$$P[N \geq 1] = 1 - \exp[-t \cdot a \cdot \lambda_{x,y}(p)]$$

となる. ここで,

- $P$  : 地点  $p(x,y)$  における新規火山の発生確率 (時空間モデル)
- $t$  : 評価期間
- $a$  : 解析エリア

である.

### 3) 隆起・侵食の影響範囲の可視化手法

隆起・侵食の影響範囲に関しては、断層や火山の影響範囲と比べると相対的に非常に狭い範囲で段丘面高度が異なることが予想される。例えば、現在知られている河岸段丘高度変化にもとづく汀線高度の分布は断片的である。さらに、今回検討した確率論は海岸段丘による評価であり、海岸線沿いの領域の評価には適しているが、内陸部の評価には適用できない。このため、内陸部では内陸部の隆起・侵食を考慮した新たな基準を作成する必要があると考えられる。

よって、断層や火山の影響評価範囲の評価と隆起・侵食による影響範囲の可視化はそれらのスケールに応じて、段階的に評価することが適当であると考えられる。つまり、断層や火山の影響範囲は陸域の広い範囲の評価が実施可能であるのに対し、海成段丘の高度を用いた隆起・侵食の影響範囲の可視化については、海岸線のみの狭い範囲の評価となる。この評価範囲を陸側へ外挿することは適切な評価とは考え難いため、内陸を含めた地域の隆起・侵食の影響範囲を可視化するためには、さらなる検討が必要となる。

### 4) 自然現象のリスク範囲の可視化手法

処分位置選定に際し、自然現象のリスク範囲を可視化するためには、以下の3段階の手順によるステップバイステップでの手法を提案する。

#### (1)大局的なリスク影響範囲の可視化

断層ならびに火山の影響範囲の可視化

#### (2)局所的なリスク影響範囲の可視化

隆起・侵食、リニアメント、地質構造などの影響範囲の可視化

#### (3)個別地点のリスク影響範囲の可視化

母岩の分布状況や物性などの不確実性の可視化

#### (1)大局的なリスク影響範囲の可視化

大局的なリスク影響範囲とは、例えば北海道や九州などの広範囲の領域におけるリスクの可視化である。日本の断層や第四紀火山の情報はデータベース化されているので、それらの情報に基づいて大局的な影響範囲を可視化する。可視化の手法については前述の通りであり、具体的な手法や表示例については後述する。

この可視化手法によって得られた結果に基づき、大局的なスクリーニングが可能になると考えられる。つまり、断層が直接伸展する領域あるいは分岐する領域に処分場を設置することは不適切であるため、そのような領域を事前に評価する必要がある。そのため、最初の段階として大局的な領域で処分場設置場所のスクリーニングを実施することが適切で

あると考えられる。

## (2)局所的なリスク影響範囲の可視化

局所的なリスク影響範囲とは、大局的なスクリーニングによって選定したリスクが少ない地域でのリスクの可視化である。海岸線であれば、今回検討した隆起・侵食の確率論的手法を用いて評価し、大局的な断層評価では抽出しきれないリニアメントや局所的な地質構造などについて確率的な影響範囲を可視化するものである（今回の検討では未実施）。

この可視化手法によって得られた結果に基づき、局所的なスクリーニングが可能になり、より具体的な地域が絞り込まれると考えられる。

## (3)個別地点のリスク影響範囲の可視化

個別地点のリスク影響範囲とは、局所的なスクリーニングにより絞り込まれた具体的な地域でのリスクの可視化である。例えば、処分施設で重要な機能が期待される自然バリアは構成する岩石の分布状態や物性状態に依存する。しかしながらそれらの分布や物性などの情報はごく限られた情報源からの補間あるいは外挿であり、少なからず不確実性を伴う情報である。

地質情報は与える結果に重要な役割を持つ情報であるにもその不確実性をより分かり易く表現する手法を検討することが重要であると考えられる。

### 4.3 大局的なリスク評価の可視化の試算

今回実施した確率的な評価手法に基づき、北海道を例とした大局的なリスク評価の可視化を試算した。なお、局所的なリスク評価ならびに個別地点のリスク評価については検討していない。

#### 4.3.1 断層の影響範囲の具体的計算手法

断層の影響範囲の確率は、前述した評価式を用いて計算した。幅は片方 30km まで計算を行った。なお、計算を行う際には断層から 1km ごとの確率を算出した。

分岐幅は断層長の比から算出しているため、伸展により断層長が長くなると分岐幅も大きな値を示すことになる。従って、断層長が最も短い時の伸展幅が最も小さく、逆に最も断層長が長いときに伸展幅が最も大きな値を示すこととなる。今回検討した断層の伸展確率には時間軸が設定されているが、分岐幅単独では時間軸の設定が行われていない。しかし、分岐幅を伸展確率と組み合わせることで時間軸の設定が可能となる。

具体的な計算手法としては、伸展距離に応じた分岐幅の確率を前述した断層が伸展する確率とそれが分岐する確率の積で求めることができ、今回の計算では片側伸展を 100km まで計算しているため、片側伸展距離 1km ごとに分岐幅の確率を計算し、その結果を重ね合わせ確率の最大値を算出することで全体の確率を導いている。

なお、断層の影響範囲を算出する際に、断層の上盤と下盤で分岐確率が異なるため両者は別々に計算を行うこととなる。この計算手法を図-4.1(1)~(3)に概念的に示し、以下に詳述する。

#### 1)断層のモデル化から計算グリッドの設定

##### Step1：断層のモデル化

既知の断層を GIS 上で計算するために、断層のモデル化を行った。具体的には後述のように産総技術研究所 HP に記載されている、活断層の活動セグメントの大局的な幾何学形状をトレースし、断層のモデル化を実施した。

##### Step2：断層の伸展方向の予測

モデル化した断層端から将来にわたりどの方向へ断層が伸展するかを予想する必要がある。断層の全体的な伸びの方向を総合的に判断して伸びの方向を予測する。

##### Step3：計算グリッドの設定

モデル化した断層端から断層の伸展方向に沿って影響範囲を計算するグリッドを作成する。断層の両端から任意の範囲でグリッドを設定し、断層の上盤、下盤などそれぞれのグリッドで計算を行う。

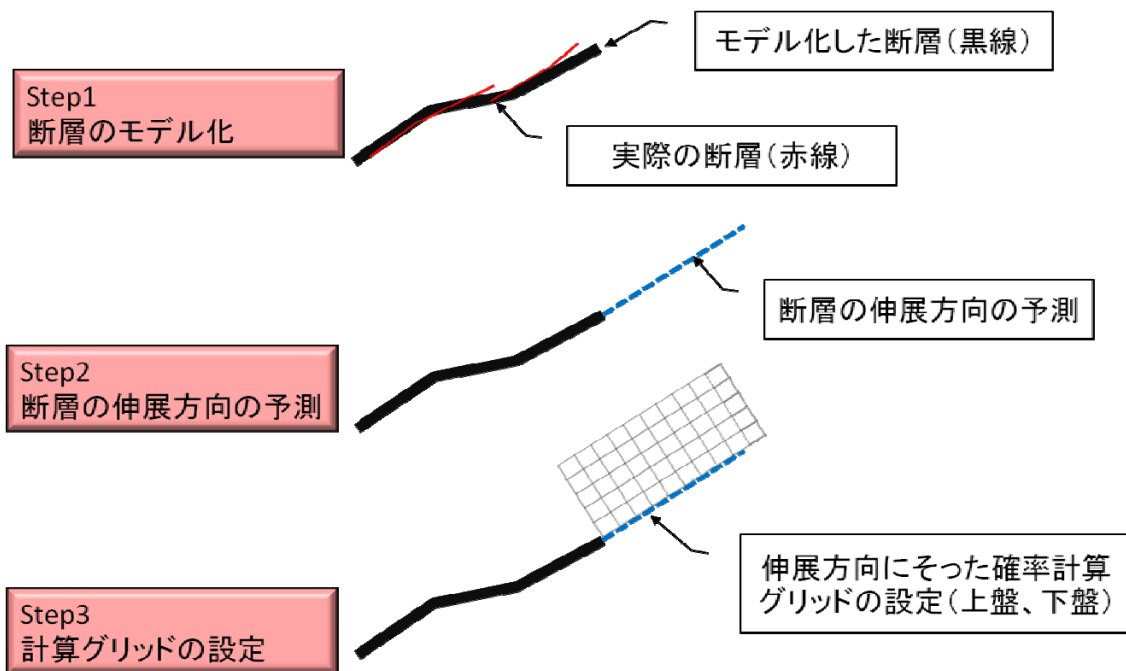


図-4.1(1) 断層の影響確率算出手法その1  
断層のモデル化から計算グリッドの設定まで  
上記の概念図では片方の断層端から上盤のみの表示を行っている  
実際には上盤と下盤をそれぞれ両端から行っている

2) 計算グリッド内の計算手法

設定した断層の影響範囲を検討するグリッド内の計算手法の概念図を図-4.1(2)に示す。図に示すように、断層の伸展距離の確率を計算し、その距離に応じた分岐確率を算出する。両者の積で伸展距離に応じた断層の影響範囲の確率を求める手法である。具体的には図に示すように例えば、1km ごとの伸展確率とそのときの分岐確率を求めていく手法である。

最後に、図-4.1(3)に示すように各断層長で求めた影響範囲の確率値を重ね合わせて、同一地点における確率の最大値を求める。

これらの計算をグリッドごとに行い任意地点における断層の影響範囲の確率を算出する手法である。

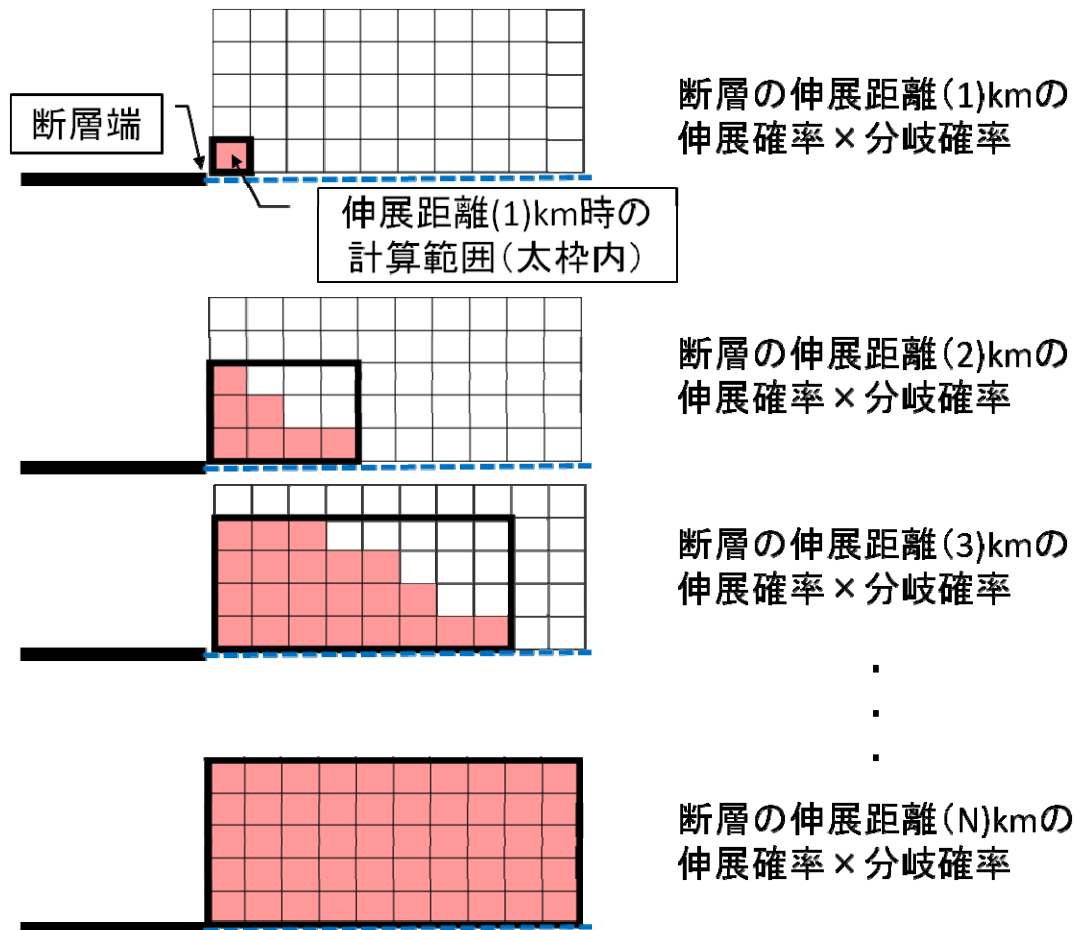


図-4.1(2) 断層の影響確率算出手法その2  
計算グリッド内の計算手法

任意地点 (X,Y) における断層の影響確率  
 $= \text{Max}\{(\text{断層の伸展距離}(1)\text{kmの伸展確率} \times \text{分岐確率}); (\text{断層の伸展距離}(N)\text{kmの伸展確率} \times \text{分岐確率})\}$

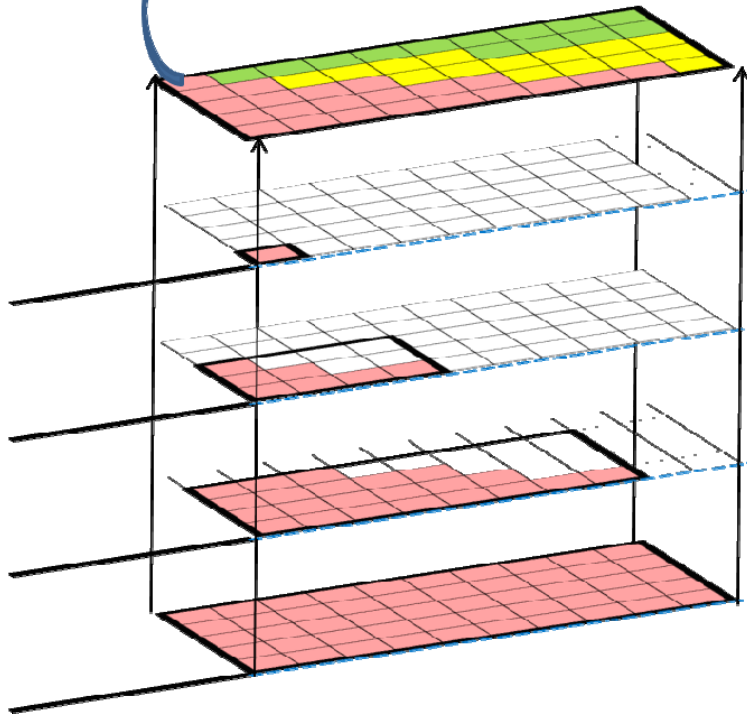


図-4.1(3) 断層の影響確率算出手法そ

任意地点 (X,Y) における断層影響確率

#### 4.3.2 既往資料に基づいた具体的な試算例

##### 1) 使用したデータ群

北海道を例として具体的な断層について、大局的な影響範囲の確率の試算を行った。試算した断層は、表-4.1 に示すように産業技術総合研究所の HP<sup>2)</sup>に明記されている活断層セグメントを例に実施した。

産総研活断層データベースには、活断層セグメントの位置や長さ、種類などの情報が示されている。

これらの情報のうち、断層の伸展の計算に用いるパラメータは、断層型（正断層，逆断層，横ずれ断層），変位の向き，断層の長さ(km)，平均変位速度(m/千年)である。これらのパラメータを前章で示した伸展の評価式に当てはめて，将来の断層長の確率を求めることとした。



表-4.1 具体的な計算に用いた活断層セグメントの情報一覧（産総研活断層 HP より引用）

活動セグメント番号	活動セグメント名	一般走向	一般傾斜	長さ [km]	断層型	変位の向き(隆起側)	平均変位速度 [m/千年]
001-01	羅臼岳活動セグメント	N 40° E	60 ° -	13	正	-	1
002-01	古多糠活動セグメント	N 40° E	45 ° W	23	逆	W	0.3
003-01	峰浜活動セグメント	N 40° E	45 ° E	14	逆	E	1
004-01	開陽活動セグメント	N 40° E	45 ° W	18	逆	W	0.3
004-02	養老牛活動セグメント	N 40° E	45 ° W	7	逆	W	0.1
005-01	網走湖東方活動セグメント	N 0° E	45 ° E	16	逆	E	0.3
006-01	士幌活動セグメント	N 10° E	30 ° E	62	逆	E	0.4
006-02	途別川活動セグメント	N 0° E	30 ° E	40	逆	E	0.3
006-03	音更活動セグメント	N 0° E	30 ° E	18	逆	E	0
007-01	光地園活動セグメント	N 30° W	45 ° E	26	逆	E	0.1
008-01	東問寒別活動セグメント	N 10° E	45 ° W	20	逆	W	0.2
009-01	富良野活動セグメント	N 10° E	45 ° W	28	逆	W	0.6
009-02	麓郷活動セグメント	N 20° E	45 ° E	23	逆	E	0.6
009-03	下金山活動セグメント	N 10° E	45 ° W	4	逆	W	0.1
010-01	吉住活動セグメント	N 40° W	45 ° E	13	逆	E	0
011-01	荻伏活動セグメント	N 60° W	45 ° S	13	逆	S	0.1
012-01	幌延活動セグメント	N 20° W	45 ° E	25	逆	E	0.3
013-01	増毛山地東縁活動セグメント	N 10° E	45 ° W	61	逆	W	0.8
014-01	当別活動セグメント	N 0° E	45 ° W	29	逆	W	0.3
015-01	馬追活動セグメント	N 10° E	30 ° E	66	逆	E	2.3
015-02	勇払活動セグメント	N 10° W	30 ° E	24	逆	E	0.5
017-01	軽舞活動セグメント	N 30° W	45 ° W	13	逆	W	0
018-01	黒松内活動セグメント	N 10° W	30 ° W	34	逆	W	1
018-02	旭浜活動セグメント	N 20° E	45 ° W	6	逆	W	0.5
019-01	函館西活動セグメント	N 10° E	45 ° W	24	逆	W	0.4
239-01	沼田一砂川活動セグメント	N 10° E	45 ° E	37	逆	E	0.3
240-01	野幌活動セグメント	N 10° W	45 ° W	21	逆	W	0.2
264-01	サロベツ北活動セグメント	N 10° W	45 ° E	21	逆	E	0.5
265-01	サロベツ南活動セグメント	N 10° W	45 ° E	11	逆	E	0.3
266-01	八雲活動セグメント	N 10° E	45 ° W	11	逆	W	0.4
305-01	尻別川活動セグメント	N 0° E	45 ° W	22	逆	W	0

## 2) 断層の影響範囲確率の具体的計算事例

断層の影響範囲確率を具体的に計算するために、以下の手順による作業を行った。

- ①現在の断層位置のモデル化
- ②断層端からの伸展方向の推定
- ③進展長とそれに対する確率の計算

### ①現在の断層位置のモデル化

現在の断層は断層の端部が分岐していたり、断層がステップしていたりして、必ずしも一本の直線で表現できるものではない。これに対して、産総研活断層データベースから求まるセグメントの断層長や平均活動度は、複数の断層群を大局的な断層の幾何学形状として捕らえた上で表現している。よって、現在知られている活断層も大局的な幾何学形状としてモデル化する必要がある。そこで、産総研活断層データベースに示されている大局的な幾何学形状をスキャニングしその位置をトレースし、各断層セグメントを GIS 上で表現した。

このようにして表現した各断層セグメントを図-4.2(1)に示す。図に示すように北海道地方では 31 のセグメントをモデル化した。なお、図-4.2(2)は新編日本の活断層<sup>3)</sup>による第四紀断層とモデル化したセグメントの両方を示している。図に示すように、日本の活断層に示されている断層のいくつかは産総研活断層データベース上で表現されていないため、いくつかの第四紀断層はモデル化していないことに注意が必要である。

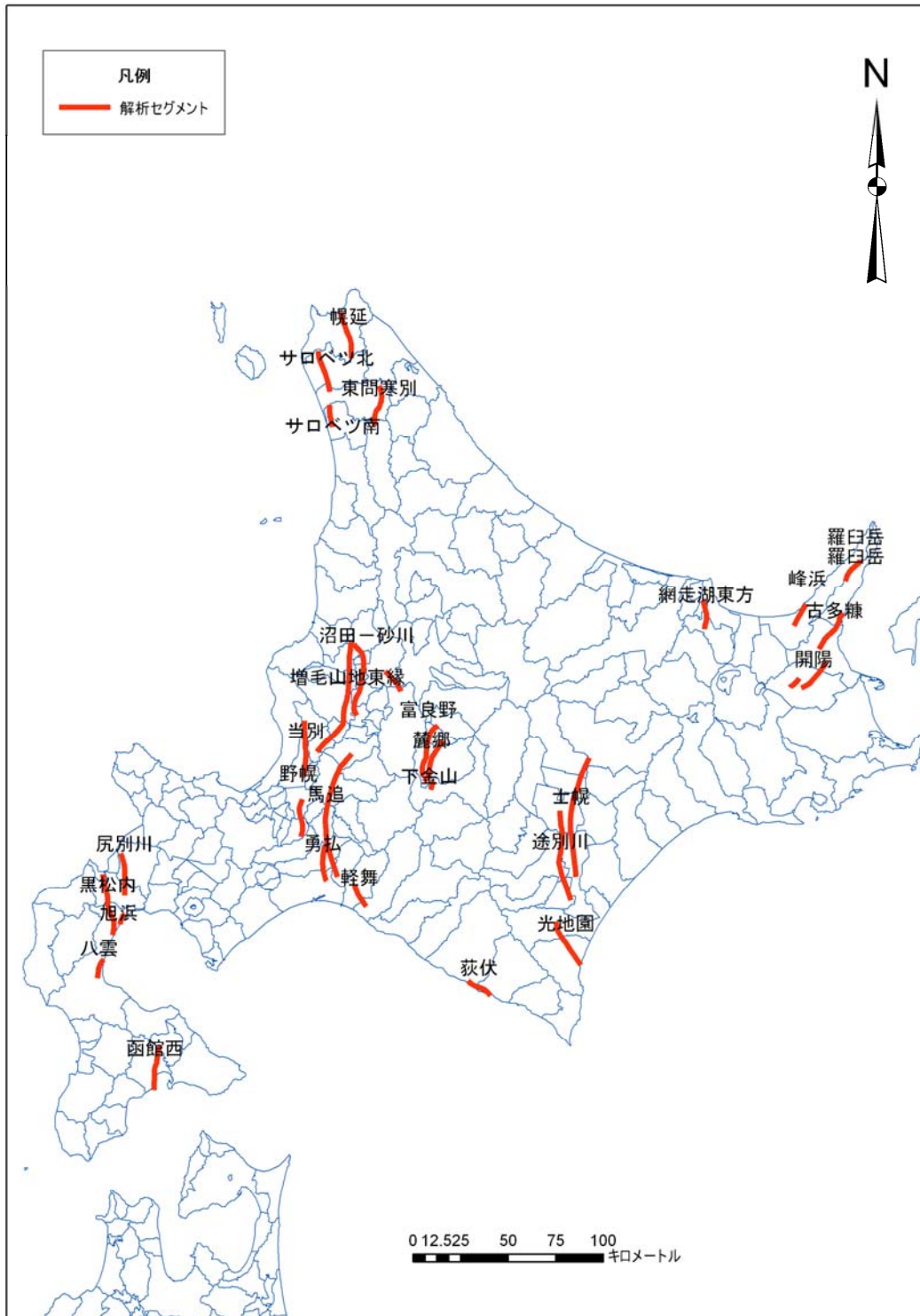


図-4.2(1) モデル化した活断層セグメント位置図



## ②断層端からの伸展方向の推定

断層の伸展を考慮する際に、どの方向へ断層が伸展するかを検討する必要がある。断層の端部の方向をそのまま延長すると、端部における断層の延びの方向が重要になり、必ずしも断層の全体方向と調和しないことが明らかとなった。例えば、弓状の幾何学形状を示すものや端部で屈曲しているものなどである。

そこで、断層の端部の局所的な方向をそのまま延長するのではなく、断層の大局的な方向などを総合的に検討し断層の延びの方向を決定した。図-4.3に決定した断層の延びの方向を示す。

図は断層端からの延長距離 100km までの直線状に延長すると仮定したものであり、その直線に沿って断層の影響確率を算出した。



### ③進展長とそれに対する確率の計算

断層の延長方向の確率の計算は、前述した(2.14)式で求めた。計算に際し断層端から100kmまでの距離の計算を行うこととした。

計算結果を図-4.4(1)～(16)に示す。図は各断層セグメントから求めた片側伸展距離100kmまでの1Ma後における伸展確率である。なお、計算を行い際には断層端から1kmごとの確率を算出している。

計算を行った活動セグメントのうち、断層型は羅臼岳活動セグメントのみが正断層であり、他の活動セグメントはすべて逆断層である。また、音更活動セグメント、吉住活動セグメント、軽舞活動セグメント、尻別川活動セグメントにおいては平均変位速度が「0」である。このため、延長方向への伸展確率が算出できていない。

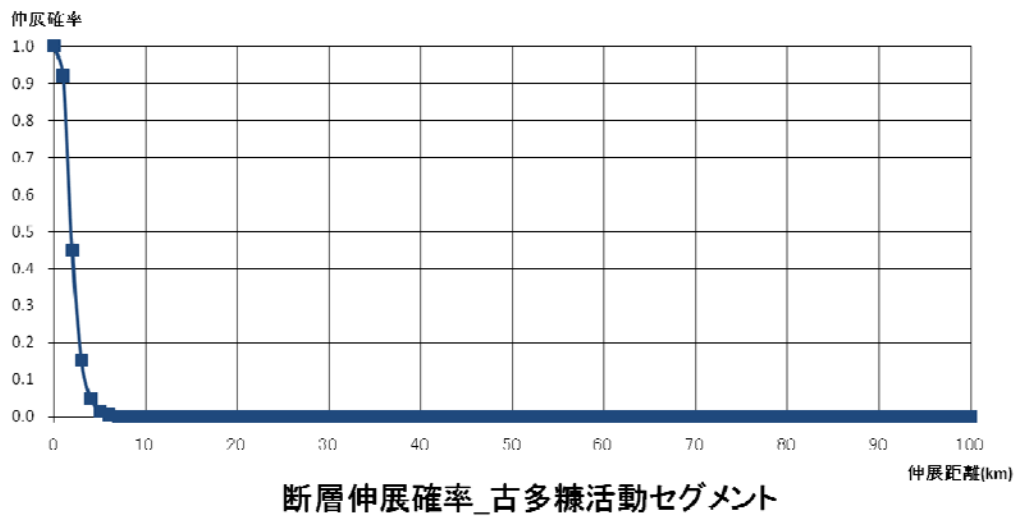
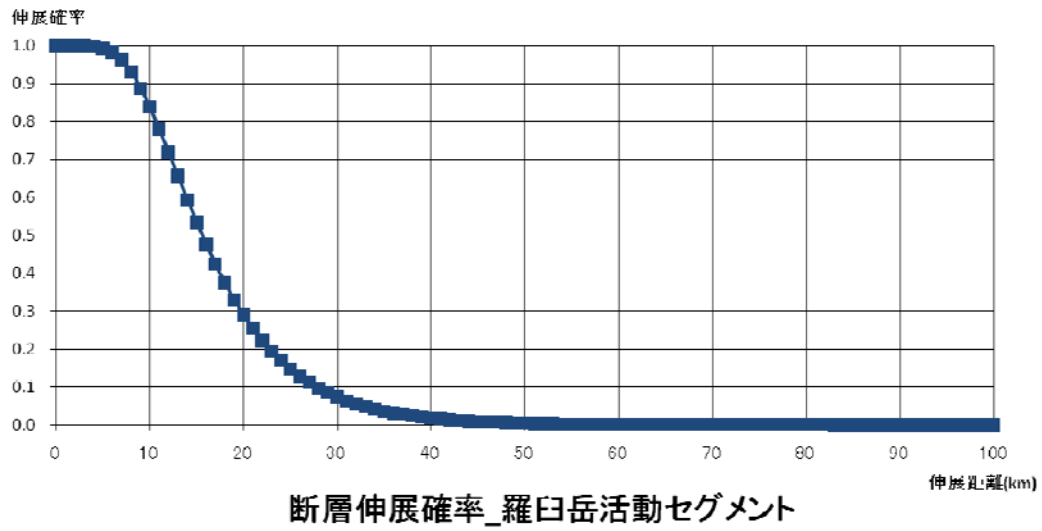


図-4.4(1) 羅臼岳活動セグメントならびに古多糠活動セグメントの1Ma後の伸展確率



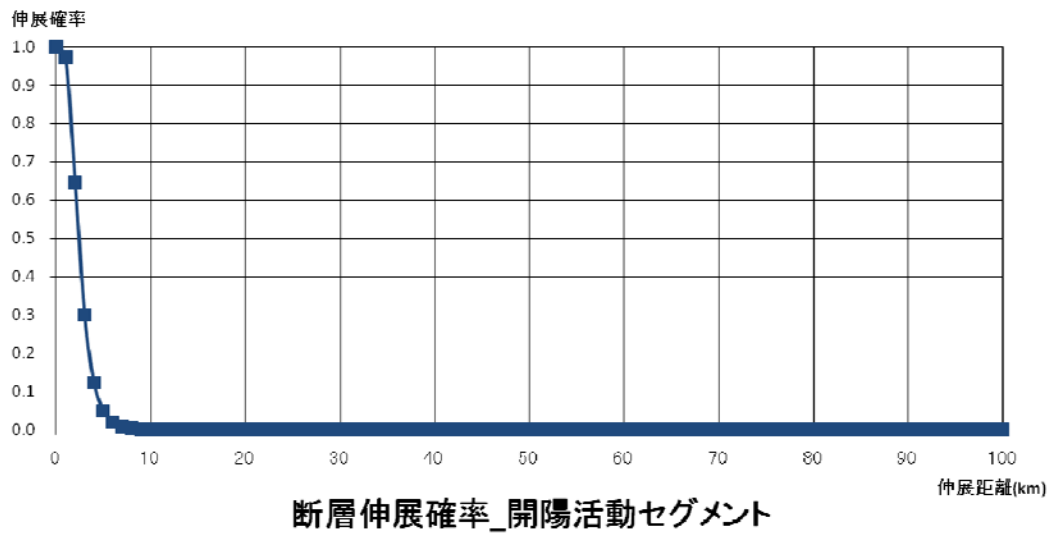
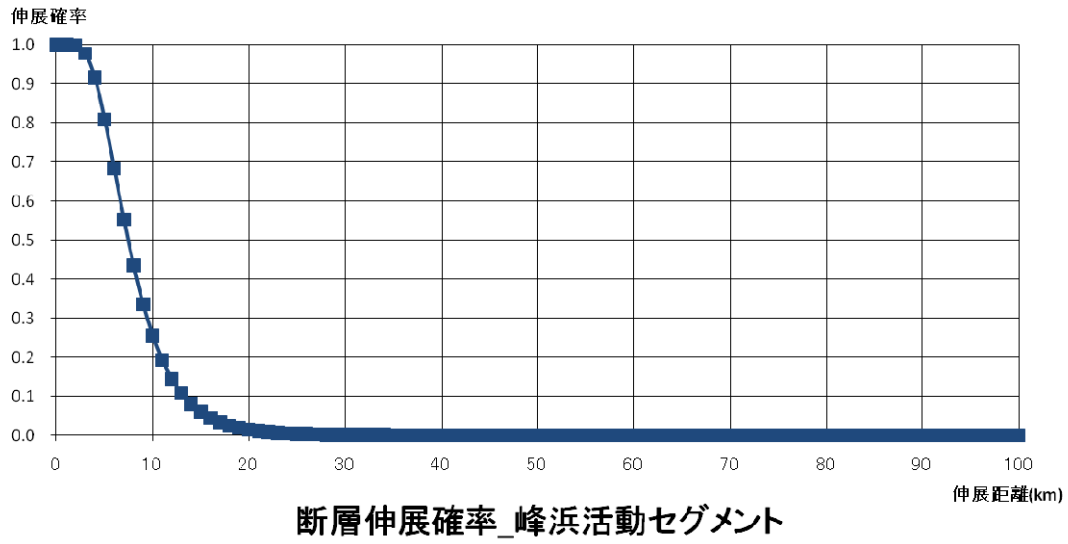


