

## 断層変位被害リスクの低減方策

(株) ニュージェック 秋山 隆

### 論文要旨

1995年兵庫県南部地震で淡路島に野島断層が出現したように、地震規模によっては地表地震断層が地上に出現することがある。本稿では、断層運動による直接的な被害から逃れるための、筆者が開発した断層運動影響範囲予測手法 Akiyama (2011) の概要を説明する。そして、本手法を2024年能登半島地震に適用した結果、および、風力発電所地点での計算事例を示す。加えて本手法の活用事例として、洋上風力発電所における配置設計への適用結果を示し、断層変位被害リスクの低減方策として本手法が有用であることを述べることをとする。

キーワード：断層運動影響範囲、確率論、洋上風力、風車配置、被害リスク低減

### まえがき

筆者は、我が国の特徴的な自然条件の中から活断層を取り上げ、断層変位被害リスク低減に寄与する断層運動影響範囲予測手法 Akiyama (2011)を開発・提案している。もともとは、超長期の評価を必要とする地層処分事業に向けて開発した手法であるが、本稿においては、同手法の必要性と概要を説明した後、能登半島地震 (2024)や風力発電施設に適用した事例を説明し、本手法が超長期の将来予測に拘らず、次の地震時の断層変位被害リスクの低減方策として有効に活用できることを示していく。

また実際の地点でのケーススタディとして、風力発電施設を選定し、断層運動による風力発電施設への直接的な影響が懸念される範囲を決定論・確率論で示す。これは、経済産業省「発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説 令和5年3月20日改正」において、風力発電所の建設に当たっては断層の有無を調査することになっているが、断層が存在していた時の対応については明記されていないので、対応案の一例を示すことにしたものである。さらに、今後の発展が見込める洋上風力発電所における配置設計に本手法を適用した事例を紹介し、手法の有用性を述べることをとする。

### 1. 断層運動の影響

一般的には、断層運動により発生する地震動に対して耐震設計を実施することにより、施設の健全性は確保される。しかし、断層の直上にある施設は断層運動の直撃に遭うと為す術もないことから、断層直上に建設することは避けるべきであろうし、断層近傍においても重要施設では地震動と断層変位を重畳させたうえでの耐震安全性を要求されることがある。実際に、米国カリフォルニア州では、活断層法の制定により明瞭かつ活動的な活断層を含んだ幅約300mの地帯で断層調査が義務付けられ、構造物の建設が規制されている。

図-1に、地表地震断層出現状況を示す。強震動発生領域であるアスペリティ部分にある震源断層では周期的に断層運動が生じるが、その規模、破壊開始点、表層の状況などにより、地表地震断層として出現する位置はばらつく。よって断層線を含むある範囲を以って、出現位置を押さえる必要がある。そして、その範囲を推測するのが断層運動影響範囲予測手法 Akiyama (2011) であり、現存する唯一の予測式である。

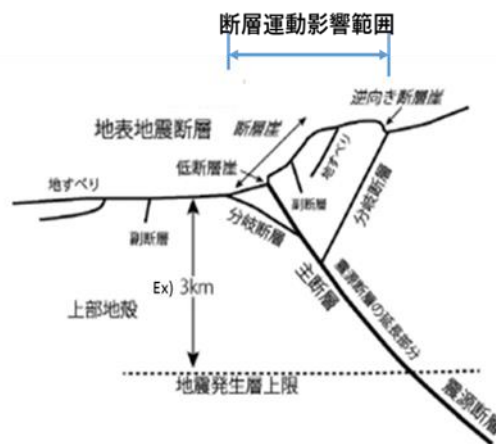


図-1 地表地震断層出現状況(山崎(2013) に加筆)

### 2. 断層運動影響範囲予測手法の概要

活断層といえば、兵庫県南部地震 (1995) の際に淡路島において出現した長さ約10 kmの野島断層が記憶に新しい。新編「日本の活断層(1991)」には、約2000本の活断層が記載されており、内陸活断層の活動周期は1000年オーダーと言われているものの、本数が多いことから断層運動が施設を直撃しないように必要に応じて一定の配慮が施されなければならない。前述の通り、断層運動から逃れるための断層運動影響範囲を示すのが Akiyama (2011) である。

断層運動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, 活断層が施設へ及ぼす影響を決定論的にあるいは確率論的に評価する手法を考案した(図-2参照).

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評価期間における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.

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.