図-4.4(2) 峰浜活動セグメントならびに開陽活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

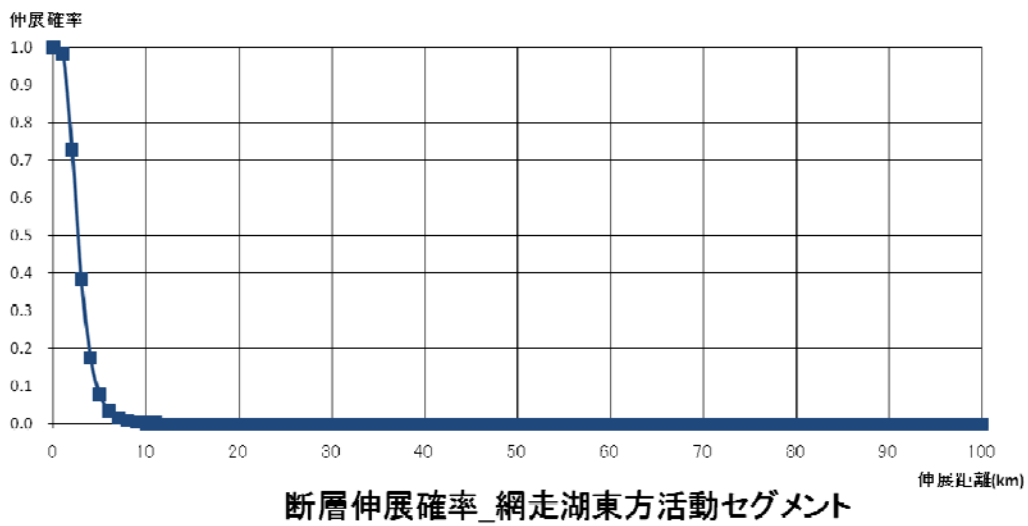
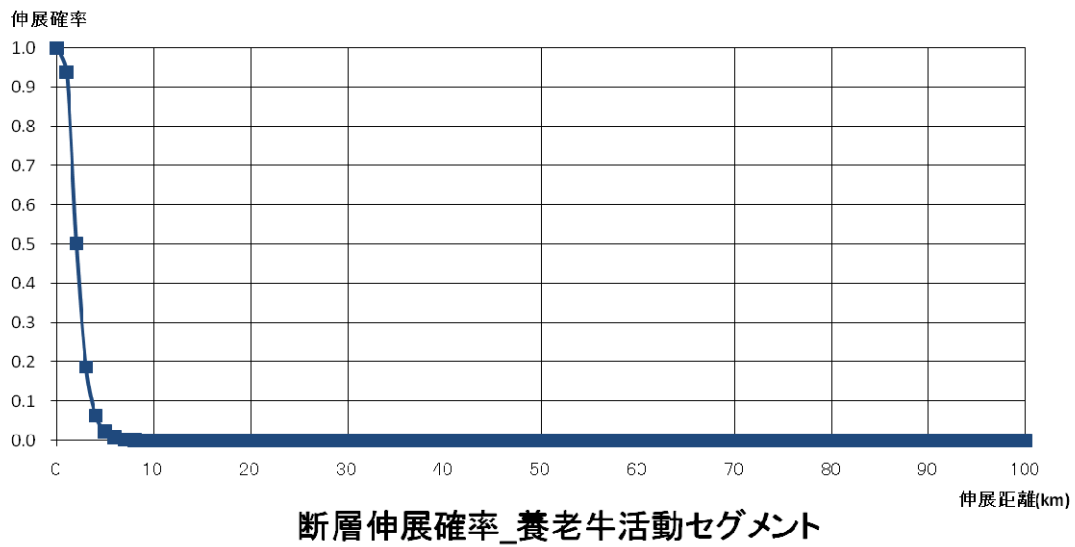


図-4.4(3) 養老牛活動セグメントならびに網走湖東方活動セグメントの  
1Ma 後の伸展確率

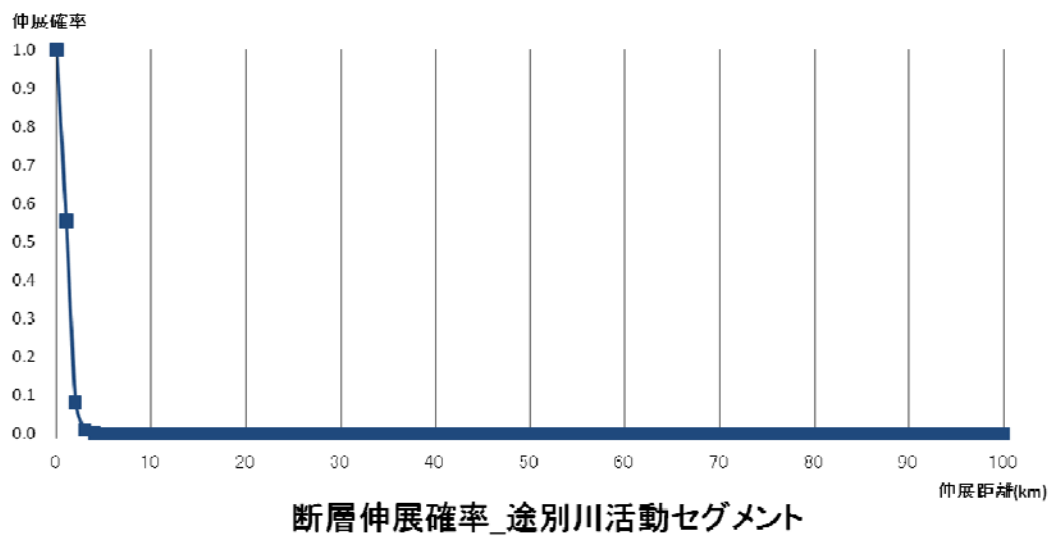
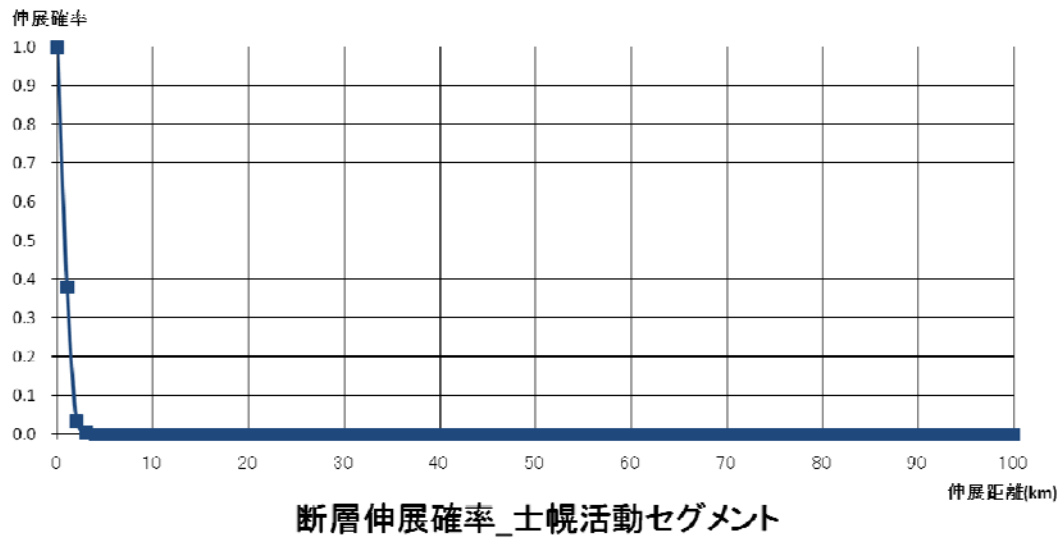
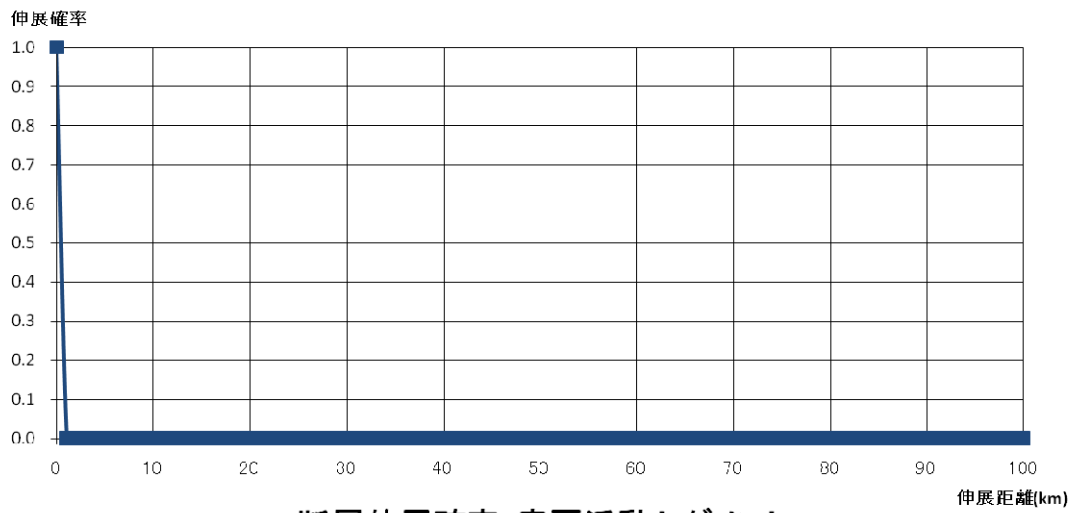
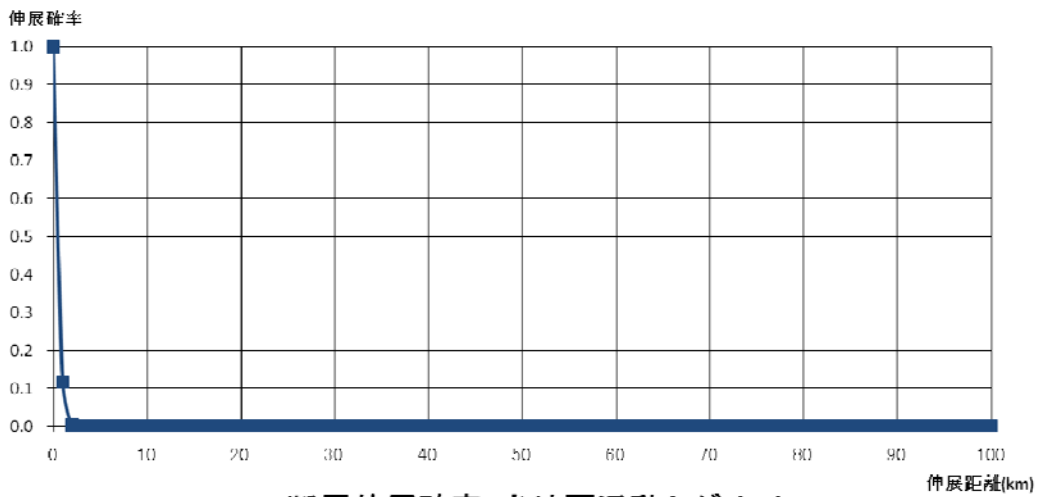


図-4.4(4) 土幌活動セグメントならびに途別川活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率



断層伸張確率\_音更活動セグメント



断層伸張確率\_光地園活動セグメント

図-4.4(5) 音更活動セグメントならびに光地園活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

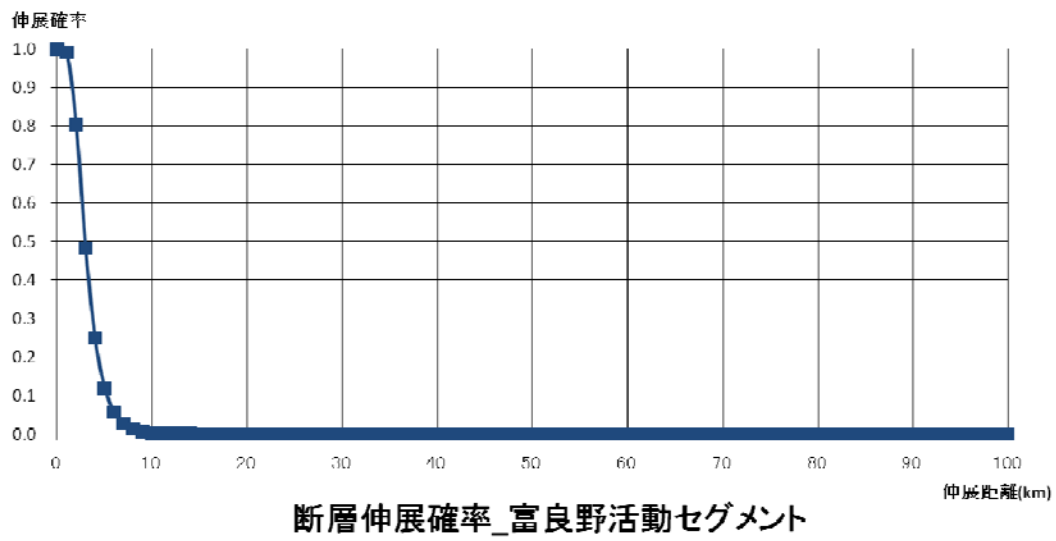
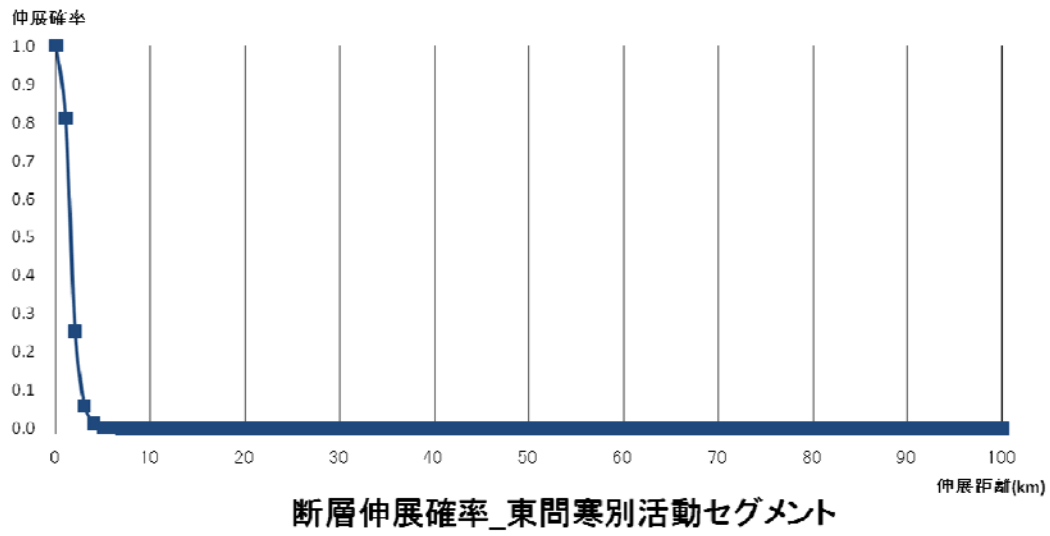


図-4.4(6) 東問寒別活動セグメントならびに富良野活動セグメントの  
1Ma 後の伸展確率

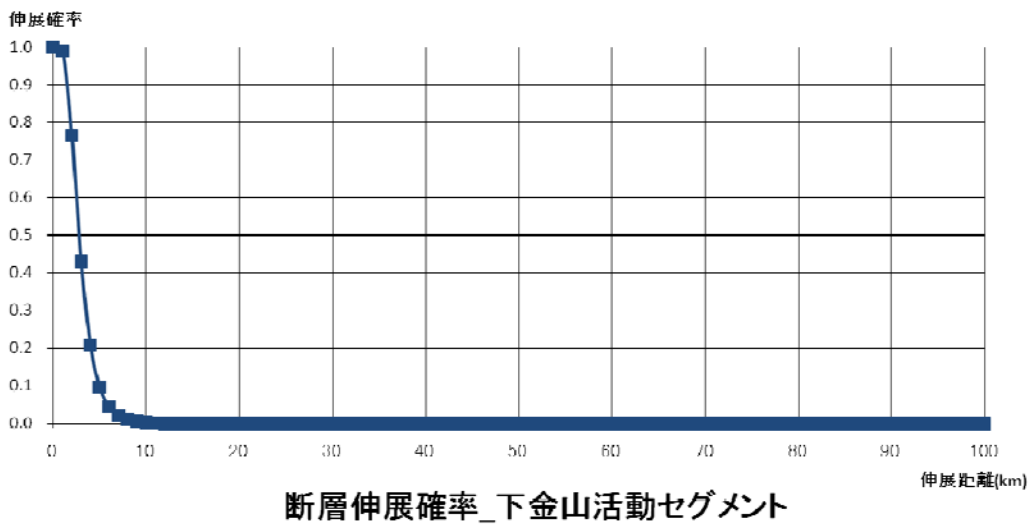
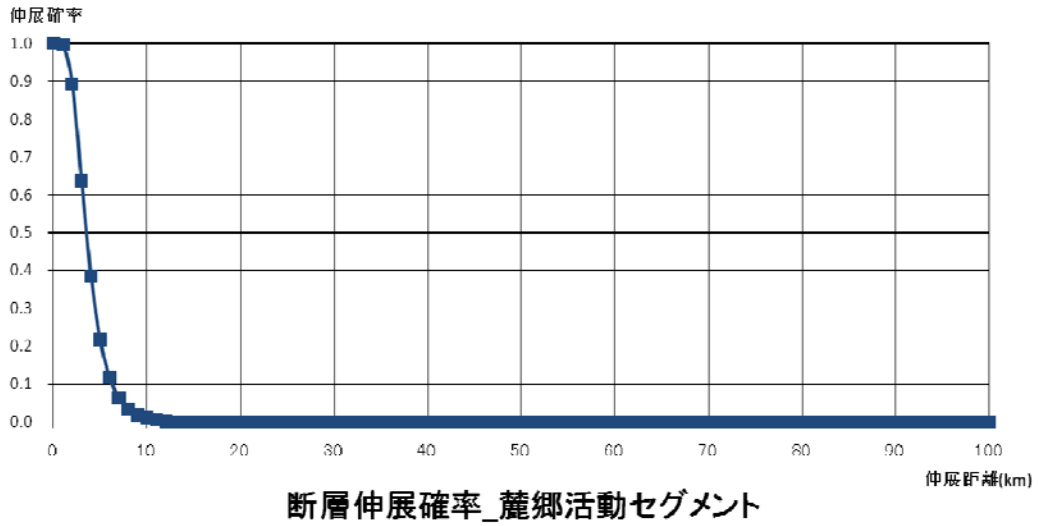


図-4.4(7) 麓郷活動セグメントならびに下金山活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

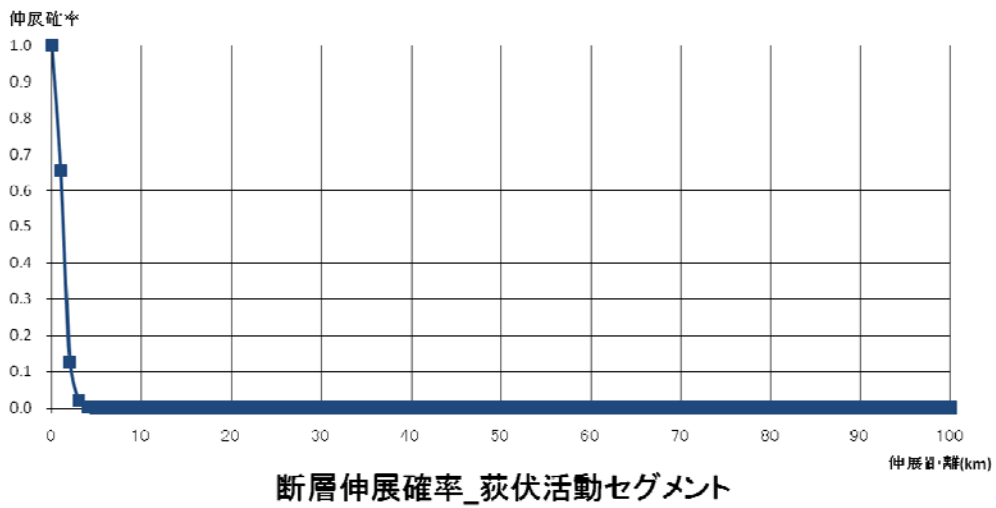
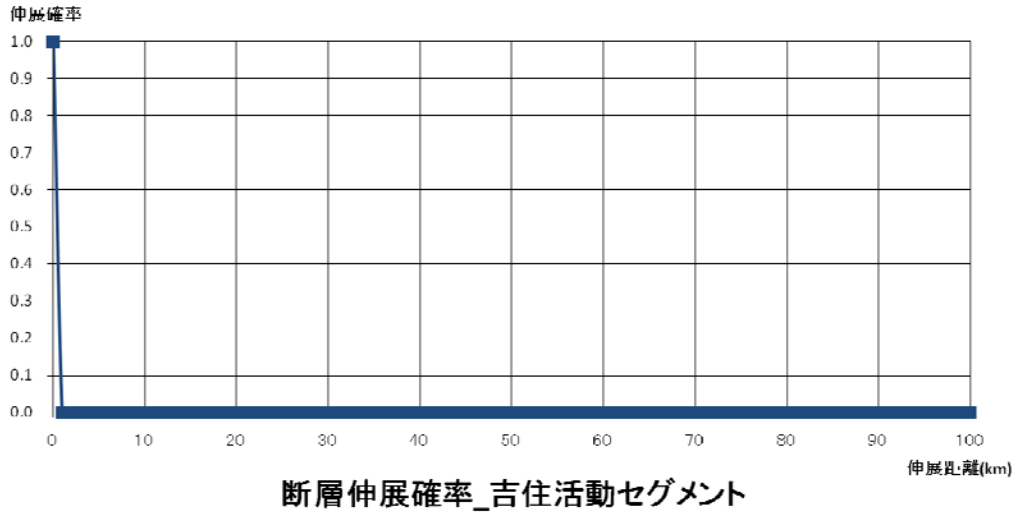


図-4.4(8) 吉住活動セグメントならびに荻伏活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

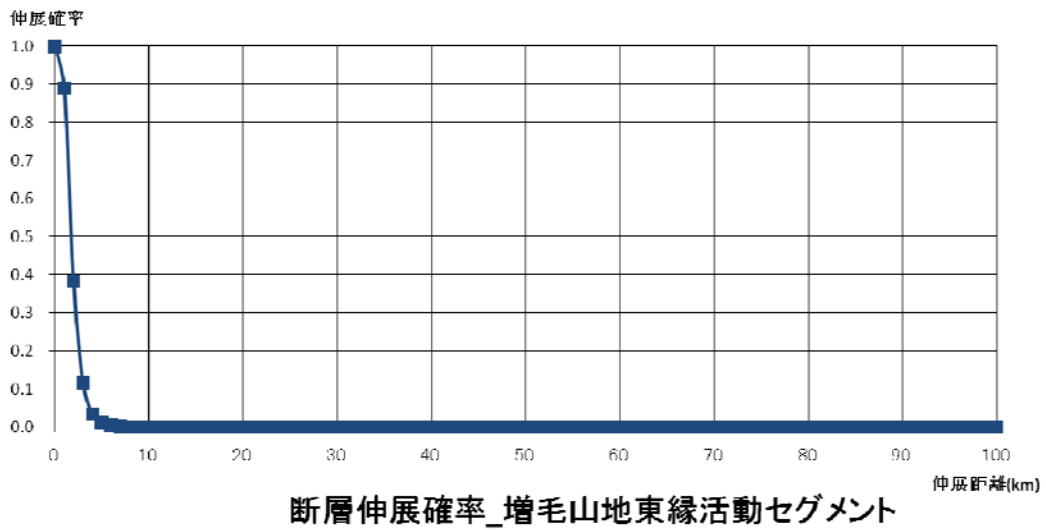
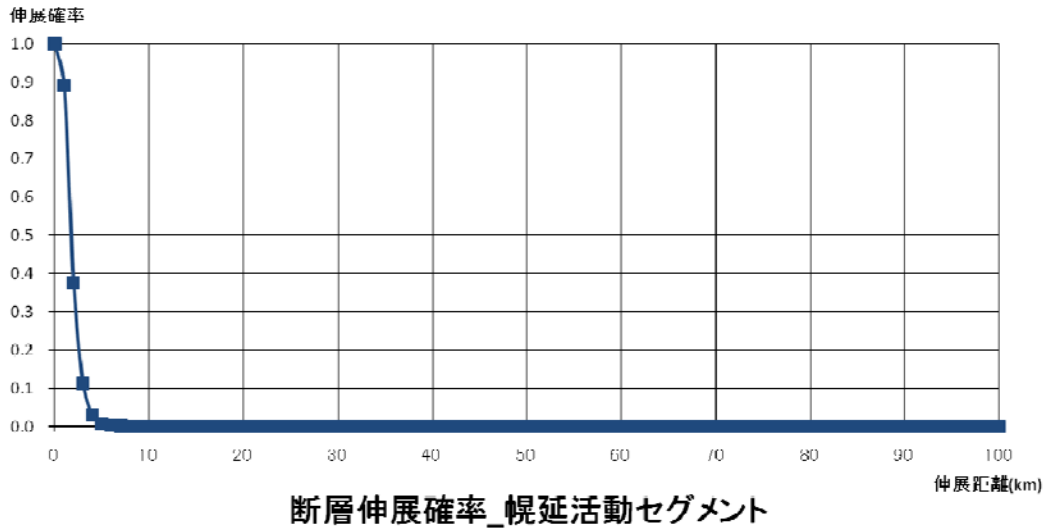


図-4.4(9) 幌延活動セグメントならびに増毛山地東縁活動セグメントの  
1Ma 後の伸展確率



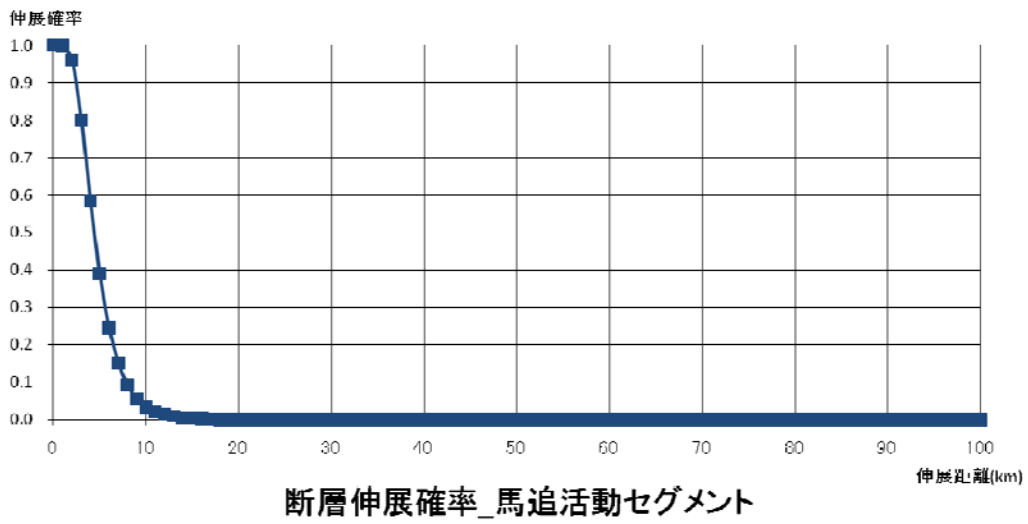
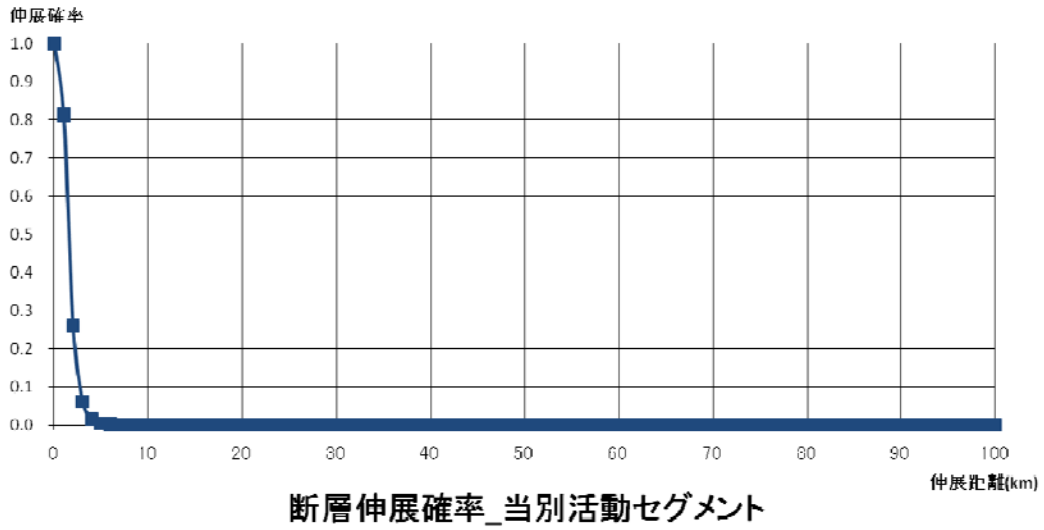