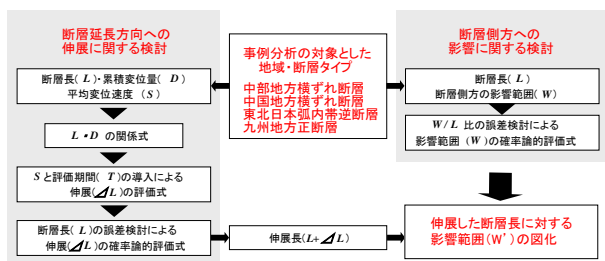


図-2 断層活動の確率論的評価に関する検討の流れ

具体的に述べると, まずは地震と断層運動の力学を考えるにあたって, Ranalli, Scholz, Schlichte, Walsh, Davis, 松田らに断層成長論として広く使われている下記一般的な関係式を用いた.

$$D=cL^n$$

断層は破壊を繰り返し成長するとし, 将来の累積変位量(D)と断層長(L)の関係を示したものである. 図-3には, Schlichteらが示した断層長さLと最大累積すべり量Dの関係を示す. これは, 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に伴い成長していくという考えに基づいており, 将来増大する累積変位量は, 現在の断層長と累積変位量が分かれば, 平均変位速度(S)を調べて評価期間を掛け合わせることで求められる.

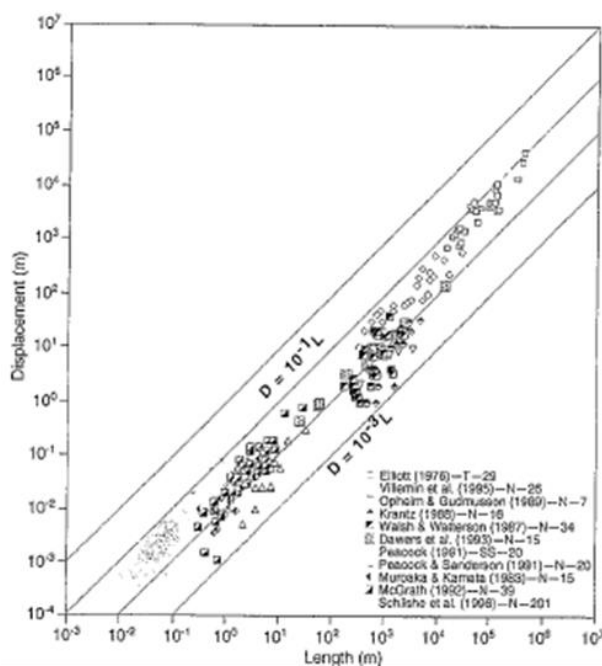


図-3 LとDの関係 Schlichte et al.(1996)

図4は, 我が国における断層タイプ・地域ごとに, 断層長と累積変位量の関係を整理したのである. 各地域の断層タイプごとのプロットの相関係数(R)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であり, 強い相関を示していることが判明した. 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異なるトレンドを形成することは, すでに松田ほかにより指摘されており, 活断層の伸展特性の地域性を示すものである. そして, 変位量の増大分を平均変位速度と評価期間の積とみなして, 地震発生時の断層の伸展長が計算できる. 以下に, 累積変位量(D)に対して整理しなおした式を示す.

中部地方横ずれ断層:  $D=0.000267L^{2.26}$

中国地方横ずれ断層:  $D=0.000395L^{1.90}$

東北日本弧内帯逆断層:  $D=0.000940L^{2.14}$

九州地方正断層:  $D=0.000370L^{2.11}$

このとき断層長は誤差を持つことから, 誤差分布を表す確率密度関数を想定し, 確率論的な伸展長が導かれる.

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(図-5), 影響幅と断層長の比の確率密度関数を正規分布と想定することにより, 断層側方の影響範囲を確率論的に評価した. 図-6に, 各地域・断層タイプの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の図を示す.