図-4.4(10) 当別活動セグメントならびに馬追活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

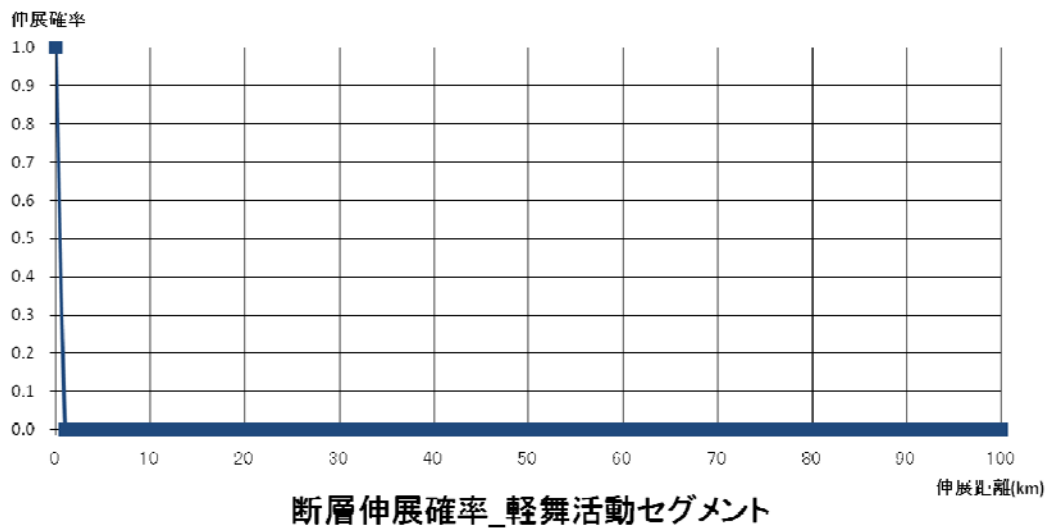
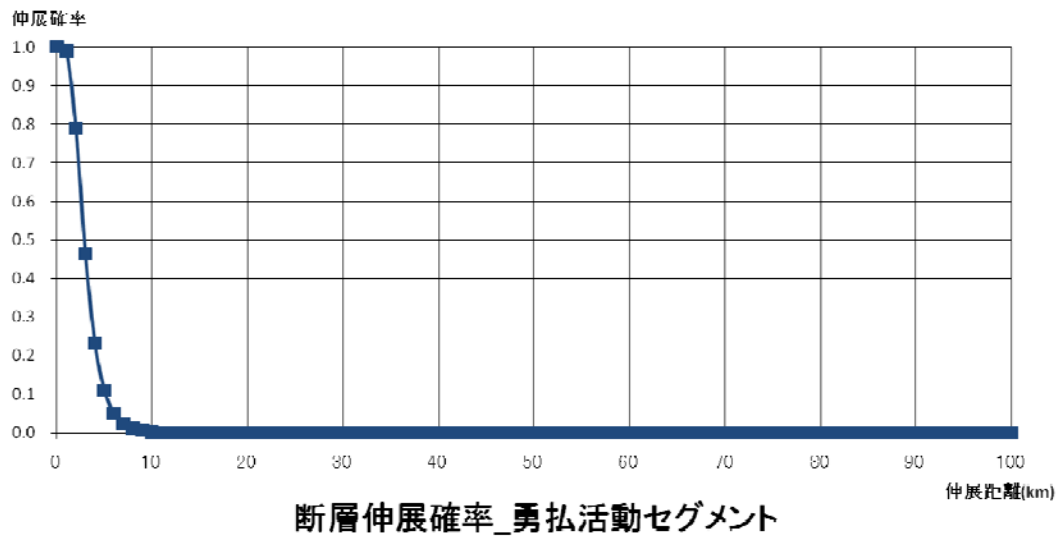


図-4.4(11) 勇払活動セグメントならびに軽舞活動セグメントの  
1Ma 後の伸展確率

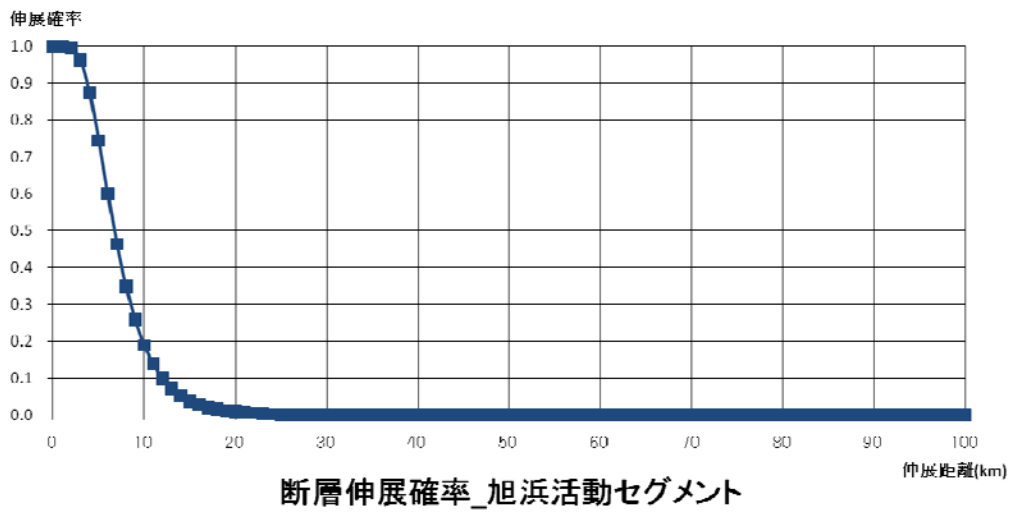
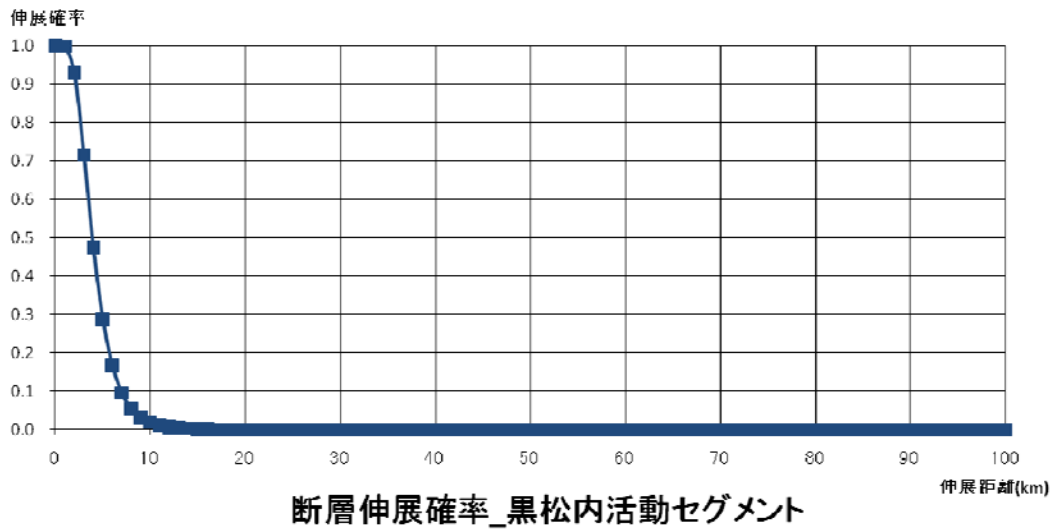


図-4.4(12) 黒松内活動セグメントならびに旭浜活動セグメントの  
1Ma 後の伸展確率

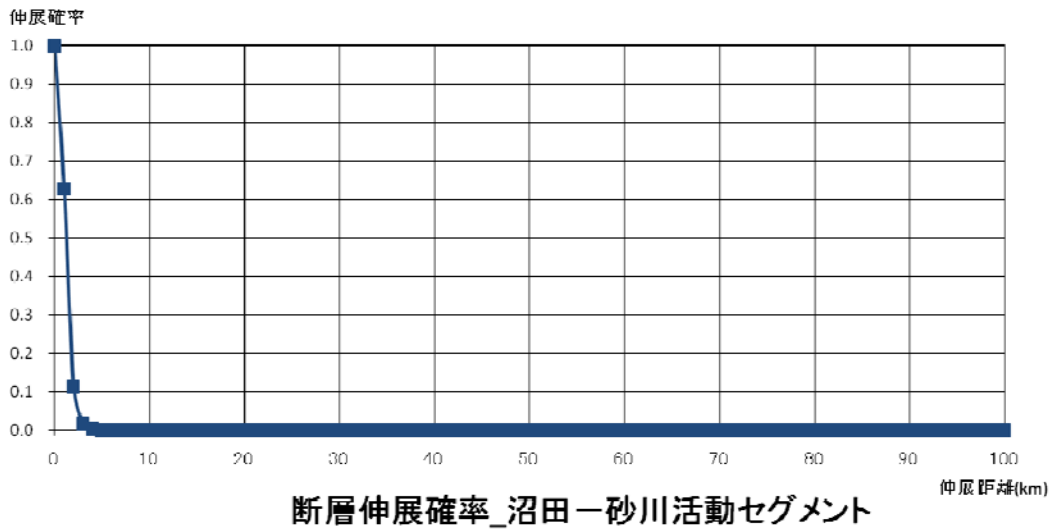
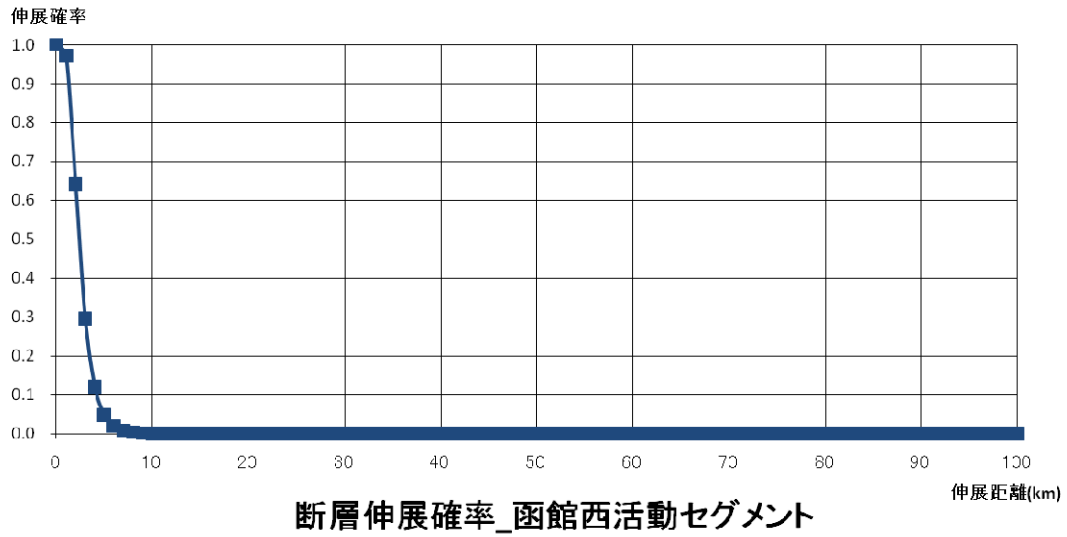


図-4.4(13) 函館西活動セグメントならびに沼田-砂川活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

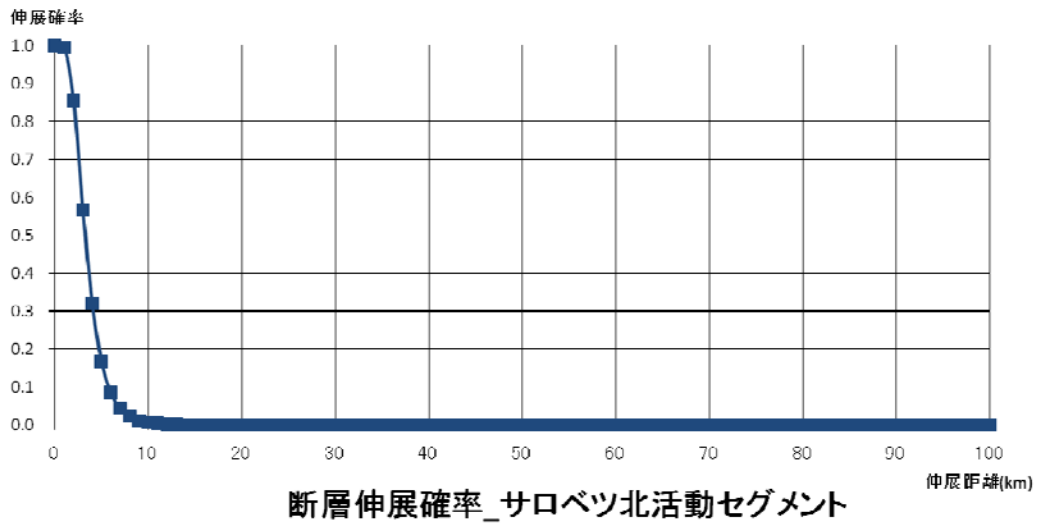
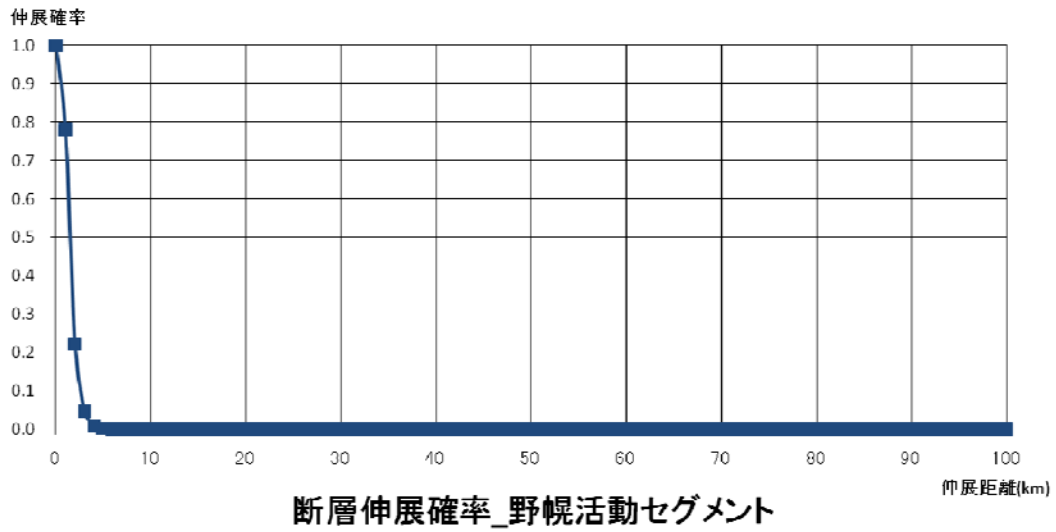


図-4.4(14) 野幌活動セグメントならびにサロベツ北活動セグメントの  
1Ma 後の伸張確率

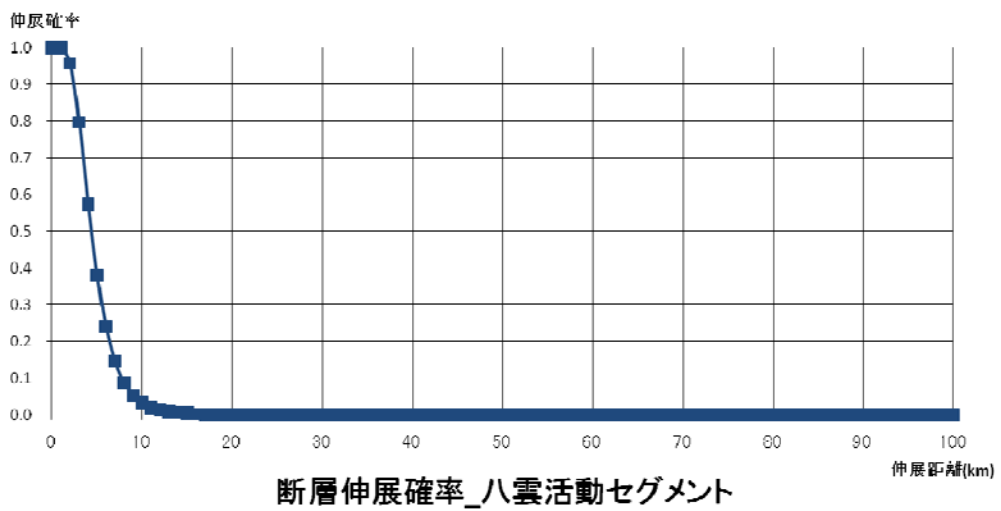
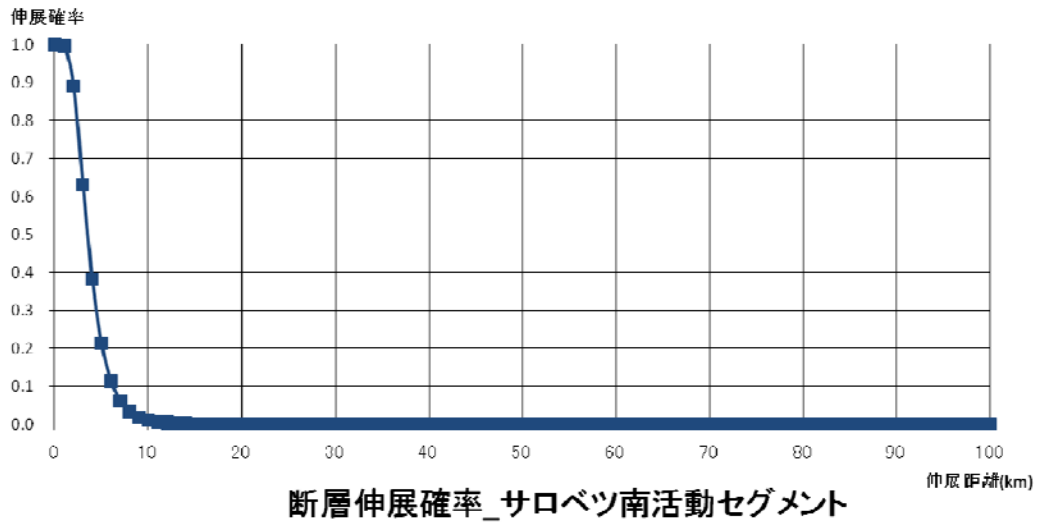


図-4.4(15) サロベツ南活動セグメントならびに八雲活動セグメントの  
1Ma 後の伸展確率

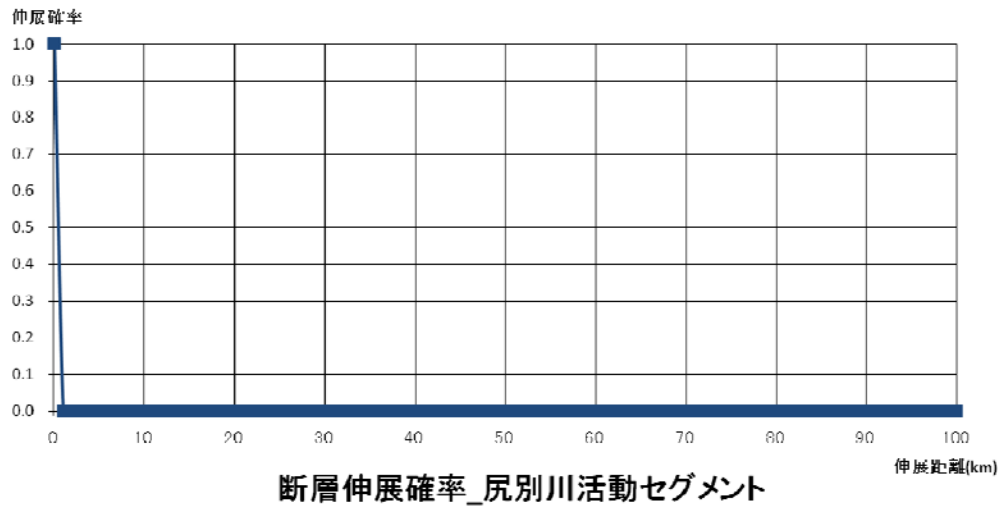


図-4.4(16) 尻別川活動セグメントの 1Ma 後の伸展確率

### 3) 各活動セグメントの計算結果

個々の活動セグメント毎に算出した結果を図-4.6(1)～(31)に示し、各活動セグメントの影響範囲について詳述する。なお、分岐幅の計算は断層長に対する比率で算出しているため、断層長によって分岐幅の確率も変化する。

(1) 羅臼岳活動セグメント

羅臼岳活動セグメントは一般走向 N40E で 60° の傾斜とされている。他の断層セグメントはすべて逆断層であるが、羅臼岳活動セグメントのみ正断層である。ただし、変位の向きは不明とされている。計算上、本セグメントの北側を隆起側とした。断層の影響範囲が解析領域の外側にまで延長しているため、一部、解析結果が得られていない。影響範囲は広く広がる結果となっている。

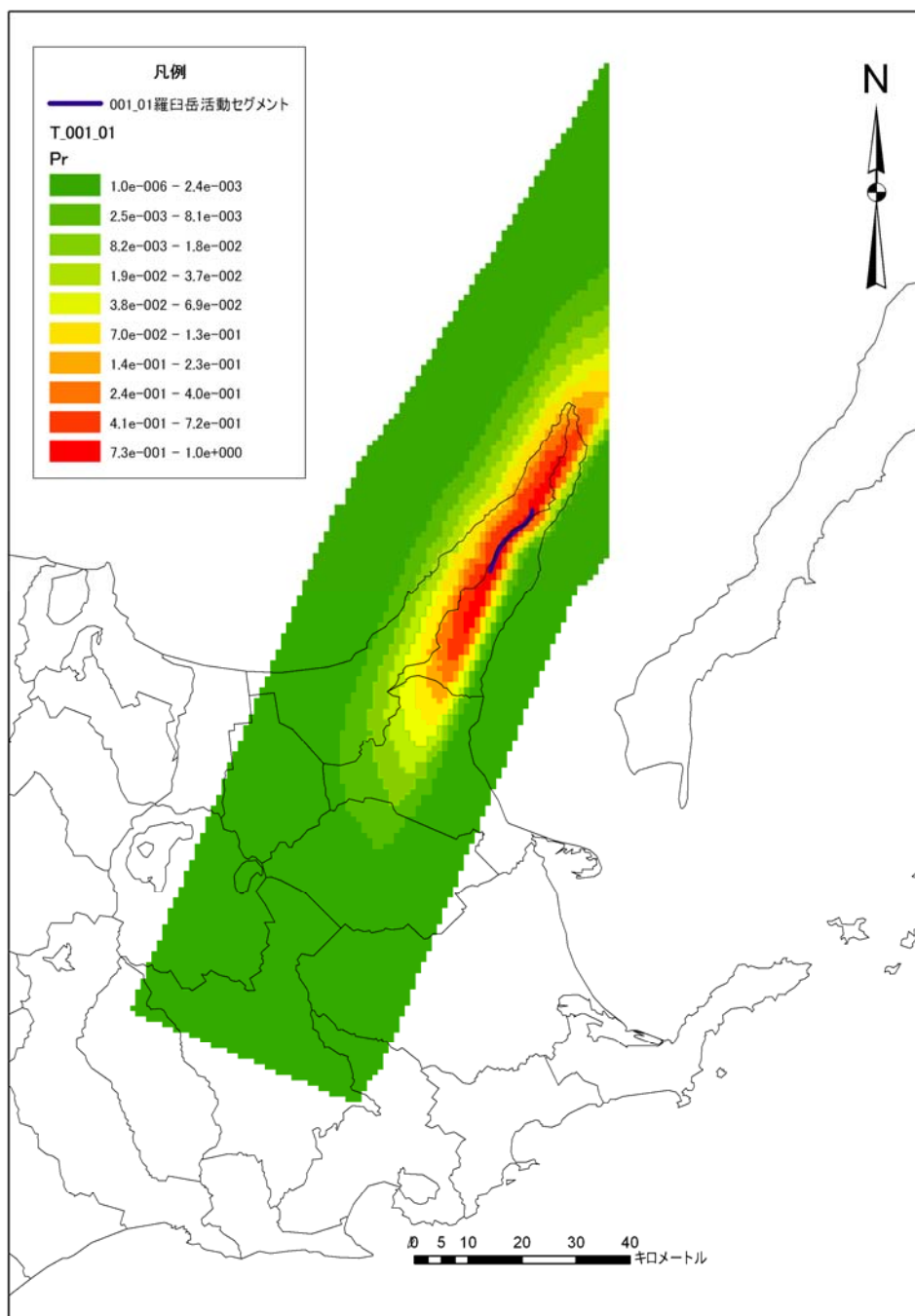


図-4.6(1) 羅臼岳活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図



(2) 古多糠活動セグメント

古多糠活動セグメントは、N40Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.3m/千年とされている。

断層の影響範囲は、概ね40km×20程度の範囲であり影響範囲は大きな広がりを持たない。

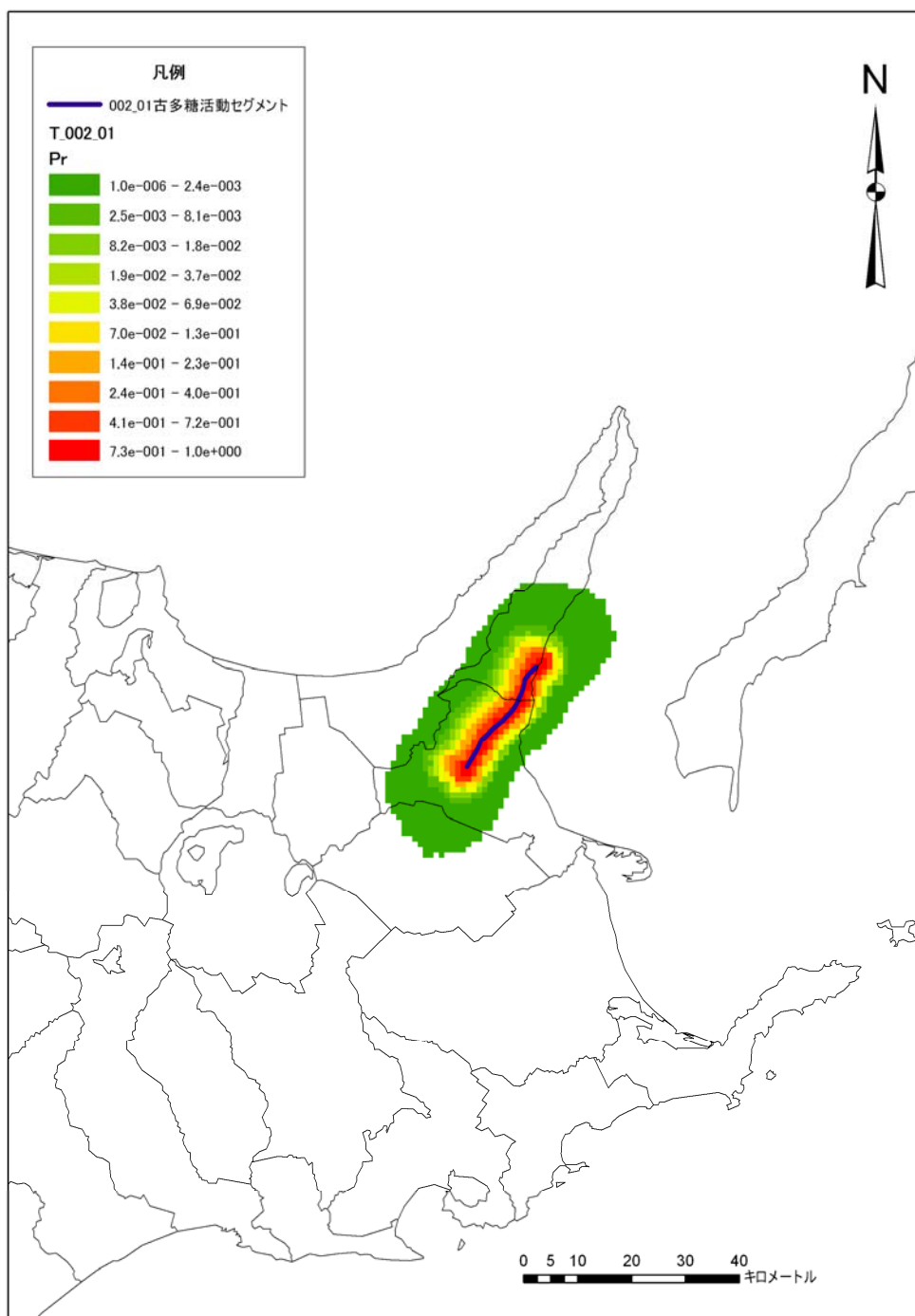


図-4.6(2) 古多糠活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

### (3) 峰浜活動セグメント

峰浜活動セグメントは、N40Eの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は1.0m/千年とされている。