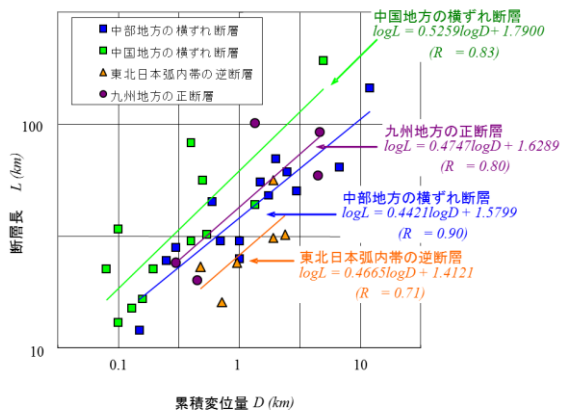


図-4 断層タイプ・地域別の断層長と累積変位量の関係

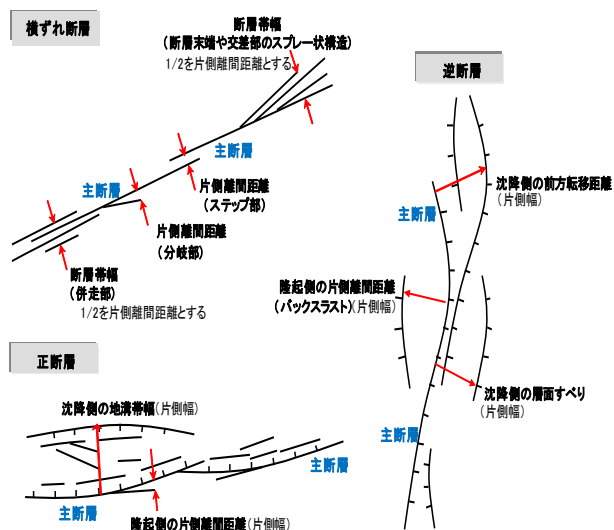


図-5 最大離間距離の計測方法の概念

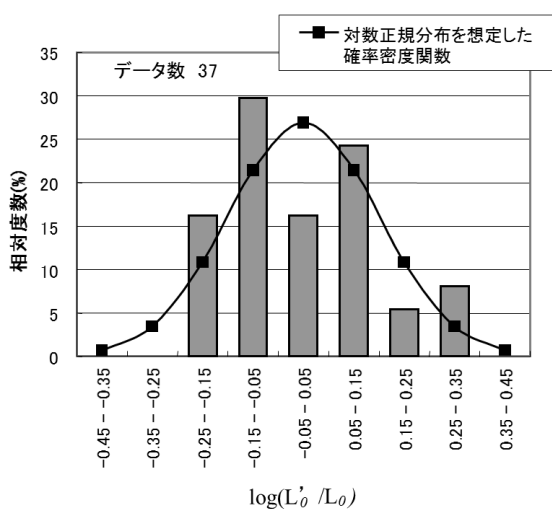


図-6 対数正規分布を想定した確率密度関数

まとめとして表-1 に, Akiyama (2011) で計算される断層運動

影響範囲に関するパラメーターの一覧表を示す。

表-1 断層運動影響範囲に関するパラメーター一覧表

	断層方向の伸展距離	
	決定論による評価値	確率論による評価値
評価値の求め方	断層長一累積変位量の近似式から求まる断層伸展長 ( $\Delta L$ ) $\Delta L = (ST/c + L_0)^{1/n} - L_0$ $S$ : 平均変位速度 $L_0$ : 断層長 $T$ : 評価期間 (1,000,000y)	近似式への偏差 ( $N_{\sigma}$ ) が対数正規分布に従うと仮定し、断層伸展長の偏差 ( $N_{\sigma}'$ ) を次式で求め、確率論による評価値を得る。 $N_{\sigma}' = (10^{N_{\sigma}} - 1) \Delta L$
中部地方横ずれ断層	n=2.26 c=0.000267	$\sigma=0.115$
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	$\sigma=0.128$
九州地方正断層	n=2.11 c=0.000370	$\sigma=0.196$

	断層側方への影響範囲			
	決定論による評価値		確率論による評価値	
評価値の求め方	断層長 ( $L$ ) に対する派生や分岐の範囲 ( $W$ ) の比 ( $W/L$ ) の平均値 $W$ : 片側影響範囲 $L$ : 断層長		側方 (片側) への最大影響範囲 ( $W_{max}$ ) と断層長 ( $L$ ) の比 ( $W_{max}/L$ ) の補正相対度数が、正規分布を仮定した片側確率密度関数に従うとし、確率論による評価値を得る。	
中部地方横ずれ断層	$W/L=0.0306$		$\sigma=0.128$	
中国地方横ずれ断層	$W/L=0.0306$		$\sigma=0.128$	
東北日本弧内帯逆断層	隆起側 $W/L=0.0665$	沈降側 $W/L=0.0504$	隆起側 $\sigma=0.128$	沈降側 $\sigma=0.128$
九州地方正断層	隆起側 $W/L=0.0260$	沈降側 $W/L=0.0757$	隆起側 $\sigma=0.128$	沈降側 $\sigma=0.128$