断層の影響範囲は、平均変位速度が大きいいため比較的広範囲となる。

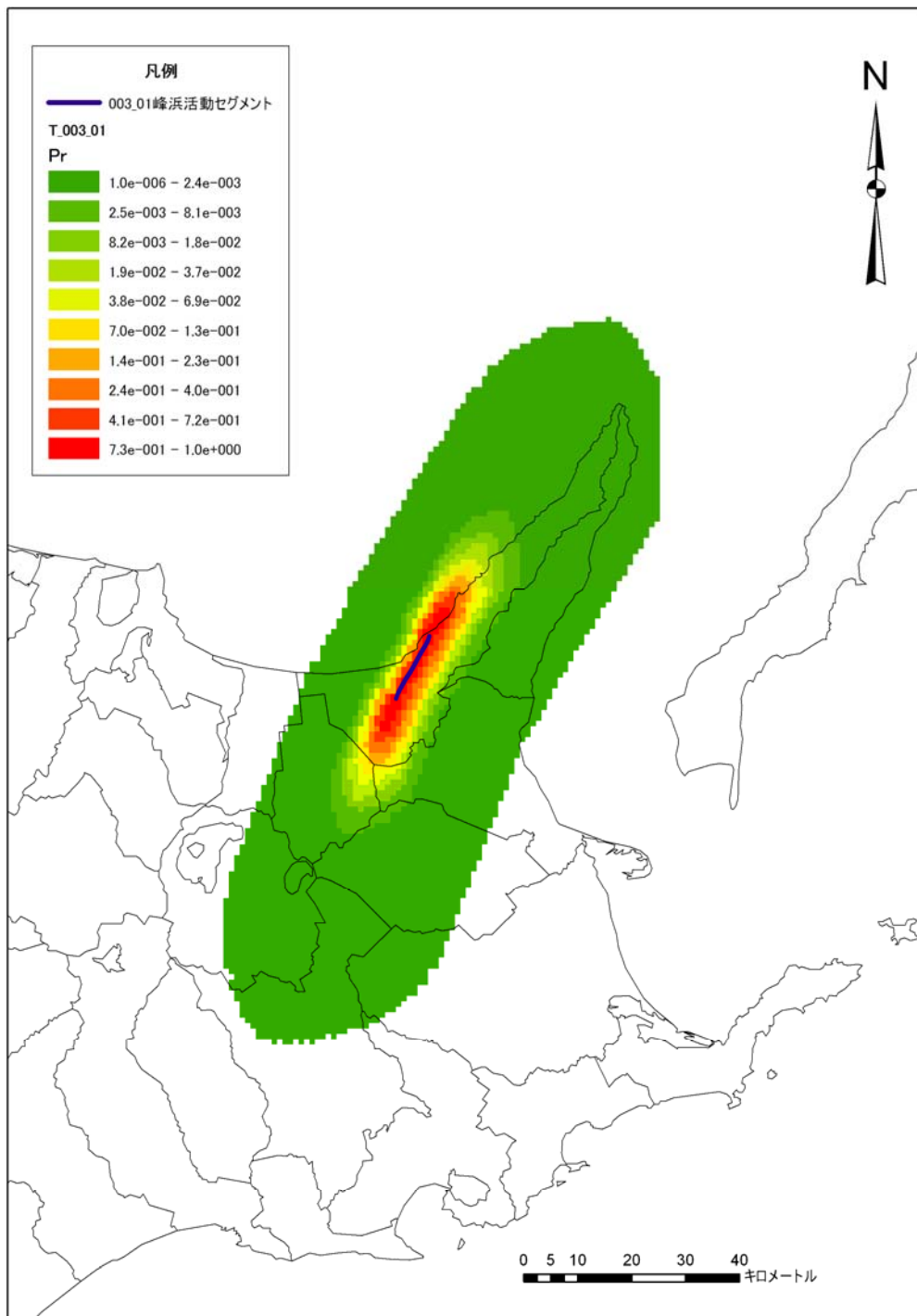


図-4.6(3) 峰浜活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

#### (4) 開陽活動セグメント

開陽活動セグメントは、N40Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.3m/千年とされている。

断層の影響範囲は、平均変位速度が小さいため比較的狭い。

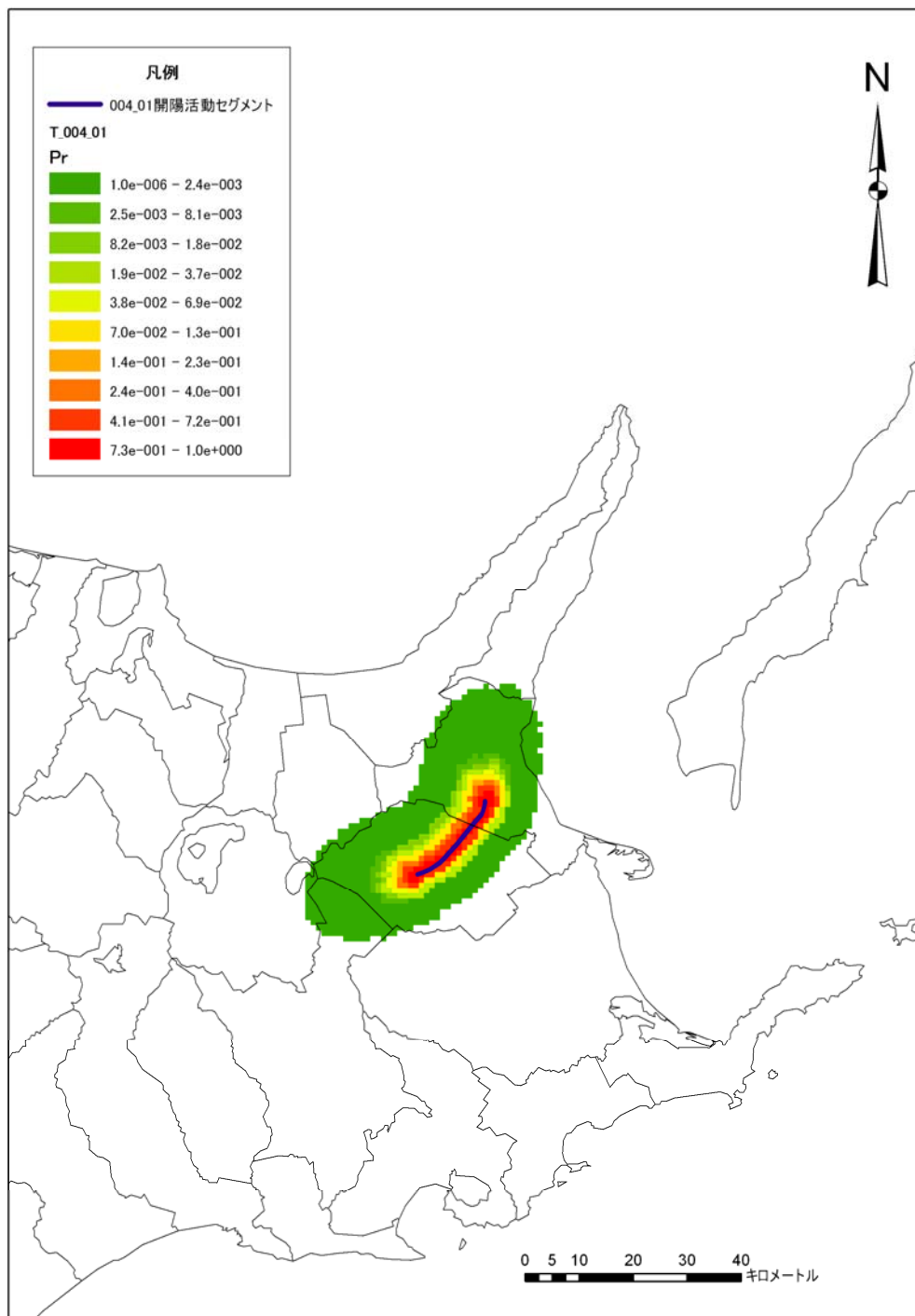


図-4.6(4) 開陽活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(5) 養老牛活動セグメント

養老牛活動セグメントは、N40Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.1m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度がかなり小さいため狭い。

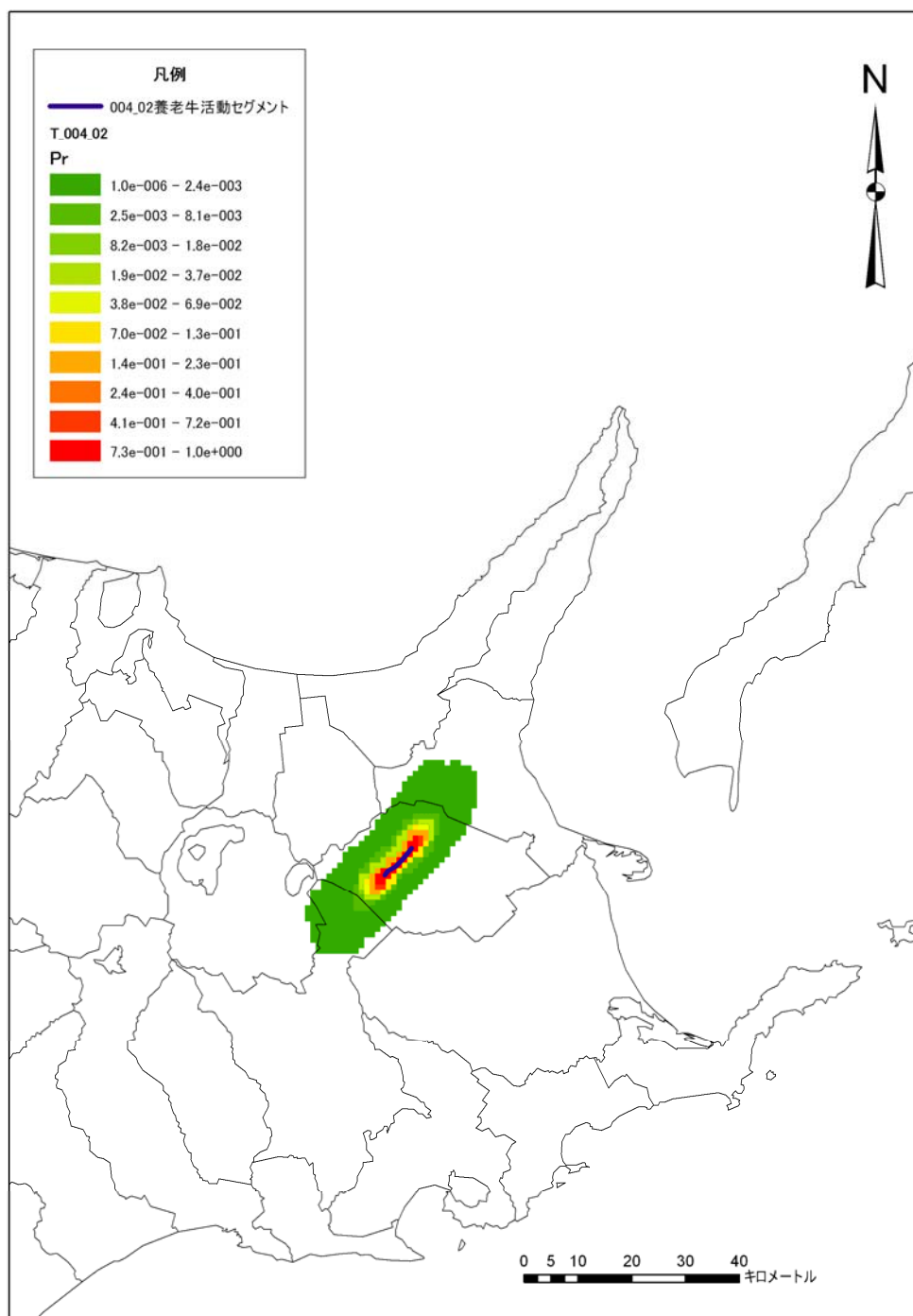


図-4.6(5) 養老牛活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(6) 網走湖東方活動セグメント

網走湖東方活動セグメントは、NE の走向で、45E の傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は 0.3m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が小さいためやや狭い。断層が若干、逆「く」の字に折れ曲がっているため伸展方向もやや逆「く」の字となっている。

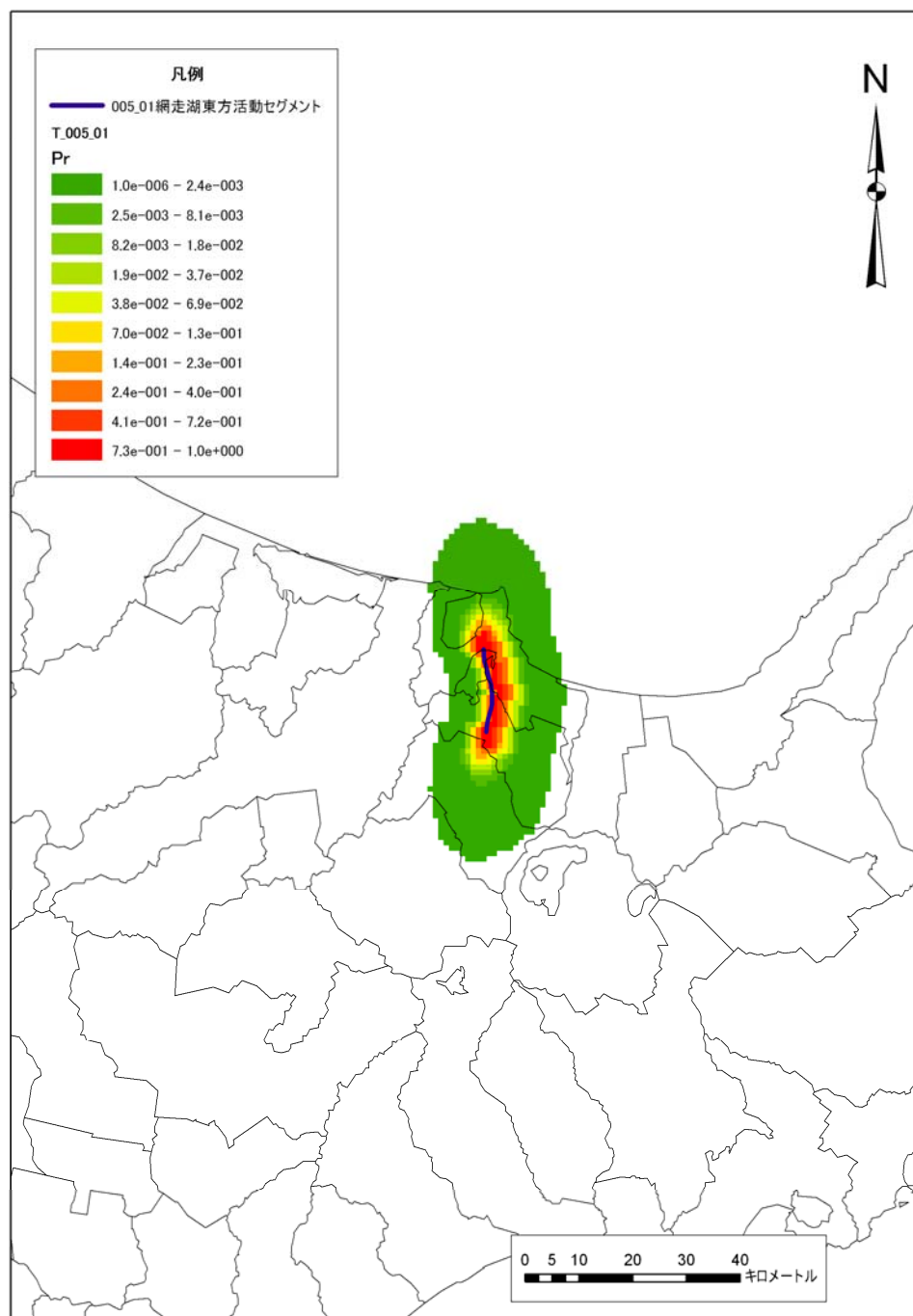


図-4.6(6) 網走湖東方活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(7) 土幌活動セグメント

土幌活動セグメントは、N10E の走向で、30E の傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は 0.4m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度に比べると伸展方向に影響範囲が少ない。これは断層長そのものが 62km と長いため、断層長と平均変位速度の比が少ないためである。つまり同じ平均変位速度であっても断層長が長いと伸展方向への影響範囲は少なくなる傾向となる。

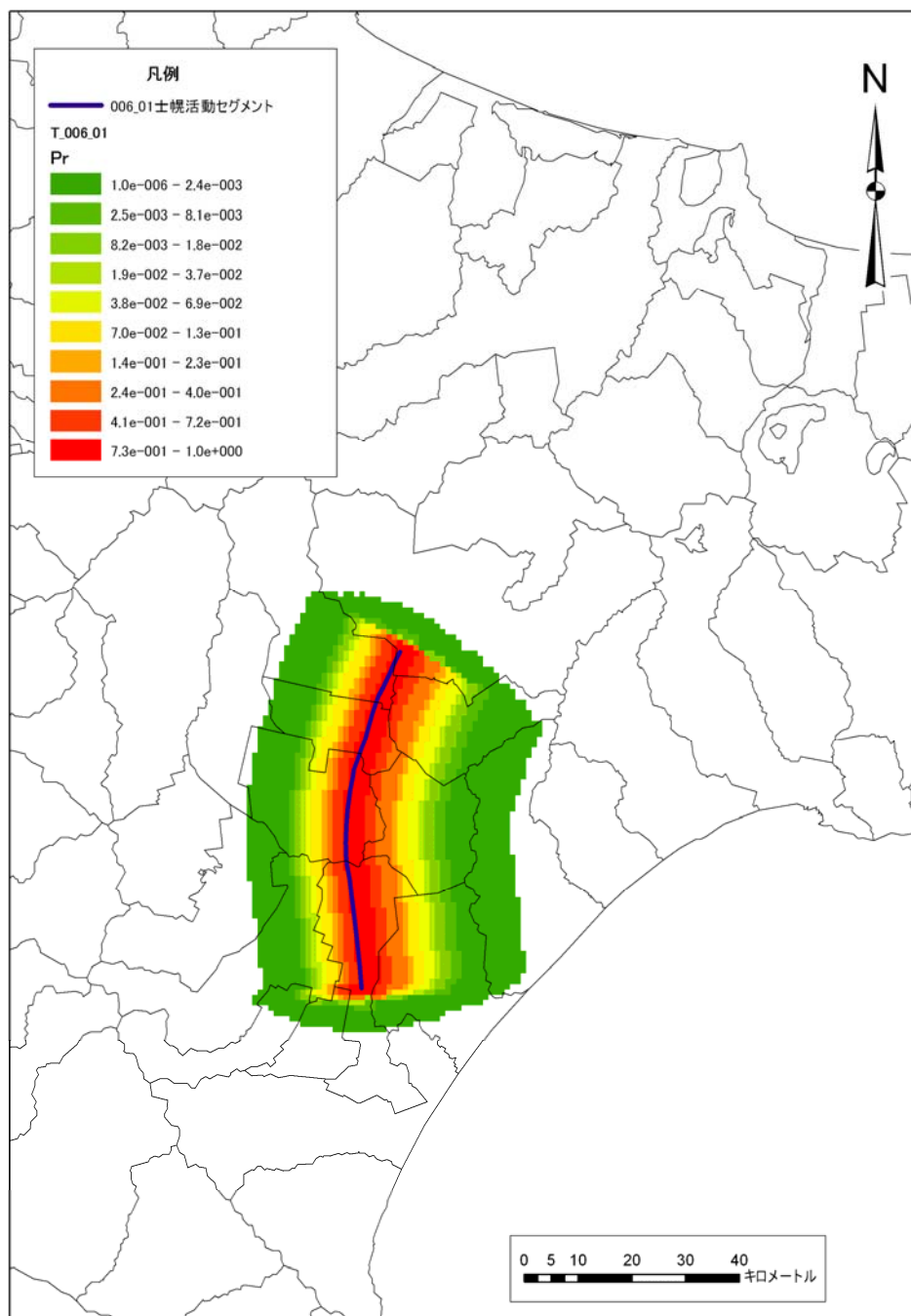


図-4.6(7) 土幌活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(8) 途別川活動セグメント

途別川活動セグメントは、NE の走向で、30E の傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は 0.3m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が小さいためやや狭い。断層が若干「く」の字に折れ曲がっているため伸展方向もやや「く」の字となっている。

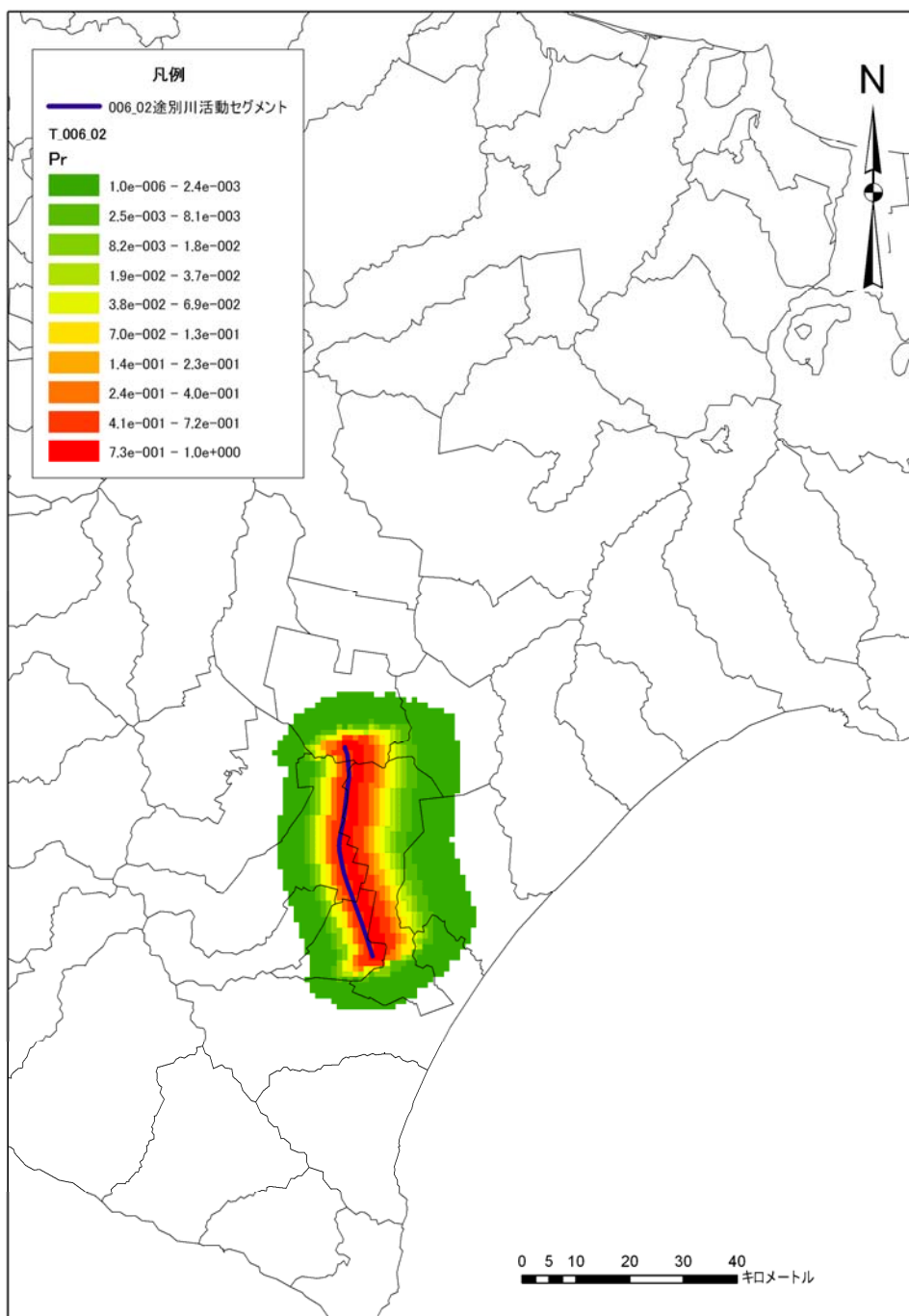


図-4.6(8) 土幌活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(9) 音更活動セグメント

音更活動セグメントは、NEの走向で、30Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側である。平均変位速度が0.0 m/千年とされているため、影響範囲の算出が不可能である。今回の検討では現在知られている断層の範囲内のみ確率を1.0として算出した。

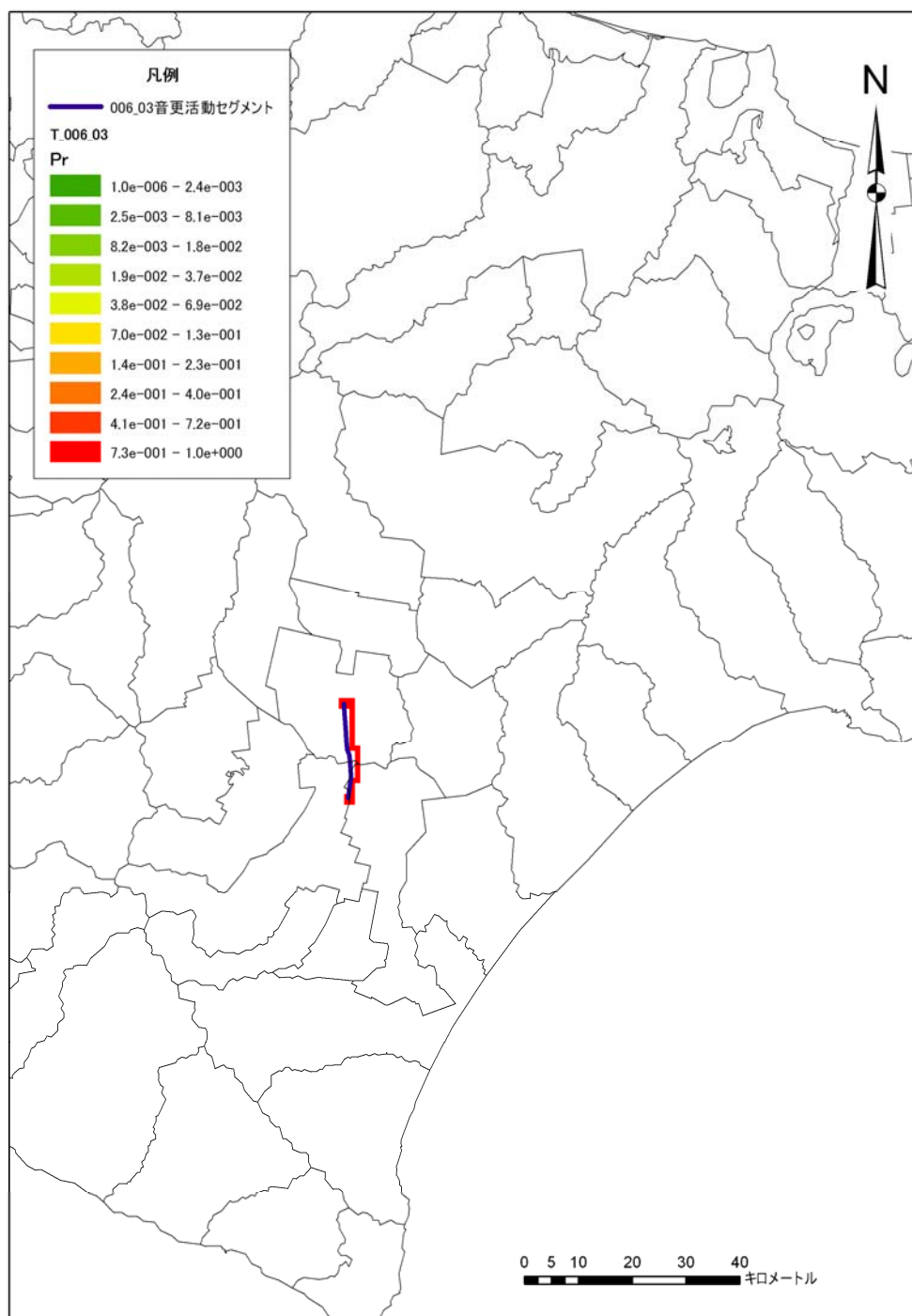


図-4.6(9) 音更活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図



(10) 光地園活動セグメント

光地園活動セグメントは、N30Wの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は0.1m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が小さいため狭い。

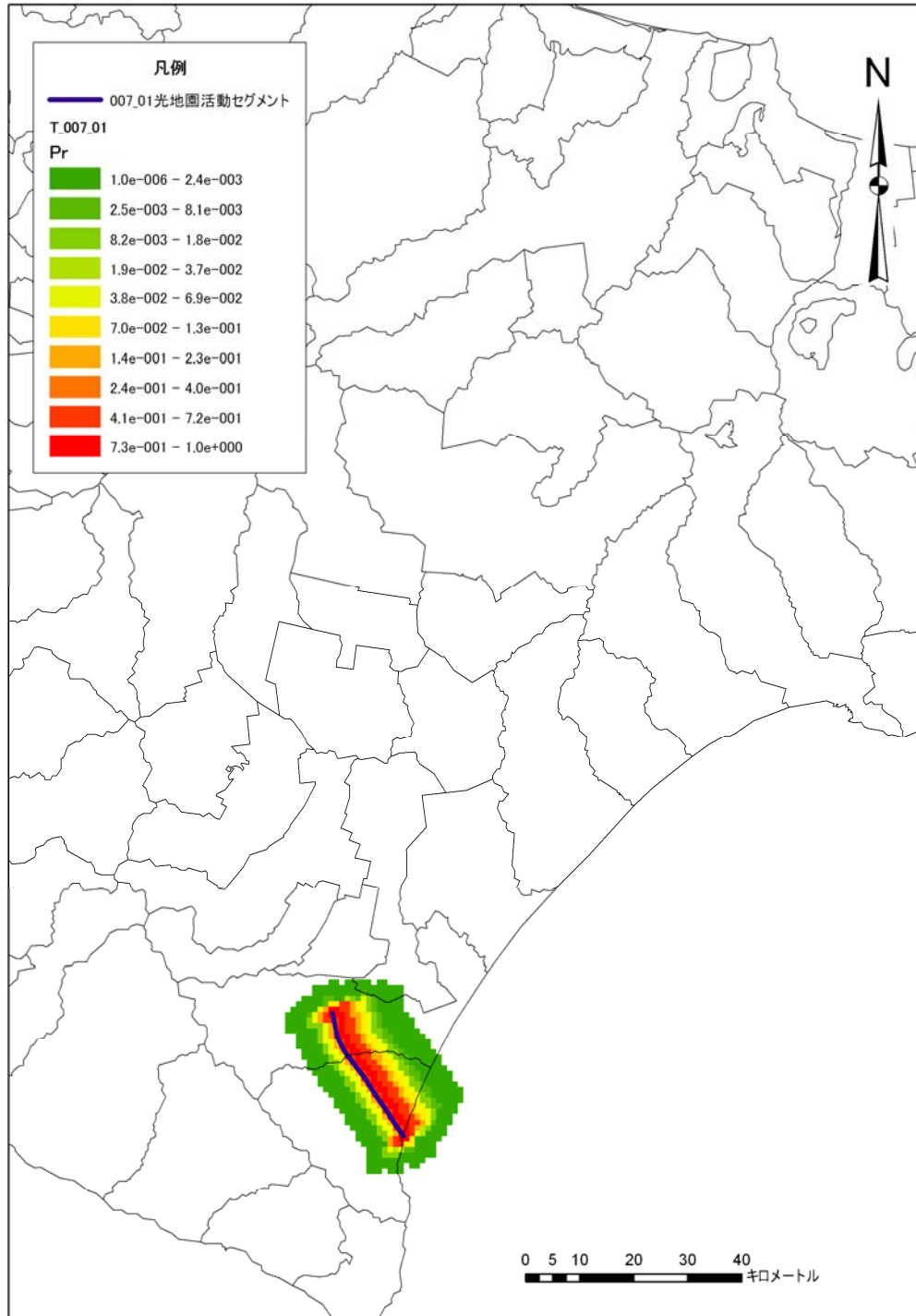


図-4.6(10) 光地園活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(11) 東間寒別活動セグメント

東間寒別活動セグメントは、N10Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.2m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が小さいため狭い。また、断層が屈曲しているため影響範囲もやや屈曲した範囲となる。

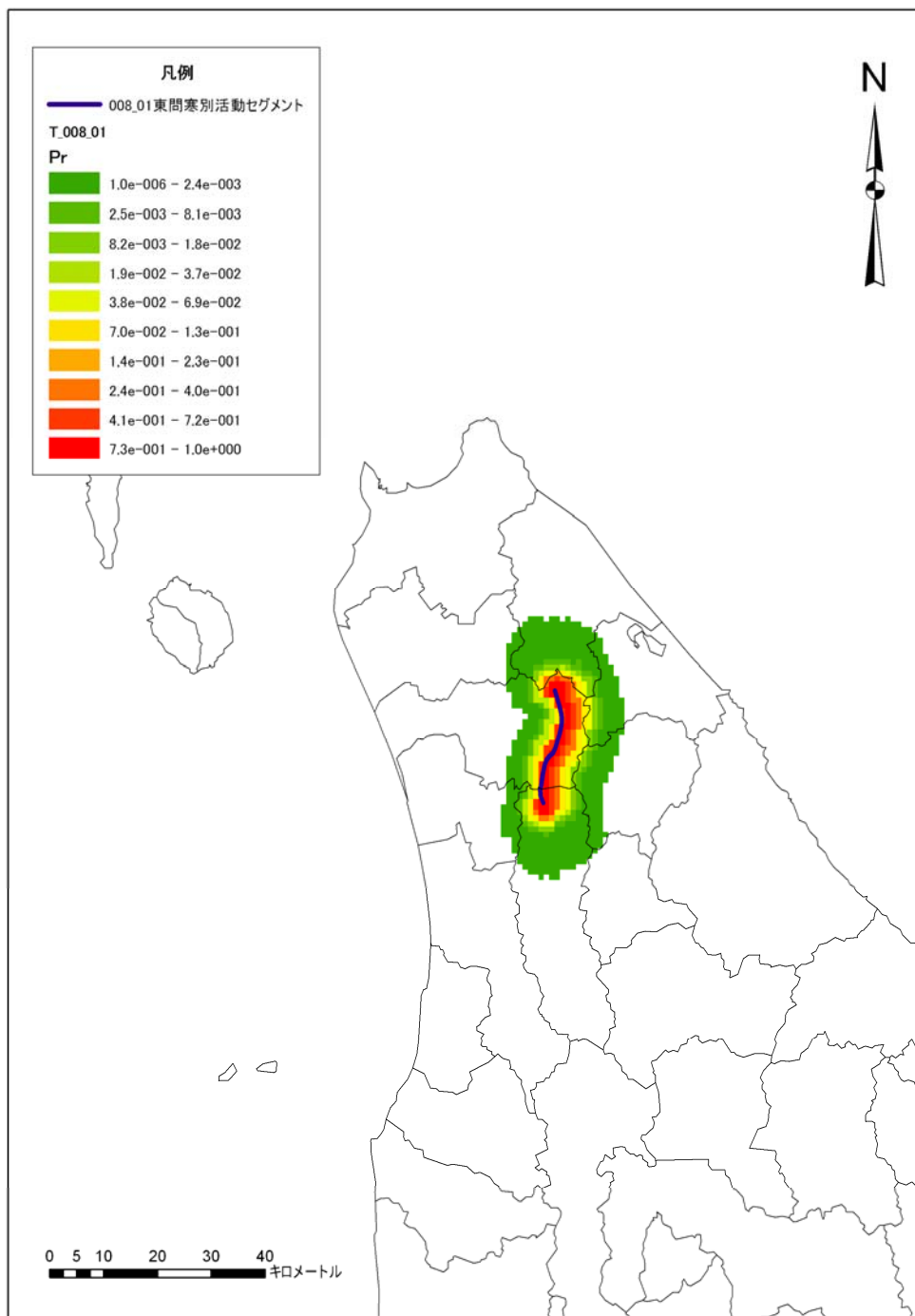


図-4.6(11) 東間寒別活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(12) 富良野活動セグメント

富良野活動セグメントは、N10Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.6m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が大きいいためやや広い。また、断層が屈曲しているため影響範囲も屈曲した範囲となる。

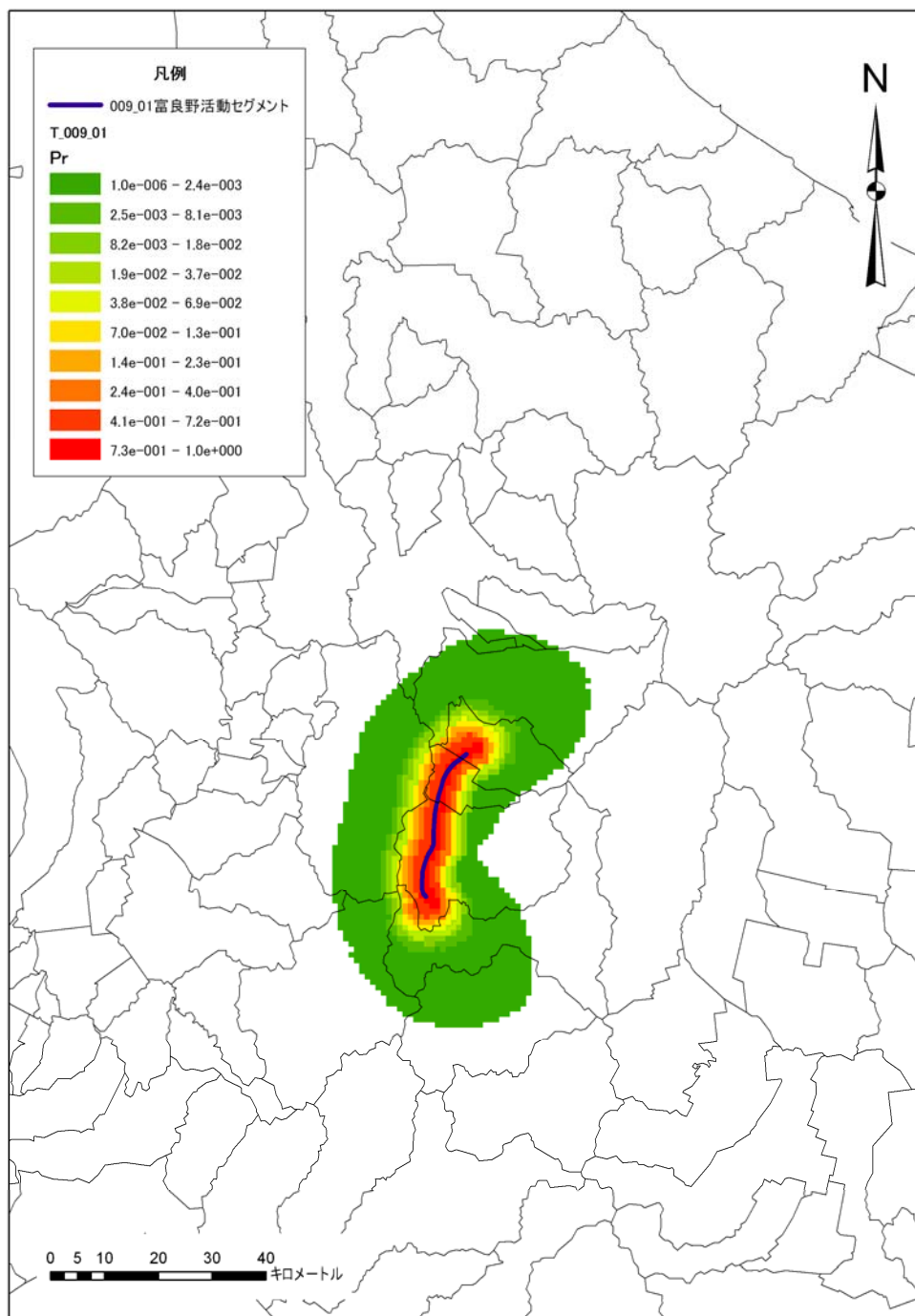


図-4.6(12) 富良野活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(13) 麓郷活動セグメント

麓郷活動セグメントは、N20Eの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は0.6m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が大きいためやや広い。また、断層が屈曲しているため影響範囲も屈曲した範囲となる。

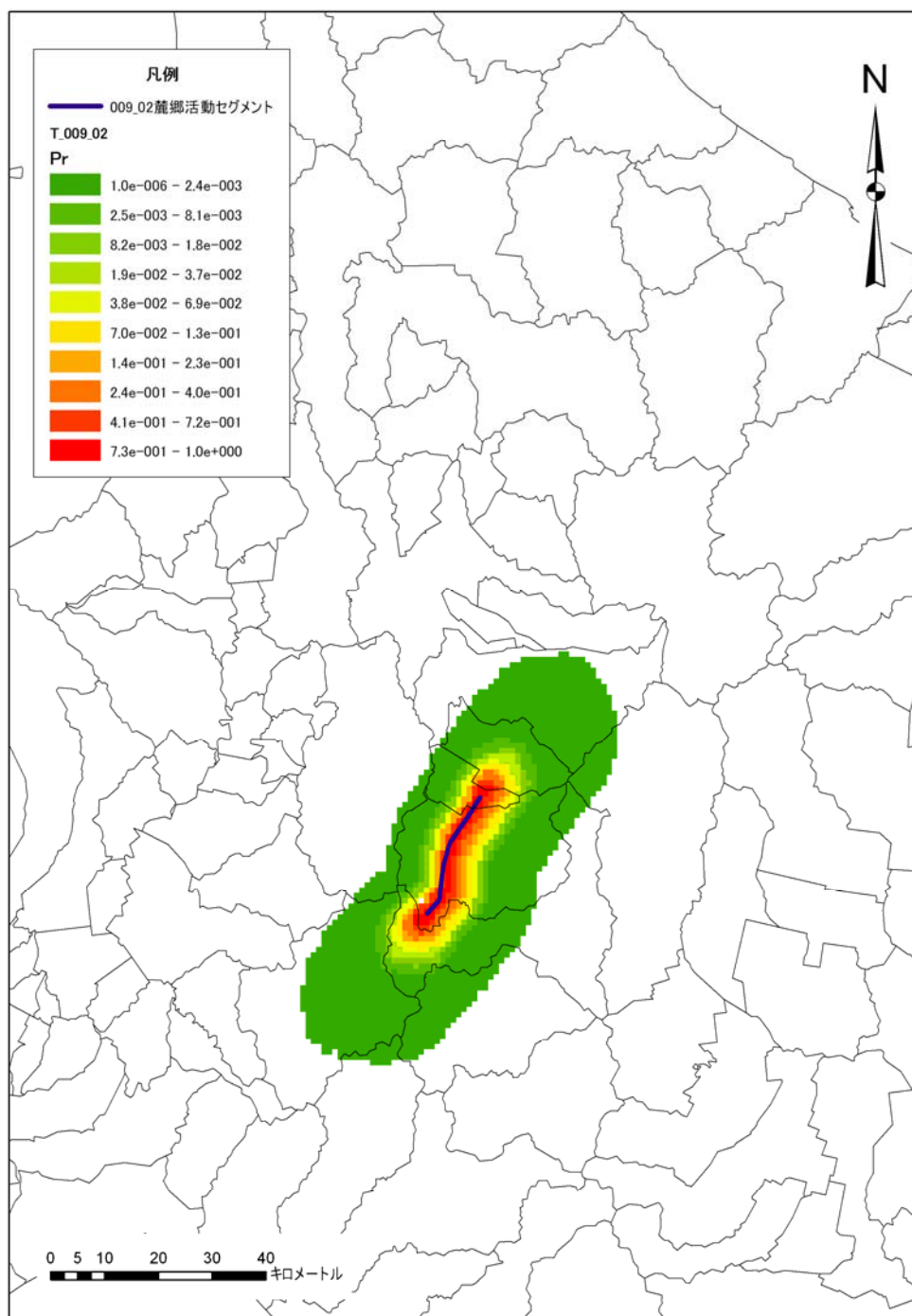


図-4.6(13) 麓郷活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(14) 下金山活動セグメント

下金山活動セグメントは、N10Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.1m/千年とされている。

平均変位速度は小さいものの断層長が4kmと非常に短いため、断層の影響範囲はやや狭くなっている。

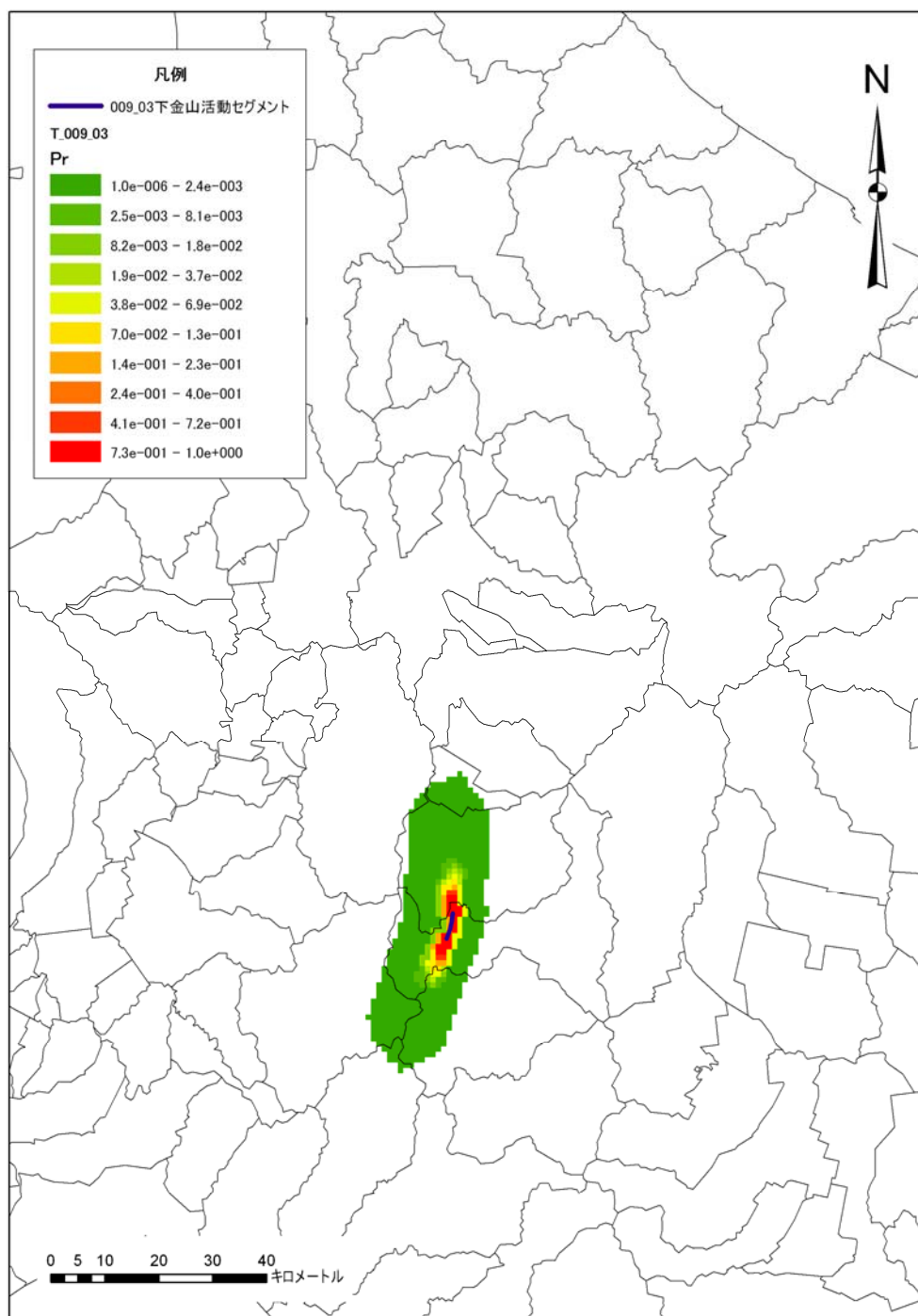


図-4.6(14) 下金山活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(15) 吉住活動セグメント

吉住活動セグメントは、N40Wの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側である。平均変位速度が0.0m/千年とされているため、影響範囲の算出が不可能である。今回の検討では現在知られている断層の範囲内のみ確率を1.0として算出した。

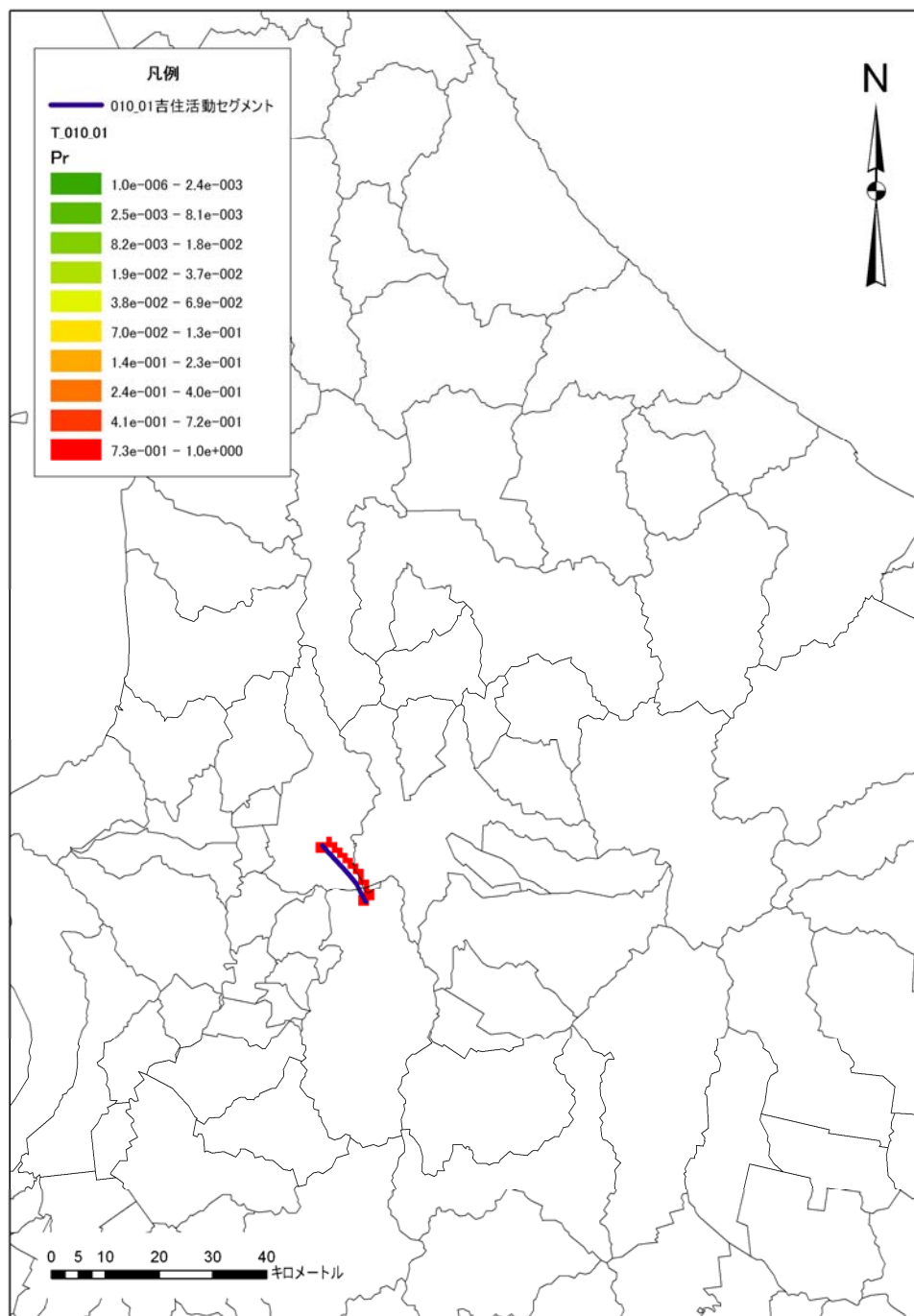


図-4.6(15) 吉住活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(16) 荻伏活動セグメント

荻伏活動セグメントは、N60Wの走向で、45Sの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は南側であり、平均変位速度は0.1m/千年とされている。

平均変位速度は小さいものの断層長が比較的短いため、断層の影響範囲はやや広がっている。

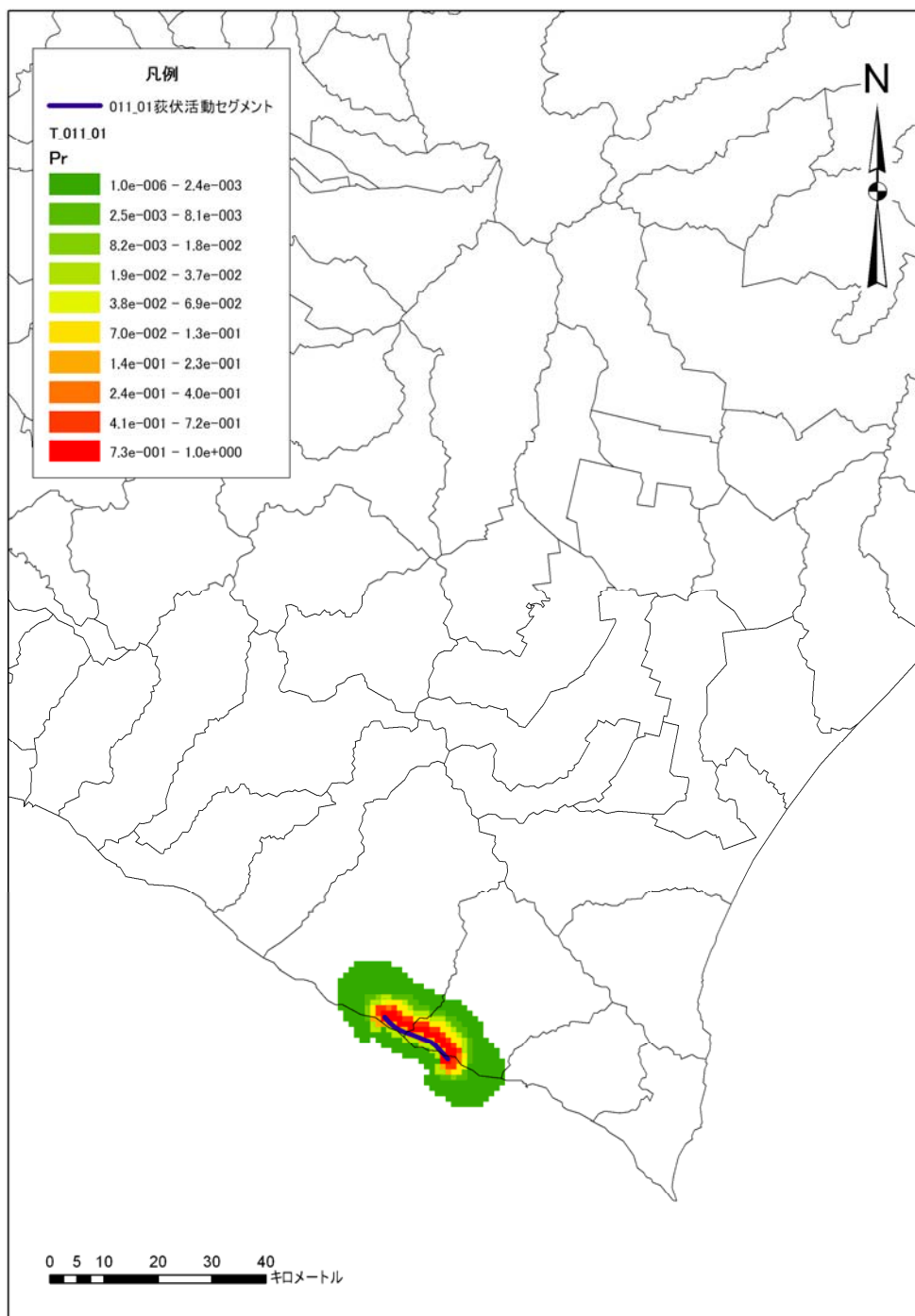


図-4.6(16) 荻伏活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(17) 幌延活動セグメント

幌延活動セグメントは，N20W の走向で，45E の傾斜を持つ逆断層である．断層の隆起側は東側であり，平均変位速度は 0.3m/千年とされている．

平均変位速度がやや小さいが，断層の影響範囲はやや広がっている．

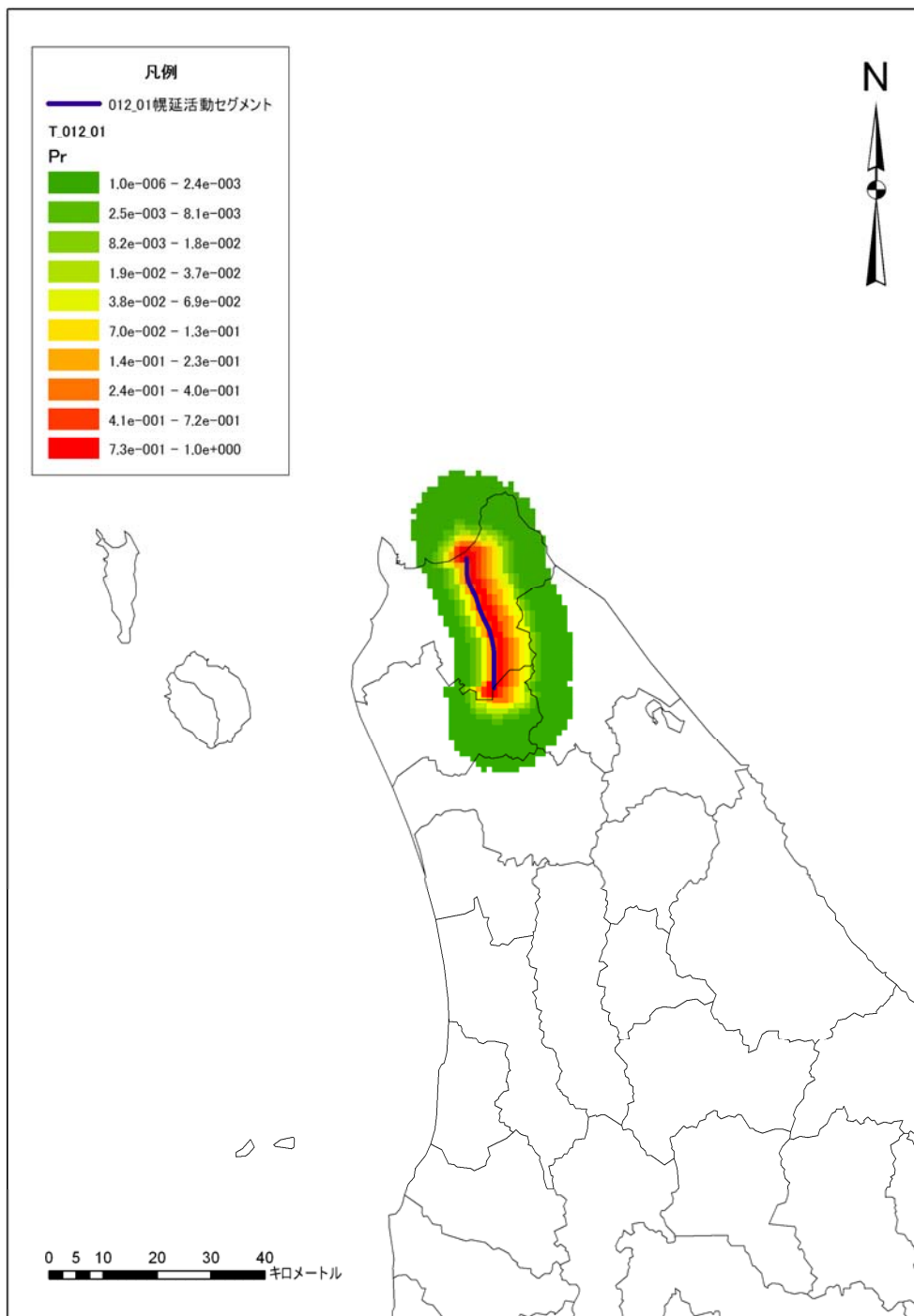


図-4.6(17) 幌延活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図



(18) 増毛山地東縁活動セグメント

増毛山地東縁活動セグメントは、N10Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.8m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が大きいためやや広い。断層が若干折れ曲がっているため伸展方向も折れ曲がった形状となっている。

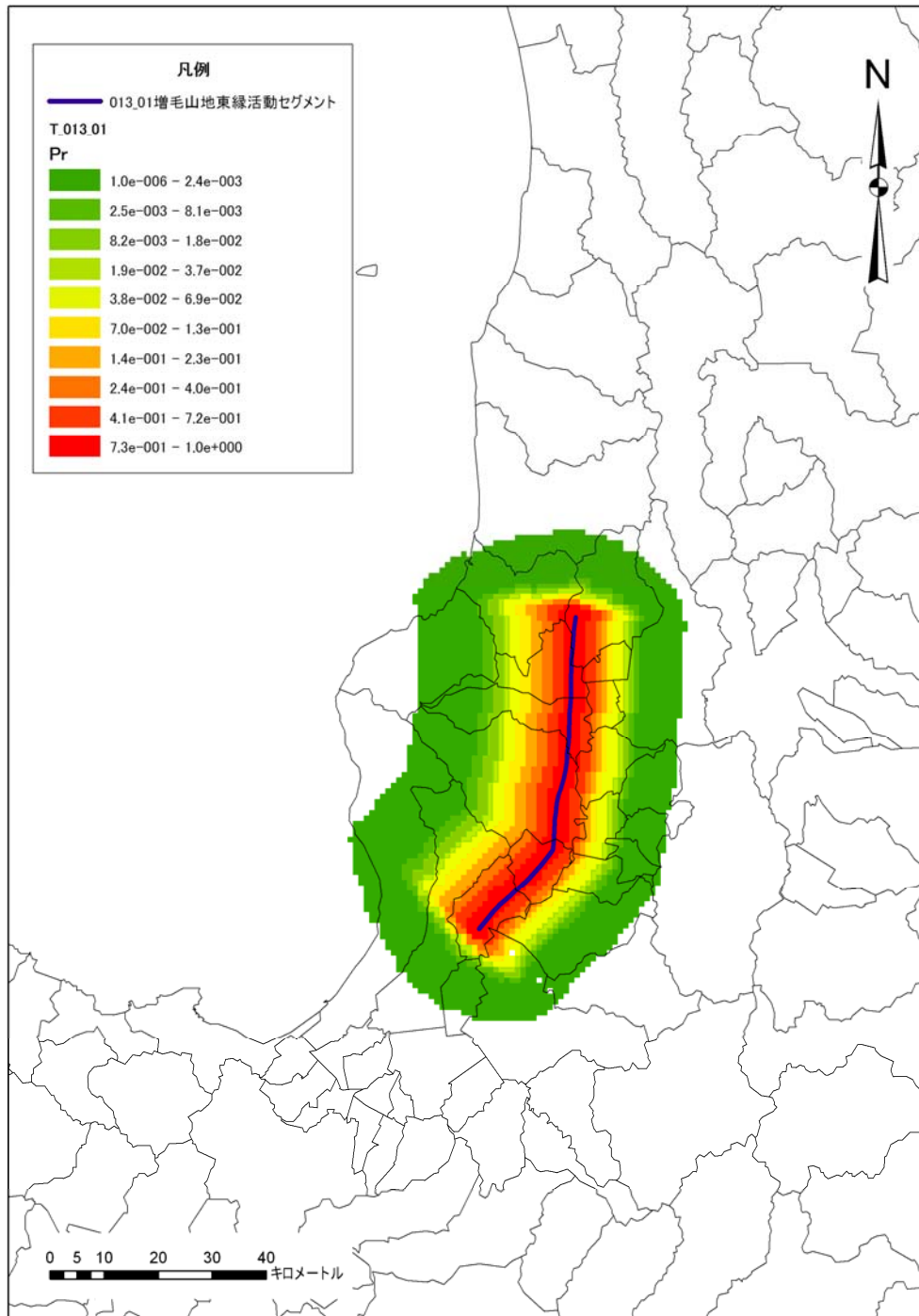


図-4.6(18) 増毛山地東縁活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(19) 当別活動セグメント