### 3. 能登半島地震 (2024) に本手法を適用した結果

2024年1月1日にM7.6の能登半島地震が発生した。表-2は気象庁発表の地震諸元に基づき、松田式により一連の地震の断層長等をまとめた表である。岡村行信(産業技術総合研究所)によると、能登半島エリアでは100万年前から現在の応力場が形成され、海底音波探査図の判読により最終氷期(約2万年前)の浸食面が能登半島北方沖断層の活動により20m以上変位(A級活断層)していることが示されている。本稿では断層変位速度を1m/千年と仮定し、東北日本弧内帯に属する活断層として本震による断層運動影響範囲をAkiyama(2011)を用いて表-3のとおり求めた。決定論による解析結果は、断層に分岐・派生が生じた際の影響範囲の平均値を示す。一方で、確率論による値はZスコア別の断層運動影響範囲を示しており、Z=3では約99.9%の推定値を包含する。つまり、最終氷期の浸食面の違いから認定された能登半島北方沖断層に対して、表-3に示す範囲において分岐や派生が生じている可能性がある。



なお図-7 に示すとおり、若山川沿いに地表地震断層が生じたという速報があるが、陸との離隔距離を考えると Akiyama(2011)の結果から直接的な断層運動は陸域では観測されないことが示唆される。その後2024年3月に実施された産業技術総合研究所の調査では、若山川を軸とする背斜状の変形の可能性が指摘されており、加えて2024年5月のJAMSTEC 他の学術研究船北鳳丸の合同緊急調査(音波探査)で、既知の海域断層付近に今回の地震で生じたと思われる断層変位が見つかったことが報告されている。

表-2 地震別の断層諸元

番号	月日	M	深さ	断層長km	変位量m
1	1.1	5.5	12	2.5	0.2
2	1.1	7.6	16	45.7	3.6
3	1.1	6.1	11	5.8	0.5
4	1.1	5.8	14	3.8	0.3
5	1.2	4.6	6	0.7	0.1
6	1.3	4.9	12	1.1	0.1
7	1.3	5.6	13	2.9	0.2
8	1.6	5.4	12	2.2	0.2
9	1.6	4.3	5	0.5	0.1
10	1.9	6.1	27	5.8	0.5
計			(km)	70.9	5.6

表-3 断層運動影響範囲

逆断層	決定論	確率論		
		Z=1	Z=2	Z=3
隆起側	61m	212m	301m	389m
沈降側	46m	153m	211m	270m



図-7 水田に生じた低断層崖

【研究速報】令和6年能登半島地震東京大学地震研究所2024年1月27日に加筆)

#### 4. 風力発電所地点に本手法を適用した結果

ケーススタディの風力発電所地点として、島根県の江津高野山風力発電所(9基,出力20,700kW)を選定した。図-8に示されるとおり、島根県地震・津波防災戦略マップ(令和4年3月)には、風力発電所と海岸線の間に、M7.3(断層長30.2km)の浜田

市沿岸断層(横ずれ)が横たわっている。

より詳細に活断層と風力発電所の位置関係を知るために市街地図で位置の確認を実施したところ、図-9に示す通り2つの河川で系統的の屈曲を確認できたことから断層位置を特定でき、活断層と風力発電所の最小離隔距離も1.1kmと確認できた。また同地図から、河川屈曲量214mと計測でき、このエリアの応力場は50万年前に形成されたと考えると、浜田市沿岸断層の平均変位速度0.428mm/年と推定できる。この値は、同エリアにある著名な宍道断層の平均変位速度0.28mm/年と調和的であることから推定値は妥当な値であると考えられる。

また浜田市沿岸断層は、浜田地震(1872)の震源断層である可能性が高いと考えられるが、近くの浜田市沖合断層が震源断層である可能性を捨てきれないことから、将来的に浜田市沿岸断層がフルスケールで動くケースと、1872年に応力が解放されたケースの2ケースで計算を実施した。

当該エリアは、Akiyama(2011)における中国地方横ずれ断層の地域ブロックのカテゴリーに該当する。また、風力発電施設設計における地震荷重の再現期間は475年(JIS C 1400-1)であり、断層に関しても475年の再現期間を採用した。但し、断層運動による直接破壊は、ばらつきが大きく一旦断層運動の直撃があると施設はほぼ被災するので、地震動と再現期間を合やすよりは、損傷確率を考慮する考え方もある。また、風力発電施設の運転期間は20年間として計算し、確率論的評価においては、Z-スコア=3(99.73%を包含)として計算を実施した。

表-4にそれぞれのケースにおける浜田市沿岸断層活動時の解析結果を示すが、断層運動影響範囲は高々24.5mであり、発電施設と断層は1.1km離れている。よって、地震時に浜田市沿岸断層の断層運動が施設を直撃する可能性は極めて低いと考えられる。



図-8 活断層分布図

(令和4年3月島根県地震・津波防災戦略マップに加筆)