当別活動セグメントは、NE の走向で、45W の傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は 0.3m/千年とされている。

断層の影響範囲は平均変位速度が小さいためやや狭い。

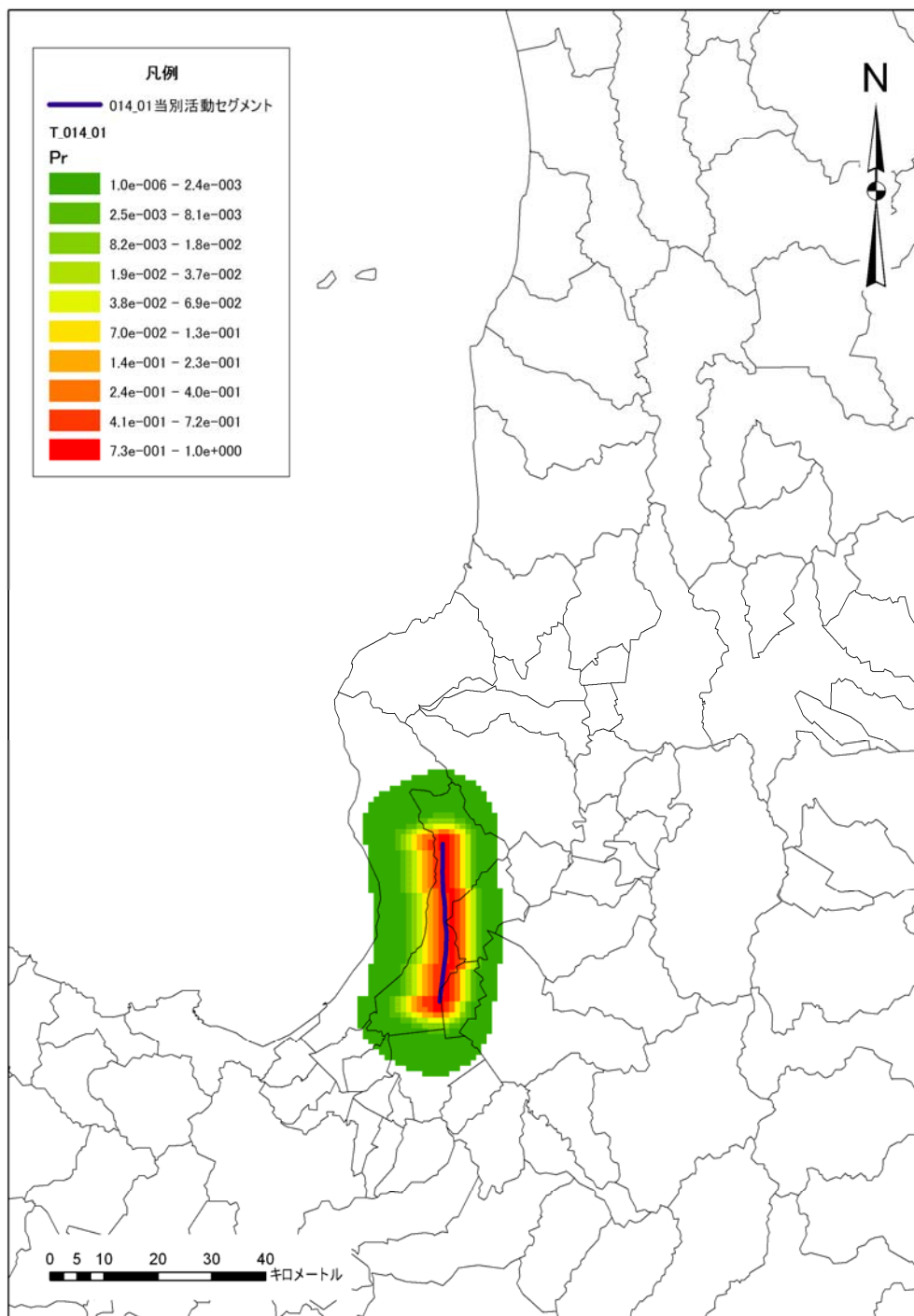


図-4.6(19) 当別活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(20) 馬追活動セグメント

馬追活動セグメントは、N10Eの走向で、30Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は2.3m/千年とされている。

平均変位速度が非常に大きいため、断層の影響範囲は非常に広がっている。また、断層が「く」の字に分布しているため、その形状に応じて影響範囲も広がっている。

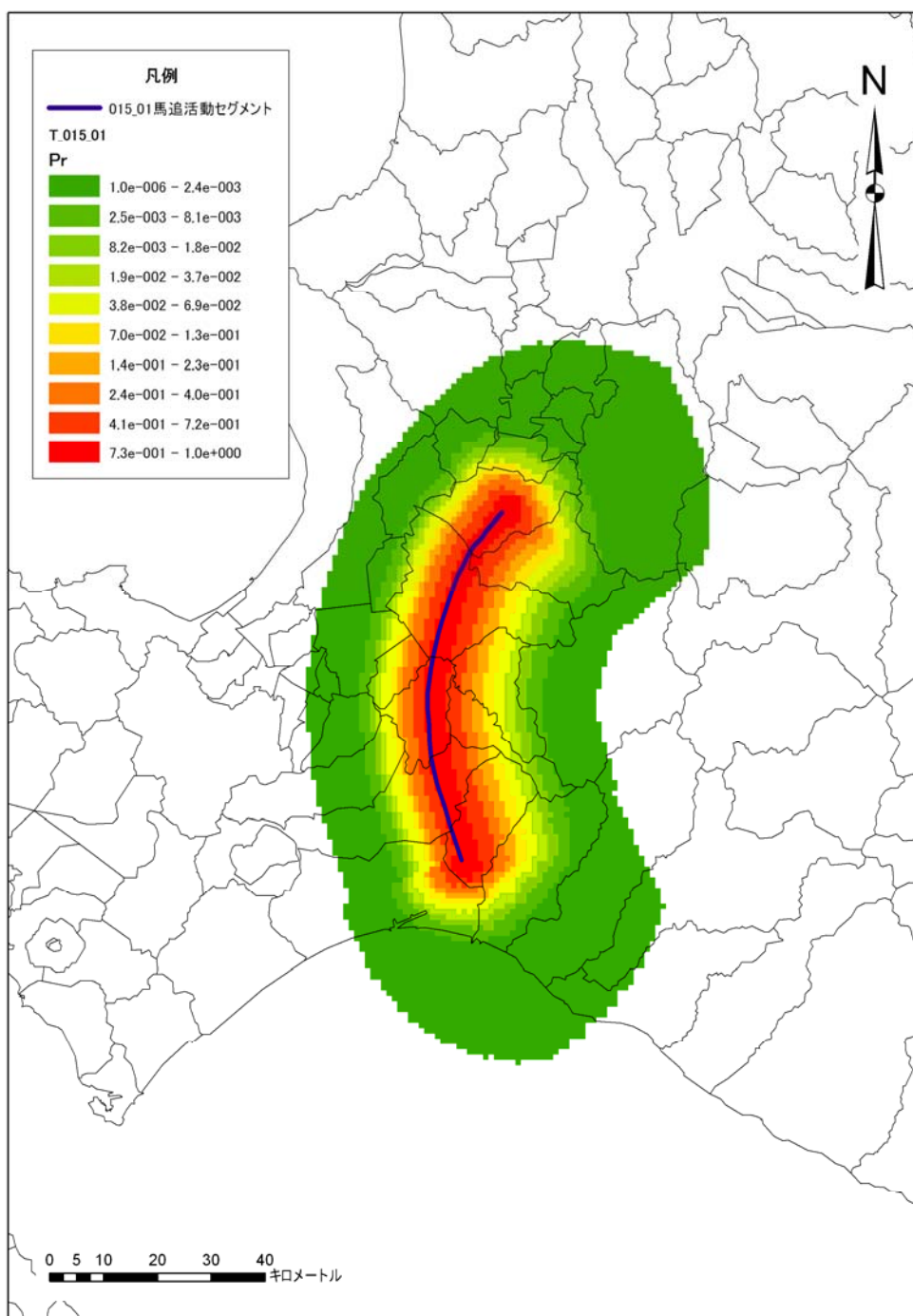


図-4.6(20) 馬追活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(21) 勇払活動セグメント

勇払活動セグメントは，N10W の走向で，30E の傾斜を持つ逆断層である．断層の隆起側は東側であり，平均変位速度は 0.5m/千年とされている．

平均変位速度がやや大きいため，断層の影響範囲もやや広がっている．

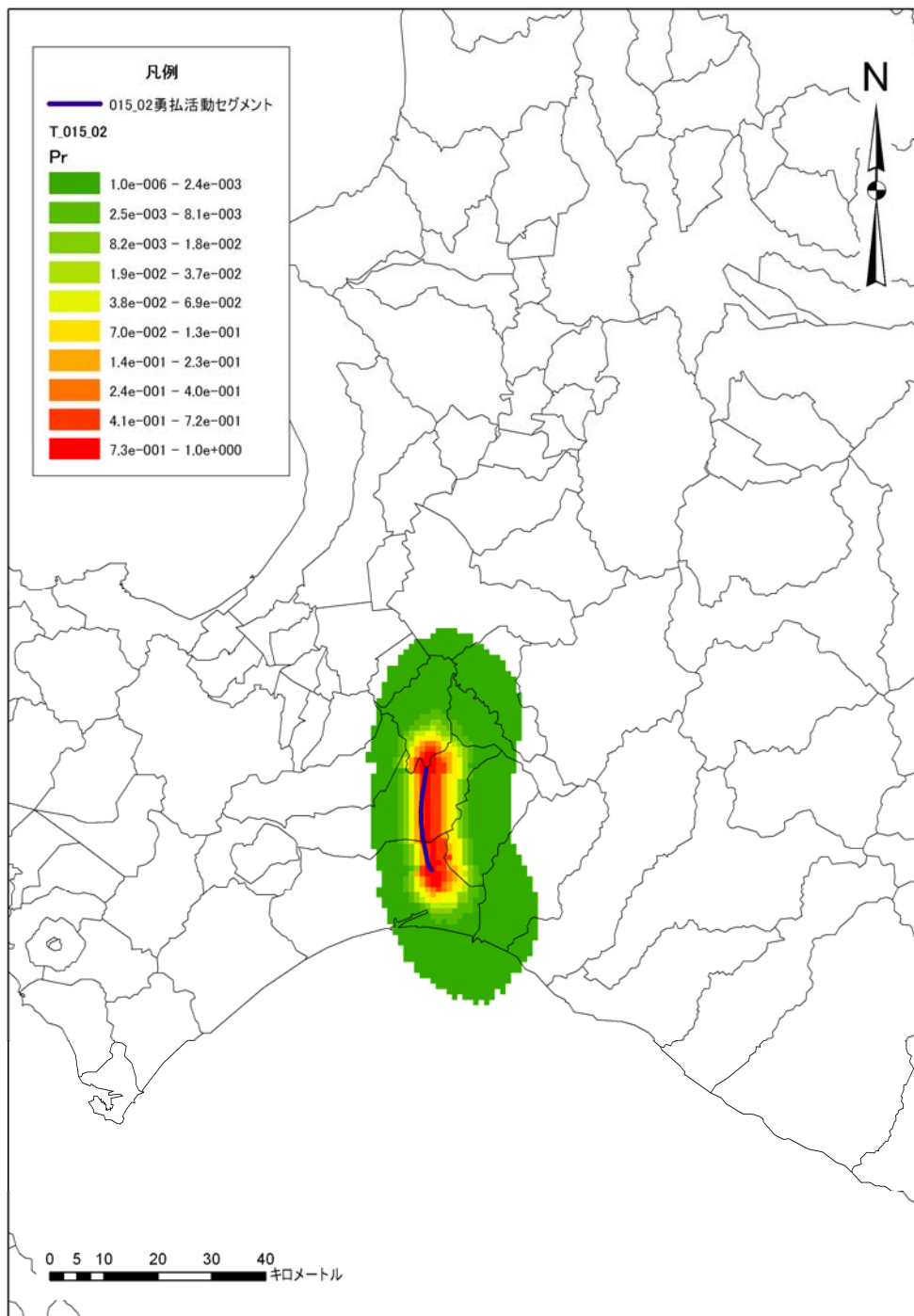


図-4.6(21) 勇払活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(22) 軽舞活動セグメント

軽舞活動セグメントは、N10W の走向で、30E の傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側である。平均変位速度が 0.0m/千年とされているため、影響範囲の算出が不可能である。今回の検討では現在知られている断層の範囲内のみ確率を 1.0 として算出した。

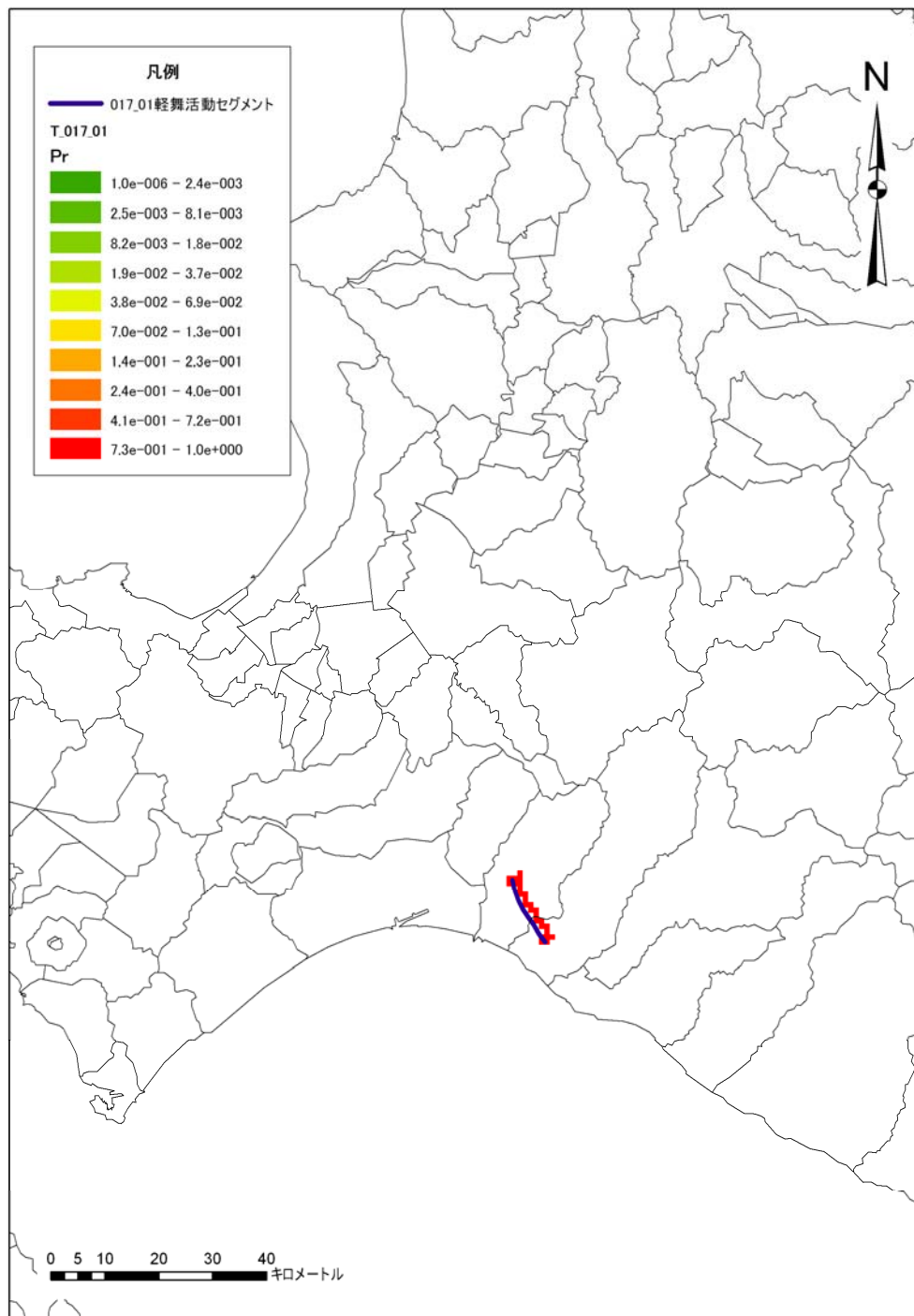


図-4.6(22) 軽舞活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(23) 黒松内活動セグメント

黒松内活動セグメントは、N10Wの走向で、30Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は1.0m/千年とされている。

平均変位速度が大きいため、断層の影響範囲も広がっている。

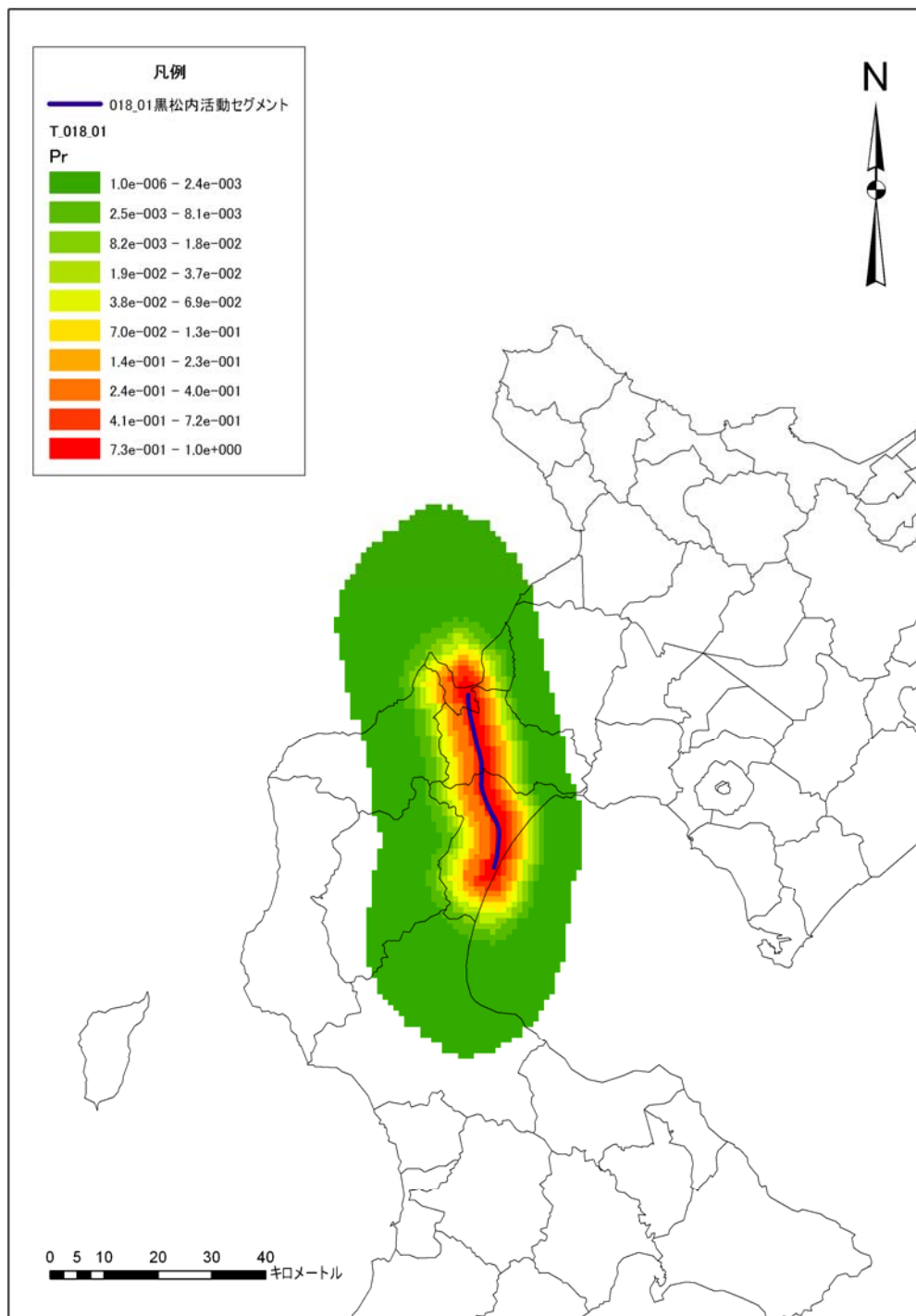


図-4.6(23) 黒松内活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(24) 旭浜活動セグメント

旭浜活動セグメントは、N20Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.5m/千年とされている。

平均変位速度に対して断層長が6kmと非常に短いため、断層の影響範囲は広がっている。

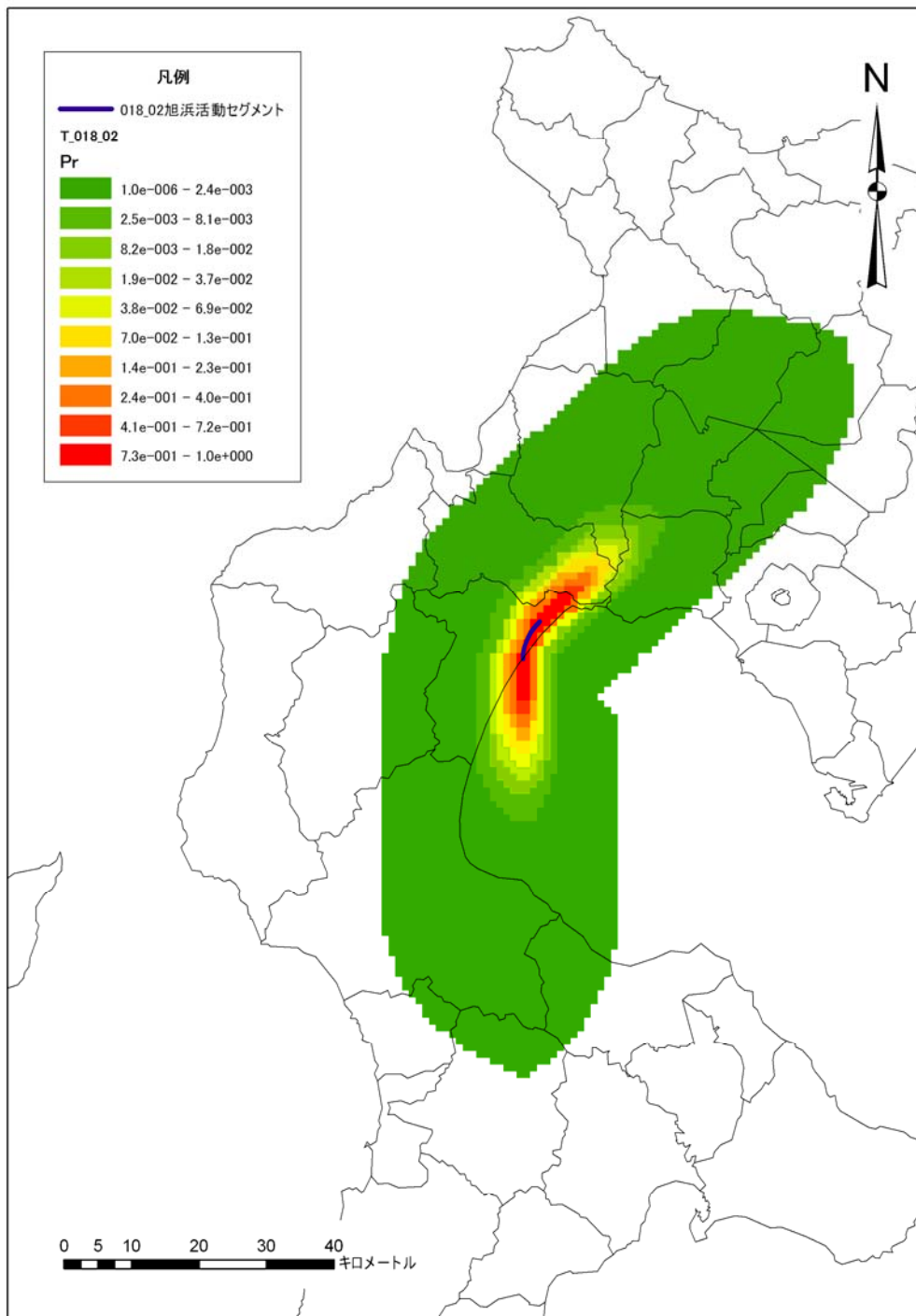


図-4.6(24) 旭浜活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(25) 函館西活動セグメント

函館西活動セグメントは、N10Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.4m/千年とされている。

平均変位速度がやや大きいため、断層の影響範囲もやや広がっている。

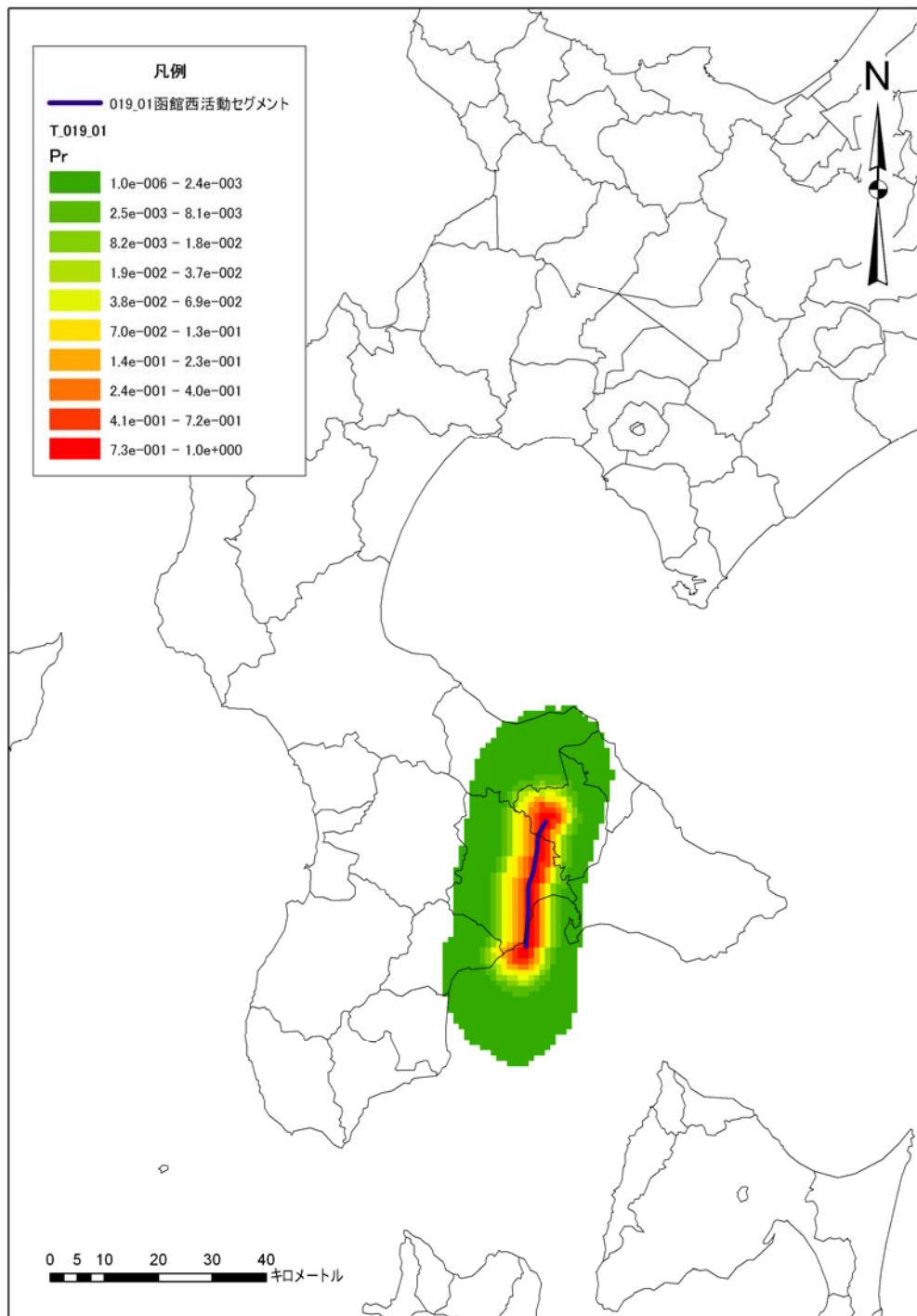


図-4.6(25) 函館西活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図



(26) 沼田－砂川活動セグメント

沼田－砂川活動セグメントは、N10Eの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は0.3m/千年とされている。

平均変位速度がやや小さいため、断層の影響範囲もやや狭くなっている。

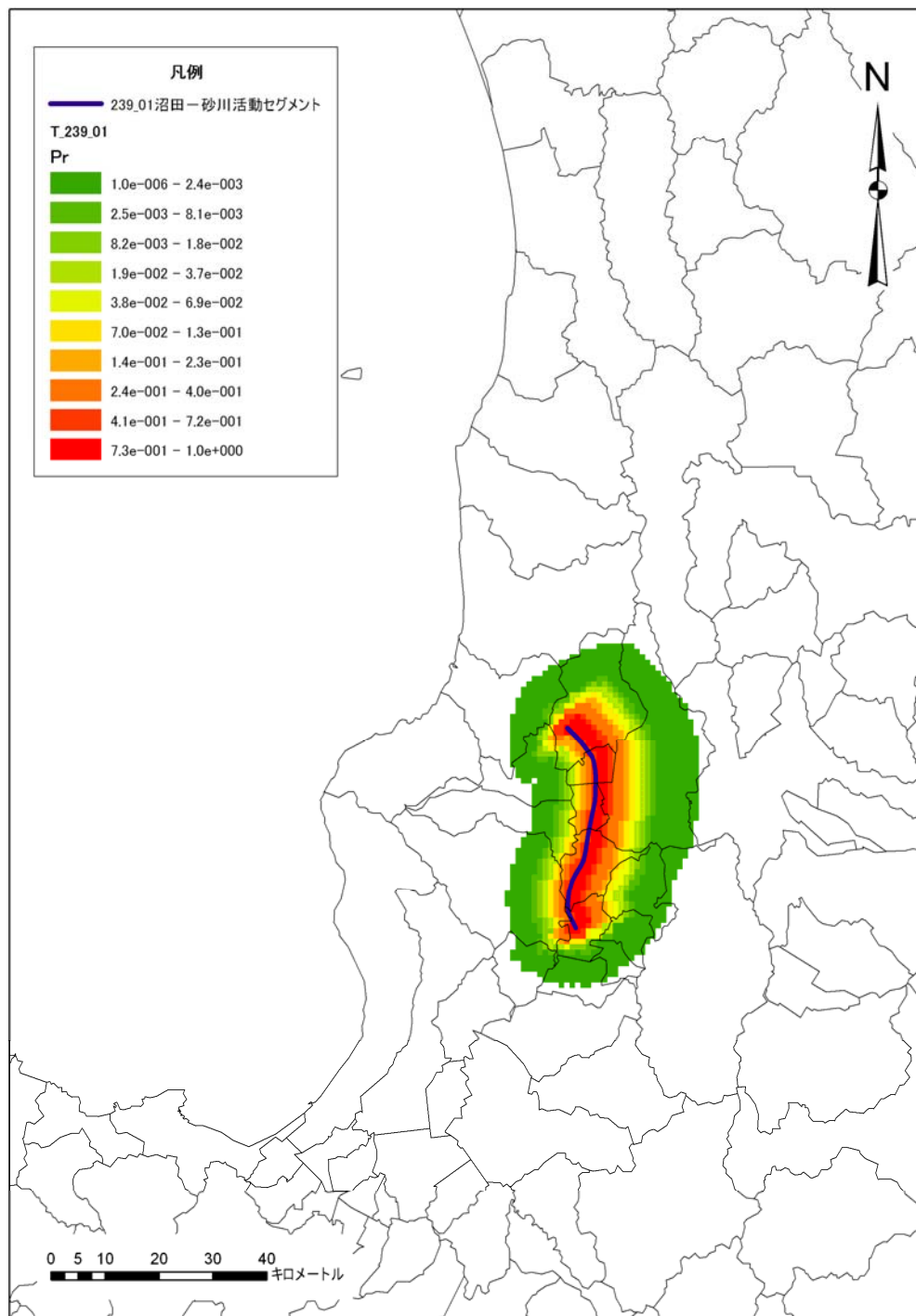


図-4.6(26) 沼田－砂川活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(27) 野幌活動セグメント

野幌活動セグメントは、N10Wの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.2m/千年とされている。

平均変位速度がやや小さいため、断層の影響範囲もやや狭くなっている。

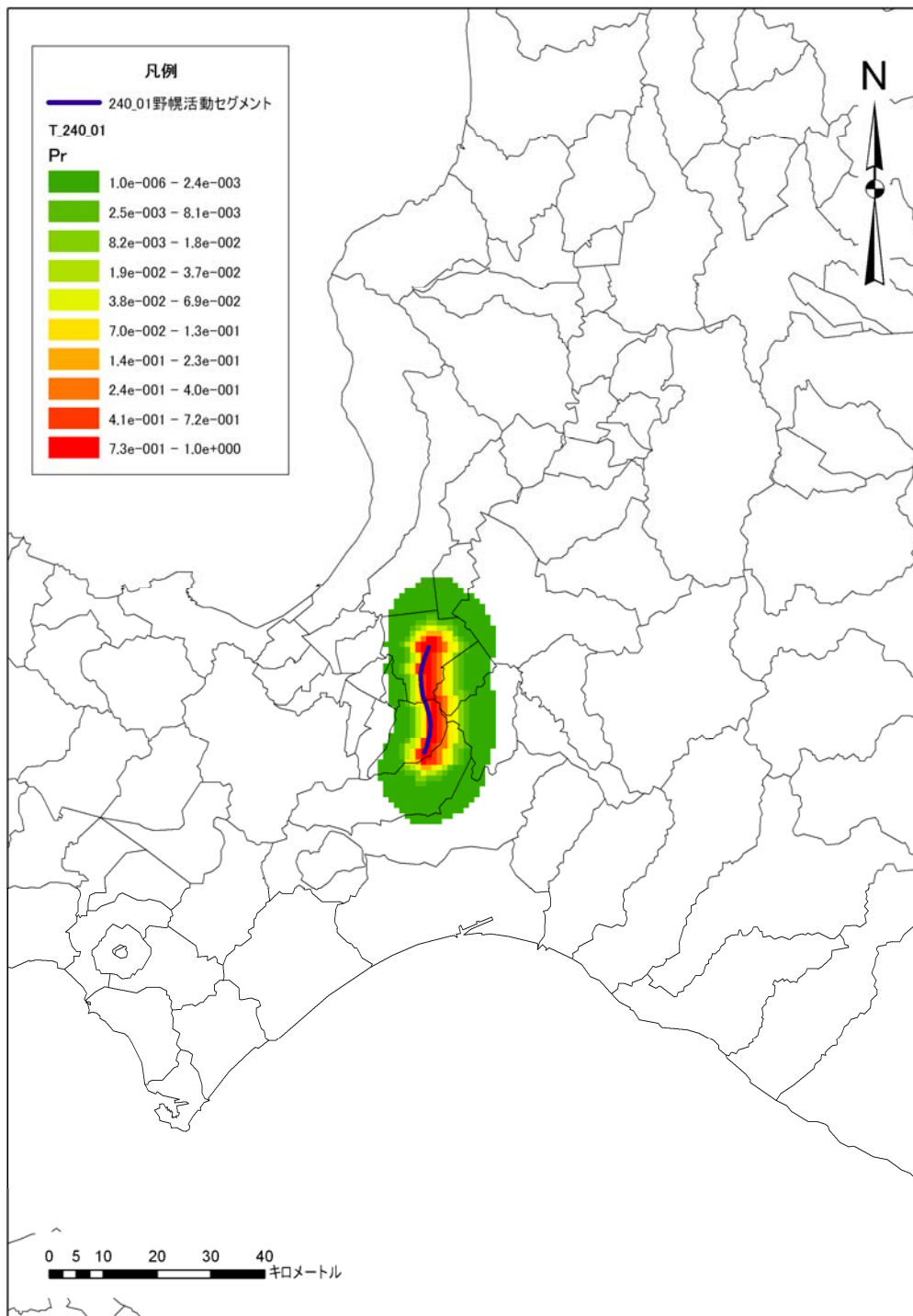


図-4.6(27) 野幌活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(28) サロベツ北活動セグメント

サロベツ北活動セグメントは、N10Wの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は0.5m/千年とされている。

平均変位速度がやや大きいため、断層の影響範囲もやや広がっている。

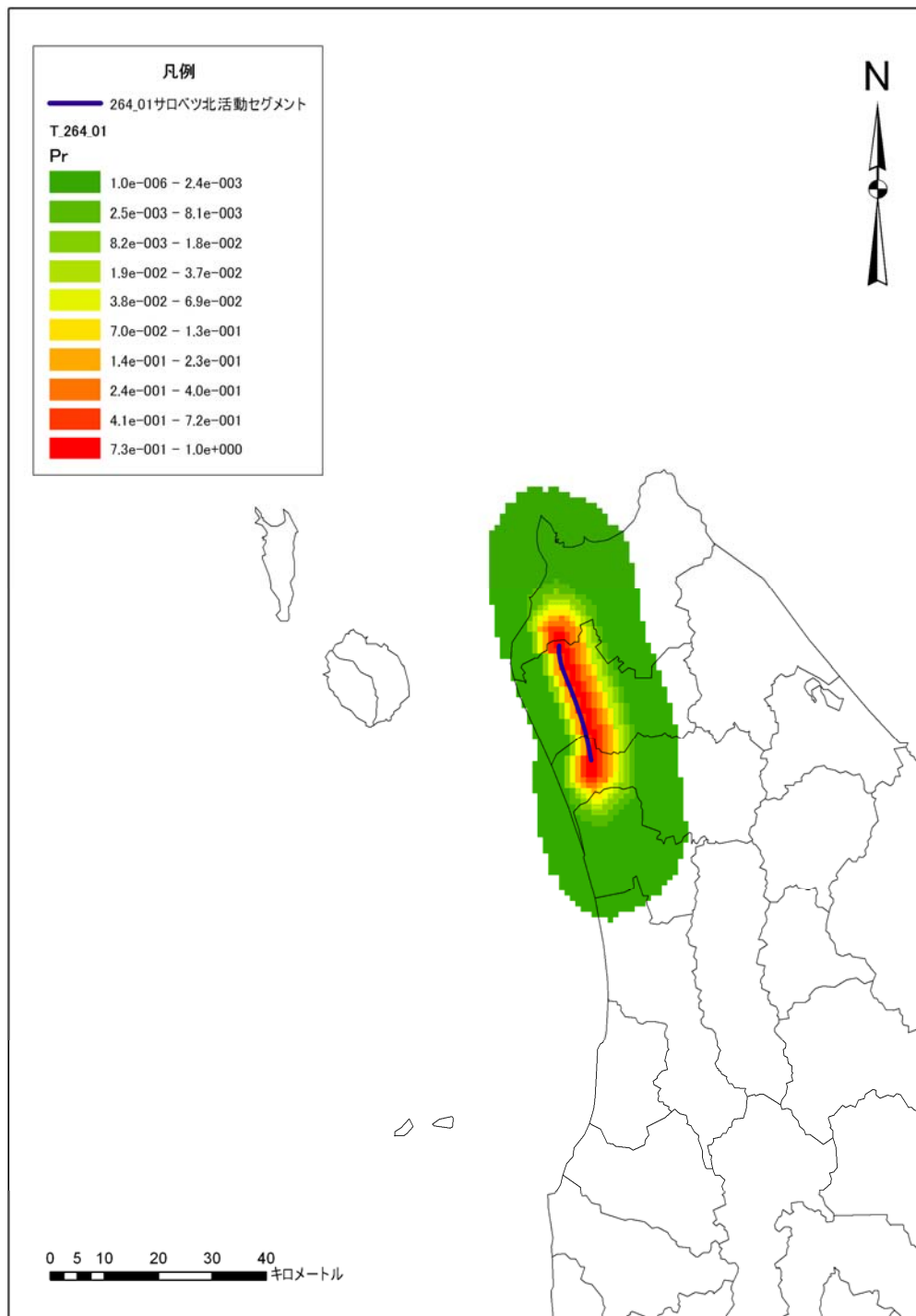


図-4.6(28) サロベツ北活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(29) サロベツ南活動セグメント

サロベツ北活動セグメントは、N10Wの走向で、45Eの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側であり、平均変位速度は0.3m/千年とされている。

平均変位速度がやや小さいが、断層の影響範囲はやや広がっている。

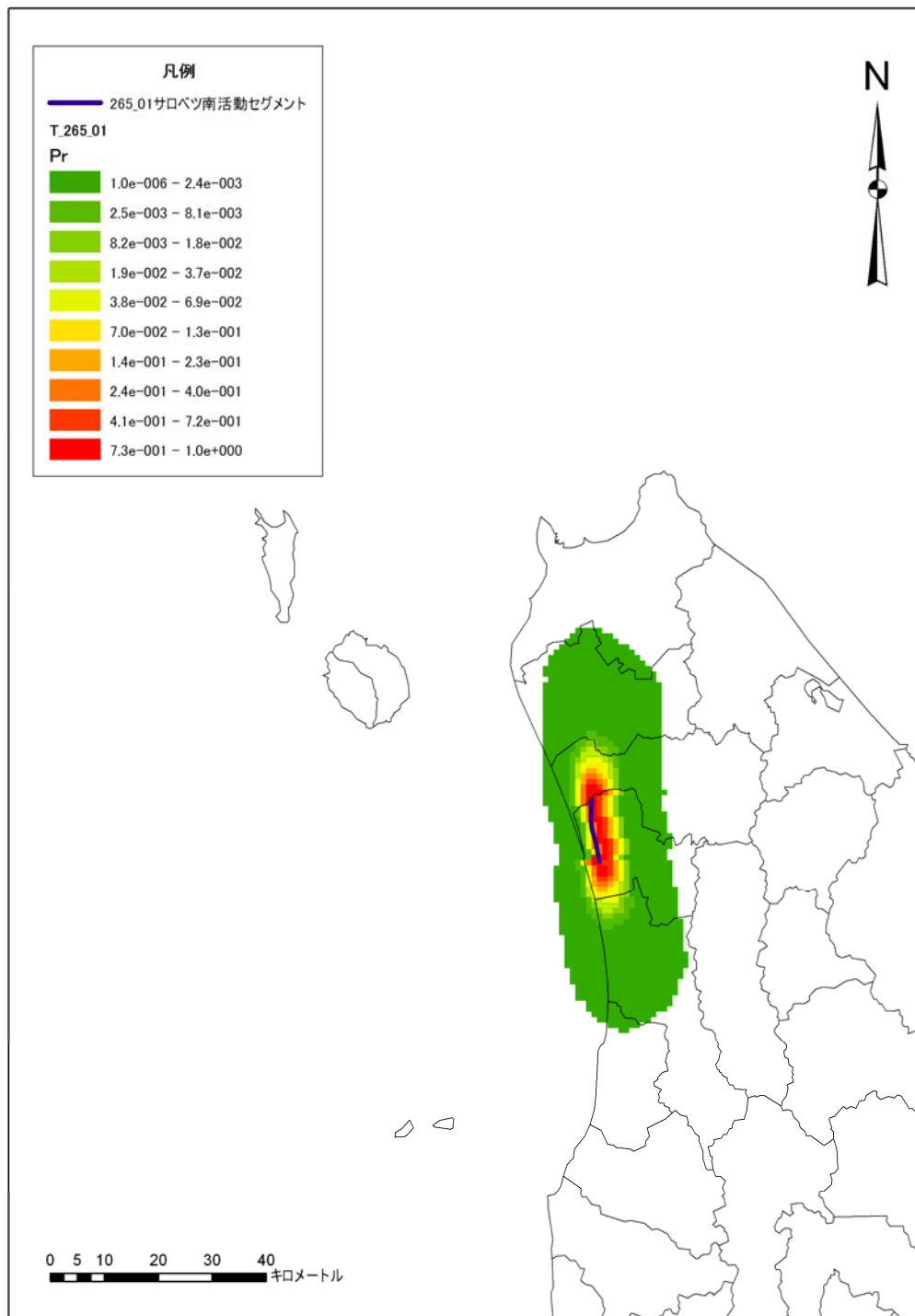


図-4.6(29) サロベツ南活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

(30) 八雲活動セグメント

八雲活動セグメントは、N10Eの走向で、45Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は西側であり、平均変位速度は0.4m/千年とされている。

平均変位速度がやや大きいため、断層の影響範囲もやや広がっている。

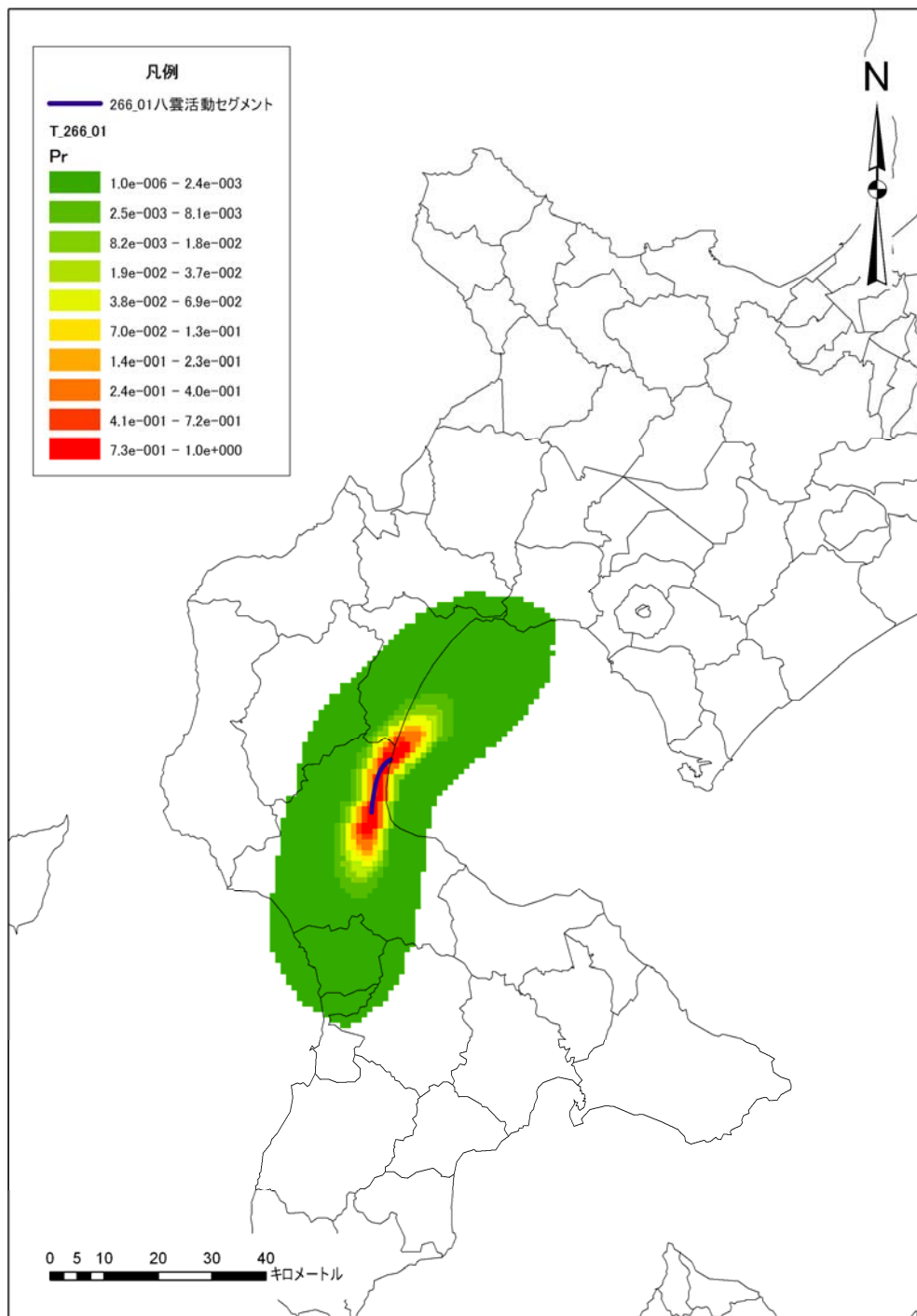


図-4.6(30) 八雲活動セグメントにおける 1Ma 間における断層影響範囲確率図

(31) 尻別川活動セグメント

尻別川活動セグメントは、NWの走向で、45°Wの傾斜を持つ逆断層である。断層の隆起側は東側である。平均変位速度が0.0m/千年とされているため、影響範囲の算出が不可能である。今回の検討では現在知られている断層の範囲内のみ確率を1.0として算出した。

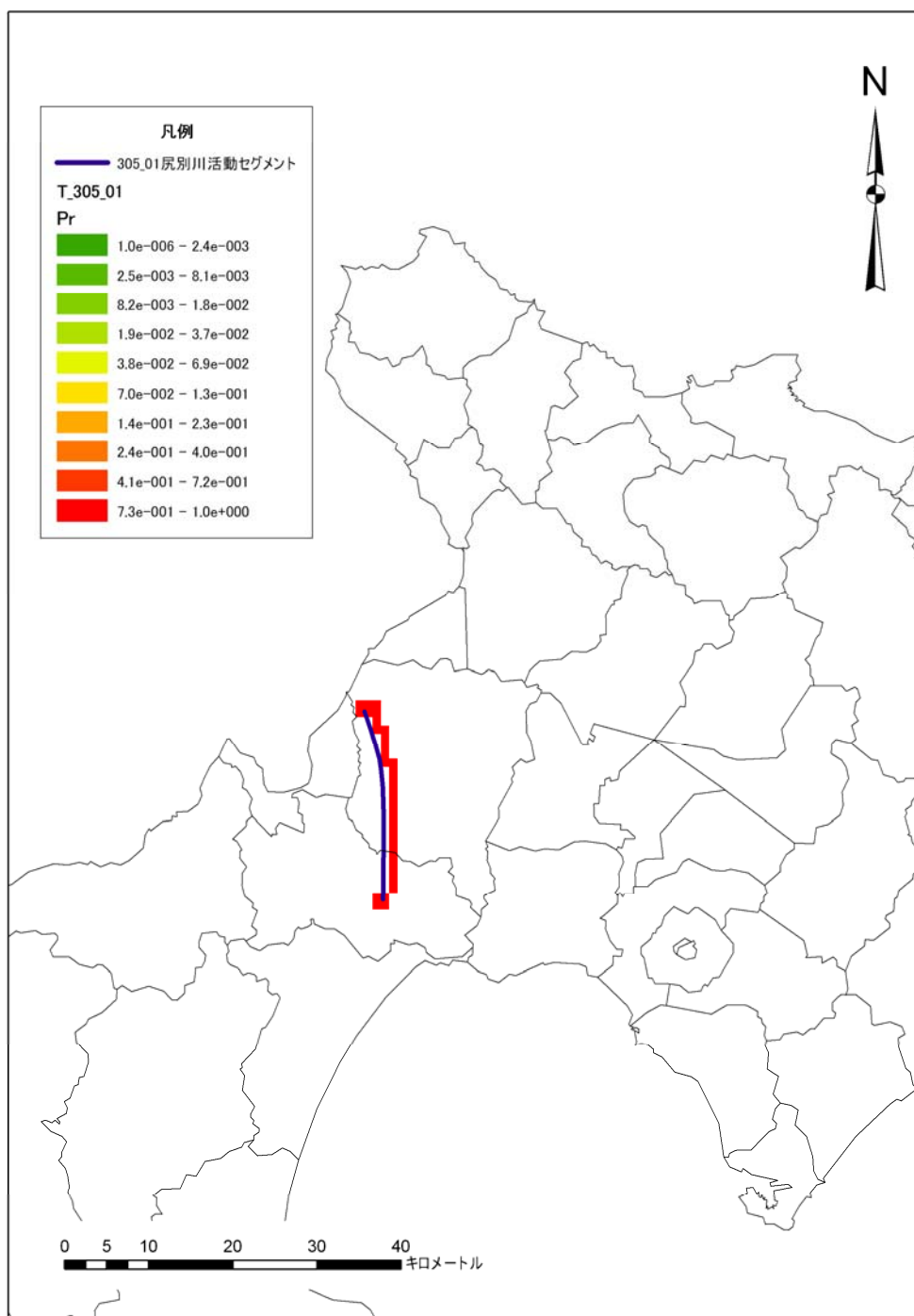


図-4.6(31) 尻別川活動セグメントにおける1Ma間における断層影響範囲確率図

4) 各活動セグメントを考慮した確率

任意地点 (X,Y) におけるすべての断層の影響確率を算出するには, N 個のすべての断層の影響確率の排反事象の積を全確率 (1) で引いた値となる.

つまり,

$$\text{Total\_Fault\_E(Pr\_X,Y)} = 1 - \{(1 - \text{Fault\_1(Pr)}) \times (1 - \text{Fault\_2(Pr)}) \times \dots \times (1 - \text{Fault\_N(Pr)})\} \quad (4.3.2.1)$$

ここで,

Total\_Fault\_E(Pr\_X,Y) : 任意地点 X,Y におけるすべての断層の影響確率

Fault\_1(Pr) : 任意地点 X,Y における個々の断層 1 の影響確率

N : 検討する断層総数 (本検討では, 31 断層)

である.

計算結果を図-4.7 に示す. 図に示すように検討に用いたすべての断層による影響を可視化した結果, 道央や道東で断層の影響が大きくなることが判明した.

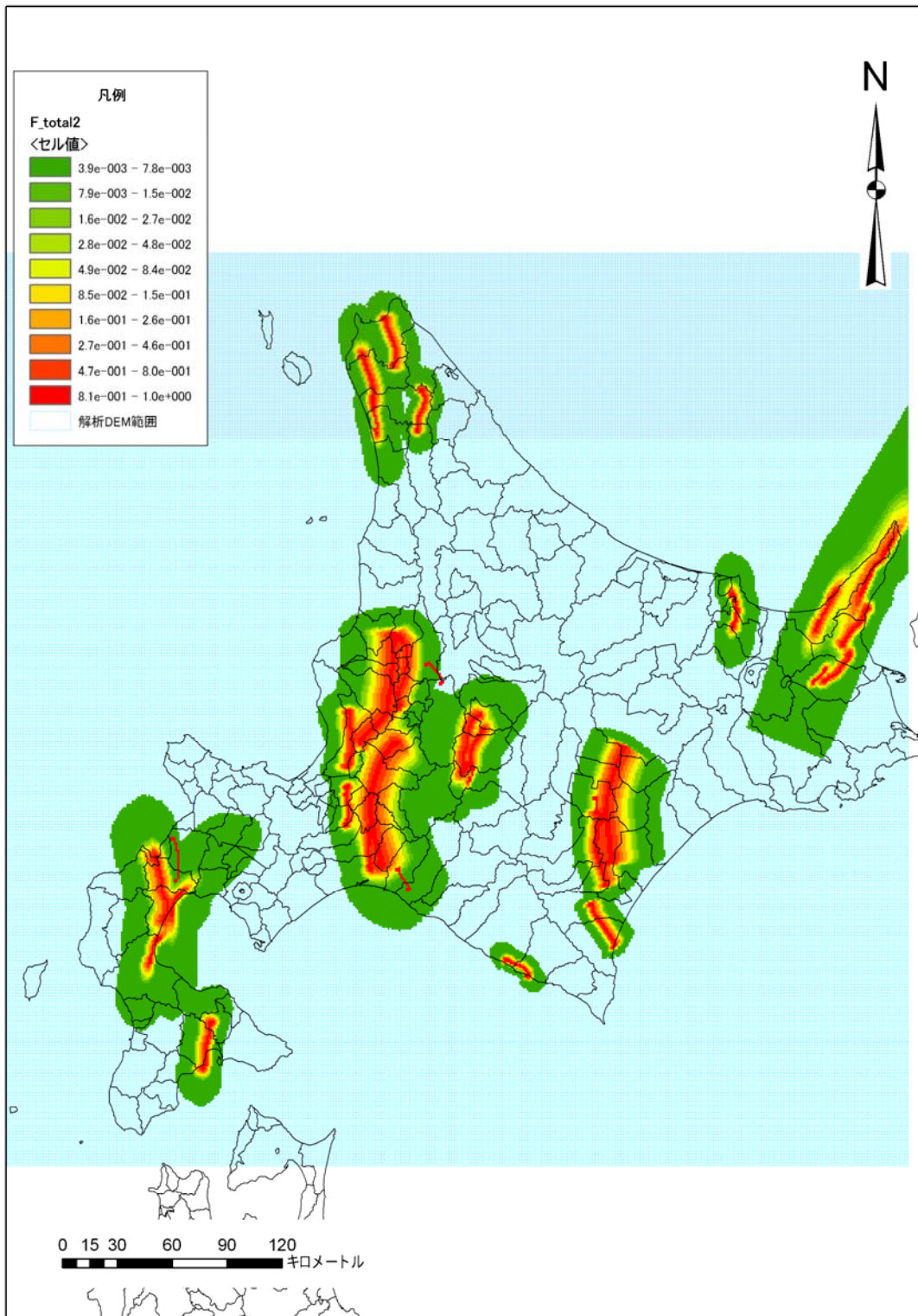


図-4.7 北海道における断層の影響範囲確率図  
 水色の塗りつぶしの領域が計算した領域



### 4.3.3 火山のリスク影響評価の可視化

#### (1)火山の影響範囲の可視化

火山の影響範囲は前述した空間確率モデルに基づいて実施した。なお、空間確率のモデルでは対象とする火山からの取り込み半径  $h$  を設定する必要がある。本検討では、簡略的に 100km の値で計算した。計算に用いた火山は第四紀火山カタログに示されている第四紀火山である。

図-4.8 に計算に用いた第四紀火山の分布位置を青色の三角で示している。また、図-4.9 には新規火山発生確率の計算結果を示す。なお、計算に用いた各パラメータを表-4.2 に示す。

表-4.2 新規火山発生確率の算出に用いたパラメーター一覧

パラメータ	記号	入力値	単位
取り込み半径	$h$	100	km
分布する火山	$n$	60	個
解析エリア	$a$	25	km <sup>2</sup>
評価期間	$t$	1,000,000	年
発生頻度	$\lambda t$	60/2,000,000	火山数/最も古い火山の発生年