図-9 江津高野山風力発電所と浜田市沿岸断層との位置関係

表-4 浜田市沿岸断層の断層運動影響範囲

計算ケース	影響範囲 (片側)
決定論 (断層が満期)	5.3m
確率論 (断層が満期)	24.5m
確率論 (断層内の歪の蓄積が少ない)	0.8m

## 5. 洋上風力発電所配置設計への本手法の活用

欧州での風車大型化による効率改善に伴う経済性確保、脱炭素化の流れ、データセンター建設などに伴う将来の電力需要拡大、加えて洋上風力については海岸線が長く EEZ も広いという我が国の地理的特徴も相まって、経済産業省は2050年までに洋上風力を中心とした風力発電を推進し、電力需要の30%を風力発電で賄う目標を立ち上げている。そして、我が国の風力発電の導入にあたって、経済産業省・NEDOにより風力発電を推進するための技術開発ロードマップが策定されており、従前の欧州メーカー中心の技術から、日本の自然条件(台風、落雷、地震、複雑な地形・地質)や施工環境からサプライチェーンの状況も加味して、日本版にカスタマイズされた技術の開発により我が国の産業競争力確保を図っていくことが謳われている。風力発電が我が国の重要な基幹エネルギーとして位置づけられるためにも、断層変位に関する技術的な安全性ロジックも含めて整備しておく必要があると考えられる。

風力発電では、風を持つエネルギーが風速の3乗かつローター(風車の回転部)径の2乗に比例することから、風車の配置において、風車間の適切な間隔を確保することがとても重要となる。風車同士が近すぎると、互いに風を遮り合い発電量が減少し、疲労により強度や耐久性に影響が生じる可能性があるのである。他の風車の影響が生じる領域はウェイクと呼ばれ、NEDOによ

ると、ウェイク領域は風向と直角方向に3D(D:ローター直径)、風下方向に約10D程度であることが実験や実測により確かめられているとされている。

図-10は、海域における洋上風力の風車配置計画事例である。風車のローター直径は今後主流になると考えられる200mとし、海域断層としては前章における島根県でのケーススタディ同様に約30km程度の海域断層が存在していると仮定した。この時、断層運動影響範囲約25mは風車配置計画図からは読み取れない程度の大きさであり、断層運動影響範囲は、ウェイク対策以上の風車配置計画上のクリティカルな制約事項とはならない。つまり、風車配置計画で一定の配慮のもと断層と影響範囲を避けることができ、費用をかけずに断層直撃に対する損傷リスクを低減できるのである。洋上風力は、大規模補修が困難なため、損傷リスクを低減するメリットは大きいと思われる。

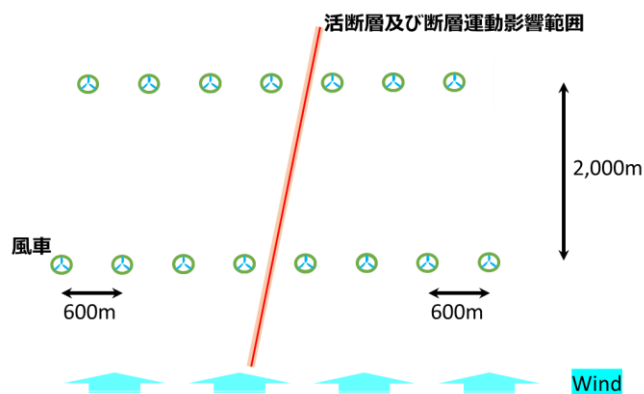


図-10 海域における風車配置計画図

## あとがき

本研究を実施するにあたっては、風力発電の専門家である足利大学工学部山口敦教授と意見交換させていただき、貴重なご意見を伺った。この場を借りて謝意を表明する。

本研究により、洋上風力の風車配置計画における断層運動影響範囲予測手法の有用性が確認できた。今後は、この断層変位対策が国あるいは民間の基準に採用されるように種々の働きかけを実施していく予定である。欧州風力メーカーは、日本の洋上風力発電市場に大きな関心を抱いているので、IEA風力部会などの国際会議での発表機会も探っていく。また、本手法は、洋上風力施設に限らず、他の重要施設にも適用可能であることから、本手法の更なる汎用化を狙って学協会における活動等を継続していく予定である。

## 参考文献

- 1) Akiyama, T.: Study on Prediction Technique of Influence Range from a super long-term Natural Phenomenon, Internet Journal of Society for Social Management Systems (ISSN 2432-552X), SMS11-3177, 2011.
- 2) 秋山隆: 断層運動等の自然事象が周囲に及ぼす影響範囲の予測手法, 地盤工学ジャーナル, 2020年15巻3号 p.609-622
- 3) 秋山隆: 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, 東京大学学術機関リポジトリ, 2022