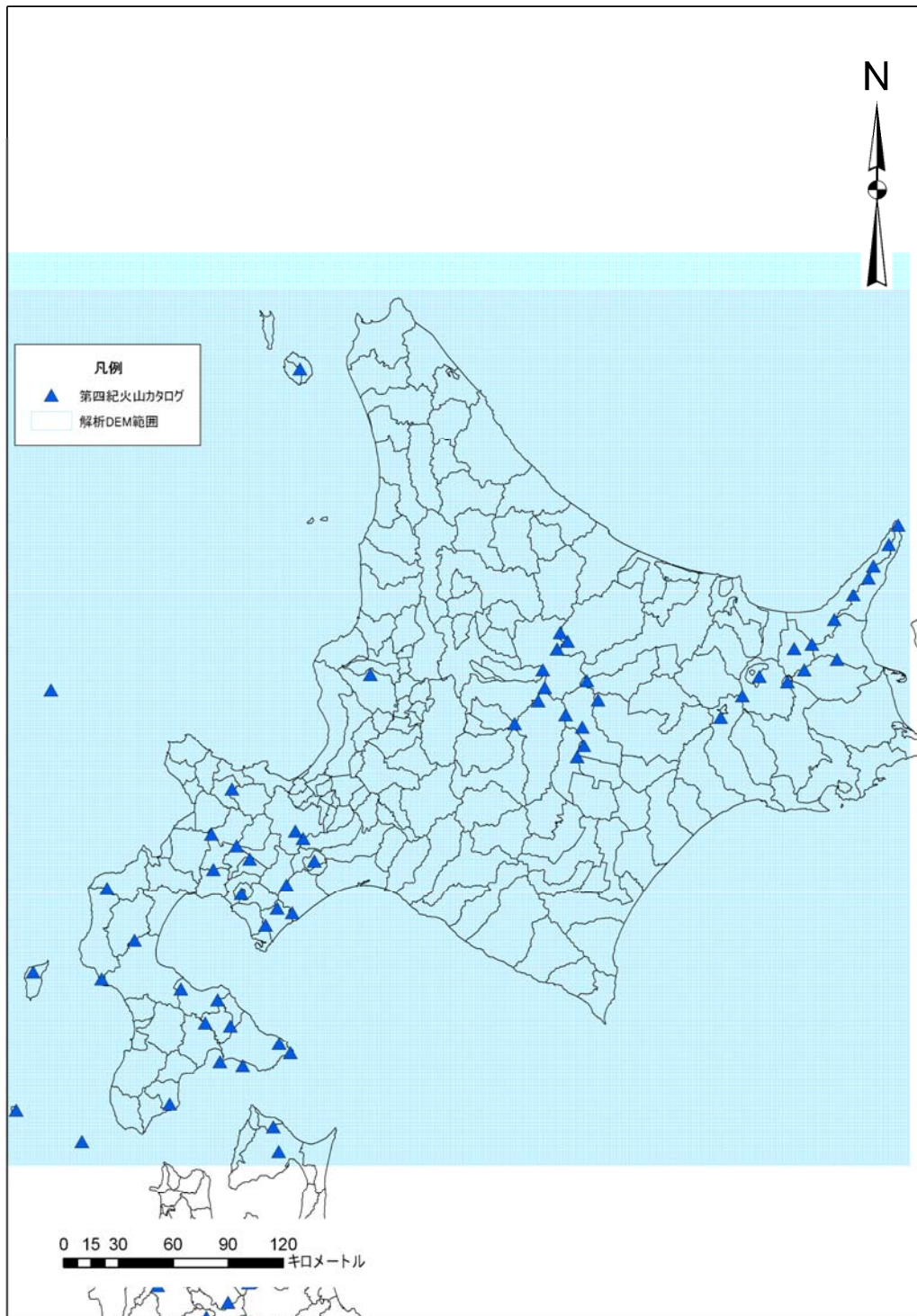


図-4.8 北海道の第四紀火山分布位置図と解析範囲  
 第四紀火山は第四紀火山カタログによる

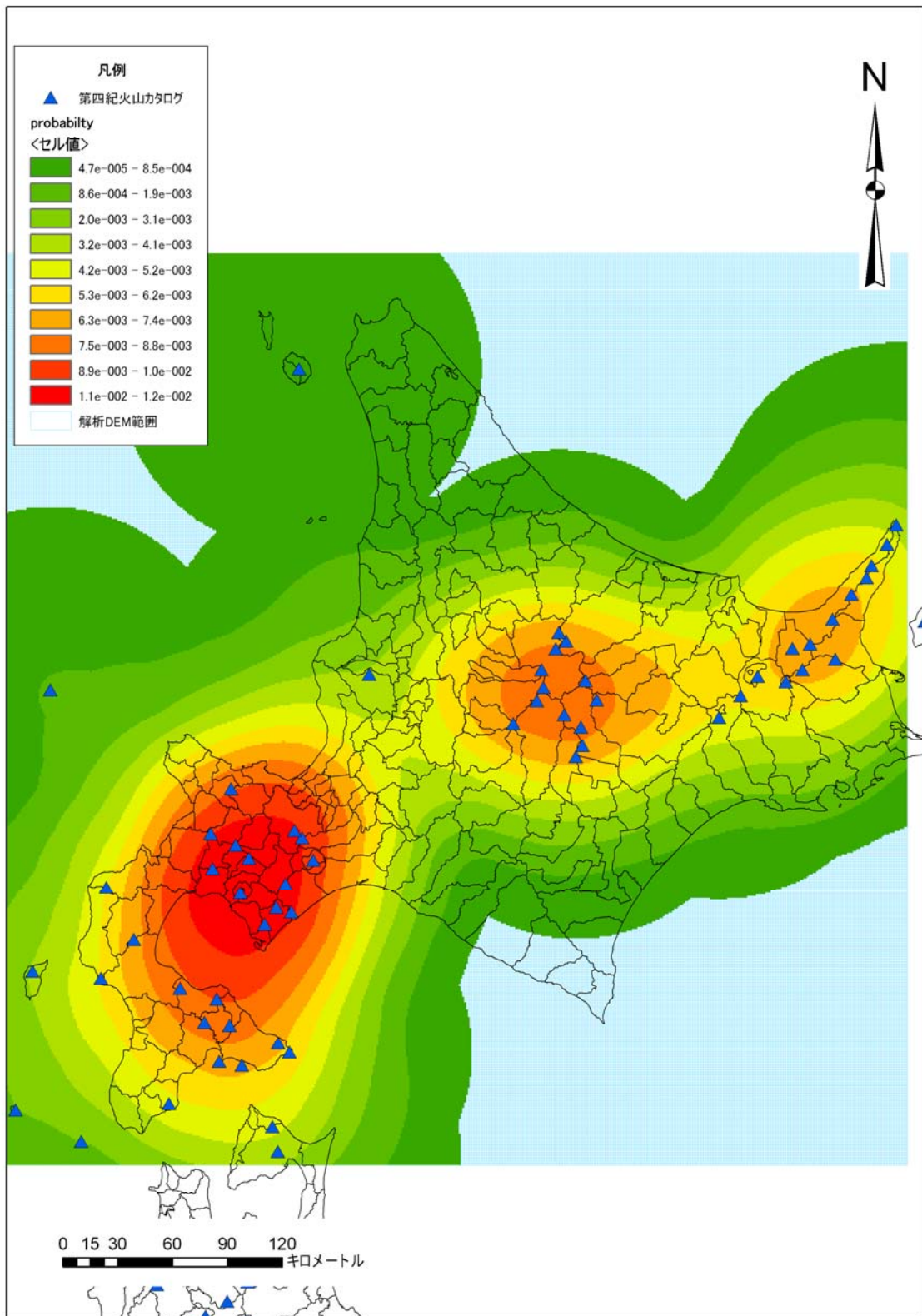


図-4.9 北海道の第四紀火山の新規発生確率（1Ma 間）

#### 4.3.4 大局的なリスク評価の可視化

現在知られている活断層（断層評価）と第四紀火山の情報に基づいて、北海道における大局的なリスク評価の試算を行った。

その結果、断層評価では 31 断層の将来に渡る影響評価範囲を可視化することが可能となり、断層の影響が将来にわたり大きい領域やそうでない領域を視覚的に理解することが可能となった。

第四紀火山の新規発生確率については、既往の空間モデルによる新規火山発生確率の算出を行い、この結果を可視化することで断層と同様に新規火山発生の影響範囲を視覚的に理解可能となった。

断層によるリスクと火山によるリスクは、互いに独立した現象と考えられるため、両者を合わせたリスクは、両者の影響確率の排反事象の積を全確率「1」で引いた値となる。つまり、

$$\begin{aligned} \text{Natural\_Risk}(\text{Pr\_X,Y}) \\ = 1 - \{(1 - \text{Total\_Fault\_E}(\text{Pr\_X,Y})) \times (1 - \text{Total\_Vol\_E}(\text{Pr\_X,Y}))\} \quad (4.3.2.2) \end{aligned}$$

ここで、

Natural\_Risk(Pr\_X,Y) : 任意地点 X,Y における自然現象（断層・火山）の影響確率  
Total\_Fault\_E(Pr\_X,Y) : 任意地点 X,Y におけるすべての断層の影響確率  
Total\_Vol\_E(Pr\_X,Y) : 任意地点 X,Y におけるすべての火山の影響確率

である。

計算結果を図-4.10 に示す。図に示すように新規火山の発生確率よりも断層による影響確率のほうが相対的に高いことが判明し、北海道では北東側で比較的自然現象（断層・火山）の影響確率が低く、西側で影響確率が高いことが視覚的に判断できる。

さらに、図-4.11 には第四紀火山から 15km の円を示している。この領域は原子力発電環境整備機構<sup>1)</sup>が全国一律に評価する事項で、概要調査地区を選定する際に除外している地域である。よって、このような領域では、前述の確率の評価とは異なるが地下処分場の設置可能性の確率としてはリスクが「1」、つまり地下処分場を設置できない領域とみなせる。

このような可視化手法により、地下施設の設置可能性の確率を視覚的に理解し、判断することができ、今後の地下施設設置場所選定にあたり非常に有効な手法と考えられる。

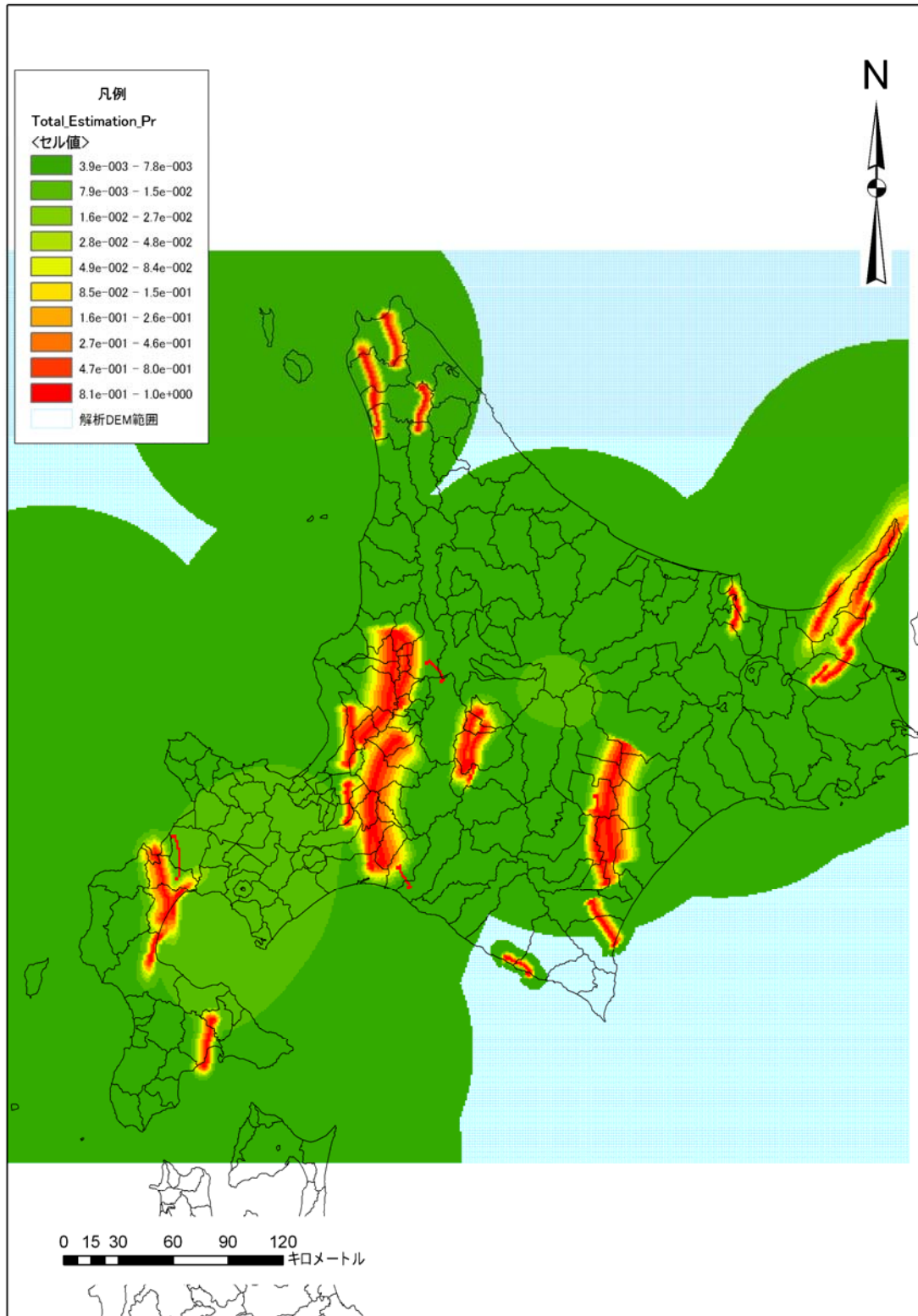


図-4.10 北海道における断層と第四紀火山の影響確率図 (1Ma 間)

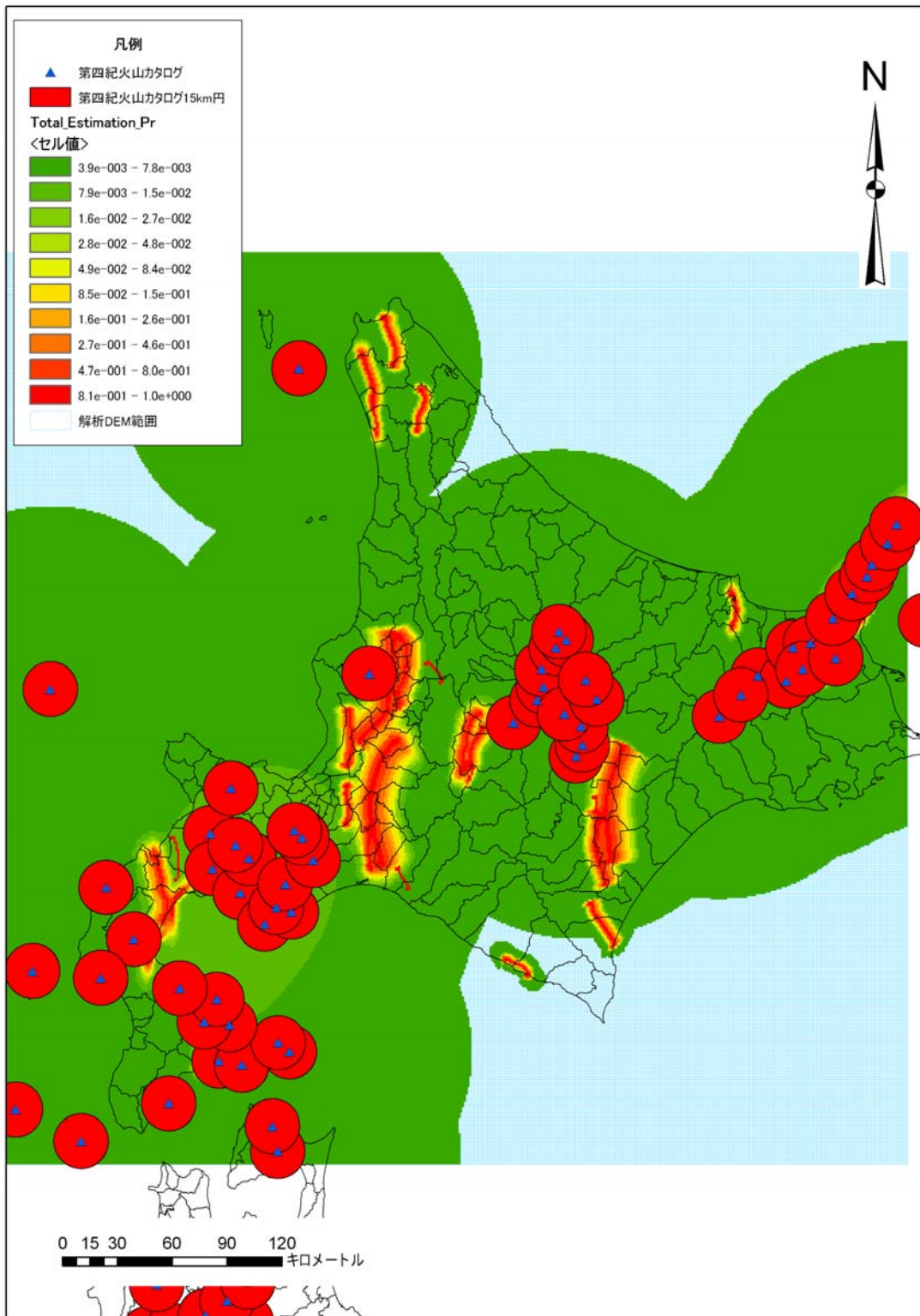


図-4.11 北海道における断層と第四紀火山の影響確率（1Ma 間）  
 ならびに第四紀火山から半径 15km 円内の範囲

#### 4.4 まとめ

本研究で検討した断層の伸展確率ならびに分岐確率の評価手法を用いて、公表されているデータベースを用いて断層の将来にわたる影響範囲の試算を行い、その結果を可視化する手法について検討した。その結果、将来にわたる断層の影響範囲や火山の影響半を可視化することが可能となり視覚的に自然現象の影響範囲を理解することが可能となった。

しかし、可視化手法を検討していると新たな問題点、課題点の浮き彫りとなった。主な項目としては、

- ①断層の伸びの方向の設定手法
- ②断層の平均変位速度のデータ欠如

などである。

断層の伸びの方向は、将来断層が端部からどの方向へ伸びを示すかの問題であり、断層が必ずしも一直線ではないことに起因する。例えば、断層端のみで断層の向きが変わっている場合や、全体的に弓状に断層が分布している場合、あるいは雁行状に断層が配列している場合など様々なケースが考えられる。これらのケースに合わせた将来予測手法の確立が必要になると考えられる。

既往の文献によるデータベースでは断層の平均変位速度のデータが少ないことが問題点として挙げられる。本研究では産業技術研究所のデータベースを用いて平均変位速度のパラメータを与えたが、平均変位速度が示されていない断層も散見された。本研究で提案した断層の影響範囲の評価手法は、断層の長さとその平均変位速度から将来の断層長を予測する手法であるため、平均変位速度の値が必要不可欠となる。しかし、断層の平均変位速度を知るためには十分な調査が必要となるため、そのような断層での評価手法を検討することも今後の課題として挙げられる。

#### 第4章の引用文献

- 1) 原子力発電環境整備機構(2004): 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠  
— 「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料—.
- 2) 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター(2010): 活断層データベース, 起震断層・活動セグメント検索
- 3) 活断層研究会編(1991): 新編・日本の活断層-分布と資料, 付図Ⅱ 300万分の1日本周辺の活断層・地震分布図, 東京大学出版会.



# Chapter 5

## 結 論

### 5 章 結論

本研究では、自然現象の超長期にわたる影響範囲について独自のモデルを構築して結果を示すと共に、社会の合意を得るツールとして評価結果の可視化手法について検討を実施した。

主な成果は、以下のとおりである。

- 活断層の影響範囲を把握するため、活断層の伸展長および側方影響範囲を、累積変位量との関係で地域・断層タイプ毎に見出し、その際のばらつきを確率論で捉えたうえで、予測モデル式を提案した。
  - 将来における隆起量を、海成段丘形成時の高度差から隆起速度を推定する際のばらつきを確率論で捉えたうえで、予測モデル式を提案した。
  - これらの有用かつ新規性のある予測モデル式の作成／可視化により、設計者が、活断層や隆起などの自然事象に対して設備の重要度／評価期間／リスク許容値などを踏まえ、事前に影響を回避すべき範囲（あるいは念入りに現地調査や対策を実施すべき範囲）を知ることが可能になった。
- また、今後の課題としては、以下のとおりである。

- ・対象とする断層や隆起に関する事例数を増やし、予測モデル式の精度を高めていくことが望ましい。
- ・地表における影響範囲を地下施設位置における影響範囲へ補正すること。
- ・断層が曲がっているときの伸展方向の判断
- ・海岸部の隆起量を内陸部に補正すること。

以下に、各章ごとの内容および課題をまとめ、本論文の結論とする。

第 1 章では、本研究の背景と目的についてまとめ、現在日本が直面している高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトの現状について記載した。

地層処分プロジェクトの特徴としては、社会からの理解を得ることが難しいプロジェクトと考えられていること、地層が本来持っている閉じ込め能力を利用し超長期に渡って安全性を確保しなければいけないこと、そのためには断層・火山活動や隆起・侵食などの処分施設に影響を与える可能性がある自然事象を適切に評価したうえで対策を講じる必要があることが挙げられる。

社会資本を効率的に整備していく使命を帯びている土木技術者としては、プロジェクトの手戻りをなくし地点選定の透明性を高めるためには、まずは机上のデータから一定以上の自然リスクを免れる地域を抽出する手法を開発せねばならないと考えた。本手法により地層処分プロジェクトに有望と考えられる地域を抽出できれば、更なる概要調査／精密調査により地点の成立性の判断を実施し、実現性が高い地域において住民や利害関係者の意見を取り入れた実証プロセス移行することが可能となり、プロジェクトの進展に大きく寄与できるというのが筆者の考えである。

第 2 章では、活断層による影響範囲を定量的に示す独自のモデルを開発した。既知の活断層における、<断層延長方向への伸展>と<断層の側方方向への分岐や派生>による影響を平面的に検討した上で、活断層が地下処分施設へ及ぼす影響を決定論的あるいは確率論的に評価する手法を考案した。

事例分析の対象とした活断層は、我が国に存在する活断層の断層タイプを考慮し、横ずれ断層・逆断層・正断層それぞれについて計 37 箇所の断層を用いた。

その結果、<断層延長方向の伸展>に関する検討では、断層長と累積変位量の関係を断層タイプ・地域ごとに分析し、両者の関係式を導くに至った。一方、<断層の側方方向への分岐や派生>の影響範囲に関する検討では、主断層とその側方に分岐・派生した断層との離間距離を活断層分布図上で計測し、基礎データ整理した。整理したデータ群を統計解析することで、影響幅/断層長比の平均値を決定論的な予測値として与えることが可能となった。

具体的には次のとおりである。

<断層延長方向の伸展>における伸展長の予測は、断層長と累積変位量の関係を断層タイプ・地域ごとに検討して得られた関係式から導かれ、この関係式にしたがって断層長が時間とともに伸展するという仮定のもとに、今後 100 万年間の変位量の増大分を平均変位速度と評価期間の積として関係式に代入することにより、100 万年後の断層長を見積もることができる。

さらに、断層長と累積変位量の関係は両者の関係式に対して誤差を示すことから、断層長の誤差分布を表す確率密度関数として対数正規分布を設定し、ここから伸展長の誤差を理論解として導くことにより確率論的な伸展長も得る手法を考案した。

また、<断層の側方方向への分岐や派生>における影響範囲の予測は、上述のとおり、主断層とその側方に分岐・派生した断層との離間距離を活断層分布図上で計測し、それらデータ群を統計解析することで、影響幅/断層長比の平均値を決定論的な予測値として与えることが可能となった。さらに、計測による影響幅/断層長比のヒストグラムは、正規分布の片側確率密度関数により近似されることから断層タイプごとに確率密度関数を設定し、これにもとづく確率論的な影響幅を得た。なお、影響幅の見積りには、入力値として当該断層の断層タイプ、断層長が必要であり、断層長は伸展距離の予測値から導かれる。また正断層・逆断層の場合には、断層の隆起側・沈降側が識別されている必要がある。ここで得られる確率は、断層周辺に位置する任意の地点を基準として、「将来断層に分岐が生じた場合に、当該地点がその影響範囲に入る確率」を意味する。

第 3 章では、隆起・侵食による処分施設への具体的な影響を述べるとともに、海成段丘の分布高度や隆起速度から将来にわたる影響を、決定論的あるいは確率論的に予測する独自のモデルを開発した。

処分施設が、地表近くに接近した場合は、地下水流動特性や酸化還元などの地化学的条件が変化して、地層による放射線の閉じ込め性能を期待できなくなる。隆起・侵食は、日本列島のどこにおいても継続的に生じているものの地域差が極めて大きく、隆起が活発な地域における処分場建設は避ける必要がある。

沿岸域における隆起速度の算定においては、最終間氷期最盛期(約 12.5 万年前)の海洋酸素同位体ステージ (MIS5e) に形成された海成段丘が、形成時の海面高度が現海面+5~6m という高い精度で形成年代とともに知られており、地形的に読み取られる旧汀線と形成時の海面との高度差から精度良く隆起速度を知ることができる。沿岸域に限定すれば、この手法により隆起速度を想定して「地下施設が隆起・侵食作用により地表へ接近する」ことを評価することができる。しかし、この手法においても平均隆起速度等の想定には様々な誤差を含むと考えられる。

そこで本研究では、特に海成段丘の旧汀線高度の認定精度を事例から検討し、確率論的評価手法により評価期間における施設の隆起量を提示するモデルを構築した。

第4章では、リスク影響範囲を可視化する手法に関して記載した。

断層の将来にわたる伸展・分岐による影響範囲、隆起・侵食の影響、新規火山形成の発生確率など、将来にわたる自然事象の影響範囲を可視化することは、それらの影響を視覚的にかつ空間的に把握することが可能となり、高レベル放射性廃棄物の立地場所の検討やスクリーニングする際に非常に有益な判断資料となる。そして社会に対する説明資料としても、効果を発揮することができる。

例えば、前章で示した断層の影響範囲は、断層の伸展長とそのときの分岐幅で求めることが計算上可能であることを示したが、実際の断層で検討した際にどのあたりまでそれらの影響が及ぶかは、特に確率論の解に関しては直感的に判断することが大変難しい。加えて、新規火山の発生確率など他の自然現象の影響範囲を併せて考えるためには、可視化の技術が必要不可欠と思われる。

本書では、今回実施した確率的な評価手法に基づく断層影響、及び、新規火山の発生による影響を空間位置情報に基づき重ね合わせ、北海道を例とした大局的なリスク評価の可視化を試みた。自然事象の影響範囲を視覚的に把握できるため、初期の地層処分候補地点のスクリーニングという観点からは、有効な説得手法になると考えられる。

## 謝 辞

筆者が初めて活断層に出会ったのは、1889年に関西電力㈱から通商産業省の外郭団体である(財)原子力工学試験センターに出向した時である。地質調査所長であられた垣見俊弘先生が同時期に赴任してこられ、全国の特定制断層を調査することとなった。活断層評価委員会を立ち上げ、松田時彦先生に委員長をお願いし、岡田篤正先生、岡村行信先生、杉山雄一先生、本荘静光先生、山崎晴雄先生に委員として加わっていただき、活断層調査が本格化した。何日も山に籠り、断層露頭の前では時間を忘れて過去の壮大なるイベントを想像しあう、先生たちの熱意あるディスカッションに立ち会わせていただいた。筆者にとっては、まさに‘門前の小僧習わぬ経を読む’という形であった。

1995年に発生した阪神・淡路大震災では、再び恩師の先生方と出会うことになる。当時関西電力㈱で活断層を担当していた筆者は、野島断層の現地調査に同行させていただき、まだ湯気が立ち上る断層の地表への出現状況を調べ、その多様性・奇怪さから多くのことを学んだ。その後国内外の研究者が野島断層の視察に来られる際には必ず筆者が案内役を請け負った。活断層と被害の状況については、IEEEが米国オレゴン州ポートランドで開催した地震セッションでパネリストを務めるなど、いくつかの国内外の学会で発表した。

社会資本を整備する使命を帯びている土木技術者としては、災害に強い国土を構築するために、起こりうる自然事象の把握と対処方法をより究めていかねばならないと、この頃から強く認識するようになった。業務を遂行するにあたっては、耐震上の視点を忘れてはならないということが筆者のバックボーンになった。2011年にポルトガル国リスボンで開催されたISRM国際会議耐震セッションでは、斯界を代表してKeynote Addressを任せられ、‘日本の原子力発電所における原子炉建屋基礎地盤および原子炉建屋周辺斜面の耐震安全性評価手法’と題して講演を行った。2010年～2017年の間、筆者がOperating Agent(主査)を務めた政府間協定IEA Implementing Agreementに基づくAnnex-XI部会(水力設備の更新と増強)においては、各国と協同作業でまとめた報告書内の耐震補強に多くの頁を費やした。2016年にラオス国で開催されたASIA2016国際会議でも、耐震設計の重要性を本会議冒頭の基調講演のなかで説いた。

さて、本稿は、筆者が2002年以降に業務として携わった放射性廃棄物を題材とし、高レベル放射性廃棄物の処分地選定という観点から、自然災害に頑健な地域を抽出するモデルを独自の研究成果として提案したものである。大規模プロジェクトを実施する際には、誘致や政治的理由により、立地場所が決まることが多々ある。しかし、通常の構造物とは違って設備に期待する機能維持の期間が十万年程度以上に至る地層処分プロジェクトの場合

は、最初に地質学的見地から日本国内を定量的にリスク評価したうえで一定以上のリスクを免れる有望地点の中から処分地を選定し、その後詳細な立地可能性調査を実施した上で成立性を判断すべきというのが筆者の考えである。何某かの理由で立地候補地点が決まってから現地調査を実施するのでは、調査結果によってはプロジェクトが振り出しに戻ることもあり、時間と費用の無駄遣いになる。地層処分施設が自然事象から受ける影響を事前に定量的評価し、超長期にわたる災害リスクが少ない有望地点を精度よく抽出するモデルを開発することは、地点選定上非常に有意義と考え、研究・論文執筆に着手した。

閣議決定された第 5 次エネルギー基本計画においては、国が前面に立って最終処分に向けた取組みを進めることが決まり、2017 年 7 月には最終処分に係る「科学的特性マップ」を公表したうえで、国民理解・地域理解を深めていくための取組を一層強化するとしている。本研究が、この数年が正念場となる複数地域における処分地選定調査受入れの一助となることを、切に望む次第である。

末筆になるが、本論文の執筆にあたって終始懇切丁寧なご指導を賜った東京大学巨大地震津波災害予測研究センター 堀宗朗教授、貴重な助言・審査をいただいた前川宏一教授（横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院）、谷和夫教授（東京海洋大学学術研究院海洋資源エネルギー学部門）、石田哲也教授（東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻）、市村強准教授（東京大学巨大地震津波災害予測研究センター）、理学的な見地から相談に乗っていただいた福田徹也博士、生活面やプライベートで筆者を理解し支援してくれた妻 かおる、長男 隆人、長女 ひかるに感謝の意を表す